

コリオリ質量流量計の力学的挙動解明と
液体中への空気混入診断の研究

Clarification of Mechanical Behavior of
Coriolis Mass Flow Meters and
Diagnostics of Aerated Flow in Liquids

2014年7月

早稲田大学大学院基幹理工学研究科
機械科学専攻 制御工学研究

上原 彬

Akira UEHARA

目 次

第 1 章 序論	1
1. 1 研究背景	1
1. 1. 1 プロセスオートメーションにおけるコリオリ質量流量計の位置づけ	2
1. 1. 2 コリオリ質量流量計の測定技術を支える通信規格とその将来性	7
1. 2 従来研究	11
1. 2. 1 管理保全技術に貢献するフィールド機器の自己診断機能	11
1. 2. 2 混相流を対象とした流量測定技術の現状と課題	12
1. 2. 3 空気の混入がコリオリ質量流量計の流量測定に与える影響	14
1. 2. 4 コリオリ質量流量計における空気混入有無診断	16
1. 3 本論文の目的	17
1. 4 本論文の構成	18
第 2 章 気液二相流におけるコリオリ質量流量計の力学的挙動の解明	19
2. 1 コリオリ質量流量計の流量算出手法	19
2. 2 コリオリ質量流量計の測定原理と気液二相流で予想される力学的挙動	24
2. 3 空気混入が従来のコリオリ質量流量計の流量測定値に与える影響	31
2. 3. 1 動的状態下での流量測定値の応答性評価	35
2. 3. 2 静的状態下での流量測定値の特性評価	36
2. 3. 3 従来の位相差算出手法が持つ問題点	39
2. 4 気液二相流に適用可能な流量測定手法の提案	44
2. 5 気液二相流におけるコリオリ質量流量計の力学的特性の解明	47
2. 6 気液二相流におけるコリオリ質量流量計の力学的特性のまとめ	50
第 3 章 空気混入がコリオリ質量流量計の流量測定値に与える影響	51
3. 1 気液二相流における流量測定偏差	51
3. 1. 1 従来の流量算出手法における流量測定偏差	55
3. 1. 2 ヒルベルト変換を利用した流量算出手法における流量測定偏差	55
3. 2 空気混入量と流量測定偏差の関係	60
3. 3 空気混入がコリオリ質量流量計の流量測定値に与える影響のまとめ	60
第 4 章 2 つのセンサ出力間における相関の揺動を利用した空気混入診断	62
4. 1 2 階差 RMS によるセンサ出力間の相関における揺動特性の定量評価	62
4. 2 気液二相流下でのセンサ出力間における相関の揺動特性	66
4. 3 センサ出力間における相関の揺動を応用した空気混入診断	69
4. 4 センサ出力間における相関の揺動を応用した空気混入診断	74
第 5 章 センサ出力の振幅を利用した流量測定偏差の推定	75
5. 1 空気混入がコリオリ流量計の振動特性に与える影響	75

5. 2 センサ出力の振幅による測定偏差補正手法の評価	78
第6章 結論	82
付録	86
謝辞	89
参考文献	90
研究業績	95

記号表

A	: センサ出力 A の振幅	V
B	: センサ出力 B の振幅	V
b	: 切片	
C	: 係数	
D	: 変位速度に比例した減衰定数(ダンピング)	
d	: U字管半円部半径	m
F	: 力	N
f	: 周波数	Hz
G	: 質量流量	kg/s
H	: 振動半径	m
I	: 慣性モーメント	m ² kg
K	: ゲイン	
K	: 曲げ剛性(ばね定数)	N/m
L	: コリオリ質量流量計の長さ	m
m	: 質量	kg
N	: 代表時間におけるセンサ出力のデータ数	
P	: 振動の振幅	m
Q	: 体積流量	m ³ /s
S	: 電磁流量計の断面積	m ²
s	: 傾き	
T	: 温度	°C
u	: 流速	m/s
t	: 時間	s
V	: 電圧	V
v	: 速度	m/s
x	: 代表値の番号	
X	: 複素数	
Z	: 変位	m
z	: センサ出力の振幅が 0[V]になる回数	
β	: 容積流量比	%
θ	: 角度変位	rad
ρ	: 密度	kg/m ³
ϕ	: 位相	rad
ω	: 角速度	rad/s

添え字

A	: 上流側センサコイル
air	: 気泡
ave	: 平均
B	: 下流側センサコイル
C	: フローチューブ
cori	: コリオリ質量流量計
centrifugal	: 遠心力
coriolis	: コリオリの力
correction	: 補正
F	: 液体
g	: ゲイン
mag	: 電磁流量計
max	: 最大
min	: 最小
mode	: 最頻
n	: 固有
R	: 半径
s	: 単相流
T	: ねじり
two	: 気液二相流
U	: フローチューブ
w	: 水
0	: 初期値

1. 1 研究背景

産業革命が起こって以来，現在まで多くの産業では，高効率，低コスト生産による利益拡大を目指し，生産ラインの自動（オートメーション）化が進められてきた．しかし，環境破壊やエネルギー資源の枯渇が大きな問題となっている中，高効率，低コストであると同時に環境負荷の低い持続可能なシステムへの転換が迫られている．また，近年大規模な災害や設備の突発的な故障を引き金とした，プラントの重大事故が頻発している．このため，プラントでは予期せぬ問題が発生した場合にも，安全に運転を継続または停止できるシステムの構築が強く求められている．特に大規模なプラントでは，最初は小さな不具合であっても，その後の対応により，個々の人命や金銭的な損失のみならず，地域や国家までに被害が及ぶ場合もある．したがって各プラントでは，問題が発生した場合のリスクを十分把握した上で，故障時のアラーム発信，運転マニュアルによる対応など安全管理を徹底する必要がある．

本論文は，プラントでの需要が高まっているコリオリ質量流量計において，気液二相流下におけるこれまでの流量測定手法の問題点を指摘するものである．また，水と空気による 2 成分混合流体により気液二相流を模擬し，空気が混入した時のコリオリ質量流量計の力学的挙動を明らかにすることで，気液二相流下でも有効な流量測定手法を提案している．さらにこれらの結果で得られた非定常特性を応用して，測定に不具合が発生する場合にはアラームを発信し危険状態を回避する診断アルゴリズムの構築，さらに気液二相流下での流量測定偏差を推定するシステムを提案することを目的としている．

本節ではまず，他の流量計にはないコリオリ質量流量計独特の特性に焦点を当てつつ，近年プラントで流量計に求められている条件，またその中でのコリオリ質量流量計位置づけを示す．また，コリオリ質量流量計の特徴を生かす上で重要な役割を果たしている，プラントにおける通信技術の動向を示し，今後のプラントの安全管理技術の可能性を記す．その上で，コリオリ質量流量計に

おける不具合として最も問題視されている，気液二相流での測定の不具合，および現状での対応状況と課題点を明らかにしていく．

1. 1. 1 プロセスオートメーションにおける

コリオリ質量流量計の位置づけ

産業オートメーションの歴史は非常に長く，時代を経るにしたがって，取り扱われる製品が多様化している．それらの製品に応じて，高効率または安全な生産を目的とした測定および制御機器においても，必要とされる条件が変わり，同時に新たな機器が出現している．本項では，この中でも比較的歴史の浅いコリオリ質量流量計に注目しその位置づけを明らかにしていく．

産業オートメーションでは，プロセスオートメーションとファクトリーオートメーションの2つに大別される．(以後，それぞれ PA, FA と呼ぶ．) PA とは，液体および気体などの流体に対して物理的あるいは化学的な処理を加える，石油の精製や薬品製造などの原料(プロセス)の生産工程を中心としたシステムを示す．PA のシステムでは生産物の移動は主に配管によって行われる，また PA の生産工程では，流量，圧力，温度，液位および密度などのプロセスの状態量(以後，プロセス値と呼ぶ)を測定し，適切な処理量をバルブなどのアクチュエータで制御することでシステムを自動化している⁽¹⁾．

FA とは，特定の形状に加工した部品を組み立てる工程を中心としたシステムである．FA の生産物は工程により，形状や大きさが様々であることから，その移動は主にベルトコンベアなどによって行われる．また，FA の生産工程では，位置，速度，力などを測定し，組み立て時のロボットアームや次の工程へ移動させるベルトコンベアなどを制御することでシステムを自動化している．

本論文で取り扱うコリオリ質量流量計は，この2つのオートメーションの内，PA において活躍する工業計器の1つである．

(1) プロセスオートメーションと流量測定

流量計とは，PA においてプロセスの流量を測定する機器である．流量はポンプやバルブによって比較的容易に制御できることから，流体の温度や化学反応の速度，反応物の混合比率などを調整するために利用される．また，流量の中でも特に質量流量は，生産能力を評価する指標となる最も重要なプロセス値と

して使用される。このことから、目的に応じて流体の質量流量をいかに正確に測定できるかが、生産効率およびシステムの安全管理能力を大きく左右する。

ただし、全ての流体を条件に関係なく、高精度に測定できる流量計は存在しない。このため PA では、測定したい流体の物性や、測定範囲、測定精度などの測定条件、さらにはコストや使用目的などを総合し、最適な測定原理を持つ流量計が選択される。表 1.1 に最適な流量計を選定する際の基準となる各種流量計の特徴を示す⁽²⁾⁻⁽¹²⁾。

Table 1.1 Characteristics of flowmeters

Type	Applications	Accuracy	Measurement value (multi-variable type)	Installation
Differential pressure	Vapor, gas or liquids	1 ~ 3%	Volumetric flow rate (Pressure and temperature)	Need straight pipe run
Variable area	Vapor, gas or liquids	1 ~ 2%	Volumetric flow rate	Only vertical alignment
Volumetric	gas or liquids (including viscous liquids)	0.2 ~ 0.5%	Volumetric flow rate	
Turbine	Vapor, gas or liquids	0.2 ~ 0.5%	Volumetric flow rate	Need straight pipe run
Vortex	Vapor, gas or liquids	1 ~ 1.5%	Volumetric flow rate (Temperature)	Need straight pipe run
Electromagnetic	Liquid or slurries (Only conductive fluids)	0.2 ~ 1%	Volumetric flow rate	Need straight pipe run
Ultrasonic	Clean liquid (Transit time) Dirty or aerated liquid (Doppler)	0.5 ~ 2% (Transit time) 5 ~ 10% (Doppler)	Volumetric flow rate	Need straight pipe run
Coriolis	Vapor, gas, liquids (including viscous liquids) or slurries	0.1 ~ 0.5%	Mass flow rate (Pressure, temperature, density)	
Calorimetric	Vapor or gas	0.1% ~ 5%	Mass flow rate	

(2) コリオリ質量流量計の位置づけ

コリオリ質量流量計とは、コリオリの力を利用して流量を測定する流量計である。この流量計は1本または2本の曲がった配管、それを振動させるための振動子（以後、励振コイル）、コリオリ力の影響を受けた配管の振動を検出するためのセンサ（以後、センサコイル）で構成される。なお、配管の形状は直管型、U字型、B字型など様々であるが、その基本的な原理は同一である⁽¹³⁾⁻⁽¹⁶⁾。このコリオリ質量流量計は他の流量計と比較して高コストである一方、以下に示す特徴を持つことから、現在急速にシェアを伸ばしている。

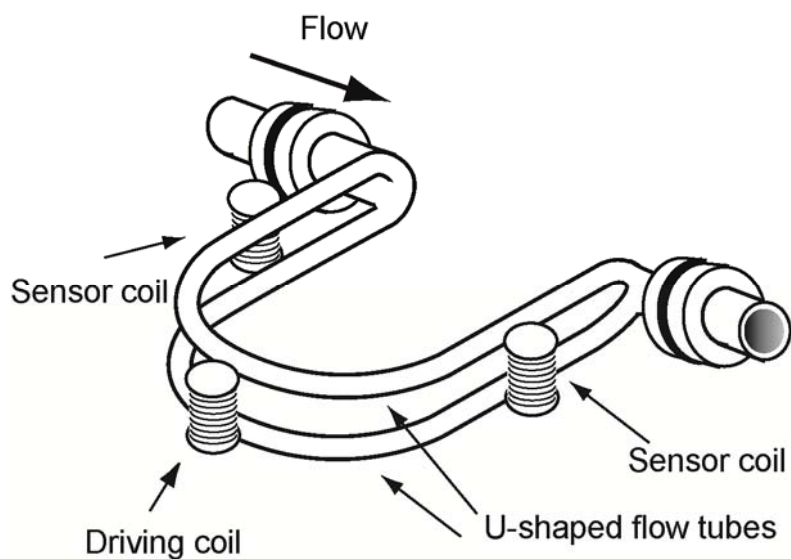


Fig.1.1 General view of Coriolis flowmeter

- ① 質量流量の直接測定
- ② 高い測定精度
- ③ 流量以外のプロセス値の同時出力機能
- ④ 広範な測定可能流体

これらの特徴について、表 1.1 に示した他の流量計の特徴と比較しつつ、コリオリ質量流量計の PA における位置づけを示す。

① 質量流量の直接測定

質量流量を直接測定できるのはコリオリ質量流量計と熱式流量計⁽¹⁷⁾のみである。一方で、これらの流量計以外は、まず体積流量を測定し、別途測定した密度から間接的に質量流量を換算する必要がある。密度換算では、成分が既知の流体であれば圧力伝送器⁽¹⁸⁾、温度伝送器等⁽¹⁹⁾を同一測定箇

所に設置の上，温度，圧力補正するのが一般的である．また，近年では，流量計内に温度伝送器を内蔵し，質量流量の換算に必要な機器の数を減らした機器も登場している⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾．ただし，複数の流体を反応させるようなラインで，その混合比率が変動するような流体を測定する場合には，依然としてガスクロマトグラフ⁽²³⁾，振動式液体密度計⁽²⁴⁾等直接密度を測定する機器に頼らざるをえない．

一方でコリオリ質量流量計は直接質量流量を測定できる特徴を持つ．したがって，成分が変動する流体の質量流量測定であっても，コリオリ質量流量計単体で密度と質量流量を同時に出力できる．なお，熱式流量計もコリオリ質量流量計と同様に質量流量を測定できるが，その測定対象はガスまたは蒸気に限られる．したがって，コリオリ質量流量計は唯一液体で質量流量を直接測定できる流量計であるといえる．

② 高い測定精度

流量計は流量測定の際に流体からエネルギーを抽出し評価するもの，外部からエネルギーを付加しその応答を評価するものの2つに分類できる．前者のようなエネルギー抽出形の流量計は差圧式流量計⁽¹⁸⁾，面積式流量計⁽²⁵⁾，タービン式流量計⁽²⁶⁾，容積式流量計⁽²⁷⁾および渦流量計⁽²⁸⁾が該当する．エネルギー抽出形の流量計は外部からの電源供給を必要としないことから，歴史の古い流量計が多い．ただし，これらの流量計は流量測定範囲が狭く，特にゼロ点付近では抽出できる流体エネルギーが少ないことから，測定が難しいとされている．

一方，電磁流量計，超音波流量計およびコリオリ質量流量計は外部エネルギー付加形に分類され，一部の例外を除き⁽²⁹⁾電源供給が必要不可欠である．ただし，流体エネルギーに依存しないため，ゼロ点付近を始め広い流量測定範囲で流量を測定でき，その測定精度も高い．特にコリオリ質量流量計は，高精度のものでは測定精度が0.1%を下回る⁽³⁰⁾ものも存在する．このことから，高付加価値の流体の高精度測定にコリオリ質量流量計は最適である．

③ 流量以外のプロセス値の同時出力機能

コリオリ質量流量計は質量流量を測定する際の副産物として，同時に密度を測定できる．したがって，体積流量が必要な場合でも，コリオリ質量流量計ならば追加のフィールド機器を必要しない．さらにコリオリ質量流量計は，このような機能は，マルチバリアブル機能⁽³¹⁾と呼ばれ，この他に

内蔵の熱電対によって測定された流体の温度も必要に応じて測定，出力できる．このマルチバリアブル機能は，対応した通信規格を持つシステムを採用することで，より高度な制御，監視システムを構築することも可能となる．なお，同様のマルチバリアブル機能を持つフィールド機器としては，圧力，温度を同時に測定できる差圧伝送器⁽³²⁾，温度を同時に測定できる渦流量計^{(33),(34)}が既に実用化されている．これらの流量計は前述した質量流量測定に必要な機器を減らす目的で開発されたものであるが，各プロセス値そのものを機器外へ出力することも可能である．

④ 広範な測定可能流体

コリオリ質量流量計は力学的な測定原理を採用していることから，他の流量計と比較しても測定対象が広く，蒸気，気体および液体，さらには高粘性流体やスラリーの流量までも測定できる．また後述するが，コリオリ質量流量計は同時測定している密度を利用することによって，複数の密度の異なる流体が混合している場合であってもそれぞれの質量流量を測定できる場合がある．

コリオリ質量流量計は，以上のような特徴を持つことから，石油や薬品などの高付加価値であり，かつ複数の成分を混合するプロセスを中心に急速にシェアを広げており，今後もより活躍の場が広がることが期待されている．

1・1・2 コリオリ質量流量計の測定技術を支える通信規格とその将来性

前項ではコリオリ質量流量計の特徴の1つとして，マルチバリアブル機能を挙げた．この機能は本論文の目的である診断アルゴリズムの構築にあたり，複数のプロセス値を取得する上で重要な機能である．ただし，この機能をPAで利用するには対応した通信規格が必要となる．本項では，PAにおける従来の通信規格を踏まえた上で，近年急速に普及しつつあるフィールドバス通信規格，特にFOUNDATIONフィールドバスによる制御システムについて述べ，コリオリ質量流量計におけるマルチバリアブル機能と診断アルゴリズムとの関連性を示す．

(1) 4-20[mA]通信規格の特徴とその課題

PA は DCS (Distributed control system) と呼ばれる分散型制御システムによる制御が現在主流である。圧力伝送器, 流量計などで測定されたプロセス値は, 主に電気信号によって DCS へ送信される。この伝送された信号は DCS 上で演算, 処理され, 制御信号はバルブなどのアクチュエータへと伝送されることでシステムは自動化されている。

情報通信技術の進歩によりデジタル通信が普及するまで, PA の通信は 4-20[mA]のアナログ通信規格が中心であった。図 1.2 にアナログ通信規格の概略を示す。この通信規格は消費電力が少なく, 爆発性のプロセスを取り扱うプラントでも使用可能であるといった安全性, 信頼性の高さが特徴である。この特徴から, 4-20[mA]のアナログ通信規格は現在でも多くの設備において依然として広く使われている。

ただし, 4-20[mA]のアナログ通信規格は, 図 1.2 に示すように電流値により 1 つの情報を 1 方向にのみ通信することしかできない。したがって, コリオリ質量流量計のようなマルチバリエブル機能を持つフィールド機器は, 1 つのフィールド機器からプロセス値の数と同じ本数のケーブルを接続しなければならない。また, 不具合発生時などは, 各機器にブレインターミナルのようなポータブル機器を直接接続して暫定的にデータを取得する必要がある。このことから, 海外を中心とする, ほとんどの新規設備では新たな通信規格を適用し, DCS のみで機器と柔軟な双方向通信ができるシステムを積極的に導入されることが一般的となっている。

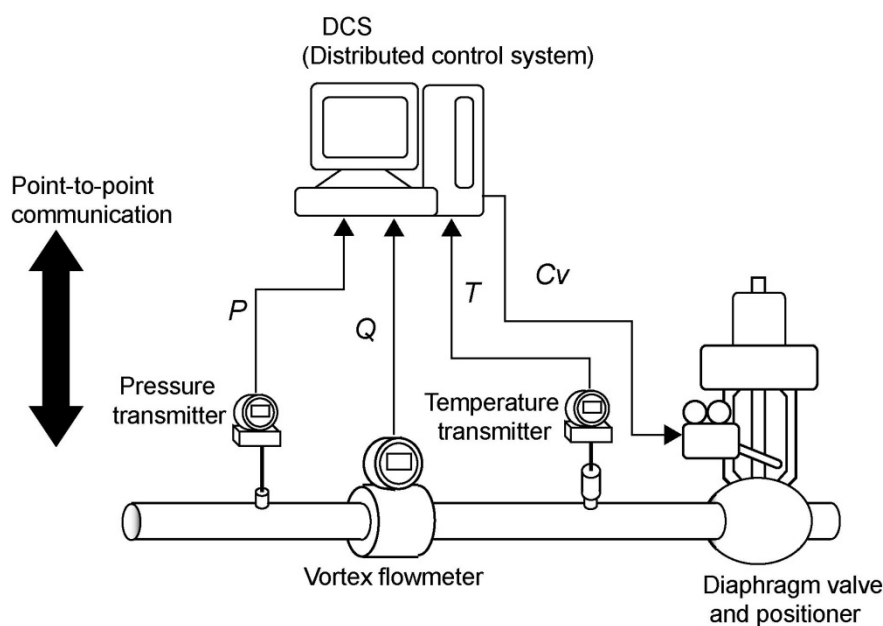


Fig.1.2 Communication flow of 4-20 mA system

(2) PAにおけるフィールドバス通信規格

4-20[mA]のアナログ通信規格に代わる通信規格として登場したのが、デジタル通信を採用したフィールドバス通信規格である。フィールドバス通信規格とは、“センサやアクチュエータ等のフィールド機器や制御監視システム間のデジタル、双方向、マルチドロップ通信規格”のことを示す⁽³⁵⁾⁻⁽³⁶⁾。フィールドバスは情報通信・処理能力が生産性に直結するFAの分野において以前から導入されており、CC-link⁽³⁸⁾やProfibus-DP⁽³⁹⁾といった規格がある。近年PAにおいても海外の新規設備を中心に導入されており、Profibus-DPの下位に接続される規格として登場したProfibus-PAや、FOUNDATIONフィールドバス⁽⁴⁰⁾⁻⁽⁴²⁾がその代表的なものである。また、既存の4-20[mA]のアナログ信号に、デジタル信号を重畳する、HART⁽⁴³⁾通信もPAで利用される。これらのフィールドバス通信規格では、入出力の数に応じてケーブルを配線する必要がない上、双方向通信を利用することで、柔軟に入出力を操作できる。

PAにおけるフィールドバス通信規格の中でもFOUNDATIONフィールドバスは、これまでDCSが一括管理していた制御機能をその役割ごとに機能ブロックとしてフィールド機器上に配置できる機能を持つ。これらの制御機能が分散配置された機器を利用することで、図1.3に示すように、下位のフィールド機器同士が相互に通信することで、上位のDCSを介さず自律的に制御することもできる。また、ユーザーの目的に合わせて、複数のデータ出力機能やアラーム通知などのプロセス監視機能^{(44),(45)}をフィールド機器に搭載できる。これにより、DCSに集中的な負荷をかけることなく、高度な演算処理を必要とするフィールド機器および分散制御システムを導入できる。これまでに、電磁流量計の絶縁物付着⁽⁴⁶⁾やバルブの診断^{(47),(48)}などのフィールド機器で発生する不具合を対象とした診断機能が各機器の機能ブロックとして搭載され、実用化されている。さらに、複数のフィールド機器の情報を利用した熱交換器の健全性に関する診断⁽⁴⁹⁾⁻⁽⁵¹⁾なども研究されており、今後これらの通信規格を利用することで、機器そのものは交換することなく、多様な監視・診断機能が搭載されていくことが期待されている。

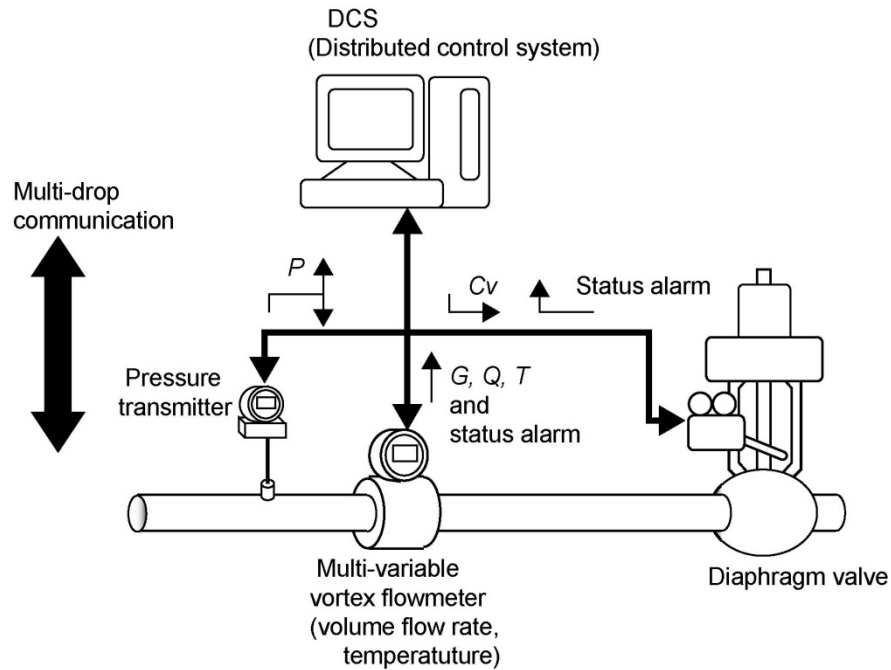


Fig.1.3 Communication flow of FOUNDATION Fieldbus system

(3) フィールドバス通信規格を利用した混相流測定への応用

コリオリ質量流量計は質量流量だけでなく密度や温度を同時測定できるマルチバリアブル機能を持つことから、この機能とフィールドバス通信規格を組み合わせることで、コリオリ質量流量計はより広い可能性を持つフィールド機器となる。その中でも期待されている機能の1つが、複数の成分が混合されている流体の測定である。具体的には2つの密度の異なる液体を混合した後、質量流量の他に混合比を監視したい場合、混合したそれぞれの流体の密度が既知であれば、測定した密度から混合比を測定できる⁽⁵²⁾。このときフィールドバス通信規格を導入していれば、機器内部で混合比を演算し補正した質量流量を直接出力することも、必要に応じて混合比を出力することもできる。また、制御機能のフィールド機器への分散や、フィールド機器による自己診断機能を有するFOUNDATIONフィールドバスを応用すれば、本論文で焦点を当てている空気混入による測定異常が発生した場合でも、測定異常をアラームで警告できるほかに、DCSの不具合が同時に発生した場合でもDCSを介さずに安全側へ運転条件を変更できる。このことから、より信頼性を重視するのであれば、FOUNDATIONフィールドバスの機能ブロックとして自己診断機能を搭載するために必要不可欠な機能であるといえる。

1. 2 従来研究

コリオリ質量流量計は、広範囲の測定条件下で高い測定精度を持つ流量計である。ただし、他の流量計と同様に、コリオリ質量流量計においても流量測定の適用範囲には限界がある。その中でも最も測定が困難とされる流量測定は、多相流、特に気液二相流における流量測定である。従来研究ではこの測定範囲の限界をより広げるため多くの研究がされている。本節ではまず、第 1.2.1 項において近年フィールド機器で注目されている自己診断機能を、第 1.2.2 項で混相流を対象とした流量測定技術の現状と課題を、第 1.2.3 項でコリオリ質量流量計における空気混入診断の従来研究を示す。

1. 2. 1 管理保全技術に貢献するフィールド機器の自己診断機能

本項では、PA において従来利用されてきた管理保全技術である、定期保全と事後保全に注目しその課題を示す。その上で、フィールドバス技術の導入により今後主流となると考えられる、予知保全についてその特徴を述べ、その 1 つであるフィールド機器の自己診断機能に関する従来研究を記す。

(1) 定期保全と事後保全の課題

PA では、生産効率と安全性を両立させるため、定期的な設備更新とともに、定期保全、事後保全の 2 つの保全手法による安定した運転が図られてきた⁽⁵³⁾。定期保全とは、定期的にプラントを停止させ、その上で点検する手法を示す。この手法は、ほぼ一定の経年劣化が予想される機器に対して有効であるとされてきた。また、定期保全では対応できない突発的な不具合に対して、その不具合がプラントへ与える影響が少ない場合に限り、故障後にプラントを停止し、破損箇所を修理または交換する、事後保全と呼ばれる手法が併用されていた。

ただし、現在のプラントの置かれている状況下では、これらの 2 つの保全手法により十分な安全性を確保することは難しくなっている。特に近年では、設備投資の減少によりプラントの更新頻度が減少している⁽⁵⁴⁾。このようなプラントでは、これまで顕在化しなかった、経年劣化の予測が難しいリスクに対応することが難しい。また、定期保全においてむやみに機器の分解・組立を繰り返すと、逆に機器を故障させる要因を生み出す恐れがあることが指摘されている⁽⁵⁵⁾。このことから、コスト、安全面の両立が可能な、定期保全、事後保全に代わる保全手法への転換が求められている。

(2) 予知保全と自己診断機能

予知保全とは、フィールド機器から伝送される情報を元に、プラントの状態を常に監視し、今後予想される不具合の進行状況や発生時期を予測する保全手法である⁽⁵⁵⁾。この保全手法では、あらかじめ監視対象に不具合が発生する場合の予兆を捉えることで、突発的な不具合に対応する保全手法である。また、不用意な分解・組み立てが不要であることから、コスト削減、分解による故障の発生を防止できる。そのことから、定期保全はプラントの停止を減らしつつ、生産効率と安全性を両立できる手法であるといえる。なお、不具合を検出するためには、複数のプロセス値が必要となることから、前節で述べたフィールドバス技術によるマルチバリアブル機能を利用し、複数のプロセス値から分析・診断することが一般的である。

この予知保全において本研究で注目しているのが、プロセス値の高周波成分（以後、揺動と呼ぶ）を利用した診断手法である。これまで著者らは、差圧伝送器における導圧管詰まり診断において、圧力信号の揺動成分から診断する手法を提案し、その有効性を確認している⁽⁵⁶⁾⁻⁽⁵⁹⁾。流量計は一般に制御量として利用されることが少なくないことから、測定に支障を来す不具合が発生し、かつその不具合を検知できない場合、制御性が低下し、運転動作点の変動する恐れがある。このことから、流量計における不具合野診断では運転動作点の影響を受けないことが重要となる。差圧伝送器における導圧管の詰まり診断では、プロセス値である流量から直接の影響を受けない圧力信号の揺動成分を利用することで、運転動作点の影響を受けることなく、機器周辺の健全性を診断できる可能性を示した。

