

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25750146

研究課題名(和文)海溝型巨大地震の震源不均質の階層性が支配する強震動生成メカニズムの解明

研究課題名(英文)Elucidation of Strong Motion Generation Mechanism Controlled by Hierarchical Structure in Source Heterogeneity of Subduction Plate-Boundary Earthquakes

研究代表者

浅野 公之 (ASANO, Kimiyuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80452324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：海溝型地震の震源破壊過程の空間的不均質と強震動生成の関係を解明し、将来の地震の強震動予測の高度化に資することを目的に、震源の空間的不均質の階層性に着目し、解析手法の高度化と実地震記録の解析に重点を置いた研究を実施した。2011年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデルの広帯域化を行った。気仙沼沖の繰り返し地震の強震動生成域のモデル化を行い、応力降下量のばらつきを明らかにした。南海トラフと東北日本で発生する海溝型地震の強震動生成域の震源特性の違いを示した。震源の空間不均質の階層性を把握するため、震源過程解析手法の改良を進め、実際の地震に適用した。三次元差分法による地震動並列化計算コードを改良した。

研究成果の概要(英文)：This study focused on hierarchical structure in source heterogeneity of earthquake source to elucidate the mechanism of strong motion generation controlled by spatial heterogeneity of source rupture process during subduction plate-boundary earthquakes. Most of achievements were based on development and improvement of kinematic source inversion techniques and analyses of strong motion records from observed earthquakes. An extended characterized source model for the 2011 Tohoku earthquake was proposed for simulating ground motion in a broadband period range (0.1-50 s). The variation in source parameters of strong motion generation area was studied for four repeating M6-class earthquakes off Kesennuma. The difference of source characteristics between the Nankai Trough and the Japan Trench was found. The source inversion techniques were improved and some new techniques were developed including frequency dependencies. The parallel FDM code for 3D seismic wave propagation was improved.

研究分野：強震動地震学

キーワード：強震動 地震 震源過程 海溝型地震 震源モデル

## 1. 研究開始当初の背景

日本における海溝型プレート境界地震の強震動予測では、過去のM7~8のプレート境界地震の経験を踏まえ発展してきた「アスペリティモデル」に基づいて、想定地震の震源断層モデルが設定されてきた。これは、場に規定されたアスペリティが繰り返し地震性破壊を起こし、そのアスペリティは地震時すべり量（震源断層のずれの大きさ）が大きいために地殻変動や津波の要因となるとともに、強震動をもたらす短周期地震波の発生源（強震動生成域）としても振る舞うとする考え方である。この枠組みでは、過去の地震を調べればアスペリティの分布が分かり（アスペリティマップ）、「アスペリティ 強震動生成域」として震源がモデル化され、強震動予測が行われる。研究代表者らも強震波形モデリングに基づき、強震動生成域とアスペリティが空間的に対応することを多くの地震について確認してきたが、2008年茨城沖、2005年宮城沖地震の強震動生成域の大きさはアスペリティよりも小さく、アスペリティ内部に含まれるものであることも指摘しており、「アスペリティ 強震動生成域」が必ずしも真とはいえない事例も見つかっていた。

2011年3月に発生した東北地方太平洋地震によって、従来の「アスペリティ 強震動生成域」の考え方が十分ではないことが明白となった。この地震の震源破壊過程に関しては、地震発生以降、日本国内のみならず国外の多くの研究チームにより、周期約10~100秒の長周期地震波形（遠地地震波形、近地強震波形）や衛星測地データ、津波波形記録など比較的長波長の情報をもつデータの解析から、震源断層面上の時空間的な地震時すべり量が推定されている。これら数多くの断層モデルに共通していえることとして、震源断層の大すべり域（従来の解釈でのアスペリティ）が海溝軸付近の浅い部分に全長100km程度の広がり度で滑らかに存在し、最大すべり量は50mに及ぶことである。しかし、この海溝軸付近の巨大アスペリティはその波長があまりにも長いために、陸域で観測された強震動にはほとんど寄与していない。これに対し、研究代表者は、より短周期域で地震動被害とも密接に関連する周期0.1~10秒の地震動を対象として、経験的グリーン関数法を用いた広帯域強震波形のモデリングを行い、4つの強震動生成域からなる震源モデルを推定した(Asano and Iwata, 2012)。35km x 35km程度の大きさをもつ強震動生成域が、震源断層（プレート境界）の深い部分に4カ所（宮城沖、福島沖、茨城沖）に孤立的に分布しており、これらが東北地方沿岸から関東地方にかけて観測された強震動波形の特徴を規定していることを明らかにした。また、これらの強震動生成域が1933~1938年に相次いで発生したM7級地震の震源位置に対応していることを発見していた。

