

2つのセンサ出力間の相関における揺動を利用したコリオリ質量流量計 の空気混入診断

上原彬*, 橋詰匠*, 涌井徹也**, 吉野晶紀***, 角口開道***, 宮地宣夫***

Diagnosis of Aerated flow in Coriolis Mass Flowmeter Using Fluctuated Correlation
between 2 Sensors' Output

Akira Uehara*, Takumi Hashizume*, Tetsuya Wakui**, Akinori Yoshino***,
Akimichi Kadoguchi*** and Nobuo Miyaji***

A Coriolis mass flowmeter provides highly accurate measurements of single-phase flows, regardless of the flow properties. However, an aerated flow causes significant measurement errors in this flowmeter. In order to diagnose the aerated flow in a waterline by using a Coriolis mass flowmeter, this study focuses on the fluctuated correlation between two sensors' output. The study suggests that the fluctuation in the function, which is obtained through the process of phase difference calculations using Hilbert transform, can be used to diagnose the aerated flow at any operating points. Through the experimental investigations, the following facts are established: (1) The flow measurement error that occurs with an increase in the void fraction can be evaluated by using Hilbert transform, regardless of operating points, (2) The RMS of the second order difference in our proposed index increases with the void fraction, and (3) the RMS is approximately 0 in a single-phase flow at any operating points. These results show that our proposed diagnostic index can be used to distinguish a single-phase flow from an aerated flow.

Key Words: Flowmeter, Aerated flow, Coriolis mass flowmeter, Hilbert transform

1. 緒言

近年、プロセスオートメーションでは FOUNDATION フィールドバスをはじめとするフィールドバス通信規格により、フィールド機器および DCS (Distributed control system) の間で双方向デジタル通信が可能となっている¹⁾。これにとともに、複数のプロセス値を同時に測定するマルチバリエブル機能や^{2), 3)}、複数のプロセス値を元に機器自身または周辺の状況を演算、評価^{4), 5)}する機能を持つフィールド機器が実用化されている。このような機能を利用したフィールド機器としてコリオリ質量流量計が注目されている。

コリオリ質量流量計は質量流量を直接測定でき、その測定精度が高いことを特徴としたフィールド機器である。この流

量計はマルチバリエブル機能により質量流量と同時に、密度や温度を測定できることを利用して、単相流(気体、液体)だけでなく一部の混合流体の質量流量を測定できる^{6), 7)}。具体的には、測定流体が2成分の混合液または固液二相流であり、かつ各成分の密度が既知である場合は、演算により混合流体の正味質量流量が測定できる。

しかし、気液二相流で測定した質量流量は、混合流体の正味質量流量だけでなく、液体のみの質量流量と比較しても測定誤差が大きいことが確認されている。このことからコリオリ質量流量計では気液二相流において質量流量を測定できないとされている。このような流量計では、測定流体が液体の単相流であるとき、予期せぬ気体の混入により測定に支障を来す恐れがある。そのため、コリオリ質量流量計での測定において、液体の単相流への気体混入を診断する手法、または気液二相流において液体のみの質量流量を補正して算出する手法が求められている。

現在は、水に空気を混入させた場合を対象として、気液二相流におけるコリオリ質量流量計での質量流量測定に関する研究が、理論および実験の両面からいくつか報告されている。J. Hemp^らは、水の質量流量に対する気液二相流で測定した

* 早稲田大学理工学術院総合研究所 新宿区喜久井町17番

** 大阪府立大学大学院工学研究科 堺市中区学園町1-1

*** 横河電機(株) 武蔵野市中町2-9-32

* Research Institute for Science & Engineering, Waseda University

** Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

*** Yokogawa Electric Corporation

(Received October 5, 2010)

質量流量の測定誤差はボイド率にのみ依存し、負側に増加するという理論を提唱している⁸⁾。しかし、M. Henry らによる実験において、気液二相流での測定誤差はボイド率だけでなく水の質量流量にも依存することが報告されており⁹⁾、理論と異なることが課題となっている。また、M. Henry, R. Liu らはコリオリ質量流量計で測定した温度、密度などの複数のプロセス値を用いて、ニューラルネットワークにより気液二相流において水のみを質量流量を算出する手法を提案している^{9), 10)}。しかしこの手法は、気液二相流での測定誤差に理論的には影響が無いプロセス値を利用して質量流量を補正している。そのため、コリオリ質量流量計の体格等が異なる場合には改めてデータの蓄積が必要となる。したがって、気液二相流における質量流量測定は現在も困難である。

著者らはまず、気液二相流で測定した質量流量の測定誤差がボイド率以外のプロセス値に依存していた原因として流量算出手法に着目する。そして、気液二相流に適切な流量算出手法としてヒルベルト変換を利用した流量算出手法を提案する。この流量算出手法の有効性を明らかにするため、気液二相流で測定した質量流量を水の質量流量と比較し、この測定誤差がボイド率にのみ依存することを明らかにする。

その上で、測定した複数のプロセス値を利用し、コリオリ質量流量計内の空気混入を診断する手法を提案する。この手法は、コリオリ質量流量計で測定した2つのセンサ出力の相関を示す関数が、空気の断続的な流入出により揺動することを利用する。この診断手法の有効性を明らかにするため、実験により複数の運動動作点において気液二相流を模擬し、空気混入量と提案する診断指標の関係から空気混入の有無が診断できるかを調査する。

