

震源域と活断層へのドリリング

池田隆司¹⁾・塚原弘昭²⁾・小村健太郎¹⁾

1. はじめに

「リソスフェアのダイナミクスと変形」は、陸上科学掘削研究を国際共同計画で推進しようと結集したポツダム会議(Zoback and Emmermann, 1995, 本誌)の一つのセッション・テーマであった。いかに超深層掘削といえども、マントルまで達することは出来ない。掘削(ドリリング)実現の可能性も加味して、主課題は「震源域での活動的断層帯ドリリング」であるがこのセッションで結論された。これには以下のような基本的問題が含まれる。(1)どんな応力が断層のスリップを引き起こすのか、(2)断層帯は弱いのか? もしそうなら何故か、(3)断層帯の固着とクリープは何によって決まるのか、(4)地震の核形成・伝播・終止・再活動を定めるファクタは何か、(5)地震の大きさは何で決まるのか、(6)断層運動過程での水の役割とその起源は?、(7)断層帯の形、構成物、変形メカニズム、構造は深さによりどう変わるか、(8)震源の深さは何によって制御されているか、(9)どんな地球物理的観測をすべきか、(10)大地震の予知は可能か、(11)陸と海の大断層では応力や地震の起こり方に差があるのか(International Lithosphere Program (CC4), 1994)。

これらは、地球科学上のまさに古くて新しい課題である。防災科学技術研究所では、これらの解決の端緒を開くべく、ボアホールを利用した実験研究を進めている。ここでは、深層とまではいかないが2本の2,000 m 級陸上科学掘削研究について紹介する。浅発微小地震が多発している栃木県足尾町で実施した震源域ドリリングと、岐阜県根尾谷断層で実施中の活断層ドリリングである。

2. 震源域ドリリング

栃木県足尾町の周辺では、極浅発微小地震がここ数十年続いている。火山フロントの近くなので、深部のマグマ活動と何らかの関係があるとは考えられているが、直接の証拠はない。震源の深さは6-7 km 付近のものが多いが、2 km より浅いものも少数ではあるが発生している。掘削は、1988年度に開始され毎年500 m づつ増掘して1991年度に2 km に達した。0-1500 m は6・1/4 インチ、1,500-2,000 m は5・7/8 インチのトリコンビットで掘削し、約100 m 毎に2-3 m の岩石コアを採取した。孔内での実験・測定(地殻応力、水圧・透水性、各種孔内物理検層、VSP など)は年度毎に裸孔状態で行ったが、最終的には1,500 m まで5インチ・ケーシングパイプを入れて実験井として保存し微小地震、水圧、温度などを適宜観測している。

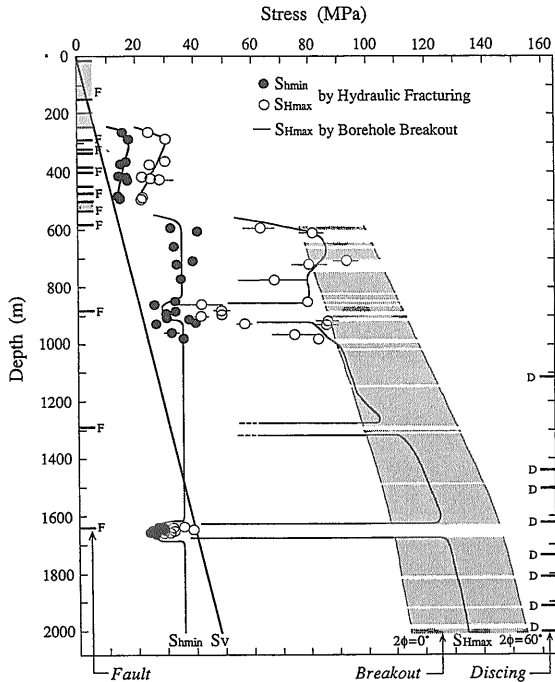
孔内での測定データを解釈するにあたって、地層変化の影響をできるだけ小さくするために、岩質変化が少ないと予想される花崗岩体をボーリング地点として選んだ。この花崗岩体は白亜紀に三疊・ジュラ系の足尾層群中に貫入したものである。南北10 km 東西5 km の小さな岩体で、群発地震域の中にある。実験・測定の内容と1,000 m までの結果の概略については、塚原・池田(1990)に紹介してあるので、次章ではその後明らかになった地殻応力状態について述べる。

