

# 実験を通して理論を理解する斜方投射実験教材の開発に関する研究

## Study on Development of Obliquely Launched Projectile Experiment Teaching Materials to Understand Theory with Experiments

小池守<sup>1</sup>, 長澤啓亮<sup>2</sup>, 野口瑛斗<sup>2</sup>, 百瀬莉子<sup>2</sup>, 魏徳良<sup>2</sup>, 倉山智春<sup>1</sup>  
帝京科学大学教育人間科学部<sup>1</sup>, 帝京科学大学教育人間科学部学生<sup>2</sup>

Mamoru KOIKE<sup>1</sup>, Keisuke NAGASAWA<sup>2</sup>, Akito NOGUCHI<sup>2</sup>, Riko MOMOSE<sup>2</sup>, Deling WEI<sup>2</sup>,  
Tomoharu KURAYAMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Education & Human Sciences, Teikyo University of Science

<sup>2</sup>Undergraduate Students in Faculty of Education & Human Sciences, Teikyo University of Science

要約： 教育現場で利用できる理論値との差が小さい斜方投射実験教材の開発を行い、高等学校「物理」の授業で使用した。次に生徒の学習の理解状況や教材に対する好感度から、教材の有用性を検証した。その結果、以下の4点が明らかとなった。

- 1) 本研究で開発したストローロケット教材は、先端に2.5 gのおもりを取り付けると、水平到達距離の実測値が生徒実験でも理論値とよく一致し、誤差4%未満であった。
- 2) 生徒は、ストローロケット教材を用いた検証授業を通して、斜方投射理論を理解し、検証授業から2ヶ月後も、その理解は継続していた。
- 3) 生徒は、実測値が理論値とよく一致することや仕組みが簡単で操作しやすいことを理由に、ストローロケット教材を有用であると考えていた。
- 4) 生徒は、計算で答えを求める授業だけではなく、計算したことを意味付ける授業を望んでいた。

以上のことから、本研究で開発したストローロケット教材を用いた探究的な学習は、生徒の斜方投射理論に関する理解を深めるために有効であることが示唆された。

### I. 序章

物体の運動については、高等学校「物理基礎」及び「物理」において、速度・加速度・重力のはたらきと関連させて学ぶ。

高等学校「物理基礎」では、物体の運動とエネルギーの「(ア)運動の表し方」において、直線運動として自由落下と鉛直投射を扱い、運動の特徴及び運動に働く力と運動の関係を理解する。水平投射については、水平方向の運動と鉛直方向の運動に分けて考えることに触れる。高等学校「物理」では、様々な運動において平面内の運動として放物運動を扱い、水平投射や斜方投射における速度、加速度、重力のはたらきなどを理解する(文部科学省, 2019)。

斜方投射は、物体をどこまで飛ばすことができるのかという探究的な問題が設定でき、現象が身近であることから、生徒の興味関心が高く、主体的に取り組みやすい題材である。力学分野の学習は、重力を受ける運動として、自由落下に始ま

り、鉛直投げ上げ、水平投射、斜方投射へと、次々展開する。

これまでも、黒板に貼り付けるタイプの投射装置を用いて、その都度、鉛直投げ上げ、水平投射、斜方投射などの現象を公式と比較検討する実験報告(小室, 2001)、自作の斜方投射実験器を用いて、原理や法則を学ぶ実践報告(荒木・川村, 2013)、斜方投射の数式と現象とを結びつけるシミュレーションソフトウエアの開発(藤本・河村・倉田, 2014)、自由落下の学習後に、作図により斜方投射を学習し、最長到達距離の問題を扱う実践報告(米田, 2003)など様々な工夫がなされている。また、斜方投射を2次関数として扱い、高校1年生を対象に、鉄球を床に置いたペットボトルに一発で落とし込む課題解決学習を取り入れた授業(葛城・深尾・黒田, 2019)、中学校数学において、斜方投射された鉄球が通過する位置を求める問題及び実験を通して数式の有用感を高める授業実践(岩間・愛木, 2010)など他教科での扱いもある。

どれも学習した知識を実験を通して確認することで、理科や数学が好きな生徒を増やすことを目指す試みとして行われてきた。

学習した知識を実験を通して確認し、理論を正しく理解するためには、理論値と実測値の差がないことが求められるが、両者を比較し、より高い測定精度で扱いやすい実験教材を開発したとの報告は見当たらない。

そこで、本研究は、教育現場で利用できる理論値と実測値の差が少ない斜方投射実験教材の開発を行うと共に、検証授業を通して、開発した教材が生徒の斜方投射理論に関する理解を深めるために有用であるのかを検証した。

## II. 斜方投射理論

斜方投射は、「物理」で平面内の運動として扱う。投げ上げた高さに戻るときまでの水平方向の移動距離（以下、水平到達距離 $x_0$ ）と発射角度の関係は、以下のように説明できる。

物体の運動を示すため、水平方向の物体を発射した向きを $x$ 軸、鉛直上向きを $y$ 軸にとり、斜方投射の運動を、水平方向と鉛直方向の運動に分けて考える（図1）。

物体は、原点 $O$ から初速度 $v_0$  [m/s]で斜め上向き（仰角 $\theta$ ）に発射され、投げてからの到達時間を $t$  [s]、重力加速度の大きさを $g$  [m/s<sup>2</sup>]とする。

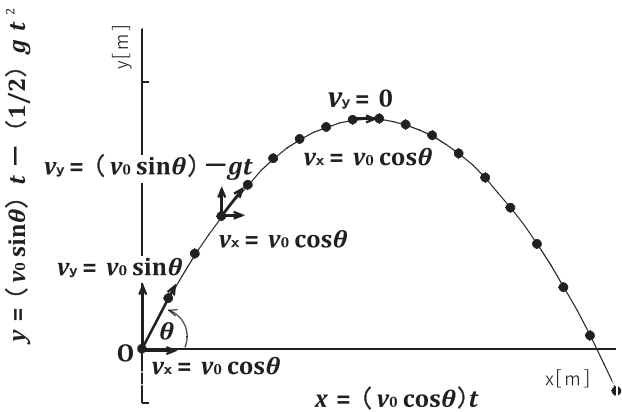


図1 斜方投射時の物体の動きと速度及び距離

### 1. 水平方向の運動

水平方向は、速度 $v_0 \cos \theta$ で等速直線運動するため、速度 $v_x$ と水平方向の変位 $x$ は①式、②式で表される。

$$v_x = v_0 \cos \theta \quad \dots \textcircled{1}$$

$$x = (v_0 \cos \theta) t \quad \dots \textcircled{2}$$

### 2. 鉛直方向の運動

鉛直方向は、初速度 $v_0 \sin \theta$ で鉛直投げ上げ運動するため、時刻 $t$  [s]での速度 $v_y$  [m/s]と鉛直方向の変位 $y$  [m]は、③式、④式で表される。

