



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                                                                          |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | CFD assisted quantitative flow measurement of Newtonian and non-Newtonian fluid flows [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review] |
| Author(s)           | Tiwari, Neetu                                                                                                                                            |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                                                                    |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                                                                                   |
| Dissertation Number | 甲第14232号                                                                                                                                                 |
| Issue Date          | 2020-09-25                                                                                                                                               |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/79944">https://hdl.handle.net/2115/79944</a>                                                                        |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>                                                  |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                                                          |
| File Information    | Tiwari_Neetu_review.pdf, 審査の要旨                                                                                                                           |



## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称      博士(工学)      氏名      Tiwari Neetu

審査担当者   主   査   教   授   村井 祐一  
                  副   査   教   授   大島 伸行  
                  副   査   教   授   渡部 正夫  
                  副   査   准教授   田坂 裕司

## 学位論文題名

CFD assisted quantitative flow measurement of Newtonian and non-Newtonian fluid flows

(ニュートン・非ニュートン流体に対する計算流体力学支援型の流体計測技術の開発)

流体の流れの基本変数は流速と圧力であり、内部流、外部流、環境流などの把握における計測と予測の対象となっている。流速については過去 20 年、PIV(Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) や UVP(Ultrasonic Velocity Profiling: 超音波ドップラー流速測定法) が急速に発展して実験流体力学の主要ツールとなった。しかしこれらは圧力を計測することが出来ない。本研究では PIV や UVP などの流速分布測定データから圧力分布を推定する方法論を開発した。特に問題となるのは流速計測に含まれる誤差や時空間分解能の制限の問題、さらには実験計測時の境界条件の不可制御性が指摘される。今日までの先行研究では PIV データからの圧力場の推定はニュートン流体のみ、つまり Navier-Stokes 方程式を満足するものだけであった。しかし産業界では非ニュートン流体の速度と圧力の同時計測が求められ、さらには PIV が適用できない不透明流体でのこれらの実現が期待されている。例えば食品工業、化学工業、燃料輸送、金属精錬などの分野では、流れに纏わる事故防止、安全性向上、ならびに品質改善のために、流れのオンライン計測の実現が期待されている。本学位論文は以下の構成で、上記の問題に対する解決策を提案している。

第 1 章では、研究背景と先行研究の事例、ならびに本研究の目的を記述している。

第 2 章では、本研究の標準実験スキームの立案と、その狙い、ならびに実験装置の詳細について記述している。

第 3 章では、不透明液体を対象として、円柱後流のカルマン渦列が有する流速分布を UVP により計測し、その結果からカルマン渦列の内外の圧力分布を推定する方法について記載している。UVP は 1 次元 1 成分の流速計測を実現し、カルマン渦の移流方向に対してその垂直成分の流速分布を時空間 2 次元でデータ取得した。このデータに対してテイラー凍結仮説による時空間座標変換、連続の式、ならびに Navier-Stokes 方程式により圧力分布を取得することに成功した。その結果は無次元の圧力係数として、圧力を直接計測した過去の文献値に符合した。さらに UVP がもつ計測誤差が、上記の支配方程式における微積分操作に耐えるよう、計測ノイズ低減法として高速フーリエ変換 (FFT) フィルタと正規直交分解 (POD) フィルタの効果を比較し、両者を併用することが圧力分布の推定において最大の推定精度を導くことを示した。

第 4 章では 2 次元 2 成分の流速分布を計測する PIV により、非ニュートン流体を対象としたカルマン渦または円柱付着双子渦における速度と圧力の同時計測を実現する方法を提唱している。非ニュートン流体として粘性がせん断歪み速度とともに低下するシアシニング特性をもつ CMC 水溶液

を利用した。得られた流速分布に対して FFT と POD による 2 段階フィルタを課すことで、2 つのレオロジーモデル方程式による粘性係数の空間分布の推定に成功した。この粘性係数分布を利用して、非ニュートン流体の運動量方程式に流速分布と物性分布を代入することで、圧力勾配ベクトル分布を取得し、その多方向積分平均により圧力分布の推定に成功した。このデータ解析から、圧力と粘度、渦度と粘度のそれぞれの相関係数を解析し、非ニュートン流体のカルマン渦が主流方向に伸張し波長が拡大する性質を明らかにした。

第 5 章では Navier-Stokes 方程式が与える圧力勾配ベクトル場が、PIV などの実測値の適用の際に、物理的には存在してはいけない回転成分をもち、それが圧力分布の線積分に積分経路依存性をもたらしていることを発見し、その改善策として、圧力勾配ベクトル場の回転成分を除去するヘルムホルツ分解処理を提案している。テイラーの孤立渦やカルマン渦列に対する新しい解析処理の導入の結果、圧力分布の推定確度が向上することを確認した。

第 6 章では本研究で得られた成果のまとめと今後の発展ビジョンについて記している。

これを要するに、本論文では、実験流体力学において普及している速度分布計測法を、圧力分布の推定ツールとしても活用可能とし、流れの基本変数である流速と圧力の二者の分布の同時計測を実現する方法論を確立した。この成果は、流れ場における圧力変動を問う流動現象の制御と理解を支援し、流体工学およびその産業利用に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。