

# 3次元ベクタ場比較可視化のための流線選択

理学専攻 情報科学コース 澤田 頌子 (指導教員：伊藤 貴之)

## 1 はじめに

一般的に数値流体力学 (CFD) では、異なる条件で繰り返しシミュレーションを実施するため、大量の結果が生成される。これらの結果を比較分析することで、流体現象の理解促進やシミュレーションの精度向上に貢献できる。本論文では、異なる条件で実行された2つの CFD 結果を効率的に比較するために、流線を用いた比較可視化手法を提案する。流線とは、速度ベクトルが接線となるように描いた曲線である。具体的には、各条件下で生成される流線のうち、重要なものを自動選択し、同一3次元空間に重ねて表示する。最終的にはこの結果を仮想現実 (VR) 空間上で観察する。これにより、条件変更にもなう CFD 計算結果の変化を効率的に発見できることが期待される。さらに本論文では、複数の風向きで実行した航空機周辺の CFD 結果に本手法を適用した事例を紹介する。

## 2 関連研究

比較に特化した流体可視化の手法はこれまでもいくつか提案されてきた。しかし多くの手法がスカラ場を対象としており、複数の結果画像を並べて表示して、ユーザーに見比べさせる可視化手法である。単一のベクタ場を対象とした可視化手法は多数存在する。中でも、可視化する意義のある重要な流線を定義し可視化する分野は流線選択と呼ばれ、広く研究されている。文献 [2] は、遮蔽を考慮した視認性の高い流線選択手法である。また文献 [3] は、視点に応じて、うねりの大きい流線の視認性の維持を目指した手法である。

流線を用いたベクタ場を明確に比較するための手法として、文献 [1] があげられる。この手法では、異なる条件で実施した2つの CFD 結果から生成される流線を3次元空間に重ねて表示することで、条件変更の影響を明瞭化した。ただしこの手法では、表示する流線の開始点を対話的に1つずつ設定する必要がある。そのため操作が煩雑になるだけでなく、適切な開始点設定のためには知識や経験が必要になるという問題点がある。

## 3 提案手法

本手法では2つの3次元 CFD 結果を比較するための流線選択手法を提案する。本手法が対象とする CFD データは格子構造で構成されており、そのすべての格子点を流線の開始点とした。本手法では2つの CFD 計算結果を同一3次元空間に重ねて可視化するため、1つの格子点から各条件の流線が1本ずつ生成される。これ以降、同一点を開始点とするこの2本の流線をまとめて、流線ペアと呼ぶこととする。本手法の流線選択は、流線ペアを自動選択することを意味する。

図1に流線自動選択の処理手順を示す。

まず、すべての流線ペアの中からランダムに  $N_1$  組の流線ペアを選択する。続いて  $N_1$  組の流線ペアについて、視点に依存しない評価基準に基づいて、流線ペアのスコア  $S_i$  を算出する。具体的には、形状エントロ

