

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—

On the Lesson of Science Executing Thought Experiments and Focusing on Creating Hypotheses in Lower
Secondary School Science:
Considering Free Fall of the Objects with Different Mass

宮澤和孝* 松森靖夫** 佐藤寛之** 佐々木智謙**
MIYAZAWA Kazuyuki MATSUMORI Yasuo SATO Hiroyuki SASAKI Tomonori

要約：本実践研究では中学校3学年を対象にして、課題「質量が違う2つの物体の落下速度はどのようになるか」に対する仮説を立てながら学習に取り組ませた。

具体的には、ガリレオの落下に関する思考実験を活用した学習である。その結果、約90%の生徒が、「質量の大きい鉄球と小さい木球をひもでつけたものと、鉄球がどのように落下すれば自分たちの仮説が正しいと証明できるのか」という問題場面に対する論理的説明を行い、表出した仮説をクラス全体で行う討論を通して共有・収束させるとともに、落下する物体の速さは質量に関係がないことに気付いた。

さらに、討論活動を通して、同じく約90%の生徒の考えが深化し、「なぜ、質量が違って物体の落下速度は変わらないのか」に対する科学的理由についても導出できた。

キーワード：思考実験 質量 落下速度 科学史 ガリレオ 仮説 討論

I はじめに

斜面上にある物体にはたらく力の大きさは、斜面の場所が変わっても力の大きさは変わらないことを、生徒に見いださせる必要がある。速さが大きくなるとそれにともない、はたらく力も大きくなると考えてしまう生徒は多い。(R.ドライバーほか1993)。そして、同じ力で引かれて続けて速さが大きくなると考える生徒は少ない。したがって、この概念を十分きちんと理解させる必要があり、自由落下運動についても同様である。

自由落下運動では物体の質量が大きいほど速く落下すると思っている生徒(R.ドライバーほか1993)は多いが、実際は質量の大きさに関わらず、落下速度は一定になる。この理解は高校物理で学習する運動方程式と関わっているため、中学校段階では難易度の高い学習だが、理解を促したい。

授業では、図1のBのように斜面の角度が大きくなればなるほど、斜面上にある物体の進行方向にはたらく力が大きくなり、運動する速さは大きくなることを生徒に理解をさせる。そして、物体の質量を大きくすると、物体にはたらく重力が大きくなり、その結果、進行方向にはたらく力は大きくなる。しかし、図1のCのように質量の大きい物体を図1のAと同じ斜面上で運動をさせると、進行方向にはたらく力は大きくなるが、質量の異なる2つの物体の速さは同じになってしまう。

質量が大きい方が重力の分力である進行方向にはたらく力は大きくなるにも関わらず、質量が小さい物体が運動をするときと同じ速さになる。生徒同様、多くの授業者は、そこに認知的葛藤を覚

* 附属中学校 ** 科学文化教育講座

えるのではないだろうか。この認知的葛藤を解消することができてはじめて、斜面の運動を理解できるものと考えている。そのために、本授業実践では、まず自由落下運動を学習し、その認知的葛藤を解消した後に、斜面上にある質量を変えた物体の運動について扱った。

斜面上の物体の運動についても、同様の理由（慣性質量）で説明することができ、これが小学校時に既習の振り子の運動にも関わりを持たせることができるからである。特に、本時に学習する内容は、小学校で学習した内容と高校で学習する内容とを関連させることに繋がっていく。

