

# 電荷重畳法を用いた変圧器巻線の電界自動解析システムの構築

富田 真代<sup>※1</sup>  
Masayo Tomida  
加藤 克巳<sup>※2</sup>  
Katsumi Kato  
高橋 誠<sup>※1</sup>  
Makoto Takahashi

Construction of automatic electric field analysis system for transformer windings using charge simulation method

## 1. はじめに

電力用変圧器の最適設計は常に求められるテーマである。この設計の実現のため、数値解析が有効な方法として用いられ、電磁界、熱流体、音場、構造的強度など、多くの設計要素に対して数値解析が有効に活用されている<sup>(1)(2)</sup>。

当社では、この数値解析に市販のソフトウェア(以下、市販ソフト)と、MATLAB<sup>®</sup>で制作した自社製プログラム(電位振動解析プログラムなど)<sup>(3)~(6)</sup>を用いている。

変圧器設計で使用頻度の高い数値解析プログラムは、変圧器の電気絶縁設計(以下、絶縁設計)で用いる電界解析プログラムである。当社では電界解析に有限要素法(以下、FEM)を用いた市販ソフトを使用していた。FEMによる電界解析は、操作が煩雑なため解析専任者が行っている。このため設計者がタイムリーに解析を行えず、設計完了までに時間を要するなどの課題があった。

この問題を解決するため、FEMの代替として、解析専任者以外の設計者でも容易に電界解析できるプログラムをMATLAB<sup>®</sup>で制作し、変圧器絶縁部の電界を自動で解析できる電界自動解析システムを構築した。以下、その概要を報告する。

## 2. 電界自動解析システムとは

電界自動解析システムとは、変圧器巻線の絶縁設計で行う電界解析を、設計者が電界解析プログラムを操作することなく、一連の設計業務の中で行えるシステムである。その概要を図1で説明する。

なお、今回構築した電界自動解析システムでは、絶縁設計の中で電界解析の実施頻度が高い、巻線端部とセクション間エッジを対象に構築した。対象の箇所を図2に示す。

### 2.1 システムの概要

従来の絶縁設計は、設計者と解析者で行っていた。これは、電界解析に熟練を要するFEMを用いているためである。設計者はPCで解析用のモデルを作成、解析者はモデル各部の素材の定義やメッシュ作成などの作業を行う。電界解析の結果が妥当でない場合、再度解析モデルを作成し直す必要がある。このように従来の方法は、解析結果を得るまで多大な時間を要していた。

