

差動変圧器の長ストローク化と大変位の位置検出

宮路 廣*・鹿野 快男**

(1989年10月13日受理)

Long Stroke Position Detector and Improvement of Linear Variable Differential Transformer for Long Stroke

Hiroshi MIYAJI and Yoshio KANO

Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University, Kagoshima 890, Japan

I ま え が き

従来の円筒形差動変圧器 (LVDT) は変位検出トランスデューサとして既に良い精度が得られており、多くの産業分野で活用され、その実用的評価も高い。しかし、その直線範囲は高々数 cm の短いものが大部分であり、円筒形のため形状変化の自由度も少ない。

近年の OA 化, FA 化の急速な進展に伴って、これらの周辺機器に使用される直線状駆動装置の高精度位置決め, 高速化, 長ストローク化等が強く望まれている。また、特に直線駆動装置の重要な一つであるリニアモータにおいては位置検出器と支持機構が重要である。これらの駆動装置に使用する長ストロークで高精度の位置検出器のすぐれたものは数少なく、それぞれ一長一短がある^{1) 2) 3)}。

今回、我々は長ストローク化した新しいタイプの同軸検出コイル形 LVDT とへん平検出コイル形 LVDT を開発試作して、位置検出特性の測定を行った。励磁コイルと検出コイルを方形状に巻いた同軸検出コイル形 LVDT については長変位の位置検出特性に良好な結果が得られた。一方、検出コイルにへん平コイルを用いたへん平検出コイル形 LVDT は長ストロークの全範囲にわたって検出特性の直線性がやや悪く、検出コイルの改善が必要であることが判明した。ここでは主に同軸検出コイル形 LVDT について報告する。

II 本長ストローク LVDT の構造と原理

1. 同軸検出コイル形 LVDT

構造は図 1 に示すように、LVDT の長手方向に巻いた長方形励磁コイルの両側に 2 個の検出コイルを斜めに巻いて、それを差動に接続してある。励磁コイルは 5 kHz (一般には数 kHz) の交流で

*鹿児島大学教育学部技術科

**東京農工大学工学部

励磁しており、励磁コイルの巻幅の中心を対称にして励磁コイルの軸方向 (Y 方向) にガウス分布状に変化する磁界ができる。この磁界は励磁コイルの両端 $\pm X_E$ 点 (励磁コイルの X 方向中央点を 0, 両端即ち, X の最大, 最小点をそれぞれ $+X_E$, $-X_E$ 点とする) を除いて X 方向のどの位置においてもほぼ一様である。この様な磁界内に透磁率の高いコアを図 1 のように置くとコアは磁化され、励磁コイル全断面積内を通過する磁束の約 30% の磁束がコアの中を通過する。このコア内を Y 方向に通る磁束もコアの中央を中心に Y 方向にガウス分布状に分布する。また、このコアを X 方向に位置を変化させてもコア内磁束密度の最大値は、コイルの両端点 ($\pm X_E$) を除いてほぼ一定である。したがって、斜めに配置された 2 つの検出コイルにはこの Y 方向の磁束分布に比例した電圧が電磁誘導により誘起されるので、コアを X 方向に移動させたときの各 X 位置に対する Y 方向磁束分布の変化を差動電圧の変化に換えて検出することができる。即ち、位置検出をすることができる。このように励磁コイルと検出コイルをほぼ同軸に巻いた同軸検出コイル形 LVDT はコ

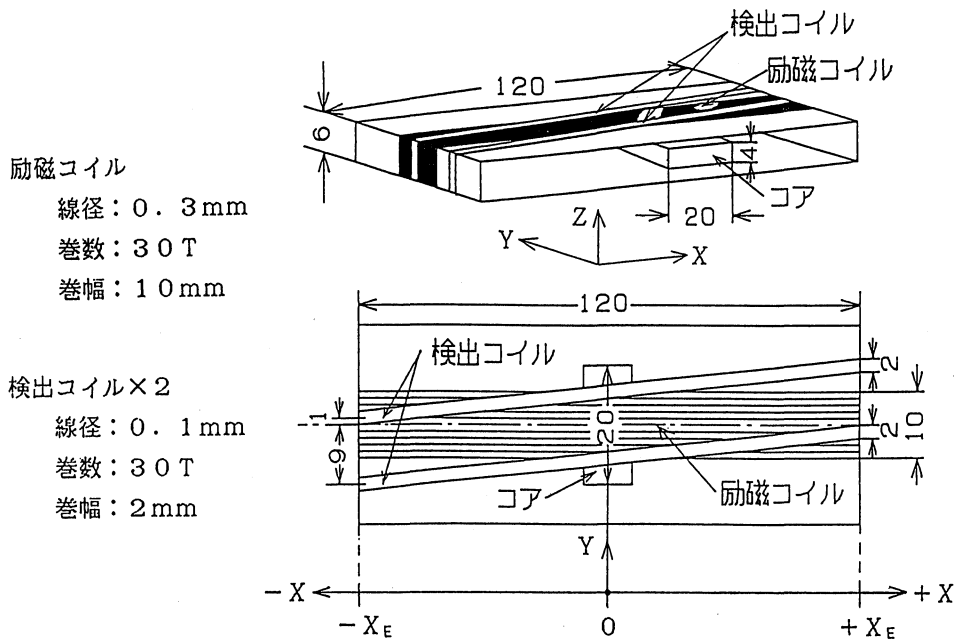


図 1 同軸検出コイル形 LVDT の構造
Fig. 1 Structure of coaxial detecting coil type LVDT

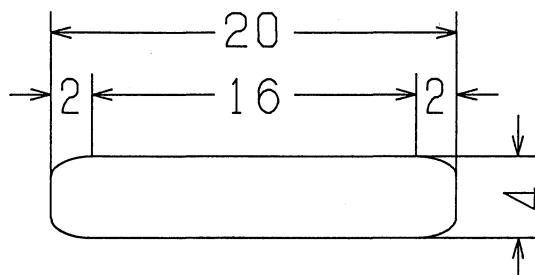


図 2 コアの断面
Fig. 2 Cross-section of core

コア内を Y 方向に通る磁束を利用したものである。Y 方向磁束分布に変化を与えるコアの材質・形状および使用個数は位置検出特性に大きく影響する。今回は、コアは図 2 に示すように断面積が 76.56 mm^2 で長さがそれぞれ 10 mm, 15 mm, 20 mm の 3 種のフェライトコアを使用した。図 1 には長さ 20 mm のコアを使用した場合を示してある。また、図 1 のようにコアを励磁コイルの内部に一個用いるタイプと励磁及び検出コイルを上下から挟んで 2 個用いる 2 つのタイプの LVDT について検討した。

