

# 変圧器巻線の損失/温度上昇の分布解析

Analysis of Loss/Temperature Rise Of Transformer Winding

高橋 誠<sup>※1</sup>  
Makoto Takahashi  
水野 康宏<sup>※1</sup>  
Yasuhiro Mizuno  
永田 徹<sup>※1</sup>  
Toru Nagata

## 1. まえがき

変圧器の設計において、熱の発生のもととなる損失計算、冷却や各部の温度上昇などの熱計算は、最も基本的でかつ重要な設計作業の一つである。

一般的な設計では、絶縁油や巻線の温度上昇は、実績技術の積み上げによる設計式でマクロ的な計算を行っている。

しかし、細部の温度を知る要求がある場合は、マクロ的な計算では不十分であり、計算機による解析により、発生損失や温度上昇の分布を求めなければならない。特に、新しい構造の変圧器を開発したり、温度分布により寿命劣化部位を想定したりする場合に、このような精度の高い解析が要求される。

以下、当社で用いている解析手法について紹介する。今回は、絶縁油の温度上昇については割愛し、巻線の発生損失と、それによる温度上昇の分布を求める解析に絞って、分布解析の概要と、実験結果について報告する。

## 2. 変圧器の構造と温度分布

### 2.1 構造と温度分布

油入変圧器の内部構造と内部の温度分布の代表例を図1に示す<sup>(1)(2)</sup>。この例は、自冷の電力用油入変圧器である。外気の周温に対して、油が温度上昇し、更に巻線が油より温度が高くなっている。温度分布は、高い位置で温度が高くなっている。

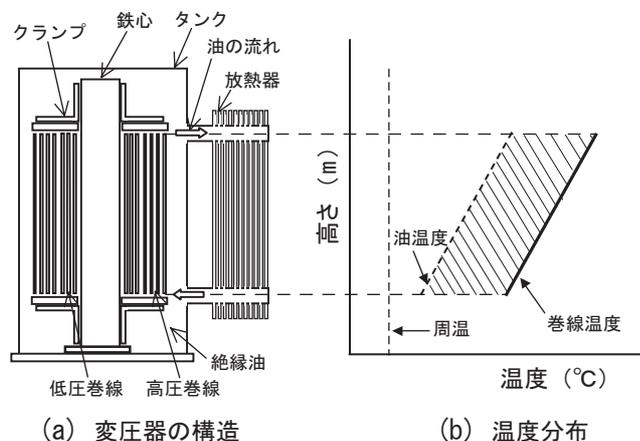


図1 変圧器の構造と温度分布

※1 電力事業部 変圧器設計G

本図では、温度分布は直線的になっているが、実際には、この様な単純な分布とはなっていない。精度良く温度分布を求めるには、解析計算が必要になる。

### 2.2 温度設計

変圧器の油や巻線の温度分布計算は、変圧器の発生損失を求め、次に放熱器他の放熱計算を行い、油の温度上昇を計算し、更に、図1の様な温度分布パターンを想定し、油、巻線の最高温度を求めている。通常の設計では、このようなマクロ計算で十分である。

### 2.3 温度分布の必要性

油入変圧器の寿命を決める、支配的なファクターは、巻線に用いられている絶縁紙の劣化である。絶縁紙の劣化速度は、良く知られているようにアレニウス則に従い、温度が高い程寿命は短くなる。

絶縁物としては絶縁油も高温で劣化が進むが、液体であるために循環して、高温部分に停まることはない。このため、劣化は平均温度に依存することになり、比較的長寿命となる。

一方、巻線の絶縁紙については、動くことが無いため、高温箇所の絶縁紙が早く劣化が進む。このため、寿命は最高温度に依存することとなる。

このような事情から、寿命を考慮した最適設計をするには、巻線の温度の最高点を知る必要がある。これが、巻線の温度上昇分布の解析が重要であるといわれる所以である。

## 3. 解析方法

### 3.1 解析の概要

巻線の温度上昇は、銅線が損失により熱を発生し、その熱が、絶縁紙を介して、油に伝導していく事から求めることができる。これを細部に分割して計算すれば温度上昇分布が計算できることになる。当社では、これを自動計算できるプログラムを作成し、設計に利用している<sup>(3)</sup>。

