

## うず電流制御による速度計の直線性の改善

田中章雄\*<sup>1</sup> 石田浩一\*<sup>2</sup> 武平信夫\*<sup>2</sup> 三木俊克\*<sup>3</sup>

### Improvement of the Linearity of an Eddy Current Speedometer by Controlling the Eddy Current

Akio TANAKA\*<sup>1</sup>, Kouichi ISHIDA\*<sup>2</sup>,  
Nobuo TAKEHIRA\*<sup>2</sup> and Toshikatu MIKI\*<sup>3</sup>

#### Abstract

The eddy current method is known for measuring, without contacting the object, the speed of a sheet conductor moving at a high speed. The eddy current speedometer consists of an exciting coil and detecting coils in difference connection. If a commercial power source can be used as the exciting oscillator, a special oscillator will no longer be needed with the structure of a speedometer being simplified.

However, if the conductor under consideration is thick and highly conductive, a good linearity cannot be obtained even with a low exciting frequency. Therefore, a coil system having a second exciting coil has been proposed and theoretically analyzed.

Simultaneously, its excellent linearity has been experimentally confirmed. Further, based on the examination by mathematical calculation of the configuration of the coil system and the sheet conductor, their dimensions and materials, a design guide for the proposed coil system has been presented. It has been shown that a second exciting coil can control eddy current and consequently an effect can be obtained which is similar to the linearity improvement of a negative feedback amplifier. This effect can be applied to other types of eddy current sensor.

**Key Words :** Eddy Current Speedometer, Sheet Conductor, Linearity Improvement, Two Exciting Coils

#### 1. まえがき

高速で移動中の平板状導体の速度を、非接触状態で測定する方法として、うず電流法<sup>(1)(2)(3)(4)(7)(8)</sup>が提案されている。測定方法は導体の片側に励磁コイルを配置し、導体に対して励磁コイルと同じ側、または反対側に差動接続された検出コイルを配置して構成される。このうず電流速度計は一種の差動変圧器であって、励磁コイルは1次コイルに、検出コイルは2次コイルに、そして移動導体は可動鉄心に相当する。差動変圧器においては励磁用発振器として、しばしば商用周波数電源が用いられる<sup>(5)</sup>。商用周波数電源を速度計の励磁用発振器として利用することが可能であれば、

特別な発振器は不要となり、測定装置は簡易な構成となる。

一般に、励磁周波数が商用周波数のように低い場合、対象導体が非磁性で薄いときは直線性は良好である。一方、導体が十分厚いときは低導電率において直線性は良いが、高導電率になると文献(1)に示すように満足のゆくものが得られていない。対象導体が後者であっても良好な特性が得られれば、励磁用発振器として商用周波数電源が利用できる。

ところで、反射磁束<sup>(1)</sup>を利用する速度計でも、導体が薄い場合、または導電率が低い場合は直線性が良好であるが、その理由として次のように考えられる。導

\*<sup>1</sup> 宇部工業高等専門学校

\*<sup>2</sup> 機械電気工学科

\*<sup>3</sup> 山口大学

体中での磁場の減衰時間<sup>(6)</sup>は導体の導電率、厚さに比例する。従って対象導体が高導電率で厚い場合は、導体内部に発生したうず電流は十分に減衰し切れないうちに移動導体板によって運ばれ、直線性が悪くなると思われる。導体が薄ければうず電流の減衰時間は短くなり、直線性が良くなると考えられる。そこで本論文では対象が非磁性で、十分厚い場合でも、薄い場合と同等の効果が得られるコイル配置を提案し、それに基づいて励磁周波数20~80Hzの範囲で実験を行ったところ良好な結果が得られた。これにより、対象導体の厚さにかかわらず、直線性の良好なうず電流速度計を設計する見通しを得ることができた。

## 2. 提案するコイル系の配置

図1に提案するコイル系の配置を示す。励磁コイル(0)、検出コイルからなるコイル系に対して、導体板の反対側に別の励磁コイル(0')を用意し、(0)と(0')の磁束が互いに打ち消し合う方向に直列接続(以下、相反と略す)し、うず電流をある程度相殺させる。そのためには励磁コイル(0')は(0)と同軸で、大きさ、形状は同一とする。ただし、軸上のどの位置に置くべきかは後に検討する。

