



固体地球プラットフォーム： GeoFEM (大規模並列シミュレーションプラットフォーム)

Mikio Iizuka

(財) 高度情報科学技術研究機構 (RIST)

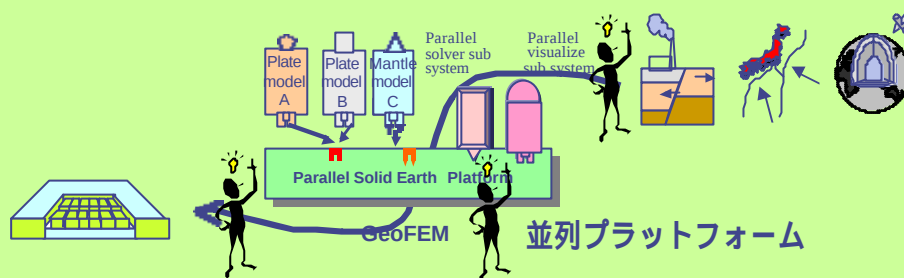
● 要求されている講演のポイント

- HPCの「新分野での利用事例」の話題として、アプリの狙い
- 計算機の利用上の工夫点(チューニングポイント等)
 - ITの観点
 - - 研究内容そのものが中心とした講演よりも、計算機の使い方の事例。
 - - なぜその計算機なのか、なぜその方法なのかの意図。
 - ・工夫点
 - - 計算機を途中で変えた場合(例:VPP500-->VPP800)の工夫点や印象
 - - 運用で解決できる点と、マシン等に依存しなければならない点
 - - チューニング、利用面での工夫点 他
- 将来展開(計算機側への要求要件等)
- 成果の普及。

- 本日の講演では、GeoFEMの特徴である以下の点に注目

- 並列プラットフォームを通して、並列計算機を容易に、有効に利用する

- GeoFEMは、洗練された並列計算のためのデータ構造をベースに、並列処理をソルバー部に全て集約させる（そして、ソルバーを並列プラットフォームの組み込む）ことで、解析プログラムの開発者が、並列計算を意識することなく、並列有限要素法の解析プログラムを開発できることを可能にしました。（GeoFEMセミナーちらしより）



概要

- はじめに
- 固体地球プラットフォームとは
- システム全体の統合化技術
- GeoFEMにおける大規模シミュレーション技術
 - 並列計算、ベクトル計算
- マルチスケール解析のための連成解析技術
- 大規模可視化技術
- 研究開発成果の普及と海外研究協力
- おわりに（将来展開）

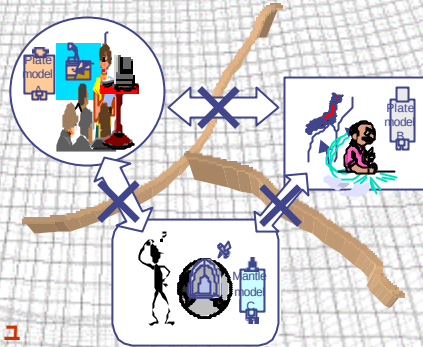
GeoFEM



固体地球プラットフォームとは

固体地球プラットフォーム開発の背景

- 過去の固体地球科学研究
 - 部分的、ケースバイケースのモデル、理想化されたモデル
 - 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
- 固体地球： 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
 - 近年、断層の破壊モデル等の物理モデル研究が急速に進展
 - 計算機シミュレーションによる研究が急速に発展している
 - 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
 - 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



GeoFEM

- 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
 - 確定していないモデルも多い
- 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
 - 要素モデル・解析手法を個別に並列化するためには多大な労力
- 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る
 - 超並列計算機を利用することは必須
- 膨大な量の観測データが利用される
 - 近年の観測技術の進歩によりGPSデータ、トモグラフィーデータのような観測データが爆発的に増加
- 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

GeoFEM

固体地球プラットフォームの構築方針

- 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、超並列計算機を容易に、効率的に扱えるようにする
- 共通基盤的機能を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
 - 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
 - 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
- 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

GeoFEM

GeoFEMから固体地球プラットフォームへ

- 固体地球の要素モデルは多様な解析手法が用いられている
- 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（並列有限要素法プラットフォーム）の研究開発を実施
 - 有限要素法は、以下の特徴を有する
 - 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
- 次ステップにその拡張として、他の解析手法を対象とした研究開発を実施
- 本講演では、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。）

GeoFEM

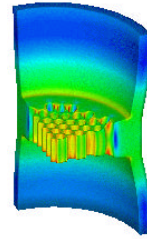
開発工程



Tiger

多目的汎用的な並列有限要素コードを目指す (1997~1998)

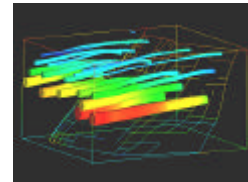
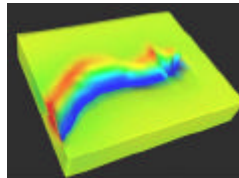
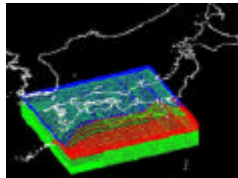
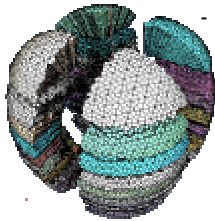
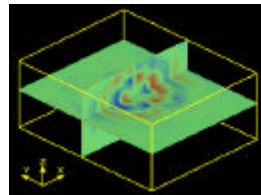
- High Performance FE Parallel Platform
Parallel I/O, Solvers, Visualization
Analysis modules (Fluid, Solid, Wave)
- Pluggable Design



Snake

固体地球解析を目指す (1999~2001)

- 100M ~ 10G DOF Problems
 - Multi-level Approaches Solvers
- Multi-module Couplers
- Optimized Solid Earth Simulation on "GS40"



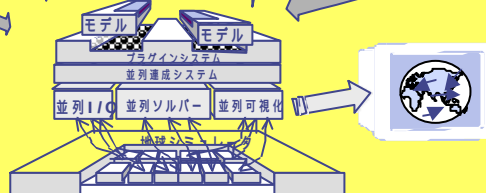
固体地球科学と固体地球プラットフォーム

RIST

□ 固体地球は大規模・複雑システム



□ 固体地球プラットフォーム (並列有限要素法プラットフォーム GeoFEMの拡張)

