

# 電力流通機器における最近の解析技術

Numerical Simulation of Electric Power Transmission and Distribution Equipment

浦井 一

Urai Hajime

橋本 裕明

Hashimoto Hiroaki

松尾 尚英

Matsuo Takahide

加藤 達朗

Kato Tatsuro

新興国の電力需要増加や再生可能エネルギーの導入により、電力流通システム市場は堅調に拡大すると予想されている。電力流通システムの主要機器である変圧器、遮断器、開閉装置では、これまでの高電圧化・大容量化に向けた技術開発から、経済性と環境負荷の低減に主眼を置いた開発に移行している。経済性の追求には限界設計が重要であり、日立グループは、解析技術の高度化に取り組んでいる。最新の解析技術として、変圧器の損失・冷却解析、ガス遮断器の熱ガス流解析・機構解析、乾燥空気絶縁開閉装置の放電解析が注目されている。

## 1. はじめに

新興国での電力需要拡大による電力供給網の拡大、先進国での再生可能エネルギー導入の拡大による送電系統強化や電力流通設備の老朽化などを背景に、電力流通システム市場は大きな成長が見込まれている。電力流通システムを構成する主要機器である変圧器、遮断器、開閉装置は、高電圧化、大電流化が進められてきた。最近では、さらなる信頼性、経済性の追求に加えて、環境に対する要求に応えた機器の開発が進んでいる。

ここでは、電力流通機器の開発において活用されている最新の解析手法について述べる。

## 2. 変圧器の解析技術

変圧器の開発では、過去には電力需要の拡大を背景に高電圧化、大容量化を進めてきたが、それが一段落しつつあり、近年では省エネルギー、省資源などの経済性や環境負荷軽減が主体となっている。高効率化や小型化を目的とした開発では、性能とコストとのバランスが重要であり、そのためには各種特性に関する高精度な解析技術が不可欠である。

変圧器の重要な検討項目は、絶縁、損失、冷却（温度上

昇）、短絡強度などがあり、さまざまな使用条件に対して、電界解析や系統解析、強度解析などを用いて各種特性を評価している。最近では、漂遊損および冷却特性を三次元で解析することにより、複雑な構造においても損失や温度上昇を高精度で解析している。

### 2.1 三次元漂遊損解析

変圧器の損失には、鉄心に発生する鉄損（無負荷損）と負荷損とがある。負荷損には、巻線抵抗によって発生するジュール損と、導電性構造物への漏れ磁束侵入によって発生する渦電流損（漂遊損）とがあり、後者は電磁界解析を使用して求める。三次元の有限要素法で油入変圧器の漂遊損を詳細解析した例を図1に示す。巻線周囲の構造物で損失が発生している様子が分かる。この結果に基づき、熱流体解析で局所温度上昇部位や損失低減対策の必要性などが詳細に評価可能である。

