U. D. C. 621.314.045 : 534.01

変圧器巻線の軸方向振動解析
Axial Vibration Analysis of Transformer Windings

堀　　康　郎* 　平　石　清　登**
Yasurô Hori　　Kiyoto Hiraishi

要　　旨

変圧器巻線に外部事故などにより大電流が流れた場合の軸方向振動について理論的解析を行ない，さらに実験との比較を行なったものである。

1. 緒　　言

近年，電力需要の増加とともに電力用変圧器の容量も増し，大形化されている。このため系統の容量も増加し，短絡などの外部事故によって変圧器に流れる短絡電流がきわめて大きくなり，変圧器巻線は強大な電磁力にさらされる。

このため短絡時の変圧器巻線の強度をは握し，これを増加する目的で研究を行なった。変圧器巻線の強度を知るには，最初に短絡時の変圧器巻線の振動状況を知る必要がある。

変圧器巻線の軸方向振動についてはCIGREに発表されたイギリス，フランス，イタリアの共同研究[1]があり，最近では国内でもCIGREの方法を使用した計算の報告が発表されている。

これら二つの方法はすべて数値計算であって，変圧器巻線の振動を総合的には握するという意味で欠けている。たとえばコイル間の絶縁物とコイル外の絶縁物の比率，コイルの重量との関係などを機械的強度と結びつけるものがない。また，数値計算はある一つの場合の結果であって，多数のパラメータを含んでおり，一般的な傾向を知るうえでは非常に不利である。

本文はこの点に着目し，軸方向振動を一般化してあらわし，変圧器巻線設計の方向を示したもので，さらに数値計算による確認，実験との対応などについて記述する。

2. 軸方向振動の一般化理論

変圧器巻線の軸方向振動についてはCIGREに発表されているようにコイルを質量と考え，コイルとコイルの間にある間隔片をばねと考えて多質点の振動系として取り扱うのが一般的である。

しかし一般の変圧器ではコイル数は数十から数百に及ぶため質点が多くなり，解析的に取り扱うことは非常にむずかしい。

ここで筆者はコイル数が非常に多いことに着目して変圧器の振動系を分布定数系と考えて解析する。集中定数系を分布定数系と見なすことによる誤差は，たとえばコイル数を100とすると100次以上の固有振動数を無視するかどうかである。

ところが変圧器巻線の一次固有振動数は一般に20～50 c/s付近にあり，100次の固有振動数は電源周波数50 c/sに比較してはるかに高く，分布定数系にして100次以上の固有振動数を導入しても誤差は少ないと考えられる。

次に変圧器巻線のコイルは一般に高さ方向に一様でなく，間隔片の厚さも場所により異なるので，そのまま分布定数系にするには問題があるが，全コイルで平均した質量，平均した間隔片厚みを考え，一様なものとして分布定数系にする。この仮定は後述する数値計算の際に成立することが証明できた。

図1に各振動系で示した変圧器の軸方向の振動系を示す。図1の(a)は変圧器巻線の外観図，(b)は集中定数系，(c)は分布定数系を示す。

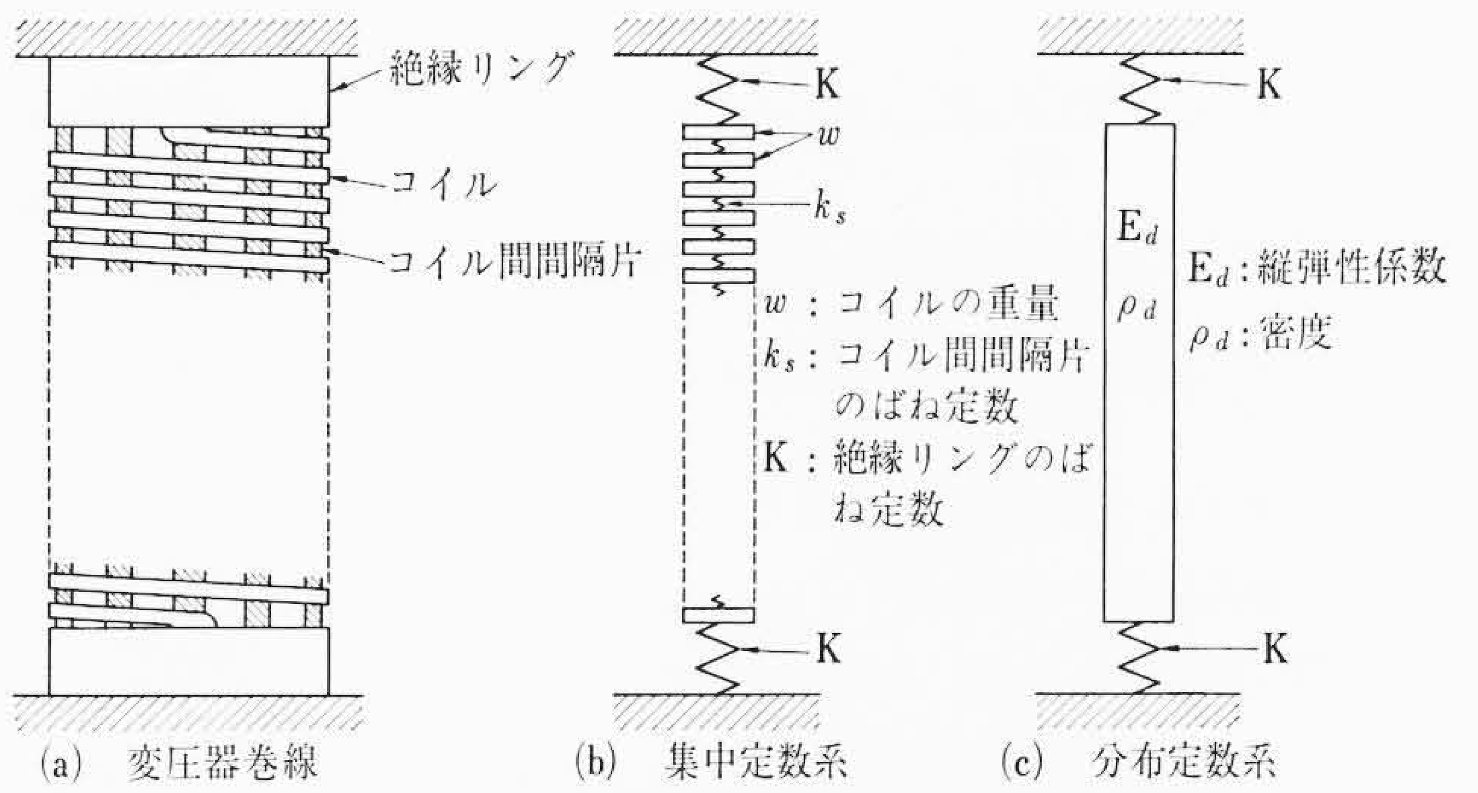


図1　変圧器巻線の軸方向振動系

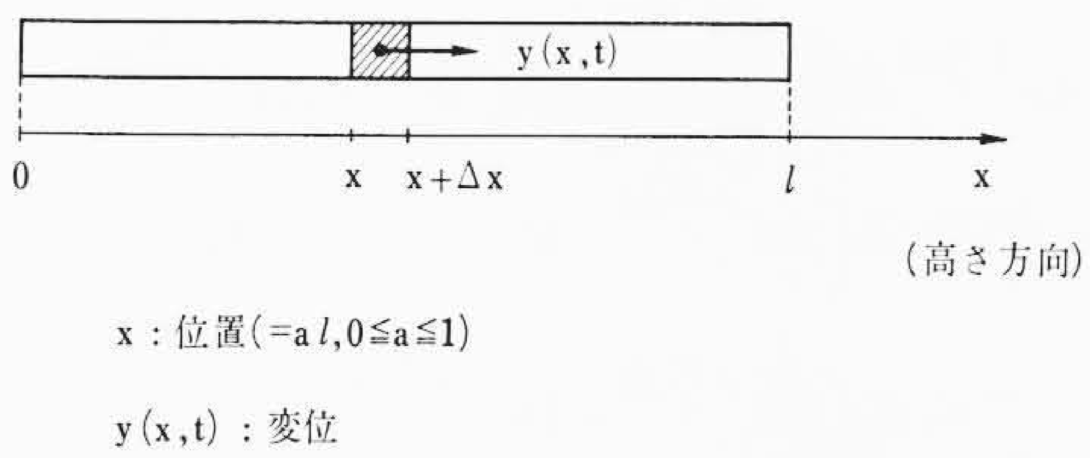


図2　分布定数系に対する座標のとり方

図1の集中定数系を分布定数系に変換するには次式を満足させればよい。すなわち

$$E_d=\frac{k_s X}{S_d} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\rho_d=\frac{w}{S_d g X} \quad \cdots\cdots(2)$$

ただし，
E_d：分布定数系の縦弾性係数　(kg/cm²)
k_s：コイル間間隔片のばね定数　(kg/cm)
X：コイルの平均ピッチ　(cm)
S_d：コイルの受圧面積　(cm²)
ρ_d：分布定数系の密度　(kg·s²/cm⁴)
w：コイルの平均重量　(kg)
g：重力加速度　(cm/s²)

である。

図2に解析を進める分布定数系に対する座標の取り方を示す。図2に示す振動系の任意の点 $x=al$ に外力 F を加えたときの応答を求める。外力を $F=F_0 e^{j\omega t}$ として定常状態の解を求める。

