

建屋・構造機器解析モデリングとシミュレーションの現状と課題

吉村 忍、河合浩志、杉本振一郎、南さつき、片岡俊二

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,

小林 敬、渡辺 愛

東京電力株式会社

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ー構造であること、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、が挙げられる。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。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ともに、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、大規模アセンブリー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。

建屋・構造・機器モデリングと シミュレーションの現状と課題

吉村 忍・河合浩志・杉本振一郎・南さつき・片岡俊二

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

小林 敬・渡辺 愛

東京電力(株)

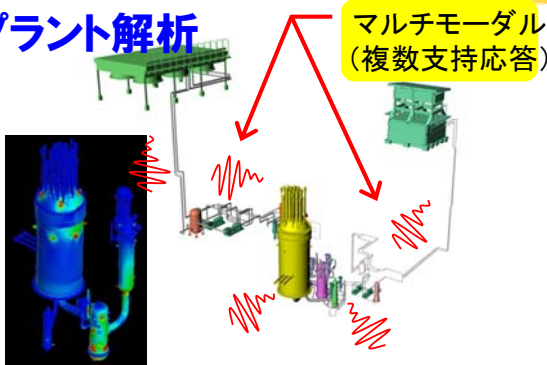


<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp>

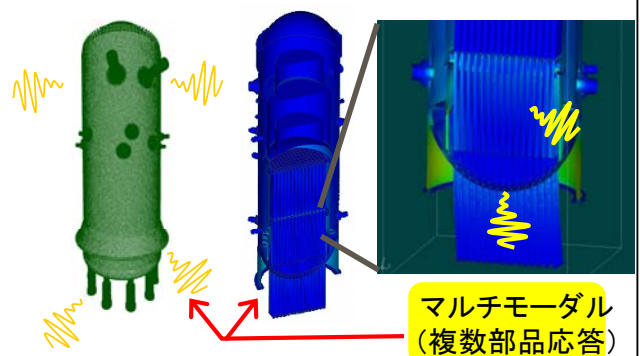
E-mail: adv-info@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

建屋・構造・機器解析の特徴 (ADVENTURE)

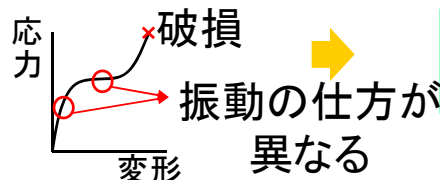
プラント解析



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双方向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