本論文においても、先行研究である導圧管の詰まり診断において得られた、流量計における診断手法を基に⁽⁵⁷⁾、コリオリ質量流量計におけるプロセス値の揺動成分に注目した、空気混入診断手法の有効性を論じている。これにより、本論文で取り上げるコリオリ質量流量計における空気混入診断においても、運転動作点の影響を受けることなく、不具合の予兆を捉えることを目指している。

1. 2. 2 混相流を対象とした流量測定技術の現状と課題

PAではさまざまな測定原理の流量計が使われており、その中でもコリオリ質量流量計は測定可能な流体が多いことが特徴である。しかし、いずれの流量計

も測定原理ごとに測定可能な流体に制限がある。この中でもほとんどの流量計において測定が困難とされているのが混相流である。混相流とは複数の物性が異なる流体が混合している流れを示す。特に、物性の異なる流体が管路内で分離し、さらに小さな塊となって浮遊している場合、ほとんどの単相流で流量を測定可能とされている測定原理が適用できない。したがって、万が一単相流のラインにおいて、予期しない複数の流体が混入した場合は、流量測定偏差が大きくなる、または流量そのものが測定できない恐れがある。

しかし、実際のプラントでは測定したい流体に物性の異なる流体が混合する事例は多数見られる。具体的には、石油掘削のように原油に天然ガスや砂、海水が混入する場合、洗剤や粘性流体が外気などに触れ、攪拌された場合などである。また、水と水蒸気のように同一成分で液相と気相が混合する場合も少なくない。このような気液二相流の状態が、石油などの付加価値の高い流体において発生し、流量測定に支障を来すと莫大な損失を被る恐れがある。

このような複数の成分を含みながら高い精度を求められる流量測定には、セレータにより各相を分離した上で流量計により測定する手法以外に、多相流流量計⁽⁶⁰⁾と呼ばれる特殊な流量計を用いて流量を測定する手法がある。それは、複数の流量計で測定した上で、配管内での各成分の混合状態を視覚的に検知し、多相流体の総体積流量と各相の体積占有率を測定することで、各相の正味体積流量を算出する手法である。各相の体積占有率を測定するには、 γ 線およびマイクロ波の減衰特性^{(61),(62)}、油-水-ガスそれぞれの電気特性（電気伝導率、静電容量等）の差異^{(63),(64)}、超音波のエコー特性⁽⁶⁵⁾などが利用される。これらのセンサを利用することにより多相流流量計は5~10%の測定精度で混相流の流量を測定できるとされている。ただし、混相流流量計は複数の測定機器を必要とすることから、非常に高価であり、適用範囲は石油などの高付加価値を持つ流体、かつ確実に混相流になると確認されている場合に限定されている。

表 1.1 で示した通り、流量計は基本的に単相流を想定したものであるが、コリオリ質量流量計は一部の混相流であれば流量を測定できることが知られている。これは、コリオリ質量流量計で流量と密度を同時に測定できることを利用するものである。具体的には、2成分で互いの流体に溶解しない液体（油と水の混合液、液体と固体のスラリーの混合液など）であれば、それぞれの密度が既知である場合に限り演算によって、各成分の正味質量流量が測定できる⁽⁵²⁾。このように質量流量と密度を同時に測定できる特徴を利用して、コリオリ質量流量計では気液二相流においても流量測定できる手法の確立が強く望まれてきた。これが実現できれば、これまでの多相流流量計を取り付けられなかった測

定箇所においても比較的安価に設置できることとなる。

1. 2. 3 空気の混入がコリオリ質量流量計の

流量測定に与える影響

コリオリ質量流量計は、水と油の混合液など一部の混相流の流量測定が可能な流量計である。このことから、気液二相流においても流量を測定できるコリオリ質量流量計の開発が進められている。しかし気液二相流では、単純に液体および気体の体積占有率より算出した平均密度および合計質量流量と比較して、コリオリ質量流量計で導出される質量流量測定値は大きく異なることが知られている。このことから、気液二相流における密度および質量流量の測定での課題を解決し、各成分の正味質量流量を算出する手法が数多く研究されている。

従来研究では、その多くが液体中に予期せず気体が混合する場合を想定し、液体の質量流量における測定偏差を補正し、さらには混入した空気の混入量を推定しようとしている。このために、それぞれ提案する理論モデルと実験結果を比較することで、空気混入時のコリオリ質量流量計における力学的挙動を明らかにしようとしている。本項では、これまでのコリオリ質量流量計における空気混入時の測定偏差を明らかにしようとする従来研究における課題を示す。

まず、気液二相流においてコリオリ質量流量計における測定偏差の問題を明らかにしたのは Grumski⁽⁶⁶⁾ ら (1984 年) である。Grumski⁽⁶⁶⁾ らは実験調査により、低流速であるほど測定偏差が大きくなり最大で 40% 近くの測定偏差が発生することを明らかにしている。

この測定偏差の問題に対し、J.Hemp⁽⁶⁷⁾⁻⁽⁶⁹⁾ および G.Sultan⁽⁷⁰⁾ ら (1989 年) は、この測定偏差の発生する原因が、チューブ内の液体中を浮遊している気泡が変形する際に消費されるエネルギーで説明できるとするモデル "Bubble Effect theory" を提案している。また、この仮説により質量流量の測定偏差は液体と気体の混合比にのみ依存するとしている。この仮説の中で J.Hemp⁽⁶⁷⁾ らは、コリオリ質量流量計に空気が混入すると、負の方向へ測定偏差が増大する傾向が、前述の Grumski⁽⁶⁶⁾ らの実験結果と合致していると述べている。ただし、Grumski⁽⁶⁶⁾ らの実験では、水の流速により測定偏差増大の程度が異なるという課題が残っており、J.Hemp⁽⁶⁷⁾ らの仮説では説明できていない。このことから、Hemp らはさらに気泡の大きさ、測定流体の粘性を考慮した "Viscosity Bubble Model"⁽⁷¹⁾ へと、さらにモデルをより正確にすることで実験結果と合致させるこ

とに力を入れている。

A. F. Skea⁽⁷²⁾ら（1999年）は油をプロセス流体とし、水または空気が混入した場合の流量測定偏差を様々な単相流用の流量計において実験的に評価している。この中で、U字型のフローチューブの他に、直管型のフローチューブを持つコリオリ質量流量計を対象として、油の中に空気を混入させた時の測定偏差を評価している。この結果、直管型であっても負の方向に測定偏差が発生し、さらに油の流量によってその偏差が変動することが確認された。これらの結果から、流体の物性やフローチューブの形状に関係なく、J.Hempらのモデルと実験結果の間に乖離があることが確かめられた。

M. P. Henry⁽⁷³⁾（2000年）および R. P. Liu⁽⁷⁴⁾ら（2001年）は、J.Hempらの提案した”Bubble Effect theory”を基に、変換器内部で演算処理を行うことで、気液二相流における測定偏差を補正した質量流量を出力できるとしている。Liuらは、この手法により、あらゆる空気混入に対し、プロセス流体である液体のみの質量流量を出力できるとしている。ただし前述の通り本手法の基となっている”Bubble Effect theory”は空気混入時の測定偏差が流速に依存することを説明できていない。このことから、コリオリ質量流量計で液体の温度、フローチューブにおける振動系におけるダンピング、密度変化および偏差を含んだ質量流量等の複数のデータを取得し、これら複数のプロセス値を元に、ニューラルネットワークを用いて液体のみの質量流量に補正している。この手法を適用すると、データの蓄積により5～10%の測定精度で質量流量を測定できるとしている。現在、さらに測定精度、および適用範囲を広げるため、水以外のプロセス流体⁽⁷⁵⁾、さらには油を含めた3相流⁽⁷⁶⁾においてデータ蓄積を進めている。

Seager M.⁽⁷⁷⁾ら（2005年）は複数の内径の異なるコリオリ質量流量計で空気を混入させ、気泡の大きさが内径に等しくなるような大量の空気を混入させた場合はJ.Hempらの提唱するモデル⁽⁶⁷⁾⁻⁽⁷⁰⁾とは異なり、気泡がフローチューブに接触した状態となることを確認している。また、このような時、フローチューブを持続振動させるための励振コイルに加える電圧出力(以後、励振ゲイン)が不足していることも同時に確認している。

現在、理論モデルと実験結果の乖離を補正するため、J.Hempらの他にDaniel⁽⁷⁸⁾ら（2006年）によって、音速や2つのフローチューブに流れる液体、気泡の不均等性も考慮する等により正確なモデル化が試みられている。ただし、いまだに測定流体の流速が空気混入時の測定偏差に与える影響を明らかにしたモデルは存在しない。

以上のように、空気の混入によって質量流量の測定偏差が発生する原因を理論モデルにより明らかにしようとしているが、実験結果との乖離が大きく、実用的と呼べるものは、M. P. Henryらによるニューラルネットワークによる流量補正の特許⁽⁷⁹⁾のみとなっている。ただし、Liuらの提案した手法で補正した質量流量は、本来コリオリ質量流量計が持つ測定精度とはほど遠く、いつ測定精度が低下するかを明確にしない限り、単相流におけるコリオリ質量流量計の測定精度を犠牲にしかねない。このため、Liuらのように質量流量を補正するならば、流量を補正する前提として空気混入の有無、すなわち空気混入が保証精度以上に測定偏差が大きくなるしきい値を明確にする必要がある。また、前述の通り、参考になっているモデルはすでに実験結果と乖離していることが明らかになっていることから、実用化の際は個々の設置個所で補正をしなければならないことが大きな課題である。

1. 2. 4 コリオリ質量流量計における空気混入有無診断

前項で示したように、気液二相流において単相流の時とは低い精度で流量補正をする場合には補正を必要とする条件の明確化、すなわち気体混入の有無を診断することが必要不可欠となる。気液二相流においてコリオリ質量流量計において空気混入の有無を診断する手法として2つの診断手法が提案されている。

一つ目の方法は Mark James Bellら⁽⁸⁰⁾による特許(2006)であり、空気が上流から下流へと通過する時のフローチューブ内で発生する突発的な密度変化を2つのセンサコイルにおいて気泡の通過を検出する手法である。この手法は、従来と比較し約1000倍の測定周期である3[μ s]周期でセンサ出力を取得することで、気泡の通過を捉えるとしている。ただし、密度の変動は測定流体の成分変動による密度変動や、固液二相流といった別の要因による密度変化も考えられ、限定されたライン条件以外では別の不具合と空気混入とを誤診する可能性があり、これらの切り分けることはできない。

二つ目の方法は Robert E. Duttonら⁽⁸¹⁾による特許であり、励振ゲインを利用した空気混入診断手法である。コリオリ質量流量計では、フローチューブが一定の振幅で持続振動するように励振ゲインを制御することから、空気が混入しダンピングが増加すると、持続振動に必要なエネルギーが増加する。その結果、空気が混入すると励振ゲインが増加する。この診断手法で用いている励振ゲインは、空気混入量が微少である場合でも大きく増加することから、診断感度が良いとされる。しかし、励振ゲインはそもそもフローチューブを振動させるた

めのエネルギーであり，コリオリ質量流量計の配管への取り付け方法やフランジの締め付け具合，あるいはフローチューブにおける腐食や異物の付着によっても変わってしまう．したがって，空気混入を判断する上で基準となる，单相流での励振ゲインが一点に定まらないことから，別の要因を空気混入と誤診する恐れがある．

以上のようにコリオリ質量流量計で空気混入を診断する手法はいずれも，空気混入以外でも変動する要素を診断指標としており，誤診の恐れがある．このことから，これらの手法に変わる診断手法により，高精度の流量測定が保証される条件を明確にする必要がある．

1. 3 本論文の目的

コリオリ質量流量計は，質量流量を直接また高精度で測定できる流量計であり，今後国内外で広く利用されることが期待される流量計である．この流量計は，質量流量を測定する過程で密度も測定できることから，混相流においても各成分を測定することが期待されている．しかし，気液二相流では，空気の混入量と測定偏差の関係が他の混相流と異なる上，従来研究では実験結果と合致するモデルを作成することが困難であった．ここで，プロセス流体が液体である場合，予期せぬ気体混入があった場合これを検知できない場合，その測定偏差によって制御性が低下し最悪事故につながる恐れがある．このことから，液体をプロセス流体とする場合において，万が一の気体混入に備え以下の測定手法および診断技術の確立が期待されている．

- ①測定偏差の発生原理および測定精度が保証されない条件の明確化
- ②精度低下前に前兆を捉える診断手法および安全側への運転条件移行
- ③測定偏差の発生を回避できなかった場合の流量補正手法

この3つの条件はいずれも実用化の段階に至っていないことから，本論文ではこれらの条件を満たすために

- (1) 気液二相流における，フローチューブの力学的挙動の解明
- (2) 空気混入が測定偏差に与える影響の解明および測定精度低下条件の定量化
- (3) 測定精度が低下する前に空気混入の有無を診断できる手法の構築
- (4) 測定偏差が発生した場合の流量補正手法の構築

を目的とする。コリオリ質量流量計は測定できるプロセス流体の範囲が広いことから、液体のプロセス流体だけでも密度、粘性等様々な物性が異なる他、混入する気体もプロセス流体の気化したものから、外部から混入したもの等様々なケースが想定される。本論文ではその中でも一般的な流体であるものの中から、プロセス流体を水および食塩水、気体を圧縮空気とした2成分気液二相流を対象とし実験調査による結果を基にして、各診断手法の構築することを目指す。

1. 4 本論文の構成

コリオリ質量流量計は高い測定精度が特徴であり、気液二相流によりその測定精度が低下する恐れがあることは、この流量計の特徴を脅かしかねない不具合である。したがってこれまでは、より詳細なモデルを構築することに焦点を当てて多くの研究がされていた。しかし、これまでいかに詳細なモデルをもってしても空気混入が測定偏差に与える影響を解明できなかった。これに対して本論文では、コリオリ質量流量計において質量流量を測定するために必要な、測定原理および流量算出手法に着目し、流量計を構成するフローチューブの振動における力学的挙動が、気液二相流により非定常となる場合には、従来の流量算出手法に問題がある可能性があると考えられる。この従来の流量算出手法による問題点を解明し、新たな流量算出手法によってモデルと実験結果を合致させられるならば、より正確な診断手法の構築が可能となる。

本論文は全6章で構成される。第2章は単相流における測定原理を通して気液二相流でのコリオリ質量流量計における力学的挙動を明らかにする。その上で気液二相流において有効な流量算出手法を提案し、これまで理論モデルと実験調査の結果との乖離の原因について論じている。第3章では、新たに得られる空気混入と流量測定偏差の関係から、流量測定精度の低下する空気混入の条件および、プロセス流体の物性が流量測定精度低下に与える影響について解明している。また同時に、質量流量の測定に支障を来す空気の混入条件実験調査により明らかにしている。第4章では、フローチューブで得られる2つのセンサ出力の相関関数が空気混入により揺動することを利用した診断手法を提案し、測定精度が低下する前に診断できることを示している。第5章では、測定精度に問題がある条件まで空気混入が発生した場合、本来振幅が一定になるよう制御されているセンサ出力の振幅に注目することで、ある一定の条件下であれば流量測定偏差を推定できる展望を示している。最後に、第6章では結論として本論文の成果をまとめ、実用化に向けた今後の課題と方向を提案している。

第 2 章 気液二相流におけるコリオリ質量流量計の力学的挙動の解明

コリオリ質量流量計においてプロセス流体である液体中に気体が混入すると、質量流量に測定偏差が生じ、流量測定に支障を来すことが知られている。しかし、気体の混入により発生する測定偏差がこれまで提案されている理論モデルとは乖離していることが問題となっている。従来研究ではフローチューブにおける力学的挙動をより詳細にモデル化することが検討されている。しかし本論文では、コリオリ質量流量計の流量算出手法、特に気泡の断続的な流出入による非定常な振動特性における位相差算出手法に焦点を当て、従来使用されていた流量算出手法の気液二相流での妥当性を検証していく。

本章ではまずコリオリ質量流量計の測定原理から気液二相流が流量測定に与えるとされる影響を確認した上で、従来の流量算出手法を用いて流量測定偏差を算出し、従来研究の問題点を確認する。その上で、実験調査を通じて気液二相流における非定常な力学的挙動を明らかにすることにより、従来単相流で利用されていた流量算出手法の気液二相流において適用することの妥当性について論ずる。

2. 1 コリオリ質量流量計の流量算出手法

コリオリ質量流量計は、測定流体の流れるフローチューブと呼ばれる配管を振動させることで円弧状の回転運動をさせ、測定流体がその円周、または円の中心へ流れるときに発生するコリオリ力から質量流量を測定するフィールド機器である。本論文では、コリオリ質量流量計の中でも図 2.1 のような U 字型のフローチューブを持つコリオリ質量流量計を対象とし、コリオリ質量流量計の測定原理および質量流量の算出手法を示す。

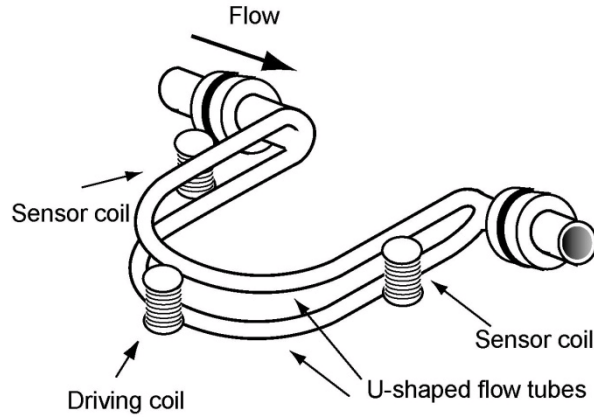


Fig.2.1 Coriolis mass flowmeter of U-shaped flow tube

図 2.1 に示すコリオリ質量流量計は、2本の平行に並んだ U 字型のフローチューブで構成される。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となるように共振周波数で線対称に振動させる。励振コイルは前後配管における測定流体を流れ方向を回転軸として円弧状に振動することから、その外周へと流れるフローチューブ上流側では振動を遅らせるような、中心への流れるフローチューブ下流側では振動を進めるようなコリオリの力が発生する。このフローチューブの両端にかかるコリオリの力は測定流体の質量流量に比例した力が発生し、その結果フローチューブにねじれ振動が加わる。このねじれ振動を含むフローチューブ両端の振動速度をそれぞれの両端に設置した 2 つのセンサコイルにより電圧として測定する。以後、2 つのセンサコイルで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。

$$V_A(t) = A(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_A(t)) \quad (2.1)$$

$$V_B(t) = B(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_B(t)) \quad (2.2)$$

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]。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、式(2.3)により算出した位相の差を位相差と呼ぶ。

$$\Delta\phi = \phi_A - \phi_B \quad (2.3)$$

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 $0.01[\text{rad}]$ と非常に小さいが、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 $\pm 0.1\%$ と高精度測定を実現している。このような高精度な測定を実現するため2つのセンサ出力はフィルタリングでノイズ成分を除去するほか、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することで配管振動などの外乱となる振動の影響を打ち消している。また、コリオリ質量流量計では図.2.2に示すポジティブフィードバックを用いて、センサ出力が振幅一定の正弦波になるように励振ゲインを制御している。

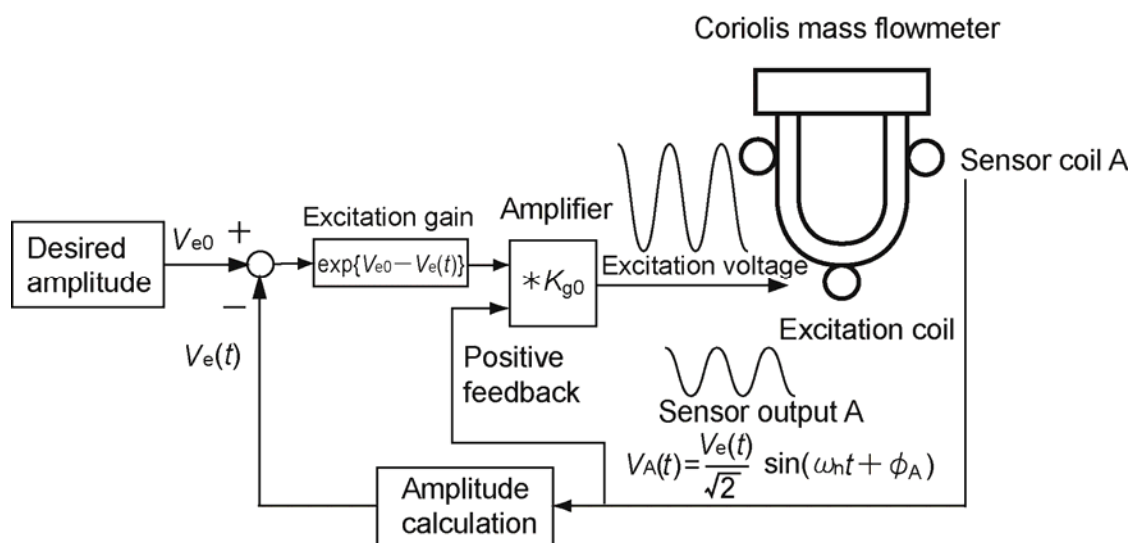


Fig.2.2 Regulation control of sensor output amplitude

これにより、測定流体の密度の急変等で共振周波数に変動しない限り、センサ出力 V_A , V_B は図 2.3 のように位相差のみが異なる正弦波とみなせる。ここで振幅、共振周波数が一定と仮定し、2つの正弦波出力の共振周波数 $f_n(t)$ における位相 ϕ_A , ϕ_B を精度良く算出する。従来研究の多くは、フィルタにより共振周波数以外のノイズ成分を除去した上で、Local-FFT法またはデモジュレーション

ン法と呼ばれる手法を応用し，共振周波数 $f_n(t)$ での位相差を正確に算出している．

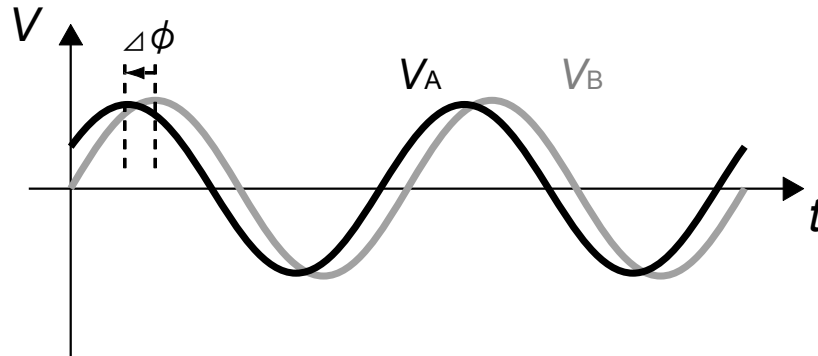


Fig.2.3 Phase difference between two sensor output

図 2.4 に Local-FFT 法による質量流量および密度の算出フローを示す．これは，位相差を算出する短い時間，すなわち窓関数において，まずセンサ出力 A，B の共振周波数 $f_n(t)$ を測定周期ごと算出する．その後センサ出力 A，B は共振周波数および振幅は一定の正弦波信号であるとみなすことで，式(2.4)～式(2.7)によりセンサ出力 A，B それぞれの位相を算出するものである．

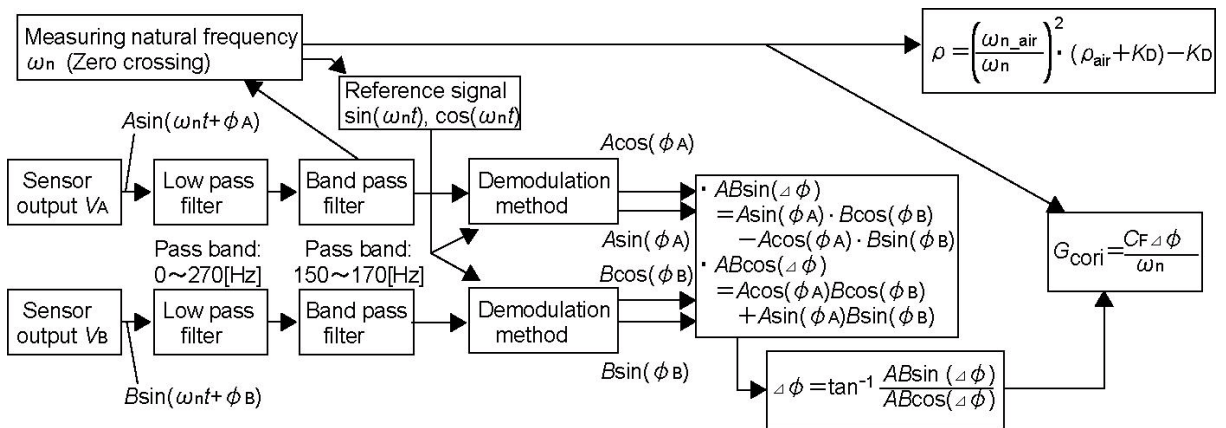


Fig.2.4 Calculation flow of Coriolis mass flowmeter (demodulation method)

$$\frac{\sum \left\{ \sin(2\pi f_n(t)) V_A \right\}}{N} = \frac{A}{2} \cos \phi_A \quad (2.4)$$

$$\frac{\sum \left\{ \sin(2\pi \overline{f_n(t)}) V_A \right\}}{N} = \frac{A}{2} \sin \phi_A \quad (2.5)$$

$$\frac{\sum \left\{ \sin(2\pi \overline{f_n(t)}) V_B \right\}}{N} = \frac{B}{2} \cos \phi_B \quad (2.6)$$

$$\frac{\sum \left\{ \sin(2\pi \overline{f_n(t)}) V_B \right\}}{N} = \frac{B}{2} \sin \phi_B \quad (2.7)$$

ここに、 N ：質量流量の測定周期におけるデータ数

なお、 $f_n(t)$ の平均値は、センサ出力からゼロクロス法を用いて算出する。まず、センサ出力が正弦波状の信号であることを利用し、 $0[V]$ と交差する回数を数える。つぎに、この回数を測定時間で除することにより、共振周波数 f_n が求まる。式(2.8)に、ゼロクロス法による共振周波数の算出式を示す。

$$f_n \approx \frac{z\pi}{2\pi T} \quad (2.8)$$

ここに、 z ：センサ出力の振幅が 0 となる回数(ゼロクロス数)、 T ：測定周期

式(2.4)～(2.7)により理想正弦波において代入した共振振動数での位相が算出できるので、加法定理により位相差 $\Delta\phi$ を算出する。

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_A - \phi_B \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{A \sin \phi_A B \cos \phi_B - A \cos \phi_A B \sin \phi_B}{A \cos \phi_A B \cos \phi_B + A \sin \phi_A B \sin \phi_B} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

以上の Local-FFT 法により算出した位相差 $\Delta\phi$ およびゼロクロス法により算出した共振周波数 f_n を用いて式(2.10)より質量流量を算出するのが従来の流量算出手法である。

$$G_{\text{cori}} = \frac{C_F \Delta\phi}{2\pi f_n} \quad (2.10)$$

ここに、 G_{cori} ：コリオリ質量流量計の質量流量[kg/s]、 C_F ：流量算出係数、 f_n ：コリオリ質量流量計の共振周波数[Hz]

Local-FFT の位相差算出手法は、通常の FFT とは異なり基本周波数の倍数に制限されることなく、特定の共振周波数での位相差を算出できることが利点である。そこで、ゼロクロス法により高い精度で共振周波数を算出できれば、コ

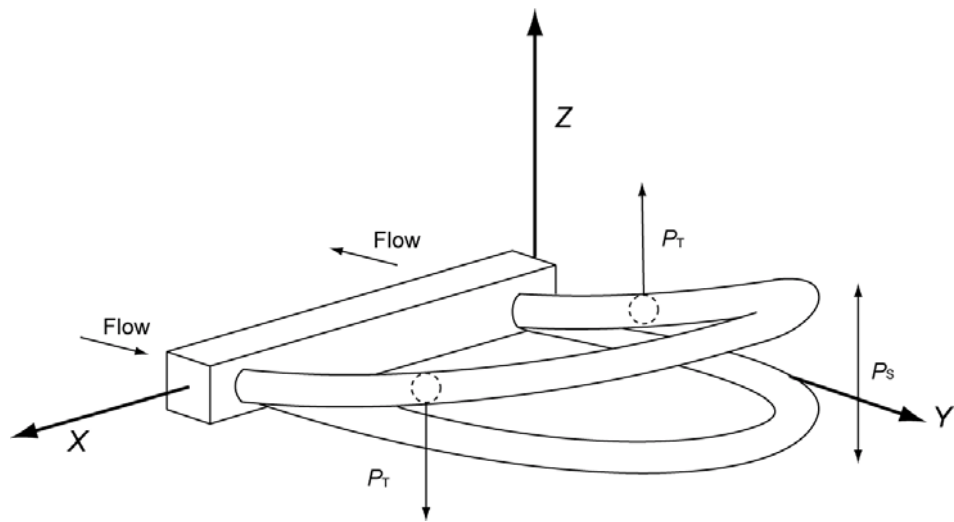
リオリ質量流量計に求められている高い精度で位相差，すなわち質量流量を測定することが可能となる．

2. 2 コリオリ質量流量計の測定原理と気液二相流で予想される力学的挙動

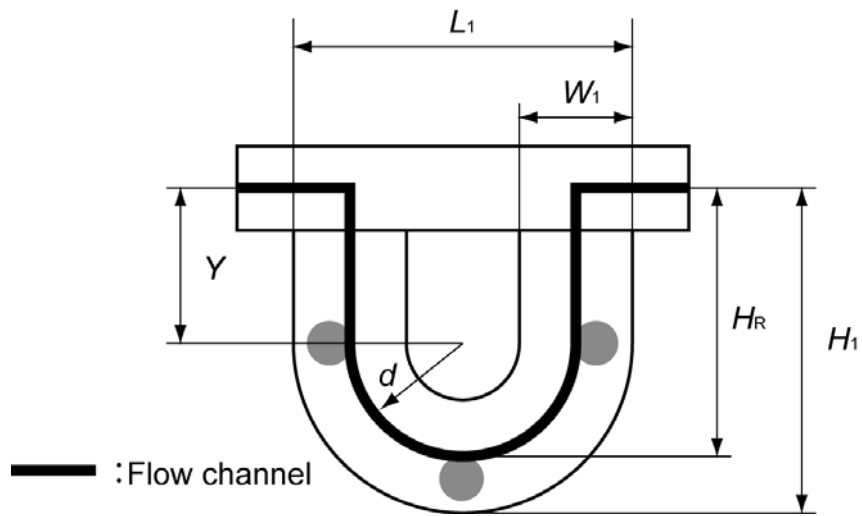
前節に示したように，コリオリ質量流量計で利用されている質量流量算出手法である Local-FFT 法は，あらかじめ共振周波数を高精度に算出し，この特定周波数における位相差を算出することで，高い質量流量の算出精度を実現している．しかし，気液二相流では測定原理の前提が崩れることで，単相流で導出した式(2.10)の流量算出係数 C_F が変動し，その結果として測定偏差が発生するとされている．本節では，コリオリ質量流量計の測定原理に注目し，気液二相流で想定される力学的挙動について論じる．

なお，測定原理を明らかにしていく上で，1 対のフローチューブのうち片側のフローチューブのみ注目する．なぜならば，この 1 対のフローチューブは，外部振動の影響を除去するために線対称に振動しており，その振動特性は同じであるためである．単相流では 2 本のフローチューブに流れる測定流体はほぼ均等に分岐するような構成となっており，1 対のフローチューブの相対変位を測定することで，励振コイルで加振した持続振動およびコリオリの力によるねじれ振動のみを検出できる．気液二相流では，フローチューブの分岐において浮力の働く方向によっては，気泡が一方のフローチューブに偏る危険性があるが，単相流においても各製造業者において測定流体によって適切な設置方向を推奨されている．本論文では，気液二相流の流れる方向として下から上に向かう流れを推奨する設置方向とすることで，図 2.5-a)の概略図に示すように片側のフローチューブの振動特性にのみ注目していく．

コリオリ質量流量計において励振コイルは測定流体の流れ方向を中心軸として円弧状にフローチューブを振動させる．この振動はコリオリの力を発生させる前提である回転運動に相当する．ここで，フローチューブに測定流体を流すと，それぞれのフローチューブの上流側では回転の中心から外側に，下流側では回転の外側から中心に流体が移動する．この時，フローチューブの両端にそれぞれ反対方向のコリオリの力が発生することで，持続振動しているフローチューブにねじれが生じる．図 2.5-b)に質量流量とねじれの関係をモデル化するにあたり必要な，コリオリ質量流量計を上から見た時のケーシングとケーシング内部のフローチューブの各部位の寸法を示す．



a) General view of a flow tube vibration



b) General view of a flow tube

Fig.2.5 Schematic diagram of Coriolis mass flowmeter

図 2.5-a)において, x 軸を中心軸とした回転運動に対して垂直に流れる液体により発生する力がコリオリの力である. なお, モデル化にあたりフローチューブに働くコリオリの力は図 2.5-b)に示す長さ y の直線部においてのみ働くと仮定する. ここで, 最初にフローチューブ内の液体が流れていない時の持続振動について考える. 図 2.6 に, フローチューブが静止状態から図 2.5-a)の z 軸方向へ振幅 P_s で持続振動しているとした場合について, フローチューブを z 軸の正方向から見た時のモデルを示す.

