

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

横ずれ型の内陸地震発生の物理モデルの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

横ずれ型の内陸地震を主な対象として、断層への応力集中機構のモデル化、断層の強度低下のメカニズム解明、地震活動変化のメカニズム解明等を行い、長期的な発生予測手法の改善につなげることが本研究全体としての到達目標である。以下に手法毎の到達目標の概要を述べる。

跡津川断層周辺の変形パターンが断層走向方向にどのように変化するかを明らかにして、横ずれ型の活断層のモデル化に反映させる。複数の微小地震活動域において、高精度の地下構造および応力分布を求め、他のデータと合わせて総合的に解析し、内陸地震の発生場の特徴を解明する。比抵抗構造研究により、内陸地震の断層の端の状態を解明し、断層の端に、地震の規模を規定する不均質構造があるのかどうかを検証する。四国地方を中心に基盤的な地殻・マントル上部の比抵抗構造研究を行い、主にフィリピン海スラブ周辺の物性状態の解明、さらには、定量的内陸地震発生モデルの構築等に貢献する。御嶽山周辺域で観測された高密度な地震データから、地震メカニズムトモグラフィ法により三次元間隙流体圧場を推定し、内陸地震の発生における間隙流体の役割を理解する。過去の歴史記

録等から明らかになっている南海トラフ巨大地震前後の西南日本における内陸地震活動の活発化について、現実的なモデルを用いた数値シミュレーションを通して活発化のメカニズムを考察することにより、今後数十年間に内陸地震の発生可能性の高い場所についての検討を行う。近年発生した内陸地震の前後の地震活動と地殻変動データの時間変化を詳細に解析し、地震活動変化のメカニズムを解明するとともに、確率予測が可能になるような統計モデルの提案を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題においては、地震、地殻変動、電磁気観測・解析、数値シミュレーション、地震活動解析など、色々な手法を活用するとともに、個別に得られた結果を総合することにより、目標の達成を計る。以下に、手法別に5か年計画の概要を述べる。

・地殻変動とモデリング：

跡津川断層周辺を対象としてGPS観測とInSAR解析を実施する。GPS観測から得られた変位場を用いてInSAR干渉画像中の長波長ノイズを軽減することにより、高精度かつ高空間分解能の面的な地殻変動分布を明らかにする。

・比抵抗観測とモデル化：

長野県西部地震震源域の南西端周辺において可聴域MT観測を行い、北東域の既存稠密観測データと統合して、震源断層全体を包括する領域について三次元比抵抗構造を推定する。基盤的比抵抗構造研究として、主に四国地方の比抵抗調査空白域において広帯域MT観測を行い大局的な比抵抗構造の地域特性を解明する。

・地震観測とモデル化：

近畿地方北部、山陰地域、長野県西部地震震源域等において実施中のオフライン臨時観測装置を用いた稠密地震観測を継続し、定常観測網の地震波形データと統合処理して、3次元地震波トモグラフィ、レシーバ関数解析、反射波解析による地殻構造解析を行う。また、極微小地震をも含んだ大量のメカニズム解を決定し、それを基に詳細な応力場を求める。電気比抵抗構造や表層地質等の情報も合わせて、活断層の分布やそれによる内陸大地震、また常時発生す定常的な地震活動の地域差が、どのような物理的要因によって支配されているかを解析・考察する。

・間隙流体圧場の推定：

名古屋大学定常観測等の地震波形データから、詳細な地震の震源分布とメカニズム解を推定しデータを蓄積する。これらのデータから御嶽山周辺域のテクトニック応力場と間隙流体圧場を三次元的に推定し、内陸地震の発生や地震火山相互作用について考察する。

・西南日本活動期のシミュレーション：

計算機上で南海トラフにおける固着と滑りや東北日本と西南日本間の東西圧縮、内陸活断層におけるすべり相互作用を考慮して、大規模計算手法を用いた現実的な数値モデルを構築する。数値モデルを用いて、西南日本内陸における応力場の変化や内陸活断層におけるクーロン応力を計算することによって、南海トラフ巨大地震と西南日本内陸地震の活発化・静穏化の因果関係を解明するとともに、現在の地殻活動の再現と今後の予測を試行する。

・地震活動変化：

内陸大地震の発生前の地震活動変化はゆっくりすべりによる応力変化(CFS)に起因するという説を、GNSS観測データの解析や地下構造や応力場のデータも含めて検証する。北摂・丹波地域における地震活動と大地震との関係や活動変化の原因について、地震メカニズム解や地下構造等の解析により、解明を試みる。さらに、地震活動の異常性を業務的に捉えられるようなモデルとそのソフトウェアを開発し、確率予測が可能になるような統計モデルの提案を目指す。

(8) 平成26年度の成果の概要：

・地殻変動とモデリング：

InSARとGNSS双方のデータを用いて跡津川断層近傍の地殻変動パターンを面的に把握するため

に、GNSS 観測点 14 箇所において、受信機・アンテナの交換や観測点新設などの整備を行った。これと平行して、人工衛星 ALOS 搭載の合成開口レーダー PALSAR が撮像した画像を用いて InSAR 時系列解析を行い、2011 年東北地方太平洋沖地震前の跡津川断層近傍の平均的速度場を求めた。この速度場を GPS データを用いて補正し、長波長ノイズを大幅に削減することに成功した。跡津川断層の北を走る牛首断層に沿って歪速度の大きな部分が見受けられる(図 1)。しかし、位相の標高依存成分や水蒸気遅延に伴うノイズがまだ残っているため、これを結論とするには至っていない。

