

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22710172

研究課題名（和文） 震源断層の幾何形状と地下構造の三次元性による強震動生成機構の解明

研究課題名（英文） Generation Process of Strong Ground Motion Considering Three-Dimensional Source Fault Geometry and Underground Structure

研究代表者

浅野 公之（ASANO KIMIYUKI）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：80452324

研究成果の概要（和文）：震源断層の三次元形状と地下の三次元速度構造という強震動生成に関わる2つの重要な三次元性に着目した。震源断層幾何形状を時空間的なすべり分布と同時推定する非線形インバージョン解析法を新たに開発した。三次元差分法により、既存の全国規模三次元速度構造モデルによる理論グリーン関数を計算し、観測点間グリーン関数との比較を行った。2011年東北地方太平洋沖地震について、プレート境界面の三次元形状と速度構造を考慮し、4つの強震動生成領域からなる震源モデルを構築した。

研究成果の概要（英文）：This project focuses on two important “three-dimensional effects” related to strong ground motion generation during earthquakes: the three-dimensional geometry of the source fault and the three-dimensional velocity structure model. New kinematic source inversion analysis method is developed to estimate the spatiotemporal slip distribution together with unknown fault geometry from observed strong motion records. Theoretical Green’s functions simulated from the present nation-wide three-dimensional crustal velocity structure models are compared with the observed inter-station Green’s functions deduced by the seismic interferometry technique. The source model composed of four Strong Motion Generation Areas of the 2011 Tohoku earthquake is estimated considering the three-dimensional geometry of the plate interface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：強震動地震学

科研費の分科・細目：自然災害科学

キーワード：地震、強震動、震源破壊過程、震源断層、強震動生成領域、三次元地下構造

1. 研究開始当初の背景

大地震の際に観測される強震動は、一般に震源特性（震源でどのように破壊し、地震波が生成されたか）、伝播経路特性（震源から観測地点までの地下構造の影響）及びサイト

特性（観測点直下の地盤による地震波の増幅・減衰などの影響）の3つの効果によってもたらされる。

1980年代以降、計算機能力と地震観測システムの発展に伴って、強震波形や遠地地震

波形記録から、大地震の震源破壊過程（断層のずれの時空間発展）を推定する震源過程解析（震源インバージョン）が国内外で広く行われるようになってきた。研究代表者も、近年発生した2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島地震などの大地震について、強震波形記録等を用いた震源インバージョン解析により詳細な震源過程を推定し、観測された強震動との関係を解明するための研究に取り組んできていた。

また、震源過程解析などで得られた震源断層モデルが蓄積されることにより得られた地震学的な知見（例：地震規模とアスペリティの面積の関係など）をもとに、震源断層モデルと地下構造モデルを設定して計算された地震波を用いる強震動予測手法が広く用いられている。

震源断層そのものに関しては、近年の国内の被害地震では、各機関による稠密余震観測とトモグラフィ解析によって再決定された詳細な余震分布から、本震の震源断層面は必ずしも単純な平面ではなく、走向や傾斜が空間的に変化する複雑な形状を有していることが明らかになりつつある。しかし、詳細な余震分布の推定には長期間の余震観測や研究を必要とする。強震波形や遠地地震波形、地殻変動などを用いた震源過程解析では1枚ないし複数枚の平面断層の位置や走向・傾斜をあらかじめ仮定し、その面上での時空間的なすべりの進展過程が求められていることが多い。平面断層を仮定して断層面上のすべり分布を推定した場合、局所的な走向や傾斜が断層面全体の平均的な走向・傾斜と異なることによる影響は、すべり方向やすべり量の誤差としてインバージョンの解に現れる。震源断層に近い地域での強震動は、震源断層の微細な不均質構造や断層面と観測地点との間の正確な位置関係の影響を強く受けるため、単純な平面断層の仮定では震源ごく近傍でしばしば見られる破壊的強震動の震動方向や振幅などの震動特性を十分には説明できていない場合もみられていた。

このことから、余震分布などの第三者的情報とは独立に、波形解析に基づいて自ら震源断層面の幾何形状を推定できる手法の開発が必要とされる。

地下構造モデルに関しては、従来の震源過程解析では一つないしいくつかの近似的な一次元地下構造モデル（地震波速度などのパラメータが深さ方向のみに変化する地下構造モデル）を仮定し、理論的手法によりグリーン関数を計算されていることが多い。より現実に近い三次元地下構造モデル（堆積層の厚さの三次元的な分布やプレートの構造などを含むモデル）の有用性は先行研究から明らかではあるが、詳細な三次元地下構造モデルを構築するためには、多額の費用をかけて

