

平成21年 5月 29日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18403006

研究課題名 (和文) スマトラ地震の余効変動と背弧海盆の粘弾性構造

研究課題名 (英文) Postseismic deformation following the Sumatra-Andaman earthquake and viscoelastic structure of back-arc basin

研究代表者 橋本 学 (Hashimoto Manabu)

京都大学防災研究所・教授

研究者番号:20293962

研究成果の概要：

東南アジアに設置された GPS 連続観測点のデータを用いて、2004 年スマトラ-アンダマン地震後の余効変動を追跡した。その結果、2008 年 5 月までの 3 年半の間に、Mw9 の地震に相当する大きな余効変動を確認した。この余効変動の成因を探るため、余効すべりモデルと有限要素法を用いた粘弾性緩和モデルとを試した。粘弾性緩和モデルでは、半年以降のデータしか説明できないが、余効すべりモデルは地震直後の半年間も含めて説明することができ、少なくとも地震直後の半年間は、余効すべりによる変動が卓越していたと考えられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2007 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	9,500,000	2,850,000	12,350,000

研究分野：数物系科学 A

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：自然地震観測・予測，地震，テクトニクス，固体地球物理学，衛星測位

1. 研究開始当初の背景

2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ・アンダマン地震は、地球の表面積の半分近い領域に変動をもたらした大地震であった。一般にプレート境界の大地震により生じる余効変動は、数十年間にわたり継続することが知られている。さらに、これまでの巨大地震後の余効変動の研究から、これがマンツルの粘弾性的性質や、プレート境界面の摩擦特性に関する有用な情報を与え、プレート運動の原動力や地震発生などの研究を大きく進めるものとして期待されている。スマトラ・アンダマン地震による余効変動が、どのような時間的・空間的な変化を示しながら減

衰していくのかは、上記のような学術的な観点から世界の研究者の関心を集めていた。

2. 研究の目的

東南アジアに設置されている GPS 連続観測局を維持するとともに、そのデータを解析し、余効変動を追跡する。さらに、2008 年夏までの余効変動の推移を、余効すべりと粘弾性緩和の 2 つのモデルに基づき解析し、その成因を探る。また、粘弾性緩和モデルにおいては、活発な背弧拡大がみられるアンダマン海下の三次元不均質構造を考慮して観測変位を再現することにより、背弧海盆の粘弾性構造を推定する。

3. 研究の方法

東南アジアの GPS 連続観測局の一部を維持するとともに、そのデータを収集し、IGS のデータをあわせて解析し、日々の座標を計算した。図 1 は、本研究に使用している GPS 連続観測局の分布を示している。現時点では、2008 年 7 月 7 日のデータが最新である。

解析には Bernese5.0 を使用し、IGS の Final 軌道情報等を用いた。2006 年 11 月 5 日より、準拠する座標系が ITRF2005 に変更されたため、ITRF2000 系の 2006 年 11 月 4 日以前の座標を、変換パラメータを用いて