従来の中~大地震では「強震動生成域 アスペリティ」が成り立っていたのに対し、2011年東北地方太平洋沖地震は、一見するとアスペリティと強震動生成域がまったく対応していないようにも見える。対象とする地震波の周期帯の違いとして第一義的には理解されているが、それ自身が海溝型巨大地震の強震動生成メカニズムや震源断層破壊過程を考える上での未解明の点の一つである。過去の大地震の解析事例とは異なり、2011年東北地方太平洋沖地震はあまりに巨大であり、現時点でのインバージョン解析は周期約10秒以上のデータと一次元地下構造が主として用いられているため、すべり分布の空間分解能が30km程度と比較的粗く、強震動生成領域のように震源断層面に孤立的に存在する不均質を認識することはもともと困難である。その点で、今回の高品質かつ多量の観測記録を活用してこの地震の全貌を完全に解明できているとまではいえない。

これらのことから、従来の「アスペリティ 強震動生成域」の考え方が十分とはいえないことが明らかとなり、「アスペリティ」と「強震動生成域」の関係の再定義が求められている。このためには、巨大地震に対応した震源過程解析手法を確立し、震源の空間的不均質の階層性と強震動生成メカニズムの関係性を調べ、「強震動生成域」の物理的実体を解明することが必要であった。

## 2. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震を契機に、巨大海溝型地震の震源破壊過程と強震動予測に関する研究の進展が必要とされている。海溝型地震の震源破壊過程の空間的不均質と強震動生成の関係を解明し、将来の巨大海溝型地震の強震動予測の高度化に資することを研究目的に、海溝型地震のもつ震源の空間的不均質の階層性に着目し、解析手法の高度化と実地震記録の解析に重点を置いた研究を実施した。これにより、巨大地震にも対応した震源過程解析手法を確立すること、震源の空間的不均質の階層性と強震動生成メカニズムの関係を解明することを目指した。

## 3. 研究の方法

(1) M9の海溝型プレート境界地震である2011年東北地方太平洋沖地震を対象に、従来の特性化震源モデルの考え方を拡張し、より長周期帯域まで含む広帯域地震動を説明可能な統一的な特性化震源モデルを構築する。広帯域地震動計算手法としては、経験的グリーン関数法(Irikura, 1986)を用いた。  
 (2) 海溝型プレート境界地震の強震動生成に関わる詳細な震源特性のばらつきについて調べるため、同じ震源域で繰り返し発生している地震複数回の地震の震源特性の比較や、東北日本の日本海溝沿いと西南日本の南海トラフ沿いで発生する海溝型プレート境

界地震の震源特性の比較を行った。

(3) 震源の空間不均質の階層性を把握するため、既存の震源過程解析手法の改良や新たな解析手法の開発を試みた。開発及び改良した手法を、実際の強震記録に適用した。震源過程解析手法の改良に関しては、手法を様々なタイプの地震に適用して検証することも重要であるため、研究対象を海溝型地震に限定はしなかった。

(4) 将来的な三次元地下構造を考慮した震源過程解析に必要である大規模空間領域での理論グリーン関数を計算するための三次元差分法による並列化計算機コードの整備を継続した。

#### 4. 研究成果

(1) 2011年東北地方太平洋沖地震本震を対象に、強震動生成域の考え方に基づく特性化震源モデルの広帯域化を実施した。震源域やや深部の4つの強震動生成域(Asano and Iwata, 2012に基づく)に加え、海溝軸付近の大すべり域に対応する矩形パッチを設定した新たな震源モデル(図1、学会発表、)により、周期0.1~50秒の広帯域地震動をシミュレーションすることに成功した(図2)。

