

# 小学校理科第三学年「ゴムの力の働き」で用いる 省スペース対応型教材の提案

大越 陽菜江\*・重松 宏武\*\*

A Proposal for Space-Saving Teaching Materials for use in a Third Grade of  
Elementary School Science Class Called “How the Force of Rubber Works”

OGOSHI Hinae\*, SHIGEMATSU Hirotake\*\*

(Received September 30, 2024)

小学校理科第三学年で行われる単元「風とゴムの力の働き」では、風とゴム両方に対応する比較的大きな教材を用いて体育館等の広い床上での実験を行う。我々は「ゴムの力の働き」に関する学習に注目し、空間的に広い体育館を必要とせず、理科の授業で使用している理科室においてグループまたは個人単位での使用が可能な省スペース対応型の小型汎用性教材の開発を試みた。この新たに製作した教材の構成並びに特性の解説、さらに実測と高校物理力学分野で学習する数式展開を活用した定量的性能評価の結果について報告を行う。

## はじめに

小学校第三学年理科で行われる単元「風とゴムの力の働き」は、「エネルギー」についての基本的な概念などを柱とした内容のうちの「エネルギーの捉え方」に関わる単元である。単元「風とゴムの力の働き」では、第一、第二学年次に行った生活科の学習との関連を考慮しながら、風を受けたときやゴムの力を働かせた時の手ごたえなどの体感を基にした活動を重視している。また、風の強さやゴムの伸びなどと物の動きとの関係を表に整理するなど、風とゴムの力の働きについて具体的に考える活動の充実を図る必要がある。これらのために、車型の市販教材キットが教育現場では用いられることが多い。従来用いられているものは風とゴムの力両方に対応しており、多様な目的に対応するために本体の大きさが大きくかつ実験時の風またはゴムの力で移動する対象物の移動距離が長いことから、使用する際は体育館等の広い施設を必要とする。さらに、対象物に働くゴムの力が一点に作用する構成となっており、まっすぐ同じ力を与えることは児童には難しく、実験の再現性並びに定量性に課題がある。

そこで我々は、先に述べた単元「風とゴムの力の働き」の中でも「ゴムの力の働き」に関する学習に注目し、空間的に広い体育館を必要とせず、日頃、理科の授業で使

用している理科室にてグループまたは個人単位での使用が可能な省スペース対応型の汎用性教材の開発を試みた。特に、ゴムの力が再現性良く均等に対象物に働くよう心掛けた。本論文においては、新たに製作した教材の提案並びにこの教材の定量的性能評価について報告する。

具体的には、第1章において、各検定教科書に掲載されている「ゴムの力の働き」に関する情報及び課題の整理を行い、第2章において、この課題を解決するために新たに製作した教材の概要説明を行う。続く第3章では、教材の特性を明らかにするために行ったゴムの力を用いて移動する木片と実験台との動摩擦係数の算出について解説を行う。そして、第4章において教材の性能評価の結果を示し、最終第5章においてまとめ、考察を行う。なお、ばねを用いた実験・評価は多く公開されており、こちらも参照頂きたい（下村他、1969;北原、2013;勝田、2018;岸本他、2018）。

## 1. 各検定教科書に掲載されている「ゴムの力の働き」に関する情報

単元「ゴムの力の働き」において、実施されている実験条件を調査・把握するため、現行の検定教科書（教育出版（養老他、2019検定）、信州教育出版（松村他、2019検定）、学校図書（霜田他、2019検定）、啓林館（石

\*海田町立海田南小学校 \*\*山口大学教育学部, 〒753-8513 山口市吉田1677-1, shigema@yamaguchi-u.ac.jp

浦 他、2019 検定)、大日本図書(有馬 他、2019 検定) 東京書籍(毛利 他、2019 検定)に記載されている教材キットのゴムを引っ張る長さに関する情報を調査した。その結果を表 1 に示す。ここで、2 種類の長さを採用したものを○、3 種類の長さを採用したものを●とそれぞれ示した。

表 1. 検定教科書に記載されている教材キットの実験例に関する情報(ゴムを引く長さ)

長さ	5cm	10cm	15cm	20cm
出版社				
教育出版	○	○		
信州教育	○		○	
学校図書	●	●	●	
啓林館	●	●	●	
大日本図書		○	○	
東京書籍		●	●	●

なお、各社が採用したゴムの特性やゴムの力で移動する物体は形状の質量も同じとは限らないことから実際に移動する距離を単純には比較することはできない。しかし、傾向を考えると、以下のことが言える。

- ・3社(教育出版、信州教育、大日本図書)は2種類の長さを採用しており、引くばねの長さと移動距離の大小関係の比較に重点をおいた実験となっている。
- ・他の3社(学校図書、啓林館、東京書籍)は3種類の長さを採用し、引くばねの長さと移動距離の関係を具体的に調べる実験となっている。
- ・5, 10 cm の場合は物体の移動距離自体はそれほど大きくないと予想するが、それでも数十人の児童が一斉に実験を行うためには体育館等の広い施設が必要である。15, 20 cm の場合はなおさら必要である。また、児童が歩いて移動した物体を回収する行為にも時間を要する。

もちろん、引くばねの長さの条件をより多く設定した方が児童の理解は増すことが期待される。しかし、上記で述べた通り、時間と空間が大きな課題となる。さらに、中学・高等学校理科における将来の学習を念頭に置くと、ゴムを引いた長さと移動距離の関係(比例関係にはならない)を正しく理解することは大切と考える。以上のことから、体育館のような広い空間を必要せず、理科室の実験台の上で実験が可能かつ5段階程度の設定を前提とした教材の製作を試みた。なお、本章では長さの単位として小学校教科書に準じてcmを用いたが、第2章以下は国際単位系(SI)となる基本単位 m(メートル)と接頭語 m(ミリ、 $10^3$ )により構成される mmを採用する。

## 2. 新たに作製した教材の概要

図 1 及び 2 に「ゴムの力の働き」を学習するために新たに提案する教材『ちぐまや砲台』の実物の写真と外観図をそれぞれ示す。ちなみに、この名称は山口県下関市に設置されている砲台をモチーフにし、頭に山口県民が認知している民放番組の名称(やまぐちを逆さに読む)をオマージュにして命名した。薄い平板の上に2つの長方形の枠板 A, B が固定されており、その間を自由に平行移動できる同型の押し板 C により構成されている。板 A, B, C は一輪のゴムでつながれており、このゴムの力により押し板 C がピンボールのプランジャー(発射台)の役割を担う。そして飛ぶ出す木片 D は床との密着性、移動の安定性や移動距離の抑制のために約 22 g(正しくは 21.81 g)の鉛板を上部に設置(固定)した。

