

プラント構造・機器解析モデリングの計画と現状

吉村 忍、河合浩志、杉本振一郎

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp, kawai@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp, sugimoto@sys.t.u-tokyo.ac.jp

1. マルチスケール構造モデリング

本研究で扱う対象構造物の特徴として、波動伝播特性の大きく異なる地殻、表層地盤、建屋、機器類の連成構造であること、中心にある機器類（炉構造）が多種多様な接合を内包する巨大で複雑なアセンブリ構造であること、各構造要素に特有の非線形・経年変化・損傷挙動および熱流体的連成挙動があること、が上げられる。そこで、本研究においては、はじめ3年間かけて、既存構成式・モデルの調査および現在有している技術やその実装形態であるソフトウェアの融合開発を行い、上述の特徴を考慮したマルチスケール構造モデリングを完成させる。本構造モデリングの実装にあたっては、吉村（東京大学）らが開発し公開してきたオープンソースの大規模並列有限要素法解析システム ADVENTURE を基盤として用いることとする。特に地盤や鉄筋コンクリート製の建屋の非線形挙動を表すために必要不可欠な技術を高性能・大規模計算機環境へ組み込む。炉構造内部については、材料レベルの非線形性ととも、放射線損傷や熱時効、クリープ、エロージョン・コロージョンなどの時間依存する経年効果についてもデータベース等を基にその影響を考慮し、さらに、経年化構造・材料と熱・流体・炉特性との相互作用も考慮するための構造モデリングを行う。

2. マルチスケール連成モデリング

1. における構造モデリングと連携し、原子力発電所周辺規模のマクロスケールと原子炉内現象のメゾおよびミクロスケールの二つのマルチスケール連成解析技術の研究・開発を実施する。ひとつは、原子炉内現象のメゾおよびミクロスケールをつかさどる炉構造内部の経年化構造・材料・流体・熱・炉特性等の強い相互作用のモデリングである。もうひとつは、原子力発電所周辺規模のマクロスケールを担う波動伝播特性の大きく異なる地殻・表層地盤・建屋・機器の構造間の強い動的相互作用のモデリングであり、機器に伝わる地震力を精緻に評価する。これらの2種の相互作用モデルはさらに弱連成的に結合させる。

具体的には、このような2種のマルチスケール連成解析を実現するために、分離反復解法に基づくデータ受け渡しのためのカプラーを新規開発する。

3. 現在進行中の開発の概要

上記の目標に向けて、ADVENTURE システム（特に構造解析コード ADVENTURE_Solid）に、大規模PCクラスタや次世代スパコン対応に向けたマルチコア向け性能チューニング、金属及びコンクリート材料の材料非線形解析機能の強化地盤（繰り返し塑性、除荷計算のロバスト化、荷重増分幅の自動制御、大規模アセンブリ構造モデリング対応に向けたMPC機能の導入とMPCモデリング用ツール開発などを行っている。また、建屋・地盤・炉構造機器・冷却材の双方向連成解析を実現するためのカプラー開発などを行っている。

プラント構造・機器解析モデリングの 計画と現状

吉村 忍・河合浩志・杉本振一郎

東京大学大学院工学系研究科
システム創成学専攻

yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp

ADVENTUREプロジェクト

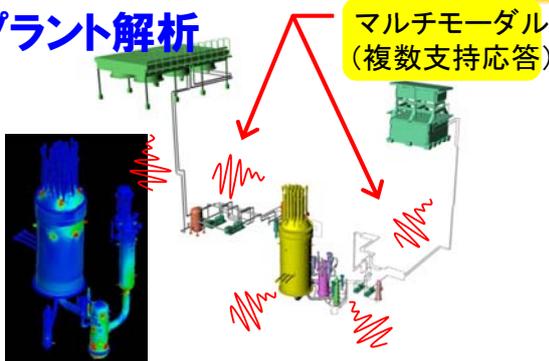
http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp

adv-info@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

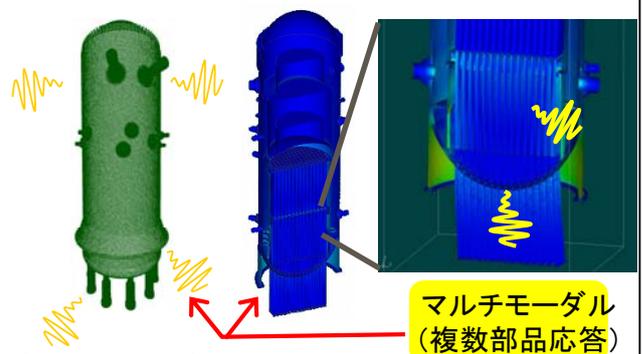


プラント・機器解析の特性(ADVENTURE)

