

相互誘導形角変位変換器の工業計測への応用

山 田 一*

(昭和44年5月28日受理)

1. ま え が き

本変換器は、差動変圧器のもつ各種の利点をそのまま受け継いでいるが、その主な特長をあげれば次の通りである。

- (1) 構造が簡単であり、高精度の角変位測定ができる。
- (2) 測定力が小さく、かつ感度が高い。
- (3) 測定範囲が比較的広い。

本変換器の工業計測への応用には、各種の方式がある。ここでは、微小角の検出を利用したものとして電気天びんの応用について考察し、さらに角変位・直線変位変換を利用した移動体の寸法測定および可変空隙計測への応用について述べる。

2. 差動変圧器などとの比較¹⁾

一つのトランスジューサを他のトランスジューサと比較することは、必ずしも容易ではない。それは、動作原理がたとえ同一な変換器についても、基準とする比較因子によってその特性が大いに異なったものとなるからである。

2.1 差動変圧器との比較

従来からある差動変圧器を直線形差動変圧器(Linear Differential Transformer, LDT)と称するならば、本変換器は角度形差動変圧器(Angular Differential Transformer, ADT)とよぶこともできる。両者は、互いに相互誘導作用を利用したものであるが、測定対象が異なるためにその比較は簡単にはできない。しかし、原理的な比較を行うと、第1表のようになる。第1表から、それぞれの変換器を計測対象によって使い分けることによって、プロセス計装化がより適切に行えることがわかる。

2.2 マイクロシンとの比較

相互誘導作用を利用した角変位トランスジューサには、この他にマイクロシンがある。マイクロシンの直線性は、固定子と回転子形状の加工精度に大きく依存し、その構造から直線範囲は 22.5° 以内(実際には $5\sim 7^\circ$ 以内)に制約される。さらに工作がきわめて困難なことも欠点になっている。その点、本変換器は、測定範囲も広く、最小測角も $10''$ であり、製作・構造が簡単である。

* 電気工学教室助教授

第1表 LDT との主な相違点

		L D T (直線形差動変圧器)	A D T (角度形差動変圧器)
構造	巻線	直線状ソレノイド	半環状ソレノイド
	磁心	棒状 断面：円形	半環状または円弧状 断面：円形，または正方形
理論	変換理論	動作原理が同一であり，理論的には共通性がある。 したがって，簡単な変数変換 ($x = r\theta$, $l_m = r\theta_m$) を行うだけで互いに適用できる。	
	直線範囲	$C = 0.7$ であるから $\gamma = 1$ のときの直線範囲 $x_0/l_m = 17\%$ である	$C = 0.6$ であり $\gamma = 1$ のときの直線範囲 $\theta_0/\theta_m = 25.5\%$ となり，LDT よりも広い
応用	計測対象	主として直線変位—電圧変換に用いられる	主として角変位—電圧変換に用いられる
	測定範囲	微小直線変位 ($1\mu\text{m}$ 程度) の測定に適するが実用的な最大測長は $\pm 100\text{mm}$	微小角変位 ($10''$ 程度) の測定に適するが，実用的な測角は $\pm 50^\circ$
製作		比較的簡単	巻線工程が LDT に比べ比較的是ん雑

3. 試料質量の時間的変化の計測

これは角変位検出それ自身を利用したもっとも素朴な応用例である。すでに差動変圧器は，コンスタント・フィード・ウェアの計量かんの傾角検出や天秤の傾角検出などに採用されている。しかし，これらの用途にはそれぞれ次のような欠点がある。

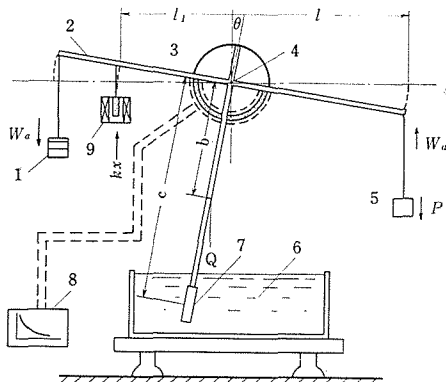
(1) 差動変圧器の磁心は，さおの傾きによって円弧状に変位し，磁心の偏心による誤差を生ずる。