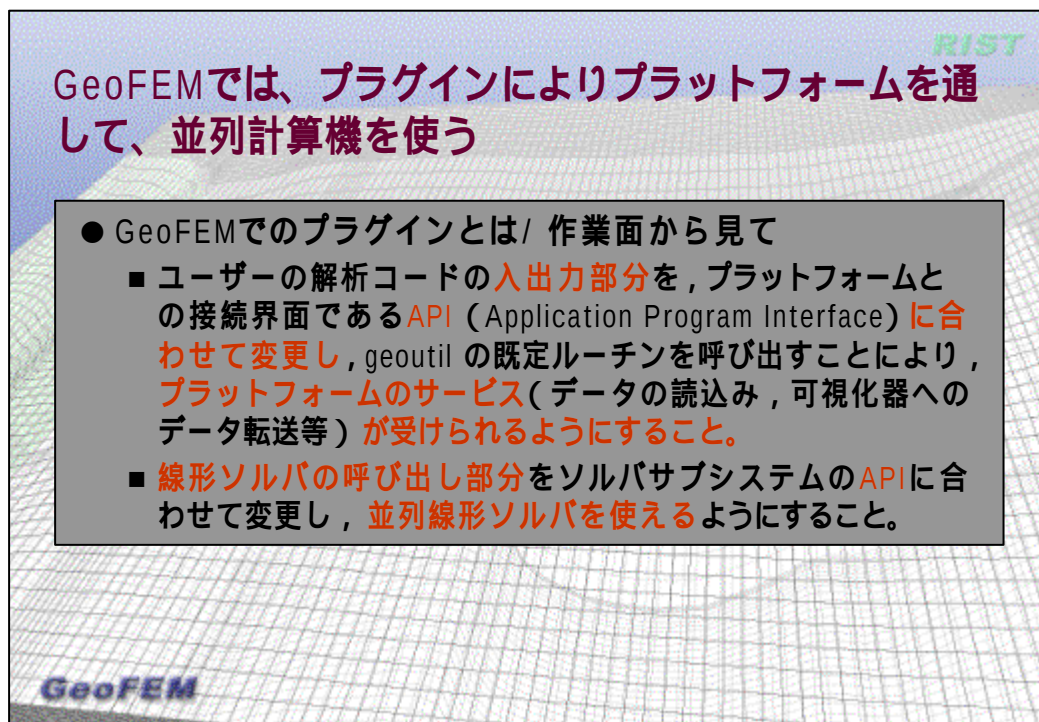
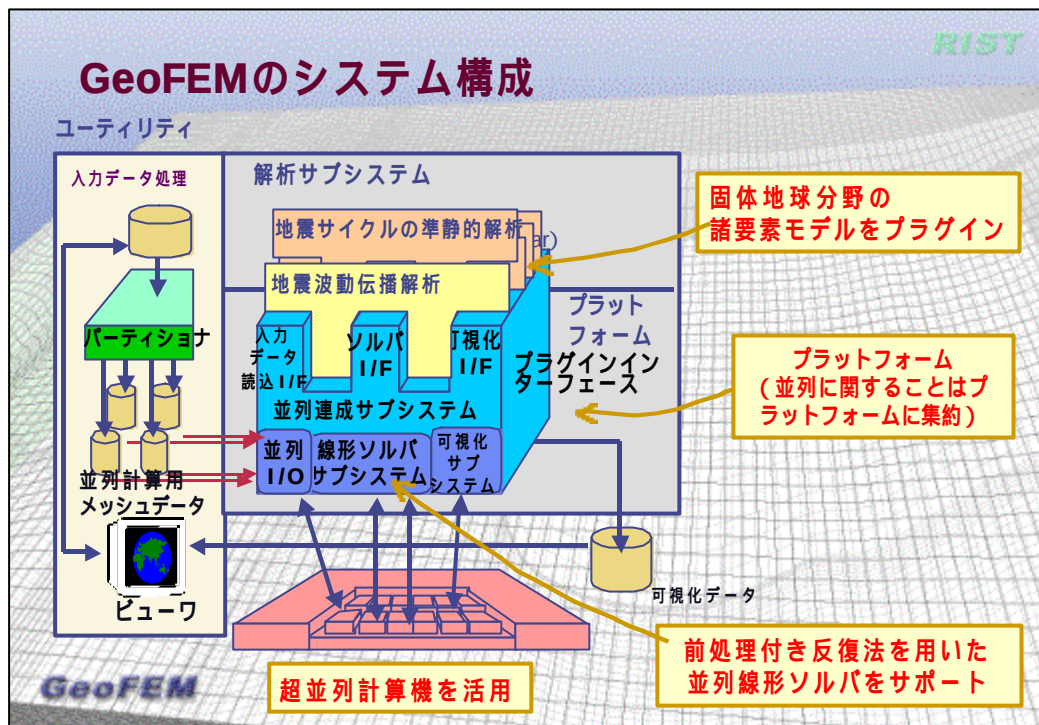


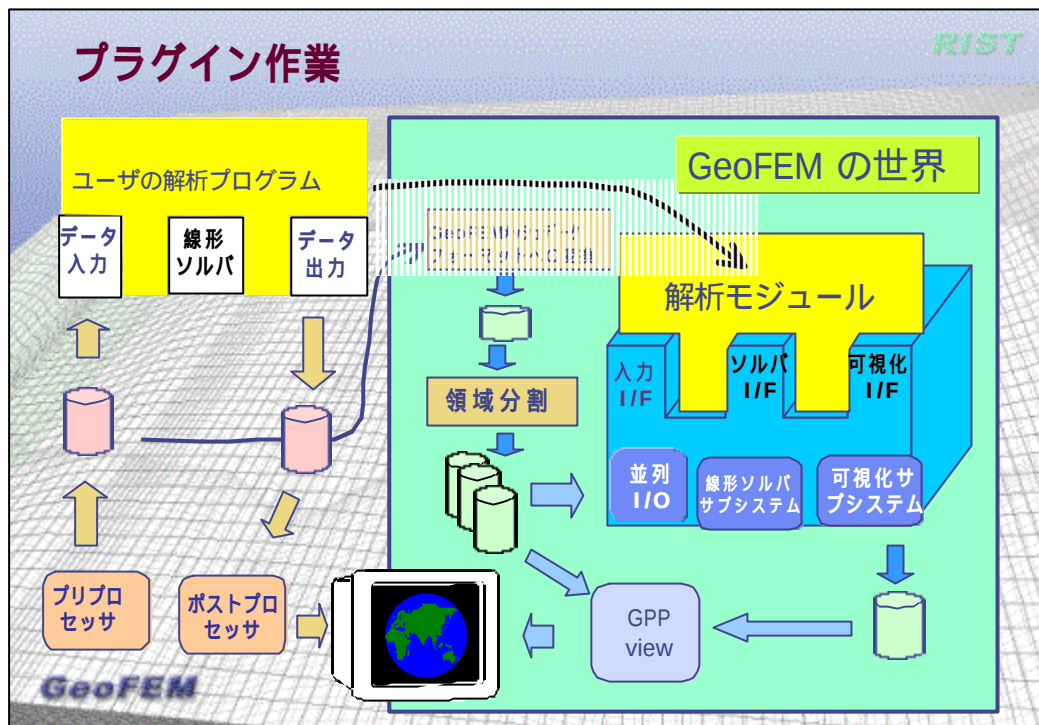
開発メンバー <http://geofem@tokyo.rist.or.jp>

矢川元基 (東大/Leader)
奥田洋司 (東大/Co-Leader/thermal-fluid)
飯塚幹夫 (RIST/structure)
柄谷和輝 (CRC, RIST/structure)
G. Prabhakar (RIST/structure)
関田大吾 (MRI /system integration, coupler)
竹島由里子 (お茶大/visualization)
陳莉 (RIST/visualization)
中島研吾 (RIST/linear solver, optimization)
藤代一成 (お茶大/visualization)
松井宏晃 (RIST/thermal-fluid)
南一生 (RIST/linear solver, optimization)
和田義孝 (RIST/pre&post-processing)
中村壽 (RIST/administration)
丸茂彩 (RIST/administration)
お茶大, 東大, 横浜国大 大学院生スタッフ
江連真一, 櫛田慶幸, 鈴木靖子, 永田雅喜, 中村浩子

システム全体の統合化技術

- GeoFEM
 - 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
 - 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
- ここでは、以下について説明
 - GeoFEMのシステム構成
 - 統合化技術の基本であるプラグイン技術について説明





RIST

2次元熱伝導FEM解析プログラムのプラグイン例

- FEM演習用コード, 定常熱伝導問題, フルマトリックス, 直接法ソルバ
- 2次元3節点三角形要素, 境界条件は規定温度, 熱流束, 発熱
- Fortran-77, common文

