

産総研一般公開における重力測定実験 「重力って!?!? とりあえず, 計ってみよう♪」

住田 達哉¹⁾・名和 一成¹⁾・田中 明子¹⁾・大滝 壽樹¹⁾
伊藤 順一¹⁾・岡田 真介¹⁾・奥山 哲²⁾・楳原 京子³⁾

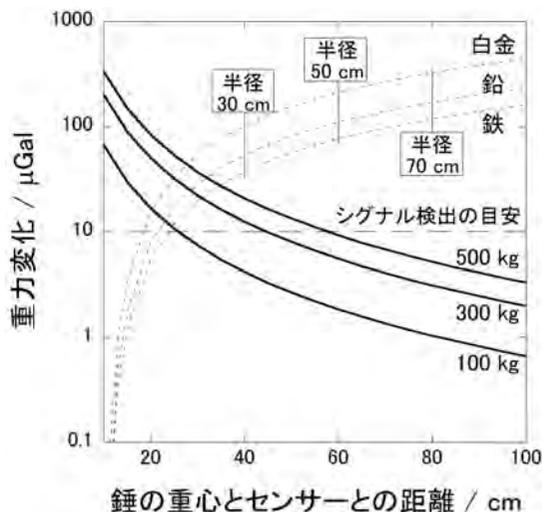
1. はじめに

重力は, 日常生活でも物が落ちることなどで感じる
ことができます。そして, その重力が地球の万有引力
によりもたらされることもご存じの方が多くかもしれ
ません。しかし重力が, 地球と月や太陽との位置関係
および地質(地下の密度構造)により微妙に変化する
こと等は, 地球物理学の常識ではあっても, 一般の方
には縁遠いことでしょう。ましてや, 地質調査の分野
には野外に持ち出せる重力計という精密測定装置が
あることは, 専門を少々かじらないと知ることはでき
ません。そこで私たちは, 2008・2009年と産総研一
般公開において, 約400kgの鉛塊の万有引力を地質
調査で使用している重力計を用いて測定する実験デ
モを行いつつ, 万有引力と重力の基礎知識や地質と
のかかわりを説明する展示を行いました。ここでは,
主に実験に用いた装置や工夫について報告いたしま
す。発表方法については, 本特集号の岡田・奥山
(2010)もあわせてご覧ください。

2. 発端と思考実験

そもそも, 2007年一般公開において, 電磁探査,
地中レーダー, 電気探査といった各種物理探査の実
験デモが紹介されているGSI Newsletterの記事(内
田ほか, 2007)を目にしたのがきっかけでした。子供た
ちが熱心に実験に参加している写真を見て, 「重力で
も何か同じような実験デモができないかな?」と思い,
「お父さんの体重を重力計で測定できないだろう
か?」というアイデアを検討してみました。そこで, 大

人の体重程度の質量で, 重力計で測定可能な重力値
の変化が得られるのか否か, 簡単な計算を行ってみ
ました。第1図に質点の質量ごとに, 質点と重力セン
サーとの距離により, どの程度重力変化が得られるか
を実線で図示しています。地質調査で用いる重力計
は, 10 μ Gal程度であれば変化を十分に捉えることが
可能ですが, この図から明らかなように, お父さんの
体重程度(100kgの線)では, 質量を集中させても重
心をセンサーからおおよそ20cm以内にする必要が
あり, 実際に実験デモを行うのは無理であることが分
かります。仮に大人の体重に代えて, 大きな質量を使



第1図 重力測定実験のための思考実験。錘はいずれも,
球を想定。太実線は, 固定した質量の場合。破
線は, 球の半径として, (横軸の値-10cm)を想
定。

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 産総研 地質情報研究部門(現:北海道大学大学院理学研究院
附属地震火山研究観測センター)
3) 産総研 地質情報研究部門(現:活断層・地震研究センター)

キーワード:一般公開, 重力測定実験デモ, 自動測定, 重力加速度,
万有引力, 密度



写真1 2008年における実験の様子。左側の金属フレーム台と台上の重力計（シントレックス社CG-3M型）が重力測定部で、赤いハンドパレットとその上の黒っぽい金属塊が移動式鉛重錘部。右端にわずかに写るコンピュータが測定結果表示部。

