

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400450

研究課題名(和文)地震の動的誘発作用を利用した地震発生メカニズムの解明

研究課題名(英文) Understanding of the mechanisms that cause earthquake occurrences by studying the dynamic triggering

研究代表者

宮澤 理稔 (Miyazawa, Masatoshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80402931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：大地震の発生に伴う地震波の広がりにより、遙か離れた場所で別の地震が誘発されることがある現象に着目し、どの様に地震が誘発されたかを調べる事を通じて、地震発生に至るメカニズムの解明を行った。2011年東北地方太平洋沖地震により、箱根カルデラ内で誘発された地震や、4日後に静岡県東部で誘発されたM6.4の地震の発生過程を調べた。また2014年南太平洋ケルマディック諸島で群発的に発生したM7弱の一連の地震活動が、9000kmも北に離れたアリューシャン列島でM7.9の別の大地震を誘発した可能性がある事を突き止め、その発生過程を調べた。

研究成果の概要(英文)： Passage of seismic waves from large earthquakes often remotely trigger other earthquakes. We studied the triggering of such triggered earthquakes to provide a better understanding of the mechanisms that cause earthquake occurrences. The triggering mechanisms studied in this research project include volcanic earthquakes in Hakone volcano in 2011 and the 2011 M6.4 Eastern Shizuoka earthquake, which were dynamically triggered by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake. We also found that the 2014 M7.9 Rat Islands earthquakes may have been remotely triggered by seismic waves from significant seismicity of M7- earthquakes in the Kermadec Islands located about 9000 km away.

研究分野：地震学

キーワード：誘発地震 動的誘発作用 2011年東北地方太平洋沖地震 箱根カルデラ 2011年静岡県東部地震 2014年ラット諸島地震

### 1. 研究開始当初の背景

地震が発生するテクトニクス場の特徴や、断層破壊開始後の破壊の多様性についての研究が行われている中で、自然地震発生直前（例えば数秒～数分前）に、どのような力が作用することで地震が発生に至っているかを直接調べる事はできていない。これは地震が発生する程の地下深部の物理量を直接観測することが、現在の技術では困難であるためである。またこのような力の作用は、単独に発生した地震の観測波形の初動部分だけを調べても分からない。このように断層破壊に至る直前の地震発生過程は、これまでの地震学的手法では調べる事が困難である。

### 2. 研究の目的

地震の動的誘発現象は、主に大地震から出た長周期の地震波によって、近地のみならず遠地であっても別の地震が誘発される現象であり、数秒から数十秒という短い時間スケールで、地震発生直後のきっかけを与えている。本研究ではこの誘発現象を利用することで、地震の発生開始に至るメカニズムの解明に迫ることを目的とする。地震学でも新しい動的誘発作用という現象を巧みに利用して、地震発生過程を調べるといったアプローチは、世界で初めての試みである。

### 3. 研究の方法

本研究は大きく分けて(1)誘発地震の検出、(2)誘発過程の研究から成る。それぞれについて、研究の方法を以下に記述する。

#### (1)誘発地震の検出

遠地で発生した地震の波の通過によって誘発されたと考えられる地震には、地震カタログに掲載される明確な地震から、波形記録の中に埋もれてしまっている微小な地震まで様々な活動がある。微小な地震を検出するために、従来から用いられることの多い信号処理のハイパスフィルタを施すだけでは、十分検出できないことが多い。このためにパターン認識技術の一つである波形相関法を用いて、数多くの地震活動の検出を試みた。ただしこの手法には、テンプレートとなる地震波形記録を必要とする。また地震カタログのような情報から、誘発した地震と誘発された地震のペアである可能性を客観的に示すことのできる点過程モデル(統合地震活動モデル)を提案した。これにより、例えば短い時間間隔で、互いに離れて発生した二つの地震の間の関連性の有無について、確率論的に評価することができるようになり、誘発された可能性のある地震を検出することができるようになった。

