

1978年伊豆大島近海の地震に伴う地殻変形の 測定—稲取三角網の光波測定

半田孝司* 徳山 明* 吉田鎮男**

Crustal Deformation after the Off-Izu-Oshima
Earthquake, 1978 — An Electro-optical Measurement
on a Trigonometric Net around the Inatori Area

T. HANDA*, A. TOKUYAMA*, and S. YOSHIDA**

An extensive crustal deformation has been brought about around a central part of the Izu Peninsula in association with the Off-Izu-Oshima Earthquake, on January 14th, 1978. Particularly in Inatori area of Higashi-izu-cho have formed many north-trending tension cracks, some of which are arranged in echelon in the north-northwest direction, indicating north-south compression.

To ascertain the areal crustal deformation, an electro-optical measurement on a trigonometric net of the Geographical Survey Institute around Inatori area (Fig. 1) has been carried out on January 22nd–23rd, by the Geodimeter Model 700.

The comparison (Tab. 2) between the present observed values (Tab. 1) and the previous values of the Geographical Survey Institute indicates that elongation has resulted between the Shirada-mura and Kazegoe trigonometric points in the northeast direction (+18cm, $+3.6 \times 10^{-5}$), and between the Kazegoe and Inatori-mura points in the east-west direction (+106cm, $+26.9 \times 10^{-5}$). On the other hand shortening has resulted between Shirada-mura and Inatori-mura points in the north-south direction (–17cm, -6.2×10^{-5}).

The result is consistent with the shortening (compression) in the north-south direction inferred from the tension cracks of the area, but not consistent with the northwest compression inferred from the radiation pattern for P-wave first motions. In addition, another electro-optical measurement after the earthquake by the Earthquake Research Institute in the northern adjacent area shows a different tendency of deformation. These lines of evidence together with the electro-optical measurements after the Earthquake off the Izu Peninsula, 1974 suggest that a shallower part of the crust of the Izu Peninsula is probably divided into several blocks of a dimension of 10km to 30km or so which move properly and separately each other, and they move in different manners from a deeper part of the crust.

1978年2月15日受理

* 静岡大学教育学部地学教室 Inst. Earthsci., Fac. Educ., Shizuoka Univ., Shizuoka

**静岡大学理学部地球科学教室 Geoscience Inst., Fac. Sci., Shizuoka Univ., Shizuoka

1978年伊豆大島近海の地震の際には東伊豆町稲取附近を中心に多くの地割れが出現し（静大災害地質調査班，1978），この地震によりかなり広い範囲で地殻変形が生じている事が明らかになったので，この実体を把握する為に光波による精密測量を企画した。選点に当っては1974年伊豆半島沖地震の直後の例（徳山，1975）を考へて，なるべく地割れ等が現われていて地表での地殻変形の証拠がある地域で，できれば他種の機械にせよ光波測量のすんでいる三角点であることが望ましく，尚解析に楽なように直角に近い辺を有する三角形の三辺測量を行うのに良い地点であり，更にわれわれが現有するジオジメーター700型で測定可能な5km以内の測線である事などが検討された。幸いにこれらの条件にはまるⅡ等三角点白田村（398.95m），Ⅲ等三角点稲取村（63.89m）及びⅢ等三角点風越（302.73m）の3点が選定でき，第2回の現地調査の1月22日現地踏査を行い，地元の方々の協力を得て樹木の伐採等の整備を行い，23日夜から24日にかけて測定を行った。同夜は寒波の襲った西高東低の気象条件で，強風が吹き観測条件は絶好であった。

尚この三角網は白田村三角点の再設（1976）に伴い，風越及び稲取村から間接水準測量の為に光波測量が行われており，観測回数は少ないが比較の参考に使うことができた。又この測定に際し使用した静岡大学のジオジメーター700型（№2045）はたまたま地震の前日1月13日に国土地理院の武蔵村山市の検定基線において機械定数の検定を済ませており，測定条件が最適であったので，この機会にその検定結果も附記する。

本測量の成果は国土地理院地殻活動観測課に報告し検討をわずらわした。同課においては今回の測量結果との比較のために白田村三角点再設に伴う実用成果の改算を行っていただき，併せて再設時の間接水準測量に使用した光波測量の成果をも公表していただいた。石井晴雄課長はじめ地殻活動観測課並に測地二課の方々に厚く御礼申し上げる。又たまたま現地で周辺地域の測定に当られていた柴野陸郎氏はじめ東大地震研究所の地殻変動観測班の方々には

現地での資料の交換，討議をわずらわした。併せて御礼申し上げる次第である。

1. 測定結果及び測定の方法

白田村，風越，稲取村の三角点を結ぶ3辺測量（図1）は，先ず白田点にジオジメーター本体を置き，風越および稲取点にプリズムを設置してこの2測線の測定を行い，次に本体を稲取点に移動して，風越および白田点までの距離を測定した。白田—稲取間は往復測定を行ったわけで，その結果は，測定時刻の違いから空間条件の変化による反射光の感度の相違等があるものの，両測定値は全く等しく今回の測定が安定したものであったことを示している。

測定結果：測定結果を第1表に示す。表中，「観測距離」は機械に表示される値を数セット*（各測線毎に表示してある）取り，それに気象補正を施した後平均した値である。「標石間斜距離」は「観測距離」に機械本体及び反射鏡の設置高その他の補正を施して標石間の距離に計算した値であり，これから国土地理院で使用しているジオイド面への投影値を求め「基準面投影距離」として示してある。その算出式は表に示したもので第4項まで取ってある。

白田村—稲取村間は往復測定を行ってあり，両者の基準面投影距離は，標準偏差の違いはあるものの，全く一致している。各測線における観測距離の標準偏差は，白田村からの測定では $\sigma = 2\text{mm}$ 前後で非常に安定しているとみられるが，稲取村からの測定ではやゝ大きく $\sigma = 4\text{mm}$ 程度となる。これは測線の空間条件が次節に述べるようにやゝ変化したことによるものと考えられる。

測定法及び測定に当っての留意事項：測定に際して，本体に充分の予熱時間を与えることに留意した。本体は電源を入れてから約10分で安定する（半田，1976）。

測定は精密測定（周波数 F_2 による**）の表示値が充分安定した状態から一分間流しこの間を5秒毎に13回読み，これを1セットの測定として15～20セッ

* 5秒毎に13回読みし1セットとする。

**基準変調周波数 29970.000 KHz

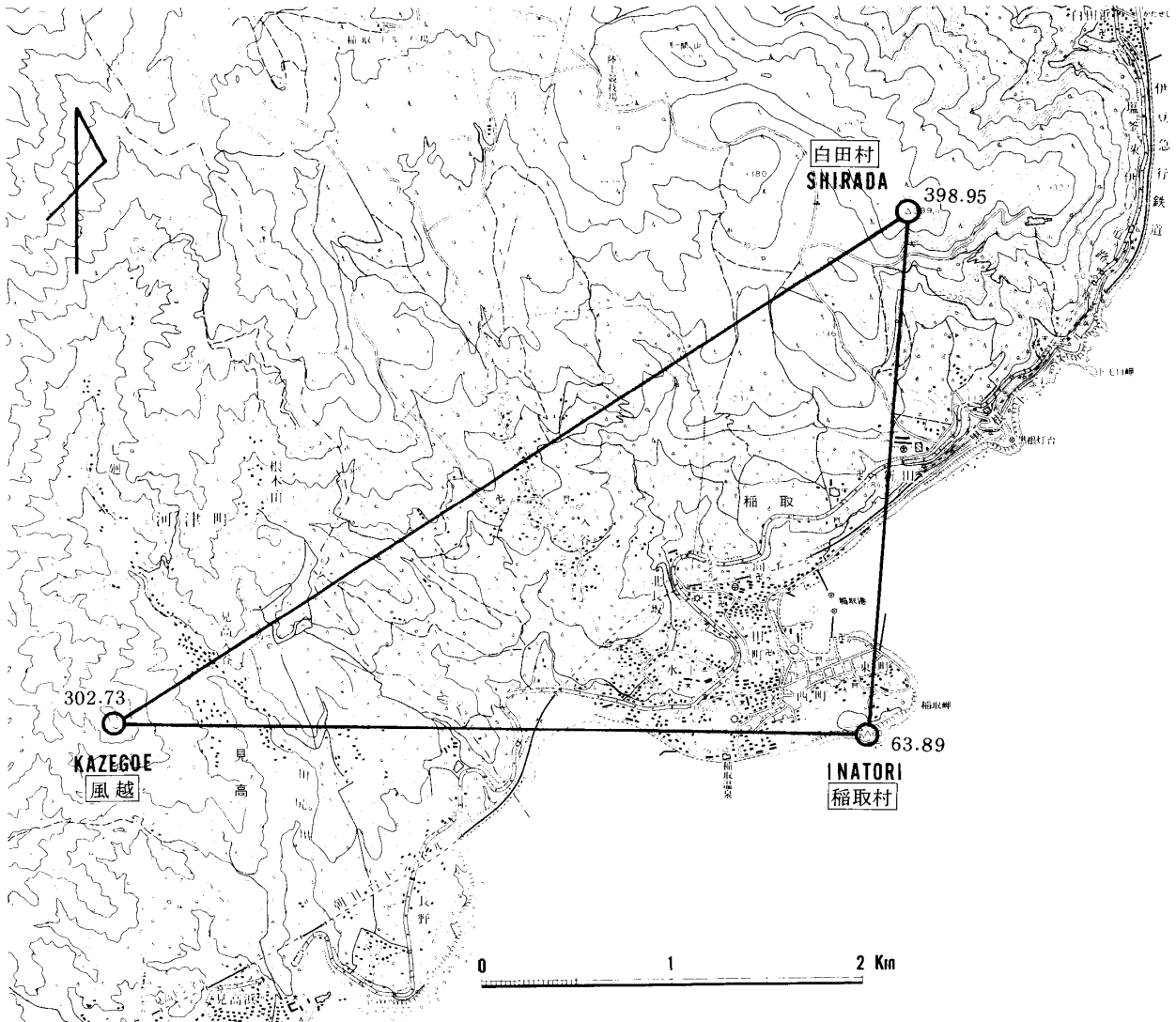


図1. 東伊豆・稲取地域光波測量基線位置

表1 東伊豆，稲取地域三辺光波測量成果

(1978, 1, 22~23, ジオジメーターM700, No.2045, による)

測線	観測距離 m	セット数/ σmm	機械及び 反射鏡定数 mm	周波数 補正 mm	器械高 補正 mm	D 標石間斜距離 m	D _p * 基準面投影距離 m	備考
白田村～風越	4944.549	21 / 1.9	-40	-2	0	4944.507	4943.298	} 差0
白田村～稲取村	2804.590	9 / 2.2	-40	-1	-34	2804.515	2784.328	
稲取村～白田村	2804.552	6 / 4.7	-40	-1	+4	2804.515	2784.328	
稲取村～風越	3935.248	20 / 4.0	-40	-2	-3	3935.203	3927.835	

$$* \text{基準面投影距離 } (D_p) = D - \frac{h^2}{2D} - \frac{D \cdot Hm}{R\alpha} - \frac{h^4}{8D^3} + \frac{h^2 \cdot Hm}{2R\alpha D} + \dots \dots \dots \text{(以下略)}$$

D : 標石間斜距離, h : 標高差 (h₁ - h₂), Hm : 平均標高 (h₁ + h₂) / 2

Rα : 2点の平均緯度と方位角を用いてオイラーの式から算出した曲率半径

ト測定した。したがって各測線毎にそれぞれ200～260回の読定を行ったわけである。

各三角点間の比高が比較的大きいため、機器の設

置は厳密を期し視準にも充分注意を払って測定を行った。屈折率補正のための気象観測は特に重要なので、気温は3点全部に隔測自記温度計(半田, 1978)

を設置して連続観測を行い、各測線毎の平均値を求めて屈折率補正式^{*}を用いて気象補正を行った。尚本機の機械定数は国土地理院の村山点検基線によって検定してあり（後述）、変調周波数についても観測の前と後に検定して基準周波数からのずれの確認を行った上で測定距離の補正をほどこしてある。

気象状況：天気は西高東低の気圧配置のもとに快晴で風が強かった。測定は1月23日の日没直後から1月24日未明にかけて実施した。この間の各三角点における気温の推移は図2に示してあるように、22時頃までは各三角点の標高に見合った一般的気温分

布を示しているがその後はや不規則な変化が認められる。即ち、稲取村三角点においては19時頃～22時頃までは徐々に気温が下がっているが、その後はほぼ一定であった。一方稲取村三角点より標高の高い風越、白田村三角点においては、21時頃までは同様な徐々に気温の下る変化を示しているがその後は逆に約1℃前後上昇してほぼ様な気温を保っている。各三角点間の測定中における気温差は、22時頃まではもっとも大きい差がみられる稲取村と白田村の間で約3.5℃である。22時以降では気温が均らされて3地点間の差はいずれも1℃位となっている。

気圧は全測定時間を通してほぼ一定であり、変化

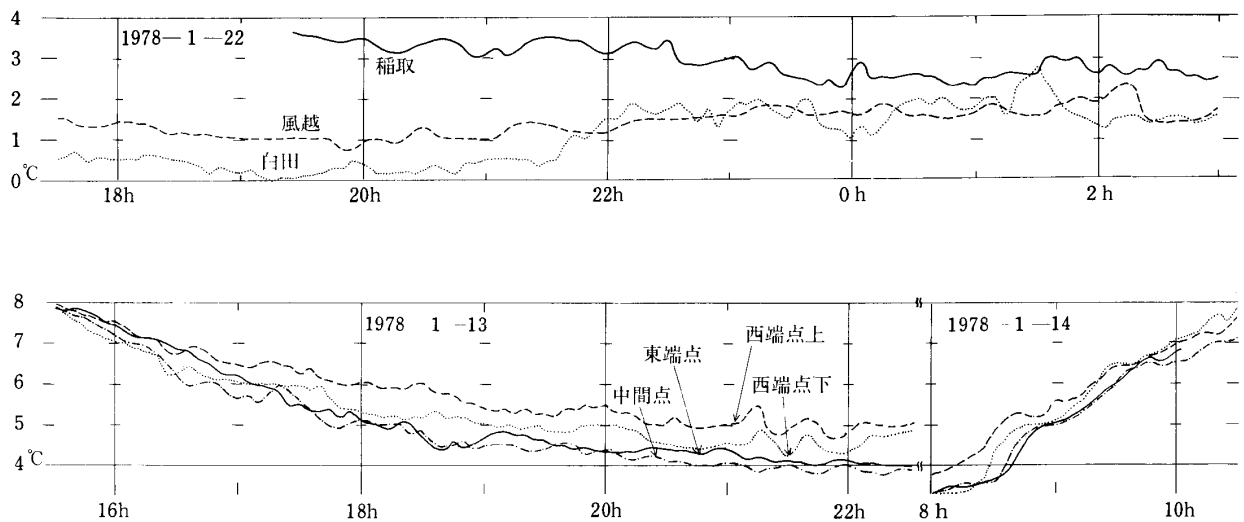


図2. 気温観測結果 上：東伊豆、稲取地域 下：村山基線

は1mm水銀柱以内であった。尚気圧の連続測定はジオジメーター設置点のみで行い、各測線毎の平均気圧は計算によって求めたが、この値は十分に信頼できるものである。

視通状況及び反射光感度は測定中ずっと良好であったが、22時頃以前とその後を比較すると、後半やゝわるくなった。

2. ジオジメーターの定数検定

光波測距儀の機械的な中心位置と、電気・光学的中心は必ずしも一致していない。両者の差は機械固有のものであり測定距離には関係しない定数として

取扱う。この定数は変化することもあるので、常に確認しておかなければ測定器としての条件を満たしているとは云えない。定数の検定は点検基線場^{**}で以下の如く実施した（図3）。

測定期日：昭昭53年1月13日～14日

測距儀：ジオジメーターM700, No. 2045

測定法：基線両端点間距離を直接測定、及び基線延長上に仮点を設け差引法による間接測定。

測定結果：東端点—西端点間 (D_1),

1, 100. 824m (416回 読定平均, 標準偏差 $\sigma = 3.7$ mm, 測定時刻15:49

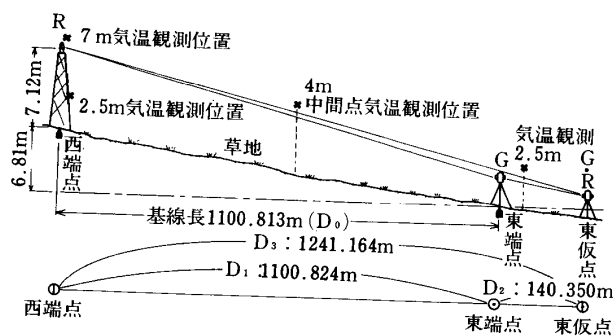
* $\Delta D = 308.6 - 107.9 \frac{P}{273.2 + t} \cdot D \cdot 10^{-6}$ (P: 平均気圧, t: 平均気温)

**国土地理院, 村山基線, インパール尺による基線長 $D_0 = 1100.813$ m

～19:37及び9:28～10:00)
 東端点—東坂点間 (D_2),
 140.350m (130回読定平均, $\sigma =$
 1.2mm, 測定時刻16:37～19:53).
 東坂点—西端点間 (D_3),
 1,241.164m (130回読定平均, σ
 = 2.0mm, 測定時刻18:26～18:56)

以上の測定結果を基線長 ($D_0 = 1,100.813$) と比較すると、本機の機械定数は、直接法によれば -11 mm、間接差引法によれば -10 mmとなる。

本機は一部部品交換等の修理調整を行ってはいませんが、昭和51年1月の点検以後の定数は変化していないことが今回の点検で確認され本機が安定していることが分った。



① 基線長との比較 $C = D_0 - D_1 = -0.011\text{m}$

② 差引法による $C = D_3 - (D_1 + D_2) = -0.010\text{m}$

図3. 村山基線における機械定数点検方法、およびその結果 G: ジオジメーター R: プリズム反射鏡 D: 観測距離 (水平距離) C: 機械定数

村山基線場における気温分布について

上記の定数点検の際に、低層における気温変化および分布を調べるために詳しい気温観測を実施した。

図3に示す4ヶ所 (東端点地上2.5m, 中間地点地上約4m, 西端点地上2.5m及び7m) にサーミスター式隔測記録温度計 (半田, 1978) を設置して連続観測を行った。図2に結果の一部を示す。村山基線付近の地形はほぼ平坦でおよそ1kmの近距離であるが、西端点のやぐら (鉄骨製) 上 (地上7m) の気温は他と予想を上まわる相違を示した。即ち、他の測点 (地上2.5～4m) に比し、最大 1.5°C の高温を示した。地上高が他より大きいにもかかわらず気温が高かったわけで一見逆転の現象を示してい

る。この現象は他の2観測点の気温はほぼ同じであることから西端点やぐら付近のみの局所的現象と推定される。

西端点は近接した工場群に囲まれており、工場に起因する局所的な暖気塊がこの付近に流れていることも予想される。やぐら上の2測点2.5mと7mでは約 0.5°C の差 (上の方が高温) で気温変化は平行性を保っていることもこの予想を支持する。また、以前からこの村山基線ではかげろう現象が顕著で測定しにくい経験があるが、これは光路が地表面近くを通ることに加えて、上述のような反射鏡を置くやぐら付近だけの局所的気塊の乱れが影響しているのかも知れない。

村山基線での実際の距離測定に当っては、気象補正式に適用する平均気温が仮に 1°C 違っていても測定距離への影響は1mm程度であるから上述の程度の気温の乱れは殆ど問題にならない。従って気温測定は一ヶ所で十分であるが、少なくとも西端点付近の気温は光路全体のそれを表しているとはいえないので注意を要する。

気象観測、特に気温の観測の精度は、直接測定距離の精度を左右するので、今後更に他地域においても実験観測を試み時空的気温分布を種々の気象状態の下で掴みたい。

3. 測定値の検討と今後の問題点

今回の測定値と国土地理院値との比較表は第2表の通りである。表中実用成果は1935年の三角測量の結果であるが、1976年の白田村三角点の再設に伴い改算された値である。又光波測定の値はこの三角点再設時のもので測定回数が少ないため参考値として取り扱う。尚表中の値はいずれも国土地理院で使用しているジオイド面への投影値であり、前出第1表の式の第4項までを使用した。

三角測量による実用成果の精度は通常 10^{-5} 程度 (坪川他, 1969年) と云われ、ここでは $\pm 5\text{cm}$ 程度と解釈される。1975年の光波測量値と実用成果を比較すると、白田村—風越は -8cm 、白田村—稲取村は -20cm である。これについては前述のように光波測定の測定回数が少ない事と、1974年の伊豆半島沖地震等に伴う地殻運動があった事等の原因が考えられるが、地震前の値としていずれが正しいかは判断で

表 2 東伊豆、稲取地域光波測量結果および実用成果等との比較

	白田村～風越	白田村～稲取村	稲取村～風越
1978, 1 静岡大学	4,943.298 ^m	2,784.328 ^m	3,927.835 ^m
1975 改算実用成果	4,943.12	2,784.50	3,926.78
歪量	+18 cm $+3.6 \times 10^{-5}$	-17 cm -6.2×10^{-5}	+106 cm $+26.9 \times 10^{-5}$
1884 明治学術成果	4,947.330	2,784.955	3,926.786
1935 修正前実用成果	4,947.308	2,784.992	3,926.780
1975 地理院光波測量	4,943.042	2,784.300	—

きない。今度の地震に伴う地殻変形には1974年の時と同様余効現象があると考えられるので、今後の継続測定により確かめたい。

今回のデータを実用成果と比較すると北東-南西方向の白田村-風越間は $+3.6 \times 10^{-5}$ 、東西方向の風越-稲取村間は $+26.9 \times 10^{-5}$ の伸びがあり、一方南北方向の白田村-稲取村間は -6.2×10^{-5} の縮みがあったことになる。この間に面積は $+1,213.17 \text{ m}^2$ 、 $+2.2 \times 10^{-4}$ の歪があったことになる。但し、これを前出の1975年の光波測量の値と比較すると、白田村-風越は $+256 \text{ mm}$ 、 $+5.17 \times 10^{-5}$ であるが、白田村-稲取村は $+28 \text{ mm}$ 、 $+1 \times 10^{-5}$ の歪となる。三角測量の精度を考慮しても稲取村-風越の106cm、 $+26.9 \times 10^{-5}$ の歪は大きい。地殻の歪限界は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ といわれるがこの値はそれを越えた値であり、この地域の地殻が歪限界を越えて地震が起きた事が示されている。

一方、地表に現われた地割れ等は既述の如く南北方向・垂直の展張クラックと北西-南東方向の右横ずれを示す展張クラックの雁行群であって、ずれが1 mに及ぶ明瞭な断層はなく、特に稲取村-風越間のほぼ東西方向の測線中にそのような大きな地震断層は観察されていない。1974年の伊豆半島沖地震の際の光波測量による地殻変形(徳山, 1975)の例でも、北西南東方向の最大圧縮歪は 10^{-4} 程度になっているが、これを凌駕する地震断層は出現して居ず、東西方向の右横ずれと南北方向の左横ずれの平行な

小断層群の集積及び広域にわたるクリープ性の“非弾性的”な地殻変形の結果であろうと考えられた。

この推論を裏付けるように、余効現象は2年間にわたって継続した(徳山・半田, 1978)。しかもこの余効現象は、はっきりした割れ目の生じたいわゆる石廊崎断層の露頭では、光波測量によって知られる広域的な余効現象に比しはるかに小さいものであった。この事から類推すると、今回の地震に伴う地殻変形も広域に広がるクリープ又は弾性反発的ではない運動を示しているものと思われ、その意味で今後の余効現象の有無や程度に興味がある。前回の南伊豆の例では余効現象が本震のときの地殻変形を更に増大させる方向に継続していることから考えて、今回もこのような余効現象がある事が予想されるので、白田村-稲取村間の変形が伸び(+)であるか縮み(-)であるかを今後の継続観測によって確かめたい。

尚、東大地震研究所の測定によると、白田-奈良本間の南北方向が3.8 kmで地震をはさむ約1年間に $+5.3 \times 10^{-5}$ であったのに対し、奈良本から北東へ6.9 kmの奈良本-赤根間は殆ど変化がなかった由である*。又遠笠山を中心とする連続観測ではこれとは又違った変動結果が測定されている由で、伊豆半島における地殻運動の複雑さを示している。

1974年の地震の際の地殻運動は青野村-入間村及び青野村-岩科村の基線範囲の青野村から南と西の範囲には変形が及んでいるが、青野村三角点から北、北東及び東への放射基線には変化があらわれていず、この事から、この地震での変形範囲が青野村点より西と南に限定されていたと考えた(徳山・半田, 1978)。このような事実から考えて、今回の地震で南伊豆の基線に変位があったかどうかにも興味がある点である。前述の東大地震研の測定結果のように、今回の白田村-稲取村-風越の基線と隣接する地域でことは異なる傾向の地殻変形が顕れたことから考えると、南伊豆地域には変形は及ばなかったと推定される。

いずれにせよ、この度の地震での稲取地域の変形は東西方向の伸びが確実であり、クラック等からは

* 1月24日地震研究所談話会における報告、及び現地討論による。柴野睦郎氏の御教示に感謝する。

南北方向の縮みが推定される。南北方向が縮みであるかどうかは実用成果と地理院の光波測定の何れが正しいかによって異なるが、たとえこの方向が伸びとしても東西の伸びに比しはるかに小さいので、東西方向の引張りは確かであろう。従って、初動分布等の発震機構から考えたと思われる東西方向の右横ずれ（北西南東方向からの圧縮で南伊豆の場合と同じ）という地殻深部での破壊条件と、このブロックでの地表の動きは異っている事になる。

以上のような観察事実と考察から、伊豆半島では基盤が10~20 km 程度のスケールのブロックに分かれており、各ブロックが独自の地殻運動をしている事が考えられる。このブロック間相互の動きによっては、地表を含めた地殻浅部での運動が北西南東方向からの圧縮として現われもし、東西方向の引っ張り又は南北方向の圧縮として現われ、或は北東南西方向の傾動という運動にもなる。今後これらのブロックがどの範囲に及びどのような大きさを有するかの具体的検討が肝要であり、この事が伊豆半島地域の地殻運動、ひいては地震活動の傾向を規定することを指摘し今回の報告とする。

文 献

- 半田孝司(1976) 光波測定の精度について—ジオジメーター700型の特徴—. 静大地球科学研究報告, 2, 19-34.
- (1978) 光波測定の温度補正と隔測精密温度計の開発. 静大地球科学研報, 3, 39-44.
- 静岡大学災害地質研究班(1978)1978年伊豆大島近海の地震に伴う震害の地質学的考察. 静大地球科学研究報告, 3, 45-64.
- 坪川家恒, 大森又吉(1969) 測地学序説, 山海堂.

徳山 明(1975) 1974年伊豆半島沖地震に伴う地殻変形. 静大地球科学研究報告, 1, 31-34.

徳山 明, 半田孝司(1978) フォッサマグナの基盤と現在の地殻運動. 地学雑, 86, (印刷中)

追記

2月20日から2月21日にかけて前述の3測線の再測を行った。この再測では前回の測定後1月間の余効的地殻変形の有無を調べる事が主目的であった。又白田村-稲取村の基線に就いては地震前の値として「実用成果値」をとるか、参考値として挙げた国土地理院の「光波測定値」をとるかによって、地震時の変形が縮みになるか又は伸びになるかなので、余効現象の傾向によって、いずれを選択すべきかを併せて判断したいと考えたからでもある。

成果の概算によると、前回に比し、白田村-風越基線が+7mm, 白田村-稲取村基線が-17mm, 稲取村-風越基線が+37mmであり、この1月間の歪率を計算すると、前回の光波測定値と実用成果値との比較による歪率(第2表)とほぼ同じ傾向になる。

このことから、地震前の値として実用成果値をとると、地震時の地殻変形と其後の余効現象は同じ傾向になり、東西方向の伸び、南北方向の縮みとなり、地表に顕れた地殻変形のパターンと良く一致する。この場合、最近1月間の余効的変形の歪量は地震時の変形量の数%である。

1974年の伊豆半島沖地震の場合にも本震時の地殻変形と余効現象とは同じ傾向であり、かつこの余効現象はかなり長時間継続したので、本文にも述べたように、今回の地震でも余効現象に就ては同じような経過をたどるのではないかと予想される。

(2月25日記)