

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540404

研究課題名（和文） 粘弾性及び間隙弾性を考慮した巨大地震の余効すべり分布の解明

研究課題名（英文） Afterslip distribution of large earthquakes with viscoelastic and poroelastic responses

研究代表者

佐藤 利典（SATO TOSHINORI）

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70222015

研究成果の概要（和文）：粘弾性と間隙弾性の両方を考慮した余効すべり分布の推定方法の開発を行った。粘弾性の効果は、本震時のすべりだけでなく、余効すべりによる粘性緩和も取り入れ、間隙弾性の効果は、排水・非排水の差によってモデルに取り込んだ。実際の地震に適用した結果、弾性体のみで解析した結果とは大きく違う結果が得られた。これは、余効すべりの解析において、粘弾性と間隙弾性の効果は必ず取り入れなければならないことを示している。

研究成果の概要（英文）：We developed a new method for estimation of afterslip distribution with viscoelastic and poroelastic responses. We consider viscoelastic responses not only due to coseismic slip but also due to afterslip in the preceding intervals. Poroelastic responses are included in the model as difference between drain-undrain responses. Results of application to two earthquakes show that large different slip distributions are obtained between our new model and elastic only model. This means that viscoelastic and poroelastic responses are needed for analysis of afterslip distribution.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地震学

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：地震、地球変動予測、地殻変動、地震発生過程、粘性緩和、間隙弾性

1. 研究開始当初の背景

近年の地震研究の発展により、地震発生の物理過程及び基礎方程式がわかるようになってきた。これを用いて地震発生予測のシミュレーションを行うためには、様々なパラメータを知る必要があるが、特に重要なパラメータとして断層面の摩擦特性がある。断層面のどの場所が不安定すべりで、どの場所が安定すべりであり、また、地震後の強度の回復はどのようになっているのかを知ることは、

現実に即したシミュレーションをする上で欠かせない情報である。これを知る方法の1つとして、プレート間の巨大地震に対してGPSなどのデータから地震時のすべりやその後の余効すべりを求めるという研究が進められている（Ozawa et al. EPS, 2004; Baba et al. EPSL, 2006; Yagi et al. GRL, 2003など）。これまでの研究から、余効すべりは地震後数年以上起こっている場合もあること、余効すべりの規模は、本震の規模と同等

(もしくはそれ以上)になる場合もあることなどがわかっている。余効すべりの時間・空間的分布がわかれば、プレート間のその場所の強度回復過程を含めた摩擦特性が推定でき、地震発生予測に対して重要な貢献ができることとなる。

これまでの研究のほとんどは、余効すべりを求める際に半無限弾性体を用いている。しかしながら、地震後の余効変動には、余効すべり以外に地震時のすべりに対するアセノスフィアの粘性緩和の影響があることが、研究代表者(佐藤)らの研究で示されている(Sato and Matsu'ura, GJI, 1992 など)。また、地表付近の流体の移動による間隙弾性(poroelasticity)の影響もありそうだということがわかってきた。このため、これまでの研究は、変動すべてを断層面のすべりに押し付けていることになり、正しく余効すべりを求めていないことになる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の問題点を克服するため、粘性緩和と間隙弾性の効果を適切に扱えるモデルを開発し、より正しい余効すべり分布を求めることである。研究開始当初に以下の3つの目標を設定した。

(1) 粘弾性を考慮した媒質での巨大地震余効すべりの時空間分布の推定

現在の時点では、粘弾性と間隙弾性を同時に考慮したすべり応答は定式化されていない。ただし、変動の緩和時間は、粘弾性は数年、間隙弾性は数週間と違うので、比較的長期間での余効すべり分布は粘弾性媒質のみを考慮すればよいと考えられる。そこで、時間ステップを長く(1-3ヶ月程度)とった粘弾性のみ考慮した媒質での巨大地震の余効すべりの時空間分布を求める。対象とする地震は、2003年9月に発生した十勝沖地震とする。この際、粘弾性変動は、地震時すべりに対応するものだけでなく、地震後の余効すべりに対する粘弾性変動も考慮する。これは、これまでの研究で、余効すべりの規模が本震と同程度であるといわれているので、余効すべりによるアセノスフィアの粘性緩和も大きいと推定できるからである。これにより、計算は大規模で煩雑なるが、より正しい余効すべり分布を求めることができる。

