深部ボアホール観測のための地殻活動総合観測装置および 地殻応力測定装置の開発と興味ある成果の例

名古屋大学大学院環境学研究科地震火山・防災研究センター* 山内 常 生
財団法人地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所** 石 井 紘・浅 井 康 広・大久保慎人
東京大学地震研究所*** 松 本 滋 夫
名古屋大学大学院環境学研究科地震火山・防災研究センター* 吾 妻 瞬 一†

Development of Deep Borehole Instruments for Both Multi- Component Observation and *in situ* Stress Measurement, and Some Interesting Results Obtained

Tsuneo YAMAUCHI

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Hiroshi ISHII, Yasuhiro ASAI and Makoto OKUBO

Tono Research Institute of Earthquake Science, 1-63 Yamanouchi,
Akeyo-cho, Mizunami, Gifu Pref. 509-6132, Japan

Shigeo MATSUMOTO

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi,
Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Shun-ichi AZUMA†

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

(Received April 1, 2004; Accepted January 4, 2005)

We have developed multi-component borehole instruments for borehole stations deeper than 1000 m. The instruments are composed of 7 strainmeter components (4 horizontal, 2 inclined, and 1 vertical), 2 tiltmeters, 3 seismometers, 4 magnetometers, and a high-resolution thermometer. The instruments are also equipped with new systems for data transmission and data monitoring, even during installation, and for determining the instrument direction at the bottom of the borehole. We have also developed an intelligent-type strainmeter based on the Ishii-type strainmeter for measuring *in situ* stresses. It is equipped with strain sensors, an A/D converter, a CPU, a memory, and a battery, and it has no outside cable. It is cemented into a deep borehole with expansion grout and then taken out by overcoring after it has coupled with the basement rock. By this procedure we can estimate *in situ* rock stresses. Observation in deep boreholes can avoid the problems of both artificial noise and

* 〒464-8602 名古屋市中千種区不老町

** 〒509-6132 瑞浪市明世町山野内 1-63

*** 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

† 現所属: 応用地質株式会社中部支社

〒463-8541 名古屋市守山区瀬古東 2-907

Present address: Oyo Corporation, 2-907 Seko-
higashi, Moriyama-ku, Nagoya 463-8541,
Japan

meteorological disturbance. It enables the performance of high S/N ratio observations for detecting very small signals. The results obtained from deep borehole observations on the Izu Peninsula and in the Tono area of Gifu Prefecture have shown some interesting variations of strains and tilts related to the precursory phenomena of earthquakes. An example of *in situ* stress determination has also been demonstrated. In the case of deep borehole observation, we first measure the *in situ* stresses and then install a multi-component borehole instrument to monitor crustal activity. By this process we can continuously monitor stress variation. This kind of stress monitoring is very important in earthquake prediction research.

Key words: Multi-component borehole instrument, Cableless intelligent type strain meter, Monitoring of crustal activities, *In situ* stress measurement, Precursory phenomena of earthquake.

§ 1. はじめに

地表に近い観測地点における地殻変動記録は、気象の影響、とりわけ、降雨の影響を受けやすい。このため、高精度の観測でありながら S/N 比が悪く、観測記録に含まれる地震発生に関連した現象を見落とす可能性が高い。筆者らは、降雨による擾乱が小さい地下深部において地殻変動観測を行う目的でボアホール式の観測装置を開発してきた。現時点では、1000 m 以上の深度であっても地殻変動連続観測が行える状況である。また、ボアホール式歪計とデータロガーを一体化した初期応力測定装置を開発してきた。この測定装置を使用すれば岩盤を破壊することなく応力測定できる。最近、地殻応力を測定した後、同じ地点にボアホール式観測装置を設置し、地殻に作用している応力状態を知った上で、地殻変

動を介して応力状態の変化を連続してモニターするようにしている。

本報告では、ボアホール式地殻活動総合観測装置と初期応力測定用のインテリジェント型歪計の構成、測定装置の埋設・設置方法、および使用方法の概要を成果とともに報告する。

§ 2. 地下深部における地殻変動観測の必要性

降雨は複雑な過程を経て地下に浸透してタイムラグを伴いながら地下水面に達し地下水面に擾乱を与える。その後、観測坑道近傍を河川の方に流れ、擾乱を受けた地下水面はゆっくりと元の状態に戻る。降雨が地下に浸透する過程、浸透により乱された地下水面の変動、その後地下水面が回復する過程など、岩盤中を移動する水

Fig. 1. Comparison of the discharge data with the strain data (N26°W, N19°E, N116°W) observed by the silica-tube extensometers at Mikawa Crustal Movement Observatory operated by Nagoya University, Central Japan. Uppermost trace shows strain change predicted by a tank model simulation using precipitation data.