プラント解析



冷却材を考慮した機器振動解析



- ・大規模複雑アセンブリ構造のMPCを活用した丸ごとモデリング
- ・材料非線形(繰返し弾塑性等)モデリング、経年化材料特性モデリング
- ・冷却材の付加質量効果と冷却材を介した機器同士の強連成効果の精緻な考慮
- ・数億自由度モデル → 数100億自由度モデルの超大規模解析 → 次世代スパコン対応へ



材料特性を捉える
構成式モデリング

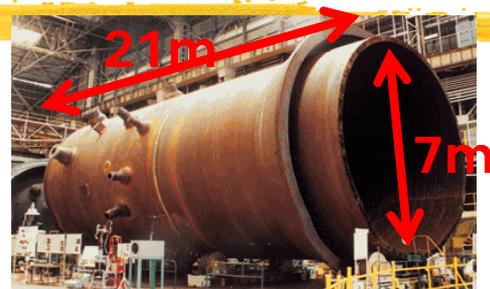
原子炉容器の3次元地震応答シミュレーション 現状

コード : ADVENTURE_Solid
マシン : 地球シミュレータ256ノード
性能 : 1億自由度 /31.8%/ 5.1Tflops
協力 : 東京電力・日立・AE

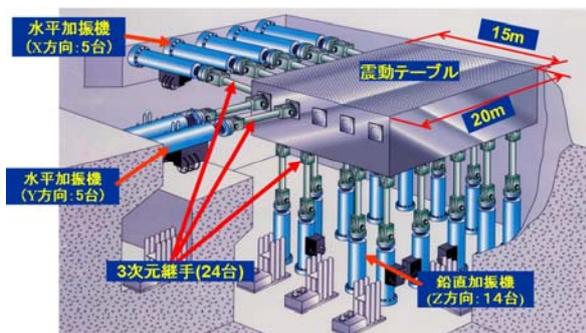
大規模モデルによる地震応答解析の背景



原子力発電所



ABWR容器

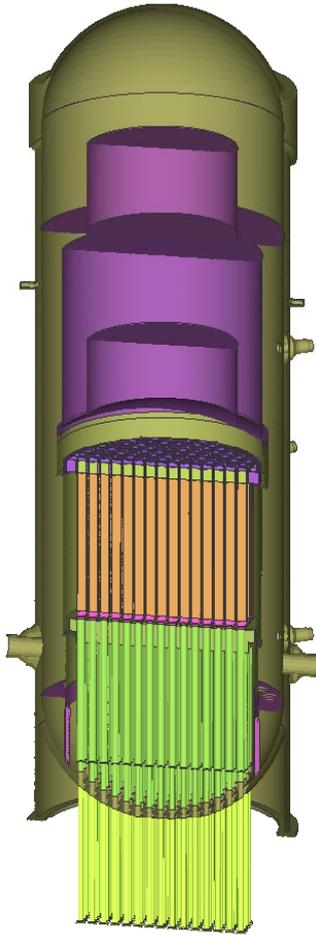


実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defense)

