

ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法

中島 研 吾^{†,††} 陳 莉^{†††}

並列計算機による大規模シミュレーションにおいて結果の可視化処理は大きな技術的課題である。これまで、様々な手法が研究、開発されているが、並列処理における計算効率と対話的処理における利便性の両立は困難であった。本研究では、1,000 を超えるようなプロセッサを有する並列計算機上で 10^8 メッシュ以上の大規模問題のシミュレーションで得られた計算結果について 100 分の 1 以下にデータ量を削減することによって、MicroAVS など単一プロセッサ上で稼動する可視化ソフトウェアを使用して描画するための、効率的なデータ処理手法、簡略化手法を開発した。本手法では、有限要素法等非構造格子による分散データを、局所細分化を含むボクセル型背景格子上にマッピングした情報と、簡略化された境界面形状の情報をもとに全体領域を四面体要素に分割することによって、PC 上のアプリケーションで処理可能な精度の高い容量の少ないデータファイルを生成する。細分化レベルを変化させることによって、データ量を変えることができ、利用可能なリソースに応じた柔軟な処理が可能となる。

Parallel visualization method for large-scale distributed data sets in scientific simulations with background voxel's

KENGO NAKAJIMA^{†,††} and LI CHEN^{†††}

In large-scale scientific simulations using massively parallel computers, visualization of results is a critical technical issue. Various types of methods have been developed in this area, but it is very difficult to keep both of parallel efficiency and interactivity. In this study, efficient parallel data processing and simplification method for distributed data sets of simulation results have been developed. This data processing and simplification method can reduce the size of data up to 1% of that of the original data set, therefore, users can easily visualize results of simulations with more than 10^8 meshes on more than one thousand of processors using general visualization tools for serial processor, such as Micro AVS. In this method, information of distributed unstructured meshes for FEM has been mapped to background voxel's with adaptive mesh refinement (AMR). Simplification of boundary surface is also applied for reducing data size. Delaunay operations for tetrahedral meshes are conducted based on the information in voxel's and simplified boundary surfaces. Users can control number of meshes in final model for visualization by level of AMR, number of voxels, and/or simplification of boundary surfaces according to memory size and performance of PC.

1. はじめに：並列可視化における問題点

並列計算機による大規模シミュレーションにおいて結果の可視化処理は大きな技術的課題である。筆者等は GeoFEM プロジェクト [1] において、様々な可視化機能をサポートする大規模向け並列可視化サブシステムを開発し、優れた並列計算性能、大規模データの効率的処理を達成している (Fig.1) [2,3]。GeoFEM の可視化サブシステムは、C 言語および MPI, OpenMP によって記述されている。特殊なライブラリ、ハードウェアを使用していないため、PC クラスタから「地球シミュレータ」[4] まで、あらゆるアーキテクチャの並列計算機上で稼動する。いくつかのモジュールには「地球シミュレータ」において最適な性能を発揮できるように、ベクトルプロセッサ向けの最適化を実施したバージョンもある。

Scalar Field	Vector Field	Tensor Field
Surface rendering	Streamlines	Hyperstreamlines
Interval volume-fitting	Particle tracking	
Volume rendering	Topological map	
	LIC	
	Volume rendering	

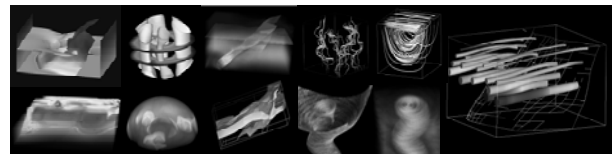


Fig.1 Various capabilities supported by GeoFEM's parallel visualization subsystem [1,2,3].

GeoFEM の可視化サブシステムには 2 種類のデータ処理方法がある。すなわち、GeoFEM を使用したシミュレーション結果とメッシュデータの分散ファイルを入力として並列可視化処理を実施し、可視化用パッチファイルまたは、イメージファイルを出力する「ファイルバージョン (via-File version)」と、ライブラリをシミュレーションコードから直接コールすることによって、パッチファイル、イメージファイルを出力する

[†] 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Science,
The University of Tokyo.
^{††} 科学技術振興機構 CREST
CREST, Japan Science and Technology Agency (JST)
^{†††} 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo.

