

# 地球科学情報研究部門における地殻変動観測

大谷 竜<sup>1)</sup>・北川有<sup>1)</sup>・小泉尚嗣<sup>1)</sup>・高橋 誠<sup>1)</sup>・松本則夫<sup>1)</sup>・佐藤 努<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

古くから、地震前後で井戸の水位の変動や湧水量、水温・水質の変動が報告されてきました。そこで産業技術総合研究所(以降、産総研と呼ぶ)地質調査総合センター(旧地質調査所)の地球科学情報研究部門では、地震等の地殻活動と地下水変動の関連を解明することを目的に、東海地方を中心に地下水連続観測を1976年以来継続しています。

こうした観測の結果、地震に前後していくつかの観測井で地下水位が特徴的な変動を見せることがわかってきました(例えば、佃, 2000; 佃ほか, 2000)。しかしながら、その変動メカニズムについては未だに不明な点が多いのです。その原因の一つとして、地震に伴う地下水位の変動の大きな要因と考えられる地殻変動が観測井付近でどのように生じているかがわからなかったことがあります。

この10年、GPS(Global Positioning System: 汎地球測位システム)を用いて高精度の測位(位置を測定すること)が比較的容易に実現できるようになってきました(例えば、土屋・辻, 1995)。GPSは従来

の方法と比べ、大きな労力を要せずに精度よく地面の動きを測定することができるので、これを利用して、地震や火山噴火に伴う地殻変動を調べるのに使われるようになってきました(多田ほか, 1997)。

一方、地殻変動を測定するほかの方法として、ボアホール歪計を用いる方法があります。ボアホール歪計は、岩石中の歪(伸縮)を精度よく測定できる機器をボアホール(縦穴)に設置することで、その場所での地殻の歪の測定を行います。降雨などの影響を受けやすいという難点がありますが、一般に、数日より短い現象に対してはGPSより高い精度で測定ができるという利点があります。

地球科学情報研究部門では、従来の東海地方に加えて、平成7年度と8年度に地下水観測井を主とした観測網を、関西地域を中心に展開しました。その際、地下水変動と地殻変動との関係を調べるために、いくつかの地下水観測井にボアホール歪計やGPS等の機器を併設して、地下水や地殻変動の連続測定を継続しています(佃ほか, 1996)。またGPS観測に関しては、国土地理院でも「GEONET」と呼ばれる、全国に1,200点以上からなるGPS連続



第1図  
産総研 地質調査総合センター  
地球科学情報研究部門の地  
下水総合観測点。

1) 産総研 地球科学情報研究部門 地震地下水研究グループ

キーワード: 地震, 地殻変動, 地下水, GPS, ボアホール歪計, ゆっくり地震, 安富観測点



第2図 安富観測点の外観。

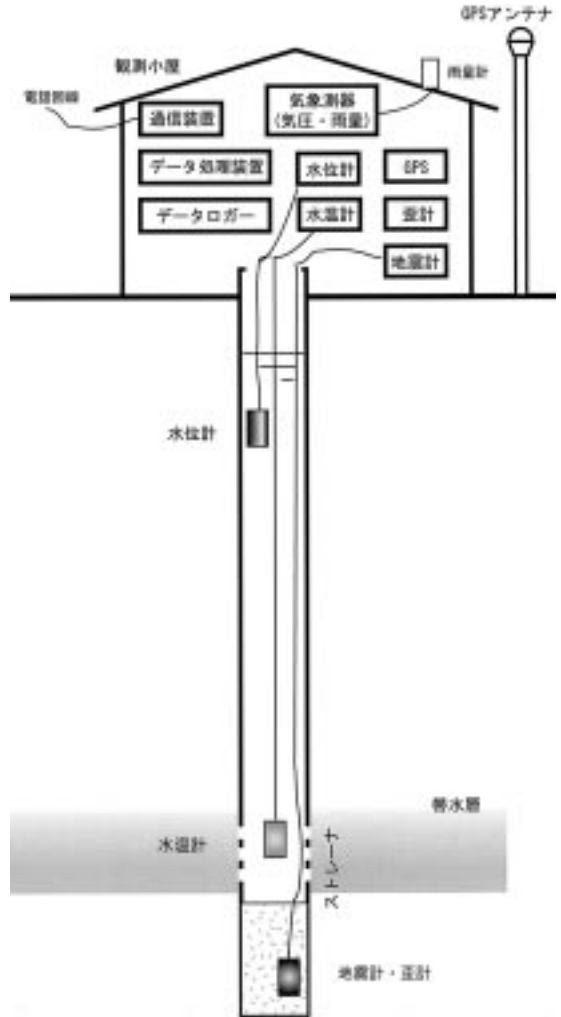
観測網が展開され、日本列島の地面の動きを測定し続けています(例えば、多田ほか、1997)。地球科学情報研究部門ではこれらのデータを用いて、ボアホール歪計やGPS等による様々な機種で観測された地殻変動場を調べることで、地下水変動と地殻変動との関係を明らかにする研究を行っています。

