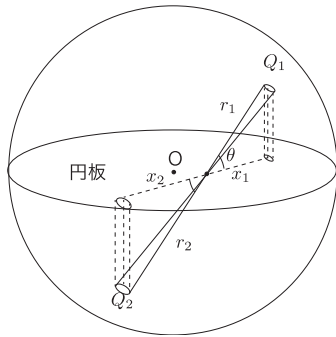




# 物理教育研究

日本物理教育学会 北海道支部



Vol.49 2021.12

BUTURI  
KYOKU  
KENKYU

## 新学習指導要領

北海道大学 理学部 物理部門 鈴木久男

多くの生徒・学生にとって物理の基本概念の理解は難しい。ほとんどの教員は、生徒に物理概念を与えられた時間数でいかに理解させるか、あるいは例題を解けるようにするかということに悩む。高校では、物理基礎・物理の内容を2年で教える必要があり、時間が足りないという声を多く聞く。この事情は大学でも同様であり、1年次に高校で学ばない剛体運動や熱力学の第二法則、力学や波動、電磁気では微分方程式を用いた解法などを授業だけでこなすには時間が足りない。大学の専門課程でも早期に研究段階に到達させるために、アメリカでは3単位、週3時間の授業である科目を週1時間半の授業で教えなければならないことも多い。もっとも学生の自習が期待できない大学や高校では、必然的に内容のレベルを落とさざるを得ない。いや、四則演算がおぼつかない生徒や学生が多く、高度な数学の利用はもう期待できないこともある。

高校では上記のように時間が足りないにもかかわらず、新学習指導要領ではすべての教科においてさらに高い希望を述べられている。新学習指導要領において、物理基礎では、科目の学修を通じて、科学的に探求するために必要な資質・能力の育成を目指すこと、また、物理学を学ぶことにより、思考力、判断力、表現力等を育成するとある。これらを行うには振り返りの学び、実験や観察も重要となり、今までよりさらに時間がかかるようになる。

高校ではアクティブラーニングを取り入れている教員がほとんどであると思う。主体性・協働性といったジェネリックスキルを習得することをその目的としているが、物理学では海外の研究によって、中程度以下の理解度の生徒にとって物理の基本的概念の理解にはアクティブラーニングは有効であることは示されている。その反面、通常の入試問題を解くための効果については限定的と実感していて悩ましいと思う方もおられるのではないか。

他方、大学では、アクティブラーニングの効果が疑問視され始めている。それは、アクティブラーニングにより主体的な学びをすれば自習時間が増加すると期待されていたのだが、学生の自習時間はほぼ変わらないという結果があるようなのである。アメリカでは長い時間をかけてレポートを仕上げるのが重視される。授業だけでは社会でも重要となる深い思考力は養成されないのである。自習時間と思考力の相関が高い。アメリカと異なり日本では、学生の自習が期待できない大学も多いのが実情であり、質保証の大きな障害の一つであろう。

さて、現在もコロナの中で、物理教育学会の活動が停滞している。しかし、物理教員の教える悩みはコロナ前と変わっているわけではない。本会誌で物理教育への情熱を再燃していただければ幸いである。

# 磁極に対するクーロンの法則から電磁力の式 $F = \mu_0 I H l$ を導く

立命館慶祥高等学校 石川 昌司

一般的な高校の授業では  $F = \mu_0 I H l$  は実験から導かれると説明されることが多いと思うが、磁極に対するクーロンの法則から理論的に導出することも可能であることがわかった。

**キーワード** 磁極に対するクーロンの法則、電流が磁場から受ける力（電磁力）、フレミングの左手の法則

## 1. はじめに

現行の高校教科書では、電流導線が磁場から受ける力—フレミングの左手の法則として一括されることも多い、以下本稿では電磁力と呼ぶ—の導入を、実験の写真や図を示した上で、“実験によると電流導線には磁場からこのような向きの力がはたらくことがわかる。その力の大きさは  $F = \mu_0 I H l$  である。”と説明している<sup>1)</sup>。筆者も長らくこの流れに沿って授業を行ってきた。この説明を、仮に  $F = \mu_0 I H l$  を実験式として見る立場としよう。しかし考えてみると、この方法では、 $F$  が、何故、 $I$  や  $H$  に比例するのか、また力  $F$  の向きが、何故、 $I$  や  $H$  の向きに垂直なのかなどという学習者の素朴な疑問に対して、“実験した結果がそうだから”として、それ以上の疑問を差し挟むことを許さないようにも見える。さらに実験式として見る立場ならば、実験式とは実験精度に依存する近似式であるはずだから、誤差はどこまで許されるのかなどといった別の疑問も沸き起こってくる<sup>2)</sup>。

そこで、筆者は、 $F = \mu_0 I H l$  を、高校物理の学習内容として無理のない範囲で、理論式として導けないか試みてみた。本稿はその結果の報告である。

導出にあたって、以下の項目を学習者の既習事項とする<sup>1)</sup>。

・磁極に対するクーロンの法則

$$F = k_m \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad k_m = \frac{10^7}{(4\pi)^2} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{Wb}^2 \quad \textcircled{1}$$

・磁場  $\vec{H}$  の定義

$$\vec{F} = m \vec{H} \quad \textcircled{2}$$

・直線電流がつくる磁場の大きさ

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad \textcircled{3}$$

・円形一巻き電流が円の中心につくる磁場の大きさ

$$H = \frac{I}{2r} \quad \textcircled{4}$$

ちなみに、真空の透磁率  $\mu_0$  は教科書では電磁力の次に登場する物理量であるが、式の表現を簡潔にするため、本稿ではこれを含めて導出とする。

## 2. ビオ・サバルの法則を使う方法

上に書いた前提と矛盾しているようで恐縮だが、読者諸氏の中には、発展的な学習としてビオ・サバルの法則を生徒に話題提供されている方もいらっしゃるのではないだろうか。その場合は、後で述べる第2の方法よりもやや一般的な導出が出来る。

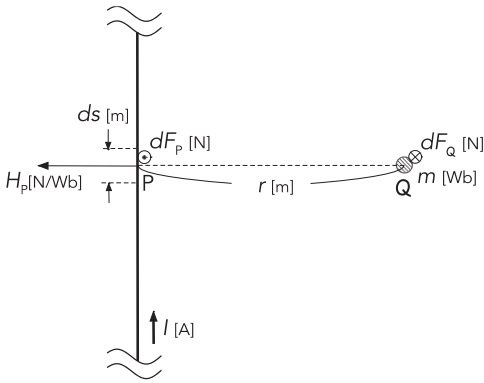
電流導線の途中の任意の位置に点Pをとる。点Pを含む電流素片を  $l ds$  とおく。点Pから距離  $r$  [m] 離れた点Qに  $m$  [Wb] の磁極が置かれているとする。ただし、PQの向きと  $l ds$  の向きは互いに垂直とする。（図1）

<sup>1)</sup> 教科書のずっと先では、運動する荷電粒子が磁場から受ける力、いわゆるローレンツ力が登場し、電磁力とはつまるところ自由電子にはたらくローレンツ力の和であるとの説明がなされる。これはこれでなるほどとも思うが、しかし、何故ローレンツ力は  $\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$  なのか説明されないと本質的に先の疑問に答えたことにはならない。筆者の考えでは、結局のところ  $\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$  またはこの式と等価であろう  $\vec{F} = I \times \vec{B} l$  は、実験式ではなく、逆にこの式で  $\vec{B}$  が定義されていて、真空中では

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \text{ なのだから、したがって } \vec{F} = \mu_0 I \times \vec{H} l \text{ で } \vec{H} \text{ は}$$

定義される、と説明するのが、一番すっきりすると思う。しかし、この定義は、高校生が磁気の最初に学ぶ原理としては難しすぎるし、教科書の記述もそのようになっていない。そこで、本稿では、磁極に対するクーロンの法則で磁極の強さ  $m$  を定義し、次に、 $\vec{F} = m \vec{H}$  で  $\vec{H}$  を定義し、その上で、磁極に対するクーロンの法則から、 $\vec{F} = \mu_0 I \times \vec{H} l$  を証明する立場をとるものとする。

磁極に対するクーロンの法則から電磁力の式  $F = \mu_0 I H l$  を導く



【図1】電流素片と磁極の間の相互作用

電流素片  $Ids$  が点  $Q$  につくる微小磁場を  $\overline{dH}_Q$ 、その大きさを  $dH_Q$  とおくと、ビオ・サバールの法則により、

$$dH_Q = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Ids}{r^2}$$

である。したがって、点  $Q$  に置かれた磁極  $m$  がこの磁場から受ける微小な力を  $\overline{dF}_Q$ 、その大きさを  $dF_Q$  とおくと、②より、

$$dF_Q = m \cdot dH_Q = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{m \cdot Ids}{r^2}$$

となる。

次に、点  $Q$  に置かれた磁極  $m$  が、点  $P$  につくる磁場を  $\overline{H}_P$ 、その大きさを  $H_P$  とおく。①、②より、

$$H_P = k_m \frac{m}{r^2}$$

一方、電流素片  $Ids$  にはたらく微小な力を  $\overline{dF}_P$ 、その大きさを  $dF_P$  とおく。 $\overline{dF}_P$  と  $\overline{dF}_Q$  の間に作用反作用の法則が成り立つならば  $\overline{dF}_P + \overline{dF}_Q = \vec{0}$ 、すなわち  $dF_P = dF_Q$  となる。したがって、

$$dF_P = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{m \cdot Ids}{r^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{H_P}{k_m} Ids = \frac{1}{4\pi k_m} H_P Ids$$

$dF_P$  は、 $l, H_P, ds$  に比例している。そこで、注目している導線の長さを  $ds$  のかわりに  $l$  と書き、また、 $dF_P, H_P$  を単に  $F, H$  と書くと、次の式になる。

$$F = \frac{1}{4\pi k_m} I H l$$

最後に  $\mu_0 = \frac{1}{4\pi k_m} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{(4\pi)^2}{10^7} = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$  とおけば、

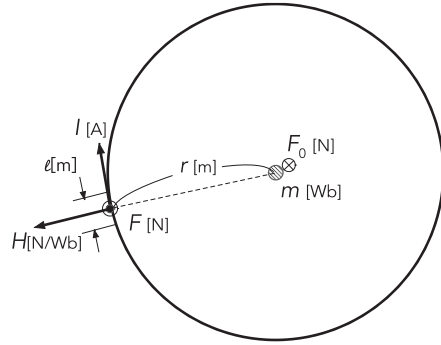
$$F = \mu_0 I H l$$

を得る。以上、導出終わり。

### 3. ビオ・サバールの法則を使わない方法

ビオ・サバールの法則は、高等学校の学習指導要領の範囲を超えるので、これを用いて証明するのは本来反則技である。そこで、ビオ・サバールの法則を用いない第2の導出を示そうと思う。

半径  $r$  [m] の円形一巻きの導線に大きさ  $I$  [A] の電流を流す。(図2)



【図2】円形電流と円の中心に置かれた磁極の間の相互作用

円の中心における磁場を  $\overline{H}_0$ 、その大きさを  $H_0$  とおく。④より、

$$H_0 = \frac{I}{2r}$$

ここに  $m$  [Wb] の磁極をおくときこの磁極にはたらく力を  $\overline{F}_0$ 、その大きさを  $F_0$  とおく。②より、

$$F_0 = m \cdot H_0 = \frac{m \cdot I}{2r}$$

次に、点  $O$  に置いた磁極が導線の場所につくる磁場を  $\overline{H}$ 、その大きさを  $H$  [N/Wb] とおく。①、②より、

$$H = k_m \frac{m}{r^2}$$

磁極にはたらく力と円形電流導線の全体にはたらく力の間には作用反作用の法則が成り立つと考える。今、導線の長さ  $l$  [m] あたりにはたらく力を  $\overline{F}$ 、その大きさを  $F$  とおく。すると、上に述べた作用反作用の法則により、

$$\overline{F} \cdot \frac{2\pi r}{l} + \overline{F}_0 = \vec{0} \text{ すなわち } F = \frac{l}{2\pi r} F_0 \text{ . したがって、}$$

$$F = \frac{l}{2\pi r} \cdot \frac{m \cdot I}{2r} = \frac{l}{4\pi} \cdot \frac{H}{k_m} \cdot I = \frac{1}{4\pi k_m} I H l$$

ここで  $\mu_0 = \frac{1}{4\pi k_m} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{(4\pi)^2}{10^7} = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$  とおけば、

$$F = \mu_0 I H l$$

を得る。以上、導出終わり。

#### 4. 科学史から・・・おわりにかえて

上に書いた2つの導出は、どちらも、電流導線と磁極の間にはたらく力が**作用反作用の法則**を満たすことを前提としている。しかし、作用と反作用であれば同一直線上になければならないのに、本導出ではそうになっていない。この点を疑問に思う生徒もいるだろう。この矛盾の原因はどこにあるのだろうか。また最初の問いに戻るが、電磁力の式  $F = \mu_0 I H l$  はそもそも実験結果をまとめたものなのか、それとも理論的に導かれたものなのだろうか。これらの問いに対する答えのひとつは、科学史の中から見出すことができるだろう。