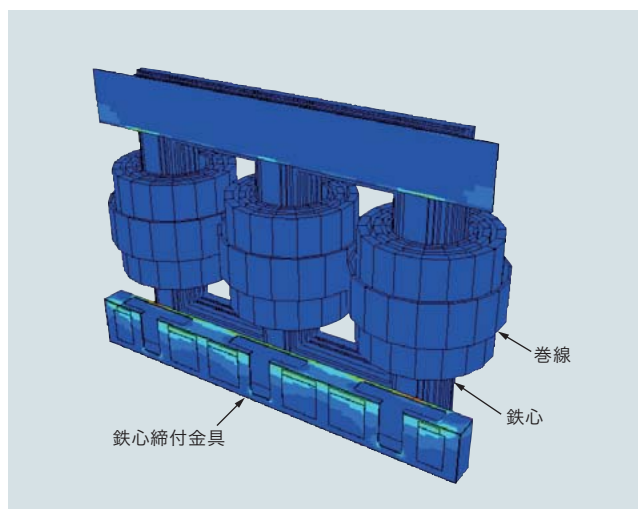


図1 | 変圧器の漂遊損解析結果

変圧器の構造物における漂遊損の発生様相を示す。巻線下方に位置する鉄心締付金具は、複雑な形状をしており、局所的に大きな漂遊損が発生している。

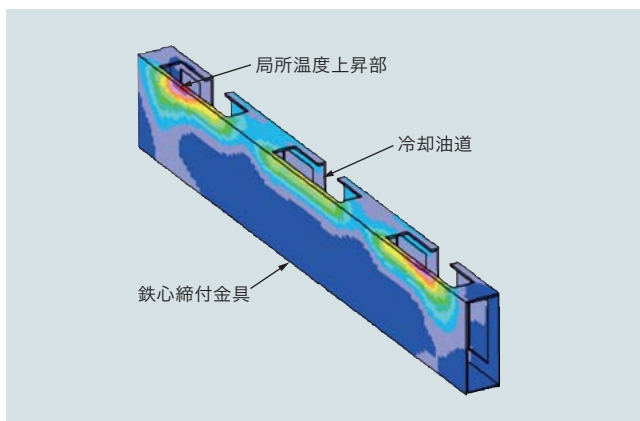


図2 変圧器の下部鉄心締付金具の熱流体解析結果

鉱油の流れを考慮した熱流体解析で得られた鉄心締付金具の温度上昇分布を示す。油道の構造などを調整し、表面温度上昇を基準値以下に抑制している。

## 2.2 三次元熱流体解析

変圧器の冷却については、変圧器全体や巻線内部を対象とした二次元あるいは三次元の熱流体解析を行う。変圧器の巻線内流路は複雑であり、流れの滞留などで局所的に高温となることがある。電磁界解析で求めた構造物や巻線内部の損失（発熱密度）分布に基づき、鉱油などの絶縁冷却媒体の温度上昇や、構造物における局所的な温度上昇などを評価する。変圧器の下部鉄心締付金具を対象とした三次元熱流体解析結果の例を図2に示す。冷媒を流すための油道周辺における局所的な温度上昇は、油道の構造や周囲の構造物配置などの影響を受けるが、それらを最適化して基準値以下に抑制している。日立グループは、この損失—熱流体連成解析技術を、次世代500 kV変圧器の試作器から適用開始しており、これにより温度上昇を高精度に評価することができる。

## 3. ガス遮断器の解析技術

ガス遮断器は、電極を機械的に高速で動作させ、電極間に発生したアークプラズマに消弧ガスを吹き付け、冷却することで電流を遮断する。ガス遮断器の開発では、1990年代に定格電圧1,100 kVの超々高圧遮断技術が完成し、大出力の操作器を用いた高電圧化の開発が終息し、近年は小型化や省保守化による経済性向上が主要な開発課題となっている。現在では、より小さい力で高い遮断性能を実現する遮断部と、従来の大出力の油圧操作器に代わり、小型でメンテナンス性に優れたばね操作方式の適用拡大を進めている。

低操作力遮断器の開発には、電流を遮断する心臓部である消弧室の遮断性能を予測するための熱ガス流解析と、消弧室を駆動するばね操作器の開発期間を短縮するための遮断器全体の動作解析を活用している。

## 3.1 圧縮性熱流体解析

アークを考慮した熱ガス流解析では、電流遮断プロセスを評価している。ここではアーク現象をより精度よく模擬するために、光の放射・吸収や、絶縁ノズル材の蒸発を考慮したアークモデルを用いている。従来は、軸対称を仮定した構造で解析していたが、最近では三次元構造での解析が可能となっている。アークによって加熱された高温ガスを三次元圧縮性流体解析で解析した例を図3に示す。絶縁ノズルから排気筒内に流入した高温ガスの温度分布を解析することにより、電極を支える構造物への影響が評価可能となっている。排気筒内の高温ガスは絶縁耐力が低く、電流遮断直後の絶縁破壊につながる可能性があるため、三次元熱流体解析を排気筒の形状検討に活用している。

## 3.2 ばね操作器の機構解析

ばね操作器は絶縁操作ロッドを介して遮断部を駆動する装置である。日立グループは、試作器製作前に遮断器の挙動を予測する技術として、ソレノイドの磁場解析、FEM（Finite Element Method：有限要素法）モデル解析、消弧室のガス圧力解析と機構解析を組み合わせ、開閉指令が入力されてから動作完了するまでの遮断器全体の挙動を把握可能な動作モデルを構築した<sup>1)</sup>（図4参照）。

