

注水に伴う誘発地震の発生特性

野島断層注水実験を中心として

西上 欽也* 田所 敬一** 永井 悟***
水野 高志* 加納 靖之* 平松 良浩****

Triggering Characteristics of Induced Earthquakes: Brief Review of Water Injection Experiments in the Nojima Fault and Other Regions

Kin'ya NISHIGAMI *, Keiichi TADOKORO **, Satoru NAGAI ***, Takashi MIZUNO *,
Yasuyuki KANO * and Yoshihiro HIRAMATSU ****

Abstract

This paper briefly reviews the triggering characteristics of injection-induced seismicity. Water injection experiments were carried out in the Nojima fault, southwest Japan in 1997 and 2000 to detect the healing process of the fault zone after being ruptured by the M_{JMA} 7.3 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake in 1995. During the experiment in 2000, ultra-microearthquakes of M -1.2 to 1.0 were induced at about 2.5-4.5 km from the injection point and about 4-6 days after the beginning of injection. This space-time migration can be explained by a 2-D diffusion process of pore water pressure. Permeability estimated near the surface, at about 540-800 m depth, is extrapolated well to a depth of 2-4 km where induced events occurred. Other experiments at Matsushiro, central Japan and KTB, Germany also showed similar space-time relationships of induced seismicity. From observations in the Nojima experiment, we obtained characteristic states that suggest differences in the generating process between induced and normal (tectonic) earthquakes. Our findings are as follows: (1) high-frequency component is richer in the waveforms of tectonic events, and (2) the clustering of hypocenters is more dominant in induced events. Further analyses of these observations will lead to elucidating the generating process of induced earthquakes by increasing pore water pressure.

Key words : induced earthquake ,water injection experiment ,Nojima fault ,diffusion process , pore water pressure , permeability

キーワード : 誘発地震 , 注水実験 , 野島断層 , 拡散過程 , 間隙水圧 , 透水性

* 京都大学防災研究所地震予知研究センター

** 名古屋大学大学院理学研究科地震火山観測研究センター

*** 東京大学地震研究所

**** 金沢大学大学院自然科学研究科

* Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

** Research Center for Seismology and Volcanology, Nagoya University

*** Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

**** Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

I. はじめに

1962 ~ 1966 年, アメリカ, デンバーの軍需工場で深さ 3671 m の井戸に廃液を注入したところ, 注水量あるいは注水圧力と連動してマグニチュード (M) 1 ~ 4 クラスの地震が多数発生し, 注入終了約 1 年後の 1967 年には最大規模 M 5 クラスの地震が発生した (Healy *et al.*, 1968)。それ以来, 深井戸への注水により誘発地震が発生する現象は, 廃棄物処分, 石油採掘, 地熱開発などに伴い, 世界各地で多数, 観測されている。これらについては, 例えば Guha (2000) による詳しいレビューが参考となる。

一方, 学術研究のための注水実験も行われ, 注水条件をコントロールして誘発地震の発生条件を探る, あるいは, 地下岩盤における応力状態を推定する試みが行われている。例えば, 長野県松代では群発地震活動 (1965 ~ 1966 年) が終息した後の 1970 年, 1800 m ボアホールの掘削による注水実験が行われた (Ohtake, 1974)。この実験では, 松代地震断層に沿った誘発地震の発生が観測され, それに基づいて断層破砕帯の透水性 ($0.1 \text{ l} \times 10^{-13} \text{ m}^2$) が推定された。また, ドイツ南西部の KTB プロジェクト (German Continental Deep Drilling Program) では深さ 9100 m の深層ボアホールにおいてカリウム塩溶液の注入実験が行われ, 誘発地震の P 軸が広域応力場に一致すること, 1 % 以下の間隙水圧の増加により誘発地震が発生したこと等が推定された (Zoback and Harjes, 1997)。

野島断層では 1995 年兵庫県南部地震の直後から断層掘削調査が行われ, この一環として断層への注水実験が 2 回実施された (島崎ほか, 1998; 西上, 2001)。2 回の注水実験ともに誘発地震の発生が確認され, 詳細な解析が行われた (Tadokoro *et al.*, 2000; 永井ほか, 2001)。

