

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20244070

研究課題名（和文） 海底測地・地震観測に基づくマルチスケールゆっくり地震の検出

研究課題名（英文） Multi-scale types of slow earthquakes based on ocean-bottom geodetic and seismological observations

研究代表者

藤本 博己 (FUJIMOTO HIROMI)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：50107455

研究成果の概要（和文）：東北日本沈み込み帯においてスロー地震観測のための海底測地・地震観測網を構築し、スロースリップの検出に先行した。スロースリップは、2008年と2011年の2回観測された。いずれのスロースリップも中規模ないしは大規模なプレート境界型地震に先行して観測された。特に2011年のスロースリップは、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の震源域内で3月9日の最大前震（M7.3）に先行して発生していた。これらの観測は、スロースリップがプレート境界型地震の発生過程における応力蓄積過程で重要な役割を果たすことを示唆するものである。

研究成果の概要（英文）：We have observed two slow slip events in the Japan subduction zone. The slow slip events was observed in 2008 and 2011 by ocean-bottom geodetic network that had been newly established on the present work. Moderate and large Interplate earthquakes in 2008 and 2011 were preceded by the slow slip events respectively. The slow slip event in 2011 preceded the largest foreshock of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. These suggest that slow slip plays an leading role in stress buildup to earthquake generation.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費       | 合計         |
|--------|------------|------------|------------|
| 2008年度 | 14,000,000 | 4,200,000  | 18,200,000 |
| 2009年度 | 13,500,000 | 4,050,000  | 17,550,000 |
| 2010年度 | 4,200,000  | 1,260,000  | 5,460,000  |
| 2011年度 | 4,200,000  | 1,260,000  | 5,460,000  |
| 2012年度 | 1,300,000  | 390,000    | 1,690,000  |
| 総計     | 37,200,000 | 11,160,000 | 48,360,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地殻変動・海底変動

## 1. 研究開始当初の背景

発生が予測される巨大地震（大地震）の震源域において、“どのように歪が蓄積されていくか”（歪蓄積過程）を明らかにすることは、地震の発生予測のみならず、地震現象そのものを理解する上で重要である。しかしながら、プレート境界における歪は地震のみによって解放されているわけではなく、地震時

すべりのプレート間の累積相対変位に対する割合（地震カップリング）は、たとえば三陸沖日本海溝ではわずか30%程度でしかない。残りは大地震の後の余効変動や地震波を放射しない超低速の間欠すべり、あるいは定常的な安定すべりによって解放されていると考えられているが、こうした非地震性のすべりのうち、実際に観測により検知されたも

のはごくわずかであった。これまでに応募者らは沈み込み型プレート境界に最も近い海底における地殻変動観測を実施し、地震に伴う地殻変動を観測した。また、海溝軸に沿ったプレート間の相対運動のゆらぎに関する観測を実施し、陸上 GPS 観測との比較を行うことで、そうした海底地殻変動観測の精度評価を行った

近年、南海および東南海地震の震源域の深部延長部において、通常地震よりもゆっくりと破壊が進行する非地震のすべり、いわゆる“ゆっくり地震”が相次いで発見された。これらのゆっくり地震は、発生する地震の規模の違いにより、短期的スロースリップ、超低周波地震、低周波微動に区別される。超低周波地震および深部低周波微動の活動は、同領域で同時に発生する短期的スロースリップの活動と同期して活発化する。これは、大規模な断層すべりである短期的スロースリップの発生メカニズムが、より小さい規模のゆっくり地震の発生メカニズムと密接に関連している可能性を示唆する。すなわち、マルチスケールなゆっくり地震を統一的に理解する鍵として大規模な断層すべりの存在を捉えることができる。

これらの“ゆっくり地震”はいずれもプレート境界で発生している可能性が高く、その浅部延長部にある巨大地震震源域への歪の蓄積を示す地下の変動現象と捉えることができる。また、地震波を用いた解析から、ゆっくり地震の震源域周辺のプレート間または岩石中に周囲よりも多くの流体が存在する可能性が示されている。さらに、地殻内部の流体の存在を示す地震波反射体の分布と低周波微動の震源分布が良く一致するとの報告もある。これら2つの結果はゆっくり地震の発生に対する流体の寄与を強く示唆する。

