

解説

重力の絶対測定

坪川 恒也

緯度観測所 〒023 水沢市星ヶ丘町 2-12

(1987年5月23日受理)

Absolute Measurements of Gravity

Tsuneya Tsubokawa

International Latitude Observatory,
2-12, Hoshigaoka-cho, Mizusawa 023

1. はじめに

地球上の質量 m (重力質量) の物体と地球との間で働く力 (万有引力) は, 地球の半径を r , 質量を M , 重力定数を G とすると, GMm/r^2 となる. この力により質量 m (慣性質量) の物体が得る加速度は, 重力質量と慣性質量が等しいとされているため GM/r^2 となり, 質量に無関係に一定となる. 地球上にある物体には上記の万有引力のほかに加わることがあるが自転による遠心力も加わる. 重力はこの二つの力の合力で, その方向は鉛直下方である. 地球は赤道面がふくらんだ扁平な回転楕円体をしている. 赤道では, 地球中心からの距離が遠くなるため万有引力は小さくなり, 遠心力は逆に大きくなる. このため, 重力は赤道で小さくなり極では大きくなる. このように重力は力であるが, その大きさは, ふつう加速度で表わされ, その単位は m/s^2 である. ただし, 重力測定で一般的に使われる単位はいまだに CGS 系の cm/s^2 で, これを自由落下の実験で有名なガリレオの名前を取って Gal と呼んでいる. つまり, $1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2 = 1 Gal$ である. 地球の重力はほぼ 977~983 Gal の間に分布している. 狭い地域での重力測定には Gal の単位では大きすぎるので 1Gal の千分の1を 1 mGal, 100 万分の1を $1 \mu Gal$ と呼んでいる. 重力は地球の表面から離れるにしたがって小さくなり, その割合は高度 1 m 上がるごとに約 $300 \mu Gal$ である. このため, 現在の目標である $1 \mu Gal$ の精度というのは, 重力測定で地表の 3mm の高さの変化も検出できる量だということになる. 地球の重力を約 1,000 Gal とし, これを

$1 \mu Gal$ まで求めようとする場合は, 10^{-9} の測定精度が要求されることになる.

重力測定には相対測定と絶対測定とがあり, 現在広く行なわれているのは相対測定である. 相対測定は比較測定とも言われ, あらかじめ重力値のわかっている地点を基準として, 未知点との重力差を求めて重力値を決定する方法である. 相対測定は地点間の重力差だけわかればよいので, 2回の測定の間重力計の状態が維持されていけばよい. このため, たとえば測定機固有のオフセットなどのように, 両地点で共通に入る量は誤差にならない利点がある. 一方, 絶対測定は他の地点とは全く独立に重力値を決定することであり, 基本単位としての時間と長さの測定を通して重力値を計算で求めることである. このため, 絶対測定は時間と長さを要求精度内でそのつど決める必要があり, 相対測定に比較するとかなり技術的に面倒なものとなる. しかしながら, 相対測定の基準点を決定するには絶対測定が不可欠であることはもちろん, 重力値の精度向上と維持, 相対測定では不可能な重力の永年変化の検出など, 重力絶対測定の必要性は近年ますます増している.

2. 重力加速度の絶対測定

2.1 測定原理

重力の絶対測定は, 高精度の時間と長さを直接使用して真空中での物体の自由落下の加速度を求めることである. 自由落下による測定の精度が上がる以前は, 精密な重力振子の周期測定による絶対測定が行なわれていた. この場合, 振子の長さは別に検定する必要があるため,

厳密な意味では絶対測定とは言いがたい。また、測定精度も 10^{-7} 程度で、最近の相対重力計（ラコスト重力計に代表されるスプリング式重力計）に基準値を与えるには十分ではない。このため、最近では絶対測定は落下法を指すようになってきている。