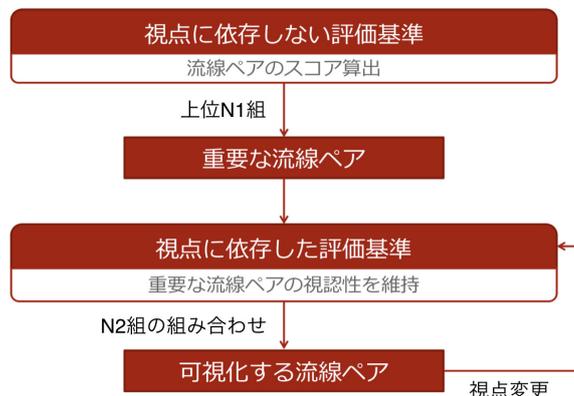


図1: 流線自動選択の処理手順

ピー  $E_{i_1} + E_{i_2}$  と流線ペア間の差分  $D_i$  という2つの値を用いてスコア算出を行う。スコア  $S_i$  の上位  $N_2$  組 ( $N_1 > N_2$ ) の流線ペアを、重要な流線ペア群として保存する。そしてこの中から、視点に依存した評価基準に基づいて、重要な流線ペアの視認性を維持できるような  $N_3$  組 ( $N_2 > N_3$ ) の流線ペアの組み合わせを決定する。この  $N_3$  組を3次元空間に描画する。視点を変更して再度流線選択を実行すると、視点に依存した評価基準は再計算される。そして選択された流線ペアを Oculus Rift 上で可視化する。なお以後の説明において、流線は多数の有向線分が連結された折れ線で近似生成されているものとする。

### 3.1 視点に依存しない評価基準

本節では視点に依存しない評価基準について説明する。 $i$  番目の流線ペアのスコア  $S_i$  を式 (1) により算出する。

$$S_i = \alpha \frac{(E_{i_1} + E_{i_2}) - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + (1 - \alpha) \frac{D_i - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (1)$$

形状エントロピー  $E_{i_1} + E_{i_2}$  とは、流れ場全体を把握可能な流線を選択するための値で、流線ペア間の差分  $D_i$  とは、条件変更の影響が大きい流線を選択するための値である。この2つの値を min-max 法で正規化して線形和をとった値を流線ペアのスコア  $S_i$  とする。

なおこの計算は、CFD 結果が与えられたとき一度だけ実施すればよい前処理である。

#### 3.1.1 形状エントロピー

形状エントロピーは、流れ場の様子を大域的に把握可能な流線ペアを選択するための値である。 $E_{i_1}$  と  $E_{i_2}$  は、 $i$  番目の流線ペアの流線それぞれの形状エントロピーで、この2つは独立に計算を行う。そこで本手法では、単一の CFD 結果に対する Ma らの手法 [3] を参考にした。これによって視認性の低い短い流線や、流れの特徴を捉えていない直線的な流線の優先度を下げ、長さとうねりの大きい流線の優先度を上げる。

具体的には、流線を構成するすべての有向線分の速度と向きをばらつきを、エントロピーの公式 (2) を用いて算出した。式 (2) における  $x$  は、速度と向きを変

量とする 2 変量ヒストグラムのビンである。

$$E_{ij} = - \sum_x p(x) \log(x) \quad (2)$$

### 3.1.2 流線ペア間の差分

本項では流線ペア間の差分  $D_i$  について述べる。これは条件変更の影響を大きく受けている流線を選択するための値である。流線ペアの 2 つの流線が大きく離れているほど、大きな値になる。本論文における実装では、流線を構成する各線分の両端点を流線ペア間で照合した。一方の流線のある端点について、他方の流線の中で最も 3 次元距離の近い端点を特定し、その 2 点間の距離を算出する。全ての端点について同様に距離を算出し、その平均をこの流線ペアにおける差分  $D_i$  とする。

### 3.2 視点に依存した評価基準

本項では視点に依存した評価基準について説明する。重要な流線ペアの視認性を維持するために、画面上での流線どうしの重なりを最小にする流線ペアの組み合わせを決定する。

まず、スコア  $S_i$  が 1 位の流線ペアを描画する。そして  $S_i$  が 2 位の流線ペアから降順に、当該流線ペアを構成する線分の端点について、既に描画されている流線ペアの中で、最も画面上での距離の近い端点を特定し、その 2 点間の 2 次元距離を算出する。全ての端点について同様に距離を算出し、この距離が閾値  $\delta$  以下の端点が閾値  $\lambda$  以上存在すれば、当該流線ペアは描画しない。これを  $N_3$  組の流線ペアが描画されるまで繰り返す。

### 3.3 VR 空間上における表示

本節では VR 空間上における流線選択結果の表示について説明する。本手法で適用するデータは 3 次元の CFD 結果であるため、2 次元のディスプレイ上で結果を観察すると、視認性の低下による情報理解の欠落は避けられない。より正確で詳細な比較を可能にするため、VR 空間上に結果を表示することを提案する。流線ペアを選択した後、選択した流線ペアの頂点座標を JSON ファイルに書き出す。これを Unity で読み込み、Oculus Rift を用いて表示する。流線の奥行き方向の位置関係の把握を容易にするため、連結した円柱で流線を描画した。