さらには、巨大地震震源域の浅部延長部(深さ 10km 以浅)でも超低周波地震が発生している。この超低周波地震はプレート境界ではなく、南海トラフ沿いに広く分布する付加体内部の分岐断層上で発生している可能性が高い。付加体内部には、流体で満たされた多数の分岐断層が存在すること知られている。浅部で発生する超低周波地震は、プレートの沈み込みに伴い生じる付加体内部の歪を付加体の逆断層帯で発生するゆっくり地震として解放する現象として解釈される。すなわち、浅部で発生する地震も、深部で発生するゆっくり地震と同様に、プレートの沈み込みによる巨大地震震源域への歪蓄積過程を示し、その発生に流体が関与している可能性が高い。さらには分岐断層が南海・東南海地震発生時には津波の波動源として、断層面上での食い違いを生じている可能性も指摘されている。

一方、Costa Rica の海溝軸付近における海底地震観測および湧水量観測では、海底地震計で観測された雑微動振幅の増加に伴って湧水量が増加する結果が得られている。観測された雑微動の振幅の変化は、ゆっくり地震の存在を直接示すものではないが、プレート間で生じるゆっくり地震により雑微動の振幅が増加し、またゆっくり地震の発生に伴いプレート間の流体経路が変化することで湧水量が変化したと解釈することもできる。

これまでの研究結果を総合的に解釈すると、ゆっくり地震、流体の存在または移動、プレート境界または分岐断層上の断層の変位の3者が密接に関連している可能性が高い。

## 2. 研究の目的

ゆっくり地震が巨大地震の震源域の周辺で発生していることから、ゆっくり地震の発生過程を正確に理解することは、将来発生が予測される巨大地震の震源域への歪蓄積・解放過程を理解する上で重要な課題である。しかしながら、「流体が関与(または移動)した断層面上の変位により発生するゆっくり地震」を直接観測し、3者の関連を明確に示した観測例はこれまでにない。

よって本研究では、これまでに開発された海底測地学的観測技術と地震学的観測技術を駆使することによって、「流体が関与した断層運動によるゆっくり地震の発生」を観測に基づき検証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 南海トラフにおけるゆっくり地震に伴う地殻変動観測

流体が関与したゆっくり地震による断層の変位を直接観測する上で最も適した断層は、南海トラフ沿いの付加体の分岐断層である。この分岐断層では断層帯内に流体の存在が指摘されており、超低周波地震の発生も確認されている。しかしながら、ゆっくり地震の発生に伴う分岐断層の変位を直接観測する研究はなされていない。本研究では変位が想定される分岐断層を跨ぐ形で海底間の短基線音響測距による測地観測を行う。2台の対となる自己浮上式の圧力センサー付き音響装置を海底に設置し、互いの相対距離と相対圧力変動を繰り返し計測する方法が東北大学により開発された。この方法による先行研究では、数 mm のオーダーで水平動・上下動を計測できる。

ゆっくり地震が観測される場合、何種類かのゆっくり地震が同時に観測される可能性が高い。本研究では、上記の海底測地観測に加えて、分岐断層におけるゆっくり地震を検出する目的で、広帯域海底地震観測も実施す

る。

## (2) 日本海溝おけるゆっくり地震の広帯域地震・測地観測

“ゆっくり地震”は、当初、南海トラフや Cascadia などの比較的若いプレートが沈み込む領域にのみ限られて検出されていた。しかしながら、近年では内陸の横ずれ断層（サンアンドレアス断層）でも発生していることが分かった。この観測事実は、このような“ゆっくり地震”が若いプレートの沈み込みのみ限られた現象ではなく、地震発生域に共通して発生している現象である可能性を示す。よって本研究では東北日本の沈み込み帯において、ゆっくり地震を検出するための観測を行う。

東北日本の沈み込み帯において、ゆっくり地震の観測例は未だない。その理由として次の点が考えられる；(1) 想定される震源域が陸から離れているために、陸側の観測網では観測できないこと。(2) 通常海底地震観測では短周期地震計を主に用いるため、長周期成分に卓越するゆっくり地震を効率よく検出することが困難であること。(3) これまでの自己浮上型の海底圧力観測では、観測データのサンプリングが1分間隔であり、超低周波地震のような20-50秒程度の卓越周期を持つ地震動を観測することができなかったこと。

