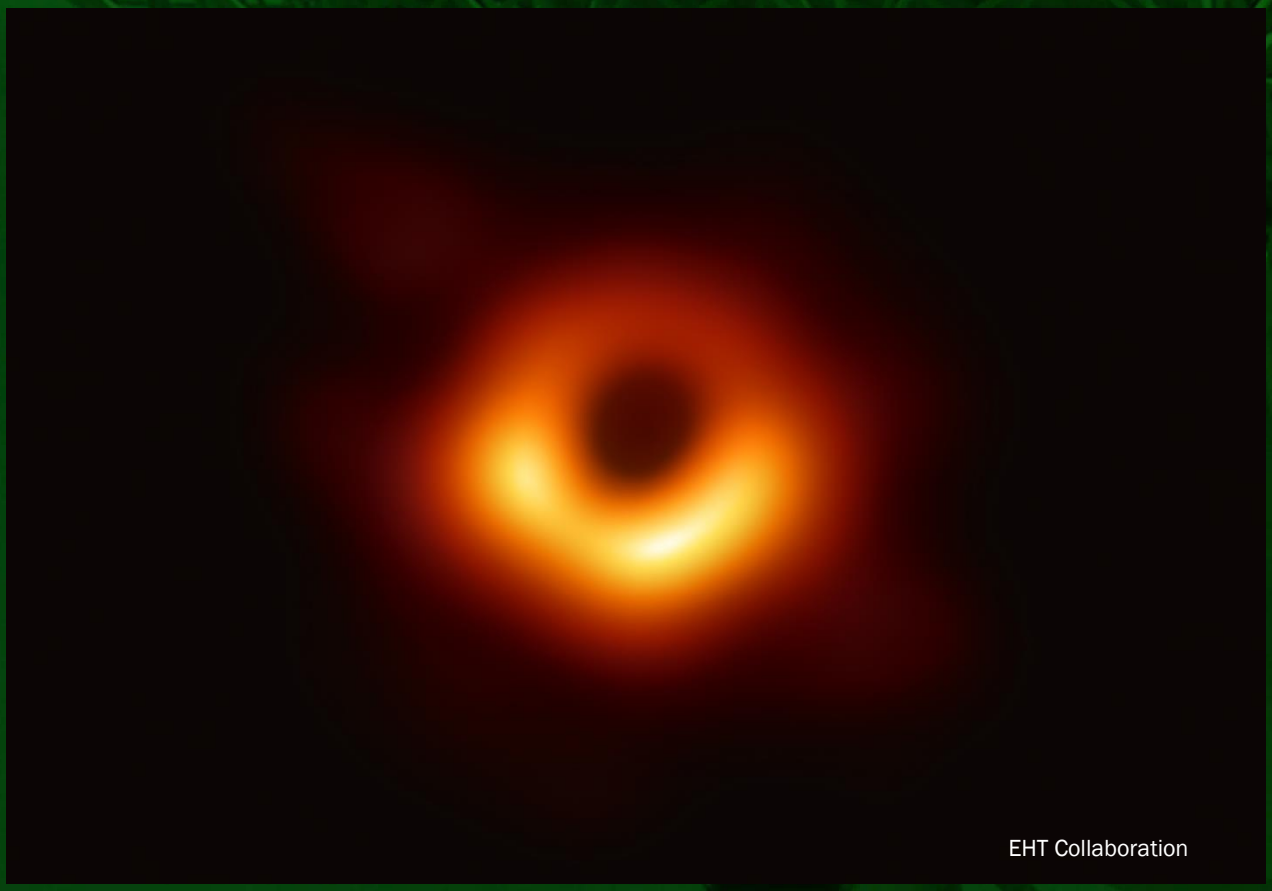
# ２０２１年度 日本物理教育学会年会
# 第３７回 物 理 教 育 研 究 大 会
# 発 表 予 稿 集

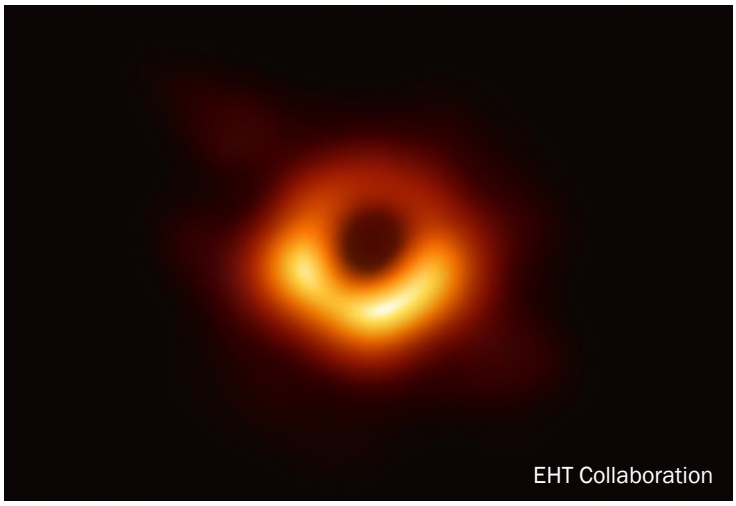



２０２１年８月１０日（火），１１日（水）
オンライン開催（大会本部：宮城教育大学）

2021 Tohoku Online Meeting
Physics Education Society of Japan

日本物理教育学会

表紙の写真




イベント・ホライズン・テレスコープで撮影された、地球から約 5,500 万光年離れた銀河 M87 中心の巨大ブラックホールシャドウ。リング状の明るい部分の大きさはおよそ 42 マイクロ秒角であり、月面に置いた野球のボールを地球から見た時の大きさに相当します。（Credit: EHT Collaboration）

参考文献：The Event Horizon Telescope Collaboration et al. 2019 ApJL 875 L1-L6
https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_EHT

今回の特別講演では、この撮影に深く関わられた国立天文台水沢 VLBI（超長基線電波干渉計）観測所所長の本間希樹教授にご講演をいただきます。



国立天文台水沢 VLBI 観測所。2018 年度東北支部研究大会で見学した際の写真。

主催：日本物理教育学会
共催：宮城教育大学
後援：文部科学省，宮城県教育委員会，仙台市教育委員会，
日本物理学会，応用物理学会

# 第３７回 物理教育研究大会開催にあたって

日本物理教育学会東北支部長・実行委員長　　内山 哲治

みなさま、お待たせいたしました。2 年ぶりに物理教育研究大会開催の運びとなりました。物理教育に携わるみなさまの日頃の研究・実践の発表・議論の場です。

2019 年 12 月に新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が明らかになりました。このサブミクロン程度のミクロな自然の脅威によって、教育界はもちろん世界規模で社会全体が不安定になりました。私たち東北支部もこの変化に対応する術がなく、2020 年度の物理教育研究大会を開催することができませんでした。明けて 2021 年度、みなさまを夏の穏やかな仙台、宮城教育大学にお迎えするべく鋭意現地開催を進めてまいりましたが、COVID-19 の余波は変異という複製過程の増殖によって単純な減衰振動とはならず、オンライン開催と相成りました。

本オンライン開催にあたり、私たちは従前から 2 点変更しました。

1 点目は、研究大会テーマを掲げず、シンポジウムも設定しなかったことです。この脅威の下、粛々と物理教育を行うみなさんのひた向きさを表現するにあたって、また、みなさんの 2 年分の発表をテーマに捉われず受け入れるため、テーマなしで時間確保を優先しました。本大会は、期待通り、一般講演 44 件、受賞講演 3 件の盛会となりました。オンラインではありますが、是非とも活発なご議論をいただければと思います。

2 点目は、研究大会参加費を無料にし、門戸を開いたことです。学問としての物理学を伝える物理教育として、みなさんの成果および試行錯誤をオープンにし、多くの人に本学会が日頃の授業の一助や個人の学びに活用できる内容であることを認識していただき、物理教育の裾野を広げられればと願っています。

私たちは自然の「驚異」として、本間希樹先生に特別講演『電波望遠鏡が解き明かす巨大ブラックホールの姿』をお願いしました。マクロであっても見えない実在を可視化したインパクトは大きく、みなさんもご記憶に新しいことと思います。閉塞感のあるオンライン開催ですが、宇宙に思いを馳せていただければと思います。

最後に、私たち東北支部はオンライン開催に向けて、本部システム担当の先生方の協力も得て、不慣れながら多くの準備、議論を行い、2 次 3 次のトラブル対策を行ってきました。本研究大会が、みなさんのご協力の下、みなさんの 2 年分の想いを充足し、さらなる展開につながるように期待しています。

# 2021 年度　日本物理教育学会年会

# 「第 37 回物理教育研究大会」

2021 年 8 月 10 日（火）～11 日（水）
オンライン開催（大会本部：宮城教育大学）

## 日程

### 第 1 日　8 月 10 日（火）

| | | |
|---|---|---|
| 8:30～ 9:00 | Zoom 接続 | |
| 9:00～ 9:20 | 開会行事 | 1　開会宣言 |
| | | 2　実行委員長挨拶 |
| | | 3　学会会長挨拶 |
| | | 4　連絡　・日程について・接続関係について・その他 |
| 9:20～10:35 | 原著講演Ⅰ | 前半 |
| 10:50～12:05 | | 後半 |
| 12:05～13:00 | 昼休み | |
| | 業者機器紹介 | ①12:10～12:30　②12:30～12:55 |
| 13:00～14:30 | 特別講演 | |
| 14:40～15:55 | 原著講演Ⅱ | 前半 |
| 16:10～17:10 | | 後半 |
| 17:10～17:20 | 連絡 | |

### 第 2 日　8 月 11 日（水）

| | | |
|---|---|---|
| 8:30～ 9:00 | Zoom 接続 | |
| 9:00～10:30 | 原著講演Ⅲ | 前半 |
| 10:45～12:00 | | 後半 |
| 12:00～13:00 | 昼休み | |
| 13:00～14:10 | 表彰式・記念講演 | |
| 14:25～15:40 | 原著講演Ⅳ | |
| 15:45～16:05 | 閉会行事 | 1　実行委員長挨拶 |
| | | 2　学会会長挨拶 |
| | | 3　次期開催地区（九州地区）代表より |
| | | 4　連絡 |
| | | 5　閉会宣言 |

# プログラム・目次

氏名は論文筆頭者のみ表示


**第１日　8月10日（火）**

8:30 ～　Zoom接続

| 予定時間 | | | | ページ |
|---|---|---|---|---|
| | 9:00 ～ 9:20 | 開会行事 | | |
| 75分 | 9:20 ～ 10:35 | 原著講演 I　（前半）　座長：室谷　心　（松本大学） | | |
| 9:20 | I-1 | 生徒が活用できる物理の知識 | 原　眞一（NPO法人　人間環境活性化研究会） | 14 |
| 9:35 | I-2 | 「内部エネルギー概念」の確立と「熱力学第一法則」の数学的定式化の完成について | 五十嵐　靖則（独創文化研究所、元東京理科大学） | 16 |
| 9:50 | I-3 | 屈折率の測定　－多様表現や振り返りとしてのPhETの有効性－ | 長谷川　大和（東京工業大学附属科学技術高等学校） | 18 |
| 10:05 | I-4 | 物理シミュレーションアプリ群PAKの開発 | 牧山　隆洋（弓削商船高等専門学校） | 20 |
| 10:20 | I-5 | 新しい方式のオンライン実験「Interaktive Bildschirmexperimente」の試行 | 安田　淳一郎（山形大学　学士課程基盤教育機構） | 22 |
| 75分 | 10:50 ～ 12:05 | 原著講演 I　（後半）　座長：山本　明利　（北里大学） | | |
| 10:50 | I-6 | マイコンとセンサーを用いた力学分野の相互作用型演示実験講義の教具開発 | 南　伸昌（宇都宮大学共同教育学部） | 24 |
| 11:05 | I-7 | 物理現象を式で理解することに困難を感じる高校生を対象とした多様表現導入の試み | 尾崎　龍之介（東京理科大学理学研究科科学教育専攻） | 26 |
| 11:20 | I-8 | 強制振動から理論的に予測できる潮汐現象の力学的運動像 | 池田　幸夫（広島修道大学付属ひろしま協創中高校） | 28 |
| 11:35 | I-9 | オンラインによる自宅での学生実験・実習の試み | 市田　正夫（甲南大学理工学部） | 30 |
| 11:50 | I-10 | 高校物理授業における問題演習を通じた認知発達伸長の試みと素朴概念解消の可能性 | 山下　哲（大阪府教育センター附属高等学校） | 32 |
| 55分 | 12:05 ～ 13:00 | 昼休み　　業者機器紹介 12:10～12:30ナリカ，12:35～12:55島津理化 | | |
| 90分 | 13:00 ～ 14:30 | 特別講演　　座長：須藤　彰三　（東北大学） | | 1 |
| | | 電波望遠鏡が解き明かす　巨大ブラックホールの姿 | | 2 |
| | | 本間　希樹　氏 | | |
| | | （国立天文台教授，総合研究大学院大学教授，東京大学大学院併任教授，国立天文台水沢VLBI観測所所長） | | |
| 75分 | 14:40 ～ 15:55 | 原著講演 II　（前半）　【パラレルセッション】 | | |
| | 【ルームA】 | 座長：笠　潤平　（香川大学） | | |
| 14:40 | II-1A | ピンポン球の鉛直投げ上げ運動における空気抵抗の効果を正しく計算する | 渡會　兼也（金沢大学附属高等学校） | 34 |
| 14:55 | II-2A | 固体表面濡れ性を調べる簡易型動的接触角計の装置開発と学生実験への導入 | 栗山　健二（静岡大学・技術部） | 36 |
| 15:10 | II-3A | 物理領域における探究活動で活用する気流可視化装置の開発 | 石川　真理代（東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科(博士課程)･東京都立豊島高等学校） | 38 |
| 15:25 | II-4A | 自転車によるダウンヒルは、２輪走行とウィリー走行のどちらが速いか？ | 梶山　裕二（岐阜聖徳学園大学教育学部） | 40 |
| 15:40 | II-5A | 学校教育を終え，企業に入って学び感じたこと | 遠藤　正昭（NPO法人　人間環境活性化研究会） | 42 |
| | 【ルームB】 | 座長：植松　晴子　（東京学芸大学） | | |
| 14:40 | II-1B | EBAPSを用いた物理学習における男女差に関する分析 | 苅谷　麻子（東京学芸大学附属国際中等教育学校, 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科） | 44 |
| 14:55 | II-2B | ジェンダーギャップ縮小に向けた反転授業の実践 | 竹内　透（東京学芸大学教職大学院教育実践専門職高度化専攻教科領域指導プログラム理科教育サブプログラム） | 46 |
| 15:10 | II-3B | 位相の遅れに注目した音響ドップラー効果の定式化とその活用 | 小島　健太郎（九州大学基幹教育院） | 48 |
| 15:25 | II-4B | 力学概念調査（FCI）問題の回答間の相関 | 合田　正毅（新潟大名誉教授） | 50 |
| 15:40 | II-5B | FCI プレ-ポスト 調査結果から見えてくる力学基礎概念理解の過程 | 合田　正毅（新潟大名誉教授） | 52 |

60分　16:10 ～ 17:10　原著講演 II　（後半）　【パラレルセッション】

【ルームA】　座長：土佐　幸子　（新潟大学）

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 16:10 | II-6A | 熱力学誤概念の解消に向けたアクティブラーニング型授業 | 板橋　克美（崇城大学総合教育センター） | 54 |
| 16:25 | II-7A | 衝突時に生じる現実の力の形 | 増子　寛（元　麻布高等学校） | 56 |
| 16:40 | II-8A | エントロピーを用いたピア・インストラクションの分析 | 尾形　総一朗（市川中学校・高等学校） | 58 |
| 16:55 | II-9A | 物理テストのオンライン実施が正答率に与える影響 | 梅田　貴士（広島大学大学院人間社会科学研究科） | 60 |

【ルームB】　座長：安田　淳一郎　（山形大学）

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 16:10 | II-6B | 日本型物理概念調査紙の試行版：研究開発の概要と現状 | 新田　英雄（東京学芸大学教育学部） | 62 |
| 16:25 | II-7B | 日本型物理概念調査紙の試行版： pre テストの試行と全体分析 | 勝田　仁之（筑波大学附属高等学校） | 64 |
| 16:40 | II-8B | 日本型物理概念調査紙の試行版：物理基礎 pre テスト | 西村　塁太（東京学芸大学附属高等学校） | 66 |
| 16:55 | II-9B | 日本型物理概念調査紙の試行版：物理 pre テスト | 今井　章人（早稲田中学校・高等学校） | 68 |

17:10 ～ 17:20　連絡

## 第２日　8月11日（水）

8:30 ～　Zoom接続

90分　9:00 ～ 10:30　原著講演 III　（前半）　座長：小島　健太郎　（九州大学）

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 9:00 | III-1 | 英国の新しい評価制度のもとでのAレベルおよびGCSEレベルの物理実験・探究活動 | 笠　潤平（香川大学教育学部） | 70 |
| 9:15 | III-2 | 高校生が簡単に実験・解析可能なA/D変換器制御アプリと授業方法の開発 | 鷲見　拓哉（兵庫教育大学） | 72 |
| 9:30 | III-3 | 描画法の導入によって明らかにする子どもの考えの特徴 | 土佐　幸子（新潟大学教育学部） | 74 |
| 9:45 | III-4 | オンデマンド型動画配信と対面授業を融合したアクティブ・ラーニングを支援する物理授業の実践 | 野原　大輝（京都教育大学附属高等学校） | 76 |
| 10:00 | III-5 | 光子計数実験で始める量子力学入門授業案の開発 | 阿部　春樹（京都大学大学院　人間・環境学研究科） | 78 |
| 10:15 | III-6 | 水面波の干渉シミュレータの開発と授業実践 | 稲垣　惇史（広島大学大学院教育学研究科） | 80 |

75分　10:45 ～ 12:00　原著講演 III　（後半）　座長：新田　英雄　（東京学芸大学）

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 10:45 | III-7 | 大学生の単振動に関する事前調査からみるグラフ理解とその困難 | 松岡　広海（東京理科大学大学院　理学研究科　科学教育専攻） | 82 |
| 11:00 | III-8 | 電磁気学における起電力 | 原田　恒司（九州大学基幹教育院） | 84 |
| 11:15 | III-9 | 大学での演示実験を交えたオンライン力学授業の取り組み | 関　義親（大阪電気通信大学 共通教育機構） | 86 |
| 11:30 | III-10 | 一人一台端末を活用した「音の三要素」に関する教育実践 | 出村　雅実（流通経済大学　教育学習支援センター） | 88 |
| 11:45 | III-11 | エネルギーの種類と変換の教育の問題点 | 西尾　信一（日本薬科大学薬学部　教養・基礎薬学部門） | 90 |

60分　12:00 ～ 13:00　昼休み

70分　13:00 ～ 14:10　表彰式・記念講演　6

| | | | |
|---|---|---|---|
| 記念講演 1 | クリッカーとレーダーチャートを用いた形成的評価 | 西村　塁太（東京学芸大学附属高等学校） | 8 |
| 記念講演 2 | 国立高専技術職員としての物理とのかかわり —2019年度日本物理教育学会奨励賞を受賞して— | 佐藤　昌也（一関工業高等専門学校） | 10 |
| 記念講演 3 | スマートフォンの内部センサーや外部センサーを活用するアプリ開発と物理教育への応用 | 安達　照（神奈川工科大学） | 12 |

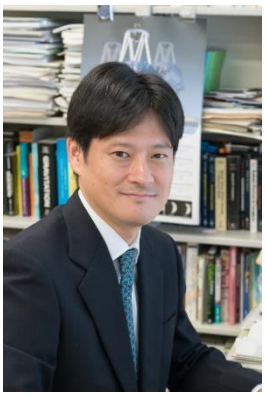
14:25 ～ 15:55　原著講演 IV　座長：栗田　和好　（立教大学）

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 14:25 | IV-1 | 大学生の視点から捉える理数科課題研究　–実態に合わせた指導に向けて– | 能代谷　賢治（宮城教育大学大学院　教育学研究科専門職学位課程　高度教職実践専攻） | 92 |
| 14:40 | IV-2 | 物理教員の教職に関する意識調査：日本とオーストリアの比較 | 植松　晴子（東京学芸大学自然科学系物理科学分野） | 94 |
| 14:55 | IV-3 | 力の作用反作用と連結２物体の思考実験 | 石原　諭（兵庫教育大学 ） | 96 |
| 15:10 | IV-4 | 教師が考える素朴概念の傾向と解決策についての考察 | 猪本　修（兵庫教育大学） | 98 |
| 15:25 | IV-5 | 高校物理定期試験における記述式問題の出題とその評価 | 清水　裕介（早稲田実業学校） | 100 |

20分　15:45 ～ 16:05　閉会行事

# 特別講演

## 「電波望遠鏡が解き明かす
## 巨大ブラックホールの姿」



講師 本間 希樹（まれき） 先生

国立天文台教授、総合研究大学院大学教授
東京大学大学院併任教授
国立天文台水沢 VLBI 観測所所長

講師略歴

1971 年　アメリカ合衆国テキサス州生まれ、神奈川県育ち
1999 年　東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了、理学博士
2000 年　国立天文台助教
2007 年　国立天文台准教授
2015 年　国立天文台教授、総合研究大学院大学教授、国立天文台水沢 VLBI 観測所所長

この間　国立天文台の VERA を用いた銀河系の 3 次元構造の研究を進める
　　EHT-J の代表としてブラックホールシャドウの撮像を目指す

2019 年　ブラックホールの影を捉えた世界初の画像を国際プロジェクトとして発表する
2021 年　日本天文学会林忠四郎賞受賞

Abbreviations

VLBI ： Very Long Baseline Interferometric
VERA ： VLBI Exploration of Radio Astrometry(The branch of astronomy that deals with the measurement of the positions and motions of celestial bodies, particularly stars)
EHT-J: Event Horizon Telescope Japan

# 電波望遠鏡が解き明かす巨大ブラックホールの姿

[A]本間希樹
[A]国立天文台 水沢VLBI観測所
mareki.honma@nao.ac.jp

## １．はじめに

2019年4月、国際共同研究のイベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトが、楕円銀河M87の中心にある巨大ブラックホールの写真を公表しました[1],[2]。この写真にはドーナッツ状の構造が写っており、中心部には黒い穴が空いていました。この黒い穴こそがブラックホールの影を人類が初めてとらえたものであり、ブラックホールからは光さえ脱出できないことを視覚的に示したものです。本講演では、人類が初めて撮影したブラックホールの写真について、観測技術、科学的意義、物理教育的観点などについて解説します。

## ２．イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトについて

今回の写真撮影を行ったのは、国際プロジェクトのイベント・ホライズン・テレスコープ（Event Horizon Telescope，以下EHT）です。イベント・ホライズンは“事象の地平面”を表す英語で、これはブラックホールから物質や光が抜け出せなくなる場所（暗黒の球体のように見えます）を指します。事象の地平面からは光は出ませんが、その周囲のガスが光っている場合にはそれを背景にしてブラックホールの事象の地平面が黒い影として浮かび上がることが予想されてきました。EHTはそのような「事象の地平面」を見る望遠鏡を国際協力で立ち上げることを目指してきました。

そのために使われたのが、電波望遠鏡を組み合わせて高い視力を達成するVLBI（Very Long Baseline Interferometry:超長基線干渉法）の技術です。VLBIの観測では、遠く離れて設置された複数台の電波望遠鏡を使い、天体を同時に観測してその電波を記録します。それを後で再生して合成すると、複数台の望遠鏡間の距離間を口径とする巨大な望遠鏡を合成することができるのです。大きな望遠鏡を合成するメリットは、高い視力が達成できることです。

望遠鏡が見極められる最も小さい角度θ（これを分解能といいます）は、

$$\theta \sim \lambda/D \quad \cdots \quad (1)$$

という単純な関係式で表されます。ここでλは波長で、Dは望遠鏡の大きさ（口径）になり、θは角度をラジアンで表したものになります。波長を固定した場合、望遠鏡の大きさDを大きくすればするほどθが小さくなり、分解能がどんどん良くなります。一方、私たちが良く使う「視力」は、分解能を１分角（１度の６０分の１）の単位で表してそれを逆数にしたものです。つまり、視力１の人は１分角が分解でき、視力２の人は０．５分角が分解できます。ですので、視力が高い人ほど小さな角度を見分けられることになります。式（１）より、口径を大きくすると分解できる角度θが小さくなり、したがってその逆数の視力が大きくなることがわかります。

VLBIの技術を使えば何千kmも離れた電波望遠鏡でも組み合わせて観測できますから、地球上で実現可能な望遠鏡の口径は地球の大きさで制限されます。図１にはEHTの望遠鏡の局配置図を示してあります。図１の観測ネットワークの大きさは11000 kmにもなり、地球の直径は約13000 kmですから、まさにほぼ地球サイズの分解能になります。分解能を決めるもう一つの要因である観測波長は1.3 mmですから、これを使うと視力としては300万（！）という値になります。これは人類




図１：EHT の局配置図：地球各地に設置された電波望遠鏡を VLBI 技術で地球サイズの巨大な望遠鏡に合成した。

が到達した視力として最高のものであり、視力１の人が見わけられる“Ｃの字”（視力検査で使うランドルト環）を３００万分の１の大きさにしても見分けられることになります。図１なるように世界中の望遠鏡が参加していることから、EHT は非常に大掛かりな国際共同研究で、現在では 300 名を超える世界中の研究者がこれに参加しています。日本人も、国内外で活躍中のメンバーを合わせると 20 名程度が現在活躍中です。

## ３．ブラックホールの影の写真について

私たちは２０１７年４月に図１の電波望遠鏡群を使って、M87 の中心にある巨大ブラックホールと、天の川銀河の中心にある巨大ブラックホール（いて座Ａスター）を観測しました。そして、２年の解析を経て２０１９年に発表したのが図２の写真です。電波でドーナッツ状の構造が鮮明に捉えられています。ここでリングのように見えているのは、ブラックホールの周囲を回る光が作り出す“光子球”と呼ばれるものです。この光子球は、回転していないブラックホールの場合、事象の地平面の 1.5 倍の大きさになることが知られています（光が曲がる関係で見かけのサイズは実際よりさらに少し大きくなります）。光子球は光子がブラックホールの周りをぐるぐると円運動する特別な場所で、しかも不安定な軌道のために、そこから外に光子が出てくることもあるのです（もちろん中に落ちていくものもあり、それらはブラックホールに吸い込まれてしまいます）。

そして、写真の中央にぽっかり空いた黒い穴が、ブラックホールの影になります。ブラックホールから光すら脱出できないことを視覚的に表しています。通常の天体の写真では中央が一番明るく見えるのが普通ですが、この写真は真ん中が暗くなっていて非常に特徴的です。これと似たものとして金環日食を思い浮かべる方もいるかもしれません。金環日食では月が太陽を隠すので穴が空きますが、今回の写真ではブラックホールが光すらも吸い込むことで、中心部に穴の開いた写真にな

っているわけです。

ちなみに、ブラックホールの存在を示す証拠はこれまでにも無数にあり、今回の写真もそれに新たに加わったうちの一つということもできます。ただし、これまでの証拠と何が違うかと言えば、やはり目で見てわかる証拠である、ということが大きいです。「百聞は一見に如かず」との諺通り、人間は視覚を重要視する生き物であり、それゆえ視覚的な証拠はやはり説得力があるわけです。

なお、図2の写真でリングの大きさが測定できたことから、ブラックホールの質量も決まります。ブラックホールの事象の地平面の大きさは重さに比例し、

$$R = 2GM / c^2 \cdots \quad (2)$$

と表されます。ここで G は重力定数、M は天体質量、c は光速度です。ブラックホールの重さが２倍になると、事象の地平面の大きさも２倍になり、それにともなって光子球の大きさも２倍になります。そして、一般相対性理論によれば、図２で見えているリング（光子球）の直径はブラックホールの直径の約 2.6 倍になっています。この関係を使うと、図２のような写真を撮影することでブラックホールの質量を求めることができるのです。このようにして、M87 の巨大ブラックホールの質量は太陽の６５億倍と求まりました。従って、M87 の中心のブラックホールは確かに巨大ブラックホールであったことが確認されたわけです。

この成果によって、物理学および天文学で 100 年に渡って疑問とされてきた２つの課題が最終的に解決されたと考えています。一つは、物理学的な意味でのブラックホールの存在の証明です。ブラックホール研究の出発点は、アインシュタインの一般相対性理論の完成と、シュバルツシルトによるその球対称真空解（シュバルツシルト解）の導出になります。どちらも 1916 年、いまから 105 年前のことです。シュバルツシルト解から、質量もった点に近づき過ぎると光や物質が出て来られなくなる場所、すなわち事象の地平面の存在が予言されました。しかし、当時の科学者は、アインシュタインも含めてそのような天体の存在に関して非常に懐疑的でした。アインシュタインは 1930 年代にわざわざブラックホールの存在を否定する論文さえ書いているくらいです。しかし、その後研究で無数のブラックホールの証拠が出てきて、そして最近では重力波によるブラックホール合体現象の検出など、ブラックホール存在の強い証拠が得られていました。そして今回、事象の地平面

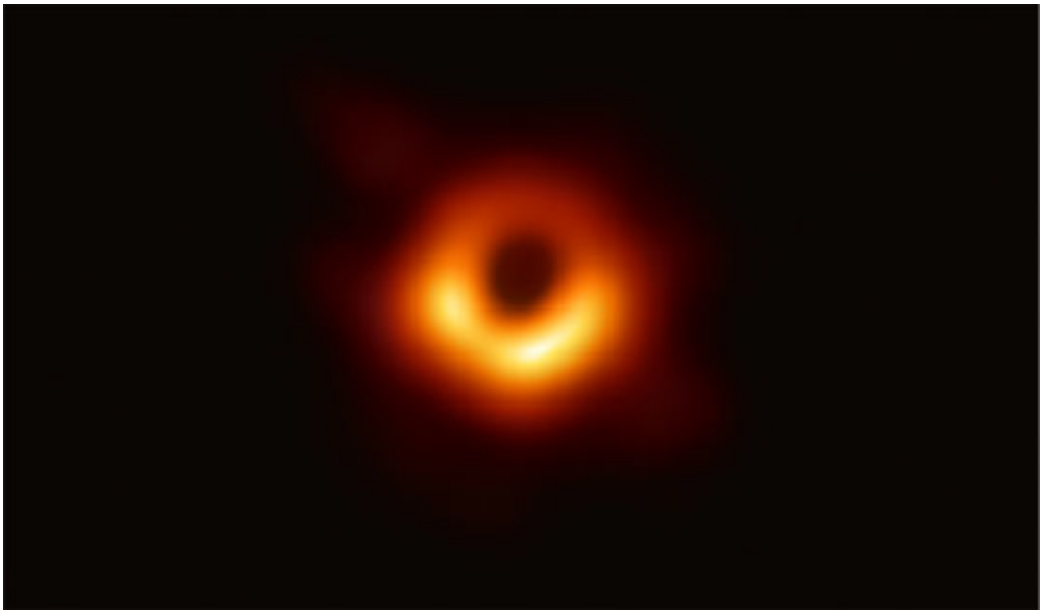


図２：EHT が捉えた M87 の中心の巨大ブラックホールの姿

の影を写真にとることで、その存在はもはや疑いの余地がなくなったわけです

もう一つの意義は、天文学で 100 年つづいた「銀河の中心は何か？」という問題が解決したことです。２０世紀の初め、天文学者は当時の大型光学望遠鏡をつかって銀河の写真を撮影し、中心部が明るく輝いたり、ジェットが放射されたりしているのを発見しました。それ以来、銀河の中心には何があるのか、というのが大きな問題になっていたのです。これについても、これまでに無数の証拠が巨大ブラックホールの存在を示唆してきましたが、今回視覚的な証拠が得られ、質量も求まったことで、銀河の中心は巨大ブラックホールであることが疑いようのないものとなったのです。

## ４．ブラックホールと物理教育

最後に、ブラックホールが物理教育に及ぼすインパクトについても、個人的な考えを述べたいと思います。子供たちの理科離れ、そして特に物理離れが懸念される中で、ブラックホールは物理に興味を持ってもらうツールとしても大いに役に立つのではと考えています。なにしろ、小学校の子供たちの多くがブラックホールという言葉を知っている上に、光さえ出てこられない、という性質も知っています。ブラックホールは小学校の理科で習わないので、これは驚くべきことと思います（映画やアニメ、ゲームなどでブラックホールが取り上げられているからでしょうか？）。

ブラックホールは子供たちの好奇心をかきたてる不思議な天体なので、物理に興味を持ってもらうきっかけに使えるのではないか、と私は（教育の素人ではありますが）考えています。ブラックホールを物理的に扱うには、厳密には一般相対性理論が必要ですが、実は高校で習うニュートン力学の知識があれば、その概要はだいたいつかむことができます。例えば、式（２）のシュバルツシルト半径の式は、ニュートン力学で習う脱出速度の概念を使って簡単に求めることができます。実際、ブラックホールは光さえ脱出できない天体なわけですから、脱出速度が光の速さ c に等しいと置いて、その天体の半径を求めてみると式（２）を得ることができます。また、式（２）に地球の質量を代入すると、地球を潰してブラックホールにした場合の事象の地平面の半径はわずか１cm になる、ということも求められます。このように、高校物理の範囲である程度ブラックホールの性質を記述することができますので、物理に興味を持ってもらうきっかけにしたり、発展的な教材として活用したりしてみると面白いのではないかと思ってここに紹介させていただきました。

## 参考文献

[1] EHT collaboration, 2019, ApJL, 875, L1-L6
https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_EHT
[2] 松下聡樹、本間希樹、井上允、天文月報 2019, 112, 444

# 表彰・記念講演

## ２０１９年度

### 日本物理教育学会賞奨励賞



西村　塁太　（東京学芸大学附属高等学校）

**「クリッカーとレーダーチャートを活用した形成的評価」および**
**「形成的評価の活用は概念理解と学習姿勢を向上させるか」**

西村氏は、クリッカー利用の小テストから個別学習票とレーダーチャート化したフィードバック票という独自の個票を考案し、これらの個票を活用した形成的評価を能動型授業に取り入れ、大きな成果を収めている。また、独自開発した個票システムによる形成的評価が、概念理解や学習姿勢の向上に寄与することを複数の手法による調査から示して論文にするなど、同氏の意欲的研究が高く評価された。

### 日本物理教育学会奨励賞



佐藤　昌也　（一関工業高等専門学校）

**「技術支援から発展した物理実験教育の新たな可能性の追求」**

佐藤氏は、電子の比電荷や熱の仕事当量の測定における誤差要因を追求し、誤差の低減を図ると共に新たな測定法の提案へと発展させた。ともすれば軽視されがちだが、実験結果の議論・検討において最も重要となる誤差に焦点を当て、実験の信頼性や精度の突き詰め方を例示した同氏の業績は、実験教育の効果の向上や新たな可能性に大きな貢献をはたすものと高く評価された。

# ２０２０年度

## 日本物理教育学会奨励賞



安達　照　（神奈川工科大学）

**「スマートフォンの内部センサーや外部センサーを活用する**
**アプリ開発と物理教育への応用」**

安達氏は、スマートフォンのパソコン機能と種々のセンサーを組み合わせ、力学、波動、音波などの物理実験を容易に行うことができる教材を多数開発してきた。これらの教材は、生徒･学生が実験室の外でも活用できるもので、物理現象への興味と理解を深めることに大いに役立つと評価できる。また、コロナ禍で遠隔授業が常態化する昨今にあって、同氏の教材開発と物理教育への応用は実践的でタイムリーな業績である。

## 日本物理教育学会賞・日本物理教育学会奨励賞について

長年にわたり会長を務められた故・大塚明郎先生から寄せられた御厚志を基に本学会の一層の活性化を図ることを主旨として 1995 年に「大塚賞」が創設されました。発足当初は“活性化”とは若手の育成と奨励を強く意識していました。その後、有志の方々からの御寄付を加えて募金を増補し、2006 年に名称を「日本物理教育学会賞（理論部門、実践部門)」と変更し、会員の優れた成果を表彰して学会の活性化を図るべく運用してまいりましたが、最近はその主旨の周知・徹底が不十分な面があり、「学会の活性化」という目的がやや不明瞭な状況でした。このような状況を改善すべく、2013 年度から、学会賞を「日本物理教育学会賞」と「日本物理教育学会奨励賞」の 2 種類としました。2019 年度は奨励賞 2 件で学会賞は受賞がありませんでした。2020 年度は奨励賞 1 件で学会賞はありませんでした。2021 年度の募集については、会誌 69-3 に掲載の予定です。

2020 年度研究大会が新型コロナウイルスの影響で開催できなかったため、今回 2021 年度の研究大会において 2019 年度、2020 年度の 2 年度分の受賞者への表彰式を行い、記念講演をいただきます。

# クリッカーとレーダーチャートを用いた形成的評価

西村塁太
東京学芸大学附属高等学校
m121805g@st.u-gakugei.ac.jp

## １．はじめに

物理教育研究（PER）では，授業効果を定量的に評価するために，Force Concept Inventory（FCI）[1]をはじめとした各種概念調査を，単元や学期の前後で実施し，各クラスの平均正答率から Hake の規格化ゲイン[2]を算出して，正答率の伸び率を求めることが多い。概念調査の事前事後調査の結果は，翌年度以降の授業改善には非常に役立つが，単元や学期の途中での授業計画の修正を意図したものではない。教師としては，授業を通して生徒が何をどの程度理解しているのかを指導の途中で把握し，意図した通りの教育効果がもたらされているかが確認され，もたらされていない場合には即時に授業計画の変更や回復指導（補充学習など）の実施といった軌道修正を図るような授業つくりが望ましい。

そこで本研究では，学期や単元の途中の段階でどの程度生徒が物理を理解・解釈し，概念を獲得しているのかを定量的に把握するとともに，生徒個別に学習に関してフィードバックを与え，その後の学習へ活用できる形成的評価の開発を目的とした。具体的には，クリッカーを利用した小テスト（ARS 小テスト）と，その結果を個別学習票とフィードバック票という二種類の個票によって学習に関するフィードバックを与える形成的評価を開発した。本発表では，開発した形成的評価の詳細と，これを導入した授業実践の結果と分析について述べる。なお，本発表は文献[3),4)]の内容に基づき作成したものである。

## ２．クリッカーとレーダーチャートを利用した形成的評価

ARS 小テストは，中間・期末テストの直前に，それまでの学習の振り返りという位置づけで授業時間内に実施した。各問は，一問につき一つだけの物理概念の理解を問う選択肢問題である。問題をプロジェクタで連続して 10 問程度出題し，クリッカーで解答する形式で実施した。なお，ARS 小テストの得点は成績と無関係で，そのことは生徒にも事前に説明した。

個票の一つ目は，ARS 小テストの各設問の出題意図，選択肢（正答・誤答）の内容の解説，生徒が実際に解答した選択肢とそれへの学習コメントを個別にまとめた「ARS 個別学習票」（図 1）である。「出題の意図」では，教師が生徒に何を理解して欲しいと考えて出題したかをまとめ，「学習コメント」では，よくある生徒の間違いや勘違いの紹介と，それをどのように修正していきたいのかという方向性の提示，さらには該当する教科書のページ数や問題集の問題番号を示した。

二つ目は，ARS 小テスト全問に対するクラス全体の平均正答数と平均正答率および各生徒の正答数と正答率，各設問のクラス全体の平均正答率および各生徒の正誤，学習の観点毎の正答数と正答率，到達度に関するコメント，そして，学習の観点毎の正答率を各頂点にとったレーダーチャートで視覚化したものをまとめた「FB（フィードバック）票」（図 2）である。学習の観点は，小単元の授業を一通り終えたところで，そこでの学習を通して生徒に身に付けさせたいと教師が考えていた一つ一つの物理概念に対応する。FB 票のねらいは，レーダーチャートによって生徒に自分の学習到達度を「学習の観点」ごとに把握させた上で，観点別コメントによって具体的にその後の学習で何に重点を置いて勉強するかの方針を定めやすくすることである。

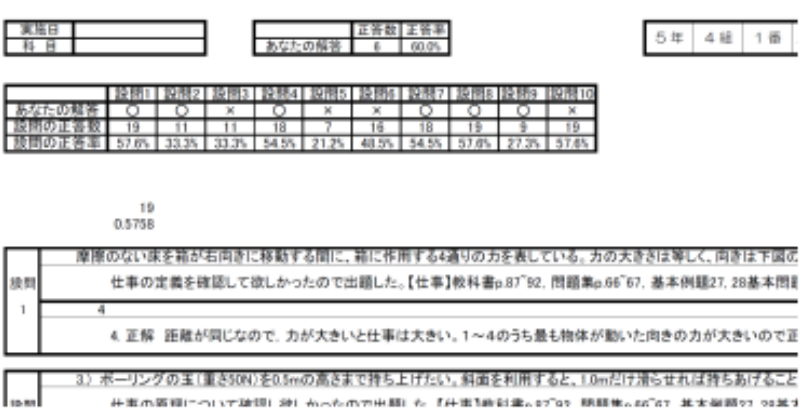


図 1：ARS 個別学習票（一部）

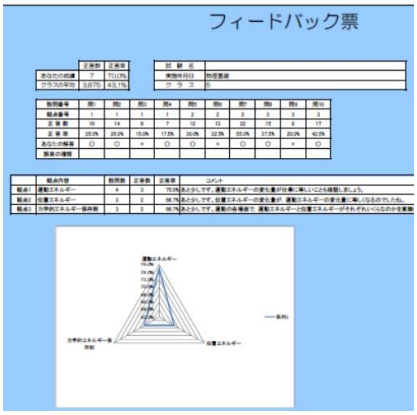



図 2：FB 票（一部）

## 3．形成的評価は概念理解と学習姿勢を向上させるか

前節で述べた形成的評価を導入した物理基礎の授業を，A 高校の 2 年生を対象にして行った。データ分析の対象としたのは，FCI と CLASS の事前事後調査および形成的評価に関するアンケートのすべてに欠席等せずに解答（回答）した生徒 65 名である。

形成的評価の活用と概念理解の関係を調べるため，アンケートの回答に基づき，個票の活用度ごとに生徒集団を 4 つに分け，グループごとに FCI の規格化ゲインを算出した（図 3）。図 3 の横軸は個票の活用度が高い順に，上位，中上位，中下位，下位である。図 3 より，個票をよく活用したと自己評価する生徒ほど規格化ゲインも高くなっていることがわかる。また，形成的評価の活用と学習姿勢の関係を調べるため，CLASS の事前と事後調査で好ましい回答割合を比較したのが図 4 である。図 4 より，個票の活用度が高い生徒集団では，CLASS 全体における好ましい回答の割合が増加したのに対し，他の分位の生徒群ではほぼ変化していないか，減少していることがわかる。

以上より，形成的評価の活用度が高い生徒群は，FCI で測定される概念理解が向上する傾向にあることが見出された。CLASS においても，上位の生徒群のスコアは高くなった。以上の結果は，少なくとも本研究の対象となった集団において，形成的評価の活用が物理概念の理解および学習姿勢の向上と関連していたことを示唆する。

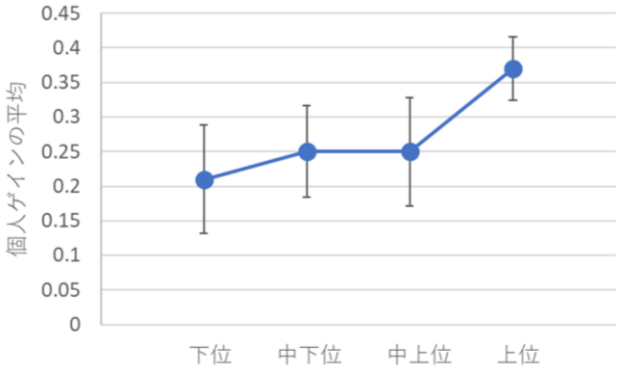



図 3：個票活用度と概念理解

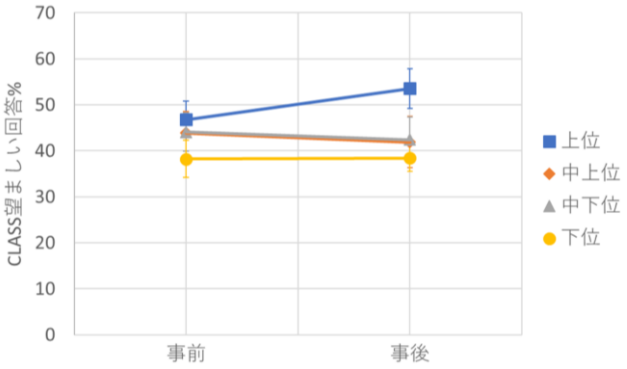



図 4：個票活用度と学習姿勢

## 参考文献

1) D. Hestenes, M. Wells and G. Swack-hamer: Phys. Teach. **30**, (1992), p. 141.

2) R. Hake: Am. J. Phys, **66**, (1998), p. 64.

3) 西村塁太：物理教育 **66-1**, (2018), pp. 28-31.

4) 西村塁太，新田英雄：物理教育 **66-4**, (2018), pp. 243-248.