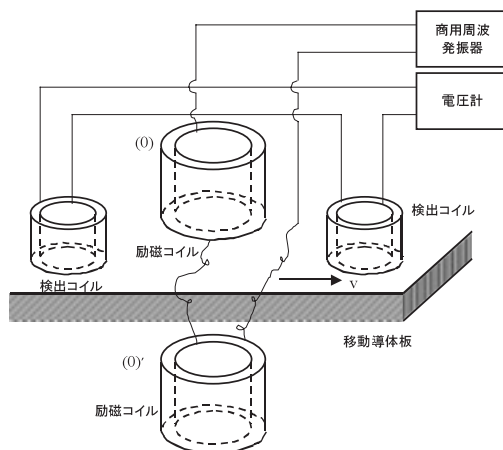


Fig. 1 Block diagram of proposed eddy current speedometer.

## 3. 理論

本章では、まず単巻コイル系について誘導起電力の理論式を求め、次にこれを拡張して多層コイル系の場合の起電力を求める。なお、移動導体板は非磁性体である。

〈3・1〉単巻コイルの起電力 図2において、励磁コイル(0)と検出コイル(+1)との移動導体板を介し

ての複素相互インダクタンスはすでに求められていて、次式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$\mathfrak{M}_{01} = -\frac{\mu_0 a_0 a_1}{2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0 \zeta) J_1(a_1 \zeta) e^{-(z_0+z_1)\zeta} \times \lambda e^{-j\zeta \sin \varphi} d\varphi d\zeta \quad (1)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{(\gamma^2 - \zeta^2)(1 - e^{-2\gamma d})}{(\gamma + \zeta)^2 - (\gamma - \zeta)^2 e^{-2\gamma d}} \quad (2)$$

である。式中の $\gamma$ は次式となる。

$$\gamma = \sqrt{\zeta^2 - j\sigma\mu_0 v \zeta \sin \varphi + j\omega\sigma\mu_0} \quad (3)$$

ただし、 $a_0$ :励磁コイルの半径、 $a_1$ :検出コイルの半径、 $z_0$ :励磁コイルと導体間エアギャップ、 $z_1$ :検出コイルと導体間エアギャップ、 $\mu_0$ :真空の透磁率、 $\sigma$ :導体の導電率、 $d$ :導体の厚さ、 $v$ :導体板の速度、 $c$ :コイル間距離、 $(x, y, z)$ :直交座標、 $(\varphi, \zeta)$ :フーリエ変換に伴う変数。

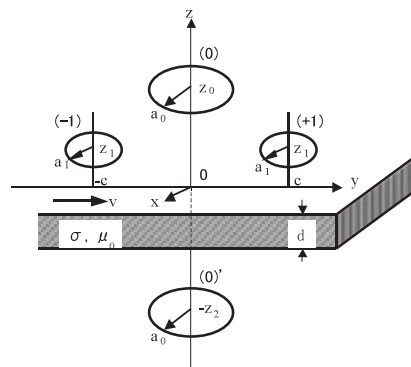


Fig. 2. Measuring system of one-turn coils.

励磁コイルに角周波数 $\omega$ の交流電流 $I$ を流した場合、検出コイル(+1)に発生する起電力は次式となる。

$$E_{01} = -j\omega \mathfrak{M}_{01} I = \frac{j\omega\mu_0 a_0 a_1 I}{2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0 \zeta) J_1(a_1 \zeta) e^{-(z_0+z_1)\zeta} \times \lambda e^{-j\zeta \sin \varphi} d\varphi d\zeta \quad (4)$$

一方、励磁コイル(0')と検出コイル(+1)との間の移動導体板を介しての複素相互インダクタンスは次式となる<sup>(2)</sup>。

$$\mathfrak{M}_{0'1} = \frac{\mu_0 a_0 a_1}{2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0 \zeta) J_1(a_1 \zeta) e^{-(z_0+z_1)\zeta} \times v e^{-j\zeta \sin \varphi} d\varphi d\zeta \quad (5)$$