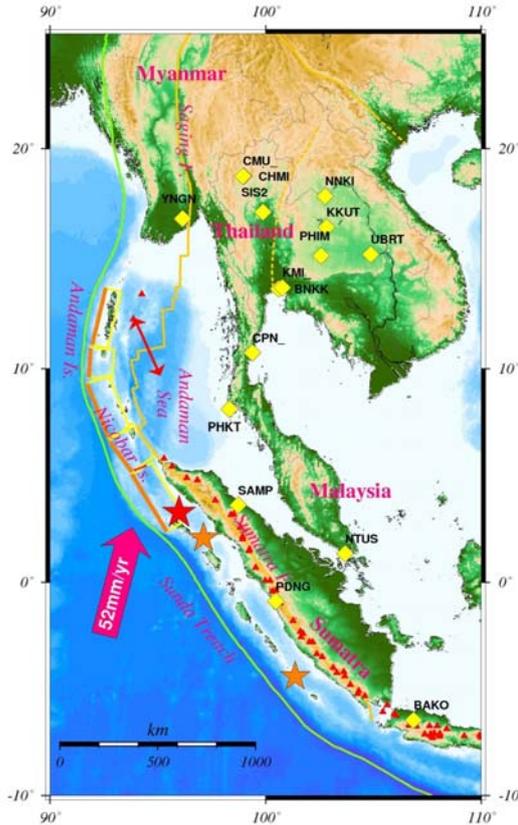


図 1. スマトラ・アンダマン地震震源域周辺のテクトニクスと、GPS 連続観測点の配置。★がスマトラ・アンダマン地震の震央、★が 2005 年ニアス地震と 2007 年スマトラ南方沖地震の震央。黄色いひし形が GPS 連続観測点を示す。緑の実線がスンダ海溝、黄色い実線がスマトラ断層-アンダマン海の拡大軸-サガイン断層を示す。いずれもテキサス大の Website より。赤い両羽の矢印がアンダマン背弧の拡大方向(Curray, 2005)を、ピンクの太矢印が Bock et al.(2003)に基づいて計算したインド-オーストラリア・プレートのスンダ・ブロックに対する相対運動方向を示す。赤い三角は活火山。矩形は、Hashimoto et al.(2006)による断層モデル。

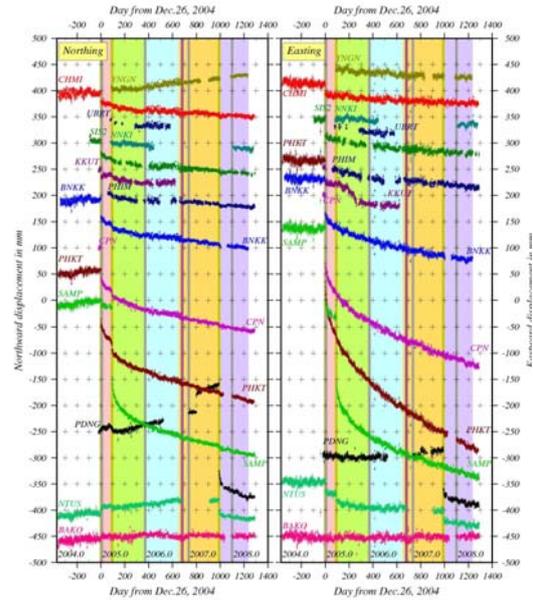


図 2. 観測された GPS 連続観測点の 2004 年 1 月から 2008 年半ばまでの座標変化、南北 (左) および東西 (右) 成分。スンダ・ブロックの運動を除去したもの。横軸は、本震からの通算日。色分けは、図 3 の変位ベクトルを求めた期間に対応する。また、灰色の実線は年始、赤い実線が ITRF2000 から ITRF2005 への変更時を示す。

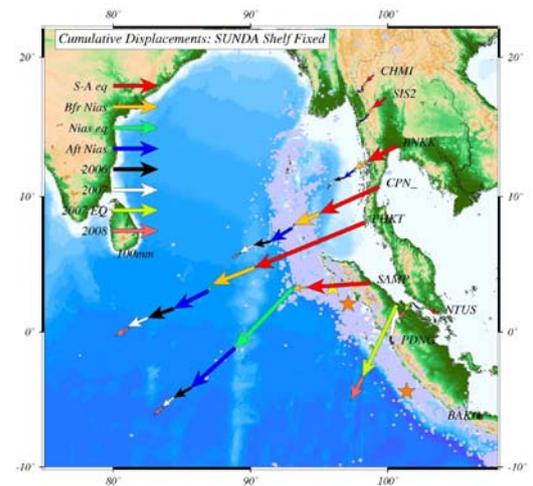


図 3. イベントおよび期間ごとの水平変位。赤がスマトラ・アンダマン地震の本震時変位、オレンジが 2004 年 12 月 27 日から 2005 年 3 月 27 日までの、緑が 2005 年 3 月 28 日のニアス地震による変位、青が 2005 年 3 月 29 日から 2005 年 12 月 26~27 日まで、黒が 2005 年 12 月 26~27 日から 2006 年 10 月 7~8 日まで、白が 2006 年 10 月 7~8 日から 2007 年 9 月 10~11 日まで、黄緑が 2007 年 9 月 12 日スマトラ南方沖地震による変位、ピンクが 2007 年 9 月 13~14 日から 2008 年 5 月 4~13 日まで。

