

# アークシミュレーション技術

## Arc Simulation Technology

坂田 昌良 SAKATA, Masayoshi

榎並 義晶 ENAMI, Yoshiaki

受配電・開閉・制御機器コンポーネントにおいては、接点の開閉時に発生するアークの挙動を予測し、制御することが重要な技術的課題である。富士電機は、コンポーネントのさらなる小型化や性能の向上、ならびに直流機器への対応を図るために、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を開発した。アークシミュレーション技術により、実際の機器の構造を用いてアークの挙動を可視化し、ガス流や電磁気的な力などについて定量的な評価を行うことができる。

With distribution, switching and control equipment components, finding a way to predict and control the behavior of the arc generated by contact switching is an important technological challenge. Fuji Electric has developed arc simulation technology that couples thermal fluid analysis with electromagnetic field analysis for further miniaturization of components, improvement of performance and accommodation of direct current devices. The arc simulation technology makes it possible to use structure of an actual device to visualize its behavior or arc for quantitative evaluation of gas flow and electromagnetic force.

### ① まえがき

受配電・開閉・制御機器コンポーネントにおいては、接点の開閉時に発生するアークの挙動を予測し、制御することが重要な技術的課題である。富士電機はこれまで、電磁界解析と回路解析を組み合わせた限流遮断シミュレーション技術<sup>(1)</sup>や熱流体解析による配線用遮断器のガス流解析技術<sup>(2)</sup>、電磁界解析によるアークの挙動予測など<sup>(3)</sup>、数値解析技術を効果的に活用することで遮断特性の性能向上を行ってきた。

受配電機器による遮断はわずかに数 ms の現象であり、測定で得られる情報は電流と電圧の波形だけである。特別な試験用のサンプルを作ることで、圧力や温度、さらには遮断部に窓をつけて高速度カメラによりアークの挙動なども観測できるが、製品形状のまま測定することは困難である。アークの挙動を左右する要因には、アーク発生時の圧力やガスの流れ、アークに発生するローレンツ力などがある。これらは、ケースの構造や材料、接点材料、開閉速度、グリッド構造などに左右される。富士電機では開発段階でより詳細な検討を行うために、これらの全ての要因を定量的に評価し、アークの挙動を視覚的に再現できるシミュレーション技術の開発に取り組んできた。

本稿では、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について、これまでの取組みと製品への適用の概要を述べる。

### ② アークシミュレーションの手法

#### 2.1 計算方法

アークは、数千度から数万度の高温の気体が電離することで導電性となり、また、電流による自己発熱で温度が上昇して通電状態が維持される現象である。

この現象を忠実に再現するためには、電子、イオンなどの荷電粒子のレベルで扱う必要がある。ここではプラズマ状態の気体の物性値を用いて、汎用の熱流体解析プログラム (STAR-CCM<sup>+</sup>) によりアーク現象を計算している。しかし、プラズマ状態になっている気体に作用する力は、熱流体解析で算出できる圧力や発熱だけでなく、電流が流れることによる電磁気的な力もある。

そこで、富士電機は、ビオ・サバルの法則に基づいて電流密度から磁場を計算するプログラムを作成し、電流と磁場の相互作用によって生じるローレンツ力などを流体要素に与えることでアークの挙動を再現した。

ビオ・サバルの法則による磁場の計算式を次に示す。

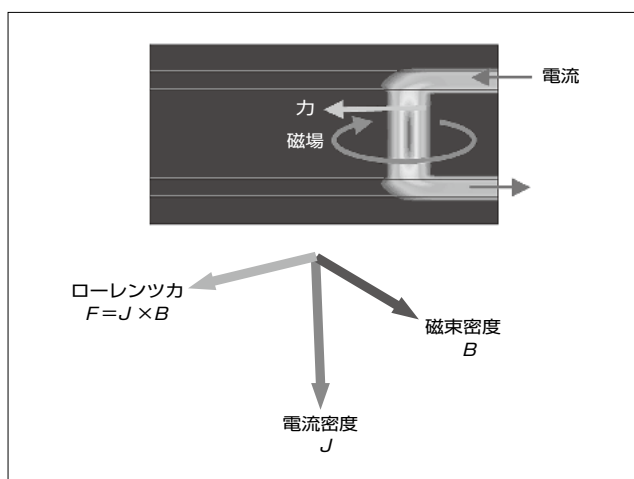


図1 ローレンツ力の計算

〈注〉 STAR-CCM<sup>+</sup> : CD-adapco 社の商標または登録商標

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{r \neq r'} \frac{J(r')(r-r')}{|r-r'|^3} dV' \dots\dots\dots (1)$$

