

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510223

研究課題名(和文) 地域防災のための高精度強震動予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of strong motions estimation method with high precision for disaster reduction during catastrophic earthquakes

研究代表者

正木 和明 (Masaki, Kazuaki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：90078915

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：対象地震の特性化震源モデルを設定し、経験的グリーン関数法で計算された基盤地震動を基に、3次元有限要素法により地盤の影響を考慮した地表地震動の高精度な計算手法を開発した。2009年駿河湾の地震の観測波形と本手法による計算波形の比較により、本手法の有効性を確認した。また、南海トラフの巨大地震による基盤地震動を経験的グリーン関数法により計算し、中央防災会議公表の地震動波形との比較から有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This study developed a method to evaluate strong ground motions with high precision for disaster reduction during great-earthquakes. A short-period source model of the 2011 Tohoku Earthquake was estimated using the empirical Green's function method (EGFM). Bedrock motions in a target area were estimated with small event motions. Velocity structures at damage sites were identified from H/V spectra of microtremors observed there. Surface motions calculated from the bedrock motions and transfer functions due to velocity structures were well consistent with recorded motions. Ground motions on surface during the 2009 Suruga Bay Earthquake were simulated using 3D FEM from input motions on bedrock calculated by the EGFM. Bedrock motions estimated for future Nankai Trough earthquakes using the characterized source model and the EGFM were consistent with those by Japanese Government. These results show that the method developed in this study is useful for evaluating strong ground motions.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学

キーワード：地震災害 強震動

## 1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震を契機に、国内では強震観測網の整備や活断層調査等からなる基盤の調査観測が実施されてきた。この観測データの解析結果に基づき、強震動予測に関する研究が発展した。また、地下構造データの追加や地下構造モデル作成手法の高度化により、精度のよい地下構造モデルも作成されつつある。これらのデータにより、一定期間内に、ある地域が強い地震に見舞われる可能性を確立論を用いて示した「全国地震動予測地図」(地震調査委員会、2009)が公表され、地震に対する防災力の向上に役立てられている。

この「全国地震動予測地図」の内、「震源断層を特定した地震動予測地図」で利用される強震動予測手法は、短周期領域は「統計的グリーン関数法」が、長周期領域は「3次元有限差分法」が用いられている。「統計的グリーン関数法」は、多数の観測波形を統計処理して特性を求めた模擬波形を使用するため、必ずしも地域性を考慮した伝播特性の評価にはなっていないなどの課題がある。上記の影響がない方法として、「経験的グリーン関数法」があるが、想定地震の震源域内に適切な要素地震がない可能性があることや、対象地点が、地震観測点のみとなるなどの制約があるため、面的な評価が難しい面があった。

近年、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手県内陸地震など被害地震が発生し強震記録の蓄積が行われてきている中、申請者らはこれまで「経験的グリーン関数法」を用いて2007年能登半島沖地震や2007年新潟県中越沖地震において手法の適用を行い、強震動特性の評価として良好な結果が得られている(Kurahashi et. al., 2008)。同時に、「理論的手法」である「有限差分法」や「有限要素法」を用いて地震動シミュレーションも実施してきた。実際の強震動シミュレーションでは強震動特有の現象である地盤の非線形性を考慮する必要性があり、同時に、「3次元モデル」用いた「理論的手法」では計算領域が非常に大規模になるため、計算機能力が向上している現在においても精度良く予測することが難しいとされており、今後の研究の発展が期待されている。本研究では、「経験的グリーン関数法」と「3次元有限要素法」を用いて、膨大な計算機能力を必要とせず、かつ、高精度な強震動シミュレーション手法の開発を試みる。

## 2. 研究の目的

本研究は構造物の耐震安全性の検討、被害予測などに必要不可欠な強震動予測を行うための高精度3次元強震動シミュレーション手法を開発するものである。強震動予測における手法はこれまで数多く提案されているが、本研究では、震源断層から地下深部の波動伝播を「経験的グリーン関数法」により解析を行い、地表付近においては「3次元有限

要素法」による地盤震動解析を行うハイブリッド手法によるシミュレーション手法の確立を行う。解析過程においては伝播特性における地域特性および地盤の非線形特性を評価することが可能であり、同時に大規模モデル(計算領域)を構築する必要性がないため広帯域の周期帯において高精度な結果が期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究は、「地域防災のための高精度強震動予測手法の開発」の目的を達成するため、最近発生した被害地震を用いて高精度な強震動シミュレーション手法の確立を行い、実際の想定東海・東南海地震における強震動予測を行うものである。

