

FrontISTRを用いた 大規模地殻変動解析、地震動解析事例紹介

EduScience

EduScience Research Institute Corporation
株式会社エデュサイエンス総合研究所
代表取締役 董 勤喜

RCCM

Research Center of Computational Mechanics, Inc.
株式会社計算力学研究センター
技術営業部 柴山 恭

現状と課題

国土地理院の観測結果

ひずみ集中帯の地殻変動分布(2010/10-11~2011/10-11)
変位ベクトル図

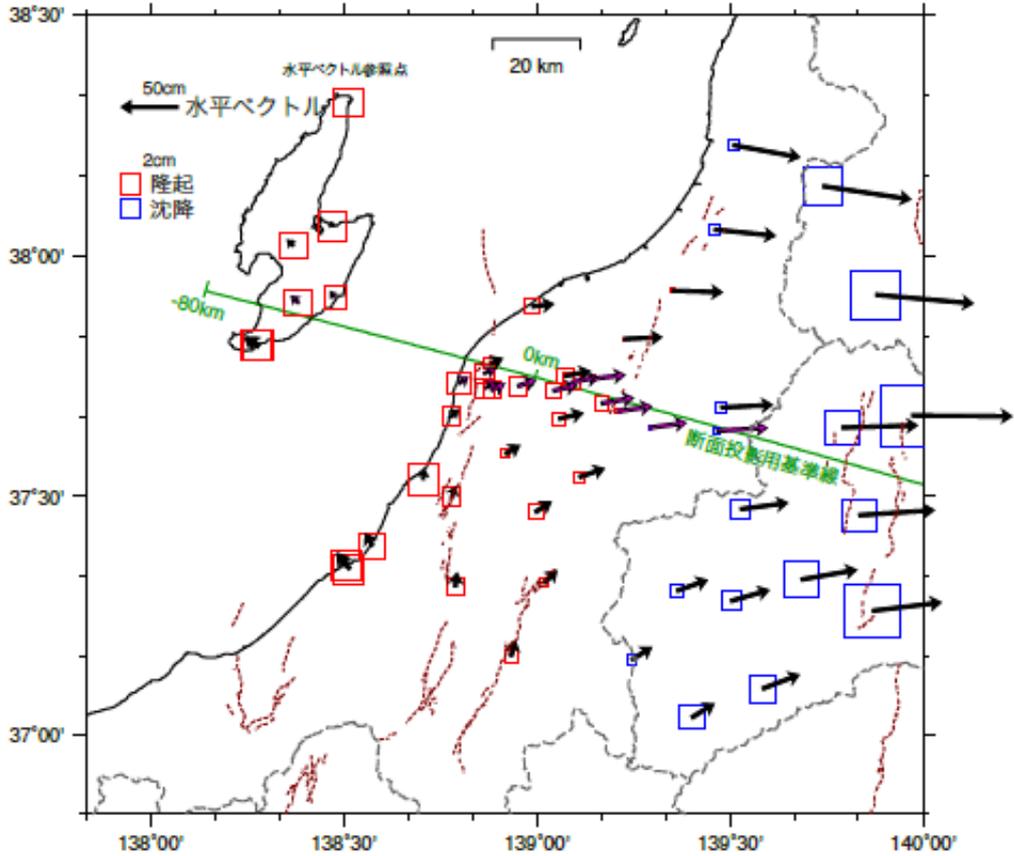


図1: 変位ベクトル観測結果

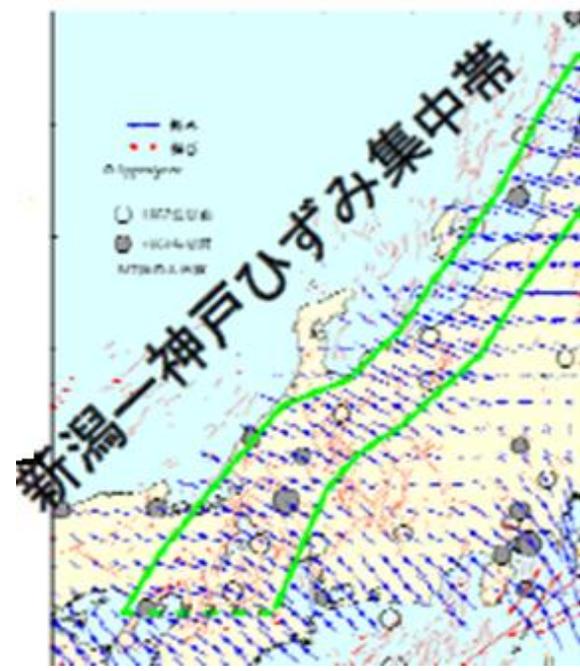


図2: 新潟-神戸ひずみ集中帯

国土地理院 ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究(第3年次)、新規研究課題提案書参考資料2より

地殻変動解析の課題

- ・食違い弾性理論(Okadaモデル、平行成層地盤)
 - メリット: 計算が速い。手間がかからない。
 - デメリット: 複雑な地下構造や地形を表現できない。断層すべりは一様。
- ・有限要素法:
 - メリット: 複雑な地下構造と地形、不均質断層すべりを表現可能
 - デメリット: モデル化の手間がかかる。計算時間がかかる。

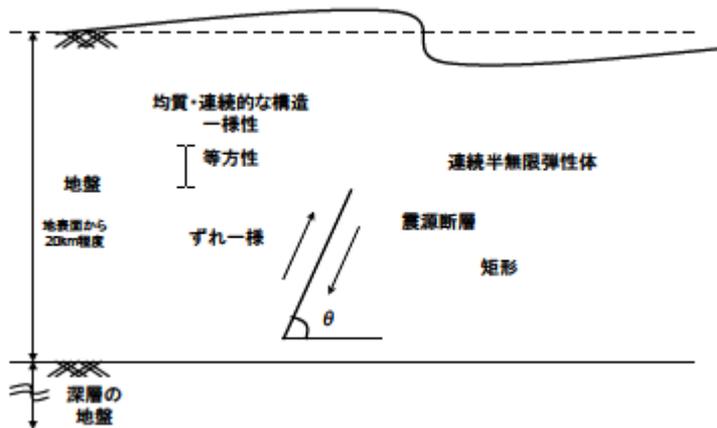


図3: 食違い弾性理論の概略

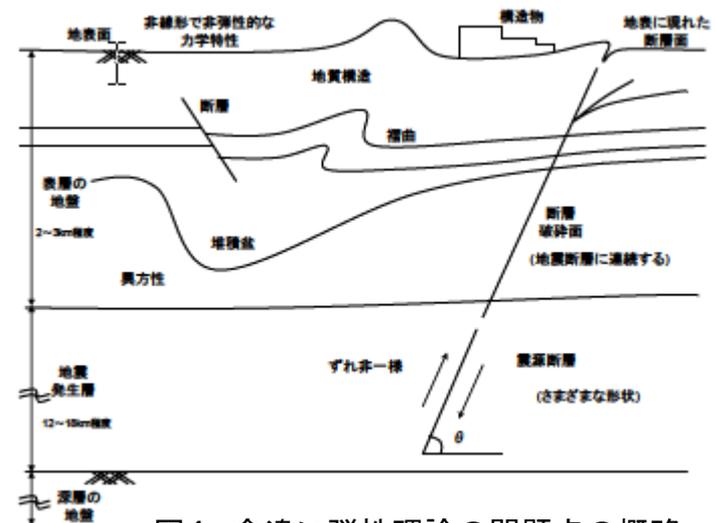


図4: 食違い弾性理論の問題点の概略

地殻変動解析 観測値と解析結果

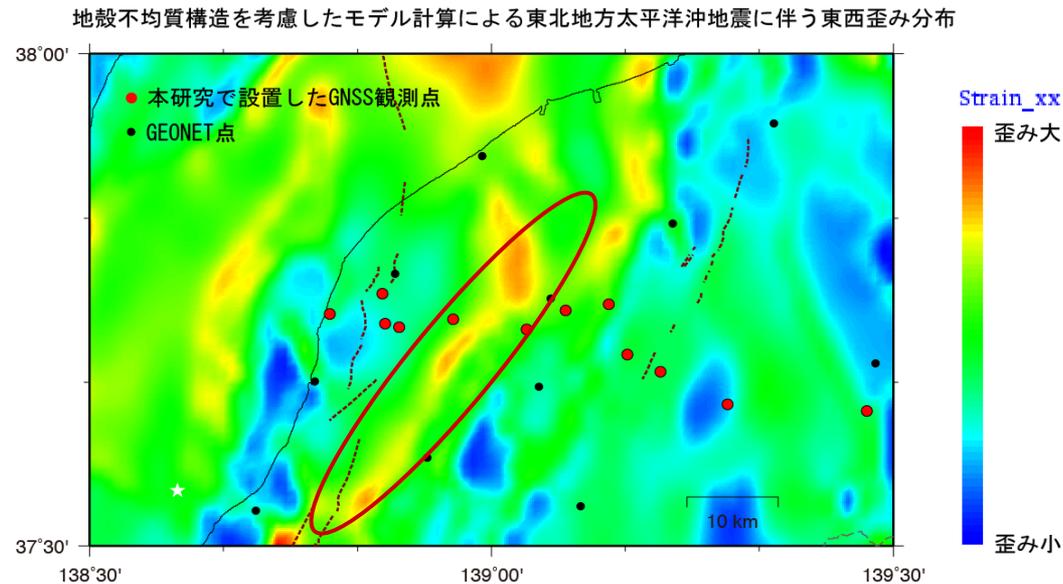


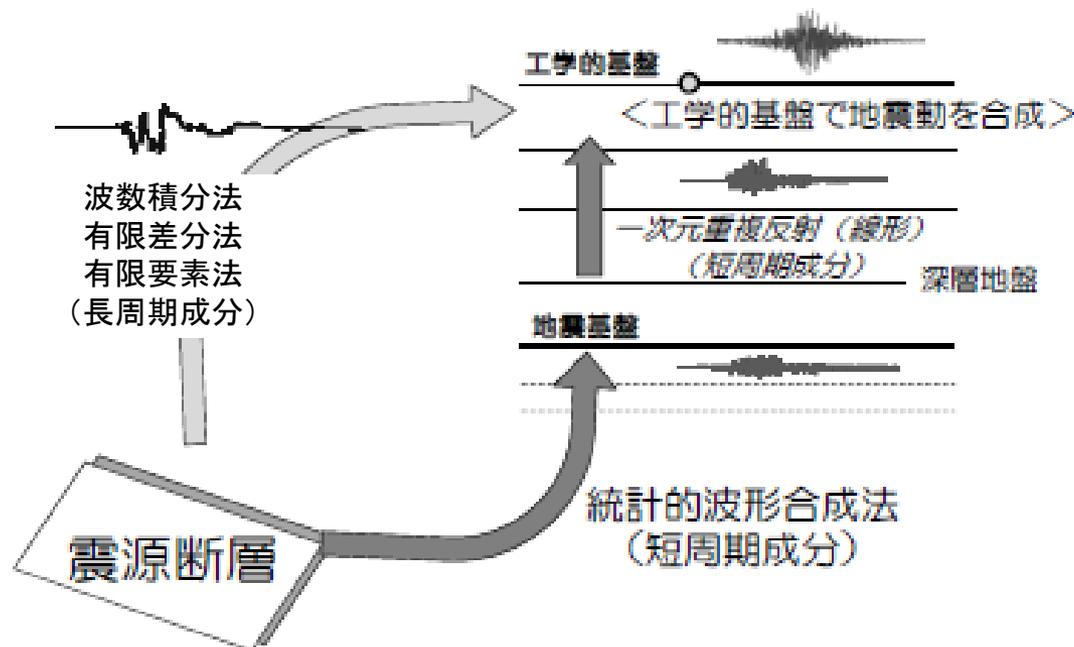
図5: 計算した東西方向ひずみ分布 (不均質モデル)