この小論では, 主に野島断層における注水実験について紹介し, 他の注水実験の結果とも合わせて注水誘発地震の発生 (トリガリング) 特性について考察する。

II. 野島断層における注水実験と誘発地震

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震 (M 7.3) に伴い, 淡路島北部の野島断層に沿って地表に食い違い (平均 1.5 ~ 2 m の右横ずれ) が出現した。同年 11 月から約 1 年間をかけて, 震源断層に 3 本のボアホール (深さ 1800 m, 800 m, 500 m) が掘削され, 地震発生直後の断層の構造, 破砕帯物性, 応力状態等を地球物理学および地質・物質科学的アプローチから調査する「野島断層解剖計画」が全国大学の共同研究として始められた (安藤ほか, 1998)。この一環として, 野島断層の強度回復過程を断層破砕帯の透水性変化から検出することが計画され, そのための注水実験が 1997 年 2 ~ 3 月, 2000 年 1 ~ 3 月の 2 回実施された (島崎ほか, 1998; 西上, 2001)。

実験では本来, 1800 m 孔の底部から断層破砕帯に直接注水される予定であったが, 水漏れの発生が注水孔内温度の連続計測から推定され (山野・後藤, 2001), 2 回の実験とも実質的に深さ 540 m 付近からの注水となった。孔口での注水圧力は約 3.0 ~ 4.5 MPa, 流量は約 10 ~ 25 リットル/分で, 4 ~ 9 日間の連続注水が各実験とも 3 ~ 4 回行われた (表 1 参照)。3 本のボアホールを利用した地殻変動, 地下水, 地球電磁気等の連続観測, および人工振動発生装置 (アクロス) による地震波速度変化の連続観測が行われ, 注入水の拡散過程が調べられた。その結果, 1997 年から 2000 年にかけて断層周辺岩盤の透水性が約半分に低下したことが複数の観測項目 (地下水湧水量, ボアホール歪み, 地表自然電位) について検出された (北川ほか, 2001; 向井ほか, 2001; 村上ほか, 2001)。これは, この 3 年間に野島断層の固着が進行したことを示唆する。

注水に伴う地震活動の変化は, ボアホール地震計 (800 m, 1800 m), 地上 5 ~ 6 力所に設置された臨時観測点, および周辺の定常観測網データのリアルタイム自動処理によりモニターされた (Tadokoro *et al.*, 2000; 永井ほか, 2001)。2 回の注水実験ともに, 注水孔近傍において誘発地震が発生した。2000 年実験における, 注水孔周辺