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt \quad \dots \textcircled{3}$$

$$y = (v_0 \sin \theta) t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots \textcircled{4}$$

### 3. 物体の軌道を表す式

上述の②式から、 $t$ は⑤式となる。

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \theta} \quad \dots \textcircled{5}$$

⑤式を④式に代入すれば、物体の軌道を表す式である⑥式が得られる。

$$\begin{aligned} y &= v_0 \sin \theta \frac{x}{v_0 \cos \theta} - \frac{1}{2} g \left( \frac{x}{v_0 \cos \theta} \right)^2 \\ &= \frac{\sin \theta}{\cos \theta} x - \frac{1}{2} g \left( \frac{x^2}{v_0^2 \cos^2 \theta} \right) \\ &= (\tan \theta) x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} x^2 \quad \dots \textcircled{6} \end{aligned}$$

### 4. 水平到達距離

最高点では $v_y = 0$ なので、これを③式に代入すれば最高点に達する時刻 $t$ が求められる（⑦式）。

$$\begin{aligned} 0 &= v_0 \sin \theta - gt \\ t &= \frac{v_0 \sin \theta}{g} \quad \dots \textcircled{7} \end{aligned}$$

最高点までの水平距離は、⑦式を②式に代入することにより求められる（⑧式）。

$$x = (v_0 \cos \theta) \frac{v_0 \sin \theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{g} \quad \dots \textcircled{8}$$

水平到達距離 $x_0$ は、最高点に達するまでの水平到達距離の2倍なので、

$$x_0 = \frac{2v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{g} \quad \dots \textcircled{9}$$

2倍角の公式から、

$$x_0 = \frac{2v_0^2 \cos \theta \sin \theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g} \quad \dots \textcircled{10}$$

水平到達距離が最も大きくなる発射角度 $\theta$ は、 $2\theta = 90^\circ$ より、 $\theta = 45^\circ$ となる。

なお、本研究では、0.45 mの高さの発射装置から発射し、床面に着くまでの到達時間と水平方向の移動距離（以下、ロケット到達距離）を扱うことにする。

### Ⅲ. 教材開発

斜方投射理論から、斜方投射実験では、発射時の仰角を45°にしたときが、最も遠方に到達するはずであるが、①発射物の形状、②発射物の回転運動、③空気抵抗、④実験操作の誤りなどにより、理論値と実測値に差が生じることがある。当然、理論値と実測値を一致させるためには、摩擦が小さな球体又は弾丸が適当であるが、高等学校「物理」の授業では実際の飛行状態を目視観察できることが重要である。そこで、目視観察できる大きさの飛行体として、空気抵抗を受けにくく、回転運動が押さえられ、運動の直線性が高い、細長い形状を持つストロー（以下、ストローロケット）を用いることにした。また、同時に実験操作における生徒の実験操作の誤りを簡便に検知できる発射装置を開発した。

#### 1. 使用材料及び測定器

実験に使用する材料及び測定器は、表1の通りである。

表1 材料及び測定器

材料	ストロー（株式会社ストリックスデザイン：MA-249，ポリプロピレン，口径6mm×長さ210mm），アルミ製ストロー（北陸アルミニウム株式会社：A-2128，アルミニウム，口径11mm×18cm），ゼムクリップ（株式会社ミツヤ：GP-503，全長23mm），紙ねんど（(株)大創産業：PAPER CLAY，500g），粘着布テープ（(株)大創産業：50mm×15m），輪ゴム（オーバンド：輪ゴム30G，16GGA-710），アートブロック（カインズ：直方，50×50×100mm），桧工作材（カインズ：900×5×15mm）
装置	速度計測器（NaRiKa：ピースピv），ストップウォッチ（SEIKO：SVAS005），スマートフォン（Apple：iphone Xs）

#### 2. 発射装置の製作

アートブロックの台座に、長さ45cmの桧工作材を鉛直に釘で固定した（以下、工作材A）。次に、発射用筒（アルミ製ストロー）を長さ40cmの桧工作材に粘着布テープで固定した（以下、工作材B）。最後に、工作材Aに工作材Bを仰角が、30°、45°、60°の発射角度となるように取り付けた3種類の発射装置を製作した。それぞれの発射装置の発射用筒の先端部には赤外線で速度を計測する非接触タイプの速度計測器を取り付けた（図2、写真1、2）。