地質資料の収集や多種多様な物理探査を行う必要があり、研究者レベルで新規に三次元地下構造モデルを作成することは容易ではない。研究代表者らはその困難を克服するため、解析に用いる個別の観測点毎に一次元地下構造を余震などの波形モデリングに基づいてモデル化し、それらを震源過程解析におけるグリーン関数計算のために用いる手法を提案した。しかし、一次元的なアプローチだけでは二・三次元的な構造が波動場に及ぼす影響を完全には再現できず十分とはいえない。2009年度には、強震動計算を目的とした全国地下構造モデルの初版が地震本部から公表され、一定のレベルの精度を保った全国規模の三次元地下構造モデルを誰もが利用できる環境になってきた。それに応じて震源過程解析と強震動の研究も発展させていくことが必要になっていた。

2. 研究の目的

本研究課題は、観測された強震波形データに基づく新しい震源過程解析手法を構築し、「震源断層の三次元形状」と「地下構造の三次元構造」の2種類の三次元性と強震動（地震被害に関わる周波数帯で強い揺れをもたらす地震波）生成機構との関係を解明する。これらを解明することにより、地震被害の集中する震源断層近傍域での強震動の予測精度向上と断層の幾何形状と断層破壊の物理的理解の進展に貢献することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者がこれまで用いてきた震源過程解析のための計算機コード群をベースにして、大地震時の震源断層面上でのすべりの時空間分布と同時に震源断層の幾何形状を波形解析に基づく非線形最適化手法により推定するための機能を拡張した解析手法と計算機コードを開発する。新たに震源断層面の傾斜や走向の空間変化を定義する変数をモデルパラメータに追加することにより、任意の断層面形状をなるべく少ない変数で表現できるよう適切な断層面モデルの定義手法を検討する。本研究課題で開発した手法を実際の大地震の強震波形記録に適用する。ここでは、余震分布の解析などから、震源断層の傾斜と走向が空間方向に変化していることが指摘されている2008年岩手・宮城内陸地震を適用対象とする。インバージョンの解の適切性、安定性は、赤池のベイズ型情報量規準（ABIC）を用いて評価する。

(2) (1)の波形解析により推定された震源断層の三次元形状が、本研究とは独立に得られ

た高精度の余震分布や地殻構造探査の結果などどのように対応しているか比較検証する。

(3) 三次元地下構造モデルを考慮した震源過程解析のためのグリーン関数構築手法の解析フローを策定する。広帯域連続記録に地震波干渉法を適用し、三次元地殻・地盤速度構造モデルの説明力検証を行うとともに、三次元速度構造モデルを震源過程解析等に導入するための地震波動計算等の計算機コードを整備する。

(4) 2011年東北地方他併用沖地震を対象として、巨大プレート境界型地震の震源破壊過程のモデル表現について、既存の震源モデル化手法の適用性の検証を行いつつ、適切な震源モデル像について検討する。

4. 研究成果

(1) 震源断層面の三次元的な幾何形状を時空間のすべり分布と同時推定する新しい震源過程解析手法を定式化し、計算機コードを開発した。ここでは、震源断層面の形状を定義するため、control point における走向と傾斜の少数のパラメータをモデルパラメータに追加することで実現した。本手法の妥当性・有効性を確認するため、モデル断層による予測波形を用いたテストを行った後、この手法を2008年岩手・宮城内陸地震の強震記録データセットに実際に適用した。

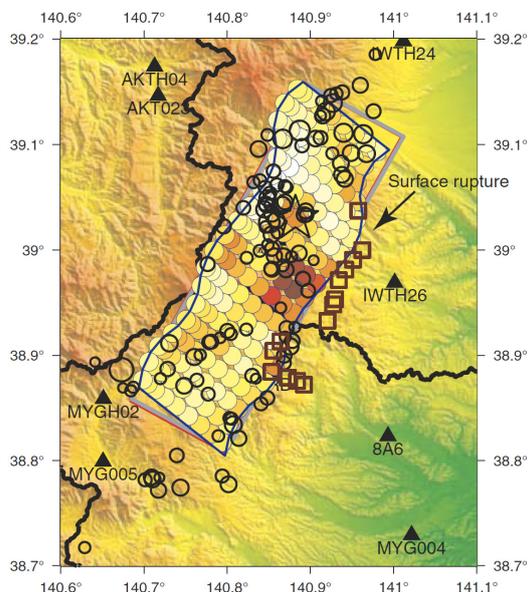


図1 本研究課題で開発した解析手法を2008年岩手・宮城内陸地震に適用した結果（色がすべり量の大きさを表す。○は余震、□は地表変位観測地点）

また、震源インバージョン解析に関連して、強震観測点やGPS観測点の空間分布が限られ

ている2007年能登半島地震を題材に、震源インバージョンにより得られるすべり分布の不確かさについて、ブートストラップテストにもとづく検討を行った。

(2) (1)により得られた2008年岩手・宮城内陸地震の震源断層面のすべりの大きい領域での走向はCMT解に基づく平面断層モデルと似ており、本研究課題で開発した手法により震源断層面の幾何形状が適切に推定されていることを確認した。この結果として得られた断層幾何形状の特徴は、既往文献において稠密余震観測によって再決定されている震源分布から見られる震源断層面のイメージと調和的であった。

