

( 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)の詳細な破碎帯構造の推定

平成 25 年度に野島断層の深部破碎帯(深さ 1800m)に対して初めて直接的な注水を行い、震源断層の透水性及び詳細な破碎帯構造を推定する。長期的には更に約 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、及びアクロス連続運転(平成 21~25 年度の各年 2-3 か月間実施)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 深度注水及び従来の 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及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及び地震発生における流体(間隙水圧)の役割の解明、及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碎帯構造を推定し、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

野島断層及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）及び回復過程（断層における回復過程進行の非一様性）の関係について、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目指す。

#### (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及びその経年変化の研究を更に進展させる。注水に伴う極微小地震（誘発地震）の検出及びその波形解析、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孔及び1800m孔地震計間の地震波走時及び振幅の経年変化について検証を行う。1800m及び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、及び野島断層近傍（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、及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。地上及びボアホール地震計データの解析、及び500m孔における地下水予備観測を行う。野島断層及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、及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。地上及びボアホール地震計データの解析、及び500m孔における地下水予備観測を行う。野島断層及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。地上及びボアホール地震計データの解析、及び500m孔における地下水予備観測を行う。野島断層及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及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及び発生特性を推定する。野島断層及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) 計画期間中（平成21年度～25年度）の成果の概要：

##### 【1800m深度注水実験】

平成24年度から25年度前半にかけて、1800m孔の漏水力所より深部にパッカーを設置する作業を行った。これまで、1997年から2009年にかけて行ってきた注水実験では、1800m孔の540m深度付近で漏水を生じており、実質的に540m深度での注水実験となっていたが、このパッカー設置により、1800m孔底（孔底付近の深さ約75m区間）のみ通水性のジェットパフォーレーションありからの注水が可能となった。このパッカー設置作業では、孔内に地震計の信号ケーブルと温度計測用の光ファイバを設置した状態で、パッカーを降下し設置した。すなわち、パッカー設置後も（注水実験中も）、孔底での地震観測を継続できるようにした。ただし、光ファイバについてはパッカー降下作業中に切断したため、孔内温度計測はできなくなった。

パッカーの設置完了後、2013年9月15日～29日の2週間、1800m深度（1800m孔底付近）への注水実験を行った。孔口での圧力を5.0MPaと設定し、流量は20-24l/min、総注水量は44klであった。

1800m深度注水実験に伴い、800m孔底で観測されたひずみ変動（StrD成分）を図1に示す。9月

26 日以前は、ロガーのトラブルのためか、現在のところ観測データを取り出せていないものの、注水停止後の特徴的な変動（伸張）は記録されている。このひずみ変動について、1800m 深度を注水地点とした間隙水圧の三次元拡散過程、および間隙水圧による弾性変形を仮定して、モデル計算を行った（図 1 の赤い線）。1800m 孔底から 800m 孔底にかけての領域の透水係数は  $0.31 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  と推定された。図 2 には、従来の 540m 深度注水実験により推定された透水係数の経年変化も合わせて示す。

1800m 深度注水実験に対して、地表での自然電位変動が観測されたが、従来の 540m 深度注水実験とは異なり、生データでは注水の開始と停止に同期した変動が明瞭ではなかった。また、今回初めて観測した 500m 孔周辺でも 1800m 孔周辺と同期した自然電位変動が観測された。これらの自然電位変動は地磁気変動による誘導電流によるものではないことを確認している。独立成分分析を用いた予察的な解析では、注水期間前半は振動的な変動であり、後半には 2mV 程度の負側への自然電位変動が 1800m 注水孔近傍の電極で見られたが（図 3 の A1）、この大きさは従来の変動と比べて極めて小さい。一部の電極で逆センスであることは 2006 年以降の 540m 深度注水実験と調和的である。今回観測された自然電位変動が小さいのは、深さ 1800m の断層破碎帯において透水性が大きいために発生する流動電位が小さいのか、1800m 注水孔のケーシング・パイプが理想的な導体ではなく有限な比抵抗値を持つために地表での値が小さくなっているのか、今後、さらなるノイズ軽減処理も含めて、検討を行う。

注水に伴う極微小地震の活動変化について、800m 孔地震計による S-P タイムの時間変化を図 4 に示す。従来の 540m 深度注水実験では、S-P タイム 0.3~0.5 秒の極微小地震が、注水開始の数日~十数日後に活発化する傾向が見られた。今後、波形の相関や震源クラスター構造などの解析も行い、さらに検討する。今回の注水実験では、注水孔周辺の 6 カ所（地上）に地震計を設置したので、詳細な震源分布等の検討も行う。

