

博士論文

高校物理授業への形成的評価導入に関する  
実践研究

東京学芸大学大学院 連合学校教育学研究科  
学校教育学専攻 自然系教育講座

学生番号 R16-6003

西村壘太



# 目次

<b>第1章</b>	<b>研究背景と目的</b>	<b>7</b>
1.1	アクティブ・ラーニング	7
1.2	物理教育研究とは何か	9
1.2.1	PERの歴史	9
1.2.2	方法	11
1.2.3	相互作用型授業	12
1.2.4	力学概念調査	13
1.2.5	Hakeの規格化ゲイン	13
1.2.6	学習姿勢・態度調査	14
1.2.7	物理スイート	15
1.2.8	物理教育研究の課題	17
1.3	形成的評価	17
1.3.1	指導と評価の一体化としての形成的評価	17
1.3.2	評価と学びの連動	19
1.3.3	形成的評価の新しい潮流	20
1.3.4	形成的評価の時間的レベル	21
1.3.5	形成的評価の先行研究	23
1.4	研究目的及び方法	25
<b>第2章</b>	<b>ピア・インストラクション型授業の定量評価</b>	<b>29</b>
2.1	背景	29
2.1.1	ピア・インストラクション	29
2.1.2	PI効率	31
2.2	PIの先行研究	31
2.3	目的	32
2.4	実践「振り返り」と「予習」を導入したPI型授業	33
2.4.1	メタ認知	33
2.4.2	「振り返り」の導入	33
2.4.3	先行オーガナイザー	35
2.4.4	「予習」の導入	35
2.4.5	形成的評価としての位置づけ	37
2.5	対象	38
2.6	力学分野の実践結果と考察	41
2.6.1	力学分野の授業全体の結果	41
2.6.2	力学概念調査による授業効果の評価	42
2.6.3	「振り返り」の評価法および力学分野の結果	43
2.6.4	力学分野 「振り返り」とPI	45

2.6.5	「予習」の評価法および力学分野の結果 . . . . .	47
2.6.6	力学分野「予習」とPI . . . . .	47
2.6.7	力学分野「振り返り」と「予習」とHake ゲインのクラス差 . . . . .	48
2.6.8	力学分野 「振り返り」と「予習」の男女差 . . . . .	49
2.7	波動分野の実践結果と考察 . . . . .	50
2.7.1	波動分野の授業全体の結果と考察 . . . . .	50
2.7.2	波動分野 「振り返り」と「予習」の結果 . . . . .	51
2.7.3	波動分野 「振り返り」とPI . . . . .	53
2.7.4	波動分野「予習」とPI . . . . .	54
2.7.5	波動分野「振り返り」と「予習」のクラス差 . . . . .	54
2.7.6	波動分野「振り返り」と「予習」の男女差 . . . . .	54
2.8	結論 . . . . .	55
<b>第3章</b>	<b>形成的テストと個票による形成的評価</b>	<b>57</b>
3.1	目的 . . . . .	57
3.2	実践 形成的テストと個票による形成的評価 . . . . .	57
3.2.1	形成的テスト . . . . .	57
3.2.2	ツールソフトの開発 . . . . .	59
3.2.3	ARS 個別学習票 . . . . .	61
3.2.4	フィードバック票 . . . . .	63
3.2.5	形成的評価としての位置づけ . . . . .	64
3.3	公立高校での実践 . . . . .	66
3.3.1	授業実践の詳細（公立高校） . . . . .	66
3.3.2	レーダーチャートによる生徒個別の学習状況の把握 . . . . .	67
3.3.3	「形成的テスト」とFCI . . . . .	71
3.3.4	生徒の声 . . . . .	72
3.4	国立大学附属中等教育学校での実践 . . . . .	74
3.4.1	授業実践の詳細 . . . . .	74
3.4.2	FCI と CLASS 事前事後調査の結果 . . . . .	76
3.4.3	形成的評価に関するアンケート . . . . .	79
3.4.4	形成的評価と生徒の学力 . . . . .	85
3.4.5	形成的評価と生徒の学習姿勢・態度 . . . . .	87
3.5	結論 . . . . .	89
<b>第4章</b>	<b>結論</b>	<b>91</b>
付録A	力学分野のPI型授業	97
付録B	波動分野のPI型授業	133
付録C	公立高校での授業実践の詳細	163
付録D	中等教育学校での授業実践の詳細	181
付録E	力学概念調査	213

目次

5

付録 F CLASS

217



# 第1章 研究背景と目的

## 1.1 アクティブ・ラーニング

文部科学省は、平成30年3月告示の学習指導要領[1]の作成に向けた論点整理[2]で、これからの新しい時代を切り拓いていくために必要な資質・能力の3本の柱を、以下のようにまとめた。

1. どのように社会・世界と関わり、よりよい人生を送るか(主体性・多様性・共働性、学びに向かう力, 人間性など)
2. 何を知っているか(個別の知識・技能)
3. 知っていることをどう使うか(思考力・判断力)

これらの育成すべき資質・能力を総合的に育むためには、学びの量とともに、質や深まりが重要であるとされ、以下のような三つの視点に立って学び全体を改善していくことが提言された。

- ① 習得・活用・探究という学習プロセスの中で、問題発見・解決を念頭に置いた、深い学びの過程が実現できているかどうか。
- ② 他者との協働や外界との相互作用を通じて、自らの考えを広げ深める、対話的な学びの過程が実現できているかどうか。
- ③ 子供たちが見通しを持って粘り強く取り組み、自らの学習活動を振り返って次につなげる、主体的な学びの過程が実現できているかどうか。

このような、主体的・対話的で深い学び、いわゆるアクティブ・ラーニング(AL)を、すべての教科・科目の授業で実現することが求められるなど、学習過程の質的な改善は、教師にとって喫緊の課題である[1]。「今後10~20年程度で、アメリカの総雇用者の約47%の仕事が自動化されるリスクが高い。」といった予想がされているように[3]、科学技術や情報通信技術の発達により、工業化社会から知識基盤社会へと転換した今、社会の変化は、私たちが予想するより遥かに早いものとなっている。このような社会で生きていくためには、「生きる力」[1]を生徒に育てる必要があり、それを育てようという試みがALである。ALでは、生徒が確定的な知識を覚えるだけに留まるのではなく、知識を活用して課題解決することを重視する。課題解決のために必要な思考力・判断力・表現力や、他者と協働して課題を解決するコミュニケーション能力、さらには、新たに生まれてくる状況や問題を解決するために、自ら考え、自ら学び、答えを見出す力を育むことを目指しているのである[2]。

このような資質・能力を身につけることは、今日の高校生にも当然必要である。しかし、生徒の多くは、従来の講義型授業に慣れ親しんでおり、自分の意見を発表したり、他者と議論したりすることの意義が理解できなかつたり、学習とは教師の与えた正解を覚えることである、と考えている者すらいるように思える[4]。このような学習に対する見方・考え方をしている場合、今の高校生はALに抵抗を感じてしまい、うまく学ぶことができない可能性がある。またALを導入した授業(AL型授業)では、生徒の能動的な学習活動が授業の中心となるため、その土台となる読

み・書きといった基礎学力，活動で活用する知識の獲得状況，コミュニケーションや討論の能力，論理的思考力など，生徒の実態に関する様々な配慮も必要となる [4]。教師が主体となり，一方向的に知識を伝達する形式ではなく，ALは生徒が主体となって，生徒同士で協働しながら活動することが中心となるため，教師は多面的に生徒の実態を把握し，その都度活動に対する適切な支援を与えていかなければ，授業の成立自体が難しいものとなるのである。

さらに最近では，上述した学び全体を改善するための三つの視点のうち，「対話的な学び」及び「主体的な学び」が注目され，「深い学び」の視点に基づく改善が図られていないとの指摘がある。深さを欠くことによるAL型授業の失敗事例も報告されているところであり [5]，「深い学び」を実現する視点は極めて重要である。森は，さまざまなALの授業を参観した経験から，ALにおいても，講義形式の授業でみられた「学生の学びの質の格差」という課題は解決されておらず，一方で，「フリーライダーの出現や，グループワークの非活性化，思考と活動に乖離があるアクティブラーニング」など新たな問題が生まれていると指摘している [6]（ここでフリーライダーとは，仲間の功績にただ乗りするような者のことを指す [7]）。

Wiggins と McTighe は，「網羅 (coverage) に焦点を合わせた指導」と「活動に焦点を合わせた指導」を，指導における「双子の過ち」と呼んでいる [8]。前者は，教科書や講義ノートに書かれた内容をくまなく教えようとするものであり，後者は，授業を聴く以外のさまざまな活動に学習者を参加させることで学ばせようとするものである [6]。前述したような深さを欠くAL型授業は，講義形式の授業，いいかえれば「網羅に焦点を合わせた指導」に対するアンチテーゼとして登場してきたが，そのアンチテーゼの振り子が，今度は，「活動に焦点を合わせた指導」の方へ振れてしまったのが現在の状況であると松下は考察している [6]。

このような現状を乗り越えるようなAL型授業が求められているわけだが，理科の授業における「深い学び」とは，科学的 content や推論に焦点が当てられたものであり，物理においては，一つの例として，生徒の概念に注目した学びが挙げられるだろう [9]。生徒の概念に注目した学びとは，自らの持ち合わせている概念と物理概念とが矛盾する状態（認知的葛藤）に生徒を置き，それを解決する過程に焦点を当てたものと言える。1.2節で詳しく述べるが，米国での大規模調査の結果，多くの生徒が誤概念（物理学習前に，日常経験に基づいて形成された現象に対する科学的に誤った見方や考え方） [10] を持っていることがわかっている [11]。多くの誤概念は非常に強固で，教師が授業で正しい物理概念を説明したくらいではほとんど払拭できない。たとえ定期試験で良い成績を取めた生徒でも，しばらくすると，正しい物理概念は忘れ去られ，また元の誤概念を持った状態に戻ってしまうことも知られている [12]。定期試験では，たとえその学習内容を深く理解できていなかったとしても，答えや公式を暗記し，問題に当てはめるだけで正答に至ってしまうことも少なくないからである。このように勉強している生徒は，物理の授業で扱われていることを，物理の教科書の中だけの非常に理想化された世界でのみ成立しており，自分が生きている現実世界とは全く縁のないものと考えてしまいがちであることも報告されている [12]。そこで，他者や外界との相互作用を通して認知的葛藤を解決し，獲得した知識の本質的な意味や現実世界への知識の適用について熟考・省察する学びを通して，見方や考え方を育む深い学びの実現が目指されているのである。

よって，これまで多くの物理授業で行われてきたような，伝統的な講義形式の知識伝達型授業ではなく，また，単に書く・話す・発表するといった学習活動を授業に組み入れただけの授業でもなく，生徒が能動的に，言い換えると，いわゆる minds-on (brains-on) 状態で授業に取り組むような仕掛けが必要である。この状態を作り出すためには，よい授業法，よい教材，よい評価法等が必要となる。より良いAL型授業実施のためには，これらを研究に基づき開発し，実践し，改善をし続けるといった授業研究と改善のループを作り出すことが必要なのである [13]。

我が国の物理教育におけるアクティブ・ラーニングやそれに類する研究の主な例としては，仮



説実験授業 [14] や玉田方式 [15] (到達目標・学習課題方式 [16]), 問題解決学習 [17] などの授業形式や, そこで扱われる教材, さらには実験開発, ものづくり [18] などが挙げられる [19]。その中で, 本研究が主に立脚しているのは, 1980 年代から欧米を中心として急速に発展している物理教育研究 (Physics Education Research; PER) の流れを汲んだ, 新たな研究領域である [12]。

## 1.2 物理教育研究とは何か

物理教育研究 (PER) は, 物理学固有の教授学習過程を対象とする研究領域で, 「専門分野を基盤とした教育研究」 (Discipline-Based Education Research; DBER) の一つとされている [13]。DBER は, 背景となる教育学, 心理学等の知見や研究手法においては共通部分を多く持つが, 立脚している学問分野の専門性に直結した領域固有性を有している [13]。例えば, 「作用反作用の誤概念をいかに払拭するか」といったことが研究課題であれば, この課題の解決のために, 学習課題や生徒の学習活動を考案し, それを導入した AL 型授業を実践, 分析したりするのである。このように PER は, 物理と教育の橋渡しをする物理学の研究領域で, 認知科学や脳神経科学の最近の成果を取り入れながら, 学習という知的作業の過程を科学的に研究する分野であり, 幅広い多くの生徒たちに, 物理概念をより一層深く理解させることを目指している [12]。生徒たちが何を考え, どのように学習しているかを分析して, そこから得られる知見をもとに, 効果的な学習をもたらす新しい授業方法やカリキュラムを開発し, さらに, その実践結果を客観的に評価して, カリキュラムや授業法の改善を試みているということである [12]。そのため, PER は物理の概念を理解し, 活用しようと試行錯誤する生徒に, 何が起きているのかを探究することに焦点が当てられている。当然, 人の思考を分析することに限界はあるものの, もし一人の生徒, あるいは多くの生徒たちが, 異なる時間や場所で, 繰り返し同じ反応をするならば, そこから一般的な理論を導き, 次なる場面での予想に用いることは可能であろう [20]。PER は「研究」と名の付くものなのであり, 「研究」であるからには過去に積み上げられてきた研究成果に立脚し, オリジナリティーと発展性, および, 定量性, 再現性, 予言性, そしてデータを取得する際の条件制御や誤差の評価, 仮説の検定といった統計学的データ処理が要素として挙げられている。もちろん, 研究成果が文化・文明や社会の発展に資するものでなければならぬのは当然である [13]。

米国では, 上記の条件を満たす形での PER が 20 世紀後半に急速に発展した [20]。その発展を受け, 1999 年に米国物理学会 (APS) は, PER が素粒子物理学や物性物理学のような他領域と同等の資格を持つ物理の研究領域の一つであることを認めた [13]。あとで述べる物理スイート (Physics suite) [12] に代表されるような, PER で開発された手法やツールは, 生徒の教授や学習を改善することが定量的に裏付けられており, PER ベースで改善された授業を受けた生徒は, 顕著な学習成果を挙げたり, 単位の失格率が減少したり, その後の学習で成功を収めたりしていることがわかっている [20]。

1.2.1 節から 1.2.8 節では, 研究に基づき開発された相互作用型授業と, 概念調査等を用いた定量的な評価法について, その概要を述べる。さらに, 本研究の動機となった現在の課題についても 1.2.8 節で概観する。

### 1.2.1 PER の歴史

#### 第1段階

前述したような, 教育心理学, 認知心理学等で確立された知見と実験手法, データ取得手法などに基盤をおき, それを物理教育固有の問題に適用するという, 現在 DBER として確立している

研究手法を意識した研究論文が発表されるようになったのは1980年代で、ワシントン大学のL. McDermottがその草分けであると言われている[13]。McDermottのグループは、発達心理学者Piagetが開発した課題の手法を学生の物理概念理解の調査に応用し、多くの学生が速度・加速度といった基礎的な概念を理解していないままであることを定量的に示した[13]。なお、同時期には、M. McCloskeyの素朴インパルス理論や、J. ClementのMIF (Motion Implies a Force) 誤概念といった、著名な研究も発表されている[10]。新田[13]にしたがって、PERの研究スタイルが確立された時期をPERの第1段階と呼ぶことにする。

第1段階の研究によって、多くの学生が物理を暗記科目としてとらえており、一貫性のある物理の理解に至っていないことが明らかにされた。特に力学教育の研究においては、学生が正しい物理概念とは異なる強固な誤概念が解消されずにそのまま保持されてしまうことが多くの研究によって示されてきた(例えば、[21])。生徒は、物理の授業で教えられた力学と、実生活の経験に根差した概念で構成された「力学」像という、二重の力学像を持ってしまっているのである。そして、前者は非常に特殊な状況でしか成り立たないのであって、現実の世界は後者が支配しているのだという、二重構造の世界観が形成されてしまっているのである。これは、ピア・インストラクションを開発したハーバード大学のMazurが、概念調査を実施した際に経験した次のような学生の質問に象徴される[13]。「Mazur教授、この問題には、先生に教わった通り答えればいいのですか。それとも、自分の思った通りでしょうか。」[22]

このような二重構造の世界観を有しているか否かは、試験によっては見えてこない。なぜなら、教科書を暗記し、演習問題を覚えてしまえば、通常の試験で高得点を得ることは容易だからである。上記の二重構造を解消するためには、後者が前者によって再解釈できること、つまり経験によって形成された運動に関する知識と概念が、正しい物理法則によって一貫性のある形で解釈できることを本人が理解し、その合理性に納得する必要がある。このような学習は受け身な学習態度では決して進まない。自ら積極的に物理法則を現象に適用していく能動的な学習が欠かせない理由はここにある[13]。

上記のような第1段階の研究成果を受けて、正しい物理概念を身につけさせるための能動的な授業方法の研究が始まった[13]。

## 第2段階

次に、生徒の誤概念の保持率を精度よく測定する方法の開発が課題となった。1992年のHestenes, Swackhammer, WellsらによるForce Concept Inventory(FCI)の開発[11]は、PERにとって重要な転機となった。FCIは、あとで詳しく述べるように、生徒のもつ誤概念と正しい物理概念とを識別する多肢選択方式の調査紙である。膨大なインタビューと記述式調査に裏付けられ、生徒がどのような誤概念をもっているかを定量的に調査するのに極めて効果的である。FCIは現在、様々な言語に翻訳され、世界共通の力学概念の調査紙として広く実施されており、日本においてもその妥当性の検証が十分に研究されている非常に精度の高い調査紙である[23]。

物理の研究では測定器の開発が不可欠であるが、FCIはPERにおける精度の良い「測定器」の役割を担っていると言える。FCIの開発によって、同一の基準により生徒の理解度や素朴概念の保持率が測定できるようになった。また、事前・事後調査に利用することによって、授業効果を同一の基準で測定することが可能となったことも、PERの進展に飛躍をもたらした[13]。

新田[13]は、FCIの開発とその広範な利用の普及を契機として、他にも様々な概念調査紙が開発されるようになっていった本段階を、PERの第2段階として位置付けている。

### 第3段階

第3段階は、教育効果の定量的な比較法の開発である [13]。1998年に R. Hake が 6000 人以上の高校生と大学生を対象として FCI を実施した論文を発表した [24]。Hake は相互作用型授業 (1.2.3 節) を受けた生徒・学生の方が、伝統的講義型授業を受けた生徒・学生よりも良い成績を取めたことを定量的に示し、結論付けた。Hake のこの論文は、現在多くの PER で採用されている、妥当性が確保された調査紙を用いた事前事後テストによる授業効果の定量化を広めるという重要な役割を果たした。Hestenes による FCI の開発、そして Hake による授業効果の定量的比較法の開発と、授業法別の規格化ゲインの比較の研究を契機として、ピア・インストラクションをはじめとした PER に基づく相互作用型授業の開発と実践、及びその授業効果の定量的な分析に関する研究の実施が、欧米を中心として広がっていった。そして日本においても、欧米に対し時間的に遅れてはいるものの、上記のような研究が発展しつつある (たとえば [25])。Hake の規格化ゲイン以降、PER には何らかの定量的結果が求められるようになっていった。この時期を第3段階と呼ぶ [13]。

### 第4段階

PER の基礎的手法と道具が、第3段階まで一通り揃えられた。それらを活用あるいは拡張しながら、広範な研究が精力的に行われてきているのが現在であり、PER の第4段階であると言えるだろう [13]。例えば概念調査紙については、現在では電気回路や熱学等、力学分野以外でも概念調査紙が次々開発され、様々な言語で翻訳、実践されている [26]。また同時に、それらを用いた授業効果の比較と改善に関する研究もおこなわれている [27]。さらに、男女差に関する研究や [28, 29]、学習姿勢や態度に関する研究が行われるなど [30]、定量的に教育効果を示す指標の開発により、PER の研究領域は多岐にわたるようになってきている。

## 1.2.2 方法

前節までで、PER の歴史を概観してきた。より具体的に研究手法や評価に用いられる概念調査、そして教材や授業法などについて本節から 1.2.7 節でまとめる。また最後に、PER の現在の研究課題と本研究のつながりについても 1.2.8 節でまとめる。

PER には大きく二つの研究手法がある [20]。個々、あるいは小グループの生徒を対象とした調査の場合、質的研究と呼ばれる手法が用いられる。質的研究の具体例としては入門物理における学生の推論様式に関する diSessa の研究が挙げられる [31]。diSessa は、マサチューセッツ工科大学で微積分ベースの入門物理を履修している 20 人の学生について、彼らの力学における推論がどのように展開されていくのかを分析した [12]。質的研究ではよく、授業の様子を動画で記録し、それを詳細に分析したり、生徒にインタビューしたり、思いつくことをすべて声に出しながら課題を解かせる “think aloud protocol” という手法をとる。質的研究からは、生徒がどのように考えているのかということについての洞察を得ることができる [32]。このような研究方法をとると、非常に価値のある多くのデータを得ることができる一方で、それらの分析には時間が非常にかかる。そのため、diSessa の研究のように、研究対象は少人数の生徒になることが多く、一般的な結論を得ることは難しい。なお、概念調査を開発する際には、Hestenes らが FCI を開発する際に行ったように、膨大な時間とスタッフを割き、設問に対する考え方などを生徒にインタビュー形式で聞き取り、問題の意図を正しく生徒が理解できているかどうかといった妥当性の検証を行うのが一般的である。よって質的研究は、単に問題に正解したかどうかという表面的なことではなく、生徒が頭の中でどのように物理を捉え、考えているのかを調べるために用いる手法である。

一方、量的研究は多くの生徒を対象とした一般化を行う手法である。これらの研究では、研究者は鉛筆と紙を使ったテスト（多くが多肢選択式）を作って生徒に解答させ、得点をつけることが多い。FCIはこのタイプの調査として最も良く知られた例である。現在、力学以外の分野においても物理概念調査紙が開発され始めており、これらの妥当性と信頼性を検証するとともに、これらを用いた授業効果の定量的測定も行われてきている。基本的に大人数の生徒を対象として実施されるため、統計的な処理をすることも可能である。しかし、個々の生徒の思考で物理的状況や問題を解くときに何が起きているのかを知ることは難しい。

PERでは、その研究目的に応じて、質的研究と量的研究の両方を、うまくバランスを取りながら併用していることが多い。最近の研究では様々な研究手法が議論され、これに伴い、さらなる洞察が必要とされている。

### 1.2.3 相互作用型授業

今までの物理の授業は、教師が黒板を使って講義し、生徒はそれを聞く、という講義型授業が主流であった。生徒自身も、多くの場合、物理を学ぶためにしなければならないことは、教科書を読み、授業を受けることに尽きると思っている [12]。しかしながら、きちんと教科書を読み、授業を受けている生徒が、物理を理解することに困難を感じるものがしばしばある。この困難は、生徒が物理を学ぶ前に、物理に対して全く白紙の状態ではないことが原因であることが多い [10]。このことは物理を学ぶ上での妨げとなる。なぜならば 1.2.1 節で述べたように、学生を持つ誤概念は、ニュートン力学と不整合を示すものだからである。

それまで持っていた誤概念よりも、ニュートン力学の方がより合理的であることを気付かせるという、いわば知識体系の転換をもたらすような教育は、前もって知識を持たない白紙の状態の生徒に何かを教えるよりも困難な作業となる [10]。Redish もこの誤概念について著書 [12] の中で詳しく言及しており、「このような教育を実現するためには、生徒は現実の物理現象に関してどのような知識や推論を物理の授業に持ちこんでくるか、ということを理解しておくのは重要である」と述べている。生徒の持つ誤概念をどのように直していくか（あるいは、学習者自らが発見して修正できるように課題状況をうまく設定するか）は、教師の重要な役割となる [34]。

そこで上述したような、相互作用型授業への注目が高まっている。相互作用型授業で重要となるのは、生徒が物理について考える活動を行う、ということである。物理は特に学習されるべき事項のそれぞれに説明が伴い、記憶よりも理解が求められる [35]。「物理が分かる、できる」ためには、まずは物理を理解することが先決なのである。そして、物理を理解するためには「よく考え」なければならない、この「よく考える」こと自体が、教師の講義を聴いているだけでは、なかなか出来ない（「講義を受けながら心の中で教師と対話しているような学生」も、実際にはいるかもしれないが、ごく少数であろう）。Reif と Larkin の研究 [36] から、科学を学ぶために要求される自発的な知性の領域と、毎日の生活の中で自然に起こる自発的な知性の領域は違うものであり、科学的な領域で考えてほしいときに、学生がしばしば日常的な領域で考えてしまうことがわかった。物理教師はおそらく自然に、そして適切に日常的な領域と科学的な領域の思考のスイッチを切り替えることが出来るが、生徒、特に物理初学者はなかなかそうはいかないだろう。そこで、教師が意識的に科学的な領域の思考のスイッチを「ON」にしてあげる必要があると思われる。そのスイッチになることが出来るのが、議論や実験といった能動的な活動なのである。

日本においては、2006年の日本で開催された International Conference of Physics Education (物理教育国際会議, ICPE) [37] をきっかけとして、Redish の著書 [12] の翻訳や、相互作用型授業の研究、実践が急速に広まっている。日本で研究、実践されている PER に基づく相互作用型授業としては、ピア・インストラクション (PI) [38, 39]、相互作用型演示実験講義 (Interactive

Lecture Demonstrations, ILDs) [25], チュートリアル [40], 協同的グループ問題解決 [41] などが例として挙げられる。またこれらの実践を公開授業の形で実施し、広く学校教育に知らせようという活動も行われている [42]。

#### 1.2.4 力学概念調査

1.2.1 節で論じられたように、PER の研究手法、そしてこれまで得られた研究成果として特徴的なことは、生徒の物理概念理解や学習姿勢・態度を、妥当性・信頼性の検証された精度の高い調査紙の実施により、定量的に比較・分析することである。代表的なものとしては、Hestenes の開発した Force Concept Inventory (FCI) [11, 43] が挙げられる (付録 E)。

FCI は、学生が力と運動の概念をどれだけ正しく理解しているのか、あるいは、どのような誤概念を持ち合わせているのか、そして力学授業の前後でどのような変容が見られたのかを調べるための調査紙である。全 30 問の、数式を用いないで答えを出す定性的な概念を問う選択式問題であり、その選択肢は、膨大な人数の学生へのインタビューに基づき作成されている。一つの設問の選択肢は、ニュートン力学概念を反映した正答と、インタビューで頻繁に登場した学生の誤概念をもとに作成した不正解選択肢からなる [10]。この力学概念調査を学期の初めと終わりで実施することで、学生の持つ誤概念を把握することや、授業効果の診断などに使える [44]。FCI は世界中でその地域の言語に翻訳されて使用されており、その信頼性や妥当性も検証されている世界標準の概念調査紙である [23]。

#### 1.2.5 Hake の規格化ゲイン

PER の研究手法、そしてこれまで得られた研究成果として特徴的なことは、生徒の物理概念理解を、FCI のように妥当性・信頼性の検証された精度の高い調査紙の実施により、定量的に比較・分析することである。例えば Hake の研究 [24] では、6000 人を越える高校生と大学生を対象として、力学概念調査 FCI を力学授業の前後で実施し、事前調査と事後調査の平均正答率から下式で定義される規格化ゲインを算出し、授業形態ごとに比較することにより、伝統的な講義型授業に比べて物理概念の獲得に有効であることを定量的に示した。

$$g = \frac{\langle post \rangle - \langle pre \rangle}{100 - \langle pre \rangle} \quad (1.1)$$

ここで、 $\langle pre \rangle$  は事前テストのクラスの前平均正答率 (%),  $\langle post \rangle$  は事後テストのクラスの前平均正答率 (%) である。規格化ゲインは、事前テストで正答できなかった生徒の割合 (つまり正答に移ることのできる余地) に対する、実際に増加した正答の生徒の割合を表しており、いわば授業による伸び率を表している。(1.1) 式のように規格化することによって、学力の異なる集団に対しても授業効果を比べることができる。

この規格化ゲインで、授業形式ごとの授業効果を比較すると、図 1.1 のような結果となることを Hake は見出した。黒いバーは相互作用型授業を表しており、規格化ゲインの平均値は 0.48 であった。一方、白いバーは伝統的講義型授業を表しており、規格化ゲインの平均値は 0.23 であった。つまり、相互作用型授業の方が伝統的講義型授業よりも規格化ゲインの平均値が 2 倍以上も高く、物理の概念形成について有効であることがわかる。

さらに注目すべきは、伝統的講義型授業で最も高い規格化ゲインが得られた授業は、ベスト・ティーチャー賞をもらうような教授たちによる、いわゆる名物授業と呼ばれるような授業だが、その授業ですら、相互作用型授業で得られた最も低い規格化ゲインの値に大体等しい値だったので

図は省略

図 1.1: 従来型授業と相互作用型授業の規格化ゲインの比較

ある。つまり相互作用型授業では、授業者の授業技術の良し悪しに関係なく、伝統的講義型授業よりも高い授業効果（物理概念形成）が期待できるということである [12]。

### 1.2.6 学習姿勢・態度調査

多くの物理教員は、常に明確に伝えているわけではないが、学生に対して期待感に関わる到達目標をもっている。大学での、特に物理学そのものを専門としているわけではない技術者や生物学、その他の分野の科学者を育成する課程における入門物理学講義では、学生に事物を関連付けさせ、方程式の適用限界と適用条件を理解させ、物理的直観を磨かせ、問題解法に個人的経験を関連付けさせ、教室で習う物理と現実世界との関連性をわからせることを目指している。何よりもまず、物理教師は学んでいる事柄の意味を学生にわかってほしいと願っているのである。このような授業のシラバスや教科書の目次の中に載っていない学習目標を、授業の中の隠れたカリキュラム (hidden curriculum) という [12]。

PER では、学習のプロセスと科学的な考え方の両方に関する授業の「隠れたカリキュラム」について、学生たちに何らかの進歩があるかどうかを知るために、学生の学習への取り組み姿勢の状態を測定する方法を考え出した。このような学習姿勢の調査は、前節で述べたように授業前後での調査紙の実施が挙げられる。調査紙には、Maryland Physics Expectations Survey(MPEX), The Views about Science Survey(VASS) と Epistemological Beliefs Assessment for Physics Science Survey(EMAPS), Colorado Learning Attitudes about Science Survey(CLASS) などがある [12]。

本研究では、コロラド大学の Adams らが作成した CLASS を使用する [45]。CLASS は物理の学習姿勢や態度を表す 42 の文からなっており、それぞれの文に対しての賛否を 5 段階 (1: 全くそう思わない, 2: そう思わない, 3: どちらとも言えない, 4: そう思う, 5: とてもそう思う) リッカート尺度で選択させるものである。42 項目の日本語訳 (石本, 新田による統一訳 [46]) を F 章に示す。それぞれの項目について学生の 5 段階の回答を「そう思う」、「どちらともいえない」、「そう思わない」の 3 段階に分け、専門家の回答 (望ましい回答) と一致している割合を算出することで点数化する。無回答の項目に関してはその項目はないものと考えて点数化する。また、でたために回答する学生を識別するために項目 31 がある。回答に要する時間は 8~10 分である。

この調査は

1. 物理の学習に関する重要な側面を広く含む
2. 注意深く構成され、検証された文の言い回し
3. 物理を選択したことのない学生にも有効な文

4. 回答の点数化が明白で簡単
5. 考えて回答するのに10分かかる
6. 調査の実施と点数化が簡単
7. 統計的に頑健なカテゴリー分類

の7つの原理に従って MPEX などの項目を改善したり、新しい項目を作成したりすることによって作成されており、多くの学生の調査結果やインタビューに基づいて改良が重ねられてきた [45]。

CLASS の項目は、作成者の考えと統計分析（探索的因子分析と確認的因子分析）に基づいて [45], [47], Real World Connection (RWC, 日常生活とのつながり), Personal Interest (PI, 個人的な興味), Sense Making/Effort (SM/E, 意味を考える努力), Conceptual Connections (CC, 概念のつながり), Applied Conceptual Understanding (ACU, 概念理解の応用), Problem Solving General (PSG, 問題解決一般), Problem Solving Confidence (PSC, 問題解決の自信), Problem Solving Sophistication (PSS, 問題解決の洗練度) という8つのカテゴリーに分類されている。また、専門家の意見が一致しないために点数化されない項目などがある。

CLASS は多くの学生や専門家にインタビューを行い、明瞭で簡潔かつただ1つの解釈をさせる内容になっているかの検証がなされており、様々なコースやレベルの学生に用いることができる。FCI と同じように授業の前後で調査を行い、変化をみることができる。多くの場合、相互作用型授業でも従来型授業でも望ましい回答の割合は下がる [45]。

### 1.2.7 物理スイート

なぜ多くの生徒たちに対して伝統的な物理の教授法がうまく機能しないのか、また教授法をどう改良すれば生徒たちがよりよく学べるようになるのか、こうしたことが、ここ20年の間にしだいに解明されてきている。こうした教育研究と最新技術を融合した成果の一つが「物理スイート (Physics Suite)」である [12]。物理スイートは、Activity Based Physics, ABP という名前のグループが、新しいタイプの教育環境を実現するために開発した、一群の授業法や教材のセットである。

1.1 節で述べたように、生徒が効果的に学ぶことができるのは、脳が活性化している brains-on 状態での活動を通してである。brains-on 状態とは、学生たちがなんとか理解しようと、熱心に考え、もがいている状態のことである。生徒が、このような脳が活性化された状態になることを促進し、支援するような環境を作り出せば、そこに効果的な授業が生まれると考えられる。議論や問題演習や実験、あるいはワークショップ学習のように、注意深く設計、構成された学習活動を通して、生徒に自ら考え推論させることを目指す授業こそが、生徒の学びをいっそう強固なものにすると予想される。ABP グループは、広範囲にわたる教育教材を統合した物理教育教材の新しい枠組みを提案している。多くの物理スイートには特徴が二つあり、(1) 学生たちが自らの学習を構築することを支援するための、誘導型の学習活動を用いること、および (2) 最近の科学技術、とりわけコンピューターを利用したデータ収集・解析技術 (Computer-Assisted Data Acquisition and Analysis, CADAA) を使用することである。

物理スイートの教員用指導書としては文献 [12, 48] がある。これらの本には物理スイートの教材だけでなく、動機づけについての議論、理論的枠組み、そしてこの方法の有効性についてのデータなどが含まれており、詳しく解説されている。

物理スイートには以下の教材が含まれる。

1. 教科書
2. 問題
3. 授業評価用の調査手段
4. 授業と教材
5. 解析ツール
6. チュートリアル
7. 実験室学習

生徒が使う教科書としては、Cummings らの“Understanding Physics”がある [49]。この教科書は主に大学生向けのもので、教育研究によって解明されてきた生徒が学ぶのに困難をきたす箇所に焦点を合わせて、そこが間違いなく理解できるように改訂されている。またこの教科書は、実験を通しての物理の知識の獲得や、物理の原理がどのようにして解明されたのかについて詳しく解説してある。

次に問題演習だが、物理スイートでは、生徒の学習到達度を測ることのできる、良い例題（試金石問題 [12] という）を教科書に掲載している。また、おおよその見積もりを行う問題（フェルミ推定 [12] など）や、式の意味を解釈して自分の言葉で表現する問題、現実的な状況に即した問題など、さまざまな文脈で物理について考える問題が開発されている。

また物理スイートでは、前述した FCI や CLASS のように、授業を評価する調査も開発、提供している。

さらに、授業形式や教材もさまざま開発されている。本研究では、1.2.3 節で挙げた PI や ILDs を実践しているが、生徒が概念的に理解し、式の意味を解釈して自分の言葉で表現したりすることを助けるために CADAA が用いられる。また、ワークショップ形式ないしスタジオ形式で実施するカリキュラムとしては、「ワークショップ物理 (Workshop Physics)」 [51]、「探究による物理 (Physics by Inquiry)」 [52] がある。ワークショップ物理は、微積分を使用するレベルで、すべてが実験に基づいた物理のコース、CADAA、ビデオ、数値モデル化等を活用する。探究による物理はワークショップ形式の物理コースで、教員養成課程の学生や現職教員を対象としたものである。

解析ツールというのは、実験やチュートリアル、ワークショップ物理などで用いるビデオ画面からデータを抽出したり、画面にプロットしたりするソフトウェアや、数値データを解析する表計算ソフトなどのコンピューター・ツールである。CADAA データの収集、表示、解析のためのソフトウェアを含む。

概念的な理解を育成したり、定性的な推論能力を育成するための、少人数グループでの誘導型の演習指導で、これに使われる教材としては、ワシントン大学物理教育研究グループが作成した「入門物理学チュートリアル (Tutorials in Introductory Physics)」 [53] と、CADAA、ビデオ画面からのデータ抽出やシミュレーションなど、物理スイートの中の解析ツールが追加的に組み込まれた「ABP チュートリアル (ABP Tutorials)」 [54] の二つが代表的である。

物理スイートでは、物理の概念的な理解を支援し、グラフ相互の変換を学んだり、物理の知識の経験的な基盤を理解することをねらいとしている。そのため実験の授業を改革した「リアルタイム物理 (RealTime Physics)」 [55] なども提供されている。

物理スイートの教材はそれぞれを単独に使うこともできるが、アプローチや、哲学、表記法は相互に整合している。その結果、もし適切で使いやすい教授法があれば、その一部を試験的に採用することもできるし、いくつかのスイート教材を自分の授業に応じて組み合わせて用いることによって授業全体を改革することもできる。



### 1.2.8 物理教育研究の課題

PERで用いられる量的研究手法のひとつである、概念調査を事前事後で実施し、その結果を用いて授業効果を定量的に分析する方法は翌年度以降の授業改善にも役立つ。しかしながら、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を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づくりが望ましい[56]。しかし、生徒の概念獲得や学習姿勢の変容を明らかにすることを目的とした研究は、聞き取り調査や発話分析（プロトコル分析）といった手法による質的なものが数例あるだけで、量的なデータの収集や分析を目的としたものはほとんど行われていない。これらの質的な手法は多くの場合、生徒一人あたりの聞き取りに1時間程度の時間を要し、かつプロトコル分析のための発話内容の文字起こしなどに膨大な時間と労力を必要とするため、現職教員が行う形成的評価活動としては現実的ではなく、かつ即時的に結果が得られるような手法ではない。また、聞き取り調査の場合、調査に協力した生徒にとっては自らの学習を振り返るとともに、教師から学習に関するフィードバックを得る良い機会となるが、上述したようにこのような評価活動を授業で受け持つすべての生徒に実施することは事実上不可能である。

このように、異なった個性や学習状況、興味・関心を持つ個々の生徒に合わせた指導を継続的に行うことは、集団を対象とする普通の授業の中では極めて困難である。しかし、1.1節でも述べたように、学校における授業では、今後ますます生徒主体の学習活動を中心とした授業実践が求められる。生徒が授業を通して思考力・判断力・表現力を伸長するためには、議論などの学習活動の質がより高くなる必要があり、そのためには基礎的な知識・理解は不可欠である。またこれからの変化の早い社会を生きる上では、主体的に学ぶ態度と能力を身に付けることも重要である。

よって、授業中や単元・学期の途中の段階で、生徒一人ひとりの理解状況を教師が把握し、生徒にフィードバックを返すことで、基礎的な知識・理解を促すとともに、何をどのように学習すればよいのかという学び方に関するフィードバックも返し、生徒の自学を助け、自ら学ぶ力身につけさせることを念頭に置いた実践と、それに関する研究が必要だと言えよう。

## 1.3 形成的評価

本節では、前節で述べたように、物理授業への形成的評価の導入を念頭に置き、これまでの形成的評価の理論的展開について、その概要を先行研究のレビュー[57]に基づき、まとめる。本節の内容は文献[57]を大いに参考にしている。

### 1.3.1 指導と評価の一体化としての形成的評価

もともと、形成的評価という言葉は初めて用いたのは、シカゴ大学の哲学者のScrivanであり、彼はカリキュラム開発の途上において行われる各種の評価活動を総称して形成的評価(formative evaluation)と呼び、全体的な望ましさや、採用するか否かを決定するような評価を総括的評価(summative evaluation)と呼んだ[58]。これに対してBloomらは、カリキュラム開発に関することだけでなく、学級における教育評価活動においても、形成的評価と総括的評価を分けるべきであると主張していた[59]。さらに診断的評価（事前的評価）という新たな機能も追加され、3種の機能に大別されることになった。

3種の評価機能を論じた『教育評価法ハンドブック』のなかでBloomは、それらを表1.1のように区別している[60]。

表 1.1: Bloom による評価区別 [60]

	目的	時期	学力観
診断的評価	授業開始時に生徒を適切に位置づけることと、授業の展開にあたって、生徒の学習上の難点の原因を発見すること	学習が開始される前	開始される学習への適正あるいはレディネス
形成的評価	カリキュラム作成、教授、学習の3つの過程の、あらゆる改善のために用いられる組織的な評価	学習の途上	学習によって獲得される学力（高次の学力を構成する基礎的な学力）
総括的評価	1つの学期やコースのプログラムの終わりに、成績づけや認定、進歩の評価、カリキュラムや教育計画の有効性の検討などを目的として用いられる評価の型	単元や学期末、年度末	学習によって獲得される学力（応用や総合、分析など学力の発展性と呼ばれる高次の学力）

つまり、診断的評価は学習の出発点における学習過程やレディネスを把握することを、形成的評価は生徒の学習や教師の授業方法、あるいはカリキュラムなど、教育課程において行われている活動の改善を、総括的評価は教育活動の効果や有効性を測ることを目的としていることになる。

Bloom が形成的評価の具体案として提唱したのは、形成的テストの導入と、この形成的テストの活用による完全習得学習（マスタリー・ラーニング）という授業システムである [59]。完全習得学習は下記の手順で進められる [56]。

1. 授業単位において達成されるべき目標群を明らかにし、すべての生徒が達成すべき最低到達水準を定める。
2. 生徒の学習適性やレディネスを考慮しつつ、最適な教え方や教材を選択する。
3. 形成的テストを実施し、生徒一人ひとりの目標の到達度合いを明らかにするとともに、つまずき箇所を特定する。
4. つまずきがある生徒には、それを克服するための補充的・治療的指導を行う。

このように形成的評価は、Scrivan でカリキュラムの開発・実施過程における情報を提供し、フィードバックすることに始まり、Bloom においてはすべての生徒を達成テストで一定程度まで完全に習得させる指導法として展開された [57]。特に Bloom の完全習得学習は、教師が何をいかに教えるのかを意思決定することを基盤としていた [57]。つまり、形成的評価は、教師による“指導と評価の一体化”を企図していたと言える [57]。

### 1.3.2 評価と学びの連動

ところが、1989年、Sadlerは生徒に“寄り添う”という意味で assessment という用語を使って形成的アセスメント (formative assessment) を定義した論文 [61] を発表した。Sadlerは、Ramaprasadの研究 [62] を引用して、「フィードバックとは、実際のレベル (actual level) と参照レベル (reference level) のギャップを何らかの方法で埋めるために用いられるシステムパラメーターの情報である」と定義し、フィードバックを形成的アセスメントの鍵であると捉えた。そして、参照レベルをカリキュラムの到達目標に見立て、教師だけでなく生徒にもわかるようにし、実際のレベルを複数の評価規準を使った生徒のパフォーマンスの質的な判断に置き換え、両者のギャップを縮小するために、他の生徒が学習した事柄を評価し、矯正する活動に係わらせると、生徒の自己評価にも役立つと主張した [57]。

つまり、教師によるフィードバックだけでなく生徒にも自己モニタリングをさせることを形成的アセスメントと捉え、「多くの指導システムのゴールは、フィードバックから自己モニタリングへの移行を促進することである」 [61] と主張した。ただし、このような主張は、すでにいくつかの学校で実施済みとはいうものの、明確な効果を示すことはできなかった [57]。

その後、1998年のBlackとWiliamの2本の論文 [63], [64] をきっかけとして、形成的アセスメントが広く知られるようになり、形成的評価と総括的評価の機能を問い直し、新たな理論的発展を希求する動きへとつながった [56]。Blackらは、教室での評価が生徒の学習の改善に役立っているか否かという問題意識に立って先行研究をレビューし、とりわけ、中学理科の探究学習で教育効果が大きいことを突き止めた。文献 [64] では、「教師によって行われるすべての活動、および生徒による自己評価について、教授や学習活動を修正するためのフィードバックとして与えられるものである。生徒の状況に応じた教授にエビデンスが実際に使われたとき、そのような評価が形成的評価なのである。」と定義するとともに、形成的評価の実験学級と通常の学級の比較研究から、形成的評価の特徴は、下記の通りであると述べた。

1. 生徒と教師の間のフィードバックを強化する新たな方法であり、教室での実践に顕著な変化を求めるものである。
2. アプローチの根底に、効果的な学習を作り出すこと、特に生徒たちを能動的に関与させるという想定がある。
3. 評価を形成的に機能させるためには、教授と学習を調整するために結果が活用されなければならない。
4. 評価が生徒の動機づけと自尊心に影響を及ぼすことや、生徒を自己評価に係わらせることによる良い効果に注目すべきである。

さらに2004年の論文 [65] では、1999年から二つの学区の六つの中等学校の教員24人で始め、その後初等学校の教員も加わった5か年に及ぶ研究で、形成的評価を改善する方法について実践的裏付けを示した。それを要約すると、第1に、形成的アセスメントをうまく活用すると、大規模テストでさえ学習者の得点がアップする。第2に、そのような変容をもたらす要因として、①発問と答えの待ち時間を長くとり、②挙手なしにランダムに指名する、③誤答を不快に感じない教室風土を醸成することが必要である。第3に、評定を介したフィードバックについては、出来た事柄と改善を要する点にコメントを添えて、生徒がコメントに反応する機会が学習機会であると捉えると、学習効果がある。第4に、生徒相互のピア評価を定期的に行い、そこで出てきた誤概念を次の学習に活用したり、カラーカードで「良くできた」「普通」「わからない」ということを伝えたり、生徒に採点用のルーブリックの使い方を教えることが効果的である。第5に、生徒

に自らの学んだ事柄を振り返らせ、改善努力を促して、総括的テストを学習過程の一部として捉えさせるということである。

教師の指導改善から生徒自身による学習改善へと力点が移されている理由は、近年の学習論、特に構成主義の学習論が切り開いてきた知見によるところが大きい。ここで言う構成主義の学習観とは、学習を生徒自身が、主体的に知識を構成したり、メンタル・モデルを構成することで、世界を意味づける行為として理解する学習観である。つまり、生徒の主体性を何よりも強調する学習観ということである [56]。

また、Black と Wiliam らは、このような形成的評価を介した様々な変化をもたらす方法について詳述した著書 [66] を 2003 年に出版し、形成的アセスメントとは、教師が教える目標を見据えて、学習者の実際のレベルを踏まえて教えた後、生徒がわからない点を生徒自身と一緒に見極め、スタンダードなどの参照レベルに照らして両者のギャップを縮めるために、教師は指導改善に、生徒は自分自身の学びの向上に努力するという意味で、“評価と学びの連動”がなされているということ述べた。

以上のように、目標に近づけるために学習を形成するという意味で、いずれも「形成的 formative」という言葉を使っているが、形成的評価で言う評価は、evaluation の訳語であり、教師が生徒の学びを値踏みし、評定するという意味合いがあるが、形成的アセスメントは、formative assessment であって、Sadler が生徒に“寄り添う”ことを重視したように、教師が生徒たちの学びを評価する際には教師と生徒との単なる対話ではなく相互作用をし、互いに影響を及ぼし合うことを含意しているということである [57]。

### 1.3.3 形成的評価の新しい潮流

日本では、現在でも、Bloom が示した表 1.1 に従って教育評価の機能を診断的評価、形成的評価、総括的評価と捉えることが多い。しかしながら、上述したように 1990 年代頃から、形成的評価と総括的評価の機能を問い直す議論が展開された [56]。Black ら Assessment Reform Group (ARG) は、形成的アセスメントとは①学習者への効果的なフィードバック、②学習者の学習における積極的な関与、③評価結果を説明するための指導調整、④学習者の動機づけと自尊心への大きな影響、⑤学習者が自己評価し、学習改善法を理解する必要性、と概括した。このように、新たな形成的評価の展望として示すのは、教師の指導改善だけでなく、生徒自身による学習改善の支援をめざす形成的評価であり、ARG はそれを「学習のための評価 (assessment for learning)」という言葉で表現している。なお、総括的評価は、「学習に関する評価 (assessment of learning)」という言葉で区別している。

さらに ARG は学習のための評価を「学習者と教師が今の学習者が学習している場所と次に進む必要のある場所とそこへ行く一番良い方法を決定する際に使うための証拠を追求し、解釈する過程である」と定義した [67]。そして Black は、教師と学習者だけでなく、学習者の仲間も加えて、表 1.2 のようにまとめている [68] (日本語訳は [57])。

また、学習のための評価と学習に関する評価の区別は、Stiggins によって表 1.3 のように明確にされた [69] (日本語訳は [57])。

このように形成的評価は、学習のための評価と言い替えられ、欧米各国で学校における実践的裏付けを伴いながら、理論的根拠を積み重ねて、様々な定義がなされてきた。2010 年に Andrade は数多くの研究者や実践家の形成的評価の定義を集約して、次のようにまとめた [70]。

「形成的評価は、少なくとも (a) 教師や管理職に学習者たちの学習についての情報を提供して、指導デザインを導き、(b) 学びの進歩について学習者にフィードバックし、学習者たちのパフォーマンスと学習目標との間のギャップの縮め方を学習者が決める、という 2 点において定義できる。」

表 1.2: 学習のための評価の三側面 [57]

	学習者が行く場所	学習者が今いる場所	そこへの行き方
教師	学習意図の解明と成功のための規準の共有	学習の証拠を引き出すような効果的な教室討論, 活動, 課題の組み合わせ	学習者を前へ進ませるフィードバックの提供
仲間	学習意図と成功のための規準の理解と解明	互いの指導資源として学習者を活かすこと	
学習者	学習意図と成功のための規準の理解	自分自身の学習としての学習者を活かすこと	

要するに、形成的アセスメント（学習のための評価）は、教師側と学習者側の両面から、フィードバックの原理である教師がねらった目標と学習者の現在の学びのレベルの間のずれを縮めるための指導法と学習法ということである。

### 1.3.4 形成的評価の時間的レベル

ここまで形成的評価に関する研究の展開についてまとめてきたが、形成的評価では教師が生徒の学習状況を把握するだけでなく、把握した実態に応じた適切なフィードバックを返すとともに、生徒自身が自らの学びのために評価を役立てることが必要であるとわかった。では、一般に教師から生徒へのフィードバックは、どのように分類できるのであろうか。

一般的にフィードバックには、時間的に3つのレベルのものを区別することができる [59]。短期的なサイクルのフィードバック機能を持つものとしては、生徒の表情・態度の観察や挙手の状況の確認、ワークシートやレスポンス・アナライザー等の使用によって、教育活動の途上における即時的なフィードバックをねらうものである。これは、それぞれの授業時限について設定されたねらいが達成されているかどうか、学習のテンポや展開の方向が学習者の能力や関心などにあっているかどうかなどを見てとり、指導展開の軌道修正を図るものといってよい。

次に、単元を単位とした形成的評価で、1つの単元内で1回ないし数回のフィードバックをねらうものである。具体的には、その単元について最低にこれだけは必ず身につけさせたい、として設定された目標群の到達状況を一応の指導が完了した時点で把握し、もし全員が未到達なままの目標があれば全員に対して、また一部の学習者が特定の目標に未到達なままであるのならその一部の学習者のみに対して、必要な補充指導を行い、最終的には学習者全員にすべての目標を達成させようというものである。そしてまた、次回からの教育活動展開のあり方、その単元に関するカリキュラム構成や教材内容などについても、目標の到達状況に応じて具体的な改善策を明らかにしようというものである。

最後に、学期・学年を単位とした形成的評価のあり方で、学期あるいは学年での一回ないし数回程度のおおまかなフィードバックをねらうものである。具体的には、中間テストや期末テスト、通知表や指導要録における成績評定といった典型的な総括的評価の手だてに、形成的評価の機能をも合わせて持たせようというものにほかならない。たとえば、中間テストや期末テスト結果や成績評定の後で数日間の特別指導の日を設定し、テスト結果や成績評定を通じて明らかになった学習者個々人の学習欠陥について補充的矯正的な指導を行ってはどうか、といった考え方なのである。もちろん、これによってすべての学力欠陥についての十分な手当てができるわけではないであろうから、学期と学期の間、学年と学年の間における休暇の期間に、テスト結果や成績評定に基づく特定の学習課題が、宿題として個々の学習者に与えられることも必要であろう。

表 1.3: 学習のための評価と学習に関する評価の区別 [57]

	学習のための評価	学習に関する評価
評価の理由	達成を高めて、学習者がより高いスタンダードを満たすことを助ける。進行中の学習者の成長を支援し、改善する。	個人や集団の達成やスタンダードの習得を文書化する。報告の目的で時間上のある時点で達成の現状を測定する。説明責任を果たす。
被評価者	学習者自身	他の学習者たち
評価の焦点	学習者たちがスタンダードに向けて形成するのを助ける教師が選んだ特定の達成のターゲット	学校、教師、学習者たちが説明責任を果たすための達成のスタンダード
評価する時	学習中の過程	学習後のイベント
主たる使用者	学習者、教師、保護者	政策立案者、プログラム計画者、指導主事、教師、学習者、保護者
典型的な使用法	学習者たちに達成を改善するための洞察を提供する。教師が句集者のニーズを診断し、反応するのを助ける。保護者が長期にわたって進歩を捉えるのを助ける。保護者が学習を支援するのを助ける。	学習者のコンピテンスを証明する。達成にしたがって学習者を選別する。進級と卒業の決定。評定。
教師の役割	スタンダードを教室の目標に変換する。目標について学習者に知らせる。評価をする。結果に基づく指導を調整する。学習者に文章や言葉によるフィードバックをする。評価に学習者を関与させる。	結果の正確性と比較可能性を確保するためにテストを注意深く実施する。学習者がスタンダードを満たすのを助けるために結果を利用する。保護者に結果を報告し、通知表のために評価をする。
学習者の役割	自己評価し、進歩を辿る。ゴール設定に貢献する。教室の評価結果にしたがって、次によりよくできるようにする。	スタンダードを満足するために研究する。テストを受ける。最高の可能な得点を得るように努力する。失敗を避ける。
主な動機	学習における成功は、達成可能であると信じる。	罰への恐れと報酬の約束
強調点	学習者と一緒にルーブリックを使う。学習者の自己評価。学習者への文章によるフィードバック。	達成テスト。最終試験。クラス分けテスト。短いサイクルの評価。

### 1.3.5 形成的評価の先行研究

平成30年公示の新学習指導要領等のための中央教育審議会の報告「幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方針等について（答申）」（平成28年12月21日）の中の「評価に当たっての留意点等」で、“学習の過程における形成的評価を行い、子供たちの資質・能力がどのように伸びているのかを、例えば、日々の記録やポートフォリオなどを通じて、子供たち自身が把握できるようにしていくことも考えられる”と述べられているように、形成的評価をはじめとして学習評価の工夫や改善への取り組みが求められているところである[71]。また、OECD（経済協力開発機構）のCERI（教育研究革新センター）は、教師が子どもの学習状況を捉え、彼らの学習ニーズを確認し、フィードバックを行うことで、学習を進めていく授業について分析を行った。その分析から、形成的アセスメントは子どもの学力の向上を促す最も効果的な戦略の一つであることや、「学習の学習（learning to learn）」の技能を形成するために重要であることが指摘された[72]。さらにOECDでは、ケーススタディと関連研究から、形成的評価の様々な要素について検討し、重要なものとして次の6つの要素をあげている[72]。

1. 相互作用を促進する教室文化の確立とアセスメントツールの使用
2. 学習ゴールの確立とそれらのゴールに向けた個々の学生の学力進歩の追跡
3. 多様な学生のニーズに応じた様々な指導方法の活用
4. 学生の理解を把握・予想（アセス）することへの多様なアプローチの使用
5. 学生の学力達成状況へのフィードバックと確認されたニーズに授業を合わせること
6. 学習プロセスへの学生の積極的な関与