の動きに対応して振幅や位相が異なる局所的な地殻変動が生じる。その結果、観測坑道に設置された伸縮計や傾斜計が複雑な擾乱を受ける。

Fig. 1 に豊橋市の名古屋大学大学院環境学研究科の三河地殻変動観測所における 40 m の伸縮計による 3 方向の伸縮変化 (N26°W, N19°E, N116°W) と坑道内湧水量変化を示す。この図は、伸縮変化と降雨量・地下水面の変化との関係を示す典型的な例である。Fig. 1 から分かるように N26°W 方向と N19°E 方向に短周期変化が見られる。この短周期の歪変化は降雨による影響であり、降雨量を入力とする 3 段のタンクモデルにより予測することができる [山内・他 (1981), 山内 (1981)]。このタンクモデルによる予測値を Fig. 1 の上部に TNK として示した。三河地殻変動観測所の場合、降雨直後に収縮しその後もとに復する短周期の地殻変動は、降雨が地下に浸透する過程で生じる過渡的な歪変化であると推測している。また、Fig. 1 から分かるように、N19°E 方向と、N116°W 方向に年周変化が現れる。この年周変化は最下部に示した湧水量変化とよく一致し、湧水量が多い夏期には伸張し、湧水量が少ない冬期には収縮する。この湧水量変化もおおむね降雨量を入力とする別の 5 段のタンクモデルの出力で近似できる [Yamauchi (1993)]。年周変化に代表される長周期の地殻変動は、地下に浸透した雨水による地下水面の変動に対応する歪変化であると推定している。

Fig. 1 で示したような表層で生じる局所的な地殻変動は、観測地点が深くなれば減衰するはずである。瑞浪で観測した深度の異なる地点における観測結果の比較から、浅井・他 (2003) は、Fig. 2 のような結果を得ている。この図には、名古屋大学環境学研究科の瑞浪観測点における歪記録 (NAMZ: 坑道を利用する長さ 30 m の伸縮計 3 成分) と、坑道入り口にある東濃地震科学研究所の戸狩観測点における歪記録 (TGR350: 深さ 350 m に設置したボアホール歪計 3 成分、計器の直径は 10 cm) が示されている。Fig. 2 から分かるように、深さ 30 m 程度の地表付近に設置されている伸縮計の記録には降雨の影響が認められるが、深さ 350 m に設置されているボアホール歪計の記録には、降雨の影響はほとんど見られない。S/N 比がよい地下深部であればわずかな異常変動であっても検出できる可能性が高い。

§ 3. ボアホール式観測装置

ボアホール式の観測装置により地下深部で地殻変動連続観測を行うためには、多くの解決すべき問題がある。大きく分類すれば、

- 1) ボーリング孔の掘削に関わること、

- 2) 観測装置の開発に関わること、
- 3) 観測装置の設置に関わること、
- 4) 観測装置設置後の連続観測に関わること、

が挙げられる。

これらは相互に関連し、どの問題が解決できない場合でも地下深部における地殻変動連続観測には支障がでる。ボーリング孔の掘削や観測装置の設置に関わることでは、ボーリング孔が曲がっていると観測装置を孔底まで降下させることができないし、観測装置を設置する際のモルタルの硬さや厚さを決めるには、設置場所の岩盤の物性を十分調査する必要がある。設置深度が深い場合、膨張セメント (以下モルタルと記す) が固まるまでの時間を遅らせ、設置完了までの作業時間を長くする必要がある。一方、設置場所が深くなるとボーリング孔の周りの岩盤内の水圧が高くなり、浅い場所に比較して地下水が湧出しやすくなる。設置場所において地下水が湧水すると観測装置と岩盤とのカップリング状態が悪くなり、岩盤の変動を正確に観測できなくなる。しかし、モルタルが固まるまでカップリング状態は判断できず、カップリングが悪いと分かった時点ではモルタルが固まっており観測装置を引き上げることはできない。したがって、設置深度が深い場合は、湧水がある場合に備え、以下のようにすべきである。

- 1) ボーリング孔の孔底をモルタルで固め、
- 2) モルタルが固まった時点でモルタルをリボーリングし、
- 3) 回収したモルタルのコアを観察しコアに湧水の痕跡がないことを確かめ、
- 4) 観測装置を設置する。

