1995年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査

著者	池田 隆司，小村 健太朗，飯尾 能久，新井 崇史，小林 健太，松田 達生，島田 耕史，田中 秀実，富田 倫明，平野 聡
雑誌名	防災科学技術研究所　研究報告
巻	61
ページ	141-153
発行年	2001-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00001121

1995年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査

池田隆司[*1]・小村健太朗[*1]・飯尾能久[*2]・新井崇史[*3]
小林健太[*4]・松田達生[*1]・島田耕史[*5]・田中秀実[*6]
富田倫明[*7]・平野　聡[*8]

Drilling Investigation through the Nojima Fault of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan

By

Ryuji IKEDA[*1], Kentaro OMURA[*1], Yoshihisa IIO[*2], Takashi ARAI[*3], Kenta KOBAYASHI[*4], Tatsuo MATSUDA[*1] Koji SHIMADA[*5], Hidemi TANAKA[*6], Tomoaki, TOMITA[*7], and Satoshi HIRANO[*8],

*[*1]National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*
ikeda@bosai.go.jp, omura@bosai.go.jp, mtatsuo@bosai.go.jp
*[*2]Earthquake Research Institute, University of Tokyo, iio@eri.u-tokyo.ac.jp*
*[*3]Shinshu University, sa96401@gipac.shinshu-u.ac.jp*
*[*4]Niigata University, kenkoba@gs.niigata-u.ac.jp*
*[*5]Waseda University, 698g5040@mn.waseda.ac.jp*
*[*6]Ehime University, tanaka@sci.ehime-u.ac.jp*
*[*7]University of Tsukuba, tomita@luna.riko.tsukuba.ac.jp*
*[*8]Japan Marine Science and Technology Center, hiranos@jamstec.go.jp*

Abstract

The Nojima fault appeared on the surface in the northern part of Awaji Island as a result of the Hyogo-ken Nanbu earthquake (1995. 1, *Ms*7.2). Three deep boreholes of 1,000m to 1,800m were drilled by NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) in the vicinity of the epicenter of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake for scientific research purposes. In particular, the Nojima-Hirabayashi borehole was drilled to a depth of 1,800m and crossed the fault zones below a depth of 1,140m. To investigate tectonic and material characteristics near and in active faults, we have been conducting an integrated study of crustal stress, heat flow, permeability, resistivity structure and material properties of the cores. Major results obtained from this study include the following : (1) Shear stress around the fault zone is very small, and the orientation of the maximum horizontal compression is perpendicular to the surface trace of the faults. (2) From the results of the heat flow value, the cutoff depth of the aftershocks was estimated to be roughly 300° C in temperature. (3) Core pieces were classified into several types of fault rocks, and the asymmetric distribution pattern of these fault rocks in the fracture zones was clarified. (4) A shear zone of low-permeability is surrounded by a damaged zone, which will act as a high-permeability conduit for fluid flow in the plane

[*1]防災科学技術研究所　[*2]東京大学地震研究所　[*3]信州大学　[*4]新潟大学
[*5]早稲田大学　[*6]愛媛大学　[*7]筑波大学　[*8]海洋科学技術センター

of the fault. (5) Resistivity structure can be explained by a simulation model of the fault continuing to a deeper part as a low resitivity body.

Key words: Fault zone drilling, The Nojima fault, The 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, In-situ stress, Fault core property

1．はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震（神戸地震，*Ms* 7.2）に伴い，淡路島北西岸に沿って野島断層が地表に出現した．我々は，断層帯を直接貫く掘削（ドリリング）によって，野島断層深部の構造や物性，応力や歪状態，流体の存在状態について直接調査することを試みた．防災科学技術研究所では，兵庫県南部地震に先立つ1993年から特別研究「地震発生機構に関する研究」により「活断層ドリリング」プロジェクトを進めていた．このプロジェクトは，陸地で最も大きなマグニチュード（*M*）8級の地震が起こる可能性が指摘されている近畿・中部地方の活断層をターゲットとしている．その中でも，根尾谷，阿寺，跡津川の3つの活断層は同規模で長さが70 km～80 kmにもおよび，歴史上 *M* 7～8級の地震が断層沿いに起きている最大級の地震断層で，地表地震断層が明瞭である．さらに重要なことは，3断層の地震発生後の経過年数が異なっている．根尾谷断層は約110年［濃尾地震（1891，*M* 8.0）から］，跡津川断層は約140年［飛越地震（1858，*M* 7.0）から］，阿寺断層は約410年［天正地震（1586，*M* 7.9）で活動したとして］である．したがって，地震発生後の経過年数が異なり，それぞれの断層は，次の地震発生に至る準備過程の異なるステージにあると考えられ，断層の時間変化過程を研究するのに適している．その後，兵庫県南部地震が発生し野島断層が地表に出現した．野島断層を調査することは，地震発生直後の状態を把握し上述の断層と比較するうえで極めて重要な意味がある．実際，地震で活動した直後の断層を掘り抜き，地下深部の新鮮な断層物質を採取できたのは世界でも初めてのことである．活断層を直接掘削するという計画自体は，米国サンアンドレアス断層（Hickman *et al.*, 1994）や台湾チェロンプ断層（Ando *et al.*, 2000）などでも計画されているが，これらの先例となる貴重な経験である．

本研究は，兵庫県南部地震直後の緊急研究として計画された．大学連合，地質調査所（GSJ），防災科学技術研究所（NIED）はそれぞれの提案を持ち寄り，野島断層およびその周辺の数カ所においてボアホールを集中的に掘削し，それを手段として用いた研究調査を協力して実施した（安藤ほか，1998；竹村ほか，1998）．これら3機関は，地点選定から掘削，実験，解析までお互いに情報交換しながらプロジェクトを推進した．したがって，互いのプロジェクトに係わった研究者も少なくない．野島断層を直接掘りぬく，あるいはごく近傍で掘削されたボアホールは，大学連合の小倉地区における3本，GSJの野島平林地区における1本，NIEDの同じく野島平林地区における1本である．本論文では，主として，野島平林で断層を直接貫いて掘削されたNIEDの深さ1,838 mの孔井（以下，平林井と呼ぶ）における，調査の内容と成果について述べる．平林井は地震発生から1年半以内に掘削され，岩石コアを1,000 m以浅のスポットコアリングと1,000 m以深のオールコアリングにより採取した．その結果，深度1,140 m，1,300 m，1,800 m付近に顕著な断層破砕帯が確認された．岩石コアの解析では，特にこの断層岩の物性，変形，変質などを総合的に解析した．採取された岩石コアは量的に限られている．これを多くの研究テーマに効率良くかつ有効に活用するために，採取から選定，切り出し，分配，保管といった一連の作業が必要になる．これらは膨大な労力と時間の要するものであり，チームとして作業することが必然的であることから，我々は「野島断層コア解析チーム」を編成した．コアの解析に関する詳細な記述は本報告書のそれぞれの論文に譲ることとし，プロジェクト全体を概観してまとめることにする．孔井内測定・実験として実施した孔井内物理検層，応力測定実験，熱流量測定，および電気伝導度調査は，掘削地点周辺のテクトニクスや地殻構造を知るうえで重要であり，コア解析の結果と相補的に解釈することによって断層の実態がより明らかになる．

2．目的と掘削地点

野島断層ドリリング調査の最大の目的は，地震発生直後の応力や熱流量などがどのような状態にあるのか，断層を構成する物質はどのような特性を有するのかを知ることである．これらの断層の物理的・物質的な特性が，断層活動全体の時間変化の中でどこに位置するのか解れば，地震の発生過程のモデル化に寄与することになろう．そのためには，地震発生から次の地震発生までの異なる時間過程にある様々な断層での調査が必要となる．野島断層は，地震発生直後の状態を把握し，地下深部の断層構造や物質について研究する貴重な場である．NIEDが実施した研究は，大きく次の2つに分けられる：(1)孔井内測定・実験：物理検層，地殻応力，熱流量，比抵抗構造，(2)断層岩コア解析：岩石物性・変形・変質，透水性．また，ボアホールを利用した実験手法や，岩石コアの解析手法は未だ確立されているわけではない．したがって，掘削地点の選定，ボアホールの仕様，掘削とコアリング技術，孔井内実験手法，および岩石コアの解析手法等に関して，研究テーマに応じた適切な手法を見いだすことも本研究の目的の一つである．