2. ヘン平検出コイル形 LVDT

ヘン平検出コイル形 LVDT の構造は検出コイル以外の部分は同軸形と全く同じで、コアの大きさおよびコア 1 個のものと 2 個のタイプがあるのも同軸形と同様である。図 3 に示すように、ヘン平に巻いた 2 つの検出コイルを励磁コイルを挟んで左右に斜めに配置し、差動に接続している。同軸形とは逆にコアから Z 方向に漏れる磁束の変化をヘン平検出コイルに誘起される差動電圧の変化として位置を検出している。即ち、コアから Z 方向に漏れて行く磁束を位置検出に利用しているので、ヘン平コイルの軸を Z 方向にとっているのが同軸形と異なる点である。

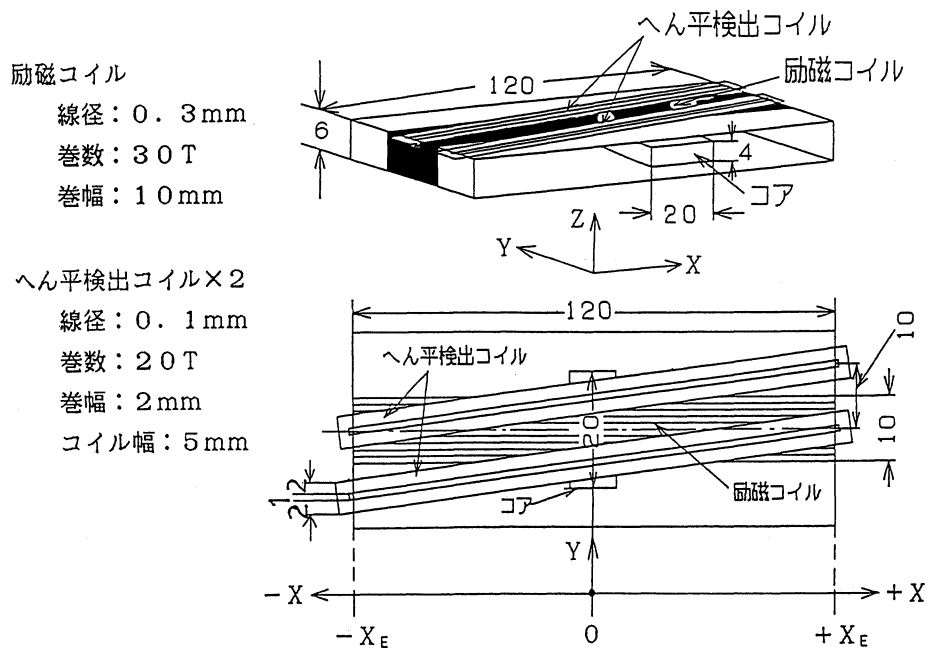


図3 ヘン平検出コイル形 LVDT の構造
Fig. 3 Structure of flat detecting coil type LVDT

III 磁束の分布特性と検出コイルの配置

1. コア内磁束のコアの変位に対する分布

励磁コイルの磁界によってコア内を Y 方向に通る磁束の総量をコアの X 方向変位に対する分布として示したものが図 4 である。

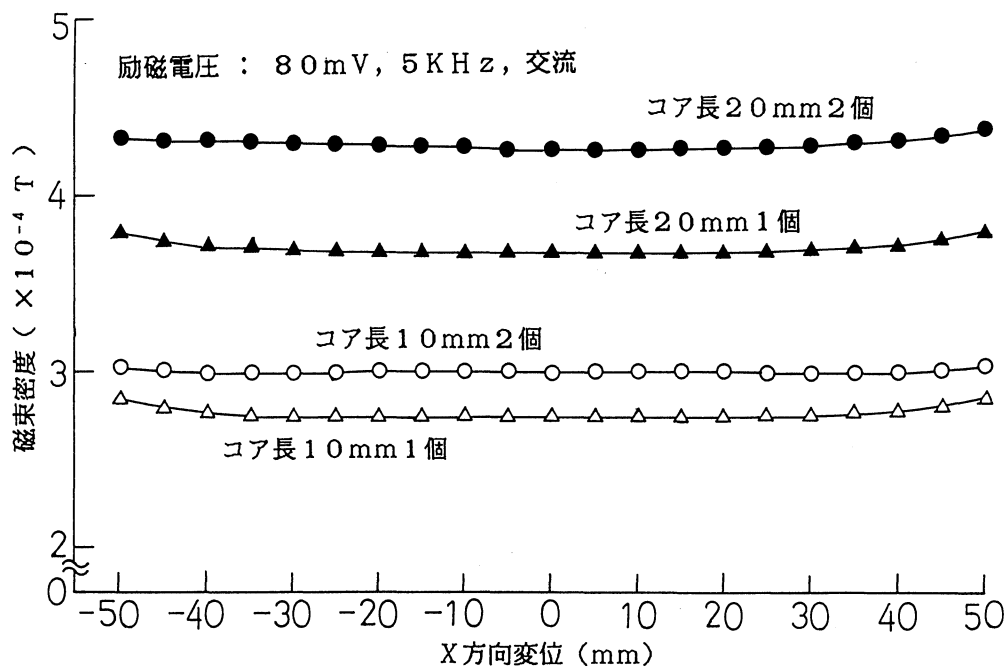


図4 コア内磁束のコアの変位に対する分布

Fig. 4 Distribution of induced magnetic flux in core for core position

図5のように n 回巻のコイルを貫いている磁束 Φ [Wb] によってコイルに誘起される起電力 e [V] はファラデー・ノイマンの法則によって次の(1)式のようなになる (起電力の方向は省略)。

$$e = n \frac{d\Phi}{dt} \text{ [V]} \quad (1)$$

また、コイルの面に垂直に磁束の通過する断面積を S [m²]、一様な磁束密度を B [T] とすれば

$$\Phi = BS \text{ [Wb]} \quad (2)$$

の関係が成立する。今、磁束が正弦波状に変化するとして

$$B = B_0 \sin \omega t, \quad e = e_0 \cos \omega t$$

とすれば

$$e = n \frac{d\Phi}{dt} = nS \frac{dB}{dt} = nS\omega B_0 \cos \omega t \text{ [V]} \quad (3)$$

となり

$$B_0 = \frac{e_0 \cos \omega t}{nS\omega \cos \omega t} = \frac{e_0}{nS\omega} \text{ [T]} \quad (4)$$