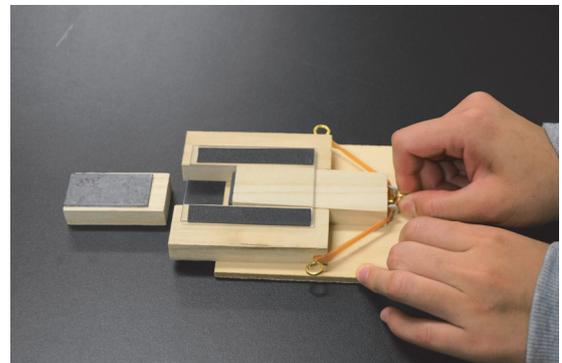


図 1. 教材『ちぐまや砲台』の実物写真

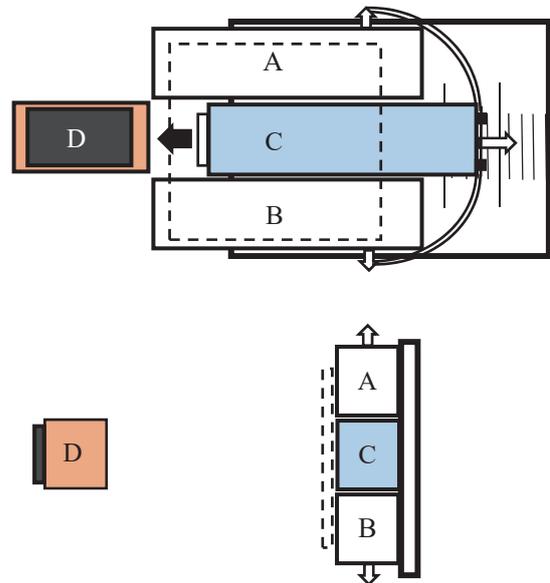


図 2. 教材『ちぐまや砲台』の外観図。(上図) 本体上方からの投影図、(下図) 側面の投影図。ここで、破線は押し板 C の飛び出し防止のために設置したアクリル板、木片 D 上の黒く塗られた長方形は鉛板、押し板 C の左手に設置したものはクッションテープをそれぞれ表す。

その他、特徴等の情報を以下に箇条書きする。

- 再現性良く木片 D を平行移動させるためには、押し板 C の平行性を保った移動が求められる。そのため両脇を枠板 A,B で挟みこむ形式を採用した。
- 枠板 A,B それぞれ側面にヒートン、押し板 C に絶縁ステップを 2 か所固定し、図 2 に示すように A,B,C の板を、ゴムを用いてつなげた。板 A,B,C が平行な位置でゴムの自然長より若干長くなる状態になるようにヒートンの位置を調整した。
- 木片 D は図 2 に示すように枠板 A,B それぞれの短辺と木片 D の短辺の位置が一致する位置に置く。
- 押し板 C が木片 D に加える力そのものを求めることはできないが、ゴムの力の定性的指標として薄い平板状の力のかかっていない状態 (板 A,B,C が平行な状態) を基準に押し板 C の始動時の移動距離を採用した (図 2)。ちなみに移動距離 (メモリ) は、10 mm ステップで最大 50mm を採用した。
- 測定は小学校理科室にある汎用性実験台上で行うことを想定していることから、同等品のヤマト科学株式会社製サイド実験台 PFA-277KZ 上で行った。実験の様子を図 3 に示す。甲板 (上面) はケミサーフ (黒色) を用いており、この甲板と木片 D の底面との動摩擦力が木片 D の移動距離に大きく影響する。



図 3. 実験の様子

なお、製作にあたり、材料は 100 円ショップやホームセンターなど安価かつ入手しやすいものを採用し、さらにシンプルな構造になるように努め、メンテナンスも容易に済むようにした。使用した主な材料を表 2 に示す。

表 2 教材作製に使用した主な材料

材 料	購入先、規格等
底板	手持ちの端材を活用 ((株) 大創産業、ダイソー、工作材料 板材 (B-9) などでも可)
枠板 A,B 及び押し板 C	(株) 大創産業、ダイソー、工作材料 直方体 (P-10)、(15×30×

	90mm)
木片 D	(株) 大創産業、ダイソー、工作材料 直方体 (P-9)、(15×30×90mm)
クッションテープ	(株) 大創産業、ダイソー、No. 63、(15×30×60mm)
ゴム (輪ゴム)	(株) 共和、オーバンド #170 (直径 67mm)
ヒートン	例えば、トラスコ中山 (株)、呼び寸法 #2、品番 THT-B2
絶縁ステップ	例えば、旭ノ本金属工業所、型番 HST-12-ECO
鉛板	手持ちの端材 (約 21g、15×24×50mm)
アクリル板	手持ちの端材 (2×60×75mm)

教材『ちぐまや砲台』において、ゴムの力によって押し出された木片 D は床となる実験台の上面との間に動摩擦力が働いていなければ、木片 D は初速度を維持した等速直線運動を行う。しかし、実際には木片 D と実験台の上面の間に動摩擦力が働いており、木片 D は加速度の大きさが負の等加速度運動を行い、最終的には静止する。これは、ゴムによって押し出す力が変わっても、木片 D と実験台の間に働く動摩擦力は不変 (一定) であるため、動摩擦係数の算出がこの研究の評価にあたる重要なキーワードとなる。続く第 3 章において、この算出方法及び得られた値の考察を詳細に述べる。

### 3. 実験台上を移動する木片 D の動摩擦係数の算出

固定されている粗い床面上を物体が移動した場合、物体には動摩擦係数で特徴付けられる動摩擦力が働く。この動摩擦係数は物体と床それぞれの組み合わせによって決まる固定値をとり、算出する方法として引っ張り法と傾斜法の 2 種類がある (冠野 他、2015; 今西 他、2015)。これらの方法に従い、木片 D とヤマト科学株式会社製サイド実験台 PFA-277KZ の上面間の動摩擦係数の算出を行った。得られた結果を前者は 3-1 節、後者は 3-2 並び 3-3 節にそれぞれ述べる。

