

# OMRON 162 Vol.51 No.1 2019 TECHNICS®

オムロングループ技術論文誌

特集

## モノづくり現場を革新する オムロンの技術



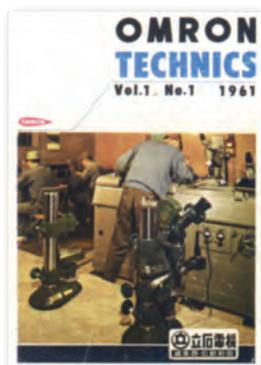
# OMRON TECHNICS のご紹介

オムロンでは、研究開発の成果を広く公開することで  
社会の発展に寄与できるよう、オムロングループ技術論文誌  
「OMRON TECHNICS」を1961年（昭和36年）5月より発行しております。

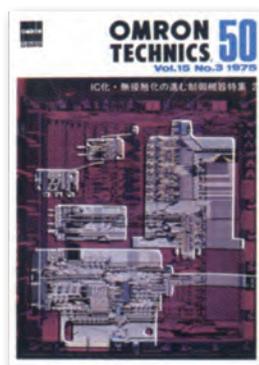
2008年（平成20年）から公開を一時休止しておりましたが、  
近年の技術革新の加速と社会的課題が深刻化する中、社会的課題を解決するイノベーションの創造に  
寄与していくためオムロングループの技術論文の公開を2018年（平成30年）より再開いたしました。  
これまで通巻161号発行し、約1,700編以上の論文を公開しております。

論文は、以下のホームページ上で公開するとともに、  
冊子としても発行しております。今後とも、「OMRON TECHNICS」を  
ご愛読いただきますようお願い申し上げます。

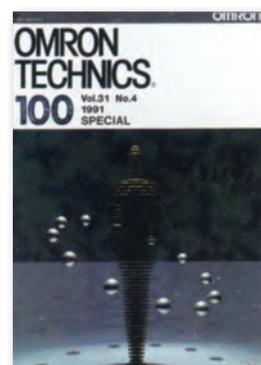
## 冊子版



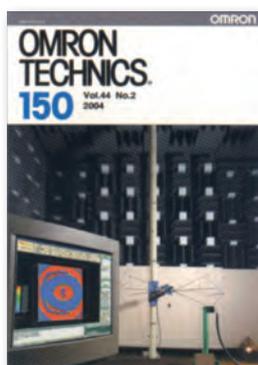
1961年5月 創刊号



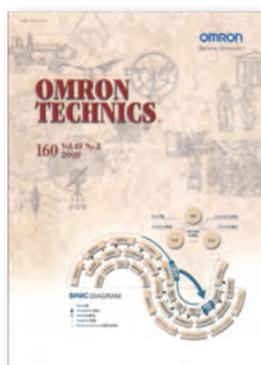
1975年 50号



1991年 100号



2004年 150号



2008年 160号



2018年 161号

オムロンテクニクス

検索

## WEB版



[https://www.omron.co.jp/technology/r\\_d/omrontechnics/](https://www.omron.co.jp/technology/r_d/omrontechnics/)

# オムロンのコア技術

## Sensing & Control + Think

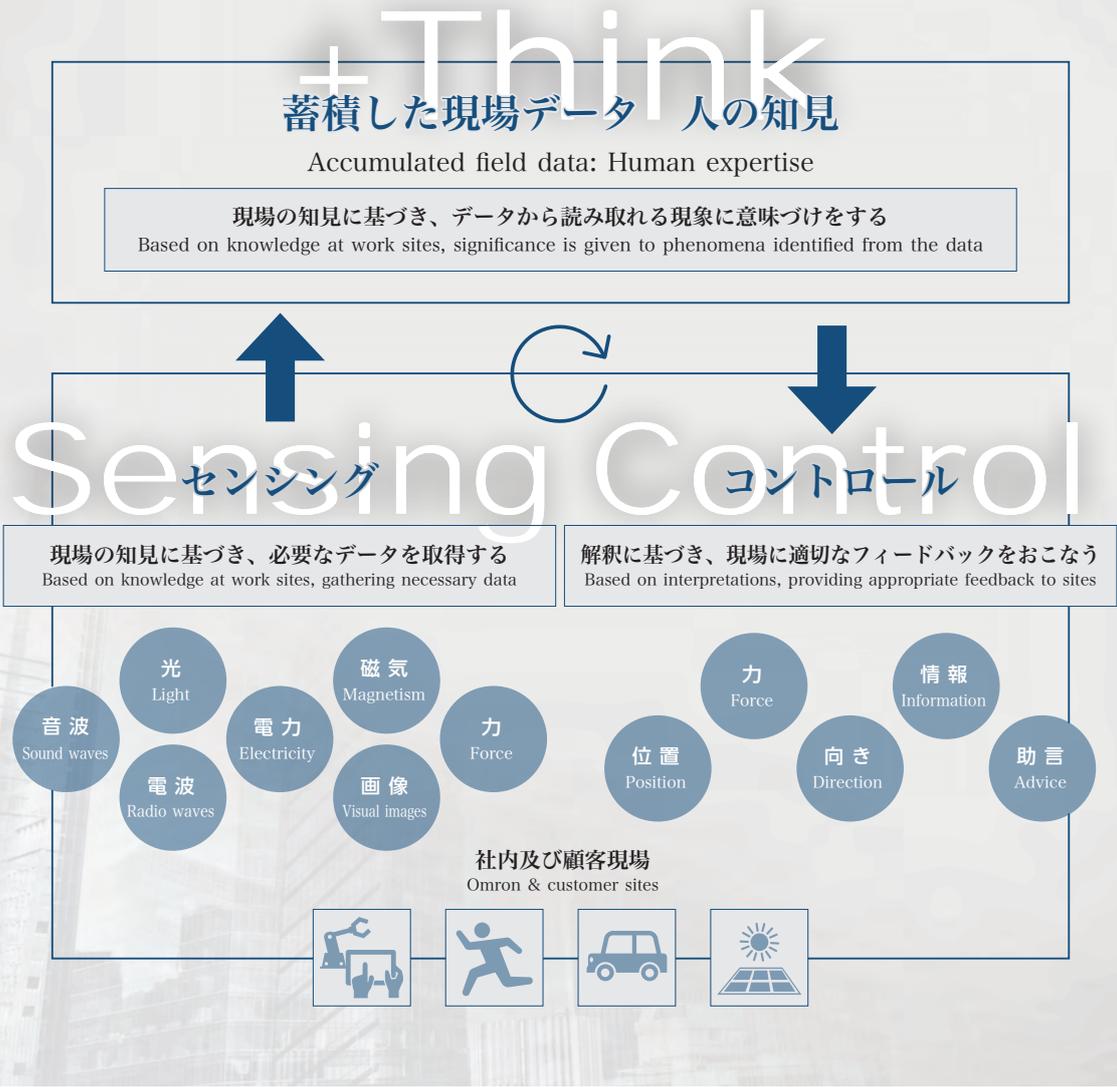
オムロンは創業以来、時代に先駆けた価値を生み出すために、独自のコア技術を進化させてきました。「Sensing & Control + Think」はオムロンが誇る全社共通のコア技術です。

「Sensing」とは現場の知見に基づき、人やモノの状態・情報から必要なデータを取得することです。「Control」とは、「Sensing」によって得られた情報をもとに、現場に適切なソリューションを提供することです。

オムロンでは、この「Sensing & Control」に「人の知恵」を表す「+ Think」を新たに加えました。今後AI、IoTなどの技術革新が進む中で、より賢く価値に変換させる必要があるからです。

オムロンでは、「ファクトリーオートメーション」、「ヘルスケア」、「モビリティ」、「エネルギーマネジメント」を注力する事業領域として、これからも社会に貢献できる価値を最大限に生み出すべくコア技術の強化と進化に取り組んでいきます。

### Sensing & Control + Think



## モノづくり現場を革新する

平素より、皆様には多大なご高配をいただき感謝申し上げます。

現在、製造業が社会になくってはならない産業になって久しい反面、先進国における少子高齢化による労働力の減少、熟練技能者不足、また新興国における賃金の高騰など、製造業を取り巻く環境は年々厳しさを増しています。そのような環境の中で、持続可能な社会を実現するためには、技術革新によるモノづくり現場の生産性向上は不可欠なものとなっています。

その技術革新に目を向けますと、労働力不足を解決する技術として、AI、IoT、ロボティクス技術に注目が集まっています。しかしながら、AI技術は統計学、または脳科学から発展してきた技術ではありますが、まだ発展途上の技術であることは否めません。IoTは技術というよりは概念であって、高度な情報通信技術によって実現されるシステムということが出来ます。ロボティクス技術は過去には産業用ロボットで発展した技術ですが、運動学と動力学といった完成された技術に加え、安全対応、自律化といった種々の技術との組み合わせによりさらなる発展が期待されています。

これらの技術を使いこなし、モノづくりを革新し、確実な生産性向上を実現するために重要なことは、技術の基礎となる科学を理解した上で、工学的アプローチ、つまりは問題設定を的確に行うことであり、これらの技術の適応範囲を明確にしていくことにほかなりません。

オムロンでは、“Sensing & Control + Think”をコア技術と定め、様々な技術を開発してきました。これらに共通して言えることは、課題を起点として必要な技術を探求することにあります。本誌、オムロンテクニクスをご賢いただくとオムロンの技術は、様々な事業領域の広範囲に及んでいるという印象をお持ちになるかもしれません。しかしそれらは、社会的課題を解決するという点において、全てつながっており、その課題解決に我々のコア技術が適応されて

# オムロンの技術



います。

このように、これら技術の適応範囲を明確にし、社会的課題を解決するソリューションとしてお届けすることがオムロンの役目であると考えております。

ファクトリーオートメーション領域では、オムロン独自のオートメーションのコンセプト“i-Automation!”によって、モノづくり革新による新たな価値の提供を目指しております。“i-Automation!”は、進化の方向性として、超高速・高精度なモノづくりを誰もが簡単にできるようにする“integrated（制御進化）”、制御と情報を融合させることで、生産性と品質を飛躍的に向上させる“intelligent（知能化）”、人と機械が協調してフレキシブルなモノづくり現場を実現する“interactive（人と機械の新しい協調）”の3つを描いております。本号ではその一部として、高速高精度なセンシング技術やAIを搭載したマシンオートメーションコントローラなどの技術を紹介するとともに、オムロンでのものづくり技術も紹介させていただきました。

本号が製造業の皆様にとって、少しでも参考になれば幸いに存じます。

オムロン株式会社  
執行役員  
インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部長

福井 信二

オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
巻頭言：モノづくり現場を革新するオムロンの技術 オムロン株式会社 執行役員 インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部長 福井 信二	2 (2)
目次	4 (4)

### 特集 モノづくり現場を革新するオムロンの技術 —ファクトリーオートメーション—

<b>製造現場の変化に追従して進化する変位センサ技術</b> —スキャニング計測時の安定計測を実現する高精度化 / 高速化について— 高嶋 潤・奥田 貴啓・森野 久康・早川 雅之	10 (10)
<b>高負荷環境でも使えるData Matrix 読取技術</b> 藤川 正寛・栗田 真嗣	16 (16)
<b>AI技術による外観検査の自動化</b> —Deep learningによる事前学習型欠陥検出について— 半澤 雄希・池田 泰之・栗田 真嗣・長谷川 友紀	21 (21)
<b>UHF帯RFID安定読み取り技術</b> —意図しないRFタグの誤読取防止技術— 野上 英克	26 (26)
<b>無線押ボタンスイッチの伝送状態を可視化する通知機能の開発</b> 矢野 慧介	32 (32)
<b>AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (1)</b> —保全担当者が使用できるAIシステムの実現とマシンオートメーションコントローラへのAI機能の搭載— 見置 孝昌・出来 仁太郎	39 (39)
<b>AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (2)</b> —制御に同期したデータ収集と時系列データベースの実現— 太田 政則・西山 佳秀	45 (45)
<b>AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (3)</b> —製造現場における異常検知モデル生成ツール— 宮本 幸太・川ノ上 真輔	52 (52)
<b>制御モデルパラメータを用いた温度管理装置における状態監視機能の開発</b> 津端 創・山田 隆章	58 (58)
<b>PLCopenのSafetyファンクションブロックを活用した安全プログラム自動化の実現</b> 菅沼 拓・藤村 亮輔・久保 寛子・田熊 伸行	65 (65)
<b>オープンソースGitを活用したFA統合開発環境における複数人並行開発の実現</b> 岩村 慎太郎	73 (73)
<b>電動機運転状態における絶縁抵抗計測技術</b> 横田 晃司・竹内 豪	80 (80)
<b>制御機器からのIoTデータ収集技術</b> 小林 義明	85 (85)
<b>超高速CT型X線自動検査装置の開発</b> 七呂 真	91 (91)
<b>IoT技術によるシート検査装置から得られるデータの新たな現場活用手段</b> 荻野 裕貴	98 (98)
<b>AOIとマウンタの連携による故障予兆検知システムQ-upAuto</b> 森 弘之・岸本 真由子	105 (105)

## 1. オムロンの成長領域でイノベーションを生み出す技術 —モビリティ—

### 社会インフラへのモニタリング技術の活用 (1)

—現場適用性の高いモニタリングシステムの実現と実証について—

黒田 卓也・西田 秀志・尾崎 智博・樋上 智彦・赤井 亮太 ..... 114 (114)

### 社会インフラへのモニタリング技術の活用 (2)

—劣化損傷の評価手法の提案とSIP現場実証での成果—

西田 秀志・高瀬 和男・幡山 五郎・佐々木 栄一 ..... 122 (122)

## 2. オムロンのものづくりを支える技術

### 塩水浸入挙動の解明とその評価方法について

達野 陽介・福原 智博・長坂 昭吾 ..... 132 (132)

### リレーの過渡的挙動を予測するシミュレーション技術

—リレーの高容量化を実現するシミュレーション技術について—

近藤 純久・横手 康浩・田中 博之 ..... 137 (137)

### フローはんだ付け品質安定化における噴流高さ管理の重要性

廣崎 旭宏・田村 敏之・上野 裕史 ..... 143 (143)

### 0402部品から大型部品までの混載実装を可能にする高アスペクト比はんだ印刷技術

山口 浩二 ..... 149 (149)

### オムロングループにおけるソフトウェアプロダクトライン (Software Product Lines) の取組み

原田 真太郎・丹羽 徹・赤松 康至・田口 正久 ..... 155 (155)

### 動的線型モデルによるコールセンターの受信コール数予測

山本 究・幡山 五郎 ..... 161 (161)

## 3. 新たな成長領域を生み出す技術

### ピン球の回転速度を考慮することで高精度な返球が可能な卓球ロボットシステムの開発

浅井 恭平・中山 雅宗・八瀬 哲志 ..... 168 (168)

### 小型・高密度実装されたセンサモジュールの発熱影響補正技術

元木 悠平・上田 直垂・三笥 佳代 ..... 174 (174)

最近発表した主な論文 ..... 179 (179)

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think" .....	1 (1)
Introduction; OMRON's Technologies Drive Innovation at Manufacturing Sites Shinji Fukui, Senior General Manager, Technology Development Division HQ, Industrial Automation Company .....	2 (2)
Table of Contents .....	4 (4)

**Special issue: OMRON's Technologies Drive Innovation at Manufacturing Sites  
- Factory Automation -**

<b>The progress in displacement sensor technology by the change of application scene in manufacturing</b> - High Accuracy / High Speed for Realizing Stable Measurement during Scanning - Jun Takashima, Takahiro Okuda, Hisayasu Morino and Masayuki Hayakawa .....	10 (10)
<b>Reading Technology of Data Matrix under High Stressful Conditions</b> Masahiro Fujikawa and Masashi Kurita .....	16 (16)
<b>AI Visual Inspection System</b> - Defect Detection using Deep Learning - Yuki Hanzawa, Yasuyuki Ikeda, Masashi Kurita and Yuki Hasegawa .....	21 (21)
<b>Stable reading for UHF RFID</b> - Technique for preventing erroneous detection of non-target RF tag - Hidekatsu Nogami .....	26 (26)
<b>Development of transmission notification indicator for wireless pushbutton switch</b> Keisuke Yano .....	32 (32)
<b>Development of AI-equipped Machine Automation Controller (1)</b> - Implementation of AI system usable by maintenance personnel and installation of AI function in machine automation controller - Takamasa Mioki and Jintaro Deki .....	39 (39)
<b>Development of AI-equipped Machine Automation Controller (2)</b> - Data collection synchronized with machine control and realization of Time-Series database - Masanori Ota and Yoshihide Nishiyama .....	45 (45)
<b>Development of AI-equipped Machine Automation Controller (3)</b> - Generation of anomaly detection models at manufacturing site - Kota Miyamoto and Shinsuke Kawanoue .....	52 (52)
<b>Development of Condition Monitoring Function of Temperature Control Device Using Control Model Parameters</b> Hajime Tsubata and Takaaki Yamada .....	58 (58)
<b>New automatic safety programming using safety function blocks of PLCopen</b> Hiromu Suganuma, Ryosuke Fujimura, Hiroko Kubo and Nobuyuki Takuma .....	65 (65)
<b>Concurrent development by multiple developers in an integrated factory automation development environment using an open-source system "Git"</b> Shintaro Iwamura .....	73 (73)
<b>Measuring "insulation resistance" for three-phase motor while operating</b> Koji Yokota and Tsuyoshi Takeuchi .....	80 (80)
<b>IoT Data Collection from Control Devices</b> Yoshiaki Kobayashi .....	85 (85)
<b>Development of super high-speed CT X-ray automatic inspection system</b> Makoto Shichiro .....	91 (91)
<b>Proposal to Make Full Use of Data from Web Inspection System by IoT Technology</b> Hiroataka Ogino .....	98 (98)
<b>Q-upAuto, Failure prediction system with AOI-mounter collaboration</b> Hiroyuki Mori and Mayuko Kishimoto .....	105 (105)

## 1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area - Mobility -

### Application of monitoring technology for social infrastructure (1)

- For validation and achievement of monitoring system with high site applicability -

Takuya Kuroda, Hideshi Nishida, Tomohiro Ozaki, Tomohiko Hinoue and Ryota Akai ..... 114 (114)

### Application of monitoring technology for social infrastructure (2)

- Proposal of evaluation method of deterioration/damage and result of field experiment under SIP project -

Hideshi Nishida, Kazuo Takase, Goro Hatayama and Eiichi Sasaki ..... 122 (122)

## 2. Technology Supporting OMRON's Manufacturing

### Explication of saltwater intrusion behavior and the evaluation method

Yosuke Tatsuno, Tomohiro Fukuhara and Shogo Nagasaka ..... 132 (132)

### Simulation technology to predict dynamic motion of relay

- Simulation technology for realizing high capacity of relay -

Sumihisa Kondo, Yasuhiro Yokote and Hiroyuki Tanaka ..... 137 (137)

### Importance of Wave Height Control in Wave Soldering

Akihiro Hirotsaki, Toshiyuki Tamura and Yuji Ueno ..... 143 (143)

### High aspect ratio solder printing technology enabling mixed mounting from 0402 components to large components

Koji Yamaguchi ..... 149 (149)

### Software Product Lines in the Omron Group

Shintaro Harada, Toru Niwa, Yasuyuki Akamatsu and Masahisa Taguchi ..... 155 (155)

### Forecasting call arrivals at call center using dynamic linear model

Kiwamu Yamamoto and Goro Hatayama ..... 161 (161)

## 3. Technology Developing a New Growth Area

### The Ping Pong Robot to Return a Ball Precisely ~ Trajectory Prediction and Racket Control for Spinning Balls ~

Kyohei Asai, Masamune Nakayama and Satoshi Yase ..... 168 (168)

### The thermal effect compensation technology for highly integrated sensor modules

Yuhei Motoki, Naotsugu Ueda and Kayo Mitoma ..... 174 (174)

---

New Publications ..... 179 (179)



# 特集

## モノづくり現場を革新する オムロンの技術

—ファクトリーオートメーション—



ation  
ine

Temp Min	15.56 C	Date	XX-XX-XXXX	Customer	World
Temp Max	33.94 C	Time	XXXX	Status	Worki
Temp Ambient	32.13 C	Job	WW25D76	Scale	MAX

# 製造現場の変化に追従して進化する変位センサ技術

## スキャン計測時の安定計測を実現する高精度化 / 高速化について

高嶋 潤・奥田 貴啓・森野 久康・早川 雅之

変位センサは従来三角測距方式が主流であったが、最先端のモノづくりを行う顧客の製造現場では、三角測距方式による設置時のチューニングの難しさ、測定対象物の材質違いによる誤差の課題が出ていた。それらの課題に対し、我々は簡単に誰でも測定対象物の材質によらない計測が可能な新原理の同軸白色共焦点変位センサ（形ZW）を2012年に商品リリースした。その結果、形ZWはデジタル業界のスマートフォンの組付状態の検査を中心に採用されてきた。しかし、スマートフォンの薄型・高性能化に伴う搭載部品の軽薄短小化や製品デザインの進化による検査点数増加のため、より高精度な検査を高速に実現することが求められている。このたび、このような製造現場の変化に対応するため、スキャン計測時の精度・速度を飛躍的に向上する技術を確立したのでここに紹介する。

## The progress in displacement sensor technology by the change of application scene in manufacturing

### High Accuracy / High Speed for Realizing Stable Measurement during Scanning

*Jun Takashima, Takahiro Okuda, Hisayasu Morino and Masayuki Hayakawa*

Conventional triangulation method has been the mainstream for displacement sensors, but on leading-edge manufacturing of customers, there have been the problems of the tuning difficulties when setting by the triangulation method and the errors due to the measuring objects' differences. In response to these issues, we will release the new Coaxial displacement sensor based on white light confocal principle (ZW) which can measure easily by anyone without material in 2012. As a result, we will release the product of the digital industry's smartphone assembled. It has been adopted mainly for inspection. However, due to the increase in the number of inspection points by the lighter, thinner, shorter and smaller packages of smartphones accompanying the slimness and higher performance of the smartphone and the evolution of product design, it is required to realize higher precision inspection at high speed. In order to cope with such changes in the manufacturing site, we have established a technology to dramatically improve the speed and accuracy in scanning, so I will introduce it here.

#### 1. まえがき

変位センサは、製造現場での検査（部品の形状、厚み、高さなど）や位置決め誤差を $\mu\text{m}$ オーダーで測定することを目的としている。これにより、検査や制御の精度向上につながり、より高度で高品質なモノづくりを実現することができる。従来、変位センサは三角測距方式のレーザ変位センサが主流であったが、最先端のモノづくりを行う顧客の製造現場では、三角測距方式による設置時のチューニングの難しさ、測定対象物の材質の違いによる誤差の課題が出ていた。それらの課題に対し、我々は、新原理の同軸白色

共焦点変位センサ（形ZW）を2012年に商品リリースし<sup>1)</sup>、小型で簡単に設置でき、測定対象物の材質に依存しない距離計測精度を実現した。

近年、スマートフォンの薄型・高性能化に伴う搭載部品の軽薄短小化や製品デザインの進化により、部品の高精度化や検査点数増加しているため、より高精度な検査を高速に実現することが求められている。

#### 2. 白色共焦点計測原理

本センサは、測定対象物の高さ方向に異なる波長の光を

集光し、測定対象物に集光した波長の光のみを分光器内の受光素子で受光することで測定対象物までの距離を測定するセンサ（白色共焦点変位センサ）である。<sup>1)</sup>

システム構成としては図1に示すように白色光源、分岐カプラ、ファイバ、センサヘッド、分光器、処理部からなる。センサヘッドは、回折レンズおよび対物レンズを含み、分光器は回折格子、受光素子を含む。

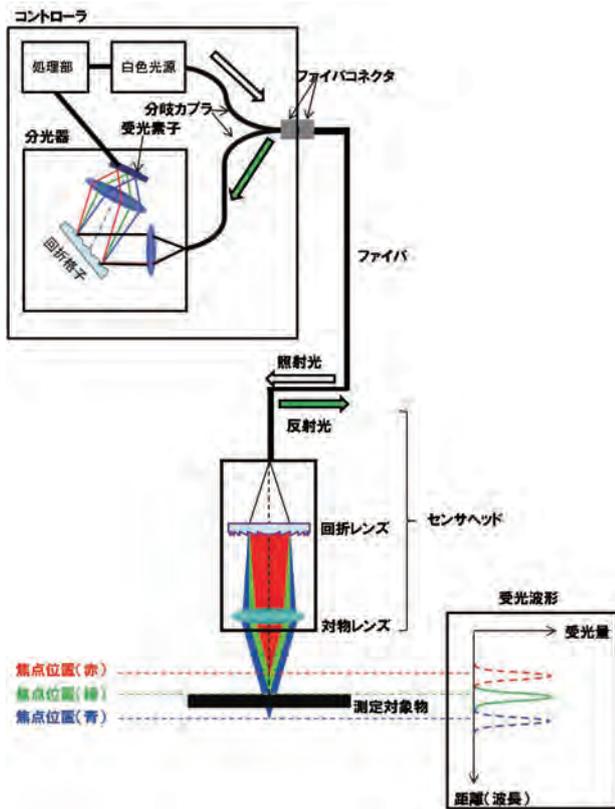


図1 システム構成

白色光源から出た光は分岐カプラ、ファイバを経由し、センサヘッドへ入射する。そして、入射した光は、センサヘッドの回折レンズにより、測定対象物の高さ方向に波長を分光される。センサヘッドは、測定対象物からの反射光がファイバ上に焦点が合う共焦点光学系であるため、測定対象物上に集光された特定の波長の光のみがセンサヘッドに接続されているファイバへ結像し、分光器へ入光する。例えば、図1の例では測定対象物に緑色光が集光されているため、緑色光のみ分光器へ入光する。一方、赤、青色光は測定対象物に集光していないためファイバへ結像されず、分光器には入光しない。分光器に入光した光は、回折格子により、分光され、受光素子に結像する画素位置を求め、予め画素位置と距離を対応付けた補正データを用いることで、測定対象物までの距離を算出することができる。

本原理には、従来技術と比較して以下の強みがある。

- ①従来のレーザ変位センサに比べて、白色共焦点変位センサは同軸光学系であるため、光沢面において急峻な角度でも形状測定が可能である。図2にレンズ形状を

計測した結果を示す。従来と比べ、形状測定範囲を拡大して計測が可能であることが分かる。したがって、平坦な測定対象物に対して、簡単な設置で計測が可能となる。

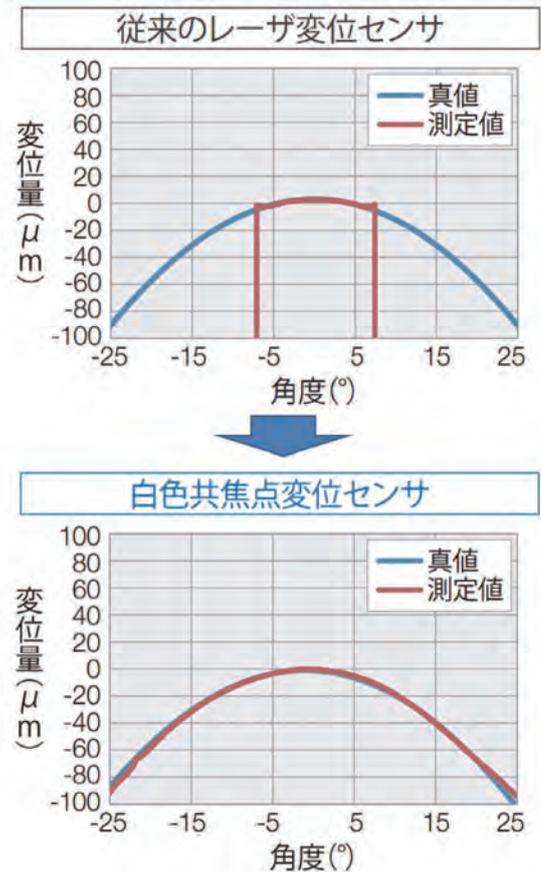


図2 レーザ変位センサと白色共焦点変位センサの角度特性比較

- ②従来のレーザ変位センサはスポット内の光強度分布がそのまま受光素子に結像するため、材質が異なると受光波形が変動し、計測誤差が生じる。一方、白色共焦点変位センサは、反射光の波長から距離を算出しているため、スポット内の光強度分布に依存せず、材質が異なる場合でも同一の精度で計測可能である。図3に異なる材質におけるリニアリティ性能（高さ方向にステージを移動した距離と計測値との差）を比較した結果を示す。

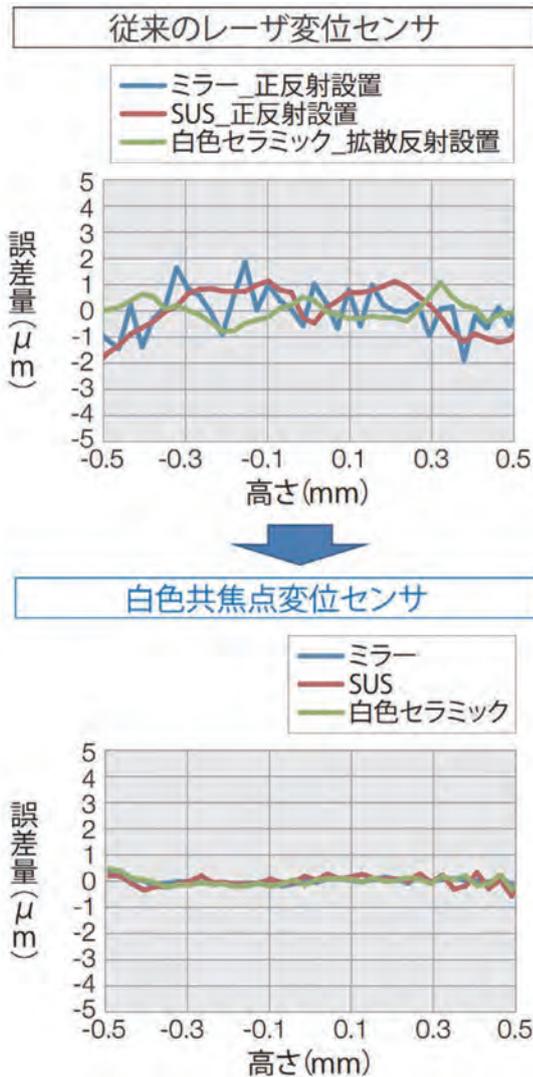


図3 レーザ変位センサと白色共焦点変位センサの材質間誤差比較

### 3. 技術的課題

例えば、スマートフォンの組付状態の検査では、軽薄短小化により、今まで以上に組付精度が厳しくなり、検査箇所も増加しているため、高速・高精度検査がより一層求められている。このような顧客ニーズに応えるためにも、白色共焦点技術をより進化させ、より高速・高精度な変位センサを開発する必要がある。

**3.1 白色共焦点技術における高精度計測課題** 白色共焦点変位センサにて、表面粗さの最大値Rz 3.2μmであるステンレス材 (SUSと表記) をスキャン計測した結果を図4に示す。測定対象物の表面粗さ3.2μm以上に計測誤差が発生し、スキャン計測時に安定計測ができないという課題があった。本稿ではこの実際の表面粗さ以上に現れる計測誤差の標準偏差の4倍 (4σ) を「移動分解能」と定義する。

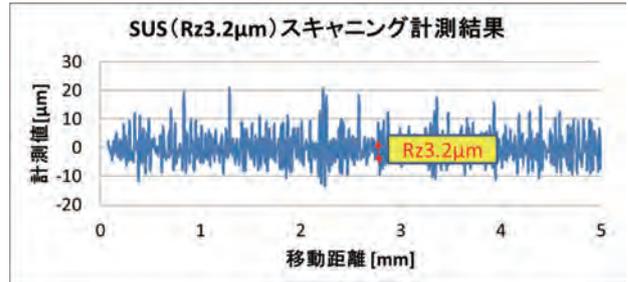


図4 SUS (Rz3.2μm) をスキャン計測した結果

**3.2 白色共焦点技術における高速計測課題** 白色共焦点方式は、照射された光の波長成分のうち距離に対応する特定の波長成分のみを利用するという原理上、光の利用効率が低い。そのため、例えば、測定対象物の表面形状をより高速に検査するためにサンプリング速度を高めると、計測に必要な受光量を十分に確保できないという課題がある。例えば、従来は反射率10%の測定対象物の場合、十分な受光量を確保するには、サンプリング速度が500μsかかる。したがって、測定対象物を10μmピッチでスキャン計測するためには、20mm/sの移動速度が限界であった。このような課題に対して、導光部を構成する光ファイバのコアを大口径化するというアプローチが考えられる。コアを大口径化することで、より多くの光量を伝搬できるようになるが、白色共焦点方式の原理上、受光波形の半値幅が大きくなる。半値幅が大きくなると、計測値のばらつきも大きくなるため、計測精度が悪化するというデメリットが生じる。

## 4. 技術内容

本稿では、移動分解能を高精度化する方法として、以下の3つを検討した。

### ①被写界深度低減

受光波形の半値幅を小さくすることで、計測誤差を低減する

### ②波形傾きアルゴリズムによる誤差補正

受光波形の傾きから計測誤差を補正する。

### ③マルチファイバ化<sup>2)</sup>

測定対象物の計測領域を増やすことで、測定対象物の凹凸を平均化させ、計測誤差を低減する

また、高速化手法として、マルチファイバ化・光源の高輝度化・受光素子の低ノイズ化を検討した。

以下に、技術内容を説明する。

**4.1 高精度計測のための被写界深度低減** 白色共焦点変位センサにおいて、投光ビームは測定対象物の高さ方向に分光しているため、被写界深度が小さければ、受光する波長幅が小さくなる。その結果、受光波形の半値幅が細くなり、計測誤差が低減すると考えた。実験を行った結果、図5に示すように、被写界深度が増加するに従い、移動分解能が大きくなっていることが分かった。

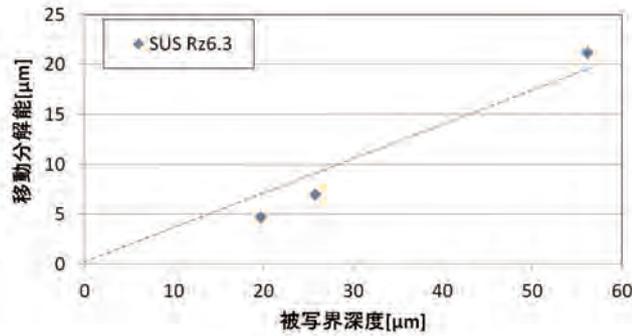


図5 被写界深度と移動分解能の関係

したがって、共焦点光学系において特定の波長のみを受光するためには、次式で表される被写界深度を小さくすることが必要となる。

$$\text{被写界深度} \propto \phi \times \text{NA}_{\text{diff}} / (\text{NA}_{\text{obj}})^2$$

また、図6に被写界深度に関連する設計パラメータを示す。

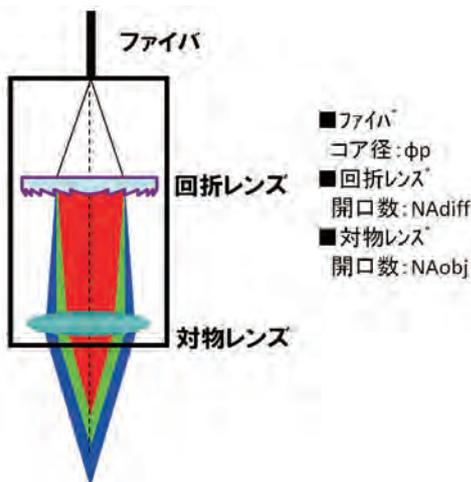


図6 被写界深度に関連する設計パラメータ

上記式から、被写界深度を小さくするためには、回折レンズのNAを小さくし、対物レンズのNAを大きくすることが望ましい。センサヘッドと測定対象物までの測定中心距離（測定範囲19～21mmの変位センサの場合は測定中心距離20mmの変位センサと表現する）を決めると、対物レンズの焦点距離が決まるため、レンズの製造限界から対物レンズのNAが決定した。これに伴い、センサヘッドの外形サイズが決まるため、回折レンズのNAを決定した。

表1に測定中心距離20mmのセンサヘッドにおいて被写界深度を0.27倍に低減した場合の試算結果を示す。

表1 測定中心距離20mmのセンサヘッドにおける被写界深度

設計パラメータ	従来比
回折レンズNA	0.65倍
対物レンズNA	1.54倍
被写界深度	0.27倍

## 4.2 高精度計測のための波形傾き補正アルゴリズム

4.1項では光学系での精度向上を説明したが、アルゴリズムでの改善も検討した。移動分解能は、図7に示すように測定対象物からの反射光の波長が凹凸により変動し、受光波形に歪みが生じ、計測誤差が発生していると想定した。

したがって、受光波形の歪み量を定量化できれば、誤差を補正し低減できる可能性があると考え、受光波形から波形の傾きを算出した。具体的には図8に示すように受光波形のピーク強度に対して70%と30%のラインの中間位置を求め、これらの座標を通る直線の傾きを波形傾きとして定義した。

図9に示すように受光波形の傾きと計測誤差の標準偏差の4倍（移動分解能）に強い相関（相関係数R=0.94）があることがわかった。したがって、受光波形の傾きを計算し、傾きから計測誤差を推定し、計測値から減算することで、計測誤差を低減するアルゴリズムを考案した。

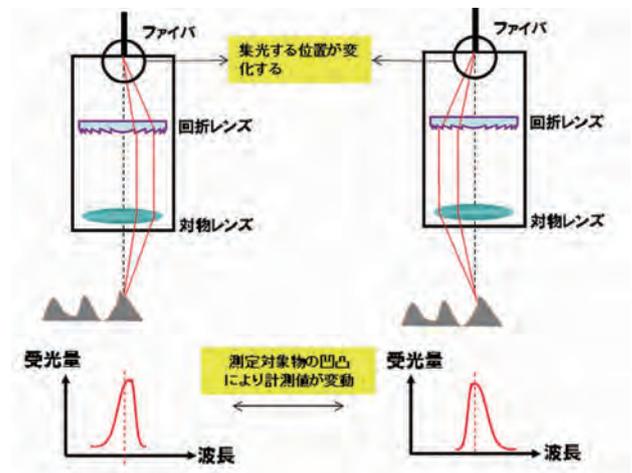


図7 測定対象物の凹凸による受光波形の歪み

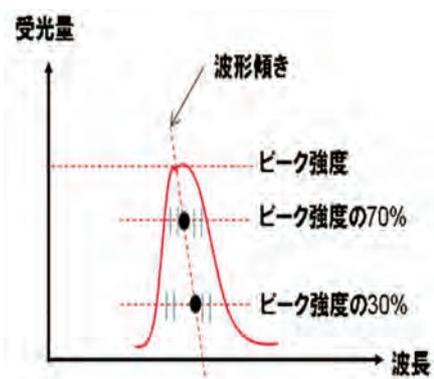


図8 受光波形と波形傾き

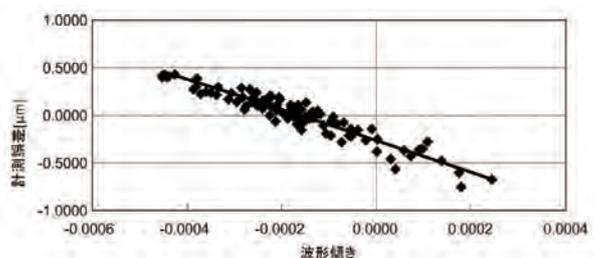


図9 波形傾きと計測誤差の関係

**4.3 高速・高精度計測のためのマルチファイバ化** 本稿では、高速・高精度計測の両方にメリットがあるマルチファイバ化を考案した。本手法は、ファイバのコア径は維持したまま複数のファイバを用いることで、受光量を増加しながら、測定対象物の微小な凹凸を平均化し、安定計測することができると考えた。本手法のシステム構成を図10に示す。

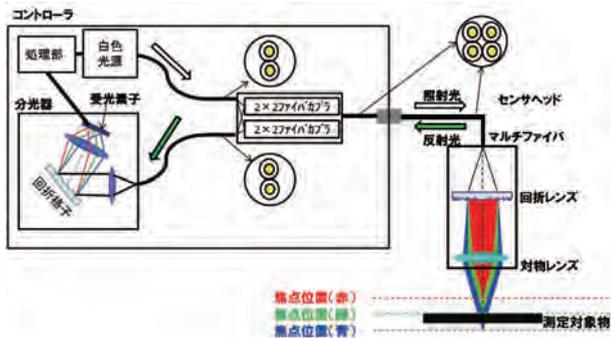


図10 マルチファイバシステム構成

つまり、4本のファイバを用いることで受光量を4倍、4本の平均化効果により移動分解能を2倍向上することが期待できる。

**4.4 高速計測のための高輝度化・低ノイズ化** 前述したマルチファイバ化による受光量4倍に加え、更に受光量を上げるべく、白色LED/受光素子の高輝度・低ノイズ化を検討した。また、受光量を上げるだけでは高速計測することはできないため、高速撮像できる受光素子デバイスを選定し、計測処理全般をFPGA (Field-Programmable Gate Array) 化することにより、最速20μsecの高速計測を実現した。図11に従来センサのLEDの発光パワーと本センサにて採用したLEDの発光パワーを示す。また、放熱設計によりLEDの投入電流を上げ、従来比5.1倍の高輝度化を実現した。

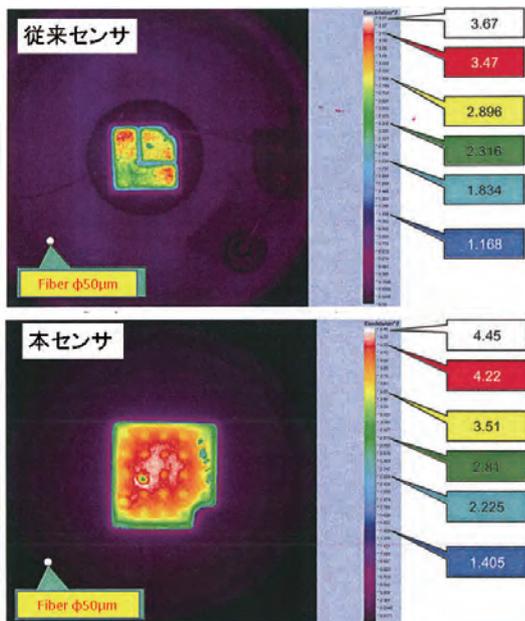


図11 同一電流でのLED発光パワー比較

図12に従来センサと採用した受光素子（本センサ）のノイズを比較した結果を示す。採用した受光素子のノイズは従来センサに比べノイズが約0.66倍に低下しているため、S/Nは1.5倍向上する。また、受光量はS/Nの2乗に比例するため、受光量換算で約2.3倍の効果がある。

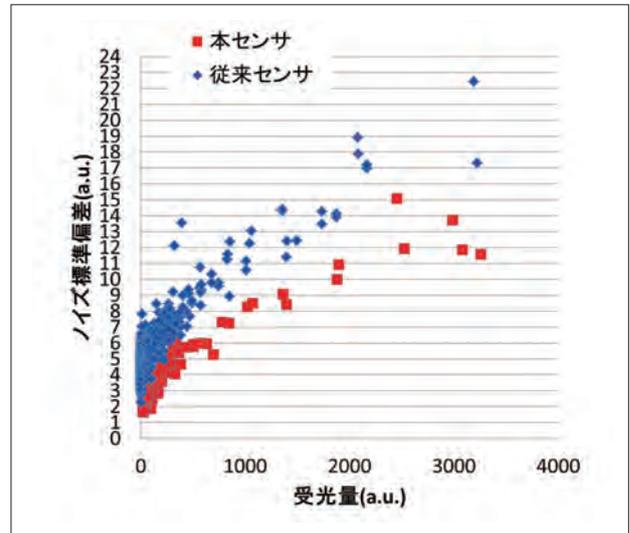


図12 受光素子ノイズ

## 5. 効果

**5.1 マルチファイバ化・被写界深度低減による高精度化結果** 単芯ファイバの従来センサと被写界深度低減を実施した4芯マルチファイバのセンサヘッドにおいて、Rz3.2μmの標準粗さ片をスキャニング計測した移動分解能の結果を図13に示す。従来センサが計測値のばらつき4σが18.1μmに対し、本センサは3.1μmと移動分解能が約5.7倍向上していることが分かる。また、本センサは、標準粗さ片のRz3.2μmとほぼ一致しており、形状を正確に計測できていると考えられる。

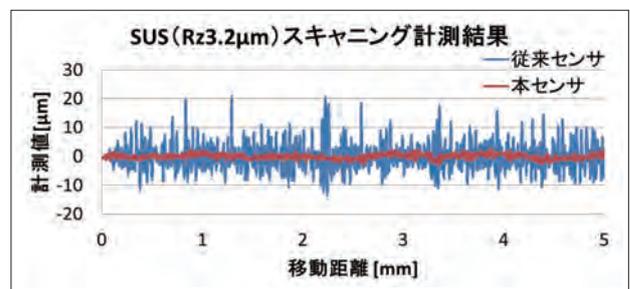


図13 従来センサと本センサの移動分解能向上結果

**5.2 波形傾き補正アルゴリズムによる高精度化結果** 図14にRz3.2μmの標準粗さ片をスキャニング計測し、受光波形の傾きから補正値を決定後、計測値を補正した結果を示す。計測値のばらつきが、補正前はMax-Minで約9μmであったのに対し、補正後は約3μmと約3倍精度が向上していることを確認した。

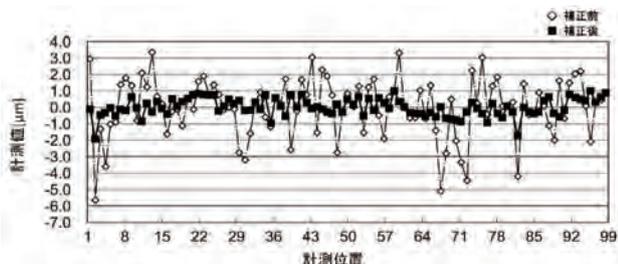


図14 波形傾き補正による移動分解能向上結果

**5.3 高速化結果** 各デバイスにおいて受光量換算で、高速化した結果を表2に示す。合計として従来比11.7倍を実現した。表3にミラーを計測した受光量と最速サンプリング時間を示す。受光量で従来比12.5倍であり、ほぼ各デバイスの受光量アップの合計値と一致しており、最速サンプリング時間20μsで計測できる受光量を実現した。すなわち、反射率10%の測定対象物の場合、サンプリング速度が20μsで計測に必要な受光量を確保できる。したがって、500mm/sの移動速度でスキャニング計測しても、測定対象物を10μmピッチで計測することが可能である。

表2 高速化結果

項目	受光量
白色LED発光パワー	従来比5.1倍
マルチファイバ化	従来比4倍
低ノイズCMOS	従来比2.3倍
センサヘッド透過率	従来比0.25倍
合計	従来比約11.7倍

表3 ミラー受光量計測結果

	受光量/μsec	最速サンプリング時間
従来センサ	48	500μs
本センサ	600	20μs

## 6. むすび

同軸白色共焦点の技術として、マルチファイバ化と被写界深度低減・波形傾き補正アルゴリズムにより、「5.効果」で示したように従来比5.7倍以上の高精度計測および従来比25倍の最速20μsのサンプリング速度を実現し、本技術をベースにした変位センサ形ZW-7000シリーズ(図15)を2016年4月に商品リリースした。



図15 形ZW-7000シリーズ

今回、変位センサの高精度化・高速化において、スキャニング計測の安定性を向上するための被写界深度低減技術・波形傾き補正アルゴリズム・マルチファイバ技術を確立した。波形傾き補正アルゴリズムは波形の傾きと誤差を機械学習し、補正することも可能であり、人工知能(AI)でセンサの計測誤差を低減できる。また、従来高精度化のために対物レンズを組レンズ設計し収差を抑えてきたが、単レンズでも波形傾き補正アルゴリズムを用いることで、高精度化できるため、コストダウン策の一つともなりうる。

今後は、更なる軽薄短小化・検査点数の増加などの顧客ニーズに応えるため、本技術をベースに変位センサの更なる小型化・高精度化・長距離化を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) オムロン. 共焦点計測装置. 特許第5790178号.2015-08-14
- 2) オムロン. 光学計測装置. 特開2017-102067号.2017-06-08

## 執筆者紹介



高嶋 潤 Jun Takashima

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
センサ事業部 第1開発部  
専門：機械工学・光学



奥田 貴啓 Takahiro Okuda

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
センサ事業部 第1開発部  
専門：機械工学・光学



森野 久康 Hisayasu Morino

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
センサ事業部 第1開発部  
専門：機械工学・光学



早川 雅之 Masayuki Hayakawa

技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
物性センシング研究室  
専門：機械工学・光学

# 高負荷環境でも使える Data Matrix 読取技術

藤川 正寛・栗田 真嗣

近年、自動車業界のリコールといった品質問題に対応するために、トレーサビリティの重要性が増している。企業はトレーサビリティを実現し、その社会的責任を果たすために、あらゆる物・あらゆる場所に二次元シンボルを印字して、個体管理の対象を拡大しようとしている。印字する二次元シンボルには、印字の省スペース化や印字形状の柔軟性から Data Matrix がよく使われる。しかし、印字対象物の範囲拡大に伴い、現場では Data Matrix が安定して読めないという問題が起こっている。これは、読取工程の拡大や部品形状の多様化に伴う読取環境の変化により、Data Matrix に対して汚れや損傷といった負荷条件が新たに加わってきたからである。

本稿では、現場の読取環境を考慮した Data Matrix の読取技術の提案を行い、従来技術と比較して、性能改善を確かめた。本技術により、高負荷条件でも安定して Data Matrix が読めるようになると思われる。

## Reading Technology of Data Matrix under High Stressful Conditions

Masahiro Fujikawa and Masashi Kurita

In recent years, the importance of traceability is increasing to respond to quality problems such as recall of automobile industry. In order to realize traceability and fulfill its social responsibility, companies are trying to expand the object of individual management by printing two-dimensional symbols on everything and every place. For the two-dimensional symbols to be printed, Data Matrix is often used because of space saving of printing and flexibility of printing shape. However, with the expansion of the range of objects to be printed, there is a problem that Data Matrix cannot be stably read in the factory lines. This is because stressful conditions such as dirt and damage are newly added to Data Matrix due to the change in the reading environment accompanying the expansion of the reading process and the diversification of the part shape.

In this paper, we propose Data Matrix reading technology considering the reading environment of the factory lines, and confirmed the performance improvement compared with the conventional technology. We believe that Data Matrix can be read stably under this high stressful condition.

### 1. まえがき

近年、自動車のリコールや食品の異物混入が起こる度に、「トレーサビリティの重要性」がよく語られる。なぜか？疑問に答えるべく、この章では、トレーサビリティの重要性と動向について述べる。

トレーサビリティ (traceability) とは、トレース (trace: 追跡) とアビリティ (ability: できること) を組み合わせた言葉で、「追跡可能性」と訳される。製造業においては、「原材料や部品の調達、加工、組立、流通、販売の各工程で、製造者・仕入先・販売元などを記録し、履歴を追跡できるようにすること」という意味で使われることが多い。

トレーサビリティを実現することで、①企業の社会的責任を果たす、②消費者の安心・安全を守る、③企業の競争力を向上させる、という恩恵を享受できる。①に関しては、

商品の欠陥や不具合といった品質問題が発生したとき、対象となる原材料や部品がどこで使われたかを時系列に沿って追跡することで、企業は迅速に適切な対応を取ることができる。これにより、消費者や取引先の不信感を高めることなく、企業の社会的責任を果たすことができる<sup>1)</sup>。②に関しては、消費者の手元にある商品について、時系列を遡って追跡することで、本物か偽物かが分かったり、アレルギー物質の有無が分かったりする。これにより、消費者は安心して、安全に商品を利用することができる<sup>1)</sup>。③に関しては、加工、組立といった各工程内の生産情報が全て記録されているため、情報を分析することで、生産品質の因果関係が分かる。これにより、生産品質が改善するため、企業の競争力を向上させることができる<sup>2)</sup>。

トレーサビリティを実現するには、原材料や部品がいつ、どこで、どのように使われたかという情報を記録し、追跡

できることが要件になるので、原材料や部品にユニークな番号を付与して管理する個体管理が必要になる。個体管理を実現するための手段の1つとして、一次元シンボルや二次元シンボルを使って、ユニークな番号を印字したラベルを対象品に張り付けて管理する方法が知られている<sup>3)</sup>。近年は管理する情報が増加傾向にあることから、二次元シンボルがよく使われている<sup>4)</sup>。さらに、対象品が小さいときやラベルが剥がれてしまう環境では、対象品に二次元シンボルを直接印字するDPM (Direct Part Mark) が使われる。印字スペースが小さくて済むことや印字形状 (正方形/長方形) が選択できることから、Data Matrixがよく使われる。

近年、自動車業界では、個体管理の対象部品が増えてきている。この背景には、①重要保安部品は1つのリコールで経営に影響が出るため、エアバッグのリコール以降、個体管理の導入が加速している<sup>2)</sup> こと、②EVシフトに伴い車載電装部品が増加していること、が挙げられる。その結果、エンジンプロックのような大きな部品から、インダクタのような小さな部品まで、あらゆる物・あらゆる場所にData Matrixが印字されるようになってきた。トレーサビリティの観点から見れば、個体に印字されたData Matrixが読めないことは、その個体の記録が途絶えてしまうことに繋がるため、最悪の場合、製品品質としては問題のない個体を破棄することになってしまう。だからこそ、高負荷条件でも、安定してData Matrixを読み取る技術の必要性が高まってきている。

## 2. 従来技術と課題

**2.1 Data Matrixの特徴** Data Matrixは、ISO/IEC 16022で規定されている<sup>5)</sup>。構成の特徴を図1に示す。

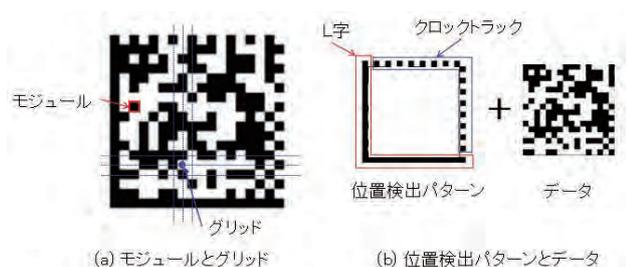


図1 Data Matrixの構成

Data Matrixの最小構成単位はモジュールと呼ばれ、モジュールの中心 (グリッド) は基盤の目状に配置される (図1 (a))。Data Matrixは、位置検出パターンとデータから構成される (図1 (b))。位置検出パターンは、1モジュール幅で構成されており、左側と下側に配置されるL字と右側と上側に配置されるクロックトラックに分けられる。L字は暗モジュールのみ配置されており、Data Matrixの位置と向きを求めるために用いる。クロックトラックは明/暗モジュールが交互に配置されており、グリッドを求めるために用いる。このように、位置検出パターンは非常に重要な役割を担っている。

**2.2 従来技術** 弊社は以前からData Matrixの読取技術を持っている<sup>6)</sup>。従来技術の読取フローを図2に示す。

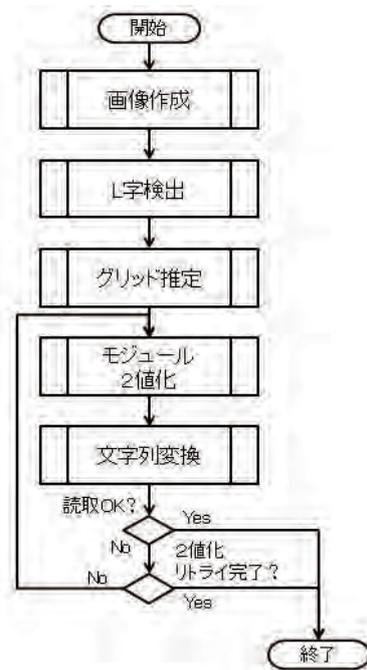


図2 従来技術のData Matrix読取フロー

「L字検出」は、取り込んだ画像の中から位置検出パターンのL字を探し出す。「グリッド推定」は、検出したL字からクロックトラックを求めて、グリッドを算出する。「モジュール2値化」は、全グリッドにおいて、暗モジュール (1) か明モジュール (0) かを判定する。「文字列変換」は、2値化された0/1情報を文字列に変換する。

読み取れる可能性を上げるために、条件を変えて、文字列変換を再度行うことをリトライと読んでいる。従来は、モジュール2値化の閾値を変えて、リトライを実施していた。

また、リトライの方法はモジュール2値化の閾値を変える方法以外に、モフォロジーのような画像前処理を用いて処理する画像を変える方法もある<sup>7)</sup>。

**2.3 課題** 個体管理の対象部品が増え、あらゆる物・あらゆる場所にData Matrixが印字されることで、現場では安定して読めないという問題が起こっている。例を図3に示す。

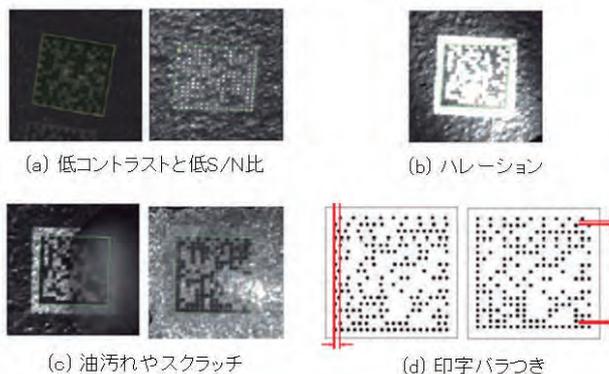


図3 安定して読めないData Matrixの例

図3 (a) は、既存工程の後付でリーダを設置するときなど、撮像環境が最適にできないときに起こる。この場合は、Data Matrixのコントラストが低くなったり、S/N比が悪くなったりして、読めなくなる。図3 (b) は、シンボルの印字位置が多少変動するなど、撮像環境が常に最適になるとは限らないために起こる。この場合は、ハレーションが起こり、一部の位置検出パターンやデータ領域における輝度がバラつき、読めなくなる。図3 (c) は、加工工程を経ると、油汚れや水滴が付着したり、スクラッチによりシンボルが一部破損したりすることで起こる。この場合は、撮像されるData Matrixは一部欠けており、特に、読取に重要である位置検出パターンが損傷した場合には、読めなくなる。図3 (d) は、高速なインクジェットプリンタ印字やドットピーン印字の場合、印字するタイミングによってはドットの並びが一定にならないときに起こる。この場合は、ドット間隔が均一にならなかったり、直線が波打ったりすることで、読めなくなる。

このように、読取時に重要である位置検出パターンに対して、コントラストが不安定になったり、損傷したり、歪んだりする負荷がかかることで、Data Matrixの検出に失敗して、読めなくなっているケースが多い。

### 3. 技術内容

**3.1 位置検出パターンに対する補正処理** 本技術では、位置検出パターンに対して負荷がかかった場合、負荷に対する補正処理を行うことで、高精度にData Matrixを読み取れるようにした。本技術の読取フローを図4に示す。赤く示している箇所が従来技術<sup>6)</sup>との差分である。

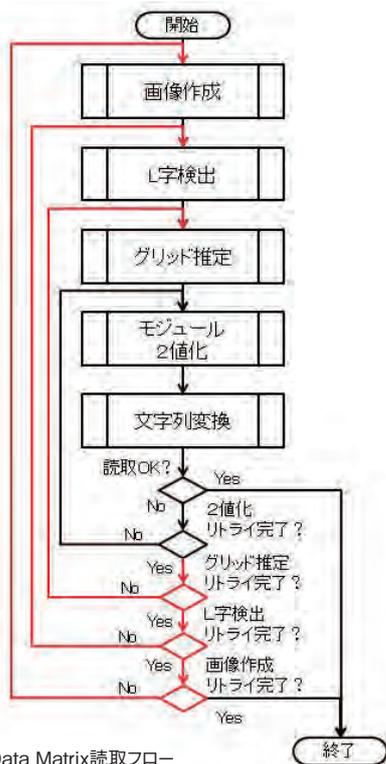


図4 本技術のData Matrix読取フロー

画像作成、L字検出やグリッド推定に対してもリトライを追加することで、様々な位置検出パターンに対する補正処理を実施できるようにした。

グリッド推定に対するリトライの一例を挙げると、クロックトラックが欠けたり、汚れたりした時である。Data Matrixの1辺に配置されるモジュール数はISO/IEC 16022で規定されており、表1に示す<sup>5)</sup>。そのため、検出したクロックトラックのモジュール数が規定された数と合致しない場合、規定された数を元にクロックトラックのモジュール中心位置を推定している。

表1 規定されているモジュール数の一覧

形状	モジュール数(行×列)
正方形 (24種)	10x10,12x12,14x14,16x16,18x18,20x20,22x22,24x24,26x26,32x32,36x36,40x40,44x44,48x48,52x52,64x64,72x72,80x80,88x88,96x96,104x104,120x120,132x132,144x144
長方形 (6種)	8x18,8x32,12x26,12x36,16x36,16x48

グリッド推定を行う時、クロックトラックを構成しているモジュールの中心座標が必要である。クロックトラックのモジュールが欠けた時の例を図5に示す。

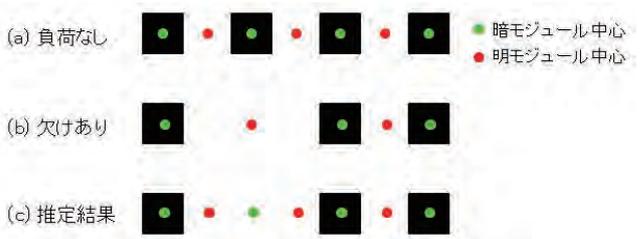


図5 クロックトラックが欠けた時の例

図5 (a) のように、負荷がないときは、それぞれの明／暗モジュールの中心を求めることができる。図5 (b) のように、左から2番目の暗モジュールがハレーションによって欠けた場合、明モジュールが長くなり、モジュール中心間隔が部分的に疎になる。このようなときに、公知のモジュール数を参考にして、図5 (c) のように、クロックトラックの中心位置を追加する。

クロックトラックが汚れた時の例を図6に示す。

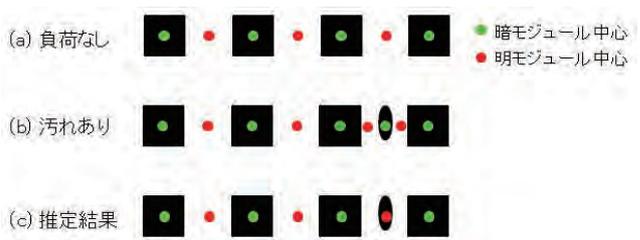


図6 クロックトラックが汚れた時の例

図6 (a) のように、負荷がないときは、それぞれの明／暗モジュールの中心を求めることができる。図6 (b) のように、左から3番目の明モジュールに汚れが付着した場合、暗モジュールが増えるため、モジュール中心間隔が

部分的に密になる。このようなときに、公知のモジュール数を参考にして、図6 (c) のように、クロックトラック中心位置を削除する。

このような補正処理を入れることで、より正確なグリッド位置を求めることができ、高精度に読み取れるようにしている。

**3.2 リトライの順序決定** リトライを何回も行うことで、高精度に読み取れるようになるというメリットはあるが、処理時間が伸びるというデメリットもある。

図4に示したように、本技術は、モジュール2値化の閾値や作成する画像の種類などのパラメータ値を変えながらリトライを繰り返し、途中で一度でも読み取れると処理が完了するように設計されている。したがって、読み取れる可能性が高いパラメータから先にリトライを実施し、読み取れる可能性が低いパラメータは後でリトライを実施することで、処理時間を確率的に短くできると考えられる。

図7を使って、リトライにおけるパラメータ順序を決定する方法を説明する。



図7 パラメータ順序を決定する例

まず、モジュール2値化の閾値や作成する画像の種類など、リトライを実施するパラメータの組み合わせを求める (図7 (a) のパラメータA~C列)。次に、サンプル画像を1枚準備し、各組み合わせに対して読み取れる可能性を評価し、スコアを求める (図7 (a) のスコア列)。最後に、読み取れる可能性が高いパラメータからリトライが実施されるように、スコアを基にパラメータ順序を決定する (図7 (b))。

一般的に、サンプル画像を用いて、シンボルの読取技術に必要な情報を事前知識として取得することをティーチングと呼んでいる。本技術では、ティーチング時にリトライにおけるパラメータ順序の最適化も実施している。

## 4. 効果

**4.1 検証方法** 本技術による性能改善を確かめるために、現場状況を模擬した評価画像DBを用いて検証を行った。評価画像DBは、現場で起こりうる負荷条件やワークの種類をできるだけ集めた画像により構成されている。その中から、2.3章で述べた低コントラスト、低S/N比、ハレーション、油汚れ、印字バラつきの負荷条件について、それぞれ

表2に示す画像枚数を抽出した。負荷条件ごとに、抜き出した1枚に対してティーチングを実施し、抽出画像に対して計測を行った。

表2 検証に用いた画像枚数

負荷条件	モジュール数	画像枚数
低コントラスト	16×16	85
低S/N比	22×22	85
ハレーション	16×16	105
油汚れ	12×12	85
印字バラつき	18×18	85

**4.2 検証結果** 抽出した画像に対する従来技術<sup>6)</sup>と本技術の認識率を図8に示す。

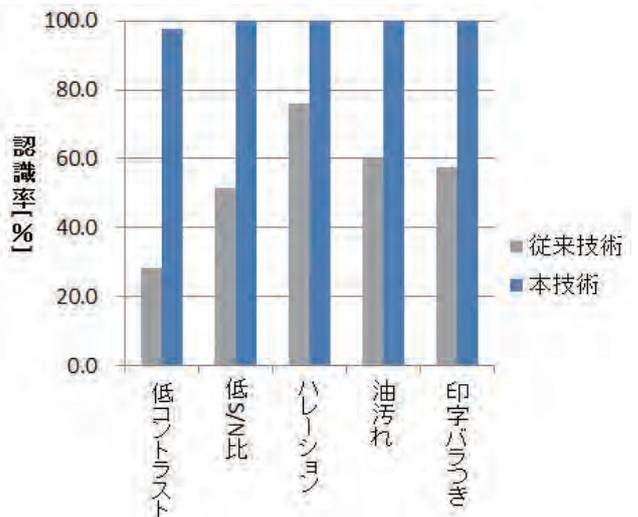


図8 従来技術と本技術の認識率

全ての負荷条件に対して、認識率が約2倍に改善しており、約100%と非常に高い値になっていることが分かる。

ハレーションや油汚れは、部分的に照明の正反射成分が強くなるため、クロックトラックの輝度値が途中から白側に大きく変化する。これにより、部分的にクロックトラックの2値化結果が明モジュールと判定され、欠けていると見なされる。したがって、前述のクロックトラックが欠けた時のグリッド推定処理が有効になり、高い認識率を実現できたと考えられる。

印字バラつきは、モジュール中心が整列されていないため、クロックトラックのモジュール中心を推定する際に、誤判定が起こる。クロックトラックの暗モジュールの位置がずれることで明モジュールに判定されたり、クロックトラックに隣接した行・列の暗モジュールがはみ出してくることで暗モジュールに判定されたりする。したがって、前述のクロックトラックの補正処理が有効になり、高い認識率を実現できたと考えられる。

抽出した画像に対する従来技術と本技術の処理時間を図9に示す。

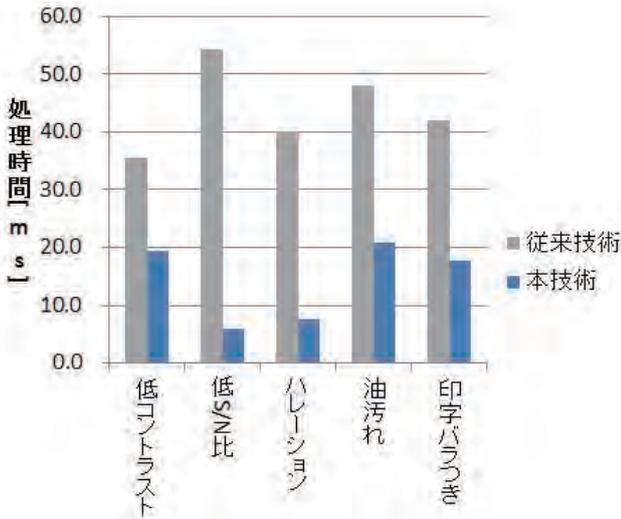


図9 従来技術と本技術の処理時間

処理時間は、弊社の画像センサ（形FH-5050）で読取が成功した画像の処理にかかった時間の平均値である。全ての負荷条件に対して、処理時間が約4倍に改善していることが分かる。従来技術よりも多くのリトライの組み合わせが存在するが、負荷条件ごとにティーチングを実施して計測しているため、負荷状況に応じたリトライの最適化が効いていると考えられる。

例えば、低コントラストと低S/N比は処理時間の観点から見れば、トレードオフな負荷になる。低コントラストに対する処理時間を速くするためにコントラストに関する閾値を下げると、小さなノイズも検出しやすくなり、低S/N比では遅くなる。逆もまた然りである。トレードオフな負荷であっても、それぞれの負荷に応じたスコアが正しく算出されているため、高い認識率を担保しながら、速い処理時間を実現できている。

## 5. むすび

本稿では、あらゆる物・あらゆる場所にData Matrixが印字されることで、現場で安定してData Matrixが読めないという課題に対して、位置検出パターンに対する補正処理を行うリトライの組み合わせを増やして、ティーチングによりその順序を最適化する読取技術の提案を行った。従来技術との性能比較を行い、高精度と高速を両立した性能改善を確かめた。したがって、本技術は高負荷条件でも、安定してData Matrixを読み取る技術になっていると考える。

今後、個体管理の対象部品はさらに増え、より小さい部品にもData Matrixが印字されると予想される。この場合、画像に対するData Matrixの大きさは小さくなるため、処理時間がかかるようになる。一方で、部品は小さいため、検査に許されるタクトタイムは短くなる。このような状況下でも高精度・高速な読み取りを実現するため、L字検出やグリッド推定の技術をブラッシュアップしていく。

## 参考文献

- 1) 高山勇. トレーサビリティにおける自動認識技術活用の現状と展望. 月刊自動認識. 2013, vol.26, no.10, p11-15.
- 2) 池松由香. 品質管理の「万能薬」. 日経ビジネス. 2017, No.1916, p.48-52.
- 3) 國領二郎. デジタルID革命. 日本経済新聞社, 2004, 356p.
- 4) コグネックス. トレーサビリティやワールドワイド調達を支えるバーコードリーダ. 月刊自動認識. 2014, vol27, no.7, p5-9
- 5) ISO/IEC 16022, Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Data Matrix bar code symbology specification .2006, p.3-5, p16.
- 6) 坂頂幸治, 村田卓也, 白水岳. 自動車業界の製造工程で求められる2次元コードリーダ. OMRON TECHNICS. 2002, Vol.42, No.3 (通巻143号) , p.248-252.
- 7) Sateesh Gopalakrishna Nadabar; Ranjit Desai; METHOD AND APPARATUS USING INTENSITY GRADIENTS FOR VISUAL IDENTIFICATION OF 2D MATRIX SYMBOLS. 2005, United States Patent, US6941026.

## 執筆者紹介



藤川 正寛 Masahiro Fujikawa  
 インダストリアルオートメーションビジネス  
 カンパニー 商品事業本部  
 センサ事業部 第2開発部  
 JAISA 認定バーコード専門技術者  
 ISO/IEC/JTC 1/SC 31/WG1国内専門委員  
 会所属



栗田 真嗣 Masashi Kurita  
 技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
 専門：画像処理

# AI 技術による外観検査の自動化

## Deep learning による事前学習型欠陥検出について

半澤 雄希・池田 泰之・栗田 真嗣・長谷川 友紀

本稿では外観検査自動化システムにおいて、一様背景（ヘアライン、梨地、等）ワークにおける多種多様な欠陥を検出する技術を提案する。現在、ものづくり領域において、「人材不足」および「嗜好の多様化」が進み、目視検査工程の自動化ニーズが高まっているが、既存の画像センサでは多種多様なワーク・欠陥種に対する自動化は実現できていない。そこで我々は Deep Learning 技術を活用し、多種多様な欠陥状態を事前に学習することで、人のような検査を複雑な設定なく誰でも自動で実行することが可能な欠陥検出技術を構築した。また、GPU のような高コストな装置を導入することなく、CPU で高速動作可能な工夫を導入することで、既存の画像センサに搭載可能にした。これにより、一様背景ワークの外観検査自動化が可能となる。

## AI Visual Inspection System

### Defect Detection using Deep Learning

*Yuki Hanzawa, Yasuyuki Ikeda, Masashi Kurita and Yuki Hasegawa*

In this paper, we propose a technique to detect various defects in uniform background objects (hairline, satin, etc.) in visual inspection system. "Human resources shortage" and "diversification of consumer needs" have emerged recently in the field of manufacturing, and the demands for the autonomous visual inspection system are increasing. The existing inspection system, however, cannot adapt to a wide variety of objects / defect types. We built Deep Learning model that learns a variety of defect types in advance, thereby constructing a defect detection system that enables anyone to automatically perform inspection like human eye without any complicated setup. In addition, without introducing high-cost computing resources such as GPU, it can be feasible on existing vision system by highly optimizing for modern CPU.

#### 1. まえがき

**1.1 背景** ものづくり領域において、「人材不足」および「嗜好の多様化」が進み、人による目視検査工程の自動化ニーズが高まっている。しかし、既存の画像センサでは検査工程の自動化は一部のみしか実現できていない。その要因は、「つくるものの多様化により、検査ワークの材質や形状の多様性に対応しきれない」「高度な専門知識を保有しなければ調整できない」などの課題がある。そこで、我々は検査工程を自動化するために、「多種多様なワーク・欠陥種に対応可能」かつ「誰でも簡単に設定可能」という要件を満たす外観検査自動化技術の実現を目指す。

多種多様なワーク・欠陥種に対応するためには、欠陥を検出するアルゴリズム、欠陥を強調する入力（照明・撮像）技術、ワーク形状に対応するための駆動技術が必要であるが、その中で、本稿では、多様な欠陥を検出可能にする欠陥検出アルゴリズムを提案する。

#### 1.2 Deep Learning を活用した事前学習型欠陥検出の提案

多種多様な画像解析において Deep Learning が成果を上げている中、ネックとなっているのは、画像の収集である。外観検査での Deep Learning の実用化にあたり、学習に使用する画像の収集が、現場の作業者にとって大きな負担となり、製品ラインの立ち上げ時に十分な枚数の学習画像を確保することは困難であることが想定される。本稿ではこの課題を解決するために、ラインごとに学習画像を準備する必要のない、事前学習型のアルゴリズムによる外観検査の自動化を提案する。

外観検査においては多種多様なワーク表面・欠陥状態の微小な差から欠陥のみを検出する必要がある。外観検査の対象ワーク・欠陥状態は表1のように分類できる。この分類の中で、既存の画像センサで実用化がなされているのは、一様ワーク上の顕著な欠陥の検査のみである。それに対して、本稿で提案するアルゴリズム、一様ワーク上の微小欠陥を対象としている。一様ワークであれば異なる製品ライン間でも似た特徴を示すため、事前学習型のアルゴリズムでも十分に対応可能である。

objects / defect types		input images	
Uniform background	Large or salient defects	stain 	dust 
	Small or weak defects	scratch / hairline 	scratch / glass 
Complex background		LED light emitter stain  dust  chip capacitor dent 	

表1 表1 ワーク・欠陥状態の分類

## 2. システム概要

検出処理の概要を図1に示す。入力画像を事前学習型のCNN (Convolutional Neural Network) によって処理することで、欠陥らしさを表すFeature Mapを生成する。そして、得られたFeature Mapを2値化し、欠陥領域として抽出する。

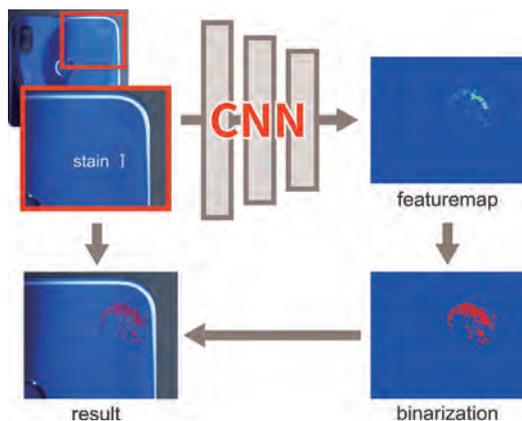


図1 検査システム概要

このようなタスクを行う場合のDeep Learningの研究事例としては、一般にはObject detectionや、Semantic segmentationといった処理結果を出力するアルゴリズムがベースとなる<sup>1)</sup>ことが多いのに対して、本稿で提案するアルゴリズムでは、Feature Mapを最終出力としている。この理由は、実際の現場においては、生産ラインごとに製品の欠陥を不良品とするか良品として許容するかの判定基

準が異なり、ラインごとの閾値を設定する余地を残す必要があるためである。実際の運用形態としては、画像センサに搭載されたうえで、提案アルゴリズムによって欠陥部分のみを強調したFeature Mapを生成した後に、単純な画像処理の2値化やラベリングを適用し、欠陥の位置や大きさを用いて良否判定を行う、といった一連の検査フローの一部として活用されることを想定している。

## 3. 欠陥検出画像の生成アルゴリズム

製造現場での欠陥検査では、欠陥以外のものが画像に映りこむことも考えられ、後段処理で欠陥とそれ以外の分類が必要な場合がある。そのために、「欠陥らしさ」を画像化したFeature Mapにより、位置や大きさを特定できるようにする。Feature Mapの作成は下記2ステップから成り立つ (図2)。

- (1) 検査画像に欠陥が含まれる確率を推定
- (2) 推定した欠陥の位置を特定し、画像化

まず、(1) では検査画像をCNNに入力し、画像内に欠陥が存在する可能性を0~1の確率で出力する。CNNは事前に大量の欠陥画像を用いて学習しておくことで、検査画像に欠陥に近いパターンが含まれると高い値を出力するようになっている。

次に、(2) では (1) が推定した欠陥確率が、検査画像内のどの場所に由来するものかを求める。CNNでは欠陥位置を表す情報は、各中間層の計算結果に含まれることが知られており<sup>2)</sup>、これらを用いて、欠陥確率への寄与度を検査画像の画素単位で算出できる。最後に、画素毎の寄与度に適切な倍率をかけてFeature Mapとする。

Feature Mapの例を図3に示す。この図では欠陥確率への寄与度が高いほど色が青から赤に変化する。検査画像中で欠陥が存在する箇所が高い値になっていることがわかる。

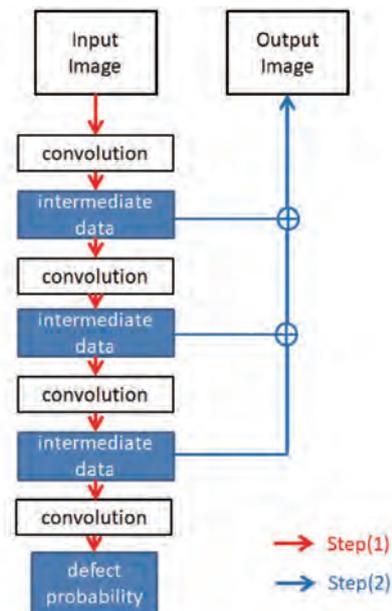


図2 Feature Mapの生成フロー

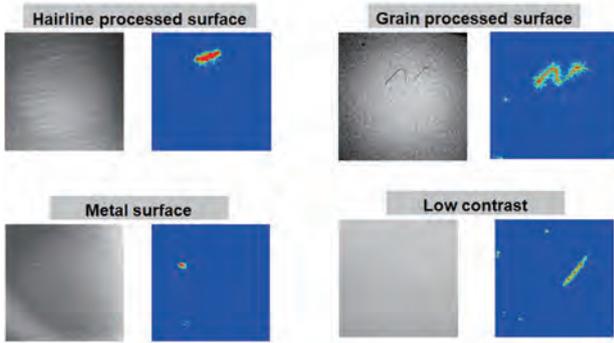


図3 Feature Mapの例

#### 4. 学習画像DB

事前学習型のアルゴリズムで十分な性能を発揮するには、現場で生産される多種多様なワークを網羅する、大規模な学習画像DBを開発時に構築する必要がある。しかし、実ラインのデータは常に保存されているわけではなく、企業秘である場合もあるため、容易には開発用途での収集はできない。特に欠陥を含む画像データは絶対数が少なく、良品とのデータ数のバランスがとれないという問題もある。

学習に使用可能な画像の調達が困難な条件においては、DB構築方法として、擬似的にCG (Computer Graphics) やGAN (Generative Adversarial Network) で生成した画像を学習画像として使用する手法が提案されている<sup>3) 4)</sup>が、実環境で実際に有効性が示されるケースは稀である。

そこで、本稿で提案するアルゴリズムの開発においては、実際の現場で発生が想定される欠陥種別、位置、サイズ、色、背景素材、光源設定等の組み合わせを網羅したパターンのワークを実際に作成、撮影し、学習画像DBを構築した。図4は実際に作成した組み合わせパターンの例である。

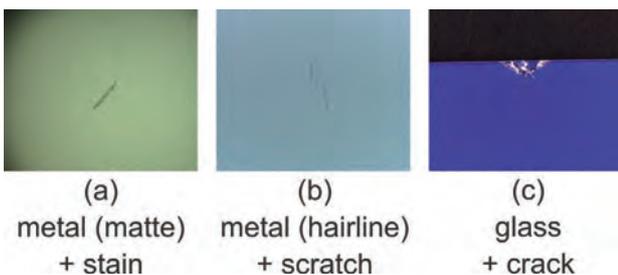


図4 学習画像の例

学習処理においては、撮影した各画像に対してクリッピングやノイズ付加等のオーギュメンテーション処理を加え、800万枚に増強した画像を使用している。

この学習DBを使用することにより、本稿で提案するアルゴリズムは、現場で多種多様なワークや欠陥形状に対応することが出来る。

#### 5. 高速化の検討

一般にDeep Learningを実行するにはGPUなど潤沢な

計算資源を用いるが、現場で使う画像センサの場合、コスト等の問題によりこれらの活用が困難である。そこでCPUのみの処理にて高速性を改善するために、CNNの処理時間の多くを占める畳み込み層に着目し、ネットワーク構造とコードの実装形態を画像センサのHW構成に最適化している。これにより、入力画像の解像度次第で、100ms ~ 600msの処理時間を実現している。

**5.1 ネットワーク構造の最適化** 高精度なDeep Learningのネットワーク自体は数多く提案されているものの、GPUの使用を前提としたものが多く、画像センサのCPUでの処理時間は1000msを超えてしまうものがほとんどである。本稿で提案するアルゴリズムで採用しているネットワークは、一般物体認識のタスクにおいて高い精度で高速なネットワークとして代表的なResNet<sup>5)</sup> や、Inception<sup>6)</sup> といったCNNのネットワークをベースとしつつ、ネットワークの各レイヤーを、多種多様な欠陥、背景パターンの組合せに対応することを考慮して、Effective Receptive Fieldの多様性を重視した構成と<sup>7) 8)</sup> し、さらに、様々な高速化構造<sup>9)</sup> を取り入れることで、速度と精度の両立を図った。

**5.2 カーネルの近似** 畳み込み演算は、カーネルのサイズに比例して計算量が増加するため、カーネルは小さいほうが高速である。一方、CNNでは小さなカーネルの畳み込み層を多段で使うことで、大きなカーネルの畳み込み層と同等の効果があることが知られている<sup>10)</sup>。そこで我々はカーネルサイズ  $N \times N \times C$  の畳み込み層を  $1 \times N \times C$  および  $N \times 1 \times C$  の2段の畳み込み層に分けることで、全体の計算時間を短縮する。(図5)

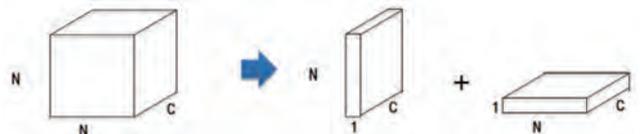


図5 畳み込み層のカーネルの小型化

**5.3 固定小数点化と並列演算命令の活用** 畳み込みは浮動小数点のデータ列に対する積和演算である。一方、画像センサで採用するCPUでは、複数のデータに対する積和演算を並列で実行する命令セット (Single Instruction Multiple Data : SIMD) が使用できる。また、SIMDではデータを表現するbit数が少ないほど多の並列実行ができる。我々は畳み込みの計算において、入力と出力を8bit固定小数点化することで、最大32並列で演算実行するようにする。

#### 6. 性能評価

本稿で提案したアルゴリズムを、466枚の検査画像 (良品62枚、不良品404枚) に対して適用し、性能を評価した。比較対象とした従来手法の精度は、画像センサに搭載されている、コントラスト強調や、エッジ検出といった一般的なフィルタをワークごとに最適化し、欠陥領域を抽出することで算出している。また、評価に使用した画像は、本稿

で採用した学習画像とは撮影環境も撮影対象も異なる画像である。

性能評価の結果を表2に示す。表中の見すぎは良品画像からの誤検出、見逃しは不良品画像に対する未検出である。

表2 性能評価結果

	見逃し	見すぎ
従来手法	3.2%	6.7%
提案手法	0.9%	3.4%

見逃し、見すぎともに、提案手法が高い精度を示した。また、従来手法がワークごとに複数のフィルタの選択と多数のパラメータの調整を要するのに対し、提案手法を使用する上で調整が必要なパラメータはFeature Mapに対する閾値のみであるため、現場での調整の手間の削減も期待できる。

図6、7に提案アルゴリズムによる欠陥部位の抽出結果の例を示す。図の1段目は入力画像で、2段目は比較用に画像センサに実装されている従来手法によって入力画像から欠陥部位の抽出を行った結果である。そして、3段目が提案アルゴリズムによる欠陥部位の抽出結果である。図6に示したワークは学習画像に類似したパターンの画像を含む場合の結果で、図6 (a) は梨地のアルミにキズが付いているワークである。入力画像の解像度が約2000 × 2000 に対してキズの幅は約4pixと細く、かつコントラスト比も低いため、従来手法によって処理を行った場合は全く抽出出来ていない。これに対して、提案アルゴリズムによって処理した結果では、従来手法では不可能だったキズ部位の抽出が出来ており、かつ、キズ部位と隣接した画像上ではより顕著なコントラスト比を示す照明の影を無視できている。図6 (b) は汚れのついたプラスチックフィルムである。フィルムには細かなヘアラインが入っており、従来手法によって処理した場合、それらに起因するノイズがワークの広範囲に発生している。それに対し、提案アルゴリズムによって処理した結果では、ヘアラインの影響を受けずによりクリアに欠陥部位の抽出が出来ている。

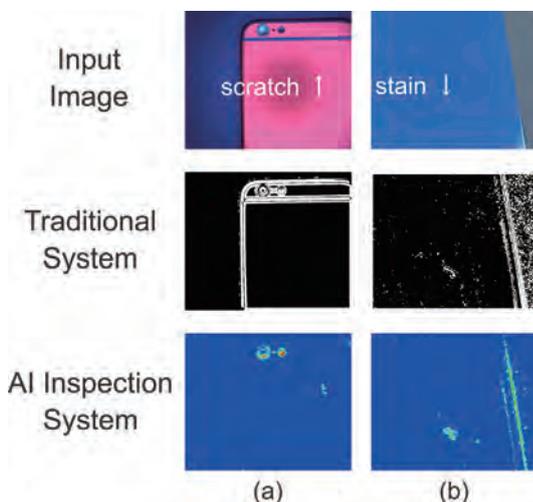


図6 学習画像と類似したワーク

図7は学習画像との差異の大きく、かつ背景部分の情報量が多いワークに対する出力結果である。図7 (a) はフェライトコアにクラックが発生している画像で、学習画像にはこのような形状の情報が含まれる画像は存在しない。この画像に対して従来手法によって処理を行った場合、クラック部分の抽出こそ行っているものフェライトコアそのものの形状や表面荒れに起因するエッジも同様に抽出されている。対して、提案アルゴリズムによって処理した結果では、クラック部分のみが顕著な欠陥部位として出力されている。図7 (b) は木製のスマートフォンカバーにホコリが乗っている画像である。学習画像には、木製のワークの画像はなく、ホコリを欠陥として含むパターンも今回の開発におけるターゲットとしていなかったため、存在しない。このワークに対して従来手法によって処理を行った場合、ホコリだけでなく、木目の部分も同等の強度で抽出されてしまっている。これに対して、提案アルゴリズムによって処理した結果では、木目パターンもホコリも学習していないものの、木目を無視してホコリ部分が欠陥として出力できている。

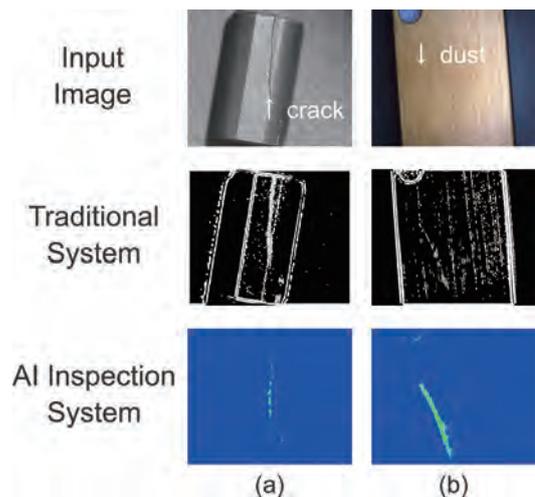


図7 学習画像と差異の大きいワーク

これらの結果から、本稿で提案するアルゴリズムは、事前学習型でありながら、学習画像に存在しない、未知パターンに対して高い対応能力も持つといえる。

## 7. むすび

本稿では、多種多様なワーク、欠陥種別に対応可能な事前学習型の欠陥検出アルゴリズムを提案した。提案手法により、未知のパターンのワーク、欠陥に対しても対応できることが確認できた。

今後の展望としては、より複雑な入力（照明・撮像）技術、ロボットの駆動技術との連携や、より複雑なデザインのワークに対応するための、オンライン追加学習を検討している。

## 参考文献

- 1) Hiroya Maeda; Yoshihide Sekimoto; Toshikazu Seto; Takehiro Kashiya; Hiroshi Omata. Road Damage Detection Using Deep Neural Networks with Images Captured Through a Smartphone. arXiv:1801.09454
- 2) B Zhou; A Khosla; A Lapedriza; A Oliva; A Torralba. Learning Deep Features for Discriminative Localization. CVPR (2016)
- 3) César Roberto de Souza; Adrien Gaidon; Yohann Cabon; Antonio Manuel López Peña. Procedural Generation of Videos to Train Deep Action Recognition Networks. CVPR (2017)
- 4) Ashish Shrivastava; Tomas Pfister; Oncel Tuzel; Josh Susskind; Wenda Wang; Russ Webb. Learning from Simulated and Unsupervised Images through Adversarial Training. CVPR (2017)
- 5) Kaiming He; Xiangyu Zhang; Shaoqing Ren; Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. CVPR (2016)
- 6) C. Szegedy; V. Vanhoucke; S. Ioffe; J. Shlens; Z. Wojna. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. CVPR (2016)
- 7) Wei Xiang; Dong-Qing Zhang; Heather Yu; Vassilis Athitsos. Context-Aware Single-Shot Detector. arXiv:1707.08682
- 8) Songtao Liu; Di Huang; Yunhong Wang. Receptive Field Block Net for Accurate and Fast Object Detection. ECCV (2018)
- 9) Mark Sandler; Andrew Howard; Menglong Zhu; Andrey Zhmoginov; Liang-Chieh Chen. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. arXiv:1801.04381
- 10) K Simonyan; A Zisserman. Very Deep Convolutional Networks for Large-scale Image Recognition. ICLR (2015)

## 執筆者紹介



半澤 雄希 Yuki Hanzawa  
技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
専門：画像処理



池田 泰之 Yasuyuki Ikeda  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
センサ事業部 第2開発部  
専門：画像処理  
所属学会：情報処理学会



栗田 真嗣 Masashi Kurita  
技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
専門：画像処理



長谷川 友紀 Yuki Hasegawa  
技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
専門：画像処理  
所属学会：精密工学会

# UHF 帯 RFID 安定読み取り技術

## 意図しない RF タグの誤読取防止技術

野上 英克

自動車業界では、リコール件数の増加が業界全体で問題となっている。リコール発生時の迅速な対応のため、全ての構成部品が、いつ、どこで生産されたかを特定する個体識別技術の重要性が高まっている。個体識別技術の中でも、粉塵や油汚れに強いという利点を持つ RFID は、短距離通信を目的とした HF 帯 RFID と、長距離通信を目的とした UHF 帯 RFID に分類される。しかし、UHF 帯 RFID は周囲構造物からの電波の反射の影響によって、誤読取が発生するという問題があった。

そこで、生産現場における RF タグの動きに着目し、RF タグからの受信電力推移を検出することにより、非対象 RF タグと対象 RF タグを識別するアルゴリズムを開発した。この技術により、信頼性の高い長距離の個体識別システムが実現できる。

## Stable reading for UHF RFID

### Technique for preventing erroneous detection of non-target RF tag

Hidekatsu Nogami

In the automotive industry, the increase in the number of recalls is a problem. In order to respond quickly when a recall occurs, there is likewise an increasing importance of individual part identification to identify when and where all the components are produced. Among individual part identification techniques, RFID, having the advantage of being more resistant to dirt, oil and dust, is classified into HF band RFID for short-range communication and UHF band RFID for long-distance communication. However, UHF band RFID has a problem whereby erroneous detection occurs due to reflection of radio waves from surrounding structures. This is the problem to be solved.

Therefore, focusing on the movement of the RF tag at the production site, we developed an algorithm to distinguish between the non-target RF tag and the target RF tag by detecting the transition of the unintended power reception from the RF tag. With this technique, a highly reliable long distance individual part identification system can be achieved.

