

研究紹介

地震発生域の物理・化学過程に関する研究

佐藤隆司¹ 藤本光一郎² 伊藤 忍¹

Takashi SATOH, Koichiro FUJIMOTO and Shinobu ITO (2000) Studies on physical and chemical processes in earthquake source region. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (9), p. 447-450, 2 figs.

Abstract: In order to investigate the physical and chemical processes, especially the healing process, in source regions of crustal earthquakes, we have started a 5-year research project since FY 1999. Laboratory friction experiments under crustal conditions are prepared to establish the friction constitutive law at very low slip rates where the healing process progresses. By using the GSJ Hirabayashi well, repeated hydraulic tests and observation of the fault trapped wave have been conducted to detect the healing process of the Nojima fault, which ruptured during the 1995 Hyogo-ken-nanbu earthquake. The modeling of mass transfer in and around the Nojima fault is also planned by integrating the results of the detailed analysis of the core samples, groundwater obtained from the Hirabayashi well and local spring water around the fault. Precise measurements of microearthquakes using borehole seismometers have been carried out at Ohtaki, Atotsugawa and Inagawa regions to investigate the earthquake source process in more detail.

要 旨

標題の工技院特別研究は、室内実験やフィールドでの各種観測・調査により、強度回復過程を中心に地震発生域でおきる物理・化学過程の解明に資することを目的として、平成11年度より5カ年計画で開始された。室内実験では、内陸大地震の発生域である上部地殻に相当する条件で、摩擦強度回復が進行する低すべり速度での摩擦構成則の確立を目指す。1995年兵庫県南部地震直後に野島平林において掘削された野島断層を貫くボーリング孔を利用して、断層破砕帯の透水率の繰り返し測定および孔内地震計による断層トラップ波の観測を行い、それぞれ、野島断層の浅部および深部での強度回復の検出を試みる。また、断層破砕帯から採取された水試料や野島断層周辺の湧水の分析を行い、これとボーリングコアの解析結果を総合して、野島断層における物質移動のモデル化を試みる。長野県王滝地域、岐阜県跡津川地域、兵庫県猪名川地域においては、微小地震の震源極近傍での精密観測を、主にボーリング孔内に設置された地震計を用いて行い、震源過程の詳細を明らかにする。

1. はじめに

本稿は平成11年度から5カ年計画で開始された標題の工業技術院特別研究の計画の概要について紹介する。大地震発生に伴いその発生域では急激な断層運動により脆性的な破壊や破砕がおきる。シュードタキライトが生成されるような条件では融解もおきると考えられる。その後、圧密や拡散・沈殿などの岩石-水相互作用により地震発生時に低下した断層の強度は時間とともに回復し、応力が蓄積されていくと考えられる。本研究では、室内実験による強度回復過程の研究、野島断層における強度回復検出の試みと断層帯における物質循環のモデル化の研究、長野県王滝地域、岐阜県跡津川地域、兵庫県猪名川地域における微小地震の震源過程の詳細を明らかにするための震源極近傍での精密観測を実施することにより、強度回復過程を中心に地震発生域でおきる物理・化学過程の解明に資することを目的とする。

2. 研究の概要

2.1 地震発生域の条件における強度回復過程に関する実験的研究

岩石の摩擦に関する実験的研究は1980年代に入って飛

¹ 地質調査所地震地質部 (Earthquake Research Department, GSJ)

² 地質調査所地殻熱部 (Geothermal Research Department, GSJ)