3. 足尾震源域の応力状態

地殻応力は水圧破壊法により測定した。第1図に、測定された最小水平圧縮応力(Shmin, 黒丸)と最大水平圧縮応力(SHmax, 白丸)を示す。1,000-

1) 科学技術庁防災科学技術研究所 地圏地球科学技術研究部: 〒305 つくば市天王台3-1

2) 信州大学 理学部



第1図 応力値の深さ分布。

(1)水圧破壊法により得られた応力値(黒丸; S_{Hmin} , 最小水平圧縮応力, 白丸; S_{Hmax} , 最大水平圧縮応力), (2)ブレイクアウトの発生条件から算出された S_{Hmax} (詳細は本文), SV; 岩石密度から算出した鉛直応力。

1,600 m 及び1,700 m 以深はデータが抜けているが、いわゆるブレイクアウト(breakout)が起きたために測定が困難であったからである。ブレイクアウトは、第1図の砂目領域で示す600 m 以深で軒並み発生しており、特に破碎帯に当たっているというわけではない。地殻応力のうち差応力($S_{max}-S_{min}$)が大きいために孔壁の一定方向のみが壊れるために起きる現象である。差応力が大きいことは、岩石コアにも反映されている。写真1は1,910-1,912 m から採取した岩石コアであるが、円盤状に細かく割れている。これはディスクングという現象で、コア採取時にコアの根本付近に地殻応力にほぼ比例する引張応力が発生し、これが岩石の引張強度を越えると盆状、鞍状の破断面で円盤状に割れてしまうためである(小村ほか, 1994a)。第1図に示すように、1,000 m 以深で頻繁にディスクングが見られる。地殻応力値は、ブレイクアウトの溝の幅と岩石強度から推定した(詳細は、Vernik and Zoback,

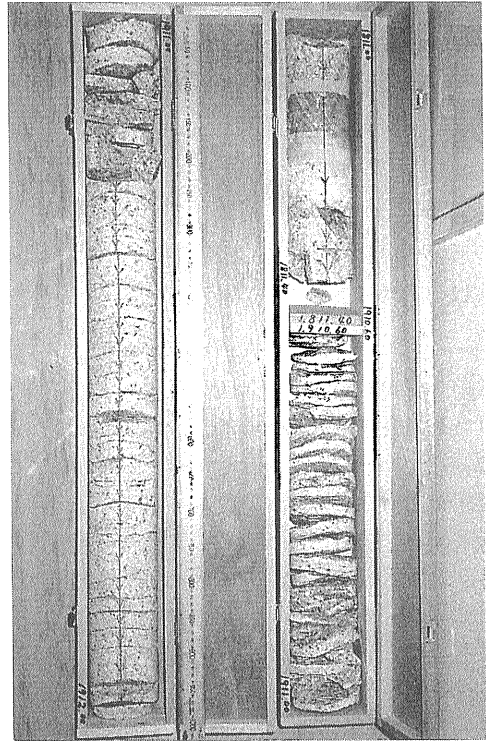
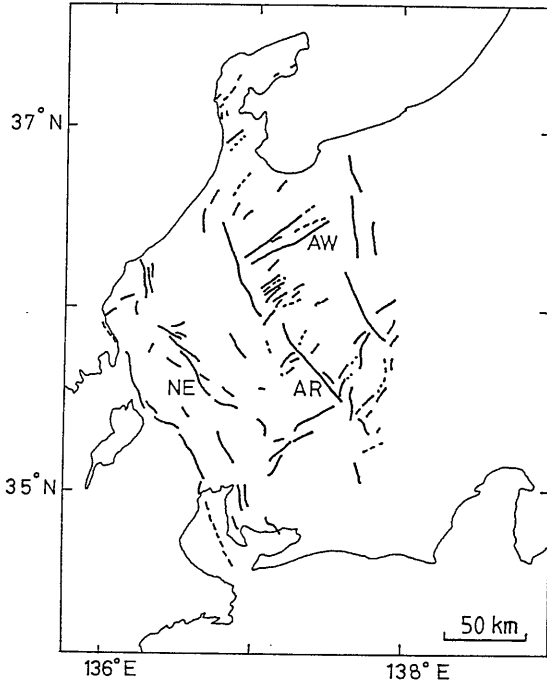


