

次世代流体計測技術TIDASの開発

A New Concept of Electro-Magnetic flowmeter with TIDAS technology

株式会社 山武

山本 友繁

Tomoshige Yamamoto

株式会社 山武

山崎 吉夫

Yoshio Yamazaki

株式会社 山武

森川 誠

Makoto Morikawa

キーワード

TIDAS、電磁流量計、渦電流、低導電率、非満水、気泡混入

我々は、ファラデーの誘導法則に現れる2種類の誘導起電力のうち、従来の電磁流量計においては誤差要因として排除されてきた磁場の時間変化によって発生する誘導起電力を積極的に利用する新技術TIDASを考案し、様々な可能性を持つ次世代の流体計測技術として提案している。今回、一般的な電磁流量計の理論をTIDASの範囲まで拡張するとともに、この技術を低導電率流体、非満水状態の流体、気泡混入流体の流量計測に適用し、良好な結果を得ることができた。その結果と今後の可能性について報告する。

We have developed a new technology, called TIDAS, which actively utilizes the induced electromotive force generated by time variations in magnetic fields, which had previously been eliminated as an error factor in conventional electromagnetic flowmeters. This force is one of the two types of induced electromotive force which appear in Faraday's law of induction. We are putting TIDAS forward as a next-generation fluid measurement technology with wide-ranging potential. In this study, we extended the theories of general electromagnetic flowmeters to the scope of TIDAS, and we applied this technology to the flow rate measurement of low-conductivity fluids, fluids which are in a less-than-full state, and fluids with entrained air bubbles. We obtained excellent results. In this paper, we report on those results and on future possibilities.

1. はじめに

電磁流量計は圧力損失が無く、流速を体積積分した形で電位が発生することから、本質的に安定して流量計測ができる優れた流量計として知られている。歴史的には直流励磁に始まり、正弦波励磁、矩形波励磁と進歩をとげてきたが、これまで世の中に送りだされた製品は、流速に比例する起電力のみに基づいて流量計測を行っている。このため従来方式では、流速以外のパラメータ変化によって発生する計測誤差を排除できず、適用できるアプリケーションにも限界があった。そこで磁場の時間変化によって発生する起電力を抽出し、抽出した起電力に基づいてスパンの補正や0点の補正を、流体が流れたままリアルタイムで行うという新たな発想に基づく方式を考案し、次世代の電磁流量計として提案している⁽¹⁾。

この新技術を我々はTIDAS (Time Derivative of Vector Potential A Sensing: タイダス) と名づけ、単なる流量計ではなく次世代の流体計測技術として、理論展開⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾と開発を

平行して進めている。

新技術TIDASを適用した電磁流量計では、高S/N比、高速応答といった基本性能の向上が実現できるだけでなく、流体の体積に関する情報を収集し、それをもとに流量の体積による誤差変動を補正するといった応用も考えられる⁽⁶⁾。

今回、TIDASの基本原理と、いくつかのアプリケーションに対しTIDASを適用した場合の実験結果、及び今後の可能性について報告する。

2. TIDASの基本原理

従来の電磁流量計においては、磁場の時間変化に起因する成分の影響を0にするために様々な方法がとられてきたが、TIDASではこの成分を積極的に活用する。図1に示すように電極軸平面に対して、測定管軸方向に非対称かつ時間変化する磁場を印加すると、流速に比例する成分に加えて、磁場の時間変化に起因する成分が出力に現れる。

電極対から検出される信号起電力を複素平面に写像すると

図.2に示すように流速に比例する成分と磁場の時間変化に起因する成分の合成ベクトルで表され、1次元から2次元の表現に拡張される。

従来では誤差として扱われてきた磁場の時間変化に起因する成分を積極的に利用することにより、後述する3つの基本動作が可能になる。

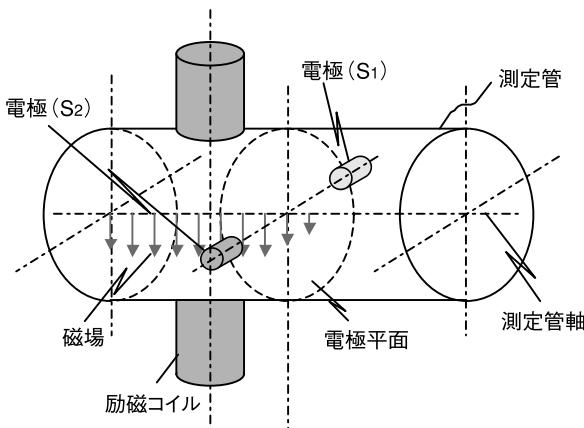


図1. 非対称な励磁

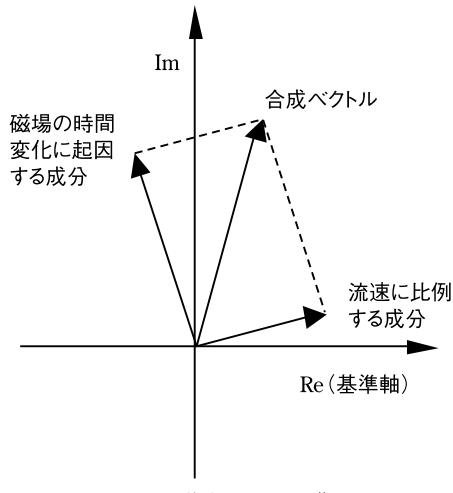


図2. 複素平面への写像

2.1 電磁流量計の理論の拡張

一般的な電磁流量計の理論はShercliff⁽⁷⁾やSchmmartz⁽⁸⁾の包括的な文献に詳しいが、方程式を解く過程で磁場の時間変化に関係する項は除去されている。そのままではTIDASに適用できないため、TIDASにも適用できる電磁場の理論として拡張し、再構築を行う。

