

# 科学史上の思考実験を活用した中学校理科授業の実践 —質量の異なる物体の自由落下運動を事例にして—

Teaching Practices of Junior High-School Science Lessons Using Thought Experiments in the History of Science:  
Focus on the Case of Free-Fall Motion by Objects Having the Different Mass

宮澤 和 孝*	佐々木 智 謙**	佐藤 寛 之**
MIYAZAWA Kazuyuki	SASAKI Tomonori	SATO Hiroyuki
松 森 靖 夫**	佐久間 覚***	新 宮 響 子****
MATSUMORI Yasuo	SAKUMA Satoru	SHINGU Kyouko

**要約**：山梨県内の公立中学校第3学年を対象にして、運動とエネルギーの概念に関する授業実践を行った。具体的には、NASAによる真空中を落下する物体の映像をはじめとする教師側からの足場かけに加え、科学史上のガリレオの思考実験（紐でつながれた鉄球と木球の自由落下に対する論理的思考操作による証明等）を導入しながら、質量の異なる物体の自由落下運動に対する科学的認識を志向した。その結果、生徒の科学的認識達成が確認でき、本授業デザインの有効性や汎用性の一端が明らかになった。

**キーワード**：中学校理科，思考実験，質量，落下速度，科学史，ガリレオ

## I はじめに

自由落下運動について、物体の質量が大きいほど落下速度が大きくなると考えている生徒が多いことが指摘されている（R.ドライバーら，1993）。また、宮澤ら（2017）においても、我が国の中学校第3学年（学習前）の約50%が「物体の質量が大きいほど、落下速度が大きい」と考えており、「質量の大きさに関わらず落下速度が一定だ」とする生徒は約40%にすぎないことが報告されている。

このような憂えるべき理科教育的実状を鑑み、筆者らは、国立大学の附属中学校の生徒を対象にして、科学史の一場面であるガリレオの思考実験（紐でつながれた鉄球と木球の自由落下に対する論理的思考操作における証明）を活用した「質量の大小に関わらず落下速度は一定になる」ことに対する科学的認識の達成を志向した授業実践を行った（宮澤ら，2017）。その結果、科学的認識に到達した生徒が約90%に及び、「重い物体ほど、速く落ちる」等のように、非科学的認識にある生徒は約10%に止まった。

そこで、まず、本授業実践では、宮澤ら（2017）による授業展開の大枠を踏襲するとともに、一般の公立中学校の生徒に対する、科学的認識の達成を図るため、NASAによる真空中を落下する物体の映像をはじめとする教師側からの足場かけを盛り込み、新たな授業デザインを行う。次に、実際の公立中学校の生徒を対象にして授業実践を行い、その結果に基づきながら、本授業デザインの有効性や汎用性について検討を加える。

\* 教育実践創成専攻（教職大学院）大学院生 \*\* 科学教育講座 \*\*\* 都留市立旭小学校

\*\*\*\* 甲府市立上条中学校

## II ガリレオの思考実験について

本理科授業実践において活用するガリレオの思考実験（ガリレオ・ガリレイ，1959）では，図1に示したように，「物体の落下速度は質量の大きい物体ほど大きい」と仮定した上で論理的思考が展開されている。具体的には，まず，図1のA案のように，質量が大きい球と小さい球を紐でつなぎ，全体で1つのものとして考えたとすれば，質量が大きい球と小さい球の質量が合わさって，質量がさらに大きくなり，質量が大きい1個の球よりも落下速度が大きくなるという結論が導かれることになる。