大型耐震試験の課題

- ・実規模の原子炉の試験は不可能
- ・加振力に限界あり
- ・高コスト
- ・パラメトリック評価は困難

2億自由度BWRモデルの耐震解析



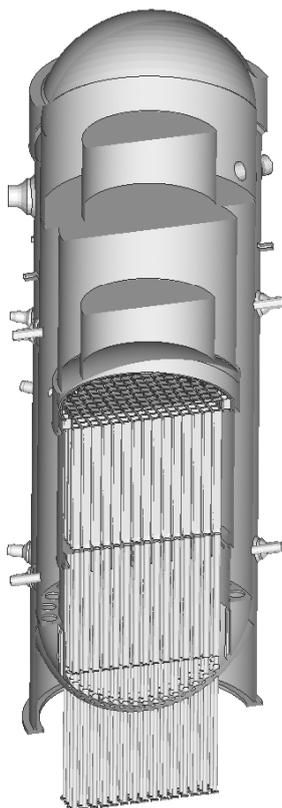
有限要素モデル

- 要素数: 39,746,750 (4面体2次要素)
- 節点数: 67,910,224
- 総自由度数: 203,614,437

解析手法

- 動弾性問題
時間積分: Newmark's beta法 (陰解法)
線形ソルバ: IBDD-DIAG法
相対残差 $< 10^{-3}$
- 入力地震動(模擬地震波)
継続時間: 10 sec.
時間刻み幅: 0.01 sec.

