

## 固体地球プラットフォーム : GeoFEM

飯塚幹夫<sup>1)</sup>, 奥田洋司<sup>2)</sup>, 矢川元基<sup>2)</sup>, 中村寿<sup>1)</sup>

1) (財)高度情報科学技術研究機構 計算科学技術第2部

2) 東京大学 大学院工学系研究科

### 1. はじめに

地球温暖化、異常気象等の気候変動や集中豪雨・豪雪等の気象災害、また一方では地球規模のマントル対流運動からその地表への現れとしてのプレート運動に帰する日本列島域の地殻変形や局所的な地震・断層運動等の自然災害等、様々な地球変動現象の解明・予測は、国民生活の安全確保や人類社会の持続的発展のために重要かつ喫緊の課題である。

地球変動現象は、その時間的・空間的スケールが大規模であること、また多様な物理的プロセスの連鎖・複合により生ずる複雑系の現象であるため、実験等によりそれらを再現することが不可能である場合が多く、その原因の解明と発生の予測には大規模かつ高精度なシミュレーションが不可欠である。最近、進展が著しい地球観測や地球変動プロセス研究等の成果を基に、こうしたシミュレーションを行うことにより、はじめて、自然現象全体をそのまま理解できるようになるとともに、社会的ニーズに応え得る定量的かつ精度の高い予測を実現することが可能となるものであり、これに対する社会からの期待が高まっている。

このような期待に応えるため、振興調整費「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究(平成10年度~)」(中核機関:財団法人高度情報科学技術研究機構)のフレームワークのもと、地球変動現象の予測の実現を目指し、地球規模の複雑な諸現象を再現することが可能な大規模計算資源として文部科学省により開発が進められている地球シミュレータ等を活用して、大規模シミュレーションを行える高度な並列ソフトウェアを、地球科学と情報技術の研究者・技術者が連携して開発を進めている。これらの連携は、地球科学技術と情報科学技術の両分野をつなぐかけ橋として、新たなブレークスルーをもたらすものと期待されている。地球シミュレータ[1]は、地球環境問題の解決、自然災害に対する対策等への貢献を図るため、地球変動予測の実現を目指し、地球観測、地球変動プロセス研究及びシミュレーションを三位一体として、総合的・計画的に推進することとし、平成9年度より、5ヶ年計画で、地球の未来を映し出す「仮想地球」をコンピュータ上に再現することを目的に開発が進められている。

振興調整費「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」では、図-1に示すように、大気・海洋分野に関しては、地球温暖化、エルニーニョ等の地球規模の長期的な気候変動、また集中豪雨・豪雪・竜巻等の領域や局域における気象災害、さらに黒潮蛇行や海洋汚染に深く関係する日本近海沿岸の海洋挙動等に関して、地球観測データを統合的に利用しつつ、全地球規模から領域さらに局域までにわたる大気・海洋変動の諸現象を連関的にシミュレーションする高度な並列ソフトウェアの開発が進められている。固体地球分野では、種々の要因が複雑に絡み合

った固体地球システムの変動現象、例えば、地球内部の熱的非平衡状態から派生するマントルやコア内部の対流運動、また相対運動するプレート同士の相互作用の結果として理解される地震、火山活動や造山運動などの地殻活動現象について、定量的予測の実現を目指し、超高速並列計算機等を基盤として、膨大な観測データと複雑な理論モデルの計算の併合を可能とする高度な並列ソフトウ

地球変動の予測：“仮想地球” 環境問題, 自然災害  
 情報科学技術の高度化 並列スーパーコンピュータ, シミュレーションソフトウェア

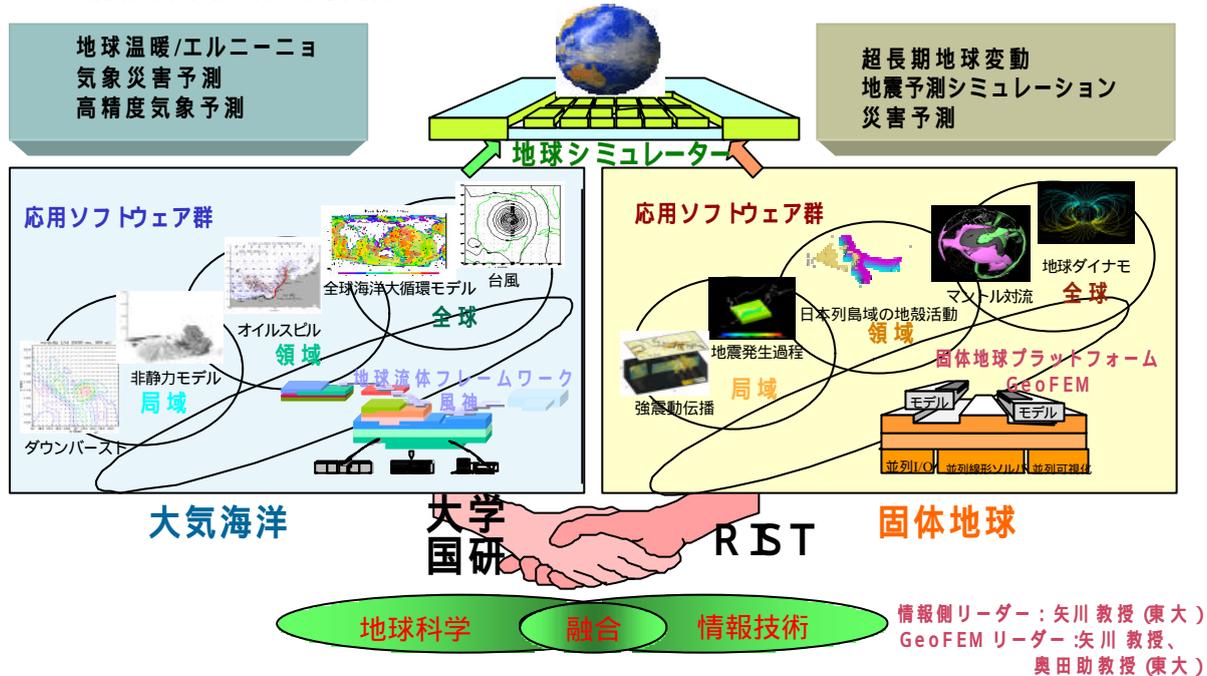


図-1 高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発 ( 科学技術振興調整費 総合研究 平成10年度～5年間 )

エアシステムの開発が進められている。一方、情報技術分野では、高精度の地球変動予測の大規模シミュレーションを実現するため、地球科学者と情報技術者が融合的に協力をしつつ、各研究機関が保有する大気、海洋および固体地球の様々な個別現象モデルに関する並列プログラムを準備する。これを通じて、個別現象モデルの並列プログラムへの適性および大規模シミュレーションの可能性を把握するとともに、各個別現象モデルを系統的に組み合わせて大規模シミュレーションを行えるプラットフォームの研究開発が実施されている。

GeoFEM [ 2 ] ~ [ 5 ] は、上記固体地球に関わるマルチフィジクス / マルチスケールな諸問題を、地球シミュレータ等の超並列計算機をプラットフォームとして解析する高度な並列ソフトウェアシステムである。GeoFEM においては、プラットフォームを通して、超並列計算機を容易にかつその性能を有効に利用できるような工夫がなされている。本報告では、このような観点に注目し、GeoFEM の概要について説明する。

## 2. 固体地球プラットフォームとは

固体地球システムは、図-2 に示すような、広い時空間スケールに渡る多様な物理現象が連成する大規模で複雑なシステムである。近年まで、各スケール・各モデルは個別の研究者・研究グル

