

日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業
第3回計算科学シンポジウム

設計用大規模計算力学システムの開発
(ADVENTUREプロジェクト)

1997.8-2002.3

吉村 忍

東京大学大学院
新領域創成科学研究科 環境学専攻



<http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp>

研究背景(1)

今後の高速計算機(HPC)環境

- 専用 / 汎用の超並列計算機
- 汎用PC/WSクラスター

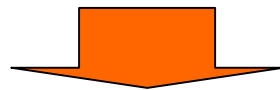
現在の商用計算力学システム

- $\sim 10^6$ 自由度が上限
主に逐次処理計算機対応
超並列計算機(TFLOPS)に不適合
詳細な部分解析 / 簡略化した全体解析
- 単一現象解析のみ
(連成解析に対応できない)
- 解析と設計が分離されている

研究背景(2)

次世代の商用計算力学システムが解決すべき課題

- 丸ごと詳細解析機能 ($10^7 - 10^8$ 自由度以上)
- 数百～数千、数万の超並列環境で高い並列処理性能
- 多様な並列分散環境への移植性の容易さ
- 単一現象の解析ばかりでなく、構造 - 流体などの各種連成解析や、設計解析を並列分散環境で自由自在に行えること



ADVENTURE システムの開発
(先進計算科学の汎用化)

ADVENTUREプロジェクトにおける 主な研究開発課題



- プレ処理 (CADとの接続、メッシュ自動生成、メッシュの領域分割、並列処理、...)
- メイン処理 (並列化、階層型領域分割法、...)
- ポスト処理 (並列可視化、仮想現実感、インターネット)
- ユーザフレンドリネス
- 多様な環境 (MPPs ~ PC / WSクラスター)
- 解析機能と設計機能の統合化

ADVENTUREシステム概観

PC用インタフェース VR用インタフェース インターネット用インタフェース	MicroCADAM I-DEAS KSWAD 幾何モデラー						プレ処理用 共通ライブラリー	プレ処理	最適化設計 モジュール 満足化設計 モジュール			
	境界条件・物性値の幾何モデラーへの貼付											
	3角形パッチ		4角形パッチ									
	4面体メッシュ		6面体メッシュ		ボクセルメッシュ							
	境界条件・物性値のメッシュへの貼付											
	METIS		ParMETIS		ADV-METIS		メイン処理用 共通ライブラリー	メイン処理				
	弾塑性解析	剛塑性解析	非定常解析(陽解法)	非定常解析(陰解法)	固有値解析	熱流体解析				磁場解析	HDDMソルバー	
											並列CG	
											ソルバー	
											接触解析	
可視化処理		誤差解析		感度解析		ポスト処理						
ポスト処理用共通ライブラリー												

主な発表項目



課題1 1億自由度問題を解析できるか？

課題2 複雑形状の大規模問題を扱えるか？
(CAD、メッシュ生成、解析、CABIN上の可視化まで)

課題3 大規模並列計算力学解析の標準データ構造とは？

課題4 多様な並列分散環境で自在に連成解析を行えるか？

課題5 解析と設計の統合化をどのように実現するか？



課題 1

1 億自由度問題を解析できるか？

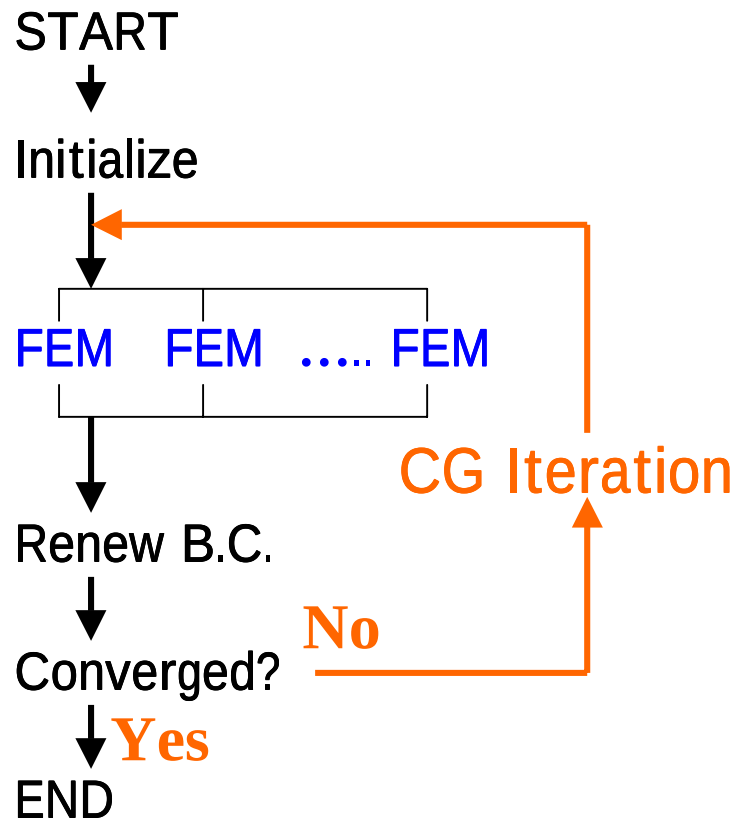
領域分割法

(Domain Decomposition Method)

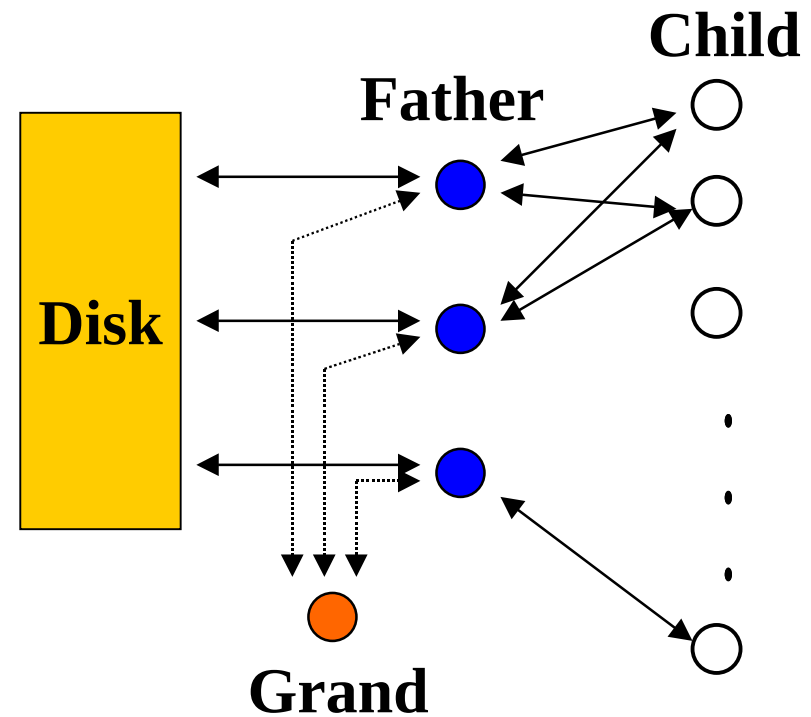
- 反復解法 を領域分割で並列化
- サブストラクチャ法ライクな領域分割並列化
 - 部分領域の静的縮約: 直接解法 / 反復解法
並列化
 - 境界マトリックスの解法: 直接解法 / 反復解法
 - 境界マトリックスの解法: 逐次処理 / 並列処理
 - 負荷分散: 静的 / 動的、ハイブリッド

階層型領域分割法

HDDM : Hierarchical DDM

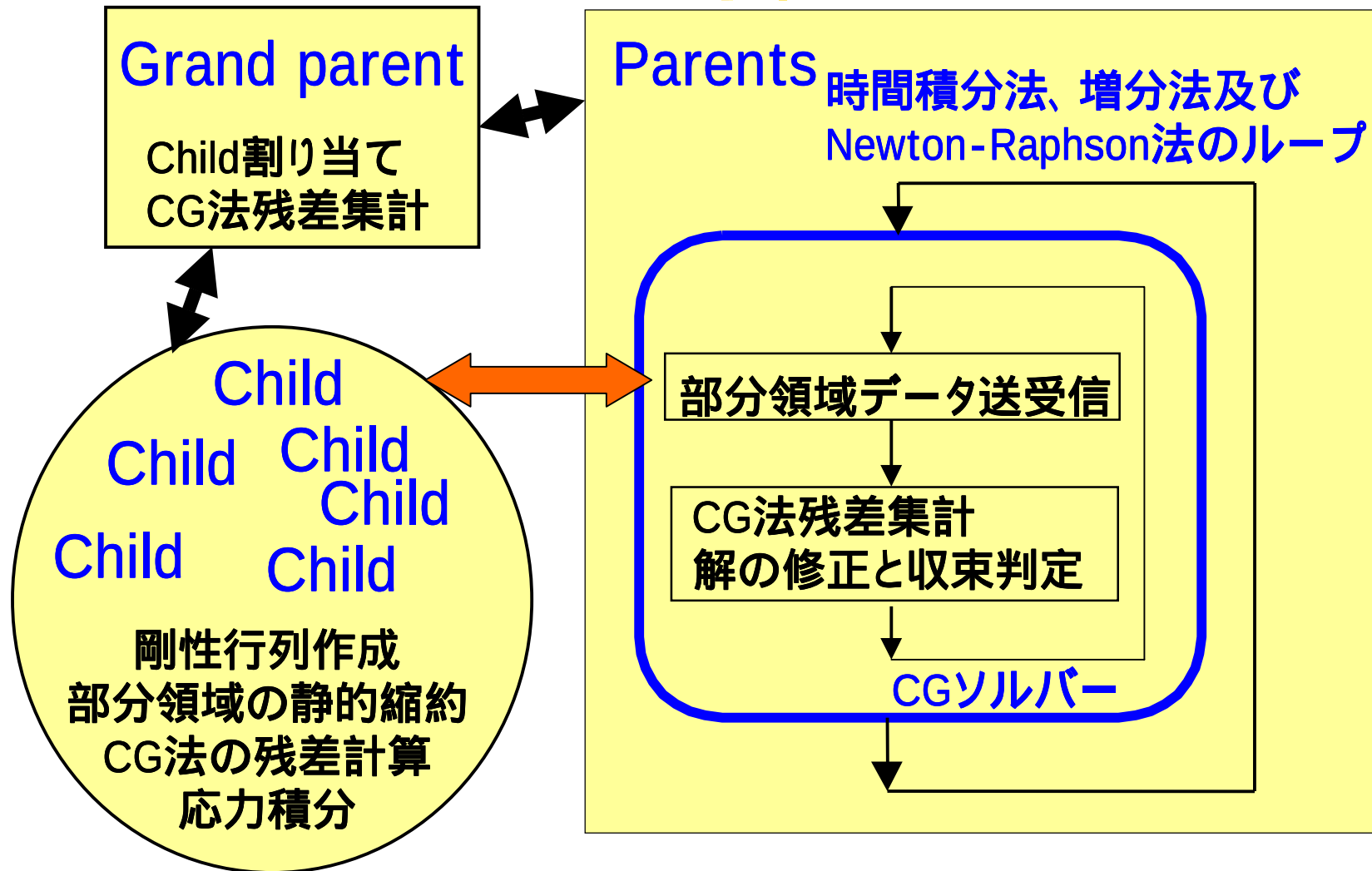


基本アルゴリズム



階層型のデータフローと
動的負荷分散

HDDMに基づく動的/弾塑性解析フロー



1億自由度の簡易压力容器モデル の弾性解析(1)



