

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

Simulation technology to support the design of power distribution and control equipment

坂田 昌良 SAKATA Masayoshi

受配電・制御機器コンポーネントのシミュレーション技術には、ケースの強度や構造部品の小型化などを検討する構造強度解析、接点の開閉やハンドル操作などの効率を向上するために行う機構解析がある。製品の小型化に直接影響する熱問題では、ケースやプリントの板などの熱解析を行い、最適な部品レイアウトに生かしている。その他にも、電磁界解析や樹脂流動解析、熱伝導・電磁界連成解析などを行っている。現在では、構想設計の段階でシミュレーションを用いることにより、機能や仕様を満足する設計となっているかどうか判断できる。

Simulation technology for power distribution and control equipment includes structural strength analysis to investigate elements such as case strength and the miniaturization of structural parts, and mechanical analysis to improve efficiency of contact point switching and handle operation. Fuji Electric performs thermal analysis on parts such as the case and circuit board to find heat problems that directly affect the miniaturization of products, and the results are used to optimize the part layout. Other analyses are performed, including electromagnetic field analysis, resin flow analysis, and thermal conduction and electromagnetic field interaction analysis. It is currently possible to determine whether a design satisfies functionality and specifications using simulations at the concept design stage.

1 まえがき

受配電・制御機器コンポーネントの設計は、三次元CADに移行したことにより、構想設計段階で製品の性能やコスト、量産時の組立性や品質など、多くの情報を推定できるようになってきている。開発のフロントローディングが進み、開発初期に設計品質を高めることで後戻りのない開発を行うことが可能である。

構想設計の段階で部品をどのような形状にしていけるかは、これまでに蓄積している製品のデータや設計者の経験によるところが大きいが、現在ではシミュレーション技術を用いることで機能や仕様を満足する設計となっているかどうか判断できる。設計者はパソコン上で自らのアイデアが実現可能かどうかを判断して形を作り込んでいくのである。本稿では、受配電・制御機器コンポーネントの開発に利用しているシミュレーション技術について述べる。

2 シミュレーション技術

受配電・制御機器コンポーネントには、電磁接触器（コンタクタ）、サーマルリレー、配線用遮断器（MCCB）、漏電遮断器（ELCB）、コマンドスイッチなど、配電系統に接続された機器の開閉を行うものや、機器や配線を過電流から保護するためのものがある。これらは接点を機械的に開閉させる機構を持ち、開閉の駆動力には電磁石の吸引力やスプリングの蓄積力を用いている。開閉機構や駆動力を検証するためには、シミュレーション技術が効果を発揮する。

2.1 コンタクタ

コンタクタでは、駆動用電力の省エネルギー化や小型化、

開閉接点の長寿命化が要求される。これらの要求を満足する機構を開発するために、シミュレーションを使って検討を行っている（図1）⁽¹⁾。

コンタクタを駆動する電磁力は、電磁界解析により予測することができる。コイルの消費電力および電流と電磁力のバランスを考えながら電磁石設計を行う。この電磁力と接点を含めた振動系の連成解析により過渡的な状態での接点の跳ね返り（バウンス）なども予測でき、接点バウンスを小さくするためのパラメータ検討も可能である^{(2),(3)}。

接点の長寿命化に関しては、電磁石のコアが衝突するときの衝撃力の影響を受けるため、この影響を事前に把握する必要がある。これらの計算も前述の連成解析により予測できる。

ケース強度に関しても、静的および動的な応力解析を利用することで予測でき、樹脂流動解析により、事前にウエルドラインの位置を把握することで、ケース強度に問題がないかどうかを検討している⁽⁴⁾。

