UDC 621.3.043.2.045.5: 621.3.048.81
536.413論 文
52-A10熱膨脹収縮によるステータコイル絶縁層内の
応力変位の一考察

正 員 磯 部 昭 二 (日 立)

正 員 松 延 謙 治 (日 立)

正 員 後 藤 益 雄 (日 立)

1. ま え が き

高電圧回転電機のステータコイルが負荷の変動による加熱冷却サイクルを受け、熱膨脹収縮をした場合の絶縁層内の応力の計算法について、既に発表⁽¹⁾している。この計算法では絶縁層の厚み方向の応力分布、変位は計算できないし、また実測値との照合ができないので、詳細な検討を行なう場合には不満足であった。

ここで筆者は、この推定のため絶縁層を構成単位に分解して、絶縁層の厚み方向の応力分布、変位が計算可能な方法を考案した。構成単位に分解して計算する方法の一つに有限要素法があるが、薄いマイカや薄いレジン層が幾重にも重なり合っているため、膨大な入力データが必要であり、事実上これを用いることはできない。この考案した方法は電気回路網⁽⁴⁾を用いた計算法である。この方法を用いれば、絶縁層の厚み方向の応力分布や変形が計算できる。特に絶縁層の端面における変形が計算できるため、拡大装置があればこの変形の観測ができ、変形量の実測ができる。従って、計算値と実測値の照合ができ、計算法の妥当性が立証できる。

また、加熱冷却サイクルを受けると絶縁特性が次第に変質することは既に報告しており、すなわち第1図のような絶縁破壊強度の低下⁽²⁾、第2図のような

$\Delta \tan \delta$ の変化⁽³⁾は発表済みである。この変質はもちろん使用材料の持つ特性にも影響はあるが、加熱冷却サイクルにより生ずる応力がコイル絶縁に影響することも関係すると言えよう。特に絶縁層の変質に影響を与えられると思われる応力は、絶縁層に平行なせん断応力である。絶縁の構成材料は抗張力よりも抗せん断力(接着力で代表可)に弱いからである。

第3図は絶縁に使用されているレジンの抗張力と接着力の比較⁽⁵⁾を示したもので、不飽和ポリエステルレジンに接着力はエポキシレジンに比較して弱い。このようなせん断応力が第4図のようにコイル全長にわたり発生した場合、且つこれがコイルの熱膨脹収縮ごとに繰返されると、繰返し疲労のため次第に絶縁層内ではくりし、空けきが発生し絶縁破壊強度の低下、 $\Delta \tan \delta$ 特性の低下などが生ずる原因となる。

本計算法によれば、このせん断応力をコイル長さ方向ならびに絶縁層の厚さ方向にも算出することができるため、コイル絶縁に対しいかなる特性を有するレジンが良いかを判定する場合、有力な判定材料を提供することができる。本文には不飽和ポリエステルレジン絶縁とエポキシレジン絶縁の比較をしているが、不飽和ポリエステルレジン絶縁の方が変質の大きい理由が理解されると思う。

また、既報に述べた絶縁層の応力計算値との比較も行なっている。

2. 応力、変位の計算と実測

〈2・1〉 マイカ絶縁層の構成 本研究は、はがしマイカ片を主体にした絶縁を対象として行なったものである。ステータコイル絶縁は第5図に示す構成であ

Study on Stress and Deformation in Insulation Layer of Stator Coils due to Thermal Expansion and Contraction. By Shoji Isobe, Member (Kokubu Work, Hitachi Ltd.), Kenji Matsunobu, Member (Hitachi Work, Hitachi Ltd.) & Masuo Gotō, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.).

磯部昭二：正員，日立製作所国分工場
松延謙治：正員，日立製作所日立工場
後藤益雄：正員，日立製作所日立研究所

第1図 熱膨脹収縮サイクルによる絶縁破壊強度の変化

Fig. 1. Changes of dielectric strength after 1,000 cycles of thermal expansion and contraction.