(2) 粘弾性と間隙弾性を考慮した媒質におけるすべり応答の定式化とプログラム開発

現在、粘弾性媒質でのすべり応答の定式化と間隙弾性媒質での定式化はそれぞれ行われている(Fukahata and Matsu'ura, GJI, 2006; Pan, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 1999)が、粘弾性と間隙弾性を同時に扱う「間隙粘弾性媒質」での定式化はないので、これを定式化しプログラムを開発する。

(3) 地震サイクルモデルを適用した地震前変動からのすべり遅れ分布の推定

余効すべりだけでなく、地震前のすべり遅れ分布も知らなければ、摩擦特性の推定が正しくできない。これは、余効すべりの時空間分布は、主に強度の回復過程を示しているのに対して、地震前のすべり遅れ分布は、定常時での断層面の摩擦特性を示していると考えられるからである。従来のすべり遅れ分布を求める研究は、半無限弾性体を用い、変動をすべてすべり遅れに押し付けて求めている。しかし、物理的に妥当な地震サイクルモデルからするとこれは正しくなく、プレート境界全体の定常的すべりによる変動が欠けている。そこで本研究では、地震サイクルモデルを適用し、粘弾性体での正しいすべり遅れ分布を求める。

以上の研究成果をもとに、最終的に粘弾性と間隙弾性を考慮した巨大地震余効すべり分布の推定を行う。

3. 研究の方法

(1) 粘弾性を考慮した媒質での巨大地震余効すべりの時空間分布の推定

2003年9月に発生した十勝沖地震を対象として研究を進めた。

・データは、国土地理院による「日々の座標値」を用い、地震前の定常的変動を地震後の変動から取り除いたものを解析に使用するデータとした。

・粘弾性媒質のすべり応答関数は、Matsu'ura et al., J. Phys. Earth, 1981 のものを用いた。

・解析に用いる構造は、これまで我々が進めてきた日本列島地殻活動モデリングで作成したプレート境界モデル(Hashimoto et al. Pure appl. geophys., 2004 など)を用いた。

・データからすべり分布を求めるインバージョンは、Yabuki and Matsu'ura, GJI, 1992、Fukahata et al. GJI, 2004 の ABIC を用いた方法を応用した。

本研究では、粘弾性媒質を考慮しているので、地震後のある期間の変動は、その期間に起こった余効すべりとその期間以前のすべり(地震時すべりと余効すべり)によるアセノスフィアの粘性緩和をたし合わせたものになる。そのため、観測方程式は以下の式ようになる。弾性体の場合であれば、行列 \mathbf{A} は \mathbf{E} の部分のみ非 0 でその他は 0 になり、かなりスパースなものとなるが、粘弾性体では、 \mathbf{V} の部分(粘性緩和の効果を表す)があるので、かなり密な行列となる。これを解く方法として、以下の方法を用いた。

観測方程式をみると、行列 \mathbf{A} は下三角行列のような形をしているので、時間ステップごとに解いていく。最初のステップ t_0 では、 $\mathbf{d}(t_0) = \mathbf{E}\mathbf{m}(t_0) + \mathbf{g}(t_0)$ 、次のステップ $t_0 + \Delta t$ では、

