

論文の要旨

題目 自動車周りに発生する低圧旋回渦の同定手法に関する研究

(Study on Identification Method of Low-pressure Vortex with Swirling Motion around Automobile)

氏名 中村 優 佑

本論文では、自動車周りに発生する低圧旋回渦を同定する手法の開発および検証を行った。さらに、自動車空力の様々な問題に対して開発した渦同定技術を適用し、その実用性を示した。

第1章では、本研究の背景と先行研究、および目的を述べた。地球温暖化への関心は高まり、自動車の燃費規制は年々厳しくなっている。近年、電気自動車が普及しつつあるが、充電インフラは十分ではなく、航続距離の増加が課題である。そのため、自動車の走行抵抗の低減、特に、自動車の空気抵抗低減は、自動車開発の重要な課題の1つである。従来の空気抵抗低減は、流線型の流れを目指した車体形状や細部形状最適化といった車体の外形形状に制約を与える流れの制御が行われてきた。しかし、近年は、車体の外形形状と関係が深いデザインも重要な要素となり、空気抵抗低減とデザインとの両立が求められる。そのためには、車体周りの流れ現象に基づいて効果的に空気抵抗を低減する設計技術が必要であり、その実現には、まず自動車周りに発生する渦を同定することが重要である。自動車空力の分野で求められる渦同定手法としては、①低圧旋回渦の同定、②ガリレイ変換不変性、③渦の個別同定が可能、④渦の定量化が可能、⑤非構造格子への適用が可能、⑥並列計算が可能を満たす必要がある。しかし、従来の渦同定手法は、自動車周りの複雑な流れ場に対して煩雑な同定結果を与え、さらには必ずしも低圧旋回渦を同定しているとは限らず、自動車空力の分野で求められる渦同定手法の要請を満たしていない。そこで、本研究では、自動車周りに発生する低圧旋回渦を同定する手法の開発、検証、実用性の実証を目的とした。

第2章では、様々な渦同定手法と本研究のベースとなる手法の選択について述べた。様々な渦同定手法については、自動車空力の分野で従来用いられてきた渦同定手法だけではなく、多様な分野で用いられる渦同定手法を調査し、それらの概要と特徴について述べた。渦同定手法は、渦の領域を等値面で表す領域型と渦の中心を線で表す渦中心型に分類される。領域型は、局所のスカラー量を用いるため、渦中心型と比較して実装が容易である。しかし、スカラー量の閾値に任意性があることに加えて、渦同士が連結し個別の同定が困難である。一方、渦中心型は、領域型と比べて渦の個別同定がしやすい。渦中心型は、渦の旋回を表す流線の形を利用して渦中心軸を同定する流線トポロジー型と、渦中心点となるスカラーの極値を結んで渦中心軸を同定するスカラー極値型に分類される。流線トポロジー型は、速度をそのまま同定に用いるため、ガリレイ変換不変性を満たさないうえ、低圧旋回渦を同定していることは限らない。スカラー極値型は、ある格子点から出発して渦中心点を探索しながら渦中心軸を成長させていく予測—修正法と、全ての渦中心点を求め、それらを線で結合させる圧力断面極小旋回法に分類される。予測—修正法は全領域を参照しながら渦中心軸を構築するため、並列計算への拡張が困難である。以上を踏まえ、ベースとなる渦同定手として、多くの要請を満たす圧力断面極小旋回法を採用した。

第3章では、自動車周りに発生する低圧旋回渦を同定するために、圧力断面極小旋回法を自動車空力に適用できるよう改良した方法および検証結果を示した。まず、従来の圧力断面極小旋回法の方法を解説した。この手法の具体的な手続きとして、圧力を格子点周りでテイラー展開し、圧力ヘシアンの実固有値の二つが正となる二元的な極小点を求め、それらを最短距離で結んで渦中心軸を同定する方法であることを述べた。次に、自動車空力の分野で求められる渦同定手法の要請に対する課題解決の方法を示した。一つ目は、テイラー展開の精度を担保する渦中心点の格子内外判定を非構造格子で行うために、任意の多面体で点の格子内外判定ができる球面投影法を実装したことを述べた。二つ目は、渦中心軸の断片化を抑制する渦中心点の物理的情報を考慮した渦中心軸構築アルゴリズムについて述べた。従来手法は、渦中心点を最短距離で結ぶため一方向での渦中心軸の構築であったが、本論文では渦軸に垂直な平面の正と負側の二方向で渦中心軸を構築するアルゴリズムを提案した。また、格子スケールで渦中心軸の向きが急激に変化することは考えにくいいため、渦軸同士の角度および渦軸と渦中心軸の角度に対して、最大許容角度のパラ