その計算フローを図2に示す。このフローにおいて、解析モデルを作成すれば、あとは自動で温度分布の結果出力が得られる。銅線の損失計算には、漏れ磁束による渦電流損も計算するため、有限要素法による磁界解析プログラムを利用している。

巻線は、軸対称の構造であるため、損失/温度上昇計算の分割単位はコイル1ターンとしている。以下、実際の変圧器の解析例に従って、解析方法を説明する。解析対象例の変圧器(多重円筒巻線 LRT 77kV 10MVA)の巻線構造を図3に示す。

### 3.2 巻線の損失分布解析

マクロ計算では、巻線の損失は、一括計算されるが、温度分布を調べるためには、コイル1ターンごとに発生損失を求める必要がある。

巻線の損失は、抵抗損と渦電流損で構成されており、抵抗損は単純計算でよいが、渦電流損は漏れ磁束が発生原因であるため、磁界解析が必要となる。

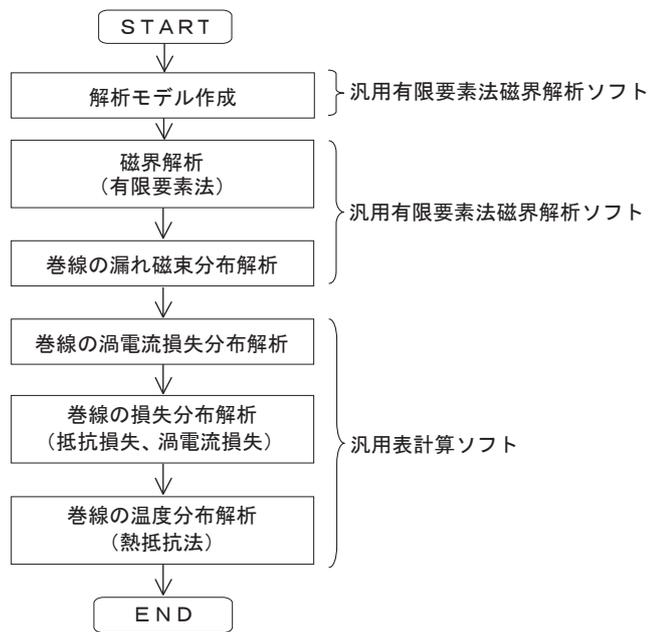


図2 計算フロー

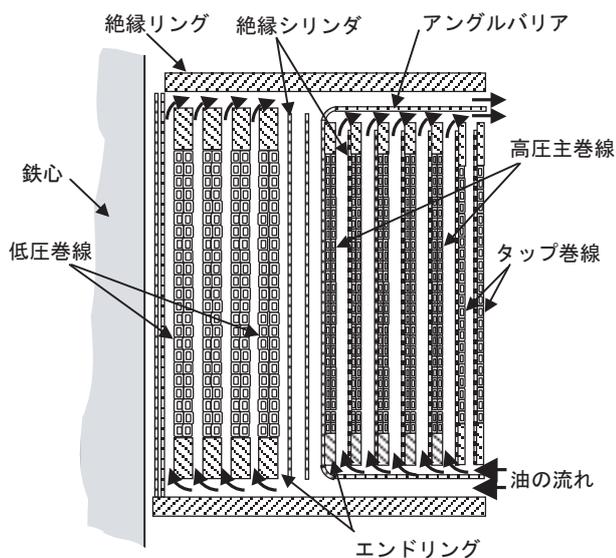


図3 解析対象巻線構造(多重円筒巻線)

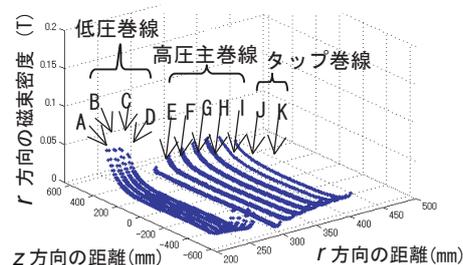
### (1) 磁界解析による漏れ磁束分布解析

有限要素法磁界解析により、得られた磁界分布を図4(a)に示す。これを、巻線の半径方向と高さ方向の各成分に分解し、各コイルごとの分布を求めたのが図4(b)(c)である。これは、渦電流損を、この2成分の磁束密度により計算するためである。

