

# 重力の絶対測定

中 川 一 郎\*

## 1. 重力と重力測定

地球上にあって、これとともに自転しつつある物体には、一般に、2つの力が働いている。1つは地球の質量による引力であり、他は地球とともに自転することによって生ずる遠心力である。この2つの力の合力が重力といわれるものであり、その方向は鉛直下方である。ある物体に働く重力は、その質量に比例している。したがって、この物体が重力の作用だけを受けて自由に落下する際の加速度は、質量の大小には関係しないで、一定である。

さて、地球上の物体に働く重力は、文字どおり、力であるが、ある物体に働く重力の効果は、通常、加速度として取り扱われる。すなわち、地球の表面で重力を測定する際には、地球に向かって自由落下する物体の重力加速度が測定される。したがって、地球の表面において重力の大きさを表わすには、通常、加速度の単位が用いられる。国際単位系において、重力加速度は  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  で示される。重力加速度を cgs 単位で表わした場合の単位すなわち  $10^{-2}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  は、落体の実験を最初に試みたガリレオの名に因んで、gal と呼ばれ、重力加速度の単位として広く使用されている。赤道における重力加速度は約 978.03 gal、極では約 983.22 gal であり、一般には、赤道から極に向かって、重力加速度は次第に増加している。狭い地域での重力測定や重力異常を問題にする場合などは、gal の 1/1,000 である mgal を用いる。また、1地点における重力の時間的な変化を問題にする場合などは、その量はさらに小さいので、mgal のさらに 1/1,000 の単位である  $\mu\text{gal}$  を用いるのが普通である。一方、地球の重力加速度を単位とするような大きい加速度を取り扱う場合には、gal の 1,000 倍にあたる kgal が用いられる。重力加速度の慣用単位と国際単位との関係は、

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgal} &= 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \\ 1 \text{ gal} &= 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2} \\ 1 \text{ mgal} &= 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2} \\ 1 \mu\text{gal} &= 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 10 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2} \end{aligned}$$

である。

2つの物体の間に働く引力の大きさは、それらの物体の質量の積に比例し、距離の2乗に反比例する。また、

遠心力の大きさは、赤道で最大であり、極で最小である。地球の表面上にある単位質量の物体に働く遠心力の大きさは、それが最も大きい赤道でも約 3.4 dyn であるのに対し、引力の大きさは約 980 dyn であるので、地球の表面上にある単位質量の物体に働く重力は、近似的には、地球の質量とその点の地球中心からの距離とによって決められる。ところが、地球の赤道半径は約 6,378 km であり、赤道での重力加速度は約 978 gal であるので、これらの値を用いて、高さの変化に応ずる重力の変化の割合（これを、重力の分野では、フリー・エア勾配と呼んでいる）を求めると、高さ約 3.2 m に対して、重力加速度の約 1 mgal が対応する。したがって、重力加速度が 1 mgal 小さくなることは、高さが約 3.2 m 高くなることに相当し、重力加速度が 1  $\mu\text{gal}$  大きくなることは、高さが約 3.2 mm 低くなることに相当する。

地球上のある地点における重力の大きさを求めるためになされる重力測定は、その性質によって、絶対測定と相対測定に分類される。前者すなわち重力の絶対測定は、その地点における重力値を、他の地点の重力値とはまったく無関係に、独立に定めることであり、後者すなわち重力の相対測定（比較測定ともいわれる）は、あらかじめ重力値の知られている地点を基準として、両地点間の重力差を測定して、相対的に重力値を定めることである。重力の絶対測定を世界の各地で行なうことは、経済的にも、また、技術的にも、多くの困難を伴ったので、従来、特定の地点においてのみ重力の絶対測定を行ない、その地点の重力値をもとにして、測定の精度と容易さの双方において有利である重力の相対測定によって、世界の各地の重力値が定められていた。しかし、最近における測定計器と測定技術の進歩は、一方では、定点型の重力絶対測定装置を用いて、重力の絶対測定の精度を相対測定なみの精度に高揚し、他方では、可搬型の重力絶対測定装置の出現によって、世界の各地における重力の絶対測定の実施を容易ならしめた。こうして、重力の絶対測定は、いまや、世界の各地で実行することが可能となり、その成果は、単に計量学上に寄与するばかりでなく、測地学や地球物理学の分野にも、大きい貢献をなしつつある。

本稿では、重力の絶対測定の現状を概観し、あわせて、近い将来における重力の絶対測定を展望しよう。

## 2. 重力の絶対測定の原理

重力の絶対測定には、古くは、重力振子が用いられた。

\* 京都大学理学部

I. Nakagawa: Absolute Measurement of Gravity

ある重力の場で振動する理想的な単振子の運動理論によると、長さ  $l$  なる単振子が振幅  $\alpha$  で振動するとき、その自由振動の周期  $T$  は、