電磁流量計の動作は以下のMaxwell方程式で記述される。
(E:電界の強さ, B:磁束密度, H:磁界の強さ, J:電流密度, D:電束密度、全てベクトル)

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

導電性流体が流速 v で閉管内を流れるとき、電流密度と電束密度はFaradayの電磁誘導法則により (ϵ :物体の誘電率, ϵ_0 :真空の誘電率, σ :物体の導電率)

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} + (\epsilon - \epsilon_0) \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

となる。ここで流体の透磁率は真空と同じ μ_0 とした。

励磁周波数 ω が高いか、流体の導電率が低いとき(2)、(3)式の第2項は無視できなくなる。無視できる条件は(5)式であらわされる。⁽⁷⁾

$$\omega \frac{\epsilon}{\sigma} \ll 1 \quad (5)$$

また流体に印加される磁場の表皮効果を無視できる条件をとり、磁界は与えられたものとして起電力信号を求める。解析をすすめるにあたってポテンシャル U, A を導入する。すなわち

$$\mathbf{E} = -\text{grad } U - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (7)$$

$$\text{div } \mathbf{A} = 0 \quad (8)$$

となるポテンシャルにより、Maxwellの方程式は満たされる。以下図.1の構成の電磁流量計において、Bevirの定式化⁽⁹⁾を拡張し、非対称励磁時の動作解析を行う。

励磁磁界を $B(x,y,z,t)=B(x,y,z)\exp(-i\omega t)$ とし、流速分布は $v(x,y,z,t)\equiv v(x,y,z)$ で定常とする。このとき、壁面上の信号電極 S_1, S_2 で検出される電位差信号 $U_0=U_1-U_2$ を求めるとき出力信号は

$$U_0 = U_A^D + U_v^D \quad (9)$$

$$U_A^D \equiv - \iiint_V (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} d\tau \quad (10)$$

$$U_v^D \equiv \iiint_V (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \frac{\sigma - i\omega(\epsilon - \epsilon_0)}{\sigma - i\omega\epsilon} \mathbf{v} \times \mathbf{B} d\tau \quad (11)$$

で与えられる。流体の導電率、励磁周波数が(5)式を満たす通常の条件では、

$$U_A = - \iiint_V \mathbf{J} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} d\tau \quad (12)$$

$$U_v = \iiint_V \mathbf{J} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) d\tau \\ = \iiint_V (\mathbf{B} \times \mathbf{J}) \cdot \mathbf{v} d\tau \quad (13)$$

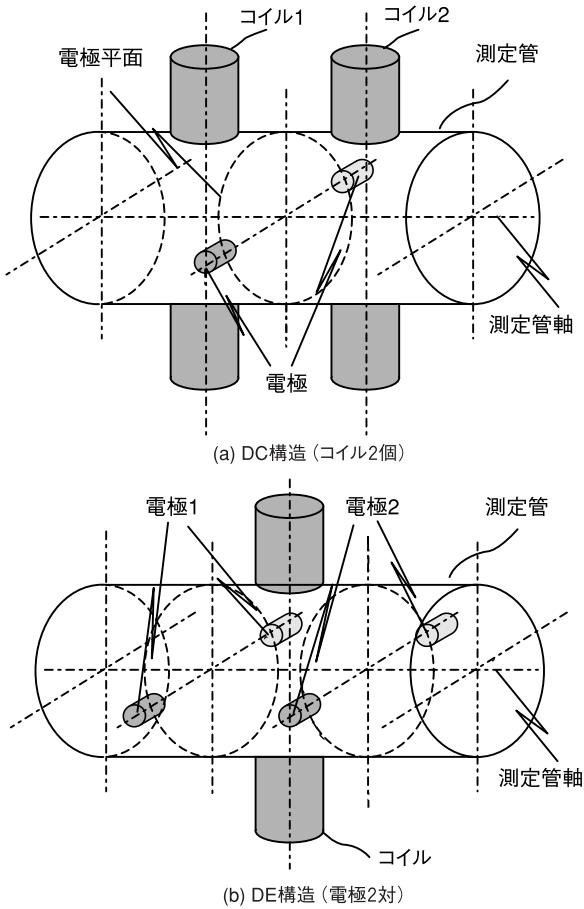
と単純化される。ここで(13)式はBevirの結果と同じであり、 $W \equiv \mathbf{B} \times \mathbf{J}$ は重みベクトルと呼ばれている。(12)式は、対称性により信号成分に重畠しないように従来の電磁流量計では排除されてきた成分である。この U_A は、流量計の幾何学的形状を現す仮想電流と励磁磁界の情報を集約したものであり、この成分を非対称励磁により積極的に利用することがTIDASの本質である。

以後 U_A のように磁場の時間変化により発生する起電力を $\partial \mathbf{A} / \partial t$ 成分、 U_v のように流速に比例する起電力を $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 成分と呼ぶ。