兵庫県南部地震は，明石海峡で断層運動が開始し，神

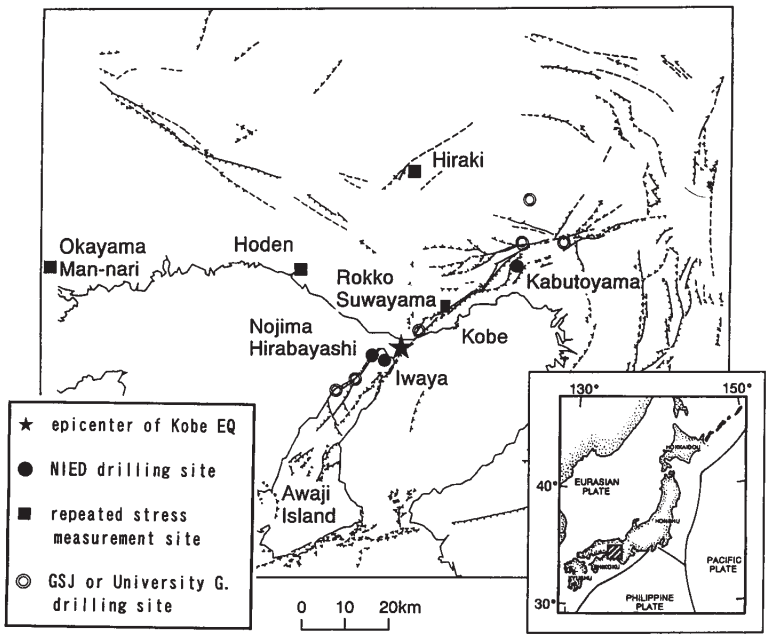

図1 掘削地点と活断層：1995年兵庫県南部地震の震源(星印)，活断層(破線；活断層研究会，1991)，孔井位置(黒丸，NIEDの深層3井；二重丸，GSJと大学グループによる孔井；黒四角，応力繰り返し測定用浅井)

Fig. 1 The drilling sites around the epicenter of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (star symbol) on the map of active fault distribution (broken line ; after the Research Group for Active Faults of Japan, 1991). The three black circles locate the NIED deep boreholes discussed in this paper. Double circles locate the boreholes drilled by the Geological Survey of Japan and the university group. Black squares show the location of repeated stress measurement sites.

戸側と淡路島の2方向に進展し（例えば，Ide *et al.*, 1996；Kikuchi and Kanamori, 1996)，淡路島の北西岸に沿って野島断層として地表に出現した（中田ほか，1995)．野島断層を直接掘りぬく位置で，あるいはごく近傍で掘削されたボアホールは，大学連合の小倉地区における3本（深さ500 m，鉛直より30°の傾斜；深さ800 m，最大傾斜3°；深さ1,760 m，1,200 m以深鉛直より20°以内で傾斜)（安藤ほか，1998；Ando, 1999)，GSJの野島平林地区における1本（深さ747 m，最大傾斜4°）（伊藤ほか，1996；Ito *et al.*, 1999)，NIEDの野島平林地区における1本（深さ1,838 m，最大傾斜7°20'）である．NIEDは，野島平林のほかに淡路町岩屋（深さ1,001 m，最大傾斜4°）と西宮市甲山（深さ1,313 m，最大傾斜11°20'）でも掘削した（池田ほか，1998；Ikeda, 1999)．これらの掘削地点を活断層の分布図（活断層研究会，1991）上にまとめて示す（**図1**)．また，**図2**に淡路島北部地域の地質概略図と断層およびNIEDの平林井と岩屋井の位置を示す．この地域の基盤岩は主として花崗岩類で，第三系の堆積岩である神戸層群が花崗岩類を不整合に覆っている．東西の海岸に分布する鮮新統・更新統の大阪層群は一部は断層と接し，段丘層・沖積層に不整合に覆われる(市原編，1993)．淡路島北部の北西側には野島断層と浅野断層が，また南東側には楠本断層と東浦断層が，それぞれ山地と丘陵の境界に沿って北東—南西方向に延びている．

NIEDの3掘削地点はいずれも花崗岩質の地域にあり岩質的な差は少ないが，活断層や余震分布との位置関係でそれぞれ特徴的な場所に位置する．3地点のうち，野島断層を直接貫くように掘削されたのが平林井で，掘削地点は断層の走向と直交する方向（断層からS 55°E方向）約302 mの採石場跡地に位置する．GSJの掘削井も同採石場で断層からは同方向約75 mに位置しており（伊藤ほか，1996；田中秀実ほか，1998)，両者で断層破砕帯の位置や物質を確認することにより，その形状や特性を明らかにすることを意図して計画された．このように掘削地点の選定には，断層との位置関係が最重要視されたが，応力測定等の孔内実験のために地層の固結度など地質的条件も考慮された．その他，掘削作業上ある程度広い平坦な地形と，周囲の環境（水や騒音の問題）に注意が払われた．なお，**図1**の黒四角（■）印の地点は，応力の繰り返し測定が行なわれた地点である（Ikeda *et al.*, 1996a)．

3. 掘削と検層の概要

3.1 掘削

NIEDの3孔井の概略仕様を**表1**に示す．また，平林井の掘削およびケーシングプログラムを**図3**に示す．掘削は4段階で行なわれ，0 m～141.09 m間はハンマービッ

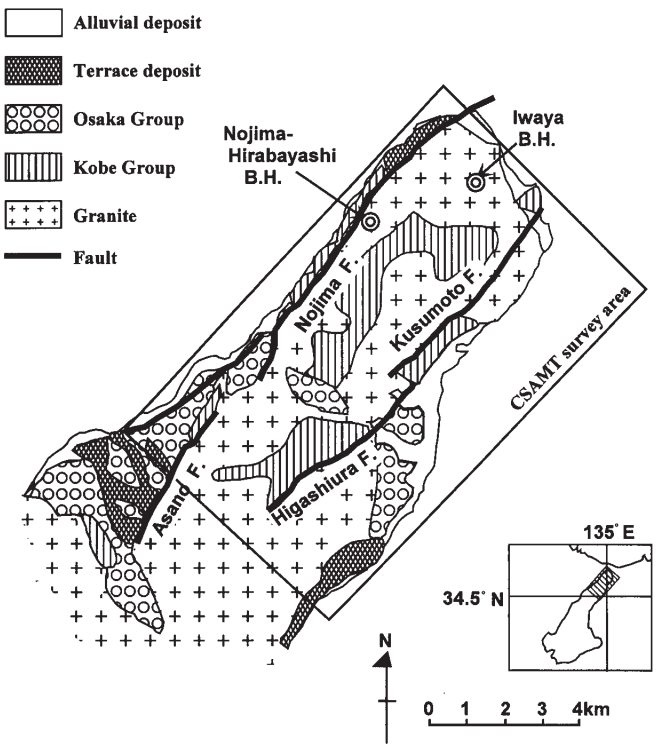

図2　淡路島北部地域の地質図と孔井の位置（◎印）．四角の領域はCSAMTの調査地域

Fig. 2　Geological map and borehole sites (◎) in the northern part of Awaji Island. The rectangular area is the CSAMT survey field.

ト，141.09 m～1001.50 m間はトリコンビット，1001.50 m～1838.80 m（孔底）間はオールコアリング・ダイヤモンドビットが用いられた．断層帯を貫き，かつ断層破砕帯からのコアを採取するという掘削にとっては崩壊の危険を伴う作業であることから，泥水管理および孔芯傾斜には細心の注意が払われた．44 m付近では湧水が発生し，高比重泥剤（バライト）を使用して湧水を抑えながら掘削した．孔芯傾斜は約50 m毎に測定した．地表から1,000 mまで断層方向に増角傾向で掘削し，最大孔芯傾斜は深度993.9 mで鉛直から7°20'で，それ以深は減角傾向で最終測定深度1,782.3 mで0°45'であった．

3.2　コアリング

岩石コアは，1,000 m以浅では5箇所においてスポットコアリング（コア長約4～19 m）で採取した．それぞれの深度とコア径は，98.55-103.00 m（コア径 ϕ 131 mm）；201.05-205.12 m（ϕ 131 mm）；448.08-467.65 m（ϕ 97.5 mm）；658.52-673.65 m（ϕ 97.5 mm）；830.24-845.45 m（ϕ 97.5 mm）である．それ以深，1,001 mから1,838 mまではコア径 ϕ 64 mmのオールコアリングである．採取率はいずれもほぼ100%であった．また，単にコアを採取するだけでなく，コアが岩盤中でどの方向にあったかを明確にし，地層の傾斜や方向を知るとともに，岩石コアによる応力やひずみに関する実験（例えば，佐野ほか，1997；山本・矢部，1998）を行うためにコアに方位付けして採取することを行った．既存の定方位コアリング技術には種々の難点があったので，NIEDと住鉱コンサルタント（株）が共同で開発した技術を用いた．これは端面形状記憶方式と称する方法で，装

表1　孔井の位置と仕様の概要：1995年兵庫県南部地震に関連する防災科学技術研究所の断層ドリリング・プロジェクト

Table 1　Outline of drillhole sites and specifications: the NIED fault drilling project relevant to the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake.