#### 1. まえがき

自動車業界では、リコール件数の増加<sup>1)</sup>が業界全体で問題となっている。リコール発生時には、リコール対象範囲の特定と製品の回収、および、生産工程の改善が行われる。この際、重要となるのが、問題となった部品の「加工・組立」が「いつ」「どこで」行われたかを把握することである。このように、製品の「加工・組立」の履歴を素早く追跡する能力を「トレーサビリティ」と呼ぶ。

生産現場では、トレーサビリティの確保のために、CR (コードリーダー)、HF (High Frequency) 帯 RFID (Radio Frequency Identifier) 等の個体識別システムが利用されている。特に、RFID システムは、「汚れに強い」という特

長を活かし、油よごれ等が付着する部品の個体識別に重用されてきた。RFID は、磁界結合方式と電波方式に分類される。このうち、大型部品を識別するためには、長距離通信が可能な UHF 帯 RFID を用いる必要がある。

しかし、UHF 帯 RFID は、磁界結合を用いる HF 帯 RFID とは異なり、電波を利用しているため、周囲構造物からの電波の反射により非対象 RF タグを誤読取する場合がある。

電波の反射の影響を軽減するために、以下の方法が知られている。

- ①電波吸収体を設置する方法<sup>2)</sup>
- ②アンテナを工夫して電波の広がりを抑える方法<sup>3)</sup>
- ③アンテナ角度や送信電力を調整する方法

しかし、生産ラインにおいて、①の方法は電波吸収体の設置場所がなく採用できない。②の方法はアンテナが大型化するため、設置スペースが確保できない。さらに、①②の方法いずれもコストが非常に高くなる問題もある。③の方法は、設置スペースやコストアップの問題はないが、設置調整の難易度が高いという問題がある。なぜなら、周囲構造物（例えば、近くの搬送装置や組立ロボット）は常に動いているため、電波の反射状態が常に変化する。その結果、非対象RFタグからの受信電力が測定する毎に変化するため、最適に調整できない。今までは、長期間の運用テストにより確認してきたが、問題発生たびに調整が必要のため、調整完了に時間を要した。特に、製造ラインを変更するたびに、周囲構造物が変化し再調整が必要な環境では、運用が出来なかった。

そこで、我々は、従来のような通信領域を調整して非対象RFタグに電波を届けないようにするアプローチではなく、電波が対象RFタグと非対象RFタグの両方に届くことを前提として、両者を見分けるアルゴリズムを検討した。アルゴリズムによって、両者を見分けることができれば、設置スペースやコストアップ、および設置調整等の従来法の問題を解決することができる。

## 2. 想定利用シーン

UHF帯RFIDの利用シーンの一つとして、車体組み立てラインを想定している。図1のとおり、リーダライタの設置高さは3m～5m、RFタグ設置位置は車のルーフ上、RFタグ間距離は4～5m、車両高さは1～3mである。

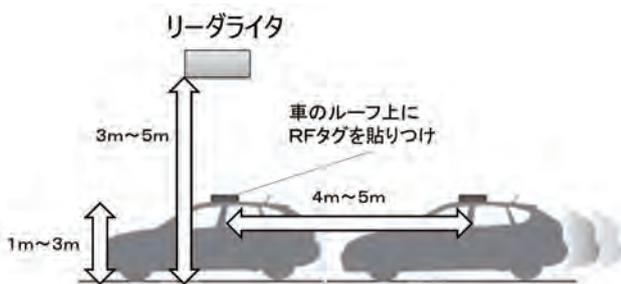


図1 想定利用シーン

図1の利用シーンのシステムでは、コンベア制御装置や光電センサを使い、リーダライタの直下に車体が移動したことを検知し、そのタイミングで上位システムからリーダライタへ読み取りコマンド送信する。

## 3. 課題

リーダライタ直下にある対象RFタグに対して読み取りコマンドを送信した時に、前後にある車に設置された非対象RFタグを誤読取しないようにしなければならない。

リーダライタから対象RFタグの距離（図2青線）に対

して、リーダライタから非対象RFタグの距離（図2赤線）の差が小さい時に、対象RFタグと非対象RFタグの受信電力の差が小さくなり、誤読取が発生しやすい。

想定利用シーンでは、工場建屋の天井の高さは3m～5m、車高は1～3m程度であり、リーダライタから対象RFタグまでの距離は2～4m。また、非対象RFタグと対象RFタグは4～5mである。

想定利用シーンの範囲では、リーダライタから対象RFタグまでの距離4m、かつ、非対象RFタグと対象RFタグ間のRFタグ間距離4mの時が最も距離差が小さくなり誤読取しやすい条件となる。

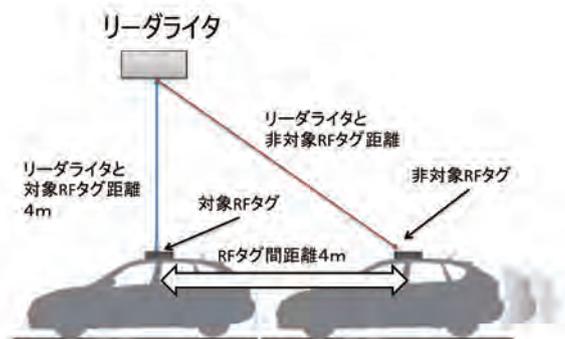


図2 誤読取しやすい条件

電波反射の無い理想環境においては、対象RFタグと非対象RFタグからの受信電力は図3のような軌跡を描く。対象RFタグ（青点線）の車両位置（0m、リーダライタの真下）に対象RFタグが存在するときに、非対象RFタグ（赤点線）と大きい電力差があるため、誤って非対象RFタグを読み取ることは無い。

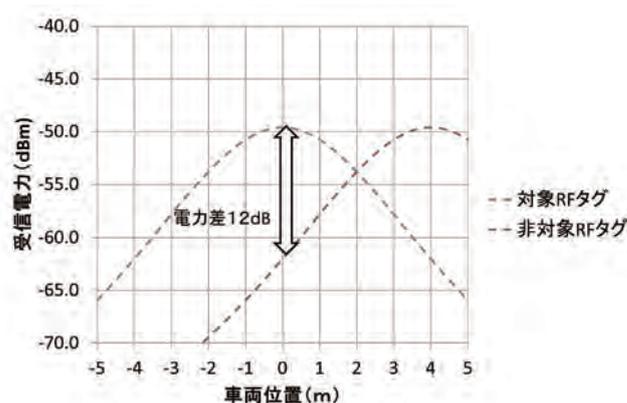


図3 理想環境での受信電力の推移

しかし、電波は周囲構造物の反射の影響を受けるため、実環境では図3のような振る舞いはしない。

そこで、図4のように車のルーフ上に貼り付けたRFタグから4m相当（※1）の高さにリーダライタを配置し、周囲構造物としては、車両の左右約4mの位置に建物が存在する野外（※2）にて、実験を行った。なお、図4の点線に示すように、リーダライタの真下にRFタグが存在する位置を車両位置0mとして図5以降のグラフを表現して

いる。

- ※1：実際には、ルーフから高さ1.5mの位置にリーダライト取り付け用の梯子を配置して実験を行い、相似則により4mに換算した。
- ※2：当社工場内に車両を入れられなかったため、野外にて実験をした。

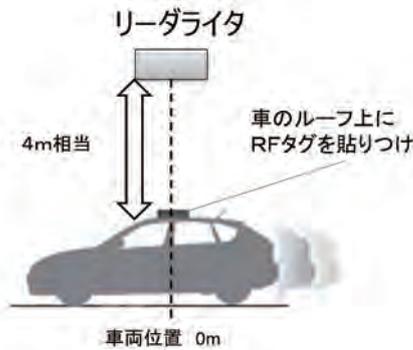


図4 実験環境

実験結果を図5に示す。周辺に反射物がない場合の理論値と比較すると、中心位置は電力が3dB低下 (図5青矢印) し、中心から約4mの位置では電力が7dB増加 (図5赤矢印) している。

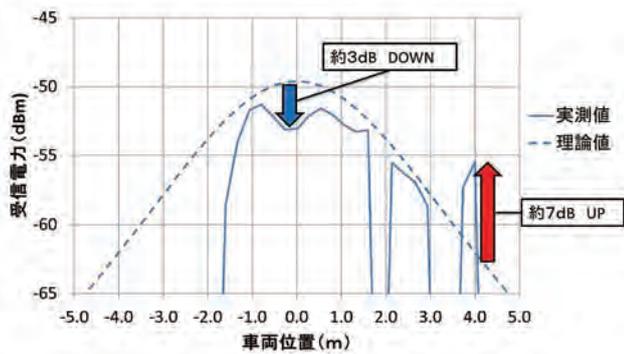


図5 実験結果

今回はRFタグ1つのみ使用した実験であるが、前後に非対象RFタグを実装した場合、図6の青線と赤線の受信電力の推移が観測されることになる。よって、図3の理論値では12dBの電力差であるが、約2.5dBの電力差 (図6白矢印) になることが推定される。

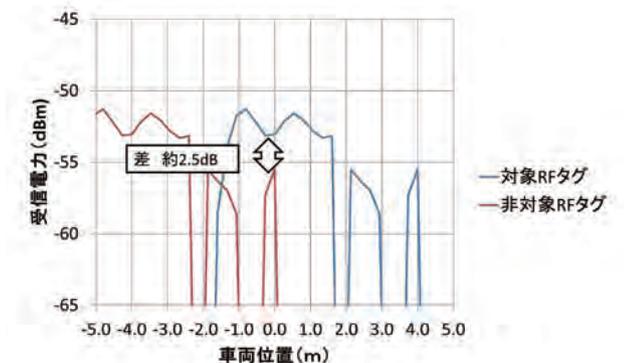


図6 非対象RFタグとの電力差(実測からの推定)

このように、理論値よりも遠くのRFタグの受信電力が増加し、誤読取る事象を「読みすぎ」という。

今回の実験では対象RFタグと非対象RFタグ間の距離4mの条件にて問題を確認できたが、4m以上の場所でも「読みすぎ」は発生する。なぜなら、今回の実験よりも工場内では周囲構造物が多く、図7の反射波A (装置Aからの反射波)、反射波B (装置Bからの反射波) のように複数の反射波が存在し、その合成波により読みすぎが発生するためである。

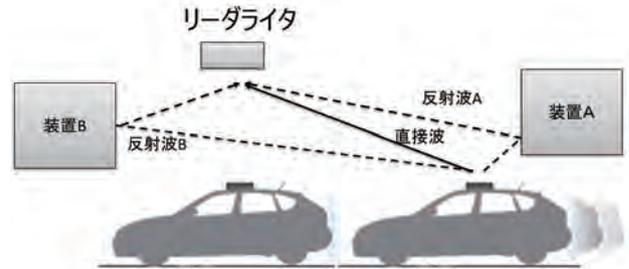


図7 工場環境での反射波

周囲構造物により受信電力が変動するメカニズムを4.1項にて解説する。

#### 4. 技術内容

**4.1 受信電力変動のメカニズム** 3項では、天井にリーダライトを設置し、下向きに電波を放射するシーンを説明したが、本項では、横向きに電波を放射するシーンでの電波の振る舞いを説明する。横向きに電波を放射するシーンでは主な反射面は床であるが、下向きに放射する場合は壁や装置等が反射面となるため、同様の事象が発生する。

リーダライトとRFタグへの電波伝播経路は、周囲構造物の影響により、直接波と反射波が存在する。(図8)

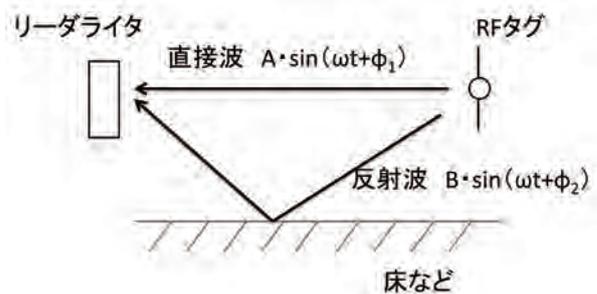


図8 直接波と反射波

直接波と反射波の合成波は、以下の (式1) にて表される。

$$Y = A \cdot \sin(\omega t + \phi_1) + B \cdot \sin(\omega t + \phi_2) \quad \dots (式1)$$

Y：合成波

A：直接波の振幅 B：反射波の振幅

$\phi_1$ ：直接波の位相  $\phi_2$ ：反射波の位相

$\omega$ ：角周波数

$\phi_1 = \phi_2$  の時は電波が強めあい受信電力の増加が発生する。一方、 $\phi_1 = \phi_2 + \pi$  の時は電波が弱めあい受信電力の

低下が発生する。特に A=B となる場合は全く読めなくなる。

ここで、交信領域内での受信電力を可視化するため、図9のような当社実験室内(天井5m、左右の壁間幅7m、リーダーライトから奥の壁まで25m、リーダーライト設置高さ1m)において、受信電力マップを測定した。

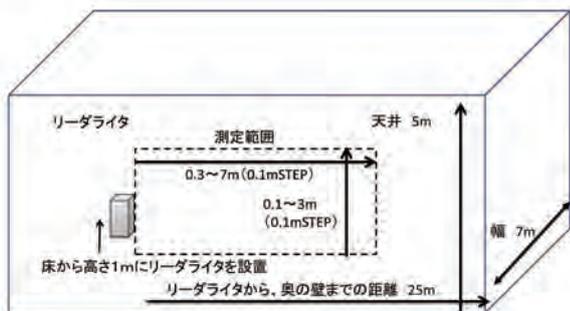


図9 受信電力マップの測定環境

図10において、電力が増加して読みすぎているポイント(赤矢印の領域)と、弱めあって読み抜けているポイント(橙矢印の領域)が確認できる。

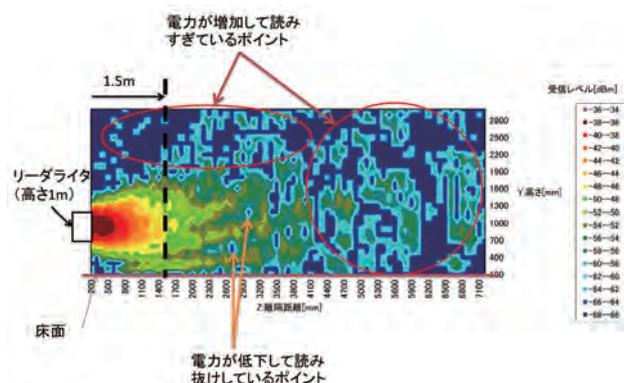


図10 受信電力マップ

ここで、リーダーライトから1.5mの距離(図10の点線の位置)の受信電力をプロットした(図11)。

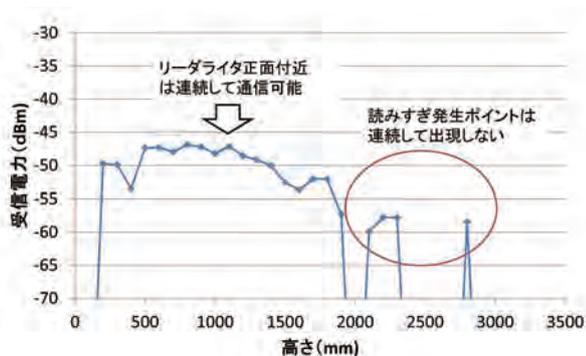


図11 リーダーライトから1.5mの高さ方向の受信電力

図11で示すとおり、リーダーライト正面付近は、連続して通信できるのに対して、読みすぎ発生ポイントは連続して発生しない。これは、正面付近は、反射波より直接波が

十分強いため、反射波の影響を受けにくく、受信電力の変動が少ないのに対して、読みすぎ発生ポイントは、直接波が弱いため反射波の影響を強く受け、受信電力の変動が大きくなるためである。

なお、工場環境では、搬送装置や組立ロボット等の周囲構造物は常に動いており、反射波は常に変化する。このため、読みすぎは定常的に発生するのではなく、発生する時と発生しない時がある。

**4.2 誤読取防止技術** 4.1項の図11のとおり、リーダーライトから一定距離をRFタグが移動している時の受信電力を測定すると、図12のような推移となる。対象RFタグ(図12青線)に対して、非対象RFタグ(図12赤線)の他に、非対象RFタグを読みすぎ(図12橙線)が発生し、△のタイミングでコマンドを発行すると非対象RFタグを誤読取る恐れがある。

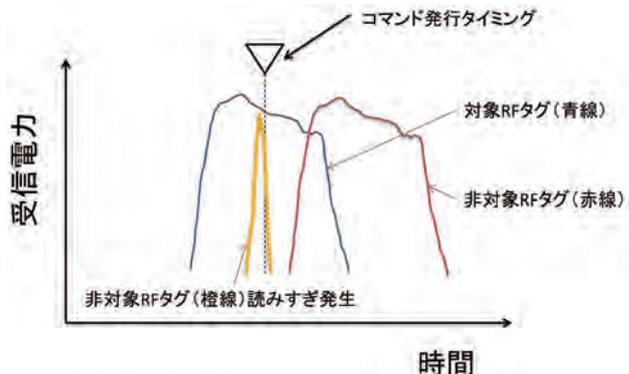


図12 想定受信電力の推移

そこで、交信を開始してからコマンド発行タイミングまでの個々のRFタグのID毎に受信電力の積分値を求めて、誤読取を回避する。

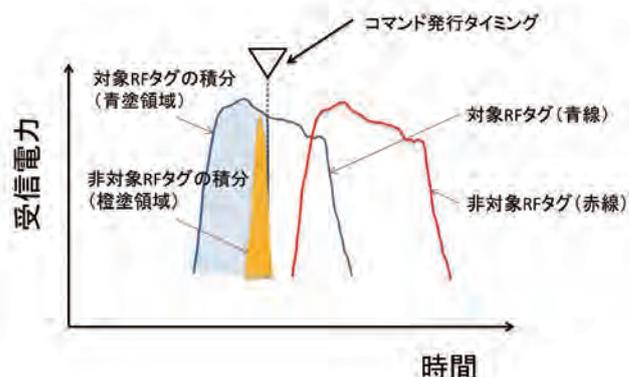


図13 積分比較

原理を説明すると、積分により図13の青塗り領域の面積と図13の橙塗りの領域を算出していることになる。読みすぎは連続的に発生しないため、青塗り領域の面積よりも橙塗り領域の面積の方が小さくなる。よって、コマンド発行タイミングの時に、非対象RFタグの電力が対象RFタグより大きい場合でも、正しく対象RFタグを読み取りできる。

図13では、単純な積分処理を説明したが、対象RFタグ

よりも先に非対象RFタグが通過した場合は、単純積分では正しく対象RFタグを識別できない。

具体的には、図14において、先行する非対象RFタグの積分領域（緑塗領域）は、対象RFタグの積分領域（青塗り領域）の方が小さく、先行して通過した非対象RFタグを選択してしまう。

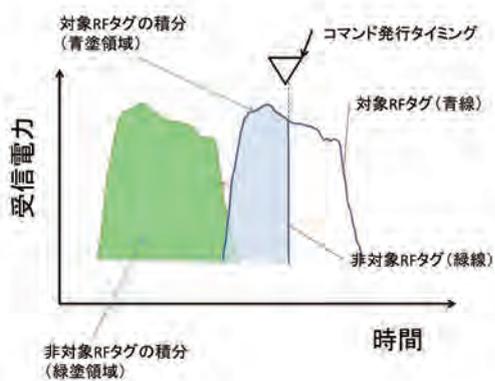


図14 非対象RFタグが先に通過した時の受信電力推移

上記を解決するため、本技術では、過去の受信電力値の積分に重み係数を加えている。

$$S_{total} = RX(t) + \sum_{n=1}^{\infty} (RX(t-n) \cdot \alpha^n) \cdot \dots \text{ (式2)}$$

- Stotal：計算結果の積分値
- RX (t)：コマンド発行時の受信電力値
- RX (t-n)：コマンド発行時からn回前の受信電力
- $\alpha$ ：重みつけ係数 (1より小さい値)
- n：コマンド発行時より過去の交信回数

(式2)により、1回前の受信電力の結果は係数 $\alpha$ だけ小さく計算し、n回前の受信電力の結果は係数 $\alpha^n$ だけ小さく計算している。よって、図15の赤線以下の面積を求めていることになる(式2による減算効果)。これにより、対象RFタグの積分値(図15青塗り領域)は、非対象RFタグの積分値(図15緑塗り領域)よりも大きい値になるため、対象RFタグを識別可能となる。

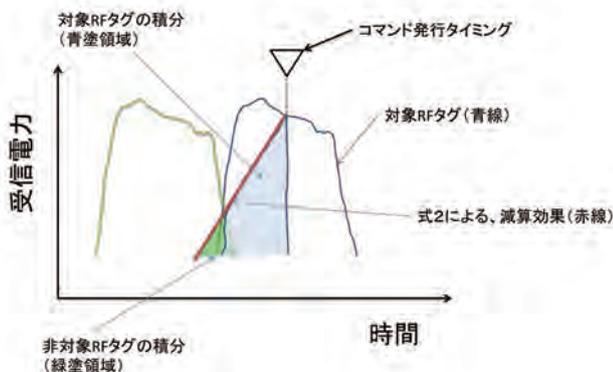


図15 式2適用後の積分結果

**4.3 効果検証** 図5の実測データを元にシミュレーションによる効果検証を行った。図16のように、コマンド発

行タイミングで非対象RFタグの読みすぎが発生しているとする。

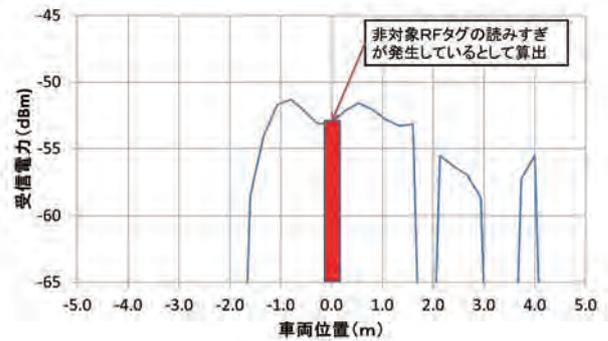


図16 シミュレーション環境

図17に、積分処理後の値を示す。対象RFタグ(図17青線)は-1.8m付近から交信開始され積分値が上昇していく。非対象RFタグは、図17の赤線のように車両位置0mの時点で入力されるため、急激に立ち上がる。

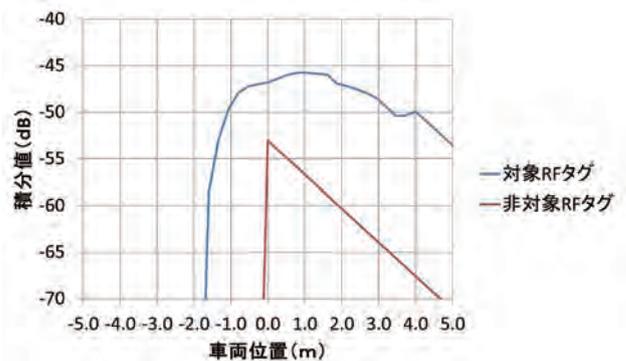


図17 積分値の推移

図17の対象RFタグ(青線)の積分値と非対象RFタグ(赤線)の積分値の差分を計算すると、図18の赤線の軌跡となる。0dBより大きい緑の領域は、正しく対象RFタグを読みとれる領域である。

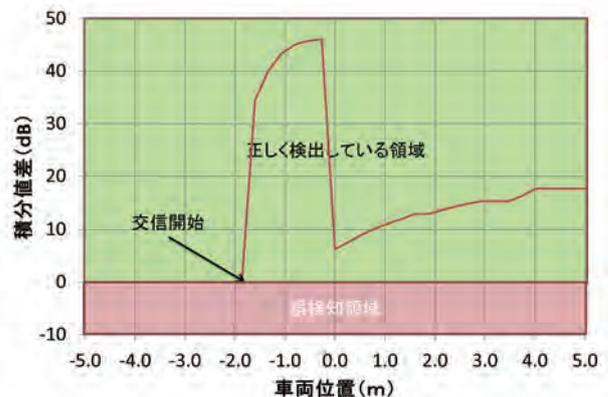


図18 積分値差分(対象RFタグ-非対象RFタグ)

図18では、-1.8mの交信開始以降、対象RFタグと非対象RFタグの差分値が0dB以下になることはなく、コマンド発行時に非対象RFタグの受信電力が強く検出された

しても問題なく識別できることを確認できた。

本技術を、弊社製UHF帯RFID（形V780-HMD68）に、「フォーカス機能」として実装している。形V780-HMD68の外観を図19に示す。



図19 V780-HMD68シリーズ

## 5. むすび

UHF帯RFIDにおいて、RFタグからの受信電力の推移を積分することにより、誤読取を排除することに成功した。本技術の特徴は、従来のリーダライタと同等のハードウェア構成でありながら、設置調整をすることなく、誤読取を排除できることである。本技術により、省スペースで安価、かつ、信頼性の高い長距離の個体識別が可能となる。

今後の課題としては、リーダライタ間の干渉問題への対応が挙げられる。本技術はRFタグからの受信電力を監視するために常時電波を放射しており、リーダライタ間の設置間隔が短い場合は、干渉が発生し、交信可能なポイント数が減少することで、対象RFタグを正しく識別できなくなる恐れがある。

このような問題に対応するため、今後もアルゴリズムの改良を重ね、お客様のライン設計に柔軟に対応できる信頼性の高い長距離個体識別システムを提供していきたい。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 各年度のリコール届出件数および対象台数  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/carinf/rcl/data\\_sub/data004.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/carinf/rcl/data_sub/data004.html)
- 2) 東京工業大学 建造物からの反射強度の抑制  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej1954/31/1/31\\_1\\_17/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej1954/31/1/31_1_17/_pdf)
- 3) アンテナ工学ハンドブック オーム社, 開口面アンテナ,p153-p154

## 執筆者紹介



野上 英克 Hidekatsu Nogami  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
センサ事業部 第2開発部  
専門：電気・電子

# 無線押ボタンスイッチの伝送状態を 可視化する通知機能の開発

矢野 慧介

製造業の多品種少量生産化の流れに伴い、工場内のレイアウト変更に対して柔軟に対応できる生産設備が求められている。無線押ボタンスイッチは、信号線が不要であり、さらに発電機能の内蔵によって電源線をも不要としているため、有線の押ボタンスイッチと比べて設置の自由度が高く、配線工数が低減できるという利点から、生産現場への導入が進みつつある。

一方で、工場内では電波強度が変動しやすく通信に失敗する可能性があること、操作時に発生する限られた電力量で無線通信を行うため通信失敗時の再送信機能の搭載が難しいことから、信頼性の面で課題がある。

著者らは、ユーザと無線押ボタンスイッチの協調による信頼性の向上を目指し、無線の伝送状態（通信の成否や電波強度）をユーザに通知する「受信通知機能」を開発した。伝送状態を即座に把握できるようにしたことで、ユーザは通信が失敗した際に生産稼働率を低下させることなく再操作できるようになった。また、十分な電波強度が確保できる設置場所を容易に特定できるようになった。

本稿では、「受信通知機能」の概要と、それを実現するための技術的手法について述べる。

## Development of transmission notification indicator for wireless pushbutton switch

Keisuke Yano

With increasing high-mix low volume production in manufacturing industry, more flexible production facility is required for rearrangement of factory layout. Wireless pushbutton switch requires no signal line and no power supply line by internal self-power generation, so it has greater flexibility for installation than wired pushbutton switch, and reduces wiring work-hours that introduction to the production site is progressing.

Meanwhile, radio wave intensity in factory is likely to fluctuate, so communication error can occur. Furthermore, wireless communication is performed with a limited amount of electric power generated at operation time. For above these reasons, it is difficult to equip with retransmission function in it when the communication error occurs, and there remains a problem for reliability.

The authors have been aiming at improving reliability by cooperating between user and Wireless pushbutton switch, and developed "reception notification indicator" that notifies the wireless transmission state (success or error of communication, intensity of radio wave) to the user. By making it possible to measure the transmission state instantaneously, the user can immediately operate again without decreasing the operating rate for production when communication error occurs. In addition, it has become possible to easily specify the installation location where sufficient radio wave intensity can be secured.

This paper describes the outline of "reception notification indicator" and technical methods to realize that.

### 1. はじめに

市場ニーズの多様化に対応するため多くの製造業が多品種少量生産へ移行しており、生産ラインのレイアウト変更が頻繁に行われるようになってきている。レイアウト変更にかかる工数の増加は生産稼働率の低下に直結しており、組み換えが容易な柔軟性の高い生産ラインが必要となっている<sup>1)</sup>。そのような背景から、配線作業が不要でレイアウトの自由

度が高い無線通信の生産現場への普及が進んでいる。産業用ネットワークに関する調査によると、無線通信のシェアは2018年現在6%程度であるが、IoT化の流れも受けて年率30%以上の高いペースで増加している<sup>2)</sup>。

生産現場で無線通信を行う制御機器の一つに、無線押ボタンスイッチ（以下、無線スイッチ）が挙げられる。従来の押ボタンスイッチでは図1 (a) のように制御対象との間を有線で接続するのに対し、無線スイッチは図1 (b)

のように、無線信号を送信する子機と受信する親機の組み合わせで構成される。子機は信号線や電源線を必要としないため、生産ラインのレイアウト変更時の配線工数を低減できる。また、ユーザが子機を携帯して任意の位置から操作するなど、新しいアプリケーションへの応用も期待されている。一方で無線通信の特性上、通信が失敗する可能性をゼロにすることが難しいという問題がある。

著者らは無線スイッチの開発にあたり、無線スイッチにおける「信頼性」を「ユーザの意図通りの制御ができる能力」と定義した。そして信頼性を高めるべく、機器の性能とユーザビリティの両面から様々な検討を行ってきた。本稿ではその中から、無線の伝送状態を即座にユーザへ通知する機能について説明する。

まず第2章において、工場内の無線通信の問題点と、無線スイッチの信頼性向上を実現するために解決すべき課題について示す。第3章では課題解決のために開発した伝送状態の通知機能の概要と、それを実現するための3つの技術的検討項目について示す。さらに、第4章にて実際の生産現場での実験結果を示す。

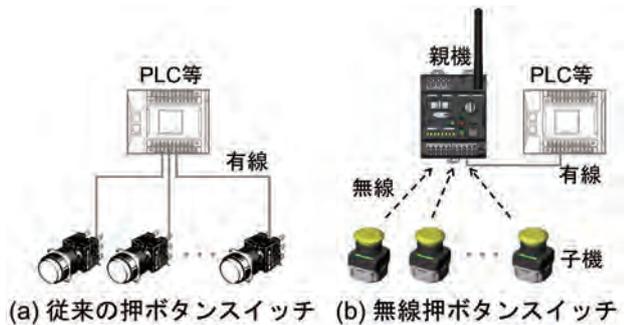


図1 従来の押ボタンスイッチと無線押ボタンスイッチの比較

## 2. 課題

**2.1 工場における無線通信の問題** 一般的に無線機器が発した電波は、回折や反射などの影響を受けながら空間中を伝搬していく。障害物やノイズが多いほどその現象は複雑化し、電波強度の変動や電波同士の干渉による通信障害が発生しやすくなる。特に閉空間かつ障害物の多い製造現場では、下記のような現象による通信障害への懸念が指摘されている<sup>3)</sup>。

- ・ 障害物による回折
- ・ 空間伝搬中の損失
- ・ 直接波と反射波による相互干渉（フェージング）
- ・ 他の無線システムが発する電波や工場外からの外来波との干渉
- ・ 生産設備からの放射ノイズ

これらは無線スイッチにおいても当てはまり、あらゆる環境で通信障害が発生する確率をゼロにするのは難しい。

**2.2 発電量の制約の問題** 無線スイッチ特有の問題点

としては、電力量の制約が挙げられる。無線スイッチの子機は、電池式のものとして、操作力を利用して発電する自己発電式に大別されるが、近年はエネルギーハーベスティング技術の進歩<sup>4)</sup>によって電池交換を必要としない自己発電式が主流になっている。自己発電式の無線スイッチは一度の操作で使用できる電力量に制約があり、通信が失敗した際に自動的に信号を再送するリトライ機能を持たせるのが難しい。この点も無線スイッチの信頼性低下を招く要因となっている。

**2.3 信頼性向上のための課題** 2.1節、2.2節の問題はいずれも通信の信頼性に関わる内容であるが、現在の通信技術や発電技術では根本的な解決が難しい。しかし著者らは、ユーザの適切なオペレーションを促す仕組みを作り出すことでこれらの問題点を補うことができると考えた。

例えば何らかの理由で通信に失敗した際、ユーザがそれに気づいて即座に再操作することができれば、リトライ機能の代替手段として通信成功率を向上できる。またユーザが2.1節で述べたような現象を考慮し、通信障害が発生しにくい場所に無線スイッチを設置することによっても、通信成功率の向上が期待できる。

著者らはこのような特性を鑑み、通信の信頼性を最大化する手段として、ユーザと無線スイッチが一体となったオペレーション、すなわち人と機器の協調性の向上が有効であると考えた。そして、その実現のための課題として以下の2点を設定した。

- ・ 通信が成功したか否かの判別をしやすいこと
- ・ 通信に適した場所へ設置しやすいこと

これらの詳細を、それぞれ2.4節、2.5節で説明する。

**2.4 通信成否の判別性向上** 協調性向上のための課題の一つは、ユーザが通信の成否を判別しやすくなることである。障害物の多い生産現場では、図2のように制御対象が直接見えない場所から子機を操作することが考えられる。このとき、次のような問題が発生しうる。

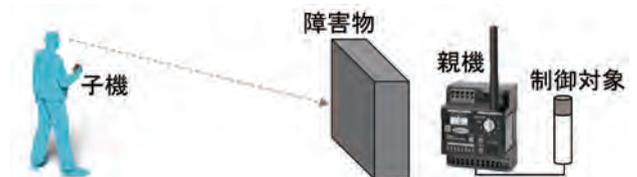


図2 制御対象が見えない場所からの操作

まずは何らかの原因で通信が失敗したケースを考える。このとき、ユーザは通信失敗に気づいて子機を再操作しなければならない。しかし制御対象が見えない場合や動き出しの遅いアプリケーションでは通信失敗に気づきにくく、再操作までに時間がかかってしまう。結果として生産の遅延や、無線スイッチが適用できるアプリケーションの限定につながってしまう。

反対に、通信が成功したことをユーザが認識できないケースも考えられる。この場合、既に制御が開始しているにも関わらず、ユーザがもう一度子機を操作してしまう可能性がある。アプリケーションによっては、このような重複した操作を受けても誤動作しないような対策が必要になる。

このように、リトライ機能をユーザの再操作で補う自己発電式の無線スイッチにおいて、通信成否の判別性向上は重要な課題であるといえる。

**2.5 通信に適した場所への設置のしやすさ** もう一つの課題は、通信に適した場所へ設置しやすくすることである。安定した通信を行うためには、伝搬中に電波の減衰や干渉が発生しても一定以上の電波強度を保てるような位置に設置することが有効である。しかし、これを無線の専門知識を有さないユーザが適切に実施するのは容易ではない。例えば障害物が多く、電波が大きく減衰する場所に設置してしまうと、通信が頻繁に失敗し、信頼性の低下を招く。一方で親機と子機を近距離に設置するように制限を設けてしまうと、電波の減衰は軽減され通信成功率は高まるが、レイアウト設計の自由度が低下してしまう。適切な位置で無線スイッチを使用するには、設置時に位置を変えながら通信テストを繰り返さなければならず、さらに設置後の微調整が必要になる場合もある。このように、従来の無線スイッチでは設置場所の検討におけるユーザの負担が大きく、ユーザと機器の協調は十分とはいえない。また、設置場所の検討に要する時間が長くなれば、配線工数低減という無線スイッチの利点が失われてしまう。

### 3. 受信通知機能の開発

**3.1 受信通知機能の概要** 2.4節、2.5節で述べた2つの課題は、①子機を操作する位置や制御対象によらず通信成否が確認できること、②通信時に十分な電波強度が確保できているかが分かることの2点によって解決できる。

そこで著者らは、子機に搭載したLEDによって伝送状態をユーザへ通知する「受信通知機能」を開発した。LEDを搭載した子機を図3に、動作イメージを図4に示す。



図3 受信通知機能を搭載した子機



図4 受信通知機能の動作イメージ

ユーザが子機を操作すると無線信号が送信され、その直後に子機のLEDが点灯する。LEDの点灯色は3色であり、通信成功し、かつ十分な電波強度が確保できている場合は緑色、通信成功したものの電波強度が弱い場合は黄色、そして通信失敗した場合は赤色が点灯する。ユーザはLEDを見ながら子機を操作することで、制御対象が見えない場合でもすぐに通信の成否を知ることが可能となる。通信に失敗した場合には赤色のLEDが点灯するため、ユーザは即座に子機を再操作し、通信をリトライできる。また無線スイッチの設置場所を検討する際は、子機を何度か操作して緑色のLEDが安定して点灯する領域内から選択すれば、レイアウト設計の自由度を損なうことなく高い通信成功率を確保できる。

このように受信通知機能は、ユーザと無線スイッチの協調性向上、ひいては信頼性向上に大きな改善効果が期待できる。さらに、これを電力量の制約のある自己発電型の無線スイッチで実現した点において、他に類を見ない技術であるといえる。

受信通知機能の実現のためには、新たにいくつかの技術や手法が必要になる。主要な検討項目とその概要を表1に示す。これらの詳細について、それぞれ3.2節～3.4節で述べる。

表1 受信通知機能実現のための主要な技術・手法

技術・手法	概要
双方向通信処理フロー	伝送状態を子機へ返信し、LEDの点灯色を決定する手段の考案
電波強度閾値の決定	緑色LEDと黄色LEDの点灯を切り替える電波強度の閾値決定
発電量の確保	双方向通信処理フローの動作に必要な電力量の確保手段

**3.2 双方向通信処理フロー** 従来の無線スイッチの処理フローを図5に示す。子機が操作されると親機への無線信号が送信され、親機が信号を受信すると制御出力をONするという単方向通信の処理フローである。

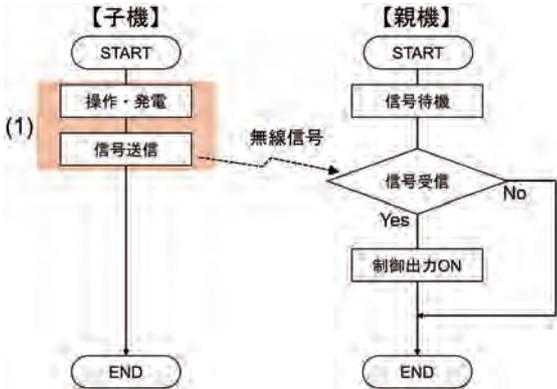


図5 従来の無線スイッチの処理フロー

これに対し、3.1節のような受信通知機能実現のために著者らが開発した処理フローを図6に示す。本処理フローは、従来の子機から親機への通信に加えて、親機から子機への通信、LED制御という3段階かつ双方向通信の構成となっている<sup>5,6)</sup>。

ユーザが子機を操作すると、子機は内部で発電し、親機に向けた信号 (SYN) を送信する。SYN送信後、子機は親機からの返信待ちの状態に移行する。親機はSYNを受信すると、その電波強度がある閾値以上か否かを判定する。その後、制御出力をONするとともに、子機に向けて受信確認信号 (ACK) を送信する。なお、ACKにはSYNの電波強度の判定結果の情報 (FLG) が含まれている。子機は受信したACKの強度を測定し、ACKとSYNの強度がともに閾値以上の場合には緑色のLEDを、そうでない場合は黄色のLEDを点灯する。一方、親機が子機のSYNを受信できなかった場合、当然ながら親機はACKを送信しない。返信待ちの状態が一定時間経過した子機は通信失敗と判定し、赤色のLEDを点灯する。

本処理フローは最小限のデータのやり取りで通信の成否と電波強度の判別が可能である。そのため通信プロトコルを単純化でき、低遅延かつ低消費電力での動作を実現している。3.4節で後述するが、電力量の制約がある子機に通知機能を搭載するにあたり、低消費電力であることは重要なポイントである。

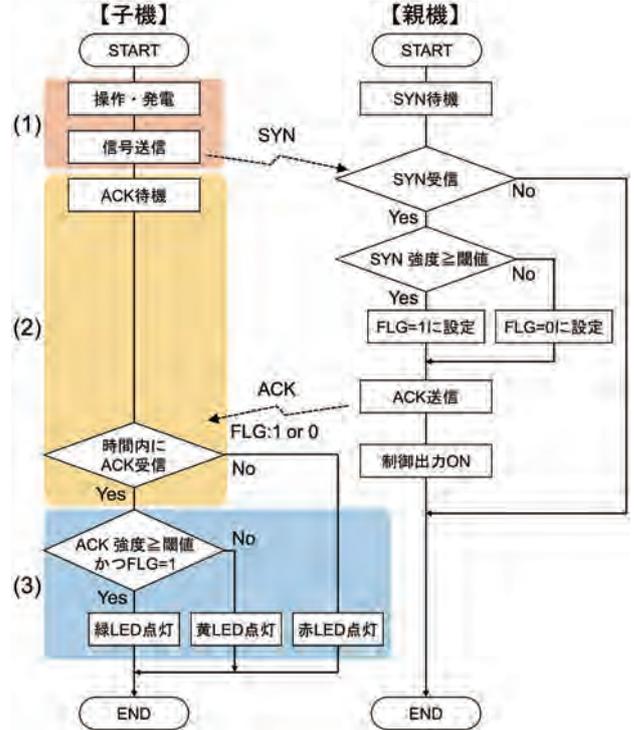


図6 双方向通信処理フロー

**3.3 電波強度閾値の決定** 先述の双方向通信処理フローにより、通信成功した際に電波強度が閾値以上か否かを通知することができるようになった。これを通信状態の良し悪しの指標として用いるためには、閾値 (以下、 $P_{th}$  [dBm]) をどこに定めるかが重要である。

親機が受信する電波強度の変動が極めて小さいとき、親機の通信成功率は図7のような傾向となる。 $R_{min}$ は製品仕様として要求される通信成功率、 $P_{min}$  [dBm] は $R_{min}$ を維持するために必要な電波強度の最小値である。

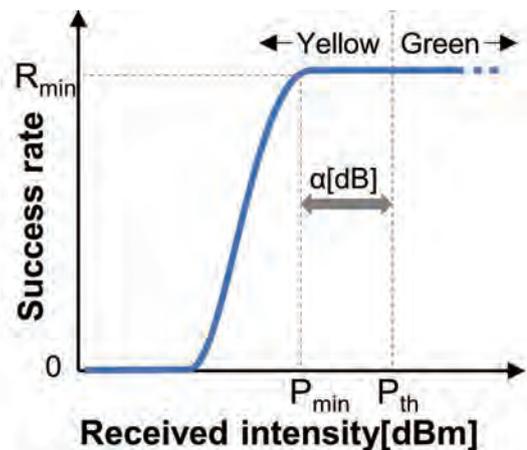


図7 親機の受信する電波強度と通信成功率の関係

実際の生産現場では、親機が受信する電波強度は周囲の障害物などの影響によって絶えず変動する。そこで、工場内で発生する典型的な電波強度変動 (特に減衰方向) のレベルを $\alpha$  [dB] とし、これを加味して次式のように $P_{th}$ を設定すればよい。

$$P_{th} = P_{min} + \alpha[\text{dB}]$$

$\alpha$ の値は過去の研究事例を参考に決定する。文献7の実験結果によると、生産現場における電波強度の変動は次の仲上-ライス分布 $f_K(p)$ で表される。

$$f_K(p) = \frac{1}{P_S} \exp\left(-\frac{p + P_d}{P_S}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{pP_d}}{P_S}\right)$$

$$K \equiv \frac{P_d}{2P_S} = \begin{cases} 17 \text{ dB} : \text{金属製設備や人が動かない環境} \\ 7 \text{ dB} : \text{金属製設備は動かず人が動く環境} \\ 3 \text{ dB} : \text{金属製設備や人が動く環境} \end{cases}$$

- $P_d$  : 定常成分の電波強度
- $P_S$  : 変動成分の電波強度
- $I_0(x)$  : 第1種0次変形ベッセル関数
- $p$  : 親機の受信電波強度

$K$ は定常成分と変動成分の比に相当するパラメータであり、値が小さいほど電波強度の変動は激しくなる。それぞれの $K$ に対する分布関数 $f_K(p)$ を図8に示す。 $P_{avg}$ は変動する受信電波強度の平均値である。

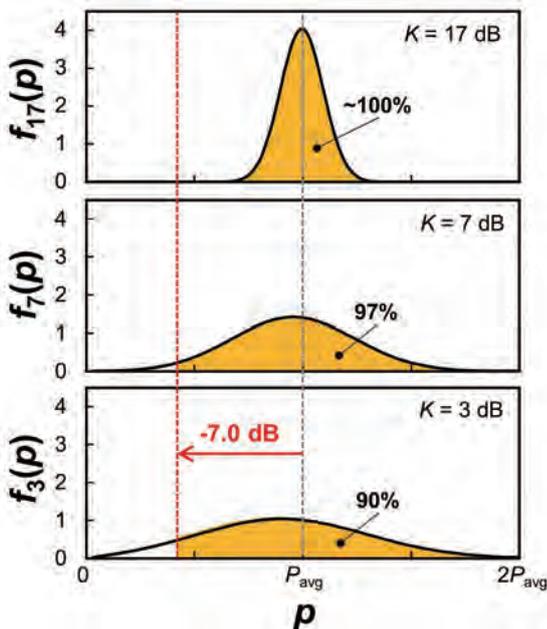


図8 電波強度変動の確率分布

図8より、親機が受信する電波強度の変動のレベルは $K$ の値、すなわち金属製設備や人の動きの有無によって大きく変わることが分かる。 $P_{th}$ の決定にあたり、最も厳しい条件 ( $K = 3 \text{ dB}$ ) の変動をすべてカバーしようとする、 $\alpha$ の値を大きくとる必要がある。しかしその場合、通信成功率が高い条件でも黄色のLEDが頻繁に点灯してしまい、かえって実用性が損なわれてしまう。そこで、 $K = 3 \text{ dB}$ の条件で90%の電波強度変動をカバーすることを目安に  $\alpha = 7 \text{ dB}$ とし、 $P_{th}$ を次式のように決定した。

$$P_{th} = P_{min} + 7 \text{ dB}$$

**3.4 発電量の確保** 3.2節で示した処理フローのうち、図6の(2)や(3)の動作は受信通知機能の追加によって新たに必要となったものである。これらに必要な電力量を、子機の発電によって確保しなければならない。

まずは、処理フローの動作に最低限必要な電力量を実験により求めた結果を図9に示す。LEDが緑・黄・赤に点灯するときの消費電力量をそれぞれ $E_G$ 、 $E_Y$ 、 $E_R$ と定義し、測定は図6の(1)～(3)の3段階に分けて行っている。

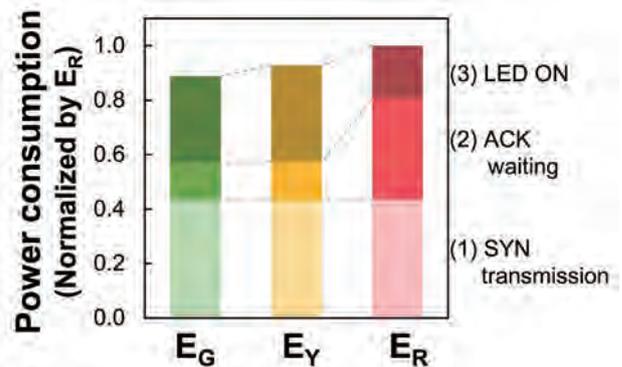


図9 LED点灯色による消費電力量の比較

従来の無線スイッチに相当する(1)のみの場合と比べると、(2)と(3)の追加によって消費電力量が約2倍に増えていることが分かる。 $E_G$ 、 $E_Y$ 、 $E_R$ の比較で $E_R$ が最も大きくなっているのは、赤色LEDが点灯する条件では(2)の状態をタイムアウトまで維持しなければならないためである。したがって、双方向通信処理フローを動作させるためには、発電する電力量が $E_R$ を上回らなければならない。

子機は発電モジュールを内蔵しており、電磁誘導により発電する。発電量はモジュールを押し込む速度に依存するため、操作部と発電モジュールが連動する単純な機構では必要な電力量が得られなかった。発電量を増加させるためには、内部構造で操作速度を増幅させる必要がある。そこで、非常停止用押ボタンスイッチの技術を応用し、図10のようなトリガアクション機構を考案した<sup>5,6)</sup>。

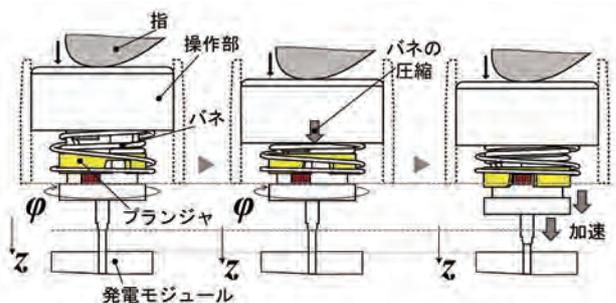


図10 トリガアクション機構の動作イメージ

トリガアクションでは、 $z$ 方向の操作力を一度 $\phi$ 方向の動きに変換する。ユーザが操作部を $z$ 方向に押し込むと、

プランジャが内部の溝に沿ってφ方向へ回転する。一定の角度まで回転するとバネの力が解放されてプランジャがz方向へ飛び出す。飛び出し速度はバネの弾性で決まり、子機の操作速度によらず概ね一定となる。

トリガアクションの有無による、発電量の差を測定した結果を図11に示す。横軸は操作部の操作速度、縦軸は発電量であり $E_R$ で正規化している。すなわち、縦軸が1を超えると必要な電力量を満足していることになる。トリガアクションなしの場合、操作速度に応じて発電量が変動しているが、いずれの操作速度でも $E_R$ に到達していない。それに対しトリガアクション搭載時は発電量が大幅に増加しており、操作速度によらず $E_R$ を上回る電力量が得られている。トリガアクション機構の搭載によって、ユーザの押し方によらず受信通知機能に必要な電力量を確保できるようになった。これにより、自己発電方式の電池交換不要という利点と、受信通知機能による信頼性向上を両立することに成功している。

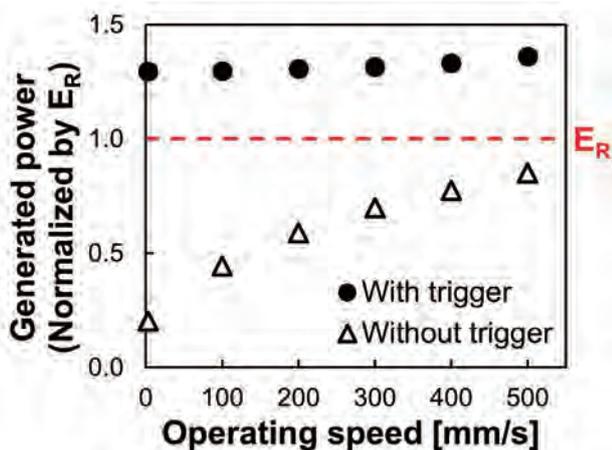


図11 スイッチ操作速度と発電量の関係

#### 4. 生産現場での検証結果

本章では稼働中の生産現場における、受信通知機能の検証結果を報告する。試験に使用した工場の概略図を図12、内観を図13に示す。電子機器の実装、組み立て用のラインが複数存在しており、生産設備や棚の高さは概ね1~2 m程度である。また製品を組み立てる自動機が稼働しており、人の移動も多いことから、無線通信環境は変動しやすい状態にある。

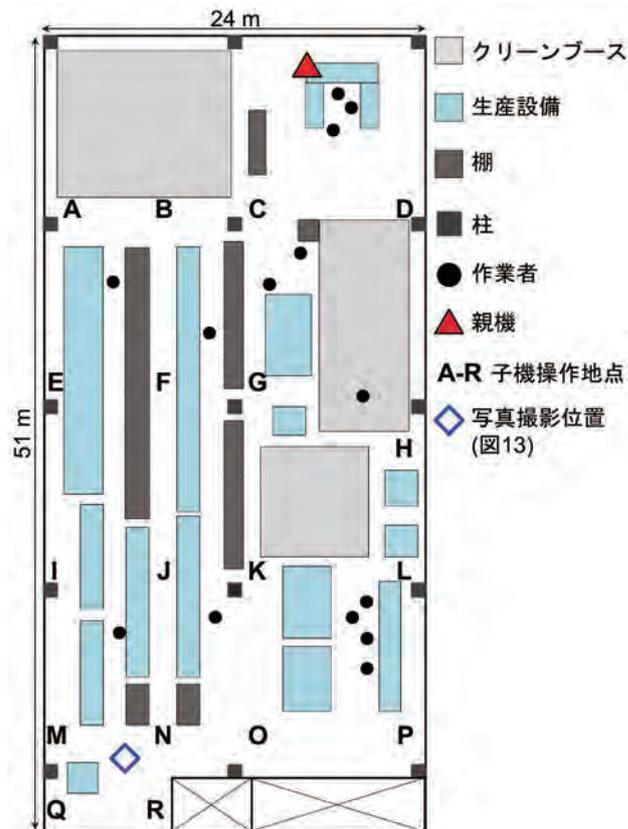


図12 工場内見取り図



図13 工場内観

ここで、親機を図12に示す位置に設置し、地点A~Rのそれぞれで子機を20回ずつ操作した際に点灯するLEDの色の割合を確認した。実験条件を表2に、結果を図14に示す。

表2 実験条件

中心周波数	929.2 MHz
通信方式	GFSK 単信通信方式
送信電力	0 dBm max.
親機アンテナ利得	2 dBi
親機設置高さ	約1.2 m
子機設置高さ	約1.2 m
子機操作方法	手動 (操作間隔: 約1 sec)

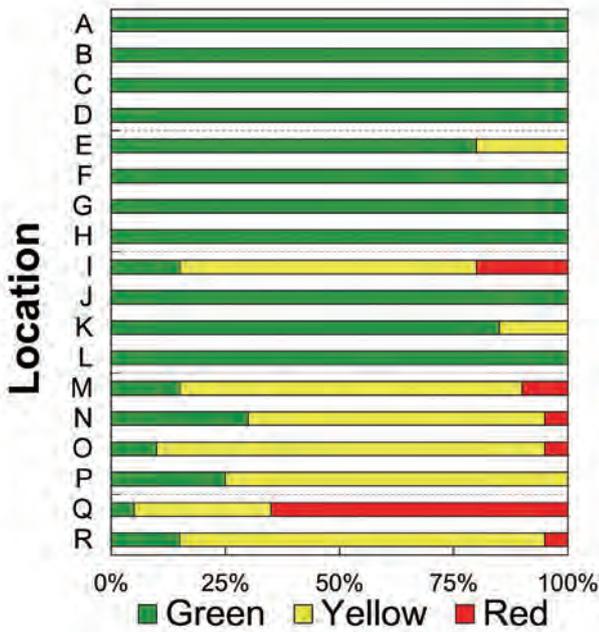


図14 子機操作位置によるLED点灯割合の測定結果

各地点のうちで親機が設置されたラインを見通せるのは、比較的障害物の少ない地点C、D、F、Gのみである。したがって受信通知機能がない従来の無線スイッチでは、上記4点以外から操作する際に通信の成否を目視で確認することが難しい。中でも地点I、M、N、O、Q、Rでは通信成功率が100%を下回っており、ユーザの再操作までに遅延が生じる可能性がある。しかし今回の受信通知機能を搭載した子機では、地点A～Rのどの場所からでも即座に通信成否を確認できる。そのため、通信失敗した場合にもすぐに再操作することで通信をリトライでき、遅延を最小限に抑えることができる。

また、無線スイッチの子機の設置場所を検討する場合、緑色が常時点灯する地点A～D、F～H、J、Lの中から選択すれば、周囲環境による電波強度の変動があっても比較的高い通信成功率を維持することが期待される。それに対して地点Pでは、通信成功率は100%であるものの、過半数が黄色であり、電波強度の変動に対する余裕度が小さいことが分かる。そのため、通信失敗時の再操作を極力減らしたい場合は点Pへの設置は避けることが望ましい。このように、受信通知機能によってユーザは各地点での伝送状態を容易に確認することができ、アプリケーションに求められる通信成功率に応じて設置場所を選択することができるようになった。

本検証の結果から、2.3節で設定した「通信成否の判別のしにくさ」、「通信に適した設置場所の分かりにくさ」という2つの課題の改善が確認できた。人と無線スイッチの協調性向上が実現することで、信頼性の確保に大きく寄与していると考えられる。

## 5. むすび

本稿では無線スイッチの信頼性向上を目指し、ユーザとの協調性を向上する受信通知機能の概要および検討項目と、実際の生産現場における実験結果について示した。著者らが開発した無線スイッチでは本稿で述べた内容以外にも、機器自体の基本性能を高めることで通信の信頼性の最大化に取り組んでいる。今後は多様な環境下での無線機器の使われ方への知見を得て、より信頼性と自由度の高い無線スイッチの開発を目指していく。また、押ボタンスイッチ以外の制御機器の無線化についても検討し、よりレイアウト自由度の高い生産設備の実現に向けて取り組んでいく予定である。

最後に、今回の開発および本論文執筆にあたり多大なご協力をいただいた方々に、深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 情報通信審議会 情報通信技術分科会 技術戦略委員会(第14回) . 狭空間ワイヤレスプロジェクトの推進. 総務省. 2017-2-27. [http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/joho\\_tsusin/gijutsusenryaku/02tsushin03\\_04000245.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/gijutsusenryaku/02tsushin03_04000245.html), (accessed 2019-1-11) .
- 2) Michela Nalin. Industrial Ethernet is now bigger than fieldbuses. HMS Industrial Networks. 2018-2-27. <https://www.hms-networks.com/press/2018/02/27/industrial-ethernet-is-now-bigger-than-fieldbuses>, (accessed 2018-12-12) .
- 3) 板谷聡子. 無線通信技術を活用したスマート工場実現に向けて. 情報通信研究機構研究報告. 2017, vol. 63, no. 2, p. 35-39.
- 4) Paul D. Mitcheson, et al. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. PROCEEDINGS OF THE IEEE. 2008, vol.96, no.9, p.1457-1486.
- 5) OMRON Corporation. WIRELESS SWITCH. U.S. Patent 2018/0158626A1. 2018-6-7.
- 6) OMRON Corporation. POWER GENERATION APPARATUS AND WIRELESS SWITCH. U.S. Patent 2018/0156632A1. 2018-6-7.
- 7) 小澤尚志、藤本卓也、片山正昭. 工場における高信頼性制御無線実現にむけた電波伝搬特性の測定とモデル化. 信学技報, 2015, vol. 115, no. 366, p191-196.

## 執筆者紹介



矢野 慧介 Keisuke Yano

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー

商品事業本部 コンポ事業部

第一開発部

専門：電気工学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (1)

## 保全担当者が使用できる AI システムの実現と マシンオートメーションコントローラへの AI 機能の搭載

見置 孝昌・出来 仁太郎

製造現場においては慢性的に人手が不足している。さらに将来、熟練技能者の減少により生産性の低下が見込まれており、省力化や省人化の要求がある。このような背景から、FA分野においてはAI技術を予知保全に用いることで、省力化や省人化を進めている。しかし、一般的にAI技術は高性能なハードウェアが必要であり、またその導入が難しく、製造現場の保全担当者が効果的に使用できていない。

弊社は今回新たに保全知識のみでAI技術を活用した予知保全を実現できるAI搭載マシンオートメーションコントローラを開発した。本稿では装置制御機能と予知保全機能をマシンオートメーションコントローラに同時実装し、検証した結果について述べる。

## Development of AI-equipped Machine Automation Controller (1)

### Implementation of AI system usable by maintenance personnel and installation of AI function in machine automation controller

*Takamasa Mioki, Jintaro Deki*

At the manufacturing site, the labor force is chronically short. In the future, productivity is expected to decline due to a decrease in skilled technicians, and there is a demand for labor saving. In view of these backgrounds, we are promoting labor saving by applying AI technology to predictive maintenance in FA field. However, in general, AI technology requires high-performance hardware, it is difficult to introduce it, and maintenance person at the manufacturing site cannot effectively use it.

We developed AI equipped machine automation controller which can realize predictive maintenance using AI technology only with conservation knowledge. In this paper we describe the implementation and verification results of machine automation controller.

### 1. はじめに

近年、製造業における労働人口不足が深刻化している。少子高齢化による生産年齢人口の減少が加速していることなどが原因として挙げられている。単純な労働力不足の問題に加え、長年日本のものづくりを支えてきた熟練工に代わる労働力が不足していることも深刻な問題である。経験や独自の勘から装置異常や製品の不良を早期にとらえて対策をする技能を若い世代に伝承しようという取り組みが行われてきたが、スムーズに引き継がれてはいない。

経済産業省のものづくり白書が2017年末に実施した人材確保の状況に関するアンケート調査<sup>1)</sup>によると、“2016年末の調査と比較して、「特に課題はない」とする回答が

約19%から約6%に大幅減少の一方、「大きな課題となっており、ビジネスにも影響が出ている」との回答が約23%から約32%に大幅増加し、人材確保の課題がさらに顕在化、深刻な課題となっている”と報告されている。

その対策として、製造業各社は製造装置のさらなる省力化や省人化を進めている。企業の大小にかかわらず、安全、正確、均質、労力軽減などの目的で、ロボットの導入や機械化が一層加速しつつある。

特に近年の科学技術の発展に伴い、Artificial Intelligence (以下 AI) 技術を製造装置の予知保全<sup>2)</sup>の実現に適用することで、省力化や省人化の実現をこころみている<sup>3) 4) 5) 6) 7) 8)</sup>。

一般にAI技術は下記に示す課題がある。

a) AI技術は演算が複雑であり高性能なCPUが必要である

## b) AI技術の導入が難しい

弊社はこれまでにAI技術を制御機器に適用する技術開発を行っており、成果を先行論文で示した<sup>10) 11)</sup>。先行論文では弊社のマシンオートメーションコントローラであるNY5シリーズに機械学習の外れ値検知アルゴリズムであるIsolation Forest (以下I-Forest)<sup>9)</sup>を搭載したプロトタイプの開発について紹介している。また、I-Forestの処理時間を検証することでマシンオートメーションコントローラへ搭載できることを評価している。さらに包装機を例にして、マシンオートメーションコントローラに搭載した外れ値検知により「いつもと違う状態」をリアルタイムに検知できることを確認している。

また一般にAI技術は統計に関する専門スキルや適用対象に応じた知識が必要であるため、AI技術の導入は難しいとされているが、本開発ではAI技術の適用対象を製造装置の予知保全に特化することでAI技術導入の難しさを低減し、製造現場の保全担当者が製造現場で使用できる製品仕様を策定した。

上記の技術をもとに、今回弊社は業界に先駆けAI技術を弊社マシンオートメーションコントローラNX7シリーズおよびNY5シリーズに搭載することで予知保全を実現するAI搭載マシンオートメーションコントローラ (以下AIコントローラ) の製品開発に取り組んだ。

先の技術開発<sup>10) 11)</sup>では、実際の制御環境において製造装置の制御とAI技術を組み合わせたシステムを運用可能であるかという点については検証していないため、製品開発においては製造装置の制御とAI技術をマシンオートメーションコントローラに共存させる方法を考慮する必要がある。本稿では共存するための設計と時間効率性<sup>12)</sup>を述べる。

## 2. 本技術のターゲット

**2.1 目的** 保全担当者がAIを使えるシステムの実現、および装置制御機能と予知保全機能のマシンオートメーションコントローラへの同時実装を実現し、検証する。

**2.2 課題認識** マシンオートメーションコントローラに制御処理とAI処理を共存させるにあたり、下記の課題を定める。

### i) 保全担当者による予知保全を実現するための構造

保全担当者が予知保全を実現するためには、単にAIコントローラによる外れ値検知だけではなく、外れ値検知のための設定や状態を監視するためのAIサポートツールや製造装置のリアルタイムなデータを蓄積するためのデータベースといった機能が必要である。それらAIコントローラを構成する機能を定める必要がある。

### ii) 製造装置の制御と予知保全機能の共存

製造装置の制御処理と予知保全を実現するAI処理とを同一のマシンオートメーションコントローラに共存させるため、CPU資源を適切に割り当てる必要がある。

弊社マシンオートメーションコントローラは製造装置を

高速高精度に制御するため、センサやサーボモータといったデバイスと制御プログラムを同期することを保証する。AIコントローラはこの特性を保ったまま、AI技術を共存させる必要がある。

また、すでに調整済みの製造装置にとりつけたマシンオートメーションコントローラをAIコントローラに置き換える際、AI機能に起因する理由で製造装置の再調整が必要になることは製造現場として好ましくない。よって、AI機能が製造装置の制御に影響を与えないこと、または製造装置の制御に与える影響を予測できることが望まれる。

**2.3 技術課題** 上記の課題認識より本製品開発の技術課題を下記の通り定める。

- 保全担当者が予知保全を実現するための構造の開発
- 製造装置の制御と予知保全機能の共存の検証

## 3. 技術内容

### 3.1 保全担当者が予知保全を実現するための構造の開発

一般にAI技術を製造装置の予知保全に導入するには次の活動が必要と想定する。

- i) データ収集：製造装置の状態を表すデータをセンサやサーボモータから取得し、“ii) データ分析”に渡すデータを収集することを目的とする活動
- ii) データ分析：i)で得たデータからルールを作成し、ルールに基づいて制御装置を設定することを目的とする活動
- iii) データ活用：製造現場において製造装置を監視し、保全担当者による製造装置の予知保全を目的とする活動

このような活動を実現するためのAIコントローラの構成を図1に示す。AIコントローラは予知保全を実現するために外れ値検知機能を搭載する。AIコントローラに搭載する各機能を表1に示す。本稿では時系列DB、特徴抽出、外れ値検知の各機能を合わせてAI機能と呼ぶ。これらAI機能を設定するWindows上で稼働するサポートツールを表2に示す。これらのサポートツールをAIサポートツールと呼ぶ。

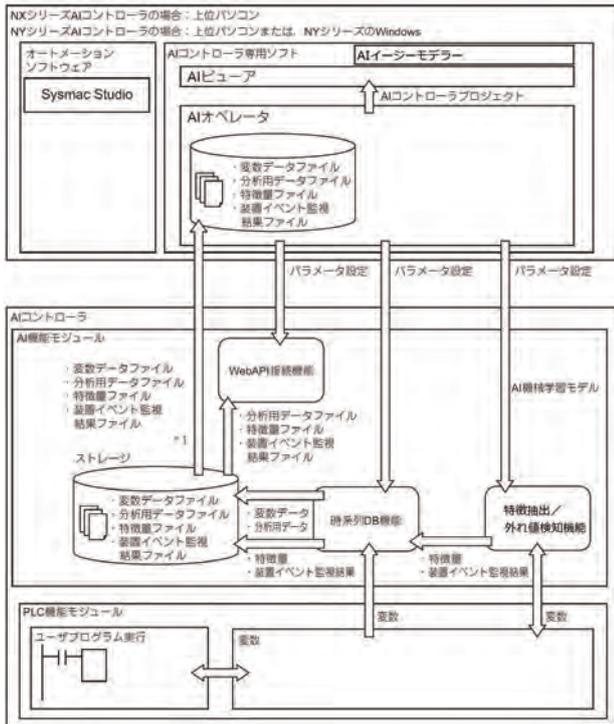


図1 AIコントローラの概要

表1 AI機能の説明

機能	説明
時系列DB	変数の値、特徴量、機械学習機能の演算結果を記録する。制御サイクルの周期で動作する。
特徴抽出	変数の値から特徴量を求める。タクト周期で動作する。
外れ値検知	特徴量と学習データから外れ値を計算する。外れ値検知のアルゴリズムはI-Forestを使用する。タクト周期で動作する。

表2 AIサポートツール

機能	説明
AIイージーモデラー	時系列DBを用いて得た変数の値から学習データを作成する。
AIオペレータ/AIビューア	マシンオートメーションコントローラに搭載するAI機能を設定する。外れ値検知の結果をWindows画面に表示する。

保全担当者にもっとも関係する活動である“3. データ活用”について、各AI機能の関係を述べる。AIコントローラは製造装置に取り付けたセンサやサーボモータから取得する値を用いて外れ値検知を実行する。外れ値検知のためのデータフローは次となる。

- (1) AIコントローラが製造装置からセンサやサーボモータの値を取得する
- (2) AIコントローラが(1)で取得した値から特徴量を求める
- (3) AIコントローラが(2)で求めた特徴量と“データ分析”で得た学習データを用いて外れ値検知する
- (4) 外れ値検知の演算結果をAIビューアに出力する

保全担当者は(4)で得た演算結果を製造装置の保全活動に用いる。

### 3.2 製造装置の制御と予知保全機能の共存の検証

マシンオートメーションコントローラに製造装置の制御とAI技術を共存させる方法について述べる。

弊社マシンオートメーションコントローラは複数のCPUコアを保有し、それぞれのCPUコアに機能を割当て、各CPUコアの処理を管理する。この仕組みにより制御プログラムとデバイスを同期した処理を実現する。

CPUコア1は優先度が高い処理を実行し、I/Oリフレッシュ、モーション制御、制御プログラムの実行などを行う。

CPUコア2は優先度が低い処理を実行し、タグデータリンク、FTP通信、ファイル操作などを行う。

上記のCPUコアの割り当て方に従い、表1に示すAI機能を分解し、CPUコアに割り当てることで表3を作成した。

表3 AI機能の分解

機能	CPUコア1	CPUコア2
時系列DB	変数の値を取得し、まとめる	まとめた変数の値をストレージに書き込む
特徴抽出	制御プログラムに同期して特徴量を求める	該当する処理はない
外れ値検知	特徴量をCPUコア2に渡す I-Forestによる演算結果を変数に書き込む	特徴量を用いて外れ値検知の演算を実施する

特徴抽出機能をCPUコア1で動作させることで、センサやサーボモータの値といったデバイスの値を漏れなく使用することを考慮した。

一方で、時系列DBがストレージにデータを保管する処理や、I-Forestによる外れ値検知の演算といった時間を要する処理をCPUコア2で実行することで、制御プログラムへの影響を小さくすることを考慮した。

## 4. 効果の検証

### 4.1 保全担当者が予知保全を実現するための構造の開発

ここでは3章で作成した構造に基づき、保全担当者、装置設計者、弊社サービスエンジニアの想定する動線を示す。“1. データ収集”における装置設計者または弊社サービスエンジニアの活動

装置設計者および弊社サービスエンジニアはAIオペレータを操作し、時系列DB機能を設定する。このとき、装置に関する知識を用いて外れ値検知に関わりそうな変数を選択、記録する。

また対象設備に詳しい保全担当者はAIオペレータを操作して、必要な変数を選択、記録することができる。

### “2. データ分析”における弊社サービスエンジニアの活動

弊社サービスエンジニアはAIイージーモデラーを用いて“1. データ収集”で得たデータから外れ値検知機能のための学習データを作成する。その後、AIオペレータを用

いて学習データをマシンオートメーションコントローラに転送することで外れ値検知機能を設定する。

“3. データ活用”における保全担当者の活動

保全担当者はAIビューアを用いて、外れ値検知機能の結果を監視する。外れ値を検知した場合、原因箇所の部品の保守などを実行する。

このように今回新たに開発した技術が利用者に応じた機能を提供していることを“1. データ収集”, “2. データ分析”, “3. データ活用”の動線をたどることで確認した。“b) AI技術の導入が難しい”という課題に対策できたと自負する。

4.2 製造装置の制御と予知保全機能の共存の検証

弊社NX7シリーズを用いてAI機能の時間効率性を評価する。評価は二段階で実施する。一段階として機能別の測定を行う。二段階として実際の製造装置を想定した性能評価モデルを用いて評価する。

**i) 測定対象** CPUコア2における外れ値検知一件当たりの処理時間は文献<sup>3)</sup>よりたかだか0.4ms程度であることがわかっている。今回新たに開発する製品仕様は、タクト周期が200msの時に外れ値検知を128個実行できることである。文献<sup>3)</sup>より128個の外れ値検知を実施する場合において、その処理に要する時間は0.4ms×128個=51.2msとなる。200msに対して51.2msは十分短い時間であると考えた。

よって、AIコントローラの製品仕様においてはCPUコア2の処理時間が問題になる可能性が低いため、機能別の測定ではCPUコア1の処理時間を測定する。

**ii) 測定条件** AI機能がCPUコア1の処理時間に影響を与える要素について述べる。AI機能によるCPUコア1の処理時間は、時系列DBに記録する変数の数、特徴を抽出する際の統計量、外れ値検知に用いる特徴量の数、外れ値検知の数に依存する。

本測定に用いる設定を表4に示す。外れ値検知一件につき特徴量は製品仕様で定める上限の16個とする。時系列DBが記録する変数は外れ値検知の数に関わらず512個固定とする。これら512変数のうち、16変数を特徴抽出に用いる。

実際の製造装置では、表4に示す値とはことなると予想されるが、本稿では単純のために時系列DBに記録する変数の数、特徴量の種類、およびその数を固定する。

上記の条件で外れ値検知の数を1個から128個まで変化させてCPUコア1の使用時間の傾向を調査する。機能別の測定として時系列DB、特徴抽出、外れ値検知の各機能が使用するCPUコア1の時間を個別に観測する。

表4 測定に用いた設定

項目	設定値
外れ値検知の数	n個 (1 ≤ n ≤ 128)
外れ値検知に用いる特徴量の数	16個
特徴抽出に用いる統計量の種類	尖度
時系列DBが記録する変数の数	512個

**iii) 機能別の測定結果** CPU1の使用時間は次の式で近似できる。

$$\text{CPU1の使用時間} = (\text{外れ値検知一件当たりの特徴量の数} \times \text{特徴抽出の時間} + \text{外れ値検知の時間}) \times \text{外れ値検知の数} + \alpha$$

ここで外れ値検知の時間は表3に示すようにCPUコア2とのデータのやりとり時間であり、I-Forestによる外れ値検知の演算時間を含まない。定数αは各機能のオーバーヘッドを表す。今回の設定ではCPU1の使用時間は外れ値検知の数に比例する。

AI機能別のCPUコア1の使用時間の内訳を表5に記す。時系列DBによるCPUコア1の使用時間が外れ値検知の数に関わらず62μs固定となっている理由は、時系列DBが記録する変数の数を512個固定にしたためである(表4)。

表5より特徴抽出機能がCPUコア1の使用時間の支配的な機能であることがわかる。特徴抽出機能のCPUコア1での処理は下記の通りである。

(1)制御サイクルの周期で変数の値をファームウェア内部のワーク領域に記録する

(2)外れ値検知のトリガ検知に基づき、(1)で記録した変数の値を参照して外れ値検知に用いる特徴量を求める

(3)求めた特徴量をファームウェア内部の変数に格納する

ここで、特徴量の計算は外れ値検知一件あたり16個と設定したため、外れ値検知の数が128個の場合、上記1,2,3を2048回繰り返す。この繰り返し処理に時間を要するため、特徴抽出機能がCPUコア1を長時間使用する。

次に、外れ値検知の時間が短い理由は、CPUコア1における演算量が少ないためと考えられる。表3に示すように、外れ値検知機能はCPUコア1とCPUコア2に処理を分けている。CPUコア1における外れ値検知の処理はCPUコア2との変数値のやりとりである。なお、処理時間を要する外れ値検知の演算はCPUコア2で実行する。よって、CPUコア1における外れ値検知の時間が短い。

以上の情報を用いることで、装置設計者はAI機能によるCPU負荷を加味した装置設計を行うことができる。

表5 AI機能別のCPUコア1の使用時間

外れ値検知の数	時系列DB (μs)	特徴抽出 (μs)	外れ値検知 (μs)
8	62	31	1
16	62	42	1
32	62	66	2
64	62	115	3
128	62	215	6

**iv) 性能評価モデルを用いた検証の条件** 次に性能評価モデルを用いてAI機能と製造装置の制御が共存できることを示す。

我々が設計した性能評価モデルは、サーボモータの外れ値検知が1個、仮想デバイスの外れ値検知が127個の合計128個の外れ値検知を実行する。外れ値検知に関する設定

を表 6、表 7 に記す。ここでタクト周期とは製造装置の繰り返しの周期であり、特徴量から外れ値を演算する周期と同じである。なお制御サイクルは2msとする。

表6 サーボモータの外れ値検知に関する設定

項目	説明
タクト周期	60s
監視対象の変数	サーボモータの位置情報、速度情報、トルク情報、速度指令値
使用する特徴量	監視対象の変数から次の4種類の特徴量を求める。 平均、最大、最小、標準偏差

表7 仮想デバイスの外れ値検知に関する設定

項目	説明
タクト周期	600ms
監視対象の変数	正弦波4変数
使用する特徴量	監視対象の変数から次の4種類の特徴量を求める。 平均、最大、最小、標準偏差

**v) 性能評価モデルを用いた検証の結果** AI機能を搭載するマシンオートメーションコントローラと従来のAI機能を搭載しないものの測定結果を表 8 に記載する。AI機能の搭載による制御サイクルへの影響はAI機能の負荷が最も高い場合に最大になるため、表 8の最大時を比較する。AI機能搭載時に1256 $\mu$ s、AI機能非搭載時に1081 $\mu$ sであり、その差は175 $\mu$ sである。この結果は表 5の結果に沿っており、十分検証できていると考える。175 $\mu$ s はAI機能非搭載時の制御サイクルの約16%であることから、AI機能の搭載による制御サイクルへの影響が小さいことがわかる。

このように、今回新たに開発した技術はAI機能を搭載することによる制御サイクルへの影響を小さくすることができる。よって、装置設計者は製造装置のハードウェアやソフトウェア構成、制御システムの大幅な変更を行うことなくAI機能を導入することができる。これは“a) AI技術は演算が複雑であり高性能なCPUが必要である。”という課題に対して有効な対策である。

表8 制御サイクルの測定結果

項目	実行時間 ( $\mu$ s)
AI機能搭載	最小: 61 平均: 1022 最大: 1256
AI機能非搭載	最小: 58 平均: 902 最大: 1081

## 5. むすび

本稿では、i) 保全担当者が予知保全を実現するための構造の開発、ii) 製造装置の制御と予知保全機能の共存の

検証、に取り組んだ。

結果、保全担当者が製造現場で使えるAI技術として予知保全を可能とするAIコントローラとAIサポートツールを開発した。製造現場でのAI技術の仕様に向けた活動を整理することで、保全担当者が利用可能であることを示した。またCPUの負荷を検証し、製造装置の制御と外れ値検知機能を共存できることを示すことで、製造装置の予知保全を実現できることを示した。

今後は、AI技術を予知保全以外に適用すること、製造装置の制御にAI技術の演算結果を利用する仕組みの開発を検討する。

最後に今回の開発にあたり、多大な協力をいただいた方々に深く感謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) 経済産業省. 2018年版ものづくり白書—第一部 我が国ものづくり産業が直面する課題と展望. [http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2018/honbun\\_pdf/pdf/honbun01\\_01\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2018/honbun_pdf/pdf/honbun01_01_01.pdf). 2018-11-06.
- 2) JIS Z 8141:2001. 2018-11-06.
- 3) オムロン株式会社. オムロン草津工場事例: ビッグデータから見える製造現場. <http://www.fa.omron.co.jp/solution/sysmac/technology/bigdata/index.html>, (2018/03/01).
- 4) 日本アイ・ビー・エム株式会社. 予知保全 (PQM) 資産の障害を予知/ 予防し、稼働率や歩留まりの向上を実現. <https://www-01.ibm.com/software/jp/info/predictivemaintenance/>, (2018/03/01).
- 5) 日本電気株式会社. “いつもと違う”を発見し、故障や異常を未然に防ぐ。インバリエント分析. <http://jpn.nec.com/ai/analyze/invariant.html> (2018/03/01).
- 6) 株式会社NTT データ. IoT&AI 時代におけるエッジコンピューティングへの取り組み. <http://www.nttdata.com/jp/ja/insights/blog/20170316.html>, (2018-03-29).
- 7) 経済産業省. 2017年版ものづくり白書—第一部 ものづくり基盤技術の現状と課題. [http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun\\_pdf/pdf/honbun01\\_01\\_02.pdf](http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun_pdf/pdf/honbun01_01_02.pdf), (2018-4-10).
- 8) 日本電信電話株式会社. 高レスポンスやビックデータ処理が要求される新たなアプリケーションの開拓を推進する「エッジコンピューティング構想」を策定. <http://www.ntt.co.jp/news2014/1401/140123a.html>, (2018-03-05).
- 9) Fei Tony Liu, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou. Isolation-based anomaly detection. ACM Transaction on Knowledge Discovery from Data (TKDD), Vol. 6, No. 1, p. 3, 2012.
- 10) OMRON TECHNICS Vol.50 No.1 (通巻161号). マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1).
- 11) OMRON TECHNICS Vol.50 No.1 (通巻 161号). マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (2).
- 12) ISO/IEC 9126.

## 執筆者紹介



見置 孝昌

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 第一開発部  
専門：情報科学  
所属学会：なし



出来 仁太郎

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 第一開発部  
専門：情報工学  
所属学会：なし

## AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (2)

### 制御に同期したデータ収集と時系列データベースの実現

太田 政則・西山 佳秀

近年、製造業では、設備の稼働率向上と高品質な製品を安定的に生産するため、製造現場においてAI (Artificial Intelligence) やIoT (Internet of Things) を活用するニーズが高まり続けている。

従来、製造現場のデータを活用するには、センサやモータ等各機器のデータをネットワーク経由で専用のデータベースサーバへ蓄積し、分析を行うという作業を行っていた。しかし、装置を制御するコントローラが高速・高精度になるに従い、より高速なデータ収集が必要となるが従来のシステムでは全てのデータをサーバへ格納することができなかった。

そこで我々は、AI機能を搭載したマシンオートメーションコントローラを開発するにあたり、制御周期に同期したデータ収集の仕組み、および収集したデータをコントローラ内に蓄積する時系列データベースを開発した。これにより高精度なAI機械学習モデルを作成することを可能にし、モデルに基づいたAI機能による設備の異常検知を行うコントローラを実現した。

## Development of AI-equipped Machine Automation Controller (2)

### Data collection synchronized with machine control and realization of Time-Series database

*Masanori Ota, Yoshihide Nishiyama*

In recent years, in the manufacturing industry, the need to utilize AI (Artificial Intelligence) and IoT (Internet of Things) at the manufacturing site continues to rise in order to improve availability of facilities and stably produce high quality products.

Conventionally, in order to utilize the data of the manufacturing site, data of each device such as a sensor and a motor was accumulated in a dedicated database server via a network and analyzed. However, as controllers controlling the apparatus become faster and more accurate, it is becoming necessary to gather data necessary for more accurate data analysis, but in the conventional system, it is impossible to store all the data in the server It was.

Therefore, in developing a machine automation controller equipped with the AI function, we developed a data collection mechanism synchronized with the control cycle and a time series database that accumulates the collected data in the controller. As a result, we made it possible to create highly accurate AI machine learning model, realized controller based on model based AI function and abnormality detection of facility.

#### 1. まえがき

近年、製造現場へのIT (Information Technology) の導入が進み、製造現場のデータを活用した取り組みが加速している。例えば、製造情報や品質データをデータベースへ蓄積・解析し、稼働率管理や予防保全に活用する事例があげられる<sup>1) 2)</sup>。

また、近年発展の著しいAI技術をファクトリーオートメーション分野、特に製造管理や設備保全などの業務に対

して導入することが検討されており、装置を制御するコントローラから取得できるデータを活用した生産設備の異常検知の実証例が報告されている<sup>3) 4)</sup>。

AI技術を活用することにより、従来の人によるデータ解析では困難な大量のデータの解析が可能となったが、データに基づいた設備保全のさらなる質の向上には、現場で動作する設備の挙動を十分に捉えられる周期でのデータの収集が必要と考えられる。そこで、我々は、AI搭載マシンオートメーションコントローラを開発するにあたり、装置を制

御するコントローラの制御周期と同期したデータ収集およびデータを蓄積する技術を確立した。

## 2. 課題

**2.1 従来のデータ収集の方式** 製造現場において用いられるマシンオートメーションコントローラは、あらかじめ定められた順序に従い制御を行うシーケンス制御、モータの位置制御を行うモーション制御などを行う制御機器である。コントローラはEtherCATに代表される産業用のネットワーク（以下、フィールドネットワーク）を介してセンサやモータなど製造設備を構成する様々な制御機器の入出力データ（以後、製造データとよぶ）を0.125 msから数msの周期で収集できる。これらの製造データは「変数」に割り当てることができ、さらにコントローラ内の制御プログラムにより演算を施した結果を別の変数に代入することができる。また、コントローラはTCP/IPベースのネットワーク通信機能を備えるなどIT化が進み、製造現場と上位の製造管理システムとのインタフェースとしての役割も果たしている。

従来から製造業では、製造工程の把握や作業者への指示などを行うMES（Manufacturing Execution System：製造実行システム）や、不良・故障の原因追究、製造工程の製造履歴の記録などのために、コントローラをインタフェースとして製造情報や品質データをデータベースへ蓄積することが行われている。

従来、多く採用されている方法は、コントローラとサーバの間にネットワークで接続したデータ収集ソフトを配置し、データ収集ソフトが収集したデータをデータベースへ格納する方法である（図1a）。また、近年ではコントローラからネットワークで接続したデータベースへ直接データを格納することが可能な製品も存在する（図1b）<sup>1)</sup>。

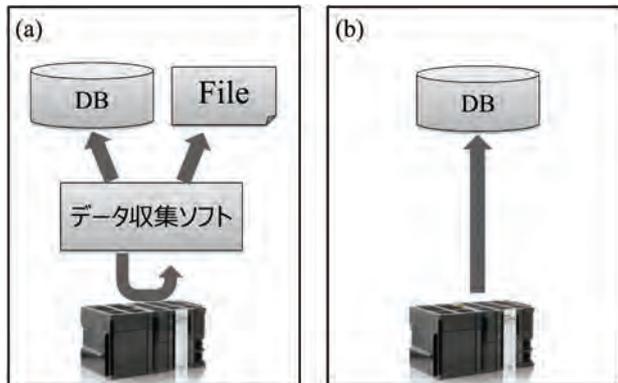


図1 従来のデータ収集の方式

**2.2 高速・高精度のデータ収集の課題** 従来のデータ収集の方式は、いずれの方式においても、ネットワークを介して収集するため数msから数100msのオーダーとなる。また、ネットワークやデータ収集ソフト、DBサーバの負荷などの要因により、データ収集の間隔の揺らぎが発生す

ることが避けられない。

一方、コントローラは最短0.125 msという高速かつ高精度な制御周期で動作することが可能である。図2は、コントローラへ入力したサイン波形を表すアナログ値（図2a）と、入力したアナログ値を10ms周期で収集したデータ（図2b）をグラフにしたものである。

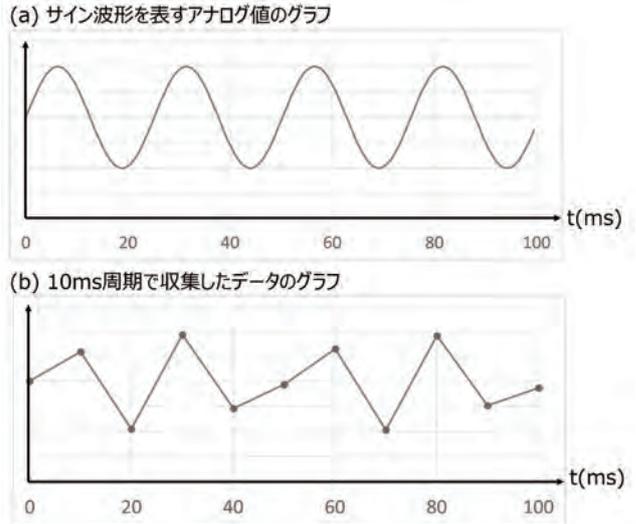


図2 従来の方式で収集したサイン波形のグラフ

AI技術を活用した高精度なデータ解析の実現にはコントローラの制御周期と同期した高速で高精度なデータ収集が必要と考えるが、従来のデータ収集の方式では10ms周期程度の収集となり、元のデータがサイン波形であることを解析できない。

そこで我々は、AI技術を活用した機械学習・特徴抽出機能を搭載したAI搭載マシンオートメーションコントローラを開発するにあたり、コントローラの制御周期と同期してデータを収集および蓄積する「時系列データベース」を実現した。

## 3. 技術内容

**3.1 時系列データベース** 2章で述べた課題を解決するために、制御と同期して時系列に発生する製造データを収集、蓄積することを目的とした「時系列データベース」（以降、時系列DB）をコントローラの内部で実現した。

一般的に時系列DBは、一定の時間間隔で生成されるデータ（時系列データ）の扱いに特化し、時刻（Timestamp）をインデックスとした単純なデータ構造で、大量なデータを扱うこと特徴とするデータベースシステムである。

図3にAI搭載マシンオートメーションコントローラにおける時系列DBのシステム構成図を示す。コントローラは、IOユニットまたはフィールドネットワークでセンサやモータに接続する。制御プログラムは、装置のシーケンス制御、モーション制御を実行するプログラムである。データ収集処理は、センサやモータなどのデータを収集し時系列DB

へ格納する。時系列DBは格納したデータをCSVファイルへエクスポートする。CSVファイルは上位パソコンでデータ解析される。

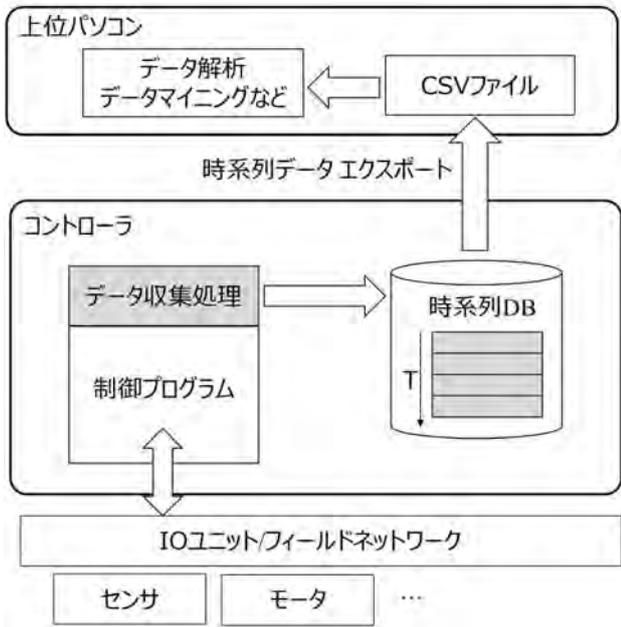


図3 時系列DB システム構成図

AI搭載オートメーションコントローラに組み込むデータベースを実現するに当たり、我々は以下の設計指針を設定した。

<設計指針>

- 1) データ収集処理は制御タスクと同期して変数値を収集すること。
- 2) データ収集した時刻と変数の値が正確に紐づけられていること。
- 3) 制御プログラムの実行時間に影響を与えることなくデータを記録できること。  
データ収集処理は時系列DBへのデータの記録処理でブロックしてはならない。
- 4) 時系列DBに記録したデータを取得する仕組みを提供すること。

3.2 時系列DBのデータ構造 データベースシステムは長らくリレーショナル・データベースが主流であった。

一般的にリレーショナル・データベースは、

- ・データは2次元のテーブル形式で格納される
- ・複数の表を結合することができる
- ・汎用問い合わせ言語であるSQLにより選択、追加、更新、削除ができる、

というデータ構造を特徴とするデータベースシステムである。

一方、Webベースなどのシステムで扱うデータ量は増加し、高速なレスポンスが要求されるようになった。これらのシステムではリレーショナル・データベースのような厳密なテーブルの定義や複雑な条件を組み合わせた問い合わせ

は不要である。そこで近年はリレーショナル・データベース以外のデータ構造を持つデータベースが提唱されている。このようなりレーショナル・データベース以外のデータベースの総称としてNoSQL (Not Only SQL) と呼ばれている<sup>5)</sup>。

NoSQL型のデータベースは、データ構造の違いによりいくつかの種類がある。例えば、キーと値をペアにして保持する「キーバリュ型」、文書データの格納に特化した「ドキュメント型」、列方向のまとまりでデータを扱う「カラム型」、グラフ構造でデータを格納する「グラフ型」などがある。本システムでは、時系列に発生する大量の製造データを時刻と関連付けて蓄積するために、「キー」と「バリュー」という単純なデータ構造により高速なデータの格納および取得に適したキーバリュ型を採用した。

時系列DBのデータ構造は、データベース内で一意な「キー」と製造データを格納する「バリュー」のペア形式でデータを持ち、キーとバリューのペアは「レコード」を構成する。時系列DBは、レコード単位でデータベースに格納する。キーは時刻を含むインデックス情報を持つ。バリューは収集対象の変数値の集合である。個々の変数値は変数のデータ型を表す情報と変数の値を表すバイナリ列で構成する (図4参照)。

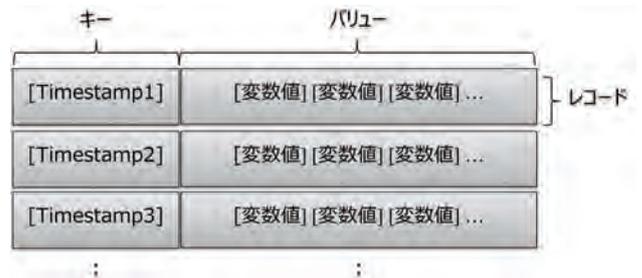


図4 時系列DBのデータ構造

図4で示したように、時系列DBは発生時刻と変数値をペアで時系列にデータを管理することで、時刻と製造データを正確に紐づけることが可能となる。

**3.3 制御に同期したデータ収集** オムロンのマシンオートメーションコントローラは、0.125 ms 制御周期と呼ぶ一定の時間間隔で制御プログラムを実行する。制御周期は、最短0.125 ms で実行可能である。フィールドネットワークに接続したセンサやモータなどのデータ通信も、制御周期に同期して実行する。オムロンのマシンオートメーションコントローラが採用するタスクスケジューリングモデルを図5に示す。

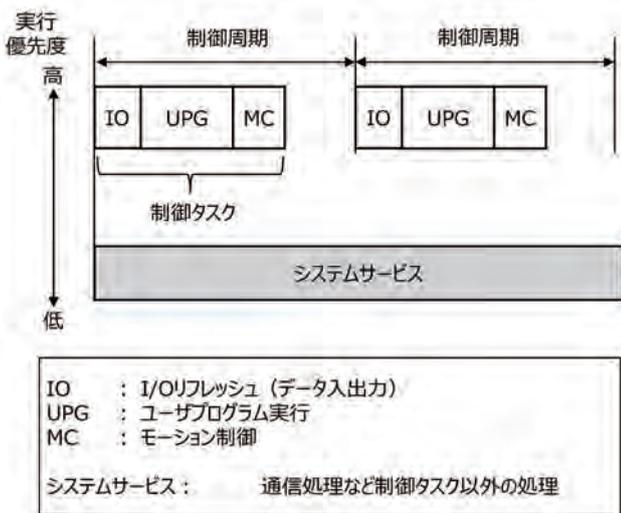


図5 タスクスケジューリングモデル

制御タスクは、制御周期ごとにI/Oリフレッシュ（データ入出力）、ユーザプログラム実行、モーション制御の処理を厳密な時間間隔で実行する。システムサービスは、周辺ツール/表示機/上位パソコンなどとの通信処理やSDメモ리카ードへのアクセスなど制御タスク以外の処理を実行する。オムロンのマシンオートメーションコントローラは、タスク優先度管理機能とタスクスケジューリング機能を有しており、制御タスクをシステムサービスより高い優先度で実行し、揺らぎのない高精度な制御周期を実現している。本システムでは、制御タスク上でデータ収集処理を実行することで制御周期に完全に同期したデータ収集を実現した（図6参照）。

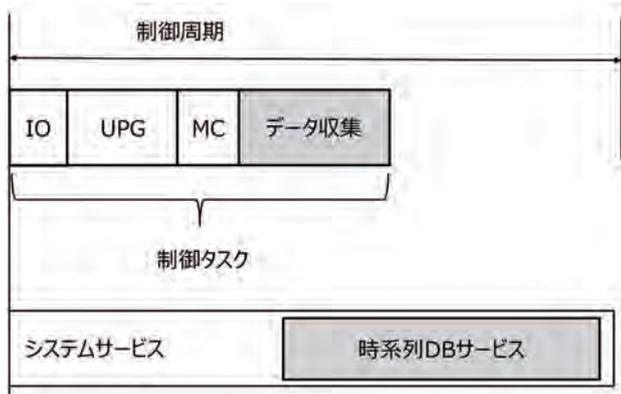


図6 時系列DBのタスクスケジューリングモデル

データ収集処理は、あらかじめ登録した収集対象の変数のリストに従い、毎制御周期の変数の値を取得し、取得した時刻とともに時系列DBへ格納するレコードを構築する。しかしながら、制御タスクは厳密な制御周期を守る必要があり、制御タスクの実行時間は制御周期を超えてはならず、ストレージ・メディアへの書き込みのような処理時間が保障されない処理を制御タスクで実行することはできない。そこで、データ収集処理で作成したレコードを時系列DBへ書き込む処理は、システムサービス上で実行する「時系

列DBサービス」に分離することで、厳密な制御周期を守りながら制御に同期したデータ収集及び時系列DBへの格納を実現した。

**3.4 時系列DBのストレージへの書き込み** 時系列DBは格納先としてSDメモ리카ード、SSD (Solid State Drive)、RAMディスクなどコントローラの各種ストレージ・メディアに対応する。ストレージ・メディアの書き込み時間は、ストレージの種類により非常に長くなる場合がある。例えばSDメモ리카ードへ書き込む場合のレイテンシーは揺らぎが大きく、数100 msから数秒のオーダーになる場合がある。また、ストレージ・メディアはまとまったデータ量を一度に書き出すほうが単位データ量あたりの保存時間が小さくなる特徴がある。

このため、時系列DBはデータ収集処理からの複数個のレコードを内部のバッファにキャッシュし、時系列DBサービスはキャッシュされた複数のレコードをまとめてストレージ・メディアへ書き出すことで、制御プログラムからストレージへの書き込みまでの処理時間の差異と変動を吸収する機構「Non-Blocking Queue」(以降、NBQ)を実現した(図7参照)。

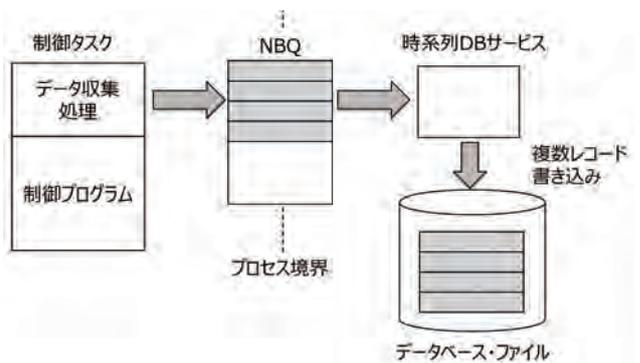


図7 ストレージへの書き込み

ここまでに記載した技術により、時系列DBの書き込み処理において以下のような特徴を実現した。

- 1) 制御周期ごとにレコードをNBQへ格納  
データ収集処理は、制御周期ごとにレコードをNBQへ格納する。レコードを格納する操作をブロックせずに行うことで、制御タスクの実行時間の延びを最小化する構造とした。
- 2) NBQを共有メモリ上に配置  
NBQを共有メモリ上に配置することで、高い優先度で動作する制御タスクから低い優先度で動作する時系列DBサービスへデータを受け渡し、プロセス境界をまたぎデータ交換をまとめて実行することが可能な構造とした。
- 3) 複数レコードの一括書き込み  
時系列DBサービスは、NBQにキャッシュされたレ

