

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540452

研究課題名(和文) 東北地方太平洋沖地震の破壊過程：陸海統合3次元構造モデルに基づく最良解推定

研究課題名(英文) Rupture Process of The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Analysis by using Green's Tensor Waveforms

研究代表者

岡元 太郎 (Okamoto, Taro)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40270920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程解析と、そのための手法に関する基礎的な研究を行った。解析には遠地実体波記録と近地強震動記録を利用した。強震動理論波形は陸海統合3次元構造モデルをもとにして3次元差分法を利用して計算した。遠地実体波理論波形は2.5次元差分法を利用して計算した。理論波形の妥当性は小地震解析により確認した。破壊過程解析には波形インバージョン法を適用した。得られたすべり分布は震源付近にすべり量の大きな領域を持ち、海溝近くのすべり量は相対的に小さいものであった。このことから巨大津波を発生させた海溝近傍での変形は強い地震波を放射しなかったことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We analyzed "seismic" rupture process of the March 11, 2011 Tohoku-Oki earthquake (GCMT Mw9.1) by using a non-linear multi-time-window waveform inversion analysis. We used Green's tensor waveforms computed for laterally heterogeneous structure models: full 3D model was used for strong-motion Green's tensor waveforms, and 2.5D structure models were used for teleseismic P-wave Green's functions. The inferred slip distribution was characterized by large slips near the hypocenter with maximum slip of about 37 m. The near-trench slips were inferred to be relatively small. An isolated slip region was also identified at deep beneath the coast of Fukushima prefecture. On the other hand, large amount of "artificial" slips were inferred close to the trench when we apply 1D Green's functions that did not incorporate the effect of realistic lateral heterogeneity. Our result suggests the trench-ward large deformation that caused large tsunamis did not radiated strong seismic waves.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：東北地方太平洋沖地震 破壊過程 3次元構造 差分法 GPU計算 波形インバージョン

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.1、図1) 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被害をもたらした。そのため、巨大地震の発生条件や巨大津波励起の仕組みを解明することが地球科学においてきわめて重要な課題となっている。

この巨大地震について地震波解析から得られた破壊過程では、主要なすべり領域の位置が海溝寄りであるか、陸寄りであるかという点で、研究者間で相違が見られた。この相違は地震の全体像を左右するという点で重要である。つまり、沈み込み帯では海溝側から陸側にかけてプレート境界物質が堆積物から地殻・マントル物質へと急変し、プレート境界の性質も急変する。そのため主要なすべり領域が海溝寄りの堆積物の多い場所にあったか、陸寄りの地殻・マントル物質にあったかによって地震の描像は大きく変わることになる。

そのため研究開始当初では、東北地方太平洋沖地震の破壊過程を高精度で確定することが大きな課題の一つとなっていた。

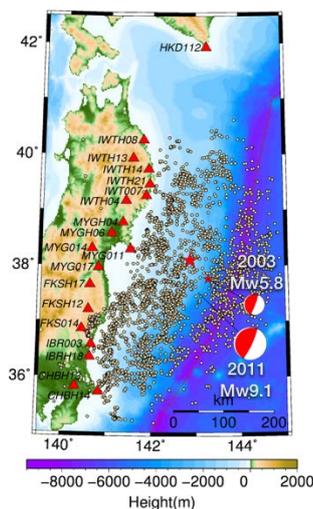


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の本震後1ヶ月間の余震分布。本震の震央 (大きな星マーク) と2003年の小地震の震央 (Mw5.8、小さな星マーク)、およびそれぞれのGCMT解も示した。三角は本研究で観測データを用いた強震動観測点を示す。余震データは気象庁による。

### 2. 研究の目的

上記のような破壊過程解析結果に現れる相違の原因の一つには、解析で用いるグリーン関数波形が正しくないことがあると考えられる。グリーン関数波形の計算には、水平方向の不均質性を無視した単純な地球モデルが広く使われている。しかし、沈み込み帯では強い横方向不均質性 (図2) があり、地震波波形にはその影響が大きく現れる (図3)。そのため、この影響を無視すると破壊過程解析結果の信頼性が低下する可能性がある [参考