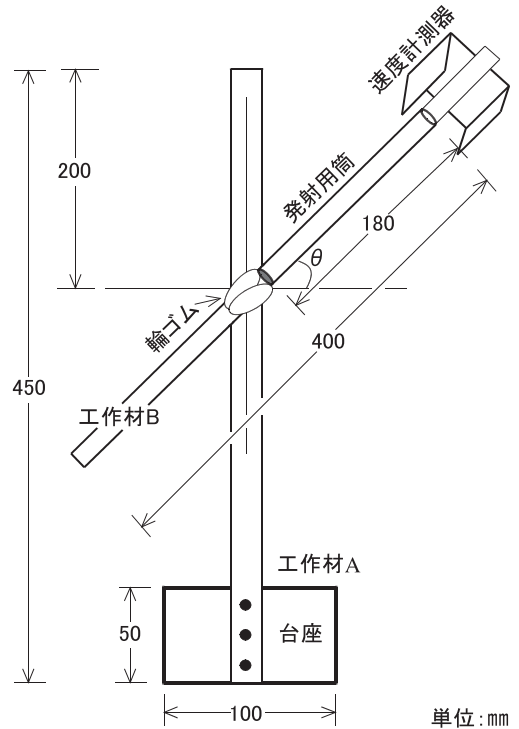


図2 発射装置

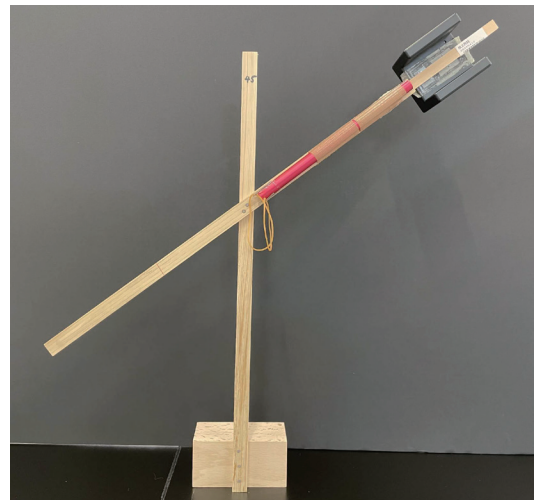


写真1 発射装置全景（仰角45°モデル）

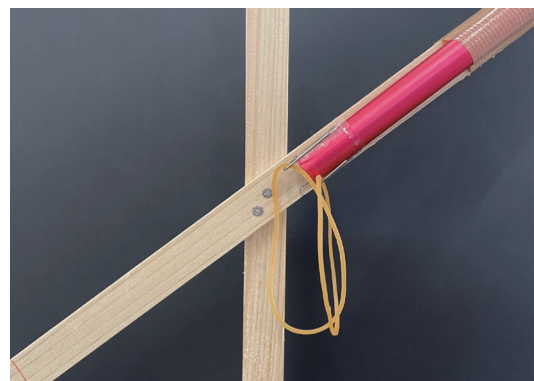


写真2 発射装置ゴム掛け部

### 3. ストローロケットの製作

長さ120 mmに切ったストローの先端に, 0.5 g, 1.0 g, 1.5 g, 2.0 g, 2.5 g, 3.0 g, 3.5 g, 4.0 gの紙粘土(以下, おもり)を取り付けた8種類の発射物を製作した. なお, ストローの他端には, 輪ゴムをかけるための切り込みを入れた(図3).

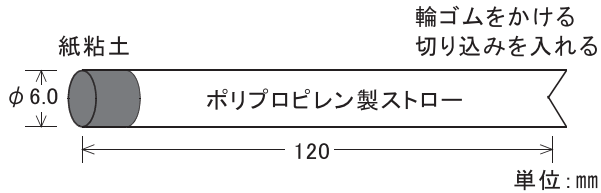


図3 おもりを取り付けたストローロケット

### 4. ストローロケットの選定

#### (1) 初速度と到達時間, ロケット到達距離(理論値)

発射角度 $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ の発射装置を用いて, 発射用筒の先端である床面から0.45 mの高さから, 発射物を発射して, 発射物が床面に達するまでの時間(到達時間)を④式の $y$ に $-0.45$  mを代入して求めた.

初速度 $v_0$ を4 m/sから20 m/sまで, 1 m/s刻みで変化させた結果, 理論的には初速度20 m/s以下で発射物は全て発射後4秒以内に床面に到達することが分かった.

次に, ②式に到達時間を代入し, 発射物が床面に達するまでのロケット到達距離を求めた. その結果, 理論的にはおおむね初速度14 m/s以下で発射すれば, ロケット到達距離は20 m以下になり, 体育館内で実験できることが分かった.

#### (2) 発射角度と到達時間, ロケット到達距離

##### 1) 最適実験法

斜方投射実験で理論値と実測値を近似させるためには, 以下の4点に留意する必要がある.

- ①初速度のばらつきを防ぐため, 発射装置に取り付けたゴムを引く距離を一定にする.
- ②速度計測器で測定した初速度(実測値)と, 実測したロケット到達距離 $x$ と到達時間 $t$ , 発射角度 $\theta$ を基に, ②式から求めた計算値とに相違がないことを確認する.
- ③ストローロケットの先端に取り付ける紙粘土の質量を変えて, 飛行時間がストップウォッチで測定できる適正質量に調整する. なお, おもりはストローに詰めるため, 質量が変わると同時に重心位置も変化している.

- ④ストローロケットの飛行軌道を録画し, 飛行状況を確認する.

##### 2) ストローロケットの初速度確認

斜方投射実験では, 初速度の管理が重要である. 特に, 生徒実験においては, 実験装置の扱い方が原因で期待した初速度が出ていないことも考えられる. そのため, 発射装置の発射用筒の出口付近に非接触タイプの速度計測器を取り付け, 発射物の初速度を測定した(実測値). 次に, 実測したロケット到達距離 $x$ と到達時間 $t$ , 発射角度 $\theta$ から, ②式を基に初速度(計算値)を求め, 実測値と計算値とを比較した.

まず予備実験として, 各質量のストローロケット(8種)を用いて3種類の発射装置で, 輪ゴムを発射用筒の下端から12 cm引き, 5回ずつ計120回の発射実験を行い, 計算値に対する実測値の比の出現率を調べた結果, 実測値の92.5%が計算値の $\pm 0.2$ 倍の範囲内に入った(表2).

表2 初速度の計算値に対する比の出現頻度

実測値 計算値	0.70 以下	0.71 0.80	0.81 0.90	0.91 1.00	1.01 1.20	1.21 1.30	1.31 以上
頻度	1	4	18	67	26	3	1

※ $n=120$

そこで, 実測値が計算値の $\pm 0.2$ 倍の範囲を超えた場合は外れ値として再実験を行い, 5回の平均値を最終的な初速度にした. 到達時間とロケット到達距離についても, 5回の平均値を, 最終的な実測値にした.

図4は, 発射角度の異なる3種類の発射装置を

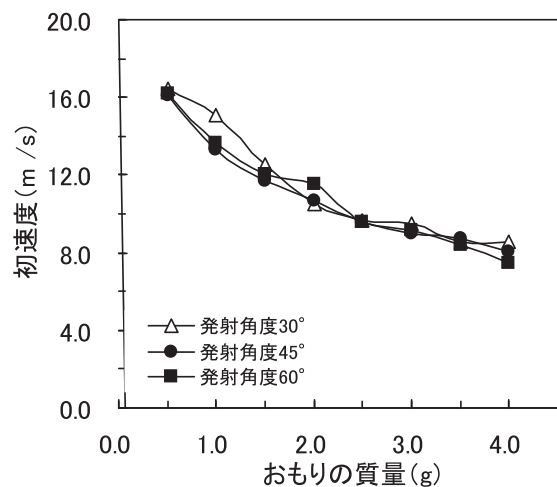


図4 おもりの質量と初速度の関係

用いて、発射物を発射させたときの、おもりの質量と初速度の関係を調べたものである。初速度は発射角度とは関係なく、おもりの質量に依存し、おもりの質量が大きいほど初速度は小さくなった。これは、おもりの質量が大きくなるほど発射物の全質量も大きくなり、初速度が小さくなるためと考えられる。