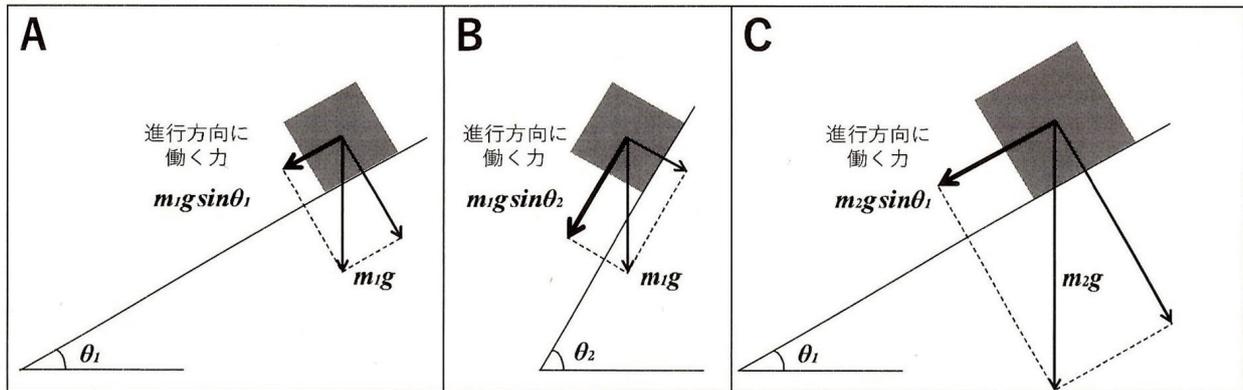


図1 斜面上の物体にはたらく進行方向の力の比較

慣性質量は力学台車を使えば確認できる。同じ力を加えたとき、質量を大きくした力学台車と質量を小さくした力学台車の移動距離を確認すると、重い力学台車は動きにくく、軽い台車は動きやすいということを確認することができるので、これらの実験も活用した。

ところで、かねてより国内外において科学史上のトピックを題材とした理科授業実践が遂行されてきた（レオ・E・クロッパー 1976, F. J., ラザフォードほか 1977）。科学史上の実験場面やパラダイム変換のプロセスが、理科学習者の認識過程等と類似したり適合したりしている場合、効果的な授業実践を構成するための格好の教材となるためである。そのため、本授業実践では、ガリレオの落下に関する思考実験（ガリレオ・ガリレイ 1959）を取り上げ、「質量が違う2つの物体の落下速度はどのようになるか」という問題のもと、仮説を立てて学習を進めた。

具体的には、2つの球をひもでつけて、この球がどのように落下すれば自分たちの仮説が正しいと証明できるのか、その結果と理論を結びつけて考えさせた。そのとき生徒から出た仮説を収束させるところまで話し合いを深化させて、仮説の精緻化を図らせながら、落下する物体の速さは質量に関係がないことに対する実感を伴った理解を志向していった。

II 授業実践

1. 指導計画「運動とエネルギー」【運動の学習】

図2に本単元の指導計画を示す。生徒のレディネスを把握するための事前調査を含めて、計19の授業時数を充当した。

第1時 事前調査 第1次…力の合成・分解(4時間) 第2時 一直線上にはたらく2力の合成 第3時 一直線上にない2力の合成 第4時 力の分解 第2次…物体の運動(15時間) 第5時 速さと向き 第6時 運動の記録と速さ 第7時 斜面を下る運動① 第8時 斜面を下る運動② 第9時 斜面上にはたらく力の大きさ 第10時 自由落下運動①	第11時 自由落下運動② 第12時 質量が異なる物体の落下運動①…本時 第13時 質量が異なる物体② 第14時 質量が異なる物体が同じ斜面を下る運動 ・力の向きと運動 第15時 等速直線運動① 第16時 等速直線運動② 第17時 慣性① 第18時 慣性② 第19時 作用・反作用
---	---

図2 単元指導計画

2. 本時の目標と展開

本時の学習内容は「単元1 運動とエネルギー／2章物体の運動・2力がはたらき続ける運動・B 自由落下運動」であり、エネルギーを扱う中学校最後の単元である。

本時の目標は、「自由落下運動では、質量の違う物体がどのように落下するか、思考実験を通して仮説を立てることができる」である。授業は山梨大学教育学部附属中学校3年生計3クラス117名(男子58名・女子59名)である。実施日は平成28年9月下旬から中旬にかけて実施した。本時の展開については、表1に示す通りである。

