

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5712000号
(P5712000)

(45) 発行日 平成27年5月7日(2015.5.7)

(24) 登録日 平成27年3月13日(2015.3.13)

(51) Int.Cl.

G O 1 V 7/14 (2006.01)
G O 1 P 15/03 (2006.01)

F 1

G O 1 V 7/14
G O 1 P 15/03

C

請求項の数 6 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2011-41018 (P2011-41018)	(73) 特許権者	504137912 国立大学法人 東京大学 東京都文京区本郷七丁目3番1号
(22) 出願日	平成23年2月27日(2011.2.27)	(73) 特許権者	502348903 坪川 恒也 岩手県水沢市桜屋敷129-10
(65) 公開番号	特開2011-209276 (P2011-209276A)	(74) 代理人	100103137 弁理士 稲葉 澄
(43) 公開日	平成23年10月20日(2011.10.20)	(72) 発明者	新谷 昌人 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
審査請求日	平成26年1月16日(2014.1.16)	(72) 発明者	坪川 恒也 岩手県水沢市桜屋敷129-10
(31) 優先権主張番号	特願2010-53797 (P2010-53797)	審査官	田中 秀直
(32) 優先日	平成22年3月10日(2010.3.10)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】重力計に用いられる自由落下装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

反射鏡を備えた落体と、

前記落体の保持・離脱手段と、を備え、

前記反射鏡の光学中心と当該反射鏡を含む落体全体の重心とを一致させてあり、

前記保持・離脱手段は、横方向に変位可能な複数の接触子を備え、

前記複数の接触子は、前記光学中心と一致する前記重心を通る平面上の複数点で落体に接触すると共に、各接触子の変位方向は、前記重心と、各接触子と落体との各接触点と、を通る直線上にあり、各接触点において、各接触点と前記重心を結ぶ方向の力により落体を初期状態に保持し、

前記複数点において落体に接触している前記複数の接触子を落体から離れる方向に同時に変位させることで落体を初期状態から離脱させて自由落下させるように構成されている、重力計に用いられる自由落下装置。

【請求項2】

前記複数の接触子は水平方向に変位可能であり、

前記複数の接触子は、前記重心を通る水平面上の複数点で落体側面に水平方向から接触することで落体を初期状態に保持し、前記複数点において落体に接触している前記複数の接触子を落体から離れる方向に水平方向に同時に変位させることで落体を初期状態から離脱させる、

請求項1に記載の自由落下装置。

10

20

【請求項 3】

前記保持・離脱手段の各接触子が落体から離れる方向に変位する時間は、1.0 m/s 以下である、請求項1、2 いずれかに記載の自由落下装置。

【請求項 4】

前記保持・離脱手段の各接触子は、ピエゾ素子の伸縮によって変位する、請求項1乃至3 いずれかに記載の自由落下装置。

【請求項 5】

前記自由落下装置は、

初期状態から離脱して落下した落体を受け取る受け部と、

受け部で受け取られた落体を初期状態に復帰させるための移動機構と、
を備え、

10

前記落体は、少なくとも下端が開口状の筒状のケースと、前記ケース内に設けた落下鏡と、を備え、

前記ケースの外周面には全周に亘って突縁部が形成されており、前記突縁部は前記重心を通る平面上に位置しており、前記接触子は、前記突縁部の周面に接触するようになっており、

自由落下する落体は、当該落体の突縁部の周面以外の部位で前記受け部に当接して受け取られる、

請求項1乃至4 いずれか1項に記載の自由落下装置。

【請求項 6】

20

前記復帰機構は、昇降可能な昇降台と、前記昇降台を下方位置と上方位置との間で昇降させる移動機構と、を備え、

前記昇降台は、前記落体のケースの内部に当該ケースの下端から挿入する落体セット台座と、先端側に前記落体セット台座が設けられ、基端側が前記移動機構に連結されたアームと、からなり、

落体が初期状態にある時には、前記昇降台は下方位置にあって前記落体セット台座は前記受け部内で待機姿勢にあり、

落体が自由落下して受け部に受け取られると、前記移動機構によって前記昇降台が上昇することで、前記落体セット台座が前記落体のケース内部に下端から挿入して落体に下方から当接した状態で上方位置まで移動し、前記保持・離脱手段が落体を初期状態に保持し、

30

落体を初期状態に保持した後は、前記昇降台は、前記移動機構によって下方位置まで下降して待機姿勢となる、

請求項5に記載の自由落下装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、重力計に用いられる自由落下装置に係り、詳しくは、真空中で物体（光学素子）を自由落下させるための装置に関するものである。

本発明に係る自由落下装置は、典型的には絶対重力計に用いられるが、自由落下装置を上下2段に配置することで、重力の高さ方向の違いを求める重力偏差計に用いることも可能である。本明細書において、「重力計」には「重力偏差計」も含まれるものとする。

40

【背景技術】**【0002】**

重力加速度を計測するための装置としては、主として、重力の絶対値を測定する絶対重力計と、重力差や重力変化を測定する相対重力計と、が知られている。絶対重力計は、真空中で自由落下する物体あるいは投げ上げた物体の落下距離と経過時間を計測し、これらの計測結果から重力加速度を算出する。

【0003】

重力加速度計測の基本的な考え方とは、真空中を自由落下する物体の落下距離 y_i 、経過

50

時間 t_i の関係を、物体の初期位置を y_0 、初期速度を v_0 、重力加速度を g として、

$$y_i = -\frac{1}{2}gt_i^2 + v_0 t_i + y_0 \quad [y_i: \text{位置}, t_i: \text{時刻} (=i\Delta t)]$$

で表し、落下中の 3ヶ所以上で (y_i , t_i) を測定して、未知数 y_0 、 v_0 、 g を同時に決定することで重力加速度 g を得るものである。

そして、落下する物体の位置（落下距離）は、図 1 に示すようなレーザ干渉計を用いて取得できることが当業者に良く知られている。

【0004】

絶対重力計としては、Micro-g LaCoste社の FG5 絶対重力計（特許文献 1）や A10 絶対重力計が知られている。また、本願の発明者の一人は、微小距離投げ上げ式絶対重力計（特許文献 2）を提案している。

【0005】

重力加速度の計測に広く利用されている FG5 絶対重力計は、ドラッグフリーチャンバーと呼ばれるカートで落下鏡を持ち上げ、そこから落下鏡を自由落下させ、マイケルソン型のレーザ干渉計を用いて計測される落下鏡の位置と原子時計によって計測される経過時間との関係から重力加速度を求めている。

【0006】

ドラッグフリーチャンバー方式では、落下鏡を格納したカート（一種のエレベータ）を、内部に格納した落下鏡と接触を断った状態を保ちつつ駆動装置によって下方に移動させて、結果的に落下鏡の自由落下を実現している。この方式では、自由落下中にもモータ等の駆動装置が動作しているため、重力加速度以外に機械振動の加速度も重畠されてしまう。機械振動に起因するこの加速度は、重力加速度の絶対値を決定する際に系統誤差を発生させるおそれがある。また、A10 絶対重力計においても、カム振動が生じるため、同様に、機械振動による系統誤差が発生するおそれがある。

【0007】

このように自由落下装置自体から発生する機械振動加速度は、測定精度に悪影響を及ぼしえることから、自由落下装置では落体の自由落下中の機械振動加速度を低く抑えるあるいは無くすことが望まれる。

【先行技術文献】

30

【特許文献】

【0008】

【特許文献 1】米国特許第 5 351122 号

【特許文献 2】特許第 3689737 号

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の目的は、落体の自由落下中の機械振動発生を無くすと共に、落下中の落体の回転量を抑制して自由落下させることで、重力加速度を、高精度かつ安定に測定することを可能とする自由落下装置を提供することにある。