### 3) 発射物に取り付たおもりの質量と到達時間

到達時間が短いとストップウォッチでの測定が困難であるため、おもりの質量と到達時間の関係を調べた(図5)。その結果、発射角度が小さくなるほど床面への到達時間は短くなった。また、おもりの質量が小さくなるほど到達時間の実測値は長くなった。おもりの質量が小さくなるほど到達時間が長くなるのは、前項で示したとおりおもりの質量が小さくなるほど初速度が大きくなるためと考えられる。

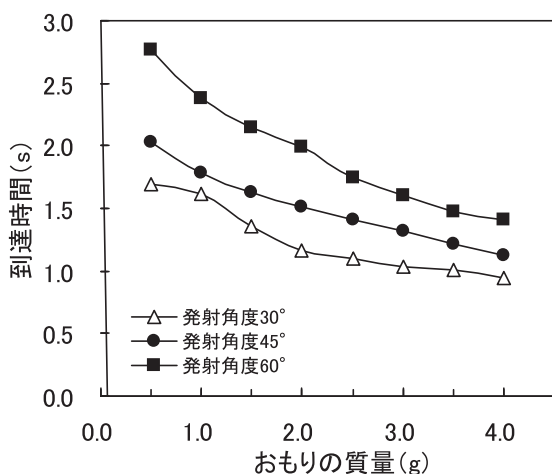


図5 おもりの質量と到達時間

これらのことから、おもりの質量が大きいと到達時間が短くなり、ストップウォッチでの測定が困難であることが示された。

### 4) 発射物に取り付たおもりの質量とロケット到達距離

実測した初速度の平均値  $v_0$  を基に、④式から到達時間  $t$  を求め、②式に初速度の平均値  $v_0$  と到達時間  $t$  を代入してロケット到達距離(理論値)  $x$  を求めた。次に、ロケット到達距離の理論値  $x$  と実測値  $x'$  とを比較するため、おもりの質量とロケット到達距離(理論値と実測値)の関係をプロットした(図6)。その結果、発射角度45°の発射物が最も遠方に到達し、30°、60°と続いた。しかし、

おもりの質量が2.0 g以下では、発射角度30°の発射台から発射した発射物のロケット到達距離(実測値)が発射角度45°よりも大きくなるなど、理論値とは異なる結果になった。これは、空気抵抗の影響や空中の挙動に問題があるためと考えられた。

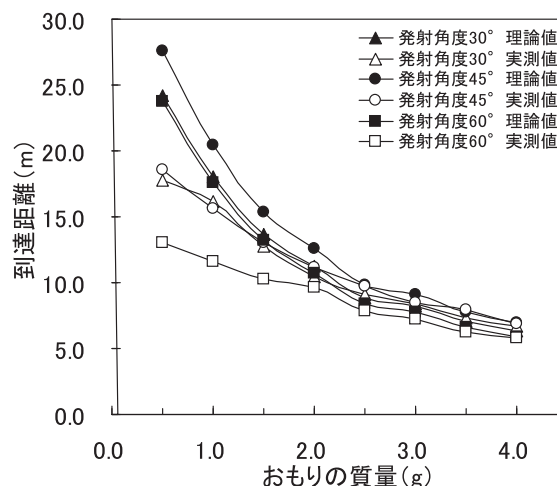


図6 おもりの質量とロケット到達距離 (理論値と実測値)

これらのことから、質量2.5 g以上では理論値と実測値の差が小さくなることが分かった。しかし、前項で示したとおり、おもりの質量が大きいと、到達時間が短くなり、ストップウォッチでの測定が困難であることから、質量2.5 gのおもりを付けたスローロケットが実験に適していることが示された。

### 5) 発射物の空中での挙動

質量2.0 g以下の発射物でロケット到達距離の理論値と実測値の間に差が生じた原因を探るため、改めて発射物の空中での挙動をスマートフォンを用いてスローモーション動画を撮影し確認した。その結果、質量2.5 g以上の発射物では、運動中の回転は見られなかったが質量2.0 g以下の発射物では、空中で様々な方向に回転しながら運動していることが分かった(図7)。

これらのことから、実際の授業で斜方投射の実験を行う場合は、おもりの質量2.5 g以上のスローロケットが、理論式の検証実験に適することが明らかとなった。

なお、質量2.5 gのおもりを取り付けたロケット到達距離の理論値に対する実測値の誤差<sup>1)</sup>は、仰角45°で約1.1% (±0.10 m)であった。

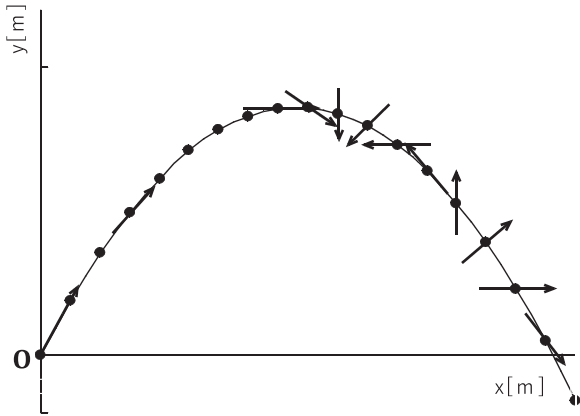


図7 質量2.0 g以下の発射物に見られる回転運動

#### IV. 検証授業

##### 1. 調査対象学級と調査時期

長野県の公立高等学校2年生1学級(対象学級:男子16名,女子16名,計32名)を調査対象に,令和3年5月上旬に調査校の理科教員が,「物理」の時間に検証授業(以下,授業)を行い,筆者の内1名は授業補助を担当した。授業は,単元「平面内の運動」(全8時間扱い中の7時間目)の中で行い,「斜方投射の理論式の正しさを実験を通して検証し,斜方投射に関する理解を深める。」をねらいとした(表3)。

##### 2. 授業の実際

授業は,始め物理実験室で5人1組の6班(内,2班は6名)で行った。最初に前調査(3分間)を実施した後,前時に行った斜方投射の理論式が書かれた模造紙を黒板に貼り,「横軸は等速運動,縦軸は鉛直打ち上げ運動が同時に進行している。」ことを確認し,授業がスタートした。

教員は,学習カードを配布し,初速度9.8 m/s,発射角度30°,45°,60°で発射したときの到達時間とロケット到達距離を求めるよう話し,班毎に計算を始めた。約5分後に,教員が「今日は,斜方投射の計算式で求めた値が正確なのか,実際に実験して確かめたいと思います。」と口火を切り,実験装置と実験手順の説明を始めた。説明が終わったところで,「質問はありますか?」と尋ねたが,生徒からの質問はなかった。