文献1]。それでも単純なモデルが使われるのは、不均質性を考慮した波形計算は計算量が膨大で実用になりにくいためである。

そこで本研究では、東日本地域の陸域・海域を統合した3次元構造モデルに基づいてグリーンテンソル波形を生成し、東北地方太平洋沖地震の破壊過程の最良解を推定することを目的とする。大規模地震波伝播シミュレーションには独自に開発した、GPUによって演算を加速する手法を利用する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 陸海統合3次元構造モデルの構築

既存の構造モデルでは、陸域モデルと海域モデルとが別々に構築されてきたため、境界面の重複等の矛盾も存在する。そこで本研究では既存の各種モデルを総合して東日本地域に関して陸域と海域を統合した陸海統合3次元構造モデルを作成する。

#### (2) グリーンテンソル波形の生成

上記の3次元構造モデルをもとにして大規模3次元差分法計算により強震動グリーンテンソル波形を生成する。同様に2.5次元差分法計算によって遠地実体波グリーンテンソル波形を生成する。

#### (3) グリーンテンソル波形の検証

上記のグリーンテンソル波形を利用して点震源で近似できる小地震に関する波形解析を行う。そして観測波形の特徴を計算波形が再現できているかを検証する。

#### (4) 破壊過程の推定

3次元構造モデル内に東北地方太平洋沖地震の断層面を設定して、波形インバージョンにより破壊過程を推定する。

### 4. 研究成果

#### (1) 陸海統合3次元構造モデルの構築

本研究では複数のモデルをコンパイルして、関東地域から北海道南端 (襟裳岬付近) までを包含する一つの3次元構造モデルを構築した。コンパイルに利用した各モデルを表1にまとめた。また鉛直断面図を図2に示した。この構造モデルには、陸上地形・海底地形・海水層・不規則厚さ堆積物・不規則厚さ地殻・太平洋プレート・フィリピン海プレート、の各構成要素を全て含む。また非弾性減衰構造も取り入れた。

|               |       |
|---------------|-------|
| 陸上・海底地形モデル    | 参考文献5 |
| 深部地盤モデル (堆積物) | 参考文献6 |
| 陸地地殻          | 参考文献7 |
| 太平洋プレート       | 参考文献7 |
| フィリピン海プレート    | 参考文献8 |

表1 構造モデルの構成要素。

強震動グリーンテンソル波形の生成では、この陸海統合3次元構造モデルをそのまま3次元差分法計算に適用する。一方、遠地実体波グリーンテンソル波形の生成では、上記の3次元構造モデルから断層の傾斜方向に沿っ

た 23 枚の鉛直断面を切り出して、それぞれを 2.5 次元構造モデルとして設定した。そして各断面について 2.5 次元差分法を適用して波形計算を行った。つまり遠地実体波の計算は完全な 3 次元計算ではないが、複数の異なる 2.5 次元構造モデルを海溝に沿った方向に設定することによって海溝の構造の 3 次元性を取り入れたことになる。同時に、我々が本研究で構築した陸海統合 3 次元構造モデルをもとにして 2.5 次元構造モデルを設定したので、強震動波形と遠地波形の双方で整合性が取れた解析を行えることになる。

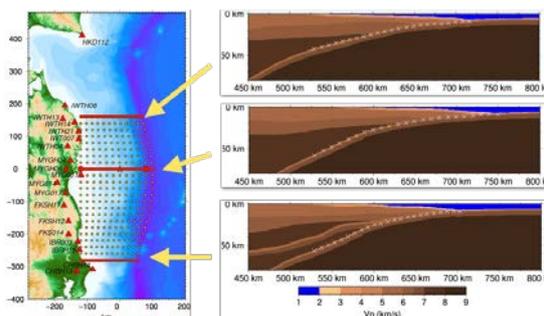


図 2 左図)3次元差分法の計算領域平面図。断層面を構成する 12×23 個の格子点も示した。右図) 矢印で示した線で取った鉛直断面における P 波速度の分布図。

## (2) グリーンテンソル波形の生成

強震動グリーンテンソル波形の計算には、我々が開発した大規模並列 GPU 対応の 3 次元差分法 [参考文献 2, 3] を利用する。これは GPU (Graphics Processing Unit) を演算加速器として利用することにより、計算を高速化するものである。

| 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  | 約9000 s (TSUBAME-2.5) |

