

## II-6 VR 技術を用いた非構造格子に基づく流体解析のための 対話的可視化システムの構築とその応用

### Development and Application of an Interactive Visualization System based on Unstructured Grid Using VR Technology for Flow Simulation

山崎輔<sup>1</sup>・樫山和男<sup>2</sup>・陰山聡<sup>3</sup>・大野暢亮<sup>4</sup>

Tasuku YAMAZAKI, Kazuo KASHIYAMA, Akira KAGEYAMA, Nobuaki ONO

**抄録:** 著者らは既往の研究において没入型 VR (Virtual Reality) 環境に注目し、非構造格子に対応した対話的可視化システムの開発を行ってきた。しかし、可視化における補間処理に対して、バケット法に基づく要素検索処理の高速化を行ったが、検索時間が増大する問題が発生した。そこで本研究では、要素検索に対して高速化の検討を行うとともに、粒子位置を求める際の高精度化を行った。適用例を通じて可視化処理における計算精度と計算時間について既往の構造格子に対する可視化システムである VFIVE との比較を行。また、応用例として複雑な領域形状を有する大気環境シミュレーションの結果の可視化に適用し、本可視化システムの有効性を検討した。

**キーワード:** 流体シミュレーション、可視化、立体視、VR 技術

**Keywords :** Flow simulation, Visualization, Stereovision, VR

#### 1. はじめに

近年のコンピュータの性能の飛躍的向上により、三次元流れ現象の予測および把握のために、数値解析手法が一般に用いられている。しかし、大規模で複雑な三次元流れ現象を取り扱う場合、ディスプレイなどの二次元表示媒体による可視化では、正しく現象を評価することが困難となる場合が多い。そこで、近年 VR (Virtual Reality) 技術<sup>1)</sup>に基づく可視化が注目され始めており、さまざまなハードウェア・ソフトウェアが開発されている。

著者らは既往の研究において、複雑な三次元流れ現象を、より正確にかつ対話的に可視化するために、CAVE (CAVE Automatic Virtual Reality Environment)<sup>2)</sup>に代表される没入型映像投影技術 (Immersive Projection Technology : IPT)<sup>3)</sup>に注目し、地球シミュレータセンター高度計算表現法研究グループが開発した構造格子用可視化システム VFIVE<sup>4)</sup>を基に、四面体要素に基づく非構造格子に対応した流れの対話的可視化システムの構築を行ってきた<sup>5)</sup>。しかし、可視化の補間処理における計算時間の増大、および粒子位置の計算精度の欠落といった課題が残った。

そこで本研究では、既往の可視化システムの補間に

対して高速化を図るとともに、粒子位置の計算の高精度化を行い、計算速度・計算精度について、VFIVE と定量的な比較を行うことで、本可視化システムの妥当性を検討した。また、応用例として、日本橋周辺気流解析の結果の可視化に適用し、複雑な領域形状を有する問題に対する本可視化システムの有効性について検討した。

#### 2. 可視化処理の高速化

図-1 は、本可視化システムにおける可視化処理工程を示したものである。本可視化システムは入力データの読み込み後、描画スレッドと計算スレッドに分かれてそれぞれ独立して計算を行う。また、本可視化システムでは、観察者がコントローラを操作することで指定した位置に、指定した可視化機能に対話的に表示することが可能である。その際、計算スレッドにおいて、指定した位置 (指定点) における物理量 (ベクトル場・スカラー場) を非構造格子の節点値 (入力データ) を用いた補間により、リアルタイムで算出する必要がある。著者らは既往のシステムにおいて、グリッド状の分割領域データを事前に作成し (図-2 参照) それを用いた要素検索 (バケット法) を行うことで計

1 : 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻  
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27, Tel :03-3817-1815, E-mail : tasuku@civil.chuo-u.ac.jp)  
2 : 正会員 工博 中央大学 教授 理工学部土木工学科  
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27, Tel :03-3817-1808, E-mail : kaz@civil.chuo-u.ac.jp)  
3 : 非会員 理博 神戸大学 教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
4 : 非会員 理博 (独) 海洋研究開発機構, 地球シミュレータセンター  
(〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