絶縁操作ロッド、回転軸、レバーは、部品の剛性が機構の動作特性に影響を与えるため、FEMモデル解析と連携した弾性体要素とした（図5参照）。ばね操作器では、部品どうしの接触、衝突、分離を考慮してモデル化した。これらのモデル化により、開閉動作特性の予測と諸元の最適化が可能になった。また、遮断器全体を動作解析することにより、絶縁操作ロッドをはじめとする各部に発生する動的荷重の予測、摺（しゅう）動部位における摩擦係数の

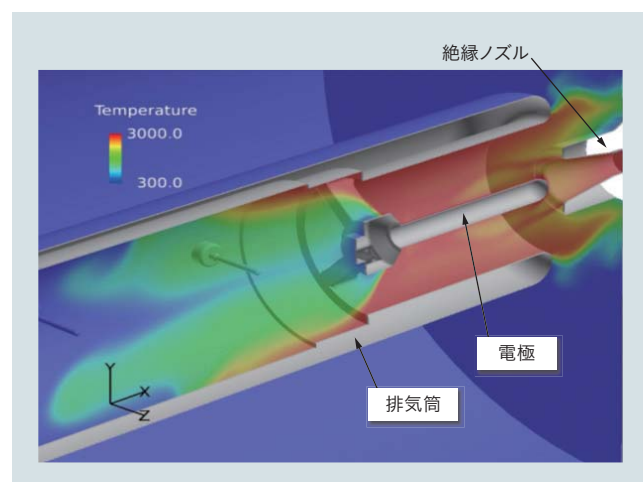
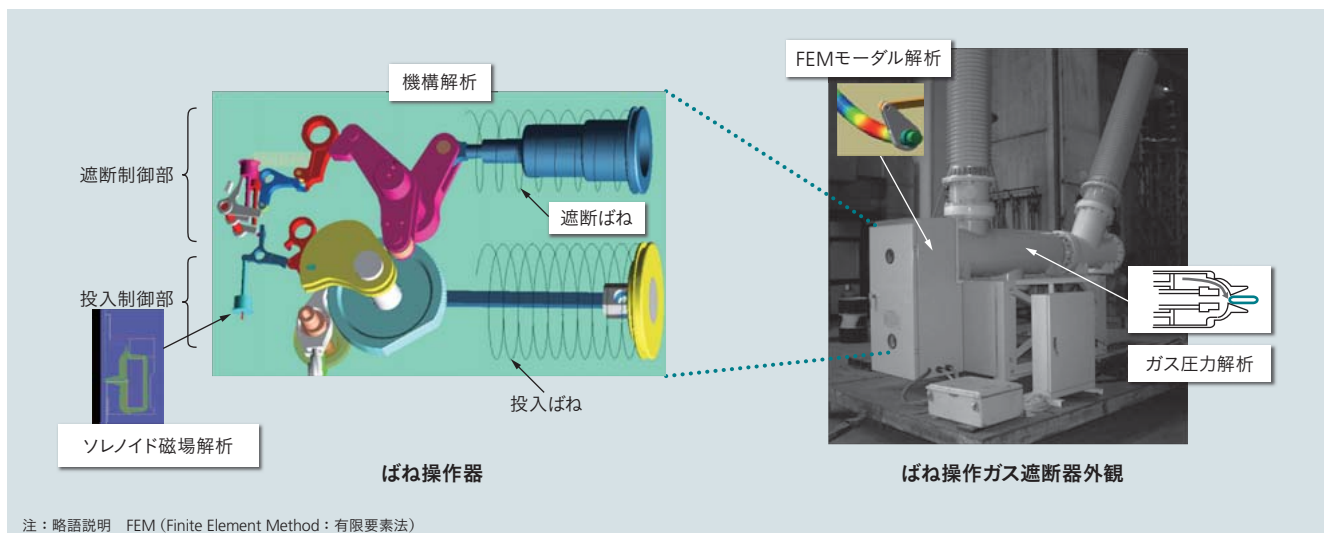


図3 ガス遮断器の電流遮断時の熱流体解析結果

研究用モデル遮断器の排気筒内の高温ガスの温度分布を示す。絶縁ノズルよりアークガスで加熱された高温ガスが排気筒内に流入する様子を三次元で解析している。



注：略語説明 FEM (Finite Element Method：有限要素法)