第2図 熱膨脹収縮サイクルによる $\Delta \tan \delta$ の変化

Fig. 2. Changes of $\Delta \tan \delta$ due to thermal expansion and contraction cycles.

第3図 レジンの接着力 (抗せん断力に関連), 抗張力

Fig. 3. Bonding strength and tensile strength of resins.

って、マイカ片、マイカペーパー裏打紙、マイカバインダ、含浸レジンが混全一体となったものである。このままであると、全く応力、変位の計算に数学的手法の入り込む余地が見いだされぬが、次のような仮定を設けることにより、これを数学的手法で求めることができる。

(1) マイカ片は長手方向に連続であり、導体の熱膨脹に伴う絶縁層に発生する引張力はすべてマイカ層

第4図 コイル全長にわたるせん断力

Fig. 4. Shearing force on whole coil length.

第5図 絶縁層

Fig. 5. Insulation layer.

で受持つものとする。

(2) マイカペーパー裏打紙およびバインダは含浸レジンと全く同一のものとする。

(3) 含浸レジンはマイカ層を十分接着し、マイカ層間に生ずる引張力は、すべてレジンのせん断力を通じて伝達される。

(4) 導体は均一であり、且つ、その温度も均一である。

(5) 絶縁層は均一であり、且つ、その温度も均一である。

以上の仮定を考えた理由は次のとおりである。

(1) マイカ片は互いにオーバーラップし合いながら積重ねられていること、及びマイカ片のヤング率はレジンに比較して非常に高いので、長手方向の引張力はほとんどマイカが受持つと考えた。

(2) 紙およびバインダはレジン含浸によりレジンと一体になってしまうと考えられるため、この存在は無視しレジンに含めた。

(3) 含浸レジンはマイカ片と十分接着しており、且つマイカに比較してレジンのヤング率は極めて低いゆえ、せん断変形はほとんどワニスにより起り、マイカではせん断変形が起きないと考えた。

〈2・2〉 等価モデル⁽⁶⁾ 上記の仮定を基にして、マイカ絶縁の長手方向の機械的モデルを考えて見ると第6図のようになる。但し、記号の付け方の関係でマイカ番号1は導体を示すことになる。第7図には以下に示す $p_{m,n}$, $q_{m,n}$, $\ell_{m,n}$, $v_{m,n}$, $w_{m,n}$ の説明を示す。これを電氣的モデルに変換すると第9図のようになる。

(1) 記号

$A_{m,n}$: 番号 n におけるマイカの面積 (cm²)

E : マイカのヤング率 (kgf/cm²)

第6図 マイカ層長手方向断面モデル
(機械的モデル)

Fig. 6. Longitudinal section of mica layer model (mechanical model).

第7図 $p_{m,n}$, $q_{m,n}$, $t_{m,n}$, $v_{m,n}$, $w_{m,n}$ の説明

Fig. 7. Explanation of $p_{m,n}$, $q_{m,n}$, $t_{m,n}$, $v_{m,n}$, $w_{m,n}$.

G : レジンのせん断弾性率 (kgf/cm^2)

m : 機械的モデルにおけるレジン番号とマイカ番号及びこれに対応する電気的モデルでは縦方向導体番号と幅番号。第6図, 第9図参照。

n : 機械的モデルにおける長さ方向の分割長番号と分割点番号, 及びこれに対応する電気的モデルでは横方向番号と長さ番号。第6図, 第9図参照。

P : 外力 (kgf)

$p_{m,n}$: マイカ番号“ m ”で, 長さ方向分割点番号“ n ”の点に作用するマイカ層の長さ方向の力 (kgf)

$q_{m,n}$: レジン番号“ m ”で長さ方向分割長番号“ n ”の部分に作用するレジン層のせん断力 (kgf/cm)

$t_{m,n}$: レジン番号“ m ”で長さ方向分割点番号“ n ”の部分のレジン層の周長 (cm)

$v_{m,n}$: マイカ番号“ m ”で, 長さ方向分割点番号“ n ”の点が長さ方向の力による同方向への変位 (cm)

$w_{m,n}$: レジン番号“ m ”で長さ方向分割長番号“ n ”の部分のレジンの厚み (cm)

x : 絶縁厚み方向の座標 (第6図) (cm)

第8図 (1)~(3)式の説明図

Fig. 8. Explanation of formulas (1), (2), (3).

