

(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：

注水実験による内陸地震の震源断層の詳細な構造と回復過程の研究

(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

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(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

(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：

野島断層において第 2 回目の 1800m 深度注水実験を実施する。第 1 回注水実験(2013 年実施)と合わせて、震源断層の透水性構造、および震源断層から分岐断層にいたる詳細な破碎帯(透水性)構造を推定する。震源断層における透水性の経年変化を検出し、野島断層(震源断層)の強度回復過程について検討する。1800m 深度注水に伴う誘発地震を検出し、誘発地震の発生過程および詳細な断層構造と地震発生特性について解明する。野島断層および他の活断層(震源断層)について、断層深部構造(特に走向方向の構造不均質性)と本震時の破壊過程および回復過程に関する特性を抽出する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

野島断層での第 1 回目の 1800m 深度注水実験(2013 年 9 月)について、観測データの解析・モデリングを深化させる。まず、震源断層を深さ約 400m において貫通する 500m 孔での地下水位データについて、注水に伴う微小な変動を抽出し、拡散過程モデリングにより震源断層の透水係数を推定する。800m 孔底における歪み変動、地下水位変動、地表で測定された自然電位データについてもさらにモデル化を進め、野島断層の震源断層から分岐断層にいたる断層帯全体の透水性構造、および注入水の挙動を推定する。これにより、従来の 540m 深度注水に対して行った 800m 孔歪変動および地下水位変動のモデリング解析(拡散過程モデル)の改善・高度化へのフィードバックを行う。

第 2 回目の 1800m 深度注水実験を 5 年度目(平成 30 年度)に実施する。野島断層の震源断層(最上部)の透水性構造の時間変化を検出し、強度回復過程について検討する。

野島断層上盤側の地表岩盤に設置されたアクロス震源の連続運転を実施する（各年度約2ヶ月間）。これにより、従来検出されていたアクロス震源～800m孔底地震計間の地震波の走時・振幅の経年変化についてさらに検証する。S波偏向異方性の測定も合わせて行い、地震波の走時や振幅変動の要因となる野島断層近傍の構造特性について検討する。

1800m深度注水に伴う誘発地震（極微小地震）の発生を検出する。1800m孔地震計の高速（10kHz）サンプリング波形の解析により、誘発地震の震源過程（震源パラメータおよびそのスケージング、初期破壊過程、等）を推定する。地表に設置する地震観測点も含めて高精度の震源決定を行い、断層トラップ波の解析とも合わせて、断層破碎帯と誘発地震の位置関係を明らかにする。誘発地震および定常地震活動について、800m孔地震波形の相互相関係数等にもとづいて震源精度以上に高い精度の震源分布特性（震源クラスター構造）を明らかにする。これらの結果に基づき、注水誘発地震および定常地震活動について、震源過程および発生特性の違い、およびそれらと断層微細構造との関係を明らかにする。

注水実験によらない地震学的な手法（地震波散乱係数やS波偏向異方性の経年変化）からも地震発生後の震源断層の回復過程を検出できる可能性がある。野島断層および最近発生した内陸地震の震源断層を対象として、断層深部構造（特に走向方向の構造不均質性）、本震時の破壊過程と回復過程の関係を系統的に調べる。

年度毎の計画概要は以下のとおり。

26・27年度：1800m深度注水実験（第1回）データの解析・モデル化、ボアホール連続観測・データ解析（地震、地殻変動、地下水）、アクロス連続運転、野島断層等の深部不均質構造および回復過程の地震学的解析

28・29年度：ボアホール連続観測・データ解析（地震、地殻変動、地下水）、アクロス連続運転、野島断層等の深部不均質構造および回復過程の地震学的解析

30年度：1800m深度注水実験（第2回）の実施および解析・モデル化、地震臨時観測・自然電位観測、アクロス連続運転、ボアホール連続観測・データ解析（地震、地殻変動、地下水）、野島断層等の深部不均質構造・回復過程の取りまとめ