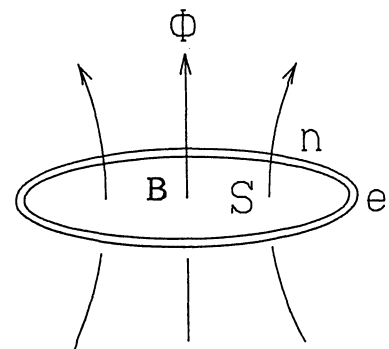


図5 電磁誘導
Fig. 5 Electromagnetic induction

e_0 がわかれば B_0 が求まる。

即ち図4は、各コアの全体に一様かつ密にコイルを巻き、コアを X 方向に移動させてコイルに誘起される実効値電圧 E [V] ($e_0 = \sqrt{2}E$) を(4)式によって磁束密度に換算した値である。この値はコアの変位範囲内ではどこでも一定であることが望ましいが励磁コイル長手方向の両端部 ($\pm X_E$ 点) では磁束密度が増加している。これは、コアが巻線の端部 (X_E 点) に近付くと励磁コイルの厚み方向の巻線によって生ずる磁束がコア内を多く通るようになるためと考えられる。図4のような励磁コイル両端部 ($\pm X_E$ 点) におけるコア内磁束の増加は最大変位近くの位置検出電圧に影響を及ぼす。また、コア内の磁束密度は励磁を一定とすればコアの大きさと数によって異なり、図4に示すようにコア長が 20 mm でかつ 2 個のときが最も大きく、かつ直線に近くなっている。したがって、コア長 20 mm 2 個のときが他のコアのときより、大きい感度で精度よく位置検出ができることになる。また、このことは表1のコア内磁束比 (κ) の値からも推論される。

ここでは

$$\text{コア内磁束比 } (\kappa) = \frac{\text{コア内磁束 } (\Phi_c)}{\text{励磁コイル断面積内全磁束 } (\Phi_t)} \times 100\% \quad (5)$$

と定義する。

表1 コア内磁束比
Table. 1 Ratio of Φ_c to Φ_t

コア長, コア数	Φ_t ($\times 10^{-8}$ wb)	Φ_c ($\times 10^{-8}$ wb)	κ (%)
10 mm 1 個	8.70	2.11	24.3
10 mm 2 個	8.93	2.30	26.2
20 mm 1 個	9.23	2.74	29.7
20 mm 2 個	9.79	3.23	33.0

コアがないとき、左右の2つの検出コイルに誘起された電圧は検出コイルが差動接続のためほとんど 0 [V] になっている。コアがあればコアに対する各検出コイルの位置が異なるため、2つの検出コイルには違った電圧が誘起されることになるのでその差電圧を位置検出として利用している。したがって、 κ の値が大きければそれだけ多くの磁束がコアを通ることになるので、各検出コイルに誘起される電圧の差が大きくなり検出される電圧の値も大きくなる。また、コア長が 20 mm でコアが 2 個の場合励磁コイルによって生じた全磁束の約33%がコアを通るようになるので、励磁コイルの両端点 ($\pm X_E$) では厚み方向の励磁コイルによって生じる磁束の影響が他に比べて小さくなる。したがって、図4のコア長 20 mm 2 個の分布は両端部でも一様となっており、よい精度の位置検出が可能となる。

ストロークを長くすれば必然的にコイル断面積が大きくなるので、 κ の値は小さくなっていく。この比率が大きいことが望ましい。

2. コア内磁束の Y 方向分布

励磁コイルに直角に置かれたコアにはコアの長さ方向の中央部が最大で両端部に向かって対称に減少するコア内磁束の分布が生ずる。この磁束によって検出コイルに誘起される差動電圧を位置検出に利用している。

コア内磁束は図7に破線で描いてあるように、コア中央より端部に向かって左右対称に直線的に減衰していくのが理想的である。しかし、実際にはコア中央部と端部では曲線状に変化するので、直線部分が短くなっている。コア内磁束分布の直線部分はできるだけ長いことが良好な位置検出のために必要である。

このコア内磁束の分布はコア長とコア数によって異なる。その様子を図6, 図7に示している。図6はコア内磁束の分布をコア長をパラメータとして示したもので、コア長 10 mm より 20 mm の方が直線部分が長くなっており、励磁コイル幅に比して非常に長い 140 mm のコアでは逆に直線部分は短くなっている。この直線部分の長さは励磁コイルの巻幅とも関連しているので巻幅に応じた適切なコアの長さを決める必要がある。また、図6は+Y方向の分布しか描いてないが、-Y方向にも0を中心に対称的に分布している。

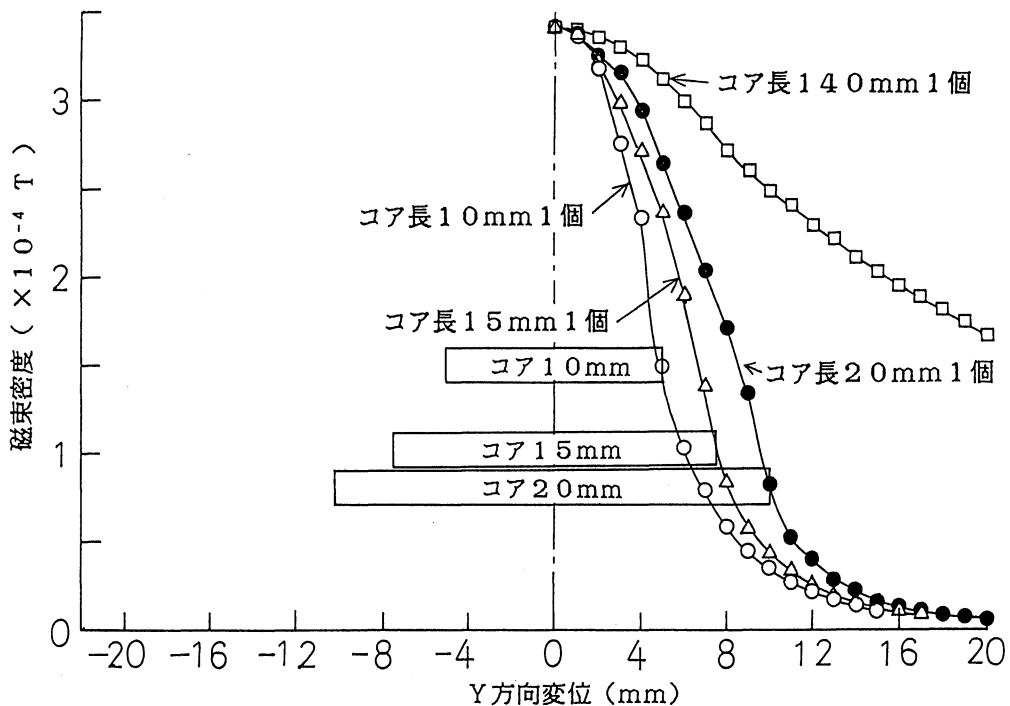


図6 Y方向のコア内磁束分布

Fig. 6 Distribution in Y-direction of magnetic flux in core

図7はコア内磁束の分布をコア数をパラメータとして 20 mm のコアについて示したものである。コア 1 個より 2 個の方が磁束密度も大きく直線部分も長くなっている。このことは 10 mm, 15 mm のコアについてもいえる。したがってコアを 2 個使用した方が感度も高くよい精度で位置検出ができる。

