

(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微細構造と回復過程の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-2) 地震破壊過程と強震動

ア．断層面の不均質性と動的破壊特性

3. 新たな観測技術の開発

(3) 観測技術の継続的高度化

ア．地下状態モニタリング技術

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

5 か年間の到達目標は主として以下の 3 つである。

1) 野島断層（震源断層）の詳細な破砕帯構造の推定

平成 25 年度に野島断層の深部破砕帯（深さ 1800m）に対して初めて直接的な注水を行い、震源断層の透水性および詳細な破砕帯構造を推定する。長期的にはさらに約 5 年後（次期 5 か年計画）において 2 回目の 1800m 深度注水実験を実施して、震源断層における透水係数の経年変化を検出し、野島断層（震源断層）の強度回復過程の検出につなげる。これまで実施した 540m 深度注水データの解析・モデル改善、およびアクロス連続運転（平成 21～25 年度の各年 2-3 ヶ月間実施）により、野島断層近傍岩盤の強度回復過程についても引き続き検証を行う。1800m 深度注水および従来の 540m 深度注水の結果を合わせた解析により、震源断層から分岐断層（震源断層から南東方向に約 400m）にいたる断層帯の広範囲にわたる透水性構造および注入水の挙動を推定する。

2) 注水誘発地震の発生過程の解明

1800m 深度注水により誘発地震（深さ 2-4km）が多数発生することが予想される。これを用いて、誘発地震の震源過程の特性および地震発生における流体（間隙水圧）の役割の解明、および断層面の摩擦特性の推定等、活断層における誘発地震の発生過程を解明する。これまで実施した 540m 深度注水に伴う誘発地震と合わせた解析を行い、野島断層の詳細な深部破砕帯構造を推定し、断層構造の不均質性と地震の発生過程について解明する。

3) 内陸地震の震源断層における応力集中過程の解明

野島断層および他の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（アスペリティ分布等）および回復過程（断層における回復過程進行の非一様性）の關係について、既存の研究成果を含めて系統的に事例集積し、総合的に検討する。これに基づき、内陸地震の震源断層における構造不均質性と応力集中過程についての解明をめざす。

（6）本課題の5か年計画の概要：

平成21年度は、従来の540m深度注水実験により得られたデータ、特に平成20年度に実施した第6回注水実験のデータ解析により野島断層近傍岩盤の透水係数およびその経年変化の研究をさらに進展させる。注水に伴う極微小地震（誘発地震）の検出およびその波形解析、クラスター構造解析等を系統的に行い、野島断層周辺に発生する極微小地震の発生過程の特性について検討する。アクロス連続運転を実施し、地表震源装置と800m孔および1800m孔地震計間の地震波走時および振幅の経年変化について検証を行う。1800mおよび800m孔における地震・地殻変動・地下水の連続観測を継続する。さらに、平成25年度実施の1800m深度注水実験に向けて、500m孔における新たな地下水連続観測の準備、および野島断層近傍（地上）における地震観測点設置の準備を行う。

平成22年度は、引き続き従来の540m深度注水実験データのモデリング高度化、およびアクロス連続運転により野島断層近傍岩盤の強度回復過程検出を進展させる。地上およびボアホール地震計データの解析、および500m孔における地下水予備観測を行う。野島断層および他の内陸地震の震源断層・活断層の深部構造と回復過程の事例（解析も含む）を集積する。

平成23年度は、引き続き従来の540m深度注水実験データのモデリング高度化、およびアクロス連続運転により野島断層近傍岩盤の強度回復過程検出を進展させる。地上およびボアホール地震計データの解析、および500m孔における地下水予備観測を行う。野島断層および他の内陸地震の震源断層・活断層の深部構造と回復過程の事例（解析も含む）を集積する。