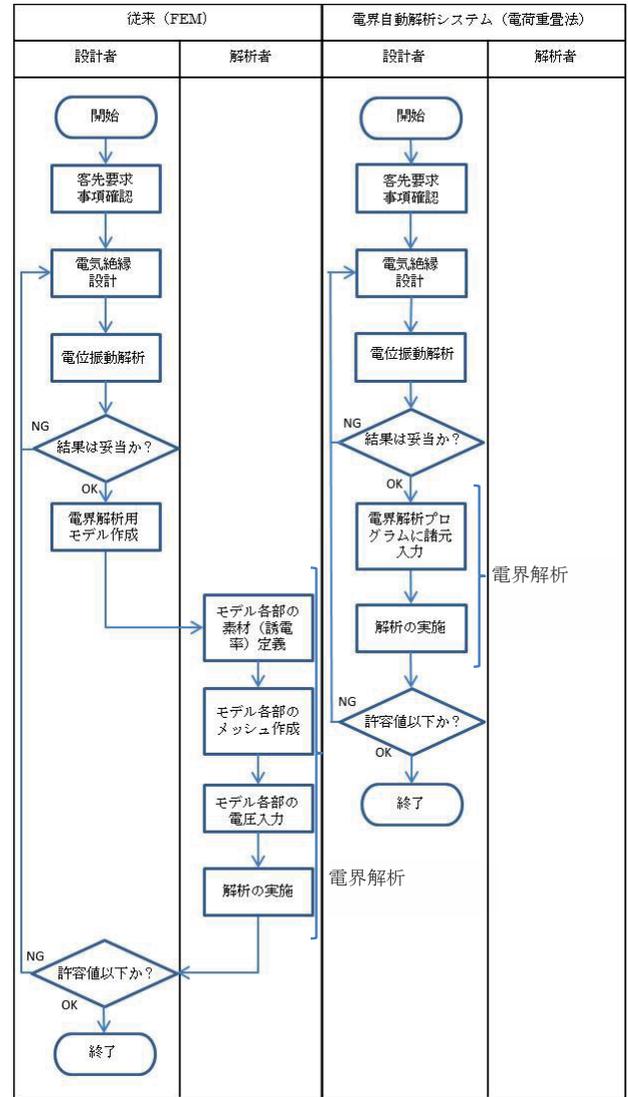


図1 変圧器の絶縁設計のフロー

※1 変圧器部大型設計グループ  
※2 新居浜工業高等専門学校

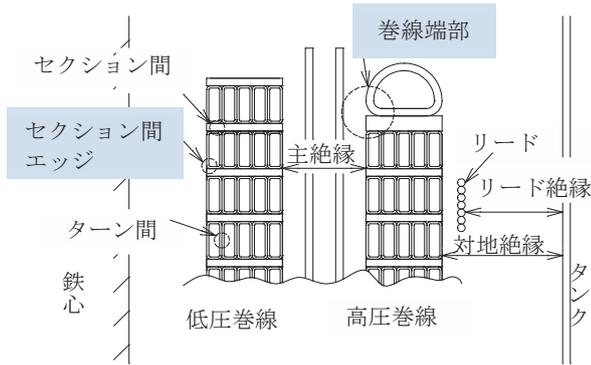


図2 絶縁設計の要素と電界自動解析システムの対象箇所

※ セクション間、セクション間エッジ、ターン間を総称して巻線内絶縁とする。

### 3. システムに用いた電界解析法<sup>(7)(8)</sup>

本システムでキーとなるのは、電界解析プログラムである。ここでは、電界解析法の概要と、本システムで採用した電界電荷重畳法の計算原理について簡単に示す。

#### 3.1 電界解析法と特長

電界解析の方法は、領域分割法と境界分割法に大別される。領域分割法には、解析対象の全体場を有限個の要素に分割するFEMと、全体場を格子点に分割する差分法がある。境界分割法には、電極内あるいは誘電体内に置いた仮想電荷で計算する電荷重畳法と、電極あるいは誘電体境界面上に置いた電荷で計算する表面電荷法がある。

各種電界解析手法の計算精度とプログラミングの一般的な特長を表1に示す。

FEMや差分法、表面電荷法は、絶縁物が多媒質(絶縁油とプレスボード、銅線被覆などによる複合絶縁)の場合でも計算が可能である。

電荷重畳法は、FEMなどと異なり電極などの境界のみで計算でき計算精度が高い。またプログラミングが容易な特長がある。

本システムの電界解析の対象は、巻線端部とセクション間エッジであり、解析モデルは二次元軸対称、絶縁物の媒質は2つで十分である。このことから本システムの電界解析は、電荷重畳法を適用した。

図2 絶縁設計の要素と電界自動解析システムの対象箇所

一方、今回制作した電界自動解析システムは、設計者のみでの絶縁設計を可能とした。これはMATLAB<sup>®</sup>で電界解析プログラムを制作することで実現した。電界解析プログラムは、電界解析法の一つである電荷重畳法を適用した。このプログラムの完成により、FEMで多くの時間を要していた解析モデル作成、条件設定などの作業を不要にした。

この結果、電界解析にかかる時間を大幅に削減できた。一例では、FEMでは960分要していた巻線端部の解析が電荷重畳法では30分に短縮され、設計生産性向上にも寄与している。

#### 2.2 システムを適用した業務のシームレス化

変圧器の設計は、巻数、損失、短絡インピーダンス、巻線サイズなどを設計計算で検討して行う。当社では、業務効率化のため設計計算にExcelを用いている。

巻線端部やセクション間エッジの電界解析に必要な巻線の寸法データは、設計計算に用いているExcelに入力しているので、Excelと電界解析プログラムを連携し、電界解析業務をシームレス化した。

また電位振動を用いた絶縁設計も上記と同様に電界解析プログラムと連携し、シームレス化した。巻線内絶縁は、巻線に雷インパルス電圧が印加された場合が最も絶縁破壊を起こしやすい。雷インパルス電圧が巻線に印加された場合、巻線各位置と電位の関係は電位振動のため直線的にならない。この電圧は、巻線をインダクタンスとキャパシタンスの多段回路で模擬した回路を解析して求める(以下、電位振動解析)。この電位振動解析プログラムと電界解析プログラムを連携し、巻線内絶縁設計のシームレス化を図った。