コードを取り出す。取り出したレコードは書き込みバッファにまとめられ、一括でデータベース・ファイルへ書き込む。これにより単位データ量あたりの保存時間を短くし、NBQのデータあふれが発生しにくい構造とした。

また、書き込み処理中は、レコードをNBQに保留しストレージ・メディアへの書き込みレイテンシーの揺らぎを吸収することを可能とした。

4) 複数の時系列DBへの並行書き込み

性能特性の異なる複数の時系列DBへの並行した書き込みを実行可能とするため、複数のNBQを持つことが可能な構造とした。また、ストレージ・メディアのレイテンシーや単位時間あたりに格納するレコード数などの性能特性に合わせて、NBQに格納することができるレコード数およびレコードサイズを調整可能とした。

この構造により、例えば、2つのNBQを用いて、SDメモリカードのような大容量・低速のストレージへの書き込み中に、RAMディスクのような小容量・高速なストレージへ短い周期の書き込みを実現した。

**3.5 時系列データのエキスポート** 時系列DBに記録した製造データを利用するため、時系列DBはレコードの情報をエキスポートする機構を備えている。

エキスポートの形式は、利用者により様々な形式が考えられる。AI搭載マシンオートメーションコントローラにおいては、収集したデータを容易に解析できることを考慮し、可読性および汎用性の高いCSVフォーマットのテキストファイルに出力する方式を採用した。

図8は時系列データをエキスポートした結果のCSVファイルをMicrosoft Excelで表示した例である。

1	indx	time	time	schort	schort	std	std	MC_Avto00	MC_Avto01	MC_Avto02	MC_Avto03	MC_Avto04
1	12725981	12.4516745	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21435	21435	21435	21435	21435
2	12725982	12.4516745	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21408	21408	21408	21408	21408
3	12725983	12.4516749	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21381	21381	21381	21381	21381
4	12725984	12.4516744	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21355	21355	21355	21355	21355
5	12725985	12.4516747	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21327	21327	21327	21327	21327
6	12725986	12.4516747	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21300	21300	21300	21300	21300
7	12725987	12.4516748	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21273	21273	21273	21273	21273
8	12725988	12.4516748	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21246	21246	21246	21246	21246
9	12725989	12.4516748	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21219	21219	21219	21219	21219
10	12725990	12.4516749	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21191	21191	21191	21191	21191
11	12725991	12.4516750	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21163	21163	21163	21163	21163
12	12725992	12.4516750	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21135	21135	21135	21135	21135
13	12725993	12.4516751	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21107	21107	21107	21107	21107
14	12725994	12.4516751	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21080	21080	21080	21080	21080
15	12725995	12.4516750	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21051	21051	21051	21051	21051
16	12725996	12.4516750	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	21023	21023	21023	21023	21023
17	12725997	12.4516753	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	20995	20995	20995	20995	20995
18	12725998	12.4516753	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	20967	20967	20967	20967	20967
19	12725999	12.4516754	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	20939	20939	20939	20939	20939
20	12726000	12.4516754	1.53742E+18	6.98E+12	0	0	0	20911	20911	20911	20911	20911

図8 CSVファイルの例

また、エキスポートはCSVファイル以外の形式にも対応できるように、拡張可能な仕組みを持つ。例えば、上位コンピュータ上で稼働するデータ収集システムへ、ソケット通信によりレコードを出力するようなエキスポート方式を実現することが可能である。

4. 時系列DBの活用

4.1 AI搭載オートメーションコントローラでの活用

AI搭載オートメーションコントローラによる製造装置の予知保全を実現するには、大きく2つの活動がある。

1) データ収集および分析

対象となる製造装置の製造データを収集し、異常を表す特徴量および学習済データからなる「AI機械学習モデル」を作成する。本論文では、これを「分析フェーズ」と呼ぶ。

2) 外れ値の検知

1) で求めたAI機械学習モデルをもとに製造データからリアルタイムに外れ値を検知する。本論文では、これを「活用フェーズ」と呼ぶ。

以降に、それぞれのフェーズにおける時系列DBの活用について述べる。

4.2 分析フェーズでの時系列DBの活用

分析フェーズは、対象となる製造装置のデータを収集し、収集した解析用のデータに基づいてAI機械学習モデルを作成する活動である。

AI搭載オートメーションコントローラでは、時系列DBで解析用のデータを収集し、それを基に解析ツール「AIイーजीモデラー」が異常検知に用いるための特徴量の選択、外れ値検知モデルの学習、正常と異常を判別するための閾値を決定し、AI機械学習モデルを作成する。分析フェーズの処理フローを図9に示す。

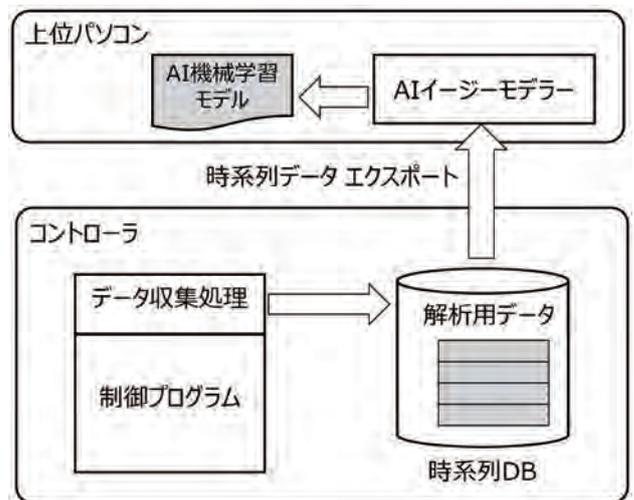


図9 分析フェーズの処理フロー

AIイーजीモデラーが精度の高いAI機械学習モデルを作成するには、精度の高い解析用のデータを収集することが不可欠である。図10は、サイン波形を表すセンサのデータを制御周期と同期した0.5 ms周期で収集した解析用のデータをグラフにしたものである。測定条件は以下の通り。

- ・制御周期：0.5 ms
- ・収集対象の変数：LREAL型 (倍精度浮動小数点型)
- ・ストレージ・メディア：SDメモリカード

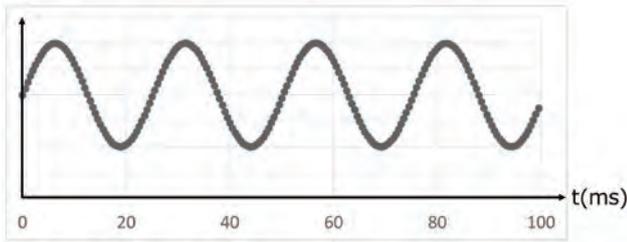


図10 0.5 ms周期で収集したサイン波形のグラフ

「2.2 高速・高精度のデータ収集の課題」で述べたように、従来のデータ収集の方式では、データ収集の間隔が数msから数100msとなり、元のデータがサイン波形であることは解析できないが、制御タスクと同期して収集し時系列DBに格納したデータは、センサのデータがサイン波形であることを正確に解析できる。

このように、AI搭載オートメーションコントローラは、時系列DBにより制御タスクに同期したデータを収集することで、精度の高いAI機械学習モデルを作成することが可能となった。

**4.3 活用フェーズでの時系列DBの活用** 活用フェーズは、AI イージーモデラーで作成したAI機械学習モデルをもとに、装置の稼働時に異常判定を行う活動である。活用フェーズの処理フローを以下に示す(図11参照)。

- 1) 「特徴抽出」機能：分析フェーズで選択した異常検知に用いるための特徴量を演算する
- 2) 「外れ値検知」機能：1) で演算した特徴量およびAI機械学習モデルをもとに異常判定を行う
- 3) 「AIビューア」可視化ツール：1) の特徴量、2) の判定結果を可視化する。

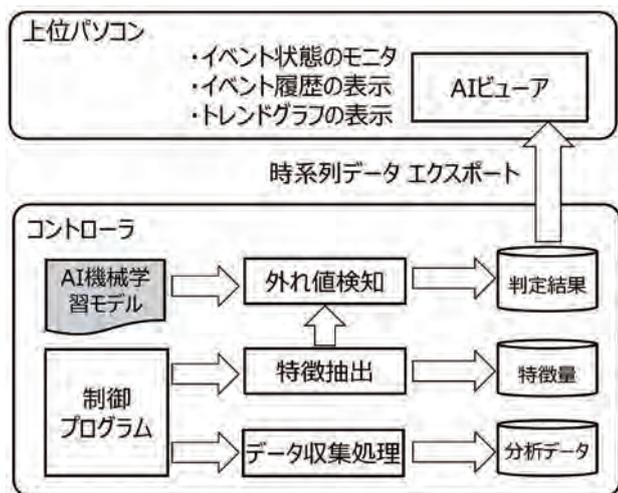


図11 活用フェーズの処理フロー

活用フェーズでは、分析データ、特徴量の演算結果、外れ値検知の判定結果の3種類のデータがそれぞれ異なるタイミング、頻度で発生する。分析データは制御に同期し最短0.125ms周期で発生し、特徴量、判定結果は製造物のタクトに同期しおよそ数100msから数秒の頻度で発生

する。

AI搭載オートメーションコントローラは、分析データ、特徴量、判定結果の3種類のデータをそれぞれ異なる時系列DBへ格納する。ユーザはAIビューア画面上に可視化された判定結果により異常が発生したこと検知し、さらにその時の特徴量、分析データを解析することで異常の要因を特定することが可能となる。

**4.4 AI搭載オートメーションコントローラ以外への活用** 製造現場の製造データはセンサで感知する温度や振動、モータの回転数や位置などが絶え間なく発生する。これらのデータを制御周期に同期して取りこぼし無く収集する時系列DBの技術は、様々な用途に応用できる。その一つが「エッジ・コンピューティング」(Edge Computing) への活用である。

製造現場で絶え間なく発生する膨大なデータをクラウド上などにあるデータサーバに格納するには膨大なコストと通信帯域が必要となる。一方、製造現場のデータは、正常時はそれほど重要な意味はなく、実際には利用されないことが多い。このような課題に対してエッジ・コンピューティングという考え方が出てきている<sup>6)</sup>。

図12は、時系列DBをエッジ・コンピューティング層で活用した例である。「クラウド層」はインターネット上で稼働するシステムであり、「フォグ・コンピューティング層」は工場内のローカルネットワーク上で稼働するMESやデータ解析などのサービスを提供するシステムである。「エッジ・コンピューティング層」には時系列DBが動作するコントローラを配置する。時系列DBに製造データを毎周期で格納する。時系列DBは一定期間分のデータだけ蓄積し、古いデータは破棄する。装置に異常が発生した時にのみ、その前後のデータをフォグ・コンピューティング層のサーバへ格納するような利用が想定できる。

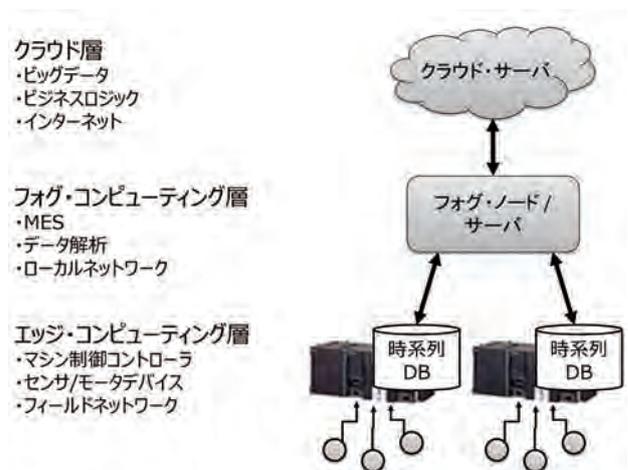


図12 時系列DBのエッジ・コンピューティングへの活用

表1 収集データ量の試算

試算条件	データ量
全データの場合のデータ量	1日分で約82GB
異常発生前後のデータの場合のデータ量	1分間で約59MB

表1は、発生する倍精度浮動小数点型の製造データ128個を1 ms周期で収集した場合のデータ量の試算である。全てのデータを上位のサーバへ格納した場合、発生するデータ量は1日で約82GBになる。時系列DBに異常発生前後のデータのみを格納することでデータ量を約59MBへ削減でき、通常のネットワーク回線で扱うことが可能なデータ量に削減することができる。

## 5. むすび

**5.1 考察** 製造装置のデータを高速・高精度に収集・活用する技術として、時系列に発生する製造データを制御と同期して収集、蓄積する時系列DBを実現し、AI搭載オートメーションコントローラに内蔵した。

時系列DBを用いることで、従来のネットワークを経由した方式では困難であった制御周期に同期したデータ収集を実現し、精度の高いAI機械学習モデルの作成が可能となった。

また、AI機械学習モデルをもとにした特徴量演算、外れ値判定の結果を収集し、可視化することで製造装置の保全活動に利用することを可能とした。

**5.2 今後の展開** エッジ・コンピューティングに代表するように、製造現場のデータを制御周期に同期して収集、蓄積する時系列DBの技術は、様々な用途に応用可能である。

今後は、コントローラなどデバイスへ組み込み可能な高速データベースエンジンとして、時系列DBを応用した技術の展開を目指す。

## 参考文献

- 1) オムロン株式会社. ビッグデータ化する装置データ.  
<https://www.fa.omron.co.jp/solution/sysmac/innovation/bigdata.html>. (参照 2018-10-11)
- 2) オムロン株式会社. ビッグデータから見える製造現場.  
<https://www.fa.omron.co.jp/solution/sysmac/technology/bigdata/index.html> (参照 2018-10-11)
- 3) 鶴田 浩輔、峯本 俊文、広橋 佑紀. マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1) 装置制御用データを利用した生産ラインの異常検知手法について. OMRON TECHNICS 2018 vol.50 no.1 p.6-11
- 4) 阿部 泰明、上山 勇樹、阪谷 信幸、藤井 高史. マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (2) 異常検知コントローラプロトタイプ開発における実証例について. OMRON TECHNICS 2018 vol.50 no.1 p.12-17
- 5) 露崎 浩太、鬼塚 真. NoSQLデータベースの特性とベンチマーク体系. NTT技術ジャーナル 2012 vol.24 no.10. p.22-25  
<http://www.ntt.co.jp/journal/1210/files/jn201210022.pdf> (参照 2018-10-26)
- 6) 海部 美知. クラウドの次、エッジ・コンピューティングのアメリカでの現状. KDDI 総合研究所 R&A 2018年 4月号.  
<https://rp.kddi-research.jp/article/RA2018003>  
(参照 2018-11-1)

## 執筆者紹介



太田 政則

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 第一開発部  
専門：ソフトウェア工学



西山 佳秀

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 第一開発部  
専門：ソフトウェア工学

MicrosoftおよびExcelは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標です。  
本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

## AI 搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (3)

### 製造現場における異常検知モデル生成ツール

宮本 幸太・川ノ上 真輔

近年、製造業では、熟練技能者の不足や人件費高騰の影響を抑えるため AI や IoT を活用するニーズが高まり続けている。

オムロンでは、設備の稼働率向上と高品質な製品を安定的に生産するため、設備の異常検知を実現する「AI 搭載マシンオートメーションコントローラ」を開発した。本来、異常検知を実現するには、データサイエンティストによる装置の因果関係を踏まえたデータ分析を元に、異常検知モデルを生成する必要があるが、属人性の高さおよび、専門性の高さという点で課題がある。

我々は、その課題を解決するため、異常検知モデルの生成の自動化を実現するツールを開発した。機械学習アルゴリズムを活用することで、異常検知モデル生成の自動化を実現し、そのモデルにより高精度な異常検知を実現できることを確認した。

## Development of AI-equipped Machine Automation Controller (3)

### Generation of anomaly detection models at manufacturing site

*Kota Miyamoto, Shinsuke Kawanoue*

In recent years, the need has continually risen for the introduction of AI and the internet of things (IoT) on manufacturing floors. It allows manufacturers to contain the impact of skilled worker shortages and surging labor costs, while simultaneously increasing equipment utilization and achieving stable production of quality products. OMRON has developed a machine automation controller equipped with a machine learning artificial intelligence (AI) algorithm.

Conventionally, in order to realize anomaly detection of a machine, it was necessary to analyze data based on the cause-effect relation of the device, and to generate an anomaly detection model by data scientists. Dependence on individual skills is an issue to be solved. In order to solve the issue, we have developed tools to realize automatic generation of an anomaly detection model by utilizing a machine learning algorithm.

#### 1. まえがき

近年、製造業では、多品種少量生産やグローバルでの最適地生産の流れが加速する中、熟練技能者の不足や人件費高騰の影響を抑え設備の稼働率向上と高品質な製品を安定的に生産するため、モノづくりの現場において AI や IoT を活用するニーズが高まり続けている。

オムロンでは、AI 技術の活用事例の一つとして「AI 搭載マシンオートメーションコントローラ (以下 AI コントローラ)」を開発した。AI コントローラはマイクロ秒単位で刻々と変化するラインや装置の状態をリアルタイムに監視し、

搭載した AI に学習させた「異常検知モデル」を基に機械の“いつもと違う動き”を推定することで、異常が発生する前に安全に装置やラインを制御するというものである<sup>1) 2) 3)</sup>。

製造現場において、異常検知や予知保全を実現するためには、製造装置の異常と測定可能なセンサーデータの因果関係を把握する必要があり、現状、統計処理の知識と、多くの解析のための時間を要するという問題がある。

また、AI コントローラの利用者である製造現場のエンジニアの趣向として、実現した異常検知モデルがどのように生成されたか生成過程が明瞭であることを重視する傾向がある。

我々は、これらの問題や利用者の趣向を踏まえた上で、AIコントローラに不可欠な異常検知モデルの生成を自動で行うツールについて検討した。本稿では、その検討結果について述べるものとする。

## 2. 課題

**2.1 AIコントローラを活用した異常検知の流れ** AIコントローラは、周期的に繰り返し製造を行う装置を対象に、PLC (Programmable Logic Controller) の制御対象である製造装置の各種機器の制御データ (サーボモータのトルク値やファイバセンサの論理信号など) を活用することで、リアルタイムに異常を検知する。AIコントローラでの異常検知の方法は、図1の通りで、まず収集した装置の制御データを製造の周期単位 (タクト、サイクル等) に切り出す。次に切り出した区間の波形に対して特徴量を算出する。AIコントローラでは、平均値、標準偏差、歪度、尖度、最大値、最小値の分布の形状を表現する6つの特徴量を扱うことができるため、1つの波形に対して最大で6種の特徴量を得ることができる。この算出した特徴量に対して異常検知アルゴリズムの1種である Isolation Forest (以下 I-Forest) <sup>4)</sup> を適用し、その結果として異常度合いを示すスコア (以下異常度スコア) を得る。最後に異常度スコアに対してしきい値判定を行うことで、製造の周期単位に異常が起こっているかどうかを判定するというものである。

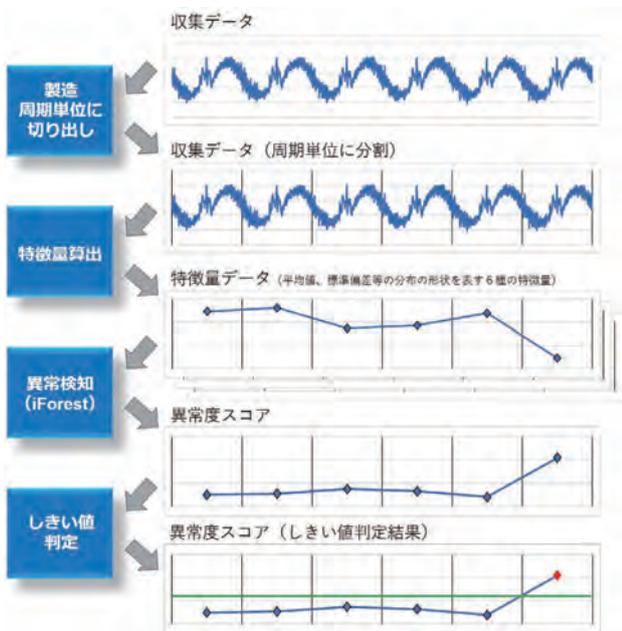


図1 AIコントローラによる異常検知方法

この異常検知方法により、AIコントローラは高い検知性能および処理の高速性を実現している<sup>5) 6)</sup>。但し、この異常検知の方法を実現するためには、事前に設定しておくべき次の2つの事象がある。

- A) 異常検知に有効な変数および特徴量の選択
- B) しきい値の設定

そのため、AIコントローラの利用者は、異常検知を実現する上で、図2に示す収集、分析、活用の3つのフェーズから構成されるプロセスを実行する。

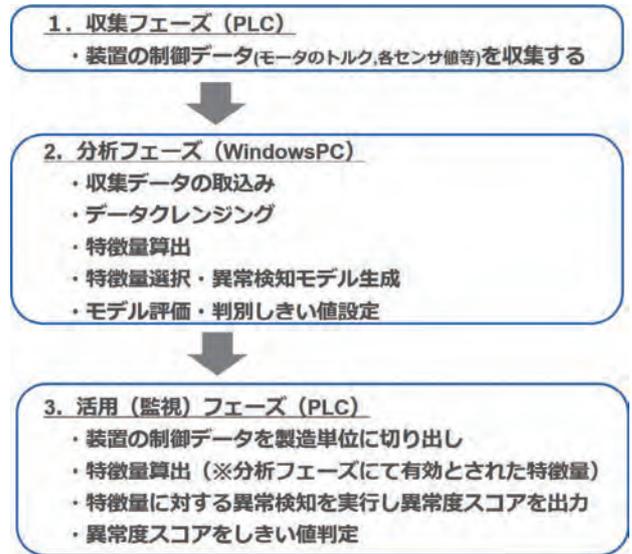


図2 AIコントローラの異常検知プロセス

本稿で述べるAIコントローラのモデル生成ツールは、このプロセスにおける分析フェーズにて用いるもので、収集フェーズで収集した装置の制御データを元に、異常検知モデルを生成する役割を持つ。

**2.2 製造現場における異常検知モデルの獲得** 製造現場において異常検知を実現するためには、製造装置の異常状態を起こすイベントと測定可能なセンサーデータの因果関係を把握する必要がある。通常は、製造装置の知識やノウハウを踏まえた上で、データサイエンティストが装置の因果関係が得られるまで、様々なデータ処理や解析を人手による試行錯誤を含め繰り返す過程を経るものであり、深い統計処理の知識と、多くの解析のための時間を要する。また、解析手法の使用が不適切なためデータの中に潜む重要な情報を見逃す、対象装置の振る舞いの考慮が不十分なため誤った解析結果を導くなど、データサイエンティストの高度な専門性が解析結果の精度に影響を与える。

一般的に、データから目的とする因果関係を踏まえた異常検知モデルを得るためには、高い専門性を持ったデータサイエンティストが図3に示すKDD (Knowledge Discovery in Databases) <sup>7)</sup> プロセスを何度も繰り返す必要がある。

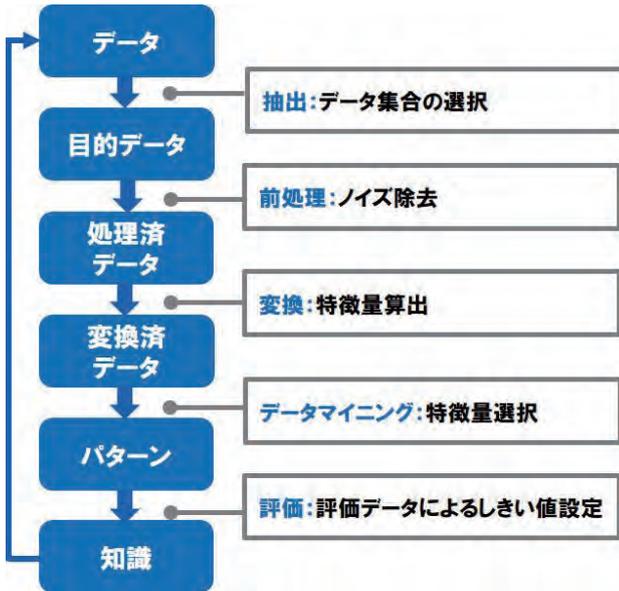


図3 KDDプロセス

AIコントローラでは、装置の保守者も利用者になり得るため、統計処理の知識のない人でも少ない工数で、最良の異常検知モデルを作成できるようにする必要があり、このKDDプロセスを簡単に実行できるようにすることが鍵となる。

モデル生成ツールでは、上述のAIコントローラ活用の異常検知のプロセスにおいて、分析フェーズを担い、事前に収集した制御データから、目的とする異常検知モデルを生成する。この分析フェーズの流れをモデル生成ツールで実現するにあたり、我々は分析の流れをKDDプロセスに即した形とし、それぞれのプロセスを簡単に実行できるように、可能な限り自動化を目指すこととした。

しかしながら、分析フェーズを自動化することで、モデル生成過程が不透明になるため、生成過程の明瞭性を求める製造現場では適しない面がある。我々はこれらの相反するニーズを解決するため、次の課題を解決する。

1. モデル生成ツールによる分析フェーズの自動化
2. 異常検知モデルの生成過程の説明性を上げるUI

この2つの課題を解決するために実現した技術について、次章より述べる。

### 3. 技術内容

**3.1 分析フェーズの自動化** 我々は、分析フェーズにおける属人性の高さを無くすため、異常検知モデル生成ツールによる分析フェーズの各プロセス（データクレンジング、特徴量算出、特徴量選択、しきい値設定）を自動化する。具体的には、次に述べる通りである。

#### A) データクレンジング

収集したデータの中から明らかに分析には活用できないデータ（欠損値、分散ゼロのデータ）を除去することとした。

#### B) 特徴量算出

2.1章で述べたようにAIコントローラでは、6種の特徴量を扱うことができる。異常検知モデル生成ツール上では、収集データの1波形に対してこれらすべての特徴量を自動的に算出する。

#### C) 特徴量選択

変数選択の手法として、決定木<sup>8)</sup>とロジスティック回帰<sup>8)</sup>を活用することで、どの特徴量が正常と異常を判別するのに適しているかを、効率的に探索することを採用した。

図4に特徴量選択の流れを示す。

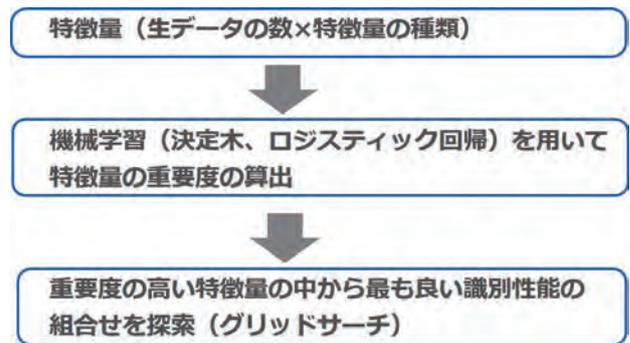


図4 特徴量選択の流れ

まず収集データにつけられた正常・異常のラベルを目的変数、得られたすべての特徴量を説明変数として、決定木およびロジスティック回帰を実行し、重要度（正常・異常を判別するのに適しているかどうかを見るための指標）を算出する。得られたすべての特徴量の中から、この2つの分析手法で算出した重要度の高い特徴量を選出することで、特徴量の絞り込みを行う。

決定木は、木構造を用いて分類や回帰を行う機械学習の手法の一つで、非線形の問題にも適用できるというメリットがある。本手法の決定木における重要度は、各特徴量で判別したときの判別前後のGini係数の減少量であり、値が大きいほど正常・異常を判別する変数として適していることを表す。

ロジスティック回帰は、0から1の間の値を取るロジスティック関数への回帰であり、本手法では1変数ずつアルゴリズムを適用する。また目的変数（＝正常・異常を表すラベル）とのあてはまりの良さを表す尤度を重要度として解釈し、値が大きいほど正常・異常を判別する変数として適していることを表す。1変数ずつ適用しているため説明性が高いというメリットがあるが、非線形の問題には適用できないというデメリットがある。

我々は、これら異なる特徴を持った2つの変数選択の手法を組み合わせることで、偏りのない特徴量の絞り込みを実現した。

次に、AIコントローラの異常検知アルゴリズムとして採用されているI-Forestを適用する中で、実際にどの特徴量の組合せが、高い識別能力を有するか探索する。前の過

程で決定木およびロジスティック回帰にて選択した特徴量の中から、すべての組合せを網羅的に検証し、I-Forestを適用した時の識別能力の高さを計測する。このとき識別能力の高さを測る指標として、AUC (Area Under the Curve) <sup>9)</sup> を採用した。AUCとは、ROC曲線の曲線下面積を表す。ROC曲線とは、しきい値を変化させたときの、偽陽性率 (間違っって正常を異常と判定した確率) と真陽性率 (正しく異常を異常と判定した確率) の関係をプロットしたものである。判別能力の高いモデルとは、この偽陽性率が低い点で、真陽性率が高くなるモデルと表現することができ、この考え方を表した指標がAUCである。本手法では、網羅的な探索からAUCが最も高くなる特徴量の組合せを異常検知モデルの変数として採用することで、自動的な探索を可能にした。

#### D) しきい値設定

しきい値の設定は、正答率 (正常を正常と、異常を異常と正しく判別した割合) が最も高くなる点をしきい値の初期値として設定する。

このようにA) からD) までを収集データに対して実行することで、自動的に識別能力の高い異常検知モデルを生成することを可能とした。

**3.2 モデル生成過程の説明性を上げるUI** 3.1により異常検知モデルの生成過程を自動化することができたが、その自動化により、モデル生成過程の透明性が欠けてしまうという問題が発生する。そのため我々はモデル生成過程の説明性を上げるため、モデル生成ツールに次のような工夫を施した。

ひとつが操作フローにおける工夫で、具体的には、自動的に異常検知モデルを生成する際の最終工程において、一旦、ユーザに生成されたモデルの識別能力、および、選ばれた特徴量の組合せやしきい値について確認を促すようにしたことである。もしユーザが識別能力や選ばれた特徴量に疑問がある場合、異常検知モデル生成の各工程に戻り、処理内容や履歴を確認でき、設定内容に納得できない場合、設定内容を調整できる仕組みを構築した。



図5 モデル生成ツールの画面例

図5は、モデル生成ツールの画面例であるが、異常検知モデル生成の各工程に遷移することができるナビゲーションバー、異常検知モデルの識別能力およびその中身である

特徴量の組合せやしきい値を確認する画面、操作履歴を確認する画面を備えている。このような操作フローおよびUIとすることで、ユーザは、異常検知モデル生成の各工程で、どのような処理がなされたかを確認することができ、また、最終的に生成されたモデルの識別能力と、その中身である特徴量の組合せやしきい値について確認することができるため、モデル生成過程の説明性を担保することができると思う。

もうひとつの工夫が、モデルの識別能力を表す指標を複数個持たせることにより、特徴量の組合せの変更やしきい値の調整をしやすくした点である。

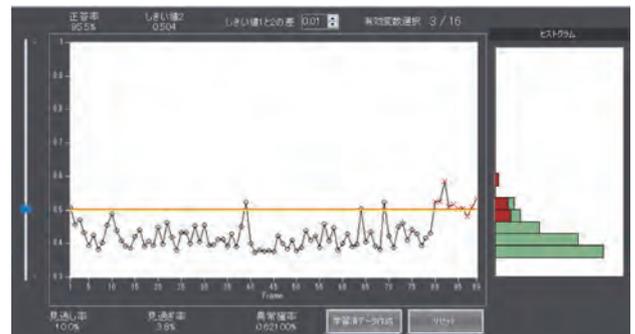


図6 異常検知モデル設定ツール(しきい値の調整画面)

図6は、異常検知モデルの識別能力を確認する画面である。中央のグラフは、異常度スコアとしきい値の関係を示しており、画面周辺部分に異常検知モデルの識別能力として正答率に加えて、見過ぎ率、見逃し率が確認できる。見過ぎ率は、正常データのうち、間違っって異常と判定した割合を示し、見逃し率は、異常データのうち、間違っって正常と判定した割合を示す。グラフの各点において○が正常、×が異常を示しており、この図6の例ではしきい値で、正しく判別できていない点が存在している。

製造現場では、異常を正常と誤検知する見逃しが許されない現場もあれば、正常を異常と誤判定する見過ぎが多くなることで、監視機能の結果を、利用者に信じてもらえない状態になることを懸念する現場も存在する。

図6のように生成された異常検知モデルの結果において、正常と異常の領域が重なり、完全に判別できない場合が起こり得る。そのような場合において、この3つの識別能力の指標を確認し、現場の意見を取り入れながら調整することが可能となる。

## 4. 実験

本章では、弊社製PLCで制御されている横ピロー包装機 (図7) を題材として、実際にモデル生成ツールを活用したモデル生成機能の検証結果について述べる。横ピロー包装とは、樹脂製フィルムなどの包材によって製品を枕状に包装する方式である。横ピロー包装機は一般的に、包材の搬送、製品の搬送、製品の梱包と包材胴部の溶着、包材端の溶着と切断の主に4つの機能から構成されており、各

機能を実現するためのサーボモータが包装機に搭載されている。この横ピロー包装機について、その主要なイベントである異物噛み込みを検証の対象とした。異物噛み込みは、包材の溶着部分に異物が噛み込むことで、密閉が不十分となる異常であり、製品の品質に大きく影響する重大な不具合である。

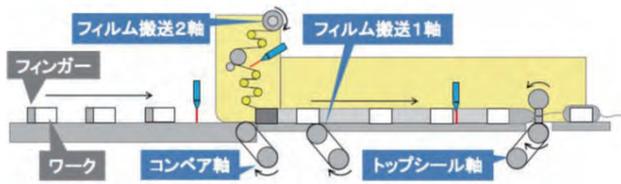


図7 横ピロー包装機

包装機に搭載されているAIコントローラは、4カ所のサーボモータ（コンベア軸、フィルム搬送1軸、2軸、トップシール軸）についてそれぞれトルク・速度・位置の実測値と、3カ所のファイバセンサの論理値を一定周期（2ms）で収集する。毎秒1個の速度でワークを包装した場合、包装1個あたりサンプル数500点のデータが取得できる。図8にサーボモータのトルク・速度の収集データの一部を示す。

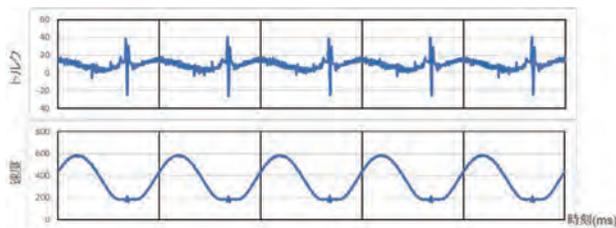


図8 収集データ(トップシール軸トルク・速度)

この収集データを、モデル生成ツールに入力し、異常検知モデルを生成する。まず収集データを元に算出された特徴量データは、合計90次元（収集データ15次元×6種の特徴量）が得られた。

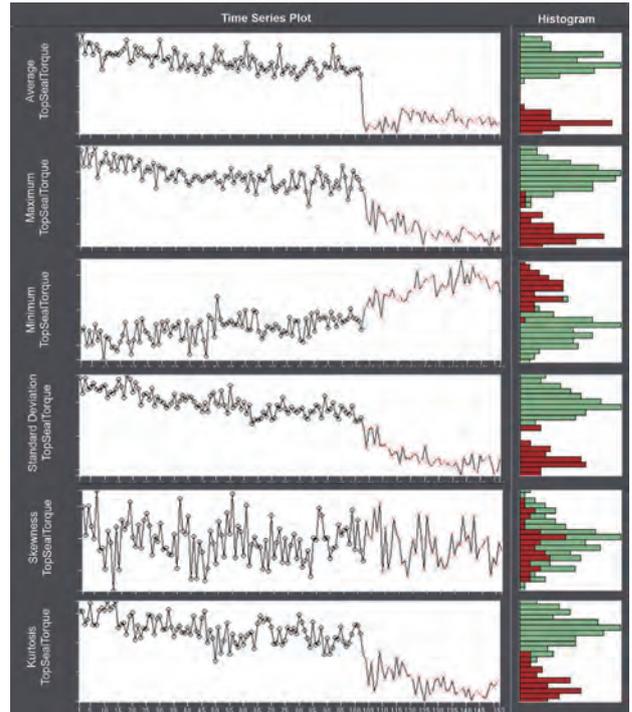


図9 特徴量データ

図9にトップシール軸のトルク実測値から得られた6種の特徴量データについて時系列グラフ（縦軸：特徴量、横軸：時刻）を示す。またグラフ上の各点において○は正常、×は異常を表す。

次に、特徴量算出によって得られた90次元の特徴量データを元に、異常検知に有用な特徴量を選択する。表1にモデル生成ツールにより算出された、各特徴量の重要度（尤度）を示す。決定木、ロジスティック回帰の重要度（尤度）は値が大きいほど、正常・異常を判別するのに適していることを示している。

表1の結果より、トップシール軸トルクの平均値、標準偏差、トップシール軸速度の最大値が最も異常検知に有用な変数であることが確認できる。これは前の図9で示す特徴量のグラフから、トップシール軸トルクの平均値は、正常と異常の領域が分かれていることが読み取れ、そのことからトップシール軸トルクの平均値が異常検知に有用であることが確認できる。

表1 各特徴量の重要度

特徴量名	重要度(尤度)	
	決定木	ロジスティック回帰
トップシール軸トルク-平均値	67.1	0
トップシール軸トルク-標準偏差	67.1	0
トップシール軸速度-最大値	67.1	0
トップシール軸トルク-最大値	63.2	-6.13
トップシール軸トルク-尖度	61.2	-7.79

最後に、重要度の高い特徴量の中から、実際に異常検知アルゴリズム（I-Forest）を適用し、最も異常検知精度の

高い特徴量の組合せと、しきい値の設定を行う。図10に示す画面は、最終的に選ばれた特徴量の組合せ、しきい値の設定結果、および、その時の、異常度スコアの振舞いと判別性能を示している。

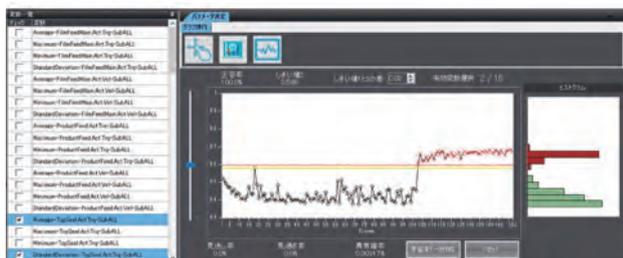


図10 異常度スコア(I-Forest)

画面左側に表示される変数一覧においてチェックのついているものが選択された特徴量を示している。結果、トップシール軸トルクの平均、標準偏差が選択されたことが確認できる。また、画面右側に表示されるグラフ部分は、I-Forestにて算出された異常度スコア（図9同様、各点において○は正常、×は異常である）と、しきい値（赤の直線）を示している。正答率100%、見逃し率0%、見過ぎ率0%となる位置にしきい値を設定できていることがわかり、この結果より、適切にモデル生成ができたことが確認できる。

また最終的に選択された特徴量は、トップシール軸トルクの平均値、標準偏差の2つとなったが、理由は、この2つの特徴量で正答率100%となるため、重要度の高い特徴量のうち、トップシール軸速度の最大値以降の変数は採用されていない。

## 5. むすび

本稿では、AIコントローラに不可欠な異常検知モデルの生成を行うツールについて検討し、異常検知モデル生成の自動化と、モデル生成過程の説明性向上を実現する手法について検討した。

結果、4章の包装機を用いた実験による検証で、収集したデータから、自動的に正答率100%の判別性能を持つ適切な異常検知モデルを生成できることを確認した。

また、弊社社内の技術者が検証用に本異常検知モデル生成ツールを活用しているが、異常検知モデル生成の性能に加え、ツールとしての操作性においても、生成過程の履歴が追える点や、しきい値や選択特徴量の調整時のUIについて好評を得ている。

また、本手法において、決定木とロジスティック回帰を用いて異常検知モデル生成における特徴量選択を実現したが、得られたデータのみから導出した結果であるため、実際の装置の因果関係として、選ばれた特徴量よりも相応しい特徴量が存在する可能性がある。データのみを頼りに異常検知モデル生成をしている以上、実際の装置の因果関係を表すことは、現状困難である。今後は、データ以外の現場

情報等の活用により、より現場の知見に沿った因果関係を導き出し、よりよい異常検知モデルの生成を実現したいと考える。

## 参考文献

- 1) オムロン株式会社. マシン制御とAIをリアルタイムに融合「AI搭載マシンオートメーションコントローラ」を開発 <http://www.omron.co.jp/press/2017/04/c0425.html>, (参照 2018/11/01)
- 2) 見置 孝昌, 出来 仁太郎. AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (1) 保全担当者が使用できるAIシステムの実現とマシンオートメーションコントローラへのAI機能の搭載
- 3) 太田 政則, 西山 佳秀. AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発(2) 制御に同期したデータ収集と時系列データベースの実現
- 4) Fei Tony Liu, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou. Isolation-based anomaly detection. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD) ,6 (1) :3, 2012.
- 5) 鶴田 浩輔, 峯本 俊文, 広橋 佑紀. マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1) 装置制御用データを利用した生産ラインの異常検知手法について. OMRON TECHNICS 2018 vol.50 no.1 p.6-11
- 6) 阿部 泰明, 上山 勇樹, 阪谷 信之, 藤井 高史. マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (2) 異常検知コントローラプロトタイプとモデル開発における実証例について
- 7) Fayyad, Usama; Piatetsky-Shapiro, Gregory; Smyth, Padhraic. "From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases" (1996) .
- 8) 平井有三. 初めてのパターン認識, 森北出版
- 9) 井手剛, 杉山将. 異常検知と変化検知, 講談社

## 執筆者紹介



宮本 幸太  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
技術開発本部  
第1技術部  
専門：ソフトウェア工学



川ノ上 真輔  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
技術開発本部  
第1技術部  
専門：ソフトウェア工学、機械工学

# 制御モデルパラメータを用いた温度管理装置における状態監視機能の開発

津端 創・山田 隆章

製造業では、少子高齢化などの環境変化により保全を担う技術者が不足している。また、設備の老朽化による突発故障の発生頻度が増えており、生産の稼働率が低下している。このモノづくりの課題を解決するためには、設備の劣化状態を把握して、故障する前に計画的に保全を行う“状態基準保全”に移行していくことが効果的と考えられている。一方で、この状態基準保全を実現するためには、管理基準とすべき状態を特定し、その状態を適正な精度で計測する必要があり、容易には取り組めない。本稿が対象としている温度管理装置においても同様の状況であり、ヒータや温度センサなどの保全は故障後の交換がほとんどである。

著者らは、温度管理装置の状態基準保全を可能とするため、制御工学の分野で一般的に使用される伝達関数を活用して、装置の特徴をベクトル化して扱うことで、保全が必要な箇所、および保全が必要となる時期の目途付けを可能とした。本稿では、この状態基準保全を可能とする状態監視機能の概要と、それを実現するための要素技術について述べる。

## Development of Condition Monitoring Function of Temperature Control Device Using Control Model Parameters

*Hajime Tsubata and Takaaki Yamada*

In the manufacturing industry, there is lack of engineers who are responsible for maintenance, due to environmental changes such as a declining birth rate and an aging population. In addition, the existing equipment has become decrepit, so the frequency of occurrence of unexpected failures has increased, and the operating rate of production has decreased. So as to solve these monozukuri (manufacturing) issues, it seems effective to grasp a status of deterioration of equipment, and shift the maintenance to Condition-based maintenance (CBM) that maintains systematically before failure. To conduct CBM, it is necessary to identify optimal condition as a control standard, and measure its status in appropriate accuracy, but it not easy to do it. Also, the temperature control device covered by this paper is in the same situation of maintenance that the equipment is mostly replaced after failure, including heaters, temperature sensors, etc.

The authors have enabled CBM of temperature control device to decide which and when maintenance is need by using transfer function to vectorize features of equipment. The transfer function is generally used in the field of control engineering. In this paper, we describe the outline of condition monitoring functions that realize CBM, and element technologies to enable it.

### 1. まえがき

製造業では、少子高齢化や学生の理系離れにより、保全を担う技術者の確保が困難になってきている。また、製造装置の老朽化により突発停止の発生頻度が増加し、生産の稼働率が低下するという経営課題が顕在化している。このようなモノづくりの現場の課題を解決するためには、設備の劣化状態を把握して、故障する前に計画的に保全を行う“状態基準保全<sup>1)</sup>”へ移行することが必要となる。しかしな

がら、保全を行うべき現象（以下、状態変化）を把握するための特徴量の抽出や特定が難しかったり、製造設備状態を計測するために、多くのセンシング機器を取り付けることが求められ、多額の設備投資が必要になることが製造業にとっての問題となっている。

製造工程の中で一般的に使用されている成形機、包装機といった温度管理が必要な装置（以下、温度管理装置）においても、状態基準保全が適用できれば、保全業務の効率化が期待できる。著者らは、温度管理装置に対する状態基

連絡先：津端 創 hajime.tsubata@omron.com

準保全の特微量として、システム同定<sup>2)</sup>によって得られるモデルパラメータ（以下、制御モデルパラメータ）の適用を検討した。

本稿では、制御モデルパラメータを活用して状態基準保全を実現した状態監視機能について説明する。

第2章において、検出したい状態変化のメカニズム、および状態基準保全の取り組みを実現する上での問題点について示す。第3章では、目指すべき状態基準保全の概要、および実現するために必要な要素技術について示す。第4章では、要素技術を活用した状態基準保全の実現方法を示す。さらに、第5章にて、検証実験の結果を示す。

## 2. 課題

**2.1 温度管理装置における状態変化** 図1に温度管理装置の構成を示す。温度管理装置は被加熱物を設定した温度にするために、温度センサで被加熱物の温度を計測し、この温度が一定になるように温度調節器が操作量を調整してヒータの熱量を制御する構成になっている。被加熱物は、成型機のシリンダ、包装機のヒートバーなどの熱伝導物、および製品に相当する。

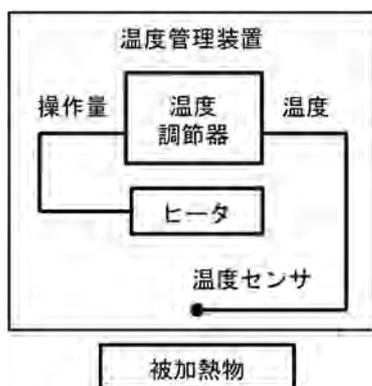


図1 温度管理装置の構成

このような温度管理装置において発生する状態変化の例を表1に示す。状態変化は3つに分類することができる。状態変化分類Aは、温度管理装置に取り付けられているヒータ、温度センサなどの機器において、時間の経過によって発生する変化である。状態変化分類Bは、ヒータ、温度センサ、あるいは温度に影響を及ぼす機器が、定期メンテナンス時のヒューマンエラーなどによって取り付け状態が変わってしまうことで発生する変化である。状態変化分類Cは、被加熱物が、湿気を含んでいた、成分が変わっていたり、大きさが変わっている等によって発生する変化である。

表1 温度管理装置における状態変化の例

状態変化分類	状態変化名
A	ヒータ容量低下
	温度センサ起電力低下
B	温度センサ位置ズレ
	断熱カバー緩み
C	材料変化

以降では、表1に示す状態変化の中でも特に発生頻度が高いヒータ容量低下、温度センサ位置ズレを例として、各々の発生メカニズムを2.2節、2.3節に示す。2.4節では状態基準保全を実現する上での課題について説明する。

**2.2 ヒータ容量低下** ヒータ容量低下は、ヒータ素線の酸化が原因であり、ヒータとしての加熱能力が低下する現象である。正常時の制御波形（温度および操作量）と、ヒータ容量低下が発生した場合の制御波形を図2に示す。温度波形で比較すると、加熱能力が低下していることによって温度の上昇カーブが緩慢になる。また、操作量波形で比較すると、ヒータ容量低下が発生した場合は低下した加熱能力を補うために操作量が増加する。

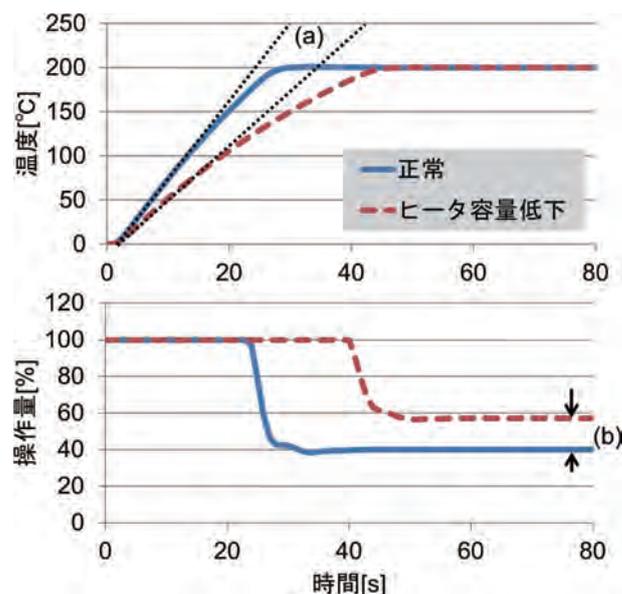


図2 ヒータ容量低下時の制御波形

この現象を検出するための特微量としては、以下の3種類が考えられる。

- 1) ヒータの酸化によって発生する抵抗値の変化
- 2) 図2の (a) で示した温度上昇の傾き
- 3) 図2の (b) で示した操作量の増加

**2.3 温度センサ位置ズレ** 温度センサ位置ズレは、ヒューマンエラーによって発生する現象である。図3のa)は、正常な場合の被加熱物の温度分布を示している。正常な場合は、図3のxの位置に温度センサがあるため、被加熱物のx'の位置が目標の温度(T)となり、x'と離れた位置では

ヒータと被加熱物の位置関係等によって温度差が発生していることを表している。

図3のb)は温度センサ位置ズレが発生している状態を表している。温度センサの位置がxの位置ではなく、yの位置に取り付けられている。このことにより、被加熱物ではy'の位置が目標の温度(T)となるように制御が行われる。ヒータと被加熱物との位置関係が変化していないことから、被加熱物上で発生する温度差は、正常場合と同じになるため図3のb)で示した分布となり、正常時と比べると全体的に温度が上昇してしまう。

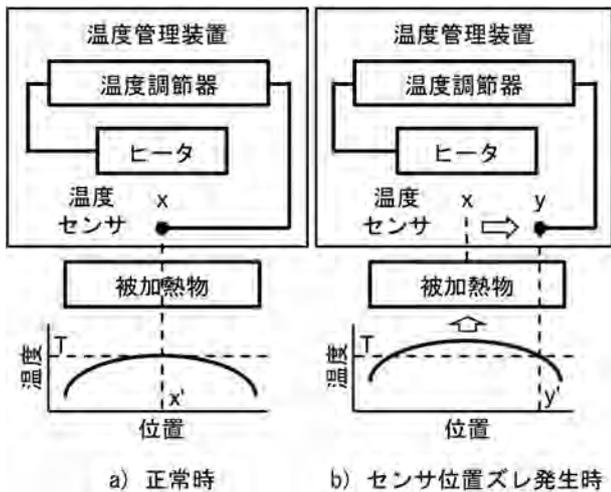


図3 温度センサ位置ズレによる温度分布の変化

正常時の制御波形と、温度センサ位置ズレが発生した場合の制御波形を図4に示す。温度センサ位置ズレが発生すると、ヒータと温度センサの位置が離れるため、温度波形で比較すると、時間遅れが発生する。また、先に説明した通りに被加熱物の温度が正常よりも高くなることから、操作量波形で比較すると操作量が増加することになる。

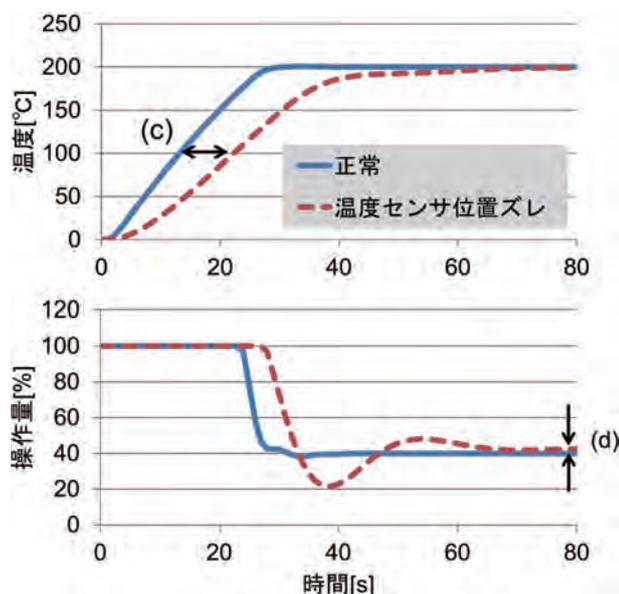


図4 温度センサ位置ズレ時の制御波形

この現象を検出するための特徴量としては、以下の3種類が考えられる。

- 1) 温度センサの取り付け位置
- 2) 図4の(c)で示した温度上昇カーブの遅れ
- 3) 図4の(d)で示した操作量の増加

**2.4 状態基準保全を実現する上での課題** 表1に示したような状態変化について、その発生メカニズムの解明ができれば、計測すべき特徴量を決定することができる。しかし、例えば2.3節で示した温度センサ位置ズレの場合は、初期段階では製品が正常時よりも僅かに変色しているといった製造不良として発見されるが、温度調節器の温度表示には変化が無く、温度センサの取り付け位置は目視できないといった状況下で、温度センサの位置がずれていることの特定に至るまでには手間を要してしまう。この原因特定の難しさが、状態基準保全への移行が進まない1つの背景となっている。また、保全工数が低減できない要因の1つとして、異常や故障の予兆を捉えることができたとしても、複数ある状態変化のいずれに起因しているのかを特定し、その変化の進行度合いを判定して最適な保全タイミングを決めるには至っていないという現状がある。

このような状況から、状態基準保全への移行を容易にするために解決すべき課題として以下の3点を設定した。

- 1) 装置の構成に依存しない共通性の高い特徴量の選択
- 2) 複数存在する状態変化から、どういった種類の状態変化が発生しているのかを見分けること
- 3) 見つけた状態変化の進行度合いを示すこと

### 3. 状態監視機能の開発

**3.1 特徴量の選定** 特徴量として、2.2節の抵抗値、2.3節の温度センサ位置を計測する方式が考えられるが、装置毎に専用の計測器を取り付ける必要がある。また、図2、図4で示したような制御波形を視覚的に捉える方式も考えられるが、様々な装置、様々なタイミングで動作する制御波形が対象であることを考慮すると共通的な機能としての実現は困難である。そこで、著者らは、温度管理装置の温度と操作量の関係は、制御系の入出力に相当し、伝達関数<sup>3)</sup>を用いて表すことができることに着目して、化学プラントなどでの活用が提案されている<sup>4)</sup> 制御モデルパラメータを特徴量として活用できると考えた。制御モデルパラメータは、状態変化に応じて変化し、その変化は状態変化の種類に対して再現性があるため、どのような装置に対しても共通して利用できる。

温度と操作量の関係は、伝達関数を用いて式1のように表すことができる。ここで、PV、MV、G、sはそれぞれ温度、操作量、伝達関数、ラプラス演算子を表している。

$$PV(s) = G(s)MV(s) \quad (1)$$

伝達関数Gは、制御モデルパラメータであるa、b(以下、特徴量a、特徴量b)を含み、一般的に式2のように表す。

$$G(s) = \frac{b}{(1+as)} \quad (2)$$

特徴量a、bは、温度管理装置において、表2のような特徴を表現することができる。

表2 制御モデルパラメータの特徴

制御モデルパラメータ	表現できる特徴
特徴量a	温度の応答速度
特徴量b	昇温能力

制御モデルパラメータの算出には、検出精度を高めるために装置動作に同期させて波形を収集することが必要であるが、制御波形の全体を入力情報として扱えるため、異なる温度管理装置から収集した視覚的に異なる制御波形であっても、必要な部分を切り出すなどの作業を必要としない。このため、制御モデルパラメータを特徴量として利用する方式は共通性が高い。尚、伝達関数(式2)は、どの程度の近似精度を求めるかによって、組み込む制御モデルパラメータの種類を選択することが可能であるため、対象とする温度管理装置の特性および検出したい状態変化の種類に合わせて最適化できる。本稿においては、分子を定数式、分母を1次式として記述する。

**3.2 状態変化の見分け** 状態基準保全の実現による保全業務の効率化のため、発生している状態変化の種類を特定できることが求められている。特徴量a、bには、表2に示した熱の伝達特性が現れるため、状態変化に応じた特性の変化を検出できる。状態変化の種類によって、反応する特徴量の組み合わせ、数値の変化方向、数値の大きさが異なるため、それらの変化を判定することで種類を見分けることができる。

正常な状態や、各状態変化が発生した状態の特徴量を図5に示す。正常とは、適切なメンテナンス直後など、状態変化が進行しておらず、良品を生産できる状態のことである。特徴量は、状態変化が進行するにつれて、正常を示す位置から、各状態変化を示す位置に向かって変化する。

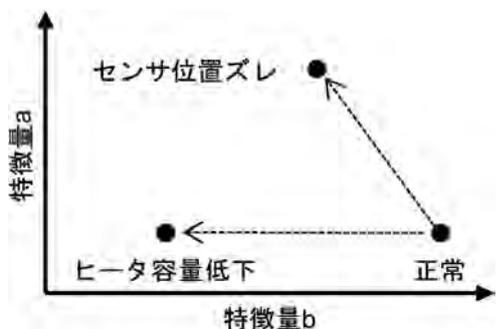


図5 状態変化時の特徴量の変化

状態変化の種類を見分けるためには、図5において正常と異常、さらに異常同士を分類すればよいので、例えば以下に示すような一般的な分類手法が利用できる。

- 1) コサイン類似度<sup>5)</sup>
- 2) サポートベクターマシン<sup>6)</sup>
- 3) k近傍法<sup>6)</sup>

コサイン類似度は、ベクトル同士の方向の近さ(角度)を数値化する指標である。特徴量が正常な状態から外れていく変化をベクトル化し、図6に示す予め登録しておく異常発生時の特徴量のベクトル(以下、異常発生ベクトル)に対して、現在の特徴量ベクトル(以下、現状ベクトル)の近さ(角度)を評価することで、どの状態変化が発生しているのかを見分ける方式である。

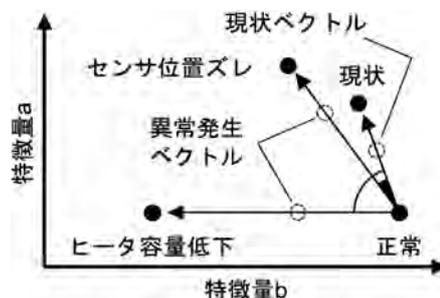


図6 コサイン類似度を用いた類似度の評価

サポートベクターマシンは、最適化計算により図7に示すような境界線を引き、どの領域に含まれているかを見分ける方式である。

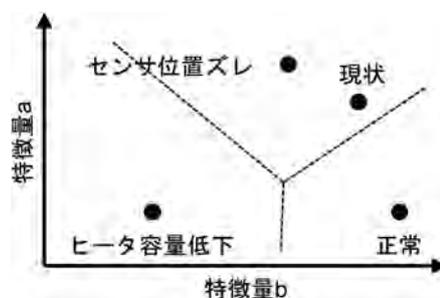


図7 サポートベクターマシンを用いた類似度の評価

k近傍法は、図8に示すように、現在位置に対して距離によって評価する方式である。

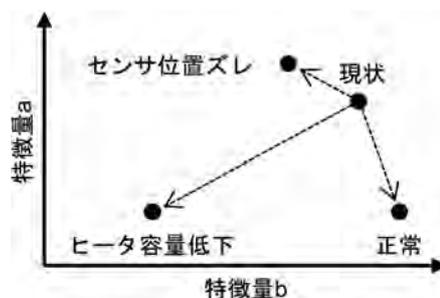


図8 k近傍法を用いた類似度の評価

**3.3 状態変化の進行度把握** 状態基準保全を実現するためには、3.2節で示した分類手法を用いて状態変化を見分けた上、さらに状態変化の進行度を示し、故障に至る以前、あるいは製品の品質が低下する以前のタイミングで保全を行うようにする必要がある。

3.2節で示した分類手法の中で、コサイン類似度については特徴量の変化をベクトルで表現しているため、進行度もベクトルの大きさにより数値化できる。数値化は、図9で示すように、あらかじめ登録している異常発生ベクトルの大きさに対する、現状ベクトルの写像の大きさの比 (q/p) で求めることができる。

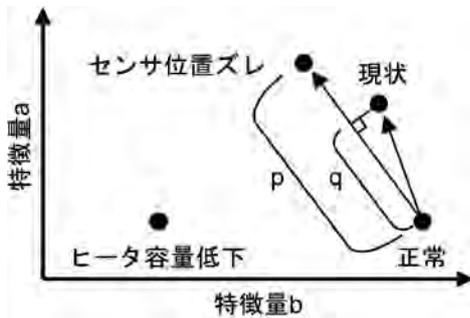


図9 ベクトルを用いた進行度の表現

## 4. 状態基準保全の実現

状態基準保全の実現は、3.2節で示したいずれの方式でも可能であるが、保全を担当する技術者が使いこなせる技術にするにはベクトルを使った方式が適していると考え、状態変化の見分けにコサイン類似度、進行度の表現にベクトルの写像を用いることにした。保全の実施手順を以下に示す。後述の計算式を説明するために、異常発生ベクトルをA、現状ベクトルをBと定義する。

### Step1 異常発生ベクトルの登録

図6で示した正常位置、および異常位置について特徴量を算出し登録する。制御波形から特徴量を算出する方式には、システム同定法における予測誤差法<sup>2)</sup>などを用いる。

### Step2 現状ベクトルの監視

温度管理装置を稼働する都度で現状位置の特徴量を計測する。

### Step3 状態変化を見分ける

異常発生ベクトル、現状ベクトルを算出して、下式で類似度を求める。下式で求まる類似度は、類似性が高いと100%に近づき、類似性が低いと0%に近づく。

$$\text{類似度 (\%)} = \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| |\vec{B}|} \times 100 \quad (3)$$

### Step4 進行度の算出

類似度が高い (100%付近) 場合は、下式で進行度を求

める。下式で求まる進行度は、あらかじめ登録しておいた異常発生ベクトルと同じ大きさの場合に100%が求まり、小さければ0%に近づき、大きければ100%を超える値が求まる。

$$\text{進行度 (\%)} = \frac{|\vec{B}|}{|\vec{A}|} \times \text{類似度} \quad (4)$$

### Step5 保全計画の立案実行

類似性が高いとした状態変化、および進行度を目安として、保全の計画を立案し実行する。

以上が、本稿で実現した状態基準保全を実施する基本的な手順となる。尚、上記手順は、異常発生ベクトルが複数存在していても独立して実行できるので、表1に示したような複数の状態変化を同時に監視することができる。また、本方式の特徴により、以下のような派生効果が期待できる。

#### (1) 原因推定

温度管理装置内で、原因の分からない異常や故障が発生した場合でも、特徴量の変化を捉えることで、状態変化の発生していることが分かる。この特徴量と状態変化の相関関係を利用し、温度管理装置内でどのような現象が発生しているかについて推定ができ、原因特定にかかる期間を短縮できる可能性がある。

#### (2) 周辺機器の監視

温度に影響を与える機器であれば、その異常や故障が特徴量に現れることが見込まれるため、例えば熱処理時に使用されるガスや薬液といった触媒の変化についても監視できる可能性がある。

#### (3) 効果検証が容易

温度と操作量のデータが収集できれば、PCと表計算ソフトで効果の検証が可能である。

## 5. 検証結果

**5.1 検証実験の内容** この検証実験は、複数の状態変化に対する異常発生ベクトルを登録した状態から、進行度の異なる状態変化を発生させた場合に、状態変化を見分けることができ、進行度を適切に求めることができることを検証する。検証実験は、複数の状態変化を発生できる検証用の温度管理装置 (図10) を使用して実施する。被加熱物 (製品) を模擬したアルミニウムのプレートに130WのカートリッジヒータとK型熱電対の温度センサを固定した構成になっている。温度と操作量の時系列データは、温度調節器の通信機能を利用してPCに取り込む。PC上では、温度調節器から取得した温度と操作量の時系列データに対して、4章で説明した手順を実行させることで特徴量、類似度、および進行度を算出できる環境を構築している。計測は、実験のばらつきを考慮して、3回ずつ実施し、平均値を採用する。

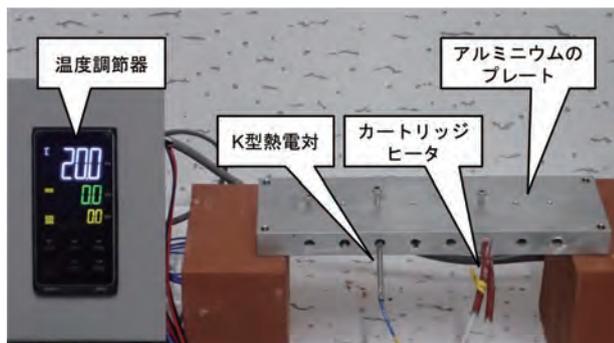


図10 実験装置の外観

検証実験は、2章で説明したヒータ容量低下と温度センサ位置ズレの状態変化を発生させて実施した。予め両者の異常発生ベクトル（以下、ヒータ容量低下ベクトル、温度センサ位置ズレベクトル）を登録しておく。期待する実験結果は、ヒータ容量低下を発生させた場合においては、ヒータ容量低下ベクトルに対する類似度と進行度が反応し、温度センサ位置ズレベクトルに対する類似度と進行度は反応しないことである。また、温度センサ位置ズレを発生させた場合は、その逆になることが期待する実験結果である。予め登録する異常発生ベクトルの発生条件は以下の通りである。

- ・ヒータ容量低下ベクトル：
  - ヒータ印加電圧10%低下（ヒータ容量19%低下相当）
- ・温度センサ位置ズレベクトル：
  - 温度センサを1穴分遠い方向に移動

**5.2 ヒータ容量低下の実験結果** ヒータ容量低下の検証実験は、ヒータ印加電圧を5%、10%、15%の3通りに低下させた条件で実施した。各条件の実験で得られた制御波形を図11に示す。ヒータ印加電圧の低下によって、2.2節で説明した通り、温度上昇の傾きが低下し、操作量が増加している。

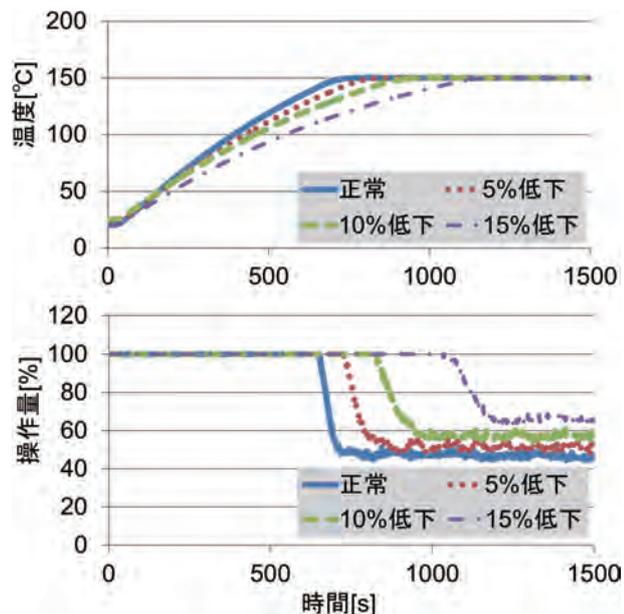


図11 ヒータ容量低下実験時の制御波形

実験で得られた制御波形を用いて、制御モデルパラメータを算出した結果を表3に示す。状態変化が昇温能力を表現する特徴量bに表れている。

表3 ヒータ容量低下時の実験結果

印加電圧	制御モデルパラメータ	
	特徴量a	特徴量b
正常	1058	2.71
5%低下	1053	2.48
10%低下	1024	2.16
15%低下	1018	1.95

表3の結果を用いて算出したヒータ容量低下ベクトルに対する類似度と進行度を表4の左側に、温度センサ位置ズレベクトルに対する類似度と進行度を右側に示す。類似度と進行度の数値は、異常ベクトルと一致した時に100%となる。

類似度については、ヒータ容量低下ベクトルによる判定で100%付近の値を示し、温度センサ位置ズレベクトルによる判定で0%付近の値を示していることから、状態変化の種類が正しく判定できていることがわかる。また、進行度については、類似度が高いヒータ容量低下ベクトルの判定結果のみを参照し、印加電圧の低下度合いが進行度の変化として捉えられていることがわかる。

表4 ヒータ容量低下時の実験結果

印加電圧	ヒータ容量低下ベクトルによる判定		温度センサ位置ズレベクトルによる判定	
	類似度	進行度	類似度	進行度
5%低下	99.8%	43.1%	0.0%	—
10%低下	100.0%	103.5%	0.0%	—
15%低下	100.0%	142.5%	0.0%	—

**5.3 温度センサ位置ズレの実験結果** 温度センサ位置ズレの検証実験は、温度センサの位置を1穴分、2穴分の2通りにずらした条件で実施した。各条件の実験で得られた制御波形を図12に示す。温度センサ取り付けミスによって、2.3節で説明した通り、温度上昇カーブが遅れている。

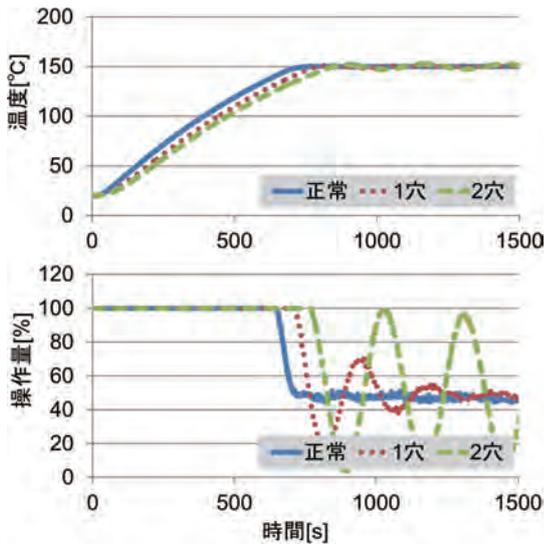


図12 温度センサ位置ズレ実験時の制御波形

次に、得られた制御波形を用いて、制御モデルパラメータを算出した結果を表5に示す。状態変化が温度の応答速度を表現する特徴量aに表れている。

表5 温度センサ位置ズレ時の実験結果

ずらし量	制御モデルパラメータ	
	特徴量a	特徴量b
正常	1058	2.71
1穴	1197	2.72
2穴	1468	2.71

表5の結果を用いて算出したヒータ容量低下ベクトルに対する類似度と進行度を表6の左側に、温度センサ位置ズレベクトルに対する類似度と進行度を右側に示す。

類似度については、5.2節の実験結果と逆になり、ヒータ容量低下ベクトルによる判定で0%付近の値を示し、温度センサ位置ズレベクトルによる判定で100%付近の値を示していることから、状態変化の種類が正しく判定できていることがわかる。また、進行度については、類似度が高い温度センサ位置ズレベクトルの判定結果のみを参照し、位置をずらした度合いが進行度の変化として捉えられていることがわかる。

表6 温度センサ位置ズレ時の実験結果

ずらし量	ヒータ容量低下ベクトルによる判定		温度センサ位置ズレベクトルによる判定	
	類似度	進行度	類似度	進行度
1穴	0.0%	—	99.7%	106.4%
2穴	0.0%	—	99.9%	313.6%

## 6. むすび

本稿では、温度管理装置における状態基準保全の実現のため、制御モデルパラメータを特徴量として活用した状態監視機能の開発と、検証実験の結果について示した。

特徴量をベクトル化することで、発生している状態変化の種類を見分けることができ、さらに変化の進行度を知ることができるようになった。計測のために特別な機器を購入する必要もなく、容易に取り組みを始めることを可能にした機能である。

今後は、制御モデルパラメータ以外の特徴量と組み合わせることによって、検出精度や感度の向上を目指す予定である。最後に、今回の開発および本論文執筆にあたり多大なご協力をいただいた方々に、深く感謝を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 滝澤恒夫, 金澤忠信, 予防・保全システムにおけるサステナビリティ. 電気設備学会誌, 2014, Vol. 34, No. 6, p.385-388.
- 2) 足立修一, システム同定の基礎. 東京電機大学出版局, 2009, p.245.
- 3) 足立修一, 制御工学の基礎. 東京電機大学出版局, 2016, p.284.
- 4) 松島洋輔, プラントの故障予測方法. 特許第4520819号, 2010.
- 5) 奥野陽, グラム・ニュービッド, 萩原正人, 自然言語処理の基本と技術. 翔泳社, 2016, p.239.
- 6) 平井有三, はじめてのパターン認識. 森北出版, 2012, p.219.

## 執筆者紹介



津端 創 Hajime Tsubata

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
商品事業本部 コンポ事業部  
第一開発部  
専門：制御工学  
所属学会：電気学会



山田 隆章 Takaaki Yamada

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
商品事業本部 コンポ事業部  
第一開発部  
専門：制御工学  
所属学会：計測自動制御学会

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# PLCopen の Safety ファンクションブロックを活用した安全プログラム自動化の実現

菅沼 拓・藤村 亮輔・久保 寛子・田熊 伸行

近年、製造業の現場においては、ニーズ多様化の時代に求められる「多品種変量」への対応が必要となっている。これに伴い、安全制御も柔軟に製造ラインの段取り替えが可能な安全システムの構築が必要であり、その解決策として、安全コントローラの導入が挙げられる。

標準化団体PLCopenによるSafetyファンクションブロック仕様の定義により、安全コントローラの導入障壁は徐々に下がってきてはいるものの、PLCopenのSafetyファンクションブロック仕様の柔軟性の高さゆえに、安全プログラムの未熟練者がこれらのファンクションブロックを使用することは容易ではない。また、将来の改良、拡張を考慮した安全システム構築に向けた、拡張性・可読性の高い安全プログラム作成も困難であるため、安全コントローラの導入障壁は依然高い状態であると言える。

そこで上記課題を解決するために安全プログラムの自動化を実現した。本稿では、オートメーションソフトウェア Sysmac Studioにて実現した安全プログラム自動化の技術成果とその効果について報告する。

その結果、Sysmac Studioで実現された「自動プログラミング」機能により、装置立ち上げ工数の短縮効果があることを確認した。

## New automatic safety programming using safety function blocks of PLCopen

*Hiromu Suganuma, Ryosuke Fujimura, Hiroko Kubo, Nobuyuki Takuma*

In recent years, manufacturing companies need to meet the request of “multi-variety variable-volume production” in the era of diversified needs. Along with that, they also need to develop safety systems that can be flexibly modified according to the changeover of production lines. As a solution for that, safety controllers are often introduced.

Since PLCopen, the standardizing association defined the specification of the safety function blocks, introduction of safety controllers have gradually become less challenging. However, it is still not easy for unskilled developers in safety programs to use these function blocks, because the specification defined by PLCopen is highly flexible. Since it is also difficult to create a safety program with high scalability and readability considering future improvements and extensions, it can be said that the barriers to introduce safety controllers are still high.

To offer solutions for those issues, we realized automatic safety programming on the Omron’s programming software Sysmac Studio. In this paper, we describe technical achievements and effects of automatic safety programming.

We confirmed that the “automatic programming” function of the Sysmac Studio can shorten development period of safety systems.

### 1. まえがき

**1.1 安全コントローラ導入の必要性** 近年、日本の製造業は、「人材不足の深刻化」という大きな環境変化に直面している。経済産業省が発行しているものづくり白書

2018<sup>1)</sup>によると、94%の企業が人材確保に課題があり、3割超えの企業においてはビジネスにも影響があると回答している。その中で、特に確保に課題のある人材は「技能人材」であり、工場とその制御の変化に原因があると考えられる。

モノが不足していた時代の「少品種大量」工場から、ニーズが多様化する時代の「多品種変量」工場への変化対応により、製造ラインの柔軟な段取り替えが可能なシステム構築と保守が必要となっている。

安全制御においても同様に、柔軟に段取り替えが可能な安全システムの構築が必要になるが、従来のハードワイヤリングや安全リレーユニットでは配線の入替えや拡張のための変更にかかる時間がかかり、生産リードタイムを維持するための柔軟な安全システムを実現することができない。この対応策として安全コントローラ導入の必要性が高まっている。

安全コントローラとは、国際安全規格の認証を取得した安全制御のためのコントローラであり、安全回路のソフトウェア化や安全ネットワークによる省配線により、柔軟な安全システムを実現することを可能としている。

**1.2 安全コントローラの現状** 過去10年余り、IEC 61508<sup>2)</sup>を代表とする国際安全規格に対応した安全コントローラが各社から発売されている。また、「PLCアプリケーション開発の効率化」を目的とした標準化団体であるPLCopenは、トレーニングコストの低減、プログラム再利用性の向上、安全規格認証コストの低減などの効果を狙い、プログラムに関する共通定義を推進している。

その結果、安全プログラムで使用するファンクションブロックやデータ型が共通化され、プログラム作成のハードルが下がり、安全コントローラの導入障壁は低くなってきている。

オムロンもPLCopenのSafetyファンクションブロックに対応した安全コントローラNX-SLシリーズとオートメーションソフトウェアSysmac Studioをリリースし、ニーズ多様化に対応できる安全システムを提供している。

## 2. 課題と対策

**2.1 PLCopenのSafetyファンクションブロックの課題** PLCopenのSafetyファンクションブロック仕様は、複雑な安全システムであっても柔軟に対応できるように定義されている。そのため、安全プログラムの設計者は、これらのファンクションブロックに定義されている多くのパラメータの中から、必要なパラメータを選択し、適切な値を設定する必要がある。例えば、インターロック用のリセット信号だけで3つのパラメータが存在し、それぞれに設定が必要となる。

加えて、PLCopenのSafetyファンクションブロックで定義されている安全入力用のファンクションブロックは、国際安全規格ISO13849-1<sup>3)</sup>で要求されているパルスリセット信号OFF→ON→OFFによるスタート/リスタートインターロックをサポートしていない。そのため、複数のファンクションブロックの組み合わせと適切なパラメータの設定により、規格要求に対応したプログラムを設計者自らが作成する必要がある。

上記のとおり、PLCopenのSafetyファンクションブロックを使用した安全プログラムの作成には国際安全規格に基づいた安全プログラムの知識と経験が必要であると言える。

**2.2 安全プログラムの課題** また、進化する「多品種変量」工場への変化対応として、将来の改良、拡張に耐える安全システムの構築を実現する必要がある。例えば拡張のためにI/O点数を増やす場合、それに伴うプログラムの追加量が必要以上に多くなったり、また追加プログラムによってプログラムが複雑化し、可読性が低くなってしまったりすることがある。こういった事態を避けるために、あらかじめI/O点数の増減を考慮した拡張性と可読性の高い安全プログラムを実現することが、変化対応への課題であるといえる。

**2.3 対策** 前述した課題を解決すべく、安全コントローラのプログラム設計を行うオートメーションソフトウェアSysmac Studioにおいて、プログラミングレスの簡単設定のみで自動的にプログラムを生成する機能を実現した。

従来、パルスリセット信号によるスタート/リスタートインターロックの実現や、I/O点数の増減に対応可能な拡張性と可読性の高いプログラムの作成には熟練設計者の技能が必要であり、プログラミングツールによる安全プログラム生成の自動化は困難であった。

今回、オートメーションソフトウェアSysmac Studioに安全プログラムのノウハウを自動プログラミング機能として組み込むことで、設計者が設定する項目を最小限に抑え、また入力処理部、出力処理部、論理演算部の3つに分割された拡張性と可読性の高い安全プログラムを容易に作成できるようになり、未熟練設計者であっても熟練設計者と同等の安全プログラムの作成を可能とする。

## 3. 自動プログラミング機能の概要

自動プログラミング機能は、表1に示す設定項目をインプットすることで、自動的にプログラムを生成する機能である。

表1 自動プログラミングの設定項目

設定項目	内容
基本設定	安全プログラムのリセット信号として使用する変数を指定する。
入力設定	安全入力に割り付けられた変数とリセット種別、および使用するセーフティファンクションブロックの名称を指定する。
出力設定	安全出力に割り付けられた変数と、外部機器モニタリング (EDM) 使用の有無を指定する。
期待値設定	各入力変数に対する出力変数の期待値 (0または1) をマトリックスで設定する。

自動プログラミング機能で生成されるプログラムは、図1のようになる。

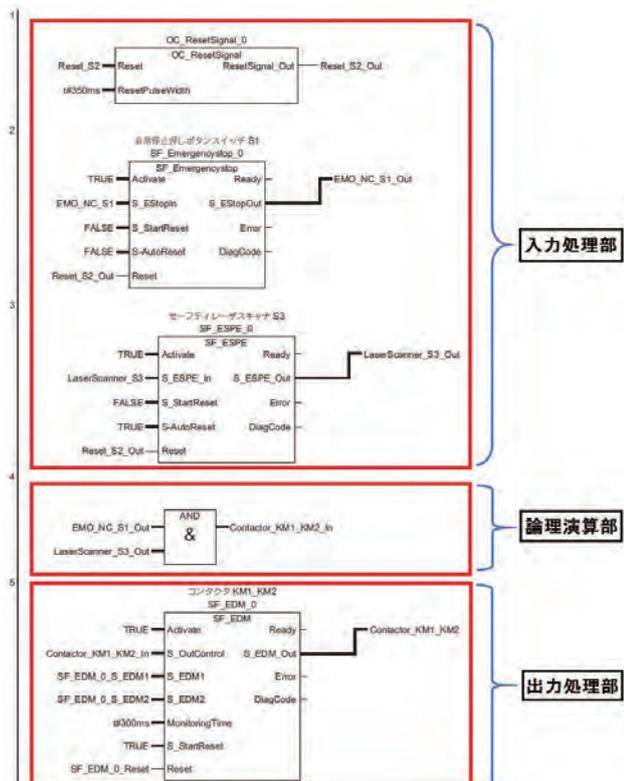


図1 自動プログラミングで生成されるプログラム

生成されるプログラムは、安全スイッチや安全センサからの入力を処理する「入力処理部」、セーフティリレーへの出力を処理する「出力処理部」、それらを接続する「論理演算部」の3つのブロックからなり、これら3つのブロックは内部変数を介して接続される。ここで、内部変数とは、プログラム構成単位内のみで使用されるローカル変数のことである。

次章では、自動プログラミング機能の実現方法について、ブロックごとに順を追って説明する。

#### 4. 自動プログラミング機能の実現方法

**4.1 入力処理部の生成** 入力処理部では、入力信号に割り付けられた変数を取り込み、PLCopenのSafetyファンクションブロックで定義された安全入力用ファンクションブロックを使用してスタート/リスタートインターロックなどを行う。

しかし、PLCopenのSafetyファンクションブロックの安全入力用ファンクションブロックはパルスリセット信号によるスタート/リスタートインターロックに対応していない。プログラムで実現するには、信号のタイミングを考慮し、複数のファンクションブロックを組み合わせるロジックの構築が必要である。

そこで我々はパルスリセット信号に対応したユーザ定義ファンクションブロック「OC\_ResetSignal」を開発した。ユーザ定義ファンクションブロックとは、複数のファンクションブロックを組み合わせたものを部品化し、ユーザプ

ログラムで使うことができるファンクションブロックのことである。図2にユーザ定義ファンクションブロック「OC\_ResetSignal」の外観を示す。

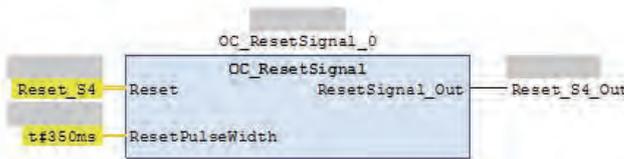


図2 ユーザ定義ファンクションブロック「OC\_ResetSignal」

「OC\_ResetSignal」の内部ロジックは非公開としているが、Sysmac Studioの自動プログラミング機能では、このユーザ定義ファンクションブロックと、PLCopenのSafetyファンクションブロックを自動的に組み合わせることで、スタート/リスタートインターロックを実現している。

また、安全入力用ファンクションブロックは多くのパラメータと設定のバリエーションを持つため、パラメータを選択して適切な値を入力することが設計者に求められる。

そこでファンクションブロックのパラメータ設定を容易にするために、後述するパラメータ分析を行い、設定が必要なパラメータの絞り込みを行った。安全入力用ファンクションブロックに必要なパラメータは、表2にある3つに絞り込むことができた。

表2 安全入力用ファンクションブロックに必要なパラメータ

パラメータ	内容
安全入力	安全スイッチ/安全センサなどの入力信号
Auto Reset	リスタートインターロックの有効/無効を切り替えるパラメータ
Reset	リスタートインターロック有効時のリセット信号

出力パラメータと入力パラメータを次の観点で分析し、必要なパラメータを絞り込んだ。

- ・観点
  - 設計者による設定が必要
  - 設定は必要だが、自動設定することで、設計者による設定は不要
  - 設定は不要

まず、出力パラメータを分析した結果を表3に示す。

表3 出力パラメータの分析結果

パラメータ	分析内容	分析結果
安全制御に関連しないパラメータ	エラーフラグやエラーコードなどのモニタ用途の出力パラメータ。ファンクションブロックの動作や安全制御に関連しないため、設定しない。	設定不要
安全出力	安全制御信号として論理演算部と接続する。自動で内部変数を割り当てる。	自動設定

続いて、入力パラメータを分析した結果を表4に示す。

表4 入力パラメータの分析結果

パラメータ	分析内容	分析結果
一般的な用途において使用しない入力パラメータ	ファンクションブロックの動作開始条件フラグなどのパラメータ。自動で定数を割り当てる。	自動設定
安全入力	安全スイッチ/安全センサなどの入力信号。設計者が変数を割りつける。	設定対象
Auto Reset	リスタートインターロックの有効/無効を切り替えるパラメータ。設計者が設定によって切り替える。	設定対象
Reset	リスタートインターロック有効時のリセット信号。設計者が変数を割りつける。	設定対象

上記分析によって絞り込んだ3つのパラメータと、安全入力用のファンクションブロックの種別を、Sysmac Studioの自動プログラミングの入力処理部の設定として表5のように定義した。

表5 自動プログラミング機能の設定項目(入力処理部)

設定項目	関連パラメータ	内容
リセット信号	Reset	リスタートインターロック有効時のリセット信号に割り当てる変数
変数	安全入力	安全スイッチ/安全センサなどの入力信号に割り当てる変数
リセット種別	Auto Reset	Manualリセット(リスタートインターロック機能有効)またはAutoリセットの選択
ファンクションブロック名	—	安全入力用のファンクションブロックの種別

Sysmac Studioの入力処理部のパラメータ設定画面を図3に示す。



図3 入力処理部パラメータ設定画面

上記設定項目から生成される入力処理部のプログラムは図4のようになる。

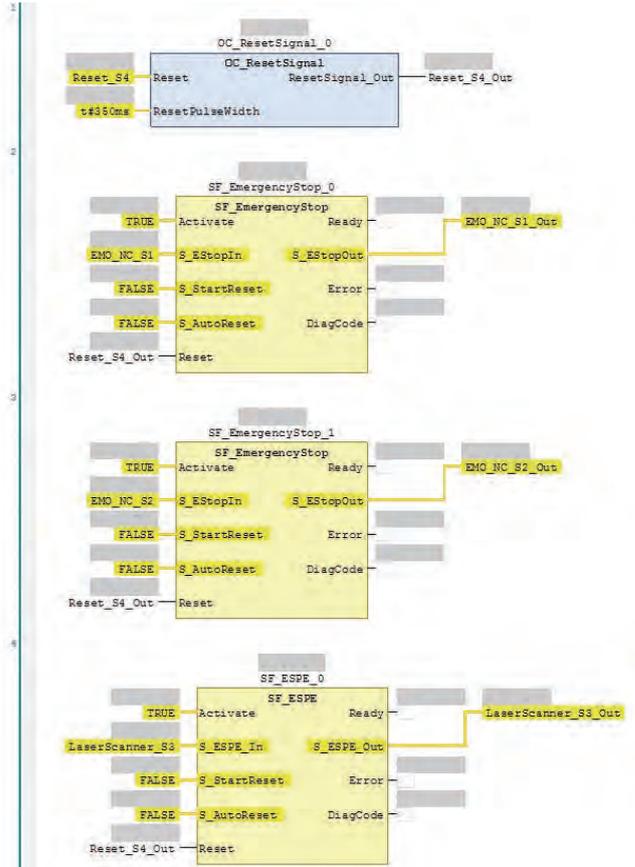


図4 生成される入力処理部のプログラム

各安全入力用ファンクションブロックからの安全信号出力には内部変数を設定し、後述の論理演算部との接続に使用する。また、パルスリセット信号に対応したOC\_ResetSignalをプログラムの先頭に配置し、その出力パラメータには内部変数を設定する。その内部変数を各安全入力用ファンクションブロックのReset入力パラメータに設定することでパルスリセット信号によるスタート/リスタートインターロックを実現している。

**4.2 出力処理部の生成** 出力処理部では、出力信号に割り付けられた変数に対して安全制御信号を出力し、外部機器モニタリング(EDM)を行う。

入力処理部と同様、ファンクションブロックのパラメータ設定を容易にするために、後述するパラメータ分析を行い、設定が必要なパラメータの絞り込みを行った。安全出力用ファンクションブロックに必要なパラメータは表6にある1つに絞り込むことができた。

表6 安全出力ファンクションブロックに必要なパラメータ

パラメータ	内容
安全出力	動力供給を制御する安全リレーの出力信号

出力処理部においても、入力処理部と同じ観点で分析することで、必要なパラメータを絞り込んだ。

まず、出力パラメータを分析した結果を表7に示す。

表7 出力パラメータの分析結果

パラメータ	分析内容	分析結果
安全制御に関連しないパラメータ	エラーフラグやエラーコードなどのモニタ用途の出力パラメータ。ファンクションブロックの動作や安全制御に関連しないため、設定しない。	設定不要
安全出力	動力供給を制御する安全リレーの出力信号。設計者が変数を割りつける。	設定対象

続いて、入力パラメータを分析した結果を表8に示す。

表8 入力パラメータの分析結果

パラメータ	分析内容	分析結果
一般的な用途において使用しない入力パラメータ	ファンクションブロックの動作開始条件フラグなどのパラメータ。自動で定数を割り当てる。	自動設定
安全入力	安全制御信号として論理演算部と接続する。自動で内部変数を割り当てる。	自動設定
EDM入力	外部機器モニタリング信号。設計者が後から変更する。自動で内部変数を割り当てる。	自動設定
EDMリセット	EDMのエラーを取り除くパラメータ。設計者が後から変更する。自動で内部変数を割り当てる。	自動設定

上記分析によって絞り込んだ1つのパラメータと、安全出力用のファンクションブロックSF\_EDMの使用有無を、Sysmac Studioの自動プログラミングの出力処理部の設定として表9のように定義した。

表9 自動プログラミング機能の設定項目(出力処理部)

設定項目	関連パラメータ	内容
変数	安全出力	動力供給を制御する安全リレーの出力信号に割り当てる変数
EDM使用	-	外部機器のモニタリングを行うためのファンクションブロック「SF_EDM」使用有無の指定

Sysmac Studioの出力処理部のパラメータ設定画面を図5に示す。

No.	変数	コメント	EDM使用
1	Contactor_KM1_KM2		TRUE
2	Contactor_KM3_KM4		TRUE

図5 出力処理部パラメータ設定画面

上記設定項目から生成される出力処理部のプログラムは図6のようになる。

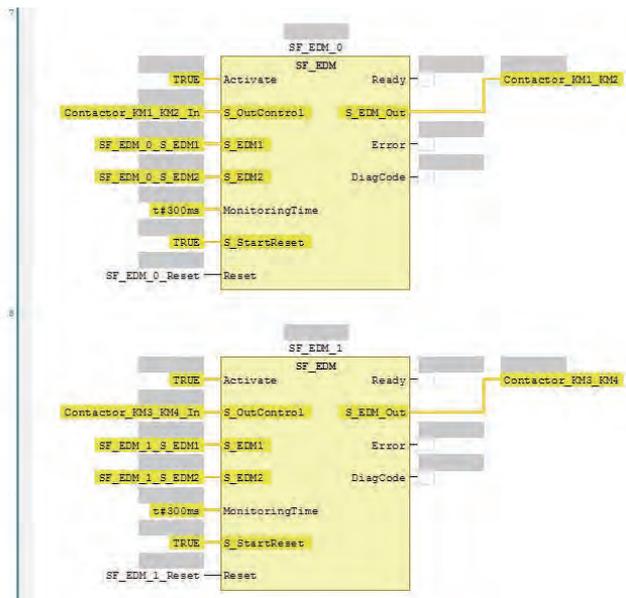


図6 生成される出力処理部のプログラム

安全制御信号であるSF\_EDMファンクションブロックの入力パラメータS\_OutControlには内部変数を設定し、後述の論理演算部との接続に使用する。外部機器モニタリング(EDM)を使用しない場合は、SF\_EDMファンクションブロックを介さず、論理演算部において直接指定した変数へ出力する。

**4.3 論理演算部の生成** 論理演算部は、入力処理部と出力処理部を接続する論理回路である。今回我々は、安全入力をOFFにしたときの安全出力の期待値を記述したテーブルを元に、論理回路を生成する技術を開発した。

安全制御信号に対する論理演算は、入力処理部と出力処理部による論理積(ANDファンクション)で構成される。これを、安全設計者が保有している設計ドキュメントを活用し、自動で論理演算部の生成を行う。

安全設計者が保有している設計ドキュメントである、安全入力と安全出力の関係性を表すテーブルの例を表10に示す。

表10 安全入力と安全出力の関係を表すテーブルの例

		安全出力		
		コンタクタ KM1_KM2	コンタクタ KM3_KM4	...
安全入力	非常停止スイッチS1	OFF	OFF	...
	非常停止スイッチS2	OFF	ON	...
	レーザスキャナS3	ON	OFF	...
	:	:	:	

OFF: 遮断する、ON: 遮断しない

このテーブルの情報を元に設定されるSysmac Studioの自動プログラミング機能の期待値設定画面を、図7に示す。

▼期待値設定					
No.	変数	コメント	リセット種別	Contactor_KM1_KM2	Contactor_KM3_KM4
1	EMO_NC_S1		Manual	0	0
2	EMO_NC_S2		Manual	0	1
3	LaserScanner_S3		Manual	1	0

図7 自動プログラミングの期待値設定画面

この期待値設定から、それぞれの安全出力に対応する安全入力を抽出し、AND ファンクションで結ぶことで論理演算部は以下の図8のように実現される。

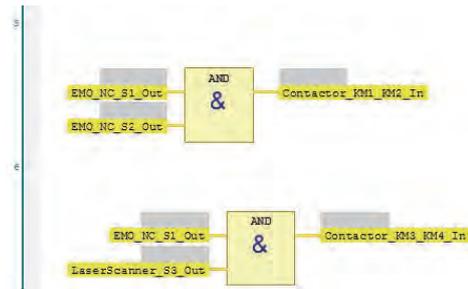


図8 生成される論理演算部のプログラム

今回の簡単な構成においては、設計者によるプログラム作成で誤りなく論理演算回路を実現することは可能だが、複雑な構成になると多大な単純作業とそれ故のケアレスミスが発生してしまうため、この自動化が有効であると言える。

**4.4 論理演算部を入力処理部と出力処理部から分離するメリット** 「入力処理部」、「出力処理部」、「論理演算部」に分けて、自動的にプログラムを生成する方法について述べたが、これら3つのブロックに分離することで、プログラムの拡張性と可読性が高まると言える。

例えば、1つの安全出力に対して複数の安全入力が影響する一般的な安全システム事例において、論理演算部を分離する場合のプログラムを図9に、論理演算部を分離しない場合のプログラムを図10に示す。

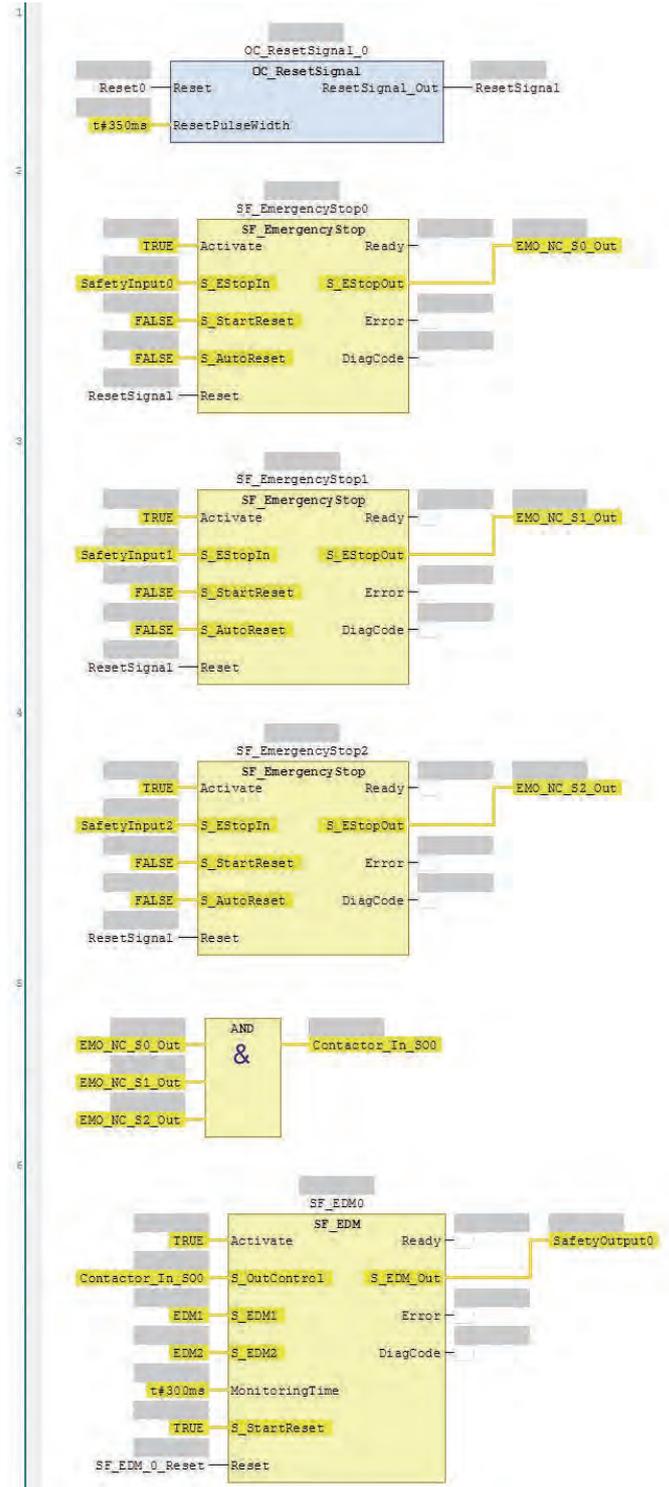


図9 論理演算部を分離するプログラムの例

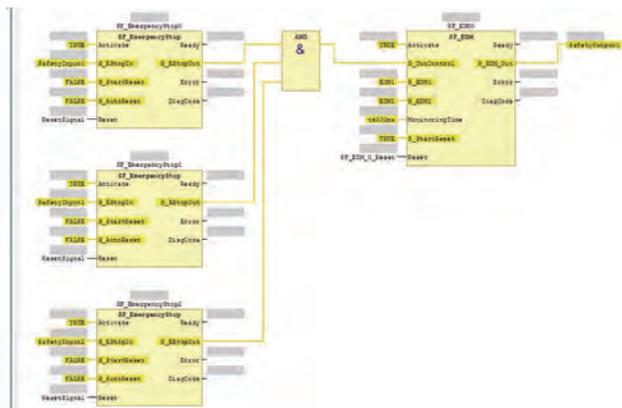


図10 論理演算部を分離しないプログラムの例

これらのプログラムに安全出力1点を追加した場合に追加が必要なプログラムを図11と図12に示す。

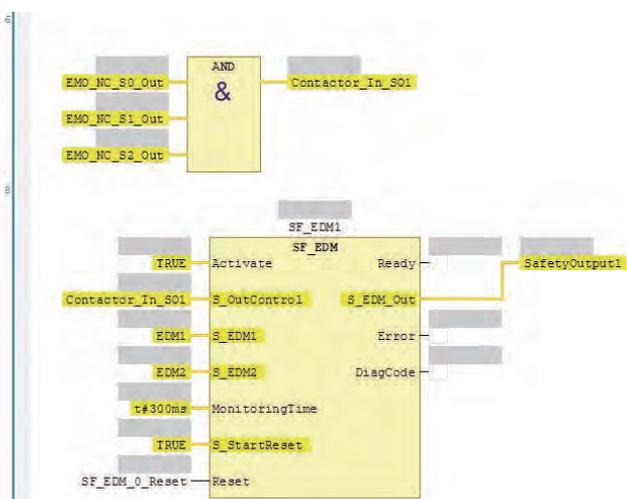


図11 論理演算部を分離する場合の追加されるプログラム

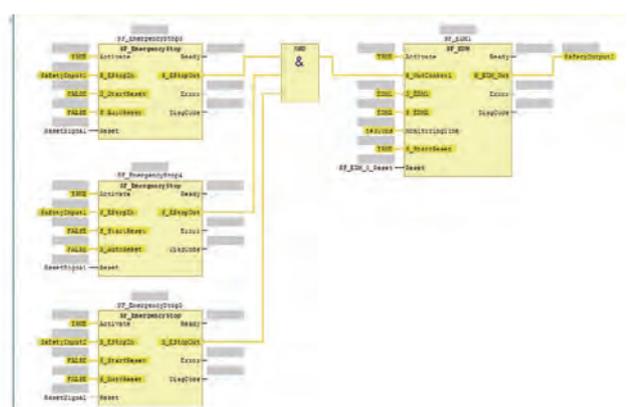


図12 論理演算部を分離しない場合の追加されるプログラム

論理演算部を分離する場合においては、図11に示すとおり論理演算部の追加と安全出力用のファンクションブロックの追加のみで可能である。

一方で論理演算部を分離しない場合においては、図12に示すとおり、プログラム全体を複製し、安全入力用のファンクションブロックの設定を行い、安全出力用のファンク

ションブロックを追加する必要がある。

よって、内部変数を使用して論理演算部を分離する方が、追加されるプログラムが簡単で、かつ変更量が少ないことから、拡張性と可読性が高まると言える。

**4.5 効果の検証** 今回Sysmac Studioに機能追加した自動プログラミング機能によって、必要最小限の簡単な設定で、拡張性と可読性の高いプログラムを自動生成することを実現した。

さらに、Sysmac Studioの自動プログラミング機能を使用した場合の導入効果について、自社内で妥当性検証を行った。その結果、図13に示すように、ある安全システムのモデルケースにおいてプログラム作成に要する時間が90%短縮され、その結果、装置設計全体工数の40%を短縮する効果があることを確認した。

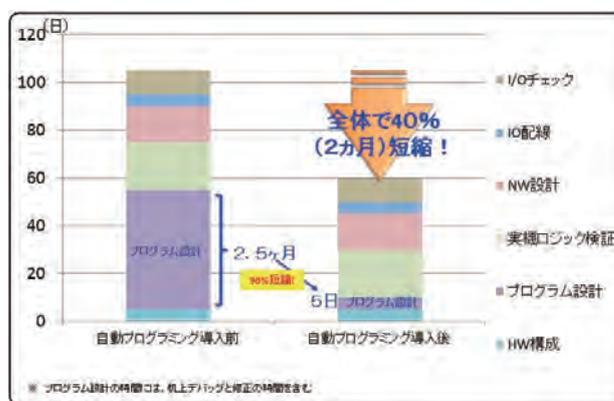


図13 自動プログラミング機能導入の効果

## 5. むすび

本稿では、PLCopenのSafetyファンクションブロックの活用により、安全プログラム自動化の技術革新について述べた。

必要パラメータの絞り込み技術と論理回路生成技術により、必要最小限の設定項目から熟練設計者と同等レベルの安全プログラムを自動生成することで、装置立ち上げ工数の短縮効果があることを確認した。また、論理演算部を分離することでI/O点数の増減に対応可能な拡張性と可読性の高い安全プログラムを定義し、自動プログラミング機能に組み込むことで、柔軟な安全システムの構築を可能とした。

今後においては、市場からのフィードバックを受け、自動プログラミング機能を進化させていくとともに、さらに多様化が進むお客様のニーズに対応できる技術革新への取り組みを継続する。

最後に、Sysmac Studioの自動プログラミング機能の実現にあたり、多大なご協力をいただいた、事業企画・コンサルティング・販売の方々をはじめ、開発に携わった方々に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 経済産業省:「2018年版ものづくり白書 - 第2節 人手不足が進む中での生産性向上の実現に向け、「現場力」を再構築する「経営力」の重要性」  
[http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2018/honbun\\_pdf/pdf/honbun01\\_01\\_02.pdf](http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2018/honbun_pdf/pdf/honbun01_01_02.pdf)
- 2) IEC 61508:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems
- 3) ISO 13849-1:2015 Safety of machinery -- Safety-related parts of control systems -- Part 1: General principles for design

## 執筆者紹介



菅沼 拓 Hiromu Suganuma  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 ソフトウェア開発部  
専門: ソフトウェア工学



藤村 亮輔 Ryosuke Fujimura  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 ソフトウェア開発部  
専門: ソフトウェア工学



久保 寛子 Hiroko Kubo  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 ソフトウェア開発部  
専門: ソフトウェア工学



田熊 伸行 Nobuyuki Takuma  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 コントローラPMG  
専門: ソフトウェア工学

# オープンソース Git を活用した FA 統合開発環境における複数人並行開発の実現

岩村 慎太郎

近年、市場における消費者ニーズの多様化に伴い、短いサイクルで新しい商品が次々と生み出されている。製造業各社は、新しい商品を製造するために、新たな生産設備の増設や既存設備の段取り替えパターンの追加などの対応を行っている。

こうした中、生産設備の制御システムの複雑化や、制御ソフトウェアの大規模化が進んでいる。また商品リリースの短いサイクルに対応するため、生産設備の開発期間の短縮も必要になり、制御システムの開発を複数の開発者にて分担するケースが増えてきている。このようなケースにおいて、制御ソフトウェアを1つにまとめ管理する必要があるが、重複した変更の整合や変更履歴の管理などの課題があった。

本稿では、このような課題解決に向け、オムロンのFA統合開発環境である SysmacStudio とオープンソースのバージョン管理システムである Git の連携技術を確認し、複数人による制御ソフトウェア開発の変更管理工数および変更作業のミスによる後戻り工数を削減し開発期間を短縮できることを確認した。また、完成した制御ソフトウェアを流用し、類似する生産設備の制御ソフトウェア開発（派生開発）についても、本技術を適用し開発期間を短縮できることも確認した。

## Concurrent development by multiple developers in an integrated factory automation development environment using an open-source system “Git”

*Shintaro Iwamura*

In recent years, consumer needs in the market have diversified, and new products have been successively produced in a short cycle. Manufacturing companies have installed new facilities or added new production patterns to existing systems to manufacture new products.