・比抵抗観測とモデル化：

四国地方の比抵抗調査空白域において大局的な比抵抗構造の地域特性を解明するために、経度及び緯度方向に 10 分毎のメッシュを設定し、基盤の比抵抗構造研究を開始した。本年度は、自然界に存在する微弱な電磁場変動を信号とする広帯域 MT 法観測では観測点周辺の電磁ノイズ環境の状況が観測データの質を左右するため、観測候補地の選点は注意深く行った。その結果をふまえ、四国地方東部から中央部にかけて 5 地点で、2014 年下旬から 12 月中旬にかけての約 2 週間、広帯域 MT 法観測を実施した(図 2)。観測の結果得られた見かけ比抵抗探査曲線及び位相差曲線を図 3a 及び図 3b に示す。その探査曲線の特徴から、見かけ比抵抗値の全体的なシフト成分を除けば、全観測点で探査曲線の周波数方向の変化の傾向は共通していることが明らかになった。

・地震観測とモデル化：

山陰地方の地震帯における 3 次元地震波速度構造、地震メカニズム解、電気比抵抗構造、火山の分布や表層地質等の情報から、活断層と内陸大地震、また常時発生する定常的な地震活動の地域差が、どのような物理的要因によって支配されているかを解析・考察した。特に、2000 年鳥取県西部地震の余震域の北部に着目して、断層端部の特性を推定した。

鳥取県西部地震の余震域においては、南部では P 軸の空間分布が地震による応力変化と調和的なことから絶対応力が小さいと推定されるのに対して、北部では断層近傍でも広域応力場と調和的なことから摩擦係数 0.4 以上の高応力状態であると推定されていた(Yukutake et al., 2006)。しかしながら、図 4 に示すように、北部(C 領域以北)では P 軸は非常に良く揃っており、断層の極近傍でも乱れは見られないこと、直後の余震はその領域には震源が決定されていないこと(Ohmi et al., 2002)、InSAR でもその付近に干渉縞は見られないこと(矢来・他, 2002)などから、本震時にすべりが起こっていない可能性の方が高いと推定される。図 5 に、単純な矩形断層で長さが短めである鷲谷・西村(2000)の断層モデルによる応力変化に、広域応力場として差応力 20MPa を加えたものと P 軸の方位分布を比較した。北部においては、このような低応力でも P 軸の分布を説明可能である。北部では、余震分布が断層面から鉛直方向に拡がっており震源の深さも浅いことが知られているが、そこは、大地震の破壊が侵入しにくい領域である可能性がある。

そのことを各種のデータからより広域的に検討したものが図 6 である。深さ 5km における S 波速度偏差の図に P 軸の方位分布を重ねた。第四紀火山および更新世前期に活動した火山の分布や活断層(産総研 地質図 Navi による)と Shiozaki et al.(2006)による下部地殻の低比抵抗領域も合わせて示した。島根半島において第四紀火山付近を中心に海岸線と平行な低速度異常域(N)が顕著であるが、その南に平行して、規模の小さな低速度異常域(S)が伸びていることが分かる。鳥取県西部地震の余震域北部はこの低速度域の中に含まれる。さらに、余震域から約 25km 西の誘発された M5.5 の活動(黒線楕円)は、この低速度域(S)とさらに南のスポット的な低速度異常域に挟まれた部分に限られている。この付近は横田の単性火山活動が活発な領域である。鳥取県西部地震の余震域の南端にも周囲よりやや低速度の小さなスポットがあるように見える。

この低速度域(S)と南の低速度異常のスポットの間の高速度域の直下の下部地殻には Shiozaki et al.(2006)により低比抵抗異常域が 2 測線において見出されている。さらに、この領域付近ではメカニズム解の逆解析から応力場の回転が推定されているが、直下の下部地殻内にゆっくりすべりの断層運動を仮定することで説明されている(Kawanishi et al., 2006)。1978 年の三瓶山の地震(M6.1)の余震域でも同様の特徴が見られ、応力逆解析から、その付近において、鳥取県西部地域と調和的な応力場の回転が推定されている。

ところで、高速度域付近の P 軸の分布が深部のゆっくりすべりによる応力集中(回転)と調和的であることは当然であるが、図 6 では、北側の 2 つの低速度域 (N,S) でも P 軸の回転が見られる。この原因は今後の検討課題であるが、有限要素法による preliminary なシミュレーションによると、上部地殻内の幅を持ったやわらかい領域においても応力場の回転が作り出されることから、低速度域における応力緩和を見ている可能性がある。これは、大地震の断層運動がこの低速度域に侵入しないことと調和的である。

・間隙流体圧場の推定：

御嶽山周辺域では、1984 年長野県西部地震や 1984 年長野県西部地震などの内陸大地震、1976 年以降継続活発中の微小群発地震活動、御嶽山直下の火山性地震など多様な地震活動が観測される。本研究では、地震メカニズムトモグラフィー法 (Terakawa et al., 2010) により、これらの多様な地震活動を支配する地殻内の間隙流体の役割を明らかにすることを目指している。H26 年度は、従来の地震メカニズムトモグラフィー法を改良し、地震のメカニズム解から間隙流体圧場の時間発展を推定する手法 (Terakawa, 2014) を開発した (図 7) 。

また、最近の地震活動の震源域の拡大を考慮して、既存の定常地震観測網に新たな観測点 2 点を設置した。これにより、震源域を取り囲むように定常地震観測網が補強され (図 8)、震源位置やメカニズム解がより精度よく得られるようになった。

メカニズム解に関しては、従来、P 波初動の押し引き分布をデータとして推定してきた (Hardebeck & Shearer, 2001)。H26 年度は、P 波初動の押し引き分布に P 波と S 波の振幅比をデータに加えた解析法 (Hardebeck & Shearer, 2003) を用いるようにデータ処理の改良を実施した。これにより、メカニズム解が求まる地震数が 30% 程度増加した。この効果は規模の小さな地震 (M 0 - M 1) で大きい (図 9)。また、2014 年 9 月 27 日の御嶽山噴火に伴う火山性地震についても、63 個の地震のメカニズム解が得られた。噴火前は、主として東西方向に T 軸を持つ正断層型地震が卓越するのに対し、噴火後は東西方向に P 軸を持つ逆断層型の地震が卓越することがわかった (図 10)。