ITRF2005 系に変換して、不連続のない時系列を得た。さらに、空間フィルターを適用して全観測点共通の誤差を除き、最後に Bock et al.(2003)のオイラー極を用いて、スダ・ブロックに対する変位とした。

4. 研究成果

4-1. 観測された余効変動の特徴

図 2 に、2004 年 1 月 1 日から 2008 年前半までの座標水平成分の変化の時系列を示す。PHKT (プーケット)、SAMP (サンパリ) はじめ、多くの観測局において余効変動が認められる。PHKT の地震時変位は、西へ 25cm、南へ 11cm であるが、本震直後から 2008 年 5 月上旬までの変動は西へ 30cm、南へ 15cm であり、余効変動が地震時変位を上回っている。CPN (チュンポン) は西へ 19cm (地震時変位 13cm(以下同じ))、南へ 10cm (6cm)、BNKK (バンコク) は西へ 9cm(7cm)、南へ 6cm (4cm) と、いずれの観測点においても余効変動が地震時変位より大きくなっている。データの欠測やアンテナの移設があるものの、タイ内陸部の PHIM (ピマーイ) と NNKI (ノンカイ) においても西向き余効変動が認められる。なお、YNGN (ヤンゴン) は、2006 年初めころから北西方向に移動していることが注目される。スマトラ島内の SAMP などは、ニアス地震の影響の方が大きい。

図 3 に、スマトラ・アンダマン地震から 2008 年半ばまでの変動を、期間毎に分けて求め、連続的に表示した。PHKT は、地震時変位と同じ方向に余効変動が進んでいくのに対して、SAMP はニアス地震による地震時変位と余効変動が顕著であることがわかる。

4-2. 余効すべりモデルによる解釈

まず、余効すべりモデルで説明することを試みる。震源分布に基づいてプレート境界面を設定し、この面上の走向・傾斜方向 600km × 300km (アンダマン諸島周辺)、750km × 300km (ニコバル島からスマトラ北端部)、および 500km × 300km (ニアス地震震源域) の 3 つの矩形領域内で、約 75km 間隔のグリッドにおけるすべり分布を推定した。なお、各矩形領域の外側境界では、すべりを 0 に拘束している。観測期間を、(1)本震からニアス地震までの期間、(2)ニアス地震から 2005 年末、(3)2006 年の 1 年間、(4)2006 年末から 2007 年スマトラ南方沖地震までの期間、(5)スマトラ南方沖地震から 2008 年 5 月末まで、の 5 つの期間にわけ、それぞれの期間における変位に対するすべりを推定した。なお、遠地の観測点のみを使用しているため、推定されるすべりの深さ方向の解像度は低いことに留意が必要である。

図 4 にインバージョンの結果、得られた余

効すべり分布と計算変位を示す。本震発生からニアス地震直前までの期間、顕著な余効すべりがスマトラ島北端からアンダマン諸島に至る領域に推定された。推定されるモーメントは $1.23 \times 10^{22} \text{Nm}$ で、Mw8.66 に相当する。これに対して、ニアス地震発生後 2005 年末までの期間では、スマトラ島西方沖に最大のすべりが推定されている。また、アンダマン諸島南部において余効すべりのピークが認められる。推定されるモーメントは 1.79