本研究の計画は、以下の4つの課題からなる。

- (1) 経験的グリーン関数による震源インバージョンを用いた震源特性の評価
- (2) 地表面における地形が強震動特性に与える影響の解明
- (3) 経験的グリーン関数法と3次元有限要素法によるハイブリッド手法の構築
- (4) 想定東海・東南海地震における強震動予測

## 4. 研究成果

- (1) 経験的グリーン関数による震源インバージョンを用いた震源特性の評価

Mw9.0の超巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震(以下、2011年東北地震と呼ぶ)による強震動生成域(SMGA)の震源モデルを、経験的グリーン関数法を用いて構築した。本震の大きいすべり上のすべり速度の大きい場所であるSMGAは、いくつかの特性化震源モデルで成り立っている。試行錯誤的に求めた最終的な震源モデルは、大きさの異なるSMGAが5つ存在するものとなった。図1に構築したSMGA震源モデルを示す。

本検討で構築したSMGA震源モデルによる強震動波形は、観測波形とよく一致している。特に、観測記録に見られる宮城県2つの波群や福島県で見られる複数の波群、茨城県で見られる破壊開始から約100秒遅れた波群などの時間差と振幅はよく一致しており、SMGA震源モデルの妥当性および、経験的グリーン関数法の適用の妥当性を示している。

また、海溝型巨大地震の長周期成分での地震動評価として、2011年東北地方太平洋沖地震を対象として、SMGAからの長周期成分の寄与について検証した。Kurahashi and Irikura(2013)によるSMGAモデルを利用して、離散化波数法による理論波形を計算し、観測記録と比較した結果、20秒程度まではよく一致することが確認された。また、既往の研究による波形インバージョン結果と比較すると、SMGAは震源より深い側、大すべり域は海溝軸側と顕著に分離する形であったことも確認された。

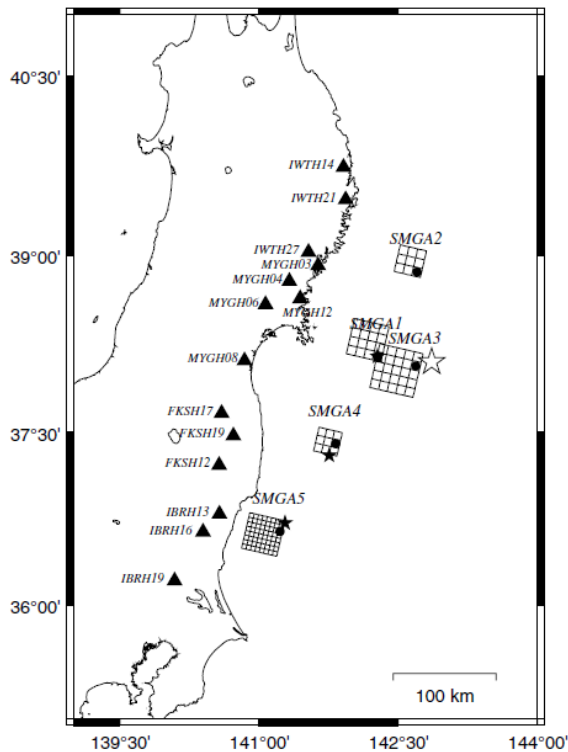


図1 経験的グリーン関数法を用いて構築した SMGA 震源モデル。白抜き星印と黒塗り星印は、それぞれ、本震の震央と要素地震の震央位置を示す。小矩形のメッシュと黒塗り丸印は、それぞれ、SMGA と SMGA の破壊開始点を示す。黒三角は、解析に利用した KiK-net 観測点を示す。

### (2) 地表面における地形が強震動特性に与える影響

地表面での強震動を計算する場合、対象領域の地盤構造モデルの構築が必要となる。本検討では、地表面における地形が強震動特性に与える影響を調べる前に、微動記録を利用した地震観測点外の地盤構造モデルの同定手法の確立を行った。対象点は、2011年東北地震で大きな被害を受けた仙台市北部の地域とした。