40

【課題を解決するための手段】

【0010】

かかる課題を解決するために本発明が採用した自由落下装置は、

反射鏡を備えた落体と、

前記落体の保持・離脱手段と、

初期状態から離脱して落下した落体を受け取る受け部と、

を備え、

前記反射鏡の光学中心と当該反射鏡を含む落体全体の重心とを一致させてあり、

前記保持・離脱手段は、横方向に変位可能な複数の接触子を備え、前記複数の接触子は、各接触子と落体との接觸点において、各接觸点と前記重心を結ぶ方向の力により落体を

50

初期状態に保持し、前記複数点において落体に接触している前記複数の接触子を落体から離れる方向に同時に変位させることで落体を初期状態から離脱させて自由落下させるよう構成されている。

各接触点から重心の方向に向かって力を加えて落体を保持することによって、解放時の最後の接触点（本発明では複数の接触子を同時に変位させるものではあるが、厳格に見ると各接触子が落体から離れる瞬間には時差があると考えられる）から作用する力が落体に回転を与えないようにする。

【0011】

1つの態様では、前記複数の接触子は、前記重心を通る平面上の複数点で落体に接触することで落体を初期状態に保持する。 10

1つの態様では、各接触子の変位方向は、前記重心と各接触点を通る直線上にある。

1つの態様では、前記複数の接触子は水平方向に変位可能であり、

前記複数の接触子は、前記重心を通る水平面上の複数点で落体側面に水平方向から接触することで落体を初期状態に保持し、前記複数点において落体に接触している前記複数の接触子を落体から離れる方向に水平方向に同時に変位させることで落体を初期状態から離脱させる。

1つの態様では、前記保持・離脱手段の各接触子が落体から離れる方向に変位する時間（解放時間）は、1.0ms以下である。解放時間は短い方が望ましく、より好ましくは、0.5ms以下、さらに好ましくは、0.2ms以下、さらに好ましくは、0.1ms以下である。 20

1つの態様では、前記保持・離脱手段の各接触子は、ピエゾ素子の伸縮によって水平方向に変位する。ピエゾ素子の伸縮時の変位量がそのまま接触子の変位量となる。ピエゾ素子を用いることで、0.1ms以下の解放時間を実現することができる。

1つの態様では、接触子は、落体に点接触する球面状接触子である。

1つの態様では、接触子は、落体（球面状の保持部を備える）に点接触する平面状の接触部を備えている。

【0012】

1つの態様では、前記落体は、少なくとも下端が開口状の筒状のケースと、前記ケース内に設けた落下鏡と、を備え、 30

前記ケースの外周面には全周に亘って突縁部が形成されており、前記突縁部は前記重心を通る平面上に位置しており、前記接触子は、前記突縁部の周面に接触するようになっており、

自由落下する落体は、当該落体の突縁部の周面以外の部位で前記受け部に当接して受け取られる。

1つの態様では、落体は、当該落体の突縁部の周面よりも下方部位で前記受け部に当接して受け取られる。

1つの態様では、突縁部は、接触子が接触する周面と、下面と、を備えており、落体は、前記下面が前記受け部に当接して受け取られる。

1つの態様では、突縁部の周面は垂直面である。

1つの態様では、突縁部の周面は下方から上方に向かって拡径する傾斜面である。 40

1つの態様では、前記突縁部の周面は球面であり、前記重心を通る平面は前記球面の最外縁部分を通っており、前記接触子は、前記最外縁部分に接触することで前記落体を保持する。こうすることで、落体の離脱位置を、常に重心（光心）を通る水平面に一致させることができ、より安定した落下特性を得ることが可能となる。さらに、1つの態様では、前記接触子の接触部は平面であり、当該平面が球面の最外縁部分に接触することで前記落体を保持する。

1つの態様では、前記ケースの外周面には、前記突縁部の下側に位置して第2の突縁部が形成されており、自由落下する落体は、前記第2の突縁部で前記受け部に当接して受け取られる。こうすることで、落下する落体が落体受けに入るとき、落体の保持部である上側の突縁部に直接衝撃が加わることを防止して、上側の突縁部の周面を保護する。 50

【0013】

1つの態様では、前記自由落下装置は、受け部で受け取られた落体を初期状態に復帰させるための復帰機構を備えており、前記復帰機構は、昇降可能な昇降台と、前記昇降台を下方位置と上方位置との間で昇降させる移動機構と、を備え。

前記昇降台は、前記落体のケースの内部に当該ケースの下端から挿入する落体セット台座と、先端側に前記落体セット台座が設けられ、基端側が前記移動機構に連結されたアームと、からなり、

落体が初期状態にある時には、前記昇降台は下方位置にあって前記落体セット台座は前記受け部内で待機姿勢にあり、

落体が自由落下して受け部に受け取られると、前記移動機構によって前記昇降台が上昇することで、前記落体セット台座が前記落体のケース内部に下端から挿入して落体に下方から当接した状態で上方位置まで移動し、前記保持・離脱手段が落体を初期状態に保持し、

落体を初期状態に保持した後は、前記昇降台は、前記移動機構によって下方位置まで下降して待機姿勢となる。

【0014】

1つの態様では、前記落体の下方部位の外周面は、複数の面から平面視多角形状に形成されており（すなわち、多角形筒状部位となっている）、前記受け部は、前記落体が落下する時に、前記下方部位の複数の面に摺接する複数の摺接面を備えている。こうすることで、落体が落体受けに入る時に衝撃で光軸周りに回転することを防止し、したがって、落下する反射鏡（コーナリフレクター）の光軸周りでの回転が防止されるので、常に一定の偏光特性が保証され有利である。

1つの態様では、多角形筒状部位は、6つの垂直面を備えた六角形筒状部位であり、受け部には、前記6つの垂直面のうちの5つの垂直面に摺接する5つの摺接面が設けられるが、落体の光軸周りの回転を防止するためには、多角形筒状部位の面の数は6つに限定される必要はなく、また、摺接面の数も（面数 - 1）に限定されるものではない。

1つの態様では、前記摺接面は、板バネから形成されている。摺接面を板バネから形成することで、落体の多角形筒状部位の面が摺接面に接触した時に良好にブレーキが掛けられると同時に、落体の光軸周りの回転を防止できる。

【0015】

本発明は、上記自由落下装置を備えた重力計としても提供される。

1つの態様では、前記重力計は絶対重力計であって、

少なくとも前記自由落下装置を格納する真空容器と、

参照鏡と、

原子時計と、

落下鏡の位置を時系列的に測定するための干渉計と、

干渉計で得られる干渉波形と原子時計で特定される時刻とに基づいて重力加速度を算出する演算部とを有している。

【発明の効果】

【0016】

本発明は、機械振動による系統誤差混入を最小にし、かつ、落下中の物体の回転量を抑制して自由落下させることで、重力加速度の絶対値を、高精度かつ安定に測定することを可能とする。

保持・離脱手段によって落体を離脱させて単純に自由落下させるため、自由落下中の機械振動の発生がない。

【0017】

昇降可能な昇降台と前記昇降台を下方位置と上方位置との間で昇降させる移動機構と有する復帰機構を備えたものであっても、落体の自由落下中では、昇降台は待機姿勢にあって復帰機構の駆動系は停止しているため、機械振動の加速度は無視できる。

本発明では、落体の解放に用いる保持・離脱手段と、落体を受け取る受け部、落体を初

10

20

30

40

50

期状態に復帰させる復帰機構とを分離している。この点において、全てをカートが兼用する上述の F G 5 絶対重力計とは異質である。

【 0 0 1 8 】

落体 2 に突縁部を設け、突縁部の周面に重心を設定して、当該周面で落体を保持するものでは、自由落下する落体は、突縁部から下の部分が受け部に挿入されるため、突縁部の周面には傷が付かない。自由落下装置では、突縁部の周面で落体を保持するため、突縁部の周面に傷が付いて落下特性を損ねることがない。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 9 】