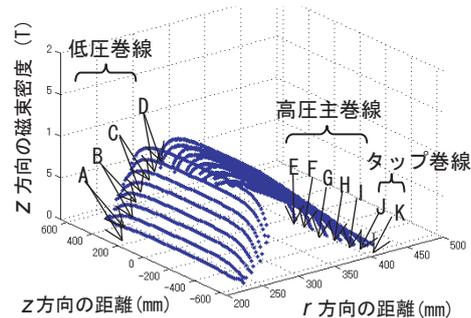
### (2) 巻線の損失分布

求められた磁束密度をもとに、巻線の渦電流損を計算するモデルを図5に示す。図に示すように、銅線(平角線)の断面の2方向について単位長さ当りの渦電流損を計算し、巻線1ターンの渦電流損を求める<sup>(4)(5)</sup>。

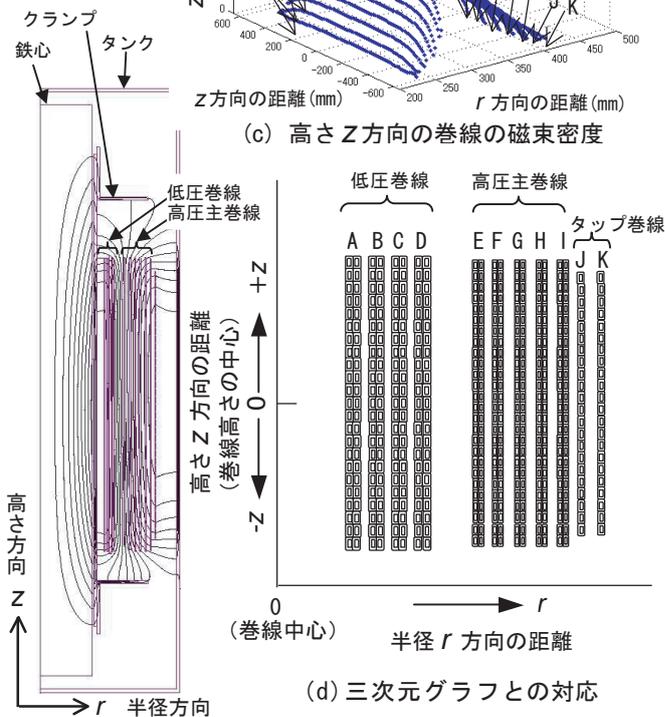
そして、抵抗損を加えて、巻線の損失分布を求めたのが、図6の結果である。低压巻線の上部と下部は、漏れ磁束の影響を受け、損失が大きくなっている事がわかる。



(b) 半径  $r$  方向の巻線の磁束密度



(c) 高さ  $z$  方向の巻線の磁束密度



(a) 漏れ磁束分布

(d) 三次元グラフとの対応

図4 磁場解析による巻線の漏れ磁束分布解析

### 3.3 巻線の温度上昇分布解析

#### (1) 解析方法

本解析では、図7のモデルに、熱抵抗法を適用して温度上昇解析を行っている。巻線の1ターンごとに、銅線で発生した、熱(損失)が絶縁紙を介して油に伝導していくモデルである。

今回の解析例は多重円筒巻線構造であるため、層間には絶縁油が流れているので層間の影響は無視して、ターン間の影響のみ考慮している。

なお、マクロ計算で求めた油の温度分布に、今回の温度上昇を加算すれば、温度の絶対値が得られることになる。

計算で使用する熱抵抗は、絶縁紙については、絶縁紙の熱伝導率から、絶縁紙表面-絶縁油間については、実験から得た局所熱伝達率からそれぞれ計算して求めている<sup>(7)</sup>。

