

1 万有引力定数の測定

ーキャベンディッシュ装置の原理と実験ー

キャベンディッシュ装置にレーザー光を用いて、ねじりばかりの回転角を測定し、万有引力定数を求める。また、万有引力が、作用する距離の2乗に反比例することを検証する。

【使用実験機器】キャベンディッシュ装置

§ 1 はじめに

ニュートンは物体を地面に落とす力は、惑星を太陽の周りに軌道を描いて回らせている力と同じものであることに気づいた。1687年に「プリンキピア」のなかで、太陽と惑星間に働く引力は、その距離の二乗に反比例し、物体の質量に比例することを示した。これをニュートンの万有引力の法則という。

$$\text{万有引力の法則 } F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (G = 6.672 \times 10^{-11} [\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2] : \text{万有引力定数})$$

1798年、ヘンリー・キャベンディッシュは、一部屋をまるごと占拠した装置を使って、地球の質量を計算した。キャベンディッシュの実験装置[3]を図1に示す。二つの小さい鉛の球が、ワイヤーによって吊られた自由に回転できる棒の両端に吊り下げられている。二つの大きな鉛の球を支える梁を回転させ、大小の球を互いに接近させる。すると大小の球の間に生じた万有引力によって棒が回転する。一方、小球を吊したワイヤーはねじれるので、ねじれ力が働き万有引力とつり合う。キャベンディッシュは、この振れる量を測ることで、質量のわかっている球同士が所定の距離だけ離れているときに生じる引力を計算した。これから、ニュートンの万有引力の法則を用いて、地球上で観測されるような重力の力を生むためには、地球がどれだけの質量を持っているか計算した。

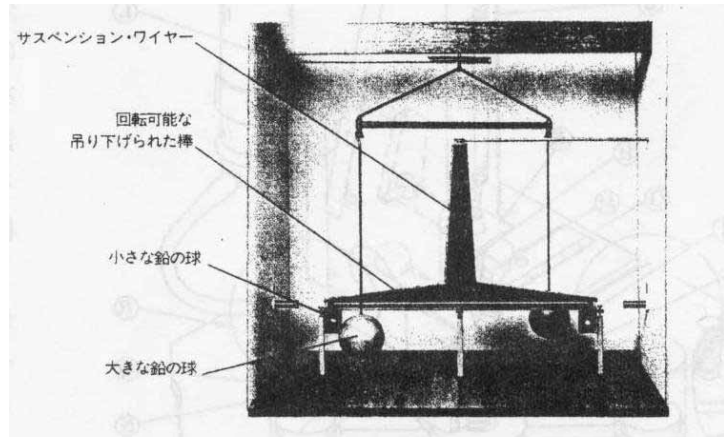


図1 キャベンディッシュの実験装置[3]

ここでは、このキャベンディッシュの装置を小型化した装置を使って、万有引力定数 G を求める。この測定法には、最終変位法（実験）と、加速度法（実験）とがある。最終変位法は、測定精度が良く一般的である。一方、加速度法は、測定法が簡単で測定原理も理解しやすいが、測定前に1～2時間放置して安定させる必要があり、また最終変位法に比べ測定精度がやや劣る。最後に、この装置を使って、万有引力の距離依存性(逆二乗則)についても検証する（実験）。