【図 1】重力加速度の測定の原理を示す図である。

10

【図 2】絶対重力計の全体概略図である。

【図 3】自由落下装置の全体概略図である。

【図 4】落体を分解して示す図である（落下鏡は図示せず）。

【図 5】ピエゾブロックを示す図である。

【図 6】落下鏡の回転に伴う誤差を説明する図である。

【図 6 A】各接触点と重心を結ぶ方向の力を示す概略図である。便宜上、2つの接触点及び2方向の力のみを示す。

【図 7】受け部を示す図である。

【図 8】昇降台を分解して示す図である。

【図 9】第 1 支柱を示す図である。

20

【図 10】自由落下装置のクランプ位置（接触子と落体の接触点）がほぼ落体の重心を通る水平面上の場合で、解放時間をえた際の落体の落下中の角速度を示す図である。解放時間を、1.0ms、0.46ms、0.20ms、0.10msとして測定を行った。

【図 11】自由落下装置のクランプ位置（接触子と落体の接触点）がほぼ落体の重心を通る水平面上の場合で、解放時間0.1msの場合の測定結果を示す。

【図 12】自由落下装置のクランプ位置（接触子と落体の接触点）が落体の重心から20mm上の水平面上で、解放時間0.1msの場合の測定結果を示す。

【図 13】他の実施形態に係る落体の筒状ケースを示す図である。

【図 14】他の実施形態に係る落体受け部を構成する受け部本体を示す図である。

【図 15】受け部本体が取り付けられる支持プレートを示す図である。

30

【図 16】支持プレートの下面に取り付けられる板バネ材を示す図である。

【図 17】他の実施形態に係る落体が、他の実施形態に係る落体受け部に受け入れられた状態を示す図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 2 0 】

【 A 】絶対重力計の全体構成

本発明に係る自由落下装置を備えた絶対重力計の実施形態について図面を参照しながら説明する。図 2 に示すように、絶対重力計は、真空容器 1 と、真空容器 1 内に設けられた落体鏡 2 0 を備えた落体 2 及び落体 2 を自由落下させる自由落下装置 3 と、参照鏡 4 と、光源 5 と、光源 5 から出射された光ビームを落体 2 に設けた落下鏡 2 0 及び参照鏡 4 に入射し、落下鏡 2 0 及び参照鏡 4 からの反射光の干渉を生成する光学系と、光学系により生成された干渉光を受光する光検出器 6 と、光検出部 6 の出力を高速サンプリングして干渉波形を取得する高速信号取得装置 7 と、原子時計 8 と、得られた干渉波形と原子時計（GPS 時計）8 での計測時間から重力加速度を算出する演算部 9 と、を備えている。

40

【 0 0 2 1 】

絶対重力計は、地面上に置かれた架台上に載設されている。図示の態様では、絶対重力計の上部構造（落体 2 、自由落下装置 3 を格納する真空容器 1 ）と下部構造とは別個の架台に載設されているが、絶対重力計全体を共通の 1 つの架台に載せてもよい。真空容器 1 への光の入射、真空容器 1 からの光の出射は真空容器 1 に形成した光学窓を通して行う。落下鏡 2 0 、参照鏡 4 を構成する光学素子としては、コーナキューブプリズムまたはコー

50

ナリフレクターが例示される。

【0022】

絶対重力計において、落下鏡20、参照鏡4、光源5、前記光学系、光検出器6、高速信号取得装置7から干渉計が構成されている。より具体的には、干渉計は、光ビームを出射する光源5としての波長安定化レーザと、光源5から出射された光ビームの導光部としての光ファイバー5Aと、光ファイバー5Aから出射された光ビームを参照鏡4に向かう第1の光ビームと落下鏡20に向かう第2の光ビームとに分割するとともに、参照鏡4を経由した第1の光ビームと落下鏡20を経由した第2の光ビームとを再結合させるビームスプリッター4Aと、再結合された光ビームの導光部としての光ファイバー5Bと、再結合された光を光ファイバー5Bを通して受光する光検出器6と、光検出器6の出力信号を高速サンプリングして干渉波形を取得する高速信号取得装置7と、を有している。尚、光ファイバー5A、5Bの先端にはコリメータが設けてある。10

【0023】

演算部は、干渉計で得られる干渉波形と原子時計で特定される時刻とに基づいて重力加速度を算出するが、重力測定は地面振動加速度の影響を受けるので、本実施形態では地面振動を取得して、算出した暫定的な重力加速度から、地面の震動の加速度を減算して、重力加速度を算出する。

【0024】

地面振動の加速度の取得について説明する。参照鏡4及びビームスプリッター4Aは、地面に垂直な方向に変位可能に片持ち状に支持された振り子40（コイルスプリング等のバネ材41により支持されている）に搭載されることで参照鏡ユニットを構成している。参照鏡ユニットは、制御機構によって、地面と参照鏡ユニットとの相対位置を保つように地面と同位相で振動するよう制御される。制御機構は、参照鏡ユニットの地面に垂直な方向の位置を検出するための位置センサー42と、位置センサー42により得られる参照鏡ユニットの位置情報を一定に維持するよう、参照鏡ユニットを地面に垂直な方向に変位させる制御部43と、を有している。制御部43から供給される制御信号（参照鏡ユニットの振動を発生させる制御力）は、地面の震動の加速度に対応している。20

【0025】

重力測定手法は基本的には特許文献2に記載されている手法と同じであり、必要に応じて特許文献2を参照することができる。また、本発明に係る自由落下装置が用いられる重力計は、上記の構成及び重力測定手法に限定されるものではなく、落体自由落下方式を採用する重力計全般に広く適用することができる。30

【0026】

[B] 自由落下装置

自由落下装置3は、落体2を初期状態に保持し、初期状態にある落体2を自由落下させるための保持・離脱機構と、自由落下する落体2を衝撃を吸収しつつ受け取る落体受け機構と、受け機構に受け取られた落体2を初期状態に復帰させるための復帰機構と、を備えている。復帰機構によって、落下して受け機構に受け取られた落体2を、再度、初期状態の高さまで運搬して、保持・離脱機構によって保持することで、落体2の再落下を可能とする。保持・離脱機構、落体受け機構、復帰機構は互いに独立している。40

【0027】

[B-1] 落体の構成

落体2は、鍔の付いた円筒形状のケース21と、ケース21内部に取り付けられた落下鏡（コナリフレクター）20と、を備えている。すなわち、ケース21は、円筒形状のケース本体と、ケース本体の外周面から水平方向に突出形成した突縁部（鍔）210と、を備えている。ケース21の下端は開口状となっており、ケース21の上端面の中央には小径の螺子孔211が形成されている。

【0028】

ケース21の上端面の上方には落下鏡20を固定するための円柱状ないし円筒状のシャフト22が取り付けられている。シャフト22の下端には螺子軸220が垂下状に設けて50

あり、シャフト 22 は、螺子軸 220 をケース 21 の上端面の螺子孔 211 に螺合させることでケース 21 に取り付けられる。螺子軸 220 の下端側は螺子孔 211 を通ってケース 21 の内部空間にまで延びており、螺子軸 220 の下端側に落下鏡 20 が取り付けられる。

【 0 0 2 9 】

また、シャフト 22 の上面には、落体の姿勢モニター用の円板状の平面鏡 221 が設けてある。上方からレーザ光を照射し、平面鏡 221 から反射してきたレーザ光の軌道から落体 2 の回転角速度を得ることができる。そこから落体 2 の回転によるみかけの重力誤差の予想値を計算することで、予測値を用いて重力値の補正を行うことができる。

【 0 0 3 0 】

落体 2 において、落下鏡（コーナリフレクター）20 の光学中心（光心）と落体 2 全体の重心とを一致させてある。本明細書において、光学中心と重心とを一致させるとは、光学中心と重心とのズレが 1 mm 以下であるような精度であることを意味し、このズレは 0 に近ければ近い方が望ましく、例えば、0.5 mm 以下の精度で光学中心と重心とのズレを一致させることは技術的に可能である。落下鏡 20 はケース 21 の内部空間の上方部位に取り付けられており、落下鏡 20 が取り付けられた高さ位置に対応して突縁部 210 が形成されている。シャフト 22 には、バランスリング 23 が取り付けられており、バランスリング 23 の高さ位置を調整することで、落体 2 全体の重心の高さを調整して、落下鏡 20 の光学中心と落体 2 全体の重心を一致させ、かつ、重心を通る水平面上に突縁部 210 の周面が位置するようにしてある。すなわち、落体 2 の製作に際して、突縁部 210 の周面を通る平面上に落体 2 の重心及び落下鏡 20 の光学中心を位置させる。