巻線の損失には、前述の損失計算の結果を用いている。

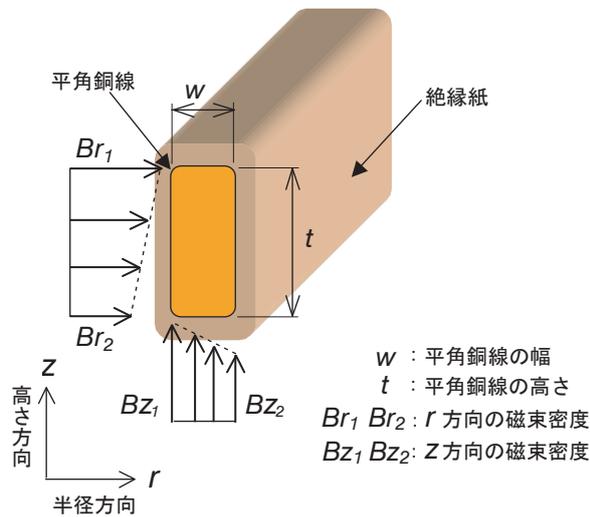


図5 巻線の渦電流損失計算

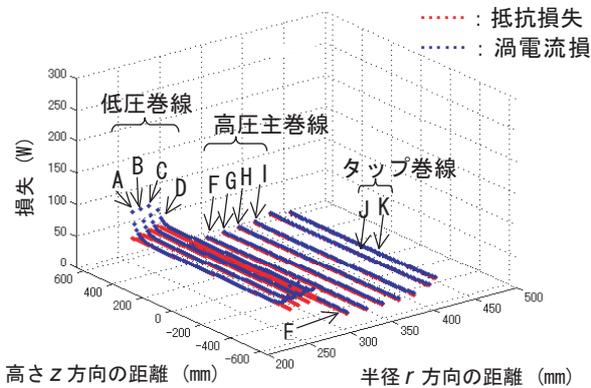


図6 巻線の損失分布解析結果

#### (2) 解析結果

解析結果を図8に示す。図6の損失分布からも推定できるように、低圧巻線の上部の温度上昇が大きいという結果であった。

最高点の温度上昇は、平均値より約5℃高くなった。

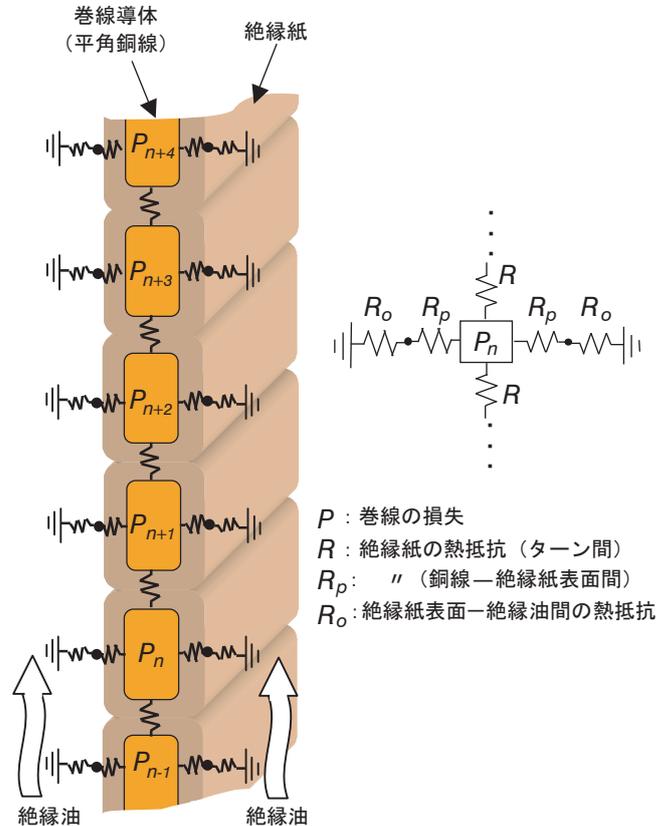


図7 巻線の温度分布解析モデル

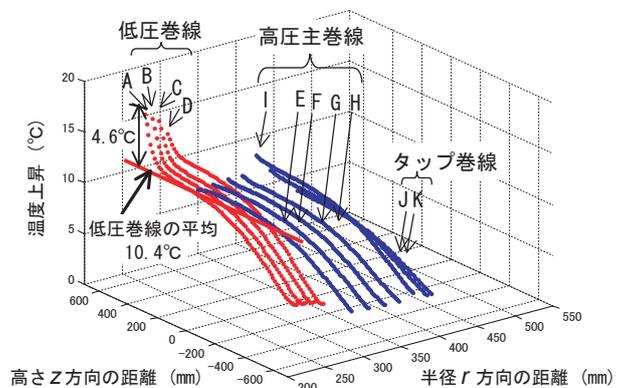


図8 巻線の温度分布解析結果

## 4. 解析結果と実測結果の比較

### 4.1 実機の巻線温度測定

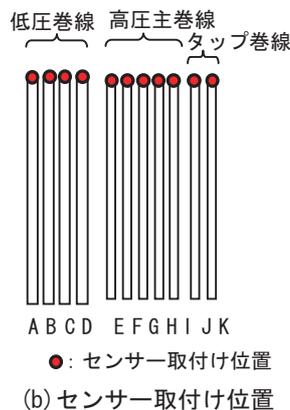
実機の温度上昇を測定し、解析結果との比較を行った。

測定は、図9に示すように、光ファイバー温度センサーを用いて、巻線の各層の最上位部(各層での最高温度点)の温度を計測した。また、絶縁油の温度は、図10に示すように、上部と下部の温度計で計測した。

