方形差動変圧器による200mmの位置検出

宮路　廣*・鹿野　快男**

(1994年10月17日　受理)

Position Detection of 200mm by Sqare Coil Type Linear Variable Differential Transformer

Hiroshi MIYAJI and Yoshio KANO

I　まえがき

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が，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。筆者らは，差動変圧器で長変位の位置検出ができる新しいタイプの方形差動変圧器を開発し，100mmストロークの位置検出特性について報告した[1)2)3)4)5)]。

100mm方形差動変圧器については，もっと精度や感度の改善，大きさや形状の工夫などの問題も残されてはいるが，方形差動変圧器で長変位の位置検出が可能であることが確認されている。また，方形差動変圧器の位置検出特性は，使用するコアの形状，大きさならびにコアの個数や検出コイルの巻く位置によって大きく変わることも明らかにされている。筆者らは，前記の問題点の解決も含め，継続して方形差動変圧器の開発を行っている。

本論文では，200mm方形差動変圧器の諸特性および差動検出電圧特性ならびに検出コイルの位置決めについて，100mm方形差動変圧器とも比較して報告する。今後200mm方形差動変圧器を単にLVDTと記す。

II　LVDTの構造

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。励磁コイルを5kHzの交流で励磁し，励磁コイルで囲まれた空間に一様な磁界を作る。この磁界内で透磁率の高いコアを図1のX方向に移動させることによって生じる磁束分布の変化を検出コイルに誘導される誘起電圧に変えて位置を検出する。励磁コイルと検出コイルはポリウレタン銅線を，また励磁コイルおよび検出コイルの巻き枠，即ちLVDTの枠は3mmのアクリル板を使用している。

