

論文・解説

27

空力性能の向上を支援する低圧旋回渦同定手法の開発

Development of Identification Method of Low-Pressure Vortices with Swirling Motions to Support Improvement of Aerodynamic Performance

中村 優佑^{*1} 清水 圭吾^{*2}
Yusuke Nakamura Keigo Shimizu

要約

空気抵抗低減とデザインの両立のために、空気抵抗に寄与する低圧旋回渦を同定する手法を開発した。自動車空力の分野で用いられる従来の渦同定手法は、煩雑な同定結果を与え、更に必ずしも低圧旋回渦を同定しているとは限らなかった。そこで、筆者らは、乱流の基礎研究において、低圧旋回渦の渦中心軸を同定する圧力断面極小旋回法に着目し、自動車周りの流れ場にも適用できるように拡張した。具体的には、既存手法を自動車空力のシミュレーションで用いられる非構造格子にも対応できるよう理論を拡張した。更に、煩雑な同定結果をもたらす渦中心軸の断片化を抑制するために、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を開発した。本手法を自動車周りの流れ場に適用した結果、自動車周りに発生する既知の特徴的な渦を同定することができた。更に、本手法は従来手法と比較して、渦中心軸の断片化を抑制することができた。これらの結果から、本手法は自動車周りの低圧旋回渦を同定するのに有効であるといえる。今後は、渦が定量的に評価できるように本手法を進化させ、空気抵抗と渦のモデル式を構築することで、空気抵抗低減とデザインの両立に貢献していく。

Abstract

To achieve both less aerodynamic drag and design, a method to identify low-pressure vortices with swirling motions around a vehicle has been developed. Previous vortex identification methods are generally used in the field of vehicle aerodynamics, which give complex identification results and do not always identify low-pressure vortices with swirling motions. Therefore, we focused on the sectional-pressure-minimum-and-swirl method that visualizes vortex core lines of low-pressure vortices with swirling motions, and extended the method to be applicable to flow fields around a vehicle. Specifically, the existing method was extended to be applied to unstructured grids used in vehicle aerodynamics simulation. In addition, we have developed a vortex core line construction algorithm that uses the physical information of the vortex center point to suppress the fragmentation of the vortex core lines. By applying the new method to the flow field around a vehicle, the known vortices that occur around a vehicle was identified. Moreover, the new method is able to suppress the fragmentation of vortex core lines, which the previous methods cannot. From these results, the new method is proved to be effective to identify low-pressure vortices with swirling motions around a vehicle. In the future works, this method will be extended to be evaluated vortices quantitatively and a model relating vortices and aerodynamic drag will be constructed. This model will be used to contribute to both less aerodynamic drag and design.

Key words : Heat • fluid, Aerodynamic, Computational fluid dynamics, Vortex Identification

1. はじめに

自動車からの二酸化炭素排出量削減や電気自動車の航続距離増加に対して、空気抵抗の低減がますます重要に

なっている。空気抵抗は、空気と物体表面間の摩擦による摩擦抵抗と空気が物体から剥離し渦が形成され、物体背面の圧力の低下による圧力抵抗に分けられる。自動車の場合、空気抵抗の約9割が圧力抵抗であるため⁽¹⁾、そ

*1,2 技術研究所
Technical Research Center

の発生原因である渦をいかに制御するかが重要である。特に、自動車の空気抵抗増大に関連する渦は、渦の中心で圧力が周囲より低く、旋回運動を伴う特徴をもつ低圧旋回渦であることが実験的に観察されている⁽²⁾。一方で、空気抵抗は自動車の外形形状と関連が強いため、デザインと両立しながら空気抵抗を低減することが重要な開発課題となっている。

この課題に対して、筆者らは渦と空気抵抗のモデル式を構築することで、解決を目指している⁽³⁾。具体的には、渦の場所を特定し、個々の渦を空気抵抗に関連する物理量で定量化し、データ分析手法を用いて、

$$C_D = f(\dots, V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, \dots) \quad (1)$$

