

研究課題	宇宙を題材とした小型センサーによる慣性力に関わる定量実験の開発
副題	～STEAM を活用して最先端研究や大学物理の内容を高校物理とつなぐ～
キーワード	現代物理、慣性力、探究活動、STEAM、誤解の修正
学校/団体名	私立学校法人立教学院 立教新座中学校・高等学校
所在地	〒352-8523 埼玉県新座市北野 1-2-25
ホームページ	https://niiza.rikkyo.ac.jp/

1. 研究の背景

量子力学や相対性理論が生み出されて 100 年ほどが過ぎ、最先端研究ではこれらの理論が当たり前のように利用されている。しかし、高校物理では未だにこれらの理論を扱う場面が少なく、現代物理学との乖離が大きいように感じている。一部の熱狂的な生徒を満足させるような極めて発展的な授業も考えられるが、多くの生徒が理解・学習できるように、学習指導要領の範囲内で、かつ生徒の興味を促す内容で量子力学や相対性理論へつなぐことのできる教材や学習内容の開発が必要であると考えている。

2014 年に実施された「高校生の科学等に関する意識調査」[1]によると、「天文」「宇宙開発」に対する日本の高校生の関心が他分野に比べて高いことが示されている。このため、「宇宙」を題材にすることで、生徒の興味を促しながら現代物理学につなげられる可能性がある。例えば、人工衛星を題材にした教材の開発がすでになされており[2,3]、特に文献 3 では、人工衛星電波受信実験に高校生の理科の有用感を向上させる効果があることが示されている。

人工衛星の一つである国際宇宙ステーション内では、宇宙飛行士がプカプカと浮き、一見すると無重力空間にいるような様子がよく見られる。これは、宇宙飛行士が国際宇宙ステーションと一緒に地球の周りを周回運動していることにより、国際宇宙ステーション内で宇宙飛行士を見ると重力と反対向きの力（物理ではこれを慣性力、特に円運動の場合を遠心力という）がはたらくため見える現象である。この慣性力に関わる現象は、ローラーコースターなど遊園地のアトラクションで体が浮くような感覚として体感することができるし、高校物理の教科書では急停車/発進する電車内のつり革の運動などの定性的な例がよく示されており、教科書との相性がよい。また、この慣性力に関わる現象についての考察をもとにして、アインシュタインが一般相対性理論の原理をつくったことから、現代物理学の基礎となる相対性理論との相性もよい。

一方で、生徒に「宇宙」について質問すると、無重力といったキーワードがよく出てくる。このため、国際宇宙ステーション内で宇宙飛行士がプカプカと浮く現象を、素朴に国際宇宙ステーション内が無重力空間だから浮くと誤解している可能性がある。仮にこのような誤解をしていたとしても、実際に慣性力に関する定量的な実験をして結果を示すことで修正されると考えられる。なお、慣性力に関する定量的な実験が高校現場であまり見られないことから、定量的な実験教材を開発することは、それだけでも価値があると考えられる。

現代的な教材を開発することを意識し、慣性力を定量的に測定する実験道具として M5Stack



図 1. M5Stack Core2

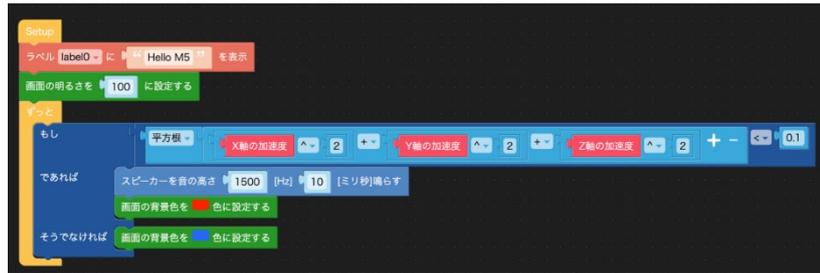


図 2. ブロックを組み合わせたプログラムコード

社製品の M5Stack Core2 (図 1) という小型センサーを使用した。これには加速度センサーの他にもいくつかのセンサー類が内蔵されており、取得したデータを SD カードに取り込むことが可能で、図 2 のようなブロックを組み合わせた簡易なプログラムコードも使用することができ意図した条件での測定や出力が可能といった特徴がある。これらの特徴を活かすことで、物理実験にプログラミングの要素、実験全体をデザインする工学やアートの要素、出力したデータを解析する数学の要素などの STEAM と関わる要素を取り入れることにした。また、対話的で探究的な学習ができるように、グループでの活動や途中経過を報告し合うような活動も取り入れることにした。