一方、深いボーリング孔では孔口からの作業で観測装置の設置方位を決めることは困難である。筆者らは観測装置に複数の磁気センサを取り付け、地磁気の方角を直接求めることで解決した。この磁気センサは、設置方位の測定に使用するだけでなく観測装置の設置後、地磁気の連続観測するために使用する。

観測装置の開発に当たっては、小型・高感度・低消費電力を目標にしてきた。孔径が大きな深いボアホール孔の掘削は費用がかさむため、孔径の小さなボーリング孔に設置できるよう、孔径の小さなボアホール式観測装置にしなければならなかった。現時点では小型・軽量化に成功し地下深部に設置しやすくなった。小型であっても地球潮汐力に対応する微小な地殻変動を観測する必要がある、高感度でなければならない。高感度にするため、センサを改良して感度を上げつつ、孔壁の変位をメカニカルに拡大し、センサの変位量を大きくする方法 [Ishii *et al.* (2001b)] を用いている。また、低周波帯域でノイズ

Comparison of Precipitation effect between NAMZ and TGR350

Fig. 2. Precipitation and crustal strain changes observed by the silica-tube extensometers in a shallow vault (NAMZ) and the strain meters in a deep borehole (TGR350, 350 m depth) constructed nearby NAMZ at Mizunami in the Tono area, Central Japan [Asai *et al.* (2003)].

が少なく、かつ、消費電力が少ないアンプを用いて信号を増幅している。これらとともに、複数の項目による地殻活動総合観測が行えるよう、多項目化と多成分化を

図ってきた。東濃地震科学研究所の屏風山観測点に設置した観測装置の場合、歪計7成分（水平4成分、斜め2成分、傾斜計2成分、短周期地震計3成

Fig. 3. Block diagram of interactive data communication system using a coaxial cable, which also supplies power for sensors.

分、磁気方位計 4 成分（水平 3 成分、垂直 1 成分）と、高精度水晶温度計により構成されている。さらに、電源線が長くなると電源電圧の降下が大きくなるため、観測装置の消費電力を可能な限り少なくするよう努力してき

た。多成分の測定装置であるが、現時点では、データ伝送部も含めた消費電流は DC12V で 300 mA 程度である。

ボアホール式地殻活動総合観測装置は、モルタルで

ボーリング孔の孔底に固定するため、故障しても引き上げることができない。このため、落雷に伴う誘導電圧から観測装置内部の電子回路を保護する必要がある。電子回路を保護するには、第1に、落雷に伴う誘導電圧が電源線を介して孔底の観測装置に進入することを避けることであり、観測装置には、商用電源から直接電源を供給せず、バッテリーを用いて電源を供給している。そして、孔底の観測装置に給電する電源線にアレスターやツェナーダイオードを取り付け、バッテリーからの電源線に過大な電圧が加わった場合、その電圧をアースラインに流すようにしている。第2は、各センサの信号線から過大な電圧が進入することを避けることであり、センサの信号線に保護回路を取り付ける。初期の頃は、保護回路をセンサごとに取り付けていたが、現時点では、孔底でデジタル信号に変換し時分割でデジタル伝送する方法に変更しセンサからのアナログ信号線をなくした。そして、デジタル伝送用の信号線にのみ保護回路を付けている。具体的には、デジタル信号を、1) 光ファイバーを介して伝送する方法と、2) 微弱電波をコイル結合させ同軸ケーブルを介して伝送する方法を用いている。

ここでは、同軸ケーブルでデータ伝送を行う方法について述べる。孔底と孔口を同軸ケーブル(5D2V相当)で接続し、両端に微弱電波を利用する無線送受信ユニットを取り付け、双方向通信をする。具体的には、同軸ケーブルで観測装置に電源を供給しつつ、A/D変換用の同期信号を観測装置に伝送するとともに、デジタル化

したデータを観測装置から孔口まで伝送する。この方式の開発により、従来まで使用してきた多芯で太く重量のあるアナログ信号線と電源線を省略することができ、地下深部に観測装置が設置できる条件が整った。開発した微弱電波を利用する双方向通信ユニットは、60 mW程度の消費電力でありながら、孔口から孔底へは9.6 kbpsで、孔底から孔口へはその12倍の115.2 kbpsでデータを伝送できる。現時点では、観測装置の消費電流は300 mA程度である。現在使用している同軸ケーブルの1 km当たりの線抵抗は往復で20 オーム程度であるため、同軸ケーブルによる電圧降下を数Vに抑えることができる。設置深度が2 kmであっても孔口では24 Vの直流電源で対応することができる。