2. 気液二相流でのコリオリ質量流量計の流量測定

本章では供試コリオリ質量流量計の測定原理を示す。また、気液二相流に著者らが適用する流量算出手法を示す。

2.1 コリオリ質量流量計の測定原理^{6), 7)}

コリオリ質量流量計の概略図を Fig.1 に示す。コリオリ質量流量計は内径の小さい配管（以後、フローチューブ）を振

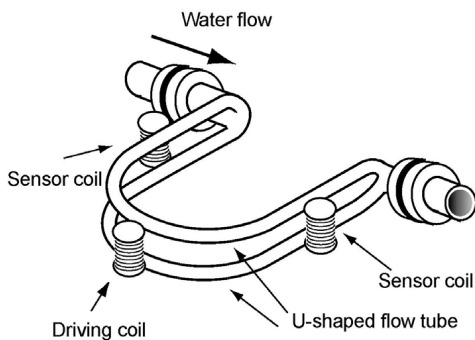


Fig.1 Coriolis mass flowmeter of U-shaped flow tube

動させ、内部に流体を流したときの振動特性から質量流量を算出するフィールド機器である。振動させるフローチューブは、U字型、B字型、直管型など多様な形状があるが、いずれの形状でも測定原理は同じである。本論文では、2本の平行に並んだU字型のフローチューブ（内径：13.4[mm]）で構成されるコリオリ質量流量計を対象とする。1対のフローチューブには、中央部とその両端に3つのマグネットとコイルが設置されている。3つのコイルのうち中央部に設置したコイル（以後、励振コイル）に電流を流すことで、1対のフローチューブを一定の振幅で線対称に自励振動させる。励振コイルは測定流体を流れ方向に対し垂直方向へ円弧状に振動させることから、フローチューブの両端には質量流量に比例したコリオリの力が発生する。このコリオリの力によりフローチューブにねじれ振動が加わる。ねじれ振動を含む自励振動の速度をフローチューブの両端に設置した2つのコイルにより電圧として測定する。以後、2つのコイルをセンサコイルと呼び、それぞれの出力を上流側からセンサ出力A、センサ出力Bと呼ぶ。得られたセンサ出力をそれぞれ $V_A(t)$ 、 $V_B(t)$ とすると、以下のような正弦波とみなせる。

$$V_A(t) = A(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_A(t)) \quad (1)$$

$$V_B(t) = B(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_B(t)) \quad (2)$$

ここに、 A 、 B ：センサ出力の振幅[V]、 f_n ：共振周波数[Hz]、 ϕ_A 、 ϕ_B ：励振コイルでの入力電圧を入力、センサ出力AおよびBを出力としたときの位相[rad]。

2つのセンサコイルは、配管振動などの外乱となる振動の影響を打ち消すため、線対称に振動する1対のフローチューブの相対速度を測定している。また、位相 ϕ_A 、 ϕ_B は正負が異なるが、ともに質量流量に比例する。コリオリ質量流量計では、センサ出力 $V_A(t)$ 、 $V_B(t)$ を測定し、2つのセンサ出力間の位相差が質量流量に比例することを利用して質量流量を測定している。以後、(3)式により算出した位相の差を位相差と呼ぶ。

$$\Delta\phi(t) = \phi_A(t) - \phi_B(t) \quad (3)$$

本論文で対象とするコリオリ質量流量計の位相差は最大で0.01[rad]であるが、測定流体が液体の単相流である場合は、質量流量の測定精度は±0.1%である。したがって、位相差も同等の精度で算出する必要がある。そこで、コリオリ質量流量計では Fig.2 に示すポジティブフィードバックを用いて、センサ出力の振幅が一定になるように励振コイルに加える電流（以後、励振ゲインと呼ぶ）を制御している。このとき、単相流ではセンサ出力の振幅は時間に対し一定となることから、密度の変化にともない共振周波数が著しく変動しない限り、高精度で位相差を測定できる。

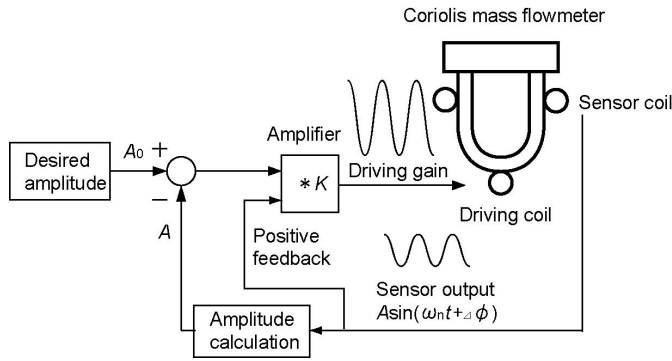


Fig.2 Regulation control of sensor coil amplitudes

2. 2 気液二相流に適用する流量算出手法

本節では、気液二相流において質量流量を算出する手法を示す。コリオリ質量流量計は、フローチューブにおける自励振動およびねじれ振動を利用して質量流量を算出している。これらの振動系においてコリオリ質量流量計は、質量、ダンピング、ばね定数は測定周期中ほぼ一定であることを前提として設計されている。しかし、気液二相流では気体が気泡となってフローチューブ内を断続的に流入出することから、振動系でのダンピングおよび質量が断続的に変動する。このときセンサ出力および振幅が断続的に変動する。本論文では以後、これらの断続的な変動を揺動と呼ぶ。このような状況において高精度で位相差を算出するため、これまで単相流に使われていた流量算出手法の1つであるヒルベルト変換を利用した流量算出手法を適用することを提案する。

ヒルベルト変換とは入力信号に対し全周波数領域の位相を $\pi/2$ 進めた信号を出力する変換である。この手法は音声分析などの信号処理において、非定常な周波数変調波や振幅変調波の解析をする場合に、フーリエ変換などのスペクトル解析に替わる手法として利用されている¹¹⁾。本論文ではSimulinkのSignal processing blocksetを利用して、共振周波数および振幅の揺動が大きい気液二相流のセンサ出力をヒルベルト変換し、加法定理により位相差を算出する。Fig.3にヒルベルト変換を利用した流量算出フローを示す。

まず、2つのセンサ出力から、共振周波数近傍以外の周波数におけるノイズをローパスフィルタおよびバンドパスフィルタにより除去する。なお、本論文では、気液二相流であってもセンサ出力の波形は単相流の場合と同じ正弦波とみなす

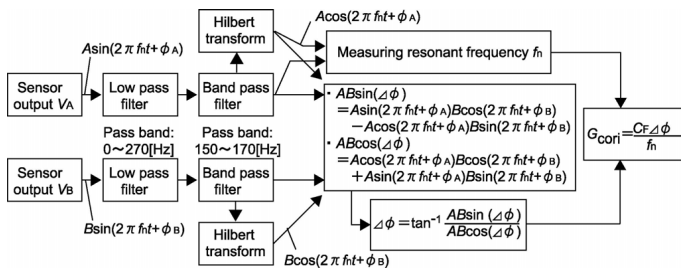


Fig.3 Hilbert-based calculation flow for mass flow rate

ことができる。ただし、フローチューブ内の流体密度が低下するとともに、共振周波数の平均値は最大で約1[Hz]増加する。また、空気の断続的な流入出により共振周波数は一時的に最大168[Hz]まで増加する。このため、バンドパスの通過帯域を共振周波数の変動に応じて、150[Hz]~170[Hz]で固定している。

