

反磁性を利用した磁気浮上と斜面での重力加速度測定への応用

高 重 正 明¹ 山 口 俊 久¹ 飯 塚 礼 子²

Magnetic levitation utilizing diamagnetism and its application to gravitational acceleration measurement on slope

Masaaki Takashige¹, Toshihisa Yamaguchi¹, Reiko Iizuka²

By utilizing the magnetic levitation effect of the diamagnetism, the body such as the oxide superconductor or the graphite plate can run without contact on the rail made of neodymium magnet. In this study, we performed experiments to slide vehicles made of oxide superconductors and graphite plates on slopes of such magnetic rail with different gradients. By measuring the speed and running time, we estimated the value of gravitational acceleration g to be about 9.4 to 9.6 m/s².

キーワード：反磁性、超伝導、グラファイト、磁気浮上、重力加速度

Keywords : diamagnetism, superconductivity, graphite, magnetic levitation, gravitational acceleration

1. はじめに

磁石と反発するような物質のことを反磁性体という。このような物質は、その反発力を使うと磁石の上に浮上させることもできるが反発力は弱い。グラファイト(炭素、C)などの反磁性体を永久磁石上で浮上させるという展示実験が物理教育の行事などで行われるようになったのは 20 年前くらいからであろうか。なお超伝導体も反磁性体(完全反磁性体、後述)であるが、その磁気浮上の展示実験は銅酸化物超伝導体の発見直後の 30 年程前から始まっている^{1,2)}。このような浮上実験が容易に行えるようになった決定的な理由には強力な磁気力をもつネオジウム鉄ボロン磁石(以下、Nd 磁石)が普及したことが大きい。

超伝導体の磁気浮上に関しては、筆者らも昔から数多くの展示用実験装置を製作してきており^{1,2)}、本紀要^{3,4,6)}でも過去 3 回、それに関して報告している。最近では単なる展示模型を作るだけでなく、磁気軌道上で超伝導走行体の速度を測定して、発生している抵抗力を定量的に求めるという研究^{3,5)}もしている。その結果、抵抗力の大きさを支配する条件もある程度、把握できるようになってきた。

本稿では、我々のそのような最近の研究の 1 つである「斜面の運動の解析による重力加速度 g の測定」について紹介したい。斜面の運動は、物理を学ぶ全ての人が一度は出会うテーマである。ただし実験をする場合、摩擦のない斜面を使うことは難しいので、球体を転がすなどの方法をとるが、そうすると慣性モーメントなどの概念も必要となる。

摩擦のない斜面があれば、そこへ物体を滑らせて最終速度を測れば、重力加速度 g が分かる。そこで摩擦の少ない斜面として、浮上した超伝導体を磁石軌道の斜面を滑らせて速度を測れば、どの程度の重力加速度が得られるものかと思いついたのが、このような研究を始めたきっかけである。もしも 9.8 m/s² に近い g の値が算出されるならば、斜面の実験の教育機器としても可能性も出てこよう。

ただし、超伝導体を使用することは、教育機器としての可能性を探るならば案外不便である。室温超伝導体でも発見されれば別であるが、現状では高温超伝導体といっても液体窒素で冷却しなければいけない。できれば何もせずに浮上現象が起こる方がよい。

そこで室温で反磁性体であるグラファイトを使ってこのような実験ができれば一層好都合である。グラファイトの浮上には、筆者らも以前から興味は持っていたが、何しろ超伝導の反磁性効果に比べてはるかに微弱なものなので、浮上はしても水平方向への摩擦の少ない移動は無理だろうと思っていた。しかし、浮上したグラファイトを動かす研究⁷⁾も本格的に行われているようなので、我々も何枚かのグラファイト板を購入して磁石配列を工夫して試したところ、意外にスムーズな移動ができることが分かった。そこで超伝導体の場合と同様に斜面の実験を行い、その結果から g を算出してみた。

教育機器として使用可能かどうか、まだ何とも言えないところはあるが、超伝導体、グラファイトの双方ともに、現状の結果を報告することが本稿の目的である。

1 明星大学理工学部総合理工学部物理学系 教授 専門分野 物性物理学実験

2 明星大学理工学部総合理工学部物理学系 実習指導員 専門分野 科学教育

2. 反磁性による浮上と磁気軌道

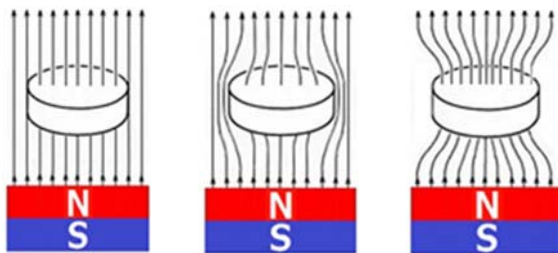
2.1 磁性体と磁石との間に働く力

本節では、磁性体の種類と磁石との間に働く力について簡単に解説する。物質は磁場に対する応答により、常磁性体、反磁性体、強磁性体などに分類される。図1は磁石の上に物質を置いた時の様子を表した模式図である。磁束は簡略のために平行に描いたが、実際には上の方では拡がると解釈されたい。また以下はNとS極の向きには依らない。

図1(a)では磁束は物質の中を何の変化もなく貫いているが、このような物質が常磁性体である。実際には常磁性体中の磁束密度は真空中より僅かに濃くなる。真空の磁束密度を基準にしてその物質中で磁束密度がどの程度変化したかを割合で表した量を磁化率 χ と呼ぶ。常磁性体の χ は非常に小さく、空気では $\chi = 3.65 \times 10^{-7}$ 程度、白金(Pt)などでは $\chi = 2.93 \times 10^{-4}$ 程度である。

これに対して、図1(b)では、物質は磁束を排除している。すなわち物質中では磁束密度が減少している。これが反磁性体である。反磁性体の χ は負であるが、やはり絶対値は非常に小さく、例えば銅(Cu)では $\chi = -0.94 \times 10^{-5}$ 、グラファイト(C)では $\chi = -1.6 \times 10^{-5}$ 程度である。