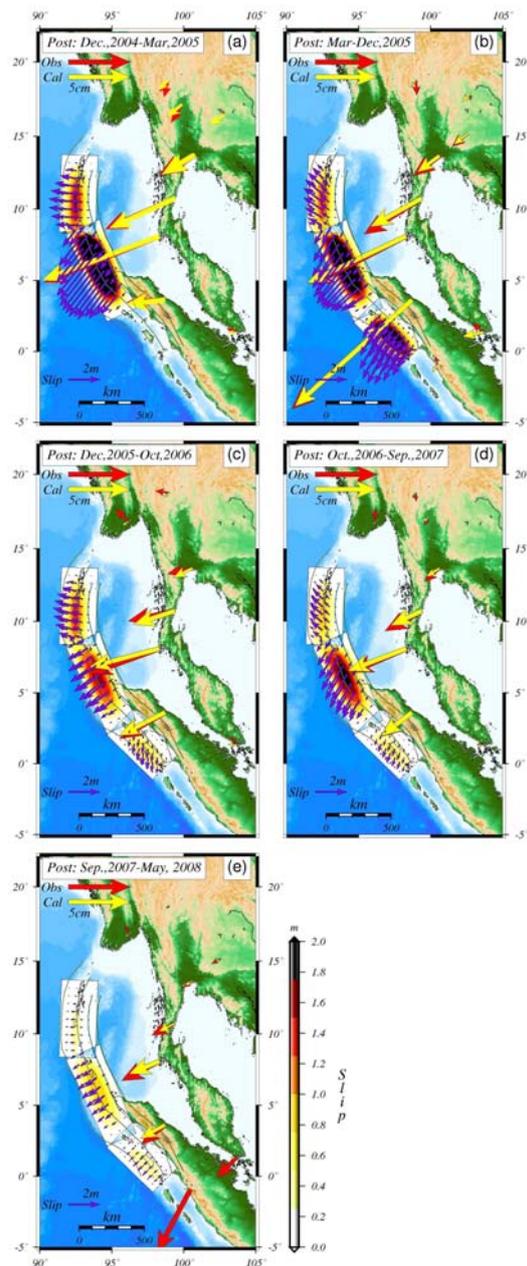


図 4. 図 3 の 5 つの期間の余効変動から推定したプレート境界面上の余効すべりの分布。矩形領域が設定した断層面を示し、紫の矢印が推定された余効すべり。コンターは、50km ごとのプレート境界面の深さ。赤と黄色の矢印は、観測および計算変位。

×10²²Nm で、Mw8.77 に相当する。2006 年に入るとニアス地震の余効すべりが急速に減衰しているのに対し、スマトラ島北端からアンダマン諸島に至る領域では依然余効すべりが認められる（モーメントは 9.70×10²¹Nm で、Mw8.59）。2006 年から 2008 年にかけては、余効すべりの領域が徐々に収縮していく。2007 年 9 月までのモーメント解放量は 9.24×10²¹Nm で、Mw8.58 に相当する。また、2007 年 9 月から 2008 年 5 月までのモーメント解放量は、4.48×10²¹Nm と推定され、Mw8.37 に相当する。この期間、余効すべりのピークはスマトラ島北端からニコバル島の下にはほとんどすべりが見られない。5 期間の余効すべりによるモーメント解放量は、総計 5.36×10²²Nm と推定され、Mw9.09 に相当する。

続いて、余効変動の時間変化のパターンについて考察した。ここでは、断層面の粘弾性クリープの理論的考察に基づく Montesi(2004)による式(1)を用いてスマトラ-アンダマン地震の余効変動の時間変化をモデル化することを試みた。

$$D_s(t) = D_0 + nV_0\tau \left\{ 1 - \left[1 + (1-1/n)t/\tau \right]^{(1-n)} \right\} \dots(1)$$

$D_s(t)$ が観測変位、 t は時間変数で単位は日、 D_0 は観測開始時の変位、 n は非線形クリープのべき乗則のべき、 V_0 は地震時の速度、 τ は時定数である。図5は、PHKT、CPN、BNKK、SIS2(シサムロン)および CHMI(チェンマイ)の5観測点の最大変位方向の成分の時系列に対して、式(1)を当てはめた結果である。1/n

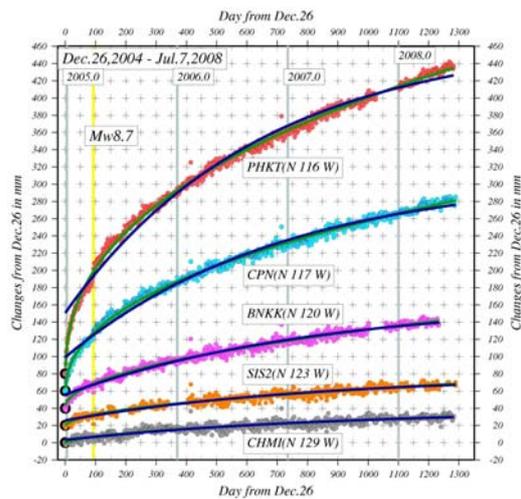


図5. PHKT、CPN、BNKK、SIS2およびCHMIの最大変位方向の成分への時系列当てはめ結果。各観測点の時系列を色を変えて表示。緑と青の実線は、それぞれMontesi(2004)の式と指数関数の当てはめ結果。