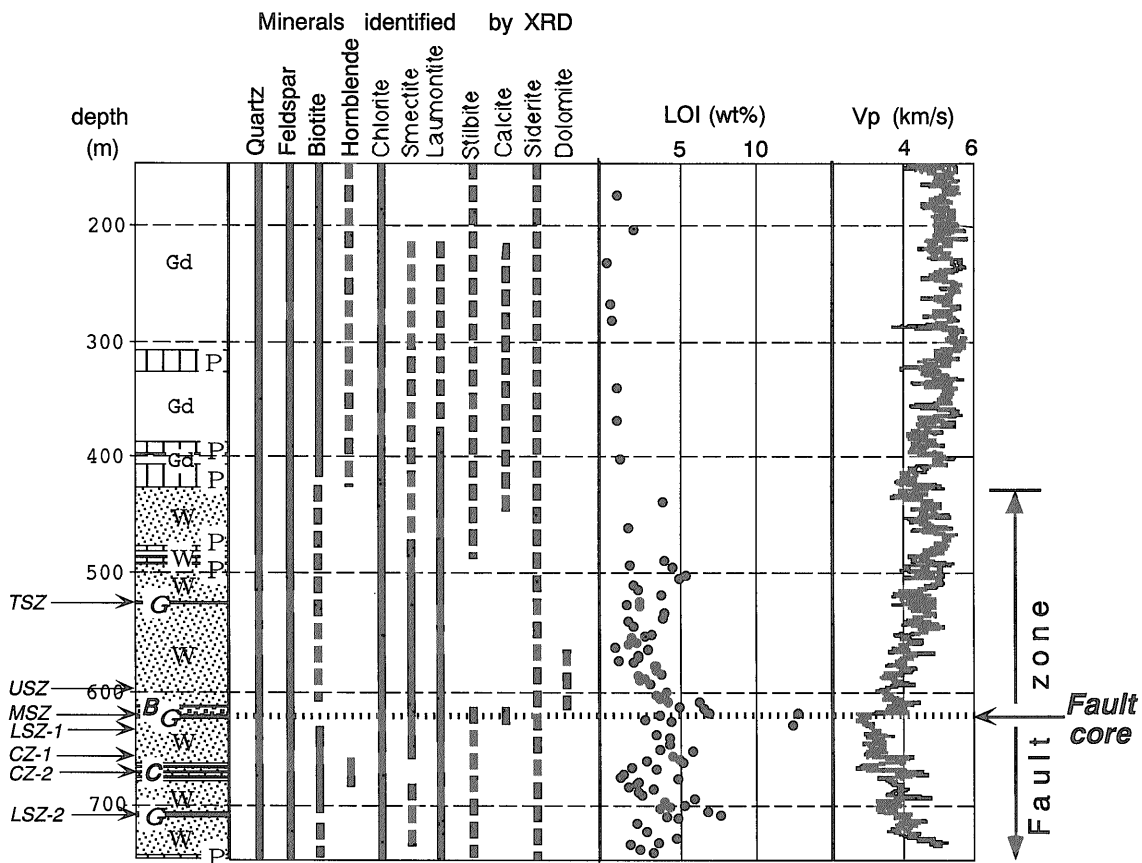
Keywords: healing process, water-rock interaction, mass transfer, Nojima fault, trapped wave, permeability, earthquake source process

躍的に発展し、震源核形成モデル (Ohnaka *et al.*, 1986) やすべり速度と状態に依存する摩擦法則 (Dieterich, 1979; Ruina, 1983) が提案された。室内実験により得られた摩擦法則を用いた地震発生過程の数値シミュレーションが行われるようになり (例えば Stuart, 1988; Kato and Hirasawa, 1997), 地震発生予測を行うための重要な方法のひとつとして認識されつつある (例えば松浦, 1998)。しかし、これまでに行われた室内実験は温度、間隙水圧、変位 (歪) 速度、断層構成物質などが地震発生の場合と大きく異なる条件の下で行われたものが大部分である。数値シミュレーションでは摩擦法則を地震発生の場合の条件に外挿したものが用いられている。地震が発生する場合の条件での岩石の摩擦特性に関する研究を系統的に行うことにより、摩擦法則の適応範囲を広めるとともにその信頼性を増すことが必要である (佐藤ほか, 1998)。

本研究では、上部地殻に対応する温度・圧力・間隙水圧条件で、すべりと停止を繰り返す、いわゆる slide-hold-slide test を行い、断層の強度回復が進行する低変位 (歪) 速度での摩擦構成則の定式化を目指す。その際、実験に用いる岩石試料やガウジの種類、間隙水の化学的性質などを考慮することにより、実際の地震発生域に近い条件での実験を行う。

2.2 野島断層における強度回復の検出と物質移動のモデル化に関する研究

1995年兵庫県南部地震では兵庫県淡路島西北部の野島断層において地震断層が地表にあらわれた。地質調査所では地震直後に野島平林において野島断層を貫くボーリング孔を掘削し、各種の孔内計測やコアの詳細な解析を行った (例えば伊藤ほか, 1996)。本研究では、本孔を利用して、断層破碎帯の透水率の繰り返し測定を行い野島