地震動解析(理論計算)

ハイブリッド手法

長周期成分: 平行成層地盤を仮定した波数積分法

短周期成分: 統計的グリーン関数法を適用



強震動計算の流れ(ハザマ研究年報 2012.12) に
一部加筆

地震動解析(数値解析)の課題

・有限差分法(FDM):

メリット: メモリ使用量が少ない、計算時間が短い、不連続格子、不等間隔格子を利用可能

デメリット: 地形や層境界、地下構造を詳細に表現できない。

・有限要素法(FEM):

メリット: 解析精度が高い、地形、斜面や不均質地下構造を詳細に表現できる。

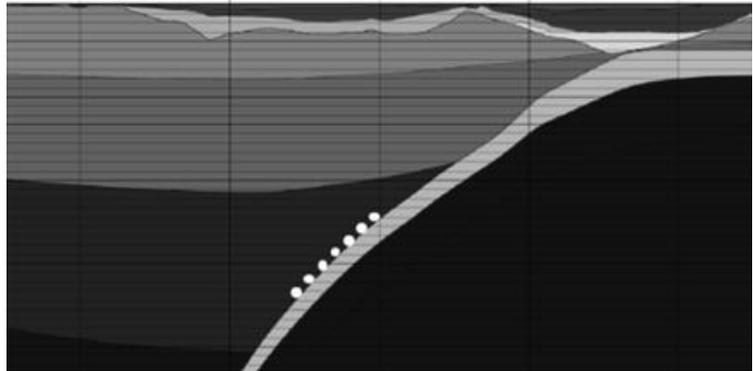
デメリット: メッシュ分割が手間かかる、メモリ使用量と計算時間が多い。

主に四面体要素を使用: メッシュ分割自動、点震源から節点力を変換する際に、座標に依存しない、

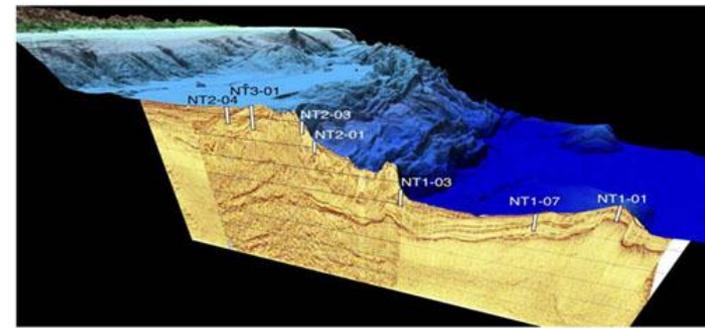
現状: 地震動解析プログラムの使用上高い技量を必要とし、また、地下構造のモデル化の手間や計算時間を要するなど、まだ設計の実務者が使いこなせる状況とはなっていない

地形と地下構造の物性モデル詳細化

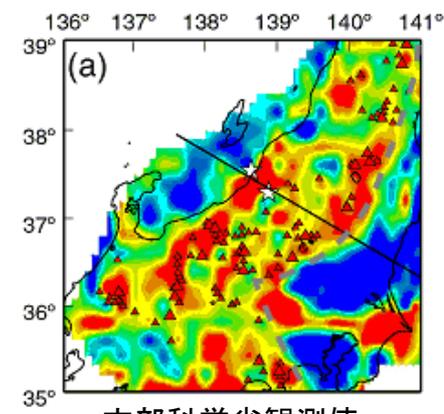
従来解析に用いられてきた不均質地下構造



本来解析したい不均質地下構造



日本地球掘削科学コンソーシアムWebより



文部科学省観測値

高精度な地殻変動、地震動解析の課題

課題

より高い精度の地殻変動予測が求められているが、大規模な解析を高精度に行うには、以下の点が課題となった。

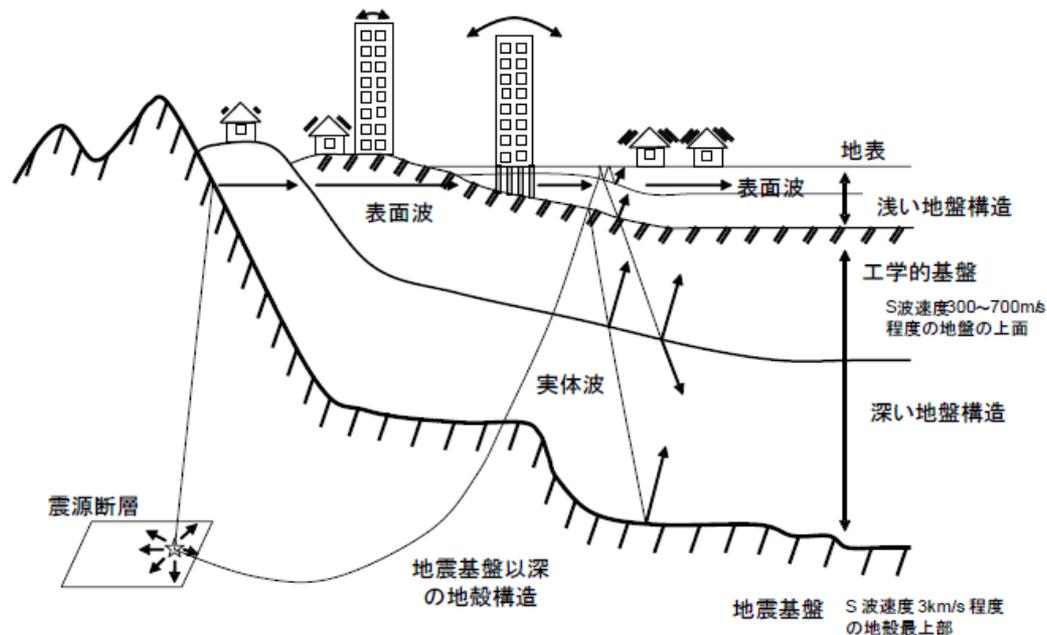
- 高い解析性能(大規模、並列)を有するソフトウェア
- 不均質地下構造を考慮して詳細に地下構造をモデリング
- 機能の改良(カスタマイズ性)

⇒ 高い解析性能を有するFrontISTRをベースに改良を加えることが最適

不均質地盤データベース構築

- 地盤DBの構造は、工学的基盤から地震基盤まではJ-SHIS(地震ハザードステーション)¹⁾、地震基盤以深はMatsubara et al.²⁾地盤モデルを利用
- FrontISTRと地盤DBの連携機能を追加開発、要素ごとに物性値を設定

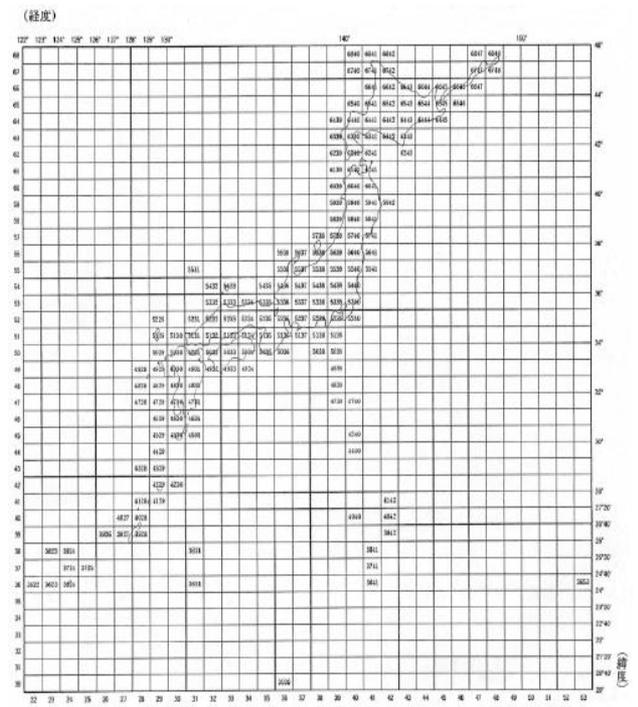
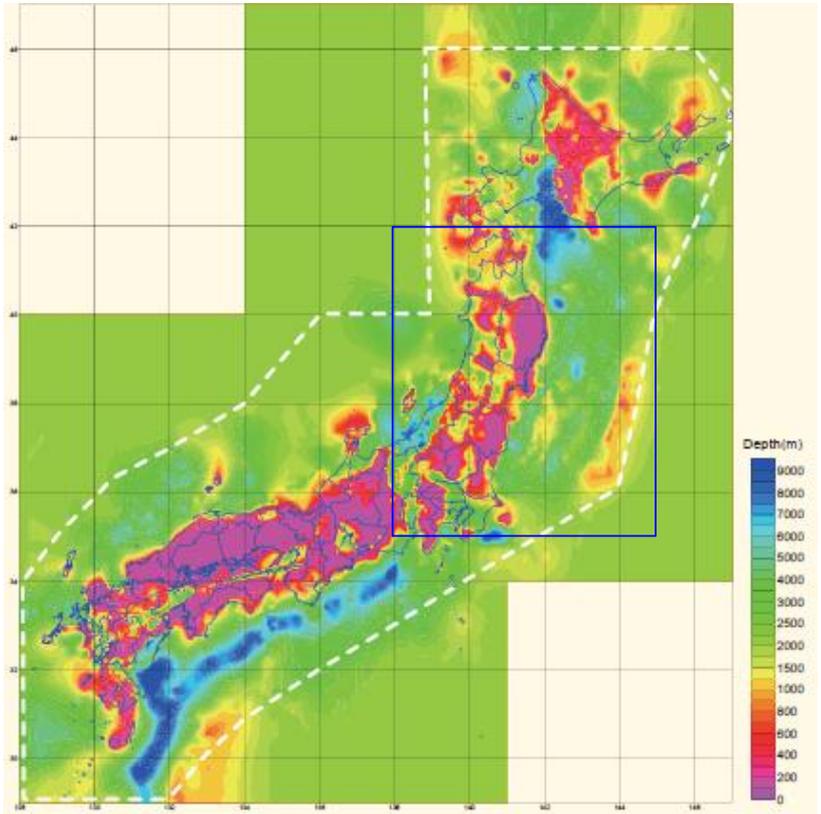
⇒ 地盤DBと連携することによりメッシュ分割の工数が最小化