最後に図1(c)では物質は磁束を吸い込んでおり、物質中で磁束密度は大幅に濃くなっている。このような物質を強磁性体という。その磁化率は正であり一般には $\chi > 10^3$ のように非常に大きい。濃くなる様子を厳密に描けば、物質中の磁束密度が高くなりすぎて真っ黒になるので、ここでは適宜省略して描いてある。このような物質は、一旦ある強さ以上の磁場中に置くと、磁場外に出しても吸い込んだ磁束は残るので永久磁石になる。すなわち、強磁性体とは鉄、コバルト、ニッケルなど永久磁石になる物質のことである。



(a) 常磁性体 (b) 反磁性体 (c) 強磁性体

図1 永久磁石上の物質と磁束の関係(模式図)

ところで磁束には常に縮みこむような力が働いているので図1(b)のような場合は、物質は磁束から圧力を受け永久磁石上では反発力(浮力)を得る。一方、(c)のような場合には磁束から引っ張られて永久磁石側から強い引力が働く。実は(a)の常磁性体の場合でも χ はゼロではないので、普通には気づかないほどの微弱な引力が働いている。

その意味では χ の絶対値からも推測されるように反磁性体の反発力も日常ですぐ気づくほど大きくはない。「物質には、鉄のように磁石に引かれるものと十円玉(銅)のように引かれぬものの2通りがある」というのが普通の感覚で

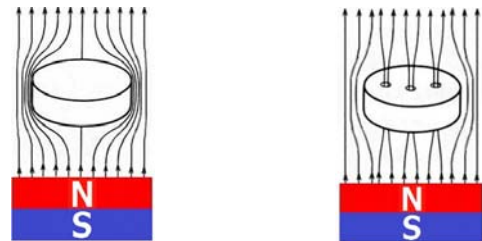
あろうが、全ての物質は磁石とは程度の差はあるが反発したり引き合ったりしているのである。

このような磁石との間の力を明確に分かるようにするには、磁束密度が濃いこと、すなわち強い磁石が必要であることは明らかである。そこで、反磁性体を浮かべるにはNd磁石を使い磁束密度の濃い状態ができるように工夫して、グラファイトのように比重の軽い反磁性体を使うことが大事になってくるのである。

2.2 超伝導体の場合

前述したように超伝導体も反磁性であるが、その磁石上での様子を図2(a)に示した。その特徴は図1(b)と比較すれば明らかであるが、磁束が完全に排除される点にある。磁化率は100%排除であるので $\chi = -1$ となり、これを完全反磁性あるいはマイスナー効果と呼んでいる。発生する浮力は普通の反磁性体よりもはるかに強い。

超伝導体ではもう一つ複雑な現象が起こる。非常に強い磁場の中に第II種超伝導体というものを入れた時には一部の磁束が超伝導体の中に侵入してそこに固定される。これを磁束のピン止め現象と呼んでいる。ピン止めされた磁束は動きにくいので、超伝導体は浮上するというよりは、宙に浮いたままある位置に固定される。したがって、上下を逆にして磁石の下に超伝導体を吊り下げることができる。以上が超伝導体の反磁性効果の特徴である。



(a) 超伝導体(マイスナー効果) (b) 超伝導体(ピン止め)

図2 永久磁石上の超伝導体と磁束の関係(模式図)

2.3 磁石軌道

本小節では、以下の実験で使用する磁気軌道の磁石配列を紹介する。反磁性体を安定に浮上させてある方向に無理なく運動でさせるには、ある方向に一樣な磁場分布を持った組磁石軌道を作る必要がある。詳しくは文献²⁻⁵⁾を参照していただくとして、超伝導体を使った走行では、我々は図3に示すような磁場配列の軌道を使っている。軌道上に超伝導体が置かれた時のその断面での磁束の様子を描いたのが図4(a)、(b)であるが、これらは図2(a)、(b)で示したマイスナー効果とピン止め効果による浮上の絵を組磁石の場合に描き直したものである。

図4(a)や(b)のような磁束のパターンが、超伝導体の進行方向(図3の左右方向)に保たれるならば、無抵抗な走行が可能になる。しかし、磁石の継ぎ目などで磁束の乱れがあるので、その不整合性から抵抗が発生すると考えられる。

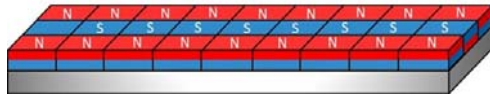
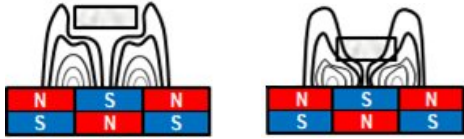


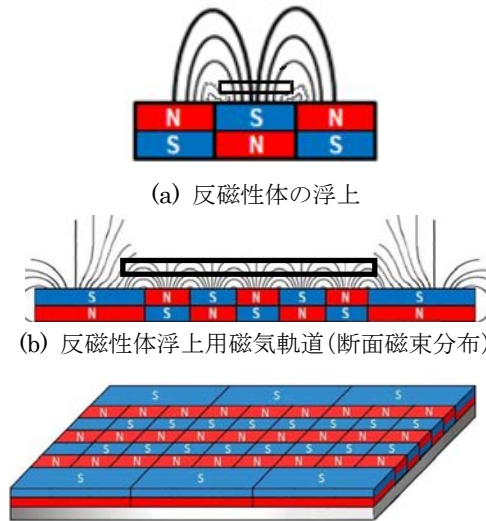
図3 超伝導浮上用磁石軌道俯瞰図



(a) マイスナー効果 (b) ピン止め効果

図4 超伝導体浮上用の軌道の磁束の様子

次に、浮上力の弱い反磁性体と同じ磁気軌道の上に置かならば、磁束の多くは反磁性体中を貫通し、磁石表面の磁束密度が特に濃い部分だけで反発されると考えられるので、超伝導のマイスナー効果の図4 (a)に相当するものは図5 (a)となると予想する。磁石表面で僅かに反発が起こっていることに注意されたい。したがって反磁性体を浮上させるならば、図5 (b)のような小さい磁石を多数並べて磁束密度の濃い部分を数多く作り、そこで全体で支えるという方が有利と思われる。その磁気軌道の俯瞰図を図5 (c)に示した。両側の大きい磁石は反磁性体が走行する際に、軌道外にはみ出さないように上向き磁場を優勢にするためのものである。