2023 年度は、高校 3 年生の希望者を対象とした週 1 回 2 時間連続の選択授業を開講することができたので、この授業において上述のことを考慮した実践研究をすることにした。授業の大部分は「国際宇宙ステーションに代表される無重力状態を再現し、加速度センサー (M5Stack Core2) を用いて確認せよ」という課題に対する、活動グループごとの探究活動である。そして、この探究活動に区切りを付けた後に相対性理論の講義などをして、現代物理学までを円滑につなげることができるのか、その可能性を探ることにした。

2. 研究の目的

本実践研究の目的は、「国際宇宙ステーションに代表される無重力状態を再現し、加速度センサーを用いて確認せよ」という課題をもとに進められる探究活動と、それにつなげた相対性理論の授業が、(i) 高校生に対する授業として成立すること、(ii) 相対性理論といった現代物理学とつながりのよい題材となること、(iii) 高校生にとって興味を引く題材となること、(iv) 「宇宙空間が無重力である」と誤解しているならば、それを修正する題材となることを、生徒に対するアンケートなどをもとに明らかにすることである。

3. 研究の経過

立教新座高等学校では高校 3 年生の希望者のみを対象とした、週 1 回 2 コマ連続 (1 コマ 50 分) の選択授業がある。2023 年度は「相対性理論に基づく宇宙論と測定」という講座名で 10 名 (内 8 名は文系志望であり物理を履修していない) を対象に表 1 のように授業を展開した。

前半の 1~11 回目までが「国際宇宙ステーションに代表される無重力状態を再現し、加速度センサーを用いて確認せよ」という課題に対する探究活動であり、講義を 5 コマ、センサーの練習も含めた探究活動を 12 コマ、経過報告を含めた発表会を 5 コマで実施した。講義では、物

理を履修していない生徒のため、必要な理論を紹介した。なお、研究に協力していただいた静岡大学の内山秀樹准教授には、まとめの講義や発表会での講評をしていただいた。また、後半の12～15回目までが相対性理論に関する内容であり、講義を4コマ、特殊相対性理論や一般相対性理論と関わる実験について調べる課題の発表を2コマ実施した。なお、16回目以降は量子力学の関わる講義や実験などをしたが、本実践研究の目的とずれるのでここでは説明を省略する。

表1. 実践授業の展開内容

回数	内容
1	前半：講義1（導入/無重力とは）、探究活動事前アンケート 後半：活動1（M5Stack Core2のインストールと簡単な練習【内山先生オンライン】）
2	前半：講義2（万有引力の法則） 後半：活動2（加速度センサーの練習）
3	前半：講義3（慣性力） 後半：活動3（課題に対する取り組み開始）
4	前半：活動4（課題に対する取り組み） 後半：活動5（課題に対する取り組み）
5	前半：発表1（経過報告） 後半：講義4（慣性力と国際宇宙ステーション内部について）
6	前半：活動6（課題に対する取り組み） 後半：活動7（課題に対する取り組み）
7	前半：発表2（経過報告） 後半：活動8（課題に対する取り組み）
8	前半：活動9（課題に対する取り組み） 後半：活動10（課題に対する取り組み）
9	前半：発表3（経過報告【内山先生、宮崎さん来校】） 後半：活動11（課題に対する取り組み） ^{※1}
10	前半：発表4（経過報告） 後半：活動12（課題に対する取り組み）
11	前半：発表4（最終発表会【内山先生、宮崎さん来校】） 後半：講義5（課題に関するまとめ【内山先生】）
12	前半：探究活動事後アンケート ^{※2} 、相対論事前アンケート 後半：相対論1（導入/電磁気と相対論、調べ課題提示）
13	前半：相対論発表1（ μ 粒子の地上到達、衛星と時間の遅れ、質量欠損と核エネルギー） 後半：相対論2（Lorentz変換と座標系）
14	前半：相対論3（座標変換と一般相対論） 後半：相対論4（座標変換と一般相対論の続き、調べ課題提示）
15	前半：相対論発表2（東京スカイツリーで行われていた光格子時計の実験、LIGOやKAGRAで行われている重力波の実験、LiteBIRDで観測しようとしている宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の実験） 後半：相対論事後アンケート ^{※2}