§ 2 万有引力実験器の部品名と装置の構造

1 部品明細

- 本体
- 大鉛球
- スライダー
- 鉛球支持管
- 制動油
- 制動 / 加速用磁石
- 部品箱... を収納
- カバー

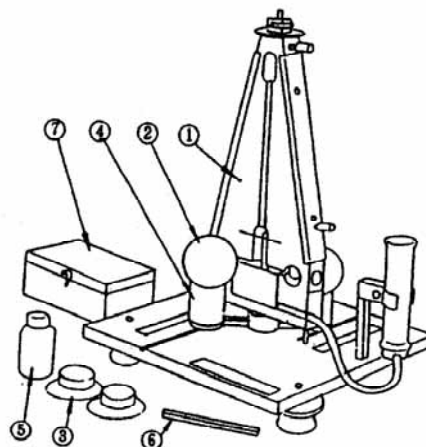


図2 部品構成

2 構造

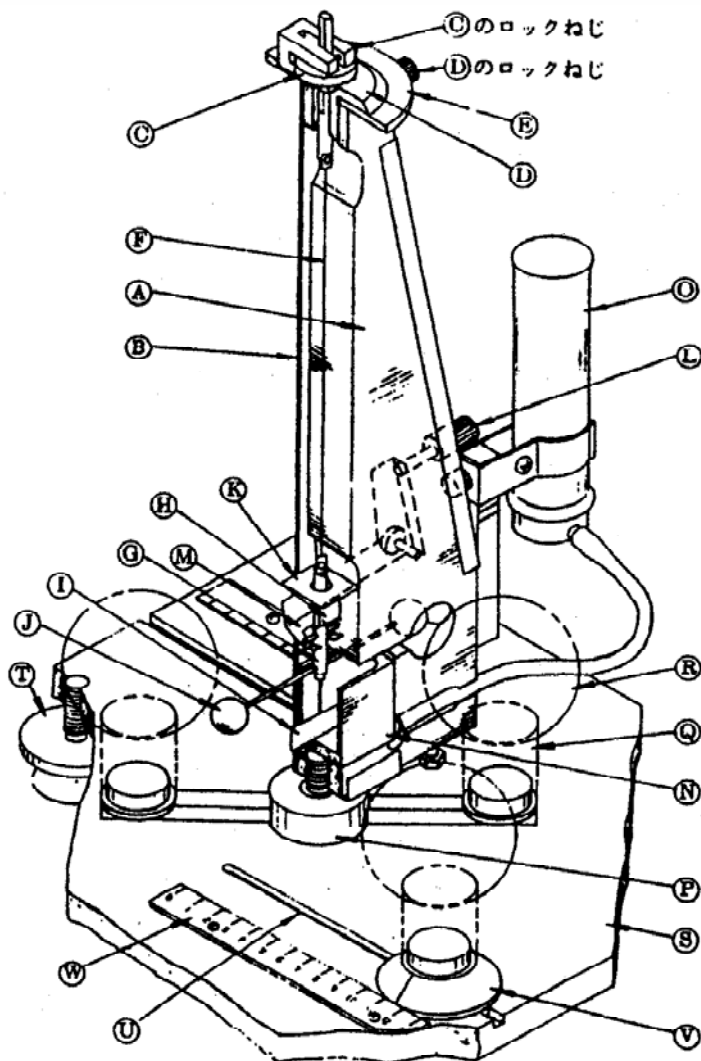


図3 装置の構造

ねじりばかりは、アルミニウムのケースAに納められ、両面からガラス板Bで囲まれている。頂部にはねじりばかりの上下調節ナットCと、角度調節器Dがあり、回転角を知るための角度目盛盤Eがついている。

吊線Fは長さ約20cm、断面が0.01×0.15mmのリン青銅のリボンで、ねじで上下につないである。ダンベル型おもりGが吊線で吊っており、その回転軸には凹面鏡Hと制動板Iがあり、また回転軸から5.0cm離れて質量16gの小鉛球Jが取り付けられている。また、ねじりばかりは、しきり板Kを通してある。

ケース側面のロックつまみLを回せば、フォークMが上下して、ダンベル型おもりを持ち上げて固定したり自由にしたりできる。

【注意】装置をわずかでも移動するときには、必ず固定状態にしておく必要がある。

ダンパー槽Nはケースの内にはめ込まれ、中に制動油を入れると制動板との作用で、振動をすみやかに吸収する。ガラス製の油だめOは制動油の出し入れに用いる。

ケースAの下には万有引力定数を測定するための鉛球旋回台Pがあり，鉛球支持管Qを介して大鉛球Rをのせる。

これらの装置はアルミニウムのベースSにしっかりと固定されている。ベースの下面には，鉛直軸を合わすための調節足Tが3ヶ所にある。上面にあるチャンネルUは逆二乗の法則の検証に使うスライダーVがはまり，鉛球支持管を介して大鉛球をのせる。この時の大鉛球と小鉛球の距離は，スライダー用目盛盤Wで示される。

3 測定の準備

(1) 実験装置および器具

- ・万有引力実験器 GN-10
- ・教育用レーザ装置 GLG-5014
- ・レーザ用光学台 LD-43形
- ・スケール 1m/1mm目盛
- ・防震台 VAM-1

(2) 装置の配置

- ・設置場所の条件 熱的に安定した場所。
(直射日光，ファンヒーターなどの熱源から遠ざける。)
床は振動を伝えにくく，机は強固でガタのないもの。
不特定の人が装置に触れることのない場所。

上記の設置場所に，万有引力実験器を防震台にのせて設置し，図4のように，レーザ装置とスケールを配置する。スケールは，ねじりばかりの凹面鏡の焦点距離が約2mなので，2m離れた付近がよい。

【注意】振動を与えないように防震台にのせること。実験中，机に触れないこと。

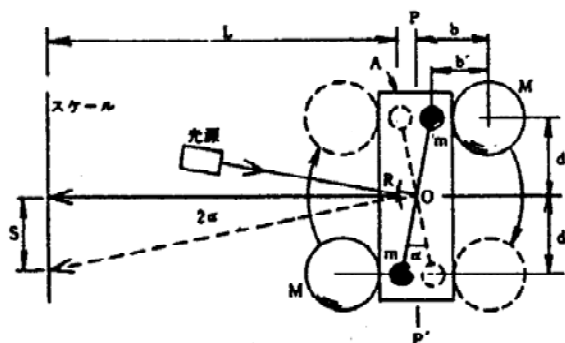


図4 装置の配置

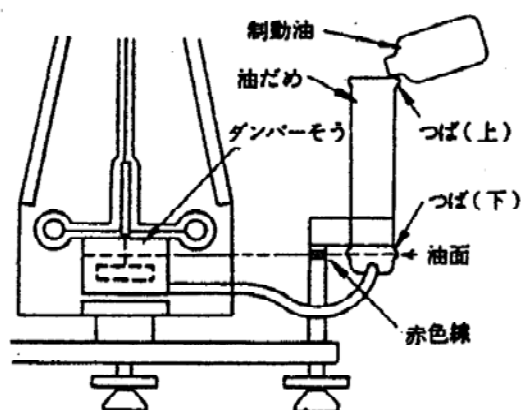


図5 オイルダンパー

(3) 装置の調整

ねじりばかりのロック用つまみを時計方向に回しきって，ねじりばかりを自由にする。調節足を回して，ダンベル型おもりの回転軸をしきり板の穴の中心と一致させる。以下の順序でオイルダンパーをセットする。

- ・図5のようにつば(下)が当たるまで，油だめを引き上げる。
- ・油だめに制動油をゆっくりと注ぐ。連通管を通してダンパー槽に油が入っていくが，

最終的な油の液面が支柱に記入してある2本の赤色線の間になるようにする。このとき、ダンパー槽では、上から約1 cmまで油が入ったことを確かめる。あふれないように注意すること。