作業量 (4日)

プラグインされたプログラムの規模

割合	行数
(1) ユーザー (オリジナル) プログラム	
27.86%	534
(2) 制御部プログラム	
12.21%	234
(3) 入力データインターフェースプログラム	
16.01%	307
(4) ソルバ処理インターフェースプログラム	
33.33%	639
(5) 可視化部 インターフェースプログラム	
10.39%	203
(*) 合計	
100.00%	1917

- (1) オリジナルのプログラムに比べ, かなりソースコードの増加有り。しかし, オリジナルのプログラムは, 教育用であり, かなりシンプル。
- (2) メッシュ, 制御データの読み込み, ポストへの出力, ソルバの結合には, 通常この程度の行数は普通。
- (3) プラグインという言葉のイメージからくる作業の量にしては, 多いと思われる人もいるでしょう。
- (4) しかし, プラグイン作業により, 解析モジュールの並列化が可能であり, 飛躍的な並列化作業の簡素化になっている。

● 効果面から見て（どんな嬉しいことがあるのか？）

- 自分で解析コードの並列化をしたら，領域分割手法に基づいても，領域分割はどうする，通信テーブルはどう作る，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，可視化はどうすると...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では，入出力とソルバに関するプラットフォームのAPIに合わせて，シリアルなユーザの解析プログラムを変更すれば，並列化ができる(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の解析モジュールの機能アップが進められる。
- さらに，入力データが共有でき，可視化器も接続される。

GeoFEM

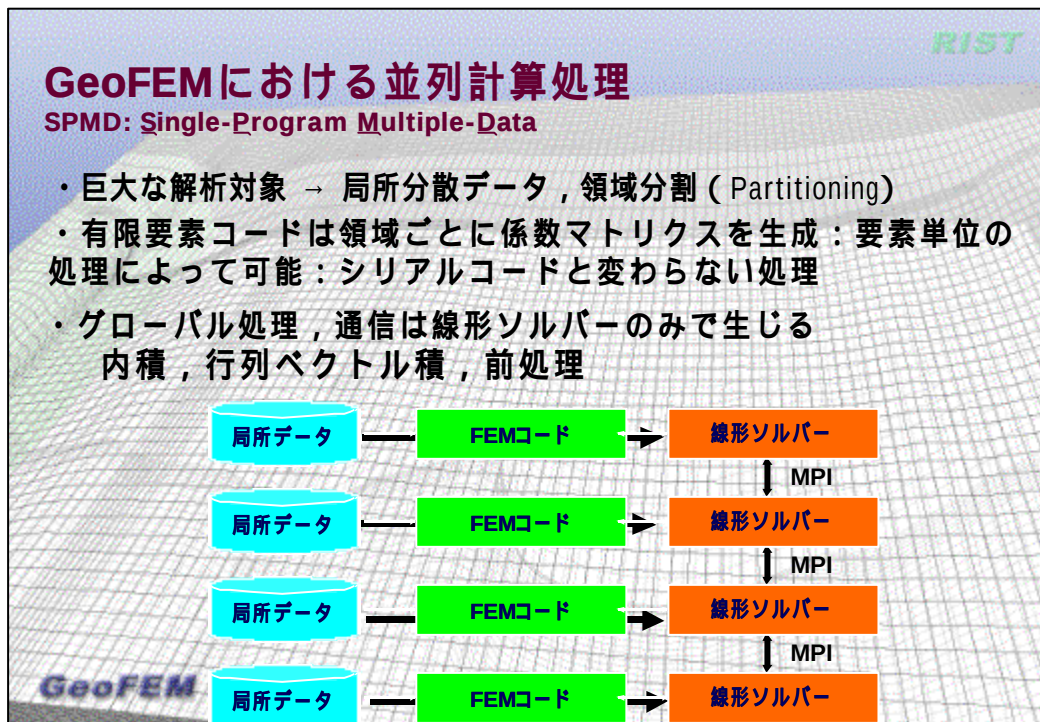
● プラグインを実現している仕組み

- データ構造とそれを反映した分散メッシュ入力データ
 - 分散メッシュ入力データは通信情報も含む
- 並列線形ソルバのサポート
 - GeoFEMでは，データ構造に基づき，線形ソルバ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，並列化の作業はユーザーには見えない！
- 並列データ入力のサポート
 - メッシュデータ，コントロールデータ
- 並列データ出力のサポート
 - 並列計算機上で可視化器へ解析結果を渡すことが可能
 - v3.0では，UCD出力，並列可視化器のどちらかを選択可能

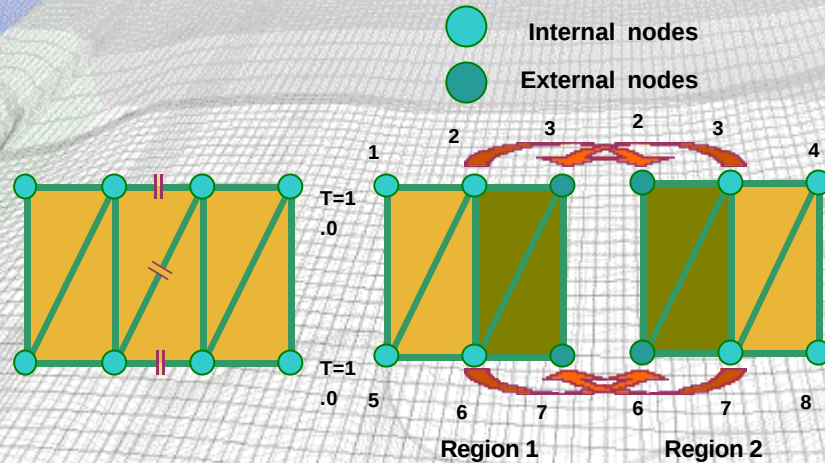
GeoFEM

GeoFEMにおける大規模シミュレーション技術： 並列計算、ベクトル計算

- 次に、並列有限要素法プラットフォームの要素技術に関して説明



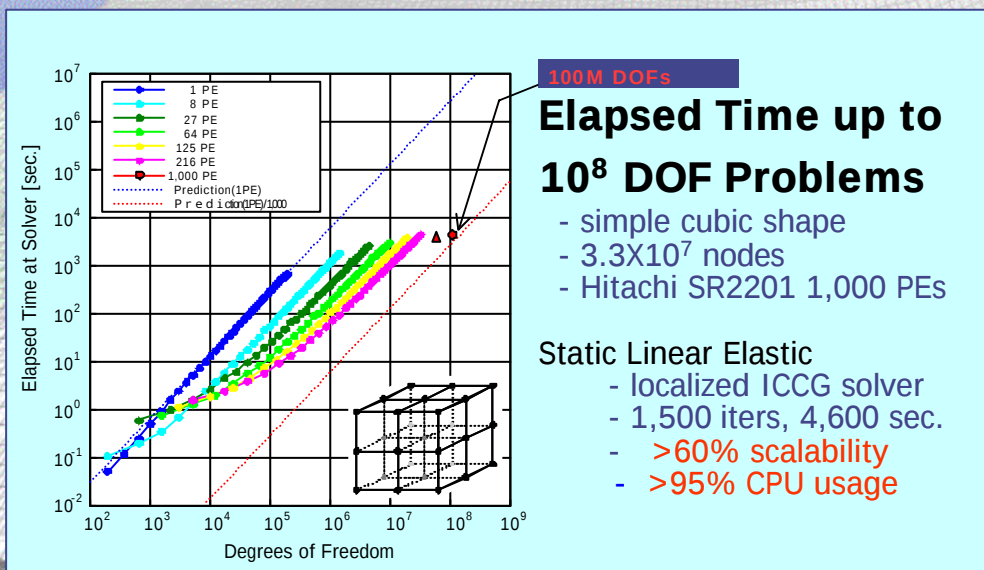
● Node Based Partitioning

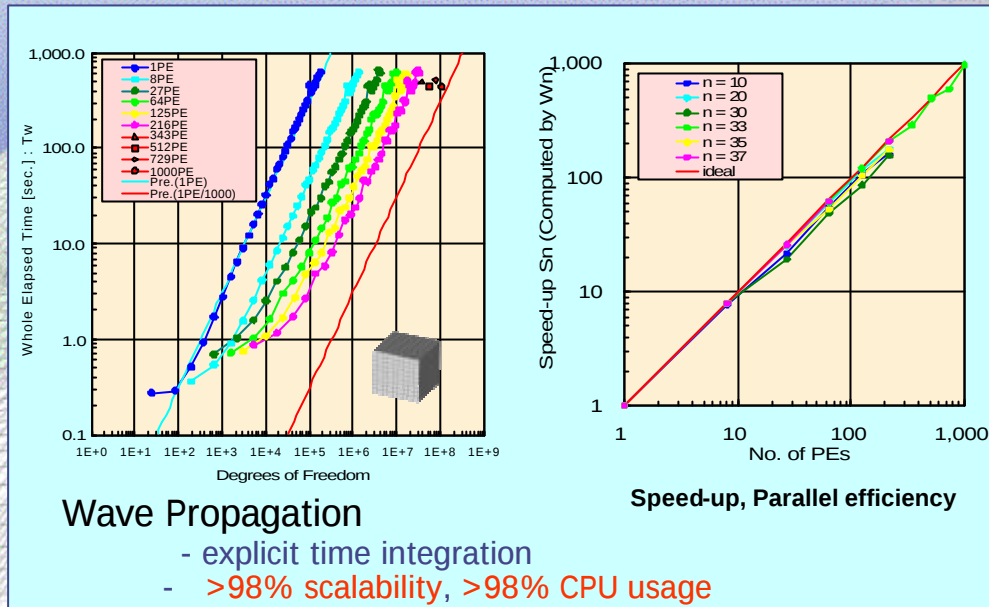


● Iterative Solvers(CG,Bi-CGSTAB...) with Localized preconditioners

GeoreM

Parallel Performance





Vector Performance

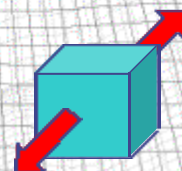
ベクトル計算機用ソルバーの結果

● Parallel/Vector ICCG for Solid Mechanics : Flat MPI type

- Localized Block IC Preconditioning : Full LU fact. in 3X3 Block
- DJDS (RCM + Cyclic Multicolor) Ordering for Vectorization
 - S.Doi, T.Washio, T.Osoda and et. al. (NEC)
 - Long Vector Length, Low Memory Storage

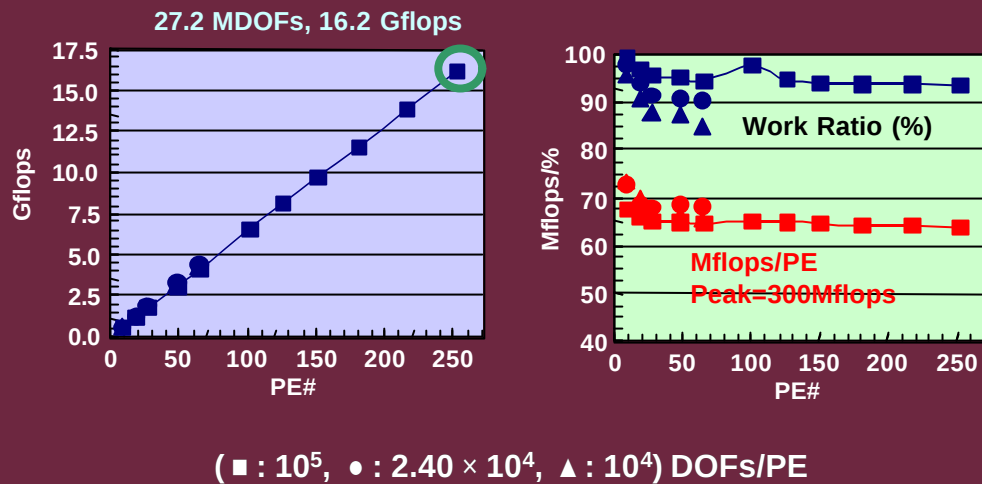
● Example : Pure Extension of Cube

- NEC SX-4
 - JAERI/CCSE
 - 2X3 PEs, 12 Gflops Peak
 - 0.20M DOFs, 1 PE, 970 Mflops (50% of Peak Performance)
- Hitachi SR2201
 - University of Tokyo
 - 1,024 PEs, 300 Gflops Peak
 - Pseudo Vector : Distributed Memory Architecture
 - 27.2M DOFs, 252 PEs, 95% Parallel Work Ratio
 - 16.2 Gflops (>22% of Peak Performance)



Recent Results :

Performance on SR2201: Fixed Problem Size/PE

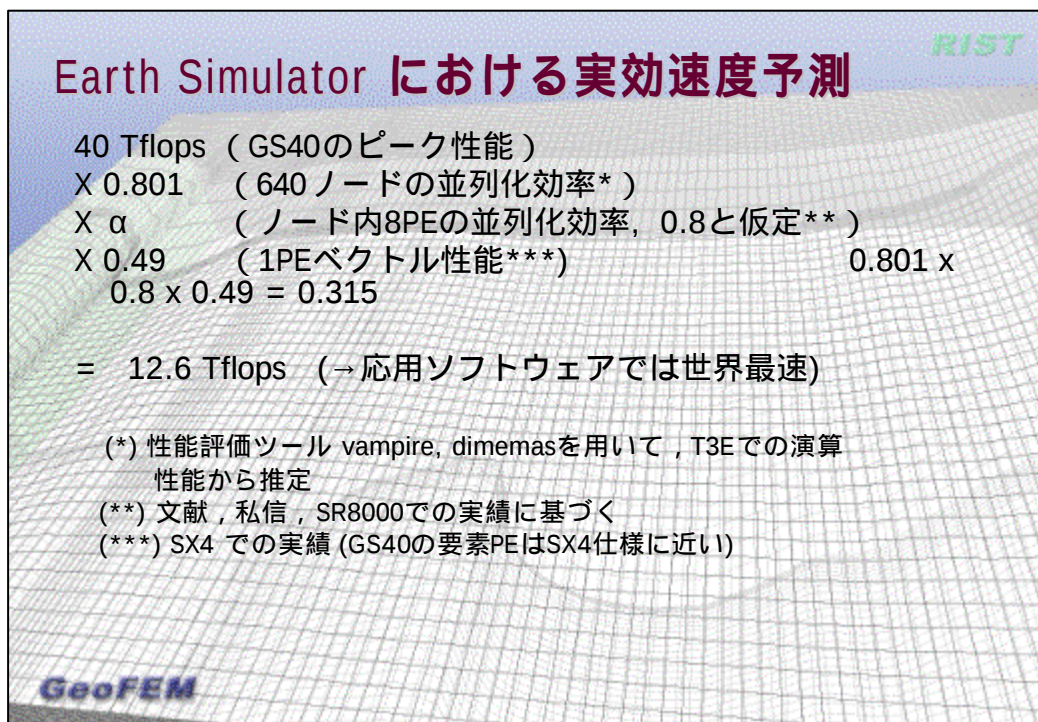
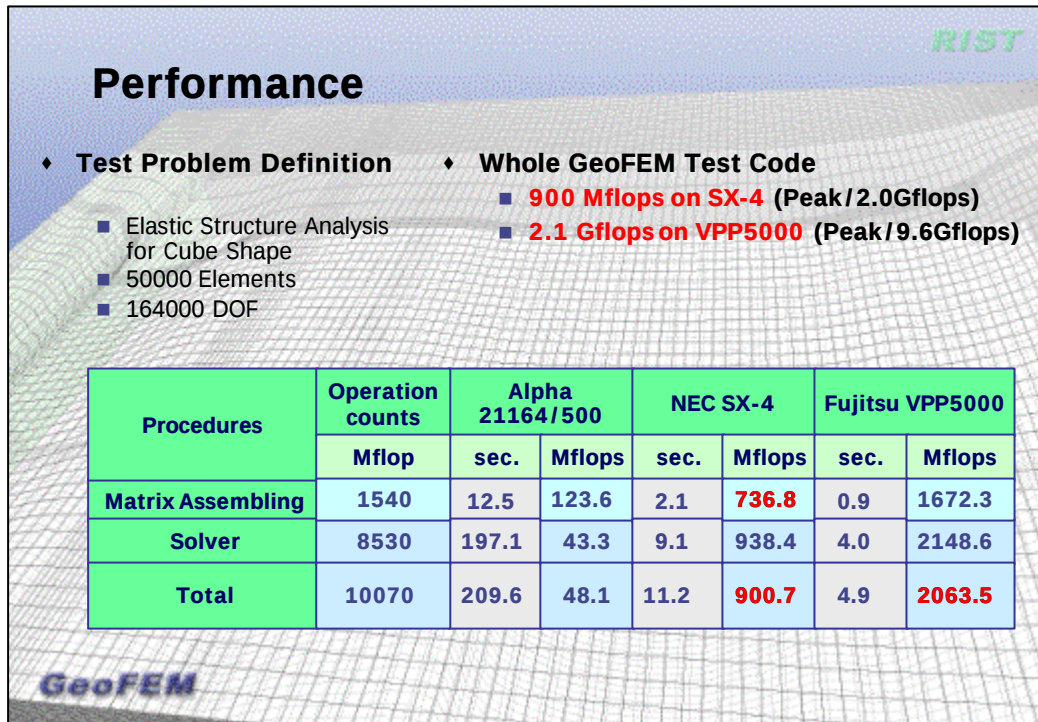


Vector Optimization for GeoFEM of Solid Earth Simulation Codes

- マトリクスの合成部分の単体プロセッサの性能が問題

Process	GeoFEM	
	Solver part	Matrix Assemble Part
Parallel Performance	Good - More than 95% Hitachi SR2201/1,000 PE	
Single PE Performance	Good - 970Mflops NEC SX-4/Peak 2Gflops	A Remaining Problem

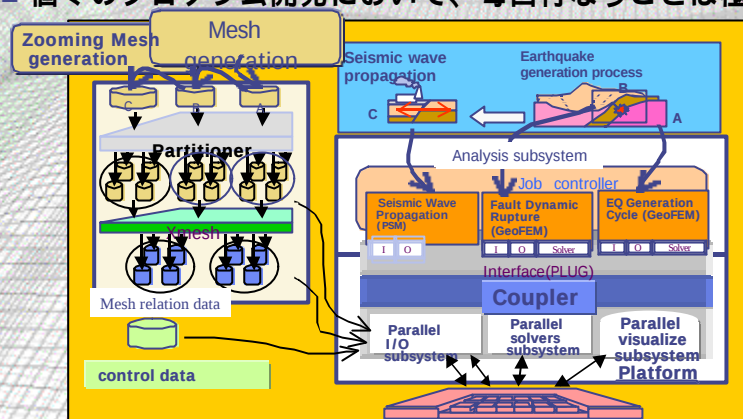
GeoFEM



連成解析もプラグインを通して実現

RIST

- 固体地球の要素モデルの組み合わせを考慮し、実行、通信、I/O等の統合制御が必要
 - 個々のプログラム開発において、毎回行なうことは極めて困難

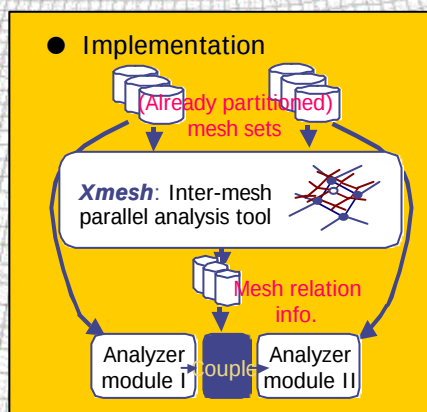
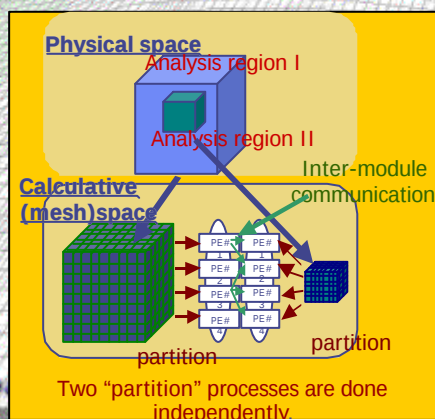


- プラグイン+カプラーインターフェース作成のみで、並列連成を実現 (可視化サブシステムも1つの連成サブシステムとして扱われる)

● カプラー：モジュール間のメッシュの関係の把握、物理量の内挿、プロセッサ間のデータ転送を実施

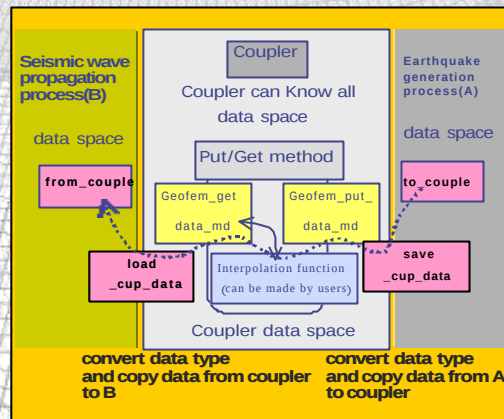
RIST

- 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使用することが可能



GeoFEMの連成システム作成法

- 連成するサブシステムプログラムをモジュールで包む。
- 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、その物理量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 (to_couple, from_couple) を作成する。
- 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。

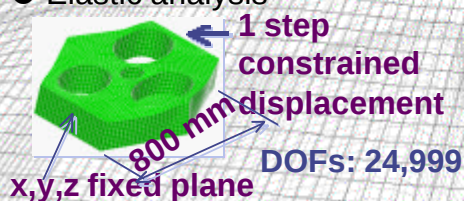


GeoFEM

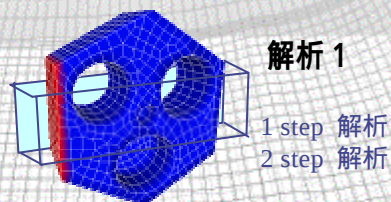
解析例

断層解析モジュールでの並列連成は開発中

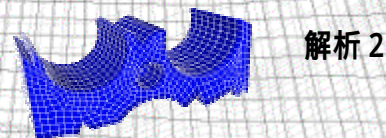
- Model
 - HTTR Carbon Block (CB)
- Material property
 - Young's modulus 193 GPa
 - Poisson's ratio 0.275
- Elastic analysis