ったとしても、最低でも300kgを重力センサー近くに配置しなくてはなりません。そのためには、密度の大きな物質を使わざるを得ないのですが、白金(21.62g/cm³)、金(19.32g/cm³)、タンゲステン(19.2g/cm³)、ウラン(18.7g/cm³)等は、価格や安全面で実験デモで使うことは非現実的です。放射線を取り扱う現場では、鉛(密度:11.34g/cm³)のブロックがよく用いられますが、この実験においても、取り扱いやすいサイズ(20cm×10cm×5cm)と質量(約11kg)という点から、鉛ブロックを積み上げて大きな重錘にすることにしました。幸いにもRIの放射線遮蔽用の予備の鉛ブロックを、大量に臨時借用することができました。なお、第1図には、重錘としてさまざまな大きさの白金・鉛・鉄の球を使った場合の重力変化の最大値の見積もりも合わせて図示しています。今後同様の実験を行われる場合、材質・サイズ等を決める際に役立つと思います。なお、重力計下端から内部のセンサーまでの距離は10cm程度あるので、サイズを決める際には、図に記載したようにこの点も考慮する必要があります。

3. 実験装置

実験は、約400kgの重錘が、重力計の直下にある時とない時とで、重力値の違いを計測しようとするものです。そのための実験装置は、移動式鉛重錘部、

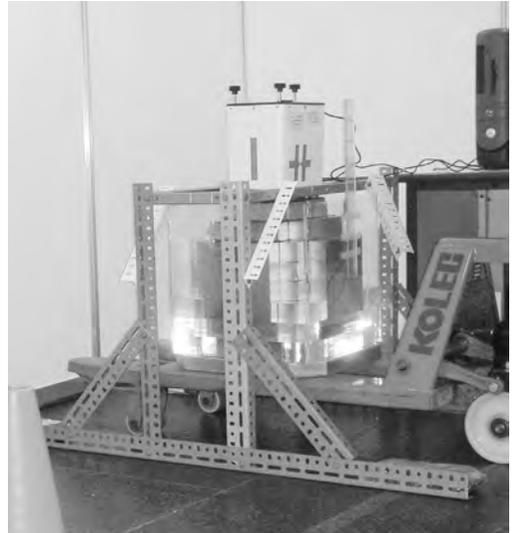


写真2 2009年における実験の様子（重力測定部に移動式鉛重錘部を挿入時）。重力計は、ラコスト社ED型。鉛の重錘は、着色して金塊に偽装した。

重力測定部、測定結果表示部の主に3つの部分からなります(写真1～3。カラー画像:本特集号口絵4ページ参照)。

重錘として、放射線の遮蔽に用いられる5cm×10cm×20cmの鉛ブロックを38個使用しました(総重量:431kg)。そのうち2個は、縦に半分^{しやへい}に切断して用いています。重錘の移動台車としてハンドパレットを使用しました。使用したハンドパレットは、最大積載荷重が1,000kgで、さらにリフト機構を持ち、高さ方向に12cm以内の調節が可能です。ハンドパレットにアルミ製土台(45cm四方、厚さ4cm)を敷き、その上に鉛ブロックを球に近い形になるように積み上げました。球形の場合、錘^{おもり}の質量分布の計算を省き、重心位置と総重量のみで万有引力を計算できる利点があります。実際に球状に積むためには、下半分に支えが必要となりますが、支えとしては、透明で密度が小さく、強度も十分なアクリルのブロックを使用しました。一般公開では、幼い子供の参加者がいるため、念のための倒壊防止として、アクリル板で鉛ブロックの周囲を囲みました。鉛の密度11.34g/cm³に対して、アルミニウムが2.69g/cm³、アクリルが1.19g/cm³であり、さらにそれらのほとんどが鉛より下部に配置されるため、距離の効果も勘案して影響は小さいと判断