第1図 平林孔の孔井地質、変質鉱物、ignition loss (LOI) および P 波速度の深度分布 (Fujimoto *et al.*, 1999)。鉱物の分布で、実線はその範囲内のほぼ全ての試料に産出し、破線は産出頻度が低いことを示している。Gd: 花崗閃緑岩, P: ひん岩, W: 弱変形変質花崗閃緑岩, G: 断層ガウジ, B: 断層角礫, C: カタクレサイト。TSZ, USZ, MSZ, LSZ1, CZ1, CZ2 および LSZ2 は田中ほか (1999) によって記載された断層帯中の剪断ゾーンをあらわす。

Fig. 1 A composite column showing simplified lithology, distribution of minerals identified by X-ray diffraction (XRD) pattern, loss of ignition (LOI) of the whole rock chemistry and velocity of P wave (V_p) of the GSJ Hirabayashi well (after Fujimoto *et al.*, 1999). The solid and dotted lines indicate major and minor occurrences, respectively. Gd: Nojima granodiorite, P: porphyry dyke, W: weakly deformed and altered granodiorite, G: fault gouge, B: fault breccia, C: cataclasite. TSZ, USZ, MSZ, LSZ1, CZ1, CZ2 and LSZ2 denote shear zones in the fault zone described by Tanaka *et al.* (1999).

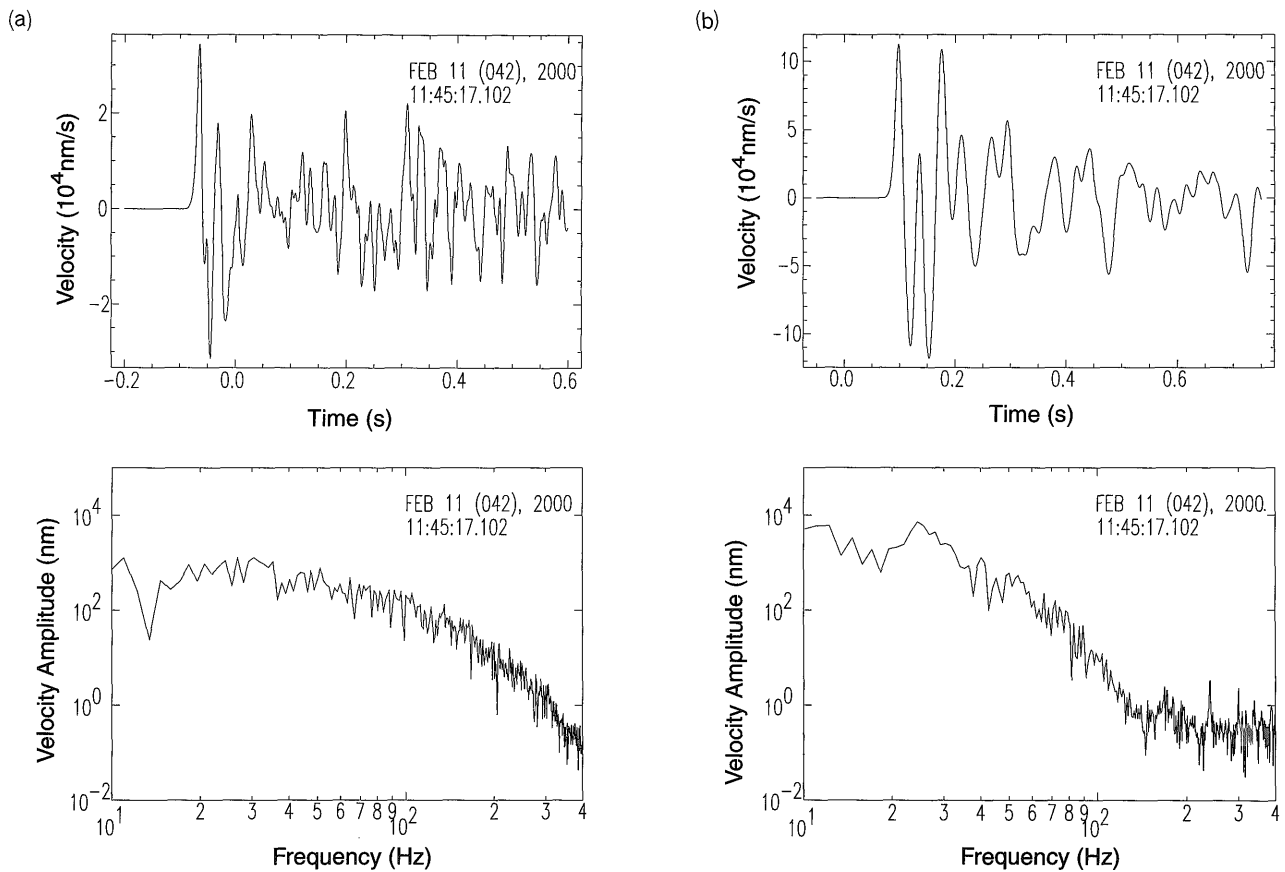
断層浅部における強度回復の検出を試みる。地震発生時に破碎された断層帯では、圧密や沈殿によって力学的性質や水理的性質が変化し、それに伴い強度回復が進行すると考えられる (例えば Olsen *et al.*, 1998)。掘削直後の孔内計測やコアを用いた測定では深度623.1~625.3mに出現した断層破碎帯中軸部と考えられる部分の透水率が周囲に比べて大きいことが分かっている (例えば Ito *et al.*, 1999) が、強度回復の進行とともに透水率が低下することが期待される。平林孔ではまた、マルチレベル孔内地震計を用いた、断層トラップ波の観測が行われている (例えば Ito *et al.*, 1998)。断層トラップ波とは断層破碎帯内を選択的に伝わる波のことで直達S波の直後にあらわれる。断層深部で強度回復が進行し、断層破碎帯とその周囲の岩石との間の力学的性質のコントラストが小さくなると、トラップ波の波形が不鮮明になったり直達S波との到達時間差が短くなることが期待される。