Zooming analysis

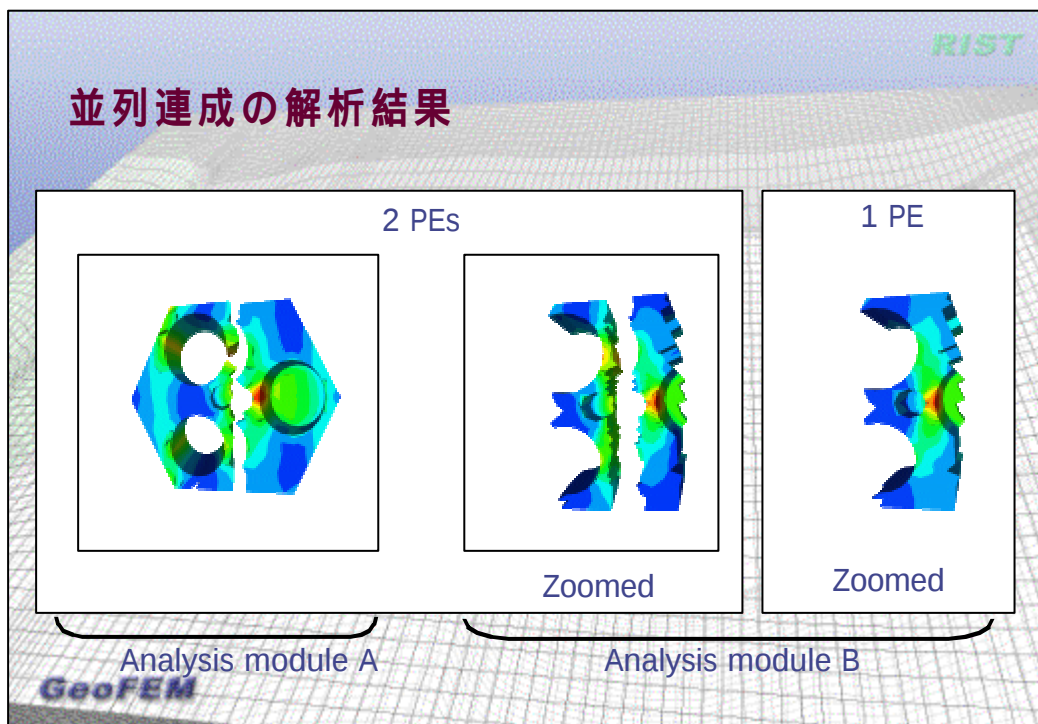
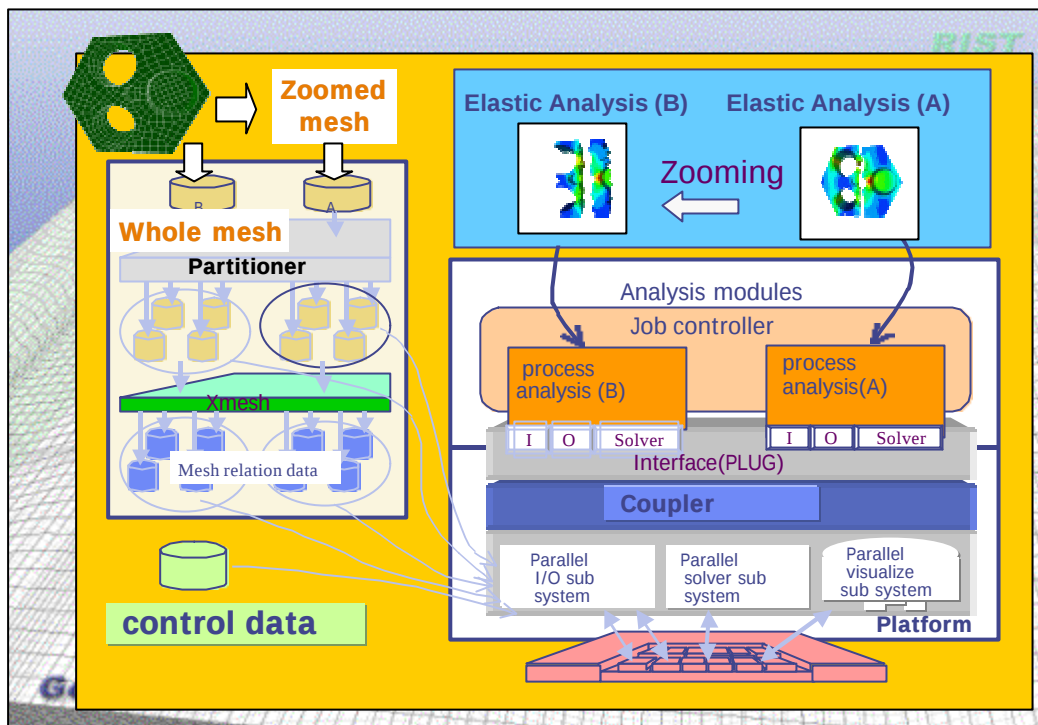


抜き出し
細分割

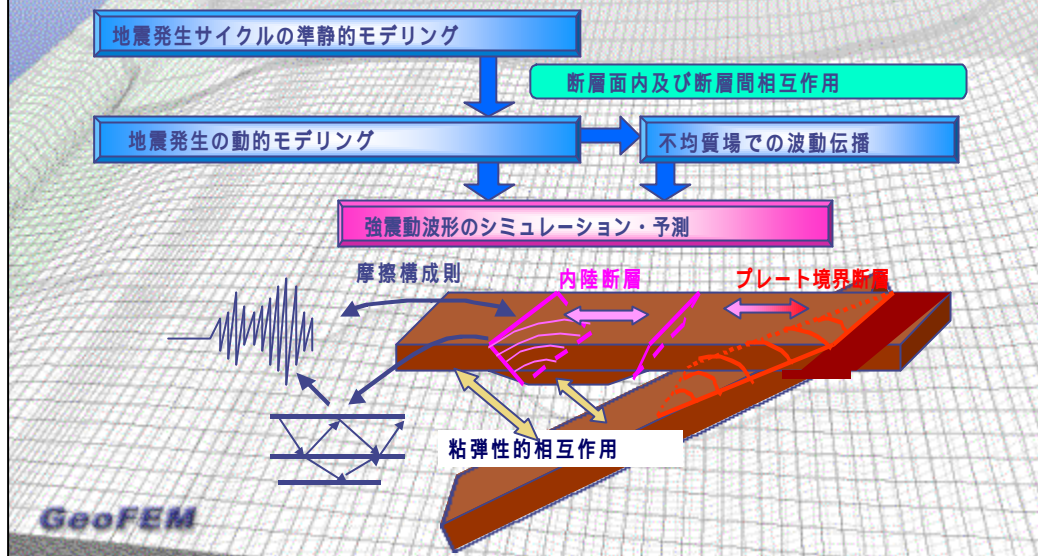


解析 1 から結果をもらって初期値として設定
2 step 解析 (解析 1 の step2の結果と比較)

