15-NA12

*竹中博士(岡山大)*

# 海溝型巨大地震を対象とした大規模並列地震波・津波伝播シミュレーション

竹中博士(岡山大)・青木尊之(東工大)・岡元太郎(東工大)・中村武史(海洋研究開発機構)・
豊国源知(東北大)・小松正直(岡山大)

## 研究目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9)は、強い地震動と巨大な津波によって東日本地域に計り知れないほどの地震災害・津波災害をもたらした。そのためこの地震の詳細な断層破壊過程を明らかにし、巨大地震発生に至った過程や強震動・津波の生成メカニズムを考察することが重要な研究課題となっている。さらに、得られた破壊過程モデルによる広域的な観測地震動の再現性も検討すべき課題である。これらは他の海溝型巨大地震(海洋プレート沈み込み帯の巨大地震)による強震動や津波を評価・予測するうえでの基盤ともなる。我々はこのような課題に取り組むために、時間領域差分法(Finite-Difference Time Domain)による大規模地震波・津波伝播シミュレーション手法の開発と応用を進めてきた。

平成27年度には、東北地方太平洋沖地震の大規模フォワード計算による東日本全域における地震動再現性の検討や、九州の南沖から台湾の東沖付近までにわたる南西諸島における3次元改良構造モデルを用いた既往地震の大規模地震波・津波統合シミュレーションを実施する。

## 海溝型巨大地震についての地震動再現性の研究

### TSUBAME-2.5(東工大)による大規模計算

図2 TSUBAMEの外観
(東工大WEBより)

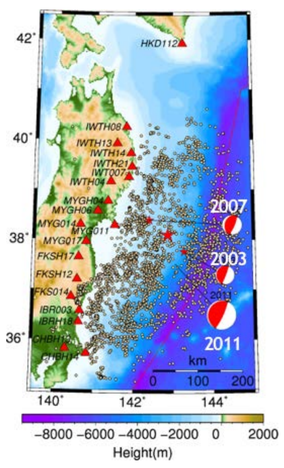
◆ HOT-FDM (上欄参照)
◆ 1408 Computation Nodes
- Intel Xeon 5670 (6cores x 2)
- Infiniband QDR x 2 (10GB/s)

◆ Accelerator: **GPUs**
- NVIDIA K20X (3GPUs/node)
- **4224 GPUs**

| 設定項目 | 利用したパラメータ |
|---|---|
| 全格子サイズ | 5120×3200×1440 |
| 副領域サイズ | 320×320×480 |
| 格子間隔 | 0.15 km |
| 全領域サイズ | 768×480×216 km |
| 時間間隔 | 0.0071429 s |
| 非弾性要素数 | 3 |
| GPU数 | 480 |
| ステップ数 | 38094 |
| 総実行時間 | 8777.1 s (@38094) |

表1 代表的な計算パラメータ。

### 計画① 小地震波形の再現性




◆ 東北地方太平洋沖地震への応用を考えて、同地震の震源域で低角逆断層型の小地震を選択
◆ 海溝側の小地震
- 2003年11月3日 Mw 5.8 深さ 12 km
- 強震動速度波形・遠地実体波(P波)変位波形

