

令和元年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02989

研究課題名(和文) 動力学的震源を活用した地震ハザード評価の新展開

研究課題名(英文) Ground Motion Prediction for the Next Generation

研究代表者

三宅 弘恵 (MIYAKE, Hiroe)

東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・准教授

研究者番号：90401265

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、理工学両面から関心が今なお高く、研究の蓄積が多い1995年兵庫県南部地震を主な対象として、経験的手法・運動学的手法・擬似動力学的手法・動力学的手法によるシナリオ型の地震ハザードを評価し、多様な震源像が強震動予測に与える効果を定量的に検討した。観測事実を説明する想定内の地震動を生成する地震シナリオに、動力学的な知見を加味することにより、想定外の地震動のハザード評価を新たに提示し、ごく稀な強震動生成を支配する断層破壊のメカニズムとその物理を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災以降、在り方が論じられてきた地震ハザード評価について、従来の枠組みにとらわれず、想定外の地震動を震源の物理に基づいてシミュレーションする手法を研究した。その結果、従来よりも多様な地震動が計算されるものの、これらの震源の物理やパラメータの拘束に関する研究がより一層重要であることが分かった。また、オープンデータを意識して、国際的な計算プラットフォームに解析手法を実装することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Based on the lessons learned from the 1995 Kobe earthquake, we performed scenario-type seismic hazard assessment by empirical, kinematic, pseudo-dynamic, and dynamic source modeling to validate the quantitative relationship between source variability and simulated ground motion variability. Our study indicates that physics-based dynamic rupture modeling have an enough potential to simulate extreme ground motions over the classical empirical approach.

研究分野：強震動地震学

キーワード：地震 自然現象観測・予測 モデル化 シミュレーション 解析・評価 強震動 震源 ハザード

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災を契機に、地震ハザード評価の在り方が論じられている。その多くは、予め対象地震が想定されていなかったという議論である。対策として、既往最大あるいはそれを超える規模の地震が想定されるようになってきた。と同時に、ある規模の地震シナリオに対して想定される地震動の多様性に関する研究も本格的に開始されている。

地震動による被害の典型は、破壊力を有する強震動パルスにより、構造物被害が生じることであり、次の大地震に備えて、可能な限りの研究を事前に行うことが重要である。そのためには、最新の理工学の知見を反映させて、想定外の地震動を生み出す研究が欠かせない。このような背景に基づき、動力的震源モデルを活用した地震ハザード評価の新展開を目指して、地震の震源の物理を積極的に用いる数値シミュレーション研究と、観測記録の解析や再現を重視する研究を融合させ、従来の枠組みにとらわれない地震ハザード評価に向けた震源モデルを構築する着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、理工学両面から関心が今なお高く、研究の蓄積が多い1995年兵庫県南部地震を主な対象として、経験的手法・運動学的手法・擬似動力学的手法・動力学的手法によるシナリオ型の地震ハザードを評価し、多様な震源像が強震動予測に与える効果を定量的に検討することを目的とする。研究成果として、観測事実を説明する想定内の地震動を生成する地震シナリオに、動力的な知見を加味することにより、想定外の地震動のハザード評価を新たに提示し、ごく稀な強震動生成を支配する断層破壊のメカニズムとその物理を明らかにする。その際、過去の記録の再現を目的とした震源モデルと、将来の予測を意識した多数回の試行による地震動のバラツキ評価のための震源モデルの両者の構築方針について、プロトタイプを作成する。

### 3. 研究の方法

1995年兵庫県南部地震直後は入手困難であった観測記録等を収集すると共に、経験的手法・運動学的手法による想定兵庫県南部地震のハザード評価を行う。そして、震源物理に基づくモデルから工学的利活用を意識したモデルに至る多様なモデルが、どの程度、地震規模・破壊様式・観測波形や、「震災の帯」を含む面的な地震動分布を説明する能力を有するかを定量的に検討する。また、擬似動力学的手法による震源モデルを試算し、擬似動力学的手法・動力学的手法による震源モデル構築に向けた研究を行う。これらに基づき、経験的手法・運動学的手法・擬似動力学的手法・動力学的手法によるシナリオ型の地震ハザードを評価において、震源が与える地震動の多様性の原因を分析する。