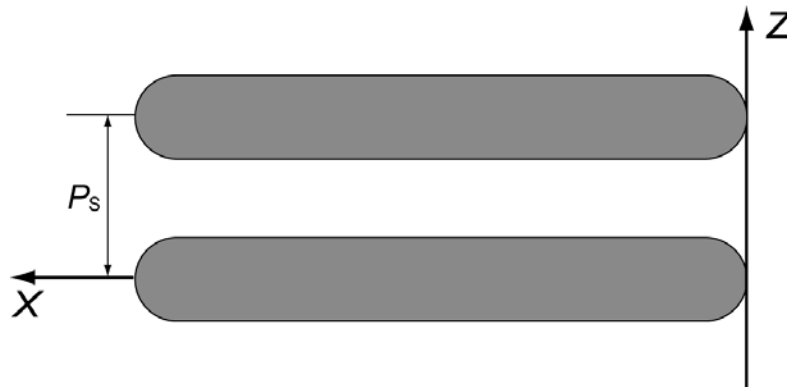


Fig.2.6 Schematic model of self-excited vibration

図 2.6 に示す持続振動における運動方程式は式(2.11)で示される. コリオリ質量流量計では, 式(2.11)の左辺第 2 項のダンピングによる減衰を防ぐため, 減衰係数 D_U に対応するような励振ゲイン K_g を加える. 具体的には, 前節の図 2.2 で示した通りである.

$$I_U \ddot{\theta}_U + D_U \dot{\theta}_U + k_U \theta_U = K_g \dot{\theta}_U \quad (2.11)$$

ここに, θ_U : フローチューブの角度変位 [rad], I_U : フローチューブと液体の合計の曲げ慣性モーメント [$m^2 kg$], k_U : フローチューブの曲げ剛性 (ばね定数) [N/m], D_U : フローチューブの振動に対する変位速度に比例した減衰定数, K_g : 減衰定数である D_U に対応した励振ゲイン.

この励振ゲインはダンピング D_U を打ち消す働きをする. 式(2.12)において $K = D_U$ とすると, 式(2.12)となる.

$$I_U \ddot{\theta}_U + k_U \theta_U = 0 \quad (2.12)$$

ここで, 図 2.5-b)のセンサコイルにおける z 軸方向への変位を z [m]とし, 時間

$t=0[s]$ で $\theta_U=0[\text{rad}]$ を初期条件として式(2.12)を解くと、持続振動による変位 $z_U[m]$ は式(2.13)のように表せる。

$$z_U(t) = y \sin \theta_U \approx y \theta_U = P_S \sin \sqrt{\frac{k_U}{I_U}} t = P_S \sin(\omega_n t) \quad (2.13)$$

つぎに、ねじれ振動について述べる。振幅 $P_S[m]$ 、周波数 $\omega_n[\text{rad/s}]$ で持続振動をしているフローチューブに、流速 $v_F[m/s]$ の液体が流れる場合について、ねじり振動のみを抽出したモデルを図2.7に示す。

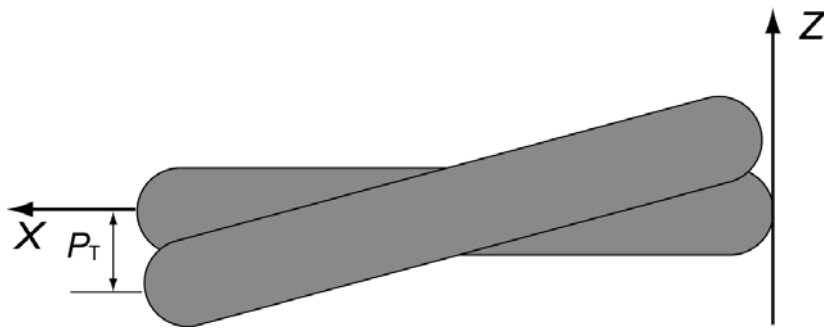


Fig.2.7 Schematic model of torsion vibration

コリオリ質量流量計において、フローチューブが角速度 $\omega_n[\text{rad/s}]$ で円運動をしている場合、コリオリの力による加速度は $2v_F\omega_n[m/s^2]$ で表せる。しかし、コリオリ質量流量計におけるフローチューブは円弧状に振動しているため、角速度は正弦波状に増減する。ここで、コリオリ質量流量計のフローチューブの両端についたセンサコイルでの振動に注目すると、フローチューブの上流側、下流側それぞれに反対方向のコリオリの力が働き、フローチューブにねじれが生じる。具体的には、液体が円弧状の振動に対して、外周へ向かう上流側では振動の位相が遅れ、振動中心へ戻る下流側では振動の位相が進む。ここで、下流側の振動を測定しているセンサコイルBにおいて、ねじれの角度変位を $\theta_T[\text{rad}]$ とすると、ねじり振動の運動方程式は式(2.14)のように表せる。なお、ねじり振動の持つ共振周波数と持続振動の持つ共振周波数は異なるが、ねじり振動は持続振動と同じ周波数で強制振動する。

$$\begin{aligned} I_T \ddot{\theta}_T + D_T \dot{\theta}_T + k_T \theta_T &= \mp 2d \cdot \omega_n m_F v_F \dot{z}_U(t) \\ &= \mp 2d \cdot \omega_n m_F v_F \left(\frac{P_S}{H_R} \right) \cos(\omega_n t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

ここに、 I_T :ねじれ振動における曲げ慣性モーメント $[\text{m}^2 \cdot \text{kg}]$, D_T :ねじれ振動におけるダンピング要素 $[\text{kg/s}]$, k_T :ねじれ振動におけるフローチューブの曲げ剛性(ばね定数) $[\text{kg/s}^2]$, θ_T :ねじれ振動による変位 $[\text{rad}]$, d :フローチューブのねじれ振動における半径 $[\text{m}]$, m_F :フローチューブの両端をそれぞれ移動する測定流体の正味質量 $[\text{kg}]$, v_F :測定流体の流速 $[\text{m/s}]$, P_D :持続振動における振幅 $[\text{m}]$, H_R :フローチューブの持続振動における半径 $[\text{m}]$.

式(2.14)の右辺はコリオリの力を示しており、測定流体の質量流量および持続振動の振動速度に比例してコリオリの力が増加する強制振動を示している。このねじれ振動の時間応答を $z_T(t)=P_T \sin(\omega_n t - \delta)[\text{m}]$ とすると、振幅 P_T は式(2.15)で表せ、持続振動に対するねじれ振動の位相 δ はおよび式(2.16)で表される。

$$P_T = \frac{2d^2 \omega_n m_F v_F \left(\frac{P_S}{H_R} \right)}{\sqrt{(k_T - I_T \omega_n^2)^2 - \omega_n^2 D_T^2}} \quad (2.15)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\omega_n \cdot D_T}{k_T - \omega_n^2 I_T} \mp \frac{\pi}{2} \quad (2.16)$$

D_T はねじれ振動における減衰項であるが非常に小さいとみなすことで、位相 δ はセンサ出力 A では $-\pi/2[\text{rad}]$, センサ出力 B では $+\pi/2[\text{rad}]$ となる。その結果、コリオリ質量流量計の持続振動とねじれ振動は複素数平面上で図 2.8 のように表せる。

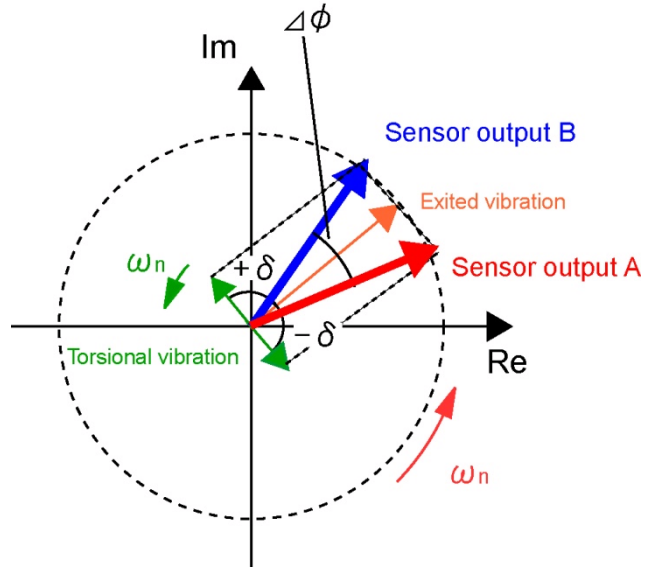


Fig.2.8 Relation between excited vibration and torsional vibration

この図においてコリオリの力が持続振動の位相を遅らせる信号がセンサ出力 V_A 、位相を進ませる信号がセンサ出力 V_B に該当する。コリオリの力は持続振動に対して直交していることから、センサ出力 AB 間の位相差 $\Delta\phi$ は P_S に対する P_T により表せる。

$$\tan \Delta\phi \approx \frac{2P_T}{P_S} = \frac{(2d)^2 \omega_n m_F v_F}{H_R \sqrt{(k_T - I_T \omega_n^2)^2 - \omega_n^2 D_T^2}} \quad (2.17)$$

$$m_F v_F = \frac{H_R \sqrt{(k_T - I_T \omega_n^2)^2 - \omega_n^2 D_T^2}}{(2d)^2} \frac{\tan \Delta\phi}{\omega_n} \quad (2.18)$$

ここで、 $m_F v_F$ はフローチューブを流れる流体の質量流量に相当することから、質量流量と位相差 $\Delta\phi$ 、および持続振動の共振周波数 ω_n の関係は式 (2.19)、式 (2.20) のように表せる。

$$G_{\text{cori}} = C_F \frac{\Delta\phi}{\omega_n} \quad (2.19)$$

$$C_F = \frac{H_R \sqrt{(k_T - I_T \omega_n^2)^2 - \omega_n^2 D_T^2}}{(2d)^2} \quad (2.20)$$

ここに C_F をコリオリ質量流量計の流量係数とする．単相流では D_T は非常に小さいことから無視すると，式(2.21)に示すように体格にのみで決定する係数として表せる．このことから，コリオリ質量流量計では機器ごとに，この流量算出係数を実流校正で求め，位相差 $\Delta\phi$ ，および持続振動の共振振動数 ω_n から質量流量を算出する．

$$C_F = \frac{H_R \sqrt{(k_T - I_T \omega_n^2)^2}}{(2d)^2} \quad (2.21)$$

一連の流量算出手法は，単相流を測定流体とした場合の測定原理であり，測定流体が気液二相流の場合は，実流校正により導出した式(2.21)の流量係数を使用すると，測定偏差が発生する．その原因はフローチューブ内の気泡における圧縮性にある．気泡がフローチューブに入っている状態で振動させた場合，測定流体が気泡を圧縮し移動させると，ダンパーと同じ原理で仕事が発生し，それが減衰項の増加として現れる．この時，位相差と質量流量の関係に影響を与えるのが，式(2.15)，式(2.16)である．その結果，式(2.21)の減衰項 D_T による流量係数の変化分が流量測定偏差として発生する．正確には式(2.16)も影響するが，流量係数としての比較をするため，質量流量の流量係数比を簡略的に表すと式(2.22)となる．

$$\frac{C'_F}{C_F} = \frac{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2}}{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2 + (\omega_n D_T)^2}} \quad (2.22)$$

ここに， C'_F ：気液二相流においてダンピング要素を考慮しなかった場合の流量係数を示す．この式において空気が混入すると， D_T が増加し，分母が大きくなる結果，算出した質量流量はダンピングを考慮した場合と比較し小さい値を示

すことになる。これが、J.Hemp らの提唱するモデルの概要であり、この減衰項の増加にともなう励振ゲインの増加を利用したものが、MicroMotion 社より空気混入の有無を診断する手法⁽⁸¹⁾として提案されている

2. 3 空気混入が従来のコリオリ質量流量計の

流量測定値に与える影響

前節において、気液二相流ではフローチューブ内の気泡がダンパーの役割を果たすことにより、単相流で実流校正した結果得られた流量係数を利用すると負の測定偏差が発生することを示した。ただし、従来の実証実験では、理論モデルとは異なり、低流速であるほど測定偏差が大きくなることが知られている。そこでこの理論モデルと実証実験との乖離を、プロセス流体を水、混入する気体を圧縮空気とした実証プラントにおいて確認する。

実験装置の概略図を図 2.9 に示す。まず、ポンプ（荏原製作所：34.5[m], 20.8[l/min]）によりタンク（500[l]）内の水を 2B 配管で構成されるメインラインへと圧送し、コリオリ質量流量計（Rota Yokogawa：RCCS36）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。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。ただし、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。

なお、通常単相流におけるコリオリ質量流量計の運用環境下では、流量計の流路を水平方向に設置する方法もある。ただし、本実験において水平方向にした場合、浮力により U 字状になっているフローチューブに気泡が滞留、または偏って流れる恐れがある。このことから、流れ方向を垂直となるようにコリオリ質量流量計を設置している。これは気液二相流での流量測定が実用化された場合にも必要な設置方法の制限であると考えられる。

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。本来はコリオリ質量流量計と比較し、電磁流量計はその測定精度が低いとされているが繰り返し性は 0.1% と高い。そこで、空気を混入させない場合でのコリオリ質量流量計で測定された質量流量の 100[s] 平均を

利用し校正を行うことで、ばらつきを抑えている。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転動作点と定義し、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[kg/s]とする。基準質量流量を上記の範囲とした理由は、1.2[kg/s]では水平配管において、混入させた空気が滞留することで、不連続な空気混入になること、3.1[kg/s]ではコリオリ質量流量計における圧損の上限である 100[kPa]を超えるところから決定している。なお、条件である基準質量流量そのものを利用して空気混入時の流量測定値を評価する際混同するのを避けるため、運転動作点を示す際は、基準質量流量の代わりに水だけの場合における流速で示す。基準質量流量 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.7[kg/s]はそれぞれ流速 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4[m/s]に対応する。

これらの運転動作点において、空気圧力 0.4[MPa]で空気混入量を 0～10[Nℓ/min]まで 1[Nℓ/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。

気液二相流は一般的に気泡流, スラグ流, 環状流の三つに大きく分けられる。その流動様式の違いは液体および気体の体積流量や流路の断面積などにより決定される。通常の流量計であれば、前後の配管にアクリルパイプを設置し、そこから見える流動様式と流量計から出力されるプロセス値を比較できるが、コリオリ質量流量計は内部に 2本の U字型のフローチューブを持つことから流動様式の比較は難しい。そこで、コリオリ質量流量計をはずし、代わりにアクリルパイプを設置した場合の空気混入の様子を図 2.10 に示す。コリオリ質量流量計は、コリオリの力によりねじれ振動を大きくするため、フローチューブの管内径は小さく (RCCS36 では内径 10[mm]), メインラインの 2B 配管と比較して高流速としている。したがって、図 2.10 の 2B 配管上では、流速 1.0[m/s]において気泡の大きさにばらつきが生じているが、フローチューブ内部の流動様式とは異なることに注意する必要がある。なお、本論文のコリオリ質量流量計による実験調査における空気は、気泡流やスラグ流のように流路内を断続的に流れると推測される。この他に空気を混入させる直前の水平配管にもアクリルパイプを設置している。これは、空気を混入させた時、水の流速によって滞留することなく、気泡が流れていくことを確認するためのものである。

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．このとき空気混入量を式(2.23)に示すように水と空気の体積流量の比を容積流量比 β とすることで，定量評価の指標とする．

$$\beta = \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{mag}} + Q_{\text{air}}} \quad (2.23)$$

$$Q_{\text{air}} = \frac{\rho_{\text{air}}(P_{\text{ave}}, T)}{\rho_{\text{air}_S}} Q_{\text{air}_S} \quad (2.24)$$

ここに， β ：容積流量比%， 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]， ρ_{air_S} ：標準状態における空気の密度[kg/Nm³]， P_{ave} ：コリオリ質量流量計前後に設置した差圧伝送器における上流側，下流側圧力の平均値[MPa]， T ：タンク側面部に設置された温度伝送器で測定した水温[°C]．また， $\rho_{\text{air}}()$ 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．

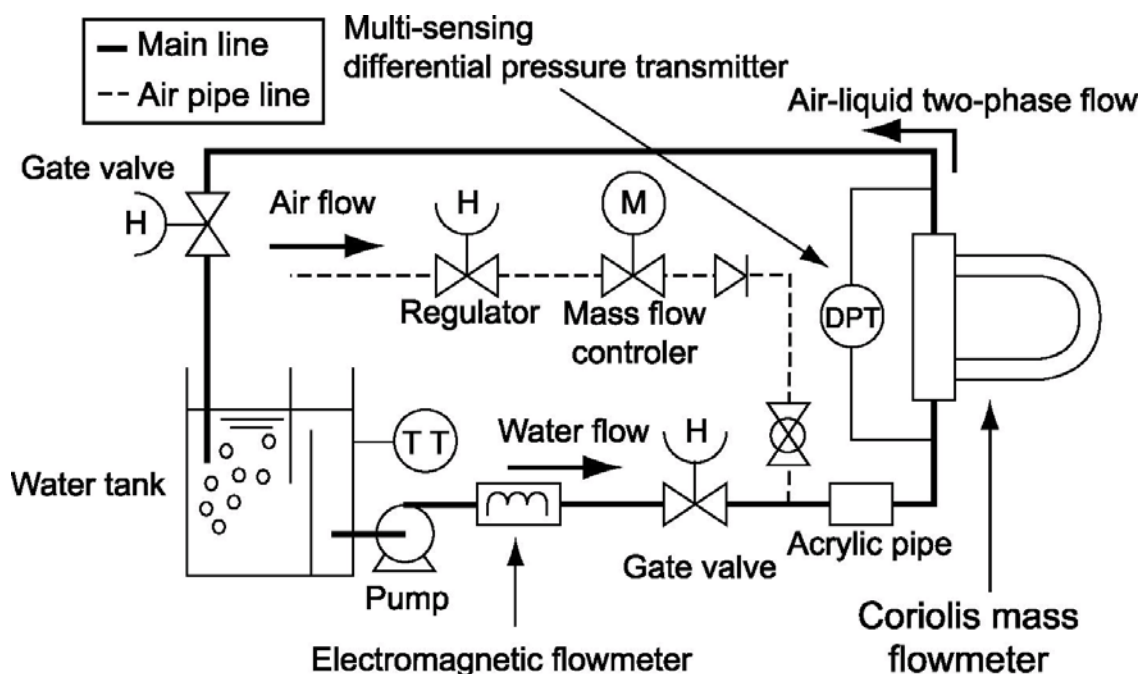
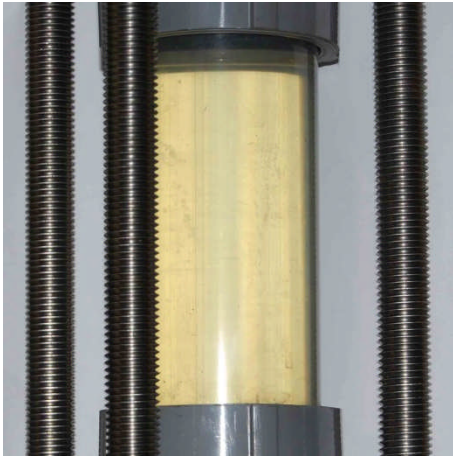
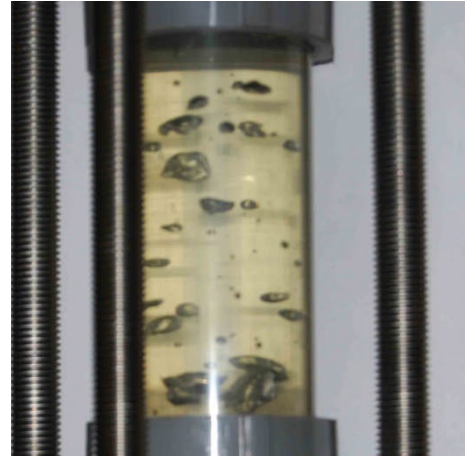


Fig.2.9 Experimental installation



a)no aeration



b>true water flow rate: 2.0[kg/s]



a>true water flow rate: 3.1[kg/s]



a>true water flow rate: 5.9[kg/s]

Fig.2.10 Appearance of bubble in piping (vertical line, air flow rate: 10[Nℓ/min])

2. 3. 1 動的状態下での流量測定値の応答性評価

プラント制御において、圧力、流量を始めとするプロセス値はほとんどの運転時間において定常状態である。しかし、測定流体である水に空気が混入した場合流量測定偏差が負の方向へ増大することが知られている。このことから、システムの定常状態を維持するために、バルブ等のアクチュエータは流量を増加させる方向へ動くことが予想される。この時、気液二相流での流量測定値の応答性も低下する場合は、よりシステムの安定性に悪影響を与える恐れがある。そこでまず、空気が混入した状態で、水の流量を変動させた時のコリオリ質量流量計の応答性を明らかにする。

具体的に、図 2.9 に示す実験装置において、ライン中の弁を瞬時に開放し、プロセス流量をステップ状に変化させたときの遅れを図 2.11 に示す。なお、空気の混入により流量は大きく揺動し、さらに流量測定偏差が発生するが、本評価では移動平均で処理した上で初期値と最終値をそろえ、応答性のみを評価する。図 2.11 より空気が混入した場合であっても、空気混入がない場合に対して応答の遅れは見られず、空気混入はコリオリ質量流量計の流量測定の応答性に影響を与えないことがわかる。このことから、流量測定中に運転条件に起因する空気混入が発生し測定偏差が発生した場合でも、コリオリ質量流量計の応答性低下により制御性の低下を気にすることなく、安全側に運転条件を変更できるといえる。この結果は特に FOUNDATION フィールドバスに空気混入の診断技術を搭載し、ホストに異常が発生していた場合でも、自動で安全側へ条件を変更することを考えると、応答性の変化の有無は重要となる。

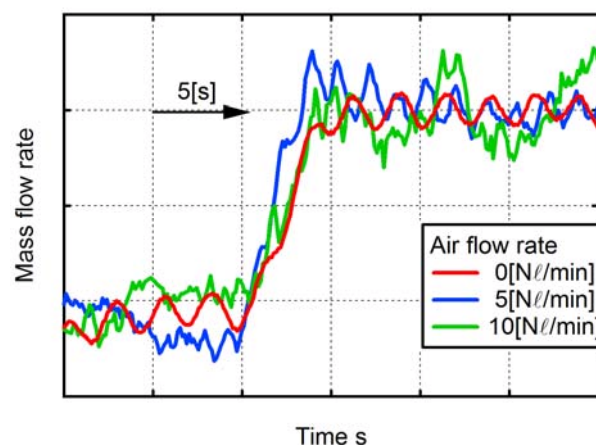


Fig.2.11 Response of mass flow rate in aerated water flow

2. 3. 2 静的状態下での流量測定値の特性評価

プラント制御において、圧力、流量を始めとするプロセス値はほとんどの運転時間において定常状態であり、各プロセス値の定常的な測定精度はシステムを安定させるのに重要な要素となっている。そこで、気液二相流がコリオリ質量流量計の流量測定に静的特性に与える影響を見る。

コリオリ質量流量計において液体中に空気が混入すると、フローチューブ内の流体密度が減少し、フローチューブの共振振動数が増加すると推測される。また同時に、液体のみの場合と比べ液体中の空気が気泡となり、その気泡の圧縮性がダンパーの役割を果たし、励振ゲインが増加すると考えられる。加えて、ダンピングの増加はコリオリの力によるねじれ振動を抑制することから、位相差が減少し、質量流量測定値は液体のみの質量流量に対して少ない値が出力されると考えられる。このことを、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）により測定した水の体積流量を基準質量流量と定義した上で、基準質量流量に対するコリオリ質量流量計により算出した質量流量の比、すなわち流量測定偏差率を定義する。式(2.25)に、流量測定偏差 $\gamma\%$ の算出式を示す。この $\gamma\%$ が負の値である場合は、気泡混入によって、コリオリ質量流量計で測定した質量流量が、実際のラインで流れている水の質量流量よりも小さく出力されることを示す。

$$\gamma = \frac{G_{\text{cori}} - G_{\text{mag}}}{G_{\text{mag}}} \times 100 \quad (2.25)$$

なお、基準質量流量は式(2.26)より算出する。

$$G_{\text{mag}} = \rho_{\text{water}}(P_{\text{ave}}, T) Q_{\text{mag}} \quad (2.26)$$

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、 $\rho_{\text{water}}()$ 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最大で 100kPa まで圧力損失が増加する。さらに、空気が混入すると、フローチューブ内の圧損がさらに増加することが予想される。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。

ここでまず、空気を混入させた場合の励振ゲインの増加量を図 2.12 に示す。液体のみの状態から空気の混入量を増加させていくと、ライン圧力、基準質量流量に関係なく励振ゲインの電圧が増加していく。励振ゲインは、フローチューブを振動させるために必要な出力の変化を示しており、空気の圧縮性がダンパーの役割を果たしていることを示している。従来の気液二相流におけるコリオリ質量流量計のモデルでは、この結果と第 2.2 節の式(2.22)に示した関係から、容積流量比が増加するにしたがって、負の流量測定偏差が発生するとされていた。次に、容積流量比に対する質量流量の測定偏差を図 2.13 に示す。図は空気混入量(容積流量比)を増加させた場合に対する、質量流量測定値の変動を基準質量流量との比で示したものである。式(2.22)で示した通り、空気の混入量が増加するにしたがって、負の流量測定偏差が発生している。ただし、その測定偏差は低流速であるほど大きくなっていることがわかる。運転動作点のうち、特に低流速である $0.6[\text{m/s}]$ の時が特に顕著であるが、プロセス流体が低流速である場合同じ容積流量比であっても基準質量流量と比較して約 40%流量測定値が低下していることがわかる。これが、J.Hemp らの指摘している理論モデルとの乖離である。