図2において巻線中では波動方程式が成立するから，軸方向の変位を $y(x,t)$ とおくと

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}=c^2\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \quad \cdots\cdots(3)$$

となる。ただし　c：音速 $\left(=\sqrt{\frac{E_d}{\rho_d}}\right)$ (cm/s)

*　日立製作所日立研究所
**　日立製作所国分工場

定常状態の解は周知なように

$0 \leqq x \leqq al$ で

$$y_1(x,t)=\left(Ae^{j\frac{\omega}{c}x}+Be^{-j\frac{\omega}{c}x}\right)e^{j\omega t} \quad \cdots\cdots(4)$$

$al \leqq x \leqq l$ で

$$y_2(x,t)=\left(Ce^{j\frac{\omega}{c}x}+De^{-j\frac{\omega}{c}x}\right)e^{j\omega t} \quad \cdots\cdots(5)$$

となる。ここに，$y_1(x,t)$：$0 \leqq x \leqq al$ の区間の変位　(cm)

$y_2(x,t)$：$al \leqq x \leqq l$ の区間の変位　(cm)

A, B, C, D：境界条件により決まる定数

である。

境界条件は上下の絶縁リングによって決定される。

$x=0$ で

$$E_d S_d \frac{\partial y_1(x,t)}{\partial x}=Ky_1(x,t) \quad \cdots\cdots(6)$$

(6)式に(4)式の $y_1(x,t)$ を代入すると

$$\frac{j\omega}{c}E_d S_d(A-B)=K(A+B) \quad \cdots\cdots(7)$$

となる。$x=al$ では変位連続より

$$y_1(x,t)=y_2(x,t) \quad \cdots\cdots(8)$$

同様に圧力連続により

$$-E_d S_d \frac{\partial y_1(x,t)}{\partial x}+F=-E_d S_d \frac{\partial y_2(x,t)}{\partial x} \quad \cdots\cdots(9)$$

となる。(8)，(9)式に(4)，(5)式の $y_1(x,t)$, $y_2(x,t)$ をそれぞれ代入すると

$$Ae^{j\frac{\omega}{c}al}+Be^{-j\frac{\omega}{c}al}=Ce^{j\frac{\omega}{c}al}+De^{-j\frac{\omega}{c}al} \quad \cdots\cdots(10)$$

$$-\frac{j\omega}{c}E_d S_d\left(Ae^{j\frac{\omega}{c}al}-Be^{-j\frac{\omega}{c}al}\right)+F_0$$

$$=-\frac{j\omega}{c}E_d S_d\left(Ce^{j\frac{\omega}{c}al}-De^{-j\frac{\omega}{c}al}\right) \quad \cdots\cdots(11)$$

となる。$x=l$　では

$$-E_d S_d \frac{\partial y_2(x,t)}{\partial x}=Ky_2(x,t) \quad \cdots\cdots(12)$$

より，(5)式の $y_2(x,t)$ を代入して

$$-\frac{j\omega}{c}E_d S_d\left(Ce^{j\frac{\omega}{c}l}-De^{-j\frac{\omega}{c}l}\right)=K\left(Ce^{j\frac{\omega}{c}l}+De^{-j\frac{\omega}{c}l}\right)$$

$$\cdots\cdots(13)$$

となる。(7)，(10)，(11)，(13)式より係数 A, B, C, D を求めることができる。ここで

$$\frac{\omega E_d S_d}{cK}=\gamma' \quad \cdots\cdots(14)$$

$$\frac{\omega l}{c}=\delta' \quad \cdots\cdots(15)$$

とおいて γ', δ' を(7)，(10)，(11)，(13)式に代入すると，それぞれ

$$j\gamma'(A-B)=A+B \quad \cdots\cdots(16)$$

$$Ae^{ja\delta'}+Be^{-ja\delta'}=Ce^{ja\delta'}+De^{-ja\delta'} \quad \cdots\cdots(17)$$

$$Ae^{ja\delta'}-Be^{-ja\delta'}-\frac{F_0}{j\gamma'K}=Ce^{ja\delta'}-De^{-ja\delta'} \quad \cdots\cdots(18)$$

$$-j\gamma'(Ce^{j\delta'}-De^{-j\delta'})=Ce^{j\delta'}+De^{-j\delta'} \quad \cdots\cdots(19)$$

となる。(16)～(19)式からわかることは γ', δ', $F_0/\gamma'K$, a が一定であれば係数 A, B, C, D が一定になることがわかる。

すなわち γ', δ', $F_0/\gamma'K$ が同一なら等価であると考えられるが，さらに $F_0/\gamma'K$ は加振力の大きさに関係するので除くと γ', δ' が同一なら等価振動系であると考えられる。

(14)式を(15)式で割ったものを γ，(14)式と(15)式をかけたものを δ とすると

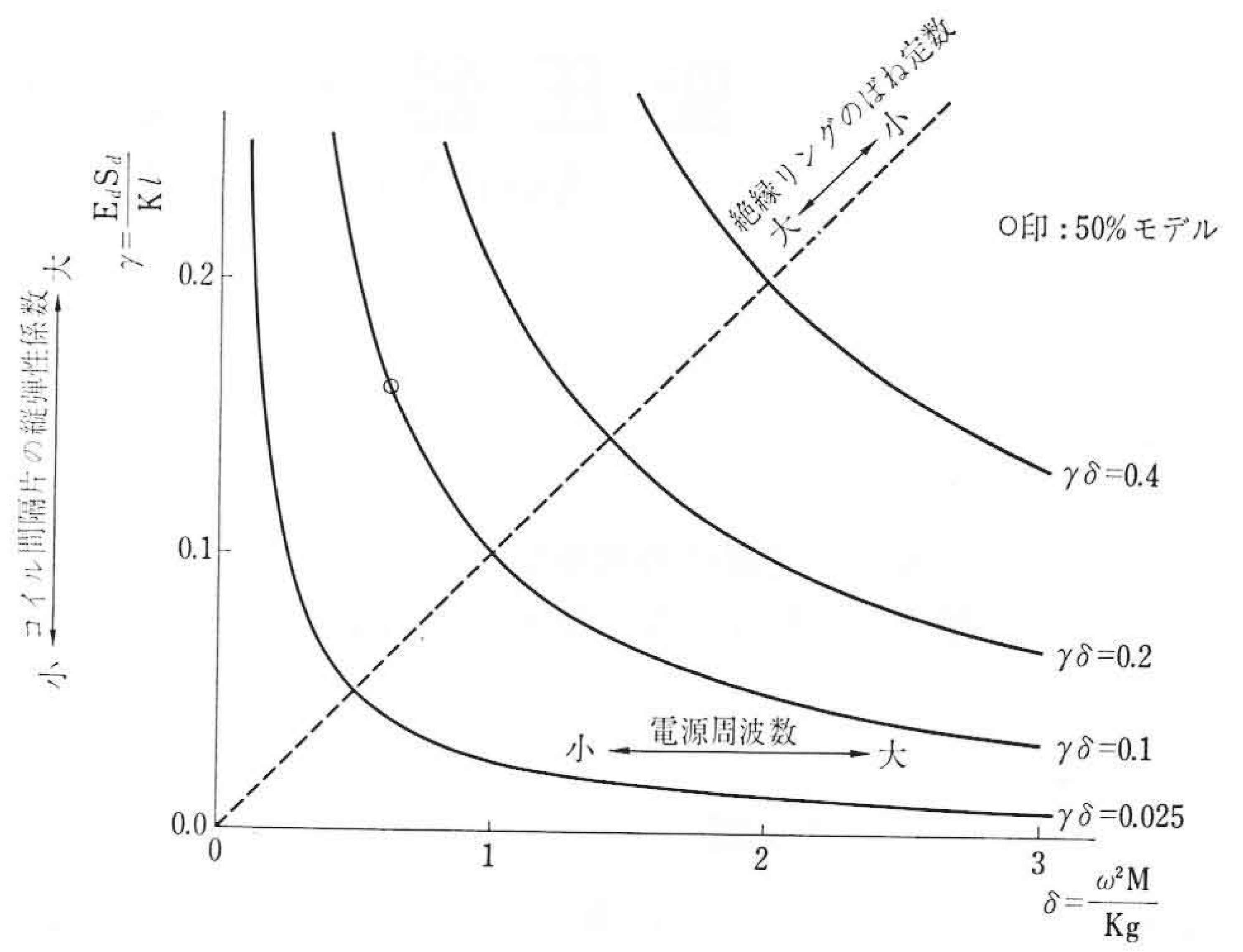


図3　δ, γ　の　関　係

$$\gamma=\frac{E_d S_d}{Kl} \quad \cdots\cdots(20)$$

$$\delta=\frac{\omega^2 lE_d S_d}{c^2K}=\frac{\omega^2 M}{Kg} \quad \cdots\cdots(21)$$

ここに，M：巻線の全重量　(kg)

となり，γ は周波数に関係しない量となる。

(20)式の物理的意味を考えると γ は巻線全体をばねと考えたときのばね定数 $E_d S_d/l$ と絶縁リングのばね定数 K との比である。すなわちコイル間の絶縁物の合計積高さとコイル外の絶縁物（絶縁リングなど）の高さの比が γ になると考えてもよい。