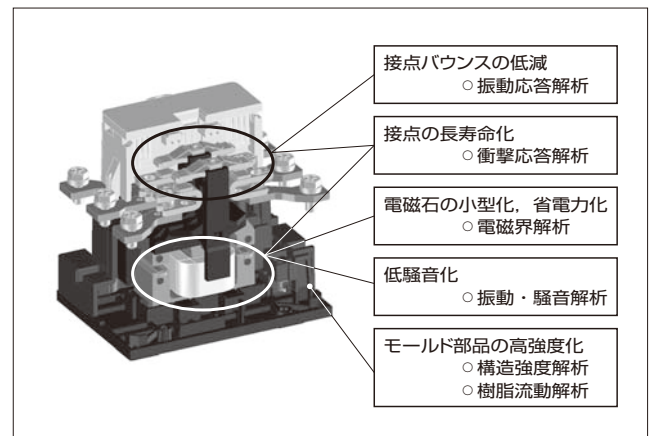


図1 コンタクタの設計におけるシミュレーション技術

2.2 サーマルリレー

サーマルリレーは、電動機などの過負荷防止のために、コンタクトと組み合わせて用いる。一般的な機械式のものにはヒータやバイメタルや接点などで構成されている。規定以上の電流が流れるとバイメタルは加熱され湾曲する。これにより接点を開閉する。図2に、サーマルリレーの設計に適用しているシミュレーション技術を示す。

サーマルリレーではヒータの発熱だけでなく、バイメタルや電線を含めた電流と伝熱の連成解析を実施することで、バイメタル、ヒータ、ケース本体および端子部の温度を予測することができる⁽⁵⁾。

機構設計におけるポイントは、規定値を超えた電流で接点を動作させるスナップアクションの機構部の解析である。スプリングや接点ばねの弾性解析を含めた機構解析により、より精度の高い動作特性の予測が可能になっている⁽⁶⁾。

2.3 MCCBとELCB

受配電・制御機器コンポーネントのもう一つの代表例としてMCCBとELCBがある。これらの設計に適用しているシミュレーション技術を図3に示す。

MCCBは、接点の開閉をハンドルで行うため、蓄勢さ

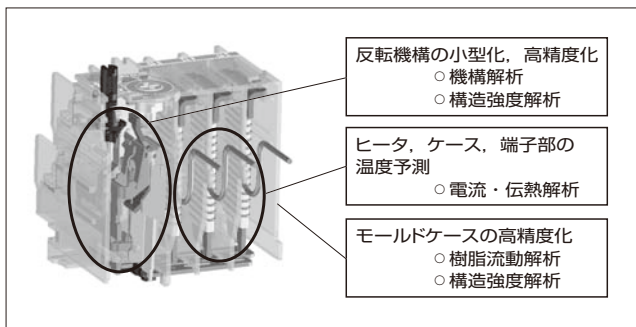


図2 サーマルリレーの設計におけるシミュレーション技術

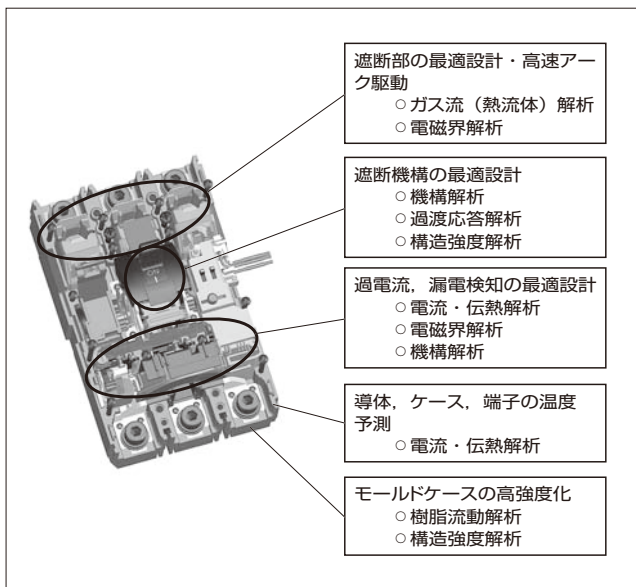


図3 MCCBとELCBの設計におけるシミュレーション技術

れたスプリングのエネルギーを効率良く接点レバーに伝達することが機構設計のポイントである。適切なハンドル操作力で仕様を満足する開閉動作ができるように、また限られたスペースの中に納まるように設計する必要がある。機構解析を用いることで、設計者のアイデアを即座に定量的に示し、製造上のばらつきの範囲内において、開閉動作に与える影響を考慮したパラメータ設計が行える。

MCCBとELCBでは過電流保護や漏電保護機能を持っており、サーマルリレーと同様のバイメタルや電磁力を利用するものがある。その構造も熱解析、電磁界解析により検討することができる。