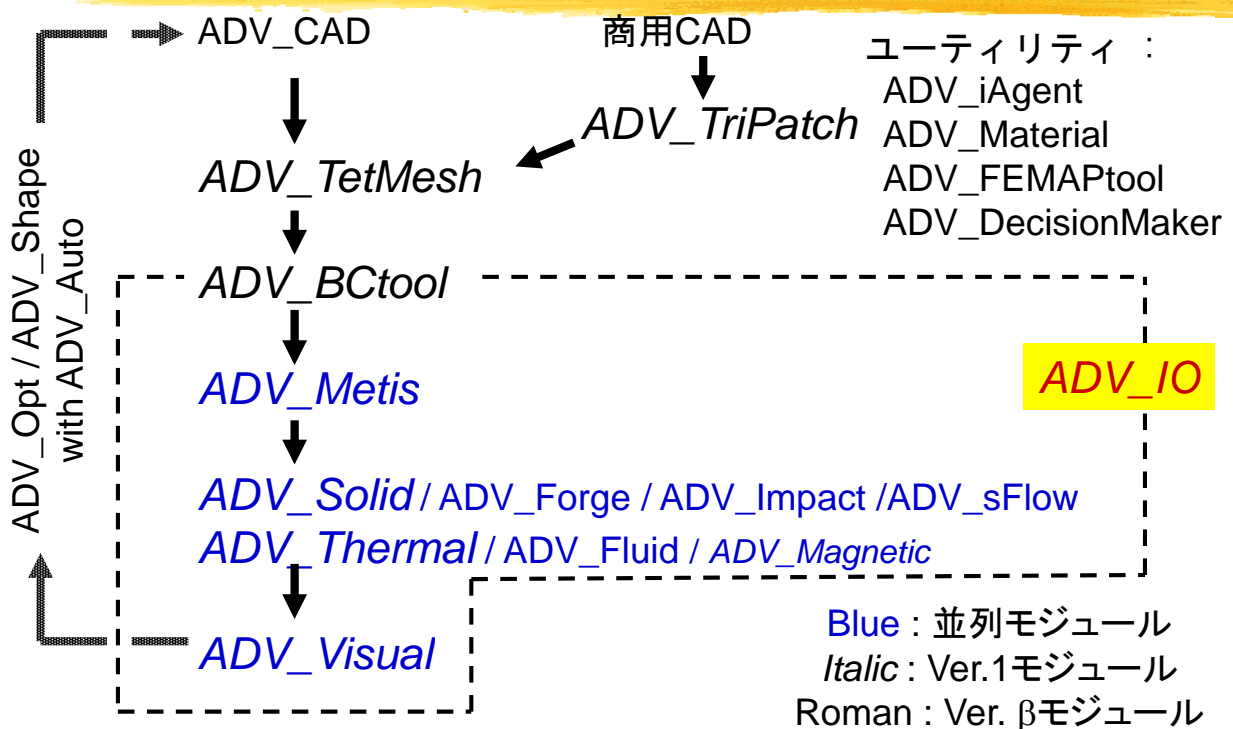
材料特性を捉える
構成式モデリング

振動の仕方が
異なる

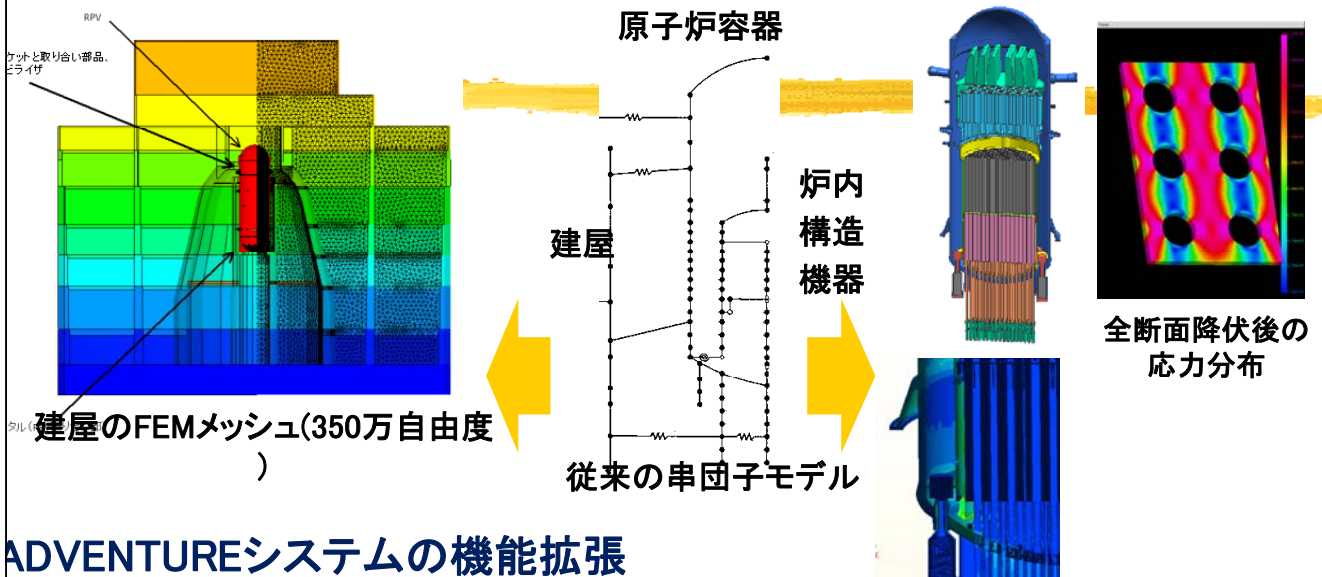
ADVENTUREシステムの特徴

- (1) 数百～数億自由度メッシュによる丸ごと解析
- (2) 1000プロセッサの超並列計算機環境でも90%を超える高い並列効率
- (3) 優れた移植性：単一プロセッサ, PCクラスター, 超並列計算機(ESなど), 非均質計算機環境(ITBLなど)
2005.3.10 Windows版公開(登録ユーザー数2,583人)
- (4) ライセンスフリー / オープンソース：登録ユーザー数5,859人
ダウンロードされたモジュール数31,246本
商用バージョン ADVENTUREcluster(アライドエンジニアリング)
⇒ IEEE/ACM SC2006 Gordon Bell Award finalist
2008年日本機械学会賞(技術)
2009年科学技術大臣表彰 科学技術賞
国産商用プレポストKSWAD(Kubota)へのメッシュ技術導入
国産商用解析コードFINASTR(CTC)への並列ソルバー技術導入
- (5) 拡張性と保守性：モジュール構造とIOの標準化、Commodity技術

ADVENTUREシステムのモジュール構造 (21 モジュール) <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp>



建屋、炉内構造機器付き原子炉容器のフルスケールモデル



ADVENTUREシステムの機能拡張

- (1) 構造機器(金属)の材料非線形(繰返し弾塑性等)モデリング、経年化材料特性モデリング
 - (2) 建屋(鉄筋コンクリート)の材料非線形モデリング
 - (3) 大規模複雑アセンブリ構造の多点拘束(MPC)を活用した丸ごとモデリング
 - (4) 震動時の(a)冷却材の減衰効果と(b)冷却材を介した機器同士の強連成効果の精緻な考慮
 - (5) 次世代スパコン向けチューニング
- 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

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)、次世代スパコン対応
- ・材料非線形解析機能(金属材料、コンクリート・地盤)
 - 繰返し塑性(等方+移動硬化等)
 - 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)

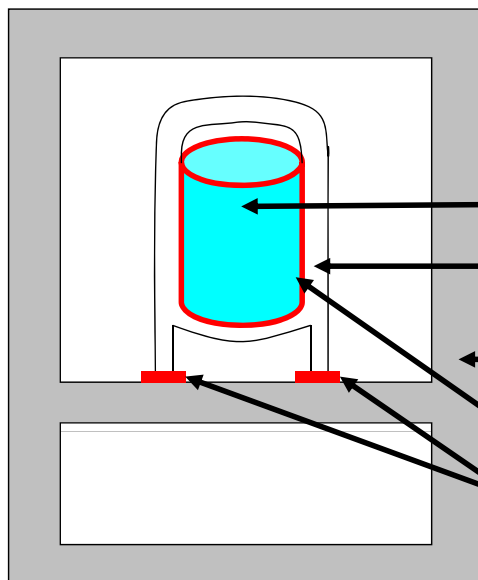
建屋(鉄筋コンクリート)・地盤 ⇄ 原子炉機器(金属) ⇄ 冷却材

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音響流体（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。

7

双方向連成解析のイメージ



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

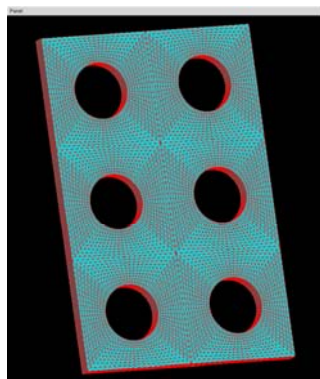
- ・効率的な分離反復型の双方向連成解析アルゴリズムの開発
- ・Solid - Thermal 双方向連成 (炉容器と建屋はMPC接続)
- ・Solid - Solid - Thermal 双方向連成

8

追加機能1:弾塑性解析 実装済み機能

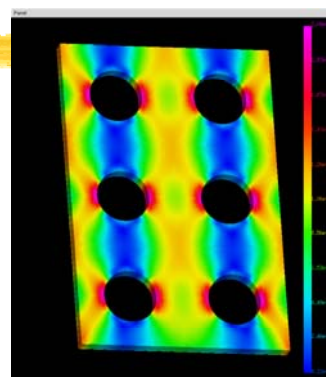
- 構成則 (von Mises材料)
 - 等方硬化、移動硬化、複合硬化
- 応力積分
 - 前進Euler積分+サブインクリメント
 - 後退Euler積分 (von Mises材料のみ)
- 非線形スキーム
 - 増分のみ (静的陽解法)
 - 増分+Newton-Raphson
 - N-R
 - N-R、コンシステント接線剛性 (von Mises材料のみ)
- 増分ステップ制御
 - 弾性・塑性間の遷移
 - 最大塑性ひずみによる制御
 - 除荷発生時の制御

弾塑性解析の例

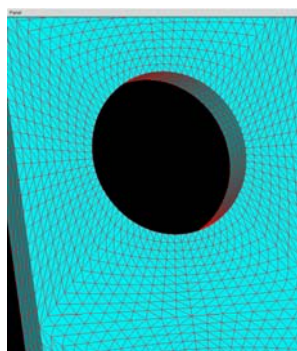
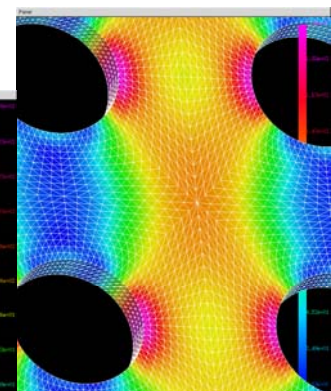