(3) 三次元速度構造モデルを震源インバージョンに取り込むため、single force や double couple force による理論地震動を差分法で計算するためのコードを整備した。側方及び底面境界にM-PML境界条件を導入するとともに、MPI及びOpenMPを用いたハイブリッド並列とした。

上記コードを用い、Iwata et al. (2008)による西南日本地殻速度構造モデルや地震調査研究推進本部による全国1次三次元地下構造モデル(暫定版, Koketsu et al., 2012)を用い、理論グリーン関数を計算した。F-net連続記録を用いた地震波干渉法により得られる観測点間グリーン関数と理論グリーン関数とを比較し、上記の速度構造モデルの説明力を検証した。

(4) 超巨大プレート境界型地震である2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)を対象として、経験的グリーン関数法を用いた広帯域強震動シミュレーションを行い、4つの強震動生成領域からなる震源モデルを同定した。震源のモデル化に際して、既存の物理探査に基づくプレート境界面の三次元形状と速度構造を考慮することで、強震動生成領域の配置を精度よく決定することができた。この震源モデルにより東日本沿岸域で観測された周期0.1~10秒の帯域の強震動をよく再現することができた。

強震動生成領域は宮城県沖に2つ、福島県沖~茨城県沖に2つ存在する。これらは、海溝軸付近の大すべり域とは異なり、破壊開始点(震源)よりも深い領域(深さ約30km以深)に分布している。本地域での過去の地震活動との比較を行い、2011年東北地方太平洋沖地震の個別の強震動生成領域は、1930年代にそれぞれ個別のM7級プレート境界地震として活動したアスペリティに対応することが明らかとなり、強震動生成領域の空間分布の予測可能性に関する重要な知見が得られた。

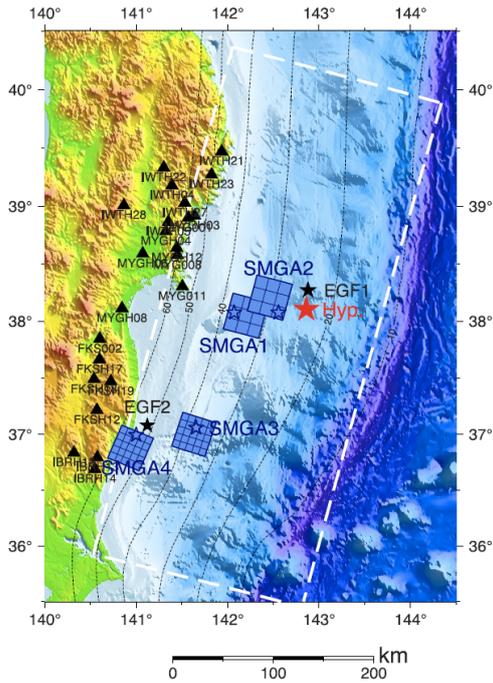


図2 2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成領域のモデル (Asano and Iwata, 2012)

2011年東北地方太平洋沖地震の最大余震である2011年3月11日15時15分の茨城県沖の地震(M_w 7.9)の震源破壊過程を強震記録及びGPS変位記録のジョイントインバージョンにより、推定した。この地震の破壊過程と沈み込む海山、周囲のプレートとの関係を議論し、この地震の破壊過程が海山やフィリピン海プレートの空間配置によって影響を受けていることを明らかにした。

海溝型巨大地震の強震動予測における断層パラメータ設定に必要な断層面積、アスペリティ総面積、強震動生成域の地震規模に対するスケーリングについて検討した。これらはいずれも既往のM7~8の海溝型地震から得られたスケーリング関係式をM9の超巨大地震に延長することにより適用可能であることを確認した。

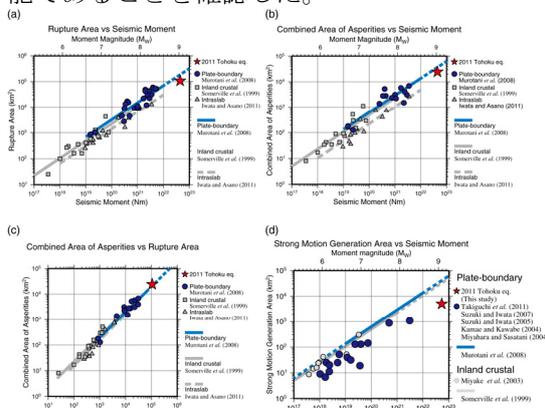


図3 海溝型プレート境界地震のスケーリング関係 (Asano et al., 2013)