GeoFEM

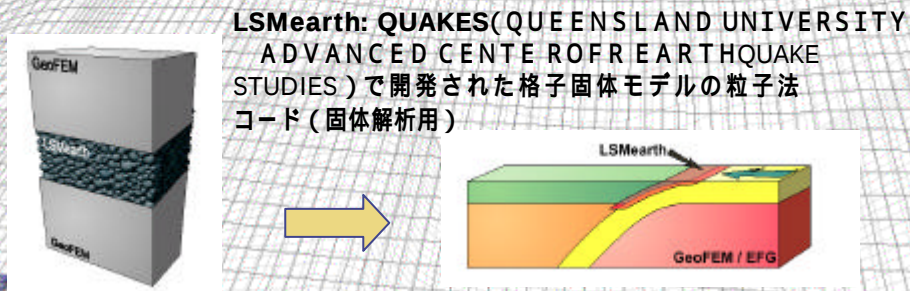


- リアルな3次元不均質場での断層面1kmメッシュ幅以下の地震発生過程～地震波動伝播までの解析

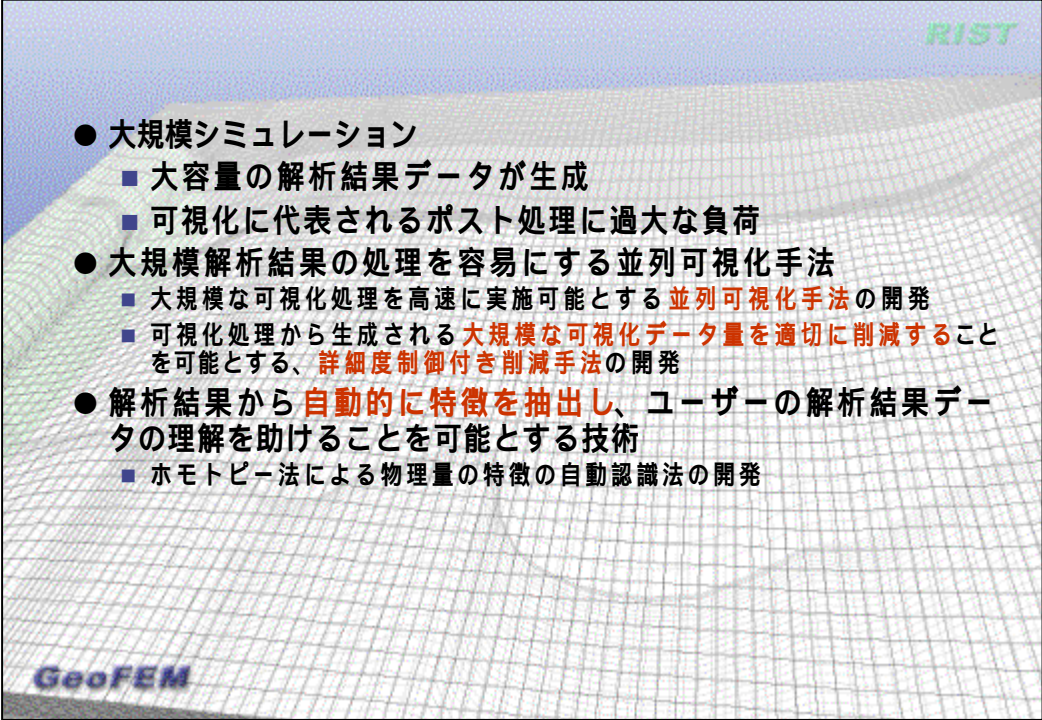


GeoFEM_LSMearth Coupling

- Under the framework of ACES international research collaborations on earthquake simulation
- Final goal:
 - to simulate the realistic fault zones/plate subduction by this coupled analysis.



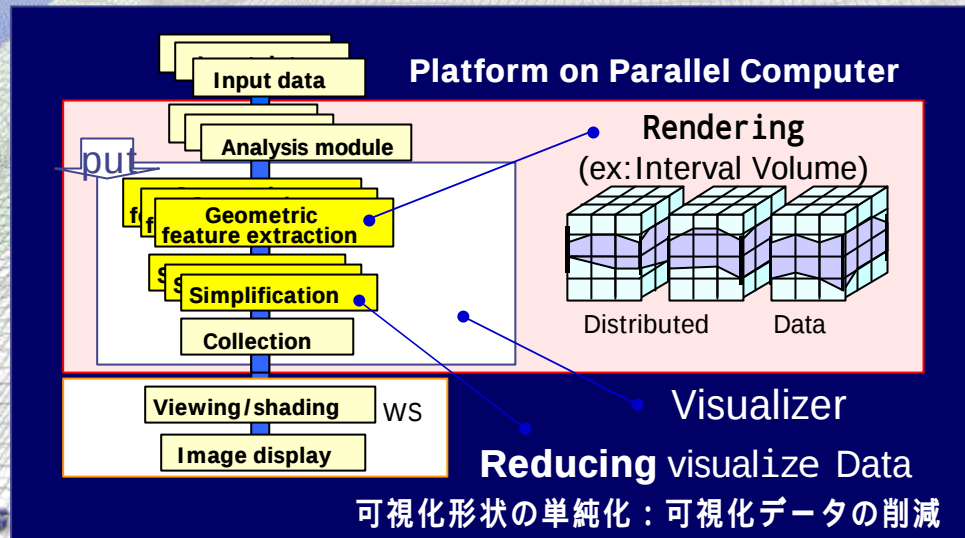
大規模可視化技術



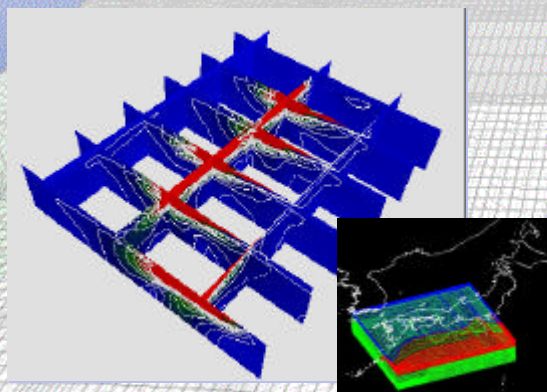
- 大規模シミュレーション
 - 大容量の解析結果データが生成
 - 可視化に代表されるポスト処理に過大な負荷
- 大規模解析結果の処理を容易にする並列可視化手法
 - 大規模な可視化処理を高速に実施可能とする **並列可視化手法**の開発
 - 可視化処理から生成される **大規模な可視化データ量**を適切に削減することを可能とする、**詳細度制御付き削減手法**の開発
- 解析結果から **自動的に特徴を抽出し**、ユーザーの解析結果データの理解を助けることを可能とする技術
 - ホモトピー法による物理量の特徴の自動認識法の開発

並列可視化処理

- 計算負荷の高い可視化マッピング並列計算機上で並列に実施



並列可視化例



西南日本の地殻変動解析
等価応力の断面コンター図
456,000 nodes モデル/16PEs

GeoFEM

日本列島周辺の断層解析：
3次元ベクトル場およびテ
ンソル場から任意本のハイ
パーストリームライン（断面
が楕円形状をした流線）

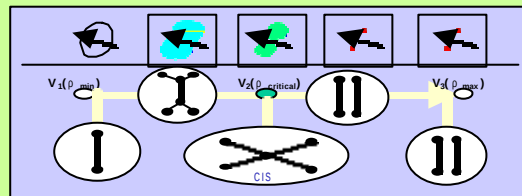
可視化データ量を削減する技術

- 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制御
 - 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
 - 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、可視化形状の簡単化)することが可能

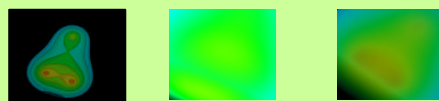
解析結果の特徴を自動抽出する技術

- ホモトピー解析により、物理量の分布特徴を把握
 - 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。
 - 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。

