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 ～VR空間への拡張

澤田　頌子† 伊藤　貴之† 三坂　孝志†† 大林　茂††

† お茶の水女子大学大学院　〒 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．我々は，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，各条件における流線のうち，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手法を開発している．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を重要な流線として自動選択する．本報告ではこの研究の続報について論じる．我々は現在，自動選択された流線群を仮想現実 (VR) 空間上で観察するシステムの開発に取り組んでいる．VR 空間を採用することにより，平面的なディスプレイ上での観察よりも，より多くの現象を観察できることが期待される．

キーワード　流体，シミュレーション，可視化，VR

1. 概　　要

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計算機シミュレーションが適用されている．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た流体の数値解析やシミュレーションのための理論を Computational Fluid Dynamics (CFD) と呼ぶ．CFD 計算結果を分析する手法として，コンピュータグラフィックス (CG) を用いた可視化は広く利用されている．

CFD 計算結果から得られるベクタ場を可視化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．しかし適切な本数の流線を自動生成することは容易ではなく，現在も研究が続けられている．

一方，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．しかしこの比較分析において，単純に複数の計算結果の画像を並べて表示するだけでは，ユーザが適切にこれを見比べるのは容易ではない．そのため，複数の計算結果を比較する目的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，ベクタ場を対象とした手法は少ない．

我々は流線を重ねて表示することで複数の 3 次元 CFD 計算結果を比較可視化する手法 [1] を提案しており，またその自動化 [2] にも取り組んでいる．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重要な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．本報告ではこの手法の続報について述べる．

また，本報告では選択された重要な流線を仮想現実 (VR) 空間上で観察するシステムを提案する．重要な流線がごく一部に集中しているデータでは，流線選択だけで視認性を保つことは困難になることが十分考えられる．そもそも 3 次元流体シミュレーション結果の観察に 2 次元のディスプレイを用いることで，流体現象を十分に視認できない場合があることは避けられない．VR 空間上で観察することにより，より適切に流体シミュレーション結果を比較・分析できるようになる．また，ユーザが選んだ流線にそって視点が移動するといった，VR 特有の機能を取り入れることによって，ユーザがこれまでよりも熱心に結果を観察することも期待している．

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 [3]．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，実験による流体現象の再現 (EFD) 結

果と CFD の結果を同時に可視化することで，両者の問題点を補う手法 [5] が提案されている．この手法では，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，その解決を図ることを可能にした．また，CFD 計算対象の空間を再構成して直線を曲線に変換することにより，異なる格子構造で構成された空間どうしの比較を可能にした手法 [4] も提案されている．

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．古矢ら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 [6] を提案した．また Lee らは，3 次元空間において視認性が下がる理由として流線が多いこと以外に，視点の選び方が悪いことを挙げ，ランダムに選んだ視点の中から最も評価が高いものを推薦する手法 [7] を提案した．また Ma らは，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 [8] を提案した．

2.3 流線を用いた比較可視化手法

八反田らは，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 [1] を提案している．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．そこで我々は，比較可視化のための流線を自動選択する手法 [2] の開発に取り組んでいる．

2.4 VR を利用した可視化手法

VR を科学技術のための可視化に用いるというアイディアは古くから存在していた [9]．3 次元ベクタ場の可視化にも，VR を用いた手法 [10] は積極的に取り入れられている．Forsberg らは，動脈移植の成功率を向上させるため，血液の流れを含む移植のシミュレーションを VR 空間上で行うシステム [11] を提案している．Coffey らは，3D ディスプレイとマルチタッチディスプレイを用いて、VR 空間上で 3 次元データ全体を観察しながらディスプレイ上でそのデータの特定の断面を観察するという、俯瞰と詳細の両立を叶えた可視化手法 [12] を提案した．

3. 比較可視化のための流線自動選択

本章では，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紹介し，さらに自動選択結果を VR 空間上で観察するシステムを提案する．

これ以降，異なる条件で実施した 2 つのシミュレーション結果の各々について，同一位置を開始点として生成した 2 本の流線を，「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ことを前提とする．よって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．

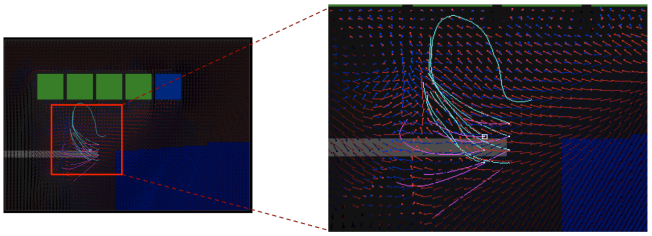

図 1　流線生成結果の例 [1]