表1 本時の展開

流れ	学習内容	教師のはたらきかけと生徒の活動	評価及び・研究の留意点
導入 3分	問 物体を落下させたとき、速さはどのように変化しますか？	・落下する物体の速さは速くなる	自由落下運動では、速さは速くなる運動をすることを想起する
展開 1 7分	問題1 体積が同じ鉄球と木球が、同じ高さから同時に落下するとき、早く落下するのはどれか？ただし、空気抵抗は考えないものとする 仮説分布の確認 仮説の発表	自分の考えをワークシートに書く (A:仮説1) ・鉄球の方が重いので、はたらく重力も大きいので、速く落下する ・硬式テニスの方が軟式テニスよりも、ボールのスピードが速いから、鉄球の方が速く落下する ・なんとなく、同時に落下する ○鉄球が最も多く、次に両方同時が多いと予想 ・仮説毎にグループ分けを行う。 ・仮説の交流を行う ・理由の板書	思考1 ☆自分の考えが書けているか ☆「質量」「力」「重力」「速さ」といった語句を使って説明しているか 視点を変える1(思考2) ★班で意見を交流し視点が変わるか、自分の仮説の根拠を明確にする

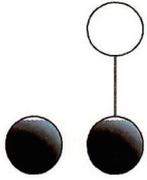
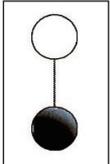
<p>展開 2 15分</p>	<p>ガリレオの落下実験にふれ、ひもをつけた球を用意した理由についてふれる</p> <div data-bbox="236 331 1061 560" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>課題 鉄球と木球の2つのボールをヒモで結んだものと、鉄球（木球）を使って、自分たちの仮説が正しいことを説明してみよう * 空気抵抗は考えない * 思考実験を行い、結果・考察を考える</p>  </div> <p>仮説の再構成ポイント</p> <ol style="list-style-type: none"> ① こうだからこうなると100%断言できるようにする ② 「この結果がありえないからこれしかない」と相手の仮説を否定して仮説を作ってもよい ③ 鉄球が速いと考えたグループには、ヒモで結んでいるものだけで考えてよい ④ 同時には、ヒモ付きの鉄球をまとめた場合と、別々で考えるアドバイスをを行う 	<p>仮説の再構成ポイント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 中身が詰まった体積が同じで、質量の違う2種類の球をひもでつなげたものを用意する ・ どのように球が落下したら自分たちの仮説が正しいと証明されるのか、予想される実験結果とその理由を論理的に説明できるように、各班で話し合う ・ ホワイトボードをメモに使用し、パソコンに記入する（最後にプリントアウト） 	<p>視点を定める2 (思考3)</p> <p>★教材・教具を与えて、考える視点を変える</p> <p>仮説の書き方</p> <ol style="list-style-type: none"> ① こういう実験を行い ② こういう結果になった ③ なぜならこうだから ④ だから私たちの仮説は正しい。(必要に応じて、同時に落下のグループには、相手の仮説は間違えているから、私の仮説が正しいという視点で考えるようにさせる)
<p>展開 3 20分</p>	<p>仮説と検証方法の発表による話し合い活動を行う</p> <p>話し合い活動について</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 鉄球が速いと考えた班から、意見を発表させる 鉄球にはたらく重力が大きいから速く落下するという理由から発表させ、同じことを考えた班を確認する ② 速く落下するという意見から、同時に落下する班に質量は落下速度は関係ないと考え理由を引き出し、話し合いを進める ③ 意見が出尽くしたところで、鉄球の落下速度が速いと考えた違う意見に発表をしてもらう ④ 同じように意見の数だけ発表をさせる ⑤ 同じと考えたグループの発表その中で、右の考えが出てきたらそれをもとに話し合いを進める ⑥ 出なければ、発表終了をみて教師から提示して考えさせ、仮説を完成させる 	<p>仮説ができたなら、パソコンに記入する (B)</p> <p>・ パソコンの画面を電子黒板とTVモニターに映し出して、自分たちの仮説を発表する。そこで、質問をしながら話し合いを進め、仮説を収束させる</p> <p>◆鉄球が速く落下する</p> <p>X) 鉄球は、木球が遅くなるので、上に引っ張られて、1個で落下するより速さが遅くるとよい</p>  <p>Y) 2つの球を全体で一つのものと考えれば球2個分の重さだから、鉄球1個より速く落下する</p>  <p>Z) 鉄球が重いので先に落下する</p>  <p>* 討議のポイント 重力が大きい鉄球が速く落下するとなると予想され、ここを起点に考えさせたい</p>	<p>視点を定める3 (思考4)</p> <p>★クラス全体で仮説とその検証方法を交流し、自分の仮説をさらに練り上げる</p>