(2) また角変位が大きくなると，磁心がコイルに接触するので角変位が大きくとれない。

(3) さらに傾角を直線変位で検出しているために，原理上誤差が入る（簡単な計算から角変位 6° で 0.2% ， 11° で 0.7% の誤差が生ずる）。

本変換器を傾斜てこの傾角検出器として利用し，電気天秤とした例を第1図に示した。

まず差動変圧器の磁心をてこにつけたときの感度について解析してみよう。試料質



第1図 電気天秤の構造

量が P だけ変化したときこの運動方程式は、次式で与えられる。

$$Pl \cos \theta - 2Wal \cos \theta - kx l_1 \cos \theta - Qb \sin \theta - k_1 v c - A\dot{\theta} - I\ddot{\theta} = 0. \quad (1)$$

ここに、 P ：試料質量の変化分、 l ：支点から試料、または基準荷重までの長さ、 Wa ：基準荷重と試料の慣性力、 kx ：差動変圧器磁心の抵抗力 (k ：係数、 x ：磁心の変位)、 l_1 ：支点から差動変圧器磁心までの長さ、 $k_1 v$ ：ダンパの抵抗力 (k_1 ：係数、 v ：ダンパの変位速度)、 c ：支点からダンパまでの長さ、 $A\dot{\theta}$ ：支点での摩擦力、 $I\ddot{\theta}$ ：さおの傾斜によって生ずる慣性モーメント、 Q ：さおの質量。

天秤の感度については種々の定義があるが、定常状態では (1) 式中の第 2, 5, 6, 7 項が無視できるので、差動変圧器による天秤の感度は、

$$S_D = \frac{x}{P} = \frac{l_1 l}{k_1 l_1^2 + Qb}, \quad (2)$$

となる。 l_1 を増加させると感度を高くすることはできるが、 l_1 の増加は前述の理由で制限されている。

つぎに、本変換器による感度 S_A は、(1) 式中の第 3 項が存在しないから

$$S_A = \frac{Q}{P} = \frac{l}{Qb}, \quad (3)$$

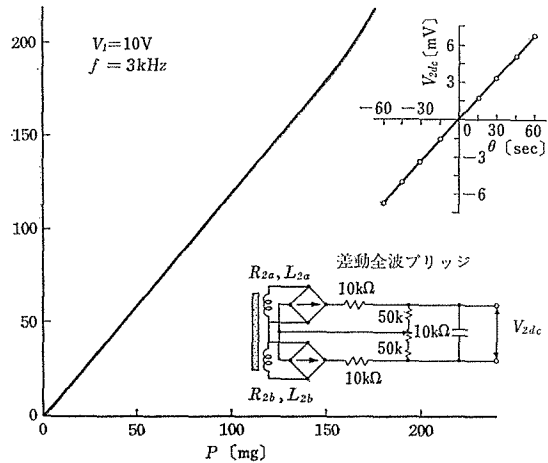
となり、この長さ l とその質量 Q のみに関係し、他の定数の影響を受けないので感度の直線性は、LDT とくらべて一段と改善される。

LDT を用いて試料質量の時間的変化を測定した例が報告されているが、直線性はあまりよくない。

本変換器 (第 2 表) を用いて電気天秤を構成させると、試料質量の時間的変化が簡単、か

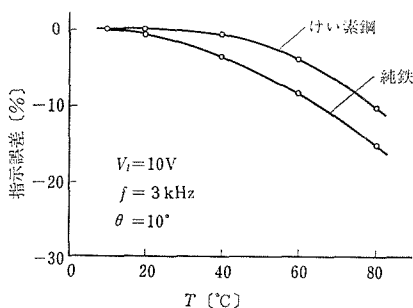
第 2 表 電気天秤用角変位変換器の寸法 (ADT-40-3B)