Fig. 3に東濃地震科学研究所の屏風山観測点で実施している、同軸ケーブルを用い電源の供給を行いつつデータの双方向通信をする観測システムのブロック図を示す。屏風山の場合、地表からの深さ1000 mの地点でGPS信号に同期した高速サンプリングの地殻変動データが得られるようになった。A/D変換データのサンプリングは10 Hzから200 Hzで、22ビットの分解能である。将来は、ボアホール観測装置内のCPUのプログラムを地表から変更できるようにするとともに、各センサを小型のCPUで制御する方式に変更し、センサごとに個別の制御ができるようにしたい。さらに、通信回路を利用することで、研究室のCPUから各センサをダイレクト制御したい。

Fig. 4. Strain changes in several 3-D directions observed by the multi-component borehole instrument during installation into a deep borehole at Takayama station, Central Japan. A: the instrument immerses in water near surface of borehole and stops until temperature of the instrument becomes stable. B: the instrument starts moving down into borehole bottom. C: the instrument plunges into grout at the bottom.

Fig. 4 は名古屋大学環境学研究科の高山地震観測所において観測施設を移転した際に得られた、ボアホール地殻活動総合観測装置を設置したときのリアルタイムモニター記録である。水平4成分と垂直成分の歪記録が図示してある。図のA点以前は孔口に観測装置を移動させているときであり移動に伴う乱れが記録されている。移動後、孔底にモルタルを入れ、その後、ボーリング孔を水で満たす。その水を満たしたボーリング孔に挿入した時間がA点で、観測装置の温度が安定するのを待ち、B点で降下を開始した。降下した観測装置はC点で孔底のモルタルに入り、その後は停止したまま、モルタルが硬化するのをモニターした。水平成分と垂直成分ではメカニカルな部分の構造が違い、温度変化に対する応答が異なるため、ボーリング孔中を降下するときや、モルタルが硬化するときの変化が違っている。

高山の場合は、デジタルデータを光ファイバーで伝送したが、無線ユニットによる伝送の場合は、電波でデジタルデータを伝送できるため、回転するドラムから簡単にデータを取り出せる。地下深部に観測装置を設置する場合、予期せぬ障害が発生する可能性があり、不慮の事態に対応するためにはリアルタイムで観測装置のデータを取り出し、そのデータを監視しながら設置作業を進めることが重要である。

同軸ケーブルでは観測装置を吊り下げることができないため、同軸ケーブルの補強を兼ねて金属製のワイヤーで覆う必要がある。屏風山で採用したこの方式では、観測装置を設置する際、観測装置と長い補強ケーブルを巻いたドラムを一体として扱わなければならないため、作業性が悪い。将来は、ケーブルの補強をカーボンロッドやグラスファイバーなどで行う方式に変更し、荷重に耐えるためのロッドの機能をもつ信号ケーブルを開発したい。この信号線内蔵ロッドであればコネクタで接続しつつボーリング孔に観測装置を降下させることができ、測定装置を設置しやすくなる。

§ 4. 初期応力測定装置

地殻に作用している応力が破壊強度を超えなければ地震は発生しない。地震発生を予測するためには、地下深部に作用している応力の値を知ることが最も重要である。しかしながら、地下深部で応力を測定することは容易ではない。

筆者らは、ボアホール観測装置を開発する過程で、メーカーの協力を得て、低消費電力で作動する高感度の変位センサを開発した。同時に、前記したようにセンサの出力信号を孔底でデジタル化する方法を模索してきた。また、野外における地殻変動観測を行うことを目的

にして低消費電力で作動するデータロガーの開発を進めてきた。これらの技術を統合することで、歪計とデータロガーが一体となった、信号線や電源線がない初期応力測定用のインテリジェント型歪計を開発した〔山内・他(2000)〕。

この初期応力測定装置では、以下のようにして原位置の応力を測定する。

- 1) ボーリング孔の孔底に、小口径のボーリング孔を掘削する。
- 2) 応力測定装置をボーリング孔の孔底にモルタルを用いて設置する。
- 3) モルタルが固まり測定装置と孔底の岩盤との間がカップリングするのを待つ。
- 4) カップリング後に、測定装置を周囲の岩盤とともにコアとして回収する。
- 5) データロガーのデータを取り出し、逆解析から原位置の応力値を求める。