800m 孔および 1800m 孔地震計のデータについては 10kHz サンプリングで連続収録した。注水期間およびその前後に注水孔周辺で発生した極微小地震（図 5 に示す 5 個）について、1800m 孔地震計の 10kHz サンプリング波形データの解析を行った。観測された P 波速度波形から変位スペクトルを求め、周波数依存性の無い Q の補正を行い、それに  $-2$  モデルを適用してコーナー周波数と地震モーメントを推定した（図 6 の赤丸）。比較のため、Hiramatsu et al. (2002) による 2000 年注水実験時のデータ（今回と同じ 1800m 孔地震計の 10kHz サンプリングデータ）についても同じ解析を行った（図 6 の緑丸）。ノイズの影響により地震モーメントが小さい地震についてはコーナー周波数が低めに見積もられている、すなわち静的応力降下量が小さめに推定されている可能性もあるが、得られた静的応力降下量はほぼ 0.1 MPa から 10 MPa の範囲であった。過去の研究結果とも比較すると、この解析結果は地震モーメントがコーナー周波数の 3 乗に比例する関係と調和的である（図 6）。

#### 【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】

平成 21 年度から 25 年度にかけて、毎年、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。平成 25 年度については、2013 年 5 月 15 日~6 月 5 日にかけて、および 11 月 27 日~2014 年 1 月 15 日にかけて実施した。過去 8 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~2010 年 1 月、2010 年 11 月~2011 年 1 月、2011 年 11 月~2012 年 2 月、2012 年 10 月~2013 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。また、1999 年 6 月および 9 月に試験的に実施した実験データについても再解析を行い、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~2013 年にわたる経年変化を推定した（図 7）。その結果、走時は各期間で  $\pm 1\text{ms}$  程度のばらつきを持つものの、1999 年~2013 年にかけて約 2 ms (0.4%) 程度速くなる傾向が確認された。P、S 波の振動方向による変化傾向の違いは見られない。振幅については各期間で  $\pm 10\%$  程度のばらつきがあり、経年変化について単調な増加あるいは減少の傾向は見いだせない。1999 年、2011 年、2012 年、および 2013 年には P 波の振幅が特に大きく推定されているが、これは走時の速まりに対応して振幅が大きいものと考えられる。上記と同じ伝達関数を用いて、後続波部分における走時変化についても推定した（図 8）。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

変化がないかもしくは0.1%程度速くなっているように見える。後続波（散乱波）部分は直達波経路よりも広い領域の速度変化を反映すると考えられるので、野島断層の破碎帯近傍ではその周辺領域よりも速度の速まり（強度回復）が大きいことを示唆するものと考えられる。

【その他】

平成21年度から25年度にかけて、1800m孔および800m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し、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、および回復過程に関わる観測事例等の検討を行った。

- (8) 平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：  
村上英記・比嘉哲也・鈴木健士・川崎慎吾・吉村令慧・後藤忠徳・大内悠平・山口 覚、2013年度野島注水実験序報，Conductivity Anomaly 研究会，2014年1月8日（東京大学地震研究所）。  
西上欽也・野島断層注水実験グループ，野島断層における繰り返し注水実験 回復過程と誘発地震の研究 ，月刊地球，36，130-138，2014。  
西上欽也・野島断層注水実験グループ，野島断層における繰り返し注水実験 - 野島断層の回復過程と誘発地震の研究 - ，ICDP 次期10年ドイツ会議に向けた国内ワークショップ，2013年9月21-22日，2013。

- (9) 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） 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） 防災科学技術研究所（小村健太郎）