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right\}$$

で与えられる。ここで、振子の振幅  $\alpha$  があまり大きくなければ、近似的に、

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{16} \alpha^2 \right)$$

となり、したがって、

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \left( 1 + \frac{1}{16} \alpha^2 \right)^2$$

となるので、 $l$  と  $T$  を測定すれば、その地点の重力  $g$  が求められるはずである。実際の測定に際しては、単振子のかわりに、物理振子や可逆振子が用いられたが、 $l$  を精密に測定することが困難であったために、所期の成果をあげることはむずかしかった。

最近では、重力の絶対測定は、重力振子を利用するかわりに、物体の自由落下を利用している。いま、均一な重力場で、真空中を自由落下する物体を考え、ある時刻  $t$  に高さ  $s$  なる点を通過するものとする、 $s$  と  $t$  との間には、

$$s = s_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

なる関係が成立する。ここに、 $g$  は求めるべき重力加速度であり、 $s_0$  は時刻が測定されはじめる時点 ( $t=0$ ) における物体の位置であり、 $v_0$  はその時点 ( $t=0$ ) において物体がもっている速度である。この式で、未知量は  $s_0$ 、 $v_0$  および  $g$  の3量であるから、物体が異なる3点の高さを通過する時刻を測定すると、 $g$  を求めることができる。いま、そのような高さを  $s_1, s_2$  および  $s_3$  とし、物体がそこを通過した時刻が、それぞれ、 $t_1, t_2$  および  $t_3$  であったとすると、 $g$  は、

$$g = \frac{2\{(s_1 - s_2)(t_3 - t_1) - (s_3 - s_1)(t_1 - t_3)\}}{(t_1 - t_2)(t_2 - t_3)(t_3 - t_1)}$$

で与えられる。物体の自由落下によって重力を測定する最初の試みは、目盛を刻んだものさしを落下させ、その刻線を写真に撮影して行なわれた。しかし、この方法によって得られた重力値の精度は、さほど高いものではなかった。そこで、最近では、落下する物体としては、たがいに直角に組みあわせた3枚の鏡で構成されているコーナー・キューブを用い、ヘリウム・ネオン安定化レーザーが放出する高純度の光の干渉を利用して、測定精度を高めることに成功している。

物体の自由落下によって重力を測定する際の問題点は、測定装置の振動と空気の抵抗である。前者すなわち測定装置が受ける振動は、測定装置全体を除震台の上に

のせることによって、その影響を除去している。しかし、後者すなわち落体の受ける空気の抵抗は、装置内を真空にしないかぎり、避けることはできない。いかに真空度を高めても、装置内には、わずかな残留空気が存在するものである。そのため、空気中を自由落下する物体の加速度は、残留空気の抵抗によって、減少する。したがって、測定される重力値は、見かけ上、小さくなるのが普通である。この影響を除去するために考案されたのが、物体の投げ上げ方式である。物体が投げ上げられるときには、残留空気の抵抗は、重力を見かけ上増大させる方向に働き、落下するときには、減少する方向に働く。したがって、物体がある点を通過して鉛直に上昇したのち、下降して同じ点を通過するまでの時間は、空気の抵抗に関係しない。いま、鉛直線上の2点を  $S_1$  および  $S_2$  とし、その高さを、それぞれ、 $s_1$  および  $s_2$  (ただし、 $s_1 < s_2$  とする) とする。投げ上げられた物体が点  $S_1$  および点  $S_2$  を上向きに通過する時刻を、それぞれ、 $t_1$  および  $t_2$  とし、この物体が落下するとき、点  $S_2$  および点  $S_1$  を下向きに通過する時刻を、それぞれ、 $t_3$  および  $t_4$  とすれば、前に掲げた自由落下の式を用いて、 $g$  は、

$$g = \frac{8s}{T_1^2 - T_2^2}$$

で与えられる。ただし、 $s = s_2 - s_1$ 、 $T_1 = t_4 - t_1$  および  $T_2 = t_3 - t_2$  である。したがって、 $s$ 、 $T_1$  および  $T_2$  を測定すれば、その地点の重力  $g$  が求められる。

### 3. 重力の絶対測定

18世紀の末に、ボルダなどが、単振子を用いて、パリ天文台で重力の絶対測定を試みて以来、重力の絶対測定を行なう気運は、急速に高まった。しかし、重力の絶対測定において、精度の点から信頼のおける最初の測定は、ポツダムの測地研究所(北緯  $52^\circ 22.86'$ 、東経  $13^\circ 4.06'$ 、高さ  $86.69$  m、1969年以降は、地球物理中央研究所の一部になっている)において、クーネンとフルトヴェングラが、可逆振子を用いて、1898~1904年に行なった重力の絶対測定であった。