（8）平成26年度の成果の概要：

1．これまでの注水実験（1800m深度および540m深度）データの解析

昨年度実施した1800m深度注水実験（2013年9月）において、地表での自然電位変動は明瞭ではなく、一部の電極では従来の540m深度注水実験とは逆センスの変動が観測された。この自然電位変動について統一的に理解するために、従来の540m深度注水実験も含めた再検討を行った。1997年、2000年、および2003年の注水実験では、注水に伴う自然電位変動には次の3つの特徴が見られた：1)注水の開始・停止に同期した変動、2)注水孔（1800m孔）周辺では電氣的に負の変動、3)変動の大きさは注水孔からの距離が離れるほど小さくなる。しかし、2004年以降、とりわけ2006年の実験では特徴の2)、3)とは異なる変動が観測されるようになった。すなわち、注水孔から30m～50m離れた電極では変動の極性が逆（電氣的に正）となった。これは、従来の1800m注水孔を線電流源とするモデル（LSM）では説明されないため、これに正の電荷が注水孔から一定の距離に環状に分布する環状電流源（CSM）を重ね合わせるモデルを新たに検討した。その結果、以下のことが分かった：1)CSMを注水孔の540m深度に配置した場合には注水孔からの距離に関わらずLSMが卓越し正の電位変動は現れない、2)CSMを注水孔からの距離50m、200m深度に置くと注水孔から30m～50mの範囲内に正の電位変動が現れる。また、正の電位変動が現れる場合に従来の電位変動の空間分布から総電流量を求める方法を当てはめると総電流量を小さく見積もることも分かった。したがって、2006年の注水実験において推定された透水パラメータは、正の電荷の影響を受けているとすると、実際には小さくなることが予想される（図1）。540m深度注水実験において800m孔の湧水量から推定された透水係数の経年変化は、自然電位同様に2003年の実験までは減少し、以後の実験ではほぼ一定になっている（Kitagawa et al., 2007）。この透水係数がほぼ一定になった時期に自然電位変動の極性も従来とは

変わっている。深さ 540m に注入された水は、もともと浅い方向にも拡散していたはずであるが、注水深度での透水係数が低下し、より浅部に拡散するようになった結果と解釈することもできる。この CSM モデルだけでは 1800m 深度注水実験による自然電位変動を説明できないので、さらに統一的なモデルの構築を目指す必要がある。

その他、昨年度実施した 1800m 深度注水実験に関しては、極微小地震の活動変化の再検討、波形相関を用いた極微小地震の震源クラスター構造の解析なども行った。

2. アクロス連続運転による野島断層近傍の地震波伝播特性の測定：

2014 年 12 月 26 日から 2015 年 2 月中旬にかけて、野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源の連続運転を実施した（本成果報告後の 2 月 20 日に連続運転を終了する予定）。過去 12 回の連続運転（1999 年 6 月～2014 年 1 月の期間に各回 1～2ヶ月間実施）と同じパラメータで運転し、アクロス震源と 800 m 孔底地震計の間の伝達関数から P 波および S 波の走時と振幅の経年変化を推定した。いずれの連続運転においても共通の周波数帯の応答を取り出して比較することにより、1999 年～2015 年にかけての経年変化を推定した（図 2）。なお、2013 年 7 月に地震計データの収録機器を更新したため、その特性変化を計測して補正した。図 2 を見ると、走時は各期間で ± 1ms 程度のばらつきを持つものの、全体として 1999 年～2015 年にかけて約 2 ms（4%）程度速くなる傾向が認められる。2011 年以降については、S 波走時の変化がほとんどないのに対して、P 波走時が速くなっているように見える。振幅については各期間で ± 20 % 程度のばらつきがあり、2011 年以降については P 波の振幅が大きくなる傾向が見られる。後続波部分についても、上記と同じ伝達関数を用いて走時の経年変化を推定した（図 3）。鉛直成分、水平成分ともに走時のばらつきが大きいものの、鉛直成分については変化がなく、水平成分については数 % 程度速くなる傾向が見られる。以上の結果は、長期的には、断層近傍でのクラック密度の減少による地震波速度の増加（強度回復）を示唆している。1999 年～2000 年、および 2011 年以降の実験で、S 波走時の変化が小さい一方で P 波走時が速くなっていることは、例えば、これらの期間ではクラック密度は変化しないままクラックの水飽和率が増加した等、水の動きが関与している可能性が示唆される。