「メモリーバージョン (via-Memory version)」である (Fig.2)。大規模並列シミュレーションを実施した場合、出力ファイルの規模も計算規模に応じて合計数十テラバイトを超えるような場合があり〔1〕、ファイルの I/O に膨大な時間を必要とする場合もある。そのような場合、「メモリーバージョン」はファイルの書き出しが一切ないため、非常に効率的であるが、計算実行時に描画のための位置、出力変数名 (場合によっては視点) を指定する必要がある。

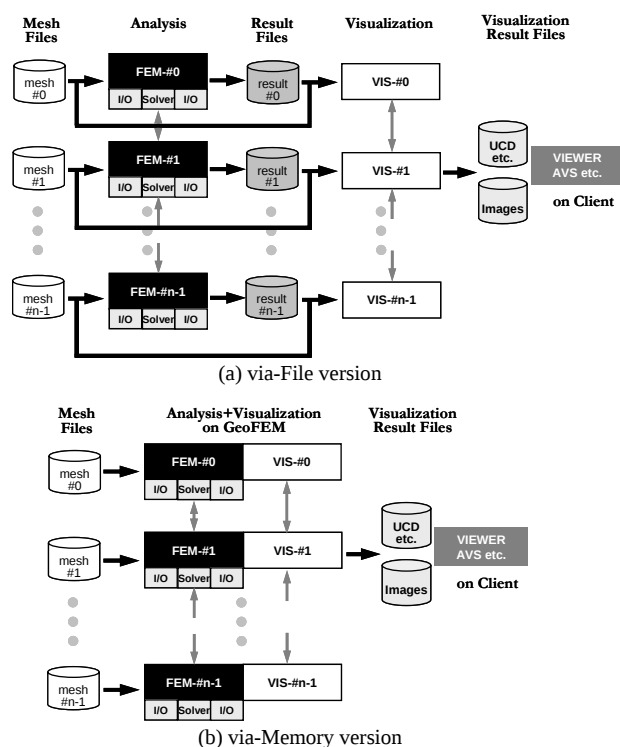


Fig.2 Data flow procedures in GeoFEM's parallel visualization subsystem (a) via-File version, (b) via-Memory version [1,2,3].

並列計算において、シミュレーションと可視化処理、可視化結果表示は別々のハードウェアにおいて実施されるため、並列処理における計算効率と対話的処理における利便性の両立は困難である。藤代ら〔1,5〕によると並列可視化処理における処理の流れとデータの関係は Fig.3 のようになる。並列計算のための環境を PB (parallel backend, 大規模並列計算機)、表示処理のためのものを VF (visualization front end, 机上の PC など) とすると、処理の多くを PB 上で実施すれば計算効率は高まるが、対話性は低下する。結果として、その都度 PB にもどって並列計算を実施する必要があるため、全体としての処理時間を考慮すると却って非効率的になっている可能性もある。

GeoFEM の並列可視化サブシステムにおいても、Fig.4 に示すように、PB 側で実施する処理が多いため、並列計算性能、大規模データの効率的処理については優れているものの、視点の変更、対象の画面上での回転、切断面の変更などの操作を対話的に実行すること

は困難で、可視化処理のための並列計算を複数回実行する必要がある場合もある (Fig.4 参照)。

商用の並列可視化システムとして、PC クラスタを対象とした AVS/Express PCE〔6〕がある。このシステムでは、各プロセッサにおいて形状、計算結果に関する分散データを独立に処理し、得られた画像イメージを一つにまとめて表示する。この場合は PB と VF が同一のハードウェアである。非常に高い並列性能が期待されるものの、対話性という観点から「待ち時間」も多くなり、必ずしも使い勝手の良いものではない。

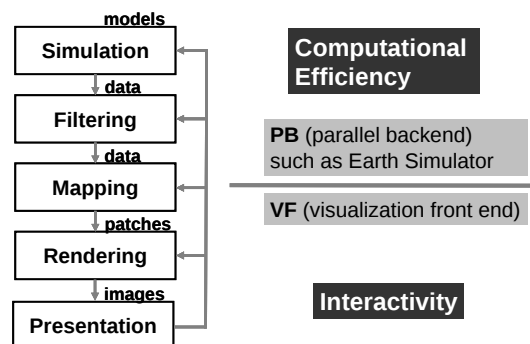


Fig.3 Data flow paradigm in parallel visualization [1,5]