今世紀にはいつてからも、重力の絶対測定は試みられたが、第2次世界大戦後の進歩には、とくに著しいものがある。とりわけ、1960年代の後半以降になると、重力の絶対測定は、長足の進歩を遂げた。そして、いまや、重力の絶対測定は、 $1 \mu\text{gal}$  (約  $3$  mm の高さに相当する) の測定精度に達しており、測定装置は、かつての定点型(大型)から可搬型(小型)へと改良されている。重力の絶対測定の技術は、つねに、その時代の先頭に位置しているので、重力の絶対測定の精度は、その時代の技術水準を表わしているといっても過言ではない。

ポツダムの測地研究所で行なわれた記念すべき重力の

表1 クーネンとフルトヴェングラー以降のおもな重力の絶対測定 (1898~1971年)

測定地名	測定点	測定期間	測定方法*	測定値 (gal)	測定者
ポツダム	測地研究所	1898~1904	RP	981.274 ±0.003	Kühnen & Furtwängler
ワシントン	国立標準局	1934~1935	RP	980.080 ±0.003	Heyl & Cook
デントン	国立物理研究所	1936~1938	RP	981.1815 ±0.0015	Clark
セーブル	国際度量衡局 (A <sub>2</sub> )	1951	FFM	980.916	Volet
レニングラード	連合計量研究所	1954~1959	RP	981.9188 ±0.0004	Agaleckij ほか
			FFM-FK	981.9215 ±0.0016	
			FFS	981.9229 ±0.0013	
			平均値	981.9192 ±0.003	
セーブル	国際度量衡局 (A <sub>2</sub> )	1957~1958	FFM	980.9280 ±0.0010	Thulin
オタワ	国立研究協議会	1958~1959	FFM	980.6132 ±0.0015	Preston-Thomas ほか
ヴェノスアイレス	ヴェノスアイレス大学	1958~1961	RP	979.6903 ±0.0008	Baglietto
				979.6867 ±0.0005	
				979.6940 ±0.0008	
プリンストン	プリンストン大学	1962	FFI	980.1604 ±0.0007	Faller
柿岡	計量研究所	1964~1969	FFM	979.9648 ±0.0001	狐崎ほか
ゲザースバーグ	国立標準局	1965	FF3-FK	980.1018 ±0.0005	Tate
デントン	国立物理研究所	1965	SW	981.18181 ±0.00013	Cook
セーブル	国際度量衡局 (A <sub>2</sub> )	1967~1970	SWI	980.925965 ±0.000006	佐久間**
ポツダム	測地研究所	1968~1969	RP	981.2601 ±0.0003	Schüler ほか
ブラウンシュヴァイク	連邦物理工学研究所	1969	FFS	981.2523 ±0.002	German
ベルリン	ドイツ計量商品試験所	1969~1970	FF3	981.26631 ±0.00050	Dietrich
シドニー	国立標準研究所	1970	FFI	979.6717 ±0.00019	Gibbins ほか
セーブル	国際度量衡局 (A <sub>2</sub> )	1970~1971	SWI	980.925988	佐久間***

\* RP : 可逆振子

FFM : 自由落下, 標準尺

FFS : 自由落下, 感光剤塗布棒

FFI : 自由落下, 運動干渉鏡

FF3 : 自由落下, 3点測定

FK : 落下箱

SW : 投げ上げ, ガラス球

SWI : 投げ上げ, 運動干渉鏡

\*\* 10組の測定の平均値

\*\*\* 6組の測定の平均値

絶対測定以降の世界における重力の絶対測定を、表1~6に示す。これらの表からもわかるように、重力の絶対測定においては、初期のころの可逆振子法に対して、最近では、電子技術の発達による時間計測の著しい進歩を反映した自由落下法や投げ上げ法が多く用いられている。そのなかでも、重力の絶対測定において、つねに中心的な存在であったのは、国際度量衡局において試みられている定点型重力絶対測定装置である。

#### 4. 定点型重力絶対測定装置による重力の絶対測定

##### (1) 国際度量衡局 (セーブル)

パリの郊外セーブルにある国際度量衡局の佐久間晃彦は、運動干渉鏡 (コーナー・キューブ) の投げ上げ方式を採用した重力絶対測定装置をつくり、国際度量衡局において、1967年以降、今日にいたるまで、重力の絶対測定を繰り返している。この装置は定点型 (固定型) で

あり、その主要部分および落体として用いているコーナー・キューブを、それぞれ、図1および2に示す。重力の絶対測定において、その測定精度を高めるためには、いろいろな点に細心の配慮が必要である。たとえば、測定誤差の原因となる地面の振動に対しては、装置全体を除震台の上のせ、装置に取り付けられた地震計の出力を除震台にフィード・バックして、装置に動く外来振動を除去している。また、重力の絶対測定の精度を高めるためには、その資料処理において、その地点の測定時刻における地球潮汐の詳しい情報を必要とするが、この点に関しては、1974年5月以降、同じ佐久間によって開発されたスプリング形式の重力計による地球潮汐の記録を利用して、改良が加えられている。

佐久間の重力絶対測定装置は、現在、1  $\mu$ gal の測定精度をもっていると考えられている。国際度量衡局における重力の絶対測定は、1967年8月にはじめられたので、