・西南日本活動期のシミュレーション：

現実的な内陸域断層帯におけるクーロン応力を計算するためには、ある程度単純でかつ現在の GEONET データを説明する断層ジオメトリの設定が必要である。そこで、ブロック断層モデルを用いて、西南日本の GEONET 速度場を説明する内陸断層のすべり・すべり欠損速度と南海トラフのすべり・すべり欠損速度の同時推定を行った。推定されたブロック間相対運動を図 11 に、南海トラフにおけるすべり欠損速度を図 12 に示した。主な成果は以下のとおりである。

全般的に GNSS から推定された断層すべり速度は、地質・地形学的に推定されたすべり速度より大きい。すべりの向きや種類はほぼ一致している。個々に見ると、中央構造線では測地学的なすべり速度は地質・地形学的なものよりもやや大きい。四国に対して紀伊半島側のすべり速度が半分程度になっている点などの傾向はよく似ている。一方、近畿周辺の活断層帯 (琵琶湖西縁・花折・六甲・淡路島・木津川・柳ヶ瀬断層帯など) では、5-10mm/yr の測地学的なすべり速度が推定され、地質学的すべり速度の数倍から 1 桁大きい。九州の主要断層帯では、測地学的なすべり速度が地質学的速度より 1 桁以上大きいだけでなくすべりのセンスも整合していない場所があり、ブロック分割や断層形状などのモデルを修正していく必要がある。

測地学的、地質学的な速度すべり速度が異なる原因として、測地学的すべり速度は、単一の断層帯ではなく、複数の平行する断層帯などを合算した速度であることや、時間スケールによる違い (例えば山陰など)、ゆらぎなどが考えられる。特に、測地学的には山陰や南九州に明瞭なブロック境界が見出され、ひずみ集中帯を形成しているが、対応する断層帯は見られない。このような違いは、これらのひずみ集中帯が若い構造帯で長期的にはそれほど変位が累積していないことを示唆している。

南海トラフ沿いの相対運動速度は、内陸での変形を考慮することにより、38-47mm/yr とグローバルプレート運動モデル (60mm/yr) よりやや小さく推定される。アムールプレートとフィリピン海プレート間の相対運動は、中央構造線や山陰ひずみ集中帯でも 2-3 割程度まかなわれていることを意味する。南海トラフのすべり欠損速度は、四国沖で最大となり、固着域の下限は微動・SSE 発生域にほぼ対応

する。日向灘やトラフ軸近傍の固着の有無は陸域 GNSS からは分解能がなく、推定できていない。

・地震活動変化：

内陸大地震の発生前の地震活動変化はゆっくりすべりによる応力変化 (CFS) に起因するという説を検証することが本研究の主な一つである。近年発生した内陸大地震に関連した地震活動変化と GNSS 観測データの関連の検討を開始したが、GNSS 観測データの小さな変化については注意深い検討が必要であることが分かった。

(9) 平成 26 年度の成果に関連の深いもので、平成 26 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

飯尾能久, 2015, 内陸地震の発生過程に関する研究, 地震被害の軽減に向けた研究者たちのメッセージ-阪神・淡路大震災 20 年: 地震関連科学の到達点と新たな決意-アブストラクト集.

前田裕太・寺川寿子・加藤愛太郎・山中佳子・古本宗充・山岡耕春・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 2014, 2014 年御嶽山噴火に伴う地震活動および地震波の解析結果序報, 日本火山学会 2014 年秋季大会, UP-22.

塩崎一郎・宇都智史・吉村令慧・大志万直人・久保篤規・村上英記, 2014, 「中国・四国地方の比抵抗観測研究の概要」, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (ホ?スター発表), SEM36-P05.

Terakawa, T., 2014, Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms, *Geophysical Research Letters*, 41 (21), 7468-7476.

Terakawa, T., Nicholas Deichmann, 2014, Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms, AGU 2014 Fall Meeting, S54A-07.

寺川寿子・Nicholas Deichmann, 2014, 地震メカニズムトモグラフィー法によるパーゼル地熱貯留層での間隙流体圧分布の時間発展解析, 日本地震学会 2014 年秋季大会, A22-02.

(10) 平成 27 年度実施計画の概要：

・地殻変動とモデリング：

引き続き跡津川断層周辺において GNSS(GPS) 観測を継続する。InSAR 解析を GNSS データにより補正する技術を高め、東北沖地震前の地殻変動パターンをより精度良く求め、物理モデルに拘束を与える。また、昨年打ち上げられた ALOS2 のデータを用いて InSAR 解析を行い、東北沖地震後の地殻変動パターンを把握する。

・比抵抗観測とモデル化：

長野県西部地震震源域の南西端周辺において可聴域 MT 観測を行い、北東域の既存稠密観測データと統合して、震源断層全体を包括する領域について三次元比抵抗構造を推定する。四国地方東部から中央部における基盤的比抵抗構造調査のための広帯域 MT 法観測を実施する。平成 26-27 年度のデータを用いて四国地方東部から中央部における予察的な基盤的比抵抗構造を推定する。

・地震観測とモデル化：

近畿地方北部、山陰地域、長野県西部地震震源域等において実施中のオフライン臨時観測装置を用いた稠密地震観測を継続し、定常観測網の地震波形データと統合処理して、レシーバ関数解析等による地殻構造解析を行う。また、極微小地震をも含んだ大量のメカニズム解を決定し、それを基に詳細な応力場を求める。これらに基づき、活断層の分布やそれによる内陸大地震、また常時発生する定常的な地震活動の地域差が、どのような物理的要因によって支配されているかを解析・考察する。