表1 電界解析手法の特長

		計算精度の高さ	プログラム制作の容易さ	絶縁物媒質数
領域分割法	FEM	△	△	多媒質
	差分法	△	○	多媒質
境界分割法	電荷重畳法	○	○	2媒質
	表面電荷法	○	△	多媒質

○：よくあてはまる △：あてはまる

#### 3.2 電荷重畳法の特長と計算原理

##### (1) 原理

電荷重畳法は式(1)に示すラプラスの方程式を満たす解を重ね合せ、全体の場を満たす解を得る方法が原理となる。

$$\text{div}(\text{grad } \varphi) = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$\varphi$  : 電位

## (2) 計算方法

計算方法は図3を用いて説明する。電極と絶縁物の媒質の境界面上に境界の形状に沿って点を $n$ 個配置する。この点を輪郭点と呼ぶ。電極面上には仮想電荷 $Q$ を輪郭点と同じ $n$ 個配置する。

$j$ 番目の電荷 $Q_j$ が $i$ 番目の輪郭点につくる電位 $V_i$ は、電荷の電気量 $Q_j$ に比例する。その比例係数(電位係数)を $P_{ij}$ とすると、この電位は $P_{ij}Q_j$ と表わされる。 $i$ 番目の輪郭点につくられる電位 $V_i$ は、すべての電荷の重ね合わせにより決まるため式(2)で表され、式(3)の連立一次方程式が成り立つ。

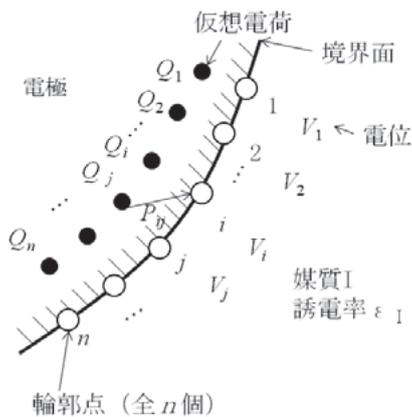


図3 絶縁物の媒質が1つの場合の計算モデル

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad \dots\dots (2)$$

$n$  : 仮想電荷の個数

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3)$$

$V$  : 電位 (既知)  
 $P$  : 電位係数 (既知)  
 $Q$  : 電荷 (未知)

電位 $V$ は、電極の電位を輪郭点に与えるので既知である。電位係数 $P$ は、電荷の種類および輪郭点と仮想電荷 $Q$ の位置関係から算出されるので既知となる。電位 $V$ と電位係数 $P$ が既知なので未知の仮想電荷 $Q$ を求めことができる。

求めた仮想電荷 $Q$ および仮想電荷 $Q$ と輪郭点の位置関係から算出される電界係数から輪郭点での電界が算出される。

油入変圧器では、絶縁物として絶縁油と油浸された絶縁紙が使用されるため、絶縁物の媒質が2つの場合の計算が必要となる。媒質が2つの場合は、前項に示した媒質が1つの場合の計算に、電位連続および電束密度の連続を考慮することで電界が計算できる。

## 4. 電界解析プログラムの制作

### 4.1 電荷重畳法のプログラム

当社では、変圧器設計に必要な自社プログラムをMATLAB®で制作しており、電荷重畳法もMATLAB®で制作した。

電荷重畳法では、逆行列計算、電界・電位係数の計算に第1種・第2種完全楕円積分が必要となる。MATLAB®にはこれらが標準ライブラリとして用意されている。また電界の計算結果をベクトルで表示するグラフィックも用意されている。