平成24年度は、1800mボアホール地震計の引き上げ等、1800m深度注水実験の準備を行う。アクロス連続運転による地震波走時・振幅の経年変化の検出を進展させる。地上およびボアホール地震計データの解析、および500m孔における地下水予備観測を行う。野島断層および他の内陸地震の震源断層・活断層の深部構造と回復過程の事例（解析も含む）を集積する。

平成25年度は、1800m深度注水実験を実施し、震源断層（野島断層）の透水係数を推定する。従来の540m深度注水の結果も合わせた解析により、震源断層から分岐断層にいたる断層帯の透水性構造および注入水の挙動を推定する。1800m深度注水による誘発地震の発生を検出し、誘発地震の震源過程および発生特性を推定する。野島断層および他の内陸地震の震源断層・活断層の深部構造と回復過程について取りまとめる。

（7）平成22年度成果の概要：

1．注水実験による野島断層の回復過程および誘発地震の発生過程の解明：

第6回注水実験（2009年）を中心に、それ以前の5回の注水実験（1997年～2006年）のデータも合わせて解析し、野島断層近傍における透水係数（変動）モデリングの改善・高度化をめざすとともに、誘発地震を含む極微小地震の発生過程の検討を行った。

1) 注水実験に伴う極微小地震の発生過程の特性：

第6回注水実験（2009年1月31日～2月8日、2月28日～3月7日の2期間注水）を含む期間（2009年1月1日～3月31日）に野島断層の注水地点近傍で発生した極微小地震について、その活動特性の検討を行った。まず、800m孔地震計によるS-Pタイム時系列を作成した（昨年度作成したものを改善し、さらに小さいイベントを追加した）。注水に伴う誘発地震の震源域を含むと考えられる、S-Pタイム0.5秒以下の極微小地震は3個（注水開始後については2個）であった。次に、地震波形の情報をを用いて、この震源領域における詳細なクラスター活動特性を抽出した。これまでの注水実験で誘発地震と考えられる活動を含む期間（1997年、2000年、2006年）および定常的な活動のみを含む期間

(2001 年) を上述の 2009 年注水実験を含む期間と合わせて解析期間とし、合計 586 個の極微小地震 (S-P タイム 0.5 秒以下) について、800m 孔地震波形データの相互相関係数を計算した (図 1)。2009 年のイベントは過去のいずれの期間のイベントとも波形相関が小さく、震源域が異なるものと推定される。図 1 から分かるその他の特徴としては、全期間を通じて時間空間的に集中したクラスター活動 (数時間 ~ 10 日間) が見られること、注水開始数日後から複数の新たなクラスター活動が開始すること、定常活動のクラスターが注水開始後に活発化する場合があること、などである。

2) 自然電位変動のモデリング高度化のための自然電位の空間分布特性の測定 :

注水に伴い注水孔周辺で観測される自然電位変動について、界面動電現象によるモデル計算を行い、1997 年 ~ 2006 年にかけて地下の透水係数低下が推定されることを示してきた。しかし、2004 年以降の注水実験では、注水孔から遠い一部の地点 (観測室近傍) で従来とは逆センスの自然電位変動が観測された。また、最近の注水実験時に 1800m 孔と 800m 孔を電極として電位変動の計測を実施したところ、1800m 孔 (注水孔) は注水に同期して電氣的に正に変化し、800m 孔は負に変動していることが分かった。この問題を検証するために、注水の行われていない平常時における自然電位の空間分布を測定した (2010 年 12 月 1 日 ~ 3 日)。注水孔および観測室周辺での自然電位分布を計測し、同時にノイズ特性の計測を実施した。測定結果を図 2 に示す。1800m 孔および 800m 孔周辺の自然電位が小さくなっている。また、注水時の変動極性が逆転している観測室付近でも自然電位が小さくなっていることが分かった。第 6 回注水実験 (2009 年 1 月) の際に観測された自然電位分布と比較すると、負のピーク位置がややずれているようであるが、注水時に逆センスに変動する電極位置はこのローカルな自然電位異常の位置に相当することが判明した。このローカルな異常が過去にも存在したのか、あるいは 2004 年以降に出現したのか、注水時の変動とどう結びつくのか、等について検討を行い、今後の自然電位変動のモデリング改善につなげる。