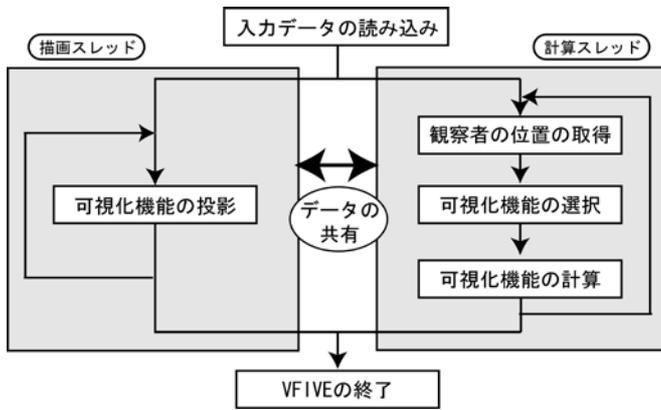


図-1 本可視化システムにおける可視化処理工程

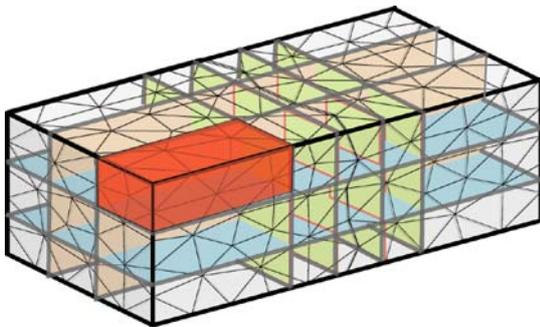


図-2 分割領域データの作成

算速度の向上を図った。しかし、大規模な計算を行う際に時間遅れ等の問題が生じる結果となった。また、粒子位置の計算精度に関しても、可視化する流線の形状がVFIVEと異なる問題が発生した。そこで本研究では、上記の問題点を解決するために、以下に示す方法の導入により可視化システムの高速度・高精度化を行った。

### (1) 分割領域データのバイナリ化

前述した分割領域データの他、可視化処理中に読み込む入力データをバイナリデータ化することにより、データの受け渡しを高速に行うことを可能とし、計算速度の高速化を行った。

### (2) 流線の可視化における積分精度の向上

従来のシステムでは計算を高速に行うため、全ての可視化機能に対して要素の補間精度および次ステップの位置を求める際の積分精度を、VFIVEより低い一次精度で可視化を行っていた。本研究では、可視化精度を向上するために、粒子の軌跡や流線表示等において、その粒子の次ステップの位置を算出する計算において、6次ルンゲ-クッタ法を採用した。

### (3) 計算座標系に基づく要素検索の採用

指定点を包含する要素検索手法に対して、従来は体積座標を用いた検索手法を用いていたが、今回新たに実際の座標系 $(x, y, z)$  (図-3左図参照)から要素ごとに構成される簡単な座標系 $(\zeta, \eta, \xi)$  (図-3右図参照)に写像を行い、その計算座標系に基づいて要素を検索