遮断器における技術的な課題は、短絡時の大電流遮断である。接点間に発生するアークを素早くグリッド側に移動させ、消弧することが設計上のポイントであり、この現象に関しては、ガス流解析や電磁界解析を用いてアークの移動を推定することができる^{(7),(8)}。

近年では、直流給電のニーズの高まりに対応した直流遮断の技術開発も積極的に進めている。直流遮断の場合には、低電流領域でのアーク移動に利用する永久磁石の最適な位置や形状を決定するために電磁界解析を利用する。

3 適用事例

3.1 構造強度解析

受配電・制御機器コンポーネントに一般的に使用する樹脂材料は、鉄鋼材料とは異なり弾性領域が明確でない。また、ガラス繊維が充填されているものは塑性ひずみも小さい。定性的な強度検討には、弾性解析で十分であるが、定量的な判断を行うには、弾塑性の物性を考慮した解析が必要になる。

テストピースを使った引張り試験や、曲げ試験の結果を

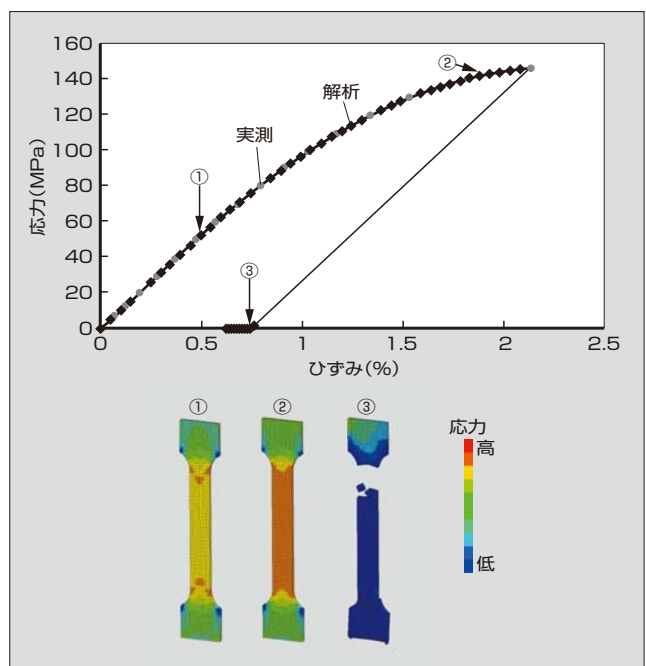


図4 引張り試験のシミュレーション結果

基に得られた樹脂の機械的特性値を使用することで、高い精度で強度の検討を行える。

図4は、テストピースの引張り試験をシミュレーションで再現したものである。現在では材料の破壊を含めた検討まで行える。

図5に、MCCB短絡時のモールドケースの応力解析を実施した例を示す。短絡時にはアーク発熱によりケース内部で圧力が上昇し、図のようにケース全体が膨らむ際の、過渡的な応力状態を検討している。このような解析は、MCCBだけでなくコンタクトでも利用されている。

図6は、ミニコンタクトの保護協調時のアークにより発生する圧力を想定した場合の端子カバーの強度を検討した事例である。初期案では、圧力の上昇に伴いカバーが飛散することがシミュレーションにより予測された。このため、カバーのフック形状などを見直し、同一圧力でもカバーが飛散しない構造とすることができた。