内部構造物付きBWRモデル

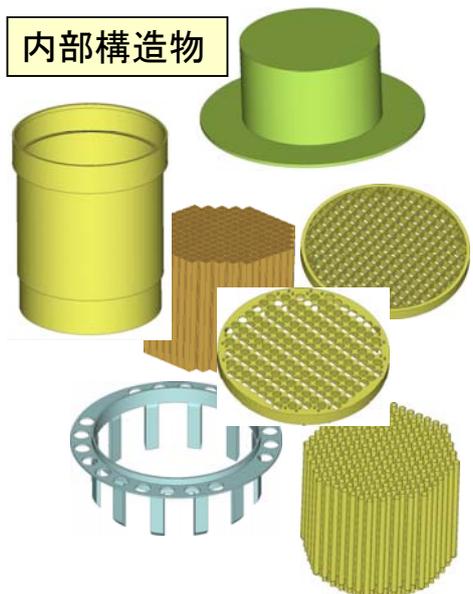


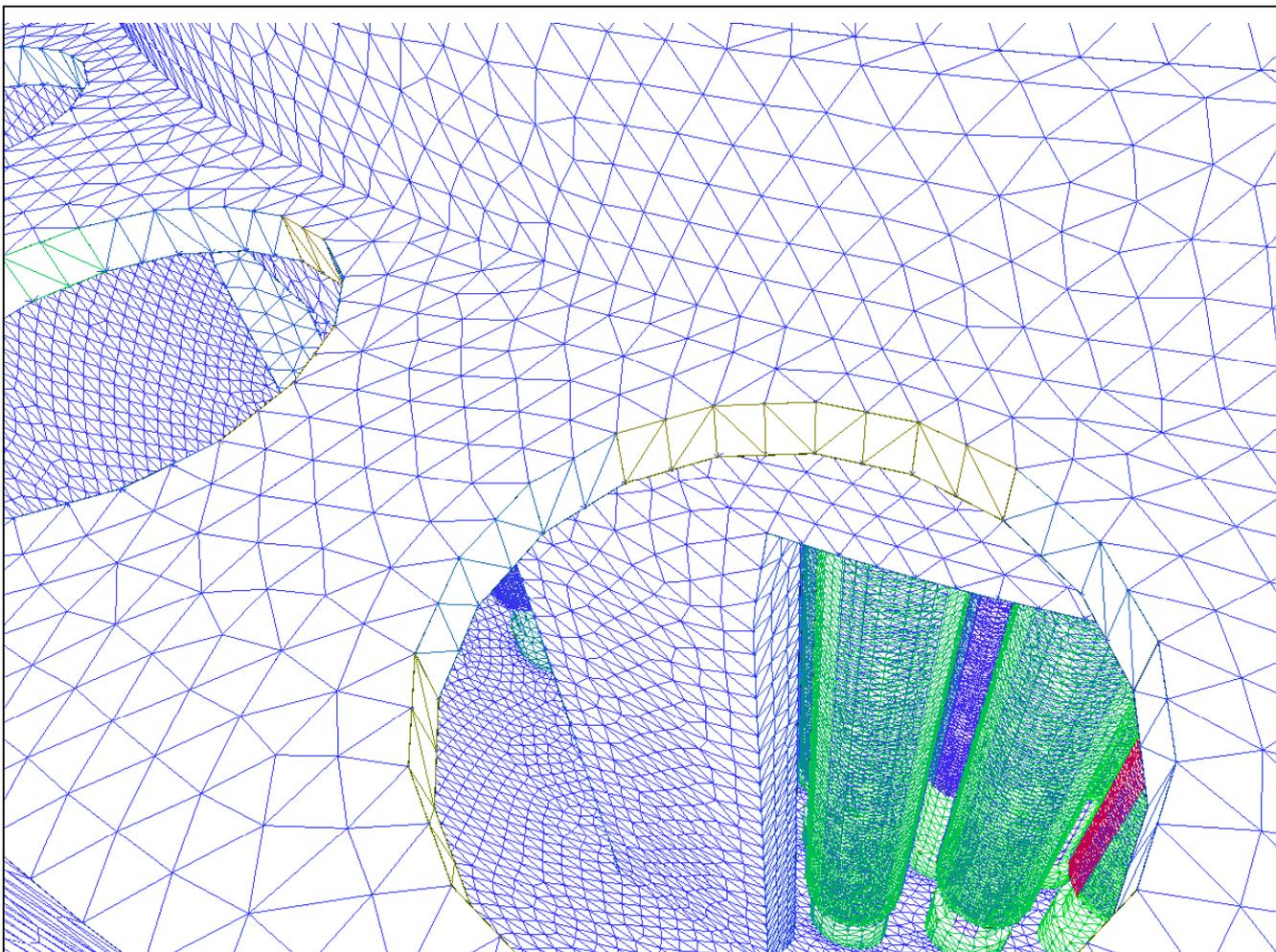
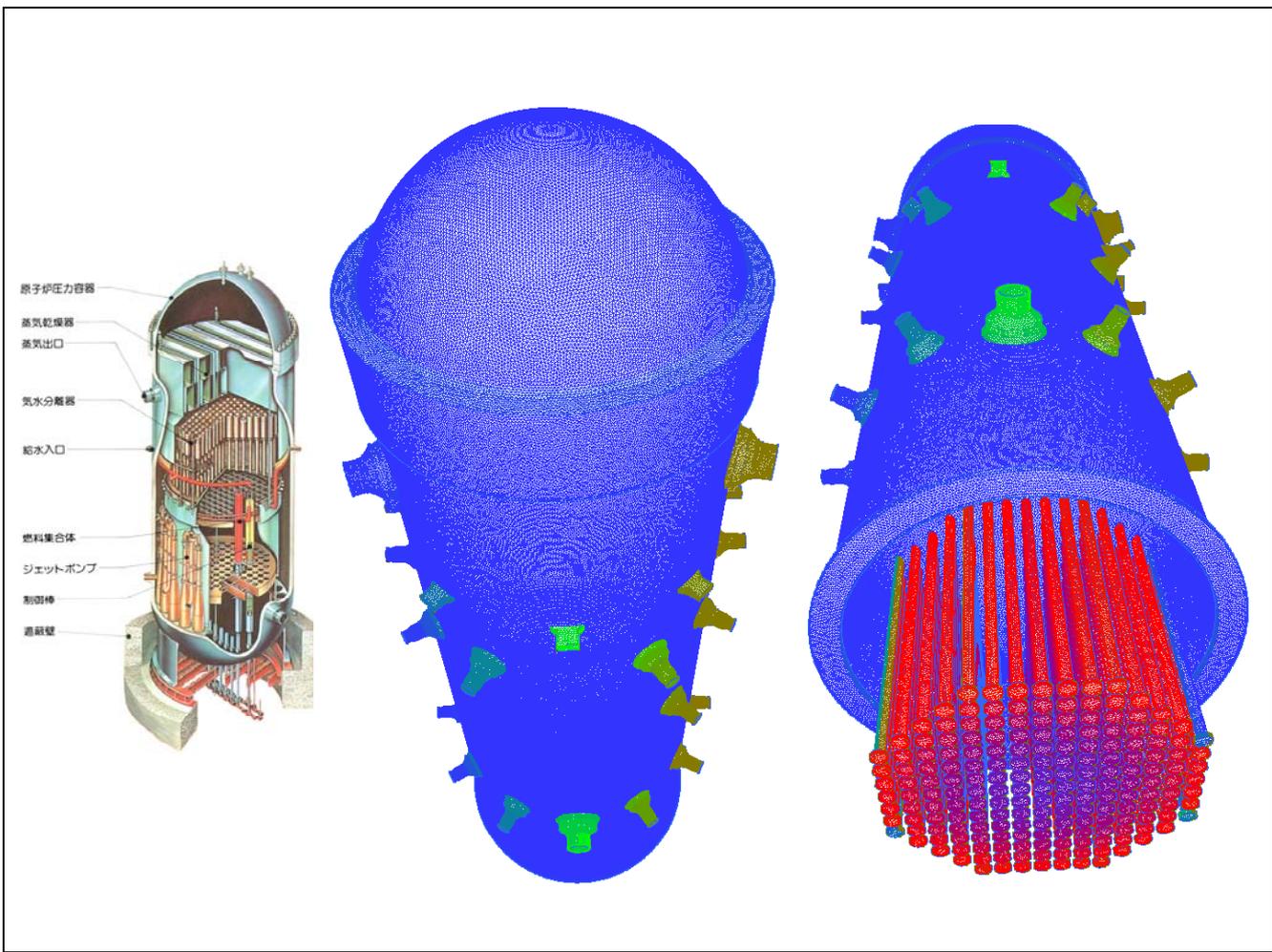
モデル(断面)



