

京で挑む、東北地方太平洋沖地震の再現、 そして南海トラフ地震の予測

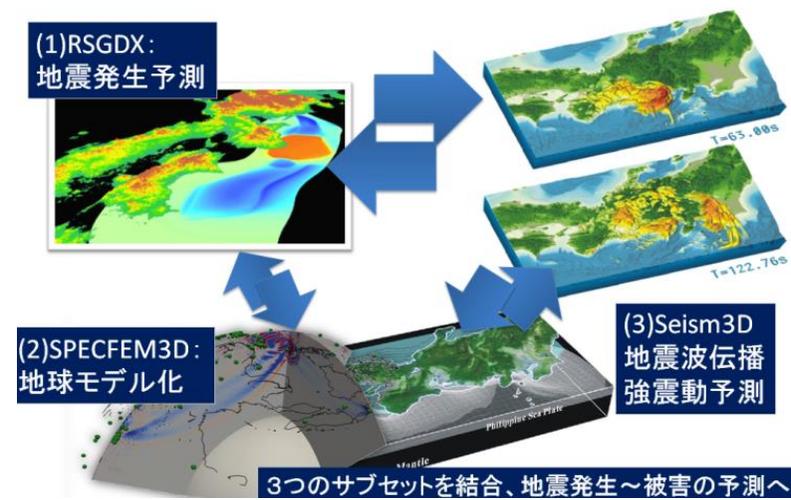
古村 孝志

(東京大学 大学院情報学環 / 東京大学 地震研究所)

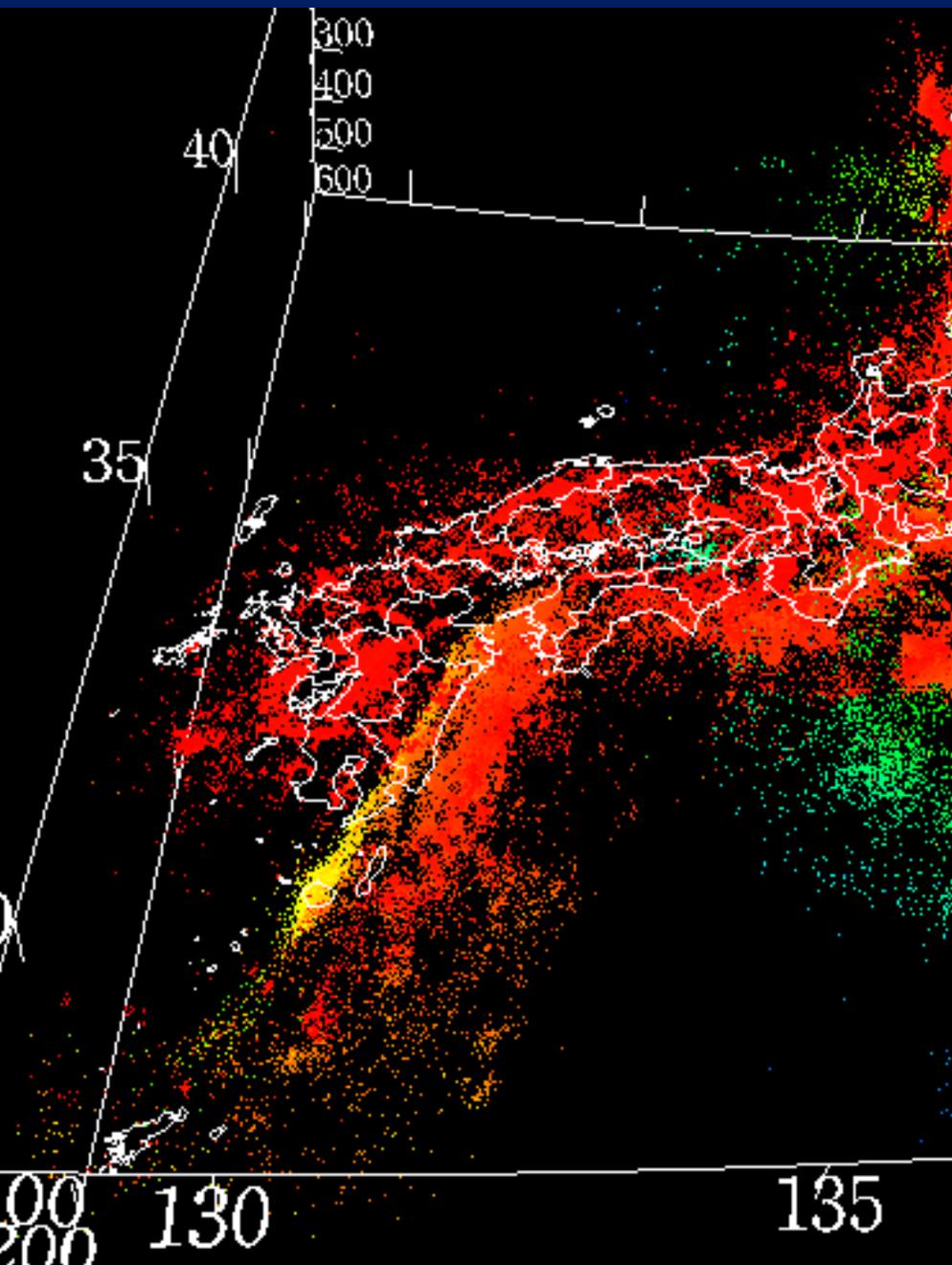
(1) 地震動シミュレーションの目的

(2) 京コンピュータによる
地震動シミュレーションの進展

(3) ポスト京への期待と課題



地震国日本 — 地震シミュレーションの必要性



主な被害地震(1993年～)

2011年 3月11日	M9.0	東北地方太平洋沖地震
2009年 8月11日	M6.5	駿河湾の地震
2008年 7月24日	M6.8	岩手県沿岸北部の地震
2008年 6月14日	M7.2	岩手・宮城内陸地震
2007年 7月16日	M6.8	新潟県中越沖地震
2007年 3月25日	M6.9	能登半島地震
2005年 8月16日	M7.2	宮城県沖の地震
2005年 3月20日	M7.0	福岡県西方沖の地震
2004年 10月23日	M6.8	新潟県中越地震
2003年 9月26日	M8.0	十勝沖地震
2003年 7月26日	M6.4	宮城県北部の地震
2003年 5月26日	M7.1	宮城県沖の地震
2001年 3月24日	M6.7	芸予地震
2000年 10月 6日	M7.3	鳥取県西部地震
2000年 6月26日	M6.5	三宅島近海の地震
1997年 5月13日	M6.4	鹿児島県薩摩地方の地震
1997年 3月26日	M6.6	鹿児島県薩摩地方の地震
1995年 4月 1日	M5.6	新潟県下越地方の地震
1995年 1月17日	M7.3	兵庫県南部地震
1994年 12月28日	M7.6	三陸はるか沖地震
1994年 10月 4日	M8.2	北海道東方沖地震
1993年 7月12日	M7.8	北海道南西沖地震
1993年 1月15日	M7.5	釧路沖地震

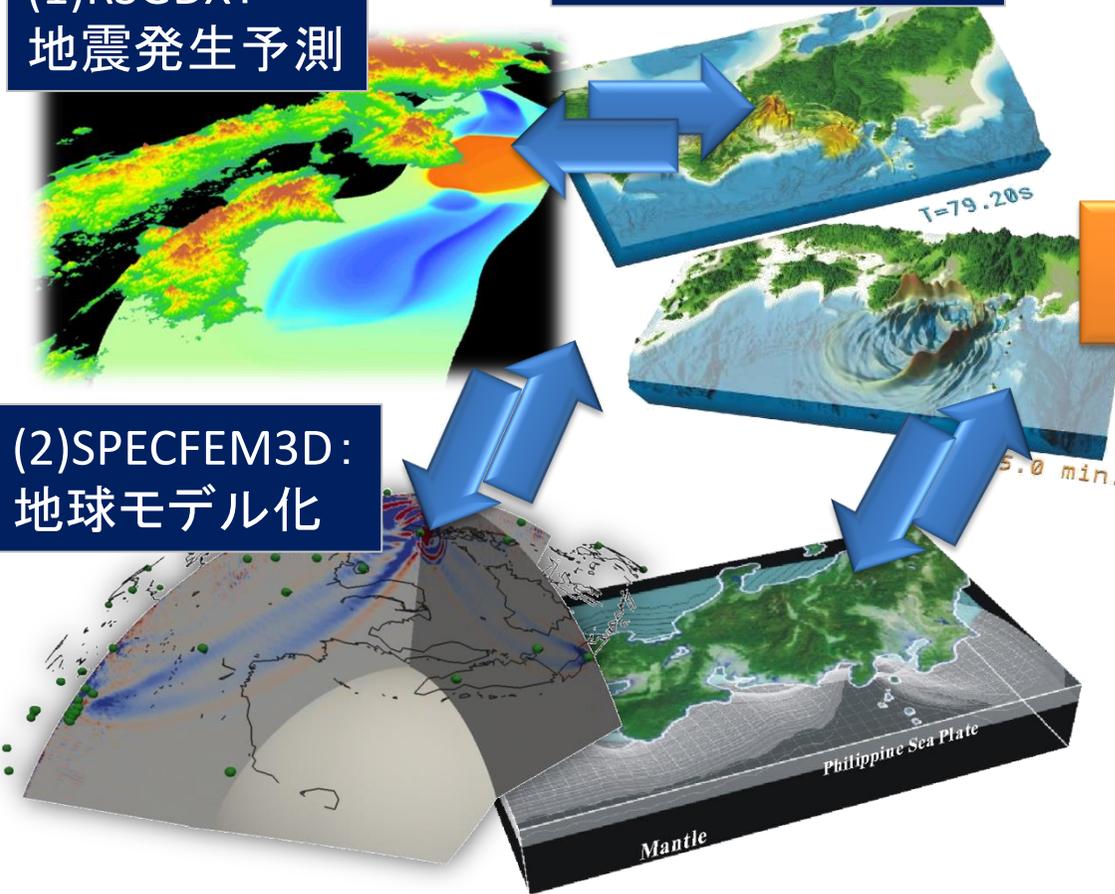
地震シミュレーションの役割と工学研究との強い連携

理学研究(地震学)