ただし、

$$v = \frac{4\gamma \zeta e^{(\zeta-\gamma)d}}{(\gamma + \zeta)^2 - (\gamma - \zeta)^2 e^{-2\gamma d}} \quad (6)$$

また、 $z_2$  は検出コイル側の導体表面と励磁コイル (0)' との距離である。励磁コイル (0)' によって検出コイル (+1) に誘導される起電力は、(0)' を流れる電流の向きが (0) と反対であることを考慮して次式で求められる。

$$E_{01} = j\omega M_{01}I \\ = \frac{j\omega\mu_0 a_0 a_1 I}{2} \\ \times \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0\zeta) J_1(a_1\zeta) e^{-(z_1+z_2)\zeta} v e^{-j\zeta c \sin\phi} d\phi d\zeta \quad (7)$$

よって、励磁コイル (0), (0)' による検出コイル (+1) への誘導起電力は (4), (7) 式から

$$E_{+1} = E_{01} + E_{0'1} \\ = \frac{j\omega\mu_0 a_0 a_1 I}{2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0\zeta) J_1(a_1\zeta) e^{-z_1\zeta} \\ \times (e^{-z_0\zeta} \lambda + e^{-z_2\zeta} v) e^{-j\zeta c \sin\phi} d\phi d\zeta \quad (8)$$

となる。励磁コイル (0), (0)' によって検出コイル (-1) へ誘導する起電力は、コイル (-1) がコイル (0) に対してコイル (+1) と対称な位置にあることから、(8) 式の  $c$  を  $-c$  とおくことによって容易に求められ、次式を得る。

$$E_{-1} = \frac{j\omega\mu_0 a_0 a_1 I}{2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0\zeta) J_1(a_1\zeta) e^{-z_1\zeta} \\ \times (e^{-z_0\zeta} \lambda + e^{-z_2\zeta} v) e^{j\zeta c \sin\phi} d\phi d\zeta \quad (9)$$

コイル (+1) とコイル (-1) は差動的に接続されているので、その起電力は次式となる。

$$E = E_{+1} - E_{-1} \\ = \omega\mu_0 a_0 a_1 I \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0\zeta) J_1(a_1\zeta) e^{-z_1\zeta} (e^{-z_0\zeta} \lambda + e^{-z_2\zeta} v) \\ \times \sin(c\zeta \sin\phi) d\phi d\zeta \\ = \omega\mu_0 a_0 a_1 I \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0\zeta) J_1(a_1\zeta) e^{-(z_0+z_1)\zeta} \\ \times A \sin(c\zeta \sin\phi) d\phi d\zeta \quad (10)$$

ただし、

$$A = \frac{(\gamma^2 - \zeta^2)(1 - e^{-2\gamma d}) + 4\gamma\zeta e^{-(d+z_0-z_2)\zeta} e^{-\gamma d}}{(\gamma + \zeta)^2 - (\gamma - \zeta)^2 e^{-2\gamma d}} \quad (11)$$

〈3・2〉多層コイル系の起電力 図3に示すように、励磁コイル、検出コイルが共に多層の場合の起電力は、コイルの半径方向、長さ方向に積分することにより得られ、次式となる。

$$E = \frac{\omega\mu_0 N_0 N_1 I}{\tau_0 \tau_1 a_0 a_1 (1 - \beta_0)(1 - \beta_1)} \\ \times \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{S(a_0, \beta_0) S(a_1, \beta_1)}{\zeta^6} e^{-(z_0+z_1)\zeta} \\ \times (1 - e^{-\tau_0\zeta})(1 - e^{-\tau_1\zeta}) A \sin(c\zeta \sin\phi) d\phi d\zeta \quad (12)$$

ただし、

$$S(a, \beta) = \int_{\beta a \zeta}^{a\zeta} x J_1(x) dx \quad (13)$$

また、 $\tau_0, \tau_1$  は励磁コイル、検出コイルの長さ、 $\beta_0, \beta_1$  はそれぞれ内半径と外半径の比、 $N_0, N_1$  は巻数である。