地下構造と地震波伝播の概要(震源断層を特定した地震の強震動予測手法の付録3-18より)

日本列島の深部地下構造データ

- 国土地理院の地域区分に対応、1kmの分解能
- 地域区分を自由に指定し、日本全域の解析が可能
- 今後さらに詳細な地下構造データ等も取り込み可能



国土地理院地域区分コード

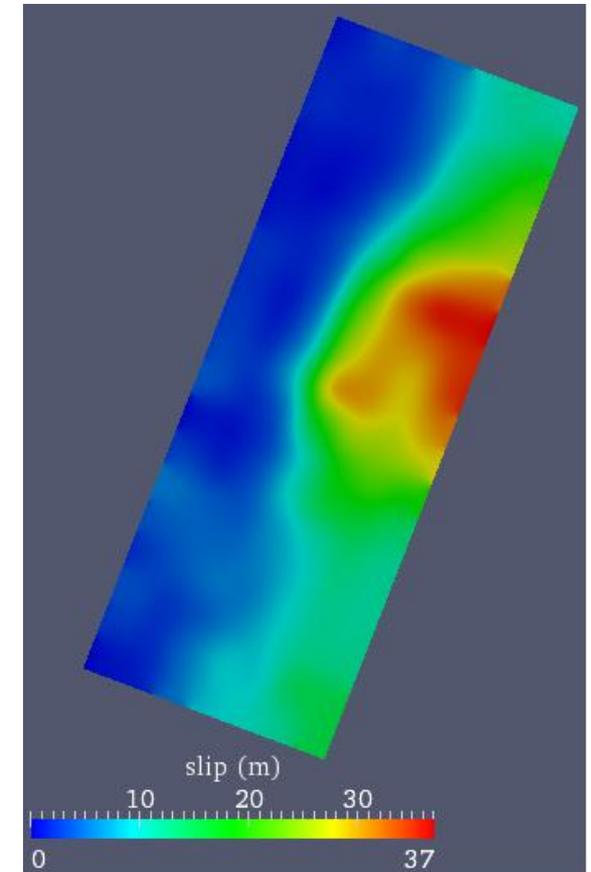
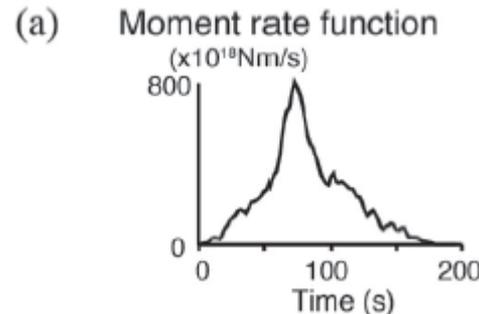
防災科学技術研究所:強震動評価のための全国深部地下構造モデル作成手法の検討より

東北地方太平洋沖地震の シミュレーション事例

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション

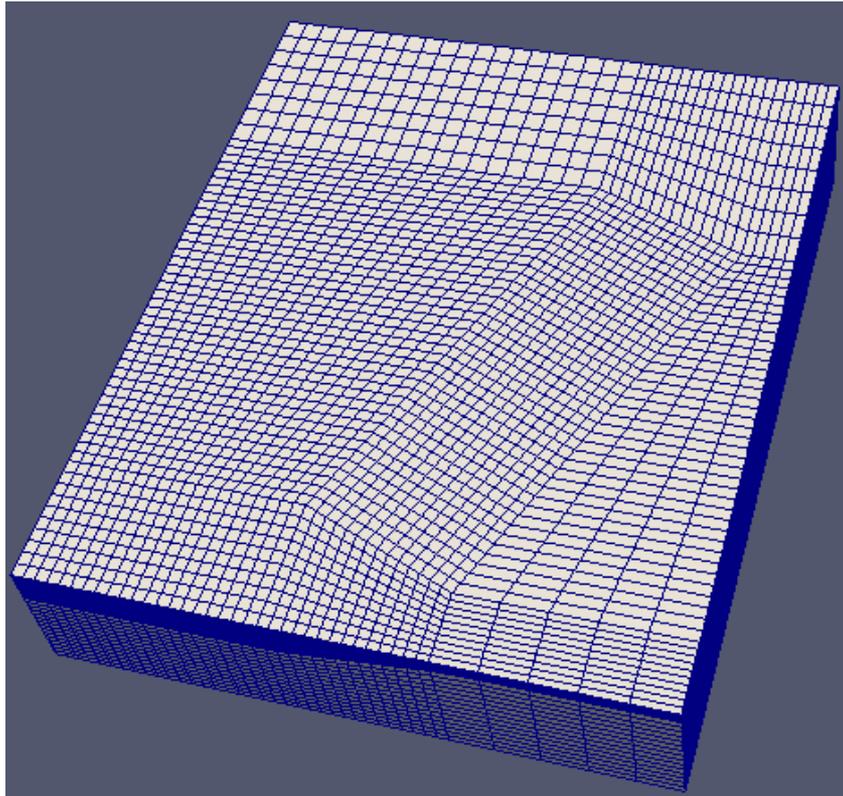
解析の概要

- ・範囲: 北緯 35° ~ 42°
東西 138° ~ 145°
- ・J-SHISの1Km分解能の不均質地下構造を設定
- ・深さ: 80kmまで
- ・震源断層: 大きさは 475×175 km
これを $19 \times 7 = 133$ 個の小断層に分割
(右図: 走行方向19分割、傾斜方向は7分割)
- ・一つの断層は 20×20 に分割
- ・断層滑り量: 133個の小断層の滑り変位を直接入力
- ・すべり変位関数: 立上り8秒間のSmoothed Ramp関数
- ・最大断層すべり変位: 37m
- ・解析規模: 3,050万自由度

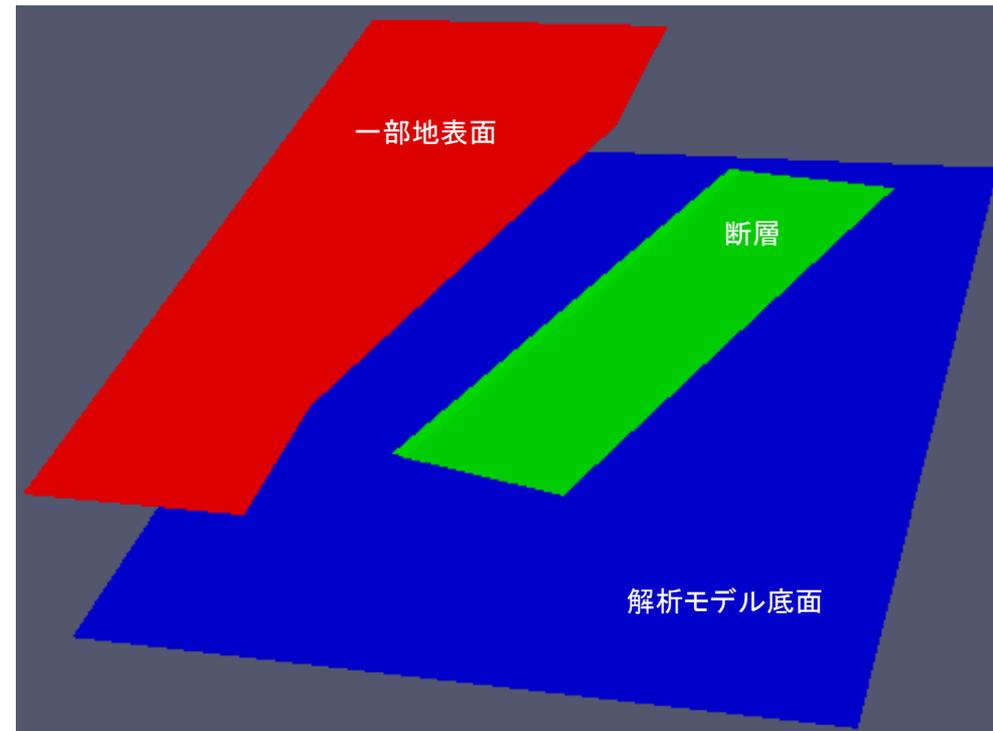


気象庁: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告P.27により
(近地強震波形による震源過程解析)

