アーク遮断現象を定量化するシミュレーション技術

森地 高大, 濱 開, 井戸田 修一, 田代 真一, 田中 学, Anthony Bruce MURPHY

近年、環境問題への関心の高まりから再生可能エネルギーの高効率化が急務とされている。効率を高めるために システムは高電圧あるいは高電流化が進んでいる。したがってシステムに利用されるリレーにおいても高容量遮断 性能が求められるようになった。これを実現するためには、遮断時に接点間に発生するアーク放電のメカニズムを 理解し、制御方法を確立しなければならない。

そこで本検討では、アーク挙動を定量的に評価し、アーク遮断メカニズムを詳細に把握するため電磁熱流体モデ ルを用いたアークシミュレーション技術の構築を試みた。

アーク挙動のシミュレーション結果と実測との比較により、高い再現性があることを確認した。さらに構築した シミュレーション技術を用いて、磁気消弧におけるアーク遮断メカニズムを明らかにした。この技術はアーク放電 のメカニズム解明に役立ち、今後のアーク挙動の制御方法確立に貢献できる。

Simulation Technology to Quantify Arc Interruption Phenomena

MORICHI Takahiro, HAMA Kai, ITODA Shuichi, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu and Anthony Bruce MURPHY

In recent years, the growing interest in environmental problems stimulates urgent spread and efficiency improvement of renewable energy. The energy efficiency makes rated voltage and current of electrical devices higher and the devices require higher interruption capability of relays. In order to achieve higher interruption capability, we have to understand the mechanism of arc discharge generated between electrical contacts at arc interruption and establish control methods for arc interruption.

In this study, we tried to construct arc plasma simulation technology based on magnetohydrodynamics model in order to measure arc behavior quantitatively and figure out arc interruption mechanism in detail.

We could replicate arc behavior measurement by this CAE technique. Furthermore, we could reveal the mechanism of magnetic blow-out arc interruption. We are going to contribute to the elucidation of arc plasma mechanism and control method of arc behavior.

1. まえがき

地球温暖化などの環境問題に対する意識の高まりや原油 の高騰などを背景に、再生可能エネルギーや電気自動車の 市場が拡大している。それらに用いられるエネルギーマネ ジメント機器やバッテリー制御回路においては、高絶縁性 と低抵抗の観点から直流リレー(以下、リレーと呼ぶ)が 使用されている。

リレーでは開極時に接点間で絶縁破壊が起こり、アーク

Contact : MORICHI Takahiro Takahiro.Morichi@omron.com

放電(以下、アークと呼ぶ)が発生する。アークとは空気 などの気体が数千度以上の高温¹⁾となり気体分子が電離お よび解離することで気体の電気伝導率が増加し²⁾、気体中 に電流が流れる現象である。このとき電流によるジュール 発熱でアーク導電経路の温度が維持されることにより、 アークが継続する。アークが継続するとアークにより高温 状態となり、筐体内部の損傷や接点の消耗が起こる。これ ら機器の破損は火災などの重大事故につながる可能性があ る。近年では数百ボルトの高電圧あるいは数百アンペアの 大電流での遮断が求められることが多く、従来にも増して 安全かつ確実にアークを遮断できることが重要となってい る。

限られたスペースで直流の高電圧あるいは大電流を遮断 するためには、電極の開閉時に生じるアーク挙動を予測し 制御することが重要な技術課題となる。アーク挙動を左右 する要因には、アーク発生時の温度場や圧力場、アークに 発生するローレンツ力³⁾ などにより生成される流れ場など がある。

これまでアーク挙動を把握するため電気波形計測や高速 度カメラによる観察が行われてきた。しかしながらそれら の観察ではアーク挙動を左右する要因である温度場や圧力 場、流れ場を把握することは難しい。そこでこの課題を解 決するため CAE (Computer Aided Engineering) によるシ ミュレーション技術に着目した。CAE を用いることによ り温度場や圧力場、流れ場を解析でき、これらがアーク挙 動にどのような影響を与えているか定量的に評価できる。 これはアーク遮断に至るまでのメカニズムを把握すること につながり、リレーの性能を高めていく上で非常に効果的 である。

そこで今回、CAEを用いて熱流体解析と電磁界解析を 連成させたアークシミュレーション技術の構築に取り組ん だ。シミュレーションする内容は接点開閉時に発生する アーク挙動であり、汎用の熱流体解析ソフトウェアの標準 機能をベースに構築した。