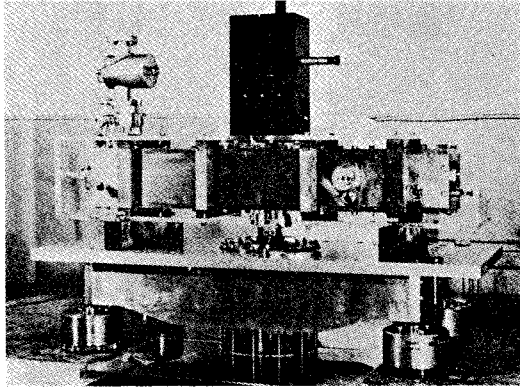


図 1 国際度量衡局の重力絶対測定装置の主要部分。

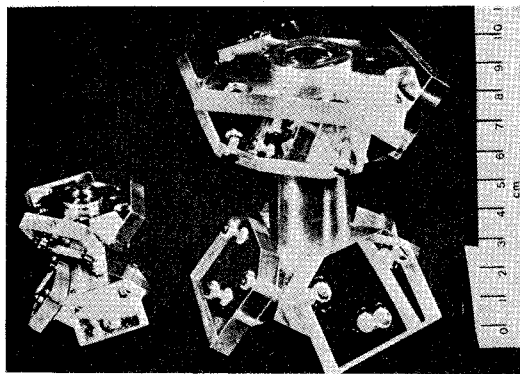


図 2 たがいに直交する 3 面の平面反射鏡をもつコーナー・キューブ (国際度量衡局)。  
(左) 高さ 5 cm, 質量 70 g の可搬用  
(右) 高さ 10 cm, 質量 430 g の定点用

すでに、11 年あまりにわたる測定資料が蓄積されている。それによると、セーブルでは、10 年間に約  $10 \mu\text{gal}$  の重力変化が検出されており、1969 年が最小値であった。重力変化の原因をはっきりさせるためには、少なくとも 18 年以上の長期間にわたる連続的な重力測定が必要であり、国際度量衡局では、今後とも、引き続いて、重力絶対測定装置による重力測定が続けられるはずである。

佐久間は、現在、第 2 世代の重力絶対測定装置を製作中であり、完成の暁には、新しい重力絶対測定装置を用いて、セーブルと水沢の両重力測定点を結合することを計画している。佐久間は、また、スプリング形式の相対測定用重力計でも、いま、その第 2 号機を製作中である。

## (2) 緯度観測所 (水沢)

1972 年以来、緯度観測所は、国際度量衡局と共同で、佐久間晃彦の重力絶対測定装置をもつ重力測定点を水沢に新設することに取り組んできた。緯度観測所に設置される重力絶対測定装置は、国際度量衡局と日本の双方で部品が製作調達され、すでに組み立てをおわり、いま、

測定準備の最終段階にあることは、衆知のとおりであり、1978 年末までに、最初の測定結果が得られるものと期待されている。

重力の絶対測定点を設置することの重要性は、国際重力委員会の第 7 回総会 (1974) で指摘され、国際測地学協会の第 16 回総会 (1975) で確認されている。それによると、緯度観測所と同じような定点型重力絶対測定装置を設備された常設観測所を、少なくとも 10 点、早急に新設することを勧告している。その際、常設観測所を世界中に効果的に分布させることが必要なことは、いうまでもないことである。この勧告に応じて、現在、オーストラリア、カナダ、アメリカおよび西ドイツなどで、定点型重力絶対測定装置をもつ常設観測所の設置計画が、進行中である。

## 5. 可搬型重力絶対測定装置による重力の絶対測定

### (1) G. Colonnetti (トリノ)

トリノ度量衡研究所“G. Colonnetti”で実用化された可搬型重力絶対測定装置は、佐久間晃彦の指導のもとにつくられたもので、国際度量衡局の定点型重力絶対測定装置の小型版である。したがって、この可搬型重力絶対測定装置の原理は、定点型重力絶対測定装置のそれと同じ光学コーナー・キューブの投げ上げ方式を採用しているが、つぎの 3 点に改良が加えられている。すなわち、第 1 に、長さの基準尺を用いることなく、コーナー・キューブの運動距離 (約 30 cm) を安定化レーザーの干渉縞計数方式で測定している。第 2 に、重力加速度の測定が、約  $0.1 \text{ Pa}$  (約  $1 \mu\text{mHg}$ ) という真空状態でなされる。第 3 に、測定装置の振動の影響は、干渉計の基準反射鏡となっているコーナー・キューブに取り付けられた周期約 20 秒の長周期地震計によって、自動的に補正される。この可搬型重力絶対測定装置の外観を、図 3 に示す。G. Colonnetti では、現在、1 台の装置が稼働中であり、その測定精度は  $\pm 1 \times 10^{-8}$  (約  $\pm 10 \mu\text{gal}$ ) よりも良好であり、すでに、 $10^{-9}$  の精度に達している。この装置による 1 測定点での重力の絶対測定は、空調の整った測定室と 2 名の測定者として、1 週間以内に短縮されている。

G. Colonnetti の可搬型重力絶対測定装置によって行なわれた重力の絶対測定を、表 2 に示す。その結果によると、各測定における出発測定点での出発時と帰着時の測定値の差は、 $10 \mu\text{gal}$  よりも小さく、各測定点での繰り返し測定による測定値の再現性は、 $10 \mu\text{gal}$  よりも良好であった。表 2 に示されている各測定点の重力値は、最新の世界重力網である国際重力基準網 1971 に与えられているが、測定によって得られた重力値と国際重力基準網 1971 に収録されている重力値との差は、 $0.1 \text{ mgal}$  以内であった。こうして、G. Colonnetti の可搬型重力

表2 G. Colonnetti の可搬型重力絶対測定装置によるノルウェーからイタリアにいたる 17 測定点での重力の絶対測定 (1976~1977年)

測定地名	測定点*	測定年	測定回数	測定値 (gal)
セーブル	国際度量衡局(6号室)	1976	98	980.925892±0.000020
ブリュッセル	ベルギー王立観測所(21604A)	1976	94	981.117301±0.000018
テディントン	国立物理研究所(18110A)	1976	135	981.181850±0.000026
セーブル	国際度量衡局(6号室)	1976	85	980.925902±0.000017
トリノ	度量衡研究所(E9号室)	1976	72	980.534256±0.000026
イェーヴレ	人工衛星制御室(地下室)	1976	149	981.923527±0.000019
ハンメルフェスト	消防署(28603A)	1976	113	982.617588±0.000017
ソダンキュレ	ピティオバラ気象台(重力計室)	1976	113	982.362206±0.000025
ヴァーサー	ヴァーサー商品取引所(地下室)	1976	123	982.090788±0.000017
イェーヴレ	人工衛星制御室(地下室)	1976	79	981.923533±0.000017
ヨーテボリ	チャーマー技術学校(54号室)	1976	107	981.718774±0.000020
コペンハーゲン	測地研究所(地下室)	1976	100	981.549602±0.000023
イェーヴレ	人工衛星制御室(地下室)	1976	41	981.923524±0.000020
トリノ	度量衡研究所(E9号室)	1976	38	980.534251±0.000025
セーブル	国際度量衡局(6号室)	1977	82	980.925896±0.000019
ミュンヘン	ドイツ測地研究所(17981A)	1977	106	980.723140±0.000018
ハンブルク	地球物理観測所(21639A)	1977	103	981.363714±0.000024
ブラウンシュヴァイク	連邦物理工学研究所(120号室)	1977	100	981.252941±0.000020
ヴィースバーデン	ヘッセン陸地測量省(K2号室)	1977	101	981.036876±0.000020
セーブル	国際度量衡局(6号室)	1977	84	980.925906±0.000017
トリノ	度量衡研究所(E9号室)	1977	90	980.534259±0.000025
ローマ	ローマ国立地震観測所(23号室)	1977	109	980.261402±0.000022
ナポリ	カポディモンテ天文観測所(車庫)	1977	102	980.226997±0.000028
カタニア	火山研究所(地震計室)	1977	97	980.034800±0.000020
トリノ	度量衡研究所(E9号室)	1977	85	980.534259±0.000030

この表に掲載の重力の絶対測定のほか、1977年には、アメリカ合衆国内におけるつぎの6地点での重力の絶対測定もある。

ベッドフォード(15221A), デンバー(11994H)  
 ビスマルク(15560A), アラモゴルド(11926A)  
 サンフランシスコ(12172A), マイアミ(08150C)

また、スイスでは、チューリヒとグールでの重力の絶対測定もある。

\* 括弧内の5桁の数字と1桁の英字は、国際重力測定中央局の登録番号を示す。

絶対測定装置は、装置自体の信頼度が高いことと、国際重力基準網1971の精度が予想していた値(0.2mgal)よりも高いことを、同時に証明した。

## (2) ソビエト科学アカデミー(モスクワ)

1970年代のはじめに、ソビエト科学アカデミーのシベリア支部の自動電気計測研究所で開発されたレーザー重力計の原理は、真空中を自由落下する反射鏡を測定する方式である。この重力計を用いて実施された重力の絶対測定を、表3に示す。その結果によると、測定によって得られた重力値と国際重力基準網1971に収録されている重力値との差は、ほぼ、+0.05mgalであり、つねに、前者が後者よりも大きかった。

とくに、セーブルの国際度量衡局では、佐久間晃彦の

定点型重力絶対測定装置、G. Colonnetti の可搬型重力絶対測定装置、および、ソビエト科学アカデミーの可搬型重力絶対測定装置による重力の絶対測定が行なわれているので、これら3測定装置による測定結果を、相互に比較することができる。その結果を、表4に示す。それによると、3種類の重力絶対測定装置によって得られたセーブルA<sub>3</sub>点(可搬型装置による重力測定点)の重力値のばらつきは13±10μgalであり、したがって、平均値からの最大偏差は±8μgalであった。