(^{※1}9回と10回の間は夏季休業期間、その期間は自宅での取り組みを促した)

(^{※2}1月の最終授業にて再度これらアンケートおよびMentimeterによる聞き取りを実施した)

4. 代表的な実践

4-1. 探究活動

探究活動では、3~4人のグループ3つに分かれて活動した。同じ課題に対する実験にも関わらず、(仮説①)自由落下中が無重力状態になる、(仮説②)円運動させれば無重力状態になる、(仮説③)投射運動の最高点でのみ無重力状態になるといったように、3つのグループがそれぞれ独自の仮説を立て、試行錯誤を繰り返しながら独創的な実験をした。複数回設けた経過報告会では、進捗の管理や考えの整理ができたことに加え、グループ間で助言をし合う学び合いの様子が見られた。これにより、適切な図表の示し方など表現方法について気づくことや、円運動させれば無重力状態になると考えていた(仮説②)のグループは、仮説が適切でないことに気づくことができた。また、どのグループもプログラミングや実験装置の作成に注力する姿が見られ、意図したSTEAMの観点からも創意工夫のできる探究的な活動になった一方、これらへ注力したためか実験の試行回数が少なく、物理の観点からすると少し物足りない活動になった。

なお、図3のように超小型人工衛星で気を付けていることを例示し意識させたこともあり、図4のようにプログラミング、実験装置の作成、データ解析、撮影などの役割分担が各グループ内で自然にできた。また、実験装置を作成する際には、助成金のお陰で各グループの希望する備品や書籍を用意することができ、活動を充実させることができた。

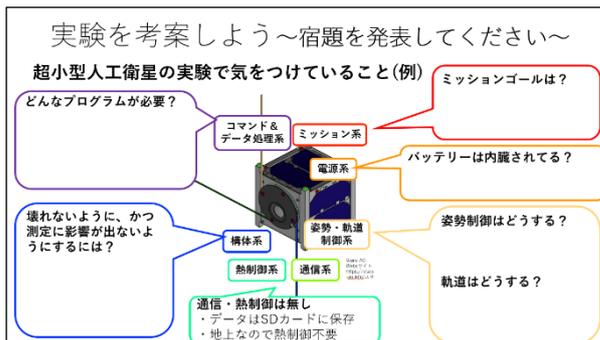


図3. 例示したスライド資料



図4. 探究活動の様子

(仮説①)のグループは、「国際宇宙ステーションに代表される無重力状態を再現し、加速度センサーを用いて確認せよ」という課題に対して、最も分かりやすい実験と発表をした。図5のように、ペットボトルの底に固定させたセンサーAと、ペットボトル中を浮いたまま落下するように工夫したセンサーBを用意し、全体を自由落下させる実験を考案し実践した。図6がそのときの実験の様子で図7が実験結果である。図7でセンサーA、Bとも加速度がほぼ0Gになっているところが自由落下しているところで、慣性力が重力とつり合うため無重力状態のような加速度0Gが測定できていることを、見事に実験結果をもとに説明してくれた。なお、このグループは、落下時にセンサーが壊れないようにペットボトルにゴムひもを取り付けバンジージャンプに見立てた工夫をしたことや、高さ30m

