

精度10億分の1の重力絶対測定

細山謙之輔*

1. はじめに

重力とは地球上の静止物体と地球との間に作用する力であり、地球自転による遠心力と地球の引力との合力である。力はダインで表わされ、ディメンジョンは $\text{g}\cdot\text{cm}/\text{sec}^2$ であるから、これはその物体の質量で割れば加速度の単位になる。重力加速度を g で表わし、単に重力と呼んでいることが多い。

我々の経験する事象はすべて重力場の中で起っているので、重力値及びその変化を知ることは最も基本的なも

のと云わねばならぬ。

振子による重力絶対測定が本格的に行なわれたのは東ドイツのポツダム (1895~1904) であり、ここが国際重力基準点となった。我国では1899年に長岡、新城、大谷らによってレブソルド可逆振子で京都、金沢、東京、水沢の4ヶ所で重力絶対測定が行なわれた。1899年は水沢に緯度観測所が創設された年であり、非常に意義深いものがある。当時の測定精度は100万分の1 (10^{-6}) に過ぎないものであったが、世界に遅れることなく重力絶対測定が行なわれたことは特筆すべきことである。

近年重力測定の精度が向上するにつれ、物理学、精密計測学上の標準値の精度が高まると共に、天文学及び地球物理学に新しい分野がひらけてきた。例えば、地球の自転速度が0.07秒/日変わったとすれば遠心力の変化によって重力が変わる。緯度 $39^{\circ}1\text{N}$ の地点の重力は $0.000002 \text{ cm}/\text{sec}^2$ (ガル) = 2 マイクロガル 変る筈である。また極が 0.3 移動した場合、或いは $39^{\circ}1\text{N}$ の地点が子午線に沿って 0.3 移動したとすると、約3マイクロガルの重力変化が現われる。重力の大きさは地表で約980ガルであるから、マイクロガルの変化は10億分の1 = 10^{-9} に当る。従って 10^{-9} 以上の精度で重力測定が出来れば上述の諸現象を検出できることを意味している。

単位質量にはたらく地球の引力は

$$g = GM/R^2$$

で表わされる。 G は万有引力常数、 M は地球の質量、 R は地球中心からの距離である。 G は単位質量をもつ2つの物体が1cm離れている時にはたらく引力の大きさであり、物体が何んであろうがその値は一定で、 $6.673 \times 10^{-8} \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{sec}^2$ とされている。しかしながら、膨張宇宙の理論によれば G は時間と共に変り得ることになるが、 G が変化すると地球表面の温度が変り、太陽内部の平衡状態も変ることになって、宇宙の歴史に大きな影響を及ぼすことになりかねない。重力測定の精度向上はこうした点についても何らかの回答をもたらすことになるのではなからうか。

2. 重力絶対測定の原理

バネばかりに錘を吊り下げるとバネは伸びてある長さで釣合い、重力が変わるとバネの伸びが変わる。この大きさを重力の変化量と対応をつけておけば重力変化の測定に用いることができる。一般に用いられている重力計はこの原理によって作られたものである。ところが、こ