記号	[単 位]	寸 法
θ_c	[deg]	120
r	[mm]	32.5
θ_m	[deg]	180
N_1	[回]	300
$2N_2$	[回]	2 × 1200
R_1	[Ω]	18.1
R_{2a}, R_{2b}	[Ω]	80.8, 87.2
L_1	[mH]	7.18
L_{2a}, L_{2b}	[mH]	59.3, 69.9



第 2 図 電気天秤の出力特性

つ高精度で測定できる。吸引力の影響を小さくするため 120° 磁心が用いられ、直線範囲を拡大するために三段形巻線構造とした。電気天秤の出力側は、第2図に示すように全波整流方式として、秤量 $P = 150\text{mg}$ まで直線性があり、秤量感度は 1.2mV/mg である。これらの値は、従来の結果と比較していちじるしく改善された。

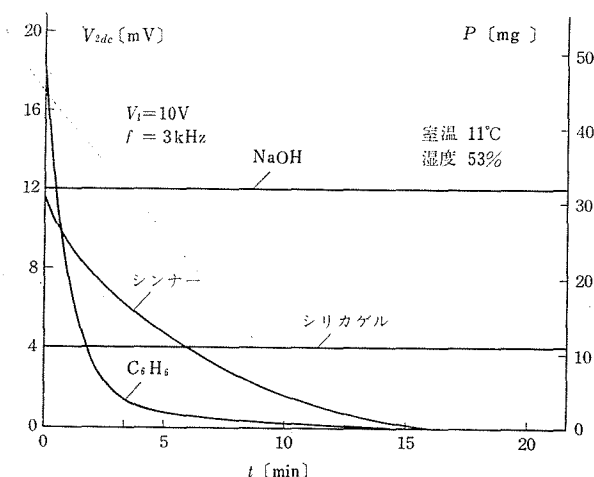


第3図 温度特性

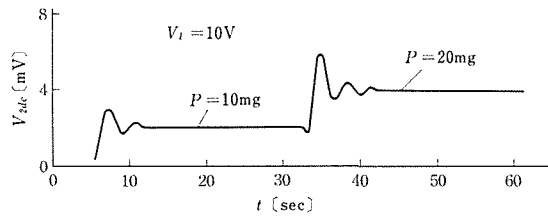
天秤のナイフ・エッジの位置変化によって磁心に偏心が与えられたときの出力電圧は、通常の動作状態 (0.25° の変化) では変化が認められない。このことは、この程度の角位変化では、磁心軸上の磁束分布が変化しないことを意味している。しかし、角変位がさらに大きくなり $\pm 5^\circ$ くらいになると、偏心によって磁束分布の形状が異なり、出力電圧に1%以上の変化(偏差)を生ずることを実験からたしかめられている。

本変換器を天秤などのトランスジューサとして用いた場合、温度特性が良好であることが望まれる。本変換器を変温速度 5°C/hr の条件で実測した温度特性を第3図に示した。けい素鋼磁心では、変温 $15\sim 40^\circ\text{C}$ では指示誤差0.01%以内である。

揮発性試料 (C_6H_6 , シンナー) および吸湿性試料 (NaOH , シリカゲル) の時間的な変化の実測例を第4図に示した。本電気天秤を用いると、揮発性試料は沸点 ($50\sim 70^\circ\text{C}$) に依存して、また吸湿性試料は吸湿率の相違に依存して変化する様相を簡便に知ることができる。電気天秤の過渡特性を第5図に示した。試料質量によってその制動時間は異なるが、ほぼ $10\sim 15\text{sec}$ であり、現在は実験の便宜上油制動であるが、空気制動を利用すればこの時間はかなり短縮できよう。



