

12. 地震および地殻変動に伴なう重力の変化

地震研究所 田 島 広 一

(昭和50年5月30日受理)

目 次

第1章 序 論

第2章 重力測定の精度

- 2-1 LaCoste and Romberg 重力計
- 2-2 気温変化に伴なう重力計の drift
- 2-3 その他の重力測定誤差の原因
- 2-4 重力測定精度についての結論

第3章 重力の基準点

- 3-1 世界の重力基準網
- 3-2 日本の重力基準網
- 3-3 東京大学構内の重力基準点

第4章 松代群発地震に伴なう重力変化

- 4-1 松代群発地震活動の推移の概要
- 4-2 重力測定
- 4-3 測定結果とその考察

第5章 南関東における重力変化

- 5-1 関東南部の地域性
- 5-2 南関東における重力の精密測定と精度
- 5-3 測定結果とその考察

第6章 東海地方における重力変化

- 6-1 重力測定
- 6-2 測定結果とその考察

第7章 その他の地方における重力変化

- 7-1 室戸地方の重力変化
- 7-2 北海道東部の重力変化
- 7-3 伊豆の白浜における G-factor の変化

第8章 結 論

第1章 序 論

重力の測定は、古くから実験物理学上の重要な課題であり、もっとも精密な物理測定の一つでもあった。Borda, Bessel, Kater 等、歴史上名高い物理学者により、重力値は振子の装置を用いて測定が行われ、その測定値は地球の形状決定のための資料として、物理測地上数多くの重要な知識をわれわれに提供した。その後、振子による重力の比較測定

が盛んに行われるようになり、19世紀末には、測定精度もすでに1 mgal すなわち 10^{-6} g に達した。簡便な振子により比較的容易に重力値が決定されるようになると重力測定の目的も地球の形状決定といった大規模な対象から、次第に局地的な地質構造との関連における問題へと移行した。とりわけ、近年になってスプリング型重力計が開発されるに及んで、測定精度も $10 \mu\text{gal}$ ($=10^{-8}$ g) にも達し、石油鉱床や金属鉱床探査法の一つとして、重力測定が応用されるに至った。このように精度が高くなると、当然、静的な重力だけではなく、動的な重力、すなわち地球の潮汐作用に伴う重力場の変動の研究や、さらには、地下水の移動や地殻変動に伴う重力場の乱れも議論されるようになる。特に後者の問題は、地震発生や火山噴火との関連において、近年わが国においてとみに盛んに研究されはじめてきた問題である。

わが国のように、地震発生や火山噴火の多い国では、それに伴った地殻変動も激しく、重力もそれと共に変化するであろうと考えられる。1891年濃美地震の直後に設立された震災予防調査会がとり上げた18項目の課題の中に、「地震に伴う重力変化の観測」がすでにあげられていたことからわかるように、地殻変動に伴う重力変化についての関心は古くからあったのである。このような問題が、実際の測定に基づいて議論されはじめたのは関東大地震以後である。石本(1929)、Ishimoto and Tuzi(1929)は関東大地震を境にして、東京天文台のRiefler振子時計が進んだことを指摘し、重力が10 mgal程度増加したのではないかとの問題を提起した。これに対し坪井(1935)が直接振子による東京・仙台・水沢の3点の重力比較測定の結果からは、10 mgalに達するような大きな重力変化は見出されなかったと報告している。これは地震による重力変化の問題を提起した最初の研究である。その後、重力変化を示唆する問題として、1946年南海道地震後の垂直線偏差の変化についての論文がある(Okuda, 1951)。しかし、1940年代まではほとんど振子による重力測定であり、その測定精度はせいぜい 10^{-6} g \sim 10^{-7} gであったため、今日われわれが取り扱うような微小な重力変化の検出には、まだ精度が不足であったと云えよう。

第二次世界大戦中、アメリカ合衆国において油田探査の目的で開発されたスプリング型の重力計は感度・精度ともに高く、感度は 10^{-8} g にも達した。戦後わが国にもこの種のWordenやNorth American重力計等が輸入され、振子装置に比較して測定が容易であるために、急速に測定網が国内に広がった。すなわち、水準路線に沿った重力測定、火山等の特殊地域を限った測定など、これらの測定によって地下構造に関する新しい事実が続々と明らかとなった。さらに、重力測定網の拡大にともなって、重力の時間的変化検出の目的で再測がはじまり、今市地震(飯田ほか, 1950)、伊豆大島三原山の噴火(飯田ほか, 1951, 1952)、近畿地方(Ichinohe, 1955)、二ツ井地震(実川ほか, 1955)、宮城県北部地震(実川ほか, 1962)等についての重力変化の報告が出るようになった。このような微小な重力変化の検出は、高精度のスプリング型重力計が開発されてはじめて可能となったのである。

重力計のスプリングには材質的に高性能のものを使用しているものの、その材質には一種の劣化現象が避けられず、そのため重力読定値にドリフトと呼ばれる見かけ上の時間的変化が現われる。微小な重力の時間的変化を検出しようとする目的のためには、このドリフト量が小さくかつドリフトが時間と共に直線型であることが望ましい。しかし、Worden

や North American 重力計のような、初期の重力計では、この点多少疑問があった。これらの初期の重力計については次の欠点が指摘されよう。

- a) ドリフト量が大きく、その時間的直線性が悪い。
- b) 重力計の定数に経年変化がある。
- c) 測定範囲が約 100 mgal で、重力差の大きい間を測定する場合リセットをする必要があり、これが誤差累積の原因となる。

これらの理由から重力変化の検出には問題があったと云わなければならない。事実、地震研究所の談話会において二ツ井地震後の重力再測について発表（実川・田島，1955）した際、重力変化の可能性に関して議論が沸騰し、変化よりは精度の問題に帰せられたことがあった。

これら初期の重力計に対して、1960年代になって出現した LaCoste and Romberg 重力計は、

- a) ドリフトが前記の重力計に比べ一桁小さい $10 \mu\text{gal/day}$ 位であり、地球潮汐の補正だけで充分重力値が求まるほどである。
- b) 重力計の定数は、読定値の大きさに対応した定数が定められていて、定数の経年変化は特に認められない。
- c) 測定範囲は、全地球上をリセットなしで測定できるという特徴があり、重力値が精度よく決まる。

というように、測定精度安定性等の点からも著しい向上を見せた。LaCoste and Romberg 重力計によって検出された重力経年変化は、その信頼性という意味において、従来の重力計のそれとは比較にならないと考えられる。例えば、新潟地震（藤井，1966）・Alaska 地震（Barnes，1966）・松代群発地震（国土地理院，1967，1968；田島・井筒屋，1974b）・伊豆大島の噴火（井上ほか，1968；井内ほか，1972）・琵琶湖周辺（中川ほか，1972）・南関東（田島，1973）など、またごく最近には1973年6月の根室半島沖地震に伴う重力変化（大川ほか，1974；国土地理院，1974）が報告されているが、これらの測定結果は信頼するに足るデータであろう。

本論文の目的の一つは、上記の重力変化のうち、筆者が測定および解析に関係した資料を紹介することである。ここでは、まず重力計の精度、測定誤差の原因等について論じ、次に実際の測定結果について、特に、松代群発地震・南関東・東海地方の重力変化を紹介し、あわせて、その考えられる要因について言及する。第2章においては、LaCoste and Romberg 重力計の構造の概要、そのドリフトの特徴、ドリフトに大きく影響すると考えられる気温変化、その他とドリフトとの関係について究明し、検出される重力変化の信頼性を検討する。第3章においては、基準点における重力値について触れ、特に東京大学構内基準点における重力値の時間的変化について述べる。

近年、地震発生のメカニズムに関して dilatancy diffusion model (Scholz et al., 1973) が提唱され、地震前の P 波速度の変化、地殻の鉛直変動、地下水位、Rn 濃度変化等の観測事実を説明しうることが示された。そして、Nur (1974) や Kisslinger (1974) はダイラタンシーを検出するには、重力の繰り返し測定がもっとも容易で効果的な方法であると述べている。第4章においては、松代地震に際して観測された重力変化と地殻上下

変動とを基にして、ダイラタンシー現象を論じる。第5章には南関東、第6章には東海地方と、地震予知計画に基づく観測強化地域の重力変化を取り扱ひ、その他の地方で観測された重力変化を第7章に要約する。

第2章 重力測定の精度

重力変化の検出のためには $\pm 10 \mu\text{gal}$ 程度の精度は必要である。ここでは、この精度が現在の重力計について果してあるか、また、その精度を保つためにはどのような注意が必要であるかについて検討する。

無定位形重力計には重力の感部として、熔融水晶バネを用いたものと、金属製のバネを用いた重力計がある。前者の代表的なものとしては Worden 重力計があり、これは弾性ヒステリシスの殆んどない熔融水晶を主スプリングにしていて、零長バネではないが、感度を最高にするような構造になっている。感部の質量は僅か 5 mgr. である。またこの感部は魔法ビンに封入してあり、初期のものは特別に積極的な温度制御をしていない。North American 重力計はエリンパー系合金を主スプリングとして、温度制御を行っているが、型が大型であり、特に温度制御用の電池に自動車用の数 10 AH 位のものを使用しているため、運搬が1人では不可能であるという欠点がある。しかもこれらの重力計は $10 \mu\text{gal}$ の感度があるとはいうものの、測定の総合精度としては $\pm 100 \sim 300 \mu\text{gal}$ である。1950年代には、これらの重力計により全国的にあるいは特殊な地域に限って、重力異常分布が精力的に求められた。なお、Worden 重力計は小型軽量という長所があるため、異常分布を求める目的で山岳地域の測定には適している。

1960年代になって LaCoste and Romberg 重力計 (あるいは単に LaCoste 重力計) が現われ、その後、続々と輸入され、現在では国内に恐らく 20 台を超えているものと思われる。1969年には日本測地学会の中に「重力および精密水準測量に関するワーキング・グループ」が設置され、多くの討論* と同時に数多くの共同基礎実験 (中川ほか, 1973, 1974) が行なわれた。

2-1. LaCoste and Romberg 重力計

LaCoste and Romberg 重力計は、1960年代のはじめに現れた。その外観を Fig. 1 に示す。その主スプリングはエリンパー系の合金で零長バネを使用し、重力計本体は $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内の安定な恒温槽内に収められている。その構造の概要を Fig. 2 に示す。重力の変化によって重錘が上下し、ダイヤルを回すことによってその軸を上下し、この動きを挺子を介して零長スプリングの上端に加えて、張力を加減し、重錘を元の位置に戻す。すなわち零位法によって測定するのである。測定用ネジの上部のダイヤルの回転量によって重力差が求められる。ダイヤルは1回転約 $1000 \mu\text{gal}$ であり、それを 100 等分した

* 重力および精密水準測量に関するシンポジウム“総合討論の要旨”

測地学会誌, 15, 31-40, 1969

第2回重力および精密水準測量に関するシンポジウム“総合討論の要旨”

測地学会誌, 16, 76-88, 1970

第3回重力および精密水準測量に関するシンポジウム“総合討論の要旨”

測地学会誌, 17, 76-83, 1971

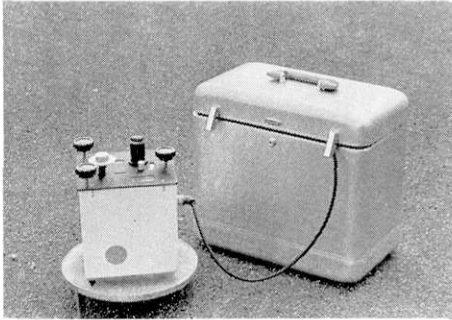


Fig. 1. LaCoste and Romberg Gravimeter.

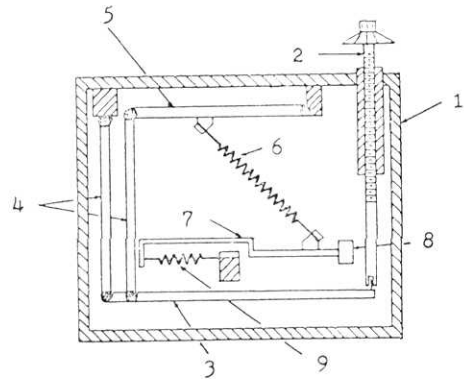


Fig. 2. Gravity-measuring devices of LaCoste and Romberg Gravimeter.

- 1: meter box
- 2: measuring screw
- 3,5: lever
- 4: connecting links
- 6: main (zero length) spring
- 7: beam
- 8: weight
- 9: shock eliminating spring

目盛で $10 \mu\text{gal}$ の読定ができる。なおこの重力計の大きさは旧型で長さ 19 cm 巾 17 cm 高さ 25 cm、新型はそれぞれ $16 \times 14.5 \times 25$ cm であり、重量はケース共電池を含めて 9 kg 程度である。この重力計は前記 Worden や North American 重力計に比べて安定性に富み、野外観測に最適とされている。

2-2 気温変化に伴う重力計の drift

ドリフト現象は材質の一種の老化現象であり、微視的には破壊現象である。スプリングの材質を作る分子間隔が正しい位置関係を失いディスロケーションを起こすものと考えられる。特に重力計のようにスプリングの伸びを微視的に観測する場合には、読みとり値が時間と共に変化するドリフト現象は避けることはできない。重力計の寿命も関係してドリフトをいかに小さくするか、また時間経過に対するドリフトの直線性をいかに保つかが重力計保持の問題上、もっとも重要であり、ドリフトの状態こそが重力計による測定精度を左右するといっても過言ではない。もし、直線的なドリフトを示せば高精度の測定が可能となる。例えば、A 点を基点として B 点の重力値を求める場合、A 点で測定した後 B 点を測り、再び A に戻るといった測定をするのが常道である。このとき、A における 1 度目の重力の読みと 2 度目の読みでその間の全体のドリフトはわかるが、B 点で読みとるとき、A 点から B 点に移った時間間隔におけるドリフトは不明である。したがって、その全測定間はドリフトが直線的であったと仮定して補正を行なうわけである。どのような測定方法をとろうとも、重力値未知の測定点の重力値を決める場合には必ず生ずる問題である。

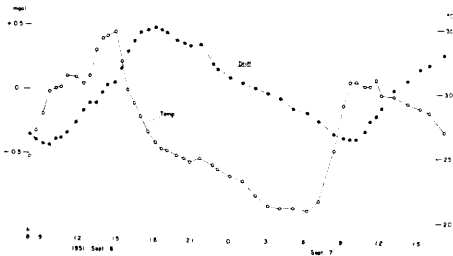


Fig. 3. Relation between drift of Worden Gravimeter No. 60 and air temperature.

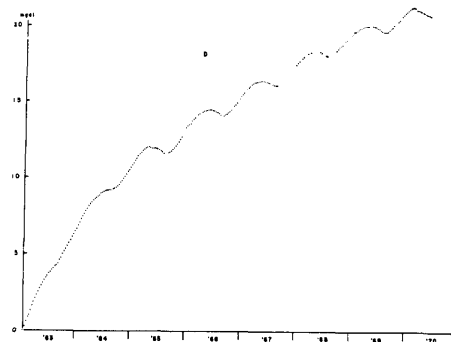


Fig. 4. Total drift of LaCoste and Romberg Gravimeter G-34.

非直線的なドリフトを生ずる原因としていくつか考えられるが、ここでは外気温の変化がそれに及ぼす影響について述べる。Fig. 3は Worden 重力計 No. 60 によって得られた外気温とドリフトの関係を示している (田島, 1969)。旧地震研究所の建物の東側で 1951 年 9 月に測定した結果である。直射日光による温度変化をなるべく大きくするために、トタン張りの小屋の中で、1 時間または 30 分間隔で 33 時間読みとりを行ない、地球潮汐の補正及び全体の直線的なドリフトを取り去った結果である。白丸が気温、黒丸がドリフトを示す。気温が約 10°C の変化に対してドリフトの振巾は約 1 mgal に達している。そして、温度変化とドリフト変化の間に 3~4 時間の時間的ずれはあるが、良い相関があることは明瞭である。この Worden 重力計は魔法ビンの容器に收容されているだけで、積極的に恒温を保つ配慮はされていない。したがって、恒温槽のある重力計についてこれをそのままあてはめるわけにはいかないが、スプリング自体に温度によるドリフトの変化があり、このような特性をもっていることは注意すべきことである。

長期間ドリフト

1963 年以來 8 年間にわたって観測した LaCoste 重力計 G-34 のドリフトの状況を Fig. 4 に示す (田島, 1970b)。地球潮汐の補正をした後、10 日毎の値の平均をとったものである。ドリフトの指数関数的な永年変化に年周変化が加わっていて、しかもその年周変化の振巾が 1 mgal に達している、そこでこの資料からドリフト D が時間について

$$D=C(1-e^{-\lambda t}) \quad (2.2.1)$$

と表わされると考え、定数 C および λ を最小自乗法で決定した。その結果 $C=0.0207\text{ mgal}$, $\lambda=0.000996\text{ day}^{-1}$ を得た。もとの資料から D を引き去った残りの残差 ΔD を求め、プロットしたのが Fig. 5 である。この図では、明瞭な年周変化が現われている。ドリフトに年周が生ずる原因として、気温変化が考えられるので (田島, 1969)、ドリフト・レートを決める。

$$\frac{d\Delta D}{dt} = \frac{\Delta D(t_2) - \Delta D(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (2.2.2)$$

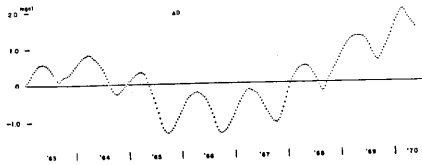


Fig. 5. Residual drift of LaCoste and Romberg Gravimeter G-34.

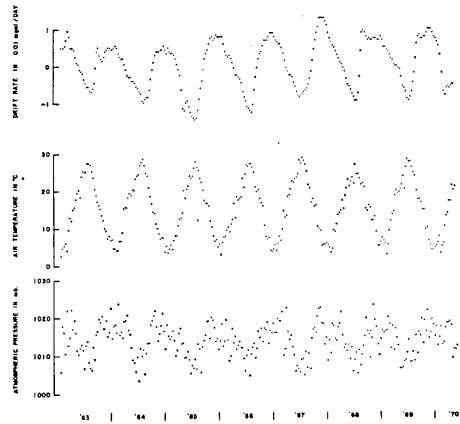


Fig. 6. Drift-rate, air temperature and atmospheric pressure.

$t_2 - t_1 = 10$ 日としてドリフト・レートを計算したものを Fig. 6 の上の図に示す。その下には、上の図と比べるために、気温の 10 日間平均値、および気圧の 10 日間平均値とを並べて示す。ドリフトそのものと、気温との相関はあまり明瞭ではないが、ドリフト・レートとすると気温との負の相関は明瞭である。気温とドリフト・レートとの相関のよさに比べて、気圧との相関は小さい。相関係数をとってみると、前者の場合 $r = -0.82$ 、後者の場合 $r = 0.61$ である。おな参考までに気温と気圧の相関係数は $r = -0.58$ であり、このことは気温と気圧に負の相関のあることを示しているのであって、特にドリフト・レートと気圧の間に相関があるとはいえないであろう。Δ*D* には、Fig. 5 に示すように年周以外の長期変化が含まれている。ドリフト・レートにも年周以外の項が含まれているか否かを調べるために、ドリフト・レートの Fourier 係数を求めた。すなわち

$$\frac{d\Delta D}{dt} = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + B_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right) \quad (2.2.3)$$

とおいたときに Fourier 係数は

$$\begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{d\Delta D}{dt} \begin{pmatrix} \cos \frac{2n\pi t}{T} \\ \sin \frac{2n\pi t}{T} \end{pmatrix} dt \quad (2.2.4)$$

と求められる。ここに T はデータの全時間間隔である。Fig. 7 は縦軸に $\sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ を、横軸に周期 (単位: 日) をとったものである。図から年周項が卓越し、年周以外に特に顕著なものは存在しないことが確かめられる。

地震研究所では、1969 年 9 月に新しい型の LaCoste 重力計 G-210 を購入した。この重力計と G-34 との相違点は、小型化されたこと以外に、温度の制御方式が変わったことである。それは旧型が水銀接点による電流の断接方式であったのに対して、サーミスターブ

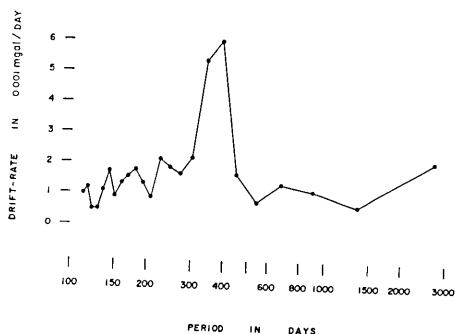


Fig. 7. Fourier spectrum of drift rate.

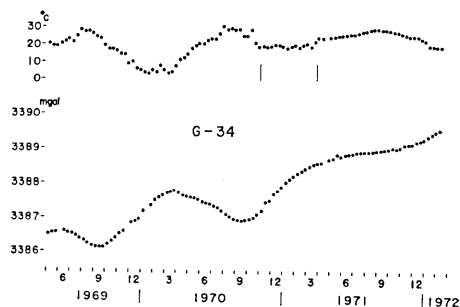


Fig. 8. Room temperature and total drift.

リッジにより電流を制御する方式に改められた。この方式の改良によって、長期間のドリフトに年周項がなくなるか少なくなるかと考えたが、必ずしもそのような改良結果はみられないようであり、数年の観測結果にやはり年周変化がみられる。これはサーミスターによる制御電流がスムーズに変化せず、断接的变化をしているためと考える。断接的变化をしていることは、電源の電流変化によって確かめられる。

これらのドリフト観測は、すべて地震研究所の実験室で行なったもので、重力計は気温の影響をまともに受けている。それにしてもドリフトの年周項が 1 mgal にも達することは注目すべきである。Fig. 8 は 1969 年 5 月から 1972 年 1 月までの G-34 のドリフト (下) と、その時の室温 (上) である。1969 年 5 月から 1970 年 10 月までは上記観測と同じ直接外気温の影響を受ける部屋であり、その後 1971 年 3 月までは恒温室、更に後 1972 年 1 月までの期間は地下 2 階の季節的温度変化の少ない部屋での観測である。この図から外気温のドリフトに与える影響が明らかであろう。元来、重力計内の温度そのものは恒温に制御されているので変化は小さい筈である。それにも拘わらず、このような年周変化が現われる原因は次のように考えられる。すなわち、冬季は気温の低下により、温度制御のための電流の断接回数が多くなり、したがって器内の温度が僅かではあるが夏季に比べ短周期で変化し、スプリングに影響を与え、ドリフト・レートを大にするのであろう。

短周期気温変化によるドリフト

前述したドリフト実験は、年周項のような長周期の気温変化によるドリフトの影響に関してであったが、もっと短い周期の気温変化については、どのような応答がドリフト上に現われるであろうか。この問題について実験を試みた (田島, 1971)。重力計に短周期の気温変化を与えたところ、ドリフトのばらつきに明瞭ではないが差異を見出した。その結果は Fig. 9 にまとめてある。この図は縦軸に重力計周囲の温度変化の振巾、横軸にその平均温度をとりドリフトのばらつきを現わす量として、平均のドリフト勾配からの標準偏差を黒丸の大きさに示した。この図で最も右の点は実験第 1 日目のものであり、東京での静止状態から急に現地まで運んだための影響があるものと思われる。この図をみれば、明瞭ではないとしても、左上に大きな丸、右下に小さな丸が分布するようにみえるであろう。もしそうであるならば、気温が低く温度変化が大きい場合に、ドリフトのばらつきが

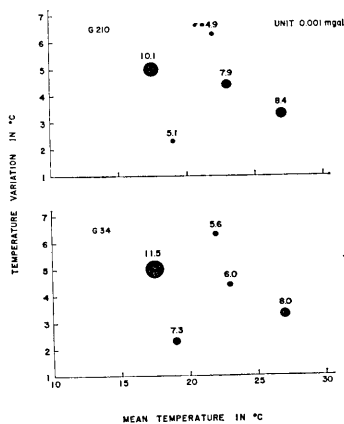


Fig. 9. Relation between temperature and standard deviations of gravimeter drift.

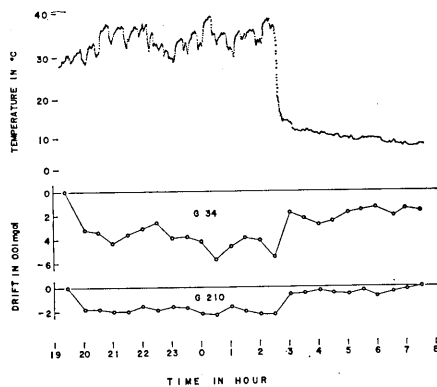


Fig. 10. Time changes in temperature and the corresponding drift curves of G-34 and G-210.

