

横坑トンネルにおける地殻変動観測

・ ・ 地殻変動連続観測の現状とこれから ・ ・

観測班（地震予知研究センター） 細 善信

1. はじめに

地殻変動観測は、近年国土地理院により日本全国に設置された GEONET（GPS 連続観測システム）や防災科学技術研究所の HINET が地殻変動観測の代表的な手法となりつつあるが、横穴トンネルを利用した地殻変動観測は地震予知のための重要な手段の一つと捉えられ、主に大学の研究者が観測の為に掘削したトンネルや鉱山の廃坑、防空壕跡などを利用して観測を続けている。

観測は気象影響を避けるためトンネルの奥深く天井から滴り落ちる水滴の音しか耳に届かないような閉ざされた暗闇の中にひずみ計や傾斜計などを設置しておこなう。

地殻変動連続観測では研究成果が得られるのは通常5年から10年の期間を要し、観測環境にも起因して一般的に地味な仕事と捉えられがちである。



写真1：鉱山跡を利用した観測坑（紀州）

そして、時代と共に研究に興味を示す若い研究者が少なくなり、大学が行なっている横穴トンネルでの地殻変動連続観測は現状のままで継続は難しく、観測施設の質的な評価など見直しを余儀なくされつつある。

このように厳しい現状ではあるが、近畿地方周辺での地殻変動連続観測が注目されている。2003年初め頃から地震観測グループにより丹波山地周辺での地震発生数が減少する地震活動の静穏化が報告され、近畿地方に展開するひずみ計による観測でも時期を同じくして歪速度の異常変化が検出された。また、近畿地方の GEONET 観測点の歪速度変化の解析でも調和的な結果が得られた。静穏化と共にひずみ変化は今も続き地殻変動連続観測に対しての評価が変わりつつある。このように異常変動の検出やスロースリップイベントの検出、巨大地震の超長周期の地震に伴うひずみ変化を捉えるひずみ地震計としての活用など地殻変動連続観測に対する期待が高まりつつある。さらに、新たに開発された簡易歪計を用いて近い将来発生するといわれている南海地震に関連したフィリピン海プレートのプレート境界で発生する深部低周波微動やスロースリップイベントなどの変動を捉える目的で観測を始めた。

長年携わってきた横穴トンネルに於ける地殻変動連続観測と新たに開発された簡易歪計（通称：わっぱ）の設置・観測に伴う技術的な問題などを報告する。

2. 地殻変動連続観測の概要

京都大学防災研究所地震予知研究センターが行なっている地殻変動連続観測は観測施設ごとに観測開始時期は異なるが、当初の計画では連続観測による歪・傾斜の経年変化や地球潮汐の観測、地震に関連した異常変動の検出などを目的として続けてきた。観測研究を続ける中で観測施設の評価や研究目的の検討がなされ現在では図 1 のような 21 観測点配置となっている。

それぞれの地域により目的は異なり、近畿北部に展開する観測では内陸地震発生に関連した歪変化の検出、紀伊半島周辺では来るべき南海地震に関連した地殻変動（歪）への対応ならびに短期的スローリップ、深部低周波微動の検出、上宝、北陸地域での観測では歪集中帯にお

ける歪変化の観測、宿毛を含む九州地域に於ける観測では豊後水道で発生する短期的スローリップならびに深部低周波微動の検出や日向灘で発生する大地震に関連した地殻変動の検出を目的としている。また、安富観測室では高速道路の下に山崎断層を跨ぐように観測坑を掘削し日々断層の動きを監視している。

これら観測点の維持管理については、近畿北陸地域は宇治ならびに上宝観測所、阿武山観測所、逢坂山観測所、屯鶴峰観測所に所属する教員・技術職員、九州地域と四国宿毛観測点は宮崎観測所の教員・技術職員がおこなっている。

