慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	ローレンツカに関する学生実験の実践方法
Sub Title	The practice of the experiment on the Lorentz force for undergraduates
Author	加堂, 大輔(Kado, Daisuke) 松浦, 壮(Matsuura, So)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2017
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.61 (2017. 3) ,p.19- 36
JaLC DOI	
Abstract	We demonstrate the experiment on the Lorentz force in physics, which is proposed in Hiyoshi Review in Natural Science, Keio university, No.51, 9-21 (2012). The experiment is designed to be done with familiar swing and magnet, and to lead experimenters with little education of physics such as undergraduate students in humanities and social sciences to understanding natural science from a fundamental perspective. In this paper, we show materials of the experiment and explain a method of making experimental equipment in detail with many photos and figures. A step-bystep procedure of the experiment is shown with example results. Some technical points are improved, and the Lorentz force can be studied at the quantitative level. We also propose some ideas avoiding extra difficulties in mathematics, which would be useful to make experimenters who are bad at math concentrate on physical phenomena of the Lorentz force.
Notes	原著論文
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20170331-0019

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

Hiyoshi Review of Natural Science
Keio University No. 61, 19–36（2017）

ローレンツ力に関する学生実験の実践方法

加堂大輔*・松浦　壮*

The Practice of the Experiment on the Lorentz Force for Undergraduates

Daisuke Kadoh and So Matsuura

Summary——We demonstrate the experiment on the Lorentz force in physics, which is proposed in Hiyoshi Review in Natural Science, Keio university, No.51, 9–21 (2012). The experiment is designed to be done with familiar swing and magnet, and to lead experimenters with little education of physics such as undergraduate students in humanities and social sciences to understanding natural science from a fundamental perspective. In this paper, we show materials of the experiment and explain a method of making experimental equipment in detail with many photos and figures. A step-by-step procedure of the experiment is shown with example results. Some technical points are improved, and the Lorentz force can be studied at the quantitative level. We also propose some ideas avoiding extra difficulties in mathematics, which would be useful to make experimenters who are bad at math concentrate on physical phenomena of the Lorentz force.

Keywords: Lorentz force, education, experiment

1. 序論

現代社会を成り立たせる科学技術の基礎として物理学の果たしてきた役割は大きい。電磁気学だけでも，電車，自動車，医療機器からスマートフォンに至るまで生活の隅々にまでその恩恵が浸透している。しかし，そのような応用を生み出す物理の基本法則・原理はブラックボックスとして社会から切り離され，結果として市民の科学技術リテラシーの低さに結びついている[*1]。このような現代社会が抱える問題を解決するためには，自然科学になじみのない人々に科学の本質を理解させる新しい取り組みが必要となる。この論考では，本来単純で美しい物理

* 慶應義塾大学日吉物理学教室（〒223–8521　横浜市港北区日吉 4–1–1）：Department of Physics, Hiyoshi Campus, Keio University, 4–1–1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223–8521 Japan. [Received Oct. 24, 2016]

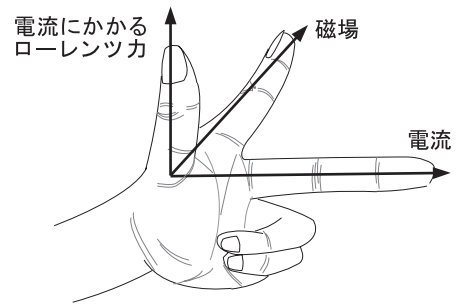

図 1．フレミングの左手の法則

の本質をより直感的に理解できる教育法について考察する。特に，阪口と本稿著者の松浦が提案したローレンツ力の実験[1)]を文系の学生向けの講義として実践する方法について述べる。

ローレンツ力は電磁場中を動く電荷をもった粒子が受ける力で，その基礎方程式は

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \tag{1}$$

で与えられる[3)]。ただし，荷電粒子の電荷を q，速度を $\vec{v}$，電場と磁場をそれぞれ $\vec{E}$，$\vec{B}$，ローレンツ力を $\vec{F}$ とした[*2]。電場がないときは，図 1 のフレミングの左手の法則が表わす通り，ローレンツ力は磁場と粒子の運動方向の双方に直交する方向に発現し，その大きさは電荷，速度，磁場の積で与えられる[*3]。この力の法則はマクスウェル方程式とともに電磁気学の基本法則として重要な役割を果たしている。それゆえ，電気と磁気の現象を理解することを目的として，ローレンツ力に関する多くの実験やデモンストレーションがこれまでに考えられてきた。

ローレンツ力と関連する学生実験としては，ホール素子を使った方法[4)]が典型的である。しかし，この方法ではミクロなホール素子のなかで本当のところ何が起こっているかの理解は天下り的になり，物理学とはどういうものかを実体験として理解させようとする我々の取り組みとは多少趣が異なる。一方，簡単なモーターを用いる方法[5)]や電気ブランコといったクラシックな方法[6)]はローレンツ力をマクロに発現させることで定性的な理解は得られるものの，科学実験として定量性を欠いているのが欠点である。この状況に対して，阪口と本稿著者の松浦は，磁場の強いネオジム磁石が近頃安価に入手可能になったことに注目し，電気ブランコとネオジム磁石を用いて定量性のある学生実験の方法を提案した[1)]。

本稿では，2 節で阪口と松浦のローレンツ力の実験法についてレビューする。実験に必要な装置とその準備方法を 3 節で述べ，それらを用いた実験の実践例を 4 節で詳述する。最後の 5

[*1] 科学技術リテラシーとその問題点については JST の報告書[2)]を参照するとよい。

[*2] 矢印付きの量はすべてベクトルで，×は直積である。$\vec{v} \times \vec{B}$ は電場ベクトルと速度ベクトルの双方と直交する方向（フレミングの左手の法則参照）を向いたベクトルで，その大きさは磁場と速度の大きさの積で与えられる。

[*3] これ以降で，単にローレンツ力という際には電場のない場合を考えている。その場合にローレンツ力の大きさ F は磁場と速度の大きさ B と v を用いて $F = qvB$ で与えられる。

