

絶対重力計用落下装置の開発

坪川 恒也

国立天文台・水沢観測センター

概要

真空中で物体を自由落下させ、落下距離と落下時間を絶対値で求めることで、測定地点の重力加速度の絶対値を求める測定装置を絶対重力計という。絶対重力計の主要部分は、長さ標準レーザを光源とした干渉計である。測定は干渉計の腕を構成する光学素子を落体として真空中で自由落下させ、その際にレーザ干渉計から発生する干渉縞信号を時間標準と関連付けて記録することである。このように重力の絶対測定の基本原理は物体の自由落下であるため、落下装置は正に絶対重力計の中心となる部分である。実際、これまで各国、各機関で開発されてきた絶対重力計において、組み込まれている落下装置や落下方法の違いが注目されてきたのは、個々の絶対重力計の特徴が一番大きく反映されるのがこの部分であるためと言える。

重力の絶対測定では、落下距離と落下時間の測定に長さと時間の標準を使用するので、本来なら測定された重力値は、標準量に準拠した精度を持つはずである。しかし、主に落下方式の違いにより、測定値に系統的に差が出ているのが現状である。一方、同一落下方式の絶対重力計のみを使用している場合、何らかの原因でその方式固有に発生する、系統的な測定結果の偏りがあったとしても見落とす恐れがある。

現在、事実上、世界的に標準 (defacto standard) となっている絶対重力計は、米国マイクロ g ソリューション社の FG5 型である。この絶対重力計の落下装置には、ドラッグフリーチャンパー方式を採用している。世界的に FG5 型絶対重力計しか入手できないような状況においては、これとは異なる落下方式の絶対重力計を開発し、相互に性能評価することは重要となる。FG5 型に比べて遜色のない国産の絶対重力計を開発し、絶対重力測定精度向上に寄与する目的で、今回、単純自由落下法を採用した落下装置を開発したので報告する。

1 落下装置の開発

落下装置の役割は、落体となる光学素子 (一般にコーナキューブプリズム、CCP) の初期姿勢を保ったまま、真に重力のみで自由落下させることにある。落体自体がマイケルソン干渉計の 1 つの腕を構成する光学素子になるため、落下中においても干渉計の光軸を正常に保つ必要がある。このため落体の落下中の姿勢が重要となる。落下中に落体の傾きや横ずれが生じると、落下距離計測の誤差や干渉縞信号の出力レベル変動の原因となるため、落体の姿勢には充分注意する必要がある。

落下装置内にセットされた静止中の落体を、自由落下状態に遷移させる際には、反作用として落下装置側にも力が作用する。この力は大きなり小なり機械的な振動加速度となって絶対重力計全体に影響を及ぼす。特に干渉計に与える振動は、正常な光路長変化に変調を与え、落下距離測定に誤差を生じさせるため、可能な限り少なくする必要がある。落体は、当然、真空中で落下させる必要があるため、落下装置にも真空環境に対応させるための諸条件が必要となる。

CCP を格納した落体を落下させる方法として、従来、単純自由落下法、投げ上げ自由落下法、ドラッグフリーチャンパー法の 3 つの方法が考案されてきた。今回は、自由落下の測定原理に最も近く、落下装置自体から発生する振動を他の 2 つの方法より少なくできる、単純自由落下法を採用した。

FG5 型絶対重力計で採用しているドラッグフリーチャンバー方式では、落体を格納したドラッグフリーチャンバーが、モータ駆動でガイドレールに沿って鉛直方向に移動する。ドラッグフリーチャンバーを静止状態から重力より充分大きな加速度で急速に下方に移動させると、チャンバー内に置かれた落体コーナキューブプリズムは、瞬間、宙に取り残された状態となる。この状態に入ると同時に、ドラッグフリーチャンバーの移動速度を落体の落下速度と同じになるように制御用サーボモータを駆動すれば、落体がチャンバー内の床に接触することはなく、結果的に自由落下させることができる。真空度が悪く残留空気分子が多い場合でも、その影響はドラッグフリーチャンバーがほとんど受け持つため、内部の落体に影響しないという利点を有する。しかしこの方式では、落下測定中に連続してサーボモータを駆動する必要があるため、絶対重力計自体が振動発生源となり、大がかりな防振対策が必要となる。

一方、投げ上げ自由落下法は、落体（コーナリフレクター）をゴム紐などの張力を利用して投げ上げる方式で、上昇と下降のそれぞれの状態で干渉縞信号が得られるため、データ数が落下法に比べ2倍にできることや、上昇及び下降で真空度や光電変換素子の周波数特性を補償する等の利点はあるものの、投げ上げに必要な力を発生させる際に、大きな機械振動を伴う欠点がある。

1.1 今回の落下装置（サイレントドロップ）

今回開発した落下装置は、高真空中で単純に自由落下させる方式を採用した。落下中の振動は極力抑えることを目標としたため、silent drop と名付けた。これまでの落下実験の結果、落体が落下装置を離脱する際、落体に加わる水平方向の力を最小限に抑えることが、落下特性を向上させるための必要条件であることが判明した。これに基づき、鉛直方向の変位変化（速度）が充分大きくなるまで、落体の移動方向をガイド機構（ミニチュアストローク）を用いて鉛直方向のみに規制し、その後、自由落下させることで落体姿勢を安定させる落下装置を考案した。落体の保持と解放には、落体上部先端に取り付けたタッチプローブのタングステン球を、 piezo素子の変位を板バネで拡大する機構を用いて、挟み込み及び解除することで行っている。落下装置のガイド機構に嵌め合わせるため、落体(CCPハウジング)中心部には、モリブデン製のシャフトを設けた。