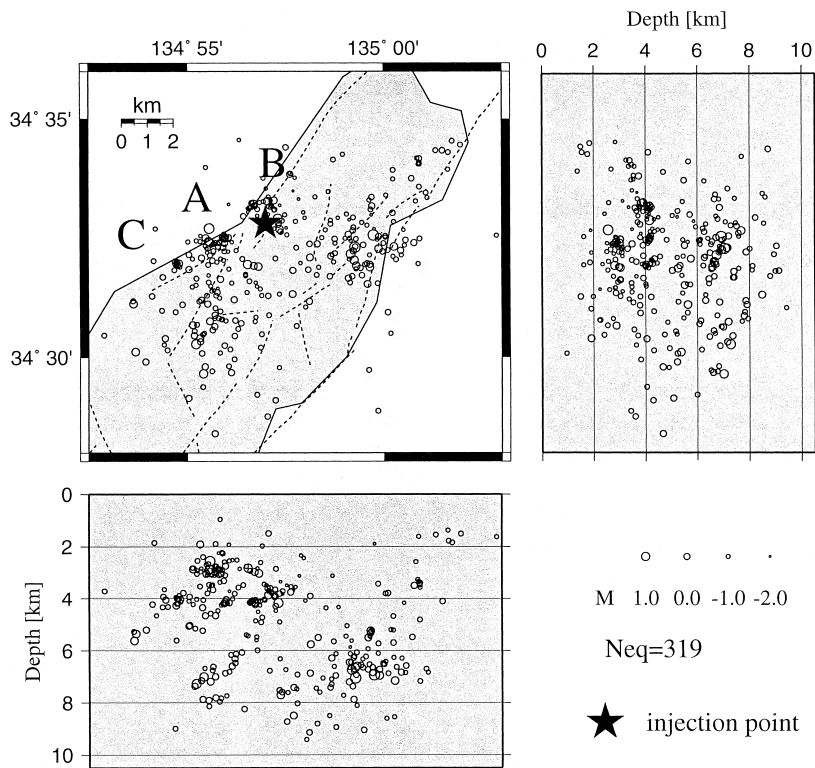


図 1 淡路島北部，野島断層における，2000 年注水実験を含む期間（1999 年 12 月 1 日～2000 年 5 月 18 日）の地震分布（永井，2001 私信による）．
：注水孔（1800m 孔）．A，B，C：誘発地震の主なクラスター位置．

Fig. 1 Distribution of ultra-microearthquakes for the water injection experiment at the Nojima fault in 2000, northern part of Awaji island in southwest Japan (after Nagai, 2001).
Star: injection point (1800-m-deep well). A C: location of three major clusters of induced seismicity.

での地震分布を図 1 に示す（永井，2001）。これは手動再検測を行った後，相対的な震源精度を高める Double Difference 震源決定法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）による再決定を行ったものである。注水孔の直下から南西方向の深さ 2～5 km の地震分布が，誘発地震と考えられる活動である。図 2 に地震発生の時間-空間ダイアグラムを示す。4.0 MPa 注水の開始約 6 日後から 10 日後にかけて，注水地点から距離約 2.5～4.5 km において M -1.2～1.0 の極微小地震が多数発生した。4.5 MPa 注水についても，注水開始の約 4 日後から 8 日後にかけて，わずかながら地震

数の増加が認められた。

注水孔から水平方向に約 50 m 離れた 800 m 孔における岩盤の歪みおよび湧水量は，注水直後から数日間の時定数で指数関数的に変動した（3 成分縮み，および湧水量増加）。これは注水による間隙水圧の拡散現象として説明され，湧水量変化については二次元拡散過程モデルにより岩盤の透水係数（ $2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）が推定された（北川ほか，2001）。さらに深部における岩盤透水性については，誘発地震の発生を用いた推定が可能である。注入水の拡散過程として，Ohtake（1974）が松代実験で用いたのと同様の二次元拡散モデルを仮

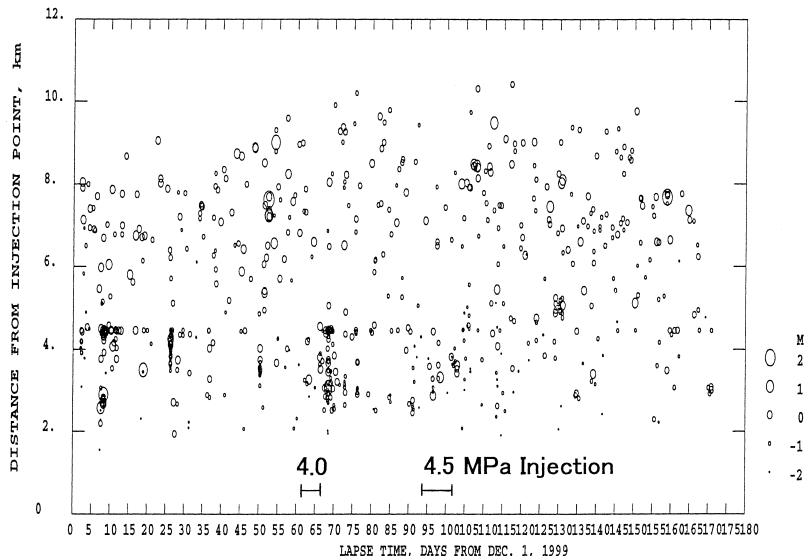


図 2 図 1 の地震に対する時間 空間ダイアグラム .
縦軸は注水地点 (深さ 540 m) からの距離 , 横軸は 1999 年 12 月 1 日
からの積算日数 . 横線は 4.0 , 4.5 MPa 注水の期間 .

Fig. 2 Space-time diagram for events shown in Fig. 1.
Two horizontal bars show the period of 4.0 and 4.5 MPa injections.