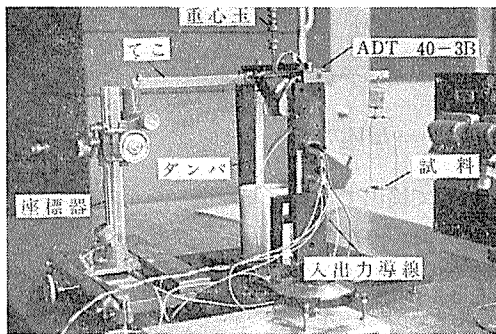
第4図 試料質量の時間的な変化



第5図 電気天びんの過渡特性

第3表 電気天びんの仕様

一次電圧	V_1 [V]	10
周波数	f [kHz]	3
測角範囲	θ_0 [deg]	± 30
直線性	ε [%]	± 1
電圧感度	S_V [mV/deg]	420
ひょう量感度	S_P [mV/mg]	1.2
最小ひょう量	P_{min} [mg]	1
最大ひょう量	P_{max} [kg]	1
磁心重量	W_c [g]	120
さおの長さ(試料)	l [mm]	200



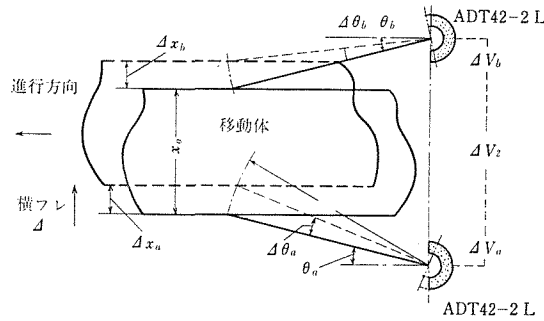
第6図 電気天びん

試作した電気天秤の仕様を示すと、第3表のようになる。本変換器は、構造がきわめて簡単でありながらも高精度の角変位検出ができ、LDTによる測定例をADTに置換えることによって改善されうる分野を多く有している。上述した例のほかに、傾斜計としての用途がある。船舶のローリング（あるいはピッチング）、石油坑井の掘削傾度、さらに粉体輸送の検出機構などへの応用がある。第6図に、試作天秤の

構造を示した。

4. 横ブレのある移動体の寸法偏差の計測

移動体（たとえば、インゴット、鉄板など）が進行方向に横ブレをもちながら運動しているとき、横ブレに関係なく所定の基準寸法からの偏差を測定、記録したい要求がある。この寸法偏差の測定は従来から差動変圧器を用いて行なわれているが、スピンドル型のものでも横ブレを大きくとれず、通常の差動変圧器では移動体の進行方向に磁心が垂直に置かれるため測定がむづかしい。^{10,11)}



第7図 移動体の寸法偏定の測定

同一特性をもつ2台の本変換器 (ADT 42-2K, 42-2L) を第7図に示すように配置すると次の原理で上の測定が容易に行える。

まず、第7図中で移動体が左方向に横フレを起しながら進行した場合、その各辺のフレ x_a , x_b は、

$$x_a = l_a \{ \sin(\theta_a + \Delta\theta_a) - \sin \theta_a \}, \quad (4)$$

$$x_b = l_b \{ \sin(-\theta_b) - \sin(-\theta_b + \Delta\theta_b) \}, \quad (5)$$

となる。いま、測定子の長さを $l_a = l_b = l$ とし、 $\theta_a = \theta_b = \pi/2$ に設定すると、

$$x_a - x_b = l(\sin \Delta\theta_a - \sin \Delta\theta_b). \quad (6)$$

所定の基準寸法 x_0 に対する偏差を δ とすれば、

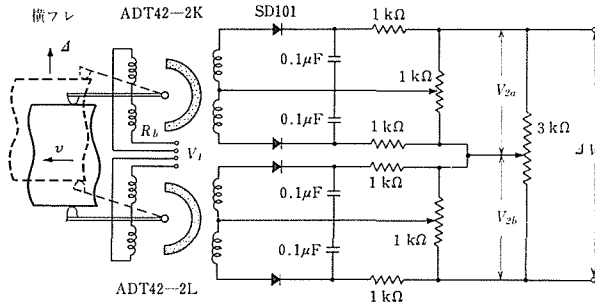
$$\delta = x_a - x_b \simeq l(\Delta V_a - \Delta V_b)/S = l\Delta V_2/S, \quad (7)$$