主な観測点の観測坑道ならびに計器配置図を図 2～7 に示す。

観測坑道図：E はひずみ計、
W は水管傾斜計を表す。



図 1：地殻変動連続観測点配置図

（地震予知研究センターパンフレットより）

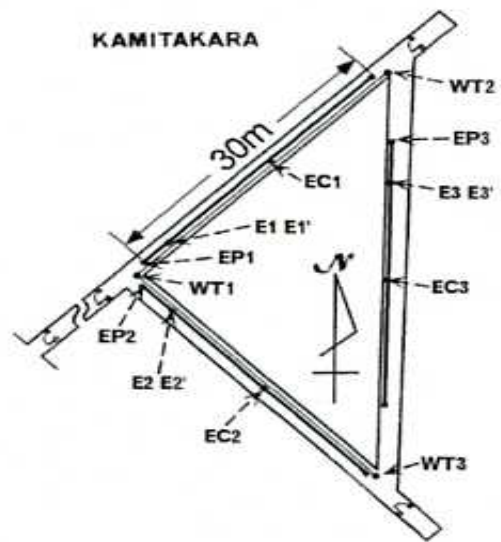


図 2：上宝・蔵柱観測室

位置：36° 16.8′ N 137° 19.6′ E

標高：800m 横坑の平均かぶり：40m



図 3：阿武山観測室

位置： $34^{\circ} 52.6' N$ $135^{\circ} 34.4' E$
 標高：190m 横坑の平均かぶり：40m

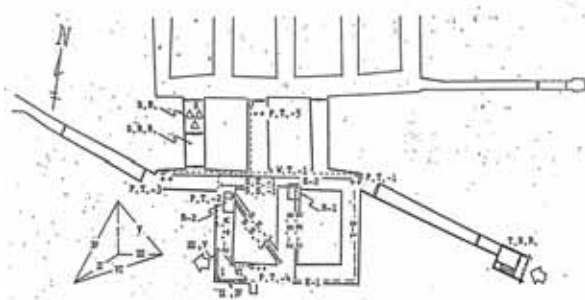


図 5：屯鶴峯観測室

位置： $34^{\circ} 32.3' N$ $135^{\circ} 49.9' E$
 標高：147m 横坑の平均かぶり：30m

図で示した屯鶴峯、紀州を除く観測室は地殻変動観測を目的として掘削した坑道であり、坑道内には伸縮計、水管傾斜計、振子型傾斜計、気象観測計器、地下水位計などの各種計器と共に地震計なども設置されている。他の観測室においても同様に計器が設置されているが、廃坑となった鉱山のトンネルや防空壕跡などを利用している。図 7 の紀州観測室のように旧鉱山の鉱石採掘跡の坑道などでは観測坑道に制約があり、最適な計器配置とはならない。

OSK (Osakayama)

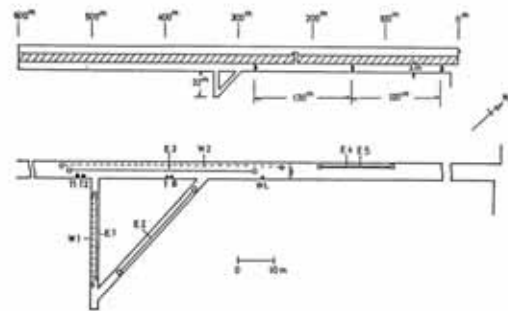


図 4：逢坂山観測室

位置： $34^{\circ} 59.6' N$ $135^{\circ} 51.5' E$
 標高：150m 横坑の平均かぶり：50m

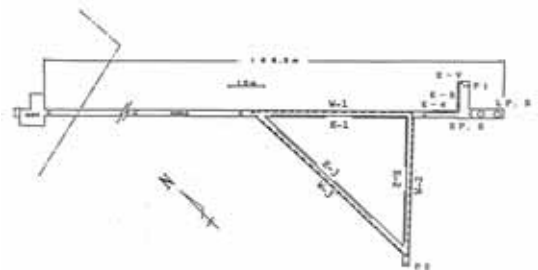


図 6：宮崎観測室

位置： $31^{\circ} 48.3' N$ $131^{\circ} 26.1' E$
 標高：13m 横坑の平均かぶり：60m

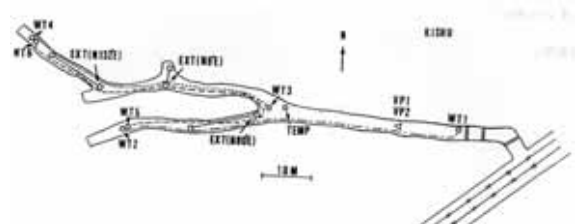


図 7：紀州観測室

位置： $33^{\circ} 51.7' N$ $135^{\circ} 53.6' E$
 標高：70m 横坑の平均かぶり：80m

3. 観測機器の改良

気象影響の少ないトンネルでの地殻変動観測には、傾斜計やひずみ計などが用いられる。傾斜計は、2つの計測水槽を数m～数10mの水管でつないだ水管傾斜計が用いられ、ひずみ計は、基準尺として熱膨張係数の少ないスーパーインバールや溶融石英管などを用い、トンネルの形状にあわせて設置される。近年、地殻変動観測や地震観測で使用する観測機器は既製品や外注により製作された計測装置が多く使われるようになったが、観測を続けている21観測点でのひずみ計や傾斜計などの変位センサーなどを取り付ける計測装置の多くは、我々の大先輩技官がそれぞれの取り付け場所に合わせた図面をもとに熟練した高度な技術により工作室でひとつひとつの部品を手作りし、精密に組み上げた計測装置が使われている。坑道内は湿度が高く過酷な環境ゆえ、変位センサーとして使用している差動トランスや電気回路などに不具合が生じる事はあるが、手作りの計測装置は長年の使用にも関わらず寸分の狂いも無く働き続けてくれている。