【 0 0 3 1 】

後述するように、自由落下する落体 2 は、突縁部 210 から下の部分が落体受け部 37 に挿入されるため、突縁部 210 の側面（周面）には傷が付かない。自由落下装置 3 では、突縁部 210 の側面で落体 2 を保持するため、突縁部 210 の側面に傷が付いて落下特性を損ねることがない。

【 0 0 3 2 】

[B - 2] 自由落下装置本体の構成

図 3 に示すように、自由落下装置 3 は、円板状の底板 30 と、底板 30 上に、互いに対向するように垂直状に立設された第 1 支柱 31 及び第 2 支柱 32 と、第 1 支柱 31、第 2 支柱 32 の上端に水平状に設けられた円板状の天板 33 と、天板 33 の上に水平状に設けられた円板状の上部取付台 34 と、自由落下装置 3 の下方側において、底板 30 の上方に位置させて、第 1 支柱 31 と第 2 支柱 32 間に水平状に支持された方形状の中間取付台 35 と、を備えている。底板 30、天板 33、上部取付台 34、中間取付台 35 の平面視の形状は上記形状に限定されない。

【 0 0 3 3 】

上部取付台 34 には、保持・離脱機構が搭載されており、中間取付台 35 には、落体 2 の受け機構が搭載されており、第 1 支柱 31 には、受け機構に受け取られた落体 2 を上昇させる復帰機構が設けてある。

【 0 0 3 4 】

[B - 3] 落体の保持・離脱機構

落体 2 の保持・離脱機構は、3 組のピエゾブロック 36 を備えている。図 5 に示すように、各ピエゾブロック 36 は、互いに離間する垂直状の前後壁 3600、3601 を備えた支持台 360 と、支持台 360 の前壁 3600 に水平方向にペアリング等を介して移動可能に水平状に支持されるスライドシャフト 361 と、スライドシャフト 361 の先端に設けた球面状接触子 362 と、スライドシャフト 361 の基端と支持台 360 の後壁 3601 間に設けたピエゾ素子 363 と、を備えている。支持台 360 の後壁 3601 にはピエゾ素子 363 へ電圧を印加ためのリード線の挿通孔が形成されている。本実施態様では、球面状接触子 362 はタンゲステン球面チップであり、ピエゾ素子は積層型ピエゾ素子である。

10

20

30

40

50

【0035】

上部取付台34には、中央の開口340を中心として、放射状に3つの凹部（図示せず）が120度間隔で延びてあり、各凹部に各ピエゾブロック36を配置することで、3組のピエゾブロック36は120度間隔で配置される。ピエゾブロック36は、上部取付台34の上面に形成した凹部に受け入れられた状態で固定金具364を用いて上部取付台34に固定される。ピエゾブロック36は先端の球面状接触子362の先端の高さが落体2の突縁部210の高さ範囲で落体2の重心を通る水平面上に位置するように調整される。ピエゾブロック36の数は3つに限定されるものではなく、複数の接触子が落体に側方から接触して落体を初期状態に保持できるものであれば、ピエゾブロック36の数は限定されない。例えば、中央の開口340を中心として、等間隔で放射状に延びる4組以上のピエゾブロックを配置してもよい。

10

【0036】

リード線（図示せず）を通してピエゾ素子363に電圧を供給すると、ピエゾ素子363が伸びてスライドシャフト361の先端の球面状接触子362が開口340に受け入れられた状態で後述する昇降台38に支持された落体2に向かって水平方向に変位して、球面状接触子362の先端が落体2の側面、具体的には、突縁部210の周面に点接触する。

ピエゾ素子363にチャージされた電荷を最適な時定数で放電すると、ピエゾ素子363は初期寸法まで縮んで、球面状接触子362は落体2（突縁部210の周面）から離れる方向に変位する。

20

【0037】

落体2の重心（落下鏡20の光学中心と一致している）を通る水平面上の3点で落体2を保持した後、この3点を自由落下装置から同時に高速離脱させることで、落体2を自由落下させる。落体2の離脱および重心の水平ラインを一致させる事により、落体2が保持された初期状態から自由落下に移行した時点における、落体2の重心点周りの回転を最小限に抑えることができる。

つまり、落体2が自由落下装置から離脱する際に、離脱線上に落体2の重心および光学素子の光心を置き、落体2の重心点周りに加わる力のモーメントを最小とすることで、離脱直後および自由落下中の落体2の回転を低減させる。

【0038】

30

自由落下時に保持された初期状態の落体の姿勢を維持させるため、離脱際の力積を小さくする。具体的には、落体2の保持と離脱を実行する自由落下装置の接触子362の変位に、ピエゾ素子363の高速変位駆動特性を直接利用して、落体2の保持および離脱（自由落下）を行う。ピエゾ素子の駆動側に、硬度が大きいタンクステン製の球面状接触子部を有することで、落体の離脱特性を向上させる。

ピエゾ素子の変位量を機械的に拡大しないで、本来の高速変位特性（高い共振周波数）を直接利用する事で、落体2の自由落下装置からの高速離脱により落体2に与える力積を最小とし、離脱直後および自由落下中の落体2の回転を低減させる。

【0039】

40

このように、本実施形態では、落体全体の重心を通る水平面上を通りるように真横から3つの接触子362で落体2の側面を把持し、短時間で解放することで、落体2に加わる実効トルクを低減し、落体2の回転を低減する。

このことは、理論的にも裏付けられる。落体の位置 x 、時間 t 、角速度 ω 、落体の重心と光学中心のズレ h とすると、落体の回転による誤差は以下のように考えることができる（図6参照）。

$$x = (1/2)gt^2 + h \cos(\omega t)$$

$$\sim (1/2)gt^2 + h (1 - \omega^2 t^2 / 2)$$

$$= (1/2)(g - h\omega^2)t^2 + h$$

【0040】

10

上記式から、光学中心と重心が一致していない場合、落体の回転にともない重力値誤差 $g = h^{-2}$ が発生することがわかる（ズレ h が正ならば重力加速度 g は必ず小さくなる）。図11と図12を比較することで、図12における重力加速度が図11における重力加速度よりも小さいことがわかる）。すなわち、重力値誤差を低減させるには、角速度を小さくする必要がある。例えば、妥協レベルの誤差として、 $h=0.1\text{mm}$ 、 $g=10\mu\text{gal}$ を想定した場合には、<30mrad/s、となる。また、目標クリアレベルとして、 $h=1.0\text{mm}$ 、 $g=1\mu\text{g}$ alを想定した場合には、<3mrad/s、となる。

【0041】

落体の回転を低減するには、落体にかかる実効トルク τ （ r ：重心から接触子までの位置ベクトル、 F が水平方向の場合には、落体の重心と力の作用点の位置の高さの差、 t ：解放時間（速度）、 F ：接触子により落体が受ける力のベクトル）を小さくすればよい。

20

$$|\tau| = r \cdot \Delta F \cdot \Delta t$$

$r \cdot F$ の部分は（重心から接触子までの位置ベクトル）×（接触子により落体が受ける力のベクトル）である（両者のベクトル積）。 r は接触点を通り F の方向の延長線に対して重心から垂線を下ろしたときの足の長さに対応し、 F は接触子により落体が受ける力の大きさに対応する。

保持力 (F) がほぼ水平を向いている場合には、落下直前に残った力 (F) も同様ほぼ水平を向いているとすることができる、重心と保持力の作用点の高さの差が r となる。したがって、1つの態様では、落体の重心を通る水平面上において、落体を真横から挟むことで、 r を 0 に近づけることができる（図6Aの左図）。尚、図6Aの中央図、右図に示すように、斜め方向から重心に向けて F の力で落体を保持することで、 r を 0 に近づけることができる。

