3次元流体シミュレーション結果比較可視化のための流線選択

澤田　頌子† 　伊藤　貴之† 　三坂　孝志†† 　大林　茂††

† お茶の水女子大学　〒 112–8610 東京都文京区大塚 2-1-1
†† 東北大学流体科学研究所　〒 980–8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
E-mail: †{shoko,itot}@itolab.is.ocha.ac.jp, ††misaka@edge.ifs.tohoku.ac.jp, †††obayashi@ifs.tohoku.ac.jp

あらまし　目に見えない流体を扱う分野において，シミュレーションと可視化は非常に重要な役割を果たしている．科学技術分野での多くの現場において，流体力学計算 (CFD) にもとづくシミュレーションが異なる条件で繰り返し実施され，大量の CFD 計算結果がデータベースに蓄積される．これらの計算結果を比較分析することで，流体現象の理解促進や，流体シミュレーションの精度向上に貢献できる．本報告では異なる条件で実行されて蓄積された複数の CFD 計算結果を効率的に比較するために，流線を 3 次元空間に重ねて表示する比較可視化の自動化手法を提案する．具体的には流れ場全体を大域的に把握しつつ，差分が大きい箇所に注目できる流線群を自動選択して可視化する．これによって条件変更の影響を確実に発見できる，効率的な比較可視化を目指す．

キーワード　可視化，シミュレーション

1. 概　　要

現在計算機が発達し，大規模な計算が容易になったことから，さまざまな分野においてコンピュータによるシミュレーションが行われている．その中でも特に，目に見えない流体を扱う分野において，シミュレーションと可視化は非常に重要な役割を果たしている．コンピュータを用いて流体の数値解析やシミュレーションを行う技術を Computational Fluid Dynamics (CFD) と言い，CFD 計算結果を分析する手法として，CG を用いた可視化は広く利用されている．

一般的に流体シミュレーションは条件を変更して繰り返し実施するため，大量の CFD 計算結果がデータベースに蓄積される．これらの計算結果をデータベースから検索して比較分析することで，流体現象の理解促進や，流体シミュレーションの精度向上に貢献できる．そのため，比較に特化した流体可視化の手法はこれまでにもいくつか提案されている．しかし多くの手法がスカラ場を対象としており，また複数の計算結果の画像を並べて表示することでユーザに見比べさせる可視化手法が多い．

CFD 計算結果から得られるベクタ場を適切に比較するための一手法として，複数のシミュレーション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手法 [1] が非常に有効である．流線とは，ある瞬間における速度ベクトルが接線となるように描いた曲線である．単一の CFD 計算結果に対して適切な本数の流線を生成して表示することで，1 枚の可視化結果から流れ場全体の様子を把握することが可能である．また空間中の特定の場所のみに流線を表示することで，注目したい箇所を重点的に観察することも可能である．しかしこの手法では流線を手動選択する必要があり，ユーザにとって煩雑な操作を必要とする．

本報告では流線を重ねて表示することで 3 次元 CFD 計算結果を比較可視化する手法 [1] の自動化手法を提案する．具体的には，3 次元 CFD 計算結果が対象とする空間全体に多数の流線を生成し，その中から可視化する意義のある一定本数の流線を自動選択して可視化する．データベースに蓄積された大量の CFD 計算結果に対してこの比較可視化手法を適用することで，条件変更にともなう CFD 計算結果の変化を効果的に発見できることが期待される．

2. 関 連 研 究

2.1　流体のための比較可視化手法

CG を用いた比較可視化の手法については古くからさまざまな手法が提案されてきた [2]．その中でも流体シミュレーションに特化した手法として，文献 [4] は，実験による流体現象の再現 (EFD) 結果と CFD の結果，両者の問題点を補う比較可視化の手法である．結果画像の右半分に EFD 可視化結果，左半分に CFD 可視化結果を表示することで，双方のデータの誤差を明確化し，その解決を図った．また文献 [3] は，空間を再構成することで直線を曲線に変換し，異なる構造からなる空間どうしでの比較を可能にした手法である．

2.2　流 線 選 択

単一の CFD 計算結果を対象とした流線自動選択手法は既に多数発表されている．文献 [5] は，等値面と流線の同時可視化において，等値面による遮蔽を考慮した視認性の高い流線選択手法を提案した．また文献 [6] は，視点に応じて表示する流線を変更することで，3 次元の流れ場の中で重要な特徴をもつ流線を可視化することを目指した手法である．また文献 [7] は，視点操作が可能な環境下での可視化において，視点に依存する重要度と視点に依存しない重要度の 2 段階で流線の重要度を算出し，流線を選択する手法である．