第9図 電気的モデル

Fig. 9. Electrical model.

y : 長さ方向の座標 (第6図) (cm)

Δy_n : 長さ方向分割長番号“ $n-1$ ”の中心から, 長さ方向分割長番号“ n ”の中心までの長さ。長さ方向分割長番号 $n=1$ と長さ方向分割長最終番号 $n=E$ の部分は除いて等分割なら $\Delta y_n = \Delta y$, $n=1, n=E$ では $\Delta y_n = \Delta y/2$, 第6図では $n=1, n=4$ は $\Delta y_n = \Delta y/2$, $\Delta y_2 = \Delta y_3 = \Delta y_4 = \Delta y$

$I_{m,n}$: 縦方向導体“ m ”の長さ番号“ n ”における電流 (A)

$i_{m,n}$: 横方向導体“ n ”の幅番号“ m ”における電流 (A)

$R_{m,n}$: 縦方向導体“ m ”の長さ番号“ n ”における抵抗 (Ω)

$r_{m,n}$: 横方向導体“ n ”の幅番号“ m ”における抵抗 (Ω)

V : 外部より与える電圧の一般表示 (V)

$V_{m,n}$: 縦方向導体“ m ”と横方向導体の交点における電圧 (V)

α : モデルスケール係数 (抵抗/単位可とう性) (Ω -

kgf/cm)

β : 負荷スケール係数 (電流/単位力) (A/kgf)

(2) 機械的モデルと電氣的モデルの関係 第6図に示す機械的モデルについてマイカ層とレジン層に作用する力および変位を考察する。

マイカ番号 m で長さ方向分割点番号 n と $n-1$ との間のマイカについて考える。導体が熱膨脹した場合導体からレジン、レジンからマイカへと力が伝達されて行く。そこで、このマイカ部分には第8図(a)のような力の平衡状態ができる。せん断力によるモーメントは第7図に示すように対抗するせん断力が生じ打消されるため、マイカ層には影響がない。このことから(1)式が求められる。

$$p_{m,n} = p_{m,n-1} + q_{m-1,n} \Delta y_n - q_{m,n} \Delta y_n \quad \dots\dots\dots (1)$$

マイカ層の変位とその長さ方向の力の関係は(2)式で示され、第8図(b)はその説明図である。

$$v_{m,n+1} - v_{m,n} = p_{m,n} (\Delta y_n / E \cdot A_{m,n}) \quad \dots (2)$$

レジン層の変形とそのせん断力の関係は(3)式で示され、第8図(c)はその説明図である。

$$v_{m+1,n} - v_{m,n} = q_{m,n} (w_{m,n} / G \cdot t_{m,n}) \quad \dots (3)$$

第9図に示す電氣的モデル内の定常電流については次に示す三つの方程式が成立する。

$$I_{m,n+1} = I_{m,n} + i_{m-1,n} - i_{m,n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$V_{m,n} - V_{m,n-1} = I_{m,n} R_{m,n} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{m+1,n} - V_{m,n} = i_{m,n} r_{m,n} \quad \dots\dots\dots (6)$$

視察により(1)式と(4)式、(2)式と(5)式、(3)式と(6)式とは相対応するものである。

機械的モデルと電氣的モデルとの対応係数、すなわちモデルスケール係数 α 、負荷スケール係数 β は下記により定義される。

$$R_{m,n} = \alpha \Delta y_n / E A_{m,n} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$r_{m,n} = \alpha w_{m,n} / G \Delta y_n t_{m,n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$I_{m,n} = \beta p_{m,n} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$i_{m,n} = \beta q_{m,n} \Delta y_n \quad \dots\dots\dots (10)$$