- B : 磁束密度ベクトル
- J : 電流密度ベクトル
- r : 位置ベクトル
- V : セル体積
- $\mu_0$  : 真空の透磁率

式(1)をそのまま適用すると、セル数の二乗に比例して計算時間が増加してしまうので、積分範囲から微小電流のセルを除くことで計算を高速化している。

受配電機器のアークの挙動を扱う場合には、電極近傍におけるシース領域での電圧降下特性のほかに、接点やグリッドから発生する金属蒸気と樹脂から発生するアブレーションガス、ならびにグリッドや磁石などの種々の外部磁場の影響を考慮する必要がある。

## 2.2 アークルートモデル

アークが電極に接する部分（アークルート）は、温度や電位の変化が大きく、電子の放出や吸収などの複雑な現象が生じている。このため、電子温度がプラズマ温度に等しいとみなす局所熱平衡（LTE）仮定が成り立たない非平衡状態にある（図2）。

電子温度を考慮した非平衡モデルとしてアークルート<sup>(4)</sup>を記述する方法もあるが、計算負荷を軽減するモデルを採用した。アークルートの電圧降下を電流密度  $J$  の関数として定義し、厚さ  $\delta$  のアークルートの導電率を式(2)で与える。

$$\sigma = \frac{\delta J}{E} \dots\dots\dots (2)$$

- $\sigma$  : アークルートの導電率 (S/m)
- $\delta$  : アークルートの厚さ (m)
- $J$  : 電流密度 ( $A/m^2$ )
- $E$  : 降下電圧 (V)

電極とグリッドの表面には、 $\delta$  のメッシュを1層配置した。このアークルートモデルの陰極側と陽極側の特性を変化させることで、電極部の電圧降下や陽極側の膠着（こうちやく）が発生し、尺取走行といわれる現象を再現するこ

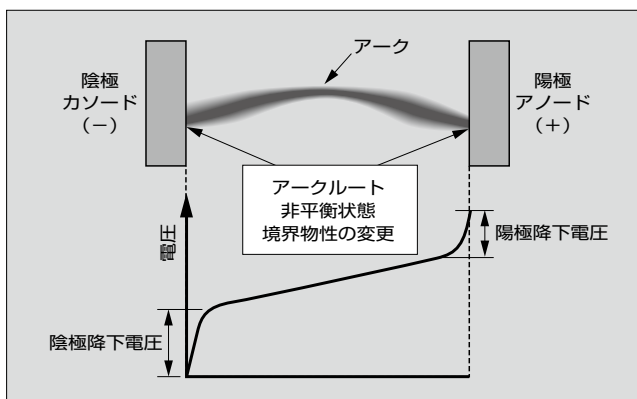


図2 アークルートの電圧降下

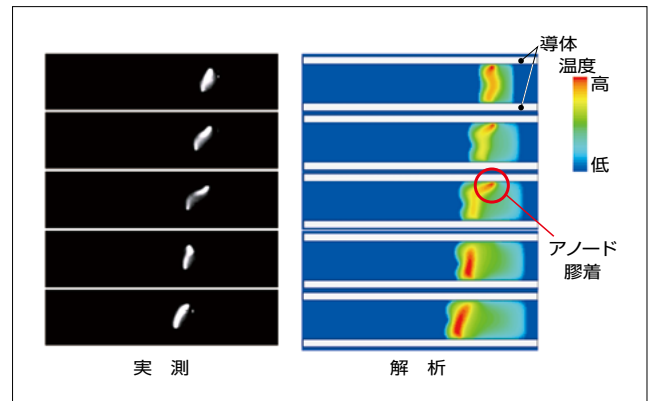


図3 平行導体におけるアークの尺取走行

とができた（図3）。

## 2.3 外部磁場（永久磁石および磁性体）モデル

外部磁場として永久磁石およびグリッドなどの磁性体があり、これらの影響を解析できるようにする必要がある。

永久磁石に関しては、初期条件として STAR-CCM<sup>+</sup> の磁場計算機能で永久磁石が作る磁場をあらかじめ計算しておき、これに式(1)の自由電流による磁場を重ね合わせて計算する。図4に、平行導体の途中に永久磁石を配置した場合のアークの走行中の状態を示す。アークは磁石の磁場により、実測と同等の速度になることが確認できた。