次に(21)式の物理的意味を考える。(21)式の分母，分子にある変位 u をかけると

$$\delta=\frac{\dfrac{\omega^2 Mu}{g}}{Ku} \quad \cdots\cdots(22)$$

となる。(22)式の分子は巻線が一体となって動くと考えたときの慣性力であり，分母は絶縁リングのばね力である。

すなわち(22)式の δ は巻線の重量と絶縁リングのばね定数との比と考えてもよい。

次に実際の変圧器では加振力が軸方向に分布しているが，今求めたものは軸方向の任意の位置で成立するから，全体の力については集めればよく，等価性は保たれる。

最後に実際の変圧器巻線の振動を減少させ，コイル，上下支持部分にかかる力を減少させるには前述のパラメータ γ, δ をどのように設計すればよいかを検討する。

(4)，(5)式からわかるようにコイルの変位は係数 A, B, C, D に関係することがわかる。

(16)～(19)式のうち(18)式が係数 A, B, C, D を決定することになるのでコイルの変位は $F_0/\gamma K$ に比例することがわかる。すなわち

$$\frac{F_0}{\gamma' K}=\frac{F_0}{K\sqrt{\gamma\delta}} \quad \cdots\cdots(23)$$

上下絶縁リングにかかる力は絶縁リングのばね定数をかければよく

$$\frac{F_0}{\gamma'}=\frac{F_0}{\sqrt{\gamma\delta}} \quad \cdots\cdots(24)$$

となる。(23)，(24)式の値を小さくすれば変圧器巻線の振動，機械力を減少させることができる。

軸方向の振動では上下絶縁リングにかかる力が特に問題になるので(24)式について検討すると

$$\frac{F_0}{\sqrt{\gamma\delta}}=\frac{cKF_0}{\omega E_d S_d}=\frac{KF_0}{\omega S_d\sqrt{\rho_d E_d}} \quad \cdots\cdots(25)$$

(25)式のようになり，(25)式の値を小さくすることにより，上下絶縁リングにかかる力を減少させることができる。(25)式から γ, δ を大きくすればよいことがわかる。

(25)式から変圧器巻線の構成として上下支持部分を柔かく，巻線を固くした一体の構造が推奨される。

図3に γ, δ の関係を示す。図3に示すように γ, δ は双曲線となり，後述する50％モデルが○印になる。

以上述べた理論では巻線の共振現象を無視してきたが，これは加振力の分布にも関係するのでここでは触れない。

しかし数値計算と実測から巻線の共振振幅は意外に減衰が大きいため，それほど大きくならないようである。

3. 数値計算による検討

3.1 理　論

変圧器巻線の軸方向振動計算としてはCIGREによる方式が考えられるが，ここでは2.に述べた分布定数系について数値計算を行なう。

図2の分布定数系の x 方向の微小素分 $\varDelta x$ の部分について運動方程式を立てる。

慣性力は周知のように

$$\rho_d S_d \varDelta x \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad (\mathrm{kg}) \quad \text{で与えられる。}$$

次に $\varDelta x$ 素分が動くとき粘性抵抗を受けると考え，減衰係数を $\varepsilon(\mathrm{kg\cdot s/cm^2})$ とおくと，抵抗力は

$$\varepsilon \cdot \varDelta x \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \quad (\mathrm{kg}) \quad \text{となる。}$$

$\varDelta x$ 素分が受ける圧縮力 $P(x,t)$ kg は

$$P(x,t) = \frac{y(x+\varDelta x,t) - y(x,t)}{\varDelta x} \cdot E_d S_d$$

$$= E_d S_d \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \quad \cdots\cdots (26)$$

となる。さて $\varDelta x$ 素分は $x+\varDelta x$ 側から $P(x+\varDelta x,t)$ を，x 側から $P(x,t)$ を受けるので $\varDelta x$ 素分にかかる力は両者の差となり

$$-P(x+\varDelta x,t) + P(x,t) = -\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \cdot \varDelta x \quad \cdots\cdots (27)$$

となる。(26)式の $P(x,t)$ を(27)式に代入すると

$$-\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \cdot \varDelta x = -E_d S_d \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \cdot \varDelta x \quad (\mathrm{kg}) \quad \cdots\cdots (28)$$

となる。

最後に電磁力を考える。軸方向1cm当たりに働く力を $F(x,t)$ kg/cm とすると $\varDelta x$ 素分には

$\varDelta x \cdot F(x,t)$ (kg)

なる力が働く。

以上の力を集めると次のような運動方程式が得られる。

$$\rho_d S_d \varDelta x \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \varepsilon \varDelta x \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - E_d S_d \varDelta x \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}$$

$$= F(x,t) \cdot \varDelta x \quad \cdots\cdots (29)$$

(29)式の両辺を $\varDelta x$ で割ると

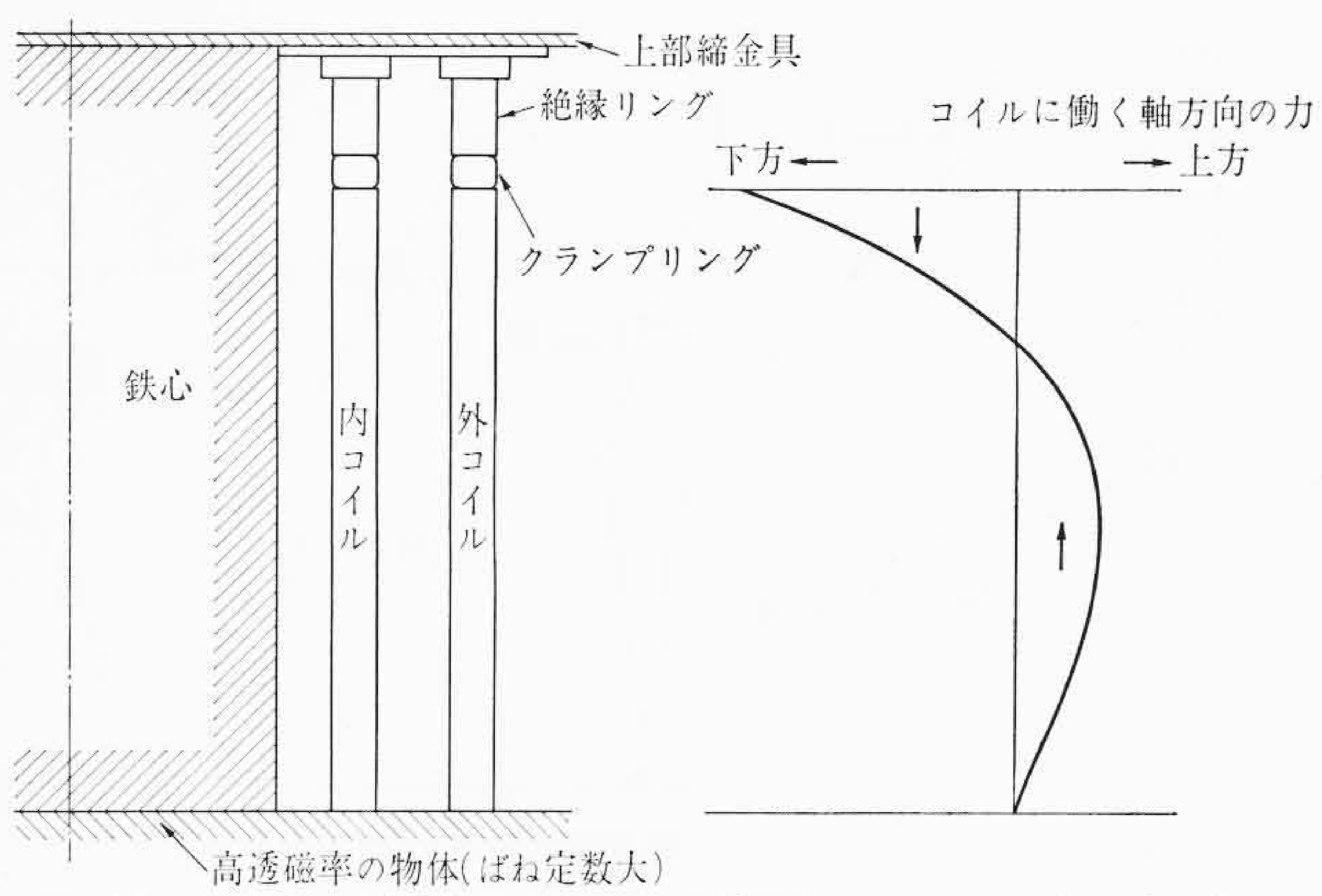
$$\rho_d S_d \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - E_d S_d \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = F(x,t)$$

$$\cdots\cdots (30)$$

となり，一次元の強制波動方程式になる。

次に巻線の上下端は絶縁リングと接しているので，境界条件は絶縁リングのばね定数により決定される。

上下絶縁リングのばね定数を K, K' とすると境界面 $(x=0, l)$ で(4)式を参照して $x=0$ において



(a)　50％モデル断面図　　(b)　軸方向電磁力分布(磁束分布から求めたもの)(内コイルを対象)

図4　50％モデルと電磁力分布

$$E_d S_d \left. \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = K y(0,t) \quad \cdots\cdots (31)$$

$x=l$ において

$$-E_d S_d \left. \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right|_{x=l} = K' y(l,t) \quad \cdots\cdots (32)$$

