

プラズマアクチュエータを用いた翼流れ剥離制御における 過渡的な流れの分析に向けた渦構造分析手法の提案

Proposing of analysis method of vortex structures toward clarifying tendency of transient flow
under flow control with plasma actuator

- 小川拓人, 東理大・院, 東京都 葛飾区 新宿 6-3-1, E-mail : 4418701@ed.tus.ac.jp
立川智章, 東理大, 東京都 葛飾区 新宿 6-3-1, E-mail : tatsukawa@rs.tus.ac.jp
藤井孝藏, 東理大, 東京都 葛飾区 新宿 6-3-1, E-mail : fujii@rs.tus.ac.jp

Takuto Ogawa, Tokyo University of Science, 6-3-1, Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo, Japan

Tomoaki Tatsukawa, Tokyo University of Science, 6-3-1, Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo, Japan

Kozo Fujii, Tokyo University of Science, 6-3-1, Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo, Japan

The overall objective is to establish a quantitative analysis method of vortex structures for large-scale numerical data with a lower spatial resolution than DNS. In this study, we proposed a method for identifying fine scale eddies by extracting vortex filaments from numerical data. The analysis method was applied to the numerical data obtained by actual LES to quantitatively evaluate the fine scale eddies. Vortex filaments were successfully extracted from the numerical data obtained by LES. In addition, the spatial distribution and characteristics of the coherent fine scale eddies were analyzed.

1. 序論

渦は流れの現象理解において極めて重要な要素であり, 工学分野においては流体機器の性能や安全性を評価するときに欠かせない分析対象の一つである. 一般的に, 実験や数値シミュレーションで得られた数値データから渦構造を同定する際には, 速度勾配テンソルの第二不変量や圧力ヘシアンなどの指標が用いられる. 同定された渦構造は可視化され, 流速や密度などの汎用性の高い指標と併せた定性的な評価が行われることが多い. 一方, 統計処理の難しい非定常な流れや複雑な乱流運動を厳密に評価する際には, コヒーレント微細渦や乱流要素渦などと呼ばれる極小スケールの渦構造の特性を定量的に評価することが求められる. Wang ら [1] は, 一様等方性乱流中におけるコヒーレント微細渦の分布や傾向を評価するために, 速度勾配テンソルの第二不変量と渦度ベクトルを用いた Vortex filament の抽出手法を提案し, 個々の微細渦の主流に対する角度などを分析している. また Kida ら [2] は, 一様等方性乱流中における乱流要素渦の時間的な変化を評価するために, 圧力ヘシアンを用いて抽出された渦軸の時系列的な移動を推定する自動追跡スキームを提案し, 乱流要素渦の分裂などを分析している. しかし, いずれの手法も極小スケールの渦構造の解像に十分な空間・時間解像度を条件とした Direct Numerical Simulation (DNS) で得られる数値データの取得を前提としている. そのため, 相対的に時間・空間解像度が低い Large Eddy Simulation (LES) など得られる数値

データに直接適用することが難しい. また, いずれの手法も非常に小さい時間ステップの数値データを分析の対象にしている. そのため, 大規模な時間ステップの数値データを分析の対象とするには, より低い計算コストの分析手法が求められる. そこで, DNS より相対的に低い空間・空間解像度を持つ大規模ステップの数値データを対象とした渦構造の定量的分析手法の確立を目指す. 本研究では, 渦構造から Vortex filament を抽出し, 微細渦を同定する手法の提案を行う. また実際の LES で得られた数値データに提案する分析手法を適用して, 微細渦を定量的に評価する.

2. 渦構造分析手法の提案

2.1 Vortex filament の抽出と微細渦の同定

以下の (1) ~ (5) に, 渦構造から Vortex filament を抽出し, 基本的な渦構造である微細渦を同定する手法を示す. なお, 抽出に用いる数値データは, 事前に実施される数値計算で得られているものとする.