図4 | ばね操作ガス遮断器の動作モデル化概要

ばね操作機構を含む遮断器全体の機構解析モデルをベースとして、ガス圧力の解析と連成させ、ソレノイドの動磁場解析と連携させた統合モデルである。

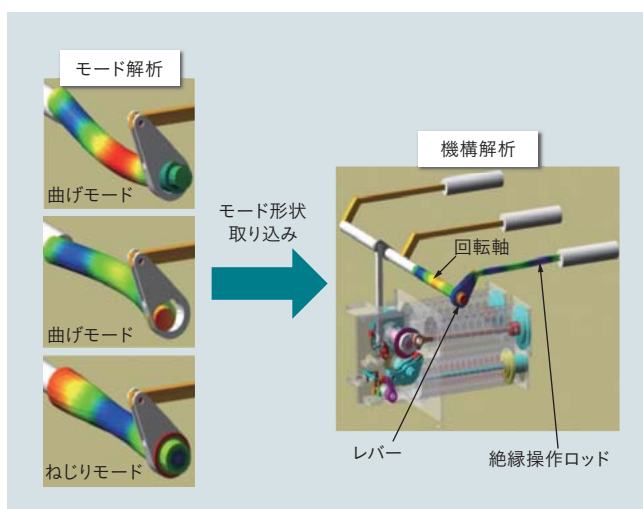


図5 | FEMモデル解析と連携した弾性体要素

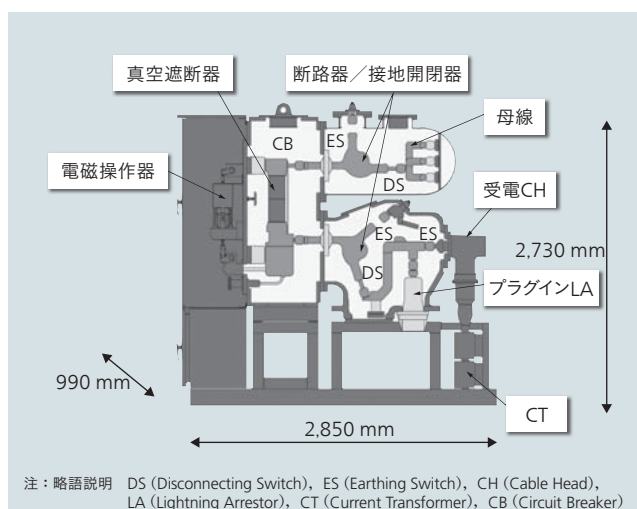
シャフトのFEMモデル解析で拘束モードを計算して得られた代表的なモードシェイプ(曲げ、ねじり)を示す。

変動の影響評価が可能になった。遮断器の高速化技術の開発にこの解析を活用している<sup>2)</sup>。

#### 4. 乾燥空気絶縁開閉装置の解析技術

環境意識の高まりを背景に、地球温暖化係数の大きいSF<sub>6</sub>の使用量削減を進めている。乾燥空気絶縁技術と真空遮断技術を核とした72 kV乾燥空気絶縁開閉装置を製品化しており(図6参照)、乾燥空気絶縁の適用拡大を進める計画である。

空気はSF<sub>6</sub>ガスに比べて約 $\frac{1}{3}$ の絶縁性能であることや、空気絶縁はSF<sub>6</sub>ガス中に比べて電界依存性が小さい。そのため、SF<sub>6</sub>ガス機器で使用される電界解析による絶縁性能予測では不十分であり、放電現象を考慮した評価が必要不可欠となる。そこで、乾燥空気中でも絶縁性能予測を実現するために、空气中放電現象に立脚した放電経路解析技術を新たに開発した。



注：略語説明 DS (Disconnecting Switch), ES (Earthing Switch), CH (Cable Head), LA (Lightning Arrestor), CT (Current Transformer), CB (Circuit Breaker)