メータを導入した。そして、直交格子で計算された角柱周りのカルマン渦を非構造格子にマッピングし、本論文で提案した改良手法（以下、本手法）を適用することで、最大許容角度のパラメータの適値を求めるとともに、非構造格子上での低圧旋回渦の同定について検証した。最大許容角度のパラメータについては、渦中心軸が断片化することなくつながった場合に想定される渦中心軸の長さに対する閾値を設け、パラメータスタディを行うことで、全てのカルマン渦の本数を同定できる角度パラメータを決定した。また、直交格子での計算結果に対して従来手法で同定された渦中心軸と、非構造格子において本手法で同定された渦中心軸の距離は、一格子幅以内であった。このことから、本手法は、従来手法と同じ渦を同定できており、従来手法が非構造格子へと拡張されたことを示した。さらに、本手法で同定された渦中心軸の周囲の圧力および速度ベクトルを可視化した結果、周囲より圧力が低く、旋回運動を表す速度ベクトルの近傍に位置しており、低圧旋回渦の同定が可能であることを示した。最後に、セダン周りの時間平均流れ場に本手法を適用し、検証を行った。まず、渦中心軸構築アルゴリズムを導入していない従来手法と本手法を比較した結果、渦中心軸の断片化が抑制されていることが確認できた。さらに、本手法が自動車周り発生する特徴的な四つの既知の渦構造を再現しているか検証を行った。既知の渦構造を同定できる領域型的手法による等値面と本手法の渦中心軸を合わせて可視化した結果、渦中心軸は、四つの既知の渦構造に対応する管状の等値面の内部に存在した。このことから、本手法は既知の渦構造を同定することが可能であることを示した。また、自動車空力分野で用いられる従来の領域型および渦中心型の同定結果と比較すると、本手法による同定結果は、渦同士が連結することなく、かつ渦中心軸の断片化が抑制されており、従来手法と比べて簡潔な渦の同定ができることを示した。

第4章では、本手法を自動車空力に関する複数の問題に適用し、その実用性を実証した。まず、本手法によって複雑な流れ場でも自動的に渦およびそれに関連する流れ場の抽出が可能であることを示した。例として、フロントタイヤ周りの流れ場に本手法を適用し、本手法で同定された渦を先行研究において同定された渦と比較した結果、渦の位置と回転方向が概ね一致した。さらに、渦中心点上に流線のシード点を設置する方法を用いることで、シード点位置の任意性を低減しつつ冗長な流線を回避し、渦に関連する流れ場を抽出した。その結果、本手法で同定された流れ場は、先行研究で同定された流れ場と概ね一致した。以上の結果より、先行研究で同定された渦および渦に関連する流れ場が、本手法によって自動的に抽出されることを示した。次に、本手法を領域型の渦同定手法と組み合わせることで、詳細な渦の考察が可能であることを示した。例として、横風下で顕著な空気抵抗増加を引き起こす簡易自動車模型の後流渦、および並走条件下と横風条件下における簡易自動車モデルの後流渦に本手法を適用した。領域型のみで同定した結果では、等値面が連結し、渦の個別同定が困難であったが、本手法による渦中心軸の同定を組み合わせることで、連結した等値面の内部に存在する渦が分離され、渦の個別同定が容易となった。これにより、条件変化に伴う空気抵抗増加と関連する渦を個別に同定でき、空気抵抗増加を生じる流れ場の変化を抽出できることを実証した。

第5章では、本手法の更なる精度向上のために、渦中心軸の断片化を抑制する前処理についての手法を示した。まず、渦中心軸が断片化する理由として、入力データの数値ノイズによる偽陽性の渦中心点が発生することを述べた。次に、これに対する様々な対策として、数値ノイズを除去するローパスフィルタ、偽陽性の渦中心点の畳み込み手法、渦中心軸の構成方法、渦中心軸の閾値によるフィルタリングについて述べた。次に、本研究では圧力の空間の2階微分を用いるため、高波数の数値ノイズの除去が重要であり、ローパスフィルタを用いることを述べた。この時、ローパスフィルタとして一般的に用いられるガウシアンフィルタは、カットオフ波数よりも低波数側の車両周りに発生する大規模な渦についても、定量的に減衰させることが懸念される。このため、本研究では、ガウシアンフィルタと比べて、低波数側の影響が小さく、かつカットオフ波数で鋭く減衰する **Implicit high-order filter** を用いた。そして、このフィルタを用いて、高波数の数値ノイズを除去するために、フィルタ幅を格子幅とする方法を示した。入力データに対して **Implicit high-order filter** を適用し、本手法による渦中心軸の同定を行った結果、フィルタを施していない時の結果と比べて、渦中心軸1本あたりを構成する平均の渦中心点および平均の長さが増加した。以上の結果より、入力データに対して **Implicit high-order filter** を適用することで、渦中心軸の断片化をより抑制できることを示した。

最後に第 6 章において、本論文の結論を述べた。本論文では、自動車周りの流れ場から低圧旋回渦を同定できる手法を開発し、検証した。そして、本手法を様々な自動車空力の問題に適用し、その実用性を実証した。