(a) 反磁性体の浮上 (b) 反磁性体浮上用磁気軌道(断面磁束分布) (c) 反磁性体浮上用磁気軌道俯瞰図
図5 反磁性体浮上用の軌道の磁束の様子

3. 斜面の運動

本研究で使う斜面の運動の解析は単純なものであるが、本節で簡単にまとめておく。斜面長 l 、高さ h の斜面を質量 m の物体が摩擦無しに滑り落ちる時の運動を考える。エネルギー保存則を使えば物体は斜面上部で位置のエネルギー mgh を持っている。滑り落ちた時の最終速度を v とすれば運動エネルギーは $mv^2/2$ であるので、摩擦がないとすれば $mgh = mv^2/2$ であり、これより

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

あるいは

$$g = v^2/2h \quad (2)$$

となる。したがって h を決めて v を測定すると g が求まる。一方、この結果は運動方程式からも求められる。斜面長 l 、高さ h の斜面の滑り落ちる運動は斜面に平行な加速度 $a = gh/l$ を持つ等加速度運動である。滑り落ちる時間を t とすれば落ちた距離は $l = at^2/2$ 、最終速度は $v = at$ となる。これより $l = ght^2/2l$ 、すなわち

$$t = l\sqrt{2/gh} \quad (3)$$

であり、最終速度 $v = at = \sqrt{2gh}$ は当然ながら式(1)と同じになり、また

$$g = 2l^2/t^2h \quad (4)$$

であるので、 t を測定すれば g が求まる。

こうして決めた g の値が 9.80 (日本重力基本網 1975 の本学推定値は 9.79743 であるが四捨五入) から異なっていれば、その時の斜面には摩擦力 F が存在することになる。それが速度に依らず一定であると仮定すると、式(4)で得た測定値を g' として、 $F = (9.80 - g')h/l$ を計算すると、これが長さ l 、高さ h の斜面の摩擦力(単位質量当たり、すなわち負の加速度)となるが、ここでは式(2)~(4)の量のみを取り扱う。

以下では、超伝導体を滑らせる場合は市販の速度計(商品名ピースピ、(株)ナリカ製)を使い、測定範囲は 1~2 m/s、精度は ± 0.01 m/s である。グラファイトの場合は試料が薄いため速度計が使えず、ストップウォッチで走行時間を測定し、時間範囲は 1~5 秒程度、1/1000 秒までの精度のものを使ってはいるが、手動であるので ± 0.1 秒の誤差は含む。

4. 実験結果

4.1 超伝導体の実験結果

斜面長さ 1 m と 3 m のものを使用している。ここでは 1 m のものを使った実験結果を主に報告する。斜面の勾配を端点の高さ(勾配正弦とすることに)で表すと 0.03~1.0 m の範囲で試みたが、主に 0.5 m 以下の結果を報告する。磁石は Nd 磁石で図3のような配列である。1個の寸法は 20×10×3 mm、軌道として組んだ時の表面磁束密度は 1 T 程度である。

これ以後、超伝導体を単に走行体と呼ぶが、これは超伝導体を発泡スチロールやガーゼで覆い液体窒素温度に保てるようにしたものである。質量は 2 から 50 g 程度までのものを使用しているが、ここでは主に 15 g 程度までのものの結果を示す。なお走行体の質量は液体窒素の蒸発により時間変動するが、以下の実験で一回の走行に要する時間は数秒以内であり、結果には影響しないことを確認している。

超伝導体が磁気軌道上を走行する時、走行抵抗に最も影響するのは図4 (a)や(b)のような超伝導体周辺の磁束の状態である。磁束の状態は、毎走行時の超伝導体の軌道上への置き方や停止時の衝撃で、その状態が変わり測定値の乱れの要因になる。そこで超伝導体を軌道上に置く時に、以下の 5

通りの方法を試みて、その走行への影響度を調べた。

- 1) 磁場がないところで超伝導状態(ゼロ磁場冷却)にした走行体を軌道に乗せる。これはいわゆるマイスナー果による浮上であり図4(a)の状態にあたる。
- 2) 1)の状態でも軌道表面に向けて軽く押しこむ。すなわちごくわずかに磁束をピン止めさせる。
- 3) 2)よりも強く押し込む。さらに2)よりピン止め磁束量は多いと思われる。
- 4) 磁気軌道上に非磁性体のスペーサを挟んで走行体を置き、そこで超伝導状態に冷却する(磁場中冷却)。これにより1)~3)よりもずっと多量の磁束がピン止めされる。
- 5) 4)の状態をさらに強く押し込む。これはもっともピン止め量の多い状態である。

この5通りの方法で走行体を、高さが0.015 m, 0.03 m, 0.06 mの3種類の斜面上に固定して、2~5 gの4種類の走行体を20回ずつ走行させて最終速度 v を測定し、式(2)より g を算出した。したがって、1個の走行体につき $5 \times 3 \times 20 = 300$ 個、4個の走行体で $300 \times 4 = 1200$ 個のデータを収集した。

まずその1200個全体の分布をヒストグラムで図6に示した。平均値と標準偏差も図中に示した。9.34を中心にはほぼ正規分布に近いものになる。標準偏差が比較的大きいのは、4種類の走行体や軌道への固定の条件が異なるものも、すべてまとめて集計しているからである。