複数円孔を有する
平板モデル

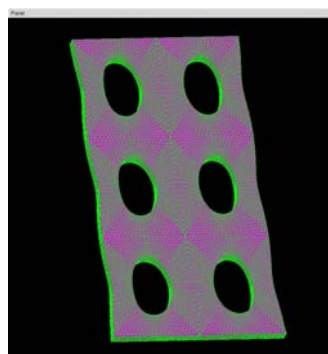
54万自由度
四面体二次要素



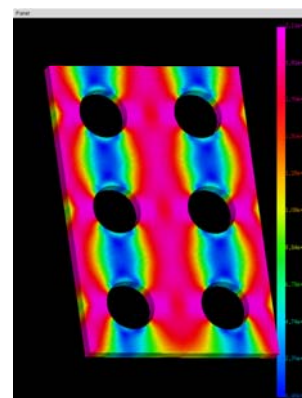
相当応力



メッシュ(拡大)



変形図



全断面
降伏直後

次世代スパコン向けチューニング HPCハードウェアのトレンド

■コア： 浮動小数点演算能力の強化

SIMD命令拡張(マルチメディア拡張)

キャッシュ内でベクトル化

■CPU： **マルチコア化**

キャッシュに載せる

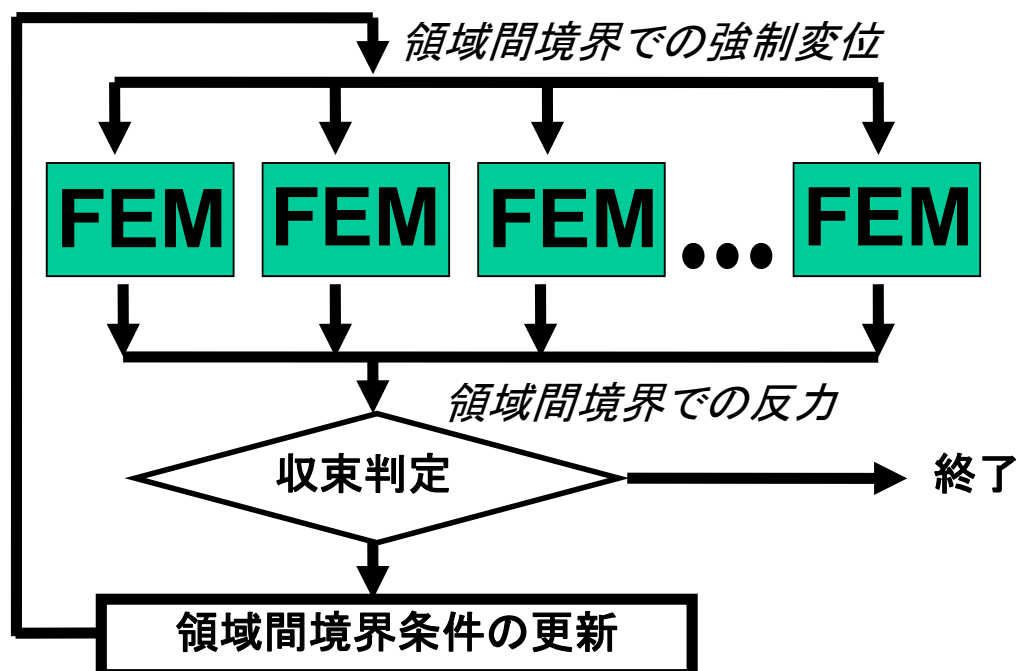
■筐体： 複数のCPUソケット

分散共有メモリ(**NUMA**)への対応

■システム： 数千から万単位の筐体

分散メモリ => MPIはmust

(反復型)領域分割法のフロー



領域FEM計算の分類

■直接法ベース

●保存型: *DS* (*Direct solver-based matrix Storage*)

係数行列とLDL分解結果をメモリ上に保存
毎DDM反復ごとに前進後退計算だけで解を求める

●省メモリ型: *DSF* (*Direct solver-based matrix Storage-Free*)

毎DDM反復ごとにLDL分解も行う必要あり

■反復法ベース

●保存型: *IS* (*Iterative solver-based matrix Storage*)

係数行列(または/かつ)前処理行列をメモリ上に保存
毎DDM反復ごとにCG法で反復解を求める

●省メモリ型: *ISF* (*Iterative solver-based matrix Storage-Free*)

毎DDM反復ごとに係数行列+前処理行列の作成を行う

WSでの性能計測(1)

■ベンチマーク環境: ワークステーション(24コア)

構成: Intel Xeon7400 (2.67 GHz x 6コア) x 4ソケット

メモリ: 128GB

共有メモリ環境、FSB (4 channel)

■DDMによる構造解析

DDM前処理: *BDD-diag*

コース行列処理に*スパースソルバ*を使用

領域FEM計算: *DS*(従来型), *DSF*, *ISF*による比較

共有メモリ並列化

OpenMP

領域間並列化にマルチカラーリング

WSでの性能計測

総自由度	領域自由度	領域数	メモリ (GB)	BDD 反復回数	時間 (分)		
					DS	DSF	ISF
13M	375	6万	5.8	40	5.7	6.4	7.5
20M	525	6万		49	7.6	9.0	11
30M	735	6万		53	12	15	17
42M	1029	6万		50	20	26	23
52M	1323	6万		48	N/A	36	30
75M	1701	6万		50	N/A	85	45
98M	2187	6万	12.0	50	N/A	205	62

メモリ不足

並列性能 : DSF, ISFは24コアで約19倍 (部分領域FEM計算は約23倍)
ピーク性能比 : 約5割(DSF), 約2割(ISF)

PCクラスタでの性能計測(1)

■ベンチマーク環境: PCクラスタ(64+4コア)

構成: Intel Core i7 (2.87 GHz x 4コア) x (16+1)ノード

メモリ: 6GB/ノード

ネットワーク: Gigabit Ethernet

■DDMによる構造解析

DDM前処理: *BDD-diag*

コース行列処理にスパースソルバを使用

領域FEM計算: *DS*(従来型), *DSF*, *ISF*による比較

分散メモリ並列化

フラットMPI

コース行列処理を別ノードで(1ノード余計に必要)

PCクラスタでの性能計測(2)

総自由度	領域 自由度	領域数	DS		DSF		ISF	
			メモリ (GB)	時間 (分)	メモリ (GB)	時間 (分)	メモリ (GB)	時間 (分)
25M	380	10万	1.0	2.5	0.3	2.8	0.3	3.1
37M	530	10万	1.0	2.8	0.3	3.4	0.3	4.2
100M	1300	10万	5.6	4.7	0.5	13		12
220M	2700	10万		N/A		N/A		35
490M	5600	10万	メモリ 不足	N/A	キャッシュ 溢れ	N/A	1.1	113