コアは100mmLVDTと同一で，断面積71.76mm^2，長さ20mmのフェライトコアを使用した。コアの断面を図2に示す。

* 鹿児島大学教育学部
** 東京農工大学工学部

励磁コイル（EC-1）	検出コイル（DC-1）
線径：0.2mm	線径：0.1mm
巻数：42回	巻数：50回
巻幅：10mm	巻幅：2mm

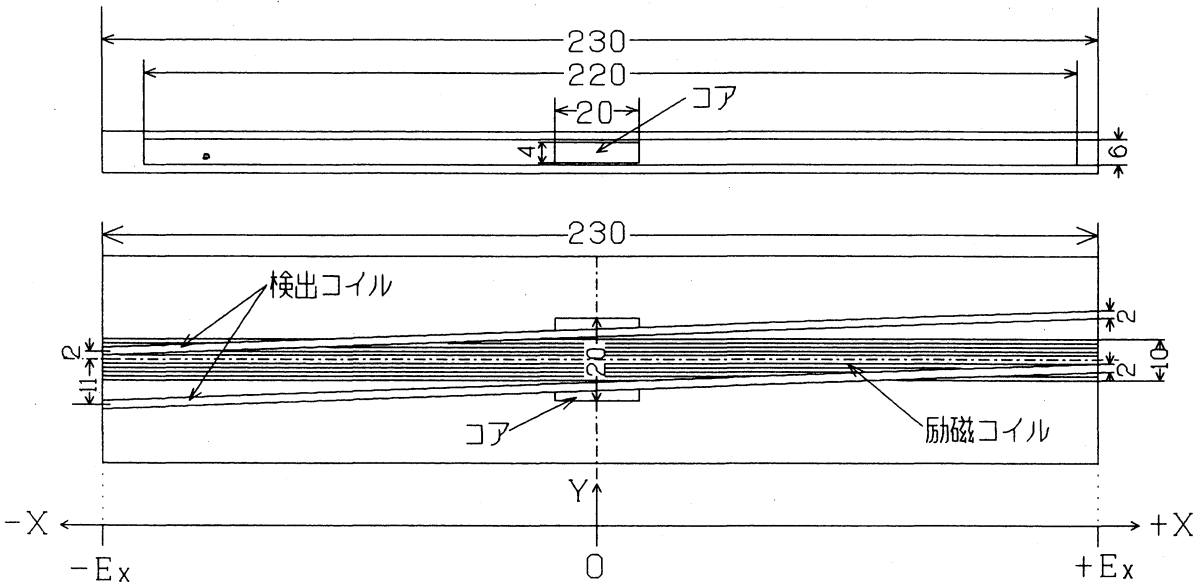

図1　LVDTの構造

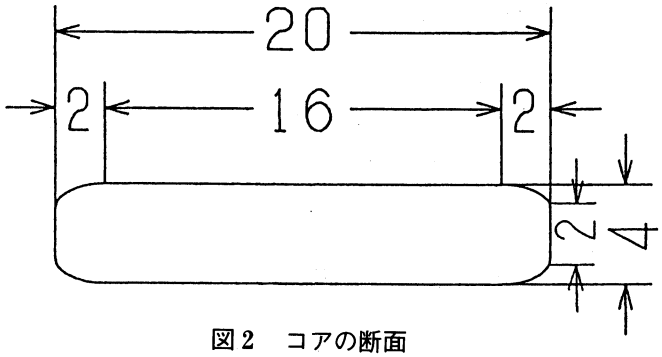

図2　コアの断面

Ⅲ　コア内磁束分布

1．コアをX方向に移動させたときのコア内磁束の分布

励磁コイルの励磁によって，コア内を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3である。即ち，コア全体に0.29mmのポリウレタン銅線を密に巻き（61回），励磁コイルを励磁した状態でコアをX方向に移動してコア巻線に誘導される電圧を磁束密度に換算した値である。図には励磁電圧200mV, 300mVの分布を示してあるが，励磁電圧1.54V（励磁電流100mA）まではコアは飽和しないことを確かめてある。

コア内磁束の分布はコアの可動範囲ではどこでも一定であることが望ましいが励磁コイルの両端部（$\pm X_E$点）では磁束密度が増加している。この励磁コイル両端部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ので，分布を一様にするか端部磁束の増加の影響を少なくする工夫が必要となる。図3の分布は100mmのLDVTと同じ傾向である。

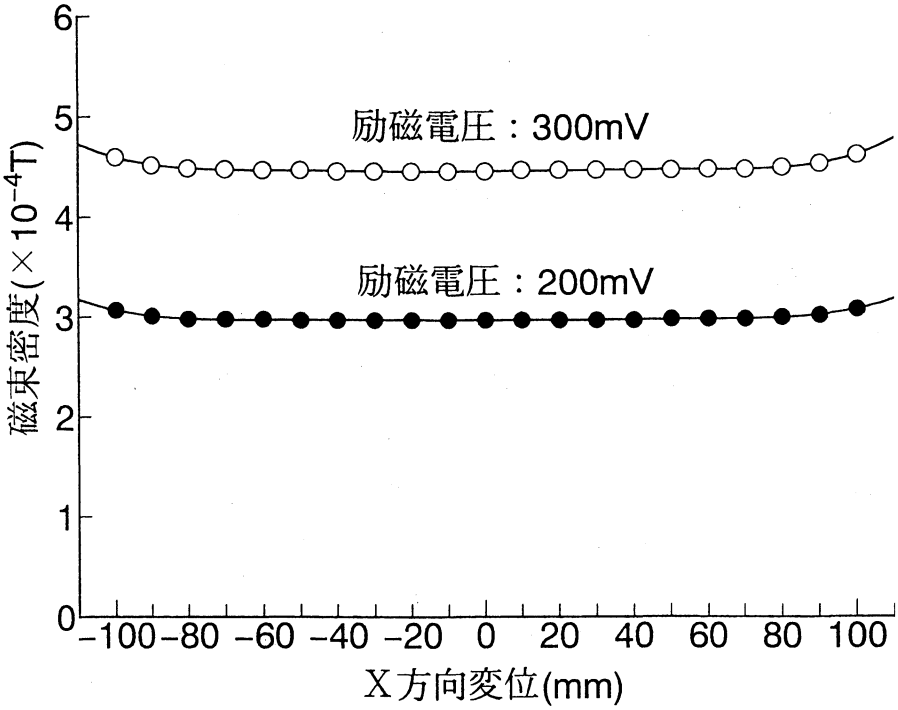

図3　コア内磁束のコアのX方向変位に対する分布

励磁コイルによって生じた全磁束（Φ_t）はコアを通らない励磁コイル空間磁束（Φ_a）とコアを通るコア内磁束（Φ_c）に分けて考えることができる。位置検出の精度と感度をよくするには励磁コイル全磁束のうち，より多くの磁束がコアを通ることが望ましい。したがって，次に示すコア内磁束比(K)は大きい方がよい。