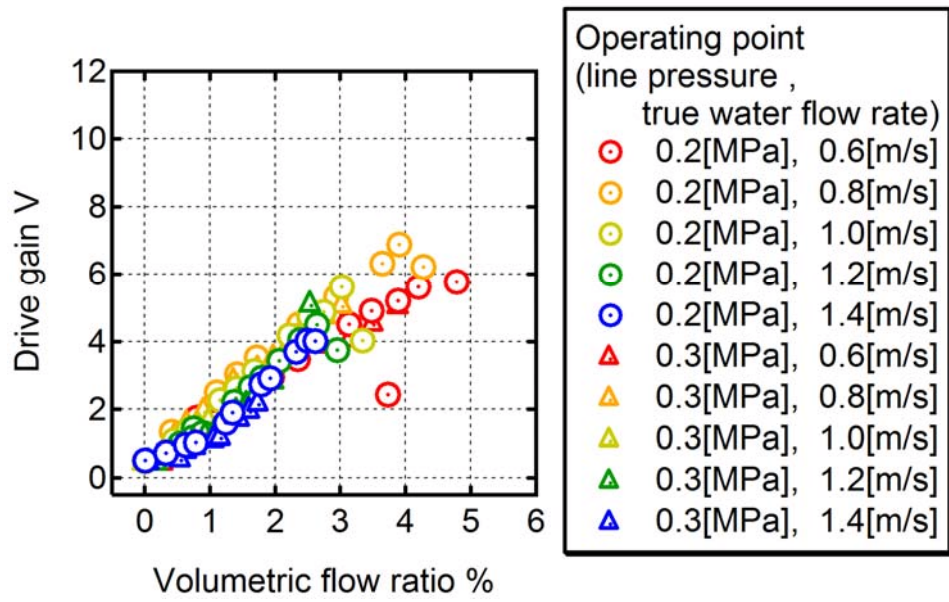


Fig.2.12 Relationship between Drive gain and volumetric flow ratio

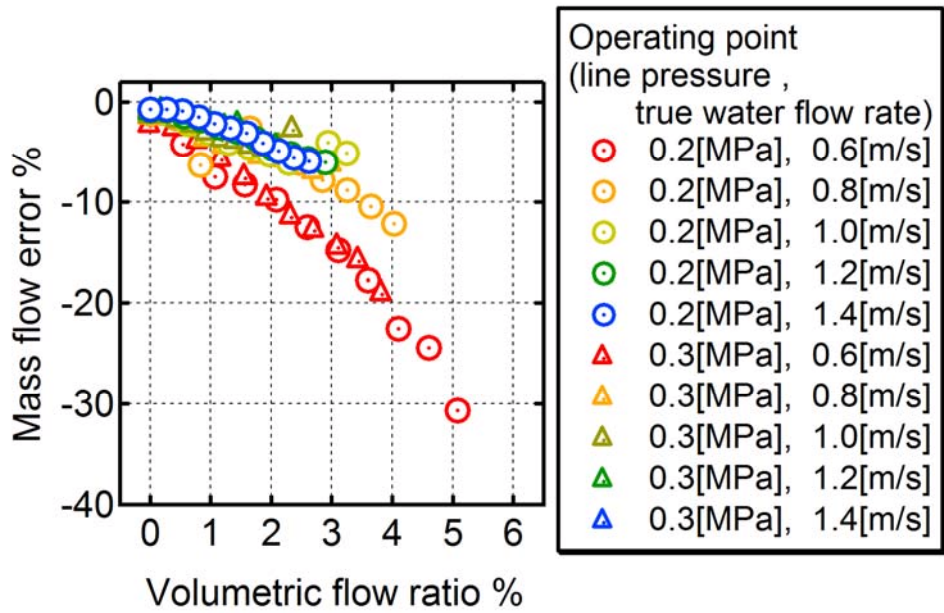


Fig.2.13 Static characteristics of mass flow error in aerated water flow using Local-FFT

2. 3. 3 従来の位相差算出手法が持つ問題点

第 2.3.2 節より，従来研究において指摘されている通り，コリオリ質量流量計では，空気が混入するにしたがって負の流量測定偏差が発生し，特に低流速ではその測定偏差が大きいことが確認された．従来の研究ではここでより正確なモデル化を研究のテーマとしているが，本論文では気液二相流における非定常特性，すなわち空気がフローチューブ内を断続的に流出入する際に発生する揺動に注目する．まずは，質量流量や密度の算出に使用されるセンサ出力の共振周波数に注目する．

コリオリ質量流量計は，前章で示したようにフローチューブの共振周波数から測定流体の密度も測定できる．具体的には，フローチューブに空気のみが満ちている場合の共振周波数と比較し，式(2.27)で導出できる．

$$\rho = \left(\frac{\omega_{n_air}}{\omega_n} \right)^2 \cdot \left(\rho_{air} + \frac{m_{D_tube}}{V_D} \right) - \frac{m_{D_tube}}{V_D} \quad (2.27)$$

ここに， ρ ：測定流体の密度[kg/m³]， ρ_{air} ：標準状態の空気密度[kg/m³]， m_D ：フローチューブ分の重量[kg]， V_D ：フローチューブの容積[m³]， ω_n ：センサ出力の共振周波数[Hz]， ω_{n_air} ：空管時のセンサ出力の共振周波数[Hz]．

このことから，空気がフローチューブ内を通過すると密度が減少する分，共振周波数が増加することが知られている．そこで空気混入時の共振周波数の揺動をとらえることとする．共振周波数をとらえる手法として，これまでゼロクロス法が主流ではあるが，ゼロクロスでは，センサ出力の1波長以下の周波数は測定できない．そこで本章では，ヒルベルト変換⁽⁸³⁾⁻⁽⁸⁵⁾を利用して，より短い算出周期でセンサ出力の共振周波数を算出する．

ヒルベルト変換とは実信号に対し，ヒルベルト変換は位相が $\pi/2$ 遅れた信号を生成する．このヒルベルト変換は式(2.28)に示す周波数特性 $H(\omega)$ を持つ．

$$H(\omega) = \begin{cases} -j, & 0 < \omega < \frac{\omega_s}{2} \\ j, & -\frac{\omega_s}{2} < \omega < 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

ここで ω_s はサンプリング周波数である．これにより生成された信号を虚部，実信号を実部とすることで解析信号と呼ばれる，複素数信号が得られる．ここで実信号を $x(t)$ とし，解析信号を，

$$\begin{aligned} x_+(t) &= x(t) + j\hat{x}(t) \\ &= |x(t)|e^{j(\omega(t)t + \phi(t))} \end{aligned} \quad (2.29)$$

とした場合，絶対値と偏角に分離できる．この解析信号の位相

$$\phi(t) = \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \quad (2.30)$$

は，瞬時位相と呼ばれ，瞬時位相の時間微分 $\omega(t)$ は

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \phi(t) \quad (2.31)$$

は，瞬時周波数と呼ばれる．これらの瞬時位相および瞬時周波数は，対象とした信号と同じ測定周期で算出できる．このヒルベルト変換をコリオリ質量流量計の流量算出に利用すると，センサ出力 A, B の解析信号は式(2.32)，式(2.33)のように表せる．

$$\begin{aligned}
V_{A+}(t) &= V_A(t) + j\hat{V}_A(t) \\
&= A(t)e^{j(\omega_n(t)t + \phi_A(t))}
\end{aligned}
\tag{2.32}$$

$$\begin{aligned}
V_{B+}(t) &= V_B(t) + j\hat{V}_B(t) \\
&= B(t)e^{j(\omega_n(t)t + \phi_B(t))}
\end{aligned}
\tag{2.33}$$

ここに、 $A(t)$ 、 $B(t)$ はセンサ出力の振幅（実数）であり、それぞれセンサ出力 A、B の包絡線と呼ぶ。これらを利用すると、2つのセンサ出力の共振周波数はそれぞれ、

$$\begin{aligned}
f_{n_A}(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_A(t) \\
&= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left(\tan^{-1} \frac{\hat{V}_A(t)}{V_A(t)} \right)
\end{aligned}
\tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}
f_{n_B}(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_B(t) \\
&= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left(\tan^{-1} \frac{\hat{V}_B(t)}{V_B(t)} \right)
\end{aligned}
\tag{2.35}$$

で、得られる。このヒルベルト変換の特長は、式(2.34)および式(2.35)で得られる共振周波数 f_{n_A} 、 f_{n_B} の算出周期をセンサ出力 A および B の測定周期と同じにできることである。したがって、センサ出力の測定周期が気泡の断続的な流入出に対し十分短ければ、フローチューブの固有振動数の変動に応じて位相差を算出できる。なお、具体的な算出手法としては、時間 t [s] のセンサ出力 A の瞬時周波数は測定周期 Δt [s] 後のセンサ出力がわかっているならば式(2.36)で算出できる。

$$f_A = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \frac{V_A(t)\hat{V}_A(t+\Delta t) - V_A(t+\Delta t)\hat{V}_A(t)}{V_A(t)\hat{V}_A(t+\Delta t) + V_A(t+\Delta t)\hat{V}_A(t)}
\tag{2.36}$$

ここで、図 2.14 および図 2.15 に単相流および気液二相流（容積流量比：2.1%）での共振周波数の揺動を示す（算出周期は 0.8[ms]）。図 2.14 の運転動作点はそれぞれ 0.2[MPa], 0.6[m/s], 図 2.15 は 0.2[MPa], 1.4[kg/s]とする。図 2.14 および図 2.15 よりいずれの運転動作点においても、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、Local-FFT 法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、気液二相流では水流速の違いに関係なく、共振周波数は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、Local-FFT において前提としていた窓関数内での周期性が失われる。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、図 2.14 および図 2.15 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方が、気泡の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偏差が大きくなったと考えられる。なお、R. P. Liu⁽⁷⁴⁾らはニューラルネットワークによる流量補正手法を提案する際、測定偏差を含む流量の算出において、周波数を半波長ごとに算出することで、瞬時周波数の算出を試みている。ただし、この手法で算出したセンサ出力 A とセンサ出力 B の共振周波数に差があることを言及している、これは、空気混入の状態が半周期の間で変動するため、位相差の変動が周波数の差として現れているものと推測される。前述の通り、コリオリ質量流量計では正確な共振周波数における位相差で流量を算出しない限り測定精度を保証できないことから、ゼロクロス法を利用した周波数の算出には限界があるといえる。以上の結果から、共振周波数が高周波数で陽動する空気混入時は、窓関数内で共振周波数が一定と仮定する必要がある Local-FFT 法ではコリオリ質量流量計に必要な精度では算出できないと考えられる。

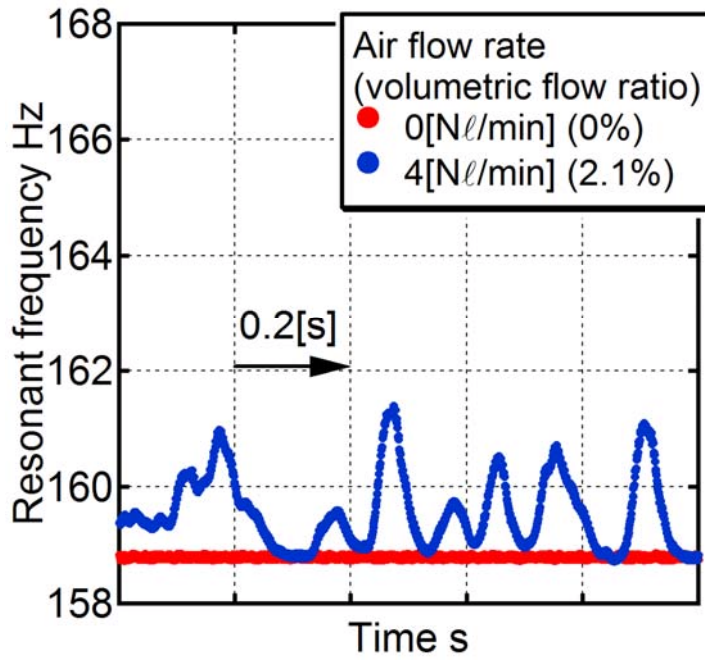


Fig.2.14 Resonant frequency using Hilbelt transform
 (Line pressure: 0.2[MPa], true water flow rate: 0.6[m/s])

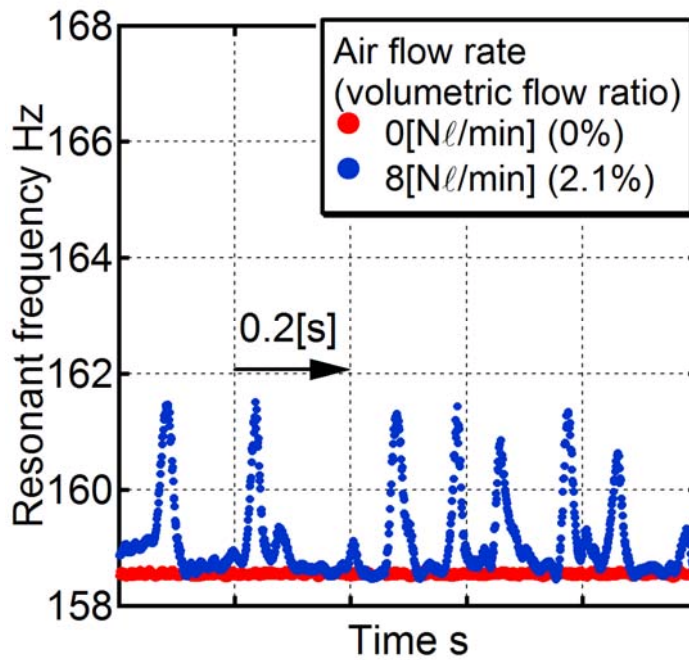


Fig.2.15 Resonant frequency using Hilbelt transform
 (Line pressure: 0.2[MPa], true water flow rate: 1.4[m/s])

2. 4 気液二相流に適用可能な流量算出手法の提案

第 2.3 節において測定流体に空気が混入した場合センサ出力の共振周波数が高周波数で揺動することから、窓関数内での周波数が一定と仮定する必要がある。従来の位相差算出手法では正確な位相を算出できないことを示した。本節では、このような高周波で共振周波数が揺動している場合でも、位相差を正確に算出する手法として、ヒルベルト変換を利用することを提案する。本節ではまず、ヒルベルト変換を利用した流量算出手法を「ヒルベルト法」と定義し、位相差の導出方法およびその特長を示す。

ヒルベルト変換は第 2.3.3 項で示した式(2.27)を利用することにより、式(2.37)および式(2.38)のような複素数信号が得られることを利用する。

$$\begin{aligned} V_{A+}(t) &= V_A(t) + j\hat{V}_A(t) \\ &= A(t)e^{j(\omega_n(t)t + \phi_A(t))} \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} V_{B+}(t) &= V_B(t) + j\hat{V}_B(t) \\ &= B(t)e^{j(\omega_n(t)t + \phi_B(t))} \end{aligned} \quad (2.38)$$

本論文では Simulink の Signal processing blockset を利用して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。図 2.16 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見なせる。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。ここまでは Local-FFT 法と同じ信号処理である。ここで、センサ出力 $V_A(t)$ および $V_B(t)$ をヒルベルト変換すると、式(2.1)、式(2.2)に対応して、式(2.39)、式(2.40)が得られる。

$$V_A(t) = A(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_A(t)) \quad (2.1)$$

$$V_B(t) = B(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_B(t)) \quad (2.2)$$

$$\hat{V}_A(t) = A(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_A(t)) \quad (2.39)$$

$$\hat{V}_B(t) = B(t) \sin(2\pi f_n(t)t + \phi_B(t)) \quad (2.40)$$

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．まず式 (2.41) および式 (2.42) より $A(t)B(t)\sin\Delta\phi(t)$ ， $A(t)B(t)\cos\Delta\phi(t)$ を算出し，その上で位相差 $\Delta\phi$ を算出する．

$$A(t)B(t)\sin\Delta\phi(t) = V_A(t)\hat{V}_B(t) - \hat{V}_B(t)V_A(t) \quad (2.41)$$

$$A(t)B(t)\cos\Delta\phi(t) = \hat{V}_A(t)\hat{V}_B(t) + V_B(t)V_A(t) \quad (2.42)$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{AB \sin \Delta\phi(t)}{AB \cos \Delta\phi(t)} \quad (2.43)$$

この位相差算出手法では，センサ出力と複素数信号の測定周期が同じであることから，第 2.3.3 項で示した瞬時周波数と同様，位相差もセンサ出力の測定周期と同じ頻度で算出できる．これはすなわち，Local-FFT のように窓関数においてフローチューブの振動特性が一定でなくとも高精度で位相差が算出できることを示す．この結果，気液二相流において，共振周波数の揺動に応じて流量を適切に算出できると予想される

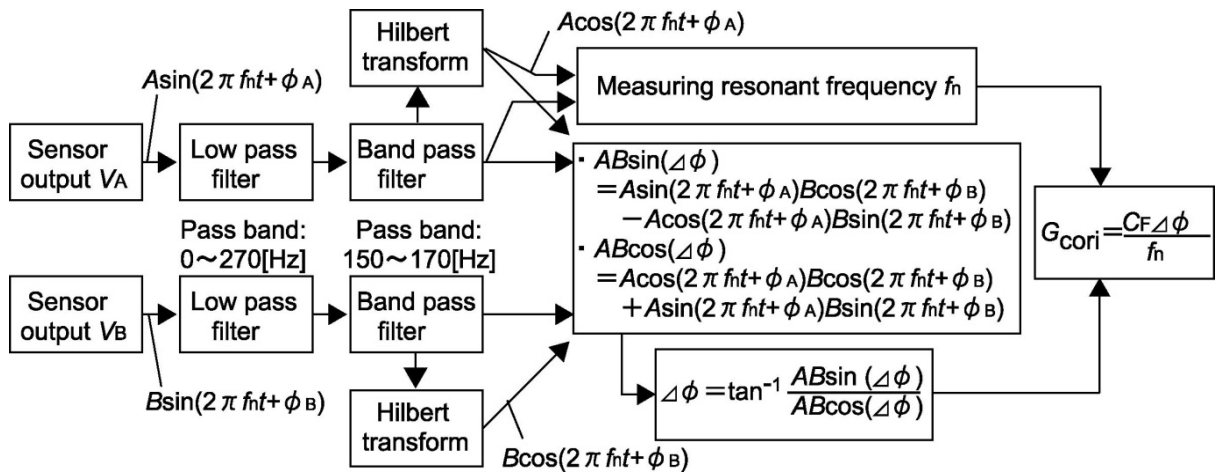


Fig.2.16 Hilbert-based calculation flow for

2. 5 気液二相流におけるコリオリ質量流量計の

力学的特性の解明

本節では前節で提案した位相差算出手法を利用して、静的状態下での流量測定値の特性を改めて評価する。図 2.17 に容積流量比に対する質量流量の測定偏差を示す。図より、流速が 0.6[m/s]の場合をのぞき、測定偏差が運転動作点に関係なく一定の傾向を示していることがわかる。流速が 0.8[m/s]以上で運転動作点の影響を受けないという傾向は、図 2.13 の傾向とは異なる。このことから、Local-FFT 法では、第 2.3.3 項で指摘した共振周波数の変動に対応できず、実際の位相差より低い値を算出していたと考えられる。

ここで、図 2.17 の流速が 0.8[m/s]以上の条件における質量流量の流量測定偏差率にまず注目すると、容積流量比が約 1%以内では流量測定偏差率は 0%であるが、1%を超えたあたりから 0%から減少していることがわかる。ここで、図 2.12 で示した励振ゲインが増加すると D_T も増加すると考えられるので、 D_T が容積流量比に対して線形に増加すると式(2.22)は少ないながらも減少はすると考えられる。

$$\frac{C'_F}{C_F} = \frac{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2}}{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2 + (\omega_n D_T)^2}} \quad (2.22)$$

そこで、測定偏差が発生しない原因を明らかにするため、容積流量比約 1%前後の特性に焦点を当てた結果、励振ゲインの時系列変化に差があることを確認する。図 2.18、図 2.19 にライン圧力 0.2[MPa]、流速 1.2[m/s]の運転動作点における容積流量比が 0.91%、1.2%である時の励振ゲインの時系列変化を示す。まず、図 2.18 より、容積流量比が 0.91%である時は、励振ゲインの波形が正弦波状になっている。これは、センサ出力をポジティブフィードバックすることにより、励振ゲインを制御しているため、空気のダンパー効果に応じて励振ゲインの電圧が増加しているためである。一方で、図 2.19 より、容積流量比が 1.2%である時は、励振ゲインの波形が方形波状になっている。これは、コリオリ質量流量計において過大電圧によるコイルの破損を防ぐための保護機能によるものである。容積流量比が増加すると励振ゲインが増加することは図 2.12 に示した通りだが、この励振ゲインの増加は直接式(2.44)の D_T に比例するのではない

と考えられる。すなわち，過大電圧保護機能により不足した図 2.19 のピーク分だけ減少するとみられる。

ここで改めて図 2.17 の流速が 0.6[m/s]の場合に注目すると，第 2.3 節で述べたとおり，流速が 0.6[m/s]の時は空気が滞留し，空気の混入量が断続的に変化している様子が確認されていた。このことから，流速が 0.6[m/s]の場合のみ，容積流量比が 1%以下でも流量測定偏差が発生していると考えられる。

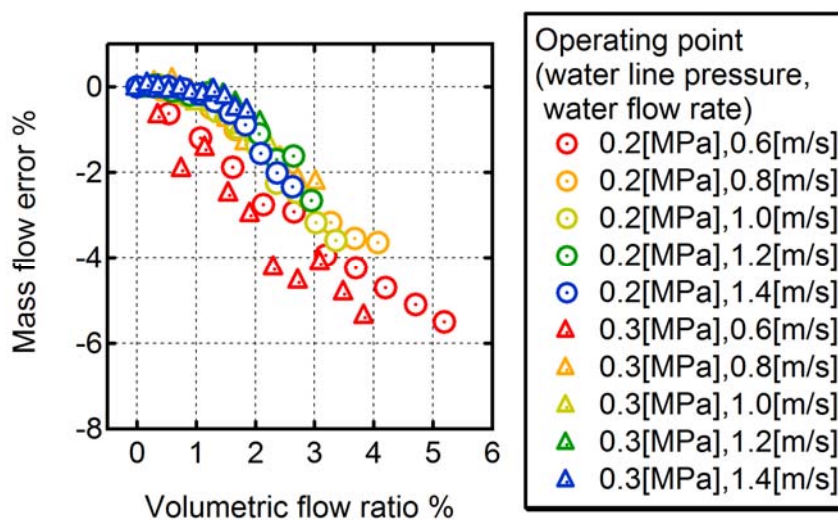


Fig.2.17 Static characteristics of mass flow error in aerated water flow using Hilbert transform

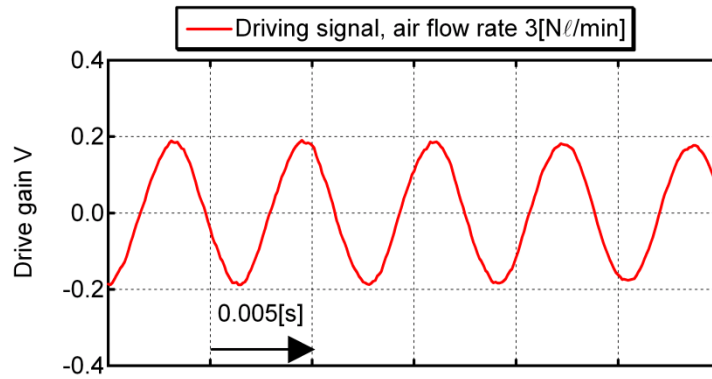


Fig.2.18 Driving signal when volumetric flow ratio is 0.91%

(Line pressure 0.2[MPa], water flow rate 1.2[m/s])

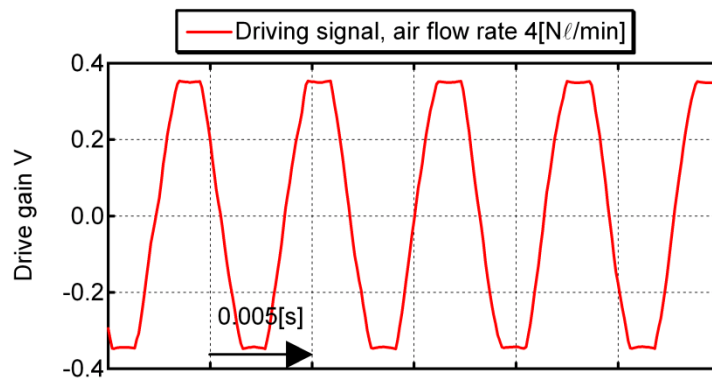


Fig.2.19 Driving signal when volumetric flow ratio is 1.2%

(Line pressure 0.2[MPa], water flow rate 1.2[m/s])

2. 6 気液二相流におけるコリオリ質量流量計の

力学的特性のまとめ

コリオリ質量流量計では、これまで単相流を測定流体としていた際、Local-FFT法により、共振周波数における位相差、そして質量流量を算出していた。しかし、本論文では気液二相流を測定するにあたり、ヒルベルト変換を使用し、瞬時周波数の揺動成分における揺動に焦点をあて、従来の流量算出手法を使用することへの妥当性を検証した。その結果、フローチューブへの断続的な流出入により共振周波数が高周波数で変動していることが確認された。このことから、Local-FFTにおいて窓関数を設定し、窓関数内部であれば振動特性、すなわち位相差、周波数が一定であると仮定することは難しいことを明らかにした。

一方で、この気液二相流下においても適用可能な流量算出手法として、ヒルベルト変換を利用して位相差を算出することを提案した。ヒルベルト変換であれば、共振周波数の高周波変動に関係なく、位相差および瞬時周波数を算出できる。この位相差算出手法を利用し、流量測定偏差を算出したところ、依然として空気混入に対し、流量測定偏差は発生するものの、従来理論モデルで提唱されていたように、容積流量比（または励振ゲイン）に対して、運転動作点に関係なく一定の増加傾向を持つことを確認できた。このことから、これまでの気液二相流における流量測定偏差が、理論モデルと合致しなかった理由は、位相差の算出手法にあったといえる。

また、ヒルベルト変換による適切な流量算出手法への変更により、容積流量比が1%以下において空気が混入しても、流量測定偏差が発生しないことを明らかにした。この原因を検証したところ、励振ゲインが励振コイルに適切に供給されている場合は流量測定偏差が発生せず、課題電圧保護機能により、励振ゲインの電圧波形のピークがカットされた場合、すなわち一時的に振動が減衰する場合において流量測定偏差が発生することを明らかにした。この結果より、気泡が混入した場合でも、過大圧力保護機能が働くまでに、空気混入を検知できれば、安全側に運転動作点を変更することも可能となる。次章では、空気混入が測定に支障を来す条件を明らかにしていく。

第 3 章 空気混入がコリオリ質量流量計の流量測定値に与える影響

第 3 章にて気液二相流において適切な流量算出手法を提案したが，その結果容積流量比に対して質量流量の測定偏差が発生し，真の値に対して低い質量流量が出力されることを明らかにした．最終的な目的としては気液二相流においても液相，気相の正確な流量を測定できることが理想ではあるが，本研究の進め方としてまず，測定流体である液体に気体が混入した際，測定に支障を来す前に空気混入の有無を検知することを目的とする．本章ではその第一段階として，容積流量比と質量流量の測定偏差の関係を明らかにすることで，空気混入を検知すべき診断目標を定量化していく．

3. 1 気液二相流における流量測定偏差

第 2.5 節において，第 2.2 節の式(2.22)の測定偏差の関係式，および第 2.3.3 項における図 2.12 の励振ゲインの増加に注目し， D_T の増加により流量測定偏差が発生するとした．しかし式(2.22)では流量係数として分子および分母の第 1 項は一定とみなせるが，分母第 2 項の共振周波数 ω_n が流量測定偏差の発生条件に影響を与える恐れがある．フローチューブの共振周波数は，フローチューブの減肉や付着，異なる形状の流量計による試験においても異なるが，本論文では同一の流量計において，測定流体の密度が変わった場合の測定偏差を検証することで，共振周波数が流量測定偏差に与える影響を明らかにしていく．

$$E_G = \frac{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2}}{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2 + (\omega_n D_T)^2}} \quad (2.22)$$

測定対象の液体として塩水を使用する場合，基準質量流量を算出するには，空気を含まない塩水の密度 ρ_{salt} を算出する必要がある．そこで，空気を混入させないときにコリオリ質量流量計で測定した塩水の密度 ρ_{salt} と温度 T を複数回取

得する．これにより得られる密度と温度の関係から，空気が混入している場合でも塩水の密度を算出する．本実証プラントでは，密度が 1.1×10^{-3} , $1.2 \times 10^{-3}[\text{kg}/\text{m}^3]$ の 2 種類の塩水において検証を行った．

ここでまず，気液二相流での流量算出手法を検証する際に注目した共振周波数に注目する．特にコリオリ質量流量計の流量算出に際し，センサ出力のノイズ成分をフィルタ処理するが，瞬時周波数がフィルタの帯域外まで増加した場合正確な質量流量が算出できない恐れがある．このことから，共振周波数の平均値と合わせてヒルベルト変換で算出した瞬時周波数にも注目する．

図 3.1～図 3.3 に，水または 2 つの濃度の塩水において測定したコリオリ質量流量計の共振周波数と容積流量比の関係を示す．運転動作点は，ライン圧力を 0.2, 0.3[MPa]，空気圧力を 0.4[MPa]とし，基準質量流量 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.7[kg/s]において，測定流体に空気を混入させる．図 3.1～3.3 より各運転動作点において，容積流量比が増加した場合の影響に注目すると，共振周波数は容積流量比に比例して増加し，その傾きはいずれの運転動作点もほぼ同じであることがわかる．これは，密度を共振周波数から算出していることから考えて妥当な変化である．なお，容積流量比 0%では密度が大きい液体ほど共振周波数が小さいことを確認できる．これは，上記で述べたように，共振周波数は密度に反比例するからである．また，測定対象の液体が同じでも，運転動作点によって共振周波数の大きさが異なっている．これは，実証プラントにおける制約上，運転動作点を設定しているゲート弁での圧力損失により，測定対象の液体温度が上昇し，密度が低下したためである．また，フローチューブ自体の膨張による共振周波数の変動もあるとされる．実際のコリオリ質量流量計の密度算出ではこの温度による共振周波数の違いも含め補正される．なお，空気の断続的な流出入により，共振周波数は一時的に大きく増加する．各測定流体において最も瞬時周波数の増加が多いと考えられるライン圧力 0.2[MPa]，流速 0.6[m/s]における共振周波数の時系列変化を図 3.4～図 3.6 に示す．図より，共振周波数は空気混入量に対して，最大で約 10[Hz]増加していることがわかる．ただし，最も共振周波数の高い水においても最大で 168[Hz]以下となっている．このことから，位相差算出前のバンド スフィルタのバンド帯域は 150[Hz]～170[Hz]で固定とする．