また、本孔から回収されたコアサンプルの解析から、断層破碎帯中軸部を含む変形変質の集中している部分において、 H_2O や CO_2 の増加が認められるなど、活発な物質移動が起こっていることを示す証拠が得られている

(第1図) (Fujimoto *et al.*, 1999)。断層帯における水/岩石相互作用や物質移動の実体を明らかにすることは、断層の力学的挙動や地震発生域で生じている物理・化学過程の理解に貢献する。本研究では、コアサンプルや断層破碎帯から採取された水試料、野島断層周辺の湧水から採取された水試料などの解析結果を総合して、断層帯における物質移動のモデル化を試みる。

2.3 地震発生域極近傍における高精度地震観測による地震発生過程の研究

地質調査所では、兵庫県南部地震を契機として、近畿・中部地域において28カ所の観測井を掘削し、地下水位、地殻歪、地震などの観測を行っている (佃, 1998)。このうち、1984年長野県西部地震の震源域直上に設置された王滝、岐阜県の跡津川断層沿いに設けられた跡津川及び宮川、近年繰り返し群発地震が発生している兵庫県猪名川地域に設置された猪名川の各観測点では、観測井の極近傍で活発な微小地震活動が認められる。本研究は、主にボーリング孔内に設置された地震計を用いて観測点極近傍で発生した地震の精密観測を行い、震源過程の詳細



第2図 (a) 王滝ボアホール観測点で記録された微小地震の速度波形 (上) と振幅スペクトル (下)。

(b) 同じ地震を地表観測点で記録した速度波形 (上) と振幅スペクトル (下)。

Fig. 2 (a) An example of velocity seismogram recorded by the borehole seismometer at the Ohtaki station (top) and its amplitude spectrum (bottom). (b) A velocity seismogram (top) and its amplitude spectrum (bottom) for the same event as shown in (a) but detected by a surface seismometer.