機械的モデルと電氣的モデルの各項目について比較すると第1表のようである。

(3) せん断応力と絶縁層端部の変形 次にこれらを用いてせん断応力と絶縁層端部における変形の計算方法について述べる。

導体が熱膨脹した場合、導体の直上にあるマイカ層すなわち電氣的モデルの縦方向導体番号 2、横方向導体番号 n の交点における引張力は下記で示される。

$$p_{2,n} = \varepsilon A_{2,n} E \quad \text{(kgf)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

第1表 機械的モデルと電氣的モデルの比較

Table 1. Comparison between mechanical model and electrical model.

機 械 的 モ デ ル		電 氣 的 モ デ ル	
項 目	記 号	項 目	記 号
長さ方向の力	$P_{m,n}$	縦方向導体の電流	$I_{m,n}$
長さ方向弾性	$\frac{\Delta y_n}{E A_{m,n}}$	縦方向導体の抵抗	$R_{m,n}$
せん断力	$q_{m,n} \Delta y_n$	横方向導体の電流	$i_{m,n}$
せん断可とう性	$\frac{w_{m,n}}{G \Delta y_n t_{m,n}}$	横方向導体の抵抗	$r_{m,n}$
長さ方向変位	$v_{m,n}$	電 圧	$V_{m,n}$

$$\varepsilon = \alpha_i (t_i - t_0) - \alpha_c (t_c - t_0) \quad \dots\dots\dots (12)$$

α_i : 絶縁層の線熱膨脹係数 (1/°C), α_c : 導体の線熱膨脹係数 (1/°C), t_i : 絶縁層の温度 (°C), t_c : 導体の温度 (°C), t_0 : 基準温度 (°C), $t_i - t_0$: 絶縁層の温度差 (deg), $t_c - t_0$: 導体の温度差 (deg), $A_{2,n}$: マイカ層の断面積 = $t \times 0.01$ (cm²) (マイカの厚み 0.01 cm とする) このせん断力 $q_{2,n}$ は(9)~(11)式より下記となる。

$$q_{2,n} = \frac{i_{2,n}}{\beta \Delta y_n} = \frac{i_{2,n} p_{2,n}}{I_{2,n} \Delta y_n} = \frac{i_{2,n} \varepsilon A_{2,n} E}{I_{2,n} \Delta y_n} \quad \dots\dots\dots (13)$$

せん断応力 $\tau_{2,n}$ は次のようになる。

$$\tau_{2,n} = \frac{q_{2,n}}{t} = \frac{i_{2,n} \varepsilon A_{2,n} E}{I_{2,n} \Delta y_n t} = \frac{0.01 i_{2,n} \varepsilon E}{I_{2,n} \Delta y_n} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $\tau_{2,n}$: 縦方向導体番号 2 と横方向導体番号 n におけるせん断応力
マイカ層 m と導体との間の絶縁層端部の変形を $\Delta_{m,1}$ とすれば、下記のようになる。但し、絶縁層端部の横方向導体番号を n_e とする。

$$\begin{aligned} \Delta_{m,1} &= v_{m,n_e} - v_{1,n_e} \\ &= (v_{m,n_e} - v_{m-1,n_e}) + (v_{m-1,n_e} - v_{m-2,n_e}) \\ &\quad + \dots\dots + (v_{2,n_e} - v_{1,n_e}) \\ &= q_{m-1,n_e} \frac{w_{m-1,n_e}}{t_{m-1,n_e}} + q_{m-2,n_e} \frac{w_{m-2,n_e}}{G t_{m-2,n_e}} \\ &\quad + \dots\dots + q_{1,n_e} \frac{w_{1,n_e}}{G t_{1,n_e}} \\ &= \frac{w}{G t} (q_{m-1,n_e} + q_{m-2,n_e} + \dots\dots + q_{1,n_e}) \\ &= \frac{w}{G t \beta \Delta y_{n_e}} (i_{m-1,n_e} + i_{m-2,n_e} \\ &\quad + \dots\dots + i_{1,n_e}) \\ &= \frac{w}{G t \beta \Delta y_{n_e}} \left(\frac{V_{m,n_e} - V_{m-1,n_e}}{r_{m-1,n_e}} \right. \end{aligned}$$