BOREHOLE	NOJIMA-HIRABAYASHI (Awaji Island)	IWAYA (Awaji Island)	KABUTOYAMA (Nishinomiya, Honsyu)
Drilling Site	Hokudan Town, Hyogo Pref.	Awaji Town, Hyogo Pref.	Nishinomiya City, Hyogo Pref.
Distance and Direction from Active Fault	302 m, S55° E, from Nojima-fault	1.7 km, S40° E, from Nojima-fault	1.5 km, E, from Ashiya-fault 1.5 km, W, from Koyo-fault
Drilling Depth	1,838.8 m	1,001.5 m	1,313.2 m
Drilling Diameter (final)	193.7 mm (10 - 253 m) 149.2 mm (253 - 1,001 m) 97.5 mm (1,001 - 1,838 m)	193.7 mm (11 - 202 m) 149.2 mm (202 - 1,001 m)	215.9 mm (21 - 701 m) 175.0 mm (701 - 740 m) 149.2 mm (740 - 1,313 m)
Maximum Inclination	7° 20' (at 993.9 m)	4° 00' (at 959.3 m)	11° 20' (at 934.0 m)
Lithology	tonalite, granodiorite, cataclastic rock, fault gauge	granodiorite, diorite, cataclastic rock	biotite granite
Coring	spot coring; 5 points in every 200 m (>-1,000 m), and all coring (<-1,000 m)	spot coring; 6 points in every 100 - 200 m	spot coring; 6 points in every 200 m
Casing	4" c.p. to 1000.3 m deep	6" c.p. to 200 m deep	7" c.p. to 701 m deep

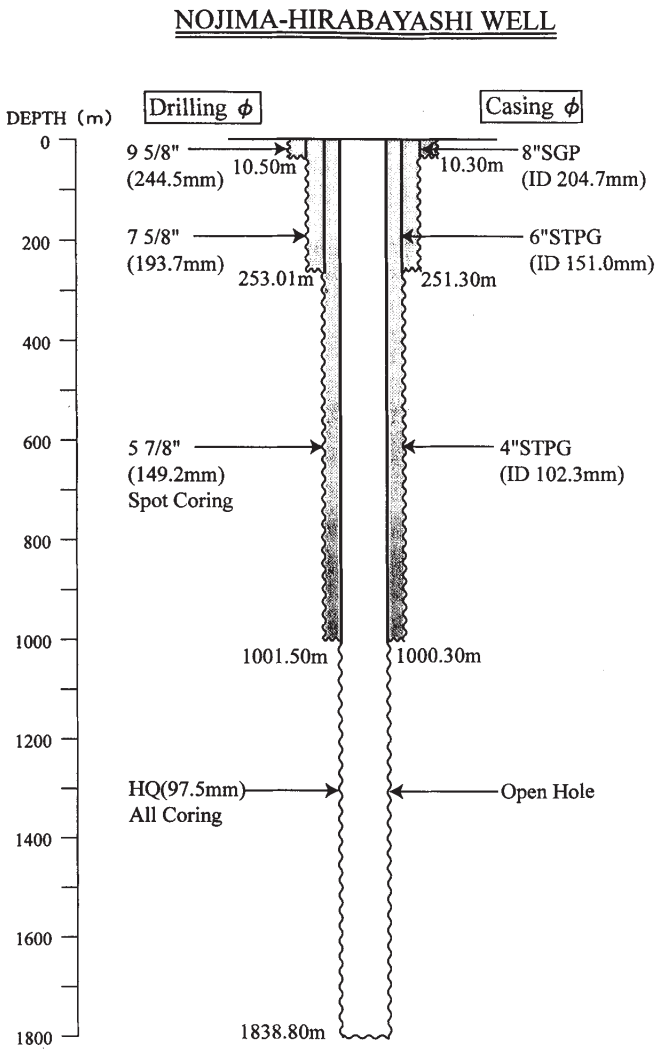

図3　野島平林井の掘削孔径とケーシングプログラム

Fig. 3　Drilling diameter and casing program of the Nojima-Hirabayashi drillhole.

置の概略を図4に示す．複数の針状の棒（形状探査針）を孔底に押し付けることにより，採取しようとするコアの端面の形状の型取りを行なう．同時に孔芯傾斜測定器により，キーとなる形状探査針の方位を測定する．コアリング後，採取されたコアの端面の形状と記憶された探査針の形状とを照合し位置関係を復元することにより，コアの方位を正確に検知しようとするものである．この方法は，ワイヤーラインのインナーチューブを利用することで，比較的短時間で連続的に定方位コアリングを行なうことが出来る．コアおよびカッテングスの観察に基づき，図5の地質柱状図を描いた．母岩は花崗閃緑岩とトーナライトであるが，断層ガウジ（粘土）を伴うカタクラスティック岩石の顕著な破砕帯が，1,140 m，1,300 m，1,800 m付近の3箇所で確認された．

3.3　検層

原位置での岩盤の特性は，孔井内物理検層により把握される．また，検層のメリットは地表から地下深部までの連続的な変化が追えることである．平林井で実施した

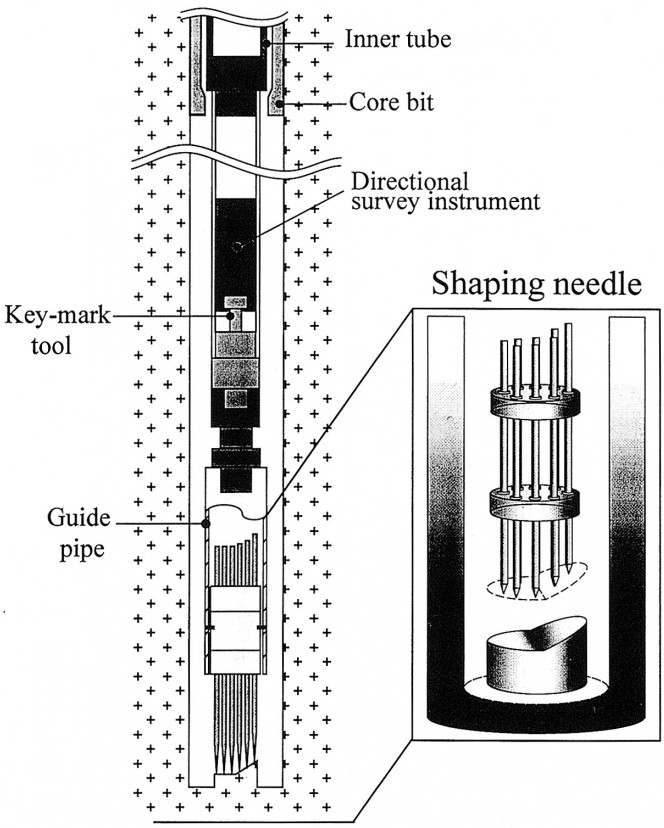

図4　定方位コアサンプリング器具

Fig. 4　Instruments for oriented core sampling.

検層種目は，温度・電気（自然電位，比抵抗）・音波（Vp）・中性子・自然放射能（γ線）・密度（γ線）・マイクロ比抵抗・孔径（X-Y）・超音波式ボアホールテレビュアの9種目である．図5に検層結果の一部を地質柱状図と共に示す．他の種目については，小村ほか（2001 a，本誌）を参照されたい．破砕されていない花崗岩部では密度が2.6～2.7 g/cm³，比抵抗値が数百～数千 Ω·m，P波速度が5～6 km/secであるが，断層破砕帯部ではそれぞれ1.5～2.5 g/cm³，10～20 Ω·m，2～4 km/sec程度に極端に減少する．1,140 mの破砕帯部で見ると，断層ガウジのある中軸部に向かって比抵抗やP波速度の減少となって現れており，中軸部より上盤側の方が下盤側より破砕度が大きい．物理検層の目的の一つは，断層破砕帯の強度に直接影響を及ぼすであろう流体や熱に関連する原位置の情報を得ることである．池田ほか（1997）は，断層の規模，2次孔隙率の存在，断層中の地層水の成分，岩石のマトリックスの物性などについて，検層結果から破砕帯や割れ目を分類評価することを試みた．小村ほか（2001 a）は，1,140 m，1,300 m，1,800 mの各破砕帯についてより詳しく比較解析し，それぞれの破砕や変質の特徴について検討している．図5には，平林井の掘削軌跡が断層との位置関係で示されている．これにはGSJによる掘削井の軌跡も示されており，623.3 mから625.1 mで断層破砕帯が確認されている（伊藤ほか，1996）．これらの断層破砕帯を結ぶと，野島断層の傾斜角は70°～85°と推