現在、時間と長さの基本単位は計測技術の進歩により非常に高い精度で決定されている。時間の場合、秒の定義に用いられるセシウム原子時計の短時間安定度は、測定時間を t (秒) としたとき $10^{-11} t^{-0.5}$ で、さらに高精度の水素メーザー原子時計は $10^{-14} t^{-0.5}$ とされている¹⁾。一方、長さの単位メートルは、光速 c と周波数 f とから決まる波長 λ ($\lambda f = c$, $c = 299,792,458$ m/s) をもとにして決定される。具体的には、飽和吸収により安定化されたレーザーの放射あるいはスペクトルランプの放射が使用される。たとえば、ヨウ素安定化 He-Ne レーザーで $^{127}\text{I}_2$ の吸収線 i 線を基準とした発振線の真空中での波長は、 $\lambda = 632991398.1$ fm と決められ、その不確かさは $\pm 1 \times 10^{-9}$ とされている²⁾。このように高精度の時間および長さの標準を、直接落下時間と落下距離の測定に使用すれば、原理的には重力の絶対値を求めることができる。

図1は重力絶対測定の原理図である。装置の主要部分は、コーナーキューブプリズムを反射鏡としたマイケルソン干渉計である。光源としてヨウ素安定化 He-Ne レーザーまたはこれにより波長校正されたゼーマン安定化 He-Ne レーザーを使用している。レーザーからの入射光はビームスプリッターで二つに分けられ、一つは参照用のコーナーキューブに向かい、もう一方は真空槽内の落下用コーナーキューブに入射する。それぞれの反射光は、再びビームスプリッター上で重ね合わせられ干渉す

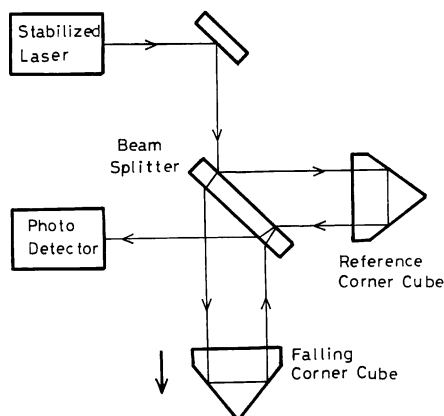


図1 重力絶対測定の原理図

る。自由落下中に発生する干渉縞を光電変換素子で検出し、この信号を処理することで落下距離が求まる。落下に要した時間は、時間標準（たとえばルビジウム原子時計）をもとに計測する。

一様な重力場で落下する物体の落下距離 x と時間 t との間には $x = x_0 + v_0 t + 0.5 g t^2$ の関係が成り立つ。ここで、 x_0 は落下の初期位置、 v_0 は初速度、 g は重力加速度である。未知数が x_0 , v_0 , t の3個であるから、 x と t の測定値が最低3組あれば重力値が求められる。

干渉縞信号の周波数は落体の速度 v に比例する。つまり、一様な重力場における自由落下では、干渉縞の周波数は落下時間 t に比例し、その比例係数が重力となる。レーザー波長を λ とすると、干渉縞信号の周波数 f_b は、 $f_b = 2v/\lambda = 2t/\lambda$ となる。たとえば、落下1s後の周波数は、 $g = 9.8$ m/s², $\lambda = 633$ nm とすると、約 30.96 MHz となる。

落下距離は、装置の大きさ、光電変換素子の周波数特性、真空ポンプの排気能力等から決定される。現在、各国の装置で採用されている落下距離は 30 cm 程度である。この程度の落下距離で、干渉計から得られる干渉縞の総数は、633 nm の波長を光源とした場合約 10^6 個である。落下距離測定には重力測定と同じ精度が要求されるため、干渉縞の個数のみを注目すると 10^{-6} の精度（重力値で表わすと 1 mGal）しかないことになる。このため、重力を 10^{-9} の測定精度で求めようとする、1 フリンジをさらに千分の1まで分割する必要がある。