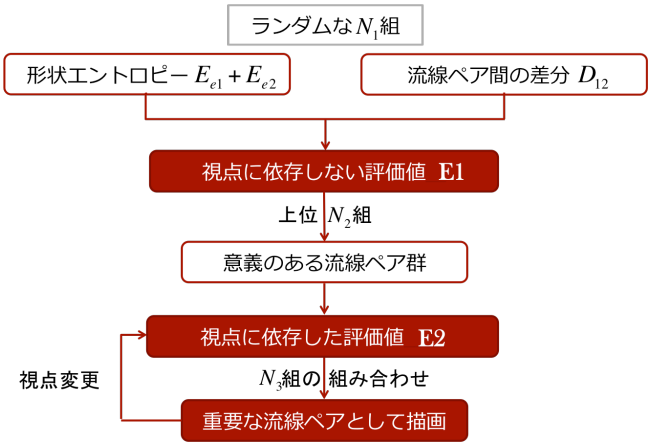

図 2　流線自動選択の処理手順

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，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 視点に依存しない評価値

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．

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

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

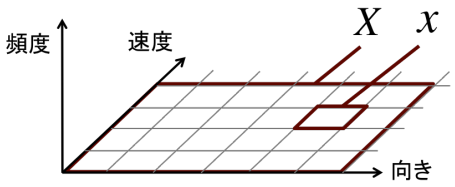

図 3　2 次元ヒストグラム

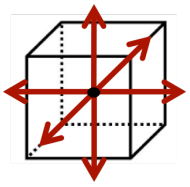

図 4　ヒストグラムの向き

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．なおこの計算は，CFD 計算結果が与えられたときに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 [8] 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．

$$E_{e_i} = -\sum_{x} p(x)log(x) \qquad (2)$$

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．

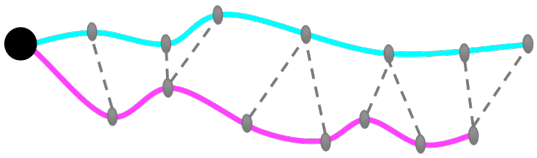

図 5　流線ペア間の差分 D_{12} の算出

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 [6] 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．

3.3　VR 空間上での表示

本節では VR 空間上で流線選択結果を表示するシステムについて説明する．前節で述べたような視点を考慮した流線選択の手法を実装しても，データによっては一部に流線が集中し，視認性を維持できない可能性が残っている．そもそも本手法で適用するデータは 3 次元の CFD 計算結果であるため，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．そこで我々は，3 次元のデータを 3 次元空間上で，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．

我々は流線の自動選択部分を Java で実装している．これを実行することで，流線の自動選択結果をファイル出力する．また，VR 空間上での表示部分を Unity 上で実装し，Oculus Rift を用いて表示している．

流体シミュレーション結果の格子構造が与えられると，Java で実装した自動選択手法により重要な流線ペア群を選択し，JSON ファイルに書き出す．これを Unity で読み込み，図 6 のように連結した円柱で流線を描画する．図 7(上) のように平面的な線を用いて描画するよりも，図 7(下) のように円柱を用い

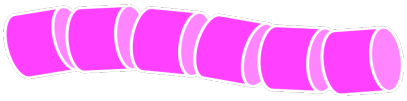

図 6　連続した円柱で流線を描画

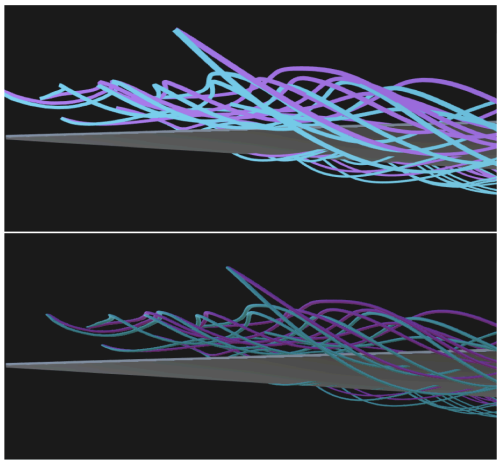

図 7　流線描画方法の比較
(上) 平面的に描画
(下) 立体的に描画

て立体的に描画した方が，流線の奥行き方向の位置関係を把握しやすくなり，煩雑さの解消につながると考えられる．さらに，流線に沿って視点 (カメラ) が動くという要素も追加した．これは，流れのうねりを体感して比較できる上に，流線の開始点から終了点にいたるまでその周辺をくまなく観察できるようになり，新たな発見が生まれることを期待している．

本システムでは，回転，拡大・縮小，移動などの基本的な操作をはじめ，どの流線に沿って視点 (カメラ) を動かすか，といった多彩な操作をサポートしている．我々はすべての操作について，Xbox(注1) のコントローラを用いることを前提に実装した．ただし，マウスとキーボードでの代替操作も可能である．

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 8 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　可視化結果

図 9 は Java プログラムによって出力された可視化結果である．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