モルタルが固まった後、測定装置の周りの岩盤を、より孔径が大きなコアバーレルで掘削すれば、岩盤から作用している応力が解放され、測定装置を含むコアには水圧しか作用しなくなる。さらに、この測定装置を含むコアを地表に引き上げれば、水圧も含め応力が解放された状態の変形量が観測される。応力測定に関するシステムや工程に関しては松本・他(2000)、松本・他(2001)に述べられている。筆者らが使用している初期応力測定装置の特徴は、測定装置の設置からオーバーコアリングを完了し感度検定を終えるまで、あらかじめプログラムしたサンプリング間隔で岩石のコア内部でコアの変形量を測定できることである。

Fig. 5 は岐阜県恵那郡福岡町で行ったオーバーコアリング前後の記録の例である。福岡町では水平3成分と垂直1成分のインテリジェント型歪計を使用した。従来実施されてきたオーバーコアリングの方法は、設置した計器の周辺のオーバーコアリングを連続して行う方法である。筆者らは、インテリジェント型歪計の上部にある歪計から徐々に、歪計毎に時間差を設けてオーバーコアリングを行う。このため、オーバーコアリングを開始した10時30分頃から記録の乱れとステップ状変化がN164°W, N76°W, N44°E方向、さらに、垂直方向成分の順に生じている。12時30分頃インテリジェント型歪計を岩盤から切り離し、そのまま孔底に静止させ歪計の出力が安定するのを待った。14時30分頃から段階的にインテリジェント型歪計を水で満たしたボーリング孔中から引き上げた。ボーリング孔中の温度変化の影響により分かりにくい、引き上げる段階に見られるステップ状の変化が水深の変化に対応した歪変化である。福岡町に

Fig. 5. Strain and temperature changes measured by cableless intelligent type strainmeter during overcoring in Fukuoka-cho 400 m borehole, Gifu prefecture, Central Japan.

おける初期応力測定の場合は、このときの水深に対する歪変化を用い、温度補正を行って感度検定値とした。ここでは結果を示していないが、通常の場合、オーバーコアリングを行う前の歪と、オーバーコアリング後に孔底に静止させた時の各成分の歪の差を利用し（水圧の差および温度変化の補正を行う）、インバージョンにより初期応力の大きさと方向を求める。この報告では、垂直のボーリング孔を利用して得られた水平成分のデータを解析した。したがって、インバージョンを行う場合、初期応力の方向は水平であると仮定する。解析方法に関しては、Mukai *et al.* (2004) を参照されたい。筆者らは歪計ごとに時間差を設けて各方向における応力解放を行い、そのときの歪変化を記録し、3次元的な応力値の情報を得ようとしている、しかしながら、現時点ではその解析方法は確立していない。この方法が確立した時点で、福岡町のデータを再解析し、初期応力の3次元的な情報を引き出せるようにしたいと考えている。

オーバーコアリング開始前に、孔底で周りの岩盤から受けていた応力状態における歪変化と、コアとして地表に引き上げられ応力解放された状態の歪変化を比較すれば、オーバーコアリング前後の応力解放に対応する歪変化が分かる。実際には、測定装置の周りにはモルタルと岩盤が同心円に近い状態で密着しているため、感度検定を行い、モルタルの影響を取り除く必要がある。筆者らはオーバーコアリングにより得た、歪計を内部に含むコ

アを水圧容器に入れ、加圧してその加圧による歪変化から感度検定値を得るが、この感度検定作業をボーリングの作業現場で行うと、環境温度の変化により加圧する圧力が乱され解析しにくくなる。このため、環境温度がほとんど変化しない最寄りの地殻変動観測点の観測坑道等を感度検定作業に利用する。Fig. 6 がその例で岐阜県吉城郡神岡町の茂住坑道で行った感度検定時の記録である。はじめに加圧して大きく収縮させる。時間をおいて徐々に減圧し、その後、徐々に再加圧する方法をとる。14時30分頃に加圧を完了し減圧後、15時15分頃に再加圧を開始した。この図から分かるように感度検定作業を環境温度が安定している場所で行えば、データの乱れが少なく、精度の高い感度検定結果が得られる。

実際の解析は、既知の静水圧に対する歪変化の大きさと岩盤から受ける応力に対する歪変化の大きさが比例すると仮定し、オーバーコアリングの前後の歪変化から、温度補正を行ってそれぞれの歪計ごとに岩盤から受けていた応力解放に伴って生じた歪変化を求める。その歪変化から、初期応力の方向が水平であると仮定し、インバージョンで初期応力の方向と大きさを求める。この場合、オーバーコアリング時にはインテリジェント型歪計とコアとしての岩盤は同軸であり偏芯がないものとして解析する。

Fig. 7 には和歌山県新宮市で行った初期応力測定の結果を、池田・他 (2001) により得られた水圧破壊法によ

Fig. 6. Strain and temperature changes recorded by cableless intelligent type strainmeter during calibration of its sensitivity just after overcoring in the Mozumi Mine, Central Japan.

