

# 密閉型高電圧コンタクタの開発を支えるシミュレーション技術

Simulation Technology Supporting Development of Sealed High-Voltage Contactors

坂田 昌良 SAKATA, Masayoshi

竹本 貴紀 TAKEMOTO, Takanori

富士電機は、バッテリーの高出力・大容量化に対応できる高過電流耐量を備えた、車載向けの密閉型高電圧コンタクタを開発してきた。高電圧コンタクタは、密閉容器となるカプセル内に接点を配置し、遮断性能の良いガスを封入することで、小型でありながら大容量の開閉性能と遮断性能を実現している。電磁界、伝熱、熱などのさまざまな解析にシミュレーション技術を効果的に活用した解析主導型の開発を行うことで、実現可能性の可否を事前に判断するとともに、製品の性能や信頼性の向上を図った。

Fuji Electric has developed a sealed high-voltage contactor for automotive applications that has a high overcurrent withstand capability to deal with high-output and large-capacity batteries. The high-voltage contactor achieves high-capacity switching and breaking performance despite its compactness because its contacts are arranged inside a sealed capsule container filled with a gas of good breaking performance. By conducting analysis-driven development that effectively utilizes simulation technology for various types of analysis, such as electromagnetic field, heat conduction and thermal analysis, we were able to determine feasibility in advance and implement a design that improves product performance and reliability.

## 1 まえがき

富士電機は、バッテリーの高出力・大容量化に対応できる高過電流耐量を備えた、車載向けの密閉型高電圧コンタクタを開発してきた。このコンタクタは密閉容器となるカプセル内に接点を配置し、遮断性能の良いガスを封入することで、小型でありながら大容量の開閉性能と遮断性能を実現することができる。

高電圧コンタクタの開発に当たっては、カプセル内での接点の開閉や車載を視野に入れた環境性能の実現など、これまでのコンタクタで蓄積された技術やノウハウだけでなく、新しい技術領域での開発が必要であった。

現在では、受配電・開閉・制御機器コンポーネントに関しては、性能評価の多くの範囲をコンピュータによるシミュレーション技術により計算機上で再現できるようになってきている。ここでのシミュレーション技術とは、有限要素法による構造強度解析や熱伝導解析、振動解析、電磁界解析、数値流体解析を指し、さらにこれらの解析を連成させることで複雑な現象も再現することができる。このため、高電圧コンタクタの開発においてはシミュレーション技術を効果的に活用することで性能や信頼性の向上を図っている。

## 2 技術課題とシミュレーション技術

高電圧コンタクタの開発では、密閉容器となるカプセル構造に起因した技術課題や、コンタクタの延長線上にある小型化および高信頼性化に基づく技術課題などがある。

図1に、各種の性能を達成するための技術課題と、それらに対応するシミュレーションの解析分野を示す。高電圧コンタクタの技術課題は多岐にわたり、その解析分野も電

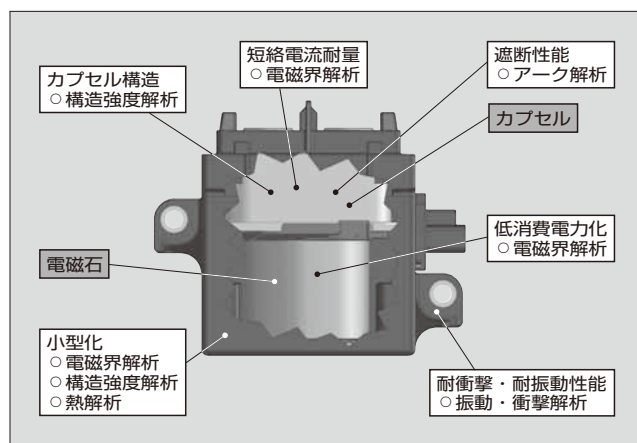


図1 高電圧コンタクタの技術課題と対応するシミュレーションの解析分野

磁界、熱、振動などの広範囲になる。

高電圧コンタクタの開発では、このような技術課題を解決するために、シミュレーションを事前に実施することで実現可能性の可否を判断し、有効となるアイデアに対して試作実験を行っていくという解析主導型の開発を行った。