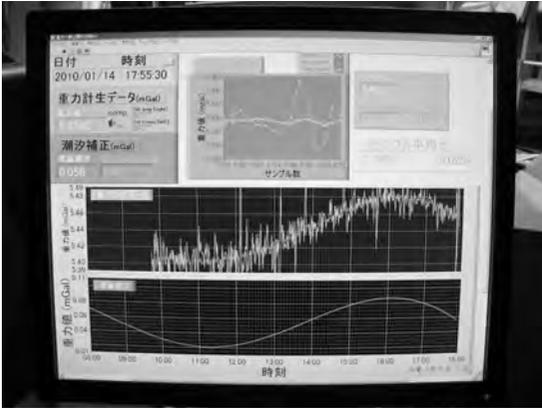


写真3 測定結果表示部のディスプレイ画面（後日、研究室内で撮影）。上部中央のグラフが、1分間の重力測定の様子を示す（黄色：4秒間の平均値、赤細線：24秒間の平均値、赤太線：60秒間の平均値）。下段のグラフが潮汐の理論曲線、中段のグラフが、重力の実測値を示し、重力計で潮汐変化が捉えられていることが分かる。

しています。たとえばアルミ製土台は、質量が22kg程度で、重力計センサー位置から50cm程度の距離にあります。計算される重力加速度は、 $0.6\mu\text{Gal}$ 程しかありません。また、ハンドパレットのフレームは、5mm厚の鉄の板を曲げて作ってあるため、見かけによらず軽量（約60kg）です。また、その質量のほとんどが、重力センサーから見て、距離も角度もある操作部に集中しているため影響は軽微です。

重力測定部は、高さ75cm、幅90cm、長さ140cmの戸棚等を作るスチールフレーム製で、安定して重力を測定できるよう、支柱部には筋交いを配しています（写真1および2）。重力計を載せる天板の下部は、大きく空間になっており、ハンドパレットに載せた鉛重錘を自由に入れたり抜いたりできるようになっています。高さは、ハンドパレットをリフトさせた状態での鉛の最大高さに合わせてあります。また、重力計と鉛重錘との距離がなるべく近接しつつ重力計の水平が調節できるように、アルミ板3か所にネジを立てて、簡易の水平台を作成しました。以上の工夫で、鉛重錘と重力計の隙間を最小で1cm程度にまで減らすことが可能となりました。重力計は、2008年ではシントレックスCG-3M型重力計、2009年ではラコストED型重力計を使用しました。

測定結果表示部は、ウィンドウズパソコンと

LabVIEW（ナショナルインスツルメンツ社）を使用しました。重力計とパソコン間をシリアルケーブルにより接続し、自動測定・収録・表示が可能です。写真3（カラー画像：本特集号口絵4ページ参照）が測定結果表示部の様子です。表示の左上部は、時刻と重力値の生データの他に、潮汐に関する情報を表示しています。潮汐による重力の変化は、地球と月と太陽の位置関係によって決まるのですが、日によっては、今回の鉛重錘の出し入れの変化量より一桁大きな日変化を示すので、決して無視できません。右上部は、潮汐補正後の重力値およびその移動平均値（6および15サンプル）が表示されます。また、直近15回の生データおよび2つの移動平均値をグラフ化して（上部中央）、視覚的に安定度を確認できるようにしました。CG-3M型重力計の場合は、前もって測定したドリフトプレートを使用して、ドリフトも自動補正しています。後述のパネルを使った説明に関連付けるために、表示の下半分には、その日の予想される潮汐変化と実際の重力値を比較できるようにグラフで表示しました。

測定結果表示部のプログラムを書くにあたり特に気をつけることは、重力計からのデータを吸い取るタイミングです。基本的には、パソコンの時間を用いて任意の時刻にデータを取りに行くのではなく、重力計がデータを吐き出すタイミングを待って、データを取り、その後パソコンの時刻を抱き合わせるようにすると、良好な結果を得ます。2009年においては、その問題に気付くのが遅かったため、一般公開本番で重力値が安定せず、急遽、ラコストD型重力計を用いて、人力による計測で対応する羽目になりました。後に検証すると、データを吸い取っている最中に、次の計測が完了してしまい、読み取っている最中のデータの後ろ部分が欠損していることが判明しました。

4. そのほかの実験上の工夫

・室内であること

地球のおおよその重力加速度 980Gal に対して、今回の実験は、相対的測定とはいえ、精度として $1\mu\text{Gal}$ を目指しており、10億分の1の物理量を測定する精密な実験です。そのため雨風をしのぐことはもちろんのこと、安定した測定のために、第7事業所の正面玄関ホールは最適の場所でした。