3. その他

その他、1800m 孔、8000m 孔および 500m 孔における地震、地殻変動、地下水の連続観測を継続するとともに各種の基本的な解析を行った。また、野島断層および他の内陸地震の震源断層や活断層について、深部構造やその不均質性、本震における破壊過程等の検討を行った。

- (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）：
村上英記、野島注水実験における自然電位変動モデル再構築、地球電磁気・地球惑星圏学会、R003-P007、
2014 年 11 月 2 日（松本）。

(10) 平成 27 年度実施計画の概要：

野島断層での第 1 回目の 1800m 深度注水実験（2013 年 9 月）について、観測データの解析・モデリングを深化させる。震源断層を深さ約 400m において貫通する 500m 孔での地下水位データ、および 800m 孔底における歪み変動、地下水位変動、地表で測定された自然電位データについてモデル化を進め、野島断層の震源断層から分岐断層にいたる断層帯全体の透水性構造、および注入水の挙動を推定する。これにより、従来の 540m 深度注水に対して行った 800m 孔歪み変動および地下水位変動のモデリング解析（拡散過程モデル）の改善・高度化へのフィードバックを行う。

野島断層上盤側の地表岩盤に設置されたアクロス震源の連続運転を実施する（約 2ヶ月間）。これにより、従来検出されていたアクロス震源～800m 孔底地震計間の地震波の走時・振幅の経年変化についてさらに検証する。S 波偏向異方性の測定も合わせて行い、地震波の走時や振幅変動の要因となる野島断層近傍の構造特性について検討する。

注水実験によらない地震学的な手法を用いて、野島断層および最近発生した内陸地震の震源断層や活断層を対象として、断層深部構造（特に走向方向の構造不均質性）、本震時の破壊過程と回復過程

の関係を検討する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

西上欽也・大志万直人・吉村令慧・加納靖之(京都大学防災研究所)

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所(山野 誠)

名古屋大学環境学研究科(山岡耕春・田所敬一)

静岡大学理学部(生田領野)

金沢大学理工研究域自然システム学系(平松良浩)

高知大学理学部(村上英記)

大阪市立大学理学部(山口 覚)

奈良産業大学情報学部(向井厚志)

産業技術総合研究所(北川有一・小泉尚嗣)