と表すことである。ここで、 C_D は空気抵抗係数、 V_i は*i*番目の渦の定量値である。このようなモデル式ができれば、デザイン形状により発生する渦は触らずに、目標の空気抵抗を達成するためにどの渦をどれだけ制御すればよいか分かる、つまりデザインと空気抵抗低減の両立を実現する空力開発の戦略立てに役立つことが期待される。更に、空気抵抗に寄与する大きな渦を小さくする効果をもつ渦の発見や、渦同士の複雑な相互作用を逆に利用し、あえて渦を作るという新しい発想ができることで、流線形の外形形状でなくても低空気抵抗を実現できる可能性がある。

渦と空気抵抗のモデル式を構築するためには、まず自動車周りの複雑な流れ場から渦の場所を特定する渦同定手法が必要である。モデル式の構築のために、渦同定手法は以下の三つの要請を満たす必要があると考えられる。一つ目は、低圧旋回渦を同定できることである。これは前述にあるように、低圧旋回渦は自動車の空気抵抗に関連するためである。二つ目は、自動車が走行する状態と風洞状態で同定された渦が同じである、つまり同定された渦がガリレイ変換に対して不変である。ガリレイ変換は、静止または等速度運動している二つの座標系の変換であり、流体の運動方程式であるナビエーストークス方程式はガリレイ変換を施しても方程式の形が変わらず不変である。この性質を利用して、自動車空力の研究開発では、再現性や簡便性の観点から、地上に固定した座標系、すなわち空気が静止して自動車が走行する環境でなく、自動車とともに等速運動する座標系、つまり空気を動かして自動車を固定する風洞状態を用いることが多い。しかし、渦同定手法によっては、同定された渦がガリレイ変換に対して不変でないことが指摘されている⁽⁴⁾。三つ目は、渦の個別同定である。これは、モデル式において、空気抵抗の説明変数として定量化された個々の渦を用いるためである。

一方で、さまざまな流体现象下で渦を同定するために、これまでに多くの渦同定手法が提案されている⁽⁵⁾。しかし、これらの従来手法は、モデル式の構築に必要な渦同

定手法の要請を満たしていない。渦同定手法は、大きく分けて領域型と渦中心型の二種類に分けられる。まず、領域型の可視化事例を Fig. 1 に示す。領域型は、スカラーの物理量の等値面を用いて渦の領域を同定する手法であり、三次元空間の大規模な渦の同定に適する。しかし、ユーザーが選択する等値面の閾値によって渦の同定結果が変わること、本来個別に存在する渦同士が連結し、塊として可視化されることから、渦の個別同定が困難である。次に、渦中心型の可視化事例を Fig. 2 に示す。渦中心型は、線を用いて旋回する渦の中心軸を同定する手法であり、小規模な渦の把握に適する。しかし、渦の中心軸が断片的になり、多数の渦が可視化されるため、複雑な流れ場での渦の個別同定が困難である。

そこで、筆者らは、ガリレイ変換に対して不変で、かつ低圧旋回渦の渦中心軸を同定できる渦中心型の圧力断面極小旋回法⁽⁴⁾⁽⁶⁾に着目した。しかし、この手法を自動車周りの流れ場に応用するためには、二つの課題がある。一つ目は、さまざまな形の計算格子で使用できるよう手法を拡張することである。圧力断面極小旋回法は、乱流の基礎研究で用いるため、規則正しく並んだ立方体の計算格子を前提としている。自動車周りの流れ場のシミュレーションでは、自動車の複雑な形状を再現するため、四面体や三角柱などのさまざまな形の計算格子、いわゆる非構造格子を用いることが多い。二つ目は、渦中心軸の断片化を抑制するアルゴリズムの開発である。渦中心型の手法は、渦中心軸が断片化しやすく、渦の個別同定が困難になりやすい⁽⁵⁾。

そこで、本稿は圧力断面極小旋回法を自動車周りの流れ場に応用し、その有効性を示すために、筆者らが行った手法の拡張内容及びその検証結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾について解説する。