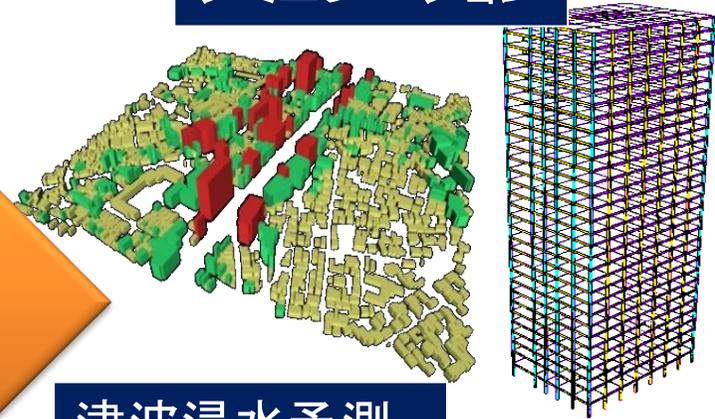
工学研究(土木・建築学)

(1)RSGDX:
地震発生予測

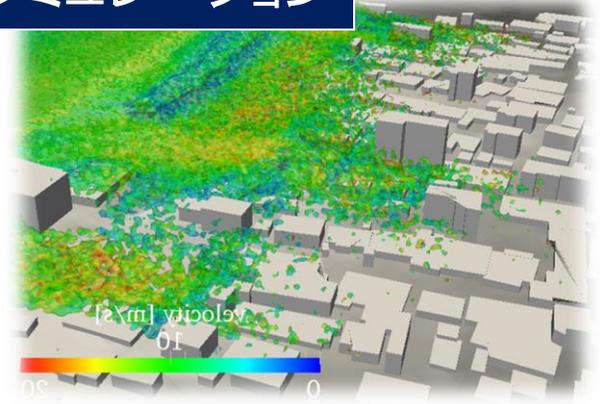
(3)Seism3D
強震動・津波予測



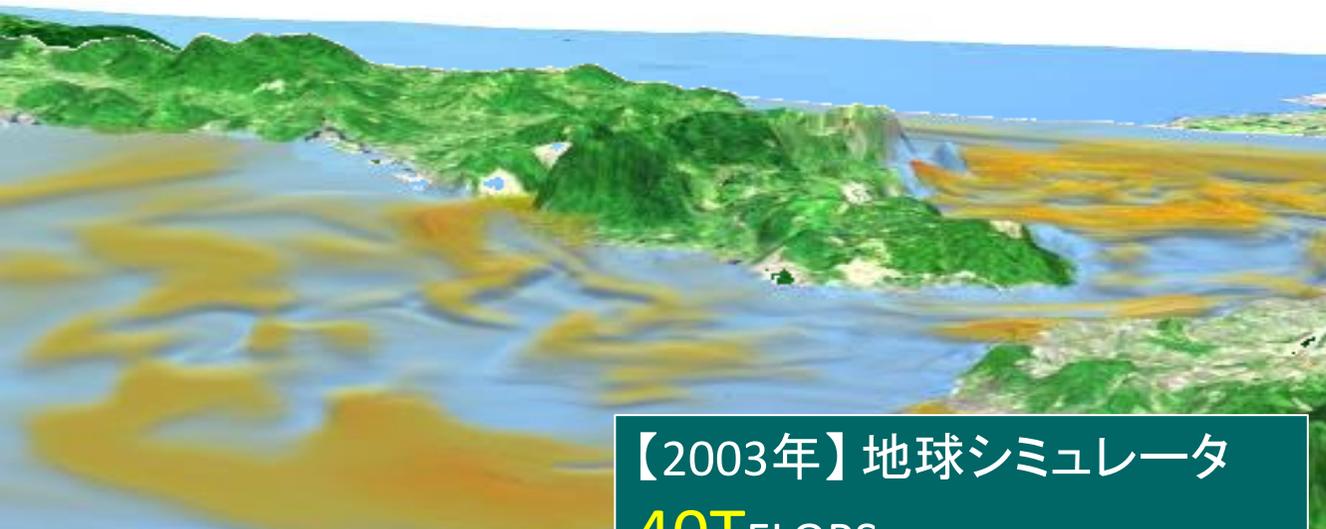
建物振動
都市被害予測
シミュレーション



津波浸水予測
シミュレーション



計算機の進化と地震シミュレーションの進展 — 兵庫県南部地震 —



【2009年】地球シミュレータII
131T FLOPS



【2003年】地球シミュレータ
40T FLOPS



3.3倍

【1996年】CRAY CS6400
2G FLOPS



20000倍

計算機の進化と地震シミュレーションの進展—兵庫県南部地震—

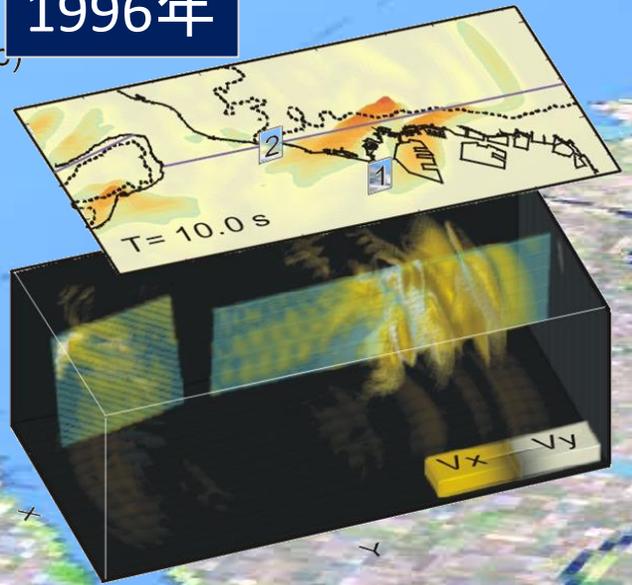
2006年

淡路島

六甲山

神戸

1996年



大阪

$T = 3.7 \text{ s}$

「京」によるPeta FLOPS 計算の実現



京によるPetaFLOPS計算に向けて: B/Fの制約の克服

☆メモリバンド幅の制約

- 地球シミュレータ 4.0 B/F
- 地球シミュレータ II: 2.5 B/F
- 京コンピュータ: 0.5 B/F



低下

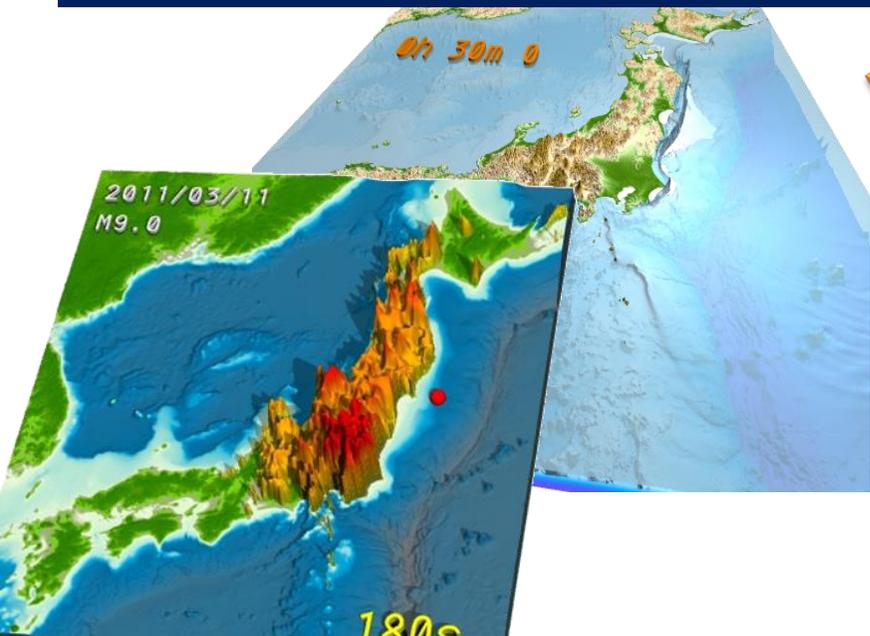
CPU
(FLOPS)

B/F

Memory



(例) 運動方程式の差分法シミュレーション



(1) 応力変数の更新

$$\sigma_{pq}^{n+1} = \sigma_{pq}^n + \left[\begin{array}{l} \lambda \left(\frac{\partial \dot{u}_x^{n+1/2}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}_y^{n+1/2}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{u}_z^{n+1/2}}{\partial z} \right) \delta_{pq} \\ + \mu \left(\frac{\partial \dot{u}_p^{n+1/2}}{\partial q} + \frac{\partial \dot{u}_q^{n+1/2}}{\partial p} \right) \end{array} \right] \Delta t$$

