

横坑定常観測と地震予知

古澤 保

要旨

地震予知を目的にした京都大学，特に天ヶ瀬，宮崎における地殻変動連続観測について述べる。

キーワード：地震予知，地殻変動連続観測，伸縮計，歪変動

1. はじめに

昭和38年4月に地すべり部門の助手として採用され，高田理夫先生とともに地震予知計測部門，地かく変動部門と変わり，平成2年からは地震予知研究センターに所属して，通算40年にわたり防災研究所にお世話になりました。その間，主として横坑観測室での連続観測，中でも地殻変動連続観測，に従事してきました。横坑観測の性質から小回りが利かないため，私の先輩である田中寅夫先生のように地中から宇宙へ羽ばたくこともできず，観測を重視された諸先生方が築き上げられた「観測の京大」のブランドを背負って続けてきました地震予知を目的にした地殻変動連続観測について述べたいと思います。

2. 京都大学における地殻変動連続観測

京都大学における地殻変動観測の歴史は古く，1910年に志田先生が上賀茂観測所で水平振子傾斜計による地球潮汐の観測を開始されて以来90年以上になる。

伸縮計を用いた地殻歪の観測は，1941年に佐々憲三先生によって考案された，いわゆる佐々式伸縮計による観測が最初であり，その後小沢先生開発の棒型伸縮計による観測へ引き継がれていった。

地殻変動観測は温度，気圧，降雨等の気象変化

による擾乱を避けるため，鉱山の坑道内に計器を設置して行われていたが，1947年に旧逢坂山トンネルを借用した観測室が創設され，本格的に連続観測が開始された。その後も鉱山，防空壕，発電所の調査坑等を利用した観測点が広く展開されていった。当初，これらの観測は「地球及び地殻の剛性」の研究を目的にした地球潮汐の観測を主に行われていたが，次第に地震前の微小な地殻歪・傾斜の変化を捉える地震予知を目的とする観測が重視されるようになった。有名な1943年の鳥取地震の際の生野で得られた異常傾斜変動については，田中寅夫先生によって記録が示されている(田中，1999)。1952年の吉野地震の前には逢坂山と井手の2観測点の伸縮計で異常歪が観測されている(小沢，1956，Takada，1959)。これらの観測点は鉱山の廃坑等に伴い撤去されることもあったが，地震予知計画の発足前に既に約20点の観測点で連続観測が行われていた。防災研究所では，私が就職したころは地震観測の定常観測は行われておらず，地震予知計画の実施に向けて微小地震観測点の準備段階であり，高田先生の井手以外は地殻変動部門の田中豊・田中寅夫先生によって多くの観測点で地殻変動観測が行われていた。その後井手観測室の閉鎖に伴い，高田先生により1967年に岩倉，天ヶ瀬，屯鶴峯の3観測室が相次いで開設され，筆者らも地殻変動観測に直接従事することになった。

過去における地殻変動連続観測による地震前兆現象の発見は、その後の国家事業としての地震予知研究計画の推進の大きな指標となった。しかしながら、その後の研究から必ずしも前兆現象発見は、期待されるようには観測されなかった。これは、観測環境（地表面からの深さ、坑道の形状、地質等）をあまり考慮せずに廃坑、防空壕跡、廃棄坑道を利用して観測点の拡大を行ったため、個々の観測点での観測計器の相異、気温、降雨などの外的要因による影響の表れ方の著しい相違を生じ、各観測点の担当者以外に記録上の変動の解釈を行うことが困難となり、定量的評価の客観性を欠くことになったことに主な原因がある。また、新しい観測計器の開発、進歩が目覚ましいデータ処理とネットワーク構築技術の導入においても、多くの観測点を個々別々の担当者が管理する京都大学の観測体制（いわゆる穴番体制）が災いして中々進展しなかった。このような弱点を抱えつつも、1995年兵庫県南部地震発生を契機に、各観測点のデータの統一化が開始され、データベース構築が行われた。その結果、地震時変動および余効変動の検出、兵庫県南部地震の数ヵ月前からの複数点での歪変動の変化、1998年8月の上高地群発地震1週間前からの異常歪変動、地下水位の異常変化と地震発生の関係などが明らかになり、地殻変動連続観測の地震予知研究での重要性が再認識されつつある。