となり、偏差 δ は二変換器の各出力の差に比例して検出できることになる。測定子の偏角 $\Delta\theta_a$ と $\Delta\theta_b$ があまり大きくなると当然誤差が生じてくるが、この程度の誤差が無視できる範囲では測定力が小さく、機構上差動変圧器のような無理が生じないために偏差測定はきわめて簡便に行なえる利点がある。この実験を行うために第4表に示すほぼ同一な特性を有する二変換器を試作した。振動変位の影響の除去と記録の容易さから当初出力側に全波整流方式を採用したが、ゆらぎ電圧が 0.2mV/hr あった。これは主としてダイオードの特性不一致とそれらの熱雑音によるもので、半波整流方式にしてゆらぎ電圧は、 0.05mV/hr におさえることができた。したがって、以下の実験は感度を若干犠牲にしてもゆらぎ電圧をおさえるために半波整流方式を採用している。

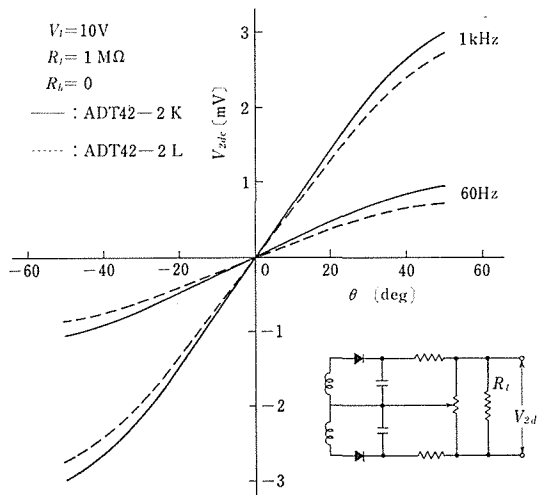
第8図に半波整流方式による二変換器の直流出力回路を示した。変換器の測定子は移動体の進行方向に対して水平位置におかれ、二変換器の出力電圧は半波整流して抵抗 $1\text{k}\Omega$ で零点調整をそれぞれ行い、その後移動体の基準寸法にあわせて差電圧 ΔV_2 を零になるように $3\text{k}\Omega$ を用いてセットする。移動体の幅寸法の基準寸法からの偏差のみが ΔV_2 として指示、記録される。

第4表 角変位変換器の寸法
(ADT 42-2K, 42-2L)

記号	単位	ADT 42-2K	ADT 42-2L
θ_c	deg	180	180
r	mm	32.5	32.5
$2N_1$	回	2×190	2×190
$2N_2$	回	2×800	2×800
R_1	Ω	8.0	7.7
R_2	Ω	36.9	36.3
L_1	mH	8.2	7.5
L_2	mH	49.1	47.5