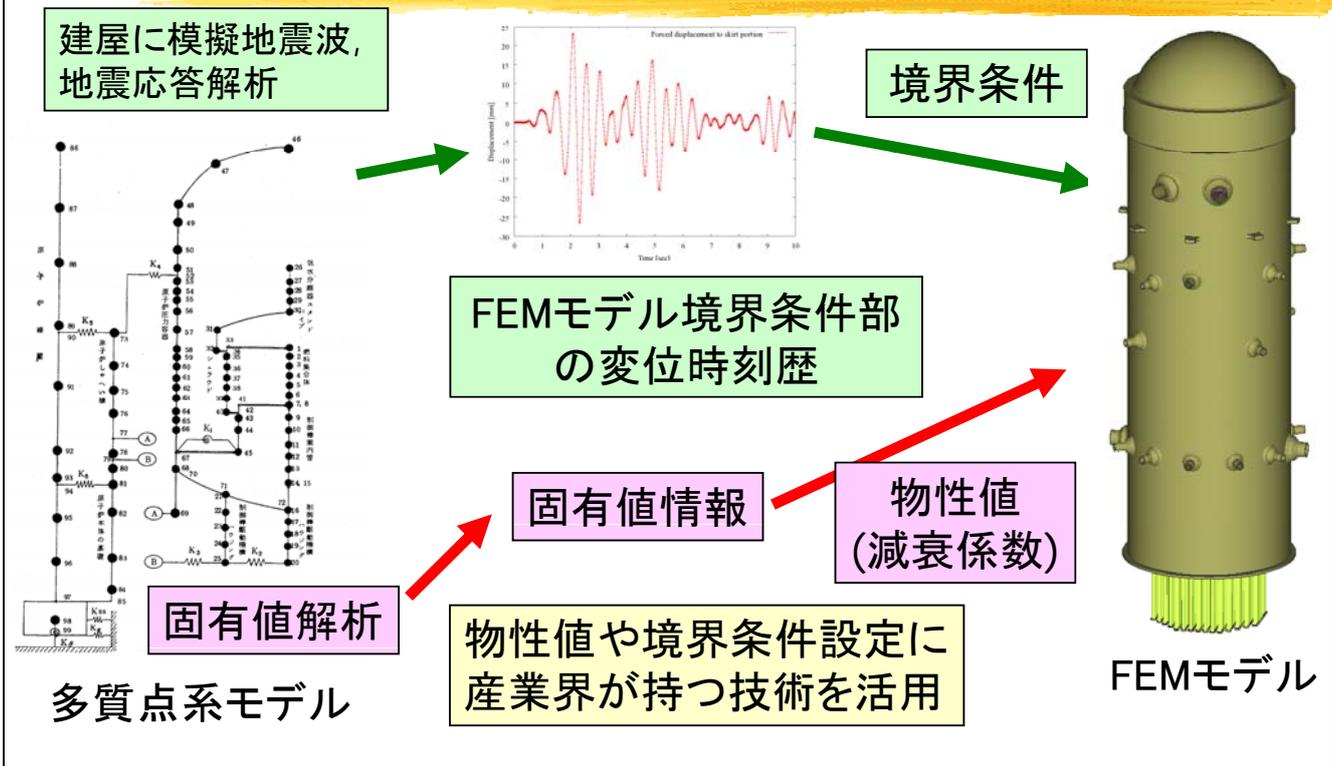
メッシュ

内部構造物





多質点系モデルとの連携(現状)