# 国立高専技術職員としての物理とのかかわり

## —2019 年度日本物理教育学会奨励賞を受賞して—

佐藤昌也
一関工業高等専門学校　技術室
masaya@g.ichinoseki.ac.jp

### １．はじめに

このたび、2019 年度日本物理教育学会奨励賞を受賞し、身に余る光栄に恐縮しております。受賞タイトルの「技術支援から発展した物理実験教育の新たな可能性の追求」は、ご指導をいただいた本学会並びに本校の先生方、研究のディスカッションにたくさん付き合っていただいた弘前大学技術職員の安藤賢氏のおかげである。しかし忘れてはいけないのは、この仕事に取り組むきっかけを与えてくれた学生の存在である。それらの方々に、この場をお借りして感謝申し上げたい。

### ２．電子の比電荷の測定とのかかわり

受賞に至った業績の一つは、電子の比電荷測定実験における誤差要因を探究したことである。

著者は、国立高専の技術職員である。大学・高専の技術職員の業務は、実験実習の指導補助や研究支援、機器や装置の保守・管理等と多岐に渡る。著者が本校で物理実験を担当することになり、任せられたテーマの一つに電子の比電荷測定があった。ところが、だれが何度実験を行っても文献値に近い値が得られなかった。その当時は誤差の分析をできる知識や経験は持っていなかったが、素人目にも誤差が大きすぎることはわかっていた。でも、その原因が何かは全く分からなかった。学生から、どうして誤差が大きいのか尋ねられても、無責任に考えてみてとしか言えなかった。今思えば、教える立場の者として恥ずべきことだったと思う。さすがに、このまま誤差の原因をうやむやにしておくわけにはいかないと思い、インターネットで文献を探したり自分で考え始めた。

そんな中、比電荷の測定値を地磁気と実験装置の残留磁場で補正している文献を見つけた[1]。その文献をもとに、本校の比電荷の実験装置を用いて検証実験を行った。その一つは、地磁気を測定できる高感度の磁束計を用いて、ヘルムホイルコイル内部の空間磁場分布を測定した。ヘルムホルツコイルの軸を南北に向けて、コイルの軸方向の磁場を測定したところ、理論値と測定値の差はほぼ地磁気の大きさに相当することを確認した。また、コイル中央から外側への半径方向の磁場勾配は、ほぼ理論値通りの傾きであり、それほど磁場の減少が大きくないことも分かった。もう一つは、比電荷の実験装置のコイルの軸を、先の実験と同様に南北に向けて比電荷を測定し、地磁気の存在を確認した。それらの結果を論文にまとめて物理教育に投稿した[2]。ダメもとで投稿したのだが、受理されたときは驚き喜んだ。でも、それはまだスタートに過ぎなかった。この研究では、地磁気の影響は明らかにできたが、それでも加速電圧に起因すると思われる誤差が大きく、それを菅球の劣化と済ませてしまっていた。

その後、まったくの興味で、100 円ショップで購入した方位磁針と電子の比電荷の装置を用いて、地磁気の実測を行った。その結果が比電荷の測定値の補正に役立てばいいと思っていた。その研究を、秋田大学で開催された 2019 年度東北地区国立大学法人等技術職員研修でポスター発表したところ、弘前大学技術職員の安藤賢氏が私の研究に興味を持ち質問に来て、そこからお互いに連絡を取り合うようになった。安藤氏は、電子の比電荷の装置のコイルの軸を南北に向けて、コイルに流

す電流の方向を切り替え、どちら向きの電流でも同じ大きさの円軌道を取った場合の、コイル電流の差から地磁気を測定した。それらを共著で、平成 29 年秋の第 32 回東北支部研究大会で発表し、支部機関誌「東北物理教育」に投稿した[3]。

その後も、文献値に近い測定値が得られることを願い、新品の菅球を用いて測定し、先の手法で実測した地磁気の値で補正を施しても、文献値に近い値は得られなかった。地磁気の発表と同じ第 32 回東北支部研究大会で発表した際、「地磁気で補正した後の比電荷の値が、メーカーの測定例の値と一致した」と報告したら、I 先生から「メーカーの測定値と一致したら、それでいいのですか？」と厳しいご指摘をいただいた。まったく中身のない仕事や発表だった。

I 先生からは常々、「佐藤さん、あなたの書いたあの論文で、比電荷の値がずれている原因が管球の劣化だって言っているけど、それ本当なの？」と言われ続けていた。論文が公表されてからずっと、管球の劣化が原因とお茶を濁したことに後ろめたさを感じていた。そんな中、I 先生から、この測定方法では、管球内のヘリウムの原子に電子が非弾性衝突するので真値は得られない、とヒントをいただいた。それをもとに再び、加速電圧に由来すると推定していた誤差の要因の調査に取り組み始めた。

幸いなことに、電子の比電荷測定において、飛行する電子と菅球内のヘリウム分子との衝突を議論した論文を見つけることができた[4]。ちょうどそのころ、科研費（研究課題/領域番号 18H00219）で行った比電荷の遠隔実験システムについて、東北物理教育第 29 号に報告の投稿を進めていた。遠隔実験システムは、ビデオカメラで電子ビームの円軌道を動画撮影し、画像処理を用いてリアルタイムで半径を自動計測するものである。視差の生じない画像処理による円軌道半径の計測でも、比電荷の値は地磁気の補正を超えるずれが生じており、現在その原因を調査中と記した。その調査・研究を東北大学の吉澤雅幸先生と進め、昨年（令和 2 年度）の第 35 回東北支部の研究大会において共著で報告させていただいた。今後は、共著者の吉澤先生とともに親学会誌への投稿に向けて進めて行く。

## 謝辞

今回の受賞には、東北大学の吉澤雅幸先生にご推薦をいただき、また東北支部長の内山哲治先生はじめ東北支部の先生方にご賛同いただきました。ここに深くお礼申し上げます。最後に、この道に進ませてくれた両親といつも支えてくれる家族に感謝します。

## 参考文献

[1] 内藤勝之，鈴木昭弘：大学課程での物理学実験教育における電子の比電荷の測定について，Journal of the Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University. Ser. F, Physics and mathematics, 3: 1-16(1981)　http://hdl.handle.net/10091/6451

[2]佐藤昌也：電子の比電荷(e/m)測定の誤差要因について，物理教育，2015，63 巻，3 号，p. 201-204, https://doi.org/10.20653/pesj.63.3_201

[3] 佐藤昌也，安藤賢：地磁気測定の 2 手法(方位磁針,比電荷測定器)の報告，東北物理教育，第 27 号(2018.3)，p.11-14　http://hdl.handle.net/10129/00006451

[4] 笠井拓登，三井隆久：電子サイクロトロン運動における希薄気体衝突の影響，慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学，No.64 (2018.9)，p.1-10 https://ci.nii.ac.jp/naid/120006501626/

# 2020年度日本物理教育学会奨励賞記念講演

# スマートフォンの内部センサーや外部センサーを活用する

# アプリ開発と物理教育への応用

神奈川工科大学　　安達　照
E-mail: diracma888@yahoo.co.jp

## 1　はじめに

低価格のスマートフォン(Android系スマホ)が2011年ごろから普及してきた。このようなスマホに、公開されているアプリをインストールして、高校の物理授業への活用の可能性を検討してきた。

2013年ごろからは、本報告で述べるスマホ用の自作アプリ”Diracma”シリーズを開発し、自分の授業で使いやすいように工夫してきた[1-9]。

## 2. アプリ"Diracma"シリーズ

当時、一般に公開されているアプリが有していなかった機能として、例えば、加速度センサーのデータから$v-t$グラフを表示する機能、スマホを水平に正確に投射しようとするときに必要なスマホの傾きを表示する機能、ジャンプしたときの高さを測定する機能、音波を発生と同時に音波を記録できる機能、スマホが内蔵していない外部のセンサーを接続できる機能等があった。

これらの機能を実現し、使いやすいようにした自作アプリについて紹介する。

## 3. スマホの内部センサー活用

スマホの内部センサー（又は機能）として、加速度センサー、オーディオ機能（音入力、音発生）等を用いたアプリを自作してきた。

（１）DiracmaA（iPhone用Diracma１）[3,4]

加速度センサーを用いたアプリで、自由落下、鉛直投げ上げ運動等の加速度、速度をリアルタイムに測定可能である。また、スマホ自身を水平に投射して、水平方向の加速度、鉛直方向の加速度を一目瞭然に表示できる。このような2次元運動の加速度を瞬時に測定する方法はなかった。

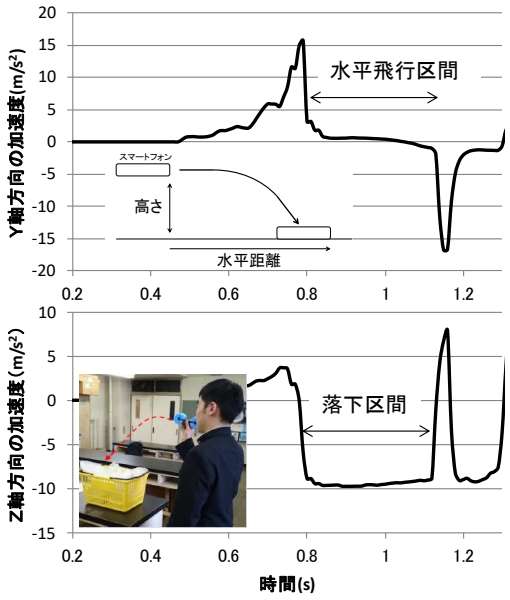



図１　水平投射の実験概要図と$a-t$グラフ

（２）DiracmaJump（iPhone用あり）[2,3]

スマホを持ってジャンプすると、ジャンプの高さを加速度波形から自動計算してくれる。今までジャンプのような人の動きにおける加速度を簡単に測定する方法はなかった。

（３）DiracmaS[3]

音波実験全般（人の言葉「あ」、「い」等の波形、音速測定、気柱共鳴させた開管内の音圧分布等）を従来よりも簡単な操作、装置構成で実験できる。

## 4. 外部センサーをスマホに接続

（１）DiracmaM [5-9]

「モバイル物理教育ラボ」製の小型超音波センサーユニット [9]を USB ケーブル１本で直結できるようにしたアプリで、従来に比べて、低価格で、どこにでも持ち運びができるようになっている。

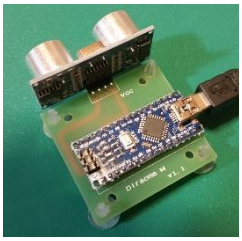


図 2　超音波センサーユニットの外観 [9]

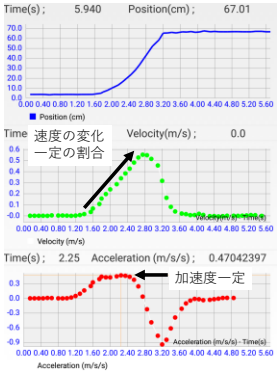



図 3　斜面の運動（等加速度運動）[8,9]
（上：距離、中：速度、下：加速度）

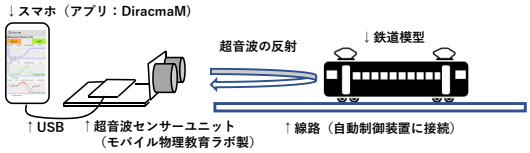



図 4　鉄道模型の運動の測定 [6,7]

二つの実験例を紹介する。一つ目は、100 円で購入できるおもちゃの車を斜面で運動させたときのグラフ（図３、等加速度運動）で、もう一つは、自動制御させることにより任意の運動が可能となった鉄道模型の運動を測定したものである（図４、５）。

鉄道模型の運動を利用した実験は、任意の動きからグラフを予想させることにより、物理概念を構築させる新しい手法として研究している [8,9]。

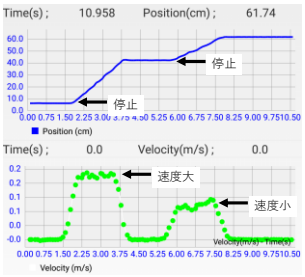



図 5　鉄度模型の運動の例

## 5. まとめ

既にある公開アプリを用いることは便利であるが、ノーマン [10]が「人（教育）を技術に合わせるのではなく、技術を人（教育）に合わせる」と述べているように、技術というものは、本来は教育や人（生徒、学生、教員）に合うように変えていくことが理想である。このような理想に近づけるよう、今後も研究・開発を続けていく予定である。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP17H00166、JP19H00087 の助成を受けている。また、今年から基盤研究(C)JP21K02954（３年）も受け、オンライン授業に最適なものへと発展させていく予定である。

### 参考文献

1) 安達照：応用物理教育　40-2 (2016) 131-134.
2) 安達照：日本理化学協会研究紀要 (2016) 5-8.
3) 安達照：東レ理科教育賞受賞作品集 (2017)6-8.
4) 安達照：応用物理教育 42-1 (2018) 57-60.
5) 安達照：物理教育 67-1(2019)31-34.
6) 安達照：物理教育 68-4(2020)234-237.
7) A. Adachi :″ New Physics Experiments using Model Train and Smartphone Apps (Volume 1 Constant-Velocity Motion)″ (Kindle e-Books, 2021).
8) 安達照：理科の教育 70(2021)6.
9) 「モバイル物理教育ラボ」のサイト：https://sites.google.com/view/diracma888/
10) D. A. ノーマン：「人を賢くする道具」（新曜社,1996）

# 生徒が活用できる物理の知識

[A]原 眞一，尾島正男，遠藤正昭
NPO 人間環境活性化研究会
[A]hara_birdhill@nifty.com

## １．はじめに

世の中の様々な動きは全て物理法則によっている。学校教育でも小学校から高等学校まで様々な形で物理を教えている。しかし高等学校まで物理を学んでもそれを日常生活や仕事に結び付けない事例を見かける。本論では，てこの原理など力学の基本を中心として物理の理解とは何か，どのようにして役に立つ知識となるのかを考察してみたい。

## ２．てこの原理

原理そのものは小学校でも習う単純なものである。逆に，その後は中学高校ともほとんど取り上げていない。小学校教科書では道具としてのてこの原理の説明になっている。栓抜きや釘抜きを例にして小さな力で大きな力を出す道具としての話が多く出ている。これを逆にして支点に近い所を力点にすると支点から遠い作用点に直接力を加えるより大きな力が要求される。単純には無駄に聞こえるがこの様な使い方もある。例えば私たちの筋肉である。筋肉は関節に近い所につながっているので，重いものを持ち上げるときなど筋肉はさらに大きな力を出している。腕や足など空間に制約がある中で動かす時にさらに大きな力を必要とする機構を採用している。筋肉が関節から離れた所につながっている使い勝手の悪い姿を想像してみると良い。

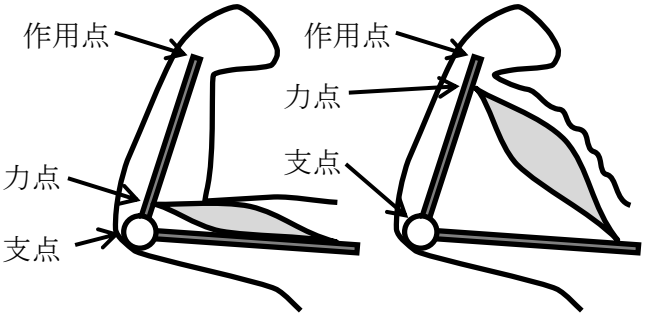


図１　腕の筋肉

身の回りを観ると，片持ちのものをよく見かける。棚を付けるときの金具も片持ちの一種で，根元が太くなっている。てこの原理で２倍太ければ加わる曲げの力は半減する理屈となる。

高層ビルも横にして眺めればわかる通り片持ちの一つである。普段は真下に力が掛かっているが，地震や強風では横方向の力が掛かるので正に片持ちと同じことになる。ビルを柔らかく作ることで根元に加わる力を小さくしようとしている。しかし遠方巨大地震などで発生する周期数秒の揺れと共振してビルの揺れが収まらないという現象が起きた。てこの原理の逆で根元部分がビルの揺れを早く収めるだけの力を出せない。地震で破壊される高速道路の１本足の橋脚も同様である。

物理を学んだ生徒がいかにしてこの様な事を理解して仕事や生活に生かすようにできるかが課題である。高速増殖原型炉もんじゅの事故も温度計さやの構造から来る片持ちの弱さへの配慮不足から起きている。

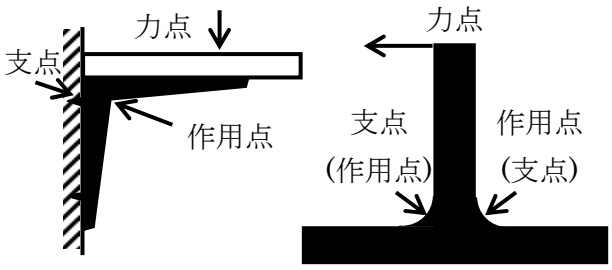


図２　片持ちでのてこの原理

## ３．知識が身に付くようどう教育しどう活用するか

得られた知識をどのようにして行動に生かせるかが課題になる。小学校教科書の内容は支点から

の距離と力の関係の説明が主であり，支点に加わる力は求めてない。支点と作用点は現象のとらえ方で入れ代わるものである。小学生にはこの理解は困難であり，高等学校の力学の授業で再度取り上げて本質を説明することが肝要である。

日常生活での活用では，例えば日曜大工で本棚や机を作るときは，片持ちにならないように構造を考え，片持ちとせざるを得ない場合には結合部を十分に大きくとり，曲げの力を受ける作用点を構造物の全体に広げることが重要となる。仕事上も，例えば製造設備設計や金属加工のとき，てこの原理を念頭にして結合部に加わる力を減らし，力学的に破壊しにくい基本構造を考える。

## ４．理解力構築と活動に向けての教育

どのように教育したら，役立つように物理の理解ができるか。てこの原理では道具に限らないより普遍的な説明が必要である。物理では数式が出てくるが，てこに限らずその意味の説明も重要である。落体の運動での $v^2 - v_0^2 = -2gy$ の様な意味を説明しない式は生徒の理解を妨げる。仕事の説明では前提となる床から受ける摩擦力の記述がないと生徒は疑問を持ったままとなる。これらに限らず，数式には常に理解につながる説明が求められる。

物理を学ぶことにより得られるものは物理そのものに加えて，定量的論理的に物事を考える力と考える。それには教える側が率先して物理量や単位の扱いを正しくして行く必要がある。現在は教科書に多くの誤用がある。例えば物理量に用いる記号は斜字体で他は直立体となっているが守られていない。特にギリシャ文字に多い。α 線，$\Delta T$，円周率 π などである。教科書の表においてギリシャ文字を斜字体で紹介していることから問題である。

単位に関しては，物理量が数値と単位の積であることが守られていない[1]。また，物理法則が単位と無関係であることも示されていない。絶対温度，比熱，重さなど定義されてない用語の使用も問題である。これらは物理の基本であり，生徒に正しく伝えることが教育者の責務である。

学校で学んだことを確実に理解するには生徒自身の体験と結びつけるのが有効である。学んだことを頭に入れて周りを観察するなりニュースやスポーツの映像を見たりすると良い。地震や強風などでどのように建物が倒壊したか，なぜ走者は腕を振るのか，短距離走で一所懸命力を入れても途中からはなぜ加速しないのか，などである。静電気では感電死しないのになぜ電灯線で死に至るのかでも良い。疑問を持って授業を聴くのも良いし，授業で学んだことを念頭に周りを観察するのでも良い。関連する本を探して読むのも良い。生徒が学校の外で気づいたことや読んだ本を積極的に発表させたり文章にさせるのも良い。教科書をデータ化するのであれば，検索機能を付けて生徒が自主的に関連情報を取得できるようにするのも効果が大きいと考える。これこそが積極的な勉学 active learning への道筋と考える。

## ５．まとめ

教科書から見る限り，物理の全体像を把握できる生徒は一部に留まるのではと危惧される。物理と生活やスポーツなどの様々な現象を結び付け，生徒が真の理解に進めるよう検討していく必要がある。

## 参考文献

[1]原眞一: 国際単位系(SI)の概要と課題,技術士 2020.12,日本技術士会

# 「内部エネルギー概念」の確立と「熱力学第一法則」の数学的定式化の完成について

独創文化研究所　元東京理科大学　五十嵐 靖則
igarashi-yasunori@nifty.com

## 1 はじめに

熱力学第一法則の定式化には、「内部エネルギー概念」の確立が欠かせないが、山本義隆氏は、1850 年論文によって Clausius は、『状態関数 -内部エネルギー- が存在することを示し、原理Ⅰすなわち熱力学第一法則の数学的に厳密な定式化をはじめて与えたのである。』[1]と論文を引用しながら記述している。しかし、Clausius の論文には、「内部エネルギー」の用語は存在しない。では何時、誰によって、「内部エネルギー」の用語を用いて熱力学第一法則の数学的定式化が完成されたのか。1850～1890 年代までに出版された報告書や著書などを調査した結果を報告する。

## 2 Clausius の著作を精読する

### (1) 第Ⅰ論文 (1850 年)[2] 『熱の動力、および熱学へ演繹される諸法則について』を見る

『Ⅰ　熱と仕事の等価性に関する基本法則からの推論』の章で次の様に論じられている(八木監訳本の７頁)。

> ここで、一般に物体の内部に考えられる運動の本性について、… 一般に以下のことを仮定する必要があろう。すなわち、(物体の)微小部分(粒子)の運動が存在し、それらの部分の熱は、上の活力(運動エネルギー)の量に等しい。あるいはもっと一般的には、この仮定から基本定理として規定される法則のみを問題にすべきであろう。すなわち、
>
> **熱から仕事が生ずるようなすべての場合には、発生した仕事に比例する熱量が消耗(verbraucht)されている。**
>
> **逆に上と同量の仕事の消耗によって、上と等しい熱量を生じさせうる。**
>
> 一般に、しばしば物体の**全熱(Gesammtwäre)**について、特に気体や蒸気の場合について問題にし、物体中を自由に動ける熱と(動けないで)潜んでいる熱との和を全熱とする。…　**(下線は五十嵐による)**

また、15 頁に

> …この式を、1 次のオーダーの完全な(vollstandig)微分方程式の形に変換すると、つぎのようになる。
>
> (Ⅱa)　$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + AR[(a+t)/v]\,\mathrm{d}v$
>
> ここで、$U$ は $v$ と $t$ の任意の関数(**willkürliche Function**)である。…　**(下線は五十嵐による)**

と記されていているが、$U$ は体積と温度の任意関数と云うだけで、「内部エネルギー」とは明示されていない。

また、**附録 B(論文集 32 頁へのもの、1864 年)** の54頁に次に様に記述されている。

> (Ⅱ’a)　$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + Ap\,\mathrm{d}v$
>
> 関数 $U$ は、この論文で述べられたように、物体の状態変化の際に考慮される３種類の熱量のうち、２つのもの、すなわち**実際に現れる知覚できる熱量**、あるいは(別な言葉でいえば)いわゆる**自由な**熱と、**内的な仕事のために費やされた**熱とを含んでおり、熱学にとって大きな重要性をもつている。…　**(下線は五十嵐による)**

関数 $U$について、**自由熱や内部仕事の熱が含まれていると言及するが**、「内部エネルギー」の言及はない。

### (2) 第Ⅳ論文 (1854 年)[2]『力学的熱理論の第２主法則の修正された形について』を見る　71～72頁に、

> …ここで、物体が一定の道筋を通ってある状態から別の状態へと移動した際に、その物体に与えられる全熱量を $Q$ としよう。そうすれば、この熱量は３つの部分に分けられる。その第１の部分は実際に物体中に存在する熱の増加、第２の部分は内的な仕事に費やされた熱、第３の部分は外的な仕事に費やされた熱と理解される。第１の部分については、第２の部分についてすでに述べられていることと同じことがいえる。すなわち、それは変化の生じた道筋にはよらない。したがつて２つの部分を一緒にして１つの関数 $U$ で表すことができよう。この関数については、まだあまり詳しくしることができないとはいえ、すくなくともすでに物体の最初と最後の状態とによって完全に決められるものであるということはわかっている。一方において、第３の部分は外的な仕事と同様に、変化の道筋のすべてが与えられた時に初めて決定されうる。外的な仕事を $W$ とし、単位の仕事に対する熱の等(価)量を $A$ とするならば、第３の部分の値は $A \cdot W$ である。そして第Ⅰ主法則の表示として、ここに次の式を得る。
>
> (Ⅰ)　$Q = U + A \cdot W$　…　**(下線は五十嵐による)**

と記述されており、関数 $U$は状態関数であることが暗に示されているが、「内部エネルギー」の言及はない。

**この論文の[脚註] 253-1)に：**　**『…私が導入した関数 $U$は、その出現後に W. Thomson と G. R. Kirchhoff とによって非常に興味深い数学的展開がなされてきた。トムソンは関数 $U$を物体の与えられた状態の力学的エネルギー**(mechanical energy of a body in a given state)**とキルヒホッフはそれを作用関数** (Wirkungs-function) **とそれぞれ命名した。…』　と記されている。**

### (3) 第Ⅸ論文 (1865年)[2]『力学的熱理論の主法則を適用するためのさまざまな便利な形式について』を見る

**128頁に、　…　（Ⅰ）　$dQ = dU + A\,dW$**

ここで $U$は、私が 1850 年の論文で熱学に最初に導入して、それまでに入ってきた自由な熱と、内的な仕事(innere Arbeit)に消費された熱との総和として定義した物理量である。W. Thomson がのちにこの(物理)量に対して、物体の**エネルギー**(Energie)という名称を提案した。　W.トムソン(W. Thomson)のこの命名法を、私は非常に適切な選択として同調してきたが、その場合でもなお、一般には、$U$ における 2 つの要素が個々に示唆されるような例においては、**熱の部分と作用の部分**(Wäerme-Werkinhalt)　それぞれの表示を残しておくことができれば、私のもとの定義が何かさらに単純な形式を再び与えると思われる。…　**（下線は五十嵐による）**

と記述されており、関数 $U$に対するトムソンの提案する「物体の**エネルギー**」**に対して賛同はするものの、Clausius の思い(考え)は捨てきれない様である。しかし、1875 年序文の“Mechanical Theory of Heat”[3]を見ると、トムソンの提案「物体の**エネルギー**(*Energy* of the body)」を受け入れたことが分る。しかしながら。1875年の段階に於いても「内部エネルギー概念」の確立も用語も存在していなかったことが判明する。**

## 3　P. G. Tait 著“Sketch of Thermodynamics”(1868 年)[4]を精読する

109 頁の 195 節に次の様に記されている(ここで、‘ **intrinsic energy**’の用語が使用されている)。

…Thus we see that, if the initial and final states be given, the quantity of energy parted with or supplied is perfectly determinate. In general it is only such *changes* in the intrinsic energy of a body that can be measured ; the whole amount present is unknown, but could not be infinite in a finite quantity of matter at ordinary temperatures and pressures.　We must therefore suppose $E$ to be measured from some particular state, and it will not be necessary to add an unknown constant, so as to make it represent the whole energy present.　**（下線は五十嵐による）**

115 頁の 208 節には次の様に記されている。

…　where,　if $w$ denote the work done by the applied forces, we have

$$\varepsilon = w + JH \qquad (31)$$

(補足説明　$\varepsilon = E - E_0$　$E$：total energy of the body,　$H$：heat absorbed )

Thus, also, the *work* required to strain the body through any give change of state, at a constant temperature, is independent of the succession of strains by which that change is effected.**(下線は五十嵐による)**

記号こそ異なるが、(31)式は Clausius の(Ⅰ)式に対応している( $\varepsilon \Leftrightarrow dU$、$w \Leftrightarrow A\,dW$、$JH \Leftrightarrow dQ$)。このことから、Tait の‘**intrinsic energy**’はﾄﾑｿﾝの「物体の**エネルギー**(***Energy*** of the body)」のことであり、Clausius の関数 $U$であることが分ると共に、ﾄﾑｿﾝの命名から進化し‘**intrinsic energy**’の用語の使用が始ったと解せられる。Maxwell の“Theory of Heat”[5]の序文にも、『…on the consideration of the Intrinsic Energy of a system of bodies,…』と記され‘**Intrinsic Energy**’の用語の使用が確認できる。1876 年の J.W. Gibbs の熱力学論文に於いても、「**internal energy** (内部エネルギー)」の用語は見当たらない(**energy** of a given body とあるが)[6]。

## 4　C. Christiansen 著“Elements of Theoretical Physics”(訳者序 1896 年)[7] を見る(著者は熱放射研究の権威)

Copenhagen 大学教授の著した理論物理学教科書であり、1894 の独語訳書からの英訳書が 1897 年に出版された。Chapter 13 が『Thermodynamics』に充てられている。266 頁には次の様に記されている。

…　A certain amount of energy is inherent in every body. This we call its ***internal energy***, since we take no account of that part of its energy which arises from its mutual actions with other bodies. By the possession of this internal energy the body is in a condition to do work: thus variations occur in its form, volume, temperature etc. … and finally retains to its original state, the internal energy will be again equal to $U$. …　**（下線は五十嵐による）**

また、268～269 頁に次に紹介する様に、第一基本式が記述されている。

…　If the quantity of heat $dQ$ is communicated to a body it receives the energy $J\,dQ$. This goes partly to increase the internal energy $U$ of the body, partly to do the work $dW$.　We then have　$J\,dQ = dU + dW$.　(a)
This equation is called the first Fundamental equation.　**（下線は五十嵐による）**

ここに至って「内部エネルギー概念」が確立され、「熱力学第一法則」の厳密な数学的関係式が示されたと見る。

## 5　参考文献


**1）山本義隆 著 熱学思想の史的展開３ ちくま学芸文庫 筑摩書房 2009 年、pp. 030–038　この著書は、第二法則の確立の過程に比重を置いている。**

**2）R. Clausius クラウジウス熱理論論文集 エントロピーの起源としての力学的熱理論、八木絵里 監訳　東海大学出版会 2013 年 pp.3-167**

**3）R. Clausius　“The Mechanical Theory of Heat”　Translated by Walter R. Browne　Macmillan and Co. 1879　§8. Energy of the Body, pp.30-31**

**4）P. G. Tait Sketch of Thermodynamics　Edmonston and Douglas 1868 , p.109, p.115　W. Thomson との共著の多い英国ｴﾃﾞｨﾝﾊﾞﾗ大學の理論物理学者**

**5）J. C. Maxwell　Theory of Heat　Original Text 1871,Longmans Green and Co. in 1888, Dover edition 2001 内部エネルギー概念の確立に至っていない。**

**6）J. Willard Gibbs　The Scientific Papers of J. Willard Gibbs Vol.Ⅰ Dover Pub. Inc.1961, Ⅰ：pp.1-32, Ⅱ：pp.33-54, Ⅲ：pp.55-353**

**7）C. Christiansen　Elements of Theoretical Physics　Translated by W. F. Magie　Macmillan and Co.1897, pp.266-272,原著執筆は 1894 以前と推察。**

# 屈折率の測定－多様表現や振り返りとしてのPhETの有効性－

[A]長谷川大和，[B]遠藤霞，[C]尾崎龍之介，[C]松岡広海，[C]中村公亮，[C]興治文子
[A]東京工業大学附属科学技術高等学校，[B]新潟明訓高等学校，[C]東京理科大学大学院
hasegawa@hst.titech.ac.jp

## １．はじめに

物理学の学習に多様表現（図，数式，グラフ，言語など）を活用することは，学習者の深い理解を手助けできることが知られている[1]。PhETは，Carl Wiemanが開発した，能動的な学習を支援するシミュレーション教材群であり[2][3]，日本においてもその活用が報告されている[4][5]。ただし，多様表現の一つであるシミュレーションを，どのように活用すると，概念理解に有効であるかを検証する研究は，我々の知る限り現状ではあまり行われていない。

世界的に猛威をふるっているCOVID-19感染拡大のため，2020年度から2021年度前期までの日本の大学の多くの授業は，オンラインとなることを余儀なくされた。オンライン授業において，学生にPhETを使わせることはどれだけ有効かを調べることを目的とし，今回は屈折率測定において振り返りの場面でPhETを用いさせた効果について報告する。

## ２．調査対象

A大学の2020年度前期（履修者67名）と2021年度前期（履修者38名）の入門物理学（主に1年生が受講，微積分を用いない代数ベースの物理学のタイプ）において，オンライン授業（オンデマンドの動画配信型）をおこなった。扱った内容は，力学，波動，電磁気，原子である。この授業を履修している学生の，高校時代の物理履修歴の割合は図1の通りである。年度は異なっているが，同一の学科の学生群であることや，授業における小課題の結果を確認すると，2つの年度の学生群間の学力はほぼ同じとみなせる。

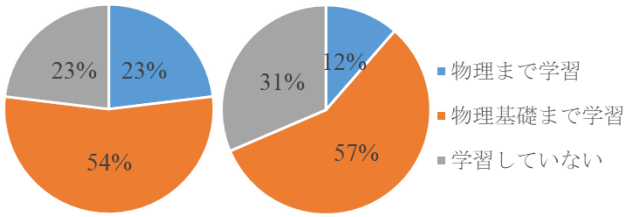
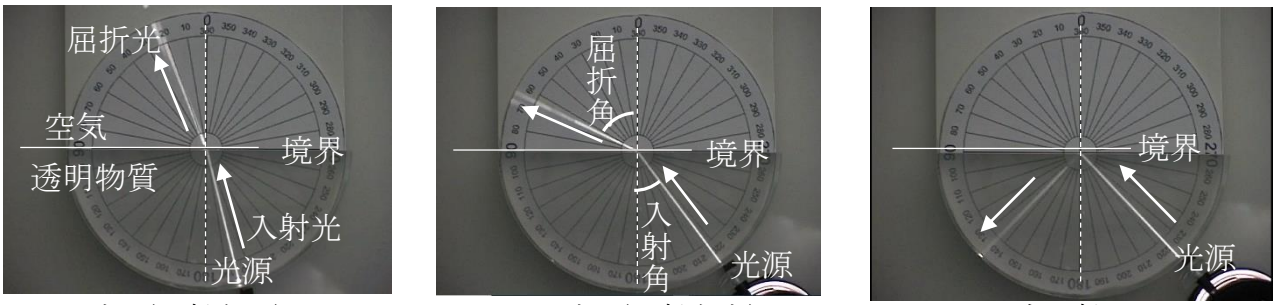



図1　高校時代の物理の履修歴

## ３．屈折率の測定課題

学生には課題として，図2のような実験動画を用いて，透明物質の屈折率を測定させた[6]。




(a)屈折（入射角小）　(b)屈折（入射角大）　(c)全反射

図2　光の屈折と全反射の様子（動画[6]より）

入射角と屈折角の関係と空気の屈折率より，透明物質の屈折率$n$を求めることができる。また，求めた透明物質の屈折率$n$より，全反射の臨界角$\theta_C$を求めることができる。その臨界角$\theta_C$について

は，実験動画より確認することもできる。

## ４．課題レポート評価

2020 年度の学生に向けた課題としては，実験動画から屈折率・臨界角を求めるレポートを課したが，それだけではなく，発展的な課題として PhET による光の屈折シミュレーション「Bending Light」を用いて振り返りを行うことを勧めた。「Bending Light」は屈折率を入力することにより，2 つの物質の境界で光がどのように反射・屈折するかを定量的に調べることができるシミュレーションであり，実験動画から学生自身が求めた屈折率を入力することにより，その屈折率が妥当な値となっているかどうかを振り返らせることができる。この課題レポートに対する評価を 3 段階（2：PhET で振り返りながら，きちんと理解している，1：屈折率は求められているが，理解が曖昧である，0：理解できていない）でおこなったところ，表 1 のような結果が得られた。

表 1 屈折率の測定（2020 年度）

| 評価※ | *N'*=58 |
|---|---|
| 2（きちんと理解） | 38 |
| 1（理解が曖昧） | 9 |
| 0（理解できていない） | 11 |

※振り返りを含めて評価

表 2 屈折率の測定（2021 年度）

| 評価※※ | *N'*=34 |
|---|---|
| 2（きちんと理解） | 9 |
| 1（理解が曖昧） | 11 |
| 0（理解できていない） | 14 |

※※振り返り以前で評価

なお，2021 年度の学生に対しては，PhET による効果を確かめるために，まずは振り返りを行わせずに，実験動画から屈折率・臨界角を求めることを課した。この課題レポートに対する評価を 3 段階（2：きちんと理解している，1：屈折率は求められているが，理解が曖昧である，0：理解できていない）でおこなったところ，表 2 のような結果が得られた。提出後に再度の課題レポートとして，PhET による振り返りを実施してもらったが，この結果については講演で触れたい。

## ５．終わりに

表 1，表 2 より，PhET による振り返りは，測定結果から計算した屈折率の妥当性を学生に促すことができることは確かめられたと言える。レポート提出後に，課題に対して PhET が役に立ったかなどについてアンケートを実施した。アンケートの詳細については当日の講演で触れたい。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K02890 の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 右近修治,「物理教育における多様表現の活用」, 青山学院大学 教職研究, Vol. 6, pp.39-55, 2020.

[2] C. Wieman，W. Adams，and K. Perkins，"PhET: Simulations That Enhance Learning"，Science，Vol. 322，pp. 682–683，2008.

[3] PhET Interactive Simulations　https://phet.colorado.edu/

[4] 覧具博義,「能動的学習を支援する PhET シミュレーション教材」，大学の物理教育，Vol. 16，pp. 34-37，2010.

[5] 國仲寛人，荻原彰，後藤太一郎,「小中学校の理科の授業におけるシミュレーション教材 PhET の活用」，三重大学教育学部研究紀要，Vol. 69，pp. 313-318，2018.

[6] P. Laws，R. Teese，M. Willis，and P. Cooney，*Physics with Video Analysis*，(Vernier)，2009.

# 物理シミュレーションアプリ群 PAK の開発

[A]牧山　隆洋、[B]猪本　修
[A]弓削商船高等専門学校、[B]兵庫教育大学
makiyama@yuge.ac.jp

## １．はじめに

近年，学習教材のデジタル化・オンライン化が進んでいる。勤務先の学生と協力して高校物理のシミュレーションアプリを複数開発し，応募者の web ページにまとめ[1]，PC さえあれば誰でもアプリをダウンロード・実行できるようにした。これにより学生はアプリを使った自立学習が可能になり，教員もアプリを活用した授業を実施できる。開発アプリは，Ball Simulator（ボールシミュレータ），Galileo（ガリレオ），Accelerator（Mr.加速器），Quantum（クオンタム），Tsunami Simulator（津波シミュレータ）の 5 種である。資料や実行のための動画も作成し，使用者が自由に閲覧できるようにした。




PAK のトップページ

## ２．内容

Ball Simulator は平面内の運動に対応したアプリで，2 次元内の運動を自由にシミュレートすることができる。Galileo は落体の運動に対応したアプリで，自由落下・鉛直投げ上げ・水平投射・斜方投射などの運動を自由に再現することができる。Mr.加速器は電磁気学に対応しており，一様な電磁界中での荷電粒子の運動のシミュレーションができる。また，Quantum は一次元の量子力学シミュレーションアプリであり，シュレーディンガー方程式を解いた結果の動きを視覚化できる。トンネル効果などの再現ができ，大学での授業にも活用できるようにしている。「津波シミュレータ」は「波動」分野に対応しており，海底地形によって津波の動きがどう変わるかをシミュレートすることができる。

## 参考文献

[1]PAK のサイト URL　pak.makiyama-phoenix.jp

【メモ】

# 新しい方式のオンライン実験「Interaktive Bildschirmexperimente」の試行

安田淳一郎
山形大学 学士課程基盤教育機構
ysdjun16@kdw.kj.yamagata-u.ac.jp

## １．はじめに

COVID-19の影響により，様々な方式で遠隔実験授業が行われている。たとえば，学習者が実験動画やシミュレータを通じてデータを取得し分析する方式，自宅に送付された実験キット等で実験器具を作成する方式など，様々な実践が開発・蓄積されている。これらの授業のために開発された教材には，COVID-19が終息すれば一旦は役割を果たすものもあれば，その後もオンデマンド授業やデジタル教科書の補助教材として引き続き活用されるものもあるだろう。

本研究では，遠隔実験授業で利用可能で，COVID-19終息後も活用が見込まれるデジタル教材の一つとして，Interaktive Bildschirmexperimente（IBE）に着目した。本発表では，IBEの特長を紹介し，IBEを用いて試行した授業実践について報告する。

## ２．Interaktive Bildschirmexperimente（IBE）とは

IBEとは，実験器具および実験結果の静止画をプログラミングで統合したデジタル教材である。IBEは，学習者がいつでも（仮想的な）実験を繰り返すことが可能な教材として，1996年頃にベルリン工科大のKirstein[1]によって開発された。その後，各国で展開されているが，日本での開発・実践事例はほとんどない。英語圏では，Interactive Screen Experimentと翻訳されており，直訳すると「双方向型画面実験」となる（呼びやすさから，「デジタル画像実験」と意訳したい）。IBEは，ベルリン自由大学のウェブサイト「tetfolio」で公開されており，誰でも無料で利用可能である。現在，遠隔実験授業で利用可能な教材として再評価され，開発が加速している。

本報告では，IBEの一例として「電離放射線の種類」[2]を取りあげる（図1・2）。このIBEの目的は，3種類の放射線源（Am-241，Sr-90，Co-60）から放出される放射線の種類を，ガイガー＝ミュラー計数管と4種類の吸収材（アクリル板，紙，厚紙，鉛）を用いて特定することである。学習者は，IBEの画面上のオブジェクト（図1）を操作して仮想的な実験に取り組む。たとえば，放射線源や吸収材をクリックすると，保持台の上に設置できる。また，測定器の制御パネルをクリックして拡大し（図2），COUNTSボタンを押すと，事象の数を計測できる。

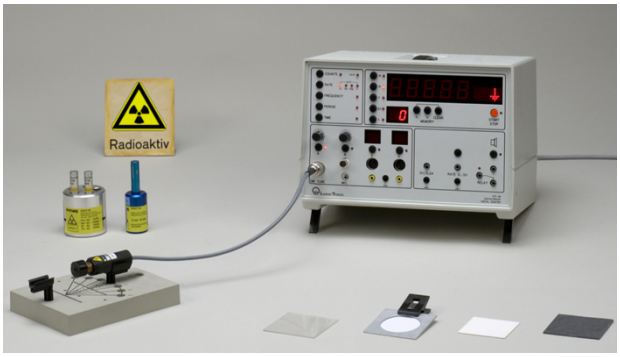



図1．IBE「電離放射線の種類」の初期画面

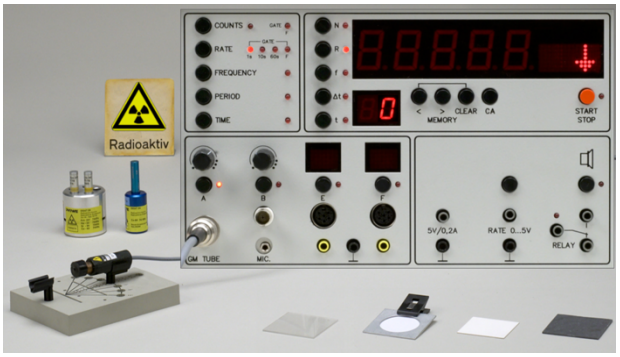



図2．測定器の制御パネルを拡大した画面

IBEの特長として，実験動画のように実写で表現されていながら，シミュレーション教材のように学習者の操作によって動作が分岐する点が挙げられる。また，シミュレーション教材は数理モデルに基づいて動作するが，IBEは実験で得られたデータに（可能な限り）基づいて動作する。これらの特長により，学習者は現実により近い形で，仮想的な実験に取り組むことができる。

IBEを用いた探究学習の設計例がtetfolioで提示されている。たとえば，IBE「電離放射線の種類」では，学習目標を「吸収材を用いて，異なる種類の電離放射線を検出する実験について説明できる。」と設定し，課題①「どのような予備実験が必要かを考え，実行してください。」，課題②「異なる吸収材を用いたすべての試料（放射線源）について，計数率を調整し，測定してください。そして，測定値を表に記録してください。」，課題③「測定値を使って，各放射線源から放出されている放射線の種類を，理由立てて説明してください。」という課題が設定されている。

## ３．IBEを用いた授業実践の試行

2020年後期にA大学の教養科目のオンライン授業（1コマ分）で， IBE探究学習「電離放射線の種類」を和訳したものを提示し，課題に取り組ませた（Zoom面接試験の残り時間を利用)。IBEの操作方法は，オンデマンド動画で解説した。課題の解答は，解答欄を設定したExcelワークシートに入力させ，LMSを通じて提出させた。放射線の種類の特定で必要となる知識は，文部科学省「放射線副読本」[3]等のウェブサイトで調べるよう促した。本課題の提出者数は17名であった。

採点の結果，ほぼすべての学生が課題①～③の全問を正答した。ただ，1名の学生については，「Am-241は紙，厚紙によって弱められているが遮られてはいないのでγ線・X線である（中略）Co-60は鉛でも遮ることはできていないので中性子線である」と解答した。確かに，「放射線副読本」では，放射線の種類に応じて各吸収材が「遮る」「止める」「弱める」と表現されているが，定量的には説明されていないため，どのようなデータが得られれば「遮っている」と解釈できるのか，学生が判別に戸惑う場合があることも理解できる。

課題提出時に，「デジタル画像実験を体験した感想等を自由に記述してください。」という質問項目のアンケートも合わせて実施した。回答には，「準備や後片付け，危険な思いをすることなく実際に自分で機材を操作して数値を計測することができる点はとても魅力的に感じた。あらかじめ計測してある値から考えるのと，実際に自分で操作し導き出した値から考えるのでは理解にかかる時間が後者の方が圧倒的に短いように感じた。」などの好意的な意見が多く見られた。

## ４．IBEの展開の可能性

IBEの活用は，正課の授業時間内にとどまらない。学習者の自習用，生徒・学生実験の予習用としても活用できる。また，操作ログ分析による学習評価，教師の教材研究用など，その他の活用可能性も多岐に渡る。一方，デジタル教材であることから，実験における手の感覚を体験できない等の限界もある。実験への橋渡しとして，新しい学習評価の手段として等，様々な可能性について，IBEをどのように物理教育に位置づけていくのか，検討が必要である。

## 参考文献

[1] J. Kirstein and V. Nordmeier：Eur.J.Phys.28-3 (2007).
[2] 「電離放射線の種類」https://tetfolio.fu-berlin.de/web/996022
[3] 「放射線副読本」https://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1409776.htm

# マイコンとセンサーを用いた力学分野の相互作用型演示実験講義の教具開発

[A]南伸昌、[A]夏目ゆうの、[A]瀧本家康、[A]柴山絵里花、[B]渡邉剛士、[C]望月真菜美
[A]宇都宮大学共同教育学部、[B]栃木県立宇都宮清陵高等学校、[C]栃木県立宇都宮東高等学校附属中学校
minami@cc.utsunomiya-u.ac.jp

