

CT 型 X 線自動検査装置の高精細・高速検査技術

七呂 真^{1*}

High-Resolution and High-Speed Inspection Technology for CT-Type Automated X-Ray Inspection Systems

Makoto SHICHIRO^{1*}

¹ オムロン株式会社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本部 X 線検査システム事業部開発部開発 2 課 (〒 525-0035 滋賀県草津市西草津 2 丁目 2-1)

¹ Development Group 2, Automated X-ray Inspection Business Div., Development Dept., Inspection Systems Business Division HQ, Industrial Automation Company, OMRON Corporation (2-2-1, Nisikusatsu, Kusatsu-shi, Shiga 525-0035)

概要 近年、半導体の 3D 実装技術が進展する中で、微細構造や積層接合の複雑化により、従来の X 線透過検査では欠陥の検出が一層困難になっている。本稿では、これらの課題に対し、われわれが開発した CT 型 X 線自動検査装置 VT-X950 の技術的特徴を紹介する。VT-X950 は、高分解能 X 線源、微細画素 FPD、連続撮像による高速制御、AI 補助による自動レシピ生成といった独自技術を組み合わせることで、 $0.2\ \mu\text{m}/\text{pix}$ の高精細かつ高速な CT 検査を実現している。本技術により、今後ますます重要となる半導体製品の品質保証、開発期間の短縮、ならびに工程の歩留まり改善に貢献していく。

Abstract

With recent developments in 3D semiconductor packaging technology, defects have become even more difficult to detect using conventional X-ray transmission inspection. This is due to the increasing complexity of microstructures and stacked junctions. This paper introduces the technical features of the VT-X950 automatic CT-type X-ray inspection system developed by the company to address these issues: the VT-X950 combines unique technologies such as a high-resolution X-ray source, fine pixel FPD, high-speed control through continuous image capture and automatic recipe generation with AI assistance to realise $0.2\ \mu\text{m}/\text{pix}$, enabling high-resolution and high-speed CT inspections. This technology will contribute to quality assurance of semiconductor products, shortening development times and improving process yields, which will become increasingly important in the future.

Key Words: Inspection and Equipment Technology, X-ray Inspection Method, 3D Connection Reliability, 3D Packaging Design

1. 半導体・3次元実装の課題

1.1 半導体の微細化と高積層化

「半導体の集積密度は 18~24 か月で倍増する」

1965 年、ゴードン・ムーアが提唱したこの法則は、半世紀以上にわたり、半導体技術の進展を予測する指針として、情報処理能力の飛躍的な向上を牽引してきた。しかし近年、微細化技術は物理的・経済的限界に直面しつつある。そのため、従来の法則に依存しない新たな技術革新が求められている。

その中で、「チップレット技術」は、次世代の半導体実装アーキテクチャとして注目されている。チップレットとは複数の小型チップを高精度に統合することで、高性能かつ高歩留まりを実現可能とする技術である。一方で、チップレットは、接続部の形状や実装条件が多様化・複雑化するため、従来の設計・工程管理だけでは品質保証が困難となる。

本稿では、このような課題に対応する検査手法として、CT (Computed Tomography) 型 X 線自動検査装置の有効性について述べる。

1.2 3D 実装の流れ

近年、ロジック半導体においては、TSV (Through-Silicon Via) やマイクロバンプ ($\mu\text{-bump}$) による三次元積層技術の実用化が進展しており、これにより高密度かつ高性能な実装が可能となっている。具体的な例としては、フォトダイオードと信号処理回路を垂直方向に配線し、Cu-Cu 接合を用いる技術や、メモリ半導体における 3D NAND フラッシュメモリの普及などが挙げられる。これらの技術動向は、半導体の 3D 実装 (図 1) として総称される。