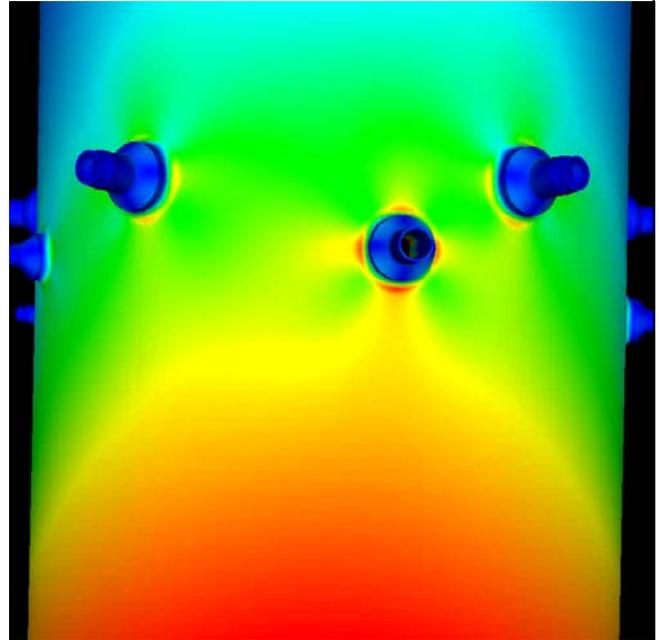
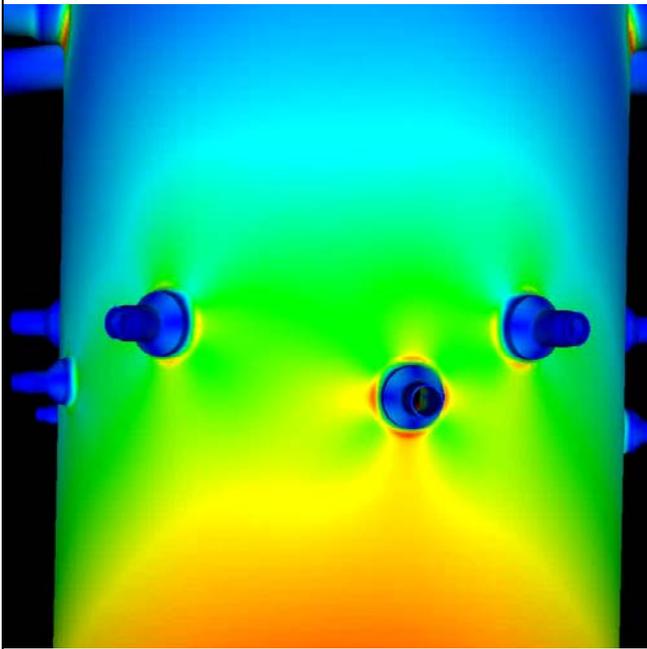
2億自由度BWRモデルの耐震解析