The control system of production facility has become more complex and the scale of control software has increased. Also, in order to respond to a short cycle of product release, it is necessary to shorten the development period of the production facility, and the number of cases in which the development of the control system is shared by multiple developers is increasing. In such a case, it is necessary to collectively manage the settings and control program, but there have been problems such as matching of duplicate changes and management of change history.

This article describes the cooperating technology that we developed for SysmacStudio which is Omron's integrated factory automation development environment, and an open source version management system Git. We confirmed that it can shorten the development period by managing changes of software developed by multiple developers, and reducing the backward man-hour caused by mistakes. It was also confirmed that the development period could be shortened by using the completed control software and applying this technology to the control software development (derivative development) of similar production facilities.

### 1. まえがき

オムロンは、生産設備の制御に必要なセンサ (Input)、出力機器 (Output)、コントローラ (Control) に加えて、ロボッ

トやセーフティ機器を含めたFA (Factory Automation) システム全体を1つのアプリケーションソフトウェアで開発可能なFA統合開発環境 SysmacStudio を提供しており、生産設備を制御する機器の設定および制御プログラムなど

の制御ソフトウェアを一元管理できるようにしている。SysmacStudioでは、この一元管理された制御ソフトウェアをプロジェクトデータと呼んでいる。

近年の生産設備の高度化・複雑化に伴い、それぞれの制御機器に精通したスペシャリストが集まり1つの生産設備を開発するケースや、生産設備の開発期間を短縮するため、大規模化するプログラマブルロジックコントローラ (PLC) の制御プログラムの開発を複数人で行うケースが増えてきた。複数人で1つの生産設備を並行して開発する場合、マスタとなる生産設備のプロジェクトデータのコピーを各開発者に配布し、都度、各開発者がSysmacStudioの編集機能を用い変更内容をマスタのプロジェクトデータに反映する作業が必要になる。

しかしながら、各開発者の変更内容をマスタに反映するには、変更箇所の特定制を行い、他の開発者との変更箇所の重複の有無の確認、重複して変更された箇所の取捨選択、および変更の見直しを行う必要があり、この作業に多くの工数を要することが課題となっていた。加えて、この作業が手作業で行われるため、開発者の判断・操作ミスで制御ソフトウェアに不具合が混入し、開発の後戻りの原因にもなっていた。

一般的に、ソフトウェア開発を複数人で行う場合、開発するソフトウェアの変更管理を行うため、バージョン管理システムの導入が広く普及している。バージョン管理システムとは、開発するソフトウェアのソースコードファイルやドキュメントファイルの変更日時、変更者、変更内容など変更履歴を管理するためのシステムであり、ファイル単位で変更履歴を保存することができる仕組みである。また、複数人で1つのファイルを同時に編集しても、編集の重複がない場合は自動的に各編集内容を1つのファイルに反映できる自動マージ機能など、効率よくファイルの変更の集約、管理ができるようになっている。

そこで、このバージョン管理システムを活用し、複数人による生産設備の制御ソフトウェア開発における課題解決に取り組むこととした。SysmacStudioのプロジェクトデータをバージョン管理システムで効率良く、かつ正確に変更管理できるようにするため、プロジェクトデータの更新に関わる3つの技術課題を抽出し解決策を検討した。

本稿では、これらの技術課題に関する具体的な解決手段に加え、バージョン管理システムと連携するFA統合開発環境により、プロジェクトデータの変更管理工数を削減できた具体的事例についても説明する。なお本技術は弊社商品SysmacStudio Ver.1.20.0のチーム開発オプションの機能として2017年10月にリリースしている。

## 2. 課題

プロジェクトデータには、制御プログラムなどテキスト形式で保存されたデータの他、表示器 (HMI) で使用するグラフィックデータなど、様々なデータ形式のファイル

が含まれる。また、FAシステムの1つの制御機能がプロジェクトデータの複数のファイルに分割し保存されている場合や、プロジェクトデータ内で定義されるデータの冗長性を排除するため、ファイル間で相互にデータを参照する場合もある。

こうしたプロジェクトデータについて、SysmacStudioを使用せずにバージョン管理システムで自動マージ機能などによりファイル更新を行うと、データの参照関係が壊れてしまう可能性がある。また開発者がバージョン管理システムの機能を用いてファイルの差分を直接確認してもデータの内容が理解できないため正しくマージを行うことができず、ファイルを直接編集するとプロジェクトデータを壊してしまう可能性もある。

そこで、SysmacStudioとバージョン管理システムを連携させることで、上記のような問題の発生を未然に防ぐプロジェクトデータの変更管理の仕組みについて検討した。この仕組みの実現にあたり、次の3つの技術課題の解決に取り組んだ。

**2.1 クライアントツール機能の実現** バージョン管理システムの操作には、一般的には専用のアプリケーションソフト (クライアントツール) を利用する。クライアントツールは、バージョン管理システムの運用に必要な機能を備えており、管理するソフトウェアについてファイル単位での編集や編集の履歴、その差分を表示することもできる。しかしプロジェクトデータには開発者が直接理解できないファイルも含まれるため、プロジェクトデータの生成元であるSysmacStudioで、ファイル毎の差分を意識することなくプロジェクトデータの変更箇所、変更履歴が確認できる必要がある。そこでバージョン管理システムのクライアントツール機能をSysmacStudioへ統合することが1つ目の技術課題である。

### 2.2 プロジェクトデータの比較・マージ機能の実現

開発者はクライアントツールを使用して、修正中のファイルとバージョン管理システムに登録されているマスタファイルと比較し、その差分情報を含む新たなマスタファイルを登録することができる (比較・マージ機能)。しかし、この機能が利用できるのはテキスト形式のファイルのみであるため、表示器のようにグラフィック形式など複数の形式のファイルを含むプロジェクトデータはバージョン管理システムに差分情報を登録することができない。そこで、バージョン管理システムと連携しSysmacStudioでプロジェクトデータの比較・マージ機能を実現することが、2つ目の技術課題である。

**2.3 プロジェクトデータの整合性の保証** プロジェクトデータにおいて、ファイル間で相互にデータを参照し整合性の保証が必要なものについては、バージョン管理システムによる不正な変更を防止することや、不正なデータの変更を検知し、必要に応じてバージョン管理システムの過去の履歴から正常なデータを復元することが必要になる。このプロジェクトデータに含まれるデータの整合性に関わ

る異常の検知と、正常データへの復元が3つ目の技術課題である。

### 3. 技術内容

本稿ではソフトウェア開発の現場で広く普及しているバージョン管理システムの一つである Git<sup>1)</sup> と SysmacStudio との連携技術について説明する。Git は分散型のバージョン管理システムであり、セキュリティの制約からネットワークが使用できない生産現場でも利用可能な特徴を持つものである。

**3.1 ウィンドウズシェル拡張機能を用いたアプリケーションソフトウェアの統合** SysmacStudio において、バージョン管理システムの操作機能を実現するため、Git のクライアントツール (TortoiseGit<sup>2)</sup>) との連携技術を検討した。具体的には、SysmacStudio からウィンドウズシェル拡張機能を通して TortoiseGit の機能呼び出すことで、Git の機能を利用できるようにした (図1)。ウィンドウズシェル拡張機能とは、Windows OS が提供するエクスプローラ上に存在するファイルやフォルダのコンテキストメニューなどを独自に変更し拡張する機能である。このウィンドウズシェル拡張機能を利用することで、TortoiseGit のコンテキストメニューを SysmacStudio に統合した (図2)。これにより、SysmacStudio から TortoiseGit の機能を直接使うことができるようになった。

また、ウィンドウズシェル拡張機能を使うことで、常に最新の TortoiseGit の機能を SysmacStudio から利用できるようになった。TortoiseGit と SysmacStudio をウィンドウズシェル拡張機能のインタフェースで結合することにより、それぞれのアプリケーションソフトウェアは相互に影響を与えることなく独立して機能強化をはかることができる。実際にオムロンがバージョン管理システムと連携した SysmacStudio を発売してから Git、TortoiseGit 共に何度も更新されており、リビジョングラフ機能などの TortoiseGit の新機能や Git 本体の機能の改善を SysmacStudio ですぐに活用できている。オムロンとしてはこの間 TortoiseGit や Git の進化に追従するための SysmacStudio の改造は不要であった。

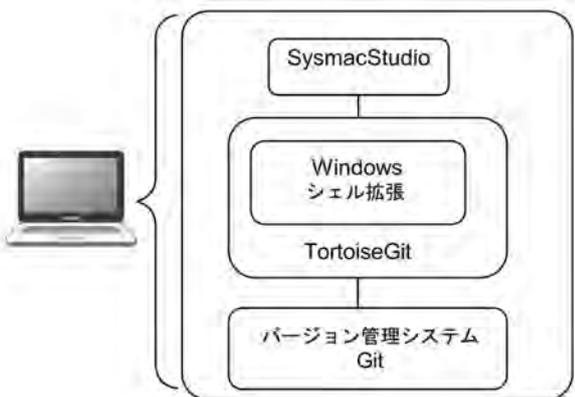


図1 バージョン管理システムとの連携構成

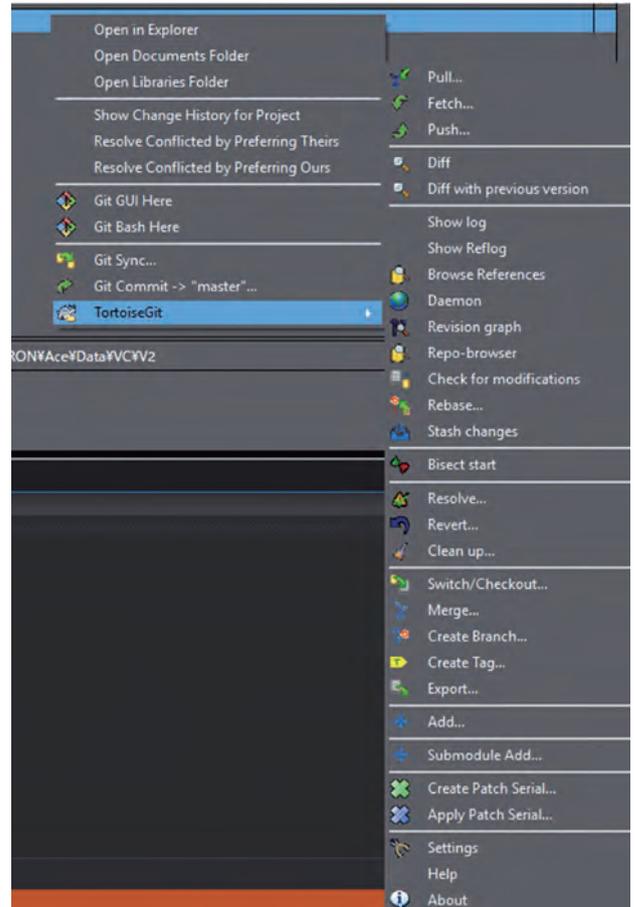


図2 SysmacStudio 上の TortoiseGit コンテキストメニュー

### 3.2 開発者が直感的に操作できる差分の表示とマージ

バージョン管理システムから取得したプロジェクトデータの差分情報から装置を構成する制御機器の設定や制御プログラムの変更内容を確認し、マージできるようにするため、制御機器単位でビジュアルに表示比較できる機能を SysmacStudio で実現した。

本稿ではこれら比較機能の中で、ラダープログラムの比較、表示機の画面データの比較について説明する。

ラダープログラムは、PLC で一般的に使われているプログラム言語であり、リレーによる論理回路を記述するために考案されたものである。現在では複雑な演算などを行うための命令語なども使用できるようになっている。

従来、この論理回路を図示表記するラダープログラムは、変更の差異を見分けることが難しかったが、回路要素単位で差分を抽出することによって、回路要素単位で比較できるようにした (図3)。回路要素単位での比較を回路の接続順 (パワーフロー) に沿って入力側と出力側の2方向から差異を検索し、その差分結果を比較することで実現した。これによって、現場で変更したラダープログラムの内容を詳細に比較できるようになった (図4)。

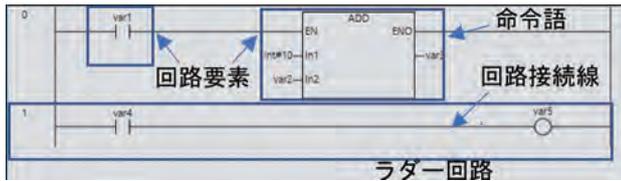


図3 ラダーエディタのデータ構成

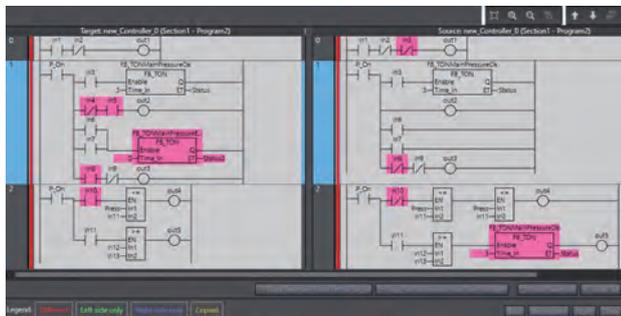


図4 ラダーエディタの比較画面

SysmacStudioは、表示器の画面を編集するPageEditorという機能を持っている。PageEditorで編集する画面データには、画面に配置するボタンなどの形状、色などのデータや、ボタンの状態に応じて切り替わる文字データなど、複数の形式のデータから構成される。SysmacStudioはこれらのデータおよびデータの関係を階層的に管理している。そこで、SysmacStudioはバージョン管理システムから取得したデータの差分情報を階層化したデータの並びで整理し、PageEditorの画面から全てのデータ差分詳細を簡単に把握できるしくみを実現した。例えば、画面上に配置されたボタンに表示する文字列が変更された場合、PageEditorの画面上でボタンに関連するデータに変更があることを表示し、その後、文字列の詳細を表示する画面に表示を切り替え、差異の詳細が把握できるようにした(図5)。

この、PageEditorの比較機能は現在(2018年11月現在)特許出願中である。



図5 PageEditorの比較画面

これらにより、バージョン管理システムと連携し、開発者がデータの差分を直感的に理解し正確にマージする機能をSysmacStudioで実現することができた。

**3.3 MD5ハッシュを用いたデータ間の整合性保証** バージョン管理システムによるプロジェクトデータの整合性に関わる異常を検知するために、データ間の整合性を保証する方法を検討した。

相互に依存関係のあるデータの整合性を担保するために、

依存関係のあるデータを1つのデータ群として扱う方法をMD5ハッシュを使って実現した。MD5ハッシュは任意の長さの元データを元に128ビットの値を生成するハッシュ関数であり、MD5ハッシュによって生成されたデータを見ることでデータが変更されたかが分かる仕組みである。ハッシュ値は広く一般にWebのデータのやり取りにも使われている技術であり、MD5、SHA-1、SHA-2といった種類があり、セキュリティや、ファイルの同一性の担保に用いられている。今回の用途はファイルの内容が完全一致しているかのチェックであるので、計算時間が短く、サイズの小さいMD5ハッシュを採用した。

依存関係があるデータは、複数のデータを1つのデータとしてまとめたMD5ハッシュ値を作り、データが更新される度にハッシュ値を更新するしくみとした(図6)。これをプロジェクトデータとして保存することによって依存関係のあるデータの一部だけ変更した場合に、MD5ハッシュ値のデータの不整合を検出することで、プロジェクトデータの不整合を検出できるようになった。SysmacStudioでプロジェクトデータの読み出し時に不整合を検出した場合、検出した対象のデータを表示することで、ユーザはバージョン管理システムを使って変更履歴から正常データへの復元が可能になった(図7)。

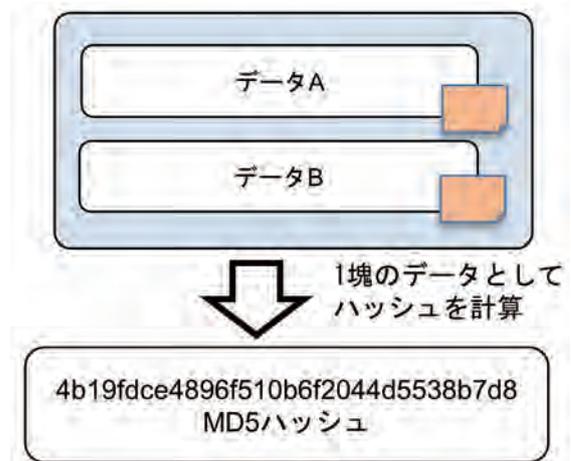


図6 MD5ハッシュの生成

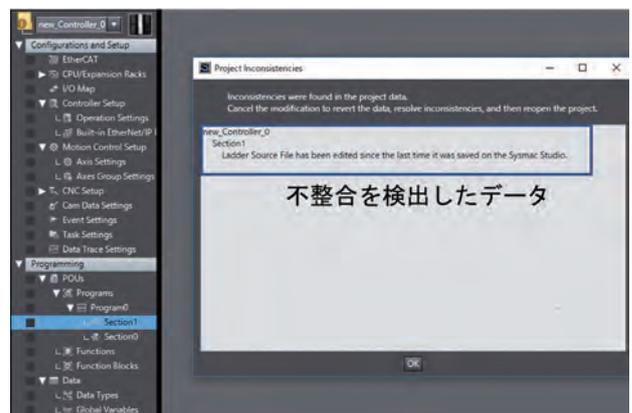


図7 データの不整合検知UI

#### 4. 技術の検証

バージョン管理システム Git と連携した SysmacStudio を利用して、実際の複数人による生産設備の開発ができること、および変更管理にかかる工数が削減できていることを検証した。検証のためのユースケースは、複数人開発を実施している複数の顧客に対して、生産設備の開発の進め方についてヒアリングを実施し、その結果に基づき定義した。

検証内容について説明する前に、まず、分散型バージョン管理システム Git のシステム構成と運用について簡単に説明する (図8)。

分散型バージョン管理システムは各ユーザのパソコン内にローカルリポジトリと言われる保存領域と、ユーザ間でデータを共有するためのリモートリポジトリを持つ。リポジトリにはバージョン管理対象のプロジェクトデータとその変更履歴情報が格納される。各ユーザは任意の作業タイミングでローカルリポジトリとリモートリポジトリの同期をとることができる。ローカルリポジトリでの変更を他のユーザと共有するときはリモートリポジトリへの反映 (プッシュ) する操作を、他のユーザの変更をローカルリポジトリに反映するときはリモートリポジトリからの取り込み (プル) する操作を行う。ユーザはローカルリポジトリを使って作業し、ある程度作業がまとまったところでリモートリポジトリに反映する使い方ができる。

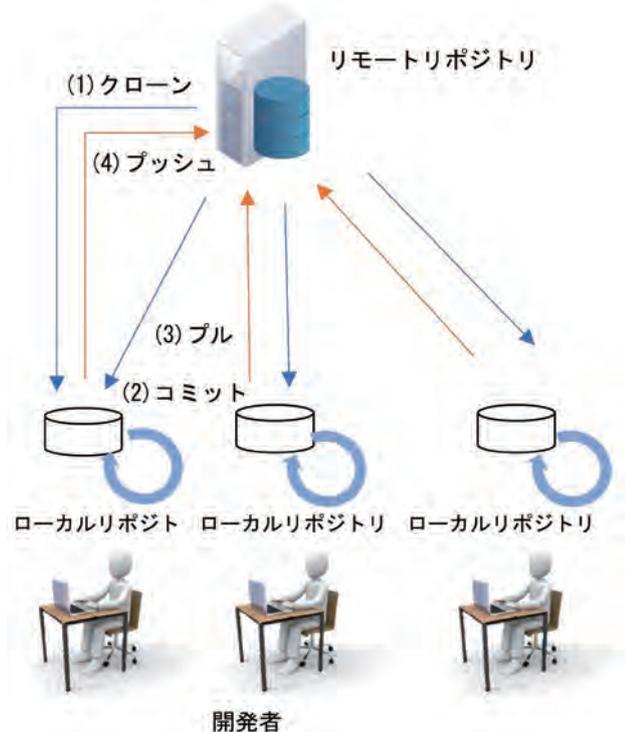


図8 分散型バージョン管理システム

**4.1 バージョン管理システムの運用** 実際の運用形態には、リモートリポジトリの共有方法の違いにより次の3つの形態があり、ユーザはいずれかの形態を選択する。

- リモートリポジトリをパソコンの共有フォルダで共有する
- Git専用のサーバを構築し運用する
- インターネット上のGitサーバサービスを活用して運用する

SysmacStudioでは、以上の3つの形態すべてをサポートできることを実際のサーバを運用して検証した。これによって、開発者は自社の生産設備の開発に適した方法を選択してバージョン管理システムを運用することができる。

**4.2 複数人による生産設備の開発** バージョン管理システムを使用して2名の開発者 (開発者XとY) が生産設備の開発を進めるフローを以下に示す。

はじめに、プロジェクトデータの編集の分担を決める。SysmacStudioのバージョン管理機能は、複数人で1つのプロジェクトを同時に編集しリモートリポジトリへプッシュする際に、Gitのオートマージ機能によって他の開発者の変更内容をマージする機能を持っている。他の開発者が同じデータを同時に編集していた場合、変更をマージしようとすると、変更内容に競合が発生しマージすることができなくなる。この競合の発生を防ぐために以下のように分担する。

開発者X: SysmacStudio プロジェクトの構成・設定全般と、データ型、グローバル変数、ラダープログラム (ProgramX) の編集を担当

開発者Y: ラダープログラム (ProgramY) の編集を担当  
リポジトリとブランチの関係は図9の通りである。

各開発者は各開発者のパソコンのローカルリポジトリ上で作業用ブランチの作成し、プログラムの変更を行う。変更が終わった後に、ローカルリポジトリの変更をリモートリポジトリにプッシュして変更を反映する。リモートリポジトリを介して各開発者のパソコンのローカルリポジトリのデータをマージする。

詳細な操作方法はSysmacStudio プロジェクトバージョン管理機能 スタートアップガイド参照<sup>3)</sup>。

社内で検証した結果、図9に示すフローを繰り返すことによって、複数人で並行して、装置を開発できることを確認した。また、表1のように従来のバージョン管理システムを利用しない生産設備の開発に比べてバージョン管理システムを利用した場合、繰り返し行う変更管理の作業を大幅に短縮できることを確認した。

表1 検証結果

ユースケース	バージョン管理システムなし	バージョン管理システムあり
対象のプロジェクトを見つけるまでの時間 (変更箇所特定)	1分	10秒
データ比較までにかかる時間 (変更箇所の重複の確認)	1分	5秒
プログラムデータのマージ時間 (重複して変更された箇所の取捨選択)	2分	30秒

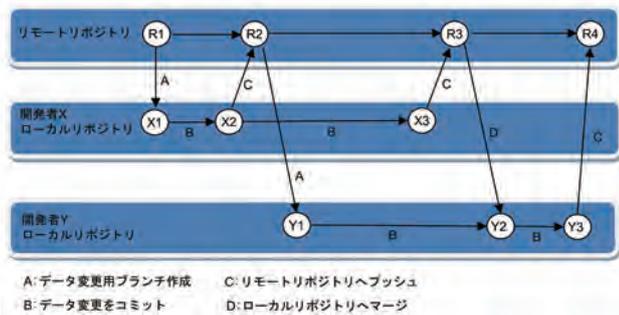


図9 複数人開発のフロー

**4.3 複数人による派生生産設備の開発** 次に、実際の顧客の装置で複数人開発を応用した派生開発についてバージョン管理システムとの連携の効果を検証した。派生開発とは、生産装置のバリエーションの増加に伴う、装置のハードウェア構成が異なる複数の派生装置のプログラムを共通化して開発する方法のことである。

検証内容は包装機のシステムのプロジェクトデータを複数の開発者で派生開発した場合の実施例である。

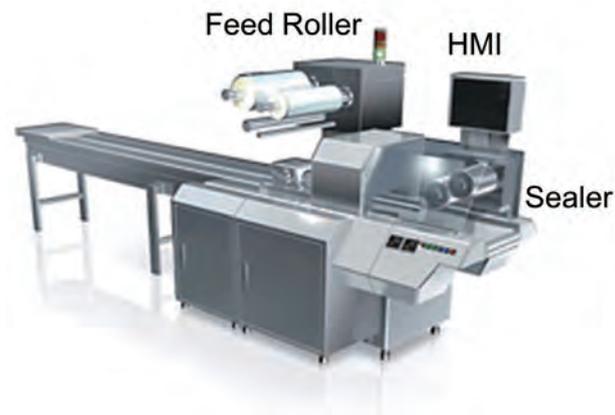


図10 包装機のシステム

この顧客は包装機のシステムをそれぞれの顧客の要望に合わせて一品一様の仕様で制作することを得意としている大手包装機メーカーである。すべての包装工程を含む基本構成から、顧客に不要な機能を省き、顧客が求める機能や仕様を組み合わせて一台の装置を開発している。一品一様ということもあり、ユーザの要求に合わせて装置を開発していくと、装置が複雑になり、複数人で開発すると誰がどこを変更したのか把握することやプロジェクトデータのマージなどの変更管理工数が大きくなっていった。複数人で開発しているが、生産性がなかなか上がらないことが課題であった。また、装置が大規模になるに従って不具合が発生した場合の原因特定に時間がかかるようになっていった。

そこで今回、バージョン管理システムとの連携機能を実装した SysmacStudio を採用し、実際の生産設備の開発で運用した。

上の図10のような包装システムを以下の表2条件で開発した。

表2 分担構成(開発者 5名)

分担構成	人数
SysmacStudioプロジェクトの構成・設定全般	1
制御プログラム	2
表示機画面	2

装置の制御システムには、オムロン製の以下の機器が採用された。

1. PLC NJシリーズ CPUユニット
  2. NXシリーズ I/Oシステム
  3. ACサーボシステム 1Sシリーズ
  4. プログラマブルターミナル (表示機) NAシリーズ
- この開発案件が完了した後、包装機メーカーの開発者より以下の評価・フィードバックがあった。

このバージョン管理システムを使って開発する前は、プロジェクトデータを SysmacStudio のエクスポート機能で1つのファイルにまとめ、ファイル名に日付をつけて保存、管理していた。トラブルの際などはプロジェクト間の照合機能を使って比較していた。この方法では、都度ファイルを開いて照合・比較するため、特定の修正箇所の履歴を時系列で確認する作業に時間がかかり、トラブルの原因箇所のプログラムを特定する作業に大変な時間と手間がかかっていた。

今回 SysmacStudio のバージョン管理システムの導入によって過去の履歴から原因となる履歴を探し、瞬時に比較結果を表示することで原因箇所の特定時間が従来の1/4以下に短縮できた。その結果、開発工程におけるファイルのバージョン管理工数が半分以下になった。

## 5. むすび

SysmacStudio で複数人開発を実現するために、バージョン管理システム Git のクライアントツール TortoiseGit と ウィンドウズシェル拡張技術を利用して、Git と SysmacStudio の連携を実現した。

また、FA 統合開発環境の様々なデータ形式に対して、ビジュアルな比較技術を実現し、ユーザが直感的にデータを比較・マージできるようになった。

さらに、MD5ハッシュを利用して、SysmacStudio のプロジェクトデータに含まれるデータの間にある整合性を保証する技術を確認した。

この確立した技術を複数人開発に適用することで技術の有効性を確認した。また、複数人開発だけではなく装置の派生開発についても今回確立した技術が有効であることを確認した。

実際に装置開発の現場においてプロジェクトデータの管理工数を半減することができ、本技術を実装した SysmacStudio の導入がグローバルで拡大している。

今後も、オープンソースの技術進化を活用して、お客様のものづくり革新に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) <https://git-scm.com/> (参照 2018-11-19)
- 2) <https://tortoiseGit.org/> (参照 2018-11-19)
- 3) オムロン. SysmacStudio プロジェクトバージョン管理機能  
スタートアップガイド, SBCA-112

## 執筆者紹介



岩村 慎太郎 Shintaro Iwamura  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コントローラ事業部 第2開発部  
専門：ソフトウェア工学

## 電動機運転状態における絶縁抵抗計測技術

横田 晃司・竹内 豪

生産現場において、設備の安定稼働は重要な要素の一つであり、稼働を維持するためには計画的、かつ的確なタイミングでの保全が重要になる。

保全現場においては、保全員が定期的に工場内を巡回し保守点検しているが、近年は人手不足・技術者不足により計画的な保全活動を継続することが難しくなっている。そのため、設備の突発停止による機会損失が増大するとともに、保全員は復旧対応（事後保全）に注力しなければならず、人員不足に拍車をかけている。従って、設備の状態監視による保全（予防保全）への転換が求められている。

この状況で、著者らは、動力源として多種多様な設備に用いられており保守点検の対象となっている電動機に着目し、「モータ状態監視機器K6CMシリーズ」を開発した。これは、電動機の振動、温度、電流、絶縁抵抗の状態を監視可能としたもので、それぞれの機器を組み合わせることで、電動機の故障要因を包括的に捉えられる。

本稿では、状態監視項目の一つである絶縁抵抗について、従来の計測手法では運転状態にて測定が困難であったインバータ駆動される電動機の状態監視に求められる計測手法について記す。

## Measuring “insulation resistance” for three-phase motor while operating

*Koji Yokota, Tsuyoshi Takeuchi*

In production lines, stable operation of machines is one of the most important factors so that it is required to have scheduled maintenance at the right timing.

In most maintenance scenes, maintenance personnel will visit factories for regular maintenance and inspection. However such action has become more and more difficult these days due to shortage of workers and engineers. Additionally, risks of losing business chances due to the sudden stop of machines often force maintenance personnel to focus more on the corrective maintenance. As a result, the shortage of workers and engineers will accelerate. This fact urged us to change our style of maintenance to a preventive maintenance by monitoring machines' condition.

We focus on the three-phase induction motor which is used in various machines as power source and normally treated as an inspection target. To deal with its problems, we developed the “Motor Condition Monitoring equipment (K6CM series)”. The K6CM series makes it possible to identify common motor failure by using the parameters (vibration, temperature, current and insulation resistance) it's able to monitor.

This article describes the method of measuring insulation resistance of an operating three-phase induction motor with inverter. In conventional method, it is very difficult to realize. The method did not only make the measurement possible, but also succeeded in achieving sufficient accuracy.

### 1. まえがき

**1.1 電動機の保守点検における現状と課題** 生産設備を安定して稼働させるため、その動力源である低圧誘導電動機（以下、電動機）は、保全現場において重要な保守点検の対象である。保守点検には、毎日行う日常点検、1～2ヶ月に一度の定期点検、1～2年に一度の分解点検があり、点検項目も多岐に渡る<sup>1)</sup>。

しかし、24時間連続稼働が求められる電動機も多い中で1～2ヶ月に一度の点検を計画的に行うことは、保全現場の人手不足、技術者不足が深刻化している中で、難しくなっている。

特に、定期点検項目の一つである固定子巻線とアース間の絶縁抵抗（以下、絶縁抵抗）の測定に関しては、電動機を停止させ絶縁抵抗を測定するのが一般的であり<sup>1)</sup>、計画的な点検をさらに難しくさせる一つの要因となっている。

連絡先：横田 晃司 k.yokota@omron.com

そのため、電動機を運転状態で絶縁抵抗を測定する技術が望まれており、絶縁抵抗または、その代わりとして漏洩電流を常時監視する製品が弊社を含め各メーカーから提案されている<sup>2)</sup>。

加えて、省エネ効果<sup>3)</sup>を求めてインバータ駆動される電動機の絶縁抵抗の計測は、従来の技術・製品<sup>2)</sup>では対応できない条件があり、新たな計測技術が望まれていた。

**1.2 従来技術の計測手法** 従来技術・製品の課題と解決策を述べるにあたり、本節では一般的な電動機運転状態での絶縁抵抗計測手法を述べる。

電動機運転状態での絶縁抵抗は、漏洩電流（以下  $I_0$ ）と対地電圧から、オームの法則により算出することができる。ただし、 $I_0$ には、電動機に限らず一般的に対地抵抗成分の電流（以下  $I_{0r}$ ）と対地容量成分の電流（以下  $I_{0c}$ ）があり、 $I_{0c}$ は絶縁抵抗に寄与しないため除去する必要がある。

$I_{0r}$ の計測には受動的方法および能動的方法がある。受動的方法では、零相変流器<sup>4)</sup>（以下 ZCT）より取り出した  $I_0$ から、“ $I_{0r}$ は電源電圧と同位相”、“ $I_{0c}$ は $90^\circ$ 進み”、という原理を用いて分離抽出する。図1に位相の関係、図2にシステム構成図を示す。

一方、能動的方法は、重畳用変成器を用いて接地線に電源系統とは異なる周波数の信号を重畳させ、重畳信号をZCTから取り出し、 $I_{0r}$ と  $I_{0c}$ を算出してその影響を除去する<sup>5)</sup>。

本稿では、重畳用変成器が不要で設置しやすい受動的方法を採用して検討を行った。

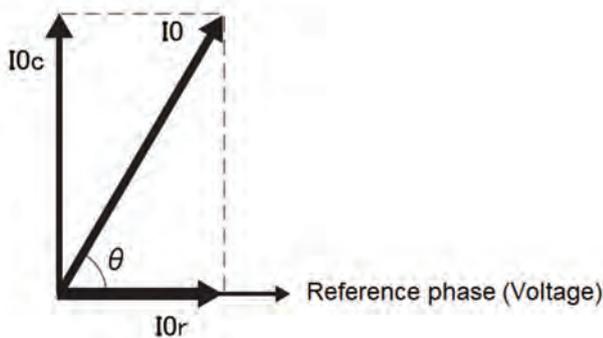


図1  $I_{0r}$ と $I_{0c}$ の関係

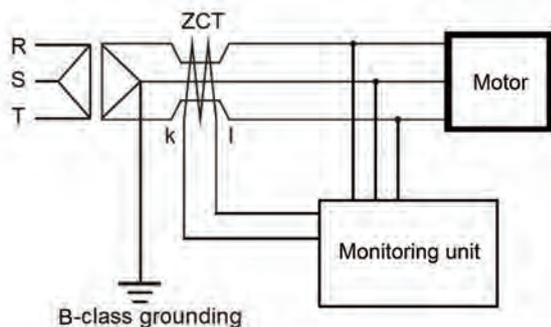


図2  $I_{0r}$ 抽出のシステム構成

**1.3 従来技術の問題** 電動機をインバータで駆動する場合は、商用電源周波数の  $I_0$ に、インバータから放出される伝導ノイズやインバータ運転周波数の  $I_0$ が重畳するため、除去しなければならない。この方法が、文献<sup>6)</sup>で提案されているが、特に、商用電源周波数とインバータ運転周波数が接近した場合に、対地電圧と  $I_{0r}$ の間で“うなり (beat)”が発生し、絶縁抵抗の算出に大きな誤差が出る。これが、活用できるアプリケーションに限られるという大きな問題につながる。

第2章において、問題解決のため、インバータ運転周波数に起因する“うなり”を避けて絶縁抵抗を高精度に計測する手法を示す。

**1.4 実用化における課題** 図2のように、一般的なZCTの出力端と監視ユニットは、有線で接続される。電動機の絶縁抵抗は、 $1\text{ M}\Omega$ 以上であることが推奨されおり<sup>1)</sup>、対地電圧 $200\text{ V}$ ならば、 $I_{0r}$ は $200\text{ }\mu\text{A}$ 以下になる。このとき、ZCTの一般的な変流比として $1,000:1$ とすれば、ZCTの出力電流は $200\text{ nA}$ という微小なレベルとなる。このような微小信号を測定するため、一般的な工業環境において、周囲の動力配線などから受けるノイズの抑制を課題とした。

第3章にて、常設型機器として実用化するための課題と対策、第4章にて、今回開発した製品を使つての検証結果を示す。

## 2. 提案する運転状態での計測手法

**2.1 インバータの“うなり”の影響** 電動機をインバータ駆動した場合、図3のように商用電源周波数による漏洩電流（以下  $I_{0\text{sys}}$ ）、インバータの高周波ノイズによる漏洩電流（以下  $I_{0\text{noise}}$ ）、インバータの運転周波数による漏洩電流（以下  $I_{0\text{inv}}$ ）がそれぞれ大地へ流れ、重畳された状態で電源系統の接地された相に還流する<sup>7) 8)</sup>。絶縁抵抗  $R_0$ は、オームの法則から  $R_0=V/I$ で算出される。算出の際、基準の電圧を商用電源とした場合、ZCTで検出した  $I_0$ からは、インバータ運転周波数の影響を受けて絶縁抵抗算出が困難である。そのため、商用電源周波数に基づく  $I_{0\text{sys}}$ を抽出する技術を得て、絶縁抵抗  $R_0$ を算出する必要がある。

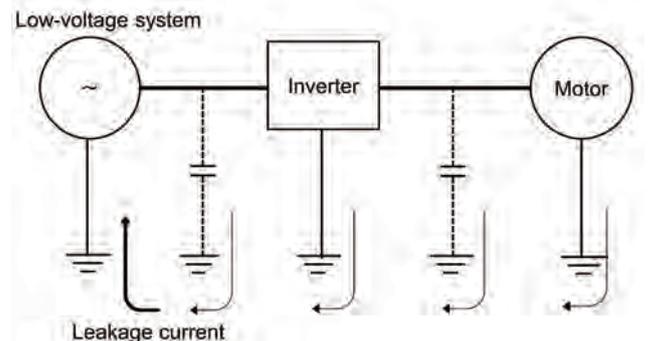


図3 漏洩電流の経路

商用電源周波数とインバータの運転周波数が、接近した場合と異なる場合を比較検証したシステム構成を図4に示す。商用電源周波数を60 Hzとし、インバータ運転周波数が異なる場合として50 Hz (a)、また“うなり”が起きやすい60 Hz近傍 (b) に運転周波数を設定した。電動機の絶縁劣化に起因しないIONOISE成分の影響を除去するため、ZCTはインバータの出力側に挿入した。監視ユニット内には商用電源を参照信号とする同期検波器 (Phase Sensitive Detector) を構成して測定を行った。IOを発生させるため既知の抵抗R0を設置し、IOを計測した結果を図5に示す。

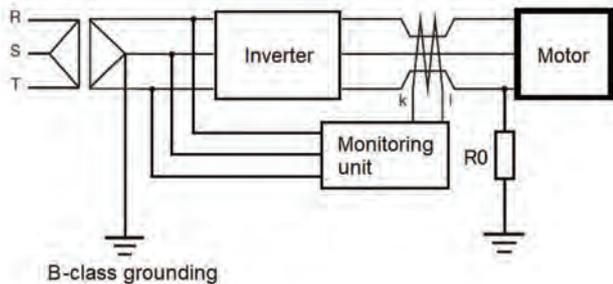


図4 検証システム計測構成

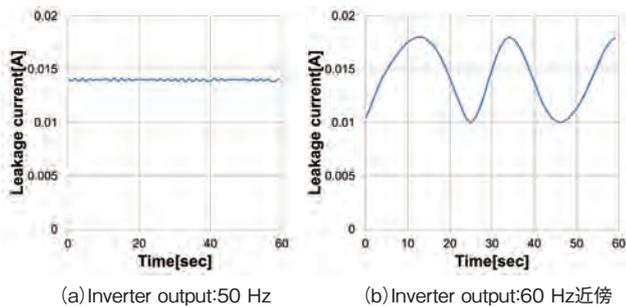


図5 IO計測結果

50 Hz (a) の場合は、同期検波によりIONOISEおよびIOINVが除去され、IO=IOSYSとして計測できている。60 Hz (b) においては、商用電源周波数に接近しているため、同期検波を用いてもIOに、IOSYSとIOINVが重畳された状態で“うなり”を生じている。この“うなり”が運転状態でIOの計測を阻害する要因である。

**2.2 提案の漏洩電流分離手法** “うなり”がある状態でも商用電源周波数に基づくIOSYSを測定する手法を述べる。IOrとIOcを分離するため位相情報を用いて、図5に示したIOを2次元で表現した結果を図6に示す。

50 Hzにおいては同期検波によりIO=IOSYSとなり、IOは同一点に集中する。60 Hzにおいては、IOSYSとIOINVが重畳された状態で、IOが円を描く。そのときのIOは式 (1) で示される。なお、式 (1) の周波数Δfは基準である商用電源周波数とインバータ運転周波数の差を意味する。

$$I_0 = I_{0SYS} + I_{0INV} e^{j2\pi\Delta f t} \quad (1)$$

図6と式 (1) から、インバータ運転周波数が商用電源周波数に接近した場合、IOSYSはインバータ運転周波数に関係なく、円の中心点から算出すればよいことがわかる。

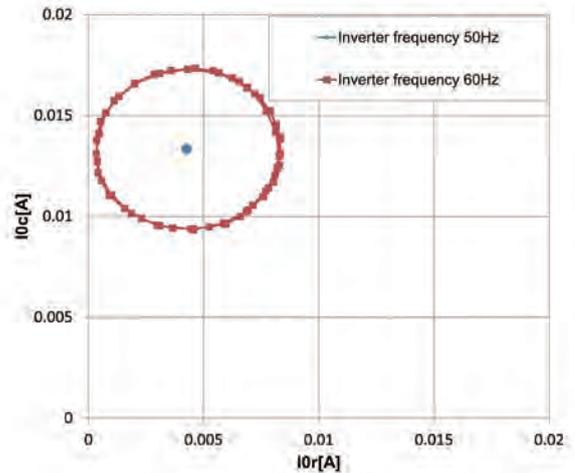


図6 漏洩電流IOr, IOcの分離

**2.3 計測手法の高速化** 電動機のアプリケーションには寿命を延ばすために複数電動機を一定間隔で切り替えて運転を行う交互運転方式があり、その間隔は短いもので数十秒～数分単位で行われている。

このような電動機の駆動時間が短いアプリケーションにも適用できるように計測時間を短縮するため、円周が閉じる前に、最小二乗法を使って図6に記した軌跡の中心を算出した。

図7は、数秒内の計測値の軌跡から最小二乗法を使ってIOを算出した結果である。数秒で商用電源周波数に基づくIOSYSが算出できている。IOrは円の中心座標のX値に相当するので、1.2項に記載の従来技術で算出できる。

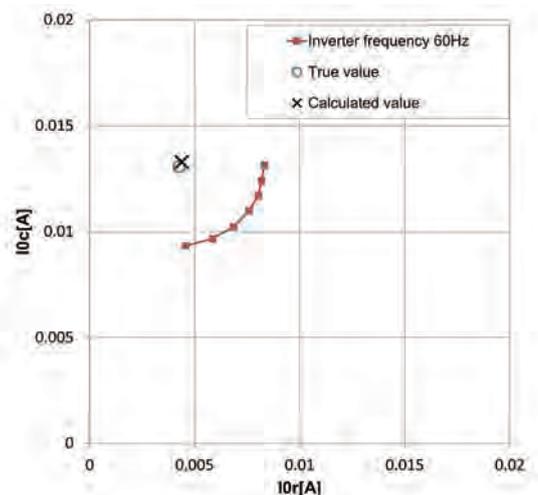


図7 円の最小二乗法による漏洩電流算出結果

以上に述べた手法で、インバータ運転周波数の影響を除き、短時間で商用電源周波数に基づくIOrおよび絶縁抵抗の算出が可能となる。

### 3. 常設型機器としての実用化

**3.1 実用化するための課題** 実用化するには、測定環境のノイズの影響を低減することも重要である。状態監視機器として常設する場合、設置できる場所が限られるため、環境に起因するノイズの影響を受けて必要なS/N比を確保できない懸念があるためである。

ノイズにも様々なものがあり、動力線などが発する商用電源周波数の誘導ノイズに最も大きな影響を受ける。これは、誘導ノイズの周波数が $10r$ と完全に同期しているためである。

**3.2  $10r$ と同期したノイズの対策** ZCTと監視ユニット間の配線長が短いほど誘導ノイズの影響は小さくなるため、配線長に制限を設けることを検討した。しかし、実際のフィールドで誘導ノイズと配線長の関係を調査したところ、測定精度を保つためには配線長を数cmに抑える必要があると分かった。

これを実現するために、ZCTに計装アンプを一体化した。計装アンプでA/D変換しデジタル信号として監視ユニットへ送ることで、ノイズ耐性を維持しながら、配線長を飛躍的に伸ばすことが出来る。

**3.3 対策の具現化** 図8は今回開発した計装アンプ一体型ZCTの概略図である。計装アンプを動作させる電力は、監視ユニット側から供給する構成としてシステムを小型化した。

図9に今回開発した監視ユニットの外観、図10及び図11に絶縁抵抗計測のシステム構成図を示す。インバータの有無によらず、基準電圧は商用電源から直接取り込み、ZCTは電動機の近傍に設置する。

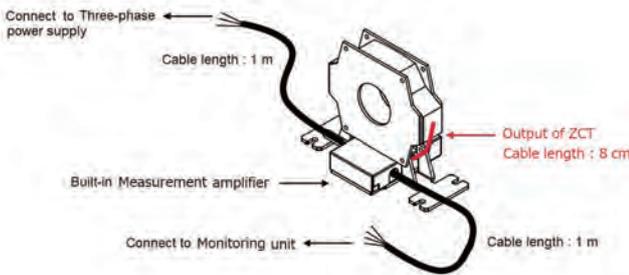


図8 計装アンプ一体型ZCT 形K6CM-ISZBI52



図9 監視ユニット 形K6CM-ISM

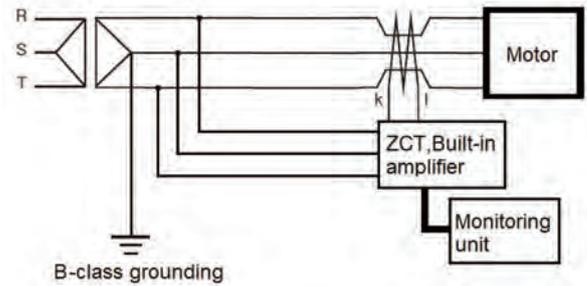


図10 直入れ駆動でのシステム構成

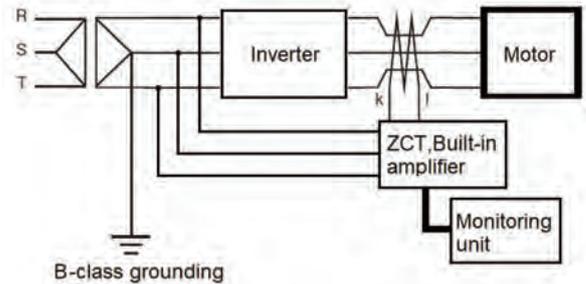


図11 インバータ駆動でのシステム構成

### 4. 性能評価

今回開発した計装アンプ一体型ZCTと監視ユニットを用いて、実際のフィールドで性能評価を実施した。

インバータ駆動における性能評価は、3章で示した誘導ノイズ対策が十分なレベルにあることが前提になる。前提を確認するため、図10のシステム構成で、商用電源直入れ駆動での評価を実施した。

実際に絶縁劣化している電動機を使って、一般的な絶縁抵抗計での測定結果と比較検証するのが理想であるが、そのような電動機は入手困難である。代わりに、図4のように既知の抵抗 $R_0$ を設置し、絶縁抵抗の劣化を模擬した状態で測定した。この時に使用した電動機は初期の健全な状態であり、絶縁抵抗は絶縁抵抗計による測定で100 M $\Omega$ 以上を示していた。なお、電源は三相200 V / 60 Hzとした。

検証結果を表1に示す。 $R_0=1.0$  M $\Omega$ に対して測定結果の誤差は5.7%であった。3章で述べた対策を行わず、図2のシステム構成であれば、同条件で誤差50%を超えるレベルであり、大幅に改善している。絶縁劣化が進行していくことを模擬して $R_0$ を小さくすれば、それに追従した測定結果となっており、実際の保全現場での状態監視に十分耐えうる性能であると判断できる。なお、これはT相の絶縁劣化を模擬しているが、他相の検証でも同様の結果が得られている。

表1 微小IOr検出性能の検証

RO [MΩ]	測定結果 [MΩ]	誤差 [%]	参考：IOr理論値 [μA]
1.0	0.943	-5.7	200.0
0.9	0.853	-5.2	222.2
0.5	0.499	-0.2	400.0
0.2	0.199	-0.5	1000.0

次に、図11のシステム構成で、インバータ駆動での性能評価を行った。インバータの運転周波数を変える以外は、直入れ駆動と同じ条件である。

商用電源周波数と接近した場合として、運転周波数を60 Hzに設定した検証結果を表2に示す。従来方式では、RO=1.0 MΩでの測定結果が、0.2 MΩ~1.3 MΩ程度の範囲でバラついていたが、本技術では安定して高精度な測定結果が得られた。インバータ駆動における従来の問題を解決して、絶縁抵抗1 MΩを基準とする状態監視を実現する性能を有していると判断できる。

表2 インバータ運転周波数=商用電源周波数の検証

RO [MΩ]	測定結果 [MΩ]	誤差 [%]	参考：IOr理論値 [μA]
1.0	0.976	-2.4	200.0
0.9	0.879	-2.3	222.2
0.5	0.492	-1.6	400.0
0.2	0.207	3.5	1000.0

商用電源周波数と異なる場合として、運転周波数を50 Hzに設定した評価結果を表3に示す。インバータ運転周波数によらず、絶縁抵抗の計測が実現できていることを確認した。

表3 インバータ運転周波数≠商用電源周波数の検証

RO [MΩ]	測定結果 [MΩ]	誤差 [%]	参考：IOr理論値 [μA]
1.0	0.944	-5.6	200.0
0.9	0.844	-6.2	222.2
0.5	0.508	1.6	400.0
0.2	0.210	5.0	1000.0

## 5. むすび

インバータ駆動において商用電源周波数がインバータ運転周波数と近く“うなり”現象があっても、提案するユニークな漏洩電流分離手法により高速に絶縁抵抗を計測することが可能となった。さらに、計装アンプ一体型ZCTにより、工業環境に常設する機器として、ノイズ耐性も実用に耐え得るレベルで製品化することが出来た。本技術により、アプリケーションを限定せず、電動機が運転状態で状態監視ができる。

「モータ状態監視機器K6CMシリーズ」では絶縁抵抗測定以外に振動、温度、電流の測定が可能であり、それぞれの機器を組み合わせることで、電動機の各種故障要因に紐

づく状態監視が可能となる。これらを常設し、リアルタイムで設備の状態を把握することで、保全現場の事後保全を最小化し、予防保全へ転換できると考える。

## 参考文献

- 1) 日本電機工業会：「JEM-TR 160 一般用低圧三相かご形誘導電動機の取り扱い及び保守点検指針」, 1987,
- 2) 古谷一彦. 低圧回路の漏電検出技術. 電気設備学会誌. 2013, Vol.33, No.4, p. 254-256.
- 3) 日本電機工業会. 「伸びゆくインバータ」2017~2018年版パンフレット. 2017, 5200, p.1-8.
- 4) 大浜庄司. 自家用電気技術者実務読本. 第2版, オーム社, 1988, 256p, ISBN4-274-03208-6.
- 5) 日本電気協会 需要設備専門部会. 自家用電気工作物保安管理規定 JEAC8021-2013. 第2版. オーム社, 2013, p.209-216.
- 6) タナシン電機株式会社. 漏洩電流算出装置及び漏洩電流算出方法. 特許第5631444号. 2014-11-26.
- 7) 森本雅之. 統合接地システムにおけるPWMインバータの漏洩電流への対策. 電気設備学会誌. 2011, Vol. 31, No. 6, p.436-442.
- 8) 飯盛憲一, 篠原勝次, 樋口剛. PWMインバータ駆動誘導電動機のコモンモード等価回路. 電子情報通信学会技術研究報告. EE, 電子通信エネルギー技術. 2002. p.19-24.

## 執筆者紹介



横田 晃司 Koji Yokota

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 商品事業本部  
コンポ事業部 第一開発部  
専門：電気電子工学



竹内 豪 Tsuyoshi Takeuchi

オムロン 阿蘇株式会社 技術統括部  
専門：電気電子工学  
所属学会：電気学会、電気設備学会、  
日本太陽エネルギー学会

# 制御機器からの IoT データ収集技術

小林 義明

近年、センサなどの制御機器の生み出すセンシングデータを AI などの最新 IT 技術を駆使して活用することの重要性が高まっている。その促進には制御機器の不統一なセンシングデータを体系化された IoT データに変換して収集・蓄積することが重要である。

FA 現場で制御を担ってきた PLC をデータハブとすることで、多様な制御機器からの生データを体系的に IoT データに変換することを試みた。

実現手段として制御機器の仕様情報をライブラリ化した「機器情報ライブラリ」と、それを参照してデータ収集・変換プログラムを自動生成するソフトウェア「フォーマットツール」を開発した。自動生成されたプログラムを PLC に転送することでデータ収集から変換、IT 層への送信を統合的に実行できる。

## IoT Data Collection from Control Devices

Yoshiaki Kobayashi

In recent years, it has become important to make a full use of sensing data from control devices like sensors via new IT technology such as AI. To accelerate this, it is important to collect and transform ill-formed sensing data from control devices to well-formed data.

In this paper, we have tried to transform raw data form various control devices to IoT data systematically by using PLC in FA field as a data hub.

As an implementation, we have developed “Device Information Library” which contains specifications of devices and “Formatting Tool” software which generates PLC programs to collect and convert data based on Device Information Library. The generated programs transferred into a PLC execute integrally data collection, transformation and upload to IT layers.

### 1. まえがき

ファクトリーオートメーション（以下、FA）では用途やその時代の技術水準に応じて様々な制御機器インタフェースが乱立してきた。インタフェースの例としては古くからあるアナログ入出力や、近年では IO-Link などの通信インタフェースがある。FA 現場では対象や目的に応じてこれらの中から最適な機能・性能を持つインタフェースが選択されてきた。また、制御機器は長期間利用し続けることが珍しくなく、新規設備であっても信頼性重視の観点から旧式で実績のある制御機器をあえて選択する場合もある。この結果、FA 現場では接続インタフェースが劇的に淘汰・集約されることはなく混在して稼働していることが一般的である。

このような多種・多様な制御機器を機能させるためには、制御機器（以下、単に機器）をプログラマブルロジックコントローラ（以下、PLC）や産業用 PC（以下、IPC）のような汎用機器に接続したうえで、制御用のプログラムを記述するのが一般的である。プログラミングに際してはイン

タフェースごとに異なる知識が必要となる。また、同じインタフェースであっても機器ごとに単位や有効桁数などの特性が異なっている。さらにプログラミングは自由度が高いため、プログラミング結果は属人的なものとなる。このような多様性や属人化により FA 現場が生み出すデータ形式は不統一になりがちであり、制御データを分析などに二次利用する妨げとなっている。

従来の装置開発では PLC や IPC などのコントローラを中心とした機器間の連携が同一装置内に限られることが多いため、データ形式の不統一が問題視されることは少なかった。対象となる機器は制御に直接関わるものに限られ技術者の負担はそれほど大きなものではなかった。性能・品質の属人性は摺り合わせ型開発としてむしろ強みとも考えられてきた<sup>1)</sup>。

しかし、第四次産業革命<sup>2)</sup>を目指す取り組みが加速する中、制御には直接関係しないものも含め、かつてないほどの多くのセンシングデータを収集して、装置内外を問わず横断的に分析活用する必要性が高まってきた。そのような活用の例としては総合設備効率や省エネルギー、トレーサ

ビリティなどがある。オムロンもIoTサービス基盤「i-BELT」を立ち上げ、この取り組みを加速させている<sup>3)</sup>。

このような用途ではデータを現場で収集された「あるがまま」の多様な形式で集めるのではなく、単位や精度などのメタ情報を付加したうえで、IT層での分析やAI処理などに適した形式に統一して収集することが求められる<sup>4)</sup>。

また、各データの有用性は分析をして始めてわかることが多く、収集対象を絞ることは困難である。このため、多数のセンサからデータ収集するためのプログラミングコストは増大し、情報活用の取り組みを開始する際の大きな障害となる。

本稿ではライブラリ化された機器の仕様情報に基づいてデータ収集・変換プログラムを自動生成することでPLCを機器から収集したデータを集約して送信するデータハブとし、アナログセンサを含めた多様な制御機器からの生データを体系的にIoTデータに変換する試みについて述べる。

## 2. 課題

**2.1 OT-IT間のデータモデルの違い** 制御機器から収集したデータをAIなどのIT技術を駆使して活用するためには、リレーショナルデータベースやデータレイク、メッセージブローカなどのIT技術に基づくストレージやインターフェースに送信することが一般的である。送受信のためにはPLCやIPCが送信するデータモデルと、受信するIT側のデータモデルを同一にすることが必要である。PLCやIPCのプログラムはOT (Operational Technology : 運用・制御技術) と呼ばれるスキルを持ったエンジニアによって作成されるのに対し、受信側はITスキルを持ったエンジニアによって作成される。

このようにOTとITの間のIoTのためのデータ交換では、異なる分野のエンジニア間でのコミュニケーションが発生する。ここで用語の違いや知識の違いがあるため、データ交換の実現までに時間がかかり、データ交換において齟齬が発生し誤ったデータが利用されるなど課題が生じやすい。

また、FA現場の装置はCADやPLCツールを使ってFA技術者によって設計され、機器の接続などの構成情報(以下、機器構成情報)はこれらの設計情報に含まれる。OT側の情報を正しくIT側に伝達するためには、設計情報を一次情報としてIT側のデータモデルを作成するべきであるが、技術や手法の違いから情報の断絶が発生している。

**2.2 データ形式の不統一** データ収集をプログラムで行う場合、収集されるデータの形式や付加されるメタ情報はプログラムの実装者に依存して差異が生じる。差異の例としてはデータの項目名や値の型・精度、単位の表記などがある。

同一の業界や組織内であれば規格や規約によって定型化を図ることは可能である。しかし、規格や規約は業界や組織ごとに異なっている。それらを遵守するかどうか実装者次第であり徹底することは容易ではない。IoTでは業界

や組織を横断したデータ収集が行われる場合も多く<sup>5)</sup>、形式の定型化はより一層困難となる。

**2.3 プログラミングコスト** PLCやIPCはプログラム次第で様々な処理を行うことで、ユーザの多様なニーズに応えることができるが、その反面、データ収集のように単純な処理であってもプログラムが必要になる。プログラム作成にあたってはPLCやIPCに接続するインターフェースやセンサの仕様情報をデータシート等から読み取り、パラメータとして組込むことになる。

このようなデータ収集・変換プログラムは類似性が強く、熟練のエンジニアであれば、ある程度ルーチン化できるものの、多数の機器を対象にする場合のコストは無視できない。また、練度の低いエンジニアが作成する場合、性能や品質に問題が生じるリスクが高くなる。

## 3. 技術内容

**3.1 概要** 制御機器の仕様情報を登録した「機器情報ライブラリ」と、機器情報ライブラリを参照して取得した情報からデータ収集・変換用のPLCプログラムを自動生成するソフトウェア「フォーマットングツール」を開発した。「機器情報ライブラリ」が登録対象とする制御機器はセンサ類や、それらをPLCに接続するための入出力ユニットや通信ユニットなどがある。

生成するプログラムの言語には、テキストベースであるため自動生成技術との親和性が高く、変換処理に必要な論理演算・数値計算を得意とする<sup>6)</sup>ことから国際標準規格IEC61131-3の構造化テキスト(ST言語)を採用した。

フォーマットングツールによって生成されたプログラムは、PLCに接続された機器からデータを収集し、「工業量変数」と名付けた構造体に格納する。機器から取得されたデータは「デバイス変数」と呼ばれるPLCのメモリ領域に格納され、その値は工業量そのものではなくAD変換値のような代用値であることが多い。このような場合は生成されたプログラム内で工業値に変換したうえで工業量変数に格納する。工業量変数はネットワーク変数としてPLCの外部からの読み出しや、PLCのデータベース接続機能により外部データベースへ送信することも可能である。

図1にシステム構成を示し、続いてプログラム生成からデータ収集までの流れを説明する。

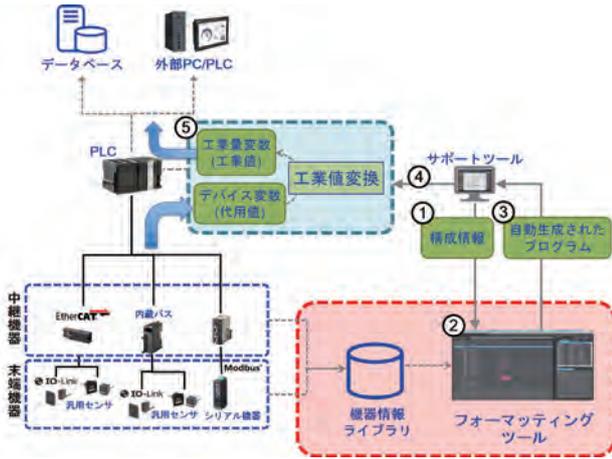


図1 システム構成

- ① PLCのサポートツール（以下、サポートツール）で設定済の中継機器（3.2に記載）までの機器構成情報をフォーマットングツールに取り込む
- ② ユーザ選択操作に従い機器情報ライブラリから制御機器の工業量情報、変換情報、単位情報などを①に追加し、デバイスマップ（3.2に記載）を完成させる
- ③ 完成したデバイスマップからプログラムを自動生成する
- ④ 自動生成したプログラムをサポートツール経由でPLCに転送する
- ⑤ 転送したプログラムをPLC上で動作させて機器からのデータ収集とネットワーク公開・データベース送信を行う

**3.2 デバイスマップの作成** サポートツールはPLCに接続している入出力ユニットや通信ユニット（以下、中継機器）を機器構成情報として管理している。フォーマットングツールはPLCの機器構成情報を取り込み、それを中継機器の先にあるセンサなどの末端機器まで入力および設定することでデバイスマップを作成する。図2はデバイスマップの概念図である。

デバイスマップはPLCを始点、各機器をノードとするツリー構造によって定義されており、各機器は1つ以上の入力と、1つ以上の出力を持つように構造化している。この構造は接続インタフェースに依存しないものであり、接続インタフェースの違いは各入出力の属性として機器情報ライブラリに登録されている。フォーマットングツールは中継機器の入力と末端機器の出力それぞれのインタフェースが一致するようデバイスマップを構築する。

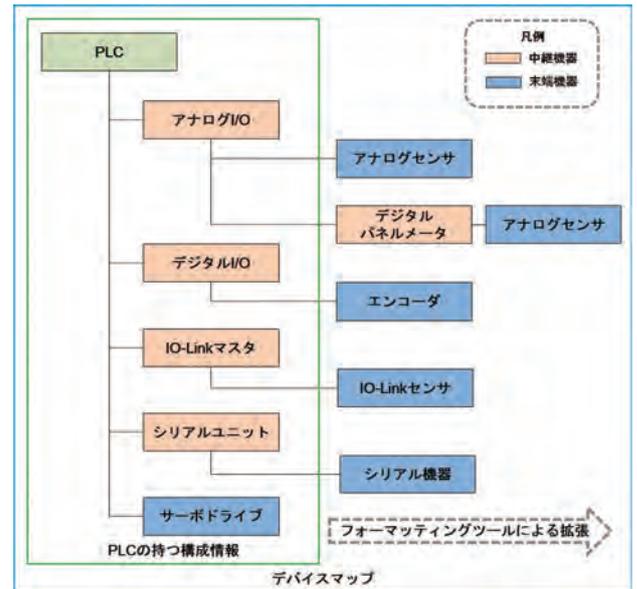


図2 デバイスマップの概念図

機器情報ライブラリを簡略化した図3と、フォーマットングツールの画面（図4、図5）で具体例を説明する。サポートツールの持つ機器構成情報から中継機器の形式（①）を条件としてライブラリを検索し中継機器の入力が持つアナログなどのインタフェースをユーザに提示する（②）。提示されたインタフェースをユーザが選択したら、仕様の合致するインタフェースと工業量（③）を出力として持つ機器を列挙し、選択候補としてユーザに提示する。選択候補のいずれかをユーザが選択（④）すると、その機器のパラメータを取得して計測対象の工業量を特定する（⑤）。

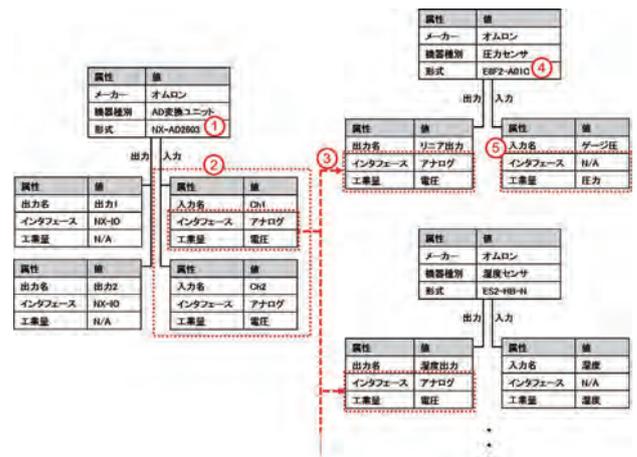


図3 機器情報ライブラリを使った機器選択



図4 選択可能機器の提示

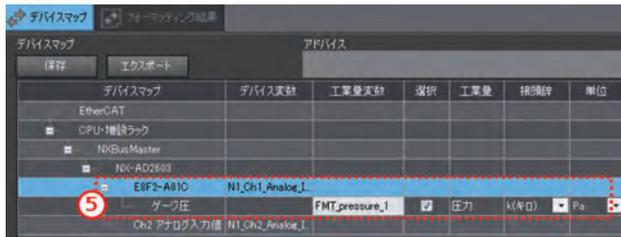


図5 工業量の特定

3.3 共通雛形プログラムと機器個別パラメータへの分解

個別の機器に応じたデータ収集・変換プログラムを生成するために、接続インタフェースごとに共通の雛形プログラムと、機器個別のパラメータに分解して機器情報ライブラリに登録した。

以下、アナログセンサを例として説明する。アナログセンサは計測した工業量を電圧もしくは電流に変換して出力する。AD変換ユニットはアナログセンサの出力をデジタル値に変換する。PLCのプログラムではこのデジタル値をAD変換ユニットの仕様に従って電圧もしくは電流の値に変換したのち、アナログセンサの仕様に従って更に変換を行うことで工業量を得る。図6に示す例では計測値 50kPa が電圧値 3V を経て変換値1200としてAD変換ユニットのデバイス変数に格納される。

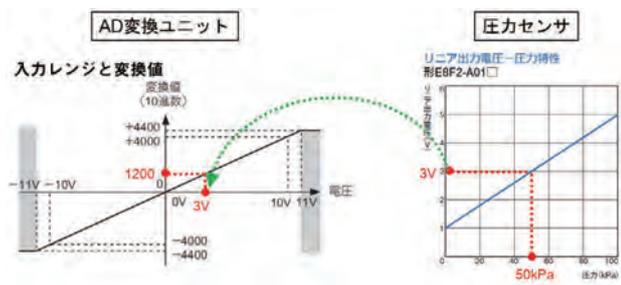


図6 計測値の取り込み

デバイス変数の値を工業量である圧力 (単位: kPa) に変換するために図7に示す線形変換式 (1) (2) を使う。各変数の意味は表1の通り。Pressureが工業量変数である。

$$\text{Voltage} := (\text{Analog\_Input\_Value} + 4000) / 8000 * 20 - 10; \dots(1)$$

$$\text{Pressure} := (\text{Voltage} - 1) / 4 * 100; \dots(2)$$

図7 工業量への変換

表1 変換式で用いる変数

変数名	内容	単位	値の例
Analog_Input_Value	デバイス変数	なし	1200
Voltage	電圧値	V	3
Pressure	圧力値	kPa	50

この線形変換式はアナログセンサやAD変換ユニットに共通するものであるが、傾きやオフセットを決めるパラメー

タは個別の機器によって異なる。そこで機器情報ライブラリでは (1) (2) のような変換式を生成するために図8で示す共通の雛形プログラムを登録している。雛形プログラムには  $\{ \}$  で囲まれたパラメータが組み込まれている。線形変換式でのパラメータ一覧を表2に示す。

$$\{ \text{output} \} := (\{ \text{input} \} - \{ \text{outMin} \}) / (\{ \text{outMax} \} - \{ \text{outMin} \}) * (\{ \text{inMax} \} - \{ \text{inMin} \}) + \{ \text{inMin} \};$$

図8 線形変換式の雛形プログラム

表2 線形変換式のパラメータ一覧

パラメータ名	内容	意味
input	変数名	変換前の値
output	変数名	変換後の値
inMax	数値	入力上限
inMin	数値	入力下限
outMax	数値	出力上限
outMin	数値	出力下限

機器情報ライブラリ内には機器ごとにその仕様に基づくパラメータの具体的な値を登録している。フォーマットツールは雛形プログラム内のパラメータをこの具体的な値で置き換えて変換式を自動生成する。図8の場合、AD変換ユニットでは表3の値に置き換えることで図7の (1) 式が生成され、圧力センサでは表4の値に置き換えることで図7の (2) 式が生成される。

表3 AD変換ユニットのパラメータ例

パラメータ名	値
input	Analog_Input_Value
output	Voltage
inMax	10
inMin	-10
outMax	4000
outMin	-4000

表4 圧力センサのパラメータ例

パラメータ名	値
input	Voltage
output	Pressure
inMax	0
inMin	100
outMax	1
outMin	5

上記の例は単純なパラメータ置換であるが、雛形プログラムからのプログラム生成ではパラメータの値に沿って分岐や繰り返し処理を使うことも可能である。これにより符号の有無によるキャスト処理や、エンコーダが出力するピッ

ト列をデコードし測定値を抽出する処理などを共通の雛形プログラムから生成できる。また、変数値の変換処理だけでなく、通信プログラムであっても生成できる。例えばModbus RTUであればコマンド送受信処理を雛形化し、そこに機器情報ライブラリに登録したファンクションコードやレジスタアドレスなどの機器個別パラメータを埋め込むことでシリアル通信プログラムを自動生成できる。

表5に示す5つの接続インタフェースを例に共通処理の雛形プログラム化とパラメータへの分解を行い、個別の機器に対応するプログラムの生成ができることを確認した。

表5 接続インタフェースと共通処理

インタフェース	共通処理	主なパラメータ
アナログ	線形変換	入出力の上下限
エンコーダ	ビットの結合	ビット数
	デコード	エンコード方式 (BCD、グレイコード)
IO-Link	ビット演算	ビットオフセット ビット長
	キャスト	符号の有無
	線形変換	傾きとオフセット
EtherCAT	線形変換	傾きとオフセット
Modbus RTU	コマンド送受信	ファンクションコード レジスタアドレス ワード数
	エンディアン変換	エンディアン種別
	キャスト	符号の有無
	線形変換	傾きとオフセット

**3.4 設定選択によるパラメータ切り替え** 変換式に組み込まれるパラメータが設定によって変化する機器に対応するため、機器情報ライブラリは設定ごとにパラメータを変更可能なように設計されている。例えば入力仕様が切り替えられるAD変換ユニットの場合、表6に示すようなパラメータ群を機器情報ライブラリに登録する。

表6 設定によってパラメータが変化する例

設定名	工業量	inMax	inMin	outMax	outMin
-10-10V	電圧	10	-10	4000	-4000
0-5V		5	0	8000	0
1-5V		5	1	8000	0
0-10V		10	0	8000	0
4-20mA	電流	20	4	8000	0

図9のようにフォーマットツールを通して設定名を選択することで、適切なパラメータが適用される。

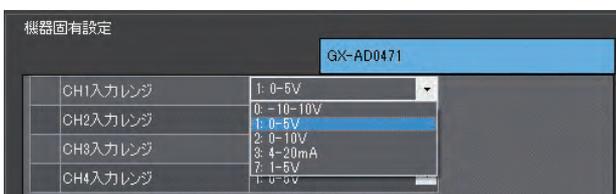


図9 設定選択によるパラメータ決定

**3.5 データ形式の定型化と外部への送信** 工業量変数の格納先として表7に示すPLC内の構造体を自動生成する。

表7 収集データの構造体定義

項目	データ型	内容
TimeStamp	DATE_AND_TIME	収集時刻
FMT_<識別子>	LREAL	工業値
FMT_<識別子>_unit	STRING	単位
FMT_<識別子>_physicalQuantity	STRING	工業量名

収集したデータのメタ情報である単位および工業量は機器情報ライブラリ内にあるリストから選ばれ、文字列型として格納される。このリストはSI国際文書および日本の計量法、計量単位令で定められた表記に従って作られており、属人的な表記の差異が生じないようにしている。

同じくメタ情報である収集時刻にはPLCの内部時計の時刻を使うことで、すべてのデータの収集時刻が同一の基準で記録されるようにした。

PLCがデータベース接続機能を搭載している場合、フォーマットツールは工業量変数の値をPLCから上位システムにあるデータベースのテーブルに格納するプログラムを生成する。またフォーマットツールは、上記の格納のための、データベースのテーブルを定義するSQL文も生成する。このSQL文をデータベースに対し実行することでPLCとデータベースのデータ構造を同期して構築できる。(図10参照)

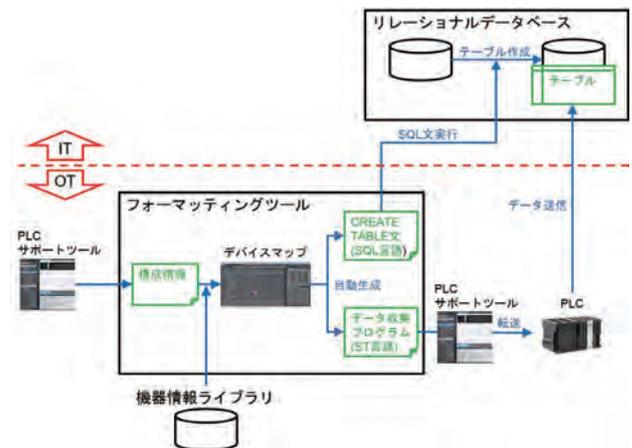


図10 データベース送信のデータフロー

## 4. 効果

機器情報ライブラリは制御機器仕様というOTドメインの知識の一種をライブラリ化したものと言える。また、サポートツールの持つ機器構成情報は装置の設計情報の一部である。フォーマットツールはこれらを一次情報として、工業量変換した情報を表現する定型の構造体と、それを収集・変換・送信するプログラムを自動生成する。またIT層のデータモデルとしてデータベースのテーブル定義を自動生成する。

すなわち OT および IT の異なる 2 つの分野の知識・スキルをツール化することで同一のエンジニアによる作業で完結したデータベースへの送信の実行が可能になった。これにより 2.1 で述べたコミュニケーションでの遅れや齟齬を回避し、OT-IT 間の情報断絶を軽減することが期待できる。

フォーマットツールは機器情報ライブラリの内容に従って一定の規則のもとに構造体の定義を自動生成するため、同じ機器構成に対して同じ結果が得られる。これにより 2.2 で述べたような作業への依存なしにデータ形式を統一することができる。

データの定型化には本稿の技術の他に、ゲートウェイデバイスと呼ばれるデータハブ機能を担う専用装置を用いる方法や、クラウドを含む IT システム上で変換処理を行う方法がある。これらに対する本稿での取り組みの利点としては、PLC 自身がデータ収集を担うため、生産タクトや制御周期に同期したデータを扱いやすいことや、装置の設計情報を活用できることなどが挙げられる。

フォーマットツールは機器情報ライブラリを利用することでデバイスマップ作成時にユーザが機器および設定の選択という簡単な操作をするだけで、プログラムの生成に必要な情報を特定することができる。

このため 2.3 で述べたように従来の方法で必要とされたデータシートからの仕様情報の読み取りが不要となる。また、仕様の読み誤りによるプログラミングミスを抑止し、デバッグ工数を低減できる。これにより、データ収集開始までの費用・期間増の要因となるプログラム作成コストの低減を図ることができる。

## 5. むすび

本稿での取り組みにより自動生成されたプログラムを使って PLC をデータハブとすることで、アナログセンサを含めた多様な制御機器からの生データを体系的に IoT データに変換するというアイデアの実現性と有用性を実証できた。

現在の機器情報ライブラリに登録されている機器は限られたものである。今後市場に存在する多くの機器をカバーするためにはパラメータの登録や更新を管理・運営する仕組み作りが求められる。

また、今回はデータの送信先をリレーショナルデータベースとしたが、これを各種の IT 接続に展開することで、FA 現場の情報を多様な IT エコシステムと結合するシステムを構築する際の一助となることを目指したい。

## 参考文献

- 1) 藤本隆弘. 能力開発競争. 中央公論新社, 2003, 406p.,
- 2) 総務省. 厚生労働省. 文部科学省. 2018年版ものづくり白書. 2018, 325p.,
- 3) オムロン株式会社. 共創型現場データサービス i-BELT. オムロン制御機器. 2018-09-20. <https://www.fa.omron.co.jp/solution/i-belt/>. (参照 2018-12-19) .
- 4) Industrie 4.0 Platform. インダストリー4.0実現戦略, 2015.,
- 5) スマートマニュファクチャリング特別委員会. 2016年度版 製造業2030. (一社) 日本電機工業会, 2016, 76p.,
- 6) (社)日本配電制御システム工業会ほか. はじめての IEC61131-3. PLCopen Japan, 2011, 105p.,

## 執筆者紹介



小林 義明 Yoshiaki Kobayashi  
 インダストリアルオートメーションビジネス  
 カンパニー  
 技術開発本部  
 第1技術部  
 専門: ソフトウェア工学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

## 超高速 CT 型 X 線自動検査装置の開発

七呂 真

基板実装の世界では、はんだが見えず外観検査困難な部品や基板が増加している。また、自動車業界をはじめ、はんだの接合強度や全面検査など高品質を担保するための要求が増えている。これらの要求に答えるべく、CT型X線自動検査装置において、最たる課題であったインライン全面検査に必要なタクトを実現するための最新技術を紹介する。

高精度なモーションコントロール技術と高速画像センシング技術、これらの組合せにより開発された非停止で撮像する連続撮像技術を搭載したVT-X750は、従来機から2倍以上の大幅なタクト改善をはかり、低被曝検査を実現し、業界で初めてインラインでの全面検査を可能とした。信頼性を向上した新たなハードウェアを土台とし、時代とともに進化するオムロンのAXI (Automated X-RAY Inspection system) を紹介する。

## Development of super high-speed CT X-ray automatic inspection system

*Makoto Shichiro*

In the board mounting industry, there are an increasing number of parts and boards that are difficult to be inspected with AOI because solder is invisible. And high quality requirements such as bonding strength of the automobile industry and full surface inspection of the solder are increasing. In order to respond to these needs, we introduce the latest technology for achieving within the given on-line takt time required which was the most problematic task in CT type X-ray automatic inspection equipment.

For continuous imaging technology, highly accurate positioning control and high speed image sensing are required. With this technology, the VT-X750 realized a significant improvement in takt time by more than twice as compared with the conventional machine, realized low radiation inspection and made the first in-line full surface inspection possible in the industry. Based on a new platform, we introduce Omron's AXI (Automated X-RAY Inspection system) that brings about a safer and more secure world while evolving with the times.