GeoFEM



(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。)

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

研究成果の普及と海外研究協力

GeoFEMセミナー

- 成果は固体地球分野のみならず、広く理工学一般へ普及するため
- 多数の参加者（第1回（'99、7月）：174名、第2回（'00、7月）：76名、第3回（'01、7月）：66名（第1回、第2回、第3回とも定員超え））

WEBでの公開

- 成果は固体地球分野のみならず、広く理工学一般へ普及するため
- GeoFEM ver.4.0
 - ダウンロード関連統計（ver.3.5以前も含む）
 - 2001年7月11日現在
 - 総数229（うち日本：148）
 - ・世界 27ヶ国
 - ・アメリカ：26、ドイツ：8、中国：7、UK：5



GeoFEM ver.4.0

Download

GeoFEM Downloading Page

Congratulations !!
You have reached the GeoFEM downloading page !
Select your choice of downloading from the below:

- サンプルデータ
- 1 [GeoFEM Version 4.0 Basic Distribution Kit](#) **New!** → 静弾性，動弾性，静的接触，
(1073 KB compressed, 6840 KB expanded) 非定常熱伝導，ソルバー，
可視化器，パーティショナ
 - 2 [Collection of GeoFEM Version 4.0 Sample Data](#) **New!**
(3888 KB compressed, 22598 KB expanded)
 - 3 [Thermal Fluid Analysis Subsystem for GeoFEM Version 4.0](#) **New!** → 非圧縮性熱流動
(809 KB compressed, 4540 KB expanded)
 - 4 [GUI Shell for GeoFEM Version 2.0](#)
(15 KB compressed, 41 KB expanded)
 - 5 [Backend Visualization Program](#)
(732 KB compressed, 4372 KB expanded)
 - 6 [Sample 2D FEM Program Plugged Into GeoFEM](#)
(428 KB compressed, 2140 KB expanded)
 - 7 [GPPView beta version](#) → メッシュビューア
(GeoFEM Pre/Post Viewer Editor)

海外研究機関との研究交流等

RIST

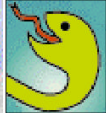
- [アメリカ国立サンディア国立研究所](#) (Sandia National Laboratories)
 - 悪条件マトリクスに対する線形ソルバ適用問題
- [ドイツ国立情報処理研究所](#) (German National Reserch Center for Information Technology, GMD)
 - AMG (代数的多重格子解法) に関する研究交流
- [NEC欧州研究所](#) (ドイツ)
 - 動的負荷バランスに関する研究交流
- 地震シミュレーションの国際的情報交換機関である [ACES](#) (APEC Cooperation for Earthquake Simulation)
 - 地震シミュレーションの研究交流

GeoFEM

おわりに（将来展開）



GeoFEM / Snake

RIST

- プラットフォームの充実
 - Solvers : multi-level approach
 - Parallel Visualizations
 - Optimization for "Earth Simulator"
 - System Integration : multi-module couplers
 - Non-FEM Appl. : FDM, BEM, PSM etc.
- Applications :
 - solid earth issues, practical engineering problems, coupled problems

GeoFEM

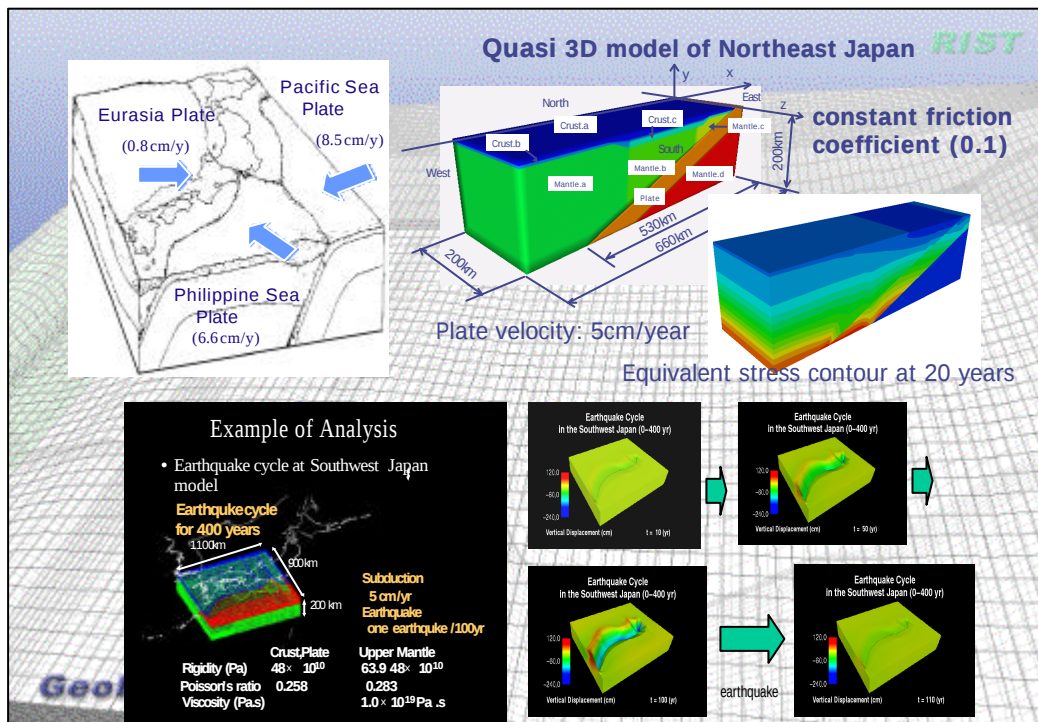
科学技術振興調整費 総合研究
「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発」
固体地球シミュレーション統合化モデル

● **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）

- Mantle : 128X120X240= 3,686,400 cells, $r = 20 \text{ km}$, $d = 1.5 \text{ deg}$
- Core : 10,000X100= 1,000K nodes, $t \sim 10^{-7}$

● **局所不均質場スケール** 複雑断層系での地震発生過程・地震波動伝播

- 地震発生サイクル問題設定 1,100km X 900km X 200km, $t = 100 \text{ y}$, 10^3 steps
- SR8000 (4nodes) 0.15M DOF ($h = 15\text{km}$), 1.0M DOF ($h = 8\text{km}$)
- Earth Simulator : $h = 1\text{km}$, 200M nodes
- 動的破壊問題設定 300km X 300km X 50km, $t = 10^{-4} \text{ sec}$, 10^5 steps
- SR8000 (4nodes) 0.15M DOF ($h = 15\text{km}$), 1.0M DOF ($h = 8\text{km}$)
- Earth Simulator : $h = 1\text{km}$, 30M nodes
- 強震動問題設定 300km X 300km X 50km, $t = 10^{-2} \text{ sec}$, 10^3 steps
- Earth Simulator : $h = 0.2\text{km}$, 100M nodes



まとめ

- 地球シミュレータをもってしても、以上説明のスケール毎のシミュレーションがやっと可能となる程度と考えられている。飛躍的な計算資源を必要としている。
- 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。
- 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。

GeoFEM

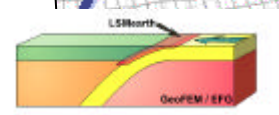
地球規模の地震シミュレーションネットワーク

米国のGEM (General Earthquake Model, <http://mekhhouse.jpl.nasa.gov/gem/>)

高度観測システム・データ処理
確率・複雑系モデル



GeoFEM



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

GeoFEM