その上で、2つのセンサ出力をヒルベルト変換し、全周波数領域で位相が $\pi/2$ 進んだ波形を得る。なお、(1)、(2)式のセンサ出力をヒルベルト変換すると、それぞれ(4)、(5)式のように変換される。

$$V'_A(t) = A(t) \cos(2\pi f_n(t)t + \phi_A(t)) \quad (4)$$

$$V'_B(t) = B(t) \cos(2\pi f_n(t)t + \phi_B(t)) \quad (5)$$

ここで、三角関数の加法定理を利用することにより、時間 $t[s]$ における2つのセンサ出力間の位相差を算出する。まず(6)、(7)式より $A(t)B(t)\sin\Delta\phi(t)$ 、 $A(t)B(t)\cos\Delta\phi(t)$ を算出する。

$$A(t)B(t)\sin\Delta\phi(t) = V_A(t)V'_B(t) - V_B(t)V'_A(t) \quad (6)$$

$$A(t)B(t)\cos\Delta\phi(t) = V'_A(t)V'_B(t) + V_B(t)V_A(t) \quad (7)$$

ここに $\Delta\phi(t)$ を時間 $t[s]$ での共振周波数における位相差とする。(6)式と(7)式では振幅 $A(t)$ および $B(t)$ の揺動が残っているが、(8)式より振幅を相殺することで、位相差を算出できる。

$$\tan\Delta\phi(t) = \frac{A(t)B(t)\sin\Delta\phi(t)}{A(t)B(t)\cos\Delta\phi(t)} \quad (8)$$

以上の式で得られた位相差より質量流量を算出する。

$$G_{\text{cori}}(t) = \frac{C_F \Delta\phi(t)}{f_n(t)} = \frac{C_F}{f_n(t)} \tan^{-1} \frac{AB \sin\Delta\phi(t)}{AB \cos\Delta\phi(t)} \quad (9)$$

ここに、 G_{cori} : コリオリ質量流量計の質量流量[kg/s]、 C_F : 流量補正係数[kg/(rad·s²)]。

なお、共振周波数 $f_n[\text{Hz}]$ も同様にヒルベルト変換を利用して算出する。まず、(6)、(7)式においてセンサ出力 B の代わりに測定周期 $\Delta t[s]$ 遅らせたセンサ出力 A を代入する。このとき、 $t \sim t + \Delta t[s]$ 間の共振周波数を $f_n(t)$ と定義すると、測定周期 $\Delta t[s]$ の時間の遅れが(10)式のように位相差として表せる。

$$2\pi f_n(t)\Delta t = \tan^{-1} \frac{V_A(t)V'_A(t+\Delta t) - V'_A(t)V_A(t+\Delta t)}{V'_A(t)V'_A(t+\Delta t) + V_A(t)V_A(t+\Delta t)} \quad (10)$$

このとき、右辺および Δt より共振周波数 $f_n(t)$ を算出する。この共振周波数は、測定流体およびフローチューブの合計質量に依存している。したがって測定流体の密度が減少すると、共振周波数 $f_n(t)$ は増加する。この特性を利用し、コリオリ質量流量計では密度も測定できる。

3. 2つのセンサ出力間の相関を利用した診断

コリオリ質量流量計のフローチューブ内に空気が混入した場合、フローチューブの振動において共振周波数、振幅、位相差の揺動が増加する。このとき、2つのセンサ出力間における相関の揺動が増加すると考えられる。そこで本論文では、位相差を算出する過程で導出される関数の揺動を利用して空気混入を診断する手法を提案する。具体的には(6)~(8)式に示す3つの関数の揺動の大きさを二次階差の Root mean square (以後二階差 RMS と呼ぶ)により定量的評価し、各関数の揺動の大きさの増加から空気混入の有無を診断する手法である。

$$RMS_{2nd} = \sqrt{\frac{1}{M-2} \sum_{i=1}^{M-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2} \quad (11)$$

ここに、 M : 関数の全データ数、 x_i : i 番目の関数。ここで二階差 RMS を利用すると、質量流量と比例関係にある位相差を含む式(6)~(8)式の関数において、ポンプ等による周期的な変動や質量流量の過渡的な変動の影響を除去できる。

本論文では、(6)~(8)式の3つの関数を対象とした二階差 RMS を診断指標と定義する。(以後それぞれを $AB\sin\Delta\phi$, $AB\cos\Delta\phi$, $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS と呼ぶ。) これらの診断指標はいずれも、単相流ではほぼゼロであるが、気液二相流であればセンサ出力の振幅および位相差の揺動が大きくなることで増加することが期待される。著者らはこれら3つの診断指標を利用して気液二相流を診断することを提案する。

4. 空気混入診断手法の有効性評価

本章では、気液二相流を模擬した水ラインにコリオリ質量流量計を設置し、前章で提案した診断指標が運動動作点の影響を受けずに気液二相流を診断できることを実験を通して明らかにする。