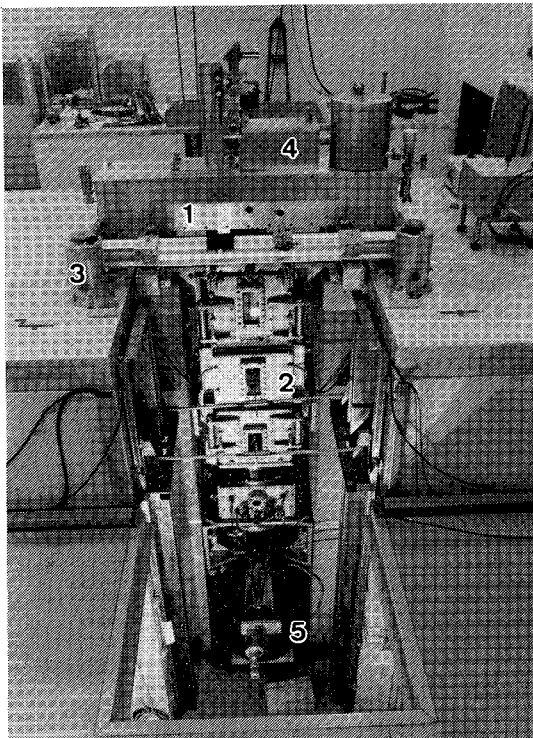


写真 1 1. 横真空槽
測長エタロン、光波干渉光学系
精密水銀温度計
2. 縦真空槽
投てき装置、頂点観測装置
軌跡記録装置
3. 除震台
4. 振動計
5. イオンポンプ

* 緯度観測所 K. Hosoyama: Absolute Gravimetry with Accuracy of 10^{-9} .

の方法では直接重力の大きさそのものを求めることはできない。加速度の単位である長さや時間の絶対測定によって重力そのものを求める方法を重力の絶対測定という。従って、その測定精度は長さや時間の測定精度で決まるものである。

物体を手放してから 1m 落下するのに約 0.45 秒かかる。重力絶対測定が始められた頃は、1m の長さを 100 万分の 1 の精度で測定することはできたが、0.45 秒の 100 万分の 1 即ち $0.45 \mu\text{s}$ (マイクロ秒) まで測定することができなかった。そこで、時間の精度を上げるため、振子重力計が用いられた。

長さ l の単振子が自由振動する時の周期 T は、

$$T=2\pi\sqrt{l/g}$$

で与えられるから、周期を測定すれば重力 g が求まる。振子は長時間振動を続けるから、振動回数を多くとれば時間の精度が上がる原理である。しかしながら、摩擦のない支点、重さのない糸、大きさのない錘という理想的な単振子は存在する筈がなく、この方法では 1000 万分の 1 即ち 10^{-7} の精度を超える可能性はなかった。

水晶時計や原子時計により時間の精度が極端に向上した今日、物体の自由落下による重力測定の方法が有利となって来たのであるが、今度は長さの測定精度に問題が生じてきた。しかし、それも図のようにマイケルソン干渉計を用い、鏡の移動によって起る光波の干渉縞(フリンジ)を光電検出し、フリンジの出現数を電子カウンターでカウントする方法を用いることによって解決した。

落下の途中で平面鏡が傾くと干渉が起らなくなってしまうが、平面鏡を平行のまま落すことは先ず無理なことである。そのため、わずかな傾斜があっても光束をいつでも平行に戻すような反射鏡のシステムを用いる。それはキューブ・コーナーと呼ばれるもので、互に直角な鏡を 3 枚組合せたものである。これと同じような作用をするものとしてキャッツアイも用いられる。図 1 に 2 つの光学系を示す。

米国のハモンド・ファーラーはレーザーの干渉系を用

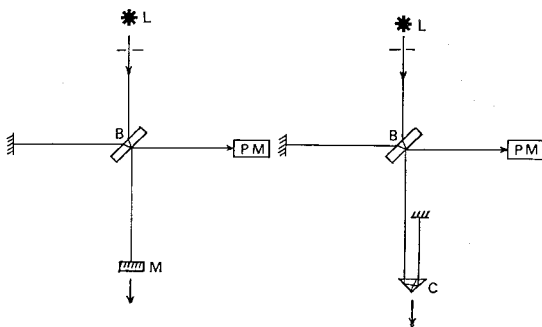


図 1 左: 平面鏡の落下の場合
右: キューブ・コーナーの落下の場合

いた自由落下法による重力絶対測定を行っており、坪川家恒は測定方法に工夫を加え改良に努めているが、現在まで 10 億分の 1 (10^{-9}) の精度の測定に成功していない。

自由落下方式は、物体を初速度 0 で落下させる困難さや、真空槽内の気体分子による抵抗、落下中の物体の傾斜や回転、装置の振動除去等に若干の問題が考えられた。これに対し、物体を鉛直上方に打上げることによる対称的な自由上昇、落下の途中で、通過距離及び時間を測定することの利点を生かし、英国の国立物理研究所、フランス国の国際度量衡局で研究が行なわれた。