(注1)：Microsoft

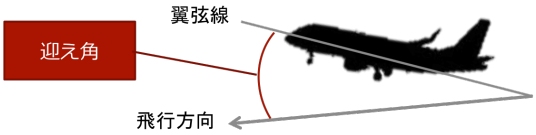

図 8　迎　え　角

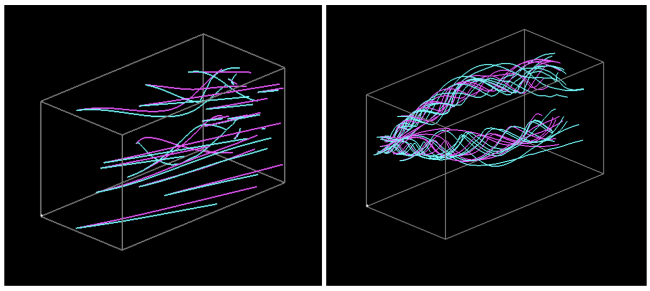

図 9　Java プログラム上での可視化結果の例
(左) ランダムに選択
(右) 本手法を用いて選択

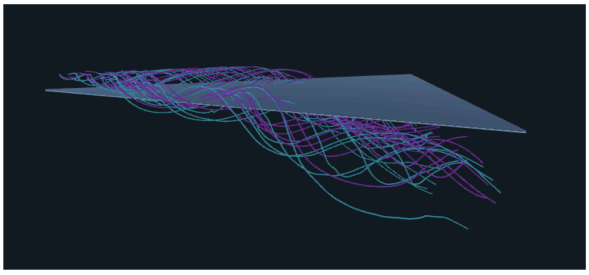

図 10　Unity 上での可視化結果の例

流線をシアンで描画している．

図 9(左) はランダムに流線ペアを選択した結果で，図 9(右) は本手法を用いて流線ペアを選択した結果である．ランダムに流線を選択した図 9(左) では，短い流線や直線的な流線が数多く選択されている．一方，本手法を用いて選択した図 9(右) では，流れ場全体を大域的に把握可能であり，さらに大きくうねった流線が選択されていることがわかる．特にシアンの流線がピンクの流線に比べて大きくうねっているものが選択されていることがわかる．

Unity 上での可視化結果の例を図 10 に示す．図中に見えるグレーの薄い三角柱はデルタ翼を簡単にモデリングしたものである，ただ使用しているデータの中には翼の位置情報が存在しないため，この配置は厳密ではない．流線を 2 次元の線ではなく 3 次元の円柱で描いたことにより，流線に立体感が生まれ，視認性の向上を確認した，

5.　まとめと今後の課題

我々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，その中から適切な本数の重要な流線群を自動選択する手法を開発している．本報告ではこの手法を紹介するとともに，VR 空間上で流線群を可視化するシステムを提案した．

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する．さらに最終的に選択された流線を，対象データのモデルとともに VR 空間上で観察した．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，より正確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．

また現在の実装では，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，より複雑な非構造格子を適用できるように実装を拡張している途中である．

また，散布図などの情報可視化手法との統合を目指したい．散布図を閲覧しながら，重要な流線を選択するための閾値を動的に変更する，といった形でさらにインタラクティブな可視化手法を実現したい．

そして，Unity 上で流線選択結果を操作可能にすることによって対話性を高めることも検討している．

文　　献

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

[2] S. Sawada, T. Itoh, T. Misaka, S. Obayashi, Streamline Selection for Comparative Visualization of 3D Fluid Simulation Results, IEEE Big Data Visual Analytics, 2016.

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

[4] 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), pp. 1235-1242, 2009.

[5] K. Hattanda, T. Itoh, S. Watanabe, S. Kuchi-ishi, K.Yasue, A Flow Representation for EFD/CFD Integrated Visualization, NICOGRAPH International, pp. 1234-1237 , 2012.

[6] 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), pp. 120-129, 2009.

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

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

[9] S. Bryson, Virtual reality in scientific visualization, Magazine Communications of the ACM, Volume 39 Issue 5, pp. 62-71, 1996.

[10] 陰山, 大野, バーチャルリアリティを用いた対話的 3 次元可視化ソフトウェアの開発とその応用, プラズマ・核融合学会誌 84(11), pp. 834-843, 2008.

[11] A. Forsberg, D. Laidlaw, A. Van Dam, R. Kirby, G. Karniadakis, J. Elion, Immersive virtual reality for visualizing flow through an artery. In Proceedings of the conference on Visualization, IEEE Computer Society Press, pp. 457-460, 2000.

[12] D. Coffey, N. malbraaten, T. Le, I. Borazjani, F. Sotiropoulos, D. F. Keefe, Slice WIM: A Multi-Surface, Multi-Touch Interface for Overview+Detail Exploration of Volume Datasets in Virtual Reality, I3D '11 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, pp. 191-198, 2011.