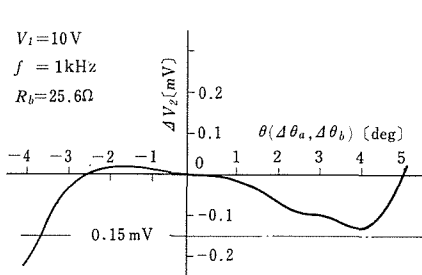
第8図 横ブレ(D)をもつ移動体の寸法偏差の測定回路



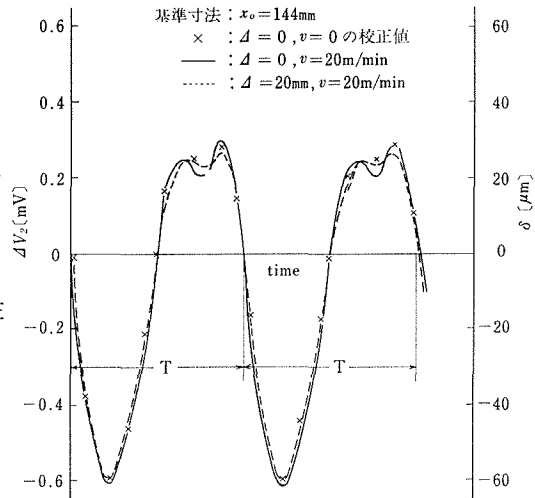
第9図 角変位変換器の直流出力特性

これら二変換器 (ADT42-2K, ADT42-2L) の直流半波出力特性を第9図に示した. 実験条件は, $V_1 = 10V$, $f = 60\text{Hz}$ と 1kHz , $R_l = 1M\Omega$ であり, 各変換器は慎重に試作したにも拘らず一致した特性がえられていない. これらの両特性を一致させるために第8図の変換器 (ADT42-2K) の一次側に平衡抵抗 R_b を挿入した結果, 両特性をほぼ一致させることができた. R_b の値は負荷抵抗 R_l によって多少異なるが, 本実験の場合は, $R_b = 25.6\Omega$ でよく, そのときの変換器の電圧感度は $0.6/10\text{ V/deg} = 60\text{ mV/deg}$ ($V_1 = 10V$) であった. また各変換器の負荷特性は, $f = 1\text{kHz}$ の半波整流で $R_l = 1k\Omega \sim 5M\Omega$ の範囲においてほぼ平坦とみなすことができた.

所定の寸法をもつ静止している物体の両面を二変換器の測定子ではさみ, その接触面と直角方向 (第8図の d 方向) に変位を与えたとき測定子の偏角 θ と差電圧 ΔV_2 の関係を第10図に示した. この特性は $R_b = 25.6\Omega$ として両変換器の特性を一致させてえられたものであり, 偏角 $\theta = -4 \sim +5^\circ$ の範囲において ΔV_2 は 0.15 mV 以下である. $\theta = 4\text{deg}$ においては $V_{2dc} = 60 \times 4 = 240\text{mV}$ であるから $\Delta V_2 = 0.15\text{mV}$ は 0.063% に対応する. したがって, $\theta = 1^\circ$ に両測定子の零点を設定すれば $\theta = \pm 4^\circ$ の偏差を 0.063% 以下の誤差で物体の寸法偏差を測定することができる.



第10図 偏角 θ に依存する二変換器の差電圧



第11図 横ブレのある移動体の寸法偏差の変化

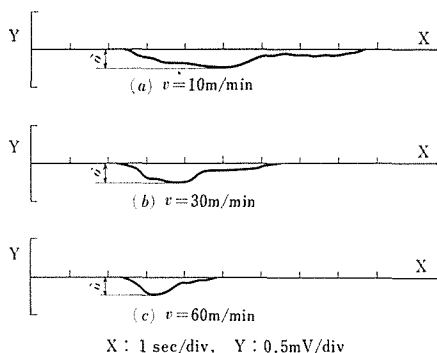
横ブレ d をもちながら速度 v で進行する移動体の標準寸法 x_0 からの偏差 δ を実測した結果を第11図に示した. 変換器の実験条件は第8図に示したものと同一値である. 第11図の実線は, 横ブレがなく移動速度のみを与えた場合 ($D = 0, v = 20\text{ m/min}$) であり, 鎖線は横ブレをもち, かつ移動速度も与えた場合 ($D = 20\text{mm}, v = 20\text{m/min}$) であり, ともに X-Yレコーダによる記録値である. 同図中 X印は, 静止状態 ($D = 0, v = 0$) のときの電気マイクロメータによって測定された校正値である. 実測値は校正値とほぼよい近似を

示し、横ブレや移動速度の影響を受けることが少く標準寸法からの偏差 $\delta = -60 \sim +30 \mu\text{m}$ を測定できる。

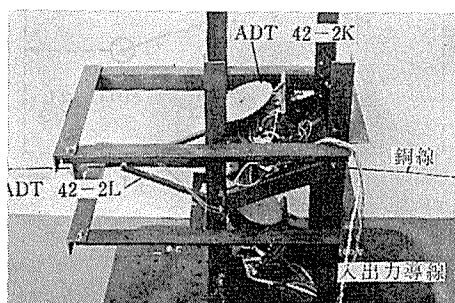
測定子の長さは、217mmであり、測定子の接触点の偏角 θ による誤差が生ずる。接触点には直径 3.5mm の鋼球を利用しているが、 $\theta = \pm 4^\circ$ の範囲における接触点の移動による指示誤差は 0.1% 以下であった。¹²⁾