東北地方太平洋沖地震のFEMモデル



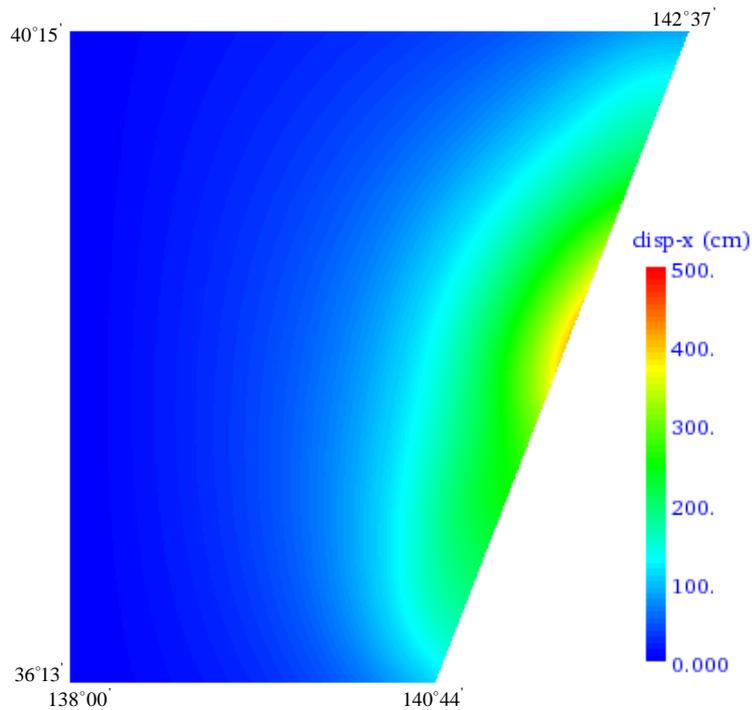
メッシュが表示できないため、
粗く表示しています



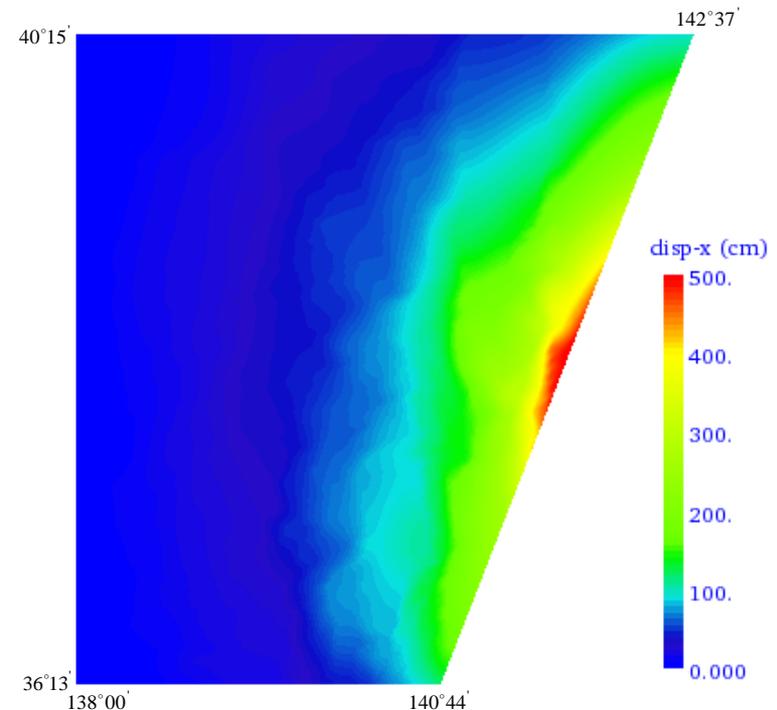
地殻変動解析結果(東西方向変位)

約2,100万自由度の不均質地下構造モデルをメッシュ分割し、8CPUで並列計算を実施した。地表面の東西方向の変位を示す。

変位は不均質地下構造の影響を再現できた。



(a) 均質構造モデル

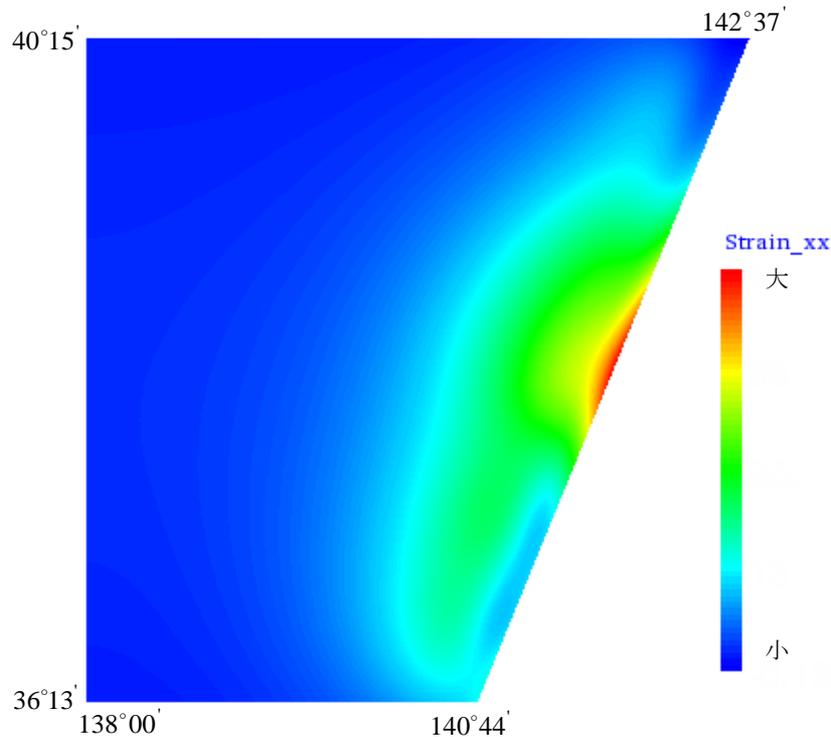


(b) 不均質構造モデル

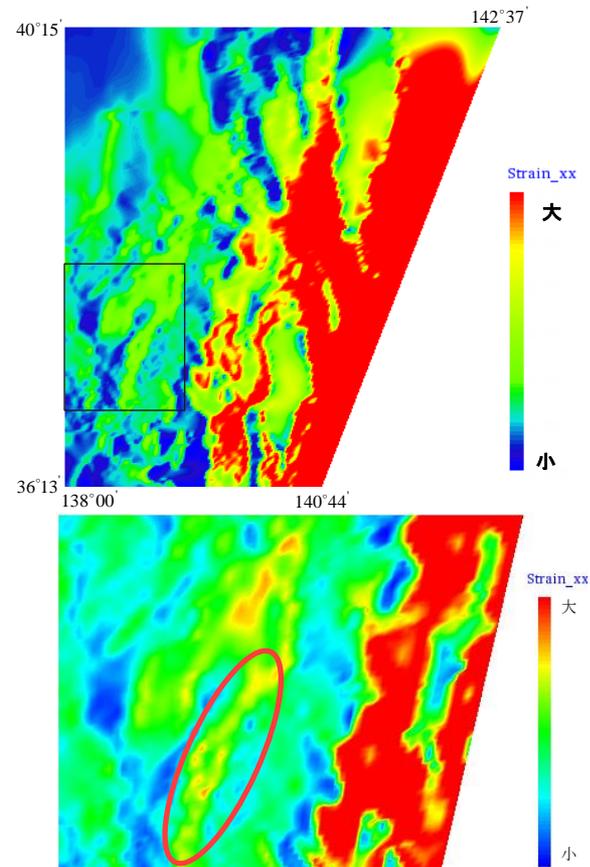
地殻変動解析結果(東西方向伸張ひずみ分布)

以下は地表面の東西方向のひずみ分布の一部。

新潟一神戸ひずみ集中帯を再現できた。



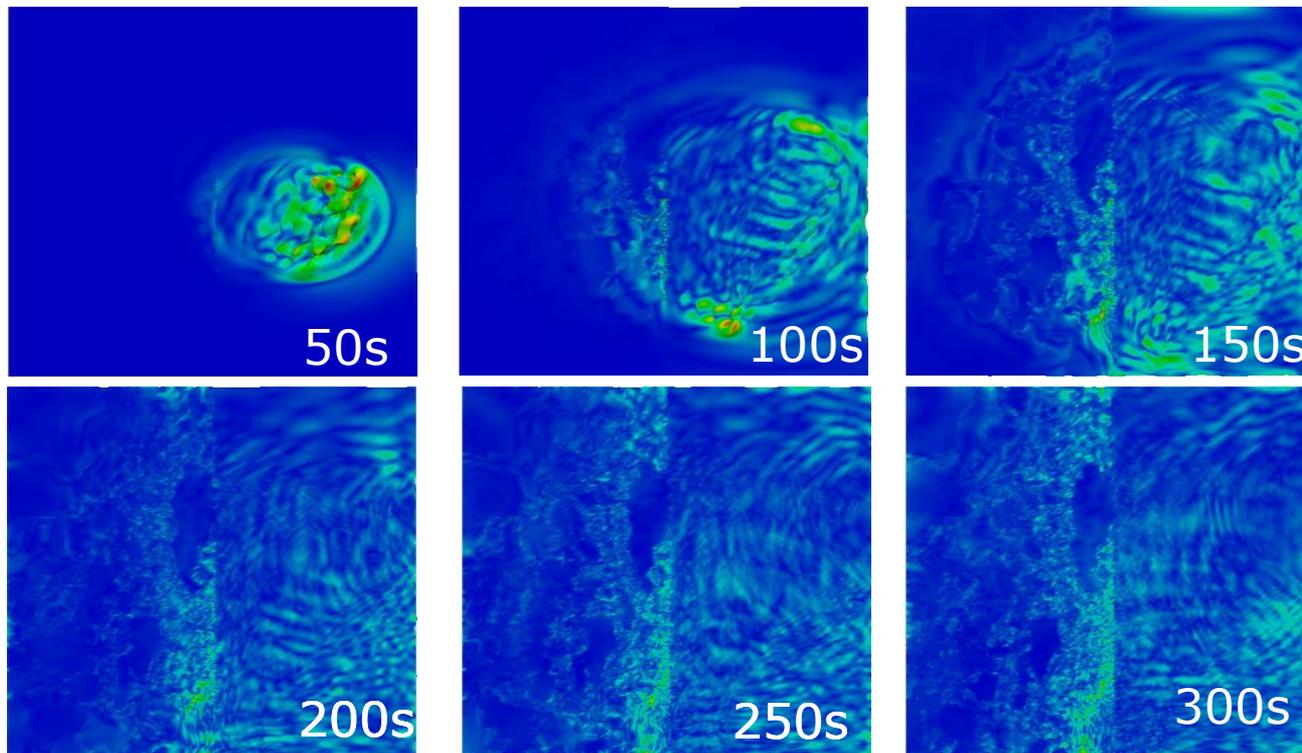
(a) 均質構造モデル



(b) 不均質構造モデル

地震動解析結果

約3,050万自由度の不均質地下構造モデルをメッシュ分割し、8CPUで並列計算を実施した。地表面の地震波伝播を示す。図を見ると、震源から断層破壊を伴い、地震波が全域に広がる様子が確認できる。また、関東平野周辺の地震波が増幅されている様子も見られた。



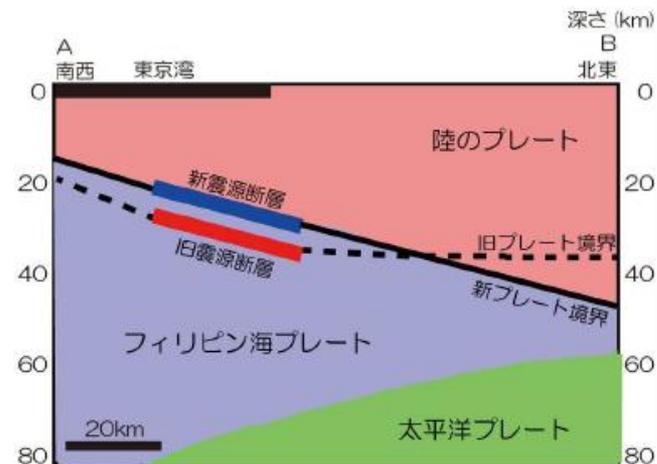
シミュレーションによる波動伝播の様子(速度・3成分合成)

東京湾北部地震の シミュレーション事例

震源断層のパラメータ

長さ:63.6km、幅 :31.2km、深さ:21km

走行角:296°、傾斜角:23°、滑り角:138°



(a) すべり量の分布と応力降下量の分布(中央防災会議資料)