大になるといえる。

しかしながら、これだけの資料では明確な結論をだすことはできない。そこで第2回目の実験を行なった(田島・井筒屋, 1974a)。この実験では気温変化を段階的に与えて、そのドリフトへの応答を調べた。ここで意図したところは次のようである。重力計は短周期温度変化に対してはあたかもコンデンサーのような役割りを示すと考える。気温変化を段階的に与えれば、電気回路における過渡現象のように、ドリフトはゆっくりした立ち上がりを示すと期待される。そこで筆者は重力計 G-34 と G-210 とを、ノイズの少ない柿岡に運び実験を行なうこととした。時期としては冬季を選んだ。その理由は、重力計に温度変化を与えるため、断熱材で囲った実験小屋の中を充分に高温にし、その小屋の天井と入口の断熱材を取り外せば外気温に急激に冷却することができるため、この実験に最適と考えたからである。

実験結果を Fig. 10 および Fig. 11 に示す。ここで意外な事実を発見した。気温変化を打点式記録計に記録させるかたわら、重力計の読みとりを30分毎にしたのであるが、図のように気温を階段状に30~40°C 上昇または下降させてから、30分後の重力計のドリフトはそれぞれ20~40 μ gal 減少・増加したのである。コンデ

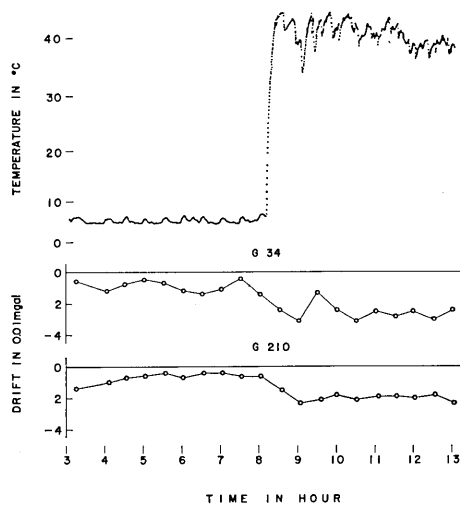


Fig. 11. Time changes in temperature and the corresponding drift curves of G-34 and G-210.

ンサー回路のようにゆっくりしたドリフトの減少・増加という期待は見事外れたのである。もしもコンデンサーの等価回路でおきかえるとするならば、極めて小容量のコンデンサーであるといわねばならない。この実験事実は次のように考えると理解される。短周期気温変化は重力計の内部にまで浸透せず、重力計の外側の部分に影響する。外側の部分が気温の上昇・下降により、早期に膨張・収縮すると、膨張・収縮しない重力計の内側に比べて見かけ上スプリングが収縮・伸長したことになる。したがって見かけ上、重力計の読みとり値は小さく・大きくなる——すなわちドリフトは減少・増大する。

以上の温度実験の結果を要約すると次のようになる。

- 1) 外気温が低温の場合には、高温のときに比べてドリフト・レートは増大し、しかも温度変化を与えるとドリフトの直線性も悪化する。
- 2) 急激な温度変化 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ を与えた場合には、温度の昇降と逆方向に、ドリフトが $20\sim 40\ \mu\text{gal}$ 程度急変する。

これらの現象の解釈としては、

- 1) 外気温が低温の場合には、重力計外枠の温度の低下が内部に徐々に浸み込み、熱源電流の断接周期を短かくして、そのため僅かではあるが計器内の温度の変化を生じてスプリングに影響を及ぼす。これに対して高温では計器内の温度変化の周期が延びスプリングへの影響が少なくなる。すなわち、恒温機能が不十分であることによる変化であろう。
- 2) 急激な温度変化を与えた場合は、応答が早いことから、重力計容器の歪みであろうと考えられる。

2-3 その他の重力測定誤差の原因

LaCoste 重力計により測定する場合、その測定結果の精度を左右する要因、すなわちドリフトの直線性を悪くする原因として、まず外気温の変化が挙げられることは前述のとおりである。その他の原因として考えられることは、

- 1) 重力計に与えるショック
- 2) 運搬方法の変化
- 3) 恒温用電源電圧の変化

等である。また重力計の測定誤差の原因としては、重力計の定数の変化も問題となるであろう。さらに、測定結果に誤差を与える原因として、重力計そのものの精度とは関係なく重力に対する地球潮汐定数 G -factor が、地域により異なること、およびその時間的変化も考えられ、このための誤差を生ずることが推察できる。これらの誤差要因について次に述べたい。

重力計に与える機械的ショック

重力計に与える機械的ショックとしては、重力計を脚上にセットするときの小さなショックから測定者のミスで重力計を落下させたときの大きなショックまでである。LaCoste 重力計の場合、小さなショックで読定値に $50\ \mu\text{gal}$ 以下の変化が現われることがあるが、必ずしも同程度のショックを加えても同じ変化がつねに起るとは限らず、全く変化の生じない場合もある。同型の重力計を誤って落した経験のある人によれば、このような場合には

衝撃の加わり方にもよるのであろうが、数 mgal から数 10 μ gal の変化があるそうである。

なお、重力計を扱っていると、特にショックを与えないにも拘わらず、読取値に 0.1~数 mgal の変化を生ずることがある。この現象をテアーと呼んでいる。このテアーが観測中に起ると大きな誤差の原因となる。この現象は、おそらくスプリングそのものの変化ではなく、スプリングの接続部のようなところの変化であろうと考えられる。スプリング型の重力計にはこのような現象があるので、精密な測定の場合には複数台の重力計を使用して同一測定をし、このテアーのチェックをする必要がある。

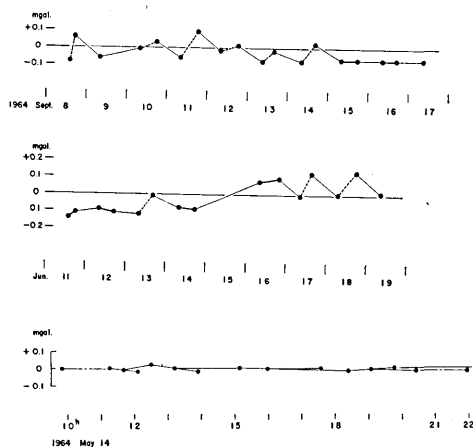


Fig. 12. Drift of G-34 during gravity surveys.

運搬によるドリフトの変化

重力を野外で測定する場合には、重力計を運搬するために与えられる振動（ショック）は避けられないことで、前述の小さなショックの繰返しと考えられる。重力計を舗装した道路上を自動車運搬した場合と、重力計を背負って徒歩で運搬した場合とを比較すると、明らかに徒歩の場合が自動車運搬に比べて大きいドリフトを示す。Fig. 12 に運搬手段によるドリフト量の比較を示す。図の上・中は鬼首における調査期間中のドリフト（Rikitake et al., 1965）である。この図で破線は徒歩で山地を測定した場合、太い実線は自動車運搬による測定、細い実線は夜間等の作業休止の間のそれぞれのドリフトを示している。Fig. 12 の下は自動車運搬時における好例で、東京・柿岡間に数点のチェックポイントを設け、それぞれのチェックポイント間で小さな環を作り、そのドリフトの状況を示している。これらの図からおおよそ次のことがわかる。

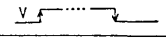


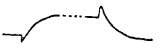
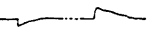
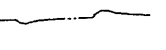
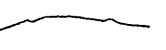
- a). 徒歩運搬のときに大きいドリフトが目立つ。
- b). 自動車による運搬は、徒歩運搬に比べてドリフトが小さい。またこの場合、一般にドリフトは直線的である。
- c). 昼間ドリフトが大きかった場合、夜間にはそのドリフトを打消すかのように、負のドリフトが現われる。

一般に徒歩による運搬の方が大きなショックを連続的に重力計に加えることとなるため、重力計のスプリングがクランプしてあるとはいえ、スプリングを完全に固定している訳ではないので、運搬中スプリングが振動してドリフトが大きくなるのであろう。

恒温用電源電圧の変化

LaCoste 重力計の恒温槽用の電源は、読定用のランプと共用となっていて、12 V の蓄電池（Ni-Cd アルカリ電池、容量 4 AH）を使用している。冬季など外気温の低いときに多くの測点で読定をする場合、夕刻には電源が 10 V 前後に降下してしまうことがある。

Table 1. Classification of the gravimeters by response to voltage change.

Type of gravimeter		Response 	No. of gravimeter	Amplitude		Duration time of disturbance
						
Medium size (Mercury contact control type)	G-29 type		G-29	-12 $\mu\text{gal}/\text{V}$	+20 $\mu\text{gal}/\text{V}$	60~80 min.
			G-31	+15	-25	60~80
			G-124	-10~-25	+10	30~50
	G-34 type		G-34	-5	+10	40~60
			G-118	-5	+12	40~60
Small size (Thermistor control type)	G-210 type		G-210	-5	+5~-10	30~50
			G-123	-5	+5~-10	30~40
	G-196 type		G-196	-2~-5	~+5	30
			G-305	~-5	~+5	(60~90)

この電源電圧の降下がドリフトにどのような影響を与えるか実験を試みた (中川ほか, 1973). この実験は, 北海道大学理学部・緯度観測所・東京大学地震研究所・同海洋研究所・国土地理院および京都大学理学部の6研究機関が共同で, LaCoste 重力計9台について実施したものである. 場所はノイズの少ない柿岡において行なった. その方法は, 安定化した電源を9台の重力計の共通電源とし, この電源電圧を $\pm 2\text{V}$ および $\pm 4\text{V}$ の階段状に変化させた. その結果をまとめたものが Table 1 である.

電圧変化に対する応答の型によって重力計を分類すると, 2-2 で述べたように恒温槽の温度制御を水銀接点によっている旧型と, サーマスタ制御になった新型に大別され, さらに, 旧型は2つの型に分けられる. 旧型の場合, 電圧ショック後の安定値が, ショック前と変るか, あるいは, 同じ値に回復するかによって区分される. 新型の場合電圧変化前後の測定値の差は少ないが, 振巾の大小と, 毎日の読みとり開始直後にみられる緩慢な変動の有無によって分類される. ほとんどの重力計について共通していえることは, 電源電圧を上昇させた場合には, 読みとり値は一旦小さくなる傾向があり, 反対に, 電圧が下降すると読みとり値は大きくなっている. 電圧当りの変化率でみると, 電圧を下降させた場合の方が上昇させた場合より大きい.

Table 1 の振巾の欄は, 電圧変化後の読みとり値の最大値と最小値を電圧差で割って, 単位ボルト当りに直したものであり, $5\sim 25\ \mu\text{gal}/\text{V}$ となっている. また, 最後の欄には読みとり値が一定の値に落ち着くまでの経過時間を示した. この調査の示すところによると, 電源電圧の変化が, 測定値に現われる異常なドリフトの原因の一部を占めているものとみられる. この対策としては, 電源電圧を安定化し供給することが必要である. 現在, 地震研究所では大容量 (7AH) の電池を使用し, この電源電圧の変化による異常なドリフトに対する対策を講じている. また測定中, しばしば電圧計によりチェックし, 電圧降下があれば測定を中断するように心掛けている.

重力計定数の変化

スプリング型の重力計は、そのスプリングの伸び方の程度によって目盛定数が変化するようにである。事実、Worden 重力計 No. 60 について定数検定を繰返した結果、3年間で $-0.23\%/year$ の変化を検出した (実川・田島, 1960)。この量は重力差 100 mgal の 2 地点を 1 年の間隔をおいて測定した場合、見かけ上 0.2 mgal の変化があるごとく測定されるということで、目盛定数の変化は重力経年変化の検出の場合には特に注意しなければならないことである。一方、LaCoste 重力計については、製作所でスプリングの伸び量に応じて、範囲を区切って定数が与えられている。このため、今までのところ、前記 Worden 重力計のような定数の経年変化はないようである。しかし、絶対に経年変化がないということはないので、充分な重力差 (200 mgal 程度以上) をもつ検定線で常時検定を行なう必要がある。

Fig. 13 に、9 台の LaCoste 重力計により、水沢—八戸間で検定を行なった結果 (中川ほか, 1974) を示す。それぞれの重力計間で 200 mgal の重力差に対し、 $\pm 60 \mu\text{gal}$ のばらつきがある。したがって、これら 9 台の重力計には定数に 3×10^{-4} の違いがあることになり、最も大きな差のある重力計で 100 mgal の 2 点を測定した場合、約 $60 \mu\text{gal}$ の差が生ずるわけである。このように個々の重力計に定数の違いがあるので、時々複数台による検定も必要である。なお、ほとんど同じ 9 台の重力計で東京—柿岡—日立の間で検定を行なっている (中川ほか, 1973)。その結果と水沢—八戸間でのそれとを比較すると、ほぼ同じ傾向を示していることがわかった。

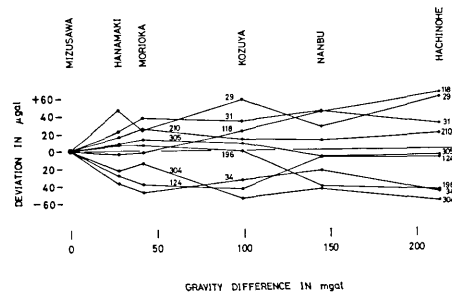


Fig. 13. Gravity difference between Mizusawa and Hachinohe and deviations of observed gravity value from the mean value.

重力の地球潮汐定数の違いと変化

重力の大きさや方向は場所によって異なり、これを地球上の 1 地点についてみても、その大きさや方向は時間の経過とともに絶えず変化している。この重力の時間的变化は、周期的なものと非周期的なものに大別できる。前者は、天体の起潮力によって起こるもの、あるいは、大地震などによって引き起こされる地球振動が原因で生じるものなどである。これに対し後者は当論文で扱う重力の経年変化である。

理論的考察の示すところによると、重力計を用いて、重力の潮汐変化を観測する場合は、Love 定数 h および k の 1 次結合、すなわち

$$G \equiv 1 - \frac{3}{2}k + h, \quad (2.3.1)$$

によって表わされる量を求めることができる。これは、起潮力の作用によって変形する地球上で実際に観測される重力変化の振巾と、地球が完全剛体であり、したがって、起潮力の作用によって地球がまったく変形しないと仮定したときに理論的に求められる重力変化

の振巾との比であって、通常、重力の潮汐定数 G-factor と呼ばれ無次元の定数である。この G-factor は潮汐を S_2, K_1 等の種々の分潮に分けて、地球内部構造を解明する際の資料となるものであるが、ここでは重力変化を検出する立場から、分潮に分けない総合的な G-factor について述べる。

G-factor は一般に地域によって異なる。特に海岸では海洋潮汐の影響で大きいといわれている。重力測定の場合、一般に、G-factor は平均の 1.2 を用いている。しかるに、地域による違いは小さく見積っても $\pm 10\%$ 程度の異常がみられ、重力の潮汐変化は最大 $\pm 200 \mu\text{gal}$ であるから、 10% として最大振巾のときには $20 \mu\text{gal}$ の誤差となる。さらに G-factor は時間的に変化することがありうる。事実、伊豆半島沖地震を挟んで G-factor の変化が検出されている（地震研究所測地移動観測班，1975）。このようにわが国のような島国・地殻構造の複雑なところでの正確な重力変化の検出のためには、重力の繰り返し測定中、その測定地域において重力の連続観測による G-factor を求めることも必要なことであろう。

2-4. 重力測定精度についての結論

本章では、重力測定精度を高く維持するための、測定者の心構えと重力計の精度そのものについて述べたが、それらを結論としてまとめると大略次のようである。

- 1) 測定にあたっては、周囲温度にできるだけ変化を与えないこと。また恒温槽内の温度（約 50°C ）に近い夏季に測定を実施することが望ましい。外気温が一定であっても、測定時には重力計を外気にさらし、運搬中はケースの中に入れるので、その中に入っている間に重力計の周囲温度が上り、取り出した時に温度が下るということを考えると、夏季が適当であろう。
- 2) 重力計の運搬時には細心の注意を払い大きな加速度を与えないように心掛ける。また、測定中の場合にも同様の注意が必要である。
- 3) 恒温槽用の電源電圧は $12 \pm 0.5 \text{ V}$ 程度に保ち急激な電圧変化を与えない。すなわち、安定化電源または大容量の電池を電源に使用する。
- 4) 重力計の目盛定数の検定を、できうれば測定の前に行なう。また時々複数台で同時に検定を実施し、それぞれの重力計の定数の傾向を把握する。
- 5) 測定地域内で重力の連続観測を行ない、重力の潮汐定数 G-factor を求め、その G-factor により潮汐補正をすることが望ましい。

以上の点に注意して、複数台の重力計により測定すれば、 $\pm 10 \sim 20 \mu\text{gal}$ 程度の精度の測定は可能である。したがって、重力変化は検出可能である。

第3章 重力の基準点

重力測定は、その方法によって絶対測定と比較測定とに分けられる。比較測定によって、ある地域内にあるいくつかの測定点の重力値を決定するためには、少なくとも、基準になる1点の重力値が正確に与えられていなければならない。この基準になる重力値既知の点が、重力基準点 (fundamental gravity station) である。特に国際基準点と呼ばれるものは、世界的な重力の結合に役立つもので、ソビエト・中国・東欧諸国を除く地域に 30

数点 (Coron, 1956) 分布している。わが国には、京都大学地質鉱物学教室に国際基準点があり、これを含めて国土地理院により6点の国内基準点と76点の一等点が設置されている (国土地理院, 1966a)。これらを結ぶ網を重力基準網と呼ぶ。この重力基準網の少なくとも1点は絶対測定によって絶対値を決めなくてはならない。

3-1. 世界の重力基準網

世界の基準重力網を設定するためには、前述のように、ある1点における重力の絶対値が与えられなくてはならない。1898~1904年の間に Kühnen und Furtwängler (1906) が Potsdam の Geodätisches Institut で可逆振子による絶対測定を行ない1906年にこの結果を発表した。当時、この測定がもっとも信頼のおける測定と考えられ、1909年 London で開かれた国際測地学協会 (International Association of Geodesy, IAG) の総会で、全世界の基準として採用された。その絶対測定値は次の通りである。

Geodätisches Institut, Potsdam

$$g=981.274 \pm 0.003 \text{ gal}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi: 52^{\circ}22.86' \text{ N} \\ \lambda: 13 \quad 4.06 \text{ E} \\ H: \quad \quad 87 \text{ m} \end{array} \right.$$

一方、Borrass (1911) は、Potsdam の絶対測定が完成すると直ちに、世界各地の Potsdam 系重力値を決める事業にとりかかった。世界に20の基準点を選び、当時もっとも精度の高い比較測定結果を使って網平均を行ない、これら基準点の重力値を定めた。この事業によって、全世界の重力測定の基準が確立し、1930年 Stockholm で開かれた IAG 総会で、Potsdam 系重力測定値を整理して得られた標準重力の式

$$\gamma=978.049 (1+0.0052884 \sin^2 \varphi-0.0000059 \sin^2 2\varphi), \quad (3.1.1)$$

が採用された。ここに φ は緯度、標準重力 γ は gal 単位で与えられる。この標準重力式は現在も使用されている。

その後、より精度の高い絶対および比較測定が各地で行われると、この基準系は十分な精度をもつ基準を与えるものではないことが判明してきた。1951年に、Brussels で開かれた国際測地学地球物理学連合 (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) の総会での決議にしたがって、国際重力測定委員会 (International Gravimetric Commission, IGC) の設置と、1954年に、IAG の特別研究班 4.05 (世界重力測定網) の設置などに併せて、測定技術の進歩と資料処理方法の改良により、新しい基準重力網をつくる国際的事業がスタートした。

その後、計測技術の進歩とともに、より精度の高い多くのデータが集積され、1967年 Lucerne で開かれた IAG 総会で、測地基準系 1967 が採用 (IAG, 1967) された。その結果標準重力 γ は

$$\gamma_{1967}-\gamma_{1930}=- (17.2-13.6 \sin^2 \varphi) \text{ mgal}$$

と変更され、Potsdam の重力値は 981.274 gal から 981.260 gal に決定された。したが

って、今までの Potsdam 系の地球上の全重力値が 14 mgal 減少されることになる。また、1971 年 Moscow で開かれた IUGG の総会では、国際重力基準網 1971 (IGSN 71) が採択された。この IGSN 71 は、全世界に約 2,000 点におよぶ重力点と、8 地点での重力の絶対測定値を用いて、それらにもっともふさわしいように接続された網である。そして、それらの各重力点の重力値の精度は ± 0.2 mgal 以上と保証されている。このように、国際的には重力の絶対値、および重力基準網が IUGG によって勧告されているものの、わが国ではまだ一般に新しいシステムは使用されていない。近い将来、全国的に新システムで重力基準網が設定されるであろうが、本論文に使用している重力値は Potsdam 系の値であることを付記したい。

3-2. 日本の重力基準網

わが国の重力基準網は国土地理院により設置され、その基準網は 6 点の基準重力点および約 60 点の一等重力点により構成されている。重力値の基準となるのが基準重力点であり、その重力値は、設置当時には重力振子の測定を繰り返していたが、最近では数台の La-Coste 重力計を同時に使用する方法をも含めて繰り返し測定を実施し、重力値精度の維持に努めている。一等重力点は重力基準網の誤差を規正するためのもので、現在では、複数台の La-Coste 重力計により測定が行われている。

測地用重力計のもっとも重要な問題は、目盛定数の検定である。この検定は、観測される重力値に対応する目盛の全範囲について行なわれなければならない。このためには、重力値の全範囲をカバーするような重力計検定線を設定し、定数検定を実施すればよい。この検定線は、高精度で決定された重力値をもつ重力点を連ねたものであり、これら重力点は、同時に基準重力点あるいは一等重力点となりうるものである。むしろ適当な基準重力点、一等重力点を選んで検定線を設定し、これを重力値の標準として、重力の標準線とするのが適当である。

この重力の標準線を設定する目的で、国土地理院が北海道から九州まで、重力差 1175 mgal の間で測定を実施した (国土地理院, 1966a)。この概要を述べる。この測定は 1963 年 IUGG の総会で決議された西太平洋重力標準線 (Western Pacific Calibration Line) の一部として行なわれたものである。このような測定には、安定した検定線 (例えば北アメリカ重力検定線) で検定された目盛定数をもつ重力計を多数使用しなければ無意味である。この条件に適する La-Coste 重力計 4 台がアメリカ陸軍極東地図局 (U. S. Army Map Service Far East) にあり、同局との共同作業で行なわれたものである。この測定は 1963 年 5 月と 1964 年 7 月の 2 回にわたって行なわれた。第 1 回の測定には、アメリカ側の La-Coste 重力計 1 台、日本側から La-Coste 重力計 1 台・Worden 重力計 1 台の計 3 台が参加し、第 2 回の測定にはアメリカ側 La-Coste 重力計 4 台、日本側から 1 台の計 5 台が参加した。測定点は北は稚内から南は鹿児島島の 11 都市におよび、基準点 4 点、一等重力点 6 点、その他 11 点の計 21 点である。この場合航空機を使用しているので、一等重力点 2 点を含む 11 点の空港でも測定している。この測定結果は測定精度に少々の疑点は残るものの、これを重力振子による従来の測定結果と比較すると、振子の結果の方にばらつきが多い。このようにして、わが国の重力標準線が一応完成し、その各重力点の重力値は

Table 2. Gravity values obtained at the main fundamental gravity stations by means of pendulum apparatuses and gravimeters.