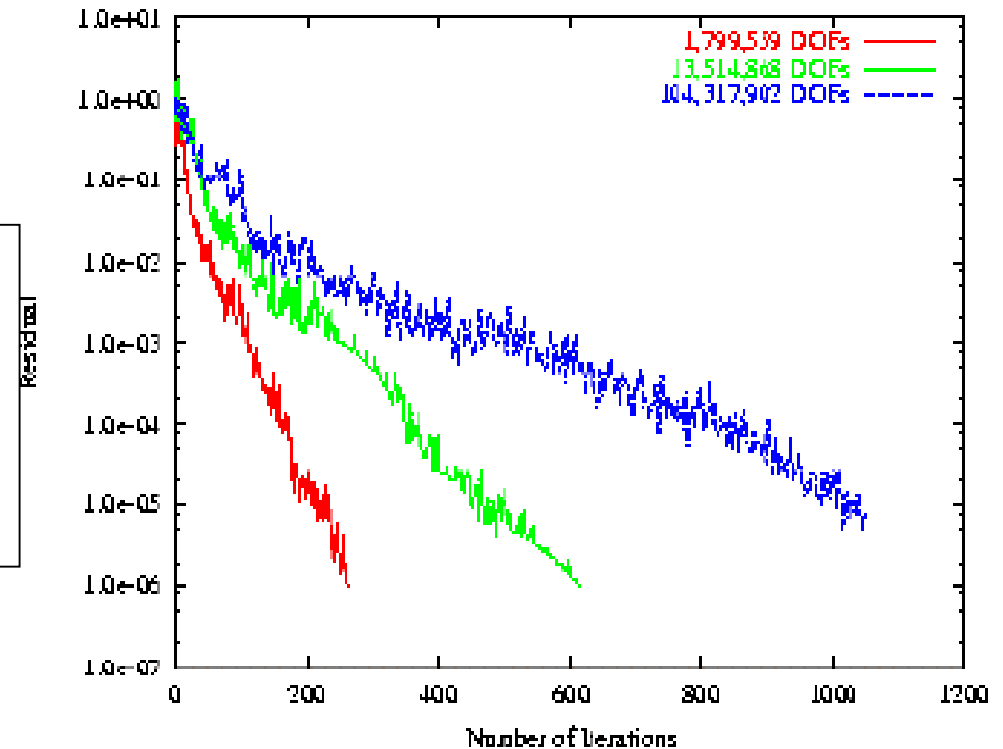
25,083,456 elements
34,772,634 nodes
104,317,902 DOFs
360,000 domains
60 parts

1億自由度の簡易压力容器モデル の弾性解析(2)

Model size & CPU time

Model	1	2	3
DOFs	1.7M	13M	100M
Iterations	114	254	421
Time(cpu)	1.9min	37.2min	3.7 h
PEs	256	256	1024