電荷重畳法は、式(3)で未知である電荷を求め、この電荷から電界を計算するプログラムを制作すればよい。このフローを図4に示す。

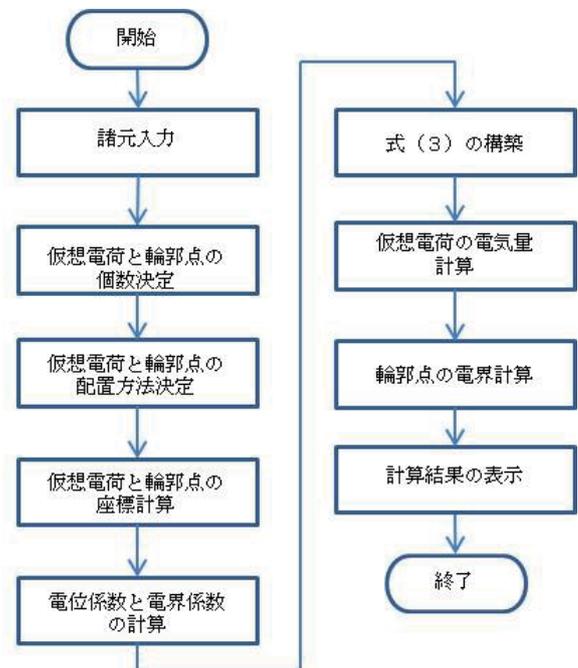


図4 電荷重畳法を用いた電界解析プログラムのフロー

計算精度を確保し、かつ計算を高速化するため電荷重畳法のプログラムで以下の工夫も行っている。この工夫を図5に示すセクション間エッジの解析モデルで説明する。

絶縁設計は、電界が高くなるコーナー部の計算精度が求められるため、コーナー部の仮想電荷を多くとることで計算精度を確保し、端部から離れるにしたがって仮想電荷を等比的に減らすことで計算を高速化している。

なおこの電界解析プログラムでは、図6に示すように電位や被覆厚を入力すれば仮想電荷と輪郭点は自動で配置される。

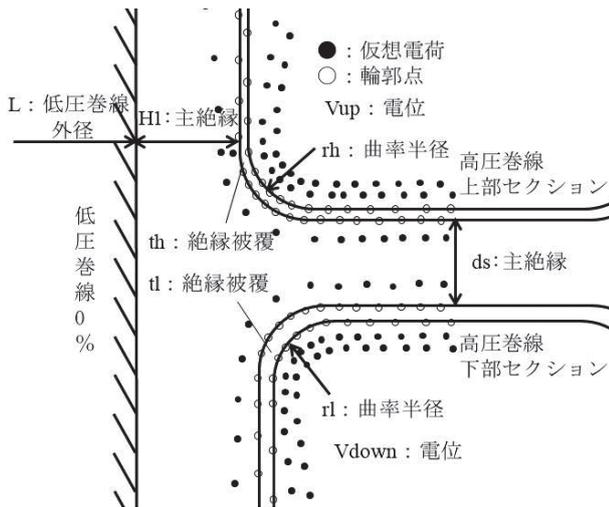


図5 セクション間エッジの解析モデル

```

%--- 各種パラメータ ---
L = 300;
H1 = 50;
%絶縁距離(mm)
ds = 4;
th = 0.4;
tl = 0.4;
rh = 1.2;
rl = 1.2;
%--- 各セクションの電位(kV)
Vup=100;
Vdown=100;

```

%-----

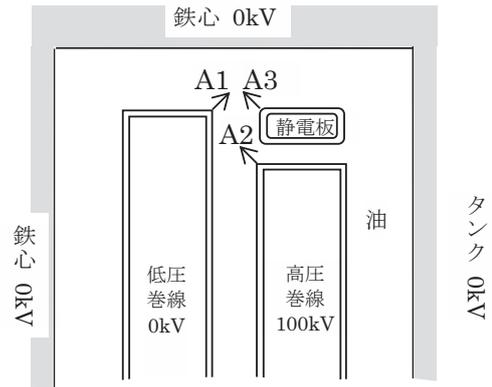
図6 セクション間エッジ電界解析の入力条件

## 4.2 電界解析プログラムの計算結果とFEMの計算結果との比較

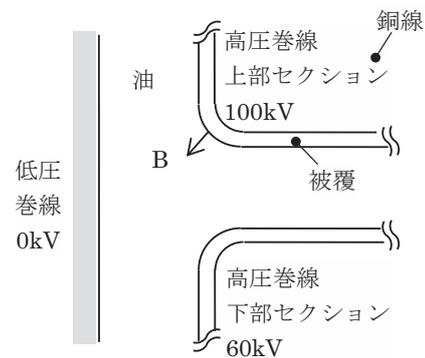
電界解析プログラムの計算結果を評価するため、FEMの計算結果と比較した。比較は、図7に示す巻線端部とセクション間エッジで行った。電界解析プログラムで計算した結果を図8に示す。電界がベクトルで表示されている。

電界解析プログラムとFEMの計算結果の比較を、表2、表3に示す。

電界解析プログラムの計算結果は、FEMと比較して1~2%程度高くなっていることがわかる。一般に電荷重畳法の計算結果は、FEMと比較して高くなると言われており<sup>(9)</sup>、電界解析プログラムは妥当であると言える。