#### 3-1 引っ張り法による動摩擦係数の算出

引っ張り法とは、2 つの物体を、質量の無いひもで結び付け、滑車を用いて、一方の物体の重力を利用し、もう一方の物体を移動させることにより、動摩擦係数を算出する方法である (図 4, 5)。ここで、物体の質量を  $M, m$ 、重力加速度を  $g$ 、動摩擦力を  $F$ 、糸の張力を  $T_1$ 、床に置かれた物体に働く垂直抗力を  $N_1 (=Mg)$ 、物体の加速度を  $a_1$  とそれぞれ定義する。質量  $M$  および  $m$  の物体はともに同じ加速度  $a_1$  で等加速度運動を行っており、2 つの物体を 1 体として考えた場合の運動方程式は

$$(M+m)a_1 = mg - \mu_1' Mg \quad (1)$$

と表される。また、加速度  $a_1$  は移動中のある 2 点  $x_1, x_2$  間の距離  $S_1 (=x_2 - x_1)$  とそれぞれの地点における速度  $v_1, v_2$  の関係から

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a_1 S_1 \quad (2)$$

と表される。ゆえに動摩擦係数  $\mu_1'$  は以下のように導かれる。

$$\mu_1' = \frac{m}{M} - \frac{(m+M)(v_2^2 - v_1^2)}{2S_1 Mg} \quad (3)$$

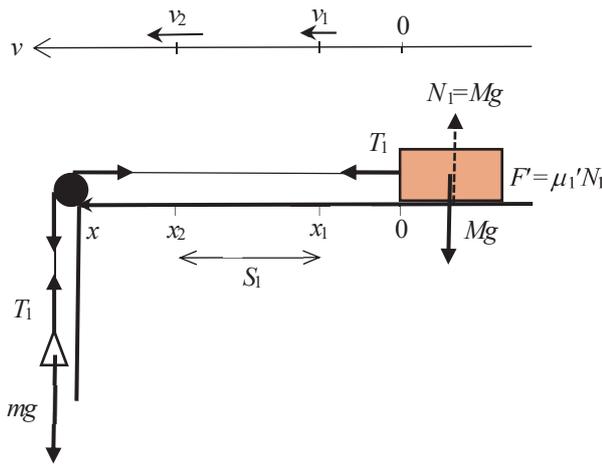


図 4. 引っ張り法の実験概略図



図 5. 引っ張り法による実験の様子

(3)式において、平面に置かれた物体の質量  $M$  は 21.81 g のおもりをつけた木片 (縦 15mm、横 60mm、奥行き 30mm、質量 7.45g) の総質量として 29.26g を採用し、一方、ぶら下げる物体の質量  $m$  は 10 g, 20 g, 30 g の 3 種類のおもりを採用し、速度の大きさによる影響を見ることとした。また、他の条件として重力加速度  $g$  は山口市における値  $9.796585 \text{ m/s}^2$  を、質量  $M$  の物体が静止させて位置を基準にして 200 mm と 400 mm 移動した地点  $x_1, x_2$  の速度をそれぞれ  $v_1, v_2$  として実験を行った (測定間隔  $S_1$  は 200 mm)。ケ

ニス社製の速度測定器 KAN の中心の位置が  $x_1$  および  $x_2$  の位置にくるように設置し、前後  $\pm 20 \text{ mm}$  間の平均値をそれぞれ  $x_1$  および  $x_2$  の瞬時の速度と定義 (設定) した (図 4)。測定は各おもりごとに 20 回行い、得られた回数ごとの結果を図 6 に、おもりの質量  $m$  の値ごとによる変化を図 7 にそれぞれ示す。

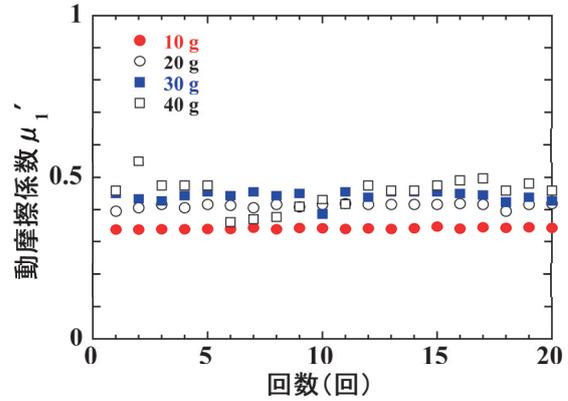


図 6. 質量が異なるおもりを用いた場合の動摩擦係数  $\mu_1'$  の回数依存

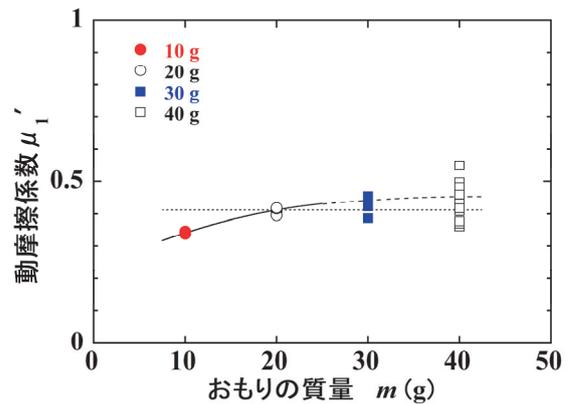


図 7. おもりの質量ごとの動摩擦係数値の散らばり。実践と破線は近似曲線、点線は平均値 0.41 を表す。

図 6 より、動摩擦係数  $\mu_1'$  は物体を引っ張るおもりの質量  $m$  の値ごとに再現性の良い値が求められたが、これら値は一定値をとらず、おもりの質量依存性が確認された (図 7)。具体的には、おもりの質量が軽い 10~20 g においては、おもりの増加による動摩擦係数  $\mu_1'$  の若干の増加、さらに 30 g を超えるとデータのばらつきが観測された。前者においては全測定点 80 点の平均値 0.41 からは外れるが、再現性の良いおもり 10~20 g における値は値そのものの信頼度は高いと予想する。そして、このおもりの質量依存性は滑車の摩擦 (抵抗) や慣性モーメントが影響していると考えられる。一方、おもりの質量が 30 g を超える領域においては、おもりの質量の増加に伴う引っ張られる物体の加速度及び速度の増加による床面との接触の度

合いに変化(きちんと接していない)が生じ、その影響が値のばらつきに影響したと考えられる。なお、滑車の慣性モーメントを考慮した(3)式に代わる式算出は可能ではあるが、それは補正項を増やすだけでなり、複雑さが増すだけである。そのため、滑車やおもりを用いることなく、よりシンプルな構成が期待される傾斜法を検討することとした。

