

博士論文概要

論文題目

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

申請者

上原 彬

Akira Uehara

機械科学専攻 制御工学研究

2014年2月

近年多くの産業では、高効率、低コストを追求すると同時に、環境への負荷、安全対策を考慮した、持続可能なシステムへの転換が迫られている。その中で、プロセスオートメーション分野では、生産量の管理および制御量として重要なプロセス値を測定している流量計において、高精度化、多機能化が求められている。コリオリ質量流量計は流量計の中でも、流量測定精度が高く、複数のプロセス値を出力できるほか、適用可能な測定流体の種類が広範に渡ることから、今後シェアの拡大が見込まれている。

ただし、測定流体である液体中に空気が混入した場合、質量流量の測定精度が大きく損なわれることが問題となっている。特にコリオリ質量流量計は、高い測定精度を必要とする箇所に設置されるため、空気混入による測定誤差発生が診断できない場合、生産物の不良やプラント制御の異常を招き、結果として経済的な損失を来す恐れがある。また、ラインの運転状況等により空気混入が突発的に発生する場合もありえるため、空気混入はコリオリ質量流量計にとって、測定に支障を来す前にオンライン診断すべき重要な事象であるといえる。

従来研究では空気混入した場合であっても流量測定を可能にするため、気液二相流におけるコリオリ質量流量計での力学的挙動の解明が試みられた。しかし、実験結果と理論モデルとの間に乖離がありその原因は明らかにされていなかった。また、ニューラルネットワークにより液体の質量流量誤差を補正する手法が提案されているが、実験結果と乖離したままのモデルを基にしている他、各設置個所であらかじめ正常なデータの収集が必要であり、実用的な診断手法は未だ確立されていない。

このような背景を受けて、本論文ではコリオリ質量流量計において空気混入が流量測定に支障を来す前に診断する手法を確立すべく、気液二相流で適用可能な流量算出手法を提案している。また、空気混入量と流量測定誤差の関係を明らかにし、その上で具体的な空気混入診断手法を提案し、実証プラントでその有効性を明らかにすることを目的としている。本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章：序論

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

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 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 5 章：センサ出力の振幅を利用した流量測定誤差の推定

まず第 1 章では、研究の背景を述べ、課題を明確にしている。

第 2 章では、コリオリ質量流量計における測定原理、および気液二相流で予想される力学的挙動を明らかにしている。この際、従来研究ではより詳細な理論モ

デルの構築による改善に力を入れているのに対し，本研究では空気混入時の非定常特性に注目し，流量を算出するまでのプロセスにおける問題点の抽出および改善に焦点を当てた．その結果，これまで理論モデルと実証プラントでの質量流量誤差との間に乖離があった原因が，気液二相流において不適切な流量算出手法を適用していることにあることを指摘した．この問題に対して，気液二相流においても適用可能な流量算出手法を提案し，実証プラントにおける結果から，気液二相流における質量流量の測定誤差は，水と空気の混合比である容積流量比によってのみ変動することを明らかにした．これにより，従来研究で問題となっていた理論モデルと実証プラントにおける評価結果は合致することを示した．

第3章では，第2章でその有効性を明らかにした流量算出手法を用いて，空気混入量が質量流量にどのような影響を与えるのかを，定常特性と過渡特性の両面から定量的に評価し，診断すべき空気混入量のしきい値を明らかにした．過渡特性実験では，従来研究の通り顕著な遅延等は発生しないことを確認した．次に，定常特性の評価では，フローチューブの振動において振幅が一定に振動させるように制御している励振コイルの出力が空気混入により不足することで，測定誤差が負の方向へ増加することを明らかにした．また，空気混入量が少ない場合，励振コイルの出力が十分な間は，測定誤差が発生しないことを明らかにした．この結果より測定誤差が発生しない空気混入量から，診断目標となる空気混入の許容上限を定量化した．これにより初めて，コリオリ質量流量計の特長である高精度測定の保証範囲を，空気混入時においても明確にできるようになった．特に，従来研究とは異なり，理論モデルによる裏付けがあることから，流量計の体格，およびプロセス流体の物性，特に密度があらかじめ明らかであれば，設置個所ごとのデータ蓄積が不要となる点が特長である．なお，さらにこれらの結果を応用することで，より高い出力でフローチューブを励振できるコリオリ質量流量計であるほど，空気の混入に対して強いことも示した．