#メモリはノードごとの値

#コース行列処理専用別途1ノードを使用
(10万領域に5.4GB必要)

ピーク性能比: DSF: 54%
ISF(SSOR-CG): 16%

- DSで1億自由度が5分弱
- ISFで2億自由度が30分程度
- ISFで5億自由度が2時間弱

T2Kでの性能計測

計算機環境: 東大T2K(日立HA8000クラスタ)

CPU: AMD Quad-core Opteron 8356 (2.3GHz) x 4 CPU (16コア/ノード)

ネットワーク: Myrinet-10G

ADV_Solid: BDD-diag前処理、フラットMPI、ISF(SSOR-CG)を使用

総 自由度	領域 自由度	領域数	ノード数	コア数	時間 (分)
18M	1000	2.4万	16	256	2.0
42M	2200	2.4万	64	1024	2.2
65M	3300	2.4万	64	1024	3.0

ISF、1024コアで2億自由度が9分(予想)

超大規模解析実現のためのロードマップ

	2008	2010	2012
1千万自由度	PC一台 数十分	→	数十秒
	PCクラスタ 数分	→	数秒
1億自由度	PC一台 1時間以内	→	数分
	PCクラスタ 数十分	→	数十秒
	大規模クラスタ 数分	→	数秒
10億自由度	PCクラスタ 数時間	→	1時間
	大規模クラスタ 一時間以内	→	数十分
100億自由度		大規模PCクラスタ 一時間以内	
		次世代スパコン	数分

