

パソコンを利用した学生実験課題の開発研究

—学生実験における重力加速度測定値の分析—

山岡 大^{1,2} 藤原 忠夫^{1,2}

Developments in Physics Education with Personal Computers

—On the measured values for the acceleration of gravity obtained in student exercises—

Masaru Yamaoka^{1,2} and Tadao Fujiwara^{1,2}

Abstract

We have developed a microcontroller-based system for measuring the acceleration of gravity in student exercises. The system has been used as experimental equipment for students since 2004. This study examined 72 results for the acceleration of gravity obtained by students. It was found that the obtained values were larger by only 0.01m/sec^2 compared to the value of 9.797m/sec^2 measured at Tokyo. We suggest two possible reasons for this discrepancy: either the measured values for the length of the metal wire were slightly too long, or those for the vibration period were too small.

Key words: acceleration of gravity, student exercises, Borda's pendulum, vibration period, wire length

はじめに

本学部の第1学年物理実験では、初等力学の基礎である重力加速度の測定を学生実験の課題の1つとして採用している。この重力加速度の測定は、ボルダ振り子の振動を光センサで電気信号（パルス波）に変換し、筆者等が独自に開発したマイクロコントローラを内蔵した電氣的振動周期検出器でそのパルス幅を計測した後、ソフトウェアにて多数回の計測値をデータ処理して振り子の振動周期を算出し、近似式を用い

て測定値を得ている。この電氣的振動周期検出器は、先に A/D コンバータ回路を用いて開発¹⁾を行ったが、A/D コンバータ回路での処理過程やその分解能に起因して、重力加速度の測定値が理科年表値と大きく異なる結果がみられた。このため、マイクロコントローラのポートの状態から振動周期を計測することとし、そのためのポート検出回路をあらたに考案²⁾するとともに、ポート検出に用いる外部クロックの周期が及ぼす振動周期（すなわち、重力加速度）への影響を検討した。この検討から、外部クロック

¹ 日本大学歯学部物理学教室

² 日本大学歯学部総合歯学研究所歯学教育研究部門

〒101-8310 東京都千代田区神田駿河台1-8-13

(受理2005年9月30日)

¹ Department of Physics Nihon University School of Dentistry

² Division of Dental Education, Dental Reserch Center, Nihon University School of Dentistry

1-8-13 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8310, Japan

周期が 2.039 msec あるいは 4.079 msec で十分満足できる重力加速度 g の測定値が得られることが認められた³⁾。

そこで、以上の基礎的な開発・研究の成果を踏まえ、電気的振動周期検出器を含む計測システムを、平成 16 年度から学生実験の実験装置として授業現場に導入した。今回、この計測システムを使用した平成 16 年度前期、後期および平成 17 年度前期の総計 36 回の学生実験で得られた測定結果（データ総数 72）について、調査・分析を行った。

学生実験に導入した実験装置

学生実験に導入した実験装置の概図を図 1 に示す。実験装置は、ボルダ振り子一式、フォトスイッチ固定台、振り子の周期を検出する周期検出装置（電気的振動周期検出器）および測定データから周期を得るためのプログラムを備えたパソコンで構成してある。

ボルダ振り子は(株)中村理工工業社製で、直径約 4 cm の金属球に細い金属線がネジで取り付

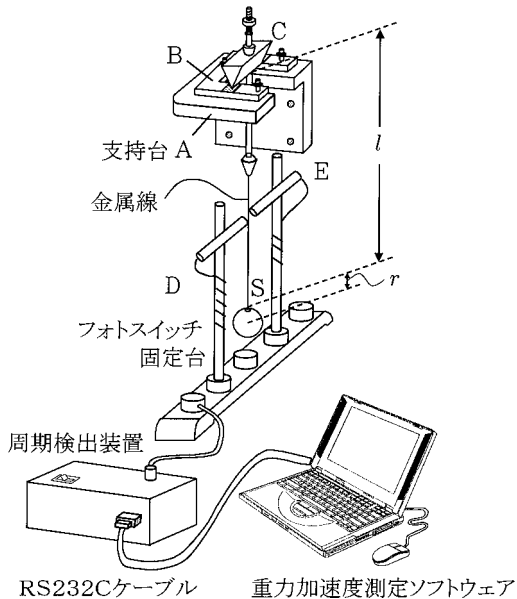


図 1 実験装置概図

けられており、金属線他端には十字形金具 C が付いている。これを支持台 A にのせたコの字形受け台 B に渡し、金属球を鉛直面内で振らせる。一方、フォトスイッチ固定台は 2 つの光電素子 D, E からなり、振り子の振動を検出する。