前述の応用例は基準寸法 ($x_0 > 100\text{mm}$) が比較的大きな場合であったが、 x_0 がさらに小さくても上の測定原理を適用して基準寸法からの偏差 δ を測定することができる。

現在、鋼線メーカーではしん線にエナメルまたはホルマル等の絶縁外被をほどこした後の線径測定は、適当な線径測定器がないため熟練者の操るマイクロメータによって検査されている。したがって、線速のアップが検査過程によって制約され、絶縁外被の付着プロセスへのフィード・バックも遅い。前例に用いた測定子の接触点を線径を測定しやすいナイフ・エッジ構造にしたものを用いることによって銅線の世界 v を変数として基準値 x_0 からの偏差 δ を測定記録した実測例を第12図に示した。偏差は人為的に与えたものであるが、 $\pm 5 \text{ mm}$ の微小振動をもつ線速に関係なく一定値 $30 \mu\text{m}$ を示している。



第12図 銅線線径 (0.35mm) の偏差測定



第13図 2ADT による銅線の線径測定実施例

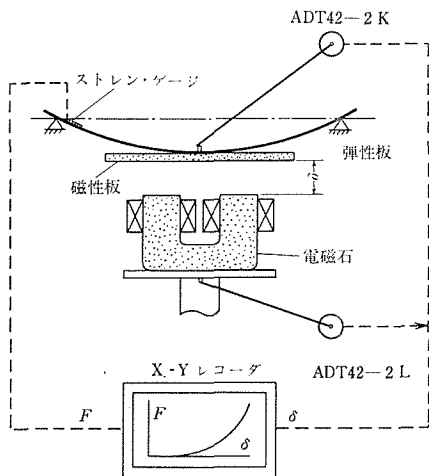
第5表 寸法測定の仕事

項目	規格
測定範囲	基準寸法 (x_0) = 0.1 ~ 200 mm 偏差 (δ) = 10 μm ~ 20 mm
指示誤差	0.5% 以下
測定力	10 g
測定子の長さ	217 mm
測定子の追従性	30 ms
電源	10 V, 1 kHz
使用温度	0 ~ 40°C

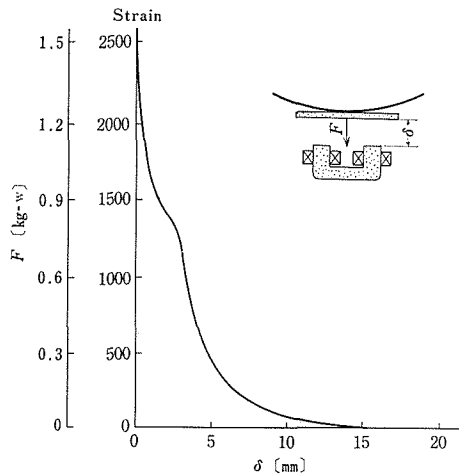
このように本変換器を用いた測定系は装置構成がきわめて簡単でありながら、走間厚み計として十分に高い精度を有している。最近、各種の厚み計が開発されているが、本変換器を用いることによって小さい測定力で横ブレや移動速度に関係なく基準寸法からの偏差を測定できる。実験結果からえられた偏差測定の仕様をまとめて第5表に示し、第13図には2ADTを用いた銅線線径の測定実施例を示した。

5. 可変空隙の測定

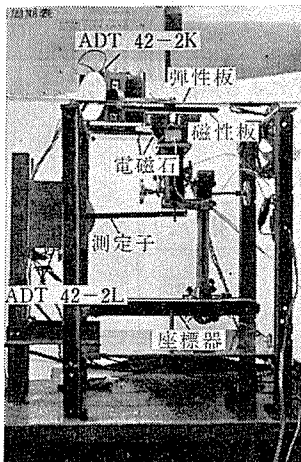
現在、製品あるいは半製品の運搬、選別、溶接系に電磁石が多量に用いられ、その“吸着力”の利用が主流をなしている。しかし、“吸引力”の利用も盛んになりつつあり、そ