となる。

変圧器巻線の半径方向磁束分布が求められており，これを $B_0(x)$ G(ガウス)とし，電流を i_0 A，コイルの半径を R cm，コイルのピッチを X cmとすると軸方向1cm当たりの電磁力 $F_0(x)$ kg/cm は

$$F_0(x) = \frac{B_0(x) \cdot i_0 \cdot 2\pi R}{980 \cdot X} \times 10^{-4} \ (\mathrm{kg/cm}) \quad \cdots\cdots (33)$$

で与えられる。

電流の時間的変化は r, L 直列回路に電圧を印加した場合となる[2]ので簡単に

$$i = \frac{V}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \{ \sin(\omega t - \theta) + e^{-\frac{r}{L}t} \sin\theta \} \quad \cdots\cdots (34)$$

ここに，θ：投入位相 (rad)

V：印加電圧 ($\mathrm{V_{max}}$)

r：回路の抵抗分 (Ω)

L：回路のインダクタンス分 (H)

となる。磁束分布 $B_0(x)$ は電流 i_0 に対応するものであるから電流 i に対する磁束は $\frac{i}{i_0} B_0(x)$ となる。

任意の電流 i に対応する電磁力 $F(x,t)$ は(33),(34)式より

$$F(x,t) = \frac{2\pi R \cdot B_0(x) \cdot i^2}{980 \cdot X \cdot i_0} \times 10^{-4}$$

$$= 6.4 \times 10^{-7} \frac{R B_0(x) V^2}{i_0 X \{ r^2 + (\omega L)^2 \}} \{ \sin(\omega t - \theta) + e^{-\frac{r}{L}t} \sin\theta \}^2 \quad (\mathrm{kg/cm}) \quad \cdots\cdots (35)$$

となる。(30)式において電磁力としては(35)式を使用すればよい。

3.2 計 算 結 果

(30)式について電子計算機による数値計算を行なった。図4(a)に計算と実験に使用した50％モデルを示す。

50％モデルは一般の変圧器の軸方向振動系が上下対称になることから，中心から上の部分のみとし，中心にあたる部分のばね定数を非常に大きくし，磁気的には高透磁率の物体を配置したものである。

巻線の振動が上下対称の場合，巻線中央は振動しないので，ばね定数の大きな材料により下半分をおきかえれば上半分の巻線だけでよい。また磁気的には高透磁率の物体により巻線の磁気的影像をとることができ，結果として100％の場合の磁束分布の中央から上半分を実現することができる。