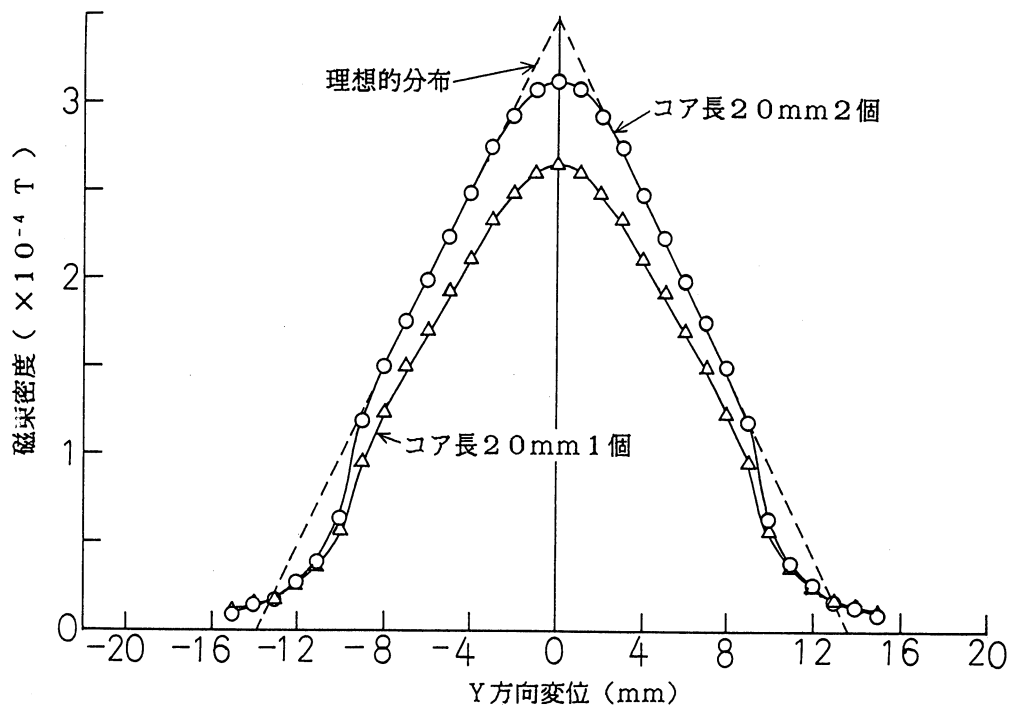


図7 Y方向のコア内磁束分布

Fig. 7 Distribution in Y-direction of magnetic flux in core

3. コアから Z 方向に漏れる磁束

励磁コイルの磁界中に置かれたコアは磁化され、コアの内部を通る磁束とコアの途中から外部に漏れていく磁束が生ずる。図8の漏れ磁束分布はコアの上側に漏れる磁束の概略を示したもので、図7のコア内磁束の分布を微分した形状となっている。この漏れ磁束密度はコア内を通る磁束密度

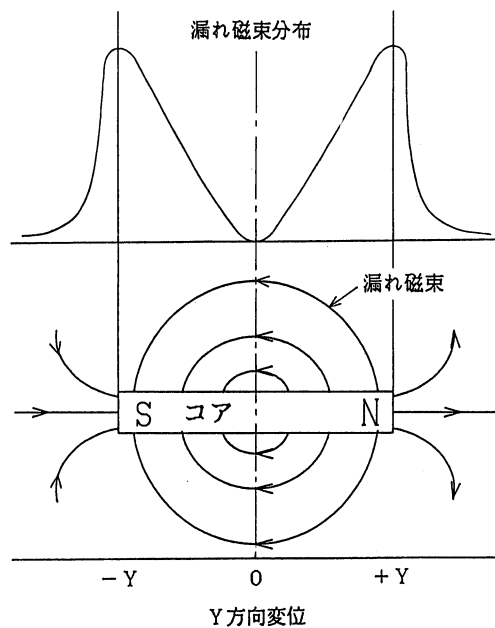


図8 コアからの漏れ磁束

Fig. 8 Leakage flux from core

より少ない。漏れ磁束はコアの Y 方向中心では 0 であるが、コアの中央部と端部近傍では放物線状に、またその中間部ではほぼ直線的に増加するが、コアの端部を過ぎると急激に減少する分布となる。へん平形はこの漏れ磁束を利用して位置検出を行っている。

4. 検出コイルの配置

励磁コイルを挟んで左右に斜めに巻いている 2 本の検出コイルの位置は、位置検出の精度と感度に大きく影響するのでその位置決めは重要である。このコイル位置の適否はコア内磁束（へん平形は Z 方向への漏れ磁束）の分布曲線を利用して調べることができる。図 9 は励磁及び検出コイルとコア位置の関係を示したもので、今細い導線をコアに 1 mm 幅に巻いた細いコイル H をコア上をスライドできるようにしておく、励磁コイルを励磁した状態でまずコイル H をコア Y 方向の中心 $Y=Y_0$ から +Y 方向に移動させたとき、コイルが切る磁束は図 10 の +Y 方向コア内磁束密度の分布に比例したものとなる。次に同様にコイル H を $Y=Y_0$ の位置から -Y 方向に移動させれば、コイルが切る磁束は図 10 の -Y 方向コア内磁束密度の分布に比例した分布となる。また、図 9 のようにコアを $-X_E$ から $+X_E$ まで +X 方向に移動させれば斜めに巻いてある検出コイル d_1 にはコイル H を $-Y_1$ から Y_0 へ移動させたのと同様な磁束密度の変化が、 d_2 にはコイル H を Y_0 から $+Y_1$ に動かしたときと同様な磁束密度の変化が検出される。これはコアを X 方向に移動させることによってコイル H を Y 方向に移動させたのと同じことになる。したがって、差動に接続してある検出コイルには d_1 、 d_2 の切る磁束密度の差が検出され、この磁束密度の差に比例した電圧が誘起される。その様子を図 10 に○印でプロットしている。また、コアの中央を中心に Y 方向にガウス分布状に分布するコア内磁束の変化をうまく検出するには検出コイルの巻幅はコアの長さにもよるが 1~3 mm 程度が適当である。