を明らかにすることを目的とする。第2図(a)は王滝地域で発生した微小地震をボーリング孔内に設置された地震計で記録した観測波形とその振幅スペクトルの例である。地表での観測波形(第2図(b))と比べると、孔内地震計の記録の方が明らかに短周期成分に富んでいる。両者の振幅スペクトルを比較すると、地表では50Hz付近から急激に減衰するのに対し、孔内では200Hz付近まで良好な記録が得られていることが分かる。このことから微小地震の震源過程についても詳細な解析が可能であると期待される(伊藤ほか, 1999)。

3. おわりに

本研究計画では、上で紹介した研究をとおして、地震発生域で起きる物理・化学過程に関する理解を深めることを目標とする。さらに、実験で得られた摩擦構成則の中のスケールに依存するパラメータの値を、フィールドにおける研究結果を参考にして推定し、それを用いて地震発生過程の数値シミュレーションに適応することも考えている。

なお、本研究は筆者らのほか以下のメンバーの参加により行われている(2000年3月現在)。長 秋雄・今西和俊・伊藤久男・加藤尚之・小泉尚嗣・楠瀬勤一郎・乗原保人・増田幸治・佐藤 努・高橋 誠(以上地震地質部)・大谷具幸(地殻熱部)・西澤 修(地殻物理部)・大湊隆雄(東京大学)・河原 純(茨城大学)。

文 献

Dieterich, J.H. (1979) Modeling of rock friction, I. experimental results and constitutive equations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2161-2175.

Fujimoto, K., Ohtani, T., Tanaka, H., Tomida, N., and Ito, H. (1999) Characteristics of texture and mineralogy of fault rocks along the Nojima fault: analysis of continuous core from the GSJ Hirabayashi borehole. *Geol. Surv. Japan Interim Rep.* no. EQ/99/1, 50-53.

伊藤久男・乗原保人・宮崎光旗・西澤 修・木口 努・藤本光一郎・大谷具幸・田中秀美・樋口孝幸・S. Agar・A. Brie・山本裕祥(1996) 断層を貫く孔井調査による野島断層の深部構造, 物理探査, **49**, 522-535.

Ito, H., Kuwahara, Y., and Ito, S. (1998) Evaluation of subsurface structure of the Nojima fault by trapped wave. *Proc. 4th SEGJ Int. Symp.*, 177-183.

Ito, H., Kiguchi, T., Kuwahara, Y., Fujimoto, K., Ohtani, T., and Tanaka, H. (1999) Structure

and physical properties of the Nojima fault. *Geol. Surv. Japan Interim Rep.* no. EQ/99/1, 18-21.

伊藤 忍・伊藤久男・W.L. Ellsworth・乗原保人・今西和俊(1999) 震源ごく近傍におけるボアホール観測によって得られた微小地震の震源課程, 日本地震学会講演予稿集1999年度秋季大会, P068.

Kato, N., and Hirasawa, T. (1997) A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **102**, 51-68.

松浦充宏(1998) 新しい地震予知研究の枠組みと地殻変動予測モデルの構築, 月刊地球号外 no. 20, 108-111.

Ohnaka, M., Kuwahara, Y., Yamamoto, K., and Hirasawa, T. (1986) Dynamic breakdown process and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instabilities. *Earthquake Source Mechanics, Das, S., Boartwright, J., and Scholz, C.H., Eds. (AGU, Washington D.C.)*, 13-24.

Olsen, M.P., Scholz, C.H., and Léger, A. (1998) Healing and sealing of a simulated fault gouge under hydrothermal conditions: implications for fault healing. *J. Geophys. Res.*, **103**, 7421-7430.

Ruina, A.L. (1983) Slip instability and state variable friction laws. *J. Geophys. Res.*, **88**, 10359-10370.

佐藤隆司・加藤尚之・増田幸治・長 秋雄・楠瀬勤一郎(1998) 地震発生の際の条件下での断層の挙動に関する実験的研究, 月刊地球号外 no. 20, 156-159.

Stuart, W.D. (1988) Forecast model for great earthquakes at the Nankai trough subduction zone. *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 619-641.

田中秀実・樋口孝幸・富田直人・藤本光一郎・大谷具幸・伊藤久男(1999) 野島断層地質調査所コアにおける断層岩区分, 分布および破碎-変質様式, 地質雑, **105**, 72-85.

佃 栄吉(1998) 変動解析研究室の現在の研究内容と今後の展望-東海地域の地震予知研究及び内陸活断層のモニタリング-, 地質ニュース, no. 523, 29-34.

(受付: 2000年4月4日; 受理: 2000年7月26日)