本稿では、その取り組みについて、以下の構成で述べ る。

第2章では、アーク挙動を記述するための仮定および支 配方程式について述べる。

第3章では、解析モデルの詳細設定および、実測結果と の比較をもってアークシミュレーション技術の妥当性を検 証した。

第4章では、磁束密度を高くするほどアーク遮断時間が 短くなる実験事実に着目し、複数の磁束密度の条件におけ る解析結果を元に磁束密度とアーク継続時間との関係性に ついて考察した。

第5章では、本解析モデルにおける課題と今後の展望に ついて述べる。

2. アークシミュレーション手法

2.1 アークの取り扱い

アークシミュレーション技術を構築するにあたっての主 な仮定を以下に示す。

 計算空間のすべての箇所で局所熱平衡(LTE=Local Thermodynamic Equilibrium)が成立する。すなわ ち、電子温度、ガス温度、励起温度などの温度は全 て等しく一温度で記述できる。電離および解離など の反応はすべて平衡状態となっている⁴⁾。

(2) 流れ場は乱流(Transition SST モデル)を考慮する。

(3) 電極は溶融・変形しないものとする。

ここで局所熱平衡モデルについて説明する。アーク内部 では種々の解離、励起、電離、再結合が同時に起こってい るが、1気圧以上の高気圧アークの場合はほぼ熱平衡状態 にあり、アーク内の電子、中性粒子、イオンの温度は等し いと考えてよい。ただし、アーク内の各位置で平衡状態は 異なるため、このような状態を局所熱平衡と呼ぶ⁵⁾。

2.2 支配方程式

局所熱平衡を仮定することにより、アークは電磁熱流体 としてり扱うことができる。アークの電磁熱流体としての 挙動は以下の質量・運動量・エネルギーの保存則により記 述できる⁶⁾。気体の熱力学・輸送特性は温度に依存した物 性値として方程式内で取り扱うことができる。

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{j} \times \vec{B}$$
(2)

エネルギー保存則

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \vec{j} \cdot \vec{E} - Q \tag{3}$$

電流保存則

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \nabla \boldsymbol{\varphi} = 0 \tag{4}$$

オームの法則

$$\vec{j} = -\sigma \nabla \varphi = \sigma \vec{E}$$
(5)
 $\prec 2 \vdash \nu \vec{\pi} \neq \nu \neq \nu$

 $\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{j} \tag{6}$

磁場

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{7}$$

(8)

電気回路の式 (キルヒホッフの法則)

$$V_0 = Ri(t) + V_{arc}(t)$$

ここで、 ρ :密度 [kg/m³]、 \vec{u} :速度ベクトル [m/s]、t: 時間 [s]、p: 圧力 [Pa]、 $\overline{\vec{\tau}}$:粘性応力テンソル [Pa]、 \vec{g} : 重力加速度ベクトル [m/s²]、 \vec{j} :電流密度ベクトル [A/ m²]、 \vec{B} :磁束密度ベクトル [T]、h:エンタルピー [J/ kg]、k:熱伝導率 [J/m・K]、T:温度 [K]、 \vec{E} :電界ベク トル [V/m]、Q:放射損失 [W/m³)]、 σ :電気伝導率 [S/ m]、 φ :電位 [V]、 \vec{A} :ベクトルポテンシャル、 μ_0 :真空 の透磁率 [H/m]、 V_0 :電源電圧 [V]、R:負荷抵抗 [Ω]、 $i(t): アーク電流 [A]、<math>V_{arc}(t): \Gamma-ク電圧$ [V] をそれぞ れ表している。

本解析モデルでは電極を取り囲む空間(以下、消弧空

間)に充填する気体は空気を想定している。空気の質量密 度、粘度、熱伝導率、比熱、電気伝導率、放射損失は、 THERMAL PLASMA で報告されたものを用いた⁷⁾。

3. 解析モデルの妥当性検証

3.1 解析モデルについて

本アークシミュレーション技術では、直流アークを想定 している。図1に示す直流電気回路の接点部分を取り出 し、図2に示す解析モデルを作成した。解析モデルに用い た設定値を表1に示す。



図1 直流電気回路



図2 解析モデル

表1 解析モデルに用いた設定値

項目	設定値
空間サイズ	42 mm×20 mm×20 mm
電極長さ	20 mm
電極径	Φ 5 mm
接点間距離	2 mm
負荷条件	200 V 60 A
磁束密度	+ Y 方向に一様磁束

直流アークの遮断では消弧空間に磁石を配置し、ローレ ンツ力でアークを伸長させて遮断する磁気消弧が一般的で ある。それに倣い、本解析モデルでも消弧空間内に一様磁 束を与えた。