(1) 各格子点上における速度勾配テンソルの第二不変量 (Q^*) を計算する. Q^* は 3 次元空間における座標成分 x_N , 速度成分 u_N ($N = 1, 2, 3$) で表される 2 階の速度勾配テンソル D_{ij} の対称成分 S_{ij} と非対称成分 Ω_{ij} を用いて,

$$Q^* = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}^2 - S_{ij}^2) \quad (1)$$

のように表される．なお，

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

$$D_{ij} = S_{ij} + \Omega_{ij} \quad (4)$$

である． S_{ij} は変形速度テンソルとも呼ばれ，流体要素の変形運動を表す指標である． Ω_{ij} は回転速度テンソルとも呼ばれ，流体要素の回転運動を表す指標である．本研究では，回転運動が卓越する $Q^* > 0$ をとる領域を渦構造と定義する（図 7a）．また， Q^* 値が空間的に極大値をとる参照点を微細渦の中心とする．なお， $Q^* \leq 0$ となる領域についても非渦構造と定義し，渦構造と同様に以下 (2) ~ (5) と同等の処理を行うが，本研究は初期的な検討のため非渦構造については議論しない．

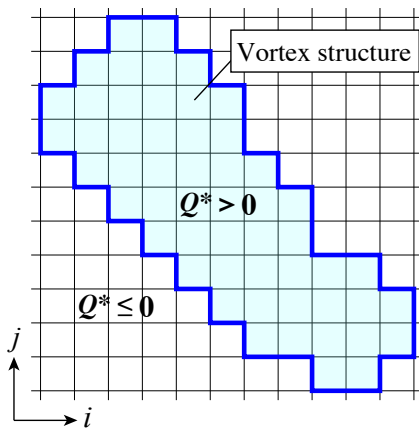
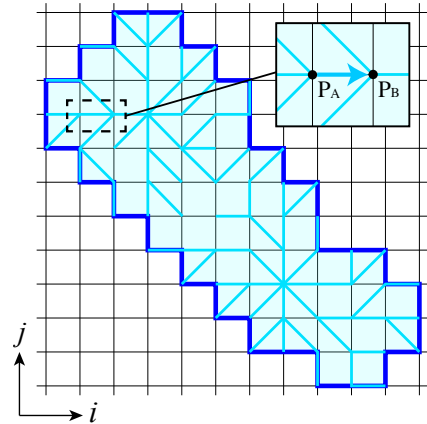


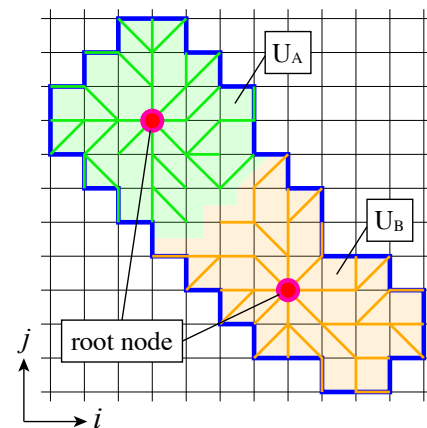
図 1 The definition of the vortex structure with the second invariant of the velocity gradient tensor (Q^*).

(2) 渦構造に属する隣接した格子点同士の Q^* 値の大小関係を計算する．ある格子点 P_A に注目する． P_A を囲む近傍点 (n 次元構造格子の場合，最大 $n^3 - 1$ 点) の中で Q^* 値が P_A より高く，かつ最も高い点を P_B とする．ここで，格子点をグラフ構造におけるノードとして捉え， P_B を P_A の親ノード， P_A を P_B の子ノードとしてエッジを張る（図 2a）．以後，個々の格子点をノードとして捉える．この処理を渦構造に属する全てのノードで行うと，複数の木構造が生成される（図 7b）．個々の木構造を，渦構造に属する基本構造としてユニット $U (\{U_i | i = 1, 2, 3, \dots\})$ と定義する．親ノードを持たないノードは Q^* 値の局所最大点であり，ユニットの根ノードとなる．子ノードを持たないノードは Q^* 値の局所最小点を含み，ユニットの葉ノードとなる．

ここまでの一連の処理は，山脈地形を個々の山々に分割することに類似している． $Q^* > 0$ をとる渦構造は特定の標高を上回る山脈地形と同義であり，ユニットは山脈に属する個々の山々と同義である．また枝は，任意の山の地点（ノード）から近傍探索によってできるだけ早い手前で稜線に到達し，最終的に頂点に到達する経路と同義である．



(a) The producing of the edges with the magnitude relationship between the Q^* value on the P_A and P_B .



(b) The producing of the tree structures (units).

図 2 The producing of the tree structures (units) in each vortex structure.