- (10) 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/ idoi/kaibo/

- (11) 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

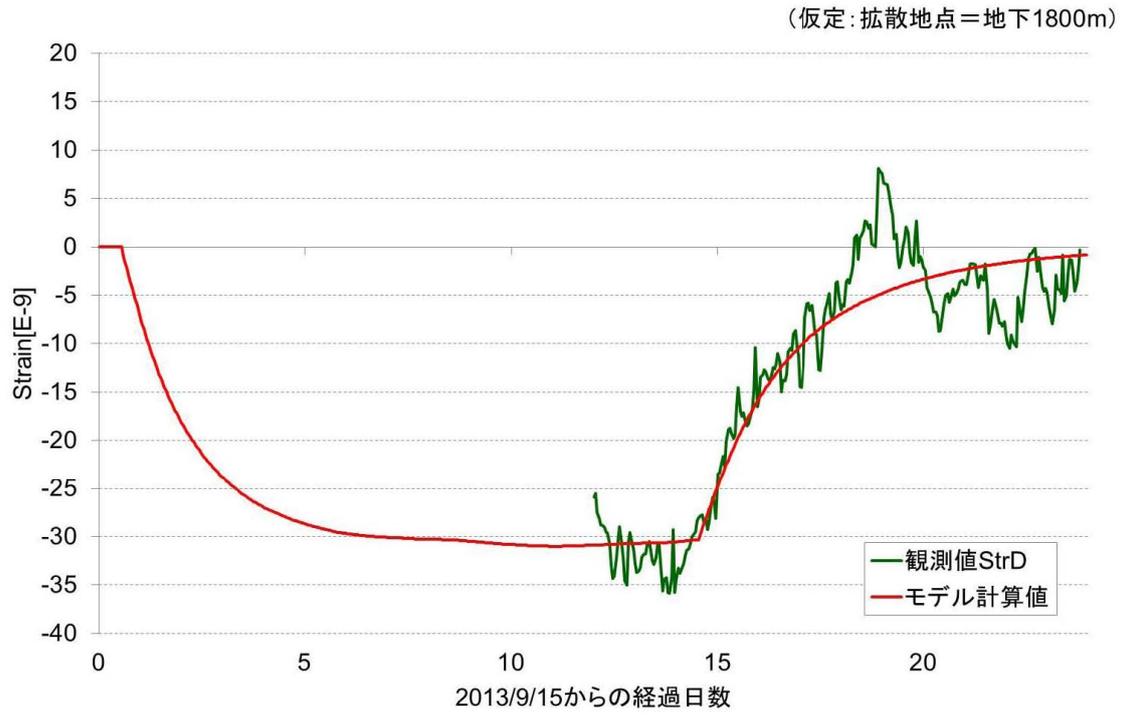


図 1

1800m 深度注水実験に伴う 800m 孔ひずみデータの変動 ( StrD 成分 ) . 赤線はモデル計算 .

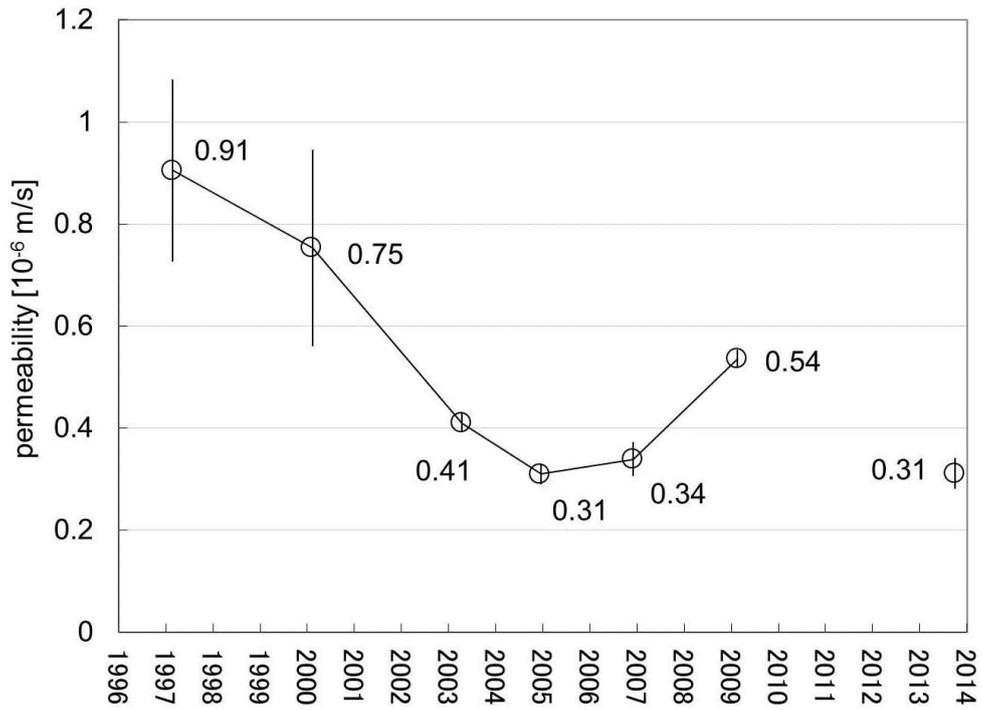


図 2

図 1 に示すモデリングから推定された透水係数（右端のプロット）．参考までに，従来行った 540m 深度注水実験による 800m 孔ひずみデータから推定された透水係数の経年変化も合わせて示す．