2 . アクロス連続運転による野島断層近傍での地震波伝播特性の測定 :

野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源の長期連続運転を昨年度に引き続き、2010 年 11 月 18 日から 2011 年 1 月 25 日まで実施した。過去 5 回の連続運転 (2000 年 1 月 ~ 2001 年 4 月、2003 年 3 月 ~ 6 月、2005 年 8 月 ~ 9 月、2007 年 11 月 ~ 2008 年 5 月、2009 年 9 月から 2010 年 1 月) と同じパラメータで運転し、アクロス震源と 800 m 孔地底地震計の間の伝達関数から P 波および S 波の走時と振幅の時間変化を推定した (図 3)。その結果、P、S 波走時ともにばらつきはあるものの、2000 年 ~ 2011 年にかけて約 0.4% 速くなった。振幅については $\pm 10\%$ 程度のばらつきがあり、単調な増加・減少のトレンドは見いだせない。今回は 2000 年、2008 年および 2010 年に引き続いて S 波偏向異方性の実験も行った。現在のところ、2000 年 ~ 2010 年にかけて、偏向異方性 (野島断層に平行な方向が速い) には、2% の分解能の範囲では有意な変化は見られなかった。また、今回は、上述したのと同じ伝達関数を用いて、後続波部分における走時変化を推定した (図 4)。その結果、2000 年 ~ 2011 年にかけて約 0.1% 速くなったことが推定された。後続波 (散乱波) 部分は直達波経路よりも数 km 広がった領域の速度変化を反映すると考えられるので、以上の結果は、野島断層の破砕帯近傍ではその周辺領域よりも速度変化 (強度回復) が大きいことを示唆する。今後、さらに解析を進めるとともに、震源近傍の影響の補正を行い、より正確な時間変化を見積もる。

(8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Goto, S. and M. Yamano, Reconstruction of the 500 year ground surface temperature history of northern Awaji Island; southwest Japan: using a layered thermal property model, Phys. Earth Planet. Inter., 183, 435-446, 2010.

Kobayashi, Y., T. Watanabe, K. Yamaoka, R. Ikuta, and K. Nishigami, Monitoring of the Nojima Fault structure using Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACCROSS), AGU Fall Meeting, 2010.

村上英記・大志万直人・山口 覚・吉村令慧・藤 浩明, 野島注水実験における自然電位変動の問題点, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2010 年秋季大会 (沖縄, 2010/11/3) .

(9) 平成 23 年度実施計画の概要：

平成 23 年度は、引き続き、従来の 540m 深度注水実験により得られた各観測項目のデータ、特に平成 20 年度に実施した第 6 回注水実験データ等のモデリング高度化を進め、野島断層近傍岩盤の透水係数およびその経年変化の研究をさらに進展させる。注水に伴う極微小地震の波形解析、クラスター構造解析等を系統的に行い、野島断層周辺に発生する極微小地震の発生過程の特性について検討する。アクロス連続運転を実施し、地表震源装置と 800m 孔および 1800m 孔地震計間の地震波走時および振幅の経年変化について検証を進める。また、S 波速度の偏向異方性についても調査し、走時や振幅変動の要因となる野島断層近傍の構造特性の推定をめざす。1800m、800m、および 500m 孔における地震・地殻変動・地下水・孔内温度の連続観測を継続するとともに、平成 25 年度実施予定の 1800m 深度注水実験に向けて、500m 孔における地下水測定（平成 22 年度（2011 年 3 月）から開始予定）および野島断層近傍（複数の地上点）における地震観測点設置を行う。野島断層および他の内陸地震の震源断層について、深部構造やその不均質性、本震時の破壊過程、および回復過程に関わる観測事例を集積し検討する。