Station	Pendulum	Gravimeter standard value	P-G
Hokkaido Univ.	gal 980.4901	gal 980.49066	mgal -0.56
Tohoku Univ.	980.1094	980.10874	+0.66
Kyoto Univ.	979.7215	979.72158	-0.08
Kyushu Univ.	979.6426	979.64244	+0.16
Kumamoto Univ.	979.5656	979.56546	+0.14

±0.16 mgal 以内で決った。この観測で決定された主な重力基準点の重力値を Table 2 に示す。

3-3. 東京大学構内の重力基準点

わが国における、国際的な重力比較測定としては、1899~1900年、Borrass・長岡らによる Potsdam—東京大学構内間の測定 (Borrass, 1911) がはじめてであろう。使用した器械はドイツの Stückrath 製 Sterneck 型の4本の振り子であった。この測定によって、わが国の重力基準点の重力値が国際的に結ばれたのである。その結果は

$$g_{\text{Tokyo}} = 979.800 \text{ gal}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi: 35^{\circ}42.6' \text{ N} \\ \lambda: 139^{\circ}46.2' \text{ E} \\ H: 15 \text{ m} \end{array} \right.$$

ただし、 $g_{\text{Potsdam}} = 981.274 \text{ gal}$ (Potsdam 系) であった。この精度は、1474 mgal の重力差に対して、各振り子ごとのばらつきが最大—最小 6 mgal であって、当時の世界の重力測定中もっとも精密なものの一つであった。

3-1 で述べたように、Borrass (1911) は Potsdam の絶対測定が完成されると、すぐ世界の網平均をはじめた。東京もこの基準点の1つに選ばれたが、ここで注意すべきことは、基準点の場所を変更したことである。採用した基準点は長岡らが測定した“東京大学物理学教室 (地下室)”ではなくて、メートル原器と測量尺検定用の 5 m 標準尺を比較検定する“基線尺室 (Base Apparatus Room)”であった。この場所による補正は高さの差からフリー・エア補正によって加えられたものと思われる。その結果は

$$g_{\text{Tokyo}} = 979.799 \text{ gal}$$

として平均計算に使用された。こうして最小自乗法による網平均の結果、

$$g_{\text{Tokyo}} = 979.801 \text{ gal}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi: 35^{\circ}42.6'N \\ \lambda: 139\ 46.0\ E \\ H: 18m \end{array} \right.$$

が定められた。この基準点はわが国を代表する基準点として、その後しばらくの間、国際的な観測網において、重要な地位を占めるにいたったのである。

1951年のIUGGの総会で、その一部門として開かれたIAGの第IV分科会(重力測定)の決議にもとづいて、東京は1923年の関東大地震で地盤の変動があり、今後も変動する恐れがあるとの理由で、京都に国際重力基準点に移されることとなった。1956年、IGC事務局のCoron(1956)がIGC第2回会議の資料としてまとめた京都の重力値は次の通りである。

$$g_{\text{Kyoto}}=979.7215\ \text{gal}\ (\text{Potsdam 系})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi: 35^{\circ}01.6'N \\ \lambda: 135\ 47.2\ E \\ H: 60.82m \end{array} \right.$$

京都大学理学部地質学鉱物学教室
理論地質学第二実験室(地下)

東京大学重力基準点は国際的な観測網からはずされたが、今日の重力基準点としてその価値を失なったわけではない。1953年、IGCの第1回会議がParisで開かれ、その席上、京都・Honolulu・Washington間の比較測定を振りで行なうことが決議され、1955年、Washington(National Bureau of Standards, NBS)と東京・京都間の測定が当時千葉にあった地理調査所(現在の国土地理院、東京都目黒区)のOkuda et al.(1957)によって、地理調査所型重力振子でなされた。その結果、 $g_{\text{NBS}}=980.1000\ \text{gal}$ とすれば $g_{\text{Tokyo}}=979.8008\ \text{gal}$ となり、東京の重力基準点の値 $g_{\text{Tokyo}}=979.801\ \text{gal}$ が精度よく定まっていることが確かめられた。さらにWoolard and Rose(1955)はGeophysical Laboratory, Washington DC・京都・Bad Harzburg・Teddingtonの重力網により、 $g_{\text{Tokyo}}=979.8015\ \text{gal}$ を得、これも東京大学基準点の重力値がよい精度であることを支持する結果となった。

その後、1961年に重力基準点のある基線尺室が化学教室増築のためとりこわしとなり、重力基準点は増築した化学教室の地下2階に移されることとなった。新点は旧点と水平位置はほとんど変わらないが、高さが数m下っている。重力値をいったん仮の重力点に移し、増築後、仮の点から新点に結び+1.5 mgalの重力差を得た。また(国土地理院の重力基準点かからも接続し、同じく新・旧の差+1.5 mgalを得たので新基準点の値は

$$g_{\text{Tokyo}}=979.8025\ \text{gal}\ (\text{コンクリート・ブロック上})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi: 35^{\circ}42.6'N \\ \lambda: 139\ 46.0\ E \\ H: 10.81m \end{array} \right.$$

と決定された。

このように、現在の東京大学の重力基準点の重力値は国際的にも正確に定まっているが、この点の安定性は、局地的な目でみると問題がないわけではない。基準点として、日常の測定における支障は、地盤特有の振動である。このことは、東京大学の基準点に限らず、東京全域、また沖積平野全般についていえることであるが、いわゆる脈動（微振動）は避けることができない。特に東京では交通機関による影響が大きく、昼間この種の振動が静止することはない。東京という地理的環境でやむをえないことであろう。しかし、これらのノイズも LaCoste 重力計の日常の測定に特に差しつかえるものではなく、重力基準点として、理想的とはいえないまでも、不適切な点というわけではない。

重力基準点としてもっとも困ることは、地殻変動その他により重力場が変化することである。筆者（1973）は東京大学基準点と茨城県柿岡の地磁気観測所構内にある重力基準点との間を、1年に数回反復測定し、東京基準点の値を柿岡のそれと比較した。

その結果を Fig. 14 に示す。この図にみられるように、東京—柿岡間の重力差は、1963年から1968~69年の間約 $11 \mu\text{gal}/\text{year}$ の変化をしている。現在のところ、柿岡における重力値、および重力計の定数に経年変化があるという積極的な理由は存在しないので、この重力差の変化は東大基準点の重力変化によるものと思われる。東大基準点における重力変化とすれば、 $11 \mu\text{gal}/\text{year}$ の割合で、重力が減少したことになり、これを地盤の上下変動で説明しようとすれば、約 $3 \text{ cm}/\text{year}$ の隆起を考えなくてはならない。実際には、基準点付近で僅かの沈下はあっても、このような大きな隆起は考えられない。

だが、ここに重力変化の説明可能な一つの原因が考えられる。それは地下水位の低下である。東大重力基準点の北方約 200 m のところ（弥生門附近）に深井戸があり、1932年以来、水位観測が続けられている（山口，1973）。この深井戸の水位の月平均値の変化の様子を Fig. 15 に示す。この水位変化は1955年頃以降1968~69年頃まで、平均して約 $2 \text{ m}/\text{year}$ の割合で低下し、それ以後は大きい水位変化はなく落ち着いている。これは、前述した重力基準点の重力の経年変化と時間的に相似的な変化曲線を描くものである。量的にあたってみると、地下帯水層のポロシティを 15% と仮定して、 $2 \text{ m}/\text{year}$ の地下水

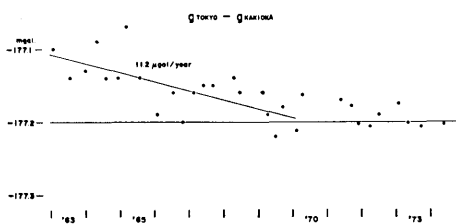


Fig. 14. Gravity differences between Tokyo and Kakioka fundamental stations.

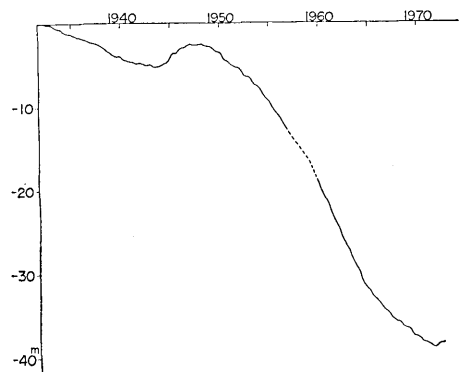


Fig. 15. Change in underground water level of a deep well in the University of Tokyo. (after Yamaguchi, 1973)

位低下率を重力変化率に換算すると $-12 \mu\text{gal}/\text{year}$ となることから、地下水位の低下が東大基準点における重力変化の原因であろうと結論できる。

東大の基準点は、このように重力値の変化が考えられ、特に、地下水位の変化をみれば 1950 年以降 1968~69 年頃まで水位変化による重力変化の可能性がある。したがって、東大の基準点を基点としたデータを重力変化に使う場合には、この点充分注意して使用することが必要である。一般的に云って、わが国のような地殻変動などの激しいところでは、重力値の変化はどこでも考えられることであるから、基準点の重力値は常に他の基準点と結び、監視する必要がある。

第 4 章 松代群発地震に伴う重力変化

1965 年 8 月頃よりはじまった松代群発地震に際して、同地域の重力測定を 1965 年から 1968 年まで、5 回にわたり測定した。その後約 5 年をおいて 1974 年 3 月にも再測を実施した (田島・井筒屋, 1974b)。また、この重力測定に併行して、水準測量が地震研究所により行なわれた (坪川ほか, 1967, 1968, 測地移動観測班, 1970)。この章では、測定された重力変化について述べ、さらに高さの変動の資料をも使用して、重力変化の原因を考究する。

4-1. 松代群発地震活動の推移の概要

松代は長野市の南約 9.5 km に位置し、松代の南東には標高 640 m のドーム状の皆神山がある。この地域はフォッサ・マグナ地域に属し、その西側に糸魚川—静岡構造線を境として、古生層がある。松代は中央隆起帯の西縁に位置し、群発地震はその隆起帯の中で起っている (Tsuneishi and Nakamura, 1970) (Fig. 16 参照)。また、Fig. 17 にこの地域のブーゲー異常分布を示す。北西と南東に負の異常がみられるが、これは中部山岳地帯の負の異常につながるものである。この負の異常を切るように、松代を通る北東—南西方向の正の異常帯がみえるが、この正の異常帯は、まさに、Fig. 16 に示されている中央隆起帯と一致している。これは周囲の Pliocene の地層を切って、より古い Miocene の岩層が表面に顔を出していることを示しているのであろう。また、この正の異常の中に皆神山を含んで負の異常がみられる。これはファンの発達した地域であり、重力異常から推定すると、せいぜい数 100 m の深さのものであろう。そしてその下部に群発地震が発生しこのファンを中心とした地域が隆起した。

この長野・上田を含む地域は爆破地震動研究グループ (Asano et al., 1969) による、地殻構造の研究がある。その測線を Fig. 18 に示す。この 2 測線のうち、中央隆起帯にはほとんど直交する A-B 測線について求められた構造を Fig. 19 に示す。この結果からも中央隆起帯および重力の正異常に対応して、6.0 km/sec の層の地表近くへの上昇がみえる。Fig. 19 の上図は A-B 測線に沿う重力異常のプロファイルで、実線は実測、破線は爆破により求められた 6.0 km/sec の層とその上の層との密度差を $0.3 \text{ gr}/\text{cc}$ として求めた重力値である。実測値と計算値はおよそ一致しているが、南東の部分に違いがみられる。これはおそらく地震波速度と密度の間に完全な相関関係が成立していないところであらう。

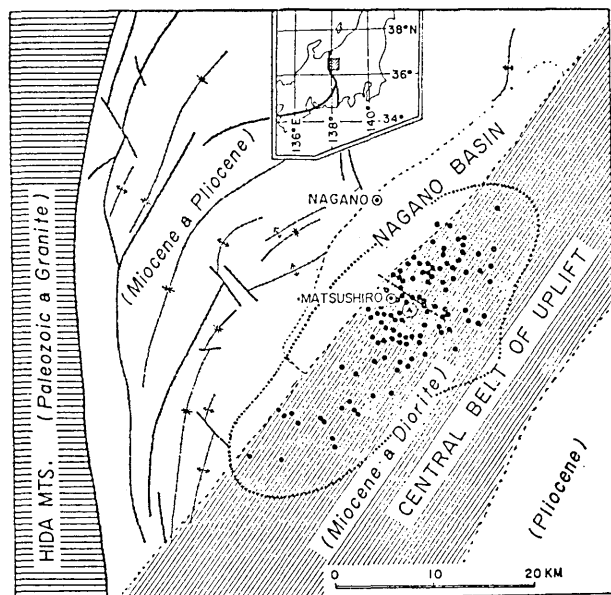


Fig. 16. Simplified tectonic map around Matsushiro including the epicentral distribution of the major shocks and the realm of ultra-micro earthquakes. (after Tsuneishi and Nakamura, 1970)

次に、松代群発地震の経過を概観してみよう。1965年8月から皆神山周辺に地震が起りはじめ、1966年2月までの間を地震の第1活動期、1966年3月～7月を第2活動期、同年8月～12月を第3活動期と呼んでいる (Hagiwara and Iwata, 1968)。Fig. 20 に、地震の頻度分布、上下変動および水平変動の代表的なものを示した。Fig. 20 の上図は地震の頻度分布である。第2活動期にはもっとも地震の回数が多く、この時期には1日に有感地震400～500回を数えた。同図の中段はもっとも上下変動の大きかった皆神山の北北東にあたる瀬関地区にある水準点Cの変動であり、最大隆起量は70cmを超えている (井筒屋, 1975)。下段は光波測量による、皆神山—可候基線の水平方向の変動であり、上下変動の最大隆起を示す第3活動期に時を同じくして 4×10^{-4} の歪を観測している (Kasahara et al., 1967)。この基線の方向は中央隆起帯の走向と約 45° 西に傾く。この他に地表に現われた現象としては、1966年3～4月頃に地割れが顕著となり、8～9月に地割れがさらに拡大し、9月になると牧内地区で $1,000$ 万 m^3 の湧水、それに続いて大きな被害をもたらした地滑りが起った (Morimoto et al., 1967)。1967年1月以降は、皆神山周辺での地震は大幅に減少し、皆神山南西約20kmの戸倉町・坂井村方面にその活動域が移行した。

4-2. 重力測定

松代群発地震は、はじめ皆神山周辺に発生したが、その後若穂町または戸倉町・坂井村方面に地震の活動域が広がった。そのため、重力測定もこれに応じて、測定網を拡大した。

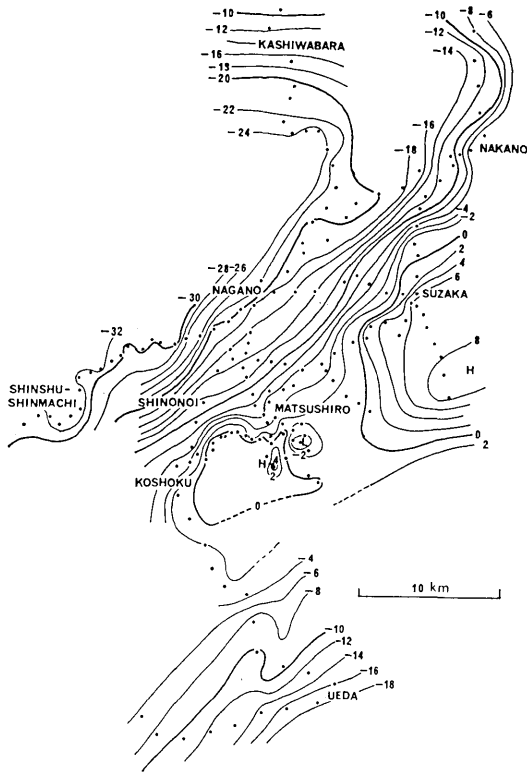


Fig. 17. Distribution of Bouguer anomaly around Matsushiro. (unit: mgal)

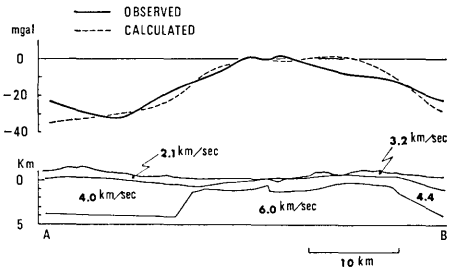


Fig. 19. Gravity profile and the estimated underground structure along the line A-B shown in Fig. 18.

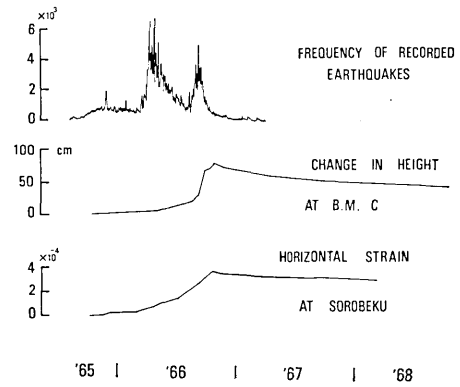


Fig. 20. Time variations in earthquake-frequency, bench mark elevation (BM. C) and horizontal strain during Matsushiro Earthquake Swarm.

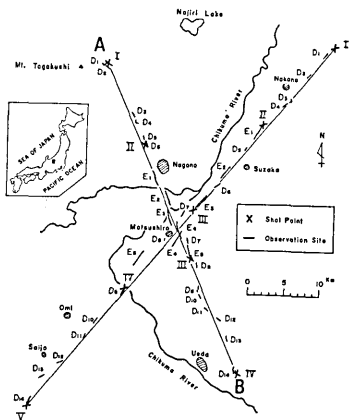


Fig. 18. Observation lines for the explosion seismic studies. (after Asano et al., 1969)

Fig. 21 にその測定網を示す。しかし、この論文で主にとりあげる地域は、大きな地殻変動が現われ、また測定回数も多い皆神山周辺に限ることとした。以下6回にわたって行なった重力測定 (田島・井筒屋, 1974b) について、その概略を紹介する。

第 I 回

1965年10・11月に、地震研究所で群発地震地域の水準測量を実施することになり、筆者らは現地へ赴いた。当時としては群発地震に伴って重力が変化するなど思いもよらなかったが、もしかすると変化するかも知れないとの予想のもとに LaCoste

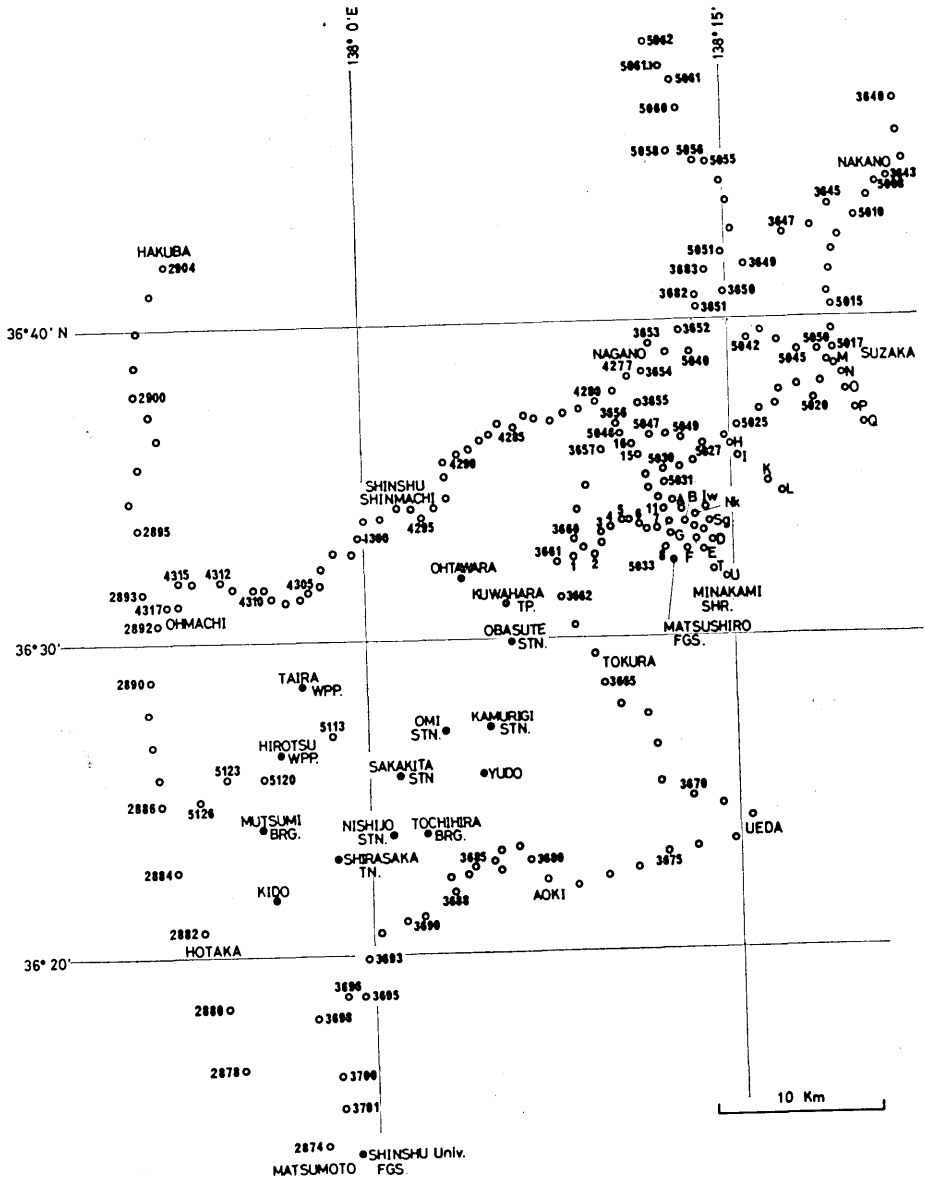


Fig. 21. Distribution of gravity stations.

重力計を携行し、水準測量のできない雨の日などを利用して重力を測定した。測定は10月31日に屋代・長野間の一等水準点と、丹波島橋南端から松代を経て屋代に至る地震研究所設置の水準点に及んだ。また、11月2日には水準点未設置であった皆神山周辺に、6ヶ所の重力点を設定し、測定を実施した。その後1966年4月には、この皆神山をとりまく地域に地震研究所により水準点が設置された。

第 II 回

1966年の地震の第2活動期にはいると、前述のように、地震回数の増加とともに地割れが顕著になった。第3活動期に入るや、激しい隆起、地割れの拡大、湧水、地滑りなどの現象が現われ、水平方向の伸びも 4×10^{-4} に達した。地震は10~11月に松代と若穂町の境界附近に多発の傾向が見られた。重力再測は1966年12月5日~14日に実施された。路線は前回と同一の路線と、地震研究所新設の皆神山周辺の水準路線に加えて、国土地理院が新設した(国土地理院, 1966b)、松代—若穂—須坂—長野—野尻と、同じく長野—信州新町間の二等水準路線、さらに地震研究所設置の若穂町川田—保科・須坂—東村仁礼の水準路線である。

第 III 回

1967年1月以降、地震は第4活動期にはいり、震源が松代南部から戸倉・上山田・坂井村方面に移った。このため、4月17日~23日には、前回までの皆神山周辺・長野—屋代—上田—青木村の一等水準路線と、長野—信州新町の路線のほか、測定地域を西方に拡大し、青木村—松本—大町—信州新町と、大町—白馬の一等水準路線での測定、また屋代—麻績村—坂井村—本城村—明科町—生坂村—大岡村の地域に重力点を設置、測定した。

第 IV 回

第III回の測定後、1967年6月~10月の第5活動期には地震の発生が著しく減少した(Hagiwara and Iwata, 1968)。測定範囲は松代・皆神山周辺をはじめとして、須坂—東村仁礼・須坂—村山橋—長野・丹波島—若穂村川田—保科・須坂—中野—長野・長野—信州新町・牟礼—長野—屋代—上田—青木村—松本の各路線と、前回設定した麻績村・坂井村・明科町方面の重力点、および同地域内に新設された国土地理院の水準点(国土地理院, 1966b)である。

第 V 回

群発地震がほとんど静まった時点の測定として、1968年12月16日~23日に、柏原—牟礼—長野—屋代—上田—青木—松本—大町—信州新町—長野と、大町—白馬間および松代・皆神山周辺の地域で再測を実施した。

第 VI 回

1973年に国土地理院により、この地方の水準測量が約3年ぶりに行なわれた。重力についてもしばらく測定されていないので、この際、その後の状況をしらべるため、再測を実施した。測定は1974年3月26日~30日の間に、松代・皆神山周辺および松代—若穂—丹波島—屋代—上田の路線である。測定には LaCoste 重力計2台を使用した。

以上、6回の測定により、270点以上の測定点で延べ720回を超える測定を行なった。またその地域は 50×50 km の広さに及んでいる。なお、重力値および高さの変動の資料は、すべて更殖市屋代の BM 3661 を仮の不動点として求めてある。また、ドリフトの補正は、ループを形成して時間で分配した。測定結果の重力値を Table 3 に示す。

4-3. 測定結果とその考察

測定結果

長野市街地の南端、丹波島橋の南にある BM 3656 から、篠ノ井—屋代—坂城を通り上

Table 3. Gravity values in the northern part of Nagano Prefecture.

Route 1 Around Mt. Minakami

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM A	36°34'0	138°12'0		79883		79886		
BM B	36 33.7	138 13.0		79819	79821	79821	79818	
BM IW	36 33.9	138 13.8		77321	77320	77320		
BM SG	36 33.6	138 13.9		77390	77393	77392		
BM NK	36 33.8	138 13.4		79126	79130	79127		
BM SZ	36 33.3	138 13.7		78395	78400	78401	78400	784013
BM C	36 33.4	138 13.4		78687	78691	78693	78689	
Sezeki	36 33.4	138 13.4	78678	78668	78670	78671	78670	786723
BM D	36 33.0	138 14.1		77286	77293	77290	77287	
Makiuti	36 33.0	138 14.0	77328	77320	77325	77324	77322	773235
BM E	36 32.7	138 13.8		77684	77691	77689		
Hirabayasi	36 32.7	138 13.8	77679	77670	77676	77672	77672	776740
BM T	36 32.2	138 14.1		76904	76912	76909	76907	769081
BM U	36 31.9	138 14.5		75748	75753	75750	75748	757501
BM F	36 32.7	138 13.1		78784	78789	78782	78784	
BM G	36 33.0	138 12.6		79578	79584	79575	79575	
BM 8	36 32.9	138 12.2	79408	79408	79413	79408		
Matsushiro FGS	36 32.4	138 12.5	78349	78345	78348	78342	78347	783484
Minakami SHR	36 33.0	138 13.5	73093	73090	73093	73085		730877
Minakami TP	36 32.9	138 13.2	73193	73201	73201	73201		732006

Route 2 Yashiro—Matsushiro—Kawanakazima BRG.—Kohhoku

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 1	36°32'6	138° 8'5	79296	79297		79297		
BM 5038	36 32.8	138 9.0		79594		79589	79590	
BM 2	36 32.7	138 9.2	80007	80006		80000		
BM 5037	36 33.0	138 9.6		79886		79885	79888	798870
BM 3	36 33.3	138 9.6	80075	80078	80079	80076		
BM 4	36 33.5	138 10.0	80188	80190		80187	80188	
BM 5036	36 33.6	138 10.2		80234		80230		802310
BM 5	36 33.7	138 10.6	80229	80230	80231	80228		
BM 5035	36 33.6	138 10.9		80190		80188	80190	801898
BM 6	36 33.5	138 11.2	79916	79917		79915		
BM 5034	36 33.5	138 11.5		79880		79877	79879	798804
BM 7	36 33.5	138 11.8	80101	80099	80101	80098	80100	
BM 5033	36 33.5	138 12.3		79690	79691	79685	79692	796897
BM 11	36 34.0	138 12.2	79786	79782	79781	79779		
BM 12	36 34.5	138 11.9	79732	79729	79728	79727		
BM 13	36 34.7	138 11.5		79611	79615			
BM 14	36 35.2	138 11.4	79495	79500	79497	79497	79498	
BM 15	36 35.9	138 11.1	79320	79319	79316	79317	79319	
BM 16	36 36.1	138 10.9	79243	79243	79238	79238	79243	

Table 3. (continued)

Route 3 Nagano—Shinonoi—Yashiro—Sakaki—Ueda—Aoki—Matsumoto

Gravity Station	ϕ	N	λ	E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 3654	36°38.5	138°11.4			78909	78913	78912	78918	78921	
BM 3655	36 37.4	138 11.2			79071	79069	79070			
BM 3656	36 36.9	138 10.3			78994	78995	78994	78992	78996	789942
BM 3657	36 36.0	138 9.7			78978	78977	78977	78974	78979	789786
BM 3658	36 35.0	138 9.1			79235	79235	79235	79233	79237	792334
BM 3659	36 34.1	138 8.5			79265	79263	79262	79260	79266	792633
BM 3660	36 33.2	138 8.4					79278	79275	79283	
BM 3661	36 32.5	138 7.8			79453	79453	79453	79453	79453	794530
Yashiro SHR.	36 32.2	138 7.8			79494	79494	79497			
BM 3662	36 31.3	138 7.9			79440	79440	79445	79439	79436	794406
BM 3663	36 30.4	138 8.6				79164	79167	79162	79163	791663
BM 3664	36 29.5	138 9.2				78713	78718	78712	78712	787159
BM 3665	36 28.5	138 9.7				78270	78270	78266	78267	
BM 3666	36 27.8	138 10.2				78108	78109	78102		
BM 3667	36 27.6	138 11.2				77593	77598	77594	77593	775970
BM 3668	36 26.5	138 11.6				76686	76686	76683	76683	766860
BM 3669	36 25.3	138 11.9				76415	76417	76413	76411	764202
BM 3670	36 24.9	138 13.0				76177	76181	76178	76177	761806
BM 3671	36 24.5	138 14.3				75380	75382	75379	75376	
BM 3672	36 24.2	138 15.4				74826	74826	74822		
BM 3673	36 23.4	138 14.7				74902	74901	74898	74897	
BM 3674	36 23.2	138 13.2				74914	74916	74913	74912	
BM 3675	36 23.1	138 12.0				75002	75005	75000	75002	
BM 3676	36 22.6	138 10.9				74602	74605	74603	74601	
BM 3677	36 22.3	138 9.5				74045	74045	74039	74039	
BM 3678	36 22.1	138 8.2				73391	73392	73389	73388	
BM 3679	36 22.2	138 7.1				72322	72322	72318	72316	
BM 3680	36 22.9	138 6.4				70723	70723	70717	70720	
BM 3681	36 23.2	138 6.0					69515	69508	69511	
BM 3682	36 23.2	138 5.3					67733	67729	67734	
BM 3683	36 22.9	138 5.0					66066	66062		
BM 3684	36 22.5	138 5.2					64415	64408	64413	
BM 3685	36 22.6	138 4.2					63707	63701		
BM 3686	36 22.5	138 3.9					64255	64250	64252	
BM 3687	36 22.4	138 3.3					64197	64190		
BM 3688	36 21.9	138 3.3					65450	65448	65446	
BM 3690	36 21.2	138 2.1					67469	67460	67434	
BM 3691	36 21.0	138 1.3					68466	68464		
BM 3692	36 20.6	138 0.2					68494	68485	68487	
BM 3693	36 20.0	137 59.9					67513	67506	67507	
BM 3695	36 18.7	137 59.6					65390	65384		
BM 3696	36 18.7	137 59.0					65518	65510		
BM 3698	36 18.0	137 58.7					67128	67125	67122	
BM 3700	36 16.2	137 58.7					65981	65978		
BM 3701	36 15.1	137 58.7					66839		66834	
Shinshu Univ. FGS	36 13.6	137 59.2					67131	67125		

(to be continued)

Table 3. (continued)

Route 4 Matsumoto—Hotaka—Ohmachi—Shinshu—Shinmachi—Nagano

Gravity Station	φ	N	λ	E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 2874	36°13.9	137°58.0					66719	66713	66716	
BM 2878	36 16.4	137 54.7					66473		66471	
BM 2880	36 18.5	137 54.1					67007		67006	
BM 2882	36 20.7	137 53.2					67368		67367	
BM 2884	36 22.7	137 52.2					67450		67449	
BM 2886	36 24.6	137 51.7					67236	67237	67234	
BM 2887	36 25.7	137 51.6					67166	67163	67162	
BM 2888	36 26.7	137 51.4					67199		67197	
BM 2889	36 27.8	137 51.2					66936		66939	
BM 2890	36 28.8	137 51.4					66693		66695	
BM 2892	36 30.6	137 51.6					66545		66547	
BM 4317	36 31.1	137 52.0					65986		65983	
BM 4316	36 31.2	137 52.5					64418		64416	
BM 4315	36 31.9	137 52.6					63158		63150	
BM 4314	36 31.9	137 53.0					64430		64430	
BM 4312	36 31.9	137 54.0					66607		66602	
BM 4311	36 31.8	137 54.6					67437		67431	
BM 4310	36 31.7	137 55.1					67899		67897	
BM 4309	36 31.6	137 55.8					67462		67457	
BM 4308	36 31.3	137 56.2					67618		67615	
BM 4307	36 31.3	137 56.8					69356		69353	
BM 4306	36 31.4	137 57.5					71750		71748	
BM 4305	36 31.6	137 57.7					74035		74028	
BM 4304	36 31.9	137 58.1					74189	74189	74189	
BM 4303	36 32.3	137 58.2					74424	74424	74425	
BM 4302	36 32.8	137 58.8					74771	74767		
BM 4301	36 32.8	137 59.6					74331	74333	74328	
BM 4300	36 33.3	137 59.5					74969	74966	74967	
BM 4299	36 33.8	138 0.1					75365	75366	75362	
BM 4298	36 33.9	138 0.5				75428	75425	75426	75422	
BM 4297	36 34.2	138 1.3					75404	75406	75403	
BM 4296	36 34.1	138 1.8				75087		75088	75087	
BM 4295	36 33.9	138 2.2				75070	75066	75072	75071	
BM 4294	36 34.2	138 2.8					75169	75174	75171	
BM 4293	36 34.5	138 3.3				75480	75480	75480	75479	
BM 4292	36 35.2	138 3.2				75546		75544		
BM 4291	36 35.7	138 3.1				75732	75728	75729	75727	
BM 4290	36 36.0	138 3.7				76227		76228	76224	
BM 4289	36 36.1	138 4.2				76246	76246	76246	76238	
BM 4288	36 36.3	138 4.7				76104		76106	76104	
BM 4287	36 36.5	138 5.2				76471	76468	76467	76471	
BM 4286	36 36.8	138 5.5				76706		76706	76707	
BM 4285	36 36.8	138 6.0				76804	76803	76804	76803	
BM 4284	36 37.1	138 6.5				76777		76775	76775	
BM 4283	36 37.0	138 6.9				76801	76794	76899		
BM 4282	36 36.9	138 7.6				76866		76866	76866	
BM 4281	36 37.2	138 8.1				77614	77613	77615	77614	
BM 4280	36 37.3	138 8.9				77580		77581	77583	
BM 4279	36 37.6	138 9.7				78313	78314	78311		
BM 4278	36 37.8	138 10.3				78578		78529	78530	
BM 4277	36 38.3	138 10.8				78470	78471	78476	78475	

(to be continued)

Table 3. (continued)

Route 5 Ohmachi—L. Kizaki—Hakuba

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 2893	36°31.6	137°51.1			66486		66486	
BM 2895	36 33.6	137 50.8			67085		67083	
BM 2896	36 34.6	137 50.5			67511		67506	
BM 2897	36 35.6	137 50.9			67588		67586	
BM 2898	36 36.4	137 51.7			67715		67714	
BM 2899	36 37.2	137 51.4			68040		68035	
BM 2900	36 37.8	137 50.9			70158		70158	
BM 2901	36 38.9	137 50.9			70666		70660	
BM 2902	36 40.0	137 51.1			71522		71518	
BM 2903	36 41.0	137 51.6			71663		71662	
BM 2904	36 42.0	137 52.1			72036		72030	

Route 6 Matsushiro—Kawata—Tambazima

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 977.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 5032	36°34.4	138°12.5		80059		80051		800590
BM 5031	36 34.9	138 12.2		79940		79937		
BM 5030	36 35.3	138 12.2		79849		79849		
BM 5029	36 35.4	138 12.9		79928		79926		799284
BM 5028	36 35.6	138 13.4		80068		80066		
BM 5027	36 36.1	138 13.8		79996		80001		800008
BM 5049	36 36.3	138 13.0		79850		79845		
BM 5048	36 36.4	138 12.4		79647		79639		796372
BM 5047	36 36.5	138 11.5		79388		79385		
BM 5046	36 36.5	138 10.4		79081		79075		

Route 7 Kawata—Suzaka—Nagano

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 5026	36°36.3	138°14.7		80165		80165		
BM 5025	36 36.7	138 15.2		80411		80406		
BM 5024	36 37.2	138 15.9		80812		80807		
BM 5023	36 37.3	138 16.8		80924		80927		
BM 5022	36 37.8	138 17.0		81236		81235		
BM 5021	36 37.9	138 17.6		80629		80629		
BM 5020	36 37.5	138 18.3		79657		79657		
BM 5019	36 38.0	138 18.6		79790		79786		
BM 5018	36 38.7	138 18.9		80351		80351		
BM J 5017	36 39.1	138 19.2		80495		80492		
BM 5050	36 39.1	138 18.5		80573		80566		
BM 5045	36 39.1	138 17.7		80847		80841		
BM 5044	36 39.4	138 16.9		80663		80658		
BM 5043	36 39.6	138 16.3		80318		80313		
BM 5042	36 39.5	138 15.7		80240		80240		
BM 5040	36 39.0	138 13.3		79402		79404		
BM 5039	36 39.0	138 12.4		79060		79057		

(to be continued)

Table 3. (continued)

Route 8 Kawata—Hoshina

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM H	36°36'1	138°14'9		80147		80153		
BM J	36 35.3	138 15.7		78625		78631		
BM K	36 35.0	138 16.3		77439		77442		
BM L	36 34.7	138 16.9		76206		76214		

Route 9 Suzaka—Nire

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM M	36°38'6	138°19'1		80170		80170		
BM N	36 38.3	138 19.4		79668		79670		
BM O	36 37.7	138 19.7		78424		78430		
BM P	36 37.1	138 20.1		77239		77243		
BM Q	36 36.7	138 20.4		76533		76535		

Route 10 Suzaka—Nakano

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 5016	36°39'6	138°19'1		80603		80596		
BM 5015	36 40.5	138 19.3		80152		80148		
BM 5014	36 40.9	138 19.1		80375		80372		
BM 5013	36 41.5	138 19.2		80544		80541		
BM 5012	36 42.3	138 19.3		80533		80529		
BM 5011	36 42.7	138 19.6		80569		80565		
BM 5010	36 43.3	138 20.3		80783		80777		
BM 5009	36 44.0	138 20.8		80913		80907		
BM 5008	36 44.4	138 21.2		81056		81051		

Route 11 Nagano—Toyono—Nakano

Gravity Station	ϕ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 3653	36°39'4	138°11'8	78305	78324		78319	78322	
BM 3652	36 39.8	138 12.9		78501		78496	78501	
BM 3651	36 40.5	138 13.7		78824		78814		
BM 3650	36 41.0	138 15.0		79551		79544		
BM 3649	36 41.8	138 15.6		79659		79646		
BM 3647	36 42.8	138 17.3		79626		79616		
BM 3646	36 43.1	138 18.5		80071		80062		
BM 3645	36 43.8	138 19.4		79868		79854		
BM 3643	36 44.6	138 21.8		80944		80939		
BM 3642	36 45.0	138 22.4		80487		80477		
BM 3641	36 46.1	138 22.1		80225		80222		
BM 3640	36 47.1	138 22.0		80242		80241		

(to be continued)

Table 3. (continued)

Route 12 Nagano—Mure—Kashiwabara—Noziri

Gravity Station	φ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
BM 3682	36°40.9	138°13.8		78214		78206	78209	
BM 3683	36 41.7	138 14.2		77670		77666	77671	
BM 5051	36 42.2	138 14.8		77636		77632	77636	
BM 5052	36 43.0	138 15.3		75158		75153	75157	
BM 5053	36 43.8	138 15.2		74867			74859	
BM 5054	36 44.5	138 14.8		75192		75190	75189	
BM 5055	36 45.1	138 14.4		76227		76221	76221	
BM 5056	36 45.1	138 13.9		75585		75576	75577	
BM 5058	36 45.4	138 12.7		72946		72944	72946	
BM 5060	36 46.9	138 13.2		72986			72979	
BM 5061	36 47.7	138 13.0		74179			74178	
BM 5061.1	36 48.2	138 12.5		73968			73964	
BM 5062	36 49.1	138 11.9		73683			73658	

Route 13 Yashiro—Inariyama—Omi—Sakakita—Ikusaka—Akashina—Honjoh

Gravity Station	φ N	λ E	Nov. '65 979.	Dec. '66 979.	Apr. '67 979.	Mar. '68 979.	Dec. '68 979.	Mar. '74 979.
Kuwabara TP	36°31.0	138° 5.4			77104	77097		
Ohtawara	36 32.0	138 3.9			70060	70056		
Obasute STN.	36 30.0	138 5.8			74801	74795		
Omi STN	36 27.1	138 3.0			72279	72275		
Kamurigi STN	36 27.2	138 4.9			71886	71885		
Yudo	36 25.8	138 4.6			71067	71066		
Sakakita STN	36 25.7	138 1.2			71541	71536		
BM 5113	36 27.0	137 58.5				71607	71610	
Taira WPP.	36 28.5	137 57.4			72574	72571		
Hirotzu WPP.	36 26.5	137 56.4			71807	71796		
BM 5120	36 25.6	137 55.7				71020	71017	
BM 5123	36 25.6	137 54.1				66927	66924	
BM 5126	36 24.9	137 53.1				67187	67183	
Mutsumi BRG.	36 24.1	137 55.7			70215	70214		
Kido	36 21.8	137 56.1			69604	69602		
Sirasaka TN.	36 23.1	137 58.6			68476	68470		
Nishijo STN.	36 23.8	138 0.9			69794	69790		
Tochihira BRG.	36 23.8	138 2.3			69357	69354		

Notes: FGS: first order gravity station

SHR: shrine

TP: triangulation point

STN: railway station

WPP: water power plant

TN: tunnel

BRG: bridge

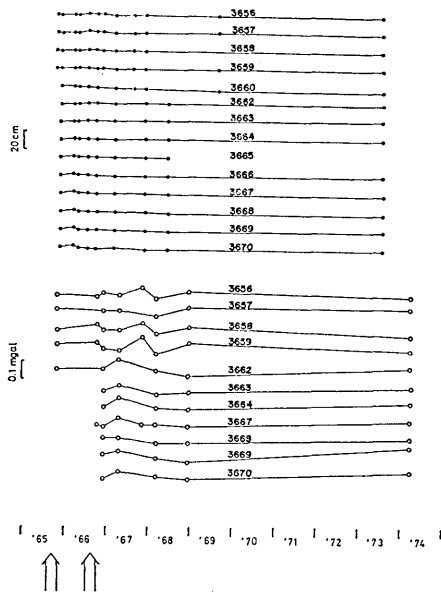


Fig. 22. Changes in bench mark elevations (upper) and gravity values (lower) along the highway route through Nagano and Ueda Cities.

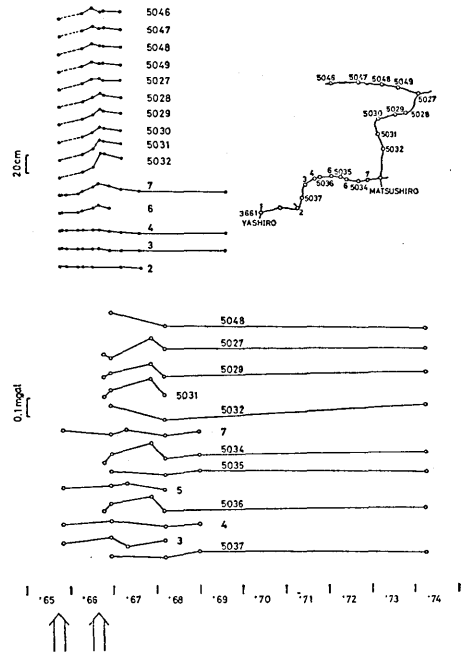


Fig. 23. Changes in bench mark elevations (upper) and gravity values (lower) along the highway route through Yashiro, Matsushiro and Nagano Cities.

田の北にある BM 3670 に至る一等水準点の上下変動と、重力変化を、Fig. 22 に示す。BM 3656~3659 は地震の第 3 活動期に僅かの隆起を示すが、BM 3660~3665 では、BM 3661 を不動としたためもあり、ほとんど変化はみられない。BM 3666~3670 では、それぞれ僅かではあるが、第 2 活動期に隆起、第 3 活動期に沈下がみられる。

重力変化についていえば、1967 年 11 月の測定で BM 3656・3658・3659 に重力増加がみられるが、これは国土地理院の測定（国土地理院、1967a, b, 1968）で別系列の測定であり、地震研究所の測定値との差の有意性は必ずしも高いとは云えない。1966 年末から 67 年 3 月にかけて、BM 3662~3670 は、大きな上下変動はみられないにもかかわらず、重力の増加がみられる。この期間は地震の第 4 活動期にあたり、戸倉・上山田・坂井村方面の地震が活発になった時期でもあり、この事実は興味深いことである。1968 年以降 1974 年までの変化は、BM 3656~3659 と BM 3662~3670 の両地域について、それぞれ、前者は減少し、後者は増加している。この両地域の境界は更殖市屋代の BM 3661 であり、地殻構造の違いによるものであろう。図中、最下段の矢印は地震の第 1, 第 3 活動期を示す。

Fig. 23 には屋代一松代一若穂町川田一丹波島橋の国土地理院二等水準路線と、地震研究所設置の水準路線（1 桁の番号）についての変動を示す。この路線の上下変動は BM 5032 で 1966 年 8 月に約 30 cm の最大隆起がみられる。BM 2, 3 および 4 については、仮不動点 BM 3661 に近いこともあり、僅かの変動しかみとめられない。なお、1966 年 4

月以前の変動(破線で示す)は、それらの点が1965年の時点では未設置であったので、1965年10月から66年4月までの松代周辺の変動量6cmを加算したものである(井筒屋, 1975)。1965年には、国土地理院二等水準点における重力測定がないのでこの隆起の期間における重力変化はわからない。BM7は約10cmの隆起に対して20 μ galの減少がみられる。これに対して、BM3・4・5は隆起量も少ないためか、重力にも特に変化はみられない。1966年以降の沈下期についても、沈下量少なく、重力にも有意な変化はない。なお、1967年11月の国土地理院によるデータは、Fig. 22に見られると同様概して大きいようである。

Fig. 24は皆神山周辺の地震研究所設置の水準点における重力変動を示している。本論文においては、特にこの地域の上下変動、およびそれに伴う重力の変化について詳細な議論をする。上下変動は、この地域でもっとも激しく、1965年10月に比べて1966年9月には、瀬関・牧内地区(BM C・D)で70cmを超える隆起を示した。そして、その隆起の最盛期に湧水と地滑りが起ったのである。Fig. 24に破線で示した変動は、1965年10月～66年4月の期間中のデータについてはFig. 23の場合と同じであるが、他のデータについては、それぞれの近くの水準点の変動をそのまま加えたものである。この上下変動に対する1965年10月から1967年4月までの重力の変化は、瀬関、牧内、平林、皆神山神社、松代地震観測所重力点(これらはすべて、水準点未設置の時期に重力点として設定)において、およそ上下変動に対応している。すなわち、隆起時に重力は減り、沈降時に増すといった傾向を示している。

結果の考察

重力変化の原因には、高さの変動によるものと、地下の密度変化によるものとの2つが考えられる。一般には、この2つは分けられず、高さの変動は密度変化を伴うであろう。われわれがこのうちの密度変化を分離し、引き出そうとするためには、高さの変動による重力変化の分を取り除かなければならない。単に重力計を持ち上げた場合、例えば鉄塔などの上で重力を測ったとき、その重力変化の鉛直勾配は平均して0.3086 mgal/m程度であり、これをフリー・エアーの勾配と呼んでいる。すなわち、実際の測定で重力と高さの間にフリー・エアーの勾配が観測された場合には、地下には隆起に応じた空間ができたことになる。これに対して、地下に密度の変化がなく隆起した場合には、地下密度を例えば2.67 gr/ccとしたとき、0.1967 mgal/mの鉛直勾配で変化することが予想される。この勾配をブーゲーの勾配と呼ぶ。この場合には、地下に隆起の大きさに応じた物質の流入を考えなくてはならない。これらのことを沈降も含めて、すべての場合について定性的に説明できる図がFig. 25である。厚さ h 、密度 ρ の地層が隆起、または沈降し、厚さが δh 、密度が $\delta\rho$ 増加したときに、 δh と δg (重力の変化)との関係が、もし $F-\bar{F}$ (フリー・エアーの勾配)であったならば、質量の変化はない。一方、 $B-\bar{B}$ (ブーゲーの勾配)であったならば、密度変化はなかったと推論されるであろう。その他の勾配になった場合には、図に示す範囲で、質量の増、減または密度の増、減があったことになる。これらの関係をさらに詳細に示したのがFig. 26であって、フリー・エアーの勾配(F)、ブーゲーの勾配(B)のほかに W, N, M, L, K の種々の勾配の領域に分けて、それに対応する地

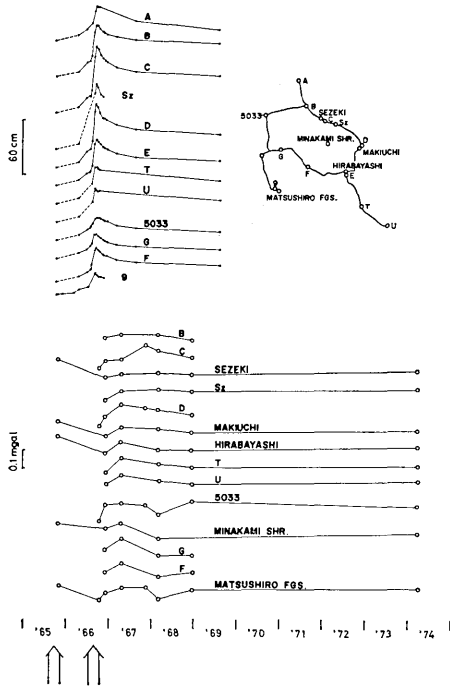


Fig. 24. Changes in bench mark elevations (upper) and gravity values (lower) around Mt. Minakami.

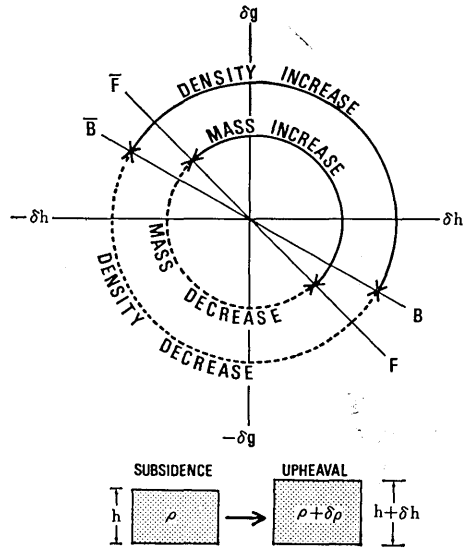


Fig. 25. Mass and/or density changes in the elevation-gravity coordinates. F and B indicate free-air and Bouguer gradients, respectively.

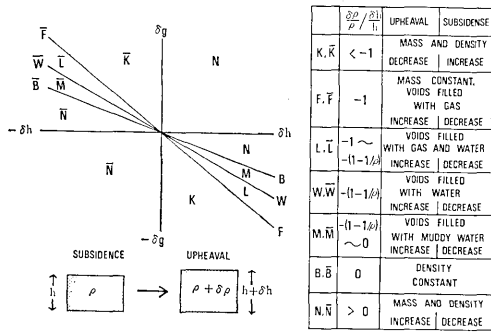


Fig. 26. Gradients of gravity change. F, B, and W indicate free-air, Bouguer and water-saturated gradients of gravity. Table (right) shows the ratio of density change to elevation change.

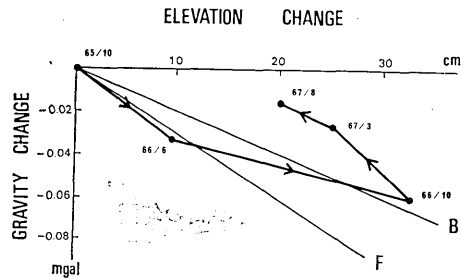


Fig. 27. The relation between gravity and elevation changes at Matsushiro First-order Gravity Station. (after Harada, 1968)

下に起こりうる状態を表示している。

松代地震観測所の重力一等点における高さとの重力の変化の関係を示したものが Fig. 27 (Harada, 1968) である。この図は高さとの重力の変化の関係を時間経過に伴う軌跡と

して表わしている。この資料にもとづいて、Fujita and Fujii (1974), Nur (1974) と Kisslinger (1974) は dilatancy diffusion model を仮定して、高さとの重力の関係を説明している。すなわち、1965年10月から1966年6月の間は、重力がフリー・エアの勾配で減少し、その後同年10月までは、

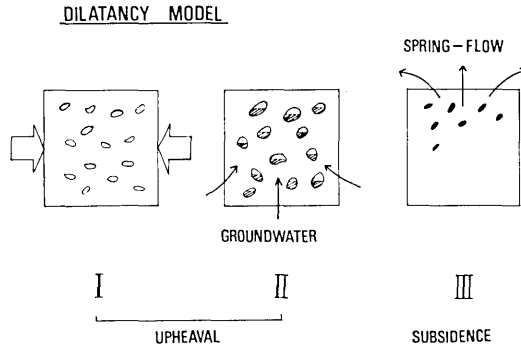


Fig. 28. Dilatancy diffusion model.