る初期応力の測定結果を示す図に加筆した。筆者らが得た結果は大きな黒丸と白丸である。大きさ、方向とも水压破碎法による結果とよく一致する。新宮の場合も、応力解放前後の歪変化と水深に対する歪計の応答特性から、インバージョンで初期応力値と方向を求めた。歪計が岩盤と比較して十分硬いため、今回の加圧検定で十分な結果が得られていると考えている。我々のシステムの場合は数値実験によれば偏芯の影響は最大で10パーセント程度であるが新宮の場合はほとんど同芯のコアが得られている。詳しくは稿を改めて応力測定を中心にした論文で議論する予定である。

§ 5. 地震発生前後に観測された異常な地殻変動

地震発生場所を予測するためには、地震発生に関連した前兆的現象の観測事例を増やすことが基本である。ボアホール式の観測装置で観測した地震発生に関連した前兆的地殻変動の例をFig. 8および、Fig. 9に示す。

Fig. 8 left と Fig. 8 right は、東京大学地震研究所の伊東観測点で観測した、1996年、1997年、および1998年の伊豆半島東方沖の群発地震に関連した傾斜変化 (Fig. 8 left) と最大主歪の変化 (Fig. 8 right) である [石井・他 (1998), 石井・他 (2001a), Ishii *et al.* (2001b)]. 群発地震の始まる前から通常と異なる傾斜変化や歪変化が観測され、群発地震の活動に呼応して、傾斜ベクトルや最大主歪方向が加速的に変化した。そして、傾斜ベク

トルと最大主歪の方向が時期を合わせて北東-南西方向に変化した直後に、群発地震の中で最大の地震が発生した。Okada *et al.* (2000) は上記の3つの伊豆の群発地震以外の群発地震についてもデータを示し比較的大きな群発地震の前には傾斜の前兆的異常変動が伴うことを示した。このように異なる時期の群発地震すべてに同様の変化が記録されたのは注目すべき事実である。

核燃料サイクル開発機構の東濃鉱山近傍では、Fig. 9a ~ 9c で示すような別の事例が観測された [核燃料サイクル開発機構 (2000), King *et al.* (2000)]. 観測点直下の震源距離 53 km 地点で発生した $M=3.9$ の地震に先行して、SN-1 号観測井の地下水位が異常な上昇を示す (Fig. 9c) とともに、近接した 97FT-01 号孔のボアホール地殻活動総合観測装置の歪計で異常な最大せん断歪が観測された (Fig. 9a). このときの歪み主軸の変化の詳細を Fig. 9b に示した。地震発生の数日前から主歪に異常が見られる。Fig. 9c から分かるように、SN-1 号観測井には 97FT-01 号孔に地殻活動総合観測装置が設置された以前の時期にも、地震の発生に先行し、1999年8月の例と同じパターンを示す地下水位の異常な上昇が観測された。この事実は、同様な現象が複数回発生したことを示唆している。ただし、本論文では図示しないが、SN-1 号観測井に近接して SN-3 号観測井があり水位変化の連続観測をしている。しかし、SN-3 号観測井の水位変化を見る限り地震発生と共にステップ状に変化し、SN-

Fig. 7 Top. Location of Shingu drilling site with vertical deformation field in Kii peninsula after the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes [Miyabe (1955)].

Bottom. Profile of the stress magnitude measured by hydro-fracturing method at various depths of Shingu station. Dashed line indicates the lithostatic pressure calculated from the density log data [Ikeda *et al.* (2001)]. Our result obtained by overcoring method is plotted at 500 m depth.

1号観測井のように地震発生の前に上昇することはない。この現象は、地下水流動現象の複雑さを反映しており、SN-1号観測井は異常な地下水位変動が生じる条件を備えている。言い換えれば、せん断歪が加わるとSN-1号観測井の帯水層には異常な圧縮力が作用し、帯水層中の間隙水圧が上昇する構造になっていると推測される。いずれにしても、地下深部のS/N比がよい地殻変動観測点近傍で地震が発生すれば、これらの例のような前兆的地殻変動が観測できるはずである。