この小文では、地球科学情報研究部門における、GPSとボアホール歪計による地殻変動観測の概要および、具体例として、最近、兵庫県の安富観測点でとらえられた地殻変動の紹介を行います。

## 2. 地球科学情報研究部門におけるGPS・歪観測

GPSとは、アメリカ国防省が開発した、衛星を用いた航法システムのことで、GPSは、地球を周回する複数のGPS衛星から発射される電波を地表のアンテナで受信し、衛星とアンテナの間の距離を測定することで、地上の位置決めを行います。アメリカ国防省が開発したことからわかるように、GPSは、もともとは軍事を目的としたものですが、近年ではカーナビに代表されるように民間にも開放され、幅広い用途に使われています。測地用の精度の高い受信機とアンテナを用いれば、水平方向はmm精度で地上の動きを測ることができます。

第1図に地球科学情報研究部門が開発した地下水観測井の分布を示します。このうち、GPS観測点は、2003年時点で3点(1998年時点では14点)あり、主に近畿地方を中心とした活断層周辺に設置しています。一方、ボアホール歪計は、2003年時点で15点であり、主に活断層沿いに設置しています。



第3図 観測井の構造と観測機器の設置図。

観測点の外観の一例として安富観測点を第2図に示します。地下水観測井がこの敷地内にあり、観測データは、中央やや右よりに見える小屋の中の装置で記録されています。地下水観測のためのボアホール(ボーリング孔)の底には3成分歪計が設置されていて、歪(地面の伸縮)の測定が行われています。中央やや左に見える巨大なつくしのようなものがGPSアンテナのピラーで、てっぺんのドームの中にGPSのアンテナが収納されています。このアンテナで受信された信号は地下のケーブルを通じて、小屋の中に設置されているGPS受信機に転送されています(第3図参照)。

こうして得られたデータは、電話回線等を通じてつくばの産総研地球科学情報研究部門まで転送さ



第4図 Webシステムを用いた解析結果表示の一例。

れ、解析が行われた後にデータサーバに保存されます。これらの結果は、Webを用いて時系列等を表示でき、地下水や地殻変動のモニター等に利用されています(第4図)。データの一部は<http://gxwell.aist.go.jp/GSJ/>で見ることができます。

### 3. ゆっくり地震

大地震は断層が急激にすべることによって生じ、その結果大きな揺れ(地震動)が発生します。ところが、最近の観測から断層は地震の時だけにすべるのではなく、それ以外の時でも揺れを伴うことなく、時々、ゆっくりすべっていることがわかってきました。しかもそのすべりの大きさは、時には、大地震に匹敵するほどの場合もあるのです。つまり、私達が揺れを感じないでいても、“静かな”、“ゆっくり”とした地震が起きていることがわかってきたのです。こうした地震のことをここでは、「ゆっくり地震」と呼ぶことにしましょう。

こうしたゆっくり地震は通常の大地震の発生に密接に関係していると考えられています。そのため、ゆっくり地震がどのように生じているのかを知ることが、将来の大地震の発生を考える上で大変重要なことなのです。また地震前後に見られる地下水の変動は、もしかすると、このようなゆっくり地震の活動を反映しているのかもしれませんが。逆に言えば、地下水の変動を調べ、ほかの観測で得られた結果とあわせることで、ゆっくり地震に関する情報が得られるかもしれません。よって、いろいろな観