これらの点を踏まえて、本研究では日本海溝陸側斜面下で発生する大地震（M7前後）の地震の固着域周辺、とくに海溝軸に近い海域周辺（図4）において、“ゆっくり地震”の発生を検証するための観測を実施する。

本研究では様々な周波数帯域の観測を同時に行うことで、“マルチスケールのゆっくり地震観測”を実施する。具体的には、広帯域地震計により、低周波微動および超低周波地震の波形を記録する。また、短周期地震計では低周波微動を観測する。さらに1秒サンプリングの海底圧力計および海底音響測地観測により、スロースリップによる海底地殻変動を観測する。

## 4. 研究成果

平成20年度は、沈み込み帯前弧側の陸側斜面の分岐断層周辺において、地震学および測地学的観測を行い、様々な時定数のゆっくり地震の観測および地震に伴う流体の移動の観測を実施した。特に南海トラフにおいて海底音響測距および圧力観測に基づく短基線の海底測地変動観測の試験観測を実施し、実際に分岐断層への機器の設置を行った。また日本海溝において、湧水を伴う分岐断層を反射法探査の再解析および有人潜水調査により発見し、その断層周辺に海底圧力計、海底短周期地震計、および海底長周期地震計

を設置した。また、日本海溝においてGPSと海底音響測距に基づく長基線の海底地殻変動の観測を実施した。その結果、短基線の海底地殻変動観測について分岐断層を挟んだ観測に対して技術開発に成功し、分岐断層を挟んだ観測への展望が開いた。さらに日本海溝においてこれまで存在の知られていなかった湧水を伴う分岐断層が確認されたことは、日本海溝においても南海トラフと同様にゆっくり地震が存在する可能性を示唆するものであった。

平成21年度は、日本海溝付近の海底に設置した海底圧力計、海底短周期地震計、および海底長周期地震計の回収および再設置作業を行った。また、南海トラフの超低周波地震の起震応力場に関する研究を既存の陸上観測網のデータを用いて実施した。結果として、圧力計記録から日本海溝において海溝型地震に先行する地殻変動を検出した。また南海トラフの付加体内部で発生する超低周波地震の起震応力場が横ずれ圧縮場であることを示した。特に日本海溝で地震に先行した地殻変動の検出については、今後の地震発生予測における圧力観測の重要性を示す結果であった。

平成22年度は、昨年から引き続き日本海溝付近の海底に設置した海底圧力計、海底短周期地震計、および海底長周期地震計の回収および再設置作業および記録の解析を継続して行った。さらに、日本海溝においてGPSと海底音響測距に基づく長基線の海底地殻変動の観測を継続して実施した。また、南海トラフの熊野灘の分岐断層を挟んで短基線測距も行った。結果として、昨年度に圧力計記録から検出した海溝型地震に先行する地殻変動が陸上観測点の歪計記録にも見られることが分かった。また、短基線の海底音響測距の検出分解能が1cm以下であることも示した。特に観測を行った分岐断層周辺で発生した2009年の超低周波地震の活動では、地震時の断層の変位が短基線測距では検出されない程度の大きさであることが分かった。これは超低周波地震活動に伴う分岐断層の変位が1cm以下であった可能性を示す。

昨年までに構築してきた宮城沖の海底観測網内で2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。このため、平成23年度は、特に2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に関する解析、特に観測網が本震の主すべり域の直上に位置したため、本震時の地震時地殻変動に関する研究を重点的に行った。その結果、海溝軸からおよそ20km離れた地点では、海底が地震時に5mの隆起したことが海底圧力記録から明らかにされた。さらに海溝軸から50km陸側の地点が地震時に31m海溝側に移動していたことがGPS/海底音響結合方式による長基線の海底地殻変動観測により明らかにされた。