#### (2)誘発過程の研究

遠地から到来した地震波が通過中することで別の地震が誘発された際に、どのような力が地下に作用していたかを調べるために、

Miyazawa and Brodsky(2008)の手法を一部改良して用いた。改良点は表面波の伝播速度の分散性をフルスペクトルで組み込んだところにある。この手法は、地表で観測された遠地地震波の波形記録から、地下の任意の深さにおいて作用した力を時間の関数として推定することができる。従って、誘発地震が発生に至るまでの間に、どのような力が震源に作用していたかを調べることができる。

### 4. 研究成果

本研究計画では、2011年3月箱根カルデラにおける地震活動の誘発、2011年3月15日 M6.4 静岡県東部地震の誘発、2014年6月アリューシャン・ラット諸島における M7.9 地震の誘発過程について、特に詳しく調べられた。本報告書ではこれら3ケースについて、報告する。なお前の二つの活動は、いずれも2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震によって誘発されたと考えられる。また飛騨地方では、波形相関法を用いた微小地震活動検出を中心に研究を行った。

#### (1)2011年箱根カルデラ地震の誘発

2011年東北地方太平洋沖地震発生直後の箱根カルデラにおける地震活動を、波形相関法を用いて多数検出することに成功した(図1)。その数は地震発生後約1時間で、通常のルーチンによる検出に比べて25倍以上の300個近くにも上り、多くの地震活動が東北地方太平洋沖地震によって誘発されていたことを発見した。

これらの活動のうち、特に顕著であった誘発初期の M4 前後の地震活動についてメカニズムを調べたところ、箱根カルデラ内の応力場に調和的であり、また東北地方太平洋沖地震による表面波によって作り出された動的応力変化と正の相関があることが分かった。

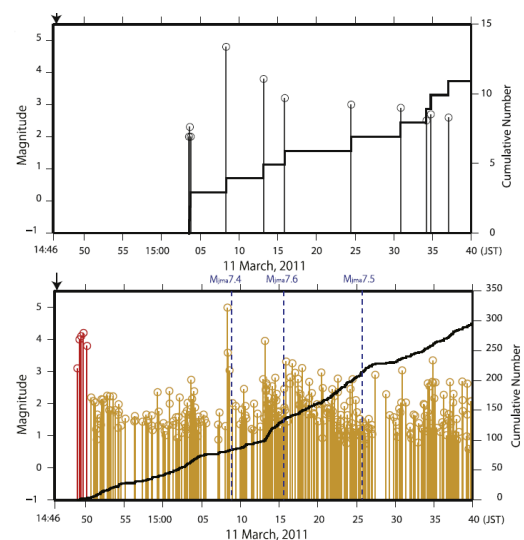


図1. 検出された地震活動の時系列  
(上)通常ルーチンによって検出された地震活動、(下)波形相関法によって検出された地震活動

## (2)2011年 M6.4 静岡県東部地震の誘発

2011年東北地方太平洋沖地震の4日後に、富士山南麓で誘発されたこの地震は、当初富士山の噴火誘発が懸念される要因となった地震である。この地震発生の約4分前には福島県沖で M6.2 の地震が発生しており、この表面波が通過している最中に、静岡県東部地震が誘発されていた。これらの地震や地球潮汐等が、静岡県東部地震の震源に及ぼす影響を見積もったところ、誘発までに要した時間で除した応力変化レートで比較した場合、東北地方太平洋沖地震の地震波通過に伴う応力変化が最も大きく、最大で 200 kPa であった。更に前震活動の検出をプレートとなる地震との波形相関法により行ったが、前震と判断できる明瞭な地震活動は見出せなかった。