- ・油だめの口には、ホコリ除けにガーゼをかぶせ、ゴムバンドで止めること。
- ・装置の移動時やオイルダンパーを無効にしたいときは、油だめをつば(上)が当たるまで下げる。オイルダンパーを効かすときは、つば(下)が当たるまで油だめを引き上げる。
- ・オイルダンパーが無効の時、ねじりばかりの静止には2時間はかかり、有効の時には20分ほどかかる。

レーザー光を凹面鏡で反射させ、スケールに輝点を合わせる。このとき、レーザー光がほぼ水平になるように、レーザー光源装置の高さを合わせる。ねじりばかりが振動していれば、ケース内でガラス板に当たるので、制動/加速用磁石の磁極を小鉛球に近づけ、輝点の左右の運動限界がスケール内に収まるように、スケールの位置を決める。左右の限界を読み取る。

次に、輝点が静止するのを待ち(1～数時間)、輝点が左右の限界の中心にあることを確認する。もし、左右の限界の間隔の10%以上離れているときは、ねじりばかりの角度調節器を回して補正する。

大鉛球を実験目的に合わせて台にのせておく。

【注意】温度が変わるのを防ぐため、実験中は触ってはいけない。

§ 3 実験 : 最終変位法

1 解説

この方法は、ねじりばかりが静止したときの最終的な回転角を測定する方法で、図4は図6のねじりばかりを上から見たものである。回転軸Oの下端から水平距離dだけ離れたところに、小鉛球mがある。2つの小鉛球を結ぶ腕の中央には凹面鏡Rが取り付けられてあり、ねじりばかりの回転角をスケールに投影した光源の像(以下輝点とする)の移動量Sにより拡大して読み取れるようになっている。

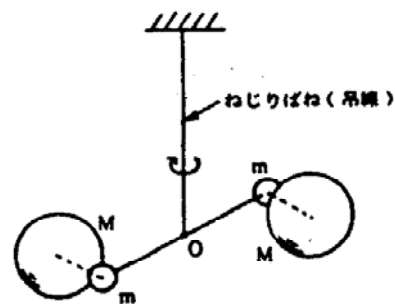


図6 基本構成

ねじりばかりはケースAに収納してあり、Aのガラス板に密着して2つの大鉛球Mが置かれ、Oに対し対象的な位置にある。大鉛球Mの中心と小鉛球mの中心を結ぶ線は、ケースAの厚みの中心p - p'を結ぶ線と直角になっている。小鉛球mは実際にはほとんどp - p'上にあると考えてよいので、このとき大鉛球Mと小鉛球mに作用しあう万有引力Fによる偶力のモーメントNは、 $N = 2 F d$ となる。

従って、ねじりばかりはねじられて、 $N = 2 F d$ とつり合う反対向きの回転モーメント $N' = c (\theta / 2)$ が生じて静止する。ここで、角 θ は大鉛球が反転して引力が逆向きになった時のねじりばかりの回転角で、また、比例定数cは吊線の単位ねじれ角あたりの力のモーメント(ねじり剛性率)である。

$N = N'$ だから $2 F d = c (\quad / 2)$ より

$$F = \frac{c \cdot}{4 d} \quad \dots(1)$$

ここで大鉛球Mを回転対称の位置(点線の位置)へ移動させると、ねじりばかりは逆方向のモーメントを受け、点線の位置で新たなつり合いに達する。回転角 θ はスケールに投影された輝点の移動量Sから測定できる。

反射鏡からスケールまでの距離をLとすると、 $S / L = \tan 2 \theta$ ($L \gg S$ より θ は非常に小さいため)が成り立つ。

$$\theta = \frac{S}{2 L} \quad \dots(2)$$

吊線のねじり剛性率cは、ねじれ振動 $I d^2 \theta / dt^2 = - c \theta$ の振動周期 $T = 2 \pi \sqrt{I/c}$ から求められる。ねじりばかりの回転軸Oのまわりの慣性モーメントIは、腕の質量を無視すると、 $I = 2 m d^2$ で表せる。よって、吊線のねじり剛性率cは、過渡振動の周期Tを測定することにより次式で表せる。

$$c = \frac{4 \pi^2 I}{T^2} = \frac{8 \pi^2 m d^2}{T^2} \quad \dots(3)$$

(2)式の θ と(3)式のcを使うと(1)式のFは、

$$F = \frac{c \cdot}{4 d} = \frac{1}{4 d} \cdot \frac{8 \pi^2 m d^2}{T^2} \cdot \frac{S}{2 L} = \frac{\pi^2 m d S}{T^2 L} \quad \dots(4)$$

一方、質量がそれぞれM, mで中心間の距離がbの2物体にはたらく万有引力の大きさは、

$$F = G \frac{M m}{b^2} \quad \dots(5)$$

(5)式と(4)式からFを消去すると、万有引力定数Gは、

$$G \frac{M m}{b^2} = \frac{\pi^2 m d S}{T^2 L} \quad G = \frac{\pi^2 b^2 d S}{M T^2 L} \quad \dots(6)$$

よって、小鉛球の質量mは測定する必要がなく、大鉛球の質量M, ねじりばかりの振動周期T, 投影距離L, 大小の鉛球間の距離b, 腕の長さd, 輝点の移動量Sを測定することにより万有引力定数Gを求めることができる。