このように、現在では過渡現象を含む弾塑性解析を行うことで、設計の初期段階で確度の高い製品設計が可能となっている。

3.2 機構解析

図7に、マルチVCBとMCCBの接点機構部の解析モデルを示す。現在では機構解析を用いることで、ハンドル

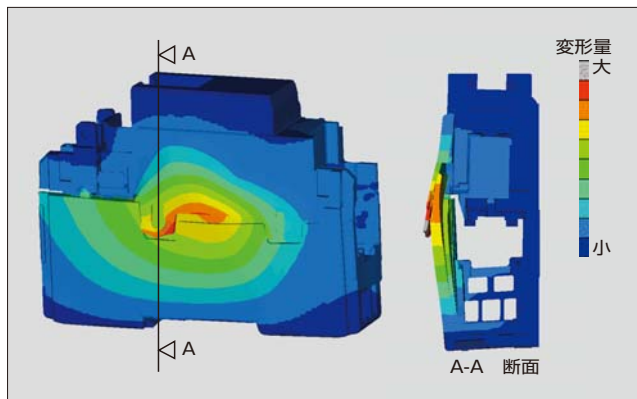


図5 MCCBの短絡時の応力解析

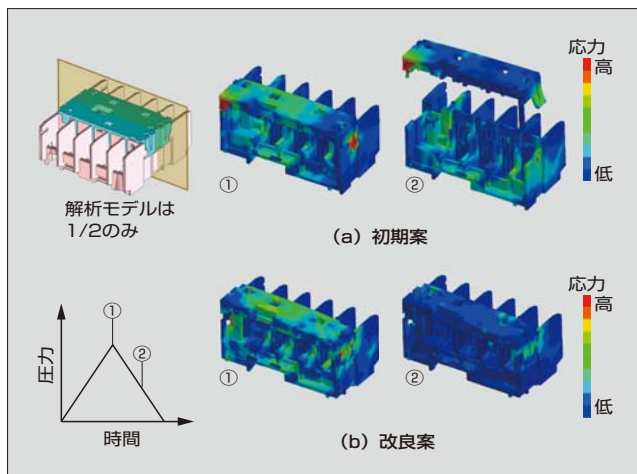


図6 ミニコンタクト端子カバーの応力解析

操作力や接点開閉スピード、トリップ荷重など、設計に必要なパラメータはパソコン上で予測できる。これらの機構解析は、開閉機構だけでなく、サーマルリレーのシフタや差動機構などの設計にも利用している。

図8に、サーマルリレーのシフタと差動機構を示す。サーマルリレーは、ヒータで熱せられたバイメタルの湾曲量をシフタで反転機構に伝達している。過電流保護のみの場合は、二相のバイメタルの湾曲量を直列に反転機構に伝達するシフタの構造になっている。一方、欠相保護の場合は、三相のうちの一相の電流が流れなくなるため、このバイメタルが湾曲しない状態となり、差動シフタを用いることで、この差分を反転機構に伝達する構造になっている。バイメタルの湾曲量は、バイメタル自体の剛性、シフタの支持位置、摩擦による抵抗、反転機構部側の剛性の影響など、多くのパラメータが影響する。機構解析を用いたことで、シフタにおいて抵抗となっている部分を視覚的に捉えることができ、ばらつきが少なく効率の良いシフタの設計ができた。

また、サーマルリレーの開発では、3.3節で示す熱解析と連動させることで、電流入力から反転までの特性を予測できる。

3.3 熱解析

受配電・制御機器コンポーネントでは、電流のジュール熱や接点抵抗、ヒータなどが発熱源となっている。小型化は熱問題に直接影響するため、製品の温度分布を事前に把握しておくことが必要である。

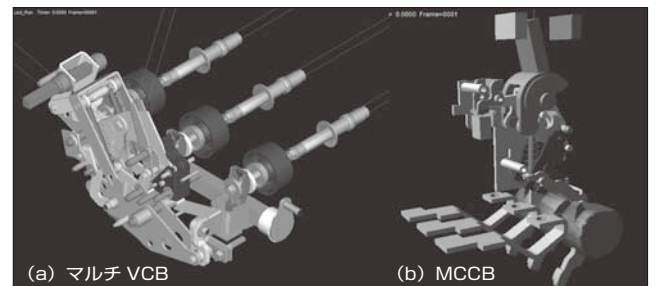


図7 機構解析モデルの事例

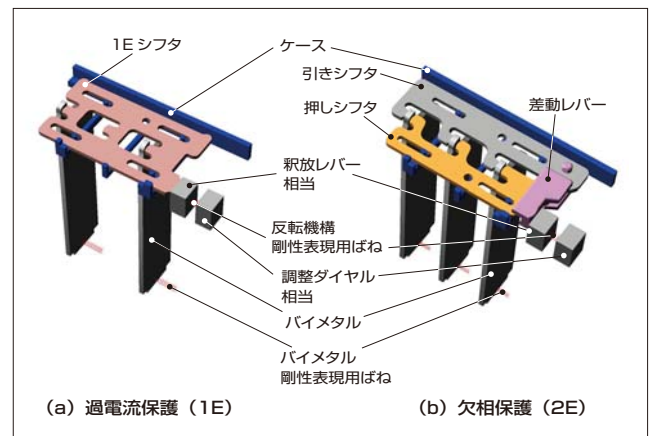


図8 サーマルリレーシフタ部の機構解析モデル

図9に、サーマルリレーの熱解析の一例を示す。配線に接続された製品では、配線からの熱の流入と流出が多く、配線側のモデル化が重要である。この部分のモデル化は、過去の実測データを基に予測精度を向上している。