一方、落下時間に注目すると、30 cm 落下するのに約 0.25 s 要したとして、 $\Delta g/g = \Delta s/s + 2\Delta t/t$ から、 10^{-9} の測定精度は時間測定に 125 ps の分解能を要求する。このように、1 μ Gal の精度の重力絶対測定を行なうには、落下距離、時間ともかなり厳しい測定精度が要求され、これが今まで測定精度向上の障害となっていた。しかし、ここ10年余りの計測技術および周辺技術の進歩によって、時間間隔を 100 ps 程度の精度で測定することが可能になり、長さ測定も nm 以下の領域に入っている³⁾。このような背景のもと、 10^{-9} 台の重力絶対測定が可能になってきた。

2.2 測定方法

測定原理は同じでも、これを実現させる具体的な装置では主に採用する落下方法により相違点があり、それぞれ特長をもっている。ここでは、代表的な落下方法とそこにおける干渉縞信号処理方法について述べる。光学素子の落下法には投上げ法と自由落下法と称する二つに大きく分けられる。

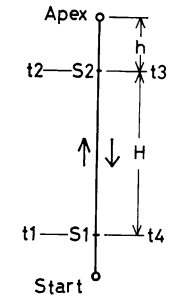


図 2 投げ上げ法

2.2.1 投げ上げ法 (symmetrical rise-and-fall)

投げ上げ法は、ゴムひも等の弾力を利用して鉛直上方に投げ上げてから自由落下させる方法であり、単に自由落下させるのに比べ約2倍のデータ量が得られ、通常1回の投げ上げで上昇、下降のデータを1組として扱い処理する。

図2に示すように、発射点から垂直上方に投げ上げられた光学素子は、頂点まで達した後発射点に向かって下降する。途中S1, S2点を上昇時に通過した時刻を t_1, t_2 とし、下降時に通過した時刻を t_4, t_3 とする。また、S1, S2間の距離を H とし、S2から頂点までの距離を h , S1点での速度を v_1 , S2点での速度を v_2 とすると、

$$v_1^2 - v_2^2 = 2gH \quad (1)$$

$$2v_1 = g(t_4 - t_1) = gT1 \quad (2)$$

$$2v_2 = g(t_3 - t_2) = gT2 \quad (3)$$

ただし、 $T1 = t_4 - t_1$, $T2 = t_3 - t_2$ とする。(1)~(3)式から

$$g = 8H / (T1^2 - T2^2) \quad (4)$$

と重力値が求められる。重力には鉛直勾配 γ ($\approx 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$)があるため、これを考慮すると(4)式で求まる重力値は、頂点よりほぼ $(1/3)h + (1/6)H$ だけ下での値となる⁴⁾。投げ上げ法では、速度に比例して落体に作用する要因は、上昇と下降の合計時間である $T1, T2$ の測定誤差にならない利点がある。たとえば真空槽内の残留空気、時間計測回路における速度に比例したタイミングエラー等は測定結果に影響を与えない。一方不利な点としては、投げ上げの反作用が、装置に大きな擾乱を引き起こす危険性があることである。

投げ上げ法は、これを用いて最初に高精度の絶対測定を行なった国際度量衡局 (BIPM) の Sakuma に因んで、佐久間式とも言われる。長さ標準としてレーザーが採用されるまで、距離 H を決めるものとして、あらかじめ長さ標準で検定した2枚の平面鏡の間隔 (end-standard)

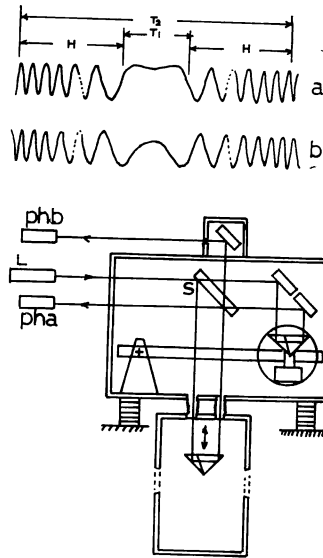


図 3 佐久間式装置模式図

を使用していた。そして干渉用光源として白色光 (Xeランプ) を使用し、上昇、下降時に S1, S2 を通過する際に発生する四つの白色干渉縞信号の出現時間間隔を測定して重力値を求めた⁵⁻⁷⁾。その後ヨウ素安定化 He-Ne レーザーの出現で、検定が必要な基準尺からレーザーの干渉縞で直接距離を求める方法に変わっていった。