3. 精度 10 億分の 1 の重力絶対測定

重力を 10 億分の 1 (10^{-9}) の精度で測定するためには長さを 10^{-9} 、時間を 0.3×10^{-9} の精度で測定しなければならない。1m の 10^{-9} は 1nm (ナノメートル) であるが、これは光の波長の約 600 分の 1 であり、ほぼ分子の大きさに相当する。時間については、100 億分の 1 秒まで測定することに相当するもので、これらが決して容易でないことは理解されるであろう。

国際度量衡局の佐久間晃彦は、キューブ・コーナーをゴム紐の弾力で鉛直に打上げ、自由上昇と落下の間に設定された 2 点を通る時間を測定する方法で、始めて 10^{-9} 精度の重力絶対測定に成功した。緯度観測所では 1974 年から 3 ケ年計画で佐久間式重力絶対測定装置の製作をし、目下調整中である。この装置について簡単

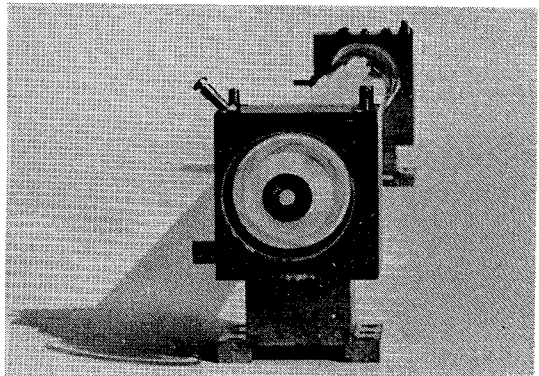
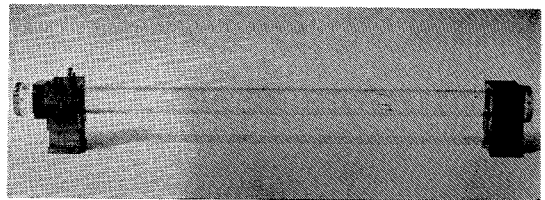


写真 2 長さエタロン
長さ: $812661.42 \mu\text{m} \pm 0.006 \mu\text{m}$
外径: 45mm
光路穴径: 6mm

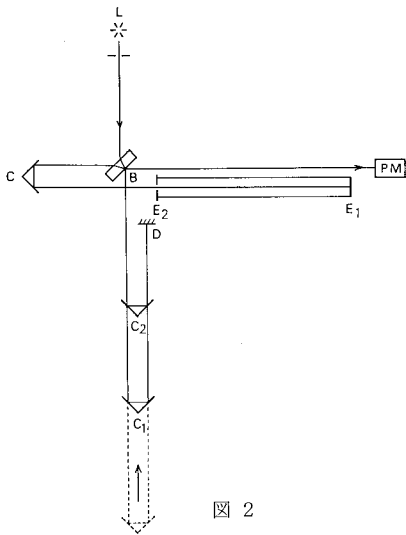


図 2

に紹介をしたい。

長さの基準としては温度の膨張係数の極端に小さいゼロジュール・エタロンを用いる。エタロンは直径 4.5 cm 長さ約 81 cm のパイプ状のものであり、図 2 の E_1 及び E_2 は両端の反射面である。 E_1 は内側が反射面になっており、 E_2 は外側が反射面で中央に直径 6 mm の穴が開いている。光は E_2 面で反射すると共に、穴を通して E_1 に到りそこでも反射する。

L から出た白色光の光束はビーム・スプリッター B で 2 つにわかれ、1 つは固定されたキューブ・コーナー C で屈折して E_1 に到達し、そこで反射して同じ光路を通過して B へ戻る。一方は B から下方へ向い、投てきされたキューブ・コーナー C_1 で屈折し、固定鏡 D で反射して同じ光路を通過して B へ戻る。ここで 2 つの光は重なり干渉し、ここで反射して光電子増倍管 (フォトマル) PM へ入る。フォトマル出力が最大になるのは、B で分れた光路長が等しくなった時、即ち $\overline{BCE_1CB} = \overline{BC_1DC_1B}$ 及び $\overline{BCE_2CB} = \overline{BC_2DC_2B}$ の時である。打上げられたキューブ・コーナーが C_1 の位置に達すると第 1 回の信号が現われ、 C_2 に来ると第 2 回の信号が出る。更に上昇して頂点に達し落下して C_2 及び C_1 に来ると同様な信号が得られる。 C_1 と C_2 の距離は E_1 と E_2 の長さの正確に 1/2 である。 $\overline{E_1E_2}$ の長さを正確に測定しておけば、空間にその 1/2 の距離をもつ C_1 と C_2 の 2 つのステーションが光学的に作り出されることになる。この様子を、時間軸を横に引き伸ばして示せば図 3 のようになる。

A, B, C, D は夫々フォトマル出力が最大になる点であり、 $\overline{C_1C_2} = H$ はエタロンの長さの 1/2 である。P を頂点とし、 \overline{APD} の時間を T_1 、 \overline{BPC} の時間を T_2 とすれば、重力 g は

$$g = 8H / (T_1^2 - T_2^2)$$

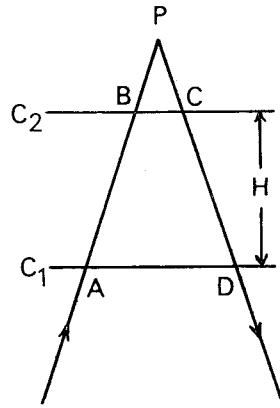


図 3

で求められる。

キューブ・コーナーの打上げの高さは約 1 m であるが、 C_1 ステーションに到達するまでの間に打上げによる振動が消えるようになっている。 \overline{AB} 、 \overline{BPC} 、 \overline{CD} を通過する時間は夫々約 0.2 秒であり、 C_2 ステーションから頂点までは約 5 cm、 H は約 49 cm である。

さて、測定の原理はこのように単純であるが、 10^{-9} 精度の測定を実現させるためにどのような点に注意されて来たか、緯度観測所の重力絶対測定装置の特徴をあげて理解を仰ぎたい。

(1) 空間距離を正確に与えるため、横真究槽に入っている長さエタロンを

厳密に測定する。物指しとしては、国際度量衡局で作られ検定された沃素安定化レーザーの波長を用いる。

(2) キューブ・コーナー (約 450 g) の投上げに特殊ゴム紐の弾力を用いる。スプリング等では飛ばし中の回転と傾斜を除くことが難かしい。ゴム紐を用いたことがこの方法を成功させた 1 つの大きな原因であった。

(3) 投てきに伴いキセノン・フラッシュランプを、キューブ・コーナーが 2 つのステーションにかかる寸前で点灯し最大の光度を得るように、トリガーと遅延の回路を設けてある。キセノン白色光の光束による干渉フリンジは高速度フォトマルで検出し、干渉波形をオシロスコープに映し、ポラロイドカメラで撮影する。ここには同時に、原子時計で較正された水晶時計の 20 MHz の時間信号を入れる。

(4) ステーション間のキューブ・コーナーの運動時間はフリンジ・カウンターによって測定される。図 3 の AB 間 t_1 、BC 間 t_2 、CD 間 t_3 と、 $t_4 = t_1 + t_2 + t_3$ が求められ、最後のチェックの式が必ず成立つよう、国際度量衡局製の特種カウンターを用いる。

(5) 投てき装置は 10^{-7} mmHg という高真空の縦真究槽の中で作動する。

(6) エタロンが上下に振動すると空間のステーション間隔が変わるので、短周期の器械振動や長周期の振動を検出し、ピエゾに逆位相の電圧をかけて振動を補償する除振装置を設け、横真究槽をその上に設置してある。0.01 ミクロンの上下動は 10^{-8} のオーダーの重力値にきいてくるので、補正としては大きなものであり、重力測定の精度を左右するものの一つである。