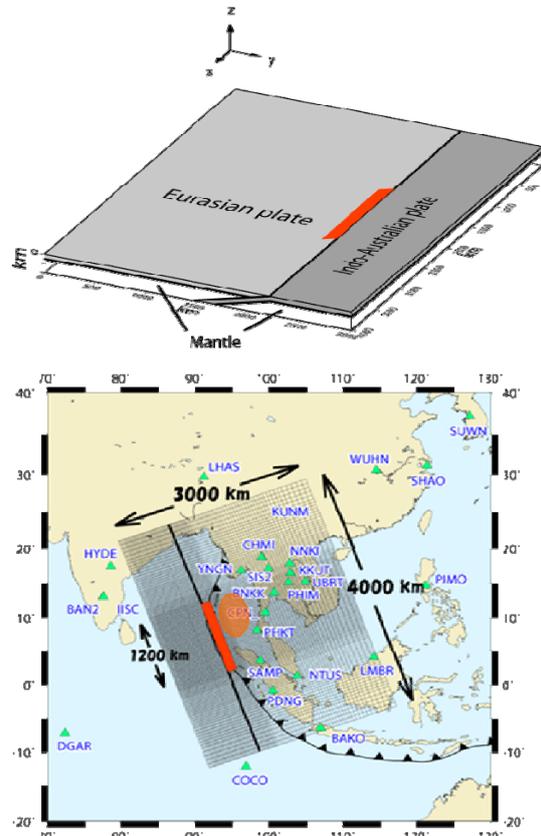


図6. 三次元有限要素モデル。(上)俯瞰図、(下)平面図。■がモデル断層の地表面への投影。太い実線がモデル・プレート境界。▲はGPS連続観測点。●は、背弧の低粘性領域を示す。

と τ をグリッド・サーチにより推定した。青の実線は、時定数が1つの指数関数での当てはめ結果で、PHKTやCPN、BNKKなどでは明らかにMontesiの式(1)の方がよく観測結果を説明している。

4-3. 不均質構造を考慮した粘弾性緩和による余効変動のモデル化

次に、粘弾性緩和モデルにより、余効変動の解析を行う。三次元有限要素法を用いて、スマトラ島からアンダマン諸島を含む領域をモデル化し、アセノスフェアの粘弾性定数を種々変えて理論余効変動を計算し、観測余効変動と比較する。

図6に作成した三次元構造モデルを示す。海溝軸に平行な方向4,000km、直交方向3,000km、深さ方向200kmの領域をモデル化した。総節点数は429,522、総要素数は405,444である。また、人為的な境界条件による影響を低減するため、モデル領域外側の境界には、無限領域要素を置いた。アセノスフェアをMaxwell粘弾性体、他の部分を弾性体と仮定した。震源断層は、長さ1,200km幅155kmで、海溝軸から東へ15°で傾き下が

るものとした。粘弾性の効果を中心に議論するために、すべりは 15m で均一な分布を仮定した。図 7 は、断層運動後 3 年間の積算変位の分布である。観測と計算変位の方向はよくあっているものの、PHKT では観測変位の方が少し大きく、タイ中北部では、計算変位の方がやや大きくなる。

アンダマン海下には、地震波速度構造の解析から、低速度領域が推定されており、高温の物質が上昇している可能性が指摘されている。そこで、一般的に考えられているアセノスフェアの粘性率より低い 1 または 5×10^{17} Pas の低い粘性率を、アンダマン海下に低粘性の領域を仮定して、余効変動を計算した(図 8)。3 年間の理論余効変動は、PHKT など計算値が観測値より大きく、さらに変位の方向が、時計回りに回転する。粘性率が小さいほど、その影響は大きいため、この領域には 5×10^{17} Pas より低い粘性率を持つ領域は存在しないと考えられる。