3.2 アーク挙動の再現

図3に磁気消弧時のアーク形状を示す。図3の上段が CAEでのアーク温度コンター図(温度5000K以上)、下段 が高速度カメラで実測したアーク形状である。接点間での アーク発生からアーク遮断完了までのアーク形状変化の解 析結果は実験結果をよく再現している。



図3 磁気消弧時のアーク形状

図4にアーク遮断時のアーク電流およびアーク電圧波形 を示す。アーク電圧の上昇やアーク電流の減少についても 解析結果は実験結果をよく再現している。これらの比較結 果より、アーク挙動を再現できたと判断した。





図5に温度場と圧力場と流れ場のコンター図を示す。 アークシミュレーション技術の構築により、これまで実測 で見ることが難しいとされていたアークの3次元挙動や温 度場、圧力場、流れ場などを可視化できるようになった。



図5 温度場と圧力場と流れ図のコンター図

4. アーク磁気消弧メカニズムの解明

4.1 遮断性能向上の検討

先に述べたように高容量あるいは大電流での直流アーク 遮断方法としては磁気消弧が一般的である。磁束密度を高 くすることで早期にアーク遮断できることが実験事実とし て知られている。

そこで本検討では磁束密度とアークの挙動との関係性を 把握するために4水準(20 mT、40 mT、70 mT、85 mT) の磁束密度にてアーク放電解析を行った。

4.2 アーク継続時間とアーク形状の関係性

図6に磁束密度とアーク継続時間の関係を示す。図より 磁束密度が大きくなるにつれ、アーク継続時間が短くなる ことが分かった。磁束密度とアーク継続時間の関係は線形 的減少ではないことから、ある一定の値に収束していくこ とが予測される。これより、永久磁石を選定する際は一定 以上の磁束密度を確保する必要があるが、ある閾値を超え ると遮断時間が一定値に収束していくと考えられる。



図6 磁束密度とアーク継続時間の関係(CAE)

今回アークシミュレーション技術の構築により実測では 困難とされる3次元データ取得が容易となった。そこで アーク遮断において密接に関係するアーク形状に着目した。特にアーク長及びアークの太さ(以下、アーク径) は、アークの抵抗率に大きく関わるため関係性を明らかに する必要がある。

図7に磁束密度とアーク長の関係を示す。CAEによる結 果では各磁束密度における遮断直前の温度場の等位面 (5000K)からアーク長を算出した。また実測では画像より 発光強度の高い部分から中心を導出し、その中心線の長さ からアーク長を算出した。図7より解析および実測ともに磁 束密度の増大に伴い、アーク長が短くなる傾向を確認した。



図7 磁束密度とアーク長の関係

アーク径の定義を図8に示す。アーク径の定義はアーク (温度5000 K 以上)を端子中心軸に対して垂直方向で切 断した断面積を円形状に換算した際の直径とする。

図9に磁束密度とアーク径の関係を示す。ここでは各磁 束密度における遮断直前のアーク径とした。図9より磁束 密度が大きくなるに伴い、アーク径は小さくなる傾向を確 認した。



図8 アーク径の定義



図9 磁束密度とアーク径の関係(CAE)

4.3 考察及びメカニズム解明

前節より磁束密度を大きくすると、アーク長は短く、 アーク径は小さくなることを解析上明らかにした。一般的 にアークを遮断するためには、アーク抵抗 R_{arc} を大きく し、アーク電圧を電源電圧 V_0 まで増加させる必要がある ことが知られている⁸⁾。これまでは負荷電流・電圧から遮 断に必要なアーク長を推定してきた⁹⁾¹⁰⁾。アークを伸長さ せることで、アーク抵抗が大きくなり最終的にアークを遮 断できた。

しかし磁気消弧では磁束密度が大きくなると、アーク長 が短くなることが実測および解析結果から分かっており、 負荷電流・電圧・アーク長のみで磁気消弧の遮断メカニズ ムを説明できない。そこでアークシミュレーション技術の構 築により取得可能となったアーク径及び温度場の結果を用い て磁気消弧の遮断メカニズムについて考察をおこなった。

アーク抵抗 Rare は以下の式で表すことができる。

$$R_{arc} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} \tag{9}$$

ここで、*σ*:電気伝導率 [S/m]、*l*:アーク長 [m]、*S*: アーク断面積 [m²] をそれぞれ表している。

この式から、磁束密度によりローレンツ力を大きくする ことで、アーク径の低減、すなわち、アーク断面積の低減 に伴うアーク抵抗 *R*_{arc}の増大により短いアーク長での遮断 が可能になったと考えられる。図 10 に磁束密度がアーク 径に与える影響メカニズムを概略図で示す。磁束密度が大 きくなるとアークに働くローレンツ力が大きくなり移動速 度が大きくなる。そのため図 10 のようにアークの周囲は 常に低温の空気に晒されてアーク径が緊縮する熱的ビンチ 効果¹¹⁾が働きやすくなっている。