ープにより独立に研究されてきていた。一方、現象の複雑性から物理シミュレーションモデルの発展が困難であった分野であるが、近年、断層の破壊モデル等の物理モデル研究の急速な進展により、計算機シミュレーションによる研究が急速に発展しており、地球全体を1つのシステムとして取り扱わなければ、固体地球科学の進歩はあり得ないという認識が広がりつつある。したがって、固体地球科学分野では、多様な物理要素モデルとその連成シミュレーションが急速に重要となっている。具体的には、地球規模のマントル・コア対流運動、その地表への現れとしてのプレート運動に起因する日本列島域の地殻変動や局地的な断層運動、それらの連成現象を解析対象とする。

固体地球分野ではまだ確定していないモデルも多くあり、様々なモデルを試行錯誤的に取り入れてシミュレーションを行う必要がある。

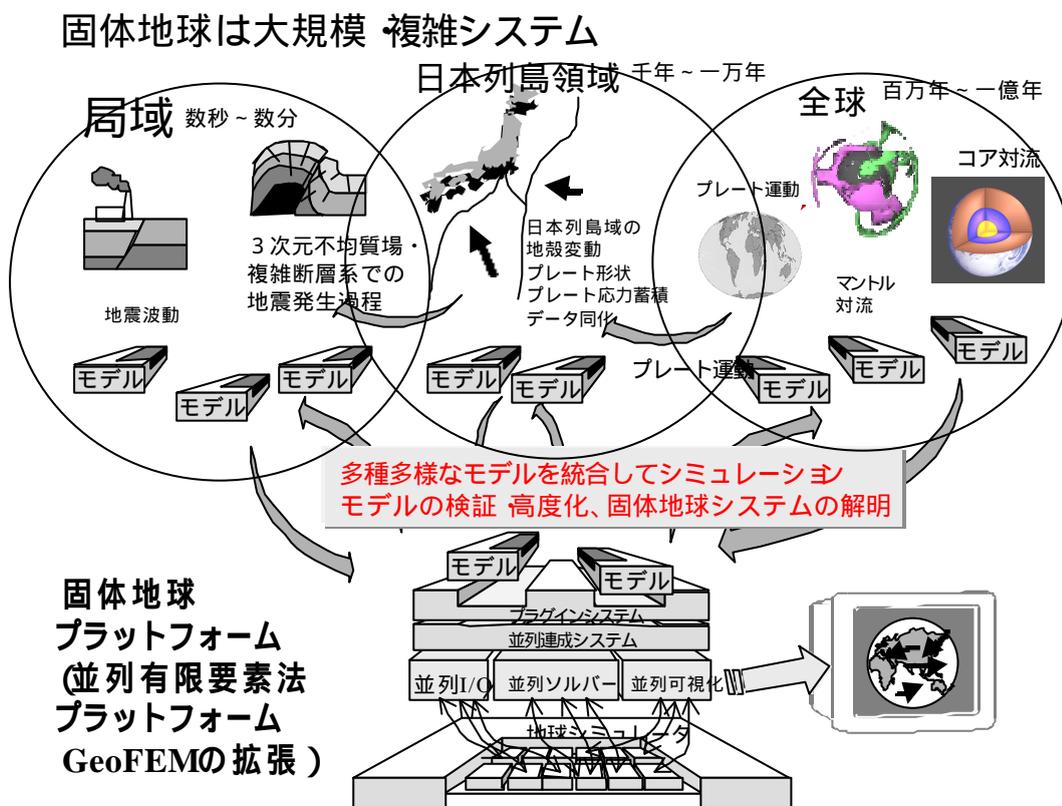


図-2 固体地球現象とシミュレーションプラットフォーム

これらのシミュレーションの中には、1つの現象だけでも地球シミュレータ相当、またはそれ以上の演算能力を必要としているものもあり、並列化により超並列計算機を利用することは必須である。また、固体地球の要素モデルで使用されている解析手法は有限要素法、差分法等多様である。それらの要素モデルや解析手法を、個別に並列化するためには多大な労力を要する。さらに、これらのシミュレーションには、GPSデータ、トモグラフィーデータのように、近年の観測技術の進歩により爆発的に増加する膨大な量の観測データが利用される。また、大規模な解析からはTeraバイト級の膨大な量の解析結果データが生成される。

このような、大規模なデータを扱い、大規模・複雑解析を可能とするシミュレーションシステムを構築するために、GeoFEMでは、超並列計算機を容易に、効率的に扱える並列I/O・並列線形

ソルバーサブシステム・並列可視化サブシステムを、また様々なモデルを試行錯誤的に取り入れ連成させるための、プラグインインターフェース・カップラーを、1つのプラットフォームすなわち、固体地球プラットフォームに統合している。GeoFEM では、固体地球プラットフォームを通して固体地球科学研究者が研究開発する多様なモデルを、また地球シミュレータ等の多様な超並列計算機を扱うようになっている。

上記のように、固体地球の要素モデルでは多様な解析手法が用いられているが、有限要素法は、

- ・複雑形状の取り扱いに適している
- ・局所的な処理が中心のため並列化が容易である
- ・複雑な構成式、物理モデルなどの適用が容易である

などの特徴を有しているため、第1ステップとして並列有限要素法を対象に大規模シミュレーションプラットフォームの研究開発を実施し、次にその拡張として他の解析手法を対象とした研究開発を実施すれば効率的である。したがって、GeoFEM においては、まず並列有限要素法プラットフォームの構築を優先的に行なってきた。本報告では、主に並列有限要素法プラットフォームに関して述べる。以上のような状況を考慮し、多様な要素モデルによる大規模計算の必要性に応えるため、下記のような機能を持つ並列有限要素法プラットフォーム GeoFEM を開発してきている。(以下、GeoFEM とは、並列有限要素法プラットフォームのことである。)

- ・固体地球システムで必要とされている多様な要素モデルが容易に組み込みでき(プラグイン可能)かつ容易に並列化(Plug & Parallel Play)される
- ・それらモデルの並列連成を容易に実施(Plug & Parallel Coupling)できる
- ・基盤機能として構造、熱流体の大規模並列有限要素法解析が可能
- ・その基盤機能の拡張として、有限要素法以外の手法の大規模解析が可能
- ・大規模な解析結果データを並列計算機上で高速可視化処理し、かつその大規模可視化データを簡単化してデータ量を削減しWS等の端末にて可視化結果を見ることを可能とする
- ・地球シミュレータの分散型並列ベクトルアーキテクチャへ適応する

GeoFEM は、多目的の汎用的な並列有限要素コードを目指した GeoFEM/Tiger (1997~1998) と固体地球の解析を目指した GeoFEM/Snake (1999~2001) の2つのフェーズで開発されてきている。次にそれらプラットフォームの要素技術を説明する。これらの説明は、Tiger の成果と現在進行中のSnake の開発にもとづくものである。

### 3. システム全体の統合化技術 [6]

GeoFEMは、並列有限要素法解析のシミュレーションプラットフォームであり、解析モジュールを組み込み、統合化された並列有限要素法シミュレーションシステムを構築するための基盤である。ここでは、GeoFEMのシステム構成とその統合化技術の基本であるプラグイン技術について説明する。図-3は、GeoFEMのシステム構成を、図-4はプラグイン技術を示す。GeoFEMシステムは、図-3に示すようにプラットフォーム、解析サブシステム、ユーティリティ群からなる。プラットフォーム

は、GeoFEMの核となるものであり、並列I/O、線形並列ソルバー、並列可視化、プラグインインターフェース、カップラーからなる。ユーティリティは、並列計算用の分散入力データを生成するパートナー、メッシュデータ・解析結果データの可視化データを表示するビューからなる。解析サブシステムとし、線形・接触構造解析、熱流体解析等のすでにプラグインされた基本的機能を有する解析モジュールが準備されている。