図6 | 72 kV乾燥空気絶縁開閉装置

真空遮断器の操作器はメンテナンス性に優れた電磁操作式を採用し、断路器/接地開閉器は直線駆動三位置機構によって小型化を実現している。

#### 4.1 空気絶縁における放電経路解析

空気中の放電解析には、ストリーマ理論を基にした放電開始モデルを適用した。対象となるギャップ空間の電界分布を算出した後、電子1個から始まった電子なだれの電子増倍過程を、電子軌道を考慮したモデル化により、全メッシュで放電発生確率が1を超えた場合に自発的な放電(ストリーマ放電)が開始すると定義した<sup>3)</sup>。この放電開始条件を満たす印加電圧を絶縁破壊電圧として計算する。

乾燥空気絶縁開閉装置の断路器部分を対象にした放電経路解析の一例を図7に示す。同図(a)は今回評価した電極形状と電界解析結果、(b)は放電経路解析によって得られた放電経路を可視化した結果である。(c)は絶縁破壊試験で得られた放電写真であり、放電経路は放電経路解析で得られた結果と一致していることが分かる。また、絶縁破壊電圧でも電極形状、ガス圧力を変えた条件での実験値と計算値がよく一致している。この結果から、今回の放電開始モデ

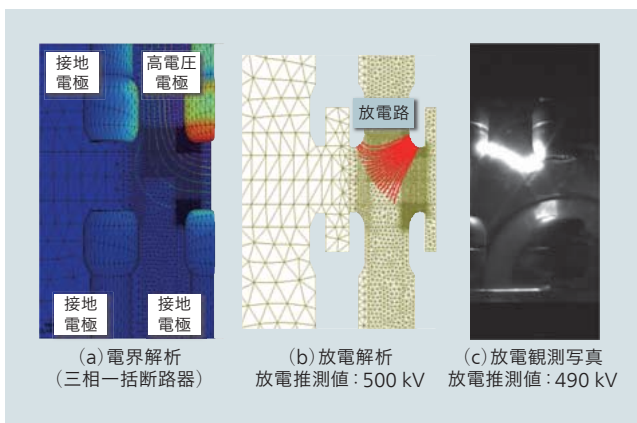


図7 | 放電経路解析の一例

今回開発した放電解析により，従来の電界解析では評価できなかった空気中の放電電圧が推定可能となった。

ルによる絶縁破壊電圧推定が妥当であることが確認できた。今後は，より複雑な現象となる絶縁物沿面に対する放電解析技術に展開し，空気絶縁機器全体を評価可能とする解析ツールに仕上げる予定である。

## 5. おわりに

ここでは，電力流通システムの主要機器である変圧器，遮断器，開閉装置の開発において活用されている解析技術について述べた。

これら電力流通機器の製品開発においては，ここで述べた各種解析技術を駆使することにより，信頼性と経済性の両立，さらには環境負荷低減などの要求に応えることが可能になる。

## 参考文献

- 1) 橋本，外：ばね操作ガス遮断器の動作モデル化，日本機械学会論文集（C編），Vol.79，No.799（2013.3）
- 2) 橋本，外：超高圧大容量ばね操作GCBの高速化技術，平成25年電気学会 電力・エネルギー部門大会，22（2013.8）
- 3) 柳田，外：湿度の影響を考慮した気中不平等ギャップにおける部分放電開始計算モデルの開発，電気学会論文誌A，Vol.131，No.12（2011.12）

## 執筆者紹介



### 浦井 一

1997年日立製作所入社，日立研究所 エネルギー・環境研究センタ  
電力流通研究部 所属  
現在，ガス遮断器の研究開発に従事  
博士（工学）  
電気学会会員，IEEE会員



### 松尾 尚英

1988年日立製作所入社，日立研究所 エネルギー・環境研究センタ  
電力流通研究部 所属  
現在，変圧器の電磁現象に関する研究開発に従事  
電気学会会員



### 橋本 裕明

1996年日立製作所入社，日立研究所 機械研究センタ 構造信頼性  
研究部 所属  
現在，ガス絶縁開閉装置とガス遮断器の機構および強度に関する  
研究開発に従事  
電気学会会員，日本機械学会会員



### 加藤 達朗

1996年日立製作所入社，電力システム社 日立事業所 国分生産本  
部 開閉装置設計部 所属  
現在，電力流通事業のガス絶縁開閉装置の開発に従事  
工学博士  
電気学会会員