粘弾性緩和モデルが観測された水平変位の時間変化と、PHKT と CPN の観測時系列と比較した。この結果、本震後 6 カ月以降の変動に対しては、粘弾性緩和モデルも、観測結果をよく説明するものの、本震直後の 6 カ月の変動は説明できず、この間は余効すべりなどの別なメカニズムが卓越していたと考えられる。

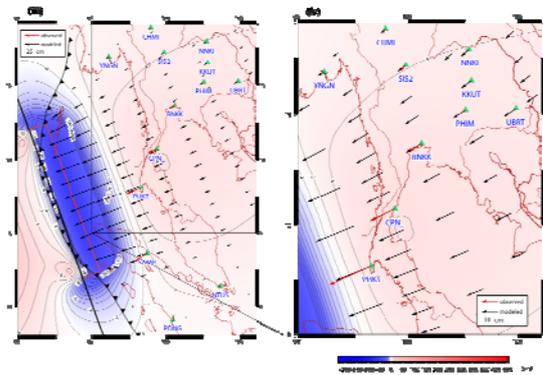


図 7. モデル 1 における断層運動後 3 年間の理論余効変動。黒→が計算値、赤→が観測値。左は全体図、右はタイ付近の拡大。

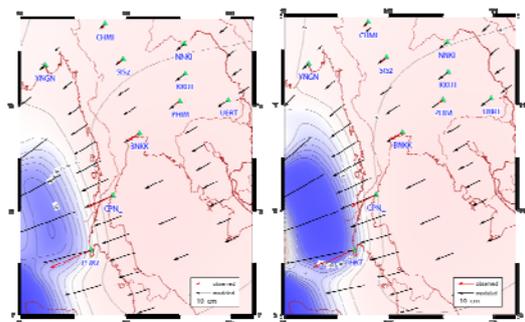


図 8. アンダマン海下に(左) 5×10^{17} Pas、(右) 1×10^{17} Pas の低粘性領域を仮定した場合の、3 年間の余効変動。

4. 3. 余効変動研究のまとめ

スマトラ・アンダマン地震後の余効変動を、東南アジアに設置された GPS 連続観測局のデータを解析することにより追跡し、2008 年 5 月末段階でも余効変動は継続しており、地震時変位よりも大きい変動が生じていることを確かめた。さらに、いくつかの期間ごとにプレート境界面上の余効すべりを推定した結果、余効すべりはスマトラ島北端とニコバル島の間の領域で顕著であり、この南北両側の領域では、かなり減衰していることがわかった。約 3 年半の余効すべりは、地震モーメントに換算して 5.36×10^{22} Nm (Mw9.09) に相当する。一方、粘弾性緩和モデルでは、本震後半年以降の変動を説明することが可能であるが、本震直後半年程度の変動は説明できず、この間は余効すべりが支配的であったと考えられる。アンダマン海下に低粘性領域を仮定した場合、観測変位を説明できないことから、アンダマン海下には粘性率が顕著に低い領域は必要ないと考えられる。

4. 5. 謝辞

本研究遂行にあたり、タイ、ミャンマーなどの地元の関係大学・機関から多大な協力を得た。さらには、名古屋大学大塚雄一氏、情報通信研究機構石井守氏から、GPS データを提供いただいた。ヤンゴン観測点は、文部科学省科学技術振興調整費「スマトラ型巨大地震・津波被害の軽減策」(代表者：東京大学地震研究所教授・加藤照之)において、設置されたものです。ここに感謝いたします。

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)

1. 橋本学・片木武・橋爪道郎・福田洋一・里村幹夫・伍培明・石井守・大塚雄一・加藤照之(2009), GPS連続観測で得られたスマトラ・アンダマン地震の余効変動とそのテクトニックな意義, 月刊地球, 31, 135-142.
2. Katagi, T., S. Yoshioka, and M. Hashimoto (2008), Influence of temperature- and depth-dependent viscosity structure on postseismic deformation prediction for the large 1946 Nankai subduction zone earthquake, Tectonophysics, 454, 1-13.
3. 橋本学・Nithiwatthn Choosakul・橋爪道郎・竹本修三・瀧口博士・福田洋一・藤森邦夫・里村幹夫・伍培明・斎藤享・丸山隆・川村真文・大塚雄一・加藤照之, GPS連続観測によるスマトラ地震の地殻変動(2006),

月刊地球号外「スマトラ島沖地震とインド洋津波／2004」, 56, 38-48.