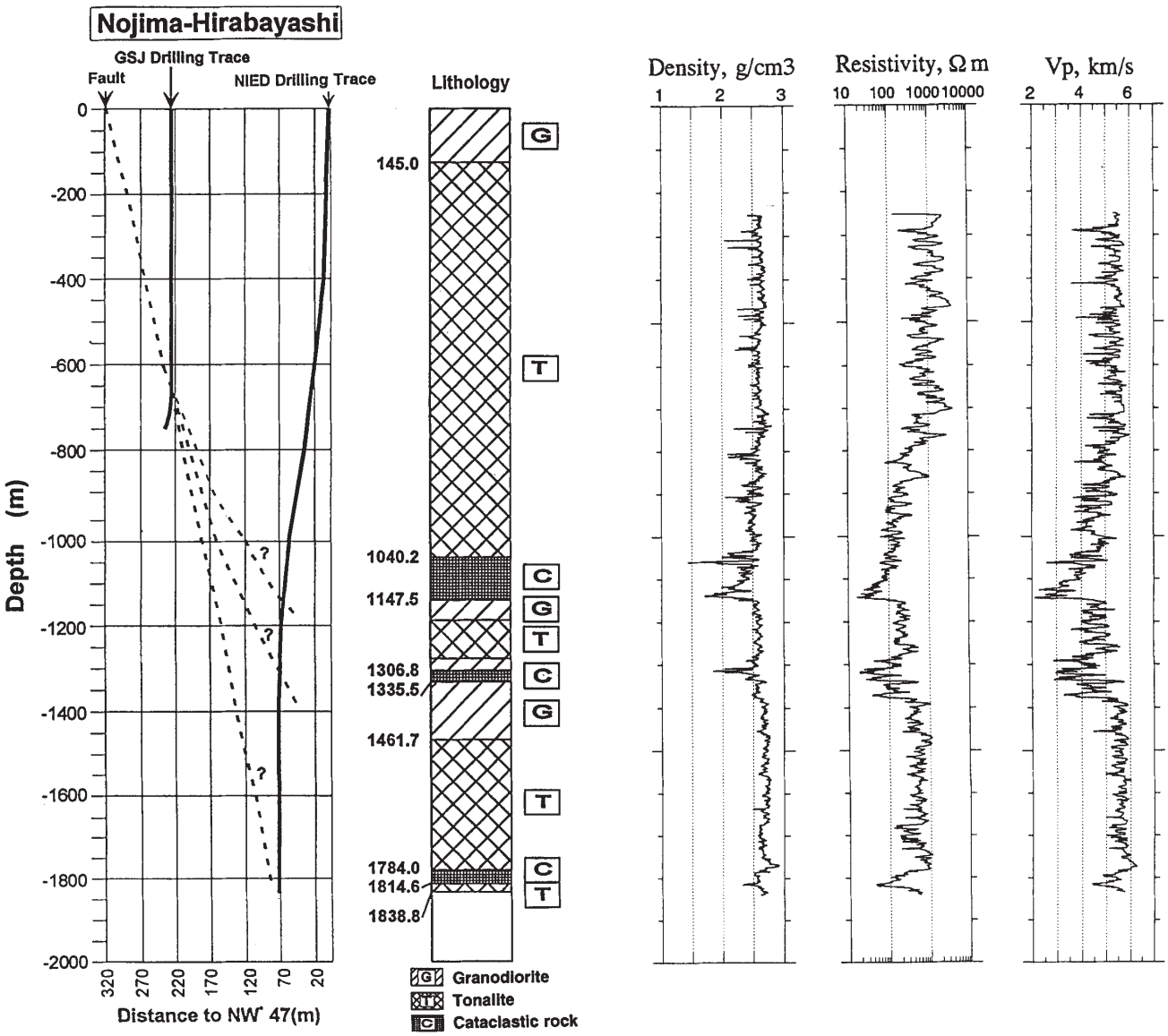

図5　野島平林井の掘削軌跡と推定断層トレース，コア解析による地質柱状図，および孔井内物理検層（密度，比抵抗，P波速度）．NIED掘削軌跡は本研究による．GSJ掘削軌跡は地質調査所（伊藤ほか，1996）による．

Fig. 5　Vertical projection of the Nojima-Hirabayashi drillhole and the Nojima fault with the lithological column as determined from the rock cores. The NIED Drilling Trace is by this study, and the GSJ one is by the Geological Survey of Japan (after Ito *et al.* 1996). Geophysical well logs of density, resistivity and P-wave velocity are also shown comparatively.

定される．

4．孔井内測定・実験

4.1　地殻応力測定

孔井内の数カ所の深度において，水圧破壊法によって地殻応力を測定した（池田ほか，1998；Ikeda, 1999）．水圧破壊法はボアホールのある部分を上下一対の膨張パッカー（栓）で密閉し，その間の岩盤に水圧で割れ目を作る．この割れ目は孔壁面で，最大水平圧縮応力（*SHmax*）の方向に孔井軸と平行に発生し進展する．また，割れ目の閉口圧，再開口圧を圧力—時間曲線上で検出し，地殻応力値を計算によって求める．割れ目の観察や岩石の物性，構造などの調査には，孔井内物理検層，ボアホールテレビュア，形取りパッカー等を用いる．応力値の深さによる変化を検出し深部応力状態を推定するためには，同一の測定井内で深さを変えて測定できる水圧破壊法が有効である．図6に平林井での応力測定の結果を，他の2地点（岩屋，甲山）での結果と比較して示す．これらの測定は，すべて花崗岩類の岩盤中で行われた．ほとんどの測定箇所で，良好な圧力—時間曲線が得

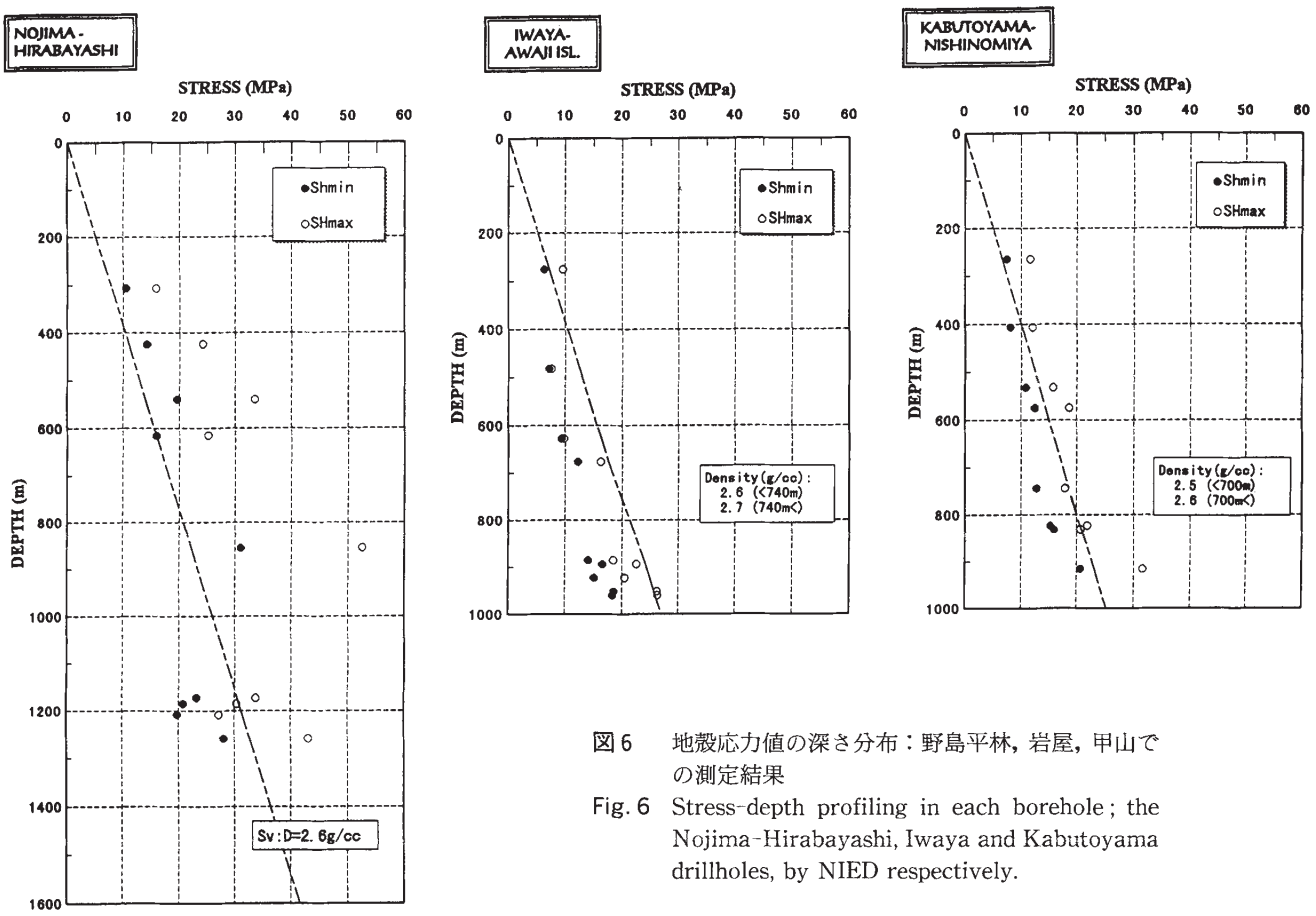

図6　地殻応力値の深さ分布：野島平林，岩屋，甲山での測定結果

Fig. 6　Stress-depth profiling in each borehole; the Nojima-Hirabayashi, Iwaya and Kabutoyama drillholes, by NIED respectively.