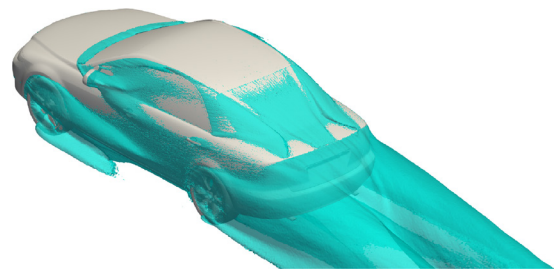


Fig. 1 Vortex Region Method



Fig. 2 Vortex Core Line Method

2. 方法

2.1 圧力断面極小旋回法

まず、渦同定手法のベースとなる圧力断面極小旋回法⁽⁴⁾⁽⁶⁾について解説する。この手法は、圧力の二次元的な極小点であり、かつ旋回条件を満たす渦中心点を求め、それらを線でつなぐことで低圧旋回渦の渦中心軸を同定する手法である。

はじめに、圧力が二次元的な極小値となる点を求める。任意の位置 x における圧力 p を求めるために、格子点 X まわりでのテイラー展開による二次近似式、

$$p(x) = p(X) + \frac{\partial p}{\partial x_i}(x_i - X_i) + \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_j}(x_i - X_i)(x_j - X_j) \quad (2)$$

を用いる。ここで、同じ添え字の繰り返しについては、1 から 3 まで和をとる。式(2)の右辺第三項は、圧力を空間で二階偏微分した圧力ヘシアンである。圧力ヘシアンは対称行列であるため、その固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は実数(ただし、 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)となり、対応する固有ベクトル e_1, e_2, e_3 は正規直交基底となる。式(2)は圧力ヘシアンの固有ベクトルで座標変換することで、

$$p(x') = \frac{\lambda_i}{2}(x'_i - C_i)^2 + \text{const.} \quad (3)$$

と標準形に変形できる。 x' は座標変換後の基底で表現した位置ベクトル、 C' は定ベクトルである。 $\lambda_2 > 0$ のとき、 e_1-e_2 平面上において、圧力は下に凸の二次曲面となり、点 C' で極小値をもつ。このときの計算格子と格子点 X 、極小点 C' の関係を Fig. 3(a) に示す。ここで、固有ベクトル e_3 を渦軸の向きと定義する。Fig. 3(b) に示すように、 e_3 に平行で点 C' を通る直線上で、格子点 X との距離が最短になる点 C を渦中心点の位置とする。このとき、式(2)の近似精度を保つためには、格子点 X と渦中心点 C の距離が近いことが必要である。そのため、渦中心点は計算格子の内部にあるもののみを抽出する。具体的には、立方体の一辺の長さが Δ の計算格子であれば、全ての $i=1, 2, 3$ に対して、

$$|X_i - C_i| < \frac{1}{2}\Delta \quad (4)$$

が成り立つという条件を課す。

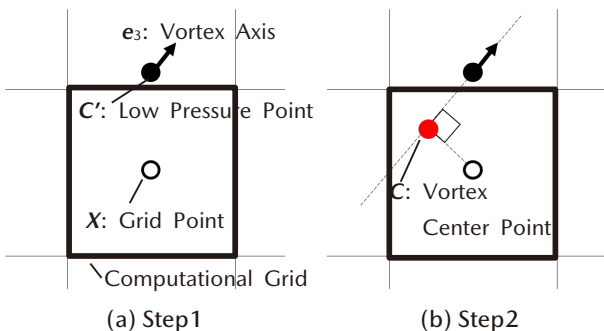


Fig. 3 Procedure for Finding the Vortex Center Point

次に、旋回条件を満たす点のみを抽出する。その条件として、 e_1-e_2 平面において、流線が楕円であることを課す。具体的には、 e_1-e_2 平面での速度勾配テンソル W が複素固有値をもつこと、すなわち判別式 D が負、

$$D = \frac{1}{4}(W_{11} - W_{22})^2 + W_{12}W_{21} < 0 \quad (5)$$

であることを課す。

全ての計算格子において、渦中心点の位置決定と旋回条件の判定を行い、最短距離にある渦中心点同士を線で結合することで、渦中心軸を構成する。

2.2 自動車周りの流れ場への応用

圧力断面極小旋回法を自動車の流れ場に応用するためには、一章で述べた課題を解決する必要がある。本節では、筆者らが行った圧力断面極小旋回法の拡張⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾について解説する。