水の流入により重力の減り方が鈍り、それから後、沈下に移って1967年3月～8月の間には、重力がフリー・エア勾配で増加したとしている。これをモデルで示すと Fig. 28 のようになる。Iの段階では、岩盤に外力が加わり岩盤中の空隙(クラック)ができ岩石は膨脹するため隆起が起り、フリー・エアの勾配で重力は減少する。IIの段階では空隙に水が流入

しながら隆起するため、重力は密度または質量の増加の勾配で変化する。IIIの段階に入ると沈下に移り、空隙のまだ水で満たされていない部分がつぶれ、フリー・エアの勾配で重力が変化すると説明される。

しかし、国土地理院によるこれらデータは次に述べる2つの理由で信頼性に乏しいものと考えられる。一つには、1965年10月の重力値は約2年間の変化を内挿して求められていること、また一つには、高さのデータは直接の水準測量から得られたものでなく、上下変動のコンターから読みとっていることである(国土地理院, 1968)。これに対して、筆者の測定した、もっとも地殻変動が激しかった地域にある代表的な3点、瀬関、牧内、平林における、 $\delta g - \delta h$ の軌跡を Fig. 29 に示す。ここに測定時点は測定順に1965年11月、66年12月、67年4月、68年3月、同年12月となっている。重力測定の精度 $\pm 20 \mu\text{gal}$ (0.02 mgal) を考慮すると、隆起時にはブーゲーの勾配 (B) で重力は減少し、沈下に移って、66年12月から67年4月の間には、 \bar{W} の勾配 (Fig. 26 参照) で増加、その後の沈下では \bar{N} で減少している。

Fig. 30 に与えたようなモデルによって、これらの現象を説明してみよう。まず、IからIIに隆起するとき、空隙が生じ、その中に水が充満する。空隙が少なくそれに水が入ったのならば、 F, B との間の勾配 W で変るはずであるが、松代の場合大量の湧水があった事実と、この地域は Fig. 17 にみられるように重力異常が負であることと、またこの間に地震が多発していることから推察できるように、恐らく地下密度は小さく $2.0 \sim 2.3 \text{ gr/cc}$ 程度であり、したがって空隙率も $30 \sim 40\%$ 位のものと考えられる。そこに、地下水の上昇があり、相当の水圧で空隙またはクラックに地下水が流入したとすれば、密度が 0.3 gr/cc 程度増加し、 2.6 gr/cc 位になったと考えても不自然ではない。したがって、ブーゲーの勾配で変化することはあり得ることである。IIからIIIの沈下の過程では、沈下量に応じた一部の空隙がつぶれ、そこから水が流出して、 \bar{W} の勾配で変り、IIIからIVの段階では、沈下はほとんど起こらず、単に空隙から水が抜けて質量が減少し、 \bar{N} の勾配で変化したと考えられる。

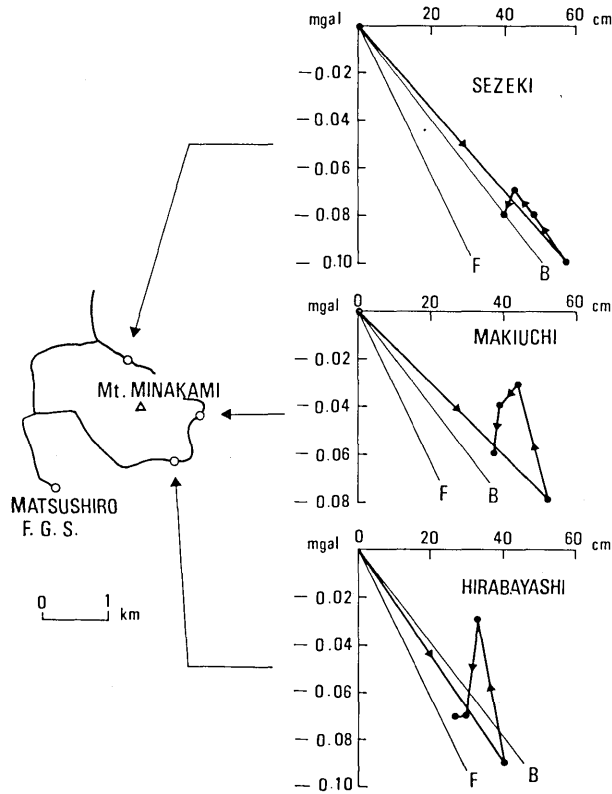


Fig. 29. Relations between gravity and height changes at some stations around Mt. Minakami.

ここに隆起の時の重力の変化を量的に見積ってみよう。まず、隆起量を平均の 50 cm とすれば、高さの変化に対するフリー・エアの勾配による重力の変化は $-150 \mu\text{gal}$ となる。一方、象山-皆神山基線の光波測量によれば、歪量にして 10^{-4} の縮みが観測されており、この圧縮を受けた領域の平均の幅を 10 km と仮定すれば、両端それぞれ 50 cm 計 1 m の変形となる (Fig. 31 参照)。もし、ポアソン比が 0.25 で弾性変形を起こしたとすると、隆起量は小さ目に見積っても 20 cm となる。この 20 cm の厚さの平板の引力による重力変化分は $+20 \mu\text{gal}$ である。したがって、フリー・エアの勾配による重力変化量 $-150 \mu\text{gal}$ と加え合わせて、 $-130 \mu\text{gal}$ の変化量が期待できる。

異常隆起の大きかった地域は、重力の低異常域と一致することから考えて、Fig. 32 に示すような A と B の地下構造、すなわち、外力によってこわれ易い脆弱な部分 B と、それに比べて強い部分 (A よりなる構造) であることが容易に想像される。外力が加われば、B には断層が起き地震が発生しやすく、その結果ドーム状に隆起するであろう (茂木, 1974)。松代の場合、隆起の中心部と周囲の地域の隆起量との比較から、50 cm の隆起量のうち恐らくは 30 cm が B の領域に属する隆起と考えられよう。またこの地域は大量の

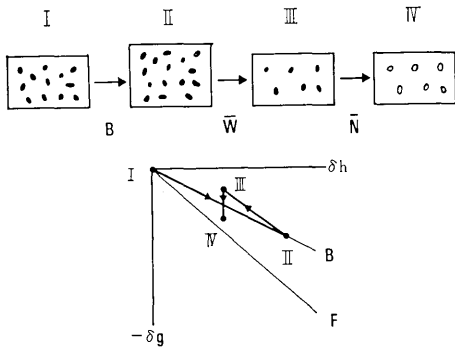


Fig. 30. Model fitting gravity change in the Matsushiro epicentral area.

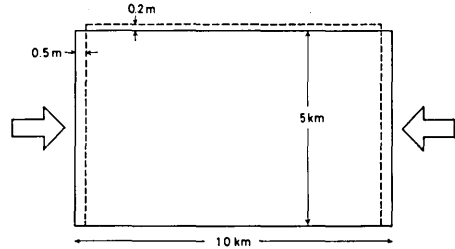


Fig. 31. Relation between contraction and upheaval.

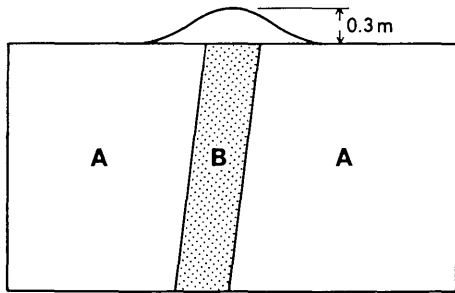


Fig. 32. Upheaval as a causative dilatancy.

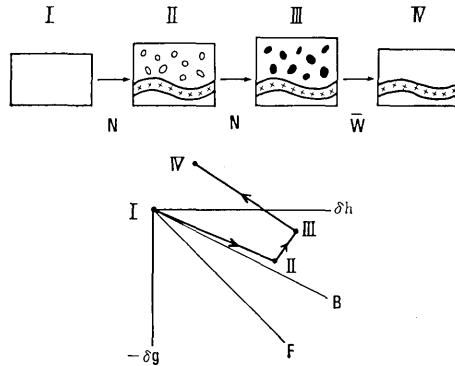


Fig. 33. Magma-intrusion model and the corresponding gravity changes.

湧水のあったことから、地下水の上昇が十分考えられ、ポロシティーを低く見積って 20% とすれば、地下水上昇による密度増加は 0.2 gr/cc となる。そして地表近くに 6 m 程度の厚さに水の飽和があれば、これにより重力は $2\pi G \times 0.2 \times 6 = 0.05 \text{ mgal} = 50 \mu\text{gal}$ (G は万有引力定数) の増加が期待できる。したがって前述した $-130 \mu\text{gal}$ と合わせて、全重力変化量を $-80 \mu\text{gal}$ と見積ることができる。これは実測の値にほぼ等しい。多少、仮定による部分も多いが、とに角、このような推算によっても説明可能である。どうも、単純な dilatancy-diffusion model だけでは、Fig. 29 に表われた $\delta g - \delta h$ の関係を説明しつくすことは出来そうもない。

松代群発地震の原因として、マグマの貫入を考える人 (Stuart and Johnston, 1975) もいるようであるが、もしも、マグマのような大きい質量の貫入があれば、 $\delta g - \delta h$ の軌跡は Fig. 33 のようになるはずである。すなわち、I から II の隆起時に、マグマの貫入と同時に、 B より緩やかな N の勾配で変化し、II から III では空隙が生じてさらに隆起が続く。空隙に水が流入すると、質量は増加し、重力は N の勾配で変る。III から IV の沈下に

移って水の流出があれば、 \bar{W} の勾配で変化するであろう。観測結果には、このような軌跡は見られなかったので、重力の資料からはマグマの貫入というような、大きな質量の流入は考えられない。勿論、重力に表われないような、極めて深部にマグマの貫入があれば別であるが。

以上の議論は、隆起や密度変化が無限の拡がりをもつ岩盤で起ったと仮定して考察したものである。しかし松代のような場合、地殻変動域が有限であるので、シリンダー状の岩盤モデルで近似する方が妥当のように思われる。そこで、シリンダー状の岩盤に隆起と密度変化が生じたとして検討してみよう。Fig. 34 の I の破線で示した部分が II のように変化したとすれば、 $\delta g/\delta h$ は図の下の式のように示される。ここで、 β はフリー・エアーの勾配、 r はシリンダーの半径、 ρ_w は空隙を満している物質の密度とする。この式により r/h と ρ_w を変えて $\delta g/\delta h$ を求めると、Table 4 が得られる。 $r/h=0.5$ のモデルは非常に細長く实际的ではないが、2.0~3.0 位と考えると、シリンダーと無限平板における $\delta g/\delta h$ の差違は無視できる程度のものである。したがって、無限平板として扱ったとしても、その結果には大きな差違はないであろう。

Fig. 29 の説明に、隆起に際してブーゲーの勾配で変化したと述べたが、この測定期間は1年を超えている。しかも、その間地下水の湧水があった。このことから、もし6月かそれ以前に測定があれば、あるいは、Fig. 27 に示した国土地理院の結果のように、隆起初期の段階でフリー・エアーの勾配の変化を検出できたのかも知れない。もしそうだとすれば、松代の重力変化は、Fig. 28 に示したような、dilatancy diffusion model として説明できる。

以上、松代の重力変化の結論として、重力の変化は地下水による役割が大きいと考えら

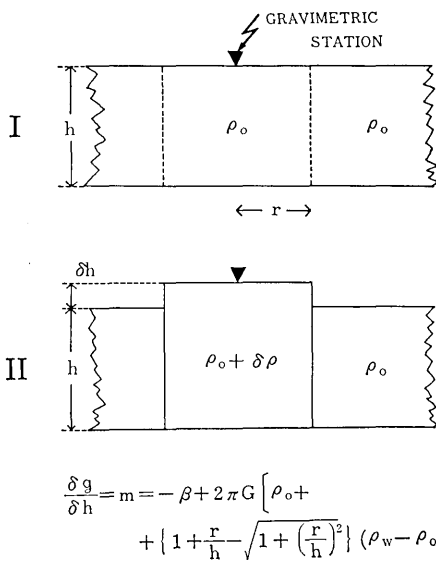


Table 4. Vertical gravity gradient with parameters of ratio of the radius to the height of a cylinder and the pore density (ρ_w).

		$\delta g/\delta h$			
r/h	ρ_w	0.5	1.0	2.0	3.0
	g/cm ³				mgal/m
0.0		-0.2395	-0.2633	-0.2822	-0.2904
1.0		-0.2235	-0.2377	-0.2502	-0.2553
2.67		-0.1967	-0.1967	-0.1967	-0.1967

Fig. 34. Vertical gravity gradient based on a cylindrical body of upheaval.

れる。横圧により地盤が dry dilatancy を起こして隆起すると重力はそれに伴って減少する。その後、空隙に地下水が流入して、wet dilatancy となり、減少率は多少小さくなるが、さらに重力は減少する。断層が生じ、その裂目から空隙の水が流出すると、地盤は隆起から沈降に移り、重力が増加したと結論できる。今後、松代のような内陸の群発地震の発生にあたっては、水準測量と並行して、重力の繰返し測定を実施する必要がある。このような繰返し測定によって、ダイラタンシーなど群発地震のメカニズムに関する情報を得ることができよう。地震観測に比べて、重力測定は容易であるという利点もあり、ある意味で V_p/V_s の観測に代り得る有効な方法であろうと考えられる。

第5章 南関東における重力変化

関東南部における重力測定は、振子による測定を除けば、1952年全国の重力測定の一環として行われた、旧型の Worden 重力計による測定 (Tsuboi et al., 1956) が最初であろう。その後、国土地理院が二等重力測量として、North American 重力計により (国土地理院, 1964)、また、部分的には地質調査所が North American 重力計で測定 (松田, 1952, 金子・小川, 1954) した資料がある。しかし、これらの測定は、前にも述べたように、変化の検出には精度不足であろうと思われるので、本論文における比較研究には使用しない。1968年には、国土地理院が第2回目の二等重力測量を LaCoste 重力計によって実施しており、この資料を参考として採用した。1969年、この地域は地震予知連絡会により、「特定観測地域」に指定され、その年に、京都大学理学部・国土地理院と協力して、6台の LaCoste 重力計によって、この地域に精密重力網を完成した (東京大学地震研究所ほか, 1970)。それ以来、毎年2台以上の LaCoste 重力計により、再測を実施している。なお、この測定は変化の検出を目的としているため、測定には特に注意を払い一日に往・復とも測定し、それぞれの重力計により求めた重力値の偏差が $50 \mu\text{gal}$ を超える場合には再測という厳しい条件を設定して実施している。したがって得られた結果の精度は変化の検出に十分に足りるものと考えられる。

5-1. 関東南部の地域性

プレート・テクトニクスの考え方によれば、わが国の太平洋側の地殻は、プレートの運動によって押し続けられており、地殻の弾性反撥の現象が大地震であると説明される。東北日本列島弧は太平洋プレート、西南日本列島弧は Philippine Sea Plate によって押され、これらプレートの境界面が、1923年関東地震の震源となった相模トラフであるといわれる。このようなプレートの運動は、測地的には、地殻歪や上下変動となって現われるはずである。地震予知のためには、これらの測地的現象を検出するのが有効な手段と考えられる。これら地域的背景のもとに、「特定観測地域」に指定されて以来、測地的地球物理学的観測が強化され、多くの資料が得られるようになった。これら観測と相呼応して、重力変化検出の努力も重ねられてきたのである。

Fig. 35 に関東南部のブーゲー異常の分布を示す。この図で、もっとも目につくことは、東京湾を挟んで2つの低異常地域があることである。測定点の分布の粗かったときには、東京湾にこの負異常の中心があると考えられていた。その後、測点密度の増加とともに

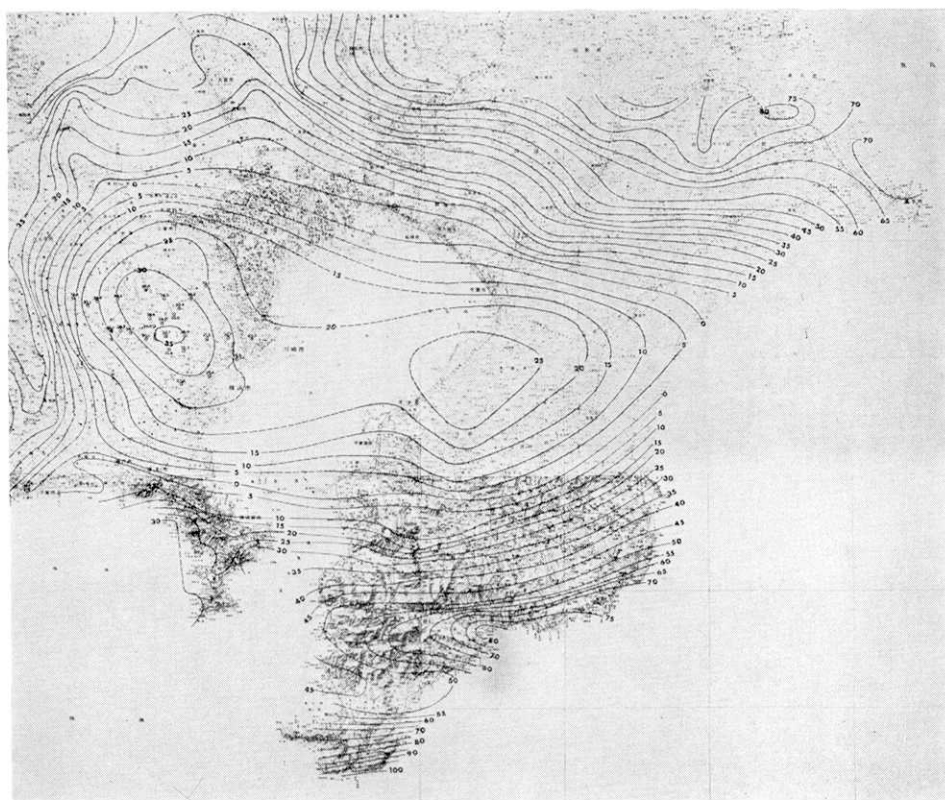


Fig. 35. Distribution of Bouguer anomaly in the southern part of Kanto District.

に、東西方向に長い負の異常地帯であること、異常の中心が千葉県木更津附近と、川崎市溝口附近の2ヶ所に分れることが明らかとなったのである。かつては、この低異常の原因は、その面積から推察して、恐らくモホ面の凹みによるものと考えられていた。しかし、今日3,000 m以上に達するボーリングがこの地域に多く、その岩芯の密度測定の結果から、多分東京湾低異常の原因は、たかだか深さ数千 m の密度差にあるとも考えられている。低異常の原因が浅いということは、沖積層の発達を示し、それは一般に地盤沈下地帯を意味する。田島・萩原(1973)は茅ヶ崎および茂原地盤沈下地帯における重力経年変化測定により、地盤沈下速度はブーゲー異常が低い程大きいと結論づけている。すなわち、重力の経年変化はブーゲー異常の分布と密接な関係が考えられるのである。

また、三浦半島から房総半島にかけて、正の異常地域がみられるが、この地域は地質的には葉山、保田、嶺岡層群とよばれ、新生代の中新世から古第三紀のもので、三浦、房総両半島の脊梁山脈ともいべき隆起帯である(垣見, 1971)。この隆起帯の分布と、三浦・房総両半島における重力の経年変化の分布との間に共通性があるか否か、この問題は興味あることである。

5-2. 南関東における重力の精密測定と精度

南関東地域における、スプリング型重力計による重力測定は、1967年以前には、地震研究所・国土地理院などによる測定が数回あるが、これらのデータをもとに重力変化を論ずるには精度不足と思われるので、ここでは1968年以降の測定データのみを取り扱うこととする。1968年の測定は、国土地理院が第2回目の二等重力測量として、LaCoste 重力計1台により実施したものである。この資料はまだ公表されていない。

1969年には、東京大学地震研究所・京都大学理学部地球物理学教室・国土地理院の3機関の共同により、6台のLaCoste 重力計を同時使用して、三浦・房総両半島において88点の測定を実施した（東京大学地震研究所ほか、1970）。測定の方法は往復測定で、それ

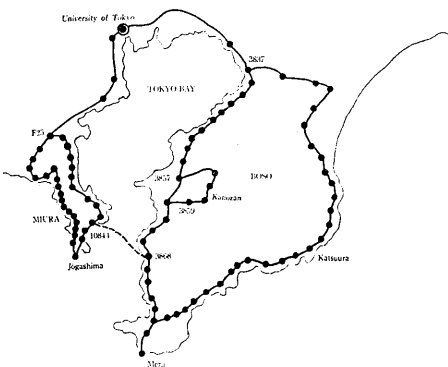


Fig. 36. Gravity measuring routes and stations in Miura and Boso Peninsulas.

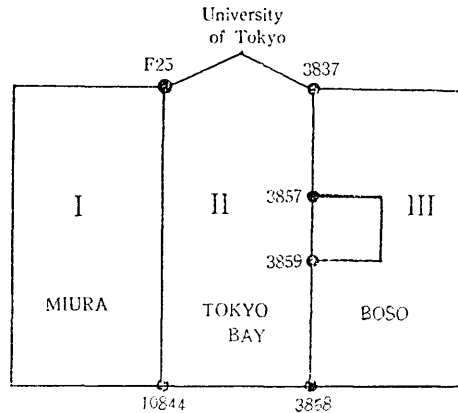


Fig. 37. Loops of the gravimetric network.

ぞれの読定回数は5回とした。Fig. 36にこの測定の測点分布を示す。図に示す通り、千葉県金谷と神奈川県横須賀間をフェリーポートで接続したので、Fig. 37に示すように、三浦・東京湾・房総の3つの環ができた。この3つの環について、6台の重力計が環を反時計回りに測定したときの閉合差をTable 5に、また、測定点を重さとして、網平均し、交点における各重力計の重力値と標準偏差をTable 6に示す。標準偏差の大きいところは $\pm 30 \mu\text{gal}$ のものがあるが、平均的にみれば ± 10 数 μgal 程度である。上記2つの表から、重力計群を2つのグループに分けることができる。それはG-29・G-111・G-123とG-34・G-196・G-210の2群であり、前者は先行

Table 5. Closure errors along loops I, II and III established in 1969.

	I (Miura)	II (Tokyo-Bay)	III (Bōsō)
	mgal	mgal	mgal
G- 29	+0.064	+0.148	-0.107
G- 34	+0.023	+0.027	-0.066
G-111	-0.084	-0.155	+0.050
G-123	+0.033	-0.020	+0.126
G-196	+0.039	+0.093	+0.003
G-210	+0.014	-0.071	-0.021

時計回りに測定したときの閉合差をTable 5に、また、測定点を重さとして、網平均し、交点における各重力計の重力値と標準偏差をTable 6に示す。標準偏差の大きいところは $\pm 30 \mu\text{gal}$ のものがあるが、平均的にみれば ± 10 数 μgal 程度である。上記2つの表から、重力計群を2つのグループに分けることができる。それはG-29・G-111・G-123とG-34・G-196・G-210の2群であり、前者は先行

Table 6. Gravity values and the standard deviations at the junction points in 1969.

B.M.	F 25	10844	3868	3837	3857	3859
	979	979	979	979	979	979
G- 29	753.787±22 mgal (S.D.)	786.946±29 mgal (S.D.)	801.197±30 mgal (S.D.)	769.041±16 mgal (S.D.)	769.654±31 mgal (S.D.)	772.692±31 mgal (S.D.)
G- 34	753.813±10	786.952±13	801.191±13	769.093± 7	769.660±14	772.698±14
G-111	753.811±19	786.998±25	801.187±25	769.117±14	769.681±27	772.736±27
G-123	753.783±19	786.927±25	801.196±26	769.150±14	769.742±27	772.762±27
G-196	753.811±14	786.945±19	801.130±19	769.049±11	769.640±20	772.684±20
G-210	753.831±16	786.988±22	801.179±22	769.161±12	769.709±23	772.741±23

Table 7. Closure errors along loops I, II and III established in 1970.

	I Miura Peninsula	II Tokyo Bay	III Boso Peninsula
G 34	- 8 μ gal	-24 μ gal	+17 μ gal
G 210	-14	+ 2	-48

の車に分乗したもの、後者は後行の車である。Table 6において、前者の標準偏差は $\pm 20 \sim 30 \mu\text{gal}$ に対して、後者のそれは $\pm 10 \sim 20 \mu\text{gal}$ であって、測定精度の上で差違があるようである。この測定精度について村田 (1970) が詳細に論じていて、この違いについて指摘している。すなわち、各重力計について測定値の標準偏差を比較した場合、前者のグループは後者に比べて 3.7 倍ほど大きくなっている。また、ドリフトを比べた場合にも前者は後者よりドリフトの直線性からのずれが大きくなっている。このことを村田 (1970) は重力計の性能の差というよりは、むしろ測定者の個人差であろうと述べている。一概にはいえないが、この実験結果から LaCoste and Romberg 重力計による精密測定精度は、当初の目標 $\pm 10 \mu\text{gal}$ にはおよばないものの、 $\pm 20 \mu\text{gal}$ 程度はあるものと結論することができる。

1970年3~4月、に測定精度を再度検討する必要もあり、筆者 (1970a) は2台の LaCoste 重力計を使用して、全く同じ路線で再測を行なった。このときの3つの環の閉塞差は Table 7 の通りである。前回に比較して閉塞差の少ないことがわかるであろう。1971年9月から11月にかけて、同じ2台の重力計により再び測定を実施した。この測定では、条件の悪い、たとえば測点が道路に面していて走行する自動車により振動が大きく、読み取りが困難なような測点は除き、三角点または保存性の良いと思われる水準点を選び重力点を設定した。1972年9~11月と1973年6月の測定では、三浦半島は従来の通りの測点で測定したが、房総半島は南部に限って実施した。

Table 8 に、1970年~73年の測定における2台の重力計による読み取り値の標準偏差、

Table 8. Standard deviations of gravity values and numbers of gravity stations.