図3に佐久間式装置の原理図を示す⁸⁾。マイケルソン干渉計は装置上部の除振台の上に配置されている。干渉計内の参照用コーナーキューブは、上下動長周期地震計の仮想不動点に固定されているため、地面振動は干渉計に直接影響を与えない。干渉計の下には高真空槽があり、内部に平面鏡を3枚組み合わせた投げ上げ用のコーナーキューブと投げ上げ装置が格納されている。打上げはゴムひもの張力を利用して行なう。投げ上げられた落体は、頂点に達した後自由落下する。この間に発生する干渉縞は、ビームスプリッターSにより位相が 90° 異なる二つの成分に分けられ、それぞれ光電子増倍管 (Pha, Phb) で検出される。この二つの信号により落体の移動方向を識別し頂点の位置を判断する。上昇中に計測開始地点から頂上までの干渉縞数を N , レーザーの波長を λ とすると距離 H は $H = N\lambda/2$ と表わされる。頂上で干渉縞の位相は図のように 90° ずれるから、下降中の距離は $H = (N - 0.25)\lambda/2$ となる。 $T2$ を測定する時間計測カウンターのほかに、頂上での時間 $T1$ を計測するカウンターは、上昇中の干渉縞パルスでスタート (リセット) して、下降時の最初のパルスでストップするようになっている。以上の干渉縞処理方法は、(4)式をその

まま適応し2点間の距離を求めているため2ステーション法とも言える。

投上げ法でのもう一つの干渉縞処理方法は、多点法 (multi-station) と呼ばれるものである。上昇および下降時で一定の干渉縞数(たとえば8,192個)を計数するのに要した時間を、時間計数カウンターと時間基準クロックカウンターで測定し、時間と移動距離のデータの組(たとえば80組×2)から、最小自乗法的に重力値を求めるものである⁹⁾。

2.2.2 自由落下法 (free-fall)

自由落下法は光学素子を落下させるもので、その方法から落下箱法と単純自由落下法の二つに分けられる。

落下箱方法は、drag-free-chamber 方式ともいわれ、Tate や Faller らによって完成された¹⁰⁾。落体に作用する残留空気の影響を避けるため、drag-free-chamber と称する小型のエレベータの中に落体を格納し、これをエレベータ内部に接触することなしに落下(移動)させるものである。真空槽内の残留空気は、落下速度で移動するエレベータには影響を与えるが、エレベータ内の残留空気は落体との相対速度がゼロのためその影響はほぼ無視できる。

図4に Faller の落下装置の原理図を示す。コーナーキューブを格納した円筒状の落下ブロック(図の斜線部分)は、静止状態でエレベータ内のV溝に乗っている。コーナーキューブに対する入出射レーザービームは、エレベータ底部の薄い窓ガラスを通過する。駆動ベルトに

固定されたエレベータは、サーボモーターによりガイドレールに沿って上下に移動する。図のようにエレベータ内に送光部(LED)と受光部(位置センサー)を配置し、中間に落下ブロックが置かれる。エレベータと落下ブロックとの相対位置は、送光部からのビームを、落下ブロック上の球レンズで光電位置センサー上に集光させるこ