## １．はじめに

相互作用型演示実験講義（Interactive Lecture Demonstrations：ILDs）は、ワークシートと演示実験を用いたアクティブ・ラーニング型の授業で、日常生活に直結したテーマを題材として設定された課題について、次の流れで学びを深める[1]。

①課題の提示を受ける。
②個人で結果について予想し、ワークシートに記入する。
③グループで話合い、予想を深め、ワークシートに記入する。
④演示実験を観察し、結果を確認する。
⑤確認した結果を元に、グループで話合い、結論を導く。

ILDsの主な構成要素は「ワークシート」と「演示実験」で、「ワークシート」は通常、開発者[1]が開発したものを、対象の生徒・学生に合わせて表現等を修正して用いる。「演示実験」はICTを活用し、力などの目に見えない性質を数値化する。そしてその時間変化をグラフ化するなどして可視化し、生徒が現象を正しく理解できるよう支援する。しかし、そのようなデータを可視化するための市販の教具は比較的高価であることがILDs普及の一つのネックとなっている。

本研究では、高校物理基礎の「運動の表し方」「様々な力とその働き」単元（それぞれ「運動」「力」と略記）における教具を、マイコンとセンサーを用いて安価に製作し、中学校、高等学校の授業での活用を検討した結果を報告する。

## ２．作成した教具

### ２−１．距離、速度、力の計測

各種センサーからの信号を変換し、PC へ入出力するマイコンには、汎用性が高い Arduino Uno（スイッチサイエンス社）を用い、プログラムはArduino IDEで制作した。センサーから物体までの距離の計測には超音波距離センサーUS-015を用い、読み込んだ数値をそのままPCに出力した[2]。物体の速度は、距離の差を、計測した時間間隔で除するプログラムを作成し、PCに出力した。物体間に働く力の計測には圧力センサーFSR402を用い、読み込んだ数値をそのままPCに出力した。

センサーから出力された信号は、数値として画面上で確認したり、その時間変化をグラフとしてリアルタイムで観察したりできる。また、出力した値は、エクセル形式で取り出すことができるため、加工して表示したり生徒の演習に用いたりすることができる。

### ２−２．「運動」用教具

ILDsのワークシートに沿って、物体の位置及び速度の時間変化を表示する教具を作成した。US-015はアクリル板に固定したブレッドボードに立て、ジャンパーワイヤーでArduinoと接続した(図1)。力学台車の運動を測定する際にはアクリル板を滑走台に固定して US-015 の位置を決めたが、

US-015 がレール面よりも高くなると、40 cm 付近の出力信号に再現性よくノイズが現れた。レール土台面まで下げると現れなくなったが、原因は調査中である。台車を等加速度運動させるための牽引装置として、実験台とスタンドに棒付滑車を固定し、たこ糸を介した錘を落下させた。

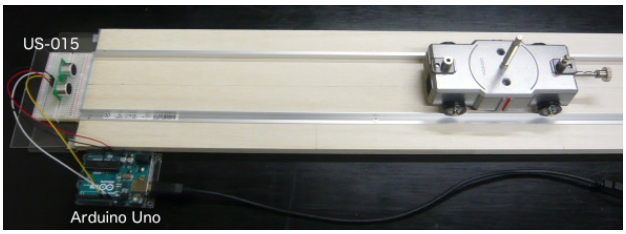


図 1.「運動」用教具

2－3．「力」用教具

ILDs のワークシートに沿って、自作の直線導入機を用いて 2 物体間に働く力を表示する教具と（図 2)、衝突時に 2 つの台車間に働く力を表示する教具を作成した[3]。衝突時の力は、力学台車の突起部に FSR402 を貼り付け、その一方に緩衝用の梱包材を貼り付けたものを、滑走台上で衝突させることにより計測した。衝突時間は大変短く、データとしては 3〜4 点となり、リアルタイムでは捉えきれない場合があるので、取得したデータをエクセル上で切り取り、衝突部分を拡大して表示した。FSR402 の出力を可視化する上で、シャフトが箱を押す力／右向きの台車が及ぼす力を正の向きに、箱が押し返す力／左向きの台車が及ぼす力を負の向きに取り、双方の大きさの比較が視覚的に容易にできるようにした。

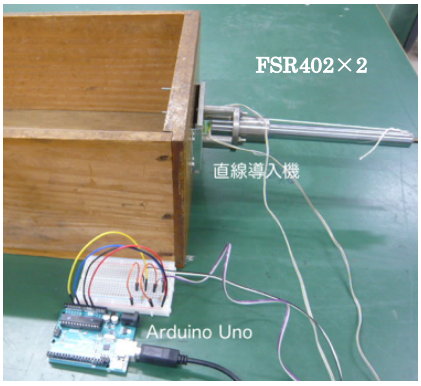


図 2.「力：2 物体間」用教具

なお、FSR402 は構造上、歪みを加えると再現性に影響を与えてしまう[4]。また、出力を安定させるためには表面の素子部に均一に力を加えるなど、印加条件を揃える必要がある。従って、本研究では素子の裏面に外径と同じφ18（厚さ 2 mm）の、表面には素子部の内径より若干狭いφ12（厚さ 2 mm）の透明アクリル板を両面テープで貼り付け、機器への着脱の際はそれらを一体のものとして扱った。

## ３．中学、高校での実線結果と展望

本教具を用いた「力」の授業を、令和 2 年 11 月に栃木県立 A 中学校 3 年生 3 クラスに各 1 時間、令和 2 年 12 月に栃木県立 B 高等学校 3 年生 1 クラスに 2 時間、何れも特別授業の形で実施した。その結果、事後の定着度調査において、授業実施前よりも有意に高い理解度の伸びが見られた。また、各演示実験で力の働きをどの程度実感できたのかを 5 件法（実感できた 5 点↔実感できなかった 1 点）で問うたところ、中学校で 4.6 点、高等学校で 4.2 点という高い評価が得られた。

当日は授業及び実施の効果の詳細についても報告する予定である。

## 参考文献

[1] D. Sokoloff and R.Thornton: Interactive Lecture Demonstrations, 2004, Wiley.
[2] 栃木県教育センター「Arduino を活用した物理の実験」
http://www.tochigi-edu.ed.jp/hiroba/plan/detail.php?plan=C3005-0075
[3] Arduino UNO と FSR402 を用いた力を可視化する教具の開発，物理教育通信 183，pp.76-81
[4] FSR インテグレーションガイド https://akizukidenshi.com/download/ds/interlinkelec/94-00004_Rev_B%20FSR%20Integration%20Guide.pdf

# 物理現象を式で理解することに困難を感じる高校生を対象とした多様表現導入の試み

[A]尾崎龍之介，[A]中村公亮，[B]長谷川大和，[A]興治文子
[A]東京理科大学大学院理学研究科，[B]東京工業大学附属科学技術高等学校
1720505@ed.tus.ac.jp

## １．研究背景及び研究目的

初学者にとって，物理現象を式で表現することは困難である。例えば，公式を暗記して代入することはできるが，その公式や物理量が何を表しているかを説明することができないことがある。また，物理現象を関係する変数の比例や反比例等の関係で理解したり，物理現象を図示して解釈することが難しい。これらは，物理学では現象を多様な表現を用いて一般化していることに由来している。本研究では，物理基礎を履修している文系の高校生が，抽象度が高い数式を用いて現象を理解することができるようにするため，彼らが多様な表現間の変換をする際に生じる困難を明らかする。また，授業内で図やグラフ，文章による記述や，センサーの活用など多様な表現を取り入れて指導したことで彼らが困難を克服できるかを明らかにする。

## ２．研究方法

本研究は2021年4月から筆頭著者が物理基礎を担当しているA高校2年生の文系102名を対象とする。調査時期は2021年4月から7月である。表1に研究に使用した調査の実施時期と実施内容及び，授業内容と授業で重点的に扱った表現を示している。

表１　本研究の実施内容及び授業内で重点的に扱った表現

| 時期 | 実施内容 | 授業内容 | 重点的に扱った表現 | |
|---|---|---|---|---|
| 4月 | ・力学概念調査<br>・学習意欲及び実験経験の調査 | ・速度<br>・加速度 | ・演示実験でセンサーを活用<br>・結果のグラフを予想して記述<br>・結果を文章で記述<br>・グラフを式で表現<br>・教科書を自分の言葉で表現 | |
| 5月 | ・中間考査 | | ・文章で書かれた現象を式で表現 | |
| | ・物理現象を図や物理量を用いて表現する課題 | ・落体の運動<br>・力 | | ・結果のグラフを4択で予想<br>・物理現象を図で表現<br>・図に物理量を記述<br>・図からグラフや式を表現 |
| 6月 | | ・運動の法則<br>・さまざまな力と運動 | | |
| 7月 | ・多様表現を用いた力学概念調査<br>・期末考査 | | | |

第一段階として，生徒が物理現象を理解する際，センサーを用いた演示実験などを通してグラフや文章，式を用いることを授業における重点的に扱う表現とする。第二段階では，第一段階で含まれていなかった，生徒が物理現象を図や言葉で説明することを重点的に扱う表現として授業を行う。4月に力学概念調査及び，理科に対する学習態度とセンサーを活用した実験経験の有無の事前調査を行う。5月に文章で記述された物理現象を読み，式で表現する問いを含む中間考査を実施する。また中間考査とは別

に，文章で記述された物理現象を読み，図や物理量を用いて表現する課題を実施する。7月に多様表現を用いた力学概念調査を実施する。これらの相関関係を調べることで，物理現象を多様な表現を用いて指導したことによる，生徒の理解度の変容を検討する。

## ３．実践結果及び考察

力学概念調査の正答率の分布は，正答率が40%以下の生徒が全体の9割を占め，とりわけ良い成績ではなかった。センサーを活用した実験経験の有無については，中学までに理科でICTを用いた教育を受けたことのない生徒が8割であった。また，理科の勉強にあまり自信がないが，実験は比較的好きだと回答した生徒がほとんどであった。そのため研究の第一段階として，授業でセンサーを用いた演示実験を行うことで，生徒は興味深く授業を受けていたと感じる。しかし，実験の予想で，生徒が選択式のグラフは選べるが，自身でグラフを描けないことや，結果のグラフを読み取り，式と関連づけることができないことがわかった。一方で，教科書に記述された文章を読み，自分の言葉でまとめることはできることがわかった。

中間考査では，文章で記述された物理現象を適切に表した式を選ぶ問いを出題したが，正答率が50%弱で，期待していたほど良くなかった。そのため，第二段階として，生徒が物理現象を具体的な図で表現した後に，図の中に物理量を書き込み，式と関連づけて表現する課題を実施した。成果物をルーブリック形式で評価した結果，約50%の生徒が物理現象を文章から具体的な図に変換することはできるが，そこに物理量を書き込むことに困難があることがわかった。そこで以降の授業では，演示実験の結果を説明する際，式とグラフに加え，文章と図を併記した。また，教科書を読んでまとめる際，自分の言葉だけでなく，図を用いて表現するよう指導した。

1学期の最後に，ボールの投げ上げに関する多様表現を用いた力学概念調査を行なった。用いた表現は，①ボールにはたらく力の矢印(選択式)と，②バットで打たれたボールにはたらく力の作図とその力の文章での説明及び，③ボールが受ける力と時間の関係のグラフ(選択式)である。その結果，生徒が持つ素朴概念は想像以上に複雑で一貫性がないことがわかった。①では生徒が持つ回答パターンは24あり，かなり複雑であった。それは，ボールが投げ上げられた後にも手から力を受けているという素朴概念と，最高点でボールにはたらく力が存在しないという素朴概念が組み合わさった結果であることがわかった。また，それらの結果と③で選択したグラフに一貫性が無い生徒が約99%であった。

## ４．まとめと今後の展望

生徒がある物理現象を理解する際，多様な表現を用いた授業をすると効果があると言われているが，初めから一連の現象を多様に表現するのではなく，一つひとつの事象に対して段階的に多様表現を用いなければならない。生徒が具体的な表現から抽象的な表現に変換する際，どの表現間のはしご掛けをすれば良いかを個別最適化の観点で明らかにしていきたい。

## 参考文献

[1]D.F.Treagust, R.Duit, H.E.Fisher,“Multiple Representations in Physics Education”, Springer (2017).
[2]P.Nieminen, A.Savinainen, and J.Viiri, Phys. Rev. SPECIAL TOPICS -PER **6**, 020109 (2010).
[3]国立教育政策研究所，平成14年度高等学校教育課程実施状況調査 物理IB(2004).
[4]右近修治,「物理教育における多様表現の活用」,青山学院大学 教職研究，**6**,39-55,(2020).

# 強制振動から理論的に予測できる潮汐現象の力学的運動像

池田　幸夫
広島修道大学ひろしま協創中高等学校（山口大学名誉教授）
ikeda2329@gmail.com

## １．はじめに

起潮力は月に面した側とその反対側で最大となる。24 時間周期で自転しているために，地球上の任意の一点に作用する起潮力の周期は約 12 時間である。周期的な外力が引き起こす運動は**強制振動**である。強制振動の理論を適用すれば，起潮力の周期 T と海洋の固有周期 T0 との大小関係によって，潮汐は，①T＞T0：「同位相」，②T＜T0：「逆位相」，③T=T0：「共振」という３つの運動様式に区分できる。この報告では，強制振動から明らかになる潮汐の新しい運動像を紹介する。

## ２．潮汐の分類

大陸の存在や水深の不均一性のために，実際の潮汐の運動は非常に複雑である。複雑な自然現象からシンプルな力学的原理を明らかにするためには，可能な限り条件を単純化する必要がある。潮汐研究においては，赤道に沿って地球を一周する「**仮想運河**」がよく用いられてきた。福住（2001）や Butikov（2002）らが潮汐の原理として強制振動を提唱した研究においても，このモデルが用いられている。

「起潮力によって月の側とその反対側の海水が引き上げられて満潮になる。自転によって１日に２回この位置を通過するので，干満は１日に２回起こる」という潮汐の説明が、社会的に広く浸透している（例えば，気象庁ＨＰや高校地学教科書など）が，この説明にはいくつかの矛盾が指摘されている。

前述したように，周期的な外力が引き起こす運動は強制振動である。起潮力の周期性に注目すれば，潮汐現象は強制振動によって理解しなければならない。強制振動の理論を適用すれば潮汐現象は次のように理解することができる。

水深に比べて波長の長い**長波**の速度は，水深の平方根に比例する。Butikov （2002）は，仮想運河の水深を 3,500 ｍと仮定して，海洋の固有周期 T0 を約 30 時間と見積もっている。また，水深が深くなると潮汐波の速度が大きくなるため，固有周期 T0 は小さくなる。この関係を用いれば，簡単な波動力学の原理から，水深 22,000ｍの海洋の固有周期は約 12 時間となり，この深さの海では共振による巨大な潮汐が発生するであろう（図１）。私はこの巨大潮汐を「**潮汐バースト**」と呼び，その科学的意義を論じた（池田，2020）。

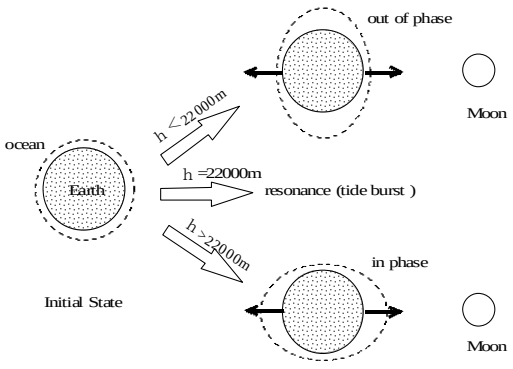



図１　水深による潮汐の分類

図１に示されているように，水深 22,000ｍを基準にすれば，海洋潮汐は水深によって３つの型に分けることができる。水深が 22,000ｍより深い場合は，同位相の潮汐が起こる。この型の潮汐では，月の南中と満潮が一致する。同位相の潮汐は，一般に広く信じられている潮汐の同じである。ただし，同位相の潮汐が起こるためには 22,000ｍ以上の深い海が必要である。固体地球の潮汐波は速度が非常に大きいので，**地球潮汐**は同位相の潮汐である。

逆に水深が 22,000ｍより浅い場合には，潮汐波の速度が月の移動速度より遅くなるため，「逆位相」

の潮汐が起こる。逆位相の潮汐では，起潮力最大の地点（月の南中地点）は満潮ではなく干潮となる。月の南中と満潮との間には約 6 時間（半波長）のずれが発生するからである。実際の海洋は 22,000m よりはるかに浅いので，地球の海洋潮汐は**逆位相の潮汐**でなければならない。

## ３　力学的運動像

では，逆位相の潮汐の運動を考えてみよう。図２は月の移動に伴う海水面の振動を，地球に固定した座標系で表した模式図である。月がＭ０の位置にいるとき、仮想運河の海洋面は月に対して 90° の方向の長軸をもつ楕円形を呈する。したがって，月に面した側とその反対側が干潮となる（図２ａ）。この状態においては，Ｂ点とＤ点では海水面が上昇して位置エネルギーが最大となり、この後，海水面は重力によって下降運動に転じ，Ａ点とＣ点では起潮力によって引き上げられて上昇に転じる。約 3.5 時間が経過して月がＭ１に移動したとき，海水面の形は円形になる（図２ｂ）。この円は重力に対する等ポテンシャル面に相当するが，運動エネルギーが最大になっているため海水の上下運動はそのまま継続する。上下運動が止まるのは，月がＭ２に移動して海水面が再び楕円形に戻ったときである（図２ｃ）。もちろん，この時の楕円の長軸は月の方向に対して直角である。

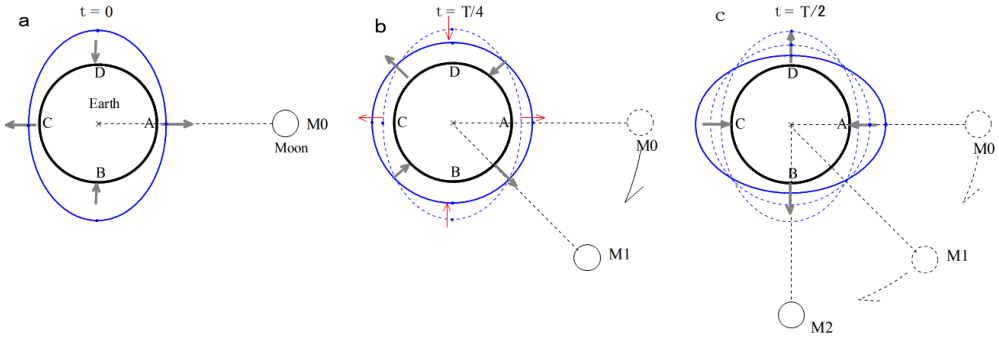



図２　逆位相の潮汐における海水面の形の変化

黒矢印は起潮力の向きを、赤色の矢印は海水面の運動の向きを表す。

以上の考察から明らかになったことは，海洋（仮想運河）の潮汐運動は楕円→円→楕円→・・・と形の変化が繰り返す運動であるということである。この運動は，起潮力によって引き上げられた楕円が，月と共に地球のまわりを回転するという通説の説明とは大きく異なっている。

海洋表面の形が楕円→円→楕円→・・・と変化すれば，図２ｃに示されているように，満潮と干潮の中心は互いに 90° 離れた 4 カ所にでき，そこから 45° はなれた領域には海水面の上下動のない，いわゆる**無潮点**ができると考えることができる。海岸から遠く離れた太平洋の中央部にいくつかの無潮点が存在することは，観測によって確認されていることである。

## 参考文献

Butikov, E. I. (2002), A dynamical picture of the oceanic tides, Am. J. Phys., Vol. 70, 1001-1011.

福住靖治（2001），起潮力と潮汐運動，物理教育、49 巻、353-357.

池田幸夫（202），強制振動仮説と潮汐バーストの概念，山口大学教育学部研究論叢，69 巻，1-5.

# オンラインによる自宅での学生実験・実習の試み

市田正夫、青木珠緒、秋宗秀俊、梅津郁朗
甲南大学理工学部物理学科
ichida@konan-u.ac.jp

## １．はじめに

2020 年の初めから始まったコロナ禍により，それまでは当たり前のように行ってた対面での授業が突然不可能となり，オンラインで行わざるを得なくなった。我々教員は，戸惑いながらもオンライン講義を行ったが，一方で，物理教育において重要かつ不可欠な実験・実習のリモート化・オンライン化という問題に直面した。この問題に対して，「オンラインによって自宅で実験・実習を行う」ということを試み，一定の教育効果が得られたと考えられるので，その内容を紹介する[1]。

## ２．自宅実験・実習の試み

我々は限られた状況下で,学生を登学させずに実際に実験をさせるために，オンラインで教員が説明を行いながら学生は自宅で実験を行う，という「自宅実験」を行った。限られた予算内で，なるべく早く学生に実験を提供する必要があるために，手軽で安価な実験を選んだ。一般家庭にあるものを使えれば予算的には 0 円で済む。この実験をカテゴリーA とする。一人あたり 1000 円以下で済むものをカテゴリーB，5000 円以下で済むものをカテゴリーC，10000 円以下で済むものをカテゴリーD とする。カテゴリーB～D の実験は実験装置を大学で準備し，学生の自宅に送付した。送付することと，自宅で実験させることを考えると，実験装置は小型であることも重要である。

**●カテゴリーA**(費用ほぼ 0 円) - 力学の実験：単振子、自由落下

単振子と自由落下は自宅にあるものだけで行うことができる。必要なものは，単振子については，ひも，ひもを止めるピン，重りとなるもの，ひもの長さを測るメジャー，周期を測定するためのストップウォッチである。ストップウォッチはスマホに搭載されているものを利用した。ひもの長さを変えながら振動の周期を測定し，そこから，重力加速度を求める。

自由落下の実験では，用意するものはボールなどの小さな物体，メジャー，スマホに標準に入っている動画撮影アプリ，「簡単スロー」や「ウゴトル」などのスロー再生アプリである。ボールの落下を動画撮影して，それをスロー再生し，各時間でのボールの位置を読み取るだけである。ボールの位置と時間の関係などから重力加速度を求める。

**●カテゴリーB**(費用 1000 円以下) - 分光の実験

自宅で分光実験を行わせるために，フィルム回折格子(500 本/mm)を用いた簡易分光器を A4 サイズのペーパークラフトとして学生に送付した。これを自宅で組み立ててもらい，それを使って蛍光灯などの分光を行った。蛍光灯には水銀の輝線が現れるので，その波長から回折格子の格子間隔を求めさせた。逆に，回折格子の格子間隔を与えておいて，観測された輝線の波長から光源に含まれる元素を同定させるのも教育的かもしれない。学生に送付するものはこの簡易分光器のペーパークラフトのみなので，普通郵便で送ることが出来て手軽である。

**●カテゴリーC**(費用 5000 円以下) - 電気回路：ホイートストンブリッジ

ホイートストンブリッジの原理は高校の教科書にも載っており，精度良く抵抗値を求めることが出来る。しかし，一般的に学生実験で用いられる装置は高額で大きい。ここでは割り切って精度を

犠牲にし，固定抵抗と可変抵抗でホイートストンブリッジ回路を組ませた。高価な検流計の代わりに安価なテスターを用いた。この方法では精度は低いが，自分で配線を行うため原理が理解しやすいというメリットがある。

●**カテゴリーD**(費用 10000 円以下) - 電磁気学の実験：電磁誘導

近年のデジタル技術の向上で，一昔では考えられなかったような高性能な「測定器」が安価で容易に入手可能となっている。 2MHz で 2mV の感度を持つオシロスコープが 1 万円以内で購入できる[2]。そのオシロスコープを用いて，ファラデーの電磁誘導の実験を行った。パイプにエナメル線を巻き，そこに磁石を落として，コイルに発生する誘導起電力をオシロスコープで測定した。その波形を解析して誘導起電力の大きさとコイルを通過する時の磁石の落下速度を求めた。

## ３．学生の反応

上記の実験のほか、自宅の PC を用いてリモートでプログラミングの実習も行った。これらについて学生にアンケートを行った。大学で行う実験との比較では 80%以上の学生が，大学の実験室で行う実験の方が良かったと回答している。その理由の多くは，実験装置や設備の良さを挙げている。次に，「自宅実験」を試みる前に行っていた，実験映像とデータを提示して実験を行わずに解析とレポート作成を行わせた「仮想実験」と比べると，半数以上の学生が「自宅実験」のほうが良かった，と回答し，自宅実験そのものに対する否定的な意見は見当たらなかった。実際に自分が実験を行うことによって，理解が深まったと答えている学生も多かった。「自宅実験」が「大学での実験の代替え措置」として満足できたか聞いたところ，60%近い学生が満足しているとの回答であった。学生は大学に行くことができず，自宅でオンラインですべての授業を受けなければいけないという制約条件の中で，「自宅実験」は一定の成果があったものと考えられる。

## ４．自宅実験から得られたこと

自宅実験はもちろん代替措置であり，総合的に見れば学内での実験に勝ることはない。しかし，その特色を生かせば新たな教育の機会を提供することも可能であろう。中には予算措置がなくても，一般家庭にあるものを使って実行可能なものもある。高校の様に予算が限られている場合でも実験が可能であろう。また今回は新型コロナ対応であったが，病気等の不可抗力で登学不可能な学生に実験の機会を失わせないという使い方も可能である。さらに，自宅実験ならではの教育効果も見いだせる。専用の測定装置がなくても代替品で実験可能であることを学生に示すのも重要であると考えられる。学生が自分で判断しなければならない局面が増えたことも重要であり，我々が懸念している 「学生実験の作業化」からの脱却に一定の効果があるともいえるであろう[3]。

## 参考文献

[1] 市田正夫，青木珠緒，秋宗秀俊，梅津郁朗 ： 近畿の物理教育 27 (2021) 7-13.

[2] 我々が用いたオシロスコープ(DSO112A)は，現在のところ，秋月電子通商のホームページから購入可能である。https://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-12971/

[3] 梅津郁朗，青木珠緒，市田正夫，山﨑篤志，山本常夏：物理教育 68 (2020) 268-272.

# 高校物理授業における問題演習を通じた認知発達伸長の試みと素朴概念解消の可能性

山下哲
大阪府教育センター附属高等学校
haz34840@wood.odn.ne.jp

## １．はじめに　認知的な発達段階と高校の物理学習に対する影響と，問題演習を通した認知的な発達段階の伸長の試み

入門物理の学習者にとって，素朴概念が概念理解の大きな障害になっていること，および素朴概念の解消に認知的な発達段階が強く影響を受けていること知られている。認知的な発達段階は科学な推論における抽象的・仮説的な思考操作の熟達度をさすが，中学校以降の理科の学習内容が形式的操作期と呼ばれる高い科学的推論能力を前提にしているため，講演者は高校生に対し，「CASE」や「CASE 的な物理授業」といったアクティブラーニング型の学習活動を行うことで，高校物理の授業の中での認知的支援の実践と素朴概念解消の効果を検証してきた[1][2]。

一方で，高校物理の授業における問題演習に対する生徒の期待が一定存在することも事実である。この期待は特に理系の生徒に顕著であり，高等物理において問題演習は非常に広く活用されている手法であるが，講演者は問題演習を行うことの意義が生徒に正確には伝わっていない様に感じている。これは欧米の物理教育研究の中で，問題演習を行っても素朴概念の解消が限定的であることが報告されていることにもあらわれていると講演者は考えている。そこで本取組においては，高校物理の授業をアクティブラーニング型の問題演習の形態で実施することで，生徒の期待に応えつつ，認知的な発達段階の伸長させる指導法の開発を試みた。なお，問題演習による高校物理の理解については，素朴概念の解消から検証することとした。

## ２．問題演習を通じた認知的な発達段階の伸長

本取組の基本的な姿勢は，問題演習を行う際に，問題を解くことではなく，題材となっている現象を原因と結果の観点から解釈することであることを生徒に継続的に指導することである。授業中においては，講演者が現象の解釈の模範例を示したのちに，生徒に類題に取り組ませ，必ず自らの解釈を他の生徒と共有・議論する時間を設けた。自宅課題については，問題を解いた後に解釈を書き込ませることを促した。高校物理の問題演習においては，様々な物理量を用いて別の物理量を導くことが多いが，認知的な発達段階は，現象を変数の観点で捉え，その関係性を相関や量的関係で整理し，他者と議論することで伸長することに期待しての活動である。ただし，後に紹介する様に，本取組を実施した生徒の平均的な認知的な発達段階は，2 年次当初の段階で後期移行期に相当し，抽象的・仮説的な思考操作に熟達しているとされる形式的操作期に達してはいないものの，基本的な思考操作は可能な集団であることは，本取組の実施の前提となると考えている。

上記の問題演習に加えて，週に一度，生徒にリフレクションシートを配布し，自らの思考を振り返る内容の記述を求めた。回収したリフレクションシートに教員がコメントを付したものを授業中に紹介し，生徒の解釈や疑問点の共有を行った後，リフレクションシートを e－ポートフォリオ上に集約して，いつでも生徒が自他のリフレクションシートを閲覧できる環境を整えた。生徒の期待

の高い問題演習を中心にした学習活動であるため，リフレクションシートの質が一定保証され，その共有によって集団としてのメタ認知を刺激することが認知発達を促進すると期待されるためである。

これらの取組を進路希望が比較的明確である，表１に示す京都市立 M 高校の 2 年次の「物理基礎」3 講座において 1 年間実施した。表１にこれら３講座の生徒と 2016 年度の全国調査[3]で得られた，CTSR と FCI の正答率の変容，および FCI 規格化ゲインを示す。表１から，本取組を実施した３講座の生徒が 2 年次当初の段階で，CTSR の正答率が全国調査とほぼ同程度であるにも関わらず，2 年次末の段階では，認知的な発達段階が全国調査の結果と比しても大きく伸長していることが分かる。

表１　高校 2 年次における認知的な発達段階と力学概念の理解度の変容

| 高 2 物理基礎履修者 | 人数 | CTSR<br>正答率変容 | FCI<br>正答率変容 | FCI<br>規格化ゲイン |
|---|---|---|---|---|
| 2016 年度全国調査 | 400～500 | 68% ⇒ 75% | 34% ⇒ 45% | 0.17 |
| 京都市立 M 高校<br>普通科理系　S コース | 16 | 69% ⇒ 81% | 25% ⇒ 56% | 0.41 |
| 京都市立 M 高校<br>普通科理系　A コース | 19 | 68% ⇒ 80% | 31% ⇒ 57% | 0.37 |
| 京都市立 M 高校<br>普通科理系　専門学科 | 18 | 70% ⇒ 81% | 37% ⇒ 63% | 0.41 |

## ３．高校物理で扱う現象の解釈と素朴概念解消の可能性

本取組は素朴概念解消を直接の目的にはしていないものの，高校物理で取り扱う現象を原因と結果の観点から解釈することを目的にしており，生徒たちは現象を解釈しようとする活動の中で，素朴概念による解釈が矛盾を生じる経験をしている。表１に示すように，本取組を実施した３講座の規格化ゲインは良好であり，高校物理の理解について一定の効果が認められると考えられる。生徒集団の認知的な発達段階が伸長している背景のもと，現象の解釈という目的が共有された生徒集団の中での思考活動が，素朴概念解消を促したものと考えられる。講演においては，生徒集団の期待を学習観の観点から議論し，学習活動への効果について触れたうえで，素朴概念解消が期待できる手法の一つとして提案したい。

## 参考文献

[1] 山下哲，谷口和成，“認知的な発達段階を考慮した高校物理授業の必要性とその効果”，日本物理学会第 73 回年次大会講演概要集，24pK510-10(2018).

[2] 山下哲，谷口和成，“シェマと物理概念の獲得の関係に注目した，認知発達に基づく高校物理授業の実践”，日本物理学会第 74 回年次大会講演概要集，16pK103-3(2019).

[3] 谷口和成，笠潤平，村田隆紀，覧具博義，“日本の高校・大学生の科学的思考力の現状”，日本物理学会第 72 回年次大会講演概要集，19pC11-6(2017).

# ピンポン球の鉛直投げ上げ運動における空気抵抗の効果を正しく計算する

[A]渡會兼也、[B]越桐國雄
[A]金沢大学附属高等学校、[B]元大阪教育大学
watarai@staff.kanazawa-u.ac.jp

## １．概要

ピンポン球を鉛直投げ上げ運動させた際の空気抵抗の効果について調べた。空気抵抗は慣性抵抗と粘性抵抗の両方の効果を取り入れ，抗力係数を正しく取り扱うことでこれまでの計算よりも詳細な解析を行った。その結果，従来の解析解を用いた方法では初速が 0～10m/s の範囲で球体のエネルギー損失を 10%程度過小評価していることがわかった。また，ピンポン球の反発係数を求める際に落下高度により異なる反発係数の値が得られていたが，空気抵抗の効果を考慮して補正した結果，妥当な値を得ることができた。

## ２．背景と課題

空気抵抗のモデルには，速度に比例した粘性抵抗と速度の 2 乗に比例した慣性抵抗の 2 種類がある。物体の形状や密度，運動によって異なるが，最終的にはレイノルズ数が空気抵抗の性質を決めている。空気抵抗を考慮した実験や教材は過去に多くの研究があるが，これまでの研究は抗力係数 $C_d$ を一定値(0.4～0.5)と仮定している。この仮定が成り立つのは，レイノルズ数が～$10^3$ より大きい場合であるが，多くの研究はその妥当性を検証していない。本研究ではこれまでの計算法の矛盾を明らかにし，鉛直投げ上げ運動を適切な計算方法を提案する。

まず，質量 $m$ で半径 $R$ の球を地上で鉛直に投げ上げる際の運動方程式は，

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_d$$

となる。第 1 項は重力，第 2 項は空気抵抗による力である。球体に対する空気抵抗による力$\vec{F}_d$の大きさ$F_d$は，$F_d = k_1 v + k_2 v^2$とする。ここで第 1 項は粘性抵抗，第 2 項は慣性抵抗であり，係数$k_1, k_2$は，それぞれ$k_1 = 6\pi R\eta$, $k_2 = \frac{1}{2}C_d\rho\pi R^2$である。ここで $R$ は球の半径，$\eta$ は空気の粘性率，$C_d$ は抗力係数，$\rho$ は空気の密度である。この問題におけるレイノルズ数 $Re$ は，

$$Re = \frac{k_2 v^2}{k_1 v} = \frac{C_d \rho_E R v}{12\eta}$$

となる。球の抗力係数 $C_d$ がレイノルズ数の関数であることは実験的に調べられている[1]。例えば，Morrison (2016)による抗力係数とレイノルズ数との関係式は以下のとおりである。

$$C_d(Re) = \frac{24}{Re} + \frac{2.6\left(\frac{Re}{5.0}\right)}{1+\left(\frac{Re}{5.0}\right)^{1.52}} + \frac{0.411\left(\frac{Re}{2.63\times10^5}\right)^{-7.94}}{1+\left(\frac{Re}{2.63\times10^5}\right)^{-8.0}} + \frac{0.25\left(\frac{Re}{10^6}\right)}{1+\left(\frac{Re}{10^6}\right)}$$

つまり，抗力係数はレイノルズ数が十分に大きいことが保証されなければ，一定値と仮定できないのである。今回我々は運動方程式を Runge-Kutta 法で数値的に解いた（鉛直上向きを正の向きとする)。その際に，抗力係数がレイノルズ数の関数になっていることを考慮し，各タイムステップで抗力係数とレイノルズ数の値が収束するまで反復計算した。

## ３．結果

ピンポン球における鉛直投げ上げ運動を数値計算した結果と，慣性抵抗のみの解析解で計算した結果を図１に示す。数値計算と解析解では，粘性抵抗の効果と抵抗係数の変化により，頂上付近での運動に違いが生じていること。特に，解析解では抗力係数を一定としているため，$Re \propto v$となるが，今回の計算では抵抗係数の第 1 項は$C_d \sim \frac{24}{Re}$であるから，$Re \propto \sqrt{v}$となり，顕著な違いが得られている。抗力係数については，頂上付近で鋭いピークが得られ，一定値ではないことがわかる。

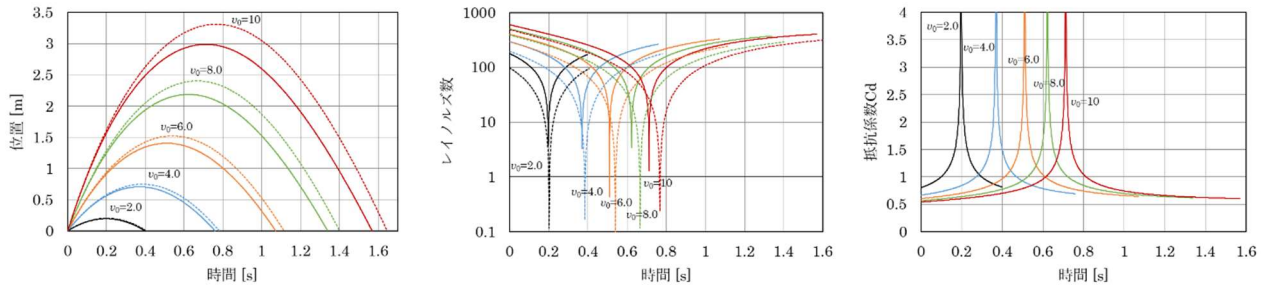



図１　様々な初速における物理量の時間変化。左から位置,レイノルズ数，抵抗係数を表す。実線が数値解，破線が解析解である。解析解の抵抗係数は $C_d$=0.44 で固定している。

また，投げ上げから元の位置に戻るまでの空気抵抗によるエネルギー損失率$\varepsilon$と初速度との関係を比較した（図２）。数値解は解析解に比べて空気抵抗によるエネルギー損失率が数～10%程度大きい。これは粘性項を考慮した効果というより，抵抗係数の変化による効果が大きい。これまでの抵抗係数が一定での計算はエネルギー損失を過小評価している。

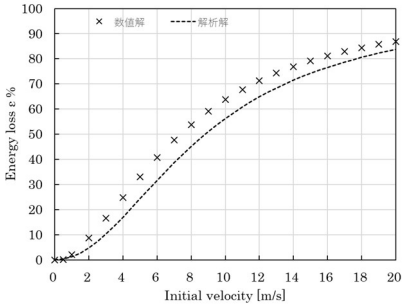



図２　初速度と空気抵抗によるエネルギー損失率の関係。×は数値解，破線は解析解を表す。

## ４．議論・まとめ

ピンポン球を床に落下させたときの衝突音を測定し，反発係数を求める実験がある。これを様々な高さで行うと，反発係数には高さの依存性があることがわかっている。この原因は空気抵抗によるエネルギー損失が示唆されていたが，従来の方法では説明がつかなかった。今回の方法で空気抵抗の効果が正確に計算可能になったことで，空気抵抗によるエネルギー損失を正しく評価できるようになった。過去に島田ら(1985)は音波によるボールの反発係数の決定に対して，空気抵抗の補正を行うことを提案し，今回と同様の結論を得ている[2]。当時は近似解法による計算だったが，本研究では抵抗係数の関数以外は，すべて考慮して解いている。ピンポン球だけでなく球体であれば，どんな物体に対しても空気抵抗を考慮した計算が可能である。

今回我々は空気抵抗を考慮した質点系の計算において，ある程度正確な計算方法を提案した。レイノルズ数が十分に大きな運動では，これまでの解析的な手法（抗力係数一定）でも問題ないが，実験結果を解析する際には注意が必要である。

## 参考文献

[1] ランダウ・リフシッツ（竹内均訳）:「流体力学 1」東京図書，1970 年
[2] 島田昌俊，下村昇（1985）日本物理教育学会年会講演予稿集 40-4，249

# 固体表面濡れ性を調べる簡易型動的接触角計の装置開発と学生実験への導入

[A]栗山 健二 、[A]芦澤 雅人、[A]中本 順子、[B]下村 勝、[C]鈴木三男
[A]静岡大学技術部、[B]静岡大学工学部、[C]福島工業高等専門学校
masuda.kenji@shizuoka.ac.jp

## １．はじめに

液体による固体表面の濡れ性（濡れにくさの指標）は、物理的・化学的現象であり、古くから両学術分野において研究対象となっている。濡れ性とは、液体が付着しやすいか、しにくいか、ということで判断する。これを具体的な数値で定量的に表したのが接触角となる。単に接触角という場合には、水平な固体表面に液体を着滴させ、静止状態での静的接触角を指している。一方、水平な状態で固体表面に着滴させ、徐々に傾斜させ、水滴が流れ出す寸前の前進接触角とその反対側の後退接触角を動的接触角という。本研究では動的接触角を評価する測定装置を開発し、これを学生実験に導入して表面張力の異なる試料（固体物質基板）に対して「静的接触角法[1]」による接着力 $B$、「動的接触角法」による付着力 $F$ を求める実験を行った。最後に SEM による表面微細構造との関係を考察するレポート課題を課している。講演では、開発した装置の概要と導入した学生実験の様子について報告する。

## ２．学生実験への導入

図 1 に、学生実験の風景を示す。 2019 年度は 1 クラス（60 名程度）を 2 組に分けて、 A 組は 11 月 26 日（火）、 B 組は 11 月 29 日（金）に実施した。導入にあたっては、装置製作、テキスト、パワーポイントによる説明など多くの工夫を行った。実験は、30 名程度で実施するので、3～4 名の班を 8 班作り、同じ装置を 8 セット用意した。



図 1　実験風景（2019 年度）

## ３．測定装置

回転ステージと USB 顕微鏡を用いた簡易型動的接触角計を開発した（図 2）。この測定器は工学部３年次の学生実験に導入した。操作が簡便で製作費が低いため、学生実験への導入がしやすいという利点がある。焦点距離が 30mm では、0.014mm/pixel の高解像度で測定できる。動的接触角の測定では、試料基板を傾けると液滴が初期位置にあるのに画面上の水滴が動く問題があった。回転ステージの回転軸と USB 顕微鏡の光軸を一致させることでこの問題を解決した。画像解析には、２次ベジェ曲線を用いたフィッティング法を提案する。

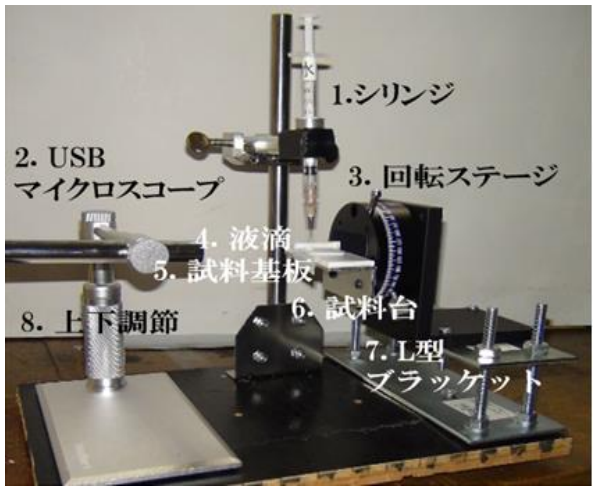



図 2　簡易型動的接触角計

## 4．滑落法による動的接触角と付着力の評価

水平な固体表面に水滴をのせ、その表面の傾斜角度を徐々に上げていくと水滴は流れ出す。その瞬間の水滴の下側を前進接触角$\theta_a$、上側を後退接触角$\theta_r$と呼ぶ。水滴が流れ出す最小の傾斜角を滑落角αと呼ぶ。図 3 にこれらの関係を示す。水滴が固体表面に留まろうとする力が付着力 $F$であり、式 (1)で表される。

$$F = mg \sin \alpha / 2\pi r \quad (1)$$

式中の $F$ は付着力、$m$ は液滴質量、$g$ は重力加速度、$r$ は液滴半径、$\alpha$は滑落角である。水滴にはたらく力の釣り合いより、滑落角 α と気体―液体界面の表面張力$\gamma_L$、前進接触角$\theta$a、後退接触角$\theta$r の間には、式(2)の関係が成り立つ。

$$mg \sin \alpha = 1/2\ \pi r \gamma_L (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad (2)$$

付着力 $F$は、式 (2)より円形の縁の部分に沿って単位長さ(2πr)あたりに働く力として式 (3)が用いられる。

$$F = mg \sin \alpha / 2\pi r = 1/4\ \gamma_L (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad (3)$$

ベジェ曲線の解析には、パブリックソフトウェアの ImageJ を使用した。ImageJ の Bezier Curve tool を用いて、水滴の端点 A（始点）と B 点を補間し、同時に B 点から第 1 制御点の D 点を補間すると、角度と長さによって端点付近の曲率が制御できる 2 次ベジェ曲線フィッティング法を利用する。角度ツールを用いて、前進接触角（$\theta_a$）∠BAC および、後退接触角（$\theta_r$）∠ABD、の角度を求める。吸着半径の求め方は、直線ツールで 2 端点間（A 点－B 点）に直線を引く。ImageJ のツールウィンドウに length という値が直線の長さとして、ピクセル数(pixel)で表示される。液滴の下部に方眼紙の目盛りが張り付けてあるので、同様にして 3mm のピクセル数を求め、1mm 分として吸着半径を mm 単位に換算する。

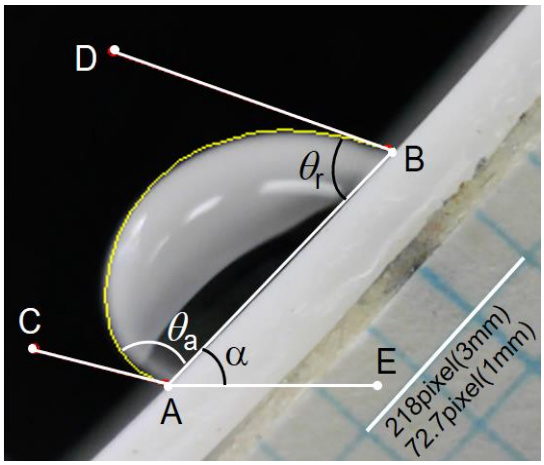



図 3 滑落法による動的接触角測定

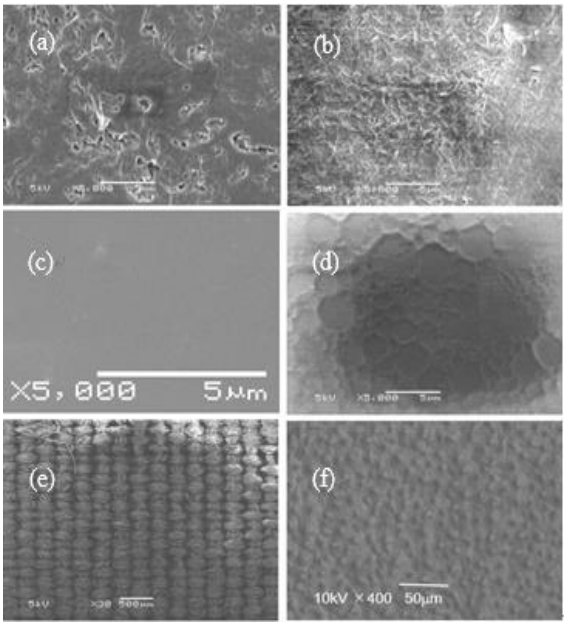



図 4 固体表面 SEM 画像（×5000）
(a) PTFE (b) LDPE (c) PET (d) 防水処理ガラス (e) 蓮の葉構造傘(×30) (f) 蓮の葉 (×400)