従来のフリップチップ実装技術は 1960 年代に開発され、1980 年代以降には、はんだバンプ技術の導入により信頼性が大きく向上した。さらに 2000 年代以降は、鉛フリーはんだの使用が環境規制により義務化されたことで、接合材の材料特性が変化し、それに対応する検査技術の進化が求められるようになった。

特に、はんだ接合部では、ボイド (空隙) や不濡れなど

*: Corresponding author

の内部欠陥が通電や熱負荷によって接合強度を劣化させる可能性があり、製品信頼性の低下を招くおそれがある。これらの欠陥は通電検査やX線透過検査である程度検出可能だが、定量的かつ正確な特定は難しい。

そのため、今後の3D実装技術の信頼性確保には、内部構造を高精度に三次元的に可視化できる検査技術の導入が信頼性確保の鍵となる（図2参照）。

1.3 3D実装の課題

3D実装の課題は、下記の2点が挙げられる。

(1) 反りによるチップ剥がれとはんだ接合部不良

半導体デバイスは、パッケージや基板の材料の熱膨張係数の違いにより、温度変化に伴って反りが生じる。この反

りが大きくなると、はんだ接合部に応力が集中し、断線や剥離のリスクが増大する。特に、バンプのピッチが微細化し、パッケージが大型化するほど、反りの影響が顕著である。そのため、反りの影響を低減する設計や精密な検査技術が不可欠である。

(2) 積層化によるバンプ検査の複雑化

3D実装においては、複数の層にわたる接合部が存在するため、従来の透過方式（2次元X線画像方式）の検査では重なりによって欠陥の検出が困難となる。そのため、X線透過検査では、正確な層別の判別には限界があり、高分解能で三次元的に構造を把握できるCT方式が有効である。

近年、CT型X線解析技術の進化により、試作期間の短縮、品質安定化が期待される。

次章では、CT型X線自動検査装置の特徴と、その導入による効果について詳述する。

2. 半導体検査に適したCT型X線自動検査

2.1 半導体向けのX線検査方式

CT方式によるX線検査は、一度の撮像により3次元構造の情報を可視化できるため、半導体のバンプ検査に有効である¹⁾。

そこで、まず、X線を用いた画像診断方式について説明する。X線検査には、大きく分けて「透過方式」と「CT方式」が存在する（表1）。

透過方式は、医療用レントゲンと同様の2次元画像（以下2Dと表記）を取得する手法であり、撮像スピードが速くデータ量も少ないことから、生産性を重視する用途に広く採用されている。しかし、構造が重なって見えるため、微細構造の特定には限界がある。

一方、CT方式はX線源とカメラを用いて複数方向から撮像を行い、三次元画像を再構成する手法である。立体的な情報が得られ、裏面部品の影響も受けないため、高精度

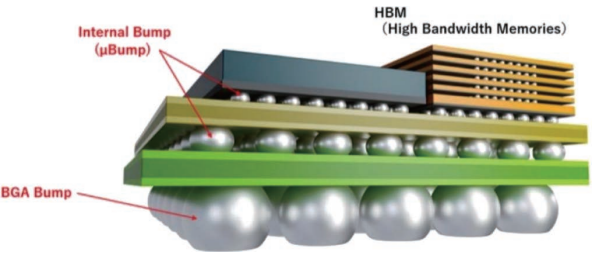


図 1. 3D実装のイメージ

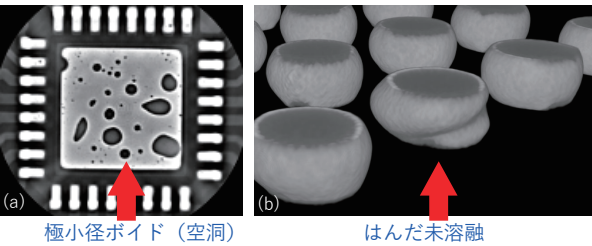
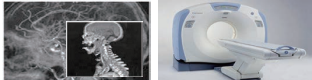
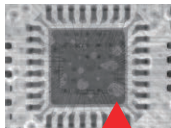
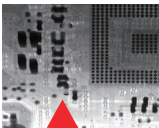
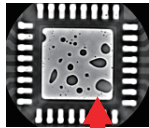
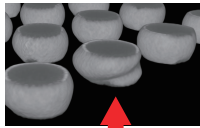