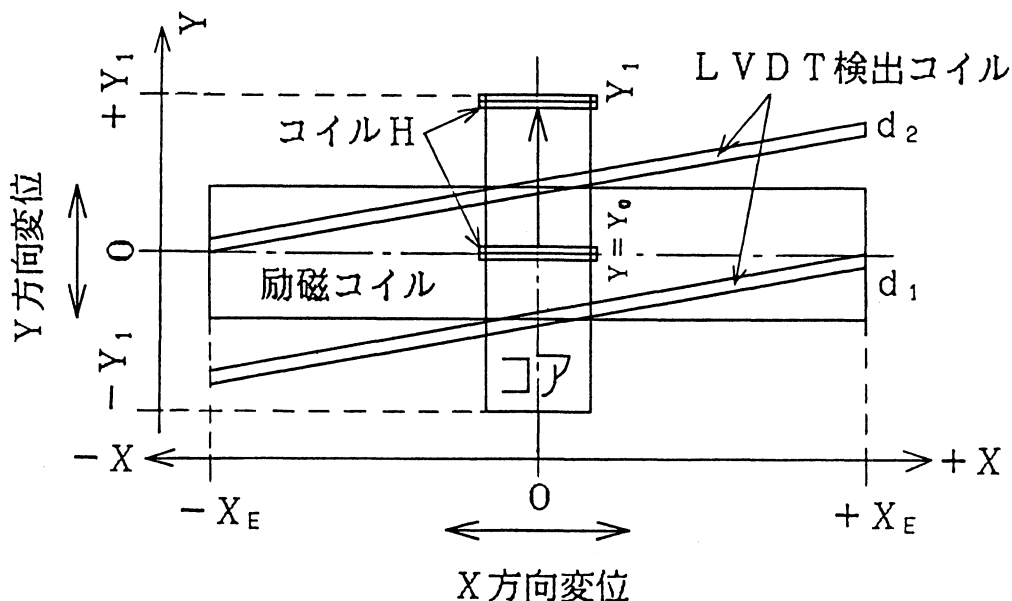


図 9 検出コイルとコア位置の関係

Fig. 9 Relations between detecting coils and core position

このプロット点は検出コイルを適した位置に巻けばほぼ直線状に並ぶようにすることができる。一方、コイルの位置が悪いと直線状からずれる度合いが大きくなり検出精度が悪くなる。2本の検出コイルを巻く位置は数多くあり、それぞれについて図10のようなやや困難な方法で検出電圧特性を確かめねばならない。したがって、実際にはコンピュータで図10の方法をシミュレーションし、その中からよい検出電圧特性を選んで検出コイルを巻く位置を決定している。

へん平検出コイル形 LVDT についても同様な方法で検出コイルの位置を求めることができる。

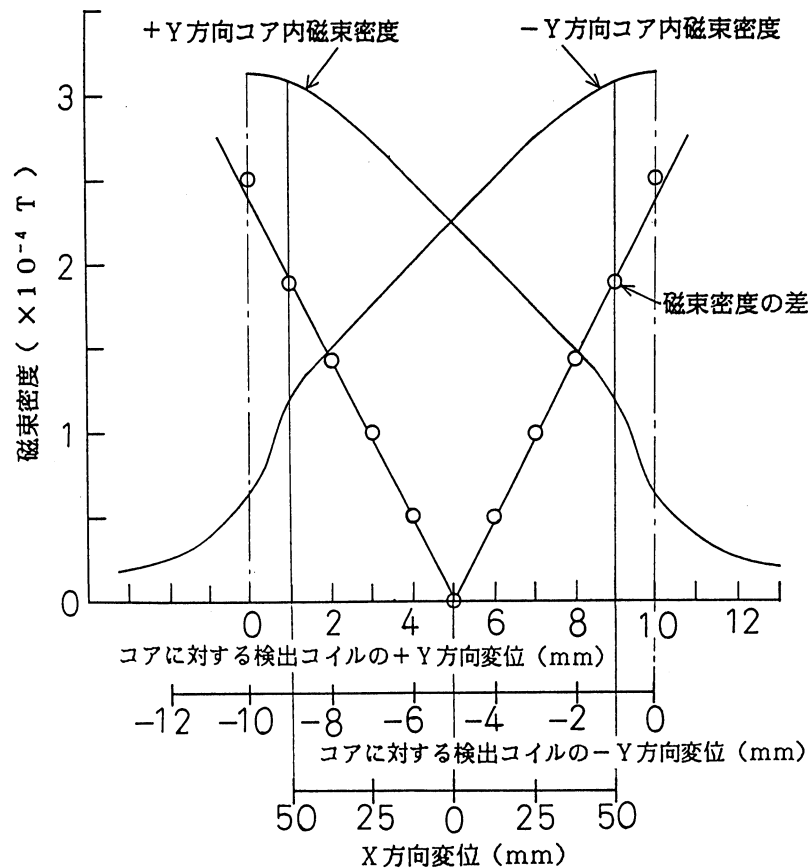


図10 シミュレーションした差動磁束密度
Fig. 10 Simulated differential magnetic flux density

IV 実験結果および検討

1. 同軸検出コイル形 LVDT の差動検出電圧特性

検出コイルの配置やコアの長短および使用数によって差動検出電圧特性が変わることを述べた。位置検出の精度と感度を高めるには、2本の検出コイルに誘起される電圧の差が直線的に変化するよう検出コイルの位置を決めることがポイントで、その求め方は3章の4節で述べている。今回試作したLVDTの差動検出電圧特性を図11に示す。図中のX方向変位に対する各点のプロット(○と△の印)は実測値であり、直線はそれぞれの位置検出電圧の値から最小二乗法によって求めた一