追加機能2:MPC機能

簡易建屋・圧力容器モデル解析事例 (1) 問題設定

■ 建屋モデル

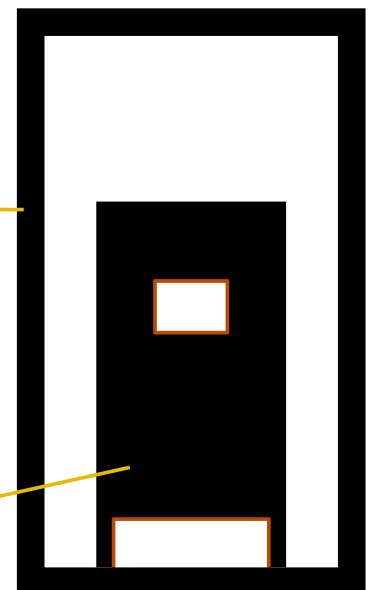
高さ30m × 幅12m × 奥行き12m
肉厚1m

■ 圧力容器モデル

高さ20m × 幅8m × 奥行き8m
肉厚 0.5m
開口部 3m × 3m

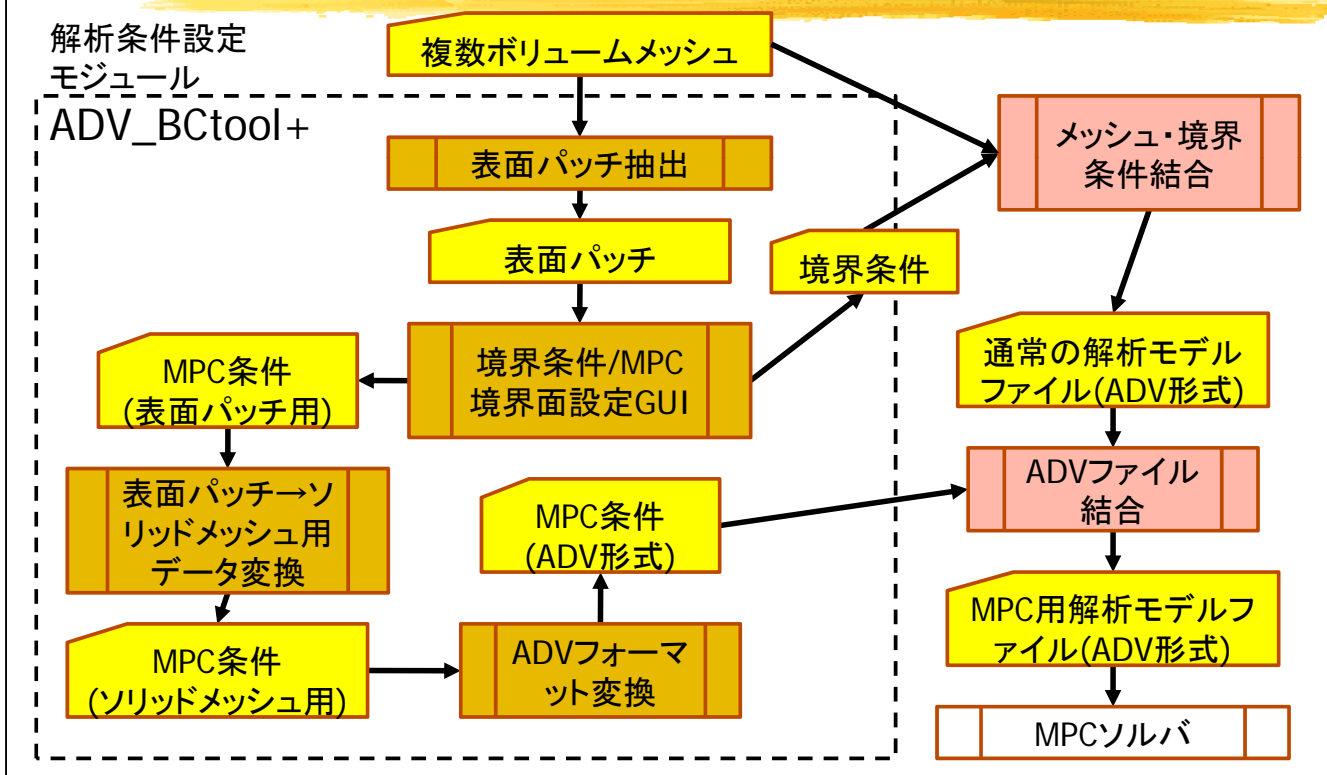
簡易建屋
モデル

簡易圧力容
器モデル



MPCソルバによる簡易建屋・圧力容器モデル解析

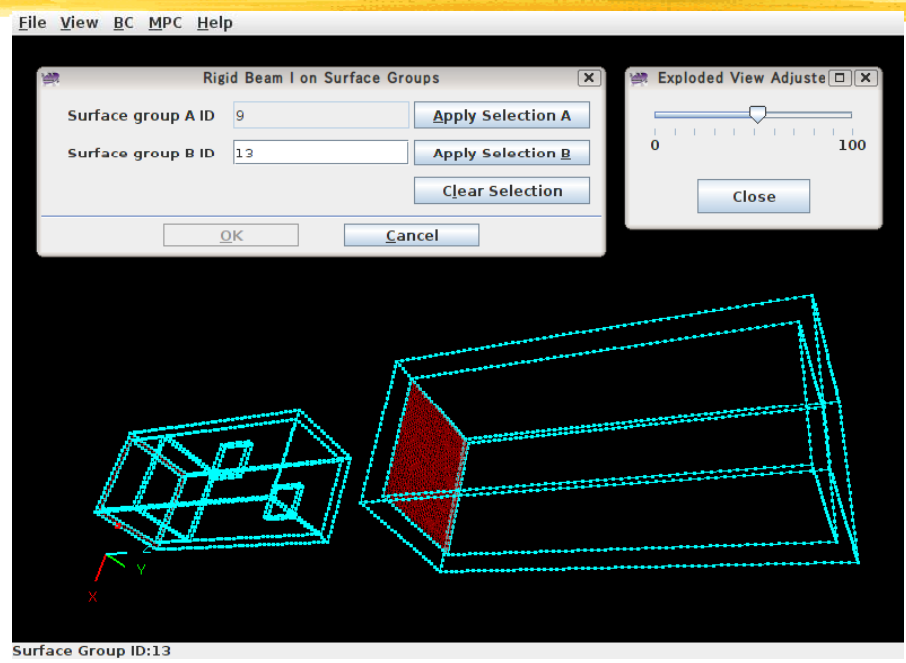
(2) MPC条件設定システム



MPCソルバによる簡易建屋・圧力容器モデル解析

(3)境界条件/MPC設定GUI

境界条件/MPC境界面をマウスを使って対話的に設定



MPCソルバによる簡易建屋・圧力容器モデル解析

(4) 境界条件/MPC条件

■要素情報

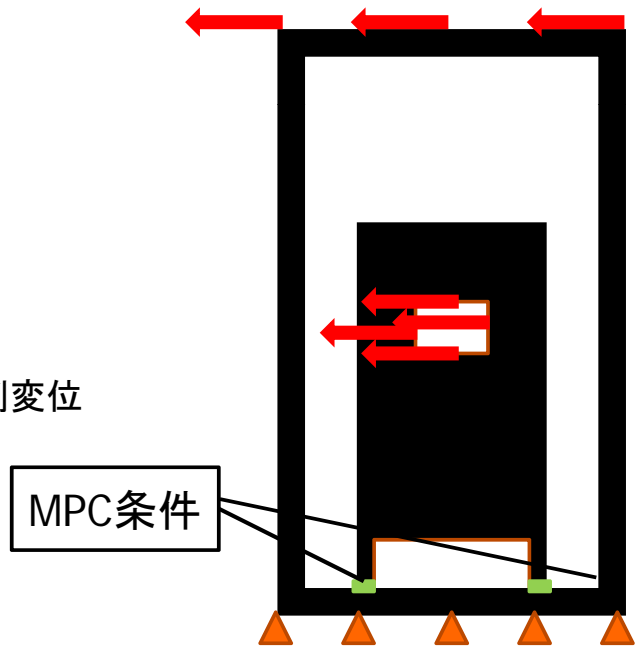
四面体二次要素
節点数：420,220
要素数：216,637
ボリューム数：2

■境界条件

建屋底面：変位完全固定
建屋上面：横方向強制変位
圧力容器開口部：横方向強制変位

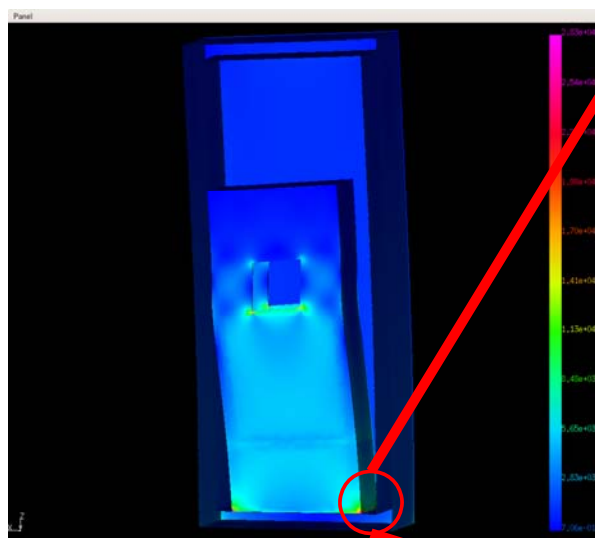
■MPC条件

圧力容器脚部 - 建屋底面
(単純固定)



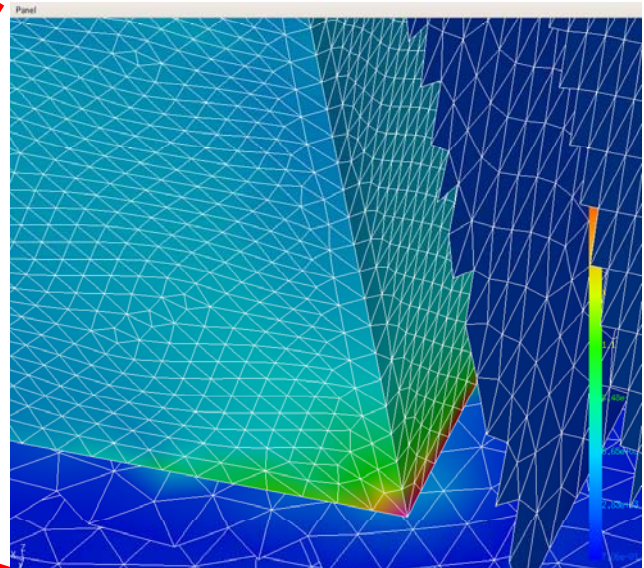
MPCソルバによる簡易建屋・圧力容器モデル解析

(5) 解析結果



解析結果(全体図)