2.2 基本構造とベクトル配置

観測できる電極間起電力は $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 成分と $\partial \mathbf{A} / \partial t$ 成分の合

成ベクトルからなり、(1)～(3)のいずれの基本動作を行うにも第1のステップとして $\partial A / \partial t$ 成分を抽出する必要がある。通常の流量計に応用する場合、 $\partial A / \partial t$ 成分を抽出するには図3(a)に示すコイル2個の構造(以下DC構造とする)、または図3(b)に示す電極2対の構造(以下DE構造とする)が適している。

図3. $\partial A / \partial t$ 成分を効率的に抽出する構造

基本的なベクトルが、DC構造においてどのように配置されるか、簡略化して示しておく。

コイル1、コイル2から発生する磁場のうち電極の軸上における磁束密度を B_1, B_2 とすると、 B_1, B_2 は(14)式、(15)式で表される。

$$B_1 = b_1 \cos(\omega t + \theta_1) \quad (14)$$

$$B_2 = b_2 \cos(\omega t + \theta_2) \quad (15)$$

ここで b_1, b_2 は磁束密度の大きさ、 ω は角周波数、 θ_1, θ_2 は基準からの位相のずれを示す。

θ_1, θ_2 は $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta_2$ の関係を持つとして、このとき検出される電極間起電力を複素平面に写像すれば、(16)式のように4つのベクトルの合成ベクトル E_c で表される。

$$E_c = \omega r_\omega b_1 e^{j(\pi/2 + \theta_1 + \theta_\omega)} \quad (1)$$

$$+ \omega r_\omega b_2 e^{j(-\pi/2 + \theta_1 + \Delta\theta_2 + \theta_\omega)} \quad (2)$$

$$+ V r_v b_1 e^{j(\theta_1 + \theta_\omega + \Delta\theta_v)} \quad (3)$$

$$+ V r_v b_2 e^{j(\theta_1 + \Delta\theta_2 + \theta_\omega + \Delta\theta_v)} \quad (4) \quad (16)$$

ここで、 r_ω, r_v は電極位置や境界条件によって決まる関数、 θ_ω は $\theta_1 = \theta_2 = 0$ のときの $\partial A / \partial t$ 成分の虚軸からのずれ(角度)、 $\theta_\omega + \Delta\theta_v$ は同じく $\theta_1 = \theta_2 = 0$ のときの $v \times B$ 成分の実軸からのずれ(角度)、 V は流体が管軸方向のみに一様な流れを持つとしたときの流速の大きさを示す。

(16)式の第1項①はコイル1の磁場の時間変化によって発生する $\partial A / \partial t$ 成分、第2項②はコイル2の磁場の時間変化によって発生する $\partial A / \partial t$ 成分、第3項③はコイル1の磁場と流速によって発生する $v \times B$ 成分、第4項④はコイル2の磁場と流速によって発生する $v \times B$ 成分となる。

このとき観測される合成ベクトルの中で全てのコイルから発生する磁場の変化による $\partial A / \partial t$ 成分は(17)式で表され、全てのコイルから発生する磁場と流速に起因する $v \times B$ 成分は(18)式で表される。

$$E_A = \omega r_\omega e^{j(\pi/2 + \theta_1 + \theta_\omega)} \{b_1 - b_2 e^{j\Delta\theta_2}\} \quad (17)$$

$$E_v = V r_v e^{j(\theta_1 + \theta_\omega + \Delta\theta_v)} \{b_1 + b_2 e^{j\Delta\theta_2}\} \quad (18)$$

またコイル1とコイル2の間に、 $\theta_2 = \pi + \theta_1 + \Delta\theta_2$ の位相差の状態にしたとき、 $\partial A / \partial t$ 成分と $v \times B$ 成分は(19)式、(20)式で表される。

$$E_A = \omega r_\omega e^{j(\pi/2 + \theta_1 + \theta_\omega)} \{b_1 + b_2 e^{j\Delta\theta_2}\} \quad (19)$$

$$E_v = V r_v e^{j(\theta_1 + \theta_\omega + \Delta\theta_v)} \{b_1 - b_2 e^{j\Delta\theta_2}\} \quad (20)$$

(17)～(20)式において、 $b_1 = b_2, \Delta\theta_2 = 0$ とおくとコイル1とコイル2間の位相差を0にした時の電極間起電力は従来の電磁流量計と同じく $v \times B$ 成分の出力となり、位相差を π にした時の電極間起電力は新しく追加された $\partial A / \partial t$ 成分の出力となる。

理論式とは、 $\partial A / \partial t$ 成分を表す(17)、(19)式が(12)式と対応し、 $v \times B$ 成分を表す(18)、(20)式が(13)式と対応する。

尚、DE構造の場合、電極1と電極2の電極間起電力の和がDC構造でのコイル間の位相差0に対応し、電極間起電力の差がDC構造でのコイル間の位相差 π に対応している。

2.3 基本動作

$\partial A / \partial t$ 成分を積極的に利用することにより、

- (1) $v \times B$ 成分を $\partial A / \partial t$ 成分で正規化するスパン補正動作
- (2) $\partial A / \partial t$ 成分が0になる点を推測する0点補正動作
- (3) $\partial A / \partial t$ 成分から、流体や配管内の状態や特性を検出する状態検出動作