全員で体育館に移動し,3つの班がまとまって大グループ(A,B)になり,発射角度30°,45°,60°の発射装置毎に分かれて,それぞれストローロケットを発射させ,データを収集した。測定は

表3 検証授業計画

学習内容	
導入 10分	<p><b>前調査(3分)</b> ※調査用紙回収</p> <p>1. 前時の復習</p> <p>☆斜方投射は,横軸に等速度運動,縦軸に鉛直投げ上げ運動の二つが同時に起こる。</p> <p>※学習カードを配布する。</p> <p><b>学習問題:「斜方投射の理論式は正確なのか?」</b></p> <p>☆計算を行い予想を立てる。</p> <p>2. 実験方法及び手順の確認</p>
展開 30分	<p>3. 発射角度30°,45°,60°の発射装置を用いて,初速度9.8 m/sでそれぞれ5回発射させた時の到達時間とロケット到達距離を測定する。</p> <p>(1) 各班に発射・時間・距離・回収の係を決める。</p> <p>(2) 3つの班で大グループを作り,3種類の発射装置に,班単位で分かれ,初速度9.8 m/sとなるようにストローロケットを飛ばす。</p> <p>(3) 発射装置に取り付けた速度計測器で測定した初速度と,実験で得られたロケット到達距離と到達時間を基に計算した計算値を比べて,初速度の誤差が±0.3 m/s未満になることを確認しながら測定する。</p> <p>4. 実験結果のまとめ</p> <p>☆理論値と実測値は一致したか。</p> <p>☆一致しない場合は,その理由は何か。</p> <p><b>後調査(4分)</b> ※調査用紙回収</p>
まとめ 10分	<p>5. 授業を通して分かったことをまとめる。</p> <p>☆理論式は斜方投射を正しく表していたか。</p> <p>☆斜方投射は,鉛直投げ上げ運動と等速直線運動が同時に起こる平面内の運動である。</p> <p>※最後に学習カード回収</p>

☆:教員の発言, ※:教員の行動

全て5回行い,大グループ内でデータを共有した。生徒は,発射実験1回毎に,班に1台用意したノートパソコンのエクセルシートにデータを入力し,速度の計算値と実測値の関係を確認していた。生徒が求めたロケット到達距離(実測値)の理論値に対する誤差は,発射角度30°で3.5%,45°で3.1%,60°で3.5%であり,Ⅲ.4(2)4項の値よりも大きかったが,生徒実験としては十分許容できる範囲であった(表4)。その場(体育館)で,理論値と測定値が一致しなかった原因について話し合った。

最後に,教員から,「次の時間にまとめをしますが,今日実験してみて,分かったことや話しておきたいことはありますか?」との発言があった。生徒からは,「実際に確かめてみて,計算の意味が分かった。」「理論は理論で実際には成り立たないと思っていたけど,実際にも成り立つことがわかり,すごく勉強になった。」などの感想が4名から出され,授業は終了した。

表4 生徒実験における実測値の理論値に対する誤差

発射角度		30°	45°	60°
理論値	時間 (s)	1.0	1.4	1.7
	距離 (m)	8.5	9.8	8.5
実測値 (平均)	時間 (s)	1.1	1.5	1.8
	距離 (m)	8.8	10.1	8.8
差	時間 (s)	0.1	0.1	0.1
	距離 (m)	0.3	0.3	0.3
誤差	割合 (%)	3.5	3.1	3.5

※時間：到達時間，距離：ロケット到達距離  
 差：距離の実測値－距離の理論値  
 誤差： $\frac{(\text{距離の実測値}-\text{距離の理論値})}{\text{距離の理論値}} \times 100$

V. 調査方法及び結果と考察

1. 調査及び検証方法

(1) 使用した検証用ソフトウェア

本研究で使用した検証用ソフトウェアは、クエード検定はエクセル統計（柳井，2018）を、 $\chi^2$ 検定はjs-STAR X Rrelease1.1.3j（田中・中野，1998）を用いた。なお、期待度数に5以下のものがある場合、 $\chi^2$ 検定できないとの制約がある（山上・倉智，2018）。本研究では、この制約を確認した上で検定を行った。

(2) 知識確認テストによる理解状況調査

調査対象生徒（以下、生徒）の斜方投射に関する知識・理解を深めるため、授業前（令和3年4月下旬）と授業直後（令和3年5月中旬）、授業2ヶ月後（令和4年7月上旬）に知識確認テスト（10分間、一問20点、合計100点、図8）を行い、その結果をまとめた。なお、各問題について、答えが正しくて10点、途中経過が書かれていて10点の計20点で採点した。

(3) 質問紙による理解状況及び教材の好感度調査

生徒の学習理解状況及び教材に対する好感度を深めるため、授業前後において、質問紙調査（前調査・後調査）を実施した。本研究で行った質問紙調査は、5段階の評定尺度や自由記述で回答させる内容である。生徒には、どれも選択できない場合は、その理由を自由に記述することを伝えたが、そのような生徒はいなかった。

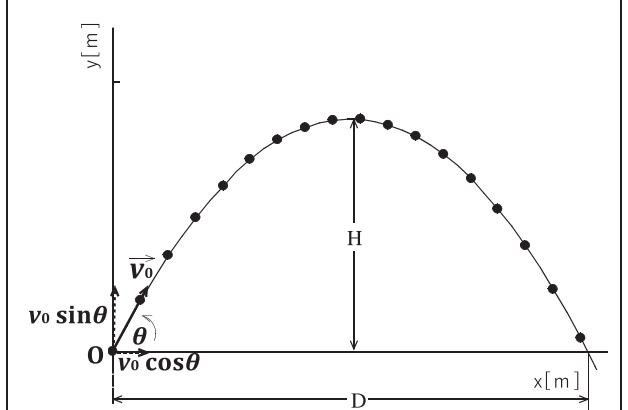
1) 前調査

生徒の斜方投射についての理解状況を探るため、表5の問1について自由記述で回答させた。

2) 後調査

生徒の斜方投射についての理解状況、使用した

図のように時刻  $t=0$  sに、地上のO地点から小物体を仰角  $\theta$  の向きに速さ  $v_0$  [m/s]で投げ出した。重力加速度の大きさを  $g$  として、以下の問いに答え、回答欄に計算式と共に答えを記入しなさい。