電流がつくる磁気作用については、デンマークのエルステッドにより、1819年の冬から1820年の春までの間に発見されたとされている。その発見が記された論文が印刷され公表されたのが1820年7月27日であった。フランスのアンペールがその報を伝え聞いたのが9月11日、それから1週間後の9月18日には早くもフランスの学士院で自らの研究の第1報を報告している。さらに10月2日、10月9日、11月6日に科学アカデミーで続報を発表している。コレージュ・ド・フランスの物理学教授であったピオとサバルは、協力して電流が磁石に及ぼす力の法則を研究し、10月30日の科学アカデミーでその研究成果を報告した。また、同じ頃、ドイツのゼーベックは、直線電流の周りに鉄粉をまくと、鉄粉が同心円状に並ぶだろうと予言し、その後のファラデーに大きな影響を与えたと小林は語っている<sup>2)</sup>。

エルステッド以前にも、磁気と電気の間には何か関係があるのではないかと考えた人たちはいたようだが、それらの人たちはみな、電荷(=静電気)と磁極(=磁石)の間の相互作用を調べていた。しかし、電荷と磁極の間にはたらく力はついに発見されなかった。

エルステッドは、電池と導線で作った電気回路のそばに磁針を置いて、この回路が開いている場合は磁針は全く振れず、回路が閉じたときだけ磁針が著しく反応を示すことを見出した。つまり、磁気と相互作用するのは、電荷ではなく電流だったのである。エルステッド以外の誰も成功しなかった理由はここにある。さらにエルステッドを驚かせたことは、はたらく力の向きが、電流導線と磁

極を結ぶ直線上の引力や斥力ではなく、また、流れる電流の向き——あるいは流れる電流と逆向き——でもなかったことである。「最初かれは磁針と直角に針金を置いたがなんの効果も得られなかった。講義ではこの否定的結果が示されたが、講義終了後針金を磁針と平行に置こうというアイデアが浮かんだ。それを試みると磁針の著しいふれが観測され、磁気と電流の関係が発見された<sup>3)</sup>。」

1820年は、電磁気学史的には奇跡の年であった。この年の暮れまでには、電流と磁気間の相互作用の法則が明らかになった<sup>4)</sup>。ちなみに、翌1921年には、電磁力の応用として、ファラデーが、あの有名な単極モーターの原理を考案している<sup>4)</sup>。

しかし、アンペールは1822年以降もこの問題にこだわり続けた。なぜなら、アンペールにとって、エルステッドが発見した力の向きの法則は、最終的な物理の基本法則と思えなかったからである。アンペールは、研究を継続するにあたって、次の事実から出発した。平行に張った2本の電流導線の間には、電流が同じ向きに流れるときは引き合い、反対に流れるときは反発する力がはたらく。これは、導線を結ぶ直線方向にはたらく引力と斥力の関係になっていて、ニュートンの万有引力の法則と同様、作用と反作用の法則を満たしている。アンペールは二つのソレノイドの間の相互作用を調べ、磁石と磁石の間の相互作用は電流と電流の間の相互作用に還元できると確信した。ということは、電流と磁石の間の相互作用の問題も、電流と電流の間の相互作用の問題に帰着できるということである。アンペールによる理論の詳細は、1827年の「実験から一意的に導かれた電気力学的現象の数学的理論について」という論文にまとめられることになった<sup>5)</sup>。

さて、本稿の本来のテーマに戻ろう。作用と反作用が一直線上の引力や斥力にならず、作用線が距離を隔てて平行にずれてしまう理由は何なのか。電磁力の発見の歴史を概観してわかったことは、磁極と電流の間の相互作用は、電流と電流の間の相互作用に還元できるということである。また一方では、電流と電流の間の相互作用では作用と反作用は同一直線上に乗っていることが実験的にも確認できている。これら二つのことから、ずれの原因は磁極の仮定にあり、磁極のかわりに、同じ場所に同じ磁気作

<sup>b</sup> 1884年頃、ロンドン大学で電磁気学を教えていたジョン・フレミングは、学生が、電流、磁気、力の向きの関係をなかなか憶えられないのを見て、これをイメージしやすいように手の指を使って覚える方法を考案し、これを学会に発表した。これがフレミングの法則の始まり

である<sup>6)</sup>。この覚え方は、それ以降世界中に広まり有名になった。しかし、電流と磁気間の相互作用の発見の歴史に関して、フレミングの法則は、ほとんど無関係であると言っていい。

用をもつ電流閉回路を置くことで矛盾は解消することがわかる。上記の質問をしに来た生徒には、よく気がついたねと大いに褒めた上で、このように答えてみてはどうか。

この論文の1章～3章の本文及び図1, 図2は、北海道高等学校理科教育研究会、北海道の理科No.64 (2021)掲載の筆者著「電流が磁場から受ける力の式  $F = \mu_0 I H l$  のあやしげな導出について」<sup>7)</sup>に若干の修正を加えたものである。4章の本文のほとんどと脚注a,bは本稿のために新たに書き下ろしたものである。

## 文 献

- (1) 例えば, 国友正和, 滝川昇, 牧島一夫, 井上邦雄, 河本敏郎, 黒田楯彦, 小林雅之, 田原輝夫, 増渕哲夫: 改訂版 物理, 数研出版, 2019 など
- (2) 小林一夫: 学生と教師のための電磁気学史 (2021年11月24日閲覧)  
<http://www.ed.niigata-u.ac.jp/~itoh/EMhistoryv5.pdf>  
pp. 82-86
- (3) E. T. ホイッターカー: エーテルと電気の歴史, 霜田光一, 近藤都登訳, 1976, 講談社, p. 101
- (4) ウィキペディア 単極電動機 (2021年11月27日閲覧) <https://ja.wikipedia.org/wiki/単極電動機>
- (5) 小林一夫: 学生と教師のための電磁気学史,  
pp. 87-88
- (6) ウィキペディア ジョン・フレミング (2021年11月24日閲覧)  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョン・フレミング>
- (7) 同じものが次の WebSite でも読める。「石川昌司のいつでもどこでも物理 別館」(2021年11月30日閲覧) <http://www8.plala.or.jp/stoneriver/>

# 帯電導体の電荷分布を巡って

北海道大学 理学研究院 鈴木久男

Hisao Suzuki, Faculty of Science, Division of Physics, Hokkaido University

高校や大学において、一様に帯電した導体板や棒という表現が現れる。そのため一様な分布が当然のように誤解することもある。高校では平行板コンデンサの理想値を学ぶが、その理想値はどの程度正しいのだろうかと問われることもある。ここでは帯電した導体板や導体棒にどのように電荷が分布するのか、また導体棒のパラドックスなどを解説する。導体円板や導体棒では、電位は初等関数で表され、等電位面は楕円体となる。また、平行板コンデンサの電気容量についての最近の解析的な研究を紹介する。

**キーワード** Society 5.0, 電磁気, 物理学, コンデンサ, 導体

**Keywords:** Society 5.0, Electrodynamics, Physics, Capacitor, Conductor

## 1. 導入

現在、急速に変化する社会の中で、教育に求められている質も変化してきている。特に重視されているのが「Society 5.0」<sup>1)</sup>への対応である。生徒、学生にはロボットやAIなどのツールを使いこなし社会に新たな価値を創造するスキルが重要となる。Society 5.0に対応した教育をという一般論は正しく、物理教育にも変化が必要であることは多くの教員が認識していると考えられる。物理教育ではアクティブラーニングの物理概念理解への有効性は、Hake<sup>2)</sup>が1998年に発表した論文により、物理教育のエビデンスベースの教育研究に大きな影響を与えた。他方、近年アクティブラーニングは、理解というより、コミュニケーションスキル、協働性などの学力の三要素の習得が主たる目標である。しかし、アクティブラーニングがSociety 5.0のための創造性に結びつくかどうかは懐疑的である。

このような状況の中で、Society 5.0に対応した物理教育の模索は重要な課題であろう。高校や大学においては、主として研究を通じて創造性を育むことが望ましいが、大学の学士課程においても研究を通じての創造性を保証する教育は極めて困難である。また一般的に高校段階での探求には、指導する教員側の研究経験不足といった課題もある。そのため高校、大学共に現れる基本的現象に対して、高校で学ぶ身近な話題についても研究がなされてきていることを生徒や学生に知らしめることにより、創造性の重要性を認識してもらう教育が重要となると考えられる。

本稿では、導体の電荷分布と電位に焦点を当て、現在まで知られている解析的な研究を紹介していこう。

また、最近でも平行板コンデンサの電気容量の解析に進展があった。このことにより、高校生や大学生が身近な話題でも研究の余地があるとの認識することにより、研究そのものの重要性の認識につながると期待される。

こうしたことからここでは、導体の電荷分布について、直感的な分布の求め方から、平行板コンデンサについての最近の研究まで含めて紹介していこう。

## 2. 導体の電荷分布

### 2. 1 帯電した導体棒の電荷分布

まず、導体とは何かについて確認しておこう。導体内には自由電子がある。帯電した導体内の電荷は他の電荷からの電場による力を受ける。簡単のため図1のように長さ $2L$ の棒に一様に電荷が分布した場合を考えてみよう。



図1 一様に帯電した棒の内部の電荷に働く力

中心から外れた点Pの電荷に働く力を考えてみよう。点Pから導体棒の端までを区間Aとし、そして区間Bは、

点 P から区間 A と反対側で A と長さが同じ部分である。仮に電荷分布が一様であるとすると等距離にある位置の電荷からは、逆方向に同一の大きさの力が働くので区間 A の電荷からの力と区間 B からの力は相殺する。するとそれ以外の区間 C の部分から点 P の電荷への力は相殺できないので、点 P の電荷に対して端に向かう方向への力が働くのである。この力のため自由電子は移動し、電荷は端の方が多く分布する。導体円板などについても同様であり、一様な分布であれば周囲に向かう力が働いてしまうのである。

### 2. 2 帯電した導体球の電荷分布

導体球に電荷が与えられたときの電荷分布は、お互いの反発力により（あるいは対称性により）一様である。それでは、このような状況で、導体内部の電場はほんとうにゼロになっているのだろうか？ 大学レベルでは通常ガウスの法則を用いて示すことが多いが、大学初年次のいくつかの教科書には、次のようなわかりやすい説明がある。

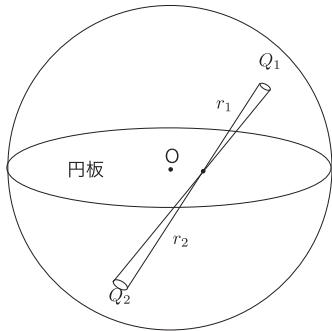


図2 導体球の表面の電荷による内部の電場

図2のように、導体球の内部の点に対して、ある方向に対して対となる部分があり、それらが電場を作る。導体球までの距離をそれぞれ $r_1, r_2$ として導体球面の微小区間にある電荷を $Q_1, Q_2$ とすると、電荷は面積に比例し、円錐は相似形となっているため、

$$\frac{Q_1}{r_1^2} = \frac{Q_2}{r_2^2} \quad (1)$$

となることがわかる。このことからクーロンの法則よりこれらの電荷による力は相殺される。これはいかなる方向に対しても成り立つので、導体内部の電場はゼロとなることがわかる。ちなみにこのことは、地球内の重力は、その半径外側からの力を受けないといったことへの説明にも使えるのである。地球内部のトンネルによる単振動は、地球内部が非常に高温であるのでいささか荒唐無稽な状況設定ではあるが、大学受験での頻出問題の一つでもある。

### 2. 3 帯電した導体円板での電荷分布

大学においても導体上の電荷分布を求めることは非常に難しい問題である。電荷分布が作る電位を求めるというのはわかるが、導体上で等電位となるように電荷分布を求めるというのはある意味逆解き問題である。そのため、電位を満たすポアソン方程式を解析的に解くのに、鏡像法や、球対称、軸対称な場合など特別な場合に限られてしまう。たとえば正方形の導体板に電荷を与えた場合についても計算は容易でない。そこで少しでも対称性の高いものとして導体円板が扱われる。ただし、この問題も容易な問題なわけではない、ランダウ・リフシッツのテキスト<sup>3)</sup>にもあるように、楕円体座標を用いて解析するのが一つの方法である。ただし、新しい座標でのラプラス方程式の解などを頑張って計算した割には、電荷分布や電位の他得るものが少ないと言った、インプットとアウトプットの比率の悪さが問題となるのである。また、直接的に軸対称な場合の一般的な手法<sup>4)</sup>があるが、汎用性は高い代わりにベッセル関数などの知識が必要となりやはり効率的ではない。