定する。透水係数を変えると誘発地震発生域で予想される間隙水圧の変動パターンが変化する。透水係数を $2.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ とした場合、誘発地震震源域における間隙水圧の増加は注水開始約 3 ~ 6 日後にピークを生じ (図 3 (a)) , これは 2000 年実験での注水開始から誘発地震発生までの経過日数 (約 4 ~ 6 日) とほぼ一致する。以上より、注水開始数日後の地震発生数の増加は注水 (間隙水圧の上昇) により誘発された活動と考えることができる。また、800 m 孔での湧水量変化から推定された地表付近 (深さ 540 ~ 800 m) における岩盤の透水係数は誘発地震発生域 (深さ 2 ~ 4 km) にまでおおむね外挿できることが推定された。断層の固着という観点からは、1997 年実験に比べて 2000 年実験の方が誘発地震の発生が約 2 日間遅くなっており (西上, 2001 : 表 1 参照) , 深さ 2 ~ 4 km までの岩盤 (破碎帯) の透水性が低下していることが示唆される。

誘発地震発生域における間隙水圧の増加は極めて小さく、二次元拡散モデルでは、4.0 MPa 注水

の場合で $4 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ 程度と推定される。KTB 実験では、注水による間隙水圧の増加は誘発地震震源域において 1 % 未満と推定された (Zoback and Harjes, 1997) 。従って、誘発地震の震源域はもともと地震を発生しやすい条件下にあるものと考えられる。具体的には、例えば破碎等により破壊強度が低く、周辺よりも地震が発生しやすい領域と考えられる。これは、図 2 において、誘発地震発生域では注水に無関係な時期にも極微小地震活動が時々活発化していることからわかる。この定常的とも言える活動は広域応力場の影響を受けて比較的広範囲に (注水地点から距離約 10 km 程度まで) 及ぶのに対して、注水誘発地震は発生域が注水孔周辺 (約 5 km 以内) に限定されているように見える (図 2) 。現在、野島断層において定常的な極微小地震活動の観測を行い、それらと注水誘発地震の発生特性の違いについて解析を進めている (西上ほか, 2001) 。その結果、図 4 に示すように注水誘発地震の方が定常活動に比べて波形の高周波数成分が少ないことがわかつ