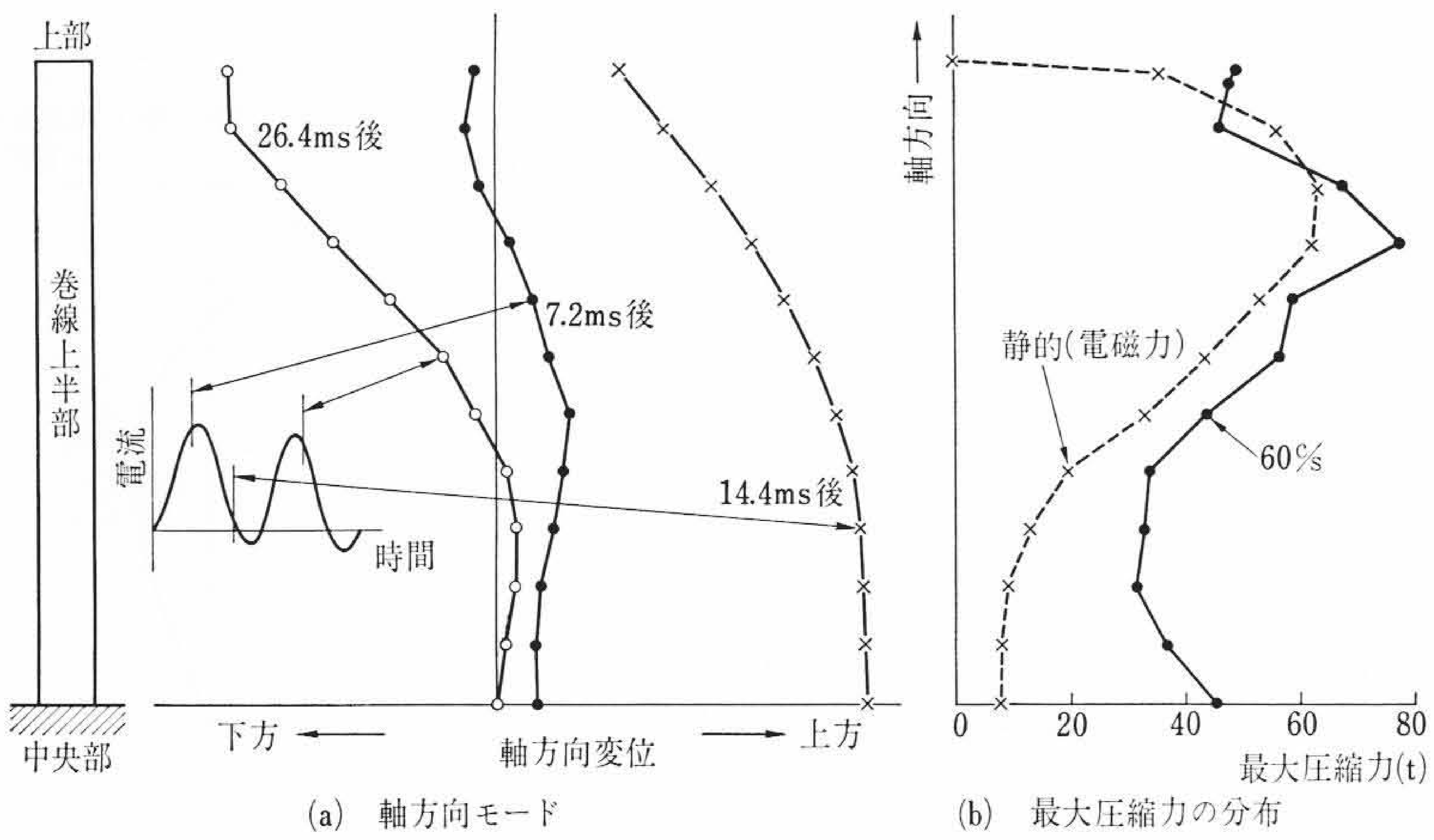


図5　軸方向振動モードと最大圧縮力分布の計算結果

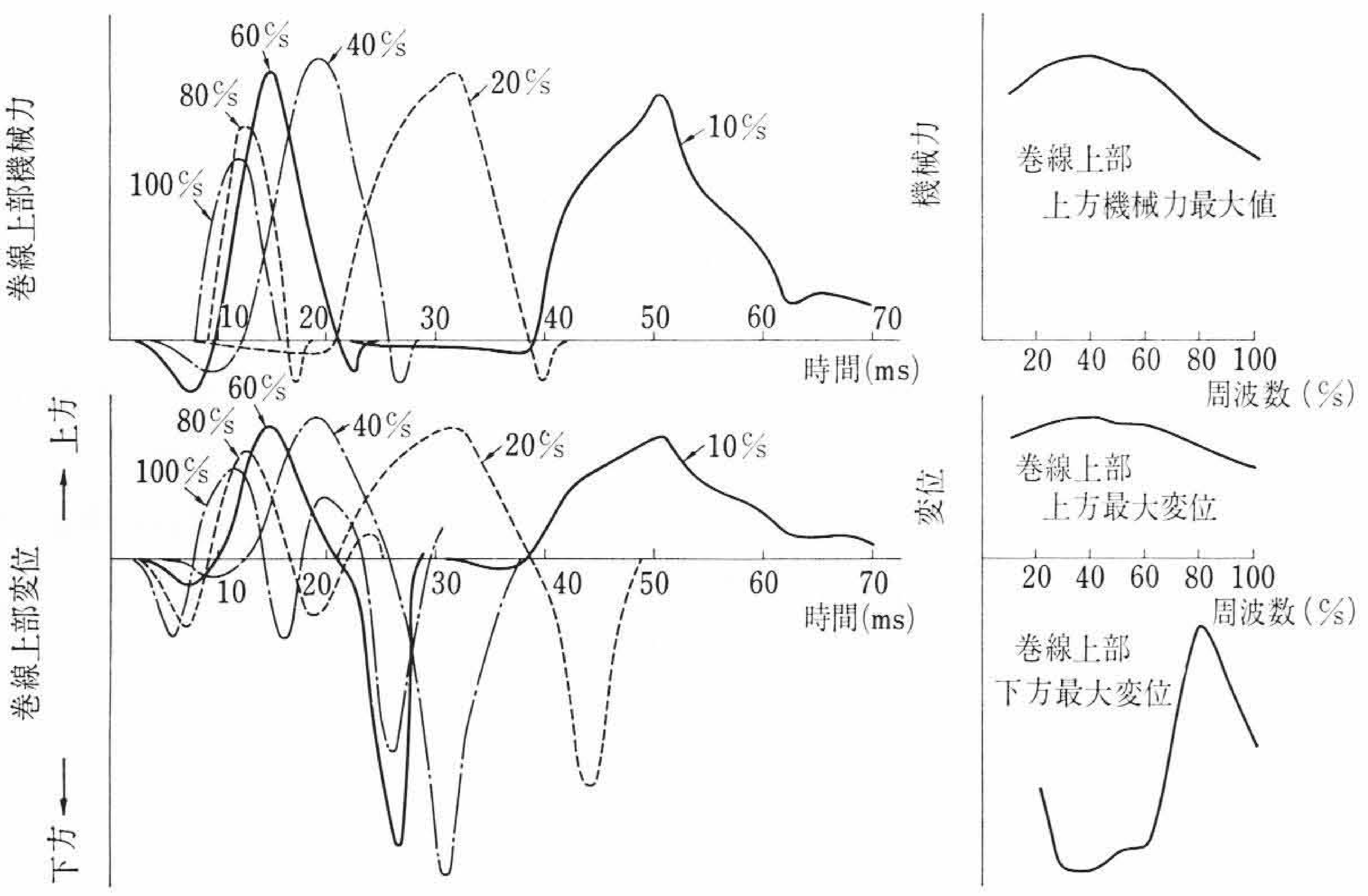


図6　電源周波数-変位，機械力計算結果

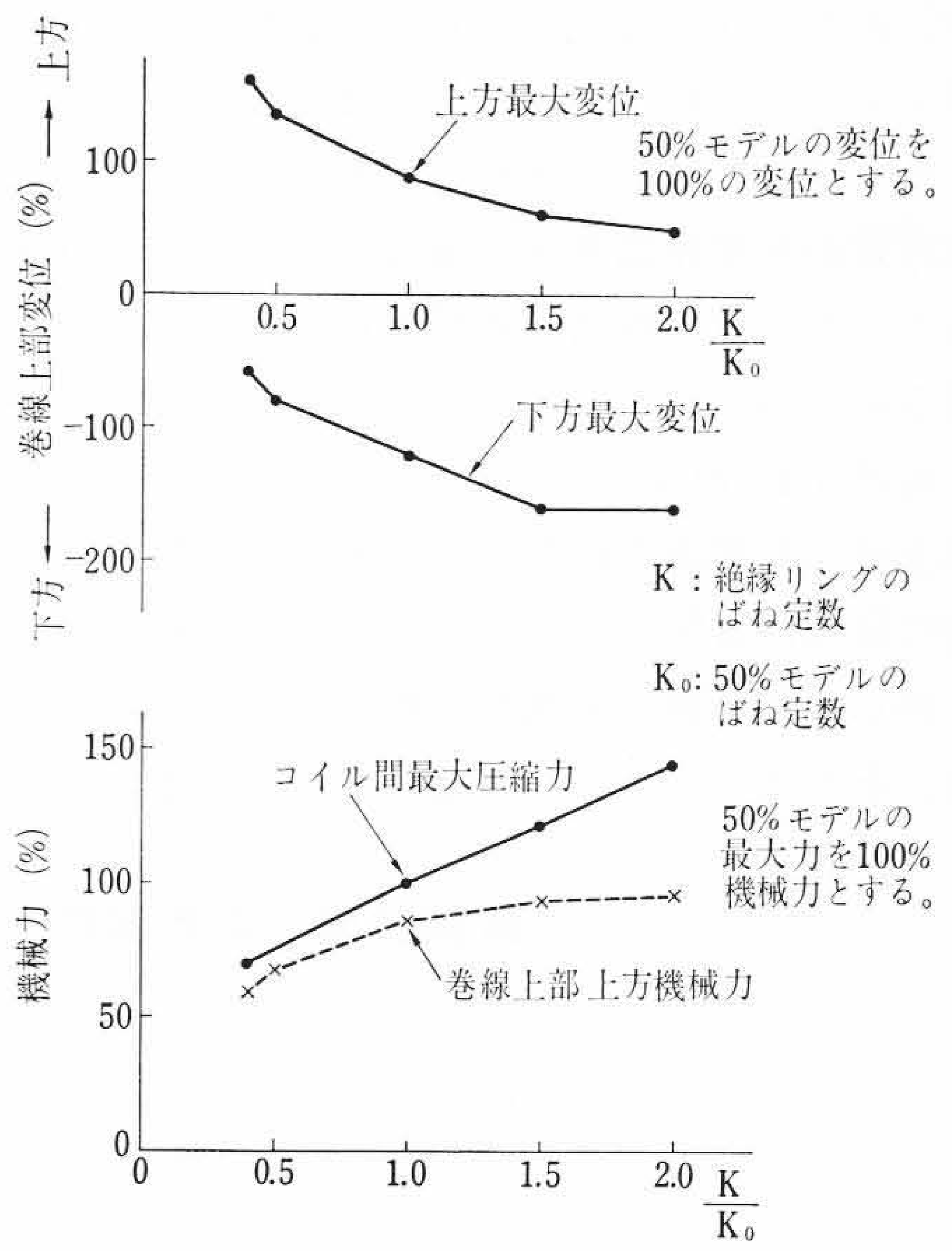


図7　絶縁リングのばね定数-変位，機械力計算結果

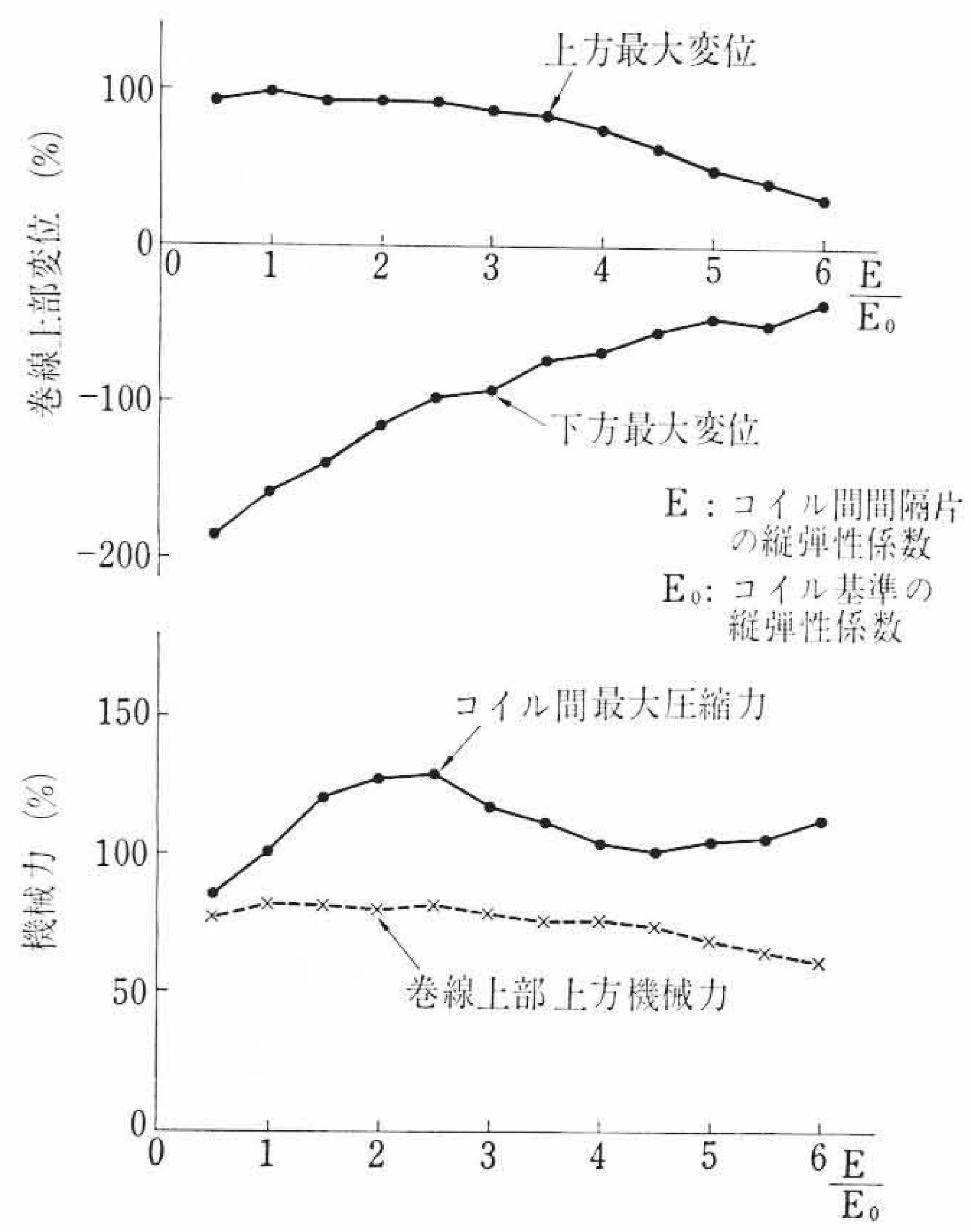


図8　コイル間隔片縦弾性係数-変位，機械力計算結果

これにより巻線の高さの50%のモデルにより実物のかわりをさせることができる。

図4(b)は50%モデルの軸方向電磁力分布を示す。すなわち巻線上部は下方に，巻線下部は上方に電磁力が働くことを示している。

図5に計算の結果求められた軸方向振動モードと最大圧縮力を示す。**図5**(a)は電源周波数60 c/sの振動の推移であって，巻線上部の変位は短絡後26.4 ms (2波目)で下方へ最大に変位していることがわかる。

図5(b)に最大圧縮力の分布を示す。×印の点線は静的に電磁力が働くとしたときの圧縮力であるのに対して実線は電源周波数60 c/sのときの最大圧縮力である。この最大圧縮力は短絡期間中に発生した圧縮力のうちの最大値をとったものである。