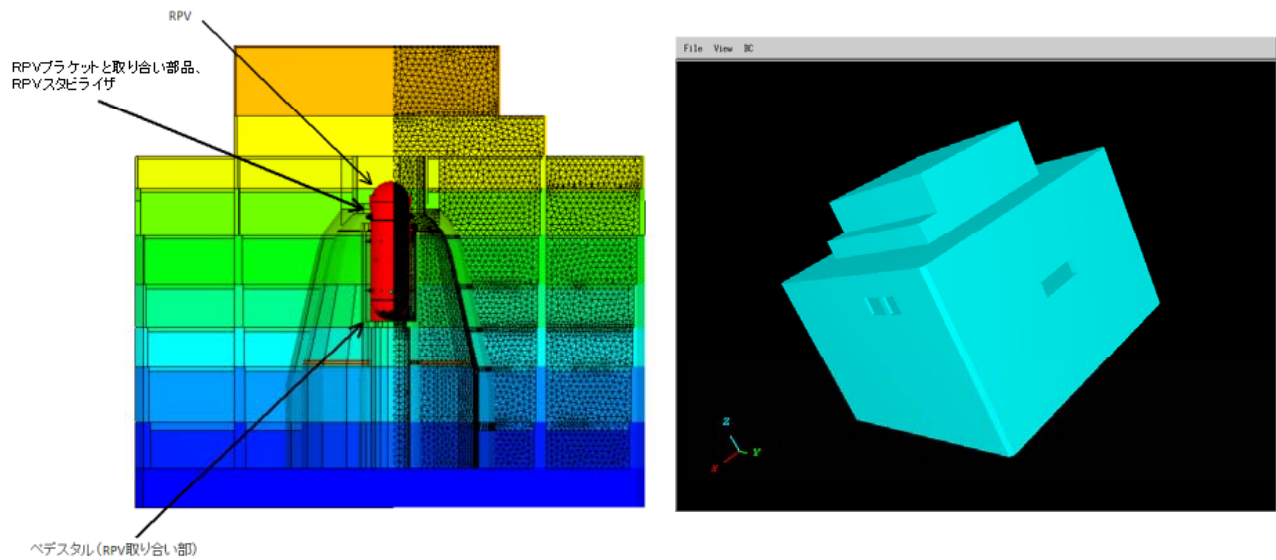
解析結果(MPC境界付近)



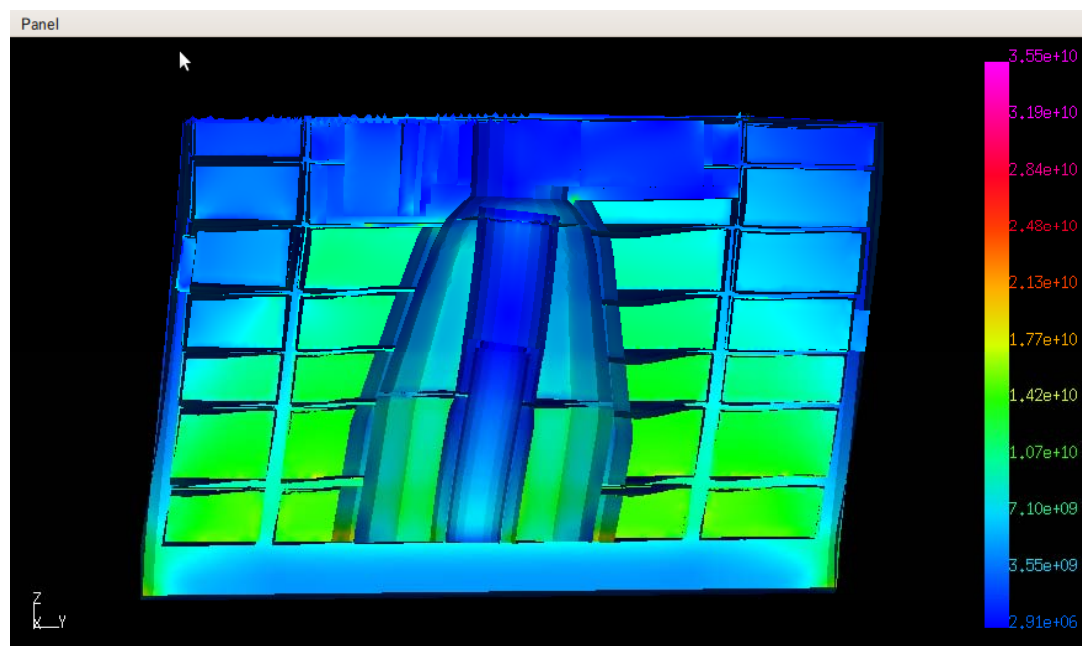
原子炉建屋モデル(1)