## プログラム本体

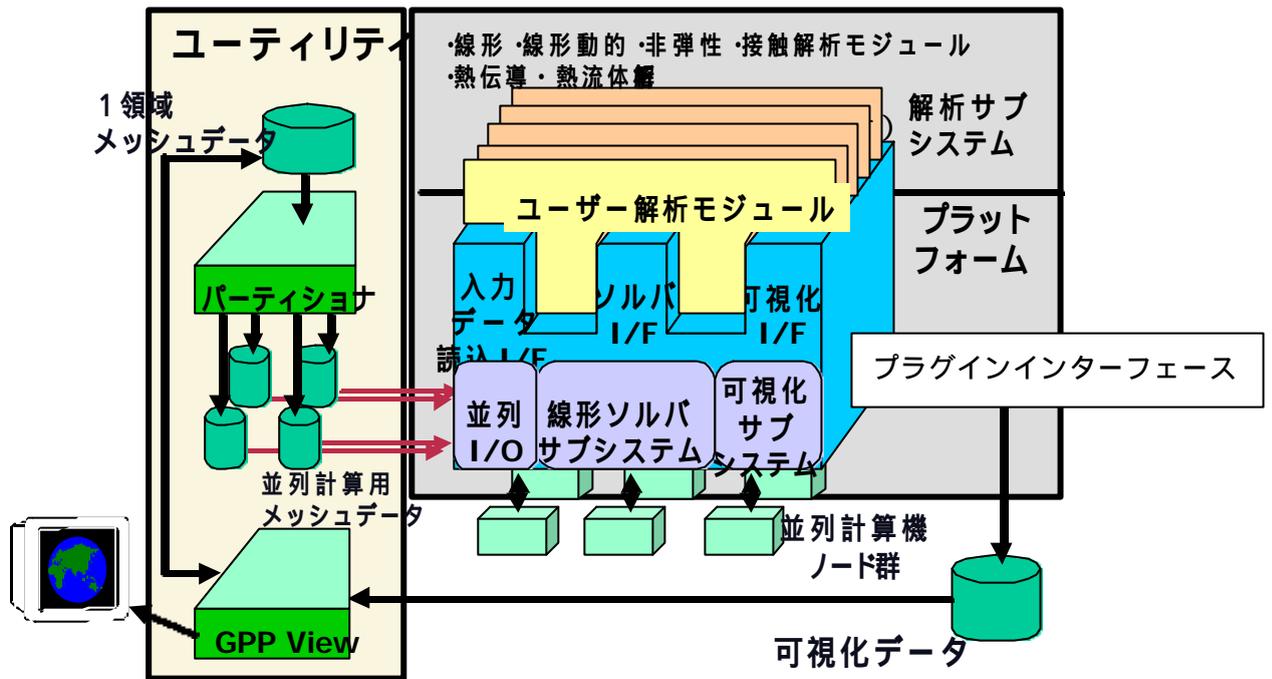


図-3 GeoFEMのシステム構成

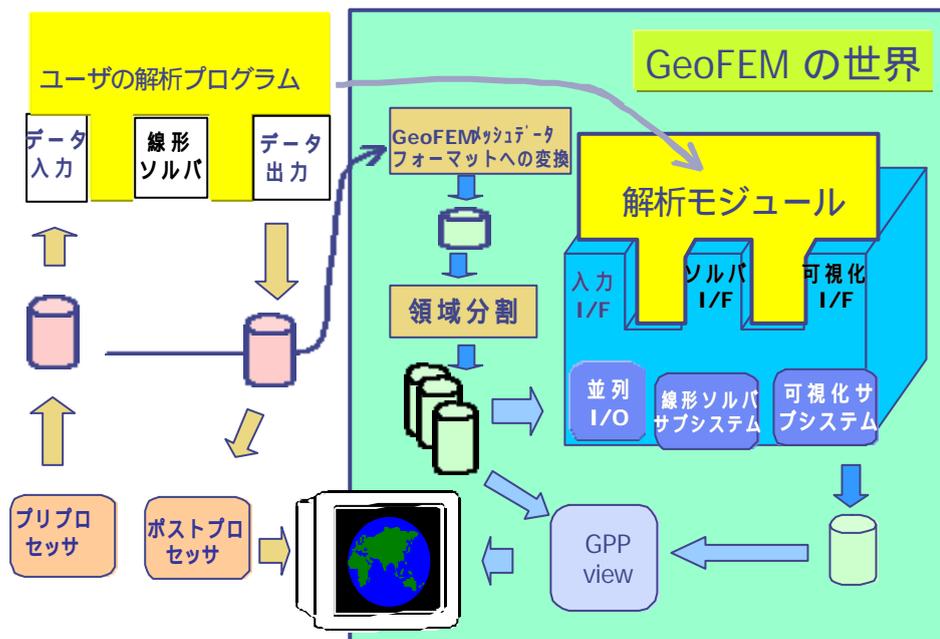


図-4 GeoFEMのプラグイン

GeoFEMのプラグインとは、作業面から見ると

- ・ユーザの解析コードの入出力部分を取り去り、プラットフォームとの接続界面であるAPI (Application Program Interface) に合わせて解析コードの接続部を変更し、プラットフォームの既定ルーチン呼び出すことにより、プラットフォームのサービス(分散データの読み込み、並列ソルバーの利用、可視化器へのデータ転送等)が受けられるようにすること。
- ・線形ソルバーの呼び出し部分をソルバーサブシステムのAPIに合わせて変更し、並列線形ソルバーを使えるようにすること。

である。効果面から見ると

- ・自分で解析コードの並列化をすれば、領域分割手法に基づいても、領域分割はどうするのか、通信テーブルはどう作るのか、解析モジュールのどこをどう並列化するのか、並列の入出力はどうするのか、可視化はどうするのかと...ほとんど絶望的な状況に陥る。つまり、非常に面倒である。
- ・GeoFEMを用いれば、入出力とソルバーに関するプラットフォームのAPIに合わせて、シリアルなユーザ解析プログラムのインターフェースを変更すれば、並列化が可能である (PLUG & Parallel Play)。
- ・しかも、すでにプラグインされた構造、流体の解析モジュールを使えば、後は単にシリアルな解析コードの開発と同じ作業で並列解析モジュールの機能アップを進められる。
- ・さらに、入力データが共有でき、可視化器も接続される。

ここで、プラグインを実現している仕組みとしては、

- ・データ構造とそれを反映した分散メッシュ入力データをサポートしている。分散メッシュ入力データは通信情報も含み、その分散メッシュデータは、GeoFEMのユーティリティにより自動生成されるため、ユーザは、通信データ生成を意識する必要がない。
- ・並列線形ソルバーのサポートをしている。GeoFEMでは、並列処理のための局所データ構造に基づき、線形ソルバーで集中的に並列処理を取り扱う。それゆえ、GeoFEMのプラグインによる解析プログラムの並列化では、並列化作業はユーザには見えない。
- ・並列データ入力のサポートをしている。分散メッシュデータ、コントロールデータの入力は自動的に行われる。
- ・並列データ出力のサポートをしている。並列計算機上で可視化器へ解析結果を渡すことが可能である。

このように、GeoFEMを用いれば、解析モジュールのプラグインにより、並列計算に関わる作業をすることなく、GeoFEMのプラットフォームで準備されている並列機能サービスが利用できるようになり、プラグイン後直ちに並列計算が可能となる。

#### 4. GeoFEMにおける大規模シミュレーション技術： GeoFEMにおける並列計算、ベクトル計算 [7]~[15]

##### (1) GeoFEMにおける並列計算

GeoFEMが対象としているシミュレーションは、細かいメッシュ・複雑形状でかつ高精度を要求する大規模問題シミュレーションである。そのため、GeoFEMでは大規模データを領域分