測方法で地殻変動を測り、ゆっくり地震に伴う信号を検出することが、大地震の発生を調べる上で重要になってきます。

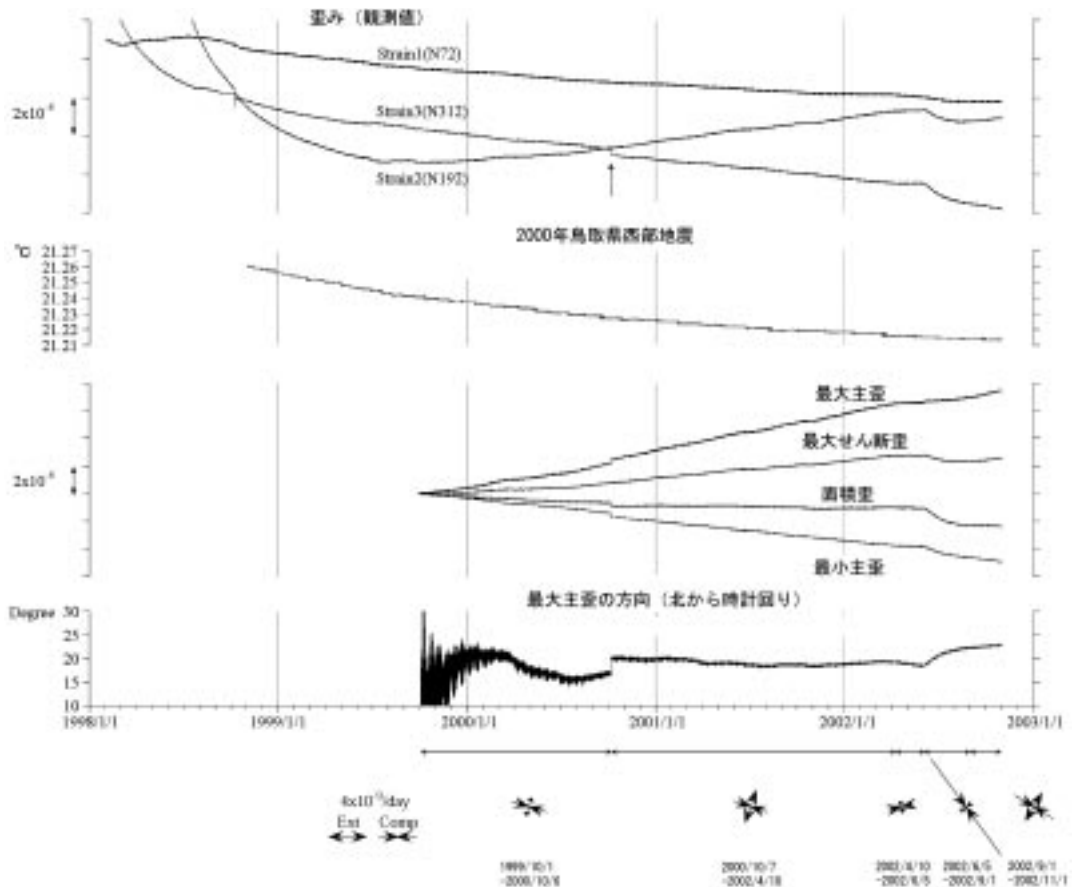
この10年の、特にGPS連続観測網等の観測の充実により、こうしたゆっくり地震が日本でも、海溝沿いの断層で発生しているのが見つかってきました。内陸で起きるゆっくり地震については、いくつかの報告がされてきましたが(多田, 1998; 伊藤・桑原, 1999), その詳細ははっきりとわかっていませんでした。産総研では内陸活断層の周辺に観測点を展開して観測を続けており、安富観測点はその中の代表的な観測点の一つです。