第 2 表 レジンのヤング率とせん断弾性率

Table 2. Young's modulus and shearing modulus of resins.

レジンのヤング率 E_r	温度 レジン	21°C	70°C	120°C
	A_{P1}	4.98×10^4	3.55×10^4	2.5
レジンのせん断弾性率 G	A_{E1}	2.02×10^4	1.6×10^4	0.92×10^4
	A_{P1}	1.99×10^4	1.42×10^4	1
	A_{E1}	0.81×10^4	0.64×10^4	0.36×10^4

単位 kgf/cm²

$$\begin{aligned}
 & + \frac{V_{m-1,n_e} - V_{m-2,n_e}}{r_{m-2,n_e}} \\
 & + \dots + \frac{V_{2,n} - V_{1,n}}{r_{1,n}} \Big) \\
 & = \frac{\tau}{G t \beta \Delta y_{n_e} r} (V_{m,n_e} - V_{1,n}) \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$

ここに、 $\Delta_{m,1}$: マイカ層 m と導体との間の
絶縁層端部の変形

また、

$$\tau_{m-1,n_e} = \tau_{m-2,n_e} = \dots = \tau_{1,n_e} = \tau$$

$$t_{m-1,n_e} = t_{m-2,n_e} = \dots = t_{1,n_e} = t$$

$$r_{m-1,n_e} = r_{m-2,n_e} = \dots = r_{1,n_e} = r$$

とした。

(15)式は更に(8)式より

$$\Delta_{m,1} = \frac{1}{\alpha \beta} (V_{m,n_e} - V_{1,n_e}) \dots \dots (16)$$

(16)式は更に(7), (11)式より(17)式に変換される。

$$\begin{aligned}
 \Delta_{m,1} &= \frac{\Delta y_{n_e}}{E A_{2,n_e} R_{2,n_e} I_{2,n_e}} (V_{m,n_e} - V_{1,n_e}) \\
 &= \frac{\Delta y_{n_e} \varepsilon}{I_{2,n_e} R_{2,n_e}} (V_{m,n} - V_{1,n_e}) \dots \dots (17)
 \end{aligned}$$

〈2・3〉 数 値 数値計算にあたりマイカ、レジ
ンなどのコイル構成材料の実態を明らかにする必要が
ある。コイル絶縁は前項に述べたようにマイカ片、マ
イカペーパー裏打紙、マイカバインダ及び含浸レジ
ンがあるが、仮定に従うとマイカとレジンに統一できる。
試験によるとマイカとレジンの容積構成はほぼ 1 : 1
であるため、マイカの厚みとレジンの厚みは同一とす
る。各々の厚みは計算の便利のため 0.1mm として計
算をする。マイカのヤング率は $1 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
であるが、 $1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ を採用する。レジンのヤ
ング率とせん断弾性率の一例を第 2 表に示す。

A_{P1} は不飽和ポリエステルレジ、 A_{E1} はエポキシ
レジである。第 3 図の不飽和ポリエステルレジは
 A_{P1} 、エポキシレジは A_{E1} である。 G は $E_r/2[1 +$
 $(1/m_r)]$, $m_r=4$ として計算した。ここに、 E_r はレ
ジンのヤング率 (kgf/cm^2)、 m_r はレジンのポアソン数で

第 10 図 機械的
モデルFig. 10. Mecha-
nical model.

第 11 図 電氣的モデル

Fig. 11. Electrical model.