Load=72Byte, FLOPS=30 → 2.4 B/F必要

(2) 速度変数の更新

$$\dot{u}_p^{n+1/2} = \dot{u}_p^{n-1/2} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xp}^n}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yp}^n}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zp}^n}{\partial z} + f_p^n \right) \Delta t$$

Load=84Byte, FLOPS=32 → 2.6 B/F必要

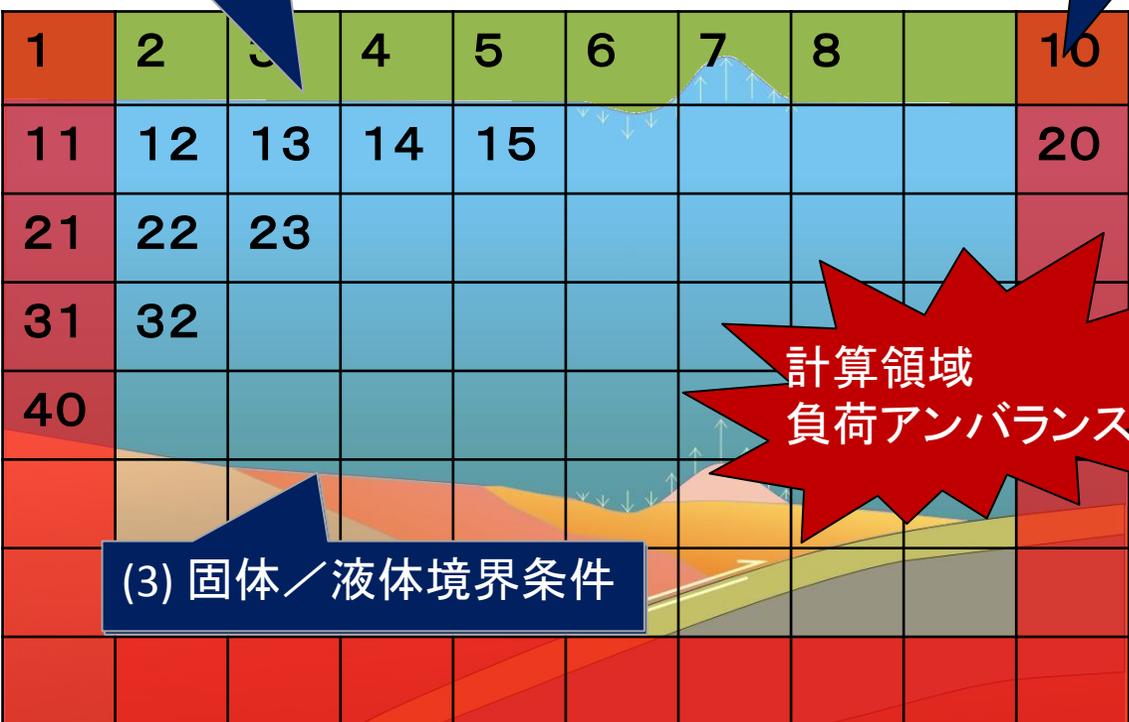
京によるPetaFLOPSに向けて： 並列負荷バランスの問題克服

★大規模並列計算の課題

- 数万CPU(領域分割)を用いた大規模並列計算
- 分割領域(CPU)毎の**計算負荷のバランス**が重要

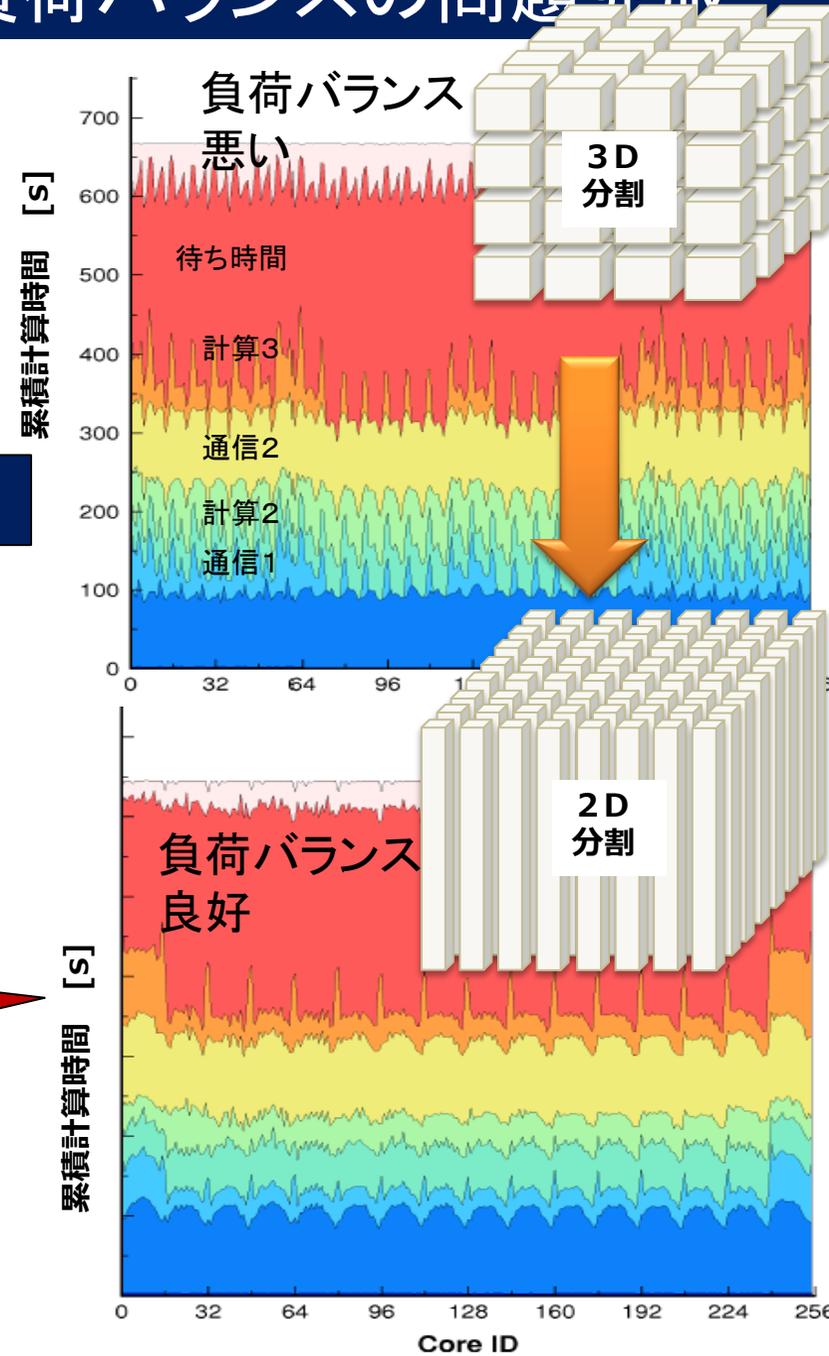
(1) 気体/固体境界条件

(2) 吸収境界条件

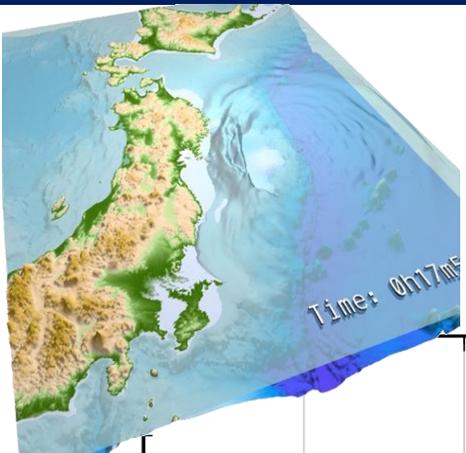


計算領域
負荷アンバランス

(3) 固体/液体境界条件



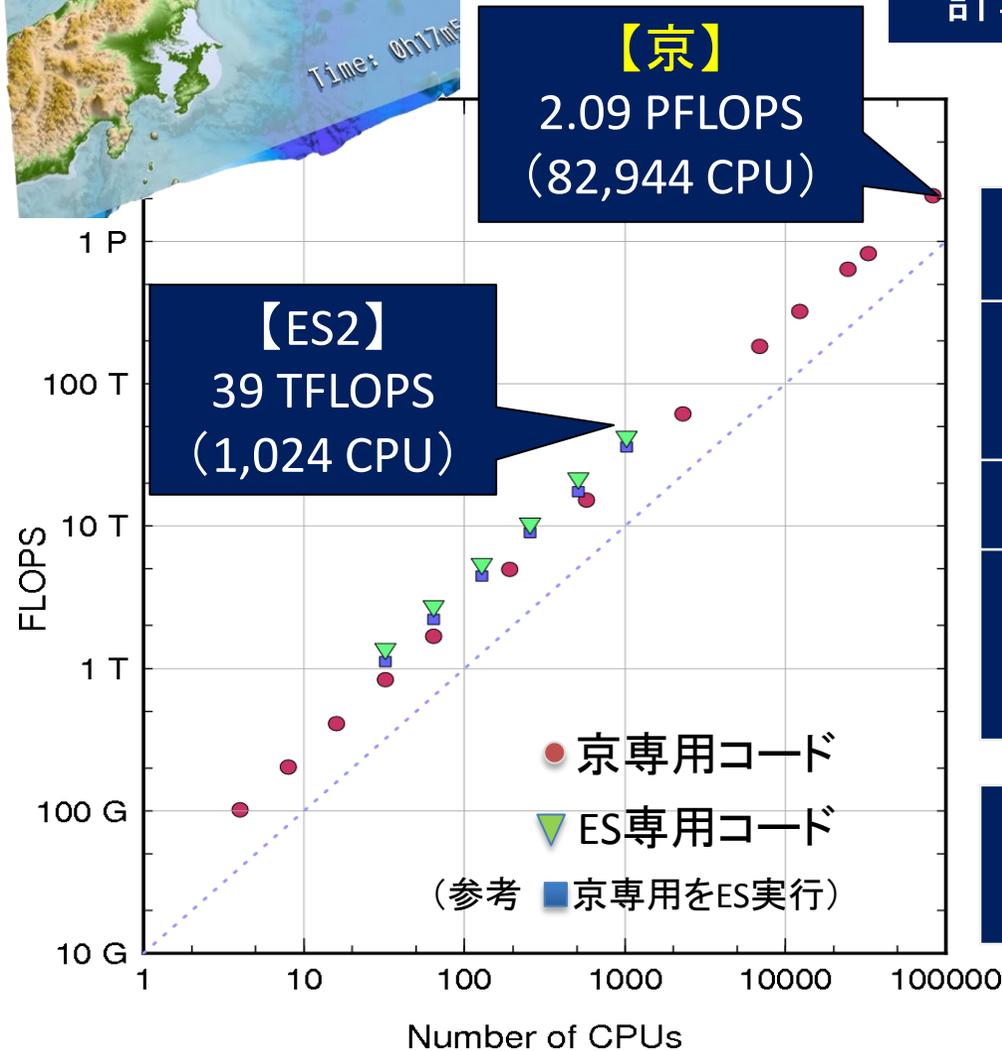
京によるPetaFLOPSに向けて：京チューニング成果



★ 京コンピュータ **フルノード計算の実現**

計算スケール拡大：40～60倍

計算解像度拡大：2～3倍 (共にES2比)



Seism3D	ES2	京
CPU性能 *CPU数(a)	102.4 GFLOPS *1,280 CPU	128 GFLOPS *82,944 CPU
実効性能(b)	37 %	20.4 %
最大 実効性能 (a*b)	0.05 PFLOPS	2.0 PFLOPS