グリッドなどの磁性体に関しては、磁性体が磁界分布に影響してアーク自体の駆動力を左右するため、磁性体を含めた磁界分布を計算する必要がある。この計算方法として、有限要素法を用いた電磁界解析と連成させる方法や磁気モーメント法<sup>(5)</sup>なども考えられるが、計算時間の観点から表面電流法を選択した（図5）。

表面電流法は、磁性体の表面に仮想的な電流（磁化電流）を与えることで、磁性体による磁束密度の変化を再現する方法である。この方法は境界要素法<sup>(6)</sup>の一種であり、線形解析であるため非線形の B-H 特性や磁気飽和は考慮できないが、LU 分解した係数行列を再利用できるため計算時間が短い。このため、通常は磁性体には使用できない式(1)で磁束密度を計算できる利点がある。

図6は、グリッド近傍に流れる電流によって発生する磁界分布を、有限要素法と表面電流法とで比較した結果である。表面電流法を用いても要素分割の方法や計算アルゴリ

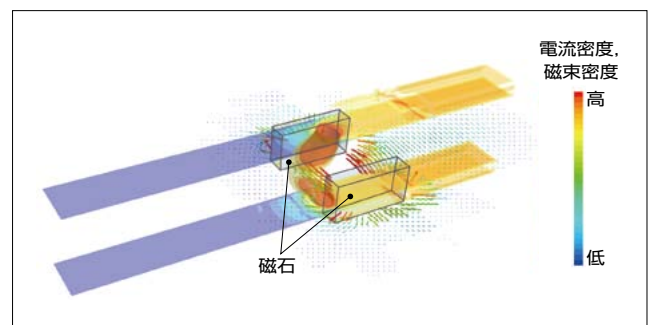


図4 永久磁石を配置した場合のアークの走行状態

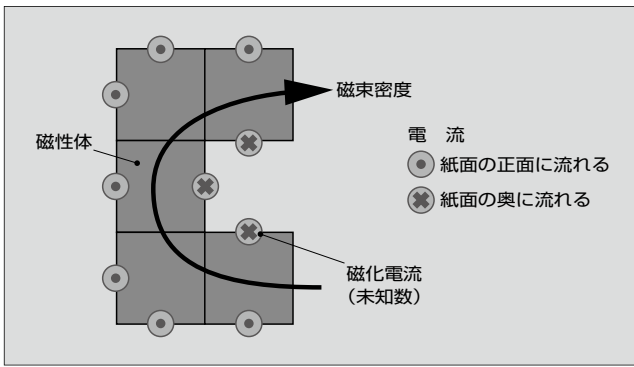


図5 表面電流法のモデル

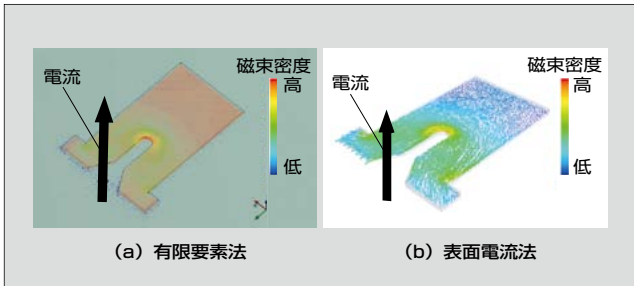


図6 グリッドの磁界解析結果

ズムの工夫により、有限要素法と同等の結果を得ることができた。

### 2.4 蒸発ガス（アブレーションガス）発生モデル

アークの挙動を大きく左右するものに、接点やケース内面から発生する蒸発ガスがある。

蒸発ガスの発生モデルとして、アークパワーやアーク電流に比例した蒸発やアークの壁面熱伝達係数  $h_{arc}$  による蒸発などについてシミュレーションを行った結果、 $h_{arc}$  による蒸発モデルが比較的精度よく計算できることが分かった<sup>(7)</sup>。