4.1 気液二相流を模擬した実験装置

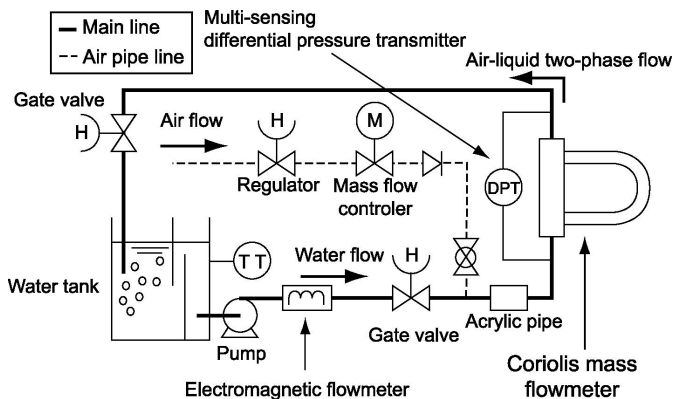


Fig.4 Experimental setup

実験装置の概略図を Fig.4 に示す。まず、ポンプ (荏原製作所: 34.5[l/min], 20.8[l/min]) によりタンク (500[l]) 内の水を配管径が 2B のメインラインへと圧送し、コリオリ質量流量計 (Rota Yokogawa: RCCS36, 測定レンジ: 0.1~4.7[kg/s], 測定精度 (液体): 指示値の±0.1%) に流す。このとき、コリオリ質量流量計の上流に設置した圧力タップから圧縮空気を混入させ、気液二相流を模擬する。圧力タップは直線距離 2.2[m] の水平配管において、上流から 1.7[m] の位置に設置する。気液二相流は水平配管の残り 0.5[m] を経て、垂直配管を 0.5[m] 上へ向かって流れた後、コリオリ質量流量計へ流入する。なお、コリオリ質量流量計に流入した気液二相流は、メインラインに比べて内径が小さく、U字型をしたフローチューブにより十分攪拌されている。したがって、コリオリ質量流量計内における気液二相流の流動様式は流量計固有のものであり、流量計前後の配管の影響を受けない。コリオリ質量流量計は流れ方向が下から上になるように設置し、2つのフローチューブの間で空気混入量に大きな偏りがないようにする。その後、空気の混入した水をタンクへと戻す。なお、タンク内部には2つの仕切りを設け、再びメインラインに圧送される水への空気混入を防ぐ。

本実験においてコリオリ質量流量計は水のみを質量流量を測定することを目的とし、空気を混入する前の水の質量流量を基準質量流量 (図中では true water flow rate) と定義する。また、コリオリ質量流量計上流側の圧力をライン圧力とする。本論文ではライン圧力および基準質量流量を運動動作点と定義し、これをコリオリ質量流量計の前後に設置したゲート弁により調整する。ライン圧力は 0.2, 0.3[MPa], 基準質量流量は 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.7, 3.1[kg/s] とする。これらの運動動作点において、空気圧力 0.4[MPa] で空気混入量を 0~10[N/l/min] まで 1[N/l/min] ごとに増加させて空気混入を模擬する。コリオリ質量流量計における2つのセンサ出力の測定周期は 0.8[ms], それ以外のフィールド機器で測定するプロセス値の測定周期は 10[s] とする。いずれのプロセス値も測定時間を 100[s] とする。なお、質量流量、共振周波数、 $AB\cos\Delta\phi$, $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ はコリオリ質量流量計のセンサ出力と同じ測定周期 (0.8[ms]) で算出できる。しかし、いずれも 200 点で平均し、測定周期を 0.16[s] とする。この測定周期において $AB\cos\Delta\phi$, $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS を算出する。

基準質量流量は、空気混入用の圧力タップ上流に設置した電磁流量計 (横河電機: AE205, 測定レンジ (水): 0~19.6[kg/s], 測定精度: 測定スパンの±0.25%) により水の体積流量を測定した上で、(12)式より算出する。

$$G_{mag} = \rho_{water}(P_{ave}, T) Q_{mag} \quad (12)$$

ここに、 G_{mag} ：基準質量流量[kg/s]、 P_{ave} ：コリオリ質量流量計内部の平均圧力 [MPa]、 T ：水温[°C]、 Q_{mag} ：電磁流量計で測定した体積流量 [m³/s]。また、 $\rho_{water}()$ は PROPATH ver.12.1 において圧力と温度から水の密度[kg/m³]を算出する関数を示す。なお、コリオリ質量流量計のフローチューブ内径は配管に比べて小さいことから、質量流量が多いときに圧力損失が大きくなる（最大で 100[kPa]）。そこで、コリオリ質量流量計前後の圧力を差圧伝送器で測定し、その平均圧力をコリオリ質量流量計内部の平均圧力と定義する。また水温は、タンクに設置された測温抵抗体での温度を温度伝送器（横河電機：YTA320）により測定する。なお、タンク内の水はメインラインから戻った水により十分攪拌されており、タンクおよびメインライン内での水および空気の温度は一定であるとみなす。

コリオリ質量流量計に混入させる空気は、レギュレータ（北辰電機：T76）により空気圧力を、空気流量調節器（KOFLOC：3660）により標準状態における体積流量を調整する。なお、コリオリ質量流量計上流に水平に設置したアクリル管において、混入した空気はメインライン内に滞留することなく流れている事を確認している。このとき空気混入量を定量評価する指標として、(13)式に示すようにボイド率を定義する。

$$\alpha = \frac{Q_{air}}{Q_{mag} + Q_{air}} \quad (13)$$

$$Q_{air} = \frac{\rho_{air}(P_{ave}, T)}{\rho_{air,S}} Q_{air,S} \quad (14)$$

ここに、 α ：ボイド率%、 Q_{air} ：コリオリ質量流量計内部の平均圧力における空気混入量[m³/s]、 $Q_{air,S}$ ：標準状態における空気混入量[Nm³/s]、 $\rho_{air,S}$ ：標準状態における空気の密度[kg/Nm³]。また、 $\rho_{air}()$ は PROPATH ver.12.1 において圧力と温度から空気の密度を算出する関数を示す。

メインラインでは、水温を制御しておらず、長時間運転すると、ポンプ・配管等の摩擦熱により、水温は 20~40[°C]の範囲で変化する。ただし、各フィールド機器の測定値は温度補正されている。したがって、上記の水および空気の密度を除けば、温度の影響を無視できる。

4. 2 気液二相流における質量流量の測定誤差

先行研究において、コリオリ質量流量計内に空気が混入した場合、気液二相流での質量流量の測定誤差は基準質量流量に対して負の方向へ増加することが報告されている⁹⁾。しかし、この報告では質量流量算出にフーリエ変換を利用しており、気液二相流での測定誤差がボイド率だけでなく基準質量流量にも依存することが確認されている。これらの結果は運