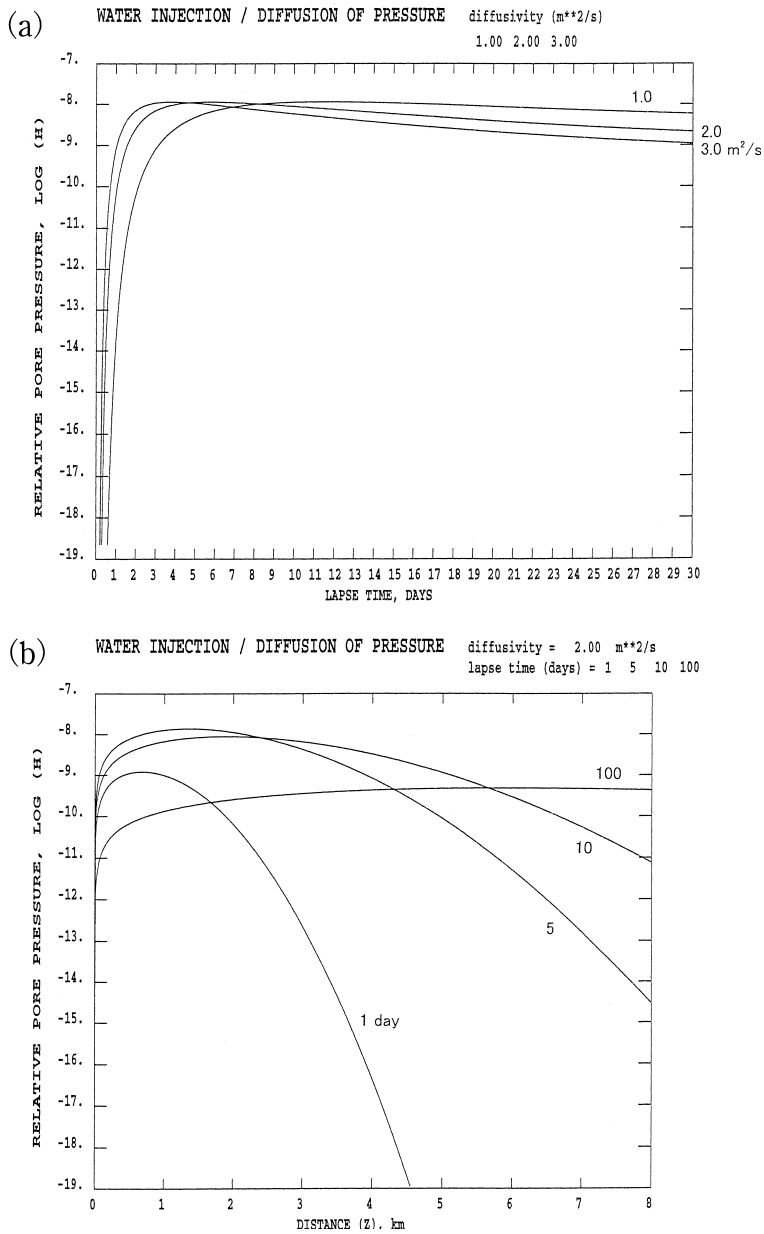


図 3 注水による間隙水圧の時間 空間変動。

二次元拡散モデルによる計算で、縦軸は任意スケール。(a) 誘発地震震源域(注水地点から水平距離 2 km、深さ 2 km)における間隙水圧の時間変化。横軸(経過時間)の原点は注水時刻で、水頭拡散係数:1.0, 2.0, 3.0 m²/s に対してプロット。(b) 注水地点から水平距離 2 km における間隙水圧の深さ分布(横軸:深さ 0 8 km で、誘発地震震源域を含む)。水頭拡散係数:2.0 m²/s とし、注水後の経過時間:1, 5, 10, 100 日に対してプロット。

Fig. 3 (a) Temporal change of relative pore water pressure at the hypocenter of induced events, calculated for three hydraulic diffusivities.

(b) Variation of relative pore water pressure against depth at a horizontal distance of 2 km from the injection point, calculated for four lapse-times measured from the injection.