ケース3			ケース1					ケース2			
115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115
115	115	361	361	361	115	115	115	115	115	115	115
115	115	361	361	361	115	115	224	224	224	115	115
115	115	361	361	361	115	115	224	224	224	115	115
115	115	361	361	361	115	115	115	115	115	115	115
115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115

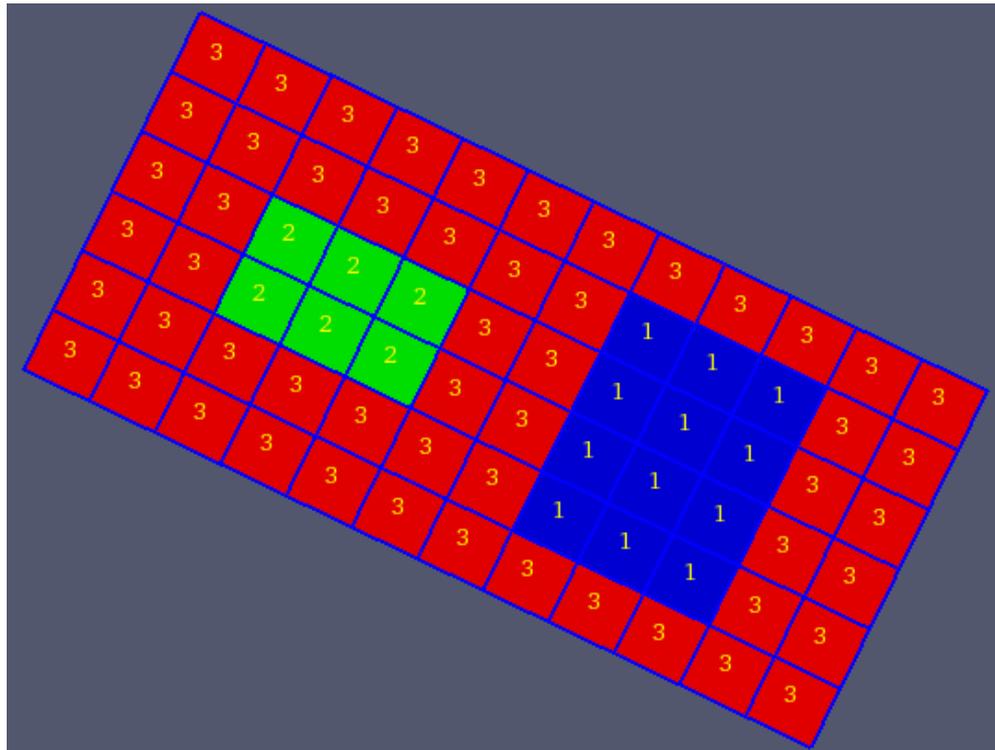
すべり量の分布(単位:cm)

2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
2.4	2.4	16.7	16.7	16.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
2.4	2.4	16.7	16.7	16.7	2.4	2.4	16.7	16.7	16.7	2.4	2.4
2.4	2.4	16.7	16.7	16.7	2.4	2.4	16.7	16.7	16.7	2.4	2.4
2.4	2.4	16.7	16.7	16.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4

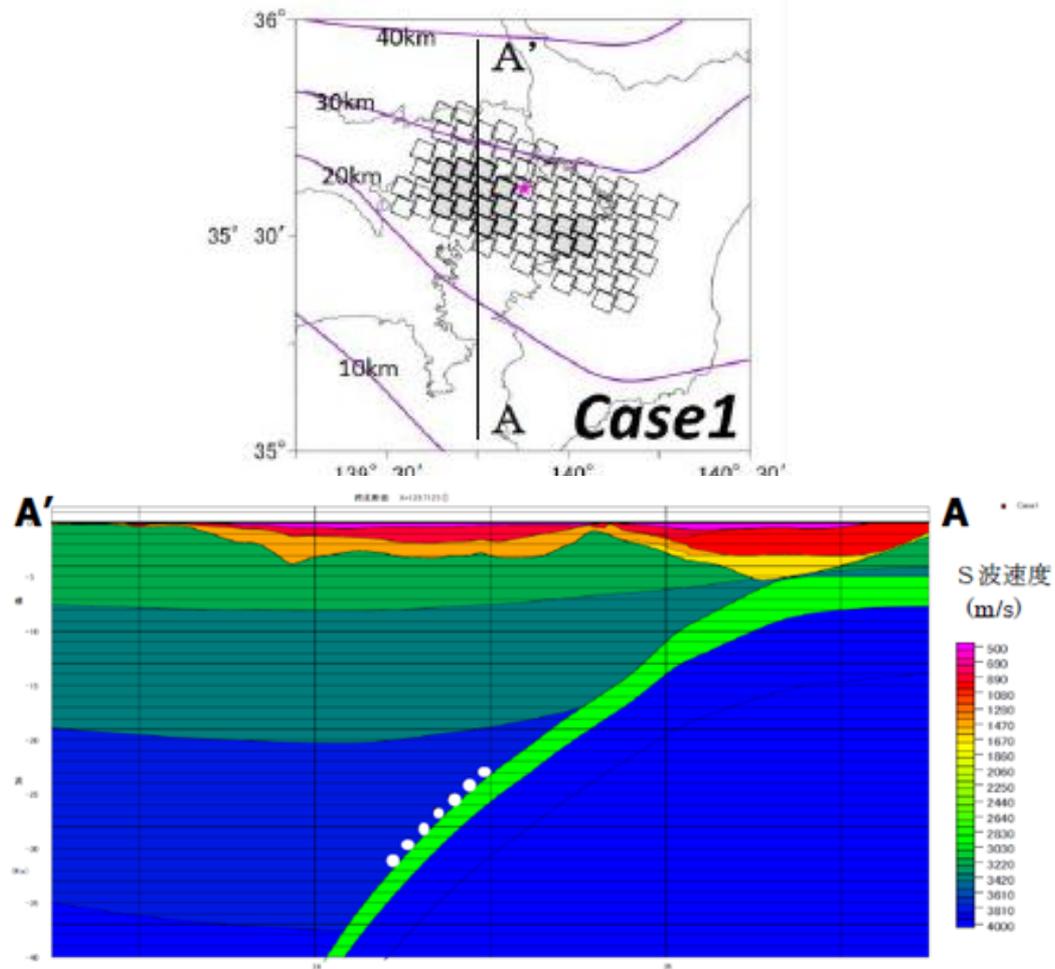
応力降下量の分布(単位:MPa)

震源時間関数

- ・震源断層: $12 \times 6 = 72$ 個の小断層に分割、走行方向12分割、傾斜方向は6分割
- ・すべり関数: 中村・宮武の震源の滑り関数と滑り速度関数



地下構造モデル

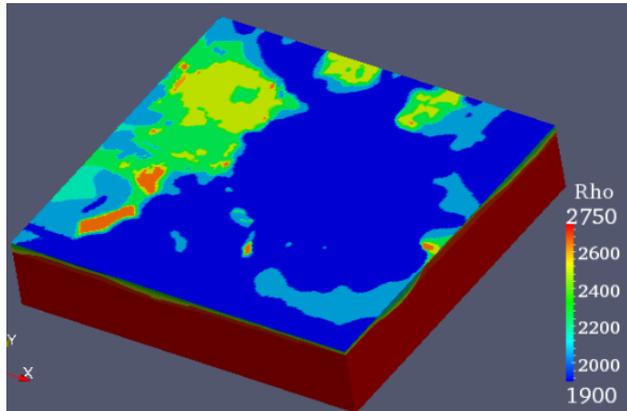


断層震源モデルと地下構造モデル

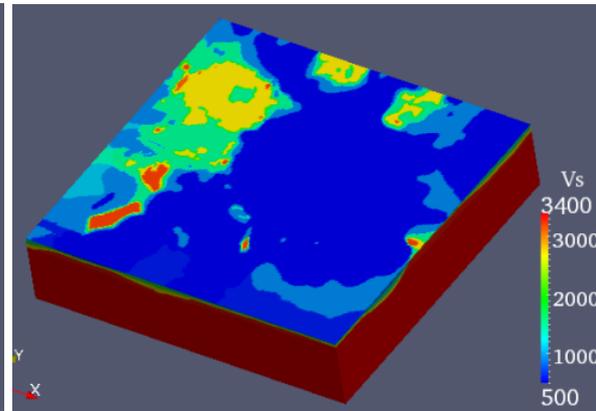
中央防災会議資料より

解析の概要

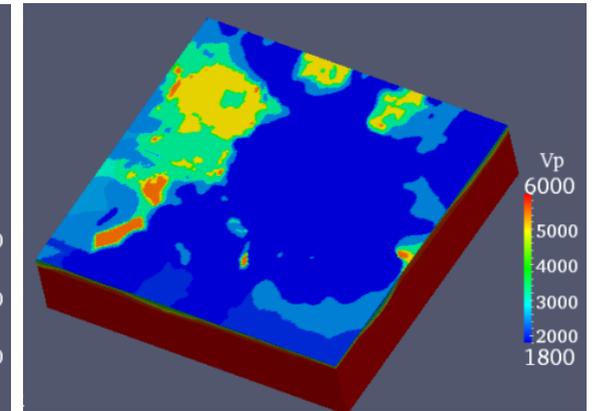
- ・範囲: 北緯 34.5° ~ 36.5° 東西 138.5° ~ 141° 深さ: 60km
- ・J-SHISの1Km分解能の不均質地下構造を設定



密度(単位: kg/m³)

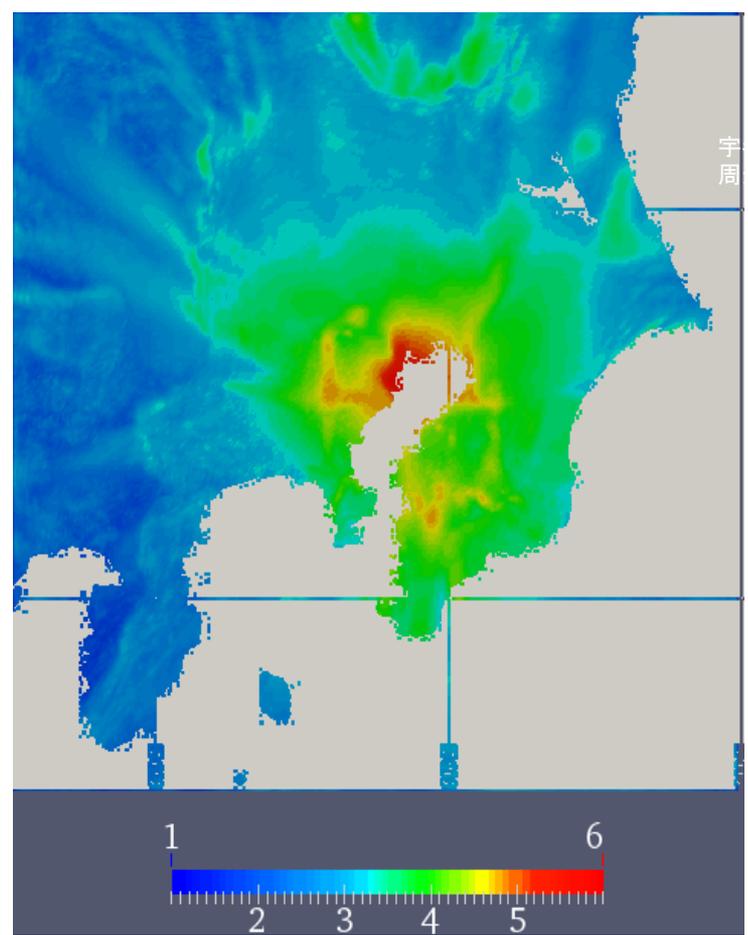


S波速度(単位: m/s)