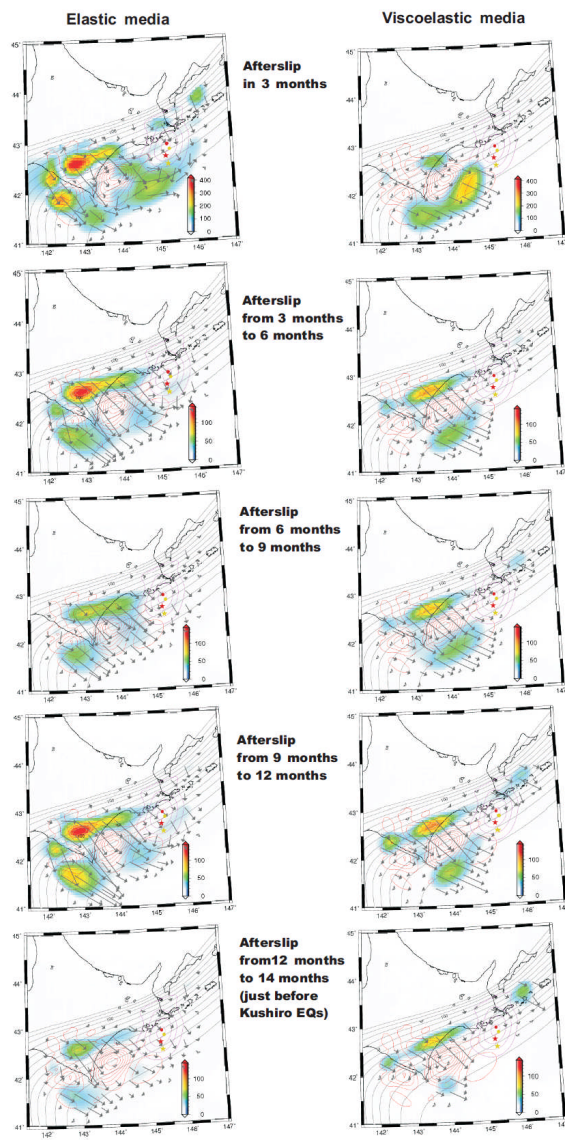


図1. 2003年十勝沖地震の3カ月ごとの余効すべり分布(cm/yr)。左図：弾性体のみの場合。右図：粘弾性の効果を取り入れた場合。矢印はすべりの大きさ、方向を示す。赤いコンターは2003年十勝沖地震のすべり分布、紫のコンターは2004年釧路沖地震のすべり分布を示す。黒のコンターはプレート境界を示す。

(2) 2007年インドネシア地震の解析

2007年南部スマトラ島沖で発生した地震(M8.5)の余効果すべり分布の解析を行った。この解析では、3カ月ごとにすべり分布を求め、最初の3カ月間では、間隙弾性の効果も取り入れて解析を行った。

その結果、間隙弾性の影響は、主に海溝付近の浅い場所で顕著に表れることがわかった。図2、図3から、間隙弾性を考慮すると、弾性体の場合に見えていたPagai島下でのすべりがなくなっている。これは、間隙弾性は

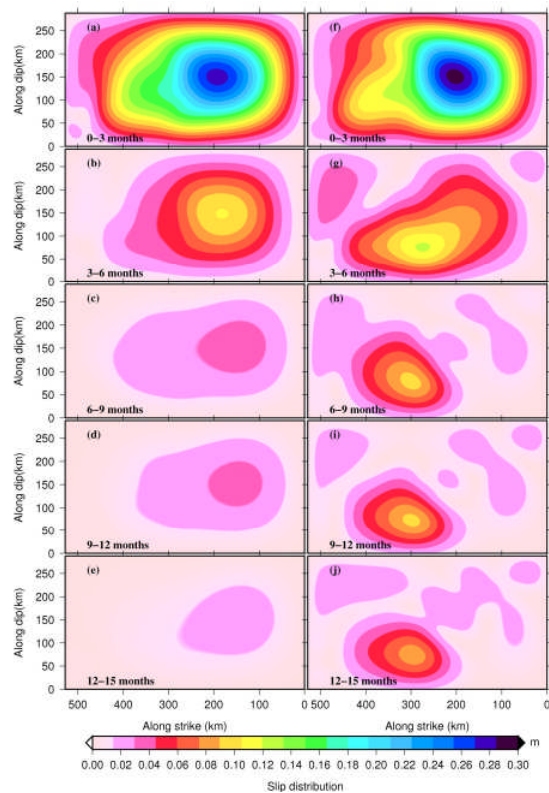
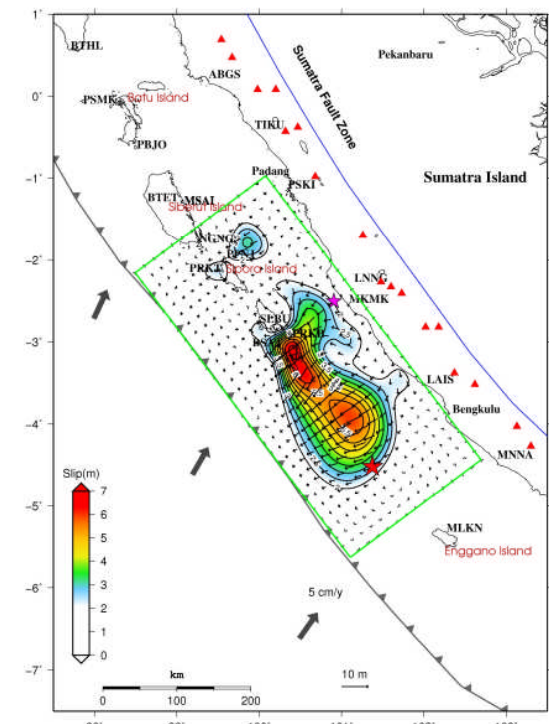