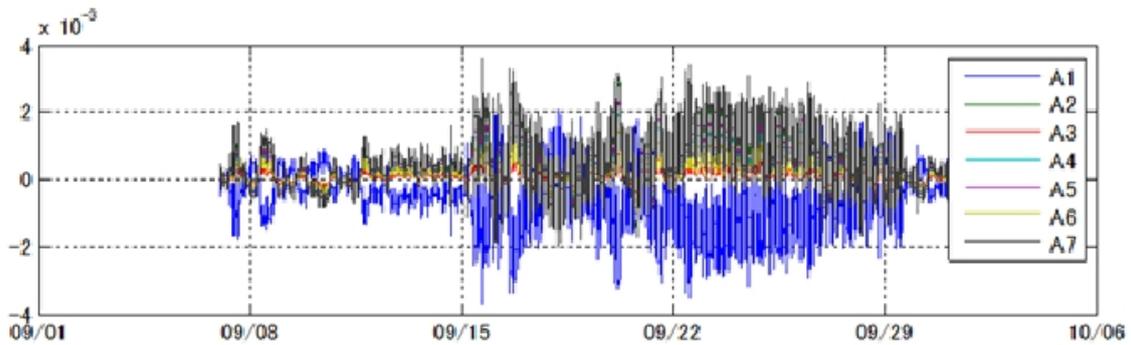


図 3

独立成分分析により抽出された，注水に関連する自然電位変動．A1（青）や A2 は 1800m 孔の近く，A7 は逆に変動している．

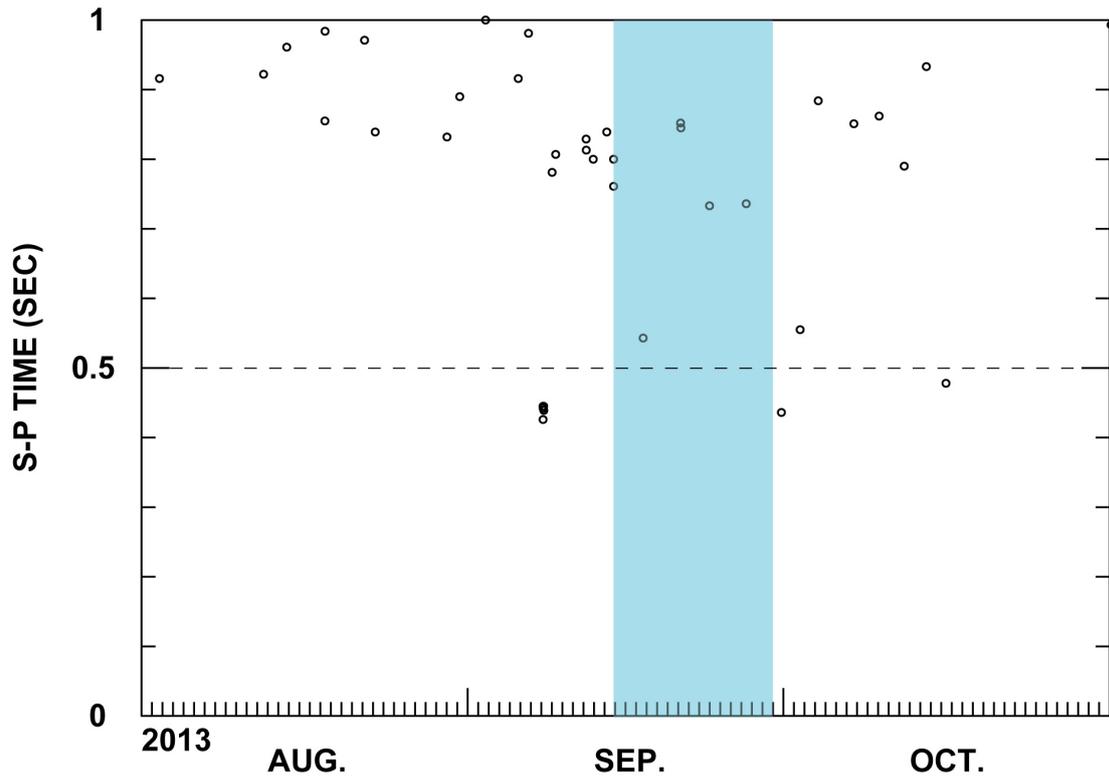


図 4  
800m 孔地震計による S-P タイムの時間変化．水色は注水実験の期間（2013 年 9 月 15 日～29 日）．