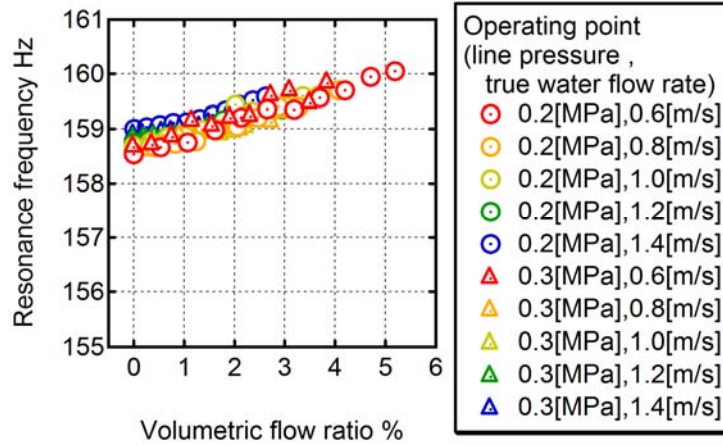


Fig.3.1 Relationship between resonant frequency and volumetric flow ratio when fluid is water

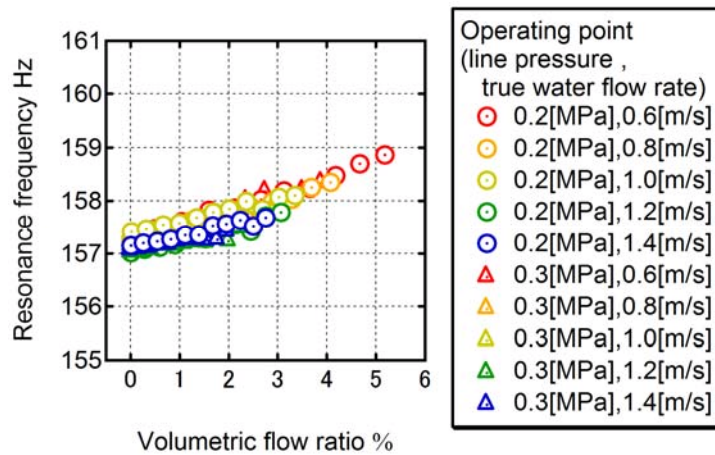


Fig.3.2 Relationship between resonant frequency and volumetric flow ratio when fluid is salt water

(fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$)

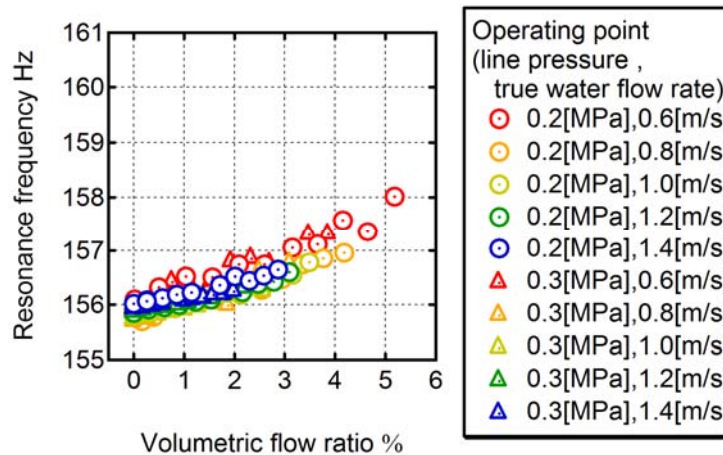


Fig.3.3 Relationship between resonant frequency and volumetric flow ratio when fluid is salt water

(fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$)

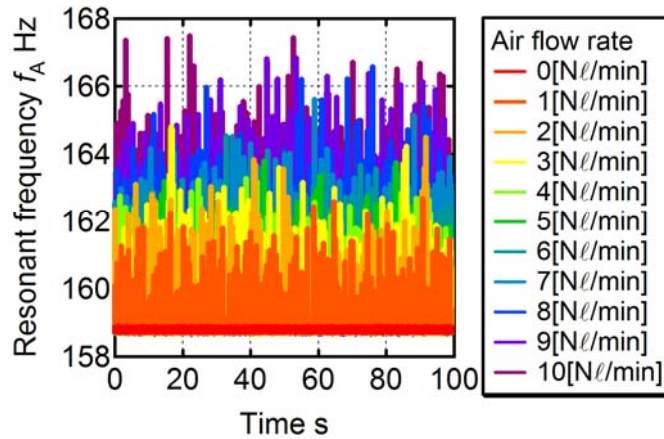


Fig.3.4 Relationship between resonant frequency and volumetric flow ratio at water line

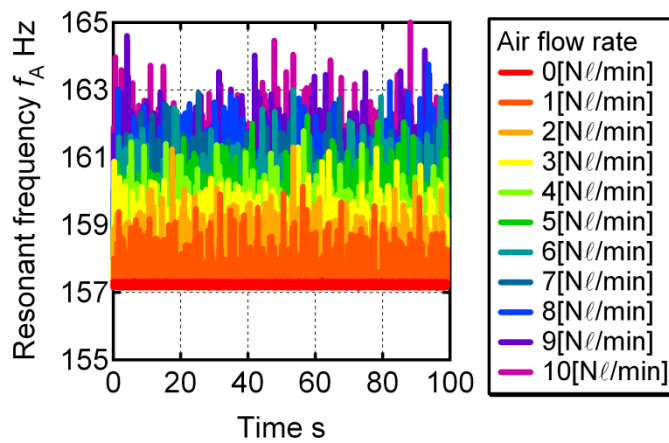


Fig.3.5 Relationship between resonant frequency and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

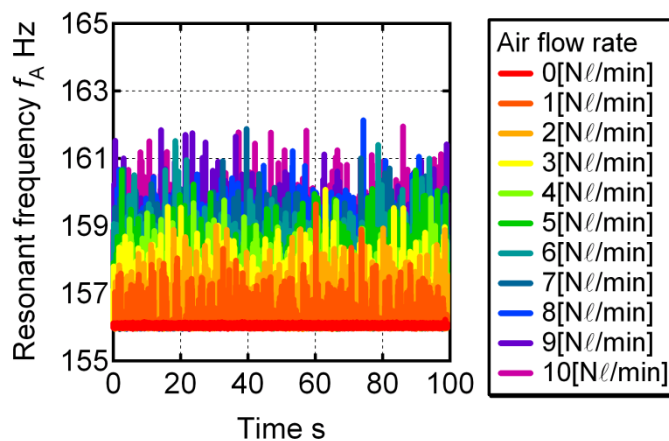


Fig.3.6 Relationship between resonant frequency and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

3. 1. 1 従来の流量算出手法における流量測定偏差

本項では、前章で明らした Local-FFT 法により算出した流量測定偏差の問題点が測定流体の密度に関係ないことを確認し、さらにこの後示すヒルベルト変換を利用した流量算出手法との違いを明確にするため、図 3.7～図 3.9 に、水および 2 つの濃度の塩水における容積流量比と Local-FFT 法により算出した質量流量の測定偏差の関係を示す。運転動作点は、ライン圧力を 0.2, 0.3[MPa]、空気圧力を 0.4[MPa]とし、流速を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4[m/s]とする条件のもとで空気を混入させる。また、空気混入量は 0 から 10[Nℓ/min]まで 1[Nℓ/min]ずつ増加させ、このとき測定周期 1.6×10^{-1} [s]、測定時間 100[s]で質量流量を測定し、その容積流量比に対する流量測定偏差率の変化を見る。ここで、密度の違いによる Local-FFT 法により算出した質量流量の測定偏差に注目すると、空気の滞留が確認されたものを除外した場合でも基準質量流量が低いほど、流量測定偏差率が増加することがわかる。このことから、やはり Local-FFT 法により算出した質量流量の偏差は、理論モデルとは乖離があると言わざるをえない。

3. 1. 2 ヒルベルト変換を利用した流量算出手法における流量測定偏差

ここで、第 3.1.1 項と同じ条件で基準質量流量に対するヒルベルト法により算出した質量流量の測定偏差と容積流量比の関係を示し、従来の算出手法との違いを明らかにする。図 3.7～図 3.9 に、水および 2 つの濃度の塩水において、液体のみの質量流量を基準質量流量としたときの測定偏差と容積流量比の関係を示す。まず、図 3.7～図 3.9 においていずれも流速が 0.6[m/s]の時の流量測定偏差率と容積流量比の関係が他の流速とは大きく異なっている。この理由は、前述の通り、測定液体が空気を押し流す力が弱く気泡が滞留したためである。このため、空気流量調節器で設定した通りに流れず、空気混入量が非常に大量に流れる時と全く流れない時が断続的に続くような実験条件になってしまった。以上より、流速 0.6[m/s]の結果は他の流速と区別する。

その上で、図 3.7～図 3.9 を改めて比較すると、いずれもある容積流量比までは流量測定偏差率が発生しないことがわかる。特に、水、密度 1.1×10^{-3} [kg/m³]の塩水、 1.2×10^{-3} [kg/m³]の塩水の順に、流量測定偏差率が発生する容積流量比が増加している。前節にて、空気が混入しても、過大圧保護機能により励振ゲインのピークが制限されない限り流量測定偏差が発生しないことを示している。そこで、図 3.10～3.12 に励振ゲインと容積流量比との関係を示す。図より空気が混入すると、容積流量比の増加にしたがい、励振ゲインが増加していること

がわかる．ただし，容積流量比に対する励振ゲインの増加量は密度にほぼ関係がないことがわかる．ここで，改めて式(2.22)に注目する．

$$E_G = \frac{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2}}{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2 + (\omega_n D_T)^2}} \quad (2.22)$$

この式を変形すると，

$$E_G = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(\omega_n D_T)^2}{\sqrt{(K_T - \omega_n I_T)^2}}}} \quad (2.23)$$

と示せる．ここで，式(2.21)の単相流における流量係数 C_F に注目する．

$$C_F = \frac{H_R \sqrt{(k_T - I_T \omega_n^2)^2}}{(2d)^2} \quad (2.20)$$

一般にコリオリ質量流量計は，出荷前に流量係数 C_F を実流校正により算出し，これを定数として扱っている．このうち，コリオリ質量流量計の体格が決まっていれば， H_R および d は定数とみなせる．したがって，式(2.20)の平方根内も定数として扱える．ここで改めて式(2.23)をみると，式(2.20)の平方根内にある定数に対して，共振周波数およびねじれのダンピング要素 D_T の積が十分大きいときに，質量流量の測定偏差が発生することがわかる．ここで図 3.1～3.3 より，測定流体が水であった場合の共振周波数 156Hz に対して，食塩水はその密度に応じて 157[Hz]～159[Hz]まで増加している．これを式(2.23)に当てはめると，過大電圧保護機能により，励振ゲインが方形波状になった時点で， D_T が増加し始めると，共振周波数が高い，すなわち密度の低い水から測定偏差が発生し始めると考えられる．したがって，流量測定偏差の発生の要因は，励振ゲインの過大電圧保護機能のほかに，流体の密度があると考えられる．

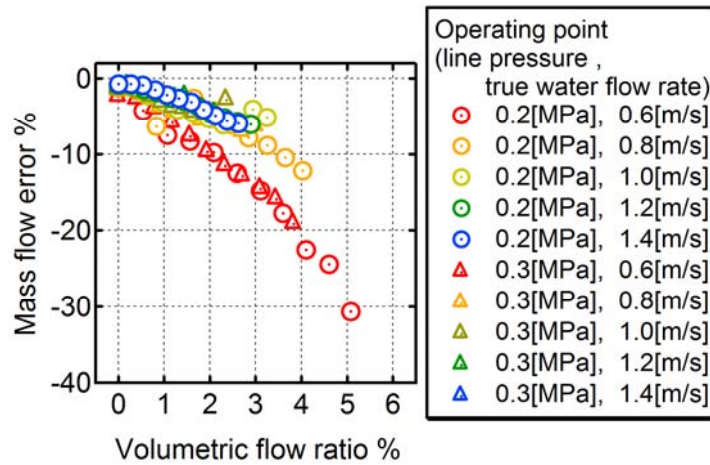


Fig.3.4 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio at water line

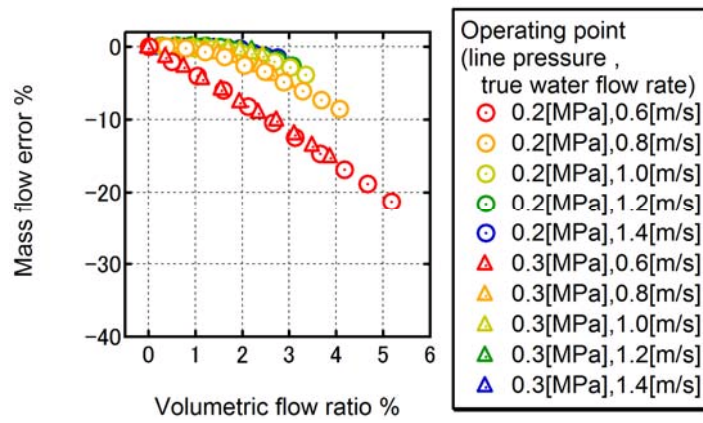


Fig.3.5 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio when fluid is salt water
(fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

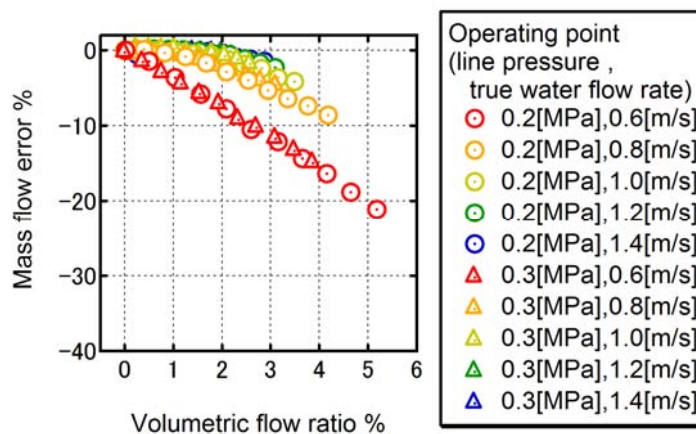


Fig.3.6 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio when fluid is salt water
(fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

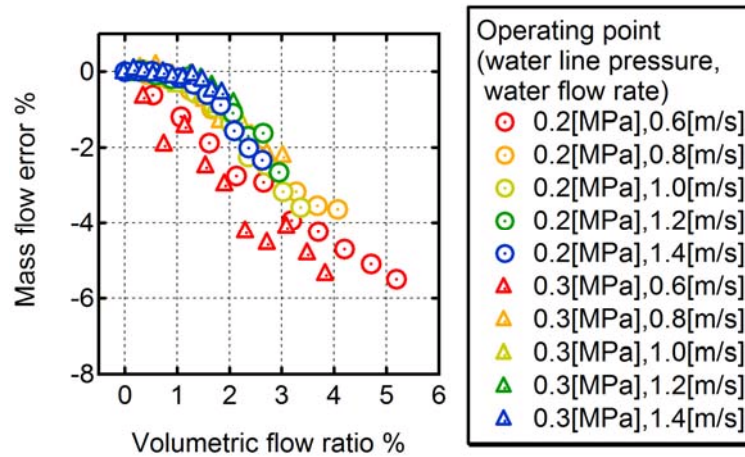


Fig.3.7 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio at water line

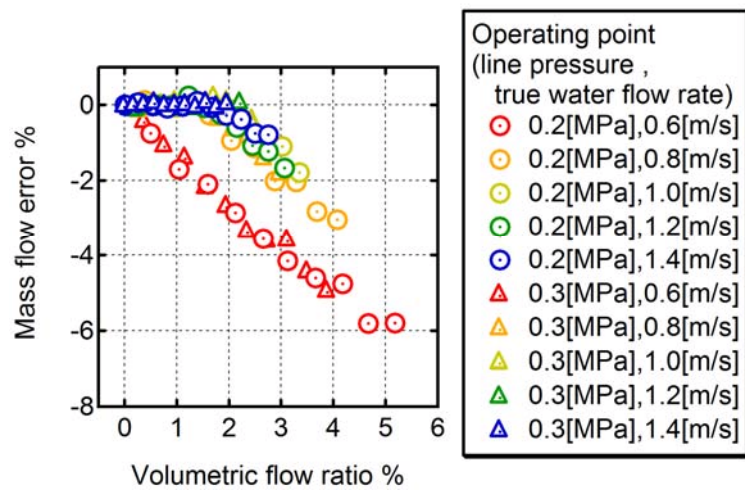


Fig.3.8 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: 1.1×10^{-3} [kg/m³])

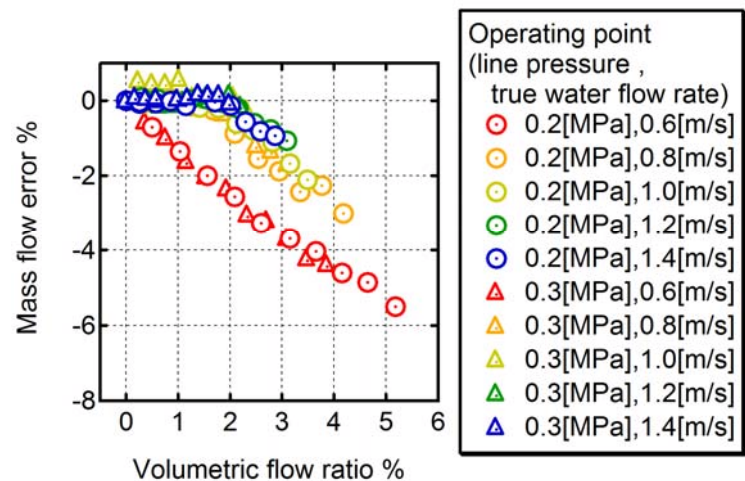


Fig.3.9 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: 1.2×10^{-3} [kg/m³])

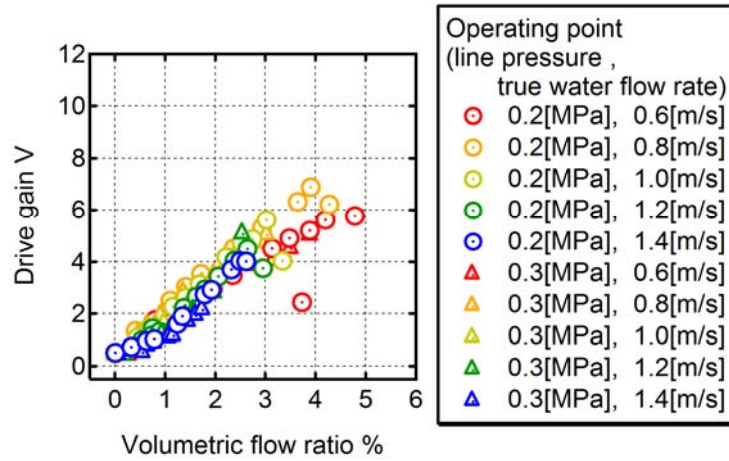


Fig.3.10 Relationship between drive gain and volumetric flow ratio at water line

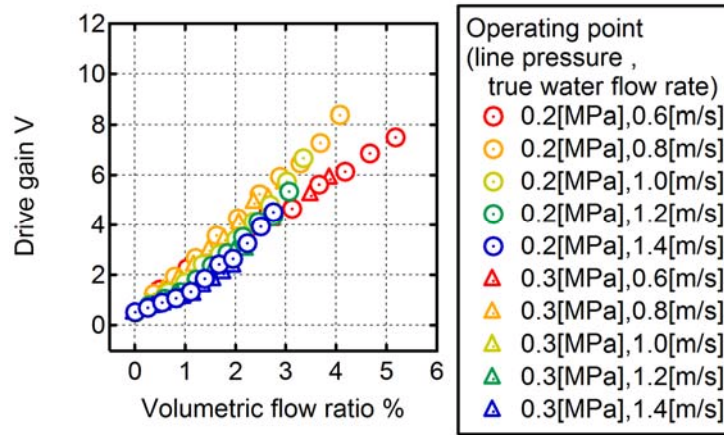


Fig.3.11 Relationship between drive gain and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

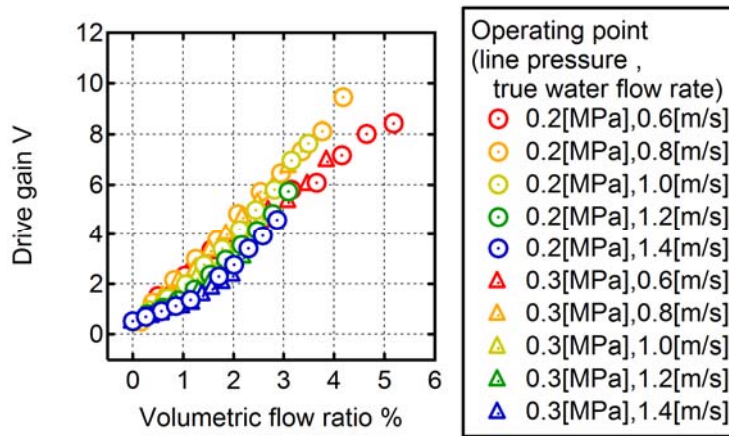


Fig.3.12 Relationship between drive gain and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

3. 2 空気混入量と流量測定偏差の関係

第 3.1 節において、質量流量の測定偏差の発生要因として、コリオリ質量流量計の励振ゲインにおける過大電圧保護機能のほかに、測定流体の密度が影響することを示した。ここで、改めて研究の目的に立ち返り、測定に支障を来す空気の混入条件を検証する。

まず前節で明らかにした流体の密度と流量測定偏差率の関係より、流体の密度が軽いほど、流量測定偏差の発生する容積流量比が減少することが確認された。これは低密度の測定流体へ空気が混入した場合、少量の空気混入量で容易に測定偏差が発生してしまうともいえる。ただしもう一つの測定偏差の要因である、励振ゲインの過大圧保護機能については、気液二相流においてフローチューブを振動させるために入力される励振コイルの電源電圧が、規定の電圧を超えたとき初めて、測定偏差が発生するものである。これはすなわち、励振コイルがフローチューブの減衰エネルギーに見合ったエネルギーを継続的に供給できれば、測定流体の密度に関係なく空気混入に強くなることを示している。

本論文では、このことを踏まえ、密度の最も低い水を測定流体とした時の測定偏差発生条件に焦点を当て、この測定流体で測定に支障を来す前に空気混入の有無を診断することを目標とする。具体的には、容積流量比 1%を診断目標とする。

3. 3 空気混入がコリオリ質量流量計の

流量測定値に与える影響のまとめ

プロセスオートメーションの分野においてコリオリ質量流量計はその測定精度の高さを特長としており、測定精度が低下することが知られている測定流体への空気混入は早期に検知し、避けるべき不具合であるといえる。本章では、コリオリ質量流量計の測定偏差の予想モデルから、流量測定偏差の要因として共振周波数とダンピング要素に焦点を当てることで測定偏差の発生条件を検証した。具体的には、共振周波数に対応する要素として測定流体の密度を、ダンピング要素に対応する要素として、励振ゲインに注目し、容積流量比を変更した場合の質量流量の測定偏差を評価した。

この結果、流量算出手法の改善により、運転動作点や測定流体の密度に関係なく、空気が混入していても流量測定偏差が発生しない条件があることが確認された。従来研究では、位相差算出手法の問題によって、空気混入により共振周波数が揺動を持った時点で流量測定偏差が発生していたことから、空気混入を検知した時点で流量測定偏差が発生し、安全側への運転条件の移行が難しか

った。ただし、本研究では少量の空気混入を測定に支障を来さない予兆として扱う。これはすなわち、プロセスオートメーション用のフィールドバスである FOUNDATION フィールドバスにおいてフィールド機器の制御機能を利用すれば、ホストの故障に起因する空気混入（異常発熱による沸騰等）であったとしても、流量測定偏差が発生する前にコリオリ質量流量計から制御ループの動作モードを安全側へ移行するように指示できるようになったということである。また、測定流体の密度が軽いほど流量測定偏差が発生しやすい知見が得られたものの、そもそもの測定偏差の発生条件が、フローチューブを一定の振幅で持続振動させるために励振コイルに出力する電圧が上限を超えることにあることを明らかにした。これらの結果から、次章においては密度の軽い水を中心に、測定に支障を来す前に空気混入を検知できる手法を検討するが、今回の成果から、同時に空気混入に強いコリオリ質量流量計の設計指針を得ることが可能となる。

具体的には、以下の3つの対策を行うことで、測定流体の密度に関係なく、空気混入による質量流量の測定偏差の発生しない流量計を設計できる。

- ①励振コイルへ入力できる許容電圧を増加させる。
- ②励振コイルの電圧が振動エネルギーへ変換される効率を上げる
- ③フローチューブの持続振動させるために必要なエネルギーを減少させる。

上記の対策は空気混入による不具合に関係なく、新しいコリオリ質量流量計の開発テーマとして進められているものであり、今後の開発によってはより多くの空気が混入した場合であっても高精度での質量流量の測定が可能になることが期待される。

第4章 2つのセンサ出力間における相関の揺動を利用した空気混入診断

第3章にて、測定流体へ空気が混入した際に、過大電圧保護機能によって励振ゲインの電圧が制限されることにより質量流量の測定偏差が発生することを明らかにした。一方で、励振ゲインが制限されるまでは、空気が混入した場合でも流量測定偏差が発生しないことから、前章では測定に支障を来す空気の混入条件を明らかにした。本章では、フローチューブの両端に設置されたセンサの相関に注目し、空気の断続的な流出入によりフローチューブ間においてセンサ出力の相関が断続的に変動することを応用し、空気混入により弱まる2センサ出力の相関の変動を揺動として扱い、その大きさから空気混入の有無を診断する手法を提案し、その有効性を明らかにする。

4. 1 2階差 RMS によるセンサ出力間の相関における

揺動特性の定量評価

一般に測定流体の状態を診断する場合、診断対象であるプロセスの圧力、流量、温度などの複数のプロセス値を測定し解析するのが一般的である。しかし、実プラントに設置された場合は、コリオリ質量流量計では測定できないプロセス値を情報として得られるかは保証されていない他、診断対象によってはその症状によりプロセス値そのものが異常な値を示すため使用できないこともある。本論文で扱っているコリオリ質量流量計における空気混入においても前章に示した通り、コリオリ質量流量計で測定される質量流量および密度が異常な値を示す。したがって、診断対象の症状の重さにより異常の程度が異なるプロセス値そのものを診断に利用することができるか明確にしなくてはならない。

これに対し本研究では、プロセス値の持つ高周波成分、すなわち揺動を診断に利用することを提案する。プロセスにおいて流量、圧力が持つ揺動成分は、一般にポンプ、ボイラ、圧縮機などの動力や、配管構成、コントロール弁などの負荷要素によりほとんどのプラントで見られる現象である。この揺動成分を決定づけるメカニズムは明らかにはなっていない一方、プロセスにおける運転条件の影響を受けないように相対評価等を採用することにより、プロセス値が

正常値であるかに関係なく，診断できることが特長である．

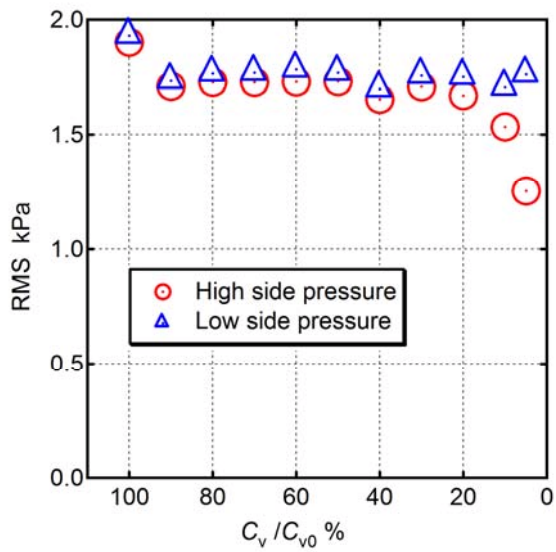
コリオリ質量流量計における診断に関する研究の前身として，まず差圧伝送器における導圧管の詰まり診断指標として，マルチバリアブル差圧伝送器で測定したオリフィス前後の圧力揺動に注目した場合の有効性を下記に示す．柴野らの研究ではオリフィス前後の圧力揺動の評価手法として位相差等複数の評価方法を検証しているが，本論文では，揺動成分の大きさを式(4.1)に示す，1階差のRMSで評価する手法を示す．

