

# 送ガス式SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器における巻線内の流速分布

Gas Flow Distribution in Windings of Forced Gas Cooled Type  
SF<sub>6</sub> Gas Insulated Transformer

中村 佳朗<sup>※1</sup> 内田 哲雄<sup>※2</sup>  
Yoshiaki Nakamura Tetsuo Uchida  
佐藤 一彦<sup>※2</sup> 神谷 俊郎<sup>※2</sup>  
Kazuhiko Satō Toshiro Kamiya  
柴田 克巳<sup>※2</sup>  
Katsumi Shibata

Understanding the cooling characteristics in windings of the SF<sub>6</sub> gas insulated transformer is an important step for simplifying the transformer construction and its auxiliary equipment. To develop an optimal winding arrangement, it is necessary to know the distribution of SF<sub>6</sub> gas velocity and temperature in windings.

For that purpose, measurements of velocity distribution using a test model and numerical analysis such as the finite element method calculated by computer, are generally applied.

This paper describes the measured results relating to two winding constructions of forced-gas circulation method-zigzag flow and duct flow- using full-scale two dimensional model of 20MVA transformer and a backscatter laser flow meter. It also describes the calculated results by numerical fluid analysis in windings using a two dimensional steady-state thermal-liquid analysis program utilizing the QUICK method applied to a general coordinate system. Furthermore, we compared the results of these two approaches, and presented application examples using numerical simulation to find the optimal flow path arrangements.

## 1 まえがき

近年、都市部の地下変電所や市街地などに設置される受変電設備には、防災上使用される機器の不燃化要求が強くなり、SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器が多く採用され始めている。

SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器の巻線の熱伝達率は、自冷式の場合、鉱油変圧器に比較して約1/20程度である。そのため比較的小容量器においても冷却媒体であるSF<sub>6</sub>ガスを変圧器巻線内に強制循環させる送ガス方式が適用される。

送ガス式SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器において、構造のコンパクト化及び補機の合理化を図るためには変圧器巻線の冷却特性を把握し、冷却効率を高めることが最も重要な課題である。強制対流時の熱伝達率は、レイノルズ数 (Re) とプラントル数 (Pr) の関数となるため、所定温度におけるSF<sub>6</sub>ガスの物性値と巻線内部の流速分布が分れば算出可能となる。したがって強制循環時の冷却特性向上を図るためには、まず変圧器巻線内の流速分布及び温度分布の解明が必要となる。従来は実測モデルによる測定結果を基にした経験的知識と判断に頼らざるを得なかった。

しかし、異なった形状に対し数多くの実験を行うことは時間と費用の面で困難を生じ、またその適用には限界があり、最適な流量比を有する流路構成を検討する上では十分でなかった。

近年、数値解析技術の進歩は著しく、計算機処理能力の向上とあいまって、冷却媒体としての鉱油及びSF<sub>6</sub>ガスなどの流体の物理現象についても数値解析シミュレーションが可能となってきている。

今回、強制循環時の巻線内流路構成方式であるジグザグフローとダクトフローの二方式について20MVA変圧器の高圧巻線を模擬した実規模大寸法の2次元モデルを製作し、後方散乱型レーザ流速計を用いて流速分布を測定した。更に巻線内の流速分布、温度分布及びガス流入口に相当する巻線下部の分岐流路における流量比を定量的、定性的に把握することを目的として、一般座標系に適用されたQUICK法による2次元定常熱流体解析プログラムを使用して数値流体解析を行った。本報では、実測結果と数値解析結果との比較及び最適化流路構成を求めめるために行った数値シミュレーションの実施例について述べる。

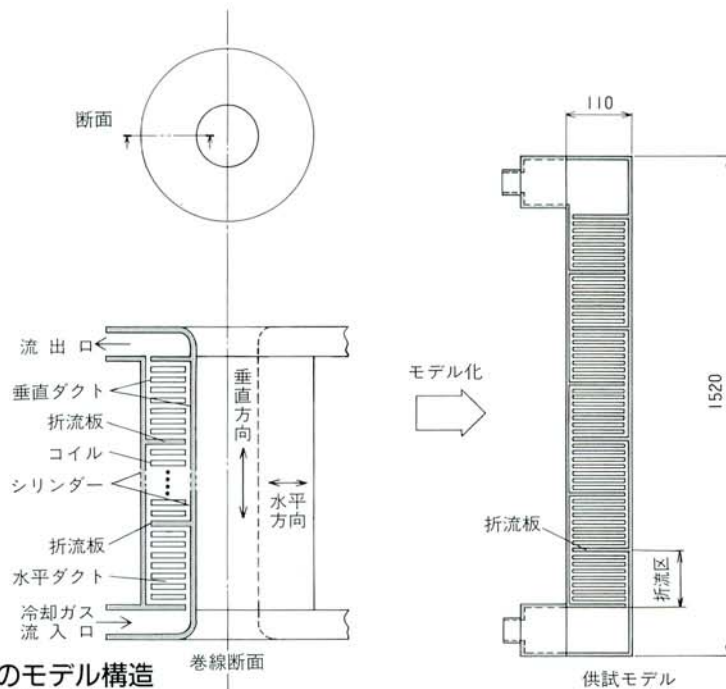


図1 /ジグザグフロー方式のモデル構造  
Fig. 1/Construction of Zig-Zag flow model

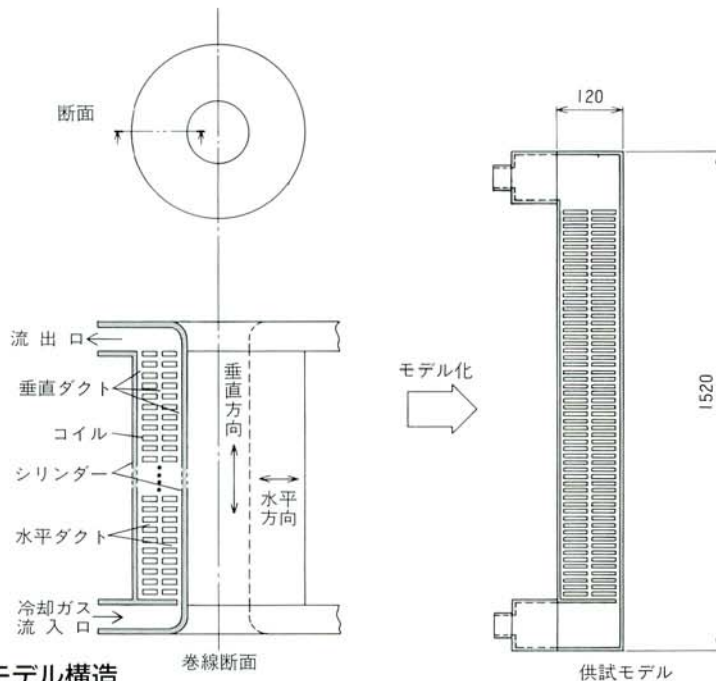


図2 /ダクトフロー方式のモデル構造  
Fig. 2/Construction of Duct flow model

## 2 巻線内の流速分布の測定

20MVA変圧器の巻線形状は、内鉄形同心配置の場合、円板巻線を垂直方向に連続して積重ねる連続板状巻線構造が一般的である。そのため、巻線内に冷却媒体のSF<sub>6</sub>ガスを強制的に循環させる送ガス式の流路構成は、垂直方向に配置されるガス折流板と水平方向に配置されるコイル間ダクトによって冷却流路が複数ブロック（以下折流区という）に区分されているジグザグフロー方式と、ガス折流板を設けず垂直方向ダクトとコイル間ダクトによって冷却流路が構成されるダクトフロー方式の二方式に大別される。この両者を2次元的に模擬したモデルを用いて巻線内の流速分布の測定を行った。