節でまとめと展望について議論する。

2. 実験の基本的なアイデア

実験では，電流の流れるブランコに磁石で磁場をかけてローレンツ力をマクロに発現させる。図 2 は実験装置の模式図である。この装置の具体的な用意の仕方は 3 節で，実験の進め方は 4 節で議論する。この節では，参考文献 1 で提案された実験の基本的なアイデアについて紹介する。その中で，オリジナルの議論になかった余計な数学上の難しさを無くすためのいくつかの提案と電流と変位の線形領域を越えた検証方法についても述べる。

ブランコの乗り場にコの字の形をした磁石で一様磁場をかけ，内部の導線に電流を流すとローレンツ力はブランコを傾けるように生じる。一方，ブランコ自身は重力の作用で元の位置に戻ろうとし，図 3 のように，ローレンツ力と重力が釣り合う位置で静止する。後述する釣り合いの条件式を解くことでローレンツ力の大きさが求められ，得られた測定結果をローレンツ力の理論式

$$F = qvB \tag{2}$$

と比較することで理論の正しさを検証することができる。このとき学生は，ローレンツ力で傾いたブランコや磁場の強さを間近で測定することで，直感的かつ体感的に物理現象としてローレンツ力を学ぶことができるというのが本実験のポイントである。

重力とローレンツ力の釣り合いを図 4 に示した。図は傾いたブランコを横から見た図である。ブランコ全体（乗り場と手を持つ部分）の質量を m，ブランコの高さ（支点から乗り場までの長さ）を L，支点から測ったブランコの重心位置を r，重力加速度を g，静止位置での傾きを θ，実際に観測するブランコの横方向への変位を x とする。このとき，ブランコの重心にか

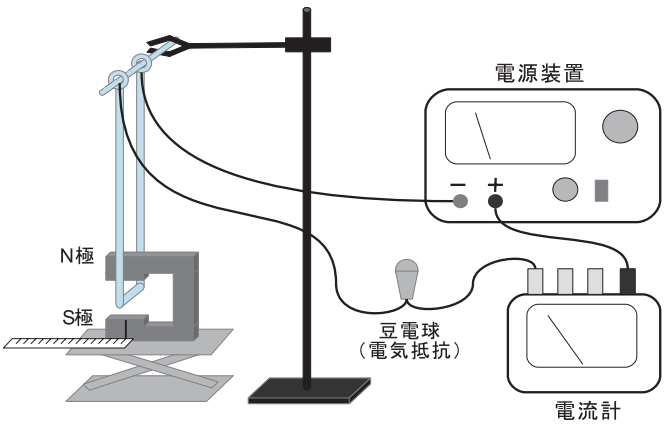

図 2. 実験装置の模式図

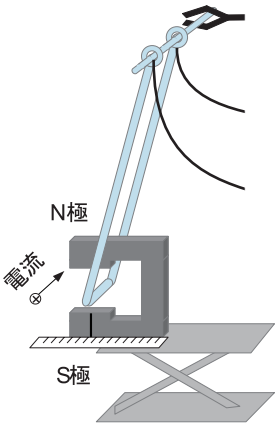

図 3. 電流を流すと傾くブランコ

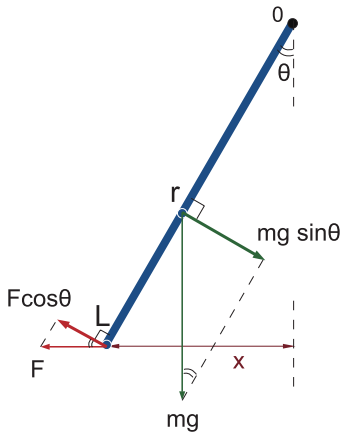

図 4. ブランコの力の釣り合い

かる重力は mg で与えられる。一方，ローレンツ力 F はブランコの乗り場の部分に地面と平行して左向きにかかっている。静止位置で，ブランコの支点を基準とした力のモーメントの釣り合いの条件式として

$$mgr \sin\theta = FL \cos\theta \tag{3}$$

が成り立つ[*4]。さらに，ブランコの変位 x と傾き θ には

$$\sin\theta = \frac{x}{L} \tag{4}$$

の関係がある。ブランコの傾き θ が十分に小さいとして $\cos\theta \approx 1$ と近似しつつ，(3) 式と (4) 式を連立することで，ローレンツ力 F は変位 x を用いて

$$F = \frac{mgr}{L^2}x \tag{5}$$

と書くことができる。

ローレンツ力の理論の検証とは，力の方向と大きさの双方が $\vec{E} = 0$ とした (1) 式に一致することを確かめることである。力が働く方向は，実験中にブランコがどの方向に力を受けているかを観測したり，実際に手でブランコを触ることで体感的に理解することができる。一方，力の大きさが (2) 式のように磁場，電荷，速度の積で書けることを示すのは，導線中を通る電子の速度と全電荷量を直接観測するわけにいかない点で厄介さが残る。そこで，速度と電荷

[*4] 阪口-松浦 [1] では中点を重心位置 $r = L/2$ としていた。参考文献 [7] でも指摘されているように，精度を高めるためには重心が中点からずれる効果を取り入れるほうがよい。(10) 式からわかるように，実際に運用する際ありうるブランコの高さ L と乗り場の長さ l が $L/l = 5$ のような場合では，無視できない約 10 % の系統誤差の原因となりうる。

の積を評価可能な量であるブランコを流れる電流 i と乗り場の長さ l の積に書き直す[*5]。電流の定義から t 秒間に Q クーロンの電荷を動かす電流が Q/t アンペアである。今，ブランコの乗り場に存在する全電荷量 q は l/v 秒の時間を掛けて乗り場外に移動しているので，電流 i は全電荷を移動時間で割った

$$i = \frac{qv}{l} \tag{6}$$

で与えられる。これを（2）式に代入することで，ローレンツ力 F は理論的に

$$F = liB \tag{7}$$

と書き直すことができる。ローレンツ力の大きさの検証にはこの式を用いる。

実験では，あらかじめブランコの質量 m と高さ L，重心位置 r を測定しておくことで，変位 x からブランコにかかるローレンツ力の大きさ（5）式を知ることができる。他方，ローレンツ力の理論式である（7）式によれば，電流 i，ブランコの乗り場の長さ l（実際には磁場がかかっている部分），磁場 B を測定すればローレンツ力が得られる。このようにして得られた実験値（(5) 式）と理論値（(7) 式）が一致すればローレンツ力の理論が検証されたことになる。この検証をより単純に実行するには，実験における直接の測定量である電流 i と変位 x の関係を調べるほうがよい。(5) 式と（7）式を連立し F を消去すると，

$$x = \frac{Bll'^2}{mgr} i \tag{8}$$

が得られる。一定の磁場下では，変位 x は電流 i に比例し，その比例定数は他の測定可能な量で表わされている。それゆえ，電流を複数変えて対応する変位を測定し，すべての測定結果が (8) 式で指定される直線上に並ぶことを見ることで，ローレンツ力の理論式の正しさが検証される。