### 3-2 傾斜法による動摩擦係数の算出1

傾斜法とは、斜面上に物体を置き、物体に働く重力の斜面方向に働く力を利用し、物体を動かすことで動摩擦係数の測定を行う実験方法である(図8,9)。角度 $\theta$ の斜面を移動する質量 $M$ の物体は斜面に沿って加速度 $a_2$ の等加速度運動を行っており、斜面方向の運動方程式は

$$mg(\sin\theta - \mu'_2 \cos\theta) = ma_2 \quad (4)$$

と表される。また、引っ張り法と同様に斜面上の任意の2点 $x_3, x_4$ における速度を $v_3, v_4$ とおくと(2), (4)式より、動摩擦係数 $\mu'_2$ は以下の式で表される。ここで $S_2$ は2点間の距離( $=x_4 - x_3$ )である。

$$\mu'_2 = \tan\theta - \frac{v_4^2 - v_3^2}{2S_2 g \cos\theta} \quad (5)$$

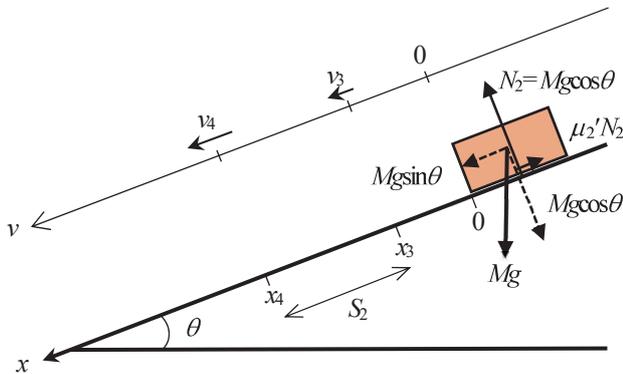


図8. 傾斜法の実験概略図



図9. 傾斜法による実験の様子

なお、(5)式で示した速度 $v_3, v_4$ は瞬時の値であり、動摩擦係数の真値を $\mu$ とおくと、以下の式で与えられる。

$$v_3 = \sqrt{2x_3 g (\sin\theta - \mu' \cos\theta)} \quad (6)$$

$$v_4 = \sqrt{2x_4 g (\sin\theta - \mu' \cos\theta)} \quad (7)$$

しかしながら、用いた速度測定器は2間隔の平均、具体的には $x_3 \pm 20 \text{ mm}$ または $x_4 \pm 20 \text{ mm}$ の40 mm間の平均速度を示している(図10)。ここで速度測定器の測定幅 $2b=40 \text{ mm}$ と置くとき実際に表示される速度 $\bar{v}_3, \bar{v}_4$ とこれらの値を用いて導かれる動摩擦係数 $\mu'_2$ (計算値)はそれぞれ以下の式で表される。

$$\bar{v}_3 = \sqrt{\frac{g(\sin\theta - \mu' \cos\theta)}{2} (\sqrt{x_3 + b} + \sqrt{x_3 - b})} \quad (8)$$

$$\bar{v}_4 = \sqrt{\frac{g(\sin\theta - \mu' \cos\theta)}{2} (\sqrt{x_4 + b} + \sqrt{x_4 - b})} \quad (9)$$

$$\mu'_2 = \tan\theta - \frac{\bar{v}_4^2 - \bar{v}_3^2}{2S_2 g \cos\theta} \quad (\neq \mu') \quad (10)$$

なお、ここで注目すべきは、 $\mu'_2$ は真値 $\mu$ とは異なるということである。そして、(5)式で表される $\mu'_2$ が真値 $\mu$ と同等である(5)式。

$$\mu'_2 = \tan\theta - \frac{v_4^2 - v_3^2}{2S_2 g \cos\theta} \quad (= \mu') \quad (5')$$

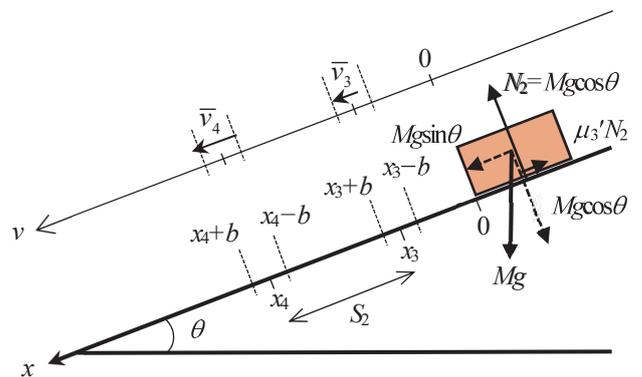


図10. 傾斜法の実験概略図(速度測定器2台使用)

図10及び(8)~(10)式の考え方を採用し、傾斜法による動摩擦係数 $\mu'_2$ の算出を試みる。ここで速度測定器の位置の条件は引っ張り法と同じ $x_3=200 \text{ mm}, x_4=400 \text{ mm}$ を用い、傾斜の角度(机の傾き)は25.0度, 30.2度, 32.5度, 35.3度,

40.6度を採用し、それぞれ20回測定を行った。ちなみに、角度の値はフリーのアプリケーションソフトウェア(計測アプリ-水準器、傾斜計、分度器:JRSoftWorX)を用いて求めた。

2地点 $x_3, x_4$ のそれぞれの平均速度の測定値を(10)式に代入することにより、動摩擦係数 $\mu'_3$ を算出した。得られた結果を図11,12に示す。数値の多少のばらつきがあるものの、引っ張り法に比べるとその差は小さく、引っ張り法(図7)で観測された傾斜の角度依存性も観測されず、一定の値を持つと言ってよい結果を得た。得られた動摩擦係数 $\mu'_3$ は $0.34 \pm 0.06$ である。

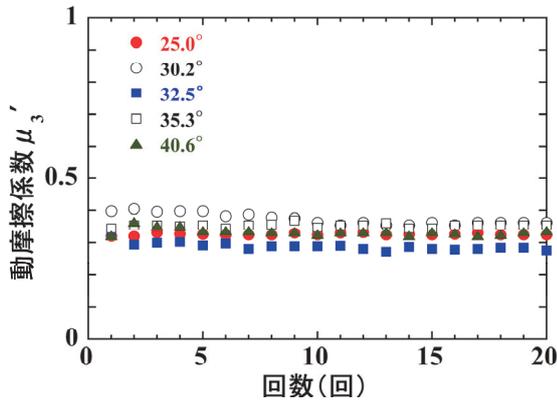


図11. 異なる角度における動摩擦係数 $\mu'_3$ の回数依存

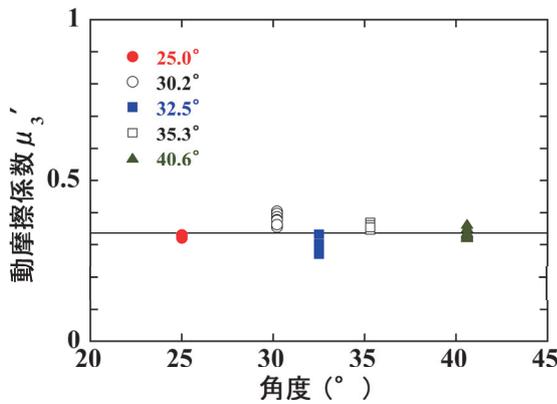


図12. 傾斜の角度ごとの動摩擦係数値の散らばり  
実線は平均値0.34を表す。

### 3-3 傾斜法による動摩擦係数の算出2

「傾斜法による動摩擦係数の算出1」では、速度計測器による(10)式に示す関係式に2地点 $x_3, x_4$ の平均速度の実験値を代入することにより、動摩擦係数 $\mu'_4$ を算出した。この値は $\mu'_2 = \mu'$ となる(5)式の値より小さい値を示している( $\mu'_3 < \mu'_4$ )。そのため、より正確な動摩擦係数を求めるために、速度測定器の改良を行うことを試みた。具体的には1台についている2個のセンサーを独立させ、図13に示すように個別に $x_5$ と $x_6$ の位置に置き、それぞれの位