原子炉建屋モデル

多層からなるマルチボリューム構造



原子炉建屋モデルの解析結果の例



追加機能3a: ADVENTURE_Couplerによる連成解析 (1) 概要

■ 単一力学現象ソルバーと連成解析ライブラリ

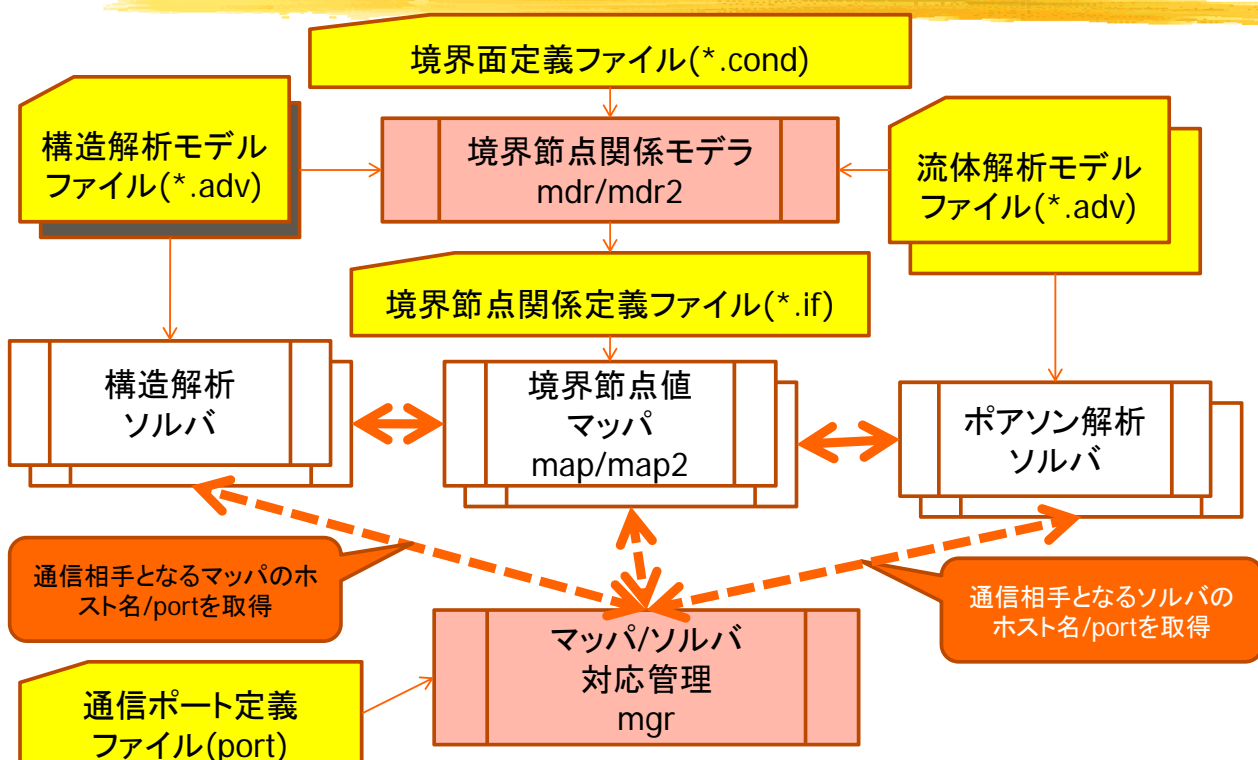
構造解析ソルバ : ADVENTURE_Solid

ポアソンソルバ : ADVENTURE_Thermal

連成解析ライブラリ : ADVENTURE_Coupler

■ 大規模問題に対応した既存ソルバーをベースに、連成対応機能を追加

ADVENTURE_Couplerによる連成解析 (2) 連成解析システム構成の例



追加機能3b: 分離反復型解法の収束性評価

■ 原子炉内構造物の振動解析

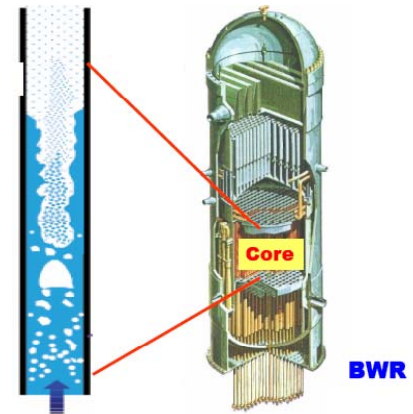
容器内の流体による影響(付加質量)を考慮する必要

➡ 大規模流体構造連成(FSI)解析

■ 本研究では大規模並列解析に適した**分離反復型解法**を採用

■ 実モデルでの解析の準備段階として、簡易モデルで分離反復型解法の収束性を評価

- 角柱モデル(ex. 燃料棒・制御棒など)
- 壁モデル(ex. 原子炉壁など)



冷却水の影響を考慮した
実証モデル

FSI解析の支配方程式およびその離散化

■ 流体領域

アコースティック流体(渦なし、遅い流れを仮定)

$$\frac{1}{c^2} \ddot{p} - \nabla^2 p = 0$$

境界条件

$$\begin{cases} \partial p / \partial n = -\rho_f \ddot{d} & (\text{構造物との境界面}) \\ p = 0 & (\text{流体の自由表面}) \end{cases}$$

➡ $M_f \ddot{p} + K_f p = -\rho_f S \ddot{d}$

■ 構造領域

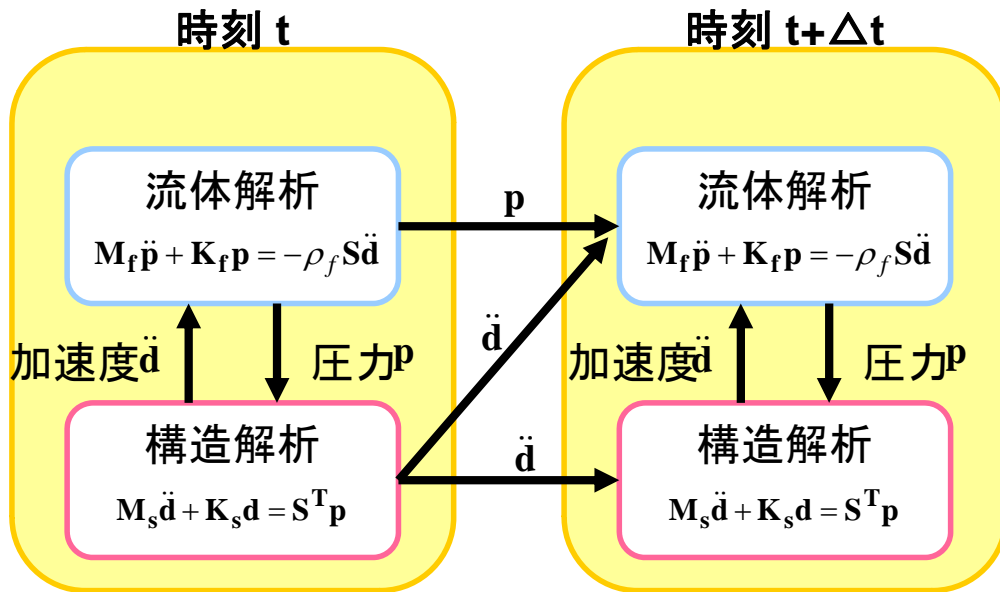
弾性体(減衰項を無視)

➡ $M_s \ddot{d} + K_s d = S^T p$

記号: M_f : 流体の質量行列 K_f : 流体の剛性行列 S : カップリングマトリックス
 M_s : 構造の質量行列 K_s : 構造の剛性行列
 p : 流体の圧力 d : 構造の変位

分離反復型解法の概要

各時刻ステップで流体と構造の支配方程式を独立に反復的に解く解法

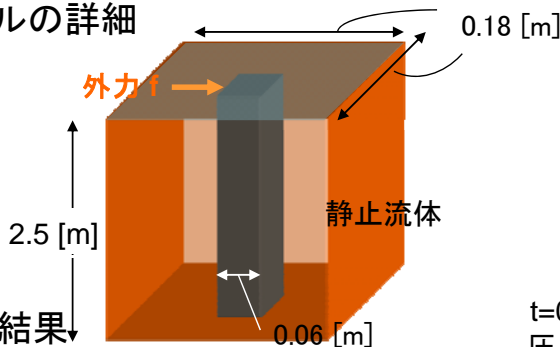


※本研究では最も基本的なブロックGauss-Seidel法を適用

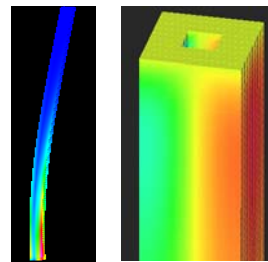
分離反復型解法の収束性評価

簡易モデル①:角柱モデル

■モデルの詳細



■実験結果



t=0.55 [s]での応力コンターと圧力コンター(非圧縮性流体)