第 12 図 電氣的モデル計算結果

Fig. 12. Calculation result of electrical
model.

ある。

〈2・4〉 電氣的モデルとその回路計算 マイカテ
ープ、ハーフラップ (半掛または半とも称す) 4.5 回
の全長 2m の機械的モデルを一例として第 10 図に示
す。

第 11 図はその電氣的モデルである。左端の導体部
分に電圧が各メッシュごとに印加される。

例えば、ハーフラップ 4.5 回、マイカヤング率 $1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、レジンせん断弾性率 $1 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、分割長 $\Delta y = 200 \text{ cm} / 20 = 10 \text{ cm}$ 、レジンの厚み $w = 0.01 \text{ cm}$ とすれば、電気的モデルと機側のモデルの間には任意の対応係数が設定できることから、ここでは $R = 3,000 \Omega$ と決めてモデルスケール係数 α を求めると $\alpha = 3 \times 10^6 t$ となり $r = 3 \Omega$ となる。

これにより計算を行えば、第 12 図のような結果が得られる。この結果よりせん断応力 $\tau_{2.10}$ は 5.28 kgf/cm^2 、絶縁端部の変形 $\Delta y_{.1}$ は $0.26 \times 10^{-3} \text{ cm}$ (但し、(12) 式、 $\varepsilon = 1.7 \times 10^{-5} \times 70 - 0.85 \times 10^{-5} \times 70$) とした) となる。

〈2.5〉 計算結果 第 11 図は一例の計算例であるが、このほか種々の場合について計算し、せん断応力とマイカ層数および長手方向距離との関係、レジンせん断弾性率とせん断応力との関係、せん断応力が無視できる位置とレジンのせん断弾性率との関係、マイカ層数と絶縁層端部の変形との関係などのコイル絶縁の計画に必要な事項をまとめた。これらの事項について以下説明する。

第 13 図はせん断応力とマイカ層数および長手方向距離との関係で、付録 1 (既報の算式を改めて再録) の(付 1)式による計算値も本計算法による値と比較のために記載した。本計算法による値は長さ方向の分割中心の値であるため、図には絶縁層端より 5cm と 15cm 離れたところの値が示されている。また、(付 1)式による計算値として、絶縁層端部とそれより 5cm

第 13 図 せん断応力とマイカ層数および長手方向距離との関係

Fig. 13. Relation between shearing stress and number of mica layers and logitudinal distance from insulation end.

第 14 図 レジンせん断弾性率とせん断応力との関係

Fig. 14. Relation between shearing modulus of resin and shearing stress.

第 15 図 せん断応力が無視($\tau = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$)できる位置とレジンのせん断弾性率との関係

Fig. 15. Relation between position where shearing stress can be neglected ($\tau = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$) and shearing modulus.

離れたところの値が示されているが、絶縁層がワンプロックで考えられているためマイカ層の厚み方向のせん断応力の浸透は計算できない。これからわかるように、本計算法によるせん断応力はコイルの長手方向に深く浸透していることがわかる。当然のことであるが、両計算法のせん断応力の長手方向の積分値は一致している。

第 14 図はレジンのせん断弾性率とせん断応力の関係を示すものである。せん断応力はレジンのせん断弾性率が大きくなるにつれ大きくなるが、長手方向(軸方向)には浸透しにくくなる。

第 15 図はせん断応力が 0.3 kgf/cm^2 となる位置とレジンのせん断弾性率の関係を示すもので、レジンのせん断弾性率が大きくなれば、せん断応力は速く消滅することを示している。不飽和ポリエステルレジンで

第 16 図 マイカ層数と絶縁層端部の変形との関係
Fig. 16. Relation between number of mica layer and deformation of insulation end.

