

## 2. 伊豆半島の地殻活動

### ① 地殻活動の概観

沈み込むフィリピン海プレート上にある伊豆半島は活発な地殻活動が継続しており、多様な地殻活動が報告されている。特に最近の特徴的活動は群発地震の継続的発生と異常隆起に特徴づけられる。

1930年代は伊豆半島の地殻活動は活発であった。群発地震の発生と減衰が繰り返した中で、 $M = 5.4$ が二度と最大地震の $M = 5.8$ が発生した。その後、11月初めから内陸部においても多数の前震とみなされる地震が発生し、11月26日に北伊豆地震 ( $M = 7.0$ ) が発生した。また、伊東を中心とする海岸沿いの南北約40キロの水準路線の測量は1930年から4回実施されているが、いずれも隆起を示し、積算すると35cmの隆起量になっている。群発地震活動が低下した後も隆起し、北伊豆地震が起こった後1933年ころも隆起が継続したのが特徴であった。

その後、伊豆半島においては小さな活動(1932, 1934年等)はあったが静穏な状態が継続していた。1974年に伊豆半島沖地震 ( $M = 6.9$ ) が発生してから活発になり、1978年伊豆大島近海地震以後、川奈崎沖および伊豆半島東方沖に群発地震の活動が活発化し、1993年までに約23回にも及ぶ群発地震が繰り返し発生した。群発地震の発生回数の時間変化を見ると前半の場合には地震の起こりかたがバースト的で群発地震の末期でも回数の多いバーストが繰り返し起こった。後半の場合は群発活動の開始が急激でバースト性が顕著でなく群発地震の減り方がスムーズであった(図II-2-1)。

一方、1976年以降、内陸部の冷川峠付近に中心をもつ隆起が進行し、その後、海岸寄りに移動した。水準測量が毎年行われるようになった1980年以降でも積算された隆起のピークは1990年までに24cmに達し、その位置は東海岸に位置している。特に群発地震は隆起のピークが東海岸の富戸付近に位置しているときに発生している(石井, 1989&1992)。東海岸に験潮場が設置された1973年からの隆起量は50cm程度に達している。これに対して西海岸においては年に5mm程度の沈降で駿河トラフをはさんで面しており東海地震予知に重要な観測地点である御前崎と同じ程度の変動が継続している。

### ② 1989年伊豆半島東方沖地震と海底噴火の経緯

1989年5月21日から川奈崎付近に群発地震が起こり始め、その後静かになったかに見えた。しかし6月30日以降、再び微小地震が起こり始め7月4日から有感地震も発生し、7月7日には $M = 5.2$ 、7月9日には $M = 5.5$ が発生した。微小地震の震源域は一部は陸地にもおよぶとともに1988年の群発地震などと比較して震源が浅くなっているのが特徴であった。その後、地震数は減少したが、7月10日には微動の兆候が現れ、7月11日から微動が発生し始め広い範囲で観測されるようになった。7月5日に続いて13日には地震予知連絡会強化地域部会が開かれた。部会終了直後の18時頃から大振幅の連続微動が発生し始め、18時28分海底噴火に至った。しかしながら地震活動は海底噴火が発生したにもかかわらず減衰していった。火山噴火予知連絡会も7月12日に拡大幹事会を開催した。海底噴火直後にも拡大幹事会を開催し会長コメントを発表した。6月30日の群発地震の活発化にともなって東伊豆および網代の体積歪計に地震活動に対応した歪変化

が記録された。川奈の傾斜計は5月21日および6月30日からの群発地震にともなった異常傾斜変動を記録した。この付近においては伊東～初島測線の自動光波観測およびGPSによる初島～川奈間の距離変化連続観測が行われており、最大地震発生の前から距離が異常に伸び始め噴火前までに約20cmに及ぶ伸びが観測された(図Ⅱ-2-2)。噴火後は距離変化は落ち着いたが群発地震発生から海底噴火にいたる連続的な距離変化を観測することが出来た。これらいずれのデータも有感地震が頻発し始め、地震回数も増加した7月4日頃から異常変化が始まっている。また伊東と初島におけるGPS連続観測によっても異常変動のベクトル成分が明らかになった。

宇佐美、赤沢等における温泉の温度や自噴量も同じ頃から異常変化を示している。伊東市においては地下水・温泉の温度変化、ラドン濃度にも異常が観測され、特に大島においては微動の発生にともなって急激な温度低下が観測された。

水路部の測量船「拓洋」は7月13日群発地震震源域において海底地形測量等を実施していた。噴火直前に手石海丘を通過し海底地形を測量した。その直後、船底に異常な衝撃音を感じた後、海底噴火を発見した。噴火の写真撮影、ビデオ撮影、衝撃音の録音などに成功した。その後の海底地形の測量により、手石海丘の大きさは比高25m、直径200m、深さ30～40mであることが明らかになった。

噴火後展開された有線、無線を用いたテレメータによる高精度観測により、それまでのルーチン観測では分離できなかった震源域が3つのグループに分離できることが明らかになった。又1930年の群発地震の震源再決定された結果と比較すると手石海丘付近の活動が過去の活動およびマグマの移動と関連していることが明らかになった。

手石海丘から2km以内の海底に7月7日から海底地震計が設置されており震源近傍の地震観測データが得られた。また人工衛星を用いた地震観測データの伝送も初めて試みられた。

プロトン磁力計による全磁力の永年変化観測によると1984年～1985年頃から伊東市の新井および吉田観測点において全磁力の減少、初島観測点において増加の傾向が観測されておりマグマ活動との関連も考えられていた。

伊豆半島における定期的な水準測量が海底噴火前の6月に実施されたが、その結果、東海岸で1年間に4cmも隆起したところがあり、緊急に伊豆の東海岸を南北に通る水準路線における測量が実施された。その結果によると伊東市付近において海底噴火前に8cmにおよぶ隆起が観測されたが、これは1930年の変動と類似している。

伊豆半島の小室山を中心にした光波測量の観測網においても噴火後の測定により、9cmから数cmにわたる変化が観測されており、初島との距離変化測定も20cm以上の伸びが測定された。

地震火山活動を発生させる場を知るための地殻構造調査も群発地震活動の起こっている海岸沿いにバイプロサイス反射法により実施された。それにより貫入岩体に対応する速度の速い構造が見だされた。

重力観測によっても水準測量に相当する隆起の分布が得られていた。

地震活動が減衰し群発地震発生前のレベルに戻った9月の末頃には各種観測データも落ち着いたが機動観測の活躍は今後の有効な観測体制について考えさせた。

### ③ 群発地震活動と海底噴火

図Ⅱ-2-3は気象庁の鎌田における地震回数である。1980年から1993年までに約23回にも及ぶ群発地震が繰り返し発生した。1989年に伊東沖において海底噴火が発生したが無線テレメータを用いた高精度観測により群発地震の震源分布が精度よく決定された。一方、同地域では1930年2月～5月に有感地震3600個以上を含む伊東沖群発地震が発生している。東北大学ではその地震の震源を再決定し海底地震発生直後の群発地震の震源分布と比較している(図Ⅱ-2-4)。それによると震源分布の違いや特に震源の深さの浅くなっていることが明瞭である。

図Ⅱ-2-5(a)は伊豆半島東方沖における最近13年間の震源分布を示しているが、群発地震発生領域が分かりやすい。また、図Ⅱ-2-5(b)は伊東(川奈)観測点のボアホール傾斜計による観測開始より約4.5年間の傾斜変動と伊豆半島東方沖に発生した日別地震回数を示している。これまで6回の群発地震のいずれに対しても明瞭な傾斜変化(矢印)が記録されたが、1993年9月中旬からは従来と異なる変動が現われているのが注目される。図Ⅱ-2-6は1989年伊豆半島東方沖の地震・火山活動に伴った地殻変動を示している。図Ⅱ-2-6(a)は伊東(川奈)観測点のボアホール傾斜記録と群発地震数の比較であるが地震活動の盛衰と傾斜変化の間には、非常に良い相関が見られる。図Ⅱ-2-6(b)はGPSにより検出された、初島に対する伊東(川奈)の位置変化であり、海底噴火前後の変動が見られる。

1980年から伊豆半島における水準測量が建設省国土地理院により半島全体に精度よく行われるようになったが、地理院のデータから時間空間変化を計算し、1年間の変化量の時間変化を示したのが図Ⅱ-2-7である。隆起のピーク的位置の変化と年間の隆起量が明らかである。また、図Ⅱ-2-8から1989年の噴火前1987年ころから海岸付近の上下変動が加速しているのが見られる。

海底噴火にともなう地殻変動を説明する断層モデルなども調べられている(Okada & Yamamoto, 1991)。

### ④ 海底噴火後の特徴的地殻活動

#### (1) 地震活動と震源分布

海底噴火発生後伊豆半島東方沖の群発地震活動は、1990年は静穏であったが1991年から再び活動が発生し始めた。特に1993年には活発な地震活動が発生した(図Ⅱ-2-3)。1月10日から1月18日まで気象庁の鎌田において2,064回の地震を観測し最大地震はM3.8であった。

1992年5月以降、地震研究所の伊豆における地震観測点が全てテレメータ化し、伊豆半島東方沖に発生する地震の震源決定が格段によくなった。1993年1/1～1/31における震源分布図(図Ⅱ-2-9(a))を見ると震源が3つに分かれているのが明白である。主な活動は8-12km付近であるが3～5km付近の浅い活動も認められ、震源の深さの変化に関する議論も可能になった。1993年5/26～6/21日頃にかけて1989年7月以来もっとも活発な群発地震活動が伊豆半島東方沖の潮吹崎付近に発生した(図Ⅱ-2-9(b))。この活動は潮吹崎付近、潮吹崎沖合い、川奈崎沖、富戸沖と内陸部にに見られた。1月の活動と異なるのは3～4kmと8～12kmに起こっていた震源が4～8kmの深さに発生している。その後8/1～12/31の震源分布は内陸部の活動がめだつようになるとともに従来と地震活動の様子が異なってきた(図Ⅱ-2-

9(c)。

## (2) 地殻変動の変化

群発地震活動と地殻変動連続観測データはしばしば対応した変化を示している。図Ⅱ-2-10は1994年5/15～6/30における体積歪計、傾斜計と地震活動との比較が示されている。地震活動の活発化に対応して地殻変動に明瞭な変化が観測されている。地震発生数が少なくなった場合でも地殻変動の変化から地殻活動の推移に関する情報が得られることが経験された。図Ⅱ-2-11は気象庁の網代と東伊豆観測点の歪観測データと群発地震の数との比較であるが非常によく対応している。図Ⅱ-2-5において指摘したように地震の震源分布の変化に対応して1993年9月ころから地殻変動の様子が変わってきている。

図Ⅱ-2-8で示した上下変動の後の1990～1993の水準測量の結果が図Ⅱ-2-12に示されている。伊東検潮場から伊東市にかけて隆起があいかわらず顕著である。特に海岸における隆起は異なる期間においてパターン異なるものの積算の結果である(地理院, 1994a)。

図Ⅱ-2-13は伊東から宇佐美と初島までの距離変化の測定結果である。伊東と初島間では1989年の伊東沖海底噴火にともなう25cm近い大きな伸びの変動のほかに1993年の6月初めの異常な伸びが顕著である。伊東と宇佐美間では6月には変化が見られないが9月から異常な変化が観測されている。川奈における精密辺長測量の結果が図Ⅱ-2-14に示されている。1993年の5-6月にかけて地震活動に対応してすべての測線において伸びが観測された。図Ⅱ-2-15は伊東光波基線の測定結果である。地震活動に対応した変化と考えられる大室山・小室山と宇佐美の大きな距離変化が観測されている。図Ⅱ-2-16は伊東地区におけるGPSの連続観測結果である。1993年9月から10月にかけてHKW-HATの約10cmの冷川峠付近の隆起の変化が明瞭に記録されており、GPSの有効性が確認された。

## (3) その他の観測

図Ⅱ-2-17は地下水観測の結果である。1993年5月26日から6月初旬にかけて発生した伊豆半島東方沖群発地震にともないEDY観測点の水位は5月27日から異常上昇した。上昇の割合は5cm/日で6月1日頃まで続き、その後地震活動が静穏化するにつれて上昇速度も鈍化した。これらの変化は体積歪計の変化など地殻変動の異常と類似している。図Ⅱ-2-18は重力測定の結果である。地震活動の変化・異常隆起に対応すると見られる重力パターンが観測されており、地殻内の変化が推定される。地磁気全磁力、地磁気変化3成分、地電位などの観測も行われているが図Ⅱ-2-19には全磁力の観測結果が示されている。人工的な騒乱の影響を受けている観測点もあるが隆起域に近いTGS(遠笠)やRKB(鹿路庭)などにおける9月頃からの変化が気になるところである。図Ⅱ-2-20に長基線地電位観測の結果を示す。

## ⑤ まとめ

1989年の海底噴火以後の地殻活動は以下のようにまとめられる。

1. 1989年の海底噴火以後、群発地震活動は静穏であったが1993年に活発になった。
2. 1993年1月における地震では活動は3つに分かれており、浅い活動は震源の深さ3～5km

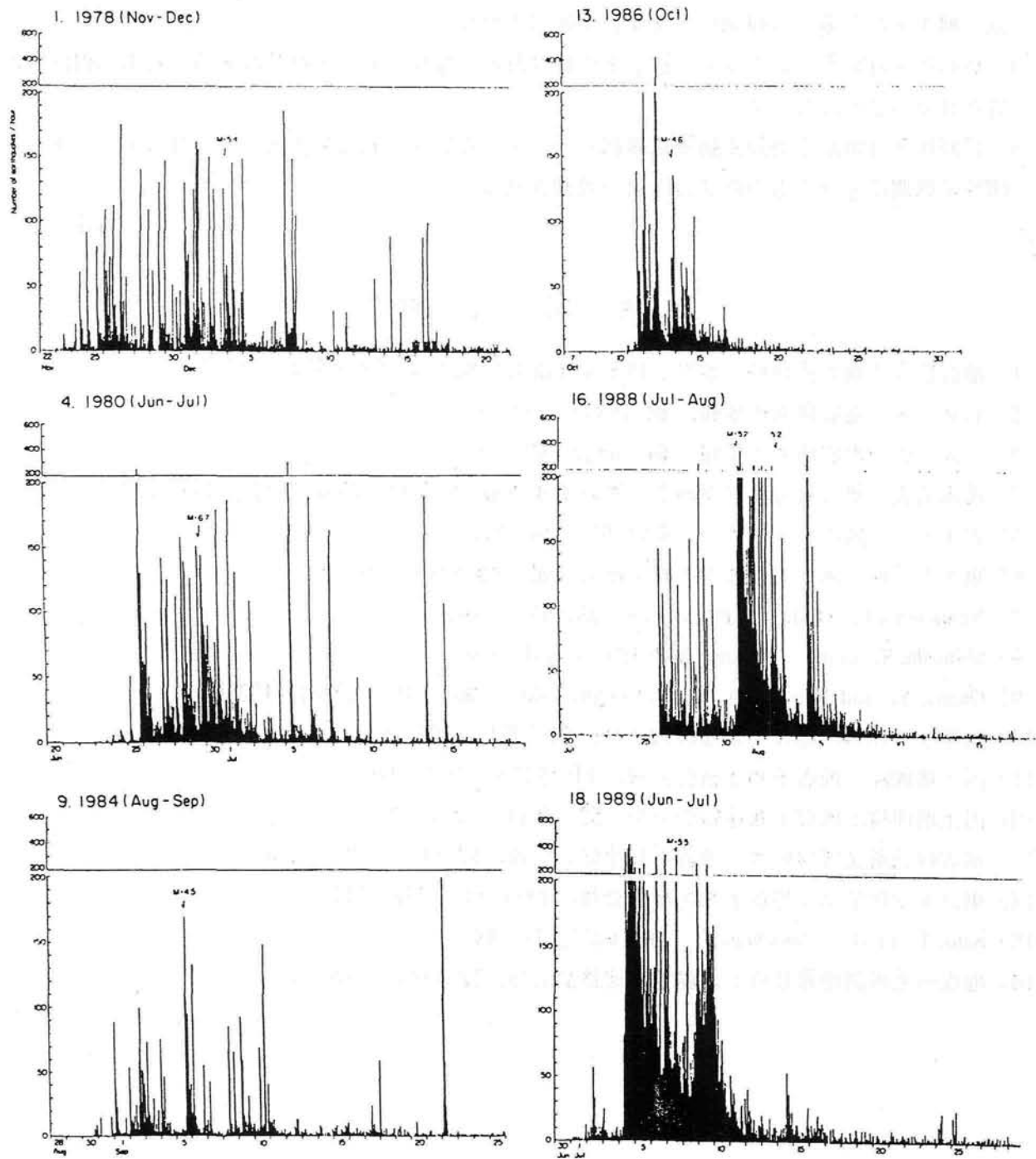
であったが5月から6月の活動はその空白部分を埋めるように発生した。

3. 群発地震活動に伴い地殻上下変動，地殻変動連続観測，光波測量，GPS観測，重力，地磁気，地下水など多くの観測に異常変化が観測された。
4. 1993年9月頃から地震発生の様子がそれ以前と異なり，発生域が分散するとともに内陸の地震が目立つようになった。
5. 1993年9月頃から地殻変動連続観測のデータにも以前と異なる変化を示しはじめた。また，GPSの観測によっても内陸部の隆起が観測された。

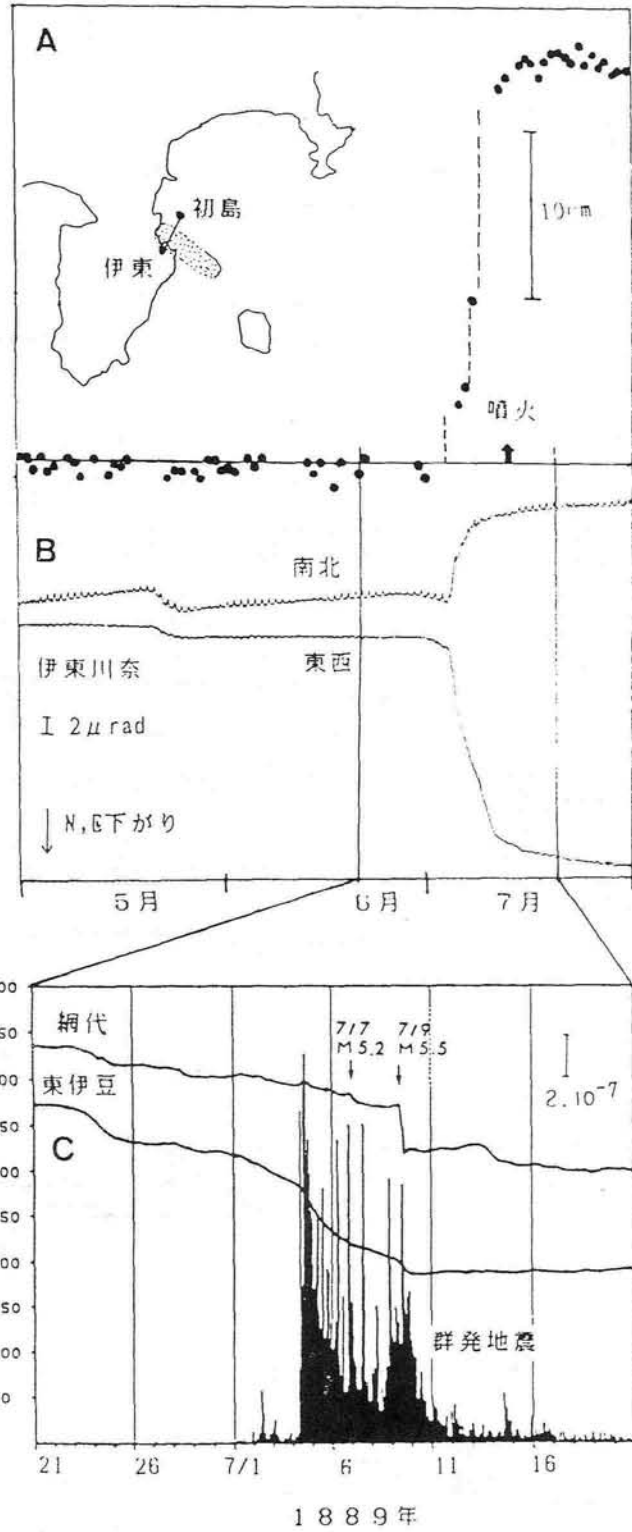
[石井 紘]

#### 参 考 文 献

- 1) 地震研究所地質移動班：地震予知予知連絡会会報，43(1990)，253-257.
- 2) 石井 紘：地震研究所彙報，64(1989)，313-324.
- 3) 石井 紘：地震研究所彙報，67(1992)，67-77.
- 4) 茂木清夫：伊豆東方沖群発地震，地震予知連絡会20年のあゆみ(1990)，203-217.
- 5) 青木治三：地震ジャーナル，8(1989)，48-51.
- 6) 東北大学理学部：火山噴火予知連絡会会報，48(1990)，21-25.
- 7) Yamamoto, E. et al. : J. Phys. Earth, 38(1991), 165-175.
- 8) Shimada, S. et al. : Nature, 343(1990), 631-633.
- 9) Okada, Y. and Yamamoto, E. : J. Geophys. Res., 96(1991), 10361-10376.
- 10) 気象庁，1994，地震予知連絡会会報，51(1994)，292-309.
- 11) 国土地理院：地震予知連絡会会報，51(1994 a)，373-400.
- 12) 国土地理院：地震予知連絡会会報，52(1994 b)，272-290.
- 13) 地震研究所光波移動班：地震予知連絡会会報，52(1994)，291-295.
- 14) 東京大学理学部：地震予知連絡会会報，51(1994)，430-432.
- 15) Sato, T. et al. : Geochem. J., 26(1992), 73-83.
- 16) 地震研究所測地移動班：地震予知連絡会会報，52(1994)，308-310.



図Ⅱ-2-1 気象庁の鎌田で観測された地震の1時間当たりの回数の時間変化。群発地震の総回数が5000以上のものを時間順に示す(茂木, 1990)。



図II-2-2 伊豆半島東方沖の群発地震および海底噴火に関連した地殻変動(青木, 1989)  
 上図: 伊東初島間の光波測距による距離変化(東京大学地震研究所による)  
 中図: 伊東(川奈)における傾斜変化(防災科学技術研究所による)  
 下図: 網代および東伊豆の体積歪計の記録(気象庁による)

鎌田（伊東市）における旬別地震回数 (S-P ≤ 6.0 SEC)

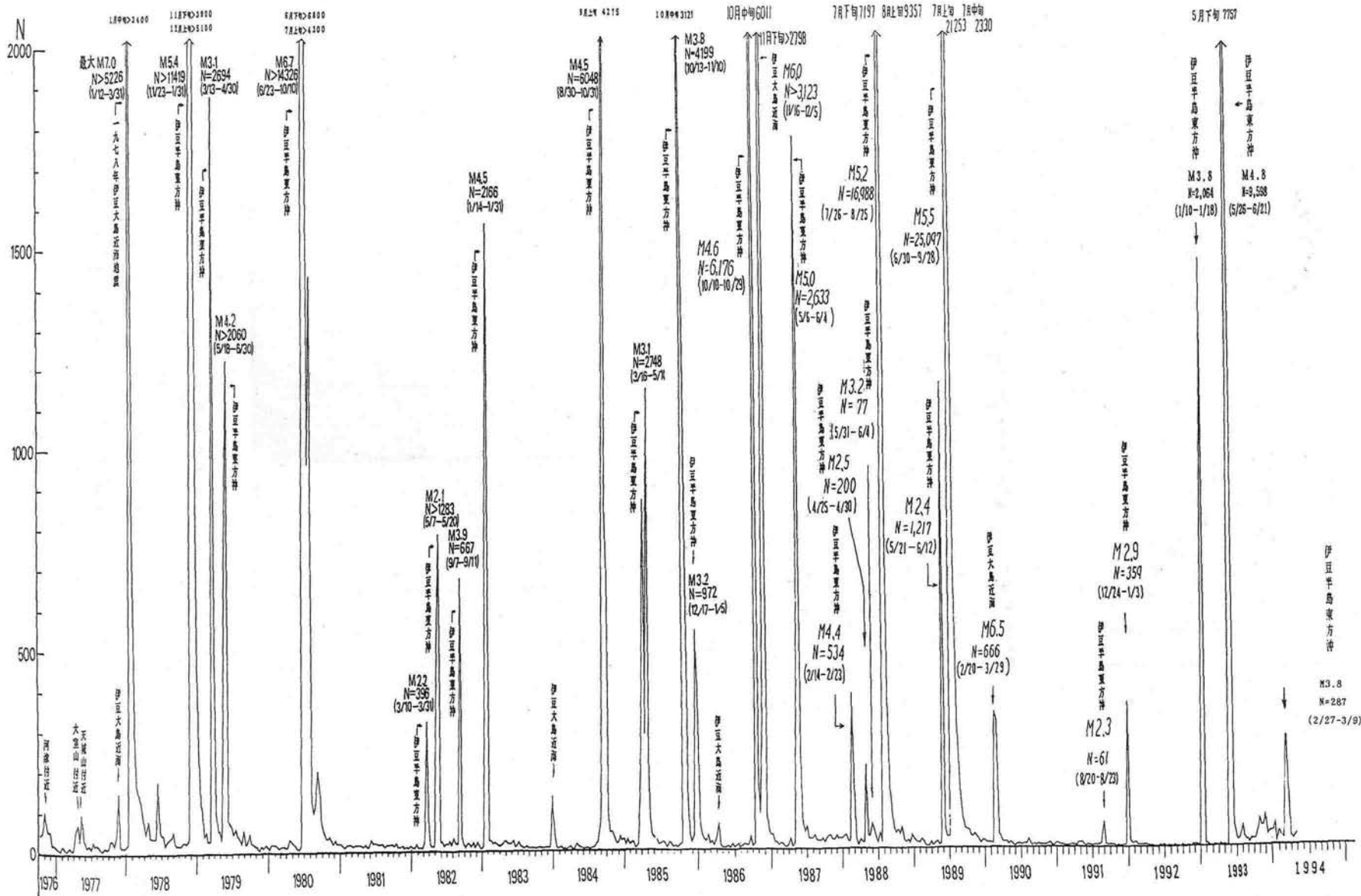


図 II - 2 - 3 鎌田における地震回数 (気象庁による)



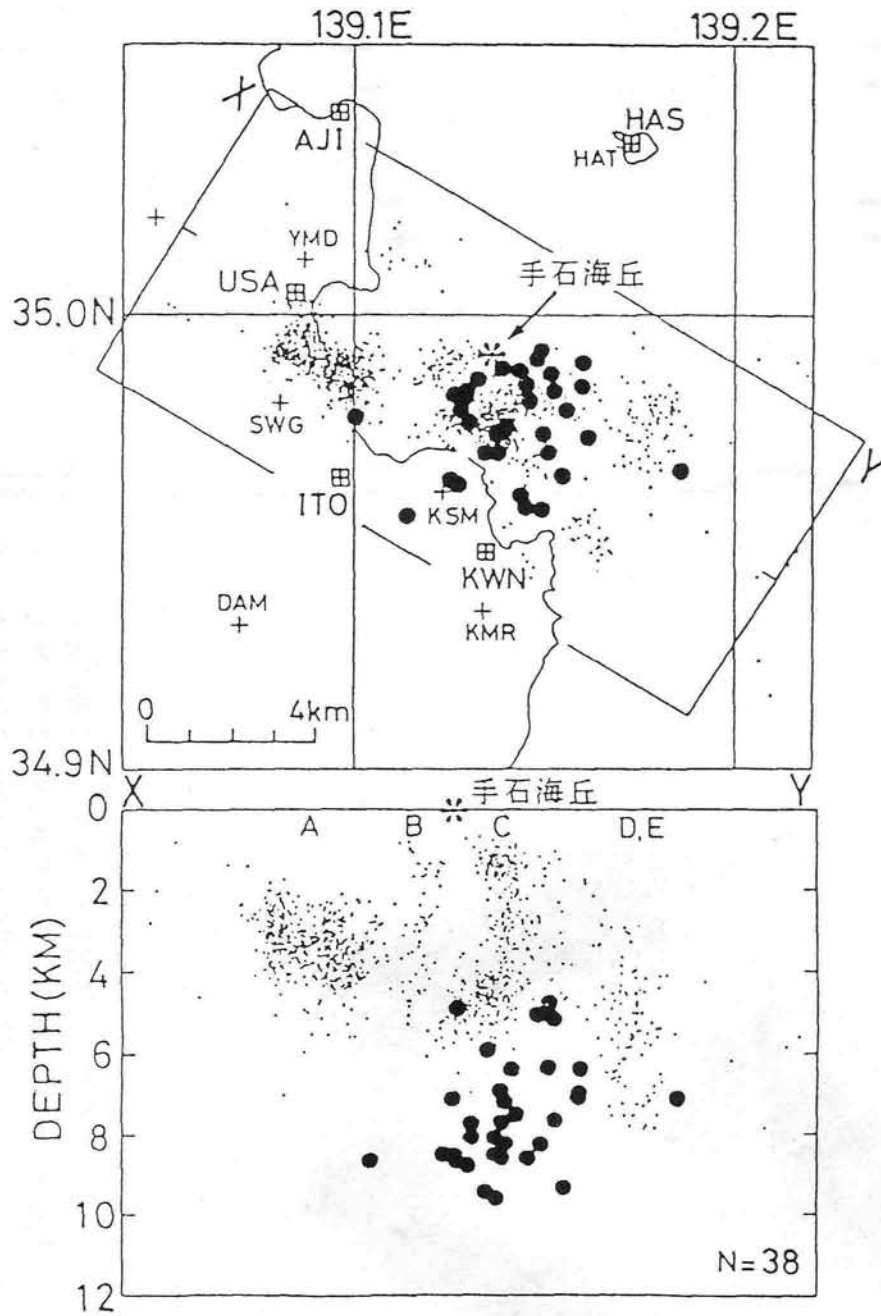


図 II - 2 - 4 1989年の海底噴火直後から観測された地震の震源分布(点)と同じ手法により再決定された1930年伊東群発地震の震源分布(黒丸)。田印は1930年の観測点, +印は1989年の観測点を示す(東北大学, 1990)。

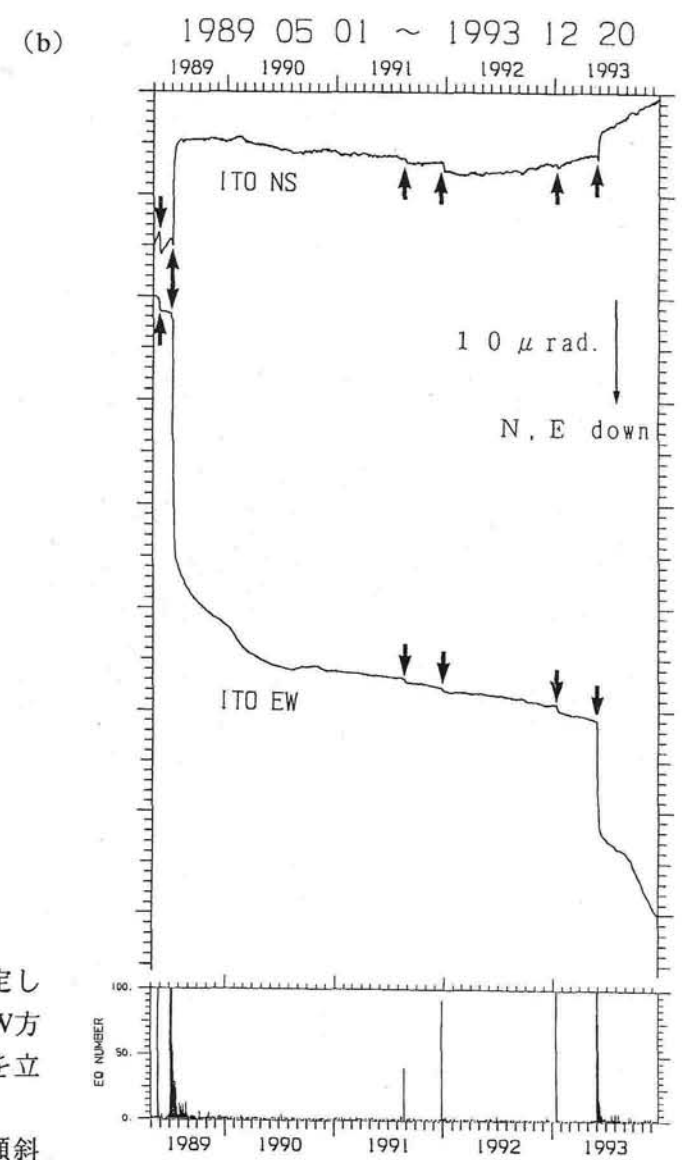
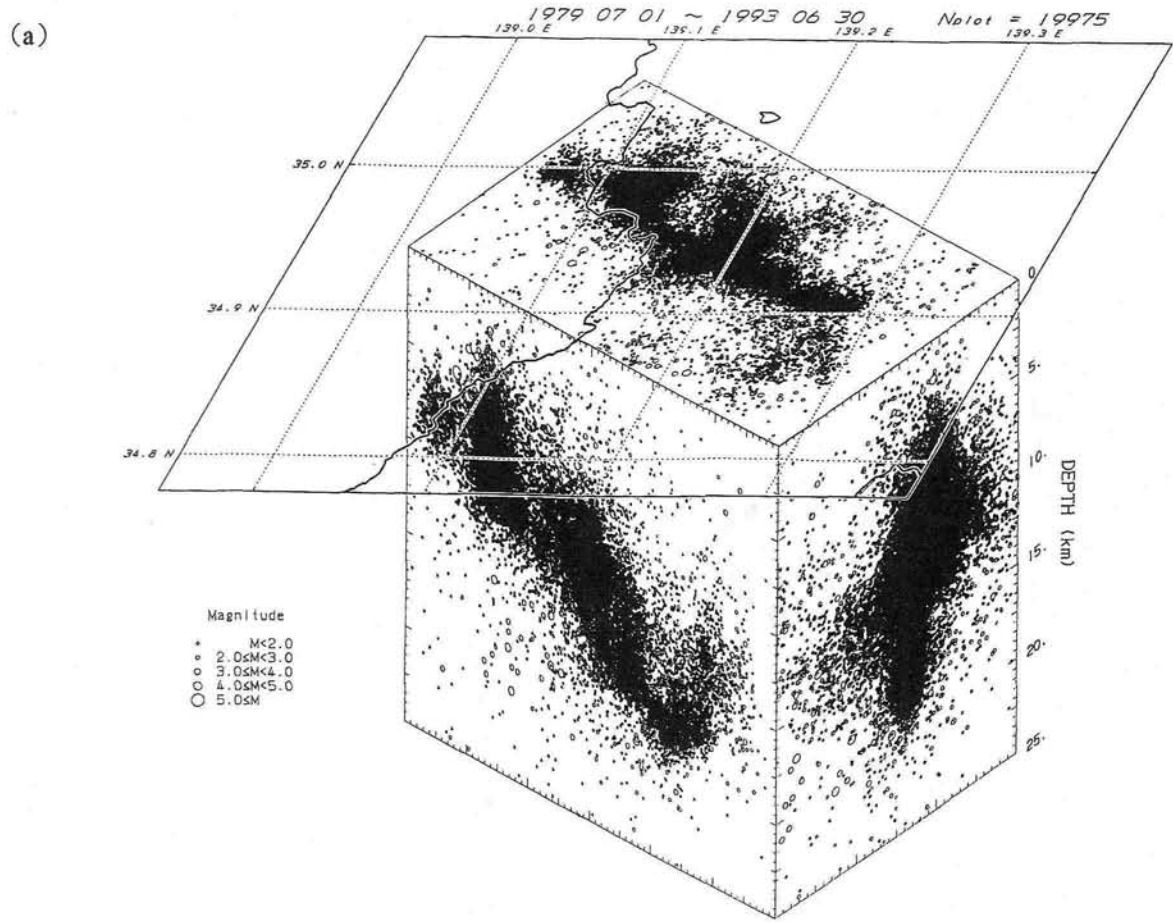
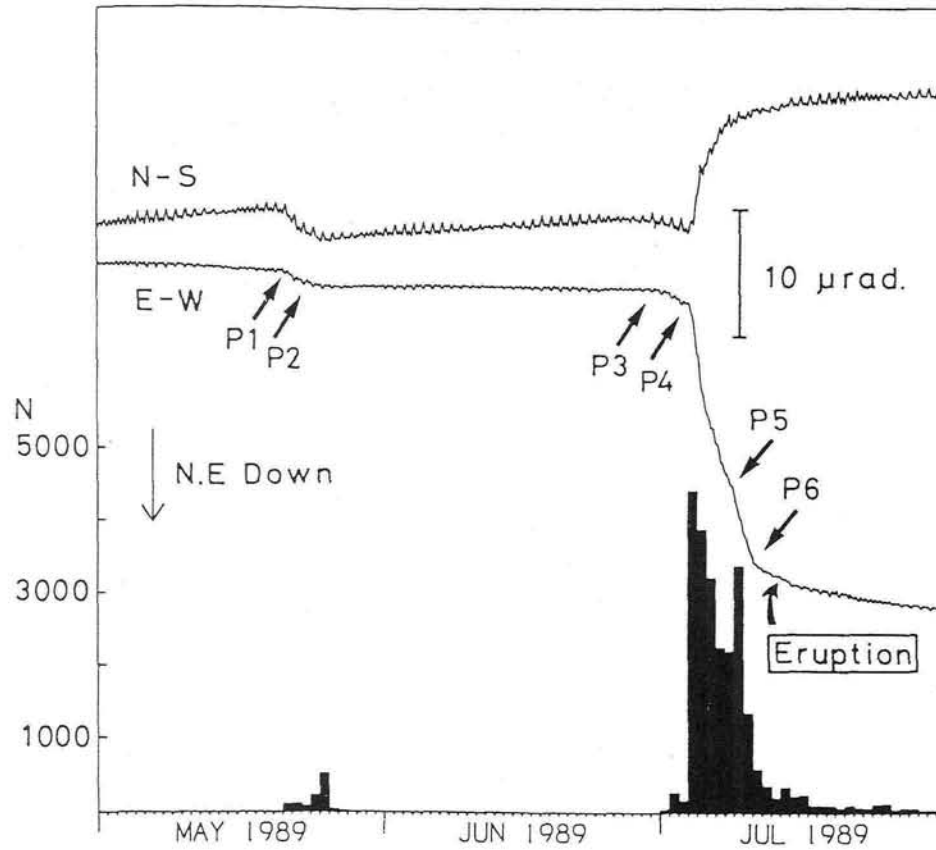
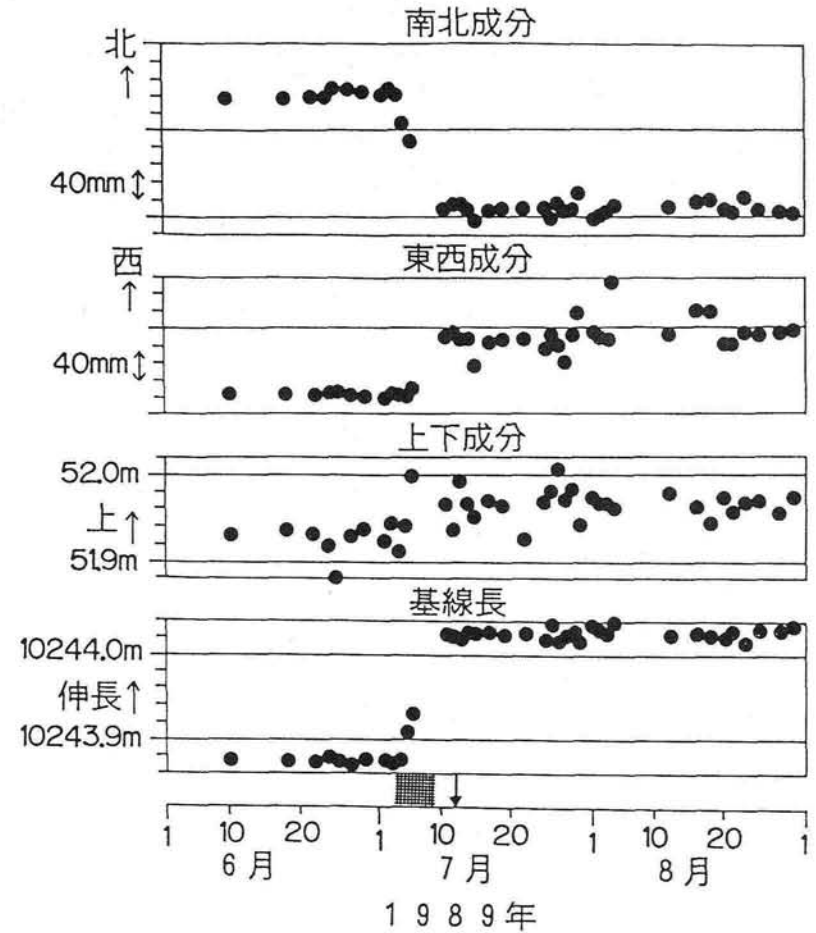


図 II - 2 - 5 : (a) 伊豆半島周辺の18観測点のデータのみを用い、観測点補正値を加えて再決定した震源に基づく、伊豆半島東方沖における最近13年間の震源分布。N60° W方向30km, N30° E方向15km, 深さ0~25kmの範囲の震源約20,000個の分布を立体的に示した。

(b) 伊東(川奈)観測点のボアホール傾斜計による、観測開始より約4.5年間の傾斜変動。図の下部は伊豆半島東方沖に発生した日別地震回数を示す。これまで6回の群発地震のいずれに対しても明瞭な傾斜変化(矢印)が記録されたが、1993年9月中旬からは従来と異なるタイプの変動が現われている。(岡田による)



(a)



(b)

図Ⅱ-2-6 1989年伊豆半島東方沖の地震・火山活動に伴った地殻変動。

(a) 伊東(川奈)観測点のボアホール傾斜記録と群発地震数の比較。地震活動の盛衰と傾斜変化の間には、非常に良い相関が見られる (Yamamoto et al., 1991)。

(b) GPSにより検出された、初島に対する伊東(川奈)の位置変化 (Shimada et al., 1990)。

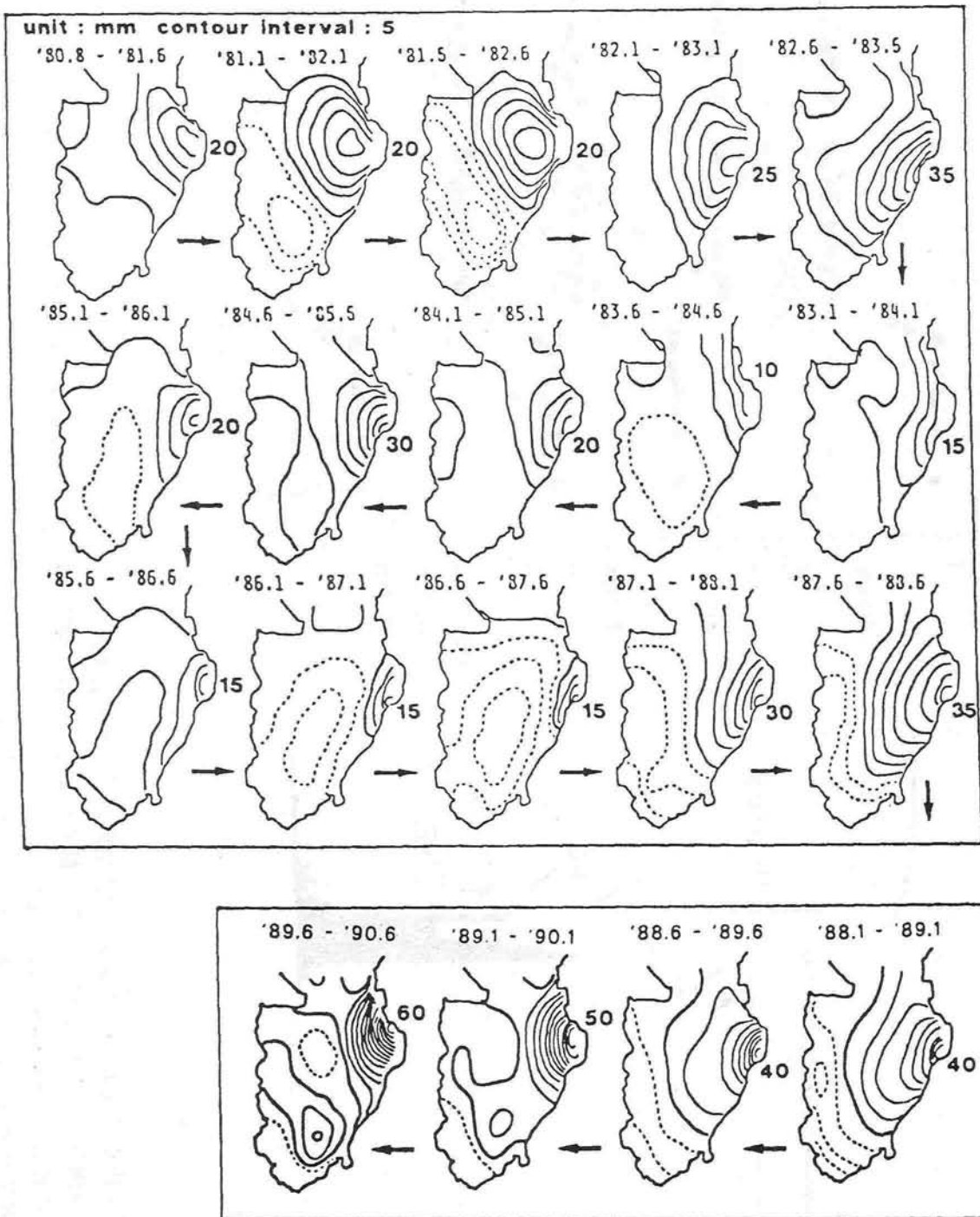
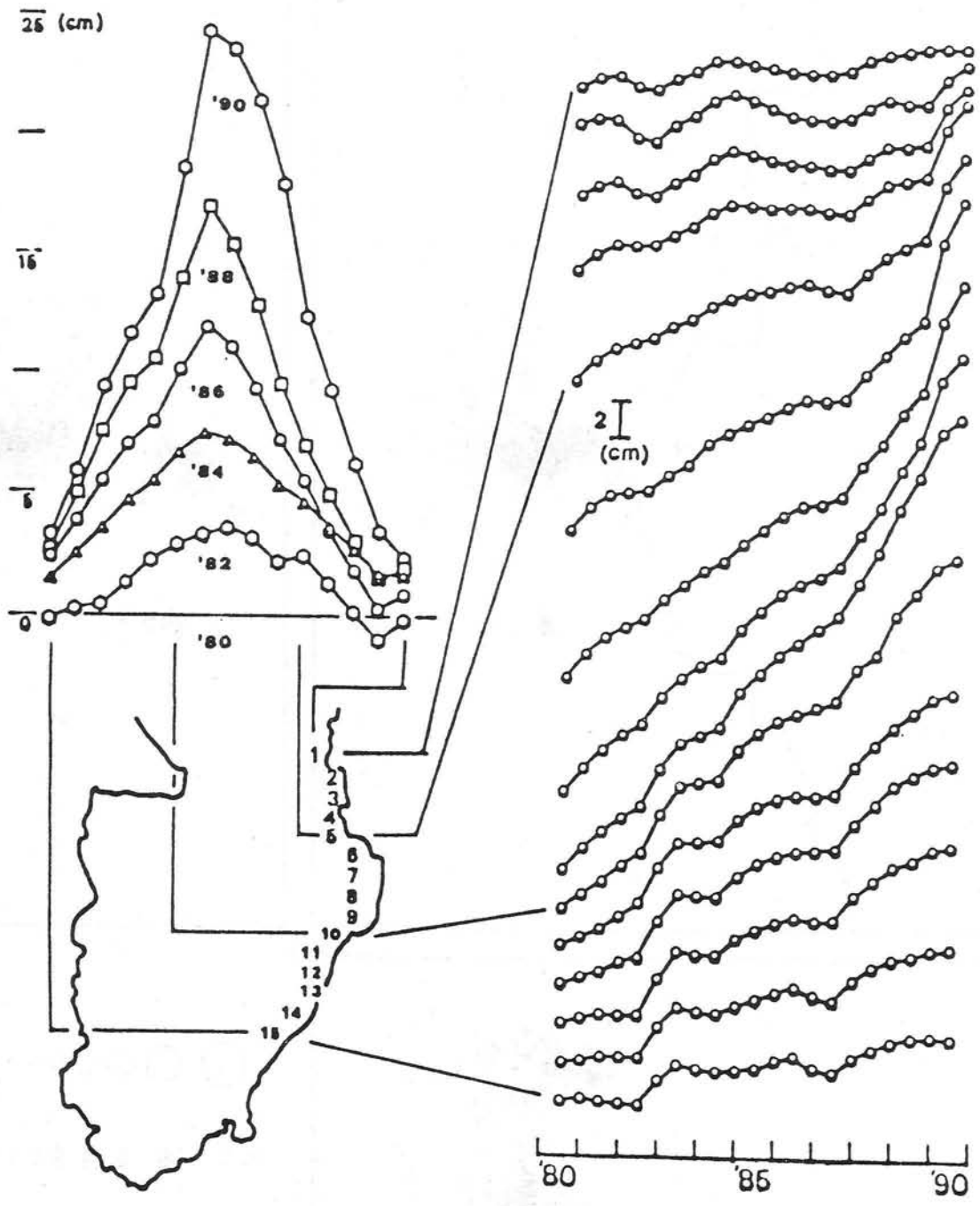


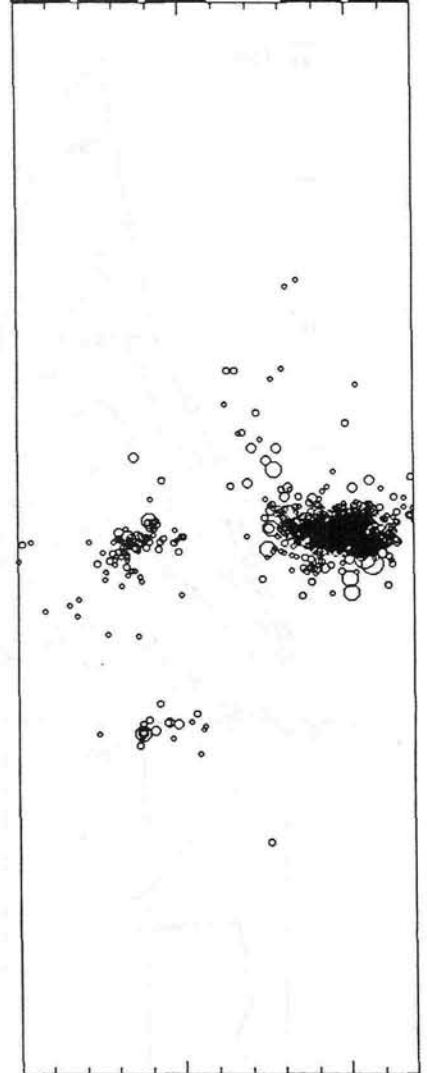
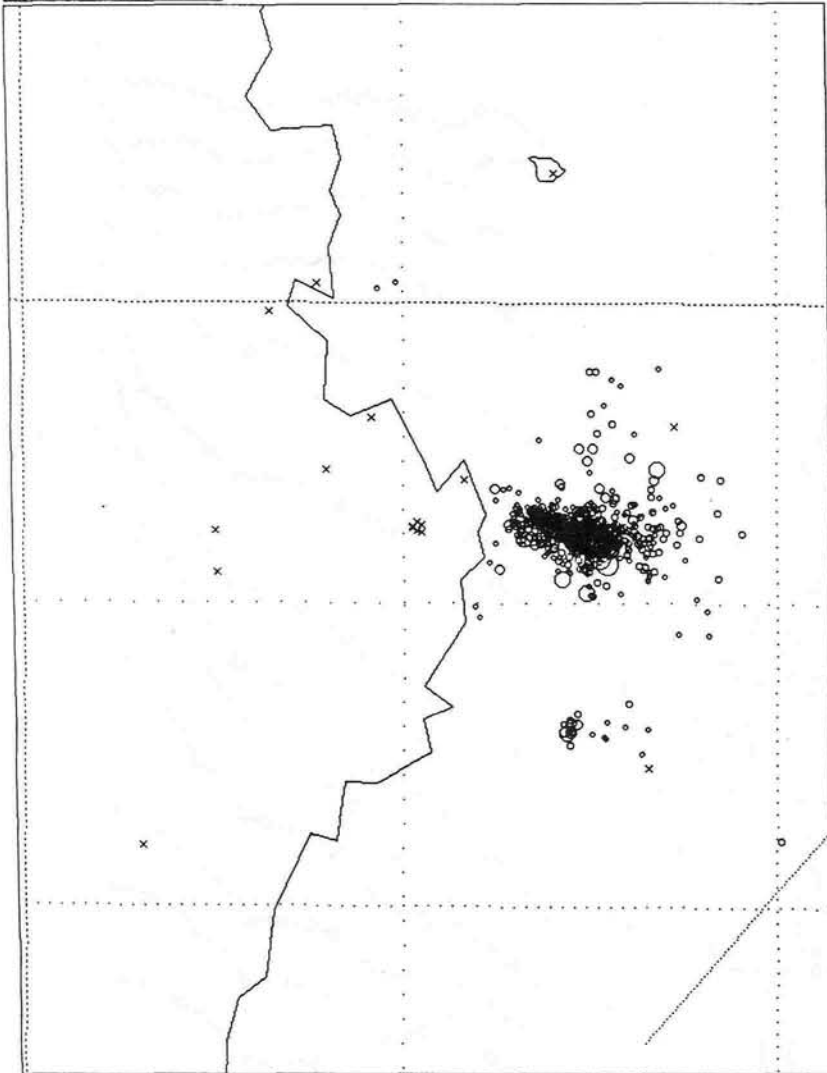
図 II - 2 - 7 地理院のデータから計算した1年間の上下変動の時間変化 (石井, 1992)



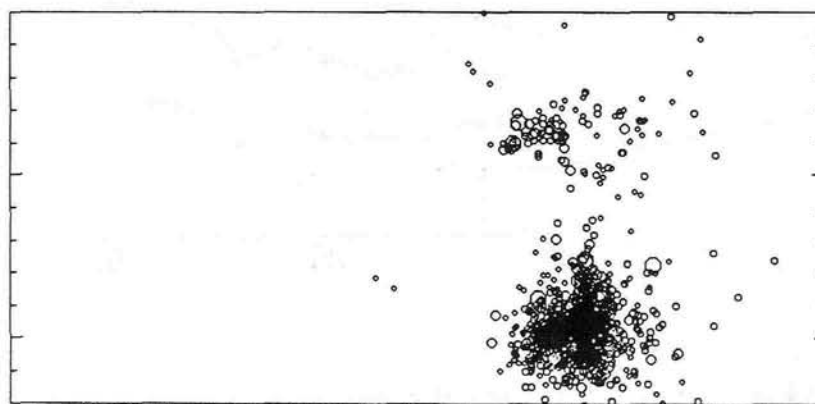
図Ⅱ-2-8 伊豆半島東海岸における上下変動の時間変化(石井, 1992)

34.9345N 139.1319E

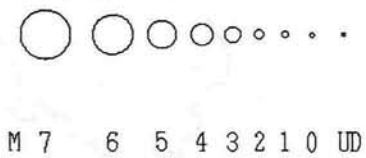
T-S STNS VERT COPY QUIT RFSH



0 12



0 12

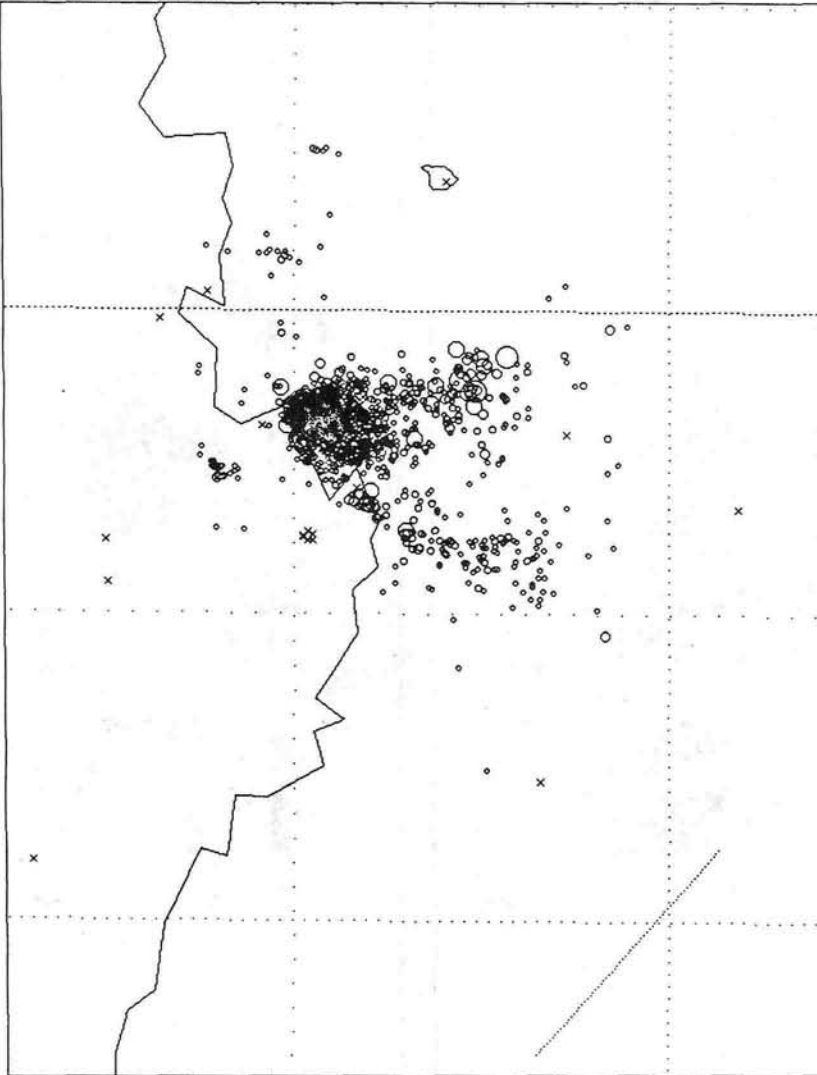


begin 93/01/01 00:00 - 93/01/31 23:59 < H < 12 km < M < +UD -BL N= 960

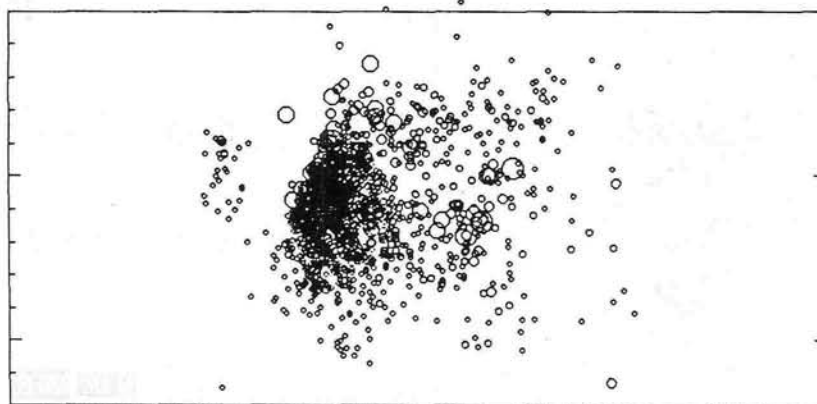
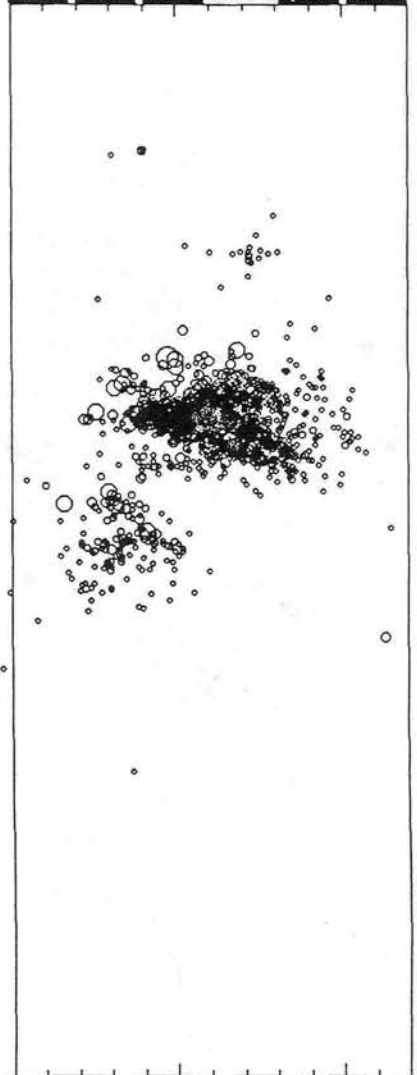
N OE RATIO  
20 UPDAT

図Ⅱ-2-9 伊豆半島東岸における地震の震源分布 (地震研究所による)  
(a) 1993年1/1~1/31における震源分布

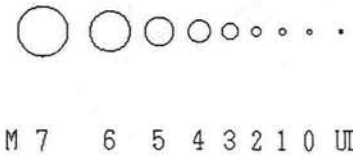
34.9372N 139.1652E



T-S STNS VERT COPY QUIT RFSH



0 12

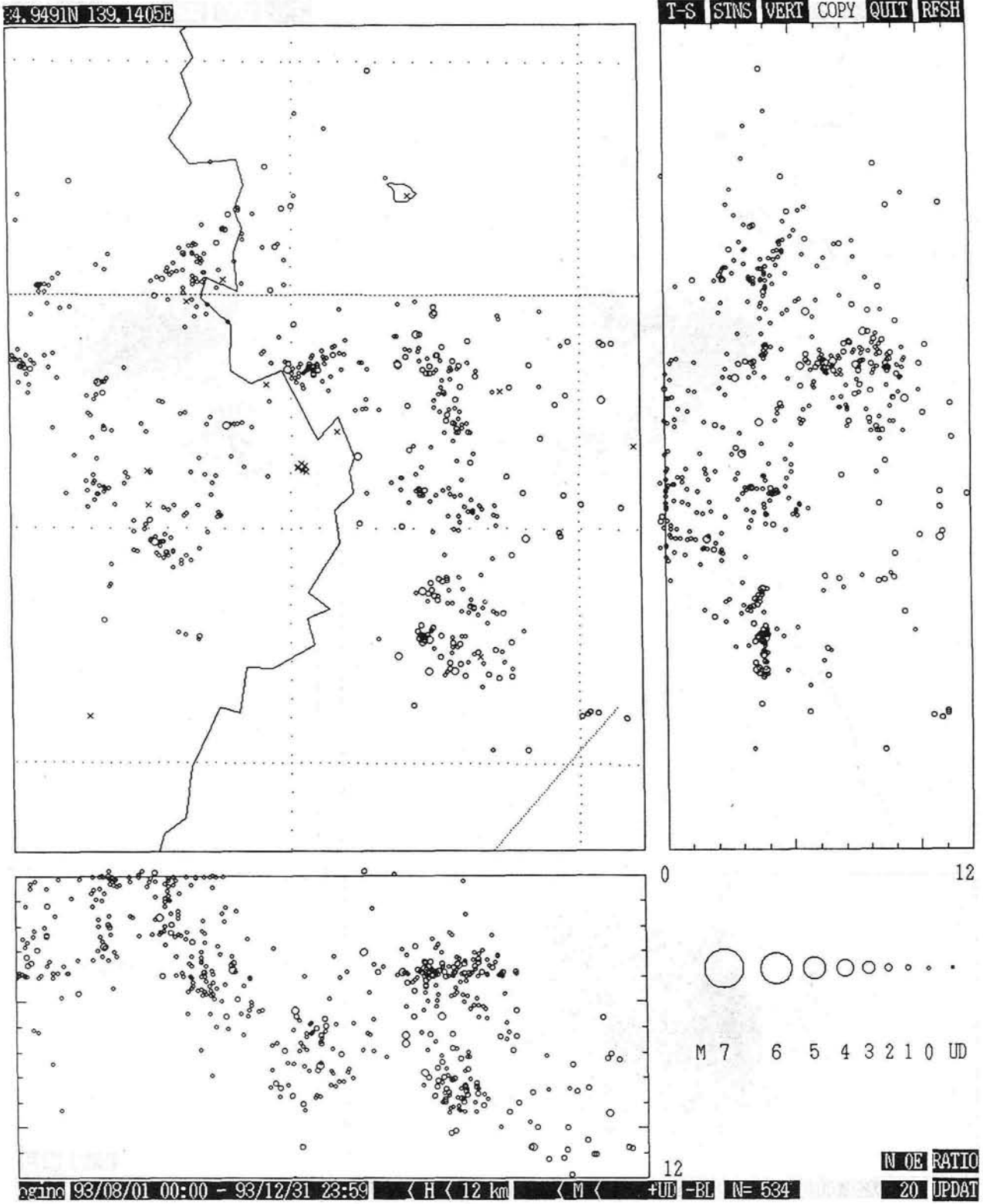


93/05/26 00:00 - 93/06/30 23:59 < H < 12 km < M < +UD -BL N= 1444

N OE RATIO 20 UPDAT

図 II - 2 - 9 つづき

(b) 1993年 5 / 26 ~ 6 / 30における震源分布

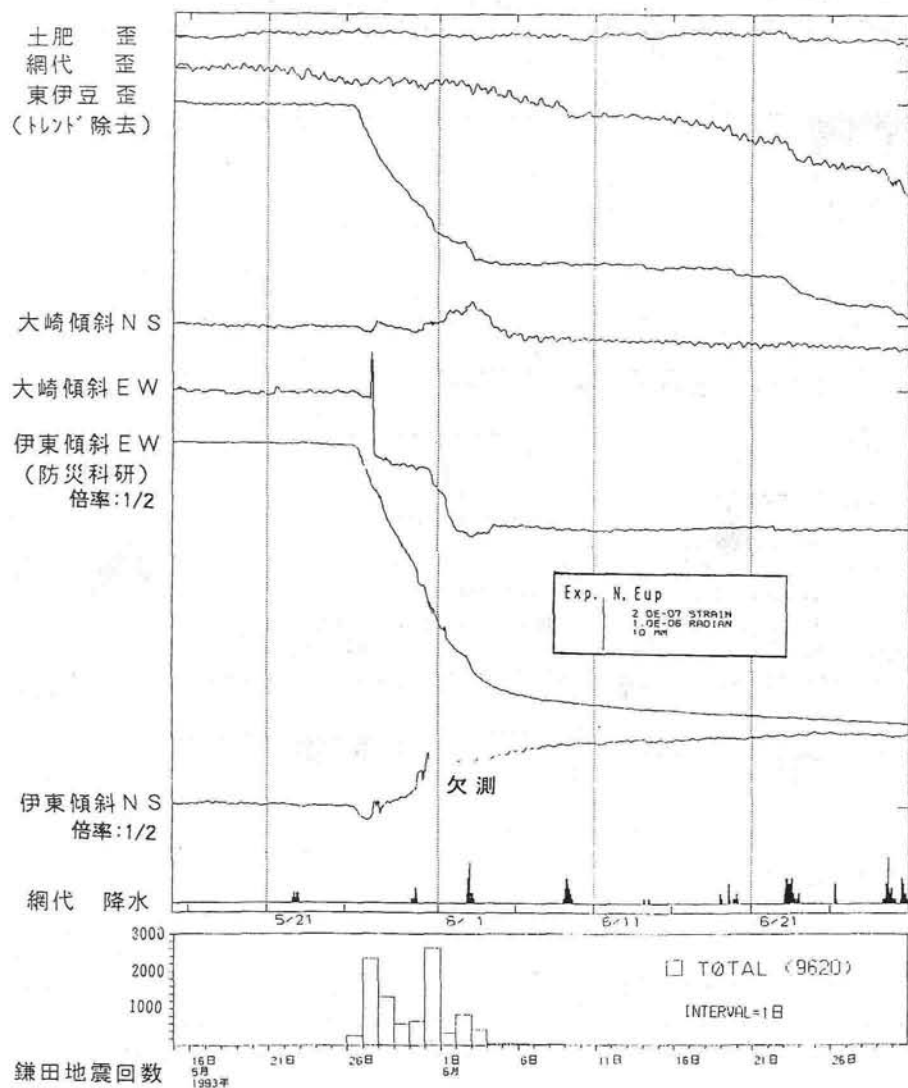


図Ⅱ-2-9 つづき  
(c) 1993年8/1~12/31における震源分布

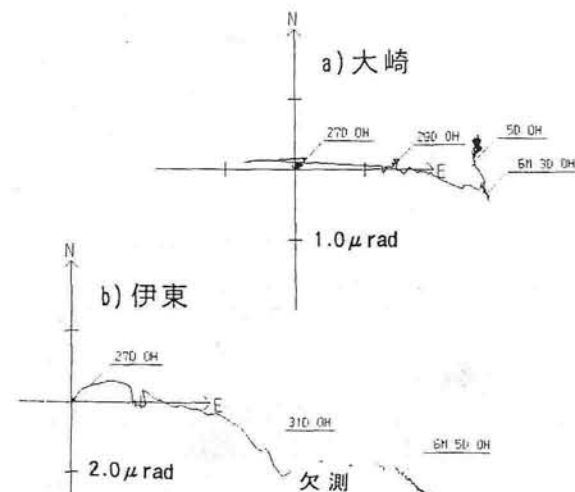


伊豆半島における地殻変動観測結果 (1993.05.15~1993.06.30、時間値)

(A) 時系列変化図



(B) 傾斜ベクトル図 (Down)

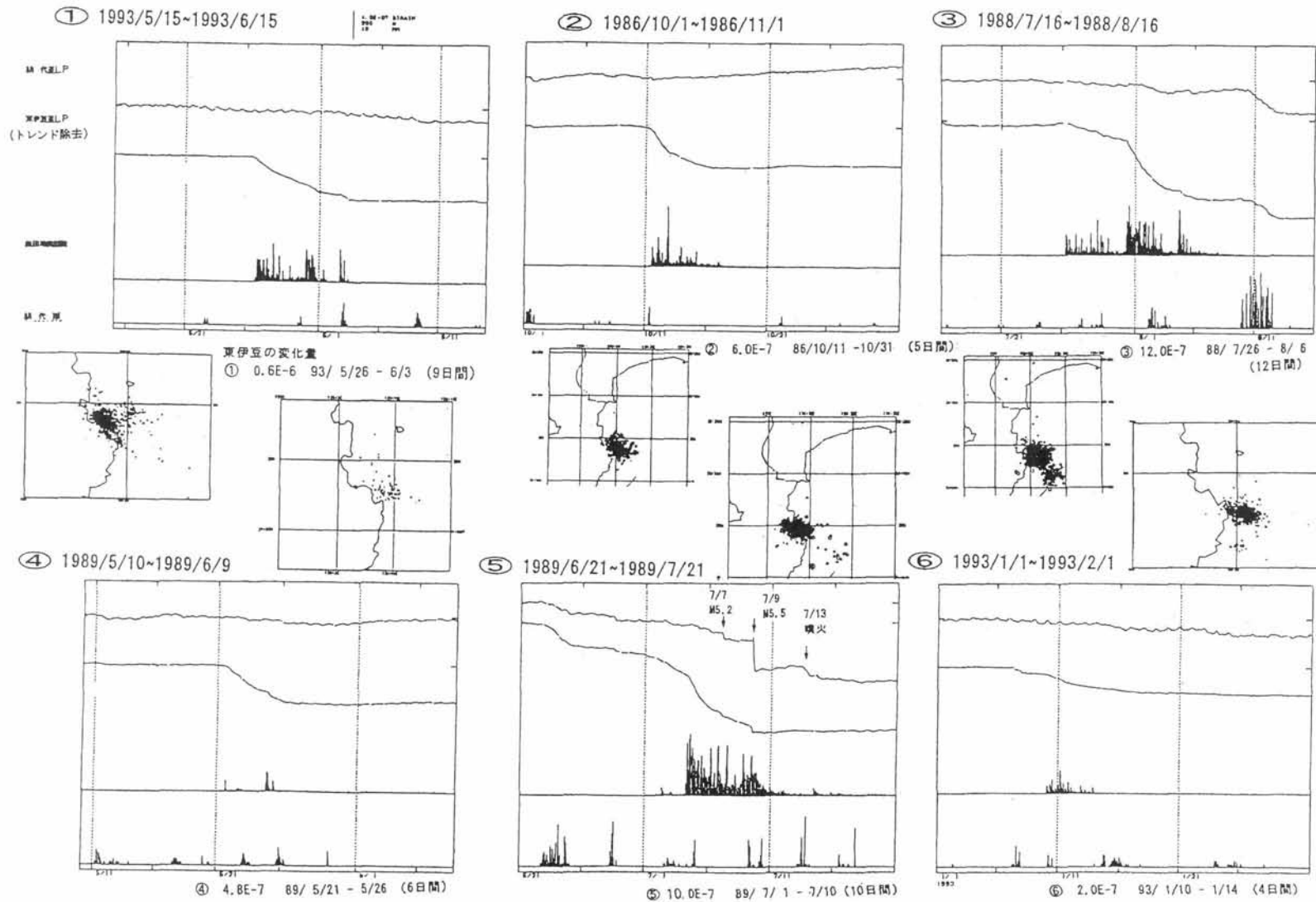


(C) 観測点分布図



図 II - 2 - 10 1993年5/15~6/30における体積歪計, 傾斜計と地震活動との比較が示されている (気象庁による)

東伊豆及び網代の体積歪変化と伊豆半島東方沖の地震活動



図Ⅱ-2-11 東伊豆及び網代観測点の体積歪変化と伊豆半島東方沖の地震活動（気象庁による）

1993.6~8 - 1990.6~7

基準 : 9400 (内湖)  
単位 : mm

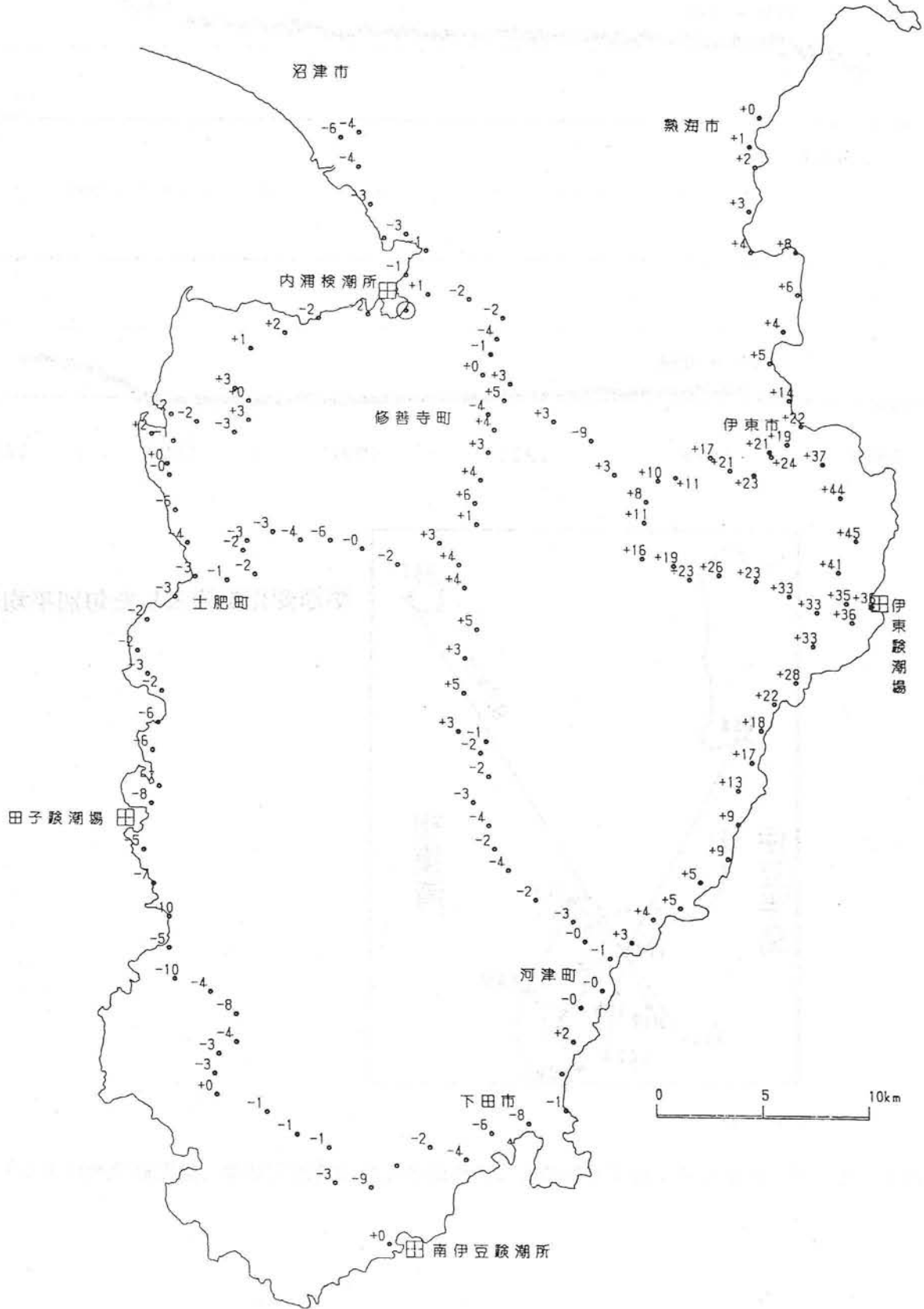
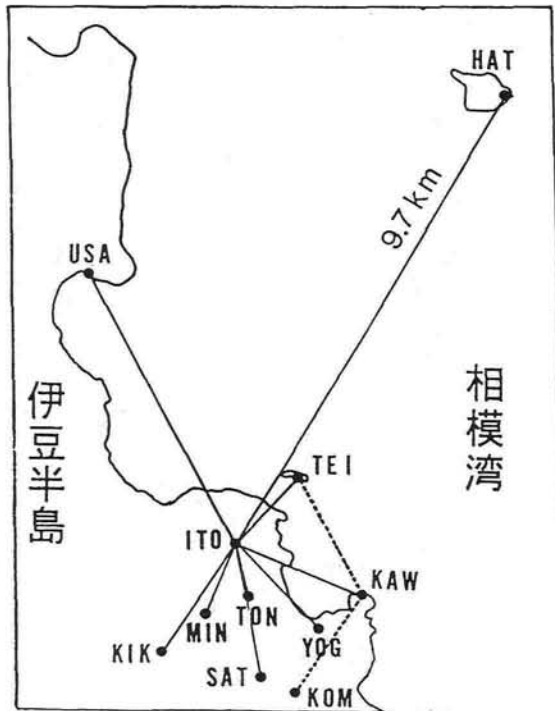
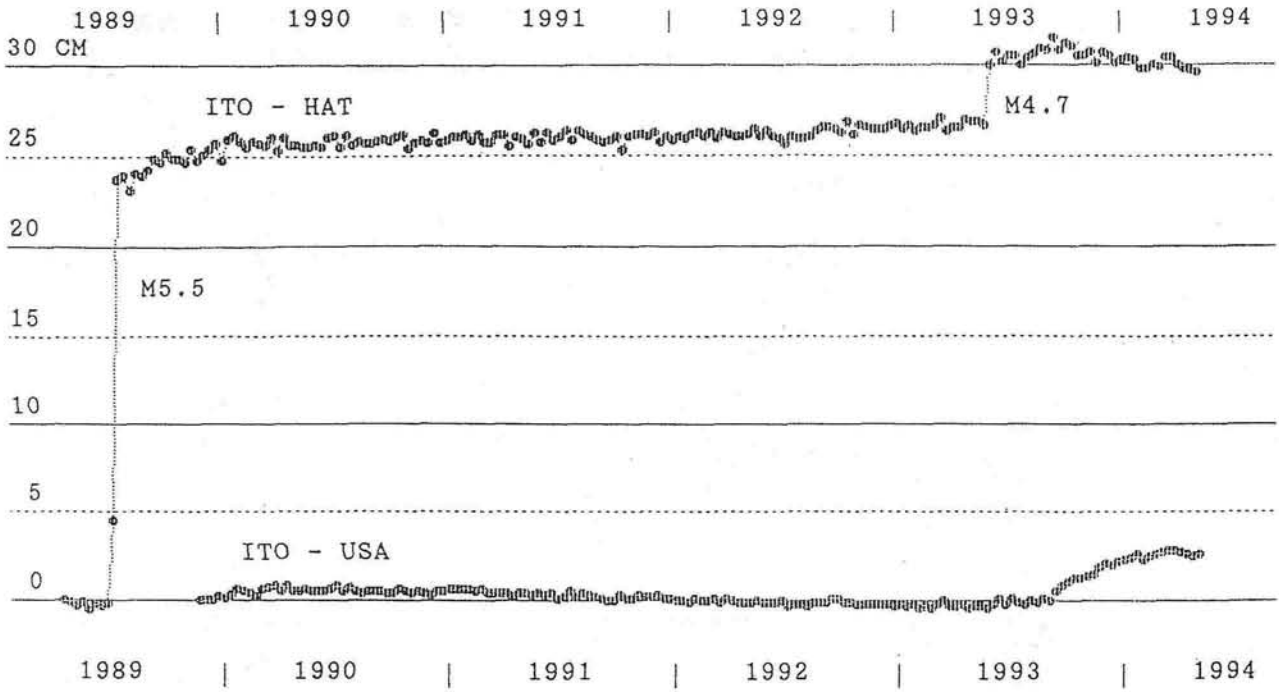
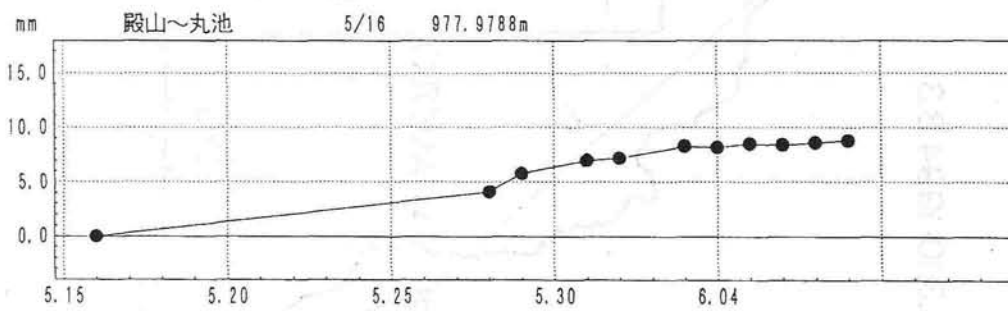
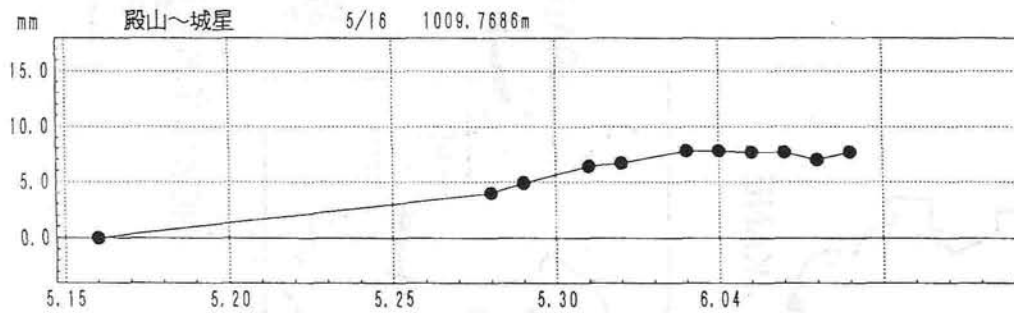
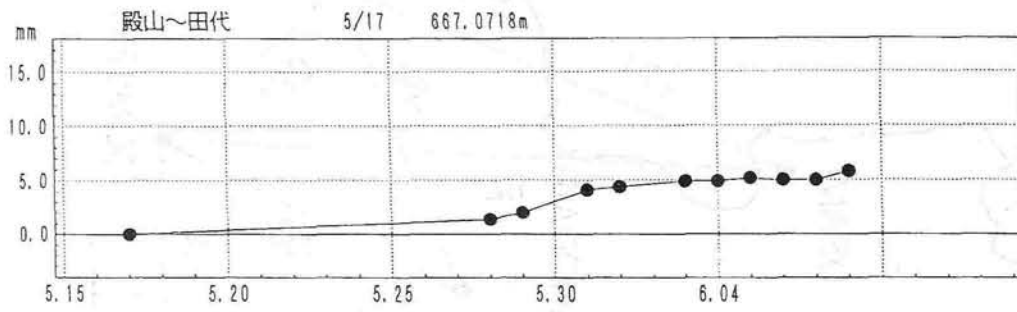
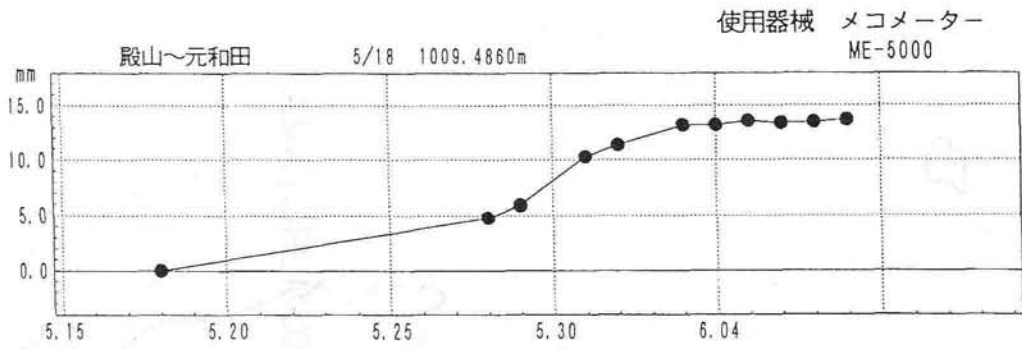


図 II - 2 - 12 1990年~1993年の伊豆半島における水準測量結果 (国土地理院, 1994a)



季節変化を除去した旬別平均値

図Ⅱ-2-13 伊東から宇佐美と初島までの距離変化の連続測定結果（地震研究所による）



図Ⅱ-2-14 川奈における辺長測量観測結果 (国土地理院, 1994a)

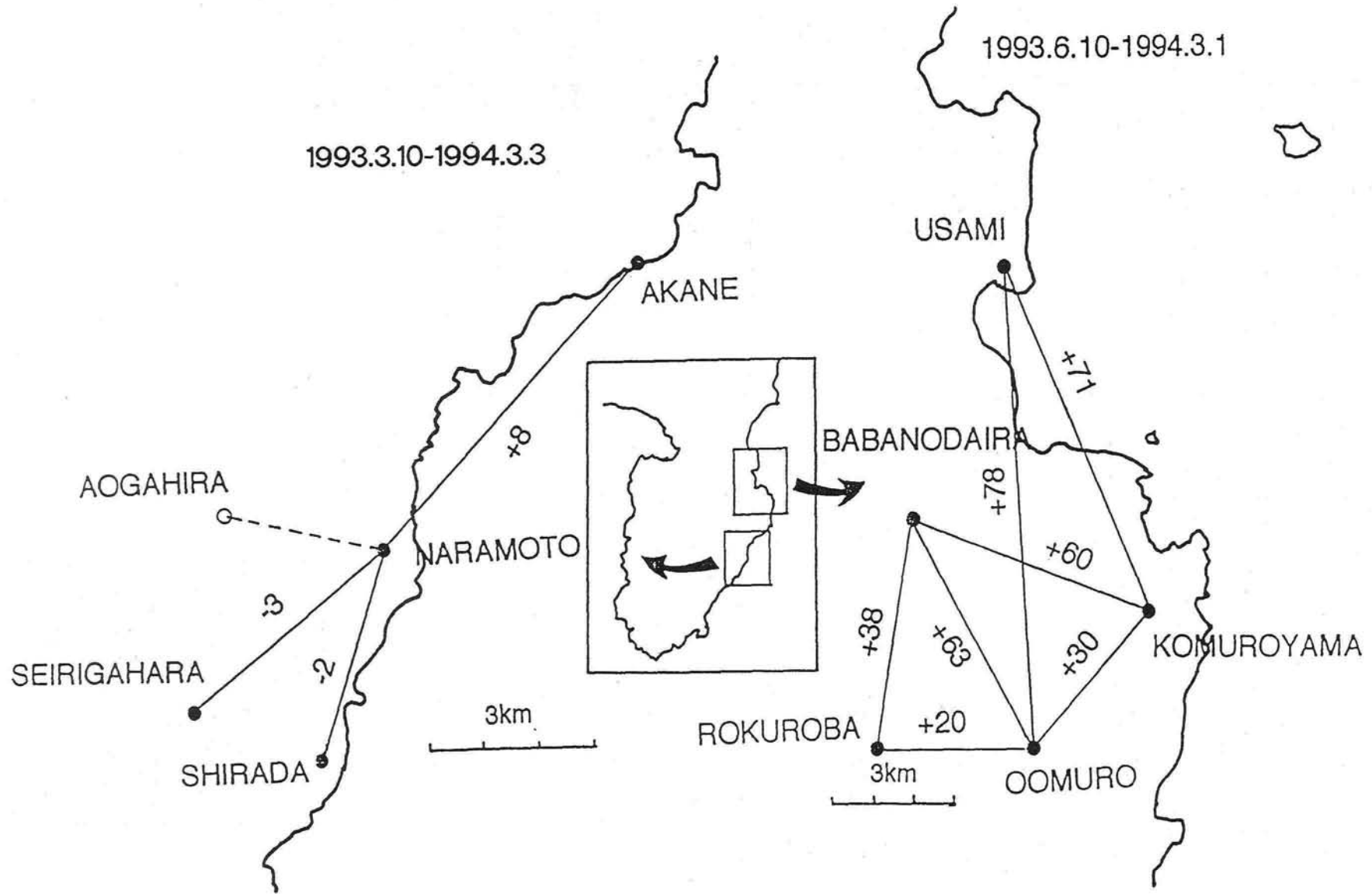
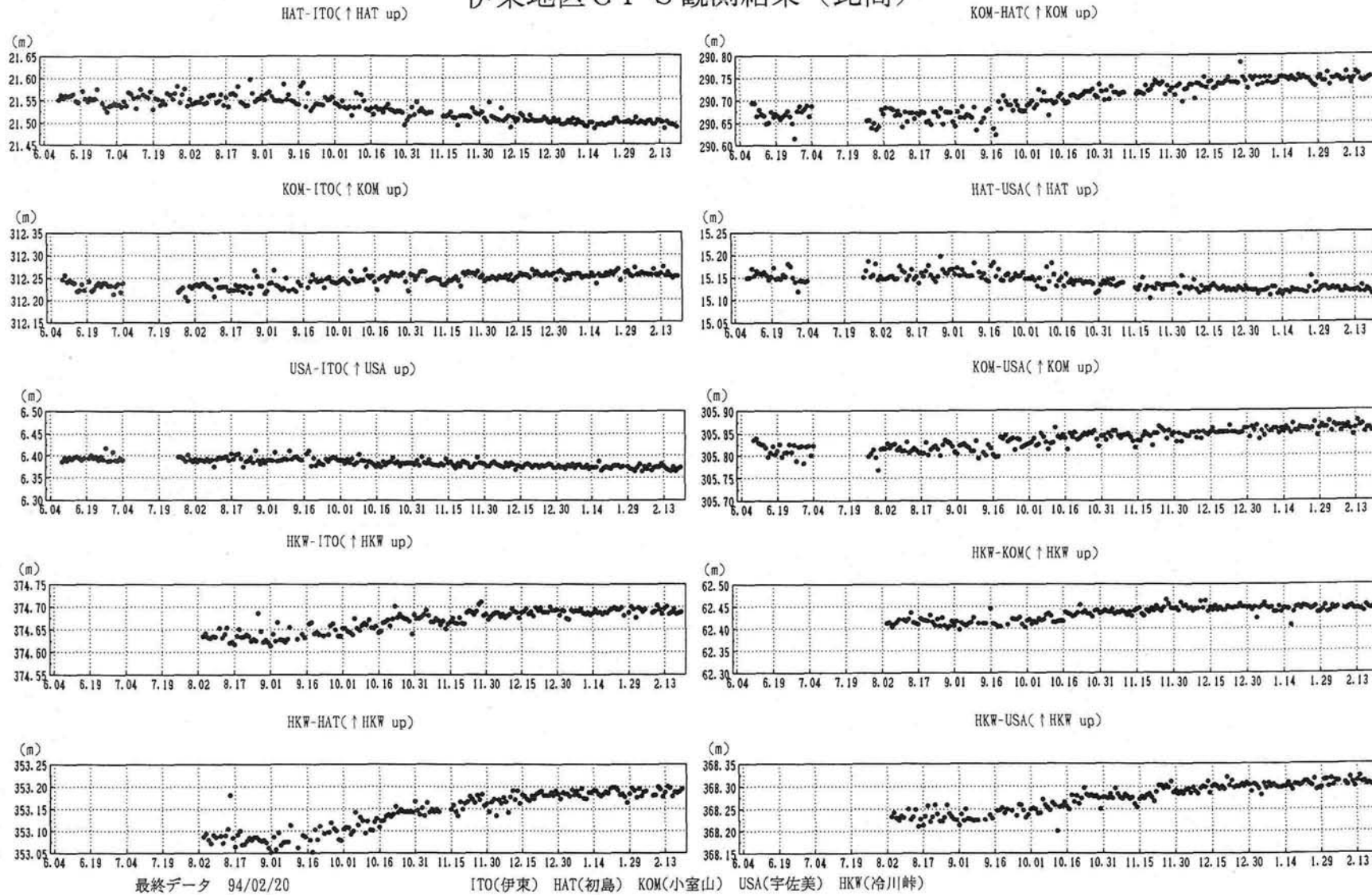
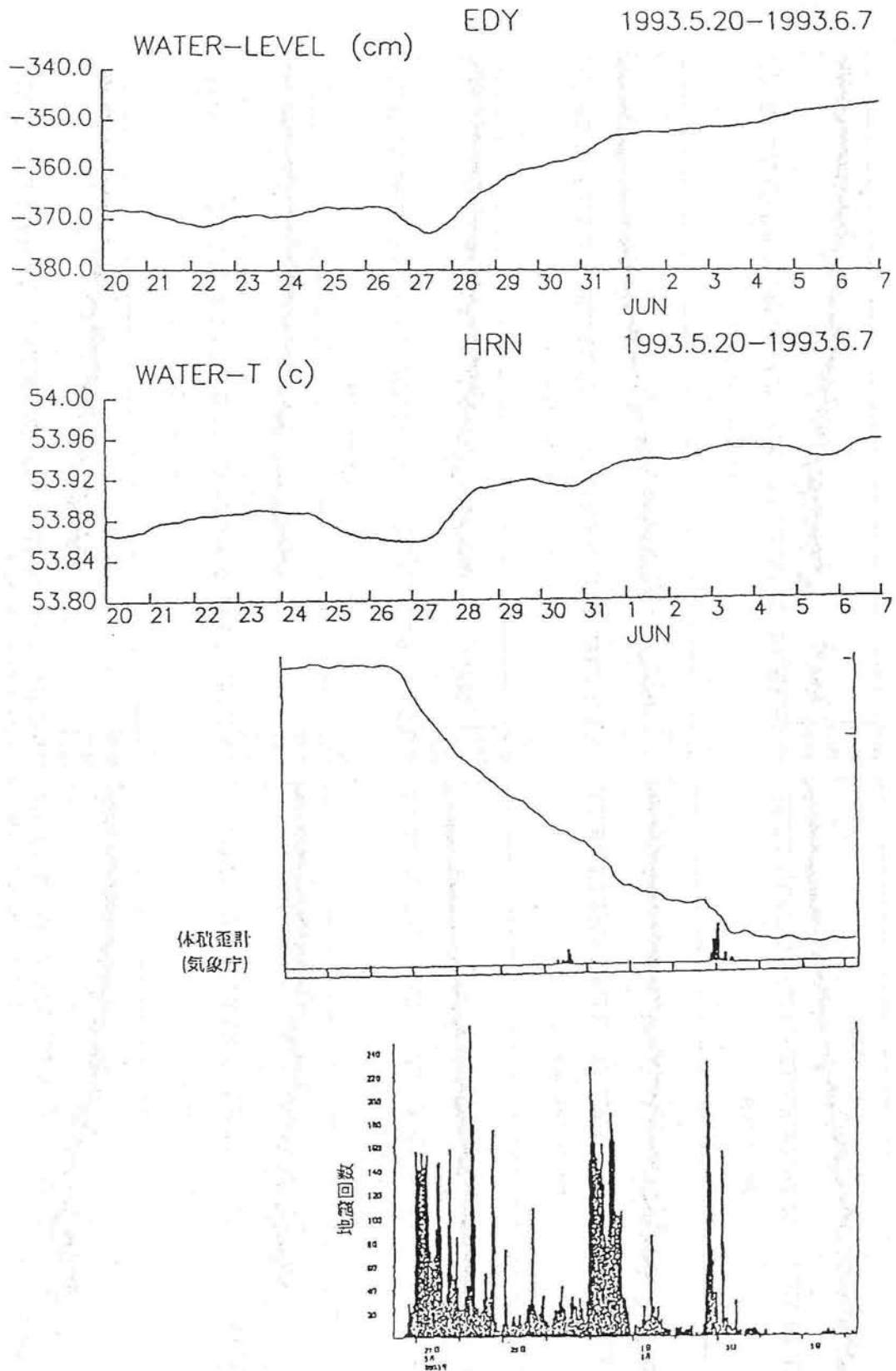


図 II - 2 - 15 伊東光波基線の測定結果（地震研究所，1994c）：辺長変化の単位はmm。

# 伊東地区GPS観測結果（比高）



図Ⅱ-2-16 伊東地区におけるGPSの連続観測結果（国土地理院，1994b）



図Ⅱ-2-17 伊豆半島東方沖地震活動（1993年5月26日から6月初旬）に伴って観測された変化：伊東における水位(EDY)，水温(HRN)，東伊豆における体積歪計(気象庁)，鎌田における地震回数(気象庁)（東京大学理学部，1994）。



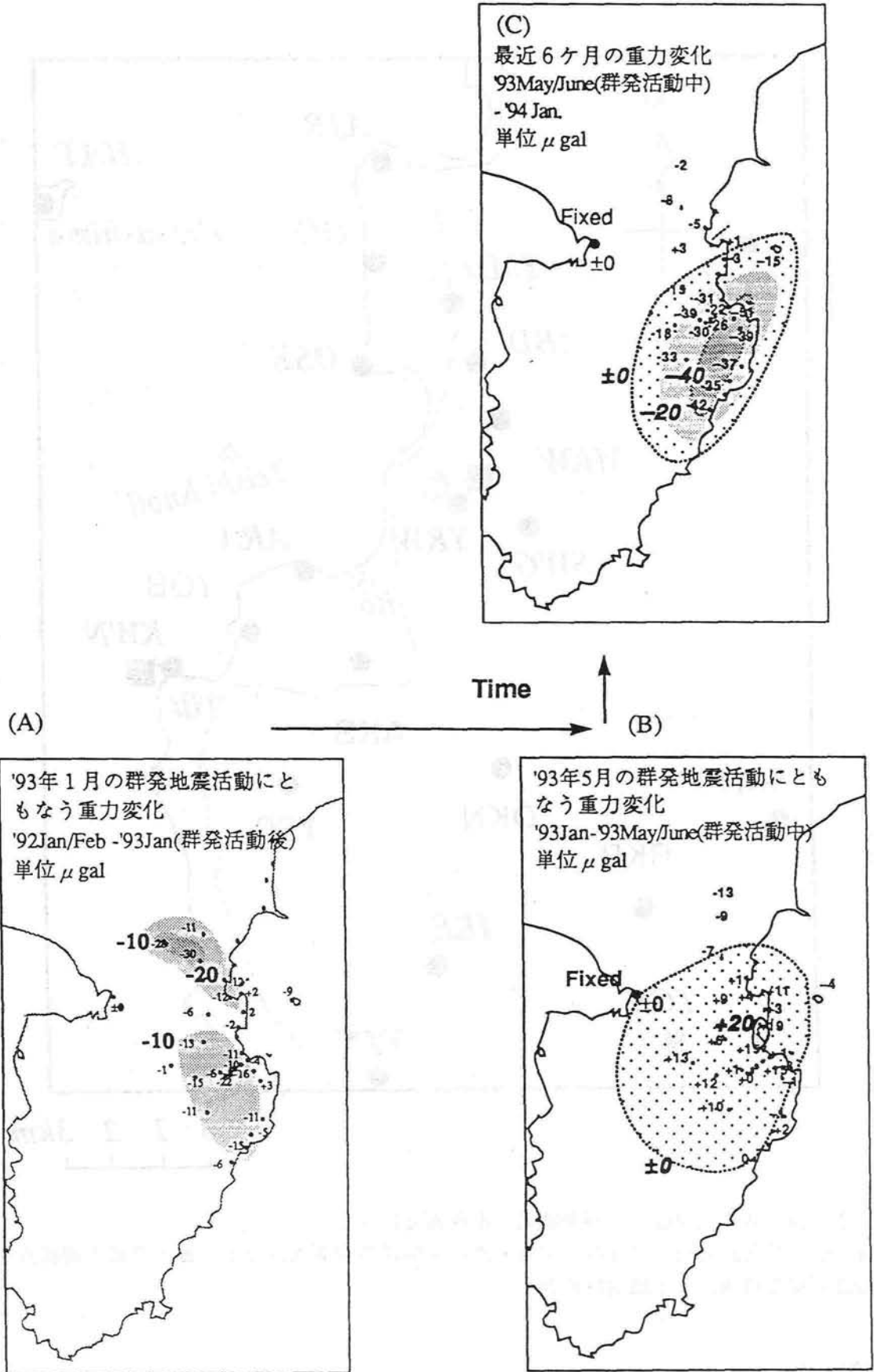
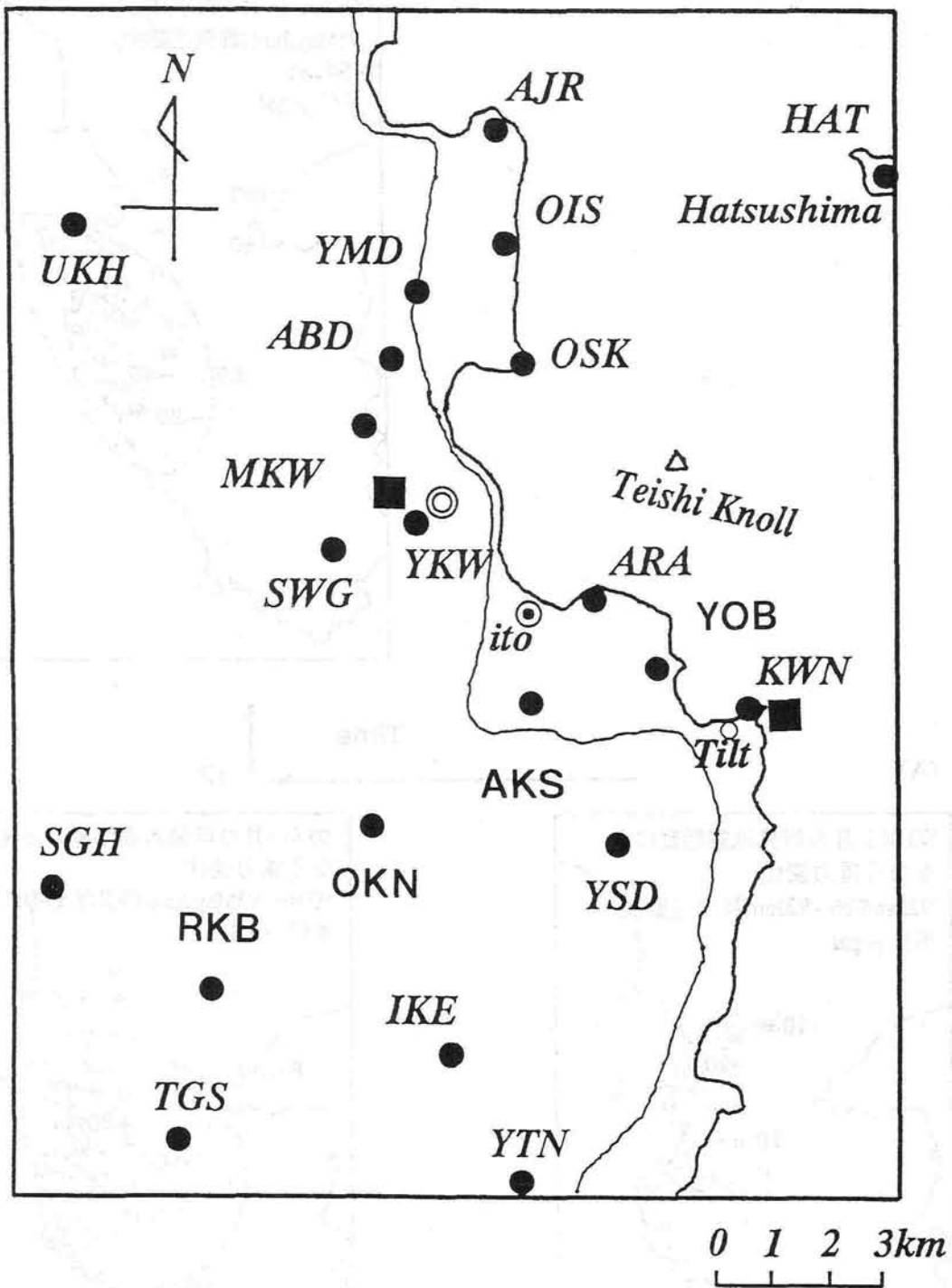


図 II - 2 - 18 1993年1月及び5月の群発地震活動前後における重力測定の結果（地震研究所，1994d）



図Ⅱ-2-19 地磁気全磁力の観測結果（本蔵義守による）

(a) 伊豆半島北東部における地磁気・地電流関係の観測点の分布（●：全磁力観測点，■：地磁気変化観測，◎：地電位観測）

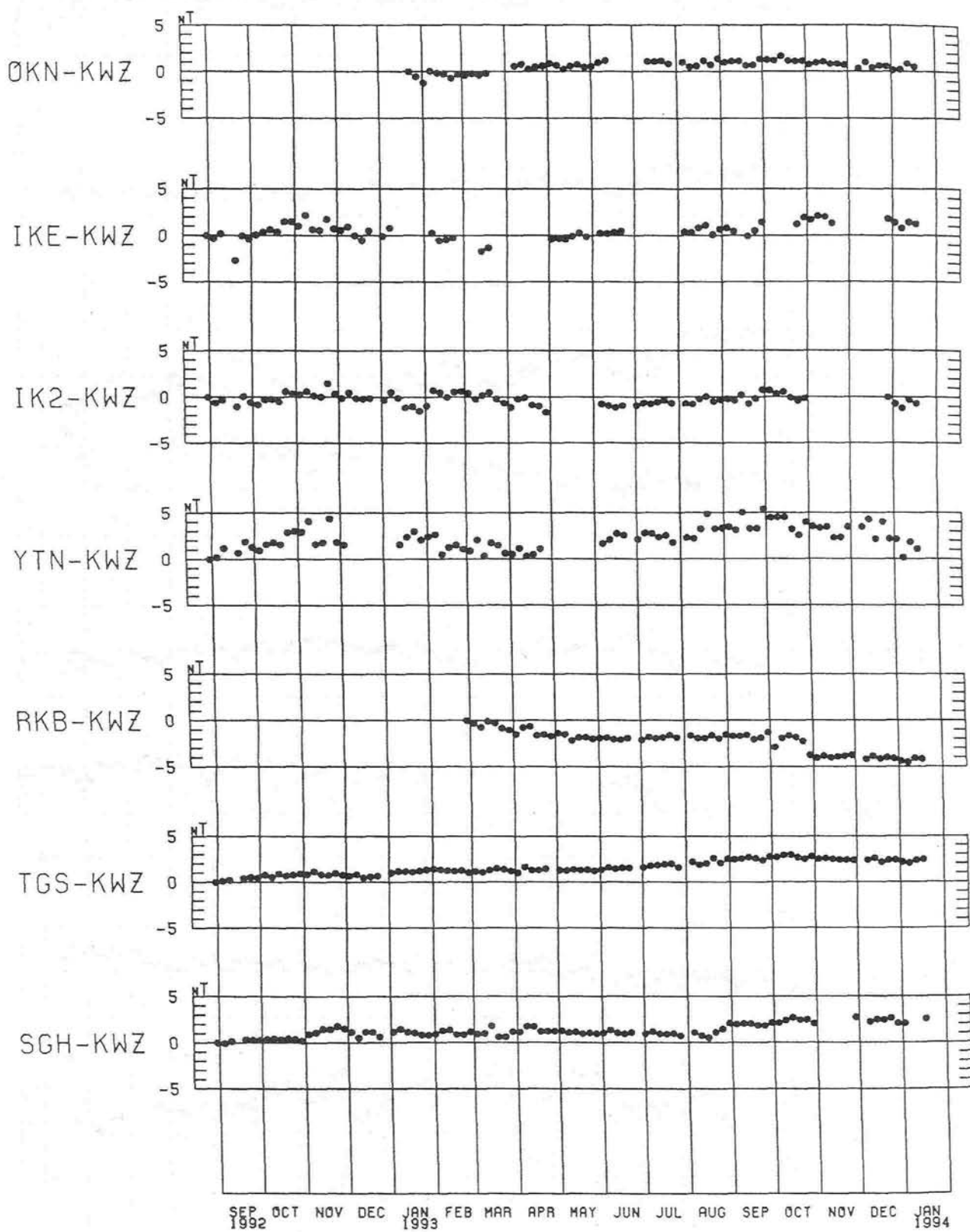
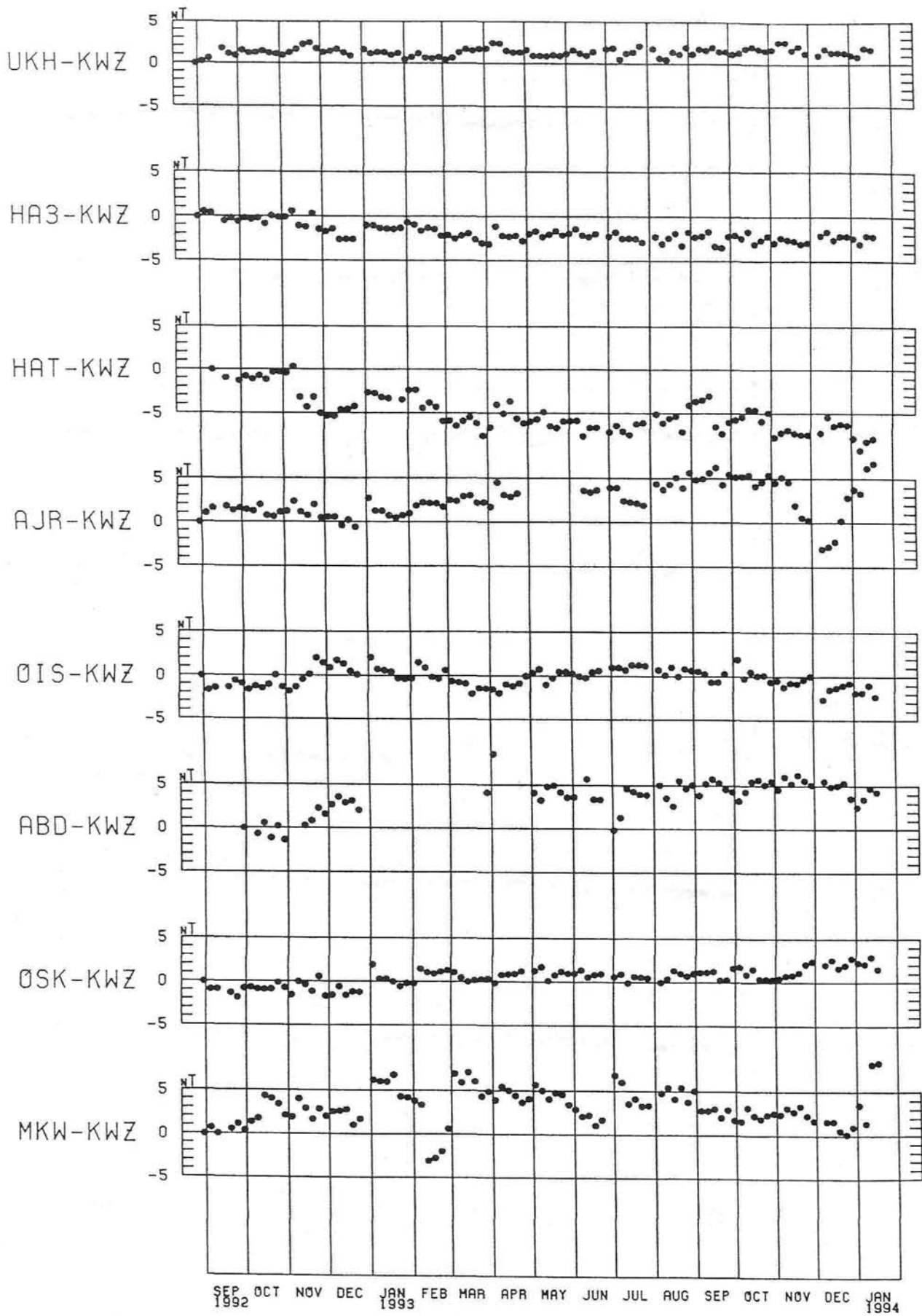


図 II - 2 - 19 つづき

(b) 河津(KWZ)観測点を参照点とした時の各観測点における全磁力の5日平均値の変化。縦軸の一目盛りは1 nTである。



図Ⅱ-2-19(b) つづき

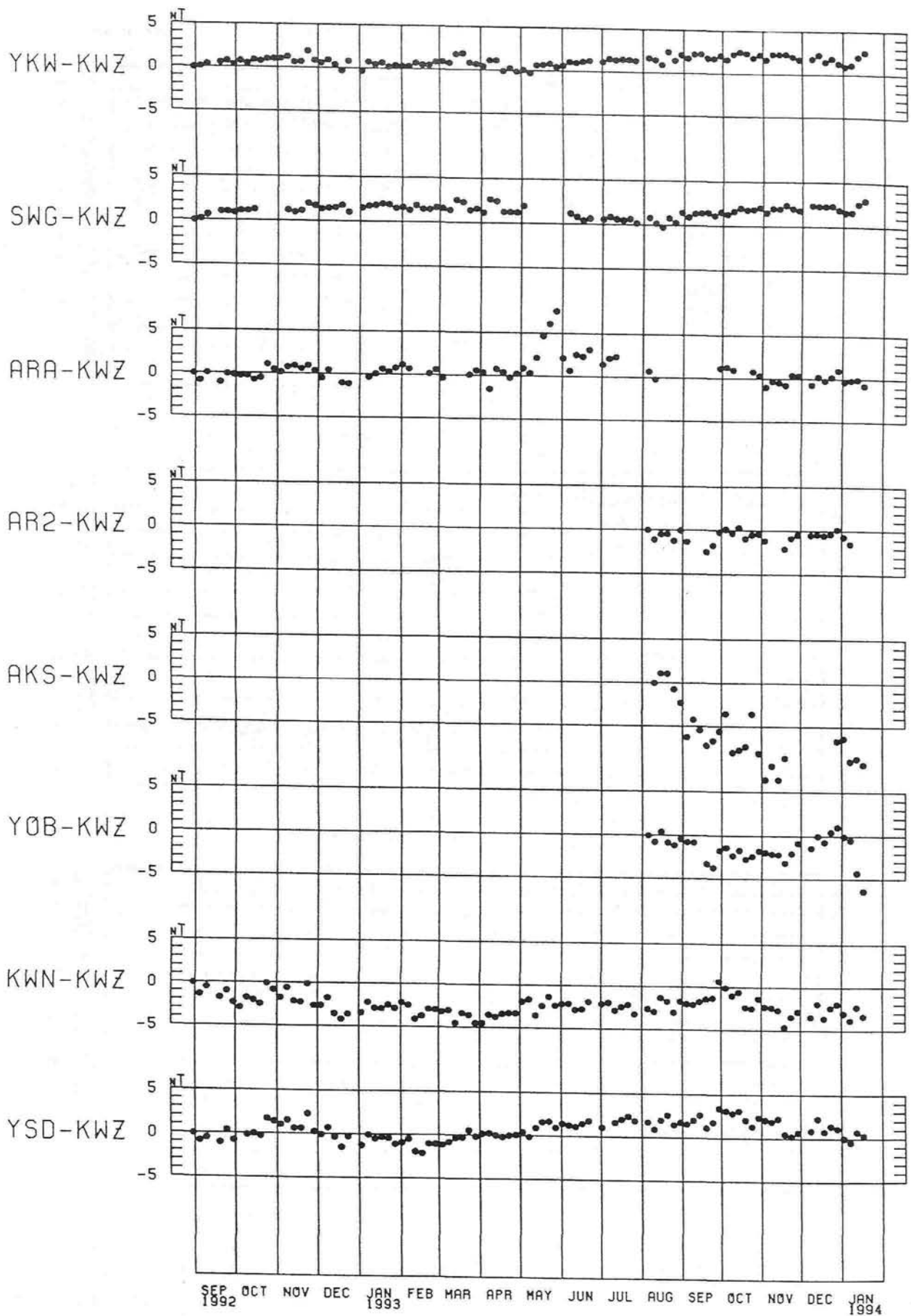


図 II - 2 - 19(b) つづき

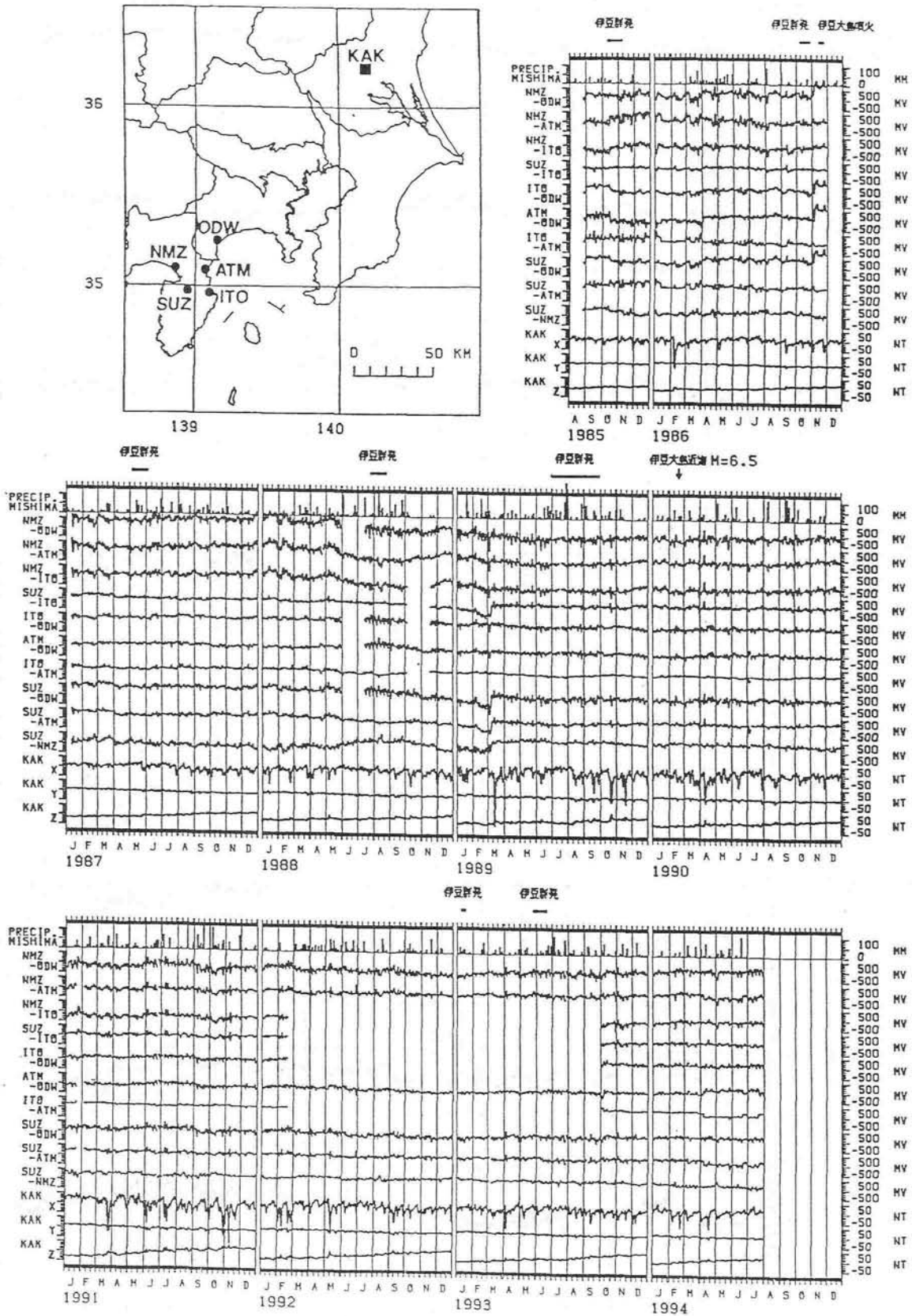


図 II - 2 - 20 長基線地電位観測結果。左上図は観測点の配置で、KAK は地磁気を観測している柿岡地磁気観測所。右図は上から、三島での日降水量(mm)、2番目から11番目までが地電位の日平均値(mv)、下から3つは地磁気変化の南北、東西、上下成分の日平均値(nT)。図の上の方に観測網付近の地震・火山活動を示す(気象研究所・地磁気観測所による)。