以上のような背景の中で私が直接担当した天ヶ瀬観測室と宮崎観測所の観測網について詳述する。

3. 天ヶ瀬観測室における地殻変動連続観測

天ヶ瀬地殻変動観測室は宇治市槇島槇尾山(135.50' E, 34.53' N)の関西電力株式会社の旧志津川発電所の導水隧道(全長 1800m)を改修したもので、入口より400mの位置から奥に100mの区間を観測室として使用している。地表までの被りは約110m、断面は幅・高さ共に6.06mと大きく、観測環境としては非常に良好な観測室である。隧道が直線一方向のため計器の設置方向に制限があるが、逆に隧道の形状が単純であるため歪変動に対する種々の影響を見積もる際にモデル化しやすいという利点を持つ。観測室にローラー型のスーパー・インヴァール棒伸縮計7成分、佐々式スーパー・インヴァール線伸縮計1成分、水平振子型傾斜計4台、水管傾斜計1成分を設置して1967年6月より観測を開始した。

地殻変動観測では 10^{-10} オーダーの微小変動

を検出することが必要であるが、これは10mの基準尺を用いた伸縮計の場合1/100-1/1000 ミクロンを検出することになる。このような微小領域で計器の感度決定を直接行うことは非常に困難であり、従来の観測では殆ど行われていなかった。このため天ヶ瀬観測室では、得られる記録の定量的解析に耐えうるよう観測計器の信頼性を高めることを目的に、計器の感度校正と気象要因による影響の検討が精力的に行われた。特に、伸縮計については竹本(1975, 1977)によりレーザー干渉計を用いた高精度の感度検定がなされ、基準尺として用いられているスーパー・インヴァール棒の温度係数の非線形性、ローラー型棒伸縮計による潮汐成分の値がレーザー干渉計で得られる値に比し40-50%になること等が明らかにされた。また、佐々式伸縮計と水平振子型傾斜計は高感度ではあるがドリフトが大きく、長期変動に対しては不安定で地震予知を目的にする観測には適さないことも判明した。

天ヶ瀬観測室で得られる歪および傾斜変動への気象要因の影響に関しては、気温の季節変化に伴う周期的な年変化は非常に小さく、降雨についても観測坑道の延長方向の成分には顕著な影響は見られない。坑道方向に直交する歪の成分には個々の降雨に対応する短周期の変動は生じないが、多雨の夏季には 10^{-6} オーダーの歪変化が観測される。この変動の方向は垂直成分が伸び、水平成分が縮みとなる。この変動は北へ13km離れた地点にある逢坂山観測所の坑道内で長期間観測されている被圧地下水位の変動と非常に良く対応しており、地下水位の上昇による観測坑道に直角方向の水平圧縮力の作用と考えられる。

観測開始から記録は光学拡大装置による印画紙記録方式で行われていたが、その後1977年にNTTの回線を利用した有線テレメータシステムが設置され、記録計として光電変換装置を使用して各成分30分間隔のデータを収録する直接デジタル方式で行われるようになった。1986年7月21日早朝に京都府南部を襲った局所的な集中豪雨による観測隧道の冠水のため、隧道床面に設置していた光電変換装置が水没し約130日の欠測を生じた。さらに1989年9月にも大雨による冠水のため成分により10日から30日の欠測を生じた。兵庫県南部地震の直前の1995年1月10日に、記録方式を光電変換装置から差動トランスに変更するため全面的に観測を停止した。その際、伸縮計の基準尺であるスーパー・インヴァール棒の支持方式をローラーからステンレスの吊糸に替えた。この改良