割 (Partition) し、局所化処理を基本としている。GeoFEM では、大規模問題を扱うことと処理の並列性を考慮して反復法を選択している。ill-conditioned な問題に対しては、前処理で対処する方針を取っている。また、有限要素法と並列反復法の特性を生かした局所データ構造を準備しており、GeoFEM の核となる技術となっている。GeoFEM を使って計算をする場合、GeoFEM 仕様の局所データを用意すればよい。しかし、この局所データは、GeoFEM のユーティリティ (パーティショナー) により自動的に準備されるのでユーザは、そのデータ構造の意味、生成に関しては意識する必要がないようになっている。GeoFEM における並列処理は、SPMD (Single-Program Multiple-Data) である。解析モジュールは領域ごとに要素単位の処理で係数マトリクスを生成し、シリアルコードと変わらない処理が可能となっている。したがって、全体系の計算のためには、領域間の通信が必要になる。グローバル処理、通信は線形ソルバーのみで生じる (図-5)。大規模問題を解析するために、前処理付き反復法を用いた並列線形ソルバーが開発されている。この並列線形ソルバーは、一億自由度の問題をターゲットに、ポータビリティを重視し、F90+MPI により開発されている。CG、BiCGSTAB、GMRES、GPBiCG などの反復解法 (スカラー、ブロックタイプ) をサポートしている。安定で並列向きな前処理として、オーバーラップつき局所不完全コレスキー/LU 分解、点ヤコビ、Block Scaling 等もサポートしている。

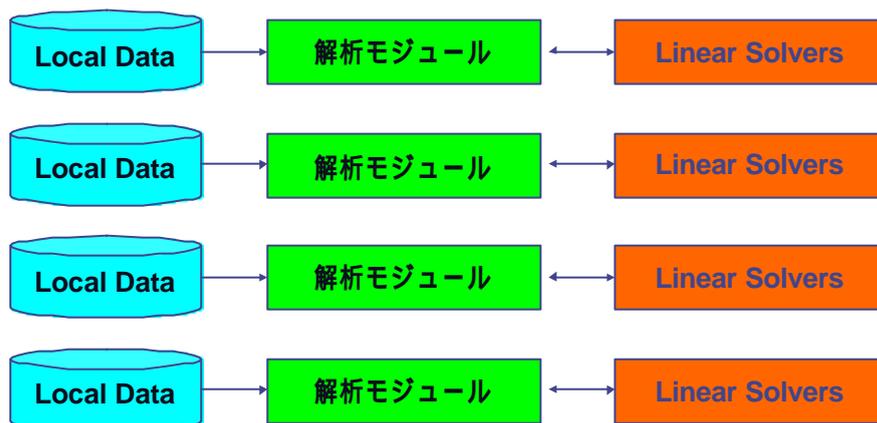


図-5 GeoFEM における並列処理

以下に GeoFEM における並列計算の成果を紹介する。

- ・最大 1 億自由度の高並列性能：日本列島域を対象とした長さ 1000km × 幅 1000km × 深さ 100km、メッシュ幅 3km の代表的な固体地球解析では、約 3000 万節点、三次元線形弾性解析の場合約 1 億元の連立一次方程式を解くことが必要となる。本並列線形ソルバーにより、SR2201 (1000 プロセッサ) を用いて、60%以上のスケーラビリティと 95%以上の CPU 利用率を達成した (図-6)。また同じく一億自由度の波動伝播問題 (陽解法) では、98% 以上のスケーラビリティと 98%以上の CPU 利用率を達成した。これは解析規模、並列性能ともに世界最先端のレベルである。
- ・複雑問題での大規模並列計算の達成：固体地球システムをシミュレーションするためには、非線形で複雑な問題を解析する必要がある。特に、固体地球シミュレーションの分野で重要な断層の接触解析問題は、解析が非常に困難である。このような非線形問題に対して、拡大ラグランジェ法を使用した非線形解析アルゴリズムとブロック前処理を導入した反復法による

線形ソルバーを開発し、効率的な解析を可能とした。また、工学から固体地球物理の広範囲な問題に渡り、複雑な問題において 100 万自由度規模の並列解析を達成した（図-7）。

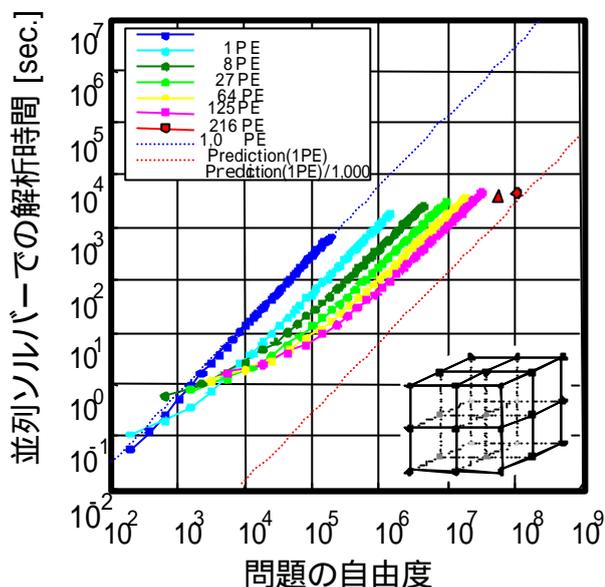
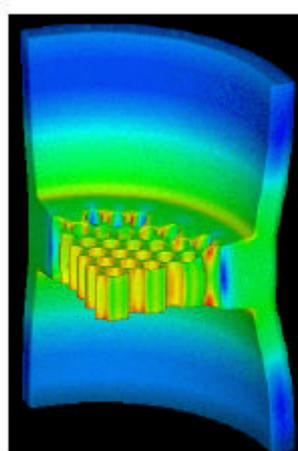
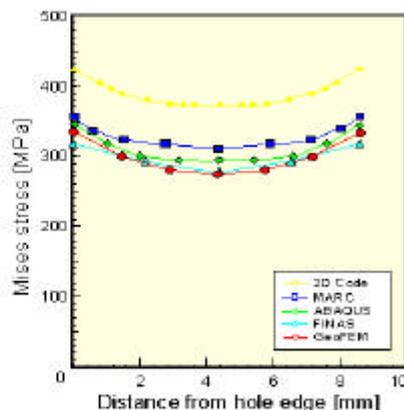


図-6 GeoFEM による、一億自由度解析

### 非弾性解析



応力分布



残留応力分布の比較

図-7 有限要素解析モジュールの工学系問題に対する機能拡張：GeoFEMの非線形解析で、熱弾塑性解析を取り上げ、管板構造の大規模非弾性解析を実施。

### (2) GeoFEM におけるベクトル計算

地球シミュレータを目指した線形ソルバーのベクトル化を実施した。ベクトル化においては、有限要素法のような非構造格子においても最大性能が発揮できるマトリクス格納方式（DJDS）とオーダリング手法（RCM + Cyclic Multicolor）を採用し、問題規模 0.20MDOFs で、NEC-SX4（JAERI/CCSE 2 × 3 PEs、12Gflops Peak）単体 CPU のピーク性能の 50%（970Mflops）に達する演算速度を得た。

また、マトリクスの生成・組み立て部分においても、要素ループの最内側への入れ替えと、その再起参照の回避により、問題規模 0.164MDOFs で、NEC-SX4 単体 CPU のピーク性能の 37%( 737Mflops ) に達する演算速度を得た ( 表- 1 )。

表- 1 GeoFEM でのベクトル性能

Procedures	Operation counts	Alpha 21164/500		NEC SX-4		Fujitsu VPP5000	
	Mflop	sec.	Mflops	sec.	Mflops	sec.	Mflops
Matrix Assembling	1540	12.5	123.6	2.1	<b>736.8</b>	0.9	1672.3
Solver	8530	197.1	43.3	9.1	938.4	4.0	2148.6
Total	10070	209.6	48.1	11.2	<b>900.7</b>	4.9	<b>2063.5</b>

- ◆ Test Problem Definition
  - Elastic Structure Analysis for Cube Shape
  - 50000 Elements
  - 164000 DOF
- ◆ Matrix Assembling
  - **740 Mflops on SX-4 (Peak/2.0Gflops)**
- ◆ Whole GeoFEM Test Code
  - **900 Mflops on SX-4 (Peak/2.0Gflops)**
  - **2.1 Gflops on VPP5000 (Peak/9.6Gflops)**