1,000ステップ動弾性解析 on 2,048APs

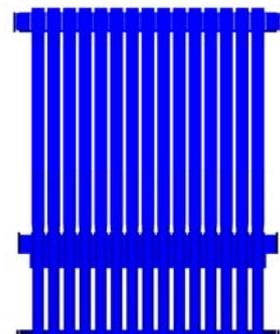
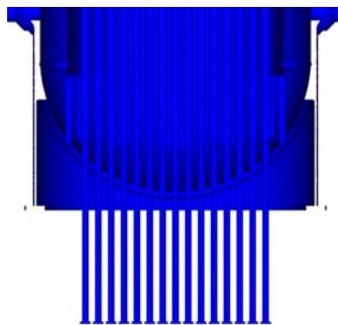
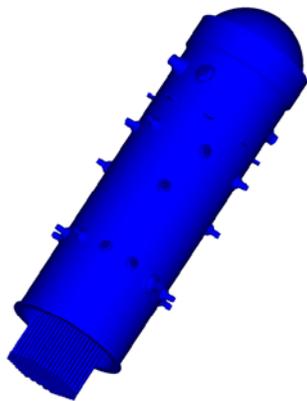
Performances of total analysis				
Number of batch jobs		Amount analysis time		Amount output data
25		26 hr.		2.3 TB
Performances of one batch job				
Time steps	Time	Memory	FLOPS	V.OP.Ratio
40	45.5 min.	3.8 TB	3.0 T	97.93 %
Average performances of one time step analysis				
Ave. iterations of linear solver		Ave. computation time		
156		67.5 sec.		

対話型ワークスルー可視化

山室弥生、吉村忍、河合浩志、階層型領域分割データ構造を用いた大規模構造静解析のワークスルー可視化、日本計算工学会論文集、No.20070017, (2007)



オフライン可視化



CRESTプロジェクト

原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション

ADVENTURE関連の主な研究開発項目

(1) ADVENTURE_Solidの機能拡張

・マルチコア向け性能チューニング

大規模PCクラスタ(T2K)、次世代スパン対応

・材料非線形解析機能(金属材料、コンクリート・地盤)

繰り返し塑性(等方+移動硬化)

除荷計算のロバスト化

荷重増分の自動コントロール(適応制御)

大規模アセンブリー構造対応(MPC・要素混在)

(2) 双方向連成解析機能(分離反復解法)

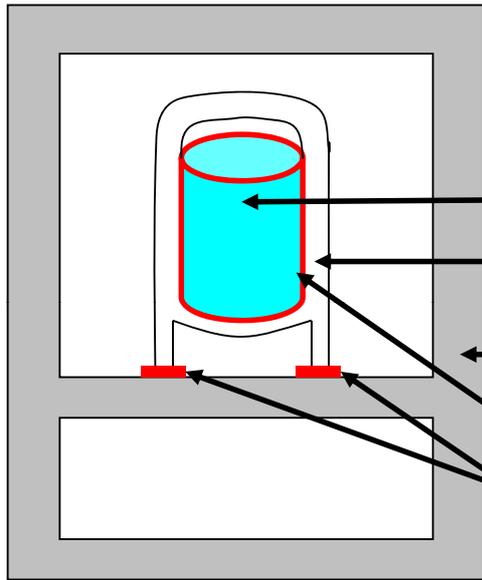
建屋(鉄筋コンクリート)・地盤 ⇄ 原子炉機器(金属) ⇄ 冷却材

13

双方向連成解析のイメージ

1. ADV_Solidで建屋+地盤のソリッドモデルを動的非弾性問題として解いている。
2. ADV_Solidで炉容器+内部構造物のソリッドモデルを動的非弾性問題として解いている。
3. ADV_Thermalで炉容器内の冷却材の動きをポアソン方程式で近似し非定常問題として解いている。
4. 1と2の解析がADV_Couplerを介してデータのやり取りを行い固体-固体の双方向連成問題を解き、同時に、2と3の解析ADV_Couplerを介してデータのやり取りを行い、固体-流体(ポアソン方程式で近似)の双方向連成問題として解く。いずれも階層型領域分割対応、メッシュは非適合。

双方向連成功の基本例題



水(ADV_Thermal) (ポアソン方程式で近似)

金属(ADV_Solid)

コンクリート(ADV_Solid)

金属と水が双方向連成

コンクリートと金属が双方向連成、あるいはMPC接続

双方向連成

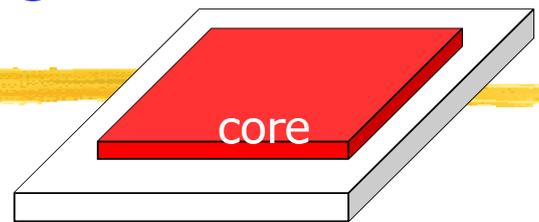
- ・効率的な分離反復型の双方向連成解析アルゴリズムの開発
- ・Solid - Thermal 双方向連成 (炉容器と建屋はMPC接続)
- ・Solid - Solid - Thermal 双方向連成