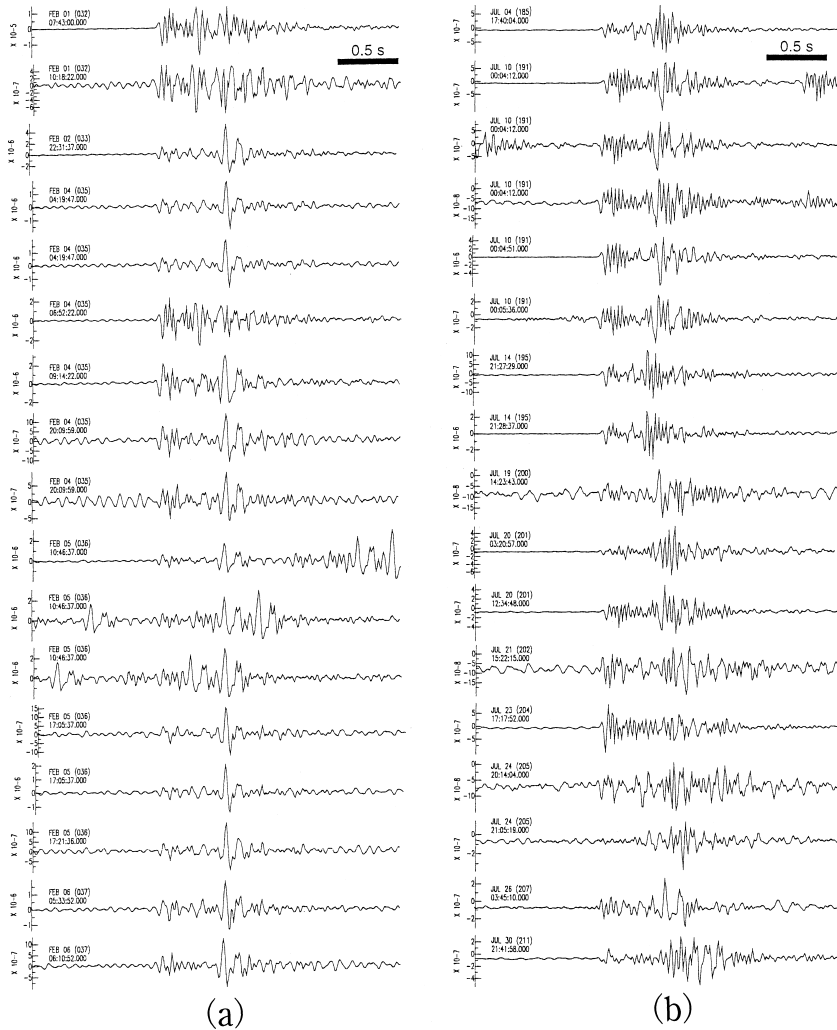


図 4 野島断層における、(a) 4.0 MPa 注水後の誘発地震（2000 年 2 月 1 日 ~ 2 月 6 日）、および (b) 定常的な極微小地震（2001 年 7 月 4 日 ~ 7 月 30 日）の波形例．800m ボアホール地震計の上下動成分．

Fig. 4 Examples of vertical-component seismograms observed in the 800-m-deep borehole at the Nojima fault. (a) Induced events that occurred in February 1 - 6, 2000, after the 4.0 MPa injection. (b) Stationary ultra-microearthquakes that occurred in July 4 - 30, 2001.

た。これは震源過程の違い、もしくは注水によるボアホール周辺の減衰構造の変化を示唆する。また、図 4 の波形例からもわかるように注水誘発地震の方が波形の良く似た地震群が多い、すなわち震源クラスターを形成する割合が高い傾向がある。さらに、注水誘発地震は定常活動よりも b 値が小

さい傾向があること（加納ほか、2001）、注水誘発地震の系統的な震源移動（田所ほか、2001）も見いだされている。注水誘発地震では、破壊面における水の存在（間隙水圧）が震源過程に影響を及ぼす可能性があり、また注入水の拡散移動が震源域の集中性（クラスター構造）と震源移動を生

表 1 野島断層（1997 年および 2000 年）、松代、KTB における注水実験および誘発地震の概要。

上から順に、実験の実施年、注水の深度、孔口圧力、流量、総注水量、誘発地震の発生開始までの経過日数（注水後）、発生距離（注水地点から）、最大マグニチュード、震源クラスターの有無、岩盤（破碎帯）の透水性、二次元拡散モデルにおける水頭拡散係数。

Table 1 Comparison of several parameters characterizing water injection and induced seismicity for the experiments at the Nojima fault in 1997 and 2000, Matsushiro and KTB.

Pressures, flow rates, and total flows of the injection were measured at the well-head. Time lags and distances indicate time and space distances between the injection point and the induced seismicity, respectively. Permeability estimates and diffusivities used in modeling the 2-D diffusion process are also shown.

	Nojima		Matsushiro		KTB
Water injection					
Year of experiment	Feb. Mar. 1997	Jan. Mar. 2000	Jan. Feb. 1970	1994	
Depth (m)	540 (1800)	540 (1800)	1800	9030	
Pressure (MPa)	2.8 4.6	2.8 4.6	1.4 5	53 max	
Flow rate (l/min)	8 20	10 26	120 300	550 max	
Total flow (m ³)	23 209	63 273	32 2851	200	
Induced seismicity					
Time lag (days)	4 5	6 7	4.8 9.3	0.083	
Distance (km)	2.5 4.5	2.5 4.5	2 4	0.05 0.1	
Maximum magnitude	0.6	0.3	2.8	1.2	
Clustering	observed	observed		observed	
Permeability (× 10 ⁻¹³ m ²)	5.5 7.0	2.5 3.0	0.1 1	0.1 1 × 10 ⁻³	
Dffusivity (m ² /s)	2.0 3.0	1.0 2.0	1.2 3.5		