表 2 本研究で実施した 3 次元差分法計算の代表的なパラメータ。

この計算は 3 次元なので計算領域サイズが大きくなり、演算としても大規模なものになる。そこで計算には、東京工業大学・学術国際情報センターの TSUBAME-2.0 およびこれをアップグレードした TSUBAME-2.5 スーパーコンピュータを利用した。これらは 1 ノードあたり 3 基の GPU を搭載したクラスタシステムである。代表的な計算パラメータを表 2 に示す。本研究では相反関係を用いてグリーンテンソル波形を生成するので、強震動波形の一

成分ごとにこのような計算を行う。

遠地実体波グリーンテンソル波形の計算には、我々が開発した 2.5 次元差分法 [参考文献 4] を適用する。

## (3) グリーンテンソル波形の検証

この陸海統合 3 次元構造モデルによって生成したグリーンテンソル波形の妥当性検討のために、点震源で近似できる小地震について観測波形と計算波形との比較を行った。小地震を用いるのは有限断層モデルの複雑性を回避して、単純かつ少数のパラメータのみを使うことによる。小地震としては、東北地方太平洋沖地震の震源域で海溝に近い場所で発生した低角逆断層型のものを選択した (2003 年 11 月 3 日、Mw5.8、図 1)。

ここでは点震源の震源時間関数とモーメント・テンソルを同時に推定する非線形逆問題手法 [参考文献 9] を適用する。さらに点震源に関する格子探索を行って最適な点震源位置を推定する。なおグリーンテンソル波形の検証が目的なので、強震動速度波形と遠地実体波変位波形の両方を同時に用いる。

このようにして得られた最適点震源を用いて生成した計算波形と、対応する観測波形、および比較のために 3 次元不均質性を含まない標準的な 1 次元地球モデル (深さ方向のみ物性に変化するモデル) を用いて生成した計算波形の例を図 3 に示す。

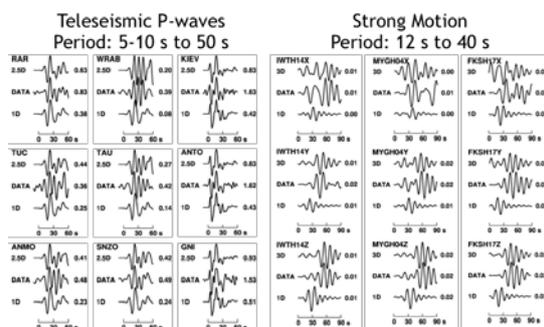


図 3 観測波形と計算波形の比較。左側 3 列は遠地実体波変位波形で、各観測点あたり 3 つの波形のペアを 9 個の観測点について示した。右側 3 列は 3 個の観測点について、上から水平成分 2 組と上下動成分 1 組について強震動速度波形をペアにして示した。波形は、DATA が観測波形、2.5D (遠地波形) と 3D (強震動波形) が 3 次元構造モデルをもとにして生成した計算波形、1D が 1 次元構造モデルをもとにして生成した計算波形を示す。

図 3 を見ると、遠地実体波では幾つかの観測点で大きな後続波が現れているが (図 3 左側の「DATA」)、2.5 次元計算波形はこれらの大きな後続波の位相・振幅の両方を良く再現している (図 3 左側の「2.5D」)。また強震動波形についても主要な表面波群の位相・振幅が良く再現されている (図 3 右側の「3D」)。

一方、1次元構造モデルを用いた計算波形(図3の「1D」)は、これらの観測波形の特徴を再現できていない。

このように本研究で設定した陸海統合3次元構造モデルをもとにした計算波形は小地震の観測波形の特徴を良く再現できていることから、グリーンテンソル波形が以降の破壊過程解析に利用できる妥当性があることを確認できた。一方、一次元構造モデルに基づいて生成したグリーンテンソル波形は観測波形の特徴を再現できないことから、破壊過程解析に利用する上で問題を生じる可能性があると言える。

