

重力の時間的変化について

(国際地球観測年重力観測第一報)

西村英一・一戸時雄・中川一郎・岡本容子・船曳 満

ON CHANGE OF GRAVITY WITH TIME

(Observation of Gravity for International Geophysical Year, First Paper)

by Dr. Sci. Eiichi NISHIMURA, Dr. Sci. Tokio ICHINOHE, Ichirō NAKAGAWA,
Yōko OKAMOTO and Mitsuru FUNABIKI

Synopsis : As an international cooperative observation in the XIII Working Group (Gravity) of CSAGI during the International Geophysical Year (1957~1958), study on change of gravity with time has been carried out by our Institute. The item on time change of gravity contains two branches, i.e. the periodic and non-periodic change of gravity. The former is the phenomenon caused by earth tidal change, and the latter is related with the rapid or gradual change of gravity caused by change of state of material in the earth and earth's crust. For example, the change of state of material in the earth's crust will be caused by earthquake-occurrence and volcanic eruption. In the present article, the aim of observation, observation instruments, observation stations are in some detail described, and the observational results obtained are preliminarily reported.

緒 言

昨年(1957)の秋 Paris で開かれた国際重力委員会の会議において、国際地球観測年(International Geophysical Year, I.G.Y. と略す)の行事として、重力部門では重力の潮汐変化の観測と南極地域の重力測定を実施することを決議した。いうまでもなく、わが国もこの企てに参加し、南極地域の重力測定は建設省地理調査所がこれを担当し、重力の潮汐変化は京都大学防災研究所が中心となり、地理調査所がこれに協力して実行することになったのである。南極地域の重力測定班は目下南極へ向う途上にあり、潮汐変化の方は現在国内十数カ所において観測を実施中であるため、観測の全成果については観測年の終了後に一括して報告することとして、本稿においては主として重力変化を観測することの目的と方法について述べ、あわせて観測開始からこんにちまで5カ月の間に得られた若干の成果について簡単に報告する。

1. 観測の目的

重力の時間的変化の中には週期的に変化する部分と非週期的な部分とがあり、週期的変化は天体の起潮力によつて起るもので、重力の潮汐変化とよばれている。重力の潮汐変化を観測することの地球物理学の意義については、筆者らの一人がすでに前の論文(1)で詳細に説明しているので、ここではその要点だけを述べることにする。

いま、地球上の一点における起潮力の potential を W_2 という記号で表わすと、地球が変形しない場合には、その一点における重力変化は $(\partial W_2 / \partial r)_{r=a}$ (a は地球の平均半径) になるはずである。ところが実際の地球は有限の弾性体であり、従つて起潮力の作用によつていくらか変形する(この現象を地殻潮汐とよぶ)

ために二次的な重力変化が起り、実際に観測される重力変化 Δg は

$$\Delta g = G(\partial W_2 / \partial r)_{r=a} \quad \text{ただし} \quad G \equiv 1 - 3k/2 + h$$

になる。 h および k は Love number とよばれる無次元の常数で、 h は観測点の鉛直変位に関係し、 k は変形による potential の変化に関係しており、いずれも地球内部の密度分布と弾性状態に極めて密接な関係を有している。係数 G は通常“重力の tidal factor” とよばれており、われわれが重力変化を観測する目的も、つまるところはこの G -factor の値を求めることにあるのである。一方、鉛直線方向変化を傾斜計で観測することにより、われわれは“diminishing factor” とよばれるところの $D \equiv 1 + k - h$ の値を求めることができるが、国際重力委員会は、できればこの観測も同時に行うよう勧告している。I.G.Y. の行事となすべき重力観測の当面の目的は上述のとおりであるが、われわれの研究室においては、このほかに、地殻変動の研究資料を得るというもう一つの目的にも副うように観測を進めているのである。重力変化の観測が地殻変動の研究に役立つ理由は次のとおりである。

(1) Tidal factor の局所性

いままで多くの人々が実際に観測して求めた G -factor の値は一致しておらず、相当の変動を示している（たとえば (1) および (2) 参照）。その原因はこんにちもお明らかでなく、またこれを明らかにすることがこのたびの国際協同観測の究極の目的なのであるが、原因の一つは地下構造の相違に基くものと推定されている。地下構造の相違が tidal factor に影響を及ぼす機構は現在のところ全く不明であるが、この方面の研究は地下構造と地殻変動との関連に対して重要な資料を提供するものと考えられる。