30

また、ピエゾ素子を利用した高速離脱によって解放時間を短くすることで、 t を 0 に近づけることができる。本実施形態では、ピエゾ素子を利用して、落体を、落体の重心を通る水平面上の複数点で水平方向から落体側面に当接することで落体を保持し、落体を保持する前記複数点において複数の接触子を同時に水平方向に落体から退避（離間）することで落体を離脱させて、<2.4mrad/sを達成することができる。

図10に解放時間をえた際の落体の落下中の角速度を示す。解放時間を、1.0 m s、0.46 m s、0.20 m s、0.10 m s として測定を行った。解放速度は、ピエゾ素子に印加する電圧を変化させることで変化させることができる。解放時間が 0.46 m s、0.20 m s、0.10 m s の場合には、<3mrad/sを満たすことがわかる。

40

【0042】

底板30、天板33、上部取付台34、中間取付台35の中央には同心状の円形の開口300、340、350が形成されており、各開口の中心は同一鉛直線軸上にある。取付台34の開口340は、落体2が挿通できる寸法に形成されており、落体2は上半部が取付台34の上方に突出した姿勢で保持・離脱機構に保持され、落体2は離脱時に開口340を通して自由落下する。

【0043】

50

[B - 4] 落体の受け機構

図7に示すように、受け機構を構成する受け部37は、上下端が開口状の円筒状部からなり、円筒状部の上方部位は大径の縁部370が一体形成されており、縁部370には3つの挿通孔371が形成されている。各挿通孔371には円筒状のリニアブッシュ（図示せず）が挿入されており、受け部37の上下方向ガイドに使用される。また、受け部37の第1支柱31に対向する部位は高さ全体に亘って切り欠かれており、スリット372が形成されており、受け部37は平面視C型の円筒形状となっている。受け部37の中央の開口内には、円筒形状の内側面に沿って、スリットの入った平面視C型形状のリニアブッシュ（図示せず）が設けてある。

【 0 0 4 4 】

10

中間取付台35には3本のロッド351が立設されており、ロッド351には圧縮バネ352が外装されている。受け部37の縁部370の挿通孔371にはロッド351が上記3つのリニアブッシュによって上下方向に案内されるように挿通されており、受け部37は3本の圧縮バネ352を介してロッド351に上下動可能に支持されており、自由落下した落体2が受け部37に当接した時の衝撃を吸収している。上記中央のリニアブッシュが落体2に接することで、受け部37に受け取られた落体2は定められた位置（後述する昇降台38の上昇時に、落体2の下端の開口が後述する落体セット台座381にスムーズに嵌るような位置）にガイドされる。

【 0 0 4 5 】

20

自由落下する落体2は、落体2のケース21の略下半部が受け部37の上端の開口から内部空間に進入し、落体2のケース21の突縁部210の下面が受け部37の上面に当接することで受け部37に受け取られる。したがって、落体2の自由落下の際に、接触子362が接触する部位である突縁部210の周面に傷が付くようなことがない。本実施形態では、落体2を自由落下させるために解放する機構の工作精度が高いために、落体2の突縁部210の周面に傷があるとうまく解放されず、落下タイミングがずれたり、落体2に回転が発生するおそれがある。

【 0 0 4 6 】

[B - 5] 復帰機構

復帰機構は、受け部37に受け取られた落体2に下方から係止して、落体2を上部取付台34まで上昇させる昇降可能な昇降台38と、昇降台38を下方位置と上方位置との間で昇降させる移動機構と、からなる。昇降台38は天板33の下面に接近した高さ（上方位置）と受け部37の底部（下方位置）との間を移動し、上方位置において、自由落下させる落体2を保持する初期状態の高さ位置にセットする位置決め状態をとり、下方位置において、落体2の落下を待ち受ける待機状態をとる。真空中の昇降台38の移動は、回転導入機を介して、大気側からモータを駆動源として行う。

30

【 0 0 4 7 】

第1支柱31には、第1支柱31の高さ方向に沿って垂直状に延びる溝部310が形成されており、溝部310には真空対応型の直動機構（テーブル382とガイド383とかなるLMガイド）が設けてあり、テーブル382が垂直状に延びるガイド383上を上下方向に移動可能となっている。

40

【 0 0 4 8 】

第1支柱31の下方部位には、ガイド溝310の下側に位置して、水平状に延びる第1軸311、第2軸312が回転自在に支持されている。第1軸311の基端側は真空容器1の壁面に設けた回転導入機（図示せず）を介して大気圧側のモータ（図示せず）の回転軸に連結されている。第1軸311、第2軸312には、径の異なるスプロケット313、314が設けてあり、スプロケット313とスプロケット314はチェーン315によって伝動連結されている。スプロケット313、314とチェーン315は変速機構を構成している。第2軸312の先端側にはスプロケット316が設けてある。

【 0 0 4 9 】

上部取付台34には、第1支柱31の直上に位置して、水平状に延びる第3軸317が

50

回転自在に設けてあり、第3軸317の先端側にはスプロケット318が設けてある。スプロケット316とスプロケット318は同一鉛直線軸上に位置しており、スプロケット316とスプロケット318との間にはチェーン319が巻き掛けされている。天板33及び上部取付台34には、チェーン319を挿通させるための開口が形成されている。

【0050】

昇降台38は、水平状に延びるアーム380と、アーム380の先端に設けた落体セット台座381と、からなり、アーム380の基端はLMガイドのテーブル382に連結されており、昇降台38は上下動可能となっている。テーブル382は鉛直方向に平行状に延びるチェーン319の一方と連結されており、スプロケット316、318間に巻回されたチェーン319の回転によりチェーン319の一方が昇降することに連動してテーブル382、すなわち、昇降台38が昇降するようになっている。10

【0051】

落体セット台座381は上下端が開口状（レーザ光を通すため）の略円筒形状を備え、上方部位は上方に向かって漸次縮径するテープ状となっている。落体セット台座381は落体2のケース21の下端の開口から落体底部内面に挿入して下方から落体2に係止し、昇降台38を上昇させることで落体2を上方に移動させる。落体セット台座381の下方部位の直径は、落体2の保持時の位置決め精度を確保するため、落体2の下半部の内部空間に挿入してフィットするように高精度に加工されている。より具体的には、落体2の下半部の内径と落体セット台座381の下方部位の外径は略同じである。保持・離脱手段の接触子362の水平方向の変位量（ピエゾ素子363の変位量）は小さく、落体2と接触子362（落体2から離れる方向に変位した状態）とのギャップは狭くなっている。昇降台38は、このような狭いギャップの範囲内に落体2を位置させるべく、上方位置（位置決め状態）において、精度良く落体2の位置決めを行う必要がある。20

【0052】

昇降台38は、アーム380が受け部37のスリット372を通過することで、受け部37と接触することなく上下に移動できるため、昇降台38の昇降時に受け部37に傷が付くことがない。このように受け部37にも傷が付きにくいため、受け部の傷が落体を上部に移動させる際に抵抗になったり、傷から発生した粉末が光学特性に影響を与えることがない。

また、昇降台38の落体セット台座381が落体底部内面に挿入した状態で落体2の内側を用いて支持しながら上昇するため、仮に、落体の外側表面や受け部に傷が付いていたとしても、傷による抵抗や位置決め誤差等の影響を受けない。30

【0053】

図示しないモータによって第1軸311を回転させると、第1軸311に伝動連結された第2軸312が回転し、スプロケット316とスプロケット318との間に巻回したチェーン319が回転する。平行するチェーン319の一方の昇降に連動して昇降台38が昇降する。

移動機構は図示のものに限定されるものではなく、高真空対応部品からなる他の伝動機構を用い得ることが当業者に理解される。例えば、巻き掛け伝動機構について、チェーンとスプロケットの組み合わせに代えて、ベルトとブーリーを用いてもよい。また、巻き掛け伝動に代えて、ギア同士を直接噛合させた伝動機構を用いてもよい。40