ある A_{P1} レジンは 70°C ではせん断弾性率は $1.42 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ であるため、 A_{P1} レジンコイルでは絶縁層の温度が 70°C になったときには、 0.3 kgf/cm^2 以上のせん断応力は完全にコイル全長まで浸透する。これに反しエポキシレジンである A_{E1} レジンは、同様な条件で $6.4 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ であるため 0.3 kgf/cm^2 以上のせん断力の浸透はわずかである。このように A_{P1} レジンコイルはせん断応力の浸透が大きく、且つ第 3 図のようにレジンはせん断力に弱いため、熱膨脹収縮の繰返しにより絶縁の変質が早いことが理解されよう。

第 16 図はハーフラップ回数と絶縁層の変形の関係を示したものである。レジンのせん断弾性率を $1 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ としている。この図は〈2・6〉節の絶縁層端部の変形実測値との比較に活用される。

〈2・6〉 絶縁層端部の変形実測結果 以上のような計算結果を客観的に裏付けできる実測値を得ることは、以上の考え方が正しいかどうかを決めるうえに必要なものである。熱膨脹による絶縁層の引張応力の測定は困難であり、なかなか正確なる測定はできない。せん断応力に関しては測定方法が見当らない。

ここにおいて、ただ一つ計算結果と実測値が対比できるのは絶縁層端面の変形だけである。この変形は極めて微小であり、拡大装置によらなければわからぬ程度である。従って、高精度には計算値と実測値との対比は無理であるが、概略値としての対比は可能であるため実施した。

(1) 供試コイル 長さ 2m, A_{E1} レジン真空注入、マイカペーパーハーフラップ 11 回を供試コイルとした。

(2) 試験方法 第 17 図のような加熱、観測装置にて試験が実施された。コイルの表面にニクロム線を巻き、加熱し熱膨脹を与えた。この方法であると絶縁表面が加熱され、その後導体が熱せられるという実機と逆な現象となる。これを防ぐため、加熱後しばらく放置し、第 18 図に示すような点をねらって観測し

第 17 図 絶縁層端部の変形実測装置

Fig. 17. Observation equipment of deformation.

第 18 図 コイル温度変化

Fig. 18. Temperature change of coil.

第 19 図 加熱前の絶縁層 ($T=12.5^{\circ}\text{C}$, $T'=11.5^{\circ}\text{C}$)

Fig. 19. Insulation layer before heating.

第 20 図 変形中の絶縁層 ($T=140^{\circ}\text{C}$, $T'=100^{\circ}\text{C}$)

Fig. 20. Insulation layer under deformation.

た。変形の観測に便利のようにコイル端部は絶縁層を斜めにそいだ。変形はシャドウグラフにて拡大撮影された。

(3) 観測結果 観測結果を第 19 図、第 20 図

に示す。第 19 図は加熱前、第 20 図は加熱変形後である。共に同一倍率で撮影している。第 20 図の右端の部分は、ほぼハーフラップ 2 回の位置に相当している。これ以上の厚みの測定は、顕微鏡の測定範囲をはずれるためできなかった。第 20 図は明かに変形を受けており、当初の位置よりハーフラップ 2 回の線は、5/1,000(mm) 移動している。

第 16 図を参照して見ると、ハーフラップ 2 回の位置の変位は 7/1,000(mm) であるが、第 16 図の計算に使用した計算条件と本試験の条件との数値的な相違がある、すなわち第 16 図の計算はせん断弾性率 10^3 kgf/cm^2 のレジンを使用したのに対し、試験には A_{E1} レジン (せん断弾性率 $3.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$, 120°C) が用いられたことや、温度の差 (計算は 70°deg , 試験は 120°deg)、コイル長さの差 (計算は 1.6m, 試験では 2.0m) を加算すると 4.5/1,000(mm) と下記のように修正することができ、実測値とほぼ一致可以说えよう。

$$\begin{aligned} & \frac{7}{1,000} \times \frac{10^3 (\text{第 16 図計算せん断弾性率 } \text{kgf/cm}^2)}{3.6 \times 10^3 (A_{E1} \text{ レジンの } 120^\circ\text{C} \text{ におけるせん断弾性率 } (\text{kgf/cm}^2), 120^\circ\text{C} \text{ は絶縁層の平均温度})} \\ & \times \frac{2.0 (\text{被観測コイル長 } \text{m})}{1.6 (\text{第 16 図計算コイル長 } \text{m})} \\ & \times \frac{128 (\text{被観測コイル銅線温度差 } \text{deg})}{70 (\text{第 16 図計算温度差 } \text{deg})} \\ & = \frac{4.5}{1,000} (\text{mm}) \end{aligned}$$