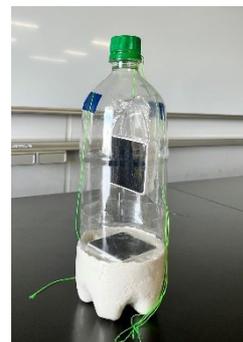


図5. グループ①の装置



図 6. 実験の様子

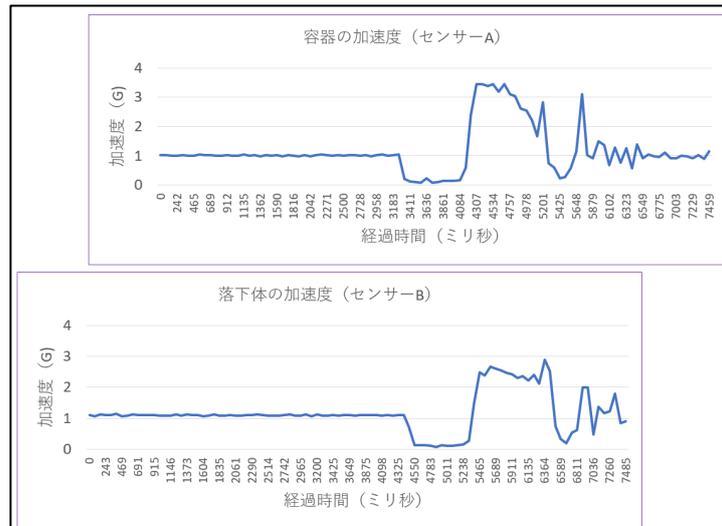


図 7. (仮説①) のグループの実験結果

ほどの塔の上から実験装置を落下させた実験結果から空気抵抗の影響を見出すことができおり、創意工夫を凝らしたこちらの想定を超える結果を示してくれた。

一方で、(仮説③) のグループは、投射運動の最高点でのみ無重力状態になるという仮説に考えを縛られていた。例えば、図 8 のような青色細線の結果を得ても、仮説の通りであれば黒色太線のようになるはずで、仮説の通りにならないのは何らかの誤差が原因であると説明をしていた。このことから、実験結果を生徒たちに考察させるだけでは、誤った考えの修正を生徒自ら見出すことができない場合があるということがわかった。実験の試行回数を増やし何度も考察を重ねることで、仮説が誤りであり、投射運動の最高点のみならず手を放した瞬間から無重力状態になるということに気づくことを期待したいが、授業という限られた時間で考えさせるときには、教員の適切な介入が必要であるということに改めて気付かされた。なお、内山先生によるまとめの講義で、加速度が 0 のときのみ音が出るようにプログラミングされた実験装置でデモ実験したことで、ようやく考えの誤りが修正された。

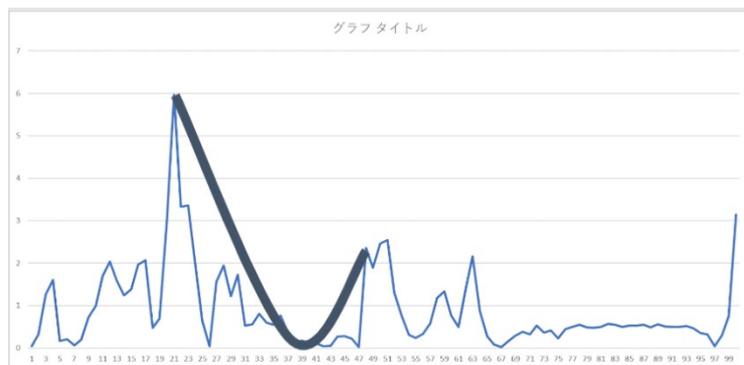


図 8. (仮説③) のグループの実験結果

4-2. 相対性理論とのつながり

計量テンソルや時空図など数学に基づいた理解をして欲しいと考えていたため、物理や数学Ⅲを履修していない生徒に対しても、微積分などの計算を一緒に丁寧にしながらか講義を進めた。また、事前に生徒たちに質問したところ Black Hole に興味があるとのことだったので、4 回の講義で特殊相対性理論から Black Hole まで到達できるような内容を考え、講義した。

内容を大幅に絞り、探究活動の内容を図 9 のように一般相対性理論の範囲でつなげることができたが、表 1 でわかるように 14 回目の相対論 3 のタイミングであったため、つながりが円滑だったとは言えない。つながりを良くするためには、特殊相対性理論の内容をどこか早い時期に予め学習するなどの工夫が必要である。なお、調べ課題は探究学習のグループ

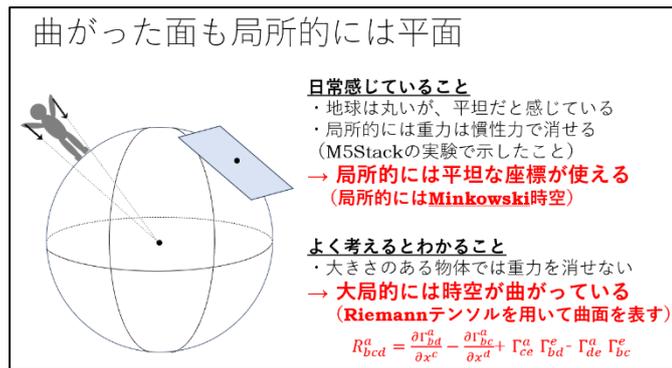


図 9. 相対論 3 の授業スライドの一部

で取り組ませた。「相対性理論に基づく宇宙論と測定」という講座名の授業を希望した生徒たちだったので、興味をもってよく取り組み、内容もすばらしい発表をしていた。

5. 研究の成果

一連の授業の中で複数回行った探究活動アンケートおよび相対論アンケートの結果と、最終授業で Mentimeter を利用しながら行った生徒からの聞き取り調査の結果から研究の成果を示す。