- (1) 放物運動の最高点の高さ  $H$  を求めよ。
- (2) 落下するまでに水平方向に移動する距離（水平到達距離） $D$  を求めよ。  
次に、初速度  $v_0 = 9.8$  m/s、仰角  $\theta = 30^\circ$ 、 $\sin 30^\circ = 0.5$ 、 $\sin 60^\circ = 0.87$  のとき、
- (3) 最高点の地面からの高さは何mか。
- (4) 地面に達するのは投げ出してから、何秒後か。
- (5) 地面に達するまでに水平方向に移動する距離（水平到達距離）は、何mか。

図8 知識確認テスト

解答例：(1)  $(v_0 \sin \theta)^2 / 2g$  (2)  $(2v_0^2 \sin \theta \cos \theta) / g$  又は  $(v_0^2 \sin 2\theta) / g$  (3) 11.0 m (4) 1.0 s (5) 8.5 m

教材に対する好感度を深めるため、表5の問1、2、3について回答させた。問1については自由記述で、問2については5段階の評定尺度で、問3については5段階の評定尺度と自由記述で回答させた。

(4) 学習カードによる理解状況及び学習好感度調査

生徒の学習の理解状況及び学習に対する好感度を深めるため、授業で使用する学習カードに考察欄や感想欄を設けた。

2. 調査結果の分析方法

- (1) 生徒の斜方投射に関する知識及び理解状況は、質問紙調査（表5問1、2）の回答内容、学習カードの考察欄の記述内容、授業前（以下、前テスト）・授業後（以下、後テスト）・授業2ヶ月後（以下、定着テスト）に行った知識確認テストを基に検討した。

表5 質問紙調査の質問事項

質問事項	
問1	斜方投射とは、どのような運動か説明しなさい（自由記述）
問2	授業は理解できましたか（5択）
問3	使用したモデル教材は、授業を理解するために役に立ちましたか？（5択、理由の自由記述）

- (2) 生徒の教材に対する好感度は、質問紙調査（表5問3）の回答内容を基に検討した。
- (3) 生徒の授業に対する好感度は、学習カード感想欄の記述内容を基に検討した。
- (4) 調査結果は、筆者の内3名が別々に評価し、合意の下にまとめた。5段階の評定尺度による回答は同じ尺度にまとめた度数集計表を作成した。理由及び自由記述については、類似する言葉を抽出し、類似する意味の言葉（以下、ラベル）に分けた分割表を作成した。筆者3名が評価結果を持ち寄り確認した結果、合致率は97.2%であった。一致しなかった項目については話し合いにより決めた。

### 3. 分析結果と考察

#### (1) 生徒の斜方投射に関する理解状況

##### 1) 質問紙による調査

生徒の斜方投射に関する理解状況を探るため、前後調査問1の回答欄の自由記述を、斜方投射に関する運動という観点で評価・抽出し、運動に係る4項目（放物運動・二種の運動・加速度・平面内運動）のラベルに分類し、前後調査の回答者数を表6にまとめた。

4項目のラベルについて、前後調査の回答者数に有意な差があるか検討するため、2要因（前調査・後調査）×4要因（放物運動・二種の運動・加速度・平面内運動）について $\chi^2$ 検定を行った結果、1%水準で有意な差が見られた（ $\chi^2_{(3)} = 18.304, p < .01$ ）。残差分析の結果、前調査と比べて後調査で有意に増加したラベルは「加速度」（ $p < .05$ ）で、有意に減少したラベルは「平面内運動」（ $p < .01$ ）であった。授業前には、教科書の小単元名である「平面内運動」を記述するなど、表面的な理解を示す生徒が多かったが、授業後には等速運動と鉛直投げ上げ運動や加速度が一定の運動といった斜方投射理論の本質を示す回答が増加した。

次に、後調査問2の回答結果を5段階の評定尺

表6 回答欄の記述例とラベル、回答者数

ラベル	記述例	前調査	後調査
放物運動	・放物線のような運動 ・放物運動をしている。 ・放物線上を動く運動	5	6
二種の運動	・横は等速運動、縦は鉛直投げ上げ運動。 ・等速運動と鉛直投げ上げ運動が同時に起こる ・二つの運動が同時に働く運動。	7	13
加速度	・横は加速度がなく、縦は一定の加速度がはたらく運動。 ・鉛直下向きに働く重力加速度のために、縦方向の速度が一定に変化する運動。	3	11
平面内運動	・立体的に見えるけれど、結局平面で考えることができる運動。	17	2

※ $n=32$ , 単位（人）

※記述例ゴシック体は後調査で初めて書かれた記述。

度で表7にまとめた。生徒の授業内容の理解傾向を探るため、1要因（調査学級）×5要因（できた・少しはできた・どちらともいえない・余りできない・できない）について $\chi^2$ 検定を行った結果、1%水準で有意な差が見られた（ $\chi^2_{(4)} = 34.563$ ）。ライアンの名義水準を用いた多重比較<sup>2)</sup>の結果、「できた」、「少しはできた」は他項目と比べて多く、有意な差が見られた（「できた」>「余りできない」&「できない」： $p=0.0026$ 、「少しはできた」>「どちらともいえない」： $p=0.0088$ 、「少しはできた」>「余りできない」&「できない」： $p < 0.0002$ ）。

表7 授業内容が理解できたか否か（自己評価）

評定尺度	授業内容は理解できたか？				
	できた	少しはできた	どちらともいえない	余りできない	できない
調査学級	11	17	4	0	0

※ $n=32$ , 単位（人）

これらのことから、生徒の斜方投射理論に関する理解は深まったと推察される。

##### 2) 学習カードによる調査

生徒の斜方投射実験に関する理解状況を探るため、実験時に使用した学習カードの考察欄「理論式と測定値が異なったとき、その理由として考えられることを全て書きなさい。」に記述された内容を、理由を示す言葉という観点で評価・抽出し、生徒が考えた誤差の発生原因との視点で4項



目（想定・実験・操作・計算）のラベルに分類し、回答数を表8にまとめた。

表8 学習カード考察欄の記述例とラベル，回答数

ラベル	記述例	回答数
想定	・ 空気抵抗の問題 ・ 発射物が点でない。 ・ 発射物が球形でない。	17
実験	・ ゴムの弾性力の問題 ・ 発射用筒を通るときに摩擦などの抵抗があるから。	9
操作	・ 全部同じ力で引けないから。 ・ 引く力がやる度が変わる。 ・ 操作するのが人間だから。	28
計算	・ 発射位置が床面から45 cm高いから、理論値が違う。 ・ 発射位置が床面でないから。	24