静岡県東部地震の誘発過程は、次のように考察される。東北地方太平洋沖地震による静的及び動的な応力変化に伴い、静岡県東部地震の起きる断層では摩擦応力が急激に増加した。その後、東北地方太平洋沖地震の大規模な余震活動による動的応力変化などにより、徐々に摩擦応力が増加し、元々から存在した応力蓄積も合わさって、結果的に東北地方太平洋沖地震から4日遅れて静岡県東部地震が誘発された(図2)。また東北地方太平洋沖地震発生時には静岡県東部地震発生の準備が十分整っていたと考えられる。

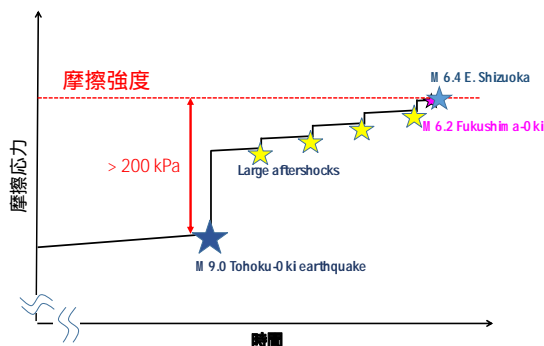


図2．静岡県東部地震の誘発過程  
断層面に働く摩擦応力が東北地方太平洋沖地震などの影響により徐々に増加し、摩擦強度に達した時点で静岡県東部地震が発生した。

## (3)2014年 M7.9 ラット諸島地震の誘発

統合地震活動モデルをグローバルな地震カタログに適用することにより、誘発した地震・誘発された地震の関係にある地震活動のペアを検出することにも成功した。2014年6月に南太平洋ケルマディック諸島で M6.9, M6.5, M6.7 の地震が群発的に発生した。その約1時間後に、北に約9000km離れた北太平洋のアリューシャン・ラット諸島において M7.9 の稍深発地震が発生した。統合地震活動モデルにより、この時間間隔を確率的に評価したところ、これよりも短い時間間隔で M7

以上の地震がアリューシャン列島周辺で発生する可能性は、わずか 0.0037% であった。つまりケルマディック諸島での地震活動とラット諸島での地震との間隔は偶然性を考慮しても短すぎ、これらの地震発生に関して関連性のある可能性が示唆された。

一方で統合地震活動モデルは関連性があるかもしれない地震のペアを探し出すツールに過ぎず、物理的因果関係の有無までは推定できない。そのために実際にラット諸島での地震の震源に作用していた応力を調べた(図3)。ケルマディック諸島の地震によって作用した応力変化値は最大でもわずか 10 Pa 程度であり、直接誘発に作用したと考えるにはあまりにも小さな値である。しかし応力変化値は小さいものの、複数の地震の波により繰り返し継続的に断層に作用することで破壊に至ったかもしれない、繰り返し疲労破壊の可能性があると考えられる。

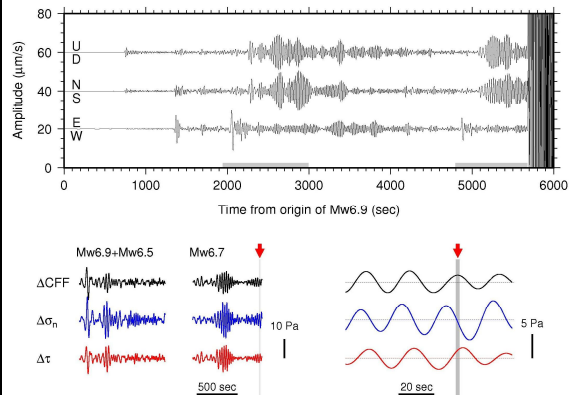


図3．地震波形と応力の時間変化  
(上)アリューシャン列島で観測されたケルマディック諸島の地震(M6.9, M6.5, M6.7)(5700秒辺りまで)とM7.9ラット諸島地震(5700秒辺り以降)。(左下)ラット諸島地震の震源に作用していた応力変化、(右下)同、誘発時相当の時間窓の拡大。