しかし、手作りの計測装置ゆえ部品の取替えなどで苦勞する面も多々ある。精密に作られた装置は余分なスペースなど殆んどなく職人技があちこちに隠されている。センサーひとつ取り替えるにもパズルのように組み上げられた部品をひとつひとつ取り外し、また組み戻す作業をなくてはならず、坑道の中は暗く狭いスペースでの作業でもあり経験を要する。

これまで長く観測を続けているが、それぞれの観測施設では観測に関わる研究者独自で考案、製作したセンサーやアンプなどが使用され、観測方法やデータ取得については統一化されていなかった。これらの問題についての検討をおこない、連続観測を続ける観測点においてセンサー、アンプ、データ収録装置のロガーなどを同一規格化し、良質なデータ取得とノイズ低減などの改良作業などをおこなっている。

改良に用いるセンサー・ロガー等は、いずれも地震予知研究センターの地殻変動連続観測グループが長年の経験にもとづいた仕様で製作される特注品である。差動トランスは坑道内設置用として防水加工などを施し、寸法を従来から使用していた輸入品と合わせている。

センサー、ロガー等を以下に示す。



写真2：水管傾斜計センサー部



写真3：ひずみ計センサー部

- センサー：新光電機株式会社製 1591-9D形差動変圧器 (K4-21344)
- アンプ：新光電機株式会社製 #1050-9D形LVDT用変位計カード
- データ収録装置：高精度記録収録システム データ・ロガー Model RL-4220
(エースポイントシステムズ株式会社との共同開発による)

最近施工されたひとつの例として蔵柱観測室の伸縮計改良作業を報告する。ひずみ計はセンサーとして差動トランスを用い観測を続けているが、従来測定精度を検証する目的で石英管の測定端に向き合う形の2個の Schaevitz050HR 差動トランスで観測をおこなっていた。長期に亘る観測の結果、精度検証が得られた事と差動トランス2個による互いの干渉の問題も考えられることから、センサーは1個とし差動トランスならびにアンプを新光電機製「1591-9D形」、「#1050LVDT変位計カード」への取替えをおこない、アンプは電磁シールドするため蓋付き鉄箱に入れる改善もおこなった。また、ひずみ計には中間点にマグネセンサー検出装置も取り付けられていたが、変位を計測する為の板バネによる石英管への負荷があり取り外した。

3成分についてこれらの改良作業をおこなった結果ノイズも低減され良質なデータが得られるようになった。



写真 4：改良前取り付け状況



写真 5：改良後の差動トランスとアンプ



写真 6：マグネセンサー計測装置と板バネ矢印の接続部分を切り離す



写真 7：アンプ収納用鉄箱

4. 観測結果

連続観測から得られた近畿地方周辺における 2003 年始めからのひずみ速度変化と同時期の地震活動の静穏化と GEONET 観測点の基線長変化を図 8～10 で示す。