また、試作実験で得られた結果はシミュレーションと比較し、乖離（かいり）がある場合はモデル化や境界条件の見直しを行い、シミュレーションの精度向上を図った。

## 3 シミュレーション適用事例

### 3.1 電磁界解析による短絡耐量性能の向上

短絡耐量性能を向上させるためには、短絡電流が流れた場合でも接点が浮き上がらないような工夫が必要となる。接点が浮き上がると、大電流アークによりカプセルが爆発する可能性がある。

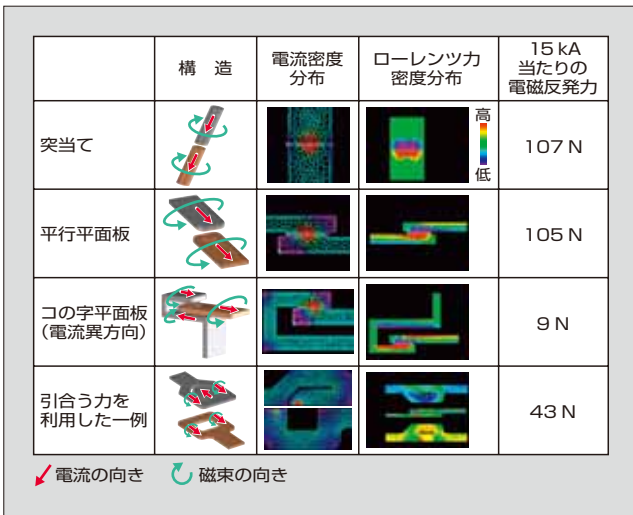


図2 接点構造と電磁反発力

開発の初期段階では、さまざまな接点の構造に対して電磁反発力がどの程度の大きさになるかを電磁界解析により検討した(図2)。この結果、コの字平板の構造が電磁反発力を極端に小さくできることが確認でき、この構造で開発を進めることにした。

また、接点の構造に関しては、電磁反発力以外に過電流が流れた場合、どの程度の時間で接点が溶融し、溶着するかなどを電気-伝熱の計算で予測した。このようなシミュレーションを実施することで、接点の接触圧力を必要最小限に確保した上で非常に大きな過電流耐量性能を実現することができた。

### 3.2 伝熱・電磁界解析による有極電磁石の高効率化

車載分野では小型化に加え、耐衝撃・耐振動性が求められることから、富士電機の高電圧コンタクトは永久磁石を用いた有極電磁石を採用している。永久磁石は温度によって特性が大きく変化することから、温度と動作特性の相関を確認しておく必要がある。車載分野では使用温度が一般の産業分野に比べて非常に高いことから、産業用コンタクトに比べてより高温になりやすい。したがって、電磁石特性のシミュレーションを行う際は、電気、磁気特性の温度依存性を考慮することが予測精度を向上させる上で重要である。

今回の開発では、電気-伝熱解析で求めた高電圧コンタクトの温度を電磁界解析にフィードバックすることで、高温時の電磁石特性も評価できるようにした(図3)。

伝熱解析に関しては、解析モデルの予測精度の向上を行った。図4に、解析結果と実測による端子間抵抗と温度上昇の関係を示す。この結果を基に、温度に影響を与える主端子間抵抗や制御コイル電圧、抵抗などのばらつきを考慮した評価を行った。

最悪な条件が組み合わさった場合においても性能を満足することを確認するために、電磁石特性に影響を及ぼす制御コイルと永久磁石における最悪な温度を予測した。この温度結果を基に、制御コイルの電気抵抗と永久磁石の磁気