図 2. BGAの(a)ボイド (X線CT断層画像) の例：左、(b) 不濡れ (X線CTレンダリング画像) の例：右

表 1. X線画像診断手法の方式と特徴

	透過型 (2D)	CT方式 (3D)
特徴	・透過画像 ・高速撮影 秒/sec	・全方向から断層撮影 ・撮影に時間がかかる 分/min
医療	簡易検査：レントゲン 	精密検査：CTスキャン 
産業 (基板検査)	透過画像を使った2D検査 ➤各メーカーがラインナップ  空洞がボヤける  裏映りしてしまう	CT断層画像を使った3D検査 ➤分析機主体。  空洞くっきり  裏映りせず立体的

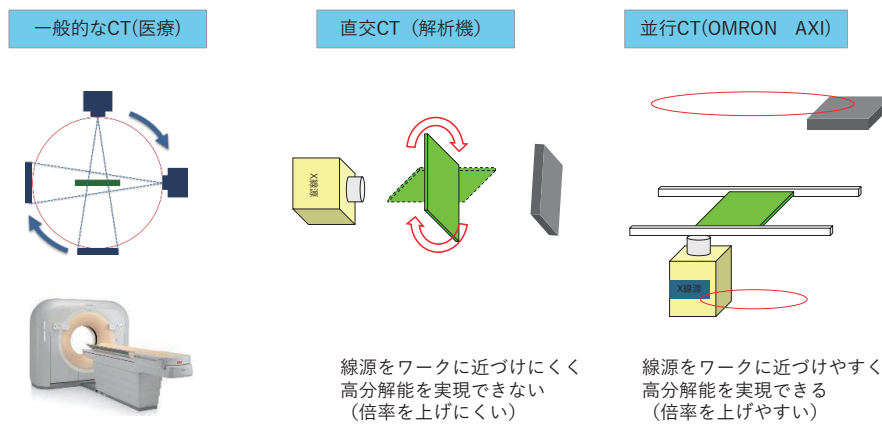


図3. CT方式の種類と特徴

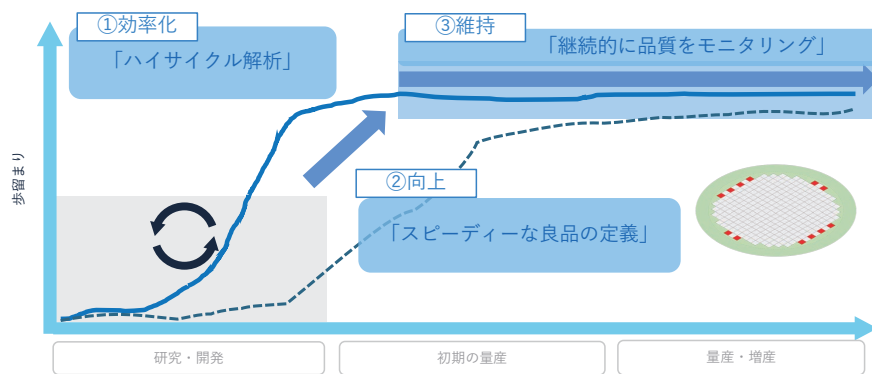


図4. CT型自動検査装置導入の効果

な検査が可能である反面、撮像や処理に時間を要し、データ量も大きくなる²⁾。

CT方式にも複数の種類があり、医療機器で用いられる「フルCT」や、「直交CT」「平行CT」などがある。中でも半導体検査には、対象物を回転させる必要がない「平行CT方式」が最適である。その理由を下記に述べる。