	Miura Peninsula		Boso Peninsula		All area	
	SD	N	SD	N	SD	N
Mar.~Apr. 1970	±8.9	30	± 9.4	53	± 9.2	83
Sep.~Nov. 1971	±7.2	16	±16.5	35	±14.2	51
Sep.~Oct. 1972	±9.6	16	± 9.3	8	± 9.5	24
Jun. 1973	±7.9	16	± 9.7	9	± 8.6	25

unit: μgal

および測定点数を示す。この表から十分な精度で測定されていることが分るのであろう。関東南部は他の地域に比較して、交通量も多く、地盤が軟弱なため振動が大きいので、測定に苦勞するところである。実例をあげるため、関東南部と後に述べる東海地方について、振動の状況を重力計の視野内の目盛を規準として比較してみる。ビームの平均的な揺れの振巾を、目盛の 1/10 単位 (約 $10 \mu\text{gal}$ に相当) で記録した結果を比較すると、

振 巾	南 関 東	東海地方
0~2	40%	93%
3~5	30	7
6以上	30	0

となっている (田島, 1971)。このような事実から考えても Table 8 に示した標準偏差は関東南部地域としては、むしろ小さな方であろう。Table 9 に 1955 年以降 73 年までの全測定の重力値を示す。

5-3 測定結果とその考察

重力の変化についての解析には、まず、測定点の高さの変動の資料が必要である。そこで、Fig. 38 および Fig. 39 にそれぞれ三浦半島・房総半島の上下変動を示す (国土地理院, 1967~1972)。三浦半島は東京三宅坂の水準原点と油壺の検潮所を結ぶ必要と、1969 年以降は特に「特定観測地域」に指定されたことから、測量が頻繁に行なわれている。これに対して房総半島は地域の広いこともあって、部分的に測量されているが、全体として使用できる資料は少ない。三浦半島のつけ根の位置にある水準点 F25 の上下変動は、1965 年から 68 年にかけて上り、70 年に下り、71 年にまた上り、72 年に至って僅か沈下を示す。半島の中央附近に位置する BM. 5363 は 1970 年まで下り、71 年に上り、その後沈下傾向を示す。一方、南の F26 は BM. 5363 と概して同じ傾向であるが、変動の振巾が多少大きくなっている。このように、これらの水準点は振動的上下変動をしており、その様

Table 9. Gravity values in the southern part of Kanto District.

Miura Peninsula

BM No.	Mar. '55 979.	Mar. '64 979.	Oct. '68 979.	Nov. '69 979.	Mar. '70 979.	Oct. '71 979.	Sep. '72 979.	Jun. '73 979.
F 25	75382	75382	75388	753826	753814	753810	753831	753816
34-1	75768	75768	75775	757692	757692			
J 35	76079	76078	76088	760814	760805	760802	760821	760802
5361-1		78114	78125	781166	781166			
5362		77940	77957	779472	779475			
5362-1	78310	78315	78329	783242	783228			
5363	79171	79177	79193	791863	791845	791822	791861	791847
5363-1		79752	79768	797590	797586			
5364		79551	79567	795577	795558	795528	795556	795550
5364-1	79331	79328	79342	793344	793332			
5365	78849	78843	78863	788500	788490	788461	788495	788492
5366	79144	79150		791578	791562			
5367		78711	78725	787166	787148			
F 26	78566	78574		785786	785750	785752	785773	785756
10847	78724	78723	78738	787321	787300	787278	787313	787301
10845	79746	79752	79765	797611	797578			
10844			78703	786987	786948	786970	786988	786979
10842	78350		78357	783584				
10841	78298	78299	78300					
10839	78251	78264	78259					
10837	77453	77450	77460	774572	774562			
10836	77200	77198	77213	772085	772082	771993	772025	772009
10835	76740	76731	76749	767458	767453			
10834	76027	76029	76038					
10833	75610	75606	75613	756114	756126		756147	756137
10832	75896	75893	75900	758956	758937			

Boso Peninsula

BM No.	Feb. '55 979.	Feb. '68 979.	Feb. '69 979.	Apr. '70 979.	Oct. '71 979.	Sep. '72 979.	Jun. '73 979.
3827	80448	80445					
3828	80323	80319					
3829	80048			800557	800582		
3832	78850	78851					
3835	77707	77702					
J 3837	76906	76904	769100	769104	769128		
3838	76656	76647					
3839	76500	76491	764936	764954			
3840	76326	76317					
3841	76179	76174	761761	761778			
3842	75933	75933					
3845	75810	75803					
3847	75970	75959					
3848	76184	76179	761684	761694			
3849	76322	76309	763110	763114			
3850	76334	76334					
3853	76486	76482	764828	764840	764810		
3855	76196	76194	761964	761968			

(to be continued)

Table 9. (continued)

Boso Peninsula

BM No.	Feb. '55 979.	Feb. '68 979.	Feb. '69 979.	Apr. '70 979.	Oct. '71 979.	Sep. '72 979.	Jun. '73 979.
3858	76997	76993					
3859	77273	77273	772710	772732			
3860	77796	77798					
3863	79212	79223					
3864	79208	79216	792186	792182	792174		
3865	79676	79679					
3868	80107	80114	801168	801167			
3870	80609	80612					
3871	81077	81085					
3872	80435	80440	804432	804437			
3874	79729	79732	797381	797386	797371	797391	797384
3876	78368	78373					
3877	78392	78396	783984	783993	783978		
3878	78760	78768					
3879	79298	79316	793188	793186			
3880		79830	798347	798350	798335	798355	798330
3881	79434	79453					
3882	79145	79160	791652	791660	791652	791682	791656
3883	78869	78881					
3885	78385	78385	783895	783922	783905	783925	783905
3886	78331	78348					
3887	78490	78501	785060	785060			
3889	79368	79387	793913	793919	793920		
3890	79808	79833					
3891	79945	79968	799727	799746	799733		
3892	80355	80380					
3895	82917	82940	829459	829478			
3897	83529	83551					
3898	83584	83609	836137	836163			
3901	83036	83051					
3909	82933	82945	829492	829536			
3911	82491	82509	825116	825152			
3913	81375	81397					
3915	81293	81306					
3916	80982	81003	810069	810073			
3917	80664	80683					
3918	80437	80446	804509	804514			
3919	80043	80050			800548		
3921	78856	78860					
3922	79152	79153	791602	791623			
3923	78744	78761					
3924	78522	78517	785217	785228	785236		
3925	78084	78090					
3926	77691	77687	776955	776950			
3928	77005	76998					
3930	77053	77043					
3931	76985	76976	769817	769815	769832		
J 3934	77506	77490	774988	774990	774990		
10690	75764		757655	757660			

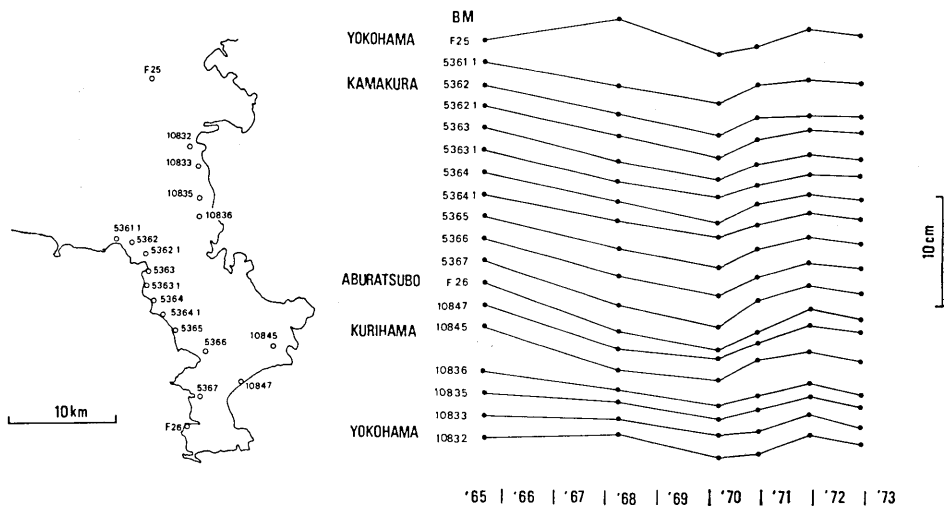


Fig. 38. Elevation changes of bench marks on Miura Peninsula.

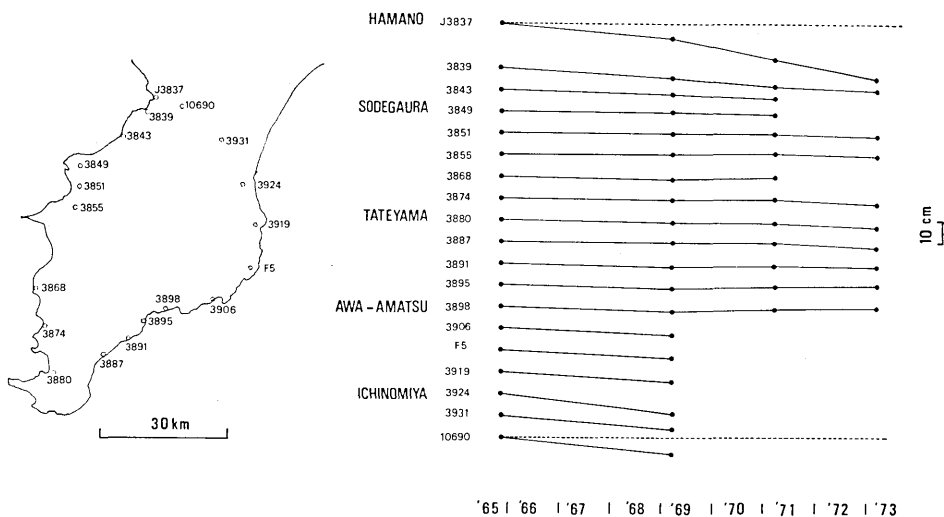


Fig. 39. Elevation changes of bench marks on Boso Peninsula.

子を Fig. 40 に示す。この問題については Matuzawa (1964) も指摘している。1965 年以降の変動も、振巾・周期ともおよそ 1964 年以前の傾向に近いようである。一方、房総半島では、J3837・10690・3931 および 3924 の水準点で沈下が著しい。これは地下水汲み上げが激しい工場地帯や天然ガス採掘地域であって、地盤沈下地域で有名なところである。その他の点では、やや沈下の傾向がみられるが、特に規模の大きい変動はないようである。

三浦、房総両半島において、特に測定回数が多い 10 数点についての重力変化を示したのが、Fig. 41 であり、図の左下に測定点の分布を示す。図の右下に示したのは、この期

間に発生した大体 $M=5$ 以上の地震の震央分布であり、図中上段の数字はマグニチュード M 、中段のアルファベットは時期(上図時間軸参照)、下段の数字は深さである。図にみられるように、ここで対象とする地域には、地震は発生していない。またここに示したそ

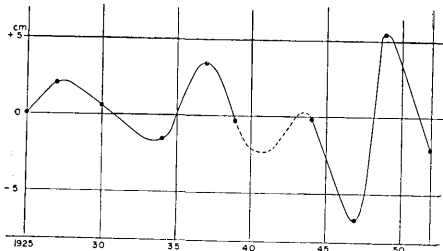


Fig. 40. Change of levels of BM. (2) at Aburatsubo relative to J36-1 at Fuji-sawa. (after Matuzawa, 1964)

れぞれの地震も特に重力の変化に対応しているとは思われない。Figs. 38 および 39 に示された上下変動を概観すると、三浦半島における上下変動のパターンと、それに対応する重力変化のそれとは逆センスであり、これは地盤が上れば重力は減少し、地盤が下れば重力は増加する傾向と定性的に合っていることを示している。房総半島では、両者のパターンを比較出来る点が少ないが、やはり沈下に対して重力は増加であ

って、定性的に合っている。さらに、上下変動と重力変化を適当な期間で区切り、コンターで示したのが Fig. 42 である。上下変動 1965~68, 69 年の三浦半島の沈下に対して、1964~69 年では、重力は増加している。以下同様に房総半島でもおよそ定性的に傾向は合っているようである。

三浦半島について、上下変動と重力変化の関係図と、各測定点の位置を Fig. 43 に示す。全期間 (1968~73 年) を通じて比較できる点は限られ、その中から代表的なものを選点して示した。それぞれに示した B・F は重力のブーゲーの勾配およびフリー・エアの勾配である。この図で、BM. 5362.1 と 10844 における高さや重力の変化との相関は、特に明白でないが、しいて云えば BM. 5362.1 では負の相関をもっている。これに対して、BM. 5363 と 10847 は、反時計廻りに回転している。BM. 10844 は BM. 5362.1 と 10847 の中間と考えることもできる。BM. 5364 と F26 に至ると、反時計廻りの回転もさらに大きくなっているように見える。これらの図形は、電子工学などで取り扱う一種のリサージュ図形であり、高度と重力の変化との間に位相の遅れがあることを示している。

Fig. 44 にリサージュ図形の説明図を示す。上段のような上下変動があった場合に、中段に示す重力変化があったとする。左端の場合、重力変化が上下変動と位相がずれていないとき (図では位相が 180° ずれているように画かれている)、上下変動と重力変化は互に逆センスに変わるので、下段の如くリサージュ図形は直線となる。次に、中央のように重力変化が少し先行すれば、下段の中のように、リサージュ図形は反時計廻りで楕円形を画く。さらに、重力の変化が先行すれば、右下段の如く、反時計廻りで円を画く。このような目で Fig. 43 を見なおすと、水準点 5362.1 と 10844 は位相差が殆どなく、5363 と 10847 は少し重力変化が上下変動に先行し、5364 と F26 は重力変化がさらに一段と先行している場合のリサージュ図形に当る。上下変動の周期を 5~6 年とすれば、半島の先端では重力の変化が起こって 1~2 年後に、それに対応する上下の変動が現われることになる。恐らく、地下で、地盤に上下変動を与える原因が起こり、重力変化は即時にその何事かの変化を拾い上げるが、上下変動となって表面に表われる迄時間がかかるのであろう。このよ

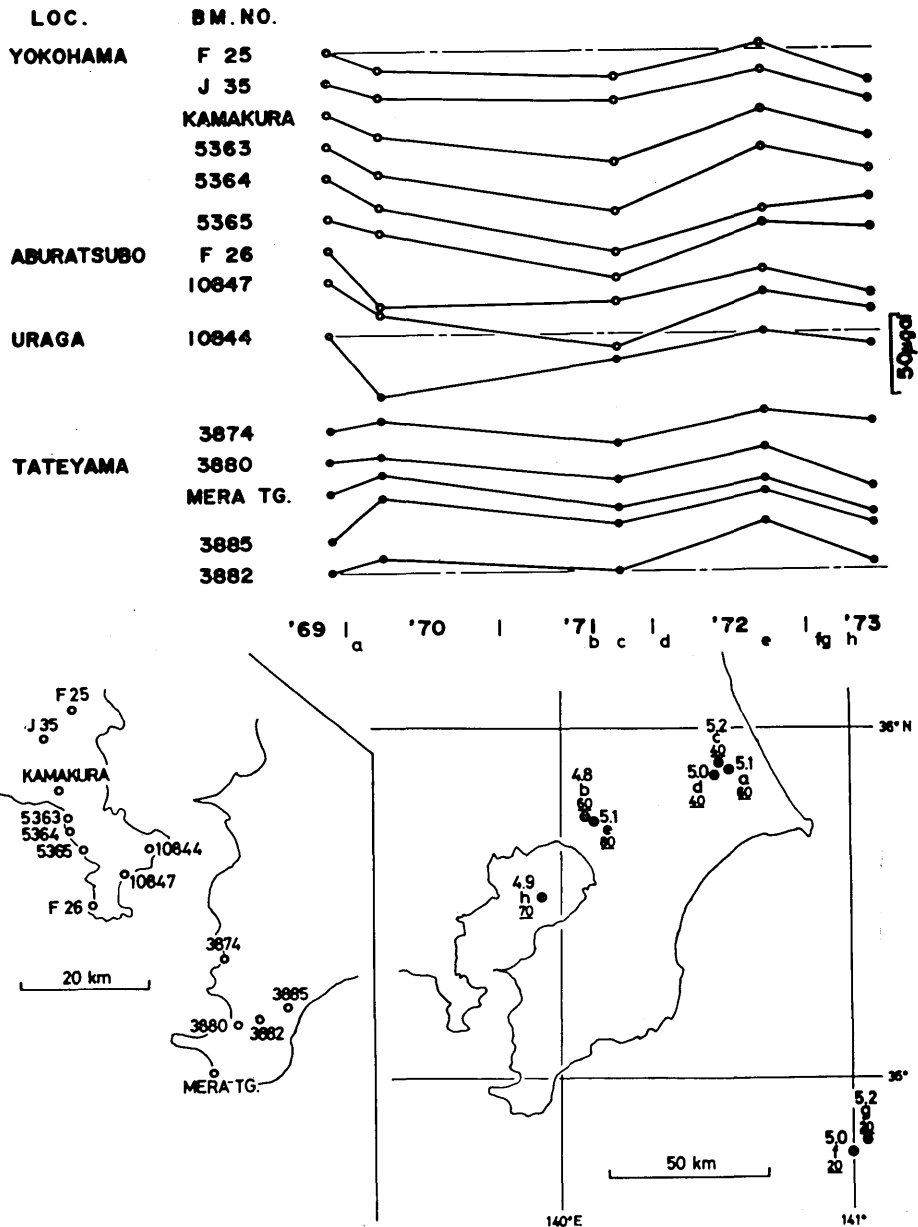


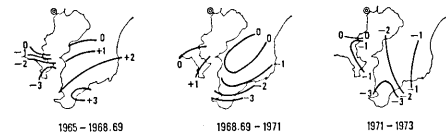
Fig. 41. Gravity changes of bench marks on Miura and Boso Peninsulas and earthquake epicenters occurred between 1970 and 1973.

うに、両者の間に時間的遅れが生ずるのは、地殻の粘性のためであろう。

地質的にみると、三浦半島には北西から南東にかけて半島の基盤とみられる葉山層群があり、南はより新しい地層となっている。そのため、葉山層群の上では、地下に重力を変化させる要因ができるとほとんど同時に上下変動が起り、これに対して、葉山層群の南

の方では、重力を変化させる要因ができて、しばらくしてから、それが表面に地盤の上下変動となって現われると解釈できる。以上が事実とすれば、両者の間に位相の遅れがある限り、重力の測定で上下変動がある程度予知できる結果となり、地殻変動の研究の上で興味あることであろう。

ELEVATION CHANGES (cm)



GRAVITY CHANGES (μgal)

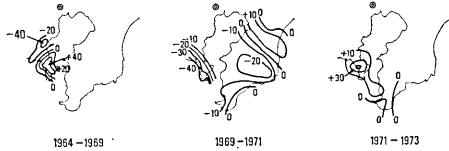


Fig. 42. Elevation and gravity changes on Miura and Boso Peninsulas.

房総半島について、同様な $\delta h - \delta g$ の時間的变化を Fig. 45 に示す。測定回数の多い点の分布は半島南部に限られるため、図のような選点となった。これらの点に関する限り、大体沈下に対して重力が増加の傾向といえるが、特に厳密にシステムティックな変化はないようである。

第 6 章 東海地方における重力変化

東海地方には、1854 年に M 8.4 の地震 (安政地震) が発生している。この地震の震源は浜名湖の南方であり、地震に伴って御前崎が 80~100 cm 程隆起したと伝え

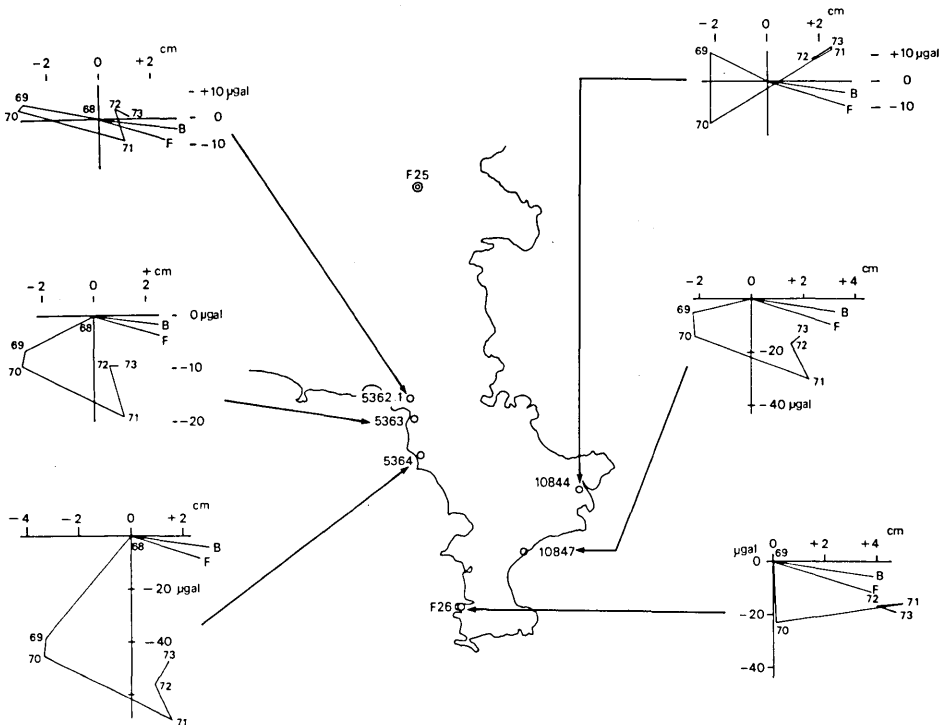


Fig. 43. Relation between elevation and gravity changes of some stations on Miura Peninsula. Both the data are assumed as zero on BM. F25.

LISSAJOUS' FIGURE

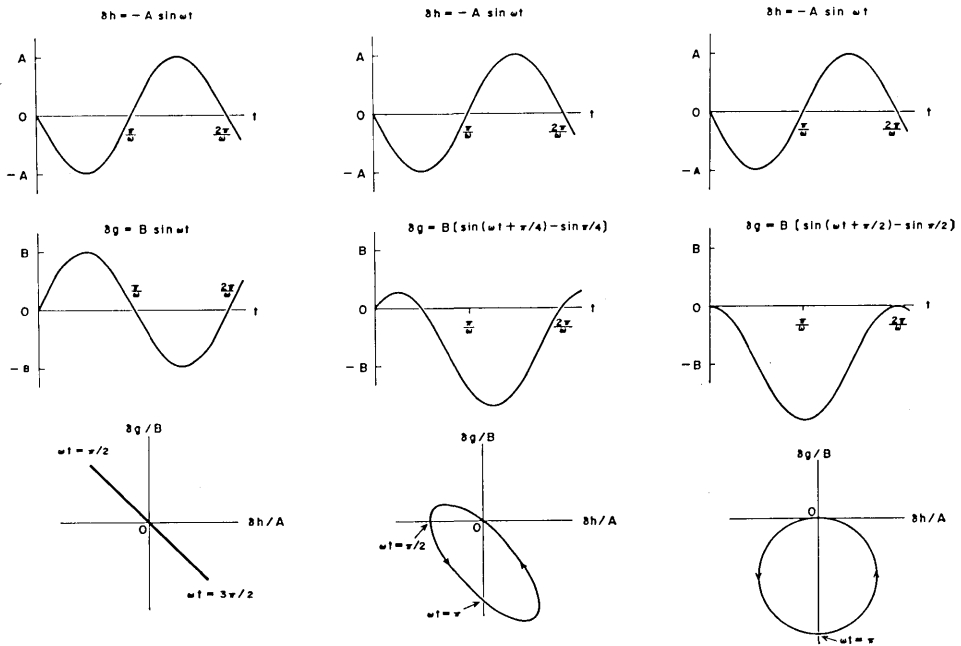


Fig. 44. Lissajous' figures for the elevation-gravity relations.

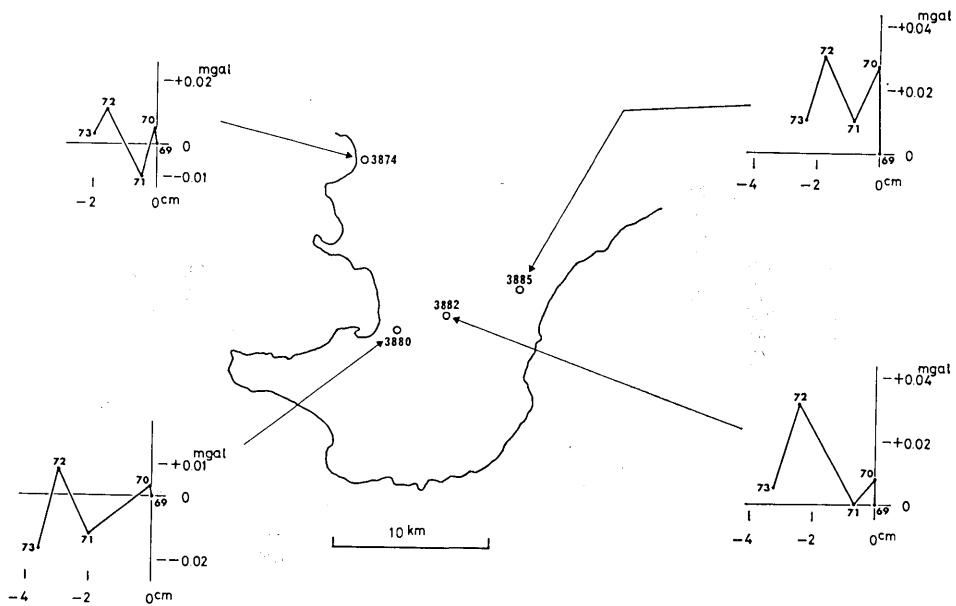


Fig. 45. Relation between elevation and gravity changes in the southern part of Boso Peninsula.