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)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Kubo, H, K. Asano, and T. Iwata, Source-rupture process of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, earthquake (Mw7.9) estimated from the joint inversion of strong-motion and GPS data: Relationship with seamount and Philippine Sea Plate, Geophysical Research Letters, 40 巻、印刷中、2013、査読有
DOI: 10.1002/grl.50558
- ② Asano, K. and T. Iwata, Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1–10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth, Space and Planets, 64 巻、1111–1123、2012、査読有
DOI: 10.5047/eps.2012.05.003
- ③ Asano, K. and T. Iwata, Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2011 Tohoku, Japan, Earthquake, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, paper no. 0934、2012、査読有
- ④ Asano, K. and T. Iwata, Source Rupture Process of the 2007 Noto Hanto, Japan, Earthquake Estimated by the Joint Inversion of Strong Motion and GPS Data, Bulletin of the Seismological Society of America, 101 巻、2467–2480、2011、査読有
DOI: 10.1785/0120100254
- ⑤ Asano, K., A. Iwaki, and T. Iwata, Estimation of Interstation Green's Functions in the Long-Period Range (2–10s) from Continuous Records of F-net Broadband Seismograph Network in Southwestern Japan, Proceedings of the 4th IASPEI/IAEE International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, paper no. 2.21、2011、査読無

[学会発表] (計12件)

- ① Iwata, T. and K. Asano, Source Model of Huge Subduction Earthquakes for Strong Ground Motion Prediction, American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, 2012年12月5日、アメリカ合衆国サンフランシスコ市モスコーンセンター
- ② Asano, K. and T. Iwata, Strong Ground Motion Generation during the 2011

- Tohoku-Oki Earthquake、American Geophysical Union 2011 Fall Meeting、2011年12月8日、アメリカ合衆国サンフランシスコ市モスコーンセンター
- ③ 浅野公之・岩田知孝、2011年東北地方太平洋沖地震の広帯域強震動生成と震源破壊過程の関係、日本地震学会2011年秋季大会、2011年10月12日、静岡コンベンションアーツセンター
- ④ 浅野公之・岩田知孝、経験的グリーン関数法による2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月26日、幕張メッセ国際会議場
- ⑤ 浅野公之・岩田知孝、震源インバージョン結果の不確かさに関する検討—2007年のと半島地震を例に一、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月23日、幕張メッセ国際会議場
- ⑥ Asano, K., and T. Iwata, Analysis of Strong Ground Motion Records from the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan Earthquake, Seismological Society of America 2011 Annual Meeting、2011年4月15日、アメリカ合衆国メンフィス市メンフィスマリオット
- ⑦ Asano, K., A. Iwaki, and T. Iwata, Validation of Velocity Structure Model for Long-Period Ground Motion Simulation in Southwestern Japan Using Green's Functions Extracted by Seismic Interferometry, Seismological Society of America 2011 Annual Meeting、2011年4月13日、アメリカ合衆国メンフィス市メンフィスマリオット
- ⑧ Asano, K. and T. Iwata, Detailed Slip Distribution and Fault Geometry of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Northeast Japan (M_w 6.9) Earthquake Directly Obtained from Strong Motion Records, American Geophysical Union 2010 Fall Meeting、2010年12月16日、アメリカ合衆国サンフランシスコ市モスコーンセンター
- ⑨ 浅野公之・岩田知孝・山下佳穂里、地震動予測用速度構造モデル検証のためのF-net 広帯域連続記録を用いた地震波干渉法による西南日本の地殻速度構造の推定(2)、日本地震学会2010年秋季大会、2010年10月27日、広島国際会議場
- ⑩ Asano, K. and T. Iwata, A Kinematic Slip Inversion Method Including Unknown Source Fault Geometry by Strong Motion Data, Workshop on Earthquake Source Dynamics 2010、2010年6月28日、スロバキア共和国シモレニツァ会議場
- ⑪ Asano, K. and T. Iwata, Source Model and

- Strong Motion Simulation of the 2009 Suruga Bay Earthquake, Japan (M_{JMA} 6.5)、Western Pacific Geophysics Meeting 2010、2010年6月25日、中華民国台北市臺北國際會議中心
- ⑫ 浅野公之・岩田知孝、強震波形から震源断層形状と震源破壊過程を同時に推定する試み、日本地球惑星科学連合2010年大会、2010年5月24日、幕張メッセ国際会議場

[図書] (計1件)

- ① Asano, K., H. Sekiguchi, T. Iwata, W. Suzuki, S. Aoi, and T. Kunugi, Source Process of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Natural Disaster Science and Mitigation Engineering: DPRI Reports Vol.1、Springer、印刷中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野 公之 (ASANO KIMIYUKI)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号：80452324

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし