九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

オプティカルフローと光学的可視化計測手法の融合による流体画像診断技術に関する研究

土黒, 聖斗

https://hdl.handle.net/2324/7157385

出版情報：Kyushu University, 2023, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

氏　　名　：土黒　聖斗
Name

論 文 名　：オプティカルフローと光学的可視化計測手法の融合による流体画像診断技術に関する研究
Title

区　　分　：甲
Category

論 文 内 容 の 要 旨
Thesis Summary

カーボンニュートラルに向けた動きは自動車や航空機，ロケットといった輸送機産業においても活発化してきており，CO2 排出量削減のため，パワーソースの高効率化や電動化，車両や機体の一層の空気抵抗低減に取り組んでいる．例えば自動車メーカーでは，研究・開発期間の短縮のためにモデルベース開発（MBD：Model Based Development）の導入が進んでいる．このうち，空力開発におけるモデルは数値流体解析であるが，乱流モデルの違いによって車両の空気抵抗に支配的な剥離，再付着現象を伴う後流構造の推定に大きな誤差が生じ全体の空力特性が合わないといった課題が残る．また，航空機やロケットといった高速流れを伴う流体現象の流体力学的メカニズムには未解明な点も多く CFD だけでなく風洞実験による高速流動現象の把握は未だ重要である．従来の風洞実験では熱線や圧力センサを用いた特定の物理量の点計測及び多点計測に加え，高速流れではシャドウグラフやシュリーレン，物体表面上の流れには油膜法など流れの物理の定性的理解に有効な光学的可視化手法が用いられてきた．一方で，近年では光学的可視化手法に対して画像診断技術を組み合わせることで定量的，非接触，非定常での物理量の計測も可能となっている．特にコンピュータービジョンの分野で用いられてきたオプティカルフローを流体の画像診断技術として適用する試みが報告されている．オプティカルフローはピクセルレベルでの解析が可能であり，取得画像の空間分解能と同等の分解能で推定することができ，例えば低速衝突噴流に対して相互相関法の PIV よりも理論解に近い流れ場を抽出できることが報告されている．しかし，従来の様々な光学的可視化手法とオプティカルフローを融合した流体画像診断技術についてそのアルゴリズムが提案されているものの実際の工学的諸問題に適用された例は少なく技術的にも課題が残る．そこで本研究では，従来の光学的可視化手法に対してオプティカルフローを融合した新たな流体画像診断技術の技術的確立を目指すとともに現状の可視化手法とオプティカルフローによる画像処理を通してどこまで物理現象を捉えることができるか議論する．初めに，遷音速の衝突噴流流れに対して密度変化の大きい高速流れの定性的理解に有効な光学的可視化手法であるシャドウグラフにオプティカルフローを融合したトレーサー粒子を用いない定量流体解析技術に関する研究について議論する．次に，物体表面の流れ場の理解に有効な蛍光油膜法に対してオプティカルフローを融合した摩擦応力分布の非接触解析技術について議論する．更に，具体的なアプリケーションとして自動車の車体周りの流れに対する摩擦応力分布の非接触可視化計測を適用し，従来の流体計測手法や CFD では捉えることができない車体表面上の流体構造や近年の自動車空力の最適化問題として関心が高いタイヤ周りの流体力学的メカニズムの解明を目的とする．

第 1 章では，本論文の研究背景，及びオプティカルフローの流体計測への適用に関する研究について述べた先行研究につて示した．また，先行研究に対して，本研究の位置づけを示すとともに本論文の研究目的について述べた．

第 2 章では，本論文で扱う光学的可視化手法の原理，オプティカルフローの原理，光学的可視化手法に対し

てオプティカルフローを適用するための手法について述べた．光学的可視化手法では，密度変化の大きい高速流れに有効なシャドウグラフ法，物体表面の流体構造の定性的理解に有効な蛍光油膜法の概要を示した．また，オプティカルフローの基礎的な原理からそれぞれの光学的可視化手法に適用した際のアルゴリズムについて示した．

第 3 章では，風洞試験における実験装置の概要や実験手法，実験条件を示した．高速衝突噴流を対象とした試験では二次元の先細ノズルと側壁に光学窓を有する衝突噴流発生装置を用いて高亜音速から遷音速の衝突噴流をシャドウグラフ法によって可視化した．また，車体周りの流れを対象とした試験では，スケールモデルを用いてリアウィンドウに相当するスラント面上での剥離，再付着を伴う流体構造やタイヤ周りの流れの流体力学的メカニズムを解明するために非回転単独タイヤ及び車体形状が付加された際のタイヤ周りの流体構造を蛍光油膜法によって可視化した．更に，傾斜面や垂直面を含む車両に対して蛍光油膜法を適用するために油膜の膜厚推定方法や薄膜塗装方法など実験手法の詳細について示した．