図1の特性化震源モデルの大すべり域と破壊領域全体の面積比は約24%、強震動生成域と大すべり域の面積比は約21%となった。なお、海溝軸寄りの大すべり域(図1のLarge Slip Area)は、三陸沖海溝軸寄りにて約100年周期(1793年、1897年)で繰り返す地震の震源域に対応して居るように見える。2011年東北地方太平洋沖地震の広帯域強震動は、海溝軸寄りの地震と、宮城沖~福島沖のいくつかの地震の連動型地震として説明できる。各観測点での波形の特徴を検討し、提案モデルの問題点の把握を進めた。

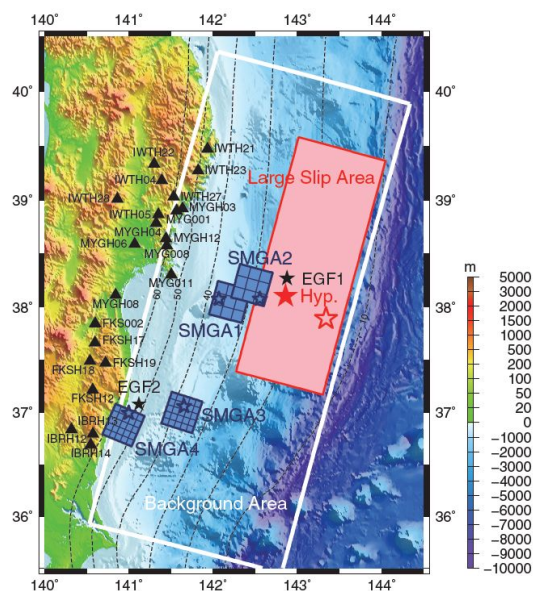


図1 2011年東北地方太平洋沖地震本震の広帯域地震動を説明するための特性化震源モデル

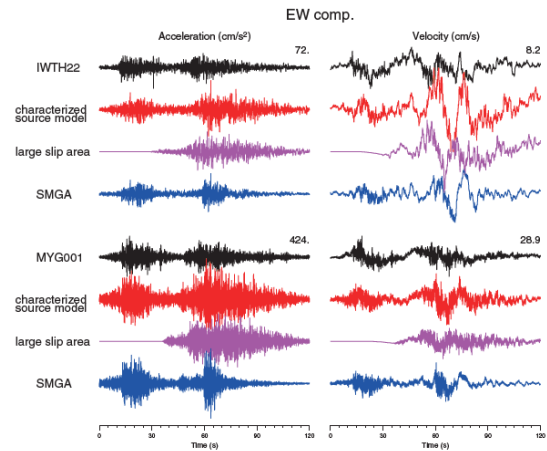


図2 図1の震源モデルを用い、経験的グリーン関数法により合成した波形例(周期0.1~50秒)

(2) 同一の震源域で繰り返し発生する海溝型プレート境界地震の例として、気仙沼沖で1973、1986、2002、2015年と繰り返し発生したM6クラスの地震を解析対象とした。これらの繰り返し地震の強震波記録を各機関から収集し、波形やスペクトル形状を直接比較した。同一地点で4回のイベント記録が得られている大船渡港の観測強震記録を比較し、最大速度振幅は2015年の地震が最も大きく、1986年の地震が小さいなど振幅に違いが見られたが、S波部分のパルス幅はほとんど同じであった。経験的グリーン関数法による強震動生成域のモデル化を行ったところ、1973、1986、2002年の地震が1つの強震動生成域、2015年の地震は2つの強震動生成域が推定された。古いイベントの震源決定誤差が東西方向に約5kmあることも考慮すると、2015年の地震の1つめの強震動生成域と、1973、1986、2002年の地震の強震動生成域は同一の強震動生成域の活動である可能性が高いと結論づけた(図3)。過去4回の地震では、1986年と2002年の地震の応力降下量が最も小さく、2015年の地震は2002年の地震の約1.4倍の応力降下量が推定された。強震動予測における震源モデル設定において、考慮すべき震源特性の不確実性についての1つの有力な知見が得られた。