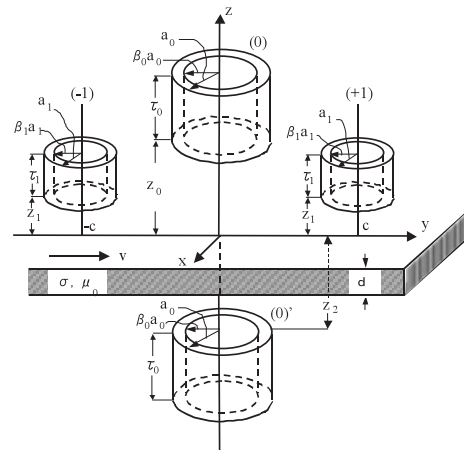


Fig.3 Measuring system of multi-layer coils.

〈3・3〉 $A$ について 特別な場合、 $A$ は若干簡略化される。導体板に対して励磁コイル (0) と (0)' が対称に配置された場合について考える。このとき  $z_2 = d + z_0$  であるから、これを (11) 式に代入して

$$A = \frac{\gamma - \zeta + (\gamma + \zeta)e^{-\gamma d}}{\gamma + \zeta + (\gamma - \zeta)e^{-\gamma d}} \quad (14)$$

となる。この位置の近辺に導体板があるとき、後述するように直線性は良好である。

#### 4. 実験

実験に用いたコイル系および導体板の概要を表1に示す。励磁コイルとして同一形状のものを2個製作し、一つを第1の励磁コイル (0)、他の一つを第2の励磁コイル (0)' とした。励磁コイル同志は同軸であり、励磁コイル、検出コイルの軸間の距離を  $c = 13.8\text{mm}$  とした。励磁コイル間の距離は  $z_0 + z_2 = 14.6\text{mm}$  である。導体板が両励磁コイルの真中にくるように配置した。その時の検出コイル側のエアギャップは  $z_0 = z_1 = 2.7\text{mm}$  である。切換スイッチにより励磁コイル (0) のみの場合 (以下、単独と略す)、および相反の各々について測定できるようにした。いずれの場合も励磁電流は  $1\text{A}$  である。測定周波数範囲は商用周波数を含み  $20 \sim 80\text{Hz}$  とした。図4に単独の場合と、相反に接続された場合の計算値と実測値を示す。両者は良く一致しており、導出した理論式の妥当性を示している。相反に接続された場合は感度は劣るが直線性は予想通り極めて良好であることがわかる。

Table 1 Specifications of coils and sheet conductor.

励磁コイル (×2)	$a_0=10.0\text{mm}$ , $\beta_0=0.78$ $\tau_0=3.0\text{mm}$ , $N_0=58$
検出コイル (×2)	$a_1=2.9\text{mm}$ , $\beta_1=0.74$ $\tau_1=3.0\text{mm}$ , $N_1=24$
導体板(アルミニウム円板)	直径: $400\text{mm}$ , $d=9.2\text{mm}$ $\sigma=3.47 \times 10^7\text{S/m}$ $\mu=\mu_0=4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$

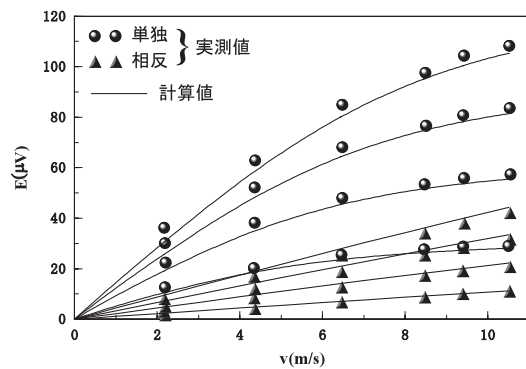


Fig.4 Induced voltage-speed characteristics of single and series opposing exciting coil system

### 5. 直線性について

出力電圧の直線性  $\varepsilon$  は、図5に示すようにある測定点 ( $v_0, E_0$ ) における直線からの偏差  $\Delta E_0$  を  $E_0$  で除したもので表され次式となる。

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta E_0}{E_0} \times 100 (\%) \quad (15)$$