### 2.1 供試モデル

供試モデルは、20MVA変圧器の実規模大寸法の高圧巻線を垂直方向に切断した断面構造を2次元的に模擬したモデルを用いた。図1にジグザグフロー方式、図2にダクトフロー方式のモデル図を示す。巻線各部の諸元は容易に任意の値に設定可能であるが、今回は両者とも56個のコイルを垂直方向に連続して積み重ねた構成とした。ジグザグフロー方式では1折流区を8個のコイルで形成し7ブロックの折流区を設け、垂直ダクトを介して流れ方向を流れの進行方向に対して左右に変えながら結合した。ダクトフロー方式ではコイル水平方向で2分割し、中央部にも垂直ダクトを設けた。両者とも垂直ダクトと水平ダクトの厚さを同一に設定した。又各モデル

側壁は後述のレーザー光を透過させるために透明ポリカーボネート板を用いて製作を行った。

## 2.2 測定方法及び実験装置

気体の流速測定法としては、ピトー管を用いて動圧より流速を求める方法、加熱センサの熱放散を利用した熱線流速計、流体中にレーザー光を投射して流体からの散乱光のドップラシフトを測定することによって流速を得るレーザー流速計などがある。しかし、今回のように流路幅の狭い(数mm~10数mm)コイル間ダクト内の流速を測定する場合、従来から使用されているピトー管や熱線流速計では、センサ等により流速を乱す、低流速域(1m/s以下)では精度が悪くなる傾向がある。一方レーザー流速計は、非接触型であるため、センサ等の影響で流速を乱すことなく低流速域から高流速域(数mm/s~数100m/s)まで精度の良い測定が可能であるが、流体中にレーザー光を散乱させるために数 $\mu\text{m}$ の微粒子を浮遊させる必要がある。このため、SF<sub>6</sub>ガスを循環させる閉ループ系での実験では、微粒子の壁面への付着、粒子濃度の低下、壁面の汚れ、ガス圧変化、ガス組成変化などの難点がある。

以上より、本研究では流速を乱さないために非接触型である後方散乱型レーザー流速計を使用し、流体としては

SF<sub>6</sub>ガスの代わりに空気を用いて循環系を形成し、レーザー光の散乱用微粒子としては、比較的長時間にわたって容易に粒子濃度を保持できる灯油ミストを用いて流速の測定を行った。実験装置の概略図を図3(a)、(b)に示す。測定系は図3(a)に示すように、後方散乱型レーザー流速計のレーザー発光部と受光部、トラック処理器より成り、循環系は図3(b)に示すように、ミスト発生器、ブロワ、流量計、巻線モデル部と、これらを接続する風洞から成る。

レーザー流速計は、後方散乱の干渉縞方式を用い、受光部でとらえたドップラ周波数信号をトラック処理器を用いて流速に変換する。入射レーザー光交角と干渉縞間隔の関係及びドップラ周波数と流速の関係は図4に示され、次式で与えられる。

$$D_F = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

$$f_D = \frac{V}{D_F} = \frac{V}{\lambda} 2 \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\therefore V = \frac{f_D \lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

ただし、 $\theta$ : 入射レーザー光交角

$D_F$ : 干渉縞間隔

$f_D$ : ドップラ周波数

$V$ : 散乱粒子速度

$\lambda$ : 入射レーザー光の波長

流量の調整は、ブロワの回転数を変化させることを行って行った。空気を所定の流量に設定した後、ミスト発生器より灯油ミストを供給し、レーザー流速計のプロブ(発光部、受光部)を上下左右方向に移動させ各コイル間ダクトの流速を測定した。図5に試験装置の外観を示す。