Kは次式で算出する

$$\text{コア内磁束比(K)} = \frac{\text{コア内磁束（}\Phi_c\text{）}}{\text{励磁コイル全磁束（}\Phi_t\text{）}} \times 100\%$$

しかし，ストロークを長くすれば必然的に励磁コイル空間の断面積が大きくなり，Φ_aの磁束が多くなるのでKの値は小さくなっていく。Kの減少に伴う位置検出の精度や感度の低下を小さくするにはコアの材質，形状や大きさ及び個数を吟味したり，励磁コイル及び検出コイルの巻数を増やし，励磁を大きくするなどの工夫が必要である。

表1にKの算出に使用したΦ_t，Φ_a，Φ_cの各値を100mmLVDT（励磁コイル：0.3mm　30T　巻幅10mm　励磁80mV　5kHz，励磁コイル磁束測定用コイル：0.3mm　28T　巻幅10mm　誘導電圧50.8mV）と200mmLVDT（励磁コイル：0.2mm　42T　巻幅10mm　励磁300mV　5kHz，励磁コイル磁束測定用コイル：0.3mm　29T　巻幅10mm　誘導電圧108.5mV）について示す。

表1　コア内磁束比

差動変圧器	励磁コイル全磁束 Φ_t（$\times 10^{-8}$ Wb）	励磁コイル空間磁束 Φ_a（$\times 10^{-8}$ Wb）	コア内磁束 Φ_c（$\times 10^{-8}$ Wb）	コア内磁束比 K（%）
100mm LVDT	9.23	6.49	2.74	29.7
200mm LVDT	16.85	13.65	3.20	19.0

2．コア内磁束のY方向分布

コア内磁束のY方向（励磁コイル軸方向）分布はコアの材質，形状，大きさ（断面積とY方向の長さ）によって異なる。コアを図4に示すように励磁コイルの中心にコアのY方向中心 Y_0 を一致させ，励磁コイルに直角に置いたとき，コア内磁束のY方向の基本的な分布は，コアの中央部 Y_0 が最大で両端部に向かって対称に減少するガウス分布状に近いものとなる。コアをX方向に移動させると斜めに巻いた検出コイルとコアY方向との相対位置が変わり，この相対位置に相当するコア内磁束が検出コイルに検出される。したがって，2本の検出コイルが切る磁束に比例して検出コイルに誘起される誘導電圧の差を位置検出に用いる。

表2に磁束検出用コイル(H)に誘起された誘導電圧と誘導電圧から計算によって求めたY方向コア内磁束密度を示す。

測定条件

励磁コイル（EC-1）：励磁電圧300mV，周波数5kHz

磁束検出用コイル(H)：線径0.1mm，巻数14T，巻幅1mm

表2　Y方向コア内磁束

コア中心からのY方向位置（mm）／磁束検出コイル誘導電圧	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
+方向誘導電圧（mV）	14.35	14.20	13.77	13.10	12.23	11.02	9.69	8.47	7.11	5.53	3.61	2.41	1.82	1.43	1.12
−方向誘導電圧（mV）		14.23	13.80	13.10	12.19	11.13	9.90	8.70	7.28	5.81	4.33	2.68	1.95	1.49	1.12
+方向コア内磁束密度（$\times 10^{-4}$T）	6.43	6.37	6.17	5.87	5.48	4.94	4.34	3.80	3.19	2.48	1.62	1.01	0.82	0.64	0.50
−方向コア内磁束密度（$\times 10^{-4}$T）		6.38	6.19	5.87	5.46	4.99	4.44	3.90	3.26	2.60	1.91	1.20	0.87	0.67	0.50

Ⅳ　検出コイルの位置決め

表2の±Y方向コア内磁束密度の値を用いて検出コイルの位置決めを行っている。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。