$h_{arc}$  による蒸発は、壁面第1層の流体セルで壁面温度  $T$  が隣接する固定の沸点  $T_k$  より高い場合に蒸発ガス（樹脂の場合は熱分解ガス）が発生するように設定したものである。蒸発速度  $m_k$  は式(3)で求められる。

$$m_k = \frac{h_{arc}(T - T_k)}{Q_k L} \dots\dots\dots (3)$$

- $m_k$  : 蒸発速度 (kg/m<sup>3</sup>s)
- $h_{arc}$  : アークの壁面熱伝達係数 (W/m<sup>2</sup>K)
- $Q_k$  : 融解熱と蒸発熱の和 (J/kg)
- $T$  : 壁面温度 (K)
- $T_k$  : 固体の沸点 (K)
- $k$  : 固体の種類
- $L$  : 壁面層の厚さ (m)

$h_{arc}$  に関しては、電極突き合わせなどの各種基礎実験を基に最適な値を求めた (図7)。

蒸発ガスは温度が沸点より低くなると凝縮して液体または固体に戻る。 $T$  が各材質の沸点  $T_k$  より低い場合は式(4)で凝縮速度を計算し、流体セルのソース項として設定した。

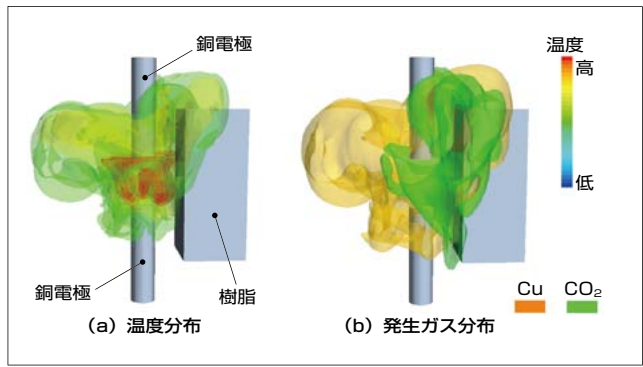


図7 電極突合せでのアークシミュレーションの例

$$n_k = Y_k R_c (T - T_k) \dots\dots\dots (4)$$

- $n_k$  : 凝縮速度 (kg/m<sup>3</sup>s)
- $Y_k$  : 質量分率
- $R_c$  : 凝縮速度係数 (kg/m<sup>3</sup>sK)
- $T$  : 壁面温度 (K)
- $T_k$  : 固体の沸点 (K)
- $k$  : 固体の種類

また、固体が蒸発して流体セル温度まで上昇する際には周囲からエネルギーを吸収し、凝縮する際には周囲にエネルギーを放出する。この関係を式(5)で計算し、流体セルに設定した。

$$S = - \sum_k (m_k + n_k) Q_k \dots\dots\dots (5)$$

- $S$  : エネルギーソース項 (W/m<sup>3</sup>)
- $m_k$  : 蒸発速度 (kg/m<sup>3</sup>s)
- $n_k$  : 凝縮速度 (kg/m<sup>3</sup>s)
- $Q_k$  : 蒸発熱と融解熱の和 (J/kg)
- $k$  : 固体の種類

アークの挙動についてシミュレーションを行う上では、前述の項目以外にもプラズマ（高温）状態での物性値や放射モデル、電極を移動させる際のメッシュ移動、再メッシュ分割などの技術的課題があり、これらの問題を解決したことでアークシミュレーションが成り立っている。

### 3 アークシミュレーションの適用事例

#### 3.1 サークिटプロテクタのアークシミュレーション

サーキットプロテクタは、機器内の回路を保護するための過電流保護機能と機器のスイッチとしての機能を併せ持つ遮断器である。小型でありながら遮断容量は2.5kA (AC240V) と大きい。アークシミュレーションでグリッドを含めた大容量遮断が再現できるかどうかを検討した。

図8にサーキットプロテクタの構造を示す。枠で囲んだ消弧室の部分モデル化し、実測の交流電流を入力としてアークシミュレーションを行った。図9に2.5kA遮断でのアーク電流とアーク電圧を示す。アーク電圧の計算結果は実測とよく一致していることが分かる。また、遮断時の