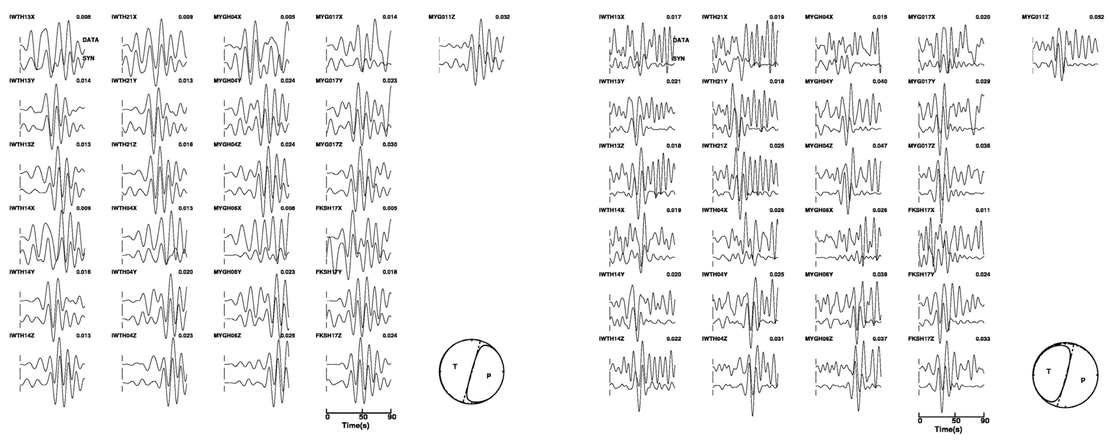
◆ 陸地側の小地震
- 2007年12月25日 Mw 6.1 深さ 30 km
- 強震動速度波形のみ

◆ 震源パラメータの逆問題解析＋格子探索

図3 小地震のGCMT解(星マーク)。2011年東北地方太平洋沖地震の余震と震央(大きな星マーク)も示した。三角は強震動観測点(K-NET、KiK-net)。

図4 海溝側小地震の逆問題解析結果(強震動速度波形)

周期 12 - 40秒　　周期 7 - 40秒



- 12-40秒の周期帯では計算波形は観測波形を良好に再現している
- 7-40秒の周期帯では観測表面波の後続波が強くなる
- それらの後続表面波の再現性は良くない ☞ 伝播経路の影響(堆積物)

### 今年度の計画

◆ 計画① 構造モデル改良による波形の再現性検討
- 堆積物層の厚さや地震波速度を変えるパラメータースタディによって波形再現性が改善するかを検討する。

◆ 計画② フォワード計算結果を用いた波形の再現性検討
- 地震波波形・波動伝播のスナップショットなどの計算結果や、最大地動速度や震度などの換算指標を利用して、主要な波動成分の走時や振幅の再現性を検討する。

**謝辞** 防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net の波形データ、および IRIS Data Center からダウンロードした波形データを利用させていただきました。また気象庁の一元化震源データおよび Global Centroid-Moment Tensor Project のCMT解を利用させていただきました。

## 地震波シミュレーションの手法

### HOT-FDM:時間領域差分法

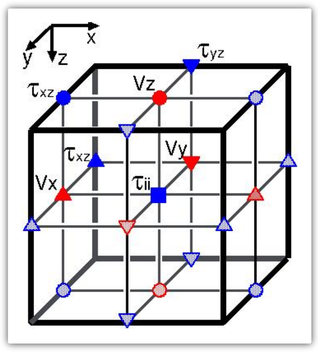



図1 食い違い格子の単位セル

***H***eterogeneity, ***O***cean layer, ***T***opography
- 食い違い格子:空間4次精度・時間2次精度
- 固体・流体境界(陸上地形・海底地形)
  岡元・竹中(2005), Takenaka et al. (2009), 中村・他(2011)
- 不均質構造
- 非弾性減衰(メモリ変数)Blanch et al. (1995)
- GPU版:Okamoto et al. (2010; 2013)
- CPU版:Nakamura et al. (2011; 2012)

## 地震波・津波統合シミュレーション

### 陸海津波統合FDTDスキーム

弾性波:HOT-FDM (上欄)を利用
津波 :重力項を導入 (Takenaka et al., ACES 2012)
自己重力のもとでの天体の弾性振動の方程式をもとにして方程式系を導出

### FX10(東京大学)による大規模計算

- 4800 Computation Nodes
  - SPARC64 IXfx (16cores x 1)
  - Tofu Interconnect

図5 FX10の外観
(東工大WEBより)

- 2014年の成果
  プログラムの改良による高速化を確認
  (条件によっては従来の約20倍の高速化)

### 高速・大規模計算の例

- 2013年4月13日 淡路島地震(M6.3)のシミュレーション
- 陸上地形・海底地形・海水層(水中音波)・地球内部不均質性・非弾性減衰
  ＊地震波部分のみの計算例