このように、形成的アセスメントに焦点を当てた研究は、注目を集めている。

Scrivanによって形成的評価という言葉が初めて使われてから、現在のZimmermanらによる自己調整学習までの理論的展開については、前節まで詳しく述べた[57]。形成的評価の事例的研究としては、例えば、安藤[73]は、形成的アセスメントの特徴（評価規準を教師だけでなく子どもとも共有し、問いや課題を設定した単元で、評価言も使いながらフィードバックを行い、子どもの相互評価や自己評価を促し、評定も次の学びに繋げる）が①ステップ・バイ・ステップ、②複数方向関連づけ、③争点比較対象、の方式に沿った中学社会科実践でどのように見出されるか検討した。安藤は、論文の中で高校地歴科の教師の実践に基づき、教師や子どもの負担増を軽減するためには討論やレポートなど同じ活動ならば異なる単元でも使用できる一般的な活動別ルーブリックを採用することが適切であると提言した。

小柏[74]は、大学等で広く利用されているLMS（Learning Management System）の1つであるMoodleの小テストモジュールを活用して、形成的評価を支援する可視化ツールを開発した。小テストの評点を使ってまずはクラスタ分析により学生をいくつかのクラスタに分類し、その後、クラスタ内の学生について問題ごとの平均点を折れ線グラフにより可視化することによってクラスタ解釈を行った。このツールの利用は、多くの教師にとって日常の授業の形成的評価を円滑に行うための支援となることが示唆された。

なお、上述のようなLMSの学習履歴データを用いたデータマイニングや可視化技術などは、近年様々なツールが開発されている。これらのツールはデータ解析を専門とする教師や教育活動の分析を専門とする教師には、大変役に立つが、すべての教師にとって有用かという点、必ずしもそうであるとは言い切れない。なぜなら、収集したデータの解析に、一定程度のスキルが要求され、それが普及を困難にしているからである。また最近では、ツール開発の研究だけにとどまら

ず、実際にLMSを使って形成的評価を行った実践事例が多く報告されるようになってきた。LMSの機能の中でも「小テスト」を使った形成的評価の有効性に関する研究が盛んに行われている。しかしながら、教師が学生の理解状況を把握するためには、小テストの評点を分析しなければならないため、多くの時間と労力を要する。そのため、データマイニングや可視化技術を取り入れて、小テストの評点を可視化することが必要であるが、小テストの評点をグラフなどで可視化し、その情報を利用して形成的評価（学生の理解を把握・予想（アセス）すること）を行うアプローチの有効性についてはあまり研究されていない。

渡辺 [75] は、理科授業における形成的アセスメントの実践として、相互アプロプリエーションがなされる授業を構想し、その授業が科学概念構築に寄与するかの検証を行った。アプロプリエーションとは、Rogoff[76]によって表現された考え方で、子どもは教師に与えられた知識を機械的に受容している訳ではなく、教師との相互作用的な活動の中で、与えられた知識を自分なりに咀嚼し、取捨選択を繰り返しながら適切に受容しているという考え方である。そして、Brown[77]は教室の中で教師も科学概念を構築している子どもと同じように、子どもの考えを咀嚼しながら取り入れ、授業の目標へ到達することを目指していると考えた。この教師と子どもの相互作用の過程を相互アプロプリエーションと呼んだ。結果として、教師と子どもの相互アプロプリエーションによって科学概念が協働的に構築されていく様態を分析することができた。相互アプロプリエーションの過程において、教師は形成的アセスメントを行い、子どもの発達の最近接領域 [34] を基にして、即時的で実効性のあるフィードバックを与えることによって、学習を深化させている様子を分析することができた。子どもは教師のフィードバックや、仲間の考えを受けて、自身の考えを深化させながら科学概念を構築していった。

長沼 [78] は、形成的アセスメントによるフィードアップ、フィードバック、フィードフォワードが機能する、タスクレベル、プロセスレベル、自己調整レベル、自己レベルの四つのレベルを意識した理科の授業デザインを考案した。その結果、フィードバックが、子どもの自律的な問題解決、メタ認知や自己評価を促し、自己調整的な理科授業を具現化するとともに、科学概念の構築に寄与することが明らかとなった。

また渡辺ら [79] はさらに、キー・コンピテンシーを基にして、理科教育において育成すべき資質・能力を、協同的な問題解決によって科学概念を構築し表現する能力と捉えた。その育成を促す教授・学習方略の実践を行うことを目的として、「構成主義に基づく学習環境の五つの鍵となる要素」に基づいて理科授業を計画・実践した。教師は児童のパフォーマンスをアセスメントし、それに基づいて支援を行っていた。

海外の実践では、PERの文脈に関係が深く、本研究のように小テストを形成的評価のための方法として用いている Olle らの研究 [80] や Chih-Ming らの研究 [81] が挙げられる。Olle らの研究では、基本的な概念の理解と、良い学習習慣の獲得のために、オンラインのクイズを出題した。彼らはクイズの結果を正解または不正解のいずれかでフィードバックすることで学生の学習に良い影響があるのかどうかを、調査とインタビューを通して研究した。その結果、38%の学生は対象の講義の学習内容をどれだけ知っているのかということについての見方が変わった。さらに言えば、20%以上の学生が学習習慣に良い変化があったと答えた。Chih-Ming らの研究では、データマイニングを利用した携帯電話での形成的評価ツールの実践について研究した。実践結果より、形成的評価のフィードバックは、学習者の興味を引き、学習のパフォーマンスを向上させることがわかった。また、Robert[82]は、入門物理学の講義で、形成的評価を導入した物理授業を実践的に研究した。彼はクリッカーで解答する選択肢問題の出題と議論、そして教師からのさらなる問いかけを通して、学生の概念理解の向上を促進しようと試みた。Clemensら [83] は、(1) 生徒の学習をモニターするために形成的評価を行う、(2) 生徒が学習目標と自分のパフォーマンスとの差を知るために形成的評価を行う、(3) 生徒の理解を検証するために調査ツールを使用する、(4) 総



括的評価を形成的な目的で使用する、の四点を研究として行うとともに、さらに4クラスの生徒のFCI事後調査の結果を分析し、スイスでは概念理解よりも数値的な問題解決を重視した授業スタイルになっていることを明らかにした。Clemensは、各生徒のFCIのスコアと誤概念保持率を、Hestenesによる分類表に基づき各学習の観点ごとに集計し、レーダーチャートの形に表すことで、例えば合計点数が同じでも、生徒個別に理解の仕方は異なることを示した。

上に述べた形成的評価・“形成的アセスメント”に関する事例的研究における形成的評価の効果の検証では、生徒の発話分析や行動の観察など、ほぼすべてで質的な研究手法がとられている。データマイニングに関して前述したことと同様に、生徒の発話分析や行動の観察からは、これを専門としている教師にとっては大変有用な情報を得ることができるが、すべての教師にとって有用であるわけではない。かつ、このような方法は、データの収集、分析に多くの時間と労力を要するため、学校現場で専任教員として働きながら研究を行い、授業の改善に取り組もうという教師にとっては、実現可能性の低い手法と言える。さらに、小テストを形成的評価の方法として取り上げている研究もあるが、把握した生徒の学習状況をフィードバックする方法について研究している事例は、ほとんど見られない。形成的評価の研究は、着実に進歩していることは先行研究からわかるが、客観的・定量的な形でのデータの収集と生徒へのフィードバックについては、これまであまり研究されてこなかったのである。

## 1.4 研究目的及び方法

以上を踏まえて本研究では、大きく2つの研究課題を設定することとした。

1. 物理授業に導入できる形成的評価を開発、実践し、概念理解と学習姿勢の向上に寄与しているのかを検証する。
2. 開発した形成的評価により、物理授業における生徒の学びの様子を多角的・定量的に分析する。

現実の授業で形成的評価がなされることは、それほど多くない[84]。多くの教師がフィードバックとして与えられているのは、テスト・レポート・ワークシート・宿題・通知表などの成績の評価であり、これらは単元・学期・学年末に学習の最終的成果を測ることを目的とする総括的評価である。このため生徒は、この時点でフィードバックを与えられても、それを当該の学習活動に活かすことはできない。このように、せつかくのフィードバックが活かされることなく、そのまま次の単元・学期・学年の新しい学習課題に移ることは多いのである。

しかし、生徒がフィードバックを最も必要としているのは、ある単元やプロジェクトの学習課題に取り組んでいる過程で自分の思考を修正しようとするときである。したがって、形成的評価の機会を増やすことは、学習と転移を促進し、生徒は思考を修正することに価値を見いだすようになる。また、グループで共同作業をする機会を設けることも、フィードバックの質を高めるための効果的な方法と考えられる[84]。

PERでは、ここまで述べてきたように、FCIやCLASSといった調査紙を授業前後で実施し、その結果を比較、分析することによって生徒の学習到達度を測定する研究手法が確立され、これまで多くの研究で用いられてきた。ここで授業前の調査は、表1.1における事前的評価(診断的評価)に相当し、授業後の調査は、総括的評価に相当すると言える。このように、PERではこれまで、精度の高い調査紙を開発し、これらを用いる形で、事前的評価と総括的評価に関する研究が結果的に盛んに行われてきた。しかし形成的評価の研究については、1.2.8節でも述べたように、これまでPERの文脈では、Plybourの研究[85]で形成的評価と総括的評価の比較研究が詳細に行

われている他には、少なくとも我が国における研究は、筆者の知る限りほとんど行われていない。当然、多くの物理教師は毎時間の授業で、教師が生徒の質問に答えたり、確認問題を出題して解答させたり、生徒のノートやプリントへの記述を読みコメントを返したり、小テストを行って理解度を確認したりしており、このような形成的評価に相当する教育活動は、誰しもが意識せずとも実施していると思われる。しかしながら、それらの形成的評価に相当する教育活動が、本当に生徒の物理概念理解や学習姿勢・態度に良い影響を与えているかどうかは、研究ベースで検証されたことはほとんどないと考える。多くの教師は、自らの感覚や経験に基づき、生徒の理解状況を把握することが多いのではなかろうか。

また、1.2.3節でも述べたように、我が国においてPERに基づく相互作用型授業の研究と実践が盛んになってから、まだ10数年しか経過していない。大学、高校教員が中心となって研究と実践が進められてはいるものの、米国で開発された教材を日本語に翻訳し、試行的に授業で実施している段階から抜け切れたとは言えない段階であり、日本の学校の背景や、カリキュラム構成、生徒学生の学習履歴を踏まえた、日本に合った教材の独自開発はあまり進んでいない。前述したように、日本の高校、大学の物理授業の実態調査が行われたり[27]、PERに基づく相互作用型授業の公開講座を通して物理教師に広めようとする動きが出てきたところなのである[42]。そのため、上記のような形成的評価を実施するには、米国で行われている先行研究を踏まえつつも、日本の大学高校の物理授業の状況に合った教材を開発することが望ましいのである。

そこで本研究では、日本の教育課程や生徒の実態に合った、学期や単元の途中の段階で生徒の概念獲得状況を定量的に把握するとともに、生徒個別に学習に関する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。さらに、開発する形成的評価は実際に高等学校物理の授業に導入し、形成的評価が生徒の概念理解と学習姿勢の向上に寄与しているのかを検証するとともに、上述した事前的評価と総括的評価で得られたデータも用いて、生徒がどのように物理を学んでいるのかということも総合的に分析した。

以上のように、PERの先行研究の知見に基づき、授業を単位としたものと、単元を単位としたものの両方の時間サイクルで、フィードバックを行う形成的評価の開発、実践、検証に関する研究を行うことで、Bloomによる3つの教育評価（事前的評価、形成的評価、総括的評価）を定量的かつ個別に行うことのできる授業モデルと、具体的な教材群を、本研究を通して開発することができる。

本章以下の本論文の構成を述べる。

第2章では、授業を単位とした短期的な時間サイクルの形成的評価として、「振り返り」と「予習」を導入したピア・インストラクション(PI)型授業の実践とその分析について述べる[39, 86, 87]。毎回の授業最後に「授業でわかったこと・まだよくわからないこと」を提出させる「振り返り」は、「文字数」と「内容の深さ」という二つの観点で評価した。「予習」は指示された教科書の範囲を授業までに読んでくることを課題とし、毎回の「振り返り」において自己評価させることで定量化した。PERの先行研究で開発されたPI効率やHakeの規格化ゲインと、本研究で新たに開発した「振り返り」と「予習」の定量的評価指標を用いて、実践した授業の分析を詳細に行う。そして、これまで感覚的に捉えていた生徒の学びの様子を「振り返り」と「予習」の定量的指標の開発、実践により関係づける。

第3章では、単元を単位とした中期的な時間サイクルの形成的評価として、新たに開発した形成的テストと個票による形成的評価を導入した授業について述べる[4, 88, 89, 90, 91]。形成的テストは、FCIやPIを参考にして、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を作成した。問題はプロジェクターを用いて連続して十問程度出題し、それぞれにクリッカーで解答する形式で実施した。個票は二種類配付した。一つ目は、形成的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」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、自学を促した。二つ目は、形成的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」である。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。なお、クリッカーから得られる生徒個別の学習データの処理を容易にし、学校現場で個票の作成と配付をできる限り可能とするために、Excel VBA マクロで動作するツールソフトを開発した。次に、事前事後調査として実施した力学概念の調査紙 FCI と物理の学習姿勢・態度の調査紙 CLASS、そして年度末に実施した形成的評価に関するアンケートを複合的に用いた分析について述べている。分析から、形成的評価の活用度が高い生徒群において、概念理解および学習姿勢がともに向上していることを見いだしたことを述べる。

第4章では、本研究の総括を行う。本研究で行った、異なる時間サイクルの形成的評価を、それを評価する定量的な指標とともに開発、実践し、詳細な分析を通して、有効性を検証した研究について総括する。



## 第2章 ピア・インストラクション型授業の定量評価

### 2.1 背景

#### 2.1.1 ピア・インストラクション

ピア・インストラクション (PI) は、ハーバード大学の Mazur が開発した能動的学習法である [39, 22]。一言で表すならば、「授業中に問題を出題し、その答えを付近の学生同士で議論させる学習活動」ということになる。教室全体で議論させることは難しくても、付近の生徒同士で議論させるだけならば、百人を超える生徒を抱える授業でも実現可能である。実際、開発者の Mazur は、100~200 名規模の入門物理学講義で PI を実施していた。

具体的に、PI の手順を説明する。まず、1 コマの授業を 10 分から 15 分程のまとまりに区切って構成する。そして、各まとまりの最後に、講義したばかりの内容に関する設問を出題し、以下の手順で生徒に解答させる。

1. 選択肢問題をスライドで提示する (図 2.1)。
2. 生徒にクリッカーで解答させる (まだ議論はしない)。
3. 付近の生徒同士で議論させる。
4. 同じ問題に対してもう一度クリッカーで解答させる。
5. 正解を示し、解説する。

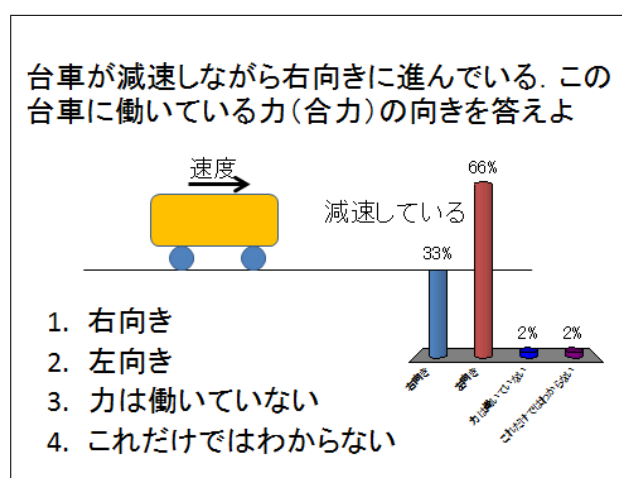


図 2.1: PI の問題例

1では、講義した内容の中心テーマの概念の理解を問うような選択肢問題を出題する。この問題は複雑な計算を必要としない、物理概念に基づく推論によって正解を得られる問題である。演示実験やシミュレーションの結果を予想する形式で出題することもある。

2は、全ての生徒に自分なりの答えを持たせるためのステップで、能動的な学習のきっかけを作る。解答の際には、クリッカーと呼ばれる聴衆応答装置 (Audience Response System; ARS) [92] を利用することで、生徒からの解答を、受信機を接続した PC によって瞬時に集計し、解答分布を問題のスライド上に表示できる。また、データを PC に蓄積することもできる。生徒にとっては匿名性があるため、周囲の生徒のことを気にして、解答を躊躇するということではなく、教師にとってはデータ収集を容易にする。クリッカーを使用する利点としては、解答分布が瞬時に表示されるため、生徒の理解度をその場で確認することができる点である。これにより、教師は生徒が理解していると思いこんで、授業を先へ先へ進めてしまうという事態を防ぐことができる。例えば、生徒の理解度に合わせて補足的な説明を行ったり、追加の問題を出題したりすることができる。また、クリッカーで収集したデータは、専用のソフトウェアで Excel データとして保存することもできるため、データの収集と教育効果の数値化が容易にできる。Mazur はクリッカーではなく、色々な色のカードを使用した解答方法で PI を行った場合でも、同じ結果が得られることを示した。

3では、答えが異なる相手に対しては、自分の答えの論拠を述べ、説得を試みさせる。同じ答えを選んだ生徒同士でも、答えに至るまでのプロセスまで同じであるかどうかを確認するように促す。生徒同士という気安さの中で、間違えることを気にせずに物理について話し合えることは物理の学習に対する考え方を前向きなものに変化させることにつながると思われる。また、教師の理路整然とした解説よりも、同じような部分がわからなくて悩んだ生徒からの説明の方が、かえって理解しやすい面もある。ほとんどの場合、「仲間同士の教え合い」の効果で、正答率が議論前よりも上がる。教師にとっては、生徒の考えを把握することができる。生徒の議論時間はだいたい2~3分程だが、基本的には議論の様子を見て判断し、生徒の様子に応じて変更することもある。議論中、教師は机間巡視し、生徒の発言に耳を傾けるが、議論に加わることや正答に導くような助言はしない。

最後の5では、生徒は固唾をのんで解答発表を待ち、その後の解説は集中して教師の説明を理解しようとする。このように、PIには授業にメリハリをつける効果がある。演示実験によって正解発表を行う場合でも、3の議論で何に注意して観察すべきかが焦点化されている。問題の解説は、教師が解説する代わりに生徒を指名し、意見を発表させることもある。

Mazur は、議論前正答率が40~70%の範囲にない設問は、実施しても効果はあまりないとしているが [22]、本研究では、議論前正答率が40~70%の範囲に無い設問についても、通常のPIの手順の通り実施した問題もある。兼田と新田の「議論によって生徒の考えが誤答に収束した場合、正解を知ったときの生徒の驚きが非常に大きい。議論をしたのにも関わらずクラスの大半が誤答を選んでいったというのは、個人レベルでの誤りをはるかに超えた衝撃を生徒に与える。そのため、正答を示して解説を行なう際の集中力も上がる。」という報告もあるためである [93]。また、基本的には議論を通して正答率が向上する問題を出題するが、必ずしも多数派の選択肢が正解となるわけではなく、直観と反するような問題を出題することもある。深く考え議論し、他人の考えに流されるのではなく自分の考えで解答することを促すためである。

PIは1つの設問に対して生徒は座席の近い生徒同士で議論をするので、クラスの編成人数に左右されることなく導入できる。今までの授業形態を変え、相互作用型授業を導入するのはなかなか難しく、カリキュラムや時間的な制約等も考慮しなければならないが、PIはそれまでの授業スタイルを大幅に変更することなく取り入れられる。また、高校で議論をもとに授業を進めるとなると、クラス全体で意見を共有するため発表し、全生徒を議論に巻き込んだの進行が必要となる。

そのため、生徒の議論が消極的であると十分に進められず、生徒の意見をまとめ、議論の内容を踏まえて授業を進行していくには、教師側の経験や熟練を要する [44, 94]。さらに、議論が特定の生徒と教師とのやり取りになってしまい、議論に参加することができない生徒や、参加しようとしていない生徒が出てきてしまう危険性もある。

このようなクラス全体での議論は教師にとって、生徒一人一人に授業内容を理解させるとともに、授業全体の運営も行わなければならない、非常に実施が難しい。つまりこのような授業形式での授業の成功は、教師の力量によるところが大きいの。しかし、PIは生徒の意見で授業の流れが大きく変わることはほとんどないため、授業者の技能が問われることは少ない。以上のことから、日本の高校物理においてPIは比較的導入しやすく、日本の高校生を対象とした実践と研究が行われてきている。[44, 93, 94]。

PIを取り入れた授業のことを、ここでは「ピア・インストラクション型授業 (PI型授業)」と呼ぶことにする。

### 2.1.2 PI効率

PIの先行研究では、設問ごとのPIの授業効果を比較するために、Hakeの規格化ゲインを模して、PI効率 (PI efficiency)  $\eta_{PI}$  という量が定義されている [94]。

$$\eta_{PI} = \frac{\langle post \rangle_{PI} - \langle pre \rangle_{PI}}{100 - \langle pre \rangle_{PI}} \quad (2.1)$$

ここで議論前正答率 (%), 議論後正答率 (%) をそれぞれ  $\langle pre \rangle_{PI}$ ,  $\langle post \rangle_{PI}$  としている。(2.1) 式は、議論前に不正解だった生徒の割合に対する、議論を通して不正解から正解に移った生徒の割合を表しており、いわば議論の効率を表す量である。PI効率により、生徒の理解しやすい、もしくは理解しにくい物理概念を見出すことができるため、PI型授業の細部を検討するための指標として有効な量であり、設問ごとの正答率から算出される値であるため、設問の難易度や種類に依らず、効果の比較を行うことができる。本研究でもこのPI効率を用いて、PIの授業効果について定量的に分析した。

このPI効率の理論的な解析によると、[95]で示されているように、 $\eta_{PI} = \langle pre \rangle_{PI}$  という関係があり、実践データにも裏付けられている [96]。

## 2.2 PIの先行研究

我が国における高等学校物理にPIを導入した授業に関する先行研究は、以下のとおりである。

2008年、兼田は高校2年生の物理Iの授業を対象にPI型授業を実践した。PI効率を導入し、議論の効果を分析した。また、生徒の能動性を高め、物理概念もより深まった [93]。

2009年、高橋はPI効率を用いて、わずかな授業展開の違いが教育効果に大きな差をつくる場合があることを明らかにするとともに、FCIの事前事後テストによる定量的な授業評価を初めて行った。授業に能動学習を取り入れることで生徒の学習意欲の喚起につながった。また、PIには高い再現性があることもわかった [94]。

2010・2011年、川島はFCIの事前事後テストにおける誤答の分析によって誤概念保持率の変化を調べ、翌年の授業において誤概念の保持率の高い項目に関する授業改善を試みる研究を行った [44]。

2014・2015年、金森はジェンダー差の観点から定量的に分析することを目的として授業実践した。力学分野の授業で行ったFCI, PI, ワークシートへの記述等から得られるデータに基づいて、

ジェンダー差を分析したところ、英米と同程度のジェンダーギャップ値があること、顕著なジェンダー差を示す誤概念があること等が分かった。また、ジェンダー差の大きい誤概念に焦点を当てて授業を行うことによるジェンダーギャップ値の変化を調べた [28]。

2015・2016年、後藤はPIの議論を詳細に分析し、生徒間の相互作用がどのように機能しているのかを分析することを目的として、PIの議論のプロトコル分析を行った。生徒の発言をより詳細に分析するために、認知負荷理論を援用した分類を考案し、議論の流れを踏まえ、相互作用の度合いに応じた議論全体を分類した。さらにPIの実施対象全体での議論の傾向を分析するために、フローチャートを用いて議論パターンを分類し、比較も行った。この研究を通じて、物理の概念問題に対する生徒の思考パターンの例がいくつか明らかになった [97]。

以上のように、クリッカーからのデータによってPIの効果を定量的に表すことができること、FCIによる事前・事後調査等によってPI型授業は物理概念の獲得等について一定の効果が得られること、物理概念の男女差に関すること、そして生徒の議論内容に関すること等が、先行研究として行われている。

### 2.3 目的

本研究では、PI型授業に、「振り返り」と「予習」を導入した授業について実践的に研究する。これは前述したように、最も短い時間サイクルのフィードバック機能を持つ形成的評価についての研究である。それぞれの授業時限、または直前の授業内容を生徒が十分に理解できているかどうか、そして、授業のテンポや展開の方向が生徒の理解状況や関心などに合っているかを、PIによって確認し、その後の指導展開の軌道修正を図る。また、議論前、議論後の正答率を用いて算出されるPI効率や、前述したHakeの規格化ゲインのような定量的結果に基づいて授業分析を行うことで、PIの形成的評価としての妥当性を検証する。さらに、毎回の授業における生徒個別の学習状況等をより詳しく知るために、従来のPI型授業に加えて「振り返り」と「予習」といった学習活動を導入するとともに、それらの定量的評価法の開発と、それを用いた授業分析についても研究する。

生徒は毎回の授業終わりに「振り返り」として「授業でわかったこと・まだよくわからないこと」をまとめることで、自ら授業内容の理解度を自己評価することができる。また教師にとっては、生徒の理解状況を把握するとともに、生徒個別に学習に関するフィードバックを与える機会、つまり形成的評価を行う機会を得ることができる。「振り返り」の導入により、生徒から見た授業の様子を教師が得ることもでき、授業計画をその都度修正することも可能となる。「予習」についての生徒の自己評価からは、授業だけでは見えてこない生徒の家庭学習の状況を教師が知ることができる。このように、2章で述べるのは、予習—授業—振り返りのどのサイクルにおいても形成的評価を可能とする授業モデルと、具体的な教材等を実践的に研究するものである。

また、これまで多くが教師の感覚によって行われてきた授業分析を、PI効率やHakeゲインのような定量的結果に基づいた形で、更に授業実践に関する分析を詳細に行うために、「振り返り」と「予習」の定量的評価法の開発と、それを用いた授業分析の研究について述べる。「振り返り」の定量的な指標としては「文字数」と「内容の深さ」という二つの観点で評価する。「予習」は、毎回ではないが、予習段階における生徒の教科書の内容に関する理解状況を確認するために、授業の冒頭でクリッカー問題を出題し、生徒に答えさせたり（議論は行わない）、毎回の「振り返り」において、生徒に自己評価させることで定量化する。

このような「振り返り」と「予習」の定量的指標を用いた分析によって、これまで感覚的に捉えていた生徒の学びの様子を、「振り返り」と「予習」の定量的指標と関係づけることができると考える。



## 2.4 実践「振り返り」と「予習」を導入したPI型授業

本研究でPIに新たに導入した「振り返り」と「予習」についてそれぞれ詳しく説明する。生徒の学習をより促進するために、認知心理学の知見に基づき、新たに「予習」と「振り返り」という学習活動を従来のPI型授業に追加した。なお、この手法は、市川伸一の「教えて考えさせる授業」[98]を参考にしている。「予習」は先行オーガナイザー、「振り返り」はメタ認知にそれぞれ対応している。先行オーガナイザーとは、学ばせたい知識を整理したり対象づけたりする目的で、前もって与えられる枠組みのことで、教科書や講義ではじめに内容の概略を述べたりすることがこれに当たる。またメタ認知は、認知の中の自己参照の部分、すなわち考えることについて考えることを意味する[12]。

### 2.4.1 メタ認知

メタ認知とは、「認知過程に対する認知」のことである。認知心理学では、人間を一種の情報処理システムであると考え、その処理をコントロールするプログラムは固定したものではない。言い換えれば、いくつかのプログラムを柔軟に使い分けたり、新しいプログラムを作りだしたりするのが人間の学習である。そこで、人間が自らの認知過程をモニターしてコントロールしていくメタ認知 (metacognition) という働きが大切になってくる。具体的には、次のような内容を指している。

- 自己の認知についての知識を持つこと—「自分はどれくらいの量の記憶ができるか」がわかる
- 自分の認知過程の状態を把握すること—「自分は今の話がどうもよくわかっていないようだ」ということがわかる
- 自分の認知行動を制御すること—「あとで思い出しやすくするためにはこのように覚えれば良い」とわかっており、実行できる

学習には、外界の事象についての知識を蓄積するだけでなく、自己の認知の過程を知り、それを自分自身でコントロールしていくというメタ認知的な側面がきわめて重要である[34]。

### 2.4.2 「振り返り」の導入

2012年度の授業実践より、毎回の授業の終わりに、メタ認知の力を身にさせることを目的として、生徒に授業の「振り返り」として「授業でわかったこと・まだよくわからないこと」をまとめさせることを試みた。図2.2は生徒の書いた振り返りの例である。提出された「振り返り」には、フィードバック・コメントを返し、さらにクラス全員のコメントと教師のフィードバックをプリントにまとめて、次の授業で配布するようにした（「振り返りプリント」）。この学習活動は、「メタ認知」の力を身に付けさせること以外にも、教師と生徒、あるいは生徒同士の相互作用を増加させることもねらって導入した。「振り返り」は、生徒にとって復習に役立つだけでなく、教師にとっても生徒の理解度に基づいて授業計画を立てるのに役立つ。

## 図は省略

図 2.2: 生徒の書いた「振り返り」の例

### 授業の振り返りから(6月6日授業分)

#### <授業で分かったこと>

・最初のクリッカーの問題は、手で引くのではなく、箱と同じ重さのおもりをつけて、初速度を与えてやっても、等速で運動すると考えられると思った。

⇒**力と関係しているのは、速度ではなく、加速度であることが確認できたかなと思います。クリッカーの問題では、問題を提示した時に「一定速度で動いている最中のことを考えていますよ」と強調したつもりでしたが、あまり伝わっていなかったようです…。逆に言えば、皆さんは無意識に「止まっている状態から動き出す」場面について考えがちだということが分かりましたね。**

#### <まだよく分からないこと>

・一定速度で運動している**最中**と、**動き初め**とで、かかる力が違う？わかってきたようなこないような…！  
 ・このとき、床から離れる瞬間の加速度 ( $>0$ ) は考えないのですか？  
 ・このときあらかじめ等速直線運動をしている状態なら、引っ張る力と重力が釣りあっていますが、ここから止まる場合、引っ張る力が弱くなるんですか？でも止まる場合も力は釣り合いますよね。  
 ⇒**まずクリッカーの問題では「一定速度で動いている最中」のことを問うていたのは、再確認して下さいね。クリッカーの問題とは関係なく、床で静止している状態から上向きに動き出す場合や、上向きに動いている状態から静止する場合について、少し考えてみます。**

図 2.3: 「振り返りプリント」の例

### 2.4.3 先行オーガナイザー

学習する事柄が複雑になると、学習者自らが知識を構造化することは容易ではなくなる。そこで、教授者が構造化して提示したり、学習者の構造化を助ける手立てが必要になってくるわけである。

Ausubel は、記憶実験で、単語のリストを記録する前にそれらの単語の関連を抽象的に記述した文章を読ませておくと、記憶成績が促進されることを示した [99]。あらかじめ提示する文章は、先行オーガナイザー (advance organizer) と呼ばれ、後続する情報を体制化して取り込むための枠組みとなる。具体的には、教科書や講義で、はじめに内容の概略を述べたりすることである [34]。

### 2.4.4 「予習」の導入

予習はこの先行オーガナイザーを生徒に与えることを目的として導入した。予習としては、基本的に教科書の指示された範囲を読んてくることを課題とした。授業実践を行った高校では、伝統的にプリントを利用して授業を進めており、教科書はあまり用いられていなかった。教科書は生徒が共通して使え、もっとも身近にあるリソースであり、学習内容がコンパクトにまとまっている。そのため、生徒に授業からの情報を体制化して取り込むための枠組みを与えるのに適していると考えられる。そこで、教科書を予習に活用することを試みた。具体的には、授業までに読んてくる範囲を「振り返りプリント」で指示し、生徒に考えてきてほしいポイントを簡単に示した。予習では、次の三点を意識しながら読むように、生徒に指導した (図 2.4)。

- 授業で何を学ぼうとしているのか
- 疑問点を明らかにする (疑問に思った箇所には付箋を貼る)
- 書かれていることを鵜呑みにするのではなく、「これは自明なことなのか」と自らに問いかける

また、予習は批判的なものの見方・考え方の基礎を身につけるためのものとして位置付けている。ここで重要なのが、予習で生徒が教科書に書かれている内容を完全に理解してくることを前提に授業を進めるのではなく、大切なのは予習段階で「授業でどんなことをするのか」という概略を掴み、ある程度の予備知識を持って学習しやすい状態を作らせることである。「予習でわからなかった疑問点」をあらかじめまとめておいた上で授業に臨むことで、何を学びたいのかが明確になると予想される。つまり、いわゆる「生わかり」状態になってもらうのが予習の大きな目的である。そして、授業でもう一度先生の説明を受けたり、課題を遂行したりして理解を深め、復習で定着を図る [98]。

ただし、生徒に負荷をかけすぎないようにするために、予習の強制はせず、授業中や「振り返りプリント」の中で、効果的な物理の学習のために教科書の予習をすると良い、ということを伝えるにとどめた。

予習段階における、生徒の教科書の内容に関する理解状況を確認するために、毎回ではないが、授業の冒頭でクリッカー問題を出題し、生徒に答えさせた (「クリッカークエスチョン：議論はせずに、選択肢問題にクリッカーで一度だけ解答させる学習活動」とここでは定義する)。このクリッカークエスチョンの問題例は図 2.5 である。なお、予習状況やクリッカークエスチョンの正答率は成績に反映させないことを、学期のはじめにアナウンスした。

なお、PI の開発者の Mazur は、Just in Time Teaching (JiT) と PI を合わせて、いわゆる反転学習の形で授業を実施している [22]。生徒は予習の段階で教科書を読むなどして自学し、web

を利用して出題された予習問題に答えることが課されている。そして Mazur は、生徒の予習状況を確認しつつ、授業の中でできるだけ長い時間を PI にかけてるように授業を展開しているのである。本研究では実践対象が高校生であることや、物理の予習が生徒にとって過度な負担とならないようにすることを前提として、上記のような形での「予習」を授業に導入することとした。

## 【学習のポイント】

## &lt;予習&gt;

教科書の指定されたページを読み、疑問点があれば付箋を貼ったり、ペンでチェックをつけたりメモを書き込んだりして、「授業で何を学ぼうとしているのか、自分は何が分からないのか」を明確にしておこう。ノートに簡単な教科書のまとめを書いてくるのも良いだろう。通学の電車の中などでも出来る事なので、必ず取り組んでもらいたい(5分準備をして授業に臨むだけで大分違う)。また、教科書に書かれていることを鵜呑みにするのではなく、「これは本当に正しいのか?なぜ正しいと言えるのか?」と自ら問いかけながら読むこと。振り返りプリントでは予習状況もチェックするが、これは成績には反映しないので正直に答えてほしい。

## &lt;授業&gt;

西村の説明を聞いて、予習で分からなかった点が解決しなかった場合、その場で積極的に質問してほしい。みんなで考え、議論することで、その疑問が解決することはよくある。また授業では、友達同士で議論をしながら問題を考えることがよく行われるが、物理概念を身につけるために、このような方法は効果的であることが証明されている。授業の最後に、みんなが自らの理解度を把握するために「分かったこと・分からなかったこと」をまとめてもらうが、そのプリントはノートに貼るなどして、きちんと保存しておくこと。

## &lt;復習&gt;

教科書を読み返すのがよいだろう。付箋を貼ってある所が「やはりよく分からないままだ」ということもある。そんな時には、友達に教えてもらっても良いし、西村に質問してもいい。「分からないまま」にするのが一番良くない。また、返却された振り返りをノートに貼っておいて、後で読み返した時にその隣に、かつての自分の質問に答えるつもりで書き込みもしておこう。自分の成長を自分自身で確認することが出来る。

図 2.4: 初めの授業で配布したプリント (一部)

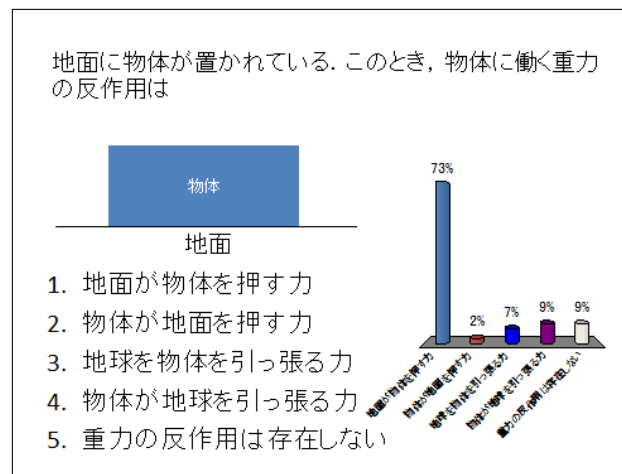


図 2.5: クリッカークエスチョンの問題例

以上のような「振り返り」と「予習」を導入した PI 型授業の基本的な形式は、図 2.6 に示してあるとおりである。授業を受ける前に自宅学習として「予習」を行い、授業に入ると、まずはじめに予習チェックとしての「クリッカークエスチョン」を行う。その後、10~15分ごとに「講義」と「PI」を繰り返し、授業終わりで「振り返り」をまとめさせ、提出させる。ただし生徒実験を行う授業では、「教師からの説明」の後、授業終了までの残り 35 分程度を実験の時間とした。

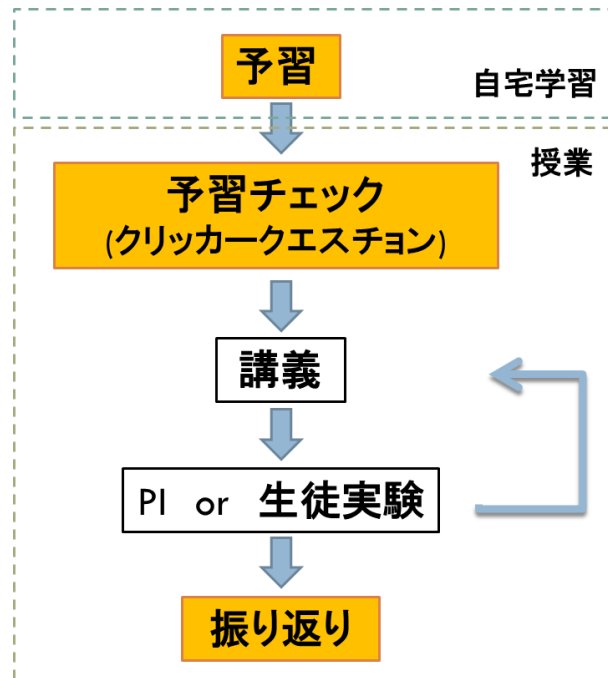


図 2.6: 基本的な授業形式

#### 2.4.5 形成的評価としての位置づけ

PIは、授業で扱った内容のうち、中心的な物理概念を問う選択肢問題を教師が出題しており、それを生徒に生徒同士での議論を通して理解することを求める。教師としては、生徒に理解してほしいことが何であるかを、問題の形式で示し、生徒はこれを自分が理解できているかどうかを正解か不正解かという点で評価できる。PIを実施するタイミングは、様々なケースが想定されるが、基本的には新たに知識を獲得したところで、その直後に知識の活用の仕方を確認させるために行うことが多い。つまり Bloom のいうところの学習途上での実施ということになる。また、評価の対象としているのは学習によって獲得された学力であるため、PIは形成的評価であると言っても良いだろう。

「振り返り」の活動は、毎時間の授業終わりに、生徒に自らの学習状況をメタ認知することを促すものである。「振り返り」により生徒は自らの学習をコントロールし、不足していると自覚した部分を補おうと自学自習を促す働きがある。さらに、「振り返り」には教師が生徒の記述に応じて、学習コメントを個別に返すため、学習内容の理解を助けることは当然のこと、学習の方向性を示すことも可能である。生徒の「振り返り」の記述と教師からのフィードバックのコメントをまとめた「振り返りプリント」を作成、配付することで、生徒にメタ認知をより深めさせるとともに、内容理解を確かなものとするができると考える。このような生徒が自ら学習することを促すという点で、「振り返り」は形成的評価であると言え、さらに言えば「学習のための評価」であるともいえるだろう。

上記をより具体的に、Black の定義した表 1.2[68] に本研究の「振り返り」を導入した PI を位置付けると、表 2.1 のようになる。

さらに詳細に、「振り返り」を導入した PI と「学習のための評価」の関係をまとめたのが表 2.2 である。

表 2.1: 「振り返り」を導入したPIの位置づけ

	学習者が行く場所	学習者が今いる場所	そこへの行き方
教師	理解して欲しい物理概念を示す	直前の授業で扱った物理概念を理解できているのかを示す	学習の方向性について示唆を与える
仲間		生徒同士で互いに教えあう	
学習者	PIの問題が解けるようになることが目標	考えをどのように修正すればよいか知る。	

## 2.5 対象

授業実践は、国立大学附属高等学校の2012年度の第二学年2クラス（72名）、2013年度の第二学年3クラス（A組43名、B組44名、C組43名：A、B、Cは仮称）を対象に行った。図2.7に、FCIの事前テストの問題別正答率を示す。

### FCI事前テスト

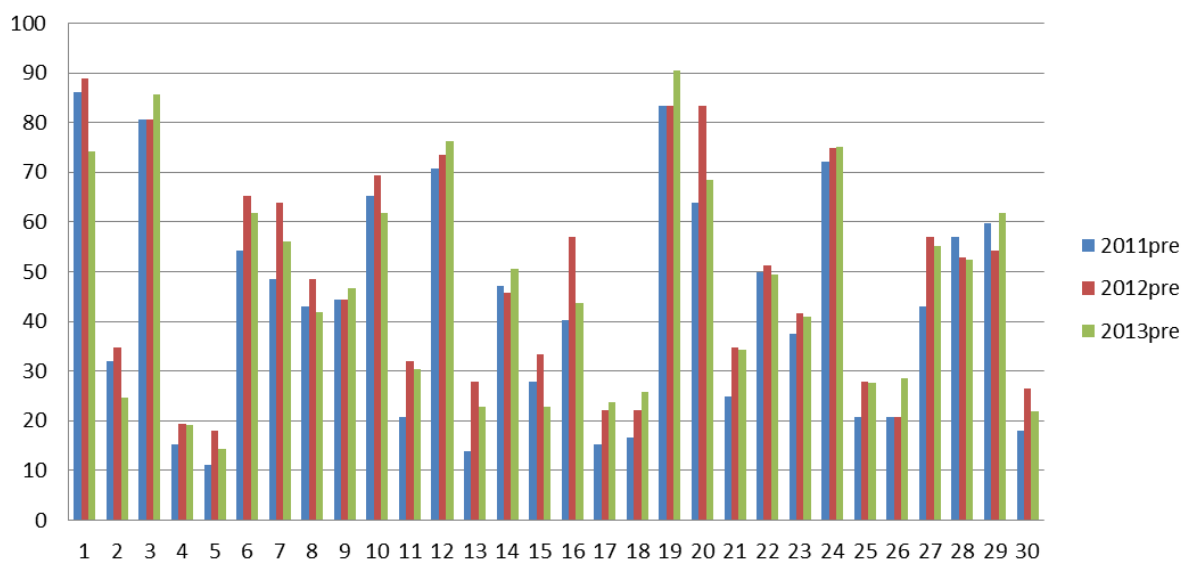


図 2.7: FCI 事前テスト正答率 (%)

事前テストは力学の授業を始める前に実施した。図2.7からわかるように、年度による生徒の差はあまりなく、傾向はほとんど同じである。t検定の結果からも、5%水準で統計的に有意な差は見られなかった。よって、本研究では、年度の違いによる生徒のもつ概念や知識の差はないものとし進めていくこととした。

2012年度は、「振り返り」と「予習」を従来のPI型授業にどのように導入するのかを、授業実践を通して試行錯誤した。2013年度は、「振り返り」と「予習」の定量的な評価方法を開発した。そして、2012年度とほぼ同様の授業を行い、その授業を開発した指標で評価・分析した。そのため本論文では、「振り返り」と「予習」の定量的結果がある、2013年度の1学期力学分野と2学期波動分野の実践結果について述べることとする。1学期力学分野は4月～7月、19時間+事前事

表 2.2: 「振り返り」を導入したPIと学習のための評価の関係

	学習のための評価	「振り返り」を導入したPI
評価の理由	達成を高めて、学習者がより高いスタンダードを満たすことを助ける。進行中の学習者の成長を支援し、改善する。	学習の到達状況を教師、生徒両方で把握するとともに、理解を深めるために行う。
被評価者	学習者自身	教師、学習者自身
評価の焦点	学習者たちがスタンダードに向けて形成するのを助ける教師が選んだ特定の達成のターゲット	生徒が直前の授業で扱った物理概念を理解しているかどうかを確認する選択肢式の問題（試金石問題）
評価する時	学習中の過程	教師による講義等、新たな知識を獲得した直後
主たる使用者	学習者、教師、保護者	生徒、教師
典型的な使用法	学習者たちに達成を改善するための洞察を提供する。教師が学習者のニーズを診断し、反応するのを助ける。保護者が長期にわたって進歩を捉えるのを助ける。保護者が学習を支援するのを助ける。	生徒に知識の活用の仕方を理解させる。生徒同士での議論を通して誤概念を払拭する。教師は生徒の理解状況や、理解しやすい、あるいは理解しにくい概念を把握し、その後の授業改善に役立てる。
教師の役割	スタンダードを教室の目標に変換する。目標について学習者に知らせる。評価をする。結果に基づく指導を調整する。学習者に文章や言葉によるフィードバックをする。評価に学習者を関与させる。	生徒に理解して欲しい物理概念がどのようなものであるかを、具体的に問題の形式で示す。どのように考えを修正すべきであるかを示す。振り返りへの学習コメントと振り返りプリントの作成、配付により生徒の自学自習を促す。
学習者の役割	自己評価し、進歩を辿る。ゴール設定に貢献する。教室の評価結果にしたがって、次によりよくできるようにする。	自らの理解度を把握し、自学自習や生徒同士の教え合い、教師への質問などを通して、理解を深めるようにする。
主な動機	学習における成功は、達成可能であると信じる。	新たに獲得した知識は、どのように活用することができるのかということを理解する。このようなことの繰り返しを通して、物理の授業の目標が達成されたと考える。
強調点	学習者と一緒にルーブリックを使う。学習者の自己評価。学習者への文章によるフィードバック。	生徒の多くが持っている誤概念に焦点を当てた選択肢式の問題を出題する。生徒同士の議論を促進し、認知的葛藤を起こさせる。生徒個別の学習状況に応じた学習コメントを提示する。

後テスト2時間で、2学期波動分野は9月～12月、20時間での実践だった。どちらも授業は週2時間行われた。

実践対象の国立大学附属高等学校では、2年生対象の「物理基礎」が必修科目である。1年生では地学基礎と生物基礎を履修しているため、2年生は全員が物理未履修の状態である。授業は毎回、物理実験室で行う。生徒は横並びに着席し、1班あたり4～5名で構成される。PIの議論は座席の近い生徒同士で行うように指示した。

実践対象の国立大学附属高等学校のカリキュラムに従って、1学期は力学分野、2学期は波動分野、3学期はエネルギー・電気・放射線分野で、「振り返り」と「予習」を導入したPI型授業を実践した。本研究では、力学分野と波動分野の授業実践の詳細と、実践結果について述べる。



## 2.6 力学分野の実践結果と考察

### 2.6.1 力学分野の授業全体の結果

1学期力学分野の授業は、表2.3のように実施した。国立大学附属高等学校の物理授業は、伝統的に生徒実験を中心に構成されており、本実践でもそれを維持することとし、9回の生徒実験を行った。そのためPIを実施した授業は、事前事後テストを除いた全19時間のうち、13時間となった。生徒実験の時間が多いので、実験に関連したPIの設問は、実験の予測や考察の時間を利用して実施したものもある。全ての授業で、前述した「予習」と「振り返り」を生徒に課している。

表 2.3: 力学授業内容一覧

2013年度	
1	力学概念調査事前テスト
2	運動を表す(位置, 速さ), CQ: $x-t$ グラフ, PI: $x-t$ グラフ, $v-t$ グラフ 1
3	速度, 変位, 平均・瞬間の速度, CQ: $v-t$ グラフ, PI: $v-t$ グラフ 2, 変位と速度
4	加速度, CQ: 瞬間の速度・加速度, PI: 加速度の符号, $a-t$ グラフ, 加速 or 減速
5	[生徒実験] 運動の記録とグラフ化
6	[実験分析] 運動の記録とグラフ化, 等加速度直線運動, PI: 等加速度直線運動
7	[生徒実験] 自由落下
8	[実験分析] 自由落下, 鉛直投射, 水平投射, PI: 鉛直投げ上げ, 水平投射 1
9	斜方投射, PI: 水平投射 2, [生徒実験] ゴムひもの実験
10	PI: 斜方投射, PI & [実験分析] ゴムひもの実験
11	[生徒実験] 力と加速度
12	[実験分析] 力と加速度, [生徒実験] 質量と加速度
13	[実験分析] 質量と加速度, 運動の法則, 重力, PI: 運動の法則, 重力
14	慣性の法則, PI: 慣性の法則 1, 慣性の法則 2
15	作用反作用の法則, PI: 作用反作用の法則 1, 作用反作用の法則 2
16	[生徒実験] 動摩擦力
17	[実験分析] 動摩擦力, [生徒実験] 最大静止摩擦力
18	[実験分析] 最大静止摩擦力, PI: 静止摩擦力, 運動方程式の利用 1
19	PI: 運動方程式の利用 2, [生徒実験] 運動方程式の利用
20	力のモーメント, 浮力, [生徒実験] 質量と密度の測定
21	[実験分析] 質量と密度の測定, PI: 浮力, 力学概念調査事後テスト

表2.3において、網掛け部分はPIを実施した授業である。また、PIは「PI」、クリッカークエスションは「CQ」、実験とその分析は[ ]をそれぞれ項目の初めにつけた。授業の詳細はA章で述べる。

力学分野で実施したPIの設問は全24問であった。PIは1回の授業当たり1~3問実施した。設問には、独自に作成したものやMazurのConceptTest[22]を和訳したものなどを用いた。生徒実験や演示実験と関連付けたPIも実施した。

図2.8は議論前正答率に対する議論後正答率を散布図で表したものである。グラフ中の黒の実線、赤の点線、黒の破線は、それぞれ、議論前正答率と議論後正答率が等しいことを表す直線、理

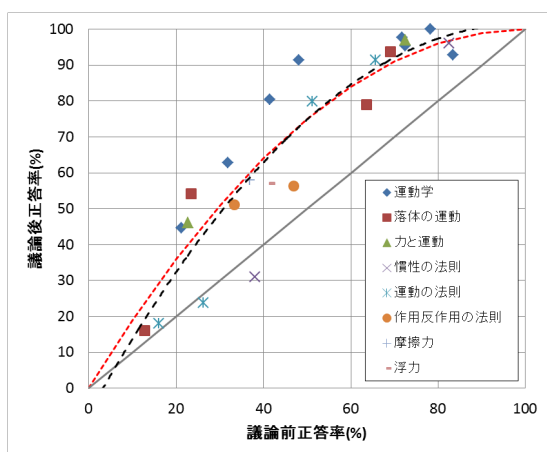


図 2.8: 議論前正答率と議論後正答率

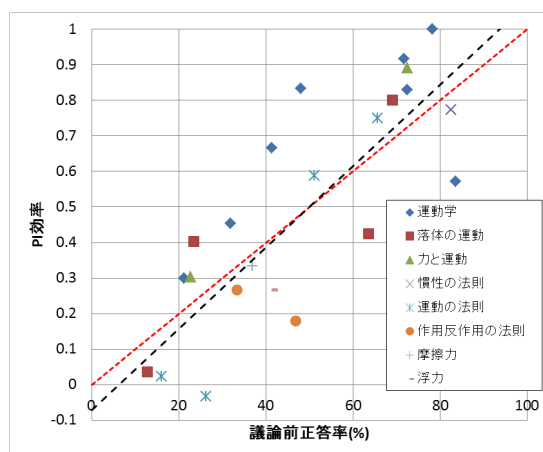


図 2.9: 議論前正答率とPI効率

論曲線 [95], 実践で得られたプロットの二次近似曲線である。グラフからわかるように, 議論の効果により, ほとんどの設問で議論前正答率よりも議論後正答率の方が高くなっている。

図 2.9 は議論前正答率に対する PI 効率を散布図で表したものである。グラフ中の赤の点線, 黒の破線は, それぞれ, PI 効率の理論直線 (PI 効率 = 議論前正答率) [95] と実践で得られたプロットの線形近似直線である。グラフからわかるように, 議論前正答率と PI 効率の間には線形関係が見られる [95]。議論前正答率が高かったために, 議論せずに解答解説のステップに移った設問もあるが, そのようなデータはここには入れていない。

また, 表 2.4 に 1 学期力学分野で実施した PI 全設問の議論前正答率, 議論後正答率, PI 効率を示す。全設問の議論前正答率の平均は 47.9% (標準偏差 22.5% [100]) で, 議論後正答率の平均は 67.3% (標準偏差 27.6%), PI 効率の平均は 0.48 である。ここで PI 効率の平均は, 各問題で算出した値を足しあわせ, 問題数で割ることによって求めた。これは, PI は独立して問題が作られており, PI 効率は個々の問題における議論の効果を評価しているためである。理論から, 議論前正答率が一様に分布している場合の PI 効率の平均値が 0.5 になることがわかるが, 上の平均値はこの理論値とよく一致している。

上記のように, 筆者の受け持つ 3 クラス全体で, それぞれの概念についての理解度がどの程度であるかを定量的に知ることができる。議論前正答率からは直前の講義や実験を通して学習した内容についての理解度がわかり, 議論後正答率からは議論を通してどれだけ生徒が理解できたのかを表す。

### 2.6.2 力学概念調査による授業効果の評価

本研究では, 先行研究と同様に, 1 学期力学分野の授業全体の評価を行うために, FCI を学期の初めと終わりに事前 (4 月)・事後 (7 月) テストとして実施した。そして得られた結果から, 1.2.5 章で述べた Hake の規格化ゲイン (1.1) 式を用いて, Hake の規格化ゲインを算出した。

図 2.10 に 2013 年度の FCI の事前・事後テストの問題別正答率を, 表 2.5 に FCI 全体の結果を示す。ただし, 事前・事後テストともに全設問について未回答や複数回答しなかった 105 名分の生徒の結果を用いている。表 2.5 にはクラスごとの結果 (A 組, B 組, C 組) と 3 クラス全体の結果 (2013) を載せてある。また比較のため, 一年前に筆者が同じ高等学校二年生物理基礎で「振り返り」と「予習」を導入した PI 型授業を実施したときの結果 (2012 年度, 2 クラス 72 名分) と筆者の前に授業を担当していた教員が, 「振り返り」と「予習」の導入以外はほぼ同じ形式の PI 型授

表 2.4: 設問ごとの議論前後の正答率と PI 効率

番号	設問	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
1	$x-t$ グラフ	83.5	92.9	0.57
2	$v-t$ グラフ 1	21.2	44.7	0.30
3	$v-t$ グラフ 2	78.2	100.0	1.00
4	変位と速度	41.4	80.5	0.67
5	瞬間の速度と加速度	72.4	95.3	0.83
6	$a-t$ グラフ	71.7	97.6	0.92
7	加速 or 減速	48.0	91.3	0.83
8	等加速度直線運動	31.8	62.8	0.45
9	鉛直投げあげ	23.4	54.3	0.40
10	水平投射 1	63.6	79.1	0.43
11	水平投射 2	69.0	93.8	0.80
12	斜方投射	12.8	16.0	0.04
13	ゴムひも 1	72.4	97.0	0.89
14	ゴムひも 2	22.7	46.1	0.30
15	運動の法則	65.6	91.4	0.75
16	重力	51.2	79.8	0.59
17	慣性の法則 1	38.1	31.0	-0.12
18	慣性の法則 2	82.5	96.0	0.77
19	作用汎用の法則 1	46.8	56.4	0.18
20	作用反作用の法則 2	33.3	51.2	0.27
21	静止摩擦力	36.9	58.0	0.33
22	運動方程式の利用 1	16.0	18.0	0.02
23	運動方程式の利用 2	26.2	23.8	-0.03
24	浮力	41.4	57.0	0.27
平均		47.9	67.3	0.48