メモリ容量	0.02 PB	1.2 PB

40倍

60倍

京によるPetaFLOPSに向けて：京チューニング成果

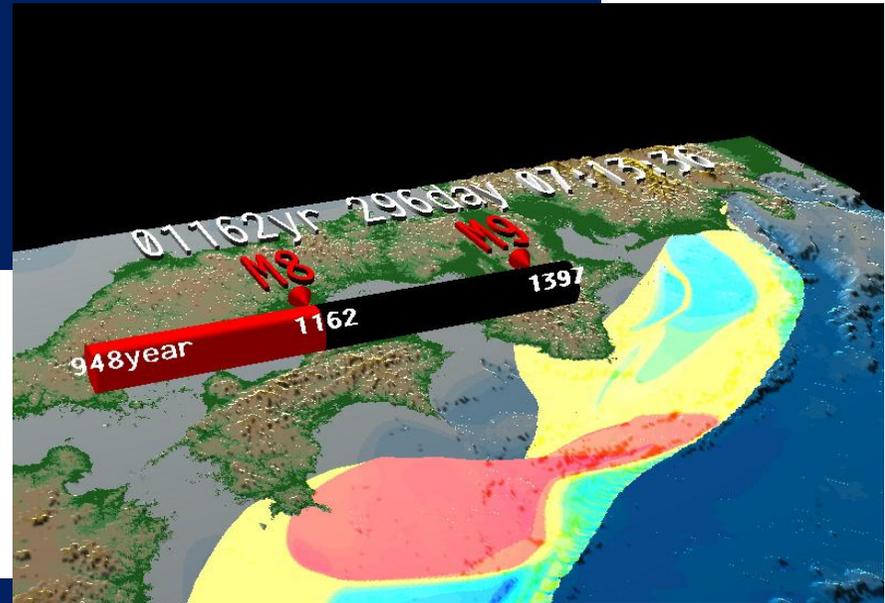
★地震発生サイクルシミュレーション(RSGDX)

- ・境界積分方程式法+H-matrices法による省メモリ・高速化

【京における計算】:

- ・実効性能: 9% (行列ベクトル積部)
- ・京128ノードx12時間(1シナリオあたり)
- ・京64,000ノード→最大500シナリオ同時計算

兵藤・堀 (JAMSTEC)



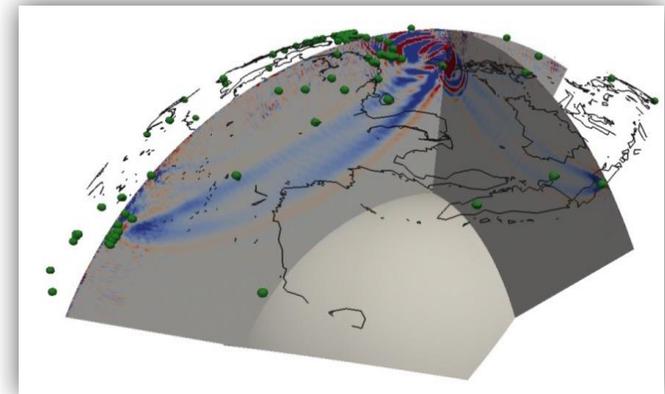
★地下構造推定シミュレーション(SPECFEM3D)

- ・Spectral Element法に基づく高精度計算

【京における計算】:

- ・12,288ノード計算、地震動周期5秒まで
- ・実効性能: 19% (最大)
- ・並列化効率: 88%

坪井 (JAMSTEC)



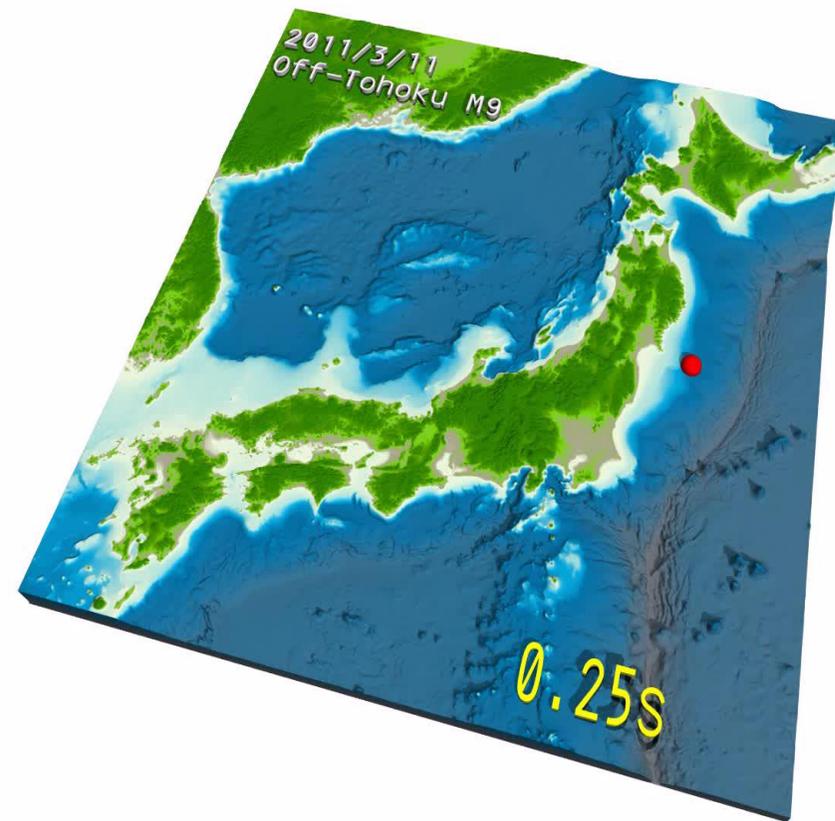
東北地方太平洋沖地震 の再現



東北地方太平洋沖地震＝複合災害

★巨大地震による地震津波災害

・強震動、地殻変動、津波の複合災害



(3) 地震地殻変動



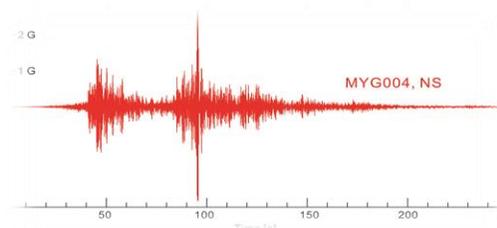
(4) 津波



複合災害

(2) 液状化・地盤災害

(1) 強震動・長周期地震動



揺れの伝播

(K-NET, KiK-net1800観測点)

複合災害の評価：地震—津波同時シミュレーションの新規開発

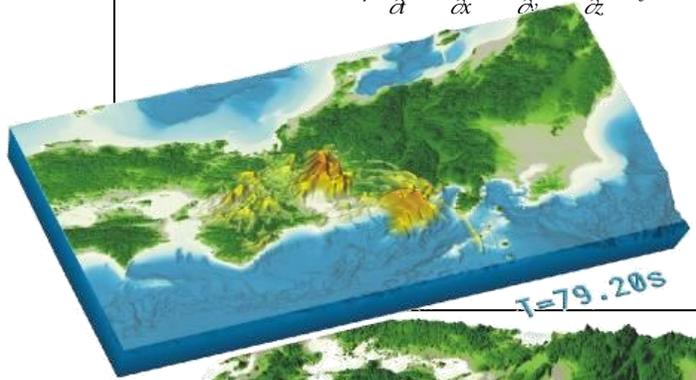
(1) 地震動シミュレーション

運動方程式

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_y$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z$$



(2) 津波シミュレーション

流体の式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + g_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + g_z$$

(3) 地震—津波同時シミュレーション

Maeda and Furumura (2012)

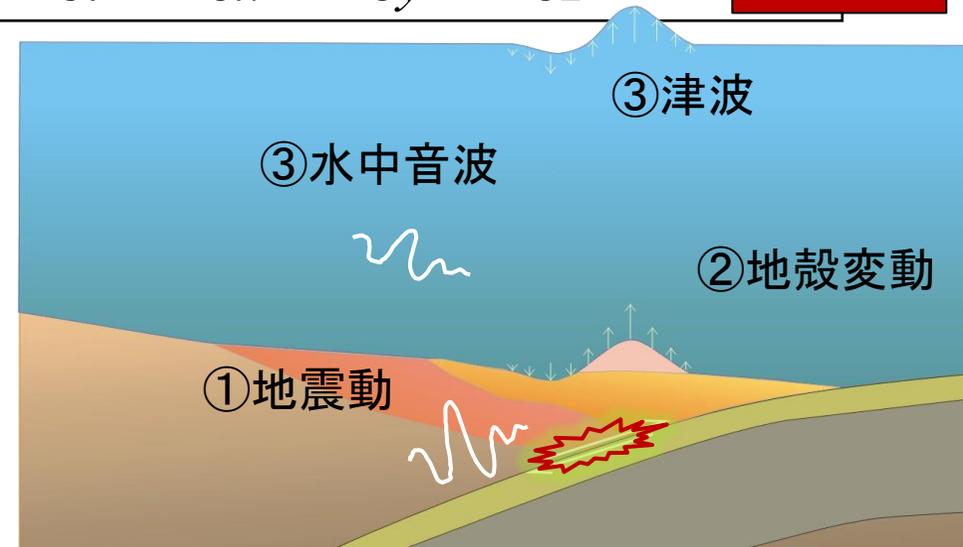
運動方程式 (+重力項、静水圧平衡からの変動)

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}^D}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho g_0 \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^D}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \rho g_0 \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}^D}{\partial z}$$

津波項
(重力項)

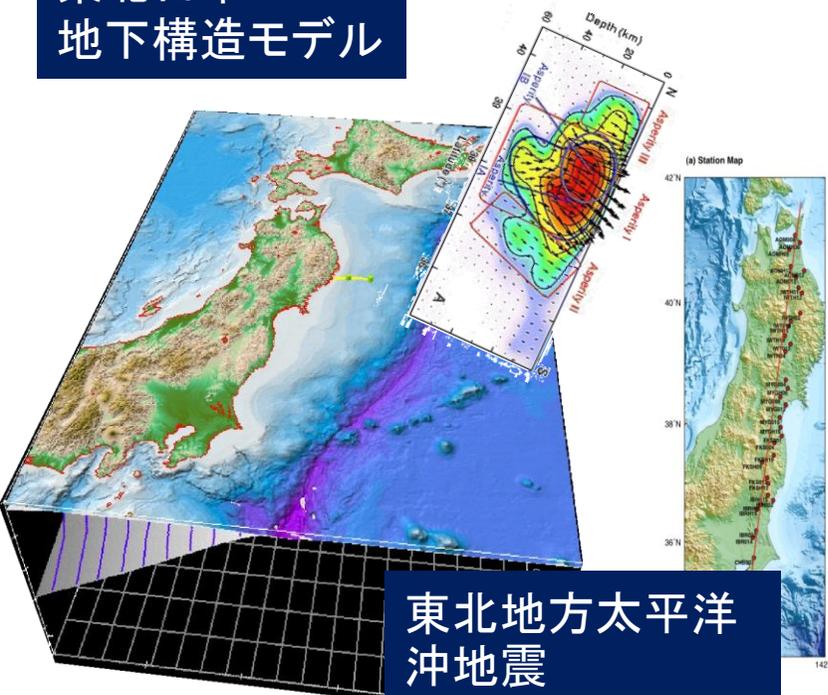


複合災害の評価：地震—津波同時シミュレーションの新規開発

★東北地方太平洋沖地震モデル

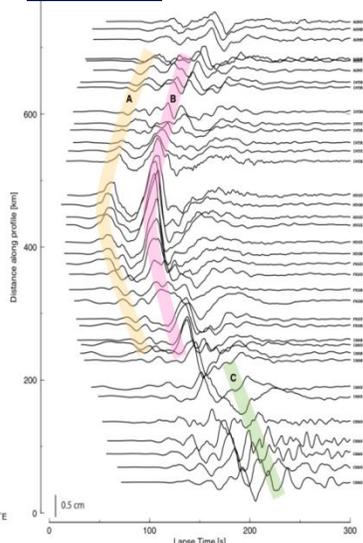
- ・計算領域：1192x768x500km³
- ・格子数：2304x1536x2000
- ・計算ノード数：2,304
- ・計算時間：4時間

東北日本
地下構造モデル

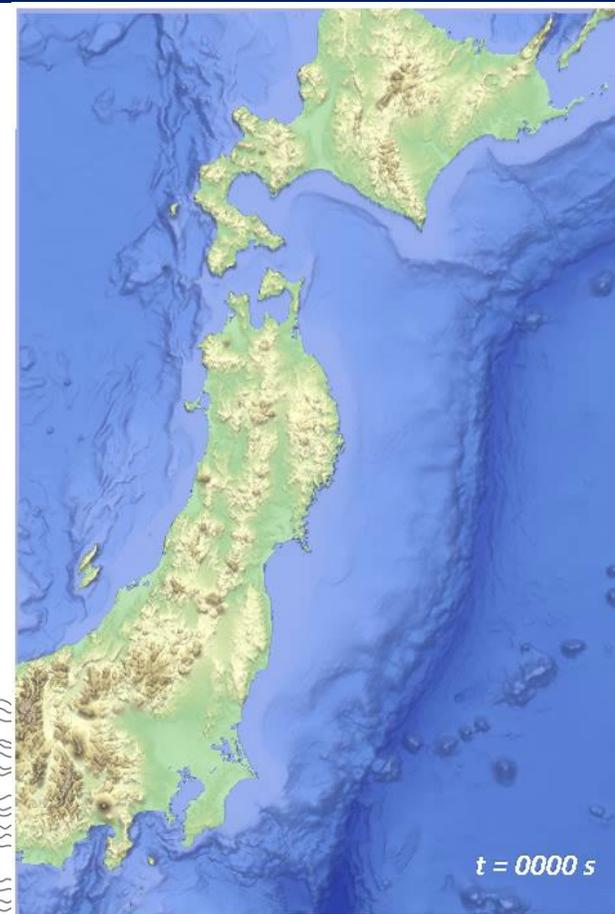
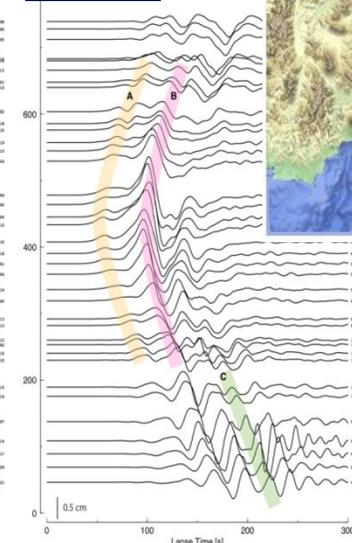