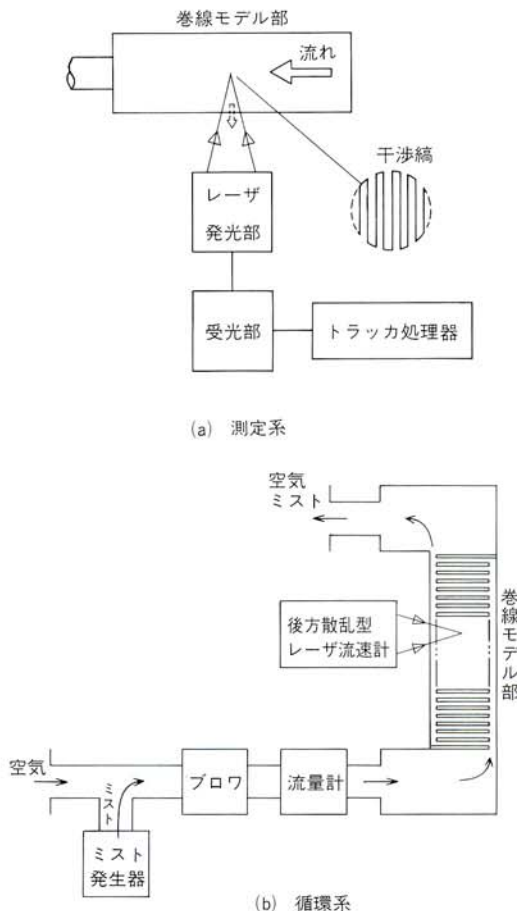


図3/実験装置

Fig. 3/Experimental arrangement

## 2.3 試験結果

ジグザグフロー方式の流速は、図6に示すように各折流区の流体入口側の水平ダクトで低く、出口側の水平ダ

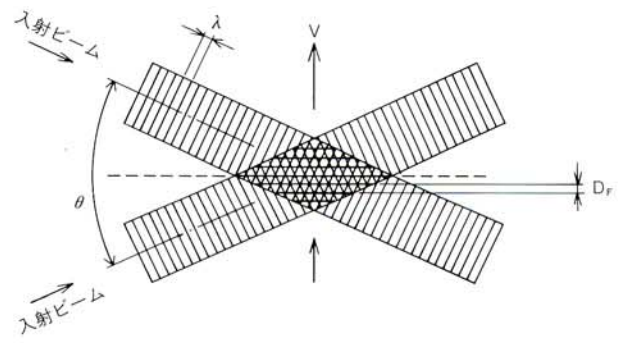
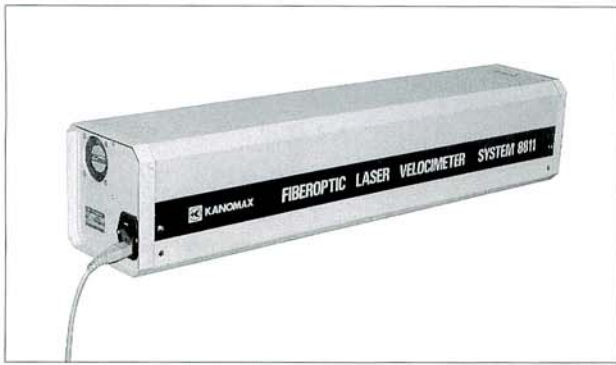
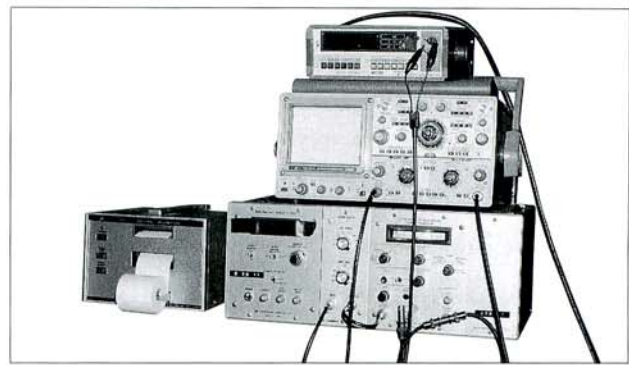


図4/レーザー光交叉点の干渉縞

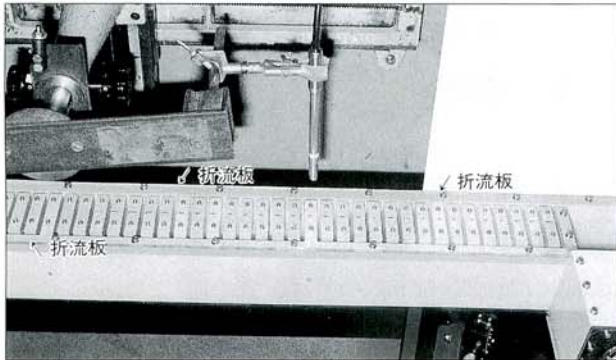
Fig. 4/Interference fringe at the crossing of two laser beams



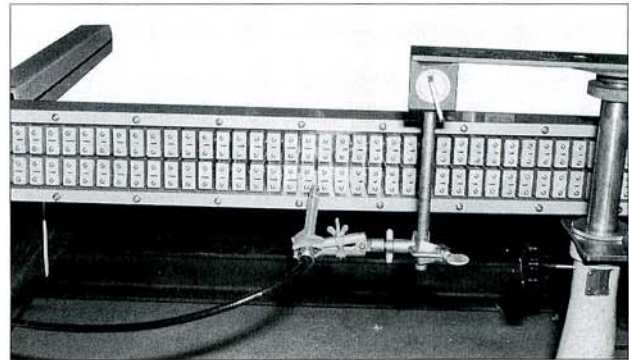
(a) レーザ+FLVプローブ(後方散乱型プローブMODEL1831(f30))



(b) トラック処理器



(c) ジグザグフロウモデル



(d) ダクトフロウモデル

図5/実験装置外観

Fig. 5/External view of experimental apparatus

クトで5~10倍と高くなる。この理由として、流体入口側では折流区の流入口で水平ダクトと垂直ダクトに流れが分岐するため、この部分での損失が大きくなり流速が低下する。また、折流板近傍の流体出口側では垂直ダクトと水平ダクトからの合流による速度増加のために急激な静圧低下を生じて、主に各折流区の水平ダクト番号7、8から気体を吸引する現象となっており、この部分のみ流速が高くなる。図6(a)中に流れの様子を実線で模式化した

て描いた。太い線は流速が大きく、細い線は流速が小さいところである。

ダクトフロウ方式の場合の流速は図7に示すように左、中、右の各垂直ダクトの圧力損失が小さいため流体入口側から出口側にかけて均等な流速分布となった。しかし、ダクトフロウ方式での水平ダクトの流速は図8に示すように流体入口側から出口側全てのコイル間で零に近い値となり流れがほとんど水平ダクト側へ分岐しないことが

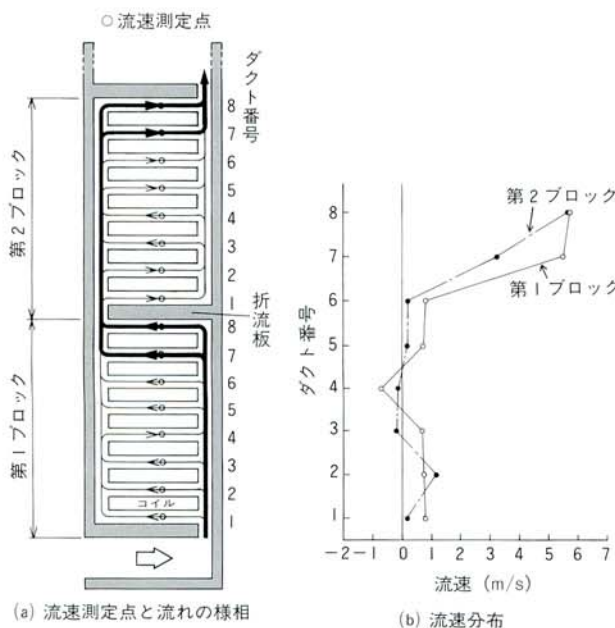


図6/ジグザグフロウ方式の流速分布(水平ダクト)

Fig. 6/Velocity distribution of Zig-Zag flow model (Horizontal ducts)

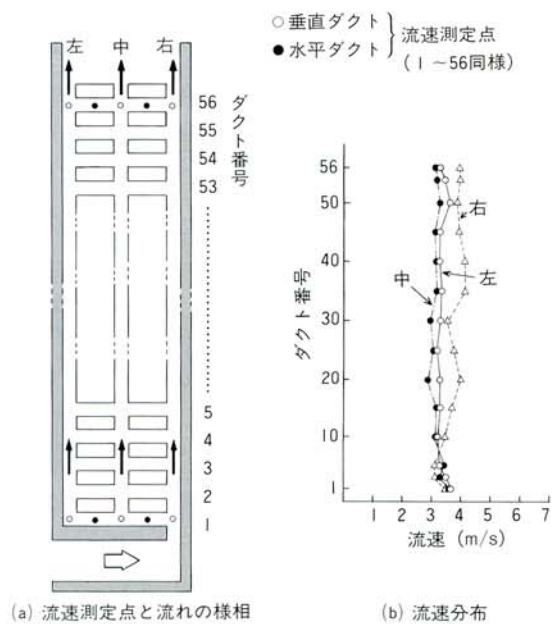


図7/ダクトフロウ方式の流速分布(垂直ダクト)