1.2 落体

絶対重力計に使用する落体は、そのまま、干渉計の1つの腕を構成する光学素子でもあるため、通常の高さ測定に要求される各種条件を満たす必要があるのは勿論、全くガイド機構がない状況での測長であるため、落下中の姿勢を考慮する必要がある。今回使用する落体としての光学素子は、コーナキューブプリズム(CCP)である。CCPは、立方体の頂角部分を切り取った形状をしており、互いに直角な反射面を3面持つプリズムである。CCPに入射したビームは内部で3回反射して、入射方向と平行に出射する。この特性から、多少傾いたとしても干渉縞を得ることができるため、落下させる光学素子としてCCPは最適と言える。CCPは、光学ガラス製でありその形状から、当然、そのまま直接落下させる訳にはいかず、円筒保護ケース内に固着する。ここでは保護ケースを含めた全体を落体と称している。絶対重力測定用の落体の役目は、鉛直方向に正しくアライメントされたレーザービームラインに沿って落下して干渉縞を発生させ、落下距離に変換することである。

自由落下中の落体の姿勢は一定で変化しないことが理想であるが、万が一、回転した場合でも、CCPのガラス媒質内で光路差が変化しないように工夫する必要がある。CCPの光心(Optical Center)も、光学レンズの光心と同様に、この点に入射する光線は出射する際に入射光と平行になる意味で重要である。CCPの光心は、表面から t/n 入った光軸上にある。ここで、 t は CCP の高さ(コーナキューブ表面からコーナポイント(corner point、頂角の点)までの距離)、 n はガラスの屈折率である。これは厚さ t の平行平面ガラス板の裏

面の点が表面から見ると t/n のところに浮いて見えるのと等価である。CCP の性質として、光心を中心としてプリズムが傾いても光路差が変化しない。このため、落体全体の重心と CCP の光心を一致させるように接着している。

落体本体は、りん青銅製の円筒（外径 20 、高さ 40、32 つば付き、金メッキ処理）とモリブデン製のガイドシャフト（4 ×26）から構成されている。シャフトの先端にはタングステン球（2 ）を接着した。落下装置はこのタングステン球を 2 枚のナイフエッジで挟み込んで保持する。落体は 300mm 以上自由落下するため、ある程度耐久性を持った材質で製作する必要がある。また外部からの擾乱の影響を少なくするためには、落体の自重は重く、かつ、体積は小さい方が望ましい。ただし、落ちてくる落体を受け止める落体受けの耐久性を考えると、落体の重量にはおのずと限界がある。落体の形状を小さくするため、コーナキューブプリズムは直径 15 、高さ 11.4mm とした。反射面はガラスと空気的全反射を利用するのではなく、保護用のアルミ蒸着を施し反射面としている。一方、入射面には 633nm 用の無反射コーティングを施してある。コーナキューブプリズムは、落体全体の重心とコーナキューブプリズムの光心とを一致させるように調整後、落体円筒内部に真空用接着剤で固定する。落体全体の質量は約 68g である。

1.3 昇降装置

落下装置から離脱した落体は、再度、落下開始点まで持ち上げる必要がある。このための昇降装置を真空槽内に設けた。昇降台には落下してきた落体の衝撃を吸収して受け止め、かつ、落体の位置決めも兼ねる受けがある。受けに入った落体は、真空槽内のパルスモータを駆動源として、再度、昇降装置の天井部分に設置された落下装置まで移動後に保持される。その後、昇降台は落体を落下装置内に残したまま下降し、落下終了地点で停止して、次の自由落下を待つ。リニアブッシュと連結した昇降台は、2 本のスライドシャフトに沿って移動する。パルスモータの回転はラダーチェーンを介して昇降台の上下駆動に変換される。昇降装置は超高真空に対応できるように機構及び材質に留意した。このように落下装置と接触するモリブデンシャフトとタングステンボールは落体上部にあるため、落下の際に落体受けと直接、接触する様な衝撃は加わらず、この部分に傷が付くことはない。落体の保持部分が落下によっても消耗しないのが、本落下方式の特徴でもある。パルスモータは計算機で制御されるため、無人観測も可能である。

真空槽は、アウトガスの少なさと軽量化のため、アルミ合金製とした。定常状態では真空槽に取り付けたイオンポンプで連続的に真空排気する。到達真空度は、絶対重力計では最高の 10^{-6} Pa 台に入っている。真空荒引き系は、荒引き時のみ、フレキシブルホースで本体と接続し、ロータリーポンプとターボポンプの組み合わせでイオンポンプの動作可能範囲まで排気し、その後、切り離される。真空槽の底部には、落下 CCP にレーザ光を導入するための光学窓を設けている。この窓はレーザ光のバックトークを予防する為、3 度傾かせている。真空槽の天井板には、落下装置点検用の光学窓が取り付けられた。真空槽全体はその底部に干渉計を設置するため、アルミ製の架台に載せられる。アルミ架台上にはガイドレールがあり、干渉計調整の際に便利なように、真空筒全体を乗せたままスライドさせることができる。