置と通過する時刻 $t_5, t_6$ から、 $x_5$ と $x_6$ 間の平均速度 $\bar{v}_5$

$$\bar{v}_5 = \frac{x_6 - x_5}{t_6 - t_5} \quad (11)$$

を測定器により計測を行い、その値を用いて動摩擦係数

$$\mu'_4 = \tan \theta - \frac{2\bar{v}_5^2}{(\sqrt{x_5} + \sqrt{x_6})^2 g \cos \theta} \quad (= \mu'_2 = \mu') \quad (12)$$

を算出した(図14)。なお、 $x_5 = 200$  mmで固定し、 $x_6$ を移動させながら距離 $x_6 - x_5$ が40, 200, 300 mmとなる位置での測定を行った。

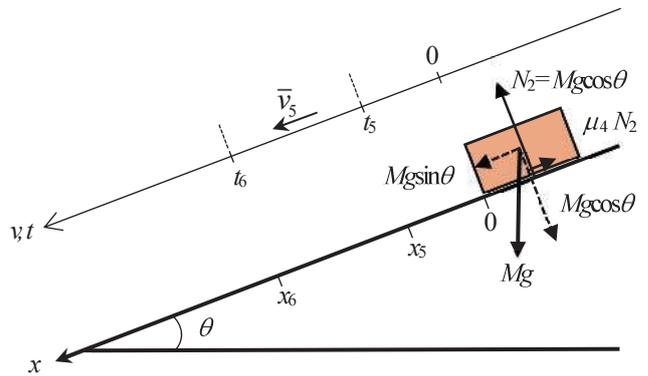


図13. 傾斜法の実験概略図(改良版速度測定器1台)

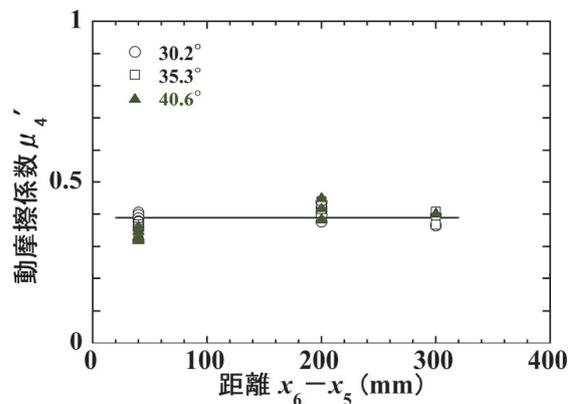


図14. 距離を変えた場合の動摩擦係数値の散らばり。  
実線は平均値0.39を表す。

図14から測定点の多少のばらつきがあるが、距離が大きくなると値の精度が上がり、同一距離における測定値のばらつきが小さくなっていることが読みとれる。結果として距離に依存しない動摩擦係数が平均値として $\mu'_4 = 0.39 \pm 0.06$ と求められた。(5)式と(10)式で表されるそれぞれの動摩擦係数 $\mu'_3$ と $\mu'_4$ の差は今回用いた条件( $x_3, x_4, b$ など)ではそれほど差は期待されないはずではあったが、実測として、 $\mu'_4$ は $\mu'_3 = 0.34$ に比べると11%程度大きい値を得た。なお、もともと個々の測定にばらつきがあること、さらにシンプルな構成なことより、測定環境による誤差は少

ないと考え、この $\mu'$ (=0.39)を木片と実験台の上面の間の動摩擦係数として採用することとした。

#### 4. 教材『ちぐまや砲台』を用いた定量的評価

第3章に示した通り、『ちぐまや砲台』の木片D(図1, 2)と実験台PFA-277KZの甲板であるケミサーフとの動摩擦係数 $\mu'$ (=0.39)が求められた。本章では『ちぐまや砲台』における定量的に評価を行うために、始めに41節において、もう1つ重要な物理量であるゴムのばね係数を実測から算出を行う。続く42節では『ちぐまや砲台』で起こっている物理現象を数式とゴムの引いた長さに対する木片Dの初速度、移動距離の実測値を用いて教材の評価を定量的に行う。さらに43節では3台の『ちぐまや砲台』を用いて個体差の有無の検証を行った結果を示す。

##### 4-1 ゴムのばね係数の算出

図15,16に示すように『ちぐまや砲台』のゴムを10mmごとに $x$ [mm]引いた時にゴムにかかる力 $F$ [N]を求め、傾きからゴムのばね係数 $k(=F/N)$ の算出を試みた。フックの法則に従う原点を通る直線で表され、最小二乗法による近似直線により、ばね定数 $k$ は $0.235\text{ N/mm} = 235\text{ N/m}$ と導かれた。



図15. 距離を変えた場合の動摩擦係数値の散らばり  
実線は平均値0.39を表す。

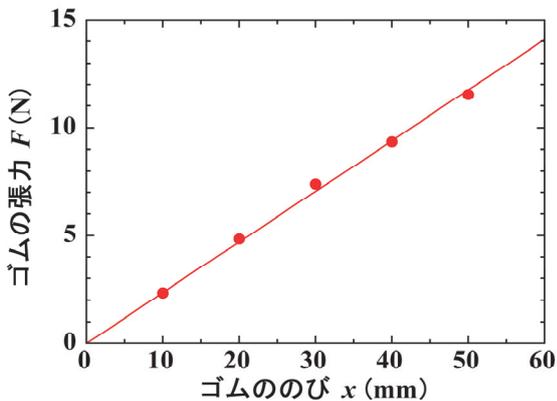


図16. ゴムののびと張力の関係

##### 4-2 数式を活用した物理現象の関係

始めに、『ちぐまや砲台』で起こっている物理現象をエネルギー保存、衝突運動、摩擦のある床上の運動の観点から整理を行う。図17(a)~(e)に物理現象のモデルを示し、続いて(a)~(e)各小図の解説を行う。なお、ゴムをばねに置き換え、押し板Cと木片Dのみを記載することとした。