## 5．考察

今回開発した動的接触角計は、回転ステージの回転軸と USB 顕微鏡（1600×1200pixel）の光軸を簡便に一致させることができ、焦点距離 30mm で 0.014mm/pixel の高解像度で測定ができる。また、USB マイクロスコープ、回転ステージ、L 型ブランケットおよび金属材料等の製作費は 25、000 円程度であり、学生実験への導入がしやすい利点がある。学生実験の静的・動的接触角の解析にベジエ曲線フィッティング法を導入した。接触角の接線の角度と長さを制御することによって、巧みにベジエ曲線を引けることから学生に大変好評である。動的接触角の付着力については、接触角ヒステリシスと表面張力や SEM の表面構造画像（図 4）に関連付けて動的撥水性を評価している。

## 参考文献

[1] 中本順子、芦澤雅人、増田健二:「水滴の動的接触角測定装置の開発と学生実験への導入の試み」技術報告 24 27-32 (2019) 静岡大学学術リポジトリ(https://shizuoka. Repo.nii.ac.jp/)「技術報告 増田健二」検索

# 物理領域における探究活動で活用する気流可視化装置の開発

石川　真理代
東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科（博士課程）・東京都立豊島高等学校
r216001w@st.u-gakugei.ac.jp

## １．目的

高等学校新学習指導要領「理数探究」等の探究活動で流体の立体的な動きを直接目で見て安全に観察できる教材を提供することと,多くの児童・生徒が流体の面白さや不思議さに気付き,その背景にある物理現象を考察することを通じて,流体力学に関する探究活動を円滑に行えるようになることを目指した。本装置の創意点は,装置内部の観察が容易にできる構造にしたことと,空気の流れを直接目で見て三次元・立体的に観察できることである。そのため「垂直型の風洞実験装置」を実現し,線香による煙を整流化した「整流発煙装置」,気流の動きを観測する「試料設置装置」,「整流吸引装置(排煙装置付き)」で構成されている（図 1)。煙による気流の動きを定量的に測定するため,煙に照射した光の散乱光をカメラで観測（図 2) し,その光強度と煙の流速に相関があることから,画像解析により気流の速度を比較する「流速比較法」を考案した。

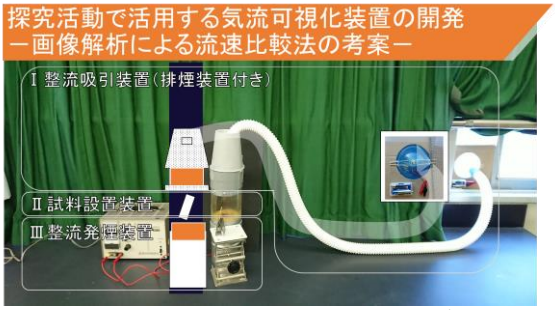


図１　気流可視化装置（全体像）



図２　本装置を活用した撮影結果

## ２．教材・教具の構造（概要）（図１，図３）

整流吸引装置（排煙装置付き）（図 3)は,直径 6 ㎜のストローを塩化ビニル管の内側に隙間なくはめ込んだ整流器に排煙装置を装着したものである。試料設置装置（図 1(Ⅱ)）は整流吸引装置の下部と整流発煙装置の上部を,透明プラスチックを巻き試料窓兼観察窓の部分 10 ㎜を残して固定したものである。この窓から試料を自由な角度で差し入れ観察することができる。整流発煙装置（図 1(Ⅲ)）は,整流器を塩化ビニル管に装着した下部に,長さ 130 ㎜の金属パイプを乗せたものである。線香立てに火をつけた線香を立て,その上に装置全体を乗せる。開発した気流可視化実験装置による目視による観察と撮影画像を用いた画像解析ソフトを用いた流速比較法が可能となる。

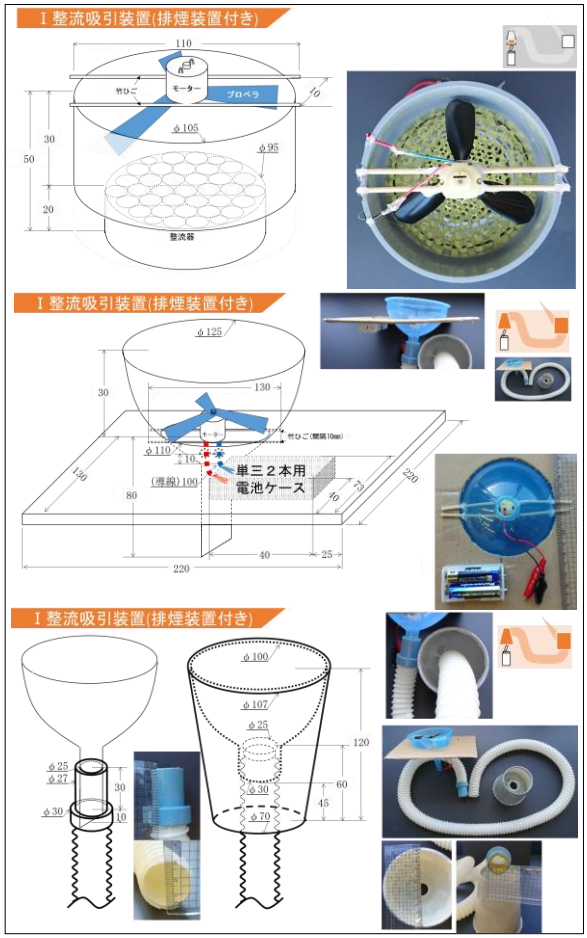


図３　整流吸引装置の各部分の構造

## ３．流速比較法の解析原理について（図４）

空気の流れを観察すると,煙分粒子の速度と,単位時間に観測領域を通過する粒子の数に相関があること

から煙粒子の明るさと速度が対応すると考え，画像処理ソフトに撮影データを取り込み，光量を解析する流速比較法を考案した。流速比較法で活用した画像解析ソフトは気流可視化装置で撮影した写真の画像解析を通じた気流（煙分子）の速度データの取得のための画像処理ソフト Makali`i である。光量グラフ解析による「流速比較法」では，翼の上面（左側）が，下面（右側）より，光度が大きいため，上面の流速が下面よりも大きく，翼に揚力が発生していることが読み取れる。このことから，曲面を帯びている方が，光度が大きく，気流の動きが速いことが写真画像解析により分析できた。

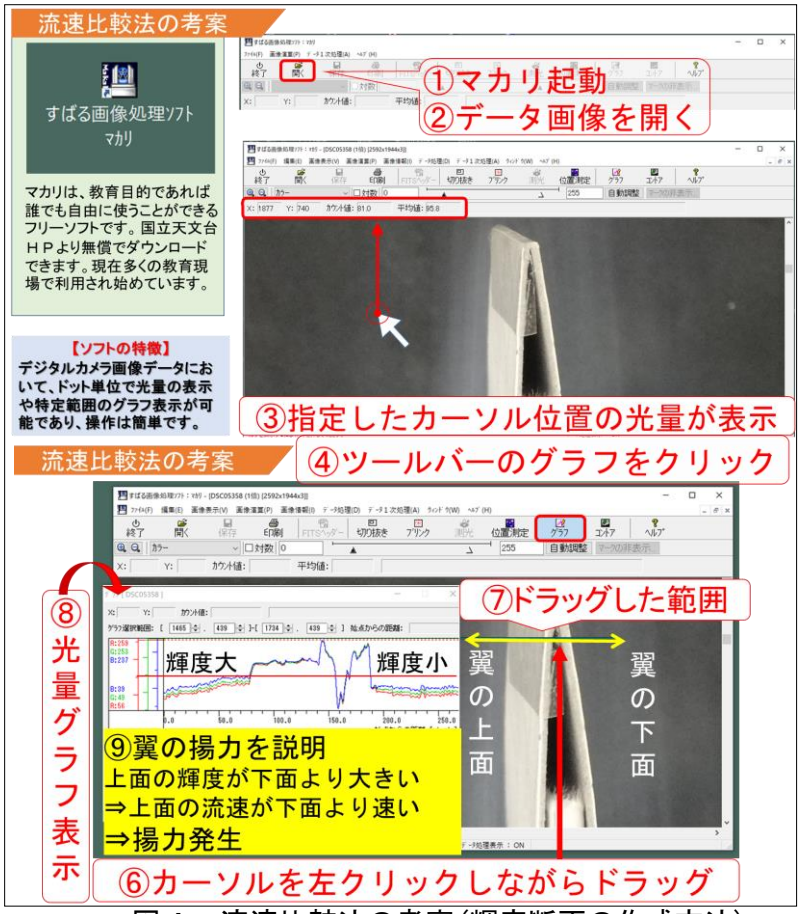



図４　流速比較法の考案（輝度断面の作成方法）

## ４．実際の気流可視化装置を活用した探究の指導場面について

平成 31 年度当時の所属校で先行実施していた「理数探究」の活動中，飛行機を題材に研究活動を行っていた生徒の活動を支援する中で本研究の着想を得た。多くの教師が，特に流体力学に関する研究を題材とする生徒に対して，探究の過程で遭遇する様々な困難や苦難を乗り越え挑戦する生徒の探究指導を円滑に行えるようなることを目指し，本教材を開発した。本研究で考案した教材と画像解析による流速比較法を用いることで，生徒が「流体力学」に関する理解を深めるようになるとともに，教師は探究の過程の指導をより良く行えることが可能になると考える。

今後は本研究をもとにした探究指導法を始原的な指導モデルとして想定し，令和 4 年度から年次進行で実施される学習指導要領における，「物理基礎」や「物理」等の通常の授業における探究指導法を含めて，探究を行うのにふさわしい題材や指導法を提案していく。

**謝辞**　平成 31 年度当時の所属校において本研究に多大なるご協力いただきました元都立日比谷高等学校 小室孝志先生をはじめ，多くの先生方と，生徒，保護者の皆様に感謝申し上げます。

**参考文献・参考資料**

[1]石川真理代：公益財団法人東レ科学振興会 東レ理科教育賞 受賞作品集より，https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/R02-05Ishikawa.pdf（2021 年 7 月 18 日入手）
[2]石川真理代：東京都教職員研修センター，（2021 年 3 月 14 日入手）http://www.kyoiku-kensyu.metro.tokyo.jp/09seika/reports/postgraduate/r01/h31_K31K10.pdf
[3]「すばる画像解析ソフトーMakali`iー配布サイト（国立天文台が教育用に限定提供する無償の画像解析ソフト）」https://Makalii.mtk.nao.ac.jp（2019 年 6 月入手）
[4] 本多一貴：令和元年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会要旨集，66-67 環状翼飛行機の原理と実用化に向けた研究（2019）

# 自転車によるダウンヒルは、２輪走行とウィリー走行のどちらが速いか？

梶山 裕二
岐阜聖徳学園大学教育学部
kajiyama@gifu.shotoku.ac.jp

## １．はじめに

自転車を漕ぐことなく斜面を下る場合、通常の２輪走行と後輪のみのウィリー走行とではどちらが速く下ることができるであろうか。車輪の慣性モーメントや転がり抵抗を考慮すると、勝敗は斜面の角度によることがわかる。ここではこのダウンヒル問題について、理論と実験の両面から議論し、回転運動を学ぶための教材として提案したい。この発表は参考文献[1]に基づくものである。

## ２．理論

図１は角度 $\theta$ の斜面上をウィリー走行（左）と２輪走行（右）で下る様子を表した図である。車輪は質量 $m$、半径 $R$ とし、人間と車体の質量を $M$ とする。車輪１個の慣性モーメントを $I=\gamma mR^2$（$\gamma$ は車輪の密度分布に依存した定数）とする。物理量はウィリー走行には１、２輪走行には２の添字をつけて表す。また車輪は滑らずに転がるとして、$v=R\omega$ が常に成り立つとする。

ウィリー走行、２輪走行それぞれに対して並進と回転の運動方程式を解くことにより、初速度０の条件である距離だけ走行したときのそれぞれの速さ $v_1$ と $v_2$ の比は

$$\frac{v_1}{v_2}=\sqrt{\frac{M+2(\gamma+1)m}{M+(\gamma+2)m}\times\frac{\tan\theta-\mu_1}{\tan\theta-\mu_2}}\equiv\sqrt{\mathcal{M}\times\Theta} \tag{1}$$

で表される。ただし抵抗を表す係数 $\mu_1$、$\mu_2$ はそれぞれ

$$\mu_1=\delta\cos\theta+k\frac{M+m}{M+2m},\qquad \mu_2=\frac{\delta}{2}\cos\theta+k\frac{M}{M+2m} \tag{2}$$

であり、$\delta$ は車輪の変形、$k$ は車軸のトルクに由来するパラメータである。またこれより $\mu_1>\mu_2$ の関係にあることがわかる。

これより、自転車が下り始める最小の角度 $\theta_{1,2}=\tan^{-1}\mu_{1,2}$ について $\theta_1>\theta_2$ が成り立つ。従って、$\theta<\theta_2$ ではどちらも動かず、$\theta_2<\theta<\theta_1$ では２輪だけ動き、$\theta_1<\theta$ では両方が動く。ただしその場合でも $\theta\simeq\theta_1$ では $|\Theta|\ll1$ であるために２輪走行が勝ち（$v_1/v_2<1$）、ある角度 $\theta_c$ を越えるとウ

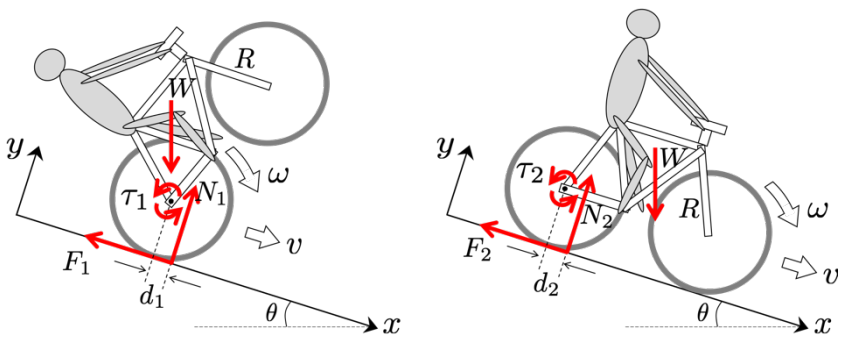



図１：ウィリー走行（左）と２輪走行（右）

ィリー走行が勝つ（$v_1/v_2 > 1$）。ここで $\theta_c$ とは $v_1 = v_2$ が成り立つ角度のことである。このように、$\theta < \theta_c$ では抵抗が小さいために２輪走行が勝ち、$\theta > \theta_c$ では慣性モーメントの利点からウィリー走行が勝つことが理論的に導かれる。

## ３．実験

理論による予言を確かめるために図２のような実験を行なった。$m = 87$ g、$R = 3.7$ cm のゴム製の車輪を二つ用意し、車軸をステンレスの細い板で磁石を用いてつないだ自転車を製作した（$M = 80$ g）。２輪走行ではレールに置き、ウィリー走行ではレールに吊り下げて初速度 0 で静かにはなし、スタートから 50 cm の位置に BeeSpi を置いて並進速度をそれぞれ５回ずつ測定した。斜面の角度はスマートフォンを置いて測定し、$\theta = 1°$~$9°$ まで $1°$ ずつ変えた。車輪を水平に吊り下げてねじって回転させる振り子の実験より係数 $\gamma = 0.70$ を得た。

結果は図３のようになった。それぞれ５回の測定による $3\sigma$ のエラーバーをつけており、$\theta = 1°$ では自転車の微調整によって走り出しに影響が出るためにエラーバーが大きくなっている。また $\theta$ が大きくなるとウィリー走行の吊り下げられている方の車輪が振動し、その領域における測定値のばらつきの原因になっている。赤い実線は式 (1)、(2) において $\delta = 0.003$、$k = 0.02$ とした場合の理論曲線であり、実験値にフィットするようにパラメータの値を選んだ。実験値、理論値共に $3° < \theta < 4°$のある角度で $v_1/v_2 = 1$ となっており、理論的には式 (1) から $\theta_c = 3.4°$ と得られ、矛盾のない値となっている。$\theta$ を大きくすると $\Theta \to 1$ となるため、$v_1/v_2 \to \sqrt{\mathcal{M}} = 1.09$ を漸近線として近づいていく。

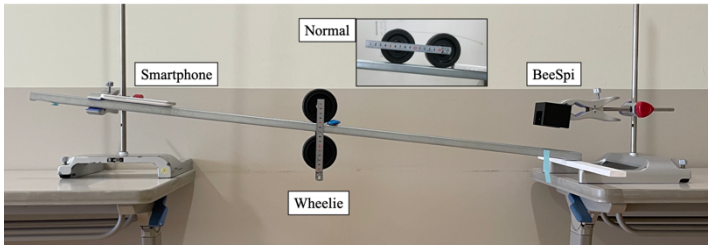



図２：実験の様子

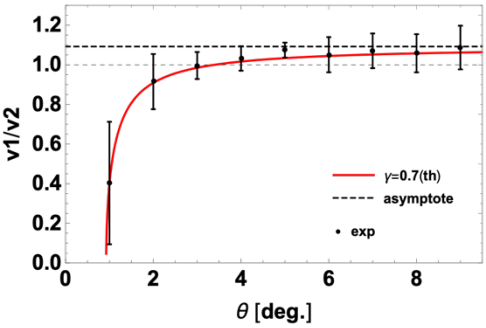



図３：$v_1/v_2$ のグラフ

## ４．まとめ

理論的には並進および回転の運動方程式を解くことによって式 (1)、(2) が得られる。実験的には簡単に作成した自転車と細いレールで手軽に行うことができる。高等学校における発展的な内容、または大学の教養課程における回転運動の教材として提案したい。

## 参考文献

[1]Y. Kajiyama,　Physics Education へ投稿中.

# 「学校教育を終え、企業に入って学び感じたこと」

遠藤 正昭[1]（発表者)、尾島 正男、原 眞一
NPO 法人　人間環境活性化研究会
mike0202endo0718@yahoo.co.jp[1]

## １．ものづくりの製造工程は総合的なプロセス:新入社員教育から

私は工学部を卒業し技術者として入社しましたが、会社の中は製造工程であっても、技術だけで成り立っているわけではない、総合的なものだという事を頭に叩き込まれました。

具体的に言えば企業はヒト、モノ、金、情報から成り立っている。そして製造工程の管理は、S（Safety)、Q（Quality)、C（Cost)、D（Delivery）のバランスで考えるという事でした。即ち技術屋といえども労務や購買や経理についても知識や理解が必要で、所謂技術バカではいけないという事を学びました。

まず上述のS:安全についてですが、新入社員教育の中で、いきなり現場に連れて行かれ、「この現場の安全チェックをしろ。どのくらいの危険が潜んでいるかリストアップし、その対策案を書け」と言われ吃驚したことは、今でも忘れられません。

この意味は、安全が大事だとか、ケガをしないように気をつけろ、とかいうことではなく、これから会社の中でいろんな計画を立てたり、指示をしたりするとき、常に安全の問題をその中に作り込んでおかなくてはならないという事でした。極論すれば安全について配慮していない計画は、いくら技術的には良くても採用されることはないという事を学びました。

次に、現場というものは、一見よく管理されているように見える製造工程でも、天候や個人差も含めて数多くの変動要因があり、常にバラツキがあることを忘れず、平均値とバラツキのデータで工程の状況を見ていかなければいけないと学びました。

今考えても上記の二つのことは企業独特のものではなく、学校においても必要なことですから、社会に出て活躍するために必要な知識・技能の一つとして、学校でももっとその教育に力を入れるべきだと思いますが如何でしょうか？

## ２．製品の目標品質の作り込み:企業活動の基本

私の入社した会社は製造業でした。従ってお客様に喜んで戴ける製品を世に出し、その代金を頂いてメシを食っているわけです。もしお客様が他社の製品の方が使い易い、便利だ、と感じ当社品を買って頂けなくなれば、たちまち倒産で路頭に迷ってしまいます。

将来世の中はどう変わっていくか、世間は、お客様は何を求めているか、それに応えるためにどんな製品・どんな品質を提供すべきか、これ等を作り出すためにどんな技術を使って、どう作り込んでいくかということが、企業活動の基本として極めて重要かつ不可欠という事を学びました。

この考え方を学校教育に当てはめてみると、製造業の場合のアウトプットは単なる製品（物）でしたが、学校の場合は日本の将来を担う人間であり、貴重な人材です。これは比較にならないぐらい重要なことだと思います。単にいくつかの学科について知識を学びましたではなく、目標とする人材になりましたか、世の中のニーズにマッチする人材ですか、という結果が重要です。

このような目標は、学校の目指すもの、卒業時に期待する生徒の資質・能力等々の形で、殆ど

の学校が既にお創りになっていると思います。しかし目標を作っただけでは何も変わりません。この目標を達成するために何が必要か演繹的にブレークダウンして、プロセス（カリキュラム、授業・指導のやり方）の改善に反映させていかなければ、目標とする人材は育っていきません。

その為には、家庭や地域社会の協力も得て、全先生が参加するプロジェクトチームを作り、以下のようなステップで進めていくことが必要だと思います。

1. 10 人位の先生で目標ごとにプロジェクトチームを作る
2. 各目標の具体的な達成イメージを作る。
   ・未来社会を切り開いていける人
3. この目標を具現するのに必要な項目を明示する。
   ・科学・歴史・社会・経済の基礎知識、コミュニケーション能力、文化や芸術など教養、倫理観
4. 必要項目を学ぶカリキュラムと学習内容を策定する。
   ・物理・化学・宇宙科学の基本的な法則と理論、日本史・世界史の要点、経済の基本的知識、読解力、英語、地域社会とのコミュニケーションの仕方、等々
5. 上記各項目について、具体的な学習すべき内容を策定する。
   ・新しい教科書の作成、現教科書を使って重要な部分をマーク
6. 学びの効率、効果性改善（アクティブラーニング）のためのツールを開発する。
   ・生徒に考えさせる質問、生徒が議論する課題

## ３．信頼による管理:人が輝く

私が入社したのは 1959 年ですが、その当時は日本でも、いろんな技術を導入したアメリカでも、計画を立案する人、作業を指示監督する人、作業を実施する人はそれぞれ別な人で、現場で実際に作業する人達の考えが取り入れられるという事はあまりありませんでした。

しかし 1960 年代に入り、京大の先生方が中心になって、「信頼による管理」という斬新な考え方を提案され、日本独特な方法として日本中の会社で採用され、戦後の日本の産業の復興・発展に大きな貢献を果たし、現在でも世界で「Japanese Way」の重要な項目として活用されております。

その要点は、「現場のことは現場で毎日働いている作業者が一番よく知っている。この人達に作業標準の策定からトラブルシューティングや改善まで、積極的に参画してもらい、自分達自身で PDCA(plan-do-check-act)を回してもらうのが一番良い」という事です。

このような変革により、主に手足を使う作業者から、頭も使う作業者になり、その後の高度成長期から始まったオートメーション、無人化において、複雑なコンピューター操作を駆使して、工程の管理を行う極めて優秀なオペレーターへと変身して行きました。

この考えを学校に当てはめてみますと、学校教育では現場の先生と生徒が主役という事になります。先生は「もっと効果的に指導していくにはどんなことが必要か」、生徒は「もっと楽しく効率よく学ぶには、自分自身の努力以外に、どうして貰うと良いのか」を発信し、それらを実現する為にどうすれば良いか、文科省や教育委員会や教育の専門家が協力して、考え、研究していくという事だと思います。

# EBAPS を用いた物理学習における男女差に関する分析

[A]苅谷麻子、[B]新田英雄
[A]東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科、[A]東京学芸大学附属国際中等教育学校
[B]東京学芸大学
[A] kariya@u-gakugei.ac.jp

## 1. 背景

中等教育段階で女子の物理に対する関心が低下することが指摘されており[1]、大学で物理を専攻する女子学生の数は男子学生に比べて極端に少ない状況にある[2]。こうした物理学習における男女差の要因は生物学的なものだけでなく、社会・環境などにも存在することが指摘されており[3]、世界的にも物理教育におけるジェンダー差問題として研究が続けられている。

概念理解度調査においては、特に力学のスコアにおいて男女差があり、男子の方が高いスコアを得る傾向があることが明らかにされている[4]。本研究では、科学的事象に関する認識、学習姿勢、概念理解度の調査を複合的に分析し、概念理解度に生じている男女差の背景を研究することを目的とする。

## 2. 方法

### 2.1　対象者・実施時期

調査は国立大学附属の高校 2 年生（中等教育学校においては 5 年生）を対象に行った。男女の内訳を表 1 に示す。表 1 に示した数は、全ての調査紙でデータがそろっている人数で、分析ではこのデータを使用した。

実施時期を表 2 に示す。概念理解度の調査（FCI や標準問題）は物理基礎の力学内容（エネルギーを除く）の学習がひととおり終了した直後におこなった。年度は全て 2020 年である。

表 1：調査対象人数

| | 女子(名) | 男子(名) | 全体(名) |
|---|---|---|---|
| A 校 | 52 | 36 | 88 |
| B 校 | 65 | 62 | 127 |

表 2：調査時期

| | CLASS | EBAPS | FCI | 標準問題 |
|---|---|---|---|---|
| A 校 | 10 月 | 10 月 | 7 月 | 未実施 |
| B 校 | 12 月 | 12 月 | 未実施 | 7 月 |

### 2.2　調査紙

以下 3 つの調査紙を用いた。

① Colorado Learning Attitudes about Science Survey(CLASS) [5]：
物理に対する考え方や、学習姿勢を明らかにすることを目的とした調査紙で、選択式の設問 42 問で構成される。提示された文章それぞれに対し、 1. まったく同意しない～5. 強く同意するの 5 段階で答える形式である。

② Epistemological Beliefs Assessment For Physical Science(EBAPS)[6]：
自然科学に対する認識を明らかにすることを目的とした調査紙で、選択式の設問 30 問で構成される。EBAPS の採点においては各問が 5 点満点で採点され、望ましい認識であるほど高いスコアとなる。

③ Force Concept Inventory(FCI) [7]：
力学の基礎概念の理解度を測定するための調査紙で、選択式の設問 30 問で構成される。物理教育研究の分野で最も広く使われている概念調査紙の一つである。数式などは用いず定性的に答える問で構成されている。

なお、B 高校では FCI は実施されていないが、著者の所属する研究グループ PEPPER（Physics Education Practice based on Physics Education Research）で作成した調査紙[8]（以下「標準問題」と記す）が実施された。「標準問題」は物理基礎全範囲を網羅する選択肢式の全 29 問からなる。本研究では FCI と類似の力学分野の問題 10 題のみを取り出した結果を用い、参考のためのデータとして扱った。

ここで、CLASS は学生本人の学習態度や自信を問う問が主である一方で、EBAPS は自然科学や学習そのものに対する認識を問うており、本人の学習態度や自信は問うていない。たとえ自然科学を正しく捉え、その習得に向けた望ましい学習姿勢や取り組み方を認識していても、実際にそうした学習姿勢をとれるとは限らない。そこで、本研究では学習姿勢を測定する CLASS だけでなく、自分自身の実際の振る舞いや自信とは切り離した形で、科学的な事象や学習そのものに対する認識を問うている EBAPS も合わせて実施し、その 2 つの違いや関係性について調査することにした。

## 3. 結果

調査スコアや正答率の学校ごとの男女別の平均値を表 3 に示す。A 高校の FCI 正答率は男子の方が高く、統計的にも男女のスコアに有意な差があったが、EBAPS や CLASS に関しては、同一学校内での有意な男女差は見られなかった。男子全体・女子全体としてみると、学習姿勢・認識ともに男女差は見られないといえる。

表 3：調査紙の男女別平均値

| | EBAPS | CLASS | FCI | 標準問題（力学） |
|---|---|---|---|---|
| A 校女子 | 2.41 (0.27) | 45.6 (15.0) | 0.47 (0.19) | 未実施 |
| A 校男子 | 2.45 (0.32) | 50.4 (20.5) | 0.62 (0.21) | 未実施 |
| B 校女子 | 2.52 (0.33) | 53.1 (19.4) | 未実施 | 0.65 (0.18) |
| B 校男子 | 2.40 (0.37) | 50.2 (19.2) | 未実施 | 0.62 (0.20) |

（（ ）内は標準偏差。FCI と標準問題は正答率，EBAPS は全問の平均スコア，CLASS は専門家に近い考えを示した問の割合[%]を示している。）

また、EBAPS と CLASS の間の相関関係を調べたところ、概念理解度の高い層では男女ともに有意な相関が見られた。概念理解度の低い層では、男子は上位層と同様に EBAPS と CLASS の間の相関が有意であったが、女子のみ EBAPS と CLASS の間の相関が有意でなかった。つまり、概念理解度の高い層の男女、低い層の男子は、認識と実際の学習姿勢に関係があるが、概念理解度の低い女子のみ認識と学習姿勢の間の関係が見られないといえる。その要因として、概念理解度の低い女子の中には、EBAPS で高いスコアにもかかわらず、CLASS で低いスコアの生徒が一定数含まれていることが分かった。発表では、分析で明らかになった概念理解度の低い女子の特徴なども含めて報告する。

## 引用文献

[1]松村泰子編，理科離れしているのは誰か 全国中学生調査のジェンダー分析，日本評論社(2004) .

[2]文部科学省，平成 30 年 学校基本調査，(2018).

[3] T. Tindall et al, Education, 125,2(2004) 282-295. 等

[4] A. Madsen et al, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. 9(2013), 020121.

[5] W. K. Adams et al, Colorado Learning Attitudes about Science Survey(CLASS), Michi Ishimoto and Hideo Nitta 訳
https://www.physport.org/assessments/assessment.cfm?A=CLASS(2021.7.5 アクセス)

[6]A. Elby, J. Frederiksen, C. Schwarz, and B. White: EPISTEMOLOGICAL BELIEFS ASSESSMENT FOR PHYSICAL SCIENCE (EBAPS)
http://www2.physics.umd.edu/~elby/EBAPS/home.htm(2021.7.5 アクセス)

[7] D. Hestenes et al, Phys. Teach. 30-3 (1992) 141-158.

[8]西村塁太 他，日本物理学会講演予稿集 75-2(2020).

本研究は、科研費基盤研究（B）課題番号 19H01731 の助成を受けている。

# ジェンダーギャップ縮小に向けた反転授業の実践

[A,B]竹内透、[B]西村塁太、[C]新田英雄
[A]東京学芸大学教職大学院、[B]東京学芸大学附属高等学校、[C]東京学芸大学
m203413n@st.u-gakugei.ac.jp

## １．はじめに

力学概念理解度調査で，男子の正答率が女子の正答率を有意に上回るジェンダーギャップの存在が数多くの研究で報告されている。このジェンダーギャップの縮小に向けて，１人１台 PC の環境を活かし反転授業形式の授業を行った。本報告では、反転授業の実践内容と、どの程度ジェンダーギャップが縮小したか調査した結果を報告する。

## ２．背景

力学概念理解度調査の FCI(Force Concept Inventory)や FMCE(Force and Motion Conceptual Evaluation)を実施すると、男子学生が女子学生の正答率を有意に上回ることが多くの研究で報告されている。Madson らは英米の 19 の大学で大規模な概念調査を行い、

$$G = \text{男子学生の平均正答率(\%)} - \text{女子学生の平均正答率(\%)}$$

で表されるジェンダーギャップ値$G$を比較した。この結果、FCI や FMCE で、事前テストで 13%、事後テストで 12%の $G$ 値が観測されることを報告した[1]。同様のジェンダーギャップは、竹内が非常勤講師として勤めている東京学芸大学附属高校でも観測されている。図１は同校で実施した FCI の$G$値を年度別に表したものである。事前テストの時点で 10%以上の$G$値があり、多くの場合それが事後テストでも持続している。

一方、成績には性差はみられないことが多い。金森によると、定期考査では男女差がみられず、提出物の成績は女子のほうが高いという一貫した傾向があることが報告されている[2]。ジェンダーギャップは、FCI のような概念理解度調査を実施してはじめて存在が明らかになるものであるといえる。

東京学芸大学附属高校では、昨年度から 1to1 を導入し、生徒が１人１台 PC（本実践の対象生徒である高校２年生は、MacBook Air）を持つようになった。現在物理基礎を履修している２年生はその１代目である。この環境と女子学生のほうが課題の取組みがよいという傾向を考慮し、反転授業形式でジェンダーギャップを縮小することができるのではないかと考え、本実践を行った。

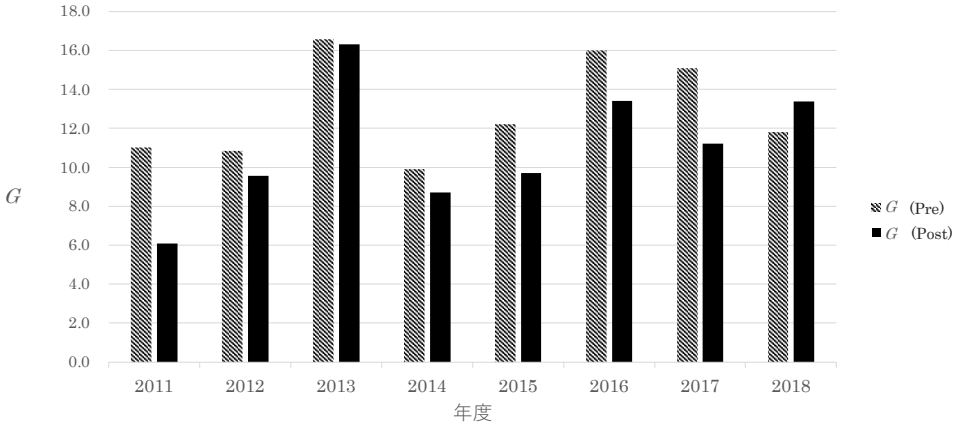



図１ 東京学芸大学附属高校における年度別の$G$値

## ３．実践内容

反転授業は図 2 のような流れで実践した。授業前に予習課題として実験方法や基礎知識を説明した動画を視聴してもらい、Google Forms で実験の予想や確認問題に取り組ませた。授業では生徒実験や、PI や相互作用型演示実験講義（ILDs）を通した議論活動など、生徒の活動を中心とした授業を行った。授業後は、生徒実験を行った場合はレポートを作成し、通常の授業の場合は Google Forms で確認問題に取り組ませた。このように予習、授業、復習のサイクルを回して学習をさせた。具体的な実践内容は発表の際に報告する。

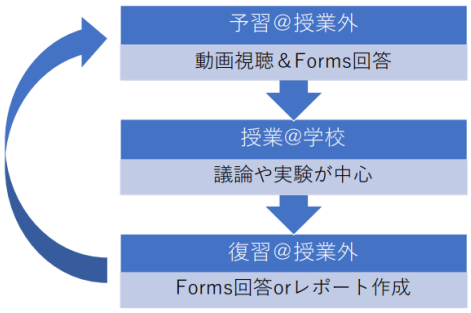



図 2　反転授業の流れ

## ４．実践結果

FCI の結果を表 1 に、$G$値を図 3 に示す。FCI を事前と事後で実施した結果、$G$値は事前テストの時点で 16.9%であったものが 11.2%に縮小した。ジェンダーギャップの解消には至らなかったが、$G$値は事前から事後にかけて 5.7%減少しており、図 1 の過去の$G$値の変化と比較するとジェンダーギャップが最も縮小されていることがわかる。表 1 の規格化ゲインは Hake の規格化ゲイン$g$のことを指しており、

$$g = \frac{\text{事後テストの平均正答率(\%)} - \text{事前テストの平均正答率}}{100 - \text{事前テストの平均正答率(\%)}}$$

で算出される。規格化ゲインを男女で比較すると、有意差は無いが女子学生のほうが高かった$(t(89) = -0.466, p = 0.642, d = -0.098)$。

また、Google Forms の予習復習課題の提出状況や、アンケートの回答の男女差を分析したところ、女子学生のほうが男子学生よりも有意に課題の提出率が高く、長い時間をかけて課題に取り組んでいることがわかった。発表では、本実践がどのようにジェンダーギャップ縮小に影響したのか、より詳細な分析結果に基づき考察した内容を報告する。

| | 事前テストの平均正答率(%) | 事後テストの平均正答率(%) | 規格化ゲイン |
|---|---|---|---|
| 全体($N$=91) | 41.0 | 54.0 | 0.22 |
| 男子($N$=40) | 50.5 | 60.3 | 0.20 |
| 女子($N$=51) | 33.6 | 49.1 | 0.23 |

表 FCI　の結果

| 項目 | 男子($N$=55) | | 女子($N$=56) | | $t$(109) | $p$ | | $d$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $M$ | $SE$ | $M$ | $SE$ | | | | |
| 全体の提出率 | 0.68 | 0.05 | 0.88 | 0.03 | -3.50 | .00 | *** | -.66 |
| 予習の提出率 | 0.76 | 0.04 | 0.91 | 0.03 | -2.89 | .00 | ** | -.55 |
| 復習の提出率 | 0.59 | 0.05 | 0.85 | 0.04 | -3.88 | .00 | *** | -.73 |

$^*p < .05, ^{**}p < .01, ^{***}p < .001$

表 2　課題の提出率の男女比較

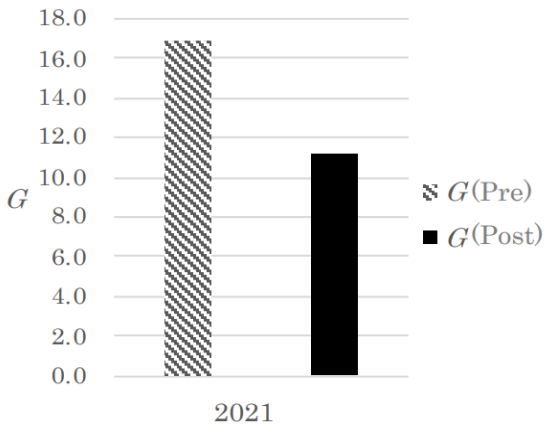



図 3　$G$値の結果

## 参考文献

[1]A. Madson, S. McKagan, and E.Sayre: Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **9** (2013) 020121.
[2]金森大和，新田英雄：物理教育，**65**-3 (2017) 139-144

# 位相の遅れに注目した音響ドップラー効果の定式化とその活用

[A]小島健太郎、[B]原田恒司
[A,B]九州大学　基幹教育院
[A]kojima@artsci.kyushu-u.ac.jp　[B]harada@artsci.kyushu-u.ac.jp

## １．はじめに

身近な自然現象である音のドップラー効果は、物理学の学習者が実体験と結びつけて物理学を学ぶのに適した題材であり、高校の教科書でも大きく取り扱われている。次節でも見るように、ドップラー効果の標準的な取り扱いでは、さまざまな場合分けのもとで複数の公式が提示される。このような取り扱いでは、学習者がドップラー効果の背景にある物理的な概念を理解することよりも、多数の公式の暗記に注力することを促してしまうこと、さらには学習者が「物理とは公式の暗記だ」という望ましくない見方を強めてしまうことが懸念される。

また、高校の教科書などで見られるドップラー効果の公式には、音源や観測者の運動が一定の条件を満たす場合にのみ成り立つという適用限界がある。場合分けや公式の数が増えると、一つひとつの公式の適用限界を適切に見極めることは、煩雑で難しくなる傾向にある。実際、後述するように、適用限界を超えてドップラー効果の公式を誤用してしまっている実例も複数見受けられる。

本研究では、ドップラー効果に関する教育手法が持つこれらの問題点へのアプローチの一つとして、位相の遅れに注目したドップラー効果の統一的な定式化を取り上げる。まず、ドップラー効果の標準的な取り扱いについて概観したのち、位相の遅れに注目したドップラー効果の統一的な定式化を述べる。その後、加速度運動が含まれる系におけるドップラー効果において、ドップラー効果の公式が誤用されている実例を指摘し、位相に注目した定式化による正しい取り扱いを議論する。

## ２．ドップラー効果の標準的な取り扱い

ここでは、ドップラー効果の標準的な取り扱いについて見ていく。例えば標準的な高校の教科書[1]では、ドップラー効果の具体例としてまず（1）音源が動く場合（観測者は静止）を取り上げ、次に（2）観測者が動く場合（音源は静止）を議論し、その後（3）音源と観測者が動く場合を考える。(1）では波長の変化が振動数の変化を導くこと、(2）では（相対）音速の変化が振動数の変化を導くこと、そして（3）では音源が動く場合の振動数を、観測者だけが動く場合の音源の振動数に代入して得られることが説明されている。（さらに発展的内容として、反射板がある場合、風がある場合、斜め方向の運動の場合が議論されている。）

こうした複数の場合分けにおいて、それぞれに異なる公式が提示され、さらにドップラー効果に対する説明の仕方も異なっている。それゆえ、この内容から学習者がドップラー効果について統一的な理解を得るのは容易ではないだろう。また、(1）から（3）いずれにおいても音源と観測者が一次元上を等速で運動することが前提とされており、非等速運動において生じるドップラー効果への拡張は難しい。

## ３．位相の遅れに注目した音響ドップラー効果の定式化

以下で、位相の遅れに注目したドップラー効果の統一的な記述方法を述べる。この定式化では、音源から発せられた音が観測者に届くまでに有限の時間伝播するという事実に注目する。そこで、

まず（i）観測者が時刻 $t$ に観測する音は、時刻 $t-\tau(t)$ という時刻に音源から発せられたと定義する。ここで $\tau(t)$ は音が発せられた地点から観測地点に達するまでにかかる時間である。このとき、(ii) 観測者が時刻 $t$ に観測する位相 $\theta(t)$ は、時刻 $t-\tau(t)$ での音源の位相に等しい。観測されるドップラー効果は、$\theta(t)$ の時間変化率から得られる［2, 3, 4］。

この議論は、音源と観測者の速さが音速を超えなければ[1]運動の詳細によらず一般的に成り立つ。そのため、場合分けせずに統一的にドップラー効果を記述できる。標準的な取り扱いに比べて公式の数も少なく、ドップラー効果の定性的な理解を促すのに役立つ可能性がある。

## ４．非等速運動を含むドップラー効果への活用の例

前節で述べたドップラー効果の定式化を活用して、等速運動以外の運動学におけるドップラー効果の適切な取り扱いが可能になる。一方で、標準的な取り扱いで得られる一次元等速運動の場合の公式を、その適用限界を超えて不適切に用いた議論も見られる。例えば、文献［5］では音源が自由落下運動する場合のドップラー効果が議論されているが、一次元等速運動の場合の公式に現れる音源の速度を単に重力加速度と時間の積に置き換えた式が用いられている。また、文献［6］では等速円運動する音源によるドップラー効果が議論されているが、一次元等速運動の場合の公式に現れる音源の速度を単に音源の速度の観測者方向の成分に置き換えた式が用いられている。これらの議論では適用限界を超えた状況に公式が使われており、不正確な結果を与える。講演では、位相に注目した定式化を用いて正しい取り扱いをすることで、結果がどのように修正されるかも議論する。

## ５．まとめ

ドップラー効果の標準的な取り扱いが持つ課題について論じ、位相の遅れに注目したドップラー効果の定式化がその解決に役立つ可能性を指摘した。また、位相の遅れに注目した定式化によって、標準的な取り扱いでは議論が難しい運動学のドップラー効果の問題も正しく扱えることを議論した。本取り扱いが持つ教育的な効果や意義についての実践的な研究は今後の課題である。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19K03172，20K03210 の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 高等学校　改訂版「物理」313，数研出版.

[2] G. M. Kapoulitsas, Eur. J. Phys. 2, 174 (1981).

[3] C. Neipp et al., “An analysis of the classical Doppler effect,” Eur. J. Phys. 24, 497-505 (2003).

[4] 原田恒司, 小島健太郎「レクチャー 物理学の学び方」サイエンス社 (2020).

[5] Sebastián M. Torres and Wilson J. Gonźalez-Espada, “Calculating *g* from Acoustic Doppler Data,” The Physics Teacher, Vol. 44, No. 8, 536-539 (2006).

[6] Marcelo M. F. Saba, Rafael Antônio da S. Rosa, "The Doppler Effect of a Sound Source Moving in a Circle," The Physics Teacher 41, 89-91 (2003).