表2 仮説1 「体積が同じ鉄球と木球が、同じ高さから同時に落下するとき、早く落下するのはどれか？ただし、空気抵抗は考えないものとする」と答えた生徒の回答結果

(対象生徒3クラス/117名)

分類	回答	理由	回答率 (%)
1	鉄球が速い	鉄の方が質量が大きいのので、物体にはたらく重力が大きくなるから	55.6
2	どちらも同じ速さ	振り子の速さは質量に関係なく速さは一定だから 空気抵抗がないので、重力は同じ向きにはたらくから はたらく重力の大きさが鉄も木も同じだから 質量が大きい方が重力が大きく、質量が小さい方が重力も小さいだけで、結果的に質量と速さの関係は総合的に変わらないから ピサの斜塔からガリレオがやった有名な実験ということを知っているから 体積が同じで空気中にあるときは、その物体にははたらく重力は同じだから 重い物体を動かすときは大きな力が必要で、軽い物体を動かすときは少ない力で済む。結果的に質量100gの物体を動かすには1.0Nの力が、質量10gの物体を動かすには0.1Ngの力が必要だけど、両方の物体の質量1gの物体を動かすには0.01Nの力になるから、質量1gに対する重力の大きさは等しいから、同時に落ちる	44.4
3	木球が速い		0

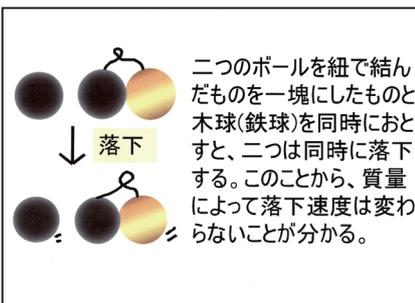
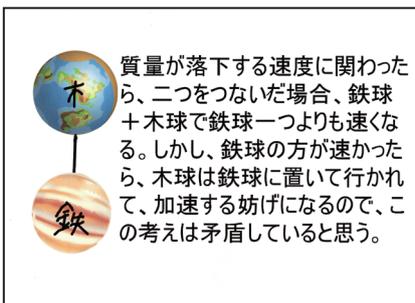
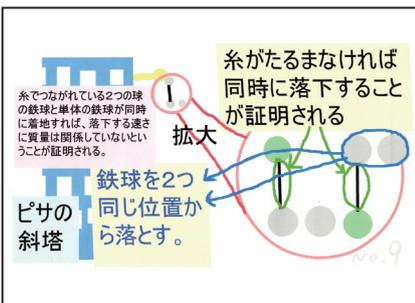
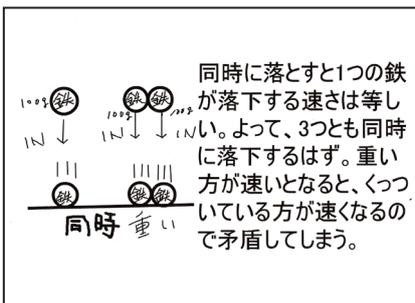
鉄球が速いと回答した生徒の理由は、まさに古代ギリシャ期のアリストテレスの考えを彷彿とさせる「重いものほど早く落ちる」というプリコンセプションに裏打ちされていることが分かる。一方、「どちらも同じだ」と回答した生徒の理由づけには、科学的に判然としない内容や論理一貫性の欠如した理由付けが散見された。

2. 課題「鉄球と木球の2つのボールをヒモで結んだものと、鉄球（木球）を使って、自分たちの仮説が正しいことを説明してみよう。*空気抵抗は考えない」の生徒の思考実験結果について生徒が考えた思考実験の結果は、表3に示す結果①～⑦に及んだ。