Fig. 7/Velocity distribution of Duct flow model (Vertical ducts)

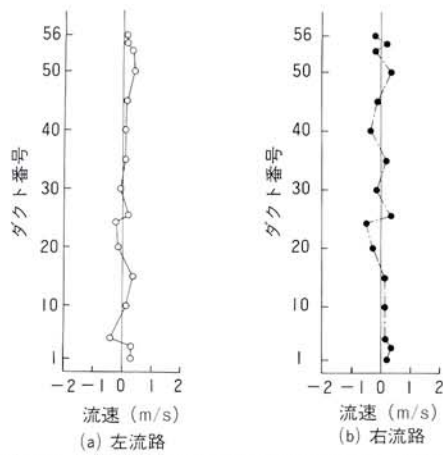


図8/ダクトフロー方式の流速分布(水平ダクト)  
Fig. 8/Velocity distribution of Duct flow model (Horizontal ducts)

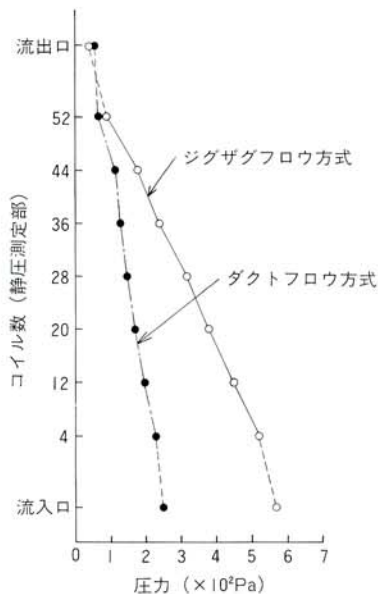


図9/静圧測定結果  
Fig. 9/Relation between the static pressure and the number of coils

分った。

このようにジグザグフロー方式では、折流区流体入口側の垂直ダクトで最大の流速となるが、他方の垂直ダクトでは水平ダクトに入り込む流れが入口側と出口側では大きな差となるため、この偏りから微少な流速となる。更に、水平ダクトでは各折流区の入口に近いダクトの流速がほとんど零となるために、実器ではこの部分に位置するコイルの冷却効果を期待することはできない。特に、最も底部にあるコイルの左下角は流速が無いため、局部過熱が起こる危険性を示唆する。

ダクトフロー方式では、垂直方向の均等な流速のために入口側から出口側にかけて均一な放熱効果が期待できるが、水平ダクトの流速がほとんどないため、コイルの放熱効果を大きくするために冷却媒体であるガスと接する面積を多く設ける必要性があり、垂直ダクト数を増やすことによって、冷却効果を高めることが可能と考えられる。

図9に両方式の垂直ダクト部での静圧測定結果を示す。

ジグザグフロー方式はダクトフロー方式に比較して圧力損失が流体入口側では2.3倍となっていることが分る。

本実験ではSF<sub>6</sub>ガスの代わりに空気を用いて流速の測定を行ったが、空気とSF<sub>6</sub>ガスでは物性値として密度及び動粘度が異なるので、空気を流体とした場合は、SF<sub>6</sub>ガスに対し10~15%程度の違いが生じるとの実験報告がある<sup>(4)</sup>。

### 3 数値解析

流体数値解析の目的は、変圧器巻線の表面の熱伝達率を算出することにある。強制対流時の熱伝達率はレイノルズ数 (Re) とプラントル数 (Pr) の関数で示され、レイノルズ数は冷却媒体の速度の関数となる。したがって冷却媒体の流速を求めることによって熱伝達率は算出可能となる。本報では、SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器の巻線内の流れを2次元空間の定常非圧縮性熱流体として取扱い解析を行った。

#### 3.1 解析方法

##### 3.1.1 基礎方程式

定常状態の2次元空間において、 $u$ 、 $v$ 、 $p$ で表した2次元非圧縮性ナビエ・ストークスの流体基礎方程式は次式で表される。

$$q_t + E_x + F_y = \text{Re}^{-1}(R_x + S_y) \cdots \cdots (1)$$

$$q = \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} u \\ u^2 + p \\ uv \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} v \\ uv \\ v^2 + p \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 \\ u_x \\ v_x \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ u_y \\ v_y \end{bmatrix}$$

ただし、 $u$ 、 $v$ 、 $p$ ：無次元化された $x$ 方向、 $y$ 方向の速度成分及び圧力

$q$ ：流速

$E$ 、 $F$ ： $x$ 、 $y$ 方向の流束

$R$ 、 $S$ ： $x$ 、 $y$ 座標における拡散項

$\text{Re}$ ：レイノルズ数

$$\text{Re} = \frac{\rho V_i L}{\mu}$$

$$\therefore \text{Re}^{-1} = \frac{\mu}{\rho V_i L}$$

ただし、 $\rho$ ：圧力 $p$ における気体の密度

$V_i$ ：無限流速

$L$ ：ダクト長さ

$\mu$ ：粘性係数

この方程式を物理空間 (xy空間) から写像空間、すなわち計算空間 ( $\xi\eta$ 空間) に変換して2次元の曲線座標格子 (一般座標系 $\dots\xi, \eta$ 座標系) 内の正方形格子に対して流れ計算を行う。

$$x=x(\xi(x,y), \eta(x,y)), y=y(\xi(x,y), \eta(x,y)) \dots (2)$$

(2)式を  $x, y$  について微分すれば、

$$\begin{aligned} 1 &= \xi_x x_\xi + \eta_x x_\eta, 0 = \xi_y x_\xi + \eta_y x_\eta \\ 0 &= \xi_x y_\xi + \eta_x y_\eta, 1 = \xi_y y_\xi + \eta_y y_\eta \dots (3) \end{aligned}$$

$\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$  は変換のメトリックで次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \xi_x &= J^{-1}y_\eta, \xi_y = -J^{-1}x_\eta, \\ \eta_x &= -J^{-1}y_\xi, \eta_y = J^{-1}x_\xi \dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 $J$  は変換のヤコビアンである。

$$\begin{aligned} J &= \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x \\ &= (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi)^{-1} \dots (5) \end{aligned}$$

以上の関係を用いて、(1)式は以下に変換される。

$$\widehat{q}_t + \widehat{E}_\xi + \widehat{F}_\eta = \text{Re}^{-1} \{ [J^{-1}(\xi_x R + \xi_y S)]_\xi + [J^{-1}(\eta_x R + \eta_y S)]_\eta \} \dots (6)$$

$$\begin{aligned} \widehat{q} &= J^{-1}q \\ \widehat{E} &= J^{-1}(\xi_x E + \xi_y F) \\ \widehat{F} &= J^{-1}(\eta_x E + \eta_y F) \end{aligned}$$