(3) 渦構造に属する全てのユニットにおいて， Q^* の経路積分値が最大となるような経路を抽出する．ここで，ユニット U_A に注目する． U_A の葉ノードの集合を $L_A (\{L_{Ai} | i = 1, 2, 3, \dots\})$ とする． L_A から取り出した最大 2 つの葉ノード L_{Ai1}, L_{Ai2} から根ノード R_A までの経路積分を行う．経路積分値 I_{EA1}, I_{EA2} が最大となる経路 P_{EA1}, P_{EA2} を抽出する（図 3，赤線）．また，得られた経路における 2 つの葉ノードを以後端ノード E_{A1}, E_{A2}

とする。

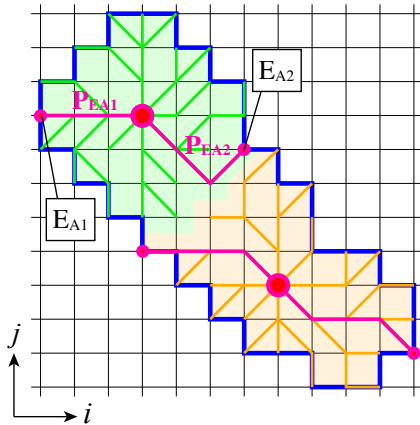


図 3 The path selection based on the line integral of the Q^* in each unit.

(4) 渦構造に属する全ての隣接するユニット間において、 Q^* の経路積分値が最大となるような経路を抽出する。任意に選択した 2 つのユニットにおいて、いずれかのノードが隣接しているとき 2 つのユニットは隣接関係にあると定義する。ここで、ノード N_A と N_B を介して隣接関係にある 2 つのユニット U_A , U_B に注目する。 U_A の根ノード R_A から N_A 、さらに N_B から R_B までの経路積分を行う。なお、 N_A , N_B は必ずしも葉ノードとは限らない。経路積分値 I_{AB} が最大となる経路 P_{AB} (図 4, 赤線) を抽出する。

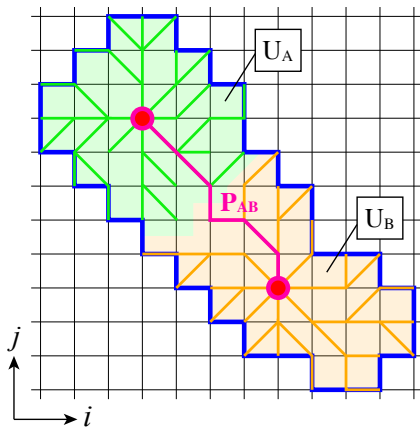


図 4 The path selection based on the line integral of the Q^* in the adjacent units.

(5) 渦構造に属する全ての隣接するユニット間において、接続判定を行う。改めて、隣接関係にある 2 つのユニット U_A , U_B に注目する。(4) で抽出された経路 P_{AB} に属するノード N_A , ノード N_B から中点となるノード B_{AB} の位置を計算する。 B_{AB} に最も近い U_A , U_B の端ノードをそれぞれ $E_{A'}$, $E_{B'}$ とする。 $E_{A'}$, $E_{B'}$ からそれぞれ

の根ノードまでの経路 $P_{EA'}$, $P_{EB'}$ における Q^* 値の経路積分値 $I_{EA'}$, $I_{EB'}$ と P_{AB} の経路積分値 I_{AB} を比較する。 $I_{EA'}$, $I_{EB'}$ のいずれより I_{AB} が大きいとき、 $P_{EA'}$, $P_{EB'}$ を経路から削除し、 P_{AB} を新しい経路として追加する(図 5)。なお、新しい経路の追加によって分岐が発生する場合は、追加処理を中断し既存の経路を保持する。

この処理を全ての隣接するユニット間で行う。なお、隣接するユニットが複数存在すると、経路の更新が注目するユニットの順序に依存する。そのため、前述した P_{AB} に相当する経路をあらかじめ渦構造に含まれる全ての隣接ユニットで計算し、その経路積分値が高いものから順に処理を行う。以上の処理で抽出された経路を、Vortex filament と定義する。また、Vortex filament が通過するユニットの集合を微細渦と定義する。図 5 の渦構造は、2 つのユニット、1 つの微細渦で構成される。同一の形状を持つ渦構造でも、 Q^* 値の分布に応じてユニットや微細渦の個数は異なる。

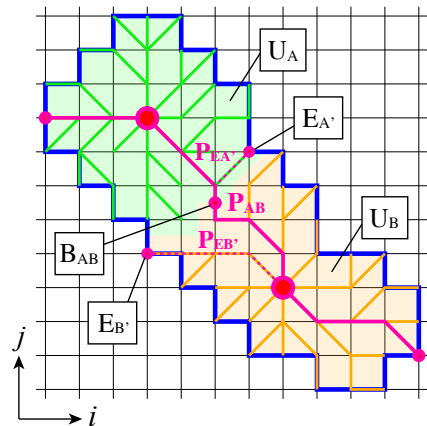


図 5 The producing of the vortex filament.