※ n=32, 単位 (人), 複数回答

生徒が考えた誤差の発生原因として最も多かったラベルは「操作」で、次に「計算」であった。中には、「想定」や「実験」など、実験の限界を示すラベルも見られた。

これらのことから、実験を通して、生徒の斜方投射に関する理解は、より具体的な操作や実験条件まで及ぶようになっていったと推察される。

### 3) 知識認識テストによる調査

生徒の斜方投射に関する理解状況を探るため行った知識確認テスト（前テスト・後テスト・定着テスト）の問題別誤答者数を表9にまとめた。過半数の生徒が間違えた問題枠を色付けしたが、色付け箇所が見られたのは前テストだけだった。

表10は、3回実施した知識確認テストの平均点と標準偏差をまとめたものである。前テストの平均点は、後テスト・定着テストと比べて低く、後テストと定着テストの平均点は近似した。各テスト点に差があるか危険率1%で検定（クエード検定）<sup>3)</sup>した結果、帰無仮説（実施時期に差はない）は棄却され、前テストと後テスト・定着テストの間に有意な差があると考えられた ( $p=6.69 \times 10^{-13}$ )。

これらのことから、生徒は授業前には、斜方投射理論を理解していなかったが、授業を通して正しく理解し、その理解が2ヶ月後も継続していたと推察される。

#### (2) 生徒の教材に対する好感度

生徒の使用教材に対する好感度を探るため、後調査問3の回答欄の自由記述を役立つ理由を示す

表9 各テスト各問題の誤答者数

問	解答例	前テスト	後テスト	定着テスト
(1)	途中経過が書けたか	19	3	2
	$(v_0 \sin \theta) 2/2g$	18	3	2
(2)	途中経過が書けたか	23	4	2
	$(2v_0^2 \sin \theta \cos \theta)/g$ 又は $(v_0^2 \sin 2\theta)/g$	23	4	2
(3)	途中経過が書けたか	18	3	2
	11.0 m	18	3	2
(4)	途中経過が書けたか	15	2	2
	1.0 s	14	2	2
(5)	途中経過が書けたか	21	4	2
	8.5 m	21	4	2

※ n=32, 単位 (人)

表10 知識確認テストの平均点と標準偏差

	前テスト	後テスト	定着テスト
平均点	40.6	90.0	93.8
標準偏差	43.7	27.8	24.2

※ n=32, 単位 (点), 100点満点

言葉という観点で評価・抽出し、教材の持つ特性に関する4項目（正確・簡便・イメージ・素材）のラベルに分類し、回答数を表11にまとめた。その結果、教材の特性として、「正確」と「簡便」のラベル内容を記述する生徒が多く、過半数以上になった。

表11 回答欄の記述例とラベル，回答数

ラベル	記述例	回答数
正確	・ 理論値と測定値がほぼ一致 ・ 正確さがある。正確。 ・ 数式を再現していた。 ・ 再現性があり数式通りだった。 ・ 理論の正確さが確かめられた	29
簡便	・ 仕組みが簡単で分かりやすい ・ シンプルで使いやすい。 ・ 説明書がいない。 ・ 初速度調整が簡単だった。	17
イメージ	・ イメージしたとおりだった。 ・ 想像どおりの発射台	8
素材	・ 木でなくて金属で作れば、もう少し安定感があったと思う。 ・ 安定感が足りない。	2

※ n=32, 単位 (人), 複数回答

次に、後調査問3の回答結果を、5段階の評定尺度で表12にまとめた。1要因（調査学級）× 5

要因（役立った・少しは役立った・どちらともいえない・余り役立たない・役立たない）について $\chi^2$ 検定を行った結果, 1%水準で有意な差が見られた( $\chi^2_{(4)} = 25.188$ ). ライアンの名義水準を用いた多重比較の結果, 「役立った」, 「少し役立った」は他項目と比べて多く, 有意な差が見られた(「役立った」>「余り役立たない」&「役立たない」:  $p = 0.0026$ , 「少しは役に立つ」>「余り役に立たない」&「役立たない」:  $p < 0.0006$ ).

表12 教材が役立ったか否か (自己評価)

教材は授業を理解するために役に立ちましたか？					
評定 尺度	役立った	少しは 役立った	どちらとも いえない	余り 役立たない	役立たない
調査学級	11	14	7	0	0

※ $n = 32$ , 単位 (人)

これらのことから, 生徒は理論値と測定値が一致する正確さや仕組みが簡単で操作しやすいことを理由に, 教材を有用と考えていたと推察される.

### (3) 生徒の授業に対する好感度

生徒の授業に対する好感度を探るため, 授業時に使用した学習カードの感想欄「実験をして理論式を確かめる授業をどう思いますか」の回答結果を, 5段階の評定尺度で表13にまとめた. その結果, 全員が「よかった」又は「少しはよかった」と答えていた.

表13 授業はよかったか否か (自己評価)

実験をして理論式を確かめる授業をどう思いますか？					
評定 尺度	よかった	少しは よかった	どちらとも いえない	余りよく なかった	よく なかった
調査学級	15	17	0	0	0

※ $n = 32$ , 単位 (人)

回答欄の自由記述を, 授業が役立つ言葉という観点で評価・抽出し, 授業場面を表す4項目(予想・実験・考察・まとめ)のラベルに分類し, 回答数を表14にまとめた. その結果, 多くの生徒が「実験」と「考察」ラベルに関する記述をしていた.

これらのことから, 生徒は単に計算で答えを求める座学の授業ではなく, 実物を用いて, 計算していることを意味付ける探究的な授業を求めていると推察される.

表14 回答欄の記述例とラベル, 回答数

ラベル	記述例	回答数
予想	・計算式の意味が分かった. ・予想を立てたから.	4
実験	・理論を実験で確かめたから. ・実物を使ったから. ・本物で確かめたから. ・実験による誤差を経験できたから. ・実験の難しさが分かったから. ・教科書に載っていないことが経験できたから.	21
考察	・計算結果を確認したから. ・検証したから. ・計算結果の検証をしたから. ・計算したことの意味が, 検証する中で分かったから.	16
まとめ	・分からないところを聞いたから. ・言葉や計算の意味が分かったから.	3

※ $n = 32$ , 単位 (人), 複数回答

## VI. 結語

本研究は, 教育現場で利用できる理論値と実測値の差が少ない斜方投射実験教材の開発を行い, 高等学校「物理」の授業で使用し, 生徒の学習の理解状況や教材に対する好感度から, 教材の有用性を検証したものである. その結果, 以下の4点が明らかとなった.