補正

小鉛球は大鉛球M₁から力Fを受けると同時に、斜め後方にある大鉛球M₂からも力fを受ける。

図7においてM₂とmの距離は $\sqrt{b^2 + 4 d^2}$ となるので、

$$f = G \frac{M m}{b^2 + 4 d^2} = \frac{b^2}{b^2 + 4 d^2} F \quad \dots(7)$$

ここで、(5)式を使った。

fのFと反対向きの分力f'は、

$$f' = f \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4 d^2}} \quad \dots(8)$$

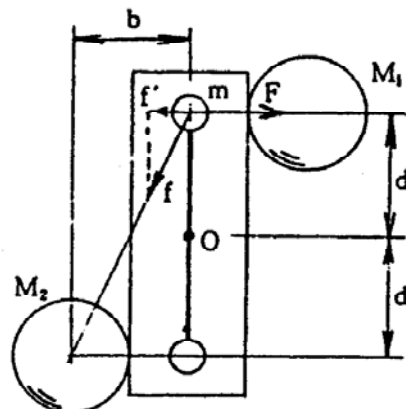


図7 補正係数の説明

(8)式に(7)式を代入して、

$$f' = \frac{b^3}{(b^2 + 4d^2) \sqrt{b^2 + 4d^2}} \quad F = F \quad \dots (9)$$

ただし

$$= \frac{b^3}{(b^2 + 4d^2) \sqrt{b^2 + 4d^2}} \quad \dots (10)$$

図7より実際に小鉛球にはたらいっている力は、 $F - f' = F - F = (1 -)F$ となる。従って、(1)式のFを $(1 -)F$ で置き換えると、

$$(1 -)F = \frac{c \cdot}{4d}$$

となり、(5)式を代入してGを求めると、

$$G = \frac{1}{(1 -)} \cdot \frac{^2 b^2 d S}{M T^2 L} \quad (1 +) \frac{^2 b^2 d S}{M T^2 L} \quad \dots (11)$$

となる。ここで、 1 より $1 / (1 -)$ $1 +$ とした。

2 実験

オイルダンパーをセットし、大鉛球を図4の状態になるようガラス面に密着する。

輝点が安定するまで、20分以上触れないように待つ。

1分ごとに5分間輝点の位置を読み、静止を確認する。

鉛球旋回台を静かに素早く回して逆位置にする。

輝点が静止するまで1分ごとに輝点の位置を読む。(15~20分はかかる。)

大鉛球をおろす。

油だめを下まで押し下げて制動油を油だめに移す。

ねじりばかりがガラス板に触れないよう磁石で振幅を小さくし、10~15秒ごとに輝点の位置を読む。グラフ化して振幅の極大値からねじりばかりの振動周期を求める。

その他の諸量を測定する。

- ・ダンベル型おもりの腕の長さ d は 5.0×10^{-2} m。
- ・ケースの厚さ h , 大鉛球の直径 D , スケールの距離 L (ガラス面までの距離 + 1 cm)
- ・大小鉛球間の距離 b は、 $b = (h + D) / 2$ で求める。

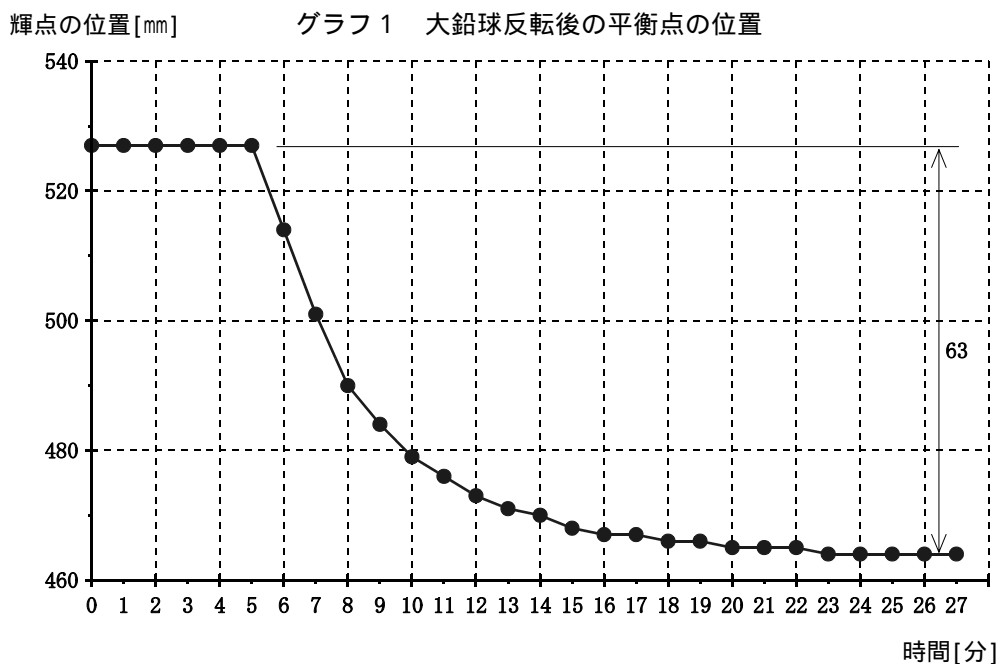
3 実験結果と分析

測定例 大鉛球の質量 $M = 1.475[\text{kg}]$ $2M = 2.35[\text{kg}]$
 大鉛球の直径 $D = 6.29 \times 10^{-2}[\text{m}]$
 ケースの厚さ $h = 2.93 \times 10^{-2}[\text{m}]$
 大小鉛球間の距離 $b = (D + h)/2 = 4.61 \times 10^{-2}[\text{m}]$
 腕の長さ $d = 5.07 \times 10^{-2}[\text{m}]$ $2d = 10.14 \times 10^{-2}[\text{m}]$
 投影距離 $L = 2.02[\text{m}]$
 1012hPa 始20.8 終21.0