・間隙流体圧場の推定：

御嶽山周辺域の微小群発地震活動の北東麓への拡大を考慮して、既存の定常地震観測網に新たな観測点 1 点を設置する予定である。また、WIN システムのイベント自動検出処理を利用した地震波形の再検出処理 (2012 年 5 月 ~) の結果から、P 波初動の押し引き分布に P 波と S 波の振幅比をデータに加えてメカニズム解を再推定し (Hardebeck & Shearer, 2003) , データベースを構築する。これらの高解像度のデータから、御嶽山周辺域の広域応力場 (可能なら間隙流体圧場も) を 3 次的に推定し、より大きな規模の地震データに基づく過去の結果 (e.g., Terakawa & Matsu 'ura, 2010; Terakawa et al.,

2013)と比較する。2014年9月に噴火した御嶽火山の活動に関しては、山頂直下の地震活動の推移を分析する。

・西南日本活動期のシミュレーション：

GNSSデータを説明するブロック断層モデルの改良を行う。特に中部地方の活断層等を考慮して西南日本のモデルを完成させる。さらに、弾性・粘弾性を考慮した西南日本の数値モデルにブロック断層モデルの結果を反映させて、内陸活断層でのクーロン応力計算の試行に着手する。

・地震活動変化：

内陸大地震の発生前の地震活動変化はゆっくりすべりによる応力変化(CFS)に起因するという説の検証、および、北摂・丹波地域における地震活動と大地震との関係や活動変化の原因の解明を試みる。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

飯尾能久、高田陽一郎、吉村令慧、片尾 浩、宮澤理稔、西村卓也、平原和朗

他機関との共同研究の有無：有

名古屋大学 寺川寿子、山中佳子

鳥取大学 塩崎一郎

九州大学 松本 聡

東京大学 上嶋 誠

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所

電話：0774-38-3348

e-mail：

URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：飯尾能久

所属：京都大学防災研究所地震予知研究センター

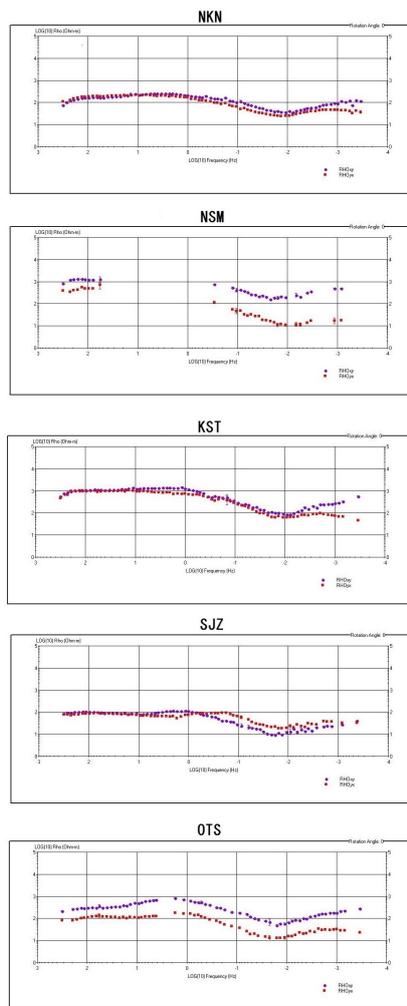


図 3a 見かけ比抵抗探査曲線

南北方向の電場と東西方向の磁場変動から推定された見かけ比抵抗を青丸で示し、他の組み合わせで推定されたそれを赤丸で示す。縦軸は見かけ比抵抗(Ω)、横軸は周波数(Hz)を表し、いずれも対数目盛りで表現されている。上図から下図へかけて東から西方向に観測点を並べている。

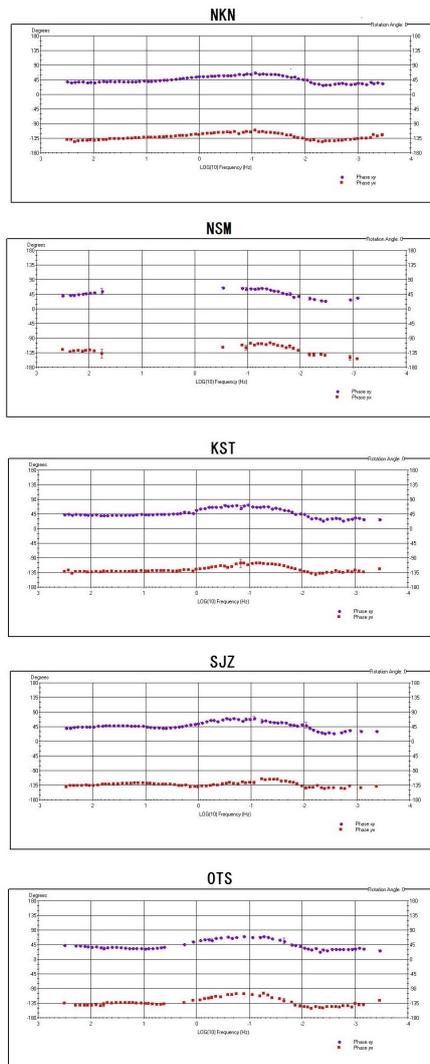


図 3b 位相差探索曲線

南北方向の電場と東西方向の磁場変動から推定された位相差を青丸で示し、他の組み合わせで推定されたそれを赤丸で示す。縦軸は位相差（度）を表す。横軸は周波数（Hz）を表し、対数目盛りで表現されている。