図4は励磁コイルに対する検出コイルの巻き位置とコアの位置関係を示したものである。今，コアを$-X_E$から$+X_E$までX方向に移動させれば，検出コイルd_1にはコイルHをコア上のY方向位置y_{L2}からコア上のY方向位置y_{R2}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をコア上のY方向位置y_{L1}からコア上のY方向位置y_{R1}に動かしたときと同様な磁束密度の変化が検出される。即ち，コアをX方向に移動させれば検出コイルには，コイルHをY方向に移動させたときと同様な磁束分布が検出されることになり，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る。これらのコア内磁束密度の差は，表2のY方向コア内磁束密度の値から計算によって求めることができる。

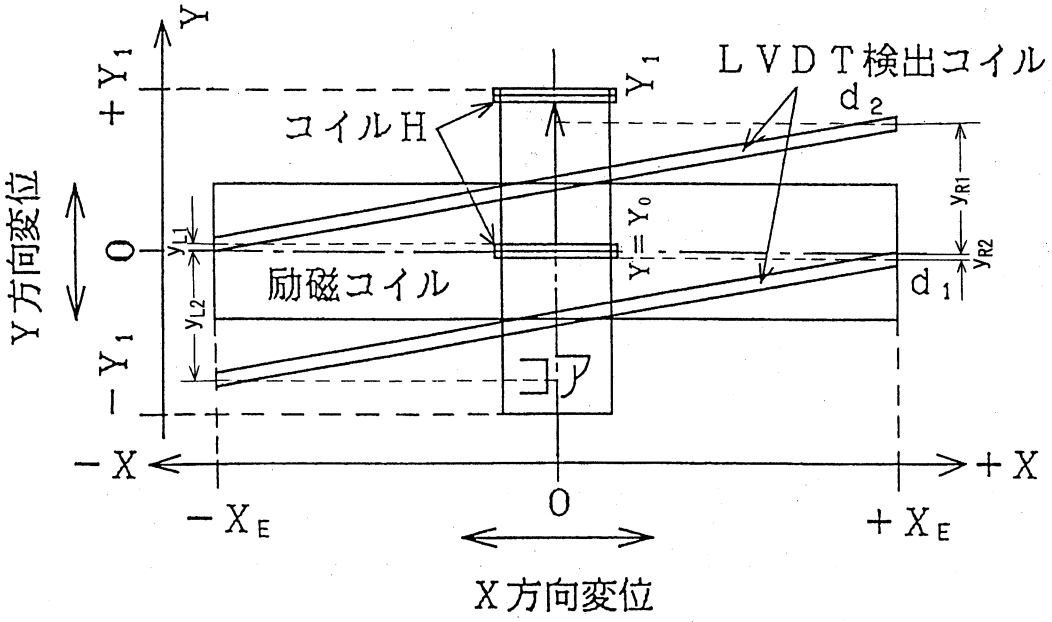

図4　検出コイルの巻き位置とコアの位置関係

図4の検出コイルの端部$+X_E$でそれぞれy_{R1}，y_{R2}の位置に，$-X_E$端でy_{L1}，y_{L2}の位置に検出コイルを巻いたとき，検出コイルの巻き位置を$y_{R1}-y_{R2}$と表示する。$y_{R1}=11$mm，$y_{R2}=2$ mmのとき，巻き位置は11－2と表示する。このとき$y_{L1}=2$ mm，$y_{L2}=11$mmとなる。

図5は，図4でコアをX方向の中心0から＋X方向に移動させたとき，検出コイルd_1，d_2に検出される磁束密度の差を各々の巻き位置について示したものである。図中のプロット点は表2から計算によって算出した値である。また，図の点線および実線は各プロット点から求めた一次回帰直線である。この回帰直線を磁束密度検出直線と呼ぶことにする。

磁束密度検出直線から適した検出コイルの巻き位置を決める。適した検出コイルの巻き位置は，磁束密度検出直線の中でプロットが直線状に並んでいる範囲内で，かつ最も高い磁束密度を与えるプロット点である。プロットのばらつきは磁束密度検出直線の推定の標準誤差で判断する。図5は検出コイルの各巻き位置に対する磁束密度検出直線である。また，図中に印した11—0，11—1，11—2の3箇所の巻き位置に対して，それぞれマークを塗りつぶした点までに位置するプロットから求めた一次回帰直線の推定の標準誤差を表3に示す。