(1)大鉛球反転後の平衡点の位置から，輝点の移動距離を求める。

表 1 大鉛球反転後の平衡点の位置

時間[分]	輝点の位置[mm]	時間[分]	輝点の位置[mm]	時間[分]	輝点の位置[mm]
0	527				
1	527	11	476	21	465
2	527	12	473	22	465
3	527	13	471	23	464
4	527	14	470	24	464
5	527	15	468	25	464
6	514	16	467	26	464
7	501	17	467	27	464
8	490	18	466	28	464
9	484	19	466	29	464
10	479	20	466	30	464

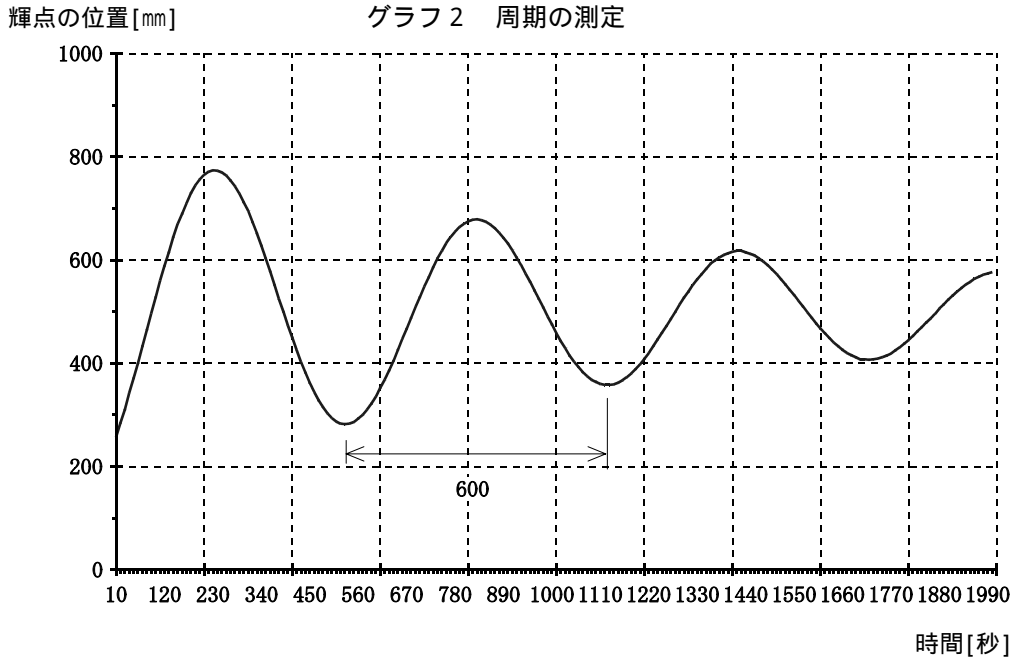


・輝点の移動距離 S は，グラフ 1 より $S = 6.3 \times 10^{-2}[\text{m}]$

(2)ねじれ振動の周期を求める。

表2 周期の測定

時間 [秒]	輝点の位 置 [mm]	時間 [秒]	輝点の位 置 [mm]	時間 [秒]	輝点の位 置 [mm]	時間 [秒]	輝点の位 置 [mm]	時間 [秒]	輝点の位 置 [mm]
10	257	410	450	810	675	1210	409	1610	467
20	284	420	426	820	678	1220	420	1620	458
30	310	430	403	830	679	1230	433	1630	449
40	342	440	382	840	677	1240	446	1640	440
50	371	450	362	850	674	1250	459	1650	433
60	400	460	344	860	669	1260	472	1660	426
70	433	470	328	870	662	1270	486	1670	420
80	465	480	315	880	653	1280	500	1680	416
90	497	490	303	890	643	1290	514	1690	412
100	528	500	294	900	632	1300	527	1700	408
110	560	510	287	910	619	1310	539	1710	408
120	588	520	283	920	605	1320	552	1720	407
130	615	530	282	930	590	1330	563	1730	408
140	644	540	283	940	574	1340	573	1740	409
150	670	550	286	950	558	1350	583	1750	412
160	690	560	293	960	541	1360	593	1760	415
170	710	570	300	970	525	1370	599	1770	419
180	730	580	310	980	508	1380	605	1780	425
190	745	590	322	990	491	1390	610	1790	431
200	756	600	335	1000	475	1400	613	1800	438
210	765	610	352	1010	458	1410	616	1810	445
220	771	620	368	1020	443	1420	618	1820	453
230	774	630	386	1030	429	1430	618	1830	462
240	773	640	405	1040	415	1440	615	1840	470
250	770	650	426	1050	403	1450	612	1850	479
260	764	660	447	1060	393	1460	609	1860	487
270	754	670	467	1070	383	1470	603	1870	496
280	743	680	488	1080	375	1480	597	1880	506
290	729	690	509	1090	368	1490	590	1890	514
300	712	700	528	1100	364	1500	582	1900	523
310	695	710	549	1110	360	1510	573	1910	531
320	673	720	567	1120	358	1520	563	1920	539
330	652	730	586	1130	358	1530	553	1930	546
340	628	740	603	1140	359	1540	542	1940	553
350	603	750	618	1150	362	1550	532	1950	558
360	578	760	633	1160	367	1560	521	1960	564
370	552	770	645	1170	373	1570	510	1970	568
380	525	780	655	1180	380	1580	499	1980	572
390	500	790	664	1190	389	1590	488	1990	574
400	474	800	670	1200	398	1600	477	2000	577



・ねじれ振動の周期 T は、グラフ 2 より $T = 600$ [秒]

(3) 万有引力定数を求める。

グラフより、周期 $T = 600$ [秒]

輝点の移動距離 $S = 6.3 \times 10^{-2}$ [m]

補正した(10)式, (11)式に代入する。

$b = 4.61 \times 10^{-2}$ [m], $d = 5.07 \times 10^{-2}$ [m] より

$$= \frac{b^3}{(b^2 + 4d^2) \sqrt{b^2 + 4d^2}} = 0.071$$

従って、

$$G = (1 + \quad) \cdot \frac{b^2 d S}{M T^2 L} = 6.68 \times 10^{-11} \text{ [N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2 \text{]}$$

$G = 6.672 \times 10^{-11}$ [N \cdot m²/kg²]との誤差は 0.12%

§ 4 実験 : 加速度法

1 解説

この方法は、万有引力による小鉛球の加速度から求める方法である。

ケース A に大鉛球 M を密着させて置くと、万有引力によるモーメント N とねじりばかりの回転モーメント N' がつり合って小鉛球 m は静止する。

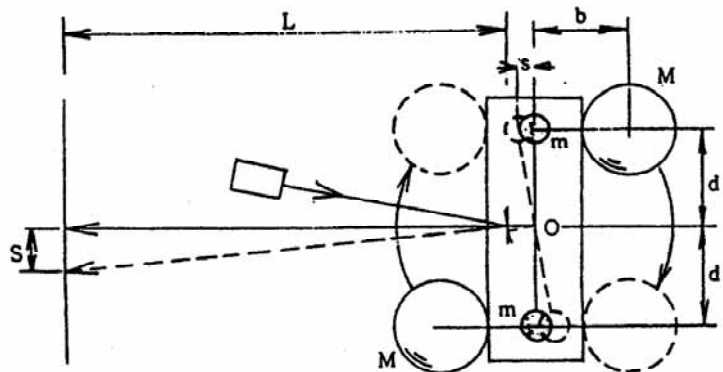


図 8 加速度法の原理説明

ここで大鉛球Mを点線で示した位置に巡回移動させると、ねじりばかりの周期が充分長いとして、小鉛球mに働く力F'は、万有引力Fと、ねじりばかりが復元しようと小鉛球に作用する力との和となる。この復元しようとする力の大きさは、大鉛球の移動前ではつり合っていたことからFとなるので、

$$F' = 2F = 2G \frac{Mm}{b^2} \quad \dots(12)$$

となる。F'によって小鉛球は動きだし、移動距離sが小さい間は一定の力で大鉛球に向かって加速する。小鉛球は等加速度運動をし、 $F' = ma$ より

$$2G \frac{Mm}{b^2} = ma \quad G = \frac{b^2 \cdot a}{2M} \quad \dots(13)$$

補正

実験と同様に補正をすると、

$$G = \frac{1}{(1 - \quad)} \cdot \frac{b^2 \cdot a}{2M} \quad (1 + \quad) \frac{b^2 \cdot a}{2M} \quad \dots(14)$$

次に、加速度aを求めるには等加速度運動より、移動距離 $s = \frac{1}{2} a t^2$ が成り立つので、大鉛球Mを巡回したときからt秒後のsを測定すればよい。ねじりばね(吊り線)の制動力のため60秒程度まで測定する。図8のSとsとの関係は、

$$\frac{S}{L} = 2 \frac{s}{d}$$

となるので、加速度aは、

$$s = \frac{S d}{2 L} = \frac{1}{2} a t^2 \quad a = \frac{S d}{t^2 L} \quad \dots(15)$$

となる。

2 実験

大鉛球を図8の実線の状態にする。

制動油を油だめに移し、オイルダンパーを無効にする。

ねじりばかりの静止に2時間程度待つ。

1分ごとに5分間輝点の位置を読み静止を確認する。

鉛球巡回台を静かに素早く回して逆位置に密着する。

15秒ごとに90秒間輝点の位置を読む。これ以上は誤差が大きくなる。

グラフのX軸に時間の二乗を、Y軸に輝点の移動距離をとり、傾きから加速度を求める。

3 実験結果と分析

測定例 大鉛球の質量 $M = 1.475$ [kg] $2M = 2.35$ [kg]
 大鉛球の直径 $D = 6.29 \times 10^{-2}$ [m]
 ケースの厚さ $h = 2.93 \times 10^{-2}$ [m]
 大小鉛球間の距離 $b = (D + h)/2 = 4.61 \times 10^{-2}$ [m]
 腕の長さ $d = 5.07 \times 10^{-2}$ [m] $2d = 10.14 \times 10^{-2}$ [m]
 投影距離 $L = 2.02$ [m]
 1016.0hPa 始20.8 終20.8