[1]音源の速さが音速を超える場合には衝撃波が形成されるが、位相の遅れに注目した定式化によって衝撃波面の形を記述することも可能である。

# 力学概念調査（FCI）問題の回答間の相関

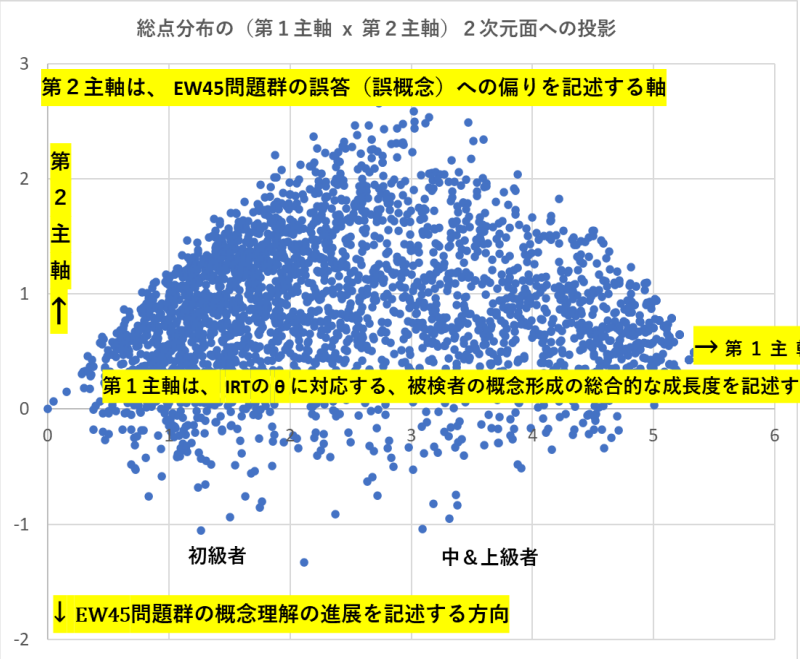
[A]合田正毅、[B]岸澤眞一、[C]長谷川大和
[A]新潟大、 [B]元拓殖大、 [C]東工大附高
Goda-m@emeritus.niigata-u.ac.jp

Hestenes 達によって創出された力学概念調査（FCI）[1] 30 問は、学習者の力学に関する素朴概念（誤概念）を引き出す優れた調査として知られている。我々は、平成 26 年度から 28 年度にかけて日本の高校と大学初期課程の累計 1 万余の生徒・学生について得られた FCI 調査[2]の結果に基づき、調査結果の系統的な理解を目指して問題正答間の相関（裏を返せば誤答の相関）を詳しく調べて来たので、その要約を報告する。

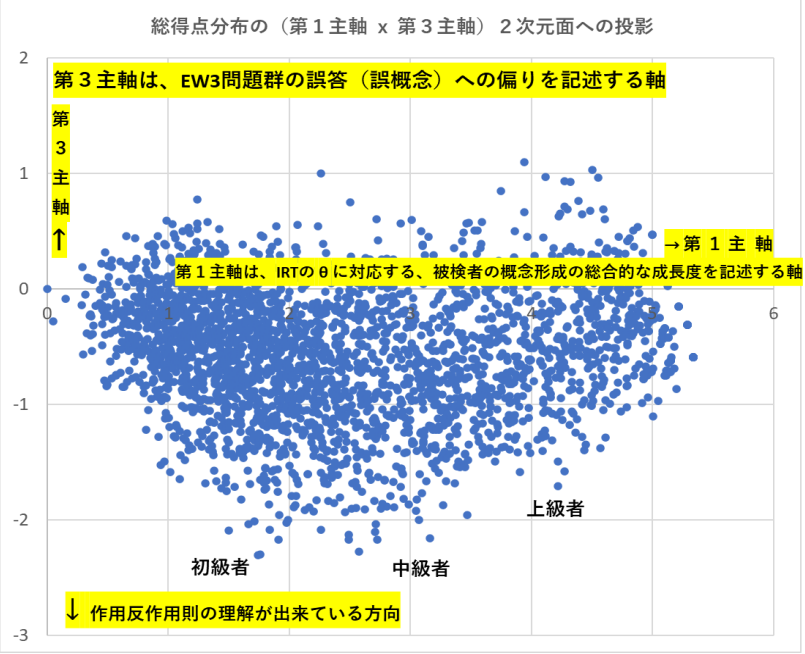
被検者$n$の 30 問の正誤表を 30 次元の総得点（ベクトル）$a_n$ =(1,0,1,1,0, , , , , , ,), ($n$ =1～13768)で表すと、問題正答間の相関係数から成る相関行列が得られる。その相関行列の主成分分析により、
（a）2 次相関に関する有意な情報は 3 次元空間に凝縮されていること、（その第 1 主軸は総得点の分布の分散の最も大きい方向、第 2 主軸はそれに直交する 2 番目に分散の大きい方向、第 3 主軸は、それらに直交する 3 番目に分散の大きな方向に対応している。）
（b）総得点分布の主要 3 次元空間への投影である図 1 及び 2 の分布からも読み取れるように，総得点の分布は単調ではなく、少なくとも初級者分布と中上級者分布（あるいは中級者分布と上級者分布）を区別して統計的な性質を調べる必要があること、
（c）30 問は Eaton&Willoughby による因子分析[3]による分類に準じて三つの問題群：EW12 問題群（運動学を含む力学に関する 14 問）、EW3 問題群（第 3 法則：作用反作用則 に関する 4 問）、EW45 問題群（力の概念理解に関する 8 問）、に大別されること、
などが分かって来た。

そこで、分布全体に渡る統計量よりも踏み込んだ量を調べようと、先ず「総得点」を上記三つの「問題群得点」（並びに「問題群平均得点」）に分け、その第 1 主軸への射影（得点の算術和としての元得点との相関は 0.996 程度）を「問題群得点」や「問題群平均得点」の第 1 主成分と呼ぶことにし、次にそれらについて上記主要 3 軸に沿って、それぞれの軸を 15 区間程度に分割し、区間ごとに輪切りにされた総得点分布についての平均値の特性を調べた。更に、「項目応答曲線」IRC[4]や各問得点の第 1 主成分（各問得点との相関は 1）による「問別得点パターン」[5]もこの主要 3 軸上で調べ、この 3 次元空間での被検者の応答の特性を浮かび上がらせることが出来た。その結果、
(i)第 1 主軸は、項目応答理論（IRT）[6]の習熟度（Proficiency）θ に対応する、被検者の力学概念形成の総合的な成長度を記述する軸であること。
(ii)第 2 主軸は,力の概念に関する EW45 問題群の誤答(誤概念)への偏りを記述する軸であること。
(iii)第 3 主軸は、第 3 法則に関する EW3 問題群の誤答(誤概念)への偏りを記述する軸であること。
などを明らかにして来た。それらの概要を図 1 と 2 に示す。もし、この総得点分布の持つ特徴が調査年度を改めてもほとんど変わらず、異なる国でも、また年月を経てもほぼ同じと見なすことが出来るのであれば（事実、アメリカ、及び日本の異なる年度のデータはかなり良く似ている。[7]）、学習者はこの全体の分布に沿って非線形な概念形成の過程をたどりながら力学概念を構築していっていることが推測されて、興味深い。

この調査にご協力いただいた全国の高校・大学の物理教育関係者に感謝する。本研究は JSPS 科研費 26282032 の助成を受けて行われて来た。また、主成分分析に関して助言していただいた岩坪秀一氏に感謝する。




（図１）
30 次元の総得点ベクトルの $N$ 人の被検者の分布の（第１主軸 x 第２主軸）２次元面への投影図。この図では見にくいが、被検者の力学概念形成の総合的な成長度を記述する第１主軸の値が 2.3 ぐらいを境に分布の様子が質的に異なっている様子が窺える。




（図２）
30 次元の総得点ベクトルの $N$ 人の被検者の分布の（第１主軸 x 第３主軸）２次元面への投影図。この図では見にくいが、被検者の力学概念形成の総合的な成長度を記述する第１主軸の値が 2.3 ぐらいと 4 ぐらいを境に分布の様子が質的に異なっている様子が窺える。

[1] D. Hestenes, M. Wells, and G. Swackharmer; Force Concept Inventory, Phys. Teach. 30 141~155 (1992).

[2] H26-30 科学研究費(B)(26282023)「国際的な評価ツールを用いた我が国の物理教育の現状調査と改革指針の探求」（研究代表者：覧具博義）.

[3] P. Eaton and S. D. Willoughby;　Confirmatory factor analysis applied to the Force Concept Inventory,　Phys. Rev. PER 14 010124-1~11 (2018).

[4] G. A. Morris, et al ; Testing the test: Item response curves and test quality, Am. J. Phys. 74(5) 449~453 (2006).

[5] 長谷川大和、他；「項目正答率パターン」を用いた力学概念理解度の分析、日本物理学会第 72 回年次大会（2017）.

[6] 例えば、J. Wang and L. Bao; Analyzing force concept inventory with item response theory, Am. J. Phys. 78 (10) 1064~1070 (2010).

[7] 山崎敏昭、岸澤眞一、他；IRC（項目応答曲線）を用いた力学概念理解度の分析 I、日本物理学会第 72 回年次大会（2017）.
岸澤眞一、山崎敏昭、他；IRC（項目応答曲線）を用いた力学概念理解度の分析 II、日本物理学会第 72 回年次大会（2017）.

# FCI プレ-ポスト 調査結果から見えてくる力学基礎概念理解の過程

[A]合田正毅、[B]岸澤眞一、[C]長谷川大和
[A]新潟大、 [B]元拓殖大、 [C]東工大附高
Goda-m@emeritus.niigata-u.ac.jp

前講演では、力学概念調査 FCI 30 問の被検者$n$の正誤表である 30 次元総得点（ベクトル）$a_n$ =(1,0,1,1,0, , , , , , ,) の $n$ =1～13768 の分布を正答相関行列の主要 3 次元空間に落とし込めば、（a）有意な相関の情報はその空間で議論出来ること。（b）総得点分布は例えばその第 1 主軸成分によって、初級者領域や中上級者領域などの異なる特性を持つ分布に分けられること。（c）30 問の問題についても、Eaton&Willoughby による分類に準じて運動学（第 2 法則）を含む力学に関する EW12 問題群（14 問）、第 3 法則に関する EW3 問題群（4 問）、力に関する EW45 問題群（8 問）、などに区分して問題群間の相関の様相を調べるのが良いこと。などを議論し、具体的に「問題群平均得点」や、「項目応答曲線」IRC や、「項目正答率パターン」IRP に相当する「問別得点パターン」などの諸特性をこの 3 次元空間で調べてみる事により、この分布が主要な 3 次元空間でそれぞれの軸方向に沿って極めて特徴的な“偏り”を持っていることを明らかにして来た。その“偏り”を概観すれば、

（i）第 1 主軸方向：項目応答理論（IRT）の習熟度（Proficiency）$\theta$に対応する、被検者の力学概念形成の総合的な成長度を記述する軸方向。（ii）第 2 主軸方向：力の概念に関する EW45 問題群の誤答（誤概念）への偏りを記述する軸方向。（iii）第 3 主軸方向：第 3 法則に関する EW3 問題群の誤答（誤概念）への偏りを記述する軸方向。　　となっている。

生徒・学生が第 1 主軸の左側から右側に“成長”して行くとするとすれば、彼らは全体の総得点分布に沿って第 2 主軸や第 3 主軸の正や負の方向に偏りながら成長してゆくことが予想される[1]。本講演ではそのことを、いくつかのクラスの Pre-Post の分布図や変化図を具体的に見ながら確認してゆく。

図 1 の左上には、大学の 43 名のクラスの総得点（ベクトル）の分布の Pre-Post 対応を（第 1 主軸　x　第 2 主軸）の 2 次元面に投影して例示してある。大まかには左下にある分布の重心図に沿って分布が動いていることが窺える。更に Pre-Post 対応に矢印を付けた右側の変化図を見れば、よりリアルに初級者が第 2 主軸の正の方向（力の概念理解に関する EW45 問題群の誤答（誤概念）の影響を受ける方向）に偏りながら“成長”して行く様子が見て取れ、その偏りが中級＆上級者の領域で取り除かれてゆく様子も読み取れる。同様に、総得点の Pre-Post 変化図を（第 1 主軸　x　第 3 主軸）の 2 次元面で見れば、第 3 法則の理解が初級者の成長期には大いに順調だが中級者で混乱が始まり特に上級者で N2-NF&N3 confliction と呼ばれる第 2 法則と第 3 法則がリンクした強い混乱[2]が起きることなどが読み取れる。

更に、クラスの Pre-Post データーでこれらの様相を具体的に読み取ることにより、クラス授業に対する受講者の反応をクラスゲインより立ち入って（3 指標で）読み取れる。これらのクラス図は、クラスの被検者$n$の正誤表 $a_n$ =( , , , ,) を相関行列の 3 主要固有ベクトルに射影して作成しているので、それらを表 1 に示した。

この調査にご協力いただいた全国の高校・大学の物理教育関係者に感謝する。本研究は JSPS 科研費 26282032 の助成を受けて行われて来た。また、主成分分析に関して助言していただいた岩坪秀一氏に感謝する。

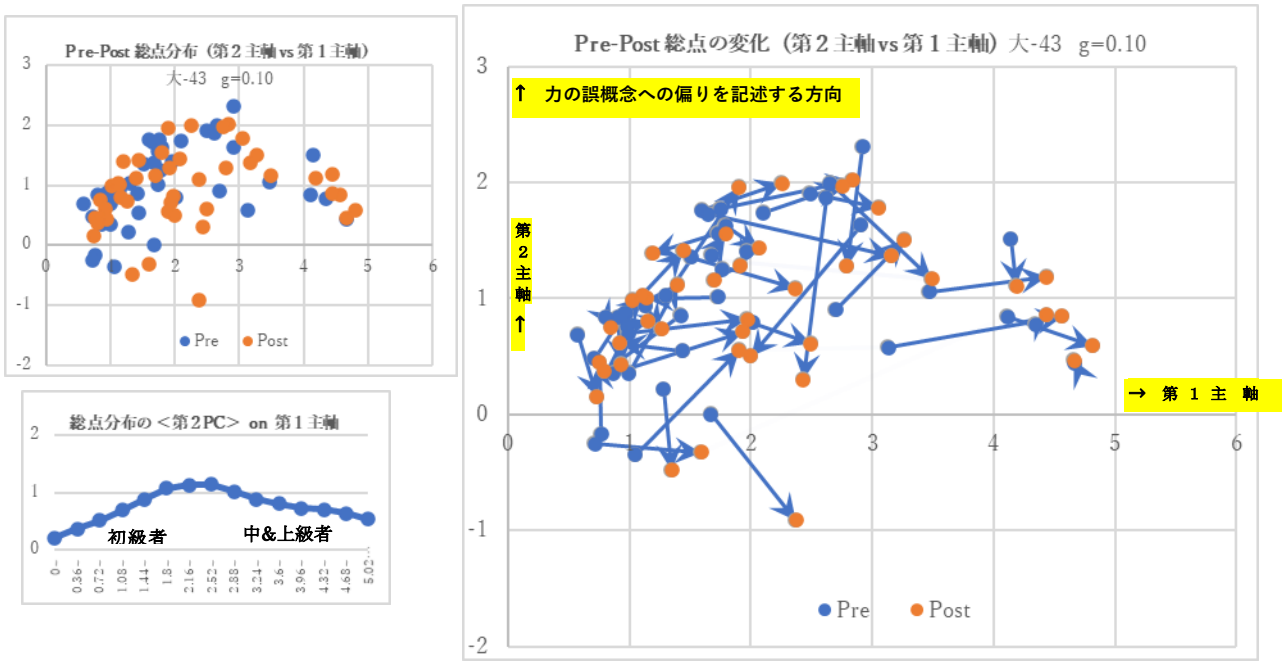



**図１．** 左上：クラスの Pre-Post 総得点分布（ベクトル）の（第１主軸　x　第２主軸）２次元面への投影図。
左下：総得点分布の（第１主軸　x　第２主軸）２次元面での第２主軸成分の重心図。
右図：左上図のクラスの Pre-Post 対応図に（プレからポストに）矢印を付けた図。

| | 第１固有 | 第２固有 | 第３固有 |
|---|---|---|---|
| 問１ | 0.453 | 0.137 | -0.256 |
| 問2 | 0.339 | -0.046 | -0.269 |
| 問３ | 0.335 | 0.242 | -0.08 |
| 問４ | 0.451 | -0.155 | -0.386 |
| 問５ | 0.545 | -0.388 | 0.131 |
| 問６ | 0.344 | 0.187 | -0.062 |
| 問７ | 0.425 | 0.079 | -0.042 |
| 問８ | 0.513 | 0.177 | 0.026 |
| 問９ | 0.51 | 0.142 | 0.145 |
| 問１０ | 0.527 | 0.268 | -0.231 |
| 問１１ | 0.553 | -0.167 | 0.058 |
| 問１２ | 0.415 | 0.193 | -0.1 |
| 問１３ | 0.696 | -0.267 | 0.081 |
| 問１４ | 0.549 | 0.132 | 0.137 |
| 問１５ | 0.332 | -0.192 | -0.501 |
| 問１６ | 0.56 | -0.142 | -0.19 |
| 問１７ | 0.511 | -0.37 | 0.034 |
| 問１８ | 0.565 | -0.363 | 0.085 |
| 問１９ | 0.477 | 0.304 | -0.002 |
| 問２０ | 0.523 | 0.24 | -0.011 |
| 問２１ | 0.371 | 0.212 | 0.317 |
| 問２２ | 0.497 | 0.163 | 0.254 |
| 問２３ | 0.523 | 0.264 | 0.27 |
| 問２４ | 0.489 | 0.324 | -0.004 |
| 問２５ | 0.595 | -0.305 | 0.132 |
| 問２６ | 0.61 | -0.2 | 0.184 |
| 問２７ | 0.417 | 0.273 | 0.114 |
| 問２８ | 0.524 | 0.052 | -0.371 |
| 問２９ | 0.123 | 0.084 | -0.316 |
| 問３０ | 0.627 | -0.257 | 0.179 |

表１．日本での大規模調査[3]の累計 $N$=13768 の調査結果による正答相関行列の主要な固有ベクトル。

[1] D. Hestenes and I. Halloun; Interpreting the Force Concept Inventory, Phys. Teach. 33 502~506 (1995).
M. S. Sabella and E. F. Redish; Knowledge organization and activation in physics problem solving, Am. J. Phys. 75 (11) 1017~1029 (2007).
N. Lasry, J. Guillemate and E. Mazur; Two steps forward, one step back, NATURE PHYSICS 10 402-403 (2014).
[2] D. J. Low and K. Wilson; The role of competing knowledge structures in understanding: Newton's second and third laws, Am. J. Phys. 85(1) 54~65 (2017).
[3] H26-30 科学研究費(B)(26282023)「国際的な評価ツールを用いた我が国の物理教育の現状調査と改革指針の探求」

# 熱力学誤概念の解消に向けたアクティブラーニング型授業

板橋克美
崇城大学総合教育センター
itahashi@ed.sojo-u.ac.jp

## １．はじめに

近年，アクティブラーニング（AL）型授業の重要性が強く言われ，物理教育では正しい物理概念の習得に向けて，相互作用型演示実験（Interactive Lecture Demonstrations，以下 ILDs）授業やチュートリアルなどの AL 型授業が多く実施されている[1]．ILDs 型授業とは，物理誤概念に焦点を当てた課題が提示され，その課題に向けて学習者同士での討論を中心とするものである．加えて，課題と討論の中で学習者に認知的葛藤を引き起こし，最後に定量的な結果を示すための演示実験を通して，科学的概念を形成させるものである[2]．

物理では，力学のみならず，他の分野でも誤概念があることは広く知られており，熱力学では「熱と温度を区別できていない」などの誤概念があることが報告されている[3]．我々も非物理系学生（生物学や化学を主専攻とする学科に所属する学生）を対象に，Wattanakasiwich らによる TCS（Thermodynamics Concept Survey）[4]の概念調査を実施しており，熱力学誤概念を研究している．

本研究では，上記の熱力学誤概念の解消や熱力学の理解度向上に向けて，ILDs の方法を部分的に取り入れた AL 型授業をオンラインで実施した．その内容と今後の課題について報告する．

## ２．実施したオンライン上での AL 型授業

実施した AL 型授業の対象は本学の非物理系学科の 1 年生 43 名であり，高等学校では主に「物理基礎・物理」を学習していないか，あるいは「物理基礎」まで学習している学生達である．実施時期は 5 月で，熱力学に関する基本的な事項（比熱と熱容量や理想気体の法則，気体がする仕事）を学習している．ただし，熱力学第一法則については，式のみを教え，具体的な状態変化での各物理量については教えていない．また，昨今の事情から今回はオンライン授業で実施し，Microsoft 社の Teams を用いた授業を行い，ブレークアウトルームの機能を用いて学生同士で討論をさせた．

実施した AL 型授業は断熱変化とサイクルのパートに分け，流れは次の通りである．①断熱圧縮に関する問い（問 1～問 5）を個人で考える．②問 4 について討論する．③サイクルに関する実験動画を視聴する．④サイクルに関する問い（問 6～問 9）を個人で考える．⑤問 6～8 について討論する．⑥③の実験の分析動画を視聴し，$p-V$ 図について確認する．

問いは Tutorials in Introductory Physics[5]の問題を基に作成した．この内，討論をさせた問 4 は断熱圧縮した場合に内部エネルギー（気体分子の運動エネルギー）の増大についての理由に関する問いで，問 6 はサイクルの $p-V$ 図，問 7 と 8 はそれぞれの状態変化における各物理量の正負を問う問題である．③のサイクルに関する実験動画はピストンと熱浴を用いて，加熱と圧縮，冷却を行うものである．この動画で，各状態変化の始状態と終状態を時刻 A～D で定義している．⑥の分析動画では圧力センサー（PASCO 社の PASPORTR シリーズ）と分析ソフト（SPARKvue）を用いて，実験動画中の各時刻における圧力と体積を測定し，$p-V$ 図を示した．補足として，講義時間中に結論に至らなかったため，次の授業回にそれぞれの状態変化における物理量の大きさ等について理論的な補充をした．

## ３．AL 型授業の結果

学生のワークシートの記述から，1 章で述べたような「熱＝温度」とする誤概念の他に，「内部エネルギーが温度以外の物理量に依存する」というような誤概念を学生が保有していることが示唆された．これらの誤概念については，別の学会にて詳しく報告する．

受講者は授業の前までにオンライン上で TCS の事前テストに回答している．授業から１週間後に１週間以内の期限を設け，事前テストにも含まれている，断熱圧縮における各物理量の変化量，およびサイクルのそれぞれの状態変化における各物理量の変化量などを，事後テストとして同様にオンラインで回答させた．回答があった 32 名の事前事後テストの結果から，AL 型授業の効果を測定するために，正答率の伸びを表すゲイン値

$$G=\frac{(\text{事後テストの得点率})-(\text{事前テストの得点率})}{1-(\text{事前テストの得点率})}$$

を定義する[6]．今回は G＝0.194 となった．Haka によれば，一方向授業での平均値が 0.23 であったことから，AL 型授業のゲイン値としてはそこまで高いとは言えない．設問ごとに見ると，断熱圧縮における温度変化や内部エネルギーの変化量についての問いでは，G＝0.4 程度となった一方で，熱量の変化についての問いでは，G＝0.05 と低かった．また，サイクルについては，等温変化での熱量と内部エネルギーの変化量を問う問題はいずれもゲイン値は 0.1 程度であった．また，$p-V$ 図については授業の最後に確認したにも関わらず伸びは見られなかった．

結果から，各物理量の変化量について，討論したことにより理解度が向上したが，中心的課題である内部エネルギーに関する正しい概念形成や「熱＝温度」の誤概念の解消には至ることなく，AL 型授業として効果が低いと言える．今後は，学習者自身に誤概念であることを認識させるための具体的準備（導入）や課題の工夫を行う．また，今回はオンライン上で行ったため，通信環境や時間不足等もあったことから討論が活発にならなかった班も多かったようである．オンラインと対面を併用しながら，学習者同士の討論が活発になるような班構成，授業の構成を考えていく．

## ４．おわりに

熱力学の理解度向上，熱力学誤概念の解消を目的に AL 型授業をオンラインで実施した．AL 型授業では，ILDs の方法を取り入れ，センサーを用いた演示実験の動画を見せて，学生同士で討論させた．温度変化や内部エネルギーの変化量に関しては AL 型授業の効果があったものの，誤概念の解消や内部エネルギーの正しい理解にはつながらなかった．今後も AL 型授業の手法や課題について検討し，熱力学の正しい概念形成につながる授業をしていく．

## 参考文献

[1] 谷口和成　物理教育 **65**-3 (2017) 170, 植松晴子　大学の物理教育 **17** (2011) 129
[2] D. Sokoloff, R. Thornton : Interactive Lecture Demonstrations, Willey (2004)
[3] 井田暁・越桐國雄　大阪教育大学紀要 **59**-1 (2010) 29
[4] P. Wattanakasiwich et al. International Journal of Innovation in Science and Mathmatics Education　**21** (2013) 29
[5] L. C. McDermott, P.S. Shaffer and the Physics Education Group : Tutorials in Introductory Physics, Prentice-Hall (2002)
[6] R. Hake Am. J. Phys. **66**, (1998) 64

# 衝突時に生じる現実の力の形

増子寛
元　麻布中学・高等学校
masuko@kdp.biglobe.ne.jp

## １．はじめに

２物体の衝突を扱うときは運動量の保存に注目するので、衝突時の力積について力の形（時間変化）にまで言及することは少ない。近年距離センサと力センサを内蔵した台車*)が市販されているので、この台車を使うと、運動量変化と力積がグラフ上に表示できる。一方教科書には、特に現在5社から出版されている高等学校物理の教科書には、ほぼ同じ力積の図が掲載されている。本稿はそこに掲載されている力積の図と、身の回りの材料で実際に行い得る衝突について、どのような形の力が作用するのか、その力の時間変化を調べたので報告する。

## ２．作用する力の時間変化

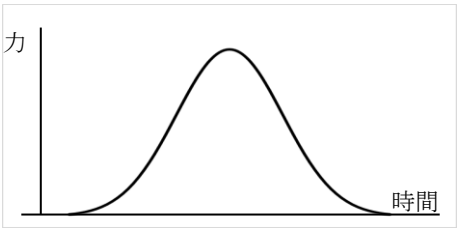
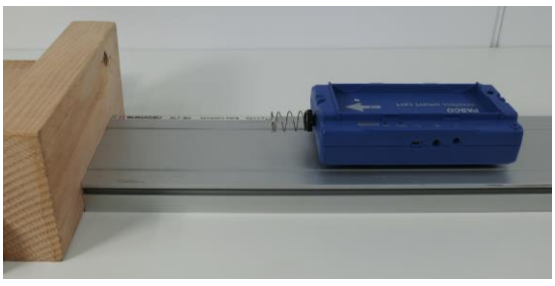


図１　力の時間変化

図１は、現行高校物理の教科書にある力積の典型的な形である。5社ともこれに近い形で図示されている。力の曲線と軸とに囲まれた領域に網がかけられて、力積であることが強調されていること、そしてその領域と同じ大きさを長方形に直して記入し、平均の力を求めていることは、5社とも共通である。さらに例として、バットでボールを打つ記述があり、ボールが変形している図も添えられているものもある。この力の変化の形をここでは「ガウス分布型」と呼ぶことにする。

## ３．衝突に使用した材料

衝突時に作用する力の計測は、スマートカート*)の力センサを用いた。力センサに、バネ、マグネットバンパー、粘土、ゴムバンパー、金属製のフックを装着して、それぞれを木のブロック、ゴムボール、梱包材に衝突させた。図２はバネを装着して木のブロックに衝突させたときの様子を示したもので、図３はその時の力の時間変化である。ここではこの力の形を「釣り鐘型」と呼ぶことにする。「ガウス分布型」のように両脇に「すそ野」はない。衝突後に振動が見られるが、これはばね自身の振動が残ってしまうからである。


図２　バネを装着したスマートカートと木のブロック

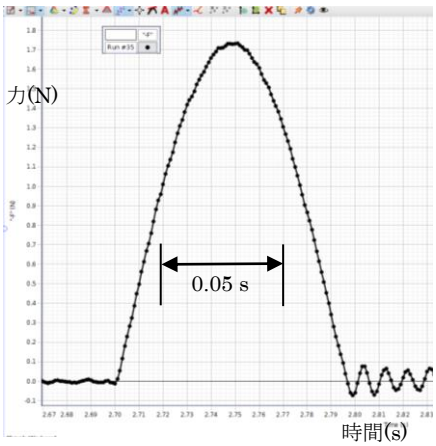


図３　カートに作用する力の時間変化

註＊　島津理化よりスマートカートとして販売

## ４．衝突時の力の時間変化

様々な材料の組み合わせで実際に衝突時の力の時間変化を計測した。以下にいくつかの例を示す。図４は力センサに粘土を装着して木のブロックに衝突させた場合である。力の形が始め鋭く立ち上がって後半ゆっくりと緩和する特徴から「粘弾性型」と呼ぶことにする。図５は力センサにマグネットバンパーを装着して、同じくマグネットバンパーを装着したカートを固定して、マグネット同士の反発力を利用して衝突させた場合である。衝突の始めと終わりに「すそ野」が拡がる火山型になる特徴から「力の場型」と呼ぶことにする。図６は力センサに金属製のフックを装着して梱包用の緩衝材を丸めたものに衝突させた場合である。衝突の前半は急だが後半は緩やかに変化して、「すそ野」は最後に現れるが衝突の始めには存在しない。これを「粘弾性型」に分類する。

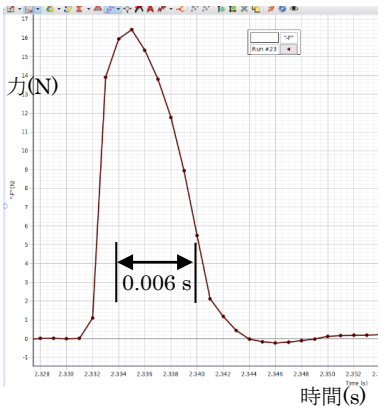



図４　粘土を装着した衝突

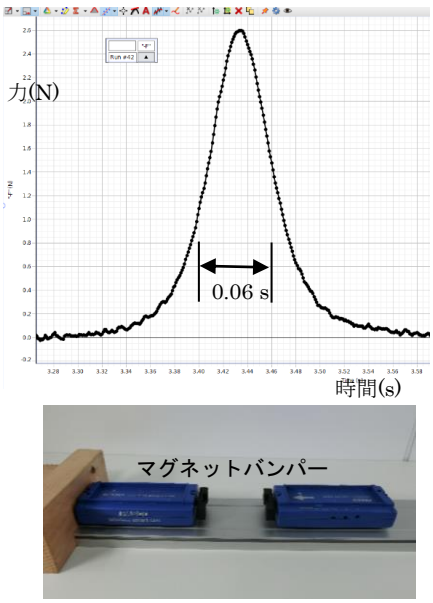



図５　マグネット同士の衝突

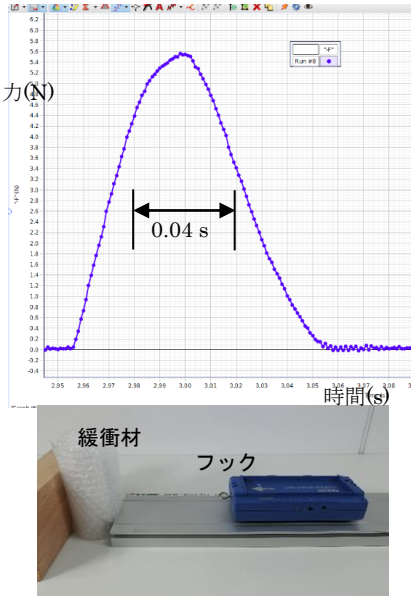



図６　鍵フックを装着した緩衝材との衝突

## ５．おわりに

上記の他にも、ゴムボールに衝突させる場合や、ゴムバンパーをセンサに装着する場合などいくつかの場合について計測した。作用する力の時間変化はそれぞれ特徴ある形をしているが、バネを使った「釣り鐘型」とマグネット同士の「場の力型」の他は、すべて「粘弾性型」になった。すなわち、ピークを中心に、前半は後半に比べて急で、後半は緩やかになり最後に「すそ野」が現れる形をしている。特に衝突の始めに「すそ野」は現れないのである。教科書にあるガウス分布型は、場の力を使う衝突を除けば、我々が計測し得る範囲で身近な素材を使った衝突では存在しない。少なくともバットでボールを打つ場面に現れる力積の形と、すぐそばの解説にある力の時間変化の形とは、現実には結び付かないもののようだ。

ちなみに図７は、Halliday らの Fundamentals of Physics 第４版 [1]にある図で、Redish らの Understanding Physics[2] では、これとほぼ同じ図を用いて、「理想化された描画」という表現を用いている。

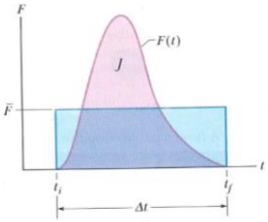



図７　力積の図

## 参考文献

[1] Halliday, Resnik, Walker :Fundamentals of Physics 4th edition : p258
[2] Cummings, Laws, Redish, Cooney :Understanding Physics: p185

# エントロピーを用いたピア・インストラクションの分析

[A]尾形総一朗，[B]新田英雄
[A]東京学芸大学大学院（現 市川中学校・高等学校），[B]東京学芸大学
m193406n@st.u-gakugei.ac.jp

## １．はじめに

近年，物理概念の理解に相互作用型授業が有効であることが多くの実践的研究によって示されている。相互作用型授業の効果は，事前・事後に概念調査を実施し，Hake の規格化ゲインを用いることによって定量化されている。また，相互作用型授業のひとつであるピア・インストラクション（以下 PI）においては，議論前後の正答率変化による PI 効率（以下$g_{\mathrm{PI}}$）によって定量化されている。しかし，生徒同士の相互作用の強さ自体を定量的に評価する方法は確立されていない。そこで本研究では Shannon の情報エントロピーを用いて生徒間相互作用の強さを評価することを試みた。本発表では，エントロピーを用いて，PI を分析した結果を紹介する。

## ２．エントロピーと情報量

Shannon のエントロピーは

$$H(A) = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log_2 P_i$$

で定義される。エントロピー$H(A)$は生起確率$P_1, P_2, \ldots, P_n$で与えられる$n$個の事象の集合$A$があるときの不確実性を表している。PI における回答分布を確率分布とみなし，エントロピーを適用すると，ここでの事象とは「あるクラスで実施した PI に対するクラスの回答」であり，生起確率$P_n$は「選択肢$n$を選ぶ確率」となる。よってエントロピーは「クラスがある選択肢を選ぶ不確定度合い」と位置付けることができると仮定できる。また，PI への適用の仕方はクラス単位だけではなく，グループ単位に対しても適用することが可能である。つまり，事象を「実施した PI に対するグループの回答」とすれば，$H(A)$は「グループがある選択肢を選ぶ不確定度合い」を表すことになる。

PI では，議論後の回答分布が正答に収束することが前提とされている。つまり，議論によってグループが回答に関する何らかの情報（誤答の場合も十分にありえる）を得たことによる回答選択の不確定度合いの減少分が，その議論の情報量だということができる。この情報量$I$を

$$I = H_{pre} - H_{post}$$

と定義し，本研究では「PI 情報量」と呼び，議論を進めていくこととする。ただし，不確定度は回答分布に対してであり，回答分布の不確実性と生徒が正しい知識を持っていることは直接関係がないということに注意が必要である。

## ３．分析結果

2012 年度～2018 年度に国立大学附属高校の第二学年で実施された PI のデータを分析した。

PI 中の議論によってクラスの正答率とエントロピーがどのように変化したのかを明らかにするために，同 PI 問題の議論前から議論後に向けて矢印の直線で結び，軌跡図付きの散布図を作成した。図１は，$0 \leq g_{\mathrm{PI}} < 0.2$のうち，選択肢の数が３つの PI を抜粋している。図１は$g_{\mathrm{PI}}$が正の値を

とっているため，正答率はわずかに上がっているが，エントロピーの変化の仕方はさまざまであり，エントロピーが大きく減少しているものは誤答の選択肢に回答が収束したことを表している。図２は$g_{\mathrm{PI}}$が 0.8 以上をとった選択肢数が３つの問題の推移を表している。議論を通して，高い正答率と低いエントロピーへと収束したことがわかる。

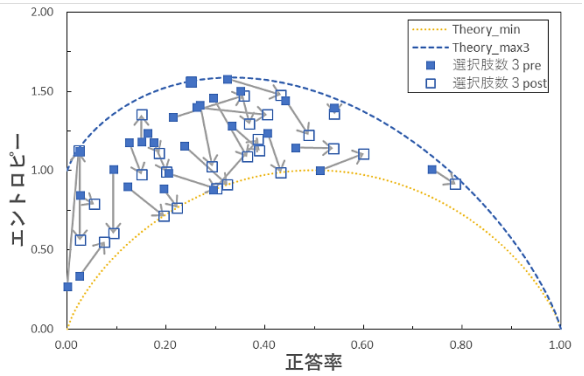



**図 1　$0 \leq g_{\mathrm{PI}} < 0.2$における推移**

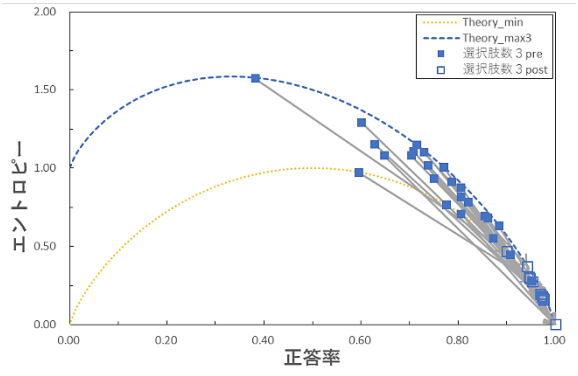



**図 2　$0.8 \leq g_{\mathrm{PI}}$における推移**

実施された PI を単元ごとに分類し，各単元の$g_{\mathrm{PI}}$と PI 情報量の平均値を比較したグラフが図 3 である。なお，PI の選択肢はばらついているので，PI 情報量を算出する際には規格化してある。相対的な視点で各単元を比較すると，「運動の法則」や「連結物体」の$g_{\mathrm{PI}}$は全単元の中でも低い値をとっているが PI 情報量は全体の中でも決して低い値をとっていない。以上より，これら二つの単元は，正答へとたどり着く割合は低いが，PI 情報量としては他単元と遜色なく同程度の議論による収束度合いをみせているということがいえる。

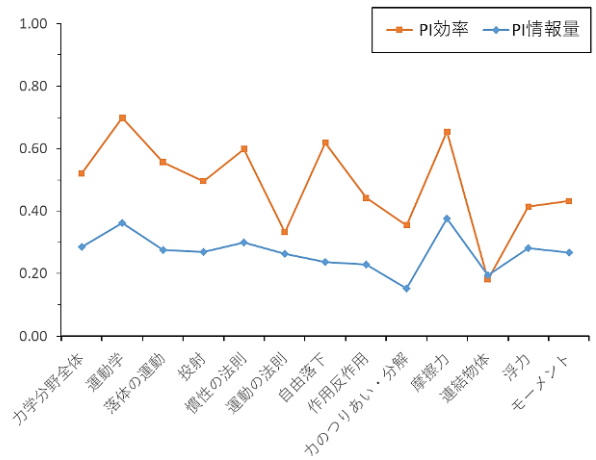



**図 3　単元ごとの PI 効率と PI 情報量の平均値**

後藤ら[1]は，PI のプロトコル分析から，議論が「PI 成立型」「未解決型」「リーダー主導型」「失敗型」「分裂型」の 5 類型に，質的に分類されることを示した。図 4 は議論パターンを分類したグループごとに正答率変化と PI 情報量をプロットしたものである。「PI 成立型」「リーダー主導型」「未解決型」は第四象限に分布し，「失敗型」は第一象限に，分裂型は第三象限に分布するという特徴がみられた。また，議論前後の正答率とエントロピーの推移の仕方を調べたところ，議論パターンを定量的に裏付けられることがわかった。

これらの詳細な結果は発表時に示す。

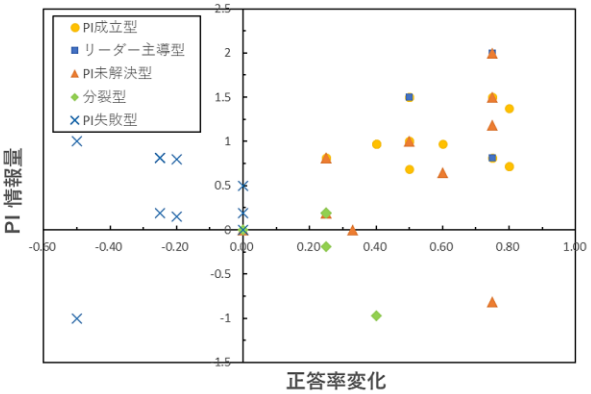



**図 1　議論パターン別の正答率変化と PI 情報量**

## 参考文献

[1]後藤敬祐，新田英雄「ピア・インストラクションにおける生徒間相互作用の分析」物理教育 67-4（2019）pp. 227 -234.