熱解析を実施することでバイメタル本体の熱分布だけでなく、補償バイメタルや端子部、ケースの温度も予測できる。これにより、検討段階で想定した構成が適切であるかどうかを判断でき、後戻りのない開発が可能となった。

受配電・制御機器コンポーネントには、電子ユニットを内蔵する製品も多く、さまざまな電子ユニットについても熱解析を適用している。図10は、コンタクトのプリント基板の小型化に際して行った熱解析事例である。新構造のプリント基板は従来品に対して面積を約75%に縮小したものである。従来のレイアウトのまま縮小しただけでは、コンデンサやバリスタなど熱に弱い部品への影響が懸念された。そこで、熱解析により温度分布を予測し最適なレイアウトを決定した。

3.4 電磁界解析

受配電・制御機器コンポーネントには、交流や直流の多種多様な電磁石が利用されている。現在では、電磁界解析を用いることにより、小型で損失の少ない高性能な電磁石の設計ができるようになった。電磁界解析は、電磁石の設計だけでなく、過電流、漏電検知の引外し装置や、パイロットランプ用の小型変圧器、過電流が流れた場合の接点の電磁反発力やアークの挙動予測などにも利用している。

図11に、DC1,000V対応ブレーカで検討したアーク挙動の電磁界解析の一例を示す。初期案に示す永久磁石の

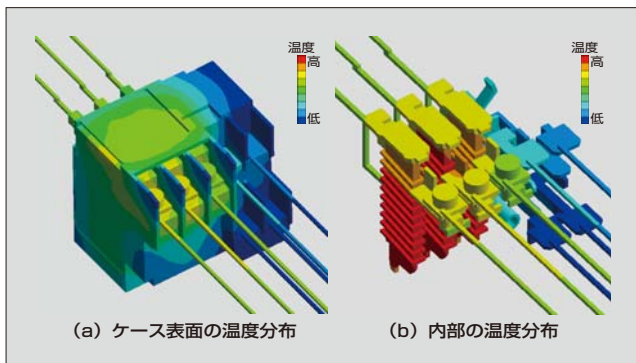


図9 サーマルリレーの熱解析

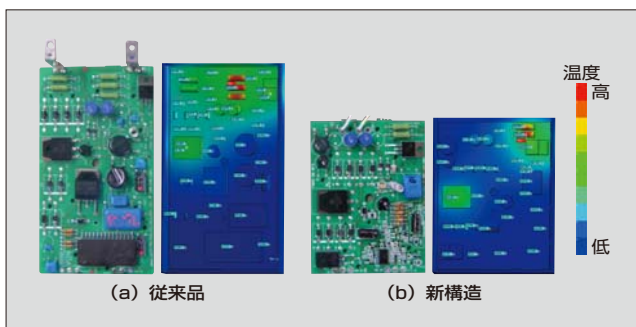


図10 プリント基板の熱解析

配置や大きさでは、アークを駆動するローレンツ力が弱く、改良案にしたことでアーク駆動のローレンツ力を得られることが判明した。これにより、損失の少ない高性能な電磁石設計が可能となった。

直流回路では電流零点が存在しないため、接点間で発生したアークを消弧グリッド側に短時間で移動させ、アークの伸長、冷却によりアーク電圧を電源電圧以上にして電流を遮断する必要がある。大電流ではアーク自身の磁界や高温のアークにより発生するガス流で移動するが、低電流領域ではこの効果は期待できないため永久磁石の電磁力を利用している。