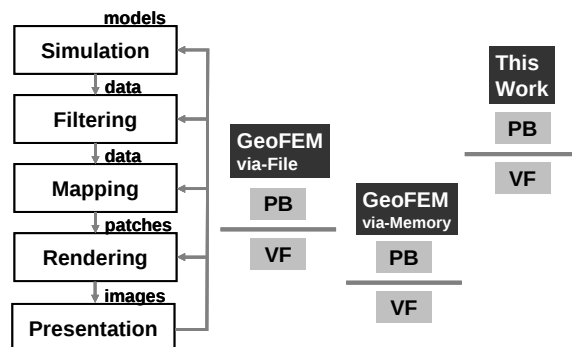


Fig.4 Data flow paradigm in parallel visualization subsystem of GeoFEM and the current work[1]

2. ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法

(1) 概要

本研究の目的は、Fig.4 に示すように並列処理における効率性を保ちつつも、できる限り処理の対話性を高めることが可能な可視化フレームワークを実現することにある。本研究では、1,000 を超えるようなプロセッサを有する並列計算機上のシミュレーションで得られた、 10^8 メッシュ以上の大規模データに対する有限要素法シミュレーション結果を、単一プロセッサ上で稼動する可視化ソフトウェアを使用して表示するための、効率的なデータ処理手法、簡略化手法を開発する。 10^8 メッシュ程度の規模のデータでも、 10^6 メッシュ相当以

下, すなわち 100 分の 1 以下にデータ量の削減が可能であれば, 1CPU の PC でも充分に処理が可能である。

本手法では, まず, 有限要素法等非構造格子による分散データ (形状, 計算結果) を, 八分木型階層構造による局所細分化 (Adaptive Mesh Refinement, AMR) を含むボクセル型背景格子にマッピングすることによって簡略化する。続いて, 境界面形状を簡略化する。2 つの簡略化から得られる形状情報 (ボクセル型格子中心, 形状表面パッチ) をもとに全体領域に Delaunay 法によって四面体要素を発生させることによって, PC 上のアプリケーションで処理可能な精度が高く, かつ容量の少ないデータファイルを生成する。本研究では, 表示用のソフトウェアとして, MicroAVS [7] を使用し, MicroAVS で処理可能な非構造格子用フォーマットである UCD (Unstructured Cell Data) 形式で出力する。細分化レベルを変化させることによって, データ量を変えることができ, 利用可能なリソースに応じた柔軟な処理が可能となる (Fig.5)。

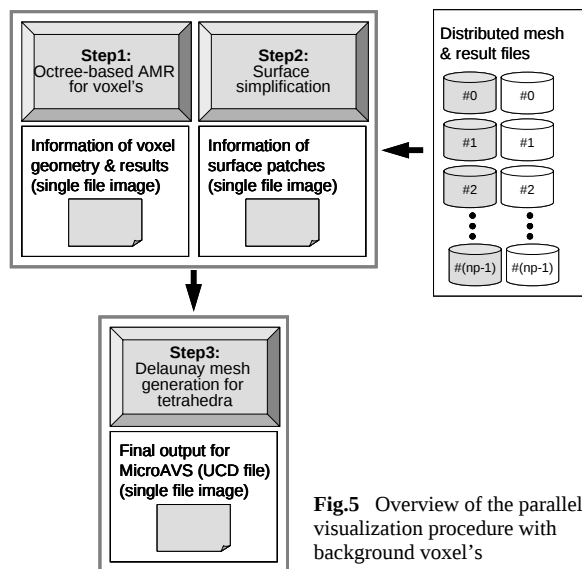


Fig.5 Overview of the parallel visualization procedure with background voxel's

(2) ボクセル型背景格子の適用

非構造メッシュによって表現された複雑な形状を簡略化して表現するために, 立方体, 直方体などのボクセル型背景格子にマッピングする手法は広く知られている。また, 応力集中, 衝撃波等, 従属変数の空間勾配が大きい部分には, Fig.6 に示すような八分木 (Octree) 型階層構造を使用して局所的にメッシュを細分化する, Adaptive Mesh Refinement (AMR) などの手法も, 正確に変数分布を表現する手法として使用されている [8] (Fig.7)。一般に, 一つのボクセル型背景格子にはもとの有限要素メッシュが複数含まれる。例えば, 10^6 メッシュを, 10^4 個のボクセル型背景格子にマッピングする場合には, 1 個のボクセルによって 100 個分の有限要素メッシュの情報が代表される。メッシュ単位で従属変数の急激な空間的変動が生じている領域では, より細かい背景型ボクセル格子が必要となる。AMR は細かい格子が必要な領域にのみ集中的,