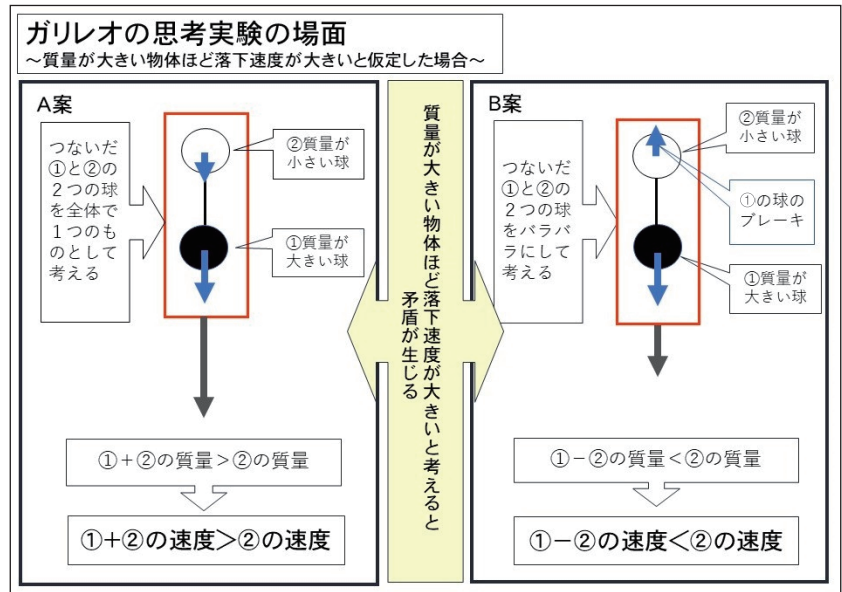


図1 ガリレオの思考実験の概要

一方，B案のように，2つの球を別個に考えたとすれば，質量が小さい球は，質量が大きい球よりも落下速度が小さくなり，大きい球が落下する時のブレーキになる。そのため，質量が大きい1個より落下速度が小さくなるという帰結が導出されることになる。

このように，「物体の落下速度は質量が大きいほど大きい」という仮定に基づきながら論理的思考を展開すると，相矛盾する結果が生じることになる。ガリレオはこの一連の背理法に依拠しながら，「物体の落下速度の大きさは，質量の大きさに関係がない」という結論を導き出したのである。

## III 研究の目的と方法

本研究の主な目的と方法は，以下の通りである。

- (1) 既存の教材（NASAによる真空中を落下する物体の映像，科学史上のガリレオの思考実験，等）の活用や，教師からの足場かけ等を想定しながら，事前調査で明らかになった公立中学校の生徒の実態に適合した「自由落下運動」に関する学習指導方策を考案する。
- (2) 上記（1）で設計した学習指導方策を，公立中学校において実際に試行する。
- (3) 上記（2）で得られた学習指導方策の試行結果を分析して，その有効性や汎用性の有無について検討する。

## IV 生徒に対する事前調査の実施と結果の概要

### 1. 調査期日と調査対象

授業を実施する前の2018年9月下旬～10月上旬に実施した。調査対象は，山梨県公立K中学校第3学年，計2クラス52名である。

### 2. 調査方法と内容

質問紙法による自由記述形式で回答を求めるものである。調査内容は，空気中の鉄球と発泡スチ

ロール球の落下速度を比べ、その理由についても記述を求める問（質問1）と、真空中の空気中の鉄球と発泡スチロール球の落下速度を比べ、その理由についても記述を求める問（質問2）で構成される。なお、回答時間は制限せず、生徒に必要なだけ与えた。

### 3. 調査結果とその分析

質問1（空気中の鉄球と発泡スチロール球の落下速度の比較）の回答結果を表1に、質問2（真空中の鉄球と発泡スチロール球の落下速度の比較）の回答結果を表2に、それぞれ示したので参照されたい。

表1 質問1（空気中の鉄球と発泡スチロール球の落下速度の比較）の回答結果

(対象生徒2クラス/52名)

分類	回答	理由	回答人数	合計
1	鉄球が速い	鉄球の方が重いから	34	43
		発泡スチロール球は空気抵抗が大きいから	6	
		理由なし	3	
2	同じ	大きさ（体積）が同じなら空気抵抗も同じと思った	2	5
		理由なし	3	
3	発泡スチロール球が速い	軽いから	4	4

表2 質問2（真空中の鉄球と発泡スチロール球の落下速度の比較）の回答結果

(対象生徒2クラス/52名)

分類	回答	理由	回答人数	合計
1	鉄球が速い	重いから	14	18
		発泡スチロール球が軽く、浮いてしまうから	1	
		理由なし	3	
2	同じ	空気抵抗がないから	14	21
		重力がはたらかないから	2	
		本で読んだことがある	1	
		理由なし	4	
2	発泡スチロール球が速い	軽いから	5	13
		空気抵抗がなく軽いから	3	
		空気で圧縮され、密度が大きくなるから	1	
		理由なし	4	