### 1. まえがき

近年技術進歩が目覚ましい、EV（電気自動車）や自動運転などのADAS（先進運転支援システム）により、基板実装の世界は、さらに高密度化されていく流れとなっている。また、はんだが見えず外観検査困難な部品や基板も増加している。フィレットレスのチップ部品、接合部がパッケージの下面に配置されたBGA（Ball Grid Array）などがその代表である。市場の中でも、自動車業界が要求する品質保証のレベルは非常に厳しく、抜き取りでなく基板全数を検査すること、そして、はんだ形状を計測して接合強度まで検査することが求められるケースも多い。さらには、生産現場における労働者不足もあいまって、高精度・高品質検査の自動化ニーズの拡大が急速に進んでいる。そのため、実装業界における基板の品質課題や製造ライン停止といった事象が顧客の重大リスクとなり、不良基板が流出すれば、

人々や社会の安全を脅かしかねない危機に直結する。よって、不良基板を世の中に出さない・出せない仕組みを提供し、我々の顧客の製品品質を向上させることが重要となってきた。

こうした世の中の流れを受けて、オムロンのX線自動検査装置AXI (Automated X-RAY Inspection system) は、部品の下面にはんだ部が存在するような外観では見えないものが検査できる装置としてSMT (Surface Mount Technology) 生産ラインへ普及してきた。しかし、従来の装置ではタクトに課題があり、オフラインでの抜き取り、あるいは重要部品に限定したインライン検査としての使われ方が主となっていた。本稿では、この課題を大幅に改善し、自動車業界の基板実装工程においても、インラインとして導入できるレベルの高速化を実現し、基板の品質を全数保証することを可能としたCT型インライン自動X線検査装置VT-X750の技術を紹介する（図1）。



図1 VT-X750

## 2. 高画質を実現するCT方式を用いたAXI

**2.1 X線画像診断方式の比較** X線をつかった画像診断の方式としては主に透過・トモシンセシス・CT (Computed Tomography) といった種類がある。それぞれの方式ごとには次のような特徴がある。

透過方式は、X線源とワーク、X線カメラを垂直に配置し1枚の画像を取得する方式である (図2)。投影した画像は2次元 (2D) データであり画像取得のための撮像時間は少ないが、扱うデータ量も少ないため、画質は他の方式に劣る (図3)。

方式	透過	トモシンセシス	CT
撮像方法の違い	1枚撮る	(制限された角度範囲内で) 角度を変えてN枚撮る	360度回転して N枚撮る

図2 X線画像取得方式

方式	透過	トモシンセシス	CT
取得できる画像	投影した画像	任意の高さを強調した画像	再構成した3Dデータから切り出した画像
被曝量	被曝量: 0.01~1 mSv	被曝量: 0.1~30 mSv	被曝量: 1~100 mSv
画質の特徴	背景と断面画像を分離しにくい	背景と断面画像を分離しやすい フォーカス位置からずれるほどぼやけが大きい	背景と着目断面画像を分離しやすい フォーカス位置からずれてもぼやけが少ない

図3 X線画像取得方式ごとの特徴

トモシンセシス方式は、X線源とワーク・X線カメラの位置関係において、制限された角度範囲内でN枚画像を取得する方式であり、任意の高さを強調した断層画像を取得することが可能となる (図3)。透過方式にくらべ、撮像に時間がかかるがCT方式よりは速く取得することが可能である。画質は透過方式よりはよいが、X線源とX線カメラ

のフォーカス位置から離れた断層像においてはCTにくらべてぼやけた画質になる傾向がある (図3)。

CT方式は、X線源・X線カメラとワークの位置関係において、360度回転してN枚の画像を取得し、3次元 (3D) データを再構成する方式である (図2)。他の方式に比べ扱うデータが多いため、画質が最もよく、再構成した3Dデータから縦横だけでなく、高さ方向にもデータが活用できることが利点であり、X線源とX線カメラのフォーカス位置から離れた断層画像においてぼやけが少ない鮮明な画質を得ることができる。ただし、撮像においては時間がかかり、その分ワークへの被曝量も多くなるのが一般的である (図3)。

**2.2 オムロンのAXI** 我々は、はんだの接合面の形状を正確に検査するため、3Dデータ中の任意箇所を特定し画像で診断できるCT方式を採用している。2009年に、CT撮像方式での自動検査装置VT-X700をリリースして以降、BGAのボイド検査などを中心に多くの顧客の検査要求にこたえてきた。当社のAXIには、多岐にわたる技術要素が組み合わさっており、外観検査装置で積み上げた多くの知見をベースとして、基板の裏面の制約を受けないCT方式の利点を活かし、高精度な検査を実現している。大きな技術要素として、安全で屈強かつ高精度なセンシングを実現するハードウェア、応答性に優れ高速なコントロールを実現するソフトウェアから成り立っている。ハードウェアにおいては、大きくはメカ、エレキ、撮像の分野から構成されており、電気機械安全・遮蔽・軸の動作精度・制御応答性・画質・撮像速度などの設計パラメータが装置の性能において重要である。ソフトウェアにおいては、機差を補正するための組み立て調整ソフト、検査プログラムを作成する本体アプリケーション、撮像した画像を3Dデータとして作り上げる再構成処理、取得した3Dデータに対して検査を実施するアルゴリズムの分野からなる。これらの技術要素は互いに複雑に絡み合うため、機能モジュールごとの関係性をシームレスに精度よく動作させることが、高精度かつ高速な検査において必要となる。また、技術のコアである高品質なCT画像の取得のためには、特に撮像デバイスの基本性能、高精度なジオメトリ設計と制御、ロバストな補正処理と検査アルゴリズムが重要である。

**2.3 撮像デバイスの基本性能 (FPDとX線源)** FPD (フラットパネルディテクタ) は、シンチレータという蛍光体を通してX線を光に変え、電気信号として変換し、デジタル画像を取得するためのカメラである。画素単位で読み込むため、鮮鋭性や感度の高い画像を得ることができる。当社では、対象物を鮮鋭に撮像するため、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) タイプのFPDを搭載し、検査で切り分けたい部品や対象に応じて、最適なコントラスト画像を得られるようパラメータを設計している。

X線源には、大きく開放管と密閉管という2種類がある。開放型のX線源は、線源外部に真空ポンプなどを配置する

必要があり、フィラメントなどの寿命が短いことなどコストが高くなるうえに、線源自体の重量が重くなってしまうというデメリットがある。これに対し、密閉管は、X線発生部がガラスなどの密閉容器で常時真空に保たれているため、管外にポンプを設置する必要がなく、線源自体が小型であるのが特徴である。当社は、軽量でかつ焦点径の小さいマイクロフォーカス密閉管線源を選定し、搭載している。

**2.4 高精度なジオメトリ設計と制御** 当社のインライン型 AXI のジオメトリ設計は、回転テーブル式ではなく並行テーブル式を採用している (図4)。これは、対象物に対し X線源や X線カメラ (FPD) の物理的な位置を変えることで CT 画像を取得する方式である。この理由は、回転テーブル式では 3D データの視野が円形で狭く、画像の端でぼやけが発生しやすいことや、回転速度の制限により撮像スピードの高速化に限界があるためである<sup>1)</sup>。

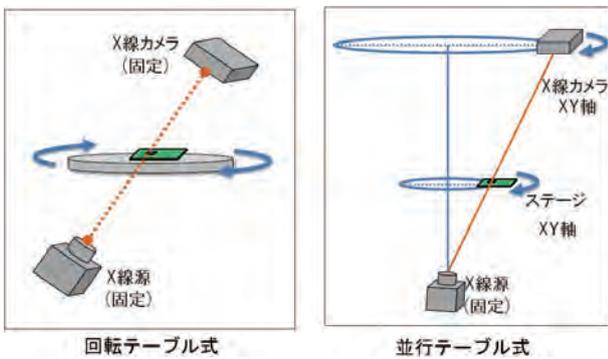


図4 CT撮像システムの方式

この並行テーブル式において特に重要となるのは、XY軸の巡回軌跡の位置精度である。また、Z軸については検査分解能を切り替える際や、変位系にて計測するワークの反りへの追従する際に駆動するため、Z方向の軸の位置決め精度も必要となる。

各軸には高精度なガイドを設け、当社独自のモータ制御技術にて  $\mu\text{m}$  オーダーの位置決め精度を実現している。特に、XY軸の巡回の精度は、巡回軌跡を真円に近づけるほど良好な CT 画像が得られる。その土台となっているのが、必要な平行・真直度で組み付けられた品質のよいメカ部品、高精度の同期駆動を可能とする当社製の PLC (Programmable Logic Controller) やサーボモータによる制御技術である。また撮像デバイスは、剛性の高いフレームによって支えられ、末端部品が振動の影響を受けないよう屈強なハードウェアアーキテクチャで設計されている。

このように鮮明な CT 画像を得るには、単に先述した撮像デバイスの基本性能や画質に起因するパラメータを追求するだけではなく、機械要素に起因するパラメータも考慮しながら設計することが重要となる (図5)。機械要素に起因するパラメータとは、装置の機械的剛性や重量バランス、どのように撮像デバイスを巡回させるかというジオメトリ設計、そしていかに高精度な軸の位置決め制御を実現するかという装置のアーキテクチャのことを示す。

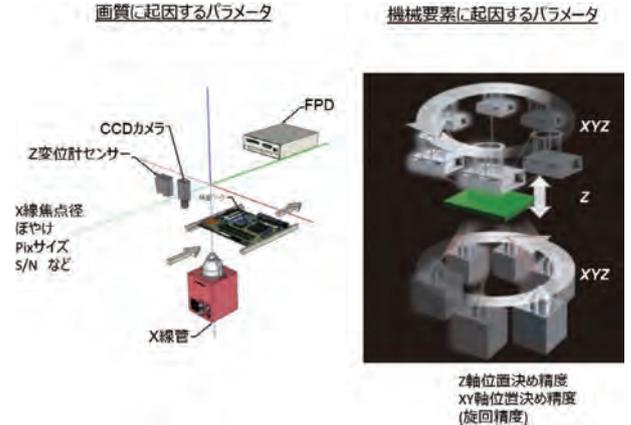


図5 画質に起因するパラメータと機械要素に起因するパラメータ

**2.5 ロバストな補正処理とアルゴリズム** 我々の AXI は、ハードウェアだけでなく、独自の再構成処理とアルゴリズム、外観検査装置での知見をベースに構築したソフトウェアアプリケーションにて、センシングした情報をスピーディに処理・コントロールを実施することで、高いはんだの形状再現性を実現し、接合面の検査を可能としている。

例えば、検査前にワークが装置内へ搬入された時に、停止する位置にはばらつきが存在するため、当社の AXI には、可視光照明とカメラを搭載しており、可視光で取得した画像を用いて、ワークのコンベア上での搬送停止位置のばらつきや回転ずれを補正する技術を搭載している。

また、正確なアルゴリズムの処理を行うには、再構成後の画像にて正しい断層位置を抽出する精度が要求されるが、装置内には、当社製の変位センサとコントローラを搭載しており、ワークの反りやたわみ量を計測して、Z軸の高さ位置を補正している (図6)。

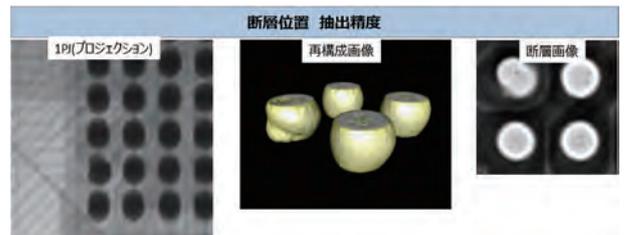


図6 断層位置抽出画像

### 3. インライン全面検査に向けた課題

インライン全面検査の実現に向けた課題としては、主にタクト、装置ハードウェアの信頼性向上があげられる。装置ハードウェアの信頼性とは、筐体重量とサイズ、検査ワークへの被曝量、メンテナンス性についてのことである。下記にそれぞれの課題を述べる。

**3.1 タクトの課題** CT撮像方式は、高精度な画質が得られる一方で、360度巡回しながら撮像することが必要となるため、それに要するタクトが大幅にかかってしまい、インラインでのタクトが満たせないという課題があった。

実際に当社の従来機VT-X700では、ある顧客の基板においては、1枚当たりの検査時間が約70秒かかっていたが、インライン用途で検査するには、37秒以下にする必要があった。よって、従来機であるVT-X700は、オフライン型として導入され検査を実施するケースが多くなっていた。当社のAXIをSMTのインライン用途で普及させるためには、いかにタクトの高速化を実現できるかということが大きな課題であった。

数多くの技術検証を実施した結果、特に大きな改善を必要としていたのが、メカの移動速度、中でもXY軸の回転速度であった。VT-X700はSTOP&GOという撮像方式を用いており、回転中の1PJ（プロジェクション：再構成の前段階における回転中のある角度で取得した1枚の画像）ごとの画像撮像時には軸を停止させて画像を取得していたため、1回転あたりのタクトが大幅にかかっていた。このSTOP&GOという方式は、確実に軸が停止してから撮像するので画像のブレは起きにくいですが、回転させるハードウェアユニットには、大きな振動や衝撃がかかるため、X線源は固定式にせざるを得ず、どうしてもステージとFPDを回転させる構造にする必要があった。そのため、FPDの回転半径が大きくなり、CT画像を得るまでの1回転あたりにかかる時間が大きくなっているというメカニズムになっていた。

**3.2 筐体サイズと重量の課題** インライン化を実現するためには、主に装置の筐体サイズと筐体重量にも配慮する必要がある。これは、X線検査装置は、SMT設備の中でも大きく重たいため、顧客の生産ラインへの運送や設置を考慮した際に標準的なサイズのコンテナで輸送できるか、搬入経路や床の耐久性は十分かなど検討する必要があるためである。このため、機械部品は、剛性を高めすぎてユニット重量やサイズが増加すると、装置が重く大きくなってしまい、輸送や設置にかかる作業負担とコストが増えて設備投資の導入障壁となる。これらはSMT市場において、インラインの設備として生産ラインに導入するには重要な要素となる。

VT-X700シリーズにおいて、検査対象となるワークサイズは250mm角のMサイズといわれるものまでしか検査できなかったが、第3世代のモデルVT-X700-Lでは、500mm角以上の大きな基板まで検査できる構造とした。しかし、この機種における装置の筐体サイズは2m以上となり、装置重量が5トン以上となった。そのため、顧客のラインへ設置するための運搬も特殊設備が必要で、顧客が大きな額の設備投資をする必要があった。また、線源が固定のままステージとFPDが回転する従来のジオメトリ構造のまま検査対象ワークサイズのカバレッジを広げると、ステージが巨大化しFPDの回転半径がより大きくなるためタクトはさらに遅くなってしまいう傾向となっていた。上記のように、いかに重量とサイズを抑え、運用設置性を考慮し、連続撮像時に画像にブレが発生しないようメカの剛性を確保するかが課題となる。

**3.3 検査ワークへの被曝量の課題** 検査ワークへの被曝量は、大きな基板や検査部品が増えるほど照射時間が増え、基板全体への被曝量も大きくなる。また、基板上に被曝耐性の弱い半導体素子などの部品が搭載されることも増えていく傾向があるため、継続的に基板への被曝量を低減する技術を検討することが必要である。

**3.4 メンテナンス性の課題** 従来機では、検査空間とデバイス格納ユニットが同一遮蔽空間内に存在しており、かつ各デバイスは立体配置となっており、手が入れにくい、腰がかがめないと見えない、工具が入りづらいといったように、メンテナンス性に課題があった。顧客の生産でインライン運用をするということは、装置の稼働率が増えるという事である。また、装置の隣には別の装置が存在するため、保守時などで装置を止められる時間を最小限にしなければならず、かつ、装置前後から確実にすべての部品のメンテナンスができるよう改善する必要があった。

## 4. インライン全面検査を実現するVT-X750

我々は長年、これらの課題を解決する技術を模索検討し、タクト課題を解決する「連続撮像」という強力な技術と、信頼性を向上したハードウェア設計にて、これらの課題を解決した商品VT-X750を開発した。

**4.1 タクト課題を解決する連続撮像技術** 以下にVT-X750に搭載している「連続撮像」技術の特徴を述べる。

**4.1.1 実現手段** 1つめのポイントは、回転撮像時メカが止まらず動き続けるということである。各視野の撮像時間を短縮するため、従来機種種のSTOP&GO方式のように画像1枚ごとに移動・停止・撮像を繰り返すのではなく、非停止で回転し、1視野分の全画像を取得する技術を構築した(図7)。



図7 連続撮像と従来のSTOP&GO方式の違い

メカは等速で回転する動作を繰り返すため、各軸の動作をいかに同期させ、回転軌跡を真円に近い状態とすることができかが重要となる。この技術を支えているのは、当社製のPLC NJコントローラとISサーボシステムによる真円の軌跡同期制御技術である。ただ単純に軸の動作を速く回転させるだけではなく、動的かつ高精度に各軸の同期制御を実現している。

2つめのポイントは、高速で画像取得しデータ処理するシステムである。独自の回路網で発行する撮像トリガシステムにて、メカが動作している最中でも次々に画像を取得できるシステムを構築している。メカが移動中に高速で撮

像する場合、画像のブレが起きやすくなることがわかって  
いるが<sup>2)</sup>、1PJ ごとの撮像開始時間を記憶し、その時間にお  
ける FPD と X 線源の位置関係を考慮した再構成技術でブレ  
を低減している。処理の速度についても、GPU (Graphics  
Processing Unit) を活用しながら、連続で高速伝送される  
画像を処理するスピードを確保することに成功した。

**4.1.2 結果と効果** このように、高精度なモーションコ  
ントロールと高速なセンシング技術の組合せが連続撮像技  
術である。2017年にリリースした VT-X750は、この連続  
撮像技術によってインライン検査に必要なタクトで CT 検  
査を可能とするという革新的な技術進歩を遂げた。従来機  
種である VT-X700と比較して、両面実装基板の標準的な検  
査条件における1視野の巡回撮像時間を7.7秒から3.2秒と  
いう倍以上の高速化に成功した。その結果、ある車載業界  
の顧客の基板の例では1枚あたりの検査時間が約70秒から  
35秒に短縮され、約2倍のタクトで検査が可能となった (図  
8)。



図8 連続撮像によるタクト短縮イメージ

この技術の利点は、等速な軸動作のため旋回するハード  
ウェアユニットに対する振動・衝撃が小さくできることだ  
である。そのため、X線源を旋回させ、重量物であるステ  
ージ部を固定にするジオメトリ構造とすることが可能とな  
った。その結果として、FPDやX線源の巡回半径を従来の約  
60%に抑え、1巡回にかかる速度を大幅に短縮することを  
可能とした (図9)。巡回半径を小さくしたことでも上述し  
た画像のブレは低減した。

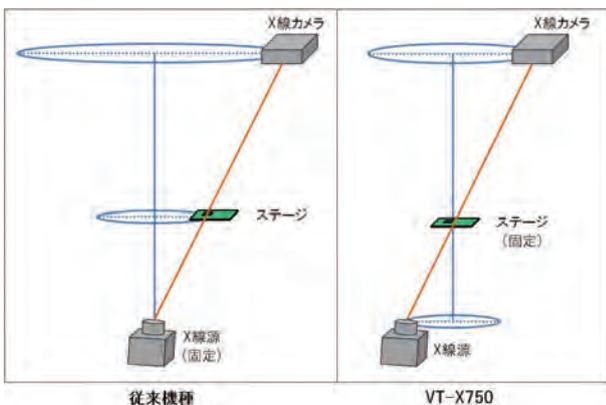


図9 撮像デバイスの配置と旋回軸

VT-X750のアーキテクチャは、シームレスな同期制御が  
核となる要素であり、これらは当社製ISサーボドライバと  
NJコントローラによって実現している。また、こうした  
キーデバイスは、新機能を搭載したデバイスがリリースさ

れば、それらを即時装置へ設計反映できるよう EtherCAT  
ベースの汎用 IF (InterFace) のものを採用している。

その結果、さらに進化したサーボドライバを即時搭載す  
ることができ、2019年度には VT-X750 VER2.0をリリース  
する予定である。VT-X750 VER2.0では、今後の検査対象  
部品の微小化に備え、より軸精度を向上させ高分解能での  
検査を実現するための開発を実行した。当社サーボドライ  
バの開発部門との共同研究の末、複数軸の同期制御に適した  
2次補間機能 (図10) を搭載したサーボドライバへデバ  
イスをバージョンアップし、そのサーボドライバを装置へ  
搭載して位置決め精度の更なる改善を実行した。



図10 線形補間と2次補間の違い

この機能を用いることで、サーボドライバ・NJコント  
ローラと各モータの同期制御において、指令値に対する位  
置偏差の精度をさらに向上させることが可能となり、巡回  
における真円の軌跡の位置偏差量を最大で約4 $\mu$ m程度改善  
することに成功した (図11)。

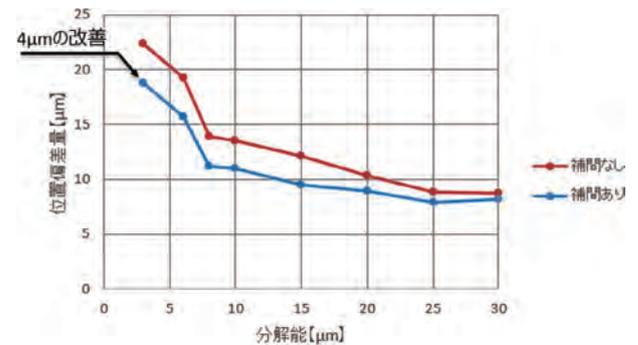


図11 補間方式の違いによる位置偏差の改善

線形補間機能から2次補間機能ができるよう改善したこ  
とで、位置指令速度を階段状から連続に行うことができる  
ようになるため、指令値との誤差が改善され、トルク変動  
を抑制することができ、巡回軌跡をより真円に近づけるこ  
とが可能となった (図12)。

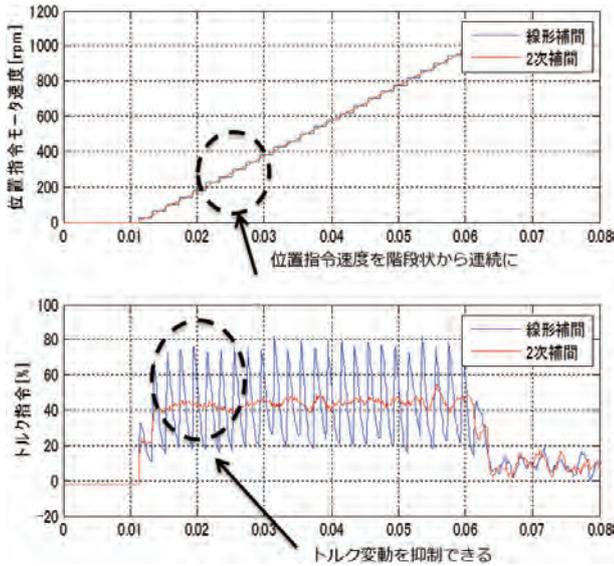


図12 2次補間による効果

このように軸精度を改善したことで、VT-X750 VER1.0では30 $\mu$ m～6 $\mu$ mまでであった検査分解能を、VT-X750 VER2.0においては、30 $\mu$ m～3 $\mu$ mまでの高分解能帯までカバレージを拡大することに成功した。こうした補正技術を用い、進化したデバイスをスピーディに装置へ反映することでハードウェアコストを上げずに高精度化を実現した。

4.2 インライン化のためのハードウェア高信頼性技術

4.2.1 高精度高速旋回に耐える省スペース高剛性技術

連続撮像によって、省スペースで旋回できるようになったため、VT-X750では検査空間と制御盤を分離したハードウェア設計とすることが可能となった。そのため、鉛遮蔽するエリアも小さく最適化でき、装置サイズと重量の観点でも改善することができた。VT-X750は、従来機のVT-X700のMサイズ検査用の装置とほぼ同サイズの筐体でありながら、検査対象基板は500mm角以上のVT-X700-L同等までのワークを検査可能とした。結果として、連続撮像によって軸の旋回速度が速くなっても画像のブレが発生しないようにメカの剛性を十分確保しながら、設置面積を45%、装置重量を2トン減らすことができた (図13)。

外形寸法図  
形VT-X750

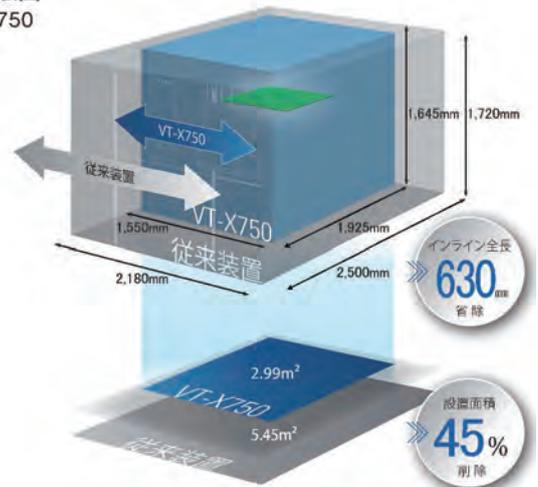


図13 従来機との面積比

4.2.2 低被曝CT検査を実現するフィルタリング技術

VT-X750は、従来機よりもワークへの被曝量は小さくなるよう設計している。まず、タクトが大幅にUPしたことでワークへのX線照射量自体が低減したため従来機より大幅に改善されている。

さらには、X線源照射窓にAlフィルタを標準搭載する設計としており、X線源のエネルギースペクトルにおいて、メモリや半導体などのアナログ素子部品に影響を及ぼす低エネルギー帯をカットしている。その結果、従来のVT-X700シリーズの23%までワークへの被曝量を低減することに成功した (図14) <sup>3)</sup>。

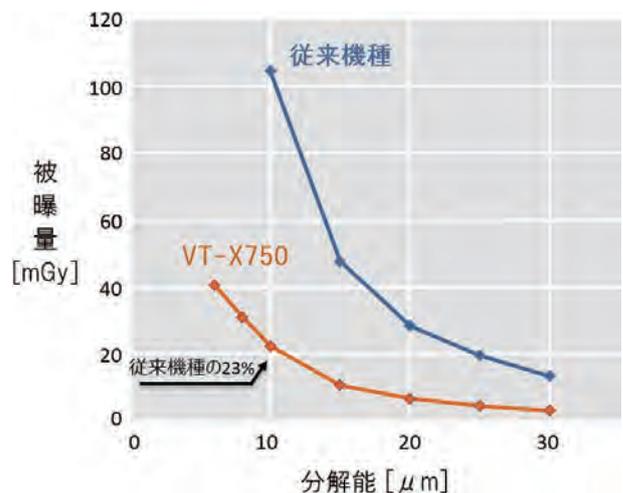


図14 被曝量の違い

4.2.3 高可用性ハードウェアアーキテクチャ

VT-X750は、遮蔽された検査空間と制御盤を分離した構造とし、すべてのデバイスを正面からアクセスできるように設計しメンテナンス性を改善した。特に制御盤の構造においては、漏電ブレーカと連動したドア機構を設け、保守時には装置のブレーカを落としてからでないと制御盤のドアを開けられないよう安全性を確保した設計となっている。また、汎用

IFを用いて省配線化されておりケーブルのメンテナンスもしやすくなっている。無理な姿勢で作業しないよう、人体にかかる負荷も考慮した。これらはすべてSEMI (Semiconductor Equipment Materials International) スタンドード<sup>4)</sup>における人体工学の考え方にに基づき設計しているため、インラインで稼働する設備においても、故障時に顧客の生産ラインをとめる時間を極小化するよう、安全かつ素早く保守できるようになった。

## 5. むすび

このように洗練されたアーキテクチャは、連続撮像技術の強みを最大化させることができる。そして、これまでより高速にインラインでのCT検査が可能になったことで、従来でのオフラインでの抜き取り検査の場合よりも遥かに多くの基板を検査することができ、来る自動運転社会に備え、顧客の生産ラインにおいてより多くの基板の製品品質向上に貢献できるということである。

本稿では、CTでの検出力を保ちながら高速化を実現するための連続撮像技術、刷新したハードウェア構造をもつVT-X750について概説した。今回は主にハードウェアの分野を中心に述べたが、自動検査アルゴリズムについても独自の技術が数多く搭載されている。優れた形状再現性を持ち、CTの特徴に基づいて最適化された検査アルゴリズムは、撮像システムの高速性に後れを取らずインライン検査可能なタクトで処理を実現している。

今後の展望としては、はんだ接合部をより正確に形状再現し定量的に測定するための検査アルゴリズムの改善に加え、外観検査装置と連携した効率的な検査工程設計、プログラミング作業の時間短縮による運用支援などの開発を進めていく。また、AXIのタクトをさらに高速化する技術を探求していくことで、部品の下面にのみはんだが存在するような基板に対しても全数検査を実現できるようになる<sup>5)</sup>。そのため、今後も自動車業界をはじめとするSMT市場において、オムロンのAXIを普及させ、顧客の製品品質を向上することに貢献していく。

## 参考文献

- 1) 杉田信治, 実装品質保証のカバレッジ拡大に向けた高速CT検査技術, 第52回ソルダリング分科会資料, 一般社団法人溶接学会, 2011, p.4.
- 2) 日本放射線技術学会 監修 市川勝弘・村松禎久, 標準X線CT画像計測, オーム社, 2009, p.27-28.
- 3) 大西貴子, 高速・高分解能・低被曝を実現するインライン自動X線検査装置, 画像ラボ, 2018, Vol.29, No.1, p.67-72.
- 4) SEMI S8-1116, Safety Guidelines For Ergonomic Engineering of Semiconductor Manufacturing Equipment, SEMI International Standards, 2016.
- 5) Jisso技術ロードマップ専門員会, 2015年度版実装技術ロー

ドマップ, 一般社団法人 電子情報技術産業協会, 2015, p.354-355.

## 執筆者紹介



七呂 真 Makoto Shichiro  
 インダストリアルオートメーションビジネス  
 カンパニー  
 検査システム事業部 開発部  
 専門：電気工学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# IoT 技術によるシート検査装置から得られるデータの新たな現場活用手段

荻野 裕貴

近年モノづくりの現場では、「モノづくりの高度化・複雑化」や「熟練者不足」といった各国共通の課題に対して、IoT 技術を活用し製造現場のデータを収集し、それらを分析することで、これらの課題解決を行う取り組みが盛んに行われている。高機能フィルム業界や製紙業界においても同様の課題・取り組みが続けられている。

我々オムロン株式会社 検査システム事業部では、従来からマルチウェーブセンシング技術により複数の光源から最適な波長を検査対象に照射し、検査対象の状況をラインカメラにて撮像し、正常領域（地合）と異常領域（欠陥）を検出・分類するシート検査装置を販売しており、多くのモノづくり現場で、不良製品の流出防止へ貢献している。

本稿では、シート検査装置を欠陥判別装置として使用するだけでなく、IoT 技術を利用し検査装置の安定稼働の監視、検査の妥当性の検証、製品品質の向上など、現場改善にまで導くオムロン独自の新たなサービス（MONOSASHi サービス）を提案する。

## Proposal to Make Full Use of Data from Web Inspection System by IoT Technology

Hiroataka Ogino

Recently, manufacturers have some common issues such as highly developed manufacturing, complicated manufacturing, or manufacturing with few skilled people. They are trying to solve these issues by IoT technologies based on big-data which are corrected from the machines in the manufacturing site.

OMRON Corporation Inspection Systems Business Division has been providing the auto web inspection systems which have Multi-wave sensing technology to find defect by utilized several light sources which have different wave length.

In this report, we have developed brand-new service named “MONOSASHi” service, based on IoT technology. The service can visualize various manufacturing condition to improve productivity using our auto web inspection systems.

### 1. まえがき

付加価値の高いモノづくり、高品質や安定稼働を追求する製造業では、グローバル競争や新しい技術の変化への対応が求められている<sup>1)</sup>。昨今の製造業を取り巻く環境は、ドイツのIndustrie4.0や米国のインダストリアルインターネットコンソーシアム<sup>2)</sup>によって、「IoT（モノのインターネット）技術」の飛躍的進化や「ロボティクス技術」「AI（人工知能）技術」など、製造現場の変化を実現する技術革新の動きが始まっている。国内でもインダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ<sup>3)</sup>といった協議会が立ち上がり、製造業においても、ロボットやIoT対応、情報化に対する取組が進んでいる。モノづくりにおいても、多品種少量生産による「個のニーズへの対応」、データ活用によ

る工場マネジメントの進化による「モノづくりの高度化・複雑化」、生産拠点の多極化による「グローバル生産体制の定着」、熟練者人材不足や人件費高騰といった人の変化による「自動化ニーズの増大」などの大きな変化への対応力が求められている。つまり、モノづくりの進化や市場のニーズの変化に対応していくには、進化する最新技術の活用が重要になってきている。

検査システム事業部では、これらモノづくりへ貢献するために、カメラを利用した検査装置を販売しており、基板実装後のはんだ接合部や部品を検査する外観検査装置(AOI)<sup>4)</sup>や、X線を利用したCT型X線基板検査装置<sup>4)</sup>、また、二次電池やディスプレイに用いられる高機能フィルムや無地シートの表面欠陥を高速・高精度で検査するシート検査装置<sup>5)</sup>を取り扱っている（図1）。

連絡先：荻野 裕貴 hirotaka.ogino@omron.com



図1 オムロンの取り扱う検査装置

本稿ではシート検査装置に着目し、単なる欠陥判別装置として使用するだけでなく、IoT技術を利用し「検査装置の安定稼働の監視」、「検査の妥当性の検証」、「製品品質の向上」など、現場改善にまで導くオムロン独自の新たなサービス (MONOSASHi サービス) を提案する。

## 2. 課題

我々のシート検査装置では、近赤外・紫外など複数の光源を保有しており、これらの光源の中から検査に最適な波長を選択し検査対象に照射している。そして、検査対象の状況を1ラインずつ撮影するラインカメラにて撮像し、独自のアルゴリズムを駆使することで、高い検出力と高度な判別性能を実現する「マルチウェーブセンシング技術」を利用している。これにより、検査対象の正常領域 (地合) と異常領域 (欠陥) を検出・分類することで検査を行っている (図2)。

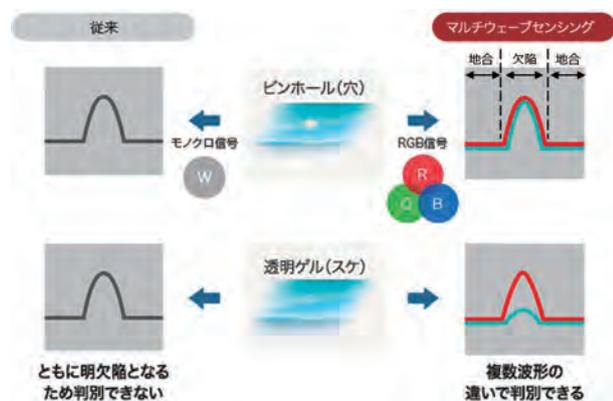


図2 マルチウェーブセンシング技術

装置から得られた検査結果は、図3に示すように欠陥を一覧表示する欠陥リスト、1ロットについて検査開始から検査終了までの欠陥発生位置を图示した欠陥マップ、および欠陥リストや欠陥マップに付随する欠陥画像や、欠陥の

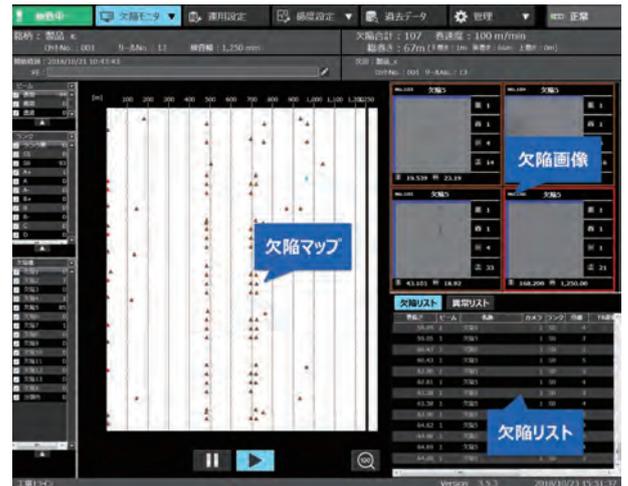


図3 シート検査装置画面

特徴を示す特徴量の出力など、主に欠陥を中心とした情報出力をしている。

しかし、これらの情報は製品一巻き (ロール) 単位の情報出力であり、製品の検査結果としてどのような欠陥がいつ・どの位置で発生したかという情報のみを出力しているため、なぜそのような欠陥が発生したのか、予兆はなかったのかなどの情報をつかむことはできない。また、予兆を捉えるためには時系列の変化を確認する必要があるが、現システムではロール単位ごとのOK/NGの情報しか持っておらず、時系列に確認するためにはユーザが手作業でまとめなければならない。さらに、ロール内の製品状態の変動を管理する機能も持っていないため、ユーザが現場の改善活動を行うためには非常に使いづらい情報となってしまう。以上から、モノづくりを進化させるために、ユーザの現場改善活動へシート検査装置を活用していこうとするには、現状の断片的な検査結果の情報利用だけでなく、以下の課題解決が必要であると考える。

- (1) 複数の検査装置から得られる、時系列な品質情報を集約し一元管理できること
- (2) 一元管理された情報から正常な状態 (良品状態) を定量的に表示し、検査の妥当性が確認できること
- (3) ユーザごとに異なる現場改善活動に対して、柔軟に画面表示手段や表示内容を変化させることができること

## 3. 検査装置データを活用するための解決策

高機能フィルムの製造工程の一例を図4に示す。シート検査装置は製造工程の最終工程に位置づけられるため、検査装置から得られる品質情報は製造工程に依存して変化していると考えられる。従って、シート検査装置から得られる良品情報、欠陥情報、装置本体の情報、必要によりユーザ操作などのイベント情報などを収集することで、それらのデータをシート検査装置だけに利用するのではなく、製造工程に起因する課題の要因特定や予兆管理など製造ライ

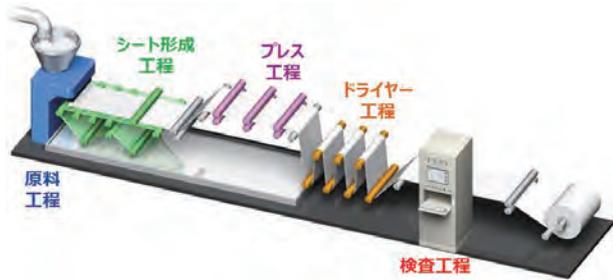


図4 高性能フィルムの製造工程

ンの状態判断に利用することで、ユーザの生産活動、品質改善活動に活用できると仮説化した。

**3.1 品質情報の集約** このようにシート検査装置から得られる品質情報を新たに活用するためには、まずこれら検査装置から得られる品質情報を、検査実施中の有無に関わらず並行して一元集約する必要がある。そこに、IoT技術を適用する。具体的には、これまでスタンドアロンとしてネットワークから分離されてきたシート検査装置をLAN（ローカルエリアネットワーク）に接続する。そうすることで、複数の検査装置の品質情報を検査に影響させることなくビッグデータとして一元管理することができるようになり、これらのビッグデータの分析を行うことで、複数の生産ラインの状態判断に利用することが可能になる。将来的にはクラウドコンピュータサービスを活用することで工場間の生産ラインの状態判断も可能になると考える。

**3.2 検査の妥当性が見える化** 現状の検査工程において、シート検査装置は製品の異常部分である欠陥を検出することのみに利用するため、ほとんどの良品部分のデータは使われていない。しかし、良品部分のデータと、欠陥部分のデータ、それらに加えて検査のしきい値情報を収集し可視化することができれば、良品と欠陥がどれだけ異なるのかという差異を確認することができる。さらに、検査のしきい値を比較することで、検査が正しく行われているかどうかを客観的にかつ定量的に確認することができる。

例えば、多品種少量生産においては、それらをロットごとに比較することで、良品箇所含め、前回と同じ生産が実現できているかを確認することもできる。また、新しい生産品種の立上げにおいても、良品のばらつき具合と、検出させたい欠陥のばらつき具合を比較することで、最適な検査しきい値を視覚的に決めることができる。

これまで、欠陥の発生傾向について、同一ロット内では欠陥マップを表示させることで、欠陥の発生位置を確認できていたが、これを複数のロット間に広げ、発生位置に基づいた統計情報と組み合わせることで、発生起因となる工程を特定する手助けとなることもできる。

他にも、検査装置からの情報を活用することで、グローバルでの生産体制の定着、新銘柄の立上げ、また、カン・コツ・経験での改善活動から定量的な分析判断による改善活動への進化に貢献できるように考えている。今後AI技術を活用することで、欠陥を発生要因ごとに傾向管理して、

生産工程の要因特定や予兆管理を容易にすることで、オペレータの習熟ばらつきに左右されにくい工程管理情報を提供する、工程監視装置へと進化できると考えている。

**3.3 ユーザインタフェースの柔軟性** このように収集蓄積したデータをビッグデータとして扱い、ユーザの抱える改善活動の課題解決の糸口として活用するためには、次のような可視化機能が必要と考える。

(1) 生産情報の分析とその可視化

ロット単位での欠陥リストや、欠陥位置を示すマップ機能だけでなく、ロット内にとどまらず、日単位、月単位、年単位での発生位置・頻度・度合などを分析、可視化する機能。

(2) 良品状況の常時可視化

欠陥が発生せずとも検査状態をモニタリングし、良品度合いや生産状態を確認することができる可視化機能。

(3) メンテナンス状況とハードウェア情報の可視化

ハードウェアごとに定められた交換時期などの定期的な判断だけでなく、最適なタイミングで必要なメンテナンスを実施可能にするための可視化機能

しかしながら、これらの可視化情報はユーザの製造工程や改善活動内容に依存し、ユーザごとに効果的な見せ方が存在すると考えられるため、柔軟に変更できる必要がある。そのため、これまでのような標準システムとして検査装置に組み込みユーザインタフェースを固定してしまうと、ユーザごとにカスタマイズが必要となり仕様検討から詳細設計を個別に都度行う必要が発生し、大幅な時間もコストも発生してしまう。これを解決するために、最新のIoT技術のひとつであるBI (Business Intelligence) ツールを利用する。BIツールの利点である柔軟な可視化機能とデータ分析機能を活用することで、ユーザごとのカスタマイズを容易に行うことができる。その結果、ユーザごとに必要なコンテンツやグラフ表現をすばやくタイムリーに提供することができる。

**4. 解決策の実現と提供手段**

**4.1 実現手段**

図5に提案するシステム構成を示す。図に示すように、各シート検査装置をローカルエリアネットワーク (LAN) に接続する。そして、ビッグデータを収集し、データを蓄積・分析し、可視化する役割を担う統合管理サーバを設置する。これにより、同一工場内の複数の検査装置から各種データの収集を行うことができる。ここでのLANとは統合管理サーバを起点としたローカルエリアネットワークを意味しており、社内LANや外部ネットワーク接続が必ずしも必要であることを意味するものではない。統合管理サーバから、LANを経由して各検査装置へアクセスをおこない、検査結果データだけでなく装置情報データを含めたビッグデータの収集を定期的に行う。

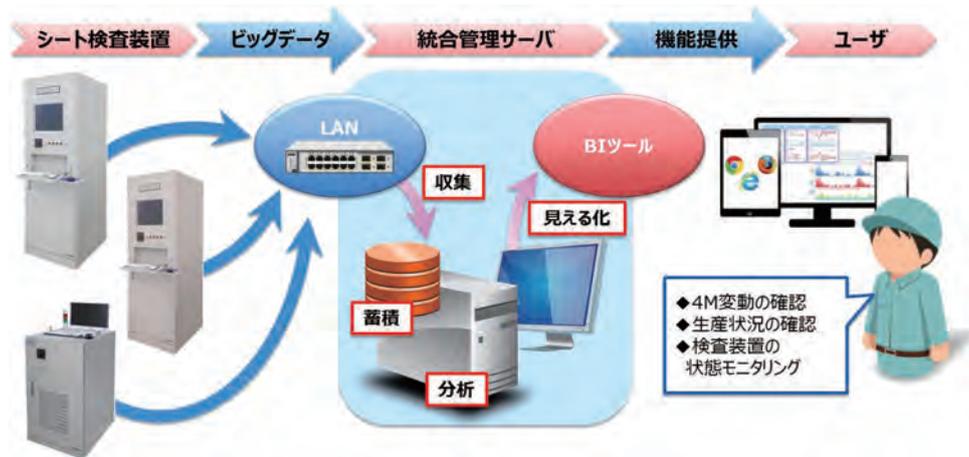


図5 システム構成

収集されたビッグデータは雑多なデータの集まりであるため、このままの状態では蓄積を行ってしまうとデータの分析や可視化に利用するには多大な時間を要してしまう。そこでこれらの収集されたビッグデータから、価値あるデータを抽出し、分析・可視化を行いやすいデータへと体裁を整え蓄積を行うこととした。そして、これらビッグデータの分析と見える化には、BIツールを利用する。表示される画面はコンテンツとして提供を行う。そのようにすることで、出来上がった確認用のコンテンツをWebブラウザ上からアクセスすることができるため、将来はこれらのコンテンツをクラウド上で取り扱うことにより、時間や場所に制限されることなくシート検査装置の活用を行うことができる可能性がある。

**4.2 提供手段** 3.3章で述べてきたように現場改善活動において解決したい課題はユーザごとに異なり、それぞれの分析手段も確認手段もユーザごとに多種多様になると考えられる。それらに対して、これまでのようなひとつの標準システムへ組み込むことを考えた場合、個々のユーザが必要とするUI表示や分析手法をすべて実現することができるようなアプリケーションが必要となり、システムが大規模かつ複雑になってしまう恐れがあり最悪の場合、改善活動の足かせとなってしまう可能性がある。そこで、我々の提案するIoTシステムは、容易にカスタマイズ可能な画面を有するコンテンツとして以下の3つの観点に絞って提供することを考えた。

(1) 検査基準づくり

これまでユーザは検査基準をつくらうとした場合、発生した実欠陥もしくは、模擬的に作成した欠陥を元に、検査基準の設定を行っている。欠陥の大きさなどの数値については、明確な基準が設定されていることが多いが、欠陥の濃さや色など数値化しにくい基準については、欠陥画像を見ながらカン・コツ・経験に基づく検査基準設定を行うこともあった (図6)。

その結果、検査基準の妥当性を説明することが難しかった。そのような課題に対して、良品状態と欠陥状

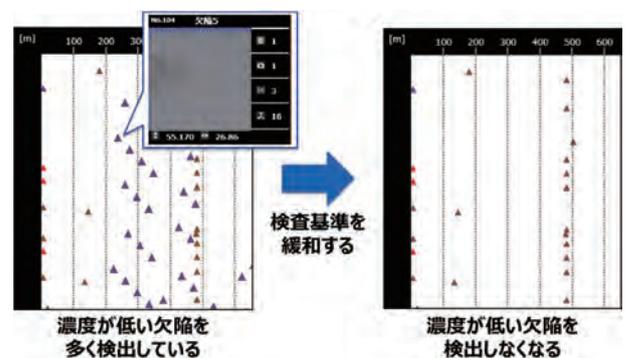


図6 検査基準の調整手順例

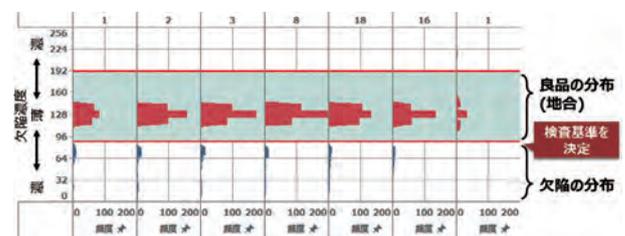


図7 良品分布と不良品分布の時系列可視化

態を時系列で可視化するコンテンツを提供する。時系列に良品の分布と不良品の分布を可視化することによって、検査基準をどの位置に設定するか、事実データをもとに決定することを可能とする (図7)。

(2) 4M変動監視

検査の変動つまり4M (Man, Machine, Material, Method) 変動を確認することで、現場の改善活動を行うことは多くある。これまでの検査装置では、時系列に品質情報をユーザへ提示する手段を保有していなかったため、4M変動を確認しようとするユーザが手作業で品質情報の比較を行ったり確認ツールを作成したりする必要があった。そのような課題に対して、欠陥情報だけでなく良品情報も活用して製品の品質情報を時系列に可視化させることで、4M変動の確認につながる製品の品質状況を容易に把握することを可能

とする。

(3) 状態基準保全 (CBM)

検査装置のハードウェアの状況をモニタリングする場合、定期点検のように時間で区切ったタイミングでメンテナンスを実施することが多い。このメンテナンスのタイミングは、期間を短くすると過剰なメンテナンスとなってしまう、逆に伸ばすとメンテナンス前に故障してしまったりと、実際にメンテナンスが必要な正しい時期がわからず、ムダなメンテナンスを実施してしまったり、定期メンテナンスのタイミングで必要なメンテナンスを行えていない課題があると考えられる (図8)。

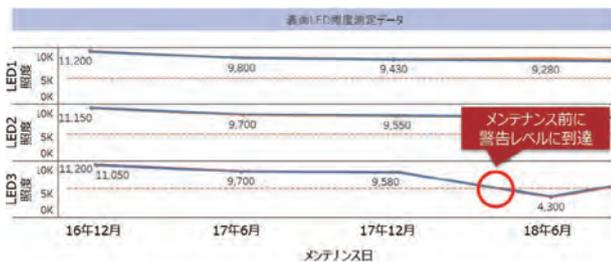


図8 現在のメンテナンス課題

そのような課題に対して、検査装置の部品劣化度合いを常時モニタリングすることにより、必要な部品に対してメンテナンスを行うことができ、正しい検査装置の運用を可能とする。

これらのコンテンツをMONOSASHiサービスとしてユーザへ提供することにより、ユーザごとに最適なデータの見せ方や、分析手段を提案し提供することができる。また、すでに稼働しているシート検査装置に対しても接続してサービスを提供することができるため、検査装置の世代を超えて一元管理することも可能となる。このように、シート検査装置を通じて「不良をつくらない良品起点のものづくり」に貢献することができる。

5. 効果検証

顧客の製造ラインで稼働しているシート検査装置へMONOSASHiサービスを適用し、現場改善活動につながると考えられた事例を紹介する。

**5.1 検査基準づくり** 検査基準づくりコンテンツにより、ユーザの検査状態から、検査基準の推奨値を提案した事例を示す。ユーザへ提供したコンテンツを図9に示す。図9①の地合傾向サマリに示すように、良品箇所 (地合データ) と欠陥箇所を定期的に取得し、それらの分布をヒストグラムで表現しロールごとに可視化している。時系列に確認すると良品箇所 (赤色) の変動は安定しており検査基準内に収まっているが、欠陥箇所 (青色) の変動が検査基準に近寄っていることがわかり、このままの検査基準では未検出による欠陥見逃しが発生するおそれがあることが分かった。そこで、全体のヒストグラム分布と対象のロールに対して詳細を確認した結果 (図9②の総分布およびロール内分布)、良品箇所分布の端と欠陥箇所分布の端は分離しており、その中間へ検査基準を設定可能であることが分かり、ユーザへ推奨値として中間値を提案することができた。その結果、未然に未検出による欠陥見逃しを回避することができた。このように、良品箇所の変動と検査基準との関係性をひと目で確認することができ、これにより、事実データをもとにして検査基準の設定や変更を即座に行えることが検証できた。

**5.2 4M変動監視による製造状況の確認** 4M変動監視コンテンツを利用して製品の製造状況を日々確認するなかで、製造状況の変化に気づき改善の起点となった事例を示す。

図10①に示すように、収集された製品品質情報をユーザが必要とする情報へ自動で変換し、時系列にグラフ化している。このようにすることで、これまで日々の製造状況を確認するために行っていたユーザによる手作業や、独自のシステム構築を不要にすることができた。さらに、製品の品質指標となるKPI (Key Performance Indicator) を設定することにより、指標にもとづいた製品品質の確認や改善活動へのきっかけとすることができた。

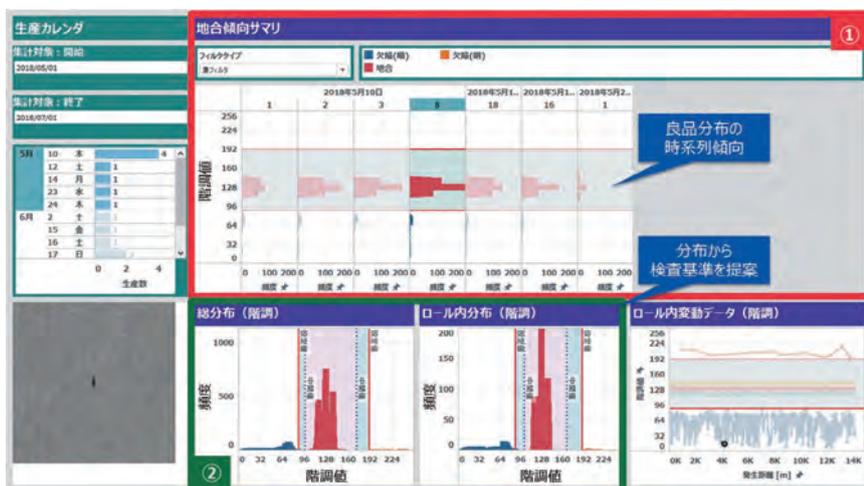


図9 検査基準づくり事例



図10 4M変動監視事例 (1)

今回、品質情報である重大欠陥数がKPIを超えた製造ロールが発生したことがわかり、検査結果を詳細に深掘りする分析を行った。まず、検査結果全体を確認することができる検査結果ビューアーを表示させ確認した (図11)。

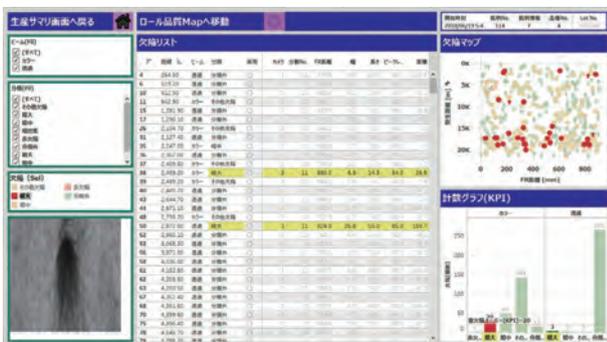


図11 4M変動監視事例 (2)

KPI指標にした欠陥をハイライト表示したところ、欠陥マップ表示から局所的に集中して対象の欠陥が発生していることが分かった。さらに分析を行うために、欠陥発生に偏りや傾向があるのかを確認できるコンテンツにて解析を行った。解析に利用したコンテンツを図12に示す。シートの流れ方向に対しては特定の巻長さ位置にて重大欠陥が発生していることがわかり、流れ方向と垂直方向の意味をなす幅方向 (ラインカメラ撮影方向) には欠陥発生への偏りが発生していないことが分かった。以上から、製造時に突発的に発生した事象がなかったかを確認する改善活動のきっかけ、および改善に必要な状況把握に活用することができた。

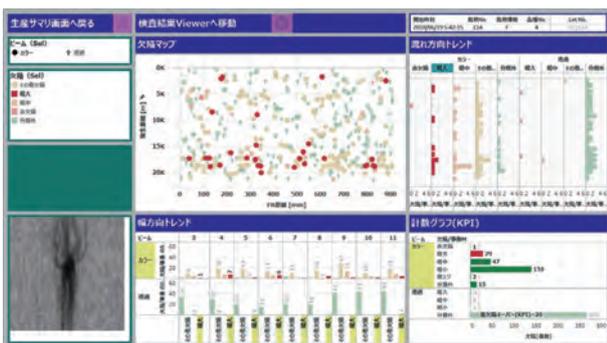


図12 4M変動監視事例 (3)

このようにして、BIツールを活用しユーザの分析したい事象に応じてコンテンツを作成し改善していくことで、現場改善活動へシート検査装置のデータを活用できることが確認できた。

**5.3 カメラゲイン監視によるLED光源劣化評価** 状態基準保全 (CBM) コンテンツにより、LED光源の劣化を評価する事例を示す。シート検査装置におけるLED光源は検査の要となる重要な部品であり、LED光源の劣化監視は検査装置を安定して利用するためには必須である。LED光源の劣化評価を実施しようとした場合、LEDの光量を光量計でユーザが計測すれば良いが、24時間365日稼働している高機能フィルム製造工程では、検査面に検査対象となるフィルムが常時存在しているため、フィルムが存在しない定期的なメンテナンスのタイミングでしか光量を計測することができない。一方で、検査を正常に行うためにシート検査装置では検査対象の明るさに応じて、カメラのゲインをコントロールし検査対象の明るさを一定に保つ制御を行っている。従ってLED光源の光量が減少し、検査対象の明るさが暗く変化すると、カメラのゲインが増加すると考えられる。よって、カメラゲインを常時モニタリングすれば、その変動や上昇傾向からLED光源の劣化度合いを予測することができ、最適なタイミングでメンテナンスを行うことができるCBMの考え方を適用できると考えた。

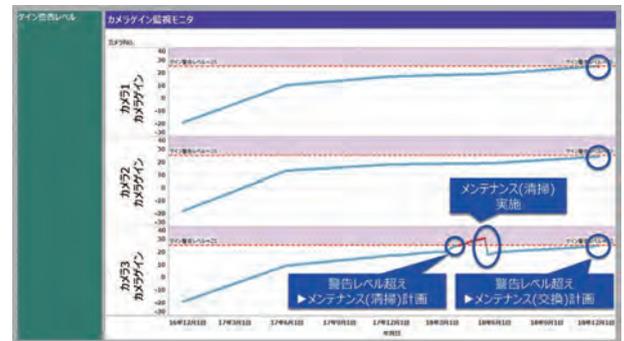


図13 CBMコンテンツ (イメージ)

図13に示すように、定期的にカメラのゲインを監視することで警告レベルを超えたタイミングで事前に清掃のメンテナンス計画を促す情報を通知することができる。このタイミングでメンテナンスを行い、結果をコンテンツにて確認し続けることでメンテナンスの効果を確認することができ、継続して検査装置の安定稼働を実現できると考えている。LED光源の劣化は非常に緩やかであるため、現状では効果確認までは至っていない。図13は現状の観測データを含めた想定仮説であるが、引き続き検証を行いながら効果を確認していく。

## 6. むすび

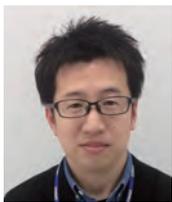
本稿では、昨今の製造業を取り巻く環境の変化に対してIoT技術を利用し、シート検査装置から得られる品質情報

データの新しい活用方法について提案した。今後も、モノづくりの進化や市場のニーズの変化に対応していくために、最新技術を利用したシート検査装置の開発と活用方法を継続することで、生産活動、品質改善活動にシート検査装置メーカーとして貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) オムロン株式会社. “インダストリー4.0に対し、オムロンが考えること”. <https://www.edge-link.omron.co.jp/news/99.html>, (参照2019-2-1).
- 2) Industrial Internet Consortium. <https://www.iiconsortium.org/>, (参照2019-2-1).
- 3) Industrial Value Chain Initiative. <https://iv-i.org/wp/ja/>
- 4) オムロン株式会社. “基板検査装置”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/pcb-inspection-system/>, (参照2019-2-1).
- 5) オムロン株式会社. “シート検査装置”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/web-inspection-system/multi-wave-sensing/>, (参照2019-2-1).

#### 執筆者紹介



荻野 裕貴 Hiroataka Ogino  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
検査システム事業部 AWI 事業推進部  
専門：画像処理

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# AOI とマウンタの連携による故障予兆検知システム Q-upAuto

森 弘之・岸本 真由子

近年、プリント実装基板の実装現場には、ますます高い品質とコスト競争力が要求されてきており、できるだけ人のスキルや工数を必要としない、自律的に高い品質を維持する生産ラインが求められている。

オムロン株式会社 検査システム事業部では、従来からプリント実装基板を3D計測し、定量化された品質基準に従って検査を行うAOIを販売しており、多くの生産現場で、不良流出防止に貢献している。

さらに不良を作らない生産ライン作りに貢献するため、AOI (Automated Optical Inspection) とチップマウンタを連携させ、生産工程の異常や故障の予兆を、リアルタイムかつ自動的に捉え、是正のための情報を提供するM2Mシステム、Q-upAutoを開発した。

このシステムを量産フィールドに導入し、品質維持改善の効果が得られた。

## Q-upAuto, Failure prediction system with AOI-mounter collaboration

*Hiroyuki Mori, Mayuko Kishimoto*

Recently, manufacturers of printed circuit boards are required more high quality and more cost competitiveness. Therefore the manufacturing lines must keep high quality autonomously without human skills and work.

Omron Corporation Inspection Systems Business Division has been providing the inspection system which performs 3D-measuring and inspection by quantified quality standard. And it contributes to prevent outflow of defects at many manufacturers.

To make their manufacturing lines not to produce defects, we have developed Q-upAuto; M2M (Machine to Machine) system of inspection machines and chip mounters. It can detect failures in manufacturing process in real time and automatically.

We installed Q-upAuto to Mass production lines and confirmed effectiveness to rise and keep quality.

### 1. まえがき

近年、自動車の安全設備やハイブリッド車の普及が急速に進み、自動車に搭載される電子部品基板が急速に増加している。自動車に搭載される部品には高い品質が求められるため、プリント実装基板の実装ラインは不良を流出させないだけでなく、手直して良品とすることも禁じられる場合があり、不良を作らないことが必要になっている。

また、豊富な経験と知識を持つ熟練した実装ライン担当者、製造技術者の高齢化が進み、高い品質を達成し維持する人材がこの10年に渡り減少し続けている。そういった人材が確保できている現場においても、コスト競争力が求められるため、改善に多くの工数を使うことができない。また業界のグローバル化が進み、海外拠点の支援のため不

在となることも多く、品質の維持向上の取り組みが難しい状況である。

従来より、検査システム事業部ではQ-upNaviという品質管理システムを販売している。これは、SPI (Solder Paste Inspection / はんだ印刷検査機)、マウント後AOI (外観検査機)、リフロ後AOIの検査情報を蓄積し、SPIやAOIごと、および製品ごとの不良発生状況を集計するパレート (図1)、不良の原因を分析するために、各工程の画像や計測値などを確認できる工程照合 (図2) といった機能を備えている。



図1 Q-upNavi パレート機能



図2 Q-upNavi 工程照合機能

しかし、検査情報は不良が発生した後の状態を確認できるだけであり、不良の原因は、画像などからユーザが推定したり、実装ラインに立ち会って調査する必要がある。前述の通り、そういった分析ができる人材は少ない上に時間をかけられないので、品質改善を進めることが難しい。しかも、不良が発生してから取り組みとなるので、不良を未然に防ぐことはできない。

こういった状況を踏まえ、さらに多くの情報収集と分析、監視を自動化した、極めて少ないユーザの作業時間で、不良の発生原因を突き止め、さらには未然防止するシステム Q-upAuto の開発を行っている。その第1弾として、マウント工程をターゲットとした商品を開発した。2017年より限定リリースとしていくつかの量産フィールドでの運用を開始し、2018年より正式リリースとなった。

これまでのフィールドでの取り組みにおいて、品質維持改善の効果が得られたので、Q-upAuto の仕組みと効果を紹介する。

## 2. 背景

**2.1 マウント工程の不良原因** プリント実装基板の実装工程は次のように構成される。先頭から、はんだ印刷機、SPI、チップマウンタ（以降マウンタと呼ぶ）、マウント後

AOI、リフロ炉、リフロ後AOIが並ぶ。それらの装置は図3のように一直線に配置され、上流から下流（この図の場合左から右）にプリント配線板（以降基板と呼ぶ）を流しながら実装を行う。はんだ印刷機は基板にステンシル状の金属板を介してはんだを印刷し、SPIは印刷されたはんだの印刷状態を検査する。マウンタはそのはんだの上に電子部品を搭載し、マウント後AOIはその部品の搭載状態を検査する。リフロ炉は部品を実装した基板を加熱してはんだを溶融させ、基板を冷却させることではんだを硬化させて電子部品を基板に固定する。リフロ後AOIは、このようにして実装された完成品を検査する。



図3 電子部品基板の実装ライン

マウンタは電子部品を基板の上に搭載する装置である。実装品質に最も関わりのある、電子部品を実装する機構は次のようになっている。マウンタの構造を図4に示す。

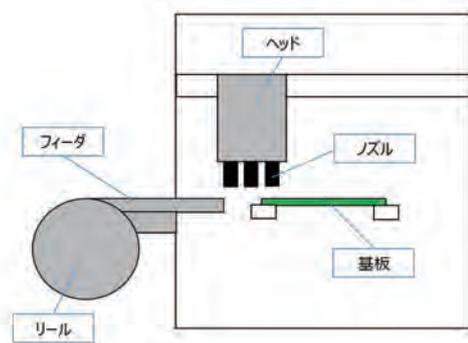


図4 マウンタの構造

まず電子部品は、フィーダで供給される。フィーダはテープに装填された電子部品を巻いたリールを装着するもので、ここから1つずつ電子部品を送り出しながら供給していくものである。この電子部品を送り出す部分が消耗すると、部品の供給位置がばらつき、実装品質を低下させる要因になる。

次に、電子部品はノズルで吸着され、部品チェックを経て、しかるべき基板上の位置に運ばれ、基板に装着される(図5)。

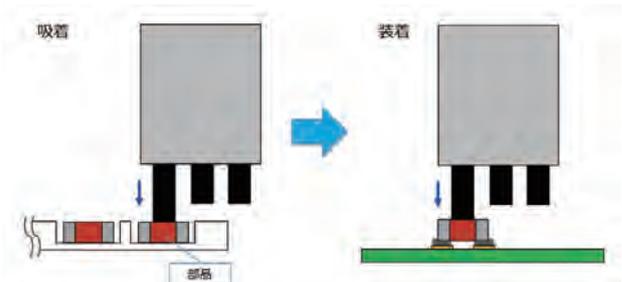


図5 吸着、装着動作

電子部品はノズルとの接触部分を真空にすることでノズ

ルに吸着される。ノズルには多数の種類があり、電子部品に対してノズルの選択が不適切だったり、消耗によって真空を作る機構の動きが悪くなると、真空が保てなくなり、電子部品を落下させたり、吸着位置がずれたりして、不良を発生させる原因となる。

このノズルは、ヘッドに取り付けられており、ヘッドが上下したり水平移動したりすることによって、電子部品の吸着、チェック、装着が行われる。1つのヘッドには同時に10個程度のノズルが取り付けられる。ヘッドが消耗すると真空圧の低下や、電子部品吸着、装着のためにノズルを押し下げる位置がばらつきによって電子部品の姿勢が不安定になるため、不良の原因となる。

これらフィーダ、ノズル、ヘッドについては、消耗だけでなく、電子部品を吸着する座標、装着する座標、電子部品の高さ、電子部品の形状モデルなど、それぞれに対して設定される実装パラメータがあり、それらが不適切な場合に、不良の原因となる。

製造設備の技術革新により、実装品質自体は以前よりも向上している。とはいえ、例えばマウンタにおいては大量の部品を高速で実装するため、実装用の機構の消耗が激しく、実装不良を引き起こす。さらに、電子部品や基板などの材料の品質ばらつきが多いため、しばしば実装条件の調整が必要になる。そのため、マウント工程では、生産量にもよるが、1ライン、1日あたり実装不良が数個～数10個発生しており、品質維持改善の取り組みが依然として必要である。

**2.2 マウント工程の従来の不良再発防止方法** マウント後AOI、リフロ後AOIを活用することで、どの機種の中の位置で不良が発生したか、不良になった電子部品がどのような部品品番であるかを確認することができる。また、パレート図などQC7つ道具などを活用することで、不良が発生しやすい部品品番や位置を確認することができる。しかし、前項で説明したような、マウンタの不良原因を突き止めることはできない。

また、マウンタにも不良予防、および不良原因分析のための集計機能が備わっており、ノズルやフィーダの使用回数や、吸着ミスなどの実装エラーの累積回数を確認できる。これを利用して、消耗していると思われるノズルやフィーダを選択し、使用回数の多いもののメンテナンスや交換をすることができる。しかし、実際にそれらが不良を実装したノズルやフィーダかどうかは、確認することができないため、必要のないメンテナンスを行う、不良原因であるノズルやフィーダを見逃し、不良を再発させる、という可能性がある。

通常、1枚の基板を実装するために、複数のマウンタを1ラインに並べて設置し、それぞれのマウンタで別々の電子部品を実装する。これは1台のマウンタに装着できるフィーダ数に限りがあることと、ラインタクトを短くするためである。また、同一部品品番の部品であっても、使用する個数が多い場合は、複数のフィーダで供給したり、複

数のノズルで同時に吸着、装着することで、ラインタクトを短縮するのが一般的である。さらに吸着ミスなどの実装エラーが発生すると実装リトライを行うので、通常と異なるフィーダやノズルが使用される。

不良の原因を突き止めるには、発生した不良がどのマウンタの中のどのヘッド、ノズル、フィーダで実装されたかを特定する必要がある。しかし、AOIから得られる情報とマウンタから得られる情報は独立しており、それぞれから情報を引き出して照合する必要がある。通常は、単純に部品品番や基板上の位置から特定することはできず、基板1枚1枚の実装情報を保存しておき、基板に刻印されたシリアル番号と個片番号、回路番号を照合する必要がある、多くの手間を必要とする。現実には、それだけの時間をかけられないため、このような作業を行うのは困難であるし、仮にできたとしても、時間が経過し生産している機種が変わり、マウンタに装着されたフィーダやノズルが入れ替わったりするため、処置ができないといった問題がある。

**2.3 マウント工程の従来の不良未然防止方法** 不良を未然に防ぐには、不良になる前の品質の変動をリアルタイムに監視し、不良の予兆を検知したら速やかに製造設備に対して処置を行う必要がある。品質の変動を捉えるにはAOIの情報を利用するが、単に良不良を判別するだけのAOIでは、不良になる前の情報を得ることはできない。オムロン製AOI（例えばVT-S730、VT-S530）はワークの位置、姿勢、はんだ付け状態といった品質評価項目を定量化して計測した上で、数値で定義された品質基準に従って、合否の判定を行っている。数値化された品質基準としてはIPC-A-610が業界でよく用いられるが、ユーザごとにさらに品質評価や検討を行い、固有の検査基準を設定することも多い。

ところで、品質とはプリント基板に形成されたランドと電子部品の電極の接合状態で評価されるものである(図6)<sup>2)</sup>。プリント基板のフィジューショナルマークとCADで指定された座標から計算される位置に正確に電子部品が実装されたとしても、プリント基板の反りや歪み、製造時に発生するランドのずれがあるため、そこにCADデータ通りにランドが存在するとは限らない。オムロン製AOIは、基板ごとにランド位置を抽出した上で、電子部品の電極との位置関係を計測するため、実装品質を正確に計測することができる。

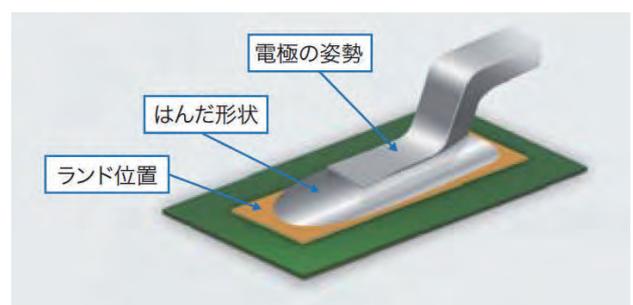


図6 品質の計測対象

不良になる前の品質変動を捉えるには、単に品質評価項目が数値化されるだけではなく、良品から不良の間で変化するワークの状態を物理的に計測した、不良との近さに比例した数値である必要がある。AOIで撮像された画像に対し、設定された明るさや色に合致した画素の数や割合を数値化するという従来のAOIでは、こういった計測はできない。

品質変動を監視する手法としては、管理図<sup>3)</sup>がある。これは、数十個以上のワークを計測した計測値に統計処理を行い、ばらつきや平均のずれを品質基準に照らし合わせて、不良が発生する可能性のある状態を検知するものである。しかしこの手法は非常に計算量が多く、全ての基板、電子部品に対して実施するには多くのコンピュータリソースが必要である。さらに、製造設備の情報がないため、品質が低下したとしかわからず、不良未然防止のための対策を行うには役に立たない。そのため、電子基板実装工程では、ほとんど利用されていない。

### 3. 目的

こういった従来方法の問題点を解決し、従来実施できなかった不良再発防止、不良未然防止が、製造技術者やラインオペレータの手を必要とせずに、リアルタイムに行える実装ラインを実現することが目的である。最終的にはマウンタへの処置も自動化し、自律的に良品を生産できるようにすることを目指す。今回は、不良を発生させる可能性のあるヘッドやノズル、フィーダを自動で特定し、是正するための情報を提供する機能を開発した。

### 4. 課題と解決方法

1つ目の課題は、検査情報とマウンタの実装情報の紐付けである。マウンタから必要な情報を取得するためのインタフェースを設計し、マウンタメーカーと提携し情報を取得できるようにした。これによって、すべての基板のすべての電子部品について、基板のシリアル番号と個片番号、回路番号ごとに、実装を行ったマウンタ名、ヘッドID、ノズルID、フィーダID（以降これら3つをまとめてマウンタデバイスIDと呼ぶ）と、それらが装着されている位置が取得できる。これらの情報を各マウンタが実装を完了した直後に取得し、リアルタイム処理ができるようにする。検査結果との紐付けは、基板のシリアル番号と個片番号、回路番号を用いる（図7）。



図7 検査情報と実装情報の紐付け

2つ目の課題は、マウント工程の不良原因や不良予兆に対してのみ検知、通知を行うことである。マウント工程以外の印刷工程、リフロ工程に原因がある場合に、マウント工程への処置を行うと、無駄なコストが発生してしまう。これについては、まずマウント工程に原因があることで発生する不良種別、および品質低下が発生する計測項目に監視対象を絞る。さらに、マウンタデバイスIDごとに品質の観測を行うことで、マウント工程の要因による品質変動を的確に観測できる。一方、印刷工程やリフロ工程の要因は、影響が及ぶ範囲がマウンタデバイスとは異なるので、特定のマウンタデバイスIDの品質低下に寄与する割合が低くなり、虚報となる可能性が低くなる。例えば印刷工程では基板上の特定の位置ではんだ体積が過多または過少となることが多いが、ノズルはそれらが実装する電子部品が決まっており、それらの位置は基板上に散らばっているため、印刷工程とは影響が異なる。

不良の再発防止については、マウンタデバイスIDごとに、不良部品の実装を行った回数を集計し、ヘッド、ノズル、フィーダごとに回数の多い順にマウンタデバイスIDと回数を通知する、不良通知機能を設けた（図8）。マウンタごとに集計結果を表示するようになっており、不良が発生した時にそのマウンタ集計結果に切り替わる。左側にマウンタ名が一覧表示されており、不良が発生したマウンタは赤色表示され、マウンタ名を選択することで表示を切り替えられる。

集計の対象は、マウント工程に不良原因がある、欠品、部品違い、極性違い、Xずれ、Yずれ、角度ずれ、電極サイドのみ出し、電極エンドのみ出し、部品浮き、部品傾きである。また、表示したマウンタデバイスIDはそれが装着されているマウンタ名、マウンタモジュール、ノズルがセットされたノズルピット番号、フィーダが装着されたステージ上の位置を表示する。これによって、不良発生が集中しているマウンタデバイスIDと、それがどこに装着されているかが調査なしでわかるため、速やかに処置を行うことができる。



図8 Q-upAuto 不良通知機能

不良の未然防止については、ヘッドID、ノズルID、フィーダIDごとに、それらが実装したすべての電子部品について、計測項目ごとに工程能力指数を算出し、工程能力指数が低下したマウンタデバイスIDを通知し、工程能力指数の推移をグラフ表示する、品質低下通知機能を設けた (図9)。計測項目は、不良になる前の部品位置、姿勢が計測できる、Xずれ、Yずれ、角度ずれ、電極サイドはみ出し、電極エンドはみ出し、部品浮き、部品傾きである。こちらも、速やかに処置ができるように、マウンタデバイスIDの装着位置を表示する。下段には過去の通知のリストがあり、選択することで過去の通知の内容を上部に表示し、確認することができる。

不良原因としてはマウンタデバイスの消耗以外にも、部品品番ごとの実装パラメータが不適切である場合がある。実装パラメータの多くは、部品品番ごとに設定されるので、マウンタデバイスIDと部品品番の組み合わせごとの工程能力指数の低い順に、部品品番をリスト表示する。これにより、特定のマウンタデバイスIDと部品品番の組み合わせだけで品質が低下しているのか、部品品番に関わらず品質が低下しているのかを切り分けられるようにした。これにより、マウンタデバイスのメンテナンスや交換を行うべきか、実装パラメータの変更を行うべきかが判断できる。



図9 Q-upAuto 品質低下通知機能

不良予兆を検知する方法としては、連続20枚の基板の工程能力指数の平均値が、しきい値を下回った時に不良予兆が発生したと判断するようにした。これは、不良予兆の検知方法をブラックボックス化せず、ユーザが理解し説明できる方法とするためである。特に車載業界においては、品質マネジメントシステムの国際規格IATF16949<sup>4)</sup>で、工程能力指数などの統計的手法を用いたプロセスの監視、測定および分析が要求されており、標準的な手法を採用する必要がある。

マウンタデバイスIDごとの工程能力指数だけでは処置内容を決定するには不十分である。工程能力指数は、ばらつきが増えた時も平均値がシフトした時も低下するため、どちらの現象が起こったのかが確認できない。これに対しては、Xbar-R管理図の手法を利用し、平均値とバラツキの推移を確認できるようにした。部品品番を選択すると、計測値の平均値、最大値、最小値の推移グラフが表示されるようにした (初期状態では、最も工程能力指数が低い部品品番が選択される)。このグラフには検査基準も表示される。計測値の分布の推移が確認できることで、不良にどれくらい近いのか、平均値がどちらにシフトしているのか、あるいは平均が変わらずにばらつきが大きくなったのか、といった現象や、その現象が突発的であるか継続的であるかが把握でき、処置内容が決定できるようになる。

例えばXずれやYずれの平均値が継続的にシフトしている場合は、実装位置がずれていることが原因であるので、実装位置パラメータを修正する、平均値のシフトがなくばらつきが徐々に大きくなっている場合は、マウンタデバイスの消耗が原因であるので、マウンタデバイスのメンテナンスを行う、といった処置を行う。

なお、上記2つの機能は、マウント後の計測値、リフロ後の計測値の両方を対象とする。ワークがリフロ炉に搬入され、はんだが溶ける時に電子部品が移動するため、マウント後とリフロ後では部品姿勢が変化する。多くの場合はセルフアライメント現象によりずれ量が小さくなる方向に変化するが、よりずれ量が大きくなる場合もある。そのため、両方の工程で監視を行う必要がある。リフロ後は、ワークが製品として出荷される状態であるので、製品の品質を直接計測したものになる。したがって、より緊急性、重要性が高い不良予兆を検知できる。一方マウント後では、マウンタが電子部品を装着した状態を直接計測できるので、不良原因の影響が顕著に現れる。マウント後の品質が低下していても、リフロ後では処置が必要なほど品質が低下するとは限らないので、緊急性、重要性が低い不良予兆も検知するため、予防保全的な意味合いも含まれる。

## 5. 結果

量産ラインにQ-upAutoを導入し、品質維持改善の効果が得られた事例をいくつか紹介する。

1つ目はノズルの型式変更の事例である。あるノズルID



今後は、印刷機、リフロ炉も対象としてSMT (Surface Mount Technology) ライン全体の監視を行うとともに、不良予兆の検知結果を元にマウンタなどの製造設備への自動フィードバックを行うようにし、より人手やスキルを必要とせずに、より高い品質を実現するシステムに進化させていく予定である。

最後に、今回の開発及び効果検証に多大なご協力をいただいた検査システム事業部の方々、生産現場の方々に、深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Institute for Interconnecting Packaging Electronics Circuits. Acceptability of Electronic Assemblies. IPC-A-610G. October 2017
- 2) 杉山 俊幸, 岸本 真由子, 藤井 心平, 杉田 信治. SJI (Solder-Joint-Inspection) 30年と3D技術で解決すること. エレクトロニクス実装学会 第31回春季講演大会, 2017.
- 3) 永田 靖, 棟近 雅彦. 工程能力指数 実践方法とその理論. 日本規格協会, p.41
- 4) International Automotive Task Force. IATF 16949:2016. October 2016

#### 執筆者紹介



森 弘之 Hiroyuki Mori

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 検査システム事業部 開発部  
専門: 情報工学  
所属学会: 日本品質管理学会



岸本 真由子 Mayuko Kishimoto

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー 検査システム事業部 開発部  
専門: 情報工学



# 1

## オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

### —モビリティ—



# 社会インフラへのモニタリング技術の活用 (1)

## 現場適用性の高いモニタリングシステムの実現と実証について

黒田 卓也・西田 秀志・尾崎 智博・樋上 智彦・赤井 亮太

日本国内の橋梁は2022年には橋長2m以上の橋の40%以上が完成後50年を超える高齢化時代を迎える。また、団塊世代の技術者が引退していき、国内橋梁を維持管理するための技術者不足も深刻となってきた。国土交通省は2013年を「メンテナンス元年」と位置付け、多くの施策を実施しており、最新技術の活用にも注力してきている。その中で、センサ技術を活用したモニタリングシステムは、技術者の代わりとなり、橋梁の損傷状態を監視するための技術として注目されている。

2013年から、オムロンのセンサ技術を土木分野で活用するべく、東京工業大学の土木知見と合わせ、産学連携で橋梁のモニタリングシステムの開発を進めてきた。ここでは、橋梁のおかれる現場環境に適用し、必要なセンサデータを効率良く収集するためのシステム開発成果を紹介する。

# Application of monitoring technology for social infrastructure (1)

## For validation and achievement of monitoring system with high site applicability

*Takuya Kuroda, Hideshi Nishida, Tomohiro Ozaki, Tomohiko Hinoue and Ryota Akai*

In 2022, over 40% of bridges with a bridge length of 2 m or more have reached an aging era exceeding 50 years after completion of bridges in Japan. In addition, engineers of the baby-boomer generation retire and the technical shortage to maintain and manage domestic bridges is getting serious. The Ministry of Land, Infrastructure and Transportation positions 2013 as the first year of maintenance, and implements many measures, and is also focusing on utilizing the latest technology. Among them, the monitoring system with sensor technology has been drawing attention as a technology for monitoring the damage of the bridge which can be substituted for the civil engineer.

Since 2013, in order to make use of Omron's sensor technology in the civil engineering field, we have been developing a monitoring system for bridges with civil engineering knowledge of Tokyo Institute of Technology through academic-industry collaboration. In this paper, we introduce the results of the system development for applying to the site environment where the bridge is placed and efficiently collecting necessary sensor data.

### 1. まえがき

2012年12月の笹子トンネルの事故以降、道路構造物の点検は非常に重要な業務となってきた。また、道路構造物、特に橋梁は2022年（平成34年）には橋長2m以上の橋の40%以上が完成後50年を超える高齢化時代を迎える<sup>1)</sup>。そのため、国土交通省は2013年を「メンテナンス元年」と位置付け<sup>1)</sup>、道路橋梁の点検に関する施策として、5年に一度の実施、かつ近接目視および必要に応じ触診や打音検査の実施を明確に示した「橋梁定期点検要領」<sup>2)</sup> および「道路橋定期点検要領」<sup>3)</sup> を策定している。この点検要領の適用お

よび、「長寿命化修繕計画」との連携した施策により、橋梁の劣化状況の実態が把握されるとともに、補修、補強を含めた橋梁の維持管理が確実に進められてきている。

筆者らはこのような状況の中で、センサ技術を、橋梁の維持管理に活用することを目的として、2013年6月に東京工業大学に「共同研究講座」を開設し、東京工業大学が有する「構造工学・地震工学・維持管理工学」に基づく「データ分析技術」と、オムロングループが保有する「センシング技術」「無線ネットワーク技術」の融合を図った<sup>4)</sup>、維持管理に活用できるシステムの開発に取り組んできた。

本稿では、定期点検間の安全性確保、構造物の継続的な

性能確認、地震や台風による突発的な損傷検知を目的としたモニタリングシステムに関して、現場適用性を高めるための技術の工夫および実証結果について紹介する。

### 2. 橋梁モニタリングシステムにおける課題

橋梁モニタリングが必要となる現場環境は、山奥、遠隔地など、人がアクセスしにくい場所、また都市内においても高架橋、跨線橋など容易に現場に立ち入ることができない場所が多く、電源の確保が困難、かつ、頻繁にメンテナンスができない環境がほとんどである。また、ケーブルの敷設は橋梁の点検や補修等の土木作業の支障となる場合もあり、極力ケーブルを排除することが必要である。

従来の計測技術においては、アナログセンサを計測装置(データロガーなど)に有線で接続し現場で計測を行う方法、計測装置のインターネット機能を使用して、遠隔地でデータを確認する方法があった。この方法では、現場での電源供給およびセンサケーブルなどの敷設も必要であり、現場環境への適応が難しく、長期設置は困難であった。そのため、短期間の計測しか実施できないため、点検間の安全性の確保や継続的、突発的な損傷の検出を実現することができていなかった。

このように、橋梁におけるモニタリングシステムでは、電源確保、ケーブルレス、長期稼働が大きな課題であり、これら課題を解決するシステムが不可欠となっている。

### 3. オムロンが考えるモニタリングシステム

**3.1 モニタリングのコンセプト** 橋梁の損傷状態により外部から橋梁に作用するダメージ要因 (INPUT) に対する応答 (OUTPUT) が変わる。筆者らは、INPUTおよびOUTPUTをセンサにより計測し、その相関を分析することで、橋梁のダメージ状態を知ることができると考えている<sup>5) 6)</sup> (図1)。INPUTとしては、橋梁に外部から作用する荷重(風、地震、通行車両)や周辺環境から作用する飛来塩分、温湿度を、OUTPUTとしては、傾斜、変位、応力変化、共振点変化などの計測を行う。これら計測値は、日射や活荷重などの環境条件や計測方法によりばらつきが生じ、そのばらつきが計測結果の評価において重要な要素となると考えている。図2にばらつきを含めた相関特性の概念図を示す。相関値は季節および、昼と夜でも変化し、ある分



図1 モニタリングコンセプト概念図

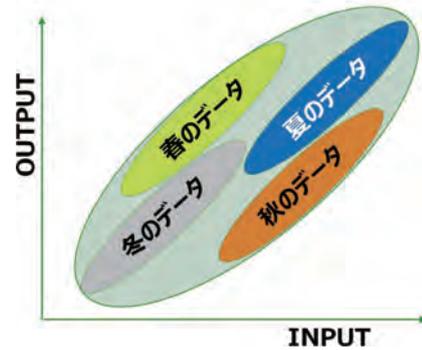


図2 特性評価の概念図

布の中で推移すると考えられる。著者らは、継続的な計測によるばらつきを含めた特性を把握することをモニタリングの基本としている。

**3.2 システム構成** 図3に実現したシステムの構成図、以下に現場に適用するための計測システムの主な特長を示す。

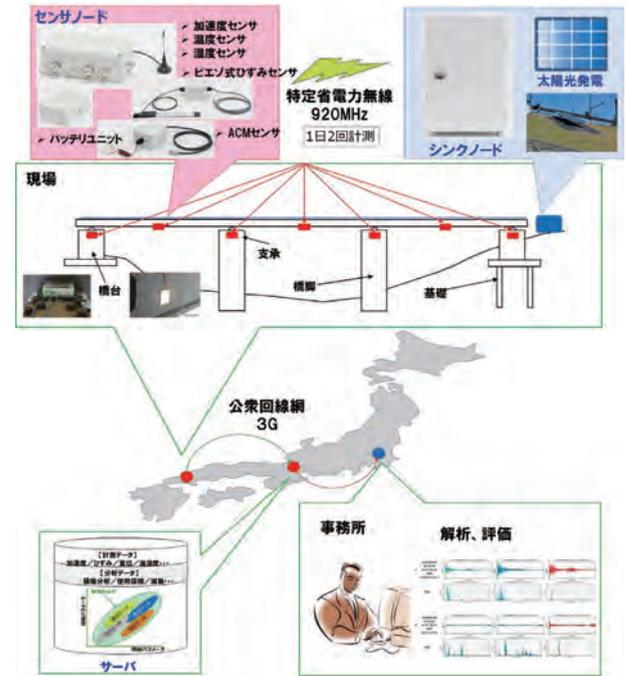


図3 モニタリングシステム構成図

#### 1) 省電力化および屋外環境における信頼性確保

消費電力が極力少ないセンサを採用し、一日に2、3回程度の定期計測機能を実装することにより、計測装置としての省電力化を図っている。複数センサを接続し、無線通信機能を持った計測装置(以下センサノード)は電池で5年以上稼働し、保護構造(IP65)と結露対策を両立し、長期屋外稼働を実現している。センサノードの外観図を図4に示す。

#### 2) 簡易設置可能な無線遠隔モニタリング

計測対象橋梁内のセンサノードは920MHz帯を利用した独自プロトコルによる無線通信によりデータ伝送を行い、基地局(以下シンクノード)に集約され、公共回線(3G、LTE)により遠隔地のサーバに保存される。管理者はインターネットを介して各地から計測データの監視、閲覧を行



図4 センサノード

う。このような無線通信により、配線工事が不要となったことで従来のシステムでは1か月ほど要したシステムの設置作業を5日間ほどで完了することが可能となった。

3) トリガ計測機能

センサノードには、時刻をトリガとする定期計測機能に加え、地震の初期振動をトリガとする地震計測機能を実装しており、さらに台風などの到来が予想される時には、短い周期で適切なデータ量を確保するなど、異常時においても効率的なモニタリングを実施することができる。

4) 多様な劣化損傷への対応

センサノードは、現場環境に応じて必要な計測が行えるよう加速度、温湿度センサ、さらに、ひずみ、ACM (Atmospheric Corrosion Monitor型腐食センサ) などのセンサを外部接続可能な構成とした。また、GPSを活用した高精度時刻同期により、各センサノード間の時刻誤差を5ms以下とし、複数地点の計測により振動モードのような面的分析に必要なデータを取得することができる。

4. モニタリングシステムの要素技術

社会インフラのモニタリングにおいて加速度データは変位分析、構造同定、構造パラメータ分析などに有効であり、ひずみデータは活荷重計測、中立軸、桁ひずみなど、局所的な状態評価に有効である<sup>5) 6)</sup>。橋梁の劣化損傷を評価するために必要な精度として加速度センサ、ひずみセンサは200Hzでサンプリングを実施し、低周波領域 (~50Hz程度) を主な計測範囲とする必要がある。本システムでは、電池駆動を可能とするため、必要な精度を確保しながら極力消費電力の小さいセンサを採用した。また、システムコストを抑えてセンサノード間の同期を実現するための時刻同期についても、独自の手法で実現した。ここでは、搭載している加速度センサ、ひずみセンサおよび時刻同期技術について紹介する。

**4.1 加速度センサ** 加速度センサは、構造物の特性評価に必要な振動特性を計測するための重要なセンサである。従来は、地震計に搭載されるような高精度なサーボ型加速度計が利用されてきた。しかし、モニタリングに活用するには消費電力も大きく、高価である。ここでは、センサの特徴、精度に関して、センサノードとサーボ型加速度計の比較評価を実施して、目的に適したセンサを採用した。

1) 加速度センサの特性比較

センサノードには、トリガ用および計測用の2つの加速

度センサを搭載している。図5に示すように、トリガ用センサは最も消費電力の小さいものを採用し、計測用センサは、維持管理の挙動把握に必要な精度を確保しつつ、極力消費電力が少ないものを採用した。これにより、普段は消費電力の少ないトリガ用加速度センサ以外をスリープ状態にすることでシステムとしての電力消費を最小限に留めている。

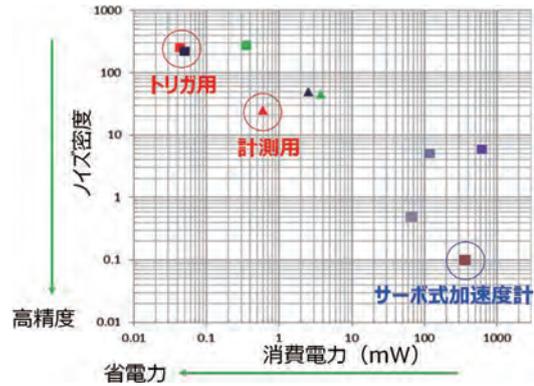


図5 加速度センサの性能マップ

2) 加速度センサの活用方法による比較

加速度センサは、微小な振動を捉えるために、そのノイズ特性が重要な要素となる。特に、変位を計測する場合には低周波領域の誤差が大きく影響する。図6に加速度から2回積分により変位を求めた場合の比較結果を示す。レーザ変位計の計測値を真値とし、サーボ式加速度計およびセンサノードで同一箇所の加速度から桁の変位を求め、結果を比較した。車両通過時の変位に対して、車両1、車両2が通過した時の変位換算の誤差は、サーボ式加速度計で振幅比0.81、相関係数0.83、センサノードで振幅比1.00、相関係数0.8となり、橋梁特性評価における差は無視できるレベルと判断できる。

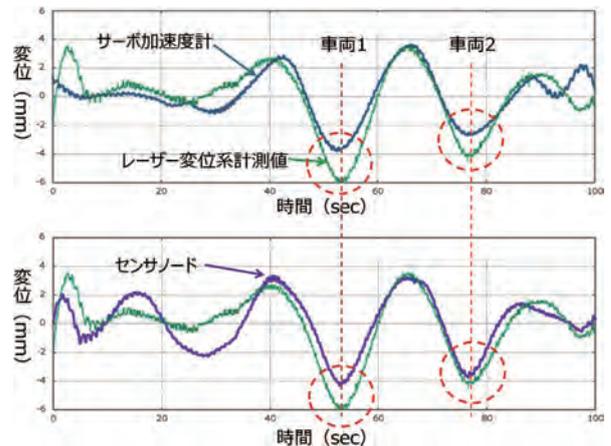


図6 変位計測精度の比較

4.2 ひずみセンサ

ひずみセンサは、構造物の局所的な状態を把握するため、損傷発生箇所周辺の部材に作用する応力の計測に用いられる。従来ひずみ計測時にはひずみの変化に比例して抵抗値が変化する金属抵抗材料を使用したひずみゲージが使用されていた。しかし、ひずみゲージは

耐久性、消費電力の課題からモニタリングに活用できない。著者らは圧電素子を活用した消費電力の小さい「 piezoelectric strain sensor (以下 piezoelectric sensor) 」を採用している<sup>7)</sup>。図7に piezoelectric sensor の外観図を示す。



図7 piezoelectric strain sensor 外観図

1) piezoelectric sensor の特長

「piezoelectric sensor」は、「ひずみ」に比例して電荷を出力する圧電素子 (PVDF) から構成されており、ほぼ電力供給なしでひずみの計測が可能である。piezoelectric sensor から出力される電荷を専用アンプで電圧に変換しセンサノードに接続して計測する。専用アンプにおいても各回路で最適化を行い、一般的なひずみゲージの消費電流30mA に対し、1/100の消費電流0.3mA を実現した。

piezoelectric sensor は、車両通行や地震動などによって橋梁に力が加わった際に発生する動的な応答を計測する動ひずみ専用のセンサであり、消費電力、耐久性の面から長期間計測が必要なモニタリングシステムに最適である。

2) piezoelectric sensor の計測精度

piezoelectric sensor は、発生する電荷をチャージアンプによって電圧に変換する構造となっている。アンプ回路の特性は、図8に示すように、低周波、および高周波側で減衰するフィルタ特性を有する。橋梁での計測において、桁ひずみは、車両通過による半波長の強制振動となるため、センサの出力電圧として現れる信号の周波数は、支間長と車両の走行速度で決定される。支間長を50mとした場合、40km/hで走行する車両通行時の桁ひずみの振動は0.111Hzとなり、5km/hで走行する車両の場合は、0.014Hzとなる。

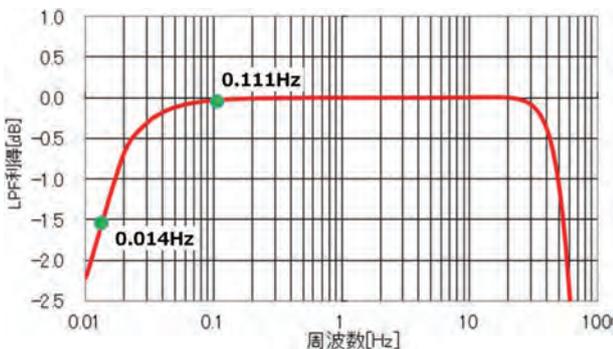


図8 piezoelectric strain sensor アンプ回路の特性

通常速度で走行する車両においては、特性評価に十分な精度を確保できている。しかしながら、渋滞などによる低速走行が発生する場合は、出力の減衰が大きくなるため、停止線付近での計測を避ける、または複数個所の計測時刻

から速度を推定し、低速走行によるデータを評価対象から除外するなど、計測場所、評価方法に留意が必要となる。

4.3 高精度時刻同期技術

1) 時刻補正方法

センサノードの時刻同期を行うには、センサノード毎に GPS 装置を取付け、個別に時刻同期することが最も高精度な方法である。しかし、1箇所で複数個のセンサノードを設置する場合、システムコストが高くなってしまふことが課題である。本システムでは、システムに1台の GPS 装置でシンクノードからセンサノードに時刻を配信する構成としている<sup>8)</sup>。図9に無線時刻同期システムの構成図を示す。



図9 時刻同期システム構成図

図10に主な時刻補正の処理について示す。GPS から時刻を受信し、シンクノードに送信するまでの間に発生する遅延分を、時刻情報と一緒にセンサノードに送信し、センサノードで受信した時刻を補正する。また、センサノード内部クロックの誤差により発生するサンプリング周期の誤差については、計測開始および計測終了時の時刻と計測回数から、サンプリング毎の時刻を高精度に補正する。計測中のすべてのサンプリング時刻において誤差5msec 以下の精度を実現した。

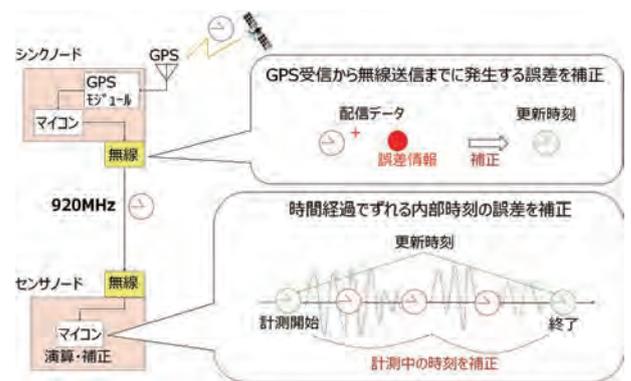


図10 時刻補正処理概念図

2) 高精度時刻同期による効果

複数個所のセンサノードにおいて、各箇所の挙動を相対的に可視化でき、橋梁がどのように揺れているのかを把握することが可能となる。図11に振動モード形状の FEM 解析結果と実測結果を示す。各計測地点の同期がとれているため、解析と同様のモード形状を確認することができた。

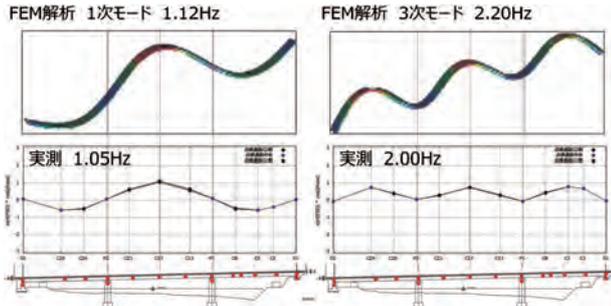


図11 振動モード形状

## 5. 長期信頼性を確保するための実装

長期稼働を実現するためには、省電力センサの活用だけでなく、計測回数、計測時間の最適化による省電力化が必要であり、また、屋外での長期稼働を確保するためには、センサとしての性能を維持しつつ、防塵、防水と高い耐候性を実現しなければならない。ここでは、長期信頼性を確保するための実装面での工夫を紹介する。

**5.1 省電力電源回路** センサノードには、待機時、計測時、通信時に電力供給経路を切替え、必要な電力のみを消費する独自の電源制御回路を搭載している。図12に概念図を示す。センサノード回路は通常待機の状態（図の破線の経路）で動作している。この時点では超省電力のトリガ用加速度センサのみが動作しており消費電流は小さい。制御部に計測を開始するためのトリガが入力されると、図の実線経路に切替わり、計測用加速度センサおよび通信回路が動作する。一定の計測時間が終了すると、再び待機時に戻る。この制御により、待機時の電力を大幅に削減し、電池駆動で5年以上の計測を可能とした。表1に本制御搭載前後での消費電流の計測結果を示す。トリガ制御搭載前後で、計測時、通信時の消費電流は変化がないが、待機時の消費電流が大幅に改善されていることが分かる。これはトリガ制御回路を追加することで、待機時に高精度センサ、通信回路への電流供給がカットされ、超省電力のセンサのみに電流供給されるように制御しているからである。

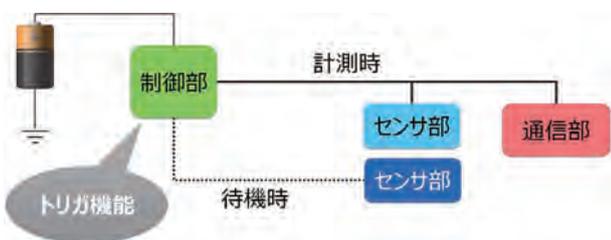


図12 省電力回路概念図

表1 センサノード消費電力評価結果

動作モード	搭載前	搭載後	改善効果
待機時	2.55mA	0.02mA	99%削減
計測時	6.4mA	6.4mA	—
通信時	32.0mA	32.0mA	—

**5.2 ピエゾセンサの長期信頼性確保** 一般的なひずみゲージによる計測においては、長くても2年程度の耐久性しか担保されておらず、長期モニタリングを実施するための信頼性を確保できていない。

ピエゾ式ひずみセンサで長期信頼性を確保するため、保護構造を独自に開発し、10年利用可能な耐久性を確保した。

図13にピエゾセンサの層構造を示す。ピエゾ素子(PVDF)自身は高い耐候性を有するが、電荷を取り出す電極の劣化および電極を絶縁するためのフィルム(PET)の加水分解により経年劣化の課題がある。一方で単純な保護を実施し、耐候性を強化すると、弾性率の関係からピエゾ素子へのひずみ伝達特性が悪くなる。その対策としてピエゾ素子の弾性率と近く、耐候性の高いポリカーボネートベース板として採用し、センサ上部には、耐候性は高いが弾性率の低いブチルゴムテープを採用した。

こうすることで、弾性率の関係が、構造物>ベース板=ピエゾ素子>ブチルゴム(上部保護)となり、構造物のひずみがピエゾ素子にそのまま伝わり、かつ上部の保護材がひずみ伝達を阻害しない構造を実現できた。

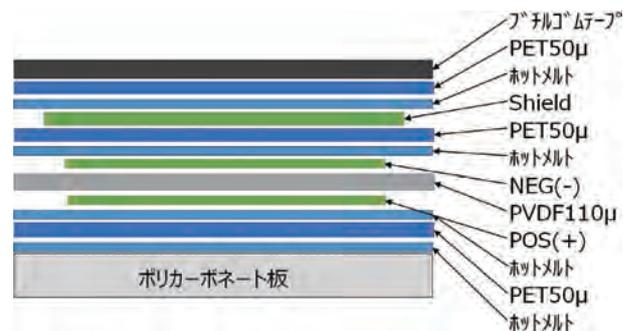


図13 ピエゾセンサの層構造

図14に温湿度加速試験のデータを絶対水蒸気圧モデルに当てはめ、寿命を予測した結果を示す。60°Cの環境においても10年相当の寿命を満足できており、橋梁等における屋外環境でも、長期計測可能であることを確認した。

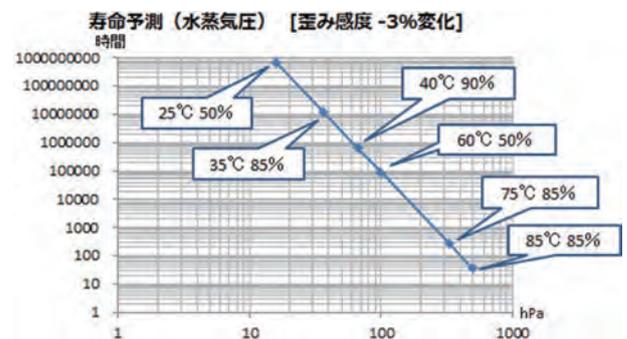


図14 ピエゾセンサの寿命予測

**5.3 トリガ計測機能** 図12に示す電源制御回路において、計測、通信を開始するトリガ機能が重要となる。適切なトリガを制御部に入力し、電源回路を制御することで、消費電力を運用に合わせて最適化でき、長期運用が可能と

なる。以下に主なトリガ機能について紹介する。

1) 定期計測機能

センサノードの内部時計により、トリガを駆動する機能である。開始時刻および計測間隔を自由に設定し、計測周期を設定することができる。劣化損傷のようにゆっくりとした変動を計測する場合は、本機能により定期的な長期間計測を行う。現場実証においては、開始時刻を午前3時、計測間隔を12時間と設定し、午前3時、午後3時の1日2回の計測周期で計測を実施した。またこれら設定はシンクノードを通じて遠隔からも設定の変更が可能である。

2) 地震計測機能

センサノード内部に搭載された、トリガ計測用加速度センサで、振動レベル（振幅）を判定し、指定する震度相当の振動レベルを検知した時に回路を切り替え、計測を実施する。図15に地震計測機能の概念図を示す。通常しきい値は、計測したい地震の震度に相当する加速度の値（gal 値）をしきい値として設定する。震度4の場合は20gal程度、震度5だと70gal程度となる。しきい値を超えた時点からの計測となるため、P波の計測はできないが、橋梁の特性を評価するには十分なデータを計測することができる。

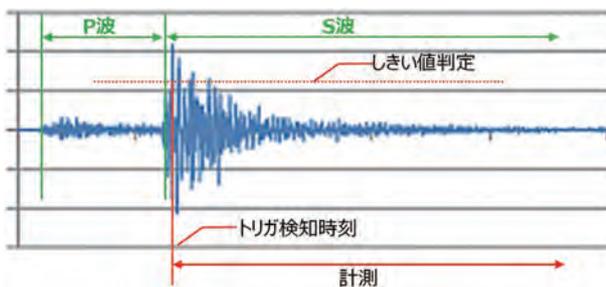


図15 地震計測概念図

5.4 自動しきい値設定機能 橋梁のモニタリングにおいては、図16のように、支点部、径間部のように複数個所の計測を行う。橋梁では、計測位置により、必ずしも震度に相当する加速度が発生するとは限らず、計測位置によりばらつき、その振動特性は異なる。そのため、固定しきい値とした場合、図17の上段に示すように、計測位置によりトリガ回数が大きくばらつく。この場合、計測位置によっては、不要な計測回数が増え、電池の余寿命の予測が困難となる。

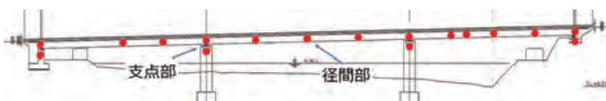


図16 センサノード設置位置

そこで、橋梁での地震計測を行う場合は、計測位置毎に、通行車両や風の影響による通常の振動を超える振動を地震発生と判断する方法を採用している。具体的には、普段の加速度データのピーク値の統計を取り、過去1週間の統計データから、1日平均のトリガ回数を推定し、発生頻度からしきい値をセンサノード毎に設定する<sup>9)</sup>方法である。こ

の方法を採用することで、図17の下段に示すように、計測位置によるばらつきを抑え、電池寿命を平滑化し、システムとしての電池余寿命の予測を可能とした。その結果、長期運用設計を可能とすることができた。

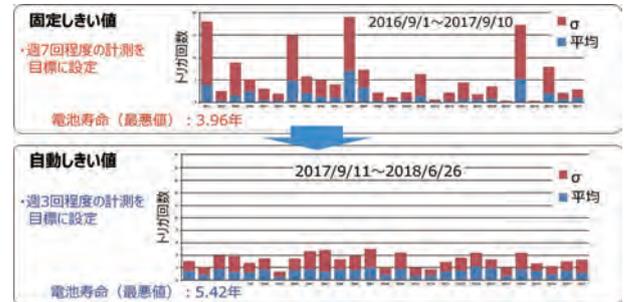


図17 しきい値と計測頻度

6. 計測結果

「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関連した、国土交通省の現場実証において、2014年～2018年の間に、実橋梁で本モニタリングシステムを活用して継続的な計測を実施した。本現場実証では、著者らが提案するモニタリングにおいて、継続的な計測によりばらつきを含めた特性を把握し、その特性から橋梁の維持管理に活用可能な指標を見出すことを目的としている。ここではその中で得られた実橋梁の特性を紹介する。現場実証の対象橋梁は、2007年3月に供用を開始した、橋長232m、支間長71.3m+88.0m+71.3mの鉄筋コンクリート床版を有する3径間連続鋼2箱桁橋である。

6.1 固有周波数 固有周波数とは、構造物が自由振動した際に現れる構造物が持つ固有の周波数のことである。損傷などにより構造物が変化した場合にはこの固有周波数も変化することになり、また、地震などの強制振動による振動がこの固有周波数と一致すると共振を起こし、構造物の破損につながることもある。固有周波数を把握しておくことは橋梁の特性を把握する意味で非常に重要である。図18に横軸を温度とし、縦軸を鉛直5次までの固有周波数の値を示す。年間の温度変化による変動は、高次になるほど若干低下することがわかり、各次数において計測値には±0.3Hz程度のばらつきを確認した。この温度特性、ばらつきを含めて、対象橋梁の平常時の剛性特性を表すものである。

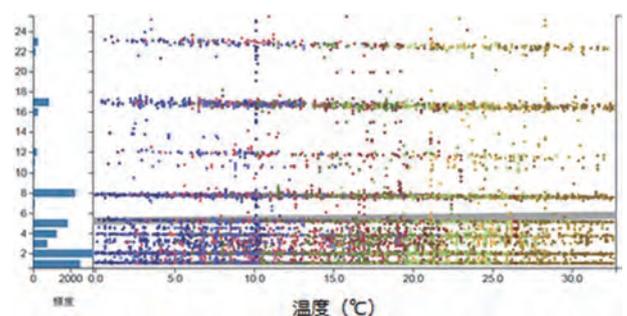


図18 固有周波数の温度特性

**6.2 中立軸** 桁などの部材にたわみが発生する場合、桁の上部と下部で圧縮力と引張力が発生する。断面内でこの圧縮力と引張力が釣り合う位置が中立軸であり、剛性低下の診断において、橋軸方向での断面で中立軸を把握することは断面応力の把握に有効である。桁上下フランジにひずみセンサを設置し、それぞれの引張、圧縮ひずみから中立軸を算出した。図19に横軸を時間軸、縦軸を下フランジから中立軸までの距離として、2016/9～2018/7まで計測した分布を示す。対象橋梁では、ねじれの影響により2つの中立軸が存在することが分かった。この中立軸の位置変化も対象橋梁の剛性特性を示す指標となる。

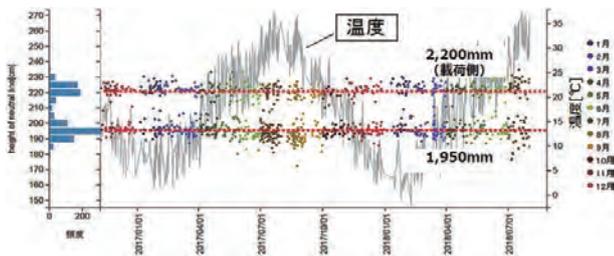


図19 中立軸の分布

**6.3 活荷重と桁ひずみの相関** 平常時のINPUT情報としての活荷重（橋梁を通行する車両の荷重）のモニタリングは有効であり、INPUTに対する橋梁の応答（OUTPUT）として桁のひずみ（車両通行時に発生する桁のひずみ）を計測することで、剛性低下の可能性を評価できる。図20に計測データの例および、図21に横軸を活荷重、縦軸を桁ひずみとした相関図を示す。図21の傾きは桁の曲げ剛性により関係付けられる。この傾きも橋梁の剛性特性を示すものであり、剛性変化のモニタリングに活用できる指標と考えられる。

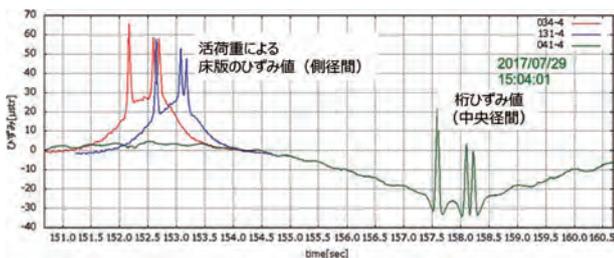


図20 活荷重、桁ひずみ計測データ例

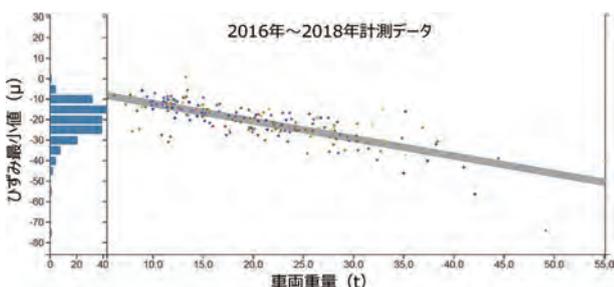


図21 活荷重（車両重量）と桁ひずみの相関

## 7. むすび

本稿では、社会インフラの維持管理へ適用が可能な常設型モニタリングシステムにおいて、筆者らが開発を進めているシステムにおける主な技術および計測結果例を示した。本システムにおける技術は、新規性を持ったものではなく、電気、通信技術の中で、既に数年前から技術的に確立しているものである。その技術を土木現場に適用できるように、工夫を加え、省電力化や無線化を実現し、その中で耐久性や信頼性の確保を図った。本システムから出力されるデータは土木技術者に分かり易いように、構造同定などの土木知見により、構造物の劣化、損傷情報に変換して提供する必要がある。このように、電気—情報—土木の融合で実現する技術が土木分野におけるIoT技術であり、今後のCPS社会を支える技術となると考える。

今後は、この技術が土木技術者の中で広く使ってもらえるよう、現場での実績、使い方の改善を行い、現場実装を進めていく予定である。

最後に、本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関連した、国土交通省の「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」によって得られた成果を利用している。計測の場所を提供していただいた国土交通省の皆様、開発当初からご指導をいただいた東京工業大学の佐々木栄一先生に紙面を借りてお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省広報誌. 社会資本メンテナンス元年. 国土交通. 2013, No.122, p.4-5.
- 2) 国土交通省道路局国道・防災課. “橋梁定期点検要領”. 2014.6.
- 3) 国土交通省道路局. “道路橋定期点検要領”. 2014.6.
- 4) オムロンHPニュースルーム, ニュースリリース2013. “異なる専門分野（土木×電気）で産業連携し、社会インフラの老朽化に対する維持管理分野の新技术構築を目的としたモニタリングシステムの共同研究を開始”. オムロン. <https://www.omron.co.jp/press/2013/08/s0807.html>, 2013.8.7.
- 5) 黒田卓也, 西田秀志, 高瀬和男, 佐々木栄一. “省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発2 (特性カルテ)”. 土木学会第73回年次学術講演会 CS9-017, 2018.8.
- 6) 佐々木栄一, Natdanai Sinsamutpadung, Poejan Tuttipongsawat, 黒田卓也, 西田秀志, 高瀬和男. “省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発3 (特性分析)”. 土木学会第73回年次学術講演会 CS9-018, 2018.8.
- 7) 樋上智彦, 西田秀志, 宮木理恵, 佐々木栄一, ジョージ ヴェルペ. “橋梁モニタリング向け低消費ピエゾ式ひずみ計の開発”. 土木学会第70回年次学術講演会 I-441, 2015.

p.821-822.