[学会発表] (計 8 件)

1. Hashimoto, M., Y. Fukushima, T. Katagi, M. Hashizume, M. Satomura, P. Wu, and T. Kato, Deformations Associated With Large Interplate Earthquakes Along the Sumatra-Andaman Subduction Zone, 2008 Fall Meeting, American Geophysical Union, 2008 年 12 月 15 日, モスコーン・センター (サンフランシスコ)
2. Hashimoto, M., Y. Fukushima, T. Katagi, M. Hashizume, M. Satomura, P. Wu, and T. Kato, Monitoring of crustal deformation in the Sumatra-Andaman arc with space geodesy, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and The 2008 Fall meeting of Seismological Society of Japan, 2008 年 11 月 27 日, つくば国際会議場 (つくば市)
3. Hashimoto, M., T. Katagi, M. Hashizume, M. Satomura, T. Kato, P. Wu, Y. Otsuka, and S. Saito, Monitoring of Stress Relaxation and Transfer After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by Space Geodesy, IAG International Symposium on Gravity, Geoid & Earth Observation 2008, 2008 年 6 月 27 日, 地中海建築センター (ハニア)
4. Katagi, T., M. Hashimoto, M. Hashizume, N. Choosakul, S. Takemoto, Y. Fukuda, K. Fujimori, M. Satomura, P. Wu, Y. Otsuka, H. Takiguchi, S. Saito, T. Maruyama, and T. Kato, Postseismic displacement following the Sumatra-Andaman earthquake detected by continuous GPS observation and the effect of viscoelastic relaxation using 3D-FEM, AGU 2007 Fall Meeting, 2007 年 12 月 10 日, モスコーン・センター (サンフランシスコ)
5. Hashimoto, M., T. Katagi, M. Hashizume, N. Choosakul, S. Takemoto, Y. Fukuda, K. Fujimori, M. Satomura, P. Wu, Y. Otsuka, H. Takiguchi, T. Maruyama, S. Saito, and T. Kato, Afterslip of the Sumatra-Andaman earthquake detected by continuous GPS observations and their tectonic implications, IUGG XXIV2007, 2007 年 7 月 10 日, ペルージャ大学(ペルージャ)
6. 片木武・橋本学・橋爪道郎・竹本修三・福田洋一・藤森邦夫・里村幹夫・伍培明・大塚雄一・瀧口博士・丸山隆・斎藤享・加藤照之, GPS連続観測で得られたスマトラ・アンダマン地震の余効変動: 2006 年までの経過, 地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007

年 5 月 22 日, 幕張メッセ (千葉市)

7. 海老原裕子・里村幹夫・島田誠一・橋爪道郎・伍培明・橋本学・加藤照之, GPS観測によるスマトラ沖地震に伴う広域地殻変動, 地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 22 日, 幕張メッセ (千葉市)
8. Hashimoto, M., T. Katagi, M. Hashizume, N. Choosakul, Y. Fukuda, K. Fujimori, M. Satomura, P. Wu, Y. Otsuka, H. Takiguchi, T. Maruyama, S. Saito, and T. Kato, Postseismic moment release equivalent to Mw9 following the Sumatra earthquake detected by continuous GPS in SE Asia, AGU 2006 Fall Meeting, 2006 年 12 月 15 日, モスコーン・センター (サンフランシスコ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 学 (Hashimoto Manabu)
京都大学防災研究所・教授
研究者番号: 20293962

(2) 研究分担者

里村幹夫 (Satomura Mikio)

静岡大学・理学部・教授

研究者番号: 50126778

大谷文夫 (Ohya Fumio)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号: 90027293

中村佳重郎 (Nakamura Kajuro)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号: 20135510

(2008 年 3 月定年退職のため、研究分担者より辞退)

(3) 連携研究者

橋爪道郎 (Michio Hashizume)

タイ・チュラロンコン大学・理学部・教授

竹本修三 (Shuzo Takemoto)

京都大学・名誉教授