# 物理テストのオンライン実施が正答率に与える影響

[A]駒井尚之，[B]梅田貴士
[A]滋賀県立彦根工業高等学校，[B]広島大学大学院人間社会科学研究科
tumeda@hiroshima-u.ac.jp

## １．はじめに

物理教育研究では，新しい授業法などの学習効果を測定するために，調査問題を授業実践の前後で実施して，その回答の変化を分析するプレ・ポストテストの方法が用いられることが多い。 しかし，限られた授業時間の中からテスト実施の時間を確保するのは負担となる。そのため，授業以外の時間に実施できるオンラインテストの活用が期待されている。

しかし，授業内で実施する筆記形式のテスト（以下，授業内テスト）から，授業外の場所・時間で回答させるオンライン形式のテスト（以下，オンラインテスト）に移行する場合，回答環境の違いによってテストの正答率が影響を受ける可能性がある。そこで本研究では，物理の問題に関するオンラインテストと授業内テストを実施し，回答者の能力差を補正する分析手法を採用することで，テスト実施環境の違いが正答率にどのような影響を与えるか，より高い精度で調べることを目的とする。

## ２．分析方法と調査問題

この研究では，ある授業の受講者を対象に調査を行うことを想定する。
まず，物理に関する同等な 2 種類のテスト（テスト A,B）を作成する。そして，受講者を二つのグループ（グループ 1 とグループ 2）に分けて，2 種類のテストをオンラインと授業内で回答させる。授業が始まる前にグループ 1 にはテスト A を，グループ 2 にはテスト B をどちらもオンラインで解答させる。 その後，授業内では，グループ 1 にはテスト B を，グループ 2 にはテスト A を筆記形式で解答させる。テストの実施パターンを（表 1）に示す。

表 1. 学生グループによるテストの実施パターン

| | オンライン | 授業内 | 平均点 |
|---|---|---|---|
| グループ 1 | テスト A | テスト B | AB 平均 1 |
| グループ 2 | テスト B | テスト A | AB 平均 2 |

ある問題のオンラインと授業内での正答率を比較する場合，異なる回答者グループによる正答率を比較する必要がある。両グループの能力差から生じる影響を無くすために，表 1 のパターンで回答させた結果を用いて補正を行う。グループ 1，2 のいずれもテスト A と B を回答しており，さらにそれらはオンラインと授業内の両方で回答されているため，それぞれのグループに対して両テストを含めた平均値「AB 平均 1」と「AB 平均 2」の差を両グループの能力差とみなす（表 1 を参照)。これらの平均正答率を用いた補正を行うことで，グループの能力差を補正する。

調査問題は，大学入試センター試験[1]の 2005 年から 2018 年の問題から選定し，全 10 問からなる多肢選択問題を 2 種類（テスト A,B)を作成した。 テストには力学や電磁気学など様々な分野から，物理概念の定性的な理解を問う思考問題や，定量的な理解を問う数値計算問題など様々な種類の問題を採用した（AB それぞれ同様の内容が含まれるようにした)。

## ３．結果と考察

調査対象は国立大学教育学部 1 年生向けの授業を受講する計 161 名とした。まず，テストを実施する前に，学生に対して高校での物理及び物理基礎の履修状況についてのアンケートを実施した。その結果から，履修状況の割合がほぼ同じになるように学生を二つのグループ（グループ 1, 2）に分けた。オンラインテストと授業内テストの回答から，ダミー問題を誤答した学生の回答は分析対象から除外した。その上で，オンラインテストと授業内テストを両方とも回答したグループ 1 の 75 名とグループ 2 の 69 名の計 144 名分の回答を分析に用いた。

表 2. 各グループのテスト A，B の結果

| グループ 1 | 平均点 | 標準偏差 |
|---|---|---|
| テスト A（オンライン） | 4.44 | 1.76 |
| テスト B（教室内） | 5.76 | 1.80 |
| 合計 | 10.20 | 2.94 |
| グループ 2 | | |
| テスト A（教室内） | 4.72 | 1.58 |
| テスト B（オンライン） | 4.99 | 2.09 |
| 合計 | 9.71 | 3.18 |

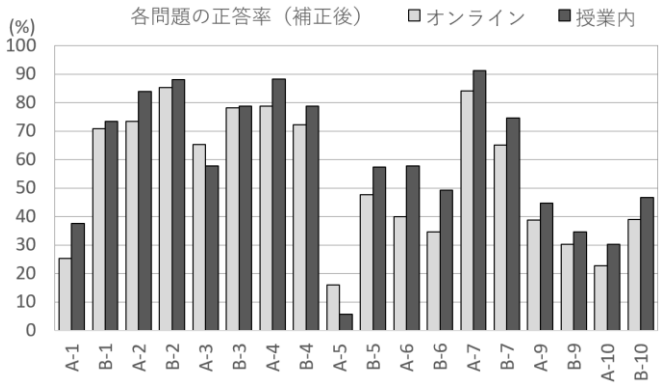



**図 1　各問題の環境の違いによる正答率の違い**

グループ毎の得点の詳細は表 2 に記している。平均正答率（合計得点）は，グループ 1 が 56.67%（10.20 点），グループ 2 が 53.95%（9.71 点）となった。これらの値をグループ毎の能力値（AB 平均 1 と AB 平均 2）であるとみなして，これらの平均正答率の差+2.72 ポイントをグループ 2 に加えた補正後正答率を用いて分析を行う。

この補正後正答率を用いてオンラインテストと授業内テストの差を議論する。オンラインテストの平均正答率はグループ 1 のテスト A，グループ 2 のテスト B の平均正答率の平均とし，53.54%となった。一方，授業内テストの平均正答率はグループ 1 のテスト B，グループ 2 のテスト A の平均とし，59.79%となった。この 6.25 ポイントの差は t 検定では 5%水準で有意差あり（p=0.0104），Cohen の d 値による効果量は d=0.304 という結果となった。したがって今回の調査では，効果量としては小程度ではあるものの，オンラインテストの結果は授業内テストの結果よりも 6.25 ポイント正答率が有意に低くなることが分かった。

一方，各問題のオンラインと授業内での正答率（補正後）を個別に比較すると，図 1 に示されるように，どのような種類の問題に影響があるのかについては，有意差のある規則性などを見出すことができなかった。問題の種類や単元に関係なく，全体的に同程度の差が表れる結果となった。しかし，低得点者の傾向を分析すると，オンラインではテストを最初から真剣に回答していない学生が一定の割合存在していた可能性が示唆された。本発表ではこれらの結果や考察の詳細について報告する。

## 参考文献

[1] 大学入試センター試験，https://www.dnc.ac.jp/center/

# 日本型物理概念調査紙の試行版：研究開発の概要と現状

[A]新田英雄，[A]植松晴子，[B]勝田仁之，[C]西村塁太，[D]今井章人，[E]尾形総一朗，
[F]苅谷麻子，[G]清水滉大，[H]長倉健哉，[I]平本健太，[J]山本岳
[A]東京学芸大学，[B]筑波大学附属高等学校，[C]東京学芸大学附属高等学校，
[D]早稲田中学校・高等学校，[E]市川学園市川中学校・高等学校，
[F]東京学芸大学附属国際中等教育学校，[G]法政大学国際高等学校，
[H]神奈川県立横須賀大津高等学校，[I]神奈川大学附属中・高等学校，
[J]新潟県立長岡大手高等学校
[A]nitta@u-gakugei.ac.jp

## １．はじめに

本発表は，4 件の連続講演「日本型物理概念調査紙の試行版」の冒頭部分である。

物理教育研究において，概念調査紙（以下，単に「調査紙」），学習姿勢調査紙等の選択肢式調査紙は，授業効果や生徒の状況を科学的に分析する際の不可欠なツールとなっている。

既存の概念調査紙の殆どは，米国の PER によって米大学の入門物理コースなどを想定して開発されてきている。そのため，日本での利用においては，日米のカリキュラムの相違に起因する問題点が指摘されてきた。例えば，FCI[1]は高等学校で用いることができる内容であり，大半の設問は「物理基礎」の内容に対応している。しかしながら，一部の設問は円運動や 2 次元運動などの「物理」で学習する内容である。したがって，「物理基礎」の力学分野を終了した時に FCI を用いて授業効果を測定した場合，学習範囲外の設問を含む調査になり，得られた規格化ゲイン等は他校のデータと比較する際に，精度が落ちる結果にならざるを得なかった。

そこで本研究では，主に高等学校物理を対象として，日本の教育課程に適合した使いやすい概念調査紙を開発し，生徒の理解度の調査や授業効果の測定を実施しやすくすることを目的とした。なお，本研究の背景等については 2019 年度の研究大会で報告した[1]。ここでは，その後の研究過程と現状について述べる。

## ２．概念問題の開発指針

学習指導要領に沿った概念調査問題を作成しても，実際の教育現場で共通に使用するにはいくつかの問題点がある。

（i）　学校によって，適切な難易度が異なる
（ii）　学校によって，「物理基礎」と「物理」を一貫して教育する形に単元の組み換えている
（iii）　教師によって，調査したい内容に違いがある

これらの問題点を解決するためには，需要ごとに概念調査問題を編集しなければならない。しかしながら，そうすると今度は，問題が異なるために，規格化ゲインなどによる授業効果の測定値を他校と比較できなくなってしまう。これらの問題を解決するために，本研究では分析に現代テスト理論を用いることにした。現代テスト理論は，古典テスト理論では相互依存関係にあった被験者集団と調査問題とを独立に評価することを目的とした確率モデルである。本研究では，現代テスト理論で最も簡単な 1 パラメタモデルである Rasch モデルを用いることにする[3]。分析の詳細については勝田による連続講演 II に譲る。Rasch モデルを用いれば，開発した個々の設問の項目困難度パラメタ（設問の難易度）を定めることができる。

そこで本研究では，多くの学校で用いることができる標準的な「物理基礎」「物理」の問題集を作成する一方，問題の入れ替えを前提として，項目困難度を定めた設問を，分野ごとに内容や難易度などを変えてプールしておく。これにより，上の（i）～（iii）の課題を解決することを目指している。

## ３．概念問題開発の現状

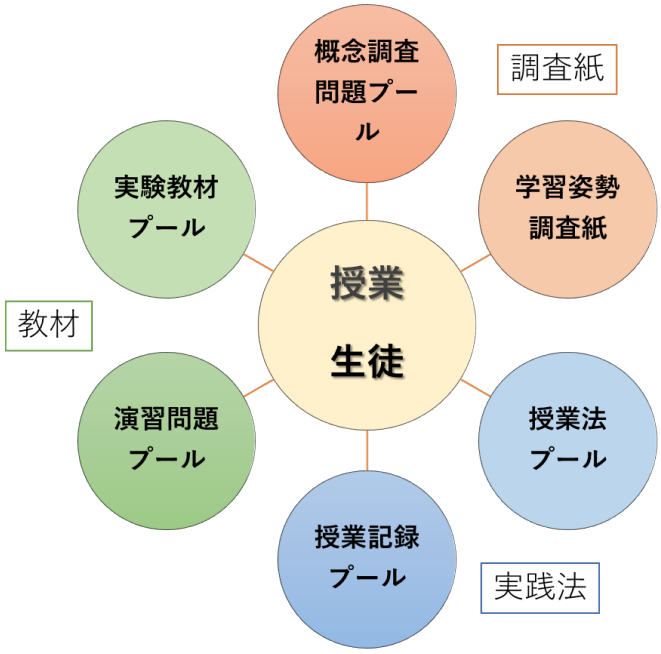
概念調査紙に用いる設問の開発過程は次のとおりである。

① 評価の対象とする物理概念を整理し，その概念を問う記述問題もしくは理由を記述をさせる選択肢問題を作成する。
② 授業において調査を試行する。
③ 回答選択肢と選択理由を詳細に分析し，設問と回答選択肢が意図したように機能しているかをチェックする。
④ 必要な修正を加え，選択肢問題とする。

本研究は構想から今年度で 4 年目，科研費による研究を開始してから 3 年目である。1 年目は研究全体の構想を立て，2 年目から作問を開始した。2 年目の終わりまでに「物理基礎」の標準問題の試作版を作成し，3 年目に試行を行った。同時に 3 年目には「物理」の標準問題の試作版を作成した。構想から 4 年目にあたる本年度は「物理基礎」「物理」の試作版の試行と分析・評価を行っている。試行では協力者を募り，「物理基礎」で 1900 名以上，「物理」で 600 名以上のデータを集めることができた。分析結果については，続く勝田，西村，今井の講演で詳述する。

## ４．今後の課題

概念調査紙はあくまで生徒の理解度を測定することによる授業評価の道具である。そのデータに基づいて科学的に授業改善をしていくことが目的である。授業改善のためには，やはり研究に基づいた，妥当性の示された教材群を整備する必要がある。これは Redish の物理スイートの構想と同様である[4]。これら全体構造の中で，概念調査問題も相互作用を保ちながら改良を重ねていく必要も，将来的には出てくると思われる。




本研究は，科研費基盤研究（B）課題番号 19H01731 の助成を受けています。本調査に協力頂いた先生方に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

[1] D. Hestenes, et. al, “*Force concept inventory*”, Phys. Teach. **30** (3), 141 (1992).
[2] 新田英雄, 2019 年度日本物理教育学会年会第 36 回物理教育研究大会講演予稿集 p.96.
[3] H. Nitta and T. Aiba, The Physics Educator, **1** 1950005 (2019).
[4]レディッシュ「科学をどう教えるか」（丸善，2012）.

# 日本型物理概念調査紙の試行版：pre テストの試行と全体分析

[A]勝田仁之，[B]新田英雄，[B]植松晴子，[C]西村塁太，[D]今井章人，[E]尾形総一朗，
[F]苅谷麻子，[G]清水滉大，[H]長倉健哉，[I]平本健太，[J]山本岳
[A]筑波大学附属高等学校，[B]東京学芸大学，[C]東京学芸大学附属高等学校，[D]早稲田中学校・高等学校，
[E]市川学園市川中学校・高等学校，[F]東京学芸大学附属国際中等教育学校，[G]法政大学国際高等学校，
[H]神奈川県立横須賀大津高等学校，[I]神奈川大学附属中・高等学校，[J]新潟県立長岡大手高等学校
katsuda.phys.edu@gmail.com

## 1．はじめに

本報告は、４件の連続講演「日本型物理概念調査紙の試行版」２件目である。発表者らの所属する研究グループ PEPPER では、日本の高等学校「物理基礎」「物理」の枠組みに則した概念調査紙の開発を行なっており，現在は試行版を作成して pre テストを実施したところである。本報告では、pre テスト全体の実施・分析について報告し，続く２件の講演につなげる。

## 2．pre テストの分析

本研究で開発した概念調査紙は，物理基礎・物理ともに全 30 問の多肢選択式テストであり，すべての学習範囲から出題している。pre テストの有効回答者数は，物理基礎 1915，物理 649 であった。それぞれの正答数分布を，図１に示す。物理基礎・物理とも全問不正解や全問正解となった被験者はほぼおらず，分布は広く取れている。分布できている。

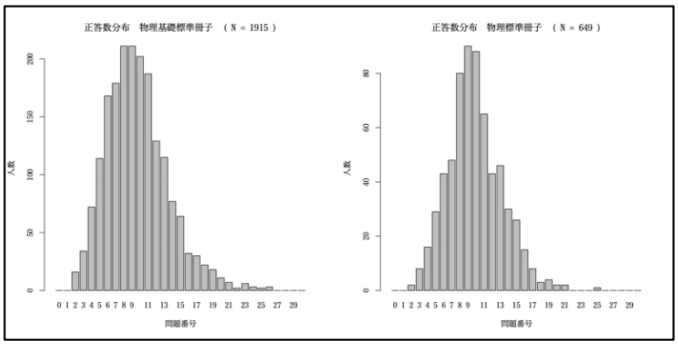



図１　正答数分布

さらに，各問ごとの正答率分布を，出題分野ごとに図２に示す。正答率が 10% を下回るものから，60%程度のものまで，広く分布している。原則として選択肢は５択としたので，当てずっぽうで 20 %の正答率となるが，それより低い正答率の問題も散見される。これらについては，注目すべき素朴概念を反映している可能性がある。

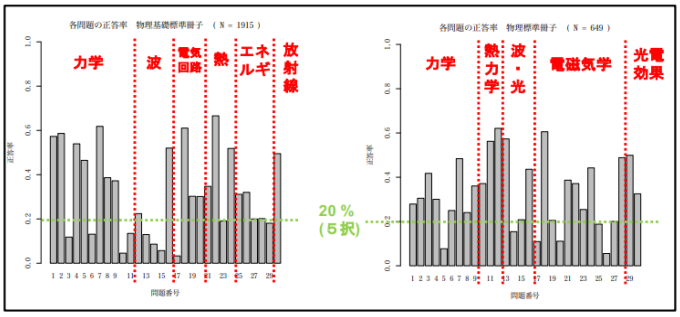



図２　各問の正答率分布・出題分野

加えて，各問の点双列相関係数（各問の正答率と，全体正答率との相関係数）を図３に示す。図３を見ると，点双列相関係数が 0.1 前後の低い値が，いくつかの問題で見られる。これらの設問は，問題改訂を含めた検討の対象となる。物理基礎の波，物理の電磁気学分野に点双列相関係数の低い問題が散見される。最終的な改定の判断は，post テストの結果も鑑みて判断したい。

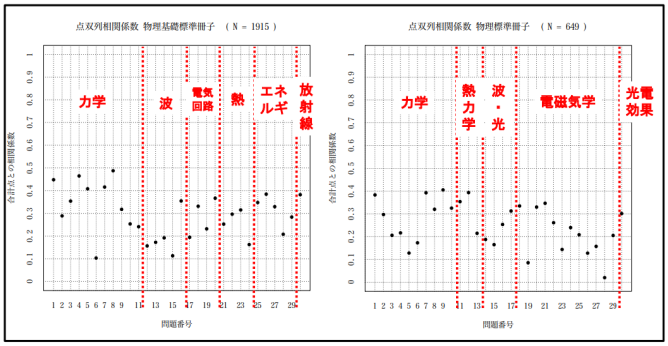



図３　各問の点双列相関係数

## ３．項目応答理論（IRT），特に Rasch モデルを用いた分析

前節の分析に加えて，項目応答理論を用いた分析も行なった。ここでは，Rasch モデルに基づく分析結果を報告する。

Rasch モデルは，各問題ごとの正答率 $p$ が，その問題の困難度 $b$，回答者の能力値 $\theta$ を用いて表現する確率モデルである。正答率 $p$ は図４のようなロジスティック曲線を描く。各パラメタはテストの回答から推定される。本研究では，R 言語プログラムのパッケージ「eRm」を用いて，各パラメタを推定した。

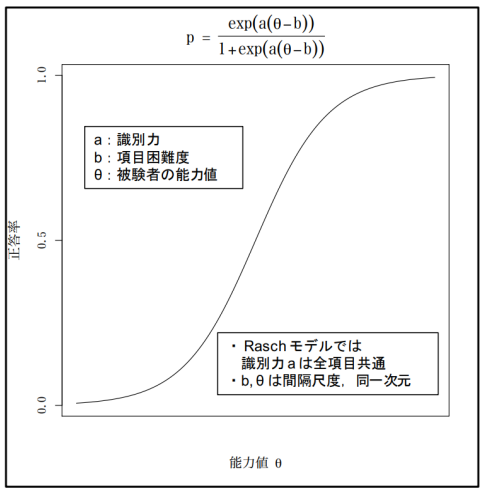



図４　Rasch モデル

Rasch モデルの注目すべき点は，問題の困難度 $b$ や回答者の能力値 $\theta$ が間隔尺度だということである。つまり，通常の 100 点満点のテストにおいては，50 点と 51 点の回答者の能力差と，90 点と 91 点の回答者の能力差は異なるが，Rasch モデルにおける１点は，どこでも同じ意味を持つ。本研究では間隔尺度を用いて，通年の授業前後で，概念調査のスコアがどれだけ改善したかを測定できるようにする。また，異なる母集団に異なる授業法で授業を行なった際に，授業効果を比較するための共通指標にもなる。

図５に，Person-Item map と呼ばれる，Rasch モデルにおける各回答者の能力値の分布，各問題の項目困難度を同一次元上にプロットした図を示す。物理基礎・物理とも，分布は広く取れている。

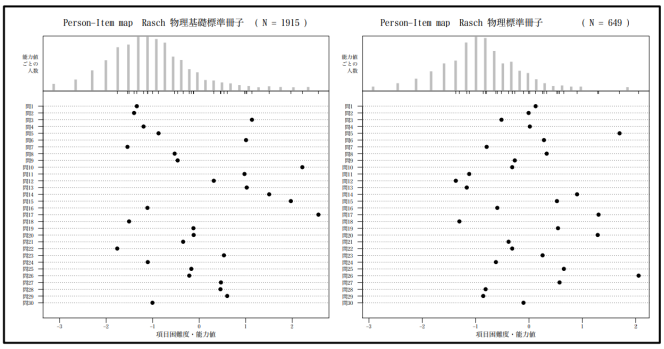



図５　Person-Item map

さらに，各問題における実際のテスト回答が，Rasch モデルにどれだけ適合しているかを，Infit-$t$ 統計量を用いて評価する。Infit-$t$ 統計量についての詳細は割愛するが，目安として値が２を超える設問は，Rasch モデルに適合していない。図６に，Pathway map と呼ばれる，各問題ごとの Infit-$t$ 統計量の値をプロットした図を示す。物理基礎の問 24，物理の問 28 は，Infit-$t$ 統計量が２を大きく上回っているので，問題の改訂が必要になる。

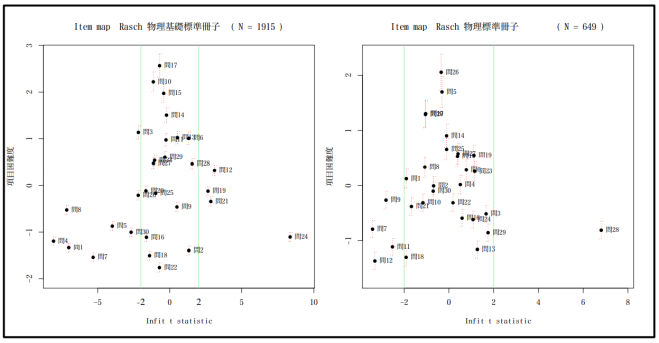



図６　Pathway (item) map

## ４．おわりに

pre テスト全体を分析して，問題改訂の対象となる問題が，複数見つかった。しかしながら，テスト全体の分析だけを以て，改訂を進めるわけにはいかない。各問題ごとに，概念調査問題としての問題文の妥当性，各選択肢の回答率などを鑑みつつ，慎重に検討を進めていく必要がある。各問題の分析については，続く２件の連続講演で報告される。また，既に述べたように最終的な改定の判断は，post テストの結果も鑑みて検討する。

本研究は，科研費基盤研究（B）課題番号 19H01731 の助成を受けている。

# 日本型物理概念調査紙の試行版：物理基礎 pre テスト

[A]西村塁太，[B]新田英雄，[B]植松晴子，[C]勝田仁之，[D]今井章人，[E]尾形総一朗，
[F]苅谷麻子，[G]清水滉大，[H]長倉健哉，[I]平本健太，[J]山本岳
[A]東京学芸大学附属高等学校，[B]東京学芸大学，[C]筑波大学附属高等学校，
[D]早稲田中学校・高等学校，[E]市川学園市川中学校・高等学校，
[F]東京学芸大学附属国際中等教育学校，[G]法政大学国際高等学校，
[H]神奈川県立横須賀大津高等学校，[I]神奈川大学附属中・高等学校，
[J]新潟県立長岡大手高等学校
m121805g@st.u-gakugei.ac.jp

## １．はじめに

本報告は，4 件の連続講演「日本型物理概念調査紙の試行版」3 件目である。発表者らの所属する研究グループ PEPPER では，日本の高等学校「物理基礎」「物理」の枠組みに則した概念調査紙の開発を行なっており，現在は試行版を作成して pre テストを実施したところである。本報告では，物理基礎 pre テストの概要と，いくつかの問題の試行結果を取り上げ，そこからわかる生徒の誤概念などについて報告する。

## ２．物理基礎 pre テストの概要

本研究で開発した物理基礎の概念調査紙は全 30 問で，すべての問題が 5 択の多肢選択式テストである。表 1 に示すように，物理基礎の学習範囲を網羅するようにして作成した。pre テストは令和 3 年 4 月の物理基礎学習前の生徒を対象として，18 の学校で実施した。有効回答者数は 1915 であった。

表 1

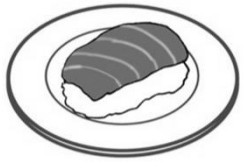
| 問題番号 | 単元 | 問う内容 |
|---|---|---|
| 問 1~11 | 力学 | 速度，加速度，落下，運動の三法則，摩擦力，力のつり合い |
| 問 12~16 | 波 | 反射，独立性，速さ，媒質の振動，波源の振動と波形 |
| 問 17~20 | 電気回路 | 電力，電源の定電圧概念，電流概念，抵抗率 |
| 問 21~24 | 熱 | 潜熱，熱の移動，熱平衡，比熱 |
| 問 25~29 | 力学的エネルギー | 仕事，エネルギー保存則，エネルギー変換 |
| 問 30 | 放射線 | 半減期 |

## ３．問題ごとの分析

まず，問 11 について述べる。問 11 は力のつりあいと作用反作用の関係の違いを理解しているかどうかを問う問題である。問題文と選択肢は，下の四角で囲まれた部分である。

11.お皿の上に，マグロのにぎり寿司がのっています。お皿がごはんを押す力の反作用として最も適切なものは，次のうちのどれでしょうか。

(1) ごはんがお皿を押す力　(2) ごはんとマグロがお皿を押す力
(3) ごはんにはたらく重力　(4) ごはんとマグロにはたらく重力の和
(5) 上のどれでもない



問 11 は元々，机の上に二つの箱（箱 A，B）を重ねておき，机が箱 B を押す力の反作用を問う問

題であった（図 1）。しかし，PEPPER 研究会での議論で，より日常生活と関連させた文脈の問題に変えるべきという意見を受けて，鏡餅など様々なものを経て，現在の文脈となった。

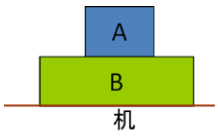


図 1

図 2 は問 11 の項目特性図である。項目特性図は本研究では，正答率に応じて生徒を 5 つの群に分けて，その群を横軸に並べ，縦軸に確率を配したグラフを用意し，各群における各選択肢の回答率をプロットし，直線で結んで作成した。図 2 より，高得点群になるほど，正答である選択肢 1 の回答率が高くなっていることがわかる。また，どの群でも誤答である選択肢 4 を 4 割以上の生徒が回答していることから，生徒の誤概念を反映した誤答になっていることが示唆される。選択肢 4 は，お皿がごはんを押す力とつり合う力のことであり，生徒が力のつりあいと作用反作用を混同していると考えられる。さらに選択肢 2 も，どの群でも 20%程度回答されている選択肢である。お皿と接触していないマグロも，ごはんをすり抜けてお皿に力を及ぼすことができるという，誤った考えを持っていることが示唆される。

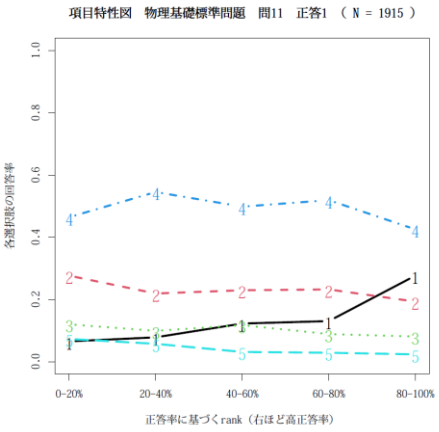
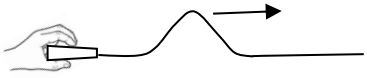


図 2

次に，問 14 について述べる。問 14 は媒質の振動と波の伝わる速さの関係を問う問題である。

14.なわとびの左端を揺らして波を生じさせ，波の速さを測定する実験を行いました。次に，手の動かしかたを下のア，イのように変えた場合，波の速さはどうなると考えますか。



ア　手を大きく動かした場合（他の条件は元の波と同じ）

イ　手を動かし始めてから動かし終えるまでにかかる時間を短くした場合（他の条件は元の波と同じ）

(1)　アの場合は変化しないが，イの場合は速くなる
(2)　アの場合は速くなるが，イの場合は変化しない
(3)　アの場合は遅くなったが，イの場合は速くなる
(4)　アの場合もイの場合も速くなる
(5)　アの場合もイの場合も変化しない

図 3 に問 14 の項目特性図を示す。図 3 より，高得点群になるほど，正答である選択肢 5 の回答率が高くなっていることがわかる。ただし，正答率は非常に低い。低得点群では選択肢 3，高得点群では選択肢 1 の誤答が，それぞれ高い割合で解答されている。選択肢 3 は，波の伝わる速さに，波源の振動の振幅と周期が影響するという考えで，選択肢 1 は周期のみが影響するという考えである。低得点群から高得点群に移るにつれて，波の伝わる速さに振幅が影響しないと考える割合が減っていくのは，非常に興味深い。今後，インタビュー調査等によって，詳細に検討していきたい。

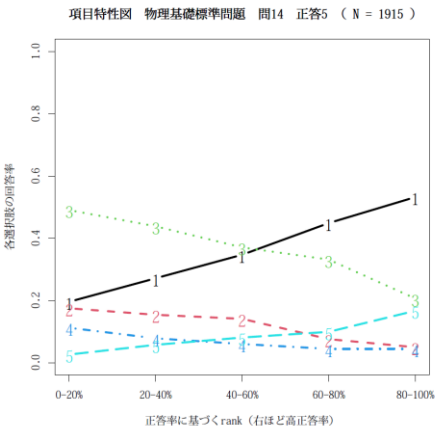


図 3

本研究は，科研費基盤研究（B）課題番号 19H01731 の助成を受けている。

# 日本型物理概念調査紙の試行版：物理 pre テスト

[A]今井章人，[B]新田英雄，[B]植松晴子，[C]勝田仁之，[D]西村塁太，[E]尾形総一朗，
[F]苅谷麻子，[G]清水滉大，[H]長倉健哉，[I]平本健太，[J]山本岳
[A]早稲田中学校・高等学校，[B]東京学芸大学，[C]筑波大学附属高等学校，
[D]東京学芸大学附属高等学校，[E]市川学園市川中学校・高等学校，
[F]東京学芸大学附属国際中等教育学校，[G]法政大学国際高等学校，
[H]神奈川県立横須賀大津高等学校，[I]神奈川大学附属中・高等学校，
[J]新潟県立長岡大手高等学校
aimaime117@gmail.com

## １．はじめに

本報告は，4 件の連続講演「日本型物理概念調査紙の試行版」4 件目である。発表者らの所属する研究グループ PEPPER では，日本の高等学校「物理基礎」「物理」の枠組みに則した概念調査紙の開発を行なっており，現在は試行版を作成して pre テストを実施したところである。本報告では，物理 pre テストの概要と，いくつかの問題の試行結果を取り上げ，そこからわかる生徒の誤概念などについて報告する。

## ２．物理 pre テストの概要

本研究で開発した物理の概念調査紙は，全 30 問で，ほとんどの問題が 5 択の多肢選択式テストである。表 1 に示すように，物理の学習範囲を網羅するようにして作成した。pre テストは令和 3 年 4 月の物理学習前の生徒を対象として，12 の学校で実施した。有効回答者数は 649 であった。

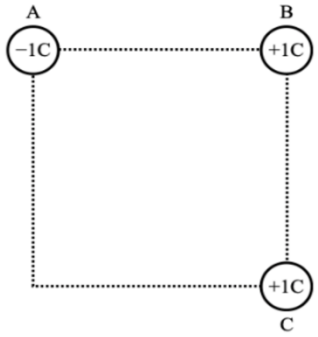
表 1　物理標準問題の構成

| 問題番号 | 単元 | 問う内容 |
|---|---|---|
| 問 1~9 | 力学 | 相対運動，放物運動，モーメント，運動量，円運動，慣性力，単振動，万有引力，運動の 3 法則(物理基礎の範囲) |
| 問 10~12 | 熱力学 | 状態方程式，熱力学過程（等温変化，断熱変化） |
| 問 13~16 | 波・光 | ドップラー効果，ヤングの実験，音波の干渉，凸レンズ |
| 問 17~28 | 電磁気 | 静電気，電場，電位，導体・不導体，コンデンサー，直流回路，電流がつくる磁場，電流が磁場から受ける力，ローレンツ力，電磁誘導，交流回路 |
| 問 29~30 | 原子 | 光電効果 |

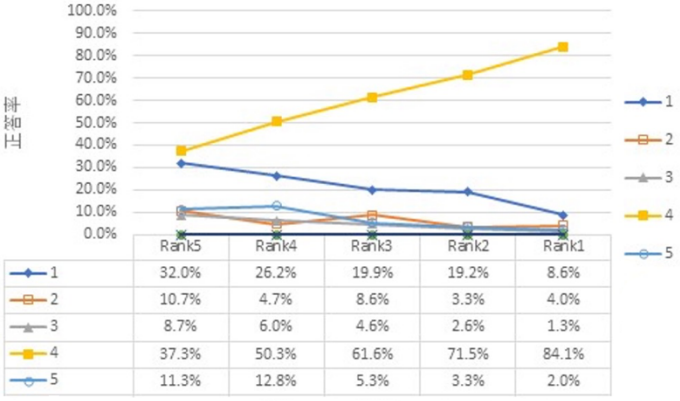
## ３．問題ごとの分析

まず，問 18 について述べる。問 18 は静電気力及び電場に関する問題である。ただし，pre でも回答できるように，「電場」という用語を回避し，静電気力だけで考えられるようにした。問題文と選択肢は，下の四角で囲まれた部分である。

18.下図のように，点電荷 A と C が同一の水平面上に固定されていて，図の位置に，点電荷 B をそっと置きました。このとき，手をはなした直後に点電荷 B の動き出す向きに最も近いものを選んでください。




(1)　(2)　(3)　(4)　(5)




| | Rank5 | Rank4 | Rank3 | Rank2 | Rank1 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 32.0% | 26.2% | 19.9% | 19.2% | 8.6% |
| 2 | 10.7% | 4.7% | 8.6% | 3.3% | 4.0% |
| 3 | 8.7% | 6.0% | 4.6% | 2.6% | 1.3% |
| 4 | 37.3% | 50.3% | 61.6% | 71.5% | 84.1% |
| 5 | 11.3% | 12.8% | 5.3% | 3.3% | 2.0% |

図 1問　18 の項目特性図

問 18 は CSEM(Conceptual Survey of Electricity and Magnetism)の問題を改題したものである。図 1 の項目特性図(正答率に応じて生徒を 5 つの群に分け，横軸にその群を並べ，縦軸に回答率を配したグラフ)からわかるように，pre テストでも上位層(Rank1)になるほど正答選択肢(4)を選んでいることがわかる。また誤答(1)は C による静電気力も引力と考えている場合で，下位層(Rank5)では正答選択肢と同程度の回答率であることがわかる。

次に，問 27 について述べる。問 27 は電磁誘導に関する問題である。

27. N 極を下向きにした棒磁石を，検流計を接続した 1 回巻きのコイル(銅線)に近づけて，その後，磁石をコイルに近づけたまま静止させました。コイルに流れる電流はどうなりますか。

(1) 時計回りに流れ続ける。
(2) 反時計回りに流れ続ける。
(3) 近づけたときだけ時計回りに流れ，静止しているときは流れない。
(4) 近づけたときだけ反時計回りに流れ，静止しているときは流れない。
(5) 電流は流れない。

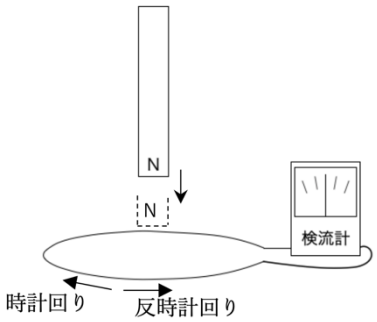
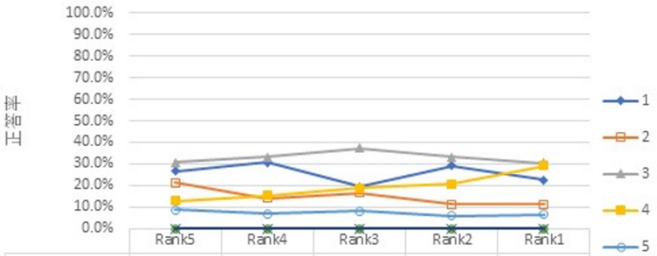



図 2 に問 27 の項目特性図を示す。図 2 より，どの得点群でも正答選択肢(3)を選んでいるものの，上位層(Rank1)では誤答(1)(4)の回答率も高い。物理履修前では，レンツの法則が適切に使用できないことや，電磁誘導が磁場の変化によることなどがわかっていないことがわかる。今後実施する post テストの実施結果にも注目していきたい。




| | Rank5 | Rank4 | Rank3 | Rank2 | Rank1 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 26.7% | 30.7% | 19.3% | 29.1% | 22.5% |
| 2 | 21.3% | 14.0% | 16.7% | 11.3% | 11.3% |
| 3 | 30.7% | 33.3% | 37.3% | 33.1% | 30.5% |
| 4 | 12.7% | 15.3% | 18.7% | 20.5% | 29.1% |
| 5 | 8.7% | 6.7% | 8.0% | 6.0% | 6.6% |

図 2問　27 の項目特性図

本研究は，科研費基盤研究（B）課題番号 19H01731 の助成を受けている。

# 英国の新しい評価制度のもとでの

# A レベルおよび GCSE レベルの物理実験・探究活動

[A] 笠潤平
[A] 香川大学教育学部
ryu.jumpei@kagawa-u.ac.jp

## １．はじめに

英国の新しい評価制度の下での A レベル（17-18 歳：2015 年受講者より新制度）および GCSE レベル（15-16 歳：2016 年受講者より新制度）の物理等の生徒による実験活動の状況について、試験実施機関の一つオクスフォード・ケンブリッジ・王立芸術協会（OCR）試験局のメンバーによる報告（Leech 他，2020）[1] 等の文献および 2020 年 1 月に来日した英国の物理教師 Herklots 氏の一連の講演・ワークショップ・公開授業およびインタビュー[2]などに基づいて報告する。導入時に様々な議論を呼んだ新評価制度は現場の教員からはおおむね好意的に受け止められているようである。（本稿では主に Leech 他の報告の主要部分を紹介し他の議論は当日の発表で補う。）

## ２．実験の評価に関わる改革の概要

今回の実験・実習活動の評価制度の変更において議論を呼んだのは、A レベル科目におけるコースワークまたは教師の立会いのもとで行われる実験活動のパフォーマンスによる直接的評価の廃止である。それに代わって導入されたのは、筆記試験における実験のスキル等に関連する問題の出題と、各科目 12 カテゴリーの実験・実習活動の修了を、最終試験の成績とは別に大学側に報告するという制度である。また、GCSE 段階においてもコースワークの評価制度への組み入れは廃止された。（その代わり、２科目扱いの“Conbined Science”で 16 カテゴリーの実験を生徒に行わせることが義務づけられている。）これらの変更の背景にあるのは、これまでの評価制度では、受験生間にうまく差がつかない、筆記試験の方がよりよく評価できるスキルを評価している場合もある、不正行為が起きやすい、学校での教育活動を縛っているなどという批判である。

## ３．教師の意見

Leech 他によれば、GCSE についても A レベルにおいても、新制度はより幅広い実験を奨励するものとなったと現場教師たちからみなされている。GCSE では、2016 年(旧制度下)では、「実験の評価制度が幅広い実験・実習を励ます」と考える者は、全回答者中 41%（授業を担当していない回答者を除く 89%を分母とする実比率で 46%）だったが、2017 年には 57%（実比率 69%）に増加した。(図２：以下、図の番号は発表スライド内の番号である) A レベルではこの傾向はさらに強く 2015 年(旧制度下)の 27%（実比率 31%）から 2017 年には 57%（実比率

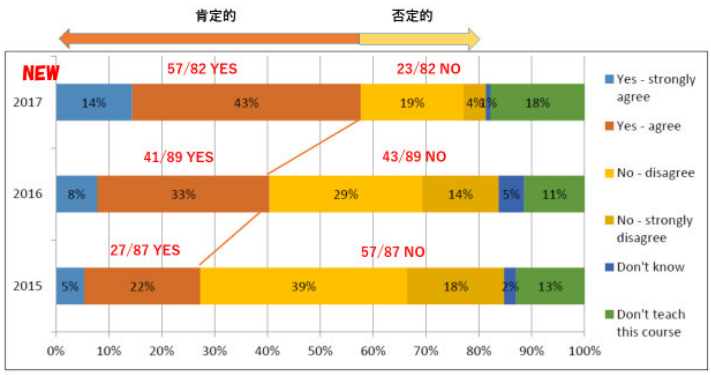



図２　GCSEで用いられている評価モデルは、あなたにとって幅広い実験・実習活動を励ますものとなっているか？

70%）に増加した。(図３)

さらに、GCSE においても A レベルにおいても、今次の評価制度の変更が理論的な教育と学習に肯定的な影響を持ったとみなしている現場教師が多い。GCSE では、2016 年(旧制度下)では、「実験の評価制度が理論的な教育と学習に肯定的影響を与えている」と考える者は、全回答者中 36%（授業を担当していない回答者を除く 89%を分母とする実比率で 46%）だったが、2017 年には 59%（実比率 69%）と顕著に増加した。また、A レベルではこの傾向はさらに強く、2015 年(旧制度下)の 50%（実比率 31%）から 2017 年には 77%（実比率 70%）に増加した。

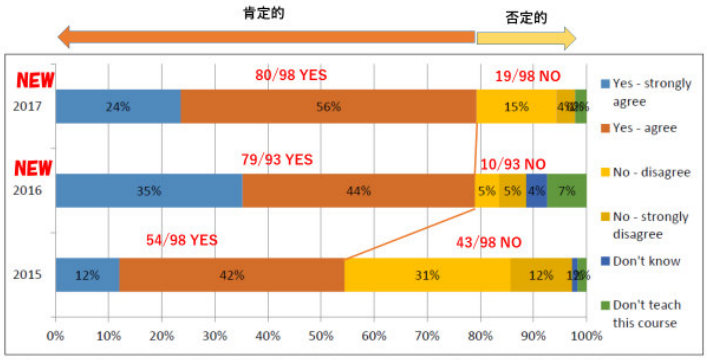


図３ Aレベルで用いられている評価モデルは、あなたにとって幅広い実験・実習活動を励ますものとなっているか？

## ４．実験ノート（ラボ・ブック）の利用

同論文からは GCSE および A レベルの実験の報告をまとめる媒体の種類、またそれは今次の評価方法の変更によって影響を受けたかもうかがえる。（図６、図７）

GCSE の実験・実習では、実験ノート（ラボブック）、A４用紙、印刷されたワークシートのうち、ワークシートの利用がもっとも多い。しかも、全体にこれらの使用傾向は今次の評価制度によって影響をあまり受けていない。

A レベルはこれとは違い、旧制度下(2015 年)では A４用紙がもっともよく使用され、ついでワークシートの利用が多く、実験ノート(ラボブック)の利用は 20%弱に留まっていたのに対して、新評価制度の導入によって、実験ノート（ラボブック）の利用が劇的に多くなり、ワークシートの利用は大きく減少している。

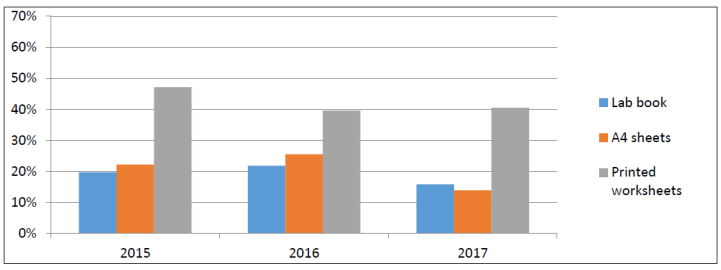


図6　GCSE 段階での実験の報告媒体

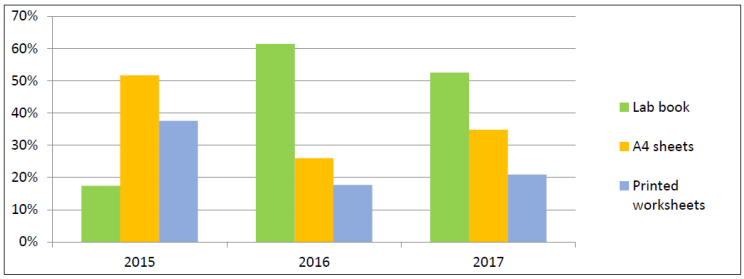


図7　A レベルでの実験の報告媒体

## 参考文献

[1] Leech et al., A longitudinal survey of teachers' attitudes to the reform of GCSE and AS/A-level sciences, 2015-2017, *SSR*, 2020(12), 102(379), 2020

[2] 笠潤平, 英国の科学教育の現状と A レベル物理における探究活動に 関する連続講演会の趣旨とその背景―ローレンス・J・ハークロッツを迎えて―, 物理教育通信,179 号, 2020

※本研究は科研費基盤研究（C）[研究課題/領域番号 16K00968（2016-2020）]の助成を受けて行われた。

# 高校生が簡単に実験・解析可能な A/D 変換器制御アプリと授業方法の開発

鷲見拓哉，猪本修
兵庫教育大学大学院学校教育研究科
p19065e@hyogo-u.ac.jp

## １．はじめに

ICT を活用した教材は，生徒自身が測定器具を組み立て，データを分析し考察することを容易にすることができる。しかし，特に電磁気や波動分野について，生徒が測定からデータの分析までを容易に行うことができる ICT 教材はあまり見られない。そこで本研究では，生徒一人ひとりの端末で，電気回路から力学・波動まで様々な実験と分析が可能な，A/D 変換器制御アプリの開発及び授業実践を行った。

## ２．本研究で開発した教材の概要

実験装置は，電気回路や圧電素子などのセンサー，A/D 変換器(Digilent 社「Analog Discovery 2」)，アプリケーションからなる(図 1)。開発したアプリケーションは，Windows，MacOS，Android，iOS に対応可能である。そのため，生徒一人ひとりの様々な端末で，実験および分析が可能である。

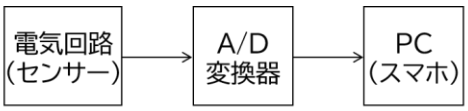



図 1　実験装置の概要

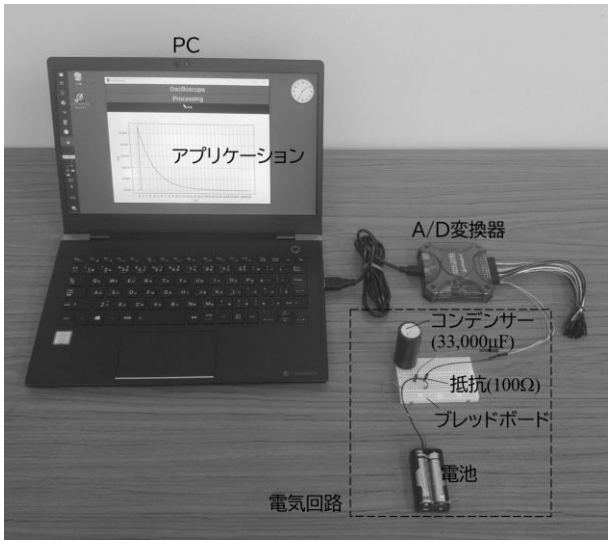



図 2　実験及び解析装置

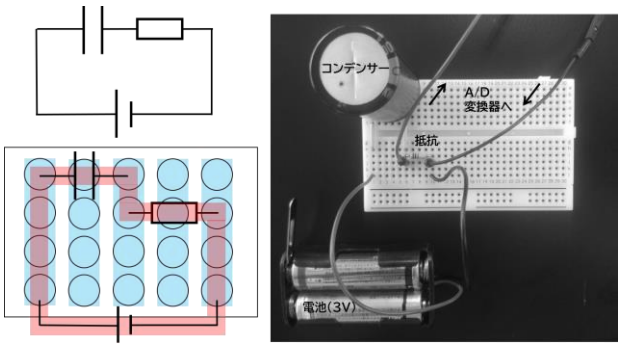



図 3　コンデンサーを含む回路の回路図と組立例

実験装置の具体例として，ここでは「コンデンサーの充電」の実験を取り上げる。実験装置全体は，図 2 のようになっている。具体的には，電気回路に，電圧計と同じ要領で，A/D 変換器を接続する。次に，A/D 変換器を PC またはスマホに USB 接続する。アプリケーションを用いて PC またスマホ上で電気回路の信号表示及び解析を行う。なお電気回路は，ブレッドボードを用いて，図 3 のように簡単に組むことができる[1]。

アプリを用いることにより，回路に流れる電流の時間変化を表示できる(図 4)。さらに，自動的にグラフの面積(電気量)が計算され，その数値が表示される(図 5)。これにより，実験による測定値と理論による計算値を比較し考察できる。また，グラフ及び電流の時間変化の数値データが csv 形式でフォルダに保存される。これらのデータを使って，生徒一人ひとりが Excel などで自由に考察を深めることができる。

また，圧電素子などのセンサーを A/D 変換器に接続することで，力学，波動(光や音など)など，様々な実験が可能である。例えば村尾(1988)は，圧電素子を用いた力積の測定方法を報告している[2]。

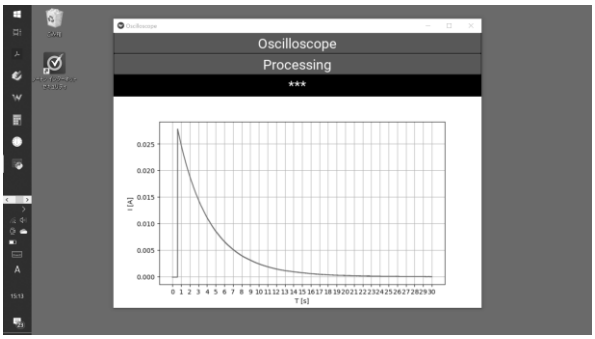



図 4　コンデンサー充電時の回路に流れる電流の時間変化を，アプリで測定した結果の画面の様子

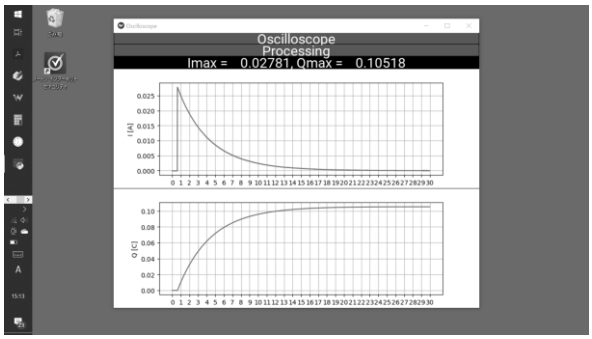



図 5　コンデンサーに蓄えられた電気量を，アプリで測定した結果の画面の様子

## 3．本教材を用いた予備実験の結果と考察

①「コンデンサーの充電」の実験

上記の方法に基づき(回路定数は表 1 の通り)実験を行ったところ,電気量の測定値は 0.11C であった。Q=CV による計算値 0.1C に対し精度よく測定できていた。

表 1　実験条件

| | | |
|---|---|---|
| 電気容量 | C | 33,000 [μF] |
| 抵抗 | R | 100 [Ω] |
| 電圧 | V | 3 [V] |

②「運動量変化と力積の関係」の実験

実験方法は，図 6 のように，小球(1.15g)を静かに落とし，床に圧電素子を固定し A/D 変換器に接続して力積を測定した。またスマートフォン等のビデオカメラを用いて，球が跳ねた高さを測定した。

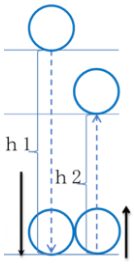



図 6

実験結果は，アプリを用いることにより，力の大きさの時間変化が図 7 のようであると分かった。球の高さは，ビデオカメラの映像をコマ送りすることより，表 3 のようであると分かった。

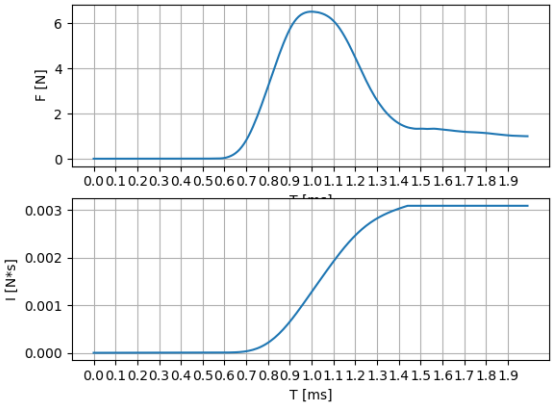



図 7　床から小球に与えられた力の大きさの時間変化(上)及び力積の大きさの時間変化(下)

表 3　実験結果

| | |
|---|---|
| 球を放した高さ　h1 | 128 [mm] |
| 跳ね上がった高さ h2 | 57 [mm] |

図 7(上)において，小球衝突後の力の大きさは 0 に戻らなかった。これは圧電素子の緩和特性によるものと考えられた。これより，力の大きさが 0 以上となる時点から波形が滑らかに変化する時点までを衝突時間，その間のグラフの面積を力積の大きさとした。力積の大きさはアプリを用いて求めた(表 4)。運動量変化は高さから計算で求めた。力積と運動量変化の大きさが精度よく一致した。

表 4　実験結果から求めた測定値・計算値

| | |
|---|---|
| 力積の大きさ | 0.0031 [N･s] |
| 運動量変化の大きさ | 0.0030 [kg･m/s] |

## 4．まとめ

本研究では生徒一人ひとりの端末を使って物理実験を行うシステムとアプリを開発した。操作の容易さと測定精度の高さから，生徒の深い学びと考察を促すことができる教材になると考えられる。授業方法についても実践を通して検討を行った。詳細は講演にて述べる。

## 参考文献

[1] 鷲見拓哉，牧山隆洋，猪本修：応用物理教育 44-1 (2020) 7-12.