図5および表3から検出コイルの適した巻き位置は11―0と判断される。したがって，11―0の位置に検出コイルを巻いて差動検出電圧を測定した。なお，比較のため他の11―1，11―2の位置にも検出コイルを巻いて差動検出電圧を測定した。

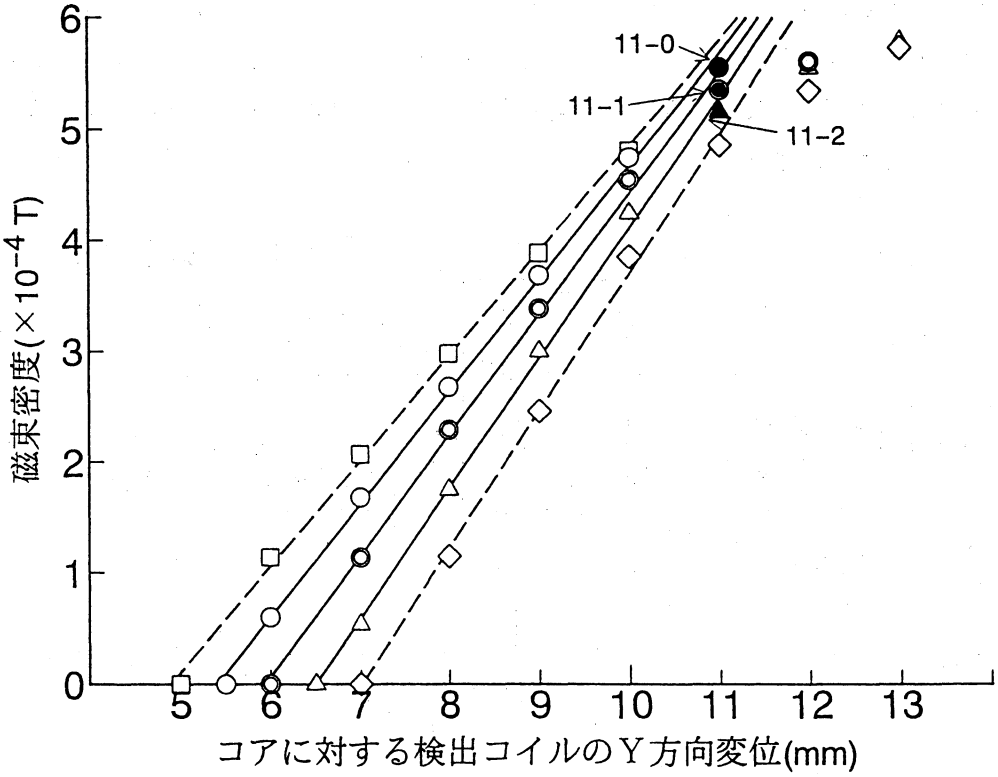

図5　磁束密度検出直線

V　位置検出特性

1．差動検出電圧

今回試作した200mmLVDTの差動検出電圧を図6に示す。検出コイルの位置は11―0で，図中の○印のプロットはコアのX方向変位に対する差動検出電圧の実測値であり，直線は実測値から最小二乗法によって求めた一次回帰直線で，直線性や誤差計算に用いる理論値としている。なお，位置の測定は読み取り顕微鏡で行っている。差動検出電圧は交流で変位Xが正のときと負のときは逆相の電圧である。また，変位Xの正負方向でほぼ対称であり，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±100mmの点では検出電圧が大きくなり，他の位置の変位と検出電圧の比例関係（V/mm）とのずれが大きくなっている。200mmLVDTの差動検出電圧の動向は100mmLVDT差動検出電圧の動向とほぼ同じである。図6の●印のプロットはLVDTの位置検出特性を検討する目的で，図の－X変位の差動検出電圧を負の直流電圧と仮定してプロットしたものである。また，＋X変位の差動検出電圧は正の直流電圧に仮定して考える。この－X変位の負の電