ここで、実験に用いたコイル系により、コイル単独の場合と相反に接続された場合で、直線性がどの程度改良されているかを計算してみる。図6に導体板およびその配置も実験時と同一としたときの特性を示す。フルスケール値としては速度10.5m/sのときの起電力を採用する。各周波数において大幅に改善されていることがわかる。

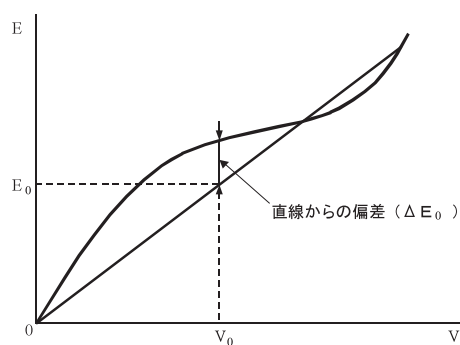


Fig.5 Linearity

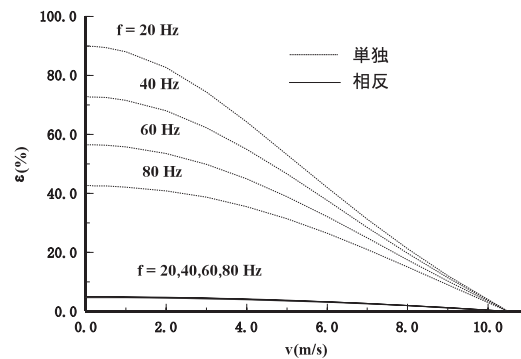
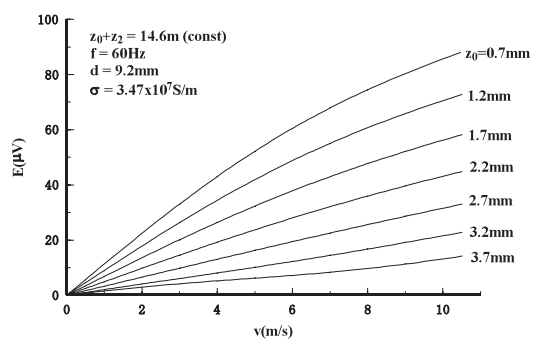


fig.6 Linearity of single and series opposing exciting coil system

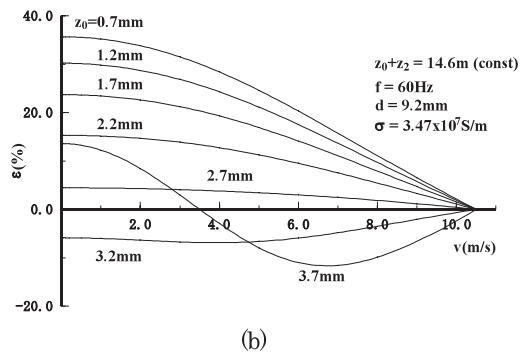
### 6. 計算による検討

導出した理論式の妥当性が確認されたので、本章では速度特性の直線性について計算により、コイル系および導体板の配置、形状、材質などを対象に検討を加える。特に断らぬ限り、コイル系および導体板の材質、寸法は実験に用いたものと同一とし、励磁周波数は60Hzの商用周波数とする。

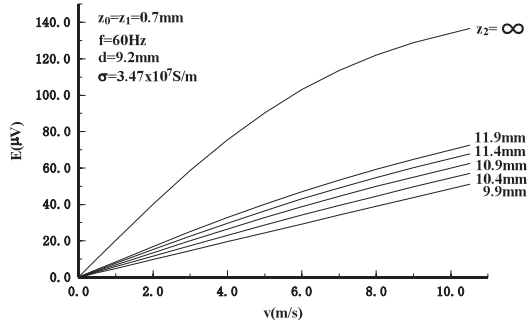
〈6・1〉距離による影響(その1) 図7に励磁コイル(0)と導体表面との距離  $z_0$  を変化させた場合の特性を示す。ただし、励磁コイル(0)と(0)'との距離は一定である。 $z_0$  が小さくなると感度は良好であるが直線性は悪化する。逆に大きくなると感度、直線性が共に悪化する。直線性を重視したとき、最適な距離は  $z_0=2.7\text{mm}$  であって、このとき導体板は励磁コイル(0)と(0)'の真中に配置されている。図7(a)からは  $z_0$  が  $2.7\text{mm}$  よりも僅かに大きい場合、直線性は更に改善されることが推察される。計算を更に進めたところ、 $z_0=2.9\text{mm}$  で直線性が0.2%以下となった。起電力の曲線は  $z_0$  が  $2.7\text{mm}$  より小さいとき上に凸であり、 $2.7\text{mm}$  より大きいとき下に凸となる。更に大きくすると変曲点が現れてきてS字状となる。