なお、解析と実測の比較は、10MVAと20MVAの2機種で実施した。



(a) 巻線への光ファイバー温度センサー取付け



(b) センサー取付け位置

(c) 測定の様相

図9 実機での巻線温度測定

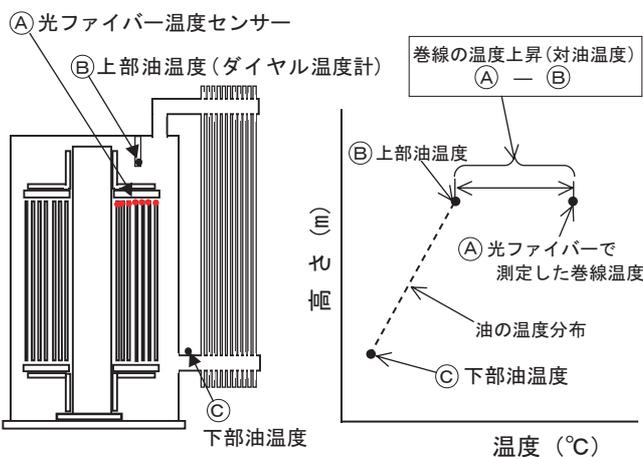


図10 実測による巻線温度上昇の算出法

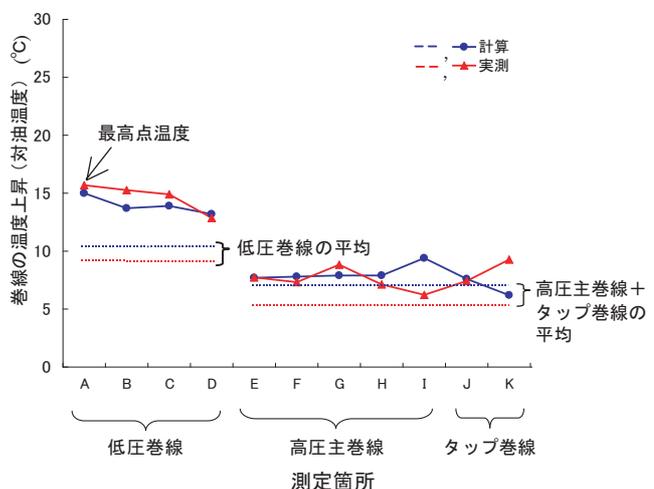
### 4.2 解析と実測の比較

解析と実測の比較を図11 (a) (b)に示す。2機種ともに解析と実測は概ね一致し、解析方法の妥当性がわかった。

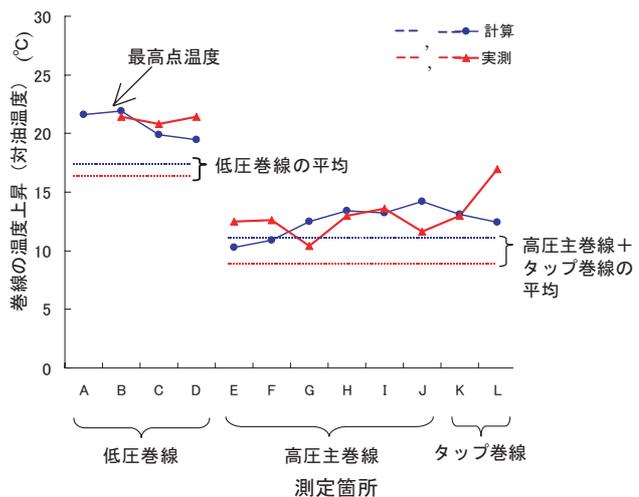
## 5. あとがき

当社で用いている、変圧器巻線の損失/温度上昇の分布解析手法と実験結果について紹介した。

本技術は、巻線の寿命診断の精度向上など<sup>(8)</sup>、お客様のニーズにお応えできるよう、今後さらに発展させていく所存である。



(a) 77kV 10MVA



(b) 77kV 20MVA

図11 解析と実測の比較

## 参考文献

- (1) 電気学会：『JEC - 2200 変圧器』電気書院（1995）
- (2) 変圧器信頼性調査専門委員会：「油入変圧器運転指針」  
電気学会技術報告（I部）第143号（1986）
- (3) 金谷、高橋、ほか：「変圧器設計支援システムの開発」  
電気関係学会東海支部連合大会 No.132（2003）
- (4) 木村 久男 監修：『新版・変圧器の設計工作法』  
電気書院（1967）94 - 95
- (5) 浅川 七平、清水 栄：『変圧器』日刊工業新聞（1966）  
129-131
- (6) L.F.Blumeほか：『変圧器工学』コロナ社（1971）55-56
- (7) 高橋、金谷、ほか：「自冷式変圧器の円筒巻線での冷却特性」  
電気関係学会東海支部連合大会 No.149（2002）
- (8) 電気協同研究会：『電力流通設備におけるライフサイクル  