表1に示したように、空気中では、鉄球が重いから速く落下すると答えた生徒が半数以上を占めた。一方、軽いから速く落下すると考えている生徒もわずかではあるが存在した。回答理由からは、重い物体が速く落下するのは、それだけ大きな重力がはたらいているからであり、軽い物体が速く落下するのは、素早く動くことができるというように、生活体験から考えが及んだものと推察される。

また、表2のように、真空中になると、重い物体が速く落下すると考える生徒が40%未満となり、同時に落下すると考える生徒が40%以上に達する。生徒の理由記述の中でも触れられていることで

あるが、その背景は空気抵抗の存在にある。しかしながら、空気抵抗がないとなぜ同時に落下するのか、その本質的原因にも言及している生徒は皆無であった。

このように、事前調査によって、生徒の誤認識の実態や自由落下運動に対する本質的原因の認識の欠如等が明らかになった。次章では、教師側からの効果的な足場づくりについても考究しながら、生徒の誤認識を科学的なものへと変容・再構成するための学習指導方策について提案する。

## V 学習指導方策の考案

### 1. 単元構成、及び本授業内容

本時の授業内容は、中学校第3学年理科単元「運動とエネルギー」（計15時間）に含まれるものである。具体的な単元構成は、一直線上にはたらく2力の合成（第1時）、一直線上にない2力の合成（第2時）、力の分解（第3時）、平均の速さと瞬間の速さ（第4時）、記録タイマーの使い方（第5時）、斜面を下る運動①（第6時）、斜面を下る運動②（第7時）、斜面上にはたらく力の大きさ（第8時）、自由落下運動①（第9時）、自由落下運動②（第10時）、質量が異なる物体が、同じ斜面を下るときの運動（第11時）、等速直線運動①（第12時）、等速直線運動②（第13時）、慣性（第14時）、及び作用・反作用（第15時）であり、本授業内容は第10時に該当する。また、本授業の目標は、「自由落下運動では、質量の異なる物体の落下速度が同じになる理由を説明できる」ことにある。

### 2. 実験法による二種類の学習指導方策の提案

まず、統制群となる生徒対象の学習指導方策を考案した。概要は図2に示す通りであり、授業の導入段階で教師側から「ボーリングの球と鳥の羽根を同じ高さから落下させたとき、落下速度が大きいのはどちらか」と問いかけ、空気中と真空中の双方の理由も尋ねながら、生徒なりの仮説づくりを行わせる。その後、NASAで行われた実験場面の動画を視聴させて、落下速度は同一であることを確認させる。次に、「真空中では物体の質量に関係なく、落下速度が同一である理由」を明らかにするという課題を提示するとともに、ガリレオの思考実験で用いられたような質量の異なる2球（紐でつないだ鉄球と木球）の活用も促して、課題の解決に迫るものである。

次に、図2の統制群用の学習指導方策を踏まえて、実験群となる生徒対象の学習指導方策を考案した。図3に示したように、授業の導入段階からNASAの実験場面の動画視聴までの展開は同一であるが、その後、真空中での落下に焦点化して思考実験を遂行させる点（足場かけ①）が異なっている。第IV章での事前調査によって明らかになった生徒の低い認識状態にあっては、空気中の思考実験を合わせて取り上げることは難しいものと考えたためである。さらに、実験群用の学習指導方策では、落下速度と質量の大きさの関係に焦点化して思考実験を行わせるために、ガリレオの思考実験に沿った問題を用意するとともに、既述した図1のA・B案も導き出すために全体で確認させる（足場かけ②）。

## VI 授業実施と結果の分析

2018年10月上旬に実施した。調査対象は、第IV章での事前調査の対象となった生徒と同一であり、山梨県公立K中学校第3学年、計2クラス52名である。なお、Aクラス（計27名）を統制群とし、Bクラス（25名）を実験群とした。