写真1 ディスキングを起こした岩石コア(深度1910.6-1912.0 m, 直径10 cm, 箱の長さ1 m)

1992)。そのようにして得られた S_{Hmax} の値が第1図の砂目領域である。図中、 $2\phi=0^\circ$ の曲線はブレイクアウトの起こる最小条件から算出された応力であり、 $2\phi=60^\circ$ の曲線は60°の幅(孔芯から見た角度の幅)のブレイクアウトが発生する応力である。超音波テレビュアの結果から、ブレイクアウトの幅は0-60°程度と確認されているので、 S_{Hmax} の値はこの2本の曲線の間であると推定される。

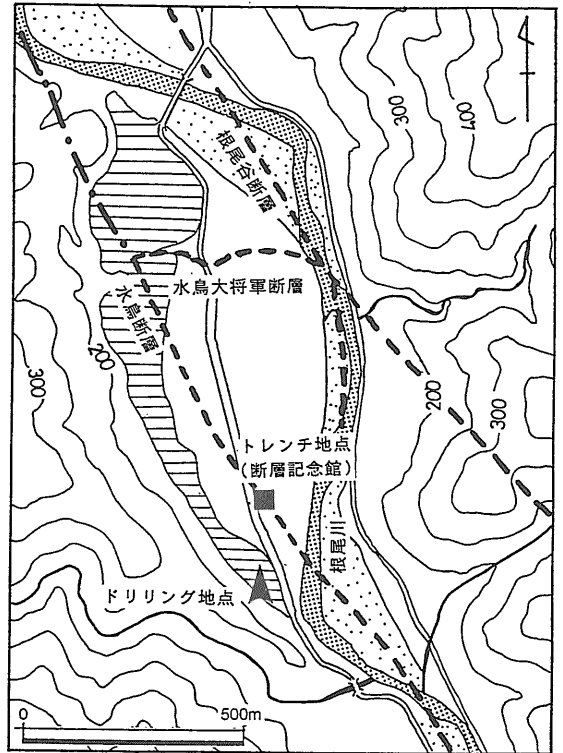
ところで、ブレイクアウトの出現しない深度が何か所かある。そこには必ず断層がある。超音波テレビュアによると厚さは1-2 m 程度のものであるが、電気検層曲線はここで極小値をとり、通常のところは2,500-3,000 Ωm (電極間隔1 m)であるのに対して1,500 Ωm 以下になっている(池田ほか, 1993)。

以上のことから、第1図の実太線で示されるような応力値の深さ分布が得られる。この図から、応力状態に関する極めて重要な2つの特徴が見いだされた。(1)全体に差応力の値が大きい。深度2,000 m で比較した($S_{Hmax}-SV$)の値は、サンアンドレアス断層付近での測定値(Zoback and Healy, 1992)



第2図 本州中央部の活断層。

糸一静線以東，根尾谷断層以西は省略。NE：根尾谷断層，濃尾地震(1891, M=8.0)で運動，左横ずれ変位が卓越。AW：跡津川断層，飛越地震(1858, M=7.0)でも動いたと考えられており，微小地震活動が活発，右横ずれ。AR：阿寺断層，最近のトレンチ調査で天正地震(1586, M=7.8)で活動した可能性が指摘されている。地震活動は極めて不活発。



第3図 根尾谷断層掘削地点

での群発地震の活発な地域の応力方位は一致している。

4. 活断層ドリリング

前章でも明らかになったように，ある程度広い地域の応力状態はテクトニックな応力場に支配されているが，断層周辺あるいは断層面に作用している応力はこの応力場から一義的に見積もることはできない。応力は，断層運動の全過程の中で変化するであろうし，場の不均質性にも大きく依存するからである。だからこそ，活動的な断層帯の現在の環境(応力状態，水圧，温度など)とその時間変化を原位置で測定する必要がある。

第2図に示すように，中部日本には根尾谷，跡津川，阿寺の3つの主要な活断層が分布する。いずれも，断層系全体で見ると長さが70~80 kmにもおよび，マグニチュード7~8クラスの地震が断層沿いに起きており内陸の最大級の地震断層であるが，地震発生後の経過年数が異なる。したがって，それぞれの断層は，次の地震発生に至る準備過程の