東北地方太平洋
沖地震
震源モデル

観測



計算

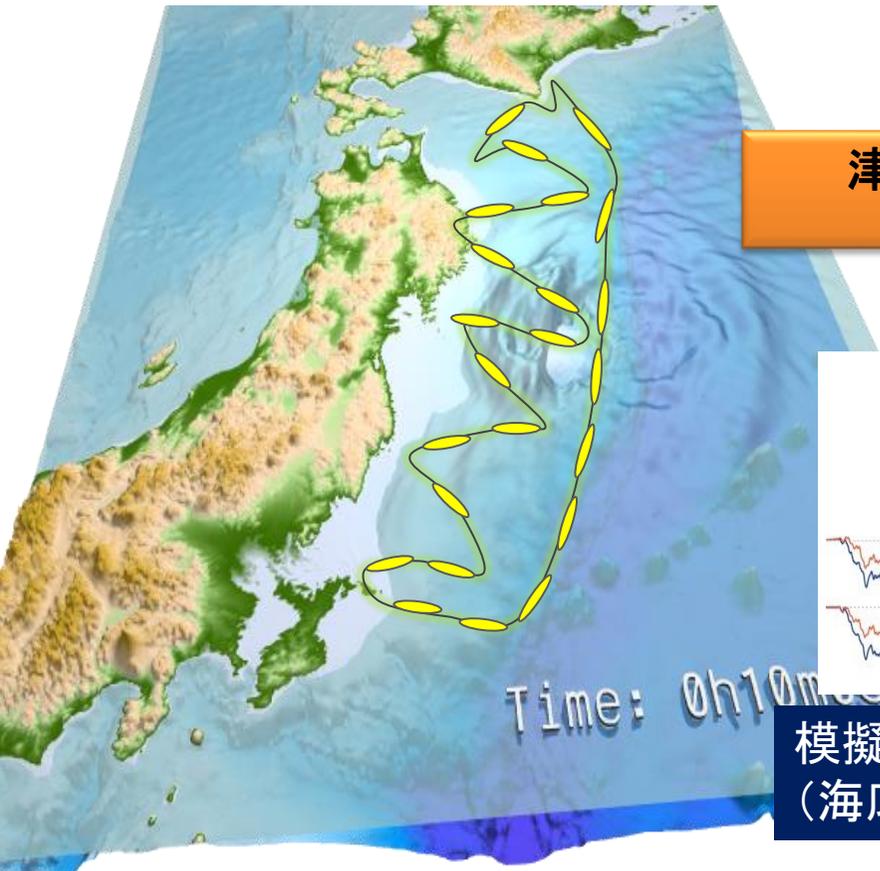


t = 0000 s

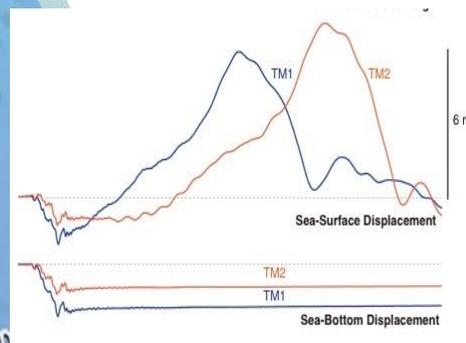
Maeda *et al.* (2013)
Bull. Seism. Soc. Am

研究成果の利活用： 防災機関との連携（日本海溝海底ケーブル）

（共同研究） 東大地震研、東北大学
— 海底ケーブル津波計で記録される地震動、水圧変化
— 津波計記録を用いた震源過程解析

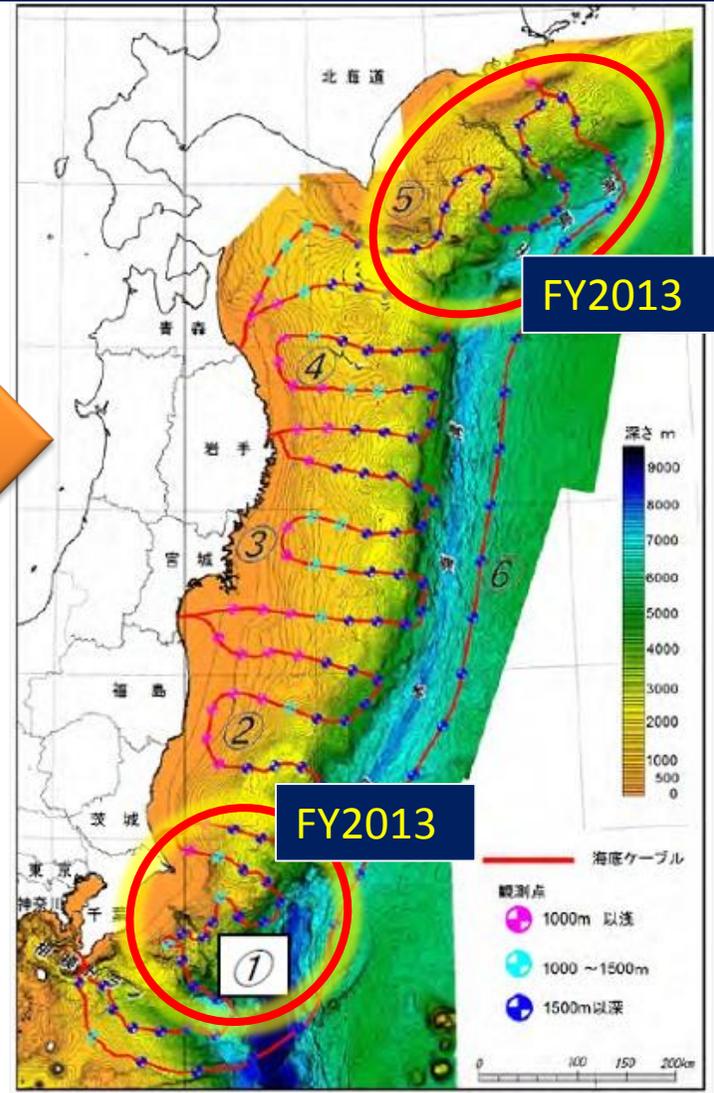


津波警報システム
開発への活用

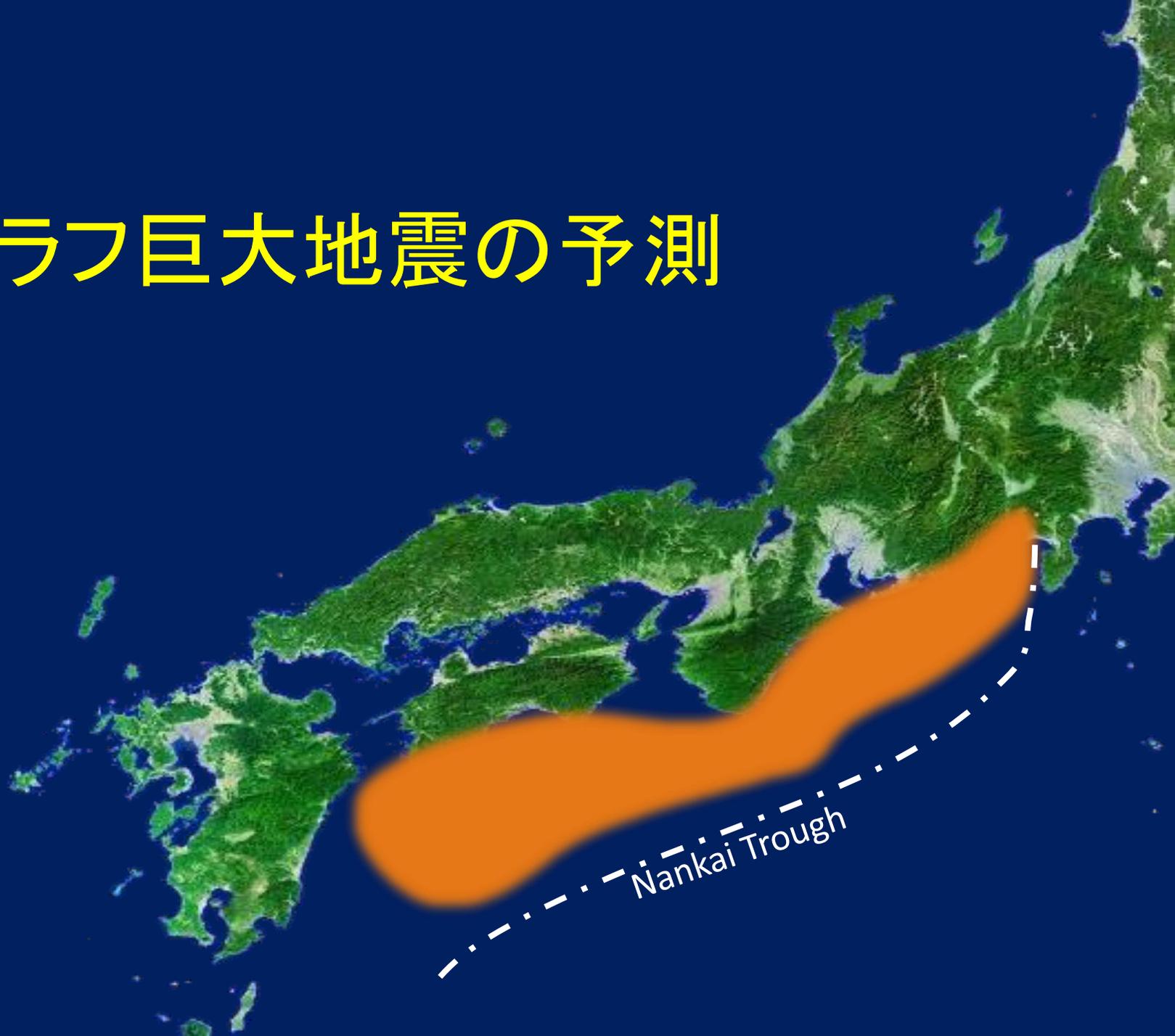


模擬データ
（海底ケーブル津波計）

海底ケーブル津波計データの活用

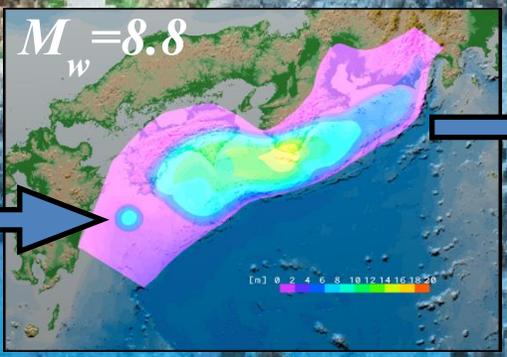
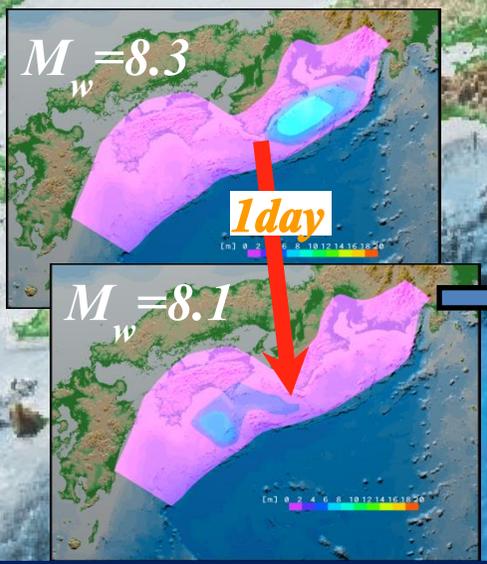