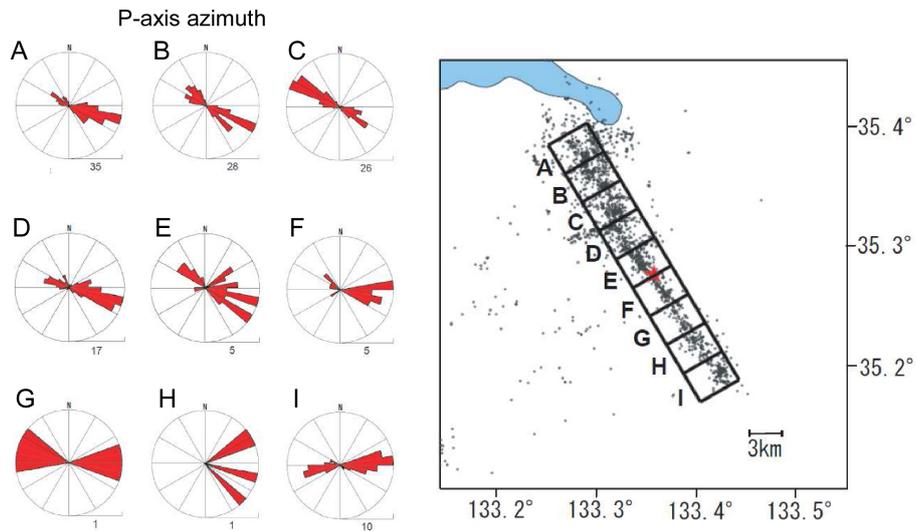


図4 鳥取県西部地震の余震域におけるP軸の方位分布
鳥取県西部合同余震観測のデータによる。余震域北部のA C領域においては、P軸の方位は良く揃っておりNからEの間となるものはない。

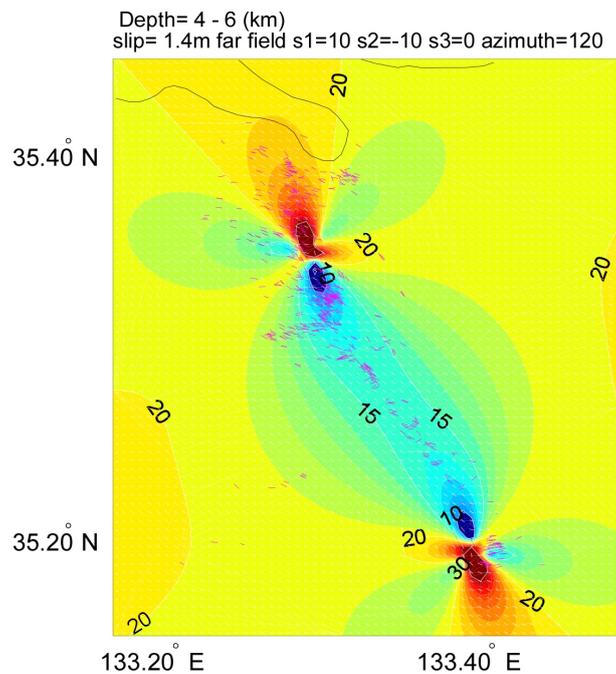


図5 鳥取県西部地震の余震域周辺における応力場とP軸の方位分布
深さ5kmにおける差応力(白線で最大圧縮応力方向を示す)と46kmにおける余震のP軸の方位分布(ピンク)。用いた震源モデルは鷺谷・西村(2000)による1枚の矩形断層。広域の差応力場としては、N120°E方向の水平圧縮応力として10MPa、N30°E方向の水平引っ張り応力として10MPaを与えた。余震域北部でP軸と最大圧縮応力の方向が調和的である。

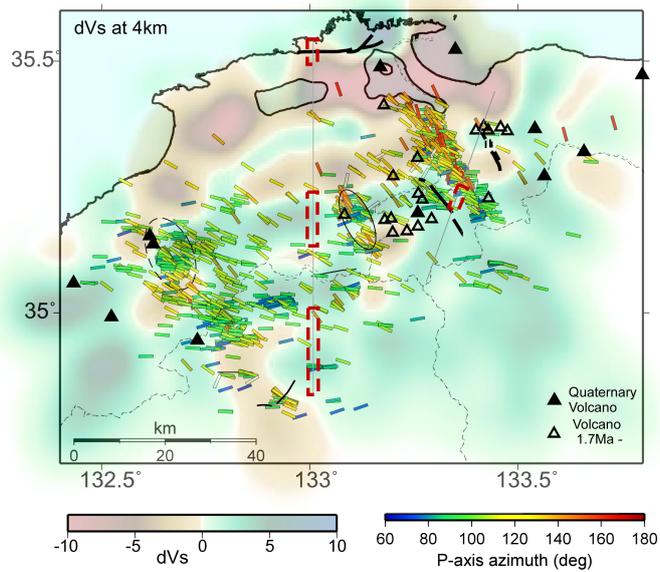


図6 山陰地方の地震帯におけるS波速度偏差とP軸の方位分布

2009~2011年の満点地震計による稠密観測データ等から推定されたS波速度偏差(深さ4km)とP軸の方位分布(全ての深さ)。第四紀火山および更新世前期に活動した火山の分布、活断層も図示している(産総研地質図Naviによる)。Shiozaki et al.(2006)による下部地殻の低比抵抗領域(赤の点線による矩形領域)と2つの測線位置(灰色)も合わせて示した。黒線楕円は2000年10月8日のM5.5の地震活動域、黒点線楕円は1978年の三瓶山の地震(M6.1)の余震域。