<振動数>

- 構造単独
f = 9.17
- 非圧縮性流体
f = 8.62
- 圧縮性流体
f = 8.62

非圧縮性流体の場合

Δt [s]	各時刻の平均反復回数
1.0E-02	5.0
1.0E-03	5.0

圧縮性流体の場合

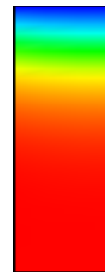
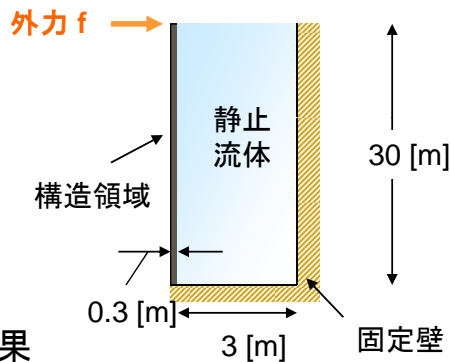
Δt [s]	各時刻の平均反復回数
1.0E-02	5.0
1.0E-03	5.0

➡ 非圧縮性・圧縮性流体いずれの場合も分離反復型解法で問題なく収束

分離反復型解法の収束性評価

簡易モデル②: 壁モデル

■モデルの詳細



<振動数>

- 構造単独
f = 0.278
- 圧縮性流体
f = 0.073

t=10.0 [s]での圧力コンター
(圧縮性流体)

■実験結果

非圧縮性流体の場合

Δt [s]	各時刻の平均 反復回数
1.0E-02	× (発散)
1.0E-03	× (発散)

圧縮性流体の場合

Δt [s]	各時刻の平均 反復回数
1.0E-02	× (発散)
1.0E-03	12.0

⇒ 非圧縮性流体では収束しないが、圧縮性流体では Δt を小さくすることで収束

数学的考察

■非圧縮性流体の場合

分離反復型解法における非線形方程式のヤコビ行列の固有値

$$j = 1 + \frac{\rho_f s^T (k^F)^{-1} s}{m^S + \beta (\Delta t)^2 k^S} \approx 1 + \frac{\rho_f s^T (k^F)^{-1} s}{m^S} \rightarrow \text{付加質量 } m^{AD}$$

収束性は流体の付加質量 m^{AD} と構造質量 m^S の比 $\frac{m^{AD}}{m^S}$ が小さくなると向上

■圧縮性流体の場合

分離反復型解法における非線形方程式のヤコビ行列の固有値

$$j = 1 + \frac{\rho_f \beta (\Delta t)^2 s^T (m^F + \beta (\Delta t)^2 k^F)^{-1} s}{m^S (1 + \beta (\omega \Delta t)^2)} \rightarrow 1 + \rho_f \beta (\Delta t)^2 \cdot \frac{s^T (m^F)^{-1} s}{m^S}$$

収束性は Δt を小さくすると向上

液中の角柱群・地震応答解析

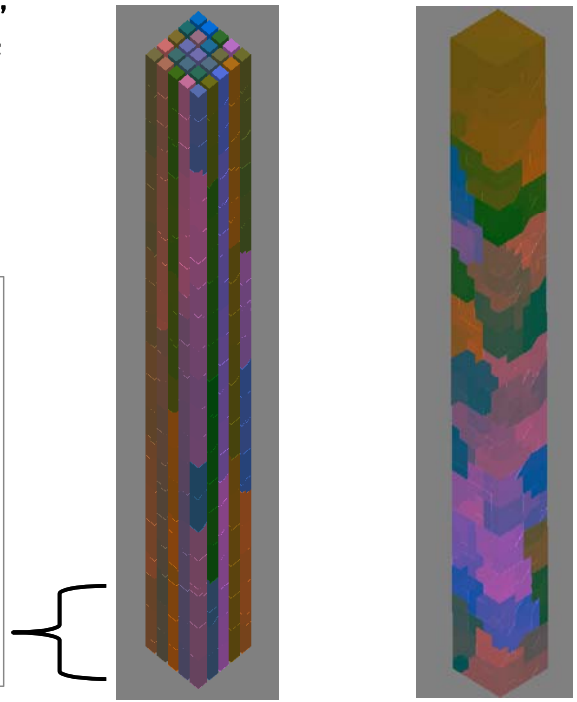
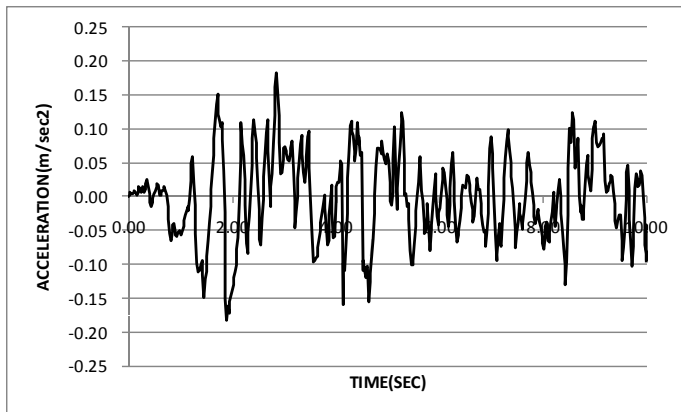
構造モデル

流体領域

ADVENTURE_Solid, ADVENTURE_Thermal,
ADVENTURE_Coupler (分離反復解法を実装)
による流体構造連成解析例

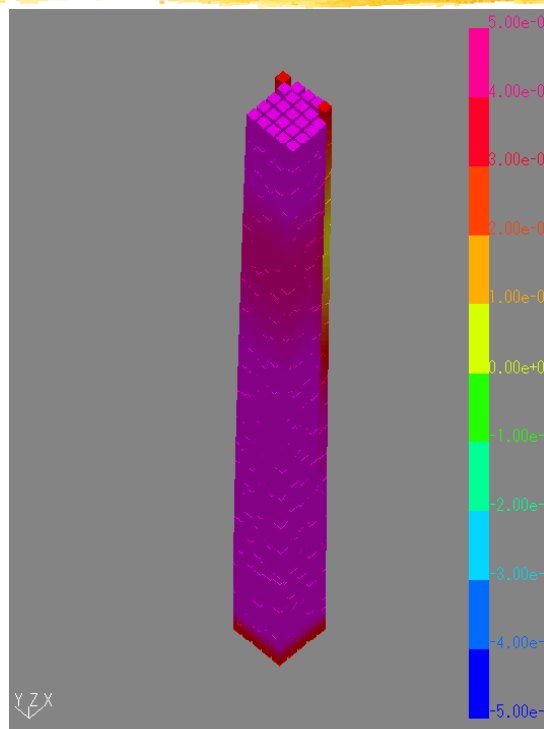
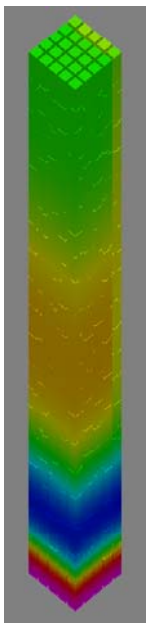
荷重条件: 底部地震加速度

地震加速度



液中の角柱群・地震応答解析

構造モデル
加速度分布



流体モデル
圧力分布

