

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540464

研究課題名(和文) 経験的グリーン・テンソルを用いた地震動予測とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Strong Motion Simulation based on the Empirical Green's Spatial Derivative Method

## 研究代表者

大堀 道広 (Ohori, Michihiro)

福井大学・附属国際原子力工学研究所・准教授

研究者番号：50419272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、経験的グリーン・テンソル法を地震動予測の代表的な手法の一つとするための基礎的な研究を行い、次に述べる成果を得た。(1)経験的グリーン・テンソル法の広帯域化を行い、周期0.1～5秒の経験的グリーン・テンソルを推定する方法を開発した。(2)経験的グリーン・テンソル法による広帯域地震動のシミュレーションを行い、観測記録との比較により、手法の妥当性を確認した。(3)経験的グリーン・テンソルを用いた地下構造モデルの推定に向けた予備検討を行い、今後の展望を得た。

研究成果の概要(英文)：To make the empirical Green's tensor spatial derivative (EGTD) method one of the useful techniques for strong motion prediction, we carried out a basic study and obtained remarks as follows. (1) The EGTD was successfully estimated from 11 aftershock events using 0.2-10 Hz band-pass-filtered waveforms. (2) Comparison with simulated waveforms and observed ones showed the acceptable agreement for most of events. (3) Preliminary analyses suggested array analyses of the EGTD from the dense array observation may give us the useful information for estimation of the S-wave velocity structure.

研究分野：地震工学

キーワード：経験的グリーン・テンソル法 地震動予測 震源モデル 地下構造モデル

## 1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震における甚大な被害により、震源近傍における強震動予測の重要性が広く認識されている。現在、主流となっている強震動予測手法として、経験的グリーン関数法が代表例としてあげられる。この方法では、小規模の地震(小地震)で得られた観測記録を経験的グリーン関数とみなし、スケールリング則に沿って大規模の地震(大地震)による強震動を合成し、たいへん実用的として広く認められている。しかし、適切な観測記録の有無と小地震と大地震間で震源メカニズムが異なる場合の補正法に問題を抱えている。この問題を解決できる方法の一つに経験的グリーン・テンソル法があり、その方法の適用範囲を広げることで、強震動予測手法の選択肢の一つとして位置づけられるようにしたいと考えている。

経験的グリーン・テンソル法は経験的グリーン関数法よりも多くの地震記録を必要とするが、先述の1995年兵庫県南部地震を契機として全国的に整備された防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET、KiK-net)により、年々強震記録の蓄積が進み、インターネットを通じたデータベースの検索と強震観測記録の取得が可能となっている。加えて、同研究所が運用する広帯域地震観測網(F-net)により、インターネットによる震源メカニズム解の検索・取得も容易となっている。従って、強震観測記録に対して経験的グリーン・テンソル法の適用を試みる環境が急速に整ってきていると考えられる。

## 2. 研究の目的

経験的グリーン・テンソル法に関する既往の研究は非常に限られており、適用事例を増やすことが重要であるとともに、その適用範囲を広げ、一層の高度化を図ることが重要である。既往の研究(大堀・久田,2006)では、周期1秒(周波数1Hz)以上の長周期帯域の地震動を対象として、経験的グリーン・テンソルの推定法の開発と、これを用いた地震動シミュレーションが実施されている。しかし、建物の地震応答や被害予測、さらに地震防災に資するためには、周期0.1秒(周波数10Hz)程度までの短周期成分を含む広帯域地震動の予測が重要である。そこで、本研究では、経験的グリーン・テンソル法の広帯域化を図り、地震動シミュレーションを通じて、その妥当性を検証する。また、推定された経験的グリーン・テンソルを用いて、地震観測記録のシミュレーションを行うとともに、他の地域で地震記録に対しても経験的グリーン・テンソル法を適用し、事例を増やす。さらに、経験的グリーン・テンソルが震源ではなく地下構造で決定される特性を活かして、経験的グリーン・テンソルに現れる後続波群を用いた応用例について検討を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 経験的グリーン・テンソル法の広帯域化

既往の研究(大堀・久田,2006)で対象とされた2001年兵庫県北部地震(M5.4)の11個の余震記録を用いて、経験的グリーン・テンソル法の広帯域化を試みる。既往の研究では、周期1~5秒(周波数0.2~1Hz)までの帯域が対象であったが、これを周期0.1~5秒(周波数0.2~10Hz)までに拡張し、これまでの方法を適用した場合の問題点を把握する。続いて、各地震のコーナー周波数の違いを取り除くために $\omega^{-2}$ モデルを仮定し、すべての余震が本震と同じコーナー周波数を有するとみなせるようにスペクトル振幅の補正を施した上で、時間領域で経験的グリーン・テンソルの推定を行うことにする。