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{i-1})^2} \quad (4.1)$$

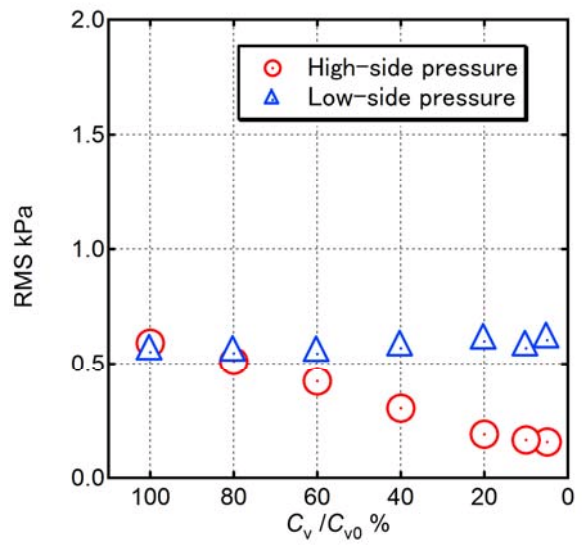
ここに， x_i ： i 番目の評価対象

N ：測定したデータの総数

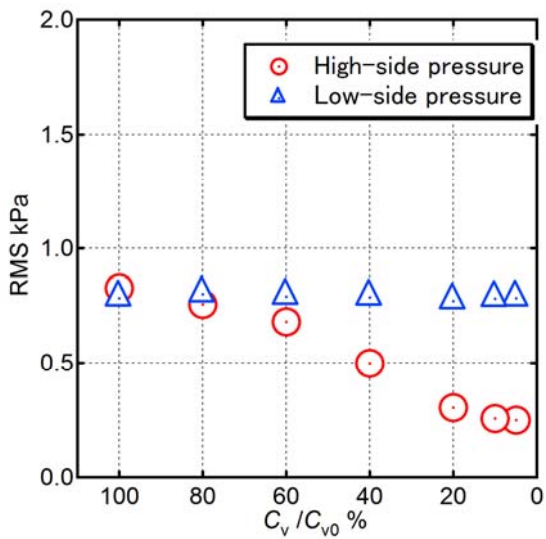
導圧管の詰まり診断においては式(4.1)を用いて，オリフィス前後で測定される圧力（以後，それぞれ高圧側圧力，低圧側圧力と呼ぶ）を100[s]測定しそれぞれの揺動の大きさを，RMSで定量評価することを提案している．この診断指標の有効性を明らかにするため，高圧側の導圧管の詰まりをニードル弁による弁開度（ C_v 値比）を小さくすることにより模擬したときの結果を図4.1に示す．図4.1-aのみ測定流体が水であり，図4.1-b)～図4.1-d)では温度によって動粘度が変動するシリコンオイルを測定流体に利用することで，測定流体の物性が揺動成分に与える影響も評価している．これらの結果よりいずれの運転動作点でも揺動の大きさには差があるものの，正常時ではほぼ同じ大きさであった高圧側圧力と低圧側圧力のRMSにおいて，高圧側の詰まりが進行すると同時に，高圧側圧力のRMSが低下していることがわかる．この特徴を利用して，高圧側圧力のRMSと低圧側圧力のRMSを診断指標とし，診断指標が1から増減するかで，導圧管の詰まりの進行度合い，および高圧側または低圧側のどちらの導圧管が詰まったのかを診断することを提案している．



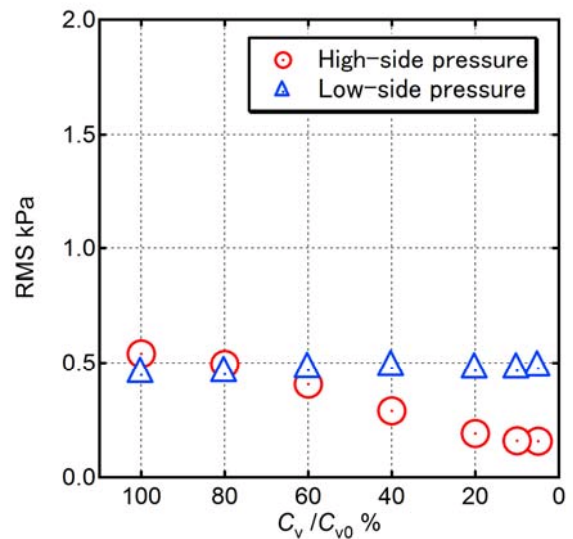
a) water line (line pressure:900[kPa], differential pressure 45[kPa])



b) Oil line (line pressure:100[kPa], differential pressure: 20[kPa] kinetic viscosity: 1.0×10^{-5} [m²/s])



c) Oil line (line pressure:100[kPa], differential pressure: 80[kPa] kinetic viscosity: 1.0×10^{-5} [m²/s])



b) Oil line (line pressure:100[kPa], differential pressure: 20[kPa] kinetic viscosity: 3.0×10^{-5} [m²/s])

Fig.4.1 Variation of RMS under High-side blockage

本章では、この揺動成分に注目した診断手法がコリオリ質量流量計の空気混入診断においても有効であることを明らかにしていく。なお、コリオリ質量流量計に空気が混入した場合においては、空気混入の有無により流路抵抗が変化しプロセスの運転条件そのものが変動することが確認されている。そこで、さらに運転条件の影響を除去しつつ揺動成分の大きさを定量評価する手法として、

揺動成分の 2 階差の二乗平均（以後 2 階差 RMS）を利用し，診断指標を定量評価する．

$$\text{RMS}_{2\text{nd}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1})^2} \quad (4.2)$$

ここに， x_i ： i 番目の評価対象（本診断では $AB\cos\Delta\phi$ ）

N ：測定したデータの総数

本節では，この 2 階差 RMS で評価すべき揺動成分として，フローチューブに設置した 2 つセンサコイルから得られるセンサ出力の相関関係に注目し，これを空気混入診断に応用することを目指す．まず，診断指標の候補として，ヒルベルト変換による流量算出の際に利用した $AB\cos\Delta\phi$ ， $AB\sin\Delta\phi$ ，そしてその比である $\tan\Delta\phi$ を候補として診断指標としての適性を検証する．センサ出力 A ， B を測定周期 8×10^{-4} [s]，測定時間 100 [s] でオシロスコープにより測定したデータより，容積流量比に対する $\tan\Delta\phi$ ， $AB\sin\Delta\phi$ ， $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS を候補とする．

$$A(t)B(t)\sin\Delta\phi(t) = V_A(t)\hat{V}_B(t) - \hat{V}_B(t)V_A(t) \quad (2.35)$$

$$A(t)B(t)\cos\Delta\phi(t) = \hat{V}_A(t)\hat{V}_B(t) + V_B(t)V_A(t) \quad (2.36)$$

$$\tan\phi(t) = \frac{AB\sin\Delta\phi(t)}{AB\cos\Delta\phi(t)} \quad (4.3)$$

ここで，まず診断指標としての適性を検証するために，測定流体は水とした状態でライン圧力 0.2 [MPa]，流速が 1.4 [m/s]，気泡を 0 から 10 [Nℓ/min] まで 1 [Nℓ/min] ごとに混入させた時における，容積流量比に対する各診断指標候補， $AB\sin\Delta\phi$ ， $AB\cos\Delta\phi$ ， $\tan\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の関係を図 4.2 に示す．

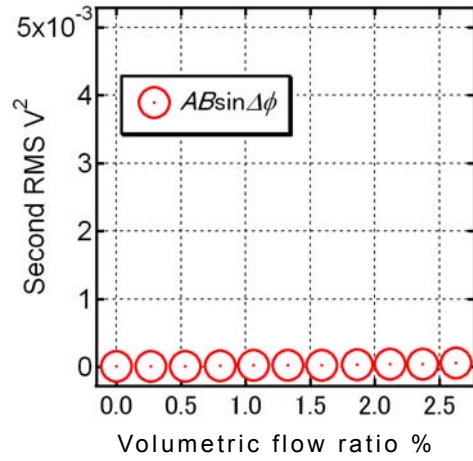
図 4.2-a) より， $AB\sin\Delta\phi$ の 2 階差 RMS は容積流量比が増加しても，0 で変化がないので診断指標として不適である．これは $\Delta\phi$ が非常に小さいため， $\sin\Delta\phi$ の値そのものが非常に小さいため揺動が評価できないものと考えられる．一方，図 4.2-b) より， $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS は空気混入が無い場合に 0 であるが，容積流量比が増加するにつれて診断指標は増加している．これは診断目標である容積流量比 1% までに 1×10^{-3} [V] まで増加していることから空気混入の有無を判別できる．最後に図 4.2-c) より， $\tan\Delta\phi$ の 2 階差 RMS は容積流量比の増加につれて診断指標も増加している．しかし，容積流量比が 0% の時に $\tan\Delta\phi$ の 2 階差

RMS が 0 でない。特にコリオリ質量流量計では、 $\Delta\phi$ が非常に小さく、 $\tan\Delta\phi$ と近似できることを考えると、 $\tan\Delta\phi$ の 2 階差 RMS は、質量流量の揺動を評価していることになる。その結果、質量流量の揺動が大きいことがこの指標の 2 階差 RMS が容積流量比 0% の時に 0 とならない理由と考えられる。一般のプラントでは、その規模や動力源との距離によって質量流量の揺動は容易に変化することが予想されるため、事前に質量流量の揺動の大きさに関するデータをあらかじめ蓄積しない限り、 $\tan\Delta\phi$ の 2 階差 RMS は診断指標としては不適である。ここで改めて、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の診断指標としての有効性を検証する。まず質量流量との関係において、 $\Delta\phi$ が非常に小さいことを考えると $\cos\Delta\phi$ はほぼ 1 となっていると考えられる。さらに $\Delta\phi$ が空気混入以外の要因で質量流量の揺動成分が増加した場合でも、変化量に該当する $\cos\Delta\phi$ の変化量は $\sin\Delta\phi$ となるため、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の診断指標には一切影響がないと考えられる。さらに前述の通り、容積流量比の増加に対して、0 から増加する特性を持つ。これらを総合すると、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS であれば、質量流量の揺動または運転動作点の変更の影響を受けることなく、空気の有無の混入を診断できる可能性がある。これにより本論文では、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS を診断指標として使用することを提案し、その有効性を明らかにしていく。

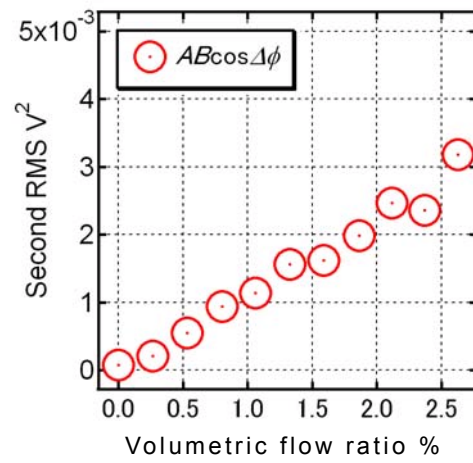
4. 2 気液二相流下でのセンサ出力間における

相関の揺動特性

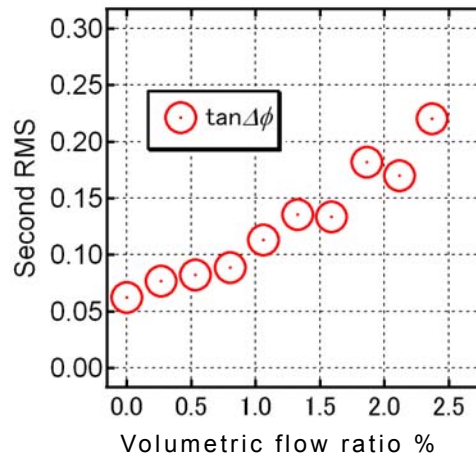
本章では、診断指標候補の算出において 2 階差 RMS を利用する。RMS は、算出対象のナイキスト周波数に近い揺動成分の増加を主に定量評価できることから、感度向上のため適切な測定周期で算出する必要がある。そこで本節では、センサ出力における揺動成分がどの周波数で増加するのかを検証する。本検証においても、測定流体は水、運転動作点はライン圧力 0.3[MPa] で基準質量流量を 0.6, 1.0, 1.4[m/s] の 3 種類とし、空気混入量を 0~10[Nℓ/min] と増加させた場合の $AB\cos\Delta\phi$ のワースペクトル密度を図 4.3 に示す。図は測定周期 8×10^{-4} [s]、測定時間 100[s] のデータを対象とし、FFT 解析したものである。図 4.3 より、 $AB\cos\Delta\phi$ のワースペクトル密度のピーク周波数の分布は多少異なるが、いずれも周波数が 0.1~10[Hz] 付近において、気泡混入量が増加するにつれてワースペクトル密度も大きくなっている。これより、最適な気泡混入診断指標として、ヒルベルト法により 200 点平均で算出した $AB\cos\Delta\phi(3.125[\text{Hz}])$ の 2 階差 RMS を用いることを提案する。これ以降のヒルベルト法を利用した診断では測定周期を 1.6×10^{-1} [s] として 2 階差 RMS を算出し、空気混入の診断感度を向上させる。



a) $AB\sin\Delta\phi$ SecondRMS vs volumetric flow ratio

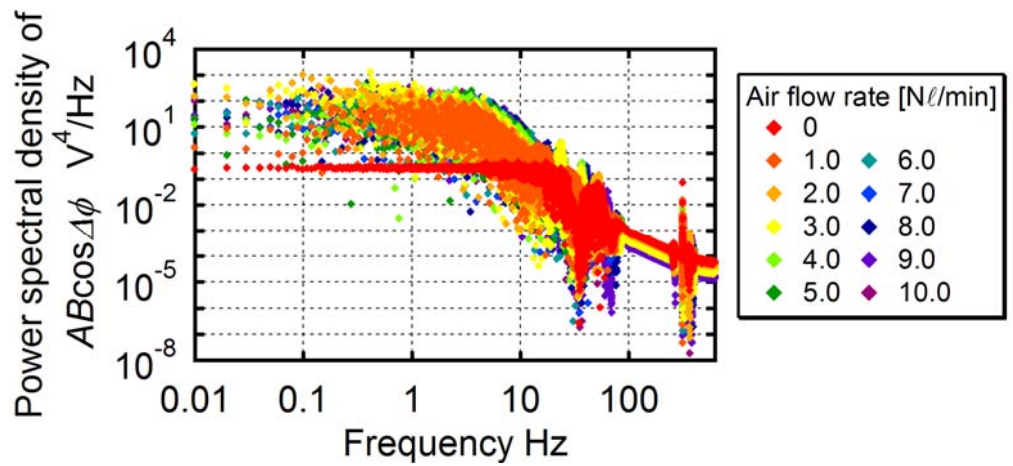


b) $AB\cos\Delta\phi$ SecondRMS vs volumetric flow ratio

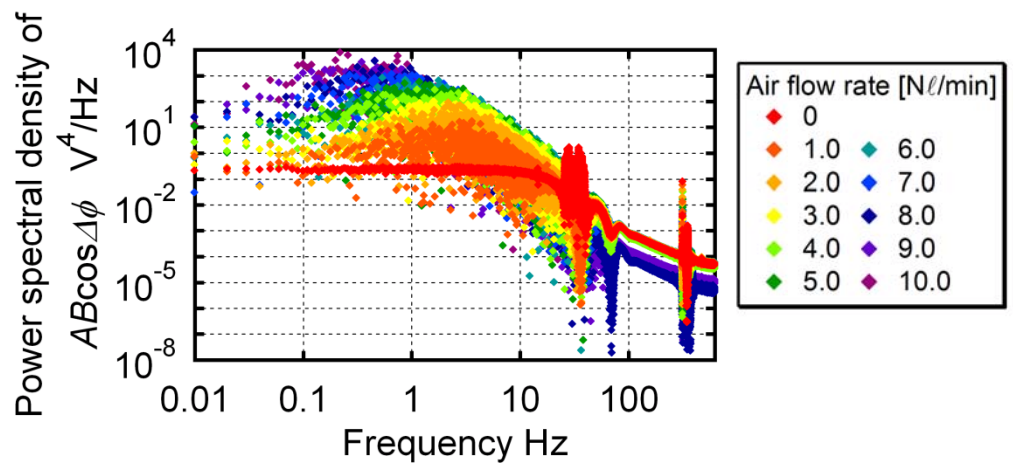


c) $\tan\Delta\phi$ SecondRMS vs volumetric flow ratio

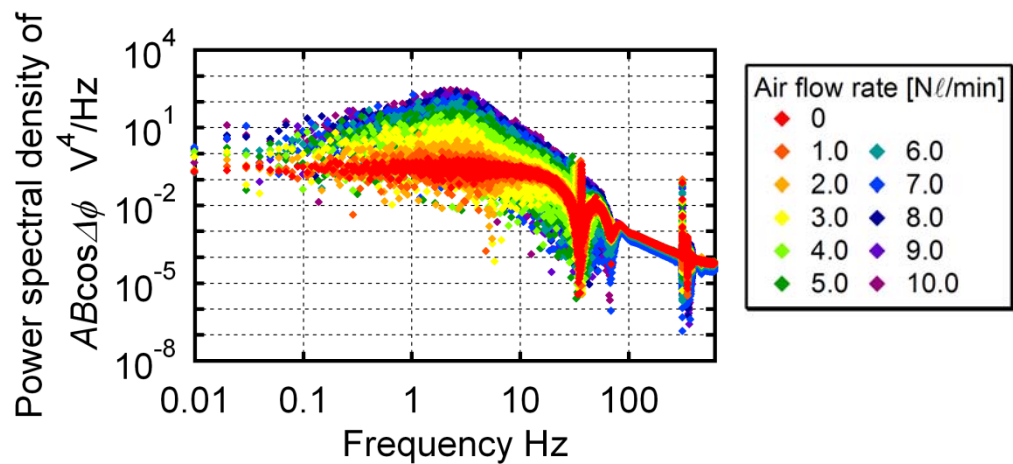
Fig.4.2 Relation between diagnostic indexes rate and volumetric flow ratio (Hilbert method)



a) Line pressure: 0.3[MPa], true water flow rate: 1.4[m/s]



b) Line pressure: 0.3[MPa], true water flow rate: 1.0[m/s]



c) Line pressure: 0.3[MPa], true water flow rate: 0.6[m/s]

Fig.4.3 Power spectral density of $ABCos\Delta\phi$

4. 3 センサ出力間における相関の揺動を応用した

空気混入診断

第 4.2 節の結果より，2 階差 RMS において感度を向上させるのに適切な階差の周期を明らかにした．本節ではこの周期を利用して， $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS と容積流量比の関係を検証し，空気混入の有無を診断する診断手法としての有効性を明らかにする．測定流体は水と，密度がそれぞれ $1.1[\text{kg}/\ell]$ ， $1.2[\text{kg}/\ell]$ の塩水とする．運転動作点は，ライン圧力を 0.2 ， $0.3[\text{MPa}]$ ，空気圧力を $0.4[\text{MPa}]$ とし，流速を 0.6 ， 0.8 ， 1.0 ， 1.2 ， $1.4[\text{m}/\text{s}]$ とする条件のもとで空気を混入させる．また，空気混入量は 0 から $10[\text{N}\ell/\text{min}]$ まで $1[\text{N}\ell/\text{min}]$ ずつ増加させる．この時，測定時間 $100[\text{s}]$ で測定したセンサ出力 A，B を信号処理し，測定周期 $1.6 \times 10^{-1}[\text{s}]$ となるように平均した上で，ヒルベルト法により $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS を算出する．

図 4.4～図 4.6 に実験調査で得た水および 2 つの濃度の塩水における， $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS と容積流量比の関係を示す．ここでまず，空気混入の有無を診断できるかを検証する．いずれの図においても，容積流量比が 0% から増加する際に $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS が増加していることがわかる．ここでまず，測定流体が水である図 4.4 に注目すると，流速が $1.2[\text{m}/\text{s}]$ および $1.4[\text{m}/\text{s}]$ の場合が容積比率 1% 以下である場合に $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の増加量が少ない．ただし，容積流量比 0% から 1% までに $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の増加量は 10 倍まで増加している．また，図 4.5 および図 4.6 と比較すると，いずれも流速が $1.2[\text{m}/\text{s}]$ および $1.4[\text{m}/\text{s}]$ の場合に終え蹴る 0% から 1% までの増加量は同じである．このことから，一見増加量が少ないように見える基準質量流量が高い条件においても，空気混入を診断できるといえる．

次に，基準質量流量における $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の増加量の違いを比較する．図 4.4 に注目すると，流速 $0.6[\text{m}/\text{s}]$ のとき空気が少量混入しただけで $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS が大きく増加している．一方で，流速 $1.4[\text{m}/\text{s}]$ のとき容積流量比が約 1% までを境に $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS が大きく増加している．この増加量の違いは，質量流量の測定偏差と同様，励振ゲインの過大電圧保護機能が影響している． $AB\cos\Delta\phi$ はセンサ出力 A および B の振幅を含んでいる．空気が混入し，過大電圧保護機能が機能し始めると，コリオリ質量流量計はセンサ出力の振幅を一定に制御することが困難になる．この時振幅 A および B は一時的に減少し，これらの積を含む $AB\cos\Delta\phi$ において揺動として測定されることになる．一方で，基準質量流量が低い時は，空気が混入した場合でも，センサ出力の振幅 A および B はほぼ一定に制御されている．このことから，空気混入による $AB\cos\Delta\phi$ における相関の揺動のみが評価される．この結果，提案する診

断指標は、空気の混入状況によって増加量が二種類に分かれているといえる。なお、本診断指標は、前述の通り過大電圧保護が機能しない場合でも空気混入の有無を診断できるほか、まだ質量流量の測定偏差が発生していない、流速 1.0[m/s]、ボイド率 1% の場合の診断指標をみると、1% 以下であっても $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS は大きく増加していることがわかる。このことから、質量流量の測定偏差が発生する前に、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の増加量が先に増加することで、測定に支障を来す前に確実に空気混入の有無を診断できると考えられる。

なお、図 4.4～図 4.6 をみる限りでの $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の問題点として、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS はいずれも容積流量比の増加に対し、一度増加した後減少している。さらに容積流量比が増加したとき $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS が減少し 0 に収束することがあれば、空気混入の有無が判別できない可能性がある。そこで、空気混入量を 0～100[Nl/min] にまで増加させて、改めて $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS の増減を評価した。図 4.7～4.9 にこのときの $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS を示す。いずれの場合も、空気混入量が 10[Nl/min] 以上に増加すると、一度減少するがその後収束することがわかる。これは、容積流量比が 0～10% までは空気が混入していればセンサ出力の振幅 A および B が揺動しているが、ある程度容積流量比が増加すると、励振ゲインが完全に飽和してしまい、振幅 A、B そのものが、ノイズ成分まで減少してしまうためである。実際に空気混入量を 0～100[Nl/min] まで増加させた時の励振ゲインを図 4.10～4.12 に示す。これらの図でも明らかにように、励振ゲインは、まず容積流量比約 1% 以上でまず過大電圧保護が機能した後、正弦波の勾配を急激にすることで、励振をするものの、容積流量比 10% を超えると、励振ゲインの値が飽和、すなわち完全な方形波になってしまう。この後も容積流量比の増加にしたがい、ダン ー要素は増加するが、励振ゲインが増加しないことから徐々に振幅が減少し、最終的にフローチューブの振動は配管振動等のノイズ成分に埋もれてしまう。ただこのような場合でも図 4.7～4.9 のように、空気混入の断続的な流出入により、センサ出力間の相関は $AB\cos\Delta\phi$ 十分な揺動を持つ。以上のことから、大量の空気混入量が突発的に起きた場合でも、 $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS ならば空気混入量の有無を診断できるといえる。

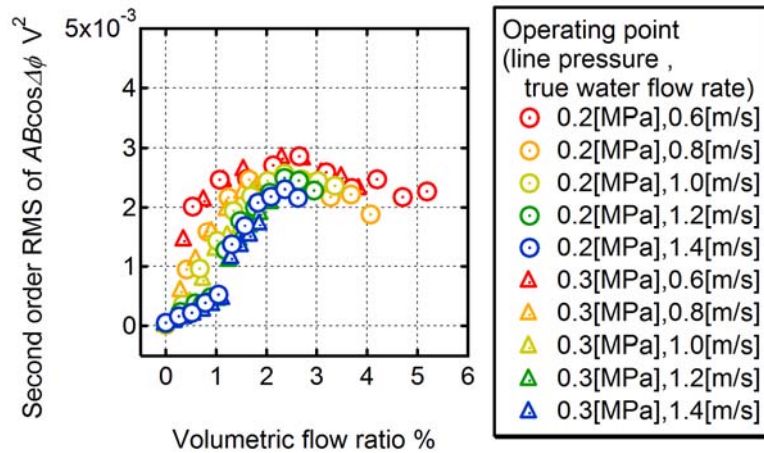


Fig.4.4 Relationship between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and volumetric flow ratio at water line

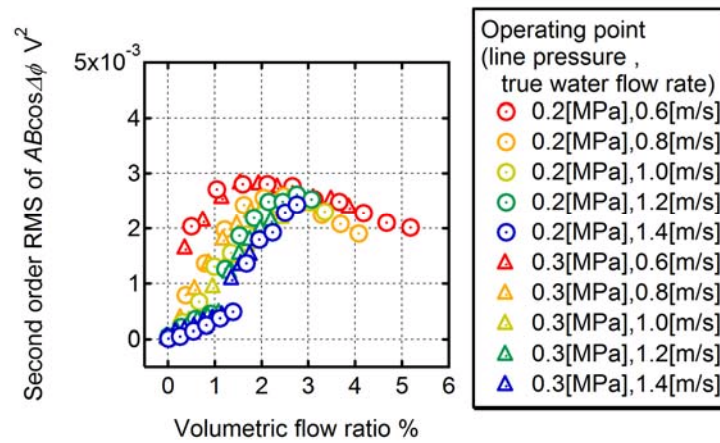


Fig.4.5 Relationship between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$)

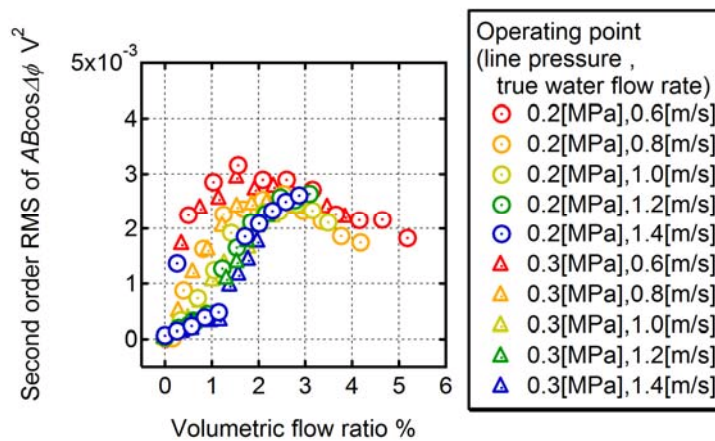


Fig.4.6 Relationship between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$)

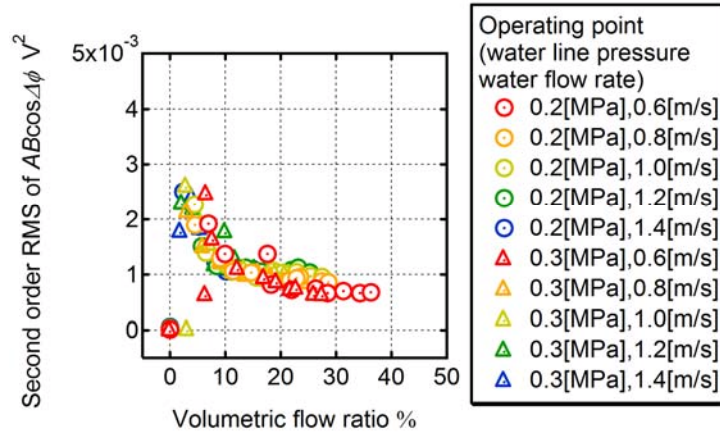


Fig.4.7 Relationship between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and volumetric flow ratio at water line

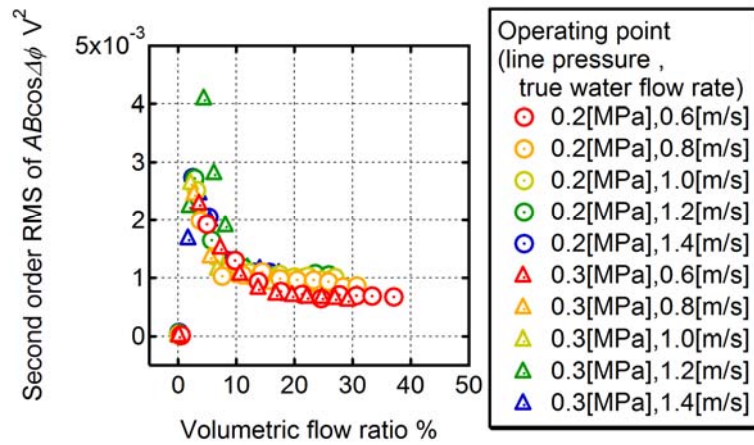


Fig.4.8 Relationship between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$)

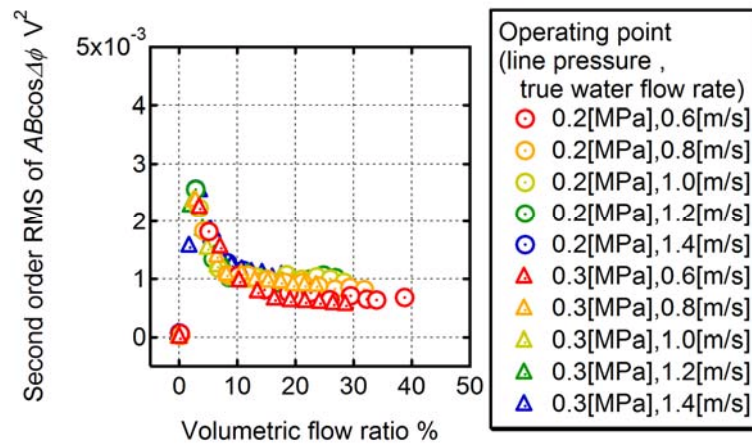


Fig.4.9 Relationship between second order RMS of $AB\cos\Delta\phi$ and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$)

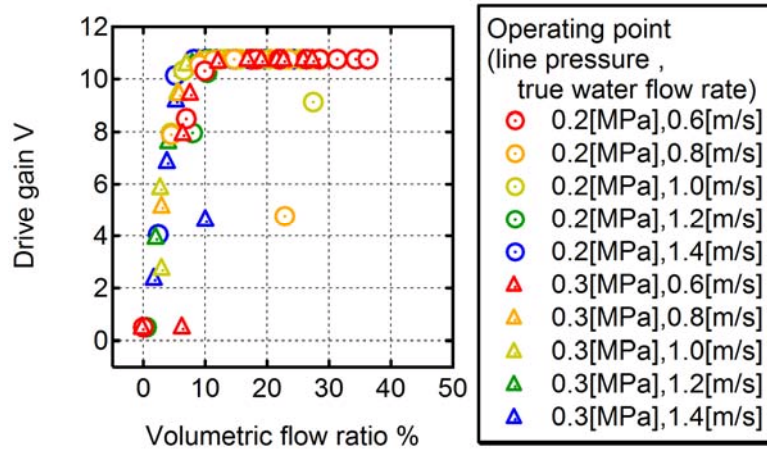


Fig.4.10 Relationship between drive gain and volumetric flow ratio at water line

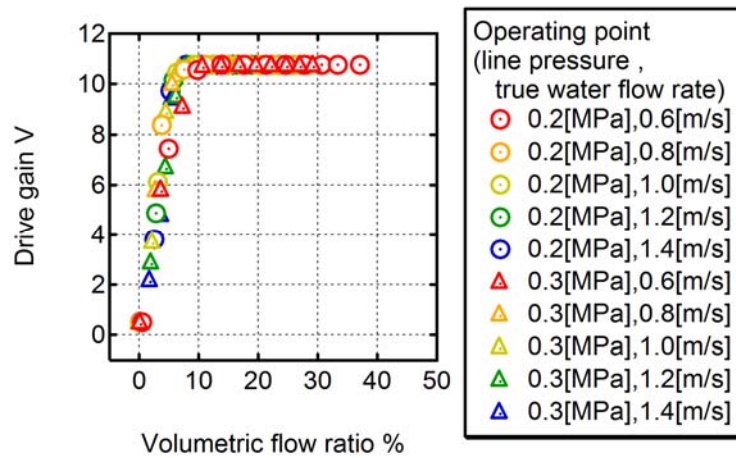


Fig.4.11 Relationship between drive gain and volumetric flow when fluid is salt water
(fluid density: $1.1 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