南海トラフ巨大地震の予測

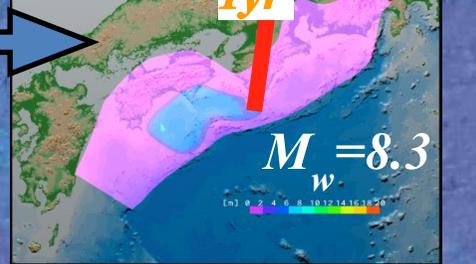
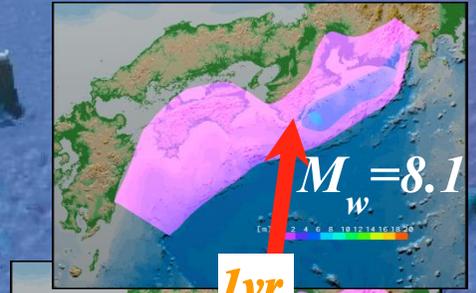
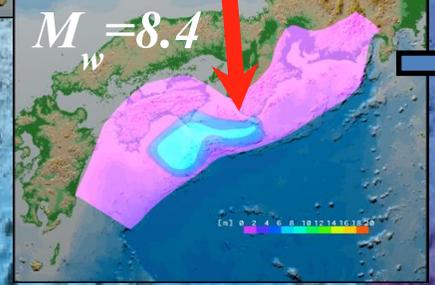
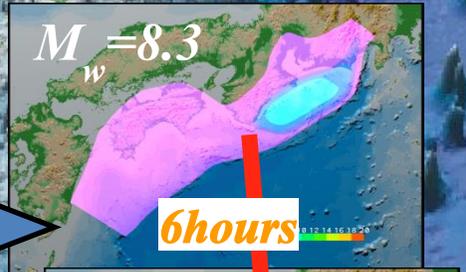


南海トラフ地震の予測(1) 地震発生、連動性の評価

南海トラフ巨大地震の発生履歴の再現計算
—モデルの検証—
—将来の予測可能性—
兵藤・堀 (JAMSTEC)



連動型地震



非連動(東南海→南海)

非連動(東南海→南海)

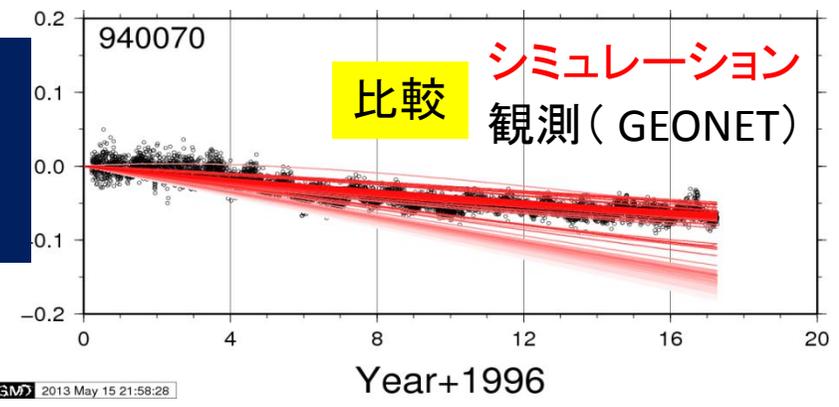
非連動(南海→東南海)

南海トラフ地震の予測(2) 地殻変動観測データ同化、未来予測

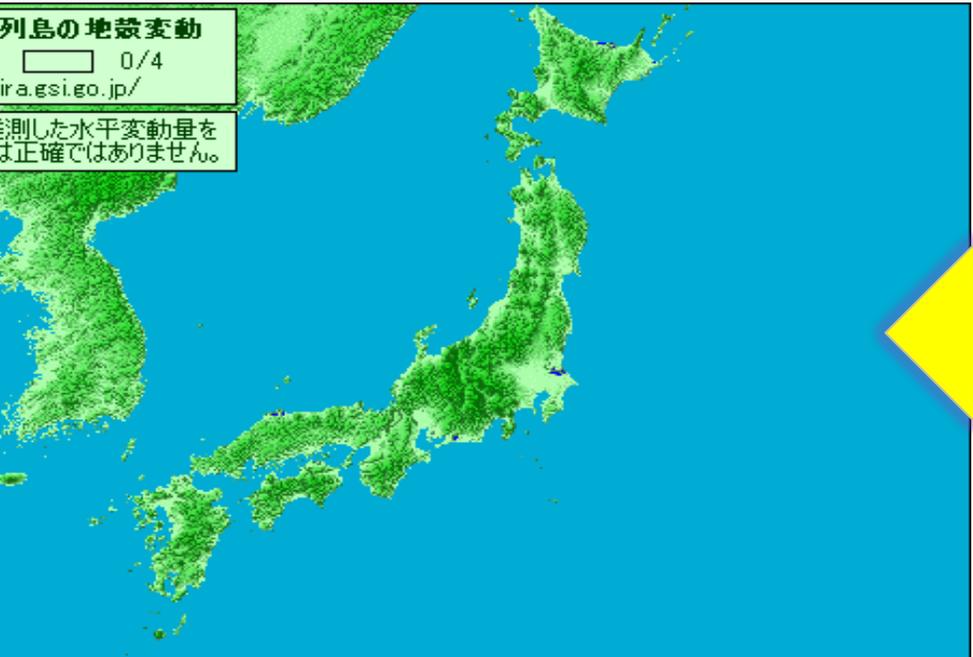
☆地震発生予測(シナリオ)シミュレーション

- ・京128ノードx12時間(1シナリオあたり)
- ・京64,000ノード→最大500シナリオ同時計算

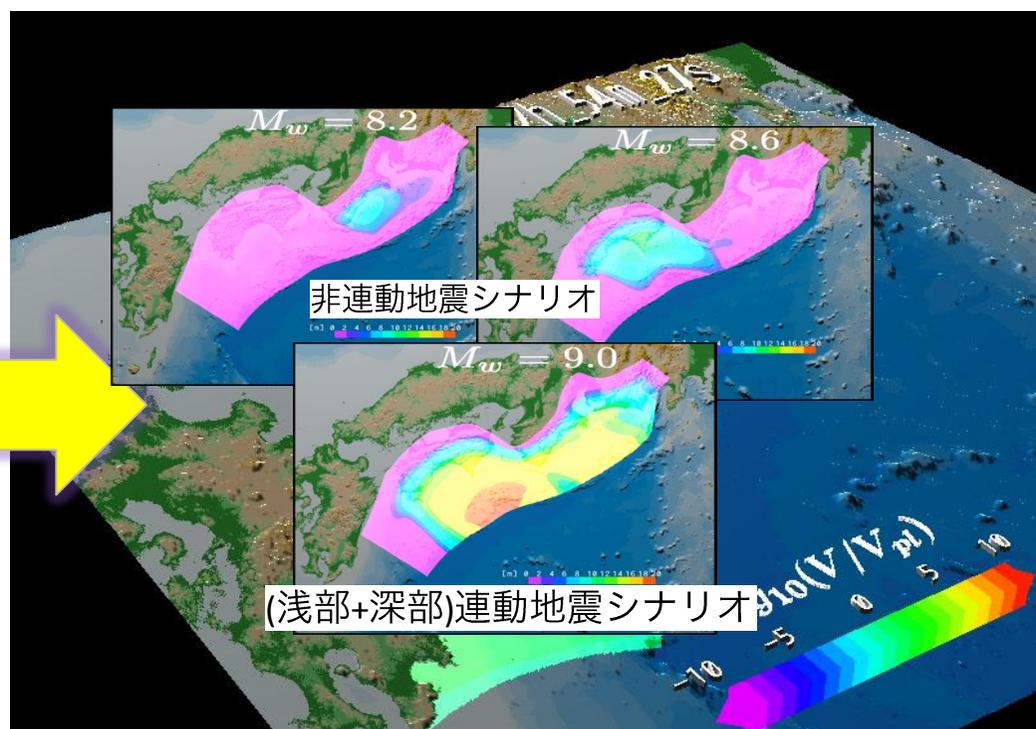
兵藤・堀(JAMSTEC)



(a) 高密度地震、地殻変動観測網(陸・海)
 GEONET地殻変動観測(国土地理院)
 DONET 海底地殻変動観測(JAMSTEC)