静的な場合と60 c/sとでは傾向は似ているが，上下端の圧縮力で大きく異なっている。

図6に電源周波数を変化させた場合の巻線上部の変位と絶縁リングに加わる力を示す。電源周波数10c/s, 20c/s, 40c/s, 60c/s, 80c/s, 100c/sについて計算したものである。

図6の右側に機械力，変位の最大値と周波数の関係を示した。**図6**からわかるように電源周波数が40 c/s付近で上方への機械力，巻線上部の上向き変位および下向き変位とも最大になっている。これは固有振動数が40 c/s付近にあるためと考えられる。

40c/sを越えると機械力，変位とも減少する。一方100c/sでは下方向の変位が大きくなっている。この原因は巻線のもつ二次の固有振動数に近いためと考えられる。

図6から変圧器巻線が一次共振周波数に共振しても振幅の増加割合は少なく，減衰がかなり大きいことを示している。

このことは**2.**の終わりに述べた事柄とよく一致する。また電源周波数と変位，機械力の関係は40 c/s以上で**図3**の関係(δを大きくすると機械力が減少する)を満足している。

次に絶縁リングのばね定数と変位，機械力との関係を調べる。

図7に絶縁リングのばね定数を変化させて計算した変位，機械力を示す。**図7**において上側は巻線上部の変位，下側はコイルにかかる機械力である。**図7**の横軸K/K_0は絶縁リングのばね定数比である。

巻線上部についてみると絶縁リングのばね定数を減少させると，上方最大変位は増加するが下方最大変位は減少している。

次に機械力についてみると，絶縁リングのばね定数を減少させるとコイル間最大圧縮力，巻線上部の上方機械力がともに減少している。このことは**図3**において，γ, δをともに大きくすることになり機械力の減少をよく説明できる。

図8にコイル間隔片の縦弾性係数を変化させた場合の巻線上部変位と機械力の計算結果を示す。**図8**で上が変位，下が機械力である。

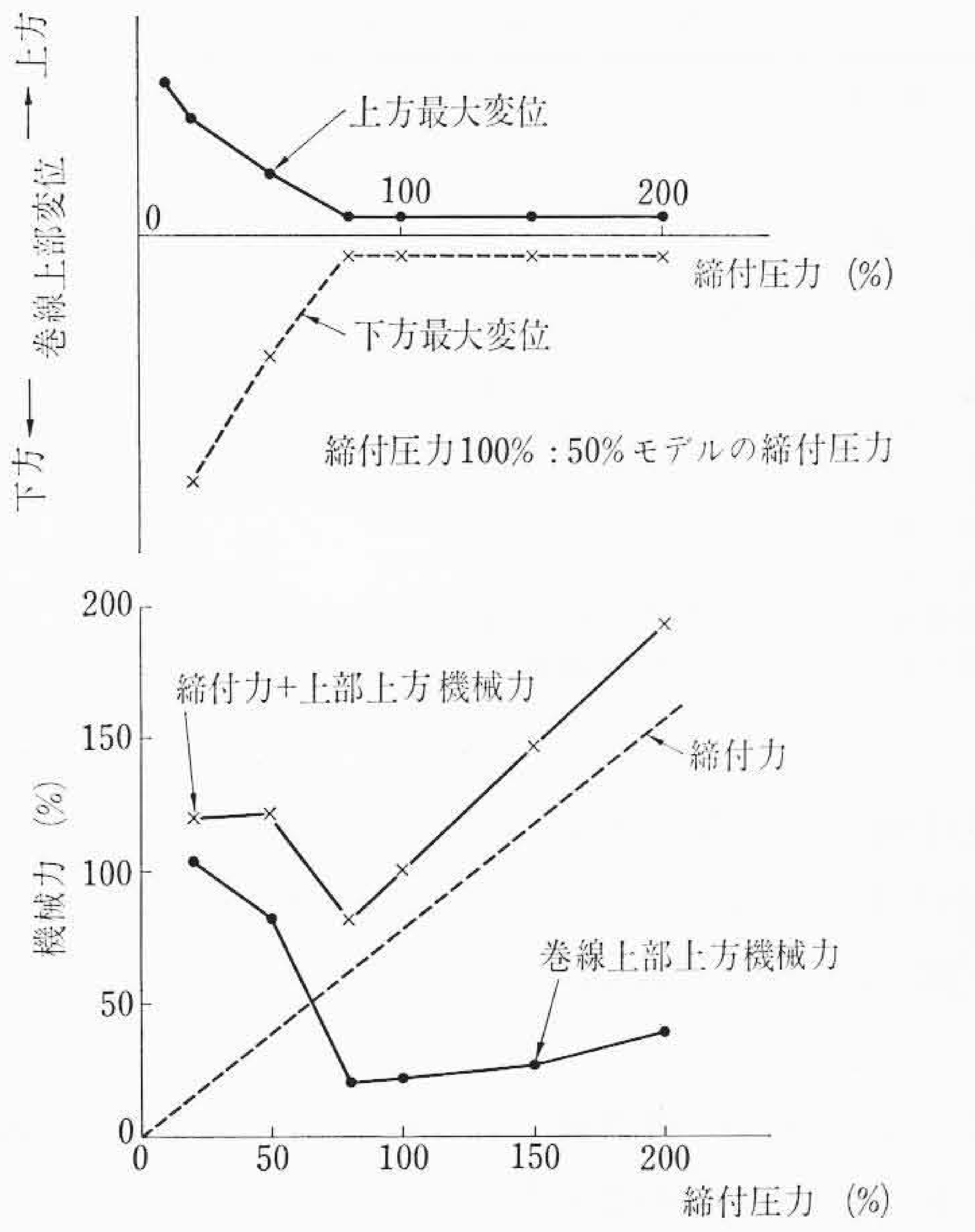


図 9　締付圧力-変位，機械力計算結果

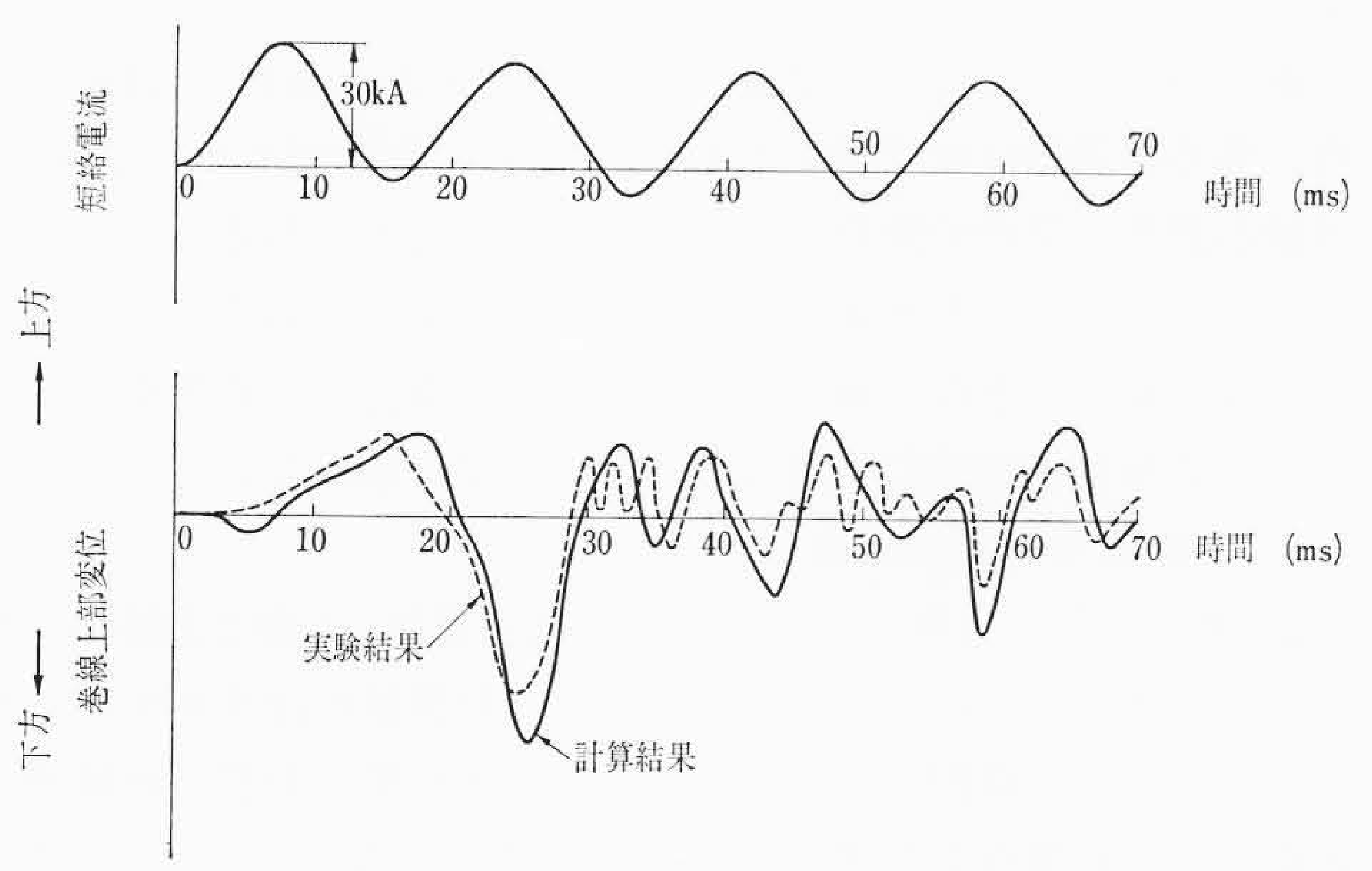


図 10　変位-時間特性計算結果

図8からわかるようにコイル間隔片の縦弾性係数を大きくすると巻線上部の変位が減少する。

次に機械力のうち巻線上部の上方の機械力は同様に減少することがわかる。コイル間の最大圧縮力には特に決まった傾向はない。コイル間隔片の縦弾性係数を増すことは図3においてγを増加させることになり，機械力が減少することを説明できる。