### 4. 研究成果

1995年兵庫県南部地震に関する、強震記録・運動学および動力学の震源モデル・地下構造モデルの最新版を収集した。特に複数の地下構造モデルと盆地端部幾何形状に着目して、1995年兵庫県南部地震の震災の帯の生成メカニズムを定量的に考察した。また、擬似動力学的手法による震源モデルを試算し、1995年兵庫県南部地震の地震ハザード評価における震源の影響を分析した。

次に、想定外の地震動を生成した被害地震を対象として、運動学的手法と動力学的手法による震源モデルと強震動シミュレーションに関する研究を展開した。具体的には、地震発生前の標準的な想定に対して大きな長周期地震動と小さな短周期地震動が観測された2011年東北地方太平洋沖地震や2015年ネパール・ゴルカ地震について、震源メカニズム解明を目的として震源モデルと強震動の観点から解析・整理を行った。その結果、長周期震源と短周期震源を震源物理に基づきモデル化する必要があり、これらの面積と応力降下量、すべり速度時間関数の形状、破壊進展の定量化が地震動をコントロールする主要なパラメータであることが分かった。また、短周期地震動の生成に関わる、強震動生成域の不均質性について解析を実施した。さらに、想定外の極大地震動が観測された2016年熊本地震を研究対象に含め、断層モデルの設定とその不均質性、強震動パルス生成メカニズム、動力学モデルの利活用について研究を進めた。

強震動予測に資する研究として、震源メカニズムの違いによる応力降下量の研究、強震動パルス生成の研究、これらの震源物理に起因する強震動レベルの研究などを進めた。経験的手法・運動学的手法・擬似動力学的手法・動力学的手法のいずれにおいても、内陸地震の地震モーメントと断層面積のスケールリング則の妥当性や、地形・地質学的データの震源モデルへの導入が重要であることが再認識され、これらの精度や安定性を向上させることが、各手法によるシナリオ型の地震ハザード評価の乖離を小さくする方向に貢献することが示唆された。また、正断層と逆断層の震源物理が、想定外の地震動を生成する地震シナリオの開発に貢献する可能性を数値計算により見出した。

以上の研究に基づいた地震ハザード計算に向けて、特性化震源モデルによる広帯域地震動の再現性について客観的指標を用いて確認すると共に、計算手法を米国南カリフォルニア地震センターの広帯域地震動プラットフォーム Scec BBP に実装した。この他、調査および共同研究推進のための会合を通じて、フランス、サウジアラビア、米国および韓国の研究者と国際的な研究基盤を構築し、国際共同研究につながった。