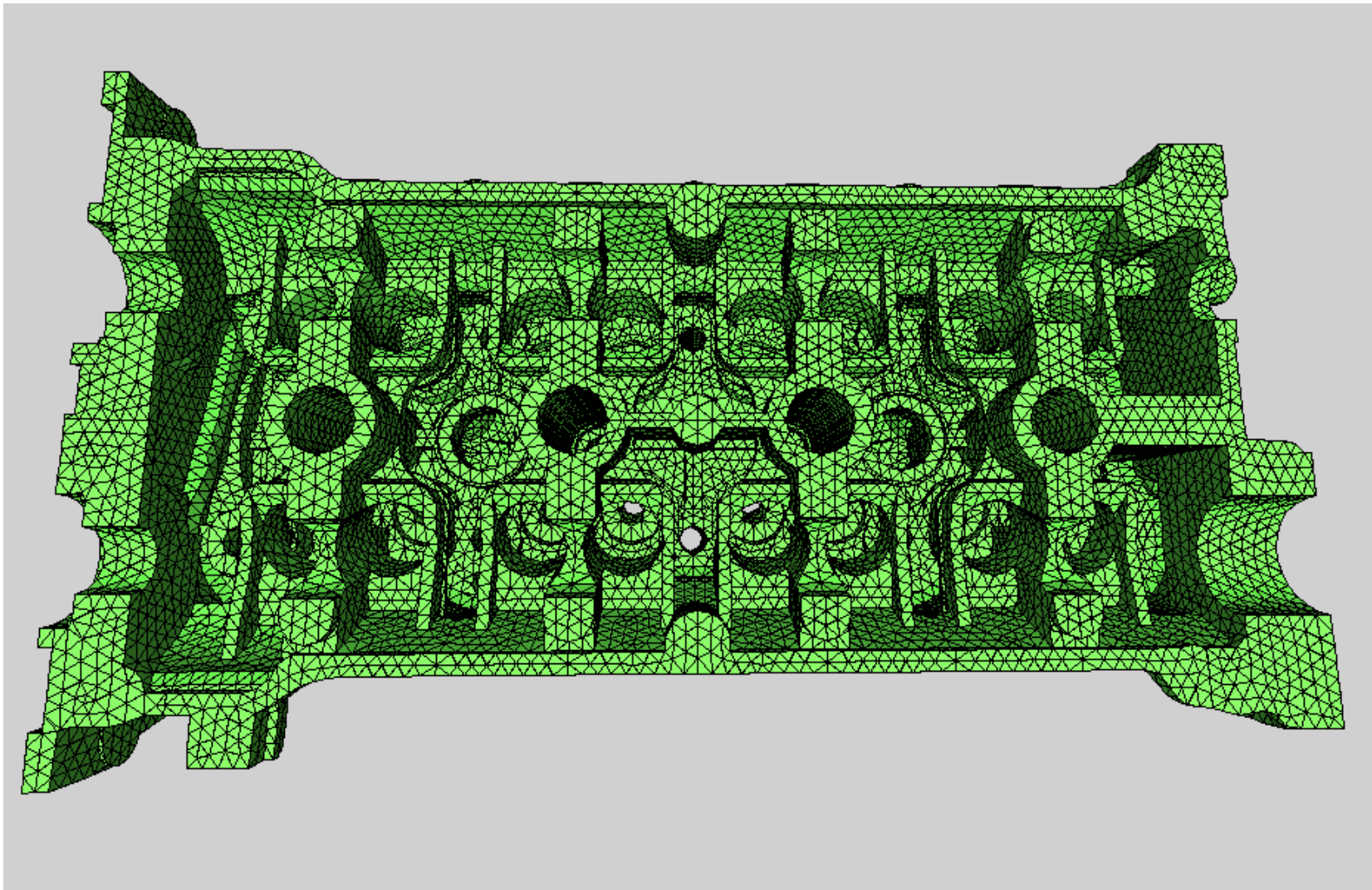
収束判定: CG残差 = 10^{-3}



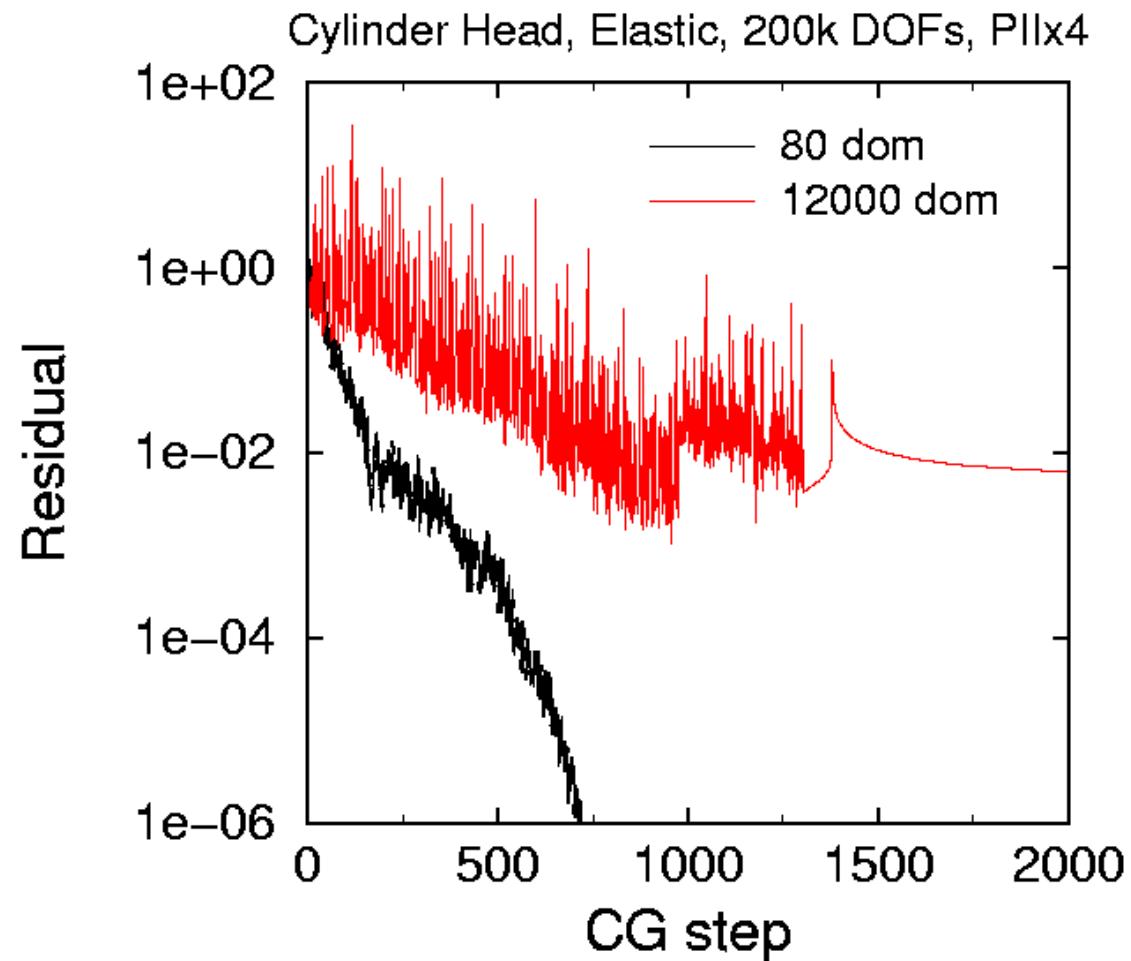
Profile of residual norms

自動車エンジンのシリンダーヘッドの弾性解析

4面体1次要素、202,740自由度

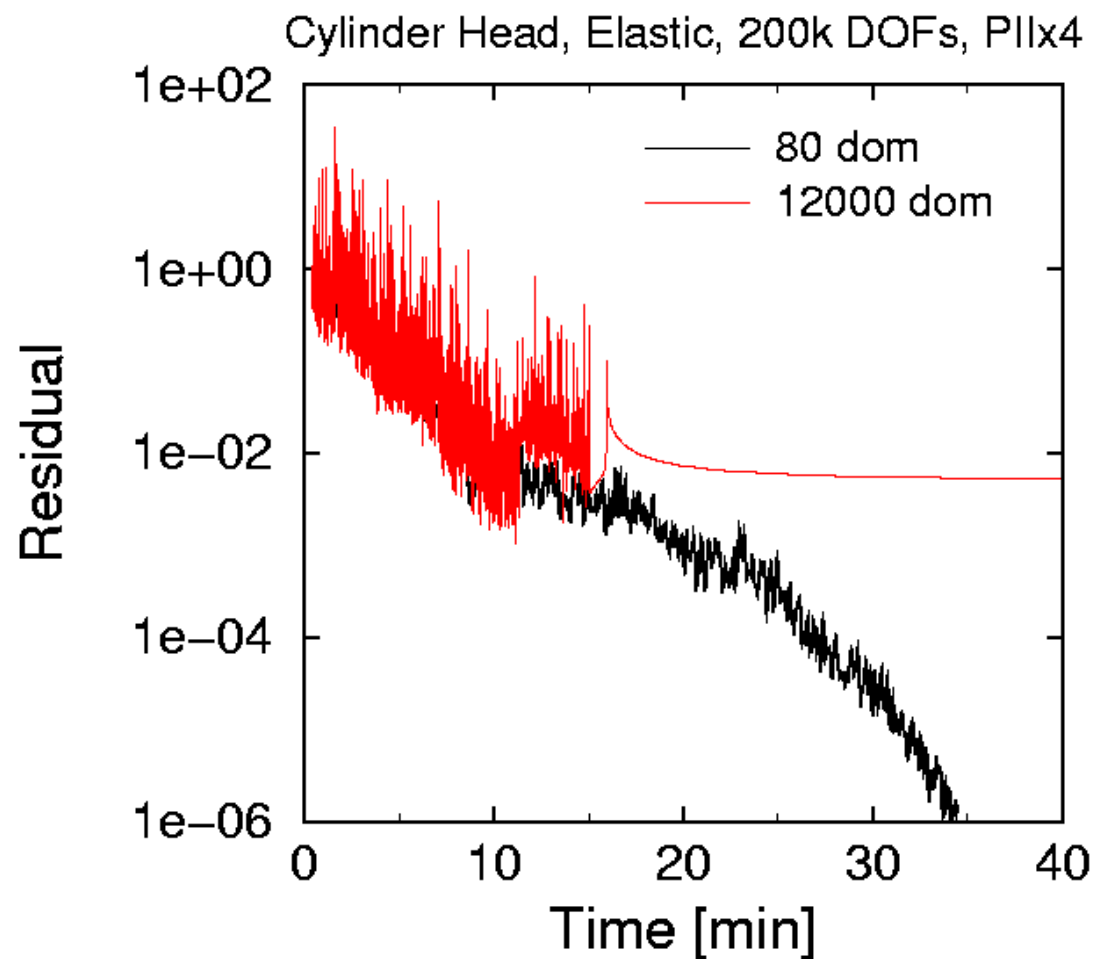


HDDMのCG法の収束の様子：反復回数



HDDMのCG法の収束の様子:

CPU time (Pentium II 450MHz × 4台)



今後の課題(高速化の追求)



- 反復回数の低減

-  1. 前処理(BDDなど)をテスト中
2. Neumann型定式化の検討

- 直接法ベースの階層型領域分割法の検討



課題 2

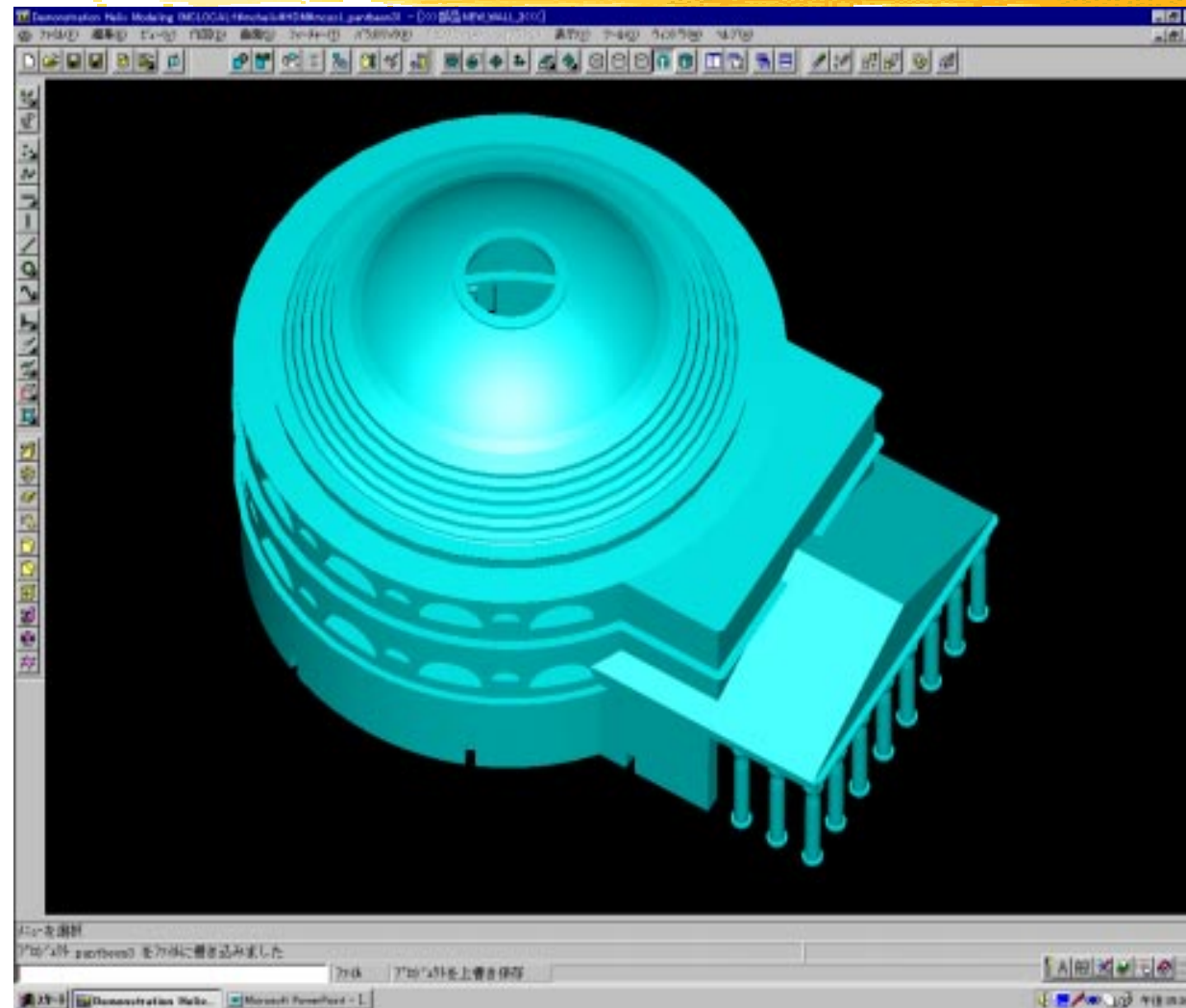
複雑形状の大規模問題を扱えるか？
(CAD、メッシュ、領域分割、解析、
CABIN可視化)

パンテオン

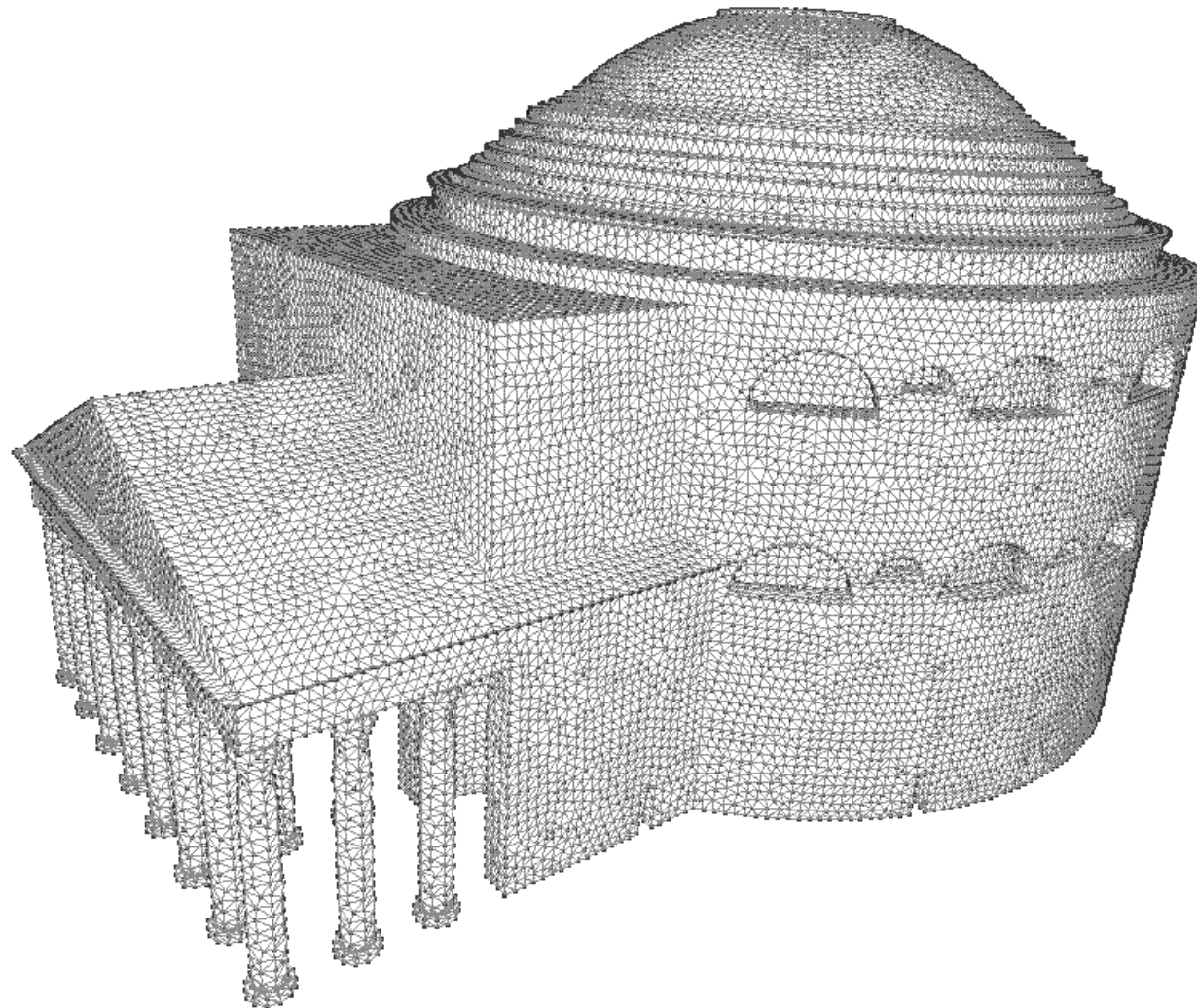
(AD118-128に建設されたローマの古代建築)