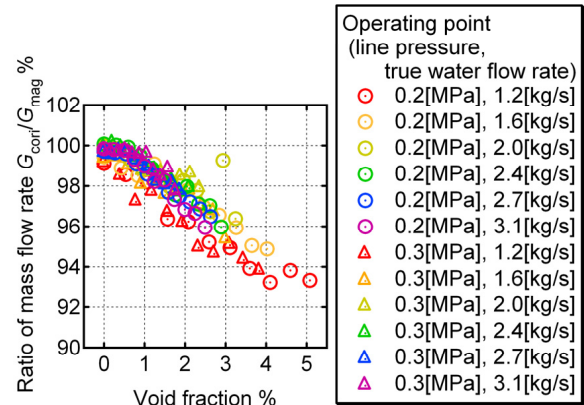


Fig.5 Coriolis mass flow error caused by aerated flow

転動作点の影響を受けることなくコリオリ質量流量計の空気混入を診断する上で課題となっていた。

本節では、気液二相流における質量流量の測定誤差を、測定時間 100[s]においてヒルベルト変換を利用して算出した平均質量流量の、基準質量流量の平均値に対する比と定義する。Fig.5 にヒルベルト変換を利用して算出した質量流量の測定誤差とボイド率の関係を示す。Fig.5 より、測定誤差はボイド率の増加に対して負の方向へ増加することがわかる。ただし先行研究とは異なり、ライン圧力および基準質量流量が異なる場合でも傾きは一定である。このことから、ヒルベルト変換を利用すれば気液二相流における測定誤差はボイド率のみに依存すると考えられる。

本論文では、流量算出手法によってボイド率が測定誤差へ与える影響が異なる理由は、センサ出力の共振周波数および振幅の揺動にあると考えられる。Fig.6 に単相流および気液二相流（ボイド率：2.1%）での共振周波数の揺動を示す（算出周期は 0.8[ms]）。Fig.6-a)の運動動作点はそれぞれ 0.2[MPa]、1.2[kg/s]、Fig.6-b)は 0.2[MPa]、3.1[kg/s]とする。Fig.6-a)および Fig.6-b)よりいずれの運動動作点においても、単相流であれば共振周波数は一定である。このときセンサ出力は周期性を持つことから、フーリエ変換を利用して共振周波数における位相差を高精度で算出できる。しかし、気液二相流では共振周波数は測定周期（0.16[s]）より短い周期の揺動が見られる。これは、空気の通過により、フローチューブ

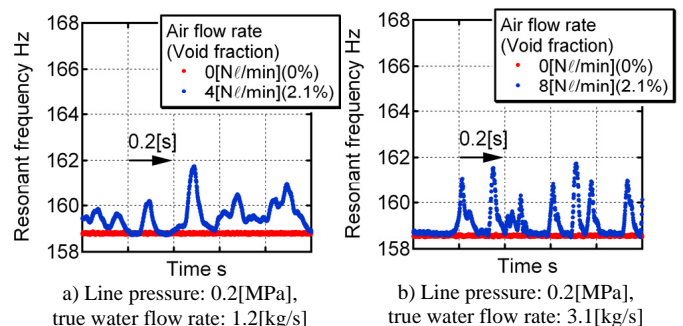


Fig.6 Resonant frequency of flow tube

内の流体密度が減少し、共振周波数が一時的に増加するためである。このような場合は、フーリエ変換に必要なとされる周期性が失われる。その結果、先行研究では、位相差の算出精度が低下したと考えられる。特に、Fig.6-a)と Fig.6-b)の共振周波数の揺動を比較すると、基準質量流量が少ない方が、共振周波数が単相流と同じ時間が短い。これは、基準質量流量が少ない場合は、気泡の大きさが成長し、気泡がフローチューブを通過する時間も長くなるためである。その結果、先行研究で得られた気液二相流での質量流量は、基準質量流量が少ないほど測定誤差が大きくなったと考えられる。

一方でヒルベルト変換は、センサ出力の測定周期と同じ周期で位相差や共振周波数を算出できることが特徴である。その結果、ヒルベルト変換であれば気液二相流であっても位相差を高精度で算出できると考えられる。これにより、気液二相流における質量流量の測定誤差がボイド率にのみ依存することを明らかにした。

なお、Fig.7 に単相流および気液二相流（ボイド率：2.1%）での、ヒルベルト変換を利用して算出した位相差の揺動を示す（算出周期は 0.8[ms]）。Fig.7 より、空気が混入するといずれの運動動作点においても位相差の変動幅は増加している。ただし、位相差の持つ揺動は、Fig.6 の共振周波数の揺動とは強い相関がないことがわかる。これは、共振周波数とは異なり、フローチューブの両端で測定される 2 センサ出力間の相関が弱くなることで、位相差の揺動を増加させているためだと考えられる。

4. 3 気液二相流における診断指標の有効性評価

本節では、ヒルベルト変換による流量算出手法の過程で算出される $\tan\Delta\phi$, $AB\sin\Delta\phi$, $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS を診断指標として用いた場合に、コリオリ質量流量計内への空気混入の有無を診断できるか調査する。前節と同じ実験条件において、ボイド率に対する $AB\cos\Delta\phi$, $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS を Fig.8, Fig.9 および Fig.10 に示す。まず、Fig.8 よりボイド率が 0% のとき $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS がほぼゼロであることがわかる。これは、単相流において 2 つのセン

サ出力は強い相関を持ち、その相関は運動動作点の影響を受けることなく時間に対して一定であることを示している。一方気液二相流では、ボイド率が増加するにつれて $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS は増加する。これは、空気がフローチューブを通過するとともに 2 つのセンサ出力間の相関が断続的に弱くなるためだと考えられる。特に、ボイド率が 1% 以下であればその増加傾向はほぼ一定であることがわかる。また、ボイド率 0.5% での $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS は、ボイド率 0% と比較し約 10 倍となる。以上のことから、2 つのセンサ出力間の相関の強さを示す $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS がゼロであるか

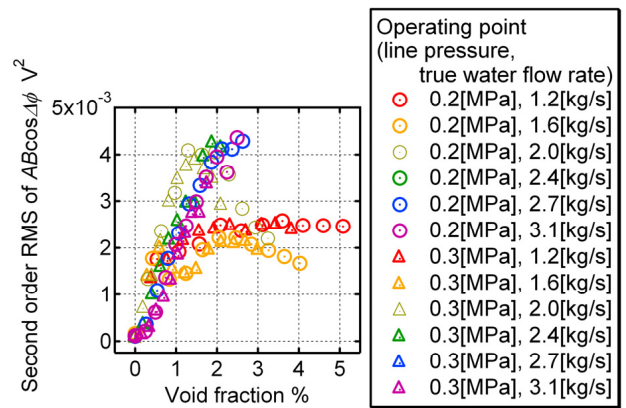


Fig.8 Relation between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and void fraction