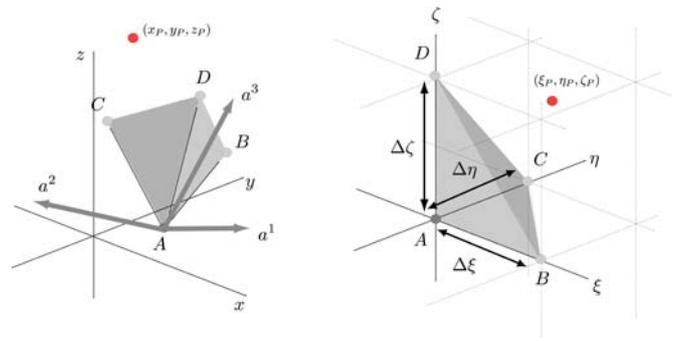


図-3 計算座標系への写像

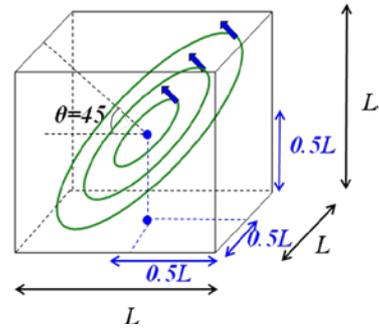


図-4 可視化適用例1

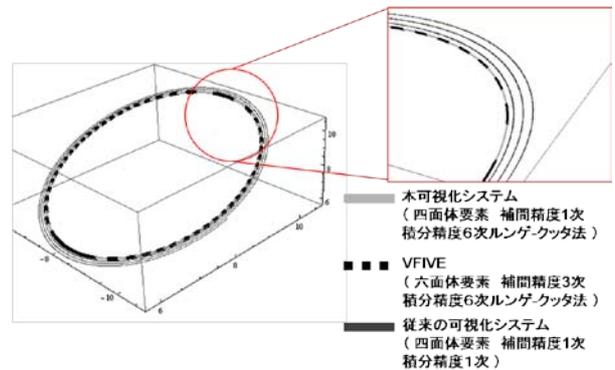


図-5 補間精度の検証

する手法<sup>6)</sup>に変更することで、可視化処理の効率化を行うと共に、計算速度の高速化を行った。

## 3. 有効性の検討

本研究では、本可視化システムの有効性を検討するため、以下の可視化適用例を通じて、VFIVEとの計算精度・計算速度の比較を行った。

### (1) 三次元柱状流れ場による計算精度の比較

ベンチマーク問題として、解析領域中心からy軸を基軸として、45度傾斜した柱状の回転流れ場を作成し(図-4参照)、計算精度の検証を行った。なお、要素は $5 \times 5$ の粗い立方体要素を用いた。

図-5は、従来の可視化システムとVFIVE、本可視化システムにおいて、同一点から流れる粒子が三回転した場合の軌跡を比較したものである(可視化機能Particle Tracerを使用)。なお、本可視化システム・従

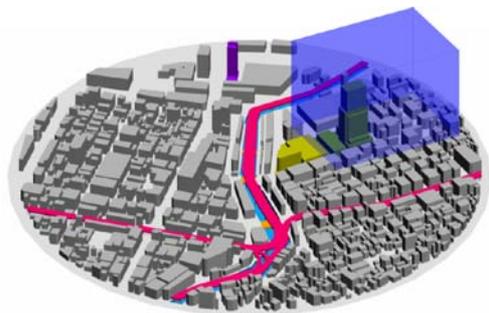


図-6 可視化適用例2

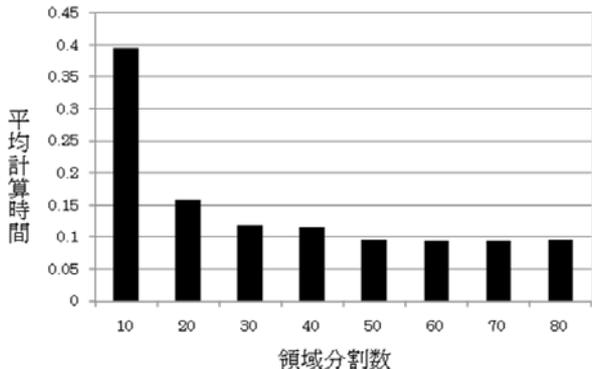


図-7 分割領域数による計算速度の比較(1)

来の可視化システムは補間精度を一次精度、VFIVEは補間精度を三次精度で計算し、流線を表示する際の積分精度は従来の可視化システムは一次精度、VFIVE・本可視化システムは6次ルンゲ-クッタ法を採用して計算を行っている。図より、本可視化システムは同一円周を流れ続けており、従来のシステムより正確に可視化を行えていることが分かる。

### (2) 大気環境流れ問題による計算速度の比較

都市域における大気環境流れ問題へ本システムを適用し、本可視化システムとVFIVEにおける計算速度の比較を行った。なお、本可視化適用例では、図-6に示す日本橋周辺の気流解析を行った結果に対し、着目する領域(図中のボックス領域)を抽出して可視化を行い、両者の比較を行った。なお、可視化領域内の総節点数は98,387、総要素数は469,055である。

本可視化システムでは分割領域を用いた要素検索の高速化を行っているが、計算時間の比較を行う上で、本解析例において、最適な分割領域数について検討した。図-7は本可視化システムにおいて、計算領域全体に配置された粒子5,000個の流速を計算し、その流速に応じて次ステップの粒子の位置を算出するまでの平均計算時間を分割領域数毎に比較したものである(可視化機能Hotaruを使用)。図より、本解析例において、分割領域が50×50×50(最大包含要素数128)以降、計算時間が短縮していないことが分かる。しかし、分割領域数を多くとるほど、領域の範囲が小さくなり、領域内の要素を正確に検索することが困難となる。図-8は、分割領域ごとに指定点を包含する要素を検出