- 1) 先端に2.5 gのおもりを取り付けたストローロケットのロケット到達距離の実測値は, 生徒実験でも誤差4%未満で理論値と一致した.
- 2) 生徒は, ストローロケット教材を用いた検証授業を通して, 斜方投射理論に関する理解を深め, その理解は2ヶ月後も継続していた.
- 3) 生徒は, 理論値と一致する正確さや仕組みが簡単で操作しやすいことを理由に, ストローロケット教材を有用であると考えていた.
- 4) 生徒は, 計算で答えを求める授業だけでなく, 実物を用いて, 計算したことを意味付ける授業を望んでいた.

以上のことから, 本研究で開発したストローロケット教材を用いた探究学習は, 生徒の斜方投射理論に関する理解を深めるために有効であることが示唆された.

## 謝辞

本研究を進めるに当たり, 快く検証授業を引き受け頂いた公立高等学校の校長, 理科教員, 調査学級生徒の皆様にご感謝申し上げます.

## 註釈

- 1) 誤差 =  $\frac{(\text{実測値} - \text{理論値})}{\text{理論値}} \times 100$
- 2) ライアの多重比較法は、 $\chi^2$ 検定の結果、全体として差が見とれる場合に行う対比較のことで、どの群間に差があるかを検討している。前提となる帰無仮説は「母比率に差はない」で、ライアでは名義的有意水準の概念が使用される。
- 3) 関連のある多群（3つ以上）の差の検定では、各水準のデータが正規分布に従っていると見なせる場合は一元配置分散分析法を用いて検定するが、今回はデータの分布に正規分布からの偏りが見られたためクエード検定を用いた。クエード検定は、対応のある3つ以上の水準に対して、帰無仮説「水準間に差はない」を検定している。

## 引用文献

- 荒木開人・川村康文（2013）。「実験を通して学ぶ理科大好き実験教室の実践とその9「斜方投射」」。『日本科学教育学会年会論文集』。37, 496-497.
- 藤本博之・川村康文・倉田亮輔（2014）。「理科大好き実験室における表計算ソフトを用いた斜方投射シミュレーション」。『日本科学教育学会論文集』。38, 529-530.
- 岩間広祥・愛木豊彦（2010）。「斜方投射について考察する中学生用の授業について」。『岐阜数学教育研究』。Vol.9, 49-53.
- 葛城元・深尾武史・黒田恭史（2019）。「高校1年生を対象とした斜方投射の数学授業の実践」。『教職キャリア高度化センター教育実践研究紀要』。第1号, 65-74.
- 小室孝志（2001）。「市販の教材を利用した簡易放物運動実験器の製作」。『物理教育』。49(6), 550-551.
- 文部科学省（2018）。「『中学校学習指導要領（平成29年告示）解説 理科編』」。東京：学校図書株式会社, 114-115.
- 文部科学省（2019）。「『高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説 理科編 理数編』」。東京：実教出版株式会社, 50-51, 64-65.
- 中川徹夫（2018）。「高等学校物理基礎と物理における重力による運動の有効な指導法－初速度の無機に基づく運動の分類－」。『神戸女学院

- 大学教職センター研究紀要』。1(1), 11-18.
- 澤田行弘・山本和典（2014）。「斜方投射における最大到達距離の算出方法についての考察」。『物理教育』。62(2), 83-86.
- 田中敏・中野博幸（1998）。「js-STAR XRrelease 1.1.3j」  
Retrieved from <http://www.kisnet.or.jp/nappa/software/star/> (accessed 2021.08.22)
- 山上暁・倉智佐一（2018）。「『新版要説心理統計法』」。京都：(株)北大路書房, 120-123.
- 柳井久江（2018）。「『4 Steps エクセル統計』」。東京：(有) オーエムエス出版.
- 米田隆恒（2003）。「作図による放物運動の学習」。『物理教育』。51(4), 270-271.

付 録

検証授業で使った学習カード

番号 \_\_\_\_\_ 氏名 \_\_\_\_\_

斜方投射の理論が正しいか、実験を通して確かめてみよう

1. 目的 理論式から求めた水平到達距離(予測値)と測定値が一致するか確かめ、理論の正しさを確認する。

2. 理論式から、予想を立てよう。

教科書(p.34)から、斜方投射の式は以下のように表される。

$v_x = v_0 \cos \theta$  ..... ①

$x = v_0 \cos \theta t$  ..... ②

$v_y = v_0 \sin \theta - gt$  ..... ③

$y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2$  ..... ④

$x =$   ..... ⑥

水平到達距離は、最高点に達する水平到達距離の2倍

なので、 ..... ⑦

$2x =$

2倍角の公式から、水平到達距離が最も大きくなる発射

角度  $\theta$  は  ..... ⑧

発射物の水平到達距離  $x$  を求める。

最高点では、 $v_y = 0$  なので、③式から、最高点に

$\theta =$

達する時刻  $t$  が求められる。

実験では、0.45 m の発射装置から発射するので、④式

$t =$   ..... ⑤

に  $v_0 = 9.8 \text{ m/s}$ ,  $y = -0.45 \text{ m}$  を代入して、予想到達時間を

最高点までの水平到達距離  $x$  は、⑤式を②式に代入して、予想到達時間を②式に代入して、予想ロケット到達距離を求めてください。

求め予想到達時間を②式に代入して、予想ロケット到達距離を求めてください。

予想到達時間及び予想ロケット到達距離

	30°	45°	60°
予想到達時間	s	s	s
予想ロケット到達距離	m	m	m

3. 実験で検証

(1) 実験方法

- 1) 大グループ内の3班がどの発射装置を使用するか、各班内で発射・時間・距離・回収の分担を決める。
- 2) 発射角度30°, 45°, 60° で、それぞれ5回ずつ飛ばす。その際、発射装置に取り付けた速度計測器で初速度が9.8 m/s になることを確認する。(±0.3 m/s の誤差は容認する)
- 3) 到達時間とロケット到達距離を記録する。

(2) 実験を通して、理論式の正しさを確かめる。

角度	30°		45°		60°	
	飛行時間	ロケット到達距離	飛行時間	ロケット到達距離	飛行時間	ロケット到達距離
1回目	. s	. m	. s	. m	. s	. m
2回目	. s	. m	. s	. m	. s	. m
3回目	. s	. m	. s	. m	. s	. m
4回目	. s	. m	. s	. m	. s	. m
5回目	. s	. m	. s	. m	. s	. m

4. 考察 理論式と測定値が異なったとき、その理由として考えられることを全て書きなさい。

5. 感想 実験をして理論式を確かめる授業をどう思いますか。

よかった

よくなかった

5      4      3      2      1

└───┬───┬───┬───┬───┘

【その理由】