(1) 静止位置の確認

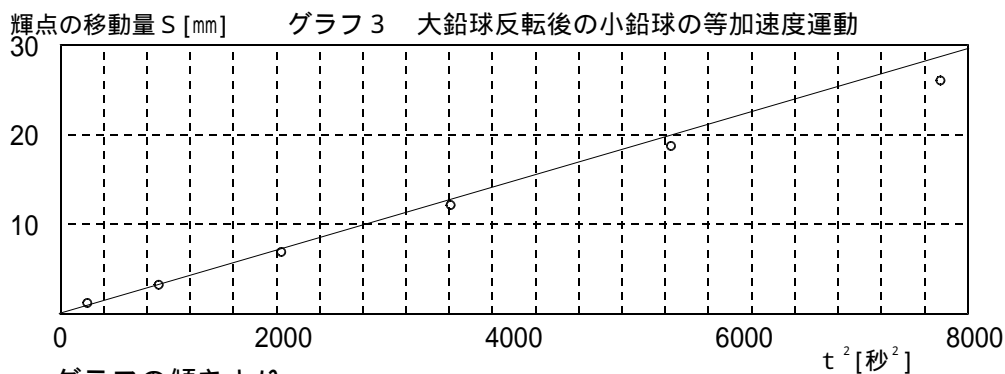
・1~5分間の間, 1分ごとに静止を確認。 静止位置: 494 mm

(2) 大鉛反転後の小鉛球の位置の変化

表3 15秒ごとの輝点の位置

時間経過 t	位置	輝点の移動量 S	時間の二乗 t^2
15秒後	493mm	1mm	225
30秒後	491mm	3mm	900
45秒後	487mm	7mm	2025
60秒後	482mm	12mm	3600
75秒後	475mm	19mm	5625
90秒後	468mm	26mm	8100

(3) 小鉛球の等加速度運動



・グラフの傾きより,

$$\text{傾き } S / t^2 = 2.00 \times 10^{-2} / 5600$$

であるから, 加速度 a は(15)式より,

$$a = \frac{S d}{t^2 L} = \frac{2.00 \times 10^{-2}}{5600} \times \frac{5.07 \times 10^{-2}}{2.02} = 8.964 \times 10^{-8} \text{ [m/秒}^2\text{]}$$

(4) 万有引力定数

故に, 万有引力定数は, (14)式より,

$$G = \left(1 + \frac{b^2 \cdot a}{2M}\right) = (1 + 0.071) \times \frac{(4.61 \times 10^{-2})^2 \times 8.964 \times 10^{-8}}{2 \times 1.475}$$

$$= 6.92 \times 10^{-11} \text{ [N}\cdot\text{m}^2\text{/kg}^2\text{]}$$

誤差は 3.7%となる。

§ 5 実験 : 逆二乗の法則

1 解説

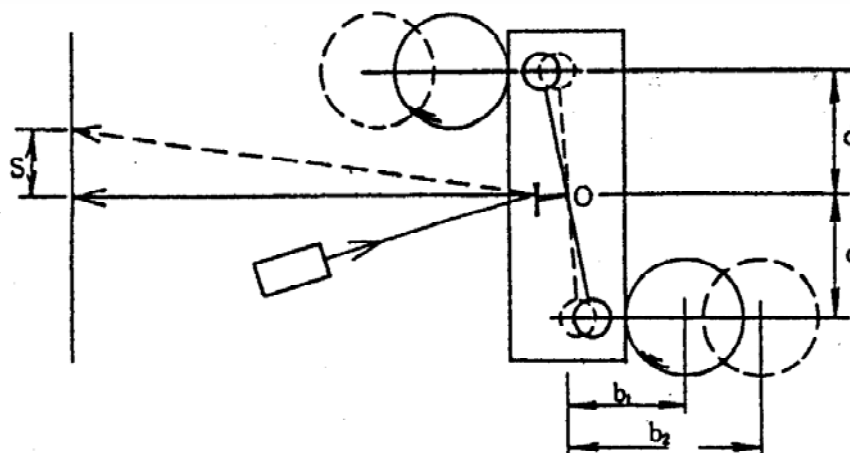


図9 逆二乗の法則の検証

図9のように、大鉛球と小鉛球の距離 b を変えて、それぞれの距離で輝点の移動量 S を測定する。(4)式より F は S に比例するので、 S が $1/b^2$ に比例することを示せば良い。