[2] 村尾美明：物理教育 37-3 (1988) 190-193.

# 描画法の導入によって明らかにする子どもの考えの特徴

土佐幸子
新潟大学教育学部
stosa@ed.niigata-u.ac.jp

## １．はじめに

平成 29 年告示の小学校学習指導要領[1]では、理科の問題解決の過程において、根拠をもって予想や仮説を発想する力を育むことの重要性が唱えられた。既習の内容や生活経験を基に、根拠をもって予想や仮説を考えるにはどのような手立てが有効だろうか。学習指導要領には、学習内容の指導に当たり、事物の性質や現象について図や絵で表現することを通して、考えたり、説明したりする活動の充実が求められている。本研究では、根拠をもって予想や仮説を発想することを促す手立ての１つとして描画法を導入し、子どもの考えの特徴を明らかにすると共に、描画法の有効性について探る。

## ２．方法

本研究では、ある小学校第３学年の児童 65 名を対象として、「光を調べよう」の単元において、2020 年９月に描画法を取り入れた授業実践を行った。全８時間の単元計画を表１に示す。第２、４、７、８時の授業では、問題とする自然現象について「どうしてか」を問うことを学習課題として、一人一人の児童がワークシートに自分の考えを図と言葉を用いて表現した。本稿では、第７時の虫めがねを使って日光を小さくして紙に当てたとき、「とても明るくなりとても熱くなるのはどうしてか」という学習課題について、児童が描いた図と言葉をデータとして議論を進める。第７時に用いたワークシートの部分を図１に示す。ここまでの学習で、日光はまっすぐ進むことを明らかにしてきたことを踏まえ、虫めがねに当たる日光は矢印の付いた直線で表してある。ワークシートでは虫めがねを通った後の光を矢印の付いた直線で表して考えることを求めている。

データ分析において、児童の図と言葉を表２の基準に沿って A、B、C で評価した。

表１　「光を調べよう」の単元計画

| 時 | 学習活動 |
|---|---|
| 1 | 鏡で的当てゲーム |
| 2・3 | 光の進み方 |
| 4・5 | ３枚の鏡で反射させ重ねた光の明るさと温かさ |
| 6・7 | 虫めがねで光を集める |
| 8 | ソーラークッカー |

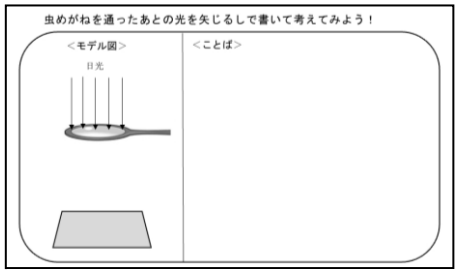



図１　第７時のワークシート（部分）

表２　第７時の評価指標

| 評価 | 図 | 言葉による記述内容 |
|---|---|---|
| A | 複数の直線を用いて，光が 1 点に集まることを表現している。 | 光が集まることに加え，虫めがねの距離を変化させることによる現象の説明が記述されている。 |
| B | 線を用いて光が集まることが表現されているが、不十分な点が見られる | 光が集まることについて記述されている。 |
| C | 光が集まることが表現されていない。 | 光が集まることについて記述が不足している。 |

## ３．結果と考察

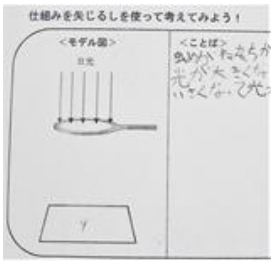
全児童（N＝65）が図と言葉による表現を記述したワークシートを提出した。このことから、描画法は根拠をもって仮説を発想することを

表３　評価別人数(割合)(N＝65)

| | 図 | 言葉 |
|---|---|---|
| A | 32(49%) | 19(20%) |
| B | 22(34%) | 29(45%) |
| C | 11(17%) | 17(26%) |

促す手立てとして有効であることが示唆された。図と言葉による表現について、評価別の人数と割合を表３に示す。図と言葉の表現の結果を比較すると、図はA評価にピークがある一方、言葉はB評価にピークがあり、言葉による表現の方が難しかったことがわかる。光が集まることに関心の焦点があり、虫めがねと紙の距離によって明るい場所の大きさが変わることには注意が向かなかった児童が多くいたことが推測される。図の表現に注目すると、約半数の33名の児童がBまたはC評価であった。特に、光が集まることが表現されていないC評価の描画11例について、その特徴を分析したところ、４つのパターンが特定された。表４にその分類と代表例を挙げる。

表４　C評価の描画の分類

| 特徴 | 空間描写なし | 集まらずに平行 | 通った後に１本 | 途中で１本 |
|---|---|---|---|---|
| 例の数 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| 代表例 |  |  |  |  |

「空間描写なし」の考えは、虫めがねを使った現象において、光源と光が当たった先だけを考えている。子どもが光を捉えるときに、このように空間における実体としての光を見過ごす傾向にあることは以前から報告されている[2]。虫めがねを通った後の光について、「集まらずに平行」という考えは、それまでの鏡を使った実験の解釈をそのまま当てはめていると推測できる。「通った後に１本」という考えは、小さくなった光が紙を焦がすほどに威力があったことに注目して発想したと推測される。代表例に挙げた図では、紙に映った黒い部分を、虫めがねのレンズの周りの枠の影と捉えている。黒い部分は虫めがねを通った光が中心に集まってしまい、光が届かなかったところであるが、この考えは幾何光学的な考えなしに理解することは難しいと考えられる。児童にとって、「黒いところ」はすなわち「影」と考えても無理はない。最後の「途中で１本」は、虫めがねと紙の距離を変えると、明るいところの大きさが変わることを認識しつつ、紙を焦がすほどの強い光は、1本の集まった光線に違いないと考えた結果であると推測される。

## ４．まとめと今後の展望

本研究により、児童の考えは、たとえ誤っていても、決してあてずっぽうではなく、既習事項や生活経験を基に新たに出会った現象を懸命に説明しようとした結果であることが示唆された。これは描画法を用いることの１つの成果と考えられる。児童の誤った解釈を正していくには、実験的に確かめることが必要であると考える。例えば、「通った後に１本」や「途中で１本」の考えを正すには、虫めがねと紙の距離を変化させ、明るいところの大きさが徐々に変化することによって示すことができるだろう。今後、児童の正しい解釈を阻害する要素をさらに探っていきたい。

## 参考文献

[1]文部科学省：小学校学習指導要領解説【理科編】, 2017年

[2] Driver, R., Tiberghien, A., & Guesne, E. (Eds.) : Children’s ideas and the learning of science, Open University Press, 1985年

# オンデマンド型動画配信と対面授業を融合した アクティブ・ラーニングを支援する物理授業の実践

[A]野原大輝，[B]谷口和成，[A]辻秀人
[A]京都教育大学附属高等学校，[B]京都教育大学
dnohara@kyokyo-u.ac.jp

## １．はじめに

次期学習指導要領では，学習評価の観点の１つとして「自らの学習を調整しようとする側面」とあり，生徒の学習習慣が確立するような適切な宿題を課すように述べられている[1]。一方で，日本の高校生の家庭学習の状況について，第５回学習基本調査報告書[2]によれば，大部分が【試験の前にまとめて】行い，その内容は【復習中心】で【問題演習】や【繰り返し書く】であり，高校教育において，宿題は授業の内容の確認的位置づけで，授業との連動性は低いことが伺える。

近年，大学教育を中心にその効果が報告されている授業形態のひとつに反転授業がある。その特徴として，学習者は対面授業の前に，授業者等が作成した動画（オンラインが中心）で基本事項を宿題として予習し，対面授業では予習動画で得た知識を活用しながら問題解決型の学習や協働学習を通じて，深い理解や知識の応用力を身につけるといった，宿題と授業が連動したアクティブ・ラーニング（AL）の形態になっている点が挙げられる[3]。しかしながら，このような AL 型授業を高校教育で実践する場合，(1)ネットワーク環境の不備や(2)授業時数の制約による生徒が主体的に活動する時間の不足[4]，また物理学習においては(3)生徒の学習に対する動機づけの低さ，等の問題も指摘されている[5]。ここで，昨年度のコロナ禍により，高校現場において休校対応，学習の遅れや継続性を保障するために，オンライン（リアルタイム or オンデマンド）型の授業が急速に普及した。したがって，ハード面において AL 型授業の準備が整いつつあるが，依然として(2)と(3)の問題は残されている。

そこで本校では，昨年度，コロナ禍でさらに厳しくなった(2)を解決するために本校ホームページ等のオンラインを活用して宿題を提示し，(3)の支援として１週間ごとに課題を提示することで生徒に学習の見通しを持たせる支援をした。その課題は学校再開後の対面授業（オフライン）において AL を実現するための予習（たとえば，ILDs の各課題の予想）として位置づけ，オンデマンド型で提示した。実際に，学校再開後の授業では予習を前提として AL 型授業を行った結果，生徒の学習活動（概念理解および動機づけ）に一定の効果を得た[6,7]。しかしながら，このような学習形態が休校期間と学校再開直後の実践に留まり，すなわち post コロナに対応できていないことが昨年度の課題となっていた。

本年度は，with/post コロナも見据え，予習のツールとしてのオンデマンド型動画の配信と対面授業を融合した物理授業を実践することにより，年間を通して通常授業における AL の実現において課題とされる“生徒が主体的に活動する時間[5]”を確保し，物理概念の理解に伴う学力の保証と，予習して授業に臨むことの意義づけ・習慣化の両立を目指した。

## ２．実践の概要

時期：2021 年 4 月～6 月
対象：国立大学附属高校　２年理系物理基礎１講座　26 名
学習内容：力学分野

対面授業における中心課題（AL を促す問い）に関連する基本事項の説明動画（講義型）を事前課題（予習）として 12 本配信（表１）し，各回の対面授業においてそれと連動させた AL 型授業を実践した。動画の視聴は必須としなかったものの，生徒は予習として事前に授業

者が作成した動画を 1 回の授業あたり 1 本（7 分～9 分）視聴して対面授業に参加していた。

実践の評価として，力学概念調査（FCI）を 4 月上旬（事前）と 7 月上旬（事後）に実施し，あわせて実践後に事前課題と対面授業に関する意識と学習の取り組み状況について調査した。

表 1　動画の内容

| | |
|---|---|
| 1 | 速さ |
| 2 | 速度・変位 |
| 3 | 平均の速度・瞬間の速度 |
| 4 | ベクトル |
| 5 | 加速度 |
| 6 | 等加速度直線運動(演示実験) |
| 7 | 等加速度直線運動の式 |
| 8 | 自由落下 |
| 9 | 斜方投射 |
| 10 | 運動の法則（演示実験） |
| 11 | 摩擦力 |
| 12 | 圧力・水圧 |

## 3．実践の結果と考察

FCI の実践前後の結果を表 2 に示す。事前・事後ともに欠損のないデータ（N=23）より，事前・事後の平均値(%)から規格化ゲイン〈g〉[8]を算出すると〈g〉=0.34 となり，概念理解に一定の効果が得られたことを示唆する結果を得た。

表 2　FCI 事前・事後統計

| | N | 最小値 | 最大値 | 平均値(%) | 〈g〉 | 標準偏差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FCI事前 | 23 | 6 | 22 | 12.5(42.1%) | 0.34 | 4.81 |
| FCI事後 | 23 | 11 | 30 | 18.3(61.5%) | | 5.07 |

右図は，実践後の学習の取り組み状況（①②）と意識調査の結果（③）を示している。図より，65%の生徒にとって動画配信が予習への意識づけとなっていると考えられる。また，54%の生徒が動画による予習が「授業で役に立った」と回答し，さらに，どのようなところが役に立ったか自由記述で求めたところ，「復習のツールにもなる」「何度も見返せる」などの回答が確認された。つまり，本実践における動画配信が，予習することの動機づけとして有効に働いただけでなく，一部の生徒には AL 型授業において理解を支える「ふり返り（メタ認知）」を促す効果があることが確認された。

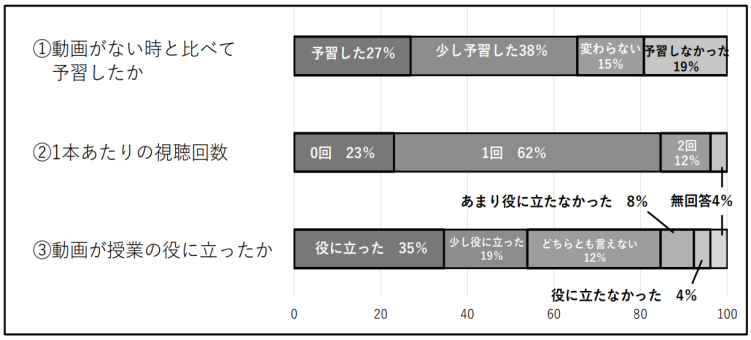



図　意識調査の集計結果（N=26）

講演では予習としてのオンデマンド型授業と対面授業のそれぞれの接続と詳細，生徒の動機づけの変容についても報告する。

## 4．今後の展望

２学期以降も熱とエネルギー，波動の学習内容について予習としてのオンデマンド型授業と対面授業を融合させた物理授業を継続する。

## 参考文献

[1] 中央教育審議会：児童生徒の学習評価の在り方について（報告）(2019).
[2] ベネッセ教育研究所：第５回学習基本調査報告書(2015).
[3] 森朋子「反転授業のデザイン」(2016)，化学と教育，64 巻 12 号，pp596-599.
[4] 文部科学省，高等学校の教育課程等に関連する資料（データ集），平成 27 年.
[5] 山崎敏昭，谷口和成，他，物理教育 61 巻 1 号，pp12-17(2013).
[6] 高橋幸太郎，谷口和成，野原大輝，日本物理学会　2020 秋季大会概要集　8pN1-1
[7] 野原大輝，高橋幸太郎，谷口和成，日本物理学会　2020 秋季大会概要集　8pN1-2
[8] R.Hake, *Am.J.Phys.***66**, 64-74(1998).

# 光子計数実験で始める量子力学入門授業案の開発

[A]阿部春樹、[B]舟橋春彦
[A]京都大学大学院人間・環境学研究科、[B]京都大学国際高等教育院
abe.haruki.88c@st.kyoto-u.ac.jp

## １．はじめに

ファインマンの講演録『光と物質のふしぎな理論』[1]を底本に、量子力学入門授業案を作成している。原著者一流の語り口で問題意識を巧みに掻き立てる底本論旨を踏襲しつつ、板倉聖宣が考案した仮説実験授業に倣い選択肢を伴う問題群を整え、教室で結果を確認できる実験を具体化した。

第１部でフォトンカウンタを導入し、光が数えられる「粒」であることを前面に押し立てる。光の部分反射を扱い「光子」の従う「ふしぎな理論」(量子電磁力学)の「奇妙なルール」(経路積分)に遭遇してもらう。第２部ではこの「ルール」がもたらす「常識に反する予想」を検証する。本発表では第２部を中心に授業案とその実験授業の結果について報告する。

## ２．仮説実験授業

科学史や教育学・理科教育史の研究から、板倉聖宣(1930-2018)は科学的認識の成立条件として、**「全て認識というものは、実践・実験によってのみ成立する」**・・・・・・・・・・・・・・・・・(＊)と提唱した[2]。実験を通じて、初めて科学的な認識が成立するというものである。ここで実験とは目的意識的に対象に働きかけ予想を確かめる活動のみを指す。この理論(＊)を検証し応用する方策として、板倉は「仮説実験授業」を組織した。仮説実験授業は、問題文・予想・討論・実験という４つの段階を授業の中で何問か積み上げ、科学上の最も基本的な概念や原理・原則を教える。仮説実験授業の方法論を実現するために準備された総合的な教材が「授業書」である。生徒の評価に依拠して授業の成否を判断し、その再現性を確立するまで多くの実験授業と改訂を重ねている。

## ３．ファインマン『光と物質のふしぎな理論』を踏襲した授業案

ファインマンが一般大衆に量子電磁力学を紹介した 1983 年の講演が元になっている。この講演は光の粒子描像を押し出して話を進めている。この授業案開発では、当時は不可能であったであろうその場での単一光子計数実験を比較的安価で簡便に構成できており、「光子」のイメージづくりを促進する。次いでファインマンが紹介した「奇妙なルール」は、「鏡の入射角と反射角は等しくない」「光は真っ直ぐ進まない」という常識に反する予想へと誘う。この「ルール」に従う光子の姿は「自然の性質のあるがままの姿、つまりどうも理屈に合わない変てこなその姿」[1]であり、実験と予想を繰り返すことで自然のそういった姿と受講生を対峙させることを目指した。

講演におけるファインマンの問いかけや実験方法の提示は上記(＊)の考え方と親和性が高い。仮説実験授業に限らずどんな科学的認識を導く行為も(＊)は指導原理になる。このことから、この授業案の題材は「最も基本的な」ことではないが、仮説実験授業のように選択肢を設けた問題群を整え教室で結果を確認できる実験を具体化するという方策を取った。

## ４．「ルール」に従う光子の「変てこな姿」を検証する

第１部『光の正体』で光子の従う不思議な「ルール」の「神託」を受け、この「ルール」の妥当性を、予想と実験を繰り返して第２部『光の粒子』で検証する。

導入された「ルール」に則れば、図１で光源Ｓから出た光子はＡ～Ｍ点のあらゆる経路を通って

反射し、検出器 P に達する確率（振幅）を持つ。「ルール」に導かれたこのイメージは、光は入射角と反射角が等しくなるようにのみ反射するという一般的な常識に矛盾している。受講生は「ルール」に従う粒子描像と反射のイメージとの背反に葛藤しながら実験を見守り結果を受け容れ自らの光のイメージを省みることになる。

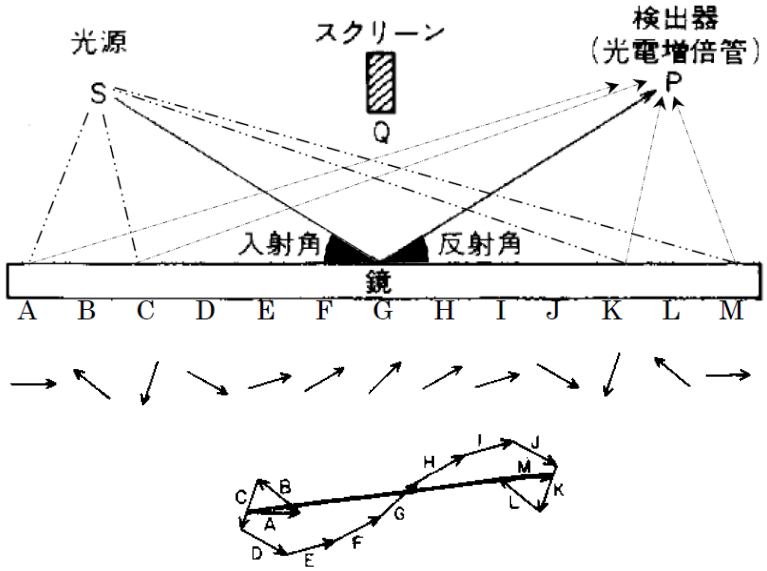



図 1（底本[1]図 19、図 20、図 24 を一部改編）

## ５．実験授業と得られた感想

文系・理系の双方を含む高校 1 年生 1 クラス約 20 名（第Ⅰ群）、主に文系の大学 1 回生 2 クラス計約 70 名（Ⅱ）、理系文系合同ゼミの大学 1 回生 1 クラス 9 名（Ⅲ）、理系の大学生・大学院生 3 クラス計約 40 名（Ⅳ）を対象に実験授業を行った。第Ⅱ群から「理屈に合わないと思うことを容易に信じられないのは当然としても、実験して、その結果と対応するようなものを受け入れていくのが大事だと感じた。」、第Ⅲ群から「直観的にありえないと思ったことでも、理論と実験が一致すればそれは正しいのだということを身をもって理解した。」を得た。他にも好意的な感想を多く得られた。

## ６．授業案の展望

量子力学を題材に、日常で培われる直観や常識に反する自然の性質を受け入れ、物理学・科学との距離を縮めてもらうことを目指した。ファインマンの講演録に基づき光の粒子性を前面に押し出した授業案を構成し、実験授業を行った。感想から、理論と実験が相補的に発展していく物理学、ひいては科学の世界観の一端に触れてもらえたと考えている。

予想と実験を繰り返してよりよい認識に改めていくプロセスは、物理学・科学に留まらず、他分野の研究でも市民の社会活動でも適用されるべきものである。既存の常識と葛藤する機会を与える題材として量子力学は適当であり、今後は量子力学以外の題材も考えていきたい。

**参考文献**　[1] R. P. ファインマン(釜江常好 大貫昌子訳)
『光と物質のふしぎな理論　わたしの量子電磁力学』岩波現代文庫(2007).
[2] 板倉聖宣『科学と方法』季節社(1969)収録「科学的認識の成立過程」.
[3] R. P. Feynman, *QED: The strange theory of light and matter*, Princeton Univ. Press (1985).

# 水面波の干渉シミュレータの開発と授業実践

[A]稲垣惇史、[B]梅田貴士
[A]広島大学大学院教育学研究科，[B]広島大学大学院人間社会科学研究科
d194760@hiroshima-u.ac.jp

## 1．はじめに

高等学校の「物理」の波動の分野では，水面波の干渉を扱う。この単元では，水波投影機等による実験（図１）により現象を観察させる。教科書などでは，図２のような，波源Ａ，Ｂから波面が同心円状に広がる図（実線を山の波面，点線を谷の波面）を用いて説明している。また，図３，４のように，波源Ａ，Ｂから点Ｐ，Ｑのそれぞれに達する波を描いた図（水面を横から見たような図）も示されている。これに加え，アニメーションやシミュレーションによる動的な教材が学習に用いられる。

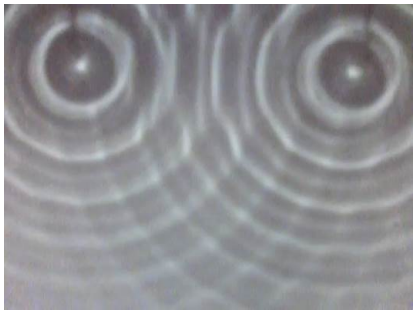


図１

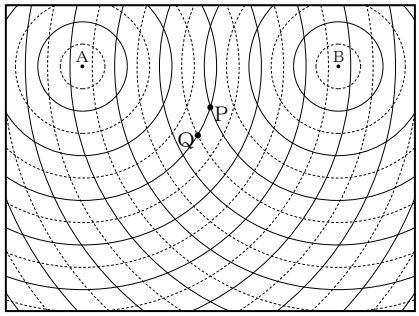



図２

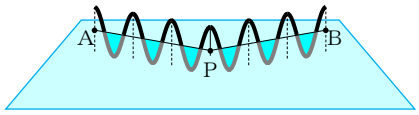



図３

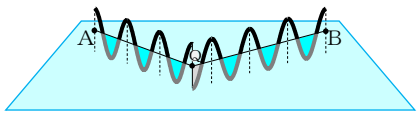



図４

水面波の干渉の学習における，私が考える課題は以下の４点である。

①水波投影機では定量的に考察を行うことが難しい
②図２のような上から見た図と，図３，４のような横から見たような図を用いて説明するため，水面を空間的に捉える必要がある
③水面の変位が時間とともに変化する
④水面波の波長や周期，波源の位置などのパラメータがあり，それらが変化することがある

これらを克服するためには，図１～４のような図を任意の視点から示せ，時間を制御でき，且つ，各種のパラメータを調整できるものが必要だと考えた。しかし，従来の教材では特定の場面しか表現できないものや，表現方法の種類が少なかったため，新たな教材の開発に着手した。本研究では，水面波の干渉を学習するためのシミュレーション教材を開発し，その教材を用いた授業実践を行い，その有効性を検討することを目的とする。

## 2．教材について

開発したシミュレーション教材[1]は，授業で用いる実験や水面を表した図（図１～４）のような描写ができるようになっており，図１の実際の水面の様子を描いた図５のような描写ができる。また，図２に対応する同心円の表示（図６）や，図３，４に対応する波源から観測点にそれぞれに達する波の表示（図７）ができ，どの場合でも画面の白い余白部をドラッグ（スワイプ）することで，任意の視点から観察した水面をシミュレーションすることができ（図８，図９），拡大や縮小もマウスのスクロール（タブレットではピンチ）を用いて自在にできる。また，観測点はピンをマウスでドラッグ（タブレットではスワイプ）することで容易に観測点を移動させることだができる。他にも，腹線，節線の表示や（図

10，11），観測点の変位を表した浮き球の表示，波源が逆位相での干渉の場合や片側の波源だけの表示もできる。また，全ての場面において，時間を制御することができるので，再生や一時停止を繰り返しながら，水面を観察することができる。

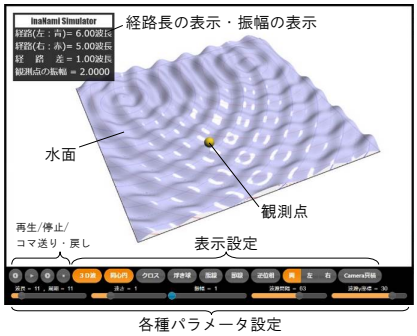



**図５**　教材概要

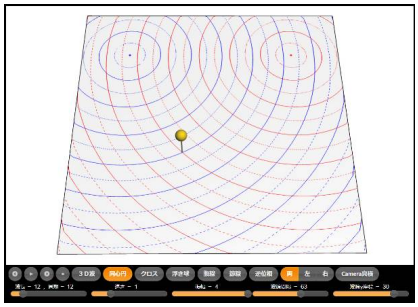


**図６**　同心円の表示

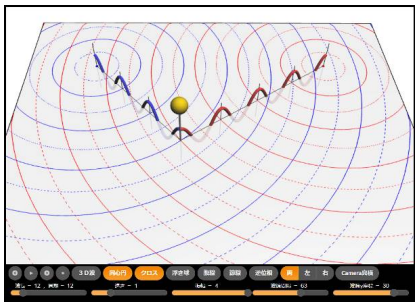


**図７**　波源から観測点にそれぞれに達する波の表示

各種パラメータを変更することができるスライダーを画面の最下部に設けた。水面波の干渉の実験では，振動子を水面にあてることで波を発生させる。その際，変更できる要素は，振動子の周期や振幅，位置である。また，水深によって水面波の速さが変化する。そのことを踏まえ，シミュレーション教材でも波の「周期」，「速さ」，「振幅」を変更することができ，「波源の位置」も調節することができようにした。ただし，干渉条件を考える上で，周期を基準にして考えることはなく，波長を基準にして考えるため，スライダーの表記には「波長」と「周期」を併記することにした。

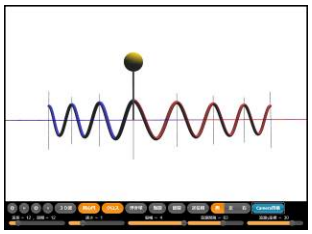


**図８**　図７を真横から

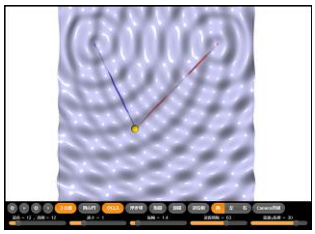


**図９**　図７に３Ｄ波を表示して真上から

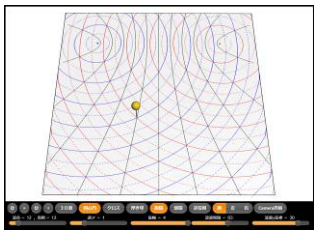


**図 10**　腹線の表示

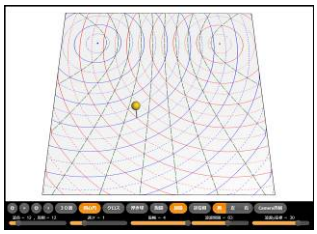


**図 11**　節線の表示

## ３．授業実践

学習者（高等学校２年次生 31 名）を対象に 50 分×４回（連続ではない）の授業で開発したシミュレーション教材を用いて取り組ませた。授業を行ってみて率直な感想としては，「圧倒的に教えやすい」という感覚を得た。３つほど挙げてみる。ひとつ目は，教科書等に載っているような図で表現でき，説明がしやすい。また，説明の際に，時間を制御できる利点と，各種の表示を切り替えられる利点は大きい。二つ目は，その場の対応力に優れているという点である。これは，説明したい場面や状況に応じて即座に描写できるので，授業準備の労力を削減できる。また，生徒が疑問に思った場面や状況にも即座に応じることができる。これは三つ目と繋がってくる。三つ目は，生徒主体の学習プログラムが作りやすいという点である。教員側はある程度課題を設定しておけば，生徒は自分のペースで理解を深めていくことができると感じた。本発表では，学習プログラムや授業実践の有効性等についての詳細を報告する予定である。

## 参考文献

［1］水面波の干渉シミュレータ教材　http://d-o-b.sakura.ne.jp/kansho/Nami_kanshou_2.0.html

# 大学生の単振動に関する事前調査からみるグラフ理解とその困難

[A]松岡広海、[B]長谷川大和、[C]右近修治、[A]興治文子
[A]東京理科大学大学院理学研究科、[B]東京工業大学附属科学技術高等学校、
[C]東京都市大学理工学部
1720519@ed.tus.ac.jp

## １．はじめに

物理現象を深く理解する上での困難の１つは、物理現象を表す表現が多様であることにある。物理現象を定性的理解から定量的理解へと深める際に、物理現象は図や数式、グラフといった多様な表現があり、その対応関係をしっかりと把握することが重要であるが初学者にとって表現を変換することはそれほど易しくない。また、日本の高校の基本的なカリキュラムは、数学と物理で進度の調整などはなく、科目横断的な要素も薄いため、学習者が個々に独立した科目だと捉えていることも少なくない。

## ２.研究目的

本研究では、現象のグラフ理解が求められる単振動に焦点を当て、学習者が物理現象とそれを表現したグラフとの対応関係をどの程度把握できているかを調査し、その困難について明らかにすることを目的とする。

## ３．研究方法と研究対象

単振動におけるグラフ理解の困難について、Somroob らは調査問題を作成し、視線追尾装置を用いた研究を行っている[1]。本研究では、彼らの調査問題を基にして調査問題を修正したもの、さらに新規作成した問題をオンラインで理系大学生に掲示し、解答時間を 20 分に制限したうえで調査を行う。問題は 12 問で、復元力や位相など、単振動の基本的な概念を中心に、グラフの読み取りに関する問題を多く取り入れた。表１は、問題の内容を示すキーワードと、問題の表現形式と選択肢の表現形式を示している。オンラインで調査を実施したため、不正防止の観点から問題番号は割り当てず、出題する順番をランダムにする機能を用いる。

表１：全問題のキーワードと問題と選択肢の表現形式

| キーワード | 復元力 | 2 倍引っ張る | ばね定数 | $v-t$グラフ | 軸の変更 | 加速度最大 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 表現形式<br>（問題→選択肢） | グラフ<br>→グラフ | グラフ<br>→グラフ | グラフ<br>→グラフ | 文章<br>→グラフ | グラフ<br>→グラフ | 文章<br>→グラフ |
| キーワード | $x-t$グラフ | 力学的<br>エネルギー | 変位、速度、<br>加速度 | 初期位相の値 | 運動の<br>第 2 法則 | 式とグラフの<br>対応 |
| 表現形式<br>（問題→選択肢） | 文章<br>→グラフ | 文章<br>→グラフ | グラフ<br>→文章 | 文章<br>→グラフ | 図<br>→数式 | グラフ<br>→数式 |

調査対象は、微積分を用いた入門物理学の授業を受講している大学生 2 クラス計 204 名である。1 クラスは数学系学科 85 名で、もう 1 つは化学系学科 119 名である。

調査を実施した 2021 年度の授業は全 15 回で主にニュートン力学の内容を扱い、対面とオンラインを同時に行うハイフレックス形式で実施されている。数学系学科と化学系学科は別々の 2 クラスであるが、どちらも著者の 1 人が教え、授業内容および課題内容はすべて同じである。高校までの物理学の履修歴との相関を検討するため、初回にアンケートを実施する。第 7 回の授業で単振動を扱うため、その前回にあたる第 6 回終了後に授業前の事前調査を行う。

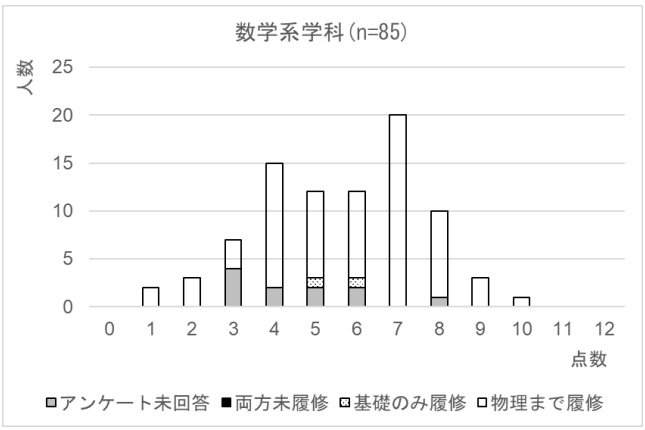
## ４．結果

調査問題 12 問を各 1 点として集計した結果、204 名の平均点は 4.8 点であった。

高校までの物理学の履修歴の調査と、単振動の調査の両方から回答が得られた 183 名のうち、高校での物理の履修状況別に見てみると、「物理基礎」まで履修した 23 名と「物理」まで履修した 157 名には、正解数に有意な差があった。最高得点でも比較しても、「物理基礎」まで履修した学生は 7 点、「物理」まで履修した学生は 10 点となっている。平均点はそれぞれ 3.0 点、5.2 点である。

学科別にみてみると、数学科の平均点が 5.6 点なのに対し、化学系学科は 4.2 点で、カイ 2 乗検定にかけてみても有意差があることがわかる。図 1 に数学系学科 85 名、化学系学科 119 名についてそれぞれの高校までの物理学の履修別ごとの得点分布を示した。

それぞれの問題の正解率に注目してみると、すべての問題で数学科が上回っており、正解率の差が 10 ポイント未満だったのは 12 問中 5 問だった。正解率の差が大きい問題は、高校で学習する公式からアプローチして解答に到達できる問題もあり、数学が得意かどうかも影響したように考えられる。実際に、式とグラフが対応できているかをみる問題では化学系学科が正解率 5 割なのに対し、数学系学科は 7 割であり、物理現象とグラフの対応関係を把握するには、数式との対応も関係していることが示唆される。



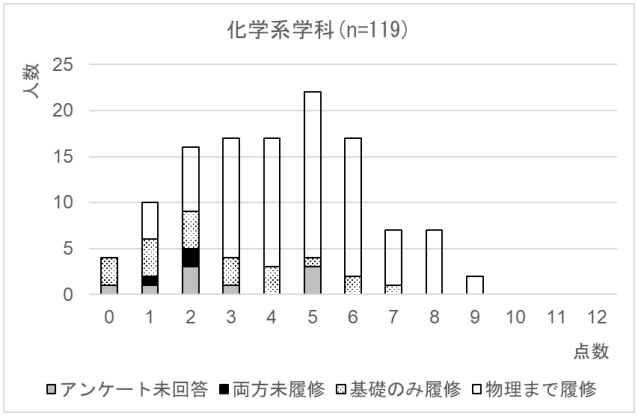




図 1（左）数学系学科 85 名の高校までの物理学の履修別ごとの得点分布、（右）化学系学科 119 名の高校までの物理学の履修別ごとの得点分布

## ５．おわりに

本研究では、物理現象とグラフとの対応関係の理解には、高校までの物理学の履修状況や数学が得意かどうかの両方が関係していることが示唆された。今後は調査問題に記述式を追加したり、実施方法に視線追尾装置を導入したりすることによって、より詳細な学習者の思考を読み取れるようにすることで、物理現象のグラフ理解における具体的な課題を明らかにしていきたい[2]。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K02890 の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] S. Somroob and P. Wattanakasiwich : "Investigating student understanding of simple harmonic motion" IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **901** (2017) 012123 (5pages).

[2] 松岡広海，尾崎龍之介，長谷川大和，興治文子：「単振動のシミュレーション教材による学習者のグラフ理解の有用性とその課題」, CIEC 春季カンファレンス論文集 **12** (2021) 51-56.

# 電磁気学における起電力

原田恒司
九州大学基幹教育院
harada@artsci.kyushu-u.ac.jp

## １．はじめに

電磁気学は物理学の基礎科目として重要な位置を占めており、高校、大学初年次、さらには理工系の専門課程においても、繰り返し学ばれている。しかし、電磁気学は力学に比べるとずっと学びにくい。その理由の一つとして、電磁気学には力学には現れなかった特有な概念があり、その概念の理解・習得に困難が伴うことが挙げられる。特にこの点に関しては、教科書等にも混乱が見られ、学習者の障害となっている場合がある。本講演では、そのような例として起電力に注目する[1]。

## ２．起電力の概念

起電力という名前自体が非常に誤解を招きやすいが、多くの教科書では他の言葉で言い換えることはせず、この歴史的な名前を用いている。

起電力とは電荷を正負に分離したり、回路に電流を流し(続け)たりする原因となるものである。そのためには電荷に対して仕事をして、電位の低い位置から高い位置に移動させる必要がある。この電荷の移動は、(誘導起電力の場合を除き)電磁気学の対象となる系の「外部」から供給されるエネルギーを用いて行われる。起電力は(閉回路に対して)単位電荷に対してなされる非静電的な仕事として定義される。電荷 $q$ を移動させる非静電気力 $\vec{F}_{ns}$ を導入すると起電力 $\mathcal{E}$ は

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\oint \vec{F}_{ns} \cdot d\vec{r}$$

と表される。ただし、積分は閉回路にわたってとられる。この式は誘導起電力の場合にも正しい。この表式はあまり馴染みがないかもしれないが、この(またはこれと同等な)定義を用いている教科書・論文は多数存在する[2]。標準的な定義と考えてよい。

起電力を議論する際に**電位差**との区別は重要である。クーロン力は保存力なので、静電場に対して、任意の経路に沿った線積分はゼロになる。**電位**はこの性質を用いて導入されるものである。起電力に現れる非静電気力 $\vec{F}_{ns}$ はもちろん、静電場や電位、電位差とは無関係である。しかし文献では「起電力は(電流が流れていないときの)電池の端子間電位差である」という表現がよく用いられ、これが起電力と電位差という全くの別物を混同させる原因となっている。電池の端子間電位差は電池の起電力の結果として生じたもので、これは起電力の定義にはならない。起電力と電位差との違いを、大学生のほとんどが理解していないという研究結果がある[3]。

## ３．教科書における起電力の取り扱い

現在高校で用いられているいくつかの教科書を調べてみると、ほとんどの教科書が電池の端子間電位差 $V$ と起電力との関係

$$V = \mathcal{E} - rI$$

(ただし $r$ は電池の内部抵抗、$I$ は電流)について言及している。しかしこれを(電池の)起電力の定義とは認めがたい。

起電力と電位差との混同は、化学電池の場合、ある程度仕方のないものかも知れないが、起電力に対する適切な説明がないことは、誘導起電力の場合により深刻な事態を引き起こす。実際、「コイルの内部の磁場の変化によってコイルに電圧が生じる現象を電磁誘導といい、生じた電圧を誘導起電力という」という説明をしている教科書が複数存在する。これは誘導起電力（これに対する閉回路の線積分はゼロではない）と電位差=電圧（これに対する閉回路の線積分はゼロ）とを混同するという誤りを犯している。

大学レベルの教科書でも同様の誤り・混同は多い。

## ４．提案

線積分を用いた起電力の定義を導入するのは、初等的なレベルでは困難かもしれない。しかし、その場合には電源（仕事源）が電荷 $q$ にする仕事 $W$ を用いて、

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q}$$

によって定義すればよい[4]。この際に仕事 $W$ が静電気力とは無関係であることを強調すれば、電位差との混同は起きないだろう。例えば文献[5]ではヴァンデグラフ起電機をモデル化した“mechanical battery”を導入して起電力を説明している。この場合、電源のする仕事 $W$ は力学的な仕事として計算できるので、化学電池よりもわかりやすい。

## 参考文献

[1] 原田恒司,基幹教育紀要 7,19 (2021): https://doi.org/10.15017/4363024 に基づく。

[2] 例えば D.J.Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 4th Ed.(Cambridge Univ. Press) (2017) ; 加藤正昭,「電磁気学」(東京大学出版会) (1989) ; R.N.Varney and L.H.Fisher, Am. J. Phys.48,405 (1980).

[3] I.Garzón, M.DeCock, K.Zuza, P.van Kampen, and J.Guisasola, Am. J. Phys.82,72 (2014) および K.Zuza, M.DeCock, P.van Kampen, L.Bollen, and J.Guisasola, Eur. J. Phys. 37,065709 (2016).

[4] D.Halliday, R.Resnick, and J.Walker, *Fundamentals of Physics*, 9th Ed.(Wiley) (2011) ; 中山正敏,「電磁気学」第 26 版 (裳華房) (2008).

[5] R.W.Chabay and B.A.Sherwood, *Matter and Interactions*,4th Ed.(Wiley) (2015).