X線撮像の原理は、光源を照射して影絵をスクリーンに映すイメージと同様であり、線源と検査対象物の距離が近いほど倍率が高くなり、分解能の高い画像が得られる。

直交CTでは構造上、線源との距離を縮めにくく、場合により対象物をカットしなければ分解能の高い画像が得られない。しかし、平行CTでは対象物の回転を要さず、線源を近接配置できるため、高分解能撮像に適している(図3)。そのため、われわれの装置では、平行CT方式を採用し³⁾、0.2 $\mu\text{m}/\text{pix}$ の高分解能を実現している。

2.2 CT型自動検査装置導入による期待効果

図4に示すように、CT型自動検査装置を用いた半導体はんだ接合部検査により、(1)開発サイクルの高速化、(2)良品定義の高速化、(3)品質の安定化、が期待されており、実装工程の歩留まり改善、早期立ち上げに貢献できると考え

られる。

近年、X線デバイス、制御技術進化に伴い、CTでありながら高速な検査が可能となってきた。

開発のフェーズでは、非破壊でワーク全体のデータ解析を素早く行い不良箇所を早期に特定することができる。解析機と併用することで開発サイクルを短縮することが期待できる。量産フェーズでは、検査結果を前後工程にリアルタイムでフィードバックし、異常があれば是正をアシストすることができる。また、不良の定量的自動判定、レポート作成向けソフトウェアを搭載できれば、良品出現率の垂直立ち上げが行え、品質の安定化に貢献できる。

次章では、われわれのAXIにおける高精細、高速CT検査を実現するための要素技術をご紹介します。

3. 高分解能X線CT装置の開発

われわれのCT型X線検査装置の技術進化と、VT-X950に搭載された主な技術の特徴を紹介する。

3.1 CT型X線自動検査装置の進化

当社では、電子部品実装検査向けに開発したVT-X750を皮切りに、より高出力・高精細な検査を可能とするVT-X



図 5. CT 型自動検査装置の進化

850, そして先端半導体向けの VT-X950 へと, X 線 CT 自動検査装置の技術革新を推進してきた (図 5)。

VT-X750 では, SMT 基板上の BGA や THT といった高密度実装部品に対し, 2 秒/FOV 以下という業界最高水準の高速検査を実現し, 量産現場での実績を築いてきた。

さらに VT-X850 では, 高出力 X 線源の搭載により, 厚物・高吸取構造体の内部欠陥検査を可能とし, 適用領域を拡大してきた。

これらの技術基盤と現場での信頼性を積み重ねた成果が結実したのが, 分解能 $0.2\mu\text{m}/\text{pix}$ の超高精細 CT 検査を実現した VT-X950 である。次章では, VT-X950 に関する技術の特徴を述べる。

3.2 高精細検査の実現

高精細な画像生成には, 小焦点の X 線源と微細画素の X 線カメラを用いた撮像, 画像処理技術が必要となる。

3.2.1 高分解能透過型 X 線源の採用

X 線源は, 開放管と密閉管に大別される。開放管は排気機構が必要で調整・保守に手間を要する一方, 密閉管は構造が簡素で小型・保守性に優れる。われわれは, これらの利点を活かし, 微小焦点径を持つマイクロフォーカス密閉管を採用している。

われわれが開発した VT-X950 では, 高分解能画像の取得を目的に, 透過型 X 線源を搭載した。透過型は前方散乱 X 線を利用することで, 反射型より焦点径を小さくできる特長を有する。従来はフォーカス電極で電子ビームを絞ることで高解像度を得ていたが, ターゲットの熱劣化が課題であった。これに対し, VT-X950 に搭載している線源では, 高熱伝導材の採用により熱拡散性を向上させ, ターゲットの長寿命化を実現した。

3.2.2 高感度・高鮮鋭度 X 線パネルの採用

X 線非破壊検査において, 撮像性能の根幹を成すのが X 線パネルである。特に近年では, 積層構造の可視化や高密度実装部品の検査精度向上に応えるため, 高感度かつ高鮮鋭度な検出技術の導入が不可欠である。

