## 課題番号:1424

- (1)実施機関名:東京大学地震研究所
- (2)研究課題(または観測項目)名: 広帯域シミュレーションによる強震動・津波予測
- (3)最も関連の深い建議の項目:
  - 2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進
    - (3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程
      - (3-2) 地震破壊過程と強震動
        - イ.強震動・津波の生成過程
- (4)その他関連する建議の項目:
- (5)本課題の5か年の到達目標:

大地震による強震動と津波の生成過程を理解し、地震現象の解明を目指すことを目的として、不均 質な地下構造と震源断層運動を高い分解能でモデル化した、長周期~短周期地震動を含む、広帯域地 震動および津波の発生伝播を、地球シミュレータ等のスーパーコンピュータを用いて高速かつ高精度 に評価するための計算手法を確立する。強震動と津波のシミュレーション結果を用いて過去と未来の 大地震の強震動と津波の発生過程の解明と予測、そしてこれを用いた地震・津波観測データの逆解析 による震源と波源域の高精度推定を目指す。これまで地球シミュレータ向けに開発した地震動・津波 シミュレーションコードを新型地球シミュレータ(2009年4月~)へ移植し、コードの最適化を図る ことにより、従来の10倍以上の性能を高めることにより、従来の2~3倍以上の分解能(計算量は16 ~27倍)で上記計算を実行する。また、高分解能シミュレーションに必要となるスケールが1km以下 の短波長不均質構造と、断層運動の不均質性(滑り分布、破壊伝播速度の揺らぎなど)を組み込んだ、 広帯域シミュレーションの実用化を目指す。

(6)本課題の5か年計画の概要:

1.短周期地震動の生成に寄与する断層面上のミクロ構造と断層破壊運動の不均質性の寄与を大地震の 震源解析および数値シミュレーションから評価する。断層不均質構造の不確定性に伴う、強震動評価の バラツキを考慮した、実用的な強震動予測手法を確立する。このために、高密度強震観測網(K-NET、 KiK-net)および高感度観測網(Hi-net)観測データを用いて、地殻および最上部マントルの短波長不均 質構造の分布特性と地域性を定量化する。S 波の見かけ放射パターンの崩れの周波数依存性、P 波コー ダの3成分(Vertical, Radial, Transverse)のエネルギー分布、地震波伝播に伴うP 波およびS 波コーダ エンベロープの拡大様式に着目し、地殻・マントルの短波長不均質構造の分布スケールとアスペクト 比、そして強度(物性揺らぎの標準偏差)を定量的に評価する。

1.短周期地震波動伝播に寄与する、地殻および上部マントルの物性の不均質ゆらぎの規模とその地 域性を高密度地震観測データ解析と地震波伝播のコンピュータシミュレーションに基づく理解の深化 を目指す。観測データ解析から求められた短波長不均質構造を計算モデルに組み込み、地球シミュレー タ等のスーパーコンピュータによる大規模数値シミュレーションをもとに、内陸地震(2008年岩手・ 宮城内陸地震など)およびスラブ内地震(2008年岩手沿岸北部の地震など)における短周期地震波伝 播と、距離減衰異常(異常震域)の再現を行う。短周期地震動の生成に寄与する断層面上のミクロ構 造と断層破壊運動の不均質性の寄与を大地震の震源解析および数値シミュレーションから評価し、断 層不均質構造の不確定性に基づく強震動評価のバラツキを考慮した、実用的な強震動予測手法を確立 する。

2.地球シミュレータ向けにこれまで開発した「地震波伝播シミュレーションコード」と、「津波発生 伝播シミュレーションコード」を、新型地球シミュレータに移植し、計算コードの最適化をはかるこ とにより現在の2~3倍以上の分解能を持つ高分解能地震 津波連成シミュレーション(計算量は現行 の16~27倍)を実用化する。さらに、次世代スパコン(京速計算機)の利用を視野に入れた、数万~ 十数万 CPU 規模の大規模並列地震波動伝播と津波発生伝播計算コードの開発を進める。地震動シミュ レーションと津波シミュレーションを連結した、「地震 津波連成計算」による地震と津波の同時評価 の実現を目指す。