## 4 実行例

### 4.1 適用事例

本節では、迎え角が異なるケースにおけるデルタ翼の CFD 計算結果のデータを適用した事例を紹介する。デルタ翼とは、高速飛行に適した、航空機の翼の一種である。また迎え角とは、図 2 に示すように、翼弦線と飛行方向がなす角のことで、端的に言うと、流れに対して機体がどれほど傾いているかを示す値である。本論文では、迎え角を 20 度、27 度および 33 度に設定して実行した結果を比較する。なお  $N_1 = 10000$ 、 $N_2 = 10000$ 、 $N_3 = 20$  とした。

### 4.2 可視化結果

本手法を用いて流線ペアを自動選択した結果を図 3 に示す。図 3(左) は、迎え角 20 度の場合の流線をピ

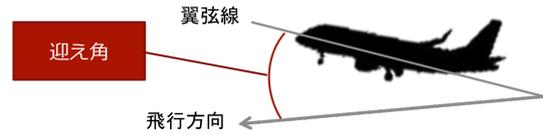


図 2: 迎え角

ンクで、27 度の場合の流線をシアンで描画した。図 3(右) は、迎え角 20 度の場合の流線をピンクで、33 度の場合の流線をシアンで描画した。図 3(左) の結果では、ピンクの流線もシアンの流線も穏やかなうねりの流線が目立つが、図 3(右) では、シアンの流線だけに激しいうねりがある。デルタ翼は、極度に迎え角が大きくなると翼の後方に逆流が発生し、機体が危険な状態に陥ることが知られている。この結果においても、迎え角最大の 33 度の結果のみに逆流を確認できる。これは航空機の性能予測の観点からみても、意義のある結果といえる。

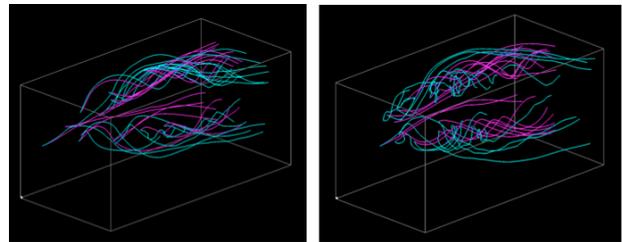


図 3: 実行例

## 5 まとめと今後の課題

本論文では、条件を変更して実施した 2 つの 3 次元 CFD 計算結果の比較可視化のために、双方の計算結果から流線ペアを生成し、その中から比較に適した重要な流線ペアを自動選択する手法について紹介した。本手法によって条件変更によって生じた差分を明瞭化し、より効率的な比較が可能になると考えられる。

今後の課題として、本手法を異なるデータへ適用して検証することや、ユーザインタフェースの改良、さまざまな格子構造のデータへの対応を考えている。

## 6 謝辞

本論文を進めるにあたり、東北大学流体科学研究所三坂孝志助教、大林茂教授にはデルタ翼の CFD 結果を提供していただきました。また Monash 大学 Dr. Tobias Czuderna, Dr. Kingsley Stephens には、VR 部分の実装についてご指導いただきました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Hattanda, A. kuwana, T. Itoh, A Comparative Visualization for Flow Simulation of Airport Wind, NICOGRAPH international, 2013.
- [2] S. Furuya, T. Itoh, A Streamline Selection Technique Overlaying with Isosurfaces, Topology-Based Methods in Visualization, 2017.
- [3] J. Ma, C. Wang, C. Shene, Coherent View-Dependent Streamline Selection for Importance-Driven Flow Visualization, Visualization and Data Analysis 2013 (SPIE 8654), 865407, 2013.