

特 集 論 文

# ガス絶縁開閉装置を支える設計・解析技術

Useful Design & Simulation Technique for Gas Insulated Switchgear

太田 剛史*	一倉 直由*
K. Ota	N. Ichikura
原田 温史*	須貝 元樹*
A. Harada	G. Sugai
堀越 和彦*	
K. Horikoshi	

## 概要

ガス絶縁開閉装置（GIS）は今まで大容量化と小型化及び複合化とが同時に進められてきた。そのため、その設計においては多くの課題が生じる。その課題を解決するために様々な設計・解析技術が使われている。本稿では、当社においてGISを設計・開発するときに活用されている設計手法・解析手法について簡単に紹介する。

## Synopsis

Gas Insulated Switchgear (GIS) has been developed over the years and has become larger breaking capacity, smaller size and more combined components. These contradictory progresses caused many problems for GIS designing and development. We use some design and simulation techniques to solve these problems. In this paper, we introduce the design and simulation techniques which we use to design and to develop GIS.

## 1. はじめに

当社のガス絶縁開閉装置（GIS）は国内向けの7.2kVから海外向けの260kVまで多岐にわたっている。それらの開発においてはそれぞれの機種に特有の様々な開発課題に対して当社の設計・解析技術を試験検証技術とともに駆使して解決してきた。また、72/84kVクラスのXAE7をはじめとする低コストのGISを市場に提供するための効率的な設計にもこれらの技術が役立った。本論文ではこれらGISを支える設計・解析技術について紹介する。

## 2. ガス絶縁開閉装置の設計課題

当社は1968年にGISの製作を開始して以来、多種多様な製品を市場に提供してきた。その進歩は相分離形GISから三相一括形GISへと進み、さらに縮小化と高電圧化・大容量化が推進されてきた。その結果、現在当社のGIS

がカバーする電圧範囲は7.2kVから海外向けの260kVまで広範囲にわたっている。

GISは遮断器（CB）、断路器（DS）、接地開閉器（ES）、避雷器（LA）および変流器（CT）などを、絶縁ガスを封入した容器に収納して構成された非常に複雑な装置である。さらに納入先の用途に合わせて複数のGISと変圧器などを構成して使われることが一般的である。

以上のようなことから、GISの開発・設計では以下のような課題に直面する。

- ・小型化、多用途化に対応する適正な機器配置
- ・小型化、高電圧化によるGIS内部の高電界化に対する電界最適化設計
- ・容器形状の多様化に対する压力容器設計
- ・小型化・大容量化に対する通電・放熱設計
- ・部品点数削減や軽量化の要請に対する最適形状設計

\*電力機器事業本部

- ・長期使用を見越した寿命設計
- ・ガス遮断器（GCB）やDS/ESなどの開閉部の遮断性能確保

当社ではこれらの課題に対処するため、様々な設計・解析技術を駆使し、高性能・高信頼性の製品を提供してきた。その活用概念図を図1に示す。次章以降では、これらの技術について紹介する。

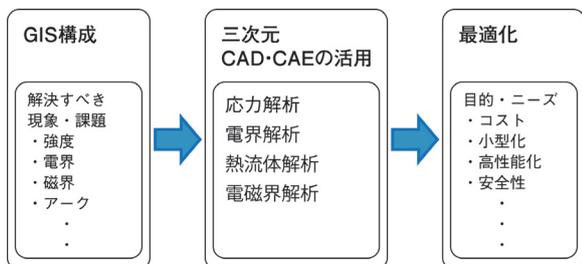
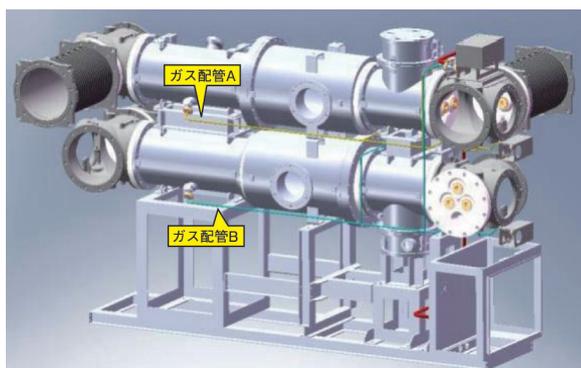


図1 三次元CAD・CAEの活用

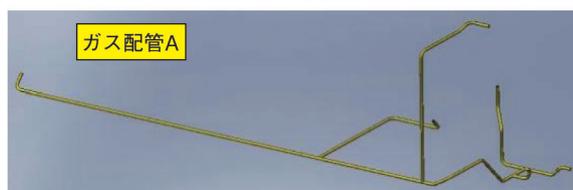
### 3. 三次元CADの活用

当社では従来まで二次元CADを利用してGISの設計を行ってきた。しかし、先にも述べたようにGISは多くの部品から構成される複雑な装置であるので、二次元の図面では分かりにくく、作業者が組み立てる手順を把握するのに多くの時間がかかる。また、二次元の図面では表現が不十分な部分が残るため、現物合わせで製作される部品もあった。