この帯電した導体円板の問題に関して次のように一様に帯電した球面を利用して求めることができる。

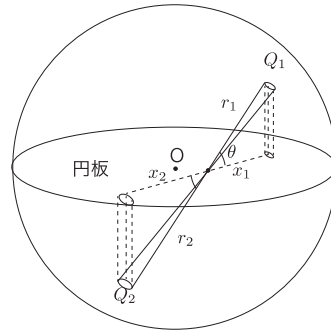


図3 導体球の分布の円板への射影

図3のように導体球に一樣に電場がある。 $x-y$ 平面内の点では、図のようにやはり(1)の関係が成り立つ。対となる点から $x-y$ 平面上に垂線を引き、その点をそれぞれ $x_1, x_2$ とすると、 $r_1, x_1$ がなす直角三角形と $r_2, x_2$ がなすそれとは相似形であることから

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{x_2}{r_2} \quad (2)$$

となる。このため、(1)と(2)により

$$\frac{Q_1}{x_1^2} = \frac{Q_2}{x_2^2} \quad (3)$$

となる。そのため、球面上の電荷分布と同じ電荷が導体板上にあれば、釣り合いの式がなりたつ。球面の傾きを $\theta$



とすると、平面内の中心からの距離を $\rho$ とすると、 $\sin \theta = \frac{\rho}{R}$ であり、電荷密度は

$$\sigma(\rho) = \frac{\sigma_0}{\cos \theta} = \frac{R\sigma_0}{\sqrt{R^2 - \rho^2}} \quad (4)$$

とすればよいことがわかる。ちなみに、縁のところ( $\rho = R$ )で電荷密度が発散しているが、物理量は区間で積分した量となっているので発散しない。たとえば全電荷 $Q$ は半径 $\rho$ 、 $\Delta \rho$ の区間の面積は $2\pi \rho \Delta \rho$ であるので

$$Q = \int_0^R \sigma(\rho) 2\pi \rho d\rho = 2\pi R^2 \sigma_0 \quad (5)$$

となる。

ちなみに、導体円板による電位は、少し面倒な計算が必要だが結果は、

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \sin^{-1} \frac{2R}{r_+ + r_-}, r_{\pm} = \sqrt{(\rho \pm R)^2 + z^2} \quad (6)$$

と比較的簡単になることがわかる。ここで、 $r_{\pm}$ が、導体の端からの距離となっているので、2点からの距離の和が等しい楕円を回転させたものが等電位面である。すなわち等電位面は楕円体である。また、導体円板上では $r_+ + r_- = 2R$ であるので導体板は確かに等電位となっていることがわかる。

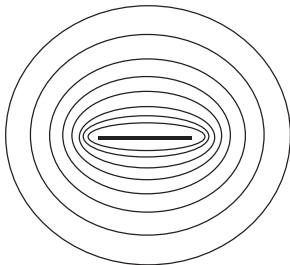


図4 導体円板の等電位面

ちなみに、電荷分布がわかった段階で、それを元に電位を求める問題はやっかいである。導体板やテキストにも出てくる一様に帯電した円板の場合に、平面内での積分が必要になる。中心の位置から極座標を取るのが便利そうだが、角度方向を積分すると楕円関数が出てきて、動径方向の積分がほとんど不可能に思えるのである。つまり、もとの形のまま多重積分をする方法では詰まってしまう。そのため、通常の計算問題としては $z$ 軸上の電位を求める問題として出題されるのが一般的である。このような多重積分を遂行する場合、クーロン電位を、ベッセル関数を用いて展開して計算する、いわゆる変数分離の手法が有効である。このような方法は、実は銀河の作る重力ポテンシャル（重力による位置エネルギー）の解

析的計算として研究されている<sup>5)</sup>。導体円板に対応する電荷分布は、遠心力の働いた銀河円板の質量分布のモデルの一つでもある。これらの解析の結果、一様に帯電した円板の電位についても、なんとか楕円積分を含む積分形でなく、楕円積分そのものを用いて書くことができることがわかったのである<sup>5)</sup>。一様に帯電した物体は楕円関数で、帯電した導体円板の方は三角関数ということで、より物理的な状況の方が簡単な答えになるというのは興味深いことであろう。

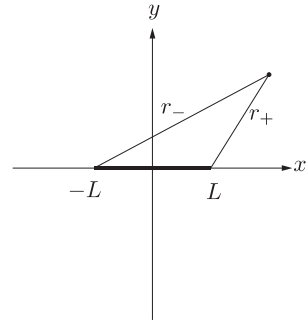


図5 幅 $2L$ の奥行き方向に無限に長い導体板

## 2. 4 長さ $2L$ の導体棒

図6のように $z$ 軸におかれた $z=-L$ から $L$ までに線密度 $\lambda$ で一様に帯電した棒を考えよう。帯電した棒の作る電位は、大学1年で学ぶ典型的な問題である。今まで一様でない場合を扱ってきたのになぜここで一様に帯電した場合を扱うのかについては後に説明しよう。数IIIレベルの積分しか用いない簡単な計算により、 $r_{\pm}$ を両端までの距離として、 $u = \frac{1}{2}(r_+ + r_-)$ を用いて

$$V = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[ \frac{u+L}{u-L} \right] \quad (7)$$

となる。これより等電位面はやはり楕円体であることがわかる。

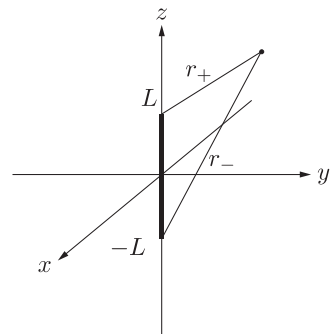


図6 一様に帯電した導体棒

### 3. 帯電した導体棒のパラドックス

球面上の分布から導体円板の電荷分布を求めるというのは非常に興味深い方法である。これに関して、Griffith and Li<sup>6)</sup>が導体棒の電荷分布を求めることを試みた。基本的に平面でなく、軸上にすべての電荷を射影することになる。端の方はやはり角度が大きくなるため、大きくなるが、中央では軸での半径が大きく射影する電荷が大きいため、電荷分布は導体針では一様であるという結果になるのである。

具体的には球の電荷の面密度を $\sigma_0$ とし角度 $\theta$ で微小角度 $d\theta$ の間の面積は $2\pi R \sin\theta d\theta$ であるので、棒の電荷分布は

$$d\lambda = -\sigma_0 2\pi R \sin\theta d\theta$$

となる。しかし、球面上で $z = R \cos\theta$ の関係があるので、

$$dz = -R \sin\theta d\theta$$

$$d\lambda = \sigma_0 2\pi dz \quad (8)$$

となり、一様な電荷分布になってしまう。

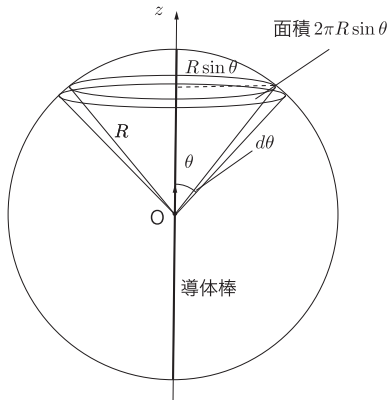


図7 球面上の電荷のz軸への射影

直感的にはとがったところに電荷が集中する。しかし球面から射影して分布を求めるという考え方は導体棒では電荷が一様になるという。それではこの解析のどこが問題なのであるか？ この結果に関しては様々な反論がある<sup>7,8)</sup>。まず、太さのない導体針では導体針表面外部の電場が発散している。(7)式で、先の導体円板と同様に、導体棒上でなるほど等電位になりそうだが肝心の電位が発散する。このため、内部の電場の釣り合いを考えたとしても発散し、前節で述べた直感的な議論は実現できない。たとえば太さのある導体棒の断面を考えてみよう。すると、電荷は反発するので断面の半径をゼロにしようすると、表面電場が大きくなり、電場の作る電場により放電現象が起こるのである。このようなことから、棒には太さを持たせての解析が必要である。たとえばシ

リンダー導体の場合にはどうなるのであろうか？ 残念ながらシリンダーの表面と端点の円板とに等電位の条件をつける必要があり、解析的解析が難しい。Waterman and Pedersen<sup>9)</sup>の行った数値計算では、線密度 $\lambda(z)$ は、シリンダーの半径 $R$ を用いて

$$\lambda = \lambda_0 [1 - (z/L)^2]^{-\gamma}, \quad \gamma \approx \frac{1}{2} / \left[ \ln \left( \frac{4L}{R} \right) - \frac{7}{3} \right] \quad (9)$$

と近似的に表されている。つまり太さがあるとやはり端点に多く電荷が分布するのである。

### 4. 平行板コンデンサの静電容量の解析的研究

平行板コンデンサは高校物理で学ぶ極めて有用なツールである。導体板の面積を $S$ とし、導体板の間隔を $d$ とすると静電容量は、間隔 $d$ が小さいとき

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (10)$$

となる。これは物理を学ぶ高校生は必ず覚えている公式である。

先に述べたように、導体板にある電荷はお互いに反発するため、単体導体板では電荷分布は明らかに一様ではない。しかし、平行板となると、平行板の間隔が小さくなれば、反対側からの電荷からの引力により同一板上の電荷による反発力はやや相殺され、単体の導体板に比べれば平行板ではより一様な電荷分布となる。ただし、端からの電束の漏れがあり、いわゆるフリンジがおこるのである。フリンジの等電位曲線として、有名なMaxwellによる解析がある<sup>10)</sup>。Maxwellの行った2次元の解析、つまり図8のように紙面奥行き方向に無限に長い導体板の端の電位は、共形写像を用いて解かれている。

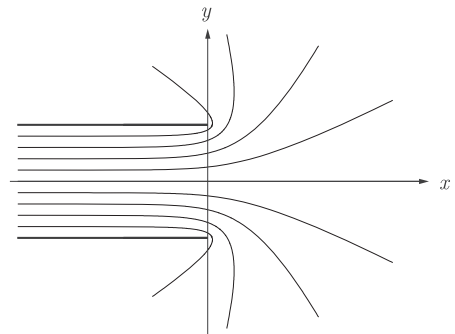


図8 Maxwellによる導体の端の等電位面

大学でも最初に共形変換による手法を学ぶとかなり困惑するが、奥行きが無限にある板を考えるとはいえ、厳密に解くことができることは極めて有用でもある。

それでは平行板コンデンサでの静電容量の計算はどう

であろうか？ これはランダウ・リフシッツの教科書<sup>3)</sup>にもあるように、補正項は端の形状による。まず、2つの導体で有限な幅（奥行き無限大）の場合は、楕円関数を用いて解かれている<sup>11)</sup>。ここにあげたのは2001年の論文ではあるが、磁場の問題としては古くからあるようなので誰が最初かは追跡できなかった。

それでは有限な大きさの場合はどうであろうか？ 導体円板の問題の問題でもそうであったように、平行導体円板の問題が解く上では一番簡単そうである。非常にエレガントな手法によりヘルムホルツ型の積分方程式を解く問題に帰着できることが知られている(たとえば 4)のテキストを参照)。方程式は単純な形をしているのだが残念ながら現在までその厳密解は得られていない。電束が漏れてしまうので、電荷を与えても期待される電位差ほどにはならない。つまり、実際の静電容量の値は理想値よりも大きくなる。

導体円板の半径を  $R$  とし  $d$  との  $\kappa = d/R$  により  $C/C_0$  の値がどのようになるのかを見てみよう。Kirchhoff<sup>12)</sup>が与えた近似式は

$$\frac{C(\kappa)}{C_0} = 1 + \frac{\kappa}{\pi} \left( \ln \frac{16\pi}{\kappa} - 1 \right) + O(\kappa) \quad (11)$$

である。

この解析解の研究は未だになされている。比較的大きな進展は、最近ボーズガスの解析に用いられた新しい摂動手法が開発されたことによる。この解析手法が平行円板コンデンサの計算に応用できることがわかり解析がなされてきている<sup>13)</sup>。しかもこれは2020年の論文であり比較的最近のことである。

ともあれ平行板の間隔が小さいとはいったいどの程度小さければいいのだろうか？ 文献 13 による値を元に計算してみたのが、表 1 である。非常に粗く言うと、理論値の精度はほぼ  $\kappa = d/R$  と同様の精度になっていることがわかる。

表 1 静電容量の理想値との比

$\kappa = d/R$	$C/C_0$
0.2	1.318
0.1	1.176
0.05	1.097
0.02	1.044
0.01	1.024
0.005	1.013
0.001	1.003

むろん現実的には円板というのはまれであり、フィルムコンデンサのように間隔が一片に比べれば非常に小さい場合にはほぼ理想値に近い値となるだろう。もし生徒や学生に質問されたら、その精度はほぼ平行板の一片の長さと同様の比の程度だと答えておけば良いだろう。

## 5. まとめ

導体での電荷分布について、球面導体、導体円板、導体棒などの電荷分布と電位についてみてきた。これらの分布による電位は三角関数の逆関数などで表される。もし高校生や大学生だったら、どのようにしてこれらが求められるのかを知りたかったら大学で勉強しましょうというのが、学習意欲をあげるの一つの手であろう。

また、平行板コンデンサの電気容量については、理想値とのずれがどのようにあるのかは、解析的な厳密解は得られていないことを見た。もし興味がある生徒や学生がいたら、自分で研究して厳密解を求めることを奨励してほしい。物理でも未だにわからないことがたくさんあることを意識してもらうのは、生徒の主体的学修につなげ Society 5.0 時代に必要な創造性を育む教育のための有用な手段であると期待したい。

## 文献

- (1) 経団連-Society 5.0—ともに創造する未来—(2018)  
<https://www.keidanren.or.jp/policy/society5.0.html>
- (2) R.R.Hake, “Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses,” *Am. J. Phys.* 66, 64–74 (1998).
- (3) 電磁気学 2 (ランダウ=リフシッツ理論物理学教程) エリ・ランダウ, イェ・リフシッツ, 井上健男 (翻訳), 東京図書(1965).
- (4) I.N.Sneddon, “Mixed Boundary Value Problems in Potential Theory” (North-Holland. Amsterdam. 1966).
- (5) J.T.Conway, “Analytical solutions for the Newtonian gravitational field induced by matter within axisymmetric boundaries,” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 316, 540-554 (2000).
- (6) D.J.Griffiths and Y.Li, “Charge density on a conducting needle,” *Am. J. Phys.* 64,706-714 (1996).
- (7) R.H.Good, “Comment on Ref. 1”, *Am. J. Phys.* 65,155-156 (1997).
- (8) M.Andrews, “Equilibrium charge density on a conducting needle,” *Am. J. Phys.* 65, 846-850 (1997).