DC1,000V対応ブレーカの開発では、初期段階に電磁界解析による検討を実施したことで、試作回数を大幅に削減でき短期間で完了した。

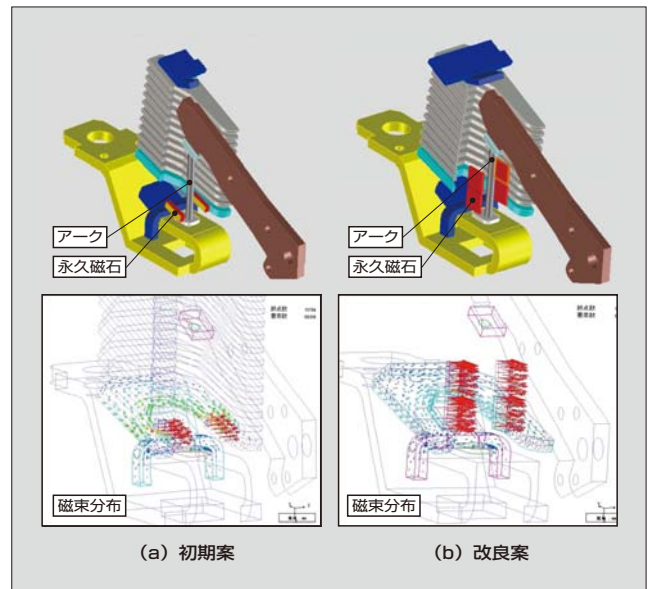


図11 MCCB遮断部の磁界解析

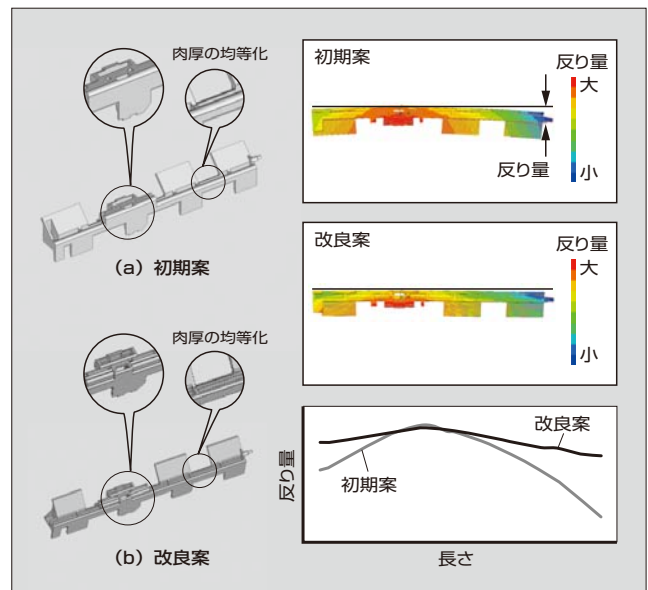


図12 クロスバーの樹脂流動解析

3.5 樹脂流動解析

受配電・制御機器コンポーネントは、多くの部品に樹脂材料を用いているため、成形後の反りや引け、ウエルドなどの位置を事前に確認する必要がある。

図12に、寸法精度が要求される低圧遮断器のクロスバーの事例を示す。クロスバーは過電流や漏電検知などのバイメタルやソレノイドの変形を開閉機構部に伝達する部品であり、反り変形に対する精度が要求される。初期案では、成形後の変形が大きくなることが予測されたため、クロスバーの肉厚を均等化することで反り変形を抑える構造にできた。

成形後の反りや引けの問題に対してはゲート位置の変更や成形条件の変更で対応できる場合もあるが、多くの場合、設計変更までさかのぼる必要がある。このため、設計初期の段階で樹脂流動解析を実施することが開発期間を短縮するポイントになる。

3.6 熱流体と電磁界の連成解析

受配電・制御機器コンポーネントは、接点开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課題である。富士電機では、これまでアークが発生するアブレー

ションなどの熱流体解析や電磁界解析によるアークのローレンツ力の解析により、これらの課題の対応を図ってきた。より精度の高い予測を行うために、熱流体解析と電磁界解析を連成させたアーク挙動のシミュレーション技術を開発した。

図13に、平行導体のアーク挙動をシミュレーションで再現した例を示す。10mmの間隔の導体に100Aを通电してアークを発生させ、そのときのアーク挙動と電圧のレベルを比較している。

図14に、解析と実測のアーク電圧の比較を示す。この解析手法を用いると、アークが発生する磁場と電場や、アークの発熱によるガス流を考慮できるため、消弧グリッドの磁場や圧力を含めた効果、ならびに永久磁石による外部磁場の影響も評価できるようになる。