業を実践した結果（2011・2010 年度 [44]）についても、全体の結果を載せておく。なお、今回の授業者（筆者）と筆者の前に担当していた教員（授業者 M とする）はともに、東京学芸大学大学院教育学研究科修士課程の 2 年間において、非常勤講師として上記の PI 型授業を実践した。扱う PI 問題や単元の構成に多少の変更はあるものの、基本的に同じ授業形式で、同じ生徒実験を行い、授業を進めた。そのため、二人の授業技術等はほぼ同程度であると考えることとする。

表 2.5 より、Hake ゲインの値は 2012 年度、2013 年度ともに 0.33 であり、これは「振り返り」と「予習」を導入する前の、異なる授業者 M による値にほぼ等しい。よって、FCI を用いた Hake ゲインの値では、「振り返り」と「予習」の導入前後で、明確な改善は見られなかった。

### 2.6.3 「振り返り」の評価法および力学分野の結果

本研究では、授業を多角的かつ定量的に分析・評価するために、PI 効率や Hake の規格化ゲイン等の数値的指標に加え、「振り返り」を数値化するための変数として「文字数」と「内容の深さ」

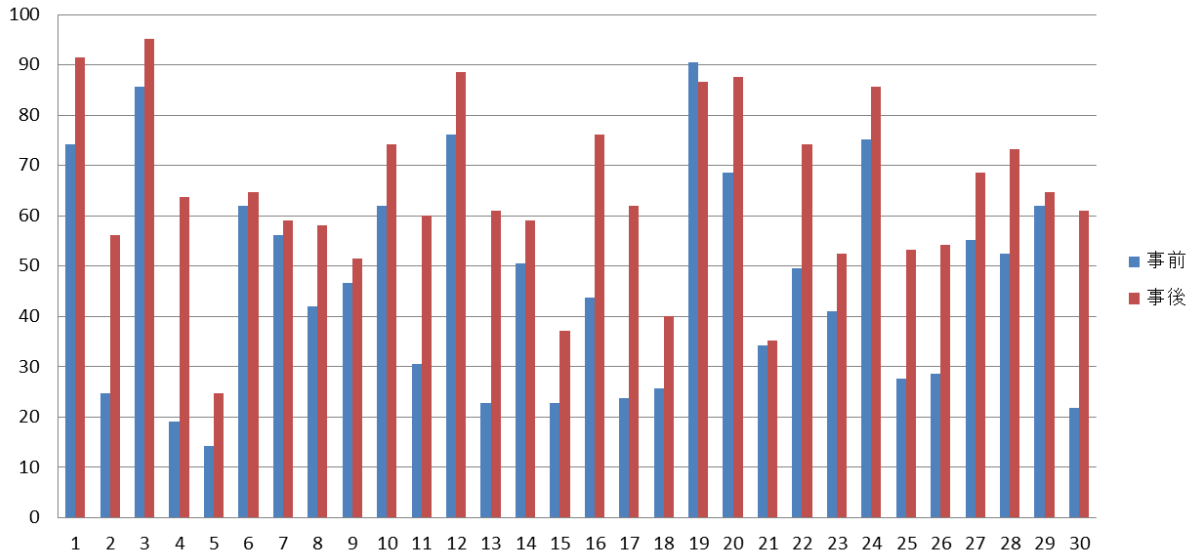


図 2.10: FCI 事前・事後テスト問題別正答率%

表 2.5: FCIの事前・事後テストの結果

	事前 (%)	事後 (%)	Hake ゲイン
A 組	46.57	65.35	0.35
B 組	43.90	63.05	0.34
C 組	48.38	63.69	0.30
2013	46.32	64.00	0.33
2012	48.52	65.28	0.33
2011	42.83	61.80	0.33
2010	48.23	62.37	0.28

を用いることを試みた。文字数はメタ認知の量に、「内容の深さ」は質に対応させている。「内容の深さ」に関しては、次の三段階の基準に従って評価した。

1. 単語や式のみしか書いていない（日本語として成立していない）。授業と直接関係のないことしか書いてない。
2. 友達や教師の説明や板書などをそのまま書いている。単純な感想のみ。
3. 自分の言葉でまとめている。自らの理解度について詳しく言及している。授業と関連するが、授業では扱わなかったことを書いている。学びに関する教訓が得られている。

この評価基準の客観性については、本学の大学院生三名（評価者 G, H, I とする）に、力学分野の授業を一時間参観してもらい、上記評価基準に従って生徒の「振り返り」の「内容の深さ」を評価してもらい、それと授業者自身の評価を比べることによって検証した。評価者 G, H は授業者と同じ研究グループに所属しているが、評価者 I は違う研究グループの所属である。その結果を表 2.6 に示す。

表 2.6: 「内容の深さ」に関する評価の一致率

	G	H	I
授業者	75.6(%)	73.2(%)	48.8(%)
G	×	63.4(%)	63.4(%)
H	×	×	53.7(%)

授業者、評価者 G、評価者 H の間の評価は 60% 以上の一致が見られたものの、評価者 I と他の評価者との間の評価にはバラつきが見られた。同じ研究グループに所属していることでバイアスがかかっており、類似した採点結果になったとも考えられるので、評価基準の客観性は十分ではない可能性がある。特に一致の悪かった I と授業者の間では、「間違っているが、生徒が自分なりに考えて書いた記述」についての評価が分かれた。このような記述を、授業者は生徒が自ら考え書いたものとして「深さ 3」という評価を付けたのに対し、評価者 I は、結局、正しい結論まで至らず、生徒が獲得したことは無い、これは感想である、と判断し「深さ 2」という評価を付けた。よって以下の「振り返り」の「内容の深さ」の結果については、妥当性が確保されたものは言えない。

力学分野の全 19 時間分の「振り返り」の文字数と「内容の深さ」について相関を取ったところ、やや強い正の相関が見られた（相関係数  $r = 0.60$ , 有意確率  $p < 0.01$ ）。その様子を図 2.11 に示す。これより、たくさん文字を書いた生徒の「振り返り」ほど、「内容の深さ」が深いと評価される傾向にあることがわかる。

#### 2.6.4 力学分野 「振り返り」と PI

次に「振り返り」と PI との間の関係について考察する。図 2.12 は、各授業で実施した PI の回数に対する、生徒の書いた「振り返り」の授業ごとの平均の文字数を、散布図で表したものである。これらの間には、強い正の相関があることがわかった（相関係数  $r = 0.86$ ,  $p < 0.001$ ）。すなわち、一時間の授業で PI をたくさん実施すればするほど、生徒は「振り返り」で文字をたくさん書く傾向がある。この傾向は、教員の説明や生徒実験よりも PI の方が、より強い印象を生徒に与えていると解釈することができる。

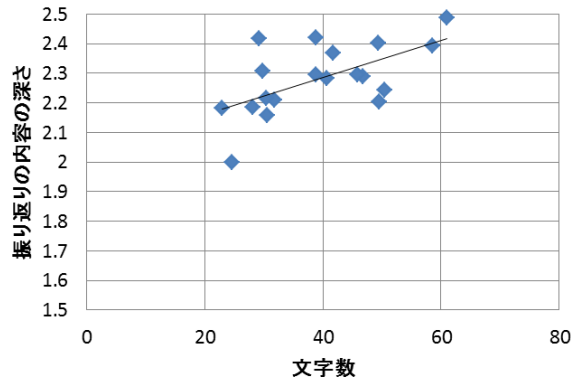


図 2.11: 力学分野 字数と「内容の深さ」の相関

図 2.13 は、各 PI 問題の議論前正答率に対する、その PI を実施した授業での「振り返り」に書かれた当該 PI へのコメントの数を散布図で表したものである。これらの間には、弱い負の相関があることから（相関係数  $r = -0.39$ ,  $p < 0.07$ ）、どちらかという議論前正答率が低い PI の方が、生徒は「振り返り」をたくさん書く傾向があることがわかる。なお、議論後正答率や PI 効率との相関を取った場合でも同様の傾向が見られた（議論後正答率 vs 「振り返り」のコメント数：相関係数  $r = -0.334$ , PI 効率 vs 「振り返り」のコメント数：相関係数  $r = -0.270$ ）。このことは、難易度の高い問題、議論をしてもなかなか理解することが難しい問題、直観と反するような問題が、問題を理解しようという生徒の意欲を高める傾向を持つためと解釈できる。また、正解発表の場面で演示実験を行った PI についても、「振り返り」のコメント数が多かった。実験器具を見せながらの問題提示、実験結果の予想、議論をしてから観察となるため、印象深い学習活動となったのだと思われる。逆に、議論前正答率が高い問題や PI 効率が高い問題については、自分だけで理解することができたり、議論によってその場で理解することができたりした問題であったと言えるため、「振り返り」に敢えて記すまでもなくなっている、という仮説を立てることができるだろう。今後、「振り返り」をさらに詳細に分析する方法を開発することによって、上記の仮説の検証を含め、個々の PI が生徒の学習に与える認知的なインパクトを定量的に示せるようにすることが望まれる。

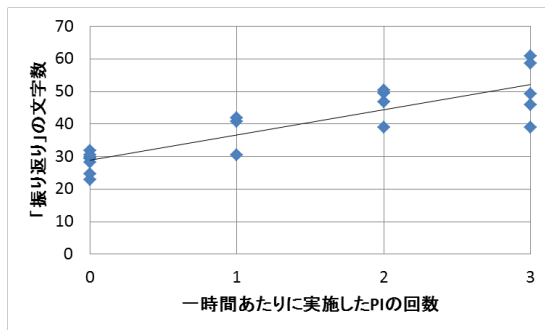


図 2.12: 力学分野 授業ごとの PI の回数と「振り返り」の文字数

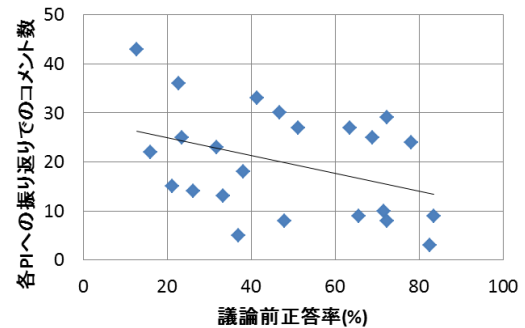


図 2.13: 力学分野 議論前正答率と「振り返り」の PI へのコメント数

### 2.6.5 「予習」の評価法および力学分野の結果

生徒の予習状況は、毎回の「振り返り」において、次の三段階で生徒に自己評価をさせた。

0. 予習できなかった
1. 教科書を読んできた
2. 教科書を読んで、わからないところに付箋を貼ってきた

図 2.14 に、予習の実施状況の時間変化を表すグラフを示す。横軸の「授業時数」は、第何回目の授業かを表す。縦軸の「予習状況」は、授業時数ごとに求めた上記数値の生徒平均値を表すもので、0 から 2 までの値となる。この予習状況は、授業で提出された「振り返り」のみから判断しているが、「振り返り」は成績に反映しないことを 1 学期の始めにアナウンスしているため、1 学期間の 3 クラス全体の提出率は 84.5% と非常に高いものの、生徒全員が「振り返り」を提出していない授業も存在する。「振り返り」を提出しなかった生徒の該当授業の予習状況は判断できないため、データには入れていない。

授業が進むにつれて、予習をしてくる生徒の割合が減少してしまっており、この原因としては、生徒に予習をすることの良さや意義を、十分に伝えることが出来ていないということが考えられる。中間試験後の 11 時間目から 16 時間目にかけて、予習に対する意欲が若干向上しているが、学期末が近づくにつれて、再び減少している。予習が強制的なものではなかったこともあるが、予習してくる生徒の割合の減少には、様々な要因が関わっていると考えられる。

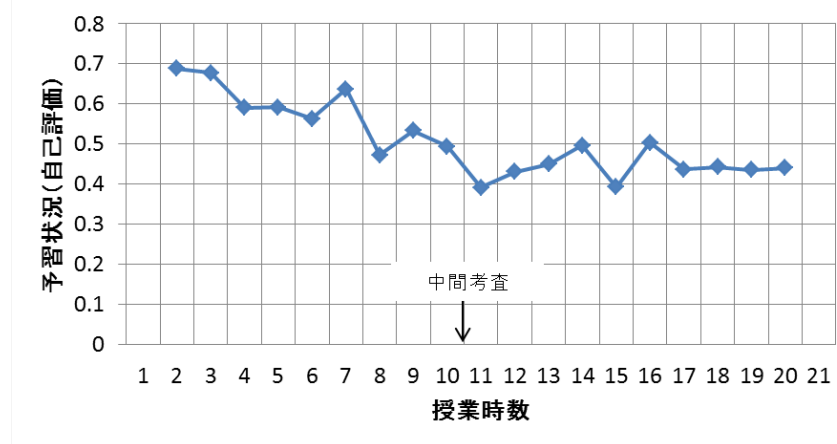


図 2.14: 力学分野 予習状況の時間変化

### 2.6.6 力学分野「予習」とPI

図 2.15 は、予習状況に対する PI 効率を散布図で表したものである。PI 効率は、1 時間の授業で PI を複数回実施した場合は、その平均値を示している。これらの間には、正の相関があった（相関係数  $r = 0.58$ ,  $p < 0.04$ ）。この結果は、予習をするほど、PI の議論が効果的に行われる傾向にあることを意味する。ただし、学習意欲が高いほど予習する割合も高く PI 効率も高いという疑似相関の可能性もある。また、図 2.14 より、予習の実施状況が時間とともに減少しているため、物理の学習が進んでいくにつれて PI 効率が減少しているのか、予習の効果によるものなのかは、はっ

きりと結論付けることはできない。また予習状況を自己評価ではなく客観的に評価することができれば、予習の効果を明確にすることができる。生徒が持続可能な形で確実に行える予習の方法を見出し、それを実施する必要がある。

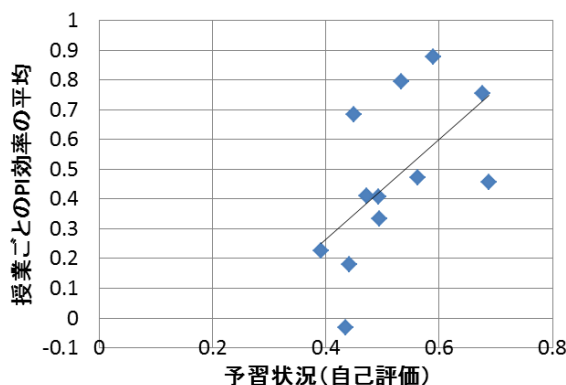


図 2.15: 力学分野 予習状況と PI 効率

### 2.6.7 力学分野「振り返り」と「予習」と Hake ゲインのクラス差

表 2.7 は、2013 年度の各クラスと 3 クラス全体について、1 学期間を通しての PI 効率、予習状況、「振り返り」の文字数と「内容の深さ」の結果の平均を表している。

	PI 効率	予習状況	文字数	深さ	考査得点
A 組	0.51	0.57	44.1	2.4	58.3
B 組	0.48	0.51	38.0	2.3	53.0
C 組	0.39	0.46	36.2	2.2	53.8
2013	0.48	0.51	39.4	2.3	55.0

表 2.7 より、すべての指標について、A 組、B 組が C 組よりも高い値を取っていることがわかる。そして表 2.7 の Hake ゲインの結果においても、同様のクラス差がある。これは授業者が、1 学期間授業中の生徒を観察して感じていた「C 組は A 組と B 組に比べて、PI の議論が活発ではない」という印象と一致している。また、参考までに 1 学期中間・期末考査の平均得点も表 2.7 に載せた。A 組が 3 クラス中、最も高い値となっているのは「予習」と「振り返り」の指標と変わらないが、次に B 組よりも C 組の方が高い値となっている。したがって、「振り返り」と「予習」の定量的な指標で数値データを収集することは、クラスの状況を考査の得点のような目に見える形だけでなく、さらに多角的かつ定量的に把握するのに役立つと思われる。<sup>1</sup>

図 2.16 は、予習状況（自己評価）に対する、「振り返り」の授業ごとの平均の内容の深さを散布図で表したものである。これらの間には正の相関があることがわかった ( $r = 0.54$ ,  $p < 0.02$ )。

<sup>1</sup>定期考査と FCI の間の相関係数は  $r = 0.33$  ( $p < 0.0006$ ) であり、やや正の相関が見られた。定期考査では授業で扱った実験をもとに出題しており、概念はもちろん、実験で扱ったデータの処理や計算等が含まれるが、FCI は授業で直接その問題を扱ってはいない。両者は無関係ではないが、同等には扱えない。



これは予習をして授業に臨む生徒ほど、授業終わりに提出する「振り返り」の内容の深さが深いことを意味する。感覚的には共感できる傾向だと思われるが、これも「予習」と「振り返り」を定量的に評価したことにより、数値で示すことができた。

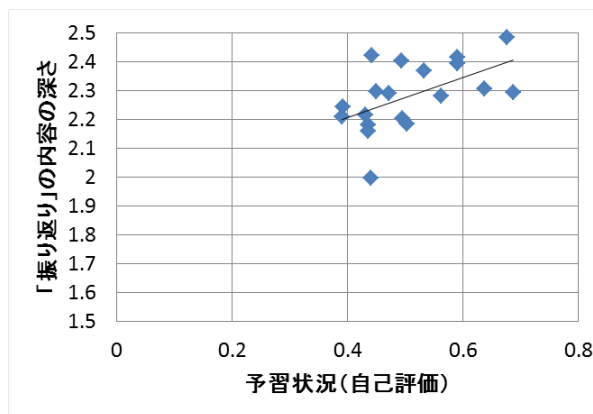


図 2.16: 力学分野 予習状況と内容の深さ

### 2.6.8 力学分野 「振り返り」と「予習」の男女差

「振り返り」と「予習」における男女差についても調べた。表 2.8, 図 2.17~2.19 は、学年全体の男女別の「予習」と「振り返り」の実施状況である。図の誤差棒は、標準誤差である。

表 2.8: 力学分野 「振り返り」と「予習」の男女差

	予習	文字数	内容の深さ
男子	0.67±0.12	35.4±3.9	2.2±0.1
女子	0.78±0.17	44.3±5.0	2.4±0.1

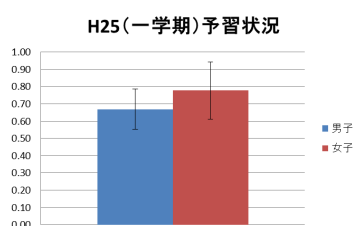


図 2.17: 力学分野「予習」の男女差

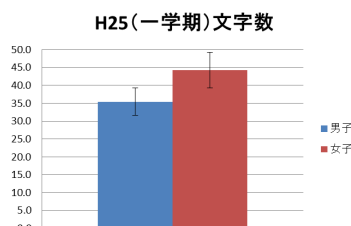


図 2.18: 力学分野「文字数」の男女差

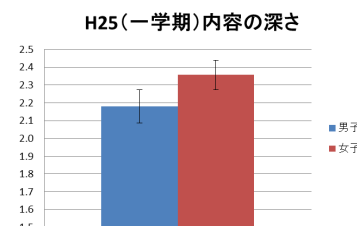


図 2.19: 力学分野「内容の深さ」の男女差

表 2.8, 図 2.17~2.19 より、有意差はどの指標でも見られなかったものの、どの指標についても、男子生徒よりも女子生徒の方が高い値を取った。男子生徒の方が考査の成績が良い傾向があることや、女子生徒の方が、提出物等の成績が良い傾向にあることは、先行研究 [101, 102] でも指摘されているが、本研究でも確かめられたことになる。

## 2.7 波動分野の実践結果と考察

### 2.7.1 波動分野の授業全体の結果と考察

二学期の「振り返り」と「予習」を導入したPI型授業は、表2.9のように実践した。第2時「波の重ね合わせ，自由端・固定端反射」，第3時「定常波，弦の振動実験」，第6時「音波，縦波の横波表示，縦波の反射」，第7時「縦波の定常波，気柱共鳴の実験」，第8時「気柱共鳴の実験の分析」が教育実習生担当の授業だった。そのため，上記授業ではPIは（ほぼ）実施していない。また，一学期同様，教育実習生の担当した授業以外で「振り返り」と「予習」を実施した。生徒実験は7回実施した。授業実践の詳細はB章で述べる。

表 2.9: 波動授業内容一覧

2013年度	
1	波の表し方， $v = f\lambda$ ，PI:波を表す・ $y-x$ グラフ $\rightarrow y-t$ グラフ・ $v = f\lambda$
2	(教育実習生担当) 波の重ね合わせ，自由端・固定端反射
3	(教育実習生担当) 定常波，[生徒実験] 弦の振動
4	[実験分析] 弦の振動，PI:弦の振動（振動数・張力・線密度変化）
5	[生徒実験] 音の三要素，PI:人の声の波長
6	(教育実習生担当) 音波，縦波の横波表示，縦波の反射
7	(教育実習生担当) 縦波の定常波，[生徒実験] 気柱共鳴の実験
8	(教育実習生担当) [実験分析] 気柱共鳴
9	教育実習生復習，うなり，PI:縦波の横波表示（疎密，媒質の速度）・うなり
10	[生徒実験] 音速の測定
11	ドップラー効果（音源の移動），PI:救急車1・2
12	ドップラー効果（観測者の移動），PI:霧笛
13	[生徒実験] スピード測定器
14	[実験分析] スピード測定器，PI:スピード測定器実験・F1レーシングカー
15	[生徒実験] 水波・光波の実験
16	[生徒実験] 水波・光波の実験
17	波の反射・屈折・回折，PI:屈折
18	波の干渉，CQ:波の干渉1・2，PI:回折・音の干渉
19	ヤングの実験，PI:ヤングの実験1
20	単スリットでの回折・干渉，回折格子，PI:ヤングの実験2・回折格子

2013年度2学期に実施したPIの設問は全21問であった。図2.20は議論前正答率に対する議論後正答率を散布図で表したものである。グラフ中の黒の実線，赤の点線，黒の破線は，それぞれ，議論前正答率と議論後正答率が等しいことを表す直線，理論曲線[95]，実践で得られたプロットの二次近似曲線である。一学期の実践結果と同様に，議論の効果により，ほとんどの設問で議論前正答率よりも議論後正答率の方が高くなっている。

図2.21に，議論前正答率に対するPI効率を示す。グラフ中の赤の点線，黒の波線は，それぞれ，PI効率の理論直線（PI効率＝議論前正答率）[95]と実践で得られたプロットの線形近似直線である。こちらも一学期の結果と同様に，線形関係が見られる[95]。

図2.20に見られるように，二学期に行ったPIは議論後正答率がほぼ100%に近い問題が非常に

多い。このことから、二学期のPI問題は、直前の講義で学習したことの理解確認としての意味合いが強いことがわかる。よって図 2.21 のようにPI効率も高くなっているのであろう。講義で習ったことをそのまま使えば解けるような問題ではなく、議論のし甲斐があり、生徒に考えさせ、実験事実からではなく論理を追っていくことで答えに至るような、深い概念理解を促す波動分野のPI問題の作成が望まれる。

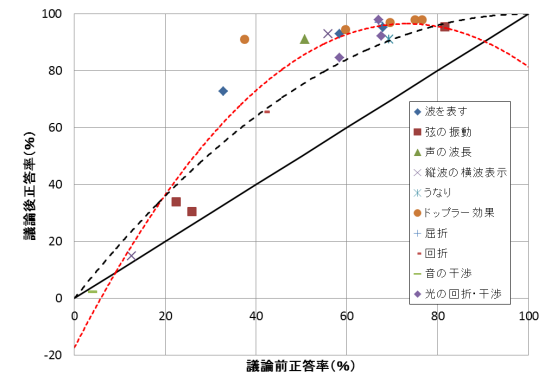


図 2.20: 議論前正答率と議論後正答率

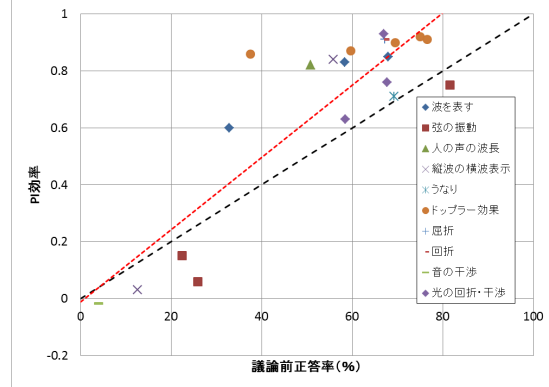


図 2.21: 議論前正答率とPI効率

また、表 2.10 に二学期波動分野で実施したPI全設問の議論前正答率、議論後正答率、PI効率を示す。全設問の議論前正答率の平均は52.5% (標準偏差 22.2%)、77.6% (標準偏差 30.0%) であり、PI効率の平均値は0.65であった。PI効率は理論値 [95] の0.5に比べ、高い値となった。

### 2.7.2 波動分野 「振り返り」と「予習」の結果

図 2.22・2.23 は、予習状況と「振り返り」の文字数の時間変化を表したグラフである。中間考査は第10・11時の間で行われた。生徒実験は第5, 10, 13, 15, 16時で行われた(教育実習生が担当した授業のうち第3, 8時は生徒実験であり、波動分野ではそれを合わせて計7回生徒実験を実施した)。予習状況については、多少の変動はあるものの、一学期のような傾向(右下がりになる)は見られなかった。予習をしてくる生徒と、してこない生徒が、ほとんど固定化されてしまっているのだろう。文字数については、生徒実験を行った授業で低い値となっている。これは一学期と同じ傾向である。

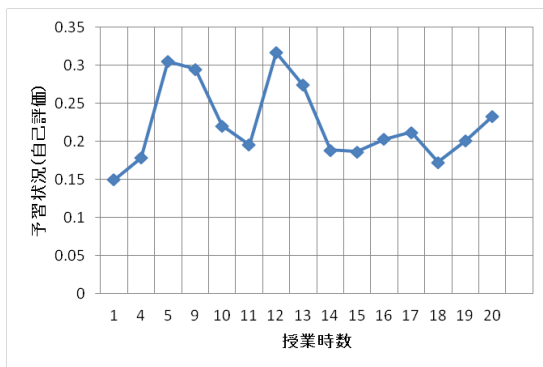


図 2.22: 波動分野 予習状況の時間変化

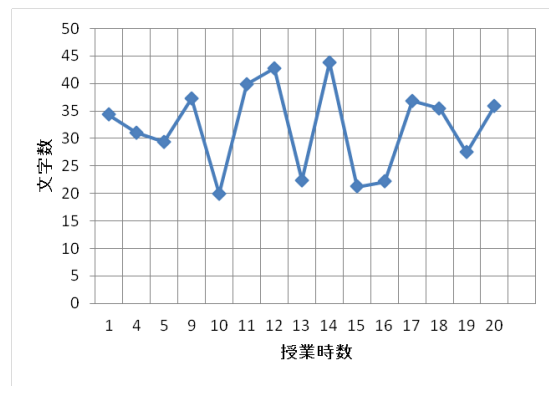


図 2.23: 波動分野 「振り返り」の文字数の時間変化

表 2.10: 二学期 設問ごとの議論前後の正答率と PI 効率

番号	設問	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
1	波を表す	58.4	93.0	0.83
2	$y-x$ グラフ $\rightarrow$ $y-t$ グラフ	68.0	95.2	0.85
3	$v = f\lambda$	32.8	72.8	0.60
4	弦の振動 (振動数変化)	81.6	95.4	0.75
5	弦の振動 (張力変化)	22.5	34.0	0.15
6	弦の振動 (線密度変化)	25.9	30.6	0.06
7	人の声の波長	50.8	91.0	0.82
8	縦波の横波表示 (疎密)	55.9	92.9	0.84
9	縦波の横波表示 (媒質の速度)	12.6	15.0	0.03
10	うなり	69.3	91.0	0.71
11	救急車 1	69.5	97.0	0.90
12	救急車 2	75.0	98.0	0.92
13	霧笛	59.7	94.6	0.87
14	スピード測定器実験	76.6	98.0	0.91
15	F1 レーシングカー	37.5	91.0	0.86
16	ファイバー	67.2	97.0	0.91
17	回折	42.0	65.6	0.41
18	音の干渉	4.00	2.40	-0.02
19	ヤングの実験 1	67.0	98.0	0.93
20	ヤングの実験 2	67.7	92.3	0.76
21	回折格子	58.5	84.6	0.63
	平均	52.5	77.6	0.65

図 2.24 は、予習状況（自己評価）に対する、「振り返り」の授業ごとの平均の内容の深さを散布図で表したものである。これらの中には、一学期同様、正の相関があることがわかった ( $r = 0.46$ ,  $p < 0.05$ )。よってこの関係については、再現性が見られた。

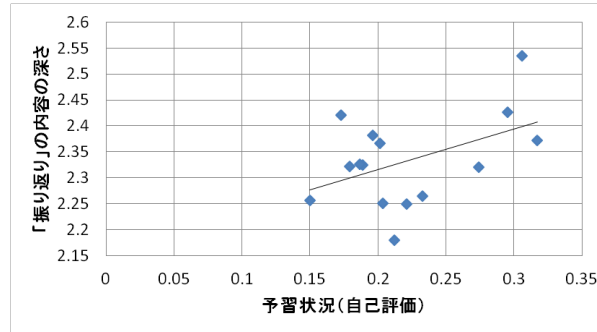


図 2.24: 波動分野 予習状況と「振り返り」の内容の深さ

### 2.7.3 波動分野 「振り返り」とPI

図 2.25 では、各授業で実施したPIの回数に対する、生徒の書いた「振り返り」の授業ごとの平均の文字数を、散布図で表したものである。これらの中には、一学期同様、正の相関があることがわかった ( $r = 0.72$ ,  $p < 0.0003$ )。

また、図 2.26 は、各PI問題の議論前正答率に対する、そのPIを実施した授業での「振り返り」に書かれた当該PIへのコメントの数を散布図で表したものである。これらの中には、一学期と同様に、負の相関が見られた ( $r = -0.69$ ,  $p < 0.0004$ )。これは議論後正答率やPI効率との相関を取った場合でも同様の傾向が見られた（議論後正答率 vs 「振り返り」のコメント数： $r = -0.66$ ,  $p < 0.001$ , PI効率 vs 「振り返り」のコメント数： $r = -0.62$ ,  $p < 0.003$ )。二学期の方が一学期に比べ、相関係数の絶対値が大きくなっており、関係が明確に表れていた。やはり、難易度の高い問題、議論をしても解決に至れない問題、直観と反するような問題が、生徒の印象に強く残り、「振り返り」に多くのコメントを書くことにつながるのであろう。

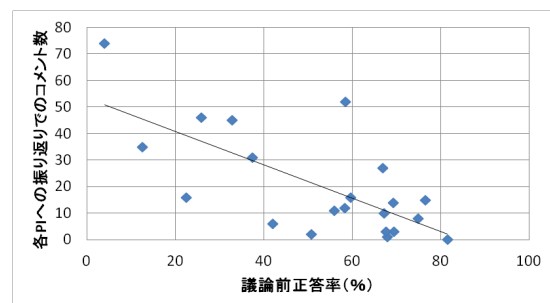
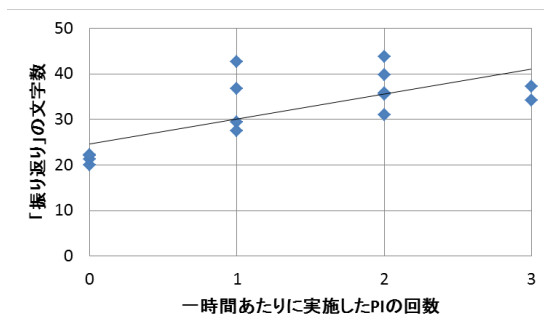


図 2.25: 波動分野 授業ごとのPIの回数と「振り返り」の文字数

図 2.26: 波動分野 議論前正答率と各PIへの「振り返り」でのコメント数

### 2.7.4 波動分野「予習」とPI

一学期では正の相関が見られた予習状況とPI効率の関係だが、二学期の結果では相関係数 $r$ の値が小さく、 $p$ 値も大きくなってしまったため、相関関係は見られなかった( $r = 0.21$ ,  $p > 0.50$ )。予習をしてくる生徒の割合が非常に少ないことが原因と考えられる。持続可能な形での予習課題の提示方法を考案し、実践する必要がある。

### 2.7.5 波動分野「振り返り」と「予習」のクラス差

表2.11に各クラスと3クラス全体の予習状況、「振り返り」の文字数・内容の深さ、「振り返り」の提出率、PI効率の結果を載せた。

一学期では全ての指標でA・B組に比べてC組が低い値を取っていたが、二学期ではC組が予習状況、文字数で高い値を取っている。提出率（各生徒の振り返りの全提出数を全授業時間数で割ったものの平均値）を見てみると、C組は70%以下と非常に低い。これはモチベーションが低い生徒は振り返りを提出せず（成績には反映しないため、提出しない生徒も存在する）、予習状況をその日に提出された「振り返り」のみから判断しているため（振り返りを提出しなかった生徒の予習状況は判定することができないので、このような方法で算出している）、値が高めになってしまったとも考えられる。このように考えると、B組は提出率があまり高くないにも関わらず、予習状況が低い値になっているため、授業を受ける前に予習をしてくる生徒は、B組にほとんどいないと考えられる。

なお、一学期の提出率はA組：82.8%、G組：77.9%、H組：75.7%であり、多少の差は見られるものの、二学期ほどではない。表2.11から、データ数が少ないため相関関係を統計的に調べることはできないが、提出率とPI効率に関係していそうである。つまり、提出率が高ければ高いほど、PI効率も高くなるといった関係がありそうである。これは一学期も同様の結果が得られていた。「振り返り」の提出率も、授業やクラスの状況を定量的に把握するのに役立つかもしれない。ただし、「振り返り」を成績に反映するとした場合は、取り組み方に変化が出そうである[104]。

表 2.11: 波動分野 「振り返り」と「予習」の結果

H25年2学期	予習状況	文字数	深さ	提出率 (%)	PI効率
2A	0.20	32.5	2.38	95.0	0.78
2B	0.17	31.1	2.33	78.9	0.64
2C	0.29	32.3	2.28	68.9	0.57
全体	0.22	32.0	2.33	79.4	0.65

### 2.7.6 波動分野「振り返り」と「予習」の男女差

図2.27～2.30は、それぞれの指標の男女差を表している。男女で人数はほぼ同じである（男子65名、女子66名）。提出数は筆者が担当した全15時間の授業中、「振り返り」を何回提出したかを表している。この提出数ではほとんど差は見られなかった。また、一学期の結果では、予習、「振り返り」の文字数・内容の深さの全てで女子の方が高い値をとっていたが、二学期では予習において男子の方が高い値となった。文字数、内容の深さでは一学期と同様に女子の方が高い。ただし、どの指標についても、統計的な有意差は認められなかった（誤差棒は標準誤差である）。

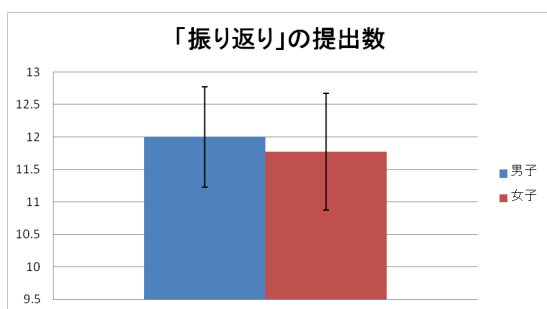


図 2.27: 二学期「振り返り」提出数

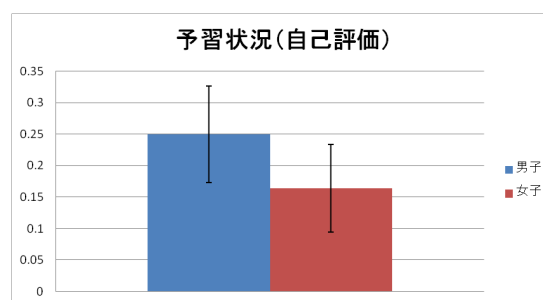


図 2.28: 波動分野 予習状況の男女差

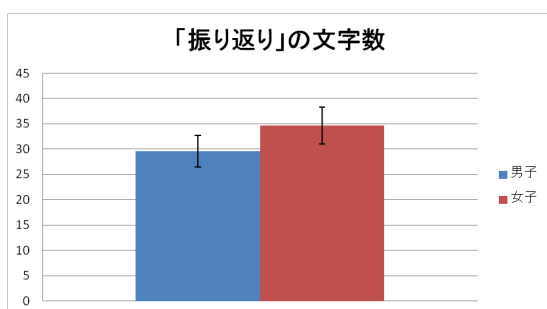


図 2.29: 波動分野 「文字数」の男女差

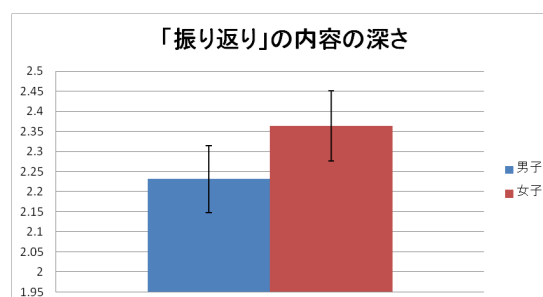


図 2.30: 波動分野 「内容の深さ」の男女差

## 2.8 結論

本研究では、授業を単位とした短期的な時間サイクルの形成的評価の開発、実践を目的として、新たに「振り返り」と「予習」を導入したPI型授業を年間を通して実践し、それらの影響を定量的に評価する方法を考案した。定量的評価の方法としては、「振り返り」の文字数と内容の深さ、「予習」の程度を数値化することを試み、FCIによるHakeゲインおよびPI効率と併用し、形成的評価と生徒の物理概念獲得の関係などに注目して、授業を定量的に分析した。

以下に、本研究で得られた結論について個別にまとめる。

- 「振り返り」と「予習」の導入による授業効果は、Hakeゲインに表れなかった。

FCIを用いたHakeゲインの値は、2012年度、2013年度ともに0.33であった。これは「振り返り」と「予習」を導入する前の、異なる授業者による値にほぼ等しい。つまり、PIを導入した授業では、本研究の対象生徒集団においては、規格化ゲインの0.33程度の授業効果があるということがわかる。なお、Hakeの研究[24]によると、講義型授業のHakeの規格化ゲインの平均は0.23で、本研究で実践しているPIのような能動的学習活動を部分的にでも導入した相互作用型授業では平均0.48の規格化ゲインが得られた。この結果は、知識習得型ではない学習活動である「振り返り」の導入によって、授業効果が直ちに表れるわけではない、ということを示唆している。

「振り返り」は生徒のメタ認知の促進を目的とした学習活動であり、メタ認知が促進されることによって、生徒は自らの学習をうまくコントロールできるようになると考えられる。よって「振り返り」の導入の効果が明確に現れてくるのは、2・3学期以降であるかもしれない。本研究では実施できなかったが、2・3学期でも事前・事後の概念調査を実施することで、上記仮説を明らかにすることができるかもしれない。

また予習に関しては、実施状況が時間とともに低下してしまったため、本研究のみで予習の効果を結論付けることはできない。

- 「振り返り」の定量的評価と分析により、PIは生徒にとって印象深い学習活動であることがわかった。

各授業で実施したPIの回数と、生徒の書いた「振り返り」の授業ごとの平均の文字数の相関を取ったところ、強い正の相関があることがわかった。すなわち、一時間の授業でPIをたくさん実施すればするほど、生徒は「振り返り」で文字をたくさん書く傾向がある。この傾向は、教員の説明や生徒実験よりもPIの方が、より強い印象を生徒に与えていると解釈することができる。そしてコメントが多く寄せられるPIというのは、議論前正答率やPI効率が低い、つまり難易度が高く直観と反するような問題であったり、演示実験と関連付けて出題された問題であった。逆に、議論前正答率やPI効率が高い問題は、自分だけで理解することができたり、議論によってその場で理解することができたりした問題であったと言えるため、「振り返り」に敢えて記すまでもなくなったのだろう。「振り返り」のコメント数に関わる上記のような生徒への見立ては、感覚的だが自然なものである。本研究ではこのような、今まで感覚的に捉えていた生徒の学びの様子と、「振り返り」の定量的な評価とを関係付けることができた。

- 「振り返り」と「予習」の定量的評価と分析は、教師が自らの授業を分析したり、授業計画を立てるのに役立つことがわかった。

クラスごとのPIの議論の様子と、「振り返り」や「予習」の定量的な評価が一致していることから、これらの指標で数値データを収集し分析することは、クラスの状況を定量的に把握するのに役立つことがわかった。また、予習状況を毎回の授業で調べることは、考査や提出物の期限、学校行事と生徒の家庭学習状況とを結びつけることにつながった。

毎回の授業で「振り返り」を提出させることは、生徒にとって復習に役立つだけでなく、教師にとっても生徒の理解度に基づいて授業計画を立てるのに役立つことがわかった。実践の中でも、生徒の「振り返り」が、授業の冒頭で前回の復習を入れるきっかけとなった授業もあった。このように定性的な面においても、「振り返り」の導入は有意義なものであった。

PI型授業は、授業で教師が何を生徒に教えたいか、という要請に柔軟に適用できる授業形式であり、逆に言えば、一つ一つの問題は教師の授業展開・授業経営に即した形で一定の目的意識を持って作られている。教師のねらいが生徒の議論や学習において達成されたかどうかを生徒の声によって評価できるため、「振り返り」は授業分析に役立った。



## 第3章 形成的テストと個票による形成的評価

### 3.1 目的

1.2節で詳しく述べたように、PERでは授業効果を定量的に評価するために、FCI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。そこで本研究では、指導途中で生徒の理解状況を把握し、その都度学習に関するフィードバックを与えることで、生徒の学習を促進するような形成的評価の開発に取り組んでいる。

2章では、毎時間の授業を単位とした最も短い時間サイクルの形成的評価に関して研究した。具体的には、授業展開中のピア・インストラクションや、その前後での予習・復習という学習活動を授業に導入するとともに、それらを定量的に評価し、学習フィードバックを生徒に返すという形成的評価を開発、実践した。

3章では、単元を単位とした形成的評価で、一つの単元内で一回ないし数回のフィードバックを行う、中間の長さの時間サイクルのフィードバック機能を持つ形成的評価についての研究について述べる。2章の「振り返り」をピア・インストラクション型授業に導入した授業を基本的には継続しつつ、単元の授業が一通り終わったところで、小テストを行い、その結果を個票の形で生徒個別にフィードバックする形成的評価を開発、実践した。小テストでは、その単元について最低にこれだけは必ず身につけさせたい、として目標を設定し、作成した。小テストの結果から、生徒個別に学習の到達状況を把握し、それを反映した個票を配布することで自学自習を促し、最終的には学習者全員にすべての目標を達成させようというものである。小テストと個票による形成的評価の妥当性の検証にはアンケートを用いた。なお、FCIや、CLASS、そして小テストとアンケートを複合的に分析することで、本研究で開発した形成的評価が生徒の学力と学習姿勢・態度の向上に寄与しているのかも検証する。

次節からは、2015年度と2016年度の公立高校の2年生と、2017年度に国立中等教育学校の5年生（高校2年生に相当）を対象に、いずれも物理基礎の授業で実践した授業に基づき、上述した形成的評価に関する実践的研究をまとめる。事前事後調査として実施したFCI、CLASS、そして年度末に実施した形成的評価に関するアンケートを複合的に用いて分析したところ、形成的評価の活用度が高い生徒群において、概念理解および学習姿勢がともに向上していることを見いだした[88, 89]。

### 3.2 実践 形成的テストと個票による形成的評価

#### 3.2.1 形成的テスト

一般に、われわれが何かの目標をもって行動する場合に、その行動が目標の方向に正しく向かっているのかどうか、適正なペースで進んでいるかどうかの確認無しには、目標に到達することはできない。道路に沿って歩いていくことを想像してみてもそうである。われわれは、既知の道な

らば、ほとんど意識しないで歩くことができるが、この場合でも、意識下で、道程が正しいかどうかの情報のフィード・バックがなされている。地図をたよりに、初めての道をたどるような場合、曲がり角や十字路では、必ず、目じるしとなるものの確認を行って、先へ進むのである [84]。

これは学習においても同様である。学習評価は、学習目標に到達したかどうかということを確認するものであり、もし到達していないのであれば、到達するようにするための補完的学習活動が続けられるのである。このようなフィードバック情報を得るための役割を果たすのが学習評価である。フィードバック情報として必要になるのは、学習目標に到達したかどうか、どの程度に到達しているのか、そしてどのような補完的学習活動が必要であるか、ということである。まず本節では、フィードバック情報として必要な情報の二番目である、どの程度に到達しているのか、ということ教師が把握し、生徒にも情報を与えるために開発した、「形成的テスト」について説明する。

生徒個別の学習状況を把握するために、学期の途中で選択肢問題を連続して出題し、それぞれにクリッカーで解答する形式の小テストを実施した。この形式の小テストを、Bloomの研究に合わせて、これ以降は「形成的テスト」と呼ぶこととする。「形成的テスト」は、生徒の動機づけのために、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ねらいで実施した。なお「形成的テスト」の得点は成績と無関係であり、そのことは生徒にも「形成的テスト」を始める前に説明した。これは、形成的評価があくまで学習者の視点に立った評価であり、生徒はテストに備えて前の晩に試験勉強をする必要もなければ、評価結果が教室内の順位づけに利用されることもないからである。生徒は形成的評価によって自分自身の思考過程を見直したり、各週ごとや各月ごとにそのコースでの自分の進歩のようすを知ることができる。一方、教師は形成的評価によって、生徒の学習上の問題点（評価をしてみないと気づかないような問題点）を見いだすことができる。

「形成的テスト」は、中程度の時間的長さのフィードバックサイクルの形成的評価として実施することを考えていたため、小単元（例えば、運動学）の授業を一通り終えたところで実施した。出題した問題はFCIやPIを参考にして、その小単元の学習を通して生徒に身に付けさせたいと考えていた「学習の観点」（例えば、「速度」や「加速度」の概念など）を、一問につき一つだけ問うような選択肢で解答する概念問題を、筆者が作成した。

「形成的テスト」で出題した問題は、例えば以下のようなものである。

**問題例** 滑車を用いて一定の速度で箱を持ち上げているとき、ロープが箱を持ち上げる力は、

1. 箱に働く重力より大きい
2. 箱に働く重力に等しい
3. 箱に働く重力より小さい

**学習の観点** 第1法則

本研究で分析対象とした力学分野の「形成的テスト」の全問題は、授業実践の詳細とともに、C章とD章にまとめてある。「形成的テスト」の問題は、文献 [12, 10, 48]などを参考にするとともに、これまでPERベースの授業実践を行ってきたことで筆者が培ってきた生徒の持つ誤概念に関する経験や、先行研究等を参考にして作成した。上記のリソースに基づきながら、誤答選択肢はできるだけ多くの生徒が持っている誤概念に対応させ、生徒がどのような誤った考えを持っているのかも、同時に把握できるようなものを作成することを目指した。

このような問題を、一つの「学習の観点」につき数問ずつ作成・出題した。生徒の解答を「学習の観点」毎に集計することで、その時点で生徒が何をどの程度理解しているのか、あるいは理解

していないのかを量的に把握できるようにした。「学習の観点」の設定により、合計点だけでは見えてこない、生徒個別の学習上の特徴を定量的に表すことができるようになり、より詳細に、そして各生徒に合わせた学習に関するフィードバックをすることが可能となった。また「形成的テスト」の解答にクリッカーを使用することで、クラス全体の解答分布だけでなく、各問題に対する生徒個別の解答結果が、解答に要した時間とともに Excel データとして保存できるため、分析にかかる時間を短縮することができた。後述する個票によるフィードバックにも関わるが、生徒個別の学習状況の把握のために、生徒には毎回同じ番号のクリッカーを使用させた。なおクリッカーが無くても、マークシート式の解答用紙を用意したり、Google スプレッドシート等のクラウドサービスを利用したり、紙ベースで生徒に解答させ、それを教員が集計し、必要なデータを収集したりすることはできる。上述した「形成的テスト」は、各校の実態に応じた形で実施可能である。なお生徒には、クリッカーによる解答は1回だけ行うこととして、集計結果が提示されるまで、周囲の生徒との相談をしないように促した。

### 3.2.2 ツールソフトの開発

次に、フィードバック情報として必要な情報の三番目である、どのような補完的学習活動が必要であるか、ということを経験から生徒個別に情報を与えるために開発した、「ARS 個別学習票」と「FB 票」について説明する。なお二種類の個票の説明の前に、これらを作成するために開発したツールソフトについて説明する。

形成的評価には、プログラムの途中で学習者が自分の理解状況を把握し、今後の学習に活用するという役割を持たせることも大切である。上述したクリッカーの活用は、教師が生徒一人ひとりの学習状況を把握することに役立つものの、生徒への具体的な学習の支援に直接繋がるものではない。「形成的テスト」だけでは、問題の意味を理解しようとして（あるいは、うまく理解できずに）、正解選択肢の番号のみを覚えようとする生徒も中には出てきてしまうだろう。このような正解暗記主義と呼べるような学習に対する見方・考え方を持っている生徒に、知識の活用の仕方や概念の意味を考えさせるためには、ただPIや「形成的テスト」を実施するだけでは不十分である。

そこで本実践では、このような課題の解決のために、クリッカーで得られる生徒個別の解答データの分析ツールソフトを Excel VBA で開発した (図 3.1)。なおこのツールソフトの開発は、本実践の対象となった公立高校で勤務する秋山崇教諭との共同で行った。

ツールソフトの具体的なはたらきとしては、「ファイル名」に「形成的テスト」のクリッカーデータが保存された Excel ファイル (以下、「元データファイル」と呼ぶ) のファイル名を入力し、図 3.1 右側の「ファイルを開く」ボタン (Socratec と TurningPoint は、「形成的テスト」で使用したクリッカーの機種に応じて使い分ける) をクリックすると、「元データファイル」からのデータの転写と並べ替えが行われ、各問題への生徒の解答、各問題に解答するのに要した時間、解答毎の正誤表と正答数・正答率の3つの表が図 3.2・図 3.3 のように作成される (以下3つの表のことを「実行シート」と呼ぶ)。以下、ツールソフトの説明で用いる「実行シート」には、仮想のデータが入っている。

本実践では、「実行シート」から生徒個別に学習状況のフィードバックを与える個票「ARS 個別学習票」「フィードバック (FB) 票」を作成し、配付することとした。なお、二つの個票は教育科学総合研究会のフィードバック票をモデルとしている [103]。この2つの個票も、ツールソフトによって作成することができる。

このツールソフトの開発にあたっては、クリッカーがどの問題で何番の選択肢を解答したのかという情報を生徒個別に収集することを念頭に置いて開発している。これまでクリッカーを活用

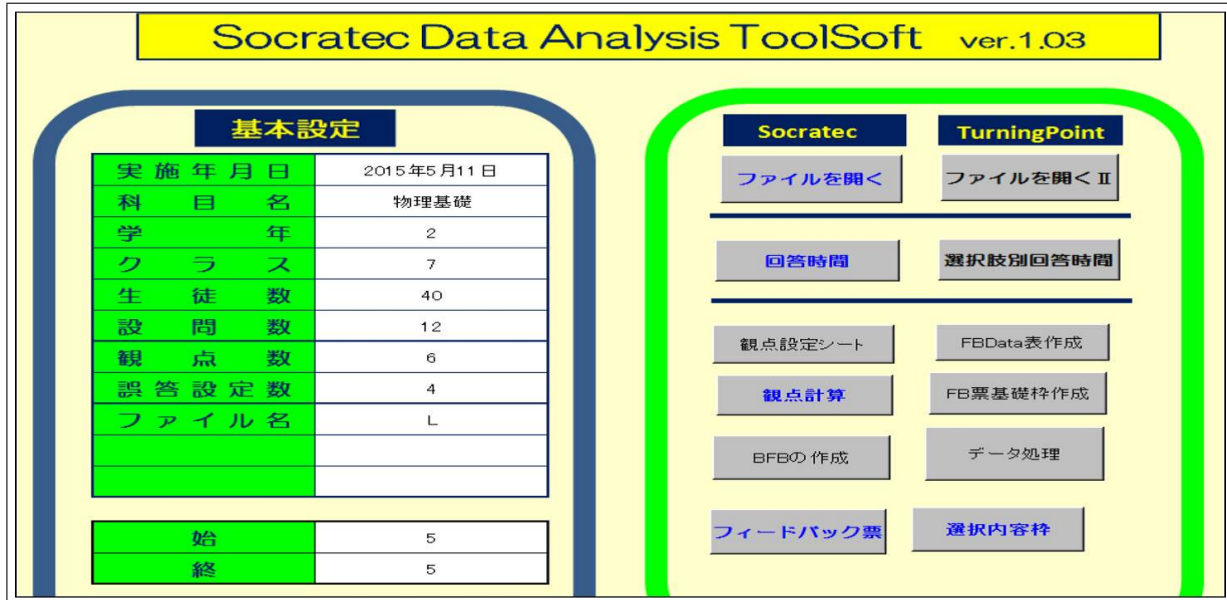


図 3.1: ツールソフト

通数	学年	組	番号	氏名	氏号	設問										回答(解答)時間						
						問1	問2	問3	問4	問5	問6	問7	問8	問9	問10	問1	問2	問3	問4	問5	問6	
1					①	4	3	1	2	2	2	3	3	4	3	84.94	3.06	59.77	6.47	49.73	10.92	1
2					②	2	4	2	3	3	3	1	4	4	3	69.51	8.49	80.81	4.34	57.11	5.06	;
3					③	4	2	3	2	2	2	2	4	4	3	59.99	4.78	66.1	10.33	29.93	3.4	;
4					④	1	1	2	1	3	4	1	3	1	1	56.18	6.9	83.04	6.66	67.04	3.83	;
5					⑤	4	2	3	2	3	2	2	3	3	3	86.19	13.62	114.22	23.08	50.29	7.17	;
6					⑥	4	2	2	2	3	2	2	1	1	3	147.92	37.4	95.62	32.37	79.13	22.82	1
7					⑦	4	2	3	1	2	2	2	4	2	2	64.71	32.81	46.2	5.25	40.5	7.4	;
8					⑧	1	2	1	2	2	1	2	2	1	3	115.53	4.81	63.07	8.71	74.38	6.45	;
9					⑨	4	4	2	2	2	3	3	1	1	3	53.34	22.21	116.85	6.3	63.73	7.72	;
10					⑩	4	2	2	2	2	2	3	4	5	3	136.26	4.24	100.33	3.79	65.35	1.77	;

図 3.2: 実行シート 1

通数	学年	組	番号	氏名	氏号	回答(解答)状況										正答数	正答率
						設問1	設問2	設問3	設問4	設問5	設問6	設問7	設問8	設問9	設問10		
1					①	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	5	50.0%
2					②	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	4	40.0%
3					③	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	6	60.0%
4					④	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	20.0%
5					⑤	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	6	60.0%
6					⑥	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	7	70.0%
7					⑦	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	4	40.0%

図 3.3: 実行シート 2

した授業実践や、そこから得られるデータの分析を授業改善に役立てる試みはいくつも先行研究としてなされてきたが、本研究のように生徒個別の解答データを活用したという例は筆者の知る限りほぼない [29]。それは、クリッカーから得られる情報が非常に貴重であることは、クリッカーを使用している教師であればだれでも認識しているところではあるが、現職教員にとってはたとえば Excel データとしてクリッカーのソフトウェアから出力されるとしても、生徒個別の解答データを並び替え、集計し、視覚的にわかりやすい形に整えることは、非常に手間のかかることであり、実施するのは困難であるからである。そのような状況から考えると、前述したような簡単な操作で直観的に理解しやすい形に生徒個別の解答データを並び替えることのできる本ツールソフトは、本研究で開発した形成的評価をより多くの教師が実施できるようにするために必須の物であると言えよう。クリッカーで得られる各問題、各生徒の解答データは、貴重なデータである反面、そのデータの膨大さ故に、分析と処理にどうしても煩雑さが付きまとい、扱いづらい面があった。しかしこのツールソフトの開発により、煩雑だったデータ処理を半自動的に済ませることができ、かつ生徒個別にデータをまとめた個票を作成できるようになった。現場で校務をこなしながらも、生徒個別に学習に関するフィードバックを丁寧に与えたいという筆者の願いを、実現する一つの方法となった。

なお図 3.1 右側の「回答時間」と「選択肢別回答時間」の2つのボタンは本稿と無関係なため、また「観点設定シート」「観点計算」「BFBの作成」「フィードバック票」「FBData表作成」「FB票基礎枠作成」「データ処理」「選択内容枠」も後述する「ARS 個別学習票」と「FB票」作成の際に使用するが、VBAの説明は本稿の趣旨から外れるため、説明を割愛する。また図 3.1 左側「基本設定」欄の「形成的テスト」の基本的な実施状況は、後述する生徒個別の学習個票に記載されることになる。

### 3.2.3 ARS 個別学習票

二つの学習個票のうちの一つである「ARS 個別学習票」が図 3.4 である。「実施日・科目」には上述した「基本設定」が反映される。「あなたの解答・正答数・正答率」は各生徒が「形成的テスト」全問題中、何問(何%)正解できたかを表す。「あなたの解答」は各生徒の設問毎の正誤が○×で示されており、「設問の正答数・設問の正答率」は各設問に対するクラス全体の正答数と正答率である。各設問の欄には上から順に問題文、「出題の意図」、各生徒が解答した選択肢とそれへの「学習コメント」が示されている。なお、「出題の意図」と「学習コメント」は予め入力しておいたものが出力される。

「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を紹介したり、それをどのように修正していきたいのかという方向性を示したりした。自分がどのような間違いをしたのかを知り、正しい知識の使い

実施日		あなたの解答		正答数	正答率	年 組 番 氏 名				
				6	60.0%					
	設問1	設問2	設問3	設問4	設問5	設問6	設問7	設問8	設問9	設問10
あなたの解答	○	×	○	○	×	○	○	×	×	○
設問の正答数	11	4	8	12	4	10	9	6	2	11
設問の正答率	33.3%	12.1%	24.2%	36.4%	12.1%	30.3%	27.3%	18.2%	6.1%	33.3%
設問 1	摩擦のない床を箱が右向きに移動する間に、箱に作用する4通りの力を表している。力の大きさは等しく、向きは下図のとおりである。移動する間、箱に対してなされ 仕事の定義を確認して欲しかったので出題した。【仕事】教科書p.87~92, 問題集p.66~67, 基本例題27, 28基本問題92~95									
	4. 正解 距離が同じなので、力が大きいと仕事は大きい。1~4のうち最も物体が動いた向きの力が大きいので正解。									
設問 2	3) ボーリングの玉(重さ50N)を0.5mの高さまで持ち上げた。斜面を利用すると、1.0mだけ滑らせれば持ちあげることができる。斜面を滑らせるのに必要な力の大き 仕事の原理について確認し欲しかったので出題した。【仕事】教科書p.87~92, 問題集p.66~67, 基本例題27, 28基本問題92~95									
	4. これだけではわからない 4. どちらも同じ質量のものを同じ高さまで持ち上げるという意味で同じ仕事量である。よって斜面を利用すると距離が2倍になる分、力は半分になる。条件は揃っている。									
設問 3	5) ばねばかりに物体をつるした。ばねばかりが物体を引く力の反作用は①~③のどれか。 作用反作用の法則と、力のつりあいについて整理してほしかったので出題した。【運動の第3法則】教科書p.54~56, 問題集p.36~37, 基本例題15, 16, 基本問題47, 57,									
	2. 正解 作用反作用は力を及ぼし合っている2つの物体に注目します。作用が「○○が△△を押し力」なら反作用は「△△が○○を押し力」です。									

図 3.4: ARS 個別学習票

方を知ることは、誤答選択肢を解答した生徒にとって学習の方向性をより良く修正するのに役立つと考えられる。つまり「ARS 個別学習票」は生徒を学習へ動機づけ、自ら学ぶ力を育てることに繋がると考えられる。また上述したように、ただPIや「形成的テスト」を実施するだけでは、内容を深く理解することや知識を活用することの重要性は、生徒同士での議論や教師による解説を通してその場で自分なりに理解できた一部の生徒にしか実感させることができない。多くの高校生には、自らの学習について自ら考える（メタ認知）習慣が身につけているとは言えず、理解することよりも答えを暗記することに重きを置く状態にある。「ARS 個別学習票」を作成、配付することは、知識の活用の仕方を明示することになるため、生徒に考えることを促し、よりよい学習者としての成長が期待できると思われる。

「ARS 個別学習票」の作成は、筆者自身にとっても大きな意味があった。「ARS 個別学習票」のポイントは「形成的テスト」問題の内容と選択肢、そしてフィードバックのコメント作成を生徒の間違いを詳しく説明することを目指して行う点にある。具体的には、生徒が問題文を読んだときに、それを何に関する問題であると捉えるのか、持ち合わせている知識をどのように活用するのか、結論に至るまでの過程はどのような流れになるのか、といったことをあらかじめ文章にしておく必要があるということである。これに加えて「学習の観点」を設定することで、問題のねらいが焦点化され、生徒にとって考えやすい問題の作成につながるとともに、教師にとっては授業改善のための議論の焦点化につなげやすくなる。「ARS 個別学習票」の作成は、多面的な意味での授業改善にもつながると筆者は考えている。

ところで間違い（誤答）についての説明とは、多くが正答からの逆引きであると言える。具体的には、正答から考えて「○○を△△と捉える（考える、思いこむ）ことで起こる誤答だ」という思考である。ここで筆者が重要だと感じたことは「なぜ、そのような思い込みが生じるのか」を考えることであった。例えば速度の符号について問う問題に対して「速度の符号は常に正だ」という選択肢を生徒が選んだとする。この解答結果を受けて筆者は、この生徒の学習状況について『この生徒は、大きさだけの量である速さと、大きさと向きをもつ量である速度の区別ができずにいるのか』と考えることになるが、さらに『なぜこの生徒は速さと速度の区別ができずにいるのか』を考えることが非常に重要なプロセスであった。そうすることによって、人間は歩いたり走っ

たりするときに、常にその人にとって前向きに移動しており、速さや速度とはこのような前向きの移動で体感するようなものである、という日常経験で培われた概念を、生徒の多くが持っていることに気付くことができた。このような生徒の概念に寄り添い、『向きは座標軸の正の向きを基準に決めます。自分では前に歩いていると思っていても、それが負の向きならば、負の速度ということになります』といった理解を助けるためのコメントをするようにした。「ARS 個別学習票」の作成は、生徒が教室に持ち込んでくる不完全な理解や誤った概念への対応を可能とする授業設計と実践を支援するツールの一つとなり得よう。

### 3.2.4 フィードバック票

フィードバック票（FB票）」について説明する（図3.5）。「あなたの成績・正答数・正答率」

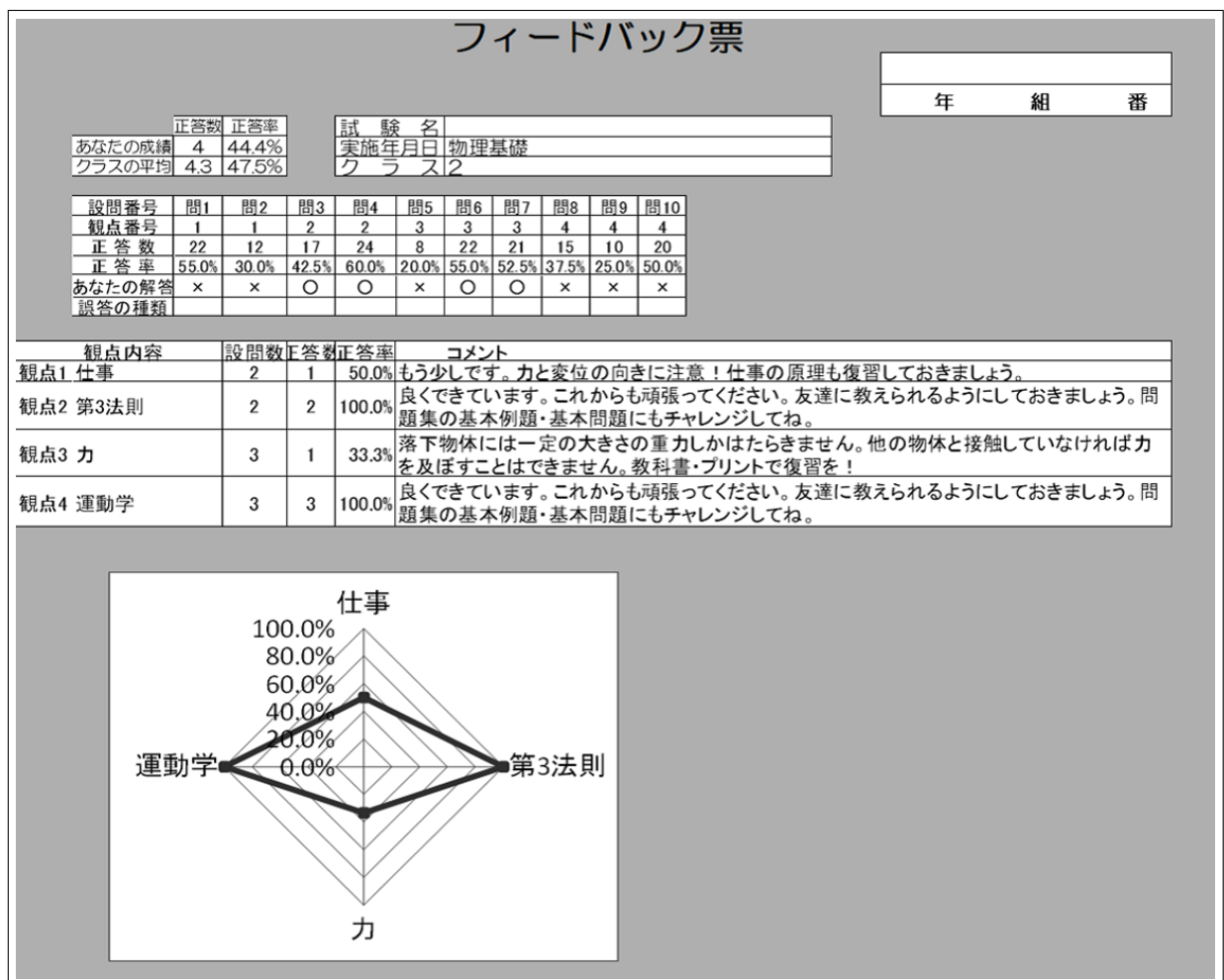


図 3.5: フィードバック票

は各生徒が「形成的テスト」全問題中、何問（何%）正解できたかという正答数と正答率である。「クラスの平均・正答数・正答率」は「形成的テスト」全問題の平均正答数と平均正答率である。「試験名・実施年月日・クラス」は「形成的テスト」の実施年月日や該当クラス、科目名などが入る欄である。その下の表「設問番号・観点番号・正答数・正答率・あなたの解答」は、各設問が該当する「学習の観点」の番号、クラス全体の正答数と正答率、各生徒の正誤が○×でそれぞれ

示されている。「誤答の種類」は本稿と無関係なので説明を割愛する。さらに下の表には、「学習の観点」毎の番号の内容と「形成的テスト」全問題中の問題数と各生徒の正答数と正答率、そして到達度に応じて学習に関するフィードバックを返す「コメント」である。最下部に、「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が示されている。

FB票を読むことで、生徒は自分の学習到達度について「学習の観点」ごとに把握することができるため、その後の学習で何に重点を置いて勉強すべきかという方針を定めることができる。また例えばテスト等で合計得点が同じであったとしても、生徒はそれぞれ得意としていること・苦手としていること、理解していること・理解していないことは異なる。このことは誰しもが納得できるが、具体的に何がどの程度違うのかということを定量的に示すことは難しいだろう。しかしFB票を使用することで、このような生徒個別の違いを定量的に示すことが可能となる。

### 3.2.5 形成的評価としての位置づけ

上述した形成的テストと個票は、目的を生徒の学習と教師の指導の改善としており、実施時期は小単元の終わりという学習途上で、評価の対象としているのは学習によって獲得された学力、特に基本的な概念であるから、表 1.1 における「形成的評価」と言ってよいだろう。また、筆者の開発した形成的テストと個票による形成的評価は、Bloom の形成的テストと完全習得学習というシステムを実践した例と言える。

また、1.3.2 節で詳しく述べたように、近年の形成的評価研究では、教師によるフィードバックだけでなく、生徒に自分自身の理解状況などを自己モニタリングさせるような働きかけが重要視されている。形成的評価が「学習のための評価」と定義し直されたように、いかに生徒が自学自習に役立てることができるものとなっているのかは、非常に重要である。本研究の形成的テストと個票による形成的評価は、理解状況や誤概念の保持状況に応じて、生徒個別に合わせて結果や学習コメントを載せた個票を配布しているという点で、「学習のための評価」になっていると考えられる。より具体的に、Black の定義した表 1.2[68] に本研究の形成的テストと個票による形成的評価を位置付けると、表 3.1 のようになる。さらに詳細に、形成的テストと個票による形成的評価と「学習のための評価」の関係をまとめたのが表 3.2 である。

表 3.1: 形成的テストと個票の位置づけ

	学習者が行く場所	学習者が今いる場所	そこへの行き方
教師	生徒に理解して欲しい物理概念を示す	形成的テストにより、何がどこまで理解できているのかの根拠を示す	個票により、何を誤解し、どのように考えを修正すべきかのフィードバックを与える
仲間		形成的テストや個票を使って、生徒同士で互いに教えあう	
学習者		形成的テストや個票を使って、自学自習に役立てる	
	形成的テストの問題が解けるようになることが目標となる		

このように、本研究で開発した形成的テストと個票による形成的評価を導入した授業は、Bloom の完全習得学習の物理授業における実践例であり、かつ近年の形成的評価研究で提唱されてきた「学習のための評価」の物理授業における実践例でもあると言えるだろう。



表 3.2: 形成的テストと個票による形成的評価と学習のための評価の関係

	学習のための評価	形成的テストと個票による形成的評価
評価の理由	達成を高めて、学習者がより高いスタンダードを満たすことを助ける。進行中の学習者の成長を支援し、改善する。	学習の到達状況を教師、生徒両方で把握するとともに、理解を深めるために行う。
被評価者	学習者自身	教師、学習者自身
評価の焦点	学習者たちがスタンダードに向けて形成するのを助ける教師が選んだ特定の達成のターゲット	生徒が小単元で扱う物理概念を理解するのを助けるような選択肢式の概念問題（試金石問題）
評価する時	学習中の過程	小単元の授業終了直後
主たる使用者	学習者、教師、保護者	生徒、教師
典型的な使用法	学習者たちに達成を改善するための洞察を提供する。教師が学習者のニーズを診断し、反応するのを助ける。保護者が長期にわたって進歩を捉えるのを助ける。保護者が学習を支援するのを助ける。	生徒に理解状況を把握させ、自学自習を促すために行う。教師は授業を通して生徒がどのように、そしてどれだけ物理を学んでいるのかを知り、補充授業の実施を検討したり、その後の授業の改善に役立つ。
教師の役割	スタンダードを教室の目標に変換する。目標について学習者に知らせる。評価をする。結果に基づく指導を調整する。学習者に文章や言葉によるフィードバックをする。評価に学習者を関与させる。	生徒に理解して欲しい物理概念がどのようなものであるかを、具体的に問題の形式で示す。形成的評価を行った時点での生徒個別の理解状況を評価する。生徒個別の評価結果に基づき個票を作成し、配付する。個票はレーダーチャートで学習の観点別の到達度を示したものと、問ごとに学習コメントをまとめたものを配付する。
学習者の役割	自己評価し、進歩を辿る。ゴール設定に貢献する。教室の評価結果にしたがって、次によりよくできるようにする。	自らの理解度を把握し、自学自習や生徒同士の教え合い、教師への質問などを通して、理解を深めるようにする。
主な動機	学習における成功は、達成可能であると信じる。	何がどれだけわかっているのか、あるいはわかっていないのかを具体的に知ることで、物理の授業の目標を達成できると信じる。
強調点	学習者と一緒にループリックを使う。学習者の自己評価。学習者への文章によるフィードバック。	選択肢式の客観テストによって生徒の理解状況を把握する。生徒個別に学習の観点別に得点率を示したレーダーチャートを提示する。生徒個別に問ごとの学習コメントを提示する。

### 3.3 公立高校での実践

2章で述べた「振り返り」を導入したPI型授業を基本として、上記の形成的テストと個票による形成的評価を導入した物理基礎の授業を、2015、2016年度に公立高校の2年生を対象に実施した。公立高校の2015年度では2クラス（67名）、2016年度では5クラス（146名）を対象にした。「振り返り」を導入したPI型授業は年間通じて実践したが、本論文では主に力学分野の実践について述べることとする。なお、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）した生徒である。

#### 3.3.1 授業実践の詳細（公立高校）

授業は1学期間（4～7月）週2時間で、下記のように実施した。

1. FCI事前調査（1時間）
2. 運動学授業（6時間）
3. 運動学「形成的テスト」（1時間）
4. 動力学授業（6時間）
5. 動力学「形成的テスト」（1時間）
6. FCI事後調査（1時間）

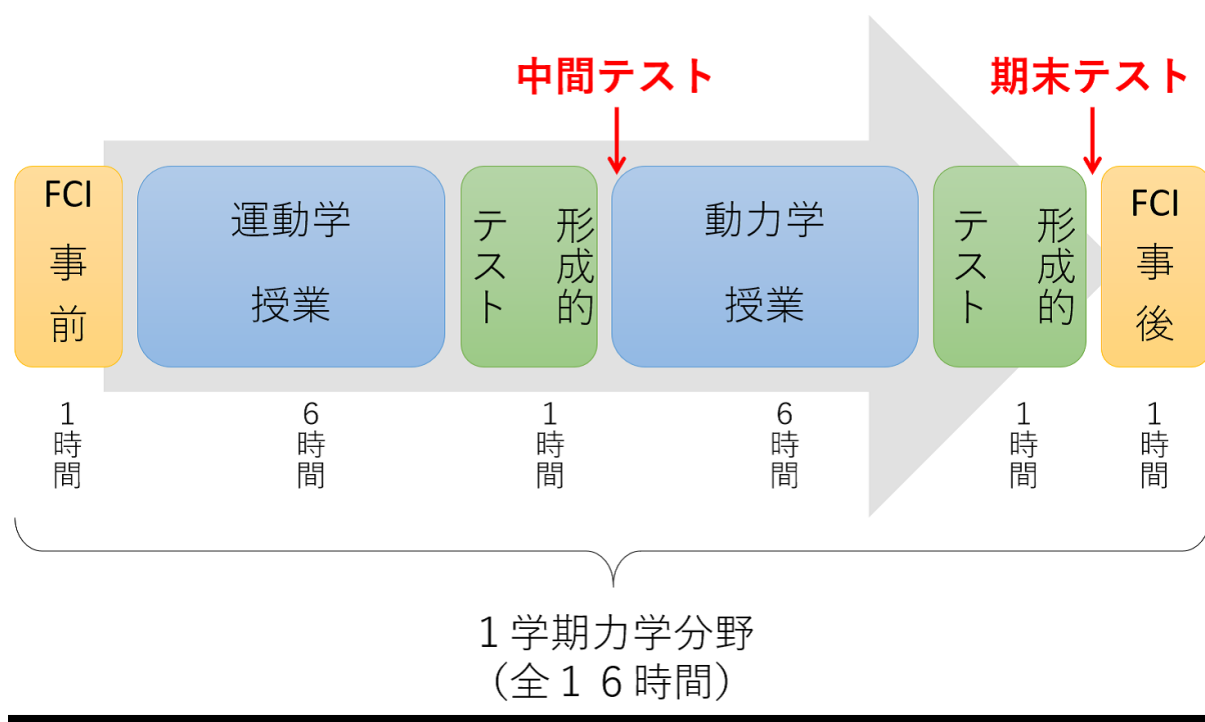


図 3.6: 授業実践の詳細（公立高校）

16時間の授業の中で、生徒実験を2時間、相互作用型演示実験講義（ILDs）を2時間、PIを全部で13問実施した。テスト範囲が中間は運動学、期末は動力学であったため「形成的テスト」もそれに合わせた出題とした。「形成的テスト」は授業時間数の関係で、2回とも完全に実施できたのは5クラスのうち3クラス（A,D,E組）であった。運動学の「形成的テスト」では、速度や加速度、グラフの読み取り問題を全部で5問、動力学では運動の第1法則2問、第2法則3問、第3法則2問、力（主に重力）3問の合計10問を実施した。毎時間の授業展開の詳細や、PIや「形成的テスト」の問題と結果等は、Cにまとめた。

表3.3はFCI事前調査の結果である。1列目のアルファベットはFCI全30問のうち、K：運動学、N1：運動の第1法則、N2：運動の第2法則、N3：運動の第3法則、F：力の「学習の観点」をそれぞれ意味しており、S：全問題である。FCIの「学習の観点」の区別は、参考文献[10]に基づいている。また1行目はA～E：各クラス、All：実践対象の全生徒をそれぞれ表している。表の数値はそれぞれの平均正答率である。表3.3からわかるように、ほとんどの観点で20～30%と

表 3.3: FCI 事前調査の結果（公立高校）

	A	B	C	D	E	All
K	22.2	22.8	18.6	17.3	24.2	21.0
N1	26.4	26.3	30.0	28.2	36.9	29.3
N2	23.3	18.7	20.6	25.2	18.2	21.3
N3	15.3	18.3	22.9	24.1	25.0	21.2
F	22.0	25.6	25.5	22.8	29.9	25.1
S	21.7	22.8	24.5	23.8	28.6	24.2

なっている。FCIは選択肢が5つの問題なので、実践対象の公立高校の生徒たちは授業前の段階では力学概念をあまり理解できていない状況であることがわかる。

図3.7は2回の「形成的テスト」の結果を、クラス別・観点別にまとめたものである。なお、2回の「形成的テスト」を完全に実施できたA、D、E組の3クラスについてまとめている。観点を表す横軸のK～Fは表3.3と表記を合わせている。第1法則の観点（N1）以外でE組が他の2クラスよりも正答率が高くなった。理系クラスで次年度に物理を選択する生徒が一定数いたことや、他クラスに比べて少人数での授業であったことが関係していると思われるが、E組が他クラスに比べて高い正答率を取ったことは、授業者（筆者）の「E組は他クラスに比べて授業に意欲的に取り組んでいる」という感覚と一致している。

### 3.3.2 レーダーチャートによる生徒個別の学習状況の把握

次に、ある生徒P、Q（仮称）二人のFCI事前・事後と「形成的テスト」の結果を学習の観点毎に集計して作成したレーダーチャートについて考察する（図3.8、3.9、表3.4）。レーダーチャートは2回の「形成的テスト」の結果を合わせて1つの図にしている。PとQは同じクラスで授業を受けており、FCI事前調査と事後調査の正答率が23.3%と50.0%で同じだった生徒である。FCI事前調査と事後調査の学年平均は24.2%と33.5%、小テストは47.4%だった。表1のKは運動学、N1は運動の第1法則、N2は第2法則、N3は第3法則、Fは力、Sは全問題の正答率をそれぞれ表している。この学習の観点の設定の仕方は、参考文献[43]に基づき、FCIに対応させている。

図3.8、3.9と表3.4より、FCIでPは5つの学習の観点すべてにおいて、事前に比べて事後の方が正答率は高くなった。一方Qは、「力」と「第3法則」で正答率が高くなったものの、「第1、2

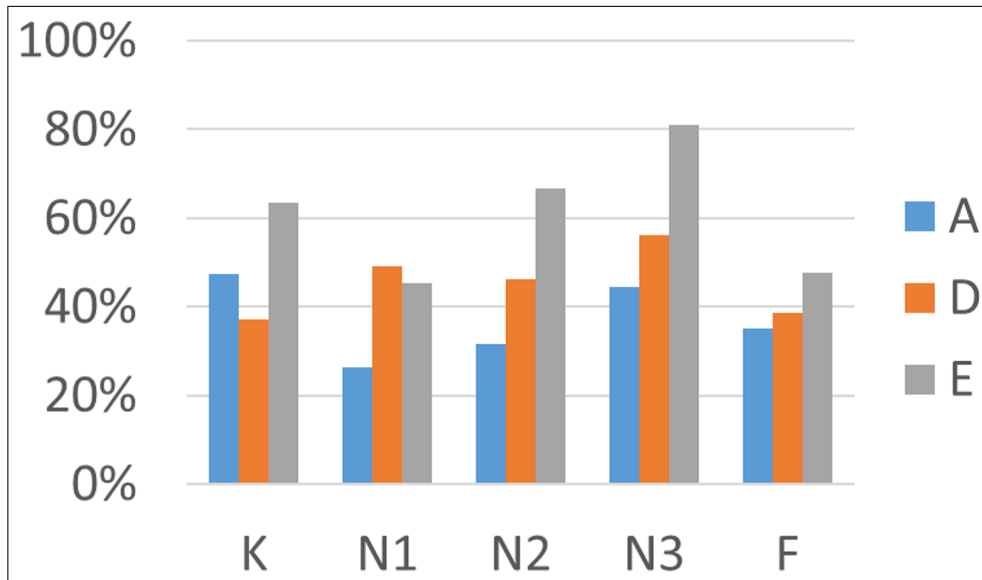


図 3.7: 形成的テスト観点別正答率

表 3.4: 生徒 P と Q の学習の観点ごとの正答率

	FCI 事前		「形成的テスト」		FCI 事後	
	P	Q	P	Q	P	Q
K	0	33.3	80.0	60.0	50.0	16.7
N1	25.0	37.5	0	0	50.0	50.0
N2	0	20.0	66.7	66.7	40.0	20.0
N3	25.0	0	50.0	100	50.0	75.0
F	33.3	25.0	33.3	100	58.3	58.3
S	23.3	23.3	53.3	66.7	50.0	50.0

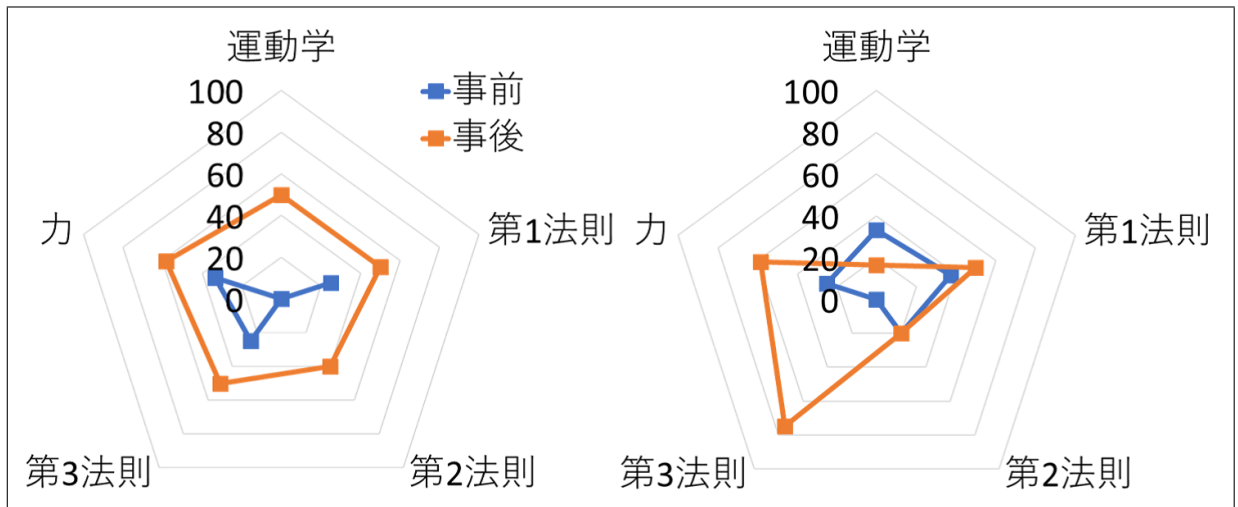


図 3.8: 生徒 P (左) と Q (右) の FCI の観点別結果

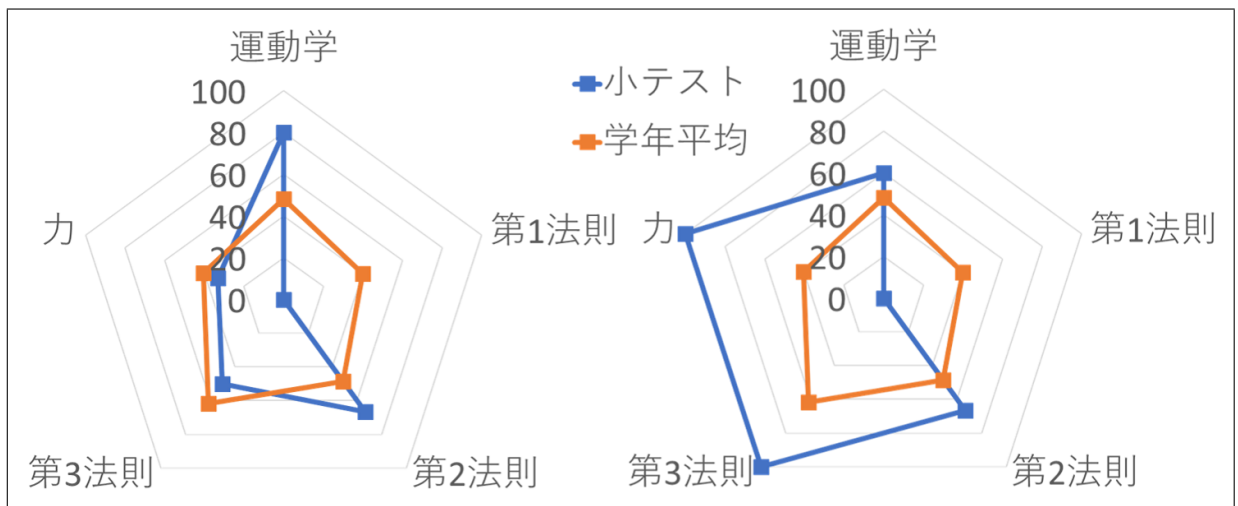


図 3.9: 生徒 P (左) と Q (右) の「形成的テスト」の観点別結果

法則」はほぼ変わらず、「運動学」にいたっては正答率が下がってしまっていた。これより、たとえ FCI の得点が事前・事後で同じであっても、学習の観点を頂点に取ったレーダーチャートの形が P と Q で大きく異なっていたことから、P と Q の知識構造は全く異なることがわかる。P と Q は同じクラスに所属しており、同じ授業を受けていたが、理解の仕方や概念の定着の仕方は同じではなかったと言える。同様なことは、FCI で Hestenes による分類を使用してレーダーチャート化した研究 [83] でも指摘されている。

この理由としては、当然のことではあるが、授業を受ける前の段階で持ち合わせている概念が異なれば、授業を通してどのように概念を獲得するのかは異なると予想される。さらに、P と Q が所属していた班で、PI や実験でどの程度の概念理解を深める議論が行われていたのかも影響しているだろう。

さらに「形成的テスト」の結果との関連も見てみる。Q は FCI 事前調査で学習の観点「第3法則」と「力」で正答率 0% と 25.0% で正答率が非常に低かったが、事後調査では 75.0% と 58.3% になり、正答率が大きく伸びた。これは、Q にとっては「力」と「第3法則」の授業が正しい概念の

獲得に有効に作用したのだと考えられる。小テストで「第3法則」と「力」の観点の正答率がどちらも100%であったことから、Qにとっては授業で学んだ概念について確信を深められたと考えられる。同じことがPの「運動学」「第2法則」の正答率の伸びについても言えるだろう。

また、PとQともに「形成的テスト」の「第1法則」は正答率0%だったが、FCI事前調査に比べて事後調査の正答率は少し上がっている。「第1法則」で出題したのは、多くの生徒が「動かす力」のような誤概念を持っていることがわかっている等速直線運動している物体にはたらく力の合力に関する問題である。「形成的テスト」で間違えたことで、自分の持っている誤概念と授業で学んだニュートン力学概念との違いに直面することとなり、印象に残ったのではないかと考えられる。その結果、FCI事後調査で改善が少し見られたのではないだろうか。

別の生徒T、U（仮称）二人のFCI事前・事後と「形成的テスト」の結果を「学習の観点」毎に集計して作成したレーダーチャートを紹介する（図3.10, 3.11, 表3.5）。レーダーチャートは2回の「形成的テスト」の結果を合わせて1つの図にしている。

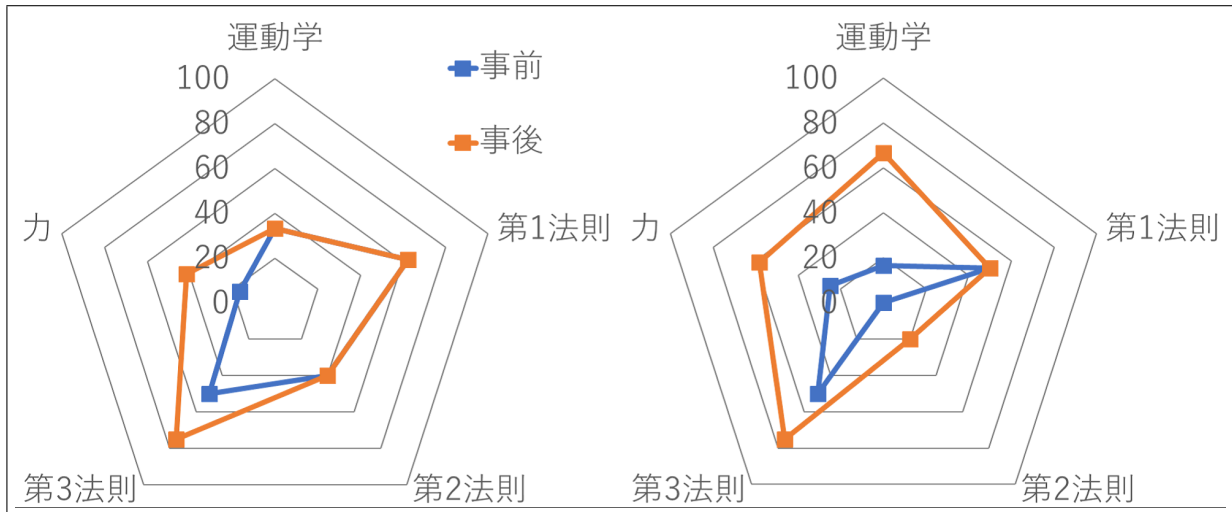


図 3.10: 生徒 T (左) と U (右) の FCI の観点別結果

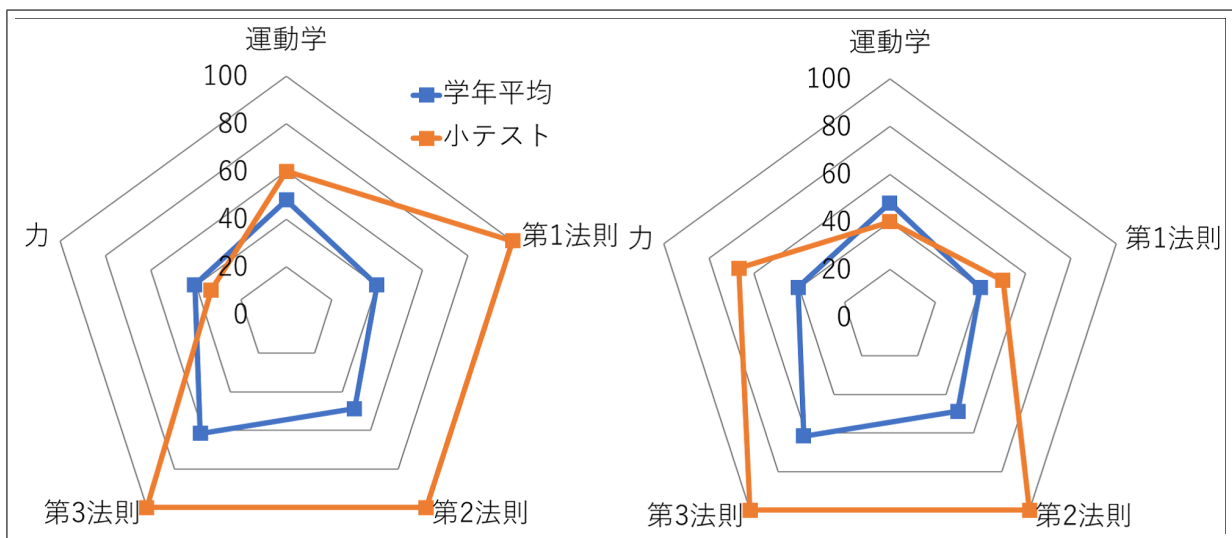


図 3.11: 生徒 T (左) と U (右) の「形成的テスト」の観点別結果

表 3.5: 生徒 T と U の学習の観点ごとの正答率

	FCI 事前		「形成的テスト」		FCI 事後	
	T	U	T	U	T	U
K	33.3	16.7	60.0	40.0	33.3	66.7
N1	62.5	50.0	100	50.0	62.5	50.0
N2	40.0	0	100	100	40.0	20.0
N3	50.0	50.0	100	100	75.0	75.0
F	16.7	25.0	33.3	66.7	41.7	58.3
S	33.3	33.3	73.3	66.7	53.3	53.3

TとUは同じクラス(E組)で授業を受けており、FCI事前調査と事後調査の正答率が33.3%と53.3%で同じだった生徒である。図3.10, 3.11と表3.5より、FCIでTは5つの「学習の観点」のうち、「力」と「第3法則」で事前に比べて事後の方が正答率は高くなり、それ以外は同じ正答率であった。一方Uは、「第1法則」以外の「学習の観点」で正答率が高くなった。特に「第1法則」と「力」の「学習の観点」の伸びが大きかった。これより、たとえFCIの得点が事前・事後で同じであっても「学習の観点」を頂点に取ったレーダーチャートの形がTとUで大きく異なっていたことから、TとUの知識構造に差異が生じていることが推察される。

TとUは同じクラスに所属しており、同じ授業を受けていたが、理解の仕方や概念の定着の仕方は同じではなかったと言える。この理由としては、当然のことではあるが、授業を受ける前の段階で持ち合わせている概念が異なれば、授業を通してどのように概念を獲得するのかは異なるためであると考えられる。さらに、TとUが所属していた班で、PIや実験でどの程度の概念理解を深める議論が行われていたのかも影響しているだろう。「形成的テスト」の実施と、「学習の観点」別の集計・分析により、このような生徒毎の概念獲得状況の違いを定量的に示すことができたといえる。さらに「形成的テスト」の結果との関連も見てみる。Tは「第1法則」、「第2法則」、「第3法則」の3つの「学習の観点」で満点を取っているが、FCI事前調査から事後調査での伸びは「第3法則」で多少見られただけで、「第1法則」と「第2法則」は変化がなかった。またUも「第2法則」と「第3法則」で満点を取ったが、FCI事前調査から事後調査での伸びはわずかだった。逆にUは、「形成的テスト」で学年平均を下回り、あまり出来の良くなかった「運動学」でFCI事前調査から事後調査での伸びが見られた。

以上より、生徒TとUについては、「形成的テスト」とFCI事前事後調査の間に明確な関係性は見つけることができなかった。この理由はいくつか考えられるが、主には、FCI事前事後調査が1学期間の力学授業全体を通じた概念獲得の状況の評価しているのに対して、「形成的テスト」はある時点での概念獲得の状況を、各「学習の観点」で2~3問程度の問題で評価している点にあると思われる。「形成的テスト」で正解できていたからといって、FCIでも正解できるとは限らないということである。

### 3.3.3 「形成的テスト」とFCI

FCI事前・事後調査と「形成的テスト」の相関係数の値を表3.6に示す。表中の\*は $p$ 値(有意確率)が0.001未満であることを表す。表3.6より、FCI事前調査と「形成的テスト」の間には相関がなく、FCI事後調査と小テストの間には正の相関があることがわかる。これより、「形成的テスト」で良い成績をとってれば、FCI事後調査でも良い成績になる傾向があると言える。前述

表 3.6: FCI と「形成的テスト」の相関係数の値

	FCI 事前	FCI 事後
形成的テスト	0.160	0.538*

したように、FCI 事前調査の学年平均正答率は 23.3%と非常に低く、授業を受ける前に生徒たちはほとんどニュートン力学の概念を身につけられていなかったものと考えられる。その後、学習がある程度進んだ中間テスト直前と期末テスト直前に受けた 2 回の「形成的テスト」と、FCI 事後調査の間に正の相関があったことから、「形成的テスト」で評価している理解度は、FCI で評価している理解度と、ある程度対応していると言えるだろう。

次に、クラスごとの FCI 事前事後調査ならびに「形成的テスト」の結果について考察する。表 3.7 は各クラスの FCI 事前事後調査の全問題の平均正答率である。表中の Pre, Post, G はそれぞれ事前調査、事後調査、規格化ゲインを表す。また表 3.8 は、クラス別、学習の観点別の事前事後の正答率から規格化ゲインを算出し、まとめたものである。表 3.7, 3.8 より 2 回目の「形成的テ

表 3.7: 各クラス FCI 事前事後調査結果

	A	B	C	D	E	全体
Pre	21.7	22.8	24.5	23.8	28.6	24.2
Post	30.7	33.8	32.6	30.7	41.1	33.5
G	0.11	0.14	0.11	0.09	0.17	0.12

表 3.8: クラス別学習の観点別ゲイン

	A	B	C	D	E
K	0.054	0.0072	0.0058	-0.14	0.057
N1	0.042	0.056	0.077	0.039	0.085
N2	-0.21	0.016	-0.11	-0.12	0.011
N3	0.25	0.27	0.21	0.20	0.41
F	0.19	0.22	0.17	0.16	0.24

スト」が実施できなかった B, C 組と実施した A, D, E 組とで規格化ゲインに大きな差は見られない。第 3 法則 (N3) と力 (F) の観点で共通してゲインの値が正になっているが、単純に事後調査の実施時期に近いところで該当の授業が行われたからなのかもしれない。よって「形成的テスト」が物理概念の獲得に直接寄与しているかどうかはわからなかった。

### 3.3.4 生徒の声

1 学期間の授業後に実施した、自由記述形式のアンケートの回答のうち、本稿で紹介している形成的評価に関係している回答をいくつか紹介する。回答は 2 年間分で、生徒の書いた回答をそのまま掲載する。



#### ARS 個別学習票とFB 票について

- 自分がどこを苦手（理解しているか）よくわかるからよかった。
- 自分の力がわかった。

#### 授業全体について

- もし自分が間違えていたら、勉強しているときにあのとき間違えたなと思いだして勉強することができるのでよかった。
- プロジェクターを使っの授業で、自分で考えてからまわりの人の答えのパーセントを見ながら近くの人と答えを話し合うことで自分でも理解しやすかった。その後に説明つきのプリントがわたされたので家で1人で勉強しやすくとてもわかりやすかったです。

これらのコメントから、ARS 個別学習票やFB 票は少なくとも一部の生徒にとって、自分の理解度を把握したり、家庭学習したりするのに役立っているといえる。

### 3.4 国立大学附属中等教育学校での実践

前節までで述べてきたように、「形成的テスト」を実施し、結果を2種類の個票にして生徒に配布することで、個々の生徒に自分の学習上の特徴を把握させるとともに自学用の学習課題を提供するという形成的評価システムを開発してきた。自由記述のアンケートによると、開発した個票は、自分の理解度を把握でき、自学に役立つ教材として、多くの生徒から好意的に受け止められている。

しかし、個票の活用が実際に生徒の物理概念や学習姿勢の向上に効果があるのかを分析・評価する方法は見いだせていなかった。そこで個票の活用度を調べるアンケートを実施し、その結果と小テストおよび物理教育研究（PER）で開発されている物理概念調査と学習姿勢調査の結果を組み合わせて、総合的に分析することを試みた。

実践対象は2017年度国立大学附属中等教育学校5年生（高等学校2年生に相当）4クラス（仮にW～Z組とする）93名で、授業は物理基礎（2単位）で行った。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。実践対象の中等教育学校では、物理基礎を筆者と同僚教師との二人で1単位ずつ、分野を分けて実施しているが、研究対象は筆者が担当した力学分野の授業である。

#### 3.4.1 授業実践の詳細

FCIの出題範囲である運動学と運動の三法則の授業は、1学期（4～7月）と2学期（9～12月）で下記のように行った。括弧内は授業時間数を表す。7.は教育実習生が担当し、9.では生徒が個人またはグループで摩擦力または空気抵抗に関する探究活動を行った。

1. FCI・CLASS 事前調査（1時間）
2. 運動学授業（4時間）
3. 「形成的テスト」①（1時間）
4. 運動の第1・2法則（2時間）
5. 「形成的テスト」②（1時間）
6. 運動の第3法則（1時間）
7. 落体の運動（3時間）
8. 「形成的テスト」③（1時間）
9. 探究活動（3時間）
10. 「形成的テスト」④（1時間）
11. FCI 事後調査（1時間）

生徒実験を5回、PIを17問、ILDs形式の授業を2時間行った。ARS個別学習票とFB票は「形成的テスト」③と④の直後に配付した。各「形成的テスト」の出題範囲と問題数は、①は運動学に関して11問（変位2問、速度2問、加速度3問、グラフ4問）、②は運動学と動力学に関して8問（グラフ3問、運動の第1法則2問、運動の第2法則3問）、③は運動の第3法則と落体の運動

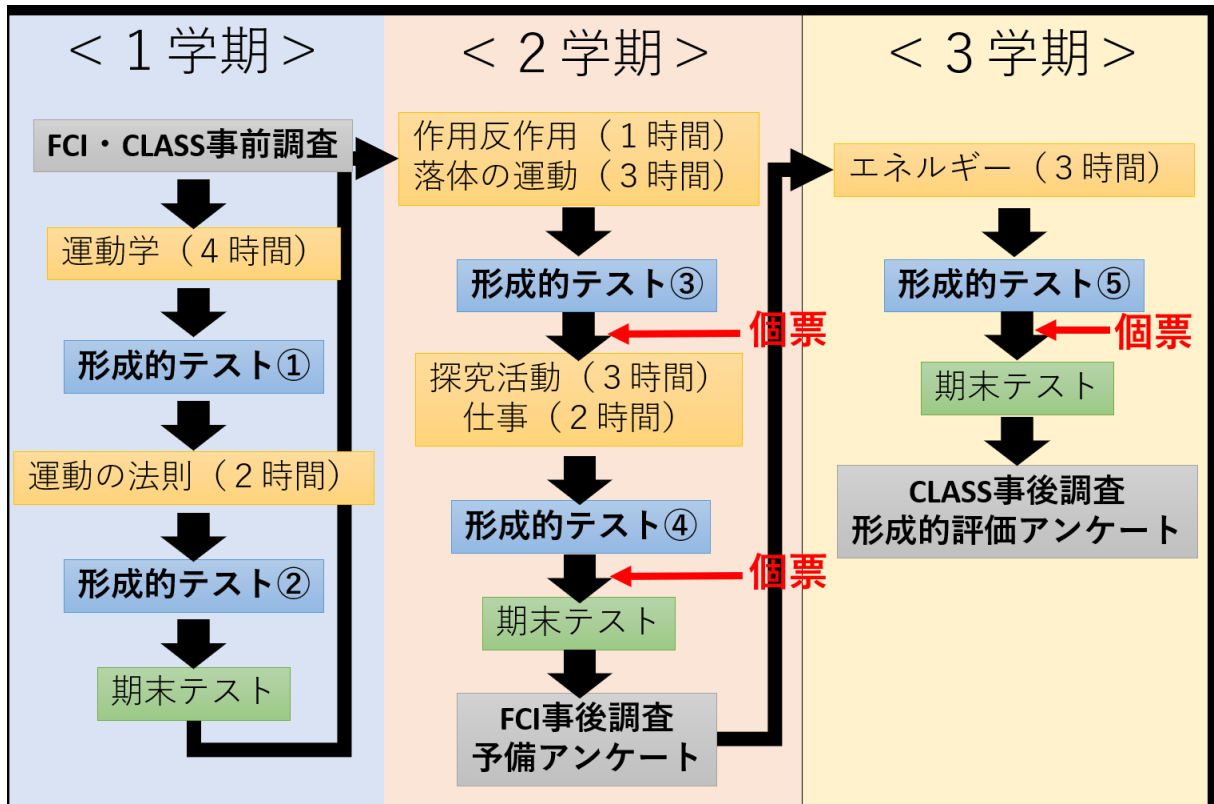


図 3.12: 授業実践の詳細 (国立中等教育学校)

に関して8問(運動の第3法則2問, 運動学3問, 力3問), ④は運動の第3法則, 落体の運動, 仕事に関して10問(運動の第3法則2問, 運動学3問, 力3問, 仕事2問)であった。なお, FCIの出題範囲から外れるため, 「形成的テスト」④の仕事に関する問題2問は, 分析から除くこととする。毎時間の授業展開の詳細や, PIや「形成的テスト」の問題と結果等は, D章にまとめた。

表 3.9: FCI 事前調査の結果 (国立中等)

%	W	X	Y	Z	All
K	46.7	34.8	48.2	38.2	40.9
N1	40.0	31.3	46.7	35.4	37.7
N2	34.0	27.3	40.0	29.2	32.0
N3	12.5	19.3	27.6	11.5	18.0
F	32.5	28.8	37.3	34.7	33.3
S	32.0	28.2	39.5	31.4	32.6

表 3.9 は FCI 事前調査の結果である。1 列目のアルファベットは表 3.3 と合わせている。実践対象の国立大学附属中等教育学校の生徒たちは, 前節で実践対象とした公立高校の生徒たちと比べて, 授業前の段階で正しい概念を保有している割合はやや高いと言える。

### 3.4.2 FCIとCLASS 事前事後調査の結果

まず、FCI 事前事後調査の結果から見える生徒の概念変容の様子を概観する。図 3.13 は FCI 事前事後調査の正答率を、設問ごとにまとめたものである。多くの設問で事前調査の正答率よりも事後調査の正答率の方が高いことがわかる。本実践の事前調査の正答率は 32.58% (標準誤差  $SE \pm 3.28$ )、事後調査 50.22% ( $SE \pm 3.35$ ) で、規格化ゲインは 0.26 であった。図 3.14 は事前事後調査の正答率から設問別に規格化ゲインを算出し、グラフ化したもので、設問別に正答率の伸び率がどの程度であるかが示されている。さらにこれらを学習の観点別にまとめたのが図 3.15 と図 3.16 である。これより、本実践では運動の第 3 法則 (作用反作用の法則) と力の観点において正答率の上昇が大きいことがわかる。これに対し運動学、運動の第 1 法則 (慣性の法則)、運動の第 2 法則 (運動の法則) ではあまり正答率が変化していない。このことは、図 3.17 からわかる。作用反作用の法則に関する誤概念保持率は下がり改善が見られるが、その他の誤概念に関しては、あまり改善が見られない。なお、ここでいう誤概念保持率は金森 [28] に合わせて、(3.1) 式で定義した。

$$(\text{概念保持率}) = \frac{(\text{ある概念が含まれる選択肢の全解答数})}{(\text{ある誤概念が含まれる項目に対する全解答数})} \quad (3.1)$$

本実践で個票を配付し始めたのは、3 回目の形成的テストからで、その出題範囲がまさに第 3 法則と力 (おもに重力) であったため、個票によるフィードバックが概念理解を促した可能性はある。ただし、公立高校での実践結果と同様に、第 3 法則と力の規格化ゲインが高いことは、事後調査を実施した時期と時間的に近い授業で扱ったことと関係があるかもしれないため、明確な結論は出せない。