の2倍であり，日本で今まで測定された中では最大である。(2)差応力は断層で激減する。これらの特徴が震源域の応力状態の一般的特徴なのかどうか，他に比べるべきデータがないので確認できない。(1)は一般に想像されていたことと調和的であり，(2)は，地震波の解析から推定された応力降下量が10 bars程度と小さい(木下ほか，1994)ことと調和する。一方，パッカーを用いて測定した間隙水圧はほぼ静水圧に等しかった(小村ほか，1994b)。これらの条件を満たす物理的メカニズム，およびこの地域での活発な地震活動との関連を考えるのは今後の課題である。なお，SHmaxの方位は深さによらず一定ではほぼ北西—南東であった。この方位は，この地域の群発地震の発震機構解から推定される方位と一致するので，ポアホールを利用して測定された地表から2 kmまでの応力方位と，2 kmから10 kmま



写真2 掘削地点から見た現在の根尾谷断層

異なるステージにあるといえよう。大地震の発生周期は、1000～4000年と見積もられている。このような地震エネルギーを蓄積する過程、つまり数千年の経時変化の調査は実験室ではとうてい実現できない。これらの異なるステージにある活断層を掘り抜いて比較することにより、物質と環境の時間変化を調査しようとする研究である。

5. 根尾谷断層を掘る

1891年に発生した濃尾地震は、マグニチュード8.0で内陸地震としては最大級の規模である。この地震では、全長80 km という大規模な断層系が運動した。根尾谷断層は、この断層系のほぼ中央部に位置し長さ約31 km、最大の変位量が8 m(左ずれ)にも達する(松田, 1974)。第3図に掘削地点の位置を示すが、断層が最も顕著に現れた水鳥(みどり)断層崖から水平距離にして120 m程離れた、比高約15 mの小高い段丘上である。なお、ここでは、水鳥の断層崖をもたらした断層を岡田・松田(1992)にならって水鳥断層と呼ぶが、水鳥大將軍断層とともに、根尾谷断層の主要な変位線である。この段丘上から撮影した現在の断層の様子を写真2に示す。断層崖が写真のほぼ中央を横切っており、その延長上(写真には見えないが右端)には濃尾地震100周年を記念して建設された断層観察館がある。ここには、活断層研究グループによるトレンチ調査によって現れた、上下変位6 mの見事な断層

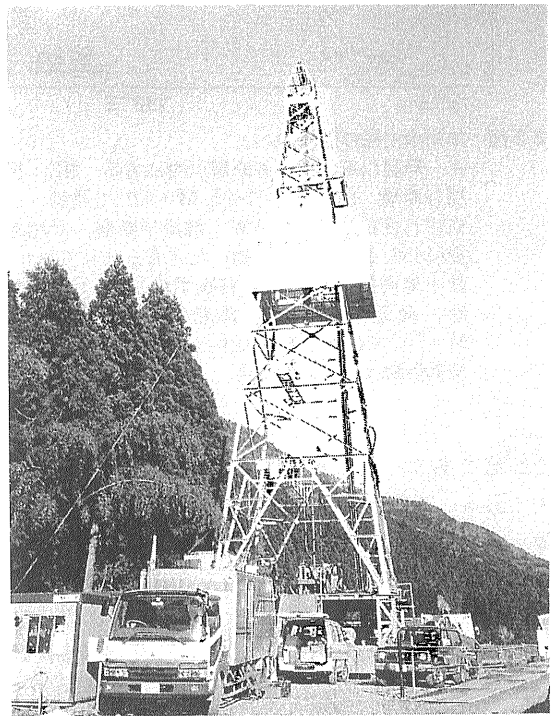
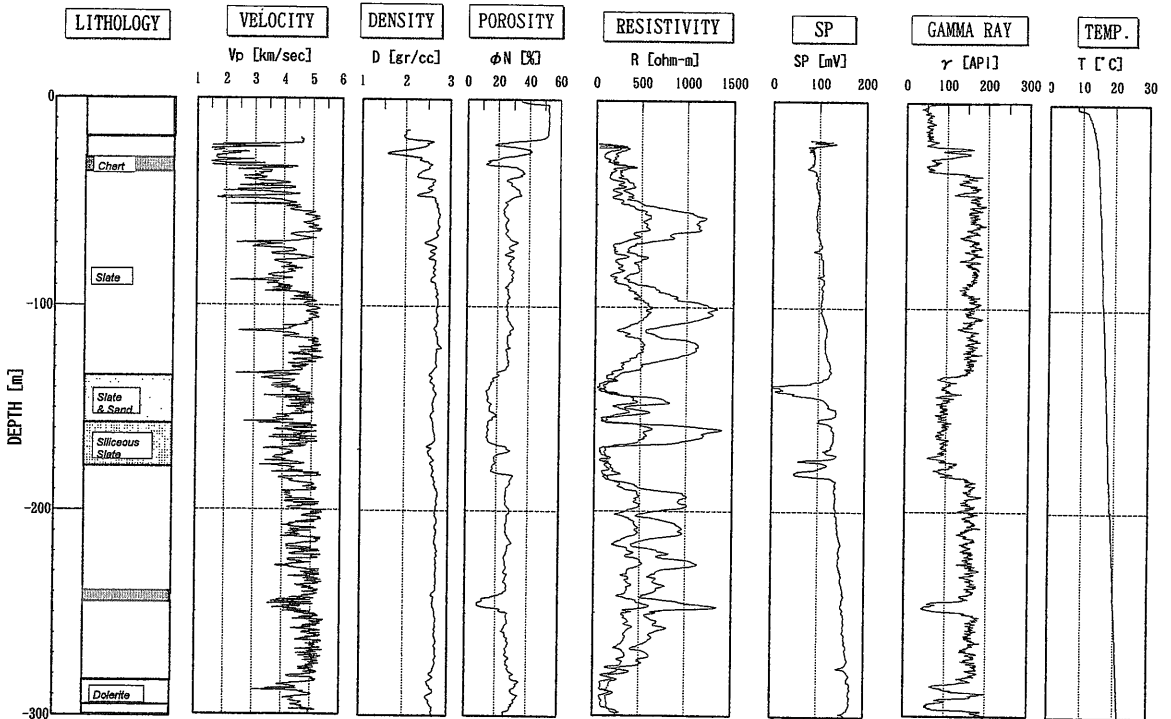