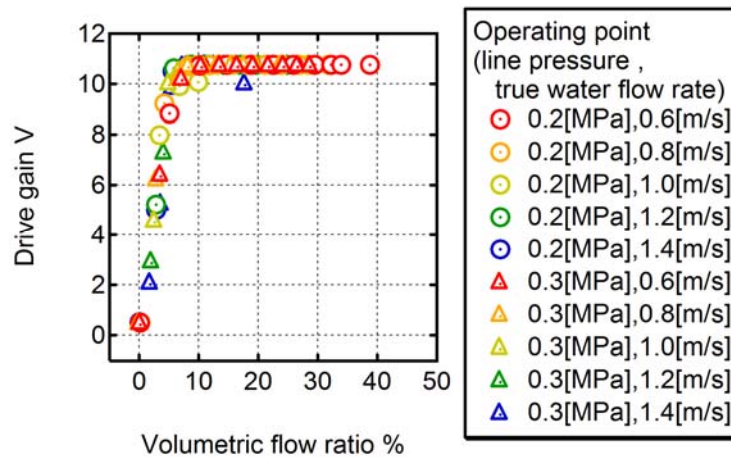


Fig.4.12 Relationship between drive gain and volumetric flow ratio when fluid is salt water
(fluid density: $1.2 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^3]$)

4. 4 センサ出力間における相関の揺動を応用した

空気混入診断のまとめ

本章では、前章で明らかにした空気混入の診断目標をもとに、フローチューブの前後に設置したセンサコイルから得られる出力の相関に注目し、空気混入により、センサ出力の相関の揺動から空気混入の有無を診断する手法を提案、実証プラントにおいてその有効性を明らかにした。本章で提案した診断指標は、診断目標の基準とした質量流量の測定偏差と同様に、過大電圧保護による励振ゲインの制限に影響を受け、さらに容積流量比が低い場合でも空気混入による相関の揺動を定量化できている。さらに、空気が混入しないときは診断指標が0となること、これまで問題となっていた基準質量量が低い場合でも診断指標が増加する。このことから、運転動作点に関係なく提案した診断指標が0か否かを判別することで空気混入の有無を診断できることを明らかにした。また、前述の通り過大電圧保護機能による励振ゲインの制限に影響をうけ、質量流量測定偏差が発生する前に急激に提案する診断指標が増加することが確認されている。このことから、測定流体が異なる場合、特に前章で示した密度が低い測定流体や、空気混入に弱い体格を持つ流量計であっても、測定に支障を来す前に空気混入を診断できる特長を持っている。本診断指標は容積流量比の増加に対して、一度増加した後減少し、その後0より大きい値で飽和する。このことから、診断指標の大きさより、空気混入量を推定することはできない。ただし、本研究の方向性としてはそもそも測定に支障を来す前に空気混入の有無を診断することを目的としており、当初の目的は達成されたと考える。

なお、ここに提案する診断手法は、本研究が対象とする FOUNDATION フィールドバス対応の機器内にて自己診断機能として組み込むことが望ましい。特にコリオリ質量流量計は、位相差算出のために機器内で高度な演算を必要としており、機器内で診断した結果のみを外部（DCS やオペレータ）に通知することが、通信への負荷も低減でき効率的である。また、空気の混入はホストのダウン等制御ループの不具合によって発生する恐れもあることから、FOUNDATION フィールドバスの自己診断機能により、双方向通信機能を使ってホストへ異常を知らせるアラームを発すると同時に、測定値に付属するステータスを利用して制御ループの動作モードを安全側へ変更する（例えば、自動運転から手動に変更）こともできればプラントの安全性が大いに向上する。

現在、PA の分野においても、FA の分野と同様に、フィールドバス技術は着実に普及しており、このようなプロセスならびに機器診断の手法の構築が、今後のフィールドバス技術の普及に拍車をかけることに結び付くと期待している。

第 5 章 センサ出力の振幅を利用した 流量測定偏差の推定

第 4 章の空気混入の有無を検知できる診断指標が実用化された場合、今後液体をプロセス流体とするラインにおいて万が一空気が混入した場合、空気混入量が少ない内に空気混入をいち早く検知できる。また、この際ホストへ通知、または安全側へ動作を移行することにより、コリオリ質量流量計の測定に支障を来す前に事態を改善できる可能性が高まったといえる。ただし、空気混入量が突発的に増加し、測定に支障を来す場合においても、液体のみの質量流量だけでも補正できれば、プラントの安全性に貢献できると考えられる。気液二相流でも単相流の場合と同様高い精度を要求する場合には、J.Hemp らのモデルに基づいてニューラルネットワークを利用した流量補正手法を提案している、R. P. Liu らの手法を、本論文で提案する流量算出手法を適用すればよいと考えられる。ただし、安全側へ動作を移行することだけを考える場合は、単相流で保証している測定精度以下でも補正した質量流量が出力されればよい場合も存在する。

本章では、単相流と同等の測定精度は保証できないものの、空気の混入が明らかになった時、液体の質量流量の測定偏差を推定する手法を提案し、その妥当性を実証実験で明らかにしていく。

5. 1 空気混入がコリオリ質量流量計の

振動特性に与える影響

第 3 章における空気混入に対する流量測定偏差、および第 4 章における空気混入に対する診断指標において、いずれも過大電圧保護機能による励振ゲインの制限が問題となっていた。この時、流量測定偏差は発生する原理として、励振ゲインの不足により持続振動およびねじれ振動が減衰振動することが予想される。このとき、コリオリ質量流量計の持続振動とねじれ振動には相関があると仮定すると、位相差とセンサ出力 A および B の振幅には比例関係が存在する可能性がある。そこで本節では、容積流量比に対するセンサ出力の振幅の平均値の減少特性に着目する。センサ出力の振幅の平均値は、測定周期 1×10^{-4} [s],

測定時間 100[s]でオシロスコープにより測定したデータ(1,000,000 点)を，信号処理によって測定周期 8×10^{-4} [s](125,000 点)とした後，データ取得開始直後の測定データの乱れを取り除くために，最初の 1,000 点のデータを除外し，残りの 124,000 点のデータを 200 点ずつ平均する．その 200 点平均したデータ 620 点をさらに平均することで振幅の平均値を算出している．式(5.1)にセンサ出力の振幅の平均値の算出式を示す．

$$A_{\text{ave}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^2} \quad (5.1)$$

ここに， A_i ： i 番目のセンサ出力 A の振幅 [V]

図 5.1～図 5.3 に実証プラントにおいて，測定流体が水および 2 つの異なる密度をもつ食塩水である時の振幅の平均値と容積流量比の関係を示す．まず，図 5.1～図 5.3 において容積流量比が増加するにしたがい，センサ出力の振幅が減少していることがわかる．ここで，空気の滞留により他との特性が異なる流速 0.6[m/s]の場合を除外すると測定流体や運転動作点に関わらず，容積流量比が 1%以下ではセンサ出力の振幅の減少量が少ないことがわかる．これは流量測定偏差率，および $AB\cos\Delta\phi$ の 2 階差 RMS における特性に近い特性である．次に，振幅の平均値によって空気混入がない場合のセンサ出力の振幅に注目するといずれの測定流体および運転動作点においても，約 0.12[V]となっている．これは，第 2.1 節の図 2.2 で示したポジティブフィードバック制御により振幅が一定になるように制御されているためである．このことから，センサ出力の振幅の平均値は目標振幅に一致するならば，空気混入が無いことが分かり，空気混入の有無の診断は可能であるといえる．ただし，容積流量比 1%までにセンサ出力の振幅はほとんど低下していないことから，第 4 章で提案した診断指標の方と比較すると，センサ出力の振幅は感度が低く空気混入の有無を診断できない．

以上のように，気液二相流においては，容積流量比が増加するにしたがい，フローチューブの持続振動においても減衰特性が確認され，特に過大電圧保護機能が働く，容積流量比約 1%を境にその減少量が増加しているといえる．

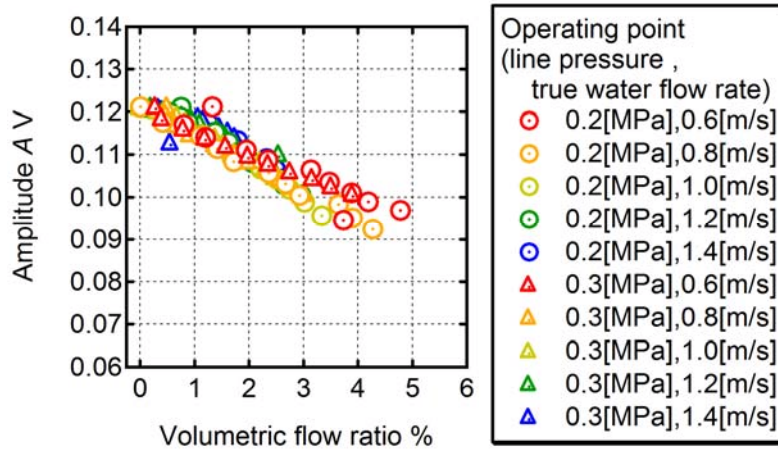


Fig.5.1 Relationship between amplitude A and volumetric flow ratio at water line

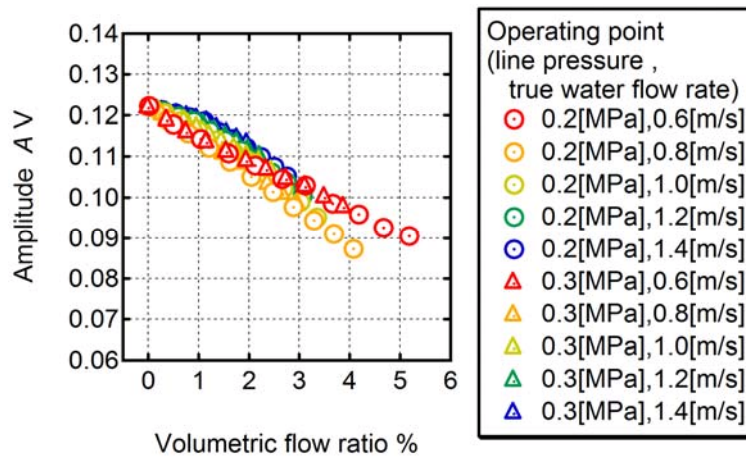


Fig.5.2 Relationship between amplitude A and volumetric flow when fluid is salt water (fluid density: 1.1×10^{-3} [kg/m³])

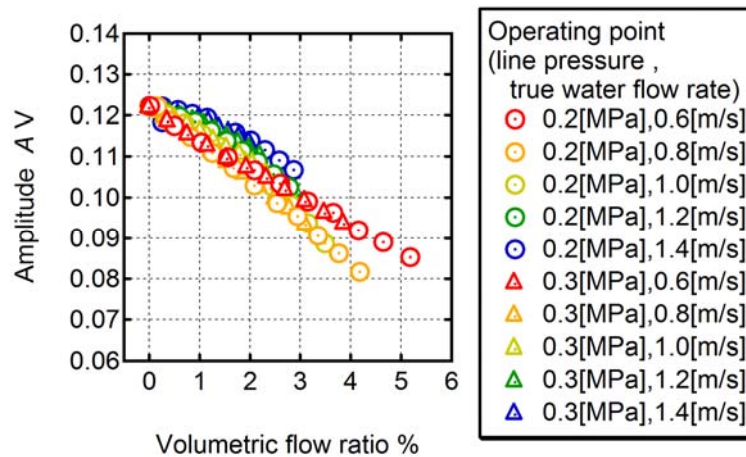


Fig.5.3 Relationship between amplitude A and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: 1.2×10^{-3} [kg/m³])

5. 2 センサ出力の振幅による測定偏差補正手法の評価

前節では、気液二相流におけるフローチューブの持続振動の特性に注目し、センサ出力の振幅が容積流量比の増加にしたがい減少することをあきらかにした。ただし、容積流量比が 1%以下の場合、センサ出力の振幅がほとんど減少しないことから、センサ出力の振幅を診断指標として、空気混入の有無を診断するには感度が低く難しいといえる。

ただしここで、視点を変えると、容積流量比が 1%以下のときに、空気が混入していないという特性は、流量測定偏差率と容積流量比との関係と酷似している。そこで、測定流体が水の場合において縦軸に流量測定偏差率、横軸にセンサ出力の目標振幅に対するセンサ出力の比の関係を図 5.4 に示す。図より、流速 0.6[m/s]の場合を除くと、センサ出力の振幅比と、質量流量の測定偏差はほぼ比例関係にあるといえる。このことから、流速 0.6[m/s]のように空気が滞留する条件である場合については有効ではないが、センサ出力における振幅の減少割合と質量流量の測定偏差の関係に関するデータを今後蓄積することにより、測定に支障を来すほどの空気混入が突発的に発生した場合でも、ある程度の測定精度で液体のみの質量流量に補正できる可能性があるといえる。

なお、この質量流量の補正手法にはこの他にも課題がある。それは空気混入量が多い場合である。空気混入量が 0~100[Nℓ/min]で混入した時の測定流体が水および 2 つの異なる密度をもつ食塩水である時の振幅の平均値を図 5.5~図 5.7 にまたその時の質量流量の測定偏差を図 5.8~5.10 に示す。図 5.8~図 5.10 より、容積流量比が 10%を超えると流量測定偏差率が運転動作点によって異なることがわかる。この時の励振ゲインを図 5.8~5.10 で確認すると、励振ゲインが、約 0.04[V]で飽和していることがわかる。この時の励振ゲインである図 4.9~4.11 も踏まえると、容積流量比が 10%を超えた場合、フローチューブを振動させるための励振ゲインが飽和し、その結果振動は減衰し、センサ出力の振幅がノイズ成分まで低下していると推測される。コリオリ質量流量計はコリオリの力を発生させるために持続振動をさせていることを考えると、容積流量比が 10%を超えた場合については測定できないとするのが妥当である。このような気液二相流を測定するには、流量補正ではなく、より強い力によるフローチューブの励振により解決する必要があるといえる。

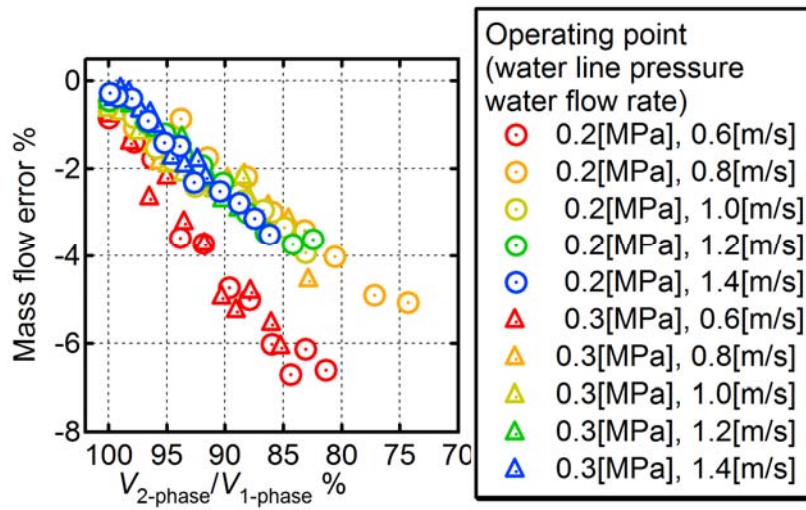


Fig.5.4 Relationship between mass flow error and ratio of amplitude A at water line

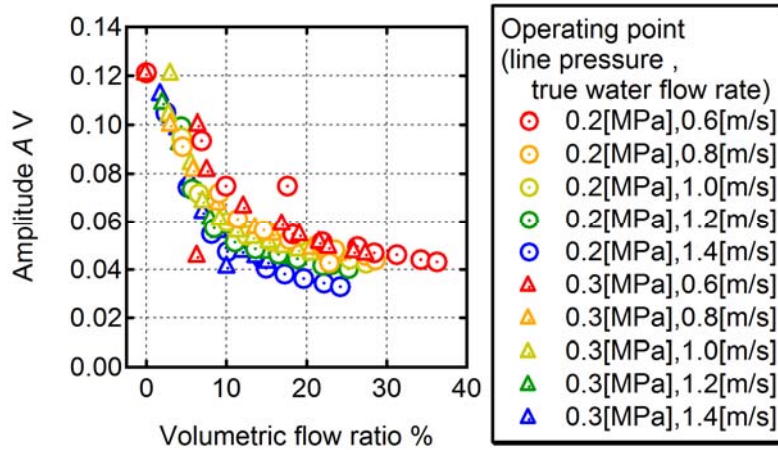


Fig.5.5 Relationship between amplitude A and volumetric flow ratio at water line

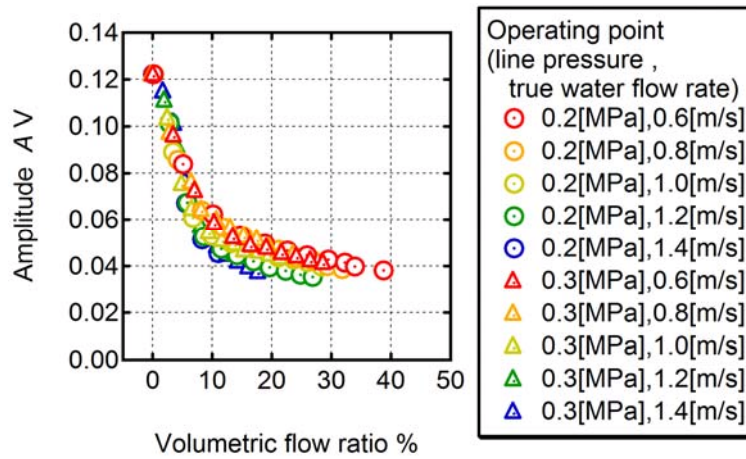


Fig.5.6 Relationship between amplitude A and volumetric flow when fluid is salt water (fluid density: 1.1×10^{-3} [kg/m³])

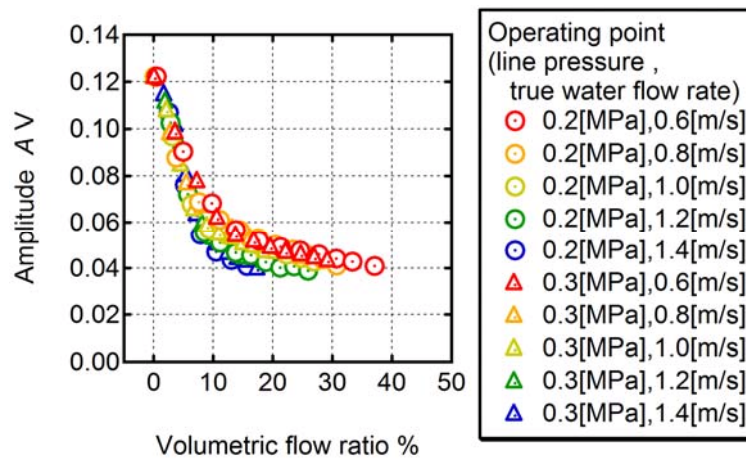


Fig.5.7 Relationship between amplitude A and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: 1.2×10^{-3} [kg/m³])

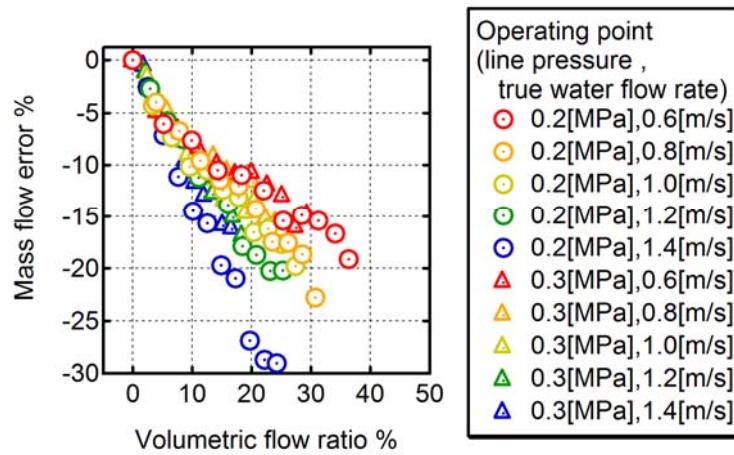


Fig.5.8 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio at water line

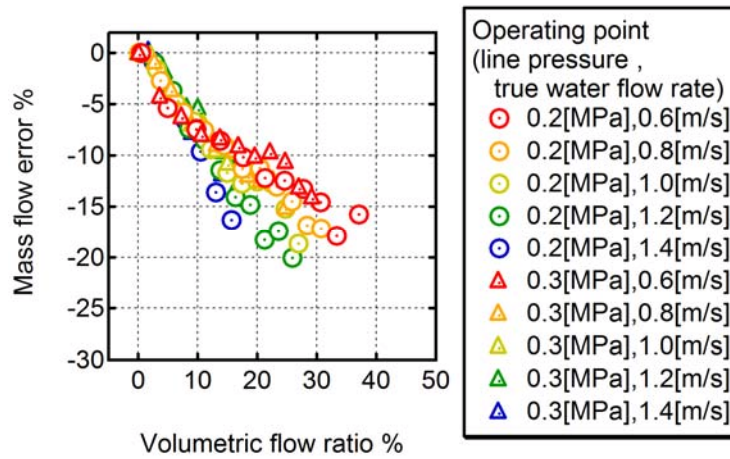


Fig.5.9 Relationship between mass flow error and volumetric flow when fluid is salt water (fluid density: 1.1×10^{-3} [kg/m³])

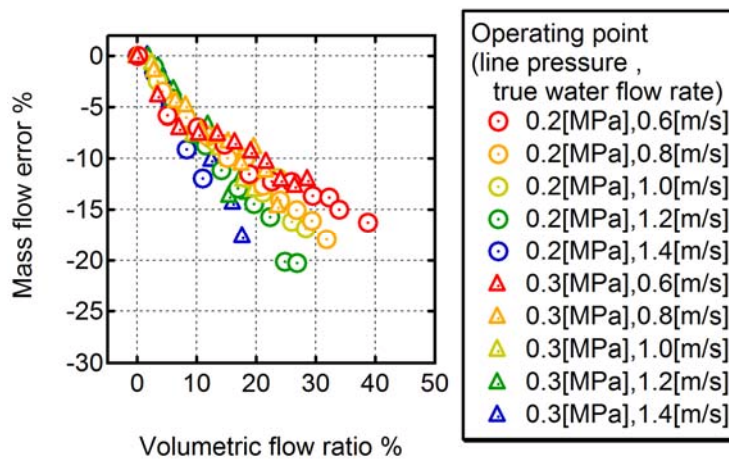


Fig.5.10 Relationship between mass flow error and volumetric flow ratio when fluid is salt water (fluid density: 1.2×10^{-3} [kg/m³])

本論文は、プロセスオートメーションの分野において高精度での質量流量測定を唯一実現させているコリオリ質量流量計において、測定精度に影響を与える空気混入をオンライン診断する手法を扱ったものである。これまで、空気が混入した時の力学的特性のモデル化、ニューラルネットワークを利用した流量補正手法など多くの提案がなされているが、実用に耐えうるものは多くない。そこで、本論文では、従来研究をと異なる流量算出手法、空気混入診断手法、測定偏差推定手法を提案しており、以下の結論を得た。

空気混入がコリオリ質量流量計の力学的挙動に与える影響

コリオリ質量流量計は 2 本のフローチューブ、その中央に持続振動をさせるための励振コイル、そしてフローチューブの上流下流にそれぞれセンサコイルが設置されている。通常測定流体が液体である場合は 2 つのセンサコイルから正弦波状のセンサ出力を測定し、その位相差から流量を算出する。ここで測定流体である液体に空気が混入すると、センサ出力の波長よりも短い周期で断続的に共振周波数が変動する。従来研究では、気液二相流においても、単相流と同様、窓関数内では振動特性が一定であるとして Local-FFT を利用して位相差を算出していたが、気液二相流では、非常に短い周期で振動特性が変動することから、算出偏差が生じる。コリオリ質量流量計では高い測定精度を維持するためには、高精度で位相差を算出することから、共振周波数の変動に影響を受けることないヒルベルト変換を利用し、位相差を算出する手法を提案した。この位相差算出手法の有効性を実証プラントにおいて明らかにし、これまで理論モデルと乖離があるとされていた、気液二相流での質量流量の測定偏差は、位相差算出手法が気液二相流下では不適切であったためであったことを明らかにした。

気液二相流における流量測定偏差

気液二相流で適用できると提案した位相差算出手法により，測定流体である液体中に混入した空気が質量流量の流量測定値に与える影響を，容積流量比，測定流体の密度に注目して評価した．空気が混入すると，コリオリ質量流量計内部の気泡の圧縮性により，フローチューブを一定に持続振動させるためのエネルギーが増加するが，この時励振ゲインの出力で過大電圧保護機能が働くことによって，持続振動を維持できなくなる，この時顕在化するねじれ振動における減衰項が流量測定偏差を発生させることを明らかにした．また，過大電圧保護機能が働くと，より測定流体の密度が小さい方が空気混入に対して耐性がないことを実験とモデルの両面から確認した．これにより，空気が混入した場合でも少量であれば，測定偏差が発生しないことを明らかにした．

研究の方向性として，空気の混入が測定に支障を来す前に空気の混入を検知することを目的としていることから，実証プラントにおける実験結果より基準とした流量計における測定値との偏差を定量評価することで，それぞれの測定流体，および運転動作点において流量測定偏差の発生する容積流量比を確認した．

2つのセンサ出力間における相関の揺動を利用した空気混入診断

実証実験により明らかにした診断目標までに空気混入を診断すべく，2つのセンサ出力間における相関に注目した．従来研究では，気液二相流の診断において主に，センサ出力の振幅や共振周波数の平均値を診断指標の一部としていたが，これらは他の不具合や運転動作点の変更等の別の要素にも影響を受けることから，空気混入のみを評価するには不適切であった．本研究では，差圧伝送器における導圧管の詰まり診断において目的とする不具合以外の影響を防ぐために利用した，揺動成分を診断指標とすることに注目した．空気混入の診断指標として，2つのセンサ出力間における相関の揺動の大きさを診断指標とした結果，測定に支障を来す前に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ことを明らかにした．なお，診断指標の定量評価手法として，差圧伝送器における導圧管の詰まり診断での定量評価方法を応用した2階差RMSを利用したことから，提案する診断指標は運転動作点の変更や他の外乱の影響を受けることなく，空気混入を診断できるという特長を持つ．この成果により，コリオリ質量流量計では測定に支障を来す前に空気混入の有無を診断できるようになった．

センサ出力の振幅を利用した気液二相流における流量測定偏差の推定

空気混入量が少量である場合には，測定に支障を来す前にDCS等のホストへ

警告を発生し、制御ループの動作モードを安全側へ変更するのが最も理想的な対策である。しかし、突発的に大量に空気が混入した場合、流量測定偏差が発生し、この結果制御性が低下または失われる可能性がある。そこで、質量流量の測定偏差の発生要因が過大電圧保護機能による減衰特性の顕在化であることに注目し、持続振動が減衰したときに確認される、センサ出力の振幅における減衰から流量測定偏差を推定する手法を提案した。実験調査の結果、励振ゲインの実効値が完全に飽和する前であれば、一部の条件を除き流量を補正できる可能性を示した。

ただし、一方で大量の空気混入により持続振動が維持できない場合には、質量流量の測定偏差がさらに別の特性を持ち、より補正が難しくなることも明らかにした。このことから、明らかに大量の空気が混入することが明らかならば、持続振動時に供給するエネルギーの上限を改善するなどの対策が必要であることを示した。

本論文では、気液二相流におけるコリオリ質量流量計の力学的挙動を解明することで適切な流量算出手法、容積流量比と流量測定偏差の関係、空気混入の有無を診断する手法、そしてある範囲で流量測定偏差を補正する手法を提案した。それぞれの有効性について液体である水中に空気を混入させる実証プラントにおける検証により、その有効性を明らかにしたが、より範囲を広げて汎用性を高めるためには、以下のことを明らかにする必要がある。これらの課題を達成することで、コリオリ質量流量計の適用範囲が広がることが期待される。

まず、空気混入量の定量化に関して、本論文では低流速である場合空気が滞留し、コリオリ質量流量計へ流れる空気の量が断続的に変動する場合、滞りなく気泡が流れる場合と比較し、特異な性質が見られた。結果として、測定に支障を来す前に空気混入を診断できることは確認されたが、今後気泡の大きさや測定流体の流れの乱れ等による気泡の流れのムラを定量的に評価する指標が必要である。

次に、センサ出力間における相関の揺動を応用した空気混入診断手法における課題は以下の通りである。提案した診断手法は、差圧伝送器での診断技術を応用し、かつ相関の揺動をFFT解析することで、適切な周期で階差をとることで高感度の診断を実現している。しかし、この揺動特性は流量計の体格、測定流体の粘性等により変動することが考えられる。本研究の成果により、一般の測定流体への空気混入した場合であれば同様の診断手法が適用可能であると考えられるが、特に今後需要の見込まれる石油掘削などに適用する際には更なる検証が必要となると考えられる。