圧と＋X変位の正の電圧を位置検出電圧として，位置検出特性を検討するのに利用している。

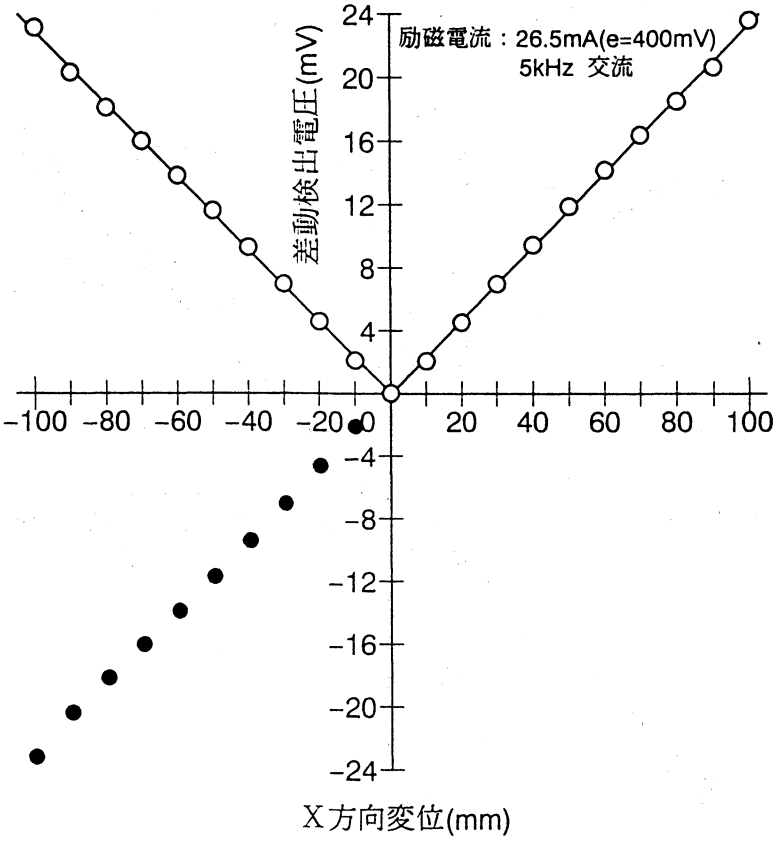

図6　差動検出電圧

2．位置検出電圧特性

LVDT の位置検出電圧は図6の○印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。同期検波回路は入力信号の振幅と位相の情報を持った出力信号を得ることができる。即ち，同期検波の動作を正しく行えば，Xの変位が＋側であれば正，－側であれば負の，差動検出電圧に比例した直流電圧に変えることができる。このことは100mmLVDT で確認しているので，今回は－X側の差動検出電圧を負の直流電圧，＋X側の差動検出電圧を正の直流電圧に置き換えて位置検出電圧とした。

図7に200mmLVDT の位置検出電圧特性を示す。図中のX方向変位に対する各点のプロット（○と◎の印）は上記の位置検出電圧であり，直線は位置検出電圧から最小二乗法によって求めた一次回帰直線で，直線性や誤差計算に用いる理論値としている。また，表3に検出コイルの位置を評価する磁束密度検出直線と差動検出電圧を評価する位置検出電圧特性のそれぞれ実測値と計算値を示している。表の磁束密度検出直線から検出コイル位置は11―0がよく，また位置検出電圧特性から最大電圧，最大誤差は検出コイル位置11―0がよい。なお，平均誤差，推定の標準誤差には大きな違いはみられないが，総合すると位置検出電圧特性は11―0がよい。このことから適した検出コイルの位置を磁束密度検出直線を基に判断してよいといえる。しかし，磁束密度検出直線と位置検出

電圧特性の間にはも少し顕著な関係があるものと思っていたが，最大磁束密度と最大電圧の関係を除いて，他にもっと有効な関連性は見られなかった。この点に関しては今後も検討を続けたい。