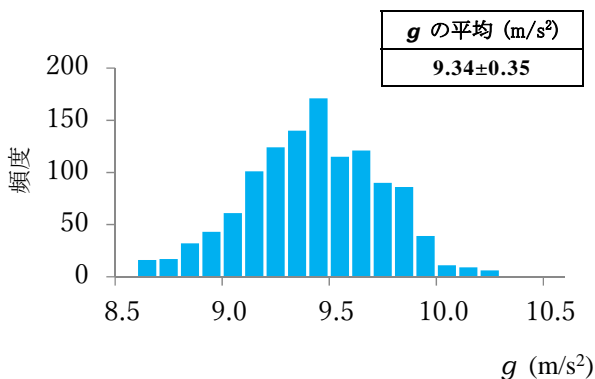


図6 全測定値(1200個)の g の分布

次にその中の重い走行体と軽い走行体を選び、各走行体につき300個ずつの g の分布をヒストグラムで図7に示し、各走行体の g の平均値と標準偏差を図中に示した。

図7からわかるように重い走行体の方が g は大きい傾向を示し、すなわち早く落ちる。ガリレイのピサの斜塔の実験の通り、質量が異なっても物体は同じように落ちるはずであるが、現実には空気抵抗などで軽い羽根のような物体は遅く落ちる。斜面にも何らかの抵抗があり、軽い物体の方は最終速度が遅くなるのでこのような結果となる。なお、質量が異なることは形状が異なるということであるが、形状の効果はここでは触れず別の機会に譲りたい。

次に上記の5通りの固定方法では1つにつき $4 \times 3 \times 20 = 240$ のデータがあるが、このうちゼロ磁場冷却した1)と3)、磁場中冷却した4)と5)を合わせてそれぞれ480個のデータ

から算出した g の平均値とその分布のヒストグラムを図8に示した。なお固定方法2)を除いたのは母集団を同数にして比較するだけのためである。

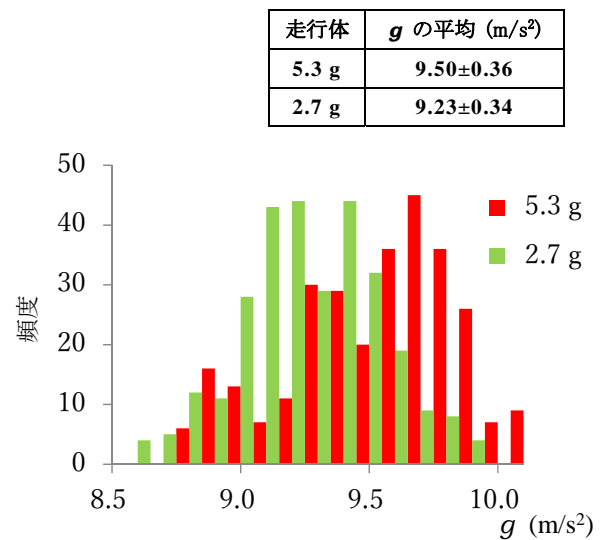


図7 走行体質量の違いによる g の分布の差

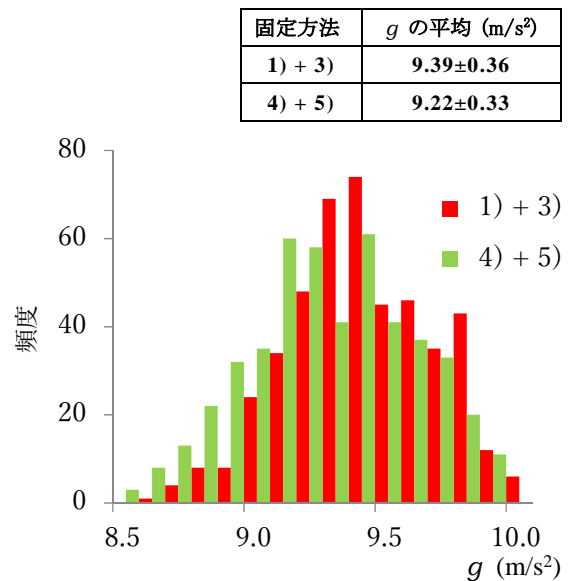


図8 固定方法の違いによる g の分布の差

これからいえることは、ゼロ磁場冷却による固定、すなわちピン止め磁束が少ない方が g は大きい(走行抵抗は小さい)ということである。磁場中冷却すると走行体は強く固定されて走行は安定になるが、ピン止めされている磁束が多い分、軌道の継ぎ目の磁束の乱れなどで不整合が発生する割合も増えて走行抵抗の増加の原因となると想像される。

ゼロ磁場冷却の時はほとんどの磁束が排除されているので軌道との磁束不整合による抵抗発生の可能性は少ないが、単に浮上しているだけで走行姿勢が揺らぐことで速度の低下を招くと思われる。

ただし、ここで使っているイットリウム系の酸化物超伝導体(溶融体、(株)豊島製作所特注)では、純粋のマイスナー

効果が起こるのは 0.05 T (テスラ) 以下の弱い磁場の時のみであり、厳密に言えば図 4(a) のマイスナー効果の場合でも超伝導体の下面部にある程度磁束は侵入しているものと想像される。したがって、1) のような条件下でも、多少の磁束はピン止めされており、4) のような磁場中冷却の時と同じように、軌道磁束との不整合による抵抗の発生は起こっていると思われる。

このようなピン止め磁束の量と走行抵抗の関係を調べる 1 つの方法として、走行体の軌道上での浮上高さを変える実験も有効である。浮上高さを変えるにはゼロ磁場で冷却した走行体を押し込んで調節することも可能であるが、4) のような磁場中冷却時を行い、挟み込むスペーサの厚みを変えることで可能である。軌道上の磁束密度は表面から離れるほど弱くなるが、今の場合、軌道上 3 mm で 0.55 T、6 mm で 0.3 T 程度であるので、高い位置ではピン止め磁束数が少なくなり軌道磁束との不整合の度合いが減り、走行抵抗が減少するので、測定される g の値も増加してくるはずである。