## (7) 平成 23 年度成果の概要:

(1) 東北地方太平洋沖の地震における強震動と長周期地震動

強震観測網 K-NET と KiK-net の 1189 観測点で記録された加速度波形を用いて、東北地方太平洋沖 地震の強震動特性を調査した。本地震により、岩手県沖から茨城県沖の広い震源域に沿う太平洋沿岸 に 0.5~1G の強い加速度が広がり、特に福島県と茨城県の 2 カ所に大きな加速度を持つ領域が現れた。 加速度波形を岩手から関東に向けて並べると、福島県沖の 2 カ所から 50 秒の時間を空けて強い地震動 が放射され、その後、茨城県の直下から 3 つめの強い地震動が放射される、マルチプルショックの震 源破壊過程が確認できた。こうした複雑な震源破壊過程により、継続時間の長い強震動が生成された ことがわかった。

最大加速度の距離減衰を求め、これに M7、M8 地震の加速度距離(断層最短距離)減衰式(Si and Midorikawa,1999)および、これを M9 地震に外挿した減衰式を当てはめると、震源距離 100km 以遠では M8 規模の加速度相当であったことがわかった。M9 地震の強震動域は M8 地震よりも何倍も広いものの、最大加速度値自体は M8 以上で頭打ちする可能性がある。

1 Gを超える強い加速度を観測した宮城県築館、塩竃、茨城県日立の3地点の加速度波形に対して 速度応答スペクトルを求めたところ、この地震の特徴として周期0.2 秒以下の極短周期地震動成分が 強く含まれていることが確認できた(図1)。木造家屋の倒壊に結びつく周期1~2秒の地震動のレベ ルは低く、たとえば1995年兵庫県南部地震で震度7を観測した鷹取や葺合地点の1/3 程度であった。 こうした強震動の周期特性は、天井の落下や斜面崩壊、液状化現象などの地盤被害・施設被害を引き 起こしたほか、木造家屋の全壊率が地震の規模に比べて小さかった原因と考えられる。

本地震により、平野部では長周期地震動が強く発生し、たとえば都心では高層ビルが最大 30~60cm 揺れ、その揺れが十数分間以上にわたって長く続く現象が確認された。地震研究所の地下に設置され ていた広帯域強震計記録を用いて速度応答スペクトルを求めたところ、周期 0.5~20 秒の広い周期帯 域で 30cm/s を超える速度応答(減衰 = 5%の場合)が確認でき、この揺れにより固有周期の短い低層 建築から固有周期の長い超高層ビルを含む、多様な構造物が一様に大きく揺れたことがわかった。た だし、都心で卓越する長周期地震動の一次固有周期である周期 6~8 秒の地震動レベル(速度応答値) は、2004 年新潟県中越地震と同程度であり、1944 年東南海地震における大手町(中央気象台)での観 測値の 1/3 程度と小さかった。これまでにも、2005 年宮城県沖地震でも、地震の規模に比べて長周期 地震動のレベルが小さかったことが指摘されている。日本海溝と南海トラフの沈み込み帯構造・堆積 層(付加体)構造の違いが、震源域から関東平野への長周期地震動の伝播特性に影響していることが 考えられる。

(2) 東北地方太平洋沖の地震により生まれた巨大津波

東北地方太平洋沖地震の津波を捉えた、釜石沖の海底ケーブル津波計記録には、地震発生直後から 海面が徐々に2 m 盛り上がり、その後5 mにまで波高が急上昇するという、二段階の津波の成長が記 録されていた (図 2 a)。 この特異な津波計記録を説明するために、震源域のプレート境界を12枚の小断層に分割し、フォ ワードモデリングに基づき各小断層のズレ動き量を見積もった。その結果、深部プレート境界(深さ 10~40km)の大きなズレ動き(10~20m程度)に加えて、さらに福島県沖の海溝寄りの浅部プレート 境界(深さ0~10km)で57mもの大きなズレ動きが起きたことが確認された(図2b)。こうした海溝 付近の浅部プレート境界の大きなズレ動き海底面を大きく隆起させ、急峻な津波を作り出すとともに、 深部プレート境界の広範囲のズレ動きが波長の長い津波を作り出し、二つが合わさることにより、沿 岸で最大40mを超えるような巨大津波が生成した可能性がわかった。