周期検出装置は、光電素子間を金属線が横切ったときの光電素子からのトリガ信号を検出し、振り子の周期に同期したパルス波を発生させる。ついで、このパルス波形のパルス幅をポート検出回路を用いて計測する。なお、ポート検出回路の外部クロック周期は、先の検討³⁾を踏まえて 4.087 msec (周波数 244.7 Hz) を使用した。

パルス幅の計測データは、RS232C ケーブルを介してパソコンに送信され、重力加速度測定ソフトウェアで振り子の振動周期が算出される。

学生実験の実験手順

図 2 は、重力加速度の測定に関する学生実験の実験手順の詳細をフローチャートで示したものである。学生実験の実験班は 1 班 5 名あるいは 6 名で、ボルダ振り子の金属線の長さ約 1.4 m と約 1.1 m の 2 種類について、図 1 の実験装置 2 台を用いてそれぞれの測定値を得ることとしている。

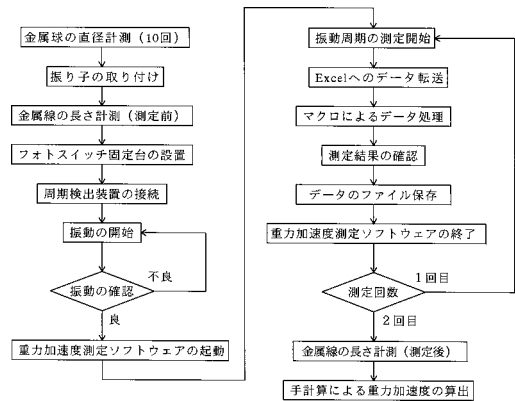


図 2 重力加速度測定の実験手順

実験では、まず最初にボルダ振り子の金属球の直径 $2r$ をキャリパーを用いて 10 回計測し、その平均値より金属球の半径 r を求めている。この「金属球の直径計測」の後に、金属線の一端を金属球にネジ止めで取り付け、金属線の他端の十字金具をコの字形受け台の測線と直角になるように十字金具のナイフエッジを置いて振り子を取り付けるが、このときコの字形受け台は水準器を用いて水平調整を行い、振り子の鉛直面内での振動に配慮している。

振り子を取り付けた後、周期測定前の金属球を吊り下げた状態で「金属線の長さ計測」を 5 回、mm 巻き尺を用いて mm 単位まで行うが、周期計測が終了した後、さらに 5 回の計測を行い、計 10 回の平均値から金属線の長さの実測長を決定している。

振り子の振動は、金属球を完全に静止させた後、フォトスイッチ固定台の上部付近で、支持台が取り付けられている壁に当たった直角定規の一边を金属線に接触させ、直角定規を壁に沿って平行に移動させて金属線下部の金属球を約 2 cm 押し込み、静かに直角定規を引いて振動を開始している。その後、しばらくの間、金属球の振動状態を観察し、わずかでも楕円振動の状態が認められる場合には振動を停止させ、再度「振動の開始」の操作を繰り返している。

振動周期の計測は、「振動の開始」後、パソコンに用意した重力加速度測定ソフトウェアを起動し、画面上に表示される [通信開始] ボタンをクリックすると同時に開始し、1 振動ごとの振動周期を順番に 250 回まで測定する。250 回の周期を計測した時点で計測データを表計算アプリケーションソフト Microsoft Excel 2003 (以後、Excel と記す) で処理するため、[送る] のダイアログボックスを表示した後、全計測データが Excel に転送される。

計測データの処理は Excel のマクロ処理と表計算機能によって行うが、振動周期 250 個の

値から 200 個のデータ抽出を行い、20 振動ごとの経過時間を算出してワークシート上に表示させている。また、ワークシート上では、測定前の金属線の実測長 l 、金属球の半径 r そして振動周期の測定値 T から重力加速度の測定値 g を算出、表示し、そのワークシートをファイル保存している。なお、振動周期の測定は、第 1 回目の計測を終了した後、第 2 回目の計測を行い、2 つの測定値を得ることにしている。

第 1 回目、第 2 回目の測定結果は、学生にデータ処理用として予め配布してある実験シートに、ワークシート上の 20 振動の経過時間を 1/100 秒までの値として転記した後、近似式りによって重力加速度 g を手計算で算出させ、実験結果としている。