られ割れ目の閉口圧，再開口圧が明瞭に検出された．平林の応力測定結果を見ると，測定値の抜けているところは，断層破砕帯の崩壊により孔壁が拡大しているために，あるいは逆に硬過ぎて測定系の限界圧に近い40 MPa以上の高圧でも割れ目を作れなかったために測定できなかったところである．応力値の深さ分布の大きな特徴は，1,140 mの断層破砕帯直下で応力値，せん断応力値ともに極端に減少していることである．深度1,000 mにおける*SHmax*の値で比較してみると，岩屋，甲山ともに平林の約1/2と小さい．また，応力のパターンが非常に対照的で，平林では逆断層型，岩屋では正断層型，甲山では横すべり型となっている．特に，六甲断層系と野島断層のいわゆる「飛び」の近くに位置する岩屋では引っ張り型の応力パターンとなっている．それぞれの地域に分布する活断層，及び余震分布域との関係で特徴的な応力状態となっていると考えられる．*SHmax*の方位を図7に示す．3地点とも北西－南東方向が卓越しており断層の走行方向にほぼ直交している．したがって，断層面上でのせん断応力はゼロに近い．

4.2　熱流量

平林井の温度検層による地温勾配と岩石コアで測定された熱伝導率から，地殻熱流量が求められた(北島ほか，1998)．計算された地殻熱流量の値は，56.6±5.2(mW/m^2)であった．また，コア中のK，U，Thの分析結果から地殻内の放射性発熱量を見積もった．これら両者から地殻内の温度分布を推定した結果，深さ約17 kmにおける温度は約300°Cと推定された（図8）．この深度は兵庫県南部地震の余震分布の発生下限に相当する．

4.3　比抵抗構造

淡路島北部地域には，野島断層の他に浅野断層，楠本断層，東浦断層などの活断層がある（図2）．池田ほか（2000）は，この地域において地表からの広域な人工電磁探査(CSAMT)法と，平林井で検出された破砕帯と地表断層を利用した流電電位検層（GEPL）法を実施した．これらの調査により，活断層周辺の深部比抵抗構造を把握するとともに，比抵抗構造と断層破砕帯との関連，破砕帯の連続性等について解析し，探査手法について検討した．CSAMT法の結果によると，高比抵抗帯は花崗岩類に，低比抵抗帯は堆積岩類（大阪層群，神戸層群）にそれぞれ対応する．花崗岩類の比抵抗値は200～2,000 Ω•mを示し，風化，粘土化等の変質を受けたものは500 Ω•m以下，新鮮なものは1,000 Ω•m以上を示す．堆積岩類の比抵抗値は20～200 Ω•mを示し，そのうち礫岩，砂岩の互層からなる大阪層群は100～200 Ω•m，シルト，泥岩からなる神戸層群は50 Ω•m以下の比抵抗値を示す．また，平林井における電気比抵抗検層結果では，深度800～1,400 m間に100 Ω•m前後の低比抵抗層が検出された（図5）．この部分は，花崗岩類の中の破砕帯及び粘土化変質帯に相当し，深度1,140 mの破砕帯付近ではさらに低く50 Ω•m以下の低比抵抗異常を示す．これらの

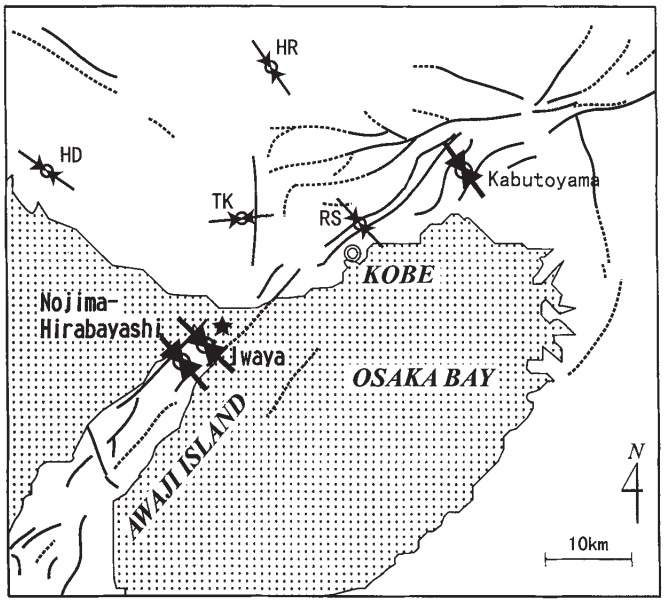

図7　最大水平圧縮応力の方位：六甲—淡路断層系周辺における測定．太い矢印は本研究による．細い矢印は田中（1993）およびIkeda *et al.*（1996a）による．

Fig. 7　The direction of maximum horizontal principal stress in the area around the Rokko-Awaji fault system. Thick arrows (taken for this study) and thin arrows (by a small scale hydrofracturing after Tanaka (1993) and Ikeda *et al.* (1996a)) indicate the direction.

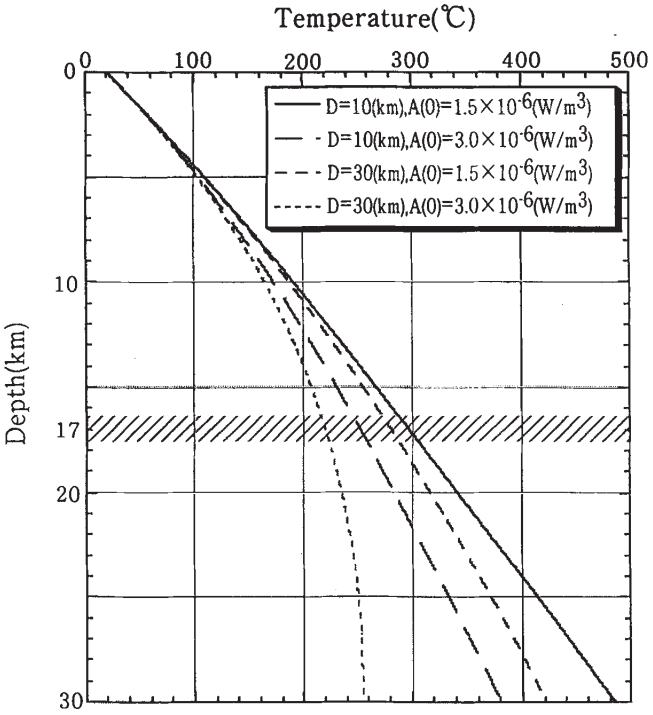

図8　平林掘削地点の地下温度プロファイル．プロファイルは地殻の放射性発熱量4通りについての計算結果．1995年兵庫県南部地震の余震の発生下限は約17km．（北島ほか（1998）による）

Fig. 8　The temperature profile beneath the Hirabayashi drill site. The profile are calculated for four conditions of radio active heat generation rate in the crust. The cutoff depth of the aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake is about 17 km. (after Kitajima *et al.*, 1998)

ことから，野島断層は高比抵抗帯と低比抵抗帯の境界付近に位置することが明らかとなった．GEPL法の結果では，深度1,140 m付近で周囲より若干大きな電位変化の周期と振幅が得られた．電気比抵抗検層及びCSAMT法調査結果から得られた当地区の比抵抗構造をもとに，有限要素法による2次元シミュレーションを実施した結果，断層を深部まで連続する低比抵抗帯としてモデル化することができた（池田ほか，2000）．