### (2) 経験的グリーン・テンソル法による地震観測記録のシミュレーション

(1)において推定された経験的グリーン・テンソルの妥当性を確認するために、余震ならび本震に対するシミュレーション波形を作成し、観測波形との比較を行う。この他、経験的グリーン・テンソル法の適用事例を増やすために、他の地域で観測された地震記録と震源情報を収集して検討する。

### (3) 経験的グリーン・テンソルを用いた地盤構造モデルの推定に向けた予備検討

稠密な地震観測記録を用いて経験的グリーン・テンソルを推定すれば、経験的グリーン・テンソルのアレー記録が取得できる。これを前提とすれば、経験的グリーン・テンソルの後続波群を用いて一般的なアレー解析を行い、地盤構造モデルの推定法が可能となる。これに関する基礎的な検討を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 経験的グリーン・テンソル法の広帯域化

2001年兵庫県北部地震(M5.4)の11個の余震記録を用いて、これまで通りの手法をそのまま広帯域地震動に適用すると、余震間で異なるコーナー周波数の違いにより、経験的グリーン・テンソルの推定精度が下がり、特に短周期成分を過大評価することが確認された。これを回避するには、各余震の震源時間関数を短周期に至るまで評価し、逆合積することが考えられる。しかし、こうした震源時間関数の評価はもともと難しく、既往の研究でも周期1秒以上の長周期帯域の波形を用いて決定されている。そこで、各地震のコーナー周波数を評価し、その違いを取り除くために $\omega^{-2}$ モデルを仮定し、すべての余震が本震と同じコーナー周波数を有するとみなせるようにスペクトル振幅の補正を施した上で、経験的グリーン・テンソルの推定を行ったところ、経験的グリーン・テンソルの推定精度を向上することができた。各地震の地震モーメントとコーナー周波数の分布を図1に示す。コーナー周波数は本震が1Hzで最も低いため、周期1秒よりも長周期帯域を対象とした既往の研究では、地震モーメントの違いを補正すれば良かったが、短周期成分を含む

広帯域地震動の予測には、地震モーメントに加えて、コーナー周波数に対する補正が必要であり、 $\omega^{-2}$ モデルを仮定したスペクトル振幅の補正が有効であることがわかった。

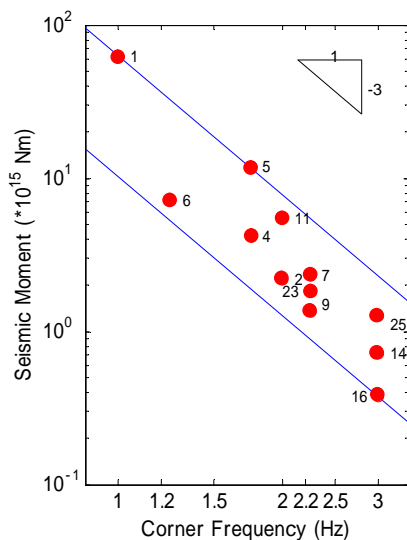


図1 本震(#1)と11個の余震(#2~#25)の地震モーメントとコーナー周波数の分布

(2)経験的グリーン・テンソル法による地震観測記録のシミュレーション

(1)において推定された経験的グリーン・テンソルを用いて、余震ならび本震に対するシミュレーション波形を作成し、観測波形との比較を行った結果、両者は良く対応することが確認できた。図2には、周波数帯域ごとの観測波形の最大振幅に対するシミュレーション波形の最大振幅の比を示す。経験的グリーン・テンソルは余震(#2~#25)のみで推定されており、本震(#1)は含まれていないにも拘らず、本震の再現性は良好である。

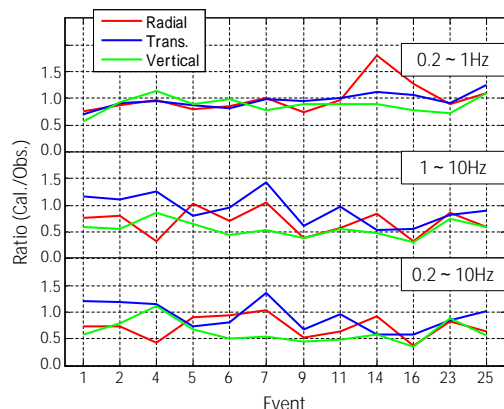


図2 各周波数帯域における観測波形の最大振幅に対するシミュレーション波形と最大振幅の比

この他、経験的グリーン・テンソル法の適用事例を増やすために、他の地域で観測された地震記録と震源情報を収集し、解析を行っている。例えば、福井県嶺南地方の7地震に対

するFKI007(K-NET敦賀)の地震記録を用いて、経験的グリーン・テンソルの推定と観測記録のシミュレーションを行い、良好な結果を得ている。この他、研究実施期間が終了に近づいた時期に国内および海外の研究者らとの共同研究も始まっており、本研究課題が終了した後も研究を継続し、発展させる予定である。