(2) Tidal factor の変化

重力の潮汐変化の振幅が時間的に変化すれば当然 G -factor の値も変わるわけであるから、(1) に述べたように、tidal factor と地下構造との間に何らかの関係があつて、その地下の状態たとえば密度・弾性率などが変化するようなことが起ると、結果的には G の値が時間的に変ることになる。このような現象が実際に起つたとしても、現在の重力計の精度ではこれを確実に捕らえることは極めて困難であるが、鉛直線の傾斜観測においては、すでにこのような現象の存在が確かめられているのであつて (3)、将来この方面の研究が進むと地震波伝播速度の変化の観測とともに地下の弾性変化の研究、ひいては地震の発生を予知するのに寄与するものと考えられる。

(3) 重力の経年変化

観測できるか否かは別問題として、造陸運動、造山運動、氷河の消長などの大規模な物質移動があると重力は変るはずである。もつと身近の問題として、地下の密度変化を伴つて地盤が隆起または沈降するような場合には、観測にかかる程度の重力変化が起るはずで、かような現象の存在を確かめるために、われわれは畿内の数府県にわたつて重力の繰返し測定を行つたことがある。その結果についてはすでに報告している (4) ので、ここでは省略するが、測定の精度さえ確保されるならば、重力変化の観測は地殻変動の研究にとつて極めて有力な手段となるであろう。

(4) 比較的急激な重力変化

地殻変動を伴う大地震の発生または火山の爆発など、地下物質が比較的急激に移動した場合に重力変化が観測された例はすでに報告されておる (5) (6)、地震の発生や火山の爆発が予想される地域で重力変化を連続的に観測することは、他種の観測とともに災害を未然に防ぐのに役立つであろう。

われわれの研究室で重力変化を観測するのは、前述の I.G.Y. 行事としての目的だけでなく、上述の防災的な目的も含んでいるのであるから、その観測は I.G.Y. の期間中で終るものではなく、今後長年間にわたつて続けられるであろう。そして観測器械もこの二つの目的にかなうように、二種類の重力計と水平振子型の傾斜計が使用されており、伸縮計も併置されている。なお I.G.Y. 行事としての当面の目的に対しては、現在使用中の重力計の性能で充分であるが、防災的な目的を果すためには精度の点で不充分であり、その点については今後さらに検討を加え、改良して行くつもりである。

2. 観測器械

現在使用中の二種類の重力計の一つは独逸から輸入した Askania Gravimeter Gs 11-No. 111 で、図-1はその構造図であり、写真-1はその外観である。いま一つは筆者らの一人が考案した複二本吊型の重力計で、図-2はその構造を示し、写真-2はその外観を示している。

Askania Gravimeter は重力の野外測定と時間的变化の連続記録を得ることの両方とも可能なことが特徴で、野外測定の場合の重力値の読取方法はいわゆる zero method である。重力値に応じた beam (図-1の(17))のふれは beam に固定された mirror (25) によつて光像のふれに換えられ、光像のふれは重力計に内蔵された differential photocell (30) と galvanometer (32) を通じて増幅され、再び scale (36) 上の光像の動きとなる。観測者はこの最後の光像が scale 上の定点にくるように spindle control (3) を廻して measuring spring (7) を調節し、その動きを microscope で読取るのである。このようにして使用する場合は、scale の1目盛が0.075 mgal の重力変化に対応し、目分量でさらにその10分の1まで読取れるようになっていいる。時間的变化の連続記録を取る場合には、differential photocell から出てきた電流を記録装置の galvanometer に導いておくと、galvanometer の光像の移動を follow-up recorder の differential photocell が捕捉して、sapphire のペンでワックス塗装の記録紙上に記録するようになっていいる。この場合の感度は、記録紙上の1mm の動きがほぼ0.0025 mgal の重力変化に対応し

ていいる。この Askania gravimeter は I.G. Y. 中に国内を移動して、各地においてそれぞれ1ヵ月間の潮汐変化を観測するのに使用される。

複二本吊型重力計の構造と性能についてはすでに詳細な報告がなされているので(2)、ここでは省略するが、重力の変化に応じて weight (図-2の(4))が鉛直軸の周りに