写真3 根尾谷断層掘削用リグ

崖断面が保存されている。トレンチ調査と深さ20 m程度の調査井で、地表付近の地質や変形は詳しく調べられている(岡田・松田, 1992)が、それ以降の情報は極めて少ない。

この断層を掘り抜く掘削が開始された。写真3はその掘削リグである。既に1993年度には、孔径98 mm ワイヤーライン、オールコアリングで深さ



第4図 根尾谷断層掘削300 m までの地質柱状図及び検層結果

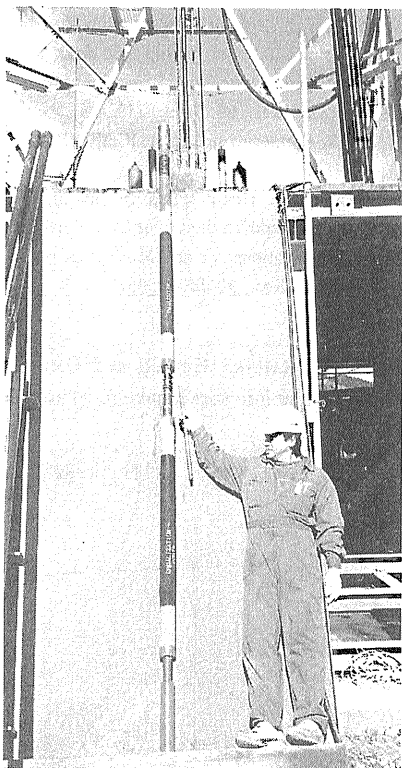


写真4 水圧破壊用デュアルパッカー

300 m まで鉛直に掘削した。引き続き徐々に傾斜をつけて掘り、1,000 m 以深で断層を横切り、最終的(1997年度)に総長2,000 m に達する予定である。300 m までの地質柱状図および検層結果を第4図に示す。地層は、粘板岩(頁岩)を主体とし、他に砂岩、珪質粘板岩、チャート、粗粒玄武岩などが数カ所でまとまって認められる。各々が連続する区間は10 m に満たず、境界にはしばしば破碎帯が発達している。典型的な中生代ジュラ紀の付加体の様相を呈する。孔内物理検層の結果は、50 m 以深の平均P波速度が約4.6 km/sec、平均密度が約2.7 g/cm³で、岩質が多様な割には測定値のばらつきが少ない。破碎帯部は、半固結状態で1~5 cm 程の礫が混じっており、P波速度、比抵抗、自然電位が共に低く流体の存在も予想される。孔隙率やγ線自然放射能も岩質と良く対応しており、チャート、珪質粘板岩、粗粒玄武岩では孔隙率が小さく、γ線強度が低い。これらの地層は比較的破碎帯や亀裂が少なく、放射性物質が集中し易い粘土鉱物が少ないためであろう。

比較的亀裂の少ない箇所を選んで、水圧破壊法による応力測定を試みた。写真4はこの時用いた

TAM社製のパッカーである。得られた応力値は深度270 mでSHmaxが約14 MPa, SHminが約8.5 MPaで、水平圧縮応力が垂直応力より大きい逆断層型の応力状態であった。さらに、孔内の一部をパッカーで栓をし3箇所の間隙水圧を測定した。いずれも静水圧に近く異常な高水圧帯は見いだされなかった。破碎度が進むにつれ透水性が良くなる傾向にある。以上のような断層周辺物質と環境が断層面に近づくにつれどう変化するのか、今後の測定が待たれる。

今一度、実験・測定項目をまとめておく。①応力の大きさと方向；種々の深度における水圧破壊法による地殻応力測定、②自然の亀裂(断層)システム；ボアホールテレビュア、レーダー、各種一般検層による測定、③亀裂中の間隙水圧や透水性の測定；原位置測定、④岩石の化学、岩石学、物理学的特性；測定井から採取した岩石コアによる分析、測定、⑥流体圧、流体成分、温度、等；ボアホール内での観測。

6. おわりに

ドリリングを利用した活断層や震源域の研究について述べてきた。これらのドリリングは社会生活と直接結びついている。地震災害の軽減のみならず、炭化水素の熟成や鉱床生成、熱水・地下水循環、地球環境の変遷などの問題と深く関わっているからである。古くて新しい科学的課題を、最もオーソドックスな手法、つまり実物に触れあるいは最も近い位置で観測することによって、その場で起こっているダイナミクスを解明しようとしているのである。しかし、数km以深は高温高圧の未知の世界である。そこに到達するには最新の技術をもってしても、数々の難題が待ち受けている。その意味で、陸上深層

科学掘削は科学技術に関する大いなるフロンティアであり、汎学際的総合プロジェクトとなろう。

参考文献

- 池田隆司・小村健太郎・山本俊也・塚原弘昭(1993)：水圧破壊実験井における物理検層，物理探査学会第88回学術講演会論文集，379-384。
- International Lithosphere Program (CC4)(1994)：Scientific Rationale for Establishment of an International Program of Continental Scientific Drilling (Eds: M. D. Zoback and R. Emmermann), pp. 194.
- 木下繁夫・藤原広行・池田隆司・竹中博士・吉本和生・佐藤春夫(1994)：足尾群発地震の震源特性，地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集，295。
- 松田時彦(1974)：1891年濃尾地震の地震断層，地震研究所研究速報，13, 85-126。
- 岡田篤正・松田時彦(1992)：根尾村水鳥および中付近における根尾谷断層の第四紀後期の活動性，地学雑誌，101, 19-37。
- 小村健太郎・池田隆司・塚原弘昭(1994a)：コア・ディスキングによる地殻応力方位の推定—足尾水圧破壊実験井における事例研究—，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，409-412。
- 小村健太郎・池田隆司・塚原弘昭(1994b)：足尾群発地震域の岩盤透水特性，地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集，129。
- 塚原弘昭・池田隆司(1990)：震源域に到達するボーリング調査—2000 m，地質ニュース，436号，25-30。
- Vernik, L. and M. D. Zoback(1992)：Estimation of maximum horizontal principal stress magnitude from stress-induced well bore breakout s in the Cajon Pass scientific research borehole, J. Geophys. Res., 97, 5109-5119。
- Zoback M. and R. Emmermann(1995)：ICDP(国際陸上掘削計画)の設立，本誌，8-9。
- Zoback M. D. and J. H. Healy(1992)：In Situ Stress Measurements to 3.5 km Depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole: Implications for the Mechanics of Crustal Faulting, J. Geophys. Res., 97, 5039-5057。
-
- IKEDA Ryuji, TSUKAHARA Hiroaki and OMURA Kentaro (1995)：Drilling into earthquake focal area and active fault.

〈受付：1994年11月18日〉