2.3　流線を用いた比較可視化手法

文献 [1] は，異なる条件で実施した 2 つの CFD 計算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手法である．この手法では 3 次元空間に流線を重ねることで流れ場の差分を明瞭化し，効率的な比較可視化の実現を目指している．図 1 は羽

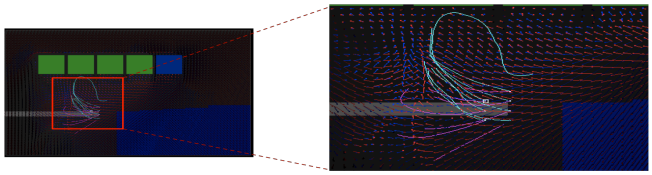

図 1　流線生成結果の例 [1]

田空港滑走路のデータを可視化した例である．異なる条件で実施した 2 つの CFD 計算結果として得られる流れ場を，ピンクとシアンの流線で可視化している．この可視化結果から，条件の変更によって風の流れが変化することをひと目で確認できる．

ただしこの手法では，表示する流線の開始点は対話的に 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となるという問題点も残っている．

3. 提案手法

本手法では 2 つの 3 次元 CFD 計算結果を比較するための流線自動選択手法を提案する．

これ以降，同一点を開始点とする異なる条件で行った 2 つのシミュレーション結果それぞれの流線をまとめて流線ペアと呼ぶこととする．本手法では，計算対象となる 3 次元空間に分布する全ての格子点を流線の開始点としており，すべての開始点において流線はペアとなっている．本手法における流線自動選択とは，データベースから流線ペアを自動選択することを意味する．

図 2 に流線自動選択の処理手順を示す．本手法ではまず，3 次元空間全体にわたって N_1 組の流線ペアを試しに生成する．我々の実装では，すべての流線ペアの中からランダムに N_1 組の流線ペアを生成している．続いて本手法では，N_1 組の流線ペアの各々について以下の 2 つの評価値

- 形状エントロピー $E_{e_1} + E_{e_2}$
- 流線ペア間の差分 D_{12}

を計算する．この 2 つの評価値から視点に依存しない評価値 E_1 を求め，この値の上位 N_2 組 ($N_1 > N_2$) の流線ペアを，可視化する意義のある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値 E_2 を最適化する N_3 組 ($N_2 > N_3$) の流線ペアの組み合わせを求め，この N_3 組を重要な流線ペアとして 3 次元空間に描画する．ここで，ユーザが視点を変更するたびに E_2 は再計算されるものとする．なお以後の説明において，流線は多数の短い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 視点に依存しない重要度

まず視点に依存しない評価値の計算方法について説明する．これは形状エントロピー $E_{e_1} + E_{e_2}$ と流線ペア間の差分 D_{12} の線形和をとって求める．具体的には以下の計算式を用いる．