探究活動アンケートの 1 つは、文献 4 の日常関連型興味の項目に基づいてつくられた「物理」「数学」「プログラミング」の項目に対する興味が 5 段階の指標で測るものである。指標に -2 点から +2 点までの点数を割り当てることで (それぞれの項目で質問が 6 つあるので、合計点は -12 点~12 点になる)、数量的に評価できるようにした。事前、事後、最終の 3 つの結果を「一連の活動で点数が変化しない」と仮定して分散分析すると、表 2 の結果を得た。表 2 の p 値を見ると、すべての項目で 0.05 よりも大きいことから、これら項目に対する興味が統計的に有意な変容が見られなかったことがわかる。つまり、一連の活動に生徒の興味を高める効果がなかったと考えられる。一方で、これは対象の生徒たちが「相対性理論に基づく宇宙論と測定」という講座名に惹かれ、かつ履修希望調査前のガイダンスにてプログラミングや数学を多用することなどを伝えた上で履修をしているので、物理やプログラミングへの興味もともとあり、その興味が持続したというようにも考えられる。また、統計的に有意な変容は見られないが、平均点のみに注目すると、「物理」の項目は事後と最終を比較して平均点が向上している一方、「数学」と「プログラミング」の項目は事後が他と比べて平均点が低い。事後から最終にかけて相対性理論など現代物理学に関わる内容を扱ったので、それが「物理」の平均点を向上させた可能性がある。また、探究活動の影響が事後の平均点に現れていると考えると、データ処理やプログラミングで苦労した姿がよく見られたので、その影響で平均点が低くなったことが考えられる。

表 2. 探究活動アンケート (興味) の分散分析の結果

	物理	数学	プログラミング
事前平均点	6.0	2.2	4.9
事後平均点	6.4	0.3	3.9
最終平均点	10.5	3.9	4.5
p値	0.19	0.90	0.96

もう1つの探究活動アンケートは、「高度 400 km を回る国際宇宙ステーション (ISS) 内部が無重力である理由を説明しなさい。ただし、”ISS 内部の物体と地球との間に働く万有引力の大きさ”について必ず述べなさい。」という記述式のアンケートである。誤った内容は0点、一部誤った表現のあるものは1点、「慣性力(遠心力)と万有引力が釣り合う」「ISSと一緒に落下している」といった表現は2点、それに加えて観測者についても言及していれば3点というように点数を割り当て、事前、事後、最終の3つの結果を「一連の活動で点数が変化しない」と仮定して分散分析した。p値は0.06となり、

表3. 探究活動アンケート(記述)の分散分析の結果

	事前	事後	最終
平均点	1.1	1.9	1.9

統計的に有意な変容は見られなかった。また、事前で「大気圏外の宇宙に出ると無重力になる」といった誤った内容を記述していた4名は、事後/最終で「宇宙空間が無重力」という誤解が修正されたが、その内の1名だけは他の箇所の表現が誤っており正しい記述にならなかった。

相対論アンケートは「相対性理論について知っていることを説明したり、キーワードを挙げてください(自由記述)」という記述式のアンケートである。キーワード、箇条書き、長文の説明といったように記述方式がいくつかあったため、統一的に扱う点数化ができなかった。なお、事前にキーワード方式で答えた生徒は、事後でキーワードの数が増える、または箇条書きや長文の説明に方式が変わるといった様子が見られた。記述内容について注目すると、事後のキーワードで特に講義で説明した学術用語が増えた。また、最終では「この理論ではこれまでの常識であったニュートン力学が真っ向から再考させられたものであるが、日常生活や簡易的な場面においては光速が十分に大き過ぎるため無視できるものとして考えることで古典力学との齟齬を解消している。」といったように、理論の詳細に注目するのではなく、より広い視点からの内容も見られるようになった。

最終授業ではMentimeterを利用し、その場で得た生徒の回答をもとに生徒と教員で雑談をするような形態で聞き取り調査をした。図10は回答の一部で、雑談の中でも「物理の面白さ」についてや「視野が広がった」、「授業で扱うものは正しいと思っていたが、誤差のことなどから使用する機械から疑

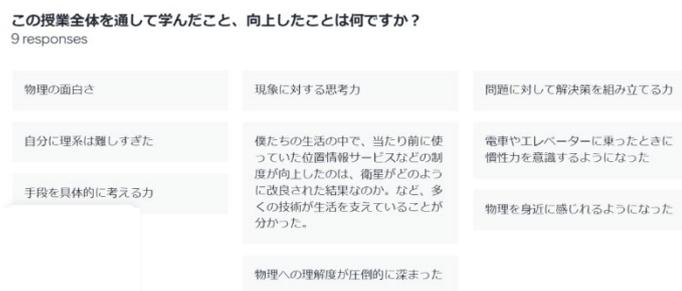


図10. Mentimeterの回答の一部

うようになった」というように、探究アンケート(興味)と関わるような発言があった。また、探究活動に関する質問の回答では、「理解が深まった」「普通の授業でも実験をすると理解が深まる、分からないところが浮き彫りになる」「グループ活動にしたのはよかった」といった肯定的な意見や、「最後に全員で協力する活動をするときさらによいのではないか」といったアドバイスも受けた。相対性理論の授業については、「計算ばかりだった」「計算難しい」という回答が多く、「土台となる部分をもう少し説明するとよいのではないか」といったアドバイスを受けた。

以上のことを踏まえて、「国際宇宙ステーションに代表される無重力状態を再現し、加速度センサーを用いて確認せよ」という探究課題と、それにつなげた相対性理論の授業の成果を研究の目的に沿ってまとめると、次のようになる。

- (i) 一連の授業は高校生に対して成立するが、Mentimeterでの結果を踏まえると相対性理論の「難しい計算」克服のための工夫が必要である。
- (ii) 授業者の印象では、国際宇宙ステーションなどの無重力状態を説明するための慣性力は相対性理論とつながりのよい題材だが、さらにつながりを良くするためには特殊相対性理論の扱いに工夫が必要である。
- (iii) 物理などに対してすでに興味をもっていた生徒たちだったと仮定すると、探究活動アンケート（興味）の結果から、一連の活動は高校生にとって興味を持続させる題材であった。
- (iv) 探究活動アンケート（記述）で統計的に有意な変容は見られないが、記述内容だけを見れば「宇宙空間が無重力である」と誤解して生徒の考えを修正する題材となっていた。

6. 今後の課題・展望

2024年度も高校3年生を対象とした同様の選択授業の開講を予定しているので、どんな生徒に対しても2023年度と同様の結果が得られるのか確認したい。また、慣性力を教科書で扱う物理の授業も担当を予定している。この授業では、本実践授業を短縮した形態で、「国際宇宙ステーションに代表される無重力状態を再現し、加速度センサーを用いて確認せよ」と同様の課題の探究活動を取り入れ、図9の内容を簡潔に紹介できるような授業展開の構築を目指し、授業づくりをしていきたい。なお、記述式のアンケート、特に相対論アンケートでは数量的な評価が難しかった。信州大学の太田理乃特任講師から文献5、6の機能機構階層図による評価方法についてご助言をいただいたので、取り入れていきたい。

7. おわりに

静岡大学の内山秀樹准教授には着想の段階から何度も議論をしていただいた。また、内山研究室の4年生宮崎元気さんには、内山准教授とともに複数回来校いただきサポートしていただいた。信州大学の太田理乃特任講師には、機能機構階層図による評価方法についてご助言をいただいた。心より感謝の意を表す。

8. 参考文献

- [1] 国立青少年教育振興機構：「高校生の科学等に関する意識調査」（2014）。
- [2] 浅井文男：物理教育 46-5（1998）246-250。
- [3] 小林尚輝，内山秀樹，山本仁，神尾誠也，木下拓史，島野誠大，武井大，松山福太郎，内山智幸，内田匡，石代晃司，渡辺謙仁：物理教育 68-2（2020）79-86。
- [4] 田中瑛津子：教育心理学研究 63-1（2015）23-36。
- [5] 太田理乃，山田雅之：日本教育工学会論文誌, 42-Suppl（2018）85-88。
- [6] 白水 始，齊藤 萌木：認知科学 22-4（2015）492-503。