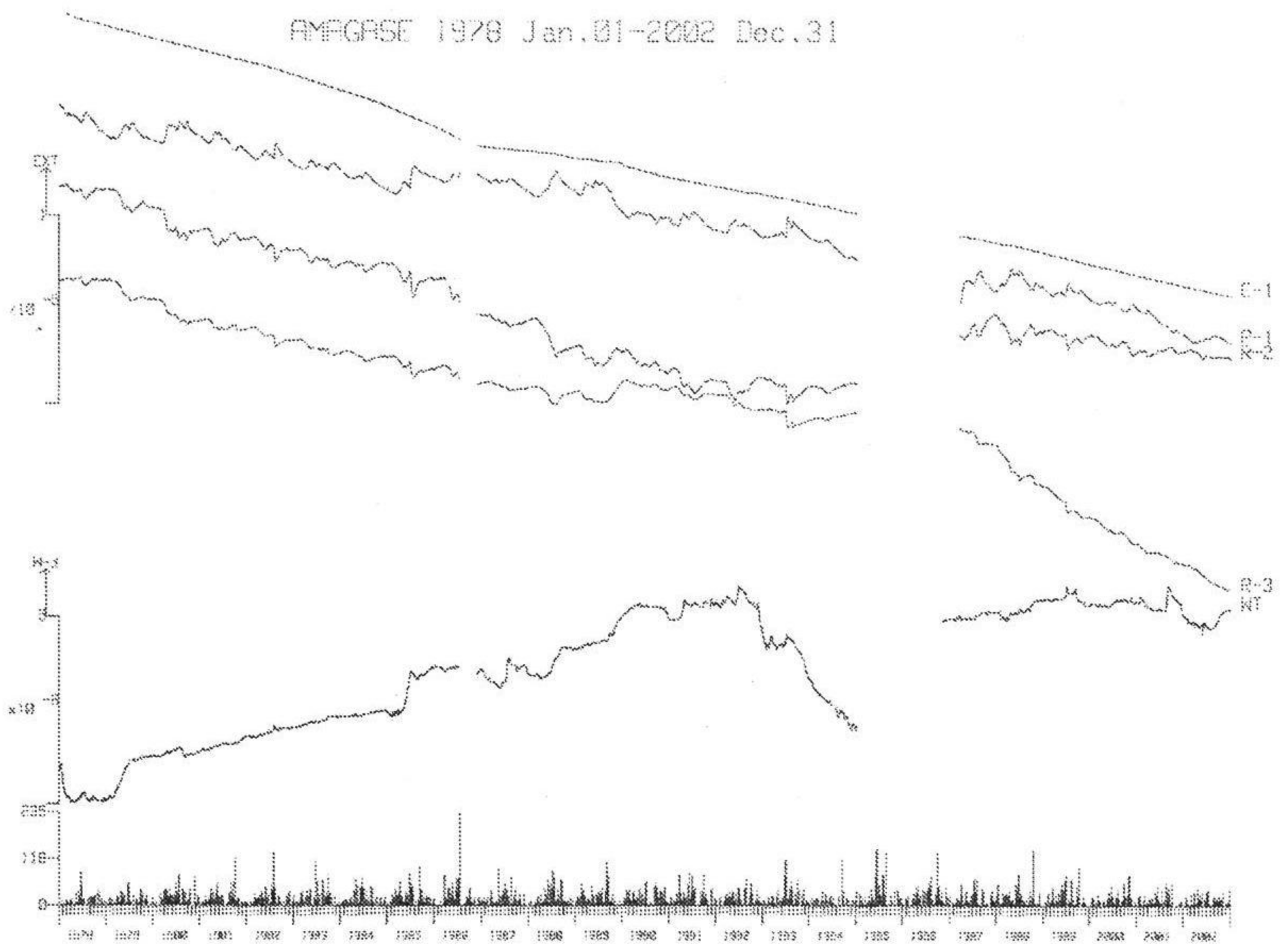


Fig. 1 Ground-strains for 4 components of super-invar-bar extensometers (E-1, R-1,2,3), ground-tilt observed with water-tube tilt-meter (WT) and daily precipitation from 1978 to 2002 at Amagase Observatory.

により、旧方式がローラーによる摩擦抵抗のため追従できなかった潮汐変動のような短周期変動にも十分な感度が得られるようになった。しかしながら、種々の要因により兵庫県南部地震を含む約2年間の欠測を生じた。

Fig.1 にテレメーターによる安定なデジタル記録が得られるようになった1978年から2002年までの25年間の伸縮計と水管傾斜計の長周期歪変動について示す。

図の記号は以下の観測成分を示す：

E-1: 隧道の延長方向の基準尺の長さが40mの水平成分スーパーインヴァー棒伸縮計 (N72.5W)

R-1: 長さ5.8mの垂直成分スーパーインヴァー棒伸縮計
R-2: 隧道方向と45°の角度をなす長さ5.5mの水平成分スーパーインヴァー棒伸縮計 (N62.5E)

R-3: R-2と直交する長さ5.5mの水平成分スーパーインヴァー棒伸縮計 (N27.5W)

WT: 隧道方向に設置された長さ80mの水管傾斜計

伸縮歪変化については以下のような特徴が見られる。

経年変化は全成分共全体としては縮みの変化

を示す。隧道方向のE-1は短周期変動が非常に小さく時期に応じた一様な永年変化を示すが、隧道方向に直交する成分を持つR-1, 2, 3には降雨の影響による大きな短期の変動が現れている。