学生実験の測定結果

調査・分析を行った学生実験の測定結果は、あらたな実験装置を学生実験に導入以後の、平成 16 年度前期、後期と平成 17 年度前期各学生実験 12 回の全実験総数計 36 回で得たデータ総数 72 で、図 3 は全測定値をヒストグラムで示したものである。ここで、横軸の目盛値は金属線の長さ計測が mm 単位であることから、 0.01 m/sec^2 とした。図 3 から明らかかなように、学生実験で得られた重力加速度 g の測定値は $9.78 \text{ m/sec}^2 \sim 9.83 \text{ m/sec}^2$ に分布し、その 86% が

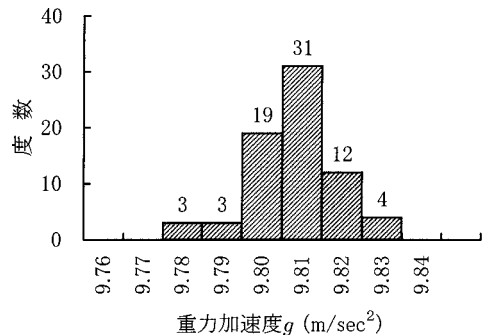


図 3 学生実験で測定された重力加速度のヒストグラム

9.80 m/sec²~9.82 m/sec²の範囲に存在するばらつきの小さい分布であった。しかし、最頻値が9.81 m/sec²で、理科年表に記載の東京での値である9.797 m/sec²に比べて0.01 m/sec²程度の明らかなズレが認められた。

図4, 図5は、全測定値が金属線の長さ約1.4 mと約1.1 mの2種類から得られた結果であることから、各測定値を長さ約1.4 m(図4)と長さ約1.1 m(図5)とに分類して、ヒストグラムで示したものである。

長さ約1.4 mの場合と長さ約1.1 mの場合とでは、重力加速度の測定値はともに9.78 m/sec²~9.83 m/sec²に分布するものであったが、最頻値に相違がみられ、長さ約1.4 mでは9.81 m/sec²、長さ約1.1 mでは9.80 m/sec²、9.81 m/sec²の度数が同じ13であった。

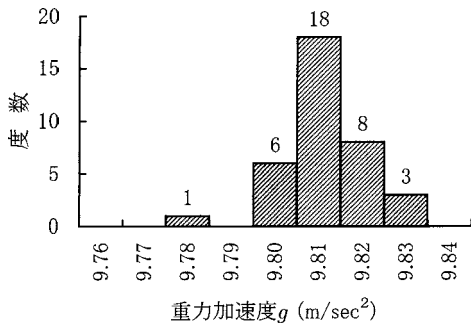


図4 金属線の長さ約1.4 mでの重力加速度のヒストグラム

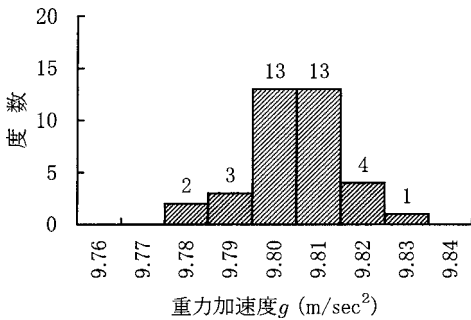


図5 金属線の長さ約1.1 mでの重力加速度のヒストグラム

これら重力加速度の測定値は近似式¹⁾で算出された結果であることから、図3にみられる測定値と理科年表に記載の実測値(東京)との間のズレの要因を検討するため、金属線の実測長 l 、振動周期の測定値 T について詳細な分析を行った。なお、金属線の半径 r については、測定された結果が 0.020 ± 0.000 m と mm の単位まで全てが同一であった。

1. 金属線の長さ

長さ約1.4 mと長さ約1.1 mの金属線はいずれも学期ごとの実験開始前に取り替えるとともに、実験期間中、学生の不慣れな取り扱いによる屈曲などが生じた場合、適宜取り替えた。このため、2種類の金属線の長さを、学期ごとの実測長(データ数12)から特定した。

図6~8は、長さ約1.4 mの金属線の実測長 l に関する平成16年度前期、後期と平成17年度前期それぞれのヒストグラムである。長さ約1.4 mの金属線の実測長は、平成16年度前期では分布幅が1.419~1.422 m、平均値が1.420 m(以後、この分布を $L_{l,1}$ と記す)、平成16年度後期では分布幅が1.408~1.412 m、平均値が1.411 m(以後、この分布を $L_{l,2}$ と記す)、そして平成17年度前期では分布幅が1.412~1.415 m、平均値が1.414 m(以後、この分布を $L_{l,3}$ と記す)であった。各分布は、その範囲が4~5