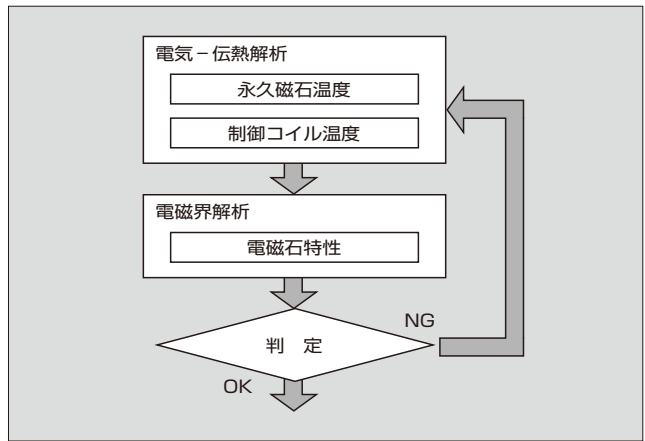


図3 高温時の電磁石特性の評価

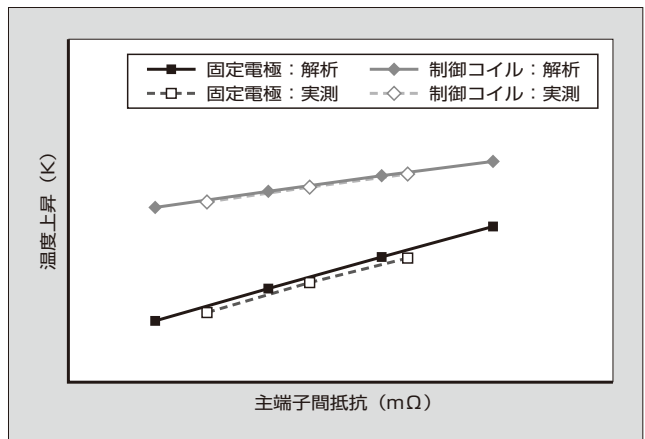


図4 端子間抵抗と温度上昇の関係

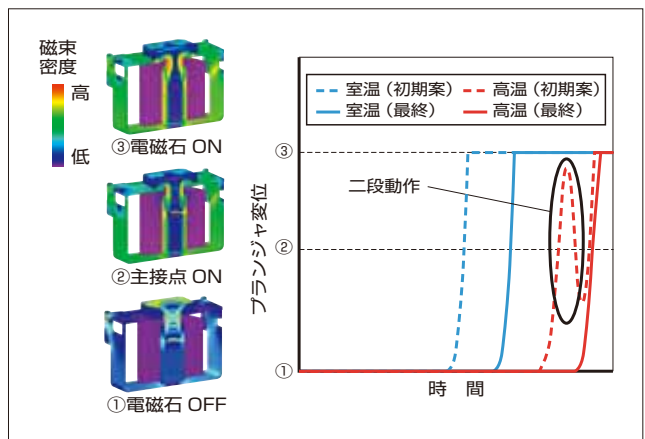


図5 電磁石部の磁束密度分布と動作特性

特性を電磁界解析で設定することで、高温時の電磁石特性を精度良く評価することができる。

図5に、室温時と高温時における電磁石部の磁束密度分布と動作特性を示す。初期案では、室温時には正常に動作しているが、高温時には吸引力不足により二段動作が発生し、正常に動作できないことがシミュレーション上で判明した。改善策を見いだすために磁束密度分布に着目し、磁気飽和状態であった固定フランジの磁路断面積の最適化を図った。その結果、高温時でも正常に動作できる高効率

電磁石を確立した。

### 3.3 振動解析による耐振動性の向上

一般に、産業用のコンタクトの共振周波数は100 Hz以上に設定すれば十分であるのに対して、車載の場合では200 Hz以上になるように設計する必要がある。共振周波数は、固有値解析により計算できる。しかし、固有値解析は原理的に材料の粘弾性などの非線形問題には対応できない。筐体（きょうたい）に使われている樹脂材料は粘弾性材料であり、成形時の樹脂配向、振動速度や振幅、温度依存などで弾性係数が変化するために予測が困難となる。今回の開発では、初期構造案の振動試験から共振周波数を確認し、その値が計算値と一致するようにヤング率を逆算することで精度向上を図った。