5．断層岩コア解析

5.1　岩石物性・変形・変質

平林井から採取した岩石コアについて，断層破砕帯の物性，変形・変質，透水性等に関する解析を行った．主として，3箇所の顕著な破砕帯，1,140 m，1,300 m，1,800 m付近のコアに焦点を絞った．どの部分が今回の地震で動いたのか特定するにはいろいろな角度からの岩石コア解析が必要であるが，いずれの断層破砕帯も変質・変形作用が著しく進行しており，長期間にわたって同一の破砕帯で断層活動が繰り返していると考えられる．破砕帯のコアは極めて脆弱な部分を含むので，肉眼観察や薄片による微小観察のためには特殊な固定処理が必要である．我々は，まずコアの表面全体をエポキシ樹脂で固定した．次にコア軸と平行に半割にし，半分のカット面を研磨して肉眼観察による変形や変質の記載に用いた後，アーカイブハーフとして保存した．もう一方の半分はワーキングハーフとして粉末X線分析（XRD），蛍光X線分析（XRF），薄片制作などに使用された．解析の詳細は，本誌のそれぞれの論文（Tanaka *et al.*, 2001；小林ほか，2001；松田ほか，2001；小村ほか，2001 b）に譲るが，断層破砕帯が最も幅広く連続している1,140 m付近の断層岩の分布様式を概観してみる．図9に，断層岩柱状図とXRF分析結果の一部を示した．断層岩柱状図は，肉眼および実体鏡を用い，変質と変形の程度から凡例の6区分に分類したものである（小林ほか，1998）．1,141 mの断層ガウジの部分を中軸として上方と下方に向かい，断層ガウジ，断層角礫，変質岩，弱変形・変質花崗閃緑岩の順で配列する．変形・変質作用の顕著な範囲は上盤側でより広く，下盤側のそれに比べて3倍以上ある．その様子は上述の検層結果にも良く現われている．XRF分析は，ワーキングハーフのうちエポキシ樹脂の付着していない部分を削りだし，ガラスビード法によって測定した．局所的な岩相変化の影響を除去するために，0.5 m毎に区分し均一に混合した．その結果，主要10元素の破砕帯部における増減は，中軸部を挟んで上盤側と下盤側で

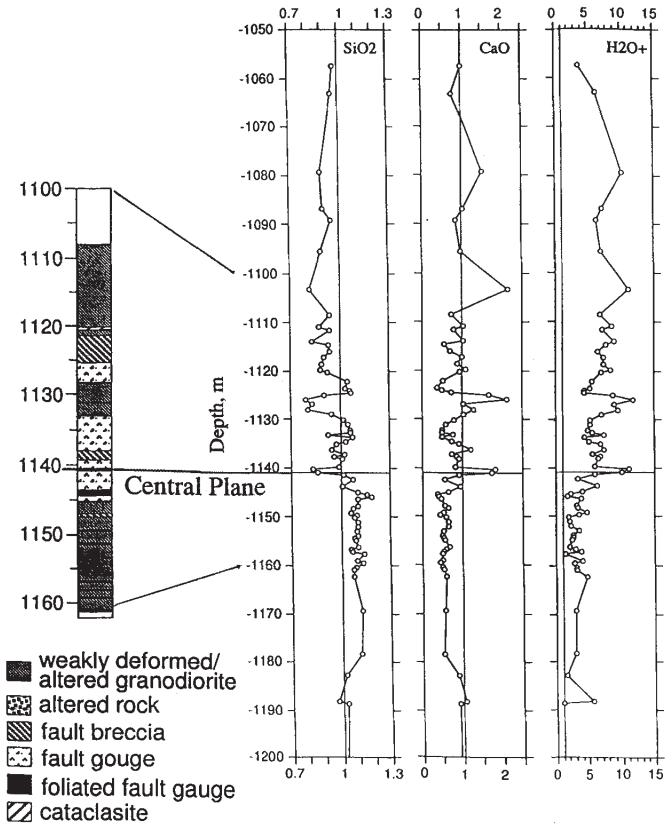

図9　野島断層1,140m 破砕帯部の地質柱状図（コア解析による）と化学分析（SiO_2, CaO and H_2O^+）の結果（小林ほか（1998），松田ほか（2001，本誌）による）．化学成分の値は，新鮮なトーナライトの値に対する比で表している．

Fig. 9　The lithological column as determined from the rock cores and results of chemical analyses in SiO_2 CaO and H_2O^+ contents around the 1,140 m fracture zone of the Nojima fault. The value of these components is shown in relation to the value of fresh tonalite. These data are compiled and modified from papers by Kobayashi *et al.* (1998), and Matsuda *et al.* (2001, this issue).

異なった傾向を示すものが多い．これらを破砕されていない新鮮なトーナライトに対する比で3つのグループに分けてみると，(1)上盤側，下盤側ともに減少するもの：Ti, Al, Fe, Mn, P, (2)上盤側で増加，下盤側で減少するもの：Mg, Ca, Na, (3)上盤側で減少，下盤側で増加するもの：Si, K, となる．また，上盤側で H_2O^+ が重量比で10%を越えるほど多量に存在する．これらのことから，中軸部形成にいたる断層活動によって，上盤側を中心に破砕が進み，天水とともにMg, Ca, Naなどの比較的溶脱し易い元素が中軸付近にまで到達したと考えられる．上盤側では下盤側に比べてより広い範囲で変質を被っていることは，XRDによる鉱物組み合わせの結果からも言える．長石類や黒雲母は熱水変質作用によりカオリナイトやスメクタイトに変化しており，上盤側に多い．ローモンタイトやアンケライト，シデライトなど岩石中の空洞や割れ目に産する二次鉱物も同様の傾向であった（小林ほか，1998；松田ほか，2001）．

新井ほか(2001，本誌)は，3箇所の破砕帯を含む600 mから1,800 mの深度について，岩石コア中のカルサイト脈($CaCO^3$)を採取しその炭素および酸素同位体比($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$)を測定した．その結果，破砕帯で採取されたカルサイトは $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ が高くなっており，カルサイトの沈殿は断層帯を通って上昇してきた地熱水によることを示唆する．また，破砕帯でのカルサイトの生成温度は非破砕部に比べ低く算出されることから，断層運動に伴い破砕帯の透水係数が増加し，大量の浅層地下水が下降した可能性も考えられる．比較的新しい解析として，谷ほか（2001，本誌）は，電子スピン共鳴（ESR）法によって石英に蓄積している放射性誘起欠陥を調べることにより，熱による異常を検出する試みを行った．これは，断層活動に伴う熱によって蓄積されていた放射線欠陥が解消されることを仮定して，第四紀の断層の活動年代を推定しようとするものである(山中ほか，1998)．今回の平林井の3箇所の破砕帯での測定では，特に目立った熱異常は検出されなかったが，試料のサンプリングをより密に行った測定などから断層面の熱履歴を推定する方法を研究する必要がある．

5.2　透水性

岩石コアの強度と透水性を，室内での岩石実験により測定した(Naka *et al.* 1998；伊藤ほか，1998；Lockner *et al.*, 1999)．米国地質調査所，GSJ，NIEDの共同研究で，平林の2孔井（GSJとNIED）から採取されたコアを用いた．浸透率の測定は，10 MPa，30 MPa，50 MPaの封圧下で行われた．その結果，粘土を含む断層帯の浸透率は，50 MPaの封圧下で約0.1 microdarcy～1 microdarcy（≒10^{-19} to 10^{-18} m^2）であった．また，断層帯から数m離れた破砕された岩石は約100 microdarcy（≒10^{-16} m^2)，断層破砕帯中軸部では60-70 microdarcyであった．この破砕帯の外ではnanodarcy（≒10^{-21} m^2）以下に減少する．粘土質コアの摩擦係数は約0.55で，測定されたコアの中で最も小さい．せん断強度は中軸から離れるに従い徐々に減少する．このように，母岩は低透水性，高強度であり，極度に破砕された断層帯では高透水性になるが，断層の中軸部で極端に減少することが定量的に測定された．破砕帯内部と外部では数オーダーの浸透率の差があり，破砕帯内部でも浸透率の分布があることが明らかになった．

6．考察とまとめ

活断層の調査研究では，浅部から深部までの総合的な解析が必要であり，深部調査にはドリリング調査が欠かせない．ボアホールからしか得られない情報が数多くあるからである．その場で進行中の現象をリアルタイムでモニターできるのみならず，そこに保存されている過去の記録を回収する形で情報量を飛躍的に増すことができる．孔井内物理検層や探査によって構造や物性，断裂系

の分布や形態が直接連続的に調べられ，何より断層を構成する物質そのものをコアとして手に取ることができる．コア観察，物性測定，力学試験などにより基本的な岩石の成分や物性，力学特性，年代などが調べられる．また，地殻応力や間隙水圧の測定に係わる原位置での実験・測定によって，地殻応力の大きさや方向，地層の亀裂（断層）の構造や性質，亀裂中の間隙水圧や透水性，構成岩石の化学・物理学的特性を知ることができる．さらに，ボアホールを利用して歪みや流体圧，温度などの観測を行うことにより，地球科学研究に寄与する基礎的データを提供することができる．これらは，いずれも地震発生に大きく関わる因子でもある．本研究は，1995年兵庫県南部地震に伴い地表に出現した野島断層を直接掘り抜いて，上述の種々の測定，実験を行ったものであり，「断層ドリリング調査」の先駆的な研究となった．