## (3) その他の可搬型重力絶対測定装置

アメリカの空軍地球物理研究所(もとの空軍ケンブリッジ研究所)でファラーとハモンドによって開発された可搬型重力絶対測定装置は、運動干渉鏡の自由落下3点

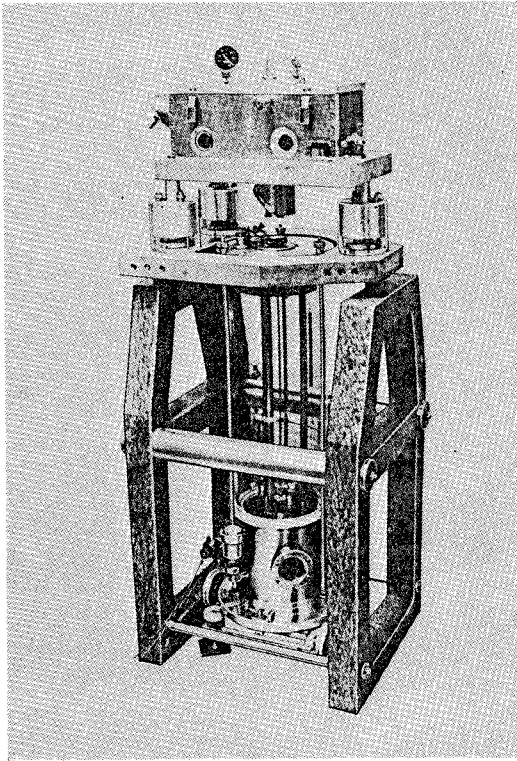


図3 G. Colonnettiの重力絶対測定装置の主要部分。

測定方式を採用している。この装置は、落体の落下距離が約1mで、携行に便利なように設計された最初の重力絶対測定装置であった。この装置によって、1968~1969年に得られた測定結果を、表5に示す。ファラーとハモンドによる重力の絶対測定の結果は、国際重力基準網1971の設定に大きな貢献をなしたことは、特記すべきことである。この測定装置は、いまは、ファラーとハモンドが、それぞれ独立に、第2世代の携帯用重力絶対測定装置をつくるべく、改良に取り組んでいる。ハモンドたちは、測定装置の大きさを、第1世代のそれのおおよそ

半分とし、重量を400~450kgとすることに成功し、現在、最初の野外測定を実施中である。一方、ファラーたちは、重力測定の際の信頼度をより高めるために、測定装置の大きさと重量を一層小さくすることを試みつつあり、最終的には、各測定点において、1日以内の測定で、2~3  $\mu\text{gal}$  の絶対精度を得ることを目標にした携帯用かつ計算機制御の測定装置に仕上げる予定である。

東京大学地震研究所で開発された可搬型重力絶対測定装置は、その第1号機によって、測定装置を測定現地に運搬して行なう最初の実用測定に、すでに成功しており、いま、その第2号機が製作中である。この測定装置は、自由落下方式を採用している。重力絶対測定装置では、落体として使用される干渉計の反射鏡として、多くはコーナー・キューブを使用しているが、この装置では、キャッツ・アイを落体として使用し、装置の小型軽量化に成功している。この装置による重力測定の利点は、その記録方式にあり、落下中の落体と装置自体との位置関係を逐一記録することにより、のちに行なわれる資料処理の過程で、外来振動や装置の動揺などという装置への擾乱の影響を除去することができることである。この測定装置による最初の現地測定は、1976年7月に、長野市松代の地震観測所観測坑内において実施された。その結果を表6に、また、測定装置の外観を図4に示す。測定の結果によると、この装置の野外における測定精度は、装置製作の目標であった0.01 mgalの域に達しているものと推定される。

可搬型重力絶対測定装置は、北京でも試作中であり、現在、 $\pm 0.1 \text{ mgal}$ の測定精度に達しているといわれているが、その詳細は不明である。

### 6. 重力の絶対測定の実行計画

重力の絶対測定における精度が、きわめて短い期間に、1 mgal から  $1 \mu\text{gal}$  へと3桁も向上した結果、それに伴う新しい研究計画が脚光を浴びてきた。そのなかで、すでに研究計画が公表されているおもしろいものは、つぎ

表3 ソビエト科学アカデミーのレーザー重力計による重力の絶対測定 (1976~1977年)

測定地名	測定点	測定年	測定回数	測定値 (gal)
レドボ (モスクワ)	測地写真測量研究所 (5035)	1976	39	981.551382 $\pm$ 0.000020
ポツダム	地球物理中央研究所 (S-13)	1976	24	981.261423 $\pm$ 0.000016
レドボ (モスクワ)	測地写真測量研究所 (5035)	1976	19	981.551377 $\pm$ 0.000017
シンガポール	シンガポール大学 (重力絶対測定点)	1976	22	978.069792 $\pm$ 0.000018
レドボ (モスクワ)	測地写真測量研究所 (5035)	1977	23	981.551380 $\pm$ 0.000017
セーブル	国際度量衡局 (A <sub>3</sub> )	1977	33	980.925938 $\pm$ 0.000016

この表に掲載の重力の絶対測定のほか、1975年には、レドボとタリンとツヴィリシにおける重力の絶対測定もある。

表 4 3 種類の重力絶対測定装置によって得られた国際度量衡局 A<sub>3</sub> 点 (18082A) における重力測定値の比較

測 定 装 置	測 定 年	測 定 値 (gal)
佐久間晃彦の定点型重力絶対測定装置	1976~1977	980.925926±0.000007
G. Colonnetti の可搬型重力絶対測定装置	1976~1977	980.925925±0.000010
ソビエト科学アカデミーのレーザー重力計	1977	980.925938±0.000016
単 純 平 均 値		980.925930±0.000005
荷 重 平 均 値		980.925927±0.000006

表 5 ファラーとハモンドの可搬型重力絶対装置による重力の絶対測定 (1968~1969 年)

測定地名	測 定 点	測 定 年	測 定 値 (gal)
ゲザーズバーグ	国 立 標 準 局 (11687V)	1968	980.101271±0.000055
テイントン	国 立 物 理 研 究 所 (18110A)	1968	981.181891±0.000050
セーブル	国 際 度 量 衡 局 (18082A)	1968	980.925986±0.000041
ベッドフォード	空 軍 地 球 物 理 研 究 所 (15221A)	1968~1969	980.378685±0.000042
フェアバンクス	アラスカ大学地球物理研究所 (23147E)	1969	982.235007±0.000042
デンパー	デ ン パ ー 大 学 (11994A)	1969	979.597716±0.000042
ミッドルタウン	ウェスレアン大学スコット物理研究所 (15212A)	1969	980.305318±0.000041
ボゴタ	コロンビア国立大学 (00844C)	1969	977.389979±0.000087

この表に掲載の測定結果は、つぎの2つの資料とともに、国際重力基準網 1971 の設定に際して用いられた。

測定地名	測 定 点	測 定 年	測 定 値 (gal)	測 定 者
セーブル	国 際 度 量 衡 局 (18082A)	1967~1970	980.925957±0.000030	佐久間
テイントン	国 立 物 理 研 究 所 (18110A)	1965	981.18184 ±0.00013	Cook

表 6 東京大学地震研究所の重力絶対測定装置による重力の絶対測定 (1976 年)

測定地名	測 定 点	測 定 年	測 定 回 数	測 定 値 (gal)
松 代	地 震 観 測 所 (観測坑)	1976	21	979.770131±0.000010

のとおりである。

#### (1) 高精度世界重力網の確立

各大陸あるいは広い国で、それぞれ、2~3 点ずつ、 $\mu\text{gal}$  の精度で、重力の絶対測定を短期間に実施すれば、重力の絶対値を基礎とする高精度重力基準網を確立することができる。この計画は、情報の交換が困難なアフリカや極東や南極のような地域で実行されるならば、とりわけ有効であり、この計画が本当に実行されれば、2~3 年のうちに、新しい高精度世界重力網を確立することができるであろう。

高精度世界重力網は、測地学における基準系の維持にも、大いに役に立つ。全世界的な規模で測定される重力

絶対値の時間的な変化は、地心の動きやジオイドに最適な地球の形を決める基礎パラメーターの変化などを監視するのに用いられるはずであり；したがって、この種の情報は、高精密測地学において、きわめて重要である。さしあたり、世界中に均等に分布する重力測定点 25 点において、少なくとも 10 年にわたって蓄積される資料を用いれば、たとえノイズ・レベルが  $10 \mu\text{gal}$  であっても、地球力学における永年変化に対して、測地基準系を監視するのに十分な精度の情報が、重力の絶対測定によって与えられるはずである。

#### (2) アフリカにおける重力の絶対測定

1976~1977 年にトリノ度量衡研究所 "G. Colonnetti"

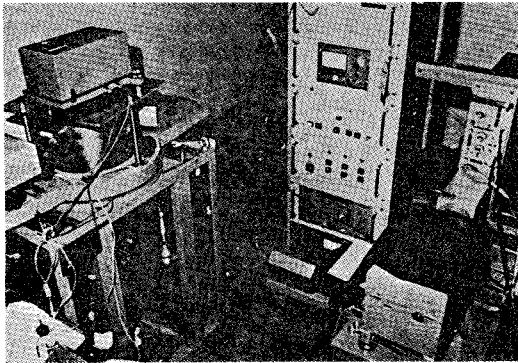


図 4 地震研究所の重力絶対測定装置。  
(左) 主要部分 (右) 電源と記録装置

の可搬型重力絶対測定装置を用いて実施されたハンメルフェスト（ノルウェー）からカタニア（イタリア）にいたる路線上の重力の絶対測定を、カタニアからケープタウン（南アフリカ共和国）に延長する計画は、1977年3月にラゴス（ナイジェリア）で開催されたアフリカ測地委員会の初会合でも取りあげられ、21測定点が候補にあげられ、現在、具体的な実行計画が立案されている。