図6に、振動応答の比較を示す。図6(a)は初期構造案に、材料物性、減衰値を同定した上で振動応答を一致させたものである。構造変更に対しては振動モードの動きから対策を実施した。

最終構造案の結果は図6(b)となる。初期構造案に対してケースのリップ追加などの対策により固有振動数は240 Hzまで高くなり、耐振動性が増加したことが分かる。この結果は室温状態での特性であり、図7に示すように環境温度が変化した場合を考慮し、200 Hz以上に共振周波数が回避していることを確認することで最終構造を決定している。

このように樹脂材料の物性値を振動振幅や周波数に応じて確実に同定することで、より良い精度で振動応答を予測することができる。

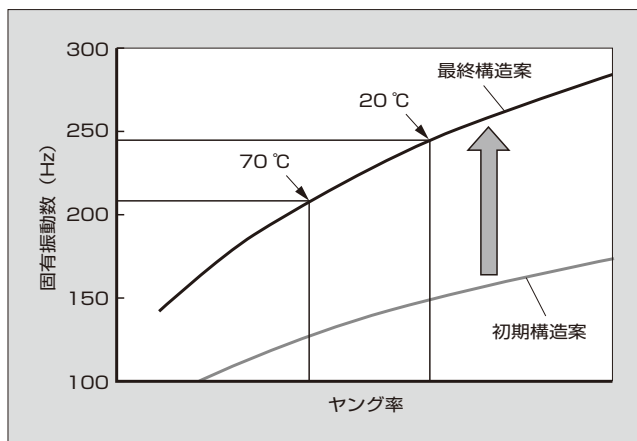


図7 ヤング率と固有振動数の関係

### 3.4 熱応力解析によるカプセル構造の高品質化

高電圧コンタクトでは、カプセル構造の気密性をいかに確保するかが重要な技術課題となる。

図8に、カプセル構造における電極の接合部を示す。このカプセル構造は、セラミックスや銅、鉄などの異なる材料から構成され、ろう付やレーザ溶接などで接合されている。このため、接合時に発生する残留応力による強度低下や破損、ヒートサイクルによる熱応力での疲労強度を事前に評価する必要がある。

接合部の強度評価に関しては、熱応力解析により接合部に発生する残留応力やヒートサイクルの応力振幅を計算することで疲労寿命の推定を行った。

熱応力解析では解析モデルを2段階に分けて計算した。最初のステップではろう付け接合時を模擬し、ろう材が固化する780°Cから25°Cまでの計算を行う。その後、その応力状態を維持したままカプセル下部の上面ヨークとフランジキャップのモデルを結合し、その状態でカプセル内に圧力を加えヒートサイクル時の温度の繰り返しを考慮した熱応力解析を行った。この一連の流れを連続して計算することで、残留応力を加味した状態での正確な応力振幅を得ることができる。図9に計算ステップと、その時のろう付け部における発生応力の計算例を示す。