・パイロン



第2図 チャレンジコーナーで用いたパネル1。前半：重力が地球の万有引力であることを、ニュートンやガリレオとともに紹介。後半：地球の重力の大きさを変化させる要因として、遠心力や潮汐の効果を紹介。



第3図 チャレンジコーナーで用いたパネル2。前半：重力探査の様子。後半：地質調査と重力探査のかかわりの説明。

重力計は、フィールドで使用するものとはいえ精密機器であり、不慮の事故による装置の破壊を防ぐため、パイロンで柵を設け、やや遠巻きに実験の様子を見ていただくことにしました。加えて、人の往来を遠ざけることで振動のノイズを低減し、測定値の安定にも貢献しているように思われます。

・WEBカメラ

今回の実験では、重力計のセンサー位置と鉛重錘の中心位置との距離を測定する必要があります。特に鉛重錘は、ハンドパレットで上下できるため、実験のたびに距離を測定することが望ましいです。しかし、装置の関係上、実際に近寄らずに、WEBカメラを利用して、手元のディスプレイを見ることで距離の測定をしていただくことにしました。

・モニタ分配器

2008年の実験においては、実験の測定結果表示部に相当するディスプレイとWEBカメラのディスプレイ

は、全体で1つずつしか準備しなかったため、5人を超える実験参加者がいた場合、2つのディスプレイを見ることが困難になりました。そこで2009年には、モニタ分配器を使用して、手元のディスプレイでWEBカメラの様子を見られるようにしました。測定結果表示部も、必要な時WEBカメラで映すことで、実験参加者の不満も解消したものと思われま。

・鉛重錘の着色

2年連続で同じ実験をそのまま行うことに多少の抵抗があったため、2009年には、「隠し砦の三悪人」をヒントに、鉛全体をスプレーで金色に塗り、金塊を思わせる趣向を凝らしました(写真3、カラー画像：本特集号口絵4ページ参照)。手間をかけて着色しましたが、実験参加者の反応は、それほどでもなかったように思われます。

5. パネル

説明用パネルを2008年では2つ、2009年ではさら

AIST 地質情報研究部門

重力って!?!? とりあえず、測ってみよう!

ニュートンの万有引力の法則:

$$g = \frac{G \times m}{r \times r}$$

g: おもりからの重力加速度
G: 万有引力定数
m: 質量 (重さ)
r: センサーからおもりの重心までの距離

変形すると、

$$m = \frac{g \times r \times r}{G}$$

重力加速度と距離から、おもりの質量 (*m*) が分かる!

さあ! 密度を求めて金塊の正体を明かそう。

おもりを入れたときの値	おもりを外したときの値	その差
<input type="text" value="mgal"/>	<input type="text" value="mgal"/>	<input type="text" value="g mgal"/>
$m = \frac{\frac{g}{mgal} \times \frac{r}{cm} \times \frac{r}{cm}}{G: 0.0667 \text{ mgal} \cdot \text{cm}^2/\text{kg}}$		
$= \text{ kg$		

次に、密度を求めてみよう。

体積: $V = 20\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm} \times 38\text{個}$

= cm^3

密度 = $\frac{m \times 1000 \text{ (g)}}{V \text{ (cm}^3\text{)}}$

= g/cm^3

そうすると、この金塊は です。

いろいろな物の密度

水	: 1.0 (g/cm ³)
鉄	: 7.9
銅	: 8.9
銀	: 10.5
鉛	: 11.3
金	: 19.3
凝灰岩	: 1.4 - 2.6
花崗岩	: 2.6 - 2.7
玄武岩	: 3.2 - 3.8
土	: 約 2

第4図 重力の測定値から重錘の重さと密度を求めるための実験シート。2009年では、ジオドクトルコースのフィールドノートとして使用。

に1つ作成しました。2008年作成のパネルは、重力とは地球の万有引力であることを説明するパネル(第2図)と地質と重力探査のかかわりを説明するパネル(第3図)であり、図や写真を多用して、直感的に理解できるように努めました。また、アイザック・ニュートンやガリレオ・ガリレイといった誰もが知る科学者を取り上げ、重力との関連を示し、重力への親しみやすさに配慮しました。詳しくは、本特集号の岡田・奥山(2010)をご覧ください。

6. 実験シート(フィールドノート)

この実験では、小・中学生には、難しい物理の計算をする必要があるため、実験参加者には、筆記具と計算機を貸し出した上で、実験シート(第4図)を使って、万有引力の計算を行いました。重錘のある時とない時の重力値の差と、重錘の重心と重力計のセンサー位置との距離から、重さ(質量)を計算してもらいました。また、重錘の正体を調べるために、ブロックの大きさと個数から、重錘全体の体積を計算してもらい、密度も計算してもらいました。

実験シートには、いろいろな物の密度として、水、鉄、銅、銀、鉛、金の密度を表として与えており、自分の計算結果から、重錘の正体分かる仕組みになっています。ちなみに実際の測定値は、重力差が32 μGal 程度で、重力計センサーと重錘中心の距離が30 cmくらいです。二桁を有効数字とすると、430kgと計算され、実際の鉛重錘の総重量(431kg)と一致します。正確な重力値が測れた場合には、鉛または銀程度の密度と計算されます。結果として、鉛以外の金属が計算された場合にも、重力を測定することの難しさと測定の誤差を説明することにより、多くの実験参加者は納得していただきました。

2009年の一般公開では、有志企画『ジオドクトルコース』(住田ほか, 2010)に参加したのですが、その際のフィールドノートの裏面には、この実験シートを印刷しました。また、参考資料として、パネルの縮小印刷物も同時に配りました。

7. 気付いたこと

実験参加者の対象者を、2008年では中学生以上、

2009年では小学校高学年以上としていましたが、実際は、やる気のある小学校低学年の方にも多く参加していただきました。また、大人にもやりがいのある実験なので、保護者の方にも積極的に参加してもらいました。難しい計算を伴う実験にもかかわらず、難しさを理由に実験を途中でやめられた参加者は、今のところおられません。しかしながら、2009年の一般公開の有志企画『ジオ ドクトルコース』におけるアンケートでは、重力実験について「計算が難しい」という回答が複数件ありました。

難しいながらも、やりがいがあって、実験への興味が増すのか、答えを導き出した満足感があるのか、あるいは理科や科学が嫌いになりそうなのか判断が迷うところですが、次回ではアンケートの質問を工夫して、そのあたりの感想を聞いてみたいと思います。小・中学生の実験参加者たちが、高校物理を習う頃、この体験を思い出して、机のどこかにしまい込んだ実験シートを再び眺めて、『ああ～、なるほど!!』とってくれた時が、この実験の本当の成功のような気がします。

謝辞：今回の重力測定実験において、地圏資源環境研究部門の上岡 晃氏から鉛ブロックを、地質調査情報センターの角井朝昭氏からハンドパレットを、地質情報研究部門の村田泰章氏からCG-3M型重力計をお借りいたしました。また、一般公開ブース全般で広報部の河村幸男氏にお世話になりました。ここに記して、感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 岡田真介・奥山 哲(2010):産業技術総合研究所一般公開における重力測定実験 ～特に、実験の説明方法と参加者の反応について～. 地質ニュース, no.671, 27-29.
- 住田達哉・伊藤順一・名和一成・宮地良典・七山 太・高田 亮・伊藤 忍・吉川秀樹・大和田 朗・佐藤卓見・福田和幸・中澤都子・今泉博之・今西和俊(2010):産総研一般公開,地質分野有志企画「ジオ ドクトル 2009」コース,地質ニュース, no.671, 8-12.
- 内田利弘・神宮司元治・中島善人・西澤 修・光畑裕司・横田俊之・上田 匠(2007):物理探査で地下の宝探し?! 産総研つくばセンター一般公開出張記, GSI ニュースレター, no.35, 1-3.

SUMITA Tatsuya, NAWA Kazunari, TANAKA Akiko, OHTAKI Toshiki, ITOH Jun'ichi, OKADA Shinsuke, OKUYAMA Satoshi and KAGOHARA Kyoko (2010): Demonstration of gravity measurement at the AIST open house "What's gravity !!?! Let's try measuring ♪".

<受付:2010年5月17日>