### 4. 安富観測点での事例

兵庫県宍粟郡安富町にある安富観測点(第5図)は山崎断層の近く(断層の北側)にある、地球科学



第5図 (上) 安富観測点(図中で▲), 及び基線を取るのに使用されたつくばGPS観測点(図中で■, 詳しくは本文参照)の位置。(下) 安富観測点(YSTM, 図中で★)と、比較に用いた周囲のGEONETのGPS観測点(図中で●)。薄線は主要断層を示す。主要断層の位置はHyperDPRImapによる。



第6図 安富観測点におけるボアホール3成分歪観測の結果。

情報研究部門の地下水観測点の一つです。そこでは、隣接する3本の観測井による地下水位に加え、ボアホール3成分歪計やGPS等による観測を1998年より継続しています(小泉ほか, 1999; 北川ほか, 2003; 大谷ほか, 2003)。山崎断層系は左横ズレ断層、つまり地震時に、断層面をはさんで向こう側が左方向に動く断層です。長さは約80km、平均すると1,000年で0.3m程度断層が動いて変位(ずれ)が蓄積されます(活断層研究会, 1991)。

安富観測点では1998年に観測を開始しました。第6図に、ボアホール3成分歪計による観測結果を示します(北川ほか(2003)の図を一部改変)。第6図の1番上のグラフは、3成分歪計による生の観測データを示します。3番目と4番目のグラフは、この生データを元にして、主歪解析という解析を行って歪を表した図です。1番下のグラフは、こうして求められた歪の大きさと方向を、矢印に示した期間に

ついてそれぞれ図示したものです。2番目のグラフは、ボアホール3成分歪計観測に影響を与える地中温度を示しています。測器の設置当初は設置による影響で大きく縮んでいますが、1999年半ば以降2002年6月までの全体的ななだらかな変化は、北北東-南南西に伸び、西北西-東南東に縮みの安定した傾向を示しています。これは三角測量等から求められた、東西方向に短縮されている西日本の広域的な変形のパターンとおおまかには一致しています(国土地理院, 1987)。

ところが2002年6月頃より、すべての歪成分において今までにない変化が発生していることがわかります。つまり、今までの東西圧縮とは違って、圧縮が一番大きいのは北西-南東方向になっています。変動量は変化の始まった初期が最も大きく、次第に緩やかになってきて、2002年9月の段階でおおよそ収束しました。2002年6月~9月の累積の歪変



化量は $10^{-6}$ にも及びます。

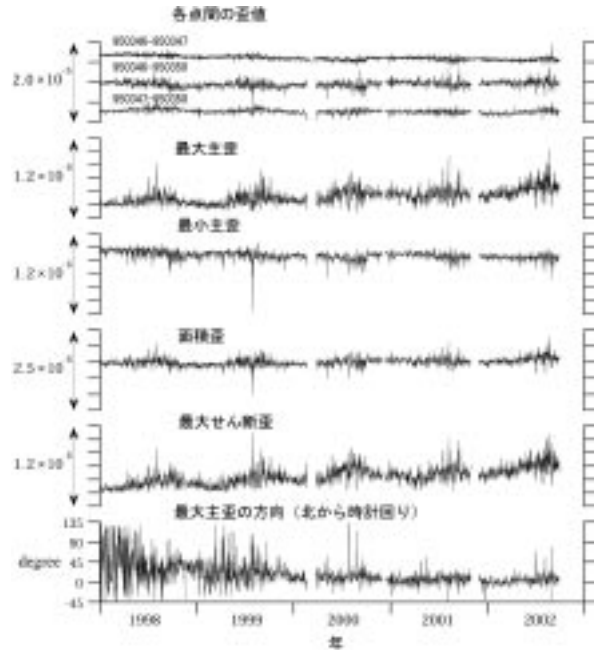
この変化が起きた期間、大きな地震は周囲では起きていません。このことから、これは「ゆっくり地震」の一端を捉えた可能性があります。実際、北川ほか(2003)は、安富観測点近くの山崎断層の一部で、ごく小さな「左横ずれゆっくり地震」が生じると、上記の異常な歪変化を説明できるとしています。そうだとすると、今まであまり見つけていなかった、日本の内陸活断層でのゆっくり地震を新たに見つけたこととなります。