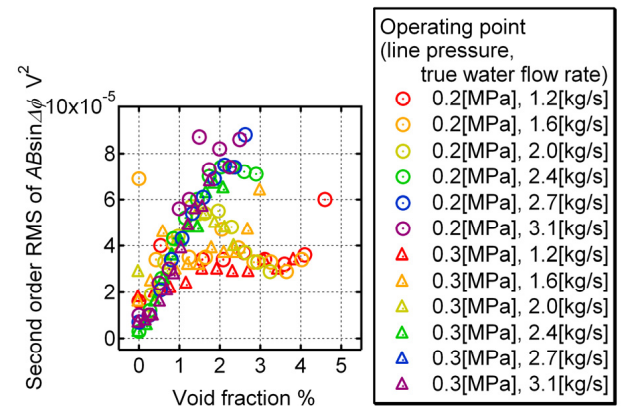


Fig.9 Relation between second order RMS of $AB\sin\Delta\phi$ and void fraction

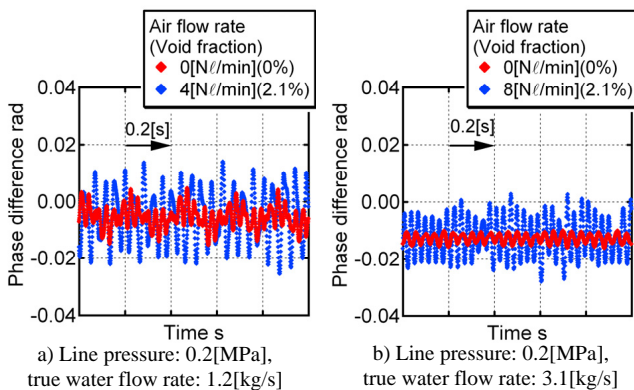


Fig.7 Phase difference of flow tube

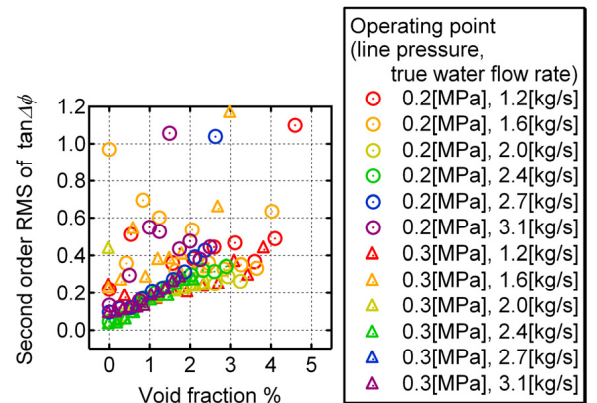


Fig.10 Relation between second order RMS of $\tan\Delta\phi$ and void fraction

否かにより運転動作点の影響を受けることなく、ボイド率 0.5%までに空気混入の有無を診断できる。

なお、ボイド率が 1%以上では、基準質量流量が少ないほど $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS は一度増加するものの減少、または増加が飽和している。この原因は次節で考察するが、ボイド率が 1%以上であっても、 $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS はゼロよりも十分大きいから、空気混入の有無は診断できる。

一方で、Fig.9 および Fig.10 より $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS はボイド率が 0%であっても、それぞれの診断指標がゼロではない運転動作点があることを確認できる。特に、 $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS は変化量が小さいことから、空気混入の有無を診断することは難しい。

また、これら 2つの診断指標はボイド率とは無関係に著しく増加する可能性があることがわかる。これは、 $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の S/N 比が小さいためである。 $AB\cos\Delta\phi$ は(7)式のように 2つの項の和であり、左辺の算出精度は右辺の各項とほぼ同等である。しかし、コリオリ質量流量計において位相差 $\Delta\phi$ は非常に小さいことから、(6)式の減算において $AB\sin\Delta\phi$ は右辺の各項に比べて算出精度が著しく低下する。このとき、気液二相流において算出される $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ が算出精度に比べ小さい場合に、空気混入量とは関係なくパワース

ペクトル密度が増加する可能性がある。これらの結果は、Fig.9 および Fig.10 において診断指標の著しい増加として現れる。以上の結果より、 $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS は空気混入を診断する指標として不適切であるといえる。

4. 4 パワースペクトル密度による診断指標の有効性評価

前節より、コリオリ質量流量計内に空気を混入させた場合に、 $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS はゼロから増加するが、 $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS は単相流でもゼロにならないことがわかった。また、 $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS はボイド率が 1%以下であれば、一定の増加傾向を示すものの、ボイド率が 1%以上であるときに減少または飽和することがわかった。

本節では、これらの原因を明らかにするため、3つの運転動作点において $AB\cos\Delta\phi$ 、 $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ を MATLAB により FFT 解析する。これにより得られたパワースペクトル密度を運転動作点ごとに Fig.11、Fig.12 および Fig. 13 に示す。対象とする運転動作点はいずれもライン圧力 0.3[MPa]、基準質量流量は順に 3.1[kg/s]、2.0[kg/s]、1.2[kg/s] である。このとき得られるパワースペクトル密度より診断指標で対象としている関数の揺動の増減を調査する。なお、 $AB\cos\Delta\phi$ 、 $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ は、2つのセンサ出力の共振周波数成分から算出した関数である。したがって、 $AB\cos\Delta\phi$ 、

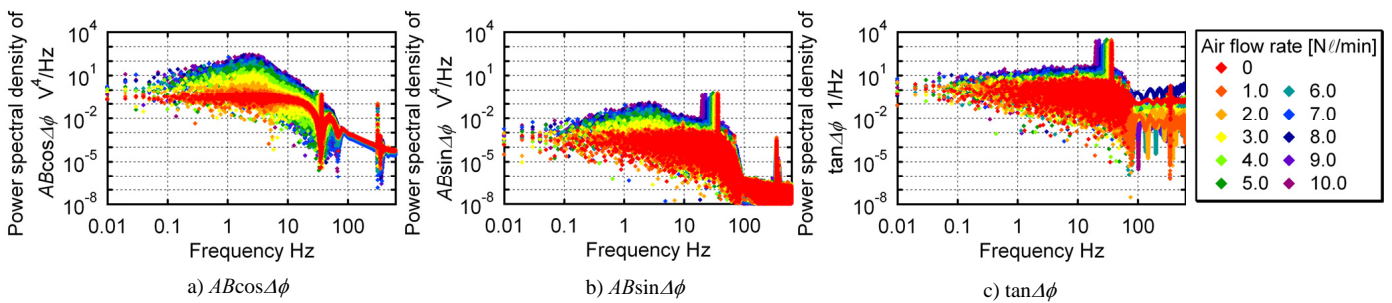


Fig.11 Power spectral density of diagnostic indexes (line pressure: 0.3[MPa], true water flow rate: 3.1[kg/s])