(1) さまざまな形の計算格子への対応

圧力断面極小旋回法では、テイラー展開による近似式(2)の精度を保つため、渦中心点が計算格子の内部にあるという条件を課している。立方体の計算格子の場合、式(4)を用いて容易に判定できる。しかし、自動車周りの流れ場のシミュレーションでは、さまざまな形の計算格子を用いるため、それらの計算格子においても、渦中心点が計算格子の内部にあるか判定する必要がある。

そこで、筆者らは、任意の多面体において、点が内部にあるか外部にあるかを判定する球面投影法⁽¹⁰⁾を採用し、実装した。この方法について簡単に解説する。Fig. 4 に示すように、 n 個の多角形で構成される多面体において、 i 番目の多角形を、判定したい点 Q を中心とする半径 1 の球面に投影する。このとき、投影された球面での表面積を S_i とする。なお、表面積の正負は、点 Q が多角形の表側に位置するか裏側に位置するかで決定する。全ての多角形において、投影された表面積の総和を求め、総和が 0 であれば点は外部、 4π であれば内部にあると理論的に決定できる。ただし、演算中に発生する数値誤差を考慮し、点が多面体の内部にある条件式として、

$$\sum_{i=1}^n S_i > 2\pi \quad (6)$$

であることを課す。

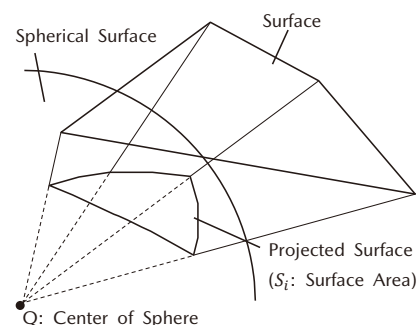


Fig. 4 Projected Surface onto a Sphere with a Radius of 1

(2) 渦中心軸の断片化の抑制

渦の個別同定のためには、渦中心軸の断片化を抑制する必要がある。断片化の原因の一つとして、渦中心軸の構築の際に、渦中心点の物理的情報を考慮していない点が考えられる。圧力断面極小旋回法は、最短距離同士の渦中心点を結合するため、数値誤差などによる誤った渦中心点と結合し、渦中心軸の断片化を引き起こす可能性がある。

そこで、筆者らは、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を開発した。具体的には、結合される渦中心点同士は、類似する物理的情報をもつことが考えられるため、以下に示す二つの角度に着目し、その角度条件を満たす最短距離にある点と結合するとした。Fig. 5 に示すように、各渦軸方向間の角度を θ 、渦軸方向と渦中心軸間の角度を η とし、角度ごとに最大許容角度 θ_{\max} と η_{\max} を設定する。 θ_{\max} を導入する目的は、同じ渦中心軸を構成する渦中心点同士の渦軸の角度の差は、さほど大きくないという点を表現するためである⁽¹¹⁾。 η_{\max} を導入する目的は、数値誤差による渦の中心点の密集によって引き起こされる渦中心軸の非物理的な曲線を防ぐことである。角度の基準である θ_{\max} と η_{\max} を理論的に決定することは困難なため、単純な渦構造である角柱のカルマン渦を用いてパラメータスタディを行い、 $\theta_{\max}=20^\circ$ と $\eta_{\max}=40^\circ$ と決定した。

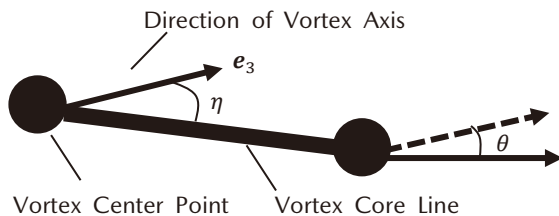


Fig. 5 Definition of Angular to Prevent the Fragmentation of the Vortex Core Lines

3. 結果・考察

圧力断面極小旋回法を拡張した手法（以下、本手法）が、従来手法と比較して有効か検証した結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を解説する。なお、検証に用いる流れ場のデータセットは、数値計算により得られたセダンタイプ周りの時間平均された流れ場とした。

3.1 低圧旋回渦の同定

本手法によって同定された渦中心軸が、低圧旋回渦であるかについて検証を行った。

Fig. 6 に、フロントピラーから発生した渦の可視化結果を示す。コンター図は圧力、矢印は平面上における2次元の速度ベクトル、線は本手法で同定した渦中心軸である。Fig. 6 の赤枠内を見ると、渦中心軸は周囲より圧力が低い部分を通過していることが分かる。更に、渦中心軸近傍の速度ベクトルが回転を表していることから、渦中心軸