局所的に格子を配置できるため, 効率的である。また, 現状では, ボクセルに含まれる有限要素メッシュの節点における従属変数値を算術平均してボクセルの代表値としているため, より従属変数の局所的な急激な変化, ピーク値を捉えることについて有効である。

ボクセル背景格子はグローバルに定義されるが, 並列計算に使用されるファイル (形状, 結果) は分散ファイル [1] として定義されるため, マッピング, 局所細分化などの処理は, Fig.8 に示すように各プロセッサ (領域) で局所的に実施している。ボクセルが複数の領域に属する場合, 領域間で通信を実施しながら情報を更新する。ボクセル型背景格子の個数は Fig.4 における「VF (Visualization Front-end)」のメモリ容量, 処理能力によって決定される。

GeoFEM では, 既に, 並列ポリウムレンダリングにおいて同様の手法が使用されている (Fig.9)。GeoFEM の可視化サブシステムでは, 有限要素法等非構造格子による分散データを, 局所細分化を含むボクセル型格子に並列にマッピングして, そのボクセル型格子上でポリウムレンダリングを実施している [1,2,3]。

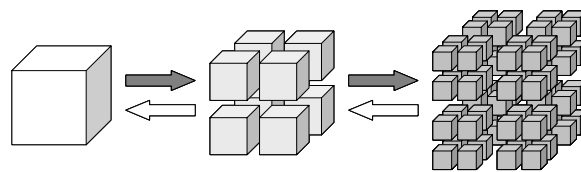


Fig.6 Hierarchical structure of octree-based voxel's

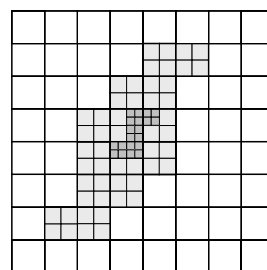


Fig.7 Local mesh refinement of voxel's (2D example)

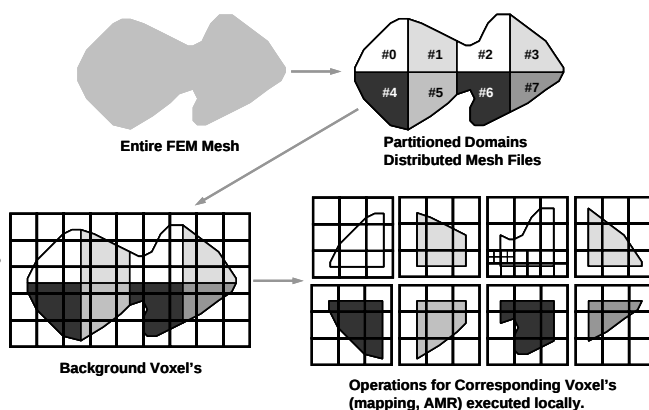


Fig.8 Local operations on voxel's for distributed data sets of parallel FEM computations.

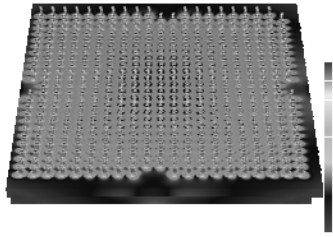


Fig.9 Results of parallel FEM simulation by GeoFEM on pin grid array of a processor for mobile PC (distribution of Von Mises stress). Parallel volume rendering by GeoFEM's parallel visualization subsystem [1,2,3].

(3) 表面形状の簡略化

Simplification (簡略化) の目的はオリジナルデータの特徴を出来るだけ保持しつつ、データ量を減らすことにある。(2) で述べた、ボクセル型格子へのマッピングもこうした「簡略化」手法の一つである。しかしながら、ボクセル型格子だけでは、複雑な形状の細部を再現することは困難である (Fig.10)。

Fig.9 において、Fig.6, Fig.7 で示したような八分木型階層構造を使用して、境界構造を再現することも可能であるが、そのためには非常に多くのボクセル型格子が必要となり、効率的ではない。