2.2 微細渦を用いた渦構造分析

2.1 章で抽出された微細渦とそれに属する Vortex filament における物理量を計算する。計算された物理量は、微細渦の代表量として分析に用いる。本研究では、微細渦からは体積 V と Q^* 値を指標とした重心 G を、Vortex filament からはその長さ l と各方向長さ l_x, l_y, l_z を計算している。なお、渦度などのベクトル量はそのまま積分するとその量を過小評価してしまう場合がある。そのため、ベクトル量については個々の次元を正負にそれぞれ分割して積分計算を行う(例えば、 x 方向渦度 ω_x については $+x$ 方向渦度 ω_{+x} と $-x$ 方向渦度 ω_{-x} に分割する)。

3. 分析対象

DBD プラズマアクチュエータを用いた翼剥離制御流れの数値計算データを分析対象とする。数値計算においては C 型構造格子を用い、出力されるデータも格子点の座標に依存している。種々の計算条件・妥当性については、既存研究 [3,4] を参照されたい。翼型は NACA0015 翼を用い、スパン方向が一様である 2 次元翼形状とする。DBD プラズマアクチュエータは、剥離点近傍となる翼上前面縁 5% にスパン方向一様に設置する。流れ場はレイノルズ数 $Re = 6.3 \times 10^4$ の一様流とする。このレイノルズ数は、翼弦長 $c \approx 0.1[\text{m}]$ 、主流速度 $U_\infty \approx 10[\text{m/s}]$ に相当する。マッハ数は $M_\infty = 0.2$ 、比熱比は空気の $\gamma = 1.4$ 、プラントル数は $Pr = 0.72$ とする。迎角は失速迎角 11° より高い 14° とする。

図 6 に、数値計算によって得られた流れ場を示す。渦構造の可視化には、速度勾配テンソルの第二不変量の等値面 ($Q^* = 50$) を用いている。等値面は主流方向速度で面塗りされている。初期状態の翼流れは剥離しており、DBD プラズマアクチュエータによる剥離制御に伴い付着が促進している。既存研究 [4] において、翼流れの付着による翼の空力特性の向上が確認されているが、流れのどの要素が付着を促進させているかについては必ずしも明らかにされていない。本研究では初期的検討として、剥離状態と付着状態それぞれにおける渦構造の特徴について提案手法を用いて分析する。

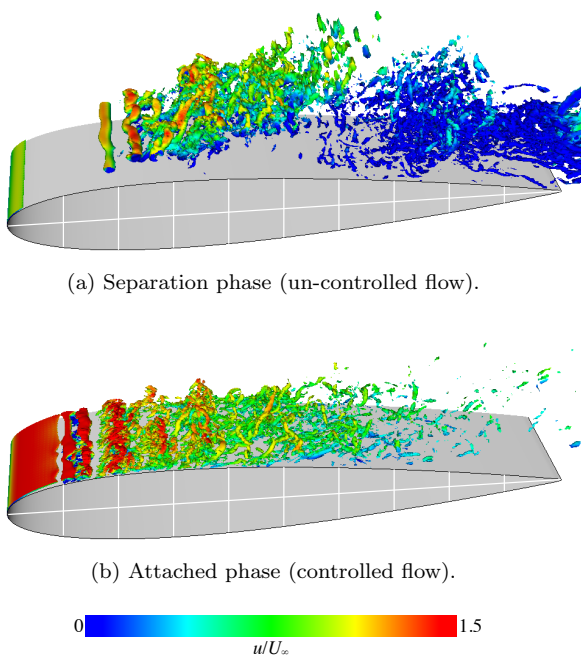


図 6 The vortex structures around the NACA0015 airfoil ($Q^* = 50$).