じさせていることが示唆される。注水誘発地震の発生メカニズム解明のため、これらの解析をさらに進めることが必要である。

III. 他の注水実験と誘発地震

野島断層、松代、KTB（ドイツ）における注水実験と誘発地震の関係を簡単にまとめたものを表 1 に示す。松代実験における岩盤（破碎帯）の透水性は誘発地震発生の時間 空間関係から推定されたものであるが（Ohatke, 1974）、野島断層、KTB では別の方法でも透水性が推定されている。KTB の場合は注水深度が 9100 m と深く、また岩盤透水性が小さく、注水地点のごく近傍（約 100 m 以内）で注水開始約 2 時間後から誘発地震が発生した（Zoback and Harjes, 1997）。この誘発地震発生の時空間特性は、野島断層の場合と同様に、間隙水圧の二次元拡散モデルにより説明可能である。注水誘発地震は注入水（間隙水圧）

が破壊条件の整った地殻内部まで拡散・伝播した時点でトリガーされ、発生するものと考えられる。

上記 3 例ともに、注入水（間隙水圧）の二次元拡散モデルにより誘発地震発生の時間 空間関係を合理的に説明できた。注入水の拡散が二次元的か三次元的かは、例えばボアホール観測（湧水量）を複数地点で行わないと判断が難しいものの、上の結果は地殻岩盤中には断層破碎帯のような割れ目系が発達して水を効率的に流す役割があることを想像させる。松代の実験では誘発地震の面的分布と震源移動が認められ、松代地震断層に沿って誘発地震が浅部から深部に移動する様子が推定されたが（Ohatke, 1974）、これは注目に値する。アメリカ Rangely 油田における注水実験でも、既存の断層に沿って誘発地震が発生した（Raleigh *et al.*, 1976）。

KTB の実験では注水圧力と誘発地震発生数の時系列に対応が見られた。これは、最初に紹介し

たデンバーの例, および, フィリピン断層 (Prioul *et al.*, 2000), Rangely 油田での注水実験でも認められた。中国 Renqiu 油田では採掘注水に伴い誘発地震が発生したが, 岩盤透水性の小さい領域では大きい領域よりも誘発地震の発生数が多い傾向が見いだされた (Genmo *et al.*, 1995)。透水性が小さい岩盤中では間隙水圧が高まる。これらの例は, 断層面における間隙水圧の上昇が誘発地震を発生させることを強く支持する。

地震波形の解析からは, 誘発地震の応力降下量が通常の地震に比べて小さめであるという結果が Renqiu 油田において得られている (Genmo *et al.*, 1995)。これは野島断層での 2000 年注水実験で観測された, 誘発地震の方が波形の高周波数成分が相対的に少ないという結果とも対応する。誘発地震の震源過程における水 (間隙水圧) の影響を示唆するが, 一般に, 微小地震の波形は媒質構造の影響 (減衰, 散乱) と観測システムの影響を強く受けるので, 慎重な解析が必要である。野島断層での実験では, ボアホール (800 m および 1800 m) 地震計データについて, 通常のルーチン観測で行われている 100 Hz サンプリングと同時に 10 kHz サンプリングによる波形収録も行われた。その結果, 地震モーメント (M_0) とコーナー周波数 (f_c) のスケージングが, 100 Hz サンプリングデータでは見かけ上 $M_0 \propto f_c^{-4}$ に従うのに対して, 10 kHz サンプリングデータでは高周波数成分まで忠実に波形収録されることにより, $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係に従うことが示された (Hiramatsu *et al.*, 2002)。良質な波形データに基づく, 今後の詳細な解析に期待したい。

IV. まとめ

注水誘発地震は注入水 (間隙水圧) の拡散・伝播によりトリガーされ, 注水開始から誘発地震発生までの時間, 空間距離は二次元拡散モデルにより説明されることを, 野島断層, 松代, KTB (ドイツ) での実験について示した。誘発地震は間隙水圧上昇に伴う, 断層面上での破壊強度の低下により発生するものと考えられる。野島断層では 2 回の注水実験 (1997, 2000 年) による誘発地震

が詳細に調べられた。1997 年から 2000 年にかけて, 注水開始から誘発地震発生までの時間が約 2 日間遅くなり, 野島断層の固着が深さ 2 ~ 4 km まで進行している可能性が示された。さらに, 注水誘発地震は通常の地震活動に比べて波形高周波数成分が少なく, また震源クラスターを形成する割合が高いことが示された。今後の詳細な解析による誘発地震の発生メカニズム解明が期待される。