次に巻線の締付圧力と変位，機械力の関係について述べる。一般に締付圧力を増加させると巻線中にすき間を生ずる機会が少なくなる。図9は巻線の締付圧力を変化させた場合の巻線上部変位と機械力の計算結果を示したものである。

図9の上部が締付圧力と巻線上部変位との関係である。図9に示すように巻線上部の変位は締付圧力100％までは締付圧力の増加により減少するが，締付圧力100％以上では一定値に落ち着いている。

図9の下部は締付圧力と機械力の関係を示しており，点線に最初の締付力を示す。×印の実線は締付力と上部の上方機械力とを加えたもので絶縁リングなどの上部締付構造にかかる真の力となる。

図9の機械力と締付圧力の関係から締付圧力100％のとき締付力＋上部の上方機械力が最小になることがわかる。すなわち100％以上に締付圧力を増加させても上部変位は変化せず，締付力＋上部の上方機械力もかえって増加するので有害である。締付圧力には固有の最適値があることがわかる。

従来は締付力よりも大きな機械力が発生すると破壊するという考え方であるが，図9からわかるように締付圧力としてはある決まった値が存在している。コイルにかかる最大圧縮力についても図9の下部と同様の傾向となることがわかっている。

最後に外部短絡時の巻線上部変位の計算結果を図10に示す。図10の上部は短絡電流で，下部は巻線上部の変位を示している。

図10の実線が計算結果で，点線が実験結果である。実験結果については後述する。

図10からわかるように電流が最初に最大になってからかなり遅れて巻線の変位が大きくなっている。図10において巻線上部変位のうち上向きの変位は絶縁リングなどの上部支持部のばね定数をかけることによって，上向きに働く力となることがわかる。

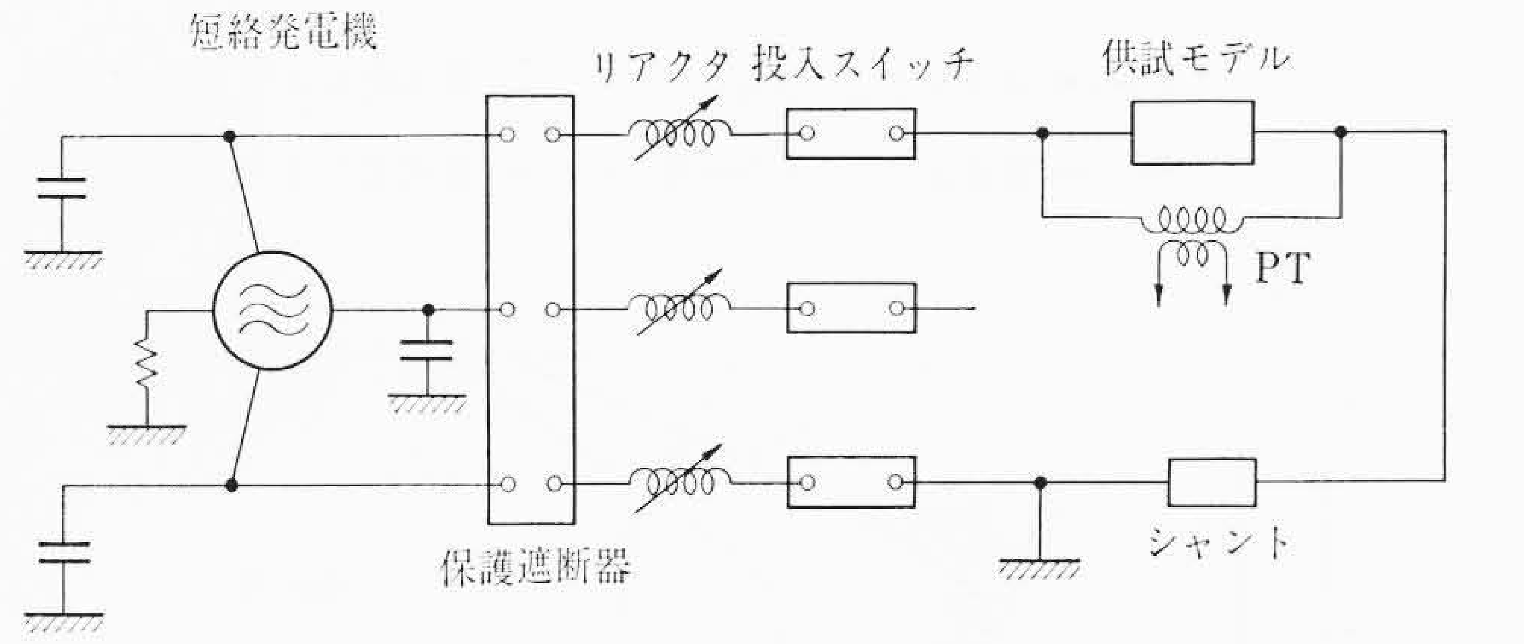


図 11　短絡試験回路

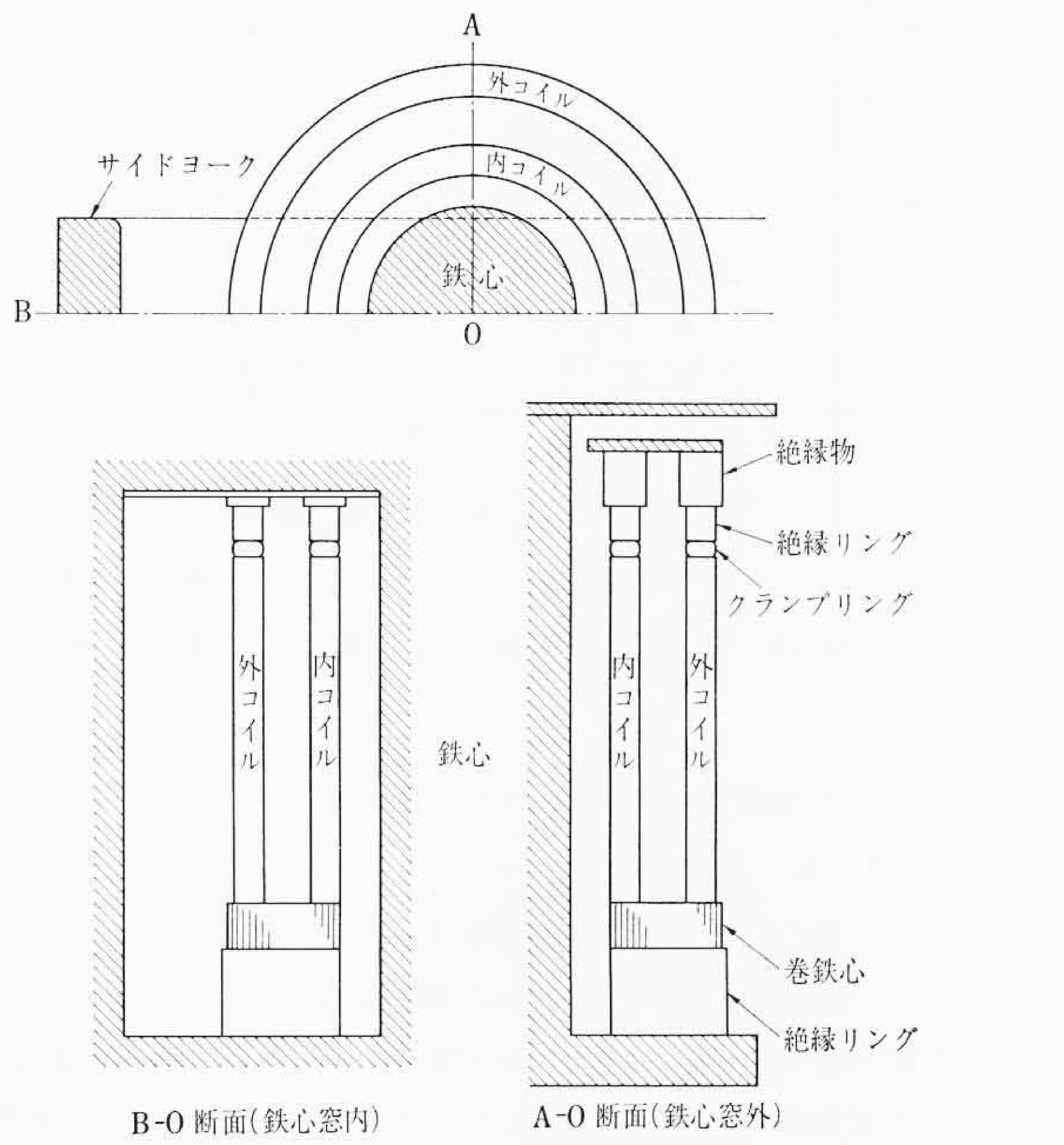


図 12　50％ モデル断面図

4. 実験

4.1 実験装置

実験は日立製作所日立研究所の 250 MVA 短絡発電機を用いて行なった。図11はその短絡回路である。電源周波数は 60 c/s，短絡時間は約 5 c/s (約 80 ms) であった。