さらに、一般座標系での速度 (反変速度)  $U, V$  は、

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \dots (7)$$

によって定義しておく、

$$\widehat{q}_t + \widehat{E}_\xi + \widehat{F}_\eta = \text{Re}^{-1}(\widehat{R}_\xi + \widehat{S}_\eta) \dots (8)$$

$$\begin{aligned} \widehat{q} &= J^{-1}[0, u, v]^t \\ \widehat{E} &= J^{-1}[U, uU + p\xi_x, vU + p\xi_y]^t \\ \widehat{F} &= J^{-1}[V, uV + p\eta_x, vV + p\eta_y]^t \\ \widehat{R} &= J^{-1}[0, g_1u_\xi + g_2u_\eta, g_1v_\xi + g_2v_\eta]^t \\ \widehat{S} &= J^{-1}[0, g_2u_\xi + g_3u_\eta, g_2v_\xi + g_3v_\eta]^t \\ g_1 &= \xi_x^2 + \xi_y^2 \\ g_2 &= \xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y \\ g_3 &= \eta_x^2 + \eta_y^2 \end{aligned}$$

が成立する。ここで、 $g_1, g_2, g_3$  は  $\xi\eta$  座標系への変換係数である。

(8)式を展開すると次式の形になる。

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{U}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{V}{J} \right) = 0 \dots (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{u}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{uU + p\xi_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{uV + p\eta_x}{J} \right) \\ = \text{Re}^{-1} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{g_1u_\xi + g_2u_\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{g_2u_\xi + g_3u_\eta}{J} \right) \right] \dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{v}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{vU + p\xi_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{vV + p\eta_y}{J} \right) \\ = \text{Re}^{-1} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{g_1v_\xi + g_2v_\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{g_2v_\xi + g_3v_\eta}{J} \right) \right] \dots (11) \end{aligned}$$

(9)式は「連続の式」、(10)と(11)式は「 $x, y$ 方向の運動方程式」を表す。また、運動方程式である、

$$m\alpha = f$$

ただし、 $m$  : 質量  
 $\alpha$  : 加速度  
 $f$  : 力

と(10)、(11)式を対比させると、左辺が加速度、右辺が力 (粘性応力) を示していることが分る。以上、微分方程式(8)の解ベクトル $q$ を求めるためにポアソン方程式から導かれる2ステップ法を用いて時間積分を行った。このとき、慣性項に対して安定性を増すために3次精度差分法(QUICK法)を用いた。このQUICK法を用いることによって高レイノルズ数領域におけるナビエ・ストークスの対流条件式の不安定要素を抑制することができる。

2ステップ法の第1ステップは対流条件についての計算であり、次式で示される。

$$\frac{\left[ \frac{u^*}{J} - \frac{u^n}{J} \right]}{\Delta t} = 1.5H^n - 0.5H^{n-1} + 0.5\text{Re}^{-1}\nabla^2 u^n \dots (12)$$

第2ステップは圧力勾配の計算で次式で示される。

$$\frac{\left[ \frac{u^{n+1}}{J} - \frac{u^*}{J} \right]}{\Delta t} = [(J^{-1}mp)_\xi + (J^{-1}np)_\eta]^{n+1/2} + 0.5\text{Re}^{-1}\nabla^2 u^{n+1} \dots (13)$$

ここで、 $u$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u &= (u, v, \theta) \\ m &= (\xi_x, \xi_y, 0) \\ n &= (\eta_x, \eta_y, 0) \end{aligned}$$

ただし、 $\theta$  : 無次元化温度

$H$  : 慣性項

$\nabla^2$  : ラプラス演算子

なお、(12)式の右辺第1、2項は対流項の方程式をアダムス・バッシュフォース法を用いて時間について展開したものである。すなわち時間について2階微分の有限差分近似法となっている。

圧力分布は次のポアソン方程式より導くことができる。

$$\nabla^2 p^{n+1/2} = \frac{D^*}{\Delta t} \dots (14)$$

ここで、

$$D^* = J(y_\eta u_\xi^* - y_\xi u_\eta^* + x_\xi v_\eta^* - x_\eta v_\xi^*)$$

また、表面の境界条件は

$$u=0, v=0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \dots (15)$$

流出条件は次の運動方程式により求めた。

$$v u_y = -p_x + \text{Re}^{-1} u_{yy} \dots (16)$$

なお、 $x$  は流れの主方向成分を示し、 $y$  は  $x$  と垂直方向の成分を示す。

### 3.1.2 解析条件

解析条件は次の(1)~(5)項で行った。

#### (1) パラメータ入力値

- ① 主流速度：無次元化量とし流体入口で基準速度「1」を与える。
- ② 圧力：相対圧力を無次元化してヒアシックな流れとした。すなわちラプラス方程式では、 $\nabla^2 u = 0$ となる。
- ③ レイノルズ数：SF<sub>6</sub>ガス物性値を考慮して $1 \times 10^4$ とした。

#### (2) 計算条件

- ① 格子数：メッシュ割は垂直方向が256或いは281ポイント、水平方向が53ポイントの長方形格子形状とした。

- ② タイム・ステップ巾： $\Delta t = \frac{1}{1000}$

- ③ 緩和係数： $\alpha = 1.5$

#### (3) 初期値設定

- ① 速度分布：コイルモデル内部で零(静止)、入口部でポアズイユ流れとし、壁面では $u=0$ 、ダクト中央部で $u=1$ を与える。

- ② 圧力分布： $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$

#### (4) 計算方法

- ① タイム・ステップ数： $n = 25000$

- ② 圧力：ポアソン方程式を用いて反復させる。

- ③ 速度：時間進行法を用いる。

#### (5) 収束条件 (判定)

- ① 圧力：反復の残差値が $10^{-4}$ より小さくなれば収束と判定する。

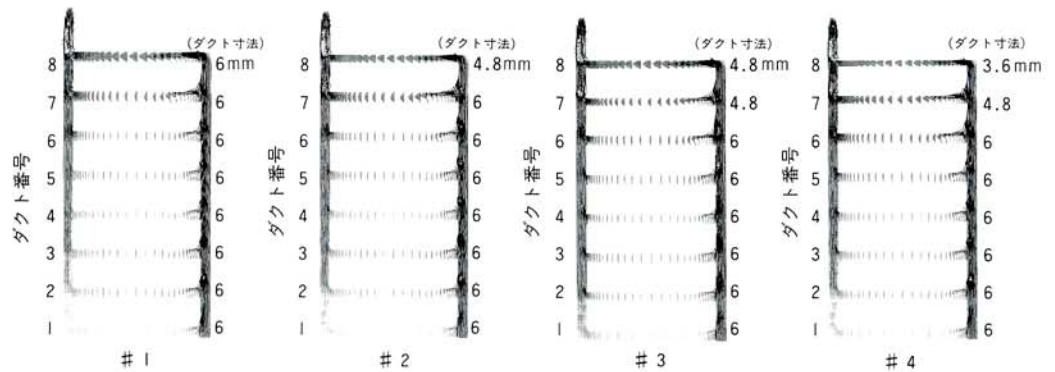
- ② 速度： $n = 25000$ すなわち $t = 25$ で一定状態とした。