1986年と1995-6年の2回の観測時期を境に変動傾向の変化が見られる。

1986年の坑道水没前後ではE-1の変化が著しく小さくなり、年変化率が約1/2になっているが、R-1, 2, 3はあまり変わらない。水没による局所的な影響とも考えられるが、この時期に広域で地殻変動のパターンが変化したとの報告もある。一方、観測システムの変更による1995-6年の長期中断前後ではE-1はあまり変化していないのに対し、R-1, 2, 3、特にR-3の変化が大きい。1995年1月10日の観測中断直後の1月17日に兵庫県南部地震が発生しており、この地震による歪の再配分により歪変化の様式が大きく変化することは十分考えられるが、欠測期間中であり不明である。

天ヶ瀬では地下水位の観測を行っていないが、積算雨量と逢坂山の地下水位のデータの間的良好な対応がみられることから、歪変動への降雨の影響を積算雨量を用いて対比する。

R - 1, 2, 3 成分は 1986 年の中断以前は短期、長期とも量的にも変動のパターンも同じ変動を示し、積算雨量の変動と良く一致していたが、1991 年以降相互に異なる変動を示し始め、積算雨量との対比も悪くなる。特に 1993 年頃からは異なる変動を示し始め、兵庫県南部地震の約半年前の 1994 年 6 月前後よりそれまでの期間と歪み変動様式の変化が見られる。1997 年以降の降雨との対比は、最近数年間の少雨傾向により積算雨量は長期低下の傾向がみられるが歪変化には顕著には現れていない。

傾斜変化：隧道方向 (N72.5° W) に設置された 80m の水管傾斜計 WT は坑道方向の成分でもあり、降雨の影響は小さく、時々急激な短期変動を示すがそれを除くと、一様な西下がりの変動を示していたが、1993 年より急激な東下がりの傾斜に転じた。変動量も年変化率にして 3 倍の大きさになっている。1996 年 11 月の再開後は変動速度は非常に小さくなっているが、西下がりに戻っている。

1994 年の歪変動様式の変化は近畿地方の複数の観測点でも現れている。この年は後半非常に少雨であったが、それ以前からの降雨と歪の対応関係の乱れもあり、広範な地域の歪変化が生じた可能性を示唆する。兵庫県南部地震の直後に地震の約半年前から震源から 100km 以内の近畿各地の観測点で顕著な歪変動の変化が観測されていたことを報告した際に、住友先生等から降雨との関係が明瞭でないので信用できないとのご批判を受けた。2001-2002 年は 1994 年以上に少雨であったにもかかわらず、当時のような変動パターンは出現していないこと、特に水管傾斜計の顕著な東下がりの変動が生じていないことを考慮すると、1994 年の異常変動は地震に関係する変動であったと考えられる。

4. 宮崎観測所における地殻変動連続観測

1965 年発足の地震予知計画の中で地殻変動連続観測は重要課題として位置づけられ、全国的に観測網の展開が進められた。京都大学でも上宝、屯鶴峯、逢坂山の地殻変動観測所が設立された。地震予知研究のための観測施設の規準としては 30m 長の基準尺を有する伸縮計と水管傾斜計を水平 3 方向に設置することを求められたが、京都大学では地震予知計画発足以前に既に多くの観測施設を有していたことにより、観測規準を充たすのは新たに坑道を掘削した上宝観測所と地震予知計画によらず独自に設営された阿武山地震観測所の

観測坑道のみであった。天ヶ瀬観測室も地殻変動連続観測の観測環境としては非常に良好ではあるが、1 方向の直線坑道であり規準観測の施設としては不十分であった。

一方、九州地域は日向灘で M7 級の地震が多発しているにもかかわらず、地震・地殻変動共に地震予知のための観測網の整備がなされていなかったが、1974 年によく宮崎地殻変動観測所の設置が認められた。京都大学では宮崎県北部の槇峰鉦山において、途中中断の時期はあったものの 1942 年以来傾斜計観測が続けられていたが、規準観測条件を充たす自前の観測施設を宮崎県南部に新設することになった。

M7 級の地震が発生する可能性が高い地域で、初めて自前の観測所の設立に場所の選定から関わることができる期待に満ちて、高田先生と共に宮崎に現地調査にでかけたが、次々と問題が生じてきて思い通りにはいかないことを悟らされた。結局、妥協に次ぐ妥協を余儀なくされながら場所の選定を終え、建設工事へと進み、観測計器の基礎台工事の現場監督を行ったりして、1976 年に無事観測所を設置・観測を開始することができた。

その後、1984 年より 3 カ年計画で宮崎観測所を含め 7 観測点で構成される日向灘地殻活動総合観測線が設置されることになり、観測点の場所選定に宮崎県の全域と鹿児島県の一部を調査して回った。観測点の選定は観測に適した人為的ノイズ源から離れた硬い岩盤が露出した所を探すのであるが、それ以上に予算的制限のほうに重視され、工事の利便性、商用電源の位置、地主の意向等が重要になってきて、好条件の場所を見つけるのは非常に難しく、結局従来の廃坑等を利用した所とあまり変わらなくなってしまった。また、予算申請時に全ての関係者の許諾を得なければならず、価格抜きひたすらお願いするだけの借用交渉は非常に辛い思いをすることが多かった。このような中で、鹿児島県内の 2 ヶ所は桜島火山観測所の全面的協力を得て、噴火予知研究の観測施設の坑道に地殻変動用坑道を付設 (伊佐)、坑道内に計器を設置 (大隅) させてもらうことになった。さらに、九州地域の地震観測網の未整備を補うため、総合観測線のすべての点に地震計を設置することにしたが、ここでも色々の面で協力して頂いた。

宮崎観測所の観測坑道は、日向灘に向かって東へ約 45° の傾斜で下がる第三紀宮崎層群の砂岩・泥岩の互層より成り、断面は、高さ、幅各 2m、総延長 260m、計器設置位置の山の被覆厚は 60m である。直角二等辺三角形の観測計器設置坑

道には、基準尺としてスーパーインヴァール棒を用いた 38.5m の長スパン伸縮計 3 成分と 9m 弱の短スパン伸縮計 3 成分、長さ 45.7m の直交 2 成分とそれに斜交する 63.2m の長さの水管傾斜計、短・長周期地震計各 3 成分が設置されている。

観測所屋上に設置した雨量計による降雨量は、近畿地方の天ヶ瀬等で観測される量に比べ非常に多く、日雨量が 100mm を越えることも珍しくは無い。年間降雨量も 3000mm に達し、伸縮計・傾斜計の記録に降雨の影響が大きく現れる。観測環境の改善を目指して自ら選定した場所に新しく掘削した観測坑のはずが、いささか期待はずれの結果になってしまい、観測の難しさを改めて認識させられた次第である。気温、気圧、雨量の気象観測に合わせて、坑内湧水量の測定も行っているが、その結果、湧水量が降雨に比例して降り始めから 4-6 時間遅れて増大し、伸縮歪の変化は湧水量の変化とほぼ同時に始まりピークの時間も良く合うことが判明した。したがって、降雨による伸縮歪の短期的変動は、砂岩と泥岩の互層構造がもたらす降雨の滲み込みによると考えられ、天ヶ瀬観測室のように被圧地下水位の変動によるものとは異なる。この短期降雨変動は、坑内湧水量の加重積算式を用いて近似することで、かなりの程度補正できることがわかった。

1976 年の観測開始以来の長期の伸縮歪変動を Fig. 2 に示す。

図の記号は以下の観測成分を示す。

E 1 : N46.5W 方向の長さ 38.5m の長スパン・スーパーインヴァール棒伸縮計。

E 2 : S43.5W 方向の長さ 38.5m の長スパン・スーパーインヴァール棒伸縮計。

E 3 : N1.5W 方向の長さ 38.5m の長スパン・スーパーインヴァール棒伸縮計。

E 4 : N46.5W 方向の長さ 8.87m の短スパン・スーパーインヴァール棒伸縮計。

E 5 : S43.5W 方向の長さ 8.89m の短スパン・スーパーインヴァール棒伸縮計。

E V : 鉛直方向の長さ 8.87m の短スパン・スーパーインヴァール棒伸縮計。

最下段に月雨量と 365 日積算雨量を示す。

伸縮歪の各成分の下に示すのは 365 日の移動平均により平滑化した変動。

宮崎観測所の長期歪変動は南北方向に伸び、東西方向に縮みとなり、 10^{-8} オーダーの年変化率を示し、近畿地方の各観測点で得られる変動量と比べ 1-2 オーダー小さい。

1900 年以降 1960 年代まで日向灘地域では、ほ

ぼ 10-20 年間隔で M7 級の地震が発生していたが、1976 年に観測を開始してからは 1984 年に M7.1 の地震が発生したものの、予期していたより発生間隔が若干長くなっている。1984 年 8 月 4 日の M7.1 の地震は宮崎観測所の北東 90 km の日向灘北部で発生した。地震前の変動としては、E1, E2 に変動の節目らしきものはみえるものの、変化量は小さい。南北方向の E3 には 1984 年初めから伸びの変化が大きくなっているが、震央距離を考慮すると、地震と明瞭に関係付けることができなかつた。

1996 年に 10 月と 12 月に 45 日間隔で M6.9 と M6.7 の地震が日向灘中部で連続して発生した。宮崎観測所からの距離は東方 52 km と 22 km である。一連の地震活動は M6 を超える地震が短期間に連続して発生したと、10 月の地震が活発な M5 クラスの前震活動を伴ったことが今まで見られなかつた特徴である。Fig. 2 の経年変化を見ると、地震発生 18 ヶ月前の 1995 年 4 月ごろから E1, E3 の伸びのトレンドがそれ以前に比べ約 5 倍に大きくなっているのがわかる。

この変化率は 12 月の地震後も継続し、2001 年になって収まる傾向にある。1995-96 年は少雨であったが、その後は平均的降雨量を示しており、降雨の影響とは考え難い。1996 年の地震活動の震源域での地震活動の推移と比較するため、宮崎観測所のデータ震源決定できるようになった 1987 年以降の M2 以上の大きさの地震の積算発生個数を Fig. 3 に示す。地震活動の方が時期的に若干早く 1994 年後半から活発化しているが、地震発生後の余震活動が収束した後も継続しており、伸縮歪変化と同じ傾向を示している。したがって、1996 年の地震活動に先んじて日向灘中部地域で何らかの地殻活動の活発化が起こっていたと考えられる。

5. おわりに

以上、地震予知を目的にした京都大学における地殻変動連続観測について、特に私が直接関与してきた天ヶ瀬、宮崎について述べたが、40 年にわたる長期間の観測を通じてようやく天ヶ瀬で 1 例、宮崎で 1 例の地震発生に関係すると考え得る変動を検知することができた。しかしながら、これらはあくまでも地震発生後のかなり長い期間の変動を含めた検討の結果であり、地震発生前に変動を評価するためには、なお多くの問題を解決しなければならず、今後の研究の進展を期待したい。

最近、短期間に研究成果を挙げることを要求さ

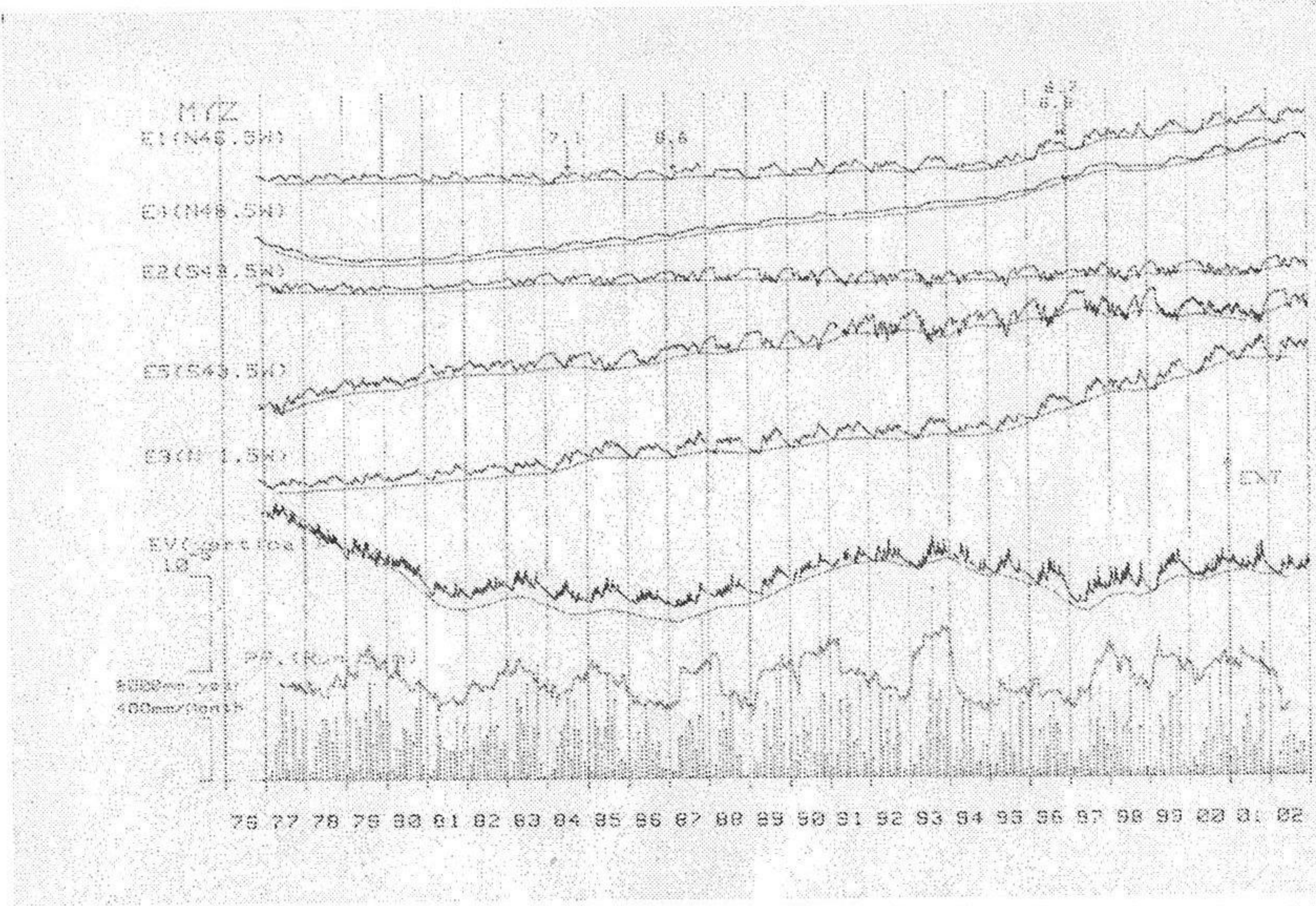


Fig. 2 Secula variations of ground-strains of 6 components of super-invar-bar extensometers and monthly precipitation observed at Miyazaki Observatory from 1976 to 2002. 365 days running mean of strains and running sum of precipitation are plotted in parallel.

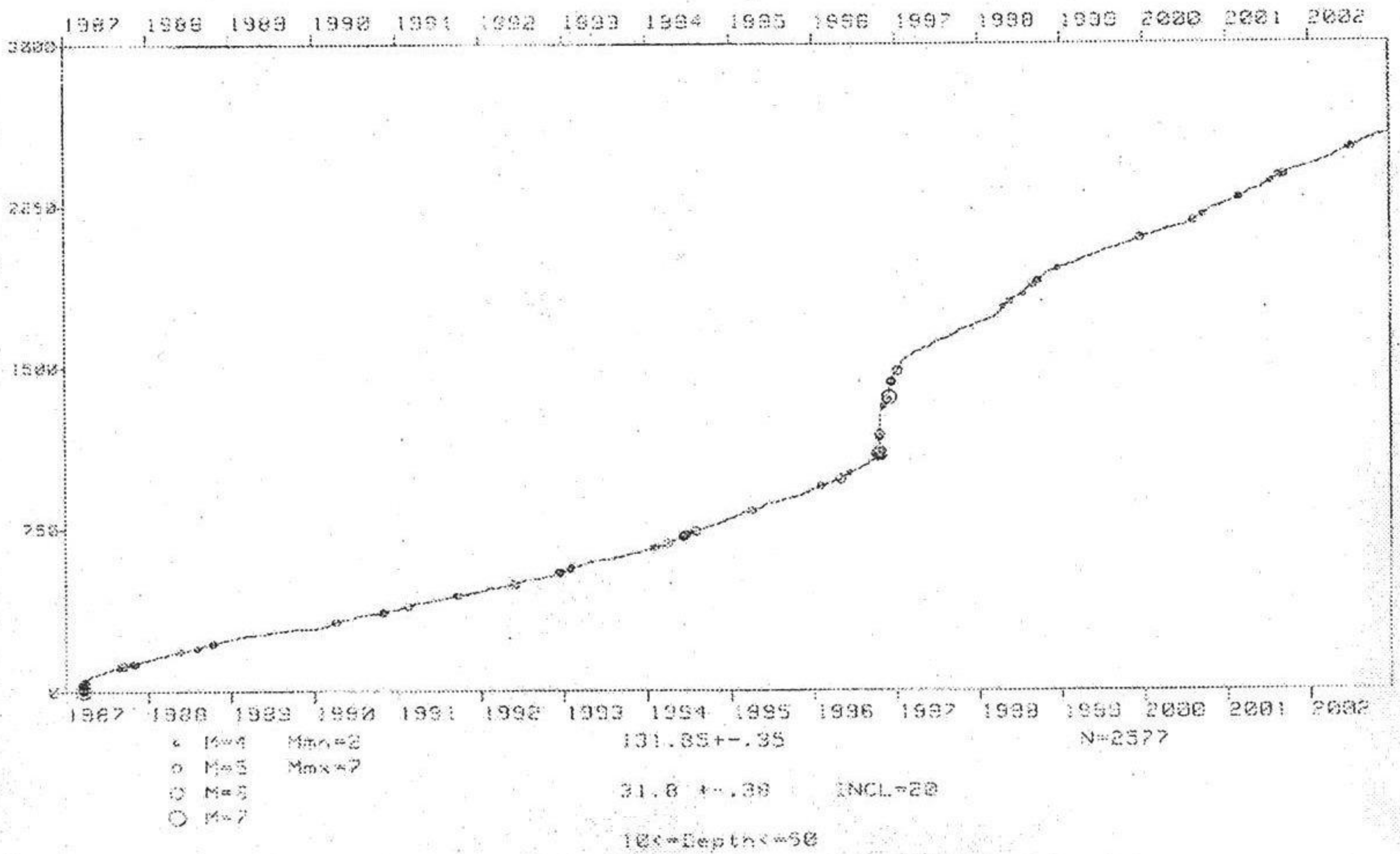


Fig. 3 Cumulative number of earthquakes in Hyuganada region from 1987 to 2002.

れるため、長期間の観測に対して否定的な傾向が強い。しかしながら、地震予知の研究を今後も続けるならば、前兆現象の検出を捉える観測は不可欠である。定常観測は監視と同一視され、大学でなすべきことではないという意見が強いが、現在何が起きているかを知り、いろいろの事象と関連付けで記録を見る目を養っておかねば異常変動の把握はできないであろう。監視観測は定まった判定基準に基づいて記録を見ていることであり、研究のための定常観測とは異質のものである。

地殻変動連続観測はその高感度性からプレスリップを含む前兆現象の捕捉を期待しうる有力な手段であるが、観測坑道を必要とするため小回りが利かず、地震発生が予測される地域へも簡単には出て行けず、基本的に待ちの観測になる。また、これまでと同じ体制で観測研究を継続するには問題がありすぎる。観測条件の優劣・S/N比の客観的評価による観測点の取捨選択の必要性は明らかである。その上で、複数の観測点のデータベース化を完成させ、広域の変動評価による異常現象検出、さらには前兆現象の発現様式の予測に向けて、地震時の歪解放・伝播、破壊過程、特に初期破壊過程の解明、地震発生メカニズムの解明などについて関係諸分野との共同作業による研究の遂行を期待したい。

おわりに、長期の定常観測の実施には、観測所・観測室の設営、観測計器の製作・改良・開発、観測システムの維持管理等、技術的支援なくしては不可能であり、長期にわたり優秀な技術をもって支えていただいた園田保美・山田 勝の両氏に改

めて感謝申し上げます。

また、宮崎観測所の設立時から、特に地震観測の面でご支援いただいた桜島火山観測所（現火山活動研究センター）に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 小沢泉夫 (1956) : 逢坂山における地殻のひずみの観測, 京都大学防災研究所創立 5 周年記念論文集, pp. 14-19.
- 住友則彦 (1996) : 地震予知—求められる大学の役割—, 京都大学防災研究所年報, 第 39 号 A, pp. 1-16.
- 竹本修三 (1975) : ローラー型伸縮計のレーザーを用いた Calibration について, 測地学会誌, 第 21 巻, 2 号, pp. 81-90.
- 竹本修三 (1977) : レーザー干渉計を用いたスーパー・インヴァール棒伸縮計について, 測地学会誌, 第 23 巻, 4 号, pp. 223-231.
- 古澤 保 (1996) : 地殻変動連続観測による兵庫県南部地震, 阪神淡路大震災—防災研究への取り組み—, 京都大学防災研究所, pp. 34-42.
- Takada, M. (1959) : On the Observing Instruments and Tele-metrical Devices of Extensometers and Tiltmeters at Ide Observatory and on the Crustal Strain Accompanied by a Great Earthquake, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.27, pp. 1-47.

Continuous observations of crustal movements for earthquake prediction research

Tamotsu FURUZAWA

Synopsis

Continuous observations of crustal movements for earthquake prediction at Kyoto University are reviewed.

At Amagase observatory the changes of secular rate of strain variations were observed about one year before the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake. At Miyazaki Observatory increases in strain rate were observed from 18 months before the 1996 Hyuganada earthquake (M6.9).

Keywords: earthquake prediction, crustal movements, extensometers, tiltmeters, ground strain