#### (4) 破壊過程の推定

3次元構造モデル内に東北地方太平洋沖地震の断層面を設定して、波形インバージョンにより破壊過程を推定する。本研究では図2に示した12×23個の格子点に点震源を置いて、各点震源のすべり時間関数を推定した。データは遠地実体波(P波)変位波形が31個、強震動速度波形が53個、合計84個の波形データを用いた。小地震解析結果をもとにして、遠地実体波波形の周期帯は5-250秒、強震動波形の周期帯は12-100秒とした。逆問題解析には我々が開発した非負非線形解析手法[参考文献1]をマルチタイムウィンドウ法に拡張して適用した。各点震源のすべり時間関数は幅8秒の三角パルス重ね合わせで表現し、三角パルス個数(=未知数個数)は点震源あたり20個とした。

このようにして3次元構造モデルをもとにして生成したグリーンテンソル波形を用いて得られたすべり分布は、震源付近にすべり量の大きな領域を持ち、海溝近くのすべり量は相対的に小さいものであった。また破壊開始から約2分後に福島県海岸付近の深部(約51km)に顕著な破壊領域(サブイベント)が見出された。

一方、1次元構造モデルによるグリーンテンソル波形を用いた場合には、海溝近傍に大きなすべりが現れる結果となった。また2分後の深いサブイベントは抽出されなかった。

これらの結果から、次のようなことを結論した。①グリーンテンソル波形の相違により、解析結果に違いを生ずる場合がある。1次元グリーンテンソル波形では小地震の観測波形を再現できなかったことを考えると、海溝近傍に大きなすべり量が現れる解はグリーンテンソル波形の不備に起因する artefact である可能性が高い。②海溝近傍でのすべり量が相対的に小さいことから、巨大津波を発生させた海溝近傍での変形が強い地震波を放射しなかったことが示唆された。

なお上記(4)に述べた最終結果は、日本地震学会2014年秋季大会、第14回日本地震工学シンポジウム、American Geophysical Union 2014 Fall Meetingなどの学会で発表し、論文を準備中である。

謝辞 防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの強震動波形データを利用させていただきました。また、IRIS Data Centerを利用して遠地実体波波形を収集しました。気象庁震源データとグローバルCMTプロジェクトによるGCMT解を利用させていただきました。

#### 参考文献

- [1] Okamoto, T. and Takenaka, H., *Earth Planets Space*, **61**, e17-e20, 2009.
- [2] Okamoto, T. et al., *Earth Planets Space*, **62**, 939-942, 2010.
- [3] Okamoto, T. et al., *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering*, 375-389, Springer-Verlag, 2013.
- [4] Takenaka, H. and Okamoto, T., in *Seismic Waves, Research and Analysis*, ed. Kanao, M., Intech, 326 pages, Chapter 14, pp.305-326, 2012.
- [5] Kisimoto, K., *Geological Survey of Japan, Open-file Report*, No. 353, 2000.
- [6] Fujiwara, H. et al., *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, No.337, 2009.
- [7] Baba, T. et al., *Abstr. Japan Geoscience Union Meet.*, S111-006, Makuhari, Japan, 2006.
- [8] Nakamura, T. et al., *Abstr. Seism. Soc. Japan, P1-06, Hiroshima*, Japan, 2006.
- [9] Okamoto, T. and Takenaka, H., *Advances in Geosciences*, **13** (Solid Earth), p.215-p.229, World Scientific Publishing, 2009.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計17件)

- ① Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Tatsuhiko Hara, Takeshi Nakamura, and Takayuki Aoki, Seismically Inferred Rupture Process of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake by Using Data-Validated 3D and 2.5D Green's Tensor Waveforms, S33B-4514, American Geophysical Union Fall Meeting, Moscone Center (Moscone South), San Francisco, California, USA, 2014年12月17日.
- ② 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之、地震波から推定される2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程:不均質構造モデルにもとづくグリーン関数を用いたインバージョン、第14回日本地震工学シンポジウム、OS1-Sat-AM-5、幕張メッセ(千葉県千葉市)、2014年12月6日.
- ③ 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之、不均質構造モデルによる地震波グリーン関数波形を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程(4)、日本地震学会2014年秋季大会、A31-01、朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター(新潟市)、