今回の実験でも、浮上高さが高いほど g が大きくなることを確認しているが結果は省略する。なお、直接 g を求めた実験ではないが、浮上高さを変えて斜面の摩擦力を測った実験は文献^{3,5)}に報告しているので参照されたい。

以上の結果から、できるだけ 9.8 に近い g を得るには、ある程度質量の大きい走行体を少ない磁束でピン止めして姿勢を安定に維持するということが結論になる。

ここまでの結果は複数の条件下で行った平均値を示してきた。最後に、1 つの走行体を使い、1 m の長さの斜面を、高さ 0.5 m (すなわち角度 30 度) まで変えて速度を測り、 g を精密に決めた結果を、その解析方法も示しつつ紹介する。

測定は以下のように行った。走行体は、12 g 程度の超伝導体を薄い発泡スチロールで覆い外形を 26×19×45 mm に成型したもので、液体窒素を満タンにすると約 20 g の重量になるものである。

この走行体を磁場中冷却でほぼ 5 mm 程度の浮上高さで固定した。まず 1 m の斜面の高さ h (勾配正弦) を決める。速度測定は斜面を 4 分割して測定器を配置し、1 回の走行で 4 か所の速度を測定した。例えば 1 m 斜面の最高点の高さを $h = 0.03$ m とすれば、最下端およびそこから 0.25 m、0.50 m、0.75 m の斜面上に測定器を置けば、高低差 0.03 m 以外に、0.0225 m、0.015 m、0.0075 m のデータも同時に収集できるというわけである。これを 10 回滑らせて各高低差での平均値とし、次に斜面の傾きを逆にして逆向きに滑らせて速度を測定し、両者を平均する。これにより水平度が保証される。

前節の式(2)は、 $v^2 = g \cdot 2h$ のように書き直せるので、各高低差での速度の 2 乗をその高低差の 2 倍に対してプロットすれば、その直線の傾きからその斜面での測定におけるもっとも確からしい g が決定できる。

図 9 は、そのようにして解析した傾き (勾配正弦) が 0.06 の斜面の測定例で、最小 2 乗法で直線の傾きを決めた。図中の式で示した値が g になる。直線性の良さから斜面の各部分で等加速度走行をしていることがこれにより保証される。

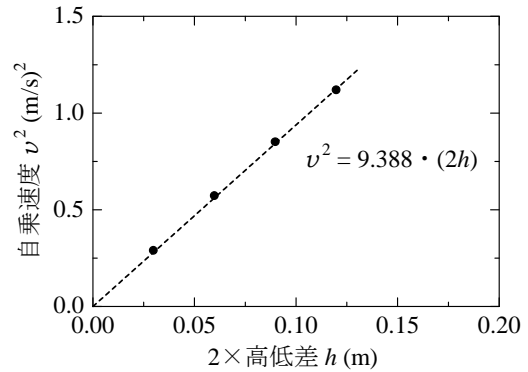


図 9 勾配正弦が 0.06 の斜面における v^2 と高低差 h の関係

斜面の傾きを変えてこのようにして決定した g をプロットしたのが図 10 である。この図には質量が 50 g 程度の大きな走行体のデータ (試料破損で低い勾配のデータが欠損) も一緒に載せてあるが、重い走行体での g の測定値が大きくなるという統計データをも裏付けているのが分かる。

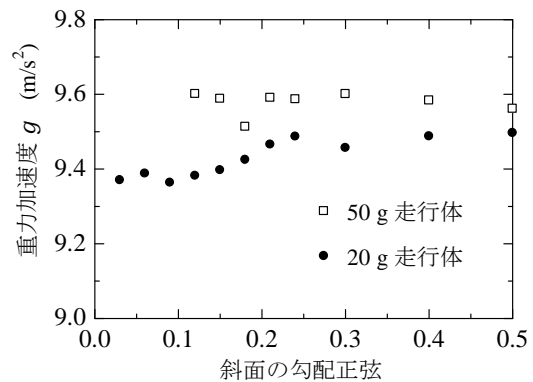


図 10 重力加速度測定値の斜面の勾配依存性

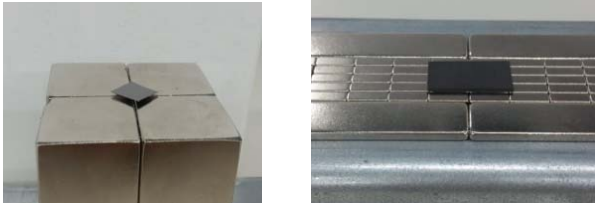
以上のように、超伝導体を磁気軌道上で走らせることにより、少なくとも 9.4 ~ 9.6 程度の重力加速度 g の値が確実に得られることが示された。統計データからも分かるようにこれ以上に 9.8 に近い値を得ることはあるが、確実にそれを得られる条件を見つけるには、超伝導体の形状がどのよう関わってくるかということや、磁石の寸法や配置を変更すればどのような効果があるかということ把握することが重要と思われる。しかしまだそこまでは至っていない。

4.2 グラファイト

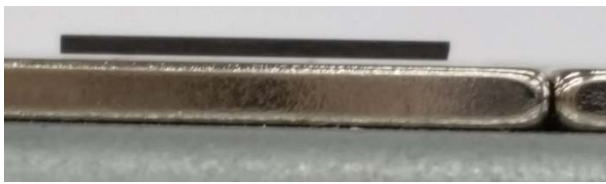
図 11(a) は、磁極を交互に並べた大型の Nd 磁石境界部の上、グラファイト板 (0.1×10×10 mm、0.014 g) が浮上している写真である。境界部の磁束密度は水平方向に 1.5 T 以上はある。概ね 1 mm 以上の高さで浮上しているが、境界部分から外れると姿勢が不安定になり磁石面と接触する。また軽いので動かすと風圧の影響を受ける。