東濃鉾山近傍の観測例では、地震の発生に先行して最大せん断歪が地球潮汐による変化より大きな異常を示したにもかかわらず面積歪には異常が見られない。面積歪に異常が生じていたとしても、潮汐変化よりかなり小さい変化である。仮に、97FT-01号孔に1成分の体積歪計が設置されていたとしても、面積変化を伴わなかったことから、異常現象は検知できなかったはずである。気象

庁は東海地震の監視に主として体積歪計を用いているが、情報量が多い多成分構成の観測装置を地殻活動の監視にもっと役立てるべきであろう。

§6. ま と め

筆者らは、降雨の影響がない地下深部で地殻変動や微小地震の観測を行う目的で、地殻活動総合観測装置を開発し、段階的に設置深度を深くしてきた。観測装置の開発過程で、

- 1) 伊豆東方沖の群発地震に先行する傾斜や最大主歪の異常変化を3回の群発地震すべてにおいて観測した。
- 2) 面積歪がなくせん断歪が卓越する地震の前兆的变化を観測した。

これらの事実から、「イベントの発生している領域に十分近いところでノイズの少ない深部ボアホール観測を実施すれば、地震発生に関連した微少な地殻変動が十分

Fig. 8 Left. Time variation of vector diagrams of descending tilt direction obtained from tiltmeters of multi-component borehole instrument at Ito station in Izu peninsula, Japan. The data before and during three earthquake swarms of 1996, 1997 and 1998 are plotted [Ishii *et al.* (2001a)].

Right. Daily change of maximum principal strain (tensional strain) from strainmeters of multi-component borehole instrument at Ito station in Izu peninsula, Japan. The data before and during three earthquake swarms of 1996, 1997 and 1998 are plotted. The data of each day are plotted by shifting in order to clarify the variation [Ishii *et al.* (2001a)].

Fig. 9a

Fig. 9b

Fig. 9c

Fig. 9 a. Groundwater levels observed at SN-1 and 97FT-01 boreholes, and shear and areal strains calculated by the use of records obtained from strainmeters of multi-component borehole instrument in 160 m depth borehole at 97FT-01 station in the period from July 1 to Sep. 30, 1999 [JNC (2000)]. b. Loci of maximum and minimum principal strains obtained from strainmeters of multi-component borehole instrument in 160 m depth borehole at 97FT-01 station nearby the Tono Mine in August, 1999 [JNC (2000)]. c. Groundwater levels observed at SN-1 borehole nearby the Tono Mine in Central Japan, in the period from 30 days before and to 30 days after three earthquakes [JNC (2000)].

検出可能である」とこと「地震発生に関連した地殻変動には面積歪や体積歪には現れないが3成分歪に現れる変動が観測され、地震の前兆変化を観測する場合には体積歪のみの観測では不十分であり、多成分歪観測に変更すべきである」ということが指摘できる。

地殻活動総合観測装置は、年が経つにつれて設置場所が多くなり、徐々に設置深度が深くなってきた。現時点では、1000 mを超える深度に観測装置を設置できる。地下深部のS/N比のよい観測地点が多くなれば、本報告で述べたような前兆的地殻変動の観測事例が増え、地震発生のメカニズムの解析に貢献するはずである。

現時点では、1本の同軸ケーブルで、地殻活動総合観測装置に必要な電源の供給とデジタルデータの双方向通信を行うことができる。多芯の複合ケーブルを省略できたことから地下深部であっても観測装置の設置がしやすくなった。将来は、双方向通信の機能を使用し、必要に応じて観測装置内部の観測用プログラムを入れ替えられるようにしたい。

ボアホールを掘削するためには膨大な経費が必要である。同じボアホール観測孔に複数の観測装置を設置し、鉛直方向のアレイ観測ができれば掘削したボーリング孔を有効に利用できる。近い将来、同一のボアホールで設

置深度を変えて複数の観測装置を設置し、アレイ観測ができる観測システムに発展させたい。

一方、地殻に作用している応力状態をモニターする目的で、電池で作動する初期応力測定用のインテリジェント型歪計を開発してきた。この歪計は外部に信号線や電源線がないため、地下深部であってもオーバーコアリングが行える。この測定装置であれば、

1) 解放歪のインバージョンから初期応力を求めることができる。

2) 非破壊測定であり、同じ地点に地殻活動総合観測装置を設置でき、歪変化を介し応力状態をモニターできる。

筆者らは、初期応力の測定を行った同じ地点に地殻活動総合観測装置を設置し、歪変化を介する応力状態のモニターを開始した。今後は、応力の絶対変化の推移と周辺地域の地殻活動との関連を調査していきたい。原位置における応力値の測定とその絶対変化は、地震予知研究だけでなく、空洞を利用する地下施設の施工、トンネルの掘削現場などにとっても重要な技術である。現場の使用条件に適合した歪計システムを開発し、他の分野においても貢献したい。