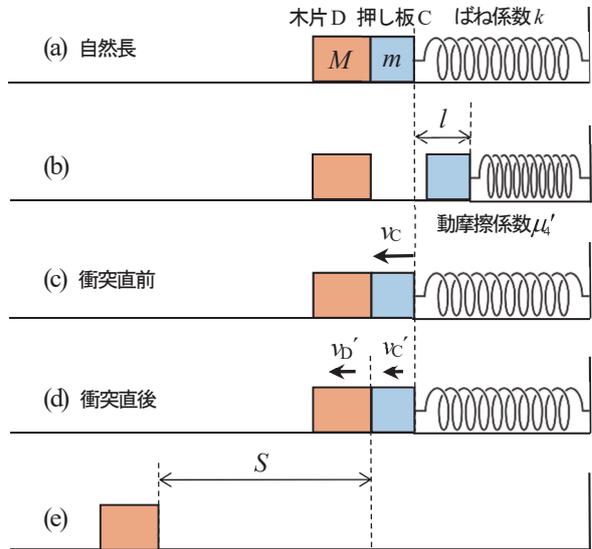


図17. 『ちぐまや砲台』における物理現象を簡易的に示したモデル

1. ばね係数 $k(=235\text{ N/m})$ のゴムに結びつけられた質量 $m(=実測\ 11.17 \times 10^{-3}\text{ kg})$ の木片Cが自然長の位置に置かれ、木片Dが押し板Cと接する位置に置かれる。板C, D共に静止している(図17(a))。
2. 押し板Cを長さ $l$ だけ引いて静止させた。この時のゴムの弾性エネルギーは $kl^2/2$ と表される(図17(b))。
3. 押し板Cが距離 $l$ だけ移動し自然長に戻る過程において動摩擦力により、エネルギーをロスしつつも質量 $M(=実測\ 29.26 \times 10^{-3}\text{ kg})$ の木片Dに衝突する直前の速度 $v_c$ となる。『ちぐまや砲台』の底板のサイズが小さいことから底板と押し板Cとの間の動摩擦係数の算出が困難なことより、第2章で求められた実験台と押し板C間の値と同等と仮定し、 $\mu'(=0.39)$ を採用することとする。(図17(c), (13)式)
4. 衝突後は運動量保存則に従い、押し板Cの速度は $v'_C$ 、木片Dの速度は $v'_D$ とそれぞれなったとする(図17においては向かって左手を正とする)。また、衝突前後の速度の関係をはね返り係数 $e$ を用いて表す。ここで $e=1$ の時は弾性衝突を意味する(図17(d), (14)式, (15)式)。なお、実測で $M > m$ より $v'_C$ は負の値を持つことが容易に推測される。
5. (13)~(15)式から衝突後の速度 $v'_C, v'_D$ をそれぞれ導き出

す ((16)式,(17)式)。

6. 衝突後に『ちぐまや砲台』から飛び出した木片 D に注目すると、実験台との摩擦力により初速度  $v_b$ 、加速度  $-\mu_4'g$  の加速度運動となり、距離  $S$  だけ移動して静止する (図 17(e), (18)式)。

$$\frac{1}{2}kl^2 = \frac{1}{2}mv_c'^2 + \mu_4'mgl \quad (13)$$

$$mv_c = mv_c' + Mv_D' \quad (14)$$

$$\frac{v_c' - v_D'}{v_c} = e \quad (15)$$

$$v_c' = \frac{m - eM}{m + M}v_c = \frac{m - eM}{m + M}\sqrt{\frac{kl^2 - 2\mu_4'mgl}{m}} \quad (16)$$

$$v_D' = \frac{m(1 + e)}{m + M}v_c = \frac{m(1 + e)}{m + M}\sqrt{\frac{kl^2 - 2\mu_4'mgl}{m}} \quad (17)$$

$$S = (x_6 - x_3) = \frac{v_D'^2}{2\mu_4'g} = \left(\frac{m(1 + e)}{m + M}\right)^2 \frac{kl^2 - 2\mu_4'mgl}{2\mu_4'mg} \quad (18)$$

つまり、行程 1、2、3 (図 17(a)~17(c)) においては (長さ  $l$  の時のゴムの弾性エネルギー) = (押し板 C が速度  $v_c$  の時の運動エネルギー) + (押し板 C が移動時に働いた摩擦力による仕事) というエネルギー保存則 ((13)式) が成立し、その後、押し板 C と木片 D が非弾性衝突することによりエネルギーの一部を失い、残りのエネルギーが押し板 C の運動エネルギーと木片 D の運動エネルギーとなる。この衝突におけるエネルギー保存則は以下のように示される。ここで左辺は衝突直前の押し板 C の運動エネルギー、右辺は衝突直後に関して第一項より押し板 C の運動エネルギー、木片 D の運動エネルギー、衝突により失ったエネルギーをそれぞれ意味する。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_c^2 &= \frac{1}{2}mv_c'^2 + \frac{1}{2}Mv_D'^2 + \frac{1}{2}\frac{mM(1 - e^2)}{m + M}v_c^2 \\ &= \frac{1}{2}m\left(\frac{m - eM}{m + M}\right)^2 v_c^2 + \frac{1}{2}M\left(\frac{m(1 + e)}{m + M}\right)^2 v_c^2 + \frac{1}{2}\frac{mM(1 - e^2)}{m + M}v_c^2 \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、右辺第二項で表された『ちぐまや砲台』から発射された木片 D に注目する。木片 D は衝突後に摩擦力が働き、等加速度運動を行い、最終的に停止する (行程 4、5、6 (図 17(d)~17(e)))。この行程は (木片 D が速度  $v_b$  となる衝突直後の運動エネルギー) = (木片 D が移動時に働いた摩擦力による仕事) というエネルギー保存則

$$\frac{1}{2}Mv_D'^2 = \mu_4'Mg(x_6 - x_3) = \mu_4'MgS \quad (20)$$

で表される。これらエネルギー保存則に加え、押し板 C と木片 D の衝突においても(15)式の跳ね返り係数  $e=1$  の弾性衝突と仮定すると、衝突後の木片 D の速度  $v_b$  並びにその移動距離  $S$  は動摩擦係数  $\mu_4$  や木片の質量  $m, M$  などの実測値を(17), (18)式に代入することから容易に求められる。実際の実験値の結果と共に表 3 に示す。なお、速度測定器の構造上の問題から移動距離が短い場合 ( $l=10$  mm) は測定することはできなかった。

表 3. ゴムを引いた長さ  $l$  と木片 D の衝突後の速度  $v_b'$  と移動距離  $S$  の計算値 (弾性衝突 ( $e=1$ )) と実測値

物理量 長さ $l$ [mm]	計算値 ( $e=1$ )		実測値		
	$v_b'$ [mm/s]	$S$ [mm]	$v_b'$ [mm/s]	$S$ [mm]	$e$
10	787	81	—	40	—
20	1588	330	928	108	0.169
30	2390	747	1506	353	0.260
40	3191	1333	2145	663	0.344
50	3993	2086	2706	940	0.355

表 3 からは計算値と実測値に大きな違いが生じていることが読み取れ、このことは衝突が実際には非弾性衝突であることを意味している。ちなみに、(17)式より算出した測定不可を除く  $l=20, 30, 40, 50$  mm における跳ね返り係数はそれぞれ  $e=0.169, 0.260, 0.344, 0.355$  であり、衝突時の押し板 C の速度が遅いと衝突で失うエネルギーの割合が大きく、そして速度は速くなるに従ってその割合が減少することが読み取れる。

次に非弾性衝突後の木片 D の運動に関してエネルギー保存が成立しているかの検証を行った。具体的には実測速度  $v_b'$  を用いて(19)式から、木片 D の移動距離を算出し、実測の距離との対比を行った。表 4 と図 18 にその結果を示す。ここで、 $l=10$  mm は速度を実測できなかったため、計算値のデータはない。また、図 18 中の実線は(18)式に跳ね返り係数  $e=0.35$  を採用し、その他変数はそれぞれの定数、測定値を代入して導き出した  $S$  [mm] =  $0.3830 l^2 - 0.0001391 l$  を表す線である。

表 4. 非弾性衝突 ( $e \neq 1$ ) 後の木片 D の実測速度  $v_b'$  を用いた移動距離  $S$  の実測値と計算値

物理量 長さ $l$ [mm]	実測値 ( $e \neq 1$ )		計算値
	$v_b'$ [mm/s]	$S$ [mm]	$S$ [mm]
10	—	40	—
20	928	108	113
30	1506	353	297
40	2145	663	602
50	2706	940	958

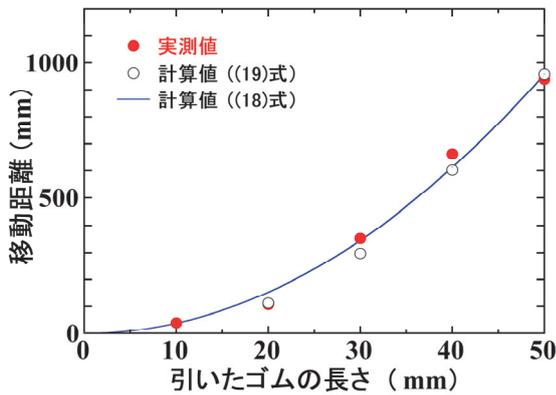


図 18. 引いたゴムの長さ と移動距離の関係 (実測値と計算値)

(19)式から導いた計算値(予想値)と実測値は良い一致を示し、さらに押し板 C と木片 D の跳ね返り係数  $e = 0.35$  を採用した(18)式から導き出した実線とも良い一致を示した。つまり、衝突後の木片 D においては等加速度運動並びにエネルギー保存則が正しく成立したことを意味する。

以上の結果をもとに改めて、図 17(b)~(e)で表されるエネルギーの移り変わりの様子を  $l = 50 \text{ mm}$  の場合の実測値を用いて図 19 に表す。さらに、具体的なエネルギーの値をそれぞれ示す。

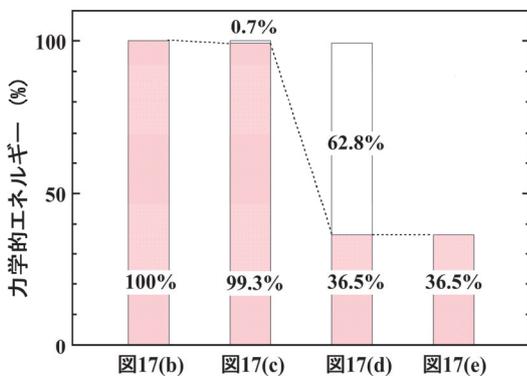


図 19. 図 17 の行程におけるエネルギーの移り替わり

1. 図 17(b)の状態のエネルギー：

長さ  $l = 50 \text{ mm}$  の時のゴムの弾性エネルギーを以下に示す。なお、このエネルギー値を 100% と仮定する。

$$\frac{1}{2}kl^2 = 0.29375\text{N} \quad 100\% \quad (21)$$

2. 図 17(c)の状態のエネルギー：

ゴムの弾性エネルギー (21)式) は以下の 2 つエネルギー (99.3% と 0.7%) に変換される。

・ 衝突直前の押し板 C の運動エネルギー：

$$\frac{1}{2}mv_c^2 = 0.29157\text{N} \quad 99.3\% \quad (22)$$

・ 押し板 C が移動時に働いた摩擦力による仕事

$$\mu_4' mgl = 0.00218\text{N} \quad 0.7\% \quad (23)$$

3. 図 17(d)の状態のエネルギー：

押し板 C の運動エネルギー (22)式, 99.3%) はさらに以下の 3 つエネルギーに変換される。なお、木片 D の速度  $v_D$  から衝突直後の木片 D の運動エネルギーは算出できるが、ゴムと結びついている押し板 C の速度  $v_c$  は測定できないため、残り 2 つは合算した値として求められる。

・ 衝突直後の木片 D の運動エネルギー：

$$\frac{1}{2}Mv_D'^2 = 0.10713\text{N} \quad 36.5\% \quad (24)$$

・ 衝突直後の押し板 C の運動エネルギー + 衝突で失ったエネルギー：

$$\frac{1}{2}mv_c'^2 + \frac{1}{2} \frac{mM(1-e^2)}{m+M} v_c'^2 = 0.18444\text{N} \quad 62.8\% \quad (25)$$

4. 図 17(e)の状態のエネルギー：

衝突直後の木片 D の運動エネルギー (24)式, 36.5%) はそのまま木片 D に働く摩擦力が行った仕事となる。

・ 木片 D が移動時に働いた摩擦力による仕事：

$$\mu_4' MgS = 0.10713\text{N} \quad 36.5\% \quad (26)$$

つまり、『ちぐまや砲台』においてはももとのエネルギーの 36.5% 程度の効率であることがわかる。最後にこの効率により削減された木片 D の距離の相関を図 20 に示す。

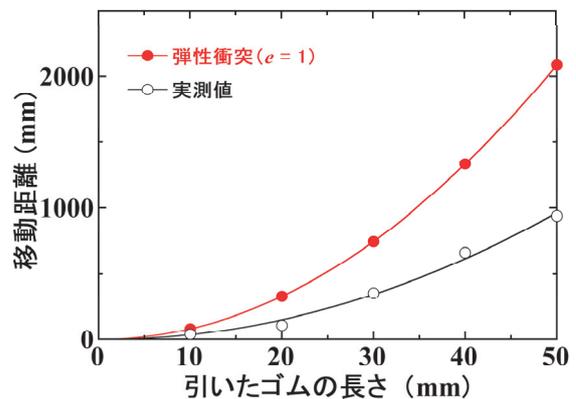


図 20. 引いたゴムの長さ と木片 D の移動距離の関係 (表 3, 4 より)

#### 4-3 『ちぐまや砲台』の再現性の評価

本研究の目的の重要な柱として児童間またはグループ間での定量的比較が行える教材を作製することである。そのためには全ての『ちぐまや砲台』を用いて、ゴムを

引いた長さと木片 D が移動した距離が同一に保たれることが必要不可欠である。ゆえに検証のための 3 台の『ちぐまや砲台』を用いてゴムを引っ張る長さ  $l$  と移動する距離  $S$  の相関を調べた。同一の長さごとに 10 回ずつ実験を行った結果を図 21 に示す。ここで、マーカーは個々の実験値、実線は平均値を用いた二次関数による近似曲線を採用した (18) 式より  $l$  の二次関数であることは自明である)。

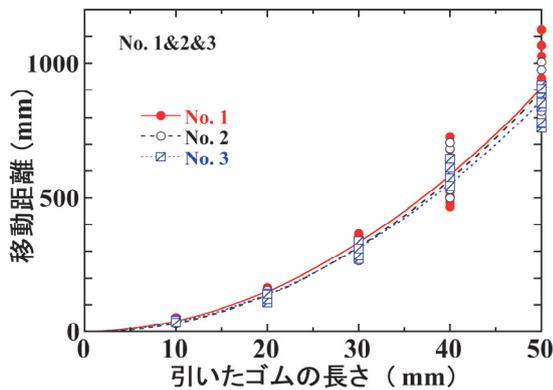


図 21. 引いたゴムの長さと移動距離の関係 (3 台)

引いたゴムの長さが長くなるにしたがって移動距離のばらつきは大きくなるものの、その平均値並びに近似曲線は誤差の範囲内でよい一致を示しており、教材『ちぐまや砲台』は、個体差は少なく、児童間での比較実験を行うことが可能であることが確認された。

## 5. まとめ

小学校第 3 学年理科で行われる単元「風とゴムの力の働き」の中の「ゴムの力の働き」で用いる教材の提案を行った。特徴としては、①：空間的に広い体育館を必要とせず、日頃、理科の授業で使用している理科室にてグループまたは個人単位での使用が可能な省スペース対応型であること、さらに②：飛ばす木片の移動距離の再現性が良く、児童間やグループ間において定量的比較ができることが挙げられる。

なお、小学校の教科書では、ゴムの伸びと移動距離の大小関係のみを議論しており、移動距離  $S$  は引いたばねの長さ  $l$  に比例するかのような結果を得るかもしれないが、実際は下に凸の(18)式に書かれたような関係 ( $l$  の二次関数) を小学校初期の段階から体感することが重要と考える。さらに、児童間でもばねの引き方に応じた定量的な比較ができることも大切である。本研究で提案する教材は、これらの課題を満たす性能が確認され、適した教材と考える。また、100 円ショップでも買える安価な材料を用い、容易に大量に作製できることもポイントである。

本論文に示した内容は小学校のみならず、中学校理科や高校物理にも発展させた「床に摩擦がある場合の運動」、「等加速度運動」、「エネルギー保存則」の学習にもつながることが期待される。今後、このような教材を用いて児童の理解が深まること、さらには指導者の現象の定量的かつ具体的な理解向上を期待したい。

## 参考文献

- 有馬朗人 他 文部科学省検定済教科書 小学校理科用 (2019 検定) 『たのしい理科 3 年』大日本図書株式会社.
- 石浦章一 他 文部科学省検定済教科書 小学校理科用 (2019 検定) 『わくわく理科 3』株式会社新興出版社啓林館.
- 今西優果・岡本直大・中村史香・丹羽英人 (2015) 「傾斜法による静止・動摩擦係数の測定～表面状態・荷重・潤滑剤による変化」物理チャレンジ 2015 第 1 チャレンジ実験課題レポート 受賞レポート チャレンジ番号 1531005, <http://www.jp-pho.jp/2015/2015-1st-chall-exp-report/1531005.pdf> (参照 2024 年 9 月 30 日).
- 勝田 仁之 (2018) 「実践報告：物理基礎において運動方程式を数値的に解く」物理教育通信 173, 49-59.
- 冠野仁志・近藤暖・中島優斗・岸本昌和・水野幹人 (2015) 「引っ張り法による摩擦係数の測定 —ビデオ画像の解析—」物理チャレンジ 2015 第 1 チャレンジ実験課題レポート 受賞レポート チャレンジ番号 1531011, <http://www.jp-pho.jp/2015/2015-1st-chall-exp-report/1531011.pdf> (参照 2024 年 9 月 30 日).
- 北原祐司 (2013) 「 $F = ma$  のパチンコ式実験」平成 29 年度東理理科教育賞受賞作品集 (第 49 回), 14-17.
- 岸本功・吉田裕 (2018) 「ゴムの働きの単元における小学校での実験とその考察」新潟大学教育学部研究紀要 自然科学編 10(2), 119-123.
- 霜田光一 他 文部科学省検定済教科書 令和 2 年度小学校理科用 (2019 検定) 『みんなと学ぶ小学校理科 3 年』学校図書株式会社.
- 下村忠行・菅原良栄・橘茂 (1969) 「力学的エネルギーに関する実験の検討」新潟県立教育センター編 研究集録第 2 集理科研究編(1), 61-70.
- 毛利衛 他 文部科学省検定済教科書 小学校理科用 (2019 検定) 『新しい理科 3』東京書籍株式会社.
- 養老孟司 他 文部科学省検定済教科書 小学校理科用 (2019 検定) 『未来をひらく 小学理科 3』教育出版株式会社.
- 松村久 他 文部科学省検定済教科書 小学校理科用 (2019 検定) 『楽しい理科 3 年』信州教育出版社.