図2. 2007年インドネシア地震の本震時すべり(上図)と3カ月ごとの余効すべり(下図)。下図左：弾性体のみの場合。下図右：粘弾性・間隙弾性の効果を取り入れた場合。下図原点は上図断層の南端である。

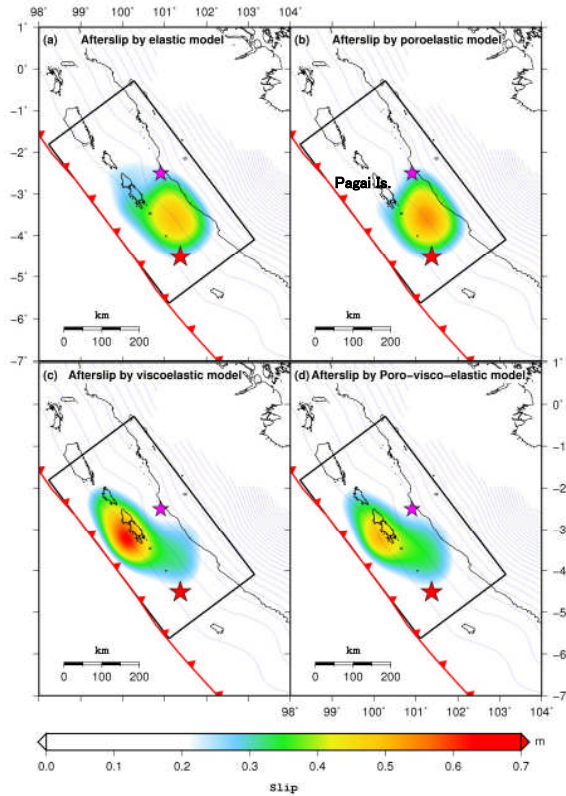


図 3. 15 ヶ月間の余効すべり分布。(a)弾性体、(b)間隙弾性体、(c)粘弾性体、(d)粘弾性体+間隙弾性体。

主に浅い部分での変動を引き起こすことから起因しているものと考えられる。

粘弾性の影響は3カ月以降に顕著にみられる。3カ月以降の弾性体のみと粘弾性・間隙弾性を考慮したものを比べると、弾性体では深い場所にすべりが集中し1年後もパターンが変わらないが、粘弾性・間隙弾性のほうは、最初の3カ月は深部ですべり、その後、浅部でのすべりが卓越するということがわかった。これは、GPSで観測された水平成分は海側方向を向いているのに対して、粘性緩和は浅い部分では陸側方向に変動するように起こるので、浅い部分でのすべりは、粘性緩和分を打ち消して海側方向に変位させるほど大きくなければならなかったことを示している。この結果は、余効すべりの解析では、粘弾性・間隙弾性の効果は必要不可欠であることを示している。なお、この浅い部分での余効すべりの上端で2010年にM7.7の地震が発生していて、余効すべりがトリガーした可能性がある。

この解析では、最初の3カ月のデータを用いて最適な粘性率も求めた。解析では、粘性率を超パラメータとしてABICを用いたすべり分布のインバージョンを行い、ABIC最小となる粘性率を求めた。その結果、粘性率は2.5