三次元CADはPCの高性能化や低価格化により、この十数年の間に急速に普及してきた。当社でも三次元CADを導入して、大きな改良成果を得ることができている。



(a) GIS三次元モデル



(b) 配管抽出

図2 三次元CADを利用した配管設計

図2は三次元CADを使ったガス配管の設計の例である。従来は設計者が組立図を参考に配管を設計していたが、最終的には現場作業による現物合わせによる微調整が必要で、配管が完成するまで組み立てた製品が停滞することがあった。現在では事前に三次元CADを使ってガス配管を詳細な寸法まで検討することができ、製作時間の削減と作業の効率化に効果を上げている。

## 4. 解析技術の活用

### 4.1 応力解析技術

GISで使用する容器には高圧力のSF<sub>6</sub>ガスが充填されており、安全で信頼性の高い設計が必要となる。中でも複雑な形状の鋳物容器の場合、簡易的な計算では強度評価をすることが難しくなるため、実検証前の三次元応力解析による事前検討が必要不可欠となる。さらに三次元CADと連携したCAEソフトを活用することにより、モデル作成→解析→モデル変更→再解析の流れを効率良く、容易に行うことができ、応力集中部などの形状を最適化することに役立っている。図3に容器の応力解析例を示す。

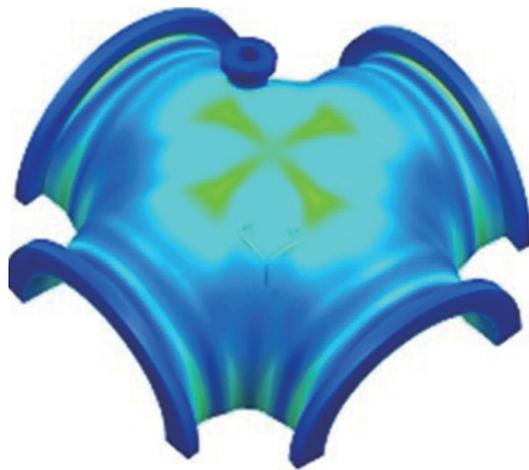


図3 鋳物容器の応力解析例

また、強度設計の段階で作成した三次元モデルを、製造段階での検討に用いることにより製造可否やコスト面での形状検討への利用が可能である。さらに、設計検討へのフィードバックをして強度解析をやり直すなど、設計の後工程への展開やフィードバック等も円滑に行うことができる。

遮断部や開閉部などの可動部においても、高荷重や衝撃荷重などの機械的負荷に対して、期待する最適な設計強度を有する必要がある。遮断部を動作させるた

めの絶縁操作棒は、充電部との絶縁を保ち、かつ、大きな操作力を伝える必要があるため、電界解析による絶縁設計および応力解析による強度設計の両面から検討して形状を決定する必要がある。図4に絶縁操作棒の応力解析例を示す。



図4 絶縁操作棒の応力解析例

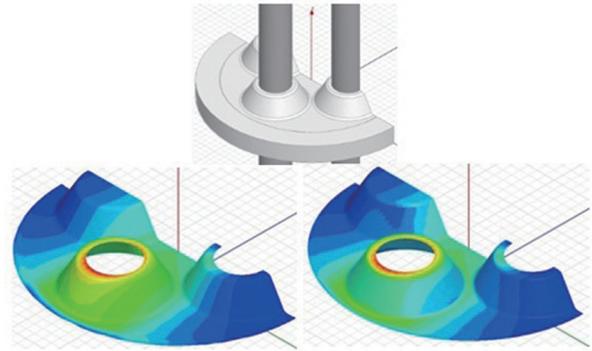
上記のようにGISの開発において三次元応力解析を多方面から活用することで、開発リードタイムの短縮や最適で無駄の少ない設計に大きく寄与している。

#### 4. 2 電界解析技術

GISは電力伝送回路を構成する各種要素を金属容器内に収納した機器であり、現在の変電設備の主流を成している。当社は1968年に製作に着手して以来、高電圧化、小型化を追求し続けてきた。それは、同時にGIS内部の導体や絶縁物の配置・形状の複雑化を意味し、絶縁設計を精度よく行うためにコンピュータを用いた電界解析が必要不可欠となっている。