地殻応力の時空間変化．活断層を対象にした地殻応力測定では，断層破砕帯そのものの空間的，時間的，物質的変化との関係で応力状態を理解することが重要となる．野島断層での応力測定結果を，この3つの関係から考察する．(1)兵庫県南部地震域の応力状態(空間的変化)は，野島断層から六甲断層系にいたる中でも応力値が異なり，場所による違いが見られる．(2)地震発生直後の応力状態（時間的変化）は，せん断応力が極めて小さい．野島断層で測定した最大水平圧縮応力の方位は，断層の走行方向にほぼ直交する．この傾向は，小倉地区の大学グループの掘削井での応力方位（塚原ほか，1998）とも一致する．これは平均的な四国・関西地域の応力方位（E-W）と異なり，断層面に垂直な方向であり，断層面上でのせん断応力はゼロとなることを意味する．断層面の摩擦係数が非常に小さいために生じた結果であろうと推定される．サンアンドレアス断層での測定でも，同様の結果が得られている（Zoback and Healy, 1992）．1996年までの余震に関しては，野島断層，および六甲断層系の走向にほぼ垂直なP軸をもつ余震が観測されていた（Katao *et al.*, 1997）こととも調和的であるが，1998年6月のイベントのP軸方向はほぼE-W方向に変化していることも報告されている(山田ほか，2000)．また，繰り返し測定によって地震前後の応力変化が実測された例として，**図1**の黒四角（■）印の測点での報告がある（Ikeda *et al.*, 1996a；田中豊ほか，1998）．同じ測定孔，測定法（水圧破壊法）により繰り返し測定を行った結果，地震前10年ほど増大する傾向にあったせん断応力が地震直後にそれ以前の応力値レベルにまで減少した．本研究で行った応力測定から既に5年が経過した．その後の応力変化を追跡するために同一井での繰り返し測定が切望される．(3)断層破砕帯近傍の応力状態（物質的変化）は，断層破砕帯直下では破砕帯上部よりもせん断応力値が極めて小さい．この傾向は，足尾（Tsukahara *et al.*, 1996）や根尾谷での測定（Ikeda *et al.*, 1996b）でも見られ，断層近傍での特有な現象とも考えられる．

地殻熱流量と地震発生下限．ボアホールの連続的な温度測定による温度勾配と，岩石コアで測定した熱伝導率とから地殻熱流量を求めた．また，コア中のK，U，Thの分析結果から地殻内の放射性発熱量を見積もった．これらから，兵庫県南部地震の余震分布の発生下限に相当する温度は約300℃と推定された．これは，小林(1977)やIto (1990)の結果とも調和的である．地殻内地震の発生下限と地殻の熱的構造の間には密接な関係があり，地殻構成物質の脆性—延性の境界であることを示唆している．

断層破砕帯と物質移動．連続的に採取された岩石コアには地殻で進行中の現象が記録されている．平林井では，深度1,140 m，1,300 m，1,800 m付近に顕著な断層破砕帯が確認された．岩石コアの解析では，肉眼および実体鏡による断層岩の物性，変形，変質などの解析，粉末X線分析(XRD)，蛍光X線分析(XRF)，薄片観察による微小構造解析，$\delta^{13}C$，$\delta^{18}O$の同位体解析，ESRなどいろいろな手法で総合的に解析を行った．断層破砕帯が最も幅広く連続している1,140 m付近の断層岩の分布様式は，断層ガウジの部分を中軸として上方と下方に向かい，断層ガウジ，断層角礫，変質岩，弱変形・変質花崗閃緑岩の順で配列する．中軸より上盤側は下盤側より，変形・変質作用の範囲が広い．このことは，鉱物の組み合わせ解析や，同位体組成の変化にも顕著に現れている．これらのことから，断層破砕帯が物質移動に大きく関わっていることがわかる．流体の通り道としての断層破砕帯の実体を浸透率で定量的に測定してみると，破砕帯内部と外部では数オーダーの浸透率の差があり，破砕帯内部でも浸透率の分布があることがわかった．狭い範囲のシアーゾーンがあり，その周りに極度に破砕された破砕帯がある．この部分が非常に透水性が良い流体の通り道になる．しかし，粘土層は断層を切るような流体の移動を邪魔する，という「断層帯モデル」が考えられる(Lockner *et al.*, 1999)．実際に断層破砕帯から採取されたコアを用い，破砕帯を横断するように連続的に浸透率が実測されたデータは希であり，断層破砕帯の固着やすべり過程を理解するためには，このようなコア実験が重要であることを示している．断層の空間的な広がりや連続性は，コアの解析からだけでは解らない．これら活断層の深部構造や断層破砕帯の連続性に関する情報は極めて少なく，また正しく評価する方法についても未だ確立していない．そこで，我々は，広域的な人工電磁探査(CSAMT)法と，ボーリング孔内で検出された破砕帯と地表断層を利用した流電電位検層（GEPL）法を行った．その結果，野島断層は高比抵抗帯と低比抵抗帯の境界付近に位置することが明らかとなり，断層を深部で連続する低比抵抗体としてモデル化することができた（池田ほか，2000）．

平林井における解析が全て終了したわけではない．3箇所の顕著な断層破砕帯は，いずれも変質・変形作用が著しく進行しており長期間にわたって同一の破砕帯で断層活動が繰り返していることは明らかとなった．しかし，どの部分が今回の地震で動いたのか特定するには，活動時期を推定する研究の更なる進展が待たれる．検層や探査とのより詳細な対比や，他の掘削井からの岩石コアと

の比較など，今後の課題として残されたものも多い．多様な様相を示すであろう他地域に分布する断層との比較が，地震発生の準備過程を理解するうえで是非とも必要なことである．

謝辞

北淡町，北淡町土地開発組合，淡路町，兵庫県洲本土木事務所，兵庫県西宮土木事務所，西宮市から掘削地点借用の便宜を賜った．本プロジェクトの計画から遂行まで，安藤雅孝教授をはじめとする大学グループの方々，伊藤久男博士をはじめとする地質調査所の方々との連携が大きな礎となった．また，技術的に困難な条件下での掘削を担当された住鉱コンサルタント(株)，および検層，実験を担当された(株)物理計測コンサルタントの方々に多大なご尽力をいただいた．岩石コアの処理と解析には，小林洋二（筑波大），富田直人（愛媛大），佐野広征（筑波大），澤口隆（早稲田大），山崎暁子（早稲田大）の諸氏との共同作業や議論によるところが大きい．これらの方々に記して厚く感謝申し上げる．

参考文献

1) 新井崇史・塚原弘昭・森清寿郎・池田隆司・小村健太朗(2001)：野島断層平林NIEDコア中のカルサイト脈の炭素・酸素同位体組成．防災科学技術研究所研究報告，No. **61**, 237-243.
2) 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，No. **21**, 5-12.
3) Ando M. (1999): Geological and geophysical drilling at the Nojima fault: Fault trace of the 1995 Hyogo-ken-Nanbu earthquake, Ms7.2. *Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Data Analysis, GSJ Interim Report No. EQ/00/1, USGS Open-file Report 00-129*, 55-63.
4) Ando M., Mori, J., Tanaka, H., Ishii, H., Yamano, M., Lee, C.T., Ma, K.F., Wang, C.Y., Huang, B.S., Lin, C. H., Wang, J.H., Zoback, M.D., and Ikeda, R. (2000): Drilling the Chelongpu fault, Taiwan: Observations and measurements of a thrust-fault with very large displacements and velocities in a recent earthquake. *EOS, Trans. WPGM*, 81, 117.
5) Hickman, S., Zoback, M.D., Younker, L. and Ellsworth, W. (1994): Deep Scientific drilling in the San Andreas fault zone. *EOS, Trans. AGU*, 75, 137, 140 and 142.
6) 市原　実編(1993)：『大阪層群』．創元社，340 pp.
7) Ide, S., Takeo, M., and Yoshida, Y. (1996): Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake determined by near-field strong-motion records. *J. Phys. Earth*, **44**, 649-53.
8) Ikeda, R., Iio, Y., Omura, K., and Tanaka, Y. (1996a): In-situ crustal stress variation before and after the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake around the epicenter. *Proceedings of The VIII-th International Symposium on the Observation of the Continental Crust through Drilling*, 393-98.
9) Ikeda, R., Omura, K., Iio, Y., and Tsukahara, H. (1996b): Scientific Drilling and In-situ Stresses in Active Fault Zones at Neodani, Central Japan. *Proceedings of The VIII-th International Symposium on the Observation of the Continental Crust through Drilling*, 30-35.
10) 池田隆司・山本俊也・小村健太朗(1997)：抗井物理検層による断層破砕帯の評価．物理探査学会第97回学術講演会講演論文集，341-346.
11) 池田隆司・飯尾能久・小村健太朗(1998)：活断層の応力測定について．月刊地球号外，No. **21**, 91-96.
12) Ikeda, R. (1999): Outline of the Nojima Fault Scientific Drilling by NIED, *Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Data Analysis. GSJ Interim Report No. EQ/00/1, USGS Open-file Report 00-129*, 65-70.
13) 池田隆司・飯尾能久・小村健太朗・高橋直良・汐川雄一・松田陽一(2000)：CSAMT法と流電電位検層法による淡路島北部の活断層調査．防災科学技術研究所研究報告，No. **60**, 57-66.
14) 伊藤久雄・桑原保人・宮崎光旗・西沢　修・木口努・藤本光一郎・大谷具幸・田中秀実・樋口孝幸・Susan Agar・Alain Brie・山本裕祥(1996)：断層を貫く坑井調査による野島断層の深部構造．物理探査，**49**, 522-535.
15) 伊藤久雄・中久宣・David Lockner・木口努・田中秀実・池田隆司・大谷具幸・藤本光一・桑原保人(1998)：野島断層の浸透率：坑井内測定とコア測定の比較．日本地震学会講演予講集1998年度秋季大会，S8.
16) Ito, H., Kuwahara, Y., Kiguchi, K., Fujimoto, T., and Ohtani, T. (1999): Outline of the Nojima Fault Drilling by GSJ: Structure, physical properties and permeability structure from borehole measurements in GSJ borehole crossing the Nojima fault, Japan. *Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Data Analysis, GSJ Interim Report No. EQ/00/1, USGS Open-file Report 00-129*, 65-70.
17) Ito, K. (1990): Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large island earthquakes. *J. Phys. Earth*, **38**, 223-250.
18) Katao, H., Maeda, N., Hiramatsu, Y., Iio, Y., and Nakao, S. (1997): Detail mapping of focal mechanisms in/around the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake rupture zone. *J. Phys. Earth*, **45**, 105-120.
19) 活断層研究会(1991)：新編　日本の活断層－分布図と資料．東京大学出版会，437 pp.
20) Kikuchi, M. and Kanamori, H. (1996): Rupture process of the Kobe, Japan, earthquake of Jan. 17, 1995,