( 3 ) GeoFEM における地球シミュレータ上での演算速度予測

性能評価ツール Vampire、Dimeas を用い、640 ノードでの並列化効率を、T3E の結果から推定し 0.801 とし、文献、SR8000 の実績に基づきノード内 8PE の並列化効率を 0.8 と仮定し、SX-4 仕様・実績を参照し 1PE のベクトル性能を 49%とし、地球シミュレータ ( ピーク性能 40Tflops ) における GeoFEM の実行演算速度予測を行ない、12.6Tflops の予測値を得た。さらに共有メモリユニット内の並列化に関する検討、地球シミュレータの特徴である単独ベクトルプロセッサ、共有メモリユニット内並列、共有メモリユニット間並列の 3 段階の並列性に関する GeoFEM の特性の検討を実施し、地球シミュレータに向けた最適化の準備を進めている。

さらに、並列線形ソルバーに関しては、SMP クラスタ用ソルバー ( Hitachi SR8000 )、接触問題向け専用ソルバー・パーティショナー、マルチグリッドソルバー等多くの研究開発が進んでいる。

5. マルチスケール解析のための連成解析技術 [16]

固体地球システムは、広い時空間スケールに渡る多様な物理現象が連成する大規模で複雑なシステムである。このような固体地球システムの変動現象をシミュレーションするためには、超並列計算機上での多様な固体地球の要素モデルの連成解析が必要であり、それぞれのモデルの組み合わせを考慮して、実行、通信、I/O 等の統合制御を行うことが必要である。しかし、個々のプログラム開発において、それらを毎行なうことは極めて困難である。このため、固体地球プラットフォームにおいて統合された固体地球の要素モデルを効率的安定に実行する、統合的な連成制御方法の開発が進められている。GeoFEM では、可視化サブシステムも 1 つの連成サブシステムとして扱っている。

GeoFEM のカップラーは、異種解析モジュール間のデータ転送のための、モジュール間のメッシ

ユの関係の把握、物理量の内挿、プロセッサ間のデータ転送を実施する。これにより、解析モジュール利用者は、連成解析モジュール間でのメッシュの依存関係、物理量の内挿、プロセッサ間のデータ転送を意識することなく、並列環境下において連成解析システムを構築することが可能となる。図- 8 に GeoFEM におけるカップラーの概念図を示す。連成する各解析モジュールの分散入力メッシュデータの関係を Xmesh というカップラーツールで解析し、その分散メッシュデータ間の幾何学的関係データを生成する。連成解析時には、その関係データをカップラーが利用し、自動的に並列データ転送、データ内挿が行われる。