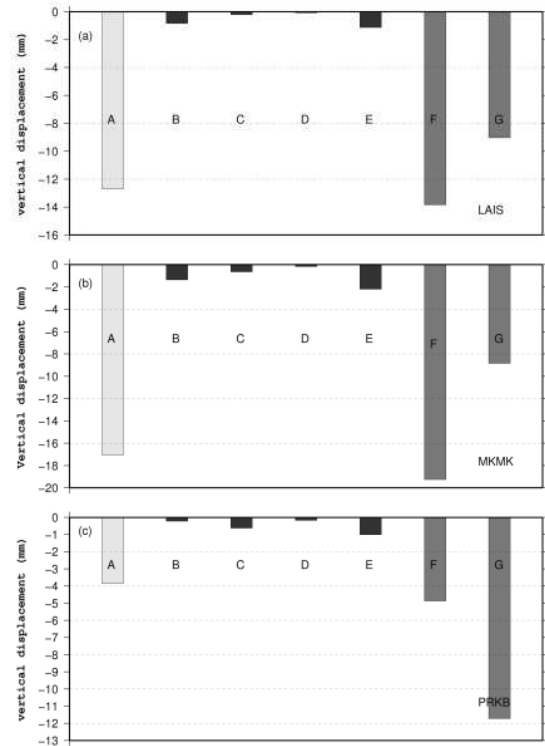


図 4. 粘性緩和による上下変動(9-12ヶ月)。A：本震時すべりの粘性緩和による変動、B, C, D：0-3、3-6、6-9 カ月時の余効すべりの粘性緩和による変動。E=B+C+D、F=A+E、G：GPS 観測値。LAIS, MKMK はスマトラ島の観測点、PRKB は Pagai 島の観測点。

$\times 10^{18}$ Pas と軟らかめとなり、粘性緩和の影響が大きいことが示された。軟らかめの粘性率であるため、余効すべりによる粘性緩和の影響も無視できないことも示された。図4は本震時すべりの粘性緩和と余効すべりの粘性緩和を示しているが、余効すべりの粘性緩和は本震によるものの2割以上となり無視できないことがわかる。

以上2つの成果から、余効すべり解析では、粘弾性・間隙弾性を考慮すると、これまでの結果と全く違う結果が得られるということが示され、この分野へ与える影響は大きい。これまで弾性体で得られていた余効すべり分布は、再解析をする必要があると考える。

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 Ashar Muda Lubis, Modeling afterslip distribution with elastic, poroelastic and viscoelastic responses investigated from Global Positioning System (GPS)

observations, 千葉大学大学院理学研究科
博士論文(指導教員:佐藤利典)、査読無、
2011.

- ②竹村英紀、粘弾性を考慮した 2003 年十勝
沖地震の余効すべり分布と 2004 年釧路沖
地震の関係、千葉大学理学部地球科学科卒
業論文(指導教員:佐藤利典)、査読無、2010.
- ③樋口春隆、粘弾性を考慮した巨大地震の余
効すべり分布の解明、千葉大学自然科学研
究科修士論文(指導教員:佐藤利典)、査読
無、2008.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Toshinori Sato, Hidenori Takemura,
Relationship between Afterslip of 2003
Tokachi Earthquakes and Coseismic-slip
of 2004 Kushiro Earthquakes Using
Viscoelastic Media, American
Geophysical Union, Fall Meeting 2010,
2010/12/13-17, San Francisco, USA.
- ②竹村英紀、佐藤利典、粘弾性を考慮した
2003 年十勝沖地震の余効すべり分布と
2004 年釧路沖地震との関係、日本地震学会
2010 年度秋季大会、2010/10/27-29、広島。
- ③Lubis, A. M., Hashima, A., and Sato, T.,
Afterslip distribution and viscoelastic
relaxation following the 2007 Bengkulu
earthquake series from GPS, 日本地球惑
星科学連合 2010 年大会, 2010/5/23-28, 千
葉。
- ④Lubis, A. M., Hashima, A., and Sato, T.,
Afterslip distribution corrected by the
viscoelastic relaxation following the
September 12, 2007 Southern Sumatra
Earthquakes, European Geophysical Union,
2010 Meeting, 2010/5/2-7, Wien, Austria.
- ⑤Toshinori Sato, Harutaka Higuchi, Aft
erslip distribution of large earthquak
es using viscoelastic media, American G
eophysical Union Fall Meeting 2009, 20
09/12/15, San Francisco, USA.
- ⑥樋口春隆、佐藤利典、粘弾性を考慮し
た巨大地震の余効すべり分布、日本地
球惑星科学連合 2008 年大会、2008/5/2
5、千葉。

[その他]

ホームページ等

[http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/edu_res/s
taff_sato.htm](http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/edu_res/s
taff_sato.htm)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 利典 (SATO TOSHINORI)

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 70222015

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者

深畑 幸俊 (FUKAHATA YUKITOSHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 10313206

2008, 2009 年度