(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地震予知研究センター

電話 : 0774-38-4195

e-mail : nishigami.kinya.3r@kyoto-u.ac.jp

URL : <http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/idoi/kaibo/>

(13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 西上欽也

所属 : 京都大学防災研究所地震予知研究センター

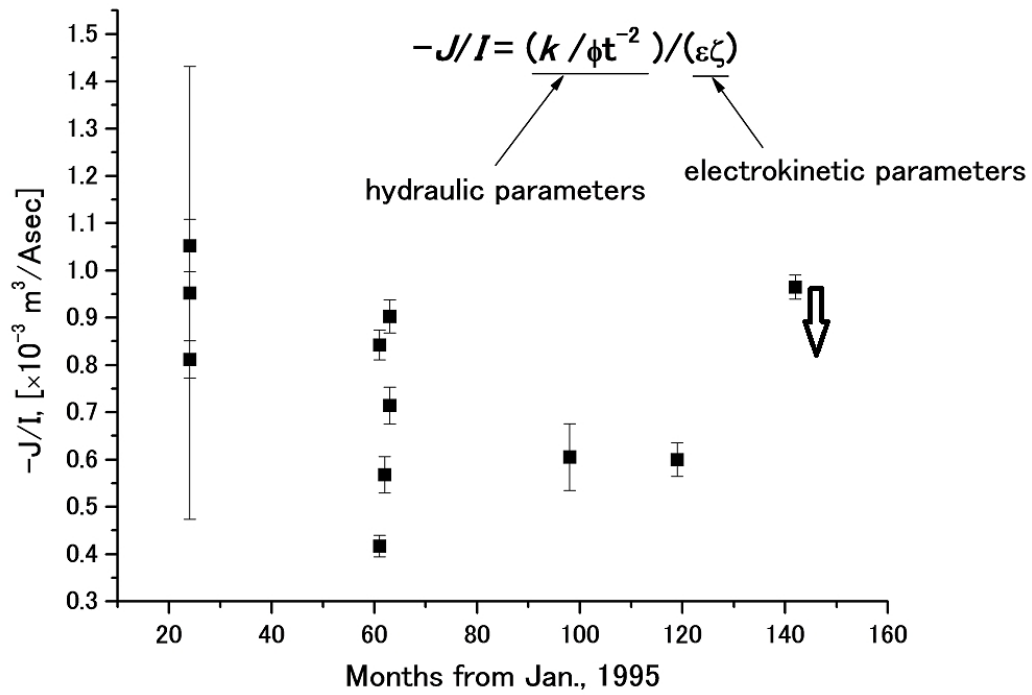


図 1

従来の 540m 深度注水実験における自然電位変動から推定された水理係数の時間変化（左から順に，1997 年，2000 年，2003 年，2004 年，2006 年実験）。正の電流源の影響を補正すると，2006 年注水実験では推定値は小さく修正される（矢印）。プロットされたパラメータに含まれる誘電率，ゼータ電位の時間変動がないとすると，透水係数の経年変化を示す。