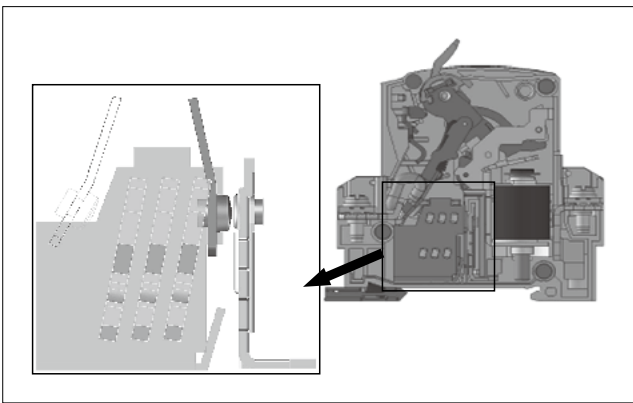


図8 サークットプロテクタの構造

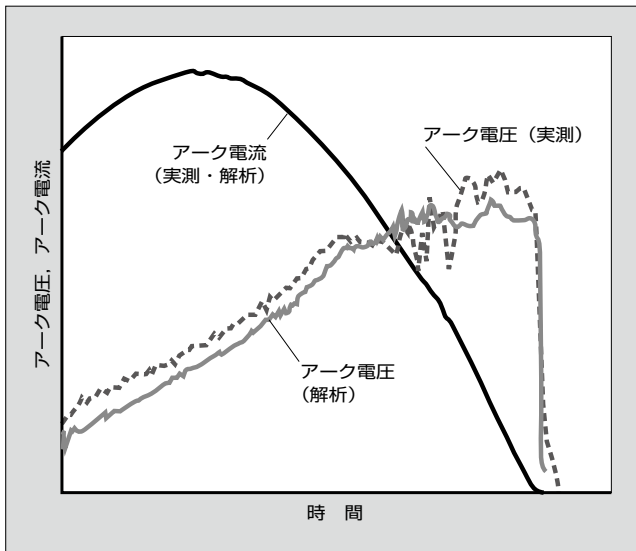


図9 遮断時のアーク電流とアーク電圧

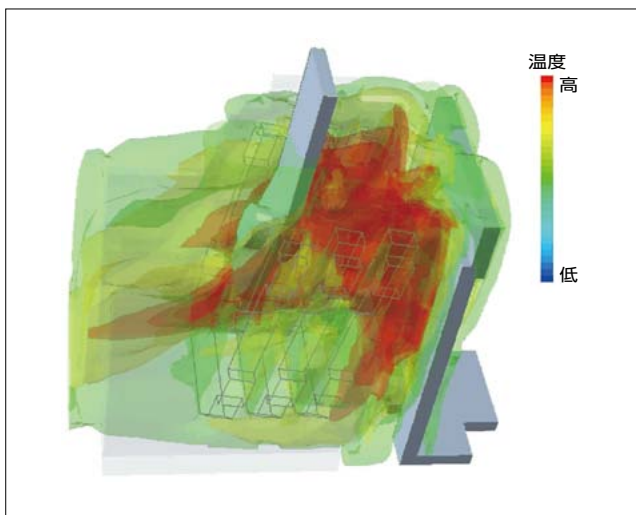


図10 サークットプロテクタのアークシミュレーション結果

アークの状態を図10に示す。

アークシミュレーションにより、時系列で温度分布、電流密度、ガス流速、圧力、ガス成分などを計算することができる。そして、その結果を基に消弧室の設計に必要な排気面積やグリッド形状、配置、ケース剛性などを検討する

ことができる。

### 3.2 配線用遮断器の直流遮断におけるアークシミュレーション

配線用遮断器は、配電系統に接続した機器を過大電流から保護する。近年では、太陽光発電やデータセンター向けなどの直流送配電の多様化、高電圧化が進行し、直流遮断に対する要求レベルも高くなってきている。ここでは、直流遮断に対する検討事例について述べる。

図11に、配線用遮断器のアークシミュレーションモデルを示す。このシミュレーションでは、試験回路を基に一定の直流電圧を入力して計算した。

図12に、直流820Aを遮断した場合のアーク電流とアーク電圧の実測との比較結果を示す。アークが転流するタイミングが多少早いがあるが電流、電圧共に実測の結果と一致している。アークは、可動接点からアークランナー側に転流し、さらにグリッド側に移動する。これに対応して、アーク電圧がいったん高くなり、続いて落ち込むという現