- 2014年11月26日.
- ④ Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura and Takayuki Aoki, Large-Scale Multi-GPU Simulation of Seismic-Wave Propagation for The Shallow Subduction-Zone Earthquakes, AOGS 11th Annual Meeting, SE36-D2-PM1-CA-003 (SE36-A019), Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan, 29 Jul. 2014.
- ⑤ Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Tatsuhiko Hara, Takeshi Nakamura, and Takayuki Aoki, Rupture Process of The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Inferred by an Inversion Using 3D Strong-Motion and 2.5D Teleseismic Green's Tensor Waveforms, AOGS 11th Annual Meeting, SE30-D1-AM1-CA-001 (SE30-A016), Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan, 28 Jul. 2014.
- ⑥ 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, 3次元強震動・2.5次元遠地理論波形により地震波波形データから推定される東北地方太平洋沖地震の破壊過程、日本地球惑星科学連合 2014年大会、SSS30-03、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)、2014年4月28日.
- ⑦ Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Tatsuhiko Hara, Takeshi Nakamura and Takayuki Aoki, Large-scale multi-GPU simulation of seismic-wave propagation and its application to analysis of the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, COMPSAFE 2014, 10D-1 (Extended Abstracts of COMPSAFE2014, pp. 678-681) 2014年4月16日(仙台市仙台国際センター).
- ⑧ 岡元太郎, 2013. 大規模並列GPU計算による地震波伝播シミュレーション、日本計算工学会第6回S&V(Simulation & Visualization)研究会、中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区)、2013年11月26日.
- ⑨ 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, 2013. 3次元グリーンテンソル波形による2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程(2)、日本地震学会2013年秋季大会、P1-62、神奈川県民ホール・産業貿易センター(神奈川県横浜市)、2013年10月7日.
- ⑩ 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, 2013. 3次元グリーンテンソル波形によるインバージョンで推定した2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程、日本地球惑星科学連合2013年大会、SSS28-09、幕張メッセ国際会議場(千葉県幕張市)、2013年5月23日.
- ⑪ 岡元太郎・竹中博士・青木尊之, 2013. 地震学における大規模・高性能GPU計算、日本地球惑星科学連合2013年大会、STT59-03、幕張メッセ国際会議場(千葉県幕張市)、2013年5月20日.
- ⑫ Okamoto, T., H. Takenaka, T. Hara, T. Nakamura, and T. Aoki, 2012. Rupture Process of The 2011 Tohoku-Oki Earthquake by a Waveform Inversion Using Green's Functions Computed For Laterally Heterogeneous Structure Model, American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, S43H-06, San Francisco, USA, 2012年12月6日.
- ⑬ Okamoto, T., H. Takenaka, T. Hara, T. Nakamura, and T. Aoki, 2012. Large-scale simulation of seismic-wave propagation using GPU supercomputer for the study of shallow subduction zone earthquakes, APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES) 8th International Workshop: Advances in Simulation of Multihazards, 9546, Maui, Hawaii, 2012年10月24日.
- ⑭ 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, 2012. 2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程解析のための3次元近地グリーンテンソル波形計算、日本地震学会2012年秋季大会、A21-07、函館市民会館・函館市民体育館(北海道函館市)、2012年10月18日.
- ⑮ 岡元太郎・竹中博士・原辰彦, 2012. 2.5次元差分法グリーン関数を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程解析、日本地球惑星科学連合2012年大会、SSS39-13、幕張メッセ国際会議場(千葉市)、2012年5月25日.
- ⑯ 岡元太郎・竹中博士・中村武史・青木尊之, 2012. GPU計算による2011年東北地方太平洋沖地震の地震動大規模シミュレーション、日本地球惑星科学連合2012年大会、SSS37-10、幕張メッセ国際会議場(千葉市)、2012年5月21日.
- ⑰ Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, 2012. GPU-accelerated parallel computing for simulation of seismic wave propagation, GPU Technology Conference, S0352, San Jose, USA, 2012年5月16日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡元 太郎 (OKAMOTO, Taro)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 40270920

### (2) 研究分担者

竹中 博士 (TAKENAKA, Hiroshi)  
岡山大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号: 30253397

### (3) 連携研究者

杉岡 裕子 (SUGIOKA, Hiroko)  
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス  
研究分野・主任研究員  
研究者番号: 0035918