表3 生徒が考えた思考実験の回答結果

(鉄球が速い17班・同時に落下13班/全30班)

分類	回答	生徒が考えた思考実験
1	鉄球が速い	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p style="text-align: center;">結果①</p> <p>2つの球を一直線に並べて落としたとき、質量が大きい鉄球の方が重力に引かれる力が大きいので、早く落ちていくこととなると考える。</p> <p style="text-align: center;">計 16 班 (53.3%)</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p style="text-align: center;">結果②</p> <p>Pは鉄球の質量が大きいので速く落下し、質量の小さい木球は遅く落下する</p> <p style="text-align: center;">計 1 班 (3.3%)</p> </div> </div>

2	同時に落下する	<p>結果③</p>  <p>計 3 班 (10.0%)</p>	<p>結果④</p>  <p>計 2 班 (6.7%)</p>
		<p>結果⑤</p> <p>振り子の実験では、重さにより振り子の振れる速さは変わらなかった。なので、重さが重い鉄球が木球よりも早く落ちることはないから、鉄球と木球を同じ高さから落としたとき、二つの球は同時に落ちると考えられる。</p> <p>計 2 班 (6.7%)</p>	
		<p>結果⑥</p>  <p>計 4 班 (13.3%)</p>	<p>結果⑦</p>  <p>計 2 班 (6.7%)</p>

生徒の思考実験を分析すると、質量が大きい鉄球が速いと考えていた生徒の中の約 94%が結果④の思考実験であった。その中で②の考えが出てくるとは予想していなかった。授業者側に「出てくるとしたら同時に落下する方の意見から出てくればいい」という願いがあったためである。

一方、同時に落下する方の思考実験の結果としては⑤や⑥が表出したが、ガリレオが実際に用いた思考実験の論理構成と酷似した結果④の表出は、まさに特筆に値するものであった。①は、重力が大きい方の球の落下速度が速いと考える生徒で、重力は落下速度に関係ないと考えるのが、同時に落下する方の意見であった。

この重力がキーワードとなって話し合いが始まり、重力をどのように考えるのか、ここを起点に話し合いが深化した。その中で出てきた④の意見、その矛盾をつくように結果②の意見が表出した。

しかし、②の考えでは、同時に落下するという理論が成り立たないことになり、その結果、生徒が考えた思考実験は図 3・4 の仮説

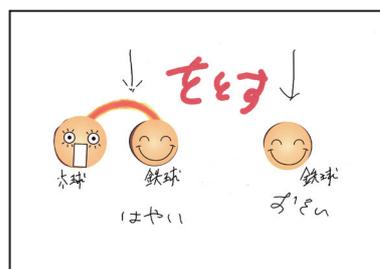


図 3 思考実験の帰着点 1

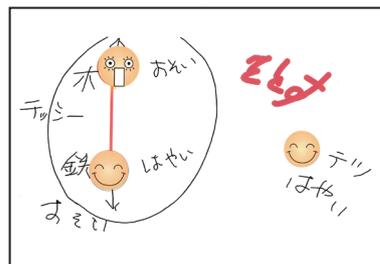


図 4 思考実験の帰着点 2

に収束していった。

質量が大きい方が速く落下すると仮定したとき、図3は鉄球と木球を一緒に考えると質量が大きくなるので、鉄球よりも速く落下することになる。図4では、質量が大きい鉄球が速く落下し、質量の小さい木球が遅くなる。その結果、木球がブレーキになり鉄球の落下を妨げてしまい、結果、鉄球1つが落下するより遅くなってしまう。

このような一連の思考過程を通して、質量が大きい方が速く落下するという仮説は捨去されていった。したがって、質量の大きい方が速く落下するとはありえないので、物体は質量に関係なく同時に落下するという事にまとまっていき、結果⑦の考えに到達したのである。

その後、なぜ物体は重力に関係なく同時に落下する理由についても話し合われ、図5のような見解にまとまっていった。

重い物体を動かすときは大きな力が必要で、軽い物体を動かすときは少ない力で済む。結果的に質量100gの物体を動かすには1.0Nの力が、質量10gの物体を動かすには0.1Ngの力が必要だけど、両方の物体の質量1.0gの物体を動かすには0.01Nの力になるから、質量1.0gに対する重力の大きさは等しいから、同時に落ちる。