重心位置 r は直接測定する代わりに理論的に求めることができる。ブランコ内部に導線が一様に分布しているとすると，図 5 のように重心位置から左右の力の釣り合いとして，

$$\left(\frac{r}{2}\right)\left(\frac{2r}{2L+\bar{l}}\right)mg = \left(\frac{L-r}{2}\right)\left(\frac{2L-2r}{2L+\bar{l}}\right)mg + (L-r)\left(\frac{\bar{l}}{2L+\bar{l}}\right)mg \tag{9}$$

という関係式が成り立つ。$\bar{l}$ はブランコの乗り場の長さで，磁場のかかる部分 l より実際上いくぶんか大きい。これは r に関して解くことができ，

$$r = \frac{L}{2}\left(1 + \frac{\bar{l}}{2L+\bar{l}}\right) \tag{10}$$

を得る。他方，余分な数学を避け，重心位置を直接測定で決める方法もある。それは図 5 と同様に天秤の要領でブランコの左右を釣り合わせて，そこから直接重心の位置を測定する方法で

[*5] 実際には l は乗り場のうち磁場のかかっている部分の長さである。

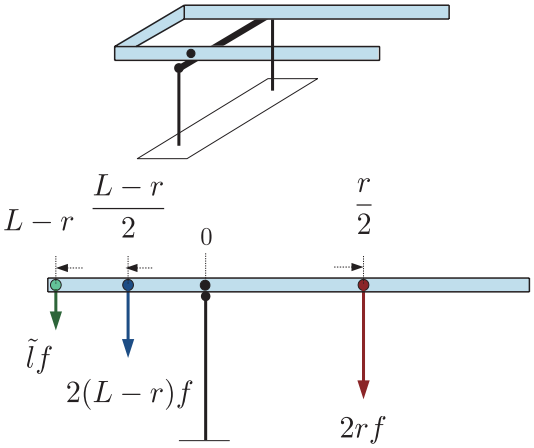

図 5. 重心まわりの釣り合い
ただし，$f=\frac{mg}{2L+\tilde{l}}$とする。

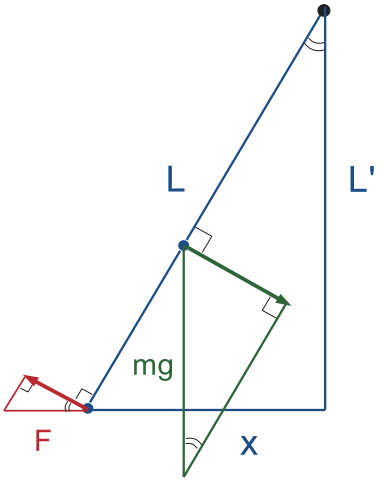

図 6. 三角形の相似関係と力の釣り合い

ある。ブランコ内部には導線が通っており，ブランコの 2 つの上端から導線が外に飛び出している。重心を正確に測定するために外側に飛び出した導線と金具を取り除いたサンプルのブランコを余分にもう一つ用意する必要がある[*6]。しかし，天秤方式で求める方法は余分な数学を必要とせず，(3) 式でも使った力の釣り合いの条件を体感させることもできる。そのため，直接測定から重心位置を求めるのも一考の価値のある方法であろう。

補足として，数学が不慣れな実験者には (3) 式を説明する際に sin 関数と cos 関数を使わないほうがよいだろう。それらの関数がなくとも三角形の相似を使って力の釣り合いを説明することができる。図 6 は関連する三角形の相似関係を書いたものである。ブランコの支点から測ったブランコの垂直方向の高さを L' とすると，ローレンツ力の回転方向の成分（図 6 の赤矢印）は

$$F\frac{L'}{L} \tag{11}$$

と書ける。同様に相似関係を用いると，重力の回転方向の成分（図 6 の緑矢印）は

$$mg\frac{x}{L} \tag{12}$$

である。これらを用いると、(3) 式は

$$mgr\frac{x}{L}=FL\frac{L'}{L} \tag{13}$$

で与えられる。傾きが十分に小さいときは $L'\approx L$ なので (5) 式が得られる[*7]。この説明では sin と cos が何であるのかの理解を必要とせず，見かけの数学に惑わされずに物理現象として

[*6] このようなサンプルのブランコは質量 m を計測する際にも使える。
[*7] ピタゴラスの定理 $L'^2+x^2=L^2$ を用いれば (14) 式も得られる。

のローレンツ力の理解に注力することができる。

数学的には多少難しくなるが，ブランコの傾きが大きい場合でもローレンツ力の検証を行なうことができる。それには（3）式を変形する際に（4）式とともに $\cos\theta=\sqrt{1-\sin^2\theta}$ を近似なしで用いればよい。そうすることで，$-\pi/2<\theta<\pi/2$ の領域で

$$F=\frac{mgr}{L^2}\frac{x}{\sqrt{1-\left(\frac{x}{L}\right)^2}} \tag{14}$$

が得られる。この場合には（7）式と連立してわざわざ直接の測定量である変位と電流の関係に直さないほうがよいであろう。測定された変位 x から（14）式を通してローレンツ力の測定値を決め，得られた測定値を（7）式から決まる理論値と比較するほうが単純である。しかし，（14）式は分母に平方根をもった複雑な表式のため，ローレンツ力の検証に余分な複雑さが付きまとう。この意味で，（8）式の線形関係の範囲に検証を留めておくのも悪いことではない。

3. 実験装置の準備

実験装置として，ブランコ，コの字磁石，ラボジャッキ（上下昇降式のテーブル），ガウスメーター，電源装置，電流計，装置をつなぐリード線を必要とする。装置一式で約 20 万円の購入資金を要する[*8]。このうちブランコとコの字磁石は材料を購入して手作りした。図 7 は完成した実験装置である。それぞれの装置ごとに必要な材料とブランコ，コの字磁石の製作方法，装置全体の組み方を以下で説明する。