4. 結果

4.1 Vortex filament の可視化

図 7 に、翼流れデータから抽出された Vortex filaments を示す。色付けは個々の Vortex filament を判別するものであり、物理的意味を持たない。図 6 に示された渦構造に対応して Vortex filament が分布している。また、Vortex filament が属する渦構造も確認できる。なお、渦構造のグラフィック描画時に格子点間の物理量のスプライン補間処理が行われているため、必ずしも渦構造が描画されている箇所に Vortex filament が存在しているとは限らないことに注意されたい。

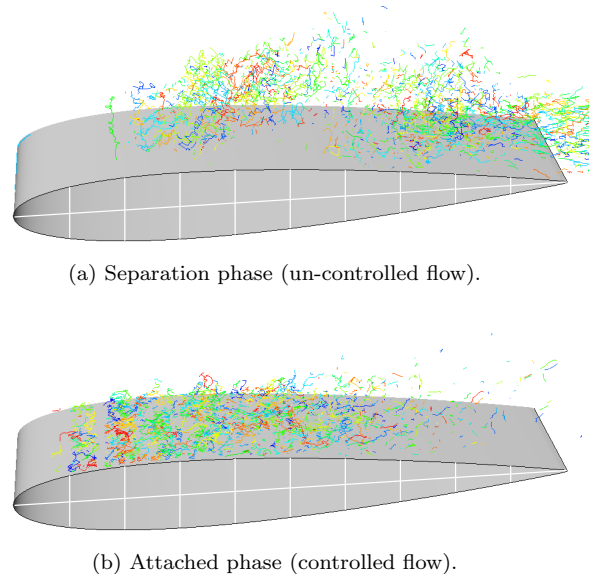
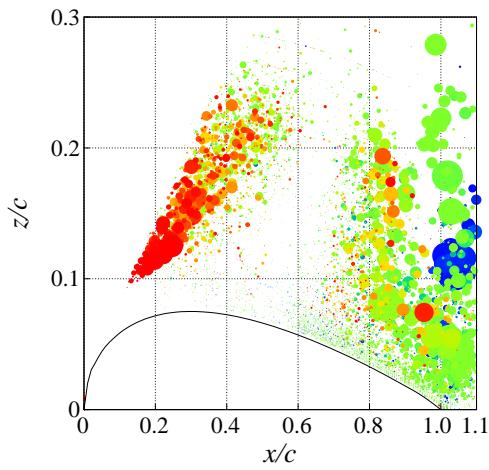


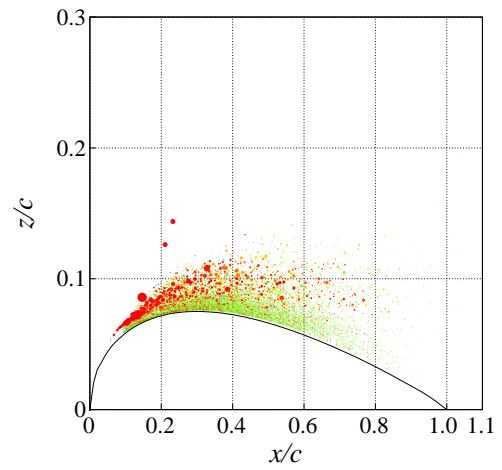
図 7 The vortex filaments extracted from the numerical data.

4.2 微細渦を用いた渦構造分析

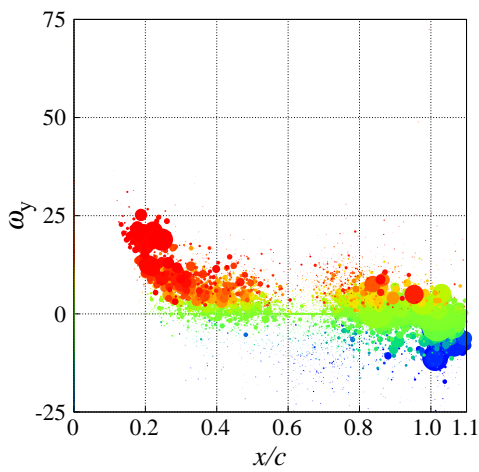
図 8, 9 に、剥離状態と付着状態における微細渦の分布とその特性を示す。図 8a, 9a の下部に描画された曲線は NACA0015 翼上面である。分布している円の中心は個々の微細渦の重心を、円の大きさは微細渦の体積を表している。円の色付けは、微細渦の Vortex filament に沿って線積分されたスパン方向渦度 ω_y と渦度ベクトルの絶対値 $|\omega|$ の比をとったスパン方向渦度比 $\omega_y/|\omega|$ である。なお、微細渦はそれぞれの状態における一定の時間範囲（翼弦長 c と主流速度 U_∞ で表される c/U_∞ の範囲）から等間隔に取り出した 10 ステップの瞬間場から抽出されたものである。剥離状態、付着状態ともに流れ場が準定常状態であるため、微細渦の空間分布が一定の領域に留まっている。剥離状態では、剥離剪断層に沿って微細渦が分布している。前縁近傍の微細渦はスパン方向渦度とスパン