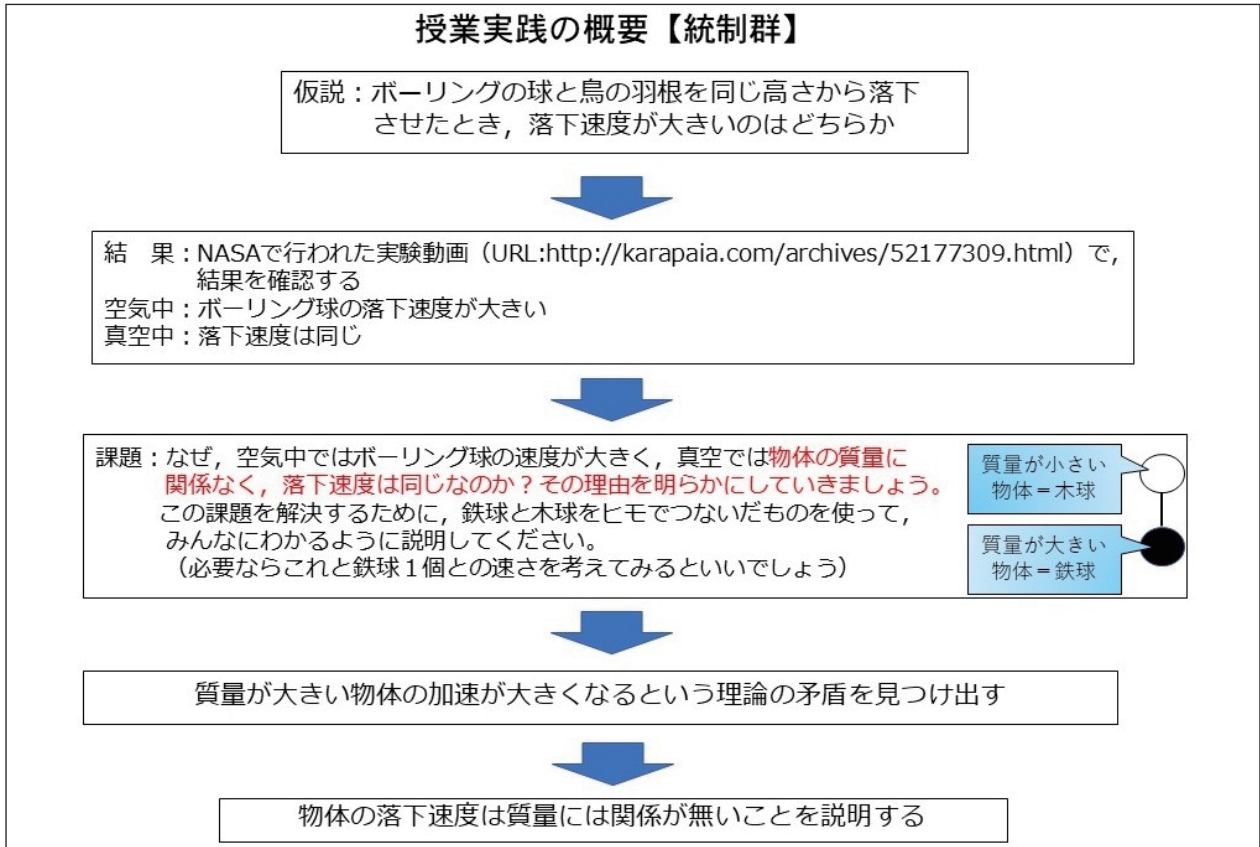


図2 統制群の学習指導方策

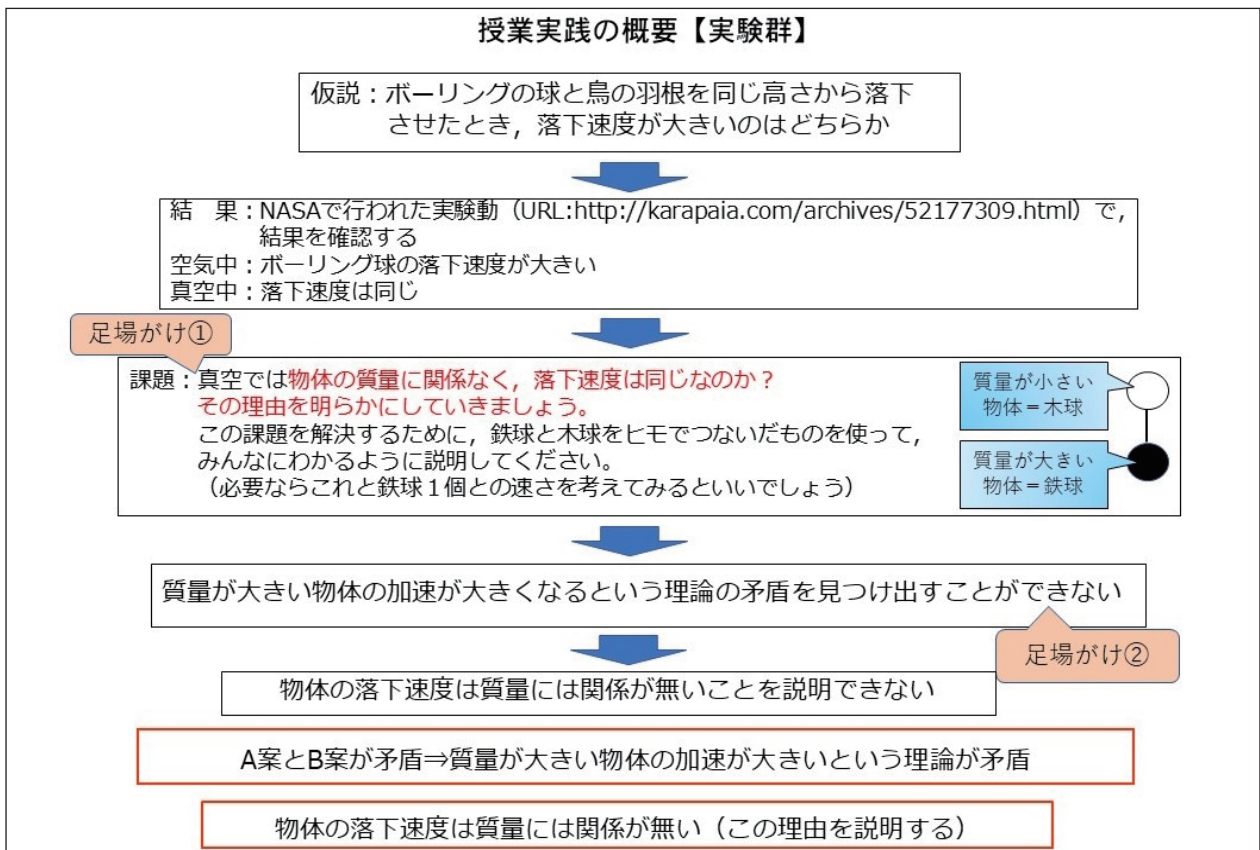


図3 実験群の学習指導方策

1. 統制群について

まず、統制群の生徒が考案した思考実験例を、図4に示す。

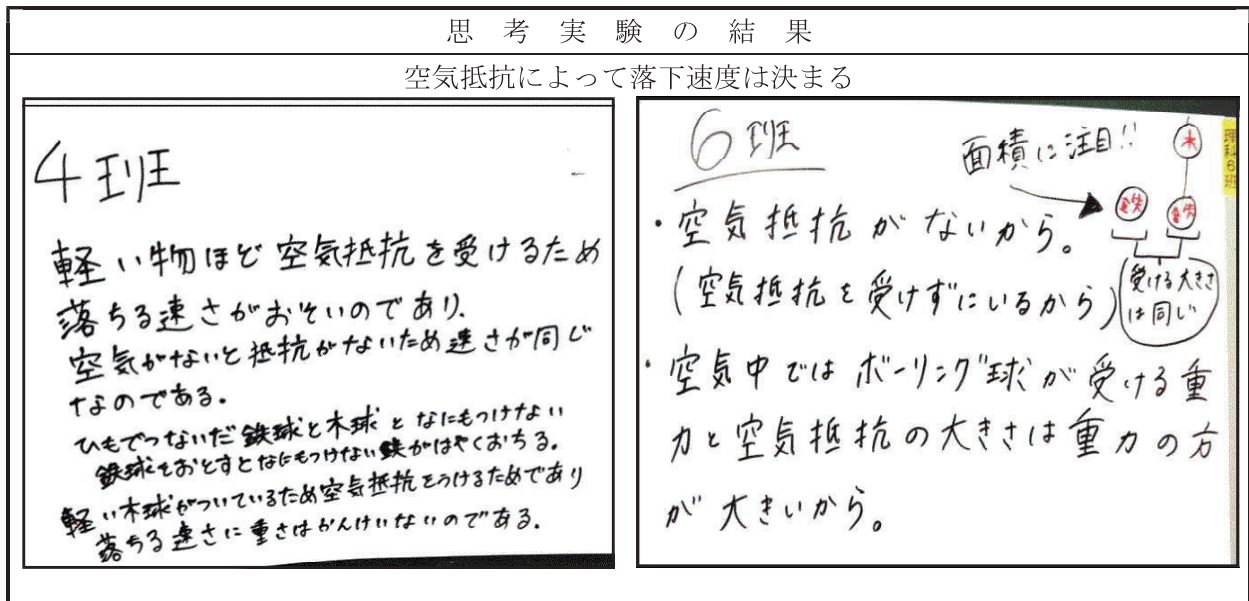


図4 統制群の生徒が考えた思考実験の回答結果例

まず、4班の思考実験結果からも分かるように、質量が小さい物体は空気抵抗が大きく、質量が大きい物体は空気抵抗が少ないと、空気抵抗の概念を誤認識している生徒が存在した。また、この班では、質量と落下速度との無関係性の理由についても示されていない。