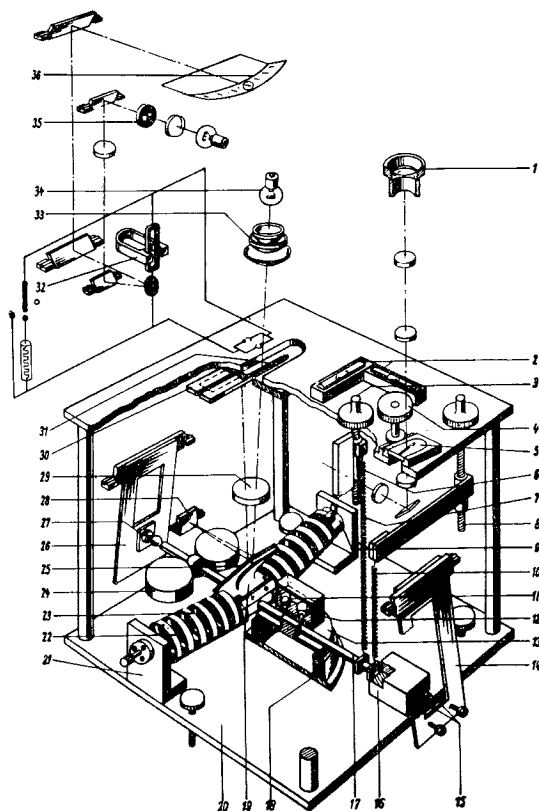


Fig. 1. Structure of the Askania Gravimeter Gs 11 - No. 111.

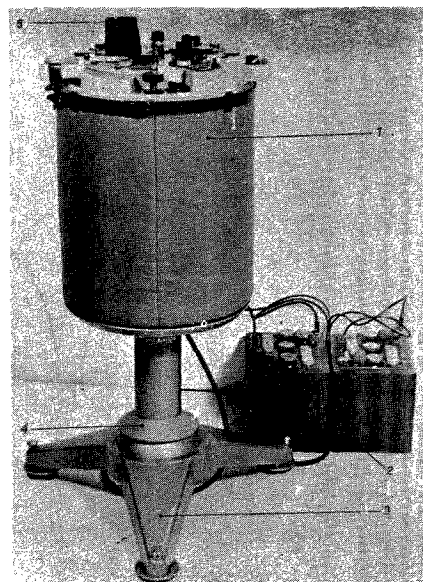


Photo. 1. Exterior view of the Askania Gravimeter Gs 11 - No. 111.

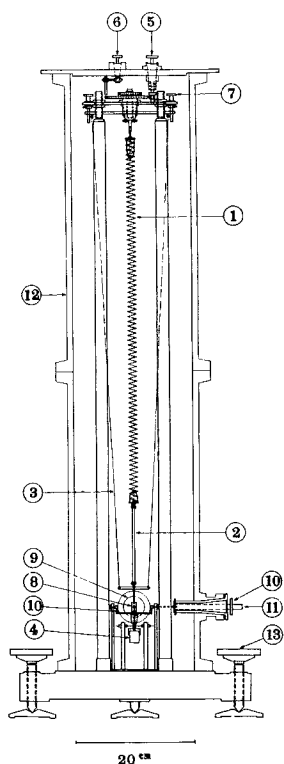


Fig. 2 Structure of the double bifilar gravimeter

1. Main spiral spring (Nivarox)
2. Inner bifilar string (30 micron super invar)
3. Outer bifilar string (30 micron super invar)
4. Weight (brass)
5. Fine torsion adjuster of main spring
6. Fine vertical adjuster of main spring
7. Vertical adjuster of outer bifilar string
8. Reflecting mirror
9. Lens
10. Calibration apparatus
11. Exhaust opening
12. Cover (iron cast)
13. Level adjuster

ある。なお、Askania gravimeter のように galvanometer と follow-up recorder でさらに感度を上げ、ペン書きにする研究もすでに始めている。

3. 観測地点

I.G.Y. 中に観測実施を予定している地点は図 3 に示すとおり Askania gravimeter の 15 点、複二本

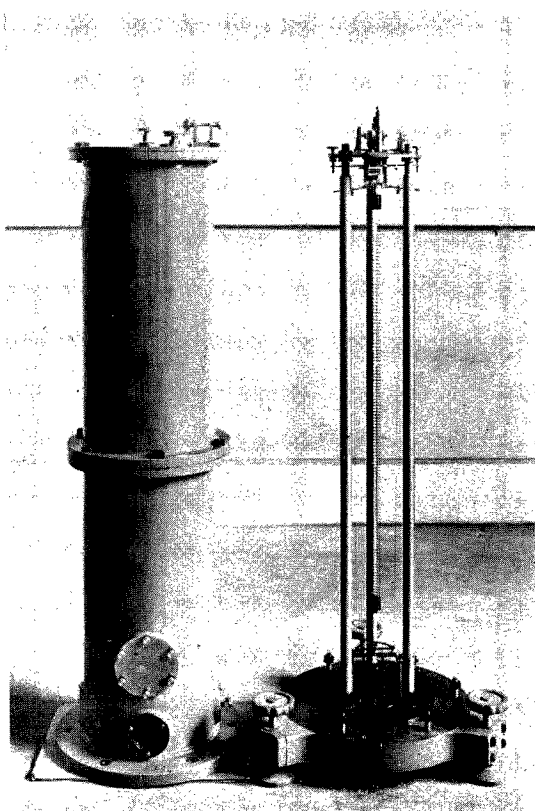


Photo. 2 Photograph of the double bifilar gravimeter

廻転するのを、mirror (8) によつて光像の動きに換え、光像の動きを直接に感光紙の上に記録させるのである、この重力計の感度は、良好の状態において、感光紙上 1 mm の動きがほぼ 0.01 mgal の重力変化に相当している。われわれはこの型の重力計を 10 台製作して設置も終り、すでに記録も取っている。この型の重力計は移動させずに、その地点の重力変化を長年月にわたつて観測するのに使用されるもので、I. G. Y. の終了後もその観測は継続されるであろう。ただ、さきにも述べたように、この重力計には二、三の難点があるので、その点について今後さらに改良を加えて完全なものにするつもりで

吊型重力計の10点で、これらの地点は主として重力の潮汐変化に影響を及ぼすと推定される海洋潮汐と地下構造の二点を考慮して選定されたものである。複二本吊型重力計の大部分は気象変化の影響を避けるために地下数100 m の鉱山の坑道に設置されており、宮崎県嶺峰鉱山では諸種の試験のために数10 m の距離において2台の重力計が配置されている。桜島は特に火山の爆発と重力変化の関連を調べるために選ばれたものである。また、千葉の観測点では、われわれの観測とは別に、建設省地理調査所も調査所所有の Askania gravimeter Gs 11-No. 105 を使用して観測を実行中であり、この観測は I.G.Y. 中同一地点で連続観測を行うことになっている。なお、I. G.Y. 中このような多数点で重力観測を行うのはわが国だけで、わが国の観測点が世界中の観測点の半数以上を占めていることをつけ加えておく。

4. 観測結果

上記の観測地点中、Askania gravimeter による1ヵ月観測のすで

に終了したのは京都（京大地球物理学教室）、松代（地震観測所）、御前崎（測候所）の3点である。さらに

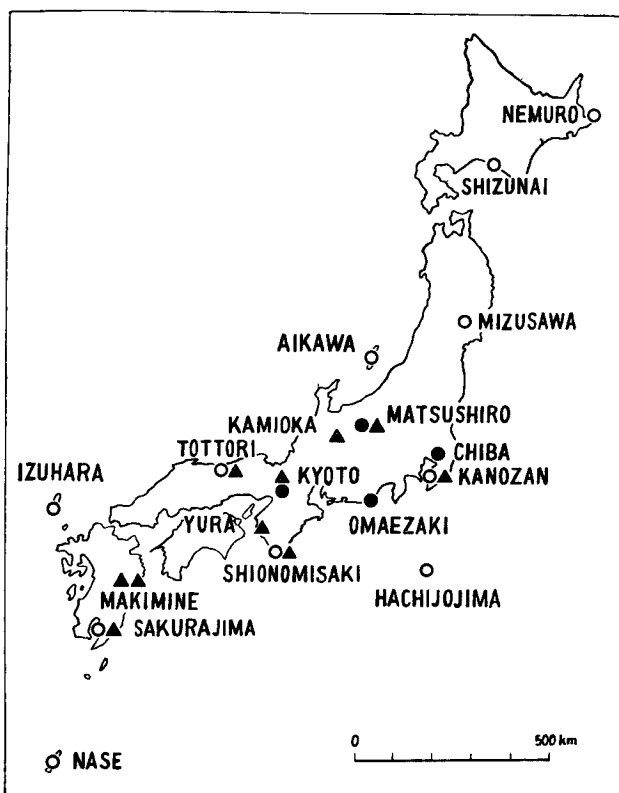


Fig. 3 Positions of the observation stations

- : Destination with Askania gravimeter
- : Completed station with Askania gravimeter
- ▲ : Continuing station with double bifilar gravimeter