3. 結 言

導体が熱膨脹収縮を受けたときの絶縁層に生ずる機械的応力や変形に関する計算法として、絶縁層をマイカとレジンに分解し、等価な電気回路網を構成し、これにて応力、変形を計算するという方法を紹介した。この計算法は既に発表した付録の方法よりも実際に近い計算方式であり、一部の変形の計算値は、試験による実測値との照合もでき、ほぼ一致していることも確認できた。

本研究について種々御助言をいただいた日立製作所田附常務取締役、実験にあたられた日立工場 保月氏に感謝の意を表す。

(昭和 50 年 6 月 23 日受付, 同 51 年 8 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 松延・磯部・岡: 電気学会論文誌 92-A, 13 (昭 47-1)
- (2) 松延・磯部・岡: 同上 92-A, 24 (昭 47-1)
- (3) K. Matsunobu, S. Isobe, J. Mukai: IEEE Trans. Elect. Insulation EI-7, 136 (1972)
- (4) 磯部・松延: 絶縁材料研究会資料 IM73-11 (昭 48-3)
- (5) K. Matsunobu, S. Isobe, J. Mukai: IEEE Trans. Elect. Insulation EI-7, 132 (1972)
- (6) R. E. Newton: Experimental stress analysis II, 2(1945)

付 録

絶縁層と導体が接着しているとした計算 この考え方による計算法については既に発表⁽¹⁾しているが、比較のため改めて掲載した。

(1) 計算式 本文のように絶縁層をマイクロに分析するのではなく、マイカ及びレジンにより一体として作られたものとし、導体と絶縁層の間にレジンによる接着層を考えると絶縁層内に発生する応力、絶縁層と導体との間のせん断応力が計算できる。この場合、次のような仮定を設ける。

(i) 導体、絶縁層は均一であり、且つそれぞれの温度は均一である。

(ii) 絶縁層内の引張力はすべて接着層を通じて伝達されるものとする。

導体と絶縁層間のせん断力は簡略化した計算式として次式が与えられる。

$$\begin{aligned} \tau = & \sqrt{\frac{G E_i S_i}{d s}} \{ \alpha_i (t_i - t_0) - \alpha_c (t_c - t_0) \} \\ & \times e^{\sqrt{G s / d E_i S_i} \cdot (x - l)} \dots \dots \dots (\text{付 1}) \end{aligned}$$

ここに、 τ : 導体と絶縁層間のせん断応力 (kgf/cm^2)、 G : レジンのせん断弾性係数 (kgf/cm^2)、 E_i : 絶縁層のヤング率 (kgf/cm^2)、 S_i : 絶縁層の断面積 (cm^2)、 d : 導体と絶縁層間のレジンによる接着層厚み (cm)、 s : 導体と絶縁層の界面の周長 (cm)、 α_i : 絶縁層の線熱膨脹係数 ($1/^\circ\text{C}$)、 α_c : 導体の線熱膨脹係数 ($1/^\circ\text{C}$)、 t_i : 絶縁層の温度 ($^\circ\text{C}$)、 t_c : 導体の温度 ($^\circ\text{C}$)、 t_0 : 基準温度 ($^\circ\text{C}$)、 x : コイル中心からの距離 (cm)、 $2l$: コイル全長 (cm)

(2) 計算値 本文と同一条件で計算した値は、第 13 図に比較して掲載されており、この両者の比較は既に述べられているので省略する。