- 8) 赤井亮太, 西田秀志他. “橋梁ヘルスマニタリング向けワイアレス時刻同期システムの開発”. 土木学会第70回年次学術講演概要, 2015, Vol.70, I-410.
- 9) 西田秀志, 高瀬和男, 黒田卓也, 佐々木栄一. “省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発1 (センサ概要)”. 土木学会第73回年次学術講演会 CS9-016, 2018.8.

#### 執筆者紹介



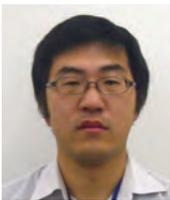
黒田 卓也 Takuya Kuroda

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
事業開発統轄本部 モニタリング事業統括部  
所属学会：土木学会



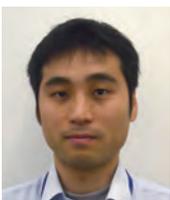
西田 秀志 Hideshi Nishida

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ ソリューション技術部  
専門：電気電子工学  
所属学会：土木学会



尾崎 智博 Tomohiro Ozaki

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ ソリューション技術部  
専門：電気電子工学



樋上 智彦 Tomohiko Hinoue

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ プロダクト技術部  
所属学会：土木学会



赤井 亮太 Ryota Akai

技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
無線・組込研究室  
専門：情報工学  
所属学会：土木学会

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

## 社会インフラへのモニタリング技術の活用 (2)

### 劣化損傷の評価手法の提案と SIP 現場実証での成果

西田 秀志・高瀬 和男・幡山 五郎・佐々木 栄一

高度経済成長期に建設された社会インフラの老朽化が進む中で、その維持管理にいくつかの社会的課題がある。点検が必要な構造物の増加に加え、点検結果の評価には高度な技術的判断が必要である。さらに、5年に一度の点検の義務化により点検費用が高額になっていることなどが課題である。これに対し、維持管理の高度化・効率化が可能なIoT技術を活用したモニタリング技術が期待されている。筆者らは、東京工業大学と共同で省電力化を図ったワイアレスセンサによる遠隔モニタリングシステムを開発し、2014年度から国土交通省直轄の橋梁において現場実証を実施してきた。本稿では、このシステムを活用し、筆者らが提案する「特性カルテ」と「劣化シナリオ評価」による健全度診断の成果と維持管理への活用の有効性について報告する。

## Application of monitoring technology for social infrastructure (2)

### Proposal of evaluation method of deterioration/damage and result of field experiment under SIP project

*Hideshi Nishida, Kazuo Takase, Goro Hatayama and Eiichi Sasaki*

Infrastructure built in the period of high economic growth in Japan is becoming deteriorated. However, there are some social issues to maintain and manage. In addition to an increase in the number of structures that need to be inspected, advanced technical judgment is required for evaluation of the inspection result. Furthermore, it is an issue that costs are expensive due to mandatory checking once every five years. On the other hand, monitoring technology utilizing IoT technology capable of sophistication and efficiency improvement of operation and maintenance is expected. The authors developed a remote monitoring system with wireless power-saving sensors jointly with Tokyo Institute of Technology, we have carried out the field test at the bridge of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport since 2014. In this paper, we report on the results of performance diagnosis by “Characteristics chart” and “Deterioration/damage scenarios” proposed by the authors using the system and the effectiveness of application for maintenance management.

#### 1. まえがき

米国では1930年代のニューディール政策によって大量の道路橋が建設され、50年が経過した1980年代に橋梁に代表される社会インフラ事故が発生し、維持管理が不十分であったことが指摘された<sup>1)</sup>。日本においては1960年代の高度成長期以降に大量に橋梁が建設されたことから、米国と同様に50年が経過する2010年以降のインフラに対する安全性が問題視され、国土交通省は、社会インフラの長寿命化の検討、維持管理への対策を進めてきた。その様な状況のもと、2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネルの天井版崩落事故では、老朽化の不安が現実化したただけでな

く、管理されているはずのインフラ構造物の点検の課題も顕在化したと言える。

また、近年頻発している地震や台風などの自然災害への備えも社会的課題となっている。これらの社会インフラが抱える課題は多種多様であり、土木分野だけでなく、IoT、AIなど、分野を超えた技術の連携が求められている。

一方、一品生産の土木構造物は個別性が高く、工業製品のような課題の体系化、共通化が容易ではない。そこで筆者らは、このような課題解決に向け、2013年度から東京工業大学に「社会インフラのセンシング・ソリューション研究講座」を開設し、オムロングループが保有するセンシング技術、IoT技術と、大学の土木工学を融合し、維持管理

の高度化・効率化を目的にインフラモニタリングの技術開発と活用の検討を進めてきた。

2014年度には、内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「維持管理・更新・マネジメント技術」に係る公募で採択を受け、5ヶ年にわたるモニタリングシステムの現場実証を行ってきた。

本稿では、第1章で本研究の背景となる社会インフラの老朽化の状況、および筆者らのこれまでの取り組みの経緯について概説した。

第2章では、社会インフラの維持管理における現状の課題から、予防保全のためにデータによる管理基準の設定が重要であることを示す。

第3章では、橋梁を対象に、劣化損傷を表す指標である「特性カルテ」と、指標の変化を評価する「劣化シナリオ評価」によるモニタリング手法を新たに提案し、構造物の階層に応じた診断の手順を示す。

第4章では、開発したモニタリングシステムをSIPの現場実証に適用した結果を示す。対象橋梁は鋼材の腐食や、コンクリート床版のひび割れが確認され、剛性低下が懸念される。これに対し、モニタリングによりひび割れが桁の剛性低下に寄与していることを、構造上の特徴量との関係により示す。さらに、初期状態、終局状態を推定し、健全度 (現有性能) を定量的に示すことで、管理基準の設定が可能となり、提案する手法が予防保全による維持管理に有効であることを示す。

第5章では、本研究で得られた成果をまとめる。

## 2. 維持管理の現状と課題

インフラ構造物は、スクラップアンドビルドから、ストック重視に変化せざるを得ない状況におかれている。これは、インフラ構造物が完成から50年を超え、老朽化が進んでいる一方で、厳しい財政状況から容易に建て替えができないためである。そのため、構造物の機能・性能を使用目的に適合するよう、維持または補修、補強をする保全が重要となる。

保全の方法は事後保全と予防保全があり、事後保全は構造物が損傷、劣化等によって機能・性能が低下するか、喪失した後に行う保全であり、一方、予防保全とは、計画的に構造物の点検、修繕、交換などを行い、使用中の機能・性能低下を未然に防止する保全である。

図1に示すように、予防保全では、継続的に構造物の健全度 (現有性能) を把握し、管理基準による評価を行うことで、小規模な修繕を実施することが可能となる。したがって、構造物の寿命を延ばし、安全・安心を確保するとともに、更新費を抑えることでライフサイクルコストの低減を図ることが可能となる<sup>2)</sup>。

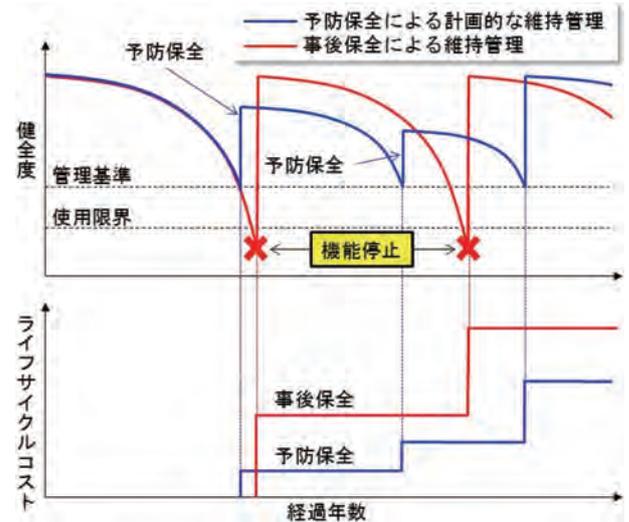


図1 予防保全対策を考慮したライフサイクルコストの低減

予防保全を実行していくためには、健全度を把握し、管理基準を設定することが重要となる。しかし、現状の維持管理における点検は、5年に1度の人手による外観検査が中心であり、表面的な劣化現象への評価が主体であるため、性能評価と結びついていないという指摘がある<sup>3)</sup>。そこで客観的なデータにより、現状の健全度の評価や使用限界を予測するための手法について、老朽化の課題が顕在化している橋梁について検討を行った。

## 3. 解決策の提案

**3.1 特性カルテと劣化シナリオ評価** 構造物の維持管理では、外力に対する応答を計測することが一般的である。代表的な計測として、振動 (加速度)、傾斜、変位やひずみなどが挙げられる。例えば、橋梁は活荷重 (自動車重量) や地震などの外力により振動する。特に、橋梁の質量や剛性によって固有に決まる固有振動を計測することは、橋梁の特性を把握する上で基本的な手法である。また、外力により橋梁は変形し、変形により応力を生じる。橋梁の設計の基本は応力であるが、応力は直接計測できないため、応力と関係のあるひずみを計測する。

すでに、これらは光ファイバや無線などを活用し、モニタリングする手法が、種々提案されている<sup>4)</sup>。しかし、「劣化メカニズム等の技術的な知見レベルに整合しておらず、劣化損傷等を説明できない」、などの指摘がある<sup>5)</sup>。これは、計測データ (振動やひずみ量など) を、直接、評価指標としている場合が多く、指標の変化が示す構造上の意味が理解しづらいことや、構造物の応答のみの評価であるため、変化の要因が評価できないことが課題として考えられる。

一方、制御分野では、実際のシステムや現象の解析、予測などを行うために、計測データからシステム同定を行うが、構造物のモニタリングでも同様であり、図2に示すように、荷重や地震など、どのような力が加わり (インプ

ト)、それにより橋梁がどう応答したか(アウトプット)、という対応関係の評価することが重要である。この対応関係は橋梁の構造特性を表すため、「特性カルテ」と呼び、新たな評価指標の考え方として提案する。

また、劣化損傷の対象により、カルテのインプットとアウトプットの組み合わせを選択する必要があるが、センサの種類を増やすことは、センサに対応した設置や保守の手間や、コスト、信頼性を考慮すると好ましくない。そこで、設置するセンサは、汎用性の高い加速度センサとひずみセンサを基本とし、上位側でデータを必要な情報に変換する。例えば、加速度データから固有周波数や変位へ、ひずみデータから中立軸や活荷重などへ情報を変換し、劣化損傷に対応した情報を得ることで、上記の課題に対応できる。

一方、図3に示すように、構造物が健全である場合も、温度や活荷重などの環境により、特性カルテはある範囲で分布し、さらに劣化損傷の進行により、この分布全体が変化すると考える。したがって、分布を把握したうえで、特性カルテの変化を構造上の特徴量として抽出できれば、初期と終局の状態を推定し、健全度を把握することができる。特徴量とは材料や構造の特性を示すパラメータを指し、例えばヤング係数や密度、バネ定数などである。この様に特性カルテと、構造解析を組み合わせた評価手法を新たに提案し、「劣化シナリオ評価」と呼ぶこととする。



図2 インプットとアウトプットによる評価

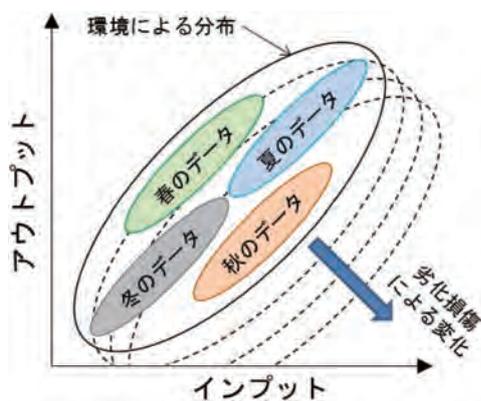


図3 特性カルテ

**3.2 モニタリング手順** 橋梁は規模が大きく複雑なため、劣化損傷の発生位置を正確に予測することは容易ではない。したがって、図4に示すように、構造物全体(グローバル)から、上部構造、下部構造、支承部などの各部へ絞り込ん

でいくことが効率的である<sup>6)</sup>。ただし、部材や材料レベル(ローカル)まで予測することは困難であるため、定期点検と組み合わせることが効果的である。

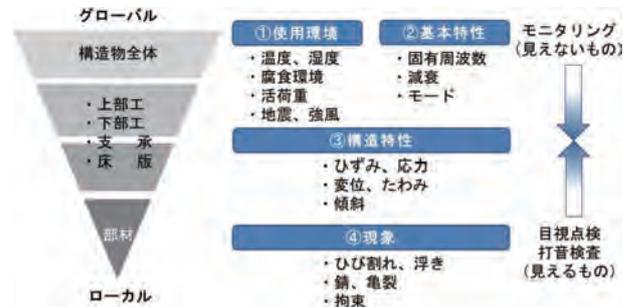


図4 評価レベル

## 4. 現場実証

**4.1 計画** 2014年度にSIP採択後、国土交通省より実証現場の提供を受け、モニタリング計画のために現地調査を行った。対象橋梁は2007年3月に竣工した、橋長232m、支間長71.3m+88.0m+71.3mの、鉄筋コンクリート床版を有する3径間連続非合成鋼桁箱橋である。図5に対象橋梁の側面図、図6に断面図を示す。

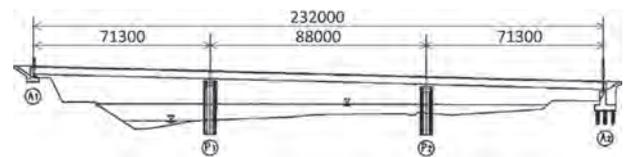


図5 対象橋梁(側面)

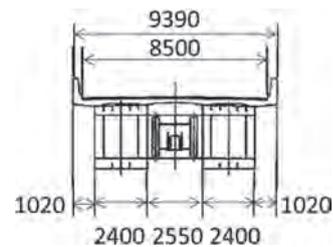


図6 対象橋梁(断面)

調査の結果、中央径間のコンクリート床版には、橋軸直角方向に約1m間隔でひび割れが生じており、鋼部材の表面には、部分的に腐食の進行が確認された。そこで、表1に示すように、腐食やひび割れによる剛性低下の把握を目的に、3.2項で示したモニタリング手順を踏まえた計画を立案した。また、災害時への備えとして、地震時の損傷評価も考慮した計画とした。

表1 モニタリング計画

項目		目的	評価
平常時	腐食 (箱桁全体)	腐食環境の把握と経過監視 板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握	①使用環境：腐食環境 ①使用環境：活荷重、温度 ②基本特性：振動特性(固有周波数、減衰、モード) ③構造特性： ・桁のひずみ、たわみ ・橋軸方向の各断面の断面応力(中立軸、合成効果、断面剛性)
	コンクリートひび割れ(中央径間：1m間隔)	コンクリート剛性低下把握	
災害時	地震、台風	異常発生位置や発生時刻、異常レベルの定量化	部材間の非線形応答分析

4.2 使用環境(活荷重)の評価

(1) 目的 自動車交通等による外力の繰り返しにより、構造物に疲労が累積され、損傷に至ることは一般的に知られている。そのため道路法では、車両の重量に対して総重量20t、軸重(車軸にかかる重さ)10tという制限が設けられている。特に橋梁に対しては、大きな損傷要因となることが研究で示されており、重量の12乗で損傷に影響するとも言われている<sup>7)</sup>。例えば、図7に示すように、軸重12tの車両1台が橋梁の疲労に及ぼす影響は、軸重10tの車両9台分に相当することになる。そこで、使用環境の評価、および4.4項に示す構造特性評価におけるインプット情報とするために、活荷重計測を行った。

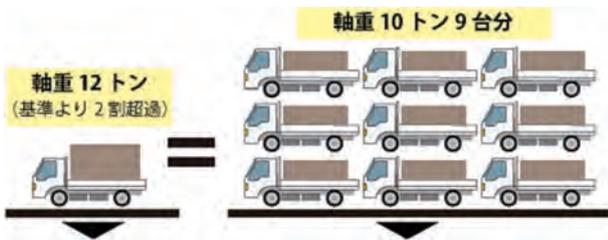


図7 車両の重量による橋梁の疲労に及ぼす影響<sup>9)</sup>

(2) 設置 車両通行時の橋梁部材の応答から重量を求めるBridge Weigh-In-Motion(以下、B-WIM)を採用した。B-WIMは1970年代に米国で開発され、桁の影響線を利用する手法が主流である。影響線とは、単位荷重が移動したときに、部材の応答(例えば、桁の断面力、または反力など)が、どのように変化するかを、単位荷重の位置の関数として表したものである。

桁の影響線は、支間長に依存するため応答時間が長くなり、複数車両が存在した場合、車両相互の影響を受ける。そこで、桁ではなく応答時間が比較的短い床版の影響線を利用するB-WIMを構築した<sup>9)</sup>。

センサは筆者らが開発した、省電力で屋外での長期設置が可能な、ピエゾ式ひずみセンサを利用した<sup>10)</sup>。

ピエゾ式ひずみセンサは、計測方向に依存性があるため、

図8に示すように、タイヤ通過位置付近の床版裏側の車線幅方向に設置することで、桁(車両進行方向)の影響を受けにくい構成とした。また、走行速度を計測するため、車両進行方向の2カ所(図9のC7、C8)にセンサを設置した。

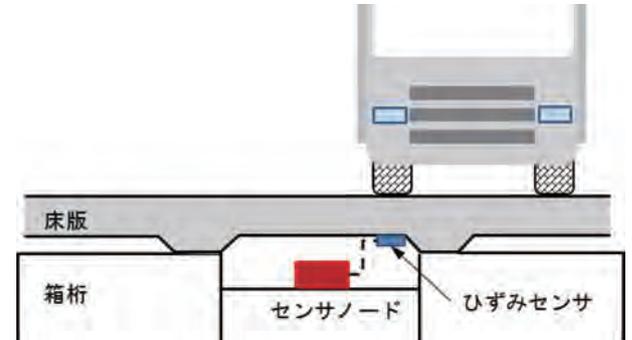


図8 センサ設置位置(断面)

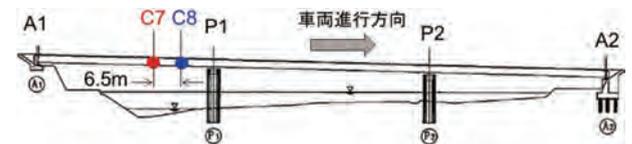


図9 センサ設置位置(側面)

ここで、B-WIMの原理について概説する<sup>11)</sup>。図10に示すように、橋梁を速度 $v$ で走行する3軸の車両に対して、ひずみセンサの設置位置( $x=0$ とする)におけるひずみと荷重の関係を考える。

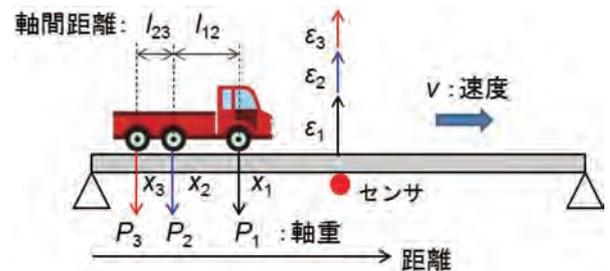


図10 B-WIM原理

影響線は、単位荷重の位置の関数として表されるため、 $I(x)$ とすると、理論上のひずみ $\epsilon_d$ に関して以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \epsilon_d &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \\ &= P_1 I(x_1) + P_2 I(x_2) + P_3 I(x_3) \end{aligned} \quad \text{式1}$$

ここで、1軸目が時刻 $t=0$ にセンサ上を通過したとすると、時刻 $t=t_n$ における理論上のひずみ $\epsilon_d(n)$ は、式1から次式で表される。

$$\epsilon_d(n) = P_1 I(vt_n) + P_2 I(vt_n - l_{12}) + P_3 I(vt_n - l_{23}) \quad \text{式2}$$

軸間距離 $l_{ij}$ と軸重 $P_k$ は既知とし、 $v$ は図9に示す車両進行方向の2カ所に設置された、ひずみセンサ間の通過時間と設置距離から求める。

一方、同じく時刻  $t_n$  におけるひずみの計測値を  $\epsilon_m(n)$  とした場合、計測時間内の全ての計測点において  $\epsilon_d(n)$  と  $\epsilon_m(n)$  の2乗誤差  $\phi$  が最小となるように影響線  $I(x)$  を求める。

$$\phi = \sum_n (\epsilon_d(n) - \epsilon_m(n))^2 \quad \text{式 3}$$

$I(x)$  は、B-WIM 運用前に試験車両による走行試験を実施し、予め求めておく。走行試験時の計測波形  $\epsilon_m(n)$ 、および、求めた影響線  $I(x)$  を図11、12に示す。

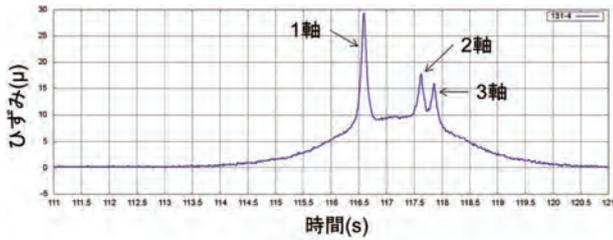


図11 ひずみ計測波形 (3軸車)

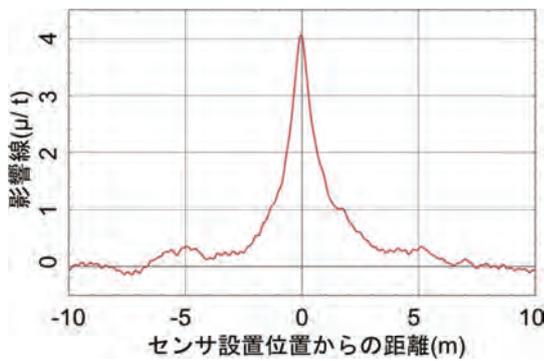


図12 求めた影響線

一方、B-WIMの運用時は、得られた一般車両の計測データから、速度  $v$  と各軸の通過時間差から軸間距離  $l_{ij}$  を求める。これらと予め求めた影響線  $I(x)$  により、式3から軸重  $P_k$  を未知数として求めることができる。

**(3) B-WIMの精度評価** 走行試験によりB-WIMの精度評価を実施した。試験車両の諸元と試験条件を表2、3に示す。目標精度は、欧米の重量計測に関する規格<sup>12)13)</sup>を参考に、総重量において真値に対する計測誤差を  $\pm 20\%$  以下とし、試験条件 (車両台数、走行位置、荷重、期間、サンプル数) から信頼度を90% (平均  $\pm 1.65\sigma$ 、 $\sigma$ : 標準偏差) とした。こ

表2 車両諸元

試験日	車両	総重量 [t]	1軸重 [t]	2軸重 [t]	3軸重 [t]
2017年1月	1	11.82	4.98	3.58	3.26
	2	19.86	6.12	7.04	6.70
2017年9月	3	19.78	8.08	6.06	5.64
	4	15.22	6.44	4.52	4.26
2018年9月	5	19.78	5.72	7.16	6.90
	6	15.32	6.00	4.80	4.52

表3 試験条件

試験日	車両	走行回数	走行速度
2017年1月	1	8走	20-60 [km/h]
	2	6走	
2017年9月	3	11走	
	4	9走	
2018年9月	5	8走	
	6	10走	

れはデータを統計的に扱うことが可能なレベルである。

図13に示すように、52走の試験において計測誤差は17.7%であり、目標精度を達成できていることを確認した。

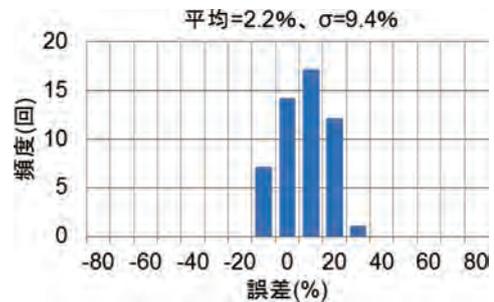


図13 総重量計測誤差 (温度補正後)

ただし、ピエゾ式ひずみセンサは温度特性 ( $0.47\%/^{\circ}\text{C}$ ) を有するため、温度による補正を実施している。また、経年変化 (センサ自体、路面凹凸など) によるオフセット変動が、対象橋梁では年間で2%程度生じることを確認しており、校正を実施している。

**(4) 重量別交通量の評価** B-WIMを用いて、2年間の重量別交通量を求めた。計測タイミングは3時と15時の1日2回で、1回につき5分間の計測とし、総重量5t以上の車両のみを集計した。図14に結果を示す。結果から、道路法の規定である、総重量20tを超過する車両の通行実態が把握できた。

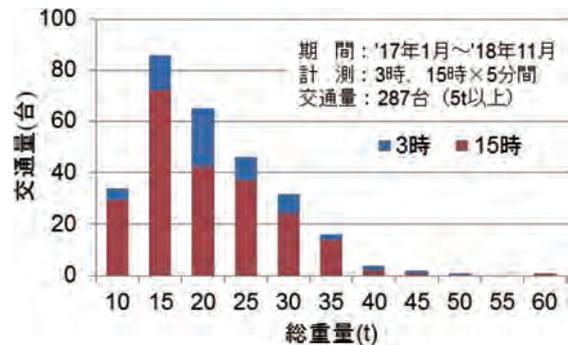


図14 重量別交通量

### 4.3 基本特性の評価

**(1) 目的** 対象橋梁ではコンクリート床版のひび割れや、鋼部材の腐食により剛性低下が懸念される。そこで、まず橋梁全体 (グローバル) の基本特性を示す固有周波数をカ

ルテとし、カルテの変化について検討を行った。これには、数値モデルを用いた特徴量（構造パラメータ）の影響度分析、および変動分布を求めることが有効である。そこで数値モデルを構築し、固有周波数を評価対象とした劣化損傷の現状（コンクリート床版のひび割れ、鋼材の腐食）に影響するパラメータの推定を実施した<sup>14)</sup>。

(2) 設置 固有周波数を計測する加速度センサは、基本特性を把握するために、低次の振動を計測する必要がある。加速度センサの設置位置を図15に示す。P1、P2、A1、A2を固定端として、支間の1/2（図15のC5、C17、C29）で奇数次モード、1/4（図15のC3、C8、C13、C21、C26）で偶数次モードが計測できる位置を選定した。

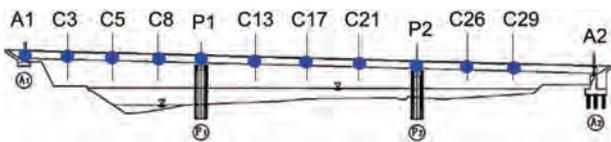


図15 加速度センサ設置位置

(3) 評価 まず、計測した加速度データから、固有周波数による構造同定解析を行った。同定解析には、システム同定手法の一つであるNEX-T-ERA<sup>15)16)</sup>と呼ばれる手法を用いて行った。これは、車両通行による強制振動の加速度波形から自由減衰応答波形を取得し、固有周波数を求める手法である。1~3次の同定結果を図16に示す。

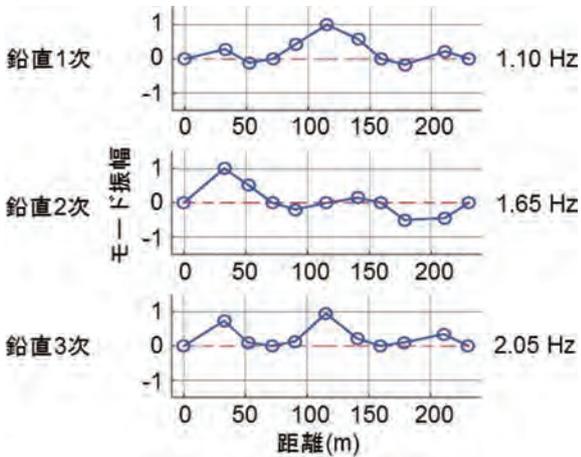


図16 固有周波数の同定結果（データ）

一方、設計図面にに基づき、主桁、横桁、RC床版、ゴム支承を数値モデル化した。図17にモデル、表4にパラメータの一例を示す。また、数値モデルによる構造解析により求めた固有周波数を図18に示す。同定結果と解析結果を比較すると、両者に5~10%の差があることが分かる。これは固有周波数を特性カルテとした場合の、初期（設計値による解析）から現状（計測データ）への変化であり、この変化に影響する構造パラメータを求めることが、劣化シナリオ評価となる。

パラメータの推定にはベイズ推定を用いた。ベイズ推定は、

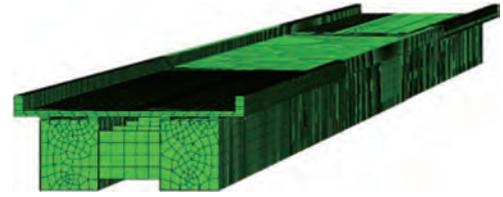


図17 桁全体の数値モデル

表4 構造解析に用いたパラメータ

材料特性	設計値
鋼材ヤング係数Es	205 (GPa)
鋼材密度 $\rho_s$	7750 (kg/m <sup>3</sup> )
鋼材ポアソン比Vs	0.3
鉄筋コンクリートヤング係数Ec	28 (GPa)
鉄筋コンクリート密度 $\rho_c$	2300 (kg/m <sup>3</sup> )
鉄筋コンクリートポアソン比Vc	0.17

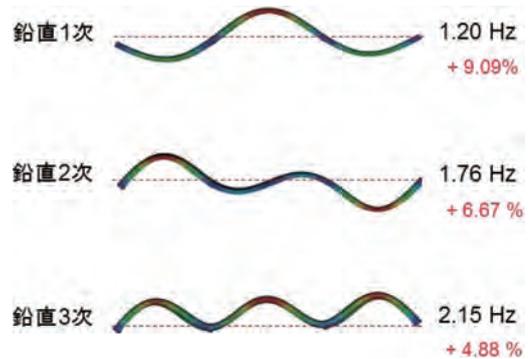


図18 固有周波数の構造解析結果（設計値）

事前の情報に、新たに得られた情報を与えて、情報を更新する数学的手法であり、事前の情報に設計値、新たに得られた情報に構造同定結果を利用することで、現状の構造パラメータを推定することができる。結果から、固有周波数の差には中央径間のコンクリートのヤング係数（Ec）が最も影響し、その値は28GPaから9.85GPaに低下しているという結果が得られた。パラメータ推定結果を図19に示す。これは中央径間にコンクリート床版のひび割れが生じている状況と一致している。また、橋梁全体（グローバル）の固有周波数から、中央径間のコンクリートヤング係数（ローカル）へ、損傷に関する特徴量の推定ができたと言える。

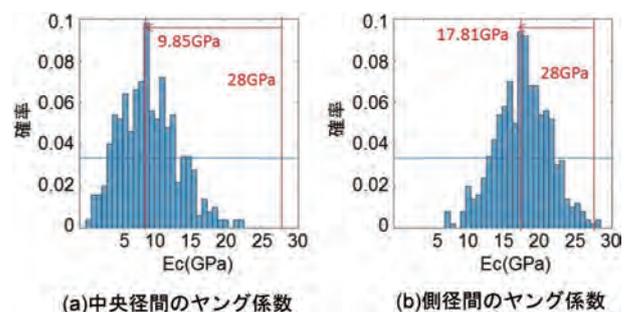


図19 ベイズ推定結果

4.4 構造特性の評価

(1) 目的 モニタリングで重要なことは、図2で示したように橋梁へのインプット情報と、アウトプット情報を比較評価することである。この対応関係は、橋梁の構造特性を表しており、劣化や損傷の原因を評価し理解するうえで重要である。そこで、4.2項で求めた活荷重をインプットとし、桁のひずみをアウトプットとした特性カルテの評価を行うこととした。

まず、活荷重と桁ひずみの関係について、構造上の意味を検討する。図20に示すように、梁に力が加わると、梁の上側は圧縮され、下側は引張られ、部材の断面には圧縮応力と引張応力が分布する。この応力の分布は、曲げ応力度 $\sigma$ と呼び、中立軸( $\sigma=0$ )から梁の上端(あるいは下端)までの距離 $y$ と、断面二次モーメント $I$ 、曲げモーメント $M$ との間に式4の関係がある。

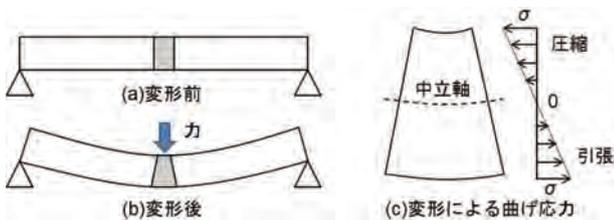


図20 曲げを受ける梁の変形

$$\sigma = My/I \tag{式4}$$

一方、図21に示すような梁を走行する活荷重 $P$ と、梁の中央に生じるひずみ $\epsilon$ との関係は、材料のヤング係数を $E$ とすると、式5で表される。

$$\epsilon = \sigma/E \tag{式5}$$

したがって、式4、5から以下の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} \epsilon &= M(x)y/EI \\ &= PD(x)y/EI \end{aligned} \tag{式6}$$

ここで、

$$D(x) = (L-x)/2 \quad L/2 < x < L$$

$$D(x) = x/2 \quad 0 < x < L/2$$

$L$ : 支間長、 $x$ :  $P$ の位置

$M(x)$ :  $P$ の位置での曲げモーメント

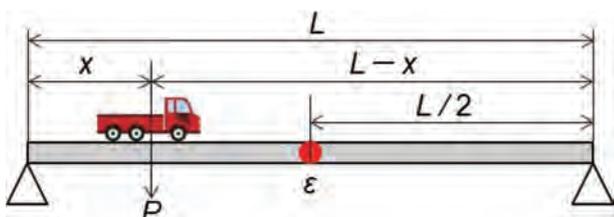


図21 荷重とひずみの関係

式6から、活荷重 $P$ とひずみ $\epsilon$ の関係は、 $EI$ を表すことができる。 $EI$ は曲げ剛性(部材の曲げにくさ)を示すことか

ら、この関係を指標とすることは、劣化損傷による剛性低下をモニタリングする指標として、有効であることが分かる。

(2) 設置 ひずみセンサの設置位置を図22に示す。コンクリート床版のひび割れが生じている中央径間の中央(図22のC17)のひずみをアウトプットとし、4.2項で求めた活荷重をインプットとする特性カルテの作成、評価を行った。



図22 ひずみセンサの設置位置

(3) 評価 測定例を図23に示す。横軸に時間、縦軸に各設置位置でのひずみ量を示す。これらのデータは、走行速度、軸数などから同一車両として対応付け、特性カルテを作成した。データは、温度補正、オフセット調整を実施している。

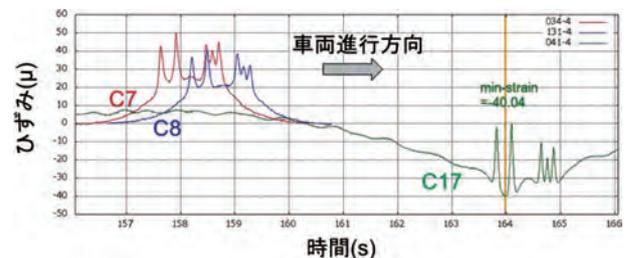


図23 測定例

作成したカルテを図24に示す。横軸に活荷重、縦軸にC17の桁ひずみとし、2016年10月から2018年11月まで年ごとに示した。図中左下の数値はデータの近似直線の傾きを表し、式6から傾きは $EI$ の逆数を示していることになる。

次に、構造解析による劣化シナリオ評価を実施した。ここでは、より実態に即した評価とするため、 $E$ はひび割れが生じていない側径間の値とし( $E_c=17.81\text{GPa}$ )、中央径間のみ、ひび割れを考慮した数値モデルを作成し、 $I$ を変化させた解析を実施することとした。

具体的には、コンクリートのひび割れによる劣化の進展に合わせ、初期状態としてひび割れが無い状態をa、現場と同様に、中央径間のみ1m間隔で橋軸直角方向にひび割れがある状態をb、終局状態として、鉄筋の配筋間隔である0.25m間隔で橋軸、橋軸直角に格子状のひび割れがある状態をcとして評価を行った。ひび割れ進行のイメージを図25に、評価結果を図26に示す。

まず、現場と同様に、中央径間のみ1m間隔で橋軸直角方向にひび割れがある状態bにおいて、カルテと解析結果が、ほぼ一致していることが確認できる。さらに、ひび割

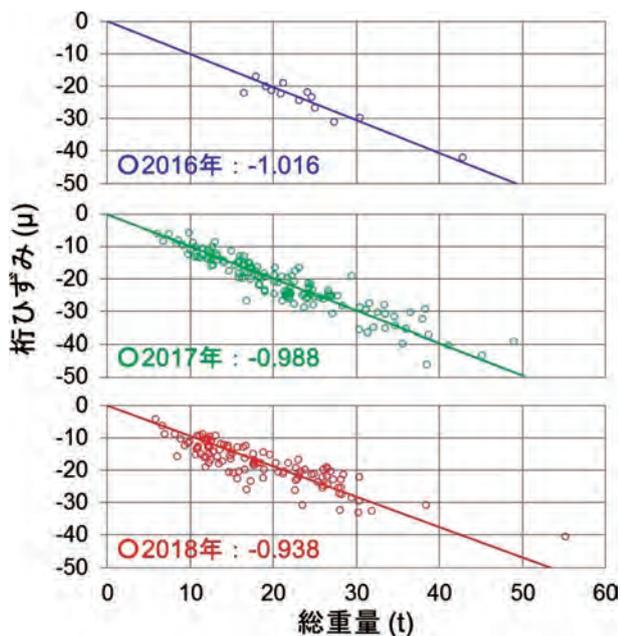


図24 桁ひずみと活荷重による特性カルテ

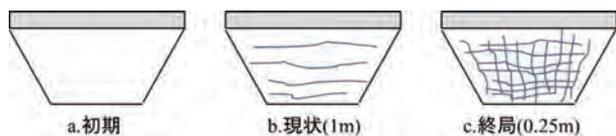


図25 ひび割れの進行

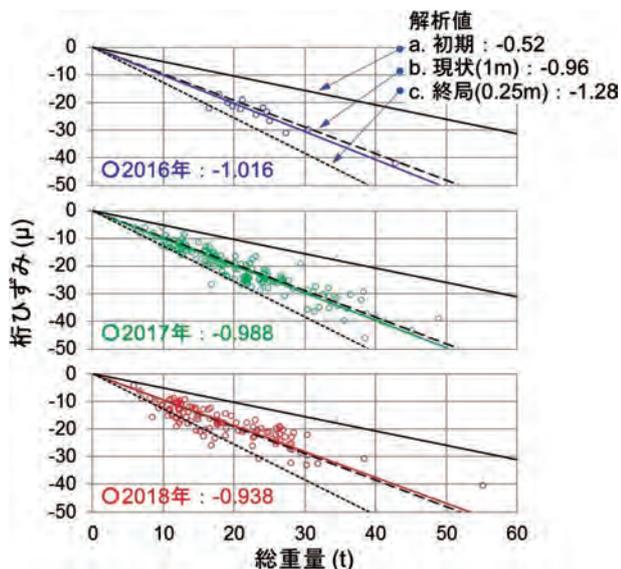


図26 カルテと解析値との比較

れの無い初期状態aとの比較では、剛性の低下が確認され、終局状態cでは、さらに剛性が低下することも明らかとなった。これにより、初期と現状、終局状態が劣化シナリオ評価により定量的に示され、健全度（現有性能）の把握が可能となった。さらに、管理基準の設定が可能であり、適切なタイミングで、予防保全による維持管理が実施可能になることを示している。

## 5. むすび

本稿では予防保全による維持管理の実現を目的に、客観的なデータによる健全度の把握や、使用限界を評価する手法の開発と、現場での実証を行った。対象橋梁は、建設後10年程度の比較的健全な状況であったが、提案するモニタリング手法の有効性を示すことができたと考える。以下に、本研究から得られた成果を示す。

(1) 構造物の入出力応答に着目した評価指標を特性カルテとして定義し、カルテの変化に影響する特徴量を構造解析により捉え、構造物の初期、現状、終局を定量化する手法を劣化シナリオ評価として導入した。これを構造物の階層に応じた評価レベルで実施し、健全度診断と管理基準の設定を目的に5年間の実証実験を計画した。

(2) 使用環境の評価として、筆者らが開発したピエゾ式ひずみセンサを用いたB-WIMにより活荷重計測を実施した。走行試験により、総重量の真値に対する計測誤差で20%以下（平均 $\pm 1.65\sigma$ ）を実現し、一般交通に対する重量別交通量の評価では、道路法の規定を超過する交通実態を明らかにした。

(3) 基本特性の評価では、構造全体の固有振動数に着目し、加速度データによる構造同定と、数値モデルによる構造解析との比較を実施した。初期と現状の固有周波数の差は、中央径間のコンクリートヤング係数の低下によることが推定され、損傷位置が、構造全体から中央径間の床版へと、絞り込みが可能であることを示した。

(4) 中央径間においては、活荷重と桁ひずみの特性カルテが、桁の曲げ剛性EIを示すという構造上の特性を踏まえ、現場で表面化しているコンクリートのひび割れの進行を想定した構造解析を実施した。その結果、カルテと構造解析による現状の一致を示すとともに、初期、終局を推定し、健全度を定量化した。

(5) また、本稿では触れていないが、湿度とACM型腐食センサの出力から、橋梁への海塩付着量を推定し、腐食環境の評価も行った。データから厳しい腐食環境であることを把握した。さらに、実証実験中に発生した震度5弱の地震時の加速度データをトリガ計測により捉え、損傷が想定される支承部の評価も行った。地震発生前後の振動を比較し、損傷が生じていないことも評価できた<sup>17)</sup>。

(6) 上記(5)を含む7種類の特性カルテによる評価を実施し、4種類において構造解析との妥当性確認、および健全度評価により、計画当初に想定した剛性低下を示す結果が得られた。

今後は特性カルテに管理基準を設定し、長期的なモニタリングによる維持管理計画の提案や、情報提供方法などを具体化しシステムの社会実装を進めていく。

**謝辞** 本研究の一部は、内閣府総合科学・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技

術」に関連した、国土交通省の「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」において得られた成果によるものである。場所を提供いただいた国土交通省の皆様は紙面を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) P. Choate et al. America in Ruins. The Decaying Infrastructure. Duke University Press, 1983, 115p.
- 2) 平成 21 年度国土交通白書, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h22/hakusho/h23/pdf/kp210000.pdf>, (参照2018-12-7).
- 3) 齊藤成彦. 構造物の維持管理における課題と展望. 道路の老朽化対策に関する講演会, 2016年2月29日.
- 4) 木村嘉富, 七澤利明, 澤田守. “損傷橋梁の監視技術に関する調査”. 国立研究開発法人土木研究所, 2009.
- 5) 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会. “モニタリング技術の現状と課題”. 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/tec/monitoring.html>, (参照2018-12-7).
- 6) 国土技術政策総合研究所. 多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン (案), 2011, p. 4-5.
- 7) 松井繁之. 床版の技術開発—耐久性の向上施工合理化—, 橋梁と基礎, 1997, Vol.30, No.8, p.84-94.
- 8) 国土交通省道路局. “特殊車両の通行に関する指導取締りの強化について”. 2008. [http://www.mlit.go.jp/report/press/road01\\_hh\\_000026.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000026.html), (参照2018-12-7).
- 9) Dung, Cao Vu; Sasaki, Eiichi; Nishida, Hideshi; Hinoue, Tomohiko. Novel Application of PVDF Sensors for Vehicle Weight Identification in Reinforced Concrete Deck Steel Bridges. Journal of Bridge Engineering. ASCE, 2018.
- 10) 樋上智彦, 西田秀志, 宮木理恵, 佐々木栄一, ジョージ ヴェルベ. “橋梁モニタリング向け低消費ピエゾ式ひずみ計の開発”. 土木学会第70回年次学術講演会I-441, 2015, p.821-822.
- 11) Moses, F. Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges. Transportation Engineering Journal, Proceedings of ASCE, 1979, Vol.105, No. TE3, p.233-249.
- 12) American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method (E1318-94).
- 13) COST323. Weigh-in-Motion of Road Vehicles Final Report. Version3.0, August, 1999.
- 14) Sasaki, Eiichi; Tuttipongsawat, Porjan; Sinsamutpaduag, Natdanai. Condition Evaluation of A Highway Bridge with RC Deck using Monitoring Data Obtained by Wireless Sensors. 1<sup>st</sup> International Conference on CASTED2018.
- 15) Juang, J.-N., Pappa, R.S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1985, Vol.8, No.5, p.620-627.
- 16) Farrar, C.R., James, G.H. System Identification from

ambient vibration measurements on a bridge. Journal of Sound and Vibration. 1997, Vol.205, p.1-18.

- 17) 西田秀志, 高瀬和男, 黒田卓也, 佐々木栄一. “省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発1 (センサ概要)”. 土木学会第73回年次学術講演会CS9-016, 2018.

## 執筆者紹介



西田 秀志 Hideshi Nishida

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ  
ソリューション技術部  
専門：電気電子工学  
所属学会：土木学会



高瀬 和男 Kazuo Takase

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
事業開発本部  
モニタリング事業統括部  
専門：構造工学, 鋼構造, コンクリート工学  
所属学会：土木学会, コンクリート工学会  
博士 (工学), 技術士 (建設部門)



幡山 五郎 Goro Hatayama

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ  
ソリューション技術部  
専門：数理物理学  
博士 (理学)



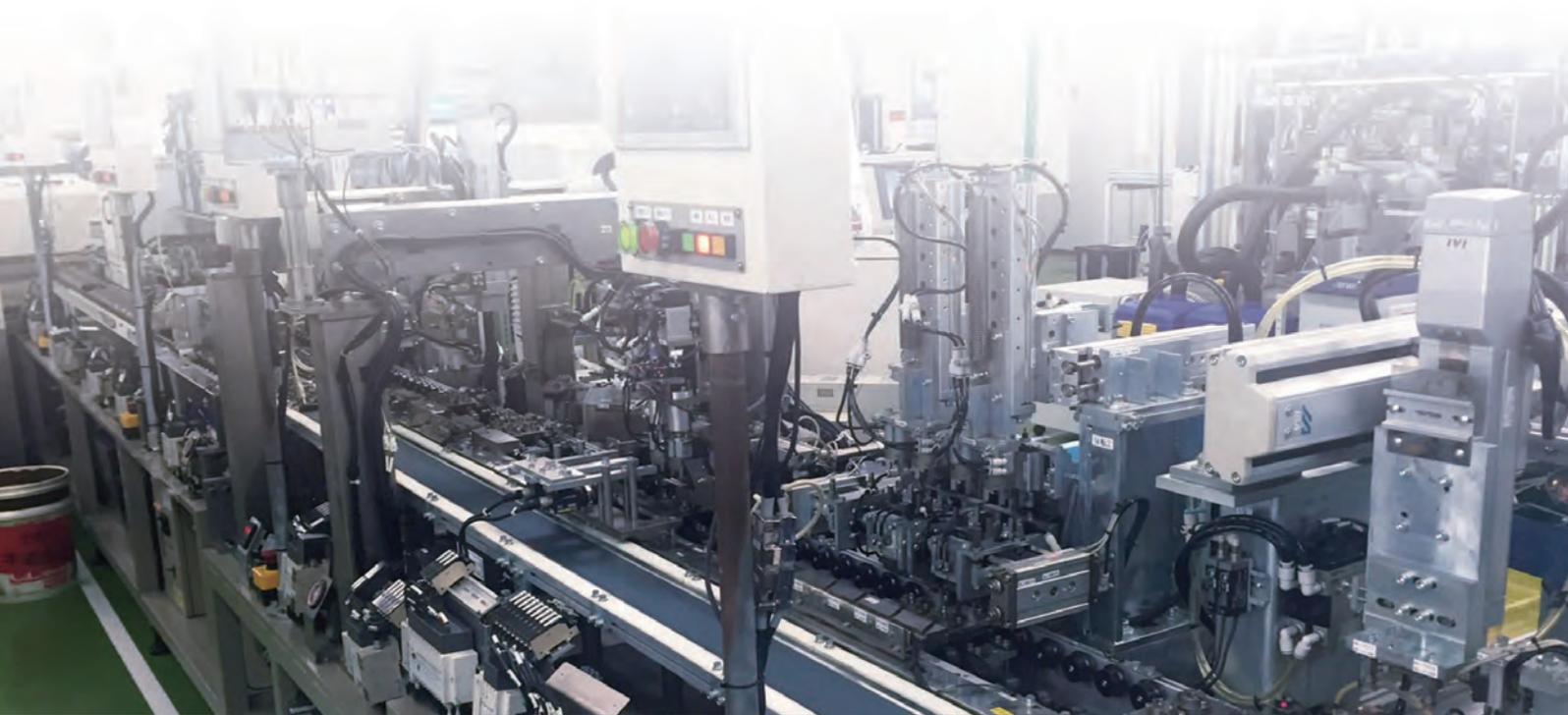
佐々木 栄一 Eiichi Sasaki

国立大学法人東京工業大学  
環境・社会理工学院  
土木・環境工学系  
准教授  
専門：構造工学, 維持管理工学, 耐震工学  
所属学会：土木学会  
博士 (工学)

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# 2

## オムロンの ものづくりを支える技術



# 塩水浸入挙動の解明とその評価方法について

達野 陽介・福原 智博・長坂 昭吾

リレーやスイッチ、FAセンサなど電子機器の多くは、様々な環境で使用されており、各々の環境での動作を保証するために封止などにより内部が保護されている。特に、屋外で使用する用途においては、海水や人の汗など塩分を含んだ水（塩水）が付着し、電子機器の樹脂筐体に浸入し乾燥することにより、機器内に塩の結晶として析出すると、導体が腐食して動作不良に繋がる恐れがある。

本論文では、塩水がどのように樹脂筐体内へ浸入し、それが塩の結晶としてどのように析出するのかという挙動を解明した。さらに、導出した塩水の浸入距離推定方法を用いて、封止部の塩水浸入を予測できることを確認した。得られた知見を設計段階から用いることで、塩水封止性を確保し、長寿命化、寿命バラつき低減を実現できる安心、安全な電子機器を顧客に提供することができる。

## Explication of saltwater intrusion behavior and the evaluation method

*Yosuke Tatsuno, Tomohiro Fukuhara and Shogo Nagasaka*

Much of the electronic equipment such as relays, switches and FA sensors is used in the various environments, and it is protected by seal to guarantee these movements. In particular, in applications where outdoor use, water including salt (saltwater) such as seawater and human sweat is attached to the electronic equipment. By entering the resin housing and dried, if it precipitated as salt crystals in the equipment, there is a risk that the conductors is corroded and leading to malfunction.

In this paper, we elucidated entering behavior of saltwater into the resin housing and precipitation of the crystals. Further, using penetration distance estimation method of the saltwater, it was confirmed that can predict the saltwater intrusion of the sealing portion.

It's possible to secure saltwater sealing properties by using obtained knowledge in the design stage and offer the relieved safe electronic equipment which can achieve a longer life and reduction of life variations to a customer.

### 1. まえがき

リレーやスイッチ、FAセンサなど電子機器の多くは、様々な環境で使用され、動作を保証するために封止されている。この封止の役割の一つに絶縁性確保があり、そのため筐体には樹脂材料を使用するが多い。しかし、樹脂材料は一般的に吸水性を持っており、長時間電子機器が水に晒されると、樹脂筐体内に水が浸入し短絡故障に繋がることがある。但し、樹脂筐体に浸入した水は乾燥させると蒸発し、樹脂筐体は元の乾燥した状態に戻る。

一方、屋外で使用する電子機器では、海水や人の汗など塩水に長時間晒されるため、塩水の浸入も懸念される。塩水は水に塩化ナトリウム：（以下NaClと表記する）が溶解したものであり、塩水が樹脂筐体内に浸入した後に乾燥させた場合、飽和濃度（約26wt.%）以上<sup>1)</sup>になると樹脂内

部であってもNaClの結晶が析出することが水の場合と大きく異なる。電子機器内に、塩水が浸入すると電気回路部の腐食進行や短絡の恐れがあり、NaClが析出すると接点間の異物として導通不良に繋がる恐れがある。そのため、塩水やNaClが電子機器内に浸入すると、使用中に突如故障してしまうことが懸念される。しかし、塩水が樹脂筐体内にどのように浸入し、乾燥によってNaClがどこに析出するのか解明されていない。

実際の使用環境では、長期使用によって筐体樹脂が劣化し発生するマイクロクラックや電子機器の内部と外部の湿度差など様々な要因が塩水浸入に影響するが、本論文では、樹脂材料を塩水へ一様に浸漬し乾燥させる単純系において、樹脂内部の塩水浸入挙動を解明し、塩水浸入距離の推定方法及び封止部への塩水浸入を予測する技術についてまとめたので報告する。

連絡先：達野 陽介 [yosuke.tatsuno@omron.com](mailto:yosuke.tatsuno@omron.com)

## 2. 浸漬・乾燥による塩水浸入挙動の解明

**2.1 浸漬・乾燥1サイクルでの浸入挙動** 本検証の対象として、図1に示すように樹脂筐体に対して封止材（エポキシ、ウレタン樹脂などの硬化性樹脂）を用いた密閉構造をモデルとした。

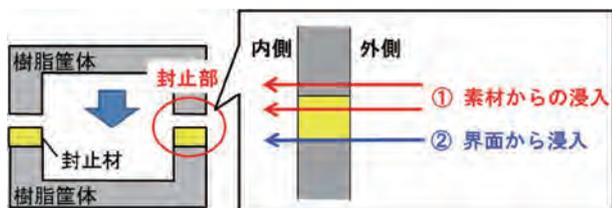


図1 封止部からの浸入イメージ

図1より、塩水が電子機器内部に浸入する際の浸入経路としては素材（樹脂筐体、封止材）と界面（筐体／封止材の接合部）がある。「界面」に対して、我々は特殊な処理により塩水浸入速度を「素材」よりも遅らせることが可能となっている。そのため、電子機器内部への塩水浸入速度は「素材」からの浸入で決まる。以上のことより、「素材」である樹脂材料を用いて塩水の浸入挙動を検証した。なお、樹脂筐体としては、絶縁性や耐熱性、コストなどの観点で、電子機器で広く使用されているポリブチレンテレフタレート樹脂（Polybutylene terephthalate 以下、PBTと表記する）とし、封止材としては、リレーやスイッチなど電子機器で使用されているエポキシ樹脂とした。

樹脂材料への液体浸入は一般的に拡散浸入<sup>2)</sup>であるためFickの第2法則に当てはまり、拡散係数を求めることができる。そのため、塩水の拡散距離（浸入距離）は、式（1）に示す一般的な拡散距離の式<sup>3)</sup>より、拡散係数を用いて算出することが可能である。

$$\sigma(t) = \sqrt{2Dt} \quad \dots \text{式 (1)}$$

$\sigma(t)$  : 拡散距離 (mm)、 $D$  : 拡散係数 ( $mm^2/s$ )、 $t$  : 時間 (sec.)

まず、JIS K7209 : 2000 「プラスチック—吸水の求め方」に準拠し、拡散係数 $D$ を算出した。25、40、60°Cの塩水に対して樹脂サンプルを浸漬した際の重量変化率を測定し、そのデータをFickの法則に適合させることで、拡散係数 $D$ （定常状態）を算出した。図2にPBTデータの重量変化率データを、表1に拡散係数の算出結果を示す。

なお、塩水の濃度はJIS Z2371 : 2015塩水噴霧試験に準拠し、5wt.%とした。

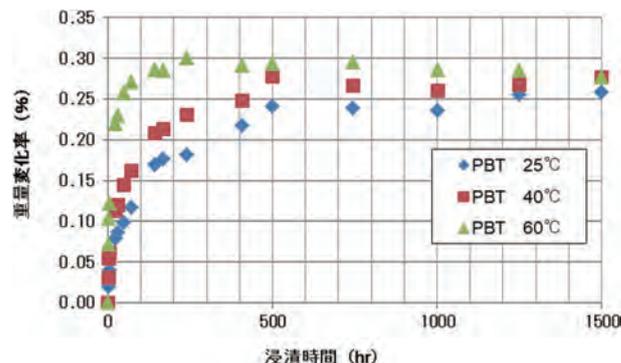


図2 温度によるPBTの重量変化率の評価結果

表1 拡散係数 $D$  ( $mm^2/s$ ) の算出結果

	5%塩水の液温		
	25°C	40°C	60°C
PBT	$3.20 \times 10^{-7}$	$5.55 \times 10^{-7}$	$3.54 \times 10^{-6}$
エポキシ樹脂	$1.41 \times 10^{-7}$	$3.52 \times 10^{-7}$	$6.45 \times 10^{-7}$

表1より、液温が高いほど拡散係数は大きいため、樹脂内に塩水が浸入しやすいことが分かる。また、エポキシ樹脂よりもPBTの拡散係数が大きく、PBTの方が塩水は浸入しやすいため、素材からの塩水浸入はPBTが律速であると考えられる。

次に、拡散係数から推定する塩水浸入距離の確からしさを検証するため、PBTを塩水が通過する時間に対して、式（1）より算出した計算値と実機検証結果を比較した。

計算値としては、例えば60°Cでの拡散係数 ( $3.54 \times 10^{-6} mm^2/s$ )を用いた場合、厚さ1.5mmのPBTを塩水が透過する時間を拡散係数から算出すると、88時間となる。

実機検証としては、板状のPBTとガラス瓶より作成した中空サンプル（図3参照）を塩水に浸漬させ、図4に示す手順で1.5mm厚のPBTを塩水が通過する時間を検証した。塩水がPBTを通過するのであれば、浸漬後にサンプルを乾燥させることで塩水が触れていない内側のPBT表面にNaClが検出される。塩の結晶はナトリウム (Na) 及び塩素 (Cl) から成っているため、Na及びCl元素が検出されれば、NaClが存在することを示す。但し、封止材として使用されるエポキシ樹脂など樹脂材料では不純物としてCl元素が含まれることがあるため、今回の検証ではNa元素の分布を電子線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro Analyzer 以下、EPMAと表記する）で確認することとした。なお、固体の無機化合物の元素分析手法としては、オージェ電子分光（Auger electron spectroscopy : AES）、X線光電子分光（X-ray photoelectron spectroscopy : XPS）、2次イオン質量分析（Secondary ion mass spectrometry : SIMS）などもある<sup>4)</sup>が、微量の検出かつ数mm角の分布を評価するため、EPMAを選択した。

また、図3に示す中空サンプルについては、PBTからの浸入を最も速くするため、PBTとガラス瓶を接着する接着剤に、PBTよりも拡散係数が小さい（塩水が浸入しにくい）

二液性エポキシ樹脂を使用し、接着部から塩水が浸透しないよう厚みをPBTの厚み以上にして封止した。さらに、温度上昇による内圧変化がPBTからの塩水浸入に影響することが懸念されるが、多くの電子機器においても封止され内圧変化の影響を受けている。そのため、本検討では実際の商品で樹脂筐体が受ける内圧になるようにガラス瓶の内容積を設定した。

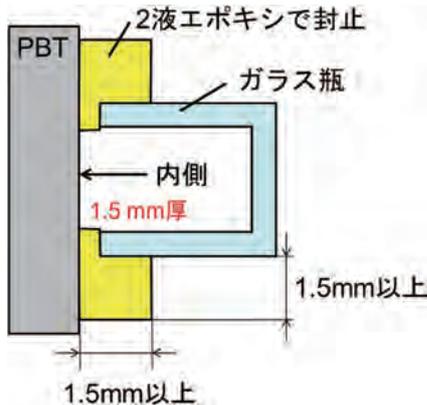


図3 PBTからの浸入時間評価用の中空サンプル

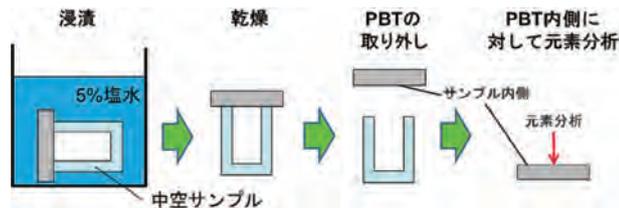


図4 試験手順

60°Cの5%塩水に72、96時間浸漬させた後の中空サンプルのPBT（内側）に対して、EPMAでNa元素の分布評価を実施した結果を図5に示す。なお、72、96時間浸漬した場合の浸入距離の計算値はそれぞれ1.36、1.57mmとなった。

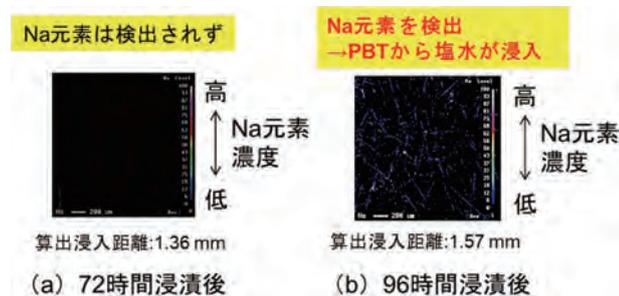


図5 1.5mm厚のPBT表面のNa元素分布の評価結果

図5より、96時間浸漬させた場合のみ、PBTの内側にNa元素が検出されており、NaClの結晶が析出した。そのため、60°Cでは塩水が1.5mm厚のPBTを通過するためには、72～96時間の間の時間が必要であることが分かった（計算値：88時間）。このことより、計算値と実機検証の整合性が確認でき、拡散係数より塩水の浸入距離は推定可能であることを確認できた。また、図5においてNa元素は線状に

検出されていることから、PBTに添加され表面に露出しているガラスフィラーとPBTの界面にNaClの結晶が多く析出していると考えられる。

なお、電子機器内に塩水やNaClが浸入すると、電気回路部の腐食進行・短絡、導通不良を引き起こし故障に繋がる恐れがあるため、本論文では、塩水やNaClが内部に存在すること自体NGと判断する。

さらに、図5では72時間浸漬させると塩水の浸入距離は1.36mmであり、1.5mm厚に対して約90%も浸入していたのにも関わらず、乾燥後にサンプル内部にNaClの結晶が確認されなかった。そこで、浸漬・乾燥サイクルを繰り返した場合、樹脂内部に浸入した塩水は、どのような浸入挙動を示すのか次節で検証した。

**2.2 浸漬・乾燥サイクルによる塩水浸入挙動** 浸漬工程では樹脂内に塩水が浸入してくるが、それに対して、乾燥工程では浸入した塩水の水が蒸発していき、塩水濃度が飽和濃度（約26wt.%）を超えるとNaClが析出してくる（例えば5wt.%塩水の場合、約81 wt.%以上の水が蒸発すると濃度は26wt.%以上となる）。この樹脂内に浸入した塩水から析出するNaClがどこに存在し、それが塩水浸入に影響するのか不明である。

そこで、浸漬・乾燥を繰り返すサイクルにおいて、塩水浸入量がどのように変化するか重量変化を測定し、試験後のサンプルを用いて樹脂中におけるNaClの析出場所を検証した。

まず、重量変化、NaClの析出場所を検証するサンプルとして、バルク上の樹脂サンプル（大きさ：20mm×20mm×3mm）を用いた。樹脂サンプルは、PBTよりも吸水性が高く浸入挙動が分かりやすいものとして、エンジニアリングプラスチックの中でも吸水性が高いポリアミド樹脂とした。

次に、サイクル試験条件を決定するため、樹脂サンプルに対して、純水へ浸漬させた際に吸水が確認できる浸漬条件（重量変化率：0.5%以上）と、その状態から重量変化が0 mgになる乾燥条件を検証した。その結果より、サイクル試験条件を以下のように決定した。

＜サイクル試験条件＞

- ・初期乾燥条件：100°C × 3.5 hr
- ・浸漬条件：40°C × 20 hr
- ・乾燥条件：100°C × 3.5 hr
- ・サイクル数：初期乾燥後から、浸漬→乾燥を10サイクル
- ・塩水濃度：5 wt.%

(JIS Z2371：2015塩水噴霧試験に準拠)

上記条件でサイクル試験を実施し、その重量変化測定結果を図6に示す。

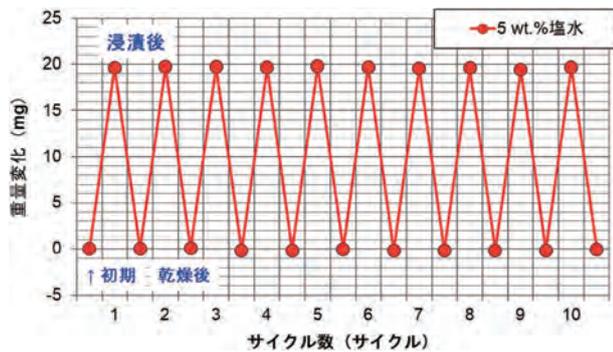


図6 サイクル試験による重量変化の検証結果

図6より、サイクルを繰り返しても、浸漬時の重量変化はあまり変わらないことから、乾燥させた後に再浸漬させても塩水浸入量が大きくなることは無く、析出するNaClが塩水浸入に与える影響は小さいことが分かった。

次に、NaClの析出場所を検証するため、樹脂材料内部のNa元素の分布をEPMAによるライン分析により評価した。塩水サイクル試験10サイクル後の樹脂サンプルを断面カットし、Na元素の分布を評価した結果を図7に示す。

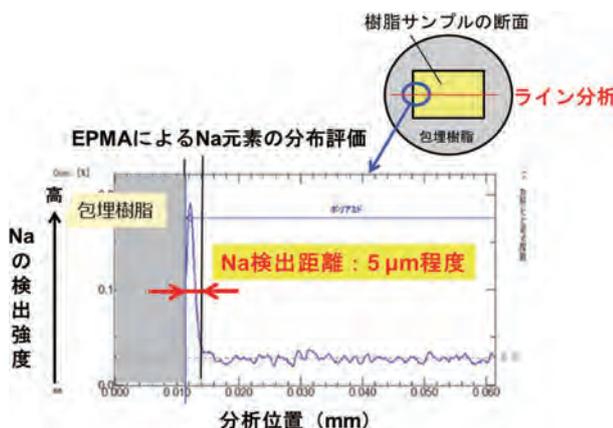


図7 試験後の樹脂サンプル断面のNa元素分布

図7より、浸漬・乾燥を10サイクル繰り返した場合、サンプル表層から5μm程度のところまでNa元素が検出されており、樹脂内部に浸入した塩水から析出したNaClは樹脂内に残存することが分かった。

10サイクル後以外にも初期、5サイクル後のサンプルについても同様に、断面のNa元素の検出距離評価を実施した結果を図8に示す。

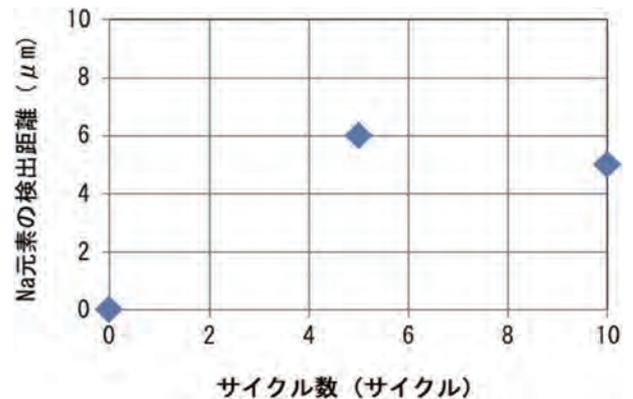


図8 サイクル数によるNa元素の検出距離

図8より、10サイクルまではサイクル数によってNa元素の検出距離が伸びていくことはなく、あるサイクル数で飽和することが分かった。

**2.3 塩水浸入挙動のまとめ** 今までの検討結果より得られた素材への塩水浸入挙動を以下に示す (図9参照)。

浸漬工程で塩水が樹脂内に浸入すると、経時で浸入は素材全体まで進む。完全に樹脂内を塩水が浸入した場合、乾燥によって水分が空気中へ蒸発していくため、水に溶けていたナトリウムイオン、塩化物イオンも樹脂表面側 (中空サンプルの外側、内側両方とも) に移動し、塩水濃度が飽和濃度以上となる箇所にNaClが析出する。そのため、樹脂内部にもNaClが析出する。

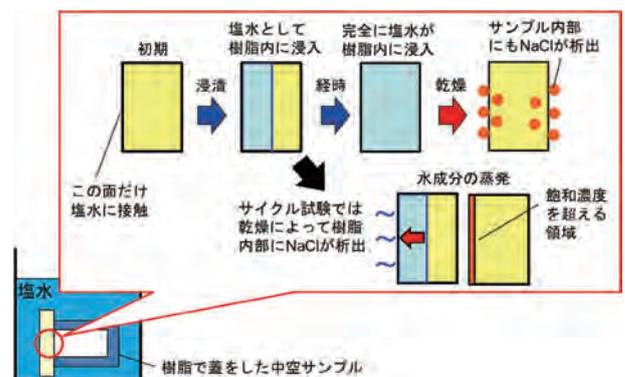


図9 塩水浸入挙動

### 3. 封止部の塩水浸入予測について

**3.1 封止部の形状コンセプト** 塩水を電子機器内に浸入させないためには、封止部の設計に留意しなければならない。2.1項 図1に示した塩水の浸入口である「素材」と「界面」、各々の塩水浸入速度を横軸、縦軸にとり、樹脂筐体からの塩水浸入速度を基準にすると、封止部の設計コンセプトは大きく4つのケースに分かれる (図10参照)。



図10 封止部の設計コンセプト

横軸に置いた素材からの塩水浸入速度に対しては、2.1項で示した拡散係数を用いることで算出は可能である。なお、我々としては、樹脂筐体よりも拡散係数を低くし塩水浸入速度を遅くした封止材も開発している。

一方、縦軸の界面からの塩水浸入については、界面状態によって欠陥が存在<sup>5)</sup>しており、その欠陥を起点として破壊(剥離)しながら塩水が浸入すると考えられるため、素材と同様に拡散係数で浸入速度を表すことができず、バラつきが大きいことが想定され、実機検証でバラつきが大きいことを確認できている。それに対して、我々は、樹脂筐体の表面状態や封止材の濡れ性を制御することで、界面からの浸入速度を制御する手法を見出しており、樹脂筐体に比べて界面からの塩水浸入を遅らせることが可能となっている。

以上のことより、塩水浸入を抑制した封止材開発及び界面状態の制御により、図10の中で制約が少なく最も設計自由度の高いCase 1の設計コンセプトでも塩水封止性を確保することができると思われる。実際に、Case 1のような封止部を施したテストピースを作製し塩水試験を実施したところ、樹脂筐体からの塩水浸入が律速であることを確認しており、塩水封止性を確保する条件を見出すことができている。

#### 4. まとめ

本論文では、海水や人の汗など塩水が付着し乾燥させられることが繰り返り起こる環境で使用する電子機器を想定し、樹脂材料を塩水へ一様に浸漬し乾燥させる単純系において、塩水の浸漬・乾燥を繰り返した際の塩水浸入挙動を示した。樹脂筐体に浸入した塩水は樹脂筐体を通過した場合に、乾燥によって電子機器内にNaClが析出し、電気回路部の腐食進行・短絡、導通不良を引き起こし故障に繋がる恐れがあることが分かった。また、今回導出した塩水の浸入距離推定方法を用いて、樹脂筐体や封止材の材料を選定し、界面状態を制御することで塩水浸入性を予測できることを確認した。

今回得られた知見を設計段階から用いることで、塩水封止性を確保し、長寿命化、寿命バラつき低減を実現できる

安心、安全な電子機器を顧客に提供することに貢献できる。

今後は、洗浄液や加工油など塩水以外の液体に対して、浸入挙動を検証し、封止性を確保する手法を確立することで、使用環境に適した安心安全な商品を顧客に届けることを目指す。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本化学会編. 化学便覧基礎編II 改訂3版. 丸善株式会社, 1984, p.173.
- 2) 岩崎玲奈, 横山直樹, 佐藤千明. ポリウレタン系接着剤の耐水性と接着界面への浸水に関する研究. 日本接着学会誌. 2007, Vol.43, No.6, p.236-241.
- 3) 河上護. 表面硬化の速度論. 金属表面技術. 1979, Vol.30, No.4, p.194-199.
- 4) 青野正和編. 表面科学シリーズ5 表面の組成分析. 丸善株式会社, 1999, p.2-3.
- 5) 山崎美稀. 樹脂モールド構造における内部界面強度評価の研究. 東京大学博士論文. 2010, p.83-88.

#### 執筆者紹介



達野 陽介 Yosuke Tatsuno  
エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネス カンパニー  
金型・材料センタ 材料技術部  
専門: 高分子化学



福原 智博 Tomohiro Fukuhara  
エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネス カンパニー  
金型・材料センタ 材料技術部  
専門: 高分子化学  
所属学会: 日本化学会、日本接着学会



長坂 昭吾 Shogo Nagasaka  
エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー  
金型・材料センタ 材料技術部  
専門: 電子工学、画像処理  
所属学会: 応用物理学会

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# リレーの過渡的挙動を予測するシミュレーション技術

## リレーの高容量化を実現するシミュレーション技術について

近藤 純久・横手 康浩・田中 博之

アプリケーション機器の小型化、省エネルギー化のトレンドに伴うメカニカルリレーの小型化や高容量化を実現させるためには、接点の過渡的挙動を予測することが設計において非常に重要なポイントである。接点挙動の予測は、まず電磁石解析において電磁石の可動部品の変位を時刻歴毎に求め、次に求めた時間と変位を接点接触部の構造解析と連成させることで達成できる。

今回2つのCAEを活用し、電磁石から接点挙動への連成解析の手法とその解析精度を検討した結果、接点バウンスや電気接点の開離速度などの過渡的挙動を相対比較評価できる手法を確立した。これにより試作前に構造変更による動作挙動変化の予測が可能となり、試作評価の絞り込みやL/T短縮につながる。

特定機種で実際に設計へ展開し、接点开離速度を制御することにより、従来比1.5倍に高容量化した商品において電氣的耐久性を約2倍に向上させることが出来た。

## Simulation technology to predict dynamic motion of relay

### Simulation technology for realizing high capacity of relay

*Sumihisa Kondo, Yasuhiro Yokote and Hiroyuki Tanaka*

It is very important for design to predict the dynamic motion of contact for realizing downsizing and high capacity for a mechanical relay along with trend of downsizing of application devices and saving energy.

In order to predict the dynamic motion of contact, first, it is possible to obtain the displacement of the movable part of the electromagnet for each time history in electromagnetic analysis, and then it will be achieved by coupling the calculated time and displacement with the structure analysis of movable contact part.

As a result of considering the method of coupled analysis from electromagnet to contact motion and the analysis accuracy with using two CAEs at this time, we established the method of verification by relative comparison of the dynamic motion such as contact bounce and breaking velocity of electric contact. It will be possible to predict the motion due to structural change before prototyping, and realize the narrowing down of trial evaluation and shortening the lead time.

By deployment to the actual design in specific models and controlling the breaking velocity, we doubled the electrical endurance for the products with high capacity of 1.5 times higher than the past.