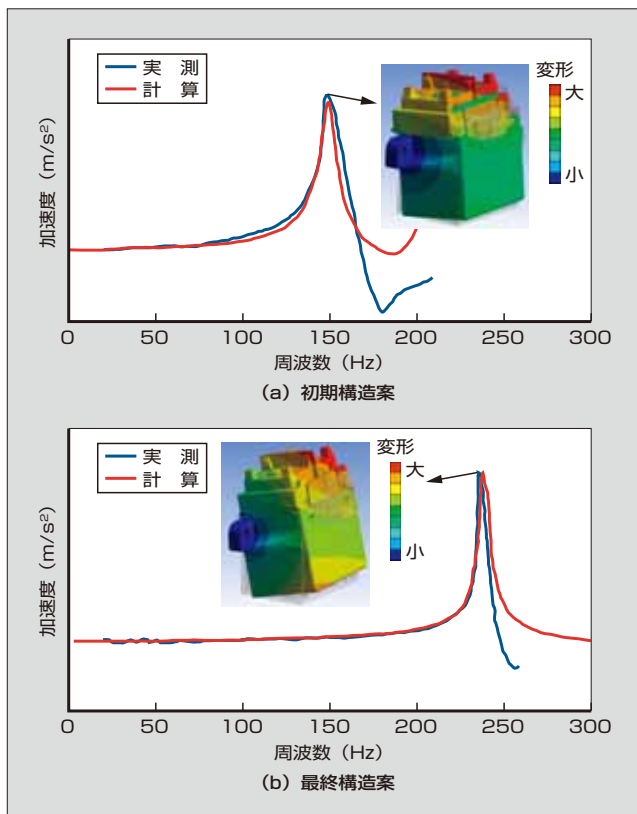


図6 振動応答の比較

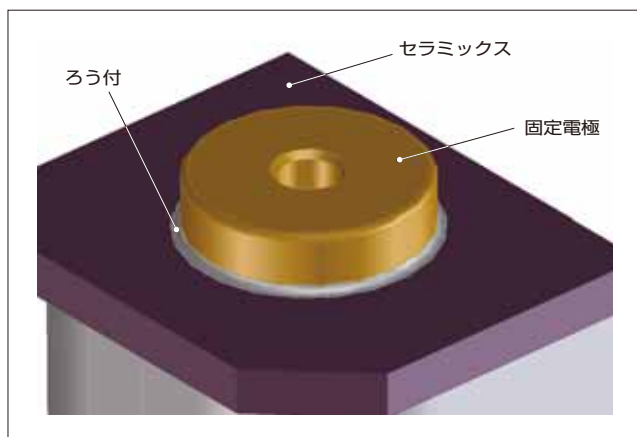


図8 カプセル構造における電極の接合部

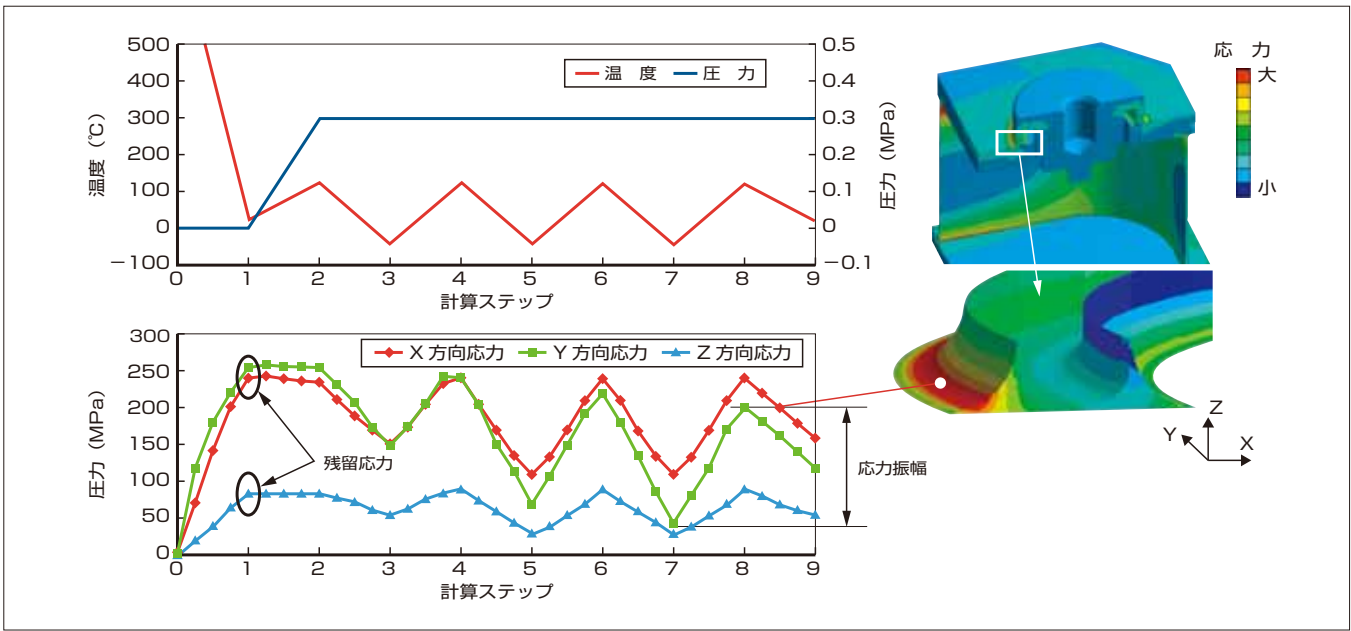


図9 熱応力解析結果例

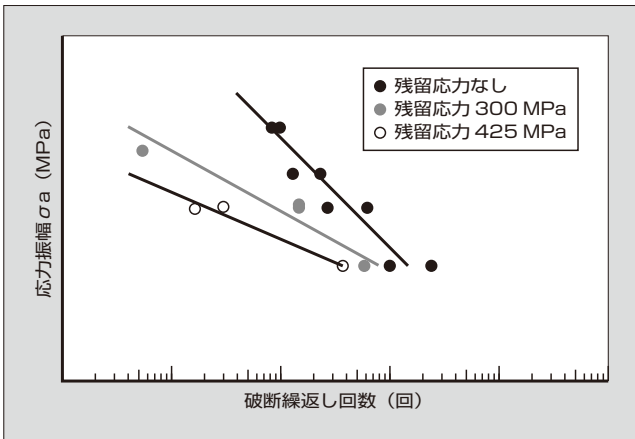


図10 ろう材のS-Nカーブ

寿命予測を行う上では解析で得られた残留応力、応力振幅とS-Nカーブとの比較が必要となる。ろう材のS-Nカーブについては、残留応力を加味した試験片を作成し、疲労試験によりデータを取得した(図10)。

この結果を基に解析で得られた残留応力、応力振幅が仕様で求められる破断繰返し回数を満足するかを判断した。

### 3.5 アーク解析による無極性遮断の実現

富士電機は、接点開閉時に発生するアーク挙動の検討に当たり、電磁場と熱流体を連成させたアークシミュレーション技術を開発し、これまでに多くの製品に適用している。

高電圧コンタクトはカプセル構造であるため、他の開閉機器と比べて内部のアーク観察が極めて困難である。測定で得られる情報はアーク電圧やアーク電流などに限られ、アークがどのような挙動になっているかを判断できない一面がある。

アーク解析では、永久磁石の外部磁場を含めた計算が可

能であり、接点の材料や内部ガスの特性、内壁の材料から発生するガスの影響などを含めて検討が可能である。さらに、アーク挙動を視覚的に判断できるので開発の初期段階で適用することで、遮断構造の方向性の決定に重要な役割を果たした。

高電圧コンタクトでは、永久磁石の磁場によってアークを引き伸ばすことでアーク電圧を上げて遮断を行っている。

図11は磁石配置とアークの伸長方向を示したものである。図11(a)の場合では永久磁石の磁束が並行となるために、フレミングの左手の法則に従い、左側の電極から入った電流はカプセルの左側の端に伸びることになる。しかし、逆向きに電流を流すとアークは中央にまで伸びてしまい、十分なアーク長を得ることができない。