定常的な地震活動が存在する地域では, わずかな間隙水圧の増加でも誘発地震が発生するので, 例えば断層トラップ波の観測による破砕帯浅部構造の調査等, 誘発地震を地下深部における繰り返し人工震源として利用することも可能である (西上, 2001)。アクティブな野外実験としての注水実験を今後, 有効に活用することも検討すべきであろう。

謝 辞

野島断層における注水実験および極微小地震観測は「野島断層解剖計画」により実施された。防災科学技術研究所の池田隆司氏からは原稿を改善する上で有益な査読コメントをいただいた。ここに記して感謝する。

文 献

- 安藤雅孝・島崎邦彦・竹村恵二 (1998) 総論; 断層解剖計画. 月刊地球, 号外, **21**, 5-12.
- Genmo, Z., Huaran, C., Shuqin, M. and Deyuan, D. (1995) Research on earthquakes induced by water injection in China. *PAGEOPH*, **145**, 59-68.
- Guha, S.K. (2000) *Induced Earthquakes*. Kluwer Academic Publishers.
- Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T. and Raleigh, C.B. (1968) The Denver earthquakes. *Science*, **161**, No. 3848, 1301-1310.
- Hiramatsu, Y., Yamanaka, H., Tadokoro, K., Nishigami, K. and Ohmi, S. (2002) Scaling law between corner frequency and seismic moment of microearthquakes: Is the breakdown of the cube law a nature of earthquakes? *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- 加納靖之・平松良浩・田所敬一・西上欽也 (2001) 注水実験前後の地震活動の規模別頻度分布. 月刊地球, **23**, 277-280.
- 北川有一・藤森邦夫・小泉尚嗣・野津憲治・五十嵐丈二 (2001) 繰り返し注水実験による淡路島 800 m 孔の湧水量変化から推定された岩盤の透水性の時間変化. 月刊地球, **23**, 245-249.
- 向井厚志・藤森邦夫・石井 紘・中尾 茂 (2001) 注水

- 試験に伴うひずみ変化．月刊地球，**23**，240-244．
- 村上英記・橋本武志・大志万直人・山口 寛（2001）注水実験時の電磁気観測（2）流動電位計測．月刊地球，**23**，250-255．
- 永井 悟・加納靖之・田所敬一・水野高志・山中寛志・大見士朗・西上欽也・平松良浩・平田 直（2001）2000年野島断層注水試験に伴う微小地震活動の観測．東京大学地震研究所彙報，**76**，163-186．
- 西上欽也（2001）注水試験の概要，および野島断層浅部構造とその回復過程．月刊地球，**23**，232-235．
- 西上欽也・水野高志・加納靖之・田所敬一・下川明子・三宅 学・永井 悟・平田 直・平松良浩・臼井佑介（2001）野島断層における極微小地震の発生過程の特性．日本地震学会講演予稿集，P013．
- Ohtake, M. (1974) Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan. *J. Phys. Earth*, **22**, 163-176.
- Prioul, R., Cornet, F.H., Dorbath, C., Dorbath, L., Ogena, M. and Ramos, E. (2000) An induced seismicity experiment across a creeping segment of the Philippine Fault. *J. Geophys. Res.*, **105**, 13595-13612.
- Raleigh, C.B., Healy, J.H. and Bredehoeft, J.D. (1976) An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, **191**, 1230-1237.
- 島崎邦彦・安藤雅孝・西上欽也・大志万直人（1998）野島断層小倉における注水試験．月刊地球，号外，**21**，33-37．
- Tadokoro, K., Ando, M. and Nishigami, K. (2000) Induced earthquakes accompanying the water injection experiment at the Nojima fault zone, Japan: Seismicity and its migration. *J. Geophys. Res.*, **105**, 6089-6104.
- 田所敬一・加納靖之・西上欽也（2001）注水試験に伴うクラスタ的地震活動．月刊地球，**23**，264-267．
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L. (2000) A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **90**, 1353-1368.
- 山野 誠・後藤秀作（2001）野島断層掘削孔における注水・湧水による孔内温度分布の変動．月刊地球，**23**，236-239．
- Zoback, M.D. and Harjes, H.P. (1997) Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany. *J. Geophys. Res.*, **102**, 18477-18491.

（2002年1月8日受付，2002年2月25日受理）