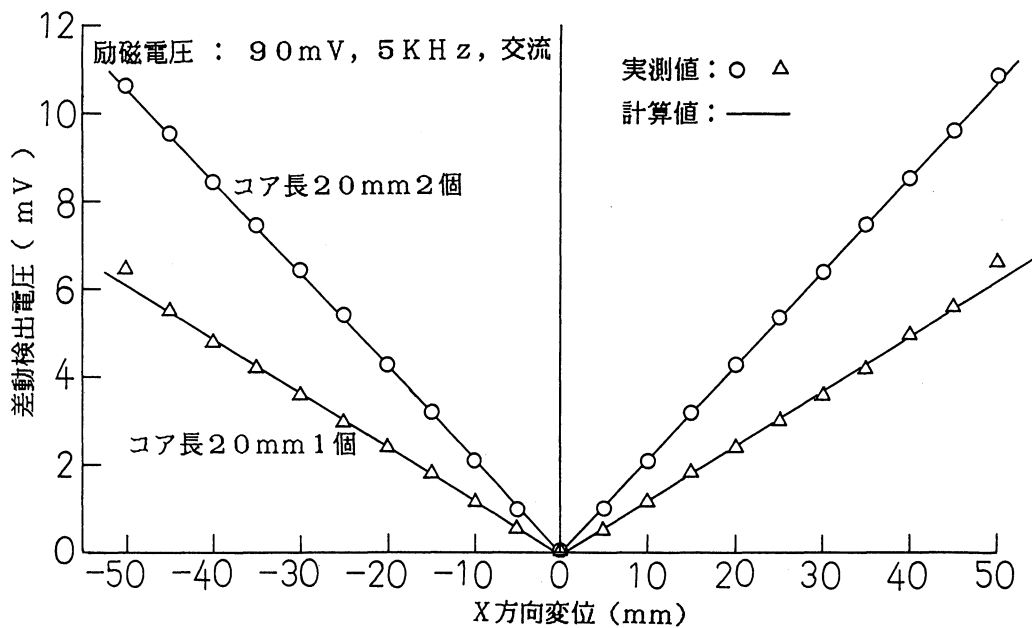


図11 差動検出電圧特性

Fig. 11 Characteristic of differential detecting voltage

次回帰直線で、直線性や誤差計算に用いる理論値としている。励磁は 90 mV, 5 kHz の交流で行った。変位 X が正のときは励磁電流と同相の、負のときは逆相の出力電圧が得られる。特性は正負方向ではほぼ対称であり、変位とそれに対する検出電圧は比例している。しかし、最大変位 ± 50 mm の点では計算値と実測値とのずれが大きくなっており、誤差もコア 2 個の場合でも最大誤差 $\epsilon_m = 0.86\%$ 、平均誤差 $A_v = 0.17\%$ とやや大きい。最大ストローク点で誤差が大きい（検出電圧が理論値より高くなっている）のは図 4 に示したように励磁コイルの両端部（ $\pm X_E$ 点）で磁束密度が増加しているためである。この影響を小さくするには 2, 3 の方法が考えられる。例えばコアの移動距離より正負両側に 5% 除いた部分の ± 45 mm を直線範囲とすれば、コア 1 個のときは最大誤差 $\epsilon_m = 1.41\%$ 、平均誤差 $A_v = 0.41\%$ となり、コア 2 個の場合も $\epsilon_m = 0.45\%$ 、平均誤差 $A_v = 0.14\%$ と小さくなる。このようにコアの移動距離を必要なストロークの正負両側に 5% 程度除いた部分を直線範囲とすることによって検出精度を高めることができるから、したがって、最初から必要なストロークの約 10% 増のコイル構成とすればよいことになる。直線範囲の大小に関わらず、コアを 2 個使用すれば直線性、最大誤差、感度共に良くなる。

2. へん平検出コイル形 LVDT の差動検出電圧特性

へん平形は図 8 に示したコアからの漏れ磁束を利用するタイプである。コア内磁束の分布と漏れ磁束の分布の大きな相違はコア端の分布である。漏れ磁束はコア中央部から両端に向かって増加していくが、端部近くで急峻に減少する。このことは、コア端近傍においては 2 本の検出コイルに誘導される電圧の差を直線的に変化させることが困難となり、最大変位付近の検出特性の悪化が予想される。へん平形においても検出コイルの位置は検出電圧特性に大きく影響する。図 12 は検出コイ

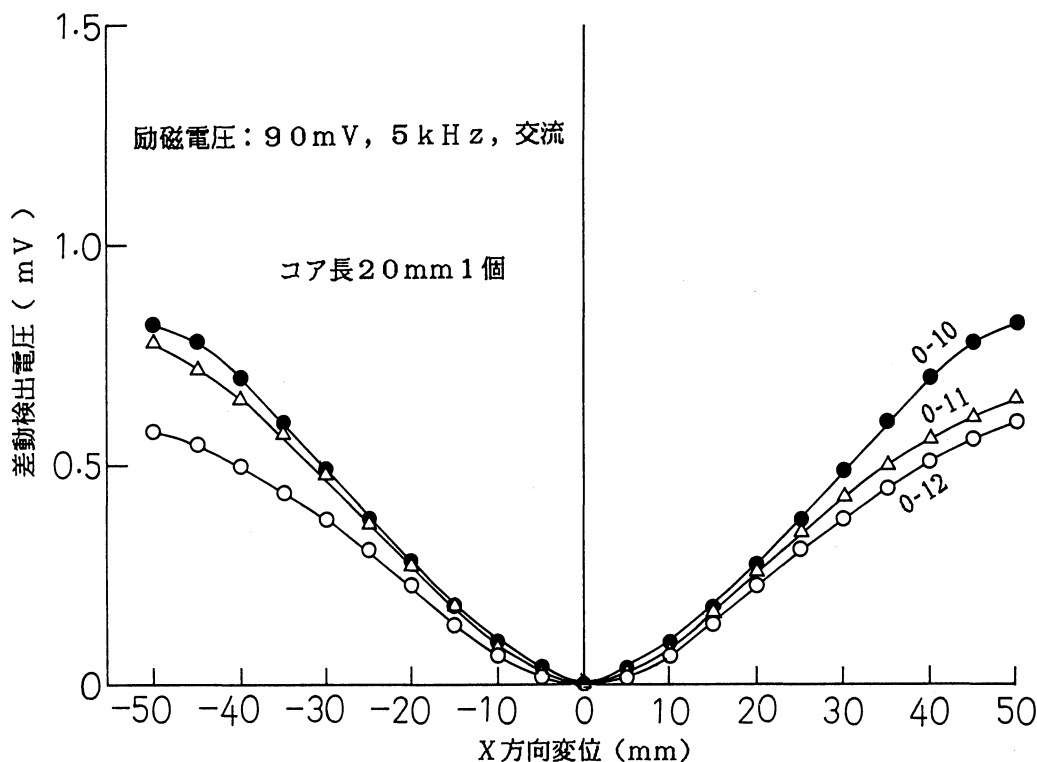


図12 差動検出電圧特性
Fig. 12 Characteristic of differential detecting voltage

ルの位置をパラメータとしてコア 20 mm 1 個のときの検出電圧特性を示している。図中の0-10, 0-11などの数字はコイルの位置につけた位置番号である。今回の実験ではいろいろとコイルの位置を変えても立ち上がり部分と最大ストローク近辺の検出特性はよくなかった。したがって、漏れ磁束分布の中央部と端部磁束の使い方、へん平検出コイルの巻方と配置等についてもっと検討が必要である。

へん平形の中で良い検出電圧特性に属するものを図13に示す。図中の X 方向変位に対する各点のプロット (○と△の印) は実測値であり、直線は計算値である。全体としてへん平形は実測値と計算値が大きく隔だっているものが多く、誤差はコア 1 個のとき最大誤差 $\epsilon_m=5.25\%$ 、平均誤差 $A_v=2.84\%$ 、コア 2 個でも $\epsilon_m=3.75\%$ 、 $A_v=1.70\%$ と同軸形に比べて非常に大きくなっており、検出電圧特性は同軸形に比べて悪い。

3. 同期検波回路

図11のような変位に比例した交流の差動検出電圧を同期検波すれば、変位に比例した直流電圧が得られる。図14に同期検波回路を示す。本回路は位置検出信号の増幅とゼロクロス・コンパレータから発生するノイズを除去するためにハイパスフィルタ回路を2段設けている。