### 1. まえがき

リレーとは外部から電気信号を受け取り、電気回路のオン/オフや切り替えを行う部品である。メカニカルリレーにおいては外部から受け取った電気信号を電磁石を介して磁気力に変換し、磁気力により接点接触機構をメカニカルに動作させて電気接点のオン/オフを行っている。実際には接点接触機構が有するバネ弾性力（以下バネ負荷）と電磁石の磁気力（以下吸引力）のバランスにより動作が決まり、吸引力がバネ負荷を上回った時点で復帰状態にある接

点接触機構部は動作を開始し、吸引力がバネ負荷を上回ると動作状態となる<sup>1)</sup>。図1は吸引力とバネ負荷の動作ストロークにおける力のバランス（静的動作設計）を示した模式図である。

このようにメカニカルリレーは電気回路のオン/オフ時に接点接触機構の動作を伴うため、動作中の接点接触機構の過渡的な挙動がリレーの性能に影響を与え、故障現象につながる事が知られている。例えば、電氣的耐久性評価での代表的な故障モードである接点溶着は、電気接点がオン（=衝突）する際の接点同士の反発によるバウンス挙動

によって起こる現象である。バウンス時に接点間に放電現象の一種であるアークが発生し、アークのエネルギーによって溶融した接点同士が再接触時に固化することで溶着する<sup>2)</sup>。また、動作時に溶着した接点に溶着状態を引き剥がすだけの力を加えることで溶着状態を解除できる。この力として静的には接点開離力が重要であるが、動作中の挙動として復帰時の接点開離速度が大きく影響する。よって、リレーの動作は吸引力とバネ負荷のバランス設計だけでなく、接点接触機構部の過渡的な挙動すなわち動的挙動設計が重要である。

今回、接点の溶着現象に影響を与える動的挙動である、①動作挙動時の接点バウンス現象、②復帰挙動時の接点開離速度について3D CAEによるシミュレーション技術を確認した。また構築したシミュレーション技術を活用してリレーの高容量化を実現した。

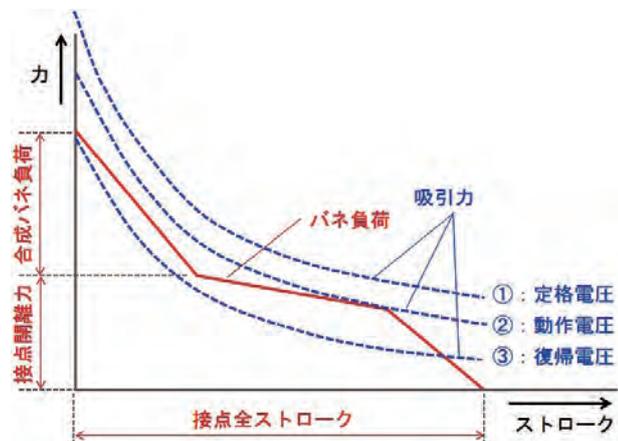


図1 吸引力とバネ負荷

## 2. 動的挙動設計

**2.1 従来の手法の課題** これまでの動的挙動を設計する手法としては井戸田らによる報告が挙げられる<sup>3)</sup>。この手法においては、電磁石解析CAEにより、リレーの電気接点を駆動する電磁石の吸引力を算出し、吸引力とバネ負荷から電磁石可動部（以下鉄片）の動的な開閉動作をシミュレーションにより定量化した。この手法は、鉄片と接点が連動する場合において活用できるが、図2に示す代表的なリレーの構造においては、鉄片と接点がカードと呼ばれる連動部品によって力が伝動して動くこと、接点接触機構部の可動バネがたわむことの影響により鉄片と接点が完全に連動することはない。よって、広くリレーの過渡的な挙動を再現するには、電磁石解析による鉄片の動的動作と、構造解析による接点接触機構部の動的動作を連成させた挙動シミュレーション技術の構築が必要となる。

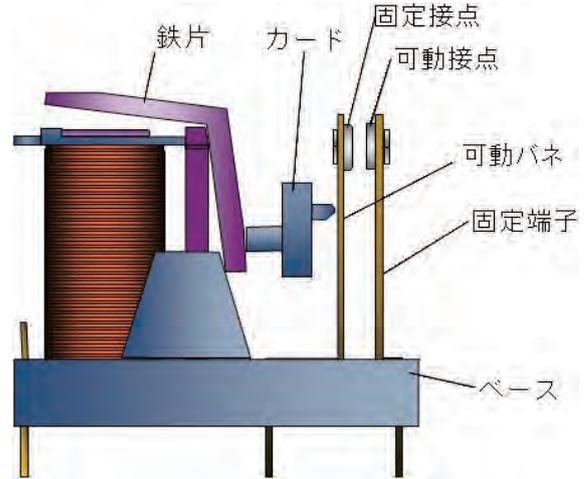


図2 リレーの代表的構造

**2.2 電磁石解析と構造解析の連成** 接点可動部の挙動シミュレーションを実現するため、電磁石解析と構造解析を連成させる具体的フローを図3に示す。

### ① 電磁石解析

電磁石解析CAEにて、コイル電流をインプットとして、CAEの中で電磁石と電磁石に加わるバネ負荷の過渡的な連成を行い、アウトプットとして鉄片の過渡的な変位を算出する。このアウトプットを次の構造解析に引き継ぎ、接点挙動のシミュレーションを行う。

### ② 構造解析

電磁石解析で求めた鉄片変位のアウトプット情報を時間と変位のテーブルにしてインプット情報とし、構造解析CAEとの連成を行う。具体的には鉄片変位の情報を可動バネを駆動するカードの時間変位情報として与えることで、接点接触機構部の過渡的な動きをシミュレーションする。

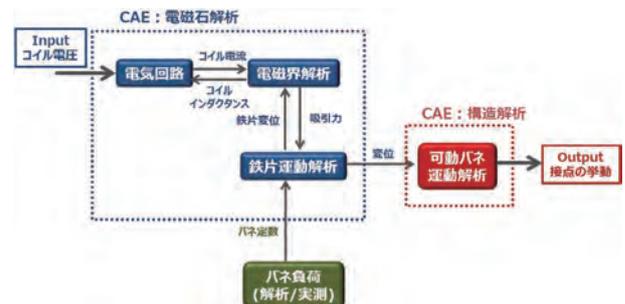


図3 電磁石と構造解析の連成フロー

**2.3 連成解析の理論的解説** 連成解析において接点挙動を算出するプロセスを解説する。

### ① 電気回路

(1) 式より電磁石コイルに流れる電流*i*を算出する。

$$V_0 = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

$V_0$ : コイル電圧  $L$ : コイルインダクタンス

$i$ : コイル電流  $R$ : コイル抵抗  $t$ : 時間

② 電磁界解析

(1) 式で導出されたコイル電流*i*から磁束密度*B*を求め、可動部で発生する吸引力*F<sub>M</sub>*を算出する。

$$F_M = \frac{1}{4\mu_0} \int B ds \quad (2)$$

*F<sub>M</sub>*: 電磁石の吸引力  $\mu_0$ : 真空の透磁率

*B*: 磁束密度 *s*: 磁束が通る断面積

③ 鉄片運動解析

(2) 式により導出された吸引力*F<sub>M</sub>*を運動方程式 (3) に挿入し、各時刻の鉄片の回転角変位置  $\theta$  (図4参照) を算出する。(3) 式に用いるバネ定数*k*は、構造解析 CAEにて事前に求める。

$$T = F_M \times A = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_0 \frac{d\theta}{dt} + k\theta \quad (3)$$

*T*: 鉄片に作用するトルク

*J*: 慣性モーメント  $\theta$ : 鉄片の回転角変位置

*A*: 鉄片回転中心から吸着点までの距離

*C<sub>0</sub>*: 減衰定数 *k*: バネ定数

⇒①～③を繰り返して行うことで  $\theta$  の時間変位置を算出

④ 可動バネ運動解析

(3) 式により計算された時間と変位置  $\theta$  を接点バネの強制変位 *x* へ変換し運動方程式 (4) を得る。

$$F_s = M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + kx \quad (4)$$

*F<sub>s</sub>*: バネ負荷 *M*: 接点の質量 *C*: 粘性減衰

(4) 式の運動方程式を解くことによりカード部の変位置から接点部の動的挙動を算出する。

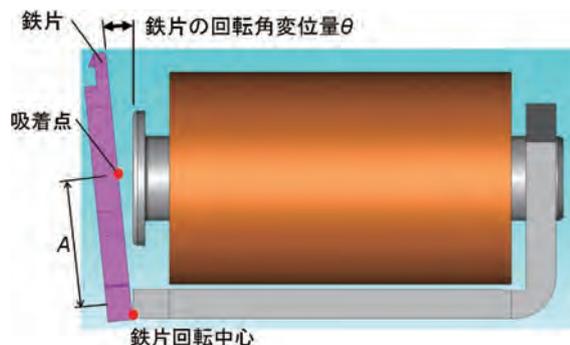


図4 鉄片回転角変位置

3. 解析結果

1項で述べたように接点の溶着現象に影響を与える動的挙動である動作挙動時の接点バウンス現象と復帰挙動時の接点開離速度について図3に示す連成フローを用いて解析した結果を以下に示す。

**3.1 3D CAEモデル** 図5、図6に今回の解析に用いた3D CAEモデルを示す。電磁石部モデルは鉄片の過渡的挙動を算出するのに用い、接点接触機構部モデルは接点の過渡的挙動の算出に用いている。接点接触機構部は、鉄片の過渡的挙動を伝達するカードと、カードの挙動を受けて電

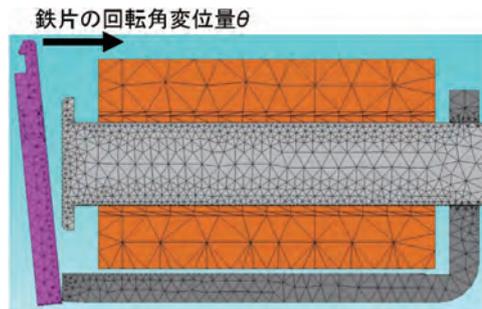


図5 電磁石部モデル

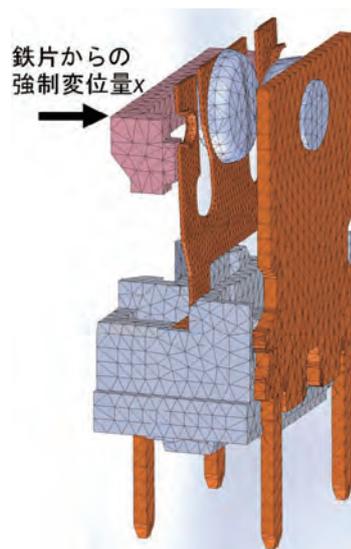


図6 接点接触機構部モデル

気接点を開閉する可動バネ、電気信号をオン/オフする可動接点・固定接点、固定接点を保持する固定端子、及び可動バネと固定端子を保持するベースにより構成される。

**3.2 動作時接点バウンス解析結果** ここでは動作挙動時の接点バウンス解析結果について報告する。図7に代表的なバウンス波形の実測波形と解析波形を示す。実測波形はリレー動作時の端子間電圧をオシロスコープにより測定した。また表1に図7に示した波形におけるリレー動作時の接点バウンス挙動のバウンス回数とバウンス時間についての実測値と解析値の比較を示す。図7のバウンス波形を比較すると接点バウンス開始直後のバウンス周期が後半に比べて疎であることなど波形の特徴が比較的再現されている。また表1に示すように接点バウンス回数と時間は実測値と比較して20～30%以内の精度差となった。

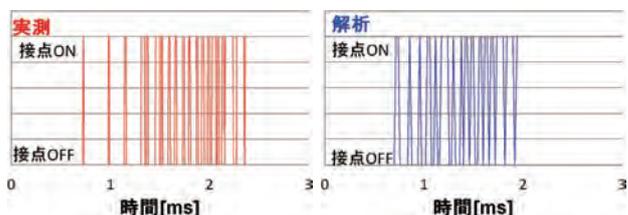


図7 動作時接点バウンス波形

表1 バウンス回数とバウンス時間

	実測	解析	解析精度差
バウンス回数	20回	16回	20%
バウンス時間	1.64ms	1.22ms	26%

次に表2にリレーの接点接触後の接点押し込み量（以下接点フォロー値）を変化させたときの動作時接点バウンスについての実測値と解析値のバウンス時間と解析精度差を示す。実測値、解析値ともに接点フォロー値が大きくなるほど接点バウンス時間も大きくなる傾向が同じように得られていること、また実測値に対する解析値の精度は接点フォロー値に関わらず、20~30%の精度差で安定していることから、相対評価として十分に使用できるレベルと考える。

表2 接点フォロー値変化によるバウンス時間

バウンス時間	接点フォロー値		
	小 (63%)	基準 (100%)	大 (150%)
実測	1.34ms	1.64ms	2.13ms
解析	0.94ms	1.22ms	1.64ms
解析精度差	30%	26%	23%

**3.3 復帰時可動接点動作解析結果** 次に復帰挙動時の動作解析結果について報告する。復帰挙動については電磁石コイルにサージ吸収用ダイオードを接続した条件で行っている。図8は復帰時の過渡的な可動接点位置の時間変位について実測と解析結果をグラフ化したものである。縦軸は接点全ストローク（図1参照）を1として示している。実測値は高速度カメラの画像データ解析により求めている。実測値と解析値の接点挙動波形を比較すると、接点が開離するタイミングや接点開離後の接点挙動は実測と解析で同じ傾向が得られており、接点開離速度（図8破線丸部の傾き平均値）の実測値と解析値には約19%の精度差があるものの、接点開離速度の相対的な検討には使用可能なレベルにあると考える。一方復帰挙動の途中で開離速度が低下する現象のタイミングには差異があり接点開離後の可動バネの振動モードについては精度向上の検討が今後の課題として残る。

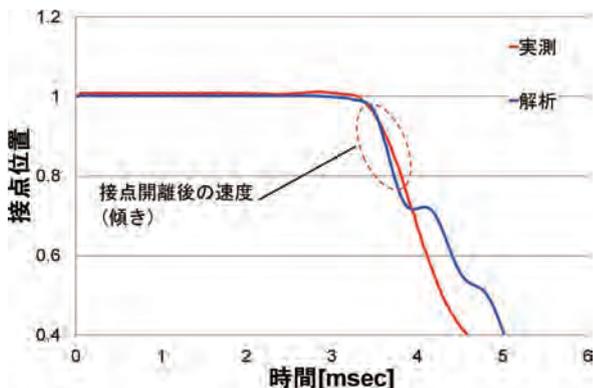


図8 復帰時の可動接点挙動

**3.4 可動接点挙動と鉄片挙動の比較** 今回の3D CAEモデルのような電磁石の挙動をカードを介して弾性体の可動バネに伝動、駆動する構造においては鉄片挙動と接点挙動が非連動となることを確認するため、復帰時の過渡的な可動接点挙動と鉄片挙動を図9にて比較した。ここで可動接点挙動は3.3項の解析結果を用いている。また鉄片挙動は井戸田らの解析手法<sup>3)</sup>を用いることでその報告同等の解析精度（5%以下）を確認している。図9より接点と鉄片の動き出しタイミングに差があること、接点開離速度と鉄片復帰速度の差が約2.1倍あることなどから接点挙動と鉄片挙動が連動していないことが確認できた。よって電磁石解析と構造解析の連成解析がこのような構造においては必要となる。

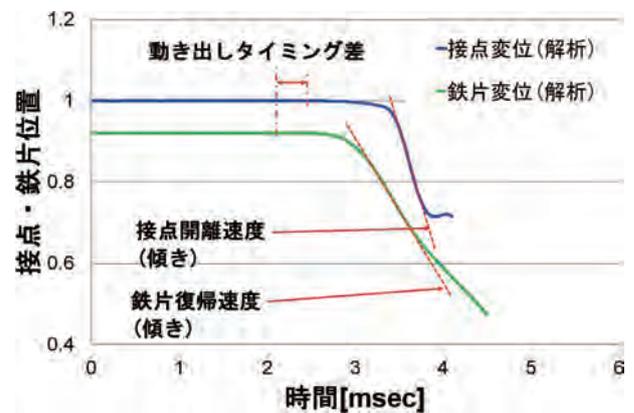


図9 復帰時の過渡的な接点と鉄片の挙動の解析結果

#### 4. リレーの高容量化商品開発への活用

アプリケーション機器の小型化、省エネルギー化のトレンドに伴い、リレーに対しても既存商品からの高容量化の市場要求が高まっている。このニーズに対応するために既存リレーと同等のサイズ、消費電力で、約1.5倍の高容量の開閉をターゲットとした業界初の商品開発を実施した。

既存リレーのまま高容量負荷を開閉した場合、早期に接点溶着故障が発生する。これは、高容量化に伴いアークエネルギーによる接点溶融量が増えて接点溶着力が増加するため、既存の復帰時の接点を引き剥がす力では接点が開離できなくなることが原因である。よって、高容量化の実現には接点溶着力と接点を引き剥がす力の改善が必要となる。

引き剥がす力の改善への打ち手として復帰時の接点開離速度に着目し、既存リレーを最小限の構造変更で接点開離速度を増加させる構造の検討をこの接点挙動シミュレーション技術を用いて実施した。

**4.1 接点挙動解析条件** 1項で述べたようにリレーの動作は静的にはバネ負荷と吸引力のバランスにより決定される。一方、リレーコイルのサージ対策でコイルと並列にダイオードが接続された回路においては、復帰挙動時にコイル電流が通減していくため接点開離時に復帰時吸引力が存在する。このため、動的にはバネ負荷と吸引力の差の時間的変化が重要な要素となる。このことより、接点開離速度

検討の条件を、①可動接点と固定接点が接触した後の接点バネ負荷（以下合成バネ負荷：図1参照）を大きくする、②復帰時の吸引力を小さくする、の2つの観点で検討した。

なお、今回の検討においては電磁石は構造・消費電力ともに既存リレーと同じとし、接点接触機構部のみの変更による開離速度の最適化を目的として実施している。

① 合成バネ負荷を大きくする

可動バネおよび固定端子形状（以下バネ形状）は変更せずバネ負荷に関わるその他のパラメータ値を変更する方法とバネ形状を変更し合成バネのバネ定数を大きくする方法が考えられる。

② 復帰時吸引力を小さくする

復帰時の吸引力は鉄片動作の影響を受けることが知られている。すなわち鉄片が動き出すタイミングが早くなるとそのタイミングにおけるコイル電流が増大するため復帰時の吸引力も大きくなる。このことから、合成バネ負荷を小さくすることで復帰時吸引力を小さくすることができる。

上記①と②は相反する条件であることから、今回は合成バネ負荷とバネ形状を表3のパターンとした。なお合成バネ負荷大かつバネ形状変更の組合せは応力設計の関係で今回は検討対象から外した。

表3 接点挙動解析条件

合成バネ負荷	バネ形状	
	変更なし	変更あり
大 (100~150%)	・パラメータ変更A	—
小 (50~100%)	・パラメータ変更B ・パラメータ変更C	・バネ定数小A ・バネ定数小B

**4.2 解析結果** 表3のパターンにおける復帰時の接点开離速度と鉄片復帰速度の解析を行った結果を図10に示す。ここでは、既存リレーの解析速度を100%とした時の相対値で結果を示している。図10において、パラメータ変更Aのように接点开離速度と鉄片復帰速度が同じ傾向で変化するものもあれば、バネ定数小Bのように傾向が逆になるものもあり、接点开離速度と鉄片復帰速度の相対的關係は連

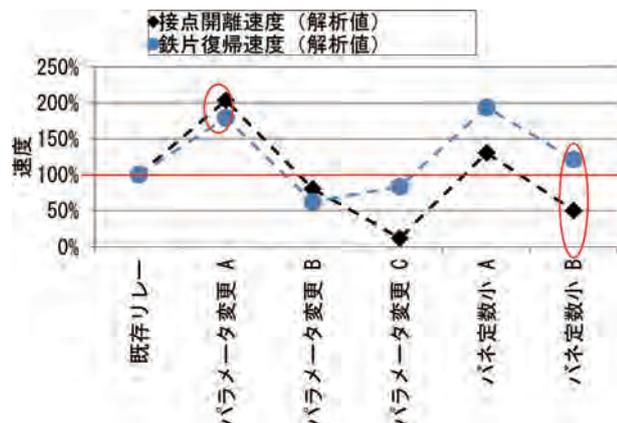


図10 復帰時接点挙動解析結果

動していないことが確認された。また合成バネ負荷の大小と接点开離速度の間に相関性がないことも確認できた。

**4.3 実機評価** 図10の解析結果から、接点开離速度及び鉄片復帰速度に効果のあるパラメータ変更Aとバネ定数小Aの2種類の条件について試作品による電氣的耐久性評価を実施した。図11に電氣的耐久性評価結果、接点开離速度の実測値と解析値、及び鉄片復帰速度の解析値を基準リレーに対する相対値で示す。ここで基準リレーとは既存リレーの溶着力改善品である。図11より接点开離速度と電氣的耐久性の傾向はほぼ一致し、接点开離速度が解析値で約2倍速いパラメータ変更Aにおいては、閉閉寿命回数も約2倍となった。また接点开離速度の実測値と解析値もほぼ一致している。一方、鉄片復帰速度と電氣的耐久性の傾向は必ずしも一致していない。この結果より、挙動解析を用いた接点开離速度の事前予測による性能改善の有効性が示された。

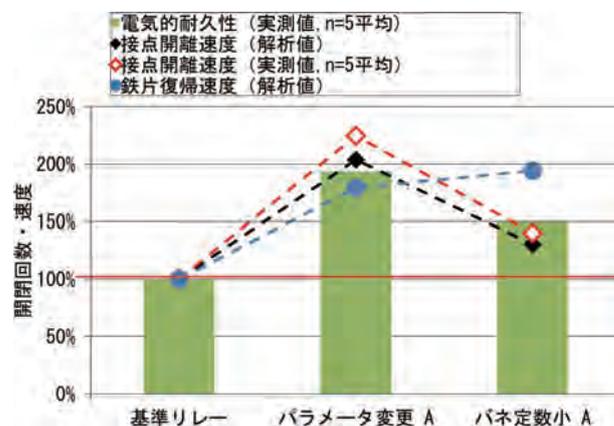


図11 電氣的耐久性評価結果と接点开離速度及び鉄片復帰速度

5. むすび

メカニカルリレーの高容量化ニーズに対応するには、動作時及び復帰時の接点挙動を設計することが重要である。従来は試作品を用いた実測検証による評価が行われていたが、試作に時間を要する、評価パターンの制約も大きい、試作品の精度によるばらつきが出やすい、などの課題があった。また従来のシミュレーション技術では電磁石部と接点接触機構部が連動しない機構においてはCAEだけで接点挙動を解析することが出来なかった。

今回、接点の動作挙動において重要なパラメータである動作時接点バウンス及び復帰時接点开離速度のシミュレーション技術を構築することで、試作前に構造変更による動作挙動変化の予測を可能とした。これは試作評価の絞り込みやL/T短縮につながる。

上記シミュレーションを高容量化商品テーマに展開したところ、電磁石の構造・消費電力を変更することなく閉閉寿命回数が約2倍となる条件を試作前に見出すことが出来た。接点復帰速度向上により接点を引き剥がす力を増加させるという狙いが有効に作用したことを示している。

なお今後は今回の検討で再現性が不十分であった接点開離以降の速度変化の精度向上と共に電氣的耐久性評価後の挙動解析など、より展開性の高い技術の構築を引き続き行っていく。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本電気制御機器工業会, “制御機器の基礎知識 (使い方・選び方) リレー編 総論”. NECA. [https://www.neca.or.jp/wp-content/uploads/CU\\_Ry\\_2%20Sou\\_1803.pdf](https://www.neca.or.jp/wp-content/uploads/CU_Ry_2%20Sou_1803.pdf), (参照 2019-1-25).  
一般社団法人日本電気制御機器工業会, 制御機器の基礎知識 リレー編, 2018.
- 2) 高木相, 電気接点のアーク放電現象, コロナ社, 1995, p.79-81, p.99-102.
- 3) 井戸田修一, 西田剛, リレー高容量化を実現する動的挙動シミュレーション技術, OMRON TECHNICS, 2018, Vol.50, No.1, p.68-73.

### 執筆者紹介



近藤 純久 Sumihisa Kondo  
オムロンリレーアンドデバイス株式会社  
汎用アプリリレ設計部  
専門：機械工学  
所属学会：日本機械学会



横手 康浩 Yasuhiro Yokote  
オムロンリレーアンドデバイス株式会社  
汎用アプリリレ設計部  
専門：計算力学



田中 博之 Hiroyuki Tanaka  
オムロンリレーアンドデバイス株式会社  
汎用アプリリレ設計部  
専門：電気情報工学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# フローはんだ付け品質安定化における噴流高さ管理の重要性

廣崎 旭宏・田村 敏之・上野 裕史

PCやスマートフォンといった高機能電子製品だけでなく、FA機器やパワーエレクトロニクス製品といった大電流が流れる製品でも小型化が進み、プリント配線板の多層化や厚さ増加によって基板の熱容量が増大している。大型部品のはんだ付けには、加熱性能の高いフローはんだ付け工法が用いられることが多いが、基板と部品の高熱容量化により、十分な加熱が困難になりつつある。基板の高熱容量化に対応できるフロー工程の実現には、フロー装置の管理レベルの向上が必要となるが、現場で経験を積む機会の少ない現代の生産技術者は、装置管理の重要性を体感して理解するのが難しい。そこで、熱供給の観点から、フロー工程のはんだ付け品質にとって最も重要で、かつ最も変動しやすい要素であるはんだ噴流を取り上げて、噴流形状の変動によるはんだ付け状態の変化をデータによって示すことに取り組んだ。噴流形状は生産現場で定量的に計測することが難しいため、適切な噴流形状で生産できるかどうかは、管理する技術者のスキルに依存する。本稿では、噴流形状を代表する値のひとつである噴流高さ、基板および部品端子温度との関係性を示すことで、はんだ付け品質を安定化させるための噴流高さ管理の重要性を明らかにするとともに、高熱容量基板に対応していくためには、より細かい噴流高さ管理が必要となることを示した。

## Importance of Wave Height Control in Wave Soldering

*Akihiro Hiroasaki, Toshiyuki Tamura and Yuji Ueno*

Not only high-function electronic products such as PCs and smartphones but also the products such as FA equipment and power electronics products have been downsized. The heat capacity of the printed wiring board (PWB) is increasing due to multi-layering of the PWB and increase in its thickness. Wave soldering with high heating performance is often used for soldering large components, but sufficient heating is becoming difficult due to high heat capacity of boards and components. In order to realize the wave soldering process that can cope with the increase in the heat capacity of the board, it is necessary to improve the solder wave control. However, it is difficult for young production engineers to understand the importance of the wave control because they have few opportunities to gain experience in the production line. Therefore, from the viewpoint of heat supply, we focused on solder wave and evaluated the change in soldering state due to fluctuation of the solder wave shape. Stabilizing the wave shape depends on the skill of the engineers. In this paper, we clarify the importance of wave height control to stabilize soldering quality by showing the relationship between the wave height, which is one of typical values of the wave shape, and the temperature of board and component terminal. We also clarify the necessity of wave control and show that finer control is needed to cope with high heat capacity boards.

### 1. まえがき

PCやスマートフォンといった高機能電子製品だけでなく、FA機器やパワーエレクトロニクス製品といった大電流が流れる製品でも小型化が進んでいる。そのため、プリント配線板の多層化や、銅箔厚の増大、これらに伴う基板厚の増大が進み、プリント配線板の熱容量が大きくなってきている。また、これら大電流の製品では、大型の自立型アルミ電解コンデンサが用いられるなど<sup>1)</sup>、搭載部品の熱容量も大きい。熱容量の大きい部品のはんだ付けは、温度上昇に

時間がかかるため<sup>2)</sup>、加熱性能の高いフローはんだ付け工法が用いられることが多いが、この工法でさえも近年の基板の高熱容量化に対して十分な加熱が困難になりつつある。加熱が不十分だと、スルーホール内をはんだで満たすことができず、接合強度の低下を招く。

フローはんだ付け工法は、溶融はんだを噴出することで基板にはんだと熱を供給しており、溶融はんだの噴流状態によって、はんだ付け品質が左右される。生産現場では、工程管理基準によって噴流状態を一定の範囲内に収めているが、良い噴流とはどのような状態で、それはなぜかとい

うことを生産技術者が理解していないと、刻々と状態が変化する噴流を適正範囲で維持しつづけることは難しい。ベテラン技術者は積み重ねてきた現場経験によって、噴流状態の良し悪しの判断を技能として身につけてきたが、今の若手技術者は現場経験を積む機会が少なく、基本的な知識の理解で留まっている。難易度の高い高熱容量基板のフローはんだ付けには高い噴流管理レベルが必要であるが、噴流形状を生産現場で定量的に計測することが難しいため、管理する技術者のスキル向上が不可欠である。そこで我々は、噴流形状の変化がはんだ付け品質に与える影響をデータで示すことで、現場経験の不足を補えるのではないかと考えた。本稿では、熱供給を主な観点として、噴流形状を代表する値のひとつである噴流高さや基板および部品端子温度との関係性を評価し、はんだ付け品質を安定化するための噴流高さ管理の重要性を明らかにした。

ただし、必要な熱供給を実現できた場合でも、フラックス量が不足していると、はんだの濡れが低下し、はんだ付け品質が悪化する。本稿では、十分な加熱条件下において、フラックスの過不足により発生する問題を示した。

## 2. フロー工程安定化の課題

フローはんだ付け工程の基本構成を図1に示す<sup>3)</sup>。工程は、フラックス塗布、フローはんだ付けからなり、フローはんだ付け装置では、プリヒート、1次噴流、2次噴流の3段階の加熱が行われる。プリヒートでは、塗布したフラックスに含まれる溶剤の揮発と基板の予備加熱を行う。噴流は2種類で、多数の小さな山状にはんだが吹き上がる1次噴流と、ひとかたまりで穏やかにはんだが流れる2次噴流である。1次噴流はスルーホール内や密集した表面実装部品の接合部にはんだを供給しやすくすることを、2次噴流はフィレット形状を整えることを狙っている。フローはんだ付け工法では、噴流による熱とはんだの供給が、はんだ付け品質にとって最も重要な要素であるが、設備状態や溶融はんだ状態のゆらぎが噴流状態を左右することから、最も変動しやすい要素も噴流である。基板の熱容量が大きくなるほど、はんだ付けに必要な熱量が増えることから、噴流による熱供給の安定化はますます重要になると考え、フローはんだ付け状態の指標のひとつであるフローアップ（スルーホール上面まではんだが満たされている状態）を評価項目として、噴流変動とはんだ付け状態との関係性を評価した。

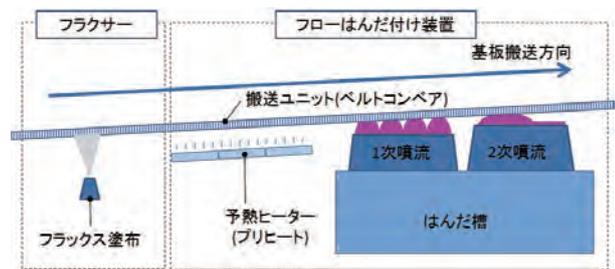


図1 フローはんだ付け工程 基本構成<sup>3)</sup>

また、熱供給以外の観点として、フローアップにはフラックスの還元作用が必要であることから、フラックス塗布量とはんだ付け状態との関係性を評価した。塗布量が不足するとはんだの濡れが悪化し、塗布量が過剰だと濡れは良好となるが、ボイドの発生により信頼性リスクが高まる。

## 3. 実験内容

**3.1 実験概要** 噴流とフラックスの変動によって、はんだ付け状態がどのように変化するかを確認するために3つの実験を行った。最初に、フローアップするために必要な温度を確認した。基板および部品の温度とフローアップを紐付けることで、温度測定によるフローアップ評価を可能にした。次に、噴流の変動による温度の変化量を評価し、噴流管理の重要性を確認した。最後に、フラックス塗布量を変化させたときのはんだ付け状態を評価した。実験で使用したはんだの組成はSn96.5/Ag3.0/Cu0.5 (質量%)である。

**3.2 フローアップ温度確認実験** はんだ付けでは、はんだと母材との間で合金層が形成される必要があるため、母材をはんだ融点以上の温度まで上昇させなければならない。基板上面までのフローアップを狙うため、基板と部品それぞれの基板上面位置を温度測定ポイントとした(図2)。はんだが温度測定ポイントの位置まで濡れ上がったときの母材温度が、フローアップに必要な温度となる。濡れ上がりの判定は、温度プロファイル上で行った。温度測定ポイントに取り付けた熱電対が高温の溶融はんだに接触すると、測定値が急上昇することから、急上昇する直前の温度をフローアップ温度とした。確実にフローアップさせるために、はんだ温度を270°Cに設定し、噴流の途中でコンベアを止めて10秒間加熱して測定した。

評価に使用した基板の仕様を表1に示す。部品には大型の自立型電解コンデンサを使用した。導いたフローアップ温度が、使用した評価基板以外でも適用できることを確認するために、同じパターン寸法で層数のみ異なる2層評価基板を用いた測定も行った。

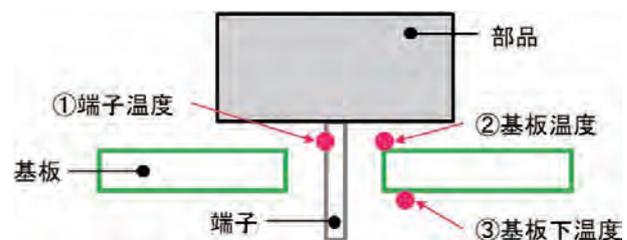


図2 温度測定ポイント

表1 評価基板仕様

外形寸法	50mm×50mm×1.6mm
Cuパターン寸法	45mm×45mm×0.035mm
層数	6層、2層
スルーホール径	2.0mm

**3.3 噴流高さ評価実験** 生産現場では、ガラス板観察や温度測定によって噴流の基板への接触を確認している。接触しているかどうかの判断には特別な技能は必要ないが、接触の程度から、加熱性能がどれだけ異なるか、はんだ付け品質に問題がないかを判断するには経験が必要である。基板への熱供給に大きく影響すると考えられる噴流高さについて、その条件と温度の関係を評価した。

評価条件を表2に示す。噴流高さは基板を基準に定義した。図3に示すように、基板が噴流に突入した時に、はんだが基板に乗り上げない限界の噴流高さを基板上限とし、上限高さから基板厚とほぼ同じ1.5mmだけ低くした噴流高さを基板下限とした。上限と下限との噴流高さ変更は、はんだ槽の高さを上下して行った。1次噴流と2次噴流はそれぞれ個別で評価し、コンベア速度1.0m/minのときの1次噴流のはんだ付け時間は約2.5秒、2次噴流のはんだ付け時間は約2.1秒であった。

表2 噴流高さ評価条件

噴流高さ	基板上限／基板下限
はんだ温度	260°C
コンベア速度	1.0m/min
基板	6層評価基板

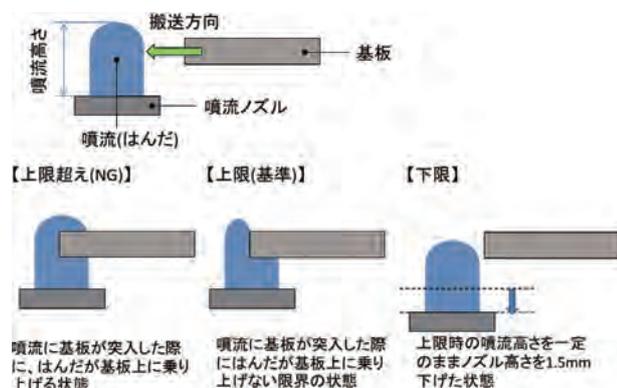


図3 噴流高さの定義

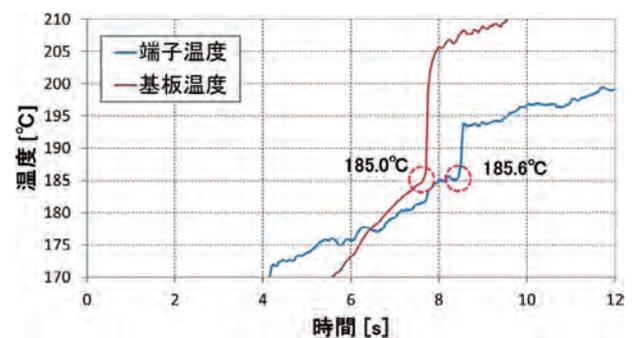
**3.4 フラックス塗布量評価実験** フローアップには母材温度だけでなく、フラックスによる母材の酸化膜除去も必要である。母材温度がはんだ付け可能な温度に到達していても、酸化膜が除去されていないと、はんだが濡れず正常な接合ができない。そのため、生産現場ではフラックス塗布量や基板全面にムラなく塗布できていることを確認している。今回、フラックス塗布量を、過少／適量／過多の3通りで設定し、はんだ付け状態への影響を評価した。塗布条件を表3に示す。

表3 フラックス評価条件

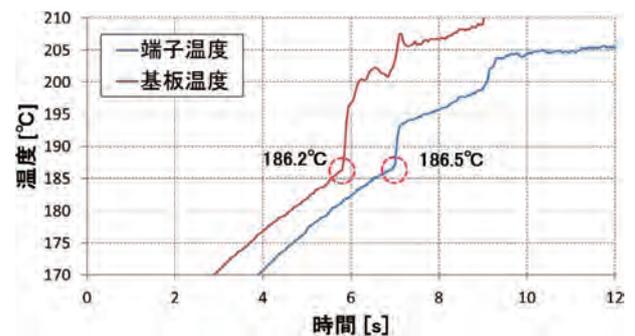
フラックス塗布量 (a)過少、(b)適量、(c)過多	(a) 30ml/m <sup>2</sup> 、(b) 100ml/m <sup>2</sup> 、 (c) 100ml/m <sup>2</sup> +刷毛塗り
コンベア速度	1.0m/min
ノズル速度	600mm/s

## 4. 実験結果

**4.1 フローアップ温度の確認結果** 測定した温度プロファイルを図4に示す。基板、端子ともに、約180°Cで温度が急上昇した。熱容量の小さい2層基板の場合でも、急上昇する温度は同等であった。この結果から、180°Cをフローアップ温度として以降の評価を進めることにした。フローアップ温度が、Sn/Ag3.0/Cu0.5はんだの固相点217°C<sup>4)</sup>よりも低いのは、測定値として出力される温度が母材温度そのものではなく、あくまでも熱電対の温度であるためである。熱電対は母材に接触しているが、外気にも触れているため、母材よりも低い温度が測定温度となる。



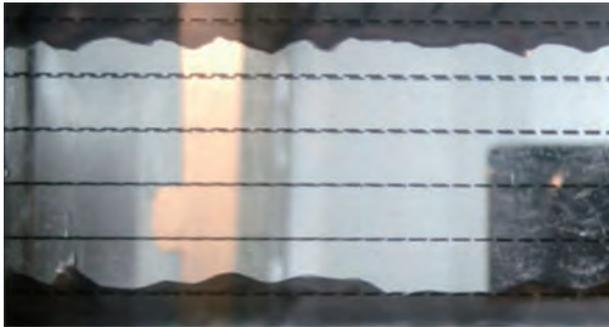
(a) 6層基板



(b) 2層基板

図4 フローアップ温度（温度急上昇部分を抜粋）

**4.2 1次噴流高さの評価結果** 1次噴流の噴流高さによる基板接触の様子と温度プロファイルの違いを図5と図6に示す。噴流の基板接触は、基板の代わりにガラス板を搬送し、ガラス板が噴流エリアに到達したときに上から観察することで確認した。噴流高さ下限の場合、基板下温度が一時的に低下することがあった。ガラス板の接触から分かるように、基板上限まで噴流が上がっていれば、噴流列間もはんだが接触しつづけているが、基板下限までの噴流高さだと局所的な接触となり、噴流が離れる領域が存在してしまう。基板上限までの噴流高さがあれば、噴流の非接触による加熱ロスを低減することができることが分かった。フローはんだ付け工程では基板に搭載される部品の仕様によりはんだ付け時間が制約されるため、高熱容量基板では、はんだ付け時間中の加熱ロスを防ぐことが特に重要である。そこで、基板下面の噴流接触状態を定量的に評価するために、基板下温度曲線の面積を算出した。図6の点線で囲った領域の



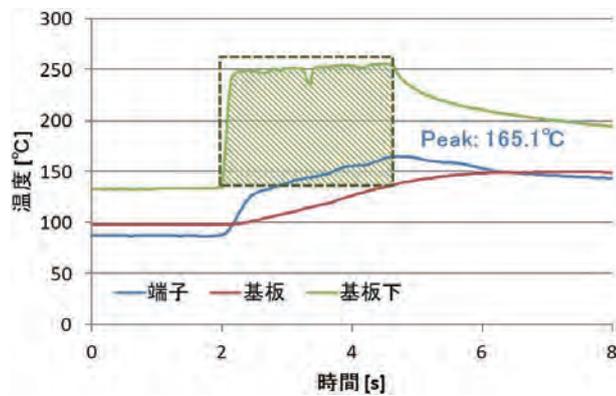
(a) 上限時



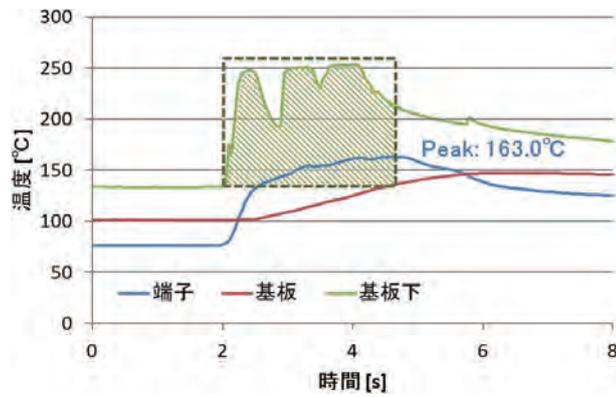
噴流列間で非接触領域が存在

(b) 下限時

図5 1次噴流高さでガラス板接触



(a) 上限時



(b) 下限時

図6 1次噴流高さで温度プロファイル (1次噴流部分を抜粋)

面積から、噴流による加熱量を表せると考え計算した結果、噴流高さ下限では面積が約20%減少することが分かった。

しかし、加熱量が20%異なるにもかかわらず、基板と端子のピーク温度は、噴流高さ上限と下限で数°C程度の差がなく、本評価基板の母材温度は180°Cに達しなかった(図6)。1次噴流で端子温度をフローアップ温度周辺まで上げないと、2次噴流完了時のフローアップ達成は難しい。そこで、1次噴流で端子温度を180°Cに到達させる手段を検討した。

噴流高さの影響が想定よりも小さかった理由として、噴流高さを基板突入時の高さで定めたために、実際にスルーホール内に進入する噴流の高さとは異なっているのではないかと考えた。スルーホール内で基板上限となるように、装置設定値の変更により噴流高さを基板上限よりさらに2mm上昇させて再度評価を行った(図7)。そのときの温度プロファイルを図8に示す。スルーホール内上限まで噴流を高くすることで端子温度がさらに上昇し、180°Cに到達することが分かった。このときスルーホール上面から乗上げが発生してないことは確認している。

本評価で使用した自立型電解コンデンサの端子は、曲げ加工が施されているため、ストレートタイプの端子よりもスルーホール内に噴流が入りづらい。基板をスルーホール中央で切断し、端子が挿入されたときのスルーホール内部の状態を側面から確認したものを図9に示す。端子が曲がっていることによりスルーホール内に噴流が入りづらくなったため、噴流高さの影響が弱められ、温度差が表れにくかったものと考えている。

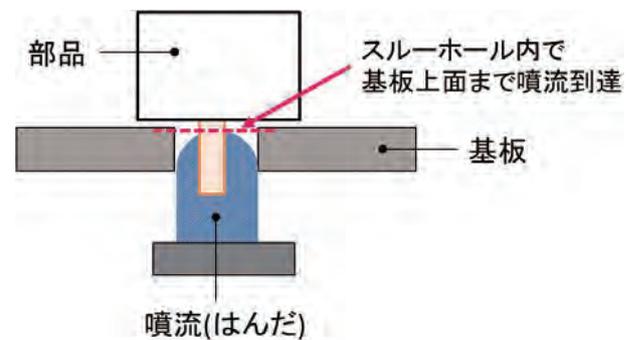


図7 スルーホール内で基板上限となる噴流高さ

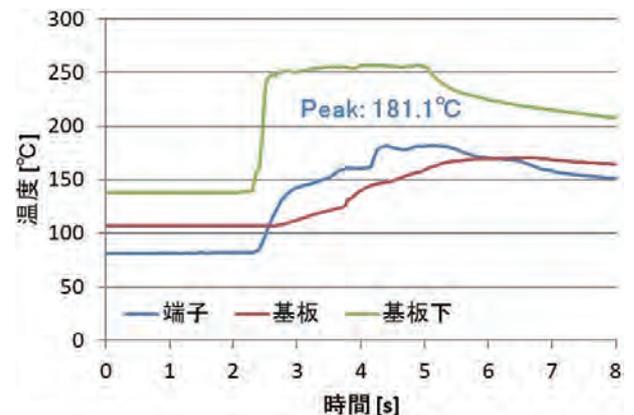


図8 噴流高さ上限以上の温度プロファイル (1次噴流部分を抜粋)



図9 スルーホール内部の端子

噴流高さによるスルーホール内の濡れ上がりの変化を、X線透過装置を用いて基板側面から観察することで確認した(図10)。噴流高さに合わせて濡れ上がり到達点が上昇しており、端子温度が180°Cに到達した条件(噴流高さ:スルーホール内上限)において、基板上面まではんだが到達していることが確認できた。

噴流高さ (端子ピーク温度)	濡れ上がり
下限 (163.0°C)	
上限 (165.1°C)	
スルーホール内 上限 (181.1°C)	

図10 噴流高さとスルーホール内の濡れ上がり

次に、はんだ付け時間について検討した。1次噴流のはんだ付け時間によるピーク温度の変化を図11に示す。はんだ付け時間に比例してピーク温度が上昇していることが分かる。はんだ付け時間を1秒延ばし、3.5秒にすることで180°Cに到達することが見込まれる。

このように、噴流高さとはんだ付け時間によって端子と基板の温度が変化することが分かった。噴流高さやはんだ付け時間は、ノズル内整流板の詰まりや液面高さなどによって経時的に変動する。噴流高さの影響をデータによって明らかにしたことで、この管理項目の重要性を示すこと

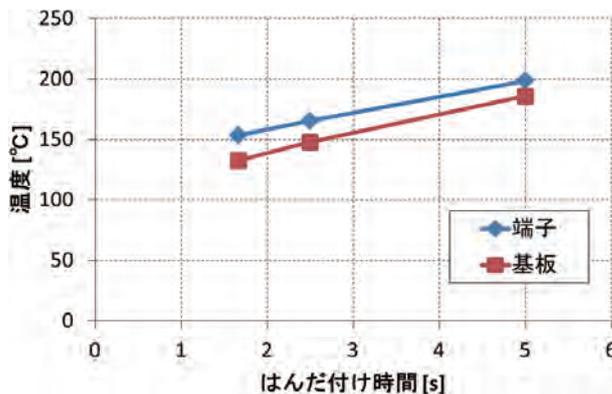


図11 1次はんだ付け時間とピーク温度

ができた。一方で、今後の高熱容量化に対応するためには、さらにきめ細かい管理をする必要があることも分かった。

**4.3 2次噴流高さの評価結果** 2次噴流の噴流高さによる基板接触の様子と温度プロファイルの違いを図12と図13に示す。噴流の基板接触は、1次噴流と同様にガラス板を用いて確認した。2次噴流はひとかたまりの大きな噴流であるため、1次噴流のような噴流高さに伴う接触状態の変化はみられず、噴流高さ下限でも基板下温度は安定していた。しかし、山型の噴流形状であるため、下限のときはガラス板の接触幅が狭くなっていた(図12)。2次噴流では、1次噴流のような噴流非接触による加熱ロスは起こらないが、加熱時間短縮による温度低下が起きることが分かった。ただし、ピーク温度差は数°C程度であり、大きな違いはみられなかった。また、使用装置では、2次噴流高さを基板上限を超えて高くすることができなかった。2次噴流では基板上限を超えて噴流を上げることによる加熱性能の向上は難しいことが分かった。



(a) 上限時



(b) 下限時

図12 2次噴流高さとガラス板接触

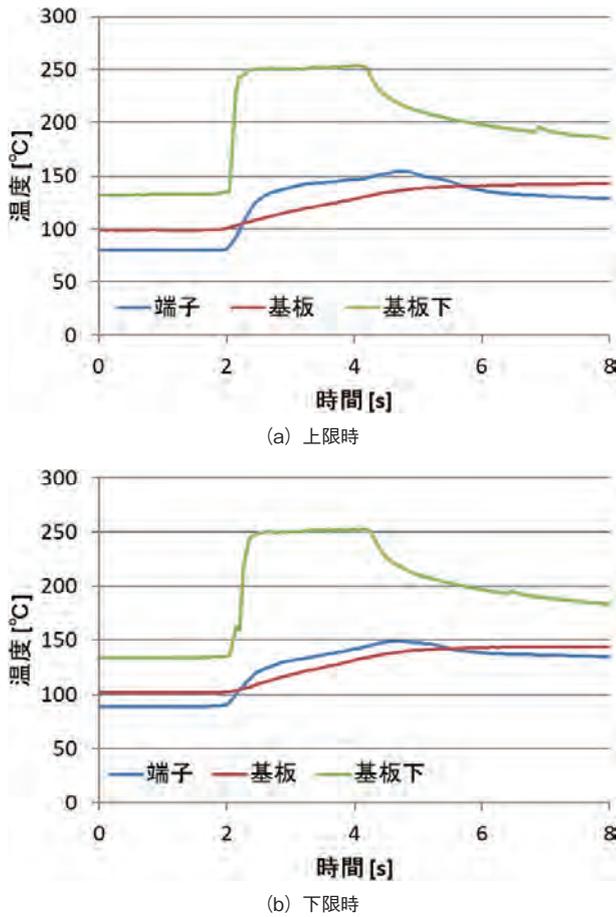


図13 2次噴流高さと温度プロファイル (2次噴流部分を抜粋)

**4.4 フラックス塗布量の評価結果** フラックス塗付量を変えた時の基板上面側はんだ付け状態の外観と、X線透過装置によるスルーホール内部のはんだ付け状態を図14に示す。フラックス塗布量が少ない場合、はんだは基板上面まで到達しているが、はんだと端子が濡れておらず、正常な接合ができていない。一方、フラックスを過剰に塗布した場合は、スルーホール内のボイドが増えてしまう。適切なフラックス量を導出するには、詳細な評価が必要だが、少なすぎても多すぎても接合に問題を起こす。フラックス塗布量は、塗布ノズルの詰まりなどによって変動するため、メンテナンスによって塗布不足や塗布ムラを防ぐことが重要である。

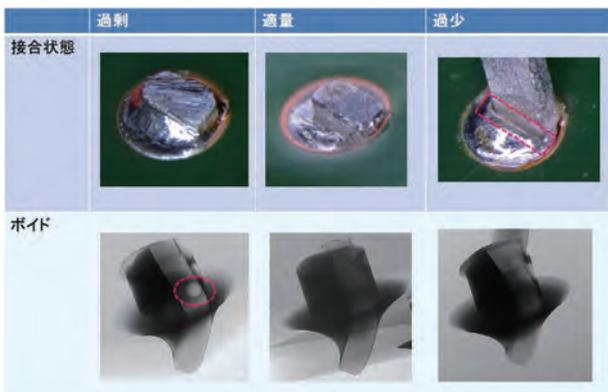


図14 フラックス塗布量とはんだ付け状態

## 5. むすび

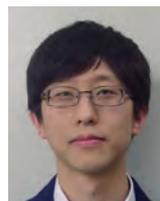
フローはんだ付け品質向上の実現には、技術者の噴流管理スキルの向上が不可欠であることから、噴流高さと基板および部品温度との関係性をデータで示し、噴流管理の重要性を明らかにした。このような取組みは、技術者のスキル向上の助けになるため、継続的に進めていきたい。

一方で、高熱容量基板に対して、これまで以上に細かな噴流管理が必要であることが分かった。従来型の人による管理では、きめ細かな管理には限界があるため、技術者のスキル向上だけでは十分な対策にならない。今後は、噴流高さのような重要な管理項目について、センシング等による数値化と監視について検討していきたい。設備や条件面では、噴流高さとのはんだ付け時間の調整が有効であったが、噴流高さを上げると同一基板上の別のスルーホールからのはんだ乗上げが起るリスクが増大し、はんだ付け時間は搭載部品の耐熱仕様範囲内に抑えなければならないため、いずれも限定的な範囲での対策でしかない。今後、噴流ノズルのカスタマイズといった噴流の加熱性能を向上する技術開発に取り組むことで、高熱容量基板のはんだ付け品質向上を実現したい。

## 参考文献

- 1) JEITA. 2017年度実装技術ロードマップ. 2017, p.266.
- 2) 大澤直. はんだ付の基礎と応用. 工業調査会, 2000, p.341-342.
- 3) 日本溶接協会 マイクロソルダリング教育委員会. 標準マイクロソルダリング技術. 日刊工業新聞社, 2011, p.108.
- 4) 日本規格協会. JIS Z 3282. 2006, p.602-603.

## 執筆者紹介



廣崎 旭宏 Akihiro Hirosaki  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センタ 要素技術部  
専門: 実装工学



田村 敏之 Toshiyuki Tamura  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センタ 要素技術部  
専門: 実装工学



上野 裕史 Yuji Ueno  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センタ 要素技術部  
専門: 材料力学, 実装工学  
所属学会: 日本機械学会

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

## 0402 部品から大型部品までの混載実装を可能にする高アスペクト比はんだ印刷技術

山口 浩二

工業製品の高機能化により、製品を構成する基板上に実装される受動部品のサイズは、従来の1608 (1.6×0.8mm) や1005 (1.0×0.5mm) から0603 (0.6×0.3mm) や0402 (0.4×0.2mm) が主流となってくる。これらの部品は、従来はスマートフォンで多く使用されてきたが、今後はセンサやコントローラのようなFA機器でも数多く使用されるようになる予想される。FA機器でこれらの部品を使用するためには、大型部品との混載が必須となる。この混載には、部品と基板配線とを電気的に接続するはんだを、大型部品に求められるものから0402のような少量までを安定供給することが求められる。このはんだ供給を、印刷工法により安定して行うため、使用するはんだペーストの特性や、印刷マスクの影響を評価し、大型部品と0402部品が混載可能なアスペクト比2.4 (マスク厚 0.12mm、開口寸法  $\Phi$ 0.2mm) を達成するための印刷条件と課題を求めた。

## High aspect ratio solder printing technology enabling mixed mounting from 0402 components to large components

Koji Yamaguchi

The size of passive components mounted on the boards composing the product has been increased from the conventional 1608 (1.6×0.8mm) and 1005 (1.0 × 0.5 mm) to 0603 (0.6 × 0.3 mm) and 0402 (0.4 × 0.2 mm) are becoming mainstream.

Though these parts have been used in the past in many smartphones, it is expected that many parts will be used even in FA equipment such as sensors and controllers in the future. In order to use these parts with FA equipment, it is essential to be mixed with large components. In mounting various components dimensions, it is required to accurately supply solder which electrically connects the components and the board pattern from the one required for large components to a small amount such as 0402 on the board. In order to accurately supply this solder by the printing method, the characteristics required for solder paste and the influence of a printing stencil were evaluated. In order to perform this solder supply accurately by the printing method, the characteristics of the solder paste to be used and the influence of the printing stencil are evaluated, and the aspect ratio of 2.4 (stencil thickness 0.12 mm, aperture dimension  $\Phi$  0.2 mm), the printing conditions and tasks were determined.

### 1. まえがき

工業製品の製造において、製品の組み立てに用いられる接合技術は重要な生産技術の一つである。接合技術には、溶接、接着などがあるが、電子回路を構成する上で、はんだ付けはその中核をなす重要な技術である。最近の情勢として、通信機能やAI処理機能の追加、処理情報量の増加により、電子機器の高機能化・高付加価値化がはかられている。そのため、電子機器を構成するプリント配線板は小さくなり、搭載する部品点数は増加する。この傾向に合わせて搭載部品の寸法は小さくなり、これまでの1608や

1005の部品から、0603や0402といった部品が主流になってくる<sup>1)</sup>。これらの部品寸法に対処するため、部品電極と基板電極を電気的につなぐはんだ接合部は、より微細になってきている。

はんだ接合によって電子回路を構成する表面実装工程は、図1に示すように、はんだペーストをプリント配線板に供給するはんだ印刷工程、部品をプリント配線板に搭載する部品マウント工程、加熱によりはんだを溶融させ部品と接合させるリフロー工程からなる。その中でも、微細な接合を行うためには、はんだ印刷工程が特に重要である。本稿では、この微細なはんだ印刷を安定して量産するための取

り組みに対して記載する。

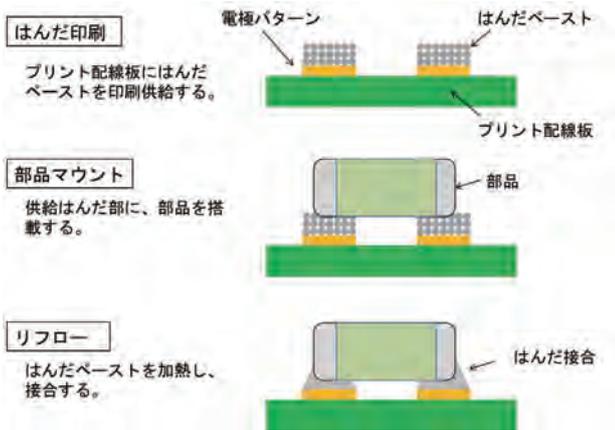


図1 表面実装工程

## 2. はんだ印刷技術の課題

はんだ印刷は、ペースト状のはんだを、部品の電極形状に開口したマスク上を移動させて、開口部にはんだを供給し、プリント配線板を下降することで、電極パターンの上にマスク開口形状のはんだを転写する。この際、図2に示すように、はんだペーストが基板上の配線パターンに粘着する力と、マスク側面に粘着して基板下降（以下、版離れと記載）時のマスクとはんだ間に生じる摩擦力（以下、ずり応力と記載）とのバランスにより、安定した印刷が行えるかどうかが決まる。これらの力は、はんだの接触する面積に比例する。この面積の比をアスペクト比として表す（図3参照）。はんだ印刷技術においては、このアスペクト比が重要な因子であり、この値が大きくなると、印刷の難易度が増すことが知られている<sup>2)</sup>。これは、アスペクト比が高くなると、はんだが基板に接触する面積に対して、マスクとはんだが接触する面積が増えてマスクとはんだの間のずり応力が大きくなり、マスク側面にはんだが残りやすくなるためである。アスペクト比は、図2からもわかるように、マスクの厚さを薄くすることで、その値が小さくなる。そのため、搭載する部品が小さいものばかりであれば、薄いマスクを使用することで、はんだ印刷を安定して行うことは可能である。実際の製品では、安定量産のためにアスペクト比1.8以下となるようにはんだ印刷を行っている。しかし、今後小型部品が主流になることで、プリント配線板に搭載する部品は小型部品だけでなく、大型部品やリード高さばらつきの大きいコネクタなどとの混載が増えてくると予想される。この場合には、マスクを薄くすると、大型部品などで供給はんだ量が不足して良好な接合が得られない。そのため、多種多様な部品を混載するプリント配線板では、マスク厚を薄くせずに小型部品に対応する必要がある。車載機器のはんだ印刷で通常使用される0.15mmのマスク厚で0603の開口部面積の場合アスペクト比2.2となり、FA機器で多く使用される0.12mmのマスク厚で0402の開口部面積に対応する場合は、アスペクト比2.4となる。従っ

て、今後は、2以上の高アスペクト比ではんだ印刷を安定して実施することが必要不可欠になる。この高アスペクト比のはんだ印刷を達成するために、使用する材料である、はんだペーストやマスクが印刷性に与える影響とそれに最適な印刷条件を評価した。

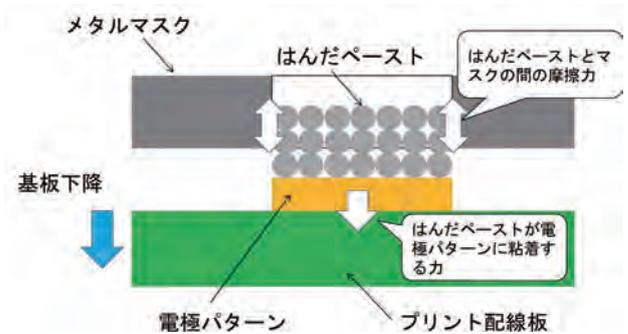
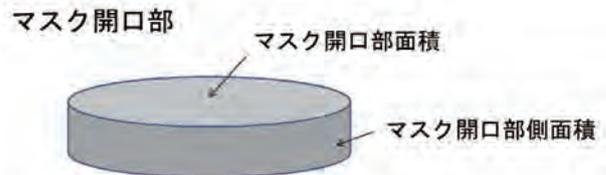


図2 はんだペーストの印刷メカニズム(版離れ時)



$$\text{アスペクト比} = \frac{\text{マスク開口部側面積}}{\text{マスク開口部面積}}$$

図3 アスペクト比

## 3. はんだ印刷性評価

**3.1 評価材料** 評価に使用したプリント配線板の仕様を表1に、外観を図4に示す。また、各はんだペーストの仕様を表2に示す。図4に示すように、プリント配線板パターンは、オーバレジスト、パターンのみ、レジスト開口の3種と、アスペクト比を変化させるために、Φ0.16～Φ0.34mmのドット状のパターンを1シートに各200個配置した。はんだペーストは、材料メーカ各社の0402部品対応ペーストで、市販品に加えて開発中のものを含めて評価した。印刷用マスクはステンレス製のメタルマスクを用い、その厚みは0.12mmとした。これは、一般的に0402チップ対応のマスク厚として使用される0.08～0.10mmの厚みと比較して厚いものである。マスクの開口寸法は、プリント配線板パターンと同様に、Φ0.16～Φ0.34mmであり、その寸法はプリント配線板面基準である。マスクは、レーザ加工を用いるため厚み方向にテーパが生じる。そのため、設計上の形状である円柱とは異なることから、実際の開口部寸法を測定してアスペクト比を算出した。表3にその結果を示す。マスク開口部の壁面処理は、粗さを平滑化した仕様と、それに撥水処理を施したものの2種を用いた。壁面の粗さは、メーカ測定値でどちらもRa0.21～0.22μmであった。

表1 プリント配線板仕様

項目	内容
寸法 (mm)	115×180 t1.6
パターンサイズ (mm)	Φ0.16、Φ0.18、Φ0.20、Φ0.22、Φ0.24 Φ0.26、Φ0.28、Φ0.30、Φ0.32、Φ0.34
ソルダレジストギャップ (μm)	パターン片側 100
表面処理	薄付けAuめっき
シルク	無し

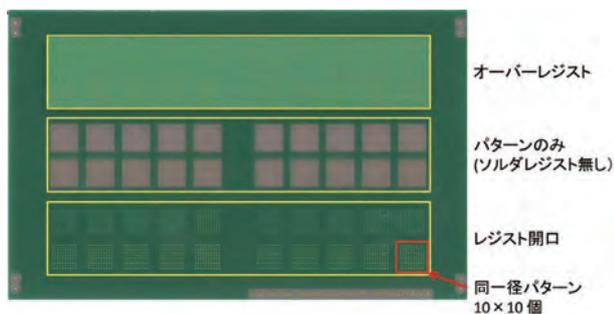


図4 評価基板外観

表2 評価はんだペースト仕様

はんだ	粒径	粘度 Pa·s	フラックス含有量 wt%
A	10~15 μm	224	11.5
B	10~15 μm	187	11.5
C	10~15 μm	243	12.0
D	20~38 μm	115	11.5

表3 アスペクト比

パターン径 mm		0.16	0.18	0.20	0.22	0.24
アスペクト比	設計値	3.0	2.7	2.4	2.2	2.0
	測定値	2.8	2.5	2.2	2.0	1.9
パターン径 mm		0.26	0.28	0.30	0.32	0.34
アスペクト比	設計値	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4
	測定値	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3

**3.2 実験条件** 各はんだペーストを評価した実験条件を、表4に示す。はんだ印刷時のプリント配線板の反りの影響を排除するため、印刷時は、装置の基板吸着機能を用いて矯正することで平面になるようにした。はんだのマスク開口部への充填については、この条件でΦ0.16mmの最小マスク開口部でもマスク底面まではんだが到達して、十分充填されていることを確認している。印刷結果は、はんだ印刷検査機 (CKD製 VP-6000M) による印刷体積の測定で定量化して評価した。実験は、はんだとマスクの組み合わせの1条件毎にマスクの洗浄を行って、マスクに付着したはんだペースト残差の影響を排除した。洗浄後に、基板を12シート連続印刷して、印刷が安定する3シート目から12シート目までの10シート分のデータにより印刷性を評価した。

表4 実験条件

印刷機	Panasonic製:SP60
スキージ	メタル (出代10mm)
基板バックアップ	へた治具、専用吸着BOX
印刷速度	50 mm/s
印圧	25 × 10 <sup>-2</sup> N
アタック角度	60°
クリアランス	-0.2 mm
版離れ	等速 10mm/s ストローク 0.3mm
版離れ待ち時間	0

**3.3 評価結果** 各はんだペーストの印刷結果の工程能力指数Cpkを表5に示す。工程能力を求めるための体積基準は、下限50%、上限170%とした。この結果から、アスペクト比の値が2より小さい場合には、全てのはんだで、Cpkは2以上で安定している。その中でも、はんだBとCの値が高い。アスペクト比が2を超えると、どのはんだもCpkの値は低くなる。ただし、その低下傾向には、はんだにより差が生じ、はんだBとDはその値が1以上と比較的高く、特にはんだBはアスペクト比2.2でも2以上である。また、マスク壁面処理によっても差が生じ、アスペクト比2以上において、はんだDは、撥水处理の方が、はんだBは、撥水处理なしの平滑処理の方が、Cpkが高く、はんだCでは差がない。アスペクト比2.5では、はんだDが、はんだ粒径が大きいにもかかわらず、他のはんだと比較して値が高い。このように、高アスペクト比での印刷性は、はんだペーストの種類により印刷性に差が生じ、マスク壁面処理の影響もはんだにより異なっている。

マスク開口部へのはんだ充填性や、はんだDを除き粒径に差がないことから、これらの印刷性に差が生じるのは、はんだをペースト状にするために用いられるフラックスの違いにより、プリント配線板パターンとの間の粘着力や、マスク壁面とはんだのずり応力が変化するためではないかと考えた。従ってこれらの特性と印刷性の関係性を評価するため、ペーストの特性を測定した。

表5 印刷結果 印刷体積工程能力Cpk

はんだ	アスペクト比	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0	2.2	2.5	2.8
A	平滑処理	5.38	5.20	4.05	3.51	2.88	2.74	2.35	0.41	0.00	0.00
	撥水处理	6.11	5.67	5.31	4.49	3.94	3.41	2.03	0.71	0.00	0.00
B	平滑処理	6.16	5.96	5.07	4.65	4.15	3.88	3.43	2.18	0.16	0.00
	撥水处理	4.98	4.91	4.41	4.00	3.61	3.18	2.76	1.10	0.09	0.00
C	平滑処理	5.90	5.48	4.84	4.78	4.37	3.74	3.22	0.69	0.00	0.00
	撥水处理	6.28	4.79	4.32	3.83	3.61	3.27	2.56	0.63	0.00	0.00
D	平滑処理	4.68	4.83	4.15	3.70	3.34	2.76	2.05	1.06	0.34	0.06
	撥水处理	5.04	5.05	4.68	4.14	3.40	2.79	2.61	1.76	0.50	0.09

\*スเปック 50%<印刷体積<170%

#### 4. はんだペースト特性評価

一般的に、はんだペーストの特性は、せん断速度により粘性が変化し、せん断速度が低い場合は粘性が高く、せん断速度が高くなると粘性が低くなる。これは、はんだ印刷の版離れ時にマスクとはんだの間のずり応力が小さくなるような特性であることを示す。一般にペーストの粘度は、

JIS規格で制定された方法で測定され、主に回転式の粘度計により特定の回転数での値が表2の粘度として示される。この測定方法では、決められた回転数での粘度であるため、特定のずり速度での粘性値のみの値となる。また、ニードル内にはんだを通過させて、その圧力と流量を測定することで、マスクとはんだペーストの間のずり応力を連続的に測定する方法もある<sup>3)</sup>。今回は、はんだペーストの粘性変化やペーストの動的挙動を連続的に評価するために、回転式レオメータを用いて測定を行った。評価は、版離れを想定して、せん断速度に対する応力（粘性）変化と、外的要因が加わった際の粘弾性特性を測定した。測定条件を表6に示す。はんだペーストの評価は、レオメータの平行プレートからはんだが剥がれない状態で比較した。

表6 レオメータ測定条件

測定装置	TA Instruments製 AR2000ex
平行プレート直径	20.00 mm
初期温度	25.0 °C
ギャップ	500 μm

せん断速度－粘性評価	
変数制御の開始	せん断速度 0.01 1/s
変数制御の終了	せん断速度 100.0 1/s

粘弾性評価	
変数制御の開始	振動トルク 1.0000 μm N.m
変数制御の終了	振動トルク 1000.0 μm N.m
周波数	1.000 Hz

せん断速度と粘性の測定結果を図5に示す。各はんだの関係を見ると、はんだAとCは、高せん断速度で粘性が高い傾向にある。はんだBは、低せん断速度で粘性が低く、高せん断速度になると他のはんだと同等になる。はんだDは、0.1以下の低せん断速度領域では粘性は高いが、1を超える高せん断速度では逆に粘性は低くなり、その比であるチクソ性が高い。この結果から、はんだDの印刷性が高アスペクト比まで良好な原因は、版離れ時を想定した高せん断速度で粘性が下がるため、マスクとはんだ間のずり応力が低下したことが原因と考えられる。はんだBは、はんだDのように粘性は低下しないが印刷性は良好である。従って、粘性の影響はあるが、この特性だけで印刷性の良否が決まるわけではないと言える。

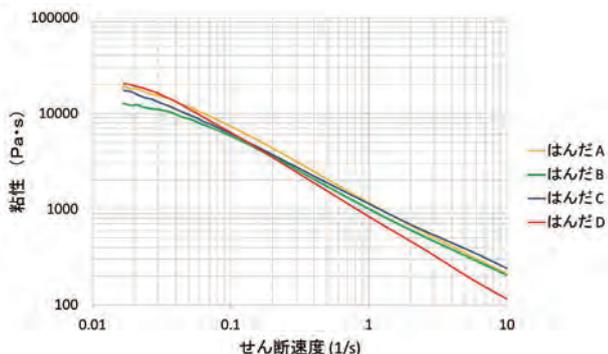


図5 せん断速度－粘性 測定結果

次に、粘弾性の測定結果を図6に示す。弾性体の挙動を示す貯蔵弾性率G'と粘性体の挙動を示す損失弾性率G''、その2つの弾性率の比であり、値が大きいと粘性体の寄与率が高いことを示すデルタの値を示す。低ひずみでは、貯蔵弾性率の方が損失弾性率より高く弾性体の挙動を示すが、ひずみが大きくなると逆転して粘性体の挙動を示すようになることが分かる。各はんだの特性では、はんだDは低ひずみでの貯蔵弾性率が高く弾性体としての特徴が強い。はんだBとCは似たような挙動を示し、低ひずみでの貯蔵弾性率は他のはんだと比較し小さいが、ひずみが増加した場合の弾性率の低下量は、はんだDよりも小さい。また、はんだBは、デルタの値が、低ひずみで大きくこの領域では粘性体としての特徴を持ち、濡れやすいことがわかる。この効果は、マスクの壁面にフラックスが濡れて、はんだとマスクのずり応力を低減する効果があるのではないかと考える。はんだAは、はんだDとはんだB、Cの中間の傾向を示す。

このように、はんだペーストにより粘性の特徴は異なることがわかった。また、高アスペクト比での印刷性が良好なはんだでも、その特性は同じ傾向ではない。これは、はんだの印刷性を向上させる効果的な主要因が1つではなく、いくつかの特性が複雑に絡み合っているためである。その中で、はんだDはせん断速度に依る粘性の差が大きいことから、印刷時の版離れ速度にその特性が大きく依存すると推測できる。はんだBとCは、低せん断速度での粘性は異なるが、高せん断速度での粘性は同等であり、粘弾性の特性も比較的似ていることから。はんだBとCは、はんだDと比較して版離れ速度による影響は小さくなると思われる。そこで、材料特性と印刷性の関係を確認するために、版離れ速度を変えた場合の印刷性を評価した。

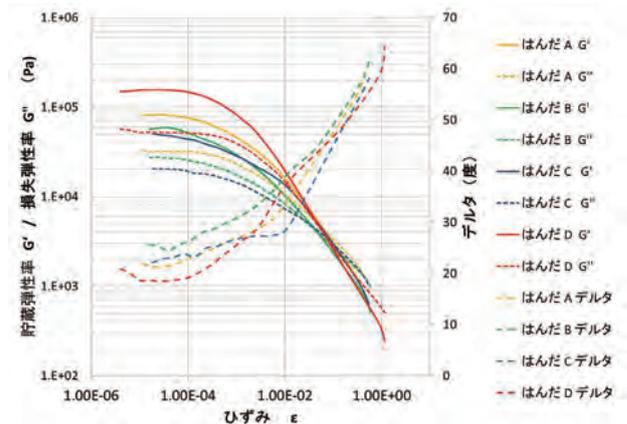


図6 粘弾性測定結果

## 5. 印刷条件の影響

はんだペースト特性の異なる、B、C、Dのはんだを評価した。版離れ速度は、3水準で1、5、10mm/sと変化させた。マスクは、平滑処理で壁面粗さはRa0.35μmのものを用いた。アスペクト比2.1のCpkと体積値のヒストグ

ラムを図7に、その印刷状態を図8~9に示す。この結果、はんだDで、版離れ速度が1mm/sと低い場合は、体積値のばらつきが大きくCpkも低い。はんだBとCは、版離れ速度の影響は、はんだDと比較して小さい。これは、はんだペーストの特性から推測した通りである。印刷状態も、版離れ速度が低い場合は、はんだDは基板パターン上に薄くしかはんだが残っていないものが多い。これは、図7のはんだDの版離れ速度1mm/sの場合に体積値分布が2つに分かれていることからわかる。この現象は、版離れ速度が低い場合、マスクとはんだの間のずり応力の増大により、はんだが破断してマスクに残るためだと考えられる。はんだBとCの印刷状態は、形状が円錐状に近くなっているが、これは、版離れ速度が低い場合の粘性がはんだDほど高くないため、マスクにはんだが引っ張られるものの破断はせずに、円錐状になるためと考える。はんだBとCを比較すると、はんだBは版離れ速度が1mm/sのばらつきが大きく、ヒストグラムの形状がなだらかであり、版離れ速度が大きくなると形状も急になり安定している。はんだCは体積の低い分布はあるが版離れ速度の影響は小さく、体積値100%近傍の分布幅もはんだBよりも小さい。低せん断速度での粘性は、はんだBの方が低いことから、この原因は今回測定した特性では説明できない。ただ、この結果から、はんだBとはんだCでは最適な版離れ条件が異なると推測される。

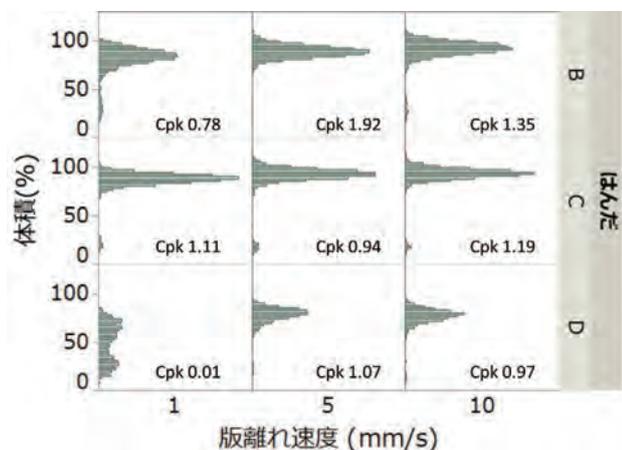


図7 版離れ速度と印刷体積

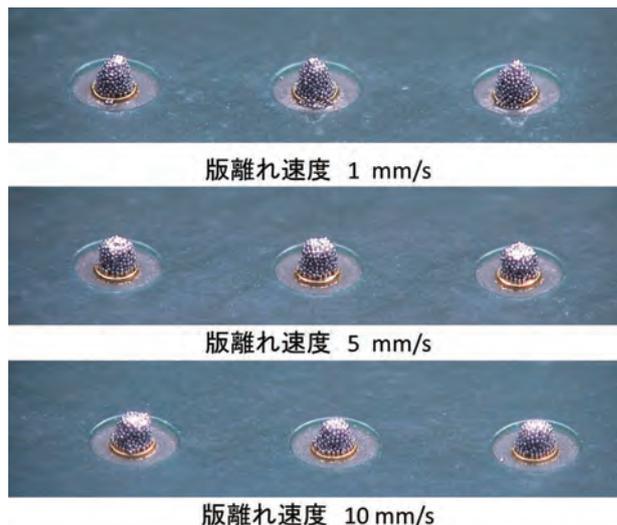


図8 はんだB印刷状態

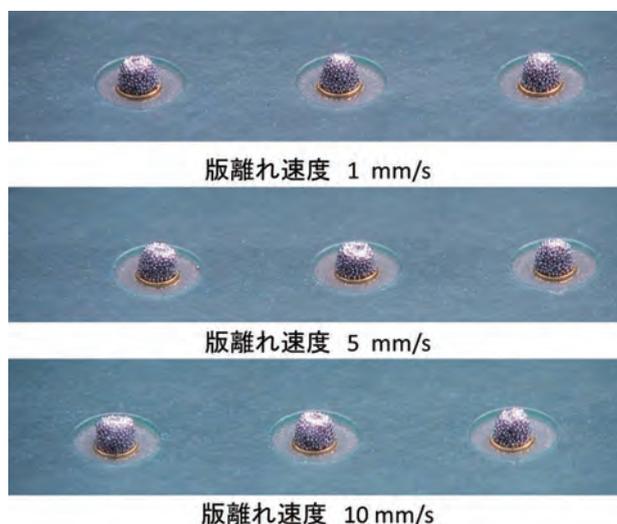


図9 はんだC印刷状態

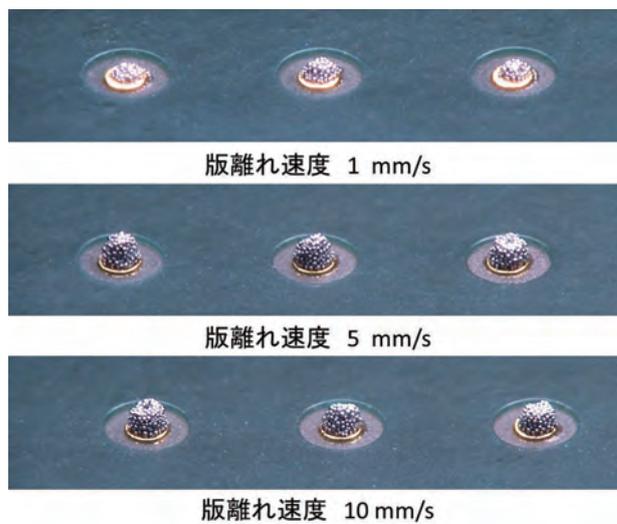


図10 はんだD印刷状態

## 6. はんだ特性と印刷性の関係

印刷性を向上させるためには、はんだとマスクの間のずり応力を低減させて、マスク壁面に残るはんだを減少させることが必要である。はんだ特性の評価と印刷性の関係から、このずり応力を低減させるはんだペーストとして、フラックスのマスク壁面への濡れ性が良好であり、高せん断速度の粘性が低く、低せん断速度の粘性との比が大きいという特徴を持つ。そして、これらのはんだペーストの特性に応じた、適正な印刷条件が決定する。その条件として、

- 低ひずみで粘性体としての特性が強く、マスクとの濡れ性に特徴をもつはんだの場合
  - ・ 版離れ速度の影響は小さく、低速から高速まで良好である。
  - ・ マスク壁面処理の影響を受け、撥水処理加工無しが良好である。
- 低ひずみで弾性体としての特徴が強く、せん断速度に依る粘性の差が大きいはんだの場合
  - ・ 版離れ速度の影響が大きく、低速では印刷ばらつきが大きくなり、版離れ速度が速い方が良好である。
  - ・ マスク壁面処理の影響は小さい。撥水処理の必要はない。

このように、版離れ時のずり応力を低減させて印刷性を良好にする目的は同じでも、それを達成するためのはんだペーストの特性が異なると、その特性にあわせた印刷条件を選定することが重要である。

本実験では、マスク壁面の撥水処理の効果は、はんだにより異なった。ウエハ上にバンプを形成するめっき法で作製したマスクでは、マスクに表面処理を実施して濡れ角を大きくした方が、はんだとマスクの間の抵抗が減り印刷転写率が向上するとの報告がある<sup>4)</sup>。マスク壁面に対するはんだの特性の差やマスク厚、マスク加工の方法により、壁面処理の効果も異なると考えられる。

## 7. むすび

本結果から、高アスペクト比のはんだ印刷を安定して量産するためには、各はんだの特性を評価して特徴を把握し、印刷条件やマスクの処理を最適化することが重要であることがわかった。本評価では、主にマスクとはんだの間の応力に注目しているが、印刷性に影響するはんだ特性としては、基板との粘着力やマスクに充填された際のペーストの凝集力など、より詳細な材料特性の評価が必要である。また、アスペクト比が2.2を超える場合には、はんだとマスクの選定や印刷条件の最適化だけでは達成が難しいことも明らかになった。2.2を超えるアスペクト比のはんだ印刷を安定量産するためには、プリント配線板のパターンや寸法、ソルダレジスト厚さなどの基板の設計要因、はんだ印

刷機の版離れ制御などの設備要因や温度変化などの環境要因の影響を把握し、最適化することが重要となる。これらの条件を揃えることで、アスペクト比2.4のはんだ印刷を達成し、FA機器における混載部品搭載基板で0402サイズの部品を安定生産することを目指していく。

## 参考文献

- 1) JEITA 2017年度実装技術ロードマップ 第4章 電子部品, p.257.
- 2) 東芝レビュー Vol.60 No.8, p. 17-18
- 3) エレクトロニクス実装学会誌 Vol.18 No.6 (2015) p449~453
- 4) マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 17 p163

## 執筆者紹介



山口 浩二 Koji Yamaguchi  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センタ 要素技術部  
専門：実装工学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# オムロングループにおけるソフトウェアプロダクトライン (Software Product Lines) の取組み

原田 真太郎・丹羽 徹・赤松 康至・田口 正久

製品の高機能化、ハードで実現していた機能のソフトウェア化などにより、ソフトウェアが大規模・複雑化している。その結果、開発費の高騰、開発期間の長期化、品質コストの増加など、事業的な課題になっている。

この課題に対して、共通化・再利用技術の一つであるソフトウェアプロダクトライン技術に着目し、オムロングループでの効果的な展開のための技術開発、および、エキスパート人材の育成を行った。その結果、5年間で8製品群にソフトウェアプロダクトライン技術を展開し、それぞれの導入目的に沿った効果を得た。

## Software Product Lines in the Omron Group

*Shintaro Harada, Toru Niwa, Yasuyuki Akamatsu, Masahisa Taguchi*

Software is becoming larger and more complex mainly due to higher functionality of the product, software implementation of functions what used to be realized by hardware. As a result, increasing development and quality costs, frequent schedule overruns of software are becoming a business issue.

To resolve this issue, we focused on Software Product Lines technology, which is one of commonalization, reuse technology. We developed technology for effective deployment, and trained expert human resources to lead the development. As a result, we deployed the technology to eight product groups in five years with each achieving the deployment purpose.

### 1. まえがき

製品の高機能化、システム化、ハードで実現していた機能のソフトウェア化などにより、組込み製品におけるソフトウェアが大規模化・複雑化している。

これはオムロングループでも例外ではなく、主力製品である制御機器・FAシステム、健康医療機器、車載電装部品、社会システム、環境関連機器などにおいても、ソフトウェアの開発量が指数関数的に増加している。その結果、開発費の高騰、開発期間の長期化、品質コストの増加など、事業的な課題になっている。

この課題に対して、我々はこれまで、ソフトウェアのQCD (Quality, Cost, Delivery) 向上を狙いにソフトウェアプロセス改善活動 (SPI) に取り組んできた。具体的には、プロセスリファレンスモデル (CMMI®) を用いた改善活動を、それぞれのビジネスカンパニーで実施し、持続的なQCD向上を実現してきた。

一方、オムロンの主力製品では、図1に示すように、製品群ごとに5~10年程度のスパンでハードウェアを含めた大きな製品リニューアルが行われる。その後、その製品群の派生開発により製品ラインナップを増やすというサイク

ルで開発が行われる。したがって、その新規開発時に構築したソフトウェア構造や派生開発を行うための仕組みが、製品群のライフサイクル全体のQCDに大きな影響を及ぼす。

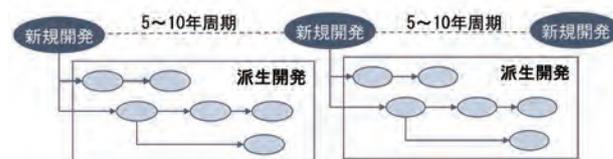


図1 新規開発と派生開発

そこで、これまでのプロセス改善活動に加えて、ライフサイクル全体を踏まえた「新規開発時のソフトウェア構造」および「派生開発を行う仕組」をより強化するための手法として、ソフトウェアプロダクトライン技術に着目した。

### 2. ソフトウェアプロダクトライン(SPL: Software Product Lines)

ソフトウェアプロダクトライン (SPL) とは、共通化・再利用技術の一つであり、製品を系列的に捉え、系列の中でトータルとしてQCDや顧客満足を向上させる総合的な仕組みや技術である。

SPLによる開発により製品数が一定の数値(損益分岐点)を超えると、図2に示すように、製品ごとに個別に開発を行う従来の進めかた以上の費用対効果が得られると言われている<sup>1)</sup>。さらに、製品バリエーションを効率的に生み出すことで製品の市場対応能力向上とシェア拡大に貢献できる。

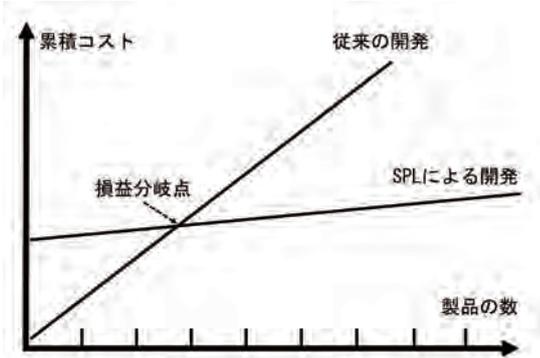


図2 SPLの費用対効果

SPLは以下の3つの活動から構成されている<sup>1)</sup>。

- ① コア資産開発  
より多くの製品開発で利用されるコア資産を整備し、派生製品を継続的に素早く開発する準備を行うことを目的とする。
- ② 製品開発  
顧客の要望に応えつつ、コア資産を最大限に利用し、派生製品を効率的かつ効果的に行うことを目的とする。
- ③ 管理  
全体が正常に立ち上がり稼働するように、組織・技術の視点からコア資産開発と製品開発を支援する。

SPLはこれらの3つの活動を組織的かつ持続的に行うことで効果を発揮する。SPLを導入すると製品開発のたびに既存のソフトウェアを改造するという従来の開発が、図3のようにコア資産を開発し、そのコア資産を活用して製品を生み出すという開発になる。

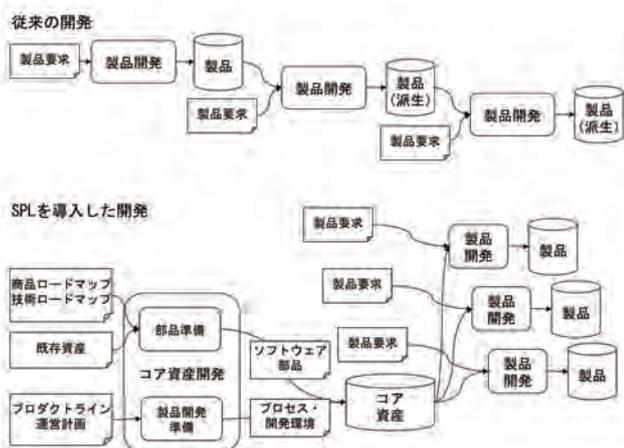


図3 SPLを導入した開発

SPLを導入したことで目覚ましい効果を上げた事例が欧米を中心に多く報告されている。一例を挙げると、米Cummins社は、ディーゼルエンジン制御システムにおいて、製品サイクルタイムを250人月から数人月に効率化した。また日本国内においても、東芝が発電監視制御システムにてコア資産を維持・活用している事例が報告されている<sup>2)</sup>。

この技術を新規製品でのソフトウェア開発に導入することで、その後の派生開発を含めたトータルでのQCDを革新できると考えた。しかし、個々の製品群にて取り組んだ他社事例は多く存在するが、企業全体として複数の事業ドメインを対象とした取り組み事例は少なく、オムロングループとして最適な方法を新たに考える必要があった。

### 3. 課題

前述のとおり製品の大幅なリニューアルは数年に一度であり、個別の開発部門では新規開発の実践頻度は少ない。従って、それぞれの新規開発でSPL開発への取り組みを行っても十分な知見が蓄積できず、オムロングループ全社にとって効果的・効率的な取り組みに発展させられないことが想定された。また、人員の配置換えなどにより、SPLを実践した開発者が、次の新規開発も担当するかは不確かで、技術の伝承という面でも対策が必要であった。

そこで、本社機能部門にて、全社の新規開発における知見を集約し、SPL開発技術の蓄積と人材育成を行うことで、効率的・効果的な改善が可能と考え、以下の2つの課題に取り組んだ。

- ① オムロングループ全社のSPLの実践から得た知見の蓄積
- ② 本社部門でのSPLエキスパート人材育成

### 4. 対策

「オムロングループ全社の知見の蓄積」に対して、世の中のSPLに関する技術やプロセスをベースに独自の知見を加え、「SPL技術マテリアル」として再構築した。

「エキスパート人材育成」に対して、「SPLエキスパート育成フレーム」を構築し、人材の早期育成を狙った。

「SPLエキスパート」が「SPL技術マテリアル」を活用して開発部門メンバとともに新規開発の課題を解決し、製品群ライフサイクル全体のQCD向上を実現する。その結果、「SPLエキスパート」のさらなる能力向上、「SPL技術マテリアル」の拡充と質向上が、継続的に行われている状態を目指した。

次章より上記の具体的な取り組みを記載する。

### 5. SPL技術マテリアル

SPLに関する技術やプロセスは、2002年に、カーネギーメロン大学・ソフトウェア工学研究所(CMU/SEI)にて、「A

Framework for Software Product Line Practice」として 29の技術領域 (Practice Area) が定義されている<sup>3)</sup>。また、2013 年 に、ISO/IEC 26550：“Software and systems engineering – Reference model for product line engineering and management”として参照モデルが定義された<sup>4)</sup>。

我々は、CMU/SEIによる29の技術領域で定義されている技術やプロセスとISO/IEC 26550で述べられている参照モデルを参考に、技術およびプロセスを再構成した。そして、オムロングループとしてSPLを効果的に導入できるように、開発の実態を踏まえたうえで、特に重要と思える観点を肉付けした。さらに、SPLの実践で得た知見も適宜取り込んだ。

このSPL技術マテリアルを、後述するSPLエキスパート育成、および、SPL導入時の課題解決に活用し、効果的なSPLの導入を実現した。

以降に、本取組みにて、特に注力した技術領域を記載する。これは、従来の開発では不足していた技術やプロセスであり、オムロンとしての最適な取り組みとすべく、特に工夫を重ねた部分である。

**5.1 コンポーネント開発 (可変性実装ガイド)** SPLで重要なのは、あらかじめ派生製品の違いを「可変性」として洗い出し、製品バリエーションや将来のバージョンアップにおける変更を見越した設計・実装をすることにある。つまり、それぞれの可変性に対して、いつ (バインディングタイム)、どのように (バインディング方式) 実現するのかを明確にしておくことである。

この実現方式の選択が、製品の保守性や拡張性に大きく影響を及ぼすため、その選択は極めて重要となる。しかし、実現方式は多種多様である上に、その選択は設計者任せとなっており、統一した選択基準も存在していなかった。

多くのオムロンの組込製品で可変性の実現方式に大きく影響する項目として、「必要なメモリ容量 (製品コストに影響)」「バイナリの種別数 (生産時の効率に影響)」「コードの可読性 (派生開発時の効率に影響)」が挙げられる。各項目の状態とそれに相応しい実現方式との関係を、過去の開発事例を基に可変性実装ガイドとして定義した (表1)。

表1 可変性実装ガイド抜粋

バインディングタイミング: 開発時	
実現主体	開発者
主な実現方式	コンパイルスイッチ Make file等による使用ファイル選択
必要メモリ量	少ない
バイナリ数	多い
コード可読性	低い
バインディングタイミング: 製造時、設置時	
実現主体	生産者
主な実現方式	設定値の書きこみ ハードウェア構成の切り替え
必要メモリ量	多い
バイナリ数	少ない
コード可読性	—
バインディングタイミング: 使用時	
実現主体	ユーザ
主な実現方式	インストーラでの選択 ユーザ設定
必要メモリ量	多い
バイナリ数	少ない
コード可読性	—

これら判断基準を組込み製品で多く使われるC/C++/MBDを対象に比較表として取りまとめ活用した。

この実装ガイドを選択基準とすることで、各設計者により可変性実現方式の適切な選択ができるようになった。

**5.2 アーキテクチャ評価 (ATAM)** 新規開発で構築したソフトウェアが、長期にわたる派生開発で使い続けられるためには、初期のソフトウェア構造 (ソフトウェアアーキテクチャ) の良し悪しが重要である。しかし、個別の製品開発を主眼に置いた開発プロセスでは、中長期にわたる改修のしやすさ (保守性・移植性) に関しては、多くの場合十分に検証されない。

そこで、中長期に利用するソフトウェア構造を体系的に開発初期の段階で評価できるかの観点で、複数の手法を検討した結果、CMU/SEIが開発したアーキテクチャ評価手法であるATAM (Architecture Tradeoff Analysis Method)を導入することとした。

ATAMとは、図4に示すように、ビジネス目標を達成するための品質特性 (処理速度、可用性、保守性、セキュリティ、移植性など) に関する具体的なシナリオ (品質要求事項) をもとに、アーキテクチャを分析し、ビジネス目標達成を阻害する項目をリスクとしてまとめる手法である<sup>5)</sup>。製品ライフサイクル全体視点でのビジネス目標を加えることで、長期にわたる派生開発で使い続けることへの評価も可能になる。

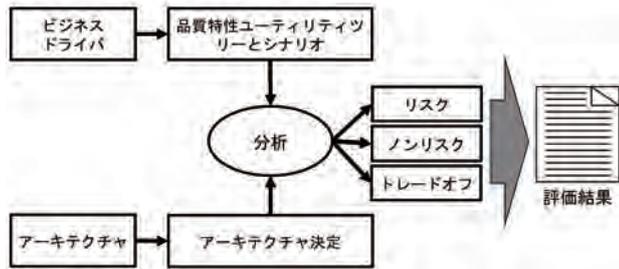


図4 ATAMの全体像

しかし、ATAMは、対象ソフトウェア構造の規模、複雑性やステークホルダーの規模、範囲によって評価期間が約1か月要する手法でもある。そこで、本手法のポイントである「品質特性を起点とした評価」を損なうこと無くプロセス全体を軽量化し、オムロン版ATAMとして体系化した。具体的には、従来手法ではアーキテクチャの理解向上に販売や運用担当など広範囲なステークホルダーの参画を求めるのに対して、オムロンの製品開発特性に合わせて開発長、商品リーダ、ソフトウェア設計リーダなど少数で充足する。活動ステップも目的を絞りこんだ結果、従来では4フェーズ20活動ステップを3フェーズ9活動ステップに簡略化した。

また、品質特性の中でも特に「変更容易性」に絞った手法として、同様にオムロン版SAAM (Software Architecture Analysis Method) も体系化した。

この手法を用いてSPL導入開発にて、新規開発時のアーキテクチャ設計にて今後も使い続けられるアーキテクチャであることの確認を行った。また、続く派生開発時の企画時に、アーキテクチャの変更の必要性判断などにも本手法を用いた。

**5.3 構成管理** 新規開発で構築したコア資産を、長期的にわたる派生開発で使い続けられるためには、コア資産を組織的に維持する仕組みが必要である。この仕組みが無いと、派生開発を重ねるごとに場当たりにソフトウェアに変更が加えられることでコア資産が劣化し、当初目論んでいたSPLの効果が見込めなくなる。

その対策として、変更管理委員会 (Change/Configuration Control Board : CCB) を設置し、コア資産への変更を管理することが推奨される。我々は、このCCBを設置・運営するための、典型的なプロセス、体制、変更時の判断基準を定め、それぞれの開発部門に適した形で導入を行った。図5は、変更時の判断基準とその結果の開発プロセスを定めたものである。

現在、複数の部門にてCCBの運用を行い、コア資産を維持管理している。

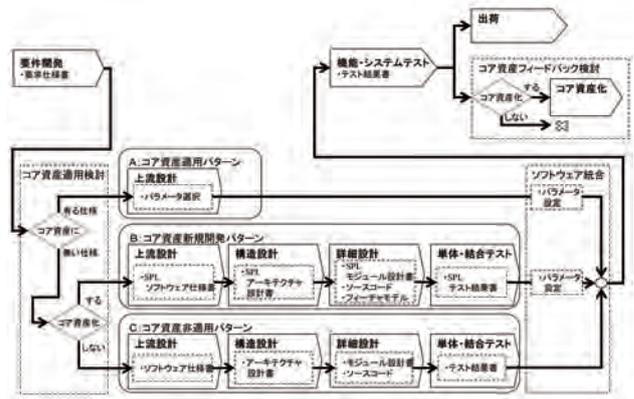


図5 コア資産の変更判断

**5.4 プラクティスパターン** SPLの29の技術領域は、技術観点で分割されているため、時間軸での取組みが把握しづらい。それにより、SPLの経験が浅い技術者は、導入に向けた具体的な進め方が分からず活動が計画通りに進まないことがあった。

誰でも効果的にSPLを実践できるようにするためには、時系列で取組みを理解し、活動を進めることが望まれた。

そこで、各製品群にてSPL導入を経験した本社スタッフが集まり、典型的なオムロンにおける29の技術領域の活用の流れ (オムロンSPLパターン) を体系化した。具体的には、図6に示す4つのフェーズ ((商品企画～コア資産開発～製品開発～振り返り) と、各フェーズの典型的な技術領域の関係と流れを整理し、各フェーズでの活動のポイントをまとめた。一例として、図7にSPL立上げの流れを示す。

これにより、SPLの導入がより体系化され、SPL導入の経験が浅いメンバでも、適切な支援が行えるようになった。また、経験が深いメンバにおいても、他取り組みの知見を加えて、より効率的・効果的に進めるようになった。

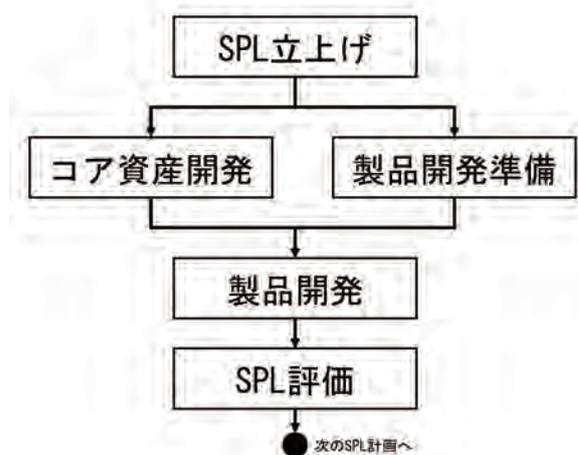


図6 オムロンSPLパターン(全体像)

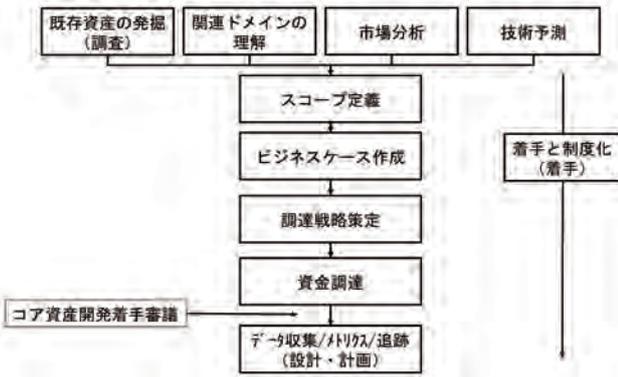


図7 オムロンSPLパターン(SPL立上げ)

## 6. SPLエキスパート育成フレーム

技術の蓄積と並行して、SPLを開発部門に効果的に適用する人財として、「SPLエキスパート」を育成し、本社機能部門にプールした。

SPLエキスパートとして活動するためには、SPL技術だけでなく、開発部門への働きかけが必要になる。SPL技術を提案し、合意形成を行い、それぞれの開発に適した形で技術を展開するといった、社内コンサルタントとしての能力も必要である。そこで、SPLエキスパートに必要な育成フレームとして、図8に示すように、「コア能力 (コンサルティング能力)」「プロフェッショナル能力 (SPL技術力)」「経験」の3つの観点で、必要な要件を定義した。

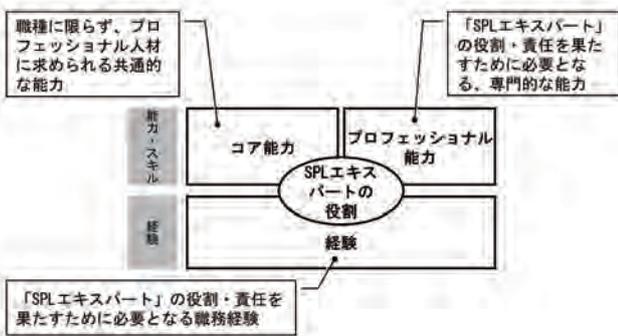


図8 SPLエキスパート育成フレーム

また、SPLエキスパートとしての能力レベルを「初級 (Beginner)」「中級 (Intermediate)」「上級 (Advanced)」として定義し、具体的な育成計画を定めた。

このフレームに基づいて、個々人が目標を設定し、計画、実践、評価・振り返りのサイクルを回すこと、および、組織として個々人の育成目標と能力に合った経験の場をアサインすることにより、効率的な人財育成を実現した。

さらに、それぞれの要素を伸ばすためのトレーニングを開発し、継続的に実施した。

この育成フレームを用いて、個々人および組織の技術力を計画的に伸ばすことができた。結果、図9に示すように7名のSPL上級エキスパートを育成した。

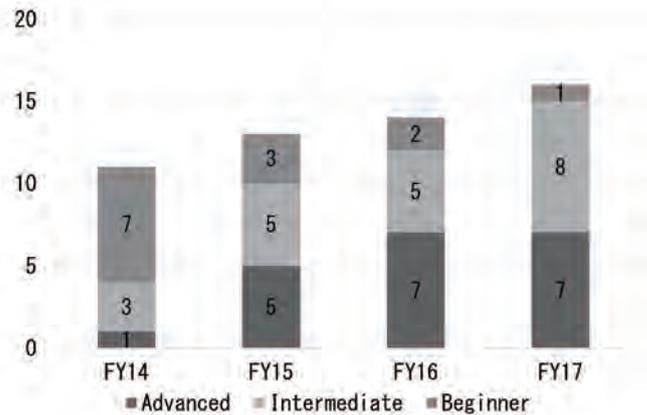


図9 SPLエキスパート認定人数

## 7. 成果

2013年から本格的な展開を始め、2017年までに16名のSPLエキスパート (内、上級7名) を育成した。また、実際のSPL導入活動から得た知見をベースに、全約400ページの「SPL技術マテリアル」を蓄積した。

図10は、本社機能部門に所属するSPLエキスパートの平均保有能力を示す。コア能力 (Core skills)、プロフェッショナル能力 (Technical skills)、総合能力 (Total) を0～3の数値で表し、経年の変化を示している。この図が示す通り、「SPL育成フレーム」の運用により、組織として継続的に能力を向上させることができています。また、各年にSPLエキスパートの他部門への異動や、他部門からの新規メンバーの参加が少なからず発生しているが、組織としての能力を落とすことなく成長し続けることができています。

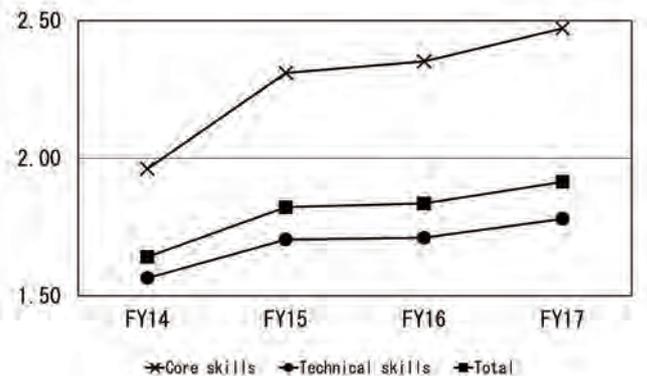


図10 本社機能部門 保有能力平均推移

その結果、8製品群に対してSPLを導入し成果が出た。

具体的には、本社スタッフで構成するSPLエキスパートチームが製品群の企画段階から製品開発に参画し、SPLを適用するかどうかのROI判断、ドメイン分析、コア資産構築、コア資産の維持方法確立などを、開発部門メンバーとともに推進した。その結果、以下のような成果があった。

- ・派生開発での開発費が従来の30%削減
- ・6種類のソフトウェアの1本化による生産効率の大幅向上

- ・コア資産の事前準備による早期の客先デモによる商談獲得

5年間で8製品群の新規開発へのSPL導入による成果への貢献、および、その実践によるSPLエキスパート人財の早期育成とSPL技術マテリアルの短期間での構築を実現することができ、本取組みは有効であったと考える。

## 8. むすび

オムロンの組込み製品で特長的な、5～10年での新規開発とその後に続く派生開発のQCDを大幅に向上するための技術として、SPL技術をオムロンに適した形で適用し一定の成果を得た。

一方で、2つの新たな課題を認識した。1つ目は、新規かつ大規模開発においては、高度な専門性を持ったソフトウェアアーキテクトの有無が開発の成否に大きく関係し、当然ながらSPL導入の成否にも影響を及ぼすこと。2つ目は、派生開発は委託先が中心となることが多く、委託先を含めた、より高度な派生開発の在り方を定義し、展開する必要があることである。現在、この2つの取組みに対して、新たな改善活動をスタートしている。

IoT/AI/ロボティクスといった技術により、今後ますます製品におけるソフトウェアの役割が高まっていく中、ソフトウェア開発におけるQCD向上は、より大きな事業課題になる。我々は、オムロンの事業成長を確固たるものにするため、今後も継続的にソフトウェア開発技術を革新していく所存である。

## 参考文献

- 1) Paul Clements; and Linda Northrop. Software Product Lines: Practices and Patterns. Addison- Wesley. 2002. 563p
- 2) Software Product Line Conferences. PRODUCT LINE HALL OF FAME.  
<http://splc.net/hall-of-fame> .  
(accessed 2018-12-14)
- 3) Paul Clements; Linda Northrop et al. A Framework for Software Product Line Practice, Version 5.0. [http://www.sei.cmu.edu/productlines/frame\\_report/index.html](http://www.sei.cmu.edu/productlines/frame_report/index.html) .  
(accessed 2018-12-14)
- 4) ISO/IEC 26550: 2013. Software and systems engineering -- Reference model for product line engineering and management
- 5) Paul Clements; Rick Kazman and Mark Klein. Evaluating Software Architectures: Methods and Case Studies. Addison- Wesley. 2002. 323p

## 執筆者紹介



原田 真太郎 Shintaro Harada  
グローバルものづくり革新本部  
開発プロセス革新センタ SPILIT 推進部  
専門：ソフトウェア工学



丹羽 徹 Toru Niwa  
グローバルものづくり革新本部  
開発プロセス革新センタ SPILIT 推進部  
専門：ソフトウェア工学  
所属学会：電子情報通信学会



赤松 康至 Yasushi Akamatsu  
インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
技術開発本部 第3技術部  
専門：ソフトウェア工学



田口 正久 Masahisa Taguchi  
グローバルものづくり革新本部  
開発プロセス革新センタ SPILIT 推進部  
専門：ソフトウェア工学

CMMIは、米国CMMI Instituteの米国およびその他の国における登録商標または商標です。

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

## 動的線型モデルによるコールセンターの受信コール数予測

山本 究・幡山 五郎

企業の問い合わせ窓口など、顧客から受信したコールへの対応を主業務とするコールセンターでは、サービス品質とコストのトレードオフを抱えており、これを最適化するようなオペレータ配置を行うことが求められる。この際、将来の受信コール数を精度よく予測する必要があるが、予測プロセスが担当者の「経験と勘」に頼っている現場も多く、手間がかかる、予測精度が担当者に依存する、といった課題を抱えており、適切な予測モデルによる自動化が求められている。コール数予測モデルは、受信コール数の時系列のゆるやかな変動と、特定の条件でのみ生じる特異な変動をうまく扱える必要があり、現場の知見を明示的に反映できることが望ましい。このような性質を備えたモデルとして、動的線型モデルが挙げられる。このモデルにはさらに、予測の不確実性を定量化し、オペレータ配置に反映できるという利点もある。

本稿では、実際のコールセンターの受信コール数データについて、動的線型モデルによって2カ月先までのコール数を予測した結果を検証し、コール数を妥当な精度で予測できており、オペレータの過剰配置を39%削減する結果につながっていることを示した。

## Forecasting call arrivals at call center using dynamic linear model

*Kiwamu Yamamoto and Goro Hatayama*

Many companies have call centers to answer telephone calls from their customers. Call centers' two major indices, service quality and running costs, have a trade-off relation; improving service quality needs additional operators, who require additional costs. To optimize the number of operators under the restriction of this trade-off, forecasting future call arrival volumes plays important role and accurate forecasting model is needed. Such model has to be capable of handling gradual fluctuations and effects of the special days (holidays, special events, etc.), and can be improved by utilizing knowledge of staffs. Dynamic Linear Model is a model with such capability. In addition, we can forecast the probability density of the call arrival volumes with this model, which can be utilized in determining the optimal number of operators.