X 線パネルとして一般的に用いられるフラットパネルディテクタ (FPD) は, X 線を直接撮像するのではなく, シ

ンチレータと呼ばれる蛍光体を介して X 線を可視光に変換し, それを受光センサで読み取り, 電気信号としてデジタル画像に変換する構造を持つ。画素単位で情報を取得する方式のため, 撮像の解像度や感度は, シンチレータの特性やセンサの読み出し方式に大きく依存する。

当社では, 対象物の微細構造をより鮮明に可視化するため, 従来型のアモルファスシリコンベースではなく, CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 方式の FPD を採用している。CMOS 型 FPD は, 画素毎に個別読み出しが可能という利点を有しており, これにより被写体の輪郭を鋭く描写する高鮮鋭度な画像が得られる。

3.3 高速な CT 検査の実現

次に, 高速かつ高精度な CT 検査を実現するために, われわれが独自に培ってきた「連続撮像技術」について述べる。

この技術は, X 線源および X 線カメラのステージを停止させることなく連続回転させながら撮像を行う方式であり, 従来の STOP & GO 方式のように毎回停止して撮像する手法とは一線を画す (図 6)。

視野ごとの画像取得を一連の連続動作で完結させることで, 1FOV^4 あたりの撮像時間を大幅に短縮した。また, 高速化と同時に機械的負荷を軽減し, 装置全体の信頼性向上にも寄与している。

この非停止連続動作を高精度に成立させる鍵は, 各モータの高精度な同期制御にある。われわれは, 当社開発の制御デバイス PLC (Programmable Logic Controller) と, サーボモータおよび専用ドライバを高度に統合することで, 複雑な巡回軌道における高精度な軸同期を実現している⁵⁾。

さらにわれわれは, 検査点間を非停止で移動する独自の高速制御技術 (当社特許) も保有している。

これらは, 長年にわたり制御機器およびモーション制御分野で技術を磨いてきたわれわれだからこそ実現できた, 業界最高峰の高速 CT 撮像技術である。

3.4 高可用プラットフォームによる自動検査技術

X 線検査においては, 安定かつ再現性の高い自動検査を可能とするソフトウェアアプリケーションの品質が, 装置

【他社技術】Stop&Go

【オムロン技術】連続撮像

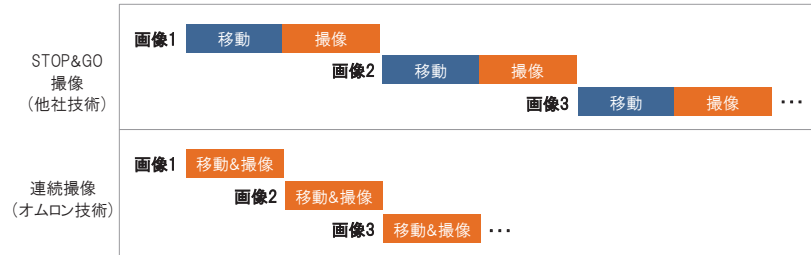


図 6. われわれ独自の連続撮像技術

性能に直結する。当社では、検査対象となるはんだ接合部に対し、管電圧・管電流・分解能・露光時間・プロジェクション枚数（CT 像を構成するために必要な投影画像枚数）などの最適条件を領域ごとに設定し、それらをレシピ（検査プログラム）として保存・運用することで、高精度な自動検査を実現している。

さらに、われわれ独自のソフトウェアは、レシピ作成の効率化にも大きく寄与している。CAD データを基にした自動レシピ生成に加え、AI による検査結果フィードバックを通じたライブラリの自動チューニング機能も搭載している。