の3つの基本動作が可能になる。

(1)スパン補正

DC構造において(17)、(18)式の状態(コイル間の位相差 $\Delta\theta_2$)の E_A と E_v の和が合成ベクトルとして検出されたとする。この時流速の大きさ V にかかる係数(スパン)の中で変化する成分を除去するには、(19)、(20)式の状態(コイル間の位相差 $\pi + \Delta\theta_2$)の中から E_A を抽出し、これを用いて(17)、(18)式の状態

における合成ベクトルを正規化すれば良い。(19),(20)式において $b_1 \approx b_2, \Delta\theta_2 \approx 0$ となるように調整しておけば, $E_A \gg E_v$ となり,この状態での合成ベクトルはほぼ E_A 成分のみとみなすことができる。

(19)式で(17),(18)式を正規化し, ω 倍すれば,正規化された $\partial A / \partial t$ 成分 E_{An} と正規化された $v \times B$ 成分 E_{vn} は(21),(22)式で表される。

$$E_{An} = \omega \frac{b_1 - b_2 e^{j \Delta\theta_2}}{b_1 + b_2 e^{j \Delta\theta_2}} \quad (21)$$

$$E_{vn} = V \frac{r_v}{r_o} e^{j(-\pi/2 + \Delta\theta_v)} \quad (22)$$

(22)式において, $r_\omega/r_v, \Delta\theta_v$ は校正時に確認できる定数であり,スパンの変動要因である磁場に関連する項や流体の状態や境界条件により変動する項が除去されていることが分かる。(21)式で表される正規化後に残された $\partial A / \partial t$ 成分は0点の変動要因となるので,この補正については後述する。

尚,DC構造において位相差を切り替えることなくスパン補正を行うためには,例えば振幅変調や位相変調を用いれば実現できる。またDE構造の場合には,電極1と電極2の電極間起電力の和を,電極間起電力の差で正規化すれば,同様の結果を得ることができる。

(2) 0点補正

スパン補正後に残された,(21)式で表される正規化された $\partial A / \partial t$ 成分は0点の変動要因になる。そのためこの $\partial A / \partial t$ 成分を除去する必要がある。

測定管やコイルのコアの渦電流損失を考慮すると $b_1, b_2, \Delta\theta_2$ は周波数によって変化するが,磁場の損失は周波数に比例する。そのため,(21)式において ω にかかる係数は周波数で変化しない値となる。

2種類の励磁角周波数 ω_1 と ω_2 においてスパン補正を行い,正規化された電極間起電力の差をとれば, $v \times B$ 成分がキャンセルされ, $\partial A / \partial t$ 成分のみが残されることになる。これを $\omega_1 / (\omega_1 - \omega_2)$ 倍すれば,(21)式の正規化された $\partial A / \partial t$ 成分が抽出できることとなり,これを角周波数 ω_1 における合成ベクトルから除去すれば,0点の変動要因が除去されることとなる。

(3) 状態検出

第3の基本動作として, $\partial A / \partial t$ 成分を抽出し,抽出した $\partial A / \partial t$ 成分から,流体の特性や状態など流量以外のパラメータを測定する状態検出動作が挙げられる。 $\partial A / \partial t$ 成分の中に含まれる流体の特性や状態の変動要因を抽出し,パラメータと対応させることにより,例えば導電率の測定,水位の測定,配管内の付着診断などが可能になる。つまり今までの $v \times B$ 成分による信号に加えて流速に関係なく,新たに流体の特性や状態を知るための信号を得ることができる。

例えば,DC構造において $\partial A / \partial t$ 成分の変動から導電率や水位のパラメータを抽出する手順について説明する。コイル間の位相差が π の状態での出力は,(19)式 E_A と(20)式 E_v の合成ベクトルとなる。スパン補正の時と同じ様に, $b_1 \approx b_2, \Delta\theta_2 \approx 0$ が成り立つように調節し,適当な周波数を選択すれば, $E_A \gg E_v$

となり位相差 π の状態における電極間出力は, $\partial A / \partial t$ 成分 E_A のみとみなすことができる。校正時において,導電率や水位などのパラメータと E_A との関係を把握しておけば, E_A の値からパラメータの大きさを流速に関係なく求めることができる。

尚,得られたパラメータが水位,断面積,気泡量など流体の体積に関係する情報の場合には,この情報を基に,流体の体積補正を行うことが可能になる。

$\partial A / \partial t$ 成分の抽出に関しては,例えばDE構造の場合には,電極1と電極2の電極間起電力の差がDC構造における位相差 π の状態に対応することなど,スパン補正における $\partial A / \partial t$ 成分の抽出と同様となるので説明は省略する。

3. TIDASの応用例

流量計測へのTIDASの応用としては大きく次の2種類に分けることができる。

①満水状態において, $\partial A / \partial t$ 成分を基に流体や磁場の状態を補正することにより,高周波励磁時の安定性を確保し,高S/N比での流量計測を実現する。

②非満水や気泡が混入した流体など,流体の体積が変動する場合において, $\partial A / \partial t$ 成分を基に流体の体積の情報を得て,高精度な流量計測を実現する。