本地震により海溝寄りで大きなズレ動きが起きた場所は、1896年明治三陸地震と1677年延宝房総 沖の地震(いずれも津波地震)に挟まれた、津波地震の空白域であったと考えることもできる。本地 震において、宮城県沖の深部プレート境界から始まった始まったズレ動きが南北に拡大し、さらに海 溝寄りの浅部プレート境界にまで進行したことにより、大きなズレ動きが一気に起きたことが考えら れる。

こうした、通常の地震の連動と津波地震との大連動は、宮城県沖だけでなく、他の場所でも起きる 可能性も早急に検討する必要がある。たとえば、南海トラフでは東海・東南海・南海地震の連動発生 (1707 年宝永地震)に加えて、津波地震であった1605 年慶長地震との「大連動」の可能性ついても検 討する必要があろう。

(3) 地震ー津波同時シミュレーション法の開発と東北地方太平洋沖地震への適用

平成22年度に新規開発した、地震-津波同時シミュレーション法(Maeda et al., 2011)を用いて、 東北地方太平洋沖地震のシミュレーションを実施し、釜石沖海底ケーブル津波計の特異な津波成長過程 を検証した。東北日本の地下構造モデルと震源モデルを1kmの分解能でモデル化し、地球シミュレー タの32ノードを用いた並列計算により、震源域から地震波と水中音波が放射され、地殻変動が発生 し、そして津波が沿岸に伝わるまでの一連の現象を再現することができた(図3)、プレート境界深部 から始まったプレートのズレ動きが日本海溝寄りの浅部プレート境界に拡大し、10mを越える海底面 の隆起により5mを越えるパルス状の大津波が生成されると同時に、東北地方の海岸線が1m程度沈 降して津波が内陸まで浸水する過程が時間を追って確認できた。また、海底ケーブル津波計観測点で は、地震時に170秒をかけて沈降が起き、その直後から海水が流入が始まって、そして大津波が到来 する過程が確認できた。今後、震源近傍海底ケーブル津波計記録と地震津波同時シミュレーションに より、たとえば、海溝寄りの浅部プレート境界のズレ動き速度の正確な推定を行うなど、巨大地震の 震源過程の理解に向けた観測・シミュレーション協調研究が進むことが期待される。 (4)地殻・マントルの短波長不均質構造を評価した広帯域強震動シミュレーション

周期1秒以下の短周期地震動を含む広帯域地震動シミュレーションの実現に向け、地下構造探査からは直接推定が難しい、短波長(数百~キロメートル)不均質構造の分布特性を、1)高密度地震観 測網を用いた地震波解析と、2)地震波伝播のコンピュータシミュレーション、の両面から進める基 礎研究を、平成22年度に継続して実施した。今年度は、不均質地下構造において強い散乱を繰り返 した周波数1 Hz 以上の短周期 P 波が Transverse 成分に現れる特徴に着目し、T 成分の相対強度の周 波数・距離変化を高密度地震観測データ解析と、不均質地下構造をモデル化した地震波伝播の3次元 FDMシミュレーション結果の比較から、地殻・マントルの不均質地下構造パラメータ(相関距離、揺 らぎの強度、分布特性など)を推定を行った。標準地球モデル(多層構造)、地震波走時トモグラフィ モデル(分解能:数+km)、そして短波長不均質構造モデル(分解能:数km以下)を結合した統合 地下構造モデルを構築し、周波数1Hz 以上の広帯域強震動シミュレーションを実施して、観測波形と の比較(震幅、走時、後続層の包絡線形状、継続時間など)から、開発した広帯域強震動シミュレー ションモデルの有効性を確認した。周波数1Hz 以上の広帯域強震動シミュレーションの実現に向け、 高密度地震観測データ解析とシミュレーションによる比較検証を進め、全国の地殻・マントルの短波 長不均質構造の地域性を調べる予定である(図4)。