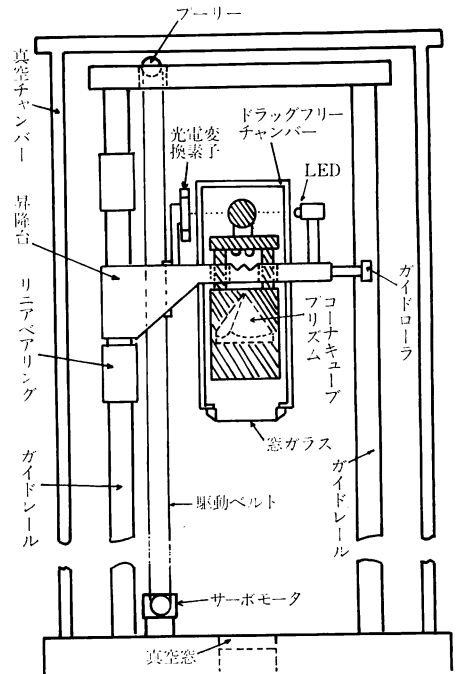


図4 ドラッグフリーチャンバー原理図

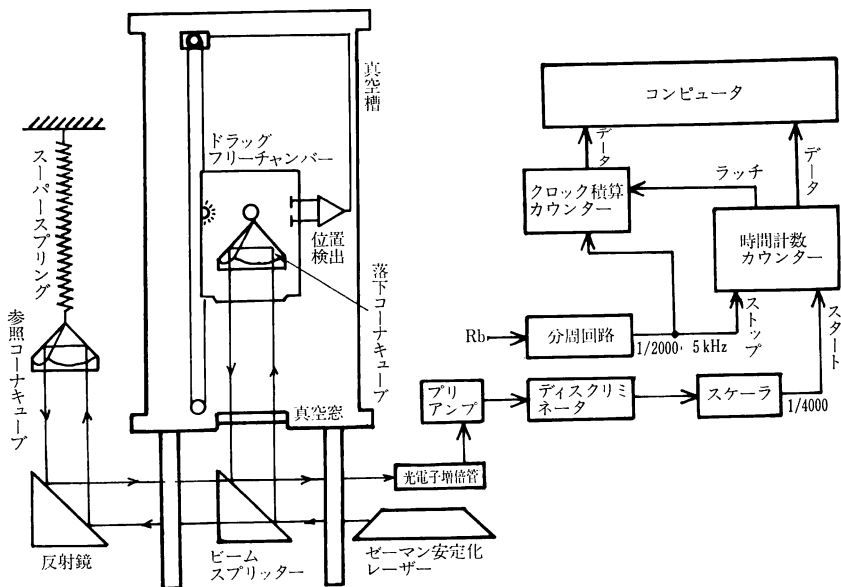


図5 ファラーの重力絶対測定装置ブロック図

とにより、電氣的に求めている。位置センサーの出力を誤差信号としたサーボ系で、エレベータを移動することにより、落体に見かけ上落下させる。最初、落下ブロックはエレベータ内に接触しているため誤差信号は大きい。このためエレベータは重力加速度より大きな加速度で移動する。その後、両者の間隔が適正になれば（落体がエレベータ内で浮く）、エレベータは重力加速度とほぼ同じ加速度をもつことになる。

この方式の利点は、測定の繰返しが非常に速いことと落体に衝撃が加わらないことである。また、すべて電氣的に制御しているためコンピュータによる自動連続観測が行なえ、大量のデータを得るのに適している。ただし、光学素子の落下中もモーターが駆動されているため、機械振動の点では不利と言える。