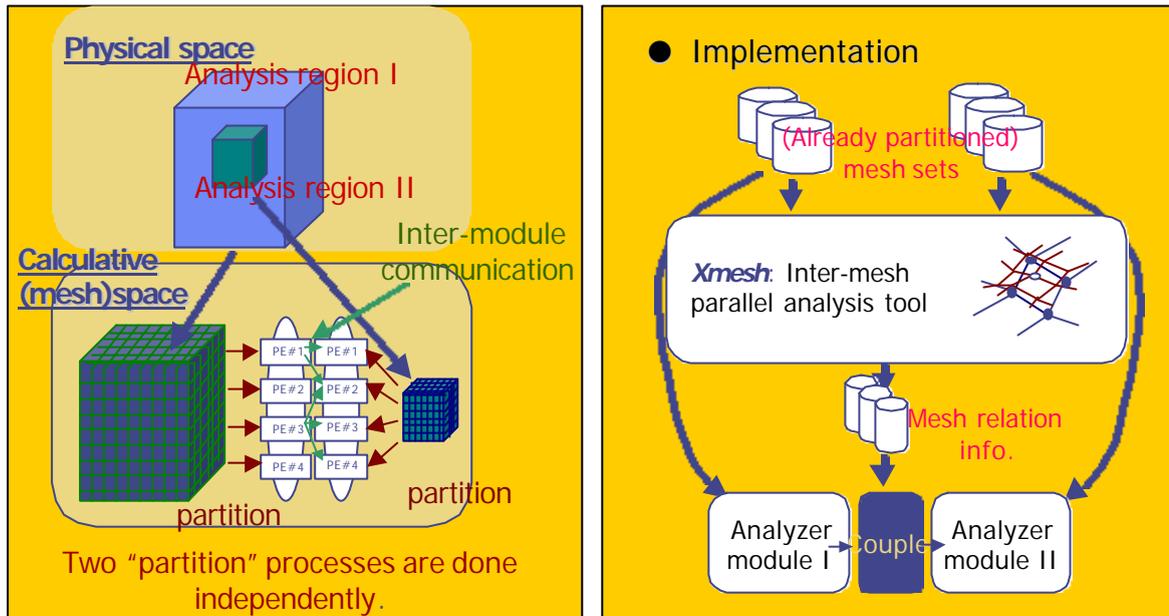


図- 8 GeoFEM のカップラーの概念図

次に、図- 9 に GeoFEM のカップラーを利用した連成解析システム構築の概念図を、図- 1 0 に連成システム全体の概念図を示す。

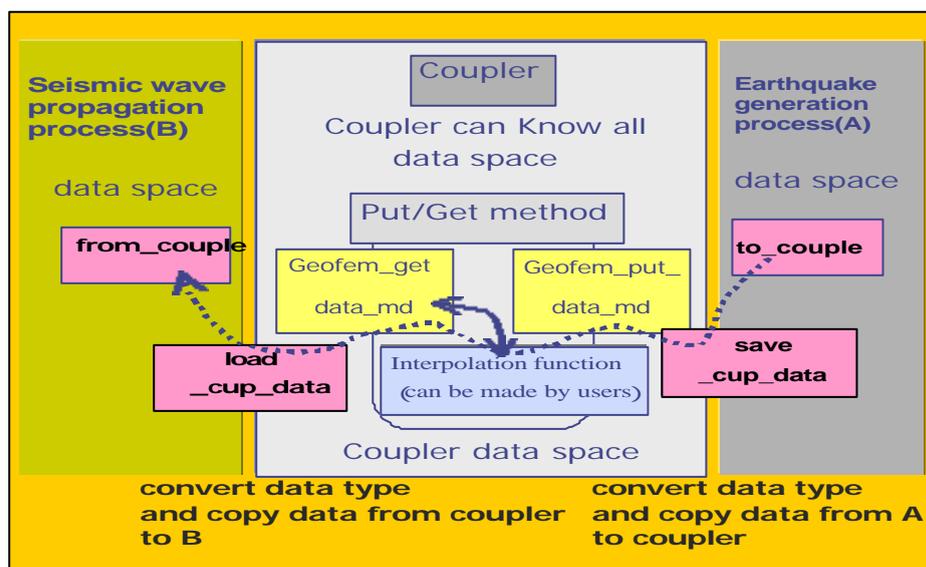


図-9 GeoFEMにおける、連成システム構築の概念図

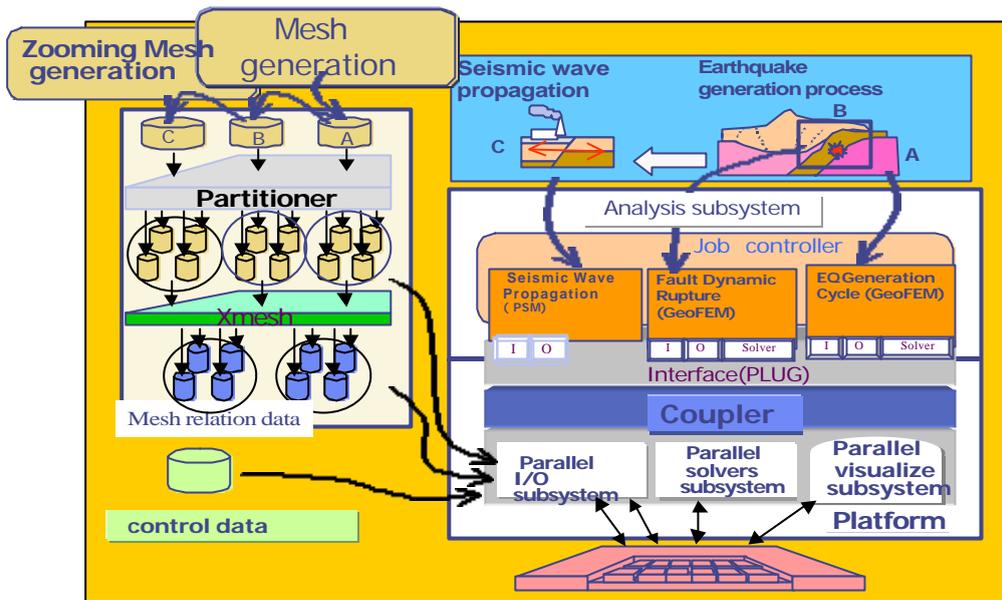


図-10 連成システム全体の概念図例で、固体地球の準静的地震サイクル・動的断層破壊・地震波動伝播解析の連成概念を示す。

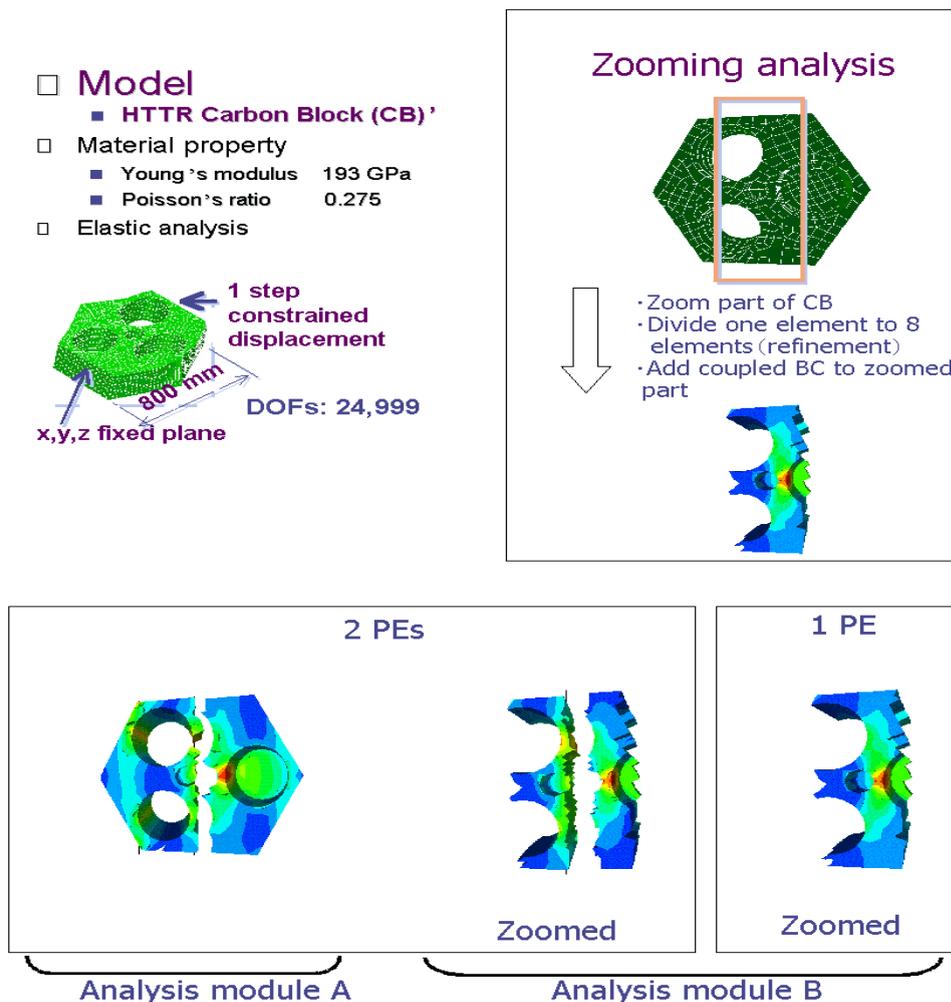


図-11 連成解析のためのカップラーを、Zooming解析に適用した検証実験例

GeoFEM では、連成システムは以下のように構築される。まず連成するサブシステムプログラムをモジュール（GeoFEM の解析モジュールは、F90 で書かれていることが前提）で包む。これは、GeoFEM では、すべての解析モジュールの統合されたプログラムが1つの実行モジュールとなるため、変数、サブルーチン名が当たることを避けるためである。次に、連成するサブシステムプログラムをプラグインする。Job controller を作成する。解析モジュール毎に、そのデータ構造とインターフェースデータ構造の変換サブルーチンを作成する。図-9の to\_couple、from\_couple に相当する部分である。モジュール間の内挿サブルーチンを作成する。データの load、save サブルーチンの作成。そして、並列連成サービスを利用できるように、図-9に示す、カップラーとのインターフェースサブルーチン geofem\_get\_data\_md、geofem\_put\_data\_md をコールする。これだけで、自動的に並列データ転送、データ内挿が実施されるようになる。このように、GeoFEM では、シリアル解析コードの連成システム構築に必要な最小限な作業は実施しなければならないが、並列に関連することは、全て GeoFEM のプラットフォームが提供するため、ユーザは並列を意識することなく連成システムを構築することが可能となる。

## 6. 大規模可視化技術 [17]~[18]

大規模シミュレーションでは大容量の解析結果データが生成され、可視化に代表されるポスト処理に過大な負荷がかかると予想される。そこで、大規模解析結果の処理を容易にする並列可視化手法、解析結果から自動的に特徴を抽出し、ユーザの解析結果データの理解を助けることを可能とする技術を開発してきている。

### (1) 大規模解析結果の処理を容易にするための技術

大容量解析結果の処理を容易にするために、大規模な可視化処理を高速に実施可能とする並列可視化手法と、その可視化処理から生成される大規模な可視化データ量を適切に削減することを可能とする、詳細度制御付き削減手法の開発を進めている。計算負荷の高い可視化マッピングを並列計算機上で並列に行ない、大規模解析結果データに対して高速な可視化を可能としている(図-12)。その並列可視化例を図-13に示す。

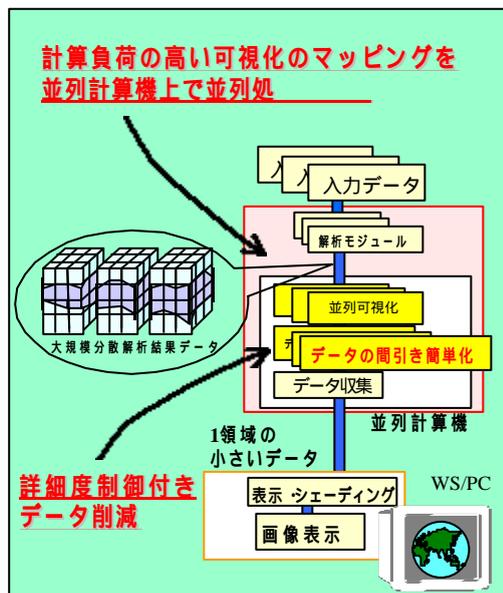


図-1 2 大規模解析結果の処理を容易にするための可視化技術

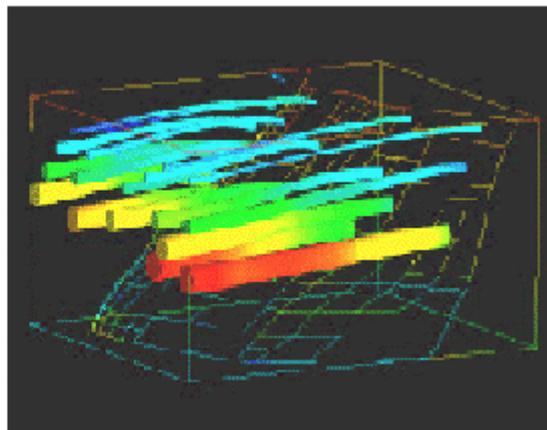
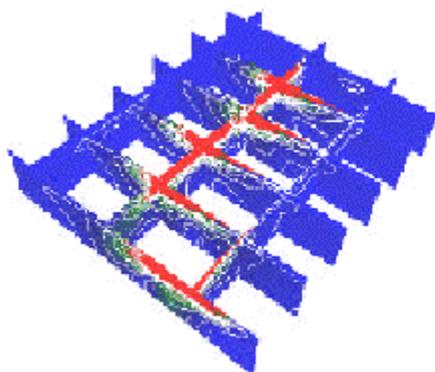