- (9) P.C.Waterman and J.C.Pedersen, "Scattering by finite wires," J. Appl. Phys. 72,349-359(1992).
- (10) J.C.Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism," (Clarendon, Oxford, 1873), Vol. 1.
- (11) E.Almayrak, "Calculation of the Potential and Electric Flux Lines for Parallel Plate Capacitors with Symmetrically Placed Equal Lengths by Using the Method of Conformal Mapping", Turk J. Phys. 25, 181-193(2001).
- (12) G.R.Kirchhoff, "Zur Theorie des Condensators, Heidelberger Texte zur Mathematikgeschichte," 2, 48 (1879).
- (13) B.Reichert and Z.Ristivojevic, "Analytical results for the capacitance of a circular plate capacitor," Phys. Rev. Research 2, 013289 (2020).

# Python を使った計算のすすめ

(1人1台のPCを活用する)

北海道札幌西陵高等学校 佐々木 淳

SapporoSeiryu Koukou Sasaki Jun

高校では、今後、生徒1人が1台のPC端末を使う環境が整う。これをチャンスと捉え、物理ではどのような授業改善が可能か検討している。特に期待したいのは、PCを関数電卓の代わりに使うことである。本稿では、プログラミング言語Pythonを使って基本的な計算問題を解くための工夫について述べる。

キーワード GIGA スクール構想 Python 計算力

## 1. はじめに

高校で生徒が使う1人1台のPC端末を、物理の授業にどう活かせるか。このような問題意識から、様々な活用方法を検討している。その中で特に可能性を感じているのが、プログラミング言語Pythonの利用である。

Pythonには、数値計算をはじめとする様々な拡張モジュールがあり、理数系・工学系の計算に適している。以下では、Pythonを使って取り組んだ物理の授業における計算力を高める工夫に関する事例を紹介する。

## 2. Python 活用の実際

### 2.1 実行環境の選択

Pythonを授業で活用する際に大きな課題となるのは実行環境である。Pythonのコードを書き、実行する環境として何を選択するか。専用のソフトウェアをインストールして環境を構築するのが一般的であるが、PCを管理する観点からは、できればインストールせずに構築できる環境が望ましい。そうした例としては、ブラウザ上でコードを書き、実行できる「Google Colaboratory」や「paiza.io」などのオンライン実行環境がある。



図1 オンライン実行環境「Google Colaboratory」

これらの実行環境は、PCに限らずスマートフォンでも使用できる。以下では、「Google Colaboratory」を使って話を進めることとする。

### 2.2 基本計算

まず授業で利用したいのは、単純な四則計算である。計算を行うには、ブラウザで「Google Colaboratory」のホームページを呼び出し、「コードセル」を表示させる。

ページの上方にある「+コード」というボタンを押すとコードセルが現れる。コードセルにプログラムコードを入力し、「実行ボタン（または、Ctrl+Enter）」を押すとプログラムが実行される。簡単なコーディングの例として万有引力に関する問題を2とおりの方法で解く。

#### 問題1

次の等式を利用して重力加速度を求めよ。ただし、 $G = 6.7 \times 10^{-11}$ 、 $M = 6.0 \times 10^{24}$ 、 $R = 6.4 \times 10^6$ 、とする。

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

```
g = 6.7*10**(-11)*6.0*10**24/(6.4*10**6)**2
print(g)
```

図2 問題1のコード例

Pythonのコードでは、指数 $A^x$ を「 $A**x$ 」と記述する。「 $A^x$ 」と書くとエラーが出るので注意が必要である。

「print」は結果を出力させるコードである。この命令により、結果「g:9.814453125」が出力される。

この計算を、文字式を使って書き換える。文字を使用することにより、複雑なプログラムが整理され、コーディングの目的や手順が読み取りやすくなる。

```
G = 6.7 * 10 ** (-11)
M = 6.0 * 10 ** 24
R = 6.4 * 10 ** 6
g = G * M * R ** (-2)
print(g)
```

図3 文字を使った計算

### 2.3 方程式

電気分野，並列抵抗の合成は，生徒が苦手とする計算のひとつである．苦手の理由を聞き取ると，手順が1つ（ワンオペ）でないこと，分数を使って最後に逆数をとること，が挙げられた．

この計算では1元1次方程式を使うので，記号計算を行うためのライブラリ Sympy を組み込む必要がある．

#### 問題2

並列に接続された20Ωと30Ωの2つの抵抗の合成抵抗を求めよ．

```
from sympy import Symbol, solve
R = Symbol('R')
ex1 = 1/20 + 1/30 - 1/R
print(solve((ex1)))
```

図4 sympy を使ったコーディングの例

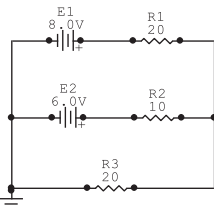
2行目はRを記号として扱うという宣言，4行目のprint(solve((ex1)))は，式の値を0にするRの値をくまなく探索し，結果を出力せよという命令である．

Sympy を組み込むと方程式が解けるようになるので，Python が関数電卓の代わりになる．

次に，このコーディング方法を拡張し，2元，3元の連立方程式を解く方法を示す．

#### 問題3

E1=8.0V, E2=6.0 Vの電源と，R1 = 20 Ω，R2=10Ω, R3=20Ωの抵抗で構成された次のような回路がある．各抵抗を流れる電流 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>を求めよ．



R1を右に流れる電流を I<sub>1</sub>, R2を右に流れる電流を I<sub>2</sub>, R3を左に流れる電流を I<sub>3</sub>とすると，I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>は次の式を満たす．

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ E_1 = R_1 \cdot I_1 + R_3 \cdot I_3 \\ E_2 = R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 \end{cases}$$

この連立方程式を解くためのコードは次のようになる．なお，「#」はコメントなので，省略してよい．

```
from sympy import Symbol, solve
# 定数
E1=8.0
E2=6.0
R1 = 20
R2 = 10
R3 = 20
# 未知数の定義
I1 = Symbol('I1')
I2 = Symbol('I2')
I3 = Symbol('I3')
# 方程式
ex1 = I1 + I2 - I3
ex2 = R1 * I1 + R3 * I3 - E1
ex3 = R2 * I2 + R3 * I3 - E2
# 結果の出力
print(solve((ex1, ex2, ex3)))
```

図5 3元連立1次方程式を解く

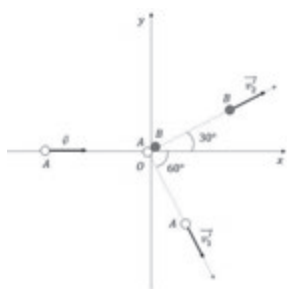
結果は，「I1: 0.15, I2: 0.10, I3:0.25」と出力される．

### 2.4 数学的関数を利用する

市販の関数電卓は，デフォルトで様々な関数が使用できる．Pythonではこれを数値計算に対応する拡張モジュール Numpy を組み込んで行う．これを利用して平面上の衝突の問題を解く．

#### 問題4

滑らかな水平面上に静止している小球Bに，質量の等しい小球Aを衝突させたところ，Aは衝突前の運動方向から右へ60°の向きに，Bは左に30°の向きに飛ばされた．衝突前のAの速さを1.0[m/s]として，衝突後のA, Bの速さv1'[m/s], v2'[m/s]を求めよ．



運動量保存則より A, B の速さ  $v_1'$ ,  $v_2'$  は、次の式を満たす。

$$\begin{cases} x: & m \times 1.0 = mv_1' \cos 60^\circ + mv_2' \cos 30^\circ \\ y: & 0 = mv_1' \sin 30^\circ + mv_2' \sin 30^\circ \end{cases}$$

Python では角度の単位として、「° (degree)」ではなく「rad」を使用する。このことからコードには次のように変換の命令を組み込む必要がある。

```
# sympy, numpy の組み込み
from sympy import Symbol, solve
import numpy as np

# 未知数の定義
v1 = Symbol('v1')
v2 = Symbol('v2')

# 係数 (角度の変換を含む)
a = np.cos((-60)*np.pi/180)
b = np.cos((30)*np.pi/180)
c = np.sin((-60)*np.pi/180)
d = np.sin((30)*np.pi/180)

# 方程式
ex1 = a * v1 + b * v2 - 1
ex2 = c * v1 - d * v2

# 結果の出力
print(solve((ex1, ex2)))
```

図6 三角関数を係数にもつ方程式を解く

結果は、「v1:0.500, v2: 0.866」と出力される。

### 3. 考察

実際に、物理 (5 単位) を選択する 3 学年の生徒 15 名にスマートフォンを持参させ、演習で使用させた。オンライン実行環境の選択では、「Google Colaboratory」を選ぶ場合、Google アカウントでログインしなければなら

いので、これを持たない生徒については「paiza.io」を推奨した。

電卓の代わりに Python を使う、というアイデアに最初は多くの生徒がとまどいを見せたが、理数系・工学系の進路を希望する生徒を中心に、最後には習熟したいという意欲が見られるようになった。

生徒には、授業でスマホと Python を使うことについて、そのねらいを次のように説明した。

ア 受験本番ではこれらのツールは使えないので、意味をしっかりと理解していない計算をロボットに解かせて正解を得る、というスタンスは通用しないこと。

イ 計算の意味や方法を理解していても、天文学的な数や数表を使う計算では、時間短縮のためにツールを活用し、考察や演習の時間を増やすよう心がけること。

ウ 考察の例としては、自分が得た結果をツールを使って検証することや、別解で同じ答が得られる場合には複数のアプローチを比較するなどが考えられること。

たとえば、問題 4 のコードは次のように書き換えても同じ結果が得られる。

```
# 係数 (角度の変換を含む)
a = np.cos((-60)*np.pi/180)
b = np.cos((30)*np.pi/180)
c = np.sin((-60)*np.pi/180)
d = np.sin((30)*np.pi/180)

# 方程式
ex1 = a * v1 + b * v2 - 1
ex2 = c * v1 + d * v2
```

この別解では、角度について正の向きを定めたので、先に図から判断して付していたマイナス符号が不要になった。

こうした相違点を丁寧に掘り下げるのが、生徒の思考力を育むことにつながるのではないかと考える。

### 4. おわりに

生徒 1 人 1 台 PC 端末を導入する GIGA スクール構想は、学習状況に応じ個々の生徒が異なる学習課題に取り組める環境を構築することを大きなねらいとしている。筆者が検討した内容は、それとはやや方向が異なるが、PC の活用を通して生徒の物理計算に対する抵抗感を減らすことも、物理教育が抱える課題のひとつである。このことから、今後も授業改善につながる取り組みを続けていきたい。