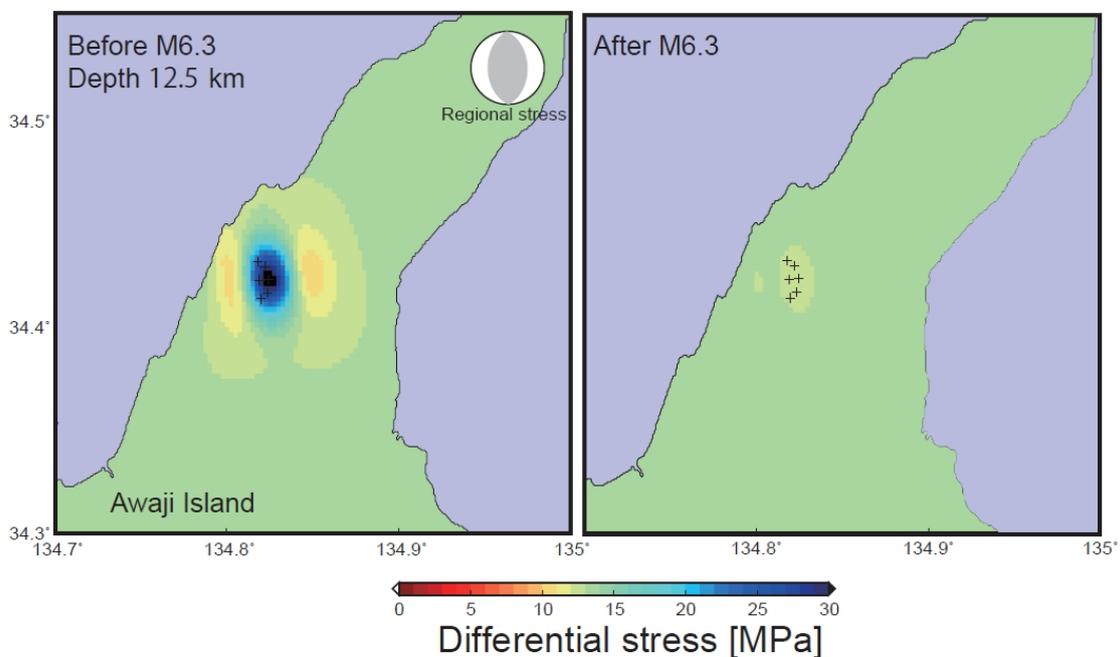


図7 2013年淡路島の地震(M6.3)前後の深12.5kmの差応力分布

兵庫県南部地震および淡路島の地震の余震のメカニズム解の解析による。

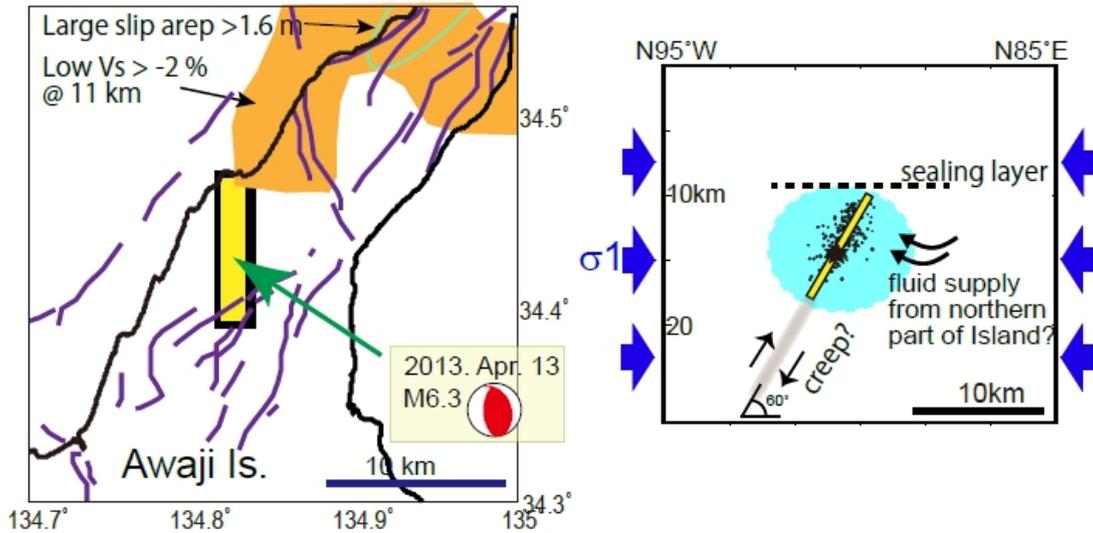


図8 淡路島の地震の発生過程の模式図
淡路島北部からの流体の供給が示唆される。

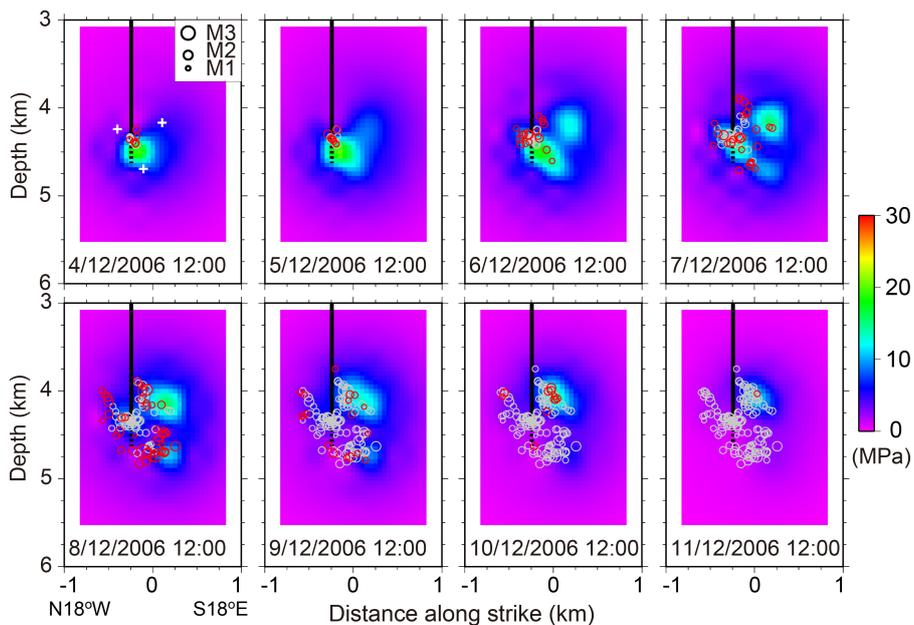


図7 バーゼル地熱貯留層の間隙流体圧場の時間発展（注水開始から約10日間）
カースケールは間隙流体圧の静水圧からのずれを表す。黒線は注水井、黒点線は井戸の開口部を表す。赤丸は表示された日時の半日以内に発生した地震、灰色の丸はそれ以前に発生した地震を表す。注水開始から6日後にシャットインするまでの間は、間隙流体は注水井の周りから時間とともに広がり、主に井戸の南東方向へ伸びる。シャットイン後は、主要な流路の先端に形成された高压流体域が孤立し、そこで地震を起こしながら、間隙流体圧は低下してゆく。