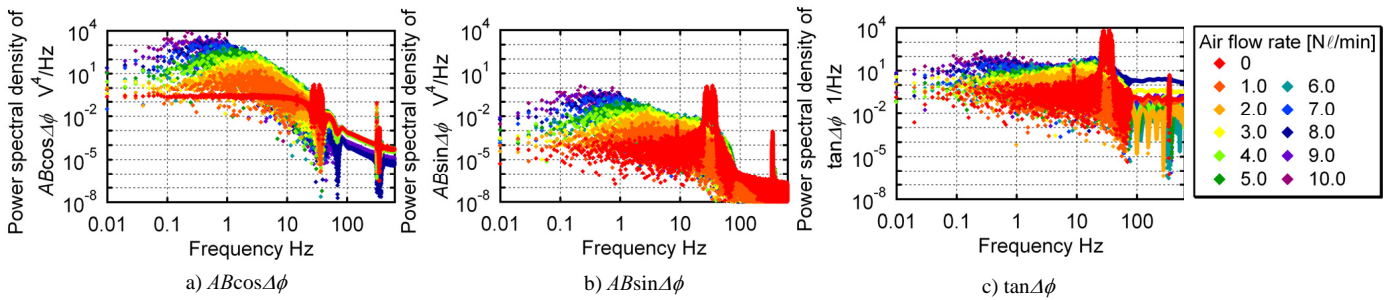


Fig.12 Power spectral density of diagnostic indexes (line pressure: 0.3[MPa], true water flow rate: 2.0[kg/s])

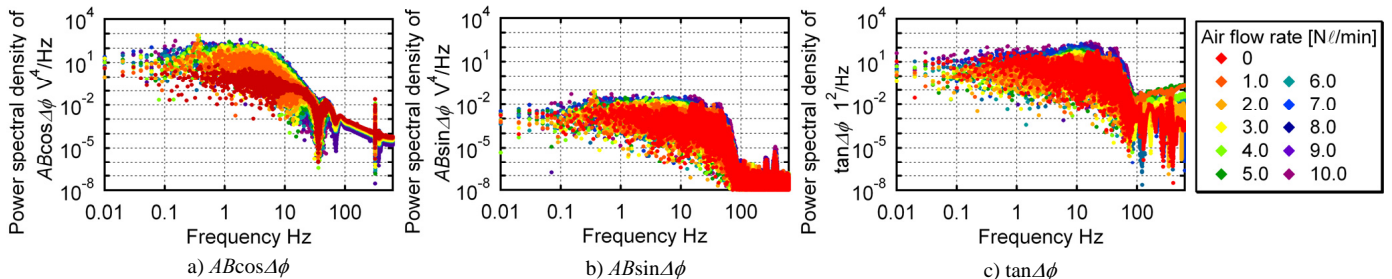


Fig.13 Power spectral density of diagnostic indexes (line pressure: 0.3[MPa], true water flow rate: 1.2[kg/s])

$AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ の周波数特性と、センサ出力における周波数特性は全く関係ない。

まず Fig.12 では、空気混入量の増加に対して $AB\cos\Delta\phi$, $AB\sin\Delta\phi$ および $\tan\Delta\phi$ のパワースペクトル密度はいずれも増加することがわかる。これは、気液二相流では位相差 $\Delta\phi$ の揺動が増加することを示している。しかし、Fig.11-c)および Fig.13-c)より運転動作点によっては、 $\tan\Delta\phi$ のパワースペクトル密度で著しい増加が見られないことがわかる。これは、位相差 $\Delta\phi$ は質量流量に比例することから、 $\tan\Delta\phi$ は脈動などの質量流量における揺動を含んでいるためである。その結果、Fig.8 に示すようにボイド率が 0%であっても $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS がゼロにならず、またその増加量も少ない。このことから、 $\tan\Delta\phi$ の二階差 RMS による空気混入の診断は難しい。

$AB\sin\Delta\phi$ は位相差 $\Delta\phi$ のほかに振幅の揺動も含んでいることから、Fig.11-b)のように $\tan\Delta\phi$ で診断できない場合でもパワースペクトル密度の増加が見られる。これは、Fig.9 を Fig.10 と比べてとき、 $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS の方がボイド率に対する増加割合が大きいことからわかる。しかし、コリオリ質量流量計で算出される位相差は非常に小さいことから $\sin\Delta\phi$ は $\tan\Delta\phi$ にほぼ等しい。その結果、気液二相流での $AB\sin\Delta\phi$ の揺動が質量流量の揺動に比べて小さい場合は、Fig.13-b)のようにパワースペクトル密度に著しい増加は見られない。その結果、Fig.9 においてもボイド率が 0%のとき $AB\sin\Delta\phi$ の二階差 RMS がゼロにならず、空気混入の有無を診断することは難しい。

一方で、 $AB\cos\Delta\phi$ はいずれの運転動作点においても空気混入量に対してパワースペクトル密度が著しく増加している。これは、位相差 $\Delta\phi$ が非常に小さいことから $\cos\Delta\phi$ はほぼ1で一定であり、質量流量の揺動が数値的に縮小されているためである。その結果、Fig.11-a), Fig.12-a) および Fig.13-a)のように質量流量の揺動に関係なく、空気混入量に対しパワースペクトル密度が増加する。これが Fig.8 において、 $AB\sin\Delta\phi$ の二階差 RMS がゼロから増加する理由である。

なお、気液二相流での $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS は、基準質量流量が多い場合は Fig.11-a)のように約 2[Hz]を中心にパワースペクトル密度が増加している。このときの二階差 RMS は空気混入量に比例して増加している。一方で、Fig.11-b)のように基準質量流量が減少すると、空気混入量の増加に対し、パワースペクトル密度の増加する周波数が低周波数域に移動する。これは基準質量流量が小さい場合に空気混入量を増やすと、気泡が大きくなるのと同時に気泡の数が減少するためである。特に、より基準質量流量の少ない Fig.13-a)では、1[N/min]以上の空気混入量では高周波数域におけるパワースペクトル密度の増加がほぼ飽和している。その結果、Fig.8 において基準質量流量が 1.6[kg/s]以下である場合、ボ

