

9. 伊豆半島東部の群発地震活動に伴う重力変化

地震研究所 { 萩原 幸男
田島 広一
井筒屋 貞勝
花田 英夫

(昭和 52 年 7 月 28 日受理)

1. はじめに

プレートのサブダクションによって、地殻がひずむと同時に、地殻の密度は変化する。重力もそれに伴って変化するにちがいない。この重力変化を検出する目的で、伊豆半島から近畿地方にかけて、精密重力測定のためのネットをはったのが 1970 年のことである(国土地理院ほか, 1971)。その後、1974 年伊豆半島沖地震の余震活動が一応収まってから、伊豆半島全域の重力再測定を行い、地震前後の重力変化を報告した(萩原ほか, 1976a)。

1975 年の秋に天城山系の北、遠笠山付近に群発地震が発生したこともあって、国土地理院は水準測量を行った。その結果、群発地震域の北側、冷川峠が 1969 年から 1976 年にかけて、15 cm も隆起したことがわかった(国土地理院, 1976)。隆起に伴う重力変化も十分に期待がもてたので、1976 年 2 月に第 3 回重力測量を実施した。その後、群発地震の推移にしたがって、同年のうちにさらに 2 度の重力測量をつけ加えた(萩原ほか, 1976b)。

1976 年の秋頃より、群発地震活動は静穏化に向かいはじめ、重力変化もそれに伴って小さくなるものと予想された。地震活動にくらべて、地殻変動や重力変化は一般に息の長いものである。地震活動が終息しかけたからといって、測量を中止するわけにはいかない。こうして 1977 年に入ってから、2 度の重力測量を実施した。

1970 年以来、伊豆半島の精密重力測量は 7 回の多きに及んだ。この際、これら重力変化のデータをまとめて発表することは有意義なことであろう。ここでは、観測結果の解釈に深入りすることなく、事実の列挙に止めたいと思う。Table I に 7 回の重力測量の期間、参加グループ、参考文献を表示する。表中、I, II, III 等はそれぞれ第 1, 2, 3 回重力測量等を示すものとする。

2. 測量ルート

重力測量 I は伊豆半島の海岸線を一巡した水準ルートに沿って行われたが、測量 II では内陸部の二等水準点をも含めて実施した。測量 III では、伊豆半島の東海岸に隆起による重力変化が予想されたので、主に東海岸に沿うルートで測量を行なった。国土地理院(1976)の水準測量によって隆起のパターンが確定されてからは、伊豆スカイライン・遠笠山道路など山地に重力点を設定した。Fig. 1 はこれら重力点の位置を示す。

Table I. Precise gravity surveys over Izu Peninsula.

Survey	Period	Surveyor	Reference
I	Feb. 1970	ERI, GI, GSI	GSI <i>et al.</i> , 1971
II	Dec. 1974	ERI, GI	Hagiwara <i>et al.</i> , 1976a
III	Feb.~Mar. 1976	ERI	Hagiwara <i>et al.</i> , 1976b
IV	June 1976	ERI	"
V	Sept. 1976	ERI	"
VI	Jan.~Feb. 1977	ERI	—
VII	June 1977	ERI	—

Notes: ERI: Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

GI: Geophysical Institute, Kyoto University.

GSI: Geographical Survey Institute, Ministry of Construction.

沼津市 BM 9402 を重力の基準点と定めた。できるだけ毎日の測定の始めと終りに、基準点で重力測定を行うため、基準点は宿舎に近い場所が望ましい。しかも、重力点は安定した土地にあって、交通による土地の振動の影響が少ないことが必要である。とくに基準点は他の重力点の選定よりもこういったことについて注意を払わなければならない。BM 9402 は自動車はかなりひんぱんに通る海岸通りに面しているが、以上の点について合格点がつけられる。また、気象庁の内浦検潮所に近いことも立地条件の一つとなっている。

海岸に近いと、潮位の変化によって海水の引力が異なるため、基準点の重力値に影響を及ぼすことがある。Fig. 2 に BM 9402 付近の海岸地形の断面図を示すが、この図の平均的な海面の位置で $\pm 1\text{m}$ の潮位の変動があったとしても、これによる重力変化はたかだか $1\sim 2\ \mu\text{gal}$ 程度である。海岸に近い重力点でも、海面に高度が

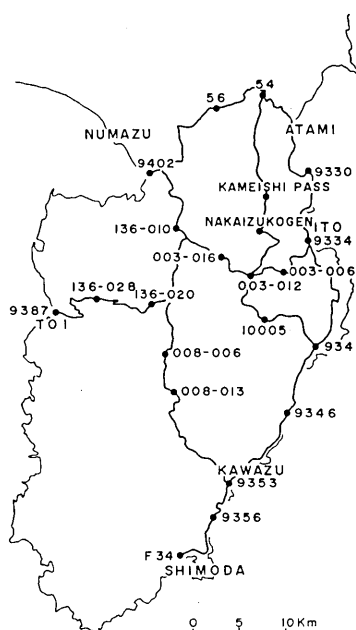


Fig. 1. Location of gravity stations.

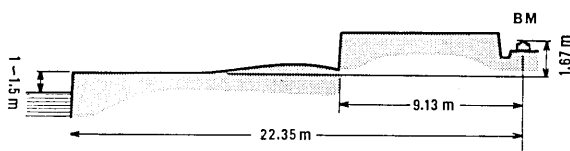


Fig. 2. Cross section of topography near B.M. 9402.

近い低地にあるならば、海水の上下による引力の変化はきわめて小さい。なぜならば、重力は鉛直方向の力であるのに対して、海水の質量の引力は主に水平方向に働くからである。

海岸付近で心配されるのは、潮位によって引き起こされる地下水位の上下変動に伴う重力変化 (Hagiwara, 1977) であるが、これは井戸を掘るか、土壤の平均的粒子の直径を見積るかしなければならないので、今のところ未解決の問題である。また、潮汐荷重による地殻の弾性たわみも考慮しなければならないが、これまた問題を将来に残した形である。とにかく、これらの影響を加え合わせて数 μgal 以下ならば、測定の精度から考えて、特に問題とすることはない。

一般に水準測量はループをつくって閉合差を求め、測定誤差として各水準点の測定値に配分する。しかし、このような誤差の配分法は隣りの点の測定誤差を背負い込むことになりかねない。時間的変化を問題とする測量にとっては、このような誤差の配分法は再考の余地がある。重力測量 I~III では、水準測量に準じてループをつくり、誤差配分を行った。しかし、測量 IV からは、毎日の測量ができるだけ BM 9402 から出発して、再び同点に戻るように心掛けた。しかも、毎回の測量には同じ道順を選ぶことを原則とした。測量ルート of 骨組みの上で、結果としてループができるが、その閉合差は測定誤差のインディケーターとしての意味をもつだけで、各重力値への配分を避けた。

Table II は測量 II~VII の重力値を示す。測量 II において用いられた重力計は La-Coste & Romberg G-34, G-196 および G-210 であったが、その後は G-34 と G-210 だけとした。

3. 重力変化

Fig. 3 に重力の時間的変化を示す。Fig. 3(a) は測量 I~II の重力変化、つまり II-I であるが、Fig. 3(b)~(f) はすべて測量 II をもとにした重力変化、つまり III-II, VI-II, ..., VII-II である。Fig. 3(b) は国土地理院 (1976) 発表の隆起のパターンとよく一致した重力減少域を示している。また、Fig. 3(c) 以後の大きい傾向として、次第に重力減少域がその南西部にかけて広がりを見せはじめた様子がうかがえる。これらの図では、 $\pm 10 \mu\text{gal}$ の誤差を含むことを承知の上で、あえて $10 \mu\text{gal}$ のコンター間隔で図示している。したがって、これら一連の図をくらべて、重力変化のパターンの細部の変化を論じるべきではなからう。

測量 III-II では、冷川峠付近の BM 003-012 の重力減少は $-31 \mu\text{gal}$ 、隆起量は 14 cm である。また伊東 BM 9334 では、 $-15 \mu\text{gal}$ の重力減少に対して 10 cm の隆起である。こういった隆起量と重力減少とを対比するためには、お互に同じ期間に測定されたデータでなければならない。ところが、国土地理院の隆起データは 1969 年 6~8 月から 1976 年 1~2 月までの約 6 年半のものであるに対して、われわれのデータは 1974 年 12 月から 1976 年 2~3 月まで約 1 年 3 か月の重力変化である。一般には、このように測定期間のちがう 2 つのデータを対比することはできないが、もし 1974 年 12 月以降に隆起がはじまったのであれば、両者の対比は可能である。

伊東と油壺に検潮場があり、潮位が連続的に記録されている。伊東の地殻が隆起を開始

Table II. Gravity in mgals assuming zero at BM 9402.

BM	II	III	IV	V	VI	VII
9402	0	0	0	0	0	0
54	-121.706	—	-121.691	-121.691	—	-121.687
56	- 44.359	—	- 44.363	- 44.373	- 44.375	- 44.362
9330	—	—	13.183	13.186	13.201	13.197
9334	8.083	8.068	8.056	8.054	8.073	8.066
9337	—	- 17.420	—	—	—	—
9340	—	- 29.580	—	—	—	—
9341	- 12.248	- 12.244	- 12.241	- 12.273	- 12.265	- 12.245
9342	—	- 7.467	—	—	—	—
9344	—	2.288	—	—	—	—
9345	—	- 5.214	—	—	—	—
9346	- 8.282	- 8.267	- 8.277	- 8.291	- 8.289	- 8.292
9347	—	4.166	—	—	—	—
9348	—	- 14.660	—	—	—	—
9349	—	- 16.984	—	—	—	—
9350	—	- 5.578	—	—	—	—
9351	—	- 15.226	—	—	—	—
9352	—	- 0.542	—	—	—	—
9353	- 1.091	- 1.074	- 1.095	- 1.102	- 1.107	- 1.089
9354	—	- 11.721	—	—	—	—
9355	—	- 12.136	—	—	—	—
9356	- 8.588	- 8.572	—	- 8.596	- 8.600	- 8.585
9357	—	- 10.891	—	—	—	—
9358	—	- 4.675	—	—	—	—

すれば、その検潮記録には潮位個有の変化のほかに隆起による潮位の変化が重なっているであろうし、隆起に無関係な油壺の検潮記録には潮位個有の変化だけが含まれていると考えられる。そのため、伊東と油壺の検潮記録の差をとれば、伊東の隆起による潮位変化だけが表われるであろう。Fig. 4 からは伊東の隆起が 1974 年末に開始したことが明らかに読みとられる。こうして、隆起と重力変化との対比が可能であることがわかったのである。

よこ軸に隆起量を、たて軸に重力変化をとってみると、Fig. 5 となる。測量 II と III

BM	II	III	IV	V	VI	VII
9365	- 7.669	—	—	—	—	—
9369	- 28.249	—	—	—	—	—
9374	0.514	—	—	—	—	—
9378	- 6.195	—	—	—	—	—
9381	0.707	—	—	—	—	—
9384	- 33.684	—	—	—	—	—
9387	- 7.481	—	—	- 7.472	- 7.476	- 7.462
9392	- 12.721	—	—	—	—	—
F34	- 3.789	- 3.764	—	- 3.804	- 3.794	- 3.795
10005	—	—	-126.730	-126.757	-126.747	-126.748
003-006	—	—	- 57.927	- 57.934	- 57.929	- 57.932
003-012	- 37.339	- 37.370	- 37.367	- 37.380	- 37.382	- 37.380
003-016	—	—	- 29.254	- 29.268	- 29.253	- 29.263
008-006	—	—	- 63.406	- 63.403	- 63.403	- 63.390
008-013	-144.791	-144.792	-144.811	-144.815	-144.823	-144.816
136-010	3.841	3.844	3.825	3.812	3.829	3.817
136-020	- 33.340	- 33.332	- 33.355	- 33.357	- 33.351	- 33.354
136-028	-120.082	—	—	-120.071	-120.080	-120.079
Iruma	- 13.807	—	—	—	—	—
Ohse	- 6.348	—	—	—	—	—
Koine	- 7.054	—	—	—	—	—
Nirayama Pass	—	—	-128.849	—	—	—
Kameishi Pass	—	—	- 89.332	- 89.396	- 89.408	- 89.396
Nakaizu-Kogen	—	—	-110.403	-110.404	-110.425	-110.422