マネージメントの動向と将来展望』第59巻 第2号（2004）

## 最近登録された愛知出願

特許番号	名 称	発明者	共有権利者
3615477	ブラシレスモータ	西上 秀明	
3618240	永久磁石モータのセンサレス駆動回路装置	森 和彦	
3623371	電動送風機の送風翼取付装置	城處 元彦 竹村 淳登	
3623380	電動アクチュエータ	北村 昭則	
3630501	混合装置	大野 敏也	
3630509	回転ドラムの洗浄・乾燥装置	大野 敏也	
3630514	混合装置	杉山 浩二 高木 康広	
3630589	系統連系用太陽光発電システムの制御装置	神部 晃 桑原 祐 有川 清二 辻本 賢次	
3639192	中性点接地抵抗装置	後藤 直樹	
3640448	中性点接地抵抗装置	佐藤 一彦 後藤 直樹 黒川 久貴	
3644854	ブラシレスモータ、および、そのブラシレスモータの磁極位置判別	太田 久義 土本 僚一	
3646018	電動アクチュエータ	尾山 弘太郎	
3657813	食品粉碎装置	布施 三千雄 田中 武雄	
3657841	有機廃棄物処理装置における脱臭装置	杉本 立央 山口 英之 竹村 哲弥 中川 勝博 山田 喜弘	
3664900	変圧器鉄心及びその製造方法	長江 洋典 山田 聡	
3672464	巻鉄心の成形方法及び成形装置	白石 真澄 安原 和徳 山田 聡	
3672472	モータ駆動回路	太田 久義 土本 僚一 駒田 圭成 大隅 升男	
3673676	食品粉碎装置	田中 武雄 栗田 忠幸	
3720498	鉄心材料の搬送装置	白石 真澄 河瀬 文雄	
3723619	有線駆動システムにおける誤動作防止装置	安田 徹 安達 隆義 渡会 智和	パラマウント ベッド(株)
3727454	アモルファス鉄心変圧器の製造方法	白石 真澄 丸山 栄太 山田 聡	
3734985	乾燥装置	大嶋 昭彦	
3754559	電磁マグネットのヨーク製造方法	高須 祐二 柴田 嘉文	
3762268	非接触電源装置	土本 僚一 近藤 英二 大隈 升男	