図5 クラス全体で共有された自由落下に対する見解

3. 結果と課題

討論終了後の生徒自身の考えを尋ねたところ、表4のような結果が得られた。

表4 討論終了後の生徒の変容(仮説1と仮説2の比較)

(対象生徒3クラス/117名)

分類	回答	理由	仮説1 回答率(%)	仮説2 回答率(%)
1	鉄球が速い	鉄の方が質量が大きいので物体にはたらく重力が大きくなるから	55.6	8.4
2	同時に落下する	重い物体を動かすときは大きな力が必要で、軽い物体を動かすときは少ない力で済む。結果的に質量100gの物体を動かすには1.0Nの力が、質量10gの物体を動かすには0.1Ngの力が必要だけど、両方の物体の質量1gの物体を動かすには0.01Nの力になるから、質量1gに対する重力の大きさは等しいから、同時に落ちる	44.4	63.3
		質量が大きいほど速く落下すると仮定すると、鉄球と木球をまとまりとして考えると、速さは速くなり、鉄球と木球を切り離して考えると、木球が鉄球の運動を妨げてしまい、速さは遅くなってしまので、この理論が矛盾するから	0	28.3

※尚、表中の「仮説1」と「仮説2」は表1中に記したそれらと対応している。

鉄球と木球との同時落下の根拠について、科学的な言葉を使用して説明していた生徒は91.6%であった。しかし、討論後も実感の伴った理解には至らず、鉄球が速いと答える生徒が8.4%存在した。平生の理科実験にあっては、ウェットラボが大半を占め、思考実験というドライラボを行う機会が僅少であることからしても、無理からぬところであると考えられる。

今後は、思考実験の機会を増やすとともに、これらの生徒の思考を促すための教師からの足場づくり(Scaffolding)が要求される。授業者としての自らの今後の課題としたい。

IV おわりに

最後に、生徒の感想に基づきながら、学習者側からみた本授業実践の有効性について検討する。まず、「授業を振り返ると、課題はとても難しく、授業終了後は達成感があった。(生徒番号 35)」、「最初は全く理解できなかったが、話し合いをしていく中で理解することができた。(生徒番号 7)」、「理論は納得できたがまだ、同時に落下する理由に納得がいかない。(生徒番号 62)」、及び「体積はどうかという疑問があったが、それは関係はないのだろう。(生徒番号 108)」を挙げることができる。思考・理解の深化、学習への達成感、自らの考えに対するコミットメントに関わる感想であり、本授業実践が肯定的に受け止められていることが読み取れる。

また、授業内容ではなく、「相手の矛盾を突いたりする考え方(背理法)を学ぶことができた。(生徒番号 19)」や、「思考実験が新鮮だった。思考実験の結果は、自分の都合良く出せてしまうことが難しい。(生徒番号 50)」というように、ガリレオが用いた背理法について新たに学び、自らの思考様式の多様化に言及している感想も認められた。このように、生徒は本授業実践に対する有効性を実感していることが窺い知れる。

本授業実践が、質量を変えた斜面上の物体の速さに対する運動や自由落下運動の授業に対する生徒や教師の認知的葛藤を解消する一助になれば幸いである。

参考文献

- ※R. ドライバー・E. ゲスン・A. ティベルギェ (内田正男訳) (1993) 『子ども達の自然理解と理科授業』東洋学出版社, 112-134 頁
- ※レオ・E. クロッパー (渡辺正雄訳) (1976) 『HOSC 物理』講談社, 全 119 頁
- ※F. J. ラザフォード・G. ホルトン・F. G. ワトソン (渡辺正雄ほか訳) (1977) 『プロジェクト物理 1』コロナ社, 全 246 頁
- ※ガリレオ・ガリレイ (青木靖三訳) (1959) 『天文対話 (上)』岩波書店, 全 439 頁