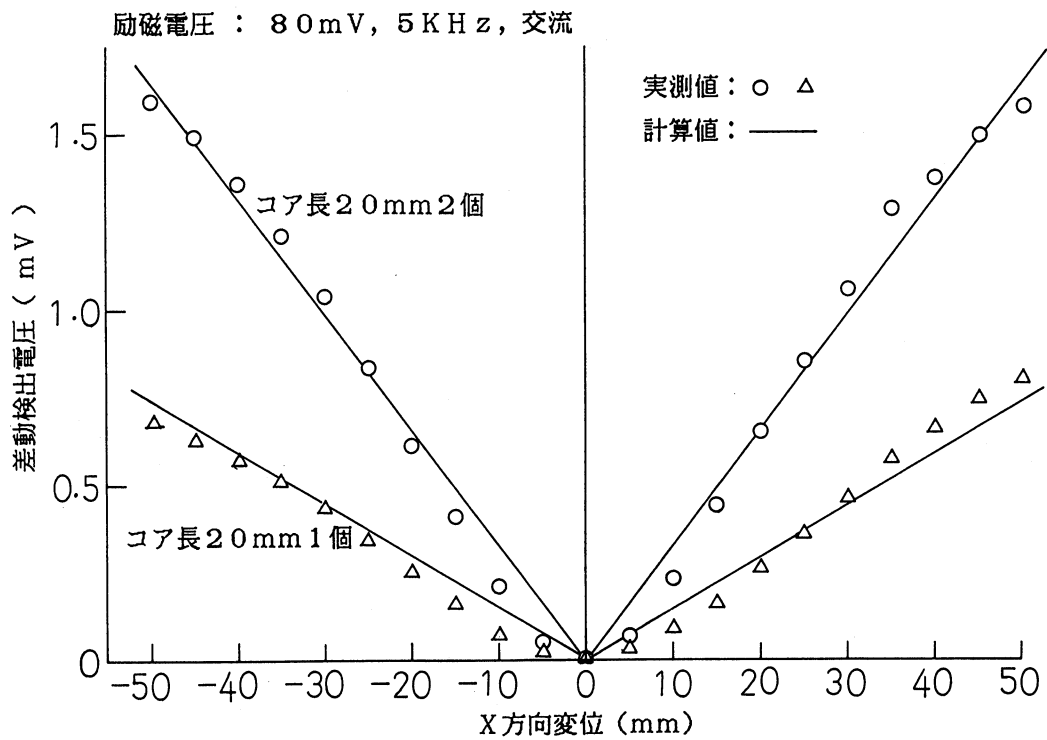


図13 差動検出電圧特性

Fig. 13 Characteristic of differential detecting voltage

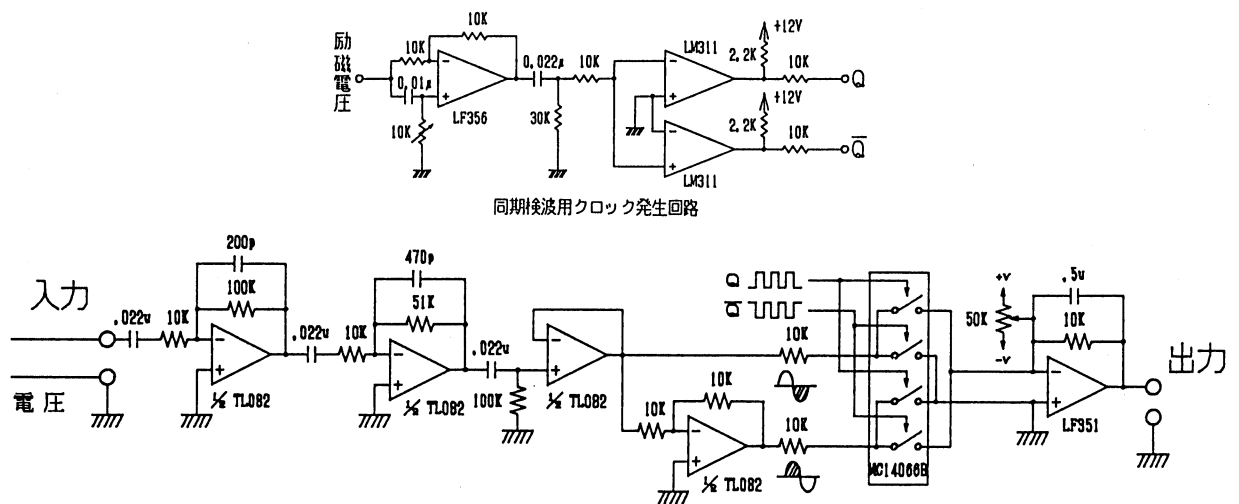


図14 同期検波回路

Fig. 14 Synchronous detection circuit

4. 同軸検出コイル形 LVDT の位置検出特性

本長ストローク LVDT の位置検出特性を図15に示す。変位に対する各点のプロット (○と△の印) は実測値であり、引いてある直線は計算値である。コアの変位とそれに対する出力電圧は非常によく比例しており、最大変位の±50 mm の点以外では計算値と実測値はよく一致している。また、コアを2個用いた方が出力電圧も高く、計算値とのずれも小さくなっている。