determined from teleseismic body waves. *J. Phys. Earth*, **44**, 429-436.

21) 北島拓・小林洋二・池田隆司・飯尾能久・小村健太朗(1998)：淡路島野島平林における地殻熱流量の測定．月刊地球号外，No. **21**, 108-113.

22) 小林健太・松田達生・新井崇史・池田隆司・小村健太朗・佐野広征・澤口隆・田中秀実・富田倫明・冨田直人・平野聡・山崎暁子(1998)：野島断層深部における断層岩・鉱物・元素の分布様式―防災科学技術研究所掘削コア・1140 m破砕帯の解析―．月刊地球号外，No. **21**, 154-159.

23) 小林健太・新井崇史・池田隆司・小村健太朗・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野　聡・松田達生(2001)：野島断層1,300 m深度の破砕帯における断層岩類の組織：平林NIEDコアの解析．防災科学技術研究所研究報告，No. **61**，223-229.

24) 小林洋二(1977)：西南日本および中央日本における微小地震の震源分布と地表熱流量との関係．地震予知研究シンポジウム，184-193.

25) Lockner, D., Naka, H., Tanaka, H., Ito, H., and Ikeda, R. (1999), Permeability and strength of core samples from the Nojima fault of the 1995 Kobe earthquake, *Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Data Analysis. GSJ Interim Report No. EQ/00/1, USGS Open-file Report 00-129*, 147-152.

26) 松田達生・新井崇史・池田隆司・小村健太朗・小林健太・島田耕史・田中秀実・富田　倫明・平野　聡(2001)：野島断層平林NIEDコア破砕帯部(1,140 m，1,300 m，1,800 m)の物質解析．防災科学技術研究所研究報告，No. **61**，183-193.

27) Naka, H., Lockner, D., Tanaka, H., Ikeda, R., and Ito, H. (1998): Strength and permeability of core samples taken from drillholes crossing the Nojima fault of the 1995 Kobe earthquake, *EOS, Trans. AGU*, 79, T11C-18.

28) 中田高・蓬田清・尾高潤一郎・坂本晃章・朝日克彦・千田昇(1995)：1995年兵庫県南部地震の地震断層．地学雑誌，**104**, 127-142.

29) 小村健太朗・池田隆司・飯尾能久・新井崇史・小林健太・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野　聡・松田達生(2001a)：野島断層平林NIED井破砕帯部の物理検層からみた特徴．防災科学技術研究所研究報告，No. **61**，155-171.

30) 小村健太朗・池田隆司・新井崇史・小林健太・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野聡・松田達生(2001b)：野島断層平林NIEDコア1,800 m破砕帯部の断層岩分布．防災科学技術研究所研究報告，No. **61**，173-182.

31) 佐野　修・薛自求・松村真一郎・伊藤久男・西沢　修・池田隆司(1997)：残留応力測定で何がわかるか？．地球惑星科学関連学会　1997年合同大会予稿集，A-22-04.

32) 竹村恵二・伊藤久男・池田隆司・田中秀実(1998)：野島断層掘削の意義・課題と現状―コア解析に関連して―．月刊地球号外，No. **21**, 132-136.

33) 田中秀実・池田隆司・伊藤久男・新井崇史・大谷具幸・小村健太朗・小林健太・佐野広征・澤口　隆・富田倫明・冨田直人・樋口孝幸・平野　聡・藤本光一郎・松田達生・山崎暁子(1998)：野島地震断層掘削コア（GSJおよびNIED)に見られる断層岩の産状．地質学雑誌，**104**, VIII-X VI.

34) Tanaka, H., Matsuda, T., Omura, K., Ikeda, R., Kobayashi, K., Shimada, K., Arai, T., Tomita, T., and Hirano, S. (2001): Complete fault rock distribution analysis along the Hirabayashi NIED core penetrating the Nojima fault at 1140 m depth, Awaji Island, Southwest Japan. *Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, No. **61**, this issue.

35) 田中　豊(1993)：近畿北部の地殻応力状態とその変化．京都大学防災研究所年報，**36**, 279-290.

36) 田中　豊・藤森邦夫・大塚成昭(1998)：地殻応力・歪の測定・観測による大地震発生の予測．地震，**50**, 201-208.

37) 谷篤史・小村健太朗・池田隆司(2001)：ESR法による野島断層平林NIEDコアの熱履歴調査．防災科学技術研究所研究報告，No. **61**，231-236.

38) Tsukahara, H., Ikeda, R., and Omura, K. (1996): In-situ stress measurement in an earthquake focal area. *Tectonophysics*, **262**, 281-90.

39) 塚原弘昭・池田隆司・山本清彦(1998)：野島断層近傍の深度1500 mの地殻応力測定―断層面に直交する小さな最大水平圧縮応力―．月刊地球号外，No. **21**, 66-69.

40) 山田卓司・安藤雅孝・片尾浩(2000)：兵庫県南部地震の余震メカニズム解から推定される周辺地殻応力場の本震後の時間変化について．地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集，Sa-003.

41) 山本清彦・矢部康男(1998)：コア資料で測定された断層近傍の地殻応力．月刊地球号外，No. **21**, 70-75.

42) 山中千博・松本浩史・池谷元伺(1998)：野島断層ボーリングコア断層面のESRによる分析．月刊地球号外，No. **21**, 186-190.

43) Zoback, M.D. and Healy, J.H. (1992): In situ stress measurements to 3.5km depth in the Cajon Pass scientific research borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting. *J. Geophys. Res.* **97**, 5039-57.

（原稿受理：2000年12月4日）

要　旨

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震（神戸地震，*Ms* 7.2）に伴い，淡路島北西岸に沿って野島断層が地表に出現した．我々は，断層帯を直接貫くように掘削したドリリング調査によって，断層深部の構造や物性，応力や歪状態，流体の存在状態について直接調査することを試みた．深さ1,000 mから1,800 mの3孔井を掘削した．野島平林井は断層を直接貫いて1,838 mまで掘削され，深度1,140 m，1,300 m，1,800 m付近に顕著な断層破砕帯が確認された．研究の内容は，(a)孔井内測定・実験：物理検層，地殻応力，熱流量，比抵抗構造，(b)断層岩コア解析：岩石物性・変形・変質，透水性である．その結果，以下の成果が得られた．(1)地震発生直後の応力状態は，*SHmax*が断層に直交する方向で，せん断応力が極めて小さい．応力値の空間的な違いも見られる．(2)地殻熱流量から，余震分布の発生下限（約17 km）に相当する温度は約300°Cと推定された．(3)岩石コアの解析では，変形・変質作用の顕著な範囲は上盤側が下盤側より広い．鉱物の組み合わせ解析などから，断層破砕帯が物質移動に大きく関わっていることが明らかとなった．(4)コアの透水性－強度実験から，破砕帯内部と外部では数オーダーの浸透率の差があり，破砕帯内部でも浸透率の分布があることが解った．(5)人工電磁探査法と流電電位検層法から，野島断層は高比抵抗帯と低比抵抗帯の境界付近に位置し，断層を深部で連続する低比抵抗帯としてモデル化することができた．

キーワード：断層ドリリング，野島断層，1995年兵庫県南部（神戸）地震，地殻応力，断層岩物性