近年、電界解析ソフトとPCの性能の高度化により、三次元の電界解析が容易に可能となり、当社でも複雑な形状の電界設計に活用されている。たとえば三相導体を一括して支持する絶縁スペーサの絶縁設計では、従来は導体の中心軸を対称軸とした軸対称三次元電界解析と相間などの特徴的な断面に対する二次元電界解析から絶縁設計を行っていたが、実形状を考慮すると必ずしも十分な検討ではなかった。三次元電界解析を活用することにより、二次元電界解析では確認できなかった部分の電界も把握でき、より効率的な電界最適化を実現することができた。図5は絶縁スペーサの表面電界強度について解析を行った例である。また、図6のように絶縁物上の金属異物による電界変化も三次元電界解析で把握が可能になった。

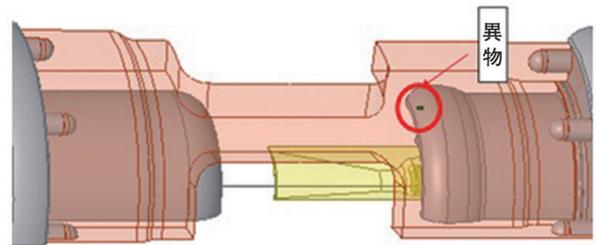
他方での確かつ迅速な解析を行うためには、電磁気学の知識を備えた技術者による的確なモデル形状、要素分割および絶縁物特性の把握などが必要である。これらについて考慮しない場合、解析時間が長くなるだけでなく、結果が実際と異なる値になることもある。的確な絶縁設計のためには当社で長年蓄積された解析者の様々な知見およびノウハウが重要であることを忘れてはならない。



表面電界強度

沿面電界強度

図5 絶縁スペーサ表面の電界解析結果 (1/2カットモデル)



絶縁物表面に金属異物を配置

図6 絶縁物上異物による電界変化の検証

#### 4. 3 熱流体解析技術

GCBは電極が開いたときに発生するアーク放電を水鉄砲の要領でガスを吹き付ける（機械パuffァ）とともに、アーク放電の熱を利用して圧力を上昇させたパuffァ室のガスを吹き付けて（熱パuffァ）除去する。したがって、電流が大きいほどガスの圧力が上昇し、吹付力が強くなる。そのため、遮断器の性能を評価する上で、ガスの状態（圧力、温度、流れ等）を知ることが非常に重要である。

近年、測定技術や解析技術の進歩により、遮断の瞬間のアークやガスの状態が明確に測定できるようになるとともに、PCの性能向上でより複雑な解析も短時間でできるようになってきた。当社でも、遮断時のガスの状態を明確化することを目的とし、熱流体解析による検討を消弧室設計に取り入れ、遮断時の物理現象解析と短絡試験検証を並行して行っている。

実施例として図7～8に、熱パuffァと機械パuffァを併用したシリーズパuffァ方式の消弧室の、アークの有無による圧力変化の解析結果と測定結果例を示す。

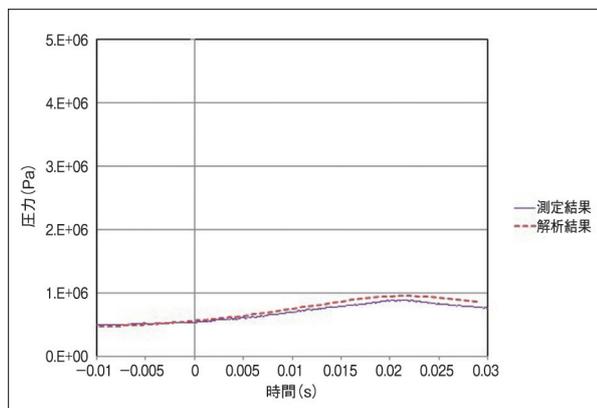
負荷電流や充電電流を遮断するときのような小電流領域では、アークエネルギーが小さく、ガスの絶縁性能は低下していないと考えられるので、アークの挙動とガスの温度変化を考慮しない流体解析と電界解析で評価できる。このような流体解析では、パuffa室内の圧力変化は機械的な圧縮による圧力上昇だけであり、図8(a)に示すように圧力上昇は小さい。



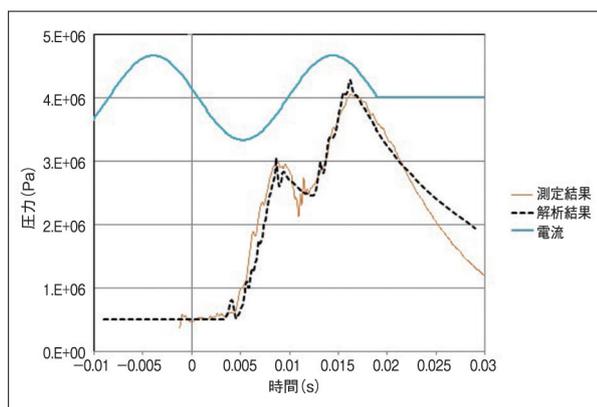
図7 ガス遮断器の消弧室の熱流体解析例

一方、端子短絡故障 (BTF) や近距離線路故障 (SLF) 等の短絡電流を遮断するような大電流領域では、アークによりガスが加熱・膨張・分解し、図8(b)のように圧力が大きく上昇する。また、ガスの温度上昇や金属・絶縁物の蒸発などの影響で、ガス自体の絶縁性能が低下し遮断性能に影響する。そのため、アーク熱、輻射、化学反応等の様々な物理現象を考慮した複雑な熱流体解析が必要となる。