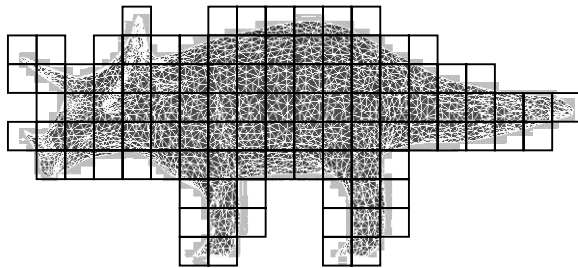


Fig.10 Mapping information of unstructured FEM meshes on to voxel's

そこで対象領域の表面形状の特徴を保つためにもう一つの「簡略化」を実施する。表面形状の簡略化 (Surface Simplification) については、これまで数多くの研究事例がある。近年は、Hoppe 等 [9] によって提案された、「反復的辺抽出法 (Iterative Edge Contraction)」が広く使用されている。反復的辺抽出法では、あらかじめ各辺にコスト関数値が与えられ、コスト関数値が大きい辺ほど、その辺を消去した場合の形状の再現性が悪化する。そこで、各反復において、最もコスト関数値の低い辺を除去し、消去された辺に接続する各辺のコスト関数値を更新する (Fig.10)。

様々な反復的辺抽出法が提案されているが、各手法の特徴は原形状と簡略化形状の間の誤差評価の手法に依存している。

本研究では、高精度で効率も良い Garland, Heckbert による QEM (Quadratic Error Metrics) 法 [10] を使用している。表面形状を三角形メッシュ (表面三角形パッチ) で表現し、この表面三角形パッチに対して QEM

法を適用している。GeoFEM では「点消去法 (Vertex Decimation)」 [11] による簡略化を実施していたが、本研究で採用している反復的辺抽出法の方が計算速度、簡略化のクオリティの点で優れていると言われている。

結果を可視化することを考慮すると、表面における従属変数分布とカラーマッピングの関係がスムーズに対応している必要がある。したがって、形状だけでなく、従属変数の分布も考慮した簡略化を実施する必要がある。本研究では、Garland, Heckbert による [12] によってこの効果を考慮している。

全体データの境界面上の節点数、面数も 1 プロセッサでは扱えないほど多くなる可能性があるため、本研究では、簡略化についても並列処理が実施されている。

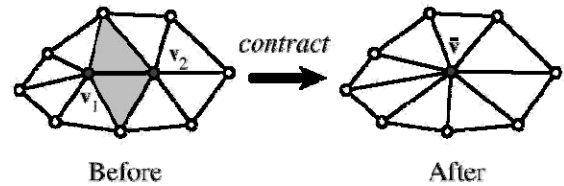


Fig. 10 Contraction of the edge (v_1, v_2) into a single point. The shaded triangles become degenerate and are removed during the contraction.

Fig.11 は QEM 法によって、三角形メッシュで表現された表面形状を簡略化した例である。初期状態では 11,884 個あった三角形メッシュが、1% (118 個) まで簡略化されている。2% (238 個) くらいまでは、原型がかなり忠実に再現されている。

簡略化された表面形状のクオリティ (表面三角形パッチの数, 対応する節点数) もまた、Fig.4 における「VF (Visualization Front-end)」のメモリ容量、処理能力によって決定される。

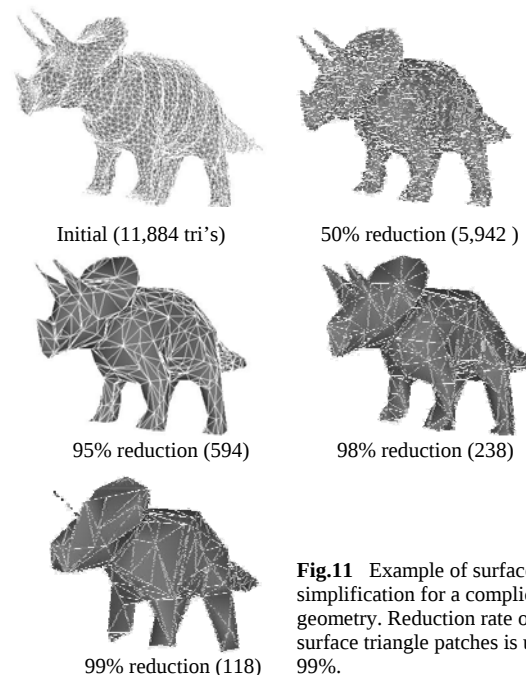


Fig.11 Example of surface simplification for a complicated geometry. Reduction rate of surface triangle patches is up to 99%.