(8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

- Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara, Significant slip on shallow portion of the fault to develop significant tsunami of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planet and Science, Earth Planets Space, 63, doi:10.5047/eps.2011.06.005, 2011.
- Furumura, T., S. Takemura, S. Noguchi, T. Takemoto, T. Maeda, K. Iwai, and S. Padhy, Strong Ground Motions from the 2011 Off- the Pacific- Coast- of- Tohoku, Japan (Mw=9.0) Earthquake Obtained from a Dense Nation-wide Seismic Network, Landslides, 8, 3, 333-338, 2011.
- Maeda, T., K. Obara, T. Furumura, and T. Saito, Interference of long-period seismic wavefield observed by dense Hi-net array in Japan, J. Geophys. Res., 116, doi:10.1029/2011JB008464, 2011.
- Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, FDM simulation of an anomalous later phase from the Japan Trench subduction zone earthquakes, Pure Appl. Geophys., accepted, 2011.
- Utada, H., H. Shimizu, T. Ogawa, T. Maeda, T. Furumura, T. Yamamoto, N. Yamazaki, Y. Yoshitake, and S. Nagamach, Geomagnetic field changes in response to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami, Earth Planet. Sci. Lett., 10.1016/j.epsl.2011.09.036, 2011.
- Maeda, T., and T. Furumura, FDM Simulation of Seismic Waves, Ocean Acoustic Waves, and Tsunamis Based on Tsunami-Coupled Equations of Motion, Pure Appl. Geophys., accepted, 2011.
- Takemoto, T., T. Furumura, T. Saito, T. Maeda, and S. Noguchi, 2012, Spatial- and frequency-dependent properties of site amplification factors in Japan derived by the coda normalization method, Bull. Seism. Soc. Am., accepted.

## (9)平成 24 年度実施計画の概要:

- (1)東北地方太平洋沖地震の地震津波同時シミュレーションを、京コンピュータを用いて高解像度 (250m メッシュモデル)に実施し、巨大地震の震源破壊過程と強震動、長周期地震動、津波の成因を 詳しく検討する。
- (2) 東北地方太平洋沖地震の発生を踏まえ、南海トラフ地震の最大級のシナリオを見直し、スパコン を用いた地震動と地殻変動、津波を再評価シミュレーションを行う。
- (3) 強震動評価の高度化に向けて、全国の表層地盤の増幅率と周波数依存性を、全国の高密度地震観 測網データを用いて、コーダ波やS波直達波について詳しく評価する。

(10)実施機関の参加者氏名または部署等名:

古村孝志、纐纈一起、三宅弘恵

他機関との共同研究の有無:有

・強震観測については地方自治体等との共同研究

・強震動シミュレーションは、海洋研究開発機構地球シミュレータセンター、および東大情報基盤 センターとの共同プロジェクトによる

(11)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:地震予知研究推進センター 電話:03-5841-5712

En: 05 5041 5712

e-mail: yotik@eri.u-tokyo.ac.jp

URL : http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html

(12)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名:古村孝志
所属:東京大学地震研究所 地震火山災害部門



図1. 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動(速度応答スペクトル)

震源近傍の震度7相当の地点の強震動と、兵庫県南部地震時の鷹取、葺合地点の強震動の速度応答スペクトルの 比較



図2. 海底ケーブル津波計記録から推定した 2011 年東北地方太平洋沖の地震断層滑りモデル 釜石沖海底ケーブル津波計記録(2点)のフォワードモデリングから推定されたプレート境界の滑り量と、津波 波形のシミュレーション結果の一致度(Maeda et al., 2011)。



図3. 東北地方太平洋沖地震の地震-津波同時シミュレーション 地震発生から5分、15分、40分後の地震動(海中音波)海底地殻変動、津波の発生伝播の様子。



図4. 地形および短波長不均質構造を組み込んだ広帯域地震動シミュレーション F-net 広帯域地震観測波形と、シミュレーションモデルおよび計算波形の比較、(a) 成層構造モデル、(b) 地形付加 モデル、(c) 短波長不均質構造付加モデル。