一方、6班の思考実験からは、空気中では、重力と空気抵抗の差が大きな物体の方が、落下速度が大きいと考えていることがわかる。しかし、4班同様、真空中における物体の質量と落下速度との関係については言及するに至っていない。

周知の通り、空気中における自由落下速度を決定する要因の一つとして、空気抵抗を挙げることができるが、真空中における自由落下速度を決定する要因ではない。そのため、まず、既に提案した実験群の学習指導方策（図3）のように、空気抵抗の影響を排除できる真空中の落下運動を取り上げて理解させた上で、空気中の落下運動を取り上げていくという一連の学習指導方策の設定が必要となるものと推察される。

次に、思考実験前後における統制群の生徒の変容様態を表3に示す。

表3 思考実験前後の生徒の変容様態（統制群）

(対象生徒 Aクラス /21名・欠席6名)

分類	回答	理由	思考実験前	思考実験後
1	ボーリング球が速い	ボーリング球の方が重いから	12	3
		鳥の羽根の方が空気抵抗が大きいから	5	3
2	同じ	重い物体も軽い物体も同じ重力になるから	0	2
		重さでは落下速度は変わらないから	0	1
3	無回答	—	4	12

この結果を一覧すれば分かるように、思考実験後、無回答の生徒が半数を超えていることから、統制群の生徒は本授業の中で認知的混乱を生じ、理由づけには至らなかったものと推察される。また、授業における机間巡視において散見された光景であるが、鉄球と木球の質量の異なる球をどのように扱えばいいのか、それ自体を認識できずに考えあぐねている生徒も存在し、生徒にとって疑問だけが残った授業展開となった。