近傍の流れは旋回運動をしていることが分かる。これらの結果から、本手法は低圧旋回渦を同定できるといえる。

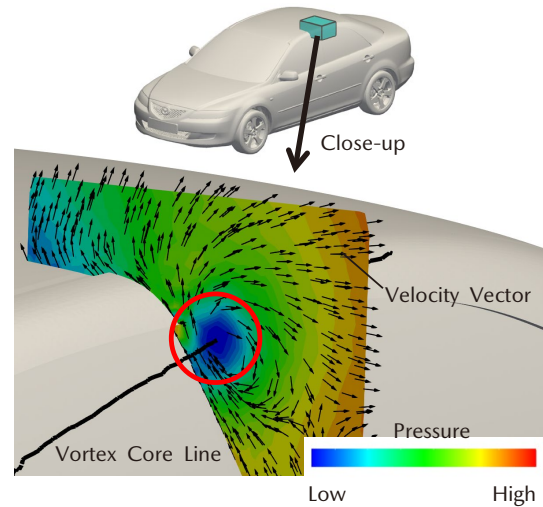


Fig. 6 Pressure Distribution, Velocity Vector and Vortex Core Line around the Front Pillar Vortex

3.2 既知の特徴的な渦の再現性

本手法で同定された渦は、既知の特徴的な渦を再現しなければならない。そこで、本手法がそれらの渦を同定できているか検証を行った。

まず、自動車周りに発生する既知の特徴的な渦を対象に行った検証結果を示す。Fig. 7 に領域型である速度勾配テンソルの第二不変量 $Q^{(12)}$ の等値面と本手法による渦中心軸の同定結果を示す。管状となる Q の等値面は、自動車周りに発生するフロントピラー渦、ボディサイド渦、床下渦、後引き渦といった四つの特徴的な渦⁽²⁾を再現することが知られている。渦中心軸は、特徴的な渦に対応する管状の等値面の中に存在していることが分かる。したがって、本手法は自動車周りに特徴的な渦を同定できるといえる。

次に、フロントタイヤ周りにおける発生する既知の特徴的な渦を対象に行った検証結果を示す。Fig. 8 にフロントタイヤハウス外側における、本手法による渦中心軸の同定結果を示す。渦中心軸の色は回転方向を表しており、主流方向（x方向）の渦度が正の場合は赤、負の場合は青で示している。大文字で示す渦は、主流方向に伸びる渦、小文字で示す渦は主流方向に対して直交する方向に伸びる渦である。主流方向に伸びる渦の位置は、先行研究⁽¹³⁾で同定された渦と定性的に一致し、回転方向も一致することが確認できた。よって、本手法により同定された渦中心軸は、フロントタイヤ周りに特徴的な渦を同定できるといえる。

更に、フロントタイヤ周りの渦と関連する既知の流れ構造を再現しているか検証を行った。渦と関連する流れ構造の抽出には、流線による手法がよく用いられる。その際、シード点とよばれる点を空間に配置することで、

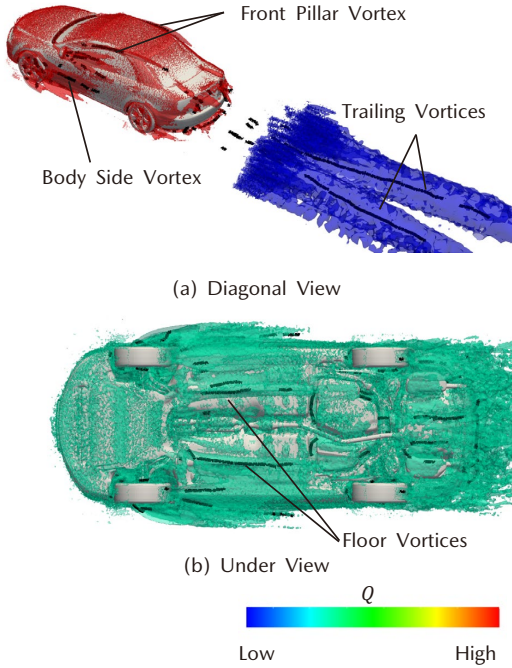


Fig. 7 The Iso-surfaces of Q and the Vortex Core Lines Obtained Using the New Method