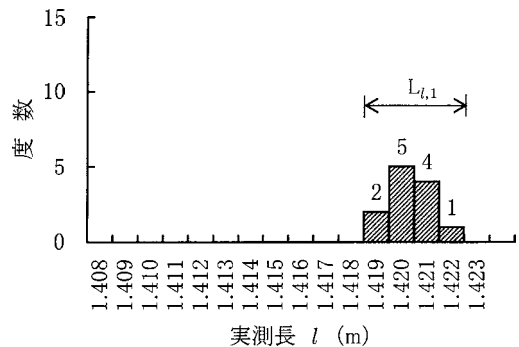


図6 平成16年度前期の金属線の長さ約1.4 mの実測長のヒストグラム

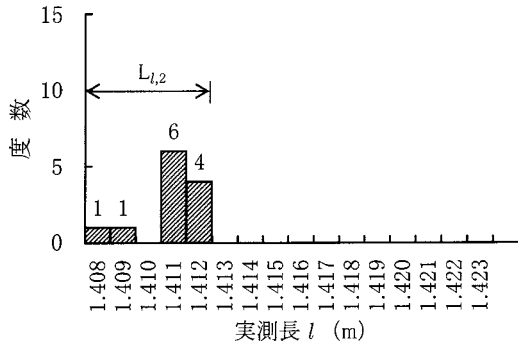


図7 平成16年度後期の金属線の長さ約1.4 mの実測長のヒストグラム

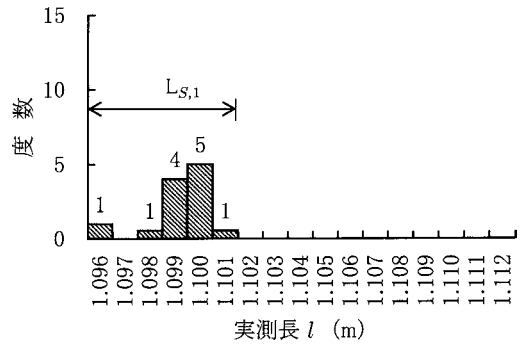


図9 平成16年度前期の金属線の長さ約1.1 mの実測長のヒストグラム

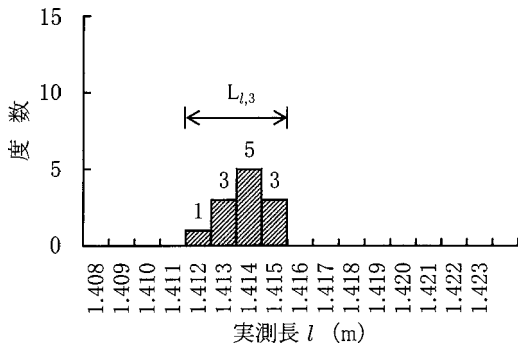


図8 平成17年度前期の金属線の長さ約1.4 mの実測長のヒストグラム

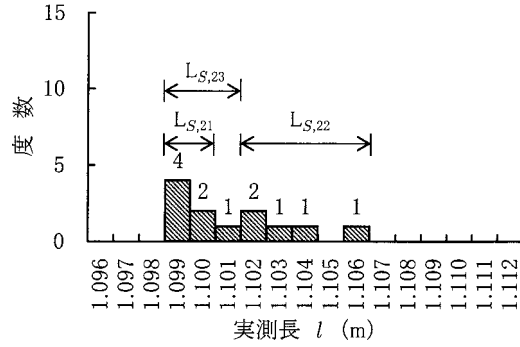


図10 平成16年度後期の金属線の長さ約1.1 mの実測長のヒストグラム

mm のばらつきであった。したがって、実験期間中における金属線取り替えの実測長への影響は認められなかったため、長さ約1.4 mの金属線の長さは各学期内では同じであったと考えられた。

図9～11は、長さ約1.1 mの金属線の実測長に関する各学期のヒストグラムである。平成16年度前期ではすべての計測値（データ数12）の分布幅が1.096～1.101 m、平均値が1.099 m（以後、この分布を $L_{S,1}$ と記す）で、長さ約1.4 mの場合と同程度のばらつきがみられ、実測長は1種類と認められた。平成16年度後期では分布幅が1.099～1.100 m、平均値は1.099 m（以後、この分布を $L_{S,21}$ と記し、データ数3）、分布幅が1.102～1.106 m、平均値は1.103 m（以後、

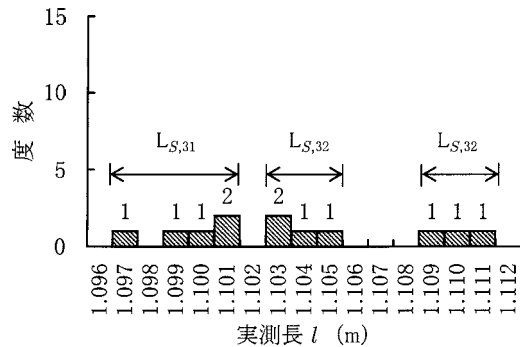


図11 平成17年度前期の金属線の長さ約1.1 mの実測長のヒストグラム

この分布を $L_{S,22}$ と記し、データ数5）、そして分布幅が1.099～1.101 m、平均値は1.100 m（以後、この分布を $L_{S,23}$ と記し、データ数4）の明

らかに異なる3種類の実測長（各分布の範囲は3～5 mm）が認められた。なお、実測長の特定は実験日と測定値との対応から行った。

平成17年度前期の分布は平成16年度後期の場合と同様、実測長の散在がみられたため、実験日と測定値とを対応して特定を行った。その結果、分布幅が1.097～1.101 m、平均値は1.100 m（以後、この分布を $L_{S,31}$ と記し、データ数5）、分布幅が1.103～1.105 m、平均値1.104 m（以後、この分布を $L_{S,32}$ と記し、データ数4）、そして分布幅が1.109～1.111 m、平均値1.110 m（以後、この分布を $L_{S,33}$ と記し、データ数3）で、各分布幅の範囲は3～6 mmであった。このことから、平成16年度後期と同様に実験期間中は3種類の長さの金属線が用いられていたことが認められた。

2. 振り子の振動周期 T

振り子の振動周期 T を算出するために用いた測定値（200個）を詳細に検討するため、1振動ごとの振動周期 t の経時的な変動を分析した。この振動周期 t の分析に用いた実験データの総数は66データで、他は実験データのファイル保存が不完全なため分析に使用できなかった。図12は振動周期 t の経時的な変動を示す実験結果の1つで、金属線の実測長1.102 m、振動周期 T 2.127 secであった測定値に関する散布図である。ここで、横軸に示す計測回数は振

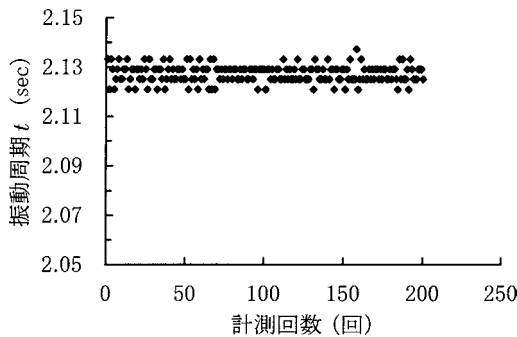


図12 実測長1.102 m、周期 T 2.127 sec の計測回数に対する振動周期 t

動開始直後からの1振動ごとの順番で、縦軸は各回数における振動周期 t の計測値である。

図12に示す測定では、1振動ごとの振動周期 t が2.121 sec, 2.125 sec, 2.129 sec, 2.133 secの4種類に分布し、その差はポート検出回路の外部クロック周期に対応して4 msecであった。また、各振動周期 t の値は計測回数に対して一定で、時系列的な減衰等は見られなかった。この結果は、振動の周期計測において、ナイフエッジの摩擦などによる振動周期の変化が生じていないことを示したものである。今回検討した他の測定値の場合も全く同様で、振動周期 t の値は計測回数に対して一定であったが、異なる振動周期 t の分布数は主に5種類(47%)、3種類(24%)、4種類(18%)で、これら3～5種類の実験データの割合は総数の89%であった。

つぎに、振り子の振動周期 T と金属線の実測長 l との間の相関を検討した。図13、図14は、金属線の長さ約1.4 mと長さ約1.1 mの実測長 l に対する周期 T の散布図を示したものである。

長さ約1.4 mでは、分布 $L_{l,1}$ 、 $L_{l,2}$ 、 $L_{l,3}$ を含む1.408～1.422 mの範囲で、各実測長に対する振動周期 T が2.399～2.409 secの範囲に分布し、分布 $L_{l,1}$ 、 $L_{l,2}$ 、 $L_{l,3}$ のそれぞれの振動周

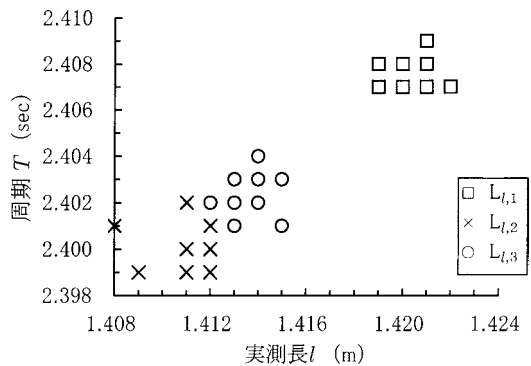


図13 長さ約1.4 mの実測長に対する周期 T の散布図

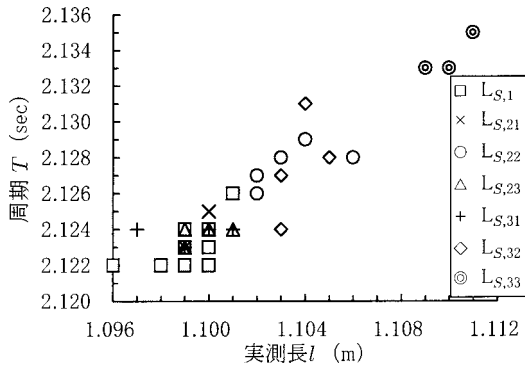


図 14 長さ約 1.1 m の実測長に対する周期 T の散布図

期 T の平均値は、2.408 sec, 2.400 sec, 2.402 sec であった。また、長さ約 1.1 m では、分布 $L_{s,1}$, $L_{s,21} \sim L_{s,23}$, $L_{s,31} \sim L_{s,33}$ を含む 1.096 ~ 1.111 m の範囲で、各実測長に対する振動周期 T が 2.122 ~ 2.135 sec の範囲に分布し、各実測長における振動周期 T の平均値は、 $L_{s,1}$ が 2.123 sec, $L_{s,21} \sim L_{s,23}$ と順に 2.124 sec, 2.128 sec, 2.124 sec で、 $L_{s,31} \sim L_{s,33}$ も全く同様に 2.124 sec, 2.128 sec, 2.134 sec であった。

考 察

ボルダ振り子の振動周期を高い精度で検出するための電氣的振動周期検出器の開発は、重力加速度測定に関する学生実験において、従来の周期計測で課題であった人為的ミスを取り除くことに端を発している。この課題解決のため、筆者らがこの間に研究・開発した電氣的振動周期検出器は、振動周期の計測を簡素化、効率化するもので、学生実験における学習者の不慣れさに起因する人為的ミスを完全に除去し、学習効果の向上に大いに寄与するものであるが、振動周期の計測精度の改善に課題が残った¹⁾。そこで、この計測精度の向上を目的とした計測方法の改良を試み、振り子の振動周期を十分に高い精度で測定することが可能と考えられるようになった^{2,3)}。そこで、筆者らはこれまでの研

究成果を踏まえ、独自に開発した電氣的振動周期検出器を含む計測処理システムを、平成 16 年度から本学部物理実験に導入した。

今回、この実験装置を学生実験に導入して以来、平成 16 年度前期から平成 17 年度前期までの 3 学期間計 36 回の学生実験で得られた重力加速度の測定値総数 72 について、学生の実験データを詳細に検討した。その結果、ボルダ振り子に関する近似式を用いて得た重力加速度の測定値分布は、理科年表に記載の東京での値である 9.797 m/sec^2 に比べて 0.01 m/sec^2 程度の明らかなズレが認められた。そこで、重力加速度の算出に用いた近似式を構成する計測値である、金属線の長さ l と振動周期 T それぞれの実測値を詳細に検討することとした。

金属線の長さに関する実測長については、各学期開始前および実験期間中に金属線を取り替えたことから、長さ約 1.4 m と約 1.1 m の金属線それぞれについて、各学生実験に供した金属線の長さを mm 単位で、実測長を元に学期ごとの特定を行った。その結果、長さ約 1.4 m では各学期で使用した金属線の実測長の平均値が 1.420 m, 1.411 m, 1.414 m であり、3 種類の長さであることが特定された。一方、長さ約 1.1 m の金属線については、平成 16 年前期では 1 種類 (平均値 1.099 m) であったが、平成 16 年後期では 3 種類 (平均値 1.099 m, 1.100 m, 1.103 m)、平成 17 年度前期も 3 種類 (平均値 1.100 m, 1.104 m, 1.110 m) の金属線であることが特定され、全期間を通して金属線の長さが 7 種類であることが特定された。

以上の金属線 (10 種類) それぞれの実測長の分布範囲は最大で 6 mm もあり、測定誤差として許容される $\pm 1 \text{ mm}$ を大きく超えることが認められた。このことは、重力加速度の測定値における $\pm 0.01 \text{ m/sec}^2$ の精度を超える誤差を与えるものであり、今回の測定値にみられた 0.01 m/sec^2 のズレを生じた要因の 1 つと考え

られた。

つぎに、金属線の実測長 l に対する周期 T^2 の散布図を作成して、学生が実験で得た各計測値の詳細を検討した。図 15 が金属線の長さ約 1.4 m, 図 16 が約 1.1 m の場合の散布図である。

図 15, 図 16 にみられるように、長さ約 1.4 m, 約 1.1 m の場合ともにばらつきは認められるものの周期 T^2 は実測長 l に対してほぼ直線的に分布したものであるため、それぞれの回帰直線を求めた。長さ約 1.4 m の場合は $T^2 = 3.6598l + 0.5974$, 長さ約 1.1 m の場合は $T^2 = 3.9412l + 0.1760$ で、これらの直線は各図中に実線で示した。各図中には同時に、金属線の長さ l と周期 T^2 の近似式¹⁾に理科年表値 9.797 m/sec²を用いて算出した関係式 $T^2 = 4.0294l$

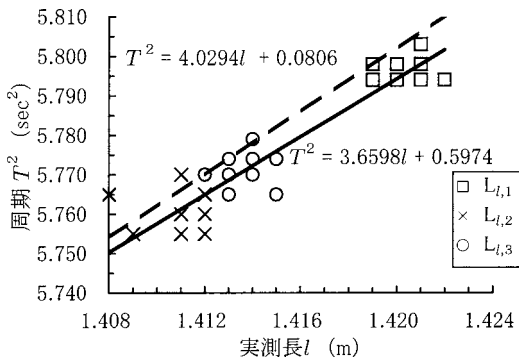


図 15 長さ 1.4 m の実測長と周期 T^2 の散布図

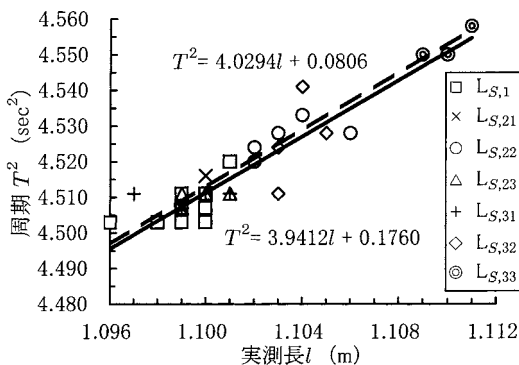


図 16 長さ 1.1 m の実測長と周期 T^2 の散布図

+0.0806 を破線で示した。また、各直線の式もそれぞれの図中に記載した。

各図中の 2 つの直線 (実線, 破線) をそれぞれ比較すると、長さ約 1.1 m の場合 (図 16) に比べて長さ約 1.4 m (図 15) の場合が明らかに 2 直線の一致が劣ることがみられた。そこで、学生実験に使用された 10 種類の金属線について、各実測長 l の平均値に対する振動周期 (算出値) を実線 (測定値) および破線 (理科年表値) からそれぞれ求めた。また、各振動周期 T の平均値に対する金属線の実測長 (算出値) を同様に求めた。表 1 は、各振動周期 T の平均値に対する金属線の長さの測定値 (実線) と理科年表値 (破線) との差 (実測長差), および各実測長 l の平均値に対する振動周期の測定値 (実線) と理科年表値 (破線) との差 (周期差) をまとめたもので、金属線の実測長の順に示したものである。表 1 から明らかなように、実測長差, 周期差ともに金属線の長さ約 1.4 m の場合と約 1.1 m の場合とで異なり、長さ約 1.4 m の場合がいずれの差もかなり大きいことが認められる。すなわち、実測長の誤差の可能性については、約 1.1 m の金属線では約 0.4 mm にすぎないが、約 1.4 m の金属線では 1.0 mm 以上も長く計測された可能性を示す結果であった。ま

表 1 金属線の長さおよび振動周期の測定誤差に関する検討

分布	実測長の平均値 (m)	実測長差 (mm)	振動周期の平均値 (sec)	周期差 (msec)
$L_{S,1}$	1.099	0.4	2.123	-0.4
$L_{S,21}$	1.099	0.4	2.124	-0.4
$L_{S,23}$	1.100	0.4	2.124	-0.4
$L_{S,31}$	1.100	0.4	2.124	-0.4
$L_{S,22}$	1.103	0.5	2.128	-0.4
$L_{S,32}$	1.104	0.5	2.128	-0.5
$L_{S,33}$	1.110	0.6	2.134	-0.6
$L_{l,2}$	1.411	1.1	2.400	-1.0
$L_{l,3}$	1.414	1.4	2.402	-1.2
$L_{l,1}$	1.420	2.1	2.408	-1.7

た、振動周期の誤差の可能性については、金属線の長さの場合と同様、長さ約1.4 mでは1.0~1.7 sec程度も短く計測された可能性を示す結果であった。以上のことは、金属線の長さ約1.4 mと約1.1 mとでは明らかに計測値の誤差に相違があり、金属線の長さ約1.4 mでは、金属線の長さの計測値あるいは振動周期の計測値のいずれかに、重力加速度測定値に認められた0.01 m/sec²程度のズレ（理科年表に記載の東京での値である9.797 m/sec²に比べて）を生じさせる要因があった可能性が考えられる。今後、学生実験で得られる実験結果の精度を向上させていく上では、以上の分析を踏まえた計測方法の更なる改善が求められると結論される。

具体的には、金属線の長さ計測では、1 mm以内の精度での計測法の考案が必要となる。また、振動周期の計測に関しては、すでに報告^{2,3)}したように、振り子の振動周期に同期したパルス幅のON状態あるいはOFF状態を外部クロックパルスでそれぞれカウントし、それぞれの整数値のカウント数 n に外部クロック周波数 f から得た周期 $1/f$ secを乗じて求めている。カウント数 n については、図12に例示した振動周期 t すなわちカウント数 n の経時的な変動の分析から明らかなように、長さ約1.4 mで約590回、長さ約1.1 mで約520回のカウントに対して3~5種類の異なるカウント数がみられたが、その経時的な変動はみられず一定した振動周期 t が得られており、振動周期のズレがカウント数の誤差に起因して生じたものとは考えられない。しかし、外部クロック周波数 f については、理科年表に記載の東京での値9.797 m/sec²とカウント数 n とから算出される周波数が金属線の長さ約1.1 mで244.4~244.9 Hz、長さ約1.4 mで245.0~245.8 Hzであり、今回使用した周波数244.7 Hzとは長さ約1.4 mの場合について最大で1

Hz程度の誤差の可能性が認められる。この周波数のズレは、外部クロック周波数を発振させるために用いた原発振器のレゾネータ（発振周波数 4.000 ± 0.002 MHz）の周波数精度⁴⁾から算出される外部クロック周波数範囲244.0~244.3 Hzとは大きく異なることから、回路作製におけるインピーダンス変化や浮遊容量の加算等によることが考えられる。

おわりに

筆者らは、ボルダ振り子の振動周期を電氣的に計測する開発研究の成果に基づいて、授業現場に導入するための新たな重力加速度実験の実験装置を作製し、平成16年度からこれを用いての学生実験を行っている。今回、この学生実験に導入した実験装置で得られた重力加速度の測定値すべてを対象とした調査を行った。その結果、測定された重力加速度 g が理科年表に記載の東京での値9.797 m/sec²より約0.01 m/sec²程度大きな値として得られていることが認められた。そこで、このズレの原因を重力加速度を算出する近似式の直接測定値である金属線の実測長と、振り子の振動周期について分析を行い、検討した。

その結果、金属線の実測長については、計測誤差を±1 mm以内とするための計測方法の改良の必要性が指摘される。また、振動周期については、測定原理であるカウント数 n と外部クロック周波数 f とから検討を加えた。その結果、カウント数 n が振動周期にズレを生させる因子とはならないと考えられたが、外部クロック周波数 f については、レゾネータの周波数精度とは異なる要因がズレを生み出す可能性のあることが結論された。

本研究は、日本大学歯学部佐藤研究費の一部によった。

参考文献

- 1) 山岡大, 藤原忠夫 (2001) パソコンを利用した学生実験課題の開発研究—A/D コンバータを用いた重力加速度の測定—. 日本大学歯学部研究紀要 29, 1-7
- 2) 山岡大, 藤原忠夫 (2003) パソコンを利用した学生実験課題の開発研究—マイクロコントローラを用いた重力加速度の測定—. 日本大学歯学部紀要 31, 1-7
- 3) 山岡大, 藤原忠夫 (2004) パソコンを利用した学生実験課題の開発研究—ボルダ振り子の振動周期に関する計測精度—. 日本大学歯学部紀要 32, 19-23
- 4) 株式会社村田製作所 (2004) セラミック発振子 (セラロック®), Cat. No. P27-15, 15