ブランコは回転部分と支柱から成り，その材料として，

・アクリルパイプ（長さ 1.04 m，穴の直径 4 mm）	約 200 円
・導線（線径 1 mm，長さ約 2 m）	約 100 円
・金属ワイヤー（長さ約 1.5 m）	約 100 円
・吊り金具（ヒートン）2 個（線径 3 mm，全長 3.4 cm，穴の直径 1 cm）	約 300 円
・ラボスタンド＋アーム（高さ 75 cm，アームの長さ 24 cm）	約 7,300 円
・アクリル棒（線径 8 mm，長さ 30 cm）	約 100 円

が必要となる。図 8 は回転部分の材料，図 9 は支柱の材料である。ブランコの回転部分はアクリルパイプに導線を通して曲げた後，支点に吊り金具を取り付けることで作成される。参考文献[1]では導線を裸のまま使用したが，アクリルパイプを利用することで装置の耐久性や測定結果の精度が向上する。支柱は，ラボスタンドを組み立ててアームを取り付け，そのアームに

[*8] 約 15 万円分は特注のマグネットホルダーとガウスメーター代である。これらの値段を下げる工夫ができれば，より手軽な実験になる。

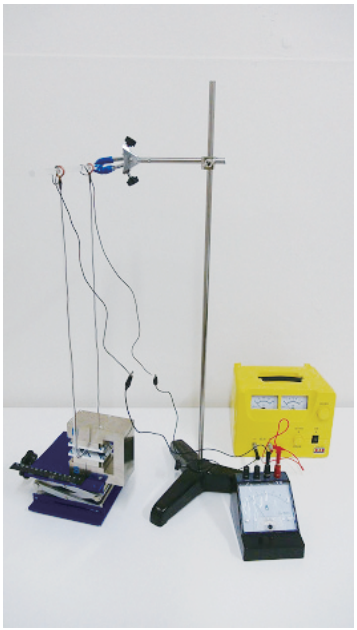

図 7．実験装置の完成形

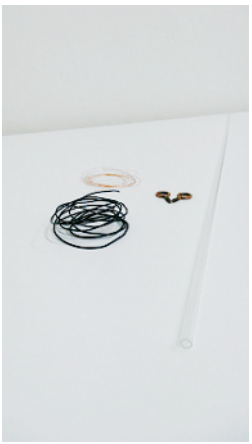

図 8．ブランコの回転部分の材料

図 9．ブランコの支柱の材料

アクリル棒をセットして作られる。図 7 の中心やや左にあるのが作成したブランコである。その乗り場の下にはラボジャッキに乗ったコの字磁石が配置されている。ブランコの高さを 50 cm 程度にするために 1 m 程度のアクリルパイプが必要となる。ラボスタンドはブランコの高さより 20 cm 程度高いものを用いればよい。導線と吊り金具はアクリルパイプの穴の中に同時に入るので，それらの線径は合わせてパイプの穴の直径程度になっている必要がある。吊り金具の穴にアクリル棒を通すため，金具の穴の直径はアクリル棒の線径よりも大きなものを用意しなければならない。また，金属ワイヤーはパイプに導線を通す際に補助的に必要となるものなので，ワイヤーなしでも導線が通せる場合は必要ではない。

コの字磁石の材料として，

・ネオジム磁石（5 cm× 5 cm× 1 cm）2 個　　約 5,000 円
・純鉄製マグネットホルダー（11 cm× 5 cm× 11 cm）
　　＋アルミ板（7 cm× 5 cm× 5 mm）　　約 56,000 円
・ラボジャッキ（15 cm× 15 cm，7 〜 22 cm まで伸縮可）　　約 4,000 円
・定規（20 cm 程度）　　約 100 円

を要する。図 10 が購入したコの字磁石の材料で，このうち純鉄製マグネットホルダーは特注して用意した。一枚の磁石だけで磁場を作っていた参考文献[1)] の手法を改良し，ホルダーの上下にネオジム磁石 2 個をアルミ板で固定して用いる。磁石は全体として磁気回路を成し，2

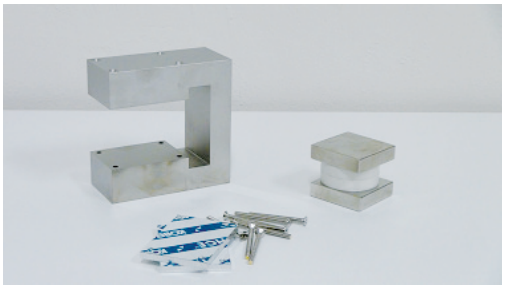

図 10．コの字磁石の材料

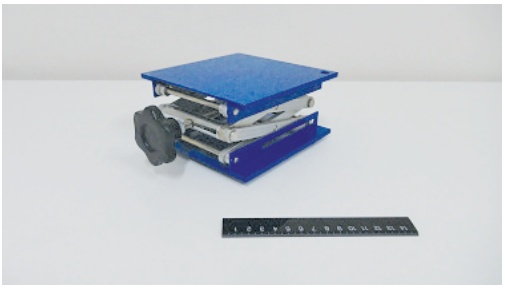

図 11．ラボジャッキと定規

図 12．電源装置，電流計とリード線

図 13．ガウスメーター

枚の磁石に挟まれた領域内でほぼ一様な磁場が実現できる。ホルダーの天井と床に挟まれた空間の高さは 5 cm，磁石をセットしたあとにできる一様磁場領域の高さは 1.5 cm になる。図 11 はコの字磁石を上下させるためのラボジャッキとそれに取り付けて使う定規である。コの字磁石は図 7 のようにブランコの乗り場の下でラボジャッキの上に乗せて用いる。

その他の機器として，

・電源装置　約 20,000 円
・電流計　約 4,300 円
・ガウスメーター　約 100,000 円
・リード線 3 本　約 800 円

を必要とする。図 12 が購入した電源装置，電流計とリード線，図 13 が磁場計測用のガウスメーターである。

ブランコの回転部分は，アクリル製のパイプに導線を通し，それを曲げることで作成できる。図 8 はその材料である。導線は曲がりやすく，パイプに通す際には多少の工夫が必要である。金属ワイヤーを先にパイプに通し，そのワイヤーの端に導線を括り付ける。後はワイヤーを引き抜くようにすれば自然にパイプに導線を通すことができる。図 14 は導線をアクリルパイプに通す作業の様子を示している。アクリルは熱に弱く，湯を沸かした際に発生する蒸気でも簡

図 14. ブランコの製作過程（その 1）

図 15. ブランコの製作過程（その 2）

図 16. ブランコの製作過程（その 3）

単に曲げることができる。この性質を利用し，ブランコの乗り場となる部分の両端を蒸気で熱しコの字形に曲げることで，ブランコの形をした導線入りパイプとなる。乗り場の長さを 8 cm にする際[*9]には余裕を持たせて 8.5 cm 間隔程度で乗り場の両端に印を付ける。曲げる際には，その印の位置の左右数 cm を十分に蒸気で熱し，3 分程度の時間をかけてゆっくり印の位置を折り曲げるようにすればよい。図 15 はアクリルパイプを曲げている作業を写している。その後，ブランコの両端に回転を生み出す吊り金具を取り付ければブランコの回転部分ができる。金具の取り付けの際には，まずパイプ内の導線にたるみがないように導線の両端を引っ張って調整する。その後パイプの両端を蒸気で熱し，接着剤を付けた吊り金具をネジの要領で両端に取り付ければよい。作業の様子を図 16 で示している。図 16 の最後の写真が完成した回転部分である。

コの字磁石は，特注した純鉄製のマグネットホルダーにネオジム磁石を固定することで作成できる。図 17 にコの字磁石の製作過程を示した。マグネットホルダーの上下にネオジム磁石

[*9] 4 節で見るように，5 cm の磁石のサイズを越えて左右 1 cm 程度は磁場の影響が残っているので，それを含むような長めの乗り場にしたほうがよい。また，平均磁場を求める際に，ガウスメーターを用いて 1 cm 間隔で測定した磁場に台形公式を簡単に適用するためには，乗り場の長さは偶数センチメートルになるようにしたほうがよい。

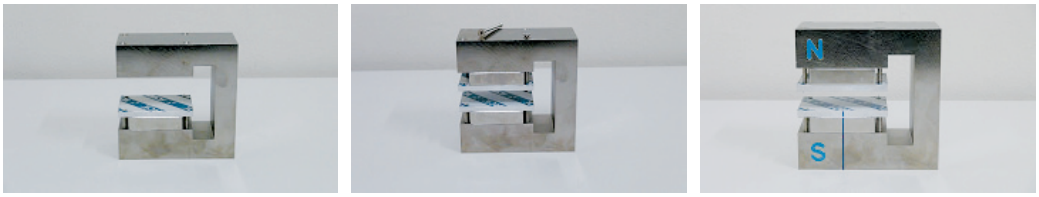

図 17.　コの字磁石の製作過程

図 18.　コの字磁石用のバッグ

2 個を N 極 S 極のペアになるように固定する。強力なネオジム磁石は鉄製のホルダーに急激に引き寄せられるので，この作業には十分な注意を要する。ホルダーに引っ付いたネオジム磁石をアルミ板で挟み込んでネジでしっかり固定することで，より安全に取り扱えるようになる。実験の際には，コの字の中央にブランコの乗り場が来るようにしなければならないので，中心の位置に目印となるように直線を引く。また，磁場がどの方向を向いているかを示すためにホルダーの上下に対応する極（N 極か S 極）を示す。実験中は，磁石を上下に動かせるように，上下昇降式の台座（ジャッキ）に乗せて使用する。ジャッキにはセロハンテープなどで定規を固定し，磁石の目印の直線と定規との交わりから移動距離を計測する。

実験装置は各装置を図 2 のように配置することによって組み上がる。ブランコ内部の導線，電源装置，電流計をリード線でつなぐ。コの字磁石はラボジャッキの上に乗せ，2 枚の磁石の中央にブランコの乗り場が来るように設置する。実験中にはブランコは左に傾くので，磁石の初期位置はジャッキ上でやや右になるように置いたほうがよい。図 7 に完成した装置を示した。電源装置のつまみを回すと電流量が大きく変わるような不安定な場合には，電球などを電気抵抗として図の装置に加えて用いればよい。

安全性について，一般的であるが非常に重要なこととして，電気とネオジム磁石の扱いへの注意が上げられる。電気については，実験者には小さな電流量から実験を始めさせ，十分に注意を促すことで事故の起こらぬように配慮すべきである。一方，ネオジム磁石もその強力さゆえに取り扱いには注意を要する。マグネットホルダーによって強力なネオジム磁石を裸の状態で扱う危険性は軽減されているものの，それでも磁石にくっつきやすいものを近づけたり，重い磁石を持ち運んだりすることによる事故の危険性がある。そのため，磁石にくっつくものを安易に近づけさせないように指導する，磁石に直接触れられないようにマグネットホルダーを目張りする，ネオジム磁石を持ち運ぶためのプラスチックケースやバッグを用意するなど，安全面への十分な配慮が必要である。図 18 はコの字磁石用のバッグの例である。

4. 実験の実践方法

ブランコ内部の導線に電流を流し，ローレンツ力で傾いたブランコの位置を測定する。2 節で説明したように，ローレンツ力の理論式（1）が正しければ，ブランコを流れる電流 i とブランコの横方向への変位 x の間には次の関係式

$$x = \frac{BlL^2}{mgr} i \tag{15}$$

が成立する。実験では，この式が成り立つかどうかを以下の手順に沿って実験・解析し，ローレンツ力の理論式（2）の正しさを検証する[*10]。

4–1　準備段階の測定

実験で検証しようとしている（15）式の右辺の比例係数はすべて測定可能な量で与えられている。m，L，r はそれぞれブランコの質量，高さ，重心の位置で，ブランコの乗り場のうち磁場 B のかかっている部分の長さが l である。重力加速度 g は，

$$g = 9.81\mathrm{m/s^2} \tag{16}$$

といった実験の行なわれる場所での代表的な値を採用する。磁場 B と磁場のかかった部分の長さ l の具体的な測定方法はステップ（2）で説明する。それ以外の量は以下の手続きに従って測定できる。