①,②の場合における信号処理について図4に示しておく。電極から得られた信号をそれぞれの周波数成分において, $v \times B$ 成分と $\partial A / \partial t$ 成分に分解し, $v \times B$ 成分を $\partial A / \partial t$ 成分で正規化する。次に複数の正規化された $v \times B$ 成分の中に残る微小な $\partial A / \partial t$ 成分($\Delta \partial A / \partial t$)の除去を行う。①の場合には,これで変動要因が全て補正されているので,ここから流量を出力する。②の体積の補正が必要な場合には水位などの情報を $\partial A / \partial t$ 成分から抽出し,それに基づいて,正規化 $\Rightarrow 0$ 補正された信号の体積補正を行い,流量を出力する。

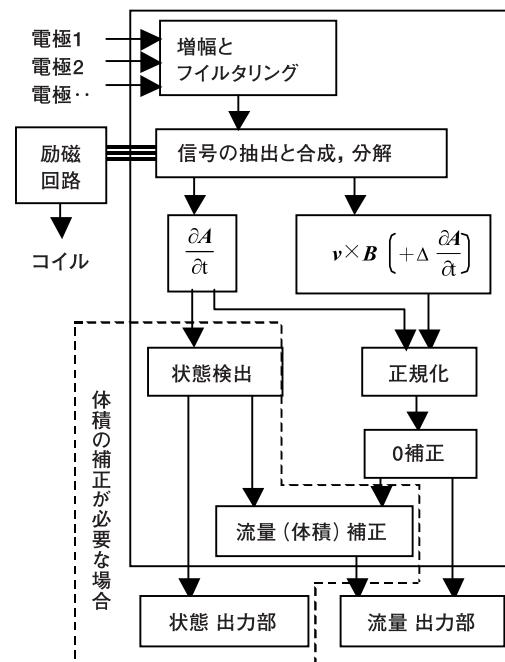


図4. 信号処理フロー

以下①の応用例として低導電率流体に適用した場合と,②の応用例として非満水状態の流体と気泡混入流体に適用し

た場合について述べる。

3.1 低導電率流体への応用

満水状態の流体を対象にすると、検出器の内径がLの場合、スパン補正 \Rightarrow 0点補正後の流量は、(22)式から(23)式で表される。

$$Q = \frac{\pi L^2}{4} E_{vn} \frac{r_o}{r_v} \quad (23)$$

評価に用いた試作モデルは図.3(b)で示したDE構造を持つ25Aの検出器を使用し、励磁は0補正のため、2種類の正弦波を合成した電圧をコイルに印加している。励磁周波数の組み合わせは①: $\omega_1 \Rightarrow 1\text{kHz}$, $\omega_2 \Rightarrow 500\text{Hz}$, ②: $\omega_1 \Rightarrow 2\text{kHz}$, $\omega_2 \Rightarrow 1\text{kHz}$, ③: $\omega_1 \Rightarrow 5\text{kHz}$, $\omega_2 \Rightarrow 2\text{kHz}$ の3条件、導電率は170~0.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲、流速は0~3.3m/Sの範囲について評価を行った。

DE構造により、ほぼ $v \times B$ 成分が電極1間起電力と電極2間起電力の和(電極和出力), $\partial A / \partial t$ 成分が電極間起電力の差(電極差出力)に対応する。

励磁周波数の組み合わせ③: $\omega_1 \Rightarrow 5\text{kHz}$, $\omega_2 \Rightarrow 2\text{kHz}$ についてスパン補正、0補正の効果を示しておく。図.5は、流量0の時の(補正前の)電極和出力と電極差出力が導電率により、それぞれの周波数でどのように変化するか、複素平面に写像したものである。導電率を下げていくと電極和出力も電極差出力も回転していることが分かる。図示してはいないが、当然スパンも回転しその大きさも周波数によって違う。このままでは0点もスパンも安定しないことが分かる。

次に電極和出力を電極差出力で正規化(スパン補正)し、さらに0補正した結果を図.6に示しておく。

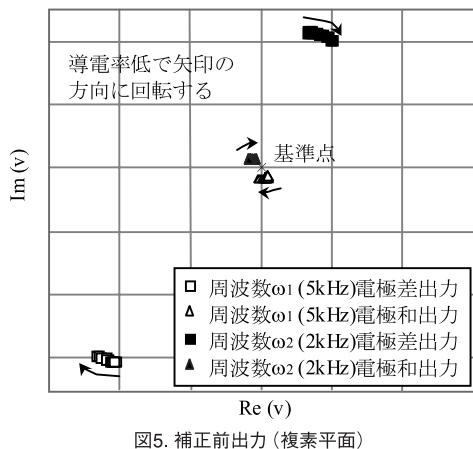


図5. 補正前出力(複素平面)