なお、この計算はFACOMスーパーコンピュータVP-200によって行った。

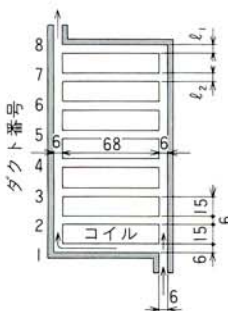
## 3.2 解析結果

実際の変圧器では、実測モデルのように折流区が直列に結合され組まれた状態となっている。しかし、全ての折流区について計算することは長時間を要するため、本報では1つの折流区についてのみ計算を実施した。

ジグザグフロー方式の解析結果を図10に示す。図10#1のモデルは垂直及び水平ダクトとも6mm幅で構成した場合であり実測モデルと同一形状を成す。#1モデルでの最も大きい流れは、右側垂直ダクトを直線的に進み、折流板の壁とぶつかりながら、折流区右上角から左の水平ダクトへと曲がり込んでくる。最上部の水平ダクト(番

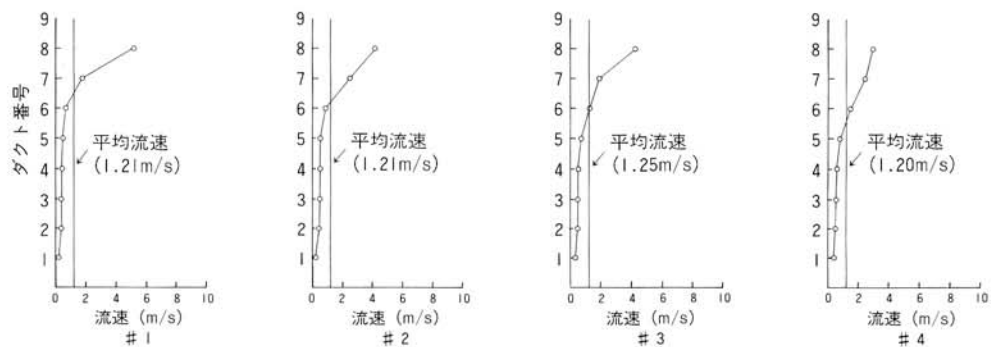


(b) 流速ベクトル図



(a) 解析モデル

( $l_1$ 、 $l_2$ のダクト寸法を変化させる)



(c) 水平ダクト流速分布

図10/ジグザグフロー方式の解析結果(ダクト寸法を変化させた場合)

Fig. 10/Analysis of Zig-Zag flow model (dimensional variation of Horizontal ducts)

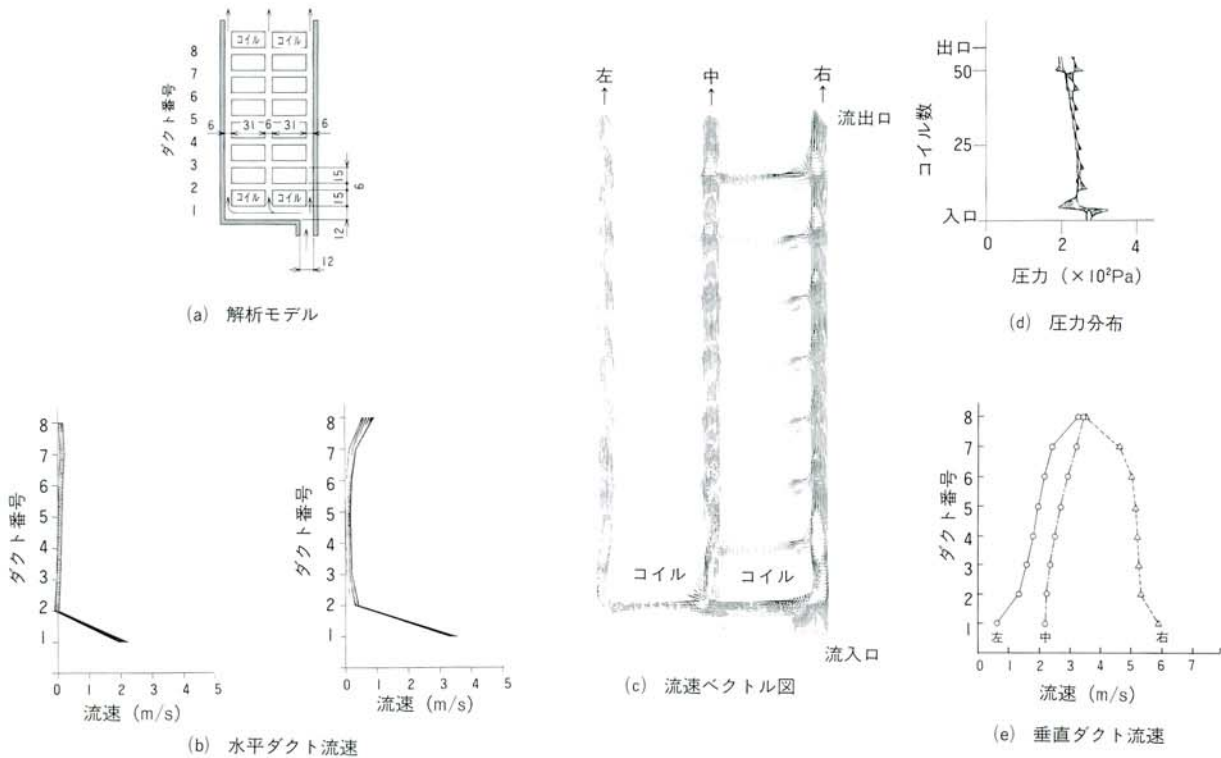


図11/ダクトフロウ方式の解析結果

Fig. 11/Analysis of Duct flow model

号8)が高い流速と流量比を有することがわかる。最上部より2番目の水平ダクトでは流速は減る。残りの水平ダクトではほとんど零となった。実測結果の水平ダクト流速分布は図6(b)のように流体入口側のコイル間ダクトで低く、出口側コイル間ダクトで高くなる傾向があった。計算値と実測値を比較すると、両者とも類似したパターンを示し、その傾向は良く一致している。また、平均流速値は計算値の場合1.23m/s、実測値では1.45m/sとなり、約15%程度計算値が低くなった。これは、空気とSF<sub>6</sub>ガスの物性値の影響と考えられる<sup>14)</sup>。なお、ダクト内の圧力損失は密度と流速の積に比例するため、密度のみが変化しても各部の圧力損失の占める割合は変化しないので、流速分布には影響を与えない。また、動粘度の影響に関しては、分岐損失の占める割合がダクト壁摩擦損失よりも大きくなるため、流速分布の決定要因に対してはそれ程大きな影響を与えないと考えられる。