一方、図 11(b) は、隣接列は逆向きで横方向は同極になるように小磁石を 5 列に並べたものである (図 5 (b) と (c) も参照)。

磁束密度の濃い境界が横に連続しているのので、図のようにグラファイト板(1×10×20 mm、0.352g)を浮上させて横方向に動かせる。両側には幅広の磁石を置き、磁束を立ち上げて走行体の脱軌道を防いでいる。浮上高さは、図11(c)の手前水平方向からの拡大写真から、0.2 mm 程度と推定される。



(a) 市松状組磁石上 (b) 横方向同極組磁石上



(c) 浮上高さの推定

図 11 グラファイトの浮上

我々は図 11 (b)のような配列で、図 12のような磁石軌道をつくり、それを斜面としてグラファイトを滑らせて最終速度を調べる実験を行った。小磁石の寸法は3×3×10 mm、両側の幅広磁石のそれは3×10×50 mmであり、軌道 1 m あたり、小磁石は 500 個、幅広磁石は 40 個必要である。磁束密度は、小磁石同士の境界部で水平方向 0.3~0.5 T、小磁石と両側の幅広磁石境界で水平方向 1 T 程度である。



図 12 グラファイト走行用磁気軌道

ところで、グラファイト板は薄いので超伝導走行体の時のような速度計を使った実験はできない。本実験では走行時間をストップウォッチで測定し g を求めた。しかし、ストップウォッチの測定は 0.1 秒程度の誤差を含むといわれているので短い時間の測定には注意を要する。例えば、距離 1 m の鉛直自由落下の落下時間は、 $t=(1/4.9)^{1/2} \approx 0.45$ 秒であるが、これを、ストップウォッチを 2 回押して測ると最大 0.2 秒の誤差を含むので、意味のある測定はできない。

落下距離を長くすれば多少は克服できるが、摩擦の少ない斜面を使い、加速度を減らす方が現実的である。3 節の式 (3) から長さ 1 m の斜面の落下時間は、 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ として、高さ $h=0.01 \text{ m}$ では、4.518 秒、 $h=0.09 \text{ m}$ では 1.506 秒となるので、精度は高くないが一応測定は可能である。以下ではこのような傾斜の範囲の斜面で実験を行った。

走行体は厚みが 1 mm のグラファイト板(ニラコ社製、炭素板 C-073511)を 5 種類用意したが、小型のものは除き、こ

こでは表 1 に示した 4 種類の結果を示す。斜面長は 1 m、高さは 0.01、0.015、0.03、0.06、0.09 m の 5 種類である。1 斜面につき左右傾斜を変えて 40 回ずつ走行させて平均して 40 個のデータとしたので、総計で $40 \times 4 \times 5 = 800$ 個のデータを以下では取り扱う。

表 1 グラファイト走行体一覧

寸法 (mm)	1×10×20	1×10×30	1×10×40	1×10×100
質量 (g)	0.352	0.535	0.718	1.783

まず、この 800 個全部の g の分布を図 13 に示す。平均値と標準偏差も図中に示した。平均値は 9.6 でかなり 9.8 に近いが、多くの異なる条件でのデータが混ざっているため、標準偏差は非常に大きい。

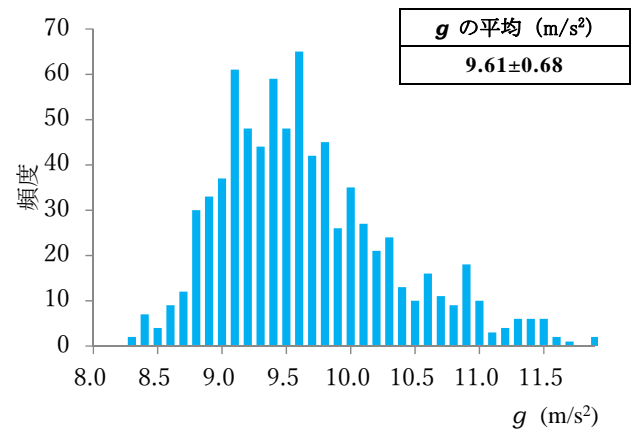


図 13 全測定値(800 個)の g の分布

次にこの中から重い走行体と軽い走行体のデータを選びそれぞれ $40 \times 5 = 200$ 個の分布を示したのが図 14 である。

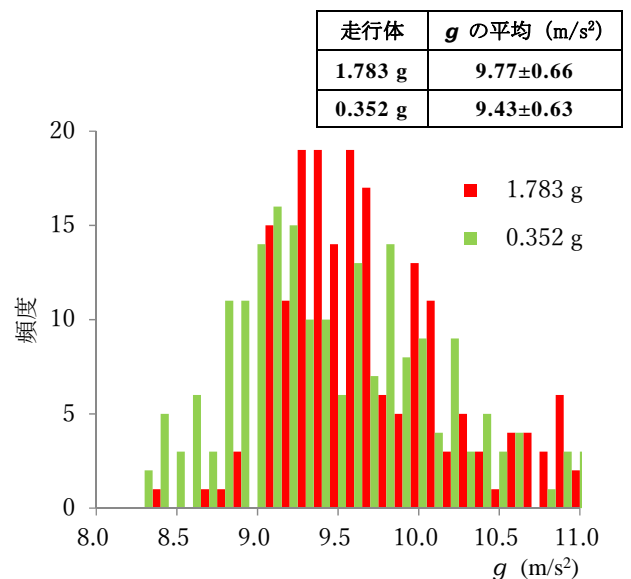


図 14 質量の違いによる g の分布の差

明らかに重い方(赤)の g の分布が大きい方にずれる。すなわち重い方が早く落ちるということを意味しており、これは超伝導の場合の図7と同じである。ただし、標準偏差は超伝導の場合よりかなり大きい。グラファイト板の場合、質量の違いとは表1から分かるように、形状、すなわち走行体の長さの違いである。磁気軌道を構成している磁石の長さなど何らかの相関があるかもしれないが、これも今後の問題としたい。

さらに、斜面の勾配の違いによる g の測定値分布の違いを示したのが、図15である。

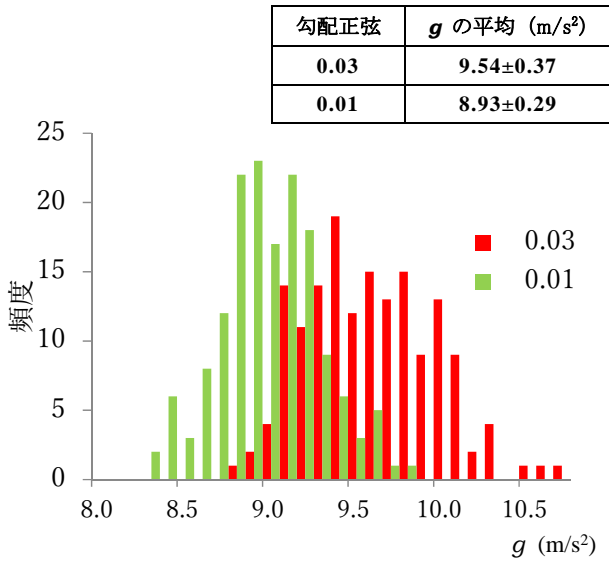


図15 斜面の勾配の違いによる g の分布の違い

上述したように斜面が急になると測定時間は短くなるので、誤差は大きくなりデータの揺らぎは大きくなる。これは超伝導体の速度測定の場合とは本質的に異なる特徴である。その傾向は本図からも明らかである。急斜面の結果(赤)は g の平均値も大きいですがデータの揺らぎも増えて標準偏差も大きくなる。0.06 m や 0.09 m の斜面を使うとさらにこの傾向は一段と明瞭になるが、グラフが横に大きく広がり紙面の関係でここでは示さない。緩斜面では測定時間が長いので誤差は小さくなり好都合であるが、 g の平均値も下がる。すなわち緩斜面では摩擦が大きくなって、本来の目的である摩擦の少ない面での運動には不都合な状況となる。

図16は勾配の異なる斜面における4種類の走行体の g の平均値と標準偏差を求めて、勾配正弦の関数としてまとめたエラーバー付きの折れ線グラフである。このようなグラフは表1の4種類の走行体ごとにも描ける。緩斜面側のエラーバーは重い方の走行体ではやや小さくなるが、急斜面側では大差はなく、どの走行体でもここで示している程度である。すなわち、急斜面では測定時間が短いために、走行体の質量には依らず測定精度が低いということである。

なお、超伝導走行体の結果(図10の20g走行体のもの)も参考までに黒丸で示してある。超伝導体の重い方の走行体

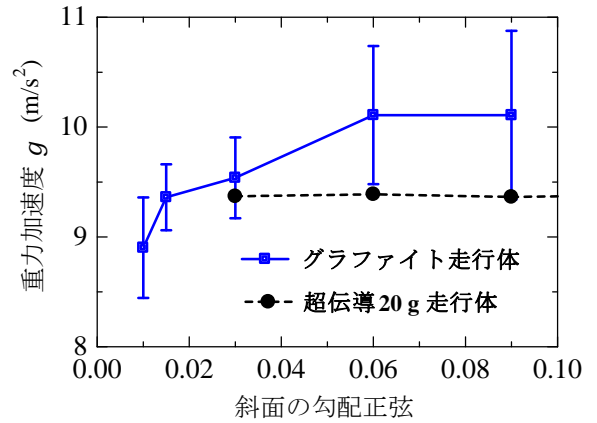


図16 各走行体の平均 g の斜面勾配依存性

のデータが欠落しているので十分な比較ができな残念であるが、エラーバーの中にはほぼ入っている。

この図の様子から判断して、9.8に近い g を与えそうな斜面として傾き(勾配正弦) 0.015 と 0.03 を、走行体として長い方3種類を選んで、走行回数左右100回に増やして実験を行い、その結果を表2にまとめた。

表2 反磁性体での測定で得られた重力加速度値

斜面の勾配正弦	重力加速度 g (m/s^2)		
	0.535 g	0.718 g	1.783 g
0.015	9.43±0.18	9.42±0.17	9.47±0.19
0.030	9.49±0.29	9.59±0.30	9.59±0.31

どの場合にも超伝導体の場合とほぼ同程度の g の値が得られている。また標準偏差も同程度に収まっている。したがって、グラファイトでも超伝導体と同程度に摩擦の少ない走行ができていと結論してもよいと思われる。浮上高さが超伝導体より非常に低いグラファイトで、このような結果になったことは、重力加速度測定の教育機器としてこの磁気浮上走行が使えること示している。初めにも述べたように超伝導体のように冷却する必要がないことは教育機器としての応用としては強みである。また、真空中での実験も特に難しいことではない。

緩斜面でそれほど g が大きくならなかったことは超伝導体の場合も同じであるが、以下のような原因が考えられる。両者ともに、勾配正弦の低い場合に走行をさせると、そもそも走行体がスタートできないことがある。磁気軌道には必ず継ぎ目があるので、そこでの磁束の乱れを乗り越える重力が必要であるが、低角度の重力ではそれが無理になる限界があるのである。ただ、一旦走り出すと結構スムーズに走行する。そのような時には静止摩擦と動摩擦の違いのものを考察することが重要になる。磁束の乱れを抑えるには、長い磁石で継ぎ目を少なくするなどの工夫でもっと改良できるものと思われる。

超伝導体とグラファイトの走行との最大の違いは、グラ

ファイトには磁束のピン止め効果がないということである。ピン止めは安定な走行を実現するという点では非常にいいのであるが、このような摩擦の少ない走行を実現するには、むしろ厄介な問題となることもある。グラファイトの場合にも排除されなかった多くの貫通している磁束がある。これによる誘導電流による効果で発生する抵抗力も発生するはずであるが、ピン止めによる影響よりは少ないと思われる。そのようなことは物理的に大いに興味があることであるが、また別の機会に譲りたい。

最後に測定上のことで一言付け加える。時間測定ではストップウォッチの精度以外に斜面の直線性からのずれ(軌道凹凸)が結果に直接反映する。一方、速度測定では最終速度は高さのみで決まる。ストップウォッチによる時間測定は教育的な効果は魅力的であるが、 g の測定精度を高めるには、グラファイトも、いずれは何かの方法で速度を測るべきであるということを確認しておきたい。

5. 他の測定方法との比較について

物理教育において重力加速度 g を測定する実験は多数ある。図 17 はその一例で、明星大学工学部の物理教育実験の「ボルダの振り子による重力加速度の測定」の過去 5 年分の結果をヒストグラムにしたものである。

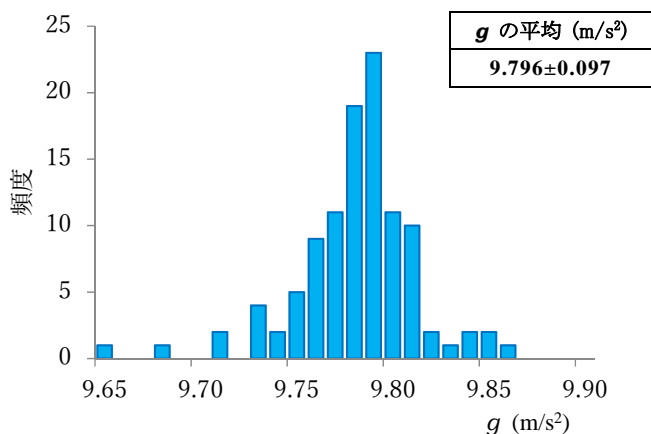


図 17 ボルダの振り子による重力加速度の測定 (2015 ~ 2018、明星大学 物理学系)

約 120 個程度の g の分布であるが、ほとんど理想的な値が得られている。前節までに示したものと比べると精度がよく、斜面を滑らす実験の及ぶところではない。

この他にも、本学では鉛直の自由落下運動をストロボ撮影した写真から g を求める実験も行われているが、平均すれば g はかなり 9.8 に近いが、10 以上になることも多い。統計処理をするにはデータが少なくここでの比較には使えない。自由落下では、写真撮影などで詳しい研究をすでにされている方も多いと思うが、十分調査できていない。

ビースピを使った報告⁸⁾は 20 年近く前からある。その場合、鉛直自由落下では、9.7 に近い値が報告⁹⁾されている。斜面では球体を転がせてビースピで速度を測定して g を求

めることも行われている^{9,10)}。我々も試みたことはあるが、 g は 9 を大きく割り込んだ値になることが多かった。

摩擦の少ない斜面での測定がどの程度されているのかということに関しては、筆者らは詳しい情報を持っているわけではないので、ぜひアドバイスをお願いする次第である。

6. 終わりに

超伝導体及びグラファイトの磁気軌道上での無接触走行による重力加速度の測定について述べた。

グラファイトに関しては、願わくは、緩斜面でもっと理想値に近い g になってほしかったというのが一番の思いである。緩斜面での摩擦の少ない遅い走行が実現すれば、ストップウォッチという簡単な道具で精度よく重力加速度が測定できることになるのである。

速度や時間を正確に測り、 g を求めることは今日の電子工学等の技術をもってすればいくらでも工夫できることであるが、それはそれとして、もっと素朴にそれを実現したい。これが本研究で最も追求したかった点である

終わりに(以下、MT 記)、この研究は筆者の一人 (MT) が中心に行ってきたものである。速度の測定や文献調査に関してやり足りない点も多く、もっと理想値に近い g のデータを得てから発表しようという気持ちもあったが、共著者である 2 人の共同研究者も今年度で本学を去られることになるので、多くの貢献を記録にとどめる意味でも、現時点を区切りとして発表することとした。

なお、この研究には、高重研究室の 2018 年度卒研究生の高崎頌平、近村貴裕、小池太、高橋悠太、酒井公、佐々木拓人、松本瑞樹の皆様の貢献があったことをここに明記して、心より感謝したい。

また、明星学苑連携事業で来学し、速度測定の実験に参加していただいた明星中学校・高等学校の生徒の皆様、引率された一之瀬繁先生にも感謝したい。

参考文献

- (1) 高重正明、鈴木晴彦、田沼静一: 固体物理 **26** (1991) 461-465 等。
- (2) 例えば、高重正明、田沼静一: 実験物理科学シリーズ 3 高温超伝導体とエキゾチック超伝導体 (共立出版、1999) pp. 281-290。
- (3) 高重正明、勝呂史湖、橋本明美、山口俊久: 「超伝導磁気浮上走行体の速度測定」、明星大学 理工学部研究紀要、**52**, pp. 5-12 (2016)。
- (4) 高重正明、山口俊久: 「レゴブロックを使った科学教材展示機器の開発」、明星大学 理工学部研究紀要、**53**, pp. 13-18 (2017)。
- (5) 勝呂史湖: 「超伝導磁気浮上走行における走行抵抗力の測定」、明星大学 大学院 理工学研究科 物理学専攻 2016 年度 修士論文。
- (6) 高重正明、山口俊久、清水俊希: 「物性物理学実験紹介」、明星大学 理工学部研究紀要、**54**, pp. 41-46 (2018)。
- (7) 例えば阿部二郎: 「磁気浮上グラファイトの光駆動技術」、NEW DIAMOND、**30**, No.1 pp. 31-34 (2014)。
- (8) 山本明利: 「ビースピによる速度・加速度測定の新ウハウ」、<http://www.2.hamajima.co.jp/~tenjin/labo/beespi.pdf>
- (9) 寺島幸正、G. M. オンガワエ、S. スプラット: 「速度測定玩具ビースピを用いた定量的力学実験教材の開発」、鳴門教育大学 教育課題研究(理科) 研究集録、2007 年。
- (10) 山本逸郎、古川由美子、野土山桃子: 「斜面を転がる球の衝突実験の物理学的考察」、弘前大学 教育学部紀要、**94**, pp. 19-28 (2005 年 10 月)。