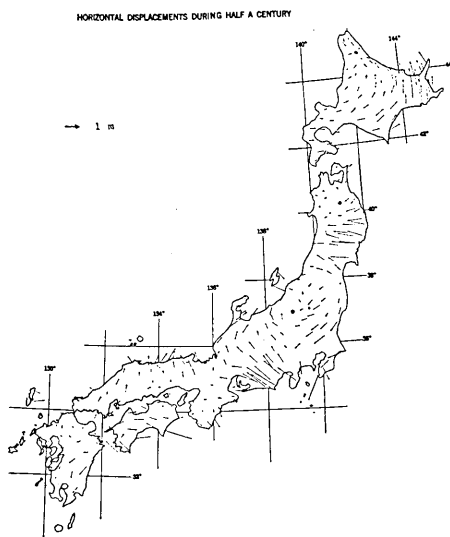


Fig. 46. Horizontal displacements during half a century (after Harada and Izawa, 1969).

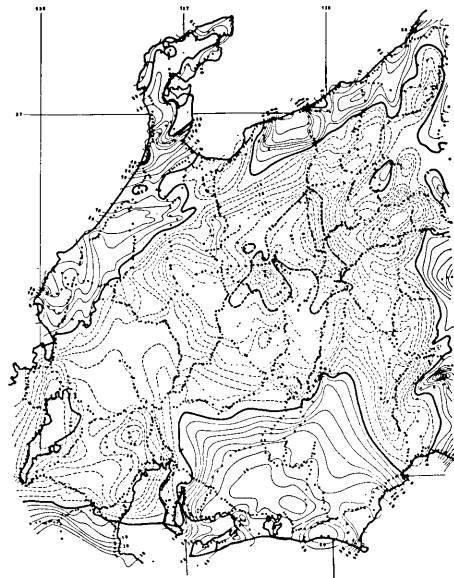


Fig. 47. Distribution of Bouguer anomaly in Chubu District (after Hagiwara, 1969).

られる。また、この地震のあった翌日、紀伊半島南に同程度の地震が発生している。その後当地方には120年経った今日まで大きな地震がなく、ここ50年間の全国の三角点の水平変動（原田・井沢、1969）にみられるように、全国的にみても第一級の変位を示し、約3mに達している（Fig. 46 参照）。このように、この地方は地殻歪の蓄積が予想され、最近「東海地震説」もとりざたされている。

Fig. 47 に、中部地方のブーゲー異常の分布（Hagiwara, 1967）を示す。ここで対象とする東海地方は、およそ掛川を中心として東西に正異常帯があり、その南側に負の異常帯が走っている。重力異常の分布には、特に三角点の水平変動を示唆するものは含まれてはいないようである。

6-1. 重力測定

東海地方の重力測定は、1969年以前にも数回あるが、特に重力の経年変化検出を目的とした精密な測定ではないので、それらの資料はここでは使用しないこととする。1970年9月に、国土地理院・京都大学および地震研究所の三機関の共同で、国土地理院3台、京都大学1台、地震研究所2台の計6台の LaCoste 重力計により、精密測定を実施した（国土地理院ほか、1971）。その後、1973年3月地震研究所が2台の重力計により再測を実施した。Fig. 48 にこれら繰返し測定により、同一地点で重力値を比較できる測定点の分布を示す。また、Table 10 にはそれらの各点における重力値を示してある。1970年の測定は、掛川—御前崎間の路線についてのみ、3機関の重力計6台の共同で実施された。これはお互いの重力測定精度を比較検討する意味をもっていた。このとき、静岡—御前崎—

掛川の三角形の路線の他に、掛川から森方面に測線を伸ばしたのは、水平変位の状況から、南東方向から北西に向かう応力が推定されるので、応力に伴う重力変化検出の目的にはこの方向に測線を伸ばすことが有効と考えたからである。測定方法は両測定とも、往復測定で単測定は3回の読定で行なった。

Table 11 にそれぞれの重力計について、環の時計回りの閉塞差を示す。

6-2 測定結果とその考察

1970年および73年の測定結果から、この期間の重力変化を求め、その結果を Fig. 49 に示す。求められた変化量はほとんど $\pm 20 \mu\text{gal}$ 以内であって、誤差の範囲内であり、有意な重力変化は検出できなかった。また、逆を云うと、これは重力測定の確からしさを示すものであり、もし $20 \mu\text{gal}$ を超える変化があったとしたなら、検出が可能であるということになるであろう。精

度ぎりぎりの変化量とはいえ、この中に何等かの有意な情報を含んでいないか検討するため、少々強引ではあるが解析を行なってみよう。Fig. 49 に示したパターンを見ると、浜岡・吉田の辺に重力増加が見える。そこで、少々強引だが0と $20 \mu\text{gal}$ のコンターを画くと、Fig. 50 に示すごとくなる。この変化のパターンは、Fig. 46 に示した三角点の変位から推定される圧縮によって起りうる重力変化と一致すると考えられる。同じ期間(1970~73)における地殻の上下変動のパターンを Fig. 51 に示すが、これも重力変化のパターンと概略似ていることに気付くであろう。

横からの応力によって生ずる地殻の水平変動に伴う重力の変化は、どのような一般的な法則に従って起るであろうか。いまここにこれを推定してみよう。Fig. 52 に示すように、地殻の左端が固定していて、右から応力が加った場合を考える。このときの密度の変化率は

$$\delta\rho/\rho = -\varepsilon(1-2\sigma)/(1-\sigma) \quad (6.2.1)$$

ここに、 σ はポアソン比、 ε は水平歪である。このとき、重力の変化は

$$\delta g = -2\pi G\rho D\varepsilon(1-2\sigma)/(1-\sigma) \quad (6.2.2)$$

で現わされる(萩原・田島, 1973)。ここに、 G は万有引力定数、 D は地殻の深さである。例えば地殻密度を 2.67 g/cc 、地殻の深さを 30 km 、地殻の歪(変位 3 m で幅 100 km として)を 3×10^{-5} 、およびポアソン比を 0.25 とすれば、これに対応する重力変化は約 $66 \mu\text{gal}$ となる。すなわち、50年間で 3 m の変位があった場合、この50年の間には水平変動だけからは $66 \mu\text{gal}$ の重力変化が期待される。したがって、この程度の速さの水平の歪だけからは、重力変化の検出可能期間は20年位となる。しかし、応力を受けた地盤は上下変動を伴うであろうから、実際の重力変化は異なる筈である。

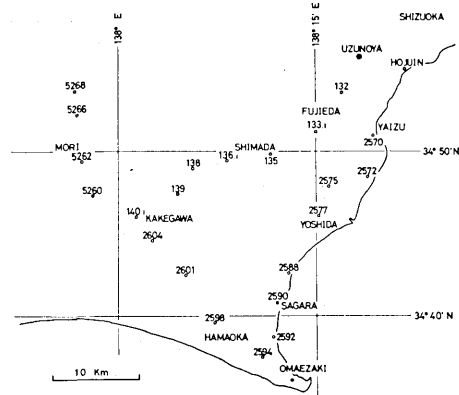


Fig. 48. Distribution of gravity stations.

Table 10. Gravity values in Tokai District.

Gravity Station	ϕ N	λ E	Garvity Value	
			Sep. '70 979. gal	Mar. '73 979. gal
Uzunoya Srn.	34°56.0'	138°18.3'	754464	754464
BM 128-1	34 57.3	138 22.1	758667	
Sizuoka Univ.	34 59.1	138 22.8	755198	
BM 2564	34 56.3	138 22.4	761375	
Hoju Tpl.	34 55.0	138 21.8	767367	767365
BM 2569	34 51.9	138 19.5	771485	
BM 2570	34 51.0	138 19.4	769090	769082
BM 2571	34 49.7	138 19.3	765616	
BM 2572	34 48.5	138 18.9	766595	766608
BM 2573	34 47.6	138 18.0	768296	
BM 2574	34 47.1	138 17.2	768548	
BM 2575	34 47.9	138 16.1	767730	767733
BM 2576	34 47.0	138 14.8	766091	
BM 2577	34 46.0	138 15.2	766869	766892
BM 2578	34 45.1	138 14.5	765492	
BM 2579	34 44.4	138 13.7	763465	
BM 2587	34 43.4	138 13.3	765069	
BM 2588	34 42.5	138 13.1	764857	764856
BM 2589	34 41.5	138 12.8	763442	
BM 2590	34 40.8	138 12.1	762309	762305
BM 2591	34 39.9	138 11.8	760775	
BM 2594	34 37.5	138 10.7	755978	755972
BM 2593	34 37.9	138 11.8	761089	
BM 2592	34 38.8	138 11.7	760295	760297
Omaezaki WS	34 36.1	138 12.9	756230	756218
BM 2595	34 37.7	138 9.6	749044	
BM 2596	34 38.1	138 8.6	750256	
BM 2597	34 38.7	138 7.9	746741	
BM 2598	34 39.7	138 7.2	745865	745888
BM 2599	34 40.7	138 6.2	745463	
BM 2600	34 41.5	138 5.7	747279	
BM 2601	34 42.4	138 5.3	749245	749251
BM 2602	34 43.3	138 4.6	748627	
BM 2603	34 44.1	138 4.1	748617	
BM 2604	34 44.6	138 2.7	742185	742187
BM 2605	34 45.4	138 1.7	739742	
BM 140-1	34 46.1	138 1.4	749789	749799
BM 140	34 46.7	138 2.6	752230	
BM 139-1	34 46.9	138 3.7	753826	
BM 139	34 47.5	138 4.5	754796	754786
BM 138	34 49.0	138 5.8	740982	740992
BM 136-1	34 49.4	138 8.4	755623	755621
BM 136	34 49.7	138 9.5	756982	
BM 135	34 49.9	138 11.7	761955	761935
BM 133-1	34 51.1	138 15.1	767535	767543
BM 133	34 52.1	138 15.5	767116	
BM 132	34 53.6	138 17.2	770280	770277
BM 129	34 56.5	138 21.2	764751	
BM 5259	34 46.5	137 58.7	751457	
BM 5260	34 47.3	137 58.0	753751	753740
BM 5261	34 48.3	137 57.5	756527	
BM 5262	34 49.2	137 57.2	756789	756782
BM 5263	34 49.7	137 56.0	758489	
BM 5265	34 51.5	137 56.5	756663	
BM 5266	34 52.3	137 56.8	753735	753719
BM 5268	34 53.8	137 56.8	745875	745873

Notes Srn: shrine
 Tpl: temple
 WS: weather station

Fig. 52 のような地殻では横から加わる
応力によって

$$\delta h = \sigma \epsilon D / (1 - \sigma) \quad (6.2.3)$$

の隆起変動を起こす。上述の例では、これは 30 cm の隆起に当たる。隆起変動に対して、重力はフリー・エアーの勾配で変化するとすれば、これは約 93 μgal の減少となつて、応力圧縮による重力増加 66 μgal から差し引かれて、計 27 μgal の減少となる。さらに、7-1 室戸岬附近の重力変化の項で後述するように、プレートの沈み込みに引き込まれて、岬の地殻はむしろ沈下する。この沈下に応じて重力はフリー・エアー勾配で増加

Table 11. Closure errors.

	1970	1973
G- 34	+14	+10
G-196	-16	
G-210	-24	+32

unit: μgal .

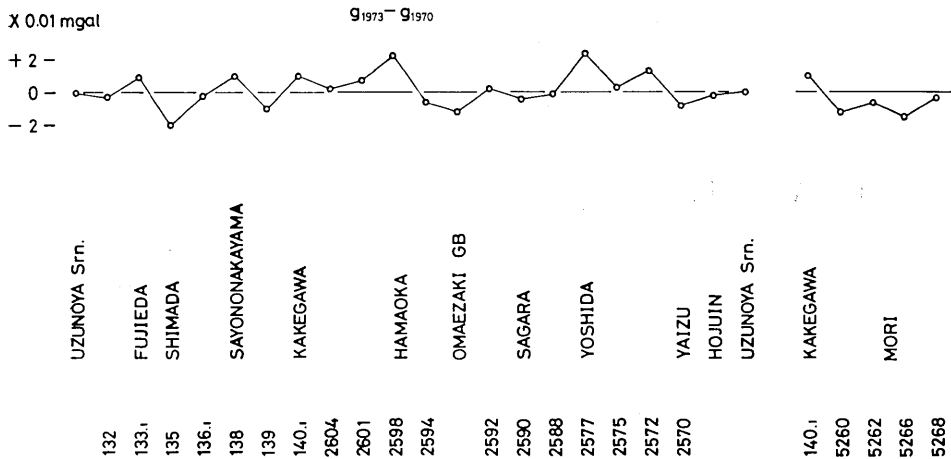


Fig. 49. Changes in gravity on Cape Omaezaki and its adjacent area.

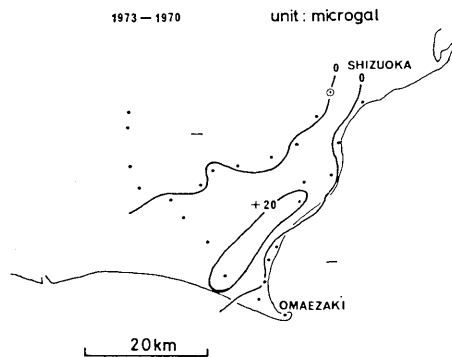


Fig. 50. Contour lines of gravity changes in μgals on Cape Omaezaki and its adjacent area.

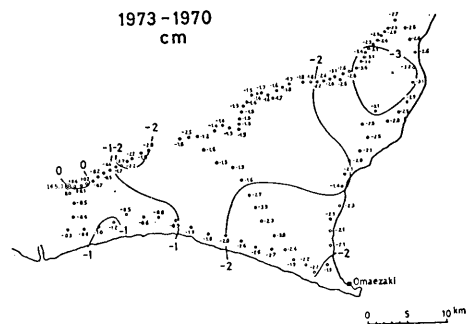


Fig. 51. Contour lines of elevation changes on Cape Omaezaki and its adjacent area (after G. S. I., 1974).

するのである。Fig. 51 によれば、御前崎附近は 1970~73 の 3 年間に約 2 cm 沈降している。50 年間には約 35 cm 沈降することとなり、したがって重力は約 105 μgal 増加する。前述の 66 μgal 増加と合わせて、合計 170 μgal の増加が期待できる。すなわち、約

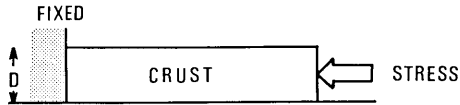


Fig. 52. A crustal model of contraction by horizontal stress.

3 $\mu\text{gal}/\text{year}$ の重力増加率である。こう考えると、3年から6年間隔で、東海地方の重力測定を繰り返せば、十分にこの量を検出できることとなる。

しかし、このような単純なモデルで説明をつけようと思うことは早計である。dilatancy model によれば、弾性論では説明できない大きな隆起が期待できるし、あるいは茂木 (1974) の wet dilatancy model のように、限られた範囲の例えば断層破砕帯のような弱い地盤に歪が吸収されてしまうのかも知れない。Fig. 50 に見えるような重力増加帯は、その弱い地盤に当るのか否か、これだけの資料からは判断が困難である。

東海地方で検出された変化は、精度ぎりぎりの値であり、有意性に乏しいともいえるが、要するに精度すれすれの差が求まったことに意義があったといえよう。数年後の再測に非常に興味もたれる。

第7章 その他の地方における重力変化

ここまで述べてきた、松代、関東南部、東海地方、のほかに、重力変化の検出されている地域があり、これらの 2~3 の地域について、筆者が測定に参加したものに限って、触れておきたい。

7-1 室戸地方の重力変化

室戸地方の重力測定は、地震研究所の Worden 重力計による全国の測定 (Tsuboi et al., 1953) を除けば、1958年6月の国土地理院 North American 重力計による二等重力測量 (国土地理院, 1966) と、1966~67年に同じく LaCoste 重力計による測定があるだけである。この第二回目の測量結果はまだ印刷公表されていない。

Fig. 53 に四国地方のブーゲー異常の分布 (Hagiwara, 1967) を示す。ここで対象とする室戸地方は、南端に向って大きくなる正の異常が、ほぼ等しい勾配で増加していることがみられる。この地方の地殻上下変動については、1946年12月の南海道地震 M8.1 に伴って、岬の先端が 1 m 余上昇し、その後徐々に沈下して、その沈下速度は地震前のそれとほぼ同じ速度で沈下している (Okada and Nagata, 1953)。1947年から64年にかけての上下変動を Fig. 54 (藤井, 中根, 1972) に示す。この変動図とブーゲー異常分布のパターンが良く似ていることに気付くであろう。5-1 に述べたように、わが国の太平洋側の地殻は大洋プレート (ここでは Philippine Sea Plate) のもぐり込みによって押し続けられ、岬などの先端は押し下げられ、歪が限界に達して弾性反撥して地震の発生となって、先端は隆起し、その後また徐々に沈下すると云われる。ここではまさにこのことが起っている。藤井 (1972) は Philippine Sea Plate が西南日本外帯の大陸塊に衝突し、日本列島が圧縮されて生ずる重力の経年変化量を 0.817 $\mu\text{gal}/\text{year}$ と見積っている。

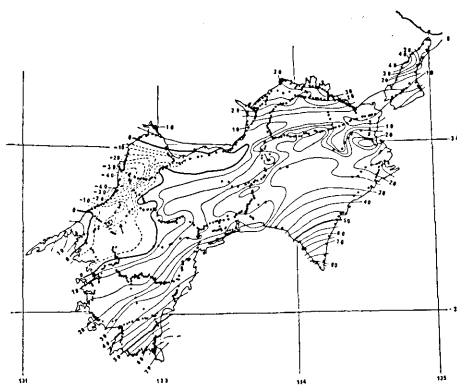


Fig. 53. Distribution of Bouguer anomaly in Shikoku District (after Hagiwara, 1967).

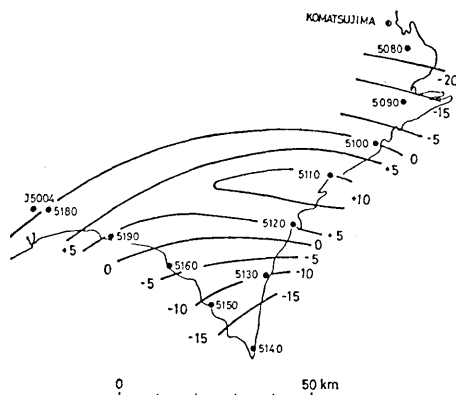


Fig. 54. Vertical crustal deformation in Muroto District during the period from 1947 to 1964 (after Fujii and Nakane, 1972).

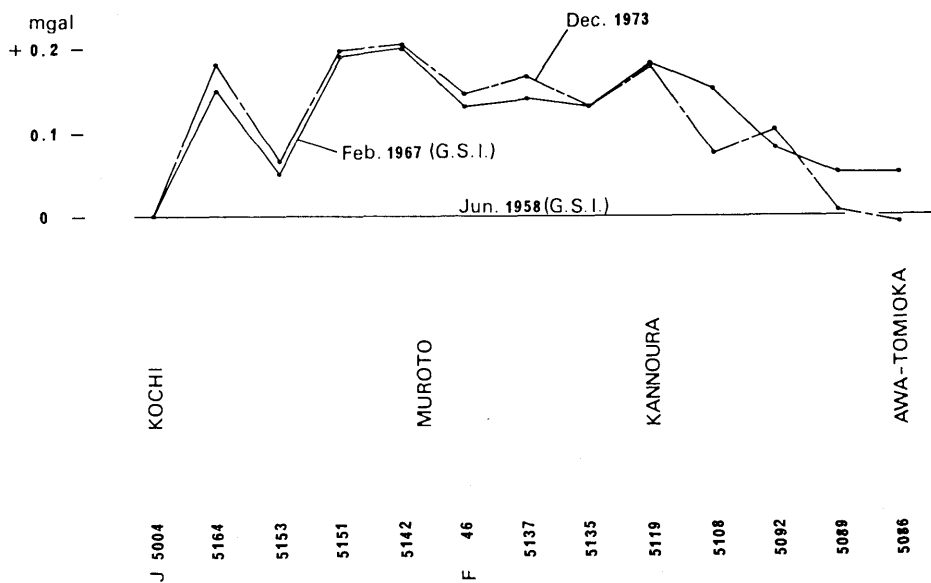


Fig. 55. Gravity changes in Muroto District.

1973年12月、地震研究所は2台の LaCoste 重力計により、当地域の重力精密測定を実施した。この際、京都大学理学部地球物理学教室の1台の LaCoste 重力計も参加している。この測定結果と前述の国土地理院による2回の結果との比較を Fig. 55 に示す。1958年~67年の間に 200 μ gal 程度の重力増加がみられるが、これについて藤井 (1972) は前述の 0.817 μ gal/year の経年変化は地質学的時間尺度の変化であり、巨大地震のあと、次の地震の準備期間中の現瞬間の観測では、0.8 μ gal/year の5倍位の量と見積って

さらに岬の先端ではそのまた数倍となるであろうから、この $200 \mu\text{gal}$ 近くの増加はありうることでありと結論している。しかし、1973年の筆者らの測定結果からは、67年との比較では増加傾向にはあるものの、数 μgal 又はそれ以下であり、もし1958年から67年の間のレートと同じレートで変化しているものであるならば、少なくとも $150 \mu\text{gal}$ の増加がなければならない。したがって、1958年の測定は North American 重力計によるものであり、増加の傾向はよいとしても量的には測定精度の点で問題があるのではなかろうかと考える。

この重力変化の図について、1967年～73年の比較をみると、甲ノ浦の近くの BM 5108 で $70\sim 80 \mu\text{gal}$ 程度の重力減少がみられるが、この位置が Fig. 54 に示す地殻の上下変動図にみられる隆起の場所に対応し、この重力減少は定性的に一致している。以上、室戸地方における現在まで測定された資料により、重力変化について述べたが、今のところ精密測定は1回だけであり、くわしい解釈については述べることはできない。この地域は巨大地震の常襲地域でもあり、精密重力測定網も完成したので、今後引き続き監視の必要があろう。

7-2. 北海道東部の重力変化

1973年6月の根室半島沖地震 (M 7.4) 後、北海道大学理学部地球物理学教室によって LaCoste 重力計 G-31 を用いて精密測定が実施された (大川ら, 1974)。路線は網走の西の豊川から斜里一標津一根室を経て厚岸に至っている。これらの測定結果と国土地理院の North American 重力計による1962年8～9月の結果とを比較すると、豊川の BM 8985 を不動として、標津の近くのポン茶志骨の BM 7641 で $175 \mu\text{gal}$ 程の減少が検出されている。他の点においても、ほとんど減少となっていて、厚岸の BM 8354 だけが $+82 \mu\text{gal}$ と増加している。

一方、国土地理院 (1974) もこの地震後、重力測定を実施した。路線は標津一厚床一根室一門静一釧路である。釧路の一等重力点を不動として、1962～63年の値と比較すると、門静・根室の間で $200\sim 300 \mu\text{gal}$ の減少がみられている。これらの結果を、地殻の上下変動と比較すると、この地域はほとんど沈下地帯であり、網走を不動とした場合、約 15cm の沈下がみられる。また、この沈下のパターンと重力減少のそれとが類似している。すなわち、沈下の大きいところほど重力が大きく減少している。このことは沈下地域ほど地下に密度または質量の減少を考えなくてはならない (Fig. 26 参照)。また、もし地震による歪の解放を考えた場合には、1桁位大きすぎるようである (大川ら, 1974)。

なお、この地域については、北海道大学・緯度観測所・国土地理院・東京大学海洋研究所・同地震研究所・京都大学の諸機関の共同により、1974年8～11月に精密重力測定を実施した。この結果は、現在整理中である。このようにして、この地域にも精密重力網が完成したことでもあり、また、特異の地域でもあるため、今後一層の観測強化が期待される。

7-3. 伊豆の白浜における G-factor の変化

1974年5月の伊豆半島沖地震 (M 6.9) が発生したときに、たまたま伊豆半島南東の白浜にある水路観測所において、地震研究所測地移動観測班 (1975) は重力の連続観測 (地殻潮汐) を実施していた。この際地震を挟んで G-factor の変化らしきものをとらえたの

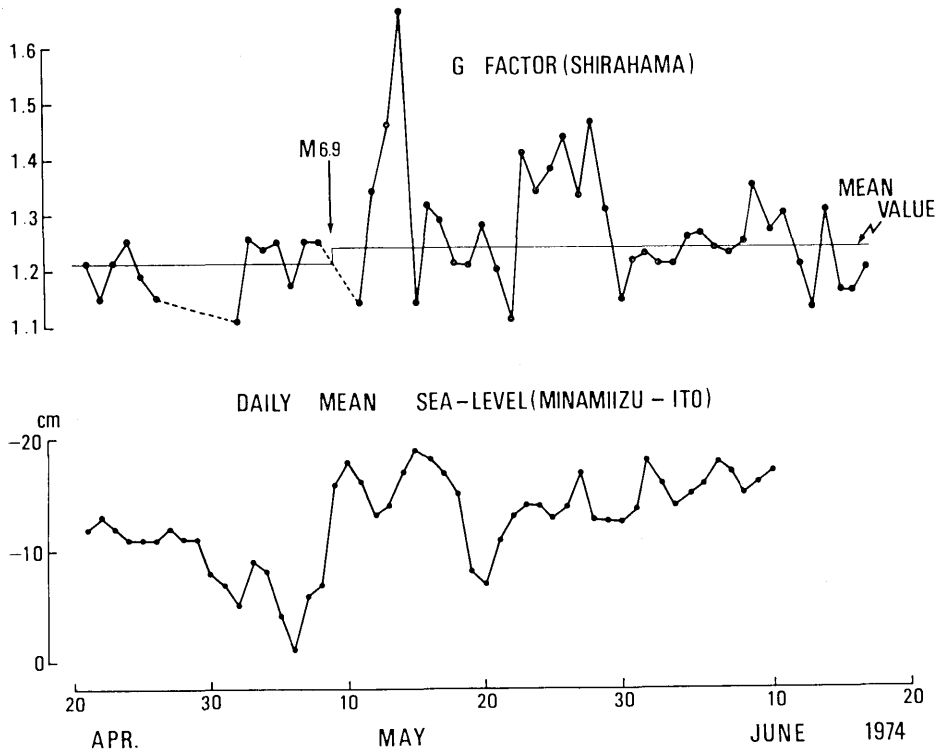


Fig. 56. Changes in G-factor and sea-level during the Earthquake off Izu Peninsula 1974.