では、修善寺から冷川峠を経て伊東に至るルートにおいて、水準と重力が共通して測量した地点はわずかに4点だけであるが、両者の関係は $-3 \mu\text{gal}/\text{cm}$ 、すなわちフリーエア勾配を示している。質量不変のまま密度だけが減少する。つまり、地殻がガサガサとひび割れして体積が増加したディラタンシーの状態、あるいは高圧の火山性ガスが地殻の割れ目をみたしたために体積が増加し、その結果として隆起が起こった状態であることを暗示している。

$\pm 10 \mu\text{gal}$ の測定誤差を考慮して、Fig. 5 にエラーバーをつけてみると、勾配は $-2 \sim$

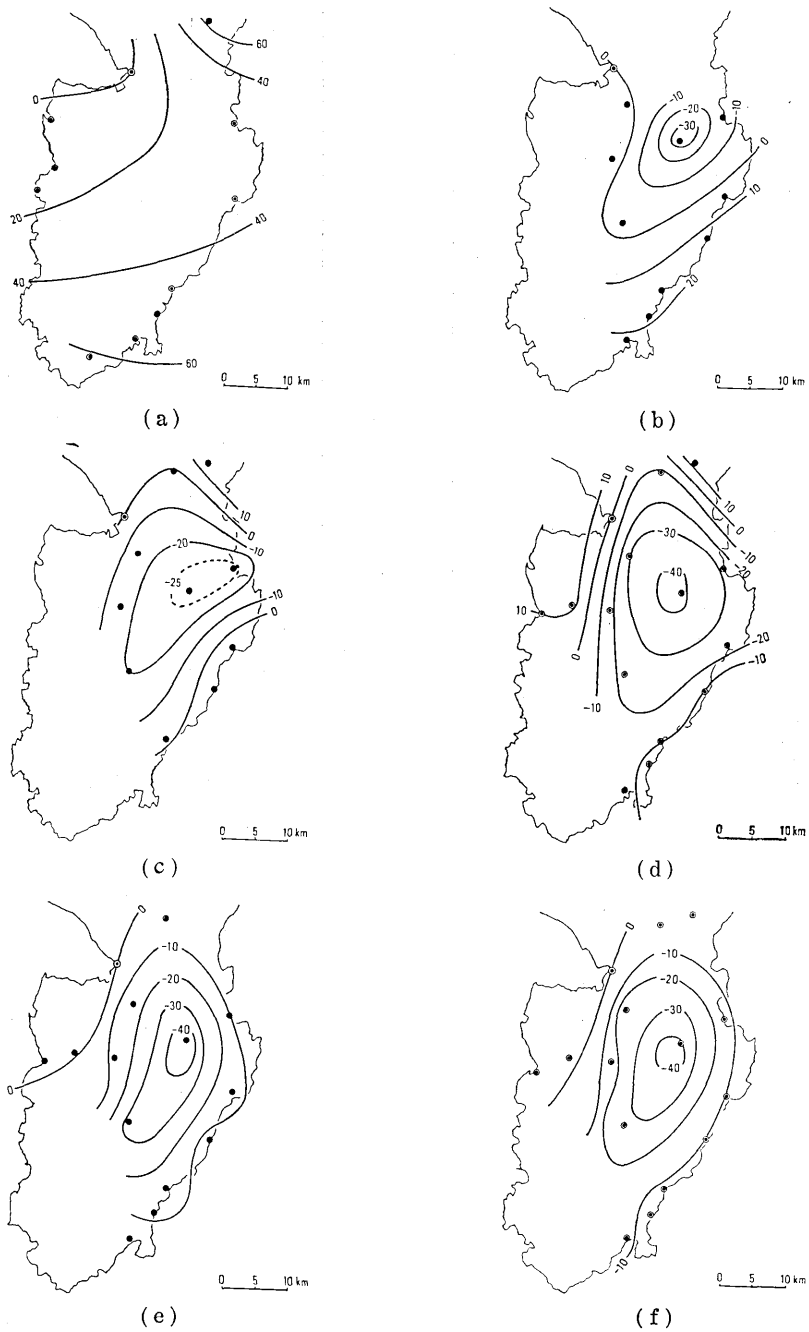


Fig. 3. Gravity changes in μgals during the period of
 (a) Feb. 1970~Dec. 1974, (b) Dec. 1974~Feb.-Mar. 1976
 (c) Dec. 1974~June 1976, (d) Dec. 1974~Sept. 1976
 (e) Dec. 1974~Jan.-Feb. 1977, (f) Dec. 1974~June 1977

-5 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ の範囲に入ってしまう。意地悪くとれば、フリーエア勾配がブーゲー勾配 (-2 $\mu\text{gal}/\text{cm}$) ともとれるのである。一般に、フリーエアかブーゲーかを明確に区別つけるためには、隆起が 30 cm をこえなければならない。こういった点、フリーエア勾配であると断言するには、説得力に欠ける向きがあることをつけ加えておきたい。

Fig. 3 (b)~(f) の一連の図は測量 II を基準とした積算値であったが、今度は各測定ごとの短期間の変化を図示してみよう。III-II はすでに Fig. 3(b) にあるので、これを省略することとし、IV-III, V-IV, VI-V, VII-VI の 4 枚の図をそれぞれ Fig. 6 (a)~(d) に与える。これらの図に共通した傾向は、重力変化が