図-1 3 並列可視化例

また、可視化データ量を削減するために、大規模ボリュームデータから抽出される等値面や区間型ボリュームなどの幾何学的データ構造の詳細度を、幾何学的制約とカラーコーディングされた表面に分布する物理値の変化を同時に考慮に入れて制御する手法を開発した。これにより、物理的に重要な情報を失うことなく、可視化データを削減（データの間引き、可視化形状の単純化）をすることが可能となった。詳細度制御によりデータ容量が数分の一に縮小され、W/S、PC等のクライアントマシンに解析結果を容易にダウンロードでき、また対話的速度で視覚的に対象を調べることができる点で、その効果はきわめて大きい（図-1 2）。

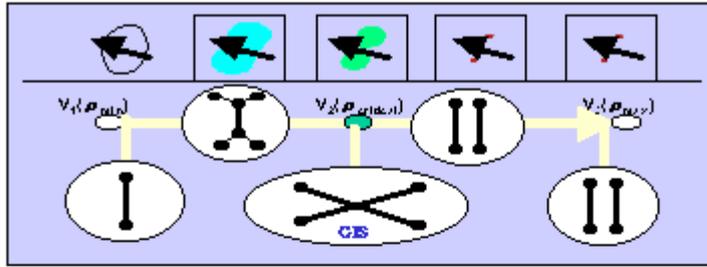
#### （2）解析結果の特徴を自動抽出する技術

ホモトピー法に基づく解析結果の特徴を抽出する技術の研究を実施した。この技術は、ホモトピー解析により、物理量の分布特徴を把握し、それに基づき不透明度や色相を強調する部分を自動的に決定し、ボリュームレンダリングを実行することで、物理量分布の特徴を自動的に認識しやすくする（図-1 4）。通常の可視化作業では、試行錯誤による可視化で物理量の分布特徴を認識するため、可視化回数が多くなるが、この方法を用いれば、可視化回数を劇的に減らせる可能性があり、可視化処理の負荷が大きい大規模解析においてはその意義が非常に大きい。

## 7. 研究成果の普及と海外研究協力

### （1）研究成果の普及

本研究の成果は固体地球分野のみならず、広く理工学一般への展開が可能である。成果を広く普及するために、GeoFEM セミナーを開催し、多数の参加者（第1回（'99、7月）：174名、第2回（'00、7月）：76名（第1回、第2回とも定員超え））を得て、GeoFEM で使用されている並列有限要素法の技術の紹介を行なった。開発したソフトウェアは WEB 上（<http://geofem.tokyo.rist.or.jp>）で公開され、現在までに299本ダウンロードされた（2001年7月11日現在）。

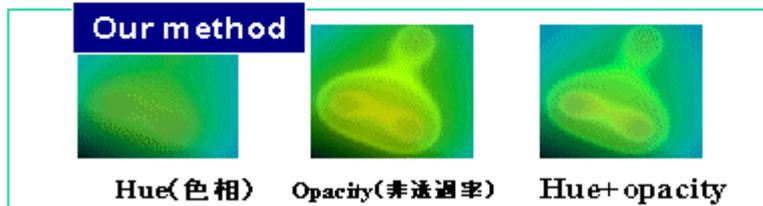


(a) ホモトピー解析: グラフが交差する特異点の配置で物理分布の特徴を解析する



Isosurfaces AVS defaults Constant opacity

(b) 従来の等値面、均一な色相や非透過率を使う方法では満足な可視化不可能



(c) ホモトピー解析により、物理量の分布特徴を解析し、それに基づき非透過率や色相を強調する部分を自動的に決定し、可視化した結果(物理量分布の特徴が自動的に強調された。)

図-14 ホモトピー解析とそれに基づく可視化の自動化・表示結果

内訳は、日本で148本、世界27ヶ国、アメリカ26本、ドイツ8本、中国7本等となっている。また、研究成果を、SC98、SC99、SC2000 (The International Conference for High Performance Computing and Communications) の Research Exhibition において展示し、世界にその研究成果を紹介した。

## (2) 海外研究機関との研究交流等

アメリカ国立サンディア国立研究所 (Sandia National Laboratories) とは悪条件マトリクスに対する線形ソルバー適用問題を、ドイツ国立情報処理研究所 (German National Research Center for Information Technology, GMD) とは AMG (代数的多重格子解法) に関する研究交流、また NEC 欧州研究所 (ドイツ) とは動的負荷バランスに関する研究交流を実施した。地震シミュレーションの国際的情報交換機関である ACES (APEC Cooperation for Earthquake Simulation) において、地震シミュレーションの研究交流を実施した。固体地球シミュレーションプラットフォームを開発する GeoFEM の研究活動は、固体シミュレーションを研究する米国の GEM (General Earthquake Model、<http://milhouse.jpl.nasa.gov/gem/>) や、豪における Australian Solid Earth Simulator (オーストラリア固体地球プロジェクト) の固体地球シミュレーションプラットフォームの開発に影響を与えた。

## 8. おわりに

固体地球に関わる諸問題を、地球シミュレータ級の超並列計算機をプラットフォームとして解析するマルチフィジクス/マルチスケール問題の並列有限要素法解析プラットフォーム GeoFEM の概

要について説明した。

GeoFEM/Tiger は、多目的の並列有限要素法コードであり、データ構造、並列環境下での前処理、MPP を最大限に稼働させる際のメモリ管理、非構造格子データの並列画像処理、オブジェクト指向のサブシステム構成、等における新たな技術の導入により、今後の並列有限要素法解析の基盤コードとして位置付けられることが期待される。

GeoFEM/Snake は現在、固体地球シミュレーションの統合化モデルの構築に向けて開発が進んでいる。それらは、

- ・全地球スケール
  - ・内的要因による固体地球変動（マントル・コア（図-15[20][21]））
  - ・外的擾乱に対する固体地球応答（地震波、電磁波）
- ・日本列島域スケール
  - ・プレート運動に伴う地震発生サイクル・動的破壊
  - ・地殻活動データの解析・同化
- ・局所不均質場スケール
  - ・複雑断層系での地震発生過程[22]（図-16[23]）
  - ・地震波動伝播

等の各スケール毎のシミュレーションを目指すものである。地球シミュレータをもってしてもこれらスケール毎のシミュレーションがやっと可能となると考えられている。このプロジェクトの成果が、固体地球科学を大きく前進させると共に、ハイエンドスーパーコンピュータ利用の拡大、大規模シミュレーション技術の高度化、他分野の大規模シミュレーションの活性化に大きく寄与するものと期待される。