で簡単に紹介する。G-factor とは、2-3でもふれたように重力で観測された地殻潮汐の振幅と、地球を剛体としたときの潮汐の振幅の比であり、Love's number k および h に関係する量で

$$G \cong 1 - \frac{3}{2}k + h \quad (7 \cdot 3 \cdot 1)$$

で現わされる。一般に野外観測で潮汐の補正をする場合には $G=1.2$ として補正を加えている。

Fig. 56 の上図は、伊豆白浜における Askania 重力計1時間毎読みとりの重力潮汐の振幅と理論値との比の G-factor 日平均値の変化である。下図は海面の日平均である。海面変化との相関はないようである。地震前には G-factor は安定していたが、地震により大きく振動的に変化し、その期間が約20日にも及んでいる。また平均値も地震を境にして変っているようにみえる。元来、G-factor は観測された潮汐の振幅から求めるのであるから、重力計の定数が直接その値を左右する性質のものである。Askania 重力計の定数は LaCoste に比べて不安定であり、常に検定しているが、観測と並行して検定はできない。このように、G-factor を求める段階において、不確定さはあるものの、現在のように重力の測定で $\mu\text{gal order}$ の変化を検出しようとするには、測定地域の G-factor を求める

ことはもちろん必要なことであり、またその時間的変化の可能性もあることを指摘しておきたい。

第8章 結 論

スプリング型重力計の測定精度、重力基準点の安定性および松代、南関東、東海地方などにおける重力変化についてこれまで述べてきたが、ここにそれぞれの結論を要約する。

重力の測定精度については、次の結論が得られた。

- a). 外気温と重力計内の温度との差をできるだけ小さくするよう努める。すなわち、重力計の恒温槽内の温度に近い夏季に測定を実施することが望ましい。
 - b). 重力計の運搬には細心の注意を払い、機械的ショックなど、大きな加速度を与えない。
 - c). 恒温槽用の電源電圧は $12V \pm 0.5V$ 程度に保ち、急激な電圧変化を与えない。特に冬季、重力計の電源電圧の低下に注意すること。
 - d). 目盛定数の検定をしばしば行い、定数変化の傾向を把握する。
 - e). 測定中に生ずるテアーをチェックするために、数台の重力計を同時に使用し、測定値を比較する。
- a). ~ e). の点に注意を払い、往復測定を実施すれば、 $\pm 10 \sim 20 \mu\text{gal}$ の精度の測定は可能である。

古くから使用されてきた東京大学構内の重力基準点は、近年の地下水位の低下に伴って、その重力値が1963年から1969年の間におよそ $11 \mu\text{gal}/\text{year}$ の率で減少してきた。幸にも、この重力基点の附近に、つねづね水位観測をしている深井戸があるので、重力値低下の原因がつかめたのである。堆積平野における重力値の変化の原因は、しばしば地下水位の上下によるのではなかろうか。

松代群発地震に際しての重力変化は、約 $60 \sim 70 \text{ cm}$ の地盤の隆起に対して、 $80 \sim 100 \mu\text{gal}$ の減少であった。地盤の隆起に対する重力減少の比はフリー・エアあるいはブーゲー勾配に近く、それは *dry dilatancy* から *wet dilatancy* への移行によって説明できる。隆起から沈下に移る変化をも考え合わせると、重力変化の原因は、地盤の上下による変化分を除けば、地下水であると考えるのがもっとも妥当であると思われる。すなわち、ほぼ *dilatancy-diffusion model* によって重力変化を説明することができる。マグマの貫入のような大きな質量の流入は重力変化からは考えられない。重力測定は、他の地球物理的観測に比べて、比較的容易であるという利点をもっているのも、もし重力変化から、*dilatancy-diffusion* が検出できるならば、 V_E/V_S の変化の観測に代りうる可能性がある。こういった意味でも、重力の繰返し測定は、地震のメカニズムの解明または予知のために有力な手段の一つであろうと考える。

三浦半島の重力変化は、地盤の上下変動 $5 \sim 6 \text{ cm}$ に対して $40 \sim 50 \mu\text{gal}$ が検出され、地盤の振動的上下変動に対して、重力の変化は位相差をもっているように見える。重力変化が上下変動に対して1~2年位先行していると考えれば、重力と上下変動との関係がほぼ説明できる。

東海地方の重力変化は、約3年の間隔をおいた観測によって、ほとんどの点が $\pm 20 \mu\text{gal}$ の範囲に入っていて、誤差の範囲内である。しかし、プレートによって圧縮される地殻モデルの弾性論的類推から、約3~6年間隔ごとの重力測定 of 繰返しにより、重力の経年変化を検出する可能性が十分あることがわかった。三角点間の測距や、水準測量の繰返しと共に、重力測量も鋭意継続する必要がある。

重力測定精度の向上により、僅かな重力変化量も検出され、その原因に関する議論がある程度可能になった。そして、これらの解析結果はともに信頼性の高いものと考えられる。重力の時間的変化の観測は、地震予知および地殻変動観測の関連において、脚光を浴びる時を迎えつつあり、重要な課題の一つとなってきたと思う。地震や地殻変動に伴う重力の繰返し測定による変化検出、連続観測によるG-factorの変化検出、重力絶対測定による重力計特性の定期的な点検、これらは近い将来、「重力」を支える有力な3本柱となって、今後ますます測地的、地球物理学的観測における重要な役割を果たすこととなる。

謝 辞

本論文は多くの方々のご指導、ご教示およびご協力によって完成したものであることをここに特記する。

東京大学地震研究所の坪川家恒教授、萩原幸男助教授には常にご指導にあずかった。特に萩原助教授には全篇ご通覧いただき、多くのご教示と終始変らざるご鞭撻を賜わった。両先生に深く感謝の意を表す。

本論文の基礎となっている重力・水準などの資料の一部は、各大学および研究諸機関の実に多くの人々によって得られた貴重なものであり、これらの測定に従事された方々に、また松代・関東南部などの測定に際して、地震研究所の井筒屋貞勝・村田一郎・長沢工の各氏のご協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

最後に、この論文を執筆するにあたり、終始ご鞭撻を賜わり、また、内容についても色々と細かくご指摘いただいた北海道大学の横山泉教授に深甚の謝意を表す。

この論文は北海道大学審査学位論文である。

参 考 文 献

- ASANO, S., KUBOTA, S., OKADA, H., NOGOSHI, M., SUZUKI, H., ICHIKAWA, K., and H. WATANABE (1969), Underground structure in the Matsushiro Earthquake Swarm Area as derived from explosion seismic data, *Sp. Rep. Geol. Surv.*, No. 5, 163-203.
- BARNES, D. F., (1966), Gravity changes during the Alaska Earthquake, *Journ. Geophys. Res.*, 71, 451-456.
- BORRASS, E., (1911), Bericht über die relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten in der Zeit von 1808 bis 1909 und über ihre Darstellung in Potsdamer Schwere-system, Verhandlungen der sechzehnten allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung.
- CORON, S., (1956), Réseau gravimétrique international de 1er ordre, (système de Potsdam), Publications du Bureau Gravimétrique International.

- 藤井陽一郎, (1966), 新潟地震の震域における重力の変化, 地震, **19**, 200-216.
- 藤井陽一郎, (1969), 地殻変動による重力の変化, 測地学会誌, **15**, 97-98.
- 藤井陽一郎, (1972), プレートの衝突と重力異常, 測地学会誌, **18**, 58-61.
- 藤井陽一郎, 中根勝見, (1972), プレートの衝突にともなう地殻変動と重力の経年変化, 測地学会誌, **18**, 180-190.
- FUJITA, N., and Y. FUJII, (1974), Gravity change in Japan, *Jour. Geod. Soc. Japan*, **20**, 77-79.
- Geographical Survey Institute (1964), Gravity survey in Japan (3). III Gravity survey in the Kanto and Chubu Districts, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **9**, 155-340.
- Geographical Survey Institute (1966), Gravity survey in Japan (5). V Gravity survey in the Shikoku District, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **11**, 125-169.
- HAGIWARA, T., and T. IWATA, (1968), Summary of the seismographic observation of Matsuhiro Swarm Earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46**, 485-515.
- HAGIWARA, Y., (1967), Analyses of gravity values in Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 1091-1228.
- 萩原幸男, 田島広一, (1973), 重力の経年変化, 関東大地震 50 周年論文集, 東京大学地震研究所, 311-327.
- 原田健久, 井沢信雄, (1969), 日本の地殻の水平変動 (多固定点法による解), 測地学会誌, **14**, 101-105.
- HARADA, Y., (1968), Geodetic work in Japan with special reference to the Matsuhiro Earthquakes, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **50**, 390-391.
- 北海道大学理学部, (1974), 北海道東部における, 根室半島沖地震後の重力および地磁気の再測, 地震予知連絡会会報, **11**, 19-23.
- ICHINOHE, T., (1955), Study on change of gravity with time. Part II. Repeated gravity surveys in the Kinki District, *Memor. Coll. Science, Univ. Kyoto, Ser. A*, **27**, 317-334.
- 飯田波事, 早川正巳, 片寄邦之, (1950), 今市地震後の重力測定, 地質調査所月報, **1**, 136-137.
- 飯田波事, 早川正巳, 片寄邦之, (1951), 1950-1951年の三原山活動時における重力測定, 地学雑誌, **60**, 133-136.
- 飯田波事, 早川正巳, 片寄邦之, (1952), 伊豆大島三原山火山における重力測定ならびにその時間的变化, 地質調査所報告, No. 152.
- 井内 登, 加納克己, 藤井陽一郎, (1972), 大島における重力変化の研究 (II), 測地学会誌, **18**, 104-111.
- 井上 登, 藤井陽一郎, 木沢 綏, (1968), 大島における重力変化の研究 (I), 測地学会誌, **13**, 146-150.
- International Association of Geodesy (1967), Geodetic reference system 1967, Publication Special N°3.
- ISHIMOTO, M., and K. TSUZI, (1929), Monthly means of the daily rates of Riefler clock in the Tokyo Astronomical Observatory and their bearing on the occurrence of earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **6**, 355-357.
- 石本巳四雄, (1929), 地震に關係して重力は変化するか, 地震, **1**, 241-249.
- 井筒屋貞勝, (1975), 松代群発地震にともなう水準測定の改訂値, 地震研究所彙報, **50**, 273-280.
- 地震研究所測地移動観測班, (1975), 1974年伊豆半島沖地震に伴う重力潮汐変化の観測, 地震予知連絡会報, **13**, 67-68.
- 実川 顕, 田島広一, (1955), ニッ井地震に伴う重力場の変化, 1955年11月地震研究所談話会にて発表.
- 実川 顕, 田島広一, (1960), No. 60 Worden 重力計の定数の経年変化, 測地学会誌, **6**, 10-11.
- 実川 顕, 田島広一, (1962), 宮城県北部地震地域の重力測定, 地震研究所彙報, **40**, 649-652.
- 垣見俊弘, (1971), 三浦半島の断層系, 測量, **21**, 4-11.
- 金子徹一, 小川健三, (1954), 千葉県および神奈川県三浦半島重力測定調査報告, 地質調査所月報, **5**, 37-45.
- KASAHARA, K., OKADA, A., SHIBANO, M., SASAKI, K., and S. MATSUMOTO, (1967), Electro-optical measurement of horizontal strains accumulating in the swarm earthquake area

- (3), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 225-240.
- KISSLINGER, C., (1975), Processes during the Matsushiro Earthquake Swarm as revealed by leveling, gravity and spring-flow observations, *Geology*, **3**, 57-62.
- 国土地理院, (1966a), 日本重力標準線設置作業報告, 測地学会誌, **12**, 102-114.
- 国土地理院, (1966b), 水準測量, 松代群発地震に伴う測地測量報告書 第1報, 2-7.
- 国土地理院, (1966c), 松代における重力値, 松代群発地震に伴う測地測量報告書 第1報, 19-21.
- 国土地理院, (1967a), 重力測量, 松代群発地震に伴う測地測量報告書 第2報, 48-62.
- 国土地理院, (1967b), 重力測量, 松代群発地震に伴う測地測量報告書 第3報, 43-44.
- 国土地理院, (1968), 重力測量, 松代群発地震に伴う測地測量報告書 第4報, 29-33.
- 国土地理院, (1967~1972), 一等水準点検測成果集録, **12~17**.
- 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.
- 国土地理院測地部, (1974), 1973年根室半島沖地震前後の重力および地磁気変化, 地震予知連絡会会報, **11**, 14-18.
- KÜHNEN, R., und PH. FURTWÄNGLER, (1906), Bestimmung der absoluten Grösse der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversinspendeln, Veröffentlichung der königlich-preussischen geodätischen Institutes, **27**.
- 松田武雄, (1952), 神奈川地区重力探鉱調査報告, 地質調査所月報, **3**, 56-59.
- MATUZAWA, T., (1964), *Study of earthquakes*, Uno Shoten.
- 茂木清夫, (1974), 岩石破壊と地震予知, 材料, **23**, 320-331.
- MORIMOTO, R., NAKAMURA, K., TSUNEISHI, Y., OSSAKA, J., and N. TSUNODA, (1967), Landslides in the epicentral area of the Matsushiro Earthquake Swarm—their relation to the earthquake fault, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 241-263.
- 村田一郎, (1970), 三浦・房総半島の精密重力測量について一問題点一, 測地学会誌, **16**, 44-53.
- 中川一郎, 里村幹夫, 一戸時雄, 住友則彦, (1972), 琵琶湖周辺における重力の経年変化について, 測地学会誌, **18**, 23-29.
- 中川一郎, 里村幹夫, (1973), 等重力点における重力測定について (第2報), 測地学会誌, **19**, 42-49.
- 中川一郎, 里村幹夫, 瀬戸孝夫, 長谷川康正, 塚原弘一, 萩原幸男, 田島広一, 井筒屋貞勝, 村田一郎, 中井新二, 中込理, 小泉金一郎, 藤本博巳, 宇田井雄司, 石原文実, (1973), La Coste and Romberg 重力計 (G型) の特性について 第1報, 測地学会誌, **19**, 100-112.
- 中川一郎, 里村幹夫, (1974), 等重力点における重力測定について (第3報), 測地学会誌, **20**, 107-110.
- 中川一郎, 里村幹夫, 中井新二, 佐藤範雄, 田島広一, 萩原幸男, 井筒屋貞勝, 瀬戸孝夫, 塚原弘一, 太島和雄, 大川史郎, 小泉金一郎, 藤本博巳, 須田芳朗, 三品正明, (1974), La Coste and Romberg 重力計 (G型) の特性について 第2報, 測地学会誌, **20**, 133-142.
- NUR, A., (1974), The Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model, *Geology*, **2**, 217-221.
- OKADA, A., and T. NAGATA, (1953), Land deformation of the neighbourhood of Muroto Point after the Nankaido Great Earthquake in 1946, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **31**, 169-177.
- OKUDA, T., (1951), On the change of local geoid in the southwest part of Japan, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **2**, 239-275.
- OKUDA, T., INOUE, E., and H. SUZUKI, (1957), Determination of the differences in gravity values at the Coast and Geodetic Survey (C and GS), the National Bureau of Standards (NBS), Washington, D. C. and the Geographical Survey Institute (GSI), Chiba, Japan, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **5**, 1-12.
- 大川史郎, 山下 濟, 横山 泉, (1974), 北海道東部地方における根室半島沖地震後の重力および地磁気の再測, 1973年6月17日根室半島沖地震調査報告 Part I. 67-71.
- RIKITAKE, T., TAJIMA, H., IZUTUYA, S., HAGIWARA, Y., KAWADA, K., and Y. SASAI, (1965), Gravimetric and geomagnetic studies of Onikobe area, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **43**, 241-267.
- SCHOLZ, C. H., SYKES, L. R., and Y. P. AGGAWAL, (1973), Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, **181**, 803-810.

- 測地移動観測班, (1970), 松代群発地震にともなう水準測量 (第3報), 地震研究所彙報, **48**, 341-344.
- Stuart, W. D. and M. J. S. Johnston, (1975), Intrusive origin of the Matsushiro Earthquake Swarm, *Geology*, **3**, 63-67.
- 鈴木弘道, (1957), 日本の重力基準点とその重力値について, 測地学会誌, **4**, 43-58.
- SUZUKI, H., (1974), Establishment of the gravimetric network in Japan, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **20**, 1-150.
- 田島広一, (1969), 重力測量, 測地学会誌, **15**, 9-13.
- 田島広一, (1970a), 三浦・房総半島の精密重力測量について——再測量の結果について——, 測地学会誌, **16**, 54-59.
- 田島広一, (1970b), LaCoste and Romberg 重力計の長期間ドリフト, 測地学会誌, **16**, 199-201.
- 田島広一, (1971), 気温変化による重力計のドリフトに関する一実験, 測地学会誌, **17**, 61-66.
- 田島広一, (1973), 関東南部における重力の経年変化, 測地学会誌, **19**, 125-134.
- 田島広一, 萩原幸男, (1973), 茅ヶ崎および茂原地盤沈下地帯における重力の経年変化, 測地学会誌, **19**, 70-75.
- 田島広一, 井筒屋貞勝, (1974a), 気温変化による重力計のドリフトに関する実験 (II), 測地学会誌, **20**, 65-69.
- 田島広一, 井筒屋貞勝, (1974b), 松代周辺における重力変化, 測地学会誌, **20**, 153-168.
- 東京大学地震研究所, 京都大学理学部地球物理学教室, 国土地理院, (1970), 三浦・房総半島における重力精密測量, 測地学会誌, **16**, 16-22.
- 坪井忠二, (1935), 重力, 岩波書店.
- TSUBOI, C., JITSUKAWA, A., TAJIMA, H., and A. OKADA, (1953), Gravity survey along the lines of precise levels throughout Japan by means of a Worden gravimeter. Part I Shikoku District, *Bull. Earthq. Res. Inst. Supl.*, **4**, 1-46.
- TSUBOI, C., JITSUKAWA, A., and H. TAJIMA, (1956), Gravity survey along the lines of precise levels throughout Japan by means of a Worden gravimeter. Part VIII Kanto District, *Bull. Earthq. Res. Inst. Supl.*, **4**, 407-474.
- 坪川家恒, 岡田 惇, 田島広一, 村田一郎, 長沢 工, 井筒屋貞勝, 伊藤 裕, (1967), 松代群発地震にともなう水準測量 (第1報), 地震研究所彙報, **45**, 265-288.
- 坪川家恒, 岡田 惇, 井筒屋貞勝, 伊藤 裕, 角野行栄, (1968), 松代群発地震にともなう水準測量 (第2報), 地震研究所彙報, **46**, 417-429.
- TSUNEISHI, Y., and K. NAKAMURA, (1970), Faulting associated with the Matsushiro Swarm Earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 29-51.
- WOOLLARD, G. P., and J. C. ROSE, (1955), Preliminary values and station descriptions world pendulum gravity base established 1954, *Woods Hole Oceanographic Institution. Technical Report*, Reference No. 55-49.
- 山口林造, (1973), 東京大学構内の深井戸の水位変化, 関東大地震50周年論文集, 東京大学地震研究所, 249-258.

12. Gravity Change Associated with Earthquakes and Land-Deformations.

By Hirokazu TAJIMA,
Earthquake Research Institute.

The recent advancement in techniques of manufacturing sensitive and stable spring-type gravimeters enables us to detect small changes in gravity by repeating measurements

at the same station. A comparison of gravity values measured before and after a large earthquake may offer an important means of checking the earthquake-induced gravity change. Repetition surveys over a volcano may disclose the effect of an abundance of effused lava on the gravity field. The relationship between gravity and elevation changes over ground subsidence area indicates secular changes in groundwater level.

There is a phenomenon called "drift" essential to gravimeter readings. This is mainly caused by microfractures occurring in the material of a gravimeter spring. The drift is so sensitive to temperature changes that, in order to avoid such instability, most of spring-type gravimeters are equipped with temperature-control devices. If the quantity of drift is neither small nor linear with time, the accurate determinations of gravity change can not be expected. The LaCoste and Romberg gravimeter, however, has the advantage of a small amount of drift linearly increasing with time in the order of $10 \mu\text{gal}/\text{day}$ or less. As a matter of fact, since such highly sensitive and stable gravimeters began to be used for survey work, gravity changes have been well documented in Japan and the U. S. A.

In order to check the significance of gravity differences obtained by repeatedly-made surveys, the author has investigated the behavior of drift through laboratory and field tests. The obtained results can be summarized as follows:

- 1) A sudden temperature change by about 30°C causes an apparent gravity-step of 0.03 or 0.04 mgals. Generally speaking, the quantity of drift becomes larger when measurements are made in the low room-temperature range. Judging from this fact, it is recommended to carry out gravity surveys during the summer.

- 2) When we transport a gravimeter, mechanical shocks to the gravimeter should be avoided. It is sometimes found that, even though the gravimeter is installed in its case, a shock may cause a considerable drift amounting to some mgals.

- 3) The source voltage should be stabilized in the range from 11.5 to 12.5 V. A sudden change in voltage of 2 to 4 V has a serious effect on the gravimeter reading with a changing rate of $\pm 25 \mu\text{gal}/\text{V}$.

- 4) The scale factor checking has to be repeated at least once a year.

- 5) It is recommended that three or more gravimeters are simultaneously used for a repetition survey. If one of the gravimeters produces a sudden drift, a comparison between reading values makes it possible to find out which gravimeter causes the drift.

- 6) Observations of the tidal gravity factor (G-factor) over the repetition survey area are desired for the purpose of making tidal corrections appropriate for the elastic properties of the local crust.

- 7) It is concluded that, if we treat a LaCoste and Romberg gravimeter with the utmost care on the basis of the above experimental facts, the detection of gravity change with an accuracy of ± 0.01 to 0.02 mgals can be possible.

The Matsushiro Earthquake Swarm provided an opportunity to test the applicability of gravity-change measurements to tectonic studies. The coseismic changes in the apparent crustal density is estimated from the relation between changes in gravity and elevation observed by the Earthquake Research Institute (Tajima and Izutuya, 1974) during the Matsushiro Earthquake Swarm. The combination of precise levelling and concurrent gravity data may possibly play an important role in disclosing the earthquake swarm mechanisms. According to the recent theory of dilatancy diffusion (Nur, 1972; Scholz et al., 1973), changes in gravity are presumably large enough to be detectable near dilatant regions. In the present paper, the author tries to confirm the dilatancy model on the basis of the Matsushiro gravity and elevation change data. The gravity decrease with the free-air gradient in the first stage of the swarm activities corresponds to the elevation increase due to the ground upheaval. The second stage characterized by the Bouguer-gradient gravity decrease is well explained as the groundwater saturation in the epicentral area. The ground subsidence generates the gradual gravity increase

in the final stage after the spring flow of mineral water along the faulting zone.

The tips of the Miura and Boso Peninsulas rose 1 to 2 meters at the time of the 1923 Kanto Earthquake. Since then, the areas that rose have gradually subsided with a speed of 1 cm/year. As it is thought that, an anomalous upheaval in the peninsulas might be an effect preceding an approaching large earthquake, the earthquake prediction project called "Operation South Kanto" was set up. Participating in the project, the author and his colleagues have repeated gravity measurements at bench marks over the peninsulas (Tajima, 1973). It is found that the gravity change there corresponds to the elevation change with a phase lag of two or three years.

Similarly, the repetition gravity surveys have been carried out over the Tokai District, Cape Muroto and its adjacent areas, and the Nemuro Peninsula. These gravity changes were originally calculated on the assumption that gravity was unchangeable at the Tokyo Base Station, the University of Tokyo. It has been discovered, however, that the ground-water table draw-down under the city caused a remarkable gravity change amounting to 0.01 mgal per year (Tajima, 1973). Consequently, recalculations based on the Kakioka Station, about 80 km northeast of Tokyo, have been made.