地震観測点以外の点での本震の地震動の評価は、以下の通りである。観測記録のある点にて、SMGA 震源モデルを基に、小地震の基盤地震動を経験的グリーン関数法により波形合成し、本震の基盤地震動を求める。ある一定以上の深さに位置する基盤による地震動は、空間的に大きな変化がないと仮定する。すなわち、観測点の近傍地点の基盤地震動は、と顕著な違いがないとみなす。

ターゲットサイトにおける、別途評価した地表と地中との伝達関数に、での基盤地震動を考慮することで、地震記録が存在しないターゲットサイトの地震動を評価する。

この方法を適用するためには、対象地域における S 波部分の伝達関数を決めるための、地盤構造モデルが必要である。本研究では、この地盤構造を常時微動 H/V スペクトル比か

ら推定することを試みる。その前に、常時微動 H/V スペクトル比による地盤構造が、適切であるかの確認のため、地震観測点にて、常時微動 H/V における地盤構造と地震動の H/V における地盤構造の比較検討を行った。その結果、それぞれの H/V スペクトルは若干異なることがあるが、推定される地盤構造については、概ね整合的であることが確認できた。すなわち、常時微動 H/V スペクトル比による地盤構造の推定の有効性が確認できた。図2に地震動と常時微動の H/V スペクトル比から同定した地盤構造を示す。ただし、適用できない点も少なからず存在するため、今後、詳細な検討も必要である。

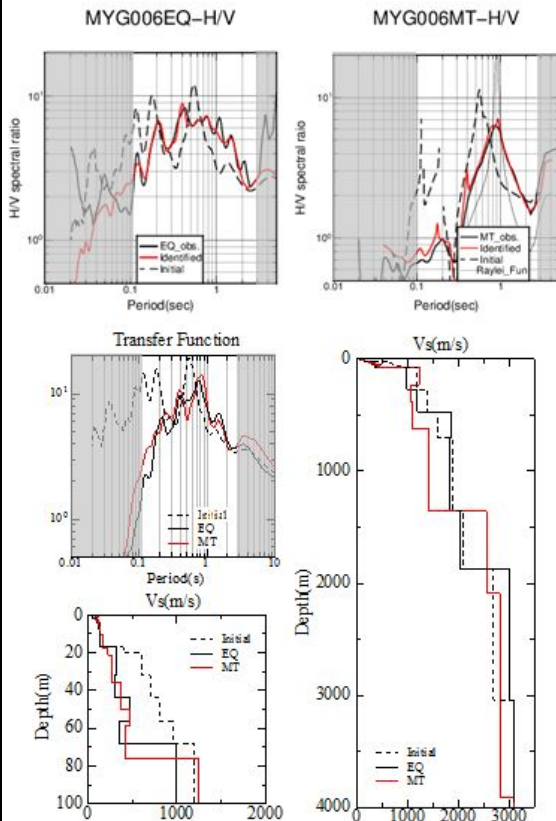


図2 (上図)地震動と微動の H/V スペクトル比の同定結果、(中右図)地震動と微動の H/V から同定された地盤構造の比較、(中左図)地震動と微動の伝達関数の比較、(下左図)地盤構造の浅層部

### (3) 経験的グリーン関数法と3次元有限要素法によるハイブリッド手法の検討

本検討では、2009年駿河湾の地震における、中部電力浜岡原子力発電所構内の地震動シミュレーションとして、基盤波を経験的グリーン関数法で計算し、その基盤波を入射波として、3次元有限要素法を利用して地表の地震動を計算した。3次元有限要素法による強震動シミュレーションでは、局所的な対象領域のみをモデル化し、遠方の震源による地震力と同等な地震力を入射境界面から入力する手法を用いた。解析の結果、観測記録と

の整合性は概ね調和的であり、モデルの妥当性およびシミュレーションの妥当性が確認できた。

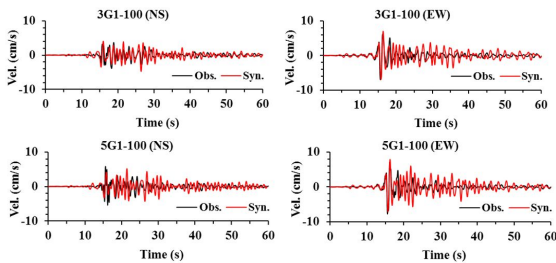


図3 観測速度記録(黒)と解析速度波形との比較(赤)(上: 3G地点、下: 5G地点)