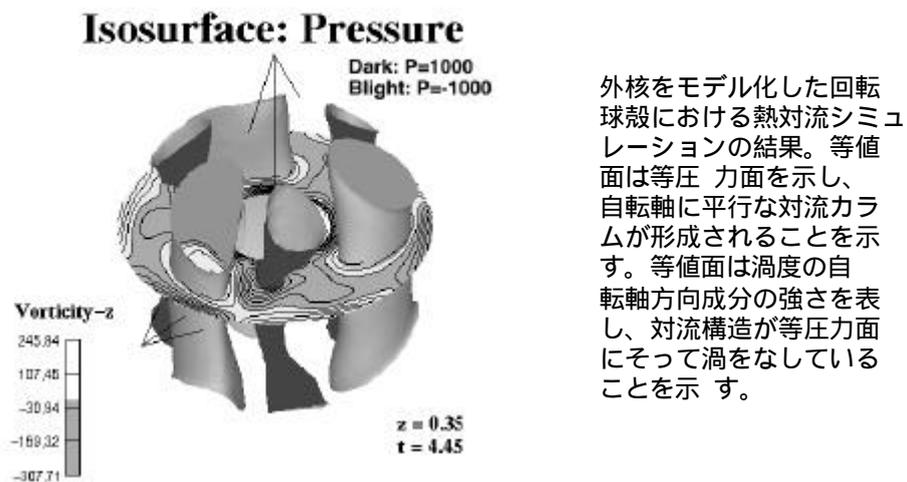


図-15 マントル・コアのダイナミクス解析の要素モデルとしてコア解析モジュールを開発しGeoFEMにプラグインし、大規模問題でのコア解析の性能を実証した。

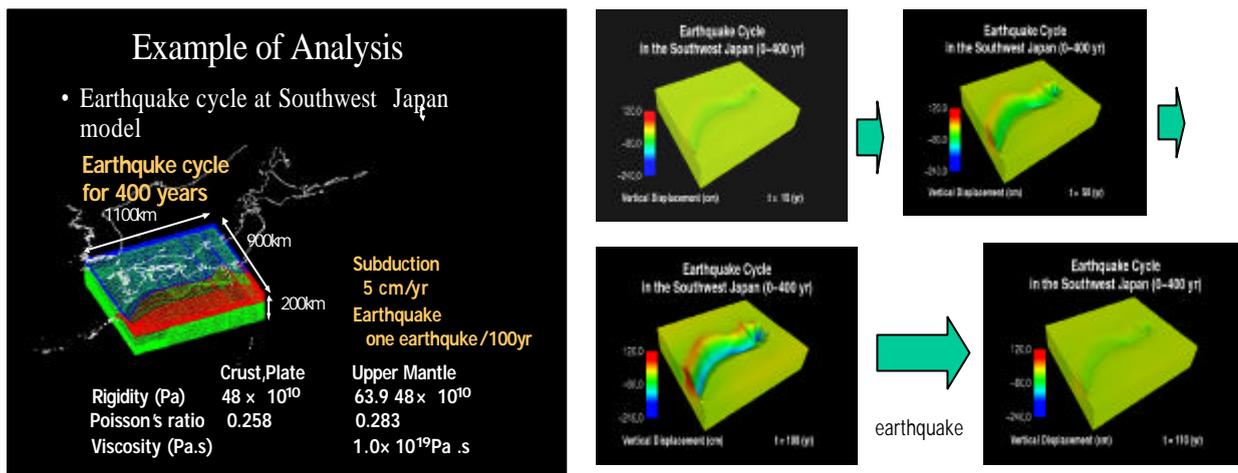


図- 1 6 マントルを含む不均質場の断層運動を合理的に取り扱える様に、並列粘弾性モデル、運動学的断層運動モデルを開発・拡充し、百万自由度規模の解析を実施し、大規模問題での不均質場の断層運動解析の可能性を実証した。

## 謝辞

本研究は、東京大学矢川教授をリーダーとする GeoFEM プロジェクトの研究成果に基づくものである。プロジェクトメンバーに深く感謝を表します。

## [ 参考文献 ]

- [1] <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-i/bio/pf6.html>
- [2] <http://geofem.tokyo.rist.or.jp>
- [3] Hiroshi OKUDA, Large-Scale Parallel Finite Element Analysis of Solid Earth by GeoFEM, Proc. Computational Science Workshop, p.11, 2001.
- [4] Genki YAGAWA, Hiroshi OKUDA and Hisashi NAKAMURA, GeoFEM-Multi Purpose Parallel FEM for Solid Earth, Bulletin for The International Association for Computational Mechanics, July 2000, No. 9, pp.2-5, 2000.
- [5] 奥田洋司, これからの計算力学, 日本機械学会第 13 回計算力学講演会講演論文集, No. 00-17, pp.747-748, 2000.
- [6] 関田大吾, 奥田洋司, 矢川元基, 中村壽, プラガブル並列有限要素法 GeoFEM/Tiger の開発, 機会学会年次大会, Nov. 1999.
- [7] K.Nakajima and H.Okuda, " Parallel Iterative Solvers with Localized ILU Preconditioning for Unstructured Grids ", IMACS Series in Computational and Applied Mathematics Vol. 5: Iterative Methods in Scientific Computation IV, 85-98, 1999.
- [8] 中島研吾, 有限要素法と並列化, Journal of JSCES, Vol.5, No2, 2000.
- [9] K.Nakajima and H.Okuda, "Parallel Iterative Solvers for Simulations of Fault Zone Contact using Selective Blocking Reordering", Preconditioning 2001, Tahoe, CA, USA, 2001.

- [10] 中島研吾、奥田洋司、“Parallel Iterative Solvers for Unstructured Grids on SMP Cluster Architectures”、日本計算工学会 計算工学講演会論文集、Vol.6, No.1, pp.203-204, 東京、May30-Jun1, (2001) .
- [11] Kazuo Minami, Hiroshi Okuda, “Performance Optimization of GeoFEM Fluid Analysis Code on Various Computer Architecture”, Abstracts of 13<sup>th</sup> Parallel Computational Fluid Dynamics (Parallel CFD2001), 2001.
- [12] K.Garatani, K.Nakajima, H.Okuda, G.Yagawa, “Three-dimensional elasto-static analysis of 100 million degrees of freedom”, Journal of Advances in Engineering Software 32(7)(2001)pp.511-518.
- [13] 柄谷和輝、中村壽、奥田洋司、矢川元基、並列有限要素法コード GeoFEM の性能評価、日本計算工学会論文集 Volume 2, 2000.
- [14] Kazuteru GARATANI, Hisashi NAKAMURA, Hiroshi OKUDA and Genki YAGAWA, Large-scale Parallel Wave Propagation Analysis by GeoFEM, HPCN Europe 2000 Proceedings, Mar. 2000
- [15] K.Garatani, GeoFEM requirements for dynamic load-balancing, 3rd DRAMA Steering Workshop, Sep. 1999.
- [16] 関田大吾、奥田洋司、矢川元基、有限要素法向け汎用並列疎結合連成カップラー、Transactions of JSCES, Paper No.20010025.
- [17] Fujishiro, I., Azuma, T., Takeshima, Y., and Takahashi, S.: "Volume data mining using 3D field topology analysis," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.20, No.5, pp.46-51, September/October 2000.
- [18] 中村浩子、竹島由里子、藤代一成、奥田洋司、大規模固体地球有限要素解析のための区間型ボリュームの詳細度制御、情報処理全国大会 57 回、1999.
- [19] Fujishiro, I., Takeshima, Y., Chen, L., Nakamura, H., and Suzuki, Y.: “Parallel visualization of gigabyte datasets in GeoFEM,” In Proc. 2nd ACES 2000 Workshop, Hakone, October 2000, S-D-27, pp.435-440.
- [20] Hiroaki Matsui, Thermal Convection Analysis in a Rotating Shell by a Parallel FEM - Development of a Thermal-Hydraulic Subsystem of GeoFEM -, ACES 2nd WS, Hakone, Nov., 2000.
- [21] Hiroaki Matsui, Development of a simulation code for thermal convection in a rotating spherical shell using the finite element method, AGU fall meeting, San Francisco, Dec., 2000.
- [22] Mikio IIZUKA, Hiroshi OKUDA and Genki YAGAWA, Nonlinear Structural Subsystem of GeoFEM for Fault Zone Analysis, Pure and Applied Geophysics, Vol. 157, pp.2105-2124, 2000.
- [23] M.Iizuka, H.Suito, M.Hyodo, K.Hirahara, and H.Okuda, “Large-Scale Viscoelastic Analysis”, 2<sup>nd</sup> ACES Workshop Proceedings, (The APEC Cooperation for Earthquake Simulation, Hakone Japan), 413-416, 2000.