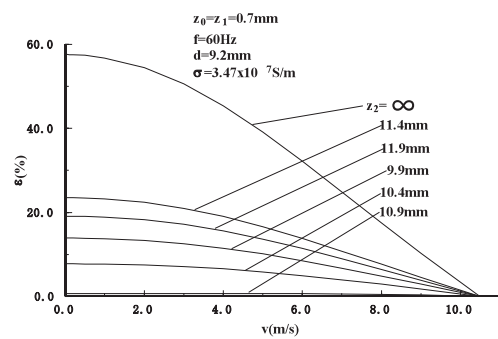
(a)

Fig. 7 Speed characteristics ( $z_0$ :parameter).

< 6・2 > 距離による影響 (その2) 前節では励磁コイル間の距離を一定として、直線性が良好な導体の位置を求めた。本節では  $z_0$  を固定して、 $z_2$  を種々変化させ、直線性が良好な位置を求めてみる。その結果を図 8 に示す。 $z_0$  としては前節で最も感度が良好であった  $z_0=0.7\text{mm}$  を採用した。その結果、ここでも  $z_2=9.9\text{mm}$  としたとき、すなわち導体板をコイル系の真中に配置したとき直線性は非常に良好で、1%以下である。このことから  $z_0$  が任意の値であっても、 $z_2$  を調整することにより直線性の優れた速度計を設計することが出来ることがわかる。



(a)

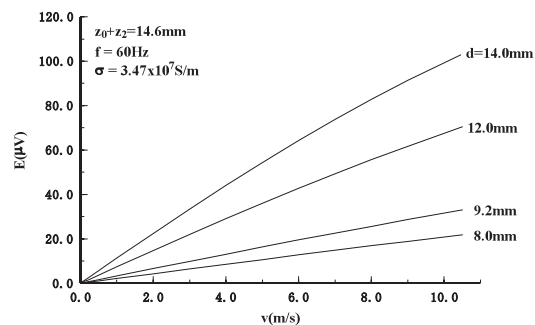


(b)

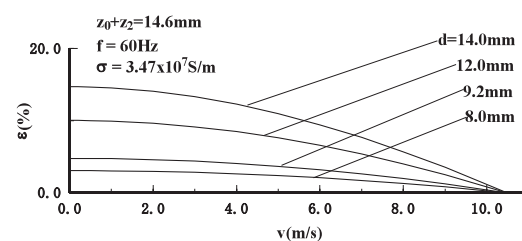
Fig. 8 Speed characteristics ( $z_2$ : parameter).

図 8 の特性は負帰還増幅器の直線性と相似性がある。これについて触れてみよう。周知の通り負帰還増幅器には種々の特徴があるが、その一つに直線性の改善がある。ただし、増幅器の利得は低下する。本論文で提案したうず電流速度計では、帰還回路として励磁コイル (0)' が対応している。負帰還増幅器では帰還率を変化させることにより直線性の改善を図るが、うず電流速度計では励磁コイル (0)' の位置を変化させることにより、直線性の改善を行う。

< 6・3 > 厚さによる影響 次に導体板の厚さのみを種々変化させた場合の特性を求めてみる。図 9 にその結果を示す。導体板は励磁コイル間の真中にくるように配置されている。最も薄い 8mm の板の場合、その厚さはコイル間距離 (=14.6mm) の 55% を占め、最も厚い場合は 96% を占めている。厚くなるほど感度は指数関数的に良好となる。たとえば、速度 10m/s 付近では 8mm の板で  $1.97\ \mu\text{V}/\text{m/s}$ 、厚さが 50% 増の 12mm の板では  $5.70\ \mu\text{V}/\text{m/s}$  で感度は 3 倍弱の増加を示している。逆に直線性は厚くなると急速に悪化する。しかし、< 6・1 >、< 6・2 > 節で述べた手法により直線性の改善は十分に可能である。



(a)



(b)

Fig. 9 Speed characteristics ( $d$ :parameter).