### (3) ジオトラバース

重力の絶対測定点は、同じ測定精度 ( $\mu\text{gal}$ ) をもつ重力の相対測定と組みあわせることによって、1つの地域あるいは1つの測線を制御するのに、利用することができる。このような測線は、通常、ジオトラバースと呼ばれており、現在、つぎのような計画が立案されている。すなわち、スイスでは、バーゼルとキャッソを結ぶジオトラバースに重力の絶対測定点4点を結合し、イタリアでは、トリエステとフリーウリ地域を結ぶ路線、ローマからアペニン山脈を横切ってナポリにいたる路線、および、カタニアからシチリア島を横断する路線の3つのジオトラバースに、それぞれ、重力の絶対測定点を結合しようとしている。

## 7. おわりに

重力の絶対測定の精度は、いまや、 $1\mu\text{gal}$  に達している。これは、地球表面での重力値の約  $10^{-9}$  にあたり、また、すでに述べたように、地球の表面近傍での高さに換算すれば、約  $3\text{mm}$  に相当する。重力の絶対測定の精度が  $1\mu\text{gal}$  に達したことは、単に、ある地点の重力の絶対値の測定精度が向上したという計測上の重要性だけにとどまらないで、重力測定、度量衡学、地球力学および天文学の分野で、新しい紀元を開くであろう。すなわち、重力測定の分野では、重力絶対測定装置と相対測定用重力計とを組みあわせることによって、前者は後者に対してドリフト量の見積りとスケール定数の検定を提供し、逆に、後者は前者に対して、連続的に、地球潮汐の

真の補正量を提供するので、精密測定において、相互に利益を与えあうであろう。また、世界の各地で行なわれる重力の絶対測定の資料をもとにして、 $2\sim 3\mu\text{gal}$  の絶対精度をもつ新しい世界重力網を確立することを可能にするであろうし、繰り返して行なわれる重力の絶対測定によって、重力の永年変化が検出されるであろう。度量衡学の分野では、重力の絶対値は、圧力標準や温度標準や電流標準などを規定するのに役だつなど、精密な重力値が要求されるすべての問題の解決に、便宜を与えるであろう。さらに、地球力学や天文学の分野では、重力の絶対測定は、地球の質量中心に関する測定点の位置の変動、地球内部の質量の分布と移動における変動、大陸移動や地殻変動や平均海面の変動、地震活動や火山活動に伴って生ずる物質の移動や物性の变化、万有引力定数の変動、地球の形の永年変化、極運動、あるいは、太陽系の力学像の精密化などの研究に、有力な手がかりを提供することになろうと期待されている。

1971年に設定された国際重力基準網 1971は、最新の世界重力網であるが、この重力基準網は1970年までの重力測定の資料を用いて制定されているので、その絶対精度は  $0.2\text{mgal}$  程度であるといわれている。しかし、その後に行なわれた重力の絶対測定の結果を国際重力基準網 1971に収録の重力値と比較することによって、国際重力基準網 1971の絶対精度は、所期の精度よりは良好な  $0.1\text{mgal}$  程度であり、地域によっては、 $0.05\text{mgal}$  にさえ達していることが証明されているが、この精度では、国際重力基準網 1971を重力の時間的変化の研究に供しうるには、不十分であるといわざるをえない。重力の絶対測定の精度が  $1\mu\text{gal}$  に達した昨今では、重力の時間的変化の研究に耐えうる  $1\mu\text{gal}$  の絶対精度をもつ全地球的な絶対重力網の設定が望まれている。

(1978年12月)

## 掲 示 板 1

### 天文学将来計画についてお願い

天文学研究連絡委員会の将来計画小委員会では、将来計画についてのご意見をできるだけ多くの方々より募ることになりました。ある程度以上関係者の集まっている組織や研究会には順次系統的に連絡がいくことになっておりますが、まだ連絡を受けておられない場合には、最寄の小委委員にお問合せ下さい。あとの整理を簡便にするために、意見を書くフォーマットも決まっております。ご意見を3月20日までに小委委員長宛お送り下さい。3月下旬に小委員会で整理を行い、春季年会直後に最終整理を行って、6月の研連委員会に資料として提出します。整理はいわゆるKJ法によって行います(中公新書No. 136参照)。小委員は海野・弓・古在・小暮・高窪・森本・奥田(治)・小平です。

小委委員長 海野和三郎, 連絡係 小平桂一