今後、さらなる検討を加えて、実電極に適用していく。

4 あとがき

シミュレーション技術は、物理現象を単純化した上で成り立つ技術であり、実際の現象を全て再現できているわけではない。しかし、製品を設計する段階において、各種パラメータの影響を定量的に、しかも視覚的に把握できる非常に有効な手段である。その製品が成り立っている物理現象を理解し、シミュレーションで検証できる限界を知った上で道具として活用していくことが必要である。

従来、解析専任者にしかできなかったシミュレーション技術は、パソコンの高性能化やプリ・ポスト処理の高度化により、設計者が手軽に利用できるようになってきている。開発の初期段階において、設計者のアイデアを自らの手でシミュレーションを駆使して検討していくことが良い製品を生み出すポイントと考える。

これまで蓄積してきたデータやノウハウをベースとして、設計者が利用できるシミュレーション技術のさらなる高度化により、高品質、高性能のものづくりに貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 村田進ほか. 電磁開閉器におけるシミュレーション技術. 富士時報. 2000, vol.73, no.9, p.517-520.
- (2) 潮崎克郎ほか. 有接点機器の長寿命化とその寿命予測. 富士時報. 2002, vol.75, no.9, p.539-543.
- (3) 和田正義ほか. 交流電磁接触器の動的挙動の解析. 富士時報. 2002, vol.75, no.9, p.535-538.
- (4) 石川和幸, 坂田昌良. 受配電・制御機器への樹脂流動解析による品質の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.206-210.
- (5) 内山拓ほか. サーマルリレーの熱変形解析による信頼性の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.188-191.
- (6) 坂田昌良, 恩地俊行. 開閉, 操作・表示, 制御機器の最適設計技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.2, p.178-183.
- (7) 恩地俊行ほか. 配線用遮断機の遮断シミュレーション技術. 富士時報. 2003, Vol76, no.4, p.217-220.

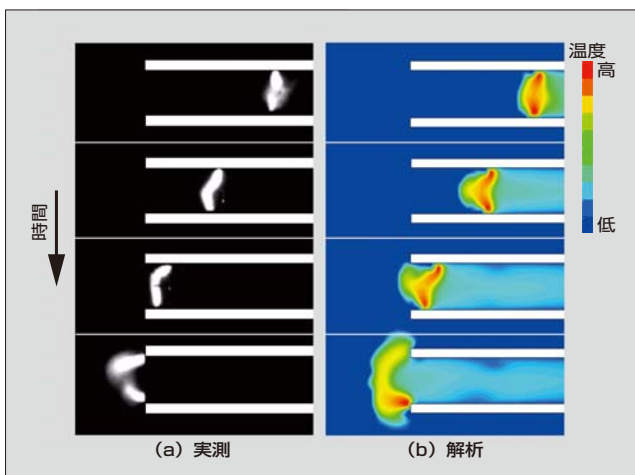


図13 アーク挙動シミュレーション事例

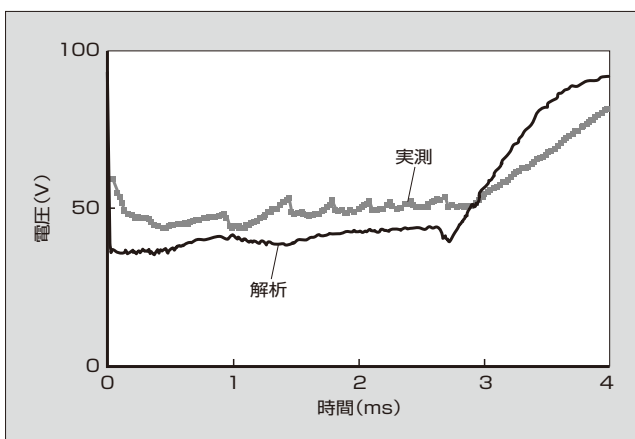


図14 アーク電圧の比較

- (8) 中村修, 恩地俊行. 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.
- (9) 中野雅祥ほか. 低圧遮断器モールド筐体の強度解析技術. 富士時報. 2007, vol.80, no.3, p.195-198.



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技術・開発本部開発技術部マネージャー。日本機械学会会員。





*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。