富士電機では車載の急速充電回路にも対応するため、電流がどちらの方向に流れても遮断できるように図11(b)のような磁石配置を考案した。開発の初期段階では、これら

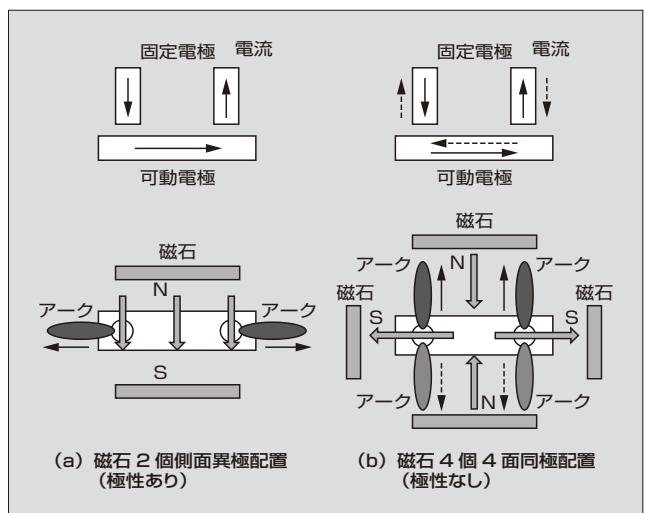


図11 磁石配置とアークの伸長

の磁石配置とアーク伸長がシミュレーションで再現できるかを確認した。図12は、図11(a)の磁石配置での遮断を解析したものである。実験で測定したアーク電圧、アーク電流とほぼ一致しており、シミュレーションがアーク挙動を再現できていることを確認した。

図13は、極性をなくすための図11(b)の原理をモデル化したものである。磁石配置に関しては電磁界解析により、磁束分布やベクトルから最適な配置の検討を行った。

図14に、無極性モデルのアーク解析結果を示す。計算結果は狙い通りのアーク長、アーク電圧になることが予測され、試作した実験結果では、ほぼ同等の特性を得た。

アーク解析ではアーク挙動を把握することができるため、図15に示すような電極形状の違いでアークの停滞に差ができることなどが判明した。さらに、蒸発ガスの挙動を見ることで、アークの再点弧の原因が金属蒸気の滞留の影響であることや、カプセル内部の空間を広げることで接点近傍の金属蒸気を拡散できること、また、外部磁場の強さや接点材料の違いにより初期のアーク速度に差が出ることなどが判明した。このようなシミュレーション結果を基に遮断構造の方向性を決定することで、無極性遮断を実現した。