第4章では，フローチューブの上流と下流に設置された，2つのセンサ出力間における相関関数の揺動成分が，空気混入により増大することを応用し，空気混入の有無を診断する手法を提案した．なお，診断に際しては，運転動作点の変更等にもなう突発的な外乱や低周波の変動による誤診を防ぐことが必要であった．そこで，差圧伝送器における導圧管の詰まり診断に関する研究においてその有効性を明らかにした，2階差 RMS を定量化の手法として採用した．その結果，2階差 RMS による診断指標により，空気混入による揺動特性のみを評価することが可能となり，運転動作点の影響を受けることなく，測定に支障を来す前に空気混入の有無を診断できること明らかにした．また，この診断指標は，プロセス流体の密度が異なる場合でも有効であることを明らかにした．これにより初めて，測定精度が悪化する前に，予兆を捉えて空気混入の有無を診断できるようになった．

第 5 章では、第 3 章で明らかにした励振コイルの出力と質量流量の測定誤差の相関を応用して、空気混入による測定誤差を推定する手法について論じている。具体的には、通常一定に制御されているセンサ出力の振幅が空気混入により減少することを利用し、振幅の減少量から質量流量の測定誤差を推定するものである。実証プラントにおける評価の結果、あらかじめセンサ出力の振幅と質量流量の測定誤差の関係をデータとして蓄積できれば、ある程度の範囲で、運転動作点に関係なく質量流量の測定誤差を補正できる見通しを得た。この質量流量の測定誤差を推定する手法は、従来のニューラルネットワークを利用した流量補正手法と比較し、必要とするデータも少なく、原理も明確であることから、より簡易的な流量補正手法として今後期待できると考える。

以上の研究を総括すると 4 つの成果が挙げられる。(1) 気液二相流に適用可能な流量算出手法を提案し、空気混入時における質量流量の測定誤差が容積流量比の増加に対して、負の方向に増加することを明らかにした。(2) 空気混入量に対する質量流量の定常特性および過渡特性から、診断時に検知すべき空気混入量のしきい値を明らかにした。(3) 2 つのセンサ出力間の揺動成分を利用することで、運転動作点に関係なく空気混入を診断できる手法を提案した。(4) 空気が混入しない場合と比較したときのセンサ出力の振幅比と質量流量における測定誤差の関係を示し、空気混入により発生した流量測定誤差を推定する手法を提案した。

本論文では、水または密度の異なる食塩水をプロセス流体とする実証プラントを用いて空気の混入を模擬し、流量算出手法、空気混入診断手法、流量測定誤差推定手法の 3 つの提案手法の有効性をそれぞれ明らかにした。これにより、一般的なプロセス流体において逐一データを蓄積することなく、原理的に同様の手法で液相流体中への空気混入事象を診断できる指針を示した。

以上で得られた成果は、高精度で測定、制御しなければならないコリオリ質量流量計にとって意義のあるもので、プラント運用の安全性を高めるものである。また、コリオリ質量流量計は本論文で取り上げた U 字型以外に直管型等様々な形状のフローチューブを採用しているものがあるが、原理的には同じであるため、流量算出手法をはじめとする提案手法を同様に適用できると考えられ、汎用性は高い。さらに、本提案手法はこれまでのコリオリ質量流量計で測定していたプロセス値のみを取り扱っていることから、ソフトウェアを追加することのみで実現できるという実用上大きな利点を持っている。

早稲田大学 博士(工学) 学位申請 研究業績書

氏名 上原 彬



(2014年2月7現在)

種 類 別	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	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	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
論文	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
論文	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
論文	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
論文	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
論文	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
論文	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 (2008.5), 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	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
国際発表	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, Akria Uehara, Wataru Inaba, Jyun-ichi Eino, Takumi Hashizume
国際発表	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

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際発表	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
国際発表	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
国際発表	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
総説	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
講演	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
講演	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
講演	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, 柴野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬
講演	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, 柴野隼一, 上原彬, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬
講演	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, 柴野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 結城義敬
講演	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, 柴野隼一, 橋詰匠, 涌井徹也, 宮地宣夫, 黒森健一

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	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，柴野隼一，上原 彬，橋詰 匠，涌井徹也，宮地宣夫，結城義敬
講演	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，柴野隼一，橋詰 匠，涌井徹也，宮地宣夫，黒森健一，結城義敬
講演	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，柴野隼一，橋詰 匠，涌井徹也，宮地宣夫，黒森健一，結城義敬
表彰	2007-2008 the James O. Gray-Fieldbus Foundation Scholarship, (2007.11), Akira Uehara
表彰	2006-2007 the James O. Gray-Fieldbus Foundation Scholarship, (2007.1), Akira Uehara
表彰	2008 年度日本機械学会 三浦賞, (2009.3), 上原 彬
講演	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