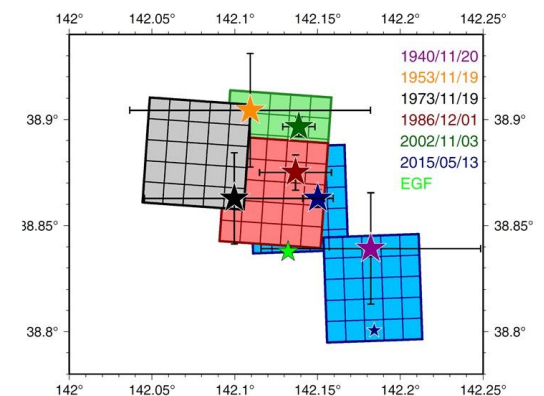


図3 気仙沼沖でのM6クラス繰り返し地震の強震動生成域

熊野灘沖の南海トラフ地震震源域で 2016 年 4 月 1 日に発生した Mw5.9 の海溝型プレート境界地震の強震動生成域を推定した。震源直上の海底地震観測網及び陸域の地震観測網の記録を統合して解析することにより、強震動生成域のサイズなどの震源パラメータを精度よく推定することができた。南海トラフで発生した 2016 年熊野灘沖の地震の強震動生成域は、東北日本のプレート境界地震に比べ小さな応力降下量を有しており、強震動生成域の面積と地震モーメントの関係も、東北日本のプレート境界地震とは異なり、既往の内陸地殻内地震のスケーリング関係に使いことが明らかになった。南海トラフで発生する海溝型プレート境界地震の強震動生成域の震源特性を明らかにした唯一の例であり、南海トラフと東北日本における海溝型プレート境界地震の震源特性の違いを把握し、その知見を強震動予測に反映させる上で貴重な成果が得られた(論文 )。

(3) 断層近傍域での強震動まで十分にモデル化するため、既存の震源過程解析手法を改良し、解析時に震源断層を点震源近似により表現する際に、断層の有限性を適切に表現した。新たな手法では、断層面上に点震源を密に分布(0.2km 間隔)させつつも、従来と同程度の空間密度(1.8km)で未知パラメータを配置した。益城町や西原村などの断層近傍強震動が観測された 2016 年熊本地震に本手法を適用し、断層近傍強震動の再現性が向上することを確認した(学会発表、 )。詳細な震源破壊過程が求められたことにより、地震発生層以深と以浅ですべり速度関数の形状や継続時間に明瞭な違いが見いだされた。

2014 年長野県北部の地震(学会発表、 )についても、震源破壊過程と震源域近傍強震動の関係を議論するため、強震波形を用いた震源過程解析を実施した。震源断層南部において地表に明瞭な地表地震断層が既往文献により報告されているが、強震動を伴う大きなすべりは、断層北部のやや深い領域に推定された。地表地震断層の変位量分布と震源断層のすべりの関係を考える上で、重要な知見が得られたと考えている。

また、従来の強震波形を用いた震源過程解析では主として低周波数の速度波形が用いられてきた。本研究では、加速度エンベロープや Cumulative Squared Acceleration などの指標の利用を検討したが、新たな解析手法の開発までには至らなかった。このほか、周波数帯(波長)別の空間不均質を解明するため、ターゲットとする波形を複数の周波数帯に分割し、周波数帯別の波形インバージョン手法やベイズモデリングを用いた波形インバージョン手法を開発し、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2011 年茨城県沖の地震に適用した(論文 )。すべりの中心が解析周波数帯によって異なっていることが明らかとな

った。

(4) 大規模空間領域での理論グリーン関数を計算するための三次元差分法による並列化計算機コードの整備を継続した。従来から開発してきた Fortran95 による OpenMP+MPI ハイブリッド計算機コードについて、MPI 領域分割や入出力の効率化などの改良を継続した。また、開発したコードを用い、E2VP のテスト用モデルシミュレーションによるコード検証のほか、2013 年淡路島の地震の際の大阪堆積盆地における長周期地震動シミュレーション(論文 )、地震波干渉法で得られた観測点間グリーン関数と理論グリーン関数の比較検証による西南日本地殻速度構造モデルや大阪堆積盆地速度構造モデルの検証等(論文、学会発表、 )を行うことで、計算機コードや速度構造モデルの検証を行った。より空間解像度の高い大規模な計算に対応できるよう、コードのチューニングや改良を継続する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Asano, K., 2018, Source Modeling of an  $M_w$  5.9 Earthquake in the Nankai Trough, Southwest Japan, Using Offshore and Onshore Strong-Motion Waveform Records, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 108, No. 3A, pp.1231-1239, 査読有.