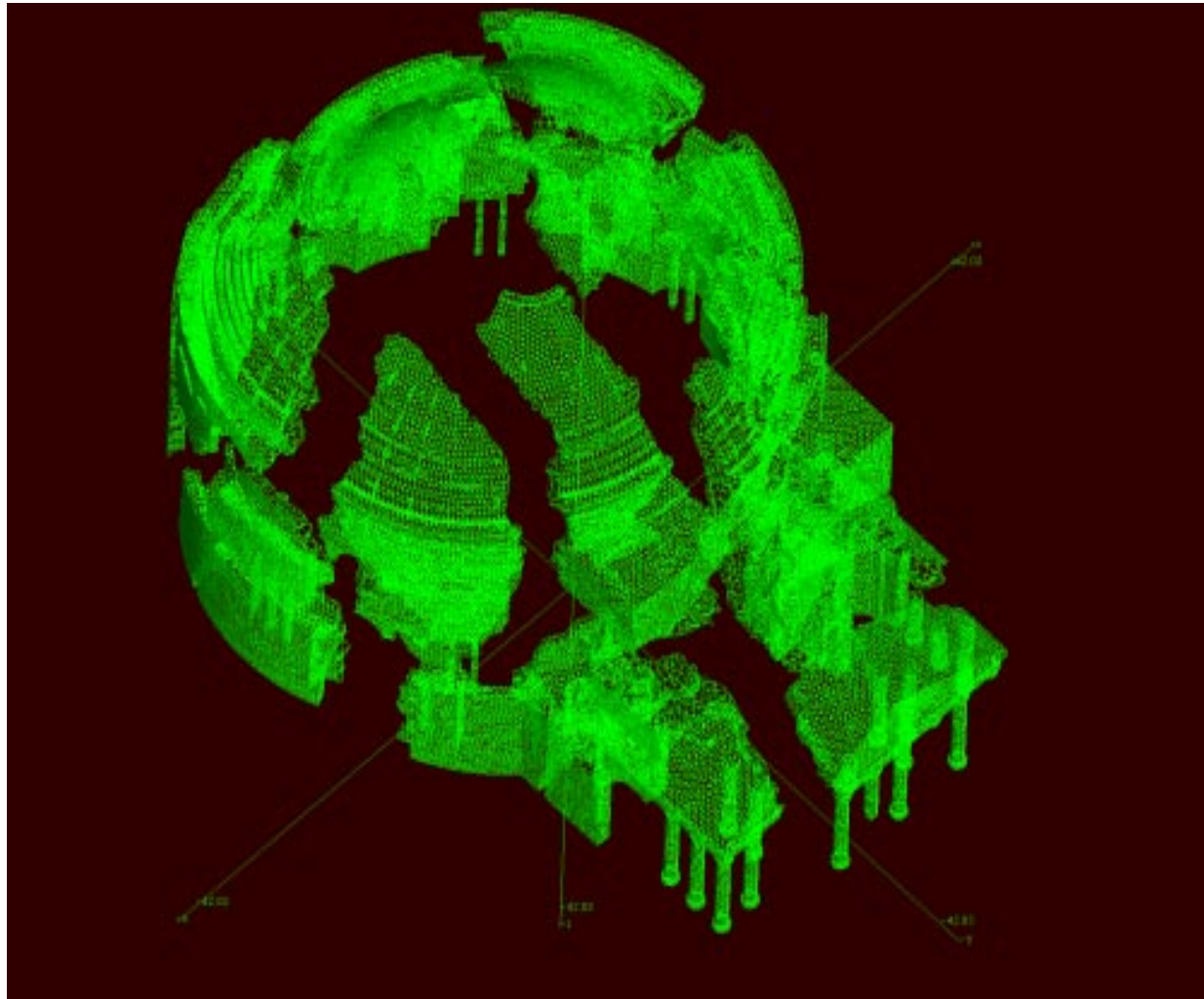
CAD Model (MicroCADAM)



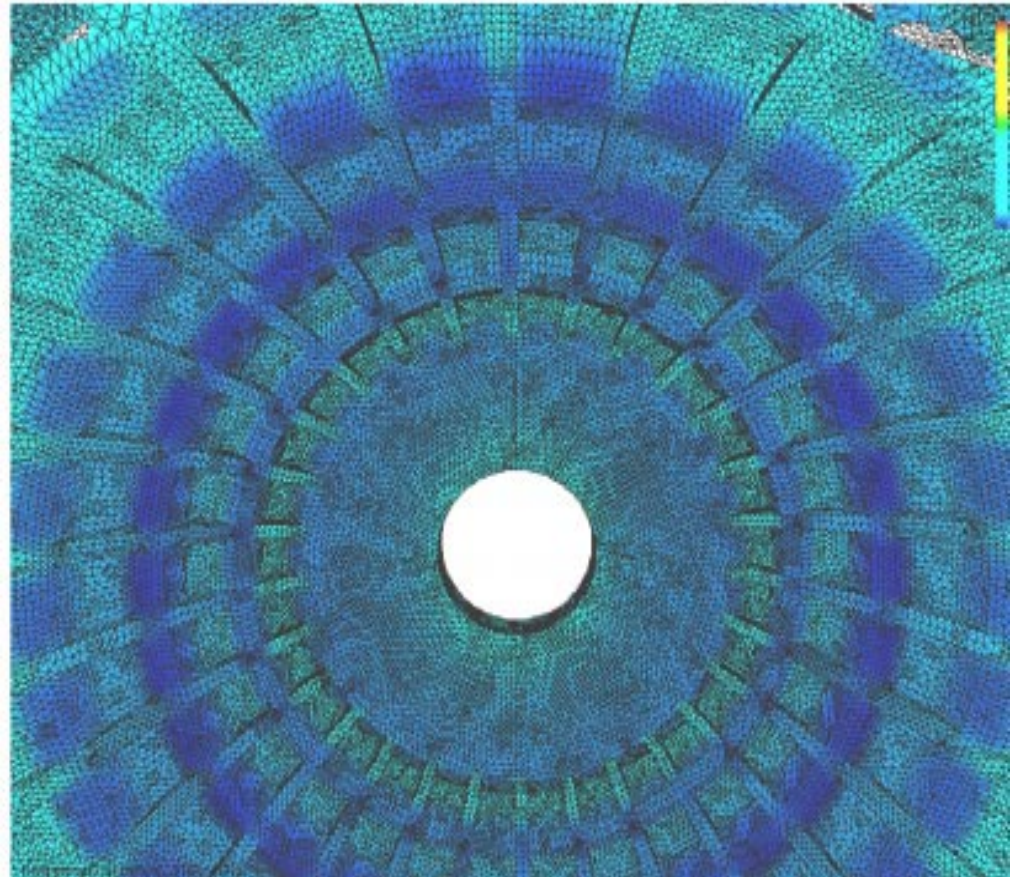
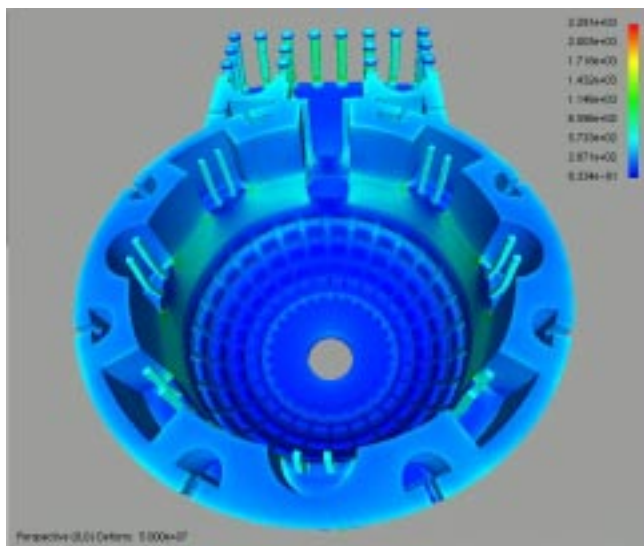
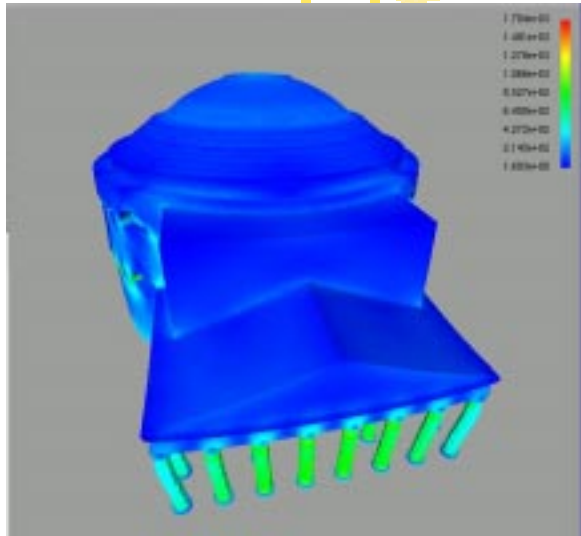
200万自由度4面体メッシュ



階層型領域分割のうちパート分割 (16分割)のみ表示

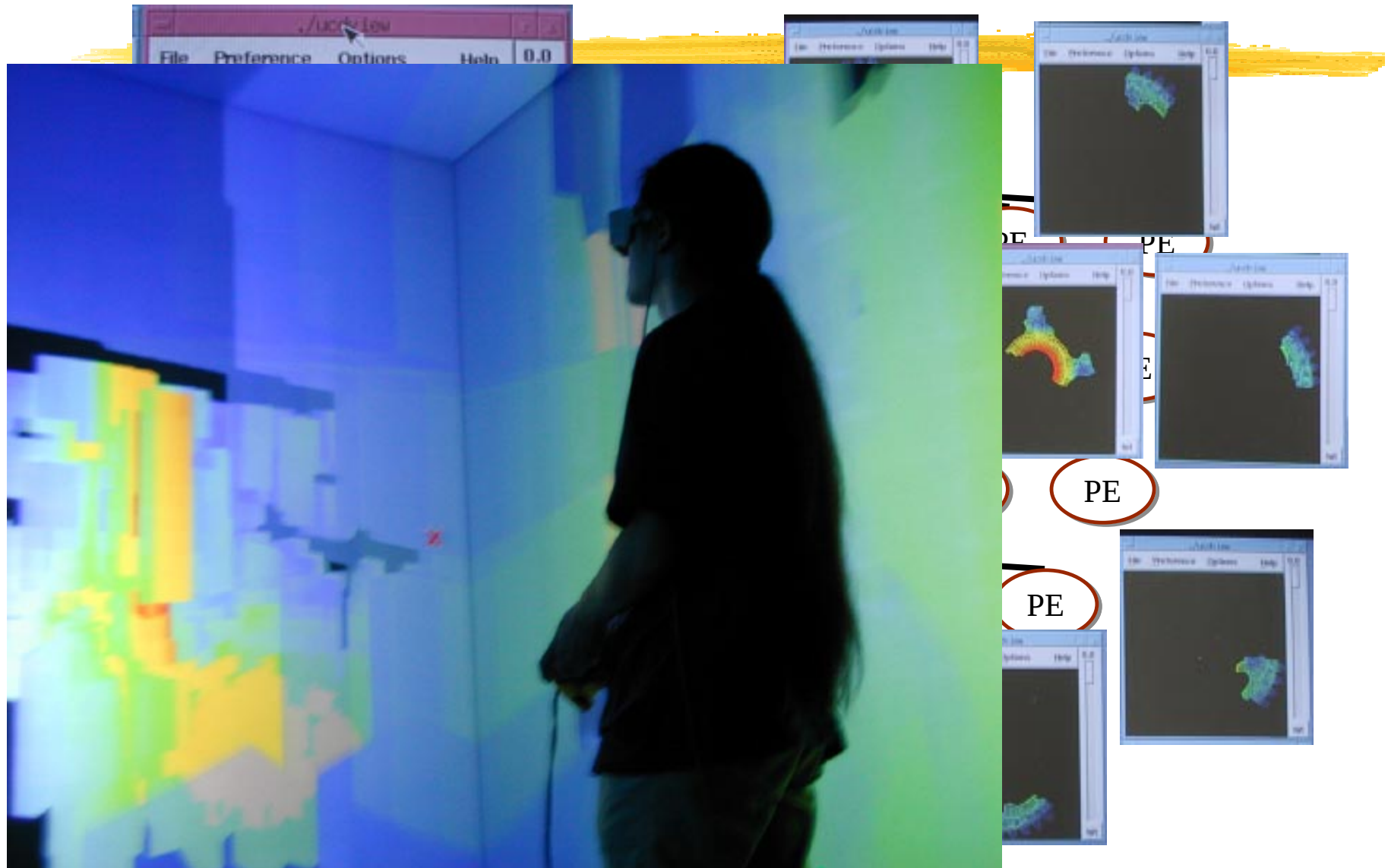


1500万自由度メッシュによる弾性解析結果 (モデル表面の応力分布) 7.3hrs / SR2201(1024PEs)

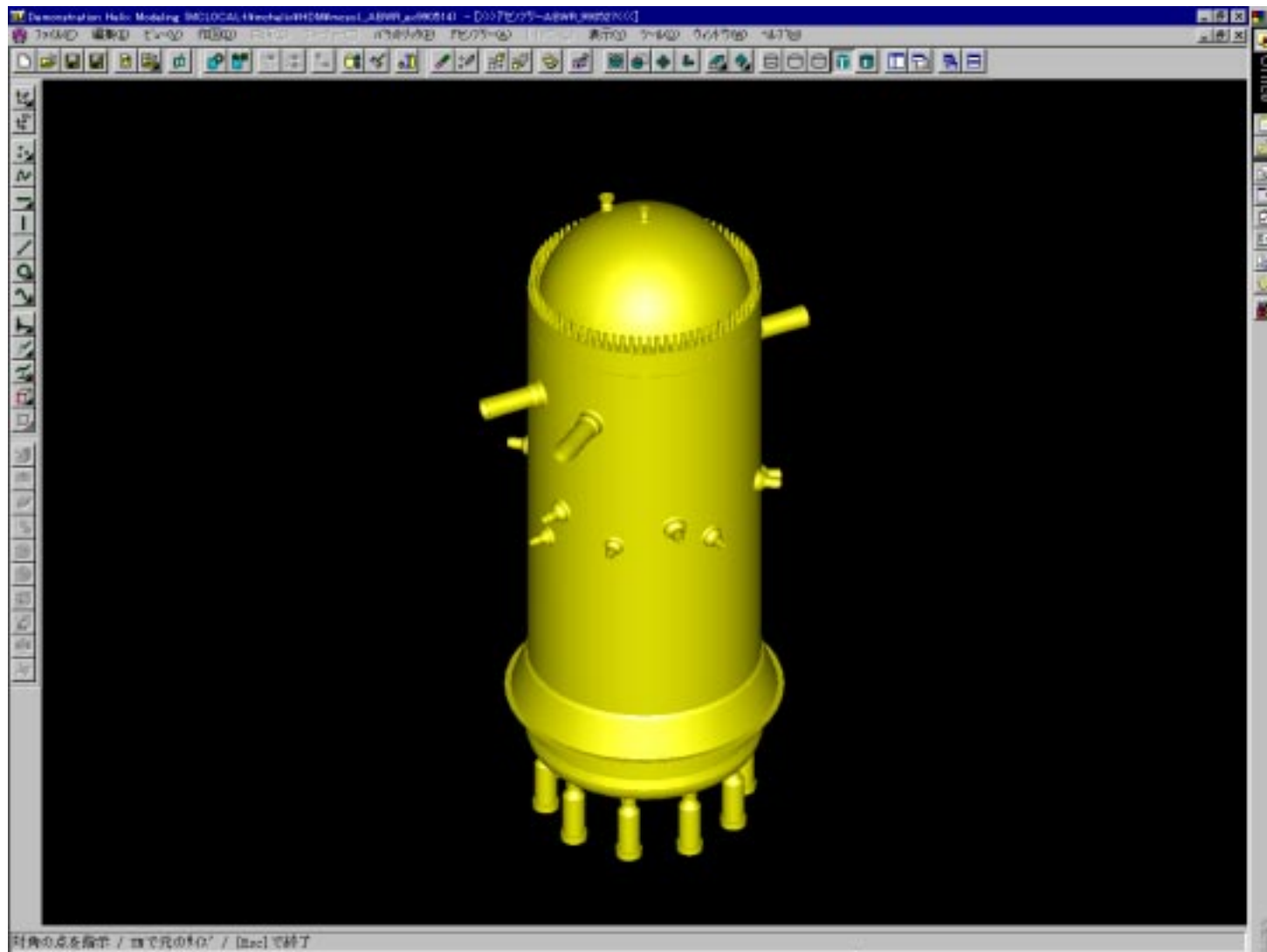


天井詳細図

Network topology

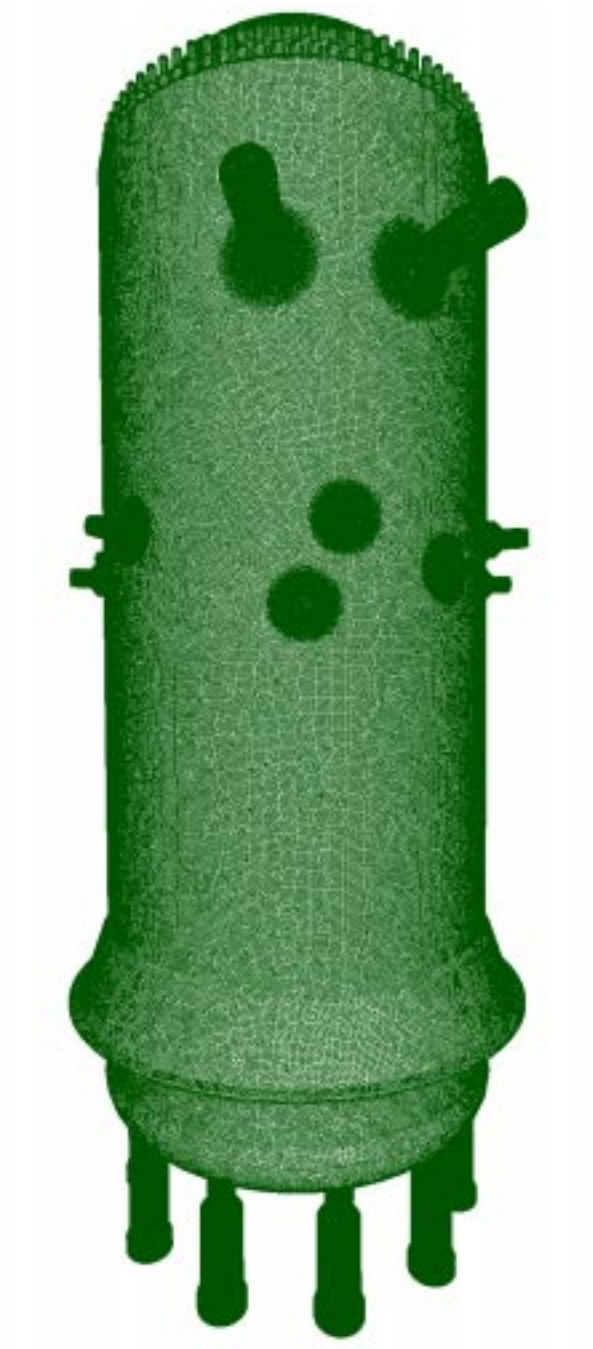


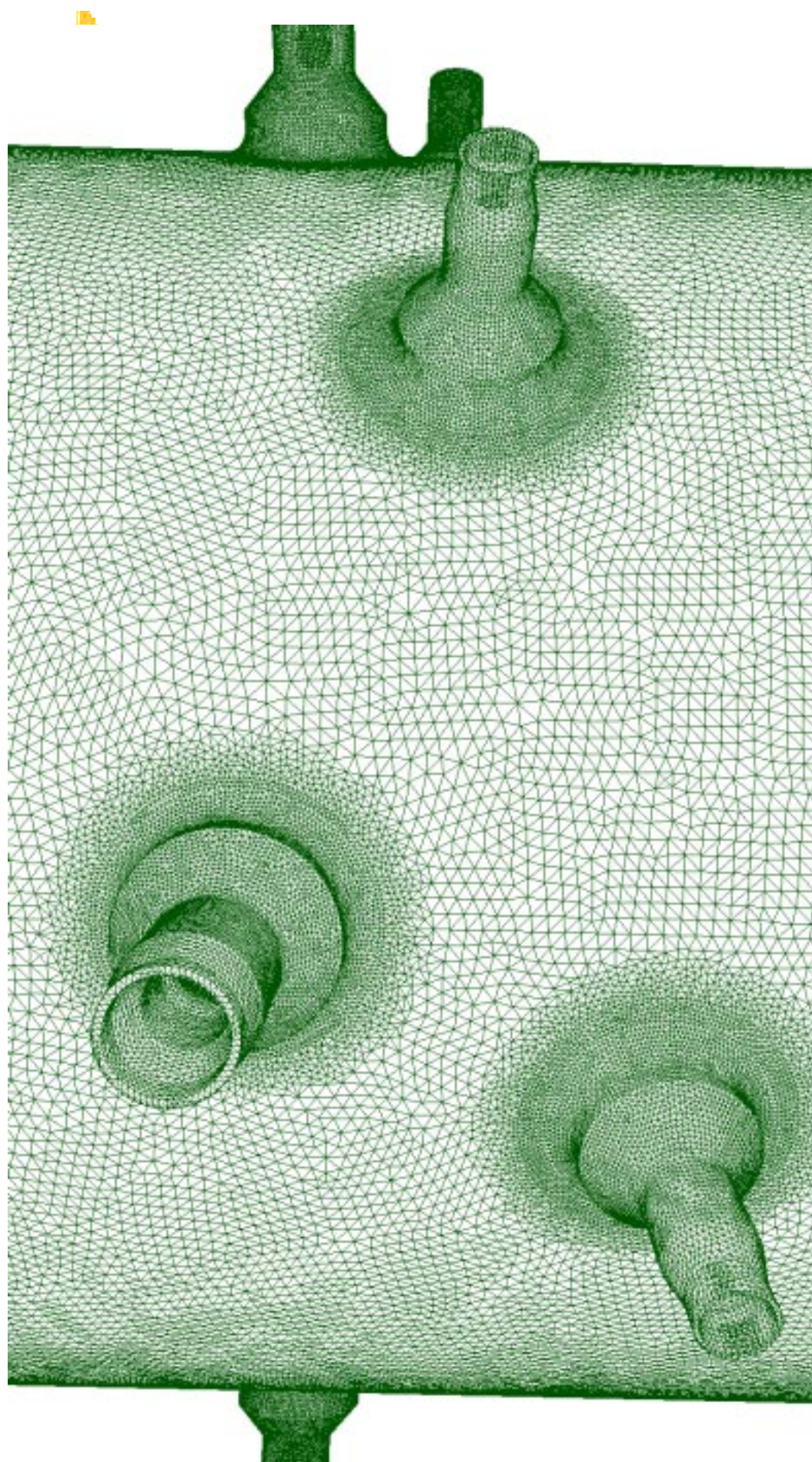
ABWR原子炉压力容器の詳細3次元CADモデル(MicroCADAM)