これらの結果は、海溝軸近傍で大きな地震時すべりが生じていたことを示す重要な成果である。また、2008年に観測された海溝軸近傍のゆっくり滑り域が本震時の巨大すべり域内に含まれることを示した。平成24年度は、特に2011年東北地方太平洋沖地震発生前に観測されたスロースリップに関する研究を行った。その結果、2008年のスロースリップに加えて2011年にもスロースリップが発生していたこと、2回のゆっくりすべりイベントはそれに引き続くプレート境界型地震に先行して発生していたことを示した。また、ゆっくりすべりイベントの断層は、2011年3月9日の最大前震(M7.3)の地震時すべり域と余効すべり域の浅部延長部に位置し、互いにはほぼ重ならないこと、またゆっくりすべりイベントは3月11日の本震時に30m以上すべった領域の内部に位置することが分かった。さらに、海溝軸近傍では本震時に50m以上すべった領域が海溝軸に沿って南北に約100km程度に広がりを示すが、ゆっくりすべりの断層もその深部延長部で南北にはほぼ同様の長さで分布することを示した。

#### 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 21 件)

- ① Y. Ito, R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022, 査読有, in press.
- ② Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Iinuma, J. Nakajima, Y. Osada, K. Suzuki, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, and S. Miura, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 39, 2012, doi:10.1029/2012GL052430.
- ③ Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 117, 2012, doi:10.1029/2012JB009186.
- ④ 日野亮太, 鈴木健介, 伊藤喜宏, 金田義行, 東北地方太平洋沖地震の前震・本震・余震の分布—海底地震観測による, *科学*, 査読無, 81, 2011, 1036-1043.
- ⑤ Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino and Y. Ito, Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 38, 2011, 10.1029/2011GL050057.
- ⑥ Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 38, doi:10.1029/2011GL048355.
- ⑦ 藤本博己, 海底地殻変動, 地震2, 査読有, 61S, 2009, S69-S74.
- ⑧ 藤本博己, GPS 音響技術を用いた測地観測手法の開発, 査読無, 20, 2008, 17-21.
- ⑨ Osada, Y., M. Kido, H. Fujimoto and Y. Kaneda, Development of a seafloor acoustic ranging system toward the seafloor cable network system, *Ocean Engineering*, 査読有, 35, 2008, doi:10.1016/j.oceaneng.2008.07.007.
- ⑩ Kido, M., Y. Osada and H. Fujimoto, Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and in situ measurements, *Earth Planets Space*, 査読有, 60, 2008, 229-234.
- ⑪ 長田幸仁・水上知子・木戸元之・太田雄策・対馬弘晃・三浦哲・藤本博己, 10 Hz GPS 受信機導入による海底地殻変動 観測高度化の試み, *測地学会誌*, 査読有, 54, 2008, 141-151
- ⑫ 木戸元之・藤本博己・長田幸仁, 過去の海底地殻変動観測における動揺センサーデータの有効利用について, 査読有, *測地学会誌*, 査読有, 54, 2008, 163-179.
- ⑬ 藤本博己・木戸元之・長田幸仁・金田義行, GPS/A 方式地殻変動観測に向けた観測システムの開発, *測地学会誌*, 査読有, 54, 2008, 181-187.

[学会発表] (計 59 件)

- ① Fujimoto, H., M. Kido, T. Iinuma, Y. Osada, J. Yamamoto, K. Tadokoro, and M. Sato, Extended GPS/Acoustic geodetic observation near the Japan Trench axis for the study of the giant 2011 Tohoku-oki earthquake, *Underwater of Technology 2013*, 2013年3月5日, Tokyo.
- ② Kido, M., H. Fujimoto, Y. Osada, Y. Ohta, J.