(10) 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）東京大学理学系研究科（田中秀実）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）神戸大学理学部（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）防災科学技術研究所（小村健太郎）

(11) 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：nishigam@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/doi/kaibo/

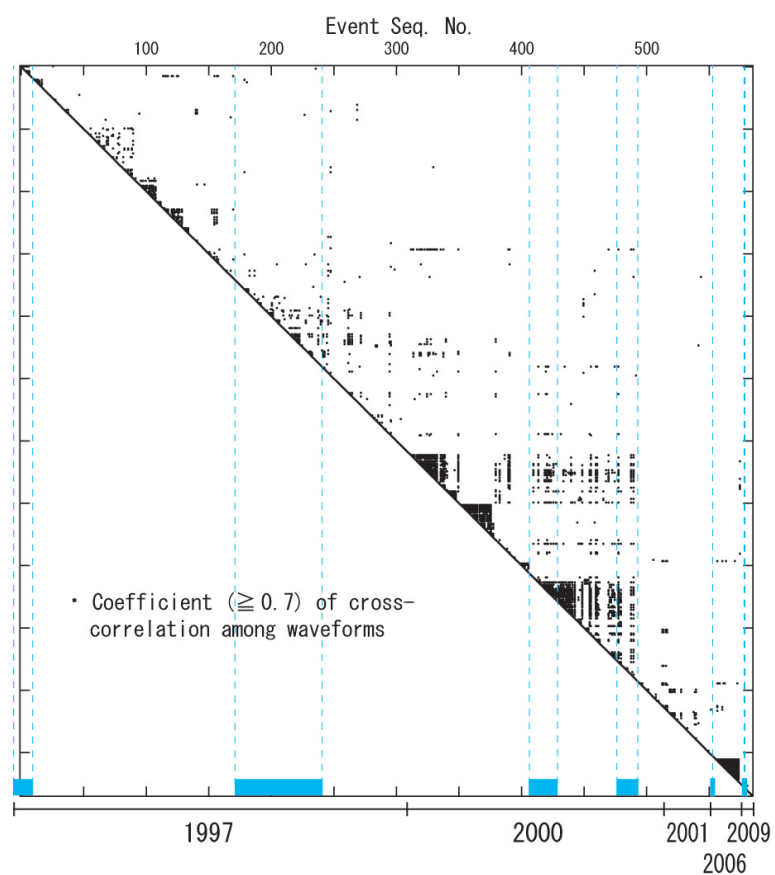


図1 2009年注水実験の期間、およびそれ以前の注水実験を含む期間（1997年、2000年、2006年）および含まない期間（2001年）に発生した極微小地震について、800m孔地震波形の相互相関係数を計算したダイアグラム。相関係数0.7以上を黒ドットで示す。横軸（左から右）および縦軸（上から下）は地震発生順。水色：注水期間。