15

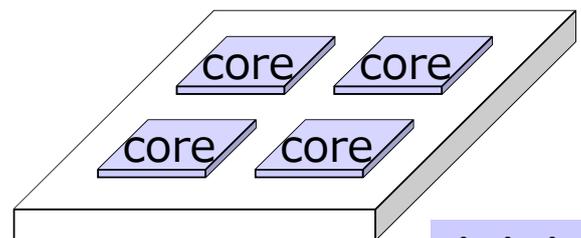
マルチコア・スカラーCPU

- ・消費電力・熱密度の問題
 - 動作周波数の向上が困難
 - 最高3GHzあたりで停滞
- ・マルチコア化が加速
 - プロセッサコアをCPUチップ上に多数集積することで、演算性能の向上を図る

従来のCPU



今後のCPU



×2

×4

×8

×16

...

マルチコアの問題点

並列化が必要

(マルチスレッド、OpenMPまたはMPI)

メモリバンド幅がボトルネック

→ データをコアごとのキャッシュ上に

計算結果をいったんメモリへ保存か、

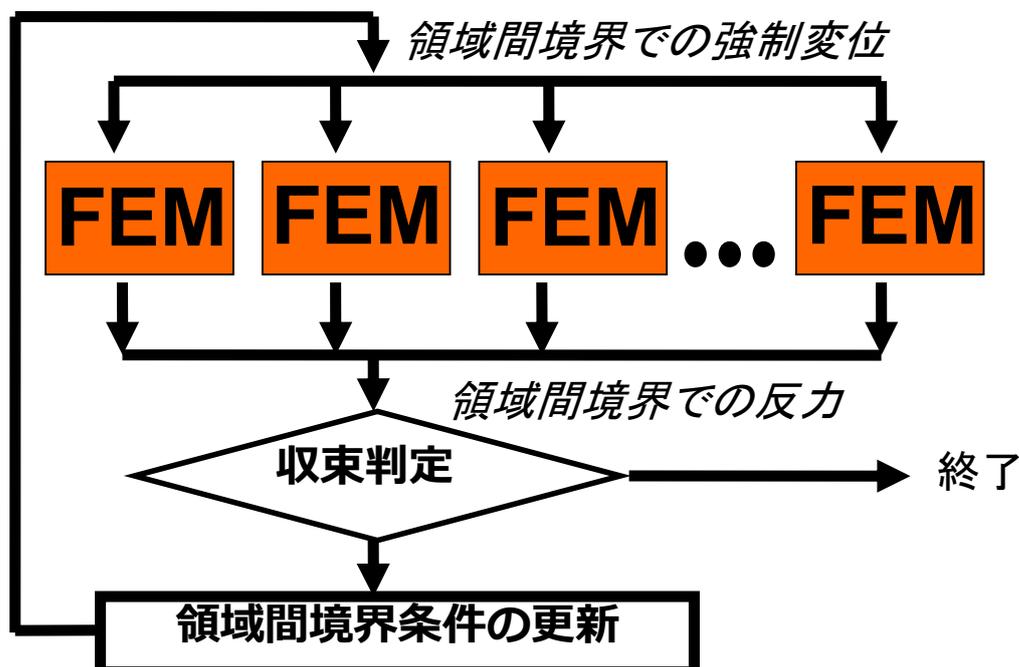
それとも必要に応じて再計算か？

マルチメディア拡張命令の利用が望ましい

Intel SSE/SSE2/SSE3... → SSE5/AVX拡張へ

17

反復型領域分割法のフロー



直接法・反復法による部分領域内FE解析

■直接法におけるバリエーション

保存型 (DS: **Direct Storage型**)

最初に一度、領域ごとの全体剛性行列をLDL分解後、skyline形式で保存。その後は保存した行列を再利用。

非保存型 (DFS: **Direct Storage-Free型**)

領域分割法の反復ごとに、領域の全体剛性行列作成とLDL分解を毎回行う。

■反復法によるバリエーション

保存型 (IS: **Iterative Storage型**)

非保存型 (ISF: **Iterative Storage-Free型**)

部分領域FE計算

—領域サイズとの相関—