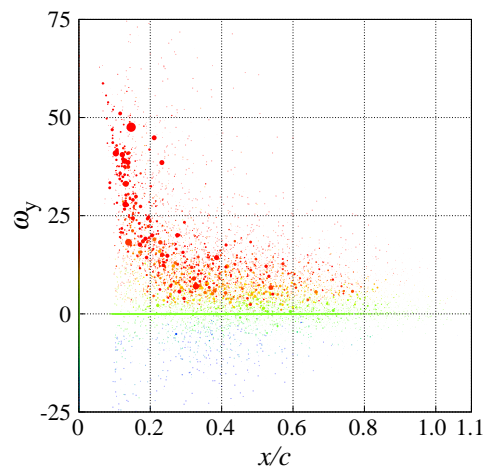
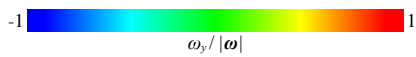
(a) Spanwise distribution of the vortex structures.



(a) Spanwise distribution of the vortex structures.



(b) Spanwise vorticity for each vortex structure.



(b) Spanwise vorticity for each vortex structure.

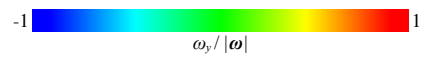


図 8 The distribution of the fine scale eddies colored with the ratio of the spanwise vorticity to the vorticity magnitude at the separation phase.

図 9 The distribution of the fine scale eddies colored with the ratio of the spanwise vorticity to the vorticity magnitude at the attached phase.

方向渦度比ともに大きい、後縁に移流するにつれ小さくなる。中腹の微細渦は、前縁・後縁近傍と比較して数が非常に少なく、かつ体積が非常に小さいことがわかる。後縁近傍の微細渦は、スパン方向渦度とスパン方向渦度比ともに非常に小さく、かつ体積が大きい。附着状態では、剥離状態より翼面に近い領域に微細渦が分布している。いずれのコード長においても、剥離状態と比較して体積が小さく、またスパン方向渦度とスパン方向渦度比が大きい微細渦が分布している。また、剥離状態で確認された後縁付近における低いスパン方向渦度を持つ微細渦は確認されない。このように、提案手法を用いることで、一定の時間範囲にまたがる流れの特徴を得ることができる。非定常な流れに適用することで、微細渦の挙動や特性の変化などを追跡することができる可能性がある。今後より様々な流れ場を分析対象にすることで、提案手法の妥当性などについて検討していく。

5. 結論

本研究では、渦構造から Vortex filament を抽出し、微細渦を同定する手法の提案を行った。また、実際の LES で得られた数値データに分析手法を適用して、微細渦を定量的に評価した。その結果、LES で得られた数値データから適切に Vortex filament を抽出することができた。

微細渦を用いた渦構造分析手法においては、従来の渦構造の可視化では分析が難しかった微細渦の空間分布や特性について分析することができた。今後は、提案手法を様々な流れ場に適用することで手法の妥当性などをより詳しく検証する。また、提案手法の改良を進め、個々の微細渦の時間的な変動を分析可能とする。

参考文献

- (1) Wang, T., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., "Coherent Fine Scale Eddies in Turbulence Transition of Spatially-Developing Mixing Layer," International Journal of Heat and Fluid Flow 28, (2007), pp. 1280-1290.
- (2) Makihara, T., Kida, S and Miura, H., "Automatic Tracking of Low-Pressure Vortex," International Journal of Physical Society of Japan, Vol. 71, No. 7, (2002), pp. 1622-1625.
- (3) Sato, M., Aono, H., Yakeno, A., Nonomura, T., Fujii, K., Okada, K., and Asada, K., "Multifactorial Effects of Operating Conditions of Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator on Laminar-Separated-Flow Control," AIAA Journal, Vol. 53, No. 9, 2015, pp. 2544-2559.
- (4) Ogawa, T., Asada, K., Tatsukawa, T. and Fujii, K., "Analysis of Transient Flows over an NACA0015 Airfoil toward Better Flow Control Authority of Plasma Actuators," ETC2019 17th European Turbulence Conference, No. 474, (2019).