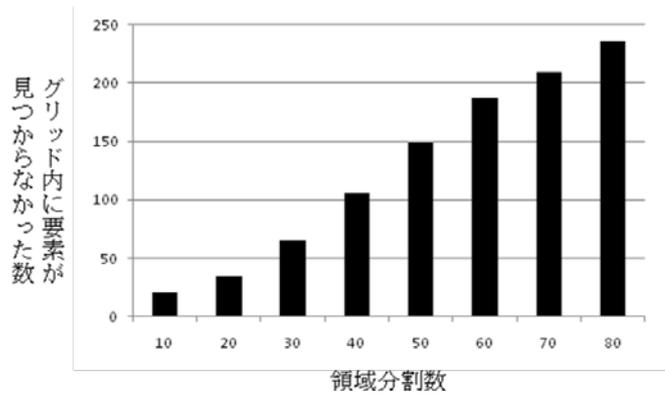


図-8 分割領域数による要素検索数の比較

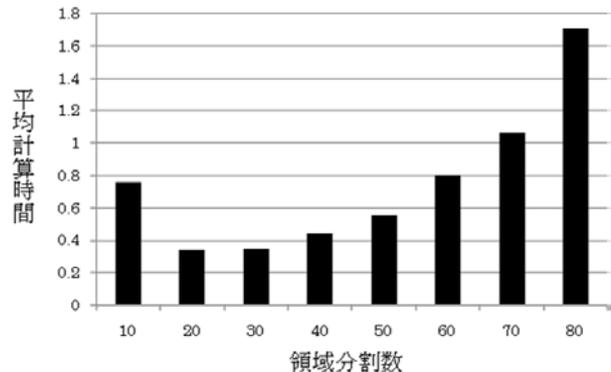


図-9 分割領域数による計算速度の比較(2)

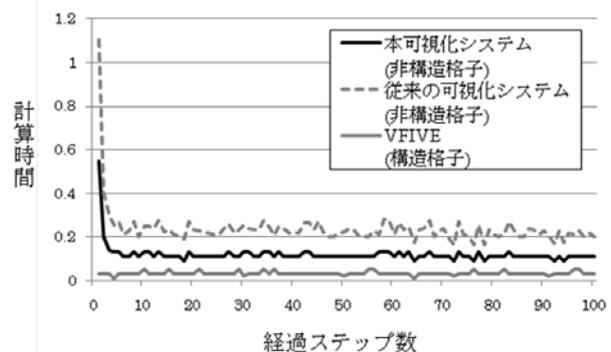


図-10 VFIVEとの計算時間の比較

できなかった回数の平均を比較したものである。図より、分割領域数が多くなるほど要素を検索できていないことが分かる。

そのため本研究では、指定点を包含する要素が分割領域内で検出されなかった場合、その分割領域周辺を検索対象として加えて、再度要素を検索する機能を追加することで、計算時間の比較を行った。図-9は上記の機能を追加した場合の平均計算時間の比較を行ったものである。これにより、分割領域を30×30×30(最大包含要素数224)の時に計算速度が速く、かつ正確に要素を検索出来ていることが分かる。

そこで、再度システムを変更し、上記と同じ条件において、本可視化システムの分割領域数30×30×30としてVFIVEおよび従来の可視化システムとの計算速度の比較を行った。図-10はステップ毎の計算時間を比較したものである。図より、本可視化システムは

VFIVE の計算速度には及ばないものの、従来のシステムより高速に計算を行うことが可能であり、リアルタイム可視化において処理落ちなどの問題が発生せず、高速に可視化を行うことが可能であることが分かった。

#### 4. 大規模問題への適用

大規模問題への可視化適用例として、上述した日本橋周辺気流解析の結果に適用し、本可視化システムの有効性を検証した。なお、可視化装置は没入型 VR システム HoloStage を使用した。HoloStage の詳細については参考文献 5) を参照されたい。