(b) 地震発生サイクルシミュレーション
 観測の再現・データ同化シミュレーション

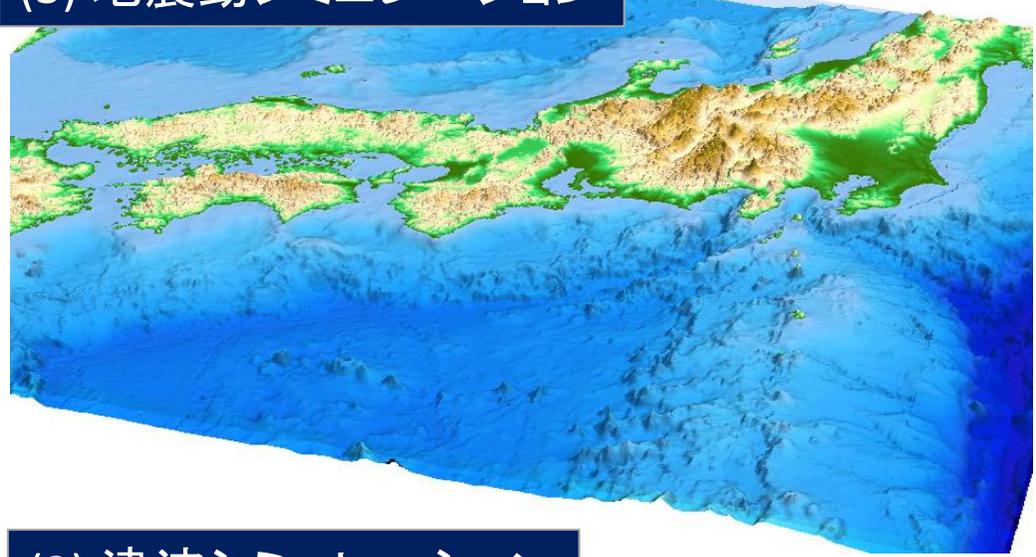


南海トラフ地震の予測(2) 予測の可能性・限界、不確定性

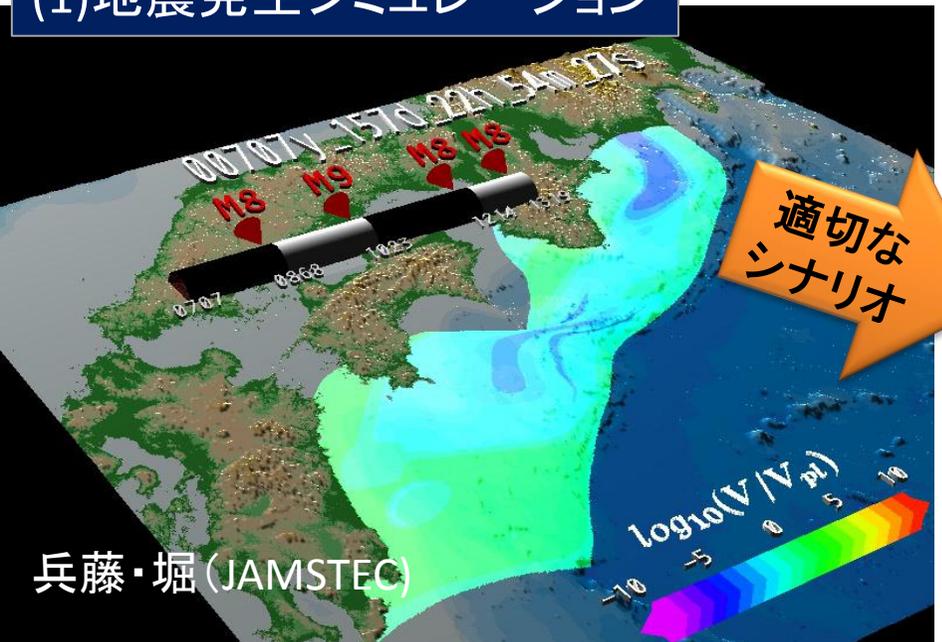
★ 現実的な地震シナリオに基づく
地震動、津波の予測
— 確度の高い地震シナリオ
— 最大、平均、バラツキ評価

適切なシナリオ

(3) 地震動シミュレーション

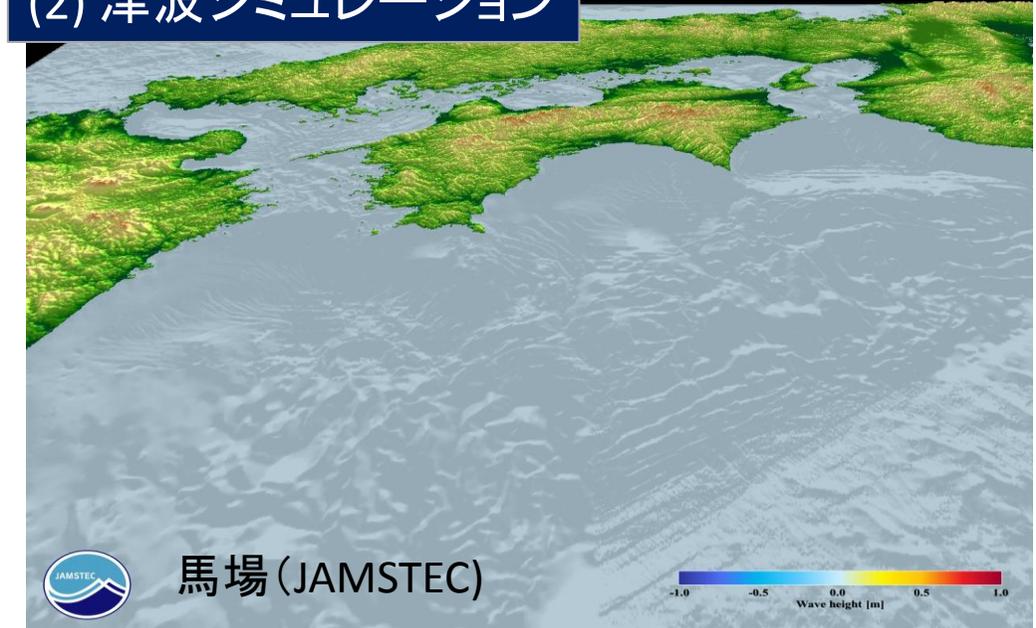


(1) 地震発生シミュレーション

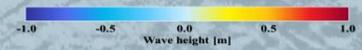


適切なシナリオ

(2) 津波シミュレーション



馬場 (JAMSTEC)



南海トラフ地震の予測(3) 地震・地殻変動・津波の複合災害



地震津波シミュレーション ポスト「京」への期待



京によるペタ計算、そしてポスト「京」エクサ計算に向けて

地震動シミュレーションへの期待(例)

【現行】

- 1200km*1000km*200km @ 500m
- 周波数 0.5 Hz程度

10,000倍

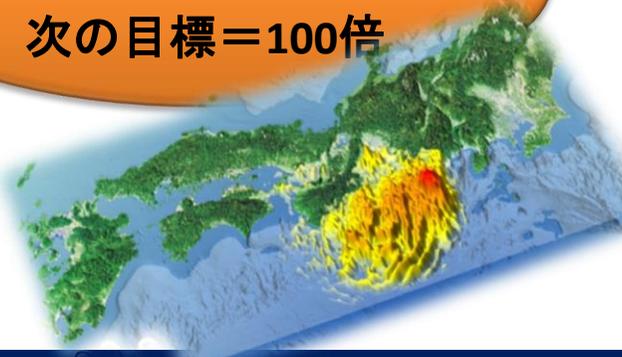
【将来】

- 1200km*1000km*200km @ 50m
- 周波数 5 Hz程度



最終目標=10,000倍

次の目標=100倍



課題: メモリB/Fの制約(B/F=1.0 or 0.1?)、超並列化(〇〇万ノード?)

エクサ計算に向けて： 計算科学研究者・技術者との協調

TOP 500[®]
 NOVEMBER 2013
 PERFORMANCE DEVELOPMENT



これまで

高速 (LINPACK) 計算の到達目標

マシン開発

アプリ整備



これから

シミュレーションの到達目標

マシン & アプリ一体開発

地震の予測精度の高度化に関する研究 成果と課題

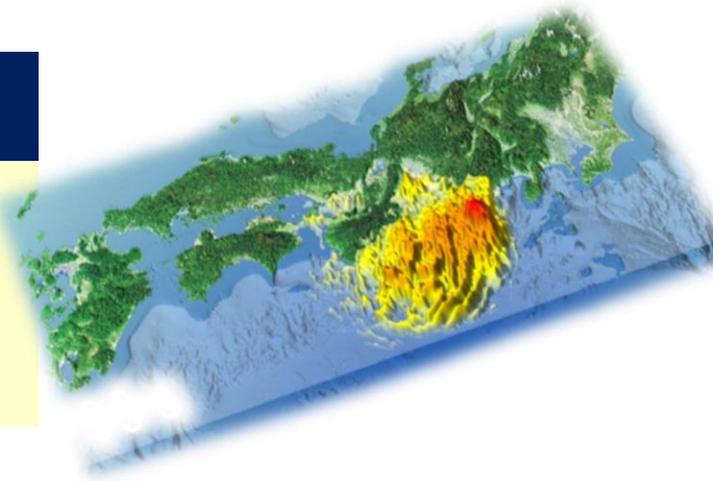
(1) 京により実現した大規模計算

- ・フルノード(82,944CPU)計算により、ESの40倍の規模
- ・かつてESの「特殊計算」が「日常計算」に



(2) 京による地震津波防災への挑戦

- ・東北地方太平洋沖地震の再現・検証
- ・南海トラフ地震の適切なハザード評価(+不確定性)
- ・高度地震津波観測データ活用、即時評価に向けて



(3) 地震予測の精度向上一ポスト京(100倍)への期待

- ・地震動シミュレーションの 10^4 倍の高速化目標、そのためにまず100倍!
- ・B/Fの制約、ハードと一体したアルゴリズムの大幅な変更(研究者も汗かく覚悟)