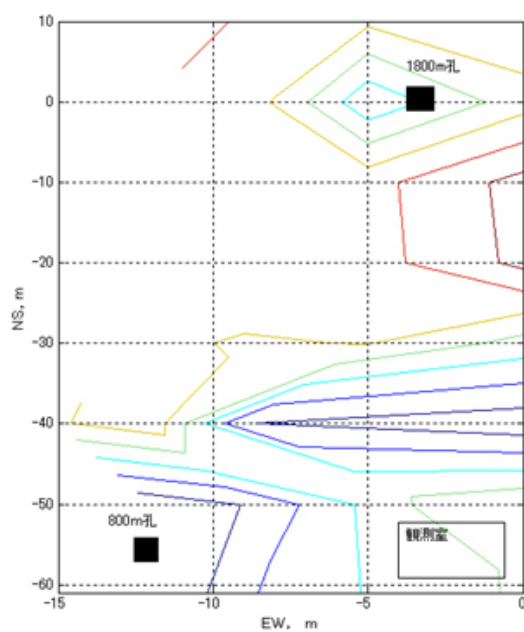


図2 注水孔（1800m孔）周辺において測定された自然電位の分布（2010年12月1日～3日）。コンター間隔は0.01V。

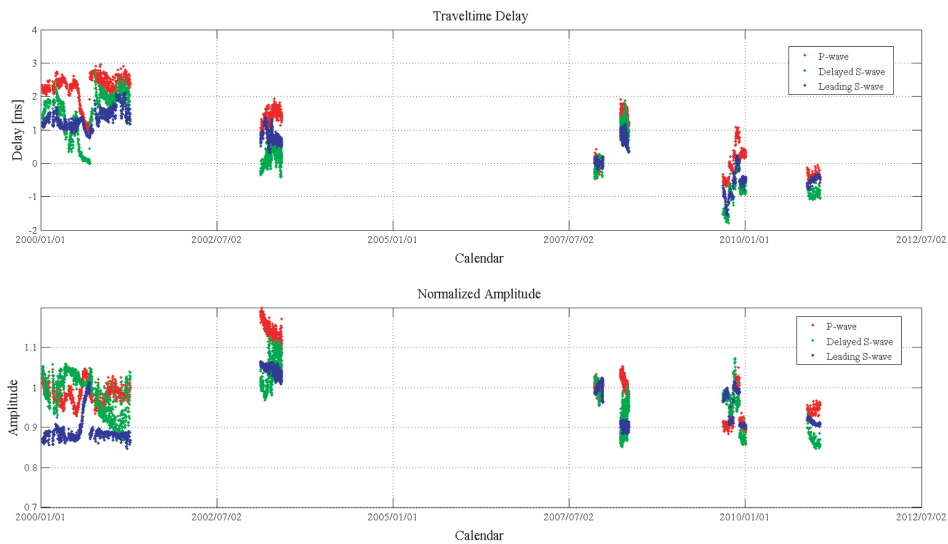


図3 2000年1月～2011年1月にかけてアクロス連続運転により測定された、野島断層近傍における直達波（P波およびS波）の走時（上）および振幅（下）の時間変化。赤、緑、青はそれぞれ、P波、断層に直交するS波、断層に平行なS波。

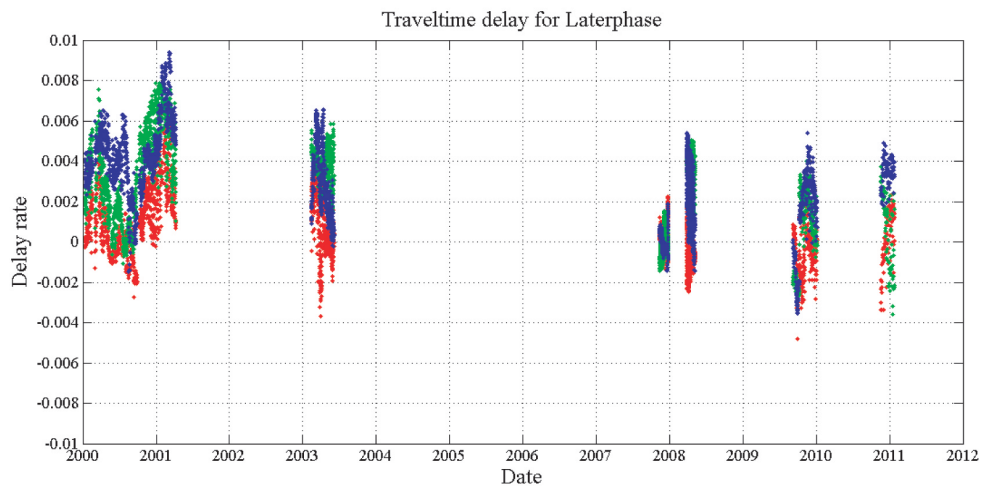


図4 2000年1月～2011年1月にかけてアクロス連続運転により測定された後続波部分の走時の時間変化。