

博士論文審査報告書

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7月

プロセスオートメーション分野では、制御量として重要な流量計測において、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、質量流量が直接計測できその測定精度が高いこと、複数のプロセス値を出力できること、適用可能な測定流体の種類が広範に渡ることから、急速に需要が高まりつつある。

測定流体である液体中に空気が混入した場合、液相流体の質量流量の測定精度が大きく損なわれる。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精度劣化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被ることが予想される。また、プラントの運転状況等により液相流体中への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。

従来研究では液相流体中に空気が混入した場合であっても液相の流量測定を可能にするため、液相中に微量の空気が混入した気液二相流におけるコリオリ質量流量計計測部の力学的挙動の解明が試みられた。しかし、実験結果を十分に再現する理論モデルは提示されておらず、その実験結果との乖離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偏差を補正する手法が提案されているが、実験結果を十分に再現できていないモデルを基にしている他、教師用学習データとして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。

このような状況の下、本論文ではコリオリ質量流量計の液相流体中に微量の空気が混入する状況において、流量測定に支障を来す前に空気混入の有無を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偏差率（気液二相質量流量 - 液相質量流量）／液相質量流量の関係性を明らかにし、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偏差率の推定

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ている。そして、これまで理論モデルと実証プラントでの質量流量偏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ている。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試験結果から、気液二相流における質量流量測定偏差率は、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ている。これにより、従来研究での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ている。

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、空気混入量が気液二相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ている。まず、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ている。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となるよう制御している励振コイルの駆動力を与えるための電気出力が空気混入の状況では電気回路保護の制約により不足することで、測定偏差率が負の方向へ増大することを明らかにしている。また、空気混入量が少ない場合、励振コイルへの電気出力が飽和していない場合には、測定偏差が発生しないことを明らかにしている。この結果より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。提案した理論測定モデルを解析することで、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。また、フローチューブを高ゲインで励振可能な計測部を実現することで、空気の混入に対する頑強性を向上させることも可能であることを示している。

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ている。なお、診断に際しては、運転動作点の変更等にとともなう突発的な外乱や低周波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を明らかにしている。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ている。これにより初めて、測定精度が悪化する前に、

予兆を捉えて微量な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への電気出力（励振ゲイン）と質量流量の測定偏差率の相関を応用して、微量な空気混入による測定偏差率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偏差率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偏差率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偏差率を補正できる見通しを得た。この質量流量の測定偏差率を推定する手法は、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有望である。

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偏差率が容積流量比の増加に対して、負の方向に増大するメカニズムを明らかにしている。(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ている。(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てその有用性を検証している。(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偏差率の関係から、微量な空気混入により発生した流量測定偏差率を推定する手法を提案し、検証している。

本論文では高精度で測定可能なコリオリ質量流量計の、気液二相領域での力学的挙動を解明し、特に液相流体への空気混入の有無を検出し、適切に測定結果を補正する方法を明らかにしている。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、その汎用性は高い。さらに、本提案手法は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。

以上より、本論文の成果はプロセス制御系における流量制御性の向上と、ひいてはプラント運用の安全性向上に寄与するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2014年7月

審査員（主査）：早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 天野嘉春
早稲田大学准教授 工学博士（早稲田大学） 武藤 寛
早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 齋藤 潔