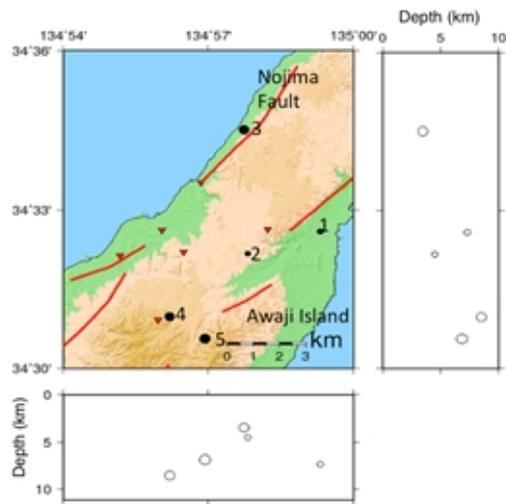


図 5  
波形解析に用いた地震の震源分布（黒丸）と臨時観測点の分布（赤三角）．赤線は活断層を示す．

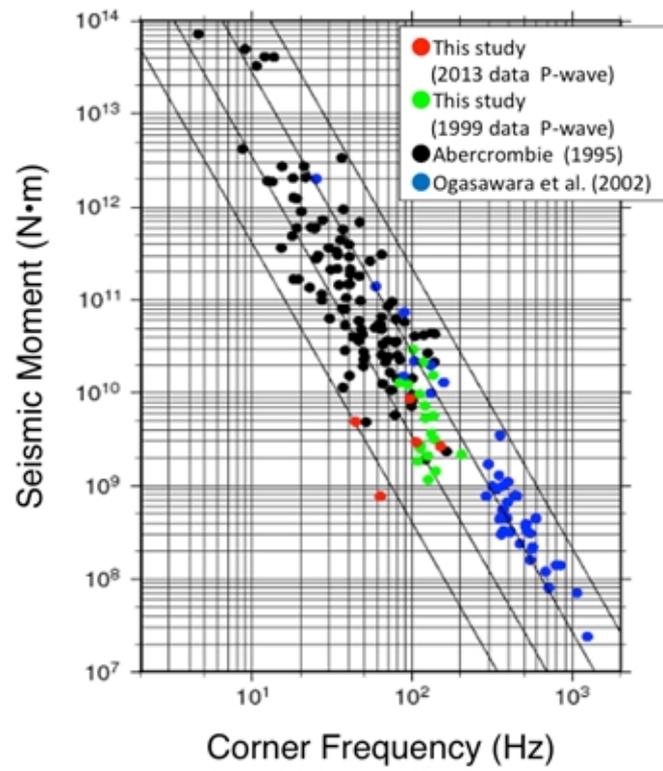


図 6

コーナー周波数と地震モーメントの関係．赤丸は今回の注水実験期間のデータ，緑丸は 2000 年に実施した注水実験期間のデータの解析結果を示す．