$$E_1 = \alpha(E_{e_1} + E_{e_2}) + (1 - \alpha)D_{12} \tag{1}$$

α の値を変化させることによって，流れ場の特徴把握と，差分が大きい箇所の発見と，どちらに重みをおくかを調整できる．

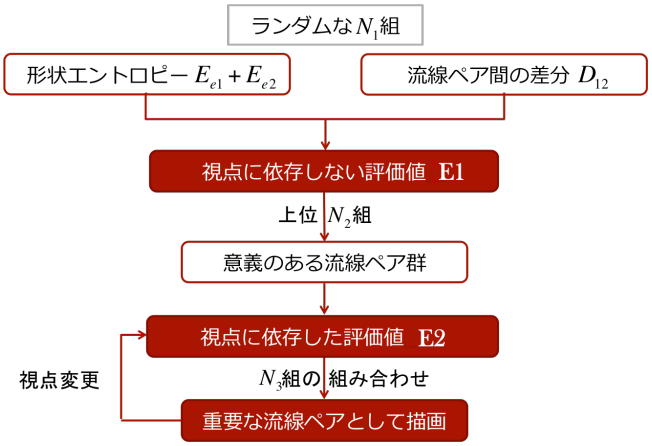

図 2　流線自動選択の処理手順

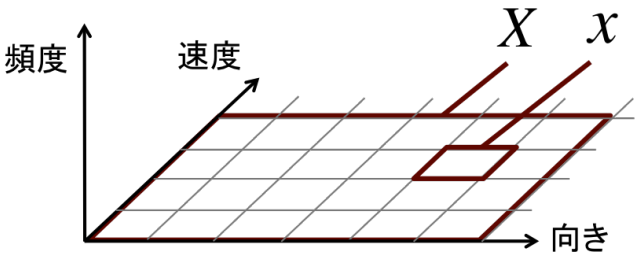

図 3　2 次元ヒストグラム

なおこの計算は，CFD 計算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

E_{e_1} と E_{e_2} は，ペアとなる 2 つの流線それぞれの形状エントロピーで，この 2 つの和がひとつの流線ペアの形状エントロピーとなる．E_{e_1} と E_{e_2} は独立に計算を行うため，ここでは流線がペアになっていることを意識する必要はない．そこで，本手法のように流線ペアを選択するのではなく，ペアになっていない単一の流線を選択する Ma らの手法 [7] を適用して E_{e_1} と E_{e_2} を計算する．これによって短い流線や直線的な流線の優先度を下げ，長くうねっている流線の優先度を上げる．短い流線は視認性が低いため，そして直線的な流線は流れの特徴を持っていないため，本手法では積極的には選択しない．

本手法では (2) に示される情報エントロピーの公式をそのまま利用する．

$$E_{e_i} = -\sum_x p(x)log(x) \tag{2}$$

形状エントロピーを算出するにあたり，まず流線を構成する各線分の速度と方向を算出する．そして 3 に示すように，各線分の速度と方向を変量とする 2 次元ヒストグラムを生成する．ここで 2 次元ヒストグラムを構成するすべての格子を X と記述し，各々の格子を x と記述する．このヒストグラムに対して，各線分を x のいずれかに割り振り，x の各々に対して所属線分数を集計する．ヒストグラムを構成する各区間の高さから，線分が x の各々に属する確率 $p(x)$ を求める．

図 3 の変量のうち，方向について，本手法では図 4 に示すように立方体を想定し，この立方体の中心から面に対して垂直方

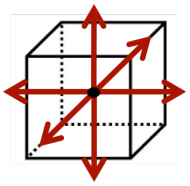

図 4　ヒストグラムの向き

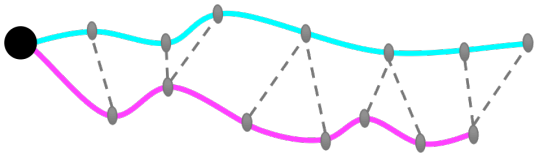

図 5　流線ペア間の差分 D_{12} の算出

向の 6 種類とし、線分とのなす角がもっとも小さいところに割り振る．

3.1.2　流線ペア間の差分

続いて流線ペア間の差分 D_{12} について述べる．本手法では，ペアとなる 2 つの流線が大きく離れているほど，可視化する意義のある流線ペアであるとみなす．

我々の実装では，流線を構成する各線分の両端点を流線ペア間で照合する．一方の流線のある端点について，他方の流線中で最も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_{12} とする．

図 5 は，流線を構成する線分の端点を照合する過程をイラスト化したものである．

3.2　視点に依存した評価値

次に視点に依存する評価値 E_2 について説明する．本手法では，画面上での流線どうしの重なりを最小にする組み合わせの流線群を求めるものとする．この問題も形状エントロピーと同様に，ペアになっていない単一の流線自動選択の目的で既にいくつかの研究が発表されている．我々の実装では古矢らが提案した手法 [5] を参考にしている．本手法では，まず視点に依存しない評価値 E_1 が 1 位となった流線ペアを描画する．そして E_1 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 d 以下の端点が閾値 λ 以上存在すれば，当該流線ペアを描画しないことにする．つまり，流線どうしがほぼ重なっていると見なせる部分の長さが一定以上であれば，この流線は選択しないということである．これを N_3 組の流線ペアが描画されるまで繰り返す．

4.　実　行　例

4.1　適 用 事 例

我々は，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．デルタ翼とは，ギリシャ文字 Δ と

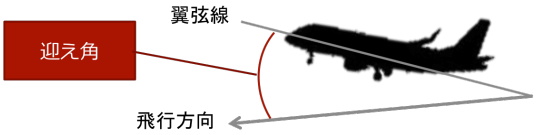

図 6　迎　え　角

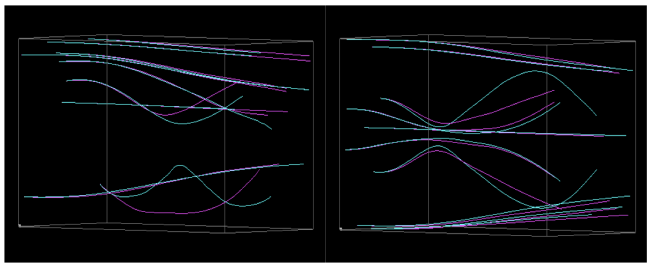

図 7　実行結果例

よく似た平面型を持つ航空機の翼のことである．また迎え角とは，図 6 に示すように，翼の前端と後端を結んだ直線である翼弦線と，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．