# 廃棄 LAN ケーブルを再活用したコイル群の製作

北海道滝川高等学校 河田 淳一

Wifi の普及で LAN ケーブルが大量に廃棄されている。SDG's の時代である。廃棄 LAN ケーブルを回収し、再利用の可能性を色々探ってみた。

キーワード Wifi LAN ケーブル SDG's

## 1. はじめに

GIGA スクール構想により Wifi の普及が各校で始まった。当然のことながら有線接続の LAN ケーブルは大量に廃棄される運命にある。



図1 廃棄される LAN ケーブル

LAN ケーブルは多少踏みつけても切れることはなく、内部に 8 本 4 組のツイストペアが存在し磁界の影響を抑える優秀な電線である。これを再活用しない手はない。

単線型はすべて剥いて銅線としたり、より線型はパスカル電線やスーパーケーブルといわれる段差接続手法でコイルを製作したり、丈夫さを活かして生徒会行事に活用したりと様々な応用をしたので以下に示す。

## 2. LAN ケーブルモーターへの挑戦

結論から言うと、LAN ケーブルのみでのモーターの製作には失敗した。台座は針金細工で形になったが、被覆を持つ回転子が巻数を多くすると重くなりすぎるのである。

回転子を軽くするため、奇数巻コイルを試作した。一般的なクリップモーターにおいて、エナメル線回転子は

被覆を片側半分だけ剥いて整流子とすることができる。しかし、LAN ケーブルは単なる銅線なので整流できない。そこで回転を続けるように 1.5T コイルで時計回り:反時計回りが 2:1 の電磁力を受けるように工夫した。まさに 3 歩進んで 2 歩下がる方式である。これを便宜上奇数回転子 3 型と名付けた。同様に 5 型は 2.5T コイルで 3:2 である。

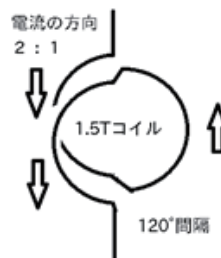


図2 奇数回転子の概念

フェライト磁石の磁場では回転の継続に成功したが、LAN ケーブルを巻いた電磁コイルでは磁場が不足し回転を誘発することはできなかった。

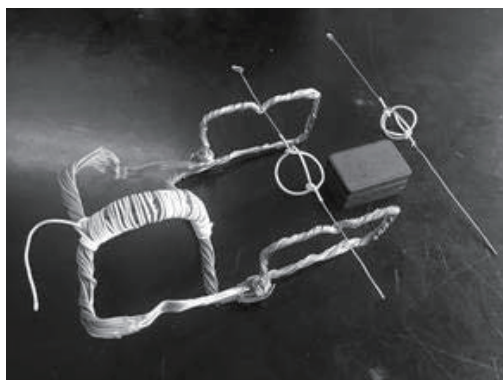


図3 奇数回転子 3 型と 5 型・台座



奇数回転子 3 型のフェライト磁石回転実験動画を示す。



<https://youtu.be/noyoBwkr8I>

奇数回転子 5 型のフェライト磁石回転実験動画も示す。



<https://youtu.be/4rd4Qtrodko>

課題としては LAN ケーブルのみで磁場を強力に発生させ LAN ケーブルモーターに発展させたい。

### 3. コイル群と値測定, TV アンテナ

段差接続手法で考えられる 3 通りのコイルを製作した。

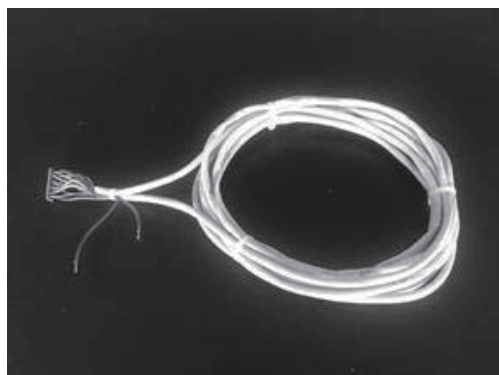


図 4 段差接続コイル

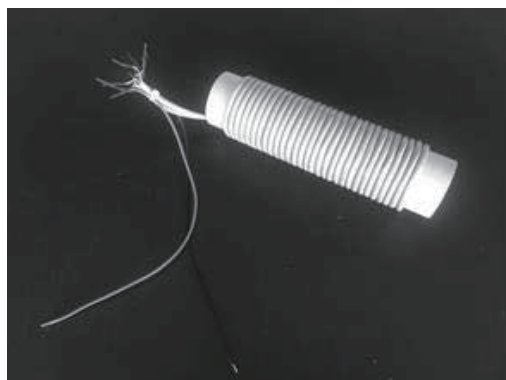


図 5 段差接続ソレノイド

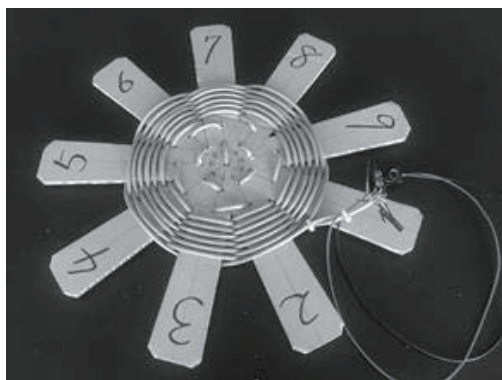


図 6 段差接続スパイダーコイル

各コイルの巻き方・接続方法は原典に譲る。特にパスカル電線あるいはスーパーケーブルといわれる優れた手法は電磁気実験をする上で欠かせない技術である。スパイダーコイルは奇数枚の羽に電線を交互に編むことで頑丈になるので大いに活用したい。

1000kHz 発振器で簡易測定したら値は 2 ~ 3 mH であった。本体の大きさの割に小さな値なので磁束漏れや被覆の厚みなどの外乱が考えられる。ここは LCR ブリッジで正確に測りたいところだ。

わかりやすく性能を確かめるためテレビのループアンテナとしてみた。室内アンテナとして十分実用可能である。LAN ケーブルでの TV アンテナ実験動画を示す。



<https://youtu.be/39Y3fbDWAAo>

金属探知機のコイルとしても頑丈なので応用範囲は広い。

### 3. 学校行事への応用

LAN ケーブルはとにかく頑丈である。生徒会のクリスマス行事でのオブジェを外に設置したが、ケーブルが切れるとの話を受け、接続部分を LAN ケーブルに変更した。8 本を 4 本ずつに分け、4 本並列で給電する方法である。万が一にもいずれか 1 本が断線しても 4 本、3 本で給電できるので安定度は高い。最終的に 3 本までの断線に耐えるが、その確率は低いであろう。また、複雑な分岐を単純な接続構造にして生徒会の文系の生徒でも簡単に設置できるように回線を工夫した。廃棄物の再利用の価値を生徒も認識し、よい SDG's の例となった。

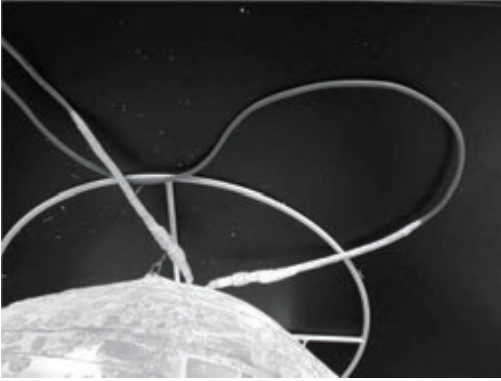


図7 LAN ケーブルへの回線変更



図8 クリスマスオブジェ群

#### 4. 展望

LAN ケーブルは頑丈な電線である。各人の工夫でいろいろな実験や工作が期待できる。各校で廃棄が進んでいるところだが、回収し各人の応用を競い合いたい。

#### 文 献

(1) 段差接続のバイブル、まずはこのファイルを参考にし  
て電磁気実験の応用範囲を考えたい。

[https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h04\\_05.pdf](https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h04_05.pdf)

「大電流電線による電磁気の実験」

京都市青少年科学センター 杉原 和男

(2) 新型クリップモーターに挑戦した拙著。

[https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h27\\_07.pdf](https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h27_07.pdf)

「銅線 5 本でできるモーターの製作指導」

北海道江差高等学校（当時） 河田 淳一

# Google Classroom を利用した実験レポートの添削 (生徒一人一台端末環境導入に向けて)

北海道中標津高等学校 李家 健  
Hokkaido Nakashibetsu High School Rinoie Ken

令和4年度入学生から生徒一人一台端末環境が導入される予定となっている。本校でも各教室の Wi-Fi 環境の整備や電子黒板の導入など、少しずつ準備は進んでいるが、肝心の授業内でどのように各自の端末を活用するか、という具体的な話にはまだなっていない。今年度から教務部が主体となり、生徒一人一人の Google アカウントを作成し、Google Classroom でクラスを作成して生徒を招待することができるようになったため、新型コロナウイルスでの臨時休校やオンライン授業も見据えて、授業の中で Google Classroom を用いて生徒への連絡やプリントの配布などを行ってきた。その中で、Classroom 上でループリックを作成し、実験のレポートを電子データで提出させて、ループリックをもとに添削をしてオンライン上で返却することを試みたので、その方法と成果をここに報告する。

**キーワード** Google Classroom 実験レポート 生徒一人一台端末環境

## 1. はじめに

新学習指導要領施行に向けて、生徒が一人一台の端末を所持し授業の中で活用する、いわゆる生徒一人一台端末環境が実施されることとなっている。本校でも教務部が主体となり、端末の斡旋や家庭への補助に関することなど様々な検討を重ねている。しかし、金銭的に端末を用意できない家庭には学校で貸し出ししなければならないことや、OS が異なることで起きる不具合などへの対応など、多くの課題が残されている。その中でも一番懸念されることは、実際に生徒が端末を持参してきても、授業中に教員がうまく活用できるかということである。今年度から生徒一人一人に Google アカウントを配布し、Google Classroom 上で各クラスの健康観察記録を行う準備をしていたが、現状は筆者のクラスでしか実施しておらず、他のクラスではまだ紙データでの提出となっている。せっかく生徒が端末を持参したとしても、教員が授業内でうまく活用できなければ保護者からの理解も得られず、何のために購入したのかという事態になりかねない。

そこで、HR クラスだけではなく、3年生進学クラスの物理の授業の中でも Classroom のクラスを作成し、授業に関する連絡やプリントの配布などを行って行く中で、Classroom 上でループリックを作成できることを知った。以前から実験レポートはループリックを用いて添削することが多かったため、Classroom 上で実験レポートを生徒に配布し、各自で編集したレポートを電子データで提出させ、ループリックをもとに添削をしてオンライン上で返却するというのを試みたので、その方法と成果をここに報告する。

## 2. 方法

Google Classroom では主に「ストリーム」と「授業」の2つのタブが用意されている。「ストリーム」は SNS というとタイムラインという位置付けで、簡単な連絡事項の伝達などに向いている。筆者は、次回の授業の場所や内容の連絡、小テストや実験の予告に使用している。図1にストリームでの連絡の例を示す。



図1 ストリームでの連絡

しかし、ストリームでは投稿を繰り返すと下の方に連絡事項が流れていってしまうため、保管しておきたい連絡や課題の提出などには向かない。

一方で、「授業」では「課題」・「テスト付きの課題」・「質問」・「資料」の4種類の投稿をすることができる。筆者は実験レポートなどを提出させるときには「課題」、小テストなどを実施するときには「テスト付きの課題」、授業などに関する質問を受け付けるときは「質問」、プリントなどを配布するときは「資料」というように使い分けをしている。また、授業タブの中ではトピックごとに整理することができるため、保管しておきたい投稿をするのに向いている。図2に授業タブの使用例を示す。



図2 授業タブの使用例

その中でも、「課題」ではプリントなどを添付できる他に、点数・期限・ルーブリック評価を設定することができ、生徒は電子データで資料を提出することができるようになっていいる。また、添付したプリントは閲覧のみか、生徒一人一人に配布かを選ぶことができる。そこで、課題の中で実験レポートのWordファイルを生徒に配布し、作成したレポートをPDFファイルで提出させることにした。

ルーブリックは、評価基準の名称・評価基準の説明・各レベルのポイント・各レベルのタイトル・各レベルの説明など細かく設定することができる。各レベルは、観点別評価で使われるA・B・Cだけではなく何個でも増やすことができ、名称や点数も自由に変更できる。また、評価基準も何個でも増やすことができるため、様々な生徒層や実験内容に対応することができる。図3にClassroom上のルーブリック評価表の一部を、表1に実際のルーブリック評価表を示す。



図3 ルーブリック評価表の一部

生徒にはなるべく電子データで提出するように指示はしたものの、今年度においてはまだ一人一台端末環境が始まっているわけではないため、全員に強制させることができなかつた。そのため、理系の大学では自分のPCで編集した電子データでレポートを出すのが主流であるこ

とを説明した上で、評価基準の最後に「レポート作成方法」という項目を設け、自分で作成したファイルで提出すればA評価、配布したWordファイルを編集して提出すればB評価、従来通り紙データで提出すればC評価として加点することとした。

表1 実際のルーブリック評価表

観点 評価	基本的な 知識・ 技能	思考力・ 判断力・ 表現力①	思考力・ 判断力・ 表現力②	主体的に 学習する 態度
S		CD・DVDのピッチが有効数字に注意しながら求められている	条件を変更して実験を行うと、実験結果がどう変わるかを理論的に予想している	実験の難易度や工夫した点を挙げ、実験を振り返った感想を書いている
A	【確認事項】をまとめ、データ測定が完了している	CD・DVDのピッチが求められている	条件を変更して実験を行うと、実験結果がどう変わるかを予想している	実験の感想を文章で書いている
B	【確認事項】の公式をまとめている	CD・DVDのピッチの求め方をまとめようとする記述が見られる	理論値との誤差を比較している	実験の感想を一言書いている
C	空欄になっている	空欄になっている	空欄になっている	空欄になっている

生徒が提出したレポートは電子データとともにClassroomで集約でき、そのデータを見ながらルーブリックの評価基準をクリックしていだけで自動的に点数を集計してくれる。最後に返却をクリックすれば生徒にそれぞれの評価と合計の点数が通知される。図4に添削中の画面を示す。

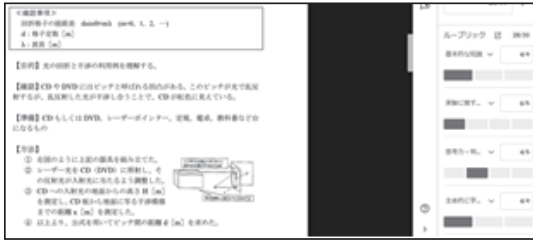


図4 ループリックの添削画面

生徒から提出されたレポートも非常に見やすく、レポート提出画面では、提出済み（提出されたが未添削）・割り当て済み（課題は配布したが未提出）・採点済み（添削終了）の3つに分類されるため、生徒の提出状況がひと目で分かる。図5にレポート提出画面を示す。



図5 レポート提出画面

さらに、限定公開コメント欄があり、ループリック評価とともに生徒一人一人にコメントを添付して返却することができる。図6に生徒へのレポート返却画面を示す。

全ての生徒へ返却が完了したあとは、成績を CSV ファイルでダウンロードすることができる。生徒へ返却する総合評価は数字でしか出ないため、筆者は最終的な S・A・B・C の評価をダウンロードした CSV ファイルをもとに、VLOOKUP 関数を用いて算出した。ただ、CSV でダウンロードしたファイルは文字化けが起きてしまうため、一度 Text ファイルで開き、名前を付けて保存で文字コードを「ANSI」にして保存する必要がある。図7に文字化けを解消した CSV ファイルを示す。

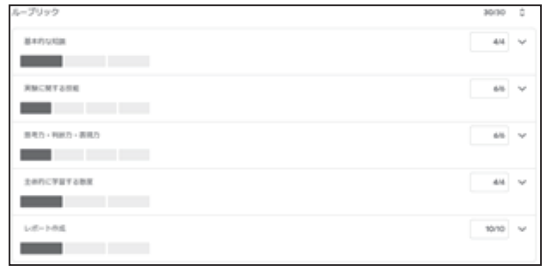


図6 生徒へのレポート返却画面

	A	B	C	D	E
1	姓	名	メール	ア	成績
2		19 b02	19-1404b0	16	返却済み
3		19 b03	19-1404b0	30	返却済み
4		19 b04	19-1404b0	21	返却済み
5		19 b06	19-1404b0	14	返却済み
6		19 b08	19-1404b0	18	返却済み
7		19 b09	19-1404b0	26	返却済み
8		19 b10	19-1404b1	16	返却済み
9		19 b11	19-1404b1	19	返却済み
10		19 b12	19-1404b1	28	返却済み
11		19 b15	19-1404b1	23	返却済み
12		19 b17	19-1404b1	25	返却済み
13		19 b26	19-1404b2	30	返却済み

図7 CSVファイル

### 3. 結果

自分で作成したファイルで提出・配布したWordファイルを編集して提出・従来通り紙データで提出の3つのパターンで生徒に選ばせて提出させたが、物理履修者12人のうち、自分で作成したファイルで提出したのが4人、配布したWordファイルを編集して提出したのが4人、従来どおり紙データで提出したのが4人という結果であった。自分で作成したファイルで提出した生徒は、自分なりに見やすく体裁を整えていたり、図を自分で挿入してまとめていたりなど、非常に完成度が高かった。一方で、配布したWordファイルを編集して提出した生徒は、大半がスマートフォンを利用しているため、体裁の乱れなどがとても気になった。しかし、一人一台端末環境が始まり生徒全員がMicrosoft Officeを搭載した端末で編集すればこういったことは解消されると考える。いずれにせよ、オンライン上で添削してリアルタイムで生徒に成績を返却でき、成績もCSVで管理できるため、実験レポートを回収する手段としてはとても便利だと感じた。

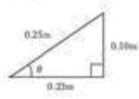
今回は夏休み前に実験を行い、夏休み中に提出させることにした。生徒は家のPCやスマートフォンで編集して提出するため、夏休み中の生徒が登校しない期間にも提出がされ、筆者も帰省先で添削を行った。オンライン上で提出・返却を行うことで、PCさえあればどこにいても比較的簡単にレポートの添削をすることができ、チェック漏れの心配もなく、確実に生徒のレポートを保管しておくことができる。

一方、計算処理を伴う実験の場合、数式に誤りがあった場合などは限定公開コメント欄では数式を挿入できないため、正しい考え方を説明するには生徒を呼んで結局紙をベースに説明するしかないというデメリットもある。また、紙に書くほうが楽という生徒は必ずいるため、一人一台端末環境が開始されたあとも全員が電子データで提出することは難しいと考える。

いずれにせよ、将来的にはPCを使用しての書類作成技術は必須であるため、高校生の頃から訓練しておくことは非常に有効であると感じた。図8に生徒が作成したレポートを示す。

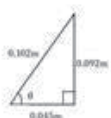
**(DVD)**  
入射光の地面からの高さ  $H = 9.2 \times 10^{-2} \text{m}$   
DVD 板から地面に写る干渉模様までの距離  $x = 4.5 \times 10^{-2} \text{m}$  (2 次)

**【計算】**  $\lambda = 6.5 \times 10^{-7} \text{m}$   
(CD)



$(\text{斜辺})^2 = (0.25)^2 + (0.25)^2 = 0.0625$   
斜辺  $= 0.251 \approx 0.25 \text{m}$   
 $\sin \theta = \frac{0.25}{0.251} \approx 0.996$   
 $\text{asin } \theta = m \lambda$  ( $m = 1$ ) より  
 $\theta = \frac{m \lambda}{\text{asin } \theta} = \frac{6.5 \times 10^{-7}}{0.996} \approx 6.53 \times 10^{-7} \approx 1.6 \times 10^{-6} \text{rad}$

**(DVD)**



$(\text{斜辺})^2 = (0.045)^2 + (0.092)^2 = 0.0105$   
斜辺  $= 0.102$   
 $\sin \theta = \frac{0.045}{0.102} \approx 0.432$   
 $\text{asin } \theta = m \lambda$  ( $m = 1$ ) より  
 $\theta = \frac{m \lambda}{\text{asin } \theta} = \frac{6.5 \times 10^{-7}}{0.432} \approx 1.5 \times 10^{-6} \approx 7.2 \times 10^{-7} \text{rad}$

**【考察】**

① CD と DVD では、なぜ明線の数と回折光の位置が異なるのか。  
CD の方がピッチ間の距離  $\lambda$  が大きいので、 $\text{asin } \theta = m \lambda$  ( $m, \lambda, \theta$  は定数) より、 $\sin \theta$  の値が小さくなり、CD から回折光までの距離が大きくなる。

② 波長の長さを変えると、回折光はどのようにになると予想されるか。また、その結果はどうなるか実際に試してみよう。

**CD・DVD のピッチの測定** 【実験日】7月27日

**【実験事項】**  
回折格子の経路差  $d \sin \theta = m \lambda$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ )  
 $d$ : 格子定数 [m]     $\lambda$ : 波長 [m]

**【目的】**  
光の回折と干渉の利用例を理解する。

**【原理】**  
CD や DVD にはピッチと呼ばれる凹凸がある。このピッチで光が乱反射するが、乱反射した光が干渉し合うことで、CD が虹色に見える。

**【準備】**  
CD もしくは DVD、レーザーポインター、定規、電卓、教科書など自になるもの。

**【方法】**  
① 右図のように、器具を組み立てる。  
② レーザー光を CD (DVD) に照射して、その反射光が入射光に当たるよう調整する。  
③ CD への入射光の地面からの高さ  $H$  を測定し、CD 板から地面に写る干渉模様までの距離  $x$  を測定する。  
④ 以上より、公式を用いてピッチ間の距離  $d$  を求める。

Part : CD の真上に光を当てる。一次の回折光をレーザーポインターと重なるように合わせる。

**【測定結果】**  
(CD)  
入射光の地面からの高さ  $H = 1.0 \times 10^{-1} \text{m}$   
CD 板から地面に写る干渉模様までの距離  $x = 2.3 \times 10^{-2} \text{m}$  (2 次)

$\text{asin } \theta = m \lambda$  より  $\lambda = \text{asin } \theta / m$  となる。  
 $\theta$  は定数なので、 $\lambda$  が大きくなると、 $\text{asin } \theta$  が大きくなるため、CD から回折光までの距離が小さくなる。

② Blu-ray で同じ実験を行うと、どのような結果になると予想されるか。また、その結果はどうなるか実際に試してみよう。

Blu-ray のピッチ  $d$  は  $3.2 \times 10^{-7} \text{m}$  である。  
【Blu-ray Drive の原理】Blu-ray 自身解説【Blu-ray とはこんな技術】(ipponnet.jp) より  
この値は DVD のよりもさらに小さいので、ディスクから二次の回折光までの距離  $x$  が 3 つのディスクの中で一番小さくなる。

**【自己評価】**  
CD や DVD は、ピッチという凹凸に情報を記録していることを理解できたか。(A)・(B)・(C)  
積極的に実験を行うことができたか。(A)・(B)・(C)  
考察を十分に記述することができたか。(A)・(B)・(C)

図8 生徒が作成したレポート

#### 4. まとめ

一度組んだルーブリックは細部を変更しながら再利用することができるため、様々なレポートで応用が効き、Google Classroom を利用した教育活動の中でも、非常に有効なものであると感じた。

また、問題のプリントをPDFにして配布し、ノート等に作成した答案を撮影して提出させることで、自宅からでも講習のような対応をすることも可能である。工夫次第では様々なことに応用していけると感じている。今後も、一人一台端末環境実施に向けてさらに工夫改善していきたい。

この論文は、2021 年度北海道高等学校理科研究会会誌「北海道の理科」に掲載された論文に加筆修正したものである。

# 単振動の実験におけるばね定数と質量の精密測定

北海道紋別高等学校 佐々木 徹

単振動の実験の精密実験を目指し、先行研究ではLMガイドを用いて、単振動の周期の精密測定を行った。本研究で、周期の公式を使って、ばね定数とおもりの質量の精密測定を目指した。

**キーワード** 単振動 LMガイド ラズベリーパイ 距離センサー マセマティカ

## 1. はじめに

本研究の先行研究<sup>(1)(2)</sup>では、単振動の精密実験を目指し、ばねの他端に取り付けるおもりの部分にLMブロックと呼ばれるLMガイド（スムーズかつ真っ直ぐに可動する工作機械）の一部を取り付け、精密に周期の測定を行う装置の開発を行った。作製した装置に対して、先行研究では周期の精密測定を目指したが、本研究ではばね定数及びおもりの質量の精密測定を目指した。目指す精度は3桁である。

一般的に行われる単振動の実験<sup>(3)</sup>は、固定されたばねの他端におもりを取り付け、単振動しているおもりの周期を測定する。一方、ばね定数およびおもりの質量を別に測定し、単振動の周期の公式より周期を求める。最終的に両者の周期を比較することが実験の主目的となる。

ばね定数  $k$  のばねに質量  $m$  のおもりをを用いた場合の単振動の周期  $T$  は公式より、

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

となる。この周期の公式(1)から、質量  $m$  を変化させることにより周期  $T$  も変化し、この関係からばね定数を決定することも可能となる。本研究では、直接ばね定数を測定する方法と、質量を変化させて周期の変化からばね定数を決定する方法の2通りの方法でばね定数の決定を試み、両者の比較を行った。同時に質量の測定も行った。

## 2. 力学モデル

上図のように押しばねを固定部に固定し、他端にLMブロック上に固定したアクリルボックスを取り付ける。アクリルボックスをばね方向に少し押し込み放すことで、アクリルボックスは”単振動”を行う。運動の測定は、距離センサーとアクリルボックスの右面との水平

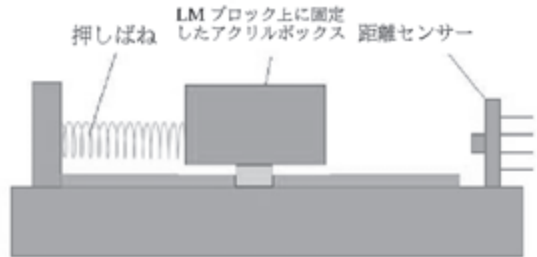


図1 実験装置の模式図

方向の距離  $x$  [cm] を測定することで行う。同時に測定した時間  $t$  [s] も記録されており、データは距離  $x$  と時間  $t$  との組として保存され、数百回連続して測定を行う。測定されたデータはラズベリーパイにデータファイルとして記録される。このデータをラズベリーパイ内蔵のマセマティカを使って  $x-t$  グラフにプロットするとプロット点が運動を再現している。さらにマセマティカを用いてこのプロット点をもっとも再現するように理論曲線を仮定して、パラメーターをフィットすることで周期を含む物理量を決定できる。仮定した理論曲線は減衰振動<sup>(4)</sup>の理論曲線

$$x = y + \exp(-bt) \sin\left(\frac{2\pi}{T}(t-s)\right) \quad (2)$$

である。ここで、距離  $x$  [cm] が時刻  $t$  [s] の減衰振動の関数として5つのパラメーターを伴って表される。 $y$  [cm] は振動中心、 $a$  [cm] は最大振幅、 $b$  [s] は減衰に関係する量、 $T$  [s] は周期、 $s$  [s] は初期位相である。

## 3. 周期の測定によるばね定数と質量の決定

2. の力学モデルにおいて、アクリルボックスの内側や側面に金属の重りを取り付けることで、さまざまな質

量のおもりでの実験を行うことが可能となる。本研究では、アクリルボックス内側には一定の重さの金属を固定し、側面に精密ばかりで正確に測定した200g弱の重りを順次取り付けていき、その都度減衰振動させ、周期を測定した。側面に重りを固定する前の最も軽い状態のおもりの質量を  $m_0$  とし、加えて側面に取り付ける重りの質量を  $m$  とすると、周期の2乗は式(1)より

$$T^2 = \frac{4\pi^2 m_0}{k} + \frac{4\pi^2 m}{k} \quad (3)$$

となる。一方、様々な質量での実験を行うことで、2.の方法により測定し決定した周期の2乗  $T^2$  と質量  $m$  の関係は下図のようになった。

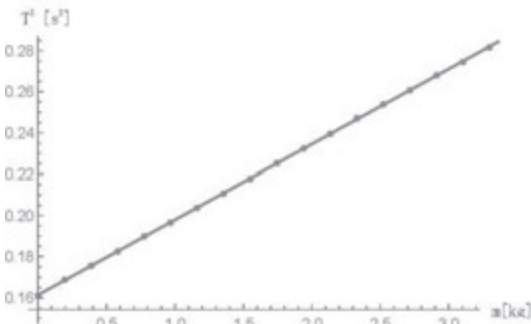


図2  $T^2$ - $m$ グラフ

プロット点を最も再現する理論直線は

$$T^2 = 0.161416 + 0.036536m[s^2] \quad (4)$$

となった。(3)と(4)を比べることより  $m_0$  及び  $k$  は次のように求められた。

$$m_0 = 4.412(0.010)kg \quad (5)$$

$$k = 1079(2)N/m \quad (6)$$

なお ( ) 内の数値はマセマティカを用いてプロット点を最も再現する直線を再現する際のパラメーターの統計誤差である<sup>(5)</sup>。

#### 4. 重りの質量の直接測定

3. の最も軽い状態の重りの質量  $m_0$  を直接測定する場合、次の各部の質量の合計を考慮しなくてはならない。アクリルボックス自体の質量 818 g、ばねやおもりを固定するための金属の質量 87 g、アクリルボックス内のおもりの質量 3663 g、LM ブロックの質量 77 g、ばねの質量の効果 231/3 g などである。231g がばね自身の質量であるが、その内ばね定数に寄与する部分はその 1/3 であ

る<sup>(2)</sup>。これらをすべて足すした質量を  $m_0'$  とすると

$$m_0' = 4.422[kg] \quad (7)$$

となった。この質量は 3. で求めた質量の統計誤差内にある。

#### 5. ばね定数の直接測定

2. の力学モデルにおいて、押しばねが取り付けられている固定部とアクリルボックスを精密な引きばねばかりで引き付け、そのときの距離を測定することで、ばね定数を直接測定することができる。今回用いたばねばかりは TK500 cN という中村製作所製のカノン棒状テンションゲージである。留意点として、引きばかりは可能な限り水平に固定しなくてはいけないことである。少しでも曲がっていると、正しくばねに加わる力を測定することができなくなる。また、距離測定は距離センサーを引き続き用いる。なお、距離センサーを用いた距離の測定では測定値のばらつきがあり、今回は同じ力で 10 回距離を測定した。測定結果は下図のようになった。

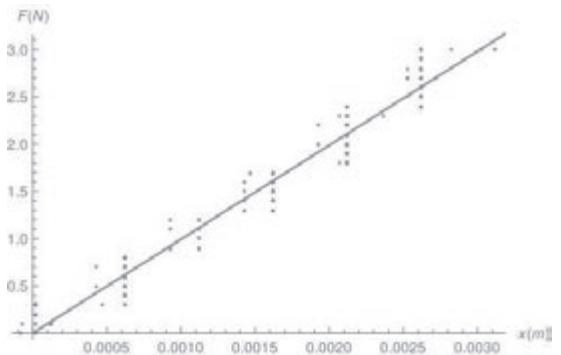


図3  $F$ - $x$  グラフ

プロット点を最も再現する理論直線は

$$F = 994.366x \quad (8)$$

となった。この理論直線から求められるばね定数にもマセマティカを用いてプロット点を最も再現する直線を再現する際のパラメーターの統計誤差が含まれ実際は 994.4(11.1)N/m である。今回用いた引きばねばかりには留意点がある。それは、同じ力を加えても水平方向と鉛直方向での力の測定値に違いあり、補正が必要であるという点である。実際、鉛直方向に比べ、水平方向の力の測定値は 1.083 倍小さくなっている。補正因子は、定滑車等を用い、両方向で同じ重さの重りを吊るして加えることで、両方向での目盛りの違いから求めた。この補正因子を考慮して実際に測定した場合のばね定数は、



$$k^r = 1078(12)N/m \quad (9)$$

と決定された．この値の統計誤差内に(6)式の値はある．

## 6. まとめと展望

本研究で，ようやく LM ガイドや距離センサー，ラズベリーパイを用いた精密な単振動の実験装置の開発，及びそれを用いた実験の決着を見た．目標としていた3桁の精度の実験も，(5)～(9)式の各数値の比較の通り概ね満足できる結果となっている．ただし，(9)式の精度が(6)式に比べ悪くなっている．精度を上げるため，測定回数を増やせば良いという単純な問題ではなく，はかりを水平に保つという根本的な難点があった．今回は用いなかったが，ばねばかりを水平に引く際に LM ガイドを用いる必要性を感じた．

## 謝 辞

本研究の発端は2019年度のサイエンスキャッスルTHK賞であり，この賞の申請者である生徒は既に卒業している．この研究を引き継ぐ形で LM ガイドを使用させて頂いて，本研究が完結させられたことは感慨深いものがある．改めてこのような機会を与えて頂いた株式会社リバネスや THK 株式会社とサイエンスキャッスル 2019 に申請した自然科学部の卒業生に感謝します．

## 文 献

- (1)北海道の理科 No.62
- (2)物理教育研究，日本物理教育学会北海道支部，Vol48
- (3)改訂版物理，数研出版，2017
- (4)機械振動入門，William Tyrrell Thomson 著，小堀与一訳，丸善，1962
- (5)Mathematica クックブック，Sal Mangano 著，松田裕幸訳，オライリー・ジャパン，2011

なお，本研究は平成 3 年度の「北海道の理科」に投稿した研究論文を加筆訂正したものである．

# 物理基礎：力学の授業における導入メモ

北海道芦別高等学校

加藤 賢一

物理基礎の力学の各授業における、導入を集めたメモである。B6のノートにまとめ、授業に利用している。  
**キーワード** 力学, 導入

## 1. はじめに

昨今では、アクティブラーニングや、ICTの利用等、新しい視点を盛り込むことが教師に要求されており、私なりに、論文等の発表も行ってきたつもりではいる。しかし反省すべきは、目の前の生徒らが、物理の普通の授業をわかりやすいと感じたか、そういう基本的なことを放置していたように感じる。論文を書いた人よりも、普通に授業を行っている人の方が、生徒にとって分かりやすい授業を行っているなんてことは、ざらにありそうだ。そこで、物理の授業では、定義や法則や公式などを頭ごなしに、押し付けずに、授業の導入で、生徒らが日常経験から考えたり、発問から議論したりするなどの前段を重視して、そこから出発するような授業を最近心掛けている。50歳半ばを過ぎて、やはり、初心のころの教師としての基本に立ち返り、目の前の生徒らの笑顔や、表情の変化を求める授業をしたい。本稿では、解説はあまりせず、導入部分をどンドンメモ書式的に書き下ろす。教科書にある普通の導入もかなりある。ついでながら、導入の実験や、発問が終わってから、今日のタイトルを書くようにしている。はじめから、今日のタイトルは、「慣性の法則」と書いたら、生徒の先入観が働いてしまう。

## 2. 導入のメモ

### ・速さ・速度・距離

力学台車を左右に動かして、方向によって、十を付けたものを速度と押さえる。月までレーザー光線で1秒。つまり、満月は1秒昔のその姿を見せている。ベテルギウスは、550年前の姿を見せている。1600年に関ヶ原の合戦があり、そのころに出たベテルギウスの光を見ている。遠ければ遠い程、昔の宇宙の姿を見せるのだから、超新星爆発などの、明るくて、遠い星の情報は、宇宙の過去の姿を知る手掛かりとなる。単なる公式の計算もやるが、自然で起きている現象を授業に盛り込むようにしている。調子のいいときは、余談として、色温度や、太陽の寿命や、肉眼での惑星と恒星の見分け方なども話す。

### ・合成速度

空港の動く歩道や、ウォーキングマシーンを例として話してから、タイトルに合成速度と記入する。

### ・相対速度

① パトカーを追い抜くことは、まずないが、パトカーを追い抜く前と、追い抜いた後では、パトカーの見え方は、それぞれ、近づく、遠ざかると異なる。しかし、ベクトルとしての相対速度は同じである。パトカーに追い抜かれる場合についても、考察する。

② 電車が止まっていれば電柱は止まっていて、電車が動いていれば、電柱は向かってくる。電車が止まっていれば、雨滴は鉛直方向に落ち、電車が動いていれば、電柱の動きを参考に、雨滴はこちらに向かいながら下に落下するから、斜めに動いて見える。相対速度のベクトル算は、その後にする。式を使わなくても、雨滴の運動が斜めになることは、頭で考えれば理解できる。

### ・加速度

カーテンレールに0cm, 10cm, 40cm, 90cm, 160cm, 250cmの所に、ビニールテープで印をつける。カーテンレールの斜面上でビー玉を転がす。0cmの所からビー玉を静かに離し、印の所で生徒が手を打つとその音は等間隔の時間となる。この規則性こそ、ガリレオが水時計で発見したものである。このように、速度が速くなっていくとき、1秒間の速度の変化を加速度という。できるだけ、現象をみてから定義に入るようにしている。

### ・水平投射

物差しに、厚紙等でL字の型を張り付け、10円玉2枚で、自由落下と水平投射を実現する。同時に床につくか、それとも、どちらかが早く着くか発問する。(大抵の教科書にある一般的な問い)勤務校のテストでは放物運動の計算は避け、放物運動の軌跡の作図ができればよしとする。

### ・力の種類／2力の釣り合い

重力を早めに導入し、あとは2力の釣り合いを原理として、張力、弾性力、垂直抗力等を導入する

### ・力の合成

静岡に住んでいたころ、清水港で、2隻のボートABがそれぞれ1本のロープで1隻のボートCを牽引していた。スピードを調整して、上手にカーブをしていた。Cは2本のロープの張力の合力を受けて運動している。要するに、ABがスピードを変え、張力を変えることで、Cが受ける合力を自在に変えている。2力の合力が平行四辺形で合成される生徒実験を**最重要の実験**と位置づけ近年は必ず行っている。

### ・力の分解

教科書にある親子で荷物を持つ場合の話をする。

### ・作用点

これは、演習の中で身に付ける。重要だが、今のところ、よい演示実験や発問が見つからない。

### ・作用・反作用の法則・

ボートを漕いだことがあるか？と生徒に投げかける。「それでは、湖の岸边にあるボートに乗り込んだ君は、どうやって、ボートを離岸させるか？ オールを使ってよいが、普通に漕ぐ方法はダメ」

答：オールで岸壁を押す。服を投げる。自分が岸に向かって飛び込むなど。この話から、歩くという動作は、地面が足をおしていることや、地球が月を引き、月も地球を引いていることなど取り上げる。ニュートンは潮汐が一日二回起こることを、月の引力から証明した。万有引力は潮汐で説明すると、現実味が増す。戦車が大砲を打つとき、車体が後方にずれ込む話もよい。今年は、水ロケットを飛ばした。

### ・慣性の法則

\*加速、減速している電車の吊革の向きを問う⇒作図で傾きを確かめる。

\*テーブルクロス引きの実演⇒盛り上がる実験である

\*カーリングのストーンが受けている力を記入させる。

\*速度運動をしている自転車からテニスボールを落とすとどこに落ちるか。(発問してから予測、実験、作図の順に、進める。ガリレオの相対性原理についても物理基礎でもざっと触れ、地球の自転速度についても話

す。地面は動いているのに動いているとは感じない。) )

### ・運動方程式による慣性質量の導入

台車一台にゴム紐1本。台車二台にゴム紐1本で、どちらが早く同じ距離を走破するか聞き、実際に実験も行う。科教協で定番化された有名な実験。

### ・動摩擦力

雪道をスタッドレスタイヤで走るときと普通のタイヤで滑るときでは、どう違うか？ 動摩擦係数は、2つの面の材質の相性で決まる。人が静止した車を押す状況設定なら、静止摩擦係数になる。 $\mu' < \mu$  より、テニスのローラや机や教壇など、動き出しの時に、ストンと軽くなる。

### ・静止摩擦力

ゼロテープの台を重くしてある理由を考える。

### ・浮力

静岡に住んでいたころ、北海道に旅行に行くときは、茨城県の大洗港や新潟港からフェリーをよく利用した。その度、たくさんの車が積まれていることに感心する。これを生徒に話し、浮力の導入とする。

問1：同じ体積の鉄球とテニスボールを水中に沈め、手で静止させておく。その後、手を離すと、鉄球は沈み、テニスボールは浮き上がる。2球に働く浮力は、どちらが大きいか、それとも同じか？

問2：油の中と、海水中、真水の中で下に落下する鉄球に働く浮力の大きさ比較せよ。

→海水魚の方が、淡水魚より受ける水圧は大きく、海水魚の方が受ける浮力が大きい、なども定番の話

### <簡単な演示>

化学で使う大きめの浴槽に水をたっぷり入れる。底面積の大きなビーカーを浴槽の水面に垂直に押し込むと、深く入れるほど、浮力が大きくなるのがわかる。排除された体積が目視できる。または、水圧が深さに比例するので、深いほど水圧×底面積が大きくなるという説明でもよい。簡単で本質的な実験に今まで気づかなかった。家庭での実験としては、風呂に水をはり、桶を水面に垂直に押し込む。桶の代わりにバケツなら、浮力が大きすぎて、最後まで押し込むのは無理であろう。

### ・仕事／仕事の原理

自分の失敗談は授業でよく話し、導入とすることがある。オートバイに乗っていたころ、事も有るうに田舎道でガス欠になってしまいバイクは止まった。近くにガソリンスタンドはなく、購入したバイク屋に来てもらった。バイクは重く、当然、手でトラックに持ち上げることはできない。どうやってトラックに積み込んだか。  
答え：地面と荷台を木製の板でつなぎ、斜面をつくった。こうすることで、人は小さな力で押し上げることができる。そのかわり、移動距離が長くなった。力×距離を仕事と定義すると、道具を使っても仕事量は不変である。仕事の原理から仕事の定義に持ち込んだ方が、自然な流れの授業となると思う。

### ・運動エネルギー

アルミ缶は手でつぶすことができる。同様に最近の車は、衝突時につぶれ衝撃を吸収する構造になっている。（クッシュャブルゾーンといい、イギリスの教科書には取り上げられている。）速度が大きいほど、衝撃は大きいなどと話をつなげ、運動エネルギーの定義に持ち込む。その他のエネルギーは運動エネルギーへ変換できることを示しながら、導入する。したがって、運動エネルギーは他のエネルギーより優先すべき、肝になる概念である。

### ・重力による位置エネルギー

これも、花瓶は高いところにあると、落ちると割れる可能性が高いなど、運動エネルギーへの変換へとつなげる。バンジージャンプなどもよい。重力による仕事による数学的な定義は、その話の後である。

### ・力学的なエネルギー保存則

問 ビースピを用意する。教卓のところで、錘をA点からB点に自由落下させる。次に糸に錘をつけ、A点と同じ高さからB点と同じ高さまで、1/4周だけ円運動をさせる。自由落下と非等速円運動の錘の最終速度はどちらが大きいか？

答 ビースピで確かめる。どちらも最終速度は同じ。教科書に載っている実験だが、準備が簡単で分かりやすい。糸の張力が仕事をしないことも、目で見て確かめられる。重力の仕事は、経路に依らない。または、重力による位置エネルギーの減少分が、運動エネルギーの増加になったと、変換を強調する。

### 3. まとめ

物理の得意ではない生徒を相手に、力学の授業を行うことは思った以上に難しい。どこで焦点を合わせればいいのか、答えはないが、あまり‘深い理解’を要求しすぎると上手くいかない、経験が教える。‘浅い理解’でもよいから、なんとなく、彼らが授業を受け入れる雰囲気醸し出すようにしている。教えたいことは山ほどあるが、授業を聞いてもらっているぐらいの感じのほうが、うまくいく。

このB6のノートは夏休みに一気に作った。こうすることで、授業はすんなり入ることができるようになった。このノートには数式はほとんどない。若いころは、式変形や定義も含めてノートを作ったことも有るが、式は教科書に書いてあるのだから、アドリブでも、なんとかなる。定義式や法則の数式に気を取られていると、肝心の導入が手薄になる。これを今回改善した。学校が変われば、また、ノートを作ることにはなると思うが、教師の仕事には終わりはない。

### 文 献

- (1) 愛知物理サークル 「いきいきわくわく物理 1,2,3」
- (2) 飯田洋治ほか 「学ぶ側から見た力学の再構成」

## A 4 論文原稿執筆要項 表題は 16 ポイント (pt) のゴシック文字 (副題は 12pt ゴシック : 両端をカッコでかこむ)

English Main Title: 12pt Times (英文のタイトル、概要等は著者からの希望がある場合にのみ掲載する)  
(English Sub Title: 12pt Times)

所属は 9pt 明朝 名前は 10pt ゴシック 明朝大学 ゴシック太郎 執筆高校 執筆 一郎  
Name 9pt Times Sippitu Koukou Sippitu Itirou

本文の 9 行目に相当する位置から抄録を書き始めます。200 字以内。日本語文字は 9pt を標準です。例えば「  
・について、  
・  
・という発想で、  
・  
・行なったところ、  
・  
・という結果を得た」キーワードを含めて下さい。なお、  
英文のタイトル、概要等は著者からの希望がある場合にのみ掲載します。

### Abstract

Abstract must be written with 9pt Times or Times new Roman Font. The number of words is within 200.

キーワード 9pt 5 語程度 Keywords: Times Font, 9pt, About 5 Words

### 1. 章タイトルはゴシック 10pt 太字

本資料は、オフセット印刷で、縮小して B5 版に印刷される冊子を作成する際に、A4 版で原稿を作成する際に必要となる投稿規定の情報を、視覚的に理解しやすい形で提供することを目的として作成したものである。

### 2. 本文執筆の要点

#### 2. 1 用紙の使い方

A4 用紙に 52 文字 45 行、2 段組の部分は 25 文字、段間隔: 8mm 段幅: 82mm とする。マージンは上 21mm 下 27mm 左 18mm 右 18mm とする。

#### 2. 2 使用フォント・サイズ・改行幅

標準フォントは 9pt の

和文: MS 明朝、平成明朝

英文: Times, New Roman, Times Symbol とする。

ただし太文字は、9pt の和文: MS ゴシック、平成角ゴシック、英文: Arial, Helvetica を使用すること。上記フォントがない場合は、類似のフォントを使用すること。

#### 2. 3 式および記号

式および記号の標準文字は、9pt のイタリック体とする。ベクトルの場合は太文字のイタリックとする。

上下添字は 6pt 程度の立体 (イタリックも可) とする。以下にいくつかの例を挙げておく。

$$J_c \quad V_i \quad P^A_{ijk}$$

式を記入する場合は、式の上下に自行を設け、右端に式番号を記入する。例えば、

$$F_D = C_P 1/2 \rho \quad |V| \quad VS \quad (5)$$

のように記入する。なお、式を文章中で参照する場合には、式(5)、式(7) - (10)のように、番号の前に"式"を付ける。

#### 2. 4 図・表、およびその説明

図ならびに表は、1 段幅、あるいは 2 段幅に収まるように作成し、論文内の適切な位置には配置する。

図ならびに表の中の文字は、十分認識できるサイズ (具体的には 9pt 程度) とする。6pt 未満の文字は使用しないこと。また、図ならびに表の前には空白行を設けること。

それぞれの図ならびに表の説明文 (caption) として、以下に示す例のように、図ならびに表の通し番号の後に 9pt の標準文字で説明を記入する。なお、図の説明文は該当する図の下、表の説明文は該当する表の上とすること。

例 表 1 生徒の履修状況

図 1 実験装置の模式図

#### 2. 5 引用・参考文献

引用または参考にした文献は、本文中の引用・参照箇所ですら肩に<sup>1)</sup><sup>2)</sup>などの表記で表示するとともに、末尾に一括して著者名、文献名、ページなどを示す。

## 文 献

- (1) 山川谷男: エントロピーの・・教育, 物理教育研究, Vol.22, No.3, pp.1~4, 1999

なお, 脚注は文章中の該当箇所に\*・\*\*の印を付しページの下に横線を引き, その下に書いて下さい。

## 3. その他

- (1) 原則として原稿は返却しません。  
(2) 本誌は毎年11月に発行予定です。  
(3) 投稿された原稿は, 支部編集委員会で内容を審査します。  
(4) 投稿及び原稿テンプレートファイルの申込み, ならびに会誌編集に関する連絡先は, 右記の投稿受付担当者までお願いします。

**原稿募集** 上記の規定に基づいて支部会報「物理教育研究第50号」の原稿を募集いたします。

- (1) 締 切 2022年9月末日(予定)  
(2) 投稿受付 投稿受付先は下記のとおりです。

投稿受付/問合わせ先

〒066-8655 千歳市美々758-65

公立千歳科学技術大学 長谷川 誠

TEL/FAX 0123-27-6059

E-mai hasegawa@photon.chitose.ac.jp

または

〒011-0025 札幌市北区北25条西11丁目

北海道札幌北高等学校 中道 洋友

TEL 011-736-3191 FAX 011-736-3193

E-mail nakamiti-yoyu@mbp.nifty.com

または

〒063-0002 札幌市西区山の手2条8丁目5-12

札幌山の手高等学校 佐藤 革馬

TEL 011-611-7301 FAX 011-641-3795

E-mail kakuma-s@ikoi-wagayatei.net

使用されるワープロが「Word」か「一太郎」であれば, この執筆要項のファイルを送付できます。担当までお知らせ下さい。

## 編集後記

新型コロナウイルスの影響は依然として収束していませんが, 教育現場では, 様々な新しい取組みが試されてきているようです。困難な局面をチャンスと捉えて, より一層の発展を目指していきたいものです。なお, 本来であれば, 支部会報には前年度の事業報告及び決算報告, ならびに今年度の事業計画及び予算報告を掲載するのですが, 支部総会が開催できていない関係で, 昨年度に引き続いて今年度も掲載していません。ご了承いただければ幸いです。

(H)

2021年12月31日発行

日本物理教育学会北海道支部

第49号 編集責任者 長谷川 誠

(060-0810)札幌市北区北10条西8丁目

北海道大学大学院理学研究院

鈴木久男気付

日本物理教育学会北海道支部

目 次

巻頭言 新学習指導要領	北海道大学 鈴木 久男	1
-----		
磁極に対するクーロンの法則から電磁力の式 $F=\mu_0 I H l$ を導く	立命館慶祥高等学校 石川 昌司	2
帯電導体の電荷分布を巡って	北海道大学 鈴木 久男	6
Pythonを使った計算のすすめ（1人1台のPCを活用する）	北海道札幌西陵高等学校 佐々木 淳	12
廃棄LANケーブルを再活用したコイル群の製作	北海道滝川高等学校 河田 淳一	15
Google Classroomを利用した実験レポートの添削（生徒一人一台端末環境導入に向けて）	北海道中標津高等学校 李家 健	18
単振動の実験におけるばね定数と質量の精密測定	北海道紋別高等学校 佐々木 徹	22
物理基礎：力学の授業における導入メモ	北海道芦別高等学校 加藤 賢一	25
-----		
原稿執筆要項、編集後記		28