図5に Faller の装置の原理図を示す。落下装置を内蔵したアルミ製の真空槽は、三脚で支えられている。ゼーマン安定化レーザーを光源とする干渉計は、真空槽の下に配置されている。干渉計の参照コーナークューブは、スーパースプリングと名付けられた長周期 (60 s) 地震計の錘に組み込まれている。光電子増倍管で検出された干渉縞は、デスクリミネータでゼロクロス点を境にデジタル信号に変換され、スケーラで分周 (1/4000) される。この分周されたパルスにより、時間計数カウンターがスタートする。一方、ルビジウム原子時計からの 10 MHz の標準信号も分周 (1/2000) され、5 kHz のクロック信号となる。この 200 μ s ごとのクロックパルスで、時間計数カウンターがストップされる。このクロックパルスのリセット時からの積算個数は、別に計数されており、そのデータはストップパルスに同期して時間計数カウンターの出力データとともにコンピュータに取り込まれる。このように、一定距離 (この例では $4,000 \times \lambda/2$, 約 1 mm) 落下するごとの時間をクロックパルスの整数倍とその補正量とから求めている。この干渉縞信号処理は、投上げ法でのマルチステーション法と原理的に同じである。

今まで述べた投上げ法と落下箱法は、落体に対する残留空気の影響を減少させることを念頭に置いて開発されてきた。しかしこのために、装置の複雑化と振動発生という犠牲を払っている。つまり、前者では超高真空用素材以外のものを使用せざるをえないため、真空度を上げることが不可能になるという事態を生じ、後者では精度向上の上で最大の障害になる振動の発生を招いた。これらはさらに高精度の測定を目指す場合に不利な条件となる。

単純落下法は、文字どおり光学素子を真空中で鉛直に落下させるもので、直接、残留空気の影響を受ける。しかし、最近の真空技術の進歩により高真空が容易に得られるようになったため、この方法による高精度測定が行なえるようになった。

残留空気が落体に及ぼす影響は、落体から気体分子に運動量が移ることにより生ずると考えられる^{11,12)}。落体の表面積、質量にもよるが、現在一般に使用されている落体では、 10^{-5} Pa (7.5×10^{-8} Torr) 程度の真空度であれば、 10^{-9} の精度の測定に残留空気の影響は無視できる。

単純落下法の例として、図6に緯度観測所の落下装置の模式図を示す。落下装置の主要部分はEのランチャーである。この部分は軸Fを中心に回転する。ランチャーには円盤状のピエゾ素子Bが固定され、落体光学素子Aはその上に乗っている。レーザービームは図の上方から入射する。ランチャー先端のボールピースを電磁石Cで吸着することにより、ランチャーは水平にセットされる。板パネDは落下時のランチャーの回転を速める役目をする。この状態で電磁石のコイル電流を切るとAは落下するが、ランチャーの回転に伴い傾くため、次のような方法で落体の傾斜を防いでいる¹³⁾。まず落下の前にピエゾ素子Bに電圧を印加して、その厚みを微量増加させる。落下と同時にピエゾの電荷を放電させ、その厚みを急速に収縮させる。これにより落体は瞬間的に宙に浮き、その時点で電磁石電流を遮断することでランチャーは落体と接触せずに回転し、落体は傾斜角 $10''$ 以内で初期姿勢を保ったまま落下する。この方法の長所は、構造が簡単であることと機械振動が極力抑えられる点である。欠点としては、マグネットを使用することで落体に渦電流が発生し電磁力が作用しやすいこと、ピエゾ素子の供給電圧で落体に静電誘導による電荷が蓄積される危険性がある点あげられる。この点を解決すれば、高精度測定に適した落下法と言える。