In this paper, we propose a forecasting method using dynamic linear model, and also apply this model to a real data of a call center to show that we can make appropriate forecast of the future call arrival volumes over 2 months and thereby can reduce over-arrangement of operators by 39.3%.

### 1. まえがき

オムロン フィールドエンジニアリンググループ (OFE) は、全国140箇所の拠点と1,200名のカスタマエンジニアによるサービスネットワークを構築し、エンジニアリングサービス/フィールドサービス/バックアップサービスを全国の顧客に提供している。このサービスを提供するうえで、コールセンター業務が重要な機能のひとつとなっている。コールセンターで行われる業務には大きく2種類があり、ひとつは電話勧誘販売のように自ら消費者等にコールを行うアウトバウンド業務、もうひとつは問い合わせ窓口

などの受信したコールに対応するインバウンド業務である。OFEのコールセンターではこのうちのインバウンド業務を主に扱っており、受信したコールのうち既定の時間内に応答できたコールの割合がサービス品質の重要な指標のひとつとなっている。そのため、受信コールに対して十分な数のオペレータを用意する必要があるが、オペレータの確保には人件費等のコストが発生するため、サービス品質とコストのトレードオフを適切にバランスさせるようにオペレータ数を最適化する必要がある。OFEでは、時間ごとの平均コール数と平均コール時間から、サービス品質の要求水準を満たすことのできるオペレータ数を算出し、それに

応じて人員を割り当てている。ここで、将来時点のコール数とコール時間は未知であり、過去のデータからの予測値を用いてオペレータ数を算出することになるため、コール数やコール時間の予測精度が重要となる。

単純な予測手法としては、前月の平均や前年同月の平均、曜日ごとの平均などをそのまま用いる方法があるが、コール数の変動がより複雑な場合には、それだけではうまく予測できず、担当者がコールセンター固有の変動要因も加味して「経験と勘」で予測値を調整するというようなオペレーションが採用されることも多い。このようなオペレーションでは、予測作業に手間がかかる、予測精度が担当者に依存する、などといった課題がある。

こうした課題を受け、様々なコール数予測手法が提案されている。一例としては、ARIMAや指数平滑等の一般的な時系列解析モデルによる予測が挙げられる<sup>1)</sup>が、これらのモデルは時系列の周期的な変動はうまく扱うことができるが、特定の日付のみ特異な変動を示すようなパターンを扱うことは難しい。このような特異な変動を扱える予測手法としては、重回帰モデルによる予測などが考えられる<sup>2)</sup>。重回帰モデルでは、年、曜日、週番号などの暦の情報に加え、各コールセンターに固有の変動要因を明示的に加味することが容易であり、説明性の高いモデルを作ることができる。しかし、重回帰モデルでは、平均値や各変動要因の影響の大きさが徐々に変化していくような、非定常な系列の扱いが難しく、そのようなデータに対しては時間とともにモデルの予測精度が低下していく恐れがある。実際のコール数データでも、平均や変動の大きさが時間とともに変わっていくようなパターンが観測されており、そのような変化を適切に扱えるモデルが必要と考えられる。

状態空間モデルと呼ばれるモデルのひとつである動的線型モデルは、複数の変動要因を持ち、非定常性や構造変化、不規則パターンがある時系列データを柔軟に扱うことができるモデルであり<sup>3)</sup>、コールセンターに固有の変動要因を容易に加味できることに加え、長期的なゆるやかな変動に追従する形で予測を行うことができる。さらに、予測結果の不確実性を確率分布の形で算出できるという特徴があり、予測結果と実際の結果の誤差がどのような確率で発生し、どの程度の大きさになるのかを定量的に評価することができる<sup>3)</sup>。得られた誤差の確率分布を活用することで、予測結果からの誤差が大きくなる可能性が高いと予測された日には、予測された誤差の大きさに応じてオペレータ数を増やしてリスクを軽減する、というような対応が可能になると期待される。

本稿では、OFEのコールセンターで扱っているATM関連の金融機関からのコール数データに対して、動的線型モデルによる予測を行った結果を検証し、2カ月先までのコール数を妥当な精度で予測できており、予測精度の向上がより適切なオペレータ配置の決定に貢献できていることを確認した。

本稿の構成を以下に示す。2章では、コール数の特性に

ついて述べる。3章では、動的線型モデルの紹介、および具体的なモデルについて述べる。4章では、実データについて予測を行った結果について述べる。

## 2. コール数の特性について

**2.1 全体の傾向** 図1に、OFEのコールセンターにおける、2015年4月1日から2018年3月31日までの1日ごとの金融機関からのコール数をプロットしたものを示す。まず平日と土曜および休日ではコール数が大きく異なっていることがわかる。また、平日のコール数の動きにはある程度の季節性が見られるものの、その変動幅は安定しておらず、全体として非定常な系列となっている。なお、図1中の実線は平日のコール数の移動平均を示しており、季節要因が加わったうえでのトレンドとしてみる事ができる。

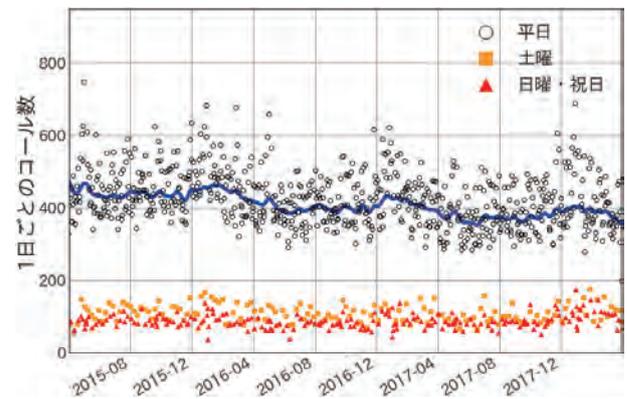


図1 1日ごとのコール数の時系列グラフ

**2.2 コールセンター特有の傾向** 多くのコールセンターでは、コール数の増減に寄与するそれぞれ特有の傾向があると考えられる。現場の関係者へのインタビューやデータの観察を通してこのような傾向を見つけ出し、予測に取り入れることで、より精度の高い予測が可能になると考えられる。

OFEのコールセンターではATM機器についての金融機関からの問い合わせを取り扱っており、給料日となることの多い毎月25日や、年金支給日である毎月15日、また連休前後など、普段よりもATMの利用が多いと考えられる日にはコール数が多いという傾向が現場の「経験知」として以前から知られており、データの分析を通して実際にそのような傾向があることが確かめられた(図2、3)。

一方で、経験的に増減要因として扱われているものであっても、データを確認すると大きな変化がないという場合もあるので、実際に増減の要因となっているのは何なのか、注意深く検討する必要がある。例として、月初や五十日と呼ばれる5の倍数となる日にはコール数が増えると言われていたが、データからは大きな差は認められなかった(図4)。

OFE担当者へのヒアリングを通じて候補に挙げた変動要因について、コール数への影響の大きさを検討した結果、

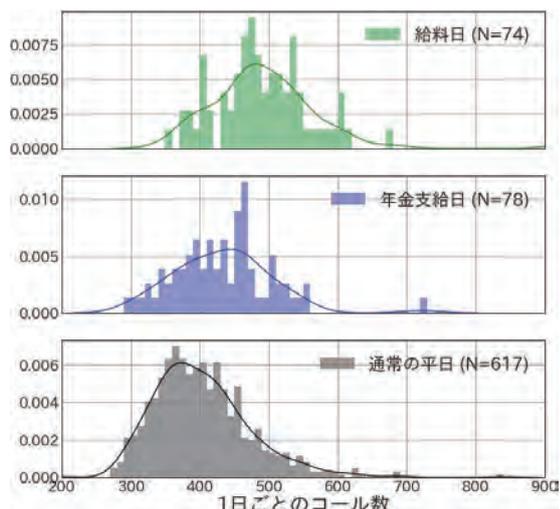


図2 給料日、年金支給日の1日ごとのコール数頻度分布

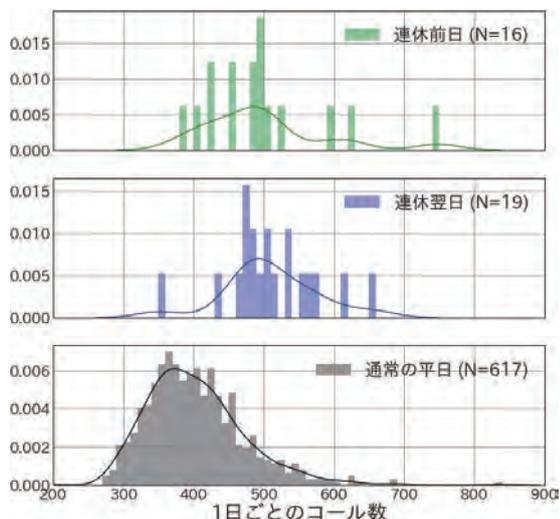


図3 連休前日、連休翌日の1日ごとのコール数頻度分布

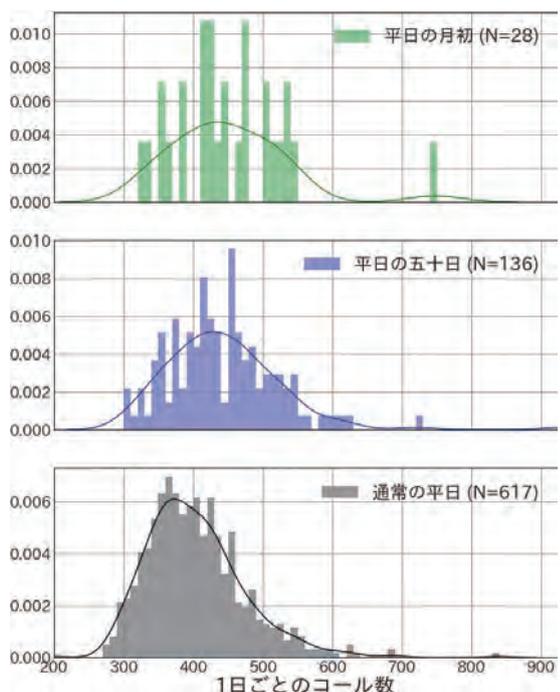


図4 月初、五十日の1日ごとのコール数頻度分布

表1 コール数の変動要因

要因名	詳細
土曜日	土曜日
日曜・祝日	日曜日および国民の祝日
年始営業日	年始営業日
年末営業日	12/20以降の営業日と12月の金曜日
月末	月の最後の営業日
給料日	毎月25日(土日祝に重なる場合はその前で一番近い平日)と翌営業日
年金支給日	毎月15日(土日祝に重なる場合はその前で一番近い平日)と翌営業日
連休前日	3日以上連休の前日
連休翌日	3日以上連休の翌日

表1に示す9項目を特殊なコール数変動要因として予測モデルに取り入れることとした。

### 3. コール数の予測手法について

**3.1 重回帰モデル** 2章で述べたような特異な変動要因を含む時系列データの分析に従来用いられてきた手法である<sup>2)</sup>、重回帰モデルを紹介する。重回帰モデルは、式(1)の形で表され、対象を  $N$  個の説明変数  $X_i$  の線型結合とみなし、各  $X_i$  の係数  $a_i$  および定数項  $b$  を過去のデータに基づき算出することで特定化されるモデルである。

$$y = \sum_{i=1}^N a_i X_i + b \tag{1}$$

説明変数として、年月、曜日などの時系列要因を加えることで、時系列分析に応用することができる。また、時系列以外の変動要因も容易に付け足すことができ、コールセンターに特有のコール数変動要因を簡単に記述することができる。

ただし、重回帰モデルでは、時間が経つにつれ平均値が変わっていくような、非定常な系列を扱うことが難しい。図1に見られるように、OFEのコールセンターでは、コール数の平均が年を経るごとに変化していき、このようなデータに対しては、より柔軟に非定常な時系列を扱えるモデルが望ましい。

**3.2 状態空間モデルと動的線型モデル<sup>3)</sup>** 上記のような特徴を持つモデルとして、状態空間モデルが挙げられる。状態空間モデルは、非定常性や構造変化、不規則パターンがある時系列にも適用できる高い柔軟性を持つモデルであり、そのうちモデルの線型性とノイズがガウス分布に従うことを仮定した場合を特に動的線型モデルと呼ぶ。

状態空間モデルでは、観測値  $Y_t$  の変動を直接モデル化するのではなく、状態過程と呼ばれる観測不可能なマルコフ連鎖  $\theta_t$  が存在し、時系列  $Y_t$  は  $\theta_t$  に誤差が加わった不正確な観測値であると仮定する(図5)。このような仮定に基づき補助的な時系列  $\theta_t$  を取り入れることで、複雑な変動モデルを持つ時系列  $Y_t$  の確率分布の推定が容易になる。



図5 状態空間モデル

動的線型モデルの場合の定式化を以下に示す。観測値  $Y_t$  は  $p$  次元、状態  $\theta_t$  は  $q$  次元とする。初期値  $\theta_0$  は、 $\theta_0 \sim \mathcal{N}_q(m_0, C_0)$  で与えられ、平均  $m_0$ 、共分散  $C_0$  の  $q$  次元ガウス分布に従う。また、 $t \geq 1$  における  $Y_t$ 、 $\theta_t$  は

$$\begin{aligned} Y_t &= F_t \theta_t + v_t, & v_t &\sim \mathcal{N}_p(0, V_t), \\ \theta_t &= G_t \theta_{t-1} + w_t, & w_t &\sim \mathcal{N}_q(0, W_t), \end{aligned} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $F_t$  と  $G_t$  は観測行列および遷移行列とよばれ、それぞれ時刻  $t$  での観測  $\theta_t \rightarrow Y_t$  に伴う写像と前時刻からの状態の変動  $\theta_{t-1} \rightarrow \theta_t$  に伴う写像を表している(それぞれ  $p$  行  $q$  列、 $q$  行  $q$  列)。また、 $v_t$  は  $\theta_{t-1} \rightarrow \theta_t$  の状態遷移で生じる誤差(システム誤差)を、 $w_t$  は  $\theta_t$  の観測  $\theta_t \rightarrow Y_t$  で生じる誤差(観測誤差)を表しており、それぞれ平均0、共分散  $V_t$ 、 $W_t$  の多次元ガウス分布に従う確率変数とする。ガウス分布の和で表される確率変数はガウス分布に従うことから、 $Y_t$  と  $\theta_t$  はそれぞれ  $p$  次元、 $q$  次元のガウス分布に従うことに注意する。

モデルの学習は、これら  $Y_t$ 、 $\theta_t$  が従うガウス分布の平均と分散に、各パラメータを観測されたデータをよく表すような値を選択するというプロセスで行われる。パラメータの選択にはいくつかの方法が考えられるが、データ全体を用いて最尤推定を行うことが多いため、ここでは最尤推定によりモデルのパラメータを特定するプロセスを紹介する。

$n$  個の観測値が従う確率変数  $Y_1, \dots, Y_n$  があり、その分布が未知のパラメータ  $\psi$  に依存しているとする。観測値として  $y_1, \dots, y_n$  が得られたとき、尤度関数  $L$  は観測値の同時確率密度を用いて  $L(\psi) = p(y_1, \dots, y_n; \psi)$  と表せる。ここで、観測値の同時確率密度は

$$p(y_1, \dots, y_n; \psi) = \prod_{t=1}^n p(y_t | y_{1:t-1}; \psi) \quad (3)$$

と書くことができるが、この右辺に現れる項がガウス分布の確率密度になる場合、その平均と分散  $f_t$ 、 $Q_t$  を用いて、対数尤度  $\ell$  は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \ell(\psi) &= -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^n \log |Q_t| - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^n (y_t - f_t)' Q_t^{-1} (y_t - f_t) \\ &\quad + \text{const} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $f_t$  と  $Q_t$  は  $\psi$  に依存している。未知パラメータ  $\psi$  の最尤値  $\hat{\psi}$  は、 $\ell(\psi)$  を最大化する  $\psi$  を数値的に計算することで求めることができる。すなわち、

$$\hat{\psi} = \arg \max_{\psi} \ell(\psi) \quad (5)$$

となる。

**3.3 動的線型モデルの定式化** 2章で述べたコール数の特性を踏まえ、以下のようなアイデアに基づきコール数予測モデルを作成した。

まず、各日でのコール数の期待値は、ベースとなる平日のコール数期待値に、図1に示した変動要因による差分を足し引きしたものとする。また、平日のコール数期待値、各変動要因により生じる差分の大きさは、日ごとにランダムに変動しており、さらに、実際に観測されるコール数は、この期待値にランダムなズレが加わったものになるとする。

このとき、各日のコール数、変動要因による増減の大きさ、およびこれらが日ごとに変動する大きさがそれぞれガウス分布に従うと仮定することで、以上のモデルは動的線型モデルの枠組みで以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} Y_t &= \theta_t^{\text{平日}} + \sum_{\text{dtype} \neq \text{平日}} F_t^{\text{dtype}} \theta_t^{\text{dtype}} + v_t, \\ \theta_t^{\text{dtype}} &= \theta_{t-1}^{\text{dtype}} + w_t^{\text{dtype}} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで予測すべきコール数を  $Y_t$  とし、ベースとなる平日におけるコール数、および変動要因による差分を  $\theta_t^{\text{dtype}}$  により表している。ただし、dtype は日付の属性を示すフラグであり、平日、または表1に示した9個の変動要因のうちいずれかに該当する値を取る。また、 $F_t^{\text{dtype}}$  は日付  $t$  が dtype であるときに1、それ以外の時は0を取る変数であり、 $v_t$ 、 $w_t^{\text{dtype}}$  は、平均0のガウス分布に従う観測誤差とシステム誤差である。このモデルの観測誤差とシステム誤差の従うガウス分布の分散値を、2015年4月1日から2018年3月31日までのデータから最尤推定し(表2)、最終的な予測モデルとした。

なお、システム誤差の分散値が大きいほど対応する変動要因に関する予測の確度が低く、予測から大きく外れる可能性があることを表しており、変動要因選択の妥当性を判断する指標として利用することなどが考えられる。

表2 観測誤差とシステム誤差の分散の推定値

$v_t$	1815.3
$w_t^{\text{平日}}$	6.6
$w_t^{\text{土曜日}}$	0.9
$w_t^{\text{(日曜・祝日)}}$	1.1
$w_t^{\text{年始営業日}}$	16.0
$w_t^{\text{年末営業日}}$	0.0
$w_t^{\text{月末}}$	12.1
$w_t^{\text{給料日}}$	0.3
$w_t^{\text{年金支給日}}$	0.0
$w_t^{\text{連休前日}}$	910.5
$w_t^{\text{連休翌日}}$	0.0

## 4. 実験結果

2章で紹介した金融機関からのATM端末関連の問い合わせコール数データについて、3章3節に示したモデルによる予測を行った。ここで、コール数を予測する目的はオペレータのシフトを最適化することであるが、シフトの決定は通常、該当の月の数週間前には行われるため、シフトの

検討を始める時点で数週間先のコール数を予測できている必要がある。本稿では、OFEでの運用に合わせ、2カ月先までのコール数予測を行った結果を紹介する。

**4.1 2カ月先までの予測結果** 図6に、2018年4月1日から2018年6月30日までの実績コール数と、予測コール数の比較を示す。ここで、予測は1カ月単位で行い、対象月の前々月末日までのデータを基に予測している（例：2018年4月1日～2018年4月30日のコール数予測は2018年2月28日までのデータを基にしている）。表3に示すように、全体の76%が68%信頼区間に、98%が95%信頼区間に収まっており、妥当な予測結果と考えられる。

動的線型モデルによる予測では、予測値が確率分布の形で得られるため、予測の確実性が低く、誤差が大きくなるリスクが高い場合には予測値の分散が大きくなり、信頼区間が広がるという形で可視化される。今回適用したモデルでは、表2にみられるように連休前日という要因による増減の予測値の分散が大きくなっており、他の日と比べて予測の確度が低くなっていることがわかる。今回のモデルで連休前日の予測確度が低くなっている要因としては、連休前日のサンプルが16件と少なく、外れ値の影響を強く受け、十分に学習できていないことが挙げられる。

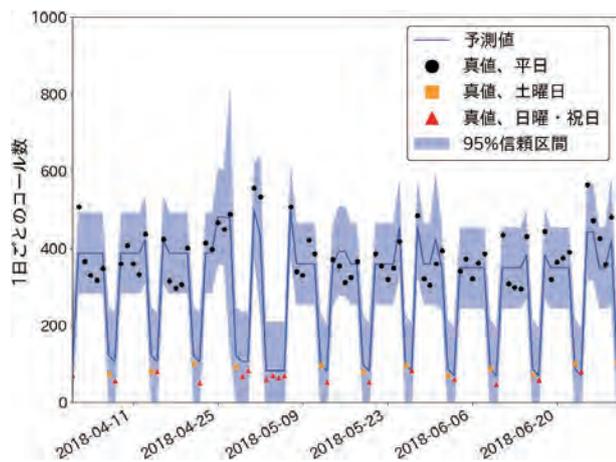


図6 2カ月先予測結果（2018年4月～2018年6月）

表3 平日コール数の信頼区間への収まりの分布

95%外	1日 (1.6%)
95%内、68%外	14日 (22.6%)
68%内	47日 (75.8%)

(計62日)

**4.2 重回帰モデルによる予測との比較** また、ベースラインとして、動的線型モデルで使用したのと同様の変動要因を使った重回帰モデルを作成し、同じデータについての予測結果を比較した。動的線型モデルは分布推定を行っているが、重回帰モデルは点推定を行うモデルであるため、予測の平均のみを用いた比較とした。図7のように、両モデルで概ね近い予測結果になっているが、予測結果と実績値の平均二乗誤差で評価すると、重回帰モデルによる予測

では3435.0、動的線型モデルによる予測では2389.9と30%低下しており、点予測のみの精度で見ても重回帰モデルと同等以上の性能を発揮できていることが確認された。

なお、全体として重回帰モデルによる予測では動的線型モデルよりやや大きなコール数が出力されている。これは、動的線型モデルではコール数の平均  $\theta_t^{PH}$  が逐次的に更新されていくのに対し、重回帰モデルではコール数の平均は固定値として全入力データから推定するという違いが影響している。図1にみられるように、OFEで受信するコール数は2015年ごろから現在までに徐々に減少しているため、全入力データから推定された平均値はコール数が大きい過去のデータに影響され、やや大きい値を取るようになってい

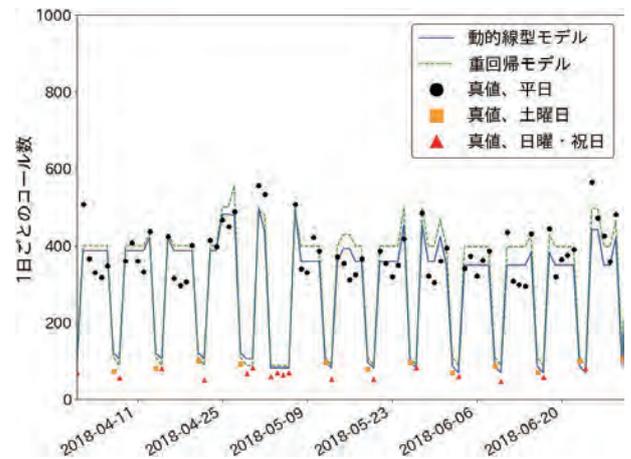


図7 2カ月先予測結果（2018年4月～2018年6月）

**4.3 コール数予測に基づくオペレータ配置の最適化** コール数を予測する目的は、必要なオペレータ数を算出し人員配置を最適化することである。したがって、予測コール数から算出された必要オペレータ数と、最適なオペレータ数の差の大きさによってコール数予測の有効性を評価した。

OFEでは、受信したコールのうち規定秒数以内に応答できたものの割合をサービス品質指標のひとつとして用いており、必要オペレータ数を算出する際には、この指標が既定の水準を超えるような最小のオペレータ数を求め、このオペレータ数を使用している。この指標は、オペレータ数  $N$ 、単位時間あたりの平均コール数  $\lambda$ 、1回のコールにかかる平均時間（通話時間+後処理時間） $\mu^{-1}$ 、および前述の規定秒数  $AWT$  (Acceptable Waiting Time) を基に、アランC式<sup>4)</sup>を用いて計算される。なお、ここではコールがポアソン到着し、サービス時間が指数分布に従うM/M/C型待ち行列モデルを仮定している。また、実際には時間帯ごとにコール数が増減することを考慮してオペレータ配置に反映する<sup>2)</sup>が、簡単のため本稿においては1日を通して単位時間当たりの平均コール数が一定であると仮定して計算を行う。

2018年4月、5月、6月の平日（計62日）について、各日の実績コール数により算出した必要オペレータ数を最適オペレータ数とし、予測コール数から算出した必要オペレータ数が最適オペレータ数と比べてどれだけ過不足していた

かを表4にまとめた。単純には、表中で色付けしている±0人の人の人数が多く、他の行の人数が少ないほど良い予測といえる。算出に当たって、パラメータ $\mu^{-1}$ 、AWTについてはOFEで実際に用いられている値を使用した。

OFEでスタッフが過去の平均コール数を経験と勘を基に補正するという従来通りの方法でコール数を予測し、その値を用いて算出したオペレータ数と、動的線型モデルによる予測コール数から算出したオペレータ数とを比較すると、最適オペレータ数より1人以上過剰になった日数が28日から17日と39%減少しており、1人以上不足した日数も9日から8日とわずかではあるが減少する結果となった。サービス品質を落とすことなく過剰なオペレータ配置のみを減らせており、適切なオペレータ配置が行えているといえる。

また、重回帰モデルによる予測を用いた場合と比較すると、オペレータ数が1人以上過剰になった日数は24日から17日に29%減少している一方、1人以上不足した日数は8日から9日に微増した。この結果から単純に優劣を判断することは難しいものの、少なくとも同等以上によい人員配置を行えていると考えられる。

表4 最適オペレータ数からの過不足の頻度表

人員過不足	OFE 算出	重回帰モデル	提案手法
-2人	1日	1日	1日
-1人	9日	7日	8日
±0人	24日	30日	36日
+1人	26日	23日	17日
+2人	2日	1日	0日

(計62日)

## 5. むすび

本稿では、動的線型モデルを用いたコール数予測手法を提案した。動的線型モデルは、コール数データの持つゆるやかな変動と特定の条件で起きる特異な変動を柔軟に扱うことができる。

実験では、オムロン フィールドエンジニアリンググループのコールセンターで扱っているATM関連のコール数データについて予測モデルを作成、予測結果を検証した。検証の結果、実績コール数の76%が68%信頼区間に、98%が95%信頼区間に収まっており、妥当な予測が行えていること、ベースラインとした重回帰モデルによる予測と比べ平均二乗誤差が30%小さく、精度の高い予測ができており、予測精度の向上が人員の過剰配置を39%抑制する効果につながっていることが確認された。

オムロン フィールドエンジニアリンググループのコールセンターでは、担当者が人手で毎月およそ1日かけて予測とオペレータ配置の検討を行っていた。このプロセスに動的線型モデルによる予測を導入することで、より適切なオペレータ配置が可能になるとともに、作業量を大きく低減

させることができる。現在、動的線型モデルによる予測システムのツール化に向け試験導入を行っており、実際に効果が確認されている。

本手法は、コールセンターのコール数に限らず、様々な時系列データの予測に利用することができる。特に、平均が時間と共に変化していくような非定常な時系列に対しては、ARIMAなどの一般的な時系列モデルや、重回帰モデルの適用が難しく、本手法による予測が適している。店舗等の来客数や売上、道路等の交通量の時系列など、こうした特徴を備えているデータは多くあると考えられ、そのようなデータの予測にもこの手法を生かしていきたい。

また、今後の課題としては、予測精度を向上させるため、モデルの構造やパラメータ更新手法を見直すことや、変動要因の選択を人間の知見を前提とせず、自動抽出を行うような手法<sup>5)</sup>を検討することなどが挙げられる。

## 参考文献

- 1) Ibrahim, Rouba; Ye, Han; Ecuyer, Pierre L; Shen, Haipeng. Modeling and forecasting call center arrivals: A literature survey and a case study. International Journal of Forecasting. 2016, Vol. 32, No. 3, p. 865-874.
- 2) 伊藤稔. コールセンターにおけるインバウンド予測. UNI-SYS TECHNOLOGY REVIEW. 2005, Vol. 87, p. 293-304.
- 3) G.ペトリス, S.ペトロネ, P.カンパニョーリ, 和合肇, 萩原淳一郎. Rによるベイジアン動的線型モデル. 朝倉書店, 2013, 272p.
- 4) Chromy, Erik; Misuth, Tibor; Kavacky, Matej. Erlang C Formula and its Use in the Call Centers. Advances in Electrical and Electronic Engineering. 2011, Vol. 9, No. 1, p. 7-13.
- 5) 田原琢士, 王軼諷, 山浦佑介, 大西健司. コールセンターを対象とした業務量予測に関する研究. 人工知能学会全国大会論文集. 2017, Vol. JSAI2017, p. 1L14.

## 執筆者紹介



山本 究 Kiwamu Yamamoto

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ ソリューション技術部  
専門：情報工学



幡山 五郎 Goro Hatayama

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ ソリューション技術部  
専門：数理物理学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# 3

## 新たな成長領域を 生み出す技術



# ピン球の回転速度を考慮することで高精度な返球が可能な卓球ロボットシステムの開発

浅井 恭平・中山 雅宗・八瀬 哲志

我々は、人と機械の関係の未来像「人と機械の融和」を表現するため、人とロボットでラリーというインタラクションができる卓球ロボット“フォルフェウス”を開発している。

卓球ロボットが卓球ボール（以下、ピン球）を返球するには、返球前後のピン球の軌跡予測及び返球時のラケットの動作計画をする必要がある。特に、ピン球の回転速度による軌跡への影響が大きいことから、卓球ロボットがより高精度に返球するためには、ピン球の回転速度の軌跡への影響を考慮する必要がある。我々の従来システムでは産業用カメラ（80fps）を用いており、回転速度を直接計測することが困難なため、ピン球の回転速度の影響を考慮することができていなかった。

そこで本稿では、産業用カメラを用いて回転速度を推定する手法を提案し、回転速度を考慮した返球前後のピン球の軌跡予測及び返球時のラケットの動作計画により高精度な返球を実現した卓球ロボットシステムの開発結果について報告する。回転速度を考慮したことにより、従来システムに比べて目標返球位置に対する返球精度が36.5cm向上し、回転の掛かったピン球に対してより高精度な返球ができるようになった。それにより、従来システムよりもラリーが続くやすくなったため、より多様な人と「融和」できる卓球ロボットを実現できた。

## The Ping Pong Robot to Return a Ball Precisely ~ Trajectory Prediction and Racket Control for Spinning Balls ~

*Kyohei Asai, Masamune Nakayama, Satoshi Yase*

We are developing a ping-pong robot “FORPHEUS” that can play table tennis with humans representing the harmony between humans and machines.

In order to accurately return the ping-pong ball, the robot must perform the following tasks: predicting the trajectory of the ball before and after hitting the racket and determining the movement of the racket (velocity and direction to return the ball).

The spin of the ball must be taken into account in those tasks because it has a major impact on the ball trajectory and the racket movement. However, we could not consider the effect of the ball spin because a standard industrial camera (80 fps) which doesn't have sufficient frame rate is being used.

Therefore, we propose a new method to estimate the rotational velocity of the ball with a standard frame rate camera and how to improve the accuracy of the return point. For the sake of the proposed method, the ping-pong robot can return 36.5 cm more accurately than the conventional one. As a result, human-machine harmony increases, especially for ping-pong beginners.

### 1. まえがき

我々は、オムロンの考える人と機械の関係の未来コンセプト「人と機械の融和」を表現するため、人とロボットがラリーというインタラクションができる卓球ロボット“フォルフェウス”を2013年から開発している<sup>1,2)</sup>。「人と機械の融和」とは、人と機械の関係性の進化を意味している。それは、機械が人の作業を代替するという関係から、機械と

人が協調し合って作業する関係となり、さらには、機械が人の状態や行動を理解し、能力を引き出すという関係に進化するというコンセプトである。このコンセプトを達成するためには、大きく以下2つの機能が必要である。

- ・人の能力を認識し、「人より少し強い」ラリーを実現するための戦略を考える機能
- ・その戦略を表現しうる返球精度

ロボットが卓球を行うためには、高速高精度なピン球のセンシング技術やラケットの動作計画技術、高精度なコントロール技術が要求されるため、ロボティクスの研究題材として古くから研究されている<sup>3)</sup>。特に近年では、高精度な返球をするための、ラケットの動作計画技術が盛んに研究されている。回転したピン球を返球するため、回転速度の影響を考慮した空力モデルや衝突モデルを用いたモデルベースのアプローチ<sup>4),5)</sup> や、ラケットの動作とピン球の軌跡の因果関係に着目した学習ベースのアプローチ<sup>6)</sup> などが提案されている。さらに、人のような柔軟なラケットの動作を実現するため、人によるダイレクトティーチングで生成された動作を強化学習することで返球精度を高めるアプローチ<sup>7)</sup> や、トルクの最適性を制約条件に組み込んだ最適制御問題のアプローチ<sup>8)</sup> などが提案されている。

我々の卓球ロボットシステムは、文献<sup>4)</sup>を参考とし、「人と機械の融和」のコンセプトの実現性を伝えるため特殊な機器は用いず自社製品を中心とした工場向けの一般産業用機器で構築している。そのため、文献<sup>4),9)</sup>で提案されている超高速カメラ(900fps)を用いて回転速度を計測する手法は、我々が採用した一般向け産業用カメラ(80fps)では適用が困難であった。結果、従来の我々の卓球ロボットはピン球の回転速度を考慮せずに軌跡予測を行っており、目標返球位置に対する返球精度が低い状態であった。また、返球の際のラケットの動作計画においては、文献<sup>4)</sup>及び我々の従来の卓球ロボット共に回転速度を考慮できておらず、回転速度に合わせたラケットの動作ができていないため、更に返球精度の低下を招いていた。

一方、人の目の認識速度は、一般的に我々が用いているカメラ(80fps)と同程度と言われている。しかし、人はピン球の回転速度に応じて打ち方や球種を使い分け、高精度に返球することができている。それは、人がピン球の軌跡から回転速度を推定することができ、その回転速度の推定に応じたラケットの動作を行っているからである。そこで我々は、産業用カメラを用いてピン球の軌跡から回転速度を推定する手法を新たに考案した。

本稿では、「人と機械の融和」を達成するための機能の内、後者の「人とのラリーの中で人より少し強い」を表現するために開発した、ピン球の回転速度を考慮することで高精度な返球が可能な卓球ロボットシステムに提案する。回転速度を推定する手法を用いることで、返球前後のピン球軌跡予測及び返球時のラケットの動作計画に対して回転速度を考慮することができるようになり、高精度な返球が実現した。

以下、第2章で卓球ロボットのシステム構成について紹介し、第3章で卓球ロボットの返球原理について説明する。第4章にて、回転速度の推定を行わない従来システムを紹介し、第5章にて提案の回転速度の推定技術について説明する。第6章でその有効性を検証し、最後に第7章にて、まとめとして今後の展望について述べる。

## 2. 卓球ロボットのシステム構成

卓球ロボットのシステム構成を図1に示す。オムロンで開発している卓球ロボットは、産業用ロボットなど産業用途として一般的に使われる機器を使用している。ピン球の3次元位置を計測するカメラには、製品検査などで使用される80fps、Quad-VGAの産業用カメラを用いている。またロボットには、ワークの高速搬送などに使用されるパラレルリンクロボットを用いている。ロボット及びラケット駆動部には、ベルトコンベアの駆動などで使用されるサーボシステムを用いており、PLC(Programmable Logic Controller)を用いて1ms周期で制御位置指令の更新を行っている。



図1 卓球ロボットのシステム構成

## 3. 卓球ロボットの返球原理

本章では、卓球ロボットの返球原理について説明する。

### 3.1 返球前のピン球の軌跡予測

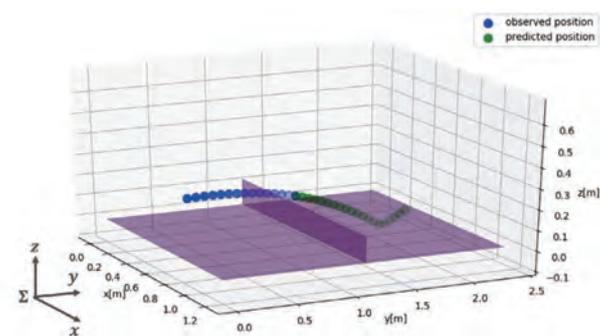


図2 返球前のピン球の軌跡予測の概念図

図2に返球前のピン球の軌跡予測の概念図を示す。軌跡予測は、バウンド後から時刻 $t$ にて計測されたピン球の位置に基づいて、ロボットの打点付近までの軌跡を予測する。一般にピン球は単純な放物運動ではなく、ピン球の速度に起因するDrag力や回転速度に起因するMagnus力などの空力特性によって非線形運動することが知られている<sup>3)</sup>。ピン球にかかる空力を図3に示す。この時、ピン球は(1)式の動力学モデルに従って挙動する。

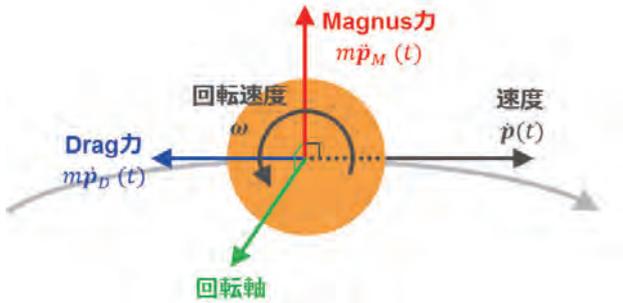


図3 ピン球にかかる空力

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\mathbf{p}}(t) &= -m\mathbf{g} - m\dot{\mathbf{p}}_D(t) + m\dot{\mathbf{p}}_M(t) \\
 &= -m\mathbf{g} - C_D\|\dot{\mathbf{p}}(t)\|\dot{\mathbf{p}}(t) + C_M\{\dot{\mathbf{p}}(t) \times \boldsymbol{\omega}\}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで、 $\mathbf{p}(t), \dot{\mathbf{p}}(t), \ddot{\mathbf{p}}(t)$  はそれぞれ時刻  $t$  における図2の座標系でのピン球の位置 [m]、速度 [m/s]、加速度[m/s<sup>2</sup>]を表す。また、 $\boldsymbol{\omega}$  はピン球の回転速度 [rad/s] を表している。ここで  $x, y, z$  軸は図2に図示した通りである。つまり、人からロボットに向かっているピン球に  $x$  軸周りの回転速度  $\omega_x = -100$  [rad/s] の回転がかかっているとすると、それは強いトップスピンがかかっているピン球である。 $m\dot{\mathbf{p}}_D(t)$  はピン球に加わる Drag 力を表しており、進行方向とは反対方向に発生する。また  $m\dot{\mathbf{p}}_M(t)$  はピン球に加わる Magnus 力を表しており、進行方向と回転軸の外積方向に発生する。 $m$  はピン球の質量 [kg] を、 $C_D, C_M$  はそれぞれ Drag 定数、Magnus 定数を表している。(1) 式はピン球の位置に関する2階非線形常微分方程式である。この常微分方程式を繰り返し解くことで、軌跡を予測することができる。

**3.2 返球後のピン球の軌跡予測** 卓球ロボットからの返球後のピン球の軌跡予測では、返球目標位置からピン球の軌跡を逆算し、返球直後のピン球の速度を決定する。図4に返球後のピン球の軌跡予測の概念図を示す。返球時の打点位置  $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_1$ 、目標返球位置  $\mathbf{p}(T) = \mathbf{p}_2$ 、さらに返球直後の回転速度  $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_1$  を境界値条件とし、返球後のピン球の速度  $\dot{\mathbf{p}}(0) = \mathbf{v}_1$  を決定する。ただし、本稿では返球後のピン球の回転速度は減衰しないものとする。ここで、目標返球位置への到達時間を  $t=T$  とする。

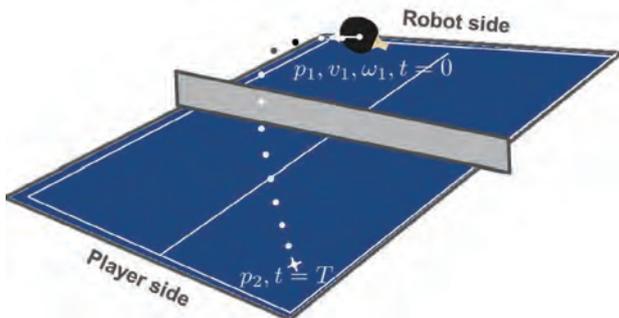


図4 返球後のピン球の軌跡予測

$\mathbf{v}_1$  は、(1) 式のピン球動力学モデルの逆問題を解くことで求めることができる。

**3.3 返球時のラケットの動作計画** 図5に返球時のラケットの動作計画の概念図を示す。返球時のラケットの動作計画では、返球後の軌跡予測によって決定したピン球の速度で返球できるように、返球時のラケットの速度  $V$  [m/s] と姿勢  $\alpha, \beta$  [rad] を決定する。

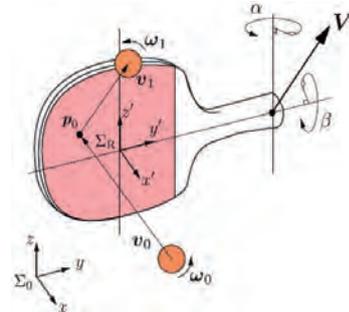


図5 返球時のラケットの動作計画の概念図

ラケットによるピン球の返球は、(2) 式のラケット-ピン球衝突モデルで定式化できる。

$$\begin{bmatrix} R^T & 0 \\ 0 & R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 - \mathbf{V} \\ \boldsymbol{\omega}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{vv} & A_{v\omega} \\ A_{\omega v} & A_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^T & 0 \\ 0 & R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 - \mathbf{V} \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix}
 \tag{2}$$

ここで、 $\mathbf{v}_0, \boldsymbol{\omega}_0, \mathbf{v}_1, \boldsymbol{\omega}_1$  はそれぞれ返球前後のピン球の速度及び回転速度を、 $\mathbf{V}$  は返球時のラケットの速度を表している。また、 $R$  は図2で示した座標系  $\Sigma_0$  から図5のラケットの座標系  $\Sigma_R$  に変換する回転行列を、 $A_{vv}, A_{v\omega}, A_{\omega v}, A_{\omega\omega}$  は返球前後のピン球の速度と回転速度の相互変換行列を表しており以下の式で表現される。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$A_{vv} = \begin{bmatrix} -k_e & 0 & 0 \\ 0 & 1 - k_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 - k_v \end{bmatrix}$$

$$A_{v\omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_v r \\ 0 & -k_v r & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{\omega v} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_\omega r \\ 0 & k_\omega r & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{\omega\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - k_\omega r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - k_\omega r^2 \end{bmatrix}$$

$k_e$  はラケットとピン球の反発係数を、 $k_v, k_\omega$  はそれぞれピン球とラケットの相対速度、回転速度によって発生する摩擦係数を表す。

(4) 式を  $\mathbf{V}, \alpha, \beta$  について解くことで、返球時におけるラケットの速度と姿勢を求めることができる。

3.1~3.3節の問題を解くことで、卓球ロボットは目標返球位置に対してピン球を高精度に返球することができる。

## 4. 従来システム

本章では、従来システムで用いた回転速度を考慮しない ( $\omega = [0, 0, 0]^T$ ) 場合の3.1~3.3節の卓球ロボットからの返球について説明する。

**4.1 回転速度を考慮しない返球前の軌跡予測** ピン球の動力学モデルは  $\omega = [0, 0, 0]^T$  とすると、(3) 式のようになる。

$$m\ddot{\mathbf{p}}(t) = -m\mathbf{g} - C_D \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| \dot{\mathbf{p}}(t) \quad (3)$$

この動力学モデルを繰り返し解くことで、回転速度を考慮しない場合の軌跡予測を行う。

**4.2 回転速度を考慮しない返球後の軌跡予測** ピン球の動力学モデルを、 $\omega = [0, 0, 0]^T$  とし、解析的に解くため文献4で提案されている下記に示す近似動力学モデルを用いた。

$$\begin{cases} \ddot{p}_x(t) = -D|\dot{p}_x(t)|\dot{p}_x(t) \\ \ddot{p}_y(t) = -D|\dot{p}_y(t)|\dot{p}_y(t) \\ \ddot{p}_z(t) = -g \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $D = C_D/m$ である。(4) 式は打点位置  $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_1$  及び目標返球位置  $\mathbf{p}(T) = \mathbf{p}_2$  を境界値条件として解析的に解くことができ、返球後のピン球速度  $\dot{\mathbf{p}}(0) = \mathbf{v}_1$  は (5) 式で求められる。

$$\begin{cases} v_{1x} = \frac{\exp(D|p_{2x} - p_{1x}|) - 1}{DT} \\ v_{1y} = \text{sgn}(p_{2y} - p_{1y}) \frac{\exp(D|p_{2y} - p_{1y}|) - 1}{DT} \\ v_{1z} = \frac{1}{2}gT + \frac{p_{2z} - p_{1z}}{T} \end{cases} \quad (5)$$

**4.3 回転速度を考慮しない返球時のラケットの動作計画** (2) 式を、回転速度を  $\omega_1 = \omega_2 = [0, 0, 0]^T$  とすると下記となる。

$$R^T(\mathbf{v}_1 - \mathbf{V}) = A_{vv}R^T(\mathbf{v}_0 - \mathbf{V}) \quad (6)$$

(6) 式を  $\mathbf{V} (= [V_x, V_y, V_z]^T)$ ,  $\alpha, \beta$  について解くことで、ロボットが返球する際のラケットの速度及び姿勢を求めることができる。ただし、3次元座標系の3つの式に対して求めたい変数が5つあるため、一意に求めることができない。そこで、返球位置精度を高める際に影響の少ない動作であるラケットの上方向への振り上げ速度  $V_z$ 、及びラケットの仰角  $\beta$  の2変数に対して  $V_z = 0, \beta = 0$  という制約条件を追加して (6) 式を解く。

以上の数値計算を用いて、回転速度を考慮しない条件で、ロボットと人とのラリーを実現している。

## 5. 提案システム

本章では、目標返球位置に対し、より高精度な返球を実現するため、ピン球の回転速度の推定手法及び回転速度を考慮した返球前後の軌跡予測、返球時のラケットの動作計画について提案する。

**5.1 回転速度を考慮した返球前の軌跡予測** 回転速度を考慮した軌跡予測を行うには、(1) 式のMagnus項 ( $C_M\{\dot{\mathbf{p}}(t) \times \boldsymbol{\omega}\}$ ) を含む動力学モデルを繰り返し解く必要がある。そこで本節では、人が返球したピン球の時刻  $t$  における回転速度  $\boldsymbol{\omega}$  を、計測する手法ではなく、推定する手法について説明する。

回転速度を推定する手法の概念図を図6に示す。バウンド後から現在時刻まで撮像した  $N$  点全てのピン球の計測点において (1) 式により対象とした計測点以後の予測点を求め、実際の計測点との平均誤差の合計値を評価関数  $E$  とし、評価関数を最小化する回転速度  $\boldsymbol{\omega}$  を求める最適化問題を解く。

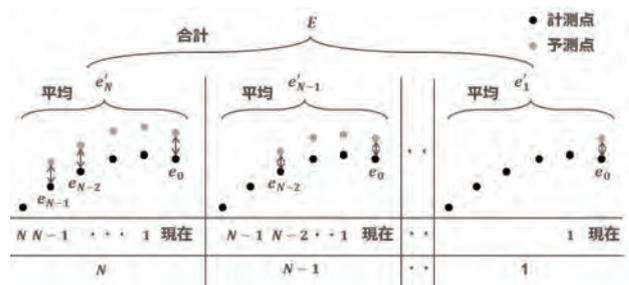


図6 回転速度推定の概念図

評価関数は (7) 式になる。

$$E(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^N e'_i(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{i-1} \frac{1}{i} e_j(\boldsymbol{\omega}) \quad (7)$$

ここで、 $e_j (j = 1, 2, \dots, i-1)$  は現在時刻から  $j$  点前の計測点において予測した現在時刻までの予測点と実際の計測点の誤差を表し、 $e'_i (i = 1, 2, \dots, N)$  は  $i-1$  点前の計測点から現在までの全ての  $e_j$  を平均したものを表す。この  $N$  個の誤差平均値  $e_j$  を合計したものが評価関数  $E$  である。この評価関数  $E$  を最小化する回転速度  $\boldsymbol{\omega}$  を推定することで、回転を考慮した軌跡予測を行うことができる。

本手法を採用した理由について述べる。回転速度は、計測点と予測点との差異を最小化することで求めるが、ピン球速度の推定精度が回転速度の精度に大きく起因する。それは、予測点を求める際に、ピン球の速度を初期条件として (1) 式を繰り返し解くからである。さらに、ピン球の速度は2点の計測点の前進差分で求めるため、速度の精度

は計測点の計測精度に依存する。そのため、過去のすべての計測点から予測した予測点の誤差を最小化する回転速度を採用することで精度を向上できる。

**5.2 回転速度を考慮した返球後の軌跡予測** 初めに、卓球ロボットからの返球後のピン球の回転速度 $\omega_1$ の決め方について考える。返球後のピン球の回転速度を決めることは、ロボットが返球する球種を決定することと同義である。例えば、 $\omega_{1x} > 0$ の値を設定した場合、ロボットはトップスピンをかけた返球を打つことになる。また、 $|\omega_{1z}| > 0$ とすると、ロボットはサイドスピンをかけて返球することになる。このようにして、ロボットにどういった返球をさせたいかによって、 $\omega_1$ を設定することになる。

次に、ピン球の動力学モデルの逆問題を解くことを考える。(1)式は非線形常微分方程式であるため、解析的に解くことは困難である。したがって、数值的に解くため、卓球ロボットから速度 $v_1$ で返球されたピン球が目標返球位置に到達する時間 $T$ 秒後の予測返球位置を $p'_2$ としたときに、目標返球位置 $p_2$ と予測返球位置 $p'_2$ との誤差を最小化する速度 $v_1$ を求めるこのとき、評価関数 $E$ は(8)式に定式化される。

$$E(v_1) = \|p_2 - p'_2\|^2 \quad (8)$$

この評価関数 $E$ を最小化する $v_1$ を求めることで、正確な返球速度を求めることができる。

**5.3 回転速度を考慮した返球時のラケット動作計画**  
5.1、5.2節で求めた返球直前のピン球の速度 $v_0$ 及びピン球の返球速度 $v_1$ を(4)式に代入し、 $V, \alpha, \beta$ のすべての変数を決定することで、目標返球位置に対して高精度な返球をすることができる。

## 6. 実機検証

本章では、5章で提案したシステムの有効性を確認した結果について述べる。

**6.1 実験概要・結果** 提案システムの有効性を、卓球ロボットからの実際の返球位置と目標返球位置との誤差を従来システムと比較することで確認した。なお、提案システム及び従来システムの両者に対し、軌跡予測誤差の影響による返球ミス(空振りやラケットのエッジにあたるなど)は外れ値とした。

図7に検証結果を示す。提案システム及び従来システムそれぞれについて、実際にロボットが約100球を目標返球位置( $p_2 = [0.6, 0.5, 0]^T$ )に向かって返球したときのピン球の到達点を表している。なお、提案システムにおいては、返球の回転速度 $\omega_1 = [50, 0, 0]^T$ と設定している。図7に示した通り、提案システムの方が精度高く目標返球位置に返球できている。ここで、 $y = 0$ が卓球台の端であるので、 $y < 0$ の領域は、卓球台をオーバーしていることを表している。

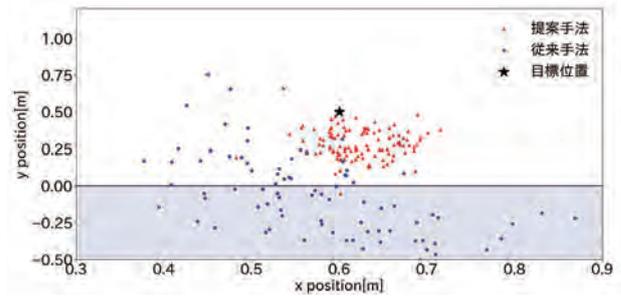


図7 検証結果

目標返球位置と実返球位置の距離を誤差とした時、従来システムにおける誤差平均59.0cm、標準偏差23.3cmに対し、提案システムにおける誤差平均22.5cm、標準偏差0.9cmとなり、目標返球位置に対する返球精度が向上したことが分かる。

初心者に対して人の能力を高めるラリー(例えば、フォアハンドとバックハンドの使い分け、安定的にフォアハンドを誘発させるなど)をする場合、ロボットは最低限でもミスせずに左右に打ち分ける性能を有する必要がある。すなわち、卓球台の大きさ(横幅が152.5cm、ネットまでの長さ137.0cm)を考慮すると、ロボットの返球精度は誤差平均が30cm程度である必要がある。したがって、実験結果より初心者に対して人の能力を高めるラリーを達成する場合十分な性能であると言える。

**6.2 考察** 回転速度を考慮した返球を行うことで、目標返球位置に対する返球精度が向上したが、提案システムでも目標返球位置に対する誤差が存在する。これは、以下が原因と考えられる。卓球の中級者(一般競技者レベル)に対して人の能力を高めるラリーを実現する場合、これらの問題を解決する必要がある。

- ①ピン球の位置計測精度
- ②ラケット-ピン球衝突モデルの精度
- ③ロボットの制御性能

①に関しては、ピン球の位置計測の誤差によって(7)式の回転速度の推定精度が決定されるためであり、更に計測精度の改善が必要である。②に関しては、本稿ではピン球とラケットとの衝突を(2)式のように線形モデルで表現している。しかし、ラケットにはラバーが貼ってあるため、ピン球とラケットとの衝突は非線形な現象となる。そのため、線形モデルでは返球時のピン球の速度に目標値との誤差が発生してしまう。最後に、③に関しては、ロボットの可動域や加速度などの制約によって目標とするラケットの速度を実現できないことがある。そのため、ロボット手先の構造を見直すなど、必要な速度を出せる機構にする必要がある。

## 7. まとめ

本稿では、80fpsの産業用カメラを用いた回転速度の推定手法及びその結果を用いた返球前後のピン球の軌跡予測と返球時のラケット動作計画により、目標返球位置に対して高精度な返球を実現した卓球ロボットシステムを提案した。

今後は、より高度な卓球動作を実現するため、6.2節で述べた課題を解決し、様々な球種に対してより高精度に返球できるようにし、それらの球種を相手に応じて戦略的に使い分ける技術の構築を目指す。また、ピン球だけでなく人の動作計測技術を構築することによって、人の返球時の動作から人が打つ前に回転速度の推定や軌跡予測を実行することで、さらに高度な卓球動作の実現を目指す。これらの技術を用い、更に人の成長を加速させる「人と機械の融和」の姿を世の中に発信していきたい。

## 参考文献

- 1) 山田圭佑: 卓球ラリーロボット—人と機械の融和を目指して—, 電気学会誌, Vol. 137, No. 2, pp. 81-84, 2017
- 2) 仁科有貴, 諏訪正樹, 川出雅人: 卓球ロボットにおける画像センシング技術・AI技術活用, O plus E, Vol. 39, No. 12, pp. 1195-1200, 2017
- 3) R.L. Anderson: A Ping-Pong Player: Experiment in Real-Time Intelligent Control, MIT Press, 1988
- 4) C. Liu, Y. Hayakawa, and A. Nakashima: Racket Control for a Table Tennis Robot to Return a Ball, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 4, pp. 259-266, 2013
- 5) Y. Zhao, R. Xiong, Y. Zhang: Model Based Motion State Estimation and Trajectory Prediction of Spinning Ball for Ping-Pong Robots using Expectation-Maximization Algorithm, Vol. 87, No. 3-4, pp. 407-423, 2017
- 6) Q. Wang, Z. Sun: Trajectory Identification of Spinning Ball Using Improved Extreme Learning Machine in Table Tennis Robot System, 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, pp. 551-554, 2015
- 7) Y. Huang, B. Scholkopf, J. Peters: Learning optimal striking points for a ping-pong playing robot, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2015-Decem, pp. 4587-4592, 2015
- 8) O. Koç, G. Maeda, J. Peters: Online optimal trajectory generation for robot table tennis, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 105, pp. 121-137, 2018
- 9) C. Liu, Y. Hayakawa, A. Nakashima: An on-line algorithm for measuring the translational and rotational velocities of a table tennis ball, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Vol. 5, No. 4, 2011

## 執筆者紹介



浅井 恭平 Kyohei Asai  
技術・知財本部  
知能システム研究開発センタ  
専門: 機械学習, ロボット工学



中山 雅宗 Masamune Nakayama  
技術・知財本部  
センシング研究開発センタ  
専門: 画像処理, 機械力学



八瀬 哲志 Satoshi Yase  
技術・知財本部 組込研究開発センタ  
専門: 電気電子工学

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

## 小型・高密度実装されたセンサモジュールの 発熱影響補正技術

元木 悠平・上田 直重・三笥 佳代

近年、あらゆる“モノ”同士がネットワークにより繋がり合う「IoT (Internet of Things)」が注目されている。さまざまな状態をセンシングし、取得したデータを分析・活用することで新たなサービス創造が期待されるIoTでは、従来型の単機能センサではなく、センシングした様々な物理量を上位システムで扱いやすい形に処理し、内蔵する通信機能でデータを送信する高機能なセンサモジュールが活用される。そこでは超小型で設置場所を選ばず、どのような環境に設置されても外乱の影響を受けずに正確な情報を出力できることが要求されるが、内蔵するデバイスの発熱や周囲環境の影響により、その実現は容易ではなかった。

そこで、内蔵する2つの温度センサを用い、検出した熱流から発熱影響を補正する技術をセンサモジュールに応用することで、複数の半導体デバイスを小型・高密度実装しながら、内部発熱や外乱の影響を受けない世界最小クラスの複合型IoTセンサの開発に成功した。

## The thermal effect compensation technology for highly integrated sensor modules

*Yuhei Motoki, Naotsugu Ueda and Kayo Mitoma*

In recent years, “IoT (Internet of Things)”, in which all “things” are connected by a network, has attracted attention. In IoT, advanced sensing devices that can process and transmit sensing data are being expected in order to create new services by sensing various states and analyzing acquired data.

They are required to be able to output accurate information without being affected by disturbances regardless of the installation environment. However, the realization was not easy due to thermal effect from highly integrated embedded devices, and external equipment at the installation locations.

We have developed the world smallest IoT sensor that is not affected by the thermal effect from either internal or external heat source by correcting unwanted disturbances utilizing thermal effect compensation technology from the heat flux detected by two built-in temperature sensors.

### 1. まえがき

近年、IoT (Internet of Things) は社会における重要な役割を担うものとして期待されている<sup>1)2)3)</sup>。インターネットにつながるデバイスは2020年には500億個に達し、そこに必要とされるセンサは年間1兆個の生産量となるとも予測されている。

IoT社会におけるセンサ<sup>4)5)</sup>は、さまざまな機器とシームレスに連携し、簡単にデータを取得できる使い勝手が要求される。これは上位機器との接続性が良いことや、センサから正確な情報を出力するというだけでなく、周囲の設置環境や、設置場所を気にせず使用できることも同時に求められることを意味している。このようにアプリケーションの多様性をもたらす使い勝手の良いセンサの実現に

は、小型で設置場所を選ばず、外部環境の影響を受けないセンサであることが必要である。

このような機器小型化の要請からMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進歩とそれを応用したMEMSセンサはIoTデバイスに欠かせない存在として期待を集めている。MEMSとは、半導体プロセスを応用して作られる微小な電気機械システムの総称で、小さく、かつ高感度なセンシングと量産性を両立し、IoTに適したセンサモジュールのコア部品として、社会のさまざまな側面で、広くその応用が進んでいる。その期待される応用分野は、社会インフラや個人の生活に至るまで大幅に拡大し、その対象は、多岐にわたっており<sup>6)</sup>、MEMS技術の発展は組込み先機器自体の小型化に大きく貢献するものである。

一方でセンサモジュールを小型化する際に問題となるの

連絡先：元木 悠平 [yuhei.motoki@omron.com](mailto:yuhei.motoki@omron.com)

はセンサやその他部品による自己発熱である。一般にセンサモジュールにはヒーター搭載型のセンサや電源部品など、発熱する部品が多数実装されており、小型化するほどその影響度は大きくなる。そのため、パッケージサイズの小型化には熱対策が必要不可欠である。

また、対象となる物理量やセンサの検出方式によっては設置場所の温度環境も検出結果に影響を及ぼす。一定の環境で、特定の機器としか接続できず、環境的に安定した設置場所では正しい出力を行えない状態ではその応用範囲が著しく限定されてしまう。

そこで、我々はこれらの課題を解決するため、内蔵部品や外部環境の発熱影響を補正するアルゴリズムを小型機器用の補正技術として内蔵するMCU (Microcontroller) に実装することで、IoT用途に特化した小型のセンサモジュールを開発した。

本稿では、開発したセンサモジュールの概要と発熱影響を補正する温度補正アルゴリズムについて述べる。

## 2. 複合型IoTセンサ

**2.1 構成** 今回開発したセンサモジュールは温度・湿度・気圧・照度・音圧レベル・3軸加速度・VOC (Volatile Organic Compounds) を計測できる7つのセンサ素子を同一基板上に高密度実装したものを業界最小クラスの小型パッケージ (横：29.1mm、縦：14.9mm、厚み：7mm) に組み込み、複数のセンサデータを同時に計測できるセンサモジュールである。IoTセンサの外観を図1に示す。PCやゲートウェイのような上位機器とのデータ通信には、シリアルバスインターフェース規格として広く普及したUSB通信だけでなく、近距離無線規格であるBluetooth® low energy (以下BLE) にも対応しており、様々な用途や場所での環境情報収集が可能な複合型のIoTセンサである。

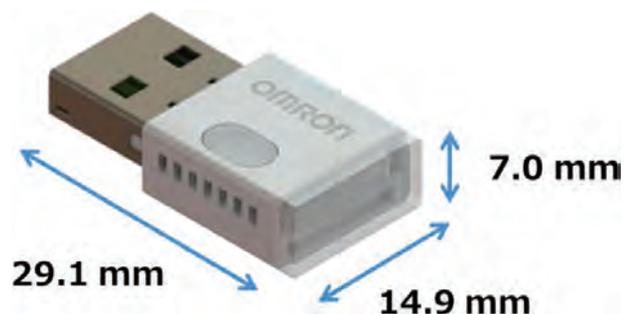


図1 IoTセンサの外観と構成図

本センサモジュールのブロック図を図2に示す。BLEを搭載したSoC (System on Chip) を採用し、内部のメモリ領域にプログラムを書き込むことでホストMCUを使用しない構成とした。また、RF (Radio Frequency) 機能とMCUの統合によるワンチップ化は、部品削減に伴う小型化につながっている。

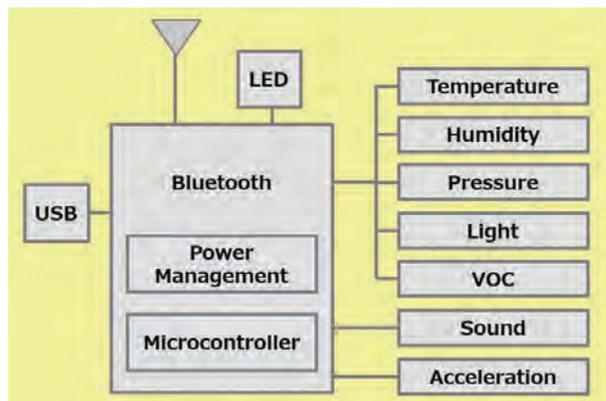


図2 IoTセンサブロック図

**2.2 特長** 本センサモジュールの特徴は、複数のセンサと通信機能、高機能アルゴリズムを実装しながら、超小型パッケージを実現した点にある。電源供給を必要とし、VOCセンサを内蔵する従来のIoTセンサ (横：210mm、縦：148mm、厚み：12mm) と比較し、体積比で約1/100のパッケージサイズを実現している。また、本センサモジュールは複数のセンサデータを組み合わせて、センサデータをユーザーにとって価値のある情報に変換する独自の高機能アルゴリズムを実装している。その中の1つとして、熱中症警戒度や不快指数が挙げられる。これは温度データと湿度データを用いて演算される指標で主に子供やお年寄り、ペットなどの見守り活用に期待される。このように、複数のセンサデータを同時に収集し、組み合わせることで新たな価値データの創出を可能としている。

**2.3 従来技術の課題** 前項で述べたように、熱中症警戒度や不快指数は温度データと湿度データから演算されるため、周囲環境の正確な温度、湿度を得る必要があるが、高密度実装、小型パッケージにした複合型IoTセンサでは、USB接続する外部機器の発熱や実装部品の自己発熱の影響を受けやすく、正確な環境温度を検出できないという課題があった。従来の温度センサでは、熱源から分離する、または別の温度センサを参照するというのが基本的な考え方であり、小型化が難しく、搭載するセンサも発熱が小さいものに制約されていた。しかしながら本センサモジュールでは、これらの課題を解決するため、熱流束センサ<sup>8)</sup>の原理を応用した温度補正技術を確立することで、正確な環境温度検出を実現した。

## 3. 発熱影響補正技術

**3.1 発熱要因** 温度出力はセンサデバイスにおける基本的な検出物理量として高い精度の出力を求められるが、2つの要因により出力誤差が拡大する。1つはデバイスに内蔵する電子部品による自己発熱であり、もう1つはUSBで接続する先の外部機器の発熱である。USB接続機器からの発熱影響はPCやACアダプタなど接続機器自体の温度上昇によって異なり、温度センサ出力に4~8°C程度の誤差を生む原因となる。

また、VOCセンサ等の一部のセンサは内部にヒーターを内蔵しており、その性質上、熱平衡状態を崩す発熱源となり得る。そのため、これらを小型集積し、高い出力精度を維持するには発熱影響を排除するための温度補正アルゴリズムの確立が必要となる。

**3.2 補正原理** 本デバイスは直線的に配置された2つの温度センサの先に発熱源が配される構造<sup>7)</sup>であり、この2つの温度センサの出力差に基づく熱流から環境温度を推定している。本デバイスの特徴は、発熱量の大きい内蔵部品による自己発熱と接続先機器による外部発熱の2つの発熱源を温度センサから見て1つの熱源とみなせるよう配置している点にある。本温度補正アルゴリズムは熱源に対して直線的に配置した2つの温度センサの出力差に基づいて補正を行うため、等価的に複数の発熱源を1つの発熱源として扱うことで、自己発熱と外部発熱の両方に対し、同一関係式に基づいた温度補正を可能としている。図3に本デバイスのセンサ配置図と熱等価回路を示す。

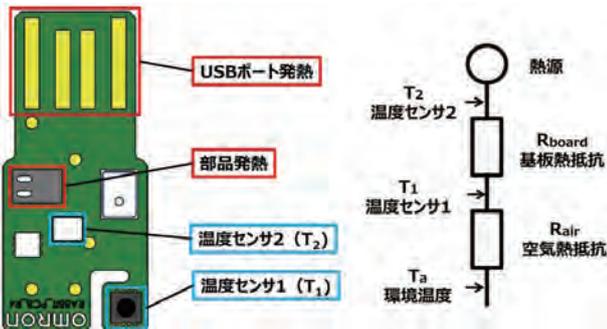


図3 基板上的のセンサ配置図と熱等価回路

熱等価回路は熱を電気に見立てたものであり温度が電圧、熱流が電流、熱抵抗が電気抵抗で表されており、次の関係が成り立つ。

$$T_a = -\frac{R_{air}}{R_{board}} (T_2 - T_1) + T_1 \quad (1)$$

ここで、 $R_{air}$  が空気中の熱抵抗、 $R_{board}$  が基板の熱抵抗であり、これらの値を予め実験により導出しておくことで、2つの温度センサの出力値  $T_1$ 、 $T_2$  から環境温度  $T_a$  を算出できる。

さらに、使用する2つの温度センサは基板上に形成したスリットにより、基板上での伝熱経路を限定し、また、筐体構造により隔壁を設け、空間的にも隔離した構造とすることで、本補正原理に対する、自然対流などの外乱の影響を抑制し、関係式の独立性を高めた。

**3.3 実験結果** 本温度補正アルゴリズムの有効性を示すため、USB接続機器と環境温度が変化しても補正が有効であることと、自然対流の影響を受けるいかなる傾き状態に対しても出力値に影響がないことを実験により検証した。

(1) 接続機器発熱影響

周囲の温湿度環境を一定 (25°C、50%) にした状態で、5W~12Wの出力範囲の異なる複数のACアダプタ (Port1~

Port7) に本センサモジュールを接続し、温度出力値を測定した結果を図4に示す。温度補正前の温度出力には約4~8°Cの誤差がみられたが、温度補正後の温度出力はいかなる接続先機器に対しても基準温度計 (VAISALA・MI70) からの誤差を±1°C以内に抑えられることを確認した。

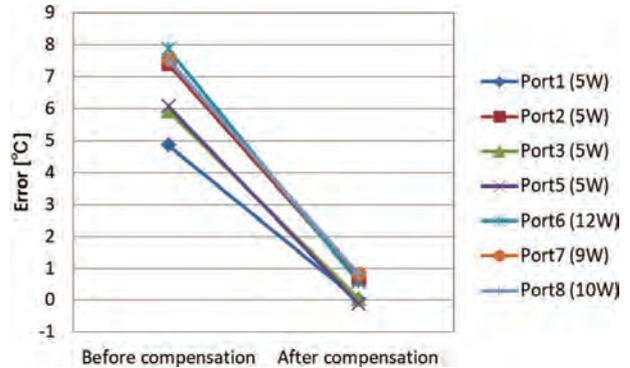


図4 接続機器による発熱影響

(2) 環境温度変動影響

本温度補正アルゴリズムは常温環境下だけでなく、周囲環境温度が変化しても同様に発熱の影響を補正可能であることが求められる。そこで接続先のACアダプタを同一とし、恒温槽を用いて環境温度を変化させ、 $n=3$ のセンサ (sample1~3) に対し、その際の温度出力値を測定した。温度補正前と温度補正後の基準温度計との誤差を図5と図6に示す。温度補正アルゴリズムを適用することで一般的なモジュール型デバイスの使用温度範囲である-10°C~70°Cの温度範囲で基準温度計からの誤差を±2°C以内に抑えられることを確認した。

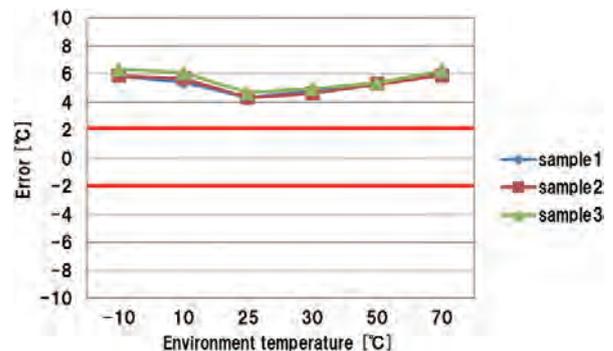


図5 温度補正前の基準温度計との誤差

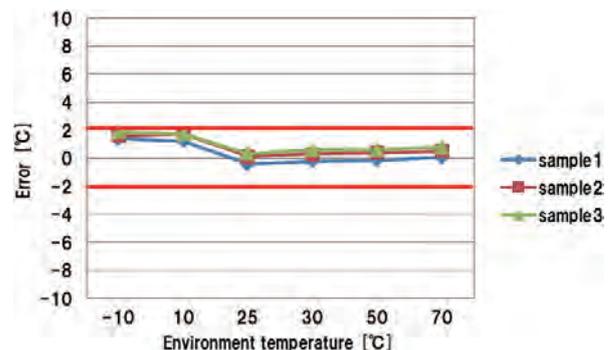


図6 温度補正後の基準温度計との誤差

### (3) 設置角度影響

本デバイスの設置向きは接続する外部機器のUSBポートの向きに依存するため、どのような向きで接続されても傾きによる温度影響がないことが必要となる。そのため、接続先のACアダプタを同一とし、各±X, Y, Zの方向(図7)に傾けてn=3のセンサ(sample1~3)の温度出力を評価した結果を図8に示す。各傾きで基準温度計との誤差が±2°C以内に抑えられており、設置角度に依らず、温度補正が有効に機能していることを確認した。

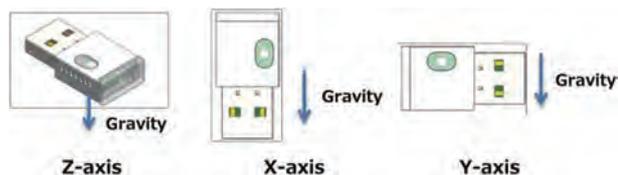


図7 設置角度

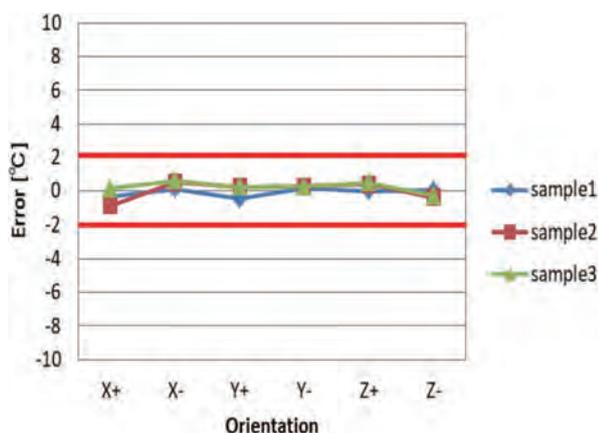


図8 設置角度影響

以上の結果より、小型高密度実装されたセンサデバイスにおいて、本温度補正アルゴリズムが有効であることを示すことができた。

**3.4 考察** 前項に示す実験結果より、2つの温度センサによって検出する熱流に基づく発熱影響補正アルゴリズムは、VOCセンサの自己発熱と発熱量の異なる外部機器発熱に対してセンサの温度出力精度を維持することができ、その有効性を示すことができた。

当該センサデバイスでは温度センサを直線上に配置することで、その直線延長上の熱源に対する環境温度推定を可能にした。この発熱影響補正技術を応用し温度センサを複数配置すれば、複数方向からの熱影響に対しても環境温度推定による補正が可能になると考える。

それが実現できれば、基板単体をセンサモジュールとして様々な装置に組み込むような熱源の位置を特定できない環境にも適用が可能となり、電池駆動型など、センサモジュールの電源構成に依存しない多様な使用環境やアプリケーションへの対応も期待できる。

## 4. むすび

本稿ではセンサモジュールに適用できる熱流検出による発熱影響補正技術について述べ、本技術をセンサモジュールに内蔵することで、自己発熱や外部接続機器の発熱影響を受けない、USB給電に対応した小型のセンサモジュールを開発した。

このセンサモジュールは、MEMS技術を用いた小型のセンサデバイスとセンサ制御系、無線通信機能を統合したものであり、本アルゴリズムの適用により、如何なる使用環境においても±2°C以内の高精度な温度出力を維持し、VOCセンサなどヒーター駆動型センサを内蔵する複合型センサモジュールとしては世界最小レベルの小型集積を実現している。

センサモジュールの小型化は設置場所の制約をなくし、組み込み先となる機器や構造物の設計自由度を大きく向上させる。このことは無数のセンサがデータを収集するIoT社会において、さまざまな場所に配置されたセンサが社会や生活に密着し、これまで取得できていなかった情報を得ることを可能とする。その結果として、新たなアプリケーションやサービスの創出が加速され、社会課題の解決に貢献するものであると考える。

今後もIoT社会に求められる多様なセンシングを可能とする、使い勝手の良いセンサモジュールの開発を進めていく。

## 参考文献

- 1) 小野悟, 活用が始まるM2Mの現状と展望, IEEJ Trans. EIS. 2012, Vol.132, No.5, p.626-631.
- 2) McKinsey Global Institute. Big data : The next frontier for innovation, competition, and productivity. 2011, p.6-7.
- 3) シスコIoTインキュベーションラボ, Internet of Everythingの衝撃(2013). インプレスR&D, 2013.
- 4) 三野宏之, 低消費自律駆動アルゴリズムを実装した環境複合センサモジュールの開発, 平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会講演文集, 2015. p.502-507.
- 5) 酒井隆介, “自律型環境複合センサを用いた遠隔監視システムの開発”, 23<sup>rd</sup> Symposium on “Development of Autonomous Integrated Environment Sensor for Remote Monitoring System”. Yokohama, January 31-February 1 2017, p.283-286.
- 6) David Boswarthick/Omar Elloumi/Olivier Hersent編, M2M基本技術書—ETSI標準の理論と体系—, リックテレコム, 2013.
- 7) 中川慎也, MEMS熱流束センサによるウェアラブル深部体温計の提案, 電気学会論文誌E, Vol.135, No.8, p.343-348.

## 執筆者紹介



元木 悠平 Yuhei Motoki  
事業開発本部  
MEMS 開発生産センタ 技術開発部  
専門：MEMS 工学



上田 直重 Naotsugu Ueda  
事業開発本部  
MEMS 開発生産センタ 技術開発部  
専門：MEMS 工学



三笥 佳代 Kayo Mitoma  
事業開発本部  
MEMS 開発生産センタ 技術開発部  
専門：MEMS 工学

---

本文に掲載の商品名は、各社が商標としている場合があります。

# 最近発表した主な論文

※所属は発表時の情報です。

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p><b>サブギガ帯無線スイッチを用いた工場内における通信性能評価</b>            Evaluation of Communication Performance in Factory Using Sub-GHz Band Wireless Switch            小端順二(技術・知財本部 組込システム研究開発センタ 無線・組込研究室)            電子情報通信学会大会講演論文集(CD-ROM)、2018年、一般社団法人電子情報通信学会、Vol.2018、p.AI-6-3、和文</p>	<p>製造現場では、製品の多品種少量化や段取り替えの増加に伴い、工場内の機器配置や製造ライン構築の変更に対する柔軟性が求められており、その実現に向けた重要技術である無線通信への期待が高まっている。一方、工場内に存在する大型設備の遮蔽による無線品質の劣化など、無線通信に対する信頼性が大きな課題となっている。</p> <p>本稿では、弊社で開発したサブギガ帯を使用した無線押ボタンスイッチを用いて、弊社工場内にて無線通信性能評価を行った結果について述べる。</p>
<p><b>平衡姿勢探索木を用いたRGB-D画像からの高速3次元物体位置姿勢認識</b>            Fast 6D Object Pose Estimation from a RGB-D Image Using Balanced Pose Tree            小西嘉典(技術・知財本部 センシング研究開発センタ 画像センシング研究室)、服部宏祐(技術・知財本部 センシング研究開発センタ 画像センシング研究室)、橋本学(中京大学 工学部)            精密工学会誌(Web)、2018年、公益社団法人精密工学会、Vol.84、No.4、p.348-355(J-STAGE)、和文</p>	<p>本研究では対象物体の3次元CADをモデルデータとして用い、RGB-D画像から高速・高精度に3次元位置姿勢を認識する手法を提案する。提案手法は二つの要素技術から構成され、一つは透視投影に基づくRGB-D累積勾配方向特徴量(PCOF-MOD)、もう一つは平衡姿勢探索木である。PCOF-MODは一定範囲内においてランダムに設定した3次元視点位置から対象物体の3次元CADを見た場合のデプス画像を多数生成し、それらからデプス勾配方向と表面法線方向について画素ごとに方向ヒストグラムを作成し特徴抽出を行う。こうすることで視点を設定した範囲内の3次元姿勢変化による見えの変化のみを照合時に許容可能な特徴量となる。一方の平衡姿勢探索木は、画像ピラミッドの階層ごとに頂点数の異なる多面体の頂点を視点位置として使用することで、画像内2次元位置の粗密探索と3次元姿勢の粗密探索を同時に実施可能とした探索木である。全ての探索木の深さは等しく、親ノードに連結する子ノードの数もほぼ均一であるため探索効率が高いという特徴を備えている。PCOF-MODと平衡姿勢探索木を組み合わせた3次元物体位置姿勢認識手法についてRGB-D画像の公開データセットを用いた性能評価を行い、提案手法が従来手法と比較して同等の処理時間でより高い認識性能を実現できることを示した。</p>
<p><b>センシングデータ流通市場におけるメタデータの定義・生成・活用の一方式</b>            An Approach of Defining, Generating and Utilizing Metadata for Sensing Data Trading Market            小田利彦(イノベーション推進本部 SDTM 推進室)、今井紘(イノベーション推進本部 SDTM 推進室)、内藤文嗣(イノベーション推進本部 SDTM 推進室)            人工知能学会全国大会論文集(CD-ROM)、2018年、日本人工知能学会、Vol.32nd、p.1C3.OS.8b.01、和文</p>	<p>様々なIoTデバイスから収集されるセンシングデータのアプリケーションを開発するために、センシングデータの流通への要求は高まりつつある。センシングデータを分析するためには、センシングデータのメタデータが重要となる。この論文では、メタデータの定義、その生成、さらに活用するための技術について、実装したプロトタイプとともに示す。</p>

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	抄 録
<p><b>スクイーズフィルムダンピング抵抗の制御によるMEMSマイクロフォンの高SNR化</b> Optimized Design of Squeeze-film Damping Toward High SNR MEMS Microphone 井上匡志（事業開発本部マイクロデバイス事業推進部 技術開発部）、内田雄喜（事業開発本部マイクロデバイス事業推進部 技術開発部）、石本浩一（事業開発本部マイクロデバイス事業推進部 技術開発部） 電気学会論文誌E、2018、一般社団法人 電気学会、Vol.138、No.7、p.301-306 (J-STAGE)、和文</p>	<p>可動部を有するMEMSデバイスにとって低ノイズ化、即ち高SNR化は共通の課題であり、かつ生産性やロバスト性との両立が重要である。本論文では、MEMSマイクロフォンにおいて68dB超のSNRを達成し、かつ工程安定性および機械強度と両立させる為の最適化設計指針を示した。</p> <p>エアギャップ部で発生するスクイーズフィルムダンピングがMEMSマイクロフォンの主要ノイズ源となり、音孔形状の最適化でSNRを改善可能なことを等価回路モデルから予測した。形状に応じた機械強度・工程安定性についても検討を行い、実験的に確かめた。本結果は、MEMS-ASIC-パッケージを含めた系の全体最適の重要性を示している。</p>
<p><b>反復学習制御によるサーボプレス機の下死点補正の一検討</b> A Study on Correction of Bottom Dead Center of Servo Press Machine by Iterative Learning Control 藤井高史（インダストリアル オートメーション ビジネスカンパニー 技術開発本部 第1技術部）、上山勇樹（技術・知財本部 組込システム研究開発センタ 無線・組込研究室）、阿部泰明（技術・知財本部 組込システム研究開発センタ 無線・組込研究室） 電気学会 産業応用部門大会、2018年、一般社団法人 電気学会、p.2-S10-1、和文</p>	<p>自動車産業をはじめとする製造現場で広く用いられているサーボプレス機では、板厚と材料特性（強度、延性など）のばらつきにより、加工荷重変動に伴う下死点の変動が発生し、製品の寸法精度が悪化することが知られている。そこで、我々は、サーボプレス機で発生する材料の硬さばらつきを加工・組立中のプロセスデータから算出した特徴量により捉え、適切な下死点補正を行い、製品の寸法精度悪化を防止する制御手法について検討を行った。本稿では、反復学習制御によるサーボプレス機の下死点補正の一手法について述べる。また、弊社製マシンコントローラを利用したサーボプレス模擬実験機により提案手法の有効性を示す。</p>
<p><b>装置データを活用した生産設備の異常検知</b> On the Anomaly Detection for Production Facilities by utilizing Machine Data 峯本俊文（技術・知財本部 知能システム研究開発センタ 知識情報研究室）、広橋佑紀（技術・知財本部 知能システム研究開発センタ 知識情報研究室）、鶴田浩輔（技術・知財本部 知能システム研究開発センタ 知識情報研究室） 平成30年 電気学会 産業応用部門大会 講演論文集、2018年、p.II-23～II-26、和文</p>	<p>本稿では、生産ラインに設置された産業用コントローラから取得できる装置データを活用した外れ値検知手法を提案した。さらに、包装機を制御するコントローラにおいて提案手法がリアルタイムに外れ値を検知できることも示した。具体的には、包装機ベンダやユーザが抱える課題の一つである「ワーク噛み込み」を検知するため、噛み込み発生の原因となる「ワーク位置ずれ」と「コンベアチェーンの緩み」の二つの現象について検証実験を実施し、装置データから算出された特徴量をもとに定義された正常からの外れ度合いによって二つの現象が検知可能であることを示した。</p>
<p><b>視線・動作を用いた作業習熟度の評価検討</b> Investigation of Worker's Proficiency from Body and Eye Movements in Manufacturing Operations 小竹康代（技術・知財本部 ヒューマンS&amp;C研究室）、王丹妮（技術・知財本部 ヒューマンS&amp;C研究室）、中嶋宏（技術・知財本部） 第34回ファジイシステムシンポジウム講演論文集、2018年、日本知能情報ファジイ学会、p.668-669、和文</p>	<p>製造現場においては、作業者の工程に対する習熟度を作業結果（作業時間や製品の誤り率）で定量化することで、生産ライン内での人員配置や育成機関を定める方式が採られる。この方式では、工程毎に習熟度が異なるため、1つの工程で身についた技能が他の工程で活かせるとは限らない。このため、自身の技能が活かせず離職を選択するケースや他の工程での習熟が長期化する課題がある。そこで著者らは、工程に含まれる作業を成し遂げる人の能力を人間の情報処理過程での知覚と身体活動に基づいて定量化することを提案する。本手法を用いることによって、現在の能力が活かせる工程の選定や人材の最適配置に加えて、所望の工程に素早く順応するための鍛えるべき能力の特定により習熟の短期化が実現でき、ものづくり現場での人材管理のあり方を刷新することに繋がる。</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p><b>駅遠隔システムで監視するエスカレータ転倒—2Dレーザセンサを活用したエスカレータ転倒検知—</b></p> <p>高田義教(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 公共ソリューション事業本部 システム開発部)、山本一仁(近畿日本鉄道株式会社 大阪統括部運輸部)、東哲生(近鉄電気エンジニアリング株式会社 テクノサービス部)</p> <p>第55回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集、2018年、日本鉄道サイバネティクス協議会、Vol.55、No.216、p. II-4-216 (5ページ)、和文</p>	<p>エスカレータで多発する転倒事故の早期発見と被害拡大防止を目的に鉄道駅の安全向上に取り組んだ。転倒の検知には、2Dレーザセンサを活用した。レーザセンサは、レーザ光を照射して、その反射光により距離を検出する。2Dレーザセンサは、レーザ光照射部を回転させることでセンサからの距離を2D(面)でとらえることができる。転倒検知エリアに入った対象物の形、大きさを抽出することでエスカレータでの転倒事象を検知するシステムを開発した。さらに、鉄道事業者と共同で実フィールドに設置し、有用性と課題を確認した。本稿では、開発したエスカレータ転倒検知システムのコンセプトと構成およびフィールド検証の結果について紹介した。</p>
<p><b>改札口ラッチ分離による旅客流動影響調査</b></p> <p>鈴木剛(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 公共ソリューション事業本部 事業開発部)、馬場基至(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 公共ソリューション事業本部 事業開発部)、宮本耕一(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 公共ソリューション事業本部 システム開発部)</p> <p>鉄道サイバネ・シンポジウム論文集、2018年、日本鉄道サイバネティクス協議会、Vol.55、No.221、p. II-6-221 (4ページ)、和文</p>	<p>これまで鉄道の駅改良工事で改札口の移設や新設に伴う自動改札機の設置数を、乗降者数、駅構造、設置スペースを考慮して人の判断(根拠があいまい)で決定していた。また、新たな改札口への人の流れや乗降者数を算出(予測)するような理論的、定量的な手段がなく、自動改札機の不足(混雑)や過多(閑散)を招くことになり、効率的な投資とならない。まず、コンコースの人流(方向)を人数カウントセンサで計測し、次に既設の自動改札機乗降者数から駅全体の人流を算出し、新設改札口の乗降者数を割り出した。自動改札機の処理能力を考慮し、適切な自動改札機の設置数とした。本論文は調査、分析方法、活用技術を解説した。</p>
<p><b>高信頼性無線通信に向けた工場環境における sub-GHz 帯電波伝搬のモデル化</b></p> <p>Modeling of sub-GHz wave propagation in factories for reliable wireless communication</p> <p>小澤尚志(技術・知財本部 組込システム研究開発センター 無線・組込研究室)、藤本卓也(技術・知財本部 組込システム研究開発センター 無線・組込研究室)、片山正昭(名古屋大学 未来材料・システム研究所)</p> <p>IEEE Conference Proceedings、2018年、IEEE、Vol.2018、No.ICIT、p.1598-1603、英文</p>	<p>This study presents a sub-GHz band propagation-loss model for a region where the error rate is lower than that observed in previous studies to realize, with high reliability, a wireless control communication system between the equipment in a factory. In particular, we show that the time-varying propagation loss in the line-of-sight channel in the electrical device factories could be approximated using the Rician distribution and determine the minimum values of the K-factors. Furthermore, we suggest the possibility of estimating the fall of propagation loss, which occurs rarely, via extrapolation using fewer samples.</p> <p>Copyright 2018 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p><b>センタータップ型 LLC 共振コンバータにおける電流不均衡メカニズムについて</b></p> <p>Mechanism of Current Imbalance in LLC resonant converter with Center Tapped Transformer</p> <p>佐藤充 (技術・知財本部 組込システム研究開発センター パワーエレクトロニクス研究室)、長岡真吾 (技術・知財本部 組込システム研究開発センター パワーエレクトロニクス研究室)、財津俊行 (技術・知財本部 組込システム研究開発センター)</p> <p>IEEE Conference Proceedings、2018年、IEEE、Vol.2018、No.IPEC Niigata 2018 -ECCE Asia、p.118-122、英文</p>	<p>In recent years, the LLC resonant converter with a center-tapped transformer has been widely used due to its high power density and high efficiency features in the Factory Automation which requires the low output voltage and high output current. However, the imbalanced secondary current for each half cycle occurs, and it cause a problem of reliability degradation associated with the high current. In this paper, the mechanism of imbalanced current is investigated focusing on the effects of coupling coefficient of the center-tapped transformer. This mechanism has been confirmed by experiments.</p> <p>Copyright 2018 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p><b>高電力密度 LLC 共振コンバータの実用的設計技術</b></p> <p>Practical Design Technique for High Power Density LLC Resonant Converter</p> <p>長岡真吾 (技術・知財本部 組込システム研究開発センター パワーエレクトロニクス研究室)、大西浩之 (技術・知財本部 組込システム研究開発センター パワーエレクトロニクス研究室)、鷹取浩二 (商品事業本部 コンポ事業部 第1開発部)</p> <p>IEEE Conference Proceedings、2018年、IEEE、Vol.2018、No.IPEC Niigata 2018 -ECCE Asia、p.4139-4144、英文</p>	<p>The LLC resonant converter is widely used for consumer and industrial applications due to its high efficiency, small size and low noise. In a practical design, a trade-off is needed between the input voltage operation range and the transformer size for miniaturization. The transformer size is determined at the minimum input voltage with full load. It is very important to have an accurate design technique so that the transformer does not have any unnecessary size margin. In this paper, inductance (L)-matrix transformer model-based design is introduced and compared with the conventional transformer model such as T-type and L-type. A 200 kHz, 240W LLC resonant converter is implemented and verified that the inductance (L)-matrix method is accurate, and it can contribute to miniaturization.</p> <p>Copyright 2018 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>

本誌掲載の論文は  
インターネットで  
ご覧いただけます



**OMRON TECHNICS web サイト**

[https://www.omron.co.jp/technology/r\\_d/omrontechnics/](https://www.omron.co.jp/technology/r_d/omrontechnics/)

オムロンの最新技術情報は  
SNS でも  
発信しています



**公式ツイッター**

 #Tech OMRON

## OMRON TECHNICS 非売品

第51巻 第1号  
通巻162号 (年1回発行)  
(禁無断転載)  
ISSN 0474-1315

編集兼発行人 宮田 喜一郎  
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部  
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1  
電話 0774-74-2000 (代)

2019年5月10日 発行

Published by OMRON Corporation  
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,  
Kyoto, 619-0238 Japan  
TEL 0774-74-2000

本誌に記載している会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標または登録商標です。

©OMRON Corporation 2019 All Rights Reserved.

OMRON