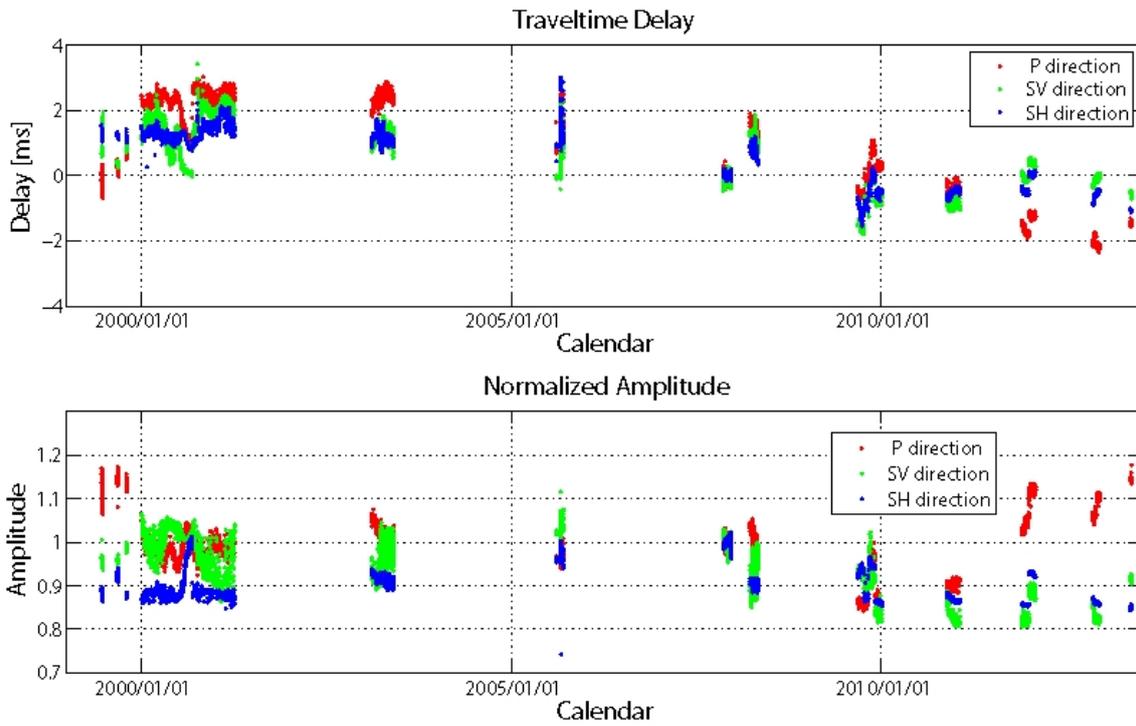


図 7

1999年6月～2013年6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．

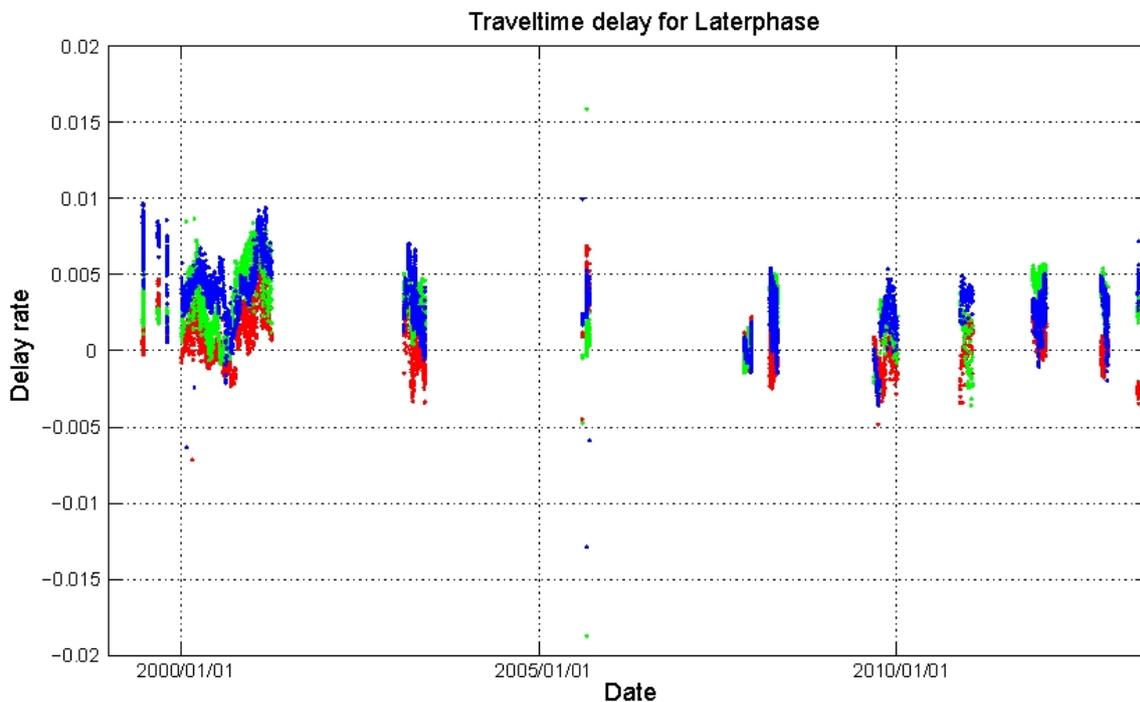


図 8

1999年6月～2013年6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．