

超音波による速度分布計測を基にした高確度流量計測

学位論文内容の要旨

プラントやダムおよび河川など、工業や環境保全分野の液体輸送において、管内流や越流、さらには河川流の流量計測は最も重要な技術の一つであり、これまでに多くの流量計測技術が提案されてきた。

円管を用いた液体の輸送における流量計測法として、ベンチュリ管やプロペラ式流量計が使用されている。しかし、これらの方法では流れが妨げられるため、液体輸送の効率が低下してしまう。一方流れを妨げない方法として、電磁流量計測法がある。しかし、この手法では計測対象となる液体が限定されており、油など、計測が困難な流体が存在する。さらに、上述した従来の計測法は、物理法則やモデル、あるいは検定実験により得られた補正係数を用いて値の推定を行っているため、適用する系がそれらのモデルや、補正係数を得た系と大きく異なる場合には、その計測確度が大幅に低下してしまう。

ダムの越流や河川などの環境流は、一般的な管内流に比べスケールが大きく、流れが複雑であるためモデルなどの設定が困難であり、さらには流れの時間変化が激しいことなどから上記の流量計測法を用いることが困難である。これまでは、水位を計測して流量を推定する方法や、電磁流量計などにより広範囲の流れ場に対して極少数の箇所における流速計測を行い、流量を見積もる方法などが用いられてきた。しかし、これらの技術は、流れそのものを計測していないことや計測点数が少ないことから複雑な流れには対応しきれず、さらに長い計測時間を要するため時間変化の影響が大きく、実用に足る高確度な流量計測の実現は困難である。

そこで本研究では、瞬時速度分布の計測が可能な超音波速度分布計測法を用いて、円管内流や環境流動に対する実用的な高確度流量計測法を確立することを目的とした。この手法では、瞬時流量が瞬時速度分布の空間積分値として得られるため、基本的に物理法則やモデル、あるいは補正係数を必要としない。また不透明液体の計測が可能であることから、従来の計測法に比べて幅広い種類の液体へ適用することができる。

管内流量計測では、超音波流速分布計測法による管内流量計測法そのものの計測確度を、本手法の流量算出過程に基づいてシミュレーションならびに実験により確認し、計測誤差ならびに脈動流に対する計測誤差を見積もった。また、作動流体に牛乳およびヨーグルトを用いることで、不透明流体ならびに非ニュートン流体への適用性および問題点を示した。

環境流計測では、矩形型水路を通過する流量、ダムをモデルとした堰の越流量および実河川の流量計測を行い、その誤差について検討した。また、流速分布から河川の底面形状を見積もる方法を確立し、大規模環境流動場の計測における、一連の計測時間を大幅に短縮できる計測方法を提案した。

本論文は全 8 章で構成されており、第 3 章から第 5 章を第 1 部として主に管内流量計測について論じ、第 6 章および第 7 章を第 2 部として環境流量計測について論じた。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、管内流量計測法ならびに環境流量計測法に関する従来の研究を総括し、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、本研究で用いた超音波速度分布計測法の計測原理を説明し、管内速度分布計測および矩形型水路速度分布における流量算出過程を示した。また、本研究で用いた超音波速度分布計（以下 UVP と略記）の基本性能を紹介した。

第3章では、本論文第1部で使用した鉛直据付型の円管水路の説明を行った。管内軸対称流れを実現すること、様々な液体計測を行うために実験装置全体を洗浄および交換可能とすることを前提とし、実験装置設計を行った。また完成した実験装置の特性を調べるため、UVP により管内流の速度分布計測を行い、軸対称流れであること、流れが周期的な脈動を伴っていることを確認した。

第4章では、計測精度に影響を及ぼすいくつかの要因のうち、速度分布の離散化による流量算出の誤差を理論的に検討し、本流量計測法が、従来の平均速度分布計測を用いた他の流量計に比べ、原理的に高確度であり補正係数を要しないことを示した。その上で、流量計測に必要な速度計測点数について論じ、実験による検証を行った。また、もう一つの誤差要因として、流れの非定常効果を取り上げ、任意の周波数の脈動を含む管内流量計測の理論的な検証、および実測試験を行った。そこから、複数の周波数成分をもつ脈動流と精度の関係式を導出し、高精度な計測に必要な計測時間の算出方法を示した。さらに、微小気泡を超音波の反射体とするため、ベンチュリ管を用いた微小気泡発生装置の開発を行い、発生する気泡の数や大きさについての検討を行った。

第5章では、作動流体として牛乳とヨーグルトを用いて管内流量計測を行った。一般的に、牛乳はニュートン流体であり、ヨーグルトは非ニュートン流体であることが知られている。ニュートン流体と非ニュートン流体の管内流速分布は同じ流量において異なるため、搾乳から商品の製造過程において流れの状態が変化することが予想される。そこで、牛乳とヨーグルトを様々な割合で混合し、計測した速度分布を基に、流体の粘性など性質変化をランダムサーチ法により解析し、検討および考察を行った。また、得られた速度分布から流量を算出し、性質変化に対する流量への影響を論じた。