第 4 章では，高亜音速から遷音速の衝突噴流のシャドウグラフ可視化結果を示し，シャドウグラフ画像に対するオプティカルフロー法の適用可能性とハイスピードカメラの時空間分解能が特徴的な渦の周波数解析精度に及ぼす影響について議論した．その結果，トレーサー粒子を用いない光学的可視化手法であるシャドウグラフ画像に対するオプティカルフローの画像解析結果から噴流せん断層の揺れやせん断層の不安定性に起因して発生するケルビン・ホルムヘルツ渦（K-H 渦）の放出と移流する様相を非定常で捉えられることが示された．また，ノズル圧力比（NPR：Nozzle Pressure Ratio）1.5 においてハイスピードカメラの時間分解能の向上によって画像解析結果から得られる K-H 渦の渦放出周波数のパワースペクトル密度とキュライトセンサを用いた K-H 渦を対象とした圧力計測結果のパワースペクトル密度に良好な一致が示された．更に，本計測技術が現状で適用可能な速度域について明らかにした．

第 5 章では，車両の準標準的スケールモデルであるアハメド模型に対して蛍光油膜法にオプティカルフローを融合した摩擦応力分布の非接触可視化計測手法である GLOF 法（Global Luminescent Oil-Film Friction meter）を適用しアハメド模型の空力特性に対する Re 数効果の流体力学的メカニズムを明らかにした．その結果，スラント面における剥離泡が Re 数の増加に伴いω型から C 型に変化する様相を示した．C 型の剥離泡はアハメド模型を対象とした先行研究などからも明らかにされており，スラント面上部のショルダー付近を起点とした一対の双子渦によって形成されている．一方で，ω型の剥離泡は C 型と同様のショルダー部から中央に向かう流れと中央から左右に向かう流れの 2 対の双子渦で形成されていることが示された．これはルーフ上からの乱れた流れによってスラント面上での再付着が促進されることに加え低い Re 数では C ピラー渦の影響が小さいことからルーフ上からの流れが支配的であったためと推察される．この結果は，摩擦応力ベクトルによって表面上の流体構造を定量的に示すことができる GLOF 法の強みであり，傾斜を有するスラント面上での計測は本研究で示した膜厚推定方法や薄膜塗装といった計測における技術的確立のもとに成立する．また，対応する圧力分布との比較からアハメド模型の抗力変化に対してスラント面上での剥離泡が支配的であり，剥離泡の構造変化が Re 数の増加に伴う抗力の減少に寄与していることが示された．

第 6 章では，未だ流体力学的メカニズムの議論が不足している車両のタイヤ周りの流れに着目し，GLOF 法によってタイヤの各要素が流れ場に及ぼす影響やタイヤ単独の場合と車体形状が付加された場合でのタイヤ周りの流体構造について議論した．タイヤ周りの流れの議論には，車両の標準的スケールモデルである DrivAer を SUV タイプへと拡張した AeroSUV を用い，非回転単独タイヤに形状要素を追加した際のタイヤ側面の流れ場，及び車体形状を付加した際のフロントタイヤ周りの流れ現象を評価した．その結果，非回転の単独タイヤではタイヤ前方のショルダー部で剥離した流れがタイヤ側面で再付着することによる剥離泡が支配的な流れ場が示された．加えて，ショルダー部の曲率拡大に伴い剥離泡の再付着位置が上流側に遷移し，剥離泡構造が縮小することがわかった．また，車体形状を付加した際には，タイヤ側面の流れ場は前方から見て露出するタイヤ下部の流れと地面との干渉によって発生する縦渦が支配的であることが示された．また，タイヤのショルダー部の曲率拡大に伴いフロントタイヤ後方車体側面での吹きおろし流れが緩和されていることが摩擦応力ベクトルより示された．これはショルダー部の曲率拡大によりタイヤ下部の縦渦の規模が縮小し車体側面流れへの縦渦の影響が低減したためと推察される．また，このようなタイヤ側面及び車体側面の詳細な流体構造は先行研究では明らかになっておらず，同条件化の PIV 計測においても捉えることはできなかった．このような剥離や再付着を伴うタイヤ周りの流体力学的メカニズムに関する議論は不十分であったが，本論文の GLOF 解析結果によって非回転ではあるもののタイヤの形状要素の違いによるタイヤ側面及び車体側面の詳細な流れ場を示すことができた．最後に第 7 章では，本論文の結論を述べた．