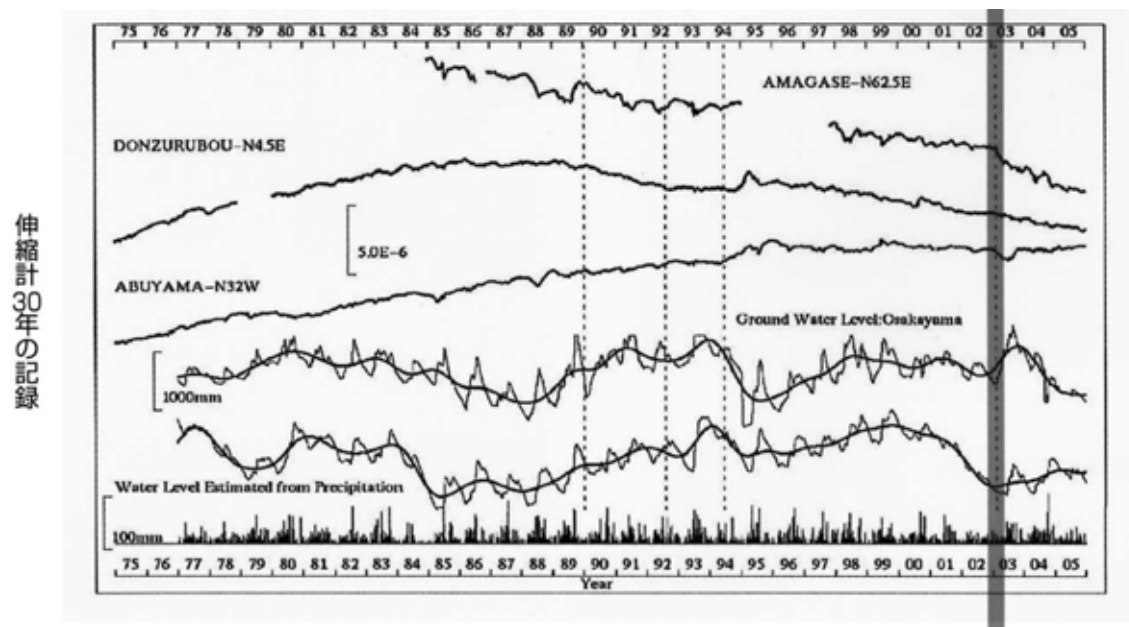


図 8：過去 30 年の天ヶ瀬、屯鶴峯、阿武山、逢坂山観測室のひずみ変化
(森井他：2006)

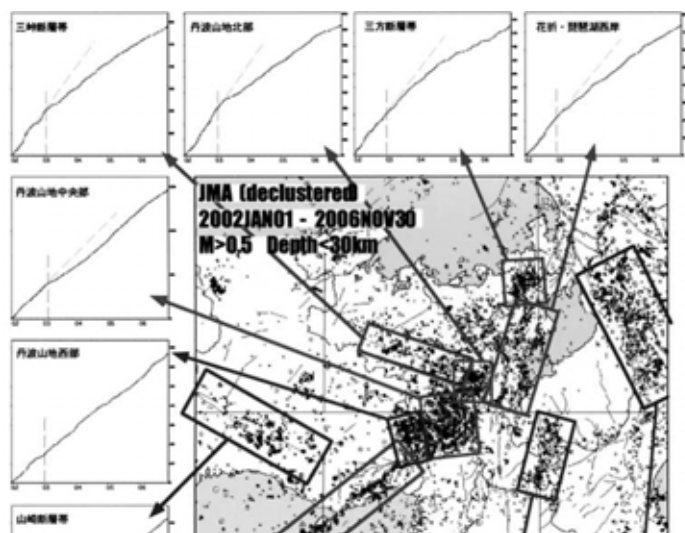


図 9：丹波山地の静穏化（片尾他：2006）
ひずみ変化、地震活動の静穏化、GPS の基線長変化がほぼ同じ時期から始まり異常変動は現在も継続している。

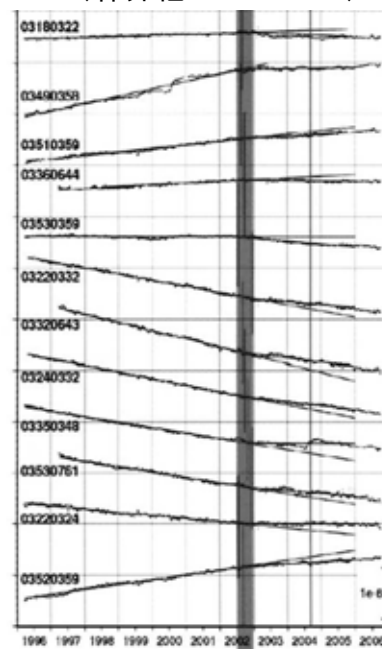


図 10：GPS データの
基線長変化（大谷：2006）

宿毛観測室では図 11 で示すように豊後水道で発生したスロースリップイベントが

ひずみ計で検出され報告されている。また、ひずみ計は振り子式の地震計では検知出来ない超長周期の地震に伴うひずみ変化を捉える事が出来る。天ヶ瀬観測室で捉えられた2004年12月に発生したスマトラ地震のひずみ変位を図12で示す。

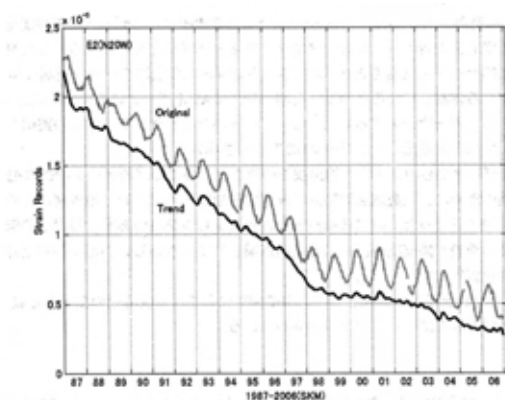


図 豊後水道で推定された等間隔3回のスロースリップ (91年、97年、03年)

図 11：宿毛観測室で観測された
スロースリップイベント
(寺石他：2007)

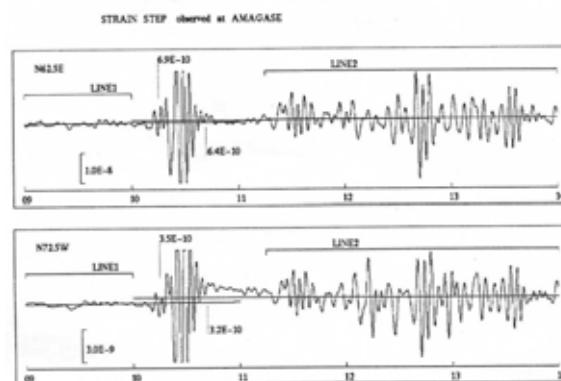


図 12：天ヶ瀬観測室で記録されたスマトラ地震のひずみ計記録
(森井：2004)

5. 簡易ひずみ計（通称：わっぱ）

ひずみ観測は高感度・高精度を維持するため数mから数10mの長さのスーパーインバーや石英管などの基準尺を用い横穴トンネルで観測をおこなう。また数百メートル掘削した深部ボアホールなどで観測がおこなわれるが、設置・観測は大掛かりとなり多額の費用も要する。このため多点観測やアレー観測の展開が困難となり面的な多くの情報を得る事が難しい。

既存の坑道を利用し、設置が簡易で比較的経費がかからず、多点観測やアレー観測が可能となる短スパンひずみ計の開発を試み観測を始めている。簡易ひずみ計の開発と設置に伴う技術的な問題について報告する。

地震予知研究センター 尾上謙介助教により開発・試作された簡易ひずみ計（通称わっぱ）は、メカニカル拡大システムを用いることにより基準尺を出来るだけ短くして、設置が容易で可搬型のコンパクトなシステムながら既存のひずみ計と同等の感度を得る事ができる。

試作したシステムの概要は厚さ10mm、幅10cm、直径75cmのステンレス製の円筒と基準尺のスーパーインバー棒で構成され、写真8のように円筒の内壁の



写真 8：尾上式簡易歪計（試作）

一点に固定端となる台座を溶接し、中心を通る直径の他端にセンサー部を固定する台

座を溶接、両端をスーパーインバーで繋ぎ変位を測定する構造になっている。コンパクトな構造ゆえ基準尺が70cm程度と短く、変位センサーとして Schaevitz050HR 差動トランスを用いているが、従来の長スパンひずみ計と同等の高感度・高精度のひずみ変位が得られるよう、センサー部には写真9で示す石井等により開発されたメカニカル拡大システムを導入している。用いたシステムは16倍に変位を拡大でき、試作のひずみ計では約11m程度の長さのひずみ計と同等の変位の検出が期待できる。



写真9：メカニカル拡大システム

この試作機を従来のひずみ計と比較するため、逢坂山観測室坑内に設置することとし、既設のひずみ計に比較的近い図13に示す黒丸地点に約2mの深さの穴を手堀で掘削して、硬い頁岩層の岩盤に固定した。

地下深く掘削すると水圧による湧水は避けられないが、止水対策として底面と壁面は防水モルタルセメントで塗り固めた。しかしセメントが固まるまでの間、水圧により壁面のあちこちから水が染み出す。止水には1分急結セメントを充填し対策を講じた。

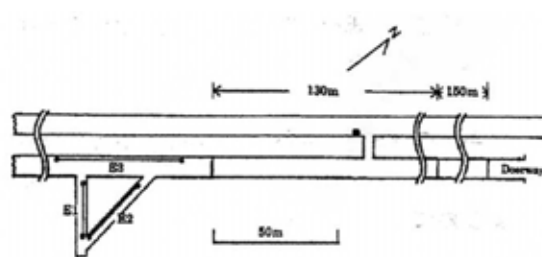


図13：簡易ひずみ計設置場所（黒丸位置）

ひずみセンサーとなる円筒の外壁と周囲の岩盤とを固着させる事が重要であるが、固着にはポルトランドセメント1、水0.5、ジブカル（膨張剤）0.07の配合比率の膨張セメントを用いた。

写真10に設置状況、図14に2006年2月7日から15日までの観測記録を示す。SE-3が簡易ひずみ計であるが、既設のひずみ計E-1～3と同じように潮汐変動を記録する事が確認出来た。



写真10：設置したひずみ計

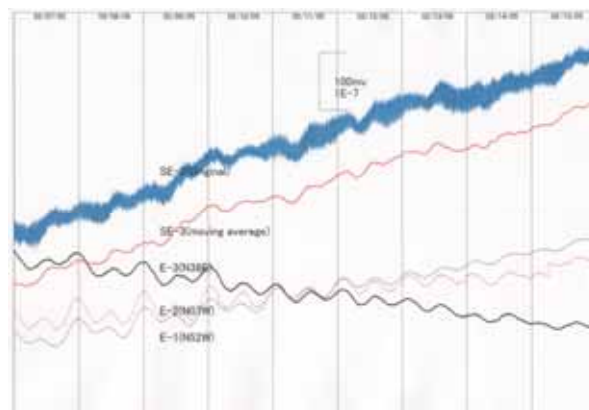


図14：2006年2月7日～15日までの観測記録

6. 三成分簡易ひずみ計

一成分短スパンひずみ計により潮汐変動や地震波の記録が捉えられたことを機に三成分ひずみ計が製作された。システムの概要は前回同様直径75cmのステンレス製の円筒型であるが高さを2倍の20cmとし、3方向の基準尺の拡大システムには石井等が開発した高感度の40倍メカニカル拡大システムを使用し、差動トランスならびにアンプは新光電機製「1591-9D形」、「#1050LVDT変位計カード」を使用している。データはロガー（白山工業、LS3350）に収録する。前回同様既設のひずみ計と比較する為、逢坂山観測所に設置していた一成分ひずみ計を取り外し、更に60cm程度掘り下げて岩盤内にしっかりと固着させた。固着には前回と同様にジブカルを配合した膨張セメントを用いた。設置状況を写真11と12に示す。

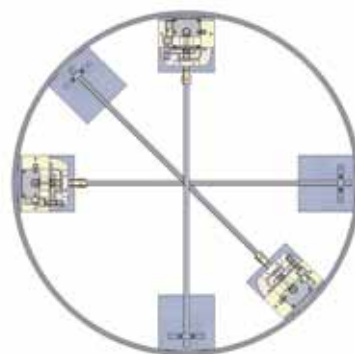


図15：三成分ひずみ計の概観

（作図：高橋）



写真11：掘削穴へのひずみ計の設置



写真12：ひずみ計設置状況

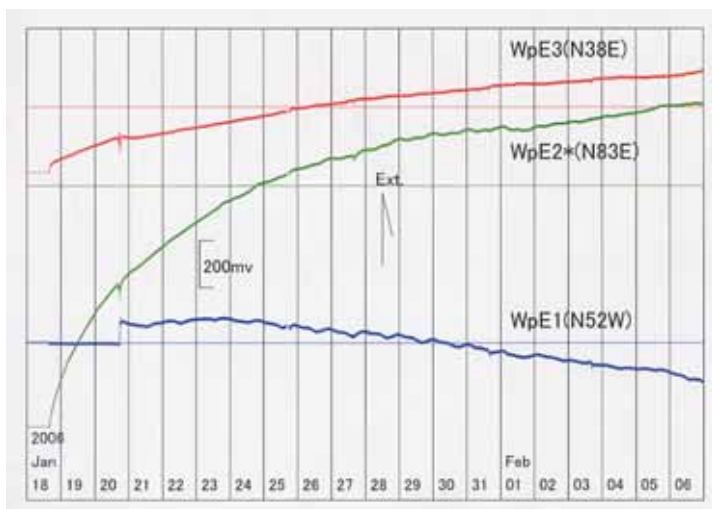


図16：三成分の観測記録（Wpはわっぱの略称）

ひずみ計を岩盤と固着させた5日後の2006年1月18日から観測を開始した。観測開始から2月6日までの記録を図16に示す。設置の影響による伸びや縮みのドリフトはあるが、一週間後ぐらいからは三成分とも潮汐変動を記録している。

7. 高尾トンネルにおける簡易ひずみ計によるひずみ観測

地震観測やボアホール型による地殻変動観測で紀伊半島から四国にかけてのフィリピン海プレートのプレート境界で発生する深部低周波微動やスロースリップイベントなどが防災科学技術研究所などの観測で発見され報告されている。三成分簡易ひずみ計による観測で深部低周波微動やスロースリップなどの検出を目的として、和歌山県や奈良県、三重県などで観測点調査をおこなった。和歌山県田辺市役所より新トンネル建設により現在使われていない古いトンネルが田辺市中辺路町(図 17+印位置)に存在するとの情報が得られた。写真 13 に示す高尾トンネルは約 100 年前に掘られた林道トンネルで、図 18 に示すように総延長 550 m、トンネル幅は約 3.7 m、高さ約 3.9 m、中間付近での山体かぶりは 200 m あり、地殻変動観測には打ってつけのトンネルであることがわかった。トンネル管理者の了解を得て、かぶりの深い中間点付近に三成分簡易ひずみ計の設置を定め準備を始めた。

ひずみ計は坑道床面から直径 1 m、深さ約 2 m の観測坑に設置する計画である。逢坂山観測室での設置・観測の経験を踏まえ、掘削作業は地元の建設業者に依頼した。

硬い岩盤のため直径 1 m の穴を深さ約 2 m まで掘り下げることが困難で、重機による掘り下げをおこなった。このため写真 14 で示すように上部が大きく広がった穴となっている。ひずみ計と岩盤の隙間が少なく固着が確実となるよう、さらに直径 80 cm、深さを円筒と同じ約 50 cm まで掘り下げた。写真 15 に示すように、わっぱのサイズに合わせ周りの岩盤への損傷を少なくするよう削岩機と手堀により作業を進めた。



図 17：高尾トンネル位置図



写真 13：高尾トンネル

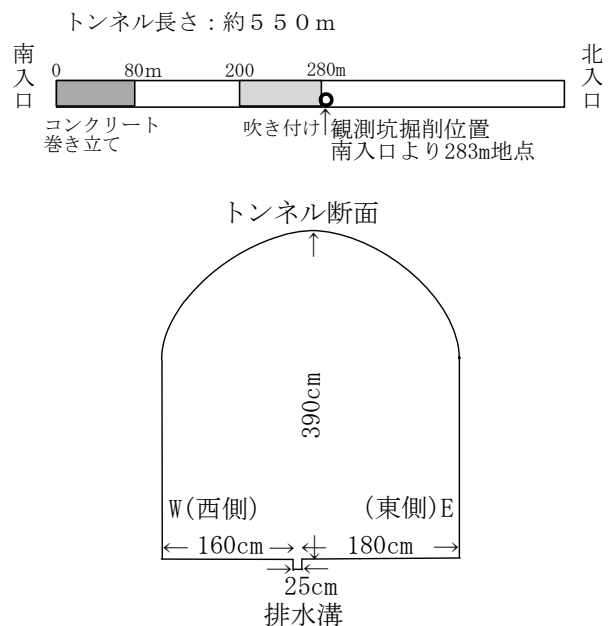


図 18：高尾トンネル坑道図



写真 14：観測坑



写真 15：ひずみ計設置穴

観測坑の上部約 2 m に防水の為マンホールを 2 段重ねにしてトンネル床面から 10 c m 程出るように積み上げ (写真 16)、外側の隙間は掘り起こした岩石などで埋め戻した。

地下深くの場所で岩盤を掘削すると湧き水があちこちからかなりの圧力で噴き出してくる。ひずみ計設置の為に掘り下げた底面は写真 17 に示す防水セメントで水止めをおこなった。ひずみ計センサーとなるステンレス製円筒と岩盤との固着には逢坂山での作業と同様に、ポルトランドセメント 1、水 0.5、ジブカル（膨張剤）0.07 の配合比率の膨張セメントを隙間に流し込んだ。



写真 16：マンホール



写真 17：防水セメント

防水セメントや膨張セメントで湧き出す水の水道（みずみち）を遮断しても、地下深くでは湧き出す水を遮断する事が出来ない。あちこちから湧き出す水には逢坂山での経験を踏まえ急結セメントで押さえ込む方法で水を止める作業を進めた。底面と円筒周りからの湧き出す水を押さえ込むと水はより上昇し、マンホールの内側からもじわじわと染み出してきた。同様に急結セメントで水止め作業をおこなったが、セメントで塗り固めた場所もマンホールの内側も完全に水を止める事はなかなか出来なかった。

湧き水との格闘でかなりの時間と労力を費やしたが、写真 18 で示す速乾防水用樹脂モルタルをコンクリート面やマンホールの内面とに塗り固める事によりほぼ確実に水を止める事が出来た。速乾防水用樹脂モルタルはホームセンターなどで買い求める事ができる。



写真 18：防水用樹脂モルタルと棕櫚刷毛

ひずみ計センサーの設置作業を写真 19 で示す。

写真 20 で示すように直径 75 cm、深さ 2 m の狭いスペースでの作業には経験と技術を要する。

設置したひずみ計を写真 21 に示す。センサーは 70 cm のスーパーインボール棒と 40 倍の石井式メカニカル拡大システム、新光電機社製 1591-9D 形差動トランス、#1050 LVDT 変位計カード（アンプ）で構成されている。

データ収録にはロガー（白山工業、LS3350）を使用し、ノートパソコンとの接続で 1 秒サンプリングの観測データを収録している。マンホール周辺の状況を写真 22 に示す。

ひずみ計を設置しているトンネル中央部付近は地表からのかぶりが約 200 m あり気圧の影響を殆んど受けないが、トンネルの南北入り口には扉などなく風通しも良く坑内の温度変化が大きい。外気の影響を避けるため、北入り口と南入り口から約 60 m 入った 2 地点に丸太や鉄パイプなど組み合わせた間仕切りを取り付けブルーシートと発泡スチロールで塞ぎ外気の流入を止める作業をおこなった。また、マンホールの中は、梯子を利用して空間を開けた 3 枚の発泡スチロール板と鉄板で温度変化を受けないような対策も施した。

このような作業をする事によりトンネル中央付近での温度変化は年間で約 1～2 度前後に抑えられ、マンホールの中は 0.5 度以下に抑える事が出来た。

間仕切り作業を写真 23、24 で示す。



写真 20：狭いスペースでの
取り付け作業



写真 19：円筒設置



写真 21：三成分ひずみ計と
塗り固めた防水樹脂

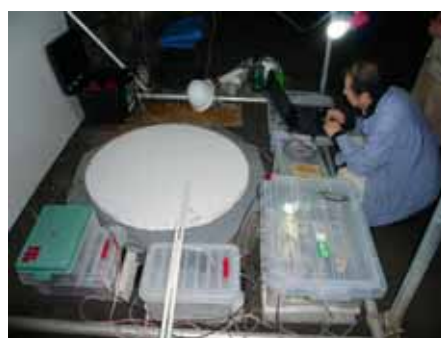


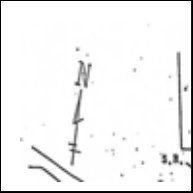
写真 22：データ収録



写真 23：北入り口



写真 24：南入り口



高尾観測室では観測を2007年4月下旬から始めている。2007年8月1日から20日までの観測記録を図19に示す。

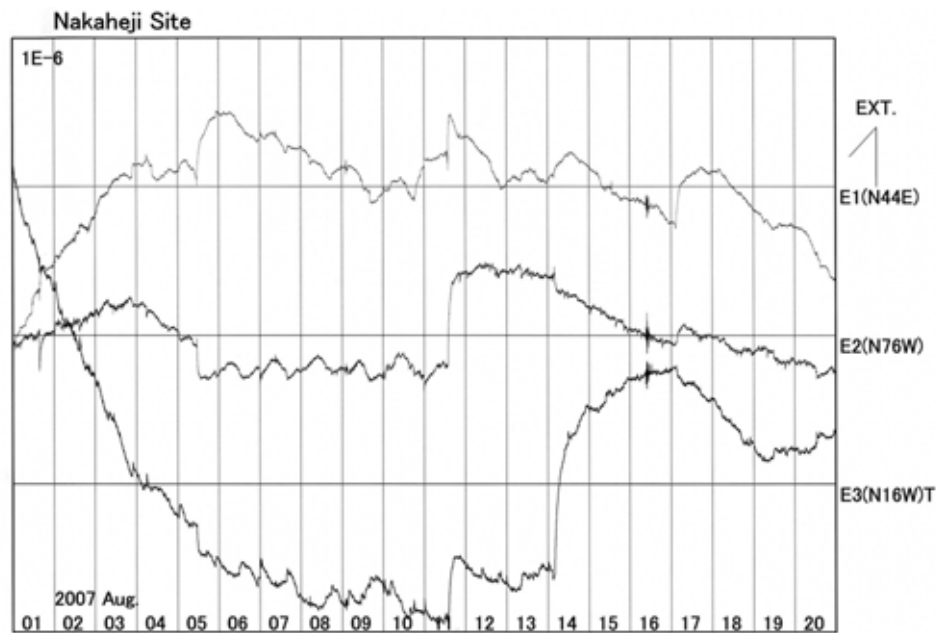


図19：中辺路高尾トンネルひずみ記録、2007. 8. 1－20

8. まとめ

横穴トンネルでの地殻変動連続観測は一般的に気象擾乱などの影響を受けやすく、長期に亘る観測では安定性を欠く事が多く改善が求められてきた。地震予知研究センター地殻変動連続観測グループではこれらの問題に対し観測機器の改良によりノイズレベルを下げ、観測記録の質を高めつつある。夫々の観測施設の質の評価もおこない更にレベルの高い観測を目指している。また、大学がおこなっている全国のひずみ計や傾斜計などの地殻変動連続観測をネットワーク化し「全国地殻変動データベース」上にリアルタイムで接続し、研究者に配信する計画も進められている。しかし、はじめにでも述べたように地震予知研究センター地殻変動連続観測は観測研究に従事する研究者と観測を支援する技術者が定年退職するなど人材不足のピンチに直面しているこれまで述べてきたような地殻変動連続観測に興味を持っていただきこのプロジェクトへの参加と技術支援を切に望む次第である。

参考文献

- 1) 森井亙・重富國宏・尾上謙介・中村佳重郎大谷文夫・細善信・和田安男：近畿地方の最近の地殻変動について 京都大学防災研究所年報、第48号、B、2005、pp197-202
- 2) 尾上謙介・松尾成光・細善信・高橋輝雄・石井紘：簡易三成分ひずみ計 京都大学防災研究所年報、第49号、B、2006、pp263-268
- 3) 和田安男：上宝観測所における地殻変動連続観測 京都大学防災研究所技術室報告、第8号、2006、pp1-11