第14図 磁気吸引力自動測定装置



第15図 直流電磁石の吸引力・空隙特性



第16図 2ADT による可変空隙の測定例

の物理的な構造の解析上まだ未解決の問題が数多くある。筆者はすでに吸引力の自動測定記録装置を試作して一応の成果をあげているが、吸引力の解析において空隙距離の測定はきわめて重要な意味をもっている。

第14図に吸引力の自動測定装置を示したが、電磁石平面と磁性板間の空隙 δ は、数 10mm から数 μm の変化をし、測定範囲が広く、かつ精度の高いことが要求され、現時点でこの δ の測定に供すべき適当な変換器がなかった。この測定のむつかしさは、電磁石側が比較的大きな変位をするのに対して、磁性板は比較的小さい変位しか与えられない点にある。この空隙 δ の測定に当初の試作装置においては差動変圧器を用いたが、吸着直前に生ずる過渡状態による振動の影響が防止しにくかった。第4図に

示すような本角変位変換器を2台用い、前述の二例と同一な測定原理に基づいて吸引力 F と空隙 δ との特性をX-Yレコーダによって実測した結果を第15図に示した。

本変換器を用いたときは、測定力が小さくてすみ、かつ差動変圧器のように磁心の重量による振動の影響をうけにくいために、過渡時の特性も精確に測定できる。第16図には2ADTを用いた可変空隙の測定実施例を示した。

6. む す び

誘導形角変位変換器は、その製造にあたって巻線工程で差動変圧器より若干面倒である点は否定できない。しかし、本変換器は差動変圧器の一変種として大いに発展し得る可能性がある。現段階では精度は我々の技術で10"台であるが、近い将来1"以上の精度になり得る余地を残している。

本研究では、本変換器の代表的な応用例について述べたが、この他に粉体輸送時の重量連続測定、比重の高精度連続測定、ターンテーブル・チェッカ、歯車研削盤の同期信号発生器等の応用分野がある。

文 献

- 1) 山田：電気学会雑誌，Vol. 85-7，No. 922，1208（昭40）
- 2) 永田：オートメーション，Vol. 8，No. 13，19（1963）
- 3) 久保・四宮：第26回応物論文集，1P-K-7（1965）
- 4) 猪野：計測，Vol. 11，No. 10，604（昭36）
- 5) L. B. Macurdy：Inst. & Cont. Sys.，Vol. 38，Sept.，127（1965）
- 6) 高橋：重量（上），コロナ社，24（昭36）
- 7) Б. М. Гершковни，Н. В. Чепик и А. Ф. Бобков：Измерительная техника，No. 12，64（1965）
- 8) 山田・神原・片山：昭42電気東海支部連大，3a-D-11
- 9) Г. Ф. Быховец，С. И. Хмыз и Л. А. Шаблий：Измерительная техника，No. 9，16（1964）
- 10) А. И. Иоффе：Измерительная техника. No. 11，62（1966）
- 11) Ю. Я. Востриков：Измерительная техника，No. 3，19（1966）
- 12) С. Г. Фатеев：Измерительная техника，No. 8，24（1964）
- 13) 安立電気，計測と制御，Vol. 7，No. 2，134（1968）
- 14) 山田・太田：昭43電気4連大，729

Summary

Application of Mutual Induction Angular Displacement Transducer to Industrial Instrumentation

Hajime YAMADA

This angular displacement transducer has following advantages.

- (1) It has a simple construction and high accuracy to an angular displacement measurement.
- (2) The measuring force is small, and it has a high sensitivity.
- (3) It has comparatively wide measuring range.

In this paper, the application of this transducer to the detecting mechanism of an electrical balance and measurement of dimension deviation of a moving body on production line system, and the variable gap detection of dc electro-magnet are described.