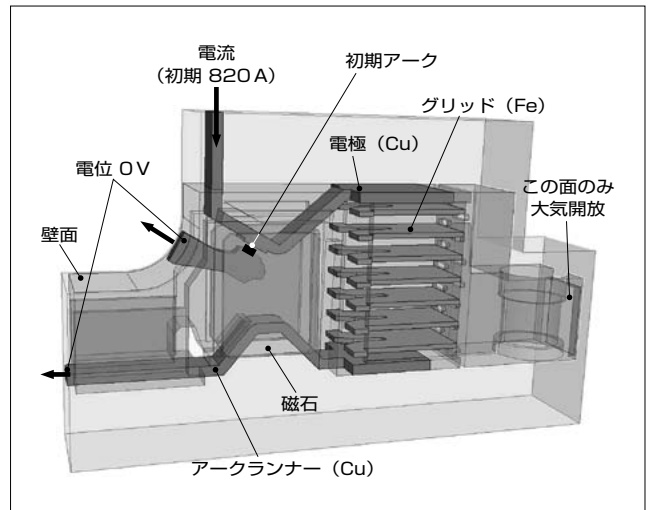


図11 配線用遮断器のアーク解析モデル

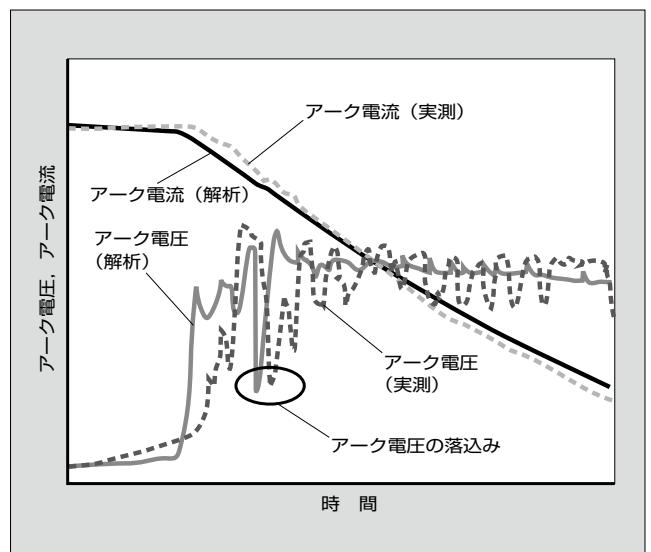


図12 820A遮断時のアーク電流とアーク電圧

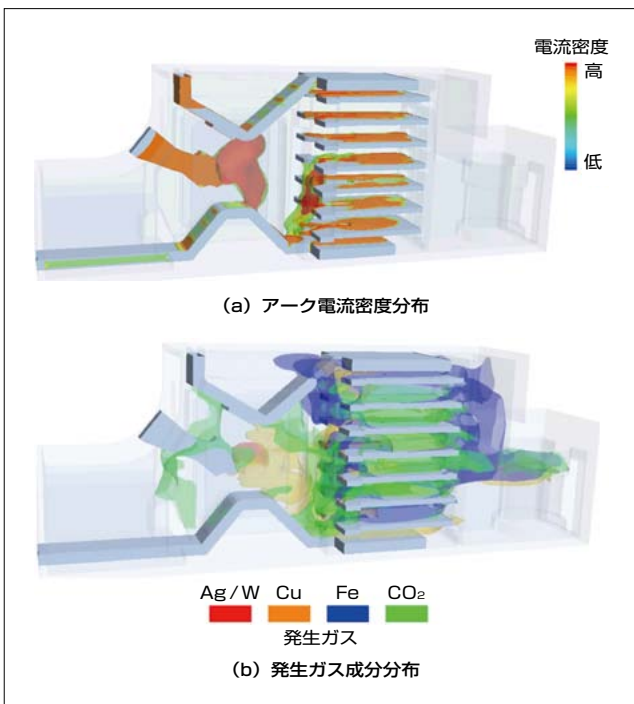


図13 アーク電流密度と発生ガス成分のシミュレーション結果

象が、実測とシミュレーションの両方に生じている。

図13に、アーク電圧が落ち込んだ時点におけるアーク電流密度と発生ガス成分のシミュレーション結果を示す。アーク電流密度を見ると、いったん、グリッドに達したアークが接点側で再点弧したことでアーク電圧が低くなったことが分かる。さらに、発生ガス成分から、導電性の高い銅の金属蒸気が接点部に対流したことで、接点間の電位が低くなって再点弧が発生したことが判明した。