位置検出電圧特性の最大電圧に限っても，検出コイル位置11—0が大きいので，その分位置検出の精度と感度も良くなる。

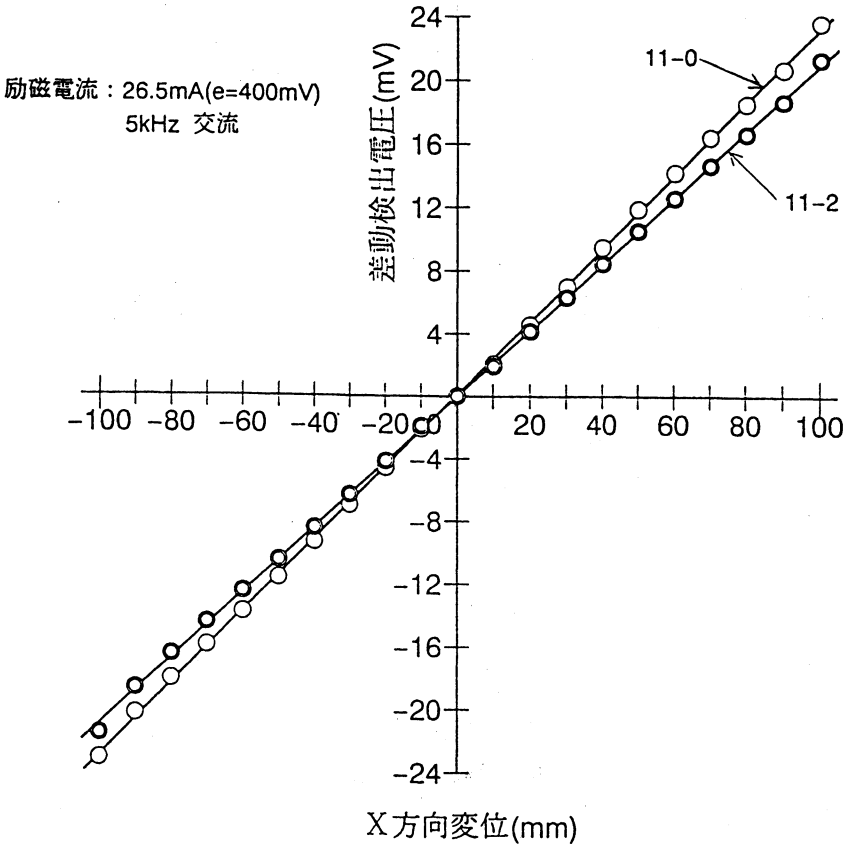

図7　位置検出電圧特性

表3　検出コイル位置と位置検出電圧特性

	磁束密度検出直線		位置検出電圧特性			
検出コイル位置	最大磁束密度(T)	標準誤差	最大電圧(mV)	最大誤差(%)	平均誤差(%)	標準誤差
11－0	5.56	0.0533	23.24	0.83	0.17	0.2009
11－1	5.36	0.1108	21.26	1.49	0.16	0.2349
11－2	5.16	0.1175	20.97	1.42	0.13	0.2003

図8に各検出コイルについて，X方向変位に対する直線誤差のばらつきを示す。図中の11—0，11—1，11—2は検出コイルの巻き位置である。

200mmLVDTの位置検出電圧特性の直線誤差の大きいものを順に3点示すと，検出コイル位置11—0では0.83%（−90），0.77%（100），0.76%（10），検出コイル位置11—1では−1.49%（−100），−0.94%（90），0.83%（−10），検出コイル位置11—2では−1.42%（−100），0.79%（100），

0.59（−80）である。括弧内の数値は誤差点のX方向の位置である。いずれも誤差の大きい点はLVDTのストロークの両端に集中しており，この点の誤差を減少させることが必要とされる。

コアを2個使用した100mmLVDTの位置検出特性の最大誤差0.48%，平均誤差0.19%に対し，検出コイル位置11—0の200mmLVDTでは位置検出電圧特性の最大誤差0.83%，平均誤差0.17%である。200mmLVDTも100mmLVDTと同程度の誤差で位置検出ができる。