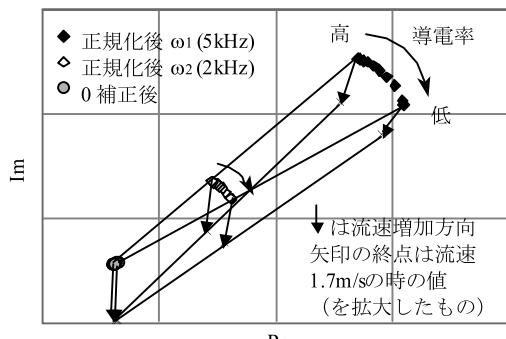
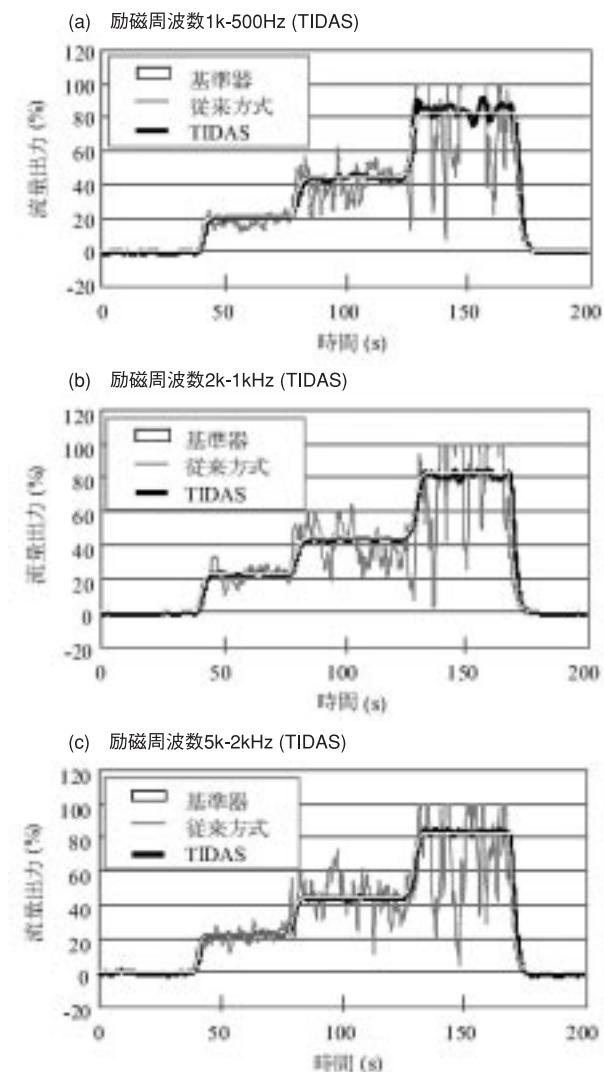


図6. 補正後の出力(複素平面)

図.6において実測した流速1.7m/sの時の値は、同一平面上では小さくて分りにくいので、拡大して示している。これからスパンが正規化され、さらに0補正が有効に機能することにより、0補正後の値は、導電率が変動しても流速に関わらず収束していることが確認できる。

最後に、低導電率時における実際の流量出力について評価を行った結果を図.7に示しておく。導電率1.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ において、導電率の影響を受けないコリオリ方式の流量計を基準器として使用し、従来方式とTIDAS(励磁周波数の組み合わせ①~③)の流量出力を比較した。それぞれの流量計のスパンはフルスケール(100%)で4m/s、応答性はダンピング約1秒に合わせている。

図7. 導電率1.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ における流量出力比較

この導電率において、従来方式の電磁流量計では発生する1/fノイズの影響が大きく、流速が上がるにつれて数十%ものふらつきが観測されるが、一方TIDASではもともとの励磁周波数が高いため数%以内のふらつきで収まっており、励磁周波数が高くなるにつれてにふらつきが少なくなっている様子がみてとれる。

但し、励磁周波数を高くすれば良いというだけではなく、最適な励磁周波数の選択を行う必要がある。励磁周波数をあげれば、ノイズも小さくなるが同時に流量信号も小さくなる、また変

換器への誘導ノイズが大きくなるなど、高周波ならではの問題も発生し、安定性が低下する場合もある。これら高周波における安定性は今後の課題として現在取り組んでいるところである。

3.2 非満水状態の流体への応用

図.8に非満水流量計測に応用した場合の構造を示しておく。満水を対象にする電磁流量計では、電極は通常側面の対向する位置に配設されており、常に流体に接しているが、非満水状態においては、水位によっては電極が露出することが考えられる。できるだけ低水位においても測定を可能にするためには、電極を、常に流体に接するように底面の部分に配置し、また磁場も横方向から印加する。この場合電極1と電極2の差がほぼ $\partial A / \partial t$ 成分、電極1と電極2の和がほぼ $v \times B$ 成分となる。各電極から得られた信号に対して図.4に示した体積補正を行う場合の処理を行うことにより水位の計測及び、流量の補正が可能になる。

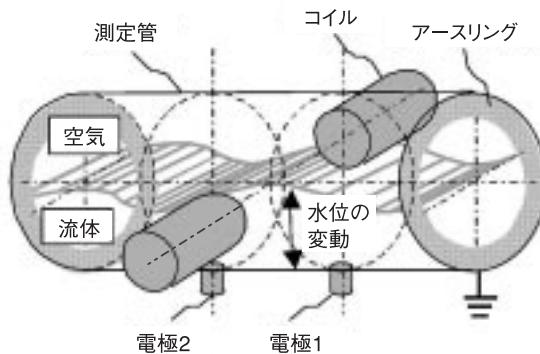


図8. 非満水流量計測への応用

(16)式～(22)式で用いた r_ω, r_v も水位によって変化するため水位 h の関数としてそれぞれ $r_\omega[h], r_v[h]$ とおき、(18)式の補正の対象となる $v \times B$ 成分 E_{vB} 及び(19)式の抽出される $\partial A / \partial t$ 成分 E_A をそれぞれ(24),(25)式で置き換えておく。

$$E_v = V r_v[h] e^{j(\theta_1 + \theta_\omega + \Delta\theta_v)} \{b_1 + b_2 e^{j\Delta\theta_2}\} \quad (24)$$

$$E_A = \omega r_\omega[h] e^{j(\pi/2 + \theta_1 + \theta_\omega)} \{b_1 + b_2 e^{j\Delta\theta_2}\} \quad (25)$$