(7) 除去しきれない振動を横真究槽の上のせた振動計で検出し、記録する。上下変位検出のために光波干渉装置を適用している。

(8) キューブ・コーナーは重心と光学的中心が10ミクロン以上離れないように調整されており、表紙写真の下方の3枚の鏡はバランスをとるため対称的につけられている。投てきによって0.01ラジアン/秒以上の回転と、0.2ナノメートル/秒以上の水平速度にならないように、事前の調整を厳密にしなければならない。また、キューブ・コーナーの運動の軌跡と、頂点の高さは同時に記録される。

(9) 横真空槽はジュラルミン、縦真空槽はステンレス18-8の非磁性体で作られており、その他の金属材料もすべて非磁性のものである。磁場を発生するものはニューメタルで覆ってシールドし、またキューブ・コーナーの運動部分もニューメタルで覆ってある。更に静電荷を生ずるゴム紐の1部はチタンチューブで覆い、ゴム紐と連結する下端は金属スプリングにし帯電を避けている。

この他、細かな点まで注意を払うことによって始めて 10^{-9} の精度が期待できるものであることを察して頂きたい。

4. おわりに

重力は時々刻々変化している。例えば、月、太陽の起潮力によって重力は周期的に変化しており、その大きさは半日変化にして 10^{-7} のオーダーである。半無限に広

がった範囲の地下水を考えれば、10cmの水位変化は約4マイクロガルの重力変化を与え、地面が1cm上下しても約3マイクロガル変る。また、大気の質量変化によるものは、気圧10mbの変化に対して約3マイクロガルになる。これらは何れも 10^{-9} の重力測定には考慮しなければならない大きさである。

上述の方法で求める重力値は瞬間の絶対値であるから、どのような条件のもとで測定されたかを、観測日時と共に記録しなければ、それを基準値として実用に供することはできない。

編集部より

最近は天文学の発展にともない専門化、細分化が進む傾向が見られますが、このような時にこそ自分の分野のことを他の分野の人にもわかってもらえるように情報を提供し、相互交流を深めることは必要なことと思います。天文月報では情報交換の場としての雑報欄を重視し、もっと充実させようと計画しています。会員の方々の各々の分野のニュースや新着論文の紹介等を原稿用紙2, 3枚程度にまとめて天文月報編集部までお送り下さい。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価240円(〒45円) 77-10月号・9月5日発売!

●10月号おもな内容

- ★久しぶりの望遠鏡テストは新しく発売された6cm屈折経緯台です。
- ★望遠鏡は片目で見るものと相場がきまっていますが、両目で見たら……?顕微鏡の双眼装置を利用したレポート、阿部国臣氏です。
- ★火球の落下経路の分析、むずかしい話のようですが、5月10日に北関東から東北地方へ向って飛び、隕石が落ちたのでは?と騒がれた例の大火球の飛び方を、多勢の観測者から分析した杉本智さんの発表。
- ★土星の衛星のひとつが、有名な輪の影にかくれる……

惑星を たずねて

天文ファンに理解の深い、惑星専門の著者の手になる解説。昨年「天文ガイド」に連載された記事をもとに、最新の情報を加え、写真や図を豊富に入れて、新しい惑星像と、いろいろな学説をわかりやすく紹介しています。

水星と月の類似、月と火星のクレーターの相違、その成因、火星の大気存在など、生き生きとした筆で、惑星の姿が眼前にうかんできます。天文ファン基本図書の一冊です。おもな内容=太陽系の概観/月・惑星ロケット/水星/金星/地球/月/月ロケット/火星/火星の大気と生命/小惑星と隕石/巨人惑星/惑星と外縁/彗星と流星

●宮本正太郎著/B6判・213ページ・1300円発売中

誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京7-6294 電話03(292)1211