【0054】

[C] 他の実施形態

本発明の他の実施形態を、図13～図17に基づいて説明する。落体2の基本的な構成は既述の実施形態の記載を参照することができ、また、同一の参照番号が付された要素については既述の記載を援用することができる。

【0055】

[C-1] 落体の構成

図13に示すように、落体2の落体ケース21'は、図4下図に示す落体ケース21と同様に、上端面を備え、下端側が開口状の略円筒形状を備えている。50

より具体的には、ケース 21' は、外周面が平面視円形状である円筒部位 21A と、外周面が 6 つの垂直面から平面視六角形状に形成されている下方部位（多角形筒状部位）21B と、からなる。

円筒部位 21A の外周面には、上側の第 1 突縁部 11、下側の第 2 突縁部 12 が、それぞれ外周面全周から水平方向に突出形成されている。

落体ケース 21' の内部には反射鏡が取り付けられ、上端面には落下鏡固定用のシャフトが取り付けられ、また、シャフトにはカウンターウェイト（バランスリング）が取り付けられるが、これらの要素の構成や説明については、既述の記載を参照することができる。

【0056】

落体ケース 21' の円筒部位 21A に形成されたリング状の第 1 突縁部 11 は縦断面視半円状であり、すなわち、周面が球面状に形成されている。第 1 突縁部 11 の周面を球面状に形成することで、落体全体の重心と反射鏡（コーナリフレクタ）の光心を一致させてなる落体が、自由落下装置から離脱されて落下する際、重心（光心）を通る水平面上の複数点（典型的には 3 点）で確実に離脱できるようにしている。

図 13 を参照して説明すると、第 1 突縁部 11 の球面の中心を通る水平面 P が円筒状の落体ケース 21' の円筒部位 21A の中心を通る点に、反射鏡（コーナリフレクタ）の光心（同時に落体の重心）をセットする。すなわち、第 1 突縁部 11 の最外縁部を通る水平面 P 上に落体 2 の重心及び落下鏡 20 の光学中心を位置させる。

落体ケース 21' の外周面の全周において水平状に突成された第 1 突縁部 11 の球面状の周面の最外縁部を通る水平面 P が落体の重心（光心）を通る水平面上に一致させるよう落体を製作することで、落体回転を最小限に抑えることができる。落体の第 1 突縁部 11 の最外縁部に接触して落体を保持する複数の接触子 362' の先端の接触部を平面（典型的には垂直面）から形成し、各接触子 362' の平面状の接触部が落体の第 1 突縁部 11 の最外縁部に接触して落体を保持し、また、接触状態から離間させることで、落体の離脱位置を、常に重心（光心）を通る水平面上に一致させることができ、より安定した落下特性を得ることが可能となる。

【0057】

下側の第 2 突縁部 12 は、落体 2 が自由落下して落体受け部 37' に挿入される際のストッパーであり、第 1 突縁部 11 の球面を落下時の衝撃から保護している。自由落下する落体 2 は、第 2 突縁部 12 より下側の部分が落体受け部 37' に挿入されて、第 2 突縁部 12 の水平状の下面が落体受け部 37' に当接するため、上側の第 1 突縁部 11 の球面（落体の保持部）に直接衝撃が加わることがなく、繰り返しの使用や経年使用等によって、落下特性を損ねることがない。

【0058】

[C - 2] 受け部の構成

落体受け部 37' は、受け部本体 37A と、受け部本体 37A を支持する支持プレート 37B と、支持プレート 37 の下面に取り付けられる 5 枚の板バネ材 37C と、からなる。

図 14 に示すように、受け部本体 37A は、中空部に落体を受け入れる円筒状部 370A と、円筒状部の上端部位に一体形成した大径の縁部 371A と、からなり、また、側部を高さ全体に亘って切り欠いてスリット 372A が形成されており、平面視 C 型の円筒形状となっている。図 17 に示すように、落下する落体 2 の落体ケース 21' の第 2 突縁部 12 の下面是、縁部 371A の上面に当接する。

図 15 に示すように、支持プレート 37B は、中心に開口 370B を備えた円板を切り欠くと共に、切り欠き部から開口 370B と連通するスリット 372B を形成することで平面視 C 型に形成されたプレートである。支持プレート 37B は、3 つの挿通孔 371B を介して、図示しない 3 本のロッドにより所定の高さ位置に支持固定される。

支持プレート 37B の中央の開口 370B は受け部本体 37A の円筒状部 370A を挿通できる寸法となっており、受け部本体 37A は、スリット 372A とスリット 372B

10

20

30

40

50

を一致させるように位置合わせし、円筒状部 370A が支持プレート 37B の開口 370B を挿通して下方に突出し、縁部 371A の下面が支持プレート 37B の上面に当接した状態で支持プレート 37B に取り付けられる（図 17 参照）。

図 16 に示すように、板バネ材 37C は、支持プレート 37B の下面に固定される水平状の取付片 370C と、支持プレート B の下面よりも下方に延びる受け部本体 37A の円筒状部 370A の外周面に沿って延びる片 371C と、円筒状部 370A の中空部の下方に位置して垂下する垂直片 372C と、垂直片 372C の下端から外側に向かって傾斜状に延びる傾斜片 373C と、からなる。落下する落体 2 が受け部 37' に受け取られる時に、円筒状部 370A の中空部を挿通して下方に突出する落体ケース 21' の下方部位 21B の垂直面 13 が板バネ材 37C の垂直片 372C の面に接触するようになっている。10

5 つの板バネ材 37C は、各垂直片 372C が、落体ケース 21' の下方部位 21B の 6 つの垂直面 13 の 5 つの垂直面にそれぞれ対応して位置するように、支持プレート 37B の下面に取り付けられる。より具体的には、落体が落下して受け部 37' に受け取られる時に、落下する落体の落体ケース 21' の下方部位 21B の 5 つの垂直面 13 が 5 つの垂直片 372C に摺接しながら下方に移動するように配置される。落体が落下する時に、複数の板バネ材 37C の垂直片 372C が、受け部本体 37A から下方に突出する落体ケース 21' の下方部位 21B に摺接しながら押さえ込んでブレーキを掛けて、衝撃吸収と回転防止作用を発揮する。

昇降台 38 との干渉を防止するために、受け部本体 37A のスリット 372A、支持プレート 37B のスリット 372B に対応する位置には、板バネ材 37C は設けられない。20
1 つの態様では、板バネ材 37C の幅寸法は、少なくともスリット 372A、372B の幅寸法よりも大きい寸法を備えている。

【0059】

本実施形態では、落体ケース 21' の下方部位 21B の外周面の形状と、複数枚の板バネ材 37C によって、落体の光軸まわりの回転を規制している。落体の鉛直軸つまり、落下する反射鏡（コーナリフレクタ）の光軸回りの回転は、反射光の偏光特性に影響を与えるため、好ましくない。通常の円筒状の落体形状では、落下時に落体が落体受けに挿入される際の衝撃で、光軸回りの回転が生じ得る。これを防止するため、落体ケース 21' の下方部位 21B を六角筒状に形成して、この六角平面に対して、落体受け部 37' の下方側に設けた複数（本実施形態では 5 枚）の板バネ材 37C の垂直片 372C が摺接して接触摩擦で押さえ込むことで、落下する落体 2 の衝撃を吸収すると共に、回転を抑制する。30
この方式を採用することで、落下回数によらず、常に一定の偏光特性を維持し、干渉縞信号の特性を向上できる。

【0060】

本発明に係る自由落下装置は、シンプルな構造であるため、絶対重力計の小型軽量化が可能になり、小型で可搬性に優れかつ安価な絶対重力計が提供できると共に、観測作業の効率化が計れる。

本発明は、これらの実施の形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において様々な変形や変更が施され得ることが当業者に理解される。