< 6・4 > 導電率による影響 次に導体板の厚さを一定に保ち、導電率のみを変化させた場合の特性を求めると。結果を図 10 に示す。ただし、導体板は励磁コイル間の真中に配置されているものとする。導電率を  $0.1 \times 10^7 \sim 6.0 \times 10^7 \text{S/m}$  の範囲で変化させた。こ



の範囲は非磁性ステンレス板から銅板までを満足している。導電率が  $1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$  以下の場合、直線性は 0.5% 以下であって極めて良好である。ただし、感度は低い。一方、導電率が  $1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$  以上となると感度は急速に上昇し、直線性は悪化する。

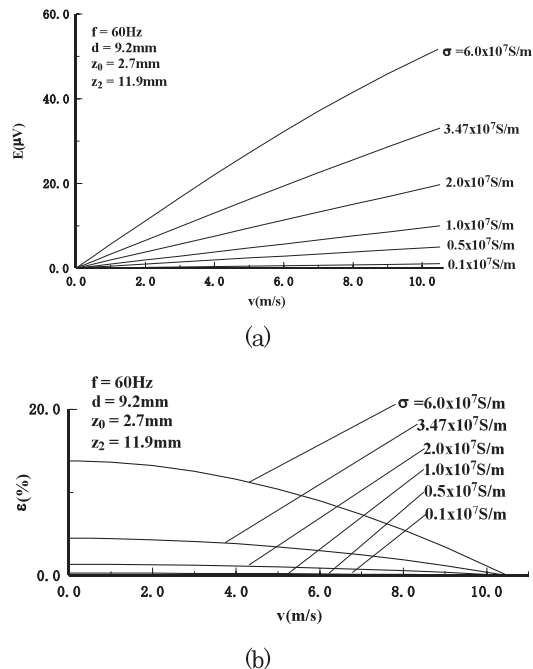


Fig.10 Speed characteristics ( $\sigma$ :parameter).

## 7. 設計指針

以上の実験及び計算による検討の結果、直線性を重視したうず電流速度計の設計指針を得た。大略以下の通りである。

- (1) 励磁コイル間の距離が固定されているとき、両励磁コイルのほぼ中間に導体板を配置する。次に、導体板をその移動方向に垂直な方向に動かして、計算により直線性の最適な位置を求める。
- (2) 励磁コイル間の距離が可変であれば、励磁コイル (0) と導体板の距離を種々の値に固定しておき、励磁コイル (0), (0)' 間の距離を変えて最適な位置を求める。

## 8. むすび

励磁用として商用周波数電源を用い、十分に厚い非磁性導体板を対象としたうず電流速度計について検討した。励磁コイル1個を有する従来の速度計に対して、更にもう1個の励磁コイルを持つ速度計を提案した。そして、その理論式を導出し、実験によりその妥当性を確認すると共に、種々の条件を考慮した計算を行っ

た。その結果、提案した方法により直線性の優れた速度計を設計する見通しを得ることができた。

新たに設けた第2の励磁コイルによって、第1の励磁コイルによるうず電流を制御することができ、それにより負帰還増幅器の直線性の改善と酷似した効果が得られることが認められた。本論文では励磁用電源と商用周波の利用を考えたが、更に高周波であっても同様に適用できると考えられる。このうず電流制御の考え方は重要であり、うず電流を利用する他の各種センサに応用可能である。今後の課題としたい。

本論文は電気学会マグネティックス研究会で発表した資料に加筆したものであり、熱心に御検討下さった委員各位に厚く感謝の意を表す。日頃、御援助を賜わる徳山工業高等専門学校機械電気工学科、宇部工業高等専門学校電気工学科の教官各位に深謝する。実験装置の製作その他で徳山工業高等専門学校実習工場の各位に厚く感謝する。