## 2. 実験群について

続いて実験群の生徒が考案した思考実験の結果例を、図5に示す。

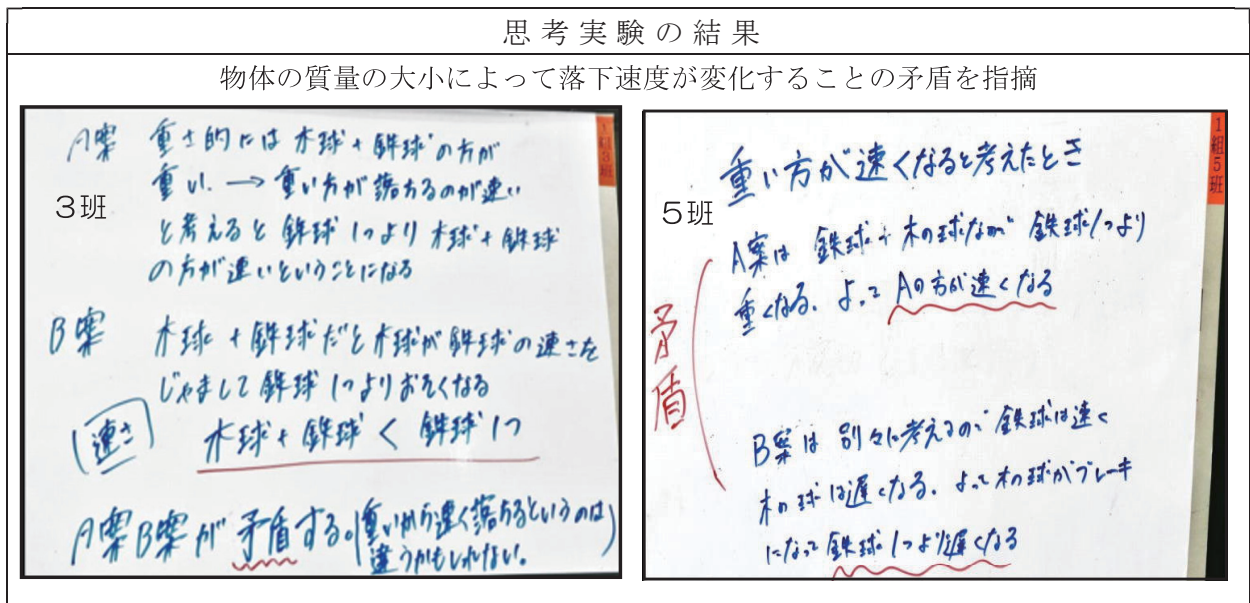


図5 実験群の生徒が考えた思考実験の回答結果例

実験群においては、図5の3班や5班のように既述した図1に示したB案を導き出すこと、さらに、A案とB案を関連付けながら、質量が大きい方が落下速度が大きいことへの矛盾を背理法で導き出すに至った生徒が表出した。このことは、統制群では表出しなかったことであり、実験群に用いた学習指導方策(図3)が公立中学校の生徒に有効であることを示している。次に、思考実験前後での生徒の変容様態を、表4に示す。

表4 思考実験前後の生徒の変容様態(実験群)

(対象生徒Bクラス/21名/欠席4名)

分類	回答	理由	思考実験前	思考実験後
1	ボーリング球が速い	ボーリング球の方が重いから	14	0
		鳥の羽根の方が空気抵抗が大きいから	2	2
		ボーリングの球が重く、羽根の空気抵抗が大きいから	5	2
2	同じ	空気抵抗がないから	0	4
		重いボーリングの球が速く落下すると考えると、見方によって速くなったり遅くなったりするから	0	10
		ボーリングと鳥の羽根には重量がはたらくから	0	1
		理由なし	0	2

既に述べた事柄でもあるが、落下速度と質量を関連付けて考えることができるようになった生徒は、統制群では皆無だったが、実験群では21名中10名に及び、実験群の学習指導方策（図3の足場かけ①と②）の有効性が改めて認められた。その一方で、4名の生徒は思考実験は論理的に遂行できていたのにも関わらず、ワークシートには、空気抵抗がないからと記載していた。

この原因の一つとしては、最初の足場かけの段階で空気抵抗にふれずに、真空中での問題場面に焦点化したことにあるものと推察され、実験群の学習指導方策の新たな課題が表出する形となった。今後は、この課題等も踏まえながら、さらなる効果的な学習指導方策の構築に向けた取り組みも急務である。

## VI 結語に変えて

本授業実践では、ガリレオの思考実験場面や、NASAによる真空中における自由落下運動の動画を活用するとともに、教師の足場かけを併用しながら、学習指導方策を開発して試行した。その結果、公立中学校の生徒の認知的変容が生じ、この学習指導方策の有効性や汎用性の一端が明らかになった。しかしながら、依然として空気抵抗に固執する生徒も存在したため、それらの生徒にも適用可能な効果的な学習指導方策へと再構成する必要がある。また、今回の授業は計52名の生徒（統制群：27名，実験群：25名）に実施することにとどまった。さらに、多くの生徒を対象にして授業を行い、本学習指導方策の有効性や汎用性について、定量的に分析を加えていく必要もある。今後の自らの課題とさせていただきたい。

### <参考文献>

ガリレオ・ガリレイ（青木靖三訳）（1959）『天文対話（上）』岩波書店，全439p.

R. ドライバー・E. ゲスン・A. ティベルギェ（内田正男監訳）（1993）『子ども達の自然理解と理科授業』東洋館出版社，pp. 112-134.

宮澤和孝・松森靖夫・佐藤寛之・佐々木智謙（2017）「思考実験を活用し，仮説づくりを中心とした中学校理科授業実践－質量の異なる物体の自由落下運動を事例にして－」『山梨大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要』No.22，pp. 169-178.