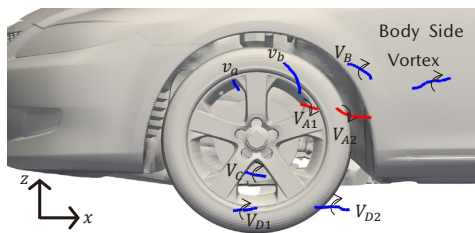


Fig. 8 Vortex Core Lines outside the Front Wheelhouse

シード点を通る流線が可視化される。しかし、シード点の配置には任意性があるため、必ずしも渦に関連する流れ構造を抽出しているとは限らない。そこで、渦中心軸を構成する渦中心点をシード点として流線を可視化する手法を用いた⁽¹⁴⁾。

Fig. 9 に渦 V_{A1} , V_{A2} の渦中心点をシード点とする流線の可視化結果を示す。これらの流線は、タイヤ後方とホイールハウスの隙間から始まっており、タイヤとホイールハウスからの吹き出しを示している。この結果は、先行研究⁽¹³⁾ での結果と一致していることから、本手法は渦に関連する既知の流れ構造を再現できることが確認された。

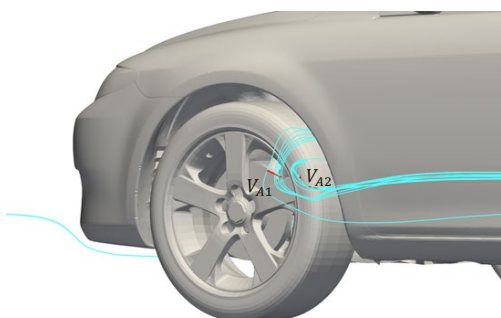
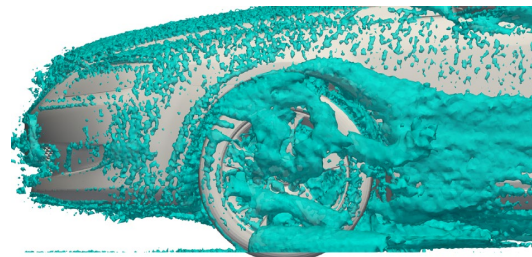


Fig. 9 Streamlines Passing through Vortices V_{A1} and V_{A2}

3.3 本手法と従来手法の比較

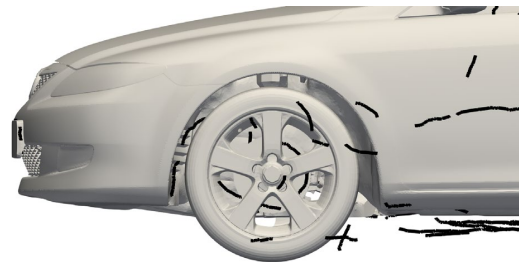
Fig. 10 に、従来手法である領域型の速度勾配テンソルの第二不変量 Q 、渦中心型でよく用いられる Reduced Velocity 法⁽¹⁵⁾ 及び本手法をフロントタイヤ周りに適用した結果を示す。領域型である Q の等値面は、自動車の表面にまばらに分布し、更に管状の等値面同士が連結していることが分かる。渦中心型の Reduced Velocity 法は、渦中心軸が断片的に分布していることが分かる。更に、ボディサイドの渦を同定することができていない。この原因として、Reduced Velocity 法は速度をそのまま渦の定義に用いているため、ガリレイ変換不変性を満たさず、一様流中の渦の同定が困難なためと考えられる。一方、本手法はボディサイド渦を同定できている。また、本手法の渦中心軸の本数は、Reduced Velocity 法に対して 8% であった。よって、本手法は、渦中心軸の断片化を抑制できているといえる。



(a) Q -criterion Method



(b) Reduced Velocity Method



(c) New Method

Fig. 10 Results of Vortex Identification around the Front Wheel by Previous and New Methods