(3)経験的グリーン・テンソルを用いた地盤構造モデルの推定に向けた予備検討

本研究の実施期間中に稠密地震観測記録を取得して、経験的グリーン・テンソルのアレ解析を実施することはできなかった。しかし、記録の入手を前提に開発したFK法やSPAC法などアレ解析手法を常時微動観測記録に適用し、Rayleigh波およびLove波の位相速度を精度よく推定することができた。表面波の位相速度は、地下構造モデルを推定する手がかりとなる与える重要な情報であり、さらにLove波はP波速度構造の影響を受けないことから、S波速度構造の推定において重要であり、副次的な研究成果を得た。今回の予備検討を通じて、今後、他の研究機関が実施している稠密地震観測記録を入手し、経験的グリーン・テンソルを推定するとともに、その空間分布や後続波群のアレ解析を行い、地下構造の推定に資する応用研究を行う展望を得た。

#### 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 1 件)

M. Ohori, S. Citak, T. Nakamura, M. Sakaue, S. Takemura, T. Furumura, T. Takemoto, I. Kazuhisa, K. Atsuki, K. Kawatani, S. Tajima, N. Takahashi, Y. Kaneda: Modeling the Shallow Subsurface Structure in the Urban Area of Kochi City, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.15, pp. 95-113, 2015.6. 査読有.

[学会発表](計 11 件)

M. Ohori: Simulation of Broadband Strong Motion Based on the Empirical Green's Spatial Derivative Method, International Symposium on Earthquake, Tsunami and Nuclear Risks after the accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, Abstract, 2014.10. 京都大学芝蘭会館(京都)

M. Ohori, S. Citak, A. Kubo, Y. Oishi, H. Takahashi, T. Yamashina: Love and Rayleigh Wave Detection from Microtremor Array Measurements in Kochi, Japan, Proc. of 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Conference USB, Paper No. 1074, 2014.8. 査読有. イスタンブール(トルコ)

M. Ohori: Simulation of Broadband Strong Motion Based on the Empirical Green's Spatial Derivative Method, Proc. of 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Conference USB, Paper No. 1854, 2014.8. 査読有. イスタンブール(トルコ)  
大堀道広, チタクセチキン, 久保篤規, 大石佑輔, 高橋宏和, 山品匡史: 高知市高須地区における微動アレー観測(その3), 物理探査学会第131 学術講演会講演論文集, pp.1-3, 2014.10. 清水テルサ(静岡)

大堀道広: 微動アレー観測における Love 波の検出事例について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.365-366, 2014.9. 神戸大学(神戸)

大堀道広, チタクセチキン, 久保篤規, 大石佑輔, 高橋宏和, 山品匡史: 高知市高須地区における微動アレー観測(その2), 物理探査学会第130 回学術講演会講演論文集, pp.5-7, 2014.5. 早稲田大学国際会場(東京)

大堀道広, チタクセチキン, 久保篤規, 大石佑輔, 高橋宏和, 山品匡史: 微動アレー観測による Rayleigh 波と Love 波の検出, 日本地球惑星科学連合大会, SSS35-02, 2014.5. パシフィコ横浜(横浜)

M. Ohori, S. Citak, A. Kubo, Y. Oishi, H. Takahashi, T. Yamashina: Detection of Love-waves and Rayleigh-waves from Microtremor Array Measurements in Kochi City, International Workshop on the New Initiative toward the Advancement of Strong Motion, Site Effects, and Risk Evaluation Studies for Future Mega-Quakes, Abstract, p.20, 2014.3. 京都大学防災研究所(宇治)

大堀道広: 経験的グリーン・テンソル法による高周波数帯域の強震動シミュレーション, 日本地震工学会年次大会, pp.379-380, 2013.11. オリンピック記念青少年総合センター(東京)

大堀道広, 久保篤規, 大石佑輔, 高橋宏和, 山品匡史: 高知市高須地区における微動アレー観測(その1), 物理探査学会第129 回学術講演会講演論文集, pp.74-77, 2013.10. 高知会館(高知)

大堀道広: Love 波の検出事例, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, p.49, 2013.10. 神奈川県民ホール(横浜)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大堀 道広(OHORI Michihiro)

福井大学・附属国際原子力工学研究所・准教授

研究者番号: 50419272

### (2) 研究分担者

チタク セチキン(CITAK Seckin)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波  
海域観測研究開発センター・研究員

研究者番号: 50581518