# 大学での演示実験を交えたオンライン力学授業の取り組み

関 義親
大阪電気通信大学 数理科学教育研究センター
seki@osakac.ac.jp

2020 年から 2021 年前期にかけて，物理初修者も含む医療科学系 1 年生を対象として，力学の入門的授業をオンラインで担当した。授業は 1963 年に板倉聖宜が提唱した「仮説実験授業」[1] のいくつかの「授業書」[2-4] に基づいて運営している。仮説授業実験では，授業書の実験に関する「問題」に対して「予想」を立て，「理由」を出し合って議論し，「実験」によって結果を確かめていくことを繰り返しながら，段階的に物理概念・法則への理解を深めていく構成をとる。

平時であれば教室で演示する「実験」は，予め 1-2 分程度の動画に収録し，YouTube 上で視聴できるようにした。リアルタイムでの演示も検討したが，一般的な web 会議サービスでは映像のコマ落ちが生じやすく，とくにタイミングが重要となる運動学の実験には不向きである。また，実験によっては，クラス全体で周期などのカウントをとることによって，教室で印象的に現象の法則性が実感できるように設計されたものもある。そのような実験については，カウント用のガイド音を動画に加えたり，スロー再生によって時間測定ができるように編集を施したりすることによって，個別視聴でも目的意識を保てるようにした。これまでに，ティーチングアシスタントの協力のもと，自由落下，振り子，斜面上の運動，水平投射，力のつり合い，力学台車と運動方程式などをテーマとする実験動画を合計 60 本程度作成した。

実験結果についての「予想」とその「理由」はアンケートツール（Google フォーム）を用いて集計し，その場で共有できるようにした。教師が挙がってきた「理由」を読み上げ，その分布状況をいったん系統別に整理することによって，当初は低調であった議論にも改善が見られた。

本講演ではこれらの取り組みについて報告するとともに，この経験を今後再開される対面授業へ活かしていくことも検討したい。

## 参考文献

[1] 板倉聖宜「仮説実験授業の ABC」仮説社
[2] 授業書「落下運動の世界」仮説社
[3] 授業書「ばねと力」仮説社
[4] 授業書「力と運動」仮説社

【メモ】

# 一人一台端末を活用した「音の三要素」に関する教育実践

出村雅実
流通経済大学教育学習支援センター
demura@rku.ac.jp

## １．はじめに

A 大学で開講している教養科目「リベラルアーツ演習」にて、STEAM 教育の一環として教育実践を行なった。A 大学では一人一台端末環境が整備済のため、GIGA スクール構想の先行研究として PC および携帯端末を活用した教育実践を行なった。

対象学生達は中学校での既習事項である音の三要素について定着度が低かったため、音に関する講義を 2 回実施した。その後、動画作成課題を出題した。事前・事後の試験の結果を分析し、音の三要素について教養として身についたと考察できたため、動画作成課題の有効性が示唆された。

## ２．実践の概要

2.1 実践の対象

A 大学 B キャンパスで開講している「リベラルアーツ演習」受講生 37 名に対して実施した。この科目は、2 年次の必修科目であり、受講者は教務課により自動的に割り振られている。高校時代は文系であった学生が大部分を占めており、中学校での既習事項である「音の三要素」について定着度が低かった。

2.2 実践内容

この科目は 2 名の教員による分担講義で、前半 8 回・後半 7 回で担当者が入れ替わる。担当分の 8 回ないし 7 回中 2 回分を「音の学習」として実施した。2 回中、1 回分を音の単元として扱った。加えて別の回に動画作成課題の意義について説明を行なった。動画作成課題は「音の三要素と音楽の三要素について学習する動画を作る」とした。

## ３．実践結果

実践の事前・事後に試験を実施した。事前試験は第 1 回講義時の課題として実施し、事後試験は第 8 回に中間試験として実施した。ともにオンデマンド試験とし、問題文も同じものとした。問題文は、「音の三要素と音楽の三要素について、なるべく詳しく答えてください。」である。自由記述とし、字数制限などは行わなかった。

表 1 は、解答に記載された正答と代表的な誤答の一覧である。この表から Hake[1]による規格化ゲインを算出すると、「3 つすべて正解」が 0.86、「音の大きさ」・「音の高さ」はともに 1.00、「音の長さ」が 0.86 となった。

自由記述による解答文字数の平均値は、事前試験が 33.8 字、事後試験が 145.3 字であった。

自由記述による解答のため、渡會[2]によるテキストマイニ

表1　解答集計

| | 事前 | 事後 |
|---|---|---|
| ３つすべて正解 | 0 | 30 |
| 大きさ | 14 | 35 |
| 高さ | 4 | 35 |
| 長さ | 0 | 30 |
| 音色 | 10 | 5 |
| 音程 | 8 | 0 |
| わからない | 13 | 0 |
| | | |
| 解答者数 | 37 | 35 |

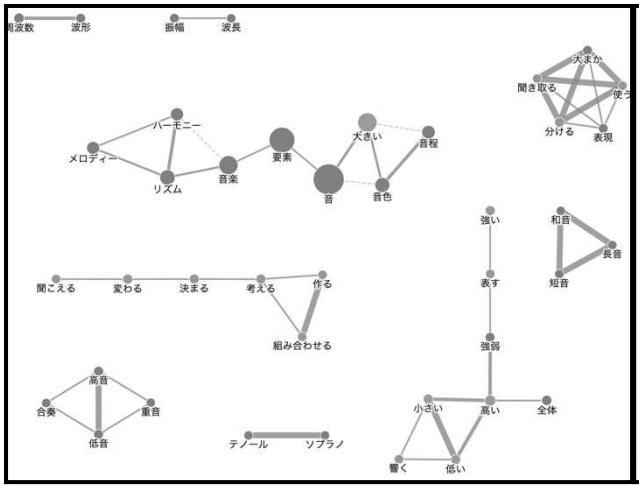



図 1 事前試験の解答による共起キーワード

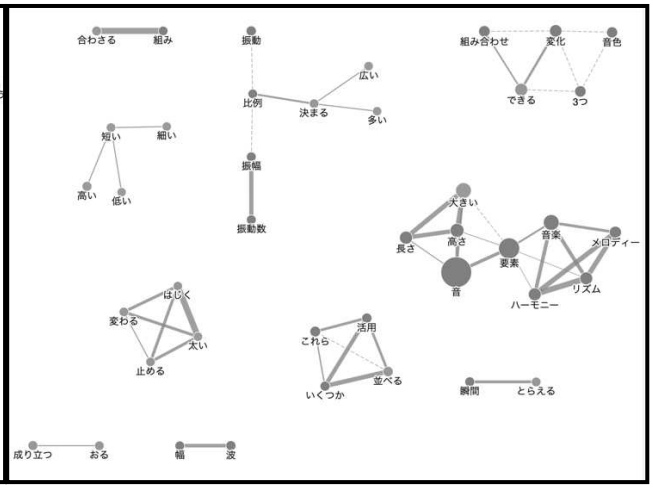



図 2 事後試験の解答による共起キーワード

ングを行った。その結果が図 1 と図 2 である。図 1 では音と音色、音と音程がつながっているが、図 2 では音と音色が切り離されており、音程は図から消えている。

動画作成課題については、一部を除き、音の三要素を説明するものであった。説明に対して、自宅などにある楽器を例に出し、音の三要素をそれぞれ変化させる工夫をしていた。

## 4．実践結果の考察

事前・事後の結果から考察を行った。

・音の三要素について、正しい知識が身についたと考えられる。
・音の三要素に音色・音程が含まれるという誤解について、ある程度解消できたと考えられる。
・解答の文字数が約 4 倍に増加したことにより、音についての知識が増え、丁寧に説明できるようになったと考えられる。
・共起キーワードによる分析から、音の三要素それぞれの結びつきが強まり、理解が深まったと考えられる。
・動画作成により、学んだことの振り返りができたと考えられる。
・動画作成の際に間違った理解をして作成している学生は、事後試験でも誤答をしていた。
・自ら工夫して実験し、説明することによって、単なる知識から教養へと深化したと考えられる。

これらより、動画作成課題を課したことによる教養の深まりが示唆された。

## 5．まとめ

今回の教育実践研究から、動画作成課題を課したことによる教養の深まりが示唆された。一人一台端末を活用する方法の一つとして、動画作成課題の有効性が示唆された。

今後は動画を互いに視聴してフィードバックすることにより、誤った理解をしている学生に対して指摘できるようにし、お互いの教養を高めあえるような教育実践研究を行いたい。

## 参考文献

[1] R. Hake: Am. J. Phys. 66 (1998) 64.
[2] 渡會 兼也：物理教育 68 巻 3 号 p.209-210 (2020)

# エネルギーの種類と変換の教育の問題点

西尾信一
日本薬科大学
nishio@zd6.so-net.ne.jp

## １．はじめに

授業教材や教科書、入試問題などで、エネルギーの種類や変換についての説明で疑問を感じたことがこれまで何度となくある。それは、標準的な物理の授業や教科書で、エネルギーの種類と変換についての扱いが軽く、十分な配慮のもとにカリキュラムが構成されてこなかったからではないだろうか。

エネルギーの種類とその説明、およびエネルギーの変換と保存は、適切に整理されて提示され、生徒・学生に正しく認識されているのだろうか。

## ２．質量エネルギーの誤解

質量とエネルギーの等価性で、しばしば「質量がエネルギーに変わる」という説明がされるし、「質量エネルギー」という用語が使われることもある。たしかに、原子核の結合エネルギーや核エネルギーの正体は質量エネルギーであるという理解なら、質量欠損や核反応における質量変化は説明できるし、素粒子の生成・消滅の説明にも都合がよい。

しかし、「質量エネルギー」が独立したエネルギーの種類だと誤解すると、力学的エネルギー保存で位置エネルギーが運動エネルギーに変換される過程のように考えてしまって、ばらばらの核子よりも原子核の質量の方が大きいという誤った結論に至る。

そもそも核エネルギーなどの正体が質量エネルギーであるという理解は不正確であるし、核エネルギーの増減が（観測にかかる）質量変化を生じる原因は核エネルギーと他のエネルギーとの量的関係にあるという大切な事柄を伝えられないということになる。

## ３．エネルギーの種類が説明されていないこと

教科書によく書かれるエネルギーの主な種類は、力学的、化学、電気、光、熱、核である。これらのエネルギーがどのようなものであるかは、中学の教科書では簡単な説明があるが、高校の教科書には明示されていないことも多い。そのため、生徒・学生はどうしても漠然としたイメージで考えており、電池がもつエネルギーは電気エネルギー、（ものを持ち上げたりするときに使う）人体がもつエネルギーは熱エネルギーと答えることがよくある。

エネルギーには、物体などがもつもの（stock）と、空間を移動するもの（flow）があり、前述のエネルギーの種類はこれが混在している。力学的エネルギー、化学エネルギー、核エネルギーは stock であり、光エネルギーは flow である。一方、電気エネルギーは単純に割り切れず、コンデンサーの静電エネルギーは stock だが、電源から負荷へ電流が運ぶ電力量は flow である。熱エネルギーは「高温物体がより多くもつエネルギー」なら stock であるが、熱力学第一法則の「熱」は flow である。もちろんこの「熱」はふつう「エネルギーの種類」には含めないが、熱の伝わり方の「伝導・対流・放射」のうち放射は電磁波なのだから、光がエネルギーの種類だとして扱うのなら、「熱」もエネルギーの種類であり、stock と flow の両方が

ある、という理解の方がよいのではないか。残る flow の「仕事」は、エネルギーを「仕事をする能力」として導入しているのだから、特別扱いでよいだろう。

なお、stock としての熱エネルギーは教科書でよく「熱運動のエネルギー」として限定的に定義されるが、状態変化に伴う潜熱も説明できるように、分子間力によるポテンシャルエネルギーも含めた内部エネルギーとして定義した方がよいと思う。熱力学を学ぶときに、「物体がもつ熱エネルギーのことを内部エネルギーという」と整理すればよい。

４．系の設定がきちんとされていないこと

本来、位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）は物体系について定義し、その物体系がもつものである。しかし、初等物理では１つの物体について定義しているため、「力学的エネルギーの変化は保存力以外の力がする仕事に等しい」ということになり、「系に流入した仕事が系のエネルギー変化に等しい」という基本的な仕事とエネルギーとの関係の概念形成に好ましくない。

また、エネルギーの変換や熱力学第一法則は、考察する系があいまいなまま議論されていることがある。たとえば、粗い面上を動く物体について、摩擦熱を摩擦力のする仕事の大きさ（＝摩擦力×変位）として求めることがある。しかし、物体も面も温度上昇するとして、それぞれを系とした摩擦力のする仕事は計算できない。「摩擦力×変位」を摩擦力のする仕事と見なせるのは、温度上昇を考えない質点として物体を扱い、温度上昇が起こるのは面だけというような理想化をした場合だが、通常そのような断り書きがされることはない。

５．エネルギー変換の不適切な説明

教科書や入試問題で、発電所の発電機はタービンの「運動エネルギー」を「電気エネルギー」に変換させるとしてくり返し扱われてきた。しかし、それは手で物体を等速で持ち上げる過程を、手の運動エネルギーが物体の位置エネルギーに変換されると説明することと本質的には同じではないだろうか。後者は、人体の化学エネルギーが仕事を介して物体の位置エネルギーに変換されると説明する方が自然であろう。そうであるなら、前者は、ボイラーの熱エネルギーや水の位置エネルギーなどが仕事を介して電気エネルギーに変換されると説明した方がよいはずである。

仕事は必ず運動を伴う。本来なら仕事で説明すべきエネルギー変換を、運動エネルギーを介在させて説明する議論が、安易にされているのではないだろうか。

参考文献

[1] 西尾信一：「仕事とエネルギー」の指導～動摩擦力のする仕事を扱うのはやめましょう，物理教育通信 169(2017) 58-61

[2] 右近修治：「仕事とエネルギー」概念の検討―「系」選択の重要性―，物理教育通信 179(2020) 6-14

[3] 西尾信一：エネルギー変換に関する誤解，物理教育 50-2(2002) 117-118

[4] 西尾信一：モーターや発電機は運動エネルギーに変換している？―教科書の記述や入試は今のままでよいのか，理科教室 2010 年 9 月号

# 大学生の視点から捉える理数科課題研究　－実態に合わせた指導に向けて－

[A]能代谷賢治，[B]内山哲治
[A]宮城教育大学　大学院教育学研究科　専門職学位課程　高度教職実践専攻
[B] 宮城教育大学　大学院教育学研究科
i21037@students.miyakyo-u.ac.jp

## １．はじめに

平成30年に告示された高等学校学習指導要領（以下，新学習指導要領）では，「主体的・対話的で深い学び」の実現に向けた授業改善がキーワードの１つとなっている。また，新学習指導要領で「総合的な学習の時間」が「総合的な探究の時間」へと名称変更され，「理数探究」や「理数探究基礎」の探究的科目を含む教科である「理数」が新設された[1]。筆者は大学院修了後，高等学校の理科教員として教育現場に出る予定である。質の高い探究を支える指導を実践すべく，令和２年度には高等学校Ａの理数科課題研究にティーチング・アシスタント（以下，TA）として携わり，令和３年度には高等学校Ｂの理数科課題研究に教育実習生として携わっている。ここでは，探究活動における課題設定及び課題解決の過程における指導について検討を行ったので報告する。

## ２．高等学校Ａでの取組

高等学校Ａの理数科は１年次より野外巡検や研究室訪問，課題研究などの理数科独自の活動を通して，自然科学に関する知識や教養，学問への興味・関心を深めることを目指している。また，探究的な学習活動を重視し，観察力・分析力・考察力を伸張させることを基本方針としている。令和２年度の理数科課題研究に携わり，月に1〜2 回程度で生徒の研究補助や生徒への指導助言を行った。理数科課題研究は理数科に在籍する 2 年生が班を作り，７月から３月までの期間で実施された。

理数科課題研究に携わって気づいた高校生の課題として，「生徒の主体性」，「学習場面における情報機器の取扱い」，「生徒自らが行う実験デザイン」，「実験データの分析」の４つが挙げられた。また，指導教員の中には生徒の研究活動に深く介入せず，研究計画や内容にあまり口を出さない教員もいた。高校生の課題と教員の指導の実態から，探究活動の指導におけるポイントとして以下４点を提案した[2]。

表１ 探究活動の指導におけるポイント

| |
|---|
| ①研究対象に関する身近な現象を取り上げる |
| ②教員−生徒間で研究の内容・計画の共通理解を図る |
| ③教えるのではなく，考えさせる問いかけを行う |
| ④生徒の実態に合わせて，問いの「解像度」を変化させる |

４つのポイントを提案した理由を述べる。①は研究主題が自分事となっておらず，主体的に取り組めていない生徒に研究対象の親近感を持たせることが探究活動への動機付けとして必要であると考えたためである。②は教員の指導の実態から，見通しを持った質の高い探究活動を進めるために，教員が生徒と課題研究に対する共通理解を図ることが必要であると考えたためである。③は生徒が実験を行う前に「どのような実験をすべきか」，追実験の前に「実験誤差を小さくするためにはどうすればよいか」などの答えを明示しない形で生徒に問いかけることで，生徒の思考及び生徒同士の対話を促すことができると考えたためである。④は実験で得られたデータから考察を行う際に，単に「この実験から何が言えるか」と問うのではなく，「条件をどのように変化させたら，結果がどのように変化したのか」と問いを明確にする（問いの「解像度」を上げる）などの工夫によって，生徒自身の言葉による思考が促されると考えたためである。

この４つのポイントを踏まえ，TA として生徒との対話を重視した研究補助や指導助言を行っていく中で，積極的な文献調査を行うようになったり，生徒同士の対話から実験の精度向上に向けた試行錯誤を行ったり，自らの言葉で思考し，考察するようになったりと生徒の行動に変容が見られた。よって，高等学校 A において４つの探究活動の指導におけるポイントが有効であることが分かった。

## ３．高等学校 B での取組に向けて

高等学校 B の理数科は課題研究や大学の研究者を招いた講演会や研修会を通して，数学・理科及び英語に重点を置いた学習を行い，十分な基礎学力と応用力の育成を目指している。また，フィールドワークや国際交流などの課外活動を展開し，領域横断的な着眼点と科学的な探究力，高い倫理性，国際性を有した生徒の育成を目指している。令和 3 年度の理数科課題研究に携わる中で，特に 2 年生の物理班（4 班）の研究を観察・指導し，探究活動における生徒の実態と教員の指導スタイルに関して現状の把握を行った。

生徒の実態として，高校生なりの視点で探究活動を行うことができているように考えられる。身近な現象に対する疑問から探究テーマを見出し，生徒自らが実験をデザインしている姿が見受けられた。また，生徒は自身のスマートフォンや貸与された Chromebook を活用しながら調べ学習をしたり，文献調査を行ったりしていた。一方で，身近な現象と理論との結び付きや実験の精度向上に関しては課題が残るように考えられた。

教員の指導スタイルに関して，教員ごとの指導スタイルに違いが見受けられた。物理班を指導する 3 名の教員でも，「～をしてみたらいいと思うよ」と声掛けを行い，生徒の探究活動に介入する指導や，「～をしてみたらどうなるかな」と声掛けを行い，生徒に考えるきっかけや気づきを与える指導など，指導のスタイルに違いが見受けられた。しかしながら，生徒との研究に関する共通理解を図っている点では指導スタイルが共通していた。課題研究の授業時間内で何を目標に取り組んだのか，どのような実験をしたらどのような結果が得られたのか，その結果をどのように考察するか，次回の授業時間内で何に取り組むのかを探究ノートに記入させていた。また，生徒が提出した探究ノートをチェックし，「このような実験データが必要なのではないか」や「このような文献があった」などのフィードバックを行っていた。

## ４．探究活動の指導における４つのポイントの検討

高等学校 A の理数科課題研究に携わって，表 1 で示した探究活動の指導における４つのポイントを提案し，有効性を確かめた。その後，高等学校 B の理数科課題研究の実態を把握し，異なる学校でも指導におけるポイントが有効であるかを検討した。その結果，②は，いずれの高等学校でも重要なポイントになっていることが考えられた。また，③と④は実験デザインとデータの分析で区別していたが，直接教えるのではなく，生徒自身に考えさせる・気づきを与えるという点で合致していることが分かった。これらは，理数科課題研究に限らず，「総合的な探究の時間」などの教科等横断的な視点での探究活動でも有効であると考えられる。①に関しては，研究主題が自分事となっていない生徒に対する指導であることから，生徒の実態及び課題研究以外の学校生活における教員の働きかけに依存することが分かった。

※なお，本研究は JSPS 科研費 19K03050 の助成を受けたものである。

## 参考文献

[1]文部科学省，平成 29・30 年改訂学習指導要領，解説等「高等学校学習指導要領の改訂のポイント」https://www.mext.go.jp/content/1421692_2.pdf （2021-07-20 Web 閲覧）

[2]能代谷賢治，内山哲治：“高等学校理数科課題研究における大学生のティーチング・アシスタント －大学生の視点から－ ”，東北物理教育 **30**(2020)，10-13.

# 物理教員の教職に関する意識調査：日本とオーストリアの比較

[A]Michael M.Hull, [B]植松晴子
[A]ウィーン大, [B]東京学芸大
uematsu@u-gakugei.ac.jp

## １．はじめに

学習指導要領[1]に示された「主体的・対話的で深い学び」や，大学教育の質的転換[2]においてはともに，学習者の能動的な学びを促すことが求められ，知識・技能だけでなく思考力・判断力・表現力や主体性・多様性・協調性の育成が重視されている．これまでにも能動的学習を促すために，多くの優れた取り組みが提案され，近年では米国を中心とした物理教育研究(Physics Education Research, PER)に基づく教授法が日本の高等学校や大学でも実践されるようになっている．一方，それらの有効性が示され，先駆的な実践者による研修や，物理教育の研究者による教員養成が行われても，受講者が学んだ授業法を実践するとは限らない現実がある．教員を取り巻く環境として，決められたカリキュラムと授業数との兼ね合い，大学受験に直接結びつく問題演習が優先されること，一部の教授法で用いられるICT機器等の整備が限定的であること，同僚や上司の賛同が得られないこと等，新しい授業法を導入する上での制約があるという声も耳にする．

学習指導要領や入試制度の改定への対応，学習者の多様性への対応，保護者の期待，働き方改革等，教員を取り巻く環境には多くの課題がある．その中で，教員自身が教職をどのように意識し，授業改革への取り組みを考えているかに関心をもち，調査することとした．質問紙は開発中[3]であり，本発表では日本とオーストリアの教員を対象に行った予備的な調査の結果について報告する．

## ２．質問紙の作成

開発中の質問紙の質問項目は，学習過程に対する学習者の意識について調査した先行研究[4]を参考にし，筆者らが現職教員から聞き取った項目を加えて作成した．英語で書いた原文を，それぞれ日本語とドイツ語に翻訳したもので予備調査を行った．予備調査の対象者に聞き取り調査を行って質問項目を修正し，妥当性を確かめた．また，教員養成に携わる物理教育の研究者の回答を分析し，一貫性の得られない質問項目は排除の検討対象としている．

現状では44の項目からなり，表1はその例である．回答は，1:「全くそう思う」～5:「全くそう思わない」の間の5段階から選ぶ形式である．全質問項目はGoogle formで見ることができる*.

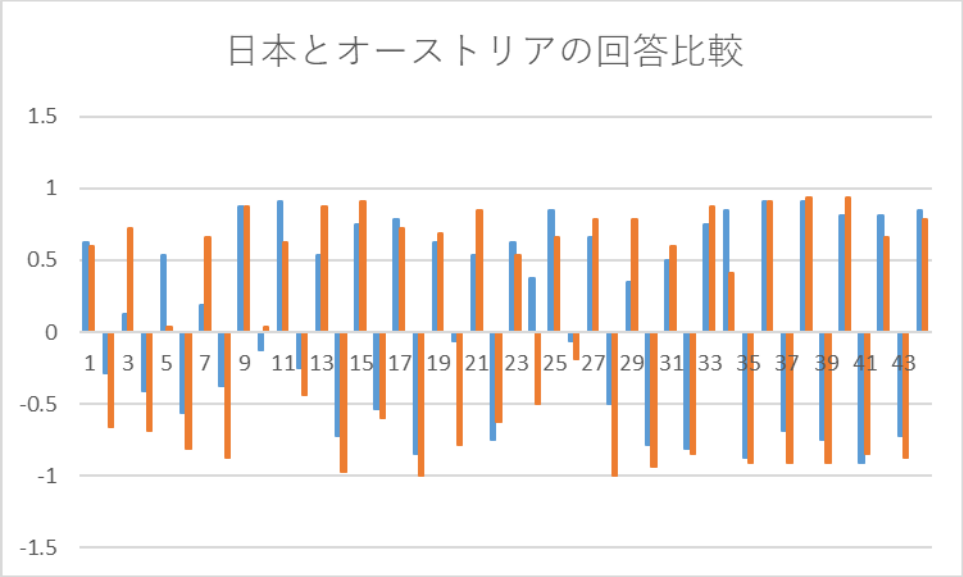
表１　質問項目の例　(2つの文から成る項目には，*で挟んだ文に対して回答する)

| | 質問項目 |
|---|---|
| 1) | 私は，自分が教室でどの物理の教科書を使うかを，使わないことも含めて慎重に検討します. |
| 2) | もし私の学校の校長先生からあるやり方で教えるようにと言われたら，たとえ本当はそうしたくなくても，私はそのやり方で教えるように全力を尽くします. |
| 15) | *勤務校の装置が古くても，だめな授業の言い訳にはなりません．*私はさらに創造性を発揮しなければなりません. |
| 21) | 私の生徒の進歩には，私が影響していると思います. |

## ３．調査の実施と結果

日本での調査は，2020 年 10 月から 2021 年 3 月にかけて行った．新型コロナウィルス感染症の影響で，対面で調査協力を依頼する機会がなく，Google form での回答を依頼したところ，32 名からの回答が得られた．内訳は，大学教員 28 %，公立高等学校教員 35 %，私立中学校・高等学校教員 25 %，国立大学附属高等学校教員 6 %，公立中学校教員 3 %である．また，教員歴は，5 年未満 6 %，5 年以上 10 年未満 10 %，10 年以上 20 年未満 34 %，20 年以上 30 年未満 19 %，30 年以上 25 %と，ややベテランの多い構成となった．オーストリアでの調査は，コロナ禍直前の 2020 年 2 月と 2021 年 3 月に行われた．

全質問項目についての，日本での回答とオーストリアの 2021 年の回答の平均値を図 1 に示す．いくつかの例外を除いては，回答の傾向に大きな違いは見られない．詳細については，講演で報告する．




## ４．おわりに

今後，質問項目を再検討し，学校の環境による比較，国際比較などの詳細な議論や教員養成での指標に役立てていきたいと考えている．質問項目の精査にはより多くのデータが必要である．調査へのご協力をお願いしたい*.

謝辞　日本での調査にあたっては，増子寛先生にご尽力いただきました．心よりお礼申し上げます．

### 参考文献

[1] 文部科学省 https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/index.htm
[2] 中央教育審議会
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1325047.htm
[3] M.M.Hull and H.Uematsu, Int. J. Phys. Chem. Ed., 12, (2020)
[4] M.Milner-Bolotin, Thesis (Ph. D.), University of Texas at Austin, (2001)

* https://forms.gle/StmifsMVKrbogmGn7 または上の QR コードからアクセス可

# 力の作用反作用と連結 2 物体の思考実験

石原 諭
兵庫教育大学
satoshi@hyogo-u.ac.jp

## 1　はじめに

Newton 力学は 3 つの公理を基礎として，力学の諸現象を体系的に記述できる．この公理的な力学体系は物理の初学者にとって敷居が高い．高等学校の物理の学習指導内容全般を考慮すると，最終的には力学の公理的な体系を伝えることは不可欠である．本論では第 3 の公理，作用・反作用の法則について考える．

力の作用反作用の法則は中学校，高等学校の理科で教育している．2 物体の質量が等しくかつ静止している場合には理解度が高いが，2 物体の質量が異なる場合や 2 物体が運動している場合には理解度が低い [1]．また作用反作用を理解するための実験は古くから知られている [2]．近年は，ICT 機器を使い作用反作用を教える方法も実践されている．一方で，作用反作用の力をばねで測定することは無意味 [3, 4] であるという批判もある．

物体が動いている場合や質量が異なる場合にも作用反作用の法則が成立することの理解を助け，かつ力を直接測定せずに行える方法が望まれる．それに対する一つの解決方法として，連結した 2 物体の運動についての思考実験を提案する．

## 2　連結した 2 物体の運動

図 1(a) のように，滑らかな床上に物体 A と B が連結して置かれている．それを外力 $\boldsymbol{F}$ で引いたときの運動を考えよう．物理基礎の教科書の典型的な例題である．通常の高等学校の学習順序では，2 物体の間に働く力の満たす作用反作用の法則を学び，運動方程式を学んだ後で，連結物体の運動を考える．

これを力の作用反作用を前提とするのではなく，力の作用反作用の理解を助ける教材として検討する．この思考実験では「運動方程式は既知だが作用反作用の法則は未知だ」と想定してすすめる．作用反作用の法則とは独立に運動方程式を教えることは可能である．

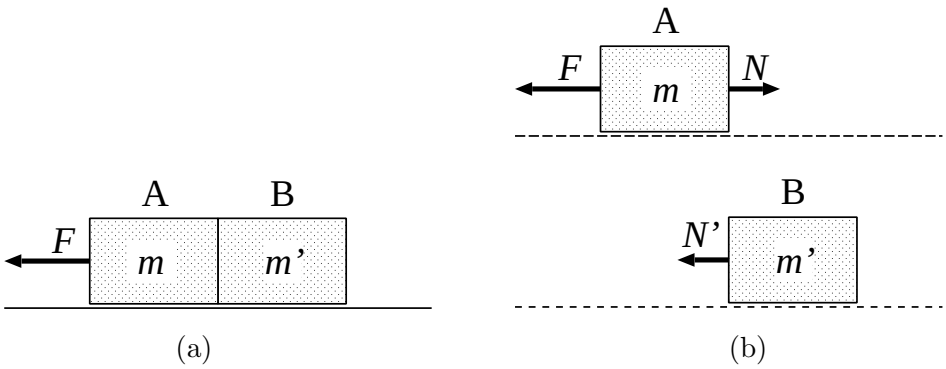



図 1　接触した 2 物体の運動. (a) 一体としての扱い, (b)2 物体としての扱い.

まず A と B をあわせて一つの物体 (系) とみなせば，運動方程式は

$$(m+m')\boldsymbol{a} = \boldsymbol{F} \tag{1}$$

となり，力 $\boldsymbol{F}$ から加速度 $\boldsymbol{a}$ が決まる．次に図 1(b) の様に A と B の運動を別々に考える．B から A にはたらく力を $\boldsymbol{N}$，A から B にはたらく力を $\boldsymbol{N'}$ とする．運動方程式は

$$m\boldsymbol{a} = \boldsymbol{F} + \boldsymbol{N}, \qquad m'\boldsymbol{a} = \boldsymbol{N'} \tag{2}$$

となる．加速度 $\boldsymbol{a}$ は 2 物体を一つの系と考えたときと同じである．式 (1) と式 (2) より，

$$\boldsymbol{N} + \boldsymbol{N'} = 0 \tag{3}$$

を得る．これは作用反作用の関係に他ならない．このようにして，2 物体が一体となり同一速度で運動している場合には，運動方程式を前提として，作用反作用の関係を導出できる．

## 3　議論とまとめ

この思考実験を運動の第 3 法則の証明と考えることはできない．多体系の運動方程式 (1) の段階で第 3 法則を用いているからである．この思考実験は運動の第 3 法則の証明ではなく，限られた実験設定の中で，もっともらしい仮説から作用反作用の関係を導くことにより，運動の第 3 法則の理解や定着を助けるものである．

この思考実験では，作用反作用の力を測定する必要はない．そのため力の測定についての批判 [3, 4] を回避できる．またこの思考実験により，2 物体の質量が異なる場合でも，作用と反作用の関係を導くことができる．また物体が動いていても，作用反作用の関係が成立していることがわかる．これらの場合は生徒が作用反作用の関係を誤解しやすい場合 [1] であり，この思考実験により，生徒の理解度を改善する可能性がある．

この思考実験は衝突の様な 2 物体の速度が異なる場合には適用できず，衝突前後の全運動量保存則が必要となる．多くの教科書では作用反作用の法則を前提として，全運動量の保存則を結果としている．しかし歴史的には運動量保存則が先に発見され [5]，のちに作用反作用の法則が発見されている．

力の作用反作用の関係の理解をたすけるために，連結した 2 物体の運動についての思考実験を提案した．この思考実験は，運動方程式を教えた次の段階で，生徒に作用反作用について再考させる教材となる可能性がある．一方で，生徒が運動方程式や数学など前提となる知識や技能に習熟していない場合，理解が難しいことも懸念される．この思考実験の教育効果は実践を通して探る必要がある．

この発表は文献 [6] にもとづいている．

## 参考文献

[1] 定本嘉郎，小川和也：物理教育 **59**-2 (2011) 96–100.
[2] 池本義夫編：三訂増補 物理実験事典 (1973) 講談社
[3] ポアンカレ:「科学と仮説」 岩波文庫 (1938)
[4] 林伝一郎：物理教育 **20**-2 (1972) 57–62.
[5] 西敬尚訳，科学の名著 第 II 期 10 ホイヘンス (1989) 7–50.
[6] 石原論：近畿の物理教育 **27**(2021)14–17.

# 教師が考える素朴概念の傾向と解決策についての考察

猪本　修
兵庫教育大学
inomoto@hyogo-u.ac.jp

物理概念に対する学習者の捉え方については，理科教育の立場からも，また認知発達心理学の立場からも長らく研究されてきている。その一方で教授する立場としての教師が素朴概念についてどのように問題意識をもち，いかに解決しようとしているのか，教師を対象とした調査研究はあまり報告されていない。そこで著者は現職の理科教員を対象として素朴概念をどう捉え，また学習者の理解を促すためにいかなる指導が必要と考えているのかを調査し，その傾向と特性を考察することとした。

理科教育および物理教育における素朴概念あるいは誤概念は，よく知られているように，学習者が日常的経験や知識を基に獲得した自然に対するナイーブな見方や考え方を指すものである。それは幼少期の外的事象に対する認知特性に基づくため，多くの学習者に相当程度の普遍性・共通性がみられることが特徴である。「ものの運動は常に力の作用によって引き起こされる」という考え方は素朴概念の代表的事例である。素朴概念は教師による指導（いわゆる学校知）では是正されがたく，素朴概念と学校知の二重性をしばしば容認することとなる。こうして高等教育の学修段階でも概念に対する理解が深まらないままであること多いことが知られている。このような素朴概念について，本研究では中学校および高校理科の教師を対象としてアンケート調査を実施し，素朴概念が教師には如何に捉えられ，理解されているのかを明らかにすることとした。これにより素朴概念の問題自体が教師にどの程度共有されているかを把握し，教師教育を行うにあたっての指針が得られるものと考えた。

アンケート調査は中学校理科教師と高校理科教師を対象としたが，高校物理の授業を行う教師については現段階では十分な回答数が得られなかったため，ここでは主として中学校の理科教員を分析の対象とした。このアンケート調査は素朴概念とその発達心理学的・学習心理学的背景を約90分にわたって説明したのちに実施した。調査事項は (1) 子どもがもちうる科学的な誤概念をひとつ挙げ，その認知的要因を説明せよ。(2) その誤概念はどのような指導によって解決できるのかを検討せよ，の２項目であった。回答には６日間の期限を設けた。

その結果，回答者が考えた素朴概念の例としては，物理に関するものとしては「浮力は物体が軽いほど大きい」「ISSの中では無重力であり力がはたらかない」「電池から流れる電流は回路によらず一定である」「自由落下において物体の質量が大きいほど落下速度が大きい」などが挙げられた。その一方で，「水が蒸発すると消えて無くなる」「全ての金属に磁石がくっつく」などのように，科学的知識の有無に関わるものも多く挙げられた。後者については概念および素朴概念に関する認識が，物理教育においてこれまでに論じられてきた形では理科教師に必ずしも共有されていないことを示すものである。

次に誤概念の解決の指導法については，回答者のほぼ全員が，実験や観察を行うか，あるいは映像資料を見せることで理解できると答えた。理科教育において実験と観察が大切であることは誰もが認めるところではあるが，上記の回答では，現象を視覚的に提示すれば長期間を要さずに概念形成が達成されると一般に捉えられていることがうかがえる。こうしたことから，素朴概念をめぐる問題の困難さを正確に把握し，学習心理学的視点をも踏まえて概念形成を促す教授法を広く理科教師に共有するような取り組みが必要であることが示唆された。現段階では主として中学校教員について調べたが，高校教員についても調査対象を広げ，問題点を明確にする必要があると考えている。

【メモ】

# 高校物理定期試験における記述式問題の出題とその評価

清水裕介
早稲田実業学校中高等部
yusukeshimizu0107@gmail.com

## １．記述式問題を取り巻く状況

思考力・判断力・表現力等が重視される中検討されてきた大学入学共通テストの数学と国語における記述式の出題は，採点の手間・公平性などの点でハードルがあり，頓挫してしまった。しかし，二次試験においては国公立をはじめとして多くの大学が出題しているし，記述式問題の重要性は広く認められているところである。高校物理においては，数式を交えた途中過程を書かせることはよくあるが，現象の原理などを文章で説明させる問題はあまり積極的に発信されてこなかったように思う。

## ２．記述式問題導入の背景

2021 年度前期の高校３年生の中間試験および期末試験において，大幅に記述問題の比重を増やして出題した。これには，1. で書いたこと以外にも，理由がある。

元々，物理の授業や試験をしていて，一部の生徒にとって「物理ができないということを確認するだけの機会」になってしまっていないか，ということがずっと気になっていた。特に，計算や式の処理が苦手な生徒にとっては，試験を受けることがそのまま悪循環につながりかねない（図１参照）。そもそも物理において身につけさせたい能力は複合的なものであり，生徒たちの個性も多様であるが，記述式問題を出題することで，それらをバランスよく評価することができる（図２参照）。今回は，それを狙って記述式問題を出題した。

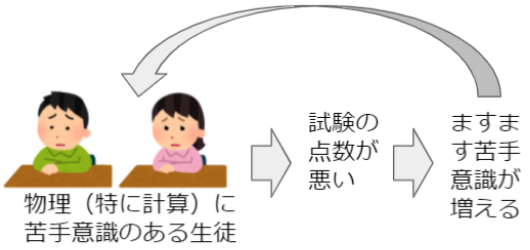



図１：防ぎたい悪循環

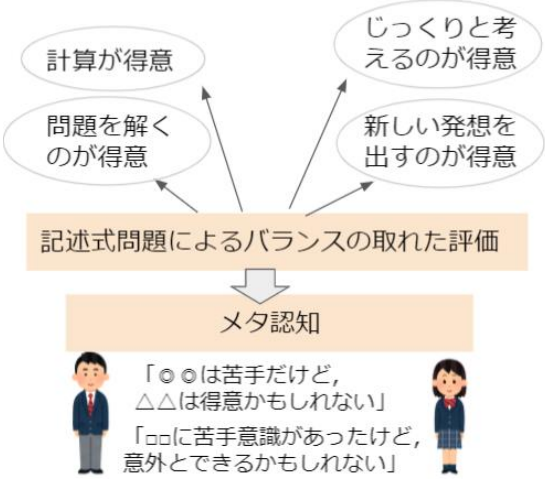



図２：物理において評価したい能力を，記述式問題によりバランスよく評価する

## ３．出題例

中間試験では約 9 割が記述式，期末試験では約 7 割が記述式となった。２回の試験で出した記述式問題をタイプ別に分け，例を 1 つずつ示したものが，次のページの表である。

## ４．評価方法

上の表の B に示した静電誘導の問題の解答及び採点基準を次のページ右下図４に示す。評価の方法としては，大まかな採点基準を作り，答案と照らし

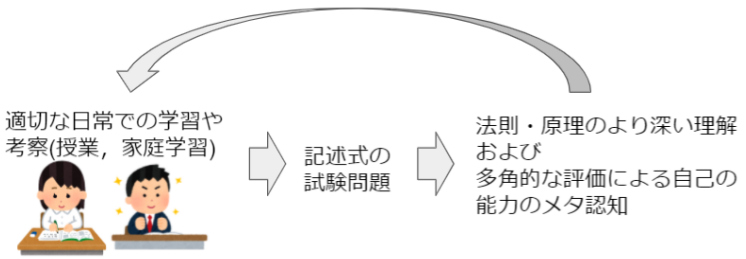



図３：目指したい好循環

合わせながら，この解答例には何点を与える，というふうに逐一決めていった。また，事前に出題することを告知した問題については，あらかじめ採点基準もしくは採点のポイントを明示した（ここでは割愛する）。

表：記述式問題の類型，出題意図，出題例

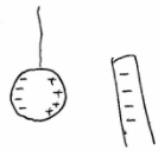
| 類型 | A. どのような現象が起きるのかを説明する問題 | B. ある現象の起こる原理について問う問題 | C. 公式の導出について，事前に出題を告知したうえで聞く問題 | D. 自分が疑問に思ったことや考察したことを書く問題 | E. 自分の将来やりたいことや日常生活と，物理の関係性を問う問題 |
|---|---|---|---|---|---|
| 出題の意図 | 授業中に扱った内容をしっかり理解していることを評価するため。 | 授業中に扱った内容をしっかり理解していることを評価するため。 | 事前に内容を指定することで，その他の分野の勉強の取り組み方の指針を示すため。 | ・試験時間内だけでない長期的なスパンで，自ら疑問を持ったり，考察したりする姿勢を評価するため。 | ・将来やりたいことと物理で学ぶ内容がどう結びつくのか，考える姿勢を評価するため。<br>・進路意識の向上に資するため。 |
| 出題例 | 回折格子は、ヤングの実験のスリットと似ているが、スリット数が格段に多くなったものと見なすことができる。授業では、回折格子の役割をする「キラキラシート」を配った。このキラキラシートを用いて、白色の光線（単スリットを通したもの）を当てたとすると、スクリーンにはどのような光が映ると考えられるか。**理由とともに**、図などを用いつつ述べよ。 | マイナスに帯電したストローを帯電していないアルミ球（糸付き）に近づけたところ、アルミ球は帯電していないのにもかかわらず、ストローに引き寄せられた。これは一見、クーロンの法則に反しているように思われる。なぜこのような現象が起きたのか。図や文章で説明せよ。 | コンデンサーにためられている位置エネルギー（静電エネルギー）の式を導出せよ。授業中に紹介した４つの方法から，自分の気に入ったものを書けば良い。 | 4月から現在までで、授業中や課題、自主的な学習等を通じて、あなたが発見したことや考察したことについて詳しく説明せよ。<br>・何かしらの数値や数式が書いてあることが望ましい。（定性的なものであっても、何かしらの数値を用いた考察等があると良い。）<br>・図を併用しても良い。<br>・字数の目安として、50文字以上は書いてください。 | 高２～現在までの物理で学んできた内容は、あなたの将来やりたいことや、大学で学びたい学問などと、どのように関係しているか、自由に述べよ。もし、ほとんど関係が見いだせない場合、日常生活と物理との関わりについて述べてもよい。<br>・具体例が1例以上挙げること。2例以上あることが望ましい。<br>・**数式もしくは数値が入っていないと得点にならない。**（数値も意味のあるものである必要がある。） |

## ５．検証

このような形式で行うことのメリットとして，まず教員側にとっては ① 記述答案を読むことで，生徒一人ひとりの理解度や，どのような思考をしているのかが手に取るように分かること　② 思いもよらぬ考えに出くわすことができること（例としては，先ほどの静電誘導の説明問題で示した，アルミ原子内で分極が起きているという記述など）。

次に，生徒側にとっては，①試験対策の過程で，学習内容が身についていると実感することができること　②分かったつもりではあったが，実際に書いてみて分かっていない点が多いと気づけること　などが挙げられる。

大会当日の口頭発表では，生徒からの意見も多く出して分析を行う予定である。



８．[模範解答例]
ストローの - 電荷により、アルミ球内部の電子が反発力を受けて逆側に行く。その分、ストローに近い方の部分は正電荷が現れる。これとストローの-電荷が引き合う。

・「静電誘導が起きたから。」だけでは引き合う理由としては不十分である。（静電誘導の結果、反発するということはないけれど、引き合う理由を書いてほしい）△4点。ただし、図が正しく描いてあれば〇となる。
・文章だけ、もしくは図だけでも〇となる。6点。
・文章で書いてあることが間違っているが図は合ってる：3点
・文章で書いてあることが間違っているが静電誘導という言葉はある：2点

・距離について触れている人、Good!
・「アルミ原子内で分極が起きている」と書いている人もいました。これは授業中にはまったく触れませんでしたが、たしかにそれも起きていると思われます。すごい視点ですね。（これは△3点としました。）
・「＋の電子」という言葉を使っている人がちらほらといました。＋になるのは何でしょうか。

図４：解答と採点基準の例

## 参考文献

[1]「記述式問題の経緯」文部科学省資料　2021 年 7 月 20 日閲覧
https://www.mext.go.jp/content/20200513-mxt_daigakuc02-000007071_11.pdf
[2]「見失われた記述式の意義：導入の見直しが必要だ」南風原朝和，『科学』Oct. 2019, Vol.89 No.10, pp.899-904

# 2021 年度　第 37 回物理教育研究大会　実行委員名簿

| 係 | | 担当者 | 係 | | 担当者 |
|---|---|---|---|---|---|
| 実行委員長 | | 内山哲治[1] | 評議員会 | | 藤原　昇・吉澤雅幸<br>吉田豊彦[13]・金　博之[14]<br>佐藤昌也・井上　清 |
| 実行副委員長 | | 吉澤雅幸[2]・戸田慶三[3] | | | |
| 事務局長 | | 藤原　昇[4] | | | |
| 副事務局長 | | 井上　清[5] | 支部長会議 | | 内山哲治・藤原　昇 |
| 企画 | 要項・テーマ | 内山哲治・藤原　昇<br>須藤彰三[6] | 大会当日の運営 | ホスト | 吉澤雅幸・佐藤昌也 |
| | | | | 全体進行 | 内山哲治・藤原　昇 |
| | 特別講演<br>受賞記念講演 | 佐藤昌也[7]<br>遠藤龍介[8] | | 計時(座長補佐) | 戸田慶三・大野　剛 |
| | | | | 受付 | 佐藤昌也・井上　清 |
| | 渉外 | 内山哲治・吉澤雅幸<br>藤原　昇 | | 支部本部詰め | 内山・吉澤・藤原・井上<br>加藤・佐藤・大野・戸田 |
| プログラム | | 加藤徳善[9]・大野　剛[10] | | 外部<br>バックアップ | 木村　清・遠藤龍介<br>川本　清[15]・興治文子[16]<br>青木悠樹[17] |
| 予稿受付・編集 | | 加藤徳善・大野　剛 | | | |
| 会計 | | 井上　清・赤城達弥[11] | | | |
| ホームページ | | 佐藤昌也・木村　清[12] | 本部システム担当者との連絡調整 | | 藤原　昇・吉澤雅幸 |
| 参加受付・管理 | | 佐藤昌也・木村　清 | | | |
| 座長依頼 | | 内山哲治・藤原　昇 | 事務局会 | | 内山・吉澤・佐藤<br>井上・藤原 |
| 共催・後援申請 | | 藤原　昇・井上　清 | | | |

所属

1　宮城教育大学大学院教育学研究科
2　東北大学大学院理学研究科
3　仙台育英学園高等学校
4　宮城県宮城野高等学校
5　宮城県仙台第二高等学校
6　東北大学大学院理学研究科
7　一関工業高等専門学校
8　山形大学理学部
9　宮城県宮城野高等学校・東北学院高等学校
10　宮城県工業高等学校
11　宮城県宮城野高等学校
12　元尚絅学院大学
13　福島県立磐城桜が丘高等学校
14　秋田県立由利工業高等学校
15　八戸工業大学
16　東京理科大学
17　群馬大学

２０２１年度 日本物理教育学会年会
第３７回 物理教育研究大会　発表予稿集
２０２１年８月１０日

編　集　　日本物理教育学会東北支部
　　第３７回物理教育研究大会実行委員会
発　行　　日本物理教育学会
印　刷　　田端印刷株式会社


PESJ
日本物理教育学会