これらの物理現象によるガスの状態変化を解析で明らかにし、短絡試験検証と解析の相互データを基にして、最適な消弧室設計を行っている。その結果、図8(b)に示すように熱パuffa室内の圧力変化に対して、解析結果と測定結果がよく一致する結果が得られており、解析の精度の高さを示している。



(a) アークによる加熱を考慮しないとき



(b) アークによる加熱を考慮したとき

図8 パuffa室の圧力変化に対する解析結果と測定結果の比較

#### 4. 4 電磁界解析技術

遮断器開発における操作器の最適化設計のための電磁界解析、特に渦電流を考慮した電磁過渡解析による解析の有用性を確認できたので、その解析例を紹介する。

紹介例は、ハッカーレス・グリスレス等によりメンテナンスフリー化を実現した永久磁石方式の、電磁操作器に関するものである。

操作器の駆動負荷・摺動摩擦・接触圧力などを入力した解析モデルに対し、シーケンスにより操作・制御コイルに指令電圧を与えることで、図9に示す制御電流波形およびコンタクトラベルを得ることがコンピュータ上で可能である。この結果、電流遮断に最適な開閉スピードを確保しつつ、電磁操作器の制御電流の低減を実現するような操作器モデルを解析で確認することが可能となった。この紹介例では、解析による磁路の最適化を繰り返すことで、設計当初の制御電流値の1/4程度の電流値に抑制でき、目標としていた制御電流値以下で動作可能な遮断器を開発することができた。

## 5. まとめ

以上のように当社で活用している設計・解析技術について紹介した。今後のGIS開発においても各社との競争の中で新しい技術を取り入れながら、より一層のコストダウンや省力化が求められると推測される。そのためには上記のような設計・解析技術を活用して開発・設計段階で作りこむことが必要であると考えられる。さらに、将来的にはさまざまな解析を連成させて実際の現象を高い精度で模擬し、検証試験やプロトタイプの実験の回数を減少させることが望まれる。

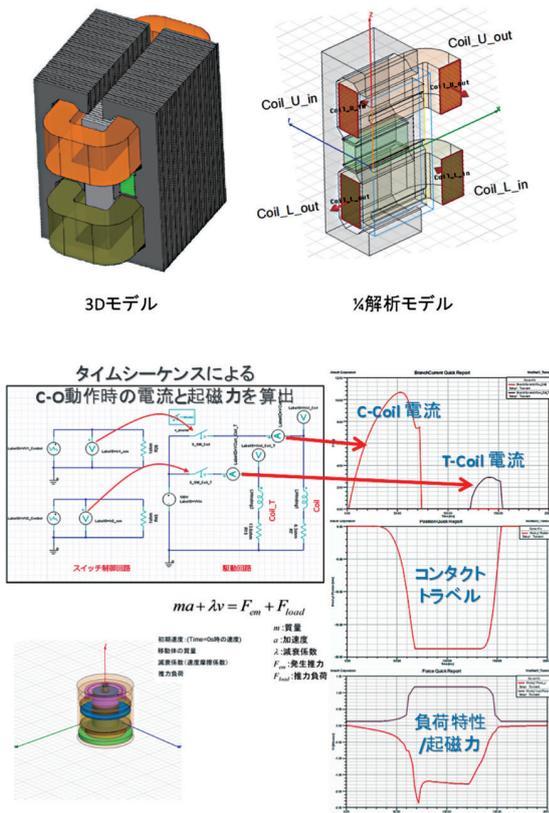


図9 電磁操作器の解析例

### 執筆者紹介



太田 剛史 Koji Ota  
電力機器事業本部  
開閉機器事業部  
開発部 主任



一倉 直由 Naoyuki Ichikura  
電力機器事業本部  
開閉機器事業部  
開発部



原田 温史 Atsushi Harada  
電力機器事業本部  
開閉機器事業部  
開発部



須貝 元樹 Genki Sugai  
電力機器事業本部  
開閉機器事業部  
開発部



堀越 和彦 Kazuhiko Horikoshi  
電力機器事業本部  
開閉機器事業部  
開発部長