NW-SE に伸びるコンターによって特徴づけられることである。Fig. 3(b) では、重力減少域はむしろ NE-SW 方向に伸びている。これに対して、その後の重力変化はそれに共役な方向に生じたことになる。これは群発地震の震央分布と同じ傾向である。

Fig. 6(a)~(d) の変化量を見ると、 $\pm 30 \mu\text{gal}$ に達するものもある。これが隆起や沈降に対応するかどうか不明だが、群発地震によって地殻がローカルな垂直変動をくり返すことは十分考えられる。 $\pm 30 \mu\text{gal}$ という垂直変動にして干 10 cm にあたる。わずかな期間に 10 cm も上下することは考えにくいから、地殻の密度変化、地下水および誤差といった他の原因も考えなければならない。それにしても、Fig. 6(a)~(d) に共通して NW-SE 方向の重力変化がみられる事実は、震央分布との関係から、なにらか意味ある情報であると考えたい。

測量 II から VII までを通して測定されたいくつかの水準点の重力変化を、II を基準として図示したのが Fig. 7 である。隆起の中央部にある BM 003-012 (冷川), 9334 (伊東), 003-013 (天城峠) などでは、早くから重力減少、つまり隆起がはじまったのに対して、周辺部では遅れてはじまっている。すなわち、重力減少域が広がったことを示している。1976 年秋ごろより、群発地震活動の衰退とともに、重力減少は停止あるいは増加に転じている。隆起の中央部、とくに山岳地帯の重力減少はほぼ停止状態にあるのにくらべて、周辺部はむしろ増加の傾向にあることは興味深い。地形形成の歴史の上で、群発地震のたびに隆起し、隆起は残留して、伊豆半島の山岳の標高を高めてきたのかも知れない。

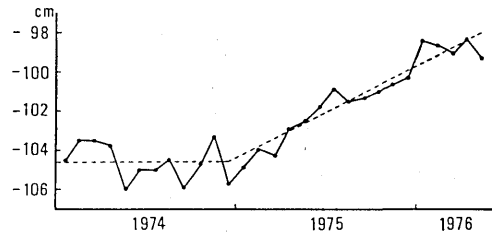


Fig. 4. Monthly mean tide difference between Ito and Aburatsubo (after GSI, 1976).