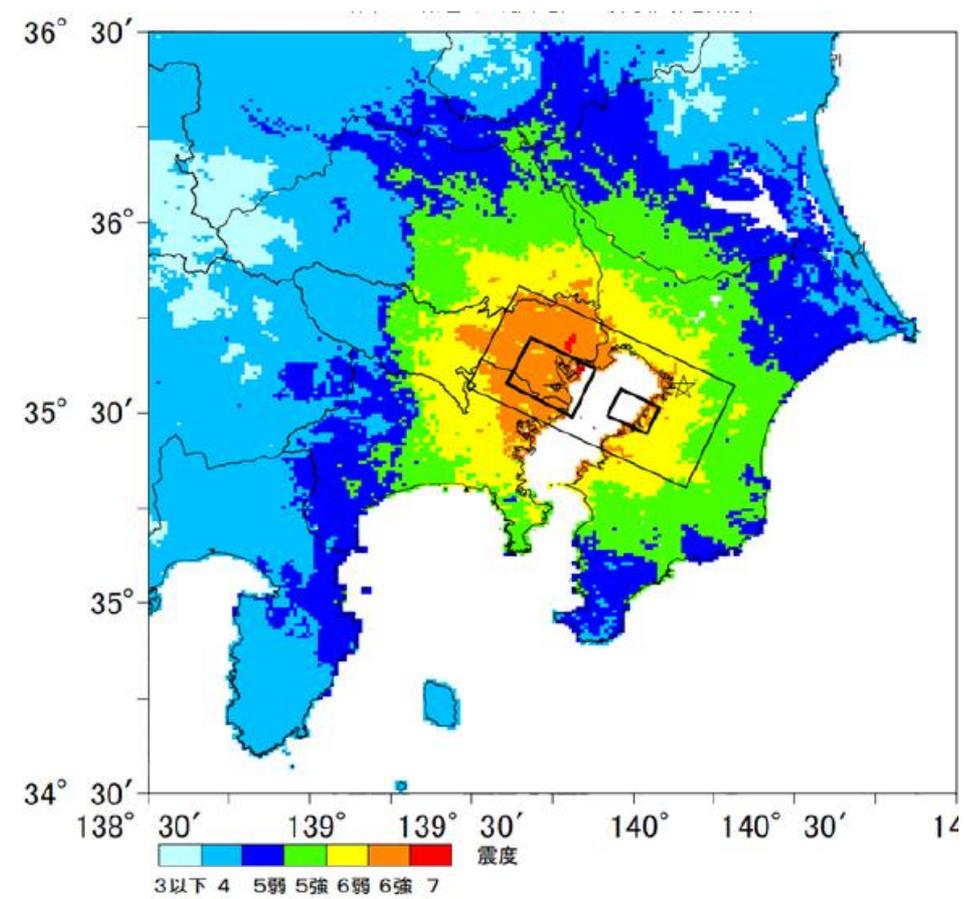


P波速度(単位: m/s)

震度分布

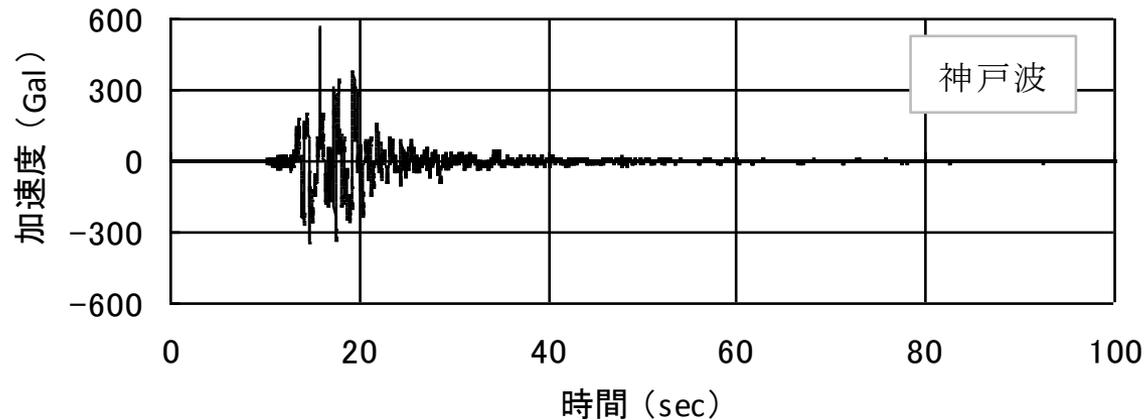


解析結果(長周期のみ)

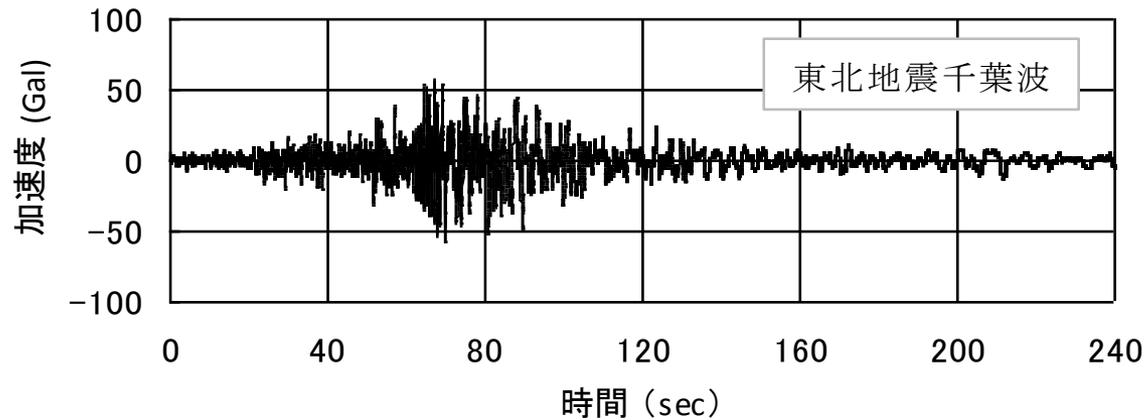


首都直下地震P1より(短周期含む)