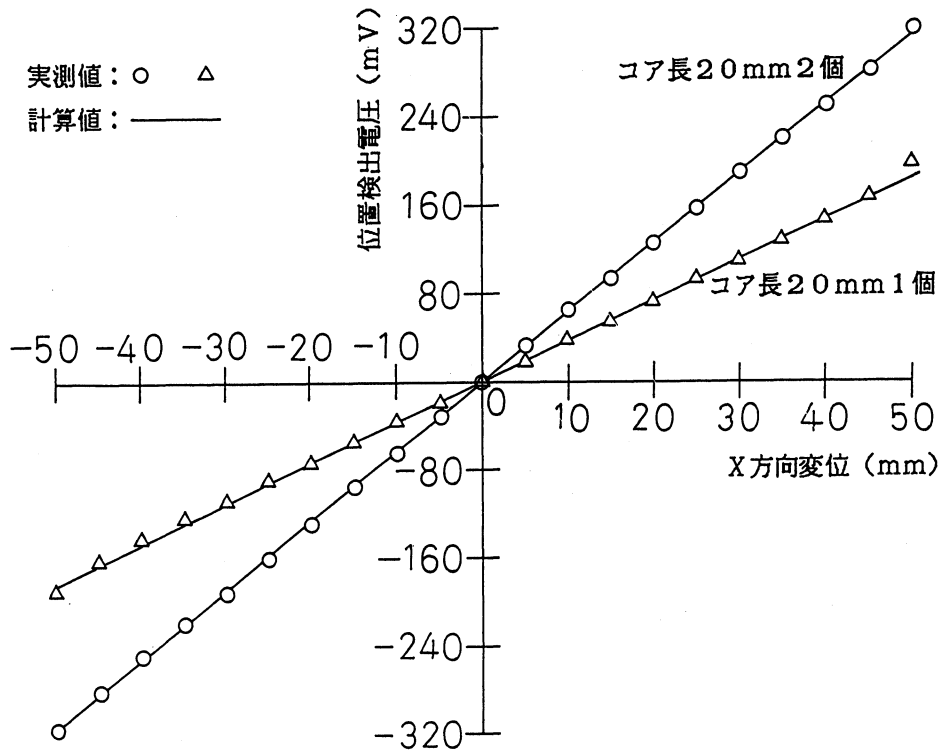


図15 位置検出特性
Fig. 15 Position detecting characteristic

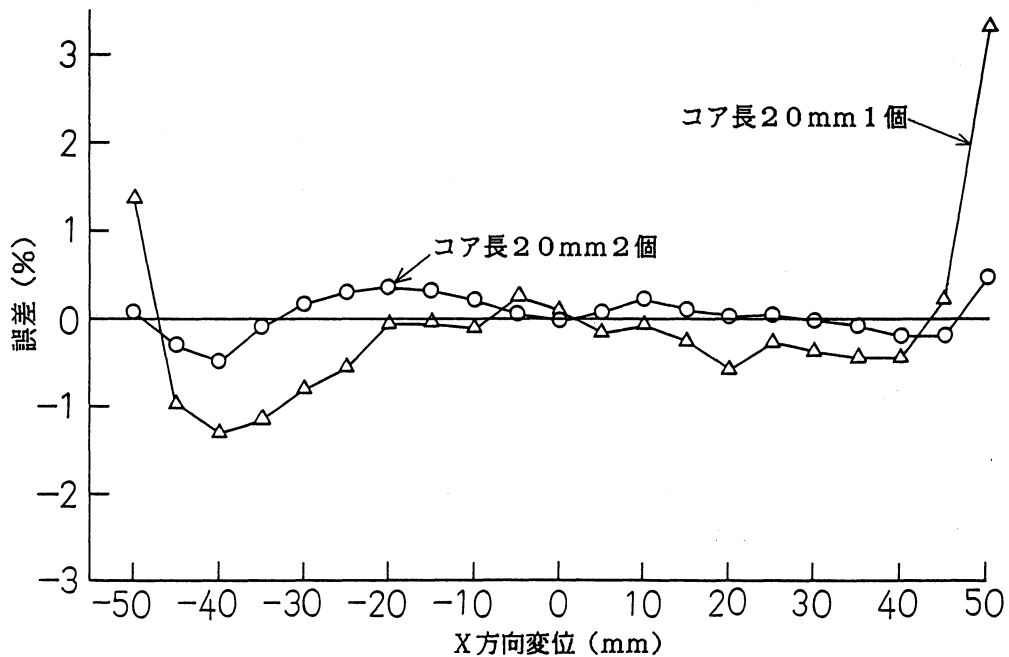


図16 位置検出の誤差分布
Fig. 16 Error distribution of Position detecting

図16に位置検出特性の計算値に対する誤差の分布を示す。コア1個の場合励磁コイルの両端部 ($\pm X_E$ 点) 即ち、最大変位点の誤差が特に大きい。このことについては前に述べている。コア2個のタイプは全体的に誤差も小さくかつ誤差のばらつきも少なくよい検出特性が得られている。位置

検出の出力である直流出力電圧の誤差とその分布は同期検波前の交流差動検出電圧の誤差特性とほとんど同じかわずかに誤差の値が大きくなっている程度である。次に直線範囲 100 mm と 90 mm の誤差の比較を表 2 に示す。コア 2 個の場合、コア移動距離全体を直線範囲としても最大誤差も小さくよい位置検出特性が得られるが、特に直線範囲をコア移動距離の 90% 程度とすればより高精度の位置検出を行うことが可能といえる。

表 2 誤差の比較
Table. 2 Comparison between ϵ_m and A_v

コア長, コア数	直線範囲 100 mm		直線範囲 90 mm	
	最大誤差 ϵ_m (%)	平均誤差 A_v (%)	最大誤差 ϵ_m (%)	平均誤差 A_v (%)
20 mm 1 個	3.30	0.61	1.13	0.28
20 mm 2 個	0.48	0.19	0.45	0.19

V ま と め

長ストローク LVDT を試作し、実測値と計算値を比較して位置検出特性を検討した。同軸検出コイル形でコア 20 mm 2 個のタイプの LVDT は感度、直線性も優れ、非接触で高精度大変位の位置検出が可能なが確認された。

長ストローク同軸検出コイル形 LVDT についてまとめると

- (1) 構造が簡単でしかも大変位の位置検出が高精度でできる。
- (2) 従来の円筒形差動変圧器はコアをコイルの軸方向に移動させるのに対し、本 LVDT はコアをコイルの軸と直角に動かす新しいタイプである。
- (3) 直線範囲をコアの移動距離 (コイル内径全長) としたとき 0.5% 程度の精度で位置検出ができる。
- (4) 直線範囲をコア移動距離の約 90% 以下にすれば検出精度を高めることができる。
- (5) 直線範囲をコア移動距離の 90% とすれば最大誤差 $\epsilon_m = 0.45\%$ 、平均誤差 $A_v = 0.19\%$ 以下の高精度で位置検出ができる。
- (6) ストロークの約 10% 増のコイル長の構成にすれば、必要直線範囲を確保できる。
- (7) コア内磁束比 κ はできるだけ大きいことが望ましい。
- (8) 直線範囲の大小に関わらずコアを 2 個使用の方が直線性、誤差、感度を良くできる。

へん平検出コイル形 LVDT は最初の予想に反し、感度、直線性共に同軸形より劣っており検出コイルやその他の改善がもっと必要であることが判明した。

参 考 文 献

- (1) 磁気アクチュエータ調査専門委員会編：「リニアモータとその応用」P. 3, P. 65~67 (S59) 電気学会
- (2) 鹿野, 長谷部, 荒木, 嶋津, 山田「へん平差動変圧器による位置検出」リニアドライブ合同研究会, LD-89-19~24 (1989)
- (3) 鹿野, 宮路, 花岡「差動変圧器の長ストローク化の研究」電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, P. 925, (1989)
- (4) 鹿野, 長谷部, 伊藤, 黄, 山田「新しい支持・位置検出機構を用いたリニア直流モータの動作特性」リニアドライブ研究会資料, LD-88-22 (1988)
- (5) Y.Kano, S.Hasebe, C.Huang, and T.Yamada: "New Type Linear Variable Differential Transformer Position Transducer", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 38-2, P 407 (Apr 1989)