- Yamamoto, K. Tadokoro, T. Okuda, T. Watanabe, S. Nagai, and K. Yasuda, Development of GPS/A seafloor geodetic network along Japan Trench and Onset of its operation, AGU 2012 Fall meeting, 2012 年 12 月 3 日, San Francisco, USA.
- ③ Fujimoto, H., and M. Kido, Development of precision acoustic transducers for GPS/Acoustic observation on the deep seafloor near the Japan Trench axis, AGU 2012 Fall meeting, 2012 年 12 月 3 日, San Francisco, USA.
- ④ Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, M. Mishina, S. Miura, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku–Oki earthquake, AGU 2012 Fall meeting, 2012 年 12 月 3 日, San Francisco, USA.
- ⑤ Hino R., Y. Ito, K. Suzuki, S. Suzuki, D. Inazu, T. Iinuma, S. Ii, H. Fujimoto, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, M. Abe, Y. Kawaharada, Y. Hasegawa, Y. Yamamoto, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Continuous offshore seismological and geodetic monitoring in a rupture zone of the M9 off Tohoku Earthquake, AOGS-AGU(WPGM) Joint Assembly, 2012 年 8 月 13 日, Singapore, Singapore.
- ⑥ Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito, Trench-normal variation in coseismic displacement of the 2011 Tohoku-oki earthquake detected trough GPS/acoustic surveys, AGU 2011 Fall Meeting, 2011 年 12 月 5 日, San Francisco, USA.
- ⑦ Fujimoto, H., M. Kido, K. Tadokoro, M. Sato, T. Ishikawa, A. Asada, M. Mochizuki, Improvement of the GPS/A system for extensive observation along subduction zones around Japan, AGU 2011 Fall Meeting, 2011 年 12 月 5 日, San Francisco, USA.
- ⑧ Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku–Oki earthquake, AGU 2011 Fall Meeting, 2011 年 12 月 5 日, San Francisco, USA.
- ⑨ Ito, Y., Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, N. Uchida, R. Hino, H. Fujimoto, S. Suzuki, H. Tsushima, R. Azuma, K. Suzuki, S. Koga, S. Ii, T. Tsuji, N. Nakayama, and J. Ashi, Ocean–bottom seismic and geodetic observations of transient slow slip events in the Japan Trench, WPGM2010, 2011 年 6 月 22 日, Taipei, Taiwan.
- ⑩ Ito, Y., Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, N. Uchida, R. Hino, H. Fujimoto, S. Suzuki, T. Tsushima, R. Azuma, K. Suzuki, S. Koga, S. Ii., T. Tsuji, N. Nakayama, J. Ashi, Ocean–bottom seismic and geodetic observations of transient slow slip events in the Japan Trench, WPGM2010, 2010 年 6 月 22 日, Taipei, Taiwan.
- ⑪ Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, and Y. Kaneda, Seafloor geodesy using the GPS/acoustic technique: towards next generation approach, 第 21 回海洋工学シンポジウム, 2009 年 8 月 6 日, 東京
- ⑫ Ito, Y., K. Obara, Y. Asano, H. Fujimoto, R. Hino, J. Ashi, T. Tsuji, Shallow very–low–frequency earthquakes around Japan; Recent studies and observation,

AGU 2008 Fall meeting, 2008 年 12 月 16 日, San Francisco, USA.

- ⑬ Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, Y. Kaneda, Development of new tubular buoy for seafloor geodetic observation with cabled system, AGU 2008 Fall meeting, 2008 年 12 月 16 日, San Francisco, USA.
- ⑭ Kido, M., H. Fujimoto, Y. Osada, Tracking buoy motion/attitude using incomplete rate-gyro data in the GPS/acoustic measurement, The 7<sup>th</sup> General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008 年 11 月 25 日, Tsukuba, Japan.
- ⑮ Ito, Y., H. Fujimoto, R. Hino, M. Kido, Y. Osada, Y. Yamamoto, S. Suzuki, R. Azuma, H. Tsushima, K. Suzuki, T. Tsuji, N. Nakayama, J. Ashi and T. Gamo, Seismological, geodetical and cold-seepage observations for detection of slow earthquakes along Japan Trench, The 7<sup>th</sup> General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008 年 11 月 25 日, Tsukuba, Japan.
- ⑯ Fujimoto, H., M. Kido, Y. Osada, Y. Kaneda, Development of GPS/A seafloor positioning system for future application to continuous observation with a moored buoy, The 7<sup>th</sup> General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008 年 11 月 25 日, Tsukuba, Japan.

〔図書〕(計 2 件)

- ① 藤本博己・三浦哲・今村文彦, 共立出版, 現代地球科学入門 シリーズ第 8 巻 測地・津波, 2013, pp. 228.
- ② NHK「サイエンス ZERO」取材班・古村孝志・伊藤喜宏・辻健, NHK 出版, 東日本大震災を解き明かす, 2011, pp. 126.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :

権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等  
特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 博己 (FUJIMOTO HIROMI)  
東北大学・災害科学国際研究所・教授  
研究者番号 : 50107455

### (2) 研究分担者

伊藤 喜宏 (ITO YOSHIHIRO)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号 : 30435581

木戸 元之 (ITO YOSHIHIRO)  
東北大学・災害科学国際研究所・准教授  
研究者番号 : 10400235

日野 亮太 (HINO RYOTA)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 00241521

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :