

深部応力直接測定手法の検討

佐野 修¹⁾

1. はじめに

地震は地殻内の破壊現象であり, その発生には地殻応力が直接関係している. したがって地殻応力計測手法の開発は地震予知研究の重要課題の一つであり, これまでにも各種手法が提案され, 計測も実施されてきた. しかし地殻応力計測手法には三つの大きな問題があった. すなわち,

- (1) 鉛直下向きの深いボアホールにおける応力測定手法の主力である水圧破碎法に関する原理的諸問題.
- (2) 地震発生メカニズムの解明あるいは発生予測のためには震源近傍の応力場を知りたいが, 多くの震源が2km以深に分布している一方で, 直接計測可能な深度はせいぜい2km以浅である.
- (3) 不均質媒体内の応力場は一律ではなく, 大きさも主応力方向も位置により変動する. 地殻もまた不均質であり, 任意の一点で計測された応力場情報のみからでは地殻内の応力状態に関する十分な情報が得られない,

の三点である. これらのうち, 問題点(1)は, 亀裂再開口の瞬間に亀裂開口部に作用する水圧に関する議論, および亀裂再開口圧そのものに関する議論である. これらの詳細については他の著作で紹介されており(Sano *et al.*, 2005; 佐野・平田, 2007; 佐野, 2009), すでに解決手法についても明らかになりつつあるので(佐野ほか, 2007), ここでは深く立ち入らない. 次の二つの問題は, ある意味で連動している.

地表付近は表土層あるいは比較的地質年代の新しい層で形成されていることが普通である. このような低弾性率の層の下に高弾性率の岩盤が存在する状態では, テクトニックな応力は主として高弾性率の下部岩盤が支えていると考えられる. 地表付近は地形

の影響も無視できない. 一般に, 応力擾乱源が存在する場合, 擾乱源サイズと同程度離れば擾乱の影響が無視できるので, 数kmサイズの地形の起伏の影響を逃れるためには地表から数km離れる必要がある.

地形の影響も含めた地殻の不均質構造がおよぼす応力擾乱の影響は, 地形および地下構造がわかれば, 測定結果を満足する境界条件を解く問題として逆解析することができる. 地形については国土地理院から50mメッシュの地形情報が入手可能であるが, 地下構造については, もっとも精細と思われる広域の地震波構造探査情報でも, 通常, 0.5kmより小さなスケールの擾乱構造は識別不能である. したがって, 小さなスケールの不均質構造の影響は多点計測による平均値によりカバーすることを前提として, 地震波構造探査で得られるスケールの不均質構造を利用するためにはキロメートルオーダーの深度の直接計測が必要と考えられる. しかし後述する理由により, 2~3km付近を上限として, それ以深では既存の地殻応力直接計測手法がすべて適用不能となる. そこで, 本論では, 数kmオーダーの深さの地殻応力の直接計測について, まず(1)何が障害となっているかをまとめ, 次に(2)直接計測の可能性を検討する.

深部地殻応力の直接計測問題は, 不均質地殻の影響を適切に評価し, 地震発生域に可能な限り接近した計測を可能とするという意味で地震予知研究と直接関係しているが, 後に述べる掘削に起因したボアホールの破壊を許容するという観点から, 破壊が起こりうるような深度を対象とした掘削, すなわち, 一般的な科学計測掘削, 石油掘削, 二酸化炭素地下貯留, メタンハイドレート, 地熱利用あるいは高レベル放射性廃棄物関連など, 地下深部を対象とする数百メートル以深の掘削の安全性と密接に関係すると考え

1) 東京大学 地震研究所
113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

キーワード: 地殻応力, 深部計測, 深部掘削, 岩石破壊, 地震予知研究

られる。

2. 深部掘削の現状と地殻応力計測

2.1 掘削技術

地下深部に到達するための手段としてボーリングが実施される。通常、超硬合金や工業ダイヤモンドが埋め込まれたビットを押しつけながら回転させ岩石を破碎することにより掘り下げる。鉱山・土木業界で発達した技術と石油掘削業界で発達した技術が存在するが、おおむね2km以深は石油掘削技術の世界である。地下深部、高温環境下では、Oリング等、掘削機械に用いられるゴム類や後述する泥水材料等による制限があり、掘削用ビットの硬度劣化が続く。さらに高温となると岩石の脆性破壊に基づく掘削手法は適用不能となるはずである。Oリング材料による制限は現在の技術では260度C近辺である。これまでにロシア共和国のコラ半島で約12km、ドイツ連邦共和国のKTBで約9kmのほか、石油掘削でも9kmレベルの掘削例が存在する。

ボーリングにより岩盤内部に円孔が形成されると孔壁近傍に応力集中が発生し(Kirsch, 1898)、掘削深度が増加すると応力値が増大し、壁面が破壊する確率が高まる(Barton and Zoback, 1988; Moos and Zoback, 1990)。掘削中に破碎帯や異常間隙水圧帯あるいはガス層等に遭遇した場合にも壁面の崩壊が起こりうる。したがって深いボアホールではケーシングによる壁面補強が基本となる。実際には、掘削予定区間の岩盤の性質や応力状態等を予測し、適切に比重をコントロールした泥水の圧力で壁面を保護しながら掘削し、予定区間を掘削した後にケーシングで保護するという掘削サイクルを繰り返しながら深部を目指す。

2.2 掘削計画

地球科学分野で掘削されるボアホールの多くは、地震計、歪計や傾斜計の設置が主目的であるが、その他にも兵庫県南部地震後に実施された断層解剖計画、東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測井戸掘削計画、海洋掘削船「地球」による南海掘削計画、さらに世界に目を向けると、KTB (Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland)、車籠埔断層掘削、CRL (Corinth Rift

Laboratory)、PBO (Plate Boundary Observatory)、SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth)等、地球科学計測を目的とした数多くの掘削計画があり、ここでは地震や歪・傾斜観測だけでなく、地殻応力計測、地下水圧計測、水温計測等、さまざまな計測・観測が提案されてきた。残念ながら、いずれの掘削においても、3km程度を限界として、それ以深では、地殻応力の直接計測は成功していない。

2.3 深部地殻応力直接測定

掘削深度が3kmを超えるとボアホール壁面の応力値が増加し圧縮破壊確率が高まる。掘削時の孔壁の崩壊を防ぐ目的で泥水の圧力を利用するが、泥水圧が高すぎると引張り破壊による水圧破碎が生じうる。これはdrilling induced tensile fracture (以後、DIFと略記)と呼ばれる。破壊条件はKirsch (1898)の解に基づき拡張された式(1)の形で表される。

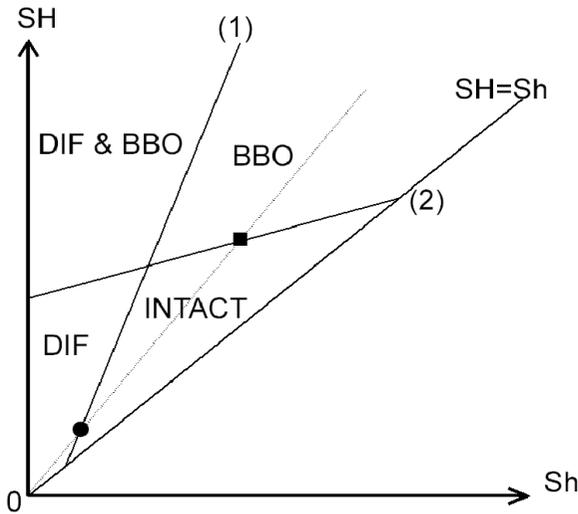
$$3Sh-SH-Pp-Pm+St-\Delta t < 0 \quad (1)$$

ただし、SHおよびShは水平面内最大および最小主応力、Pmは泥水圧、Stは引張り強度、Ppは岩盤内間隙水圧、 Δt は岩盤の急冷に起因する熱応力の項である。一方、圧縮応力集中にともなう孔壁の破壊現象はborehole breakout (以後、BBOと略記)と呼ばれる。破壊条件は式(2)の形で表される。

$$Sh-3SH+Pp+Pm+Sc+\Delta t < 0 \quad (2)$$

ただしScは圧縮強度項(全応力)であるが封圧効果により泥水圧の関数となると同時に、地下深部の温度上昇の影響も受ける。厳密には鉛直方向主応力の大きさも考慮する必要があるが(Moos and Zoback, 1990)、ボアホール壁面に垂直な方向が最小圧縮応力となることが多いと考えられるので詳細は省いた。原理的にDIFは水平面内最大圧縮応力方向に形成され、BBOは最小圧縮応力方向に形成される。いずれの場合も、既存のすべての直接測定手法は適用不能となる。応力解放法はもちろん、水圧破碎法もパッカーによるシールができず加圧できない。

深部掘削ではケーシング直後にボアホール底部をセメンティングすることにより密閉し、底部からさらに数m掘削した後、通常は地表から孔内泥水を加圧す



第1図 ボーリングにより岩盤内に円孔を穿つと孔壁周りに応力集中が発生する。引張応力集中による破壊 (DIF) 条件は式 (1) で、圧縮応力集中による破壊 (BBO) は式 (2) で表される。これらの破壊条件および水平面内最大圧縮応力 (SH) と最小圧縮応力 (Sh) の関係を示す。図中、(1) および (2) で表された境界線がそれぞれ式 (1) および式 (2) に対応する。任意の地点の任意の深さの応力場が図中 BBO と書かれた領域ならば圧縮応力集中による破壊が生じる。DIF ならば引張破壊が生じ、図中、INTACT と書かれた領域は非破壊領域である。通常は、非破壊を目標とし、両式に含まれる泥水圧を制御する。

ることにより、裸孔区間を破碎しリークオフテスト (LOT, leak-off test) あるいは Extended LOT (XLOT) を実施する。ダブルパッカーにより、ボアホールの一部区間のみを加圧する水圧破碎法とは異なり、造成亀裂の方位を調べることは行われず、圧力・注入量曲線からリークオフ圧、亀裂進展圧や亀裂閉塞圧を求め、最小主応力値を評価する。LOT は、本来、BBO を防止するために用いる泥水圧の許容限界値 (高すぎると DIF が発生する) を求めるために開発された手法であるが、最小主応力に垂直になったと判断されるまで十分長く亀裂を伸ばすことにより最小主応力値が推定される。具体的手順や得られた値の信頼性等については Zoback *et al.* (2003), Raaen *et al.* (2006) や山本 (2007) にまとめられている。

深部掘削における地殻応力計測は、(1) XLOT によ

り得られる最小圧縮応力値、(2) BBO や DIF の方位から得られる水平面内主応力方向であり、(3) BBO 領域の寸法形状および地下深部の岩盤の圧縮破壊条件あるいは DIF 発生条件に基づき推定される水平面内最大圧縮応力値からなる。事実、KTB プロジェクトでも、3km までは水圧破碎法による直接測定であるが、それ以深では、このような三種の情報を組み合わせて推定している (Brudy *et al.*, 1997)。しかしこれらの手法には、地下深部の岩石の高温高圧下の破壊条件という精密に決めることが極めて困難な物性が含まれるため、推定された値には大きな曖昧さが避けられない。

地下深部の応力状態 (水平面内最大圧縮応力 SH および最小圧縮応力 Sh) と式 (1) で示された DIF 発生条件および式 (2) で示された BBO 発生条件の関係を図示すると第 1 図のとおりである。塚原 (1990) にも類似の図を見ることができ、図中 (1) および (2) で示された境界線がそれぞれ式 (1) および式 (2) に対応し、泥水圧を高くすると境界線 (1) は右下方向に移動し、境界線 (2) は上に移動する。BBO および DIF で示された領域はそれぞれの破壊発生領域であり、INTACT と図示された領域は非破壊領域である。図中、SH および Sh が KTB と同じように変化した場合を破線で示すが、丸印と四角印の間におさまるような泥水圧が選択できれば健全なボアホールが掘削できる。

孔壁周辺の応力集中は孔壁から離れるにつれ急激に減少するため、ボアホール掘削により初めて破壊条件を満足する場合、BBO 領域はボアホール壁から奥に拡大し続けることはない。一方、DIF で形成された亀裂内部に加圧泥水が作用することにより、亀裂が進展し続け、既存の割れ目系や破碎帯、あるいはガス層と連結し、急激な逸泥による泥水圧の低下、および引き続くボアホール壁面の崩壊が生じる可能性がある。したがって掘削技術者が DIF を避ける傾向が高いことは理解できる。

深部の高温環境に地表から泥水を送り込むことにより孔壁周辺が急冷されると、式 (1) および式 (2) に含まれているように熱応力起源の引張り応力がボアホール壁面に発生する。KTB では深さ 3km で 20 MPa、8km では 80MPa にも達する熱応力起源の引張り応力が発生したものと考えられている (Brudy *et al.*, 1997)。DIF は掘削時の熱応力の影響下で発生するため、ボアホール壁面から奥に伸び続けることはない (Brudy and Zoback (1999) は述べている。したがっ

てDIFが発生したことを適切に検出し昇圧を停止すれば掘削技術者が恐れる逸泥＝ボアホールの崩壊を避けることができる可能性が高い。前述のとおり、BBOが発生すると深部ボアホールに適用可能なすべての手法が適用不能となるが、DIF亀裂に対しては固体圧載荷が可能である。あるいはダウンホールに圧力計を設置すれば地表からの加圧でも可能かも知れない。冷たい泥水の注入を停止し、熱応力起源の引張り応力の低下を待つ、あるいは泥水圧を低下させることにより、DIF亀裂を閉塞させ、固体圧あるいはそれ以外の手法で再開する手法ならば原理的に最大主応力の直接計測が可能である。ただし再開の瞬間を検出する手段が必要である。ボアホールジャッキ式乾式破砕法（例えば佐野・平田，2007）で採用されているように、ボアホール壁面の微小変位の計測がその回答の一つであろう。センサーとしては、高温高圧条件下の計測であり、孔壁変位（歪）、温度および水圧の同時計測が必要という観点から、FBG光ファイバー式が有力な候補である。なお、ボアホール口径変化では検出困難な可能性が高い。

2.4 DIF利用応力直接測定法適用限界

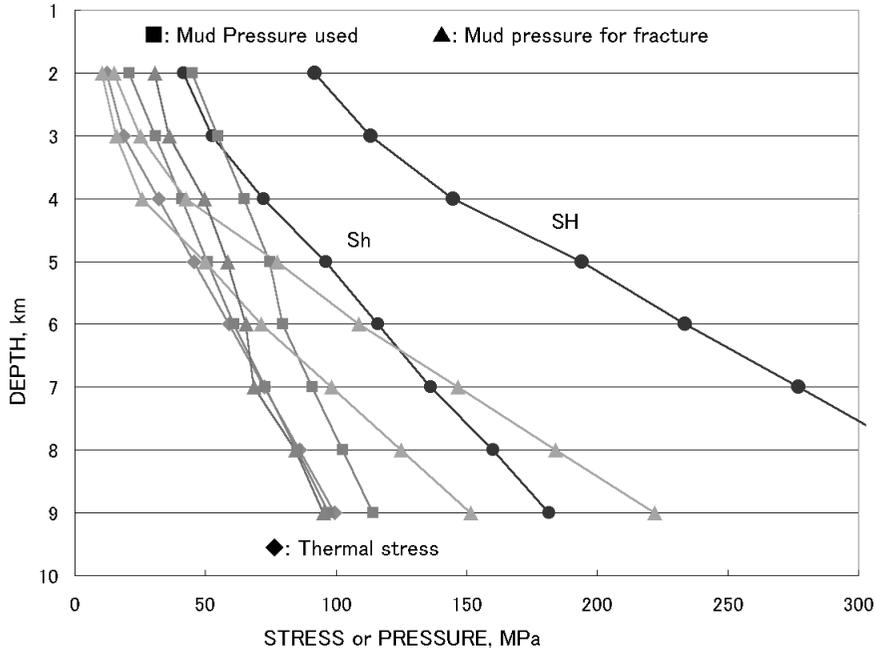
式(1)に含まれる引張強度の温度および封圧依存性は式(2)に含まれる圧縮強度より相対的に小さいので、DIF発生条件のみからでも、BBOより信頼性の高い情報が得られると思われるが、前節で述べたような直接計測手法が可能となれば飛躍的な信頼性向上が期待できる。なお、重い泥水の採用はコストアップにつながるので、掘削の全領域でDIFを発生させることを想定しているわけではない。あくまでも一部区間のみであり、そこで円形断面の利点が活用できる測定、例えば応力測定を実施することが想定されている。

ここで、KTBで得られた最大圧縮応力SH、最小圧縮応力Shおよび孔壁の熱応力推定結果(Brudy *et al.*, 1997)を参考に、BBOを抑えるために必要な最小泥水圧およびDIF発生泥水圧を式(1)および式(2)により求めた結果を第2図(口絵p.1)に示す。図中、黒丸印はSHおよびSh、赤ダイヤ印は孔壁に生じる熱応力(引張りであるが、比較のため正で示す)、青四角印で示された結果は泥水圧記録である(Brudy *et al.*, 1997)。二系統あるのは、泥水圧の設定範囲と思われる。図中、三角印で示した結果は式(1)および(2)に

より推定された破壊条件を決める泥水圧である。深くなるにつれて急激に増大する二例(ピンク三角)がBBOを抑えるために必要な泥水圧であり、泥水圧がこの圧より低い場合にBBOが発生する。一方、ほぼ真下に伸びている緑三角印で示された結果はDIF発生条件であり、泥水圧がこの圧力より大きいとDIFが発生する。計算にあたり、引張強度を10MPaと仮定し、圧縮強度はBorm *et al.* (1997)の結果を参考に、大気圧下で90MPaとし、泥水圧の増加に伴う非線形増加を仮定した。また、二通りのBBO発生条件のうち、相対的に低圧の結果は純水の密度を用いて計算された岩盤内間隙水圧および孔壁熱応力を考慮した場合であり、高圧の結果は温度平衡に達し熱応力がゼロとなった場合である。二つの結果の差と熱応力が等しくないのは、Scの圧力依存性の非線形性および一方の結果のみ間隙水圧の影響が考慮されているためである。

第2図に示された結果は必ずしもKTBで起こったことを忠実に再現できているわけではない。図中、3.7km以深でBBOが発生するような結果となっているが、実際には3km以深で発生している。一方、6.5km以深でDIFの発生が予測されるが、実際には7.5～8km近傍でDIFが発生している。厳密には一致していないが、第2図は地下深部の状態をある程度理解する助けとなる。

DIFを許容しBBOを抑制するために必要な条件とは、第2図の三角印で示された必要圧より高い泥水圧下で掘削することである。図中、DIF発生圧とBBO抑制限界圧の大小関係が代わる深度が存在することがわかる。この理由は、式(1)および(2)の左辺をSHのみの形に変形し、Pmの係数を比較することにより簡単に理解できる。さらに計算で仮定されたように、圧縮破壊強度の封圧依存性が高封圧になるほど低下する傾向があることも一因である。適用深度限界は、(1) DIFは許容するがBBOを発生させずに掘削できるか否か？ そのために必要な泥水圧は実現可能か？ (2) その条件下で生成した亀裂が伸び続けることはないか？ (3) 亀裂が閉じる程度まで温度を上げてよいか？ (4) 亀裂再開の瞬間の特定とその瞬間の圧力が計測可能か？ などにより決まる。まず、(1)については、KTBと同じような条件ならば第2図に示されるように9kmまで可能のように思われるが、泥水材料の比重および温度により制限される。



第2図 式(1)および式(2)を用いて計算された引張破壊(DIF)が発生するために必要な泥水圧(Mud Pressure: 緑三角)および圧縮破壊(BBO)を抑制するために必要な泥水圧(ピンク三角)と深さ(Depth)の関係。計算にあたってKTBで推定された最大圧縮応力(SH)、最小圧縮応力(Sh)および熱応力(Thermal Stress)を用いた。岩盤物性等、正確な値がわからないので正確な数値ではないが、地下深部の状況が理解できる。泥水圧が緑三角で示された値およびピンク三角で示された値より大きければBBOを抑制しながらDIFが発生する条件を作り出すことができる。二本のピンク三角で示された結果は、図中、左側が急冷した状態、右側が長時間おいて温度平衡に達した場合である。図中、実際に採用された泥水圧(水色四角)も示されているが、掘削直後ならば、KTBで採用された泥水密度でも6.5km程度まで可能であることがわかる。なお、比較を容易にするため、熱応力のみ引張を正としている。第2図のカラー版を口絵(p.1)に表示してあるので参照のこと。

KTBで実現した比重材料ならば、6.5km近辺までは可能であったと推定できる。さらに深い領域に挑戦するには泥水比重をさらに高める材料を開発するか、ボアホール壁面のさらなる冷却により熱応力を高めるか、あるいは加圧しながら掘削する手法の開発等が必要である。(2)については、前述のとおり、熱応力が大きい状態で破砕した亀裂がボアホール壁から遠くまで伸びることはないが、熱応力起源の引張り応力が小さい状態で、例えば第2図に示されている場合には、6.5km以深で亀裂を発生させると泥水圧がShを超え、亀裂が伸び続ける可能性がある。このような条件下で泥水圧をかけ続けることは亀裂の拡大をまねくため避けるべきである。実際には、応力場や物性により深さは変わるが、適用深度限界の一つの目安

であろう。物性や応力状態によってはさらに深い地点の計測が可能な場合もありうるが、そのような場合、泥水材料やセンサーの耐熱特性が問題となろう。現状のFBG技術は300度Cを超えると困難である。さらに高温環境となると、掘削手法のみならず、第2図に示された熱応力と同一の問題がケーシング部材にも発生する。急冷された環境下で岩盤に固定されたケーシングが元の高温環境にさらされる過程で生じうる残留応力による破壊は佐久間ほか(2007)が述べている。

3. おわりに

深部掘削において、ボアホール孔壁が破壊すると

最大主応力を直接測定することができない, そのため孔壁破壊条件から推定しているが, 精度よく推定することが困難な地下深部の岩石の破壊条件がパラメータとなっているため大きな不確実性を含んでいる. 本報告では, Borehole Breakoutが発生すると応力解放法, 水圧破碎法および固体圧破碎法など, 主要な直接計測手法が適用不能となるが, Drilling Induced Fractureなら可能であることを前提に, その適用可能性について検討した. 深部掘削計画は多数提案されており, 3km以深の応力場の直接計測が可能となる日がくるものと期待している.

参 考 文 献

- Barton, C.A. and M.D. Zoback (1988) : In-situ stress orientation and magnitude from wellbore reaktouts, *Geophys. Res. Let.*, 15, 467-470.
- Borm, G., B. Engeser, B. Hoffers, H.K. Kutter and C. Lempp (1997) : Borehole instabilities in the KTB main borehole, *J. Geophys. Res.*, 102, B8, 18507-18517.
- Brudy, M., M.D. Zoback, K. Fuchs, F. Rummel and J. Baumgartner (1997) : Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength, *J. Geophys. Res.*, 102, 18453-18475.
- Brudy, M. and M.D. Zoback (1999) : Drilling-induced tensile wall fracture: implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 191-215.
- Kirsch, C. (1898) : Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 42, 29, 797-807.
- Moos, D. and M.D. Zoback (1990) : Utilization of observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: application to continental, deep sea drilling project, and ocean drilling program boreholes, *J. Geophys. Res.*, 95, B6, 9305-9325.
- Raaen, A.M., P. Horsrud, H. Kjørholt and D. Økland (2006) : Improved routine estimation of the minimum horizontal stress component from extended leak-off tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43, 37-48.
- 佐久間澄夫・唐澤広和・林 一夫・天満則夫・須藤裕子・及川寧己 (2007) : ケーシング及びケーシングセメントの損傷に関するシミュレーションの紹介, 地熱研究会講演集.
- 佐野 修 (2009) : 孔内計測について, 地震, 印刷中.
- Sano, O., H. Ito, A. Hirata and Y. Mizuta (2005) : Review of methods of measuring stress and its variations, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 80, 87-103.
- 佐野 修・平田篤夫 (2007) : 応力計測にまつわる問題点と今後の可能性, *測地学会誌*, 53 (4), 335-348.
- 佐野 修・中山芳樹・横山幸也・平田篤夫 (2007) : 神岡鉱山跡津川坑内における地殻応力測定結果について, 東濃地震科学研究 所報告, 21, 143-149.
- 塚原弘昭 (1990) : 深層ボーリングによる地殻応力測定, *月刊地球*, 12-10, 624-625.
- 山本晃司 (2007) : 坑井取得データによる応力計測の実際-総合的検討の一部として, *物理探査*, 60 (2), 113-129.
- Zoback, M.D., C.A. Barton, M. Brudy, D.A. Castillo, T. Finkbeiner, B.R. Grollimund, D.B. Moos, P. Peska, C.D. Ward and D.J. Wiprut (2003) : Determination of stress orientation and magnitude in deep wells, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 1049-1076.

SANO Osam (2009) : A consideration for direct measurements of crustal stress at great depth.

<受付: 2008年12月25日>