図-11 は構造物周辺を流れる風の流線を、VR 空間に可視化したものである (Particle Tracer と Local-Arrows を使用)。これにより、構造物後方における渦現象や、剥離流等が表現されていることが分かる。図-12 は構造物前面および上面における風圧の圧力分布を VR 空間上に可視化したものである (Volume Rendering を使用)。これにより、構造物前面にかかる圧力分布、および構造物上面における剥離流による圧力低下等が表現されていることが分かる。また、VFIVE において、流線や圧力分布が構造物内部に侵入する問題が生じたが、本可視化システムでは構造物の形状を考慮した可視化が行われていることが分かる。

図-13 は指定位置におけるベクトルデータおよび圧力データを数値化して表示させたものである。これにより、観察者は流れのシミュレーション結果を定性的だけでなく、定量的にも観察することが可能となっている。

#### 6. 結論

本研究では、既往の研究で構築した可視化システムに対してさらなる高速化・高精度化を行い、解析例を通じて、VFIVE との計算速度・計算精度の比較を行った。また、複雑な領域形状を有する都市環境流れ問題の可視化に適用し、本可視化システムの有効性について検討した。

1. 粒子位置の計算に 6 次ルンゲ・クッタ法を採用したところ、粗いメッシュにもかかわらず、本手法は VFIVE と同等の可視化精度を与えた。
2. 粒子の存在する要素の検索手法を体積座標から一般化座標に基づく手法を採用したところ、既往の可視化システムに比べて 2 倍程度速度向上が図れ、高速に可視化することが可能となった。
3. 複雑な領域形状を有する大気環境シミュレーション結果に適用したところ、本可視化システムは領域形状を正確に考慮した可視化を行えていることを確認できた。

今後は、本可視化システムのさらなる利便性・操作性の向上について検討する予定である。

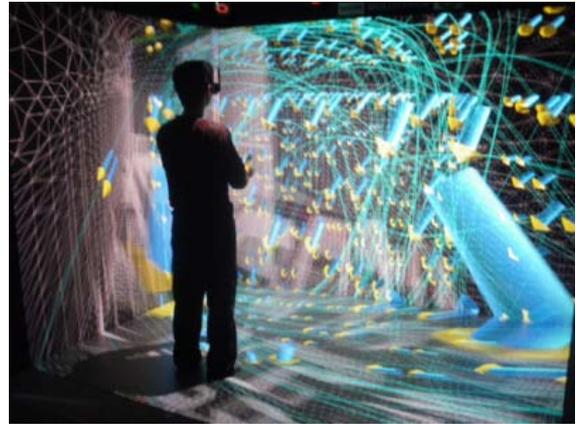


図-11 ベクトル場の可視化

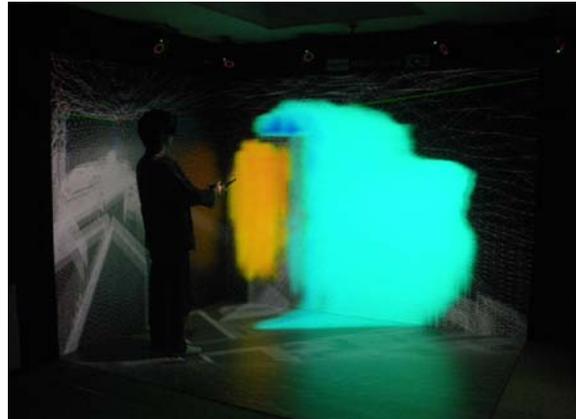


図-12 スカラー場の可視化



図-13 指定点における物理量の表示

#### 参考文献

- 1) 廣瀬 通孝：バーチャルリアリティ，産業図書(1993)
- 2) C. Cruz-Neira, C., D.J. Sandin, T.A. DeFanti: Surround Screen Projection Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE; Proc. of SIGGRAPH'93, pp.135-142, 1993
- 3) 小木哲朗：没入型ディスプレイの特性と応用の展開，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.1, No.4, pp.43-49, 1999
- 4) 陰山聡，上原均，川原新太郎：VR 可視化ソフト VFIVE の開発とその地球科学への応用，第 32 回可視化情報シンポジウム講演論文集，Vol.57, No.6, pp.319-320, 2004.
- 5) 山崎輔，榎山和男，陰山聡，大野暢亮：非構造格子に基づく流れ解析のための VR 技術に基づく対話的可視化システムの構築，土木情報利用技術講演集，Vol.34, pp.45-49, 2009 年 11 月.
- 6) 白山晋：知的可視化，計算力学レクチャーシリーズ，丸善株式会社 (2006)