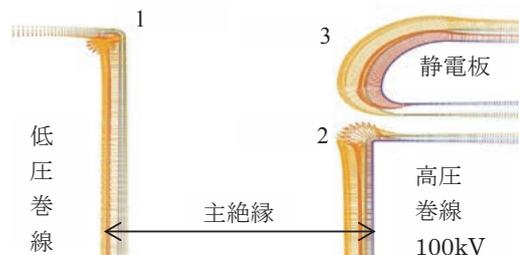


(a) 巻線端部

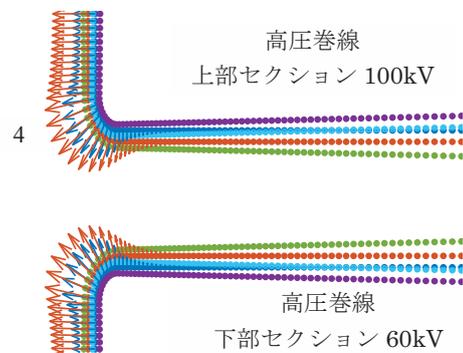


(b) セクション間エッジ

図7 解析箇所



(a) 巻線端部



(b) セクション間エッジ

図8 解析結果

表2 巻線端部電界の電界解析プログラムとFEMとの比較

部位	a:電荷重畳法 (kV/mm)	b:FEM (kV/mm)	比率(a/b) (%)
1	6.22	6.15	98.9
2	5.06	5.00	98.8
3	4.06	4.02	99.0

表3 セクション間端部電界の電界解析プログラムとFEMとの比較

部位	a:電荷重畳法 (kV/mm)	b:FEM (kV/mm)	比率(a/b)-1 (%)
4	4.78	4.77	99.8

## 5. 電界自動解析システムによる解析例

本システムを用いて解析した例を示す。解析の例は、セクション間エッジとした。セクション間エッジの絶縁設計は、巻線に雷インパルス電圧が印加された場合がクリティカルになる。これは、雷インパルス電圧が巻線に印加された場合の等価回路は図10のようになり、巻線各ノード(A、B、C...)の電位はLC回路のため振動(以下、電位振動)して、巻数に比例しないためである。

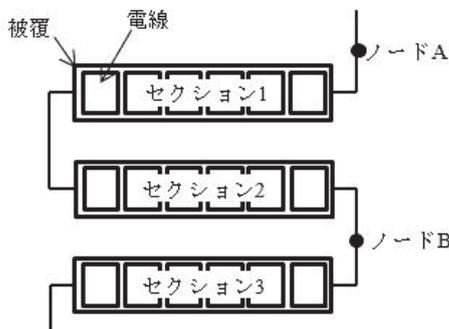
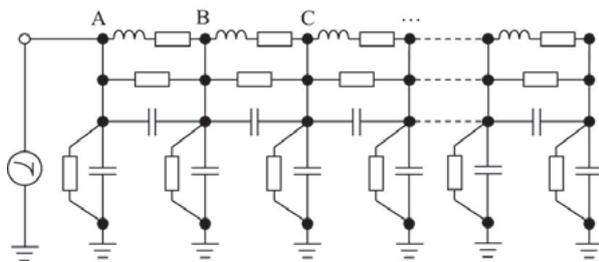


図9 セクションとノードの関係



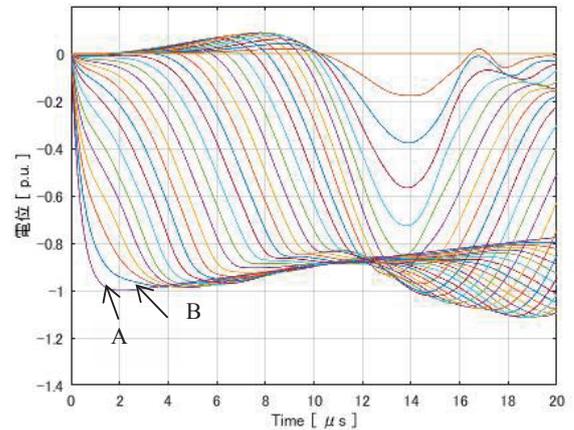
ノード: A, B, C...