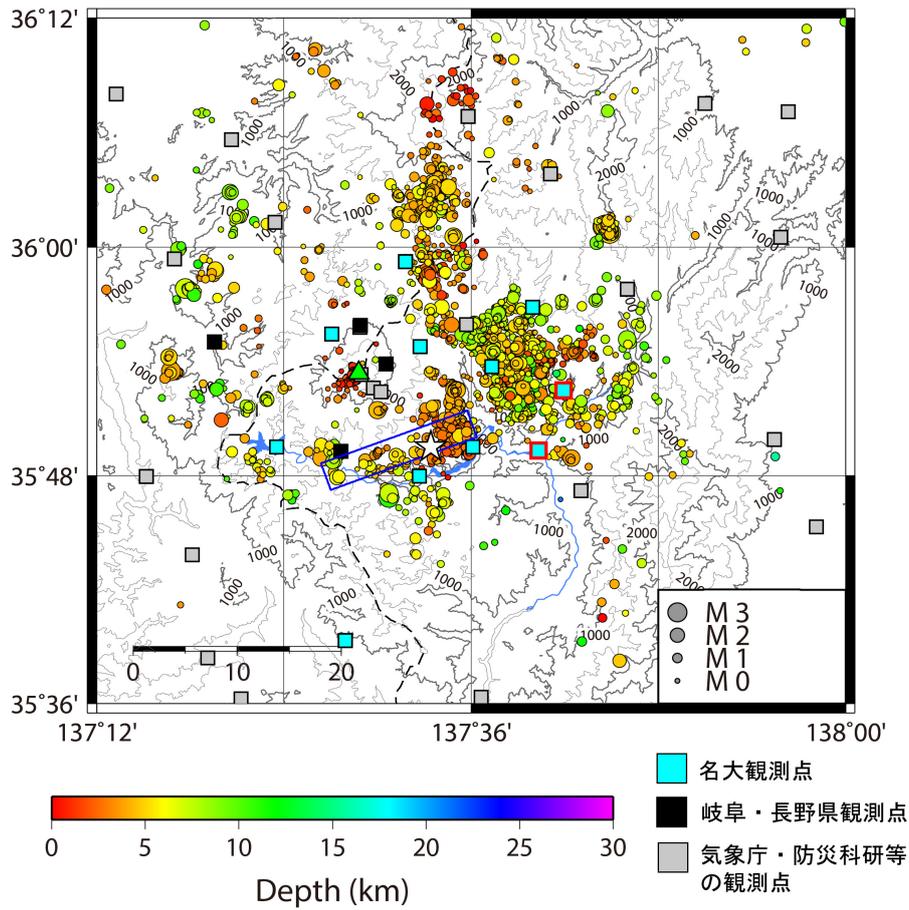


図 8 御嶽山周辺域の地震活動（2014.1-2014.12）と観測点分布
 赤線で取り囲んだ水色の四角印が H26 年度に新設した観測点。と青線の矩形は 1984 年長野県西部地震の震源と震源断層。

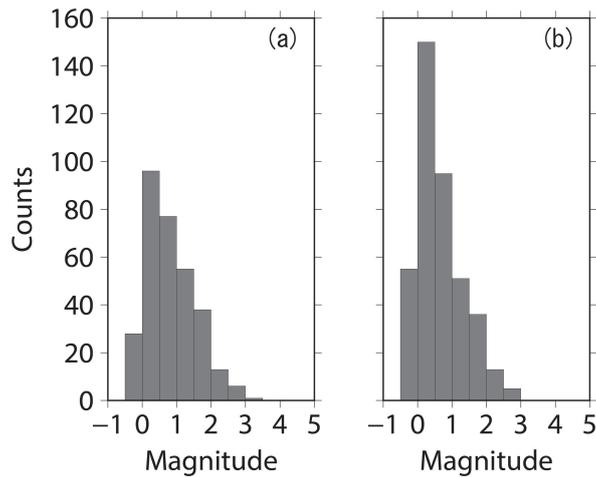


図 9 メカニズム解が得られた地震のマグニチュード度数分布（2014.8-2014.12）
 (a) P 波初動の押し引きをデータとした場合。(b) P 波初動の押し引き及び P 波と S 波の振幅比をデータとした場合。P 波と S 波の振幅比をデータに加えた場合、規模の小さな地震（M0~1）のメカニズム解をより多く推定できるようになることがわかる。