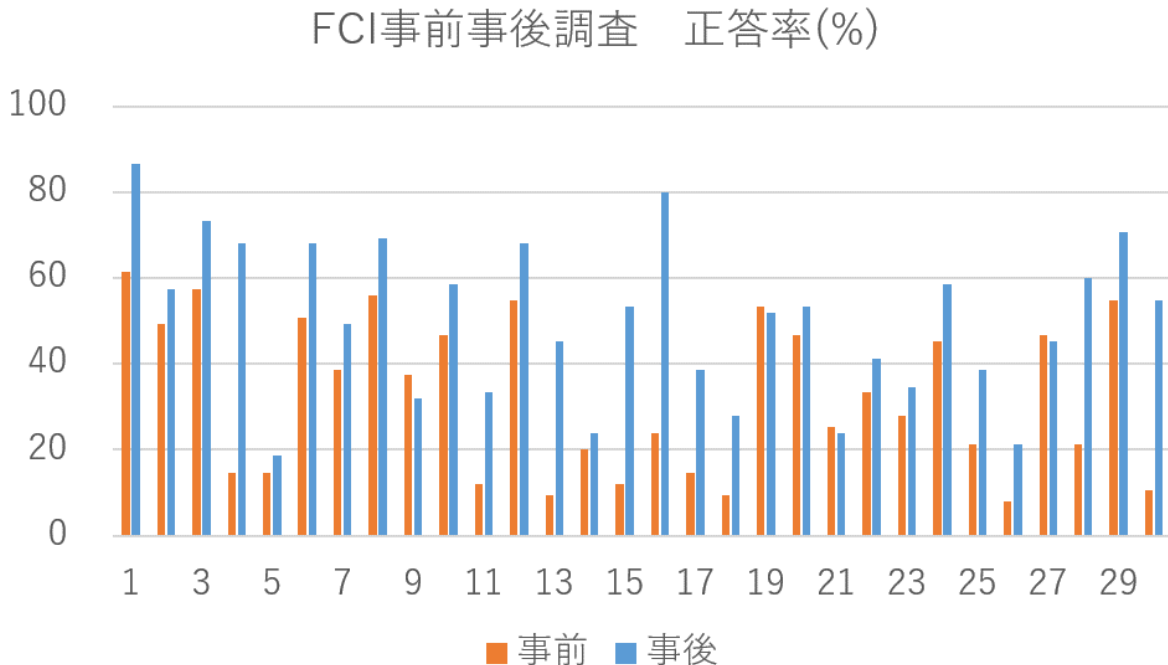


図 3.13: FCI 事前事後調査の結果

次に、CLASS の事前事後調査の結果から見える生徒の学習姿勢・態度の変容について概観する。

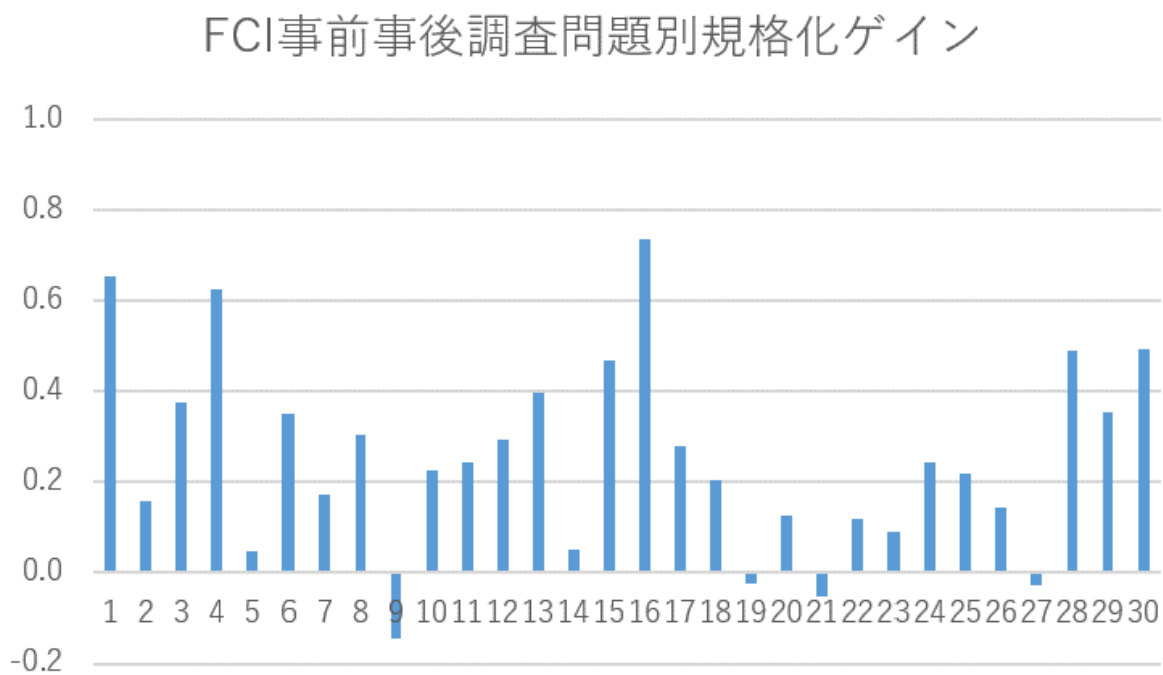


図 3.14: FCI 設問別規格化ゲイン

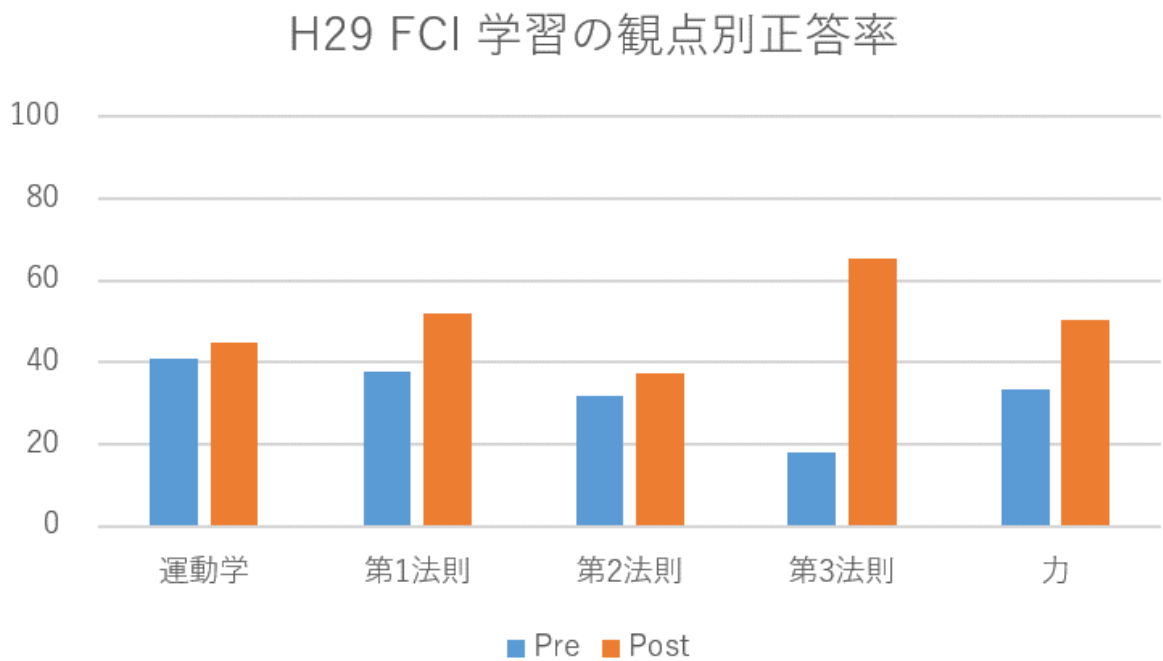


図 3.15: FCI 学習の観点別正答率

### FCI事前事後調査学習の観点別規格化ゲイン

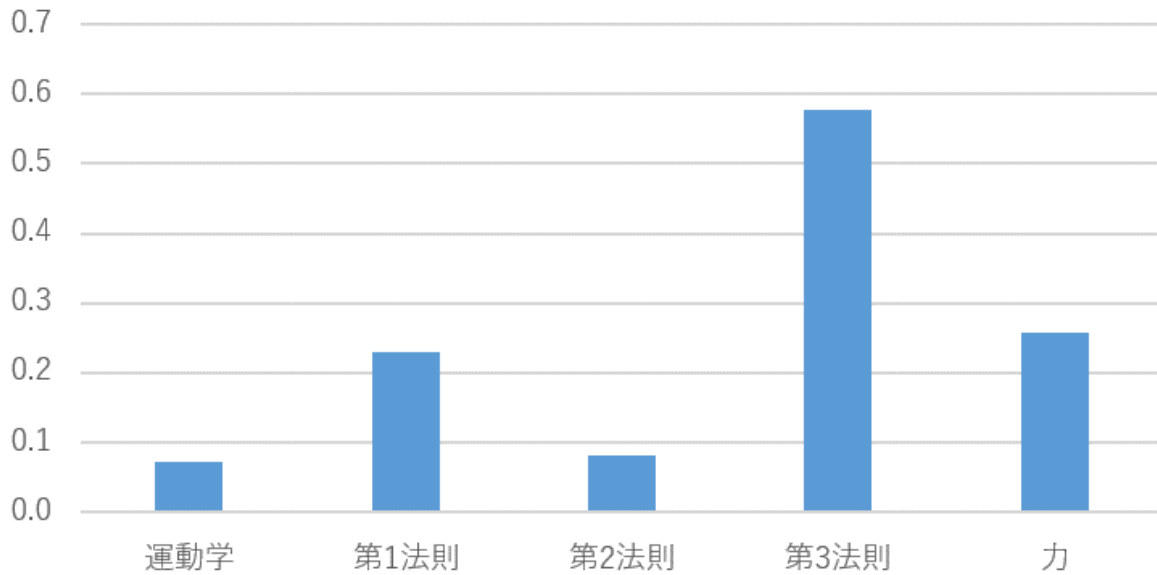


図 3.16: FCI 学習の観点別規格化ゲイン

### 2017年誤概念保持率

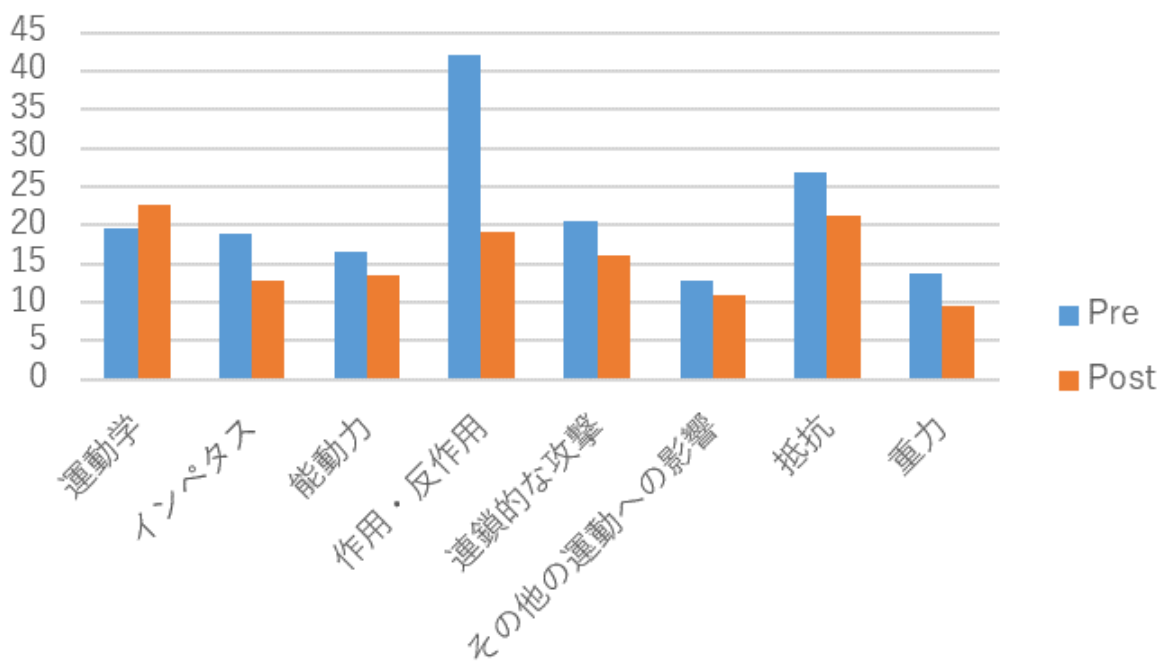


図 3.17: 誤概念保持率

CLASSの事前事後調査で望ましい回答率は、それぞれ42.3% (SE±1.9), 43.9% (SE±2.0)であった。後述するが、CLASSで測られる生徒の学習姿勢・態度を望ましいものにすることは難しく、綿密にデザインされたPERベースの相互作用型授業でも望ましい回答率が減少してしまうことも報告されている[47]。本実践ではわずかに望ましい回答率が上昇したが、統計的な有意差は見られなかった。また図3.18と図3.19は、観点別に事前事後調査での望ましい回答率をグラフで表したものである。図3.18は事前に比べて事後の方が左上にシフトしているとより良い変容があったとみなされる。概念理解に関する観点(CCおよびACU)、現実世界との結びつきに関する観点(RWC)でややその傾向は見られたが、図3.19でわかるように統計的な有意差はない。

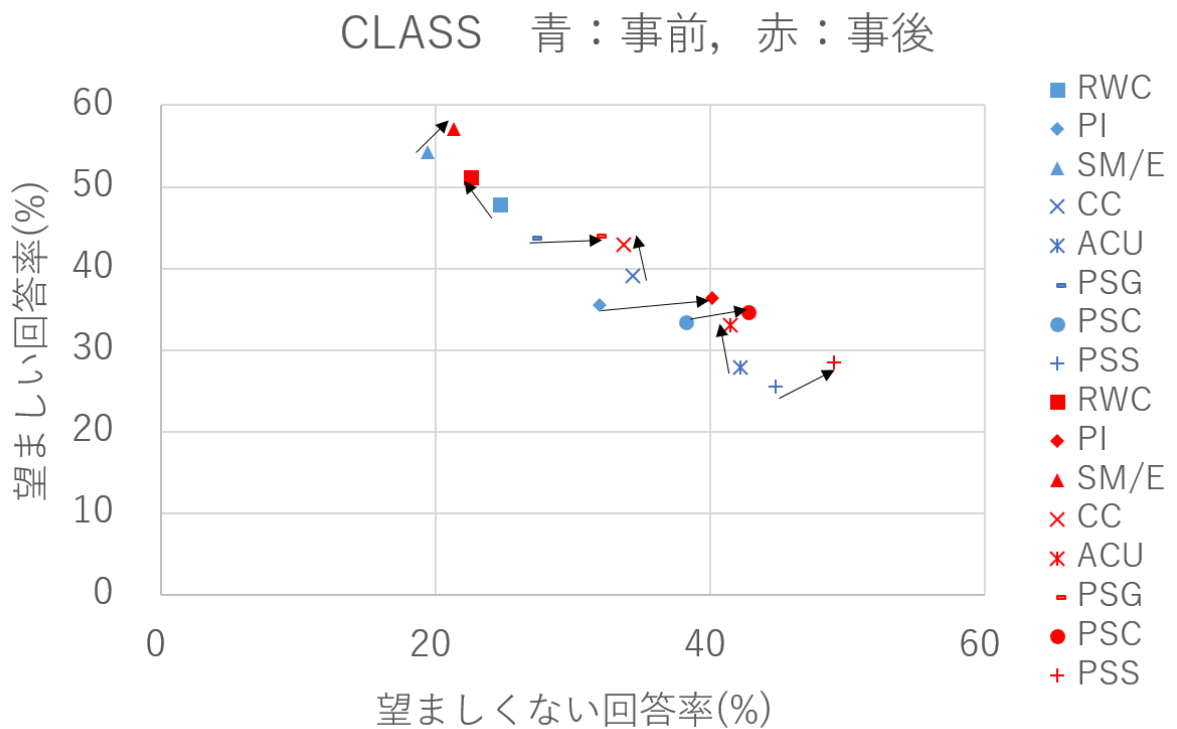


図 3.18: CLASS 事前事後調査結果

### 3.4.3 形成的評価に関するアンケート

#### 予備アンケート

図3.12で示したように、2学期末に形成的評価に関して、生徒の意識を調査するために、予備的なアンケートを行った。設問は、ARS個別学習票とFB票それぞれについて3問ずつ、計6問を実施した。提示した設問は下記のとおりである。

1. クリッカーでの小テストの後に配布されたARS個別学習票は読みましたか？
2. クリッカーでの小テストの後に配布されたFB個別学習票は読みましたか？
3. ARS個別学習票を読んで自分が理解しているところと、そうでないところがわかりましたか？

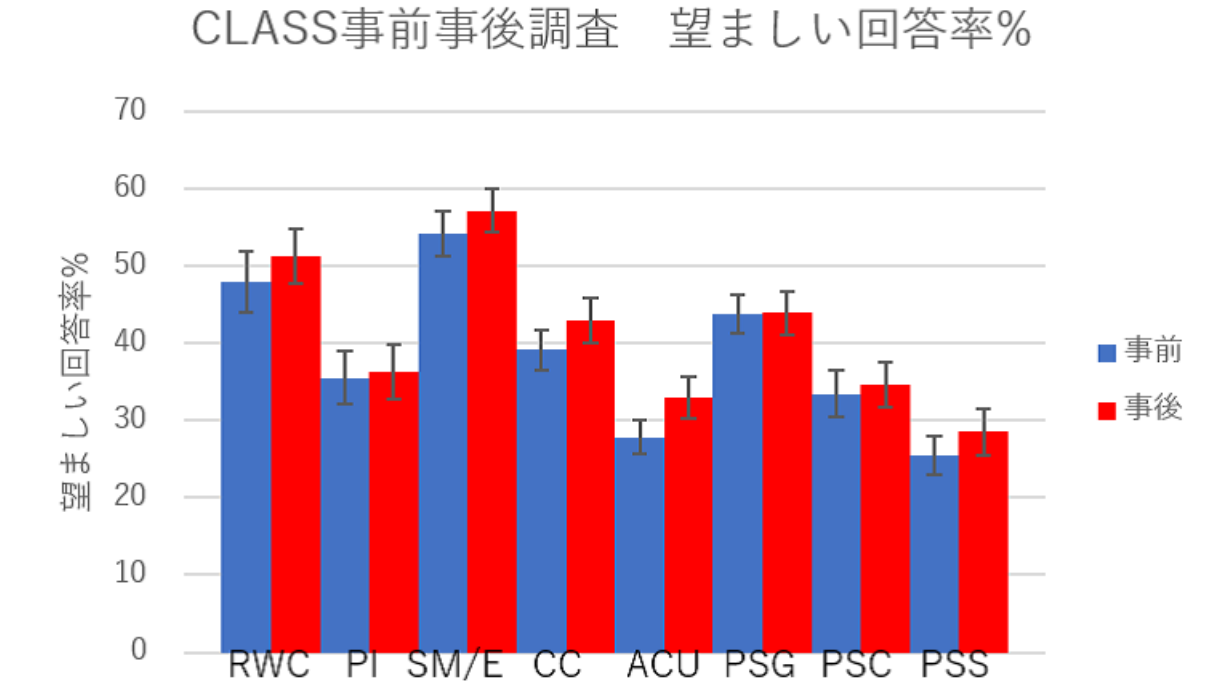


図 3.19: CLASS 事前事後調査観点別結果

4. FB 票を読んで自分が理解しているところと、そうでないところがわかりましたか？
5. ARS 個別学習票は、あなたの勉強に役立ちましたか？
6. ARS 個別学習票は、あなたの勉強に役立ちましたか？

1, 2 問目には、4：全部読んだ、3：大体読んだ、2：少し読んだ、1：読んでいない、の4段階で回答を求めた。3, 4 問目には、5：そう思う、4：どちらかと言えばそう思う、3：どちらとも言えない、2：どちらかと言えばそう思わない、1：そう思わない、の5段階で回答を求めた。5, 6 問目には、4：とても役立った、3：役立った、2：少し役立った、1：役立たなかった、の4段階で回答を求めた。それぞれの結果は、図 3.20 から図 3.25 のようになった。

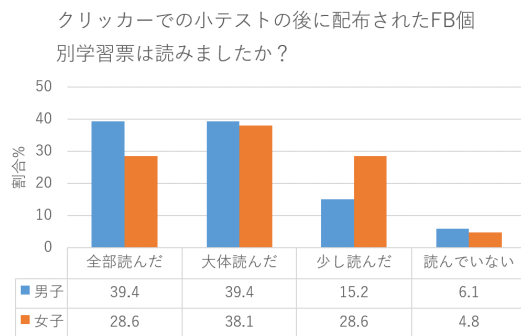
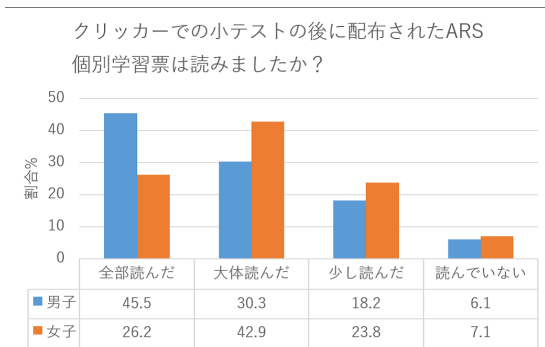


図 3.20: 形成的評価に関する予備アンケート 1 問 図 3.21: 形成的評価に関する予備アンケート 2 問 目結果



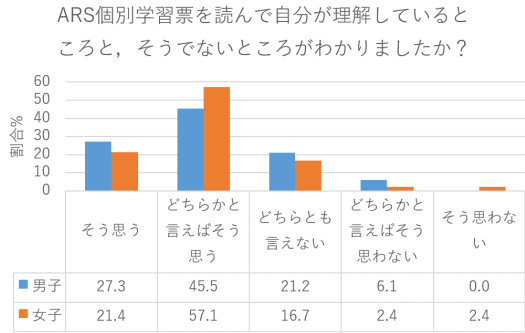


図 3.22: 形成的評価に関する予備アンケート 3 問目結果

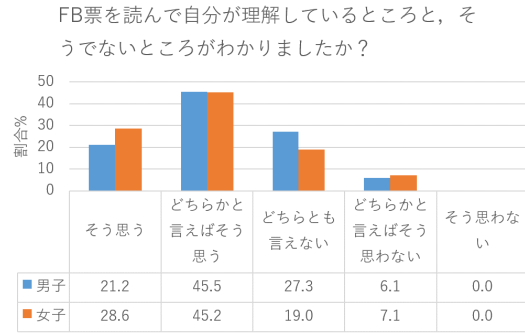


図 3.23: 形成的評価に関する予備アンケート 4 問目結果

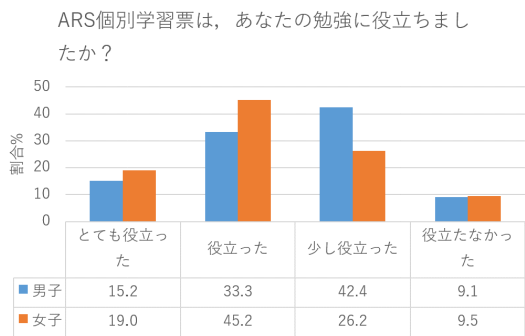


図 3.24: 形成的評価に関する予備アンケート 5 問目結果

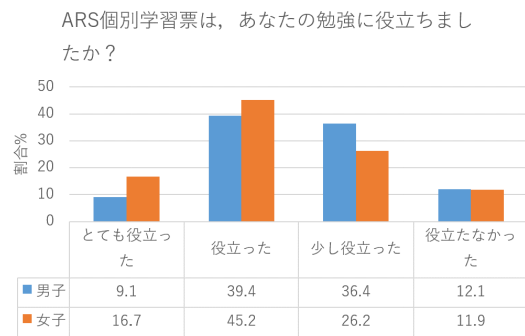


図 3.25: 形成的評価に関する予備アンケート 6 問目結果

アンケート問1, 2の結果より, 多くの生徒が個票を読んでいることがわかる。また, 問3, 4から, 7割程度の生徒が個票で自分の理解しているところと, そうでないところがわかったと答えている。問5, 6からは, 4割程度の生徒が個票は自学に役立ったと答えていることがわかる。男女で質問ごとに若干の回答分布の違いは見えるものの, 概ね同じ傾向であることがわかる。また, ARS 個別学習票とFB票とでも, 回答にはほぼ同じ傾向が見える。

### 本アンケート

上述したように, 予備アンケートの結果から多くの生徒が個票を読み, 理解状況の把握や自学に役立っていることがわかった。そこで本研究で開発, 授業に導入した形成的評価が, 生徒の物理概念獲得や学習姿勢・態度の向上に寄与しているのかどうかを検証するため, 年度末に以下の設問でアンケートを実施した。アンケートは選択式と記述式の混合形式で行った。問1~6すべての設問について, 「5: 良いと思う(そう思う), 4: どちらかというと思う(そう思う), 3: どちらとも言えない, 2: どちらかというと思う(そう思わない), 1: 良くないと思う(そう思わない)」の5段階での生徒に回答させた。また, 問1~3では下に書くように, 良いところと改善すべきところを自由に記述させたり, アンケートの最後には個票に関してと授業に関して, 自由記述を求めた。

問1 授業ではよく, 選択肢問題がスクリーンに映し出され, それにクリッカーで答え, 周囲の人と議論する機会がありました。この活動についてどう思いますか? 1~5のどれかを選んでください。また, この活動の良いところや改善すべきところを, 具体的に書いてください。

問2 学習がある程度進んだところ(特にテスト前)で, クリッカーで選択肢問題に解答する形式の小テストを行いました。この小テストについてどう思いますか? 1~5のどれかを選んでください。また, 小テストの良いところや改善すべきところを, 具体的に書いてください。

問3 小テストの結果は, 後日2種類の個票でフィードバックしてきました。個票は物理を理解するのに役立ちましたか? 1~5のどれかを選んでください。また, どのように役立ったのか, どのように勉強に使ったのかということや, 個票の良いところや改善すべきところを, 具体的に書いてください。

問4 個票から, 自分が理解していること, 理解していないことが具体的にわかりましたか?

問5 個票を配付したことは, あなたの物理の勉強に対するやる気を高めましたか?

問6 もし個票が配布されていなかったら, 今の自分ほどには物理を勉強していなかったと思いますか?

個票 個票について自由にコメントしてください。

授業 授業について自由にコメントしてください。

これらのうち, 問1はピア・インストラクション, 問2は形成的テスト, 問3~5は個票, 問6は動機づけについてそれぞれ問うている。なお, 問3(個票の活用と物理の理解の関係について) 問4(個票の活用と生徒自身による物理の理解状況の把握(メタ認知)の関係について), 問5(個票の活用と物理学習への動機付けの関係について)の3項目は, 個票の活用に関する指標として設定したもので, 次節のFCIやCLASS, 形成的テストなどとの定量的な分析にも用いる。

問1～6の結果は図3.26の通りである。問2で5または4を回答した生徒がほぼ9割で、ほとんどの生徒が「形成的テスト」を良いと思っていることが伺える。問3で半分ほどが個票は物理を理解するために役立ったと答え、問4で6割ほどが個票は自分の理解状況の把握に役立ったと答えている。問5より個票が動機づけに役立ったと考えているのは3分の1ほどであるとわかる。

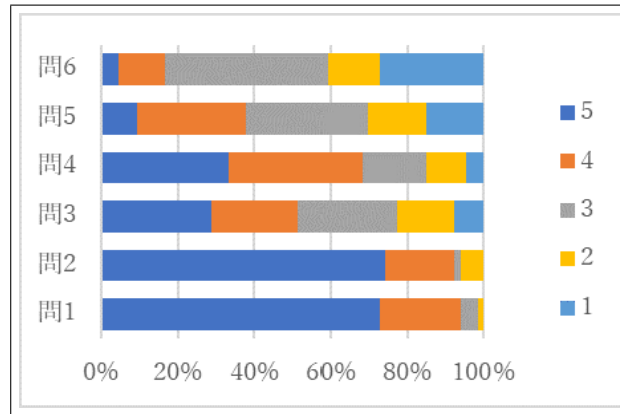


図 3.26: 形成的評価アンケートの結果

本研究の主題である、「形成的テスト」と個票による形成的評価について詳しく分析するために、問2, 3, そして最後の個票に関する設問の自由記述について分析する。

問2の自由記述では、

- 自分がどの程度理解しているのかを知ることができるから良いと思う
- 今まで学習してきたことをおさらいできる良い機会だったし、何ができて何が出来ないかがよく分かった

のように、理解度を把握できることが良い点であると答えた生徒が最も多かった。また、

- 今まで学んだことを再確認し、復習することができたので良かったです。また、グループでテストを解いているような気分になって良かったです。アメリカにいた時に、情報の授業の期末がグループでテストに取り組む方式だったのですが、それを思い出しました
- 復習として自分の知識がどのぐらいなのかを確かめるのにちょうどよいと思う
- 振り返って問題を解いて自分の成長を実感できる
- いままでの振り返りができて頭の整理ができる。色々な知識がごちゃごちゃになって分からなくなることが減る

のように、復習に役立つということや、成長を実感できるといった記述も多かった。

さらに、

- その問題を考える上でのポイントをはっきり提示して頂けると、自主的に勉強するときに理解しやすい
- この結果を元に、今後の勉強スケジュールを立てることができる

のように、自学自習に役立つという回答も、少数ながら見られた。

一方で、

- 計算問題などが少なかったので、問題の形式などを多様化すると、より効果的だと思った
- 簡単に今までのことを確認できたから良かったけど答えが全然わかんないから、やる前の週に来週やりますって言って欲しい
- このテストをいつ実施するのか事前に教えてほしい。そうすることで、授業前に自分で復習してから授業できるので小テストをよりよく活用できる

といった回答のように、物理概念の獲得に授業で重きを置いている教師と、物理がわかるということは計算問題が解けることであると考える生徒や、定期試験や大学入試を見据え良い成績を修めたいと考える生徒との間の意識の違いが見えたり、「形成的テスト」は成績に反映しないことを生徒には伝えているが、3つ目のコメントのように、「形成的テスト」のような問題に正解することが物理を学ぶ上で重要な動機づけとなり得ることや、何人かの生徒は「形成的テスト」を積極的に自学自習に役立てたいと考えていることがわかった。

このような記述と、上述したように「形成的テスト」を良いと回答した生徒がほぼ9割程度いるということから、形成的評価として「形成的小テスト」で生徒個別の小単元の理解状況を把握することは、生徒の自己評価においては十分に達成できたと考えられる。

問3の自由記述では、

- 自分の苦手な分野が一目でわかって勉強する時間の配分などに役立てた
- チャートグラフで結果を示してくれたから、苦手や覚えてないところをすぐに見抜けた

のように、問2と同様に、理解度を把握できることが良い点であると答えた生徒が最も多かった。なお、個票の活用とメタ認知、そして生徒の学力と学習姿勢・態度に関しての詳しい分析は、次節以降で行う。

次に多かったのは、

- どこで自分が間違えたかがわかり、理解が深まる
- 問題集の具体的な問題番号が書かれていて、どこに着目すればいいのか分かった
- 私は小テスト受ける段階でまだちゃんと自分で問題を解くなどの勉強をしておらず、小テストが返ってきた後に勉強を始めたので小テストの結果は酷かった。よってその時点での結果が自分からわからない部分とは捉えず一度勉強をし終えてからクリッカー問題を解いてみて、その結果を個票と照らし合せながら分析を行っていった

のように、理解や自学自習に役立った、という趣旨の回答であった。これに関しては、授業時間数の関係で、個票の返却が遅れてしまうこともあったため、

- コメントが後学のために有効でしたが、小テストの実施から発行までにやや時間があつたと感じています
- 個別にフィードバックをしてくれるのはありがたいけど、何をどう見て自分の理解をどう深めていけばいいのかわからない
- 分析が大雑把で実際何が苦手なのか分かりにくかったです

といった個票から意味を読み取りにくかったという趣旨の回答もあり、個票をすべての生徒が十分に使いこなせているわけではなかったことがわかる。このことは、個票は物理を理解するために役立ったと半分程度の生徒が回答していることからもうかがえる。ただし、

- 2回目の回答についても個票が欲しかった。そうすれば自分がどういう風に変えていったのかがわかると思う
- 個票はどれを間違えていたか、が書いてあるだけでこれは自分の小テストのメモを見ればわかることだった。どちらかといえば、点数や得点率よりも間違えた問題の簡単な解説などが付録のような形についてると助かると思った

といった回答に見られるように、生徒は物理を理解したいと思っており、そのための手立てとして個票を活用したいと考えている様子も伺えたため、形成的評価としての役割を個票に持たせているという教師の意図は、生徒にある程度は伝わっていたのではないかと考える。

個票について自由にコメントを求めた設問では、

- 自分が結構間違えてるのを実感した。知ったつもりになってたことを自覚することができた
- 忘れた頃に返って来て、あっ！物理の勉強しないと…と思い出させられました。すごく良かったです
- 実際には自分でやらなきゃ行けないことを先生がやってくれていたのが助かりました
- 数値ででてくると悔しい思いもするのでそれがちょっと勉強の原動力となりました
- まだ勉強しない時点で個票が返却されたときに「あ、これはちゃんと勉強しなきゃ」というモチベーションにはなったと思うが、なくても勉強はできていたと思う。でも定期的に自分の理解度を定量的に見ることができたので良かった。テスト前だけでなく日頃からその都合ちゃんと理解して問題を解けるようにしていかなければならないと感じた

といった回答に見られるように、肯定的に捉えている生徒が多かった。

#### 3.4.4 形成的評価と生徒の学力

本節では、生徒が二種類の個票による形成的評価をどのように活用し、そしてそれが物理の理解とどのように関係しているのかを考察するため、4回の「形成的テスト」やFCIとアンケートの結果、そしてアンケートの結果を用いて複合的に分析する。

個票の活用度の指標としては、アンケートの問3, 4, 5についての肯定的評価が高いほど個票の活用度についての自己評価が高いとみなし、これら3問の平均値を用いた。分析は、平均値の大きい集団から上位(19名)、中上位(14名)、中下位(16名)、下位(17名)の四分位に分けて行った。なお、四分位の生徒数に差があるのは、平均値の同じ生徒が複数名いた場合、個票の活用度は同程度であったとみなして同じ集団に入れるように作ったためである。

図3.27は、それぞれの集団内で各「形成的テスト」における生徒の得点の平均を求め、折れ線グラフとして表したものである。各「形成的テスト」で生徒全体の平均点が異なるため、個票を活用しなかったと自己評価している下位の生徒集団の点数が一貫して低いことはわかるものの、上位、中上位、中下位の生徒集団については明確な傾向は見出だせない。そこで、生徒集団が授業実践の間で変わっていないことから、四分位ごとに生徒の偏差値の平均を求めて比較することで、集団の中での相対的な位置づけを見たのが図3.28である。図3.28より、個票を活用したという自己評価が上位の生徒群は、「形成的テスト」の偏差値が学習の進行とともに上昇していく傾向にあること、すなわち生徒集団での相対的な順位が上がっていていることがわかる。それに対し、中上位、中下位、下位の生徒群はほぼ変化しないか、下降傾向にあるといえる。

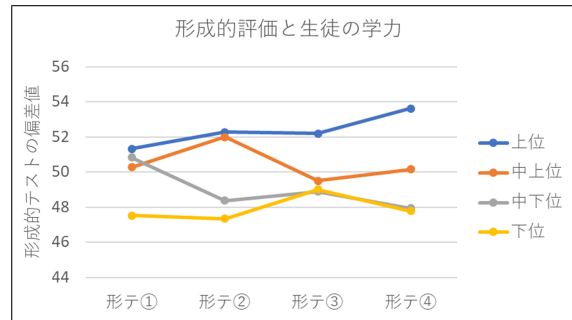
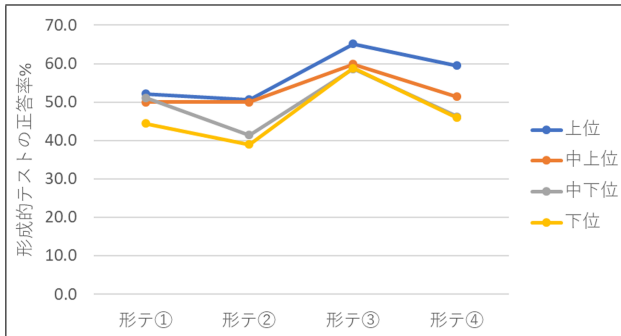


図 3.27: 形成的テスト平均点 (アンケート四分位) 図 3.28: 形成的テスト偏差値 (アンケート四分位)

表 3.10 に、アンケート四分位ごとの FCI の結果を示す。全体での FCI の事前事後調査の平均正答率はそれぞれ 32.6%と 50.2%で、Hake の規格化ゲインは 0.26 であったが、図 3.29 のように四分位ごとの個人ゲインの平均を求めてみると、個票をよく活用したと自己評価する生徒ほど個人ゲインも高くなっていることがわかる。

図 3.30 では、縦軸を偏差値の平均に取り、生徒全体における相対的な位置づけで比較した。FCI 事前事後で上位の生徒集団では上昇し、中上位と中下位ではほぼ変わらず、下位では下降していることがわかる。

表 3.10: 個票の活用度と FCI 得点率

順位	事前 FCI	事後 FCI	ゲイン
上位	34.0%	56.1%	0.34
中上位	34.3%	50.7%	0.25
中下位	29.0%	45.0%	0.23
下位	38.2%	50.2%	0.19

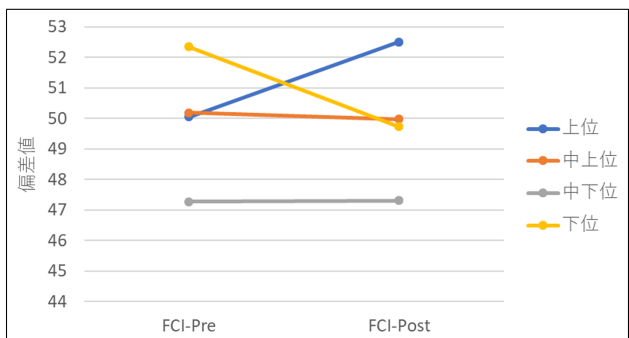
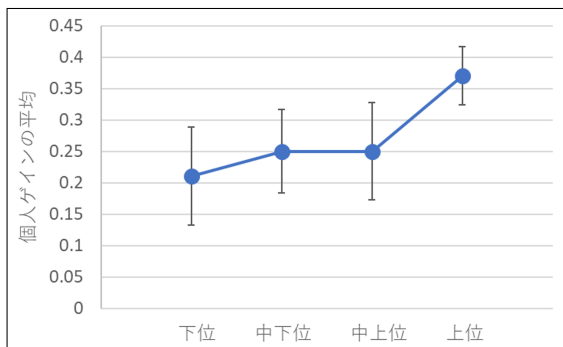


図 3.29: FCI 個人ゲイン平均 (アンケート四分位) 図 3.30: FCI 偏差値 (アンケート四分位)

次に、アンケート問 3 の自由記述で、上述したように、“自分の苦手な分野が一目でわかって勉強する時間の配分などに役立てた”、“どの分野が苦手なのか、どう間違えていたのかがわかりやすいから良かった”、“自分の弱い所がどこかわかった。それを生かすことができなかつたけど…”といった、自らの理解度について言及している「メタ認知的記述」のあった割合を、四分位ごとにまとめたのが図 3.31 である。

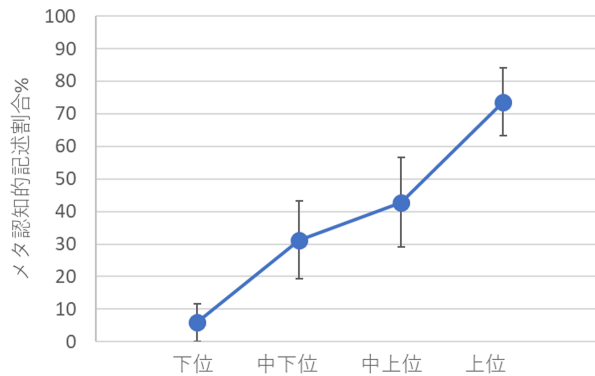


図 3.31: アンケート問 3 のメタ認知的記述の割合 (四分位)

図 3.31 より、個票を活用したと自己評価している生徒群ほど、自由記述でメタ認知的な記述をしている割合が大きいことがわかる。アンケート文は上述したように、「物理を理解するのに役立ちましたか」と問うているため、直接的にメタ認知的な記述を促していたわけではない。

さらに、図 3.32,3.33 に、問 3 の自由記述のメタ認知的な記述の有無で全対象生徒を二つに分けて、個人ゲインの分布についてまとめた。分析対象生徒 65 名のうち、メタ認知的記述をしたのが 26 名、しなかったのが 39 名であり、それぞれの個人ゲインの平均値は 0.36 と 0.22 であった。これより、メタ認知的な記述をした生徒の方が、個人ゲインの平均値は高いことがわかる。まとめると、個票をよく活用したと自己評価する生徒は、メタ認知的な記述をしており、そのような生徒の個人ゲインは高い傾向にあるということであり、これよりメタ認知が力学概念の獲得と関係しているのではないかという示唆が得られたと言えるだろう。

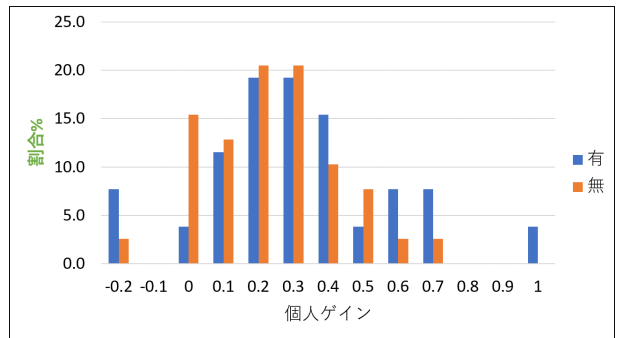
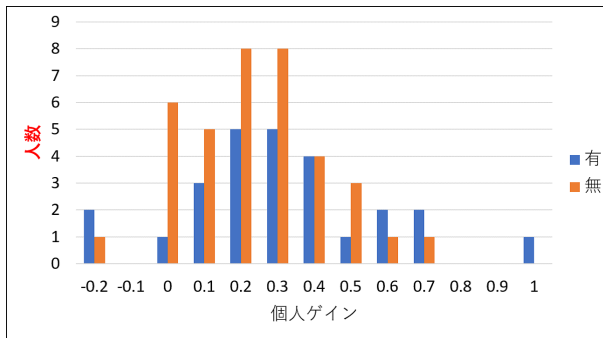


図 3.32: アンケート問 3 のメタ認知的記述の有無と個人ゲイン分布 (人数)      図 3.33: アンケート問 3 のメタ認知的記述の有無と個人ゲイン分布 (割合)

### 3.4.5 形成的評価と生徒の学習姿勢・態度

次に、形成的評価が生徒の学習姿勢・態度とどのように関係しているのかを考察するために、CLASS[45]の結果を用いた分析を行う。

表 3.11 に、CLASS の事後調査で「望ましい」姿勢や態度に分類される回答の割合とアンケートの問 2-5 の回答との間の相関係数  $r$  を示す (ただし問 1 と 6 は省略する)。CLASS の分析は、先行研究 [45, 47] に従って分類した 8 つの観点と全設問とで集計する。CLASS の各観点は、上から Real World Connection (RWC, 日常生活とのつながり), Personal Interest (PI, 個人的な興味),

表 3.11: CLASS とアンケートの相関

観点	問 2	問 3	問 4	問 5
RWC	0.09	0.25*	0.31*	0.28*
PI	0.15	0.29*	0.26*	0.35**
SM/E	0.13	0.26*	0.26*	0.14
CC	0.25*	0.17	0.13	0.08
ACU	0.29*	0.09	0.15	0.10
PSG	0.12	0.13	0.26*	0.17
PSC	0.18	0.06	0.19	0.15
PSS	0.24	0.05	0.18	0.27*
全体	0.22	0.25*	0.31*	0.26*

Sense Making/Effort (SM/E, 意味を考える努力), Conceptual Connections (CC, 概念のつながり), Applied Conceptual Understanding (ACU, 概念理解の応用), Problem Solving General (PSG, 問題解決一般), Problem Solving Confidence (PSC, 問題解決の自信), Problem Solving Sophistication (PSS, 問題解決の洗練度) である。「全体」は全設問に対する望ましい回答割合を表す。ただし\*は  $p < 0.05$ , \*\*は  $p < 0.01$  で、 $p$  は有意確率を表す。

問 3, 4, 5 と CLASS 事後調査全体の望ましい回答との間に弱い正の相関がある。これより、個票をよく活用したと自己評価する生徒ほど、物理の学習姿勢や態度が望ましいものであることがわかる。これをさらに詳しく、図 3.27 から 3.30 と同様に問 3, 4, 5 の平均値で生徒集団を四等分し、CLASS の事前と事後調査で望ましい回答割合を比較したのが図 3.34 である。図 3.34 より、個票をよく活用したと自己評価する上位の生徒群では CLASS 全体における望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。

また、CLASS 全体の望ましい回答との相関係数が最も大きいのは問 4 である。先に述べたように問 4 は自分自身の理解状況についてのメタ認知に関する項目といえる。したがって、この結果はメタ認知の進んだ生徒ほど CLASS に望ましい回答をする傾向があることを示唆するものと考えられる。一方、問 3 には、テストの結果や授業の成績を重視する傾向が表れやすいと考えられる。実際、生徒全体における 4 回の「形成的テスト」の平均正答率とアンケート問 3 との間には正の相関関係が見られたが ( $r = 0.26, p < 0.05$ )、他のアンケート項目の間には統計的に有意な相関関係は見られなかった。

次に CLASS の観点とアンケートの設問ごとで有意な相関関係が見られた項目について考察する。アンケート問 3, 4, 5 において、RWC, PI との間に正の相関関係が見られた。RWC と PI はいわば物理学習における興味、関心に関する観点であり、このような姿勢や態度が望ましい生徒ほど個票をより活用する傾向にあることが示唆される。また問 3 と 4 は SM/E とも正の相関関係がある。これは物理を理解することや理解状況を自身で把握するという、「理解」という共通の背景がもたらした結果であると考えられる。さらに「形成的テスト」について聞いている問 2 と、CC および ACU との間に正の相関関係が見られた。よって、基本的な概念の理解を問う「形成的小テスト」に対して肯定的な姿勢や態度である生徒ほど、概念の理解 (CC) と概念理解の応用 (ACU) に関する姿勢や態度が望ましい傾向にあることが示唆される。



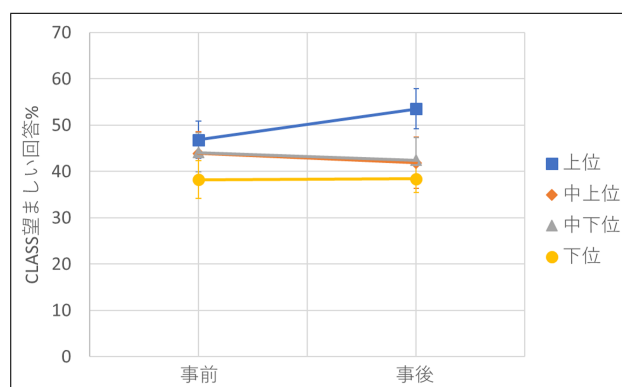


図 3.34: CLASS 望ましい回答 (アンケート) 四分位

### 3.5 結論

本節では、筆者が開発した「形成的テスト」と個票による形成的評価システムの活用が、物理概念の理解や学習姿勢の向上につながるかを、個票に関するアンケート結果を用いて調べた。具体的には、物理概念の理解の指標には FCI および「形成的テスト」を、学習姿勢や態度の指標には CLASS を用い、これらと個票に関するアンケート結果を総合的に分析した。個票に関するアンケート結果は、自己評価による形成的評価の活用度の違いを四分位に分けて比較に用いた。その結果、形成的評価の活用度が高い生徒群は、FCI や「形成的テスト」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。特に FCI の規格化ゲインは、形成的評価の活用度の順位が高いほどゲインも大きくなるという顕著な結果が得られた。実際、上位の生徒群においては、事前 FCI では中程度の順位であった得点率が事後 FCI では最も高くなった。また、「形成的テスト」の偏差値もほぼ単調に上がっていった。さらに 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。CLASS で測られるような学習姿勢や態度を向上させることは、生徒に科学的なものの見方・考え方を身に付けさせるために非常に重要な視点であるが、PER に基づき設計された授業であっても CLASS のスコアを向上させることは難しいとされている。この意味で、本研究で得た、個票の活用度の高い生徒群の CLASS スコアが向上したという結果は興味深い。



## 第4章 結論

本研究の目的は、第1に、物理授業に導入できる形成的評価を開発、実践し、概念理解と学習姿勢の向上に寄与しているのかを検証することで、第2に、開発した形成的評価により、物理授業における生徒の学びの様子を多角的・定量的に分析することであった。この目的の達成のために、本研究では、大きく分けて次の2点の研究①、②を行った。

研究①では、PERに基づき、授業を単位とした短い時間サイクルでの形成的評価の開発、実践、分析を行った。授業中に概念理解を問う選択肢問題を出題し、その答えについて生徒同士で議論するピア・インストラクションという協同学習活動を中心とした授業に、メタ認知の促進と先行オーガナイザーの提示をねらって、「振り返り」と「予習」を導入した授業を実践するとともに、「振り返り」と「予習」の定量的評価法を開発し、それらと Hake の規格化ゲインや PI 効率といった先行研究で導入された定量的指標を複合的に用いて、多角的・定量的な授業分析を行った。

研究①で得られた成果と課題は、以下の通りである。

- 「振り返り」と「予習」を導入したピア・インストラクション型授業を年間にわたって高等学校物理基礎の授業で実践した。

1.2.3 節でも述べたように、2006 年の ICPE 東京大会から 10 年程度しかたっておらず、我が国における PER に基づく相互作用型授業の実践と研究は、いまだ発展途上であると言える。我が国における PER を背景とした学位論文は、誤概念に関する研究として鈴木 [105] が例として挙げられるものの、相互作用型授業の実践的な研究はほとんどない。本研究では、ピア・インストラクションという授業手法に注目し、形成的評価としての学習活動として位置づけるとともに、実践で得られたデータに基づき詳細な授業分析を行った。力学分野と波動分野のピア・インストラクションでは、多くの問題で議論前正答率より議論後正答率の方が高いことから、ピア・インストラクションの生徒同士の議論を通して、生徒の概念理解が深まったものと考えられる。

なお、FCI を用いた Hake ゲインの値は、2012 年度、2013 年度ともに 0.33 であった。これは「振り返り」と「予習」を導入する前の、異なる授業者による値にほぼ等しい。この結果は、知識習得型ではない学習活動である「振り返り」の導入によって、授業効果が直ちに表れるわけではない、ということを示唆している。

「振り返り」は生徒のメタ認知の促進を目的とした学習活動であり、メタ認知が促進されることによって、生徒は自らの学習をうまくコントロールすることができるようになると思われる。よって「振り返り」の導入の効果が明確に現れてくるのは、2・3 学期以降であるかもしれない。本研究では実施できなかったが、2・3 学期でも事前・事後の概念調査を実施することで、上記仮説を明らかにすることができるかもしれない。

また予習に関しては、実施状況が時間とともに低下してしまったため、本研究のみで予習の効果を結論付けることはできない。

少なくとも本研究の対象生徒については、ピア・インストラクション型授業が規格化ゲイン 0.33 程度に相当する授業効果であったことがわかる。

- 「振り返り」の定量的評価と分析により、PIは生徒にとって印象深い学習活動であることがわかった。

各授業で実施したPIの回数と、生徒の書いた「振り返り」の授業ごとの平均の文字数の相関を取ったところ、強い正の相関があることがわかった。すなわち、一時間の授業でPIをたくさん実施すればするほど、生徒は「振り返り」で文字をたくさん書く傾向がある。この傾向は、教員の説明や生徒実験よりもPIの方が、より強い印象を生徒に与えていると解釈することができる。そしてコメントが多く寄せられるPIというのは、議論前正答率やPI効率が低い、つまり難易度が高く直観と反するような問題であったり、演示実験と関連付けて出題された問題であった。逆に、議論前正答率やPI効率が高い問題は、自分だけで理解することができたり、議論によってその場で理解することができたりした問題であったと言えるため、「振り返り」に敢えて記すまでもなくなったのだろう。「振り返り」のコメント数に関わる上記のような生徒への見立ては、感覚的だが自然なものである。本研究ではこのような、今まで感覚的に捉えていた生徒の学びの様子と、「振り返り」の定量的な評価とを関係付けることができた。PIは、直前の講義内容の理解度を確認するための形成的評価であり、それが生徒にとって授業内で印象深い活動であったことは、教師にとっての授業のねらいが生徒に十分に伝わったと言えるだろう。

- 「振り返り」と「予習」の定量的評価と分析は、教師が自らの授業を分析したり、授業計画を立てるのに役立つことがわかった。

クラスごとのPIの議論の様子と、「振り返り」や「予習」の定量的な評価が一致していることから、これらの指標で数値データを収集し分析することは、クラスの状況を定量的に把握するのに役立つことがわかった。また、予習状況を毎回の授業で調べることは、考査や提出物の期限、学校行事と生徒の家庭学習状況とを結びつけることにつながった。

毎回の授業で「振り返り」を提出させることは、生徒にとって復習に役立つだけでなく、教師にとっても生徒の理解度に基づいて授業計画を立てるのに役立つことがわかった。実践の中でも、生徒の「振り返り」が、授業の冒頭で前回の復習を入れるきっかけとなった授業もあった。「振り返り」を読むことで、毎回の授業を生徒一人ひとりがどのように感じ、考えたのかがわかり、生徒個別の状況に応じたコメントをその都度返すことができた。また「振り返りプリント」の配付により、他の生徒がどのようなことを「振り返り」に書き、それに対して教師がどのようにコメントを返しているのを共有することができたため、クラス（あるいは学年）全体で生徒の考えを共有することができた。このように定性的な面においても、「振り返り」の導入は有意義なものであった。

PI型授業は、授業で教師が何を生徒に教えたいか、という要請に柔軟に適用できる授業形式であり、逆に言えば、一つ一つの問題は教師の授業展開・授業経営に即した形で一定の目的意識を持って作られている。教師のねらいが生徒の議論や学習において達成されたかどうかを生徒の声によって評価できるため、「振り返り」は形成的評価として役立った。

2年度にわたって「振り返り」を導入したPI型授業を実践したことで、生徒が授業で何を感じ、何を考え、疑問に思っているのかを調査することができた。それは、授業中に提出したPIに関するところから、授業中の何気ない一言に至るまで、生徒の「生の」声を聞くことは、授業をより良いものにしていくにあたって、また、教師としての成長に、非常に意義あることだと感じた。筆者のような、授業経験がまだ浅い教員にとって、「振り返りシート」を提出させることにより、生徒の持つ素朴概念を知ることや、自らの授業を生徒の声によって見直せることは、上述したような多面的な意味での授業改善につながることは確かだと言える。「振り返り」を継続的に実施し、

データを蓄積することで、経験を積んだ教師が持っている、多くの生徒が持つ素朴概念や、「生徒にとって授業がどのように見えているのか」についての知識を、若手教師が同じ経験を繰り返さずとも、獲得する助けになるだろう。

今回、本研究では行うことはできなかったが、生徒の書いた「振り返り」一枚一枚の質的な分析を行うことで、さらに詳細な生徒や授業の実態把握につなげることができると示唆される。「振り返り」の定量的な評価も同時に行うことで、授業構成や展開、内容の表現等のわずかな違いについても、数値的に分析を行うことができ、より良い教材の開発や、授業実践へとつながると思われる。特に、PIが生徒の省察に影響を与えることがわかったので、個々のPIが生徒の学習に与える認知的なインパクトを定量的に示せるようにすることが望まれる。授業展開中の生徒の概念理解の様子について、さらに詳細な研究となるであろう。

また「予習」の実施とその評価を行ったことで、生徒の自宅学習の実態の一端を知ることができた。特にテスト前後や学期末での予習状況の増減は、非常に興味深かった。また予習状況は、PI効率との相関が見られたため、PIの議論をより効果的にすることが示唆されたが、時間的に予習状況が減少していることから、擬似相関の可能性も否定できず、はっきりと結論づけることはできなかった。今後は、上記仮説を明らかにするために、生徒に予習をすることの良さや意義が十分に伝わり、生徒が持続可能な形で確実にに行える予習の方法を見出し、それを実施する必要があると考えられる。

本研究では、教育心理学実験等で置かれることの多い対照群を設定していない。筆者が授業実践した対象クラスはすべて同じ高等学校の同じ学年だったため、一方のクラスには「振り返り」と「予習」を導入し、他方には導入しない、といった研究方法を取ることが困難であった。なぜならば、同じ学年に所属する他クラスの生徒同士で情報交換をすることは当然予想され、「予習」を課されることへの不満や、「振り返り」の実施や「振り返りプリント」の配付に伴う不公平感を持つ生徒が出てきてしまい、教師と生徒の間の信頼関係が損なわれる可能性があったからである。このことは、学校の授業を研究対象とした教育実践の研究では避けては通れない課題であるが、解決は非常に難しい。この課題に対するアプローチとしては、新田の研究[95]のように、教授・学習過程モデルの構築とその数理シミュレーションに関するものがある。実際の教室で何度も対照群と実験群を設定して教育実験をするわけにはいかないが、数理シミュレーションであれば変数を変えて何度も繰り返し行うことができる。シミュレーションによって十分に予想が得られたところで、実際に授業実践に移すということが考えられる。

次に研究②では、単元を単位とした中期的な時間サイクルでの形成的評価の開発、実践、分析に関する研究を行った。研究①で実践した「振り返り」を導入したピア・インストラクション型授業を基本的には継続しつつ、単元の授業が一通り終わったところで、クリッカーで答える小テスト「形成的テスト」を行い、その結果を二種類の個票「ARS個別学習票」「FB票」で生徒個別にフィードバックする形成的評価を開発、実践した。そして、授業あるいは年度の前後で実施した概念調査や学習姿勢・態度調査と、「形成的テスト」、さらには年度終わりに実施した形成的評価に関するアンケートを複合的に用いて分析することで、形成的評価の活用と生徒の学力、学習姿勢・態度との関係について定量的なデータに基づき、考察した。

研究②で得られた成果と課題は、以下のとおりである。

- Bloomの完全習得学習をモデルとした、形成的評価を導入した相互作用型物理授業の実践を行った。

これまで多くの教師が行ってきたのは、テストや通知票による成績の評価であり、単元や学期、学年末における学習の最終成果を図ることを目的とする「学習の評価」であった。この時点でフィードバックを得ても、生徒は当該の学習活動に生かすことはできない。生徒に

にとって必要なのは、学習の途上で自らの知識や概念、思考を修正するために役立つ学習のフィードバックであり、それが形成的評価あるいは「学習のための評価」であった。しかし、1.4節でも述べたように、形成的評価はその重要性が長年指摘されてきたものの、現実の授業で実施されることはあまり多くなかった[106]。筆者の研究の背景としている物理教育研究の分野においてもそれは同様で、概念調査や学習姿勢・態度調査を単元あるいは学期の前後で実施することで、それぞれを事前的評価と総括的評価とする授業方式は確立されていたものの、形成的評価に関する研究はほとんど行われてこなかった。

本研究では、単元の学習が一通り終わったところで、その単元で獲得して欲しい物理概念を小テストの形で出題し、クリッカーで解答する「形成的テスト」を開発、実施した。これは Bloom が提唱した完全習得学習を、物理授業において実践した例と言える。

「形成的テスト」の問題は、ピア・インストラクションやその他の PER に基づく相互作用型授業で使われている教材や、日本における物理の相互作用型授業で使われてきた教材を参考にして、筆者が作成した。物理スイートをはじめとした米国で開発された教材は、そのほとんどが大学の入門物理学で使われているものであり、日本の高等学校とは対象生徒（学生）、カリキュラム、単位数等が全く異なっている。このような違いを踏まえて、筆者が日本の高等学校物理の授業に合うよう、問題を修正したり、新たに作成した。このような「形成的テスト」は、年度終わりに実施したアンケートで、9割程の生徒から支持されるなど、形成的評価としての役割を十分に果たしたと考えられる。