図10 変圧器巻線の等価回路

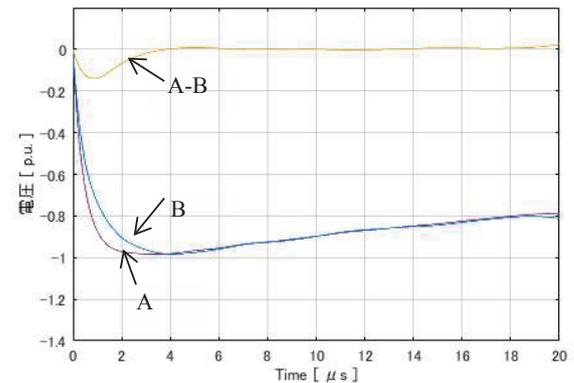
セクション間エッジの絶縁設計は、電位振動のため、電圧印加端部が最も絶縁破壊を起こしやすい。電位振動の解析結果例を図11に示す。この解析結果は、図11(a)に示す等価回路の各ノードの対アース間の電位を示している。この結果から、絶縁評価したいセクションの電位(AとB)を抽出したのが図11(b)である。参考のため図11(b)には、対アース電位の他にセクション間の差の電位も示している。

セクション間エッジの絶縁設計は、図11(b)に示すセクションの電位(AとB)を、図12に示す電荷重畳法の解析モデルに与えて電界解析を行えばよい。電界解析した結果を図13に示す。絶縁評価は、絶縁破壊の時間特性(V-t特性)を考慮した電界で行い、電界が許容値以下であれば絶縁設計が完了する。

従来のFEMを用いた解析では、電界が最大となる電位を抽出して絶縁評価を行っていたが、本システムの構築により、電界の時間特性を短時間で解析することが可能になり、より緻密な設計が行えるようになった。



(a)電位振動解析の例



(b)セクション間エッジ電圧の時間特性

図11 電位振動の解析結果

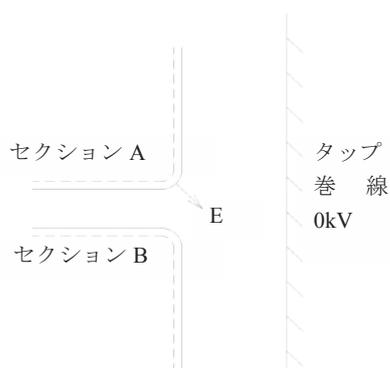


図12 セクション間エッジの解析モデル

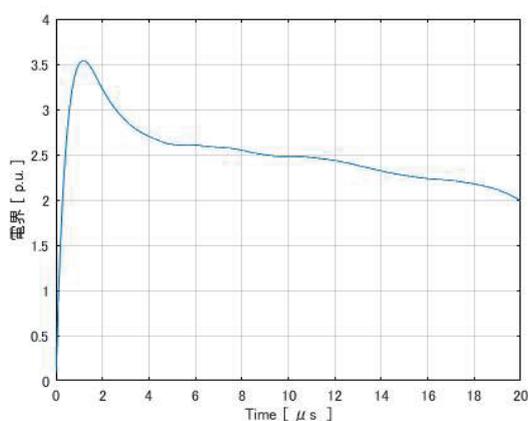


図13 セクション間エッジ電界の解析結果

## 6. あとがき

電界解析手法に電荷重畳法を適用し、設計業務をシームレス化する変圧器巻線の電界自動解析システムを構築した。

このシステムの構築で、設計の生産性向上はもとより、絶縁設計の品質向上も図ることができた。

今後も、お客様のニーズにお応えするため、変圧器の最適設計、生産性向上を目指した数値解析プログラムの開発を今後も行っていく所存である。

## 参考文献

- (1) 電気学会：「変圧器の解析技術の現状とその動向」電気学会技術報告 No.701(1998)
- (2) 電気学会・高電圧電機絶縁技術の歴史調査専門委員会編：「高電圧絶縁技術」オーム社 (2019)
- (3) 佐藤、神部、高橋、ほか：「変圧器モデルの周波数伝達関数に基づいたサージ解析法」平成6年電気学会全国大会 No.1372(1994)
- (4) 高橋、藤井、久須美：「状態方程式を用いた電位振動解析」平成9年電気関係学会東海支部連合大会 No.157(1996)
- (5) 高橋、久須美、佐藤：「系統サージ解析から変圧器絶縁評価までのコンビネーション解析」電気学会静止器研究会資料 SA-00-47(2000)
- (6) 高橋、永田：「多重円筒巻の転位について」平成19年電気学会全国大会 5-218(2007)
- (7) 大久保仁編著：「高電界現象論」オーム社(2011)
- (8) 宅間薫、濱田昌司「数値電界計算の基礎と応用」東京電機大学出版局 2006
- (9) 電気学会：「電力機器・絶縁材料技術の横断的評価と共通技術の体系化」No.945(2003)