このように、シミュレーションを実施することで内部がどのような現象になっているかを視覚的、定量的に把握することができる。シミュレーションは、対策を立案する上で有効な手段である。

アークは、大電流ではガス流やローレンツ力により大き

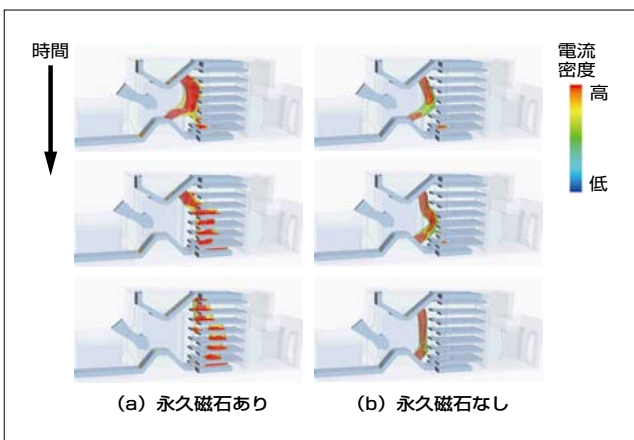


図14 100A遮断時のシミュレーション結果

な駆動力が発生するが、小電流では駆動力が小さくグリッドまで移動しない場合がある。このため、磁性体や永久磁石などを配置することで速やかにアークを駆動する方法がとられている。永久磁石の効果を確認するために、アークシミュレーションにより磁石の有無による比較検討を行った。

図14に、100Aを遮断した場合のシミュレーション結果を示す。永久磁石がない場合にグリッド手前でアークの駆動が停滞してしまうことが確認でき、実際の試験でも同様な結果を得ることができた。

#### 4 あとがき

熱流体解析と電磁界解析を連成させることでアークの挙動を予測し、評価するシミュレーション技術について述べた。本技術を適用することで、今まで見ることができなかったアークの挙動を可視化して、その挙動が電磁気的な力によるものか、ガス流によるものかを定量的に把握できるようになった。また、各種パラメータを自由に設定して検討することができるために、これまでになかった新しいコンセプトの構造に対しても試作を行わずに検証が可能となった。今後、さらなる解析精度の向上に努めるとともに、この技術を適用していくことで、より高性能かつ高品質の製品開発に貢献していく所存である。

本解析の開発に当たっては金沢大学 田中康規教授より各種物性の提供や多くの助言をいただいた。深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- (1) 恩地俊行ほか. 配線用遮断器の遮断シミュレーション技術. 富士時報. 2003, vol.76, no.4, p.217-220.
- (2) 中村修ほか. 低圧遮断器のガス流解析技術. 富士時報. 2007, vol.80, no.3, p.199-203.
- (3) 坂田昌良. 受配電・制御機器コンポーネントの設計を支えるシミュレーション技術. 富士時報. 2012, vol.85, no.2, p.169-174.
- (4) Alexandra, M. et al. Arc Behavior in Low-Voltage Arc Chambers. The European Physical Journal, Applied Physics. Feb. 2010, vol.49.
- (5) 坪井始ほか. 数値電解解析法の基礎. 養賢堂. 1994, p.22-25.
- (6) J.P. Trelles. et al. Arc Plasma Torch Modeling. Journal of Thermal Spray Technology. Volume 18 (5-6) Mid-December 2009.
- (7) Yoshiaki, E. et al. Simulation of arc in molded-case circuit breaker with metal vapor and moving electrode. 2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST).



**坂田 昌良**

機械系シミュレーション技術の開発，製品適用に従事。現在，富士電機機器制御株式会社開発・生産本部開発統括部技術開発部課長。日本機械学会会員。



**榎並 義晶**

固体高分子形燃料電池の開発ならびに熱流体シミュレーション技術の研究開発に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用研究部主査。電気学会会員。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。