本研究では，迎え角を 20 度および 27 度に設定して実行した 2 つのシミュレーション結果を比較する．なお $N_1 = 10000$, $N_2 = 200$, $N_3 = 20$ とした．

4.2　実　行　例

図 7 に示す 2 つの結果は本手法を用いて流線ペア群を可視化した結果である．迎え角 20 度のシミュレーション結果から生成した流線をピンクで，迎え角 27 度のシミュレーション結果から生成した流線をシアンで描画している．この 2 つの結果はどちらも同じ視点であるが，図 7(右) は，現在の視点で自動選択を行った結果で，図 7(左) は，別の視点で自動選択を行った後，現在の視点に変更した結果である．図 7(左) に比べて，現在の視点で自動選択を行った図 7(右) の方が流線どうしの重なりが少ないことが見て取れる．またうねりの大きい流線や，条件変更の影響を大きく受けた差分の大きい流線ペアが選択されていることも確認できる．

5.　まとめと今後の課題

本報告では条件を変更して実施した 2 つの 3 次元 CFD 計算結果から流線ペアを生成し，その中から適切な本数の可視化する意義のある流線群を自動選択する手法を提案した．本手法では前処理として，3 次元空間全体にわたって生成した流線ペア群の中から「視点に依存しない評価値」にもとづいて一定本数の流線を選択して保存する．そしてユーザが視点を調節するたびに，保存された流線の中から「視点に依存する評価値」にもとづいて適切な本数の流線を選択して表示する．計算機性能と科学技術計算技術の向上により，今後ますます大量のシミュレーションが反復され大量の計算結果がデータベースに蓄積され，その比較分析は重要になると考えられる．本手法によって，流体シミュレーションの条件変更によって生じた差分を明瞭化し，定性的な比較が可能になると考えられる．

今後の課題として以下の 3 点があげられる．視点に依存しない評価値 E_1 を計算する際に，現在は単純に E_{e_1} と E_{e_2} の線形和を算出している．しかしこの結果で本当に流れ場全体の把握と差分が大きい箇所の発見が本当にバランスよく表現できているか検証が不足している．この点について検証を進めたい．現在の実装では，均一な形状・大きさの直方体で 3 次元空間を分割した直交格子を用いた CFD 計算結果のみを対象としている．より多彩な流体シミュレーション結果に対応するためには，より複雑な格子構造である非構造格子を適用できるように実装を拡張したい．

また，現在の実装は時系列データに対応していない．CFD 計算結果は時系列データとして扱うことが非常に重要であるため，時間軸を含めた 4 次元 CFD 計算結果を適用できるように実装を拡張したい．

文　　献

[1] K. Hattanda, A. kuwana, T. Itoh, A Comparative Visualization for Flow Simulation of Airport Wind, NICOGRAPH international, 2013.

[2] H. G. Pagendarm, F. H. Post, Comparative Visualization Approaches and Examples, in Visualization in Scientific Computing, Springer, 1995.

[3] O. D. Lampe, C. Correa, K. -L. Ma, H. Hauser, Curve-Centric Volume Reformation for Comparative Visualization, IEEE Transactions of Visualization and Computer Graphics, 15(6), 1235-1242, 2009.

[4] K. Hattanda, T. Itoh, S. Watanabe, S. Kuchi-ishi, K.Yasue, A Flow Representation for EFD/CFD Integrated Visualization, NICOGRAPH International 2012.

[5] 古矢, 伊藤, スカラ場・ベクタ場同時可視化のための流線自動生成の一手法, 芸術科学会論文誌, 8(3),120-129,2009.

[6] T. -Y. Lee, O. Mishchenko, H. -W. Shen, R. Crawfis, View Point Evaluation and Streamline Filtering for Flow Visualization, IEEE Pacific Visualization, 83-90, 2011.

[7] J. Ma, C. Wang, C.Shene, Coherent View-Dependent Streamline Selection for Importance-Driven Flow Visualization, SPIE 8654: Visualization and Data Analysis, 2013.