(4) Delaunay 法による四面体メッシュ生成
(2) 及び (3) で生成された:

- 局所細分化を含むボクセル型背景格子
- 簡略化された表面形状データ

を使用して簡略化された可視化データを生成する。ボクセル型背景格子の重心, 表面形状三角形パッチの頂点を節点とする四面体を Delaunay 法〔13〕によって生成し (Fig.12), 形状データ, 各節点における従属変数値を, 出力する。この段階ではデータ量がもとのデータと比べて充分に小さくなっているため, PC または並列計算機の 1CPU を使った処理を実施可能である。出力されたファイルを PC 上の可視化ソフトウェアを使用して表示する。

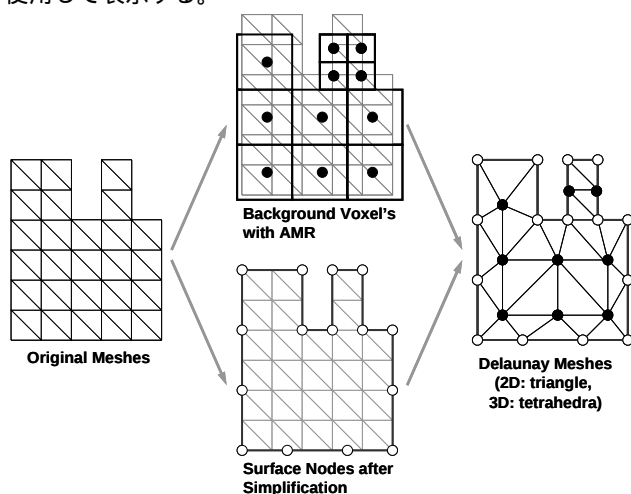


Fig.12 Tetrahedral mesh generation procedure based on Delaunay method for centers of background voxel's with AMR and surface nodes after simplification process.

3. 計算例

Fig.13 に示すような, 西南日本領域 (997,422 節点, 960,509 要素) における非定常熱伝導解析〔14〕を実施し, 計算結果の可視化を実施した。シミュレーション, 可視化処理には 64 コアを有する PC クラスタ (AMD Opteron 2.2 GHz) を使用した。

Fig.14 に局所細分化を含むボクセルメッシュを使用した可視化例を示す。Fig.15 は表面三角形パッチを簡略化した例である。

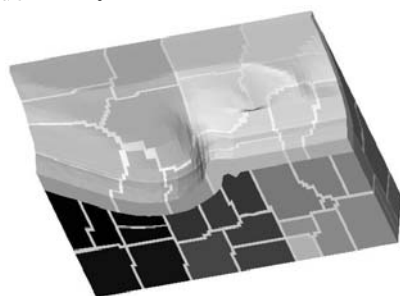
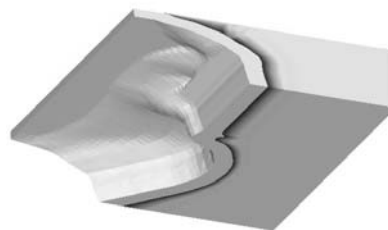
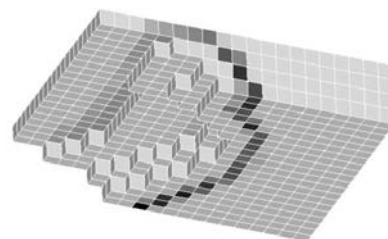


Fig. 13 Domain decomposition of Southwest Japan model (997,422 nodes, 960,509 elements) with 64 domains.

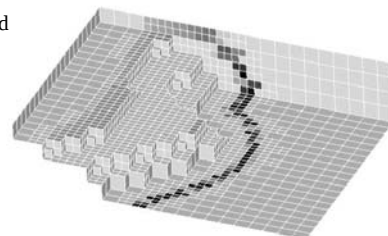
original FEM



initial voxel's
(1,181 cells)



1-level adapted
(4,407 cells)



3-level adapted
(35,212 cells)

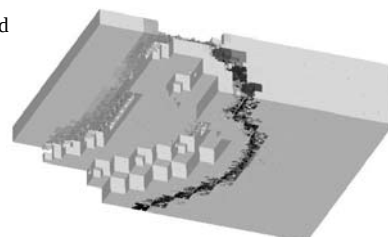


Fig. 14 Temperature distribution of Southwest Japan model with various types of background resolution.