また[103]を参考にして作成した「ARS 個別学習票」と「FB 票」は、生徒の誤概念に寄り添い、生徒個別の学習状況に応じた学習フィードバックを返すことを可能にした。「学習のための評価」として重視される、生徒が学習に役立てるという点では、アンケートで5~6割程度の生徒から支持されるなど、課題は残るものの、概ね形成的評価としての役割を果たしたものだと言えるだろう。

- 形成的評価の活用度が高い生徒群は、力学概念調査や形成的テストで測定される学力や、CLASS で測定される学習姿勢が向上する傾向にあることが見出された。

形成的評価の活用度に関する自己評価が高い生徒群（最も自己評価の高い生徒群を、??章に合わせて上位と呼ぶこととする）ほど、FCIの規格化ゲインや、「形成的テスト」の偏差値の平均が高くなることがわかった。上位の生徒群においては、事前 FCI で中程度の順位であった得点率が、事後 FCI では最も高くなったことや、「形成的テスト」で回数を重ねるごとに偏差値の平均がほぼ単調に増加していくなど、顕著な結果が得られた。このことから、少なくとも本研究の対象生徒においては、形成的評価を活用する生徒ほど、FCI や「形成的テスト」で測定される学力の向上が見られるということが示唆された。

また、上位の生徒群においては、CLASS のスコアが事前に比べて事後で高くなった。CLASS で測られる学習姿勢・態度を向上させることは、生徒に科学的なものの見方・考え方を身に付けさせるために非常に重要な視点であるが、PER に基づき設計された授業であっても CLASS のスコアを向上させることは難しいとされている。CLASS スコアを高くするためにどのような授業設計が必要であるかは、いまだに一定の回答にたどり着けていないのが PER の現状である。この意味で、本研究で得た、個票の活用度の高い生徒群の CLASS スコアが向上したという結果は興味深い。上記の結果より、個票をよく活用したと自己評価した生徒の学習姿勢や態度に向上が見られたことから、上位の生徒にインタビュー調査等を行って、どのように物理の学習に取り組んでいたのかを明らかにすることで、CLASS スコアの向上につながる授業設計のための示唆が得られるのではないだろうか。ただし、生徒の学習姿勢

や態度の向上は、物理以外の授業や学校以外での日常生活等からの影響も大きいと考えられるため、即座に CLASS スコアが向上するような授業を実践するのは困難であろう。

しかし、形成的評価をあまり活用しなかったと自己評価した生徒群（最も自己評価が低かった生徒群として、下位と呼ぶ）の生徒は、FCI 事前調査の得点の平均点が最も高かったにも関わらず、最終的に FCI 事後調査の得点の平均点は四分位の中で下から二番目に下がってしまった。個票の活用度だけがこの結果をもたらしたわけではないと思われるが、活用度が高いほど FCI 規格化ゲインも高いという結果等を考慮すると、今後、より多くの生徒に個票の積極的な活用を促していくことが、集団全体の物理概念理解および好ましい学習姿勢の底上げにつながるものと考えられる。どのようにすれば、生徒の自主性を前提としつつ、個票の活用をさらに促していく方策を見いだすことは今後の課題である。これを行うためには、個票によって生徒個別に課している課題を ICT 化して提供する等によって情報を収集して定量化していくことが考えられるが、このためには現在作成したシステムを根本から見直す必要があるだろう。

たとえテストの合計得点と同じであっても生徒一人ひとりで知識の構造が異なっていることはこれまでの研究で示してきた。集団授業で生徒の個性に少しでも合わせた教育を実現していくためには、本研究で論じたような分析・評価の仕組みを含めた意味での形成的評価システムのさらなる改善は欠かせないと言える。





## 付 録 A 力学分野の PI 型授業

「振り返り」と「予習」を導入した PI 型授業の実践の詳細と、PI の議論中の生徒の討論、さらには、その日に提出された生徒の「振り返り」から PI に関するものを抜粋して載せる。生徒の「振り返り」のコメントは、できるだけ生徒が書いた通りに載せてある。なお、授業ごとのタイトルの数字は、授業時数（第何時間目の授業か）を表している。PI 問題の出典は、キャプションにつけた引用で示すこととする。問題の図は、出典先のを参考にして、筆者が作成した。なお、引用がつけられていない問題は、筆者が作成した問題である。

### 1. 力学概念調査事前テスト

最初の授業では、物理基礎の授業についてのオリエンテーション、クリッカーの使い方を教え、練習をした後、力学概念調査事前テストとして 30 分間、物理基礎調査と FCI を実施した。

### 2. 運動を表す（位置、速さ）、CQ： $x-t$ グラフ、PI： $x-t$ グラフ、 $v-t$ グラフ

物体の運動を表すには、どんな物理量を用いてどのように記述するか、という話から、物体の位置を座標で表すこと、 $x-t$  グラフ、速さの定義、等速直線運動、 $v-t$  グラフについて学習した。

物体の位置を表現するときに、ある人から見ると右、違う人から見ると左、では分かりづらいので、どこか基準を決め、座標で表してあげればよい、ということを教えた。負の位置についても触れてから、図 A.1 のクリッカークエスチョン（以下 CQ）を実施した。生徒のクリッカーによる回答の後、距離センサーを実際に使った演示実験による正解発表を行った。初めに教師の歩行運動をセンサーで測定し、その位置のグラフがどのようになるかを見ることによって、距離センサーがどのようなものであるかを示した後（このような方法で装置の働き方を知る過程を、心理的校正とよぶことにする [12]）、生徒を問題文の通りに歩かせ、その運動を距離センサーで測定し、 $x-t$  グラフを描いた（正答率 55.9%）。

この CQ の後すぐに、 $x-t$  グラフに関する問題として図 A.2 を実施した。ここで、物理概念は友達と議論することで身に付きやすくなること、友達を納得させられるように自分の考えを主張すること、そして友達の意見に疑問点があれば、「○○をもう少し詳しく」と深く聞いてみることに、といった議論することの意義を議論前に説明した。

表 A.1: 設問 1： $x-t$  グラフ

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	90.48	95.24	0.50
2B	79.07	97.67	0.89
2C	80.95	85.71	0.25
全体	83.46	92.91	0.57

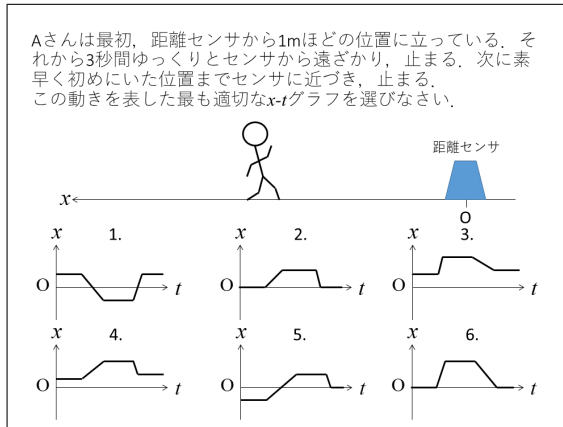


図 A.1: CQ:x-t グラフ [107]

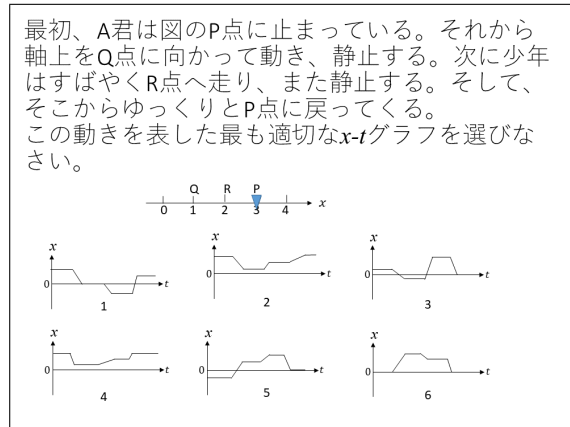


図 A.2: 設問 1 : x-t グラフ [22]

生徒の討論から

- 正の範囲でしか動いていないのだから、横軸をまたいでマイナスに行くのはダメ
- 最初と最後が P 点の 3 で同じになっているのは 2 か 4 だけ
- ゆっくり動くときの傾斜はゆるやかで、素早く動くときの傾斜が急になっている

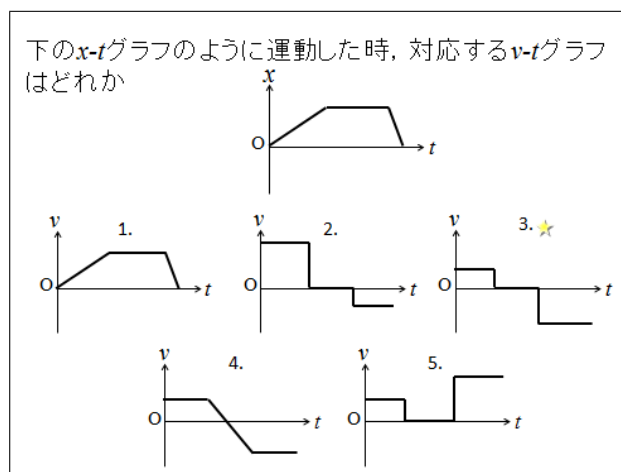
「振り返り」から

- 速さが速くなるとグラフの傾きが急になる。⇨遅くなると傾きはゆるくなる。(6名)
- 原点がどこかの把握が大切。
- 位置を示すセンサーがあること。

このあと、速さの定義、等速直線運動、 $v-t$  グラフについて説明し、最後に速度の導入として、図 A.3 の PI を実施した。A 組のデータは、PC の不調により消えてしまったので残っていない。設問 2 の解答解説をして、授業を終えた。

表 A.2: 設問 2 :  $v-t$  グラフ 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A			
2B	13.95	39.53	0.30
2C	28.57	50.00	0.30
全体	21.18	44.71	0.30

図 A.3: 設問 2 :  $v-t$  グラフ 1[107]

## 生徒の討論から

- 最後は最初と反対で位置が減少しているから, 負になるんじゃないか
- 傾きが最初の方がなだらかで, 最後が急だから, 速さ? は後の方が大きい?
- 速度の正負ってどうやって判断すれば良いんですか?
- 進行方向とは逆向きに最後動いているから, マイナスだ

## 「振り返り」から

- 位置が正でも速度が負になる時あり。
- 速度が向きを含むという意味が, 問題と議論を通してよく理解できた。
- 最後の問題で考え方が H さんの説明で分かったので, 自分自身でもう一度考えたい。
- 物体の運動を学ぶにあたってグラフは大切. グラフから読み取れる (表す) ことはたくさん。
- 最後の問題のような少し複雑になるとよくわからなくなってしまうので, 理解がまだ浅い。
- 「速度」のグラフが難しい. 最後の問題が微妙 (3名)
- 1 回ではグラフ分からないけど, 1 回よく考えた 2 回目には分かった!

3. 速度，変位，平均・瞬間の速さ，CQ： $v-t$  グラフ，PI： $v-t$  グラフ 2・変位と速度

授業の冒頭で，前回の授業の最後に学んだ，速度についての確認を目的として，図 A.4 の CQ を実施した（正答率 82.3%）。A 組，B 組では議論前正答率が 90% に近かったため議論は行わなかったが，C 組では 80% よりも低かったため，議論の効果が見込まれると考え，PI にした。C 組の議論後正答率は 90% 程で，PI 効率は 0.59 であった。

CQ の後，東向きに 10m/s で走る自動車と，西向きに 10m/s で走る自動車を例に挙げながら，速度について説明した。また，生徒は数学でベクトルを習っていないため，ここで簡単にベクトルの和・差についても説明した。変位を用いた速度の定義についても説明したところで，図 A.5 の PI を実施した。ただし，C 組は議論前正答率が 90% を超えていたため，議論は行わなかった。

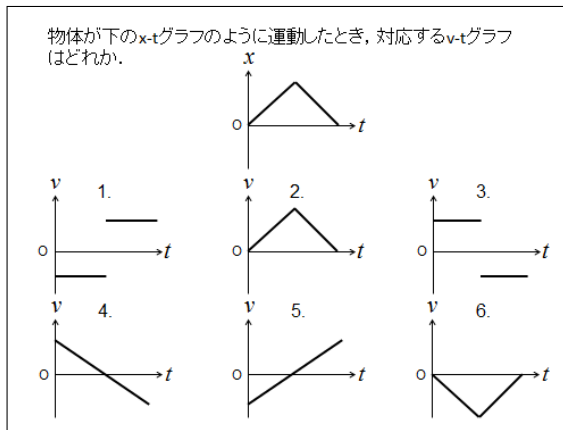


図 A.4: CQ: $x-t$  グラフ [107]

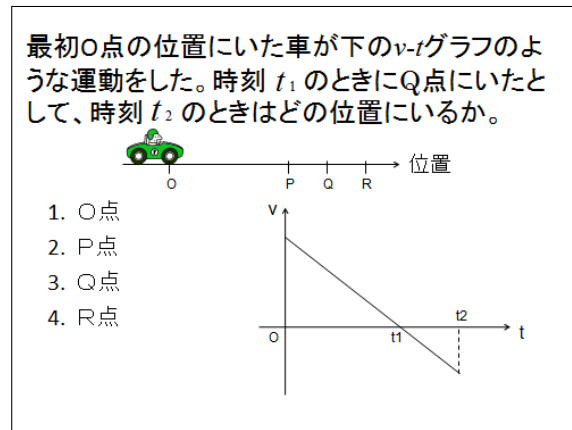


図 A.5: 設問 3： $v-t$  グラフ 2 [107]

表 A.3: 設問 3： $v-t$  グラフ 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	83.72	100.0	1.00
2B	72.73	100.0	1.00
2C	90.70		
全体	78.16	100.0	1.00

生徒の討論から

- $t_1$  以降は速度が負だから，逆向きに動いている。戻っているから P だ。
- 三角形の面積を比べたら，右の三角形は小さいから，O まで戻れない。
- $t_1$  までは正の向きに動いていて， $t_1$  からは下がっている。
- 長さが足りないから P 点だ

## 「振り返り」から

- 「バックする」「下がっている」と言うのではなく「負の速度で進む」と言うのと勘違いはおきない。(2名)
- 負の速度→(座標軸の正の向きと) 逆向きに進む。(2名)
- 速度の向きが変わるのは、 $t$  軸と交わる場所(正負が変化するとき)。(2名)
- $v-t$  グラフの面積が変位(6名) 正の面積は正の向きに進んだ距離で、負の面積は負の向きに進んだ距離を表す。
- 速度が正・負とはどういうこと? いまいち分からない。速度が負ってということは戻ってということですか?
- グラフがわからん!!!! 難しい…。 $s-t$  グラフ,  $v-t$  グラフ,  $x-t$  グラフとでてきてまじってしまう…。(3名)

A 組, B 組の議論後正答率が 100% となったように, 運動学, 特にグラフに関する問題は, 議論が効果的に行われることがわかっている [94]。この設問 3 のように, 教師があまり丁寧に教え込まずとも, 生徒同士の議論で正解にたどり着けることも多いだろう。

このあと, 平均・瞬間の速度についてグラフを用いて説明し, 授業の最後に図 A.6 の PI を実施した。ただし, A 組で議論前に正答マークが出てしまうトラブルがあり, A 組では議論することができなかったため, データがない。

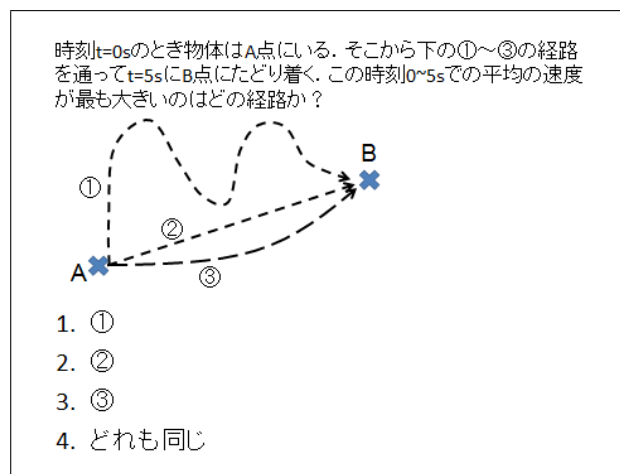


図 A.6: 設問 4: 変位と速度

表 A.4: 設問 4 : 変位と速度

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	58.14		
2B	43.18	72.73	0.52
2C	39.53	65.12	0.42
全体	41.38	80.46	0.67

## 生徒の討論から

- 1 は長い距離動いているんだから、それだけ速く動かなきゃいけない。
- 変位で考えたら、結局どれも同じになる。速度は変位で定義されているんだから、4 だ。
- 速度だったら 4 で、速さだったら 1 っていうこと？
- 距離と変位は違うもの？

## 「振り返り」から

- もし“平均の速さ”を聞かれたのだったら、一番距離が長いやつが大きい。(2名)
- 道のりに惑わされず、変位を見て速度は考えなければいけない。平均の速度は変位基準。(2名)
- 自分の中での平均の速度という概念をぶち壊された。平均の速度とは座標上に移して考えるのかなと思った。
- 速度と速さは違って、平均の速度=変位/時間だから、蛇行しても直線でも時間と変位が同じであれば値は同じだということ。(15名)
- 速度が変位/時間ということ、問いでまんまとひっかかってしまい、速さと速度の違いを実感した。(2名)
- “速度”という言葉はあくまでも変位のことを考えるのでルートは無視するという概念ですか？

生徒にとって“速度”は、直感的な“速さ”とは違う概念であることが、生徒の討論からや「振り返り」から読み取れる。解説の場面で、真直ぐゆっくり歩いても、寄り道するために速く走っていても、結局同じ時間で目的地に着いている、という例を出すなどの工夫が必要であろう。設問 4 で、時々刻々のことを考えてしまうと“速さ”になることにも注意が必要であるが、生徒の中にはそのことに気づいている様子も伺えた。生徒に考えさせたいのはあくまで道のりの違いに関する事なので、Redish の著書 [12] で紹介されているような、三角形の各辺を動く問題を扱っても良いかもしれない。「振り返り」を書かせることで、正答率だけからは読み取ることができない

生徒の実態を知ることができる。

#### 4. 加速度, CQ: 瞬間の速度・加速度, PI: 加速度の符号・ $a-t$ グラフ・加速 or 減速

この授業では, 加速度について扱った。まず予習チェックとして, 図 A.7 の CQ を実施した。これは教科書を読んで授業に臨んでいれば, 正答できると考えられる問題である (正答率 81.8%)。

物体の運動の様子を知るには, 速度が時間の経過につれてどのように変化していくかを調べることも必要である, という話から加速度を定義した。速度の変化が加速度であるということ, 加速度もベクトル量であること, 加速度の単位についての説明を行い, さらに身に付きにくい負の加速度について考えさせるために, 図 A.8 の PI を行った。また議論の際には, 具体的な物体の運動の例を挙げながら友達に説明するようにさせた。

ある物体の, 同時刻の「瞬間の速度」と「瞬間の加速度」の符号が反対になることはあり得るか?

1. あり得る
2. あり得ない
3. これだけでは分からない

図 A.7: CQ: 瞬間の速度・加速度の符号 [22]

物体が負の向きに動いている. この物体が減速しているとき, 加速度の符号は,

1. 正
2. 負
3. 速さによる

図 A.8: 設問 5: 加速度の符号 [22]

表 A.5: 設問 5: 加速度の符号

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	62.79	97.67	0.94
2B	61.90	88.10	0.69
2C	92.86	100.0	1.00
全体	72.44	95.28	0.83

#### 生徒の討論から

- $-3\text{m/s}$  が  $-2\text{m/s}$  になったと考えたら, 速度は  $+1\text{m/s}$  増えてるから正だ
- 負の向きに動いていて減速しているということは, 力が正の向きに働いていればいい
- 負の向きの力の方が正の向きの力よりも小さくなったから減速した

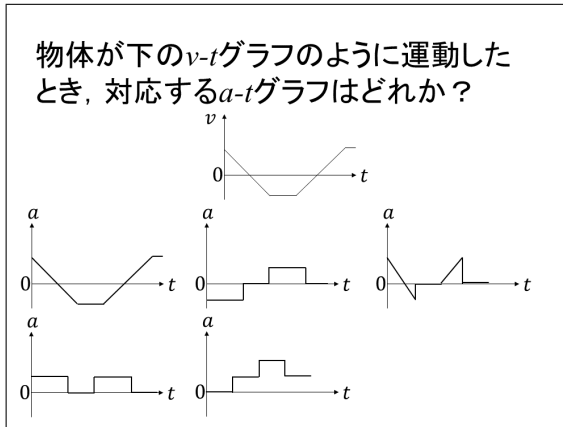


図 A.9: 設問 6 :  $a-t$  グラフ [107]

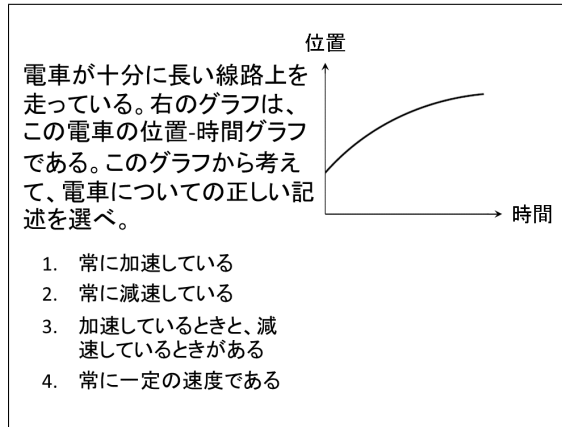


図 A.10: 設問 7 : 加速 or 減速 [22]

「振り返り」から

- 座標で考えるなり式に当てはめるなり、ちゃんと考えなきゃだめだということ!!(9名)
- 加速度の向きは、速度そのものの向きとは関係しない。(12名)
- 減速：進行方向と逆向きに速度が増しているということ。(2名)
- 「加速度の向きは“追い風”か“向かい風”で判断して、矢印の向きを決める。」ってことを O くんに教えてもらいました!!
- 例えば  $t = 0\text{s}$  のとき  $v_1 = -8\text{m/s}$ ,  $t_2 = 5\text{s}$  のとき  $v_2 = -3\text{m/s}$  ならば,  $\bar{a} = (-3 - (-8))/(5 - 0) = 5/5 = 1\text{m/s}^2$

設問 5 の生徒の討論より、素朴概念「運動は力の存在を示唆する」を持っていることが読み取れる。また、運動の法則が未習の段階にも関わらず、加速度の向きを力の向きで考えている生徒もいることがわかる。1.2.3 章でも述べたように、生徒は自らの生活経験を基にした概念を持っていることが、「振り返り」によって明らかとなった。

設問 5 の後、図 A.9, A.10 の PI を二問続けて実施した。上述したように、グラフに関して生徒同士の議論の効果が非常に大きいこと、また、 $a-t$  グラフは、 $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフの関係からの類推で十分に考えることができると判断したため、特に  $a-t$  グラフについて詳しい説明は入れずに、PI を実施した。

表 A.6: 設問 6 :  $a-t$  グラフ

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	76.74	97.67	0.90
2B	73.81	100.0	1.00
2C	64.29	95.24	0.87
全体	71.65	97.64	0.92



## 生徒の討論から

- $v-t$  グラフの傾きが加速度を表しているから、それに対応するのは 2 だ
- 速度が一定の割合で減少しているから、加速度は一定値で負
- 速度が横軸をまたいだ後のことが良く分からない。負の向きに速くなっていったら？じゃあ加速度は？
- 単位で考えれば、 $v-t$  グラフの傾きは  $m/s/s$  になって加速度を表していることが分かる

## 「振り返り」から

- $v-t$  グラフと  $a-t$  グラフの関係も一部を除いて人に説明が出来るぐらいは理解出来た。
- $v-t$  グラフで速度が右肩下がりで負に突入した時、向きは正のままなのか？
- 分からないわけではないのですが、 $s-t \rightarrow v-t$ ,  $v-t \rightarrow a-t$  の関係がまだスムーズに分からないので、練習します! (4名)

表 A.7: 設問 7: 加速 or 減速

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	55.81	93.02	0.84
2B	38.10	85.71	0.77
2C	50.00	95.24	0.90
全体	48.03	91.34	0.83

## 生徒の討論から

- だんだん位置変化が小さくなっている→減速している
- $x-t$  グラフの傾きは速度で、傾きがだんだん小さくなっているから速度が小さくなっている
- 正の方向に進んでるんでしょ？加速じゃないの？

## 「振り返り」から

- ある具体的な点と点の速度を比較して加速度を求めるのではなく、 $x-t$  グラフや  $v-t$  グラフから、物体の運動の加速、減速を読み取ることが出来ると分かった。
- 最後に  $x$  と  $v$  を取り間違えた。ごっちゃになりやすいので注意したい。
- 最後の問がむずかしかったです。直観的にしかわからなかった。
- 最後のクリッカーの問で、もし原点  $O$  から正の向きに離れた場所で静止していたら、常に減速しているのは無いのでは、と思ったので、“運動中である”などの断りが必要なのではと思った。
- 物体が運動を始めるときの点を  $O$  と定めるのですか？だから、物体のところから運動を始めたのではないかという考えはあり得ないのですか？

問題の解答解説を行い、授業を終えた。

## 5. [生徒実験] 運動の記録とグラフ化

「運動の記録とグラフ化」の実験を行った。実験内容は、力学台車を水平面上、斜面上で運動させ、それぞれの運動を記録タイマーで記録、記録テープからグラフを作成する、というものである。実験前にはどのようなグラフが描けるか、クリッカーでグラフを予想させた。

## 6. [実験分析] 運動の記録とグラフ化、等加速度直線運動、PI：等加速度直線運動

「運動の記録とグラフ化」の実験の分析を行い、グラフの描き方の説明や、物体の運動の特徴を捉えるには、 $v-t$  グラフを描くことが有効であることなどの説明を行った。また、実験データを用いて、等加速度直線運動のグラフと式を説明し、図 A.11 の PI を実施した。正解発表は、距離センサーを用いた演示実験によって行った。

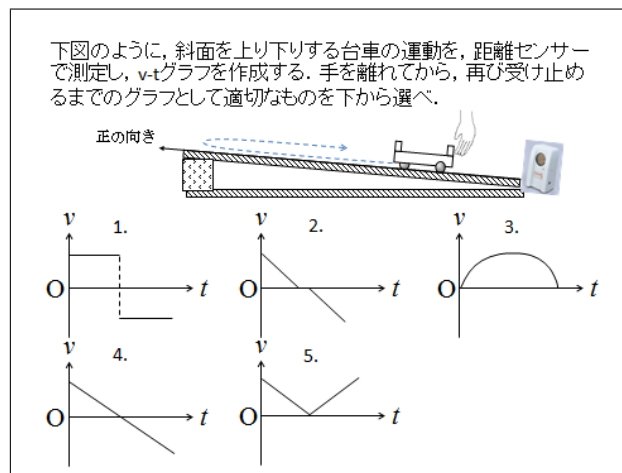


図 A.11: 設問 8：等加速度直線運動 [107]

表 A.8: 設問 8 : 等加速度直線運動

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	39.53	76.74	0.62
2B	20.93	41.86	0.26
2C	34.88	69.77	0.54
全体	31.78	62.79	0.45

## 生徒の討論から

- 上でしばらく静止すると思うから、2 だ
- 重力によって台車は下向きに加速度が生じている。頂点でもそれは同じ。
- しばらく止まるということは、その間重力の影響が無いことになってしまうから、不自然だ
- だんだん遅くなって行って、一瞬止まって、また速くなっていくのだから 5 だ
- 上りと下りで向きが変わっているのは、考えなくても良いの？速度だから向きも考えるんじゃないの？

## 「振り返り」から

- けっこう長く、頂点で止まっていたような気がしたが、きれいな直線の変化であること
- 一瞬しか止まっていないのは速度に影響されないのだと分かった。
- 重力が常にかかっているから、止まらない。だから答えは 4 !! (2 名)
- 最後の問題で、実際に目の前で実験をしてくれたおかげで、グラフについて、より分かることが出来ました。
- 速度は負の方向に一定に増加していく (加速度は負の一定値)。正の向きに注目すると分かりやすかった。
- 速度に正負があることをすぐ忘れてしまう。でも考え直すと気付けるようになった。

距離センサーを使った演示実験では、 $v-t$  グラフが表示された際に歓声があがったクラスもあった。後述するように、演示実験を伴った PI に対する「振り返り」のコメント数が多くなることから、生徒にとって印象深い活動となるようである。

設問 8 の選択肢 2 は、動摩擦力から静止摩擦力に移行する際、グラフがどのような形になるのか、といった問題があるため、PI の選択肢としては不相当であったかもしれない。この設問で ILLDs を行った場合に、生徒が選択肢 2 のようなグラフを描いた場合には、実験によって決着を着けることができるが、PI は前提として物理的な論理だけで解決できる問題が望ましい。この問題では、速度と加速度の概念を深めることを目的としており、選択肢 4 と 5 について議論をさせたかったが、生徒の様子や「振り返り」から、選択肢 2 についての話題が非常に多いことがわかる。

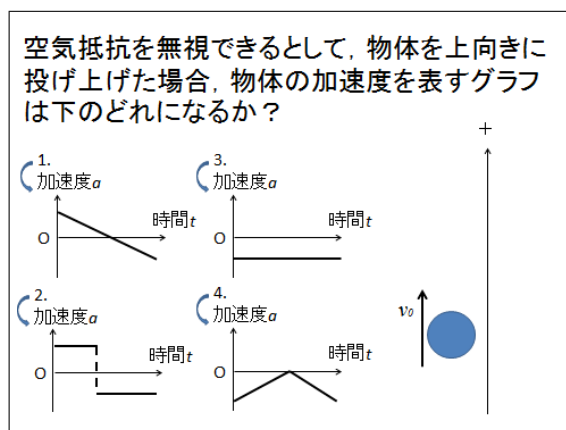


図 A.12: 設問 9 : 鉛直投げあげ [107]

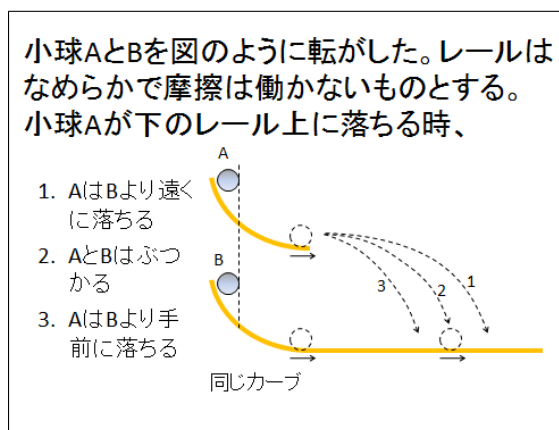


図 A.13: 設問 10 : 水平投射 1 [107]

この PI の解説を行い、授業を終えた。

### 7. [生徒実験] 自由落下

「落下物体は加速度運動しているらしいが、一体どのような運動をしているのだろうか？考えてみよう」という発問から、クリッカーによる実験で得られるグラフの予想、そして自由落下実験を行った。

### 8. [実験分析] 自由落下，鉛直投射，水平投射，PI：鉛直投げ上げ・水平投射

はじめに自由落下実験の分析を行い、落下物体の加速度は、質量が異なっても、いつでも同じであることを確認した。このことから、落下物体の運動は等加速度運動であることが分かり、グラフや式についても合わせて説明した。

次に図 A.12 の鉛直投げ上げの場合には、 $a-t$  グラフはどのような形になるのかを考えさせる PI を行った。設問 9 の後、鉛直投射についてグラフや式での説明を行い、さらに水平投射に関する PI (図 A.13) を行った。

表 A.9: 設問 9 : 鉛直投げあげ

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	19.05	65.12	0.57
2B	34.88	53.49	0.29
2C	16.28	44.19	0.33
全体	23.44	54.26	0.40

## 生徒の討論から

- だんだん手の力が重力に負けてくるから…
- 最初上向きに動いていて、だんだん遅くなっていき、止まり、下向きに速くなる。それは 1 だ
- ずっと下向きに速度が減っている。下向きは-だから、常に減っていると言える
- 頂点で向きを変えるから、グラフも形が変わるんじゃないかと考えて 2 にした
- 手で押している部分はどうすればいいですか？もし考えるなら、最初に正の向きに力働くから、正の加速度持つはず

## 「振り返り」から

- 正の向きに動いていて減速→加速度：負，負の向きに動いていて加速→加速度：負
- 加速度は重力が一定にかかっているから、(運動が) 上向きでも下向きでも等加速度直線運動!! (14 名)
- 手から離す瞬間は含めない!!初速度として既に持っています、ってことになる!
- 空中で一瞬静止しても加速度は 0 にはならない。加速度が 0=停止している or 等速直線運動
- 加速度と速度が混同しがち。加速度が一定でも速さは変わっていたり、加速度がなくても速さはあるなど、惑わされないようにしたい。
- $a-t$  グラフがひさしぶりにでてきたけど、理解出来た!!うれしい!!
- 加速度  $a$  のグラフ←班員といつも以上に議論できた。

生徒の様子や「振り返り」から、生徒たちは手でボールを鉛直上向きに投げる様子を思い浮かべているようであった。そのため、「手でボールを押している場面」はどのようなグラフになるのかで迷っている生徒が多かった。「手から離れた後の物体の加速度」のような問題文にすることで、問題の把握に関する誤解を減らすべきであった。

また、“だんだん手の力が重力に負けてくるから…”といった議論もあり、インペタス [21] を使っている様子が伺えた。

表 A.10: 設問 10 : 水平投射 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	58.14	72.09	0.33
2B	60.47	81.40	0.53
2C	72.09	83.72	0.42
全体	63.57	79.07	0.43

## 生徒の討論から

- 後ろに落ちるのではないか。A は速度が下にも使われるから、その分横方向は小さくなりそう
- B は等速直線運動する。A は良く分からない。
- A の方が高い位置にあるからエネルギー大きい。でも斜めに落ちなきゃいけないから、その分たくさんエネルギー使う？

## 「振り返り」から

- 投げてぶつかる球は面白かった。高さが違ってぶつかる。
- 水平方向には力が働いていない。
- 下の球：等速直線運動，上の球：下の球の上に常にいる。
- 飛行機の爆撃の話と同じ考え方で考えれば良いということ。
- ビデオのやつですが、 $g$  の力はないのですか？
- 上のレールから投げ出された球が、下のレールの真上にいることの原因がわからなかった。

解説は演示実験 (速すぎて見えないので、演示実験の後、あらかじめ撮影しておいた VTR を見せた) で行ったが、後ろの席の生徒は身を乗り出して実験を見ていた。VTR で二つの球がぶつかったときに拍手が起こるなど、印象深いものになったのではないだろうか。

しかし、この段階で生徒はまだ運動の法則を学習していないため、水平方向に等速直線運動することは、根拠がない。本実践では、「予習」を導入することから、教科書通りに単元を進めているが、この問題を十分に生かすためには、やはり運動の法則を学んだ後に位置付けるべきであった。運動と力の関係についての理解を問う、良い問題となったかもしれない。

演示実験の結果を使い、水平投射の定性的な説明をして、授業を終えた。

## 9. 斜方投射, PI: 水平投射 2, [生徒実験] ゴムひもの実験

はじめに前回の続きとして、水平投射のグラフや式での説明をパワーポイントのスライドで行った。そして図 A.14 の水平投射の PI を行った。前回の授業では、水平方向に等速直線運動することがわかったので、今回は鉛直方向には等加速度運動 (自由落下) することを問題にした。解答解説の場面では、実験映像を観察し、水平方向の運動は落ちるまでの時間には全く関係していないことを説明した。また、自由落下実験の結果より、質量が異なる物体でも同時に落下したことにも触れた。

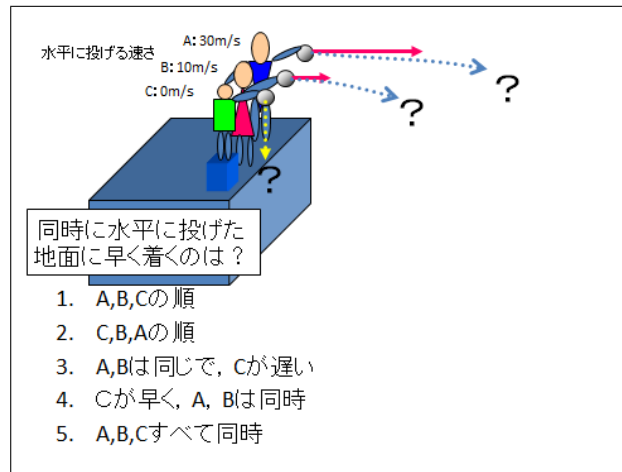


図 A.14: 設問 11 : 水平投射 2[107]

表 A.11: 設問 11 : 水平投射 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	76.74	95.35	0.80
2B	62.79	97.67	0.94
2C	67.44	88.37	0.64
全体	68.99	93.80	0.80

生徒の討論から

- C → B → A の順に着地するんじゃないか。速いほど遅そう。
- 速度を合成しても、鉛直方向にはどれも同じ長さになるから、同時だ。
- 鉛直方向には自由落下なんだから、どれも同じ。
- 同じ質量の球を同じ高さから落としたら、自由落下だったら同時。だからこの場合も同時になる。

## 「振り返り」から

- 鉛直方向に落下する分は結局同じなので、同時!!水平方向は関係ない。(9名)
- 速さを変えて投げても落としても着地するのは同時(7名)
- 同じ質量の球を同じ高さから自由落下と水平方向に投げても同じタイミングで落ちる→手を離れた後はどれも重力が同じだけ働いている。(2名)
- 投射した位置から着地する位置までの距離の違いは、最初の速さが大きいほど遠くなる。電車でジャンプした時と同じこと…?
- 30m/s で投げても 10m/s で投げても同時ってことは、例えば 10000m/s とか超剛速球を投げても同時ということなのかな?なんか解せない…

設問 11 の後、斜方投射について説明し、ゴムひもの実験を行って終了した。



10.PI：斜方投射，[実験分析] ゴムひもの実験，PI：ゴムひもの実験 1・2  
初めに図 A.15 の，前回学習した斜方投射に関わる PI を実施した。

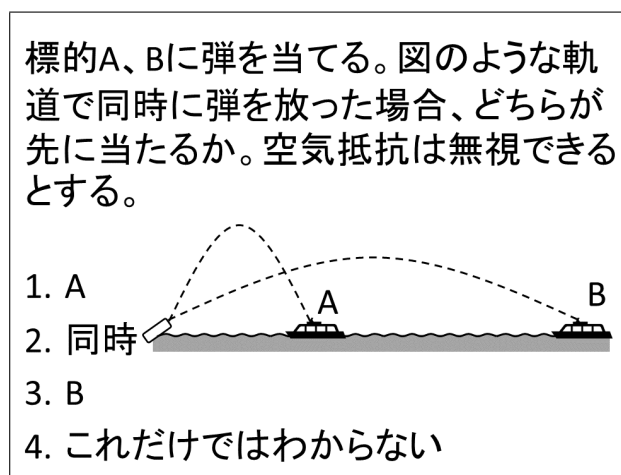


図 A.15: 設問 12 : 斜方投射 [22]

表 A.12: 設問 12 : 斜方投射

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	12.82	21.00	0.09
2B	20.93	20.93	0.00
2C	9.30	6.98	-0.03
全体	12.82	16.00	0.04

生徒の討論から

- 初速の大きさが分からないと、分からないんじゃないか
- 高く上がる方が速さは速いけど、その分距離が長い。逆もそう。だから結局同時？
- 高さが大事なんだよ。鉛直投げ上げなんだから、上がって下がってくるまで…でも分からない
- 条件が細かく書いてないんだから、A と B の位置関係はどっちでも良くて、関係ないということなんじゃないか。大砲のすぐ隣に A と B があると考えたら…

## 「振り返り」から

- 最初のクリッカーの問題の原理！ボールを投げるのを考えると、分かりやすい！
- 鉛直方向と水平方向に速度を分解して考えていけばいい。(6名)
- 同じ物体を高く近くに投げ上げたときと低く遠くに投げ上げたときでは、低く遠くの方が先に地面に着く(時間に関わるのは高さだけ。重力加速度が同じだから)。(20名)
- 最高点に到達するまでの時間と、最高点から元の高さまで戻ってくるまでの時間は同じ → Bの方が早く上がって早く下りる。
- 鉛直投げ上げを横にずらしても、落ちるまでの時間は変わらないというように考えることにした。
- 直感的な考えと違うことが物理では起こる。直観に頼り過ぎるのも考えものである。
- なぜ水平方向は無視できる？なぜ初速度は関係ない？(4名) 最初の問は角度は関係ないのか？

初速度(の成分：三角関数を用いたベクトルの分解)が気になる生徒が多かった。「AとBで初速度はどうなっているのですか？」とその場で質問してくる生徒もいた。解説をしたときに、鉛直投射の特徴を使って考えることに納得している生徒もいたが、授業後5~6人の生徒が質問に来たことから、この問題は「面白いが難しい」といった印象だったのだと思われる。

この設問12のPIは、過去の実践例から議論前正答率やPI効率が低くなることがわかっているが[44, 94, 93], あえて出題している。その理由として、非常に多くの内容を含んだ良問であるということ、正答が多くの生徒の直感に反するものであるということが挙げられる。議論が盛り上がっていたことから生徒にとって非常に考えがいのある問題であることが伺え、また、「振り返り」で、このPIへのコメントが多かったことから、生徒にとって印象深い問題であったと言える。生徒の概念理解の足場となりうる問題であること、そして、直感と反する現象が起こることもあり、物理概念・物理的な論理で物事を考えていく必要性和有用性に気づかせることができる問題である。多数意見が必ずしも正解であるとは限らない、ということを示し、議論をより活発にさせるねらいもある。

設問12のPIの後、図A.16, A.17のPIでの議論を通して、ゴムひもの実験の分析を行った。

表 A.13: 設問13: ゴムひもの実験1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	75.61	100.0	1.00
2B	72.09	100.0	1.00
2C	69.77	90.70	0.69
全体	72.44	97.00	0.89

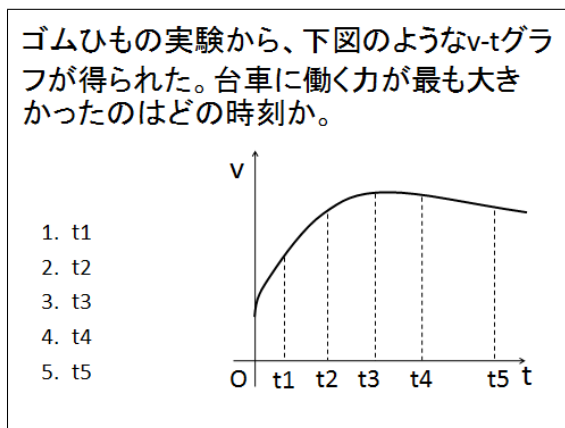


図 A.16: 設問 13 : ゴムひもの実験 1

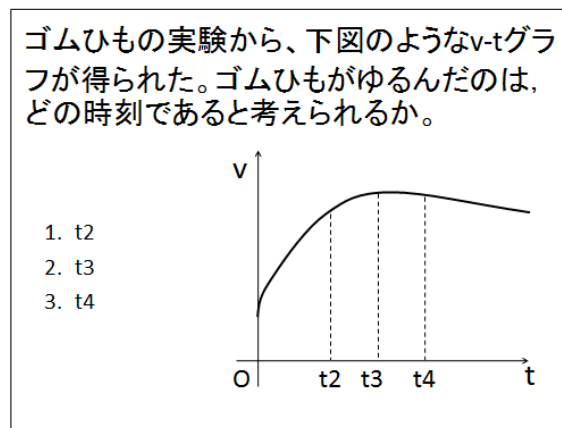


図 A.17: 設問 14 : ゴムひもの実験 2

生徒の討論から

- 一番初めが、一番ゴムがたくさん伸びているんだから、縮もうとする力は強い。
- だんだん伸びが小さくなると、力も小さい。
- 始めの方が加速度が一番大きい。力が大きければ、加速が大きくなるんじゃないか。

「振り返り」から

- 力が大きければ加速度が大きい、力が小さければ加速度が小さい。(4名)力は加速度を生じる。(3名)
- 力の大きさと加速度は関係する。速度は関係しない。

まず図 A.16 の PI を通して、「力は加速度を生じさせるものである」と定義した。これは実験の様子を思い出しながら考え、議論することで、ほぼ全員が正答を導き出すことができた。この設問 13 について、選択肢を単純に時刻にするのではなく、力と時間のグラフを選ばせるような形式にすることで、さらに生徒に考えさせる問題とすることができるかもしれない。

表 A.14: 設問 14 : ゴムひもの実験 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 1 (%)	議論後正答率 2 (%)	PI 効率 (1-3)
2A	31.71	2.44	56.10	0.36
2B	22.73	4.55	43.18	0.26
2C	13.96	2.33	39.53	0.30
全体	22.66	3.13	46.09	0.30

## 生徒の討論から：1 回目と 2 回目の回答の間の議論

- ゴムがゆるむってことは、加速度がゼロになるってことだから、 $v-t$  グラフの傾きがゼロの  $t_3$  だ
- $t_3$  を境に減速している。つまりゴムが引っ張らなくなって、摩擦によって減速を始めた点を表す

## 生徒の討論から：2 回目と 3 回目の回答の間の議論

- グラフの最後の右下がりになっている部分は摩擦力による減速。負の加速度ってことは負の力ってこと。摩擦は最初から台車に働いていたはず。でもゴムの力の方が強かったから、加速した。
- ゴムの力と摩擦力との差が、実際に台車に影響した。
- だんだんゴムが緩んでくると力が小さくなって、どこかで摩擦力と同じ大きくなる。そのときは、台車の加速度がゼロになるから、これが  $t_3$  だ。さらにゴムの伸びが小さくなると、今度は摩擦力の方が大きくなって、減速し始める。それが  $t_3$  と  $t_4$  の間で、ゴムが完全に緩んでからは、右下がりの直線になる。水平面上の運動と同じ。

## 「振り返り」から

- ゴムひもの  $v-t$  グラフで傾きが 0 になる (加速度が 0 = 等速直線運動する) というのは、ゴムの力が働かなくなったのではなく、ゴムの力と摩擦力の力がつり合っていることを示している。(17 名)
- 全て今までに習ったことを応用していて分かりやすかった。最後の摩擦が関係している問題には感動した。もっと色々考えたい。(2 名)
- 今日の問題は難しく、間違えていても全然気付かなかったが、説明を聞くと納得出来た。

設問 13 に続いて、設問 14 でゴムひもが緩んだ時刻について PI を行った。ゴムひもが緩んだとする定義は、「ゴムひもが台車を引っ張らなくなった時」とした。設問 14 では、通常の PI の手順に議論と回答を 1 回ずつ追加した。

生徒たちは非常に活発に議論していた。今まで学んできたグラフの知識から、 $v-t$  グラフの傾き = 加速度、傾きゼロ = 加速度ゼロ、よって  $t = t_3$  で力がゼロ、ゴムひもが緩んだ、というところまで議論で到達することができていた。2 回目の回答後、摩擦力の存在についてヒントを出してもう一度議論するように言うと、再度活発に議論していた。運動の法則を獲得する前の段階で、非常に高度な問題であるが、結局全体の 50% ほどが議論で正解を出すことができた。この PI を通して、力は加速度を生じさせるものであることと、物体に働く正味の力が運動に関わっていることを、学ばせることができた。

## 11. [生徒実験] 力と加速度

中間テスト明け最初の授業である。テスト返却の後、議論の更なる活性化を目指し、席替えを

行ってから授業に入った。

ゴムひもの実験より、力と加速度の定性的な関係を知ることができたので、今度は力と加速度の定量的な関係について調べよう、という発問で実験を行った。

### 12.[実験分析] 力と加速度, CQ: 質量と加速度, [生徒実験] 質量と加速度


力と加速度の実験結果から、両者は比例関係で結ばれることを説明した。その後、質量と加速度の実験予想、そして実験という流れで授業を行った。実験予想はクリッカークエスチョンで行った。

### 13.[実験分析] 質量と加速度, 運動の法則 (運動方程式の導出), PI: 運動の法則・重力

質量と加速度の実験結果から、両者は反比例関係で結ばれることを説明した。さらに「力と加速度の実験」の結果も合わせて、二つの実験から運動の法則 (運動方程式) を導いた。運動方程式の導出に伴い、SI 単位系についても説明した。

運動方程式を導出したところで、図 A.18 の PI を行った。

台車が減速しながら右向きに進んでいる。この台車に働いている力(合力)の向きを答えよ



1. 右向き
2. 左向き
3. 力は働いていない
4. これだけではわからない

図 A.18: 設問 15: 運動の法則 [107]

表 A.15: 設問 15: 運動の法則

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	69.05	95.24	0.85
2B	65.12	95.35	0.87
2C	62.79	83.72	0.56
全体	65.63	91.41	0.75

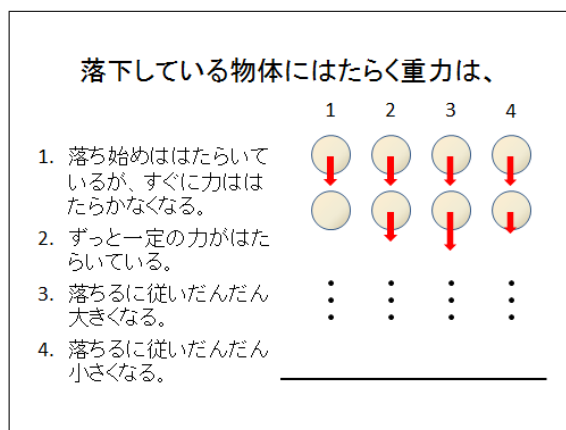


図 A.19: CQ : 落下物体に働く重力 [108]

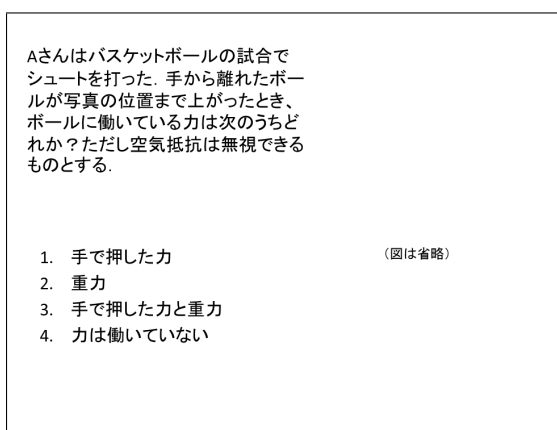


図 A.20: 設問 16 : 重力

## 生徒の討論から

- 右向きに動いているんだから右向きに力があるんじゃないの？
- 最初初速度を持っていて、何もしなければ等速直線運動をする。減速しているんだから進行方向と逆向きに力働く。
- 右向きに力があつたら、右向きに加速していってしまう。
- 動いている方向の力の方が大きいのではないか。逆向きの力によって小さくなっているだけで運動方程式から働いている力の向きと加速度の向きは同じ。だから左向き。

## 「振り返り」から

- 物体が右に進んでいるからといって、右向きに力がかかっているわけではない。
- 左向きに力がかかって減速しながら進んでいた。(3名)
- 力は加速度を生じさせるのであって速度を生じさせるわけではない。(2名)
- 最初に力は加わってたから右向きに進んでいる。
- 右向きに進んでいるときに力ははたらいていなかったら、等速直線運動。

運動の法則を適用することによって、90%以上が正答に至ることができていた。力は加速度を生じさせるものであり、力の向きと加速度の向きが一致することを学習させることができた。議論の中で出てきた、「右向きに力が働いていたら、右向きに加速していってしまう」「力が働いていなかったら等速直線運動」といった意見に、納得している生徒が多かったように感じる。しかしながら、「物体は運動の向きに力を持っている」というインペタス [21] の考え方も根強く残っている様子が伺えた。

設問 15 の後、図 A.19 のクリッカークエスチョン (正答率 96.9%)、自由落下実験で得られた  $v-t$  グラフ、そして運動方程式から、物体に働く重力について考察した。これに続いて、図 A.20 の PI を実施し、放物運動する物体に働く重力について議論した。

表 A.16: 設問 16 : 重力

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	55.81	88.37	0.74
2B	39.53	65.12	0.42
2C	58.14	86.05	0.67
全体	51.16	79.84	0.59

## 生徒の討論から

- 上にあがっているんだから、手の力が無いとダメなんじゃない？
- 手から離れたら、もう手は力及ぼせない
- 鉛直方向には投げ上げ運動だから、下向きに重力加速度、だから重力だけ

## 「振り返り」から

- 手から離れたらもう力を及ぼしていない。(6名)あたりまえだけど、あーって思った。
- 力が残っていることと、働いていることは違うということ (ボールから離れたら力はない)。
- 最後の問題は斜方投射なのになぜ重力だけなのか？ずっと生じていないと力は加わっていると言えない？
- 上に行くのは初速度が残ってるから？これは力じゃない???