校正時において水位 h と(25)式 E_A との関係を把握しておけば、 E_A の値からパラメータである水位の大きさ h を流速に関係なく求めることができる。

また流量計としてみた場合、満水の場合では流体の断面積が一定なので、流速を求ることと流量を求ることは同じ意味を持つが、非満水の場合は、流体の断面積が変化するため、同じにならない。流体の断面積を S とすると流量 Q は、 $Q = SV$ で表されることから(24)式 E_v において $V r_v[h] = Q r_v[h] / S$ となる。断面積 S も水位の関数として扱えば $r_v[h]/S$ は水位をパラメータとするひとつの関数 $r_Q[h]$ とおける。これより(22)式を(26)式のように流量に関係する式として表すことができる。

$$E_{vn} = Q \frac{r_Q[h]}{r_\omega[h]} e^{j(-\pi/2 + \Delta\theta_v)} \quad (26)$$

正規化された(26)式の $v \times B$ 成分において残された水位により変動する成分を補正する。(26)式の $r_Q[h]/r_\omega[h]$ を一つの関数としてみると、校正時に適当な流量 Q の時の水位 h と正規化された $v \times B$ 成分 E_{vn} との関係から、この関数の形を求めることが可能である。 $\partial A / \partial t$ 成分から水位 h が求まり、求まった水位 h から、流量 Q にかかる係数であるスパンの中で水位によって変動する部分を補正することが可能になる。これより最終的に求まる流量 Q は(26)式より(27)式で表される。

$$Q = E_{vn} \frac{r_\omega[h]}{r_Q[h]} \quad (27)$$

評価に用いた試作モデルは図.8の構造を持つ100Aの検出器を使用した。励磁は0補正のために2種類の正弦波($\omega_1 \Rightarrow 125\text{Hz}, \omega_2 \Rightarrow 85\text{Hz}$)を合成した電圧をコイルに印加している。

評価における非満水状態では、流量と水位を独立に変化させることが可能な実流装置を使用し、流量は0～30m³/hrの間で変化させている。

様々な水位と流速における電極差出力の基準点からの大きさと水位の関係(周波数 ω_1)を図.9に示しておく。 $\partial A / \partial t$ 成分の大きさは水位が低くなるほど大きくなり、1対1の関係であらわすことができる。この関係式を校正時にあらかじめ求めておけば、 $\partial A / \partial t$ 成分の大きさから水位 h を逆算することが可能になる。

次に図.4の信号処理フローに従い、流量を体積補正まで行い、得られた水位と流量誤差(RD%)との関係を図.10に示しておく。低水位まで精度が確保できていることが分かる。

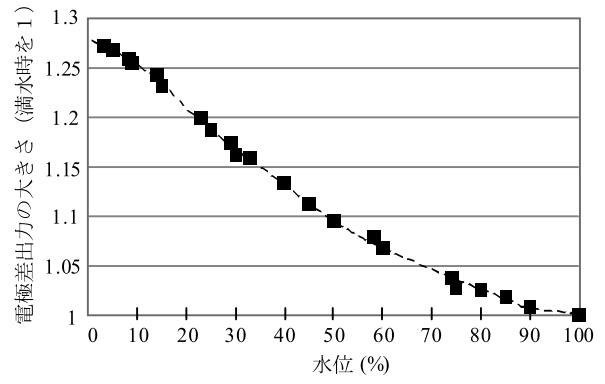


図9. 水位と電極差出力との関係

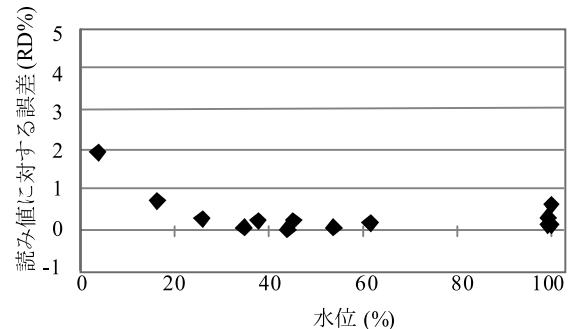


図10. 水位と流量精度

3.3 気泡混入状態の流体への応用

気泡混入状態で流量計測を行うためには、非満水の場合と同様に体積補正を行う必要がある。(24)式～(27)式で示した

非満水流量計測の理論式において、水位 h をパラメータとした関数 $r_\omega[h], r_V[h]$ の替わりに気泡量 q_{Air} をパラメータとした関数 $r_\omega[q_{Air}], r_V[q_{Air}]$ を取れば、流量は(27)式から(28)式で表される。

$$Q = E_{vn} \frac{r_\omega[q_{Air}]}{r_V[q_{Air}]} \quad (28)$$

評価に用いた試作モデルは図.3(b)で示したDE構造を持つ25Aの検出器を使用し、励磁は2種類の正弦波($\omega_1 \Rightarrow 160\text{Hz}, \omega_2 \Rightarrow 80\text{Hz}$)を合成した電圧をコイルに印加している。