それではほかの観測機器ではこの変化は捉えられているのでしょうか。安富観測点には併設してGPS観測点があります。また安富観測点の周囲には国土地理院のGEONETの観測点がいくつかあります。GPSは歪計とは違って、観測点の歪ではなく、観測点の位置を計測しています(カーナビが車の位置を計測するのと一緒です)。したがって、GPSのデータだけからは、直接ボアホール3成分歪計のデータと比べることはできません。

幸い、安富観測点を囲むように、3つのGEONETの観測点がありますので(場所は第5図参照)、これらの位置の変化のデータを使って、この3点で囲まれる領域の歪を計算することができます。ここでは、国土地理院の定常解析によって得られたGPSによる位置情報データを使って、主歪解析でこの領域の歪を計算した結果を第7図に示します。この図の上から2番目以降の図は、ボアホール3成分歪計の結果の第6図の3番目と4番目のグラフと直接比較することができます。

第7図の結果を見ると、季節変動の影響がみられますが、この点を除けば、2002年6月以降、ボアホール3成分歪計でみられたような、これまでの傾向に比べて著しく異なる非定常的な変動はみられないと言えます。このことから、ボアホール3成分歪計で計測された地殻変動が、周囲のGEONET観測点に影響を及ぼす程の広がりを持つものではないということが言えるでしょう。つまり、現象は局所的なものであることが推察されます。

では安富観測点にあるGPSではどうでしょうか。これは一点しかなく歪を計算することができません。そこで、つくばの国土地理院構内にあるGPS観測点に対する位置の変化を第8図に示します。この図から、水平成分には、直線的な変化の上に、

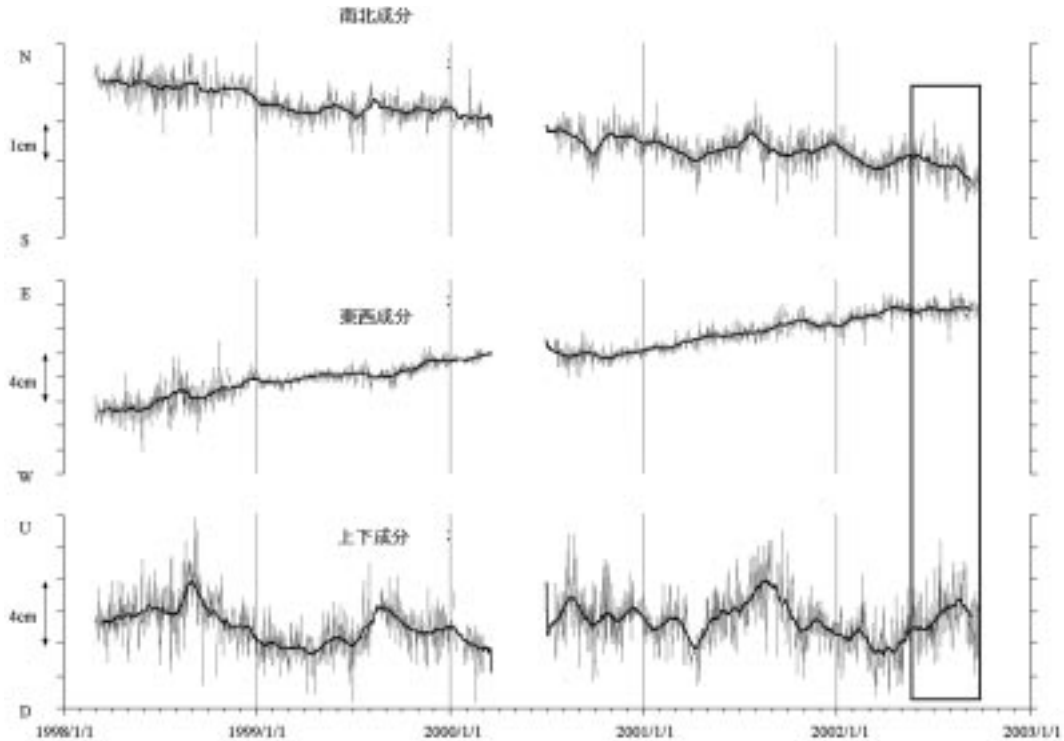


第7図 第5図のGEONETの3点の1日値の位置データを用いた主歪解析の結果。

細かい変動がのっていることがわかります。直線的な変化は、つくば観測点が位置する北アメリカプレートに対して、安富の観測点が位置するアムールプレート(第5図)が東進しているためだと考えられています。この結果、安富はつくばに対して、平均して年間2cm程度近づいてきています。