設問 16 について、予想以上に選択肢 3「手で押した力と重力」を議論後に選んだ生徒が多かった。手から離れた後の、ボールに働く重力を問う問題だが、写真も載せてあるので、問題設定の勘違い (手で押し出している間の力を問うているという勘違い) はあまり考えられない。つまりそれだけ、ボールが手から受け取ったインパルスで運動していると考えている生徒が多いということである。運動の法則を学習した直後の PI でこの状態であるため、インパルス素朴概念 [21] が払拭し難いことがわかる。

## 14. 慣性の法則, PI : 慣性の法則 1・2

ガリレオの思考実験の紹介から、慣性の法則について説明し、図 A.21 の PI を実施した。

表 A.17: 設問 17 : 慣性の法則 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	41.46	14.63	-0.46
2B	20.93	30.23	0.12
2C	52.38	47.62	-0.10
全体	38.10	30.95	-0.12

図のように、滑車を用いて一定の速度で箱を持ち上げているとき、ロープが箱を持ち上げる力は、

1. 箱にはたらく重力より大きい
2. 箱にはたらく重力に等しい
3. 箱にはたらく重力より小さい

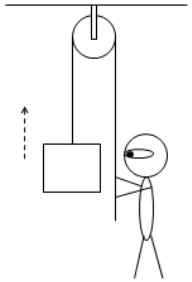


図 A.21: 設問 17 : 慣性の法則 1[107]

生徒の討論から

- もし重力と等しければ、静止してしまう。上向きに動いているんだから、重力よりも大きいはず
- 重力よりも大きかったら、上向きに加速していってしまうのでは？
- 等しいということは均衡してしまい、静止してしまうだろう
- 力は加速度を生じさせるもの、だけど、等しかったら動き出せない



## 「振り返り」から

- 滑車で物体を持ち上げる。?止まっている物体を持ち上げる→重力<張力, ? (一定速度で) 持ち上げている最中→重力=張力
- 箱を滑車で持ち上げるといことが、箱の重力と同じ力で引っ張るとするとどうしても静止してしまうように思ってしまうが、一定の速度で引っ張られている物体と考えると納得がいった。
- 最初のクリッカーの間は難しかったが、力を加速度を生じるものと考えると分かりやすかった。
- 一定の速度で進んでいる「一定」という言葉に注意しなくてはいけないということ。要注意だ。
- 位置を保っていた場合、力は重力より大きいのか小さいのか疑問だった。(3名)
- 一定速度で運動している最中と、動き初めとで、かかる力が違う?わかってきたようなこないような…!
- このときあらかじめ等速直線運動をしている状態なら、引っ張る力と重力がつりあっていますが、ここから止まる場合、引っ張る力が弱くなるんですか?でも止まる場合も力はつり合いますよね。

「重力に打ち勝って上向きに動いているのだから、持ち上げる力の方が大きくなければならぬだろう」という考え方をしている生徒が多かった。上述してきたように、この素朴概念は非常に強固なことがわかる。


また、箱の地面からの「動き出し」を問うている問題だと思っている生徒も多かった。問題を提示したところで、「一定の速度で動いているとき」のことを問うていると補足説明したが、あまり効果がなかったようである。問題文を「持ち上げているとき」ではなく、「上昇させているとき」のように変更することで、このような状況の把握に関する間違いを減らし、概念理解をきちんと問う問題にすることができるとも思われる。問題に関してもう一点、人がロープを引いている図で考えさせたが、手でロープを持ち上げる場合、現実的に考えて、一定の速度では絶対に持ち上がらない。この点についても配慮が足りていなかったかもしれない。

このあと、設問 17 を例として力の作用図の描き方について説明した。等速度で運動しているという運動状態と、物体に重力が働いていることがわかっているならば、重力と逆向きで大きさが等しい力が物体に働いているはずで、それは物体に接触している他の物体から及ぼされる力であり、今回の場合は糸に引かれる力(張力)である、という説明をした。物理は論理を積み重ねることによって、見えない力の存在についても考えられることも伝えた。

さらに班を指名し、机に置かれた物体に働く力の図示に取り組ませた。机の上で静止している場合、等速度で運動している場合(摩擦無し・有り)、加速度運動している場合のそれぞれで、物体に働く力の名称と、力のベクトルの向き・長さなどを順に発表させた。

授業の最後には、図 A.22 の PI を行い、まとめとした。

一定の速度でクルマが進んでいるとき、推進力(前向き)の力と抵抗力(後ろ向き)の力は？



1. 推進力 > 抵抗力
2. 推進力 = 抵抗力
3. 推進力 < 抵抗力
4. 速度によって異なる

図 A.22: 設問 18 : 慣性の法則 2[107]

表 A.18: 設問 18 : 慣性の法則 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	82.93	95.12	0.71
2B	90.70	100.0	1.00
2C	73.81	92.86	0.73
全体	82.54	96.03	0.77

## 生徒の討論から

- 推進力の方が大きかったり、小さかったりすると、加速したり減速したりしてしまう。
- 一定の速度で動いているんだから、つりあっているはず。
- 選択肢 4 がよくわからない。

## 「振り返り」から

- 動いているから推進力が勝っているとは思えないけど、「一定」という条件の下ではつりあっていることになる。つり合っていたら止まりそうだけれど。
- クリッカーの問題が解けるよーになってきました。

直前の活動とほぼ同じ問題設定だったため、正答率は高かった。

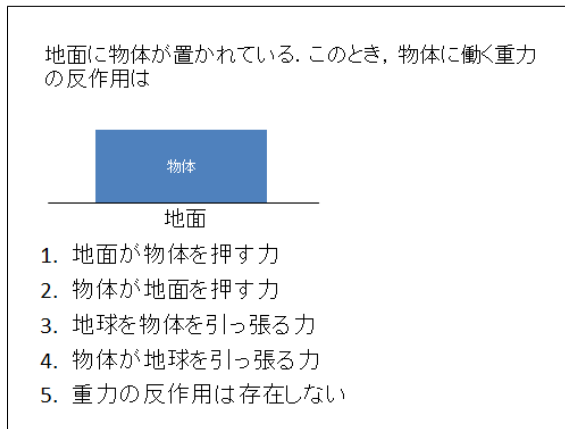


図 A.23: CQ : 作用反作用の法則 1

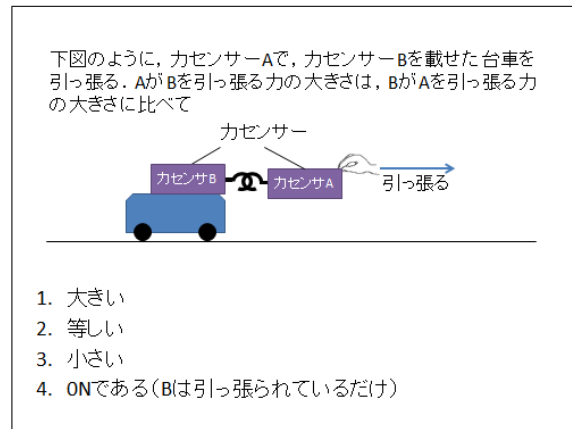


図 A.24: CQ : 作用反作用の法則 2

15. 作用反作用の法則, PI : 作用反作用 1・2

作用反作用について学習した。

授業の冒頭では、予習チェックとして、図 A.23 の CQ を行った (正答率 11.6%)。回答のほとんどは、重力とつり合う力である選択肢 1 の地面が物体を押す力に集中した。前回に慣性の法則を学習し、さらに予習も十分でなかったことから、このような結果になったと考えられる。作用と反作用は、主語と目的語を入れ替えた関係になっていることを、ここで強調した。

授業に入り、作用反作用の法則の導入として、椅子に座った生徒が先生を押す、という実験と、二つのばねはかりを互いに引っ掛けて、引っ張り合う、という実験を行った。はじめの実験では、先生はもちろん生徒に押されているのは感じるが、生徒も同様に先生から押されており、それは座っている椅子が後方に動いてしまったことから、加速度が生じていることが分かり、すなわち力が働いていることが分かるからである。ばねはかりの実験は、「二つのばねはかりが違う値を指すように引っ張り合ってみよう」という発問で行った。実際には、どんな場合でも同じ値を指す。お互いに引っ張られている力の大きさをばねはかりは測っているのだから、力の向きは反対で、大きさが同じである。

この演示実験のあと、力センサーを用いた図 A.24 の演示実験に関わる CQ を実施した (正答率 73.6%)。演示実験の前に、力センサーの心理的較正のため、おもりを吊り下げ、重力を測定し、台はかりで測定した質量から求めた重力と一致することを示し、力センサーが力を測定することができることを確認した。この CQ では、物体同士が力を及ぼし続ける場合でも、作用反作用の法則が成立していることを示すことを目的としている。さらに、動力を持たない台車も、力センサーに力を及ぼしていることも強調した。

実験結果としては、 $F-t$  グラフがセンサー A, B で上下反転した形となっており、これは大きさが等しく、向きが反対である作用反作用の法則そのものを表していることを説明した。

次に、図 A.25, A.26 の PI を二問続けて実施した。

表 A.19: 設問 19 : 作用反作用の法則 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	48.18	60.98	0.25
2B	47.62	59.52	0.23
2C	44.19	48.84	0.08
全体	46.83	56.35	0.18

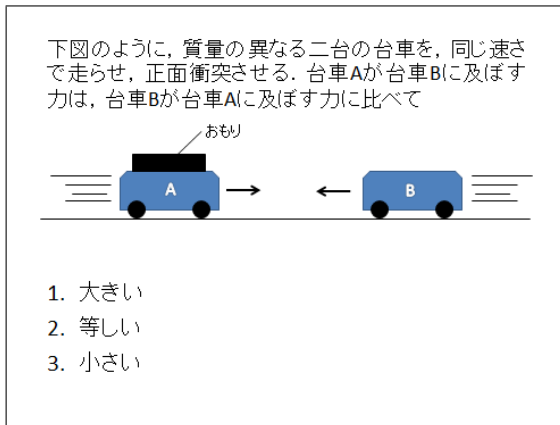


図 A.25: 設問 19 : 作用反作用の法則 1

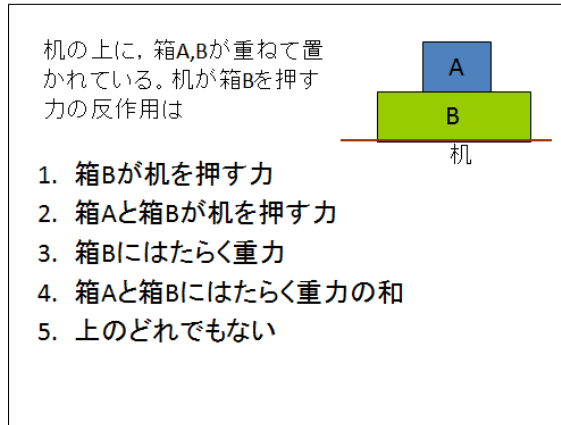


図 A.26: 設問 20 : 作用反作用の法則 2[107]

## 生徒の討論から

- Aの方がBよりも大きい力を持っている。でも反作用をどちらも受けるから、結局同じ力になる。
- 自転車を飛ばしちゃうから力大きい？
- 速さが同じだから加速度が同じで、質量が違うんだから、 $ma = F$ より重い方が大きい力だ。

## 「振り返り」から

- feelingで答えるのではなく、運動方程式を用いて考えると論理的になる。
- 質量の違いによる運動の違いと、作用反作用は関係ない。
- 実際に実験をすると納得せざるを得なくなる。
- 想像していた結果とは違ったりしていたのがよかった。
- 衝突の運動で、何で質量が違ってても力の大きさは変わらないのですか？

図 A.25 の台車の衝突の問題は、生徒の誤概念として、重いほうが大きな力を及ぼすことや、動いている物体しか力を及ぼすことはできないこと等が挙げられる。ここでは力センサーを用いた演習実験を通して、その誤概念の払拭を目指した。回答に移る前には、実際に問題と同じ状況で台車の運動の様子を見せた（測定はしない）。実験結果より、衝突する二つの台車の質量が異なっても、作用反作用の法則は成立していることがわかる。衝突後のダメージの違いから、勢いが大きいほうが大きな力を及ぼしていると考えがちであるが、それは同じ大きさの力が働いていたとして、質量が異なると生じる加速度が変わるといように、運動の法則で説明できることを示した。

CQ: 作用反作用の法則 2 のような、静的に力を及ぼし続ける場合と、設問 19 のような短い時間で力を及ぼす場合を、別のものとして考える生徒が多いことは、概念調査等でわかっていることである。いかなる場合でも作用反作用の法則は成立していることを示すために、様々な状況で、

繰り返し演示実験をすることは、概念理解に効果的である [44]。

表 A.20: 設問 20 : 作用反作用の法則 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	33.33	57.14	0.36
2B	31.82	52.27	0.30
2C	34.88	44.19	0.14
全体	33.33	51.16	0.27

#### 生徒の討論から

- 主語と目的語を入れかえればいいのかと思いました。
- A と B を接着剤でくっつけちゃえば、同じ物体じゃない？B を押すことを介して A も机を押している。

#### 「振り返り」から

- 箱 A, B の問題では主語と目的語を入れかえるだけとは分かっているけど、上の箱 A の重さが乗っかっているから 2 だと思ってしまった。実際、力を図示しようとするとき、箱 A から机にかかる力は描けなかった。
- 箱 A, B の問題についてはいまいよく分からなかったけれど、矢印を描いたら分かりやすくなった。
- 最後の問題 机には箱 A と B を合わせた質量がかかっている気が…
- どことどの力がつり合っているのかがあやふや
- 作用反作用の関係と、つり合っている力の関係が混同してしまいがちで苦手

力を及ぼしあっている 2 つの物体について考えるのが作用反作用の関係であり、力のつりあいは 1 つの物体に注目し、その物体が受ける力を考える。この二つを区別することは、生徒にとって非常に難しいことである。本実践でも、選択肢 2 と 4 を選ぶ生徒が多かった。

設問 20 では、箱 A は床と接触していないので、床に力を及ぼすことはできない。「床が箱 B を押す力」の反作用の大きさは「箱 A と箱 B の重力の和」だが、作用反作用の関係にはなっていない。床や箱 B と重力は、作用反作用の関係を考える上で全く関係ない。

授業の最後で、この設問 20 について、各物体に働く力と、作用反作用の関係にある力について、図示しながら説明した。

#### 16.[生徒実験] 動摩擦力

授業の冒頭では、前回の復習として、設問 20 の各物体に働く力の図示と、力のつり合い、作用反作用について説明した。作図にあたって、物体 A, B, 机を少し離れた状態で描き、それぞれの力の作用点を明確にした。前回提出された「振り返り」にて、作用反作用の関係にある力の作用点を同じ点に描いている生徒が目立ったため、このような形で復習の時間を取った。「振り返り」

の実施により、生徒の理解度に応じて、授業計画を修正することが可能となっている。

その後は、動摩擦力に関する生徒実験を行った。実験前には、CQによって実験で得られる  $v-t$  グラフの予想を行った。

### 17.[実験分析] 動摩擦力, [生徒実験] 最大静止摩擦力

動摩擦力の実験分析から授業を始めた。動摩擦力の実験は、机の上で木片を滑らせ、その運動を記録タイマーで測定するというものである。 $v-t$  グラフが右下がりの直線であることから、物体は等加速度直線運動していたことがわかり、さらに運動方程式より、物体に働く動摩擦力は質量に比例していることがわかる。これより、手を離れてから止まるまで、速さによらず、一定の大きさ・向きで働いていたことがわかる。この実験の場合、物体に働く重力と垂直抗力がつり合っており、質量が大きくなれば、それに比例して重力も大きくなる。重力が大きくなれば、それに釣り合う垂直抗力も大きくなる。摩擦力について考えるときに、重力ではなく垂直抗力が本質であるということは、後で説明することとして、動摩擦力の大きさは垂直抗力に比例し、その比例定数は動摩擦係数と呼ばれることを説明した。

このあと、最大静止摩擦力の測定実験を行った。

### 18.[実験分析] 最大静止摩擦力, PI: 静止摩擦力, 運動方程式の利用

最大静止摩擦力の測定実験の分析から授業を始めた。机の上に置かれた木片に糸をつけてばねはかりで引っ張り、木片が滑り出す直前のばねはかりの目盛りを読むという実験と、摩擦角の測定の二種類の実験についての分析を行った。はじめの実験結果より、垂直抗力と最大静止摩擦力の大きさが垂直抗力に比例していることがわかる。横軸に垂直抗力、縦軸に最大静止摩擦力をとったグラフの傾きは静止摩擦係数である。ここで垂直抗力を考える理由について、黒板にプリントをマグネットで留めて、それを上下に引っ張ることを考えさせた。この状況では、静止摩擦力に重力は関係ない。マグネットの数を増やすと、垂直抗力が大きくなり、摩擦力が大きくなる。つまり摩擦力の大小を決めるのは、物体が面からどれだけ押されているのか、ということであり、作用反作用の法則で考えれば、面が物体にどれだけ押されているのか、で決まるとも言える、ということの説明をした。

このあと、図 A.27 の PI を実施した。

床に置いた質量  $M$  の物体に、水平に力  $F$  を加えたところ物体は静止していた。床と物体との静止摩擦係数を  $\mu$ 、重力加速度を  $g$  とすると、物体にはたらく摩擦力はいくらか。

1.  $Mg$
2.  $F$
3.  $\mu Mg$
4. 摩擦力はない

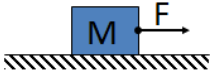


図 A.27: 設問 21: 静止摩擦力 [107]

表 A.21: 設問 21 : 静止摩擦力

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	32.50	65.00	0.48
2B	39.53	46.51	0.12
2C	38.46	64.10	0.42
全体	36.89	58.00	0.33

## 生徒の討論から

- 静止しているんだから、力はつり合っているはず。だから 2 だ。
- $\mu mg$  はマックスの大きさで、それよりも小さい  $F$  力で引っ張っているんだから、3 ならつり合わない。
- $\mu mg$  ってなに？重力は摩擦と…動きにくくなる？分からない

## 「振り返り」から

- 物体を水平方向に引っ張って、動かない場合、及ぼされた力と同じ力の静止摩擦力が働いている。(3名)
- “静止=力がつり合っている”という考えは重要！
- 静止摩擦力の値は変化する。動摩擦力の値は定数。

生徒は常に物体に働く静止摩擦力が最大静止摩擦力だと考えがちである。それでも、引っ張られたり押されたりして、加えられた力の大きさの分だけ静止摩擦力が働かないと、加えた力よりも静止摩擦力の方が大きくなってしまい、物体は独りでに加速度運動を始めてしまう、といった論理で友達を説得している生徒も見られたが、正答率はあまり良くなかった。目で見えない力についての議論は、非常に難しいことがわかる。

設問 21 のあと、摩擦角の実験の分析を行い、摩擦力と垂直抗力は、抗力の面に対して平行な方向の成分と、垂直な方向の成分であるということを説明した。そのため、摩擦力と垂直抗力の作用点は同じ点でなければならないことも説明した。物体に働いているのは抗力だけであり、摩擦力と垂直抗力はその分力に過ぎない、ということを強調した。

このあと、次に行う連結物体の運動に関する実験の、理論的な説明を行い、授業の最後で図 A.28 の PI を実施した。

表 A.22: 設問 22 : 運動方程式の利用 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	15.00	15.00	0.00
2B	16.28	18.60	0.03
2C	17.50	20.00	0.03
全体	16.00	18.00	0.02

重さ2Nのおもりと台車を糸でつなぎ、おもりを落下させたら、台車は等加速度運動をした。台車に加わる糸の張力の大きさを $T$ とする。このとき

1.  $T > 2N$
2.  $T = 2N$
3.  $T < 2N$

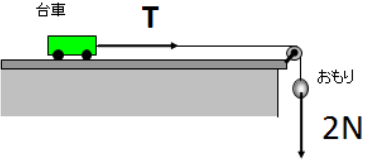


図 A.28: 設問 22 : 運動方程式の利用 1[107]

## 生徒の討論から

- おもりが台車を引っ張っているのだから、 $2N$  で同じだろう。
- 2 はつりあってしまって、おもりは動かないのではないか？
- 台車を引く張力の大きさと、おもりを支える？みたいな張力の大きさは等しいから、まずはおもりだけで考えればいい。もし張力が場所によって違ったら、たるんだり千切れたりしてしまう。おもりに働く重力と張力が同じ大きさなら、つり合っているから、静止したまま動かない。張力の方が大きい 1 では、上向きに動いていってしまう。等加速度運動しているんだから、重力の方が大きくないと、下向きに力かからない。だからおもりに働く張力は  $2N$  よりも小さくて、台車に働く張力の大きさもそれと同じだから、3 だと思った。

## 「振り返り」から

- 力はすりぬけない。力は接触しているもの同士で考える。(3名)
- 最後の問題正解してうれしかった。
- 最後の問題には、あと思った。
- 最後のクリッカー問題、はじめ考えてた理屈で合っていました。あーあ。
- 最後のスライド、「張力」とは糸のどこに働いている力ですか？
- もし等速直線運動だったら、 $T=2N$  なのか？
- おもりにかかる  $T$  の存在が良く分からない。おもりの力と対抗するのは木片の摩擦力ではないのか…？

非常に生徒にとって難しい問題に感じられたようである。設問 23 は、台車が加速度運動してお



り、おもりはその台車と糸でつながれていることから、おもりも鉛直下向きに加速度運動していることがわかる。おもりに下向きの加速度が生じていることから、おもりに働く力の合力は下向きでなければならないため、重力の方が張力よりも大きいことがわかる。このような、物体の運動状態から物体に働く力の大小関係を見抜く論理は、なかなか身につくものではないことがわかった。

### 19.PI：運動方程式の利用 2, [生徒実験] 運動方程式の利用

前回の授業の最後に行った図 A.28 の PI の正答率が悪かったことを受けて、生徒実験の前にもう一度、少し見方を変えた図 A.29 の PI を実施することにした。今回の生徒実験は、探求型ではなく、検証型の実験であるため、実験内容を生徒が十分に理解した上で取り組ませる方が良いと判断し、繰り返し議論させることにした。

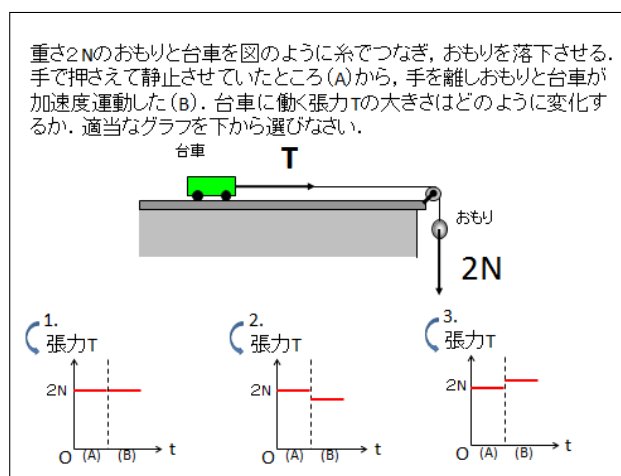


図 A.29: 設問 23：運動方程式の利用 2

表 A.23: 設問 23：運動方程式の利用 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	24.39	21.95	-0.03
2B	29.55	36.36	0.10
2C	24.39	12.20	-0.16
全体	26.19	23.81	-0.03

#### 生徒の討論から

- 台車を押さえているのですか？
- 2N で台車を引っ張っているんじゃないの？

## 「振り返り」から

- おもりが下に落ちる（加速）…重力の方がひもに引かれる力より強い＝張力の方が弱い！
- 手で押さえる（静止）…重力とひもに引かれる力が釣り合う＝張力と同じ大きさ（3名）
- 重力（変化しない）が張力より大きくないと落下しない→張力が小さくなる。
- 動いている物体に対する張力と、手で押さえてる時は違う。
- 「張力が減る」という感覚がよくわからないな。釣り合いにより結果そうなることは分かるが。

予想に反して、非常に正答率が低かった。台車が「静止している」という状態と「加速度運動している」という状態との二つを同時に考えなければならなかったため、生徒にとって難しい問題となったのかもしれない。運動方程式を導出してから、問題演習の時間を取ることもできていなかったため、どのように考えるべきか、戸惑ってしまったのかもしれない。設問 A.28・A.29 を単独で出題し、議論させるのではなく、二つの状態のそれぞれについて順を追って考えさせるような教材を開発すべきかもしれない。そのような一連の教材を使った活動を通して、生徒に運動方程式の使い方、物体に働く力の見抜き方を学ばせられれば良いだろう。

設問 A.29 の後、[生徒実験] 運動方程式の利用を実施した。

## 20. 力のモーメント、浮力、[生徒実験] 質量と密度の測定

力のモーメントの定義と浮力について簡単に説明したあと、すぐに生徒実験へと移った。てこを利用し、河原で拾ってきた石の質量と密度を測定する実験である。

## 21.[実験分析] 質量と密度の測定、PI：浮力、力学概念調査事後テスト

簡単に実験の分析を行ったあと、図 A.30 の PI を実施した。

問④ 水の入った容器を台はかりにのせると、900gwを指した。ばねばかりに吊るした重さ200gwの石をすべて水に入れたら、台はかりはどんな値を指すか。

1. 900gwより小さい値
2. ほぼ900gw
3. 900gwより大きい値
4. 1100gwくらい




図 A.30: 設問 24 : 浮力 [107]

表 A.24: 設問 24 : 浮力

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	34.88	67.44	0.50
2B	41.86	48.84	0.12
2C	47.62	54.76	0.14
全体	41.41	57.03	0.27

## 生徒の討論から

- 容器の中で完結してるんだから、全部足される？
- ばねはかりで引っ張っているんだから、張力働くでしょ。その分があるんじゃない？
- 小さくなるのはあり得ない。変わらないのか、大きくなるのかで迷っている。
- 浮力の反作用が水に働くから、その分だ。

本設問は、仮説実験授業で行われている授業書 [14] を参考にして作成したものであり、意見が割れることは予想していた [94]。生徒は、互いに意見を交換するものの、なかなか論拠を持って相手を納得させられるに至らない状況であった。本来の仮説実験授業の展開であれば、本設問の前に「ばねはかりの指す値はどうなるか」といった設問を用意するが、本実践ではそれは行わなかった。生徒の議論の様子から、順を追って考えさせたほうが良いと感じたので、上で述べたような設問を直前に CQ などで行っておくべきであったと思われる。

正解発表は実際に演示実験を行った。ピーカーの水に石を沈め、ばねはかりと台はかりの目盛を読み上げ、さらに実物投影機でそれを見せると、結果にはおおむね納得したようである。この設問の解説を行ったあと、力学概念調査事後テストを行い、授業を終えた。

以上が 1 学期力学分野の授業の詳細である。



## 付 録 B 波動分野の PI 型授業

ここから「振り返り」と「予習」を導入した PI 型授業の実践の詳細と、PI の議論中の生徒の討論、さらには、その日に提出された生徒の「振り返り」から PI に関するものを抜粋して載せる。

### 1. 波の表し方, PI: 波を表す・グラフ・ $v = f\lambda$

2 学期は波動を学ぶことをアナウンスし、身の回りの「波」の例（海の波，電波，音波）を挙げた。その後，ウェーブマシンで作った波の観察を通じて，波とは振動が隣へ隣へ伝播していく現象である，ということを確認した。振動をはじめた点を波源，波を伝える物質を媒質と呼ぶことを教え，さらに注目している媒質が，次の瞬間どちら向きに動くのかを考えるには，波の進む向きに波形をそのまま平行移動させれば良いことを説明した。その後，図 B.1 の PI を実施した。

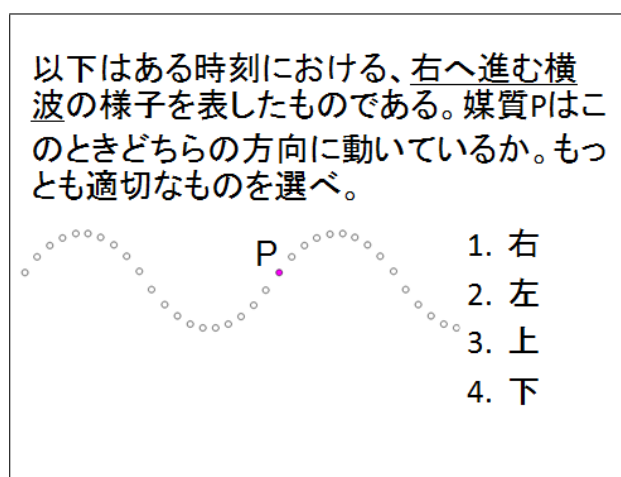


図 B.1: 設問 1 : 波を表す [107]

表 B.1: 設問 1 : 波を表す

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	78.06	100.0	1.00
2B	52.27	90.91	0.81
2C	45.00	87.50	0.77
全体	58.40	93.00	0.83

## 生徒の討論から

- 右斜め下に行ってほしい
- さっき先生が説明したとおりに，波を動かせば良いんだよ
- 上下にしか動かないから，左右ではない
- (図を描きながら) 平行移動したら，P は下に動く

## 「振り返り」から

- 振動は，次の瞬間の平行移動で考える。次に来る波形を描くと媒質の動きがわかりやすくなる。(7名)
- 考えるのがまだ遅いけれど，一回波を描いてみて動きを考えたらわかってよかった。
- 波を平行移動して，次の瞬間の振動について考えることが，まだよくわからない。

直前の講義で，この問題の考え方を説明していたからか，議論後正答率は高かった。しかし，生徒の議論の様子から，媒質が斜めに動くのではないかと考えている生徒も見受けられ，講義だけでは十分に理解できていないことがわかった。

次に波源の周期的な振動によって生じる波を扱うことにして，今後は等速円運動している物体に，横から光を当て，その時に写る影と同じ振動を波源がする場合を扱うことを説明した。このような波源の運動は単振動と呼ばれ，それにより生じる波は正弦波ということを教えた。また，振動数と周期の関係や，山，谷，振幅，波長，位相といった波の要素の説明，さらには，波全体に注目しているときには，グラフの横軸は位置  $x$  で，ある要素一つの振動に注目しているときには，横軸は時間  $t$  であることを説明したところで，図 B.2 の PI を実施した。

下図は右向きに進む波の  $t=0$  の波形とする。P 点の媒質の動きを、横軸を時間で表すと次のどれになるか。

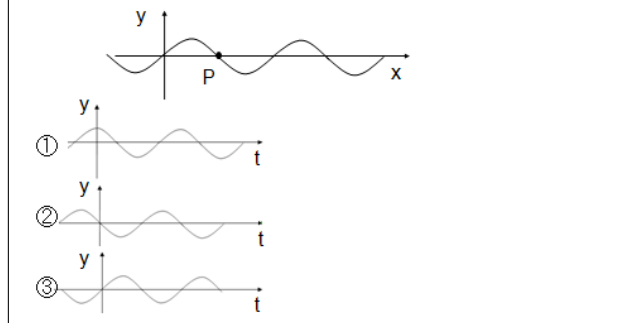


図 B.2: 設問 2 :  $y-x$  グラフ  $\rightarrow$   $y-t$  グラフ [107]

表 B.2: 設問 2 :  $y-x \rightarrow y-t$  グラフ

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	69.05	95.24	0.85
2B	69.77	95.35	0.85
2C	65.00	95.20	0.86
全体	68.00	95.20	0.85

## 生徒の討論から

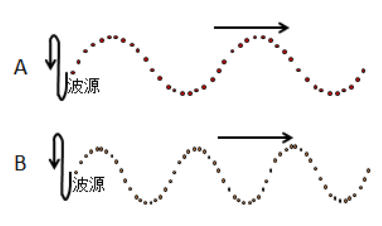
- P は最初  $y = 0$  のところにいるんだから、1 じゃない
- P はこのあと上に動くのだから、3 が正解だ
- $x$  って何を表しているんだろう？方向？位置？

## 「振り返り」から

- 横軸が時間なのか、距離なのかを注意しなければならないとわかった。

最後に  $v = f\lambda$  の導出をパワーポイントのスライドとシミュレーションによって説明し、図 B.3 の PI を実施した。

二つのウェーブマシン(A, B)を用意し、それぞれ波源を1秒に1回の同じピッチで振動させたところ、下図のような波が生じた。波の伝わる速さが速いのは、



1. A  
2. B  
3. 同じ  
4. これだけでは分からない

図 B.3: 設問 3 :  $v = f\lambda$

表 B.3: 設問 3 :  $v = f\lambda$ 

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	26.19	76.19	0.68
2B	36.16	65.91	0.47
2C	36.00	76.92	0.64
全体	32.80	72.80	0.60

## 生徒の討論から

- 周期は A と B で同じなんだから、波長が長いと速さは速い
- 同じピッチってどういうこと？
- 波長変わってるけど、その分振動数も変わってるから、速さは変わらないんじゃない？
- Bの方が速く振動しているんじゃない？波長短いし。同じウェーブマシン？

## 「振り返り」から

- $v = f\lambda$  の式に当てはめて考えられるようになった。(2名)
- 感覚で考えずに式で考えたら波の速さが比べられた!! (2名)
- 波の速さ = 振動数 × 波長 → A の波長が長い方が速い。1秒間に1回 → 周期, 振動数はそれぞれ同じ (2名)
- 隣の振動がすぐ伝わってくるとより細かいコマ送りみたいになるから波長が長くなる (=波の速さは速い)。
- 波長の長さは波の速さを決める。波長が大きいと速さも大きくなる。
- エレメントの重さが重いと遅い。
- 3つ目の問題が、まだ理解できていないけど、目で見て納得することができた。(3名)
- (波の) 感覚がせまいから速いわけじゃない。むしろ遅い。
- 最後のクリッカーの問題 実験したら確かに Aの方が速いが、いまいち納得できない。(7名)
- 最後の問がよくわからない。λは多いのになぜ速さはλが少ない方より遅いのか…。λの長さの関係が難しい。

正解発表は演示実験を行った。ストロー・ウェーブマシンによる実験は「良く分からない」「確かに！」と色々な声が聞こえた。生徒によって理解がまちまちになってしまったかもしれない。動画も用意しておいたが、時間が足りず、見せることはできなかった。



設問 3 には「振り返り」で非常に多くのコメントが集まった。生徒達は同じ PI についての議論をして、同じ実験を観察したにも関わらず、同じ内容のコメントが多数あったわけではなく、多種多様なコメントを書いていた。初めて波動について学んだこともあり、また、 $v = f\lambda$  の式は暗記することはできても、波の伝播機構から考え、概念として掴むことが難しいということを示しているのであろう。また、波の伝わる速さが媒質の状態で決まるということを示すことも目的の一つである。弦の振動の前に、張力と媒質の慣性の大きさと波の伝わる速さの関係を定性的に考えさせる機会とした。

4.[実験分析] 弦の振動, PI:弦の振動 (振動数・張力・線密度変化)

東京学芸大学の前半の教育実習生が担当した弦の振動実験の分析を行った。

まず、弦の長さ、張力、弦の種類を固定して、振動数を変化させ、腹が 1~3 コの定常波を作った実験の分析から始めた。実験結果から、定常波を生ずる時の振動数はとびとびの値であり、腹の数が 2 個、3 個と増えるにしたがって、その時の振動数は 2 倍、3 倍になっていること、それらの固有振動と基本振動、二倍振動、三倍振動といった用語との対応、定常波の波長について説明したところで、図 B.4 の PI を実施した。ただし、A 組では議論前正答率が 90% を越えていたため、議論は行わなかった。この問題では、選択肢を図で選ぶ形にした。これは、知識と実際に観察される現象とを結びつけさせることを目的としている。

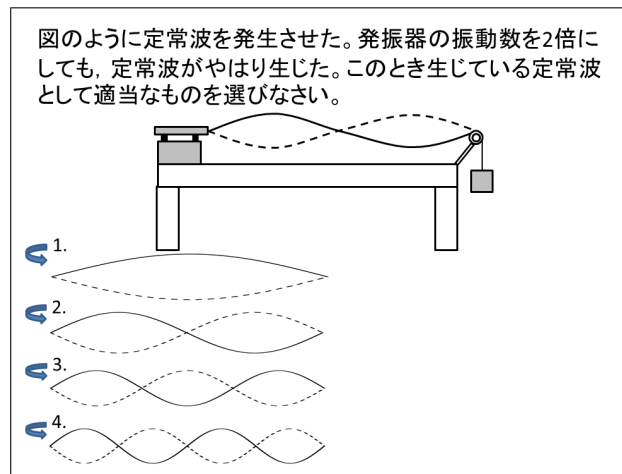


図 B.4: 設問 4 : 弦の振動 (振動数) [109]

表 B.4: 設問 4 : 弦の振動 (振動数)

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	92.86		
2B	76.74	90.70	0.60
2C	86.36	100.0	1.00
全体	81.61	95.40	0.75

## 生徒の討論から

- 実験結果から考えればいい。2 倍振動の振動数の 2 倍と、4 倍振動の振動数が同じくらいだった。
- 腹が 1 個のときに振動数を 2 倍にすると腹が 2 個になったのだから、腹が 2 個の時にさらに 2 倍にすると 4 個になるだろう。
- 腹が 4 個になると思ったのに、2 番を押しちゃった。間違えた。

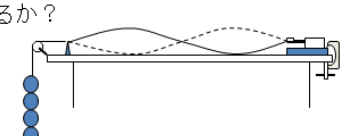
実験結果を単純に適用すれば解ける問題となっていた。生徒の議論の様子を見ても、そのことがわかる。弦の振動では、波源の発振器から波が伝わり、端で反射を繰り返して重ね合わされ続け、それが特定の条件の時にだけ定常波が生じ、激しく振動する、といった物理的な状況を考えさせたり、あるいは弦楽器の弦の振動の様子と結び付けるような問題としたかった。PI は理解を確認するために、いわゆる「問題のための問題」を出題することもできるが、本来は物理概念を使って深く考えさせるような問題を扱うべきである。

設問 4 のあと、記録タイマーとゴムひもを用いた演示実験で、振動数、弦の張力、弦の種類を固定し、弦の長さを変化させる実験を行った。それに加え、映像でも同様の実験について確認した。実験結果より、弦の長さが半波長の整数倍になったときに定常波ができることがわかる。このことから、張力や弦の種類を一定にすると、弦の長さが違って同じ固有振動数を持っていることがわかる。

さらに、弦の振動数と長さを変化させた実験の定量的な分析から、張力と弦の線密度が一定ならば、弦の長さを変えても、波の伝わる速さは変わらないことがわかる。 $v = f\lambda$  から、 $v$  が一定ならば、波長  $\lambda$  を調節すれば振動数  $f$  を変えられる。弦の長さが長くなると低い音が出て、短くなると高い音が出る弦楽器の特徴と結びつけて説明した。

次に、弦の長さとおもりを固定し、弦の張力と種類（線密度）を変化させた実験の分析を行った。実験結果より、弦に伝わる波の速さは張力の平方根に比例し、線密度の平方根に反比例することがわかる。この分析のあと、図 B.5・B.6 の二問の PI を続けて実施した。

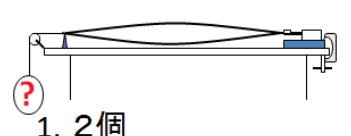
問1 記録タイマー(50Hz)を用いて図のように弦に定常波を発生させた。おもりを4個から1個にしても、定常波がやはりできた。このとき、腹の数はどうなっているか？



1. 増える
2. 減る
3. 変わらない

図 B.5: 設問 5 : 弦の振動 (張力) [109]

問2 弦を線密度が問1の4倍のテグスにした時、基本振動させるためのおもりの数は？



1. 2個
2. 4個
3. 16個
4. 64個

図 B.6: 設問 6 : 弦の振動 (線密度) [109]

表 B.5: 設問 5 : 弦の振動 (張力)

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	23.81	50.00	0.34
2B	25.58	23.26	-0.03
2C	18.18	29.55	0.14
全体	22.48	34.00	0.15

## 生徒の討論から

- おもりの数が減るのだから、今勉強した式を使えば、速さが遅くなることがわかる。振動数は記録タイマーだから一定。 $v = f\lambda$  より、波長は短くなる。だから 2 番だ。
- 波長を短くするには、おもいも 1 個の長さを短くする。弦の長さが固定されているのだから、腹の数は増える。
- おもりの数を減らしたときに、弦の長さが変わりそう。変わることは無いのですか？

## 「振り返り」から

- おもり：減→張力：小→ $v = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$  より  $v$  (小) →  $v$  (小) =  $f$  (同) $\lambda$  →  $\lambda$  : 小→腹の数：増 (8 名)
- 2 つ目のクリッカー問題よくわかった！おもいも 2 つで  $\lambda$  というのがわかりやすくてよかった。
- 様々な式を組み合わせると問題が解けて楽しかった。もっといろんな問題をやりたいです！
- よくわからない。定常波の腹の数と、弦の太さや張力の関係 (2 名)
- 答えが実感できない。ハーモニクス的原理？

張力の変化が波の伝わる速さに及ぼす影響と、 $v = f\lambda$  を使って考えさせる問題である。単なる計算問題とならないように、また、習ったばかりの式を使うことへの負担を軽くするため、選択肢は定性的なものにした。それでも生徒にとっては非常に難しい問題となってしまった。直前までの講義の時間が長くなってしまい、集中力が途切れてしまった生徒がいたことも影響しているかもしれない。

表 B.6: 設問 6 : 弦の振動 (線密度)

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	40.48	54.76	0.24
2B	11.63	6.98	-0.05
2C			
全体	25.28	30.59	0.06

## 生徒の討論から

- 難しい！計算が分からない！
- 問 1 ってどの状況のことを指しますか？
- まずは問 1 の 2 倍振動の状態を作るにはどうすればいいか考えよう。それがわかったら、その時よりも速さが 2 倍になっていれば、基本振動が作れる。線密度が 4 倍になるんだから、張力も 4 倍にすればいい。張力 4 倍はおもり 16 個。それからさらに 2 倍にしなきゃいけないんだから…わからなくなった。
- 先生、答えは 64 個じゃないですか？選択肢にない… (C 組の生徒より)

## 「振り返り」から

- 問 2 の計算のしかた 1. 線密度 4 倍 :  $v$  は  $1/2$  倍 2. 振動数  $f$  は固定 3. 波長  $\lambda$  は 2 倍  
4. 速さ  $v$  が 4 倍で式成立？
- 問 2 のこたえ…→直径が太くなれば基本振動数は小さくなるはず
- 式に問題で与えられた条件を代入していけば考えやすい。
- クリッカーの問題も論理的に解けた…はずだったんですけど  $\sqrt{\quad}$  を無視してました。

C 組では選択肢に不備があり、正解がない状態での PI になってしまったため、データは載せていない。

この問題は、非現実的な設定となってしまう、生徒は考えづらかったかもしれない。また、やや複雑な計算問題であり、習ったばかりの式を使っての計算は負荷が大きかっただろう。

## 5.[生徒実験] 音の三要素, PI: 人の声の波長

音波の導入の授業として、人の声について PI や実験を通して学習した。はじめに図 B.7 の PI を実施した。これは人の声という身近な音の波長のオーダーをつかませた上で、実験をさせることと、 $v = f\lambda$  の練習をさせることを目的として実施した。

ある女子生徒が振動数250Hzの声で話している。この声の波長はどれくらいか。下から近いものを選びなさい。ただし、音の伝わる速さは340m/sであるとする。

1. 1mm
2. 1cm
3. 10cm
4. 1m
5. 10m

図 B.7: 設問 7 : 人の声の波長

表 B.7: 設問 7 : 人の声の波長

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	48.78	100.0	1.00
2B	41.86	83.72	0.72
2C	61.36	90.91	0.76
全体	50.78	91.00	0.82

#### 生徒の討論から

- $v = f\lambda$  で計算すれば良いんじゃない？
- 250Hzってどのくらいの音？
- どの文字の値を知りたいんだっけ？

#### 「振り返り」から

- 公式が使いこなせない。
- 計算がまだすぐにできない。

解説で、「じゃあ先生から私までで波は1個分くらいなんですか？」という発言が聞こえる等、生徒にとって特に波動分野の物理量は数値的な感覚を掴むのが難しく、また、実際に出た計算結果を見て、想像していた値との違いに驚いたのだろう。

このあと、生徒実験を行った。

#### 9. うなり, [PI] 縦波の横波表示 (疎密・媒質の速度)・うなり

はじめに、後半の教育実習生が担当した授業の復習を兼ねて、図 B.8・B.9 の PI を二問続けて

実施した。

以下はある時刻における、右に進む縦波を、つりあいの位置からの変位を縦軸にとって横波表示したものである。最も密な部分はx軸上のどこか。

1. アとオ
2. イとカ
3. ウとキ
4. エとク

図 B.8: 設問 8 : 縦波の横波表示 (疎密)

以下はある時刻における、右に進む縦波を、つりあいの位置からの変位を縦軸にとって横波表示したものである。右向きにの速さが最も大きな部分はx軸上のどこか。

1. ア
2. イ
3. ウ
4. エ
5. アとウ
6. イとエ

図 B.9: 設問 9 : 横波の媒質の運動

表 B.8: 設問 8 : 縦波の横波表示 (疎密)

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	56.10	97.56	0.94
2B	53.66	92.86	0.84
2C	57.78	88.89	0.74
全体	55.91	92.91	0.84

生徒の討論から

- 縦波に戻せば良いんですよね？
- 右向きに変位してたら山になって、左向きに変位してたら谷になるから、ウのまわりに集まる。だから密になる。
- 圧力を縦軸にとったら、ウのところは山になるんですよね？
- ウとアの違いがわからない。何が違うの？ ←グラフから、アの周りからは媒質が離れている。だから疎になる。

「振り返り」から

- 音波 = 疎密 (圧力変化) を波形で表す → 横波と同じ原理で考える
- 縦波のグラフは変位を表している。
- 縦波は左右に振れながら移動する → 今日やっと理解…
- 最初の問題の説明をきいて、どれだけ自分が何も知らなかったか

単純な確認問題であったためか、議論後正答率は非常に高かった。しかしながら、生徒の様子からうかがえるように、教育実習生が担当した気柱共鳴の実験に関する授業で、縦波の二つの考え方（空気分子の変位、空気の圧力変化）について生徒は学んだが、そのどちらをどのように使えば良いのか、混乱している様子であった。縦波がどのような現象であるのか、まだ理解、定着はしていないのだろう。

教育実習の授業で縦波については学習したが、詳しく媒質の運動について扱っていない。それは横波の場合でも同じである。よってここで議論する時間を設けることにして、図 B.9 を実施した。

表 B.9: 設問 9 : 縦波の媒質の運動

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	7.32	9.76	0.03
2B	12.20	19.51	0.08
2C	17.78	15.56	-0.03
全体	12.60	14.96	0.03

## 生徒の討論から

- （縦波の横波表示の図を指しながら）イがたくさん動いているんだから、速い気がする。
- アとウは動いていないから、ゼロのところにプロットされているんだ。
- 変位のベクトルが大きいから、速いって考えたんですけど…違うんですかね？
- 円運動している物体の上下運動の速さを考えれば良いんだ！

## 「振り返り」から

- 媒質の変位の大きさが最大の点では、媒質の速さが0であるということ。てっきり変位が大きいから速さも大きいのかと思った。（3名）
- 時間軸だとかんちがいしていた
- 縦波のクリッカーで”つりあい”の意味がわからなくなってきた。
- 縦波の速さ “速さ”って…？
- 2つ目のクリッカーので、アカウになるまではわかるけど、アが↓、ウが↑になるのがわからない。

非常に正答率が低い問題となった。予想通り、変位が最大の点で、速度が最大になっていると考える生徒が多かった。変位が最大の点は、運動を折り返す地点のため、一瞬速度がゼロになる。媒質の速度が最大になるのは、つり合いの位置にある時である。設問 9 では速度を持っているか否かだけで答えが出せるような選択肢になっており、解説でも時間の制約から、シミュレーションを観察させながら、といった丁寧な説明はできなかった。問題のグラフから、少し時間を進めた波形を描き、波形のずれから速度を読み取るようなことも生徒と一緒に手を動かしながら説明し

たかった。

このあと、気柱共鳴実験の復習として、図 B.10 の CQ を実施した（正答率 59.1%）。演示実験を伴う活動ということもあり、生徒の反応は非常に良かった。ただし、ペットボトルのような複雑な形をしたものを用いると、気柱共鳴だけでなくヘルムホルツ共鳴も混ざった複雑な現象となってしまう。その点への配慮は足りていなかった。

底から1/3くらいまで水を入れたペットボトルの口の上で、ストローを使って息を吹いて、音を鳴らした。もし半分くらいまで水を増やし、同じことをしたとすると、鳴る音の高さは、

1. 変わらない
2. 高くなる
3. 低くなる

図 B.10: CQ : 気柱共鳴

この演示実験の後、音叉を用いた共鳴とうなりの演示実験、うなりの波形の作図（波の重ね合わせ）を行い、最後に図 B.11 の PI を実施した。

異なる二組の波が重ね合わされて、図1・2のうなりがオシロスコープの画面上に表れた。重ね合わされた二つの波の振動数の差が大きいのは、どちらのうなりの図か？

(図は省略)

1. 図1
2. 図2
3. どちらの振動数の差も同じ
4. 与えられた条件だけでは決まらない

図 B.11: 設問 10 : うなり



表 B.10: 設問 10 : うなり

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	68.29	100.0	1.00
2B	60.98	85.37	0.63
2C	77.78	86.67	0.40
全体	69.29	91.00	0.71

## 生徒の討論から

- 振動数の差が大きいほど、位相のずれが大きくなって、同位相で重ねあわされてから、すぐに逆位相で重ねあわされることになる。だから振動数の差が大きいと、同じ時間で比べたらうなりの波形がたかさんできるはず。1 だ。
- $N = |f_1 - f_2|$  より、振動数の差が大きいとうなりの回数が多くなる。うなりの回数が多いってことは、一回当たりの時間は短いはず。だから 1 だ。

## 「振り返り」から

- 最後のうなりめっちゃ納得!! (2 名)
- 実際におんさの音を聞いたので、わかりやすかった。
- 振動数の差が大きいと、1 秒間に聞こえるうなりの回数は多くなる。(11 名)

直前に演示実験、作図を行っていることから、現象の確認自体はできていると思われるが、議論後正答率はあまり伸びなかった。うなりを聴くということと、オシロスコープの画面に表れる波形とを結びつけるのが難しい生徒もいるということなのであろう。

## 10.[生徒実験] 音速の測定

ここまで気柱共鳴の実験や、音の三要素の実験などで、音速は  $V = 331.5 + 0.6t$  という式を使って計算してきた。今回は、この式の検証のような形で実験を行った。しかし、この実験で目指しているのは正確に音速を測定することではなく、波の空間的・時間的なイメージを捉えることである。ウェーブマシンで見ている波の横軸は位置  $x$  だが、オシロスコープでは時間  $t$  である。このイメージが試験明けのドップラー効果の学習で生きてくる。実験についての説明の後、生徒実験を行い、授業を終えた。

## 11. ドップラー効果 (音源の移動), PI:救急車 1・2

中間考査後の授業であったため、テスト返却、席替えを行ってから授業を始めた。

この授業からドップラー効果の学習に入った。まずはじめに動画で、ドップラー効果の振動数の変化、音の高低の変化を確認した。その後、音源が動く場合のドップラー効果についての講義を行い、授業の最後に図 B.12・B.13 の PI を実施した。

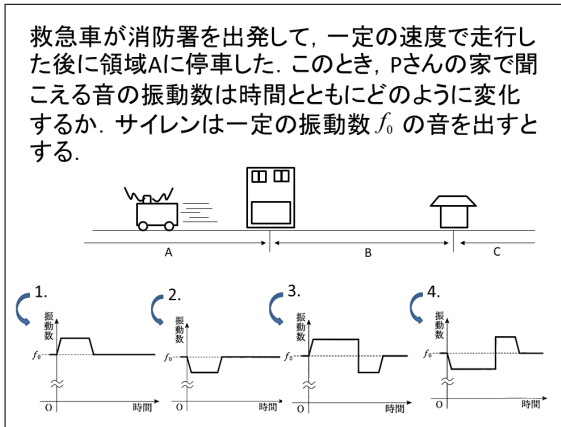


図 B.12: 設問 11 : 救急車 1[110]

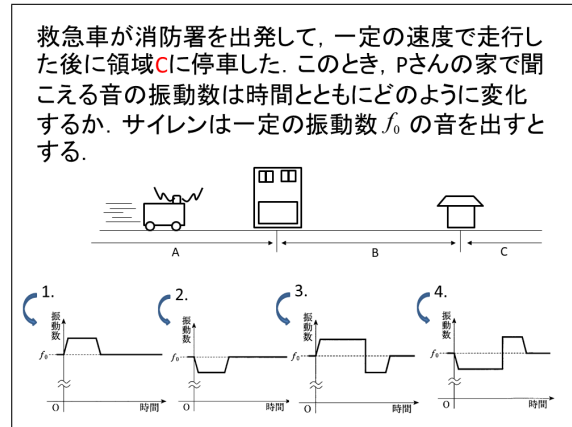


図 B.13: 設問 12 : 救急車 2[110]

表 B.11: 設問 11 : 救急車 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	66.67	100.0	1.00
2B	60.98	95.12	0.87
2C	80.00	95.56	0.78
全体	69.53	97.00	0.90

生徒の討論から

- あの斜めのところ何？
- 遠ざかるんだから、基準の  $f_0$  よりも低くなるはずだ。
- 元々止まっていたところ、 $f_0$  のところから始まって、遠ざかるから小さくなる。
- 一定の速さだから、振動数も一定だ。

「振り返り」から

- $f$  が縦軸のグラフの雰囲気
- 1 番はじめの問のとき、とまったらなんでグラフがもどるのかわからなかったけれど、わかった。
- P から遠ざかっているから振動数が一定？ドップラー効果は通過した時だけなのか？

振動数を縦軸にとったグラフは初めて扱ったが、議論を通して理解することができたようである。救急車は生徒にとって身近な教材であり、音の高低と振動数の大小を音の三要素の実験を思い出しながら考えているようであった。

表 B.12: 設問 12 : 救急車 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	76.19	100.0	1.00
2B	70.73	100.0	1.00
2C	77.78	95.56	0.80
全体	75.00	98.00	0.92

## 生徒の討論から

- 領域 C に止まるってどういうこと？ P さんの家を通り過ぎるということ？
- 今度は近づくんだから、音は高くなるよね。
- あの上下反転するところが良く分からない。

## 「振り返り」から

- ドップラー効果のグラフが急に上がったり、下がったりしているのが意外でした。
- 音源が観測者を通過するときの  $f-t$  グラフ
- 観測者を境に切り替わる。
- グラフの斜めの部分は、加速 or 減速のところ。車は急停車できません。(2名)

観測者を通過する際の音の高低と、グラフの様子とを結びつけるのが難しいようであったが、議論によって解決した。一学期の運動学と同様に、グラフに関する議論の効率は非常に良い。

## 12. ドップラー効果（観測者の移動），PI:霧笛

はじめにシミュレーションで、生徒からの「振り返り」で多かったコメントの中で、全体に共通で理解してほしいことを取り上げた。具体的には、音源の動きに関わらず、音源と観測者の間に入る音波の個数に変化はないことと、音速に変化は起こらないことから、音源が動く場合には波長が変化するということを復習した。また、観測者の速度が音速に等しいとき、音速よりも速いときにどうなるのか、という質問もあったため、同時にシミュレーションを使って確認した。音源の速さが音速よりも速いときに生じる衝撃波の話では、生徒は興味を持って聞いている様子だった。

音源が動く場合のドップラー効果のまとめとして、図 B.14 の PI を実施した。

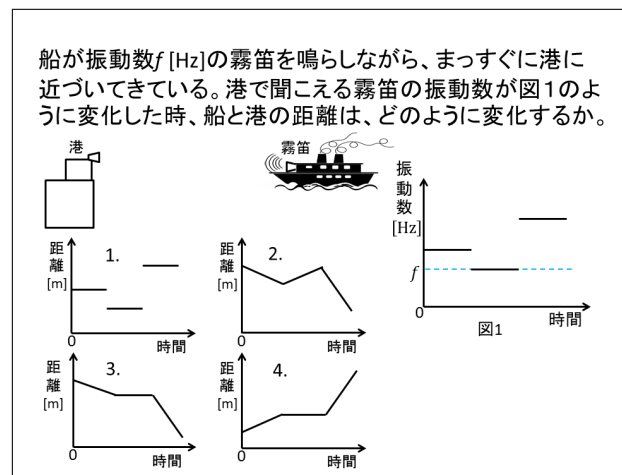


図 B.14: 設問 13 : 霧笛 [110]

表 B.13: 設問 13 : 霧笛

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	63.41	97.56	0.93
2B	62.79	97.67	0.94
2C	53.33	88.89	0.76
全体	59.69	94.57	0.87

## 生徒の討論から

- 図1の真ん中は $f$ なんだから、船は止まっていたってこと。だから選択肢は3か4に絞られる。
- 前後は振動数が大きくなっているんだから、どちらも近づいている。だから3だ。
- 振動数が大きい方が、近づく速度が速いってこと。だからグラフの傾きも急になっているはず。
- 一回振動数下がっているから、遠ざかったということでは？だから2なんじゃないの？
- 問題文で「近づいている」って言うてるけど、近づいているグラフって3だけじゃん。

## 「振り返り」から

- 振動数が変わらない時は，距離が変わっていない。
- 動いているときだけ音の高さかわる。
- 遠くても近くてもドップラー音の振動数は変わらない！大切なのは近づいているか，遠ざかっているかなのだ！！
- はやく近づく→振動数急増，ゆっくり近づく→振動数ゆるやかに増，静止→そのままの振動数が伝わる。(2名)

問題文を「近づいてきている」ではなく「動いている」とするべきであった。この一文から選択肢が絞れてしまう。

この後，観測者が動く場合のドップラー効果と，音源と観測者両方が動く場合についての説明，次回行う実験について説明して，授業を終えた。

## 13.[生徒実験] スピード測定器

実験内容と理論式の導出を簡単に説明した後，生徒実験を行った。ドップラー効果とうなりを利用して，運動物体の速度を測定する実験である。学んだことを演繹的に適用して，実験結果によってその理論を検証する形である。

## 14.[実験分析] スピード測定器，PI:スピード測定器実験・F1レーシングカー

実験分析の後，実験に関連した図 B.15 の PI を実施した。

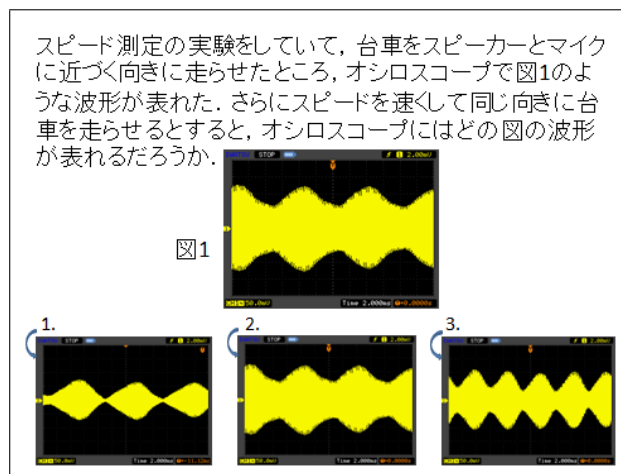


図 B.15: 設問 14 : スピード測定器実験

表 B.14: 設問 14 : スピード測定器実験

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	78.57	100.0	1.00
2B	74.42	97.67	0.91
2C	76.74	95.35	0.80
全体	76.56	98.00	0.91