## 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Masatoshi Miyazawa, Seismic fatigue failure may have triggered the 2014 Mw7.9 Rat Islands earthquake, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol.42, 2015, pp.2196-2203, doi: 10.1002/2015GL063036

大見士朗、Matched Filter Methodによる群発地震解析の試み～2013年飛騨山脈穂高岳付近の地震活動の例～、地震、査読有、Vol.68、2015、No. 1、pp.1-15

大見士朗、Matched Filter Methodによる群発地震活動の解析の試み - 2011年飛騨山脈山麓旗鉾付近の群発地震活動の例 -、京都大学防災研究所年報、査読無、Vol.57B、2014、pp.70-75、

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp>

/dSPACE/handle/2433/196159  
Yohei Yukutake, Masatoshi Miyazawa,  
Ryou Honda, Masataka Harada, Hiroshi  
Ito, Minoru Sakaue, Kazuki Koketsu, and  
Akio Yoshida, Remotely triggered  
seismic activity in Hakone volcano  
during and after the passage of surface  
waves from the 2011 M9.0 Tohoku-Oki  
earthquake, Earth and Planetary Science  
Letters, 査読有, Vol.373, 2013,  
pp.205-216,  
doi:10.1016/j.epsl.2013.05.004

[学会発表](計8件)

Masatoshi Miyazawa, Rina Tamura,  
Integrated seismicity model to detect  
pairs of possible interdependent  
earthquakes and its application to  
aftershocks of the 2011 Tohoku-Oki  
earthquake and sequence of the 2014  
Kermadec and Rat Islands earthquakes,  
AGU Fall meeting, 2015年12月14日, San  
Francisco (USA)

Yohei Yukutake, Magma-hydrothermal  
system and its relation to earthquake  
swarms at Hakone volcano, central Japan,  
revealed by dense seismic observation,  
26th IUGG General Assembly 2015, 2015  
年6月30日, Prague (Czech Republic)

Masatoshi Miyazawa, Possibility of  
remote triggering of the 2014 Mw7.9 Rat  
Islands earthquake examined by an  
integrated seismicity model, 26th IUGG  
General Assembly 2015, 2015年6月30  
日, Prague (Czech Republic)

Shiro Ohmi, Seismic activity near the  
Mt. Hotaka in the Hida mountain range,  
central Japan, detected by the matched  
filter method, 26th IUGG General  
Assembly 2015, 2015年6月29日, Prague  
(Czech Republic)

田村理納、宮澤理稔、2011年3月15日静  
岡県東部地震(M6.4)の誘発過程に関する  
研究、日本地球惑星科学連合、2015年5  
月26日、幕張メッセ国際会議場(千葉県・  
千葉市)

大見士朗、飛騨山脈南部の2014年5月の  
地震活動、日本地震学会2014年度秋季大  
会、2014年11月25日、朱鷺メッセ新潟  
コンベンションセンター(新潟県・新潟市)

Masatoshi Miyazawa, Triggering  
sequence of seismicity by dynamic  
stress changes from the 2011 Mw 9.0  
Tohoku-Oki earthquake,  
IAHS-IASPO-IASPEI Joint Assembly, 2013  
年7月24日、Gotenburg (Sweden)

Yohei Yukutake, Masatoshi Miyazawa,  
Ryou Honda, Masataka Harada, Hiroshi  
Ito, Minoru Sakaue, Kazuki Koketsu, and  
Akio Yoshida, Remotely triggered

seismic activity in Hakone volcano  
during and after the passage of surface  
waves from the 2011 M9.0 Tohoku-Oki  
earthquake, IAVCEI 2013, 2013年7月21  
日、かごしま県民交流センター(鹿児島  
県・鹿児島市)(招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮澤 理稔 (MIYAZAWA, Masatoshi)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号: 80402931

(2) 研究分担者

大見 士朗 (OHMI, Shiro)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号: 50263158

行竹 洋平 (YUKUTAKE, Yohei)  
神奈川県温泉地学研究所・研究員  
研究者番号: 20435853