4. おわりに

本稿では、空気抵抗に関連する低圧旋回渦の同定手法を開発するために、圧力断面極小旋回法を自動車周りの流れ場に適用できるよう拡張し、その有効性を検証した結果について解説した。時間平均された自動車周りの流

れ場に本手法を適用し、以下の結果を得た。

- ・本手法で同定された渦中心軸は、周囲より圧力の低い領域を通過し、その近傍流れは旋回運動を伴っていた。よって、本手法は低圧旋回渦を同定できることが確認できた。
- ・本手法は、自動車周り及びフロントタイヤ周りに発生する既知の特徴的な渦を同定できることが確認できた。また、渦中心点をシード点とする流線を可視化することで、渦に関連する特徴的な既知の流れ構造を再現できることが分かった。
- ・従来手法と比較した結果、本手法で同定された渦中心軸は、渦同士が連結することなく、渦中心軸の断片化が抑制されていることが確認できた。

以上の結果より、本手法は、自動車空力の分野で一般的に用いられる従来手法と比較して、空気抵抗に関連する渦をよりよく同定できる手法といえる。

今後の課題は、空気抵抗に影響を与える物理量を用いて、各渦を定量化することである。そして、データ分析手法を用いることで、渦と空気抵抗のモデル式を構築し、デザインと空気抵抗低減の両立をサポートしていく。

なお、本手法に関する一連の研究は、広島大学次世代自動車技術共同研究講座・空気力学研究室のテーマとして実施されたものであり、多大なご協力をいただいた中島卓司准教授、ご助言頂いた陸田秀実教授、農澤隆秀客員教授に感謝申し上げます。

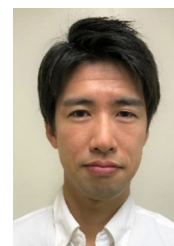
参考文献

- (1) 自動車技術ハンドブック編集委員会：自動車技術ハンドブック 1 基礎・理論編，東京，自動車技術会，p.250 (2004)
- (2) 農澤隆秀ほか：自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造 第二報 セダン車体の特徴的な流れ構造，日本機械学会論文集 B 編，Vol.75，No.757，pp.1807-1813 (2009)
- (3) 中村優佑ほか：デザインと空気抵抗低減の両立に向けた新しい渦同定手法，自動車技術，Vol.74，No.4，pp.30-35 (2020)
- (4) 三浦英昭ほか：一様等方乱流における低圧力旋回渦の同定と可視化，ながれマルチメディア，Vol.17，No.3 (1998)
- (5) Tobias Günther et al.: The state of the art in vortex extraction, Computer Graphics Forum, Vol.37, No.6, pp.149-173 (2018)
- (6) Shigeo Kida et al.: Swirl condition in low-pressure vortices, Journal of the Physics Society of Japan, Vol.67, No.7, pp.2166-2169 (1998)
- (7) Yusuke Nakamura et al.: Identification of the vortex around a vehicle by considering the pressure minimum, Journal of Visualization, Vol.5, No.23, pp.793-804 (2020)
- (8) Yusuke Nakamura et al.: Visualization of vortex core lines around automobile front wheels using the sectional-pressure-minimum-and-swirl method, 19th International Symposium on Flow Visualization (2021)
- (9) 中村優佑：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，広島大学大学院工学研究科博士論文 (2022)
- (10) 長島忍：球面投影法による多面体の内外判定方法，情報処理学会論文誌，Vol.27，No.7，pp.744-746 (1986)
- (11) David C. Banks et al.: A predictor-corrector technique for visualizing unsteady flow, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.1, No.2, pp.151-163 (1995)
- (12) J. C. R. Hunt: Vorticity and Vortex Dynamics in Complex Turbulent Flows, Transaction of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol.11, No.1, pp.21-35 (1987)
- (13) Keigo Shimizu et al.: Visualization of flow structures around the front wheel of a sedan-type automobile, 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (2017)
- (14) Alexander Wiebel et al.: Eyelet Particle Tracing - Steady Visualization of Unsteady Flow, Proceedings of IEEE Visualization, pp.607-614 (2005)
- (15) David Sujudi et al.: Identification of swirling flow in 3-D vector fields, 12th Computational Fluid Dynamics Conference, pp.792-799 (1995)

■ 著 者 ■



中村 優佑



清水 圭吾