## 5. 主な発表論文等

### <引用文献>

#### [雑誌論文](計 22 件)

1. 松島信一・三宅弘恵 (2019). 強震動予測レシピ, 日本地震学会ニュースレター, 71(NL5), 21-23.
2. Miyake, H., and K. Irikura (2018). Characterized source modeling of crustal earthquakes for broadband ground motion prediction, IAEA-TECDOC-CD-1833, ISBN 978-92-0-158917-0.
3. 三宅弘恵 (2018). 強震動予測と震源モデル, 日本地震学会ニュースレター, 70(NL6), 16-18.
4. Aochi, H., and H. Miyake (2018). On near-field ground motions of normal and reverse faults from viewpoint of dynamic rupture model, Proceedings of the 2nd IAEA workshop on Best Practice in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations, Paper ID 02.
5. 浜辺亮太・松島信一・吾妻崇・Florent De Martin (2018). 盆地端部における段差構造がエッジ効果の特性に与える影響に関する研究, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集, OS2-01-09.
6. Diao, H., H. Miyake, and K. Koketsu (2018). Near-fault broadband ground-motion simulations of the 2016 Meinong, Taiwan, earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 3336-3357, doi:10.1785/0120180113.
7. 三宅弘恵 (2017). 地震学から見た熊本地震, 建築雑誌, 132(1697), 10-11.
8. Pitarka, A., R. Graves, K. Irikura, H. Miyake, and A. Rodgers (2017). Performance of Irikura recipe rupture model generator in earthquake ground motion simulations with Graves and Pitarka hybrid approach, Pure Appl. Geophys., 174, 3537-3555, doi:10.1007/s00024-017-1504-3.
9. Poiata, N., H. Miyake, and K. Koketsu (2017). Mechanisms for generation of near-fault ground motion pulses for dip-slip faulting, Pure Appl. Geophys., 174, 3521-3536, doi:10.1007/s00024-017-1540-z.
10. Oth, A., H. Miyake, and D. Bindi (2017). On the relation of earthquake stress drop and ground motion variability, J. Geophys. Res. Solid Earth, 122, 5474-5492, doi:10.1002/2017JB014026.
11. Kobayashi, H., K. Koketsu, and H. Miyake (2017). Rupture processes of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Causes for extreme ground motions, Geophys. Res. Lett., 44, 6002-6010, doi:10.1002/2017GL073857.
12. Irikura, K., K. Miyakoshi, K. Kamae, K. Yoshida, K. Somei, S. Kurahashi, and H. Miyake (2017). Applicability of source scaling relationships for crustal earthquakes to estimation of the ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake, Earth Planets Space, 69:10, doi:10.1186/s40623-016-0586-y.
13. Miyake, H., S. N. Sapkota, B. N. Upreti, L. Bollinger, T. Kobayashi, and H. Takenaka (2017). Special issue "The 2015 Gorkha, Nepal, earthquake and Himalayan studies: First results", Earth Planets Space, 69:12, doi:10.1186/s40623-016-0597-8.
14. Koketsu, K., H. Kobayashi, and H. Miyake (2017). Irregular modes of rupture directivity found in recent and past damaging earthquakes, Proceedings of the 11th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper ID 645.
15. Viens, L., H. Miyake, and K. Koketsu (2016). Simulations of long-period ground motions from a large earthquake using finite rupture modeling and the ambient seismic field, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, 8774-8791, doi:10.1002/2016JB013466.
16. Iwaki, A., T. Maeda, N. Morikawa, H. Miyake, and H. Fujiwara (2016). Validation of the recipe for broadband ground motion simulation of Japanese crustal earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., 106, 2214-2232, doi:10.1785/0120150304.
17. Koketsu, K., H. Miyake, Y. Guo, H. Kobayashi, T. Masuda, S. Davuluri, M. Bhattarai, L. B. Adhikari, and S. N. Sapkota (2016). Widespread ground motion distribution caused by rupture directivity during the 2015 Gorkha, Nepal earthquake, Scientific Reports, 6, 28536, doi:10.1038/srep28536.
18. Kobayashi, H., K. Koketsu, H. Miyake, N. Takai, M. Shigefuji, M. Bhattarai, and S. N. Sapkota (2016). Joint inversion of teleseismic, geodetic, and near-field waveform datasets for rupture process of the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake, Earth Planets Space, 68:66, doi:10.1186/s40623-016-0441-1.
19. 三宅弘恵・浅野公之・瀧澤一起・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, 16(4), 12-21, doi:10.5610/jaee.16.4.12.
20. 関口春子・三宅弘恵 (2015). 震源過程解析と強震動予測震源モデルの進展, 第 43 回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 83-90.

21. 三宅弘恵・小林広明・纈纈一起・高井伸雄・重藤迪子・Subeg Bijukchhen (2015). 2015年ネパール Gorkha 地震の震源破壊過程, 第43回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 29-32.
22. Yagoda-Biran G., J. G. Anderson, H. Miyake, and K. Koketsu (2015). Between-event variance for large repeating earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., 105, 2023-2040, doi:10.1785/0120140196.