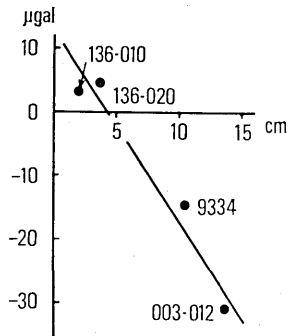


Fig. 5. Gravity change versus elevation change. The straight line indicates the free-air rate.

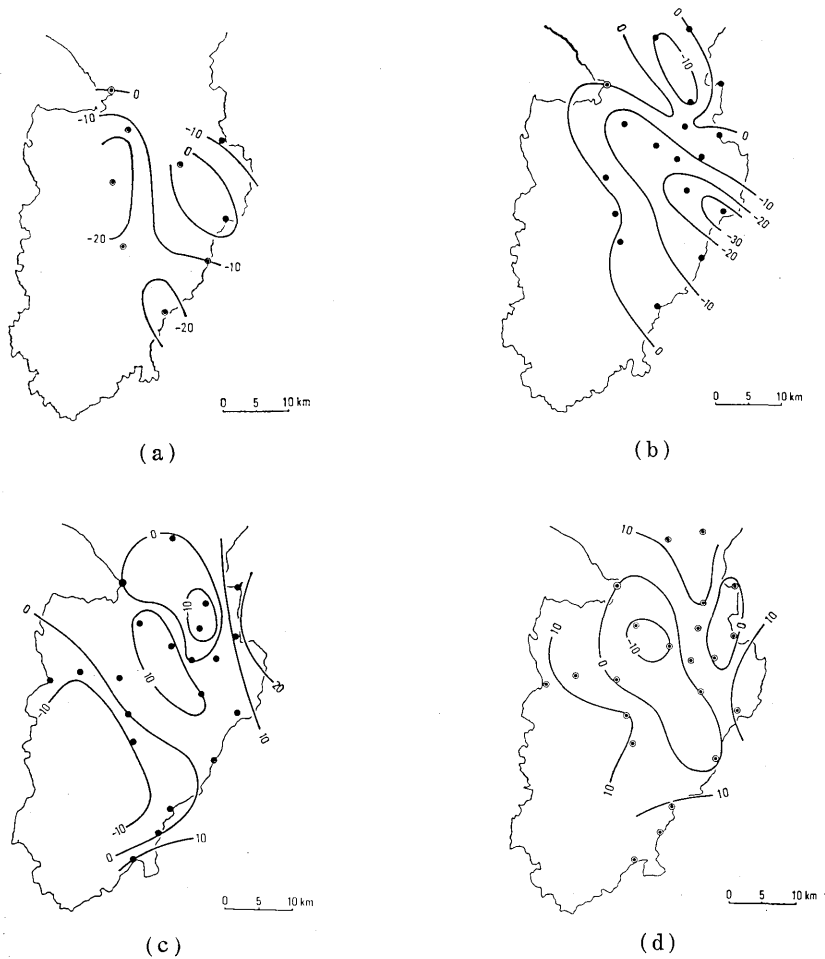


Fig. 6. Gravity changes in μgals during the period of
 (a) Fed.-Mar. 1976~June 1976
 (b) June 1976~Sept. 1976
 (c) Sept. 1976~Jan.-Feb. 1977
 (d) Jan.-Feb. 1977~June 1977

4. おわりに

伊豆半島東部の地殻隆起に伴う重力減少の検出は、隆起を発見する手段として重力測量の有効性を立証することに成功した。精度は三等水準測量程度であるが、短時間に広範囲の地域をカバーすることができる重力測量は、時間と労力のかかる水準測量の代用として十分に使えることがわかった。また、水準測量では容易に近付けない山岳地帯にまで、重力測量は入れるし、地震の前兆現象としての地殻隆起を発見する手段として、偵察的調査に好適である。くり返えし重力測量によって、ローカルに重力減少が発見されれば、一応地殻隆起を疑って、その地域に精密水準測量を実施する。その結果、地殻隆起が確定され

るものとすれば、地震予知のための作業として効率はよいし、経費の節減にもつながるであろう。

重力変化測定の第二の目的は、隆起量に対する重力減少がどのような勾配を示すかによって、隆起のテクトニックな意味を解明することにある。今回の隆起ではフリーエア勾配をもつことが判明したが、測定誤差を考慮に入れると、この結論は 100% 確信がもてるものではない。一般に、隆起量が

30 cm をこえないと、隆起に対する重力変化の勾配を議論することは困難である。現在のところ LaCoste & Romberg G 型重力計を用いているが、D 型は $\pm 2 \sim 3 \mu\text{gal}$ の精度で測定が可能である (Lambert and Beaumont, 1977)。また G 型でも、目視観測に加えて、リードアウトから電気的に取り出した信号を使えば、同じく $\pm 2 \sim 3 \mu\text{gal}$ の精度を保つことができる。こうなれば、隆起量が 10 cm 前後でも、重力変化勾配をフリーエアかブーゲーかくらいは明瞭に区別することができるであろう。

文 献

- HAGIWARA, Y., 1977, Tidal Groundwater-Related Gravity Change in a Seaside Area, *J. Geod. Soc. Japan*, **23**, 42-43.
- 萩原幸男・田島広一・井筒屋貞勝・里村幹夫, 1976 a, 伊豆半島における重力変化, 測地学会誌, **22**, 17-22.
- 萩原幸男・田島広一・井筒屋貞勝・花田英夫, 1976 b, 1975~1976 年における伊豆半島東部の重力変化, 測地学会誌, **22**, 201-209.
- 国土地理院・東京大学地震研究所・京都大学理学部地球物理学教室, 1971, 東海・近畿地方における精密重力測量, 測地学会誌, **17**, 22-37.
- 国土地理院地殻調査部, 1976, 伊豆半島中部の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **16**, 82-87.
- LAMBERT, A. and C. BEAUMONT, 1977, Nano Variations in Gravity Due to Seasonal Groundwater Movements: Implications for the Gravitational Detection of Tectonic Movements, *J. Geophys. Res.*, **82**, 297-305.

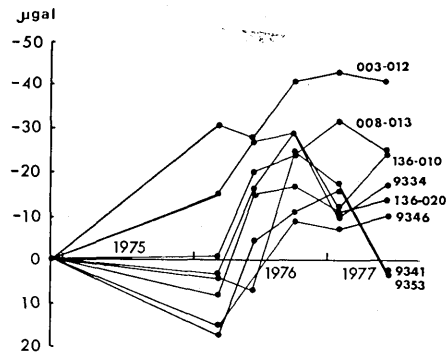


Fig. 7. Time changes in gravity at bench marks.

9. *Gravity Change Associated with Earthquake Swarm
Activities in the Eastern Part of Izu Peninsula.*

By Yukio HAGIWARA, Hirokazu TAJIMA, Sadakatu IZUTUYA
and Hideo HANADA,

Earthquake Research Institute.

Precise gravity resurveys detected gravity decrease over a marked crustal uplift associated with earthquake swarm activities in the eastern part of Izu Peninsula. The gravity change rate is about $-3 \mu\text{gal/cm}$, i. e., free-air rate, which may suggest that the possible cause of the uplift is a dry dilatancy of the upper crust or a pressure increase of volcanic gas around a magma chamber.

The gravity-decreasing area extending as the swarm activities became feeble in the fall of 1976. The last gravity survey found that gravity has still kept almost constant in the central part of the uplift but has turned into increasing in the surrounded area.