ただし、この場合も実験同様、補正が必要となるので、 $(1 + \quad)S$ と $1/b^2$ が比例することを確認する。

2 実験

スライダーに大鉛球をのせ、ガラス板に密着させる。また、オイルダンパーは作動状態にする。ねじりばかりが安定するまで20分程度待つ。

1分ごとに5分間輝点の位置を読み静止を確認する。

双方のスライダーを、たとえば 5.3cmの位置に移動する。

【注意】このとき装置に息を吹きかけないこと。またスライダーをなめらかに動かすこと。輝点が静止するまで1分ごとに輝点の位置を読む。

とを、たとえば 6.5cm、9.2cm および 大鉛球を除いた状態でそれぞれ繰り返す。

スライダー用目盛りは、大小鉛球間の距離 b を示している。

3 実験結果と分析

測定例 1016hPa, 20.9

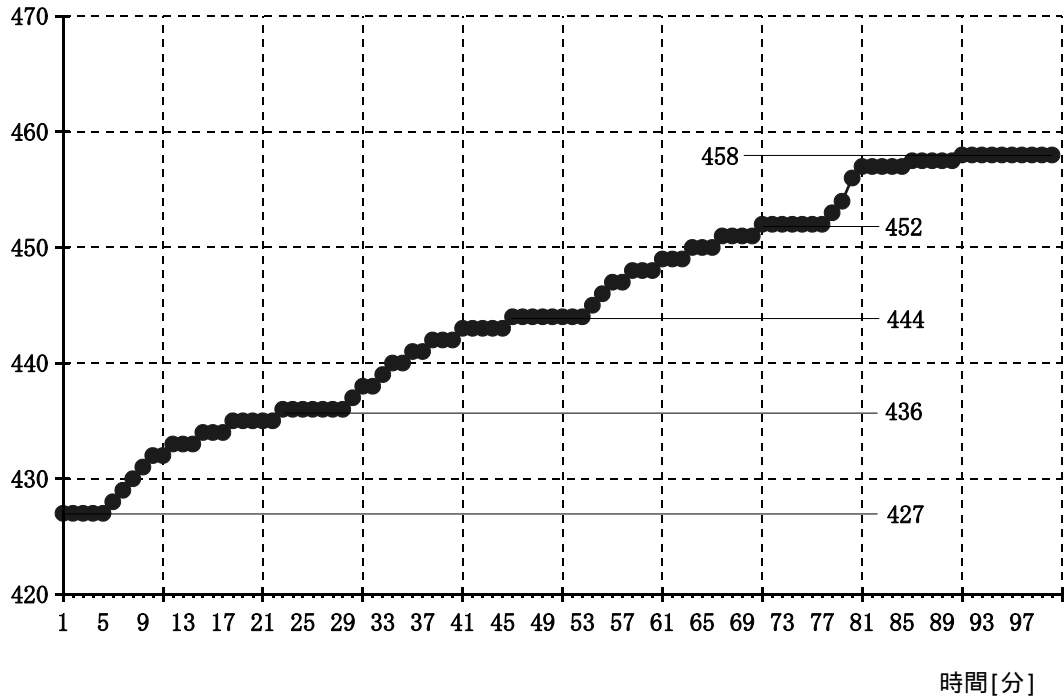
(1)測定結果

表4 距離を変化させたときの位置

距離 [cm]	時間 [分]	位置 [mm]	距離 [cm]	時間 [分]	位置 [mm]
4.61	1	427	6.5	51	444
"	2	427	"	52	444
"	3	427	9.2にセット	53	444
"	4	427	"	54	445
5.3にセット	5	427	"	55	446
"	6	428	"	56	447
"	7	429	"	57	447
"	8	430	"	58	448
"	9	431	"	59	448
"	10	432	"	60	448
"	11	432	"	61	449
"	12	433	"	62	449
"	13	433	"	63	449
"	14	433	"	64	450
"	15	434	"	65	450
"	16	434	"	66	450
"	17	434	"	67	451
"	18	435	"	68	451
"	19	435	"	69	451
"	20	435	"	70	451
"	21	435	"	71	452
"	22	435	"	72	452
"	23	436	"	73	452
"	24	436	"	74	452
"	25	436	"	75	452
"	26	436	"	76	452
"	27	436	取り除く	77	452
"	28	436	"	78	453
6.5にセット	29	436	"	79	454
"	30	437	"	80	456
"	31	438	"	81	457
"	32	438	"	82	457
"	33	439	"	83	457
"	34	440	"	84	457
"	35	440	"	85	457
"	36	441	"	86	457.5
"	37	441	"	87	457.5
"	38	442	"	88	457.5
"	39	442	"	89	457.5
"	40	442	"	90	457.5
"	41	443	"	91	458
"	42	443	"	92	458
"	43	443	"	93	458
"	44	443	"	94	458
"	45	443	"	95	458
"	46	444	"	96	458
"	47	444	"	97	458
"	48	444	"	98	458
"	49	444	"	99	458
"	50	444	"	100	458

輝点の位置[mm]

グラフ4 鉛球間距離の変更に伴う平衡点の移動



(2)最終位置と変位

表4またはグラフ4より，最終位置と変位が計算できる。

表5 距離と変位

距離[cm]	最終静止位置[mm]	変位[mm]
$b_1 = 4.61$	427	31
$b_2 = 5.3$	436	22
$b_3 = 6.5$	444	14
$b_4 = 9.2$	452	6
$b_5 =$	458	0

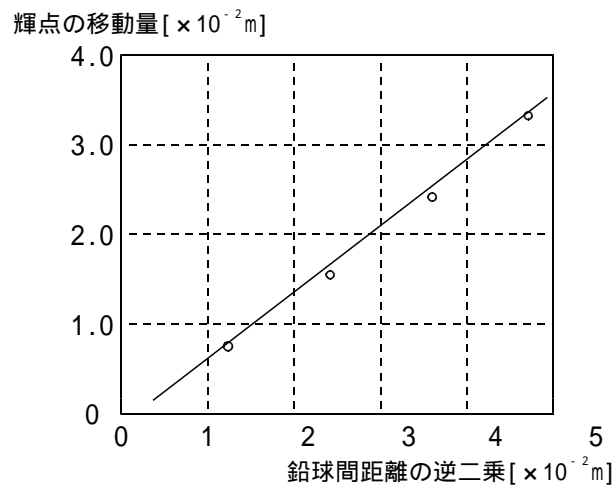
(3)逆2乗則の検証

(1 +)Sと $1/b^2$ との関係を調べるため，表6を作りグラフ化する。

表6 (1 +)Sと $1/b^2$ の値

b (m)	b^{-2}	S (m)	(1 +)S	
4.61×10^{-2}	4.71×10	3.1×10^{-2}	0.071	3.3×10^{-2}
5.3×10^{-2}	3.56×10	2.2×10^{-2}	0.099	2.4×10^{-2}
6.5×10^{-2}	2.37×10	1.4×10^{-2}	0.157	1.6×10^{-2}
9.2×10^{-2}	1.18×10	0.6×10^{-2}	0.303	0.8×10^{-2}
		0		

グラフ5 (1 +)Sと1 / b²



両者はほぼ比例することが、確認できる。

【参考文献】

- [1] 「万有引力実験器」取扱説明書（島津理化器械(株)）
- [2] 国立天文台編「理科年表」（丸善(株) 1997年版）
- [3] ピーター・ラファティ著「ザ・サイエンス・ヴィジュアル 3力と運動」
（1993,東京書籍）p32～p35