また、流量測定偏差の補正に関する課題であるが、第5章で示した通り、空気が大量に混入した場合のダン ー要素の増加は非常に急激であり、現状のコ

コリオリ質量流量計では気液二相流の流量測定そのものを目的とするのには特に持続振動を維持する部分で技術的な課題がある。現状では、励振コイル用のブーストアンプや、単相流において持続振動に必要なエネルギーを削減するなどが主な対策となるが、今後フローチューブの持続振動の発振方法を磁気コイルより強力なものに変更するなどの対策が必要である。

最後に、本論文では気液二相流の模擬として、水と空気という全く物性の異なる2成分の流体を混合させた。このような気液二相流は食品や油などの粘性流体の他洗剤など液体が空気を巻き込みやすいプロセスにおける流量測定において活躍が期待される。しかし、実際の気液二相流では、液化ガスの予期せぬ気化や水の沸騰のように1成分で液相、気相が混在するものが多く存在する。このような1成分気液二相流では、プロセス流体の圧力や温度によって、容積流量比が容易に変化することが予想され、縮流部や圧力損失の存在するコリオリ質量流量計では流量計の上流と下流で容積流量比が異なることもあり得る。

このことから、今後液化した水素、天然ガスなどのより高付加価値で需要の高いラインにおいて適用する際には、1成分気液二相流のフローチューブ内部における相変化の挙動を明らかにすることが重要となる。ただし、このように相変化が頻繁に発生する気液二相流においても、コリオリ質量流量計で問題が発生するメカニズム、およびその診断手法は、原理的には本論文で示した特性が有効である。

付録

基準質量流量とコリオリ質量流量計で計測した質量流量の不確かさ解析

本論文では、実証プラントにおいて液相のみの体積流量を電磁流量計で測定し、その測定値から算出した質量流量を基準質量流量と定義している。この基準質量流量に対するコリオリ質量流量計の質量流量の偏差の割合を流量測定偏差率とし、空気混入がコリオリ質量流量計に与える影響を評価している。流量測定偏差率は式(2.25)および式(2.26)で定義する。

$$\gamma = \frac{G_{\text{cori}} - G_{\text{mag}}}{G_{\text{mag}}} \times 100 \quad (2.25)$$

$$G_{\text{mag}} = \rho_{\text{water}}(P_{\text{ave}}, T) Q_{\text{mag}} \quad (2.26)$$

ここに、 G_{mag} ：基準質量流量[kg/s]、 P_{ave} ：コリオリ質量流量計前後に設置した差圧伝送器における上流側、下流側圧力の平均値[MPa]、 T ：タンク側面部に設置された温度伝送器で測定した水温[°C]、 Q_{mag} ：電磁流量計で測定した体積流量[m³/s]。また、 $\rho_{\text{water}}()$ 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。

基準流量計下流における流れの乱れが運転動作点により変化すること防ぐため、また設備の制限上コリオリ質量流量計を2個直列に設置した場合、流量計での圧力損失により試験可能な運転動作点が制限されることを考慮し、流路にほとんど影響を与えない電磁流量計を基準流量計として採用している。ただし、流量測定偏差率算出に式(2.26)に示した基準質量流量を用いるためには、コリオリ質量流量計で測定した質量流量と同程度の精度が一般には求められる。このため、基準流量計は空気混入がない場合の運転動作点において実流校正を実施し、一般の電磁流量計と比較し高い精度を確保している。

この条件において導出された流量測定偏差率がどの程度信頼できるのかを明らかにするため、出力量を空気混入がないときの質量流量、入力量を流量測定偏差率 γ として、Aタイプの不確かさ解析を実施する。本調査では確かさの要因として、電磁流量計の測定精度に起因する不確かさ $u(\gamma)$ と、算出した流量測定偏差率の平均値におけるばらつき $s(\gamma)$ を考える。

まず電磁流量計の測定精度に起因する不確かさ $u(\gamma)$ について、基準流量計はPFAライニングの電磁流量計であり、スパン10m/sに対し20%未満の指示で使用していることから、0.1% of spanとなる。これを本調査における運転動作点の中央値である流速1.0[m/s]を基準として、測定偏差率に換算すると、10倍の1%が測定確度となる。この測定確度は矩形分布と仮定する。

次に、算出した流量測定偏差率の平均値におけるばらつき $s(\gamma)$ について、実流校正のため繰り返し計測した結果に対して統計的な方法で不確かさを評価する。一般に x_1, x_2, \dots, x_n という値を持った n 個の測定データの標準偏差 s は式(A.1)で表される。

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{A.1})$$

ただし、ここで \bar{x} は式(A.2)に表すよう n 個の測定データの平均値を表す。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{A.2})$$

この標準偏差 s より式(A.3)に示す基本式を用いて平均値のばらつきに起因する不確かさを求める。

$$s(\bar{\gamma}) = \frac{s(\gamma)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

ここで、実流校正を目的に表 A.1 に示す 10 通りの運転動作点において空気が混入していない状態で流量測定偏差率を算出した結果を図 A.1 に示す。いずれも各運転動作点で 100[s] 測定し、そこから流量測定偏差率を算出したものである。この時、運転動作点全てにおける流量測定偏差率の平均値が -0.13% となったことから、基準流量計として利用している。

TableA.1 Conditions of experiment

Conditions	Value	
Line pressure	0.2,0.3	MPa
Water flow rate	0.6,0.8,1.0,1.2,1.4	m/s

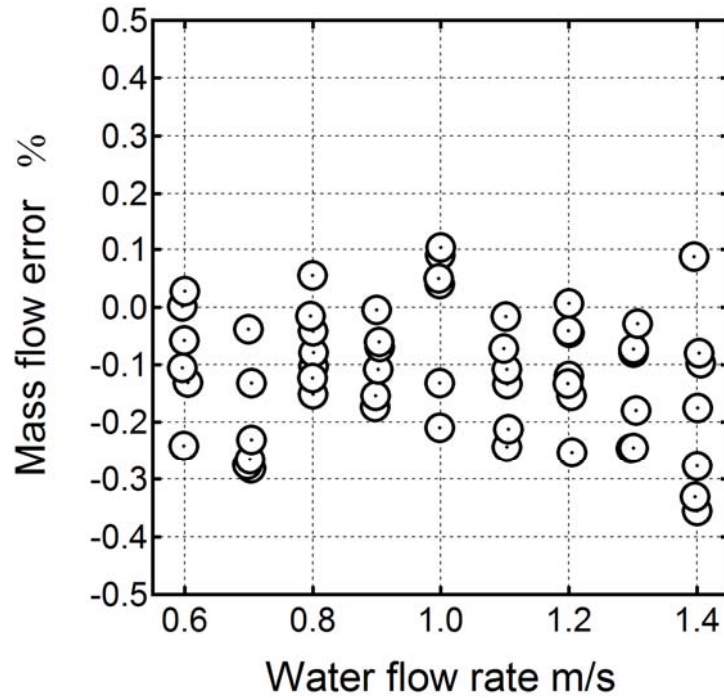


Fig.A.1 Mass flow error in water flow

これらのデータをもとに、平均値のばらつきに起因する不確かさを算出すると 0.016%となる。以上の2つの不確かさをもとに合成標準不確かさを算出すると、

$$u_c(\gamma) = \sqrt{u(\gamma)^2 + s(\gamma)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.01}{\sqrt{3}}\right)^2 + (0.00016)^2} = 0.58\%$$

したがって、信頼水準を 95%となる包含係数を $k=2$ での拡張不確かさ U 、すなわち真の値が 95%の確率で真値が存在する範囲を求めると、

$$U(\gamma) = 2u_c(\gamma) = 1.16\% \tag{A.4}$$

となる。これはコリオリ質量流量計の一般的な測定精度である指示値に対して 0.1%の測定精度と比較した場合は性能不足であるものの、第3章で示した空気混入時の流量測定偏差率と比較した場合は空気混入による影響を十分判別できる程度の信頼性を持つ。

謝辞

学士課程より13年間の長きに渡ってご指導をいただき、本論文を完成させるにあたり主査として多大なるご指導とご鞭撻を頂きました早稲田大学理工学術院の橋詰 匠教授，天野 嘉春教授には心より感謝いたします。また，早稲田大学理工学術院の齋藤 潔教授，武藤 寛教授には本論文の執筆に際して多くのご助言を賜りました，記して謝意を表します。

さらに，橋詰研究室の先輩であり直接多くの指導を賜りました大阪府立大学の涌井徹也准教授に心より感謝いたします。

本論文は，横河電機株式会社と早稲田大学の共同研究で得られた成果をまとめたものです。本研究と本論文を作成する機会を与えていただきました横河電機株式会社の関係者に謝意を表します。

橋詰・天野研究室において，ともに研究に取り組んだ方々にも多大なご協力をいただきました。本当にありがとうございました。

最後に，遠くからの研究の励ましや声援をいただいた家族と友人にも感謝いたします。

参考文献

- (1) 得丸英勝, 田中輝夫, 村井良太加, 屋敷泰次郎, 雨宮孝, 自動制御, (1981), 森北出版, p.9
- (2) 日本機械学会, 流体計測法 (1985), 日本機械学会
- (3) 松山裕, 実用 流量測定 (1995), 省エネルギーセンター
- (4) 横河電機, メーカーが書いたフィールド機器・虎の巻, (2001), 工業技術社
- (5) 松山裕, 実用 流量測定 (1995), 省エネルギーセンター
- (6) 黒森健一, プロセスオートメーションにおける最近の流量計, 計測と制御 Vol.33 No.9 (1994), pp.755-758
- (7) 小川胖, 流れわざのシルクロード【流量計測の歴史】 (2006), 日本工業出版, pp.65-66
- (8) 小宮勤一, 流体量の測定, (2005), 朝倉書店
- (9) 中尾晨一, 知っておきたい流量計測をより正確にするための知識, pp.86-87, (2004), 日本工業出版
- (10) 日本電気計測器工業会, 1999/2000 プロセス計測制御ガイドブック (1998), 日本電気計測器工業会
- (11) 片岡悦子, 石油精製・石油化学プラントにおける流量計の選定ポイント, 配管技術 2007年2月, (2007), pp.129-134
- (12) 山崎弘郎, 石川正俊, 安藤繁, 今井秀孝, 江刺正喜, 大手明, 杉本栄次 編, 計測工学ハンドブック, (2001), 朝倉書店, pp.323-339
- (13) ISO 10790:1999
- (14) JIS B7555
- (15) Roger C. Baker, Coriolis flowmeters: industrial practice and published information, How Meas. Instrum., (1994), pp.230-246.
- (16) Martin Anklin, Wolfgang Drahm, Alfred Rieder, Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research, Flow Measurement and Instrumentation, (2006), pp317-323.
- (17) 佐鳥聡夫, 流量のお話 第9回 熱式流量計, エムエスツデー, 2002年3月号, (2002) pp.2-3
- (18) JIS Z8762-1-4 (2007)
- (19) JIS Z8740
- (20) Ito A., "EJX910 MULTIVARIABLE TRANSMITTER", Yokogawa Technical Report, No42, 2006, pp.13-16
- (21) Akio Ito, Device configuration software development on EDDL and FDT/DTM environment, Proceeding of SICE Annual Conference 2008,(2008.8), pp.929-932
- (22) 中久保博史, 片岡悦子, 製品と技術 デジタル渦流量計 digitalYEWFLOW マルチバリアブル形 --マルチバリアブル形が提案する蒸気計装の革新, 計測技術 30(8), (2002.07), pp.41-44
- (23) JIS K0114 (2012)
- (24) JIS Z8804 (2012)

- (25) JIS B7551 (1999)
- (26) JIS Z8765 (1980)
- (27) 佐鳥聡夫, 流量のお話 第7回 容積式流量計, エムエスツデー, 2002年1月号, (2002) pp.4-5
- (28) JIS Z8766 (2002)
- (29) 塩見正幸, 二周波励磁方式採用の2線式電磁流量計--その特長と広がるアプリケーション, 計装 53(5), (2010.5), pp.72-76
- (30) 嶋田 隆司, 土井原良次, 武田 一英, 寺尾 吉哉, 高本 正樹, タービン流量計とコリオリ流量計による石油大流量国家標準設備と国内校正機関との比較実験, 産総研計量標準報告 Vol.4, No.4, (2006), pp.261-267
- (31) 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, 横河電機 Vol.45 No.3 (2001), pp.157-160
- (32) 伊藤章雄, 三村慎一, 小山越太郎, マルチバリアブル伝送器 EJX910, 横河技報, Vol.50 No.2, (2006), pp.65-68
- (33) 和久井秀一, 和田正巳, 吉岡貴, 安藤哲男, 温度計内蔵形渦流量計”digitalYEWFLOW Multivariable Type”, 横河技報告 Vol.48 No.1 (2004), pp.25-28
- (34) 川野高志, 吉田森之介, 渦流量計 digitalYEWFLOW における質量流量演算, 横河技報告 Vol.53 No.2 (2010), pp.97-100
- (35) 元吉伸一, フィールドバス入門, (2000), 日刊工業新聞社
- (36) 橋詰匠, 涌井徹也, プロセスオートメーション用オープンフィールドバス, 計測と制御, Vol.44 No.6 (2005), pp.358-364
- (37) Jonas, B., *Fieldbuses for Process Control: Engineering, Operation, and Maintenance*, (2002), pp.1-23, ISA.
- (38) CC-Link 協会. “CC-Link 協会 : CC-Link について”. CC-Link 協会. (online), available from <<http://www.cc-link.org/jp/cclink/intro.html>>
- (39) 日本プロフィバス協会. “PROFIBUS/PROFINET とは”. 日本プロフィバス協会. (online), available from <http://www.profibus.jp/what_is/fieldbus2.htm>, (accessed 2013-12-01)
- (40) Fieldbus Foundation. “Installations”. Fieldbus Foundation. (online), available from <http://www.fieldbus.org/index.php?option=com_content&task=view&id=51&Itemid=113>
- (41) FIELDBUS FOUNDATION, FOUNDATION Fieldbus technical overview (FD-043 Rev.3.0) (2003)
- (42) Jonas Berge, USING FOUNDATION FIELDBUS IN HYBRID AND BATCH APPLICATIONS, (online), available from <http://www.iceweb.com.au/ffeuca/papers/JAPerth/2002/P3%20hybrid_batch.pdf>
- (43) HART 協会, ”HART (ハート) とは何か?”. HART 協会. (online), available from <http://jp.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_what.html>
- (44) Scott, A.V., Buchanan, W.J., Truly distributed control systems using fieldbus technology, *Proceeding of Engineering of Computer Based Systems* (2000), pp.165-173

- (45) Terry Blenvins, Willy Wojsznis, Fieldbus support for process analysis, ISA Transactions 35 (1996), pp.177-183
- (46) 吉川修, 宿谷憲弘, 田中俊行, 田邊誠司, 新井崇, 太田博信, 新電磁流量計 ADMAG AXF シリーズ, 横河技報 Vol.48 No.1 (2004) , pp.19-24
- (47) 斉藤洋二, 高橋誠一郎, 橋住和広, 落合覚, フィールドバス対応フィールド機器の現状と将来, 横河電機 Vol.48 No.1 (2004) , pp.37-40
- (48) 福田稔, 調節弁メンテナンスの最適化・高効率化に向けてー調節弁メンテナンスサポートシステム「Valstaff」ー, 紙 ルプ技術協会誌, Vol.60, No.3 (2006) , pp.93-100
- (49) T. Wakui, J. Eino, T.Hashizume, Y. Saito, T. Nishijima, Monitoring and Diagnosis of Hot Water Supply Process using FOUNDATION Fieldbus, Proc. of the 15th Annual Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Vol.458 (2005) , pp.1-12
- (50) Jyun-ichi Eino, Tetsuya Wakui, Takumi Hashizume , Youji.Saitou, Takashi. Nishijima, Monitoring and Diagnosis of a Heat Exchanging Process Including Field Devices with FOUNDATION Fieldbus, COMADEM2005 Proceedings of the 18th international Congress (2005) , pp.113-122
- (51) Jyun-ichi Eino, Tetsuya Wakui, Takumi Hashizume, Youji Saitou, Takashi Nishijima, Proceedings of the 20th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, No.15 (2007) , pp.1-10
- (52) JIS B7555 (2003)
- (53) 板倉浩, 北良平, 瀬戸泰子, 太田啓和, フィールド計器の保全手法研究, (2001), 横河技報, Vol.45, No.1, pp.15-18
- (54) 経済産業省, 産業事故調査結果の中間とりまとめ, (2003), pp.1-25
- (55) 豊田利夫, 最近の設備診断技術と予知保全, (2004), ターボ機械, Vol.32, No.3, pp.129-137
- (56) 柴野隼一, 涌井徹也, 橋詰匠, 宮地宣夫, 黒森健一, 結城義敬, 水ラインでのデジタル式差圧伝送器による導圧管の詰まり検出, Vol.6, No.13, (2007), pp.103-109
- (57) 柴野隼一, 上原彬, 涌井徹也, 橋詰匠, 宮地宣夫, 結城義敬, 水流下での過渡状態に対応した導圧管の詰まり監視, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.7, No.2 (2008), pp.9-15
- (58) 柴野隼一, 上原彬, 涌井徹也, 橋詰匠, 宮地宣夫, 結城義敬, 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, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.7, No.9 (2008), pp.60-66
- (59) 宮地宣夫, 藪田薫, 赤堀秀雄, 差圧伝送器の導圧管詰まり診断, 横河技報 Vol.48 No.1(2004), pp.33-36
- (60) 真鍋亮, 多相流流量計の原理とフィールド適用, 石油/天然ガス レビュー(2002), pp.21-33.
- (61) 上運天昭司, 「マイクロフローセンサ」を用いた流量計測, Savemation Review (2001), pp.28-35
- (62) S. Tjugum, G. Johansena and M. Holstad, The use of gamma radiation in fluid flow measurements, Radiation Physics and Chemistry, Vol.61, (2001), pp.797-798

- (63) G. Johansen, P. Jackson, Salinity independent measurement of gas volume fraction in oil/gas/water pipe flows, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.53, No.4-5, (2000), pp.595-601
- (64) C. Xie, S. Huang, B. Hoyle, R. Thorn, C. Lenn, D. Snowden, M. Beck, Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors, *IEE PROCEEDINGS-G*, Vol.139, No.1, (1992), pp.89-98
- (65) Yuichi MURAI, Hideki FUJII, Yuji TASAKA and Yasushi TAKEDA, Turbulent Bubbly Channel Flow Investigated by Ultrasound Velocity Profiler, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 1, No. 1 (2006) pp.12-23
- (66) J. Grumski and R. Bajura, Performance of a coriolis-type mass flowmeter in the measurement of two-phase (air-liquid) mixtures, *Mass Flow Measurement ASME Winter Annual Meeting*, (1984)
- (67) J. Hemp, J.Kutin, Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.17, No.6, (2006), pp.359-369
- (68) J. Hemp, On the theory and performance of coriolis mass flowmeter, *Proceedings of the International Conference on Mass Flow Measurement*, (1989)
- (69) John Hemp, The weight vector theory of Coriolis mass flowmeters, *Flow Measurement Instrument*, Vol.5, No.4, (1994), pp.247-253
- (70) G. Sultan, J.Hemp, Modeling of the Coriolis mass flowmeter, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.132 No.3, (1989), pp.473-489
- (71) J.Hemp, H Yeungm, L. Kassi, Coriolis meter in two phase conditions, *IEE Seminar on Advanced Coriolis Mass flow metering*, (2003.7)
- (72) A.F. Skea, A.R.W. Hall, Effects of gas leaks in oil flow on single-phase flowmeters, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.10, (1999), pp.145–150
- (73) M. P. Henry, D. W. Clarke, N. Archer, J. Bowles, M. J. Leahy, R. P. Liu, J. Vignos, F. B. Zhou, A self-validating digital Coriolis mass-flow meter: an overview, *Control Engineering Practice* Vol.8 ,(2000) pp.487-506
- (74) R.P. Liu, M.J. Fuent, M.P. Henry, M.D. Duta, A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital coriolis mass flowmete,
- (75) Manus Henry, Michael Tombs, Mihaela Duta, Feibiao Zhou, Ronaldo Mercado, Frank Kenyery, Joseph Shen, Martin Morles, Carlos Garcia, Robbie Langansan, Two-phase flow metering of heavy oil using a Coriolis mass flow meter: A case study, *Flow Measurement and Instrumentation* Vol.17 , (2006), pp.399–413
- (76) Manus Henry, Michael Tombs, Mayela Zamora, Feibiao Zhou, Coriolis mass flow metering for three-phase flow: A case study, *Flow Measurement and Instrumentation* Vol.30 (2013) pp.112–122

- (77) Marc Seeger, Coriolis flow measurement in two phase flow, IEE Computing and Control Engineering, (2005.4), pp.10-16
- (78) Daniel L. Gysling, An aeroelastic model of Coriolis mass and density meters operating on aerated mixtures, Flow Measurement and Instrumentation, Vol.18, (2007), pp.69-77
- (79) United States Patent: Pub. No.US2009/0019947 A1, (2009.1)
- (80) United States Patent: No.60/683179, (2006.05)
- (81) United States Patent: No.6327914, (2001.12)
- (82) United States Patent: No.60683179, (2005.5)
- (83) Begovic, M.M., Djuric, P.M., Dunlap, S., Phadke, A.G, Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics, Journal of Power Delivery, Vol.8, No.2, pp.151-157
- (84) 土屋 陽介, 因果律に基づく新たな信号処理法を用いた遅延時間推定法, 産業技術大学院大学紀要, No.1, (2007), pp.147-151
- (85) 中村駿介, 降旗建治, 木魚音のヒルベルト変換による瞬時周波数解析, 電子情報通信学会信学技報, (2006), pp.1-6
- (86) Ph. Denys, C. Counan, L. Hossenlopp, C. Holweck, MEASUREMENT OF VOLTAGE PHASE FOR THE FRENCH FUTURE DEFENCE PLAN AGAINST LOSSES OF SYNCHRONISM, Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.1. (1992.1), pp.62-69

研究業績

分類		題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
表彰	○	1. 2012年度計測自動制御学会賞（論文賞）受賞，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，計測自動制御学会産業論文集，Vol. 10, No. 4 (2011.8)，上原彬，橋詰匠，涌井徹也，角口開道，宮地宣夫
論文	○	1. 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，計測自動制御学会産業論文集，Vol.10, No.4,(2011)，pp.27-36，上原彬，橋詰匠，涌井徹也，吉野晶紀，角口開道，宮地宣夫
	○	2. Diagnostics of Impulse Line Blockage with Multi-sensing Differential Pressure Transmitter at Air Line, Journal of System Design and Dynamics, Vol.3, No.6(2009), pp.999-1010, Akira Uehara, Jyun-ichi Eino, Tetsuya Wakui, Takumi Hashizume, Nobuo Miyaji, Yoshitaka Yuuki
	○	3. マルチセンシング差圧伝送器による空気ラインにおける導圧管の詰まり診断，日本機械学論文集 C 編「D&D2008」特集号（2009.5），pp.1480-1489，上原彬，栄野隼一，涌井徹也，橋詰匠，宮地宣夫，結城義敬
	○	4. Diagnostics of Impulse Line Blockage with Multi-Sensing Differential Pressure Transmitter at Oil Line, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 2, No. 6 (2008.9), pp.1364-1374, Akira Uehara, Jyun-ichi Eino, Tetsuya Wakui, Takumi Hashizume, Nobuo Miyaji
	○	5. 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，計測自動制御学会産業論文集，Vol.7, No.9 (2008)，pp.60-66，栄野隼一，上原彬，涌井徹也，橋詰匠，宮地宣夫，結城義敬
	○	6. 水流下での過渡状態に対応した導圧管の詰まり監視，計測自動制御学会産業論文集，Vol.7, No.2 (2008)，pp.9-15，栄野隼一，上原彬，涌井徹也，橋詰匠，宮地宣夫，結城義敬
	○	7. マルチセンシング差圧伝送器による油ラインにおける導圧管の詰まり診断，日本機械学論文集 C 編「D&D2007」特集号（2008.6），pp.1170-1176，上原彬，栄野隼一，涌井徹也，橋詰匠，宮地宣夫，結城義敬

国際発表	○	<p>1. Diagnosis of Aerated Flow at Water Line with Coriolis Flowmeter Using Hilbert Transform, SICE Annual Conference 2010 CD-ROM(2010.08), 講演番号 : FA10-02, pp.1682-1687, Akira Uehara, Takumi Hashizume, Tetsuya Wakui, Akinori Yoshino, Akimichi Kadoguchi, Nobuo Miyaji</p> <p>○ 2. DIAGNOSIS OF THICKNESS IN PIPES AND HEAT EXCHANGER TUBES -A CASE OF STRAIGHT PIPES IN WATER LINE, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-09, CD-ROM(2009.11), 講演番号 : G111, Akira Uehara, Wataru Inaba, Jyun-ichi Eino, Takumi Hashizume</p> <p>○ 3. DIAGNOSTICS OF IMPULSE LINE BLOCKAGE WITH A MULTI-SENSING DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER AT THE AIR LINE, Proceedings of 10th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization CD-ROM No.175 (2007.9), pp.1-12, Akira Uehara, Jyun-ichi Eino, Tetsuya Wakui, Takumi Hashizume, Nobuo Miyaji</p> <p>○ 4. DIAGNOSTICS OF IMPULSE LINE BLOCKAGE IN WITH MULTI-SENSING DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER IN OIL LINE, SICE Annual Conference 2008 CD-ROM(2008.08), 講演番号 : 3A15-1, pp.2977-2982, Akira Uehara, Jyun-ichi Eino, Takumi Hashizume, Tetsuya Wakui, Nobuo Miyaji, Yoshitaka Yuuki</p> <p>5. MONITORING OF IMPULSE LINE BLOCKAGE USING PHASE DIFFERENCE BETWEEN UPSTREAM AND DOWNSTREAM PRESSURES OF ORIFICE, ASME POWER 2008 (2008.7), 講演番号 : 60058, pp.1-8, Jyun-ichi Eino, Akira Uehara, Takumi Hashizume, Tetsuya Wakui, Nobuo Miyaji, Kenichi Kuromori, Yoshitaka Yuuki</p> <p>6. Practical Techniques of Impulse-line Blocking Diagnosis at Actual Plants, ISA EXPO 2007 CD-ROM, TP07EXPO067PP, (2007.10), pp.1-9, Yoshitaka Yuki, Nobuo Miyaji, Kenichi Kuromori, Jyun-ichi Eino, Takumi Hashizume, Akira Uehara, Tetsuya Wakui</p>
総説	○	<p>1. デジタル式差圧伝送器による導圧管の詰まり検出, 月刊 計装 2007. Vol.50 No.10 (2007.10), pp.29-33, 柴野隼一, 上原彬, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 黒森健一</p>

講演	<ol style="list-style-type: none"> 1. コリオリ質量流量計における空気混入診断 2つのセンサ出力間における相関の揺動による手法, Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集 No.10-8, (2010.09) 講演番号: 462, pp.1-6, 藤井宣光, 上原彬, 橋詰匠, 涌井徹也, 吉野晶紀, 角口開道, 宮地宣夫 2. コリオリ質量流量計における測定管の腐食診断 励振ゲインを固定することによる測定管のばね定数の評価, Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集 No.10-8, (2010.09) 講演番号: 461, pp.1-6, 山下英暁, 上原彬, 橋詰匠, 涌井徹也, 吉野晶紀, 角口開道, 宮地宣夫 ○ 3. 差圧伝送器による導圧管の詰まり診断に関する研究 第7報:オリフィス前後圧力の位相差を利用した詰まり診断, Dynamics and Design Conference 2008 CD-ROM 論文集 No.08-14 (2008.09) 講演番号: 215, pp.1-6, 上原彬, 栄野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬 4. オリフィス式流量計の水流ラインにおける導圧管の詰まり診断-圧力揺動と圧力伝達の遅れに基づく2つの診断手法-, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.2, No. 08-1, (2008/8), pp.133-134, 栄野隼一, 上原彬, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬 ○ 5. 差圧伝送器による導圧管の詰まり診断に関する研究 第6報:空気ラインにおける詰まり検出, 第6回日本機械学会評価・診断に関するシンポジウム講演論文集 (2007.12), pp.12-16, 上原彬, 栄野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬 ○ 6. 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検出, 計測自動制御学会 2007年度産業応用部門大会講演論文集 (2007.10), pp.19-24, 上原彬, 栄野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 黒森健一 7. フィールドバスを用いた熱プロセスの異常診断 第6報:熱交換器シェル内へのドレン滞留の診断方法について, 第5回日本機械学会評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, NO.06-47, (2006.8), pp.97-102, 栄野隼一, 上原彬, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬 ○ 8. 差圧伝送器による導圧管の詰まり診断に関する研究 第4報:水蒸気ラインにおける詰まり検出, 第5回日本機械学会評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, NO.06-47 (2006.8), pp.57-61, 上原彬, 栄野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 黒森健一, 結城義敬 ○ 9. 水蒸気ラインにおける差圧伝送器による導圧管の詰まり検出, 計測自動制御学会 2006年度産業応用部門大会講演論文集 (2006.11), pp.21-26, 上原彬, 栄野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 黒森健一, 結城義敬
----	---

表彰	○	1. 2007-2008 the James O. Gray-Fieldbus Foundation Scholarship, (2007.11), Akira Uehara
	○	2. 2006-2007 the James O. Gray-Fieldbus Foundation Scholarship, (2007.1), Akira Uehara
	○	3. 2008 年度日本機械学会 三浦賞, (2009.3), 上原 彬
講演	○	4. キャピラリーチューブを用いた中規模ヒートポンプシステムに関する研究, 2006 年度日本冷凍空調学会年次会, 福岡, (2006.10), 日本冷凍空調学会, 講演論文集, pp. 503-506, 上原 彬, 高山 啓輔, 原口 一希, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 佐々木道生

※掲載媒体が CD-ROM の場合には, ページ番号の代わりに講演番号と原稿のページ数 (p.1 から始まる) を記している