〔学会発表〕(計16件)

1. Miyake, H., K. Irikura, K. Miyakoshi, and K. Kamae (2018). Validation of a 3-stage source scaling for crustal earthquakes, 2018 Seismology of the Americas Meeting.
2. 三宅弘恵・入倉孝次郎・宮腰研・釜江克宏 (2018). 内陸地震のスケールリング則の検証, 日本地球惑星科学連合2018年大会.
3. 加瀬祐子・関口春子 (2018). 地形・地質学的データに基づく応力分布を用いた動力学的震源モデル, 日本地球惑星科学連合2018年大会.
4. Matsushima, S., and H. Miyake (2017). Re-examining the cause of the "Damage Belt" during the 1995 Kobe Earthquake, 2017 AGU Fall Meeting.
5. Miyake, H. (2017). Seismic hazard assessment of the 1995 Kobe earthquake: Before and after, IAG-IASPEI 2017.
6. Kase, Y. (2017). Dynamic rupture model of the 2014 northern Nagano, central Japan, earthquake, IAG-IASPEI 2017.
7. 松島信一・吾妻崇・野澤貴・市村強 (2017). 1847年善光寺地震の震源断層モデルの再構築と強震動シミュレーション, 日本自然災害学会学術講演会.
8. 松島信一 (2017). 地表地震断層と建物被害, JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
9. 関口春子 (2017). 不均質震源モデル, 京都大学防災研究所研究発表講演会.
10. Miyake, H. (2016). Ground motion characterization using a ground motion response matrix (招待講演), 2016 AGU Fall Meeting.
11. Miyake, H. (2016). Long- and short-period characteristics of megathrust source models and ground motions (招待講演), UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of Earthquake Shaking and Tsunami.
12. Miyake, H., K. Asano, K. Koketsu, and T. Iwata (2016). Source models and ground motions of the 2011 Tohoku earthquake (招待講演), GADRI Workshop on Bridging Strong-motion and Earthquake Damage.
13. Miyake, H., and A. Oth (2015). Ground motion prediction equations empowered by stress drop measurement, 2015 AGU Fall Meeting.
14. Miyake, H., and K. Irikura (2015). Characterized source modeling of crustal earthquakes for broadband ground motion prediction (招待講演), Workshop on Best Practices in Physics-Based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations.
15. 三宅弘恵・森川信之・岩城麻子・前田宜浩・纈纈一起・James J. Mori・藤原広行・入倉孝次郎・川瀬博 (2015). 強震動予測レシピと SCEE Broadband Platform, 日本地震学会2015年度秋季大会.
16. Miyake, H., K. Koketsu, and K. Irikura (2015). Recipe for predicting strong ground motion from subduction earthquake scenarios (招待講演), SSA 2015 Annual Meeting.

〔図書〕(計3件)

1. 土木学会 (2017). 2016年熊本地震被害調査報告書 (分担執筆: 三宅弘恵), 514 pp.
2. 日本建築学会 (2016). 2015年ネパール・ゴルカ地震災害調査報告書 (分担執筆: 三宅弘恵), 381 pp.
3. 日本建築学会 (2016). 地盤震動と強震動予測 - 基本を学ぶための重要項目 - (分担執筆: 三宅弘恵・松島信一・関口春子), 349 pp.

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

国際ワークショップホームページ

<http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/workshop/BBSimulation.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 加瀬 祐子

ローマ字氏名: (KASE, Yuko)

所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名: 活断層・火山研究部門

職名：主任研究員  
研究者番号（8桁）：90415654

研究分担者氏名：松島 信一  
ローマ字氏名：( MATSUSHIMA, Shinichi )  
所属研究機関名：京都大学  
部局名：防災研究所  
職名：教授  
研究者番号（8桁）：30393565

研究分担者氏名：関口 春子  
所属研究機関名：京都大学  
部局名：防災研究所  
職名：准教授  
研究者番号（8桁）：20357320

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。