## 文献

- 1) 武平, 田中, 戸田 うず電流を利用した速度計の解析, 電学論A, 97, 9, pp. 457 (昭52-9)
- 2) 武平, 田中 うず電流を利用した透過形速度計の解析, 電学論A, 100, 9, pp. 483 (昭55-9)
- 3) 武平, 田中 遮へいされたコイル系を持つうず電流速度計, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-83-50 (1983)
- 4) 武平, 田中 方形コイルによるうず電流速度計の特性解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-83-51 (1983)
- 5) 工業計測技術大系編集委員会編, 変位・厚さ測定, 70 (昭46) (日刊工業)
- 6) 井上, 安河内, 佐々木, 電磁気学, 234 (1978) (東京図書)
- 7) 田中, 蛭名, 武平 移動する非磁性金属箔の厚さ, 導電率および速度測定用渦電流センサの理論的検討, 電学論A, 116, 1, pp. 89-90, (1996)
- 8) 田中, 蛭名, 武平 二次元的に移動する非磁性金属箔の速度測定用渦電流センサ, 電学論A, 117, 1, pp. 94-95, (1997)

付録 直列相助に接続された場合の誘導起電力

本文では、二つの励磁コイル (0), (0)' の磁束が互いに打ち消し合う方向の直列相反について取り扱ったが、ここでは磁束が互いに会い助け合う方向に接続された直列相助 (以下、相助と略す) について触れてみよう。

図2の単巻コイルについて、相助に接続された場合、  
 (7) 式の  $E_{01}$  は  

$$E_{01} = -j\omega \mathfrak{M}_{01} I \quad (\text{付1})$$
 となる。よって、(8) 式の  $E_{+1}$  は  

$$E_{+1} = E_{01} + E_{01}$$

$$= \frac{j\omega \mu_0 a_0 a_1 I}{2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J_1(a_0 \zeta) J_1(a_1 \zeta) \times e^{-Z_1 \zeta} (e^{-Z_0 \zeta} \lambda - e^{-Z_2 \zeta} \nu) e^{-j\zeta \sin \phi} d\phi \quad (\text{付2})$$

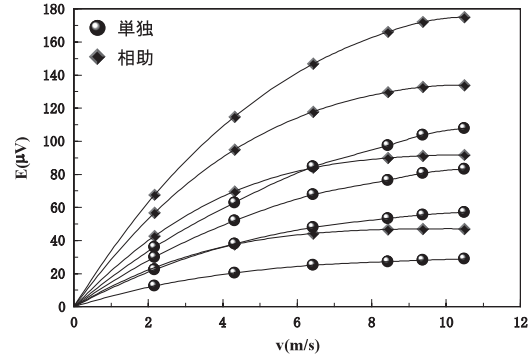
となる。(8) 式と (付2) 式の違いは括弧内の符号が異なるのみである。これより多層の場合の起電力は次式となる。

$$E = \frac{\omega \mu_0 N_0 N_1 I}{\tau_0 \tau_1 a_0 a_1 (1 - \beta_0)(1 - \beta_1)} \times \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{S(a_0, \beta_0) S(a_1, \beta_1)}{\zeta^6} \times e^{-(z_0 + z_1)\zeta} (1 - e^{-\tau_0 \zeta})(1 - e^{-\tau_1 \zeta}) \times \{\lambda - e^{(z_0 - z_2)\zeta} \nu\} \sin(\zeta \sin \phi) d\alpha d\zeta \quad (\text{付3})$$

付図1に相助の実測値を単独の場合と比較して示す。コイル系は先の実験に用いたものを相助に接続し、他

の条件は全く同一として実験した。感度は高いが、直線性については単独よりも更に悪化している。

この相助の接続は本文で述べた帰還増幅器の考え方からすると正帰還増幅器に相当する。すなわち、感度は高くなるが直線性は悪くなる。



app. Fig. 1 Induced voltage-speed characteristics of single and series aiding exciting coil systems.

(2002. 9. 5 受理)