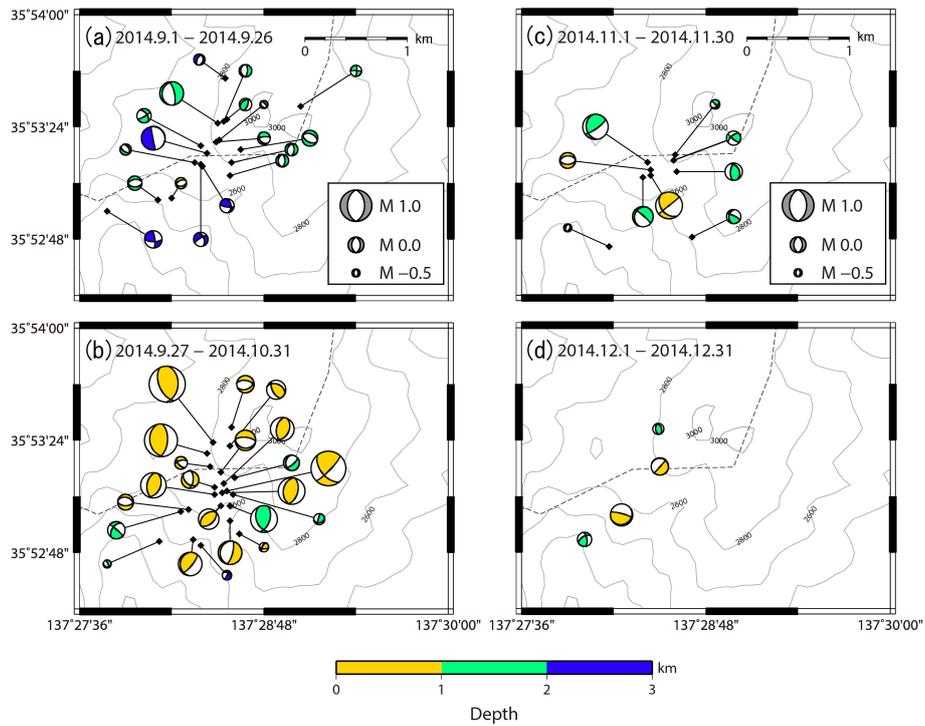


図 10 2014 年御嶽山噴火に伴う地震のメカニズム解

(a) 2014.9.1-2014.9.26、(b) 2014.9.27-2014.10.31、(c) 2014.11.1-2014.11.30、(d) 2014.12.1-2014.12.31。噴火前は、主として東西方向に T 軸を持つ正断層型地震が卓越するのに対し、噴火後は東西方向に P 軸を持つ逆断層型の地震が卓越する。

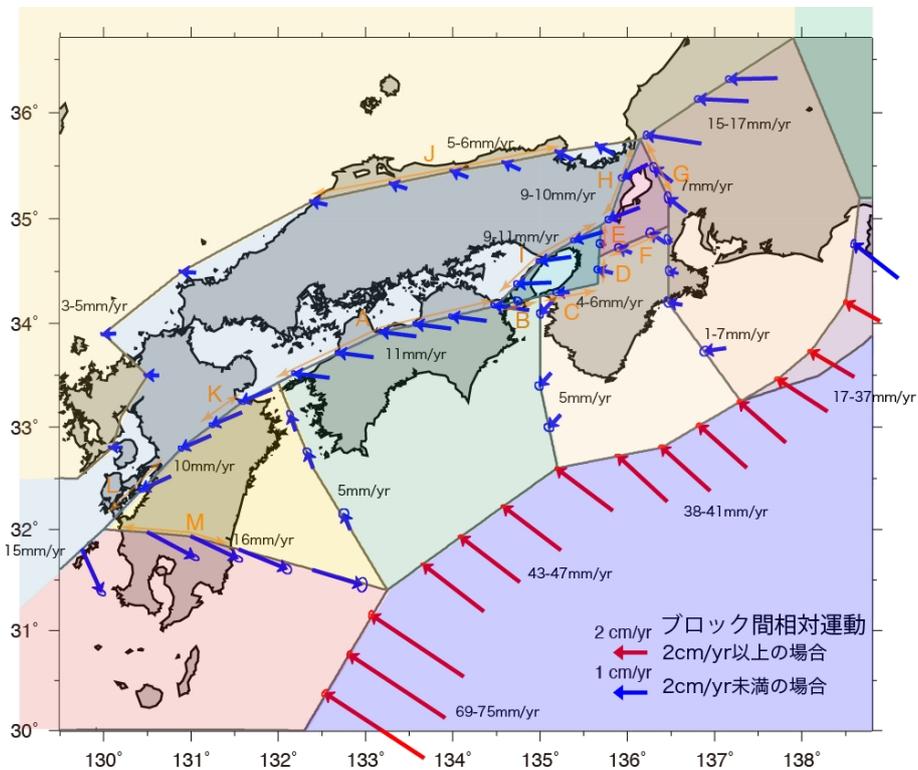


図 11 ブロック間相対運動

地図上の範囲は 11 枚のブロックで構成され、ブロック境界での相対運動速度を矢印で示した。

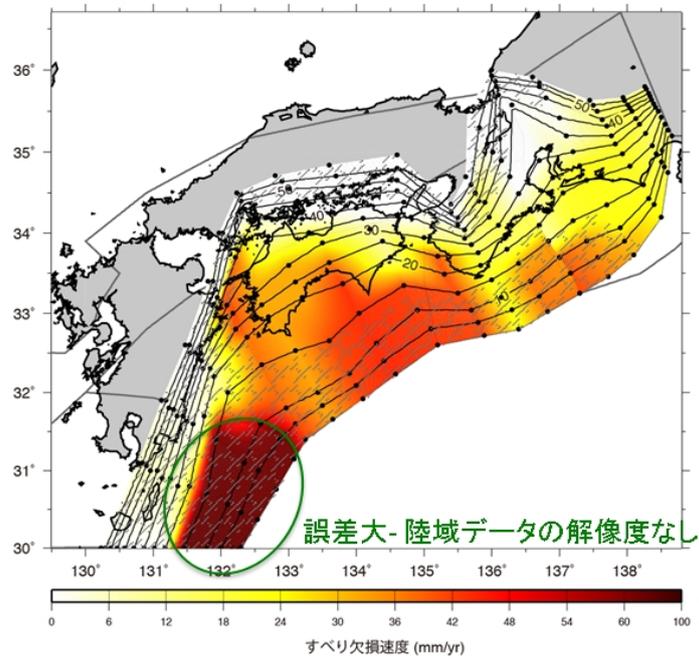


図 1 2 南海トラフのすべり欠損速度
 網掛けの領域は、推定誤差が 30mm/yr の領域。