ブランコの回転部分の質量 m と高さ L を計測する。ブランコには一様に導線が通っているとして理論を組み立てているため，両端から延びる余分な導線と金具を取り除いたサンプルのブランコを用意して質量を計測する。力のモーメントの釣り合い（3）式において支点の近傍にある金具の効果は小さく無視しているので，金具は取り外しておかなければならない。ブランコの支点から乗り場までの長さがブランコの高さなので，金具の輪っかの中心から乗り場の導線の中心までの距離を巻き尺で直接計測し高さを割り出す。

ブランコの重心位置 r の計測には，理論的に（10）式から求める方法と実際に測定して決める方法との 2 種類の方法がある。理論式から求める際には，定規を用いてブランコの手を持つ部分に通る 2 本の平行な導線の中心間の距離を計測し，乗り場部分の長さ $\bar{l}$ を決定する。判明した L，$\bar{l}$ と（10）式を通して重心位置 r がわかる。一方，2 節でも説明したように，余分な導線と金具を除いたサンプルのブランコを横向きに寝かせて天秤のように左右を釣り合わせることで直接重心を測定することも可能である。

[*10] 今回は固定された磁場と同じサイズのブランコで電流の大きさだけを変えた実験を繰り返す。余裕があれば，強度の異なる磁石や長さの違うブランコを用意することで，複数パラメータでの実験も可能である。そうすることで，理論式の正しさをより多角的に示す実験結果を得ることができる。

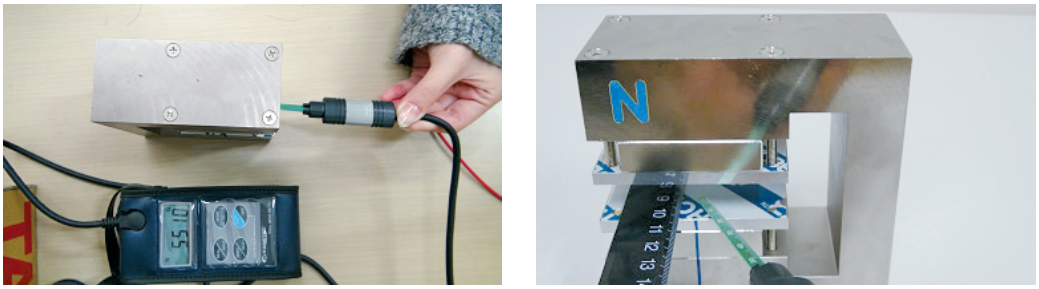

図 19．磁場強度の計測

表 1．磁場の測定例（磁石の中心を $z = 0$ とする）

位置 z［cm］	−5	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5
磁場 B［T］	0.022	0.056	0.18	0.41	0.53	0.56	0.53	0.42	0.18	0.06	0.021

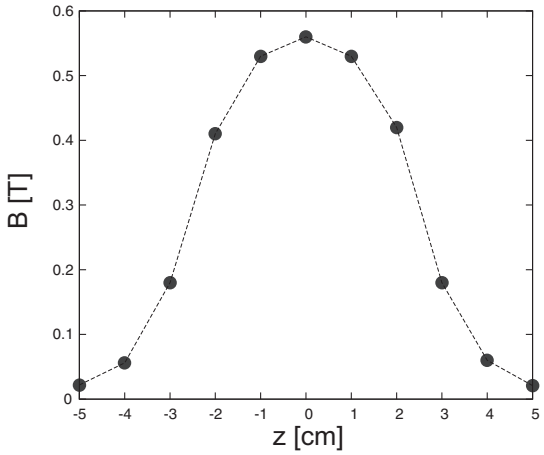

図 20．磁場の分布

4–2　磁場の測定

ネオジム磁石の強度をガウスメーターで測定し平均強度を求める。磁気回路を組んだとはいえ，磁場の強度は完全には一様でなく，位置によってばらついている。そこで磁場の強度分布を測定し，その平均値を一様磁場の代表値として採用する。なお，このばらつきがステップ (4) で行なうローレンツ力の理論式との比較における誤差の大きな要因である。

ブランコが入る部分を 1 cm 間隔に等分した場所にガウスメーターを差し込み磁場を測定する。図 19 は測定の様子を示している。このときガウスメーターの測定部は上下 2 つの磁石の中間の位置に入るように注意する。表 1 は測定の一例で，図 20 はその結果を図示したものである。これを見ると，中心 $z = 0$ から遠くなると多少磁場は弱まるものの，実験で用いた 5 cm の磁石内ではおおよそ一定の磁場が実現している。一方，磁石外に出ると磁場は急激に

図 21．リード線の固定

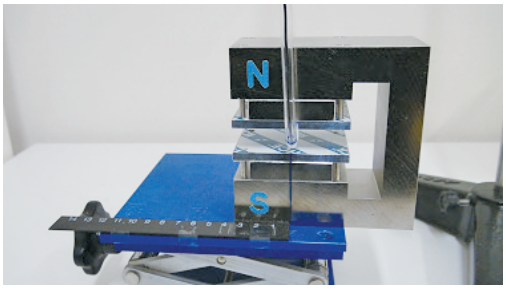

図 22．初期位置

小さくなることが見て取れる。実際にはネオジム磁石の左右 1 cm 強は磁場の影響が多少残っているので，磁場のかかっている乗り場サイズとしては $l = 8$ cm を採用しておけばよい[*11]。表 1 の結果から $l = 8$ cm の範囲（$-4\,\mathrm{cm} \le z \le 4\,\mathrm{cm}$）で台形公式を用いると，磁場の平均強度として $B = 0.36$［T］が得られる。

4–3　電流を変えてブランコの位置の測定

実験装置を図 7 のように組み立て，回路に微量の電流を流してローレンツ力を発現させる。最初に，どの向きに力が生じているかを実験者に調べさせ，フレミングの左手の法則が成り立っていることを確認させる。確認後にいったん電流をゼロに戻し，ブランコの端から出た導線を図 21 のようにテープでアクリル棒に付けておく。

測定開始前に，磁石を置く位置やジャッキを調整することで，磁石の目印と定規の原点（あるいは適当な基準の位置）が一致するようにする。また，ブランコの乗り場が磁石の目印の直上で 2 つの磁石間のちょうど中央に来るように調節する。このとき，ブランコの揺れる方向と定規の向きがあっていることを確認しておく。調整後，図 22 のように磁石の目印，定規の原点（基準位置），ブランコの乗り場が正確に一直線上に並ぶように設置できていることを確認して測定を開始する。測定を始めた後は，支柱やジャッキを前後左右に動かしてはいけない。

電流 i を変えるとブランコの傾きが変わる。その際にジャッキを上下させたりジャッキ上でコの字磁石を左右に動かすことで，再び磁石の目印位置にブランコの乗り場が静止するように調整する。このとき同時に，ブランコの乗り場は 2 つの磁石間の中央に来るようにしなければならない。そのような調整を行なったのが図 23 である。調整後ブランコが静止している状況で変位 x_i を測定する。

電流を小さなものから始めて徐々に大きくして行きながらこの操作を繰り返すと，各電流に対応する変位が記録できる。電流と変位に十分な比例関係が認められるのは，変位と L の比が 1 / 5 程度までである。その程度の変位になったら実験を終える。表 2 は測定の一例で，電

[*11] 乗り場のうち磁場のかかった部分の長さ l は一意には決まらず，コの字磁石の外にはみ出した磁場の影響をきちんと取り込むことで精度が向上する。一般に大きな l を採用すると平均磁場は小さくなるが，ローレンツ力は磁場と l の積の形で入るので，結果に本質的な違いを生じない。

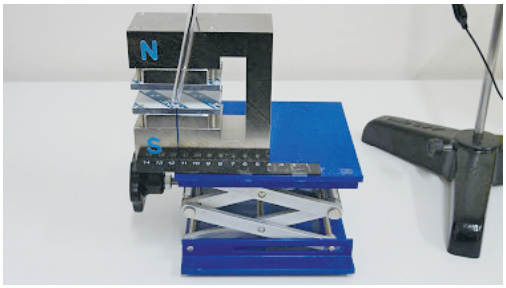

図 23.　傾いたブランコ

表 2.　電流と変位の測定例

電流 i［A］	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
位置 x［cm］	1.1	2.3	3.4	4.5	5.7	6.9	8.1	9.4	10.5	11.6
電流 i［A］	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
位置 x［cm］	12.7	13.8	14.8	15.9	17.0	18.1	19.0	19.9	20.6	21.4

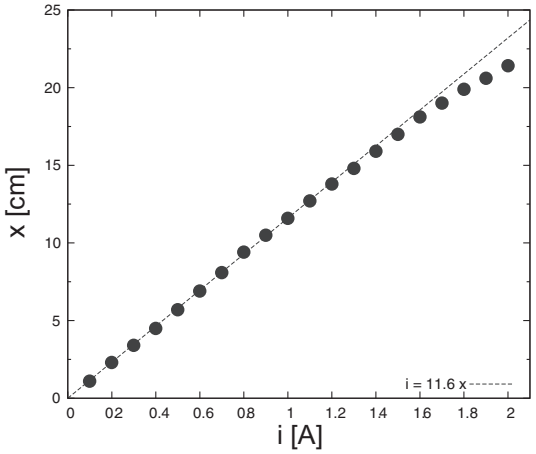

図 24.　電流と変位

流を 0.1A から 2A まで変え，変位の測定は 0.1A 刻みで繰り返している。実際には，変位と L の比が 1 / 5 程度となる 1A くらいまでが線形な領域であるが，例では参考のために 2A まで測定した。図 24 は測定結果を図にしたものである。変位が 20 cm 程度となる 2A 近辺では電流と変位の関係は明らかに線形ではなくなっている。

4–4　ローレンツ力の理論式との比較

ローレンツ力の理論式が正しければ測定された変位は電流に比例する。ステップ（3）で得られた電流と変位を図示し，変位と電流が比例関係にあることを確認する。さらに，そのグラ

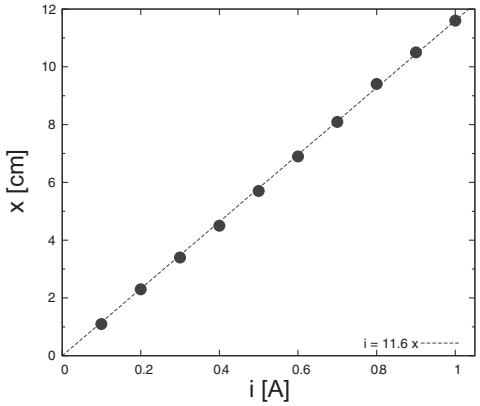

図 25．電流と変位の比例関係

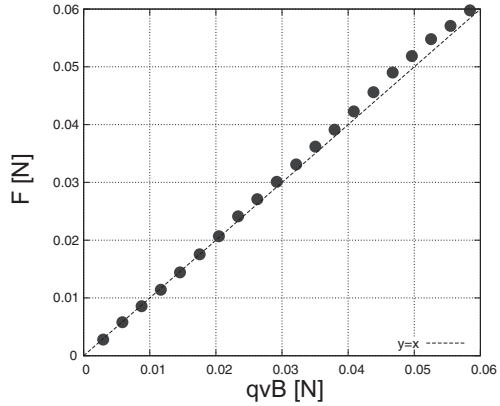

図 26．ローレンツ力の測定値と理論値

フに原点を通る直線を引き，直線の傾きを求める。傾きの式

$$\frac{BlL^2}{mgr} = (\text{傾きの測定結果}) \tag{17}$$

の左辺に現われる m，L，r，l に計測値を用いると，傾きの測定結果から B が得られる。これはローレンツ力の理論が正しいと仮定したときに得られる値である。その値とステップ（2）においてガウスメーターで直接計測した平均磁場の値との一致を調べることで，ローレンツ力の理論式である（7）すなわち（2）が検証できる。

測定例の場合に電流と変位の線形関係を調べるには 1A までで十分である。1A までの結果を図示したのが図 25 である。図ははっきりと変位と電流の比例関係を示している。測定に使った装置は，$m = 23.4$ g，$L = 49.5$ cm，$\grave{l} = 9.3$ cm，$l = 8$ cm である。（10）式を用いると重心位置 $r = 26.9$ cm が得られる。グラフを通る直線を引くと $i = 11.6\,x$ となった。その傾きから（17）を用いて磁場の強さを求めると $B = 0.37$［T］となる。ガウスメーターを使ってステップ（2）で求めていた平均磁場が $B = 0.36$［T］であったので，数パーセント程度の系統誤算の範囲内で理論値と測定値は一致している。これにより，ローレンツ力の理論が正しいことが検証できた。

実験結果の他の見せ方として，電流と変位の線形関係を使わない解析の見せ方もある。図 26 は（14）式を用いて測定例の全領域で近似なしでローレンツ力を求めた結果である。x 軸には，ガウスメーターで計測した平均磁場の値から liB の積を通して求まるローレンツ力の理論値を書いている。一方，y 軸はローレンツ力の観測値である。これは，力の釣り合い条件を使って求まった（14）式に，測定された変位を代入することで得られる。図を見ると，電流と変位の関係が非線形だった領域も含めて，おおよそローレンツ力の理論値と観測値は $y = x$ の直線に乗っていることがわかる。このような結果の見せ方をするのも印象的であろう。

5. まとめと考察

自然科学の探求は，その知見の幅広い応用とともに，我々の生活の質を劇的に向上させてきた。しかし，応用が高度化・複雑化する中で，自然科学の背後に宿る単純で美しい基本法則の数々は顧みられることもなく，人々の視野からブラックボックスとして遠ざけられている。これが市民の科学への理解を遠ざけ，科学や技術に関する社会的な問題が生じた際に，その論点を理解できない多くの市民を生み出すという新たな問題を生じさせているともいえよう。この現代社会の新しい問題に対応するには，科学の専門教育を受けていない人々でもその本質を理解できるような科学教育の方法論の確立が重要となる。本稿では，そのような教育として，阪口と松浦が提案したローレンツ力の学生実験の具体的な実践方法について議論した。彼らは，素朴な磁石や身近にあるブランコといった舞台装置を用意することで，定量性を十分に確保しながら直感的なレベルで物理現象を理解させようとしている。本論考の中で，阪口 - 松浦のオリジナルの実験装置や説明方法を改良しつつ，各装置や材料としてどのようなものを購入すればよいか，どのように実験装置全体を組み立てればよいかを写真や図を用いて詳しく解説した。実験の具体的な手続きについてもステップに分けて詳しく説明した。

オリジナルの実験装置をいくつかの点で改良したことで，ローレンツ力の定性的な議論に用いられてきた電気ブランコの実験が定量的なレベルで行なえるようになった。元の阪口 - 松浦のアイデアからの改良案として，導線をアクリルパイプに通すことで装置の安定性が増すとともに，支点に吊り金具を用いることで摩擦のない回転を生み出せるブランコを作成した。磁石についても，2 個の磁石をマグネットホルダーに固定することで磁石を裸のまま扱う危険性を軽減しつつ，ほぼ一様な磁場を生み出せるようになった。これらの改良によって，実験精度と装置自体の耐久性が同時に向上している。また，改良点は装置だけにとどまらず，理論を解説する際や実験の手続きを説明する際に，余分な数学を用いるのを避けるいくつかの工夫も提案した。これらの改良点から，実験者は体感を伴ってマクロに発現したローレンツ力の現象と対峙できるようになる。そのうえ，理論面の余計な複雑さに惑わされることなく定量的なレベルで現象を理解しその本質にダイレクトにアプローチできるようになっている。電源装置，ガウスメーター，電流計は装置としてそのまま用いたが，今後，磁場や電圧・電流の理解を助けるさらなる解説や手法の改良を行なえば，より一層の教育効果も見込めるだろう。

本論考での取り組みによって，ローレンツ力の理解を阻害してきたブラックボックスの一部が取り除かれ，単純で美しい電磁気学本来の姿を実体験を通して理解できる方向に一歩近づいたと期待している。科学を本質的なレベルから理解すべきということについて，今から 150 年前に日本に物理学を紹介した福澤諭吉は『窮理図解』[8] にこのように書いている。「苟（かりそめ）にも人としてこの世に生れなば，よく心を用いて，何事にも大小軽重に拘（かか）わらず，先（ま）ずその物を知りその理を窮め，一事一物も捨置くべからず」。それより 150 年後の現代社会はより科学技術のうえに依って立つようになった。物事を事の大小軽重で分けず，その

本質を知って理解を深め，一つの事も一つの物もないがしろにせずに理解に努めようとする学問的な立場をススメていくことが，現代社会を成り立たせるために重要であろうと筆者らは信じている。本稿で扱ったようなブラックボックスを取り去ろうとするアプローチが広く他の科学分野でも採用され，多くの人々が科学を本質的なレベルから理解できるようになることを願いたい。

謝辞

本研究は，茨城大学教授阪口真氏や慶應義塾大学准教授三井隆久氏なしではありえないものであった。彼らからの助言や助力にに心より感謝申し上げたい。また，慶應義塾大学日吉物理学教室とニールス・ボーア研究所のスタッフの手厚い支援にも感謝する。

参考文献

1) 「ローレンツ力に関する学生実験について」阪口真，松浦壮，慶應義塾大学紀要 No. 51，9–21（2012）.
2) 科学技術リテラシーに関する課題研究報告書，平成 27 年 2 月，独立行政法人科学技術振興機構.
3) 『電磁気学の考え方』（岩波書店物理の考え方 2），砂川重信，ISBN 4–00–007892–5；『電磁気学』（講談社基礎物理学シリーズ 4），横山順一，ISBN 978–4–06–157204–1；『よくわかる電磁気学』（東京図書岩波出版），前野昌弘，ISBN 978–4–489–02071–1.
4) 『新物理学実験』（学術図書出版社），物理学実験指導書編集委員会，ISBN 978–4873611006；『基礎物理学実験〈2011 秋―2012 春〉』（学術図書出版社），東京大学教養学部基礎物理学実験テキスト編集委員会，ISBN 978–4780602654.
5) 『楽しむ物理実験』（朝倉書店），東京理科大学サイエンス夢工房，ISBN-13：978–4254130904；『入門物理学実験　―体でつかむ物作りの基礎』（コロナ社），伊藤敏，磯貝正弘，伊藤豊明，村守清，坂口鋼一，ISBN 978–4339066036.
6) 『実験でわかる物理学（中学科学完全実践教科書）』（誠文堂新光社），福地孝宏，ISBN 9784416207062；『見て体験して物理がわかる実験ガイド　―演示実験・生徒実験集―』（学術図書出版社），東京大学教養学部附属教養教育開発機構・兵頭俊夫，ISBN 978–4780600711.
7) 「平成 25 年度調整予算事業成果報告書（慶應義塾大学）」，三井隆久，松浦壮.
8) 「窮理図解」福澤諭吉.