【産業上の利用可能性】

【0061】

本発明は小型軽量の絶対重力計を提供することができ、重力測定が必要とされる地震火山噴火予知研究や物理標準（質量）、資源探査、精密計測技術の研究開発などに利用可能である。

【符号の説明】

【0062】

2 落体

20 落下鏡

21 ケース

210 突縁部

10

20

30

40

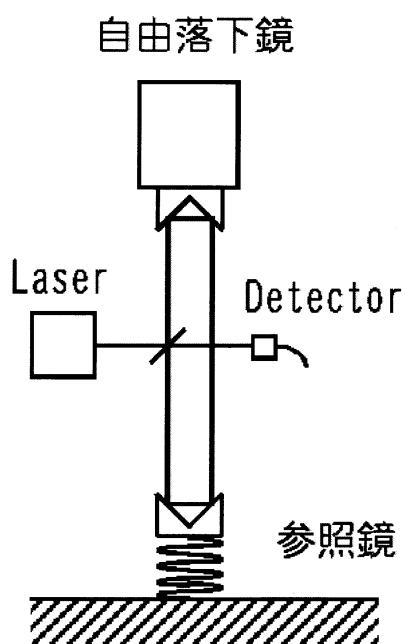
50

3 自由落下装置

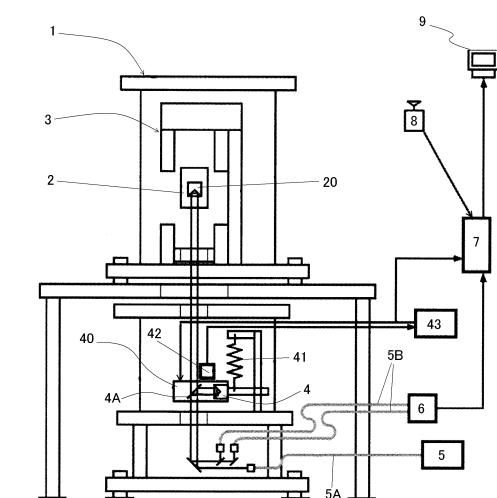
3 6 2 接触子

4 参照鏡

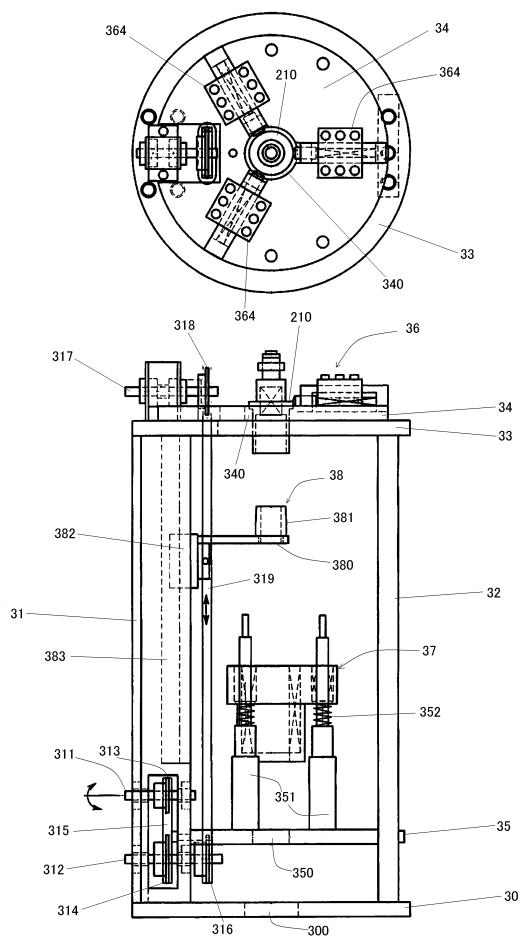
【図1】



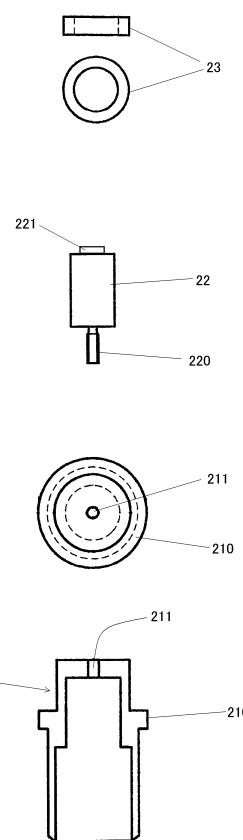
【図2】



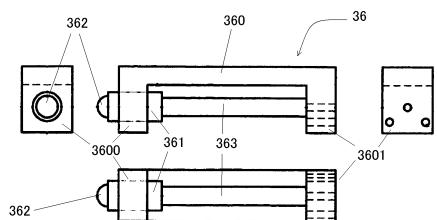
【図3】



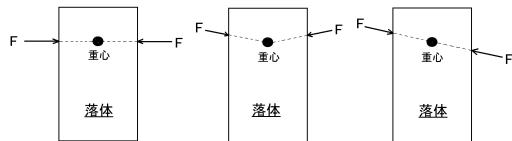
【図4】



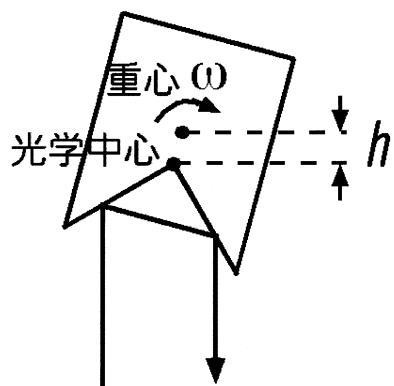
【図5】



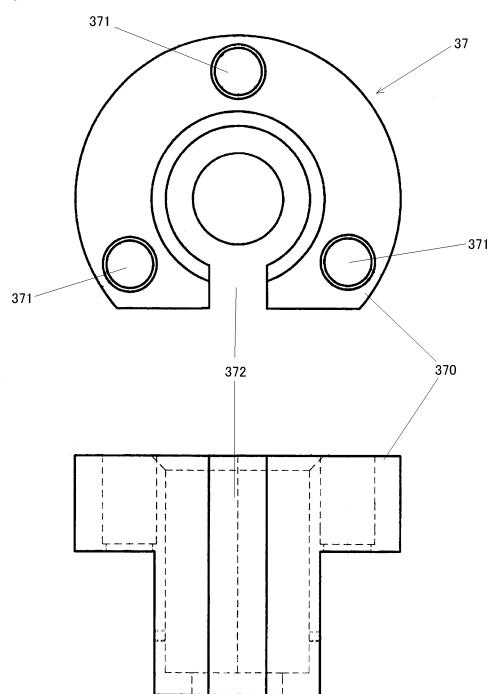
【図6A】



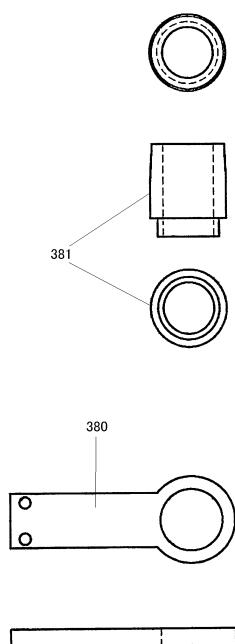
【図6】



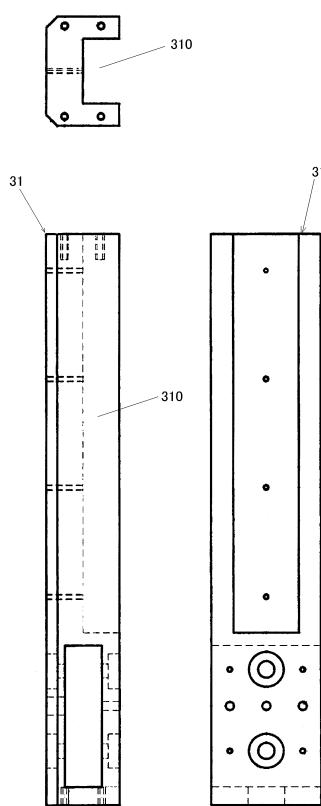
【図7】



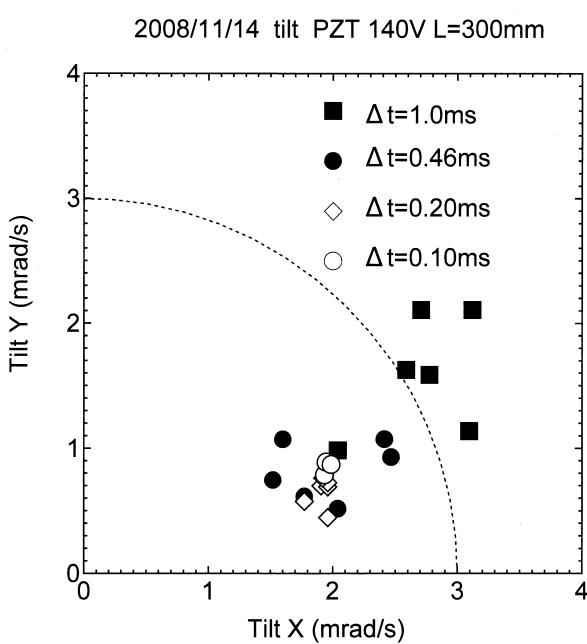
【図8】