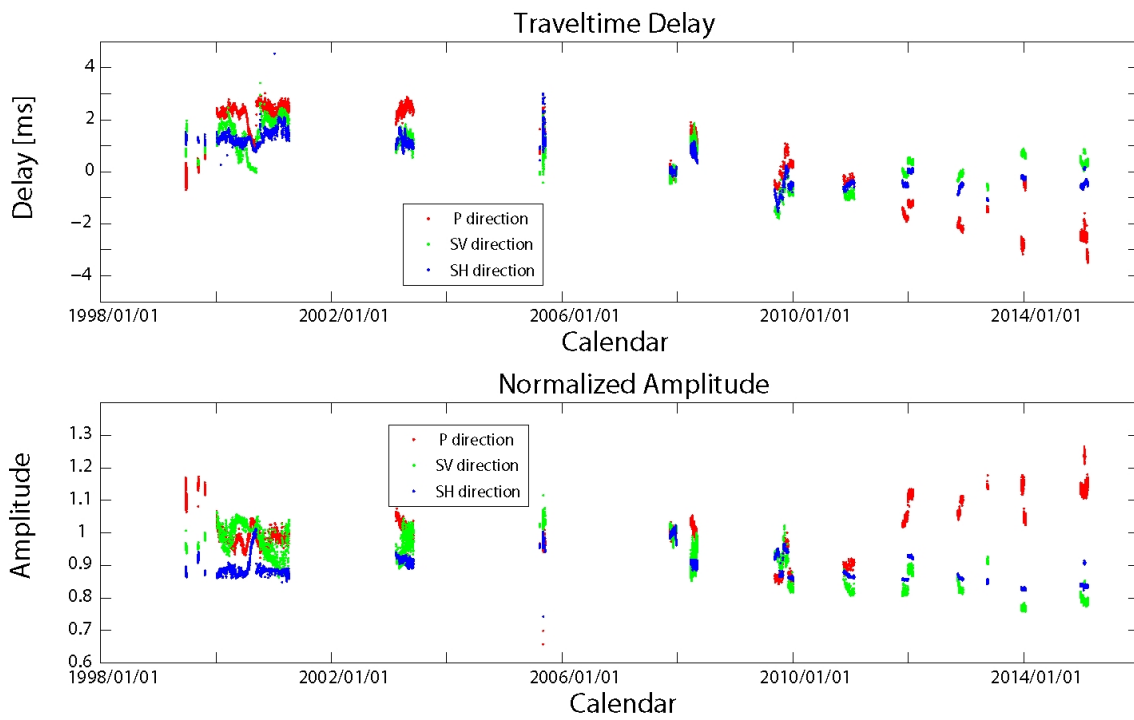


図 2

1999年6月～2015年1月にかけてアクロス連続運転により測定された、野島断層近傍における直達波（P波およびS波）の走時（上）および振幅（下）の時間変化．いずれも、2008年3月を基準とした走時の遅れと振幅の比を示す．赤、緑、青はそれぞれ、P波、断層に直交するS波、および断層に平行なS波．

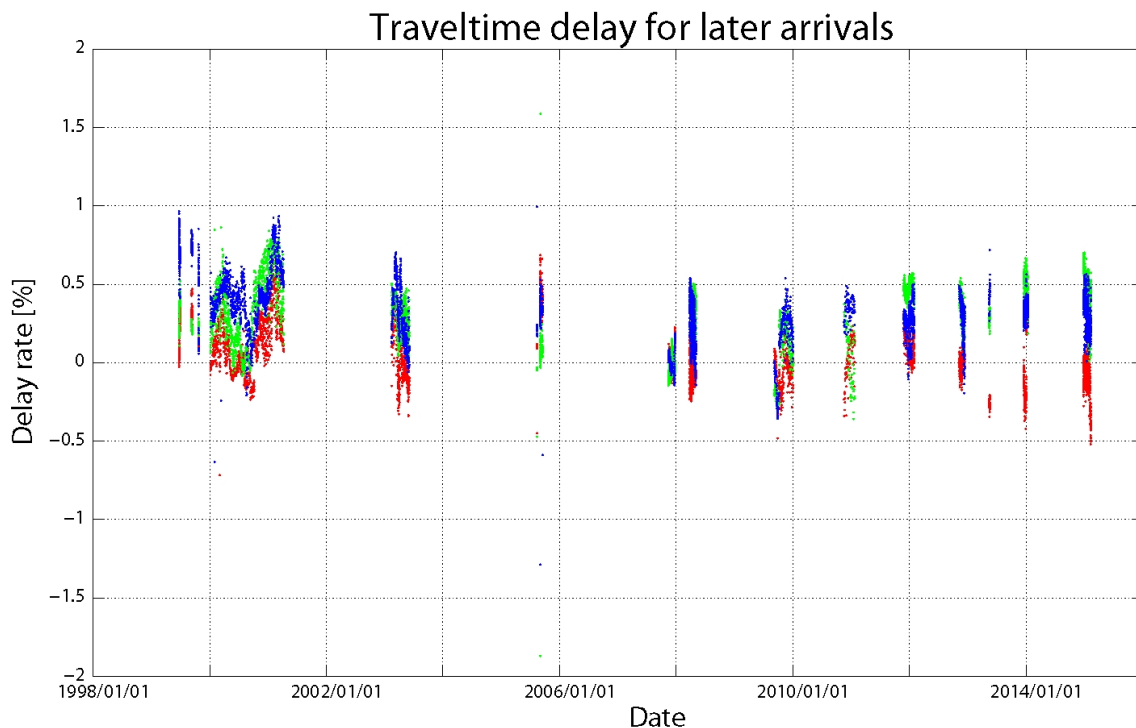


図 3

1999年6月～2015年1月にかけてアクロス連続運転により測定された、後続波部分の走時の時間変化．2008年3月を基準とした走時遅れの割合を示す．赤、緑、青はそれぞれ、鉛直成分、震源方向の水平成分、および震源直交方向の水平成分．