長周期地震動の継続時間の影響



(a) 神戸地震

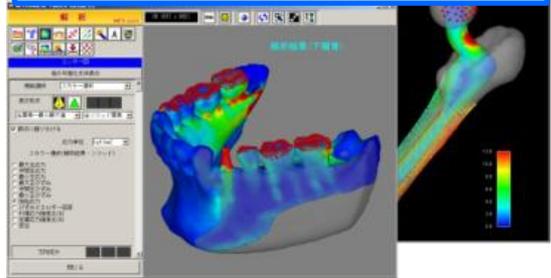


(b) 東北地方太平洋沖地震

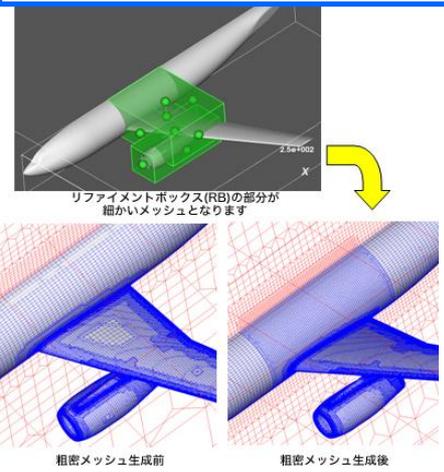
RCCMの取り組み

個々のニーズに対応する独自ソフトウェア

患者個々の骨強度を
力学的に評価する
ソフトウェア



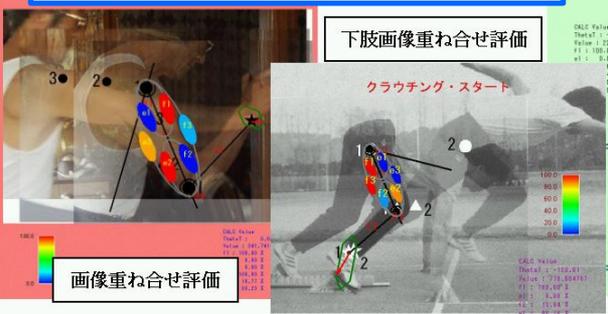
全自動六面体
メッシュ生成ツール



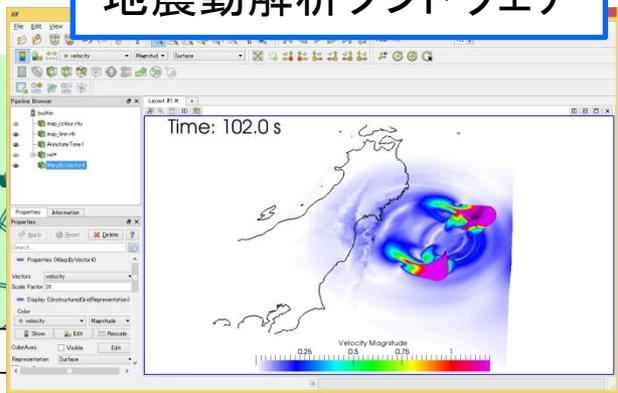
水上飛行機の開発



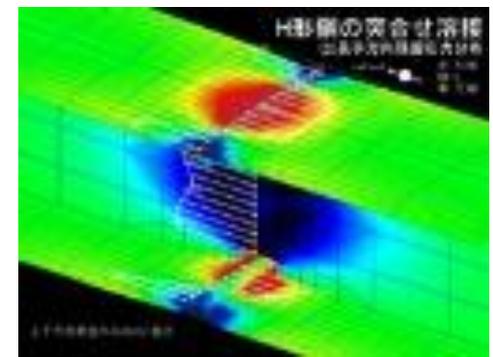
実効筋力評価
ソフトウェア



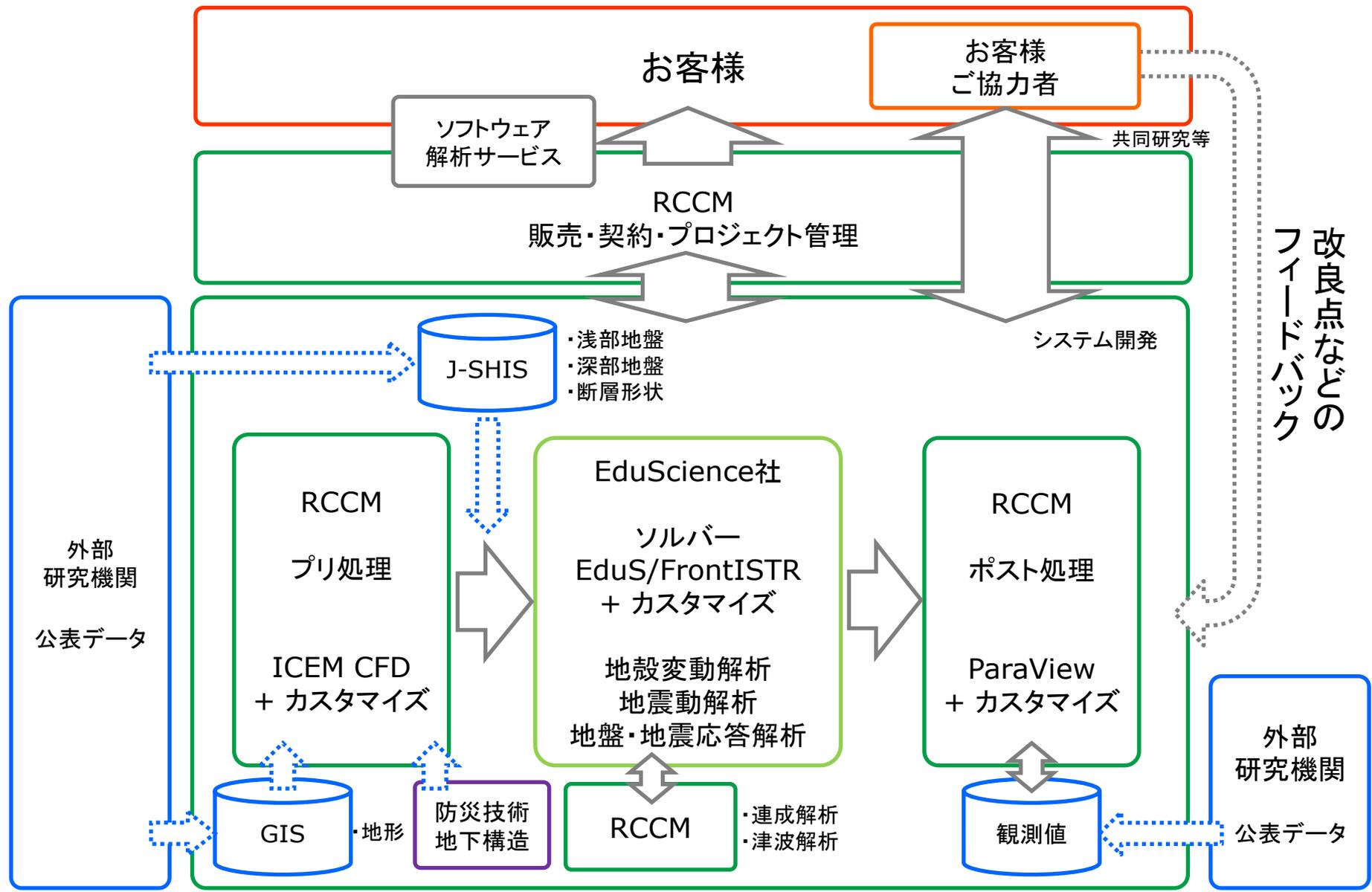
地震動解析ソフトウェア



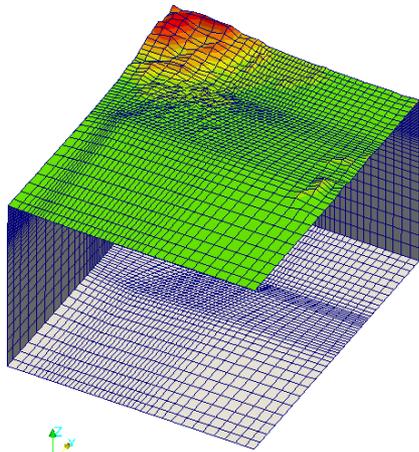
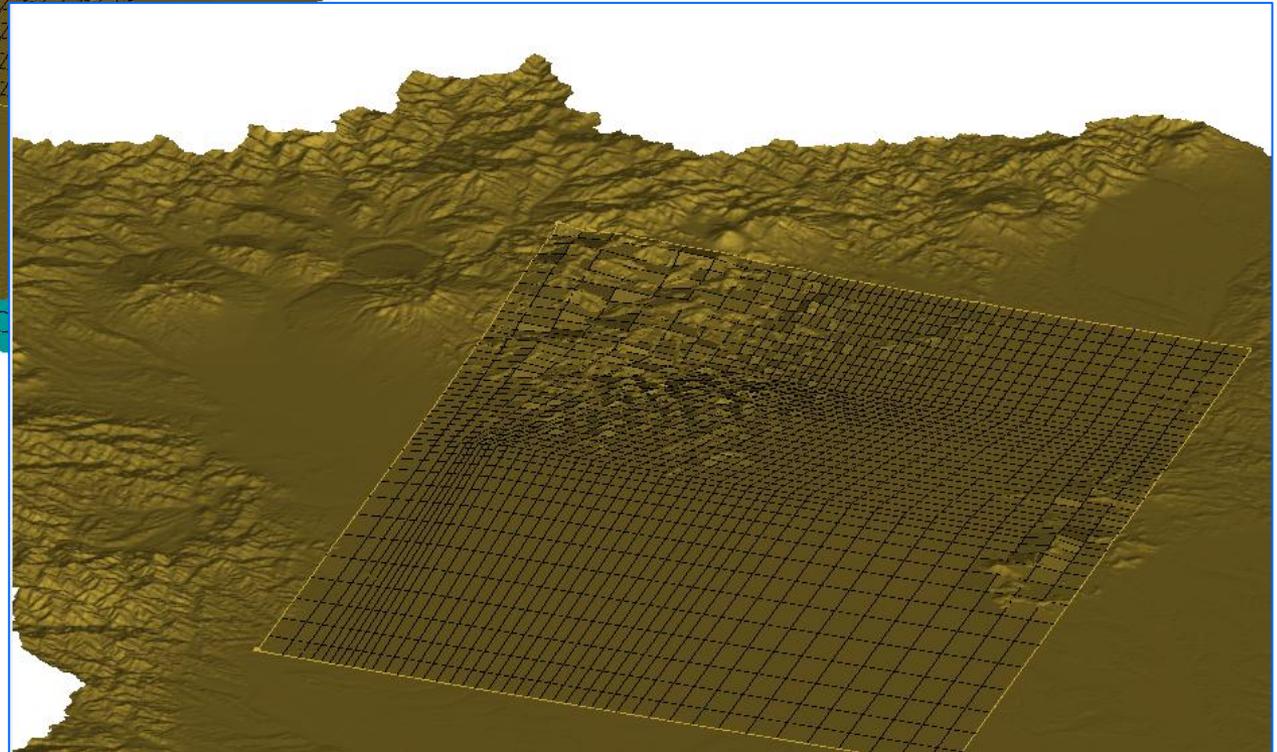
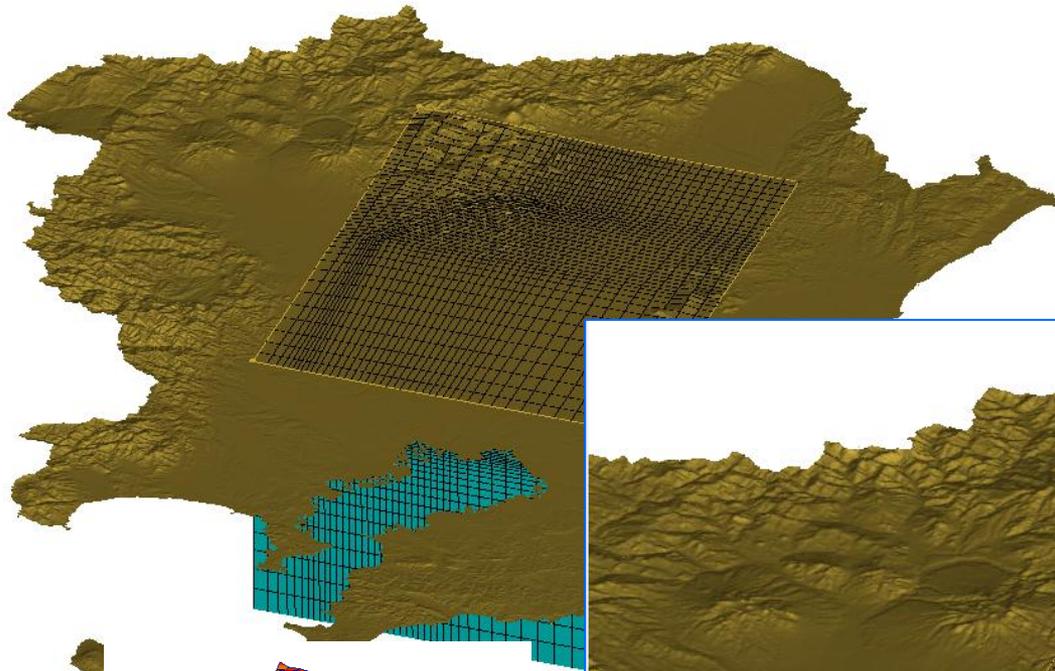
溶接解析ソフトウェア



地殻変動・地震動シミュレータの開発体制



1. 複雑な地下構造を詳細にモデリング
2. ANSYS ICEM CFDを用いた複雑地形のメッシュ生成



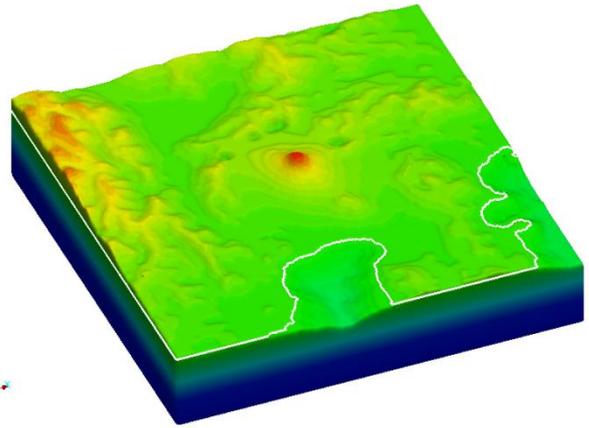
データ提供： 防災技術株式会社

J-SHISから直接モデルとメッシュ作成

J-SHIS(地震ハザードステーション)