Table 1

	M_2		S_2		K_1		O_1	
	G	κ	G	κ	G	κ	G	κ
Kyoto	1.14±0.01	+1°.51	1.04±0.01	+ 4°.75	1.04±0.08	+12°.78	1.05±0.04	+1°.46
Chiba	1.12±0.01	+0°.96	1.18±0.01	+22°.93	1.66±0.06	+22°.37	0.97±0.04	-0°.80
Matsushiro	1.14±0.01	+1°.42	1.10±0.02	- 1°.38	0.95±0.08	- 6°.28	0.90±0.03	-1°.48
	Latitude (N)	Longitude (E)	Height (m)	g' (gal)	Analysis period (Universal time)			
Kyoto	35°02'	135°47'	58	979.722	July 1st 0h-July 31st 0h, 1957			
Chiba	35°38'	140°06'	27	979.790	July 1st 0h-July 31st 0h, 1957			
Matsushiro	36°32'	138°13'	434	979.784	Aug. 26th 0h-Sep. 26th 0h, 1957			

も述べたように、I.G.Y. 観測の成果の全容はその期間の終了後、得られた総ての観測資料を整理検討して始めて明らかになる性質のものであり、しかも御前崎の分は目下計算中であるから詳細な報告は後日に譲り、今回は2点だけの観測結果を中間報告として簡単に述べておく。

(1) **Tidal factor** 観測資料を調和解析して求めた各分潮の G -factor の値および phase lag κ は表-1に示す通りである。表中、 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 というのは、それぞれ太陰半日週潮、太陽半日週潮、日月合成日週潮、太陰日週潮の略号であり、phase lag κ というのは、その分潮に対応する仮想天体が観測点の子午線を通過してから実際に重力が極小になるまでの時間、すなわち起潮力の作用に対する地殻潮汐現象の遅れを時角で表わしたもので、正符号は遅れを、負符号は進みを示している。なお、同表には京都の観測と同じ期間に地理調査所が千葉で観測して求めた値も比較のために示しておいた。京都と千葉を比較してみると、同じ観測期間であるにも拘らず、 G , κ 、ともにいくぶん異なる値を示している。その相違の原因を探究することは極めて興味ある問題であるが、それを探求することこそ今次の I.G.Y. 観測の主眼点なのであつて、それについては全観測の終了後、海洋潮汐の影響、地質構造、地震発生などとの関連において詳細に研究され、報告されるであろう。また、その相違が器械的な原因によるものかどうかを確かめるためには、I. G. Y. 中にわれわれの gravimeter を千葉へ運び、地理調査所のものと同じ場所で比較観測を行うことになつてゐる。

なお、3年前に京都の同じ場所で、Worden gravimeter で1ヵ月観測を行つたことがあり、その結果が筆者らの一人によつて報告されているが、その値は表-2に示すとおりである。

Table 2

	M_2		S_2		K_1		O_1	
	G	κ	G	κ	G	κ	G	κ
Kyoto	1.18 ± 0.02	$+1^\circ.96$	1.16 ± 0.03	$-3^\circ.33$	1.29 ± 0.07	$+22^\circ.73$	1.15 ± 0.04	$-1^\circ.93$
Analysis period : June 12th 0h-July 12th 0h, 1954 (Japanese time)								

表-1と表-2を比較すると、全く同じ場所であるにも拘らず、各分潮とも今回の G -factor の値が前のそれよりいくぶん小さくなつてゐることがわかる。このことが1.の(2)項で述べた tidal factor の時間的变化に該当するものならば新事実の発見というべきであるが、むしろ両重力計の感度目盛の相違に由来する可能性が濃厚である。この点を明らかにするために、同じ場所で同じ重力計で再び観測した場合にも同様のことが起るかどうかを確かめるため、目下京都で2回目の観測を実施中である。

(2) **不規則変化** 重力変化の中に規則的な潮汐変化と重なつて、数10分から数時間の週期をもつ不規則な変化がしばしば現われることは以前から気付かれていたのであるが、その原因については全く不明であつた。というのは、これまでの観測はすべて1点観測であつたために、その変化が果して真の重力変化なのか、それとも観測点附近の擾乱、あるいは使用計器の個性などに基く見かけ上の重力変化なのかを識別する決定的な方法がなかつたからであつて、この問題を解決するためにもわれわれは今回の協同観測に大いに期待をかけていたのである。写真-3の矢印は京都と千葉で同時に現われた数回の不規則変化の中の一例を示したものである。京都と千葉とは直線距離にして約400 kmあり、これだけの遠距離で同じような変化が起るということは、その変化が器械的原因による見かけ上のものではなくて真の重力変化であり、しかもそのような変化は少なくとも近畿と関東を含む相当広範囲の地域で同時に起つてゐるものと考えざるをえないのである。このような広地域に重力変化を起す原因としては、大規模な地殻変動、大地震の発生、地球の固有振動などいろいろ考えられるが、そのことについては観測資料が十分に蓄積されてから改めて論ずるつもりである。