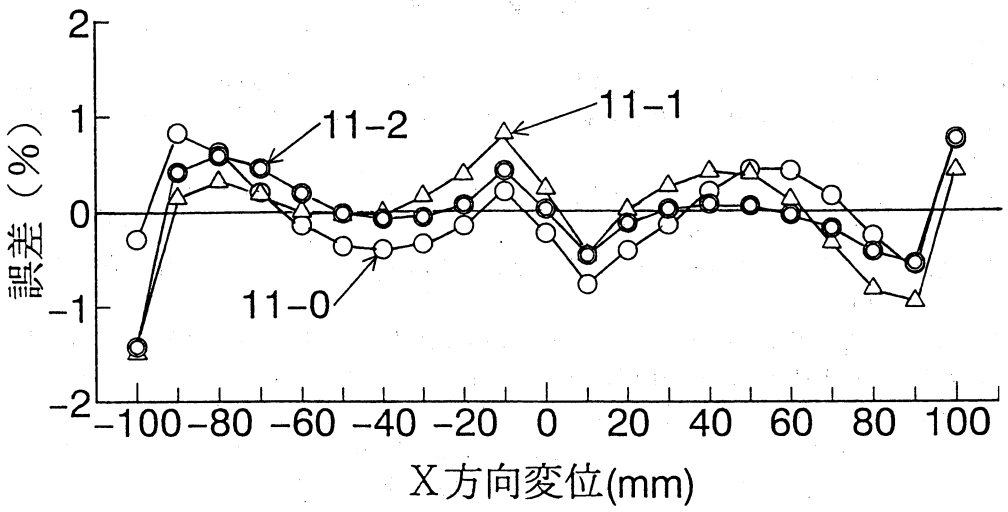

図8　位置検出電圧の誤差分布

Ⅵ　ま　と　め

差動変圧器の長ストローク化の研究の一貫として200mm方形差動変圧器を試作し，位置検出特性を検討した。方形差動変圧器では検出コイルの位置が位置検出の精度と感度に大きく影響する。

200mmLVDTにおいても，検出コイルの位置決めについて詳細に検討を加えた結果，適した検出コイルの位置は磁束密度検出直線から求められることが判明した。また，方形差動変圧器のストロークを長くしても位置検出特性の低下はみられず，200mmの直線範囲でも良好な位置検出特性が得られ，高精度大変位の位置検出が可能なことが確認された。

方形差動変圧器の開発はまだ緒の段階で，検出コイルの位置と同様位置検出の精度と感度に大きく影響を及ぼすコアの材質・形状・大きさ（断面積と長さ）・使用個数の問題，LVDTの全体的な大きさや形状，位置検出特性の改善などまだ多くの問題が残されている。現在，コアと位置検出特性の関連について研究を進めている。

200mm方形差動変圧器についてまとめると

- 適した検出コイルの巻き位置は，コア内磁束分布から導出された磁束密度検出直線を利用して決められる。
- 適した検出コイルの y_{R1}，y_{L2} の位置はコアのY方向長さと密接な関係があり，ほぼ $y_{R1}=y_{L2}=$ コアの長さ×1/2となる。

- 方形差動変圧器のストロークを長くしても位置検出特性の大きな低下は生じない。
- 200mmLVDT の位置検出電圧特性の直線誤差は，最大誤差0.83%，平均誤差0.17%で，100mmLVDT と大きな差異はなかった。
- 200mmLVDT の位置検出電圧特性は良好なものが得られた。

参 考 文 献

1）鹿野・宮路・花岡：「差動変圧器の長ストローク化の研究」，電学産業応用全大，pp. 925（1989）
2）鹿野・宮路・長谷部・花岡：「方形差動変圧器による大変位の位置検出」，電学論D. 110-D，No. 2 pp. 192-193（1990）
3）宮路・鹿野・長谷部・花岡：「斜め巻き検出コイルによる長ストローク差動変圧器」，電気学会リニアドライブ研資，LD-90-8-17　pp. 83-92（1990）
4）宮路・鹿野：「差動変圧器の長ストローク化と大変位の位置検出」，鹿児島大学教育学部紀要，第41巻 pp. 47-61（1990）
5）Y. KANO, S. HASEVE & H. MIYAJI : "NEW LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER WITH SQUARE COILS", IEEE Trans.,26 No. 5　pp. 2020-2022（1990）
6）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」，電気学会，p. 3，p. 65-67（1984）
7）山田　一：「産業用リニアモータ」，工業調査会，p. 2（1985）
8）山田　一：「リニアモータ応用ハンドブック」，工業調査会，p. 10（1986）