#### (4) 想定東海・東南海地震における強震動予測

ここでは、強震動生成域(SMGA)による震源モデルで、周期10秒まで評価できることを基礎として、想定東海・東南海地震における強震動予測を経験的グリーン関数法により行った。震源モデルに関しては、平成25年8月に中央防災会議で公表された南海トラフ巨大地震の震源モデルのうち、基本ケースを利用した。また、対象とするSMGAは、対象とする愛知県の観測点への寄与が大きい、東海地域のみとした。

東海地域のSMGAの近傍で発生した小地震の数は少なく、SMGA毎に要素地震の選択はしていない。これにより危惧される地震動評価への影響として、メカニズムによる影響と伝播経路の違いによる影響である。メカニズムに関しては、高周波をターゲットと考えれば影響は少ない。伝播経路については、地震の到来方向による影響をいくつかの地震で検証した結果、スペクトルや波形の形状に大きな差異はないため、解析結果に大きな影響を与えないと考えられる。

要素地震の面積と応力パラメータは、要素地震の震源スペクトルからコーナー周波数を求め、円形クラックモデルを基に、コーナー周波数と面積、面積と地震モーメントと応力パラメータの関係から計算した。SMGAのメッシュは、この要素地震の大きさに伴い、変更している。

図4にSMGA断層モデルを、図5にA1CH04(安城)KiK-net観測点における工学的基盤での解析結果と内閣府中央防災会議による計算波形の比較を示す。

中央防災会議による解析結果に見られる、各SMGAから到達する強震動のタイミングがよく一致している。ただし振幅は、本研究で解析した結果の方がやや大きい。これは、手法の違いや、地盤構造の違いなど、条件が異なるためと考えられる。

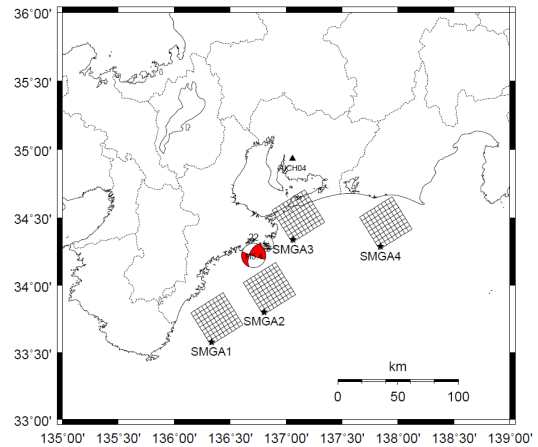


図4 南海トラフ巨大地震のSMGA震源モデル

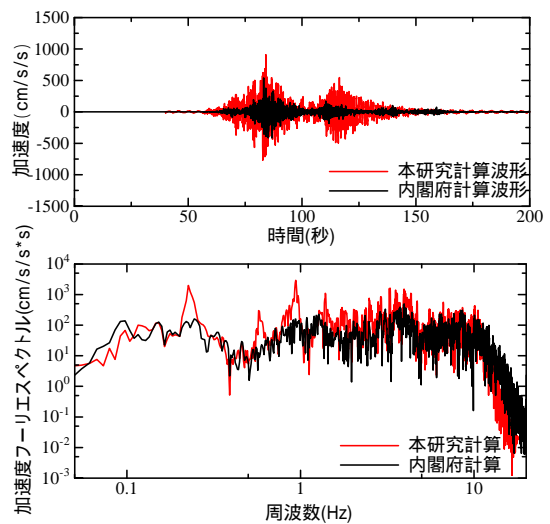


図5 経験的グリーン関数法による解析結果(赤線)と中央防災会議による解析波形(黒線)の比較

#### まとめ

本研究は、地域防災のための高精度強震動予測手法の開発と題して、震源断層から地下深部の波動伝播を「経験的グリーン関数法」により解析を行い、地表付近においては「3次元有限要素法」による地盤震動解析を行うハイブリッド手法によるシミュレーション手法の確立を目指した。超巨大地震の震源モデルの構築、地盤構造の同定手法の確立および、経験的グリーン関数法による基盤入射波と有限要素法による強震動シミュレーションを小地震によって、その手法の確認を行い、観測記録と概ね調和的な結果が得られた。このことより、本手法が確立できた。最後に、経験的グリーン関数法により、南海トラフ巨大地震の基盤入力波を構築した。将来的には、有限要素法により地表波形が計算できるように検討が必要である。

## 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 3 件)

Susumu Kurahashi, Kojiro Irikura, Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 査読有, Vol.63 (No.7), 2011, 571-576