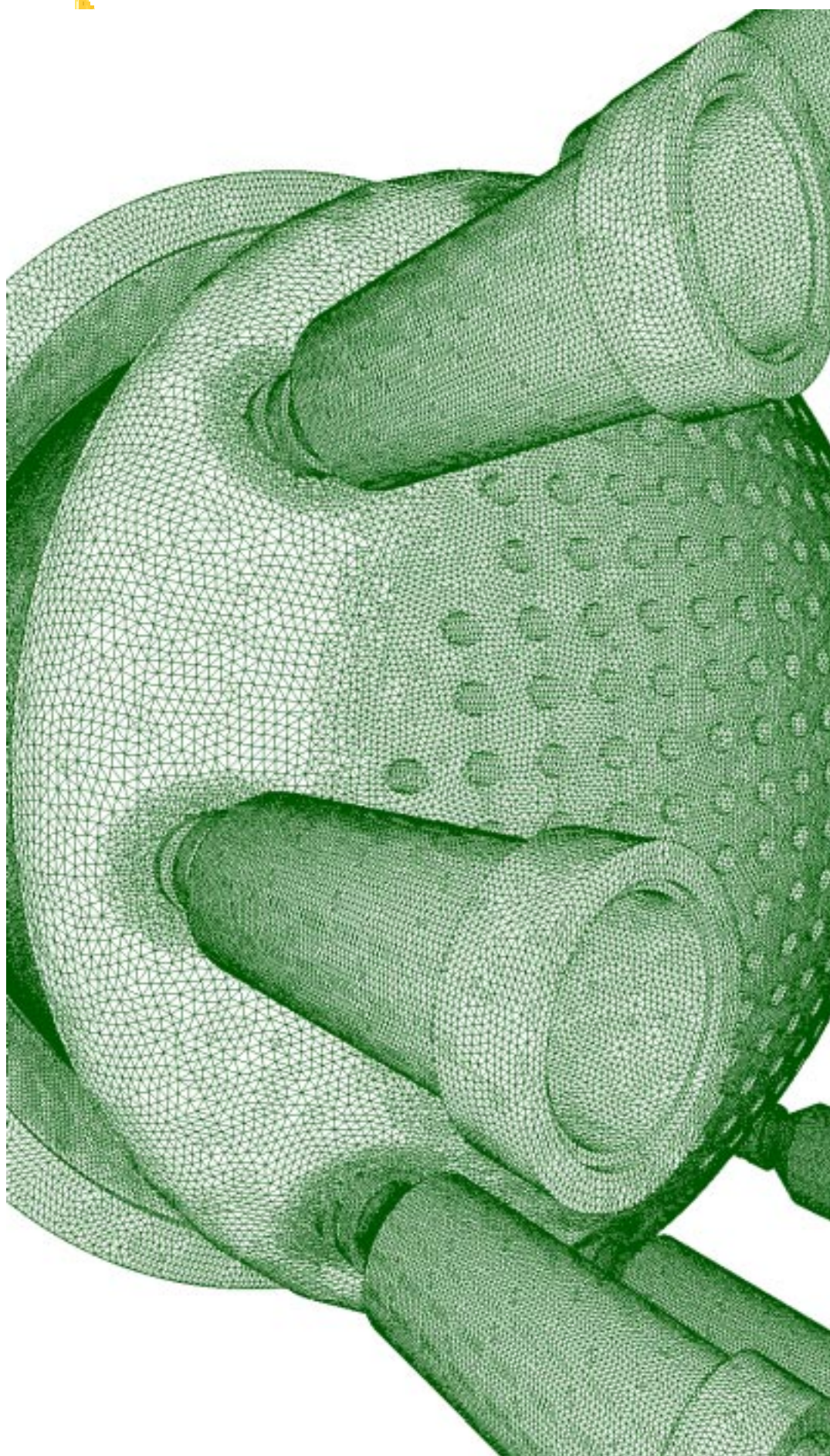


6千万自由度 4面体メッシュ

現在、内圧負荷の静応力解析
と地震荷重負荷時の動的応答
解析を準備中









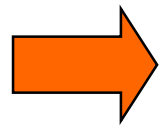
課題3

大規模並列計算力学解析の
標準データ構造とは？

ADVENTURE I/O

超並列有限要素解析用一般化入出力フォーマット

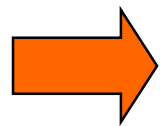
(1) 並列分散環境での巨大なデータの取り扱いを効率化する。



バイナリデータ, ランダムアクセス

ドキュメント + 入出力関数ライブラリ

(2) 単一のドメインデコンポーザを用いて、すべての解析に対応する解析データ(Mesh+BC+MP)を領域データに分割する。



フォーマットの一般化

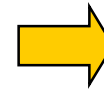
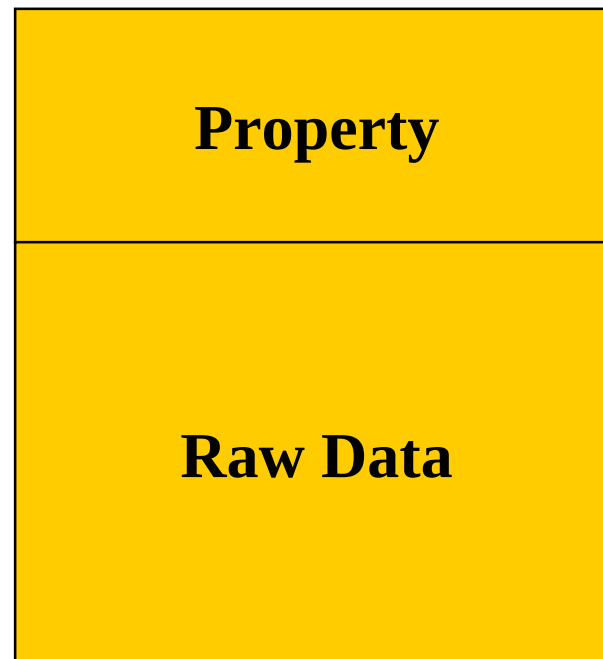
FEGA : Finite Element Generic Attributes

ドキュメントと入出力関数

ドキュメント:データの「いれもの」

ネットワーク内のディスク上のファイル、メモリに存在する。
指示文字列によって一意に特定される。
入出力を行う関数のライブラリを用意する。

ドキュメント
の構造



key=value
key=value
:



Any Data

バイナリ・リトルエンディアン

節点と要素のドキュメント

節点

[Properties]
content_type=Node
num_items=レコード数(節点数)
dimension=次元
[Data]
3次元: $(x, y, z) \times \text{num_items}$
2次元: $(x, y) \times \text{num_items}$

要素

[Properties]
content_type=Element
num_items=レコード数(要素数)
element_type=要素タイプ (ex. 3DQuadraticTetrahedron)
num_nodes_per_element=1要素の節点数
[Data]
 $(\text{節点1}, \text{節点2}, \dots, \text{節点num_nodes_per_element}) \times \text{num_items}$

FEGA : Finite Element Generic Attributes

有限要素解析用一般化属性



有限要素法の世界では、全てのデータは節点または要素に付随する。

fega_type=(All)?(Node|Element)(Variable|Constant)
(UCDと結局同じになる。)

FEGAの仕様

[Properties]

content_type=FEGenericAttribute

num_items=レコード数

format=<value>のフォーマット [((i|f)バイト数)+]

fega_type=(All)?(Node|Element)(Variable|Constant)

label=物理的意味を持つ名前。(ex. Young, Poisson)

dd_optiunon=DomainDecomposerへのオプション

index_byte=indexのバイト数(通常int32なので4(バイト))

(非常に大規模な問題では8バイトのintegerとする.)

[Data]

fega_type=All(Node|Element)Variable のとき

<value> × num_items

fega_type=All(Node|Element)Constant のとき

<value> × 1

fega_type=(Node|Element)Variable のとき

(<index>, <value>) × num_items

fega_type=All(Node|Element)Variableのとき

<value>, <index> × num_items



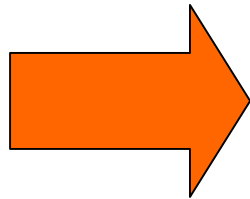
課題4

多様な並列分散環境で自在に連成解析
を行えるか？

ADVENTURE Framework

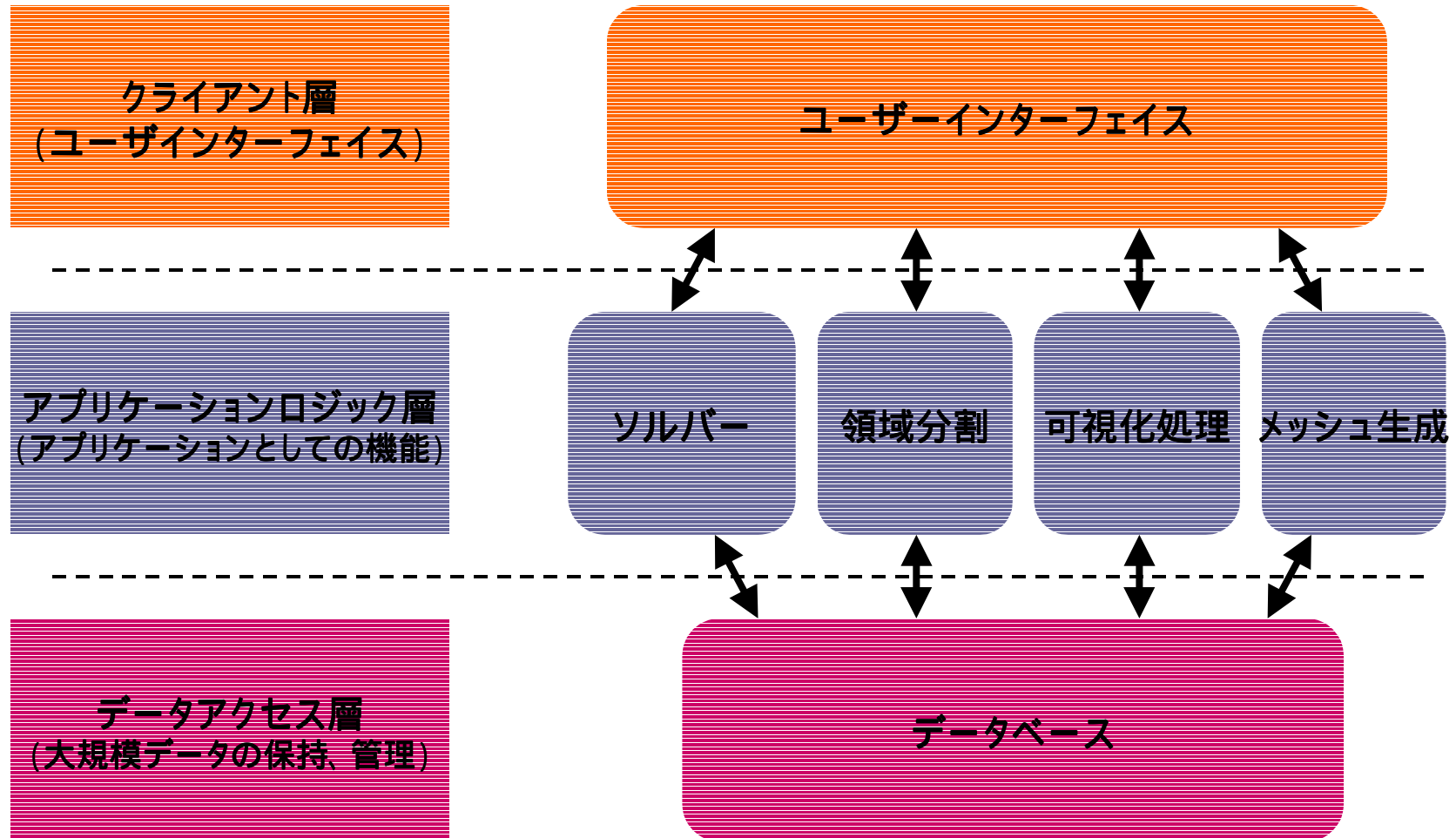
並列分散CAEのためのフレームワーク

- 専用/汎用MPPsからPC/WSクラスターまでの多様な並列分散環境への移植性の実現
- 単一現象解析から連成解析、設計解析までを一元的に柔軟に処理するためのプラットフォーム
- 巨大CAEシステムの開発・保守・管理の効率化

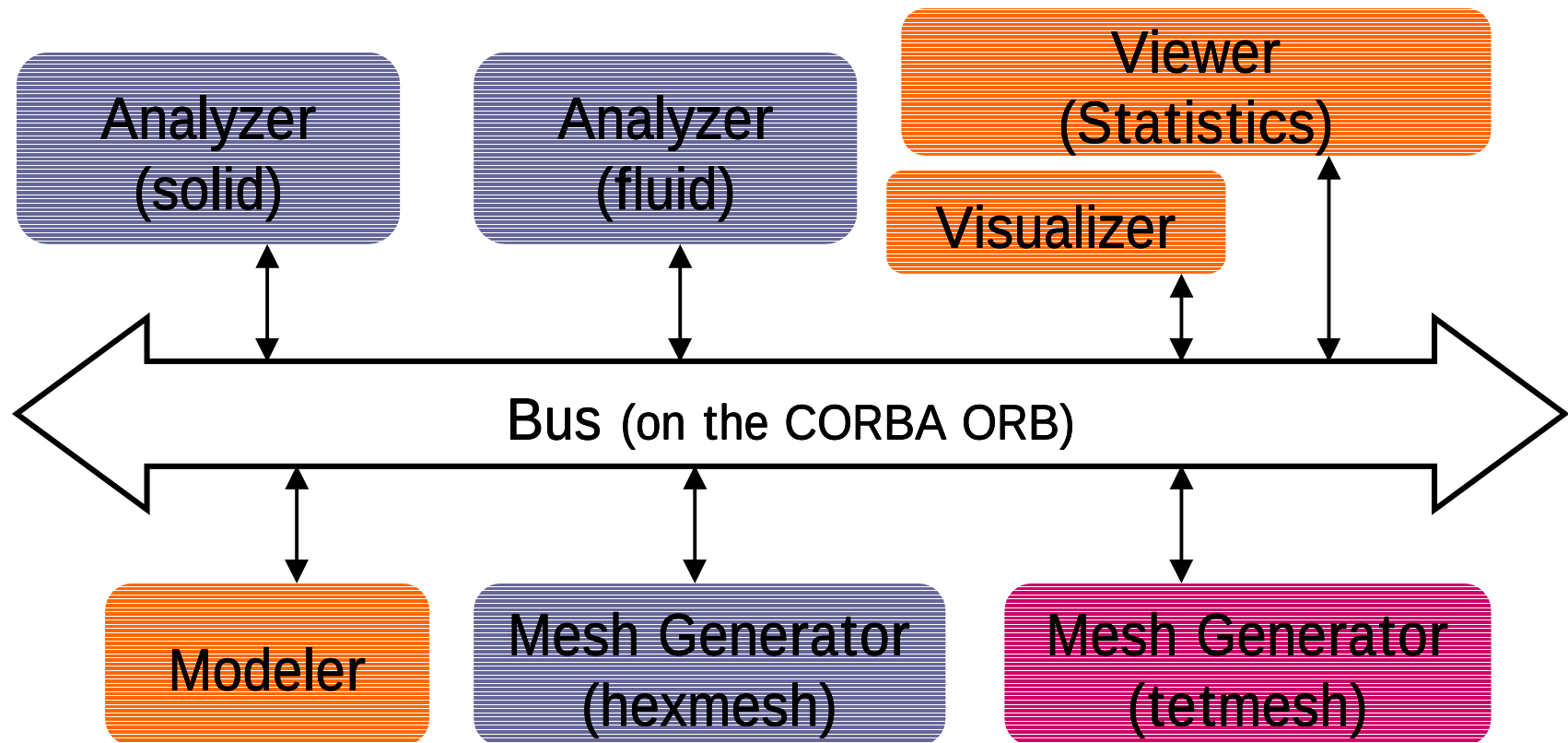


1. 三層Client/Serverモデル
2. 分散オブジェクト技術(CORBA, DCOM)
3. コンポーネントモデル
(CORBA Component, COM, COM+)

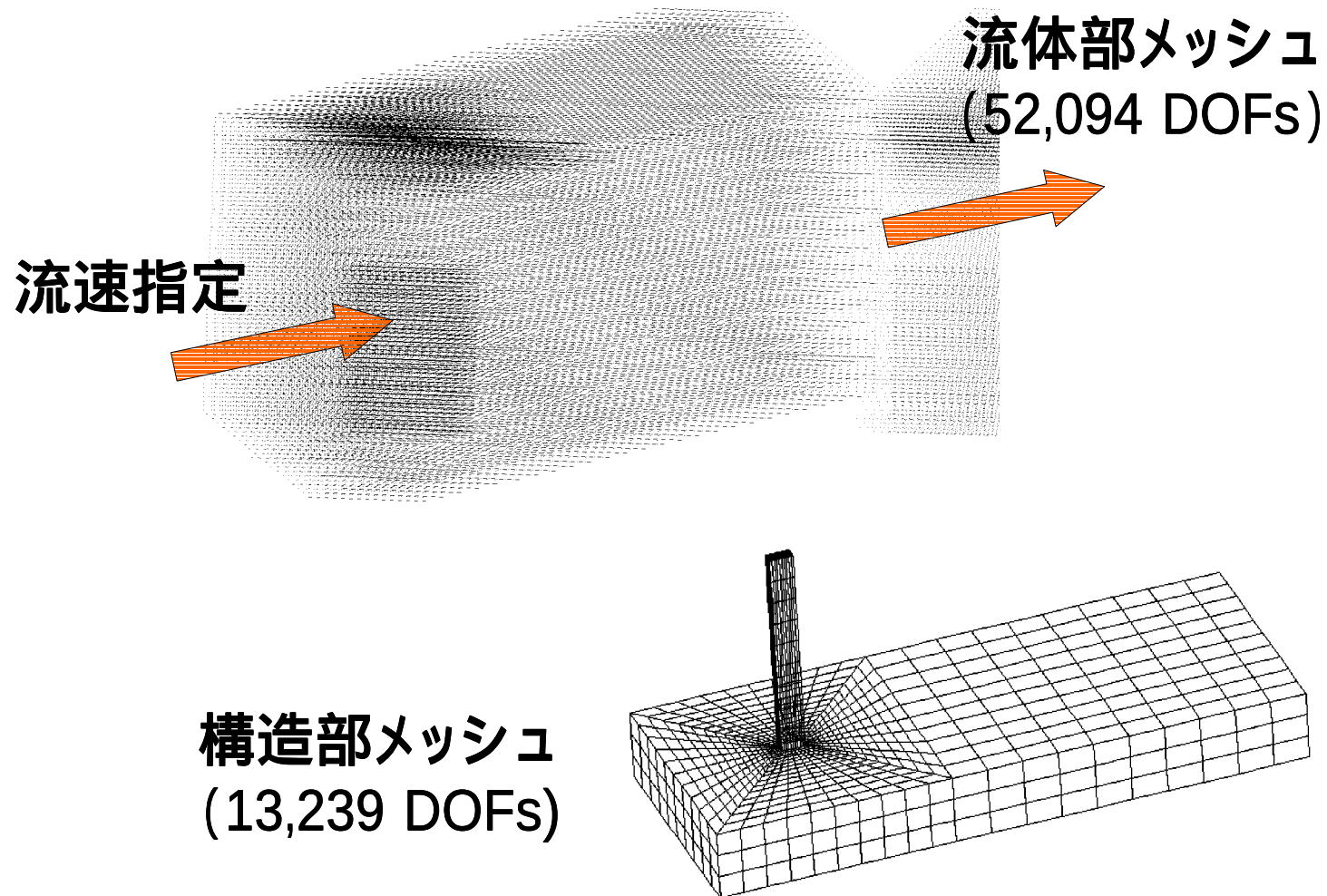
CAEシステムの 三層C/Sモデルへのマッピング



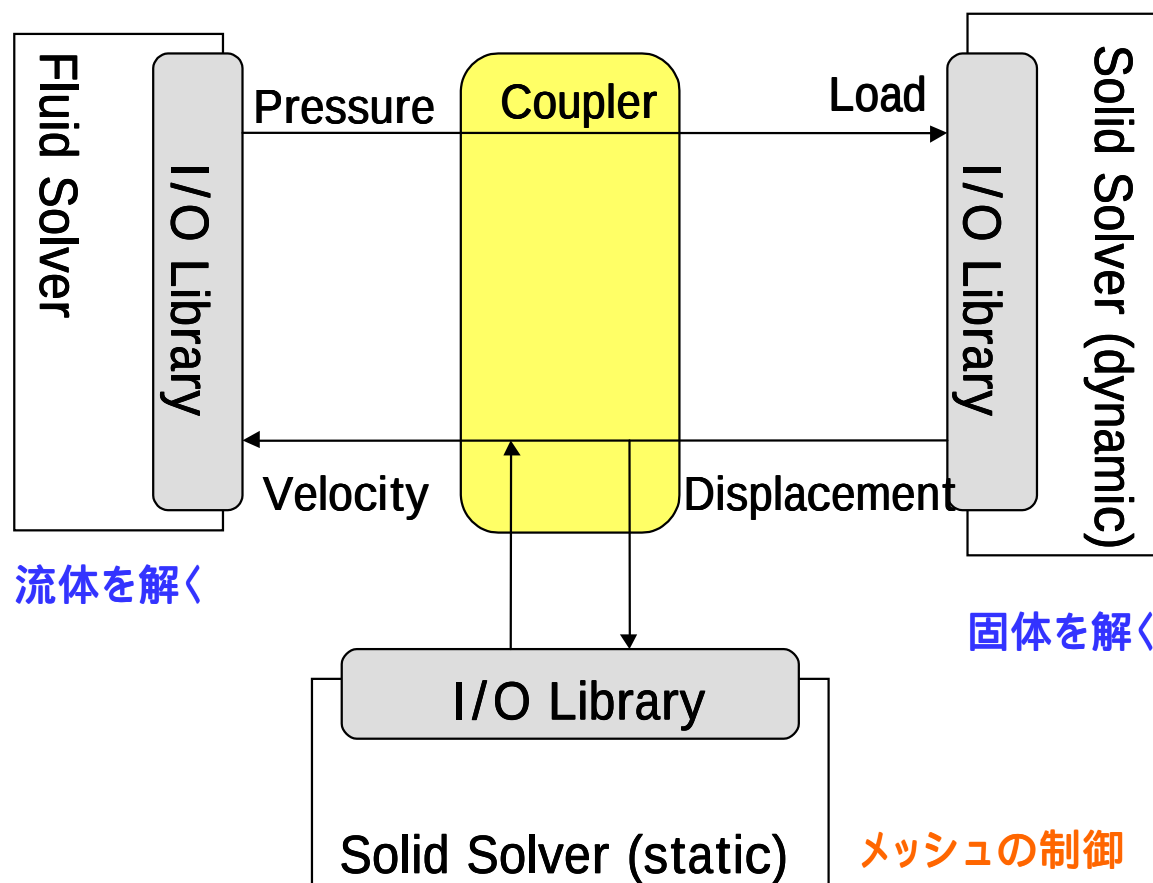
CORBAによる結合



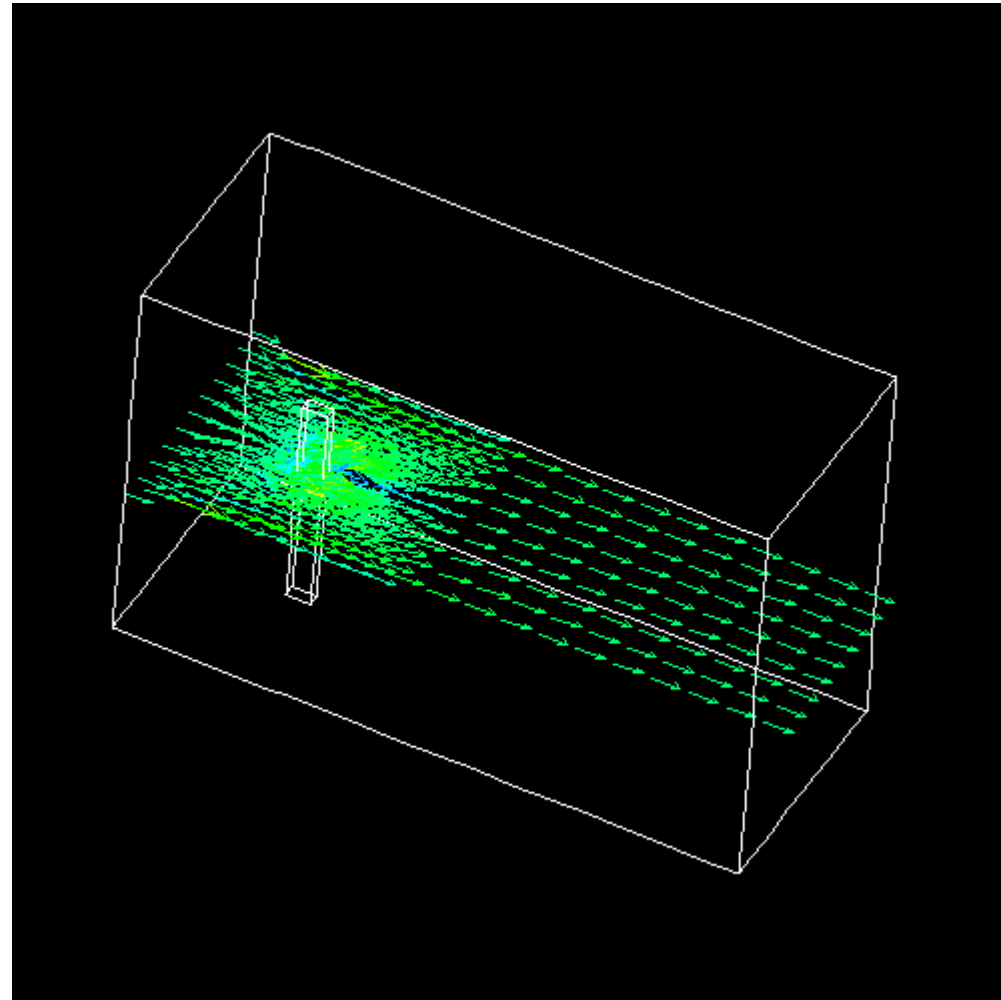
流体 - 構造弱連成解析の問題設定



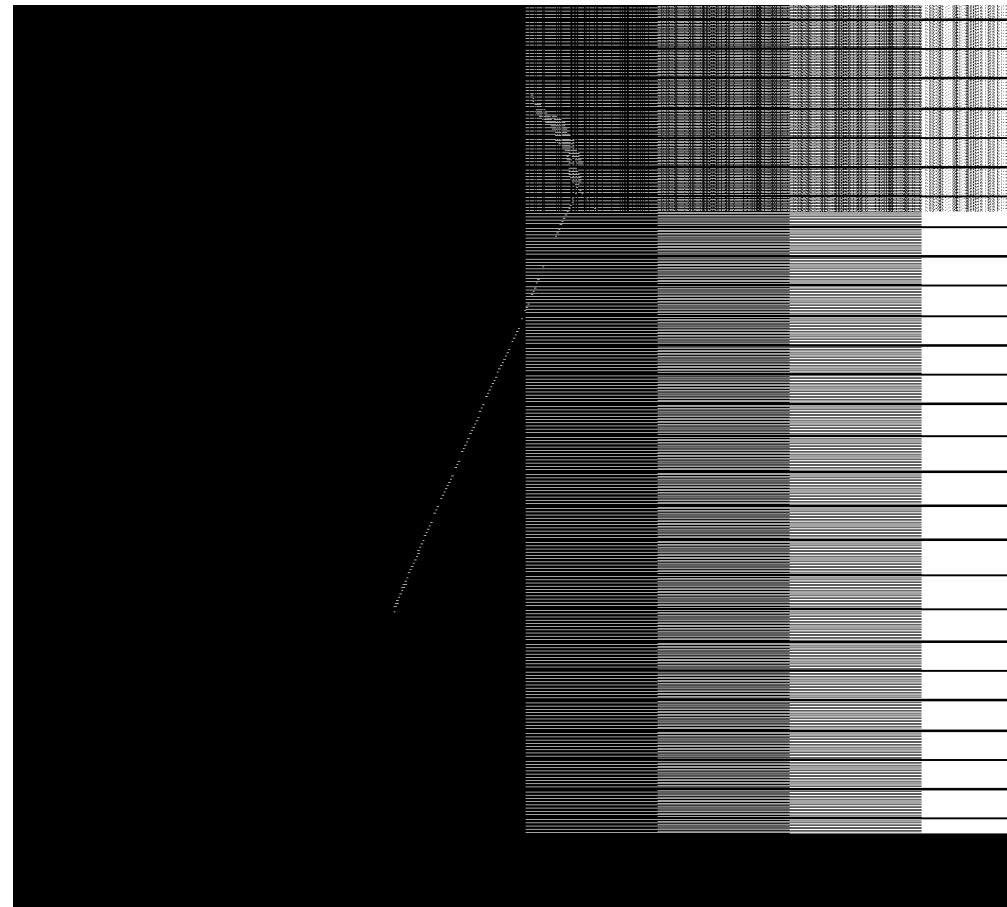
ADVENTURE Framework上での 弱連成解析時のソルバーの動作



無次元時間 $t=60$ における切断面A における流速場



無次元時間 $t=60$ における 構造物の変形及び応力図





課題5

解析と設計の統合化をどのように
実現するか？

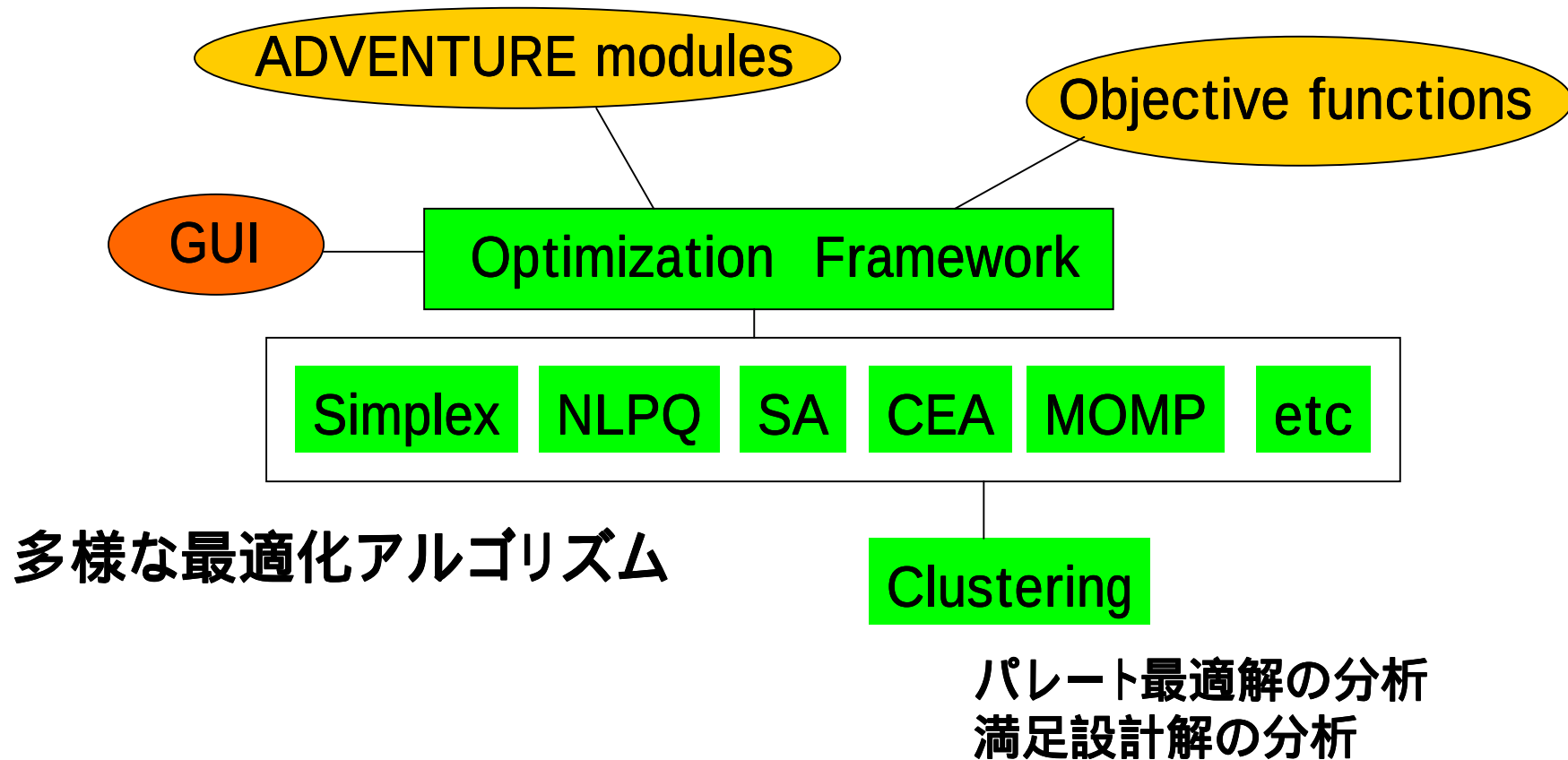
ADVENTURE Design Module

パラメトリック最適化のためのフレームワーク



- ADVENTUREモジュールとのインターフェース
(ADVENTURE Frameworkの元で、他モジュールと連携)
- 多様な最適化アルゴリズムを柔軟に統合化
- 大規模なモデルを用いた並列最適化に対応

ADVENTURE Design Moduleの構成



2000.2-2001.1の主な予定

- これまで不可能であった詳細3次元全体モデルの解析
たとえば、ABWR原子炉压力容器モデル
- 複雑形状に対して、1億自由度のメッシュ作成、解析、可視化
- ADVENTURE FrameworkとDesign Moduleの完成及び大規模連成解析、設計解析を通した性能実証
- システムのβバージョンの公開(予定)
- 様々な並列分散環境でのシステムの性能評価