以上より、計算結果は実測値に対して妥当であり、空気を流体とした実測値では、SF<sub>6</sub>ガスの場合に比較して15%程度の違いで流速が得られることが分った。図10#2~#4のモデルは折流区最上部の水平ダクト(番号8)の寸法を減少させることによって、各水平ダクトに均等化された流速が得られるかを数値シミュレーションした内容である。この結果より、折流区流体出口側の水平ダクト寸法を狭めても、各水平ダクトで均等化した流れを得ることはできないことが分った。すなわち、ジグザグフロウ方式ではダクト寸法を変えても冷却効率のよい流れを得ることはできず、流入口近傍の折流区底部には冷却されないコイルが存在

し、局所的な過熱状態の起こり得ることを示唆している。

ダクトフロウ方式の解析結果を図11に示す。解析モデルの諸元は図11(a)に示す寸法であり、流体入口部の水平ダクトのみ12mm幅とし、それ以外のダクトは、垂直、水平共6mm幅とした。水平ダクトの流速は図11(b)のように入口部で高くなるが、2番目以後のダクトではほとんど零となった。垂直ダクトでは図11(e)のように入口近傍で右側垂直ダクトが最大流速となり、中央及び左側垂直ダクトでは最低流速となった。流速分布は8コイル目以後の上部出口付近になると、それぞれ近い値となり一定値に収束する傾向を示した。図11(c)に流速ベクトル分布を示す。流れは入口部で上向きに流れていくものと、左へ曲がるものとの2方向に分割され、底部では渦が発生している。圧力分布は図11(d)に示すように右側垂直ダクトでは振動パターンを示す。特に、入口部分で大きな振動となる。しかし、その他2つの垂直ダクトでは圧力が出口に向かってゆるやかな減少を示した。これは入口近傍に発生した渦の影響によるものと考えられる。以上の数値解析結果を図6~9の実測結果と比較すると、流速、圧力分布とも類似したパターンを示し、その傾向はよく一致している。また、空気とSF<sub>6</sub>ガスの差は前述のジグザグフロウ方式の場合と同様に物性値の影響により15%程度の差が見られた。

図12にダクトフロウ方式の温度分布を示す。解析条件として、コイル表面の境界に、一定の温度勾配をもつ熱束を設定した。解析結果より水平ダクト部のコイル近傍で温度が上昇していることが分る。

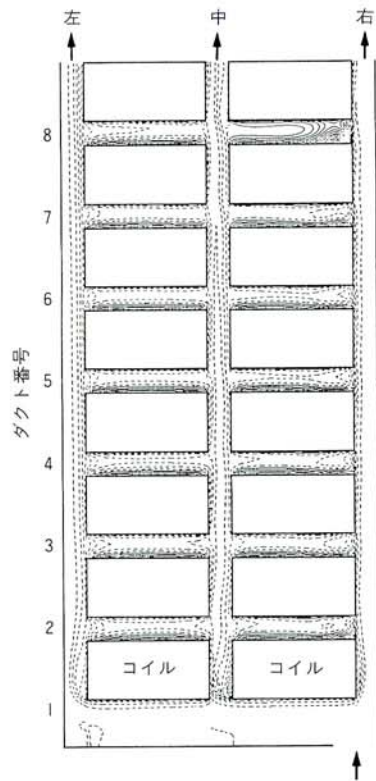


図12/ダクトフロウ方式の温度分布  
Fig. 12/Temperature distribution of Duct flow model

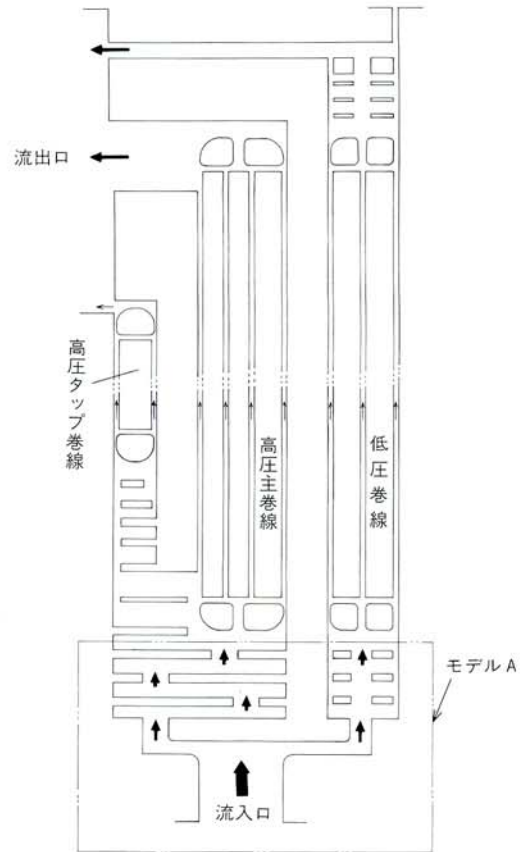


図13/巻線構造図  
Fig. 13/Construction of forced gas cooled transformer

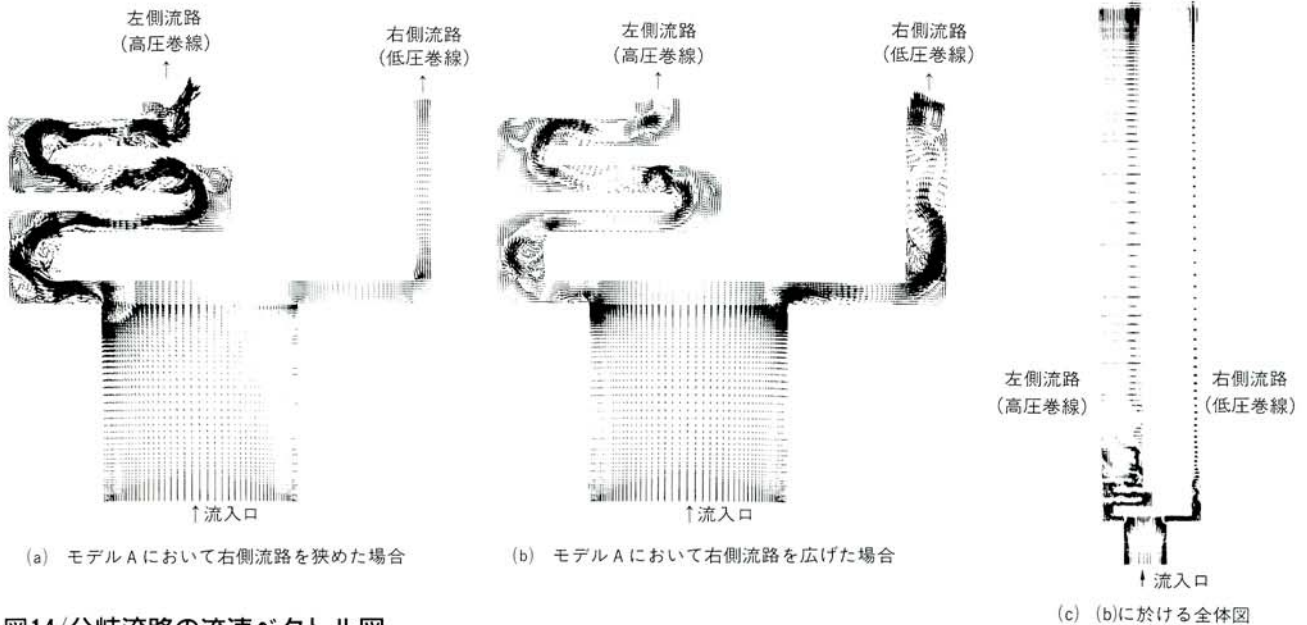


図14/分岐流路の流速ベクトル図  
Fig. 14/Velocity vectors of branch passage flow (dimensional variation of branch passage vertical portion of right side)