Hao Wu, Kazuaki Masaki, Kojiro Irikura, Koichiro Saguchi, Susumu Kurahashi, Xin Wang, Relationship between Building Damage Ratio and Ground Motion Characteristics during the 2011 Tohoku Earthquake, J. of Natural Disaster Science, 査読有, Vol.34, No.1, 2012, 59-78

入倉孝次郎, 東北地方太平洋沖地震に学ぶ超巨大海溝型地震の特徴と今後の地震対策、地理、査読無、3月号, Vol.57, 2012, 40-50

〔学会発表〕(計 15 件)

Hao Wu, Kazuaki Masaki, Kojiro Irikura, Susumu Kurahashi, Characteristics of Strong Ground Motions and Fragility Curves of Buildings during the 2011 of the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 日本地震工学会年次大会-2013, 2013年11月11日~2013年11月12日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター

入倉孝次郎, 倉橋奨, 沈み込み型巨大地震からの長周期強震動(2-20秒)の評価の感が型、日本地震学会2013年秋季大会、2013年10月7日~2013年10月9日、神奈川県民ホール、産業貿易センター

倉橋奨, 入倉孝次郎, 2008年岩手宮城内陸地震の強震動生成域から生成される長周期地震動、日本地震学会2013年秋季大会、2013年10月7日~2013年10月9日、神奈川県民ホール、産業貿易センター

Hao Wu, Kazuaki Masaki, Kojiro Irikura, Susumu Kurahashi, Characteristics of Strong Ground Motions and Fragility Curves of Buildings during the 2011 Tohoku Earthquake, 日本地震学会2013年秋季大会、2013年10月7日~2013年10月9日、神奈川県民ホール、産業貿易センター

Hao Wu, Kazuaki Masaki, Kojiro Irikura, Relationship between damage ratios and ground motion characteristics during 2011 Tohoku Earthquake, 日本地球惑星科学連合大会2013年大会、2013年5月19日~2013年5月24日、千葉幕張メッセ国際会議場

H. Wu, K. Masaki, K. Irikura, X. Wang, Damage Ratios and Ground Motion Characteristics during the off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 2012年9月24日~2012年9月28日, Lisbon

Congress Center, Lisbon, Portugal

Kojiro Irikura, Short-Period Source Model of the 2011 Tohoku Earthquake and Recipe of Predicting Strong Ground Motions from Mega-Thrust Earthquake, ESC2012 European Seismological Commission, 33-rd General Assembly, 2012年8月20日~2012年8月24日, The Russian Academy, Moscow, Russia

入倉孝次郎, 倉橋奨, 2011年東北地震の強震動の再現と海溝型巨大地震の強震動予測レシピの考え方、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012年5月20日~2012年5月25日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

呉浩, 正木和明, 入倉孝次郎, 王欣, 倉橋奨, 東北地方太平洋沖地震における地震動と建物被害の関係、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012年5月20日~2012年5月25日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

佐口浩一郎, 倉橋奨, 正木和明, 入倉孝次郎, 深層および浅層の3次元構造を考慮した2009年駿河湾の地震の強震動シミュレーション、2011年10月13日、静岡県コンベンションアーツ・グランシップ(静岡県静岡市)

倉橋奨, 入倉孝次郎, 宮腰研, 東北地方太平洋沖地震における震源モデルの検討、日本地震学会2011年秋季大会、2011年10月13日、静岡県コンベンションアーツ・グランシップ(静岡県静岡市)

佐口浩一郎, 正木和明, レシーバー関数法を用いた多点同時インバージョンによる愛知県三河地域における地下構造の推定、平成23年度土木学会全国大会第66回年次学術講演会、2011年9月7日、愛媛大学(愛媛県松山市)

佐口浩一郎, 倉橋奨, 正木和明, 入倉孝次郎, 経験的グリーン関数法と3次元有限要素法による2009年駿河湾の地震の強震動シミュレーション、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月24日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

倉橋奨, 入倉孝次郎, 2008年Wenchuan地震における震源モデルの改良、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月24日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

佐口浩一郎, 正木和明, 愛知県三河地域における3次元地下構造モデルの構築と地震動シミュレーション、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(千葉県千葉市)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

正木 和明 (Kazuaki, Masaki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 90078915

(2)研究分担者

入倉 孝次郎 (Kojiro, Irikura)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号： 10027253