ボアホール3成分歪計でこれまでにない変動が観測された2002年6月頃について第8図を注目すると、東西成分の傾きがこの時期以降、緩くなっているように見えます。つまり、それ以前に比べて東進速度が若干鈍化している傾向が見えます。つまり、これは見方を変えれば、安富観測点が相対的に西向きに動いていたということです。ここで、山崎断層は左横ズレ断層であることを思い出してください。GPSで観測されたこの東進速度の鈍化は観測点の西への動き、つまり断層の南側に対する北側(安富観測点)の左横ズレで説明可能です。このことは、この時期に山崎断層で「左横ずれのゆっくり地震」が発生した可能性を示し、興味深い結果です。

ただし、第8図をよく見ると、こうした傾きの鈍化は、1999年の中頃や2001年の中頃にも認められ、



第8図 安富GPS観測点のつくばGPS観測点に対する変位。薄線は観測値を、実線は31日の移動平均で平滑化した値を示す。四角で囲った部分については本文参照。

季節変動の一部にすぎない可能性もあります。2002年のこの鈍化が本当に「ゆっくり地震」に伴って生じた変化なのか、あるいは季節的なノイズなのかは、今後、慎重に判断する必要があります。

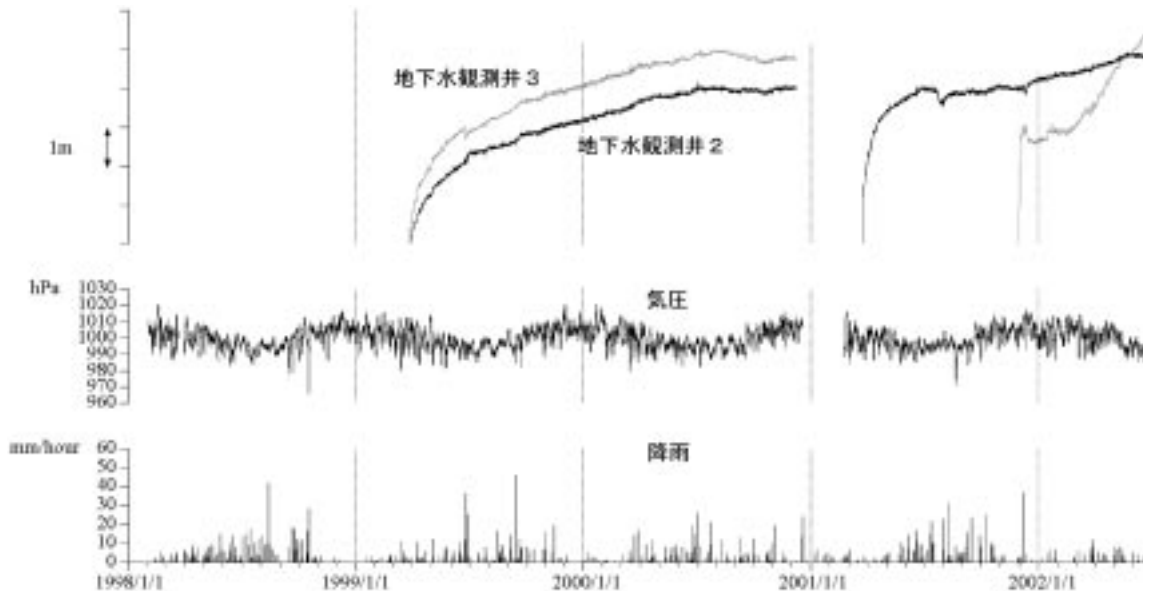
では最後に、同時期に地下水に変化があったかどうかを見てみましょう。第9図は、安富の2つの観測井の地下水位の変動(井戸を密閉しているので実際は水圧)を、気圧と降雨とともに示したものです。両方とも全体的に大きなカーブを描いているのが分かります。これは、この観測井が自噴しており、その水圧の測定のために井戸の密閉を行うと、平衡状態に達するまでに時間がかかるからです。途中、2001年に、観測井2、観測井3ともに調整を行っているため、その間是不連続な変化になっています。これらの影響のために、地殻変動による変化が出ているかどうかを見分けるのは残念ながら難しい状態です。一つ興味深いことに、2002年6月中頃以降は、地下水がこれまでの上昇傾向から低下傾向になっています。ただし、その大きさは、ボアホール3成分歪計の観測から期待される地下

水位変動よりはるかに小さな量で、「ゆっくり地震」に対応しているものかどうか、はっきりとしたことは言えません。

以上の結果について詳しくは、北川ほか(2003)、大谷ほか(2003)を参照して下さい。

## 5. おわりに

このように、今回の事例では、はっきりとした変化があらわれたのはボアホール歪計だけでしたが、いろいろな観測手段を統合することで、地殻変動の規模や変動の特徴を浮かび上がらせていくことができると考えられます。それぞれの観測手法には、固有の強み・弱みがあるので、多様な方法での観測を行うことで、断層活動の全体像を精度よく捉えることが重要です。地球科学情報研究部門では安富観測点のほかにも多くの観測点を活断層周辺に展開して、様々な観測機器での観測を継続しており、今後、「ゆっくり地震」等の現象を検出することで、断層活動の実態が明らかにされること



第9図 安富観測点での2つの観測井戸における地下水観測の結果。水圧変化は水位変化に換算してある。

期待されます。

謝辞：観測点の保守管理には地質調査総合センターの職員をはじめ、国・地方自治体・民間の多くの方々の協力を得ています。また、GEONETのデータは国土地理院から提供を受けました。一部の図の作成に片尾 浩氏のHyperDPRImapを使用しました。記して感謝します。

文 献

伊藤久男・桑原保人(1999)：跡津川断層沿いの歪計で観測されたクリップ現象について、日本地震学会1999年度秋季大会講演予稿集，141p.

活断層研究会(1991)：新編日本の活断層，東京大学出版会，363p.

北川有一・小泉尚嗣・大谷 竜・渡辺邦彦・板場智史(2003)：山崎断層沿いの産業技術総合研究所安富観測点で観測された顕著な地殻歪変化，地震2, 56, 245-254, 2003.

小泉尚嗣・高橋 誠・佃 栄吉・松本則夫(1999)：1999年4月17日の山崎断層の地震(M3.9)前後における地下水位・地殻歪の変化，日本地震学会講演予稿集，1999年度秋季大会，149.

国土地理院(1987)：日本の地殻水平歪，(財)地震予知総合研究振興会，133p.

大谷 竜・北川有一・小泉尚嗣・松本則夫(2003)：ボアホール歪計で観測された非定常的変化のGPSによる検証：産業技術総合研究所地質調査総合センター安富観測点での事例，地質調査研究報告，54, 213-220.

多田 堯・鷲谷 威・宮崎真一(1997)：GPSでみた変動する日本列島，科学，67, 917-927.

多田 堯(1998)：跡津川断層における地殻変動，月刊地球，20, 142-148.

土屋 淳・辻 宏道(1995)：GPS測定の基礎，日本測量協会，275p.

佃 栄吉・高橋誠・佐藤努・松本則夫・伊藤久男(1996)：地質調査所における地震予知地下水観測網-近畿地域の地下水観測網の新設-，地質ニュース，no.505, 11-15.

佃 栄吉(2000)：観測強化地域および特定観測地域における地下水等観測研究，地質調査所月報，51, 391-400.

佃 栄吉・小泉尚嗣・桑原保人(2000)：地震防災対策強化地域及び活断層近傍における地下水等総合観測研究，地質調査所月報，51, 435-445.

OHTANI Ryu, KITAGAWA Yuichi, KOIZUMI Naoji, TAKAHASHI Makoto, MATSUMOTO Norio and SATO Tsutomu (2004)：Crustal Deformation Observation by the Institute of Geoscience.

<受付：2004年2月18日>