DOI: 10.1785/0120170357

Asano, K., T. Iwata, H. Sekiguchi, K. Somei, K. Miyakoshi, S. Aoi, and T. Kunugi, Surface wave group velocity in the Osaka sedimentary basin, Japan, estimated using ambient noise cross-correlation functions, Earth, Planets and Space, Vol. 69, 108, 査読有.

DOI: 10.1186/s40623-017-0694-3

三宅弘恵・浅野公之・纈纈一起・岩田知孝, 2016, 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた震源モデルの概要, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻, 第 4 号, pp.12-21, 査読有.

DOI: 10.5610/jaee.16.4\_12

Asano, K., H. Sekiguchi, T. Iwata, M. Yoshimi, T. Hayashida, H. Saomoto, and H. Horikawa, 2016, Modelling of wave propagation and attenuation in the Osaka sedimentary basin, western Japan, during the 2013 Awaji Island earthquake, Geophysical Journal International, Vol. 204, No. 3, pp.1678-1694.

DOI: 10.1093/gji/ggv543

Kubo, H., K. Asano, and T. Iwata, 2016, Development of fully Bayesian

Multiple-time-windows source inversion,

Geophysical Journal International, Vol. 204, No. 3, pp.1601-1619.  
DOI: 10.1093/gji/ggv540

〔学会発表〕（計13件）

Asano, K., Source Model of the  $M_{JMA}$  6.5 Plate-Boundary Earthquake at the Nankai Trough, Southwest Japan, on April 1, 2016, Based on Strong Motion Waveform Modeling, American Geophysical Union 2017 Fall Meeting, 2017.

Asano, K. and T. Iwata, Ground motion simulation during the 2016 Kumamoto earthquake mainshock in near-fault area and Aso caldera, IAG-IASPEI 2017 Joint Assembly, 2017.

Asano, K., Analyzing Strong Motion Generation Area of the  $M_{JMA}$  6.5 Earthquake Occurring Offshore the Kii Peninsula on April 1, 2016, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.

Asano, K. and T. Iwata, Source Rupture Process and Near-Fault Ground Motions of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated from Strong Motion Data, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 2016.

浅野公之・岩田知孝, 2016年熊本地震本震の震源過程と震源近傍地震動, 日本地震学会2016年秋季大会, 2016.

浅野公之, 海溝型繰り返し地震の震源特性のばらつきの評価に向けて～気仙沼沖の繰り返し地震を例に～, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016.

Asano, K., T. Iwata, and H. Kubo, Complementary Ruptures of Surface Ruptures and Deep Asperity during the 2014 Northern Nagano, Japan, Earthquake, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 2015.

浅野公之・岩田知孝, 観測点間グリーン関数情報を用いた西南日本地殻速度構造モデルの改良, 日本地震学会2015年秋季大会, 2015.

Asano, K. and T. Iwata, Improvement of Crustal Velocity Structure Model for Ground Motion Prediction in Southwest Japan Based on Modelling Inter-station Green's functions among F-net Broadband Stations, French-Japanese Symposium on Earthquakes and Triggered Hazards, 2015.

浅野公之・岩田知孝・久保久彦, 強震波形から推定した2014年長野県北部の地震の震源過程, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015.

Asano, K. and T. Iwata, Extension of Characterized Source Model for Broadband Strong Ground Motion Simulations (0.1-50s) of M9 Earthquake,

American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, 2014.

Asano, K., Research on the mechanism of strong motion generation from huge subduction earthquake toward the advanced strong motion prediction, International Workshop on New Initiative toward the Advancement of Strong Motion, Site Effect, and Risk Evaluation Studies for Future Mega-Quakes, 2014.

Asano, K., T. Iwata, H. Sekiguchi, K. Somei, K. Miyakoshi, S. Aoi, and T. Kunugi, Observation and simulation of interstation Green's functions obtained from continuous microtremor observation in the Osaka basin, IAHS-IASPO-IASPEI 2013 Joint Assembly, 2013.

〔図書〕（計1件）

岩田知孝・浅野公之, 本震の震源過程, 東日本大震災合同調査報告 共通編1 地震・地震動, 東日本大震災合同調査報告書編集委員会・編, 日本地震工学会・日本地震学会・土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本機械学会・日本都市計画学会・日本原子力学会, pp.53-72, 2014.

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・准教授  
研究者番号: 80452324

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし