

相良における傾斜計連続観測結果と その周辺の広域傾斜変化との関係

里村幹夫*・小林茂樹**・伊藤忠士***・臼井和平****

Local Ground Movement Revealed with a Water-Tube Tiltmeter
at Sagara and Its Relationship with Regional
Crustal Movement in the Tokai District, Central Japan

Mikio SATOMURA*, Shigeki KOBAYASHI**,
Tadashi ITO*** and Wahei USUI****

It has been pointed out that a destructive earthquake will occur in the near future in the Tokai District, central Japan, by the subduction of the Philippine Sea Plate under the Eurasian Plate. In order to detect precursory crustal movements of the earthquake, a long baseline (365m) water-tube tiltmeter was set in March 1983 in the convergent direction of the Philippine Sea Plate, at Sagara, the central part of the source region of the presumed earthquake.

The results obtained by the tiltmeter shows that the ground is consistently tilting to the northwest. This change is reverse to the regional one obtained from the regional leveling surveys.

We carried out leveling surveys and gravity measurements in the area near the tiltmeter site, to investigate the mechanism of this reverse movement in detail.

The results of the leveling surveys and the gravity measurements show that the northwest tilting observed by the tiltmeter is possibly caused by a local folding, while the regional tilting change is caused by the plate motion.

Key words: crustal movement, tiltmeter, active folding, Sagara, leveling survey.

1. はじめに

駿河湾西岸地域は、近い将来大規模な地震が発

生する可能性が高い(ISHIBASHI, 1981)とされている地域であり、観測強化地域に指定されている。静岡県は、この地震の前兆としての地殻変動の異常を捕えるために、1983年3月に静岡県榛原郡

1991年3月18日受理

- * 静岡大学教養部地学教室 Institute of Geosciences, Faculty of Liberal Arts, Shizuoka University, Shizuoka 422, Japan.
- ** 名古屋大学理学部地球科学教室 Department of Earth Sciences, School of Science, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan.
- *** 静岡大学教養部地学教室 (現在 機沖システム開発東海 Oki System Development Tokai Co. Ltd., Shizuoka 420, Japan.)
- **** 静岡大学教養部地学教室 (現在 日本電気株式会社 NEC Corporation, Minato-ku, Tokyo 108-01, Japan.)

相良町鬼女新田(北緯 $34^{\circ} 40.5'$, 東経 $138^{\circ} 11.0'$, 標高105m)に $N60^{\circ} W$ 方向に365mの水管傾斜計を設置し, 同年5月より観測を開始した. 傾斜計の設置位置を図1に示す. 観測システムの詳細は, 里村・他(1986)に記載されている. また, この観測結果は, 地震予知連絡会に常時報告されている(静岡大学・静岡県, 1991).

この傾斜計による観測結果の特徴は, 明瞭な年周変化が現われていること, および約 $1 \mu \text{rad} / \text{year}$ の速度で北西側への傾斜変化が続いていることの2点である. 年周変化は, 降雨による地下水位の変化と気温の変化による影響と考えられる.

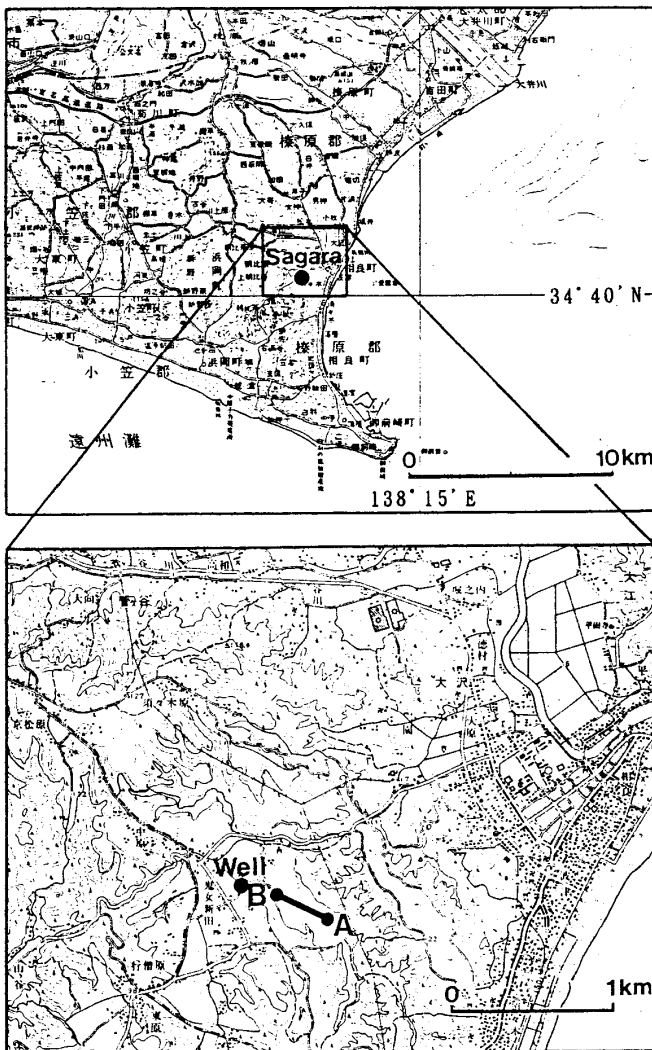


図1 水管傾斜計の設置位置
Fig. 1. Location of the tiltmeter site.

これらの影響を補正するために, 遠山・長谷川(1986)はタンクモデルを用いて雨量データから地下水位の影響を見積り, また, SATOMURA *et al.*(1990)は伝達関数(柳沢, 1980)を用いて気温と降雨の影響を見積った. 一方, 北西側への傾斜変化は, 国土地理院(1991)による掛川-浜岡間の水準測量の結果が示す広域変化とは逆向きの変化である. この傾斜変化の違いの真偽とその原因を調べるため, 水管傾斜計の両端点間(遠山・長谷川, 1986), およびこれらの点と観測点から南東(海岸側)に約1.5km離れた2等水準点BM 2591との間の水準測量を繰り返し実施してきた(SATOMURA *et al.*, 1990). 今回, この水準測量を内陸部にも延長し, 水管傾斜計の示す傾斜変化と, この地域のもう少し広い範囲での傾斜変化との関係を調べた.

2. 水管傾斜計による観測結果

水管傾斜計の観測開始から, 1991年1月末日までの傾斜計による傾斜変化, 気圧, 傾斜計の中間点(C点)と北西端(B点)での室温の日平均値, 傾斜計の北西端(B点)の近くの民家の井戸の水位, および牧ノ原アメダスによる日雨量を図2に示す.

観測された傾斜変化には, 夏に南東側へ, 冬に北西側へ傾斜する明瞭な年周変化が含まれている. また, 雨が降ると南東側へ傾斜する傾向がみられる. 1989年以降は, 1年周期の変化よりも半年周期の変化が顕著になり, 1988年以前とは異なった年周変化がみられる.

この年周変化の主な原因として次の2つが考えられる.

- (1) 観測計器の被りが浅く, 年較差 15°C 以上もの温度変化を受ける影響
 - (2) 年間5m以上もの地下水位変化による影響
- これらの年周変化を取り去るために, ここでは, この年周変化は当日の室温と50日前から当日までの降水の影響の重ね合わせと考え, 伝達関数(柳沢, 1980)を用いてその量を見積った. 伝達関数は次式で与えられる.

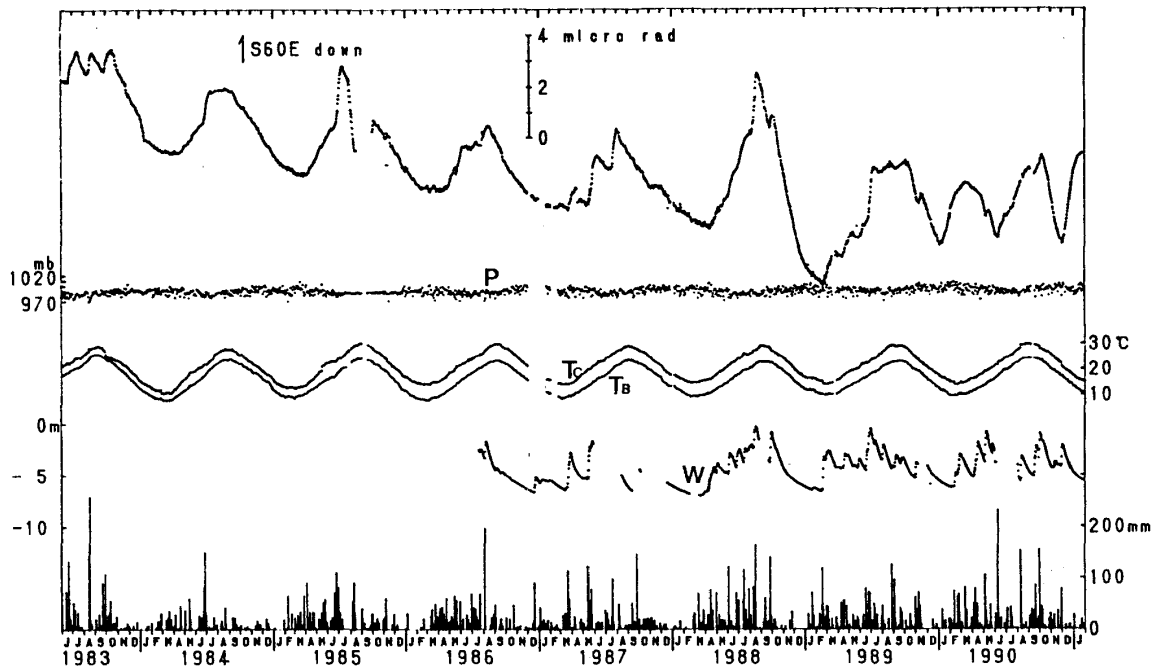


図2 水管傾斜変化, 気圧 (P), 傾斜計の中間点 (T_c) と北西端 (T_b) での温度, 北西端近くの井戸水位の日平均値, および牧ノ原アメダスによる日雨量 (1983年6月から1991年1月).

Fig. 2. Daily mean values of the tilt, atmospheric pressure (P) and room temperatures (T_c: at the central part of the tiltmeter system, T_b: at the northwest end of the tiltmeter system), ground water level at the well near the northwest end of the system, and daily precipitation near the tiltmeter site. (June, 1983–January, 1991)

$$Y(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + bT(t) + \sum_{i=0}^{50} c_i P(t-i) \quad \dots\dots(1)$$

ここで, $Y(t)$, $T(t)$, $P(t)$ は, それぞれ第 t 日の傾斜, 室温の日平均値, および日降水量である. a_1, a_2, a_3 は傾斜経年変化に対する係数, b は室温の傾斜変化に対する影響の係数, c_i ($i=0$ から 50) は降水量の影響についての係数である. これらの係数を全観測期間のデータから最小二乗法で求めた. その結果 $b=0.16 \mu \text{ rad}/^\circ\text{C}$ となり, c_i は図3に示す値となった.

図3から, 降雨による影響は, 降雨後 16~17 日で最大になり, その後ゆっくり減少していくが, 50日以上続くことが分かる. また, 伝達関数の降雨の影響は, 実測の地下水位変化とよく一致しており, 1 cm の地下水位変化に伴う傾斜変化は約 $2 \times 10^{-9} \text{ rad}$ になる.

この伝達関数によって求めた降雨と気温の影響量を, 傾斜計の日平均値から差引いた結果を図4に示す. 1988年前半までは年周変化はこの差引きによりかなり小さくなり, 経年的にはほぼ 1μ

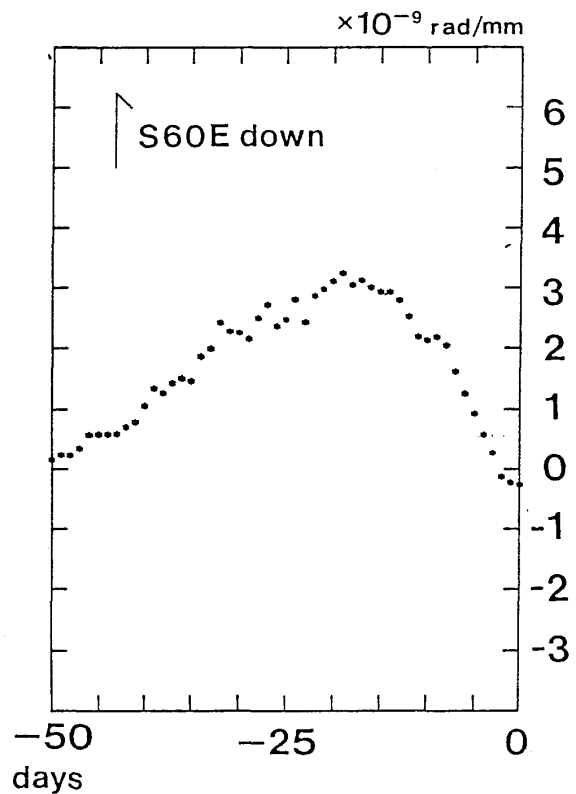


図3 伝達関数(1)の降水量の傾斜に対する影響の係数 c_i ($i=0 \sim 50$).

Fig. 3. Calculated values of the coefficient c_i of the linear transfer function (1).

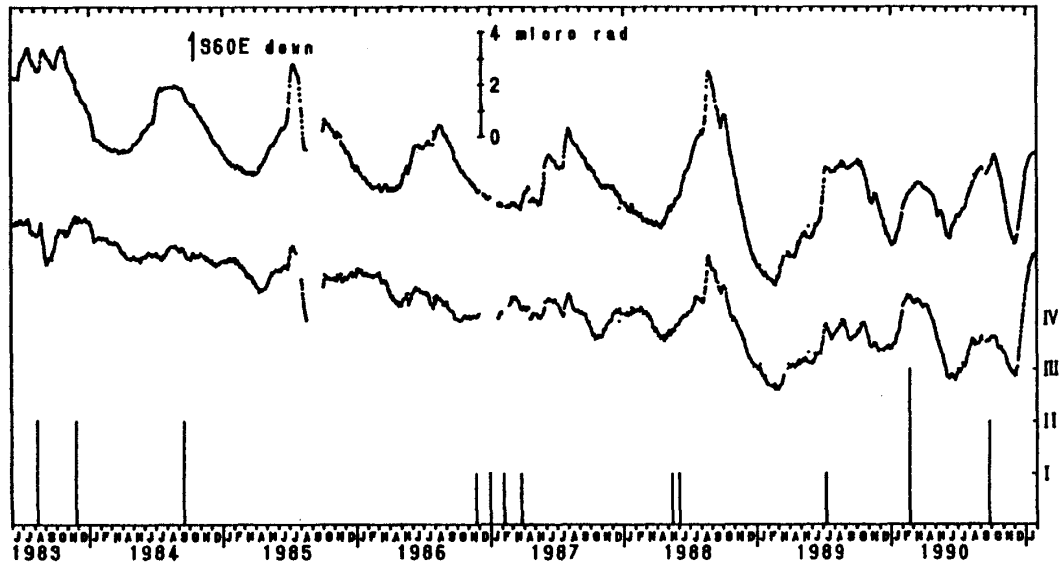


図4 傾斜変化の日平均値と、それから雨量と温度の影響を取り除いた結果、縦線は御前崎における有感地震の震度（1983年6月から1991年1月）。

Fig. 4. Daily mean values of the tilt (upper), and those corrected for the precipitation and temperature influences (middle). Seismic intensities of the felt earthquakes at Omaezaki are shown on the bottom (June, 1983 - January, 1991)

rad/yearの一定の速度で北西側(内陸側)に傾斜変化していたことがわかる。また、傾斜計の両端点間の水準測量からもこの北西側への傾斜変化が観測されており、この傾斜変化は、ドリフト等の傾斜計の機械的な誤差によるものではないことが確認されている(遠山・長谷川, 1986; SATOMURA *et al.*, 1990)。一方、この地域は、広域的には駿河トラフからのフィリピン海プレートの潜り込みに伴い、駿河湾沿岸が内陸部に対し沈降しており、国土地理院の水準測量でも掛川に対して駿河湾沿岸地域は4 mm/year程度の速度で沈降を続けていることが確認されている(国土地理院, 1990)。この水準変化は傾斜変化に勘算すると約 $0.3 \mu\text{rad}/\text{year}$ となる。したがって、この傾斜計が示す北西側への傾斜変化は、この地域の広域的な変動とは逆の向きであり、1桁大きい変動である。

1988年後半以降は、季節変化の様相が変化したため、同じ伝達関数を用いても年周変化はほとんど取り除かれていない。また、北西側への傾斜変化もほとんど止ったように見える。

この傾斜変化の様相の変化の原因については、井戸水位の変化に1988年以前とそれ以後でとくに明瞭な差はみられないし、他の手がかりも今のところ得られていないので、今後あらためて考察することにして、本報告では、傾斜計の示す北西側への傾斜と広域の変動との関係について考察する。

3. 水準測量結果と地殻変動モデル

傾斜計が示す傾斜変化と、この傾斜計の周辺の地殻変動との関係を調べるため、従来から、水管傾斜計の両端点間および観測点から南東(海岸側)に約1.5km離れた2等水準点BM2591との間の水準測量を繰り返してきた。今回はこの水準路線を内陸部に約2.5km延長し、1983年～1984年に国土地理院により実施された水準測量の結果(西, 1985)と比較した。比較した水準点の位置を図5に示す。また、水準点の高さ変化を図6, 図7に示す。図6はBM2591を基準とした各水準点の

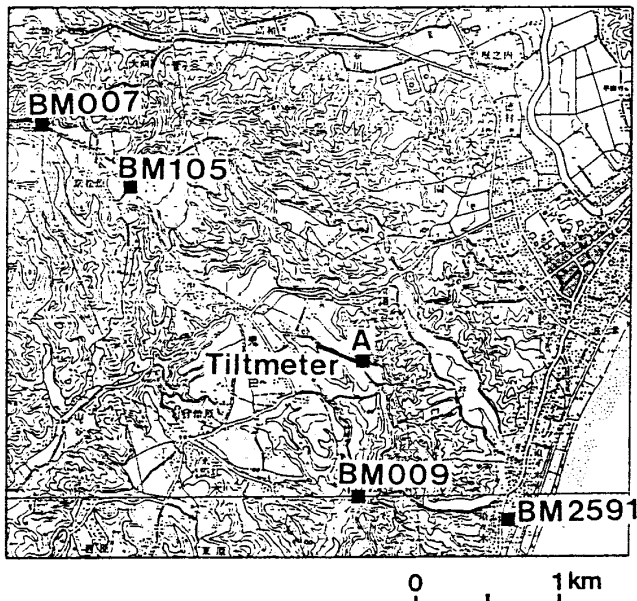


図5 傾斜計設置地域周辺の水準点の分布.
Fig. 5. Location of benchmarks near the tiltmeter site.

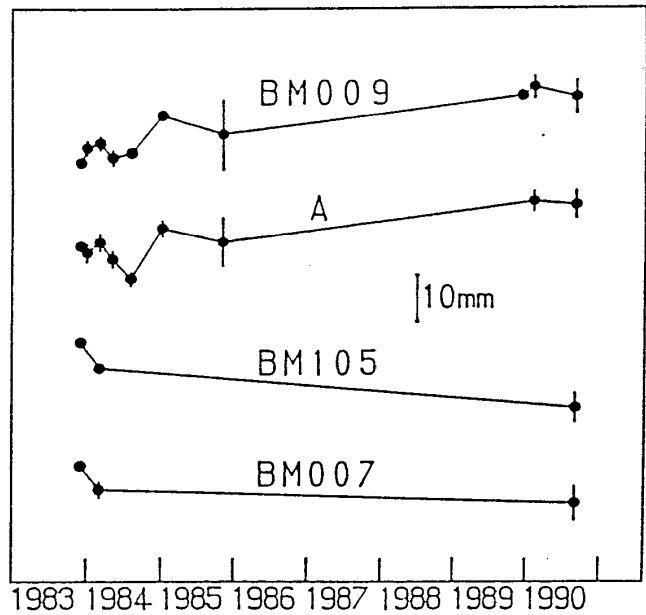


図6 BM2591を基準とした各水準点の高さ変化.
Fig. 6. Changes in the height difference at each benchmark referred to BM 2591.

変動であり、図7は隣の水準点との変動の差を表わしている。

図6を見ると、BM2591に対しBM009とA点(傾斜計の南東端)は隆起し、BM105とBM007は沈降していることが分かる。また図7に示されている結果では、A点とBM009の間の変動はほとんどみられないが、A点に対しBM105が大きく沈降している。

一方、傾斜計設置地点付近の基盤をなす相良層群は、ほぼ北東-南西方向の軸と約3kmの波長を持つ背斜・向斜構造を形成していることが知られており、このうち、傾斜計の北西約数100m付近に比木向斜軸が通ると推定されている(千谷, 1929; 池谷・堀江, 1982)。また、更新世後期における御前崎地域の段丘の変形は、フィリピン海プレートの潜り込みに伴う側方圧縮の結果であると考えられている(杉山・他, 1987; 桂島・他, 1987)。

経年的には、A点に対しB点(傾斜計の北西端)が沈降しているという傾斜計の観測結果を考慮すると、図8に示すようなモデルが考えられる。こ

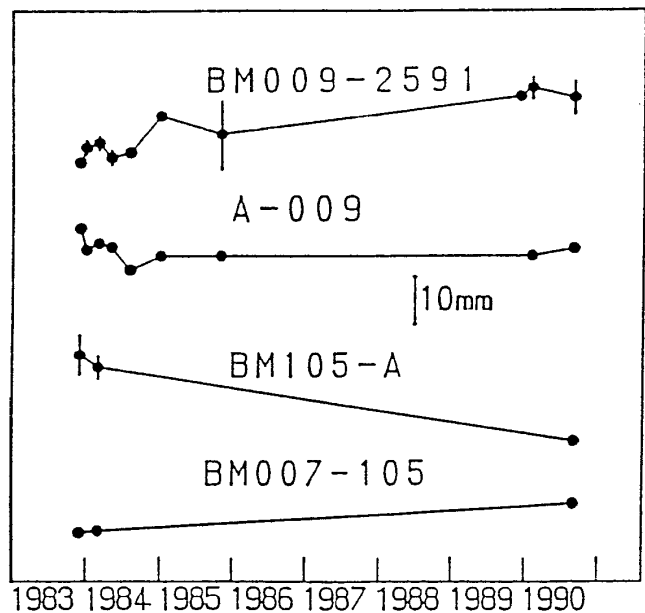


図7 隣り合う水準点の比高変化.
Fig. 7. Changes in the height difference between adjacent benchmarks.

の地域は、広域的にはフィリピン海プレートの潜り込みに伴い、北西-南東方向に圧縮されながら駿河湾沿岸側が沈降している。A点やBM009付近には、この圧縮によって北東-南西方向に向斜

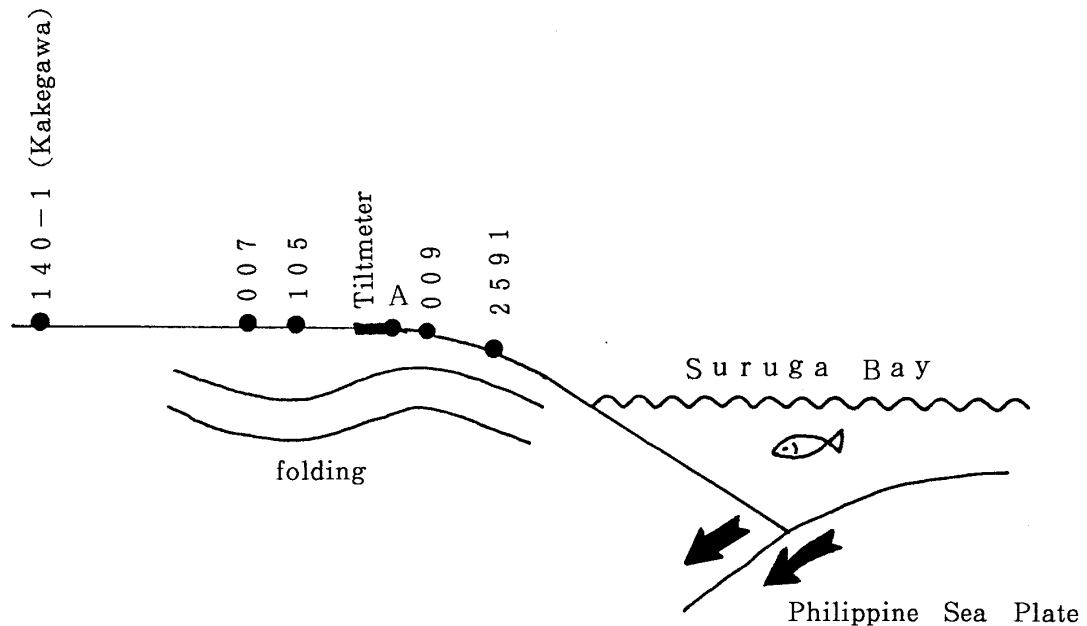


図8 傾斜計が示す傾斜変化が広域の傾斜変化と逆になる理由を説明するモデル。

Fig. 8. A possible model to explain the reason why the ground tilt at the tiltmeter site is reverse to the regional one.

軸をもつ褶曲構造が発達している。とくに、傾斜計の設置されている位置ではこの活褶曲活動による内陸側への傾斜変動($\sim 10^{-6}$ rad/year)の方がプレート運動に伴う広域的な海岸側沈降の変動($\sim 10^{-7}$ rad/year)より大きく、その結果傾斜計の位置では内陸側に傾斜変化していると考えられる。

活褶曲の波長、変形速度に関しては河岸段丘の変形や水準測量等によって、主に東北地方の日本海側の褶曲構造について調べられてきた(例えば、大塚, 1942; 杉村, 1952)。中村・太田(1968)は活褶曲による変形速度は最大 10^{-6} /year に達し、最大変形速度は波長数 km またはそれ以下のものにみられると指摘している。溝上・他(1980)は、新潟県小千谷地域で、水準改測により波長 5~10 km, 最大傾斜速度 10^{-6} /year の活褶曲運動を検出している。

BM2591 と BM007 の間にはあまり大きな水準変化がみられないので、この距離を褶曲運動の波長と考えると、4 km 程度の波長の活褶曲がこの地域に存在することになる。また、傾斜計で得ら

れた 10^{-6} rad/year の傾斜速度は、観測点の位置関係からほぼこの活褶曲の最大傾斜速度を表わしていると考えられる。中村・太田(1968)の波長、変形速度の関係をあてはめると、この活褶曲は最大変形速度で活動しているものの1つといえよう。

4. ブーゲー異常

傾斜計およびその周辺の水準測量により検出された活褶曲活動は、更新世後期における地殻変動と基本的には調和している。このような向斜軸が存在し、褶曲活動が継続しているとすれば、ブーゲー異常に影響を与えている可能性がある。そこで、ブーゲー異常からこの褶曲構造を検出し、地殻変動との関係を調べるために、相良観測点から御前崎にかけての地域で約 170 点の重力測定を実施した。測定は、主に相良、浜岡、御前崎各町の 2 千 5 百分の 1~1 万分の 1 の行政地図の標高点で行なった。これらの標高値は、異なった地図でもお互いに 1 m を越える差はなく、また国土地理院の 2 万 5 千分の 1 地形図とも 1 m 以内で一致し

ている。したがって、地形補正の誤差を考慮に入れても、ブーゲー異常の誤差は0.5mgal以下と考えられる。また、傾斜計の付近および御前崎先端付近では、測定点の間隔が300~400m程度であり、空間的にも褶曲構造によるブーゲー異常変化を調べるために必要な分解能は概ね保証されていると考えられる。

YAMAMOTO *et al.*(1982)のデータを加え、合計約210点のデータを解析した。この地域のブーゲー異常は、内陸部から御前崎の先端に向かって大きくなる傾向がある。一方、標高は内陸部から御前崎の先端に向かって低くなる傾向がある。このようなブーゲー異常と標高との間の広域的な相関関係を考慮し、FUKAO *et al.*(1981)の方法を用いて

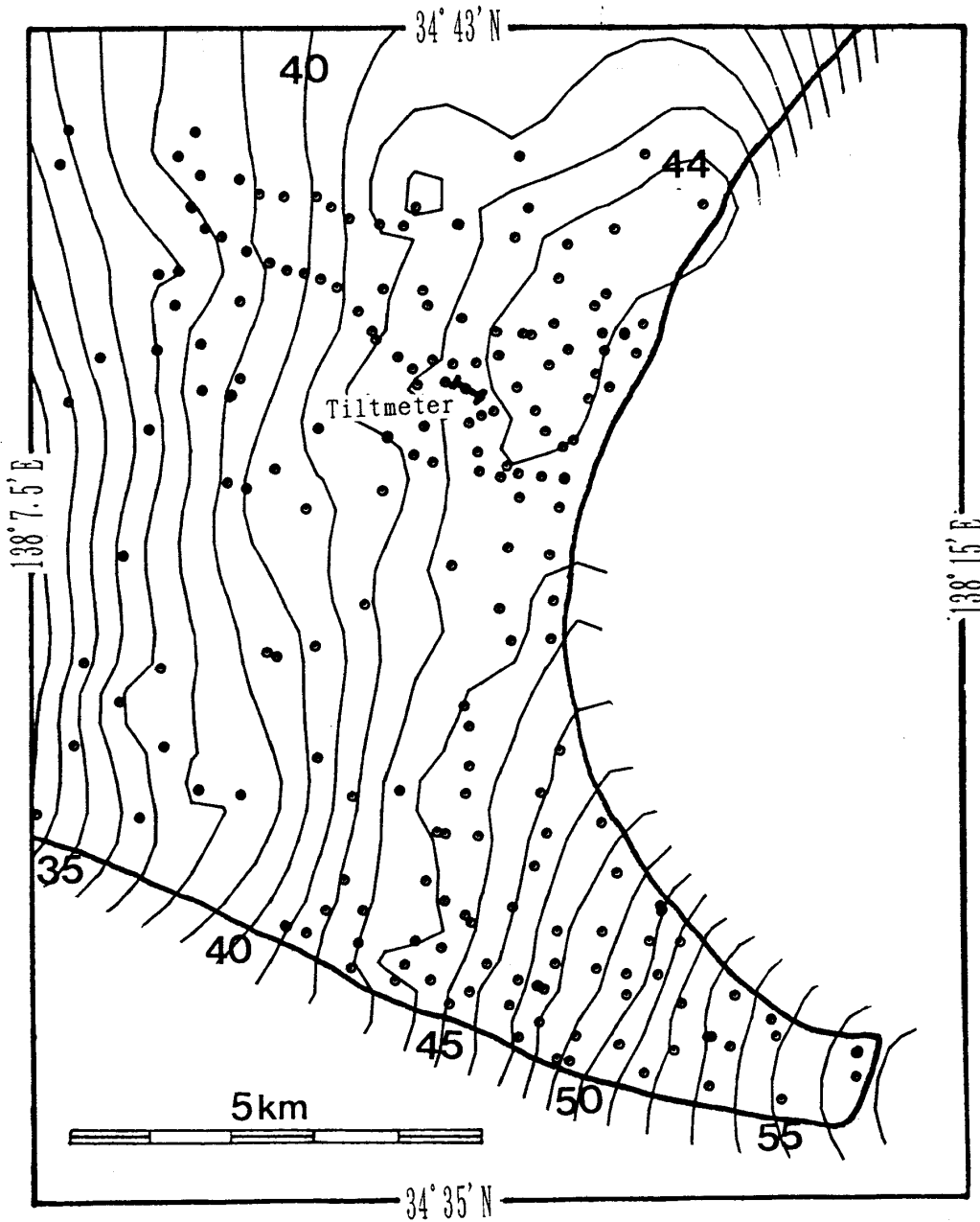


図9 ブーゲー異常図 (密度: 2.35g/cm³, コンター間隔: 1 mgal).

Fig. 9. Bouguer gravity anomalies near the tiltmeter site. (density: 2.35g/cm³, contour interval: 1 mgal)

この地域全体の平均密度を求めた。ただし計算に用いた地殻のメッシュは、等重力異常線の方角と地質構造を考慮してN75°WとN15°E方向で分割し、N15°E方向の一辺はN75°W方向の2倍の長方形とした。こうして得られた平均密度2.35g/cm³で作成したブーゲー異常図を図9に示す。

内陸部から御前崎先端へ向けてブーゲー異常値が大きくなる広域的な傾向は、フィリピン海プレートの潜り込みに関連した深部の密度構造の影響と考えられる。これら広域の傾向を除き局所的な異常について考察しやすくするため、最小二乗法を用い、ブーゲー異常の2次曲面成分を求めた。これを広域のブーゲー異常と考えて取り除いた後の

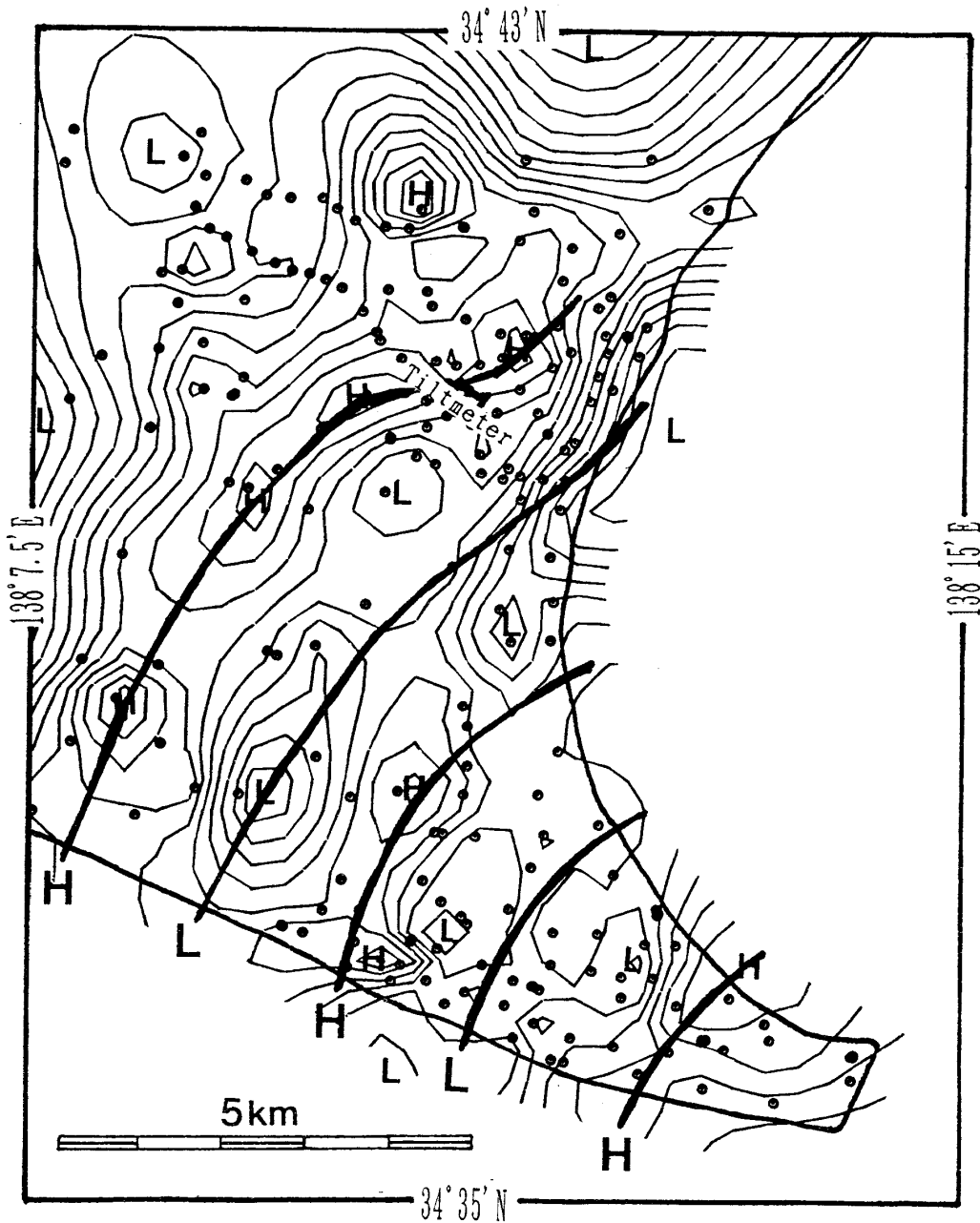


図10 2次曲面成分を仮定して地域的傾向を取り除いた残差ブーゲー異常 (コンター間隔: 0.25mgal)。

Fig. 10. Residual gravity anomalies reduced the regional trend. A paraboloidal function was applied for the regional trend of the Bouguer anomalies shown in Fig. 9. (contour interval: 0.25 mgal)

残差ブーゲー異常を図10に示す。残差ブーゲー異常は比較的浅部の褶曲構造に関連した密度構造を反映しているものと考えられる。

図10をみると、御前崎の先端から内陸部に向けて北東-南西方向の軸をもつ正負の異常帯が約2 km ごとに現われる波状構造がみられる。とくに、傾斜計の設置位置付近には、北東-南西方向

にのびた明瞭な正の異常帯がみられる。これは前節で考えた活褶曲構造に相当するものと考えられる。

水野・他(1987)により地質学的研究から求められたこの地域の背斜軸、向斜軸を残差ブーゲー異常に重ね、図11に示す。比木向斜軸は、負の異常帯とほぼ一致するが、他の背斜軸、向斜軸と重

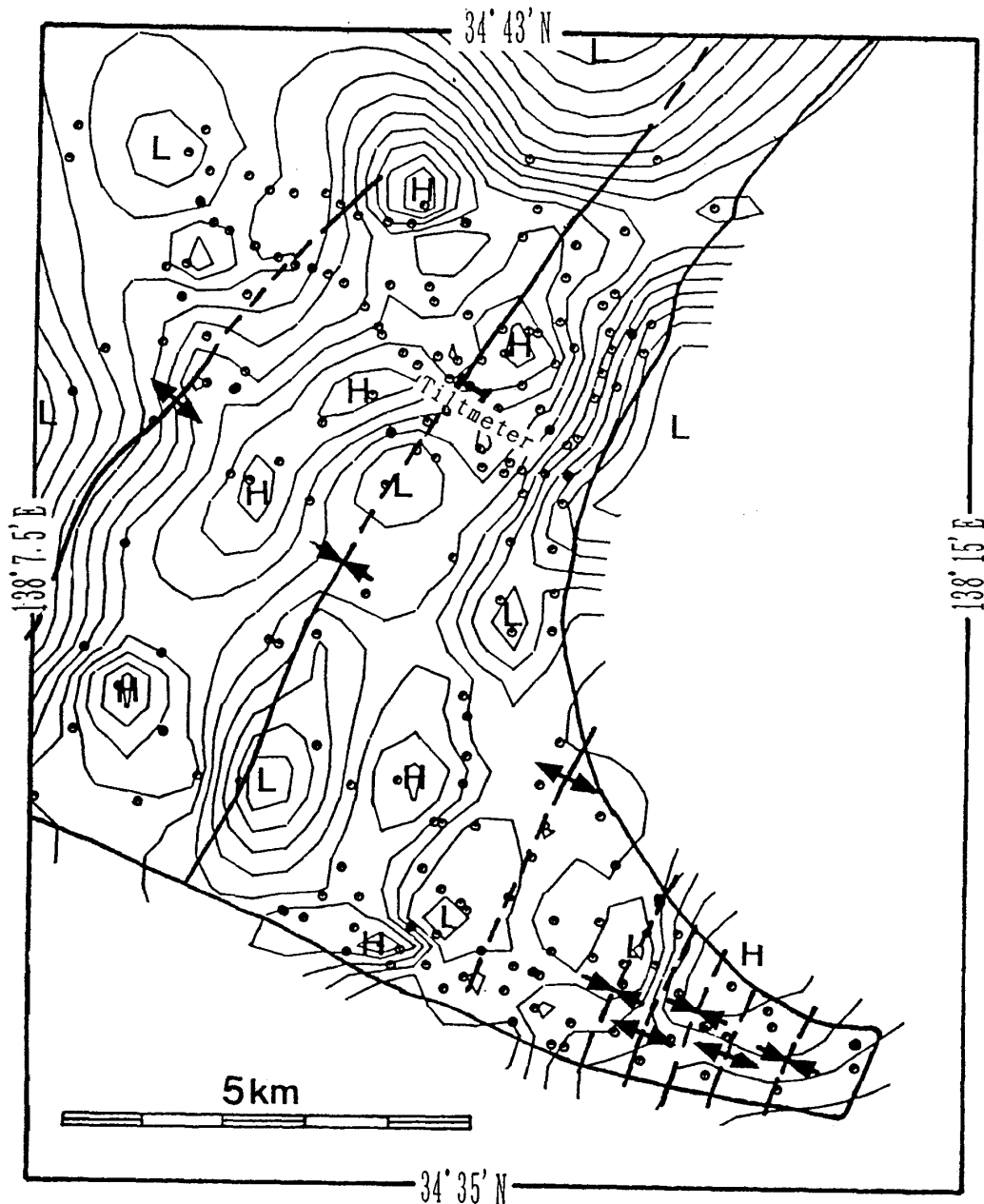


図11 地質学的研究から求めた褶曲軸の分布(水野・他, 1987)と残差ブーゲー異常。

Fig. 11. The distribution of the fold axes obtained from geological studies (MIZUNO *et al.*, 1987) and the residual gravity anomalies.

力異常帯との対応は必ずしも明瞭ではない。これは、残差ブーゲー異常は、褶曲構造よりも、より表層の第四系堆積物との密度の違いによる影響を、より大きく受けているためと考えられ、今後、堆積物の密度の違いによる残差ブーゲー異常への影響量を検討する必要がある。

5. ま と め

1983年5月から、静岡県榛原郡相良町で水管傾斜計による傾斜変動の連続観測を実施してきた。この傾斜計の結果は、北西方向(内陸方向)への経年的な傾斜変化を示し、水準測量等で得られているこの地域の広域の変動とは逆の結果になっている。そこでこの地域の傾斜変動をより詳細に調べるため、傾斜計の周辺で水準測量を実施した。また、地下構造との関連を調べるために重力測定も実施した。その結果、傾斜計設置位置の北西側に向斜軸、南東側に背斜軸が存在し、この軸を発達させる褶曲運動が傾斜計の結果に大きく影響を与えていると考えられる。しかし、重力異常から期待される地下構造がこのような褶曲活動と調和的か否かについては、今後、検討する必要がある。

謝 辞

この報告の中心になっている水管傾斜計は、静岡県地震対策課が設置し、筆者らと共同で観測を実施しているものである。この傾斜計の記録を使用させていただいた。この傾斜計の設置に深く関わった名古屋大学理学部の志知龍一博士、日本測量協会の檀原毅博士には、草稿を読んで有益な助言をいただいた。国土地理院には傾斜計周辺の水準点の位置および測量成果を教えていただいた。測量にあたっては多くの静岡大学学生にお世話になった。これらの方々に、感謝の意を表す。なお、この研究の一部は文部省科学研究費(平成元年度～2年度一般研究(C), 課題番号 01540330)によった。

参 考 文 献

- 千谷好之助(1929), 7万5千分の1地質図幅「相良」及び同地質説明書, 地質調査所, 24p.
- FUKAO, Y., YAMAMOTO, A. and NOZAKI, K.(1981), A method of density determination for gravity correction. *J. Phys. Earth*, **29**, 163-166.
- 池谷仙之・堀江善裕(1982), 静岡県牧ノ原台地に発達する古谷層(上部更新統)の堆積環境. 第四紀研究, **21**, 75-93.
- ISHIBASHI, K. (1981), Specification of a soon-to-occur seismic faulting in the Tokai District, central Japan, based upon seismotectonics. In SIMPSON D.W. and RICHARDS, P.G. (eds.) : *Earthquake Prediction, An International Review*, 297-332, Am. Geophys. Union, Washington, D.C.
- 桂島 茂・寒川 旭・橋本知昌・宮崎純一・渡辺和明・斉藤英二(1987), 静岡県御前崎地域の活構造. 地質調査所月報, **38**, 319-330.
- 国土地理院, (1990), 東海地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **43**, 362-383.
- 溝上 恵・中村一明・井筒屋貞勝(1980), 精密水準改測による小千谷地域の活褶曲の検出. 東大地震研彙報, **55**, 199-224.
- 水野清秀・杉山雄一・下川浩一(1987), 静岡県御前崎周辺に分布する新第三系相良層群及び掛川層群下部の火山灰層序. 地質調査所月報, **38**, 785-808.
- 中村一明・太田陽子(1968), 活褶曲—研究史と問題点. 第四紀研究, **7**, 200-211.
- 西 修二郎(1985), 御前崎周辺に於ける短期地殻上下変動の推定について. 測地学会誌, **31**, 212-219.
- 杉山雄一・寒川 旭・下川浩一・水野清秀(1987), 静岡県御前崎地域の段丘堆積物(上部更新統)と更新世後期における地殻変動. 地質調査所月報, **38**, 443-472.
- (1988), 御前崎地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 153p.
- 里村幹夫・檀原 毅・長谷川 靖・遠山忠昭・志知龍一・鮫島輝彦・井野盛夫・岩田孝仁・萩原利明(1987),

- 相良および上坂地殻変動連続観測施設の概要. 静大地球科学研報, **13**, 157-164.
- SATOMURA, M., KOBAYASHI, S., HASEGAWA, Y., TOYAMA, T., DAMBARA, T., SHICHI, R., INO, M. and IWATA, T. (1990), Observation of crustal movements by means of a long baseline water-tube tiltmeter at Sagara, Shizuoka, Japan. In VYSKOCIL, P., REIGBER, C. and CROSS, P. A. (eds.): *IAG Symp. 101. Global and Regional Geodynamics*, 329-336, Springer-Verlag, New York.
- 静岡大学教養部・静岡県地震対策課 (1991), 静岡県相良町および静岡市上坂における傾斜連続観測 (VI). 地震予知連絡会会報, **45**, 327-330.
- 遠山忠昭・長谷川 靖 (1987), 静岡県相良町における長距離水管傾斜計による地殻傾斜観測について. 静大地球科学研報, **12**, 33-44.
- YAMAMOTO, A., NOZAKI, K., FUKAO, Y., FURUMOTO, M., SHICHI, R. and EZAKA, T. (1982), Gravity survey in the central range, Honshu, Japan. *J. Phys. Earth*, **30**, 201-243.
- 柳沢道夫 (1980), 宇佐美臨時観測点における降水量と傾斜観測の関係. 測地学会誌, **26**, 187-199.