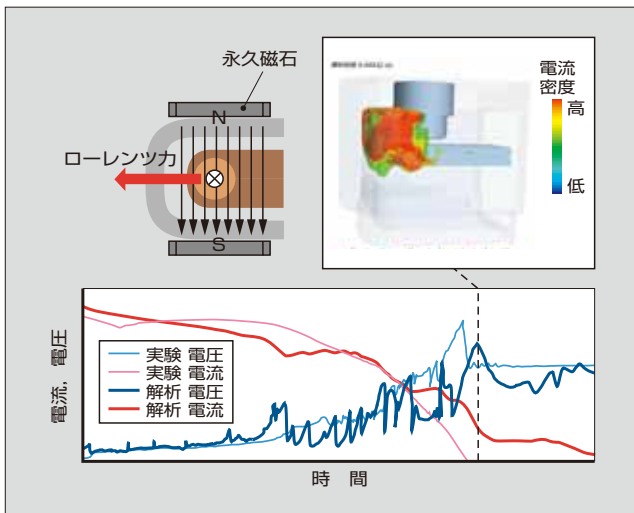


図12 平行磁場・極性ありにおけるアーク解析結果例

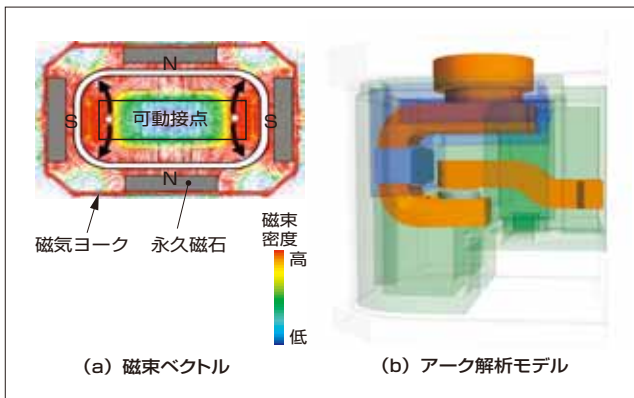


図13 無極性モデルのアーク解析モデル

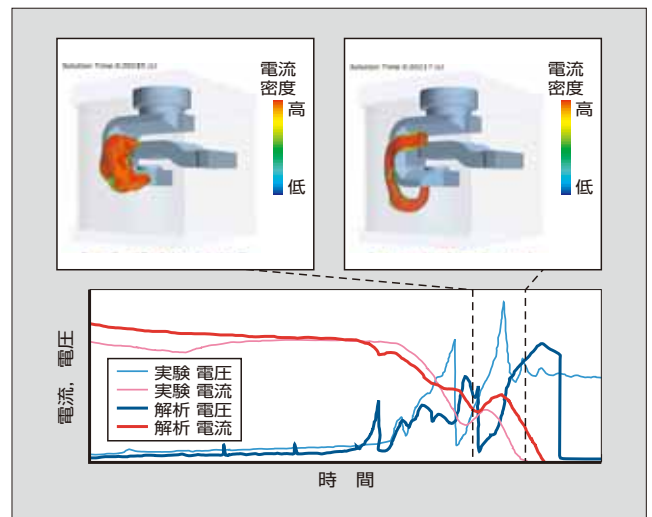


図14 無極性モデルのアーク解析結果例

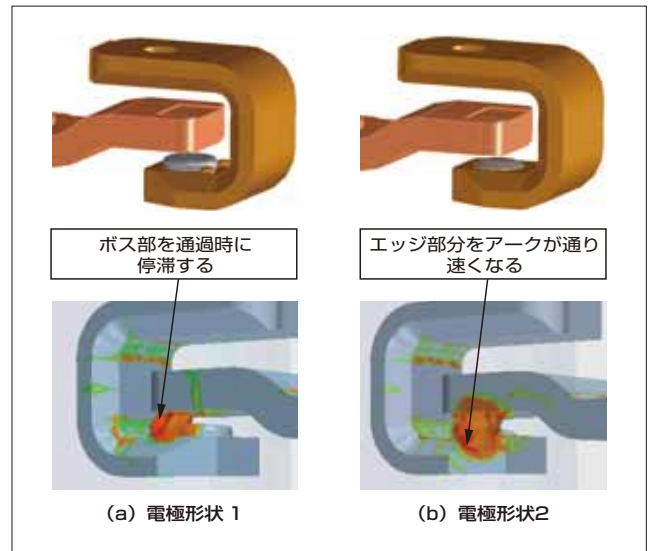


図15 電極形状の違いによるアーク挙動

4 あとがき

密閉型高電圧コンタクタの開発を支えるシミュレーション技術について述べた。代表的な事例の一端を述べたものであるが、実際の開発現場では解析主導の下、ほとんどの技術項目でシミュレーションを事前実施し、実現可能性の可否を判断してきた。この手法は設計開発にとどまらず、製造技術の分野にも適用されてきている。計算機やソフトウェアの高性能化は、多くの技術分野に対応できるようになってきたが、それでも、製品まるごとをシミュレーションで再現することは現実的ではない。ある特定の部分における現象を抜き出して計算することになるため、これを十分に理解した上でシミュレーションを利用することが重要であると考えられる。

今後も、より現実に即した結果を得られるシミュレーション技術を開発し、製品の性能や信頼性の向上に努めていく所存である。

### 参考文献

- (1) 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.
- (2) 坂田昌良, 榎並義晶. アークシミュレーション技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.3, p.216-221.



**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本部技術開発部課長。日本機械学会会員。



**竹本 貴紀**

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本部技術開発部。





\*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。