これにより、対象部品の特性に応じた最適条件を短時間で導出することが可能である。

加えて、ウェハやサブストレート、JEDEC トレーなど、搬送形態の異なる多様なワークにも柔軟に対応し、自動検査をシームレスに行える点も、われわれの強みである。

また、ボイドや不濡れ、はんだブリッジといった典型的不良の検出にとどまらず、ダイとサブストレート間の高さのような幾何的寸法検査まで網羅する豊富なアルゴリズムを備えている。

これらの技術要素はすべて、制御・画像処理・AI を融合させたわれわれ独自の高可用なソフトウェアプラットフォームによって支えられており、自動検査を実現している。

3.5 今後の展望

われわれは、当社のオートメーションソフトウェア「Sysmac Studio」と NVIDIA Omniverse™ との連携により、デジタルツイン環境の構築を進めている。これにより、CT 型 X 線自動検査装置「VT-X」シリーズの内部構造を高精度に再現し、トラブルシューティングや開発期間の短縮、設計品質の向上が可能となる（図 7）。



図 7. デジタルツインの活用イメージ

さらに、生成 AI とバーチャルヒューマン技術を融合し、自然言語による検査装置の操作を実現させる。これにより、熟練工の技能に依存することなく、誰もが直感的に検査システムを活用できる新たなユーザ体験を提供していく。

今後、NVIDIA 様との協業を通じ、リアルタイムかつ物理的に忠実なデジタルツインと AI アシスタントを組み合わせることで、次世代のスマートファクトリーにおける検査プロセスの革新と、生産性・歩留まりのさらなる向上に貢献していく方針である。

4. むすび

半導体の高密度化・高機能化が進む中で、はんだ接合部に対する非破壊・高精度な検査の重要性はますます高まっている。これに対し、われわれは CT 型 X 線自動検査技術を新たなアプローチとして提案した。

本稿では、その中核を成す X 線源・撮像・画像処理・自動化・ソフトウェア制御といった各技術領域において、われわれが長年培ってきた制御技術と装置開発力が融合することで実現した、半導体検査向けの CT 型 X 線自動検査装

置 VT-X950 を紹介した。

今後もわれわれは、お客様の製品進化と歩調を合わせながら、より高精細かつ高速な検査技術の実現に挑戦し続ける。

CT 型 X 線自動検査技術のさらなる普及と発展を通じて、半導体業界全体の検査効率と品質向上に貢献していきたい。

最後に、本研究に多大なるご協力を賜った関係者の皆様、ならびに執筆の機会を与えてくださった皆様に深く感謝申し上げます。われわれはこれからも、現場に根ざした技術革新を重ね、ものづくりの未来に貢献していく所存である。

(2025.6.18- 受理)

文 献

- 1) Jisso 技術ロードマップ専門員会：“2022 年度版実装技術ロードマップ,” 電子情報技術産業協会, p. 352, pp. 450–451, 2022 年
- 2) 七呂 真：“超高速 CT 型 X 線自動検査装置の開発,”

OMRON TECHNICS, 2019 年

- 3) 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 回ソルダーリング分科会資料, 溶接学会, p. 4, 2011 年
- 4) 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, pp. 27–28, 2009 年
- 5) 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, Vol. **29**, No. 1, pp. 67–72, 2018

著者紹介



七呂 真 (しちろ まこと)
オムロン株式会社
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 検査システム事業本部
X 線検査システム事業部 開発部
専門：電気工学
X 線自動検査装置の開発に従事

本稿は、一般社団法人エレクトロニクス実装学会の許諾を得て、『エレクトロニクス実装学会誌』28 巻 6 号掲載論文「CT 型 X 線自動検査装置の高精細・高速検査技術」を転載したものです。

著者名：七呂 真「CT 型 X 線自動検査装置の高精細・高速検査技術」, エレクトロニクス実装学会誌, 28 巻 6 号, pp. 570–575, 2025 年.
DOI:<https://doi.org/10.5104/jiep.28.570>

Copyright© The Japan Institute of Electronics Packaging