熱的ピンチ効果によりアーク断面積が小さくなりアーク 抵抗 R_{arc} が増大して、迅速にアーク遮断に至ったと考えら れる。

本検討では今回構築したアークシミュレーション技術を 用いることでアーク磁気消弧メカニズムを定量的に明らか にした。



図10 磁束密度がアーク径に与える影響メカニズム

5. むすび

従来の実測評価で把握できていなかった温度場や圧力 場、流れ場などを定量的に評価することがリレーの性能を 高める上で効果的と考え、アークシミュレーション技術に 取り組んだ。2次元断面でのアークの挙動の実測結果およ びアーク遮断時の電流・電圧波形との比較をもって妥当性 を検証し、アークシミュレーション技術の構築を完了し た。

本技術によりアークの3次元挙動や温度場、圧力場など の可視化が可能となった。本検討では磁束密度を大きくす ることで、遮断時間が短くなるメカニズムを考察した。 アークにかかるローレンツ力が大きくなることで、アーク の移動速度が上がりアーク周囲が冷却される。それにより アーク断面積が小さくなることでアーク抵抗が増大しアー ク遮断時間が短くなったと考察した。

本稿ではアーク形状の3次元データと温度場を中心に アーク遮断のメカニズムについて検証を行った。今後は圧 力場・流れ場がアーク挙動に与える影響についても検証 し、遮断性能向上につながる制御方法の確立に取り組む。 これにより、高電圧あるいは大電流のアークを安全かつ確 実に遮断できるリレーを開発し、再生可能エネルギー社会 の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- Y. Aoyama *et al.*, Spectroscopic analysis for the arc quenching effect of ablation gas on arc immobility phenomena. Thirty-Sixth IEEE Conference on Electrical Contacts, and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts. Aug. 1990
- Y. Cressault *et al.*, Influence of metallic vapours on the properties of air thermal plasmas. Plasma Sources Sci. Technol. 17. 2008, p.1–9. IOPscience,.
- H. Miyagawa *et al.*, Effect of Magnetic Blow-Out and Air Flow on Break Arcs Occurring between Silver Electrical Contacts with Copper Runners. IEICE TRANS. ELECTRON., Sep. 2017, VOL. E100-C, No9.
- (4) 渡辺隆行,田代真一.熱プラズマの解析に用いられる電磁熱 流体モデル. J. Plasma Fusion Res. 2011, Vol.87, No.8, p.514-521.
- 5) 電気学会放電ハンドブック出版委員会. 放電ハンドブック. 電気学会. 2003, p.1945.

- 6)田代真一,田中学,中田一博,興石房樹,鈴木啓一,山崎 圭. Ar-He 混合ガスタングステンアークにおける熱輸送特性 の数値シミュレーション.高温学会誌. 2006, Vol.32, No.1, p.69-73.
- Maher I. Boulos *et al.*, THERMAL PLASMA Fundamentals and Applications. Vol.1, PLENUM PRESS, 1994, 452p.
- 森口裕亮,榎本英樹、山本律、福田純久、尾崎良介、池田陽
 司. EV・HEV 用大電流メインリレーの小型化技術. Panasonic Technical Journal. May 2015, Vol.61, No.1, p.72-76.
- H. Ayrton. The Electric Arc. New York: D. Van Nostrand, 1902, 528p.
- 10) 佐藤充典. 電気接点-材料と特性. 日刊工業新聞社, 1984, 191p., ISBN-10:4526017299.
- M. Tanaka *et al.*, 溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察. 溶接学会論文集. 2007, Vol.25, No.2, p.336-342.

執筆者紹介



 森地
 高大
 MORICHI Takahiro

 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
 事業統轄本部

 技術統括部
 要素技術部

 専門:機械工学
 所属学会:IEEE



濱 開 HAMA Kai 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 事業統轄本部 技術統括部 要素技術部 専門:流体工学



井戸田 修一 ITODA Shuichi

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 事業統轄本部 技術統括部 要素技術部 専門:電気工学 所属学会:電気学会



田代 真一 TASHIRO Shinichi 大阪大学

接合科学研究所 専門:熱プラズマモデリング、アーク溶接 所属学会:溶接学会 他



田中 学 TANAKA Manabu
 大阪大学
 接合科学研究所
 専門:熱ブラズマ診断、アーク溶接
 所属学会:溶接学会 他



Anthony Bruce MURPHY CSIRO Manufacturing

専門:熱プラズマモデリング 所属学会:英国物理学会 他