第6章では、ダムをモデルとした、室内実験における越流の計測を行った。その結果、円管内流量とダムをモデルとした越流部水深を計測し、流量と越流水深が Rao による $h-Q$ 曲線に従うことを示した。また、得られた越流の流速分布から越流流量を算出し、円管部で計測した基準流量と良く一致することを示した。さらに、流速のベクトル計測から、一次元流れを仮定した流れの流量と実際の流れの流量との誤差について論じた。

第7章では、開水路計測と実河川での流量計測を行った。室内開水路において、流速分布を基にいくつかの補正を加えて流量を算出した。また、実河川において流量計測を行い検討を行った。さらに、得られた流速分布を基に、流速がゼロになる、流体力学的な底面を検出することで、スケールを用いることなく底面を検出する方法を提案し、計測の自動化についての検討も行った。

第8章は結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

なお付録として、巻末において遠隔流量計測技術の概念を示し、さらに計測機と PC 間の通信速度計測プログラムの作成して、模擬的な遠隔流量計測を行った結果を示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 田 靖

副 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 教 授 大 島 伸 行

学 位 論 文 題 名

超音波による速度分布計測を基にした高確度流量計測

工業における液体輸送や環境保全分野において、管内流や越流、河川流などの流量計測は最も重要な技術の一つであり、これまでに多くの流量計測技術が提案されている。円管を用いた液体の輸送における流量計測法として、ベンチュリ管やプロペラ式流量計などが使用されているが、これら従来の方法では流れが妨げられ液体輸送の効率が低下してしまうなどの問題がある。これに対して流れを妨げない方法に電磁流量計測法などがあるが、この手法では計測できる流体に大きな制限がある。さらに、上述した計測法は、物理法則やモデル、あるいは検定実験により得られた補正係数を用いて値の推定を行っており、適用する系がそれらと大きく異なる場合には、その測定確度が大幅に低下してしまう。また、ダムの上流や河川などの環境流は、一般的な管内流に比べスケールが大きく、流れが複雑であるためモデルなどの設定が困難であり、さらには流れの時間変化が激しいことなどから上記の流量計測法を用いることが困難である。これまでは、水位から流量を推定する方法や、電磁流量計などにより広範囲の流れ場に対して極少数の箇所における流速計測を行い、流量を見積もる方法などが用いられているが、これらの技術は、流れそのものを計測していないことや計測点数が少ないことから複雑な流れには対応しきれず、さらに長い計測時間を要するため時間変化の影響が大きく、実用に足る高確度な流量計測の実現は困難である。

このような問題を背景に、本論文は、瞬時速度分布の測定が可能な超音波速度分布計測法を用いて、物理法則やモデルあるいは補正係数を必要としない、円管内流や環境流動に対する実用的な高確度流量計測法を確立することを目的としてなされている。管内流量計測においては、超音波流速分布計測法による管内流量計測法そのものの計測確度(真値からのずれ)を本手法の流量算出過程に基づいたシミュレーションならびに実験により検証し、計測誤差ならびに脈動流に対する計測誤差を見積もっている。また、作動流体に牛乳およびヨーグルトを用いた実験を行っており、不透明流体ならびに非ニュートン流体への実用性を確認している。環境流計測においては、矩形型水路を通過する流量、ダムをモデルとした堰の越流量および実河川の流量計測を行い、その誤差について検討を行っている。さらに、流速分布から自由界面や河川の底面形状を見積もる方法を確立し、大規模環境流動場の計測における、一連の計測時間を大幅に短縮できる計測方法を提案している。

本論文で得られた結果は以下のように要約できる。

(1) 超音波速度分布計測法を用いた管内流量測定において、時間変動のない管内流であると仮定した場合、計測誤差は速度測定点数に依存し、層流や乱流などの流れの状態に関わらず、管内の測定点数を 100 点程度にすることにより、1% 以下の誤差で測定可能であることを示している。

(2) 脈動を伴う管内流の場合、誤差は脈動の振幅に比例し、脈動の角周波数および測定時間に反比例することを明らかにしている。また、この関係より平均流量を正確に得るための適切な必要測定時間の算出方法を確立している。

(3) 牛乳およびヨーグルトの管内流の計測を行い、流速や流量などの物理量を計測時間毎に得ている。また、非ニュートン流体の管内流のモデル式に Harshel-Bulkley モデルを用い、得られた速度分布データをランダムサーチにより解析して、物理量を時系列データとして得られることを示している。

(4) 円管内流量と広頂堰の越流部水深を計測し、自由界面の検出方法を示し、流量と越流水深が Rao による $h-Q$ 曲線に従うことを確かめている。また、越流の流速分布から越流流量を算出し、基準流量と良く一致することを示している。

(5) 開水路計測と実際の川での計測を行い、得られた流速分布を基に高確度な流量計測方法を実現するためのデータ処理方法の検討および提案を行っている。また、流速がゼロになる、流体力学的な底面を検出することで、スケールを用いることなく底面を測定する方法を提案している。

これを要するに、著者は、超音波速度分布計測法を用いた流量計測は、計測方法そのものが高確度であり、流体の種類を選ばず、これまで困難であった環境流においても高い実用性を有していること示している。これらの研究は、流量計測における飛躍的な進歩を促す物であり、工学および産業の分野に対し大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。