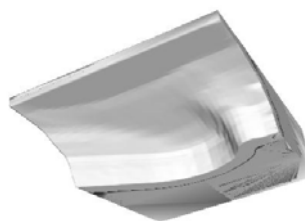


Fig. 15 Result of surface simplification. Reduction rate is 50% (72,830 triangle patches, 146,240 triangles in original data)

4. まとめ

本研究では、1,000 を超えるようなプロセッサを有する並列計算機上で 10^8 メッシュ以上の大規模問題のシミュレーションで得られた計算結果について 100 分の 1 以下にデータ量を削減することによって、MicroAVS など単一プロセッサ上で稼動する可視化ソフトウェアを使用して描画するための、効率的なデータ処理手法、簡略化手法を開発した。本手法では、有限要素法等非構造格子による分散データ（形状、計算結果）を、局所細分化を含むボクセル型背景格子上にマッピングした情報と、簡略化された境界面形状の情報をもとに全体領域を Delaunay 四面体要素に分割することによって、PC 上のアプリケーションで処理可能な精度の高い容量の少ないデータファイルを生成する。

利用者は PC 上で、切断面や視点の変更などの処理を手軽に実施することが可能となり、並列シミュレーション結果の可視化処理、結果分析に関わるプロセスの効率が大幅に改善される。

今後は、並列性能の向上、高速で精度の高い特徴抽出手法（変数分布、形状）について更なる検討を実施する。

また、現在は、ボクセル型背景格子の局所細分化レベル、表面形状の簡略化等のパラメータの設定を個別に実施している。表示処理に使用する「VF（Visualization Front-end）」の処理能力、メモリ容量に応じて、最終的に生成される四面体数等を制御できるような利用性の向上も併せて必要である。

謝 辞

本研究は、東京大学 21 世紀 COE プログラム「多圏地球システムの進化と変動の予測可能性」、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（CREST）および文部科学「戦略的革新シミュレーションソフトウェアの研究開発（RSS21）」の補助を受けている。

参 考 文 献

- [1] GeoFEM プロジェクト <http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>
- [2] Okuda, H., Nakajima, K., Iizuka, M., Chen, L. and Nakamura, H. (2003), "Parallel Finite Element Analysis Platform for the Earth Simulator: GeoFEM", Lecture Notes in Computer Science 2659, 773-780, Springer-Verlag.
- [3] Chen, L., Fujishiro, I. and Nakajima, K. (2004) "Parallel Visualization of Large-Scale Unstructured Geophysical Data for the Earth Simulator", Pure and Applied Geophysics 161, 2245-2263.
- [4] 地球シミュレータ <http://www.es.jamstec.go.jp/>
- [5] 中嶋正之、藤代一成 編著（2000）「コンピュータビジュアルライゼーション」、共立出版.
- [6] AVS/Express PCE <http://www.kgt.co.jp/features/pce/>
- [7] Micro AVS <http://www.kgt.co.jp/features/microavs/>
- [8] 中島研吾（2006）「不均質場における並列マルチレベル解法」、ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム HPCS2006, 95-102.
- [9] Hoppe, H., Deroose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W. (1993), "Mesh Optimization", ACM Computer Graphics 27, 19-26.
- [10] Garland M. and Heckbert P. S. (1997), "Surface Simplification using Quadric Error Metrics" Proceedings of SIGGRAPH 97, 209-216.
- [11] Schroeder, W.J., Zarge, J. A. and Lorensen, W.E. (1992), "Decimation of triangle meshes", ACM Computer Graphics, 26, 65-70.
- [12] Garland M. and Heckbert P. S. (1998), "Simplifying Surfaces with Color and Texture using Quadric Error Metrics" Proceedings of IEEE Visualization 98, 163-169.
- [13] Thompson, J.F., Soni, B.K. and Weatherill, N.P. (1999), "Hand book of Grid Generation", CRC Press.
- [14] 陳莉、中島研吾、藤代一成（2004）"Parallel Computational Steering using MxN Communication Model on HPC-MW", 日本計算工学会第 9 回計算工学講演会、計算工学講演会論文集 Vol.9, 867-868.