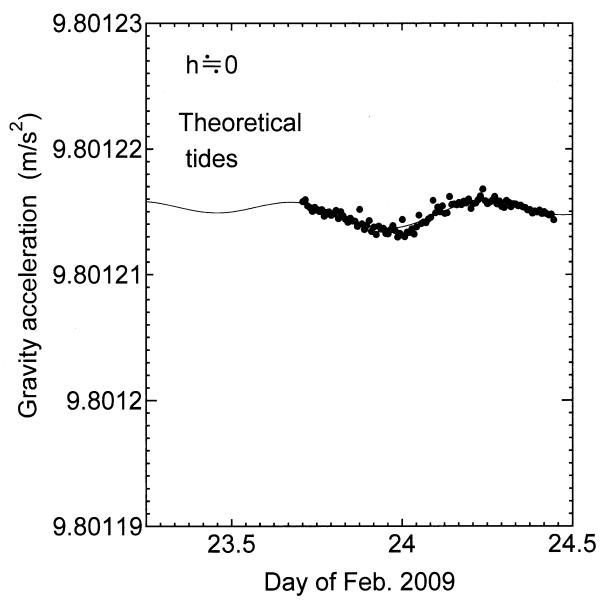
【図9】



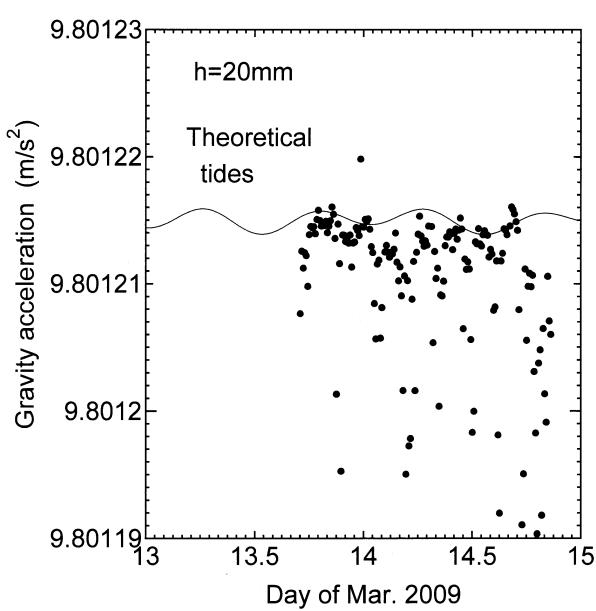
【図10】



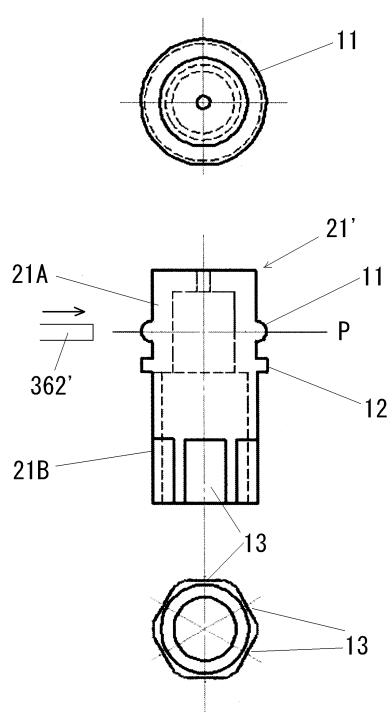
【図 1 1】



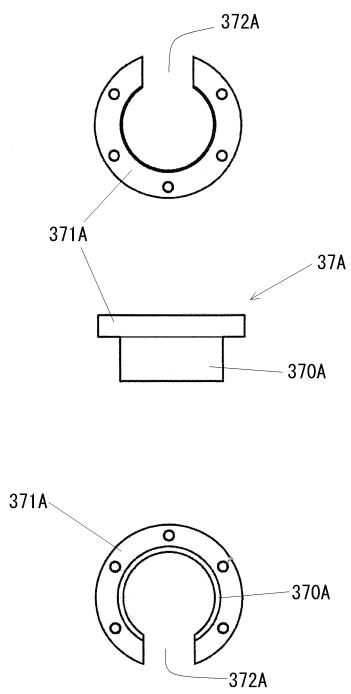
【図 1 2】



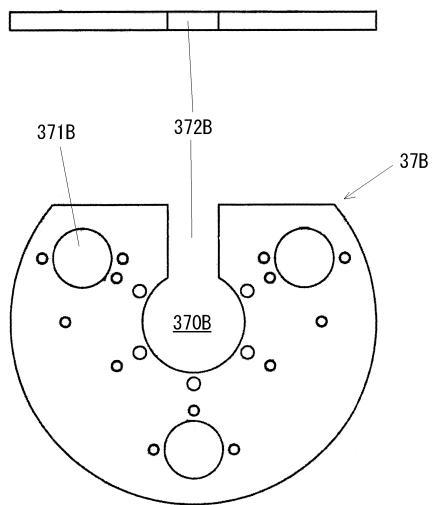
【図 1 3】



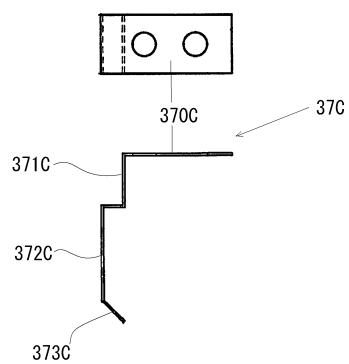
【図 1 4】



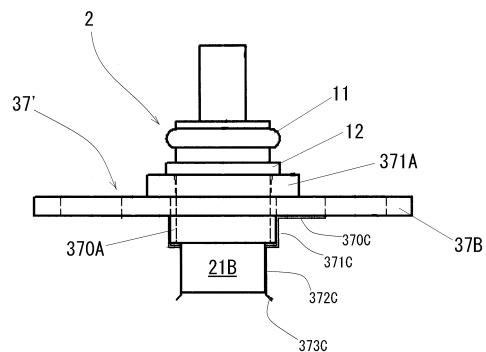
【図15】



【図16】



【図17】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平05-164774(JP,A)
特開2003-215151(JP,A)
特開2009-115525(JP,A)
坪川恒也、他、絶対重力計用落下装置「Silent Drop」の改良、日本測地学会講演会
要旨、1996年、P.38
坪川恒也、絶対重力計用落下装置の開発、KEK Proceedings, 2004年、3-
007
坪川恒也、他、絶対重力計用落下装置(silent drop)の開発、日本測地学会講演会
要旨、2010年、P.17-18

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01V 7/14
G01P 15/03