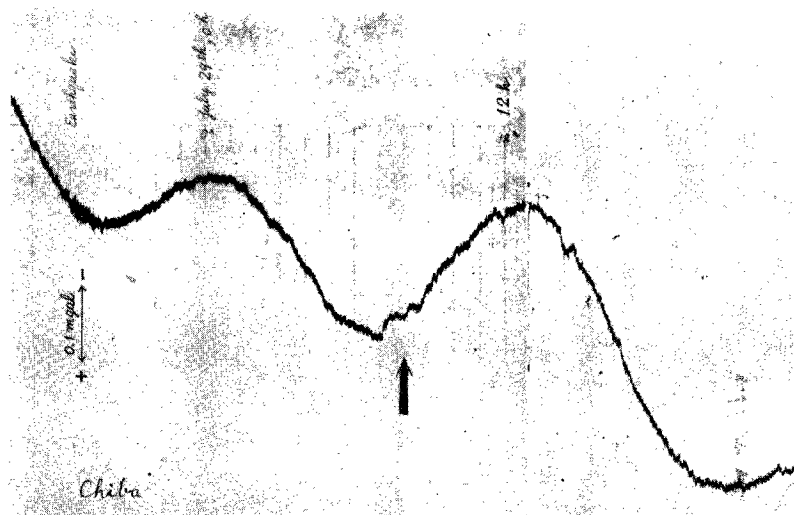
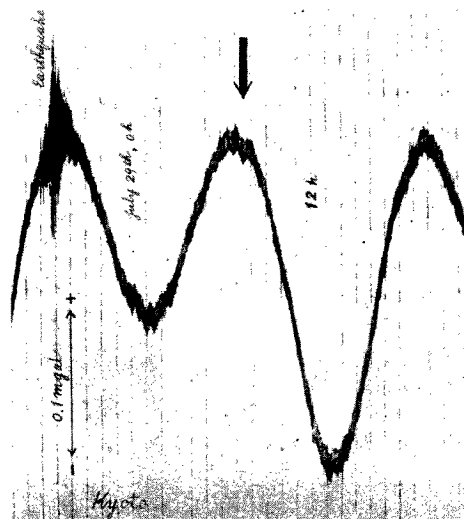


Photo. 3 Records of singular gravity changes simultaneously observed at Kyoto and Chiba

結 語

Askania gravimeter による現在までの観測結果は上述のとおりであるが、さきにも述べたように、われわれの重力観測は I.G.Y. 観測と防災研究の二つを目的としているのであつて、あとの目的に対しては、むしろ長期一斉観測に適当な複二本吊型重力計、傾斜計、伸縮計が重要な観測資料を提供するものと考えられる。これらの計器による観測結果については後日改めて報告されるであろう。最後にこの報告を草するにあたり貴重な観測資料の使用を快諾された地理調査所の方々に厚く謝意を表する次第である。



参 考 文 献

- 1) 一戸時雄：重力の時間的変化について，防災研究所創立5周年記念論文集，1956，pp. 35～41.
- 2) Ichinohe, T.: Study on Change of Gravity with Time, Part I, Mem. Coll. of Sci., Univ. of Kyoto, Vol. 27, 1955, pp. 289～316.
- 3) 西村英一：地殻物性の状態変化と地殻活動，防災研究所創立5周年記念論文集，1956，pp. 8～13.
- 4) Ichinohe, T.: Study on Change of Gravity with Time, Part II, Mem. Coll. of Sci., Univ. of Kyoto, Vol. 27, 1955, pp. 317～334.
- 5) Iida K., Hayakawa M. and Katayose K.: Change of Gravity Difference between Imaichi and Nikkō, Bull. Geol. Survey Japan, Vol. 1, 1950, pp. 136～138.
- 6) Iida K., Hayakawa M. and Katayose K.: Gravity Change according to the Eruption of Volcano Mihara, Ooshima Island in 1950 and 1951, Chigaku Zasshi, No.681, 1951, pp.133～136.