イド率が 1%以上では、低周波数域の揺動の増加を評価することができず、 $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS の増加は飽和する。なお、この場合も単相流と比較すると、 $AB\cos\Delta\phi$ の二階差 RMS は十分大きいことから、空気混入の有無は診断できる。しかし、 $AB\cos\Delta\phi$ の揺動から空気混入量も推定するためには今後診断手法を改良する必要があるといえる。今後は、低周波数域における揺動の増加も含めて定量評価し、基準質量流量が少なく空気混入量が多い場合においても空気混入量を評価することが課題である。

5. 結言

本論文では、運転動作点の影響を受けることなく、空気混入の有無を診断する手法として、2つのセンサ出力の相関における揺動に注目する手法を提案した。この診断手法の有効性を明らかにするため、水を測定対象とするメインラインにおいて圧縮空気を混入させ、気液二相流を模擬した。

また、単相流ではこれまでフーリエ変換を始めとする複数の流量算出手法が利用されているが、気液二相流での質量流量算出のために既存の手法の中からヒルベルト変換を利用した流量算出手法を適用した。その結果、これまで水の質量流量にも影響されるとされてきた質量流量の測定誤差がボイド率にのみ依存することを実験的に明らかにした。これは、センサ出力の振幅および共振周波数が高周波数域で揺動する気液二相流において、ヒルベルト変換を利用することにより高精度で位相差を算出できるためだと考えられる。

この流量算出手法を適用した上で、2つのセンサ出力の相関における揺動に注目する診断手法の有効性を明らかにした。その結果、 $AB\cos\Delta\phi$ の二次階差を RMS により評価した診断指標により単相流への空気混入の有無を診断できることを明らかにした。特にこの診断指標は、単相流ではゼロである一方、気液二相流では著しく増加することから、運転動作点の影響を受けることなく空気混入の有無を診断できる。ただし、この診断手法は、ボイド率が増加すると、運転動作点により気泡の大きさが成長することを考慮していない。このことから、ボイド率が 1%以上の場合は空気混入量を推定することは難しい。したがって今後、空気混入量を推定し、その上で水のみ質量流量へ補正するアルゴリズムを実用化するためには、低周波数域を含めた揺動の診断手法をより改良する必要がある。

本論文で明らかにした空気混入診断手法の有効性は、本実験設備で利用したコリオリ質量流量計における、気液二相流の流動様式下での調査結果に基づくものである。そこで、フィールド試験を重ねることで、異なる気液二相流の流動様式を持つコリオリ質量流量計での適用性についても調査を進めていきたい。

参考文献

- 1) Fieldbus Foundation: FOUNDATION Fieldbus Technical Overview, FD-043, Rev 3.0 (2003)
- 2) 石川, 尾土平, 新国, 小山, 津曲, 浅田: 新差圧・圧力伝送器 Dpharp EJX シリーズ, 横河技報, **48-1**, 13/18 (2004)
- 3) 関口敏夫: 第 2 世代のフィールドバス対応フィールド機器, 横河技報, **45-3**, 19/22 (2001)
- 4) 吉川, 宿谷, 田中, 田邊, 新井, 太田: 新電磁流量計 ADMAG AXF シリーズ, 横河技報, **48-1**, 19/24 (2004)
- 5) 栄野, 上原, 涌井, 橋詰, 宮地, 結城: 水流下でのオリフィス前後圧力の位相差を利用した導圧管の詰まり診断, **7-9**, 60/66 (2008)
- 6) JIS B 7555: コリオリメータによる流量測定方法 (質量流量, 密度及び体積流量測定) (2003)
- 7) ISO 10790: Measurement of fluid flow in closed conduits -- Guidance to the selection, installation and use of Coriolis meters (mass flow, density and volume flow measurements) (1999)
- 8) J. Hemp and J. Kutin: Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered, Flow Measurement and Instrumentation, **17-6**, 359/369 (2006)
- 9) M. Henry, D. Clarke, N. Archer, J. Bowles, M. Leahy, R. Liu, J. Vignos and F. Zhou: A self-validating digital Coriolis mass-flow meter: an overview, Control Engineering Practice, **8-5**, 487/506 (2000)
- 10) R. Liu, M. Fuent, M. Henry and M. Duta: A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital coriolis mass flowmeter, Flow Measurement and Instrumentation, **12-1**, 53/63 (2001)
- 11) 西村, 小泉: AD/DA 変換器における振幅および周波数変動の測定, 電子情報通信学会技術研究報告, **HDA01-6**, 6/16 (2001)

[著 者 紹 介]

上 原 彬 (正会員)



2006年早稲田大学工学部機械工学科卒業。08年同大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年同大学基幹理工学研究科機械科学専攻博士課程入学，09年日本学術振興会特別研究員，現在に至る。エネルギー・動力システムの診断・監視技術の研究に従事。

日本機械学会会員。

宮 地 宣 夫



1973年東京工業大学機械物理工学部卒業，同年横河電機(株)入社，フィールド機器，差圧・圧力伝送器の開発設計に従事。現在，フィールド機器を利用したプラント周辺機器診断技術開発に従事。

橋 詰 匠 (正会員)



1979年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。76年同大学理工学研究所助手，同専任講師，同助教授を経て，87年同教授。現在同大学理工学術院教授。エネルギー・動力システムに関する研究等に従事。日本機械学会，日本フルードパ

ワーシステム学会他会員。

涌 井 徹 也 (正会員)



2001年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1999年日本学術振興会特別研究員，早稲田大学理工学総合研究センター助手，同客員講師，大阪府立大学大学院工学研究科助手，同助教を経て，現在，准教授。エネルギーシステ

ム・各種プラントの最適設計・運用・制御，監視・診断の研究に従事。日本機械学会，ASME 他会員。

吉 野 晶 紀



2005年法政大学大学院工学研究科情報電子工学専攻修了，同年横河電機(株)入社。自動検査装置，フィールド機器の診断技術の開発に従事。

角 口 開 道



1972年大阪府立今宮工業高等学校電気科卒業。同年横河電機サービス(株)入社，サービス・エンジニアリングを担当。2006年横河電機出向。フィールド機器による診断技術の開発に従事。