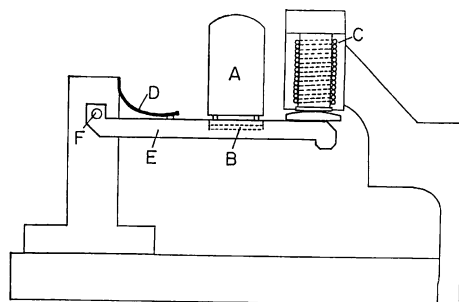


図6 緯度観測所の落下装置

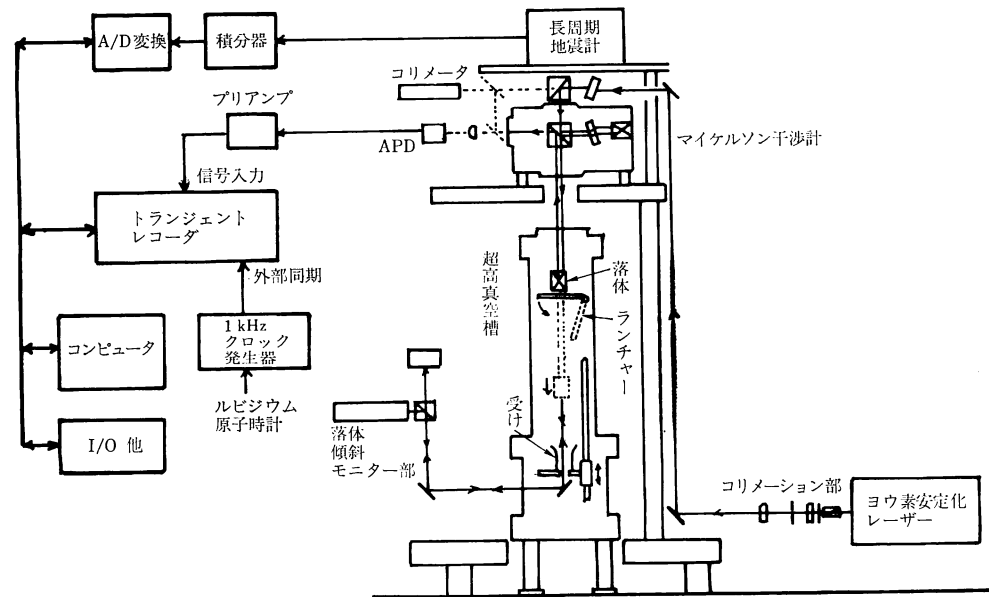


図7 緯度観測所の重力絶対測定装置のブロック図

図7に緯度観測所の装置の模式図を示す。干渉計は装置上部に配置されている。参照コーナキューブプリズムは、他の方式とは異なり干渉計に固定されていて、機械的な意味の不動点ではないため、干渉計は振動の影響を受ける。これを解決するため、落下中の振動を干渉計上部に設置した長周期上下動地震計で検出し、その信号処理から加速度成分を求め、重力値の生データに補正する方法を採用している¹⁴⁾。この方法の長所は干渉計が小型化される点である。

今までの測定方法は、一定落下距離ごとの時間を計測していたのに対し、ここでは落下距離の時間に関する2次微分が重力値であることを注目して、一定時間ごとに落下距離を求める方法を採用している¹⁵⁾。今、一定時間間隔(Δt)ごとの落下距離($x(t_0 + \Delta t)$, $x(t_0 + 2\Delta t)$, ..., $x(t_0 + n\Delta t)$)をそれぞれ求める。次に隣合う落下距離の差(第1階差)を求め、さらにその差(第2階差)を求めるとその値は $g(\Delta t)^2$ と一定値となる。 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\Delta t = 1 \text{ ms}$ とすると $g(\Delta t)^2$ は $9.8 \mu\text{m}$ となり、He-Neレーザー(633 nm)の干渉縞数で表わすと30.96フリッジ程度となる。地球上の重力値に対する第2階差の値は、ほぼ30.85から31.06の範囲にあり、その整数部は小数部から判断できる。第2階差の小数部がわかればよいことから、その前の第1階差、落下距離も整数部は測定する必要がなく、一定時間間隔ごとの端数がわかればよいことになる。このため干渉縞の整数を求めるフリ

ジカウンターは不用である。一定時間サンプリングは、関連データ(地面振動等)の収録の際の同期が簡単であることや、安定化レーザーの変調周期とフリッジのサンプリングを一致させることができる等有利な点が多い。

ルビジウム原子時計の標準周波数をもとに作られた、1 ms 間隔のトリガー信号で、トランジェントレコーダを約2 μs 間(サンプリング間隔 2 ns, 個数 1,024) A/D変換動作させ、その間のアバランシェフォトダイオードで検出した干渉縞信号を記録する。得られたデジタルデータは、次のトリガー信号が入力されるまでにメモリーに格納される。これを250回繰り返して、約30 cm 落下する間の干渉縞をサンプリングする。落下後、1 ms ごとの干渉縞の位相が計算され、それをもとに第1階差、第2階差を求める。第2階差の小数部からその整数部が求められ、最終的に1 ms ごとの落下距離が組み立てられる。こうして1 ms の整数倍の時間と落下距離の組合せから、最小自乗近似で時間の2次多項式にあてはめ重力値を計算する。

3. おわりに

世界的に重力の絶対測定の精度は年々向上して、現在1回の落下当りの標準偏差が $10 \mu\text{Gal}$ 台に入っている。このため標準誤差で見ると μGal の精度に十分に入っていることになる。しかしながら測定方式の異なる装置間で比較測定を行なった場合、同一地点の測定値にも

40 μGal 程度の系統的な差が生じているのも事実¹⁶⁾である。このため、真に重力のみの影響で自由落下する落体の移動量を、レーザー干渉法によって高精度に測定するという観点から、重力絶対測定の系統誤差を究明していく必要がある。絶対測定の精度向上は、単に地球物理の研究のみならず電流、気圧等の単位の決定にも関連し、とくに最近、慣性質量と重力質量の問題も含み理論物理学の分野で話題になっているいわゆる第五の力¹⁷⁾の検証実験からも望まれている。

文 献

- 1) “周波数安定度とその測定”, 電気学会技術報告(2部), **41** (1976) 125.
- 2) メートル定義のための諮問委員会 (CCDM) 1982年の勧告.
- 3) 武田光夫: “サブフリンジ干渉計測基礎論”, 光学, **13** (1984) 55-65.
- 4) 友田好文, 鈴木弘道, 土屋 淳: 地球観測ハンドブック (東京大学出版会, 東京, 1985) pp. 366-398.
- 5) A. Sakuma: “Recent developments in the absolute measurement of gravitational acceleration,” NBS Spec. Publ., **343**, Aug. (1971) 447-456.
- 6) G. A. Bell, *et al.*: “An absolute determination of the gravitational acceleration at Sydney, Australia,” *Metrologia*, **9** (1973) 47-64.
- 7) 須川 力, ほか: “重力絶対測定について(2)”, 緯度観測所集報, **18** (1979) 64-79.
- 8) F. Alasia, *et al.*: “Absolute gravity acceleration measurement: Experiences with a transportable gravimeter,” *Metrologia*, **18** (1982) 221-229.
- 9) M. Murakami and Y. Nakahori: “Results of absolute gravity measurements by geographical survey institute,” *J. Geod. Soc. Jpn.*, **32** (1986) 303-309.
- 10) M. A. Zumberge, *et al.*: “A portable apparatus for absolute measurements of the earth's gravity,” *Metrologia*, **18** (1982) 145-152.
- 11) A. H. Cook: “The absolute determination of the acceleration due to gravity,” *Metrologia*, **1** (1965) 84-114.
- 12) I. Murata: “A transportable apparatus for absolute measurement of gravity,” *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **53** (1978) 49, 130.
- 13) 花田英夫, ほか: “絶対重力計用落体の回転防止実験”, 測地学会誌, **24** (1978) 191-201.
- 14) 坪川恒也, 花田英夫: “緯度観測所の可搬型重力絶対測定装置: 装置の概要と東北地方における観測結果”, 緯度観測所集報, **25** (1986) 17-64.
- 15) T. Tsubokawa: “A fringe processing method for an absolute gravimeter,” *Metrologia*, **20** (1984) 107-113.
- 16) Bureau Gravimetric International: *Bull. Inform.*, No. 59 (1986) 89-103.
- 17) 藤井保憲: “第五の力をめぐって”, 日本物理学会誌, **41** (1986) 917-919.