謝 辞

岡田義光氏と匿名の査読者および編集委員の鷺谷 威氏には数々の不備な点を指摘して頂き、本文を改善するうえでたいへん有益であった。記して感謝致します。また、多くの方々の協力によりこの開発研究を進めることができた。初期応力測定に関することでは、北海道大学大学院理学研究科の池田隆司教授（独立行政法人防災科学技術研究所在職中）に協力して頂いた。ボーリングの工事に関する技術開発では住鉱コンサルタント株式会社に、測定装置のメカニカルな開発やセンシングの技術開発に関することでは(有)テクノ菅谷、株式会社マコメ研究所、(有)システム技電、アジア通信工業株式会社、および(有)中日電工に協力して頂いた。関係した方々にお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 浅井康広・石井 紘・青木治三・大久保慎人・山内常生, 2003, 東濃におけるボアホールと横坑による3次元多成分アレイ観測および能動実験による地殻変動・地下水研究と間隙弾性論への適用, 地殻変動, 地球ダイナミクスの観測とモデル計算の最近の成果, 今後の課題, 京都大学防災研究所 研究集会(一般)14K-07, 124-131.
- 池田隆司・小村健太郎・飯尾能久・石井 紘・小林洋二・西上欽也・山内常生, 2001, 南海トラフ地震に向けた陸域での地殻応力・歪測定, 地学雑誌, 110, 544-556.
- 石井 紘, 中尾 茂, 松本滋夫, 平田安廣, 1998, ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震の前兆的地殻変動, 地下深部における地殻変動連続観測に向けて研究会集録, 東京大学地震研究所 特定共同研究(B), 4751.
- 石井 紘・山内常生・松本滋夫, 2001a, 最新の地震・地殻変動計測システムによる地震前兆現象の検出, 月刊地球/号外 33, 188-196.
- Ishii, H., T. Yamauchi, S. Matsumoto, Y. Hirata and S. Nakao, 2001b, Development of multi-component borehole instrument for earthquake prediction study, some observed example of precursory and co-seismic phenomena relating to earthquake swarms and application of the instrument for rock mechanics, in "Seismogenic Process Monitoring", ed H. Ogasawara, T. Yanagidani and M. Ando, BALKEMA, 365-377.
- 核燃料サイクル開発機構, 2000, 陸域地下構造フロンティア研究, 平成12年度研究開発課題評価(中間評価)報告書, 評価課題「陸域構造フロンティア研究」, (<http://www.jnc.go.jp/siryou/hyouka/HY000823>).
- King, C., S. Azuma, M. Ohno, Y. Asai, H. Peiming, G. Igarashi and H. Wakita, 2000, In search of earthquake precursors in the water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan, Geophys. J. Int., 143, 469-477.
- 松本滋夫・石井 紘・山内常生・窪田 亮, 2000, 超深度ボーリング孔における初期応力測定のためのオーバーコアリングシステムの開発, 東京大学地震研究所技術報告, 6, 1-9.
- 松本滋夫・石井 紘・山内常生, 2001, 深部ボーリング孔などを利用した初期応力測定の問題点とその原因の検討および改良について, 東京大学地震研究所技術報告, 7, 15-30.
- Miyabe, M., 1955, Vertical earth movement in Nankai district, Bull. Geogr. Survey Inst., 4, 1-14.
- Mukai, A., T. Yamauchi, H. Ishii, S. Matsumoto, 2004, In situ stress measurement by the stress relief technique with a multi-component borehole instrument (submitted to EPS).
- Okada, Y., E., Yamamoto and T., Ohkubo, 2000, Co-swarm and preswarm crustal deformation in the east Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., 105, 681-692.
- 山内常生・山田 守・奥田 隆, 1981, 降雨に対する地殻歪レスポンスの異常と地震発生, 地震 2, 34, 301-310.
- 山内常生, 1981, 降雨に対する地殻歪レスポンスのシミュレーション, 測地学会誌, 27, 40-49.
- Yamauchi, T., 1993, A Simulation of Broad-band Strain Response to Rainfall, Proceedings of CRCM '93, Kobe, December 6-11, 31-35.
- 山内常生・石井 紘・松本滋夫, 2000, 超深度ボアホールにおける初期応力測定のためのインテリジェント回収型歪計の開発, 物理探査学会第102回学術講演論文集, 104-108.