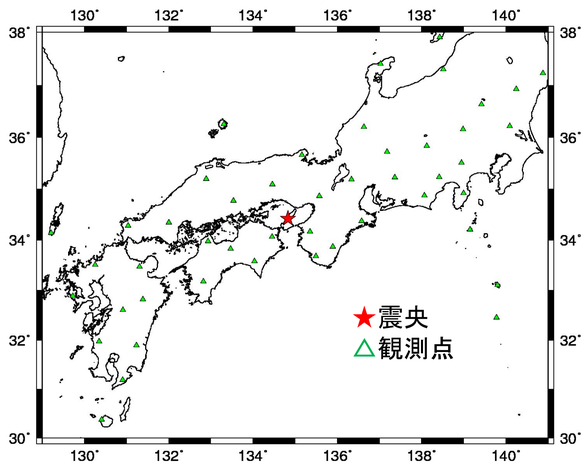



図6 淡路島地震の震央と強震動観測点。

| 設定項目 | 利用したパラメータ |
|---|---|
| 全格子サイズ | 1601×2401×401 |
| 格子間隔 | 水平 0.558 km、鉛直 0.5 km |
| 全領域サイズ | 892.8×1339.2×200 km |
| 時間間隔 | 0.025 s |
| 非弾性要素数 | 3 |
| ノード数 | 70 (1120コア) |
| ステップ数 | 20000 |
| 総実行時間 | 3.18 時間 |

表2 淡路島地震シミュレーションの計算パラメータ。

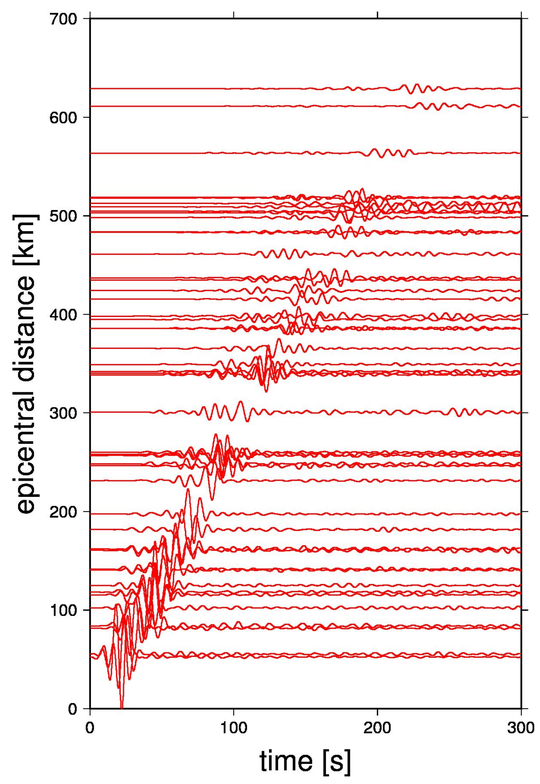



図7 淡路島地震のシミュレーション結果例。図6の観測点における地動の上下動速度成分を震央距離に従って並べて描いたもの。伝播距離600km以上まで安定に計算できることがわかる。

### 今年度の計画

◆ 地震波・津波統合計算と従来型津波計算の連携
- 地震波・津波統合計算:固体・流体相互作用を考慮できるが、3次元大規模計算のため、海岸近くではメッシュが水深よりも大きくなる
- 従来型津波計算:2次元流体計算であるためメッシュを細かくできる
  → 両者の連携により海岸近くまでをシームレスに取り扱う

◆ 地震波再現性の研究
- 南西諸島域での地震波シミュレーション結果を使って、観測波形をどの程度に再現できるかを検討する

◆ 地球の曲率の効果
- 計算機の性能向上により、強震動分野でも長距離伝播する地震波を直接シミュレートできるようになってきた。一方で、強震動分野では従来は平面地球近似が利用されてきたが、長距離では曲率の効果を無視できなくなる。そこで地球の曲率の効果を従来の計算コードに導入する手法について研究する。