次に実際の巻線構造における解析結果について述べる。図13は、三相、77kV、20MVA、ガス絶縁変圧器の巻線構造図である。内側より低圧巻線、高圧主巻線、高圧タップ巻線の順に内鉄形同心配置で構成されている。図13中モデルAは低圧巻線と高圧巻線群へ流れを分岐する部分であり、各巻線の発熱量に応じて流量を調節する役割を

持つ。左側の高圧巻線群への流路は右側の低圧巻線への流路に対し、絶縁上沿面距離を大きく取るために、流れが180°の回転を繰返す曲がりくねったクランプ形状となっている。このために左側流路は右側流路に対し、より大きな管路抵抗となり流路の圧力損失が増加する。以上のような偏りを持つ分岐流路であっても、右流路幅を調

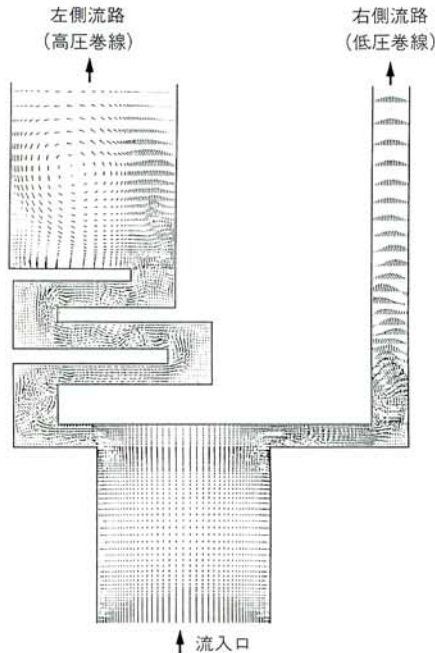


図15/分岐流路の流速ベクトル図(適正流量比)  
Fig. 15/Velocity vectors of branch passage flow (appropriate flow rate)

節することにより流量を変えることができる。

図14(a)、(b)は右流路を任意に狭めた場合と広げた場合の流速ベクトル分布である。この結果より、図14(a)では右流路幅を狭めたことにより圧力損失が増加し、左側流路の流速が増加する。図14(b)では(a)の逆効果となる。図14(c)は、高、低圧巻線内部の圧力損失を考慮したダクトを分岐部に重畳させた場合の解析結果である。

図15は、巻線内部への流量が発生熱量に対し適正となる場合の流速ベクトル分布である。このときの時間変化に対する分岐流路の流量比を図16に示す。右流路における流量比は左流路より平均して約25%程度大きく、その差はほとんど一定の値を保った特性曲線となった。

## 4 あとがき

送ガス式SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器における巻線内の流速分布を把握するため、ジグザグフローとダクトフローの二方式の巻線モデルを製作し、後方散乱型レーザ流速計を用いて流速分布の測定を行った。更に一般座標系に適用されたQUICK法を用いて2次元定常熱流体解析プログラムを開発し、巻線内流速分布と熱及び流速に連成した温度分布の解析を行った。この結果として、

- (1) ジグザグフロー方式では、折流区流体入口部のコイル間ダクトで流速が低く、流出口では高くなる傾向があることが分った。
- (2) ダクトフロー方式では、流入口から流出口にかけて垂直ダクトで均一な流れとなること分った。
- (3) 実測値と計算値は比較的良好一致し、解析手法の妥当性が確認できた。
- (4) 巻線下部に相当する、高、低圧巻線への分岐流路に対して発生熱量に応じた流量調節の数値解析が可能となった。

以上、実測結果と数値解析結果、及びその両者の比較、

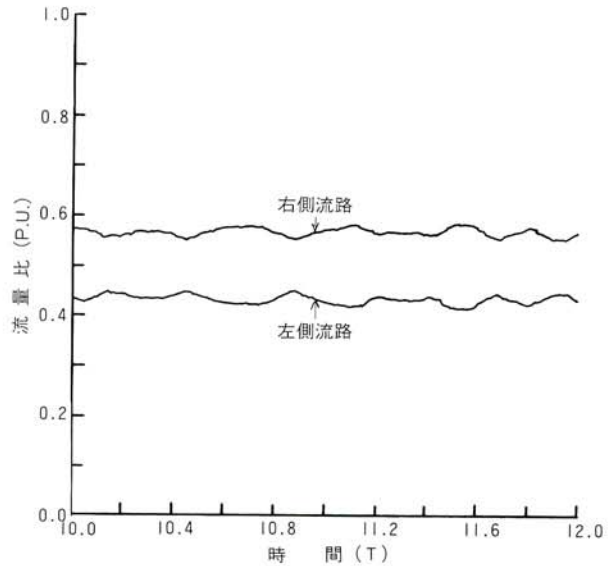


図16/流量比時間特性  
Fig. 16/Relation between flow rate and time of branch passage

更には数値解析を実器巻線構造へ応用した結果について報告した。従来の実測モデルによる経験的知識に対し、数値流体解析手法を適用することによって変圧器巻線内の流速及び温度分布が定量的、定性的に把握可能であることを確認した。

現在、本研究の結果をもとに送ガス水冷式、三相、77 kV、20/26MVA負荷時タップ切換変圧器を製作し、当社構内変電所において、フィールド試験中である。

今後は、実器フィールド試験の結果をもとに解析技術の蓄積改良を行い、機器の縮小化及び合理化に向けて適用を拡大しつつ、更に精度のよい流体解析を目指す所存である。

## 参考文献

- 1) 緒川、佐藤他：送ガス式SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器における巻線内の流速分布の測定  
昭和63年度電気関係学会  
東海支部連合大会 No.117
- 2) 佐藤、内田他：送ガス式SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器における巻線内の流体解析  
昭和63年度電気関係学会  
東海支部連合大会 No.118
- 3) 佐藤、神谷他：送ガス式SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器における巻線内流体解析  
平成元年電気学会全国大会 No.802
- 4) 熊坂、清野他：ガス絶縁変圧器における巻線内の流速分布  
電気学会静止器研究会 SA-83-62
- 5) Yoshiaki Nakamura: Incompressible Flow through Multiple Passages.  
AIAA OHIO  
July 25~28, 1988