4.2 モデル巻線

3.2で述べたようにモデル巻線としては大形変圧器の三次巻線について上下対称となることから上半分のみを使用した50％モデルとした。これを50％モデルと称する。

図12は本実験に使用した50％モデルの断面図を示したものである。図12からわかるように実物巻線の中央部(図12では下部)に巻鉄心を配置して磁気的な対称性を実現しており，振動的には剛体として作用している。このモデルの電磁力分布は図4に示すとおりである。

このモデルに使用した鉄心は中空なもので内側から変位が測定で

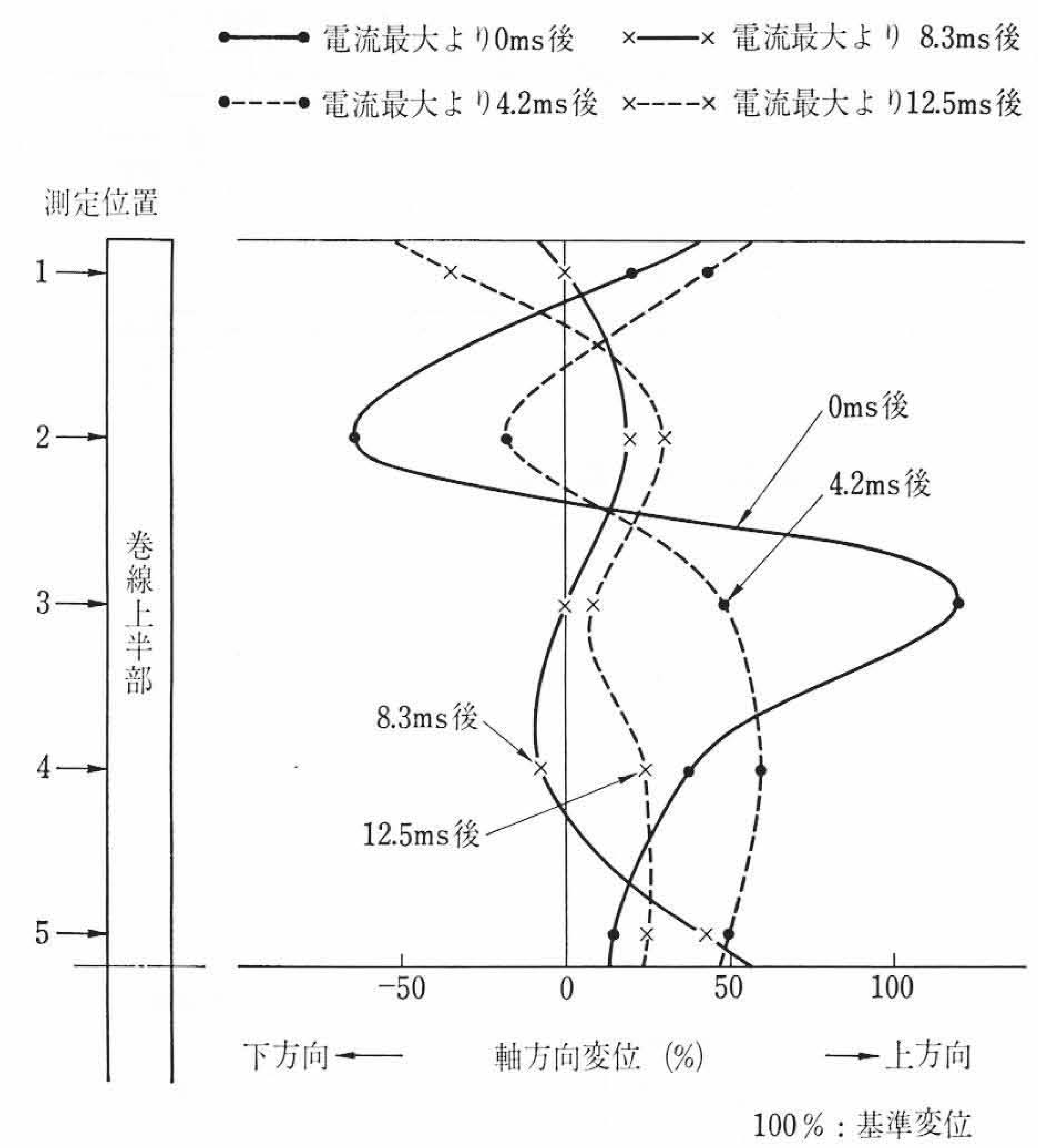


図13　50% モデル軸方向振動モード実測結果

きるように数個所穴があけられている。

4.3 測定装置

変圧器巻線の発生機械力を知る方法としては以前にも報告[3]しているが，今回は変位のみについて測定を行なった。

変圧器巻線の変位を測定する方法としては光電的に測定する方法，可変抵抗器を使用する方法などがあるが，光電式は装置が複雑になること，可変抵抗式では微小変位がとれないなどの欠点があった。そこでこれらの欠点を除いた方法として次のものを考案した。

原理はコイルにスタンドライト板を取り付け，軸方向変位を中空鉄心内に取り出し，この変位をアクリル板の曲げに変換し，さらにアクリル板のひずみをストレインゲージで取り出すものである。

この測定方法の利点は

(1) 高電圧に対してはアクリル板，スタンドライト板により絶縁されるので問題ない。特に高電圧の場合のみ沿面放電による測定器の破壊を防ぐため，ガード電極を中間につけて接地した。
(2) ストレインメータを使用するため静的変位からの測定が可能である。
(3) 磁界による誘導はストレインゲージの性質上受けやすいが，コイルの変位によるひずみの出力がきわめて大きく(S/N比が大)無視できる。
(4) 2枚ゲージで板の曲げを測定するため，リード線の静電容量が打ち消される。このためリード線を数十mにすることができた。

測定器の感度は$1{,}000\times10^{-6}$/mm程度であった。

4.4 試験結果

4.4.1 軸方向振動モード

図13に測定した50%モデルの振動モードを示す。時間の経過によりコイルの動き方が変化していくのがよくわかる。

表1　軸方向の振動の場所による相違

位置＼時間		電流最大からの時間 (ms) 0	5	10	15	20
3	窓　外	6.0	2.4	0.0	0.4	4.2
	窓　内	0.1	2.9	1.3	−0.8	0.0
5	窓　外	0.7	2.4	2.1	1.3	1.9
	窓　内	0.7	2.2	2.0	0.7	0.0

* 変位：相対値
方向：正は上方，負は下方
位置番号　3，5は図13に示す位置である。
位置の窓外は図12のA-O断面，窓内はB-O断面である。

測定は軸方向に5個所変位測定装置を取り付けて行なわれた。図13からわかるようにコイルはかなり複雑な運動をしており，中央部（図13においては最下部）は上方に変位していることがわかる。

実際には巻線の円周方向により振動が異なるので，図13は円周方向のある位置を示すにすぎない。

表1に円周方向の場所による変位の相違を示す。表1において位置3, 5は図13に示す軸方向の測定位置で中央部および最下部を示している。

表1からわかるように位置5（実物で中央部に相当）では鉄心窓内，窓外の運動はほぼ同一であるが位置3（実物で上から1/4）では鉄心窓外，窓内で変位が異なっていることがわかる。

このことは変圧器巻線の振動が三次元なものであることを示している。変圧器巻線の軸方向振動解析で円周方向の影響を入れた三次元的解析は非常に困難なので，ここでは触れない。

4.4.2 計算と実測の比較

図10は計算と実測との比較で実線は計算値，点線は実験値であるが，両者はよく似ている。定量的には計算値のほうが大きくなっている。この原因としては前述の三次元振動の影響，絶縁物の非線形性の影響などが考えられる。定性的な傾向はよく一致している。

5. 結　言

変圧器巻線の軸方向振動について理論的解析を行ない，これを実測値と比較したところ，次の事柄がわかった。

(1) 変圧器巻線を軸方向に一般化すると $\gamma=\dfrac{E_d S_d}{Kl}$，$\delta=\dfrac{\omega^2 M}{Kg}$ なる二つのパラメータにより記述できる。一般にγ,δが大きいほうが機械力，変位とも小さくなる。
(2) 変圧器巻線の外部短絡時の振動を計算機により計算し，実測結果と比較した結果，定性的な傾向がよく一致した。
(3) (1)，(2)に述べた結果から巻線の軸方向の振動，上下支持部にかかる力を明確には握することができた。

最後に本研究の遂行に当たり，ご激励を賜わった日立製作所矢部常務，日立研究所田口所長，国分工場桑山工場長をはじめとする関係各位に厚くお礼申し上げる。

参考文献

(1) Y. Tournier ほか：CIGRE Report 143 (May. 1962)
(2) 電気学会大学講座：変圧器，132
(3) 窪田，奥山ほか：電気四学会連合大会講演予稿 627 (昭和36年)