1	1600.0	850.0	1650.0	60.0	60.0	0.92
2	1600.0	400.0	1850.0	60.0	60.0	0.92
3	1700.0	450.0	1900.0	60.0	60.0	0.92
4	1800.0	500.0	1900.0	60.0	60.0	0.92
5	1800.0	550.0	1900.0	60.0	60.0	0.92
6	2000.0	600.0	1900.0	100.0	100.0	0.92
7	2000.0	650.0	1950.0	100.0	100.0	0.92
8	2100.0	700.0	2000.0	100.0	100.0	0.92
9	2100.0	750.0	2000.0	100.0	100.0	0.92
10	2200.0	800.0	2000.0	100.0	100.0	0.92
11	2300.0	850.0	2050.0	100.0	100.0	0.92
12	2400.0	900.0	2050.0	100.0	100.0	0.92
13	2400.0	950.0	2100.0	100.0	100.0	0.92
14	2500.0	1000.0	2100.0	150.0	150.0	0.92
15	2500.0	1100.0	2150.0	150.0	150.0	0.92
16	2600.0	1200.0	2150.0	150.0	150.0	0.92
17	2700.0	1300.0	2200.0	150.0	150.0	0.92
18	3000.0	1400.0	2250.0	150.0	150.0	0.92

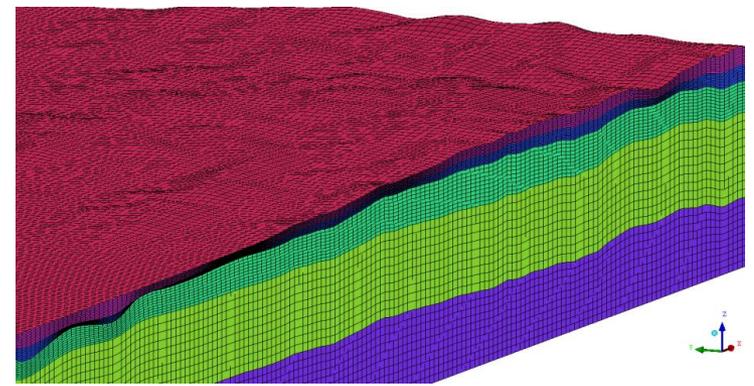
地盤データベース



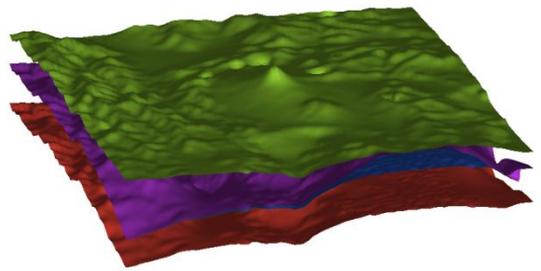
地震動解析ソフトウェア



メッシュ(ANSYS ICEM CFD)



抽出した層境界



ICEM CFD 14.5.7

File Edit View Info Settings Windows Help

Geometry Mesh Blocking Edit Mesh Properties Constraints Loads Solve Options Output

Model

- Geometry
 - Subsets
 - Points
 - Curves
 - Surfaces
- Blocking
 - Subsets
 - Vertices
 - Edges
 - Faces
 - Blocks
 - Pre-Mesh
 - Topology
- Part
 - BOTTOM
 - GEOM
 - KOBE0
 - KOBE1
 - KOBE2
 - KOBE3
 - KOBE4
 - SIDE1
 - SIDE2
 - SIDE3
 - SIDE4
 - SIDE_OTHER
 - SOLID

Blocking Associations

Edit Associations

Associate Edge -> Curve

Edge(s)

Curve(s)

Project vertices

Project to surface intersection

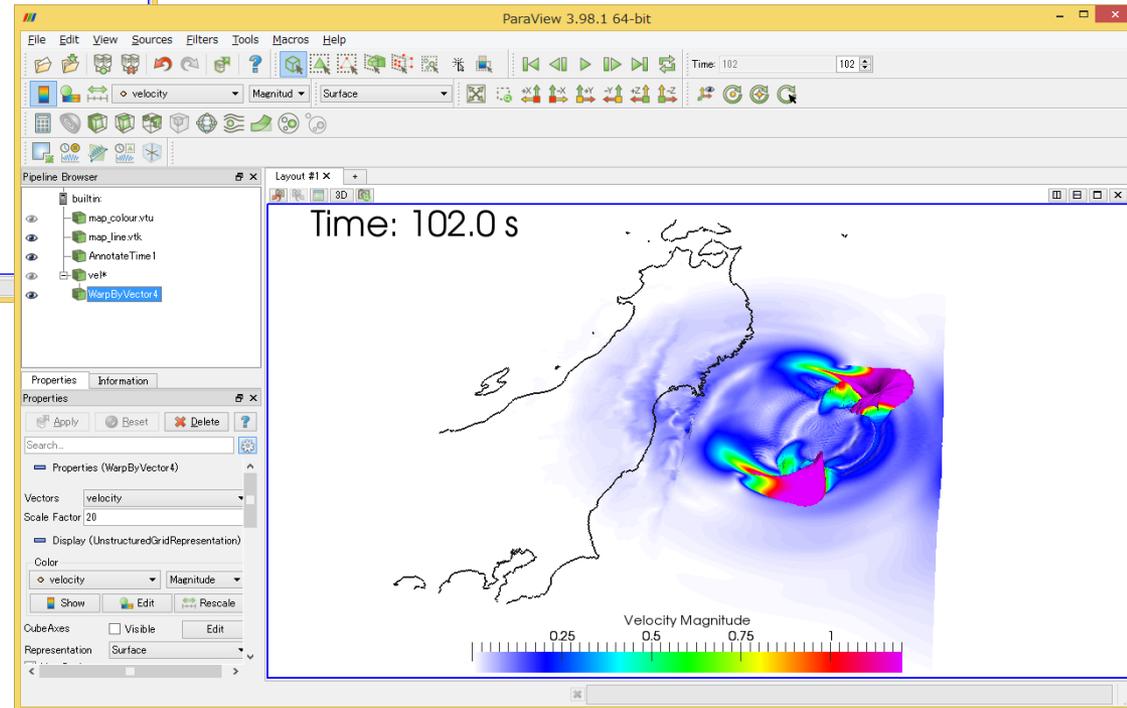
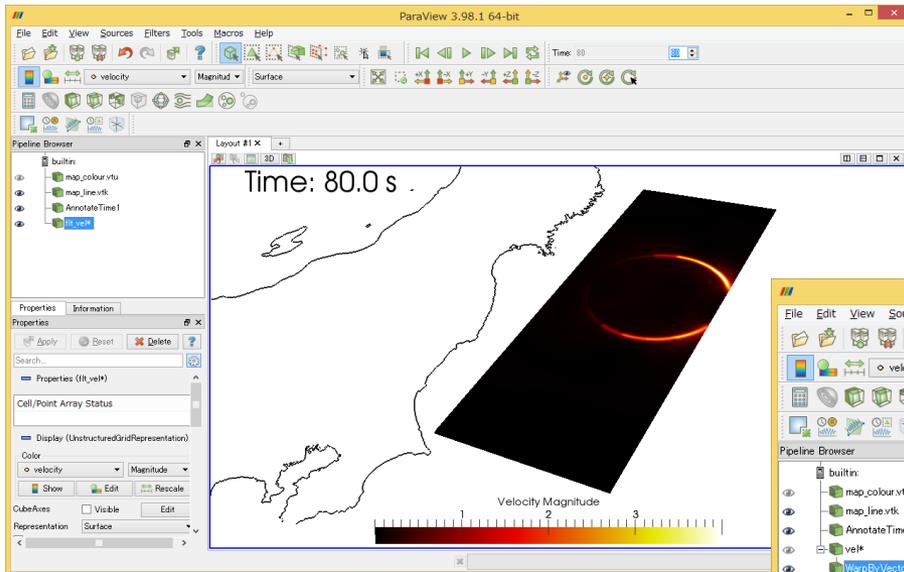
Project ends to curve intersection

Done "Edge -> Curve" association
 Done "Edge -> Curve" association
 Number of processors = 2
 Done recompute
 Previous blocking file saved as file k4 blk1
 Writing blocking file C:/work/rccm-tanaka/kobe/k4 blk ...
 Done saving blocking file

Log Save Clear

Apply OK Dismiss

ポスト処理：解析結果の効果的な表示



効果的な可視化処理を行うことにより、十分な分析が可能となる

まとめ

- FrontISTRをベースにさまざまな機能を実装し、地殻変動解析・余効変動解析・地震動解析・地盤関連分野にて利用可能なソルバーEduS/FrontISTRを開発
- 高性能プリポストANSYS ICEM CFD、ParaViewを含め総合的な解析環境をご提供。J-SHISから直接データを抽出しANSYS ICEM CFDでモデル化、メッシュ生成可能
- 不均質地下構造データベースに対応
- 地震応答解析機能と、地盤非線形材料を追加
- 断層と点震源機能を追加
- 東京湾北部地震を題材に震度分布の解析
- 不均質地下構造、不均質断層滑りを考慮した地殻変動解析の結果として、新潟ー神戸ひずみ集中帯を再現

謝辞

国土地理院 地殻変動研究室(現 京都大学)西村様には、解析条件の設定、解析結果と観測値の検証、考察等において大変お世話になりました。また気象庁、気象研究所の関係者様には、入力データをご提供いただくなど大変お世話になりました。FrontISTRの改良においては、東京大学奥田先生にご助言をいただきました。感謝いたします。

防災科学技術研究所のJ-SHIS¹⁾、Matsubara et al.²⁾の地盤データを用いました。

気象研究所の震源時間関数データ³⁾を用いました。

- 1) 防災科学技術研究所 HP : <http://www.j-shis.bosai.go.jp>
- 2) Matsubara et al.(2008)の三次元速度構造 HP : http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo_kozo/alljpn.php
- 3) Yoshida, K. et al.(2011, EPS)

ご質問・お問い合わせ

FrontISTRの改良、メッシュ生成等のご相談、ご不明な点、ご要望等ございましたらお気軽にお問い合わせください。

 *Research Center of Computational Mechanics, Inc.*

株式会社計算力学研究センター

技術営業部 柴山 恭

TEL: 03-3785-3033

E-mail: shibayama@rccm.co.jp