評価における気泡混入は0~75volume%、流速は気泡が一様に分布する1.5~3m/sの間で変化させた。

様々な気泡混入量と流速における電極差出力(電極1間起電力と電極2間起電力の差)の基準点からの大きさと気泡量との関係(周波数 ω_1)を図.12に示す。 $\partial A / \partial t$ 成分の大きさは気泡量が多くなる(流体の体積が小さくなる)ほど大きくなり、非満水の場合と同様の傾向を示している。この関係式を校正時にあらかじめ求めておけば、 $\partial A / \partial t$ 成分の大きさから気泡量 q_{Air} を逆算することが可能になる。

次に図.4の信号処理フローに従い、流量を体積補正までおこない、得られた気泡量と流量誤差(RD%)との関係を図.12に示しておく。従来方式では気泡混入量は誤差となって出力に現れるが、TIDASでは、広い範囲の気泡混入量において、気泡を除いた流量精度は±1%以下を確保できていることが分かる。

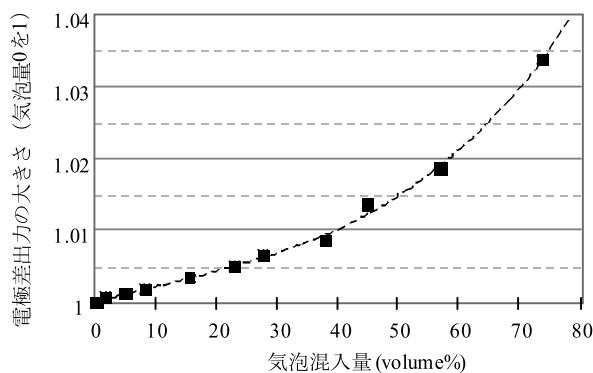


図11. 気泡混入量と電極差出力との関係

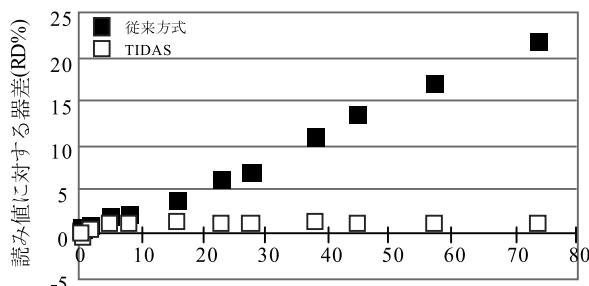


図12. 気泡混入量と流量精度

4. おわりに

新技术TIDASを適用した電磁流量計の構造と動作を提案し、それが有効に機能することを理論的な面も含めて確認できた。従来の電磁流量計では不可能であったkHzレベルの励磁周

波数によるS/N比の向上や、流体の体積補正による正確な流量計測が可能になる等、性能や機能の飛躍的な向上が期待できる。

この技術は今回紹介した接液式電極だけでなく、非接液の容量結合電極にも対応でき、また励磁波形も正弦波に限らず、従来の矩形波励磁にも応用できることが分かっている。

TIDASを用いることにより追加される新しい機能により、従来の電磁流量計の枠を越えて新たなアプリケーションが広がるものと確信している。

現在、TIDASの理論的解析やシミュレーションによる設計品質の向上とともに、次世代の流体計測に向けた製品群の開発を進めている。

5. 謝辞

本研究に関し、TIDASの理論構築において慶應義塾大学理工学部 物理情報工学科 本多敏 教授の多大な御協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

1. 山本, 山崎, 自動校正機能を持つ電磁流量計の流量測定, 計測自動制御学会 第21回センシングフォーラム講演論文集, p27-32, (2004).
2. S.Honda, T.Yamamoto, A New Configuration of Electro-Magnetic Flowmeters with Self-Calibration - Theoretical Analysis, SICE Annual Conference 2004, (2004).
3. 本多, 山本, 自動校正機能を持つ電磁流量計の理論解析, 計測自動制御学会 第21回センシングフォーラム講演論文集, p21-26, (2004).
4. S.Honda, T.Yamamoto, A New Configuration of Electro-Magnetic Flowmeters with Self-Calibration, FLUCOME 2005, (2005).
5. 本多, 山本, 自己校正機能をもつ非対称高周波励磁電磁流量計の動作解析, 計測自動制御学会 2005年度産業応用部門大会講演論文集, p27-31, (2005).
6. 山本, 山崎, 森川, 新方式の電磁流量計－非満水における流量計測と水位計測への応用－, 計測自動制御学会 2005年度産業応用部門大会講演論文集, p21-36, (2005).
7. J.A.Shercliff, The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement, Cambridge University Press, (1962).
8. G.Schmmartz, Induktive Strömungsmessung, VED Verlag Technik, (1974).
9. M.K.Bevir, Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 43, part3, p577-590, (1971).

商標

TIDASは、株式会社 山武の登録商標です。

著者所属

山本 友繁 研究開発本部 コアテクノロジーセンター
山崎 吉夫 研究開発本部 コアテクノロジーセンター
森川 誠 研究開発本部 コアテクノロジーセンター