## 生徒の討論から

- 台車の速度が速くなると、反射する音の振動数がより高くなる。
- 壁で反射した音と台車で反射した音の振動数の差が大きくなるから、うなりの回数が増える。だから、一つ一つの波長が短くなる。(←「それって波長?」と聞くと、「波長じゃなくて、時間だ」)
- 台車が速くなると、なんとなくうなりの数が増えそうな気がする。だから3だ。

## 「振り返り」から

- クリッカー 1 問目は  $f$  一定で、 $\frac{V+v}{V-v}$  が大きくなるから振動数  $f$  も大きくなる。
- 図を  $N_1 = \frac{2v_1}{V-v_1} f_0$  とすると、速くした時の式は上式の何が変わるのか!? 速さ  $v$  だけ! 速くするという事は  $v_2 > v_1$  なので、 $N_2 = \frac{2v_2}{V-v_2} f_0$  は 1 より分母が小さく、分子が大きい。よって  $N_1 < N_2$  なので、おもいが図より多い 3 が答え。(5 名)
- $v$  (台車の速度) が大きくなると、 $f$  が大きくなり、 $N$  (うなりの回数) が増える。(7 名)
- なんか理解できて嬉しい!!! I くんありがとう!!!!
- オシロスコープの横軸は time うなりの周期は反射する波長と現在発生する波長とのもの。
- 速さを大きくすると、その分だけ周期が縮まる。ってことですかね先生。良く分かん。

論理的に、いくつものステップを踏んで考えなければならない問題だが、実験をしている分考えやすく、正答率も高かった。しかし生徒の中には、「台車の速度が速くなれば、うなりが増える」という実験結果だけを使って議論している者もあり、「なぜそうなるのか?」という問いには、うまく答えられていなかった。生徒には、論理的に相手を説得するように説明するという事を、常に意識させる必要があるだろう。

このあと、観測者に対して斜めに音源が動く場合のドップラー効果の説明をして、図 B.16 を実施した。

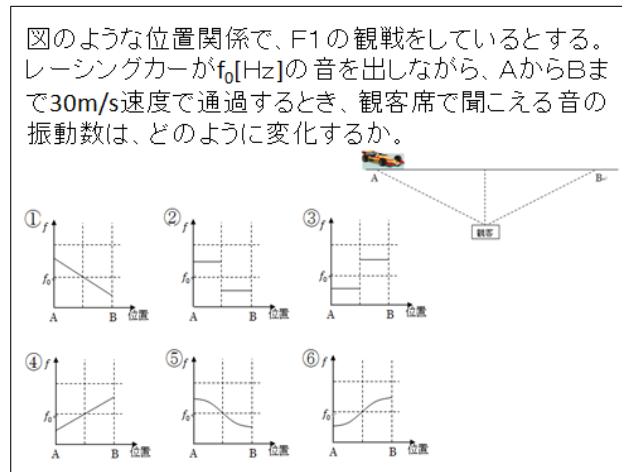


図 B.16: 設問 15 : F1 レーシングカー [107]

表 B.15: 設問 15 : F1 レーシングカー

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	38.10	100.0	1.00
2B	41.86	97.67	0.96
2C	32.56	74.42	0.62
全体	37.50	91.00	0.86

生徒の討論から

- 近づいて、遠ざかるのだから、右下がりになるのは確か。だから 1 か 5 だろう。  $\theta$  が変化して、それに伴って  $\cos \theta$  が変化する。それによって振動数も変化する。  $\cos \theta$  はグラフを考えるとわかるけど、曲線に変化するのだから、振動数もそう変化するはず。直線では変化しないだろうから 5 だ。
- 球面波の図とか、波長が短くなった図とか、この前考えてた。それを、角度を変えてやればいいのかと思う。

## 「振り返り」から

- $\cos \theta$  に左右される  $\rightarrow f$  はなめらかに変化する。(10名)
- 音源が斜めに動く場合、 $\theta$  の値が常に変化し、加えてその変化の割合が一定でないので注意が必要だと思った。
- レーシングカーの問題は、極限の考え方でやるとよくわかった。
- 極限っておもしろい。無限遠はイメージしづらく、あまり馴染みがないが、F1 の映像から確かにその考えが現実に即していることがわかる。
- レーシングカーの動画 さいごすごくわかりやすかったです。
- 角度は遠ければ遠いほど、変化率が小さくなるので、接線の傾きは 0 に近づく。
- クリッカーの漸近の話が良くわからなかった。
- 2 つ目のクリッカーで、「はなれていくから右下がり」という意見があったけど、その理論で答えを出すなら、まず右上がりになるべきだと思った。←これは合っているのか、間違っているのか??  $\cos \theta$  で  $\theta$  の角度で考えると、ちゃんと答えは出る。

議論の時間を長めに取った（活発に議論していたように思う）。生徒に意見を紹介してもらい、正解発表と解説をした後に、レーシングカーが目の前を通過する動画を見せた。極限のような考え方と、その時の振動数のグラフの様子とが、動画によって実感を伴ってつながった様子が、「振り返り」から伺えた。

最後に、風が吹いた場合のドップラー効果について説明し、授業を終えた。

## 15,16.[生徒実験] 水波・光波の実験

波と呼ばれるものには、共通の性質があり、それは反射・屈折・回折・干渉である。それらを実際に観察することと、光が波であるということを、実験的に確かめよう、という発問で、実験を二時間続けて行った。

## 17. 反射・屈折・回折, PI:屈折

波の反射の現象の確認（動画）、反射の法則の説明、「鳴き竜」の動画の観察、波の屈折の現象の確認（動画）、屈折の法則の説明、波の伝わる速さの変化のイメージ映像の確認といった内容の講義の後、確認問題として図 B.17 の PI を実施した。

表 B.16: 設問 16 : 屈折

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	73.17	100.0	1.00
2B	59.00	95.45	0.89
2C	69.77	95.35	0.85
全体	67.19	97.00	0.91



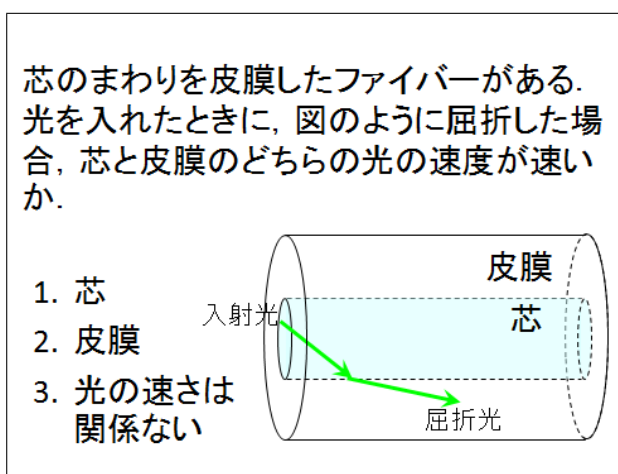


図 B.17: 設問 16 : 屈折 [107]

## 生徒の討論から

- 左右でボートを漕いでいる人を考えれば良い。皮膜には右側の方が先に入って、その時一生懸命漕ぐと、図の方向に曲がる。一生懸命漕いでるんだから、進む速度は速くなる。
- みんなが並んで走ってたとして、もし皮膜の方が速いと仮定すれば、Uさんから順番に速く走ることになる。そうすると、みんなが向く方向が変わるでしょ？

## 「振り返り」から

- $\sin \alpha < \sin \beta \Leftrightarrow v_\alpha < v_\beta$
- 光波の速度と屈折の関係がよくわかった。
- 「屈折は 手漕ぎぼをとの 原理だよ」
- クリッカーのやつ、芯の部分がやすりっていう考え方できますか？

単純な知識の確認問題であった。直前の講義で、波の伝わる速度が遅くなる場合の屈折について勉強していたため、その逆の曲がり方をしていることから、すぐに答えが出せてしまう問題である。

このあと、回折現象について、海岸の消波ブロックの隙間で回折した波が砂浜を半円形に浸食している写真の観察、動画による現象の確認、障害物があり姿が見えなくても声が聞こえてくることを、音波と光波の波長の違いから説明し、授業を終えた。

## 18. 波の干渉, CQ:水波の干渉 1・2, PI:回折・音の干渉

はじめに、前回の復習として図 B.18 の PI を実施した。

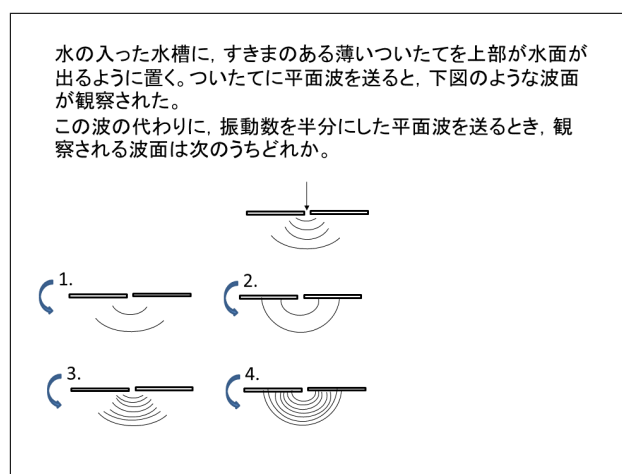


図 B.18: 設問 17 : 回折 [110]

表 B.17: 設問 17 : 回折

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	46.00	87.18	0.76
2B	58.14	93.02	0.83
2C	20.93	18.60	-0.03
全体	42.00	65.60	0.41

## 生徒の討論から

- 振動数半分になると、どうなるの？
- 波長が二倍になるんだ。そうすると、すき間に対して波長が長くなるから、よく回折する。

## 「振り返り」から

- 振動数小→波長長→回折しやすくなる→（回り込む）幅大（2名）
- 最初の回折の問題を論理的に考えて正解できた。
- 最初のクリッカーの問で回折がよくわかった（3名）

PI では物理的な論理を積み重ねることで正答まで辿り着けるべきであり、実験事実を知らなければ解決できないような問題にはすべきではない。この問題では、最終的に正答を導くためには、実験事実を知らなければならず、あまり適切な問ではなかった。C 組の PI 効率が負になってしまったというのも、前回の授業内容の理解、定着が不十分であり、かつ、議論でも解決できない問であったためであると思われる。

この PI のあと、波の伝わる速さの異なる境界面に波が入射したとき、入射波の一部が反射、一

部が屈折する様子を，水槽の半分に水を入れ，水と空気の境界面にレーザー光を入射し，その様子を観察させた。生徒は席を移動して実験を観察するなど，興味を持って取り組んでいた。

そして，二波源の水波の干渉の様子を動画で確認し，腹線と節線の作図練習，図 B.19・B.20 の CQ を二問続けて実施した（正答率はそれぞれ 74.4%，71.2%）。

点波源 $S_1$ と $S_2$ を同位相で振動させ、波長1cmの水波を発生させる。 $S_1$ から3cm、 $S_2$ から5cmの距離に点Pがあり、 $S_1$ と $S_2$ で同時に発生した波がPに伝わるまでの時間を考える。 $S_2$ から出た波は $S_1$ から出た波よりちょうど□周期遅れて届く。

1. 0.5周期    2. 1周期  
3. 1.5周期    4. 2周期  
5. 2.5周期    6. 3周期  
7. 遅れない

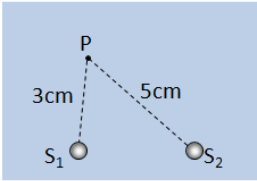


図 B.19: CQ : 水波の干渉 1[107]

2つの点波源 $S_1$ と $S_2$ を同位相で振動させ、波長1cmの水波を発生させる。 $S_1$ から3cm、 $S_2$ から5cmの距離にある点Pがある。このとき点Pでは2つの波は□。

1. 常に強めあう  
2. 常に弱めあう  
3. 強めあったり弱めあったりする

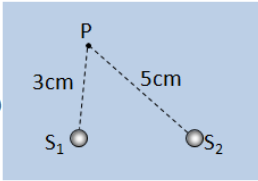
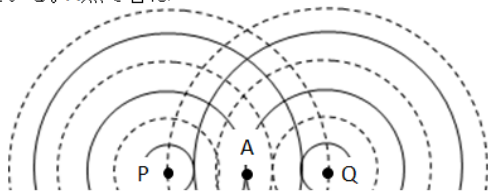


図 B.20: CQ : 水波の干渉 2[107]

授業の最後に，図 B.21 の PI を実施した。これは過去のセンター試験問題 [113] を一部修正したものであり，「これだけではわからない」が答えである。問題の図だけにとらわれるのではなく，音波とはどのような波であるのかということ，教育実習生の授業で扱った音波の二つの考え方を思い出し，議論して欲しかったので出題した。議論後の回答の後には，実際に実験室の左右のスピーカーから一定音を出し，生徒に実験室を歩かせ，音波の干渉による音の強弱を体験させてから，解答解説に移った。

同じ振動数，同位相で音波を発生させている二つのスピーカーP，Qがある。実線，破線は位相が逆になっている。A点で音は



1. 腹だから大きく聞こえる  
2. 節だから大きく聞こえる  
3. 小さく聞こえる  
4. これだけではわからない

図 B.21: 設問 18 : 音波の干渉

表 B.18: 設問 18 : 音波の干渉

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	5.13	2.55	-0.03
2B	2.33	0.00	-0.02
2C	4.66	4.66	0.00
全体	4.00	2.40	-0.02

## 生徒の討論から

- 山と山，谷と谷がぶつかるんだから，振動が激しくて，音は大きいだろう。
- 音が大きいところって，腹？節？どっちだ？わかんなくなっちゃった。
- 音が大きいって，どういうことだっけ？圧力変化がどうか…。
- これだけじゃわからないんじゃない？どっちの話をしているのか，わかんないよ？

## 「振り返り」から

- 音波の性質については理解度が比較的良好だと思うが，波全体ではもっと復習が必要だ。
- 常に空気分子の変位なのか，圧力変化なのか考える必要がある。(4名)
- 最後のクリッカー問題にやられた。勝手に変位として捉えるのは良くない。よく問題文を読む。
- 中間前にやった2つの考え方のどちらを使っているかわからないから，答えが4であることを理解できた！
- スピーカーの音の大きさが場所によって違って感動した。(5名)
- 最後の問はびっくり！でも説明を聞いて確かにと納得できた。
- 自分で考えたことを信じてクリッカーの問題を回答すべき。
- 議論では，どっち視点なんだろうねって話に出てきてたのに！
- 問題文の意味がわからない。
- 同位相は，圧力変化的には逆位相になる？(3名)

実験の時には、「あーすごい！ほんとに音が大きかったり小さかったりする！」「ここ！大きいよ！」「あんまりわからない…。」「真ん中が大きかったよ！（床を指さして）その金属の線の上が真ん中で大きい！」といった声が聞こえ，興味を持って実験に取り組んでいた。

解答解説では生徒から、「えー，なんで？」「やっぱりそうなんじゃん！変えなきゃ良かった！！」といった驚きの声上がり，センター試験の問題の類題であることを告げると，「問題が意地悪だ！

これはひっかけだ！」という声が聞こえた。

生徒の「振り返り」にもあったが、この設問の一つの目的である、自分の意見を持って議論することの重要性を伝えることができたと思われる。また、音波の二つの考え方を復習する機会にもなったのではないだろうか。授業後に質問に来た生徒もいたことや、「振り返り」でこの問題へのコメントが多かったことから、生徒にとって強く印象に残る問題であったようである。

## 20. ヤングの実験, PI:ヤングの実験 1

はじめに水波・音波の干渉の復習と、ヤングの実験の導入として、シミュレーションでその様子を観察した。そして、水波と同様に、光はスリットで回折を起こし、様々な方向へ広がって進み、互いに干渉し、強め合ったり打ち消し合ったりしていることを強調した。

ヤングの実験について講義をした後、授業の最後に図 B.22 の PI を実施した。

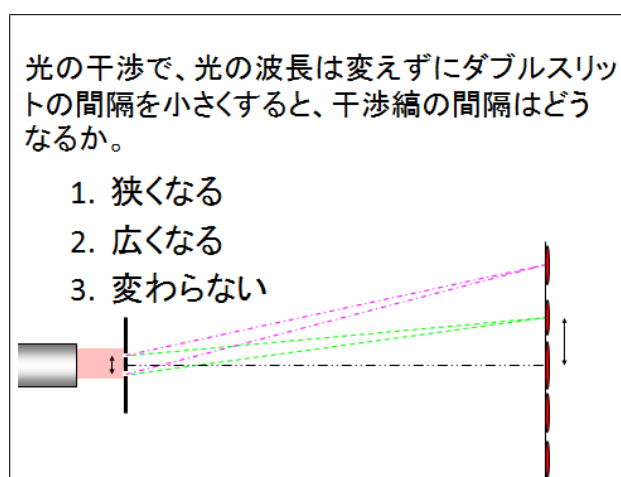


図 B.22: 設問 19 : ヤングの実験 1[107]

表 B.19: 設問 19 : ヤングの実験 1

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	66.67	97.62	0.93
2B	50.00	83.33	0.67
2C	53.00	80.00	0.57
全体	67.00	98.00	0.93

### 生徒の討論から

- この問題ってどういうこと？あの式を覚えればいいんだ！

## 「振り返り」から

- $d$  が小さくなる  $\rightarrow \Delta x$  が大きくなる (6 名)
- スリットのすきまが大きい  $\rightarrow$  明線の間隔は小さくなる。狭いほど広がりが大きくなる (9 名)
- 授業って聞いたらわかるんですね。クリッカーの問題が初めてちゃんとわかってあった。
- スリットの幅を狭くすると経路差を一波長にするには傾きが急になる。干渉縞の間隔は広がる。(3 名)

演示実験で正解発表とした。生徒は主に式を用いて友達に説明をしていた。

21. 単スリットの回折干渉，回折格子による回折干渉，PI:ヤングの実験 2・回折格子

はじめに，前回実施した図 B.22 の PI の補足説明をしてから，ヤングの実験のまとめとして，図 B.23 の PI を実施した。

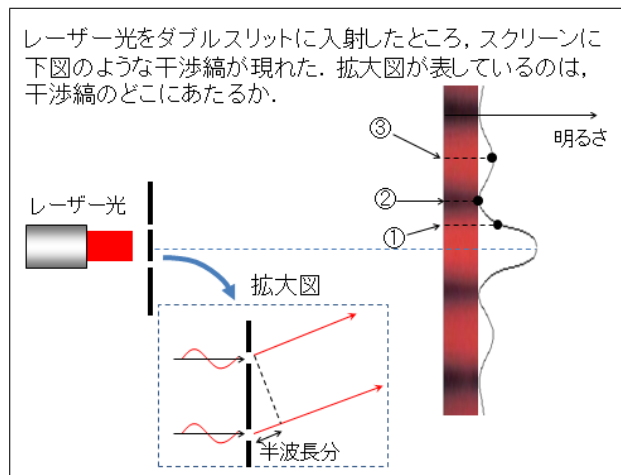


図 B.23: 設問 20 : ヤングの実験 2

表 B.20: 設問 20 : ヤングの実験 2

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	71.43	97.62	0.92
2B	67.44	97.67	0.93
2C	64.44	82.22	0.50
全体	67.69	92.31	0.76

生徒の討論から

- どういう状況？いきなり曲がっちゃうの？
- 経路差が波長の半分だから，弱め合いだね。
- あのグラフ何？
- 拡大図が表しているのは何？
- あの方向にだけ光が進むってことですか？

## 「振り返り」から

- 図を描いてみると同位相か逆位相かがわかりやすくなる。
- 干渉縞の暗いところは逆位相 明るいところは同位相の光の波
- 経路差が一波長分ずれると明線，半波長分だと弱め合うから暗線。理解が深まった。

解説の場面で、3 は経路差が一波長，1 は  $1/4$  波長，ということを説明すると，うなずいている生徒が何人か見られた。スリットを通った後，光は回折によって広がる。そのうち特定の方向について考えるというのがこの問題だが，生徒は図に描かれている方向にしか光が進まないと思っただけであったようである。問題を提示し，説明したときにこのことを強調したが，それだけでは伝わらなかったようである。光の回折現象自体をイメージできていないのだろう。

このあと，単スリットと回折格子の演示実験，理論の説明を行い，授業の最後で図 B.24 の PI を実施した。

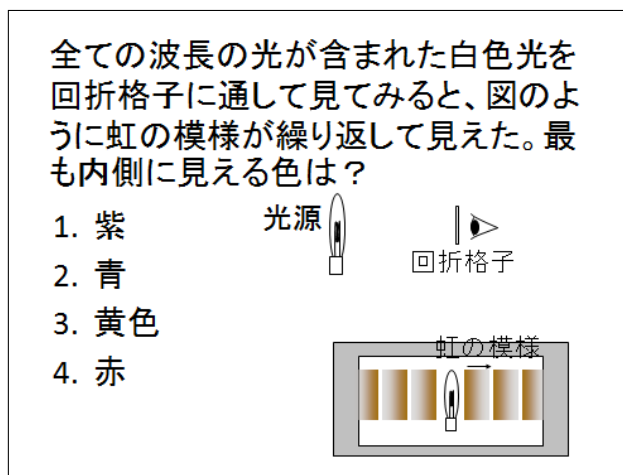


図 B.24: 設問 21 : 回折格子 [107]

表 B.21: 設問 21 : 回折格子

	議論前正答率 (%)	議論後正答率 (%)	PI 効率
2A	69.05	97.62	0.92
2B	58.14	83.72	0.61
2C	48.89	73.33	0.48
全体	58.46	84.62	0.63



## 生徒の討論から

- 内側ってどっち？
- $l$  と  $d$  が一定で、 $\lambda$  が変化するんだから…
- 波長長いほうが、たくさん角度つけなきゃだめでしょ？
- 内側から短いのが来て、赤まで来たら、また次の虹のところへとんで、紫から…
- 紫が内側なのは確かなんだけど、うまく説明できない…

## 「振り返り」から

- 回折格子で色がわかれて見えるのは  $\lambda$  の違いからだというのが、数式だとよくわかる。
- $\lambda$  が小さいほど  $x$  が小さい、 $x$  が小さいほど中心に近い → 紫!!! (3名)
- $\lambda$  が短い方が  $\theta$  も小さくて済む。
- 最後のクリッカーの問題が、作図してみるとよくわかった。
- 白色光の実験では、レーザーの実験の色（波長）違いバージョンが同時に起きている!
- 光ってよくわからない。

数式による説明は容易に納得できたようだが、図による説明の理解はやはり難しそうであった。授業後、何人かの生徒が質問にきた。経路差が一波長になる角度は、波長によって違うことに関する質問はもちろんのこと、「なぜ赤はあの方向にしか進まないのか」といった質問もあった。やはり回折現象の理解が不十分であるためだと思われる。また「振り返り」から、「紫の方が波長が短く、あまり回折しないから虹の内側に来る」と考えている生徒が何人かいるようであった。これに対しては、「振り返りプリント」でフォローした。

以上が 2 学期波動分野の授業の詳細である。



## 付 録 C 公立高校での授業実践の詳細

### 運動学授業（6 時間）

運動学授業 1 時間目は、中学校で学習する速度の定義を簡単に確認した後、人の歩行運動の  $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフについて ILDs の形式で授けた。演示実験は運動センサ（PASCO 社製）を用いた。教材は文献 [42]などを参考にして作成した。ここでは  $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフの関係と、速度の向きを正負の符号で表すことを扱った。生徒は  $x-t$  グラフの理解は問題なかったが、 $v-t$  グラフの理解には困難を感じているようであった。

2 時間目は、記録テープと記録タイマーを使って水平面と斜面を走る力学台車の運動を測定する生徒実験を行った。3 時間目はその実験結果の分析をした。実験データの処理としては、5 打点ごとにハサミで切った記録タイマーを台紙に貼りつけることで  $v-t$  グラフを作成させ、それを基に力学台車の運動の特徴を考察させた。 $v-t$  グラフの面積が変位、 $x-t$  グラフの傾きが速度をそれぞれ表すことを講義とクリッカークエスチョン（CQ、議論はせずに一回だけクリッカーで選択肢問題に解答する）で扱った。授業の最後には、加速度を簡単に扱った。

4~6 時間目は、自由落下運動を扱った。ピンポン玉と鉄球を教卓の上に乗って同時に落下させる演示実験や、真空状態での落下運動の映像の観察を通して、落下物体の運動は質量によらず同じであることを確認した。また、運動センサでバレーボールの落下運動を測定し、自由落下が等加速度運動であることを確認し、 $y-t$  グラフ、 $v-t$  グラフ、 $a-t$  グラフの形と相互の関係を確認した。その後、導出した式を使っての反射時間測定の実験を行った（自由落下する定規をキャッチし、落下距離を測定し、式からキャッチするまでにかかった時間を算出する）。

### 運動学 形成的テスト（1 時間）

グラフの理解を問う問題を全部で 5 問実施した。各問題について、ARS 個別学習票で各生徒にフィードバックした、出題の意図、各選択肢を解答した生徒への学習コメント、そして各クラスの解答結果についてまとめる。なお、各クラスの選択肢別解答率については、小数第 3 位で四捨五入して表示している。

#### 出題の意図

物体の運動とグラフを結びつけられるようになって欲しかったので出題した。

#### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. A さんは原点 O から右に（正の向きに）1m に立っていたので  $t=0$  で正の値から始まる。
2. 「ゆっくり」と「素早く」が正しくグラフで表現されていないので間違い。「ゆっくり」は  $x-t$  グラフでは傾きが小さく、「素早く」は大きくなっていなければならない。
3. 正解 右に 1m の位置からスタートしたので、 $t=0$  では  $x>0$  の位置から始まる。ゆっくりと右向きに歩いたので正のゆるやかな傾きの直線、最後に素早く左に歩いたので負の急な傾きの直線。

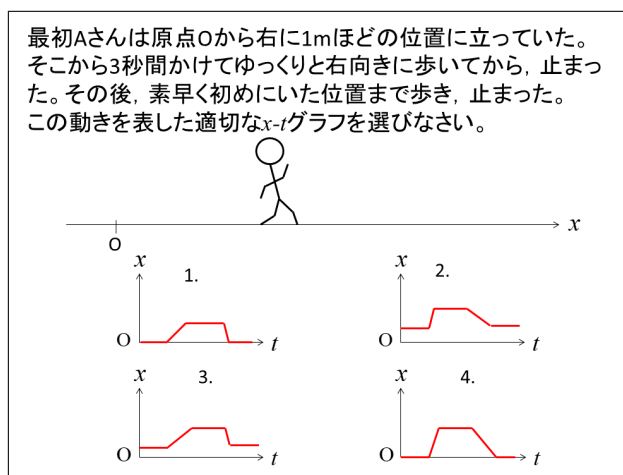


図 C.1: 形成的テスト第1問

4. 最初、Aさんは原点Oから右に（正の向きに）1mのところ立っていたのだから、 $t=0$ の位置は正の値から始まる。「ゆっくり」は $x-t$ グラフでは傾きがゆるやか、「素早く」は急。

表 C.1: 形成的テスト 問1  $x-t$  グラフ

%	A	B	C	D	E	全体
1	41.7	33.3	28.6	54.8	30.4	37.8
2	22.2	2.56	28.6	9.68	0.00	13.4
3	30.6	61.5	25.7	25.8	65.2	40.9
4	5.56	2.56	17.1	9.68	4.35	7.93

### 解答結果について

初期位置を原点に選ぶ誤答（選択肢1）が多かったものの、「素早く」や「ゆっくり」という運動の特徴と、 $x-t$ グラフの傾きとの関係は正しく理解できていた生徒が多いようである。

### 出題の意図

$x-t$ グラフと $v-t$ グラフを相互に行き来できるようになって欲しかったので出題した。

### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 速度の符号に注意しよう。
2.  $x-t$ グラフと $v-t$ グラフを区別できていない。縦軸にとっている物理量が「位置」と「速度」ではグラフの形は違う。同じ運動でも見方や表し方が変わっている。
3. 正解  $x-t$ グラフの傾きが速度を表している。前半は正で一定の傾き、すなわち正の一定の速度である。後半は負で一定の傾き、すなわち負の一定の速度である。
4. 「形が似ているから」と答える人は多い。 $x-t$ グラフの傾きは速度。前半は右上がりの直線、正で一定の傾き、すなわち正の一定の速度。後半は右下がりの直線、負で一定の傾き、負の一定の速度。

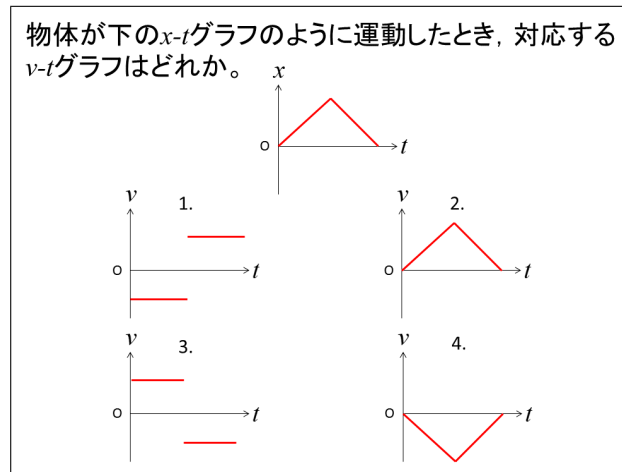


図 C.2: 形成的テスト第 2 問

表 C.2: 形成的テスト 問 2  $v-t$  グラフ

%	A	B	C	D	E	全体
1	11.4	15.4	3.03	3.23	21.7	10.6
2	37.0	51.3	27.3	29.0	9.00	32.9
3	43.0	25.6	48.5	48.4	65.2	44.1
4	8.57	7.69	21.2	19.0	4.35	12.4

### 解答結果について

$x-t$  グラフと同じ形の  $v-t$  グラフを選ぶ誤答をしている生徒が多い。グラフの縦軸が変わるということが、同じ運動を違う視点で捉えることだということが理解できていなかったのかもしれない。

### 出題の意図

$v-t$  グラフの面積が変位であることを理解して欲しかったので出題した。面積が負の値になる場合には、負の変位となることを理解して欲しかった。

### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1.  $v-t$  グラフの面積の大きさが、変位の大小になることが理解できていない。時刻  $t_1$  から  $t_2$  で左向きに変位することに気付いているのは良い。
2. 正解 左半分（正の面積）の方が、右半分（負の面積）より大きい。よって O 点から正の向きへの変位（Q 点まで到達）に比べて、負の向きへの変位は小さいので P 点が正解。
3. 時刻  $t_1$  のとき Q 点にいる。そこから時刻  $t_2$  まで負の速度を持っているので Q 点から左向きに変位する。よって答えは P 点または O 点になり、 $v-t$  グラフの面積の大きさを比べれば、P 点が正解。

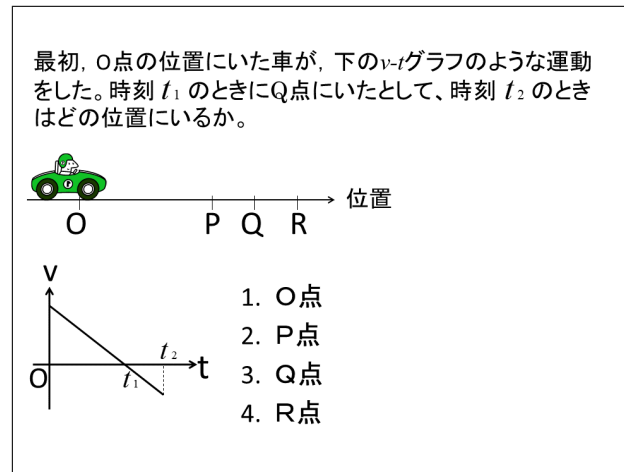


図 C.3: 形成的テスト第3問 [107]

4.  $v-t$  グラフより時刻  $t_1$  以降は速度が負で、つまり左向きに変位する。 $v-t$  グラフの面積を比べれば、左半分の三角形の面積（正の面積）の方が、右半分（負の面積）より大きいので P 点が正解。

表 C.3: 形成的テスト第3問

%	A	B	C	D	E	全体
1	5.71	5.13	6.25	9.68	0.00	5.63
2	57.0	64.1	50.0	41.9	74.0	56.9
3	3.00	7.69	9.38	19.4	0.00	8.13
4	34.3	23.1	34.4	29.0	26.1	29.4

#### 解答結果について

選択肢4の誤答を解答した生徒が多い。 $v-t$  グラフの面積が変位であることは理解できているのか（ただし負の変位であることは理解できていない）、または  $v-t$  グラフを読み取り、車が減速し、一瞬速度がゼロになってから再び加速していることに気付いたのか、いずれかの理由であろう。

#### 出題の意図

$x-t$  グラフの傾きが徐々に小さくなっているのので、電車は減速している。グラフの変化率に注目する考え方を身につけて欲しいと考えた。

#### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. グラフが右上がりになっているので加速していると考えたのでしょうか？自動車がブレーキをかけて減速しながら前にも進みますね。ある時間あたりに移動する距離が減っているのので2が正解です。

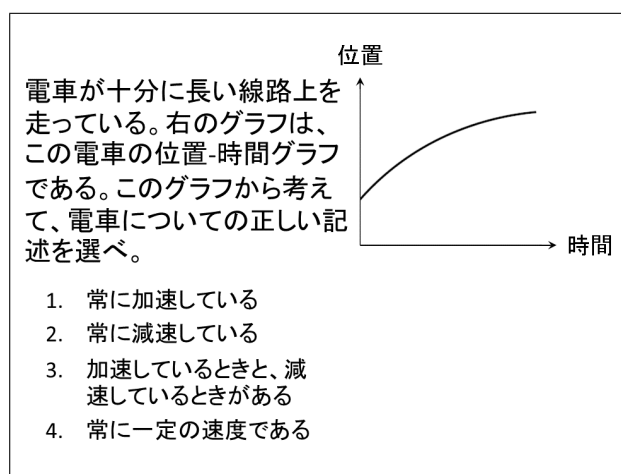


図 C.4: 形成的テスト第 4 問 [22]

2. 正解 ある時間あたりの距離が減っていつているので、減速しながら進んでいることとなりますね。
3. この選択肢の意味は、進む距離が増えたり減ったりすることですから、グラフはクネクネした波線になりますね。ある時間あたりに進む距離が減っていつているので 2 が正解。
4. この選択肢の意味は、ある時間あたりに進む距離が一定だということです。よって距離-時間グラフは直線になるはずですが、よって×。ある時間あたりに進む距離が減っていつているので 2 が正解。

表 C.4: 形成的テスト第 4 問

%	A	B	C	D	E	全体
1	40.0	41.0	46.9	43.3	43.5	42.8
2	26.0	12.8	15.6	20.0	26.0	19.5
3	23.0	28.2	25.0	30.0	21.7	25.8
4	11.4	18.0	12.5	7.00	8.70	12.0

#### 解答結果について

選択肢 1 の誤答を解答した生徒が多い。加速と物体の時々刻々の変位の変化とをうまく結びつけられていないようである。グラフが右上がり＝加速という考えの生徒もいるようだ。 $x-t$  グラフの傾きが初めは急だったので加速、後半はなだらかだったので減速という理由で選択肢 3 の誤答を解答した生徒もいた。

#### 出題の意図

物体の運動とグラフを結びつけられるようになって欲しかったので出題した。

#### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

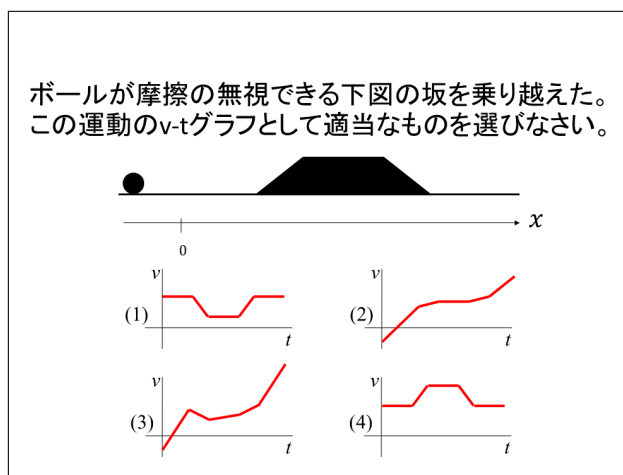


図 C.5: 形成的テスト第 5 問 [114]

- 正解 水平なレールを走っている時は速度一定で横軸に平行な直線。坂を登るときは一定の割合で減速するので負の傾きの直線、坂を下るときには一定の割合で加速するので正の傾きの直線となる。
- $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを区別できていない。(2) はこの運動の  $x-t$  グラフの形になっている。縦軸の物理量が位置なのか速度なのかを注意しよう。
- $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを区別できていない。二つのグラフの考え方が混ざっている。縦軸の物理量が位置なのか速度なのかを注意しよう。
- 問題に出てくる坂の形を意識し過ぎている。 $v-t$  グラフの問題なので、大事なものは「物体の時々刻々の速度（どちら向きにどれだけの速さ）で運動しているか」である。

表 C.5: 形成的テスト第 5 問

%	A	B	C	D	E	全体
1	80.0		40.6	50.0	87.0	63.3
2	9.00		21.9	16.7	0.00	12.5
3	3.00		25.0	30.0	8.70	16.7
4	8.57		12.5	3.00	4.35	7.50

#### 解答結果について

B 組では時間の関係で実施することができなかった。選択肢 2 や 3 といった縦軸を位置  $x$  と誤解した誤答がややあったものの、多くの生徒が正答できた。斜面の上りでは減速、下りでは加速する運動の様子を  $v-t$  グラフで正しく理解できたようである。

#### 動力学授業（6 時間）

動力学授業 1 時間目は、ゴムひもに引かれて運動する台車の運動について、 $v-t$  グラフを予想し、グループで議論し、運動センサを用いた演示実験を観察することを通して、力と加速度の間



に定性的関係を見出す授業を行った。ゴムひもの一端は台車に、他端は手で持ち、はじめ台車を手で押さえて止めておく。そして、台車を押さえていた手を離してからは、ゴムひもを持っていた手は動かさず、台車がだんだん縮んでいくゴムひもに引かれて運動するようにする。ほとんどのグループで正しい  $v-t$  グラフを予想することができていた。その後、 $v-t$  グラフの形とゴムひもの伸び縮み（台車に加わる力の大きさに関係）を比較することで、力と加速度の定性的関係に気付かせた。生徒の中には、「ゴムが完全に緩んでから、その力が残っている分だけ、少しだけ加速する」と説明している生徒がおり、インパタス的な考え方を持っていることが伺えた。

2・3 時間目は、力と質量と加速度の定量的な関係を見出すための生徒実験と、その実験結果の分析による運動方程式の導出、そして運動方程式を使って考える問題についての PI を実施した。生徒実験は力学台車に輪ゴムを引っ掛け、伸びを一定に保ったまま引っ張り、それを記録タイマーで測定し、 $v-t$  グラフを描き、分析するといったものである。輪ゴムの本数を増やしたり、おもりを乗せて質量を変えたりしながら、力学台車に生じる加速度との定量的な関係を考察させた。PI は、ばねや定力装置に引かれる力学台車の運動と加わる力を問う問題を出題し、議論させた。

4・5 時間目は、前回に学習した運動方程式を使って、自由落下や放物運動など様々な落下運動で物体に加わる重力について PI で議論した。まず中間テスト前学習した、自由落下が等加速度運動であることを復習し、それと運動方程式とから、落下物体にはたらく重力の大きさは質量に比例し、落下している間に大きさは一定であることを確認した。そして運動センサでの測定や動画解析を通して、鉛直投射や水平投射、斜方投射でも重力のみが加わっていることを確認した。

6 時間目は運動の第 3 法則を取り上げた。手押し相撲を例にして、力が二物体の相互作用であることと、作用があれば必ず反作用が存在すること、そして作用と反作用が主語と目的語を入れ替えた関係（「P が Q を押す力」の反作用は「Q が P を押す力」）になっていることを教師から説明した後、作用と反作用の大小関係について PI を行った。二台の台車に力センサを設置し、速度や質量の条件をいろいろに変えながら繰り返し衝突させ、互いに及ぼし合う力の大きさを測定し、グラフ化し、作用と反作用の大きさは常に同じであることを確認した。

#### 動力学「形成的テスト」(1 時間)

運動の第 1 法則 2 問、第 2 法則 3 問、第 3 法則 2 問、力（主に重力）3 問の合計 10 問を実施した。なお授業時間数の関係で、動力学の「形成的テスト」は A, D, E 組の 3 クラスだけでの実施となった。

輪ゴムの伸びを一定に保って台車を引っ張り続ける。台車はどのような運動をするか。

1. ずっと同じ速さで動く
2. はじめのうちはどンドン速くなるが、すぐに一定の速さで動く
3. 引っばっている間中、どンドン速くなる

図 C.6: 形成的テスト第 6 問

## 出題の意図

力が加速度を生じさせることを確認してもらいたかったので出題した。

## 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 力が一定＝速さが一定と考えていませんか？力は加速度を生じさせるものであることに注意。力が働くと加速度が生じます。つまり台車はどんどん加速します。
2. 力は加速度を生じさせるものです。輪ゴムの伸びを一定に保って引っぱり続けるので加速度は生じ続けます。
3. 正解 力は加速度を生じさせるものでしたね。

表 C.6: 形成的テスト第 6 問

%	A	D	E	全体
1	63.9	61.5	42.9	57.8
2	27.8	11.5	23.8	21.7
3	8.33	26.9	33.3	20.5

## 解答結果について

選択肢 1 の誤答を解答している生徒が、選択肢 3 の正答を解答している生徒よりも多い。「力は速度を生み出す」という誤概念を持っている生徒が非常に多いことがわかる。また、選択肢 2 の誤答を解答している生徒も多い。静止しているところから台車は走り始めると考え、始めは加速し、力の大きさに応じた速さに落ち着くと考えているようである。

輪ゴムの伸びを一定に保って台車を引っぱり続ける。輪ゴムが1本のときに生じる加速度に比べて、2本のときに生じる加速度は、

1. 2倍
2. 変わらない
3. 2分の1
4. その他

図 C.7: 形成的テスト第 7 問

## 出題の意図

力と加速度が比例関係にあることを確認してもらいたかったので出題した。

## 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 正解 力と加速度は比例関係にありましたね。

2. 力と加速度は比例関係にありました。輪ゴムが2本になる＝台車に働く力が2倍になる＝生じる加速度が2倍になる、のですね。
3. 力と加速度は比例関係にありました。輪ゴムが2本になる＝台車に働く力が2倍になる＝生じる加速度が2倍になる、のですね。
4. 力と加速度は比例関係にありました。輪ゴムが2本になる＝台車に働く力が2倍になる＝生じる加速度が2倍になる、のですね。

表 C.7: 形成的テスト第7問

%	A	D	E	全体
1	47.2	61.5	71.4	57.8
2	47.2	34.6	19.1	36.1
3	5.56	3.85	9.52	6.02
4	0.00	0.00	0.00	0.00

#### 解答結果について

A組では選択肢2の誤答を解答した生徒が、選択肢1の正答を解答した生徒と同じ割合だけいた。「輪ゴムの伸びが一定ならば、速度も一定」といった考え方をしている生徒が多いようだった。「線形応答の誤概念」を持っているようにも思える。運動方程式を適用して考える問題であることに気づけていないのかもしれない。

輪ゴムの伸びを一定に保って台車を引っ張り続ける。台車が1台のときに生じる加速度に比べて、2台のときに生じる加速度は、

1. 2倍
2. 変わらない
3. 2分の1
4. その他

図 C.8: 形成的テスト第8問

#### 出題の意図

質量と加速度が反比例関係にあることを確認してもらいたかったので出題した。

#### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 質量と加速度は反比例関係にありましたね。台車が2台になる＝質量が2倍になる＝生じる加速度が2分の1になる、のですね。

2. 質量と加速度は反比例関係にありましたね。台車が2台になる＝質量が2倍になる＝生じる加速度が2分の1になる、のですね。
3. 正解 質量と加速度は反比例関係にありましたね。
4. 質量と加速度は反比例関係にありましたね。台車が2台になる＝質量が2倍になる＝生じる加速度が2分の1になる、のですね。


表 C.8: 形成的テスト第8問

%	A	D	E	全体
1	27.8	23.1	0.00	19.3
2	30.6	26.9	4.76	22.9
3	38.9	50.0	95.2	56.6
4	2.78	0.00	0.00	1.20

#### 解答結果について

A, D組に「質量が大きいほうが勢いよく動くから」という理由で選択肢1, 「動きづらさを決めるのは摩擦のみで質量は無関係」という理由で選択肢2の誤答をそれぞれ解答した生徒がいた。E組はほぼ全員が運動方程式を正しく適用して正答の選択肢3を解答できていた。

一定の速度でクルマが進んでいるとき、推進力(前向き)の力と抵抗力(後ろ向き)の力の関係は？



1. 推進力 > 抵抗力
2. 推進力 = 抵抗力
3. 推進力 < 抵抗力

図 C.9: 形成的テスト第9問 [107]

#### 出題の意図

等速直線運動しているとき、物体に働く力がつり合っていることを確認してもらいたかったので出題した。

#### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 力は加速度を生じさせるものである。もし推進力が抵抗力に比べて大きければ、前向きに加速度が生じ、クルマは加速していってしまうので×。
2. 正解 「一定速度」ということは加速度が0ということなので、合力0である。

3. 物体に働く力の合力の向きと、物体に生じる加速度は同じ向きである。力は「他の物体から及ぼされるもの」なので「クルマの動く力」のようなものは存在しない。よって「クルマの動く力と推進力の和が、抵抗力とつり合っている」という考えは誤りである。

表 C.9: 形成的テスト第 9 問

%	A	D	E	全体
1	75.0	46.2	66.7	63.9
2	19.4	46.2	28.6	30.1
3	5.56	7.69	4.76	6.02

### 解答結果について

多くの生徒が選択肢 1 の誤答を解答した。クルマが進むためには、進行方向前向きに力が加わっていないと考える生徒が圧倒的多数だった。もし選択肢 2 ならば力がつり合っただけで静止してしまうと考えるようだった。クラスで数名は、「もし推進力の方が大きければ、クルマはどんどん加速していってしまう」と考えていた。

図のように、滑車を用いて一定の速度で箱を持ち上げているとき、ロープが箱を持ち上げる力は、

1. 箱にはたらく重力より大きい
2. 箱にはたらく重力に等しい
3. 箱にはたらく重力より小さい

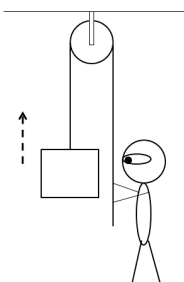


図 C.10: 形成的テスト第 10 問 [107]

### 出題の意図

等速直線運動しているとき、物体に働く力はつり合っていることを確認してもらいたかったので出題した。

### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. もし重力よりもロープが箱を持ち上げる力の方が大きければ、箱は上向きに加速していってしまうので「一定の速度で」ということに矛盾してしまいますね。力は加速度を生じさせるものです。
2. 正解 「一定の速度で」ということですから、箱の加速度はゼロです。つまり、箱に働くトータル力はゼロでなければなりません。

3. もしロープが箱を持ち上げる力よりも重力の方が大きければ、箱は下向きに加速していってしまうので「一定の速度で」ということに矛盾してしまいますね。力は加速度を生じさせるものです。

表 C.10: 形成的テスト第 10 問

%	A	D	E	全体
1	47.2	29.6	28.6	36.9
2	33.3	51.9	61.9	46.4
3	19.4	18.5	9.52	16.7

### 解答結果について

前問と同様に、選択肢 1 の誤答の「箱が動く向きに加わる力の方が大きい」と考える生徒が多かった。物理教師にとっては前問と全く同じ状況であるように見えても、生徒にとっては前問とは違う問題であるように見えるようである（文脈依存性）。運動方程式を適用して考えるということにも慣れていないのかもしれない。また問題の図中に人間が出てくることも、誤概念で考えることを引き出す原因の一つになっているのではないかと思う（自分がロープを引っばっている気持ちになる）。

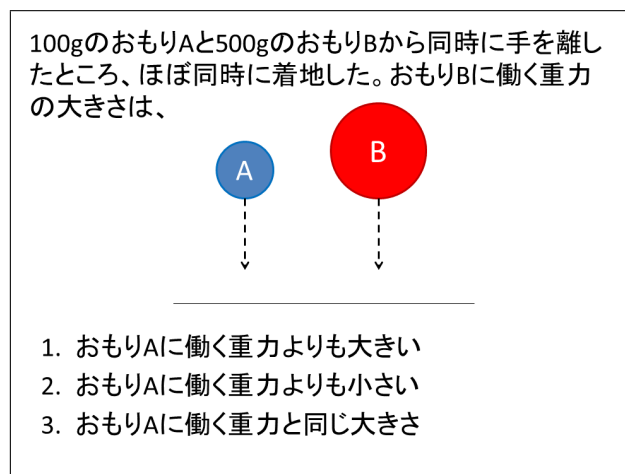


図 C.11: 形成的テスト第 11 問 [107]

### 出題の意図

重力についての理解を確かにして欲しかったので出題した。

### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

- 正解 落下物体は等しい加速度（重力加速度  $g$ ）が生じているので、物体に働く力（重力）は運動方程式  $ma = F$  より質量に比例する。
- 誤った考え「軽いものの方が早く落下する」「速度の大きい軽いものの方が力は大きい」を持っていないだろうか。落下物体は等しい加速度（重力加速度  $g$ ）が生じているので、物体に働く力（重力）は運動方程式  $ma = F$  より質量に比例する。

3. 「力＝速度」あるいは「力＝加速度」と勘違いしている？運動方程式  $ma = F$  を復習しよう。質量  $m$  を忘れないように気を付けたい。重力加速度が同じなので、重力は質量に比例する。

表 C.11: 形成的テスト第 11 問

%	A	D	E	全体
1	13.9	20.0	42.9	23.2
2	38.9	28.0	23.8	31.7
3	47.2	52.0	33.3	45.1

### 解答結果について

ここでも力と速度を同じものであるとする誤概念に基づく誤答が目立った。「物体 A と B が同時に着地したのだから、力は同じ」と考えている生徒が多かった。力は加速度を生じさせるものであるということをきちんと理解できていないのだろう。

100gの物体Aと500gの物体Bを、上向きに同じ初速度で投げ上げた。手を離れてから元の高さに戻ってくるまでの間に働いている重力の大きさは、どちらの方が大きいか。

1. 100gの物体A
2. 500gの物体B
3. どちらも同じ

図 C.12: 形成的テスト第 12 問

### 出題の意図

鉛直投げ上げ運動で、質量の違いによる物体に働く力の違いについて確認して欲しかったので出題した。

### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 「軽い物体の方が早く動くから大きな力」と誤解？物体は質量によらず同じ落下運動をします。運動方程式  $ma = F$  より働く力は質量に比例します。質量が大きい程働く重力は大きいということです。
2. 正解 落下物体は質量によらず同じ運動をします。運動方程式  $ma = F$  より物体に働く力は質量に比例します。質量が大きいほど働く重力は大きいということです。
3. 速度や加速度と力を誤解していませんか？運動方程式  $ma = F$  より落下運動の加速度  $a$  は重力加速度  $g$  でどれも同じですが、質量  $m$  が違えば物体に働く力  $F$  は変わりますね。

表 C.12: 形成的テスト第 12 問

%	A	D	E	全体
1	8.33	0.00	0.00	3.66
2	55.6	64.0	66.7	61.0
3	36.1	36.0	33.3	35.4

### 解答結果について

前問よりもやや正答率が上がったが、それでも選択肢 3 の誤答を解答する割合は以前高い。重力加速度  $g$  と重力  $mg$  の違いを正しく認識している生徒は少ないのだろう。

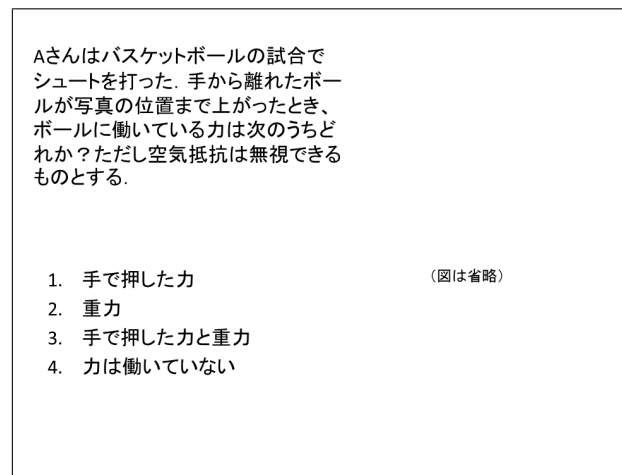


図 C.13: 形成的テスト第 13 問

### 出題の意図

斜方投射された物体に働く力について確認して欲しかったので出題した。

### 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. ボールは手から離れているので力は及ぼせません。ボールには重力のみ働きます。
2. 正解 ボールには重力のみ働きます。
3. ボールは手から離れているので力は及ぼせません。ボールには重力のみ働きます。
4. 放物運動する物体には下向きの重力加速度が生じます。よって重力のみが働きます。

### 解答結果について

選択肢 1 および 3 の誤答を解答した生徒が多い。これはインパタス的な考え方をしている生徒が多いということである。問題の写真では明らかに手とボールは離れているが、それでも「手から離れても少しの間は手の力が残っている」と主張する生徒はいる。初速度と力とを正しく使い分けることも難しいようである。

### 出題の意図

作用と反作用の見つけ方を確認してもらいたかったので出題した。



表 C.13: 形成的テスト第 13 問

%	A	D	E	全体
1	19.4	12.0	9.52	14.6
2	11.1	24.0	52.4	25.6
3	66.7	60.0	33.3	56.1
4	2.78	4.00	4.76	3.66

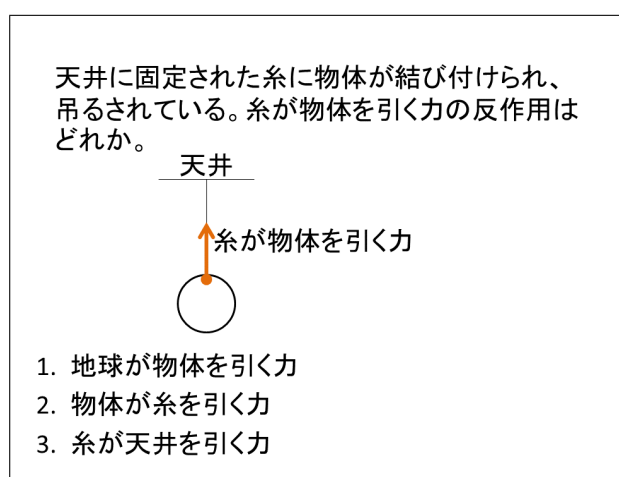


図 C.14: 形成的テスト第 14 問

## 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. つり合う力と作用反作用を勘違いしていませんか？力は二物体の間で及ぼし合うもので、主語と目的語を入れ替えることで、反作用が見つかります。
2. 正解 力は二物体の間で及ぼし合うもので、主語と目的語を入れ替えることで、反作用が見つかります。
3. 糸に働く力を答えてしまいましたね。力は二物体の間で及ぼし合うもので、主語と目的語を入れ替えることで、反作用が見つかります。

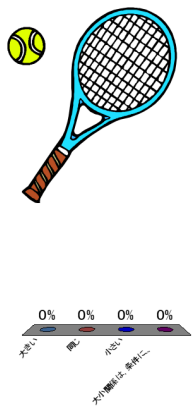
表 C.14: 形成的テスト第 14 問

%	A	D	E	全体
1	22.2	32.0	0.00	19.5
2	50.0	64.0	100	67.1
3	27.8	4.00	0.00	13.4

## 解答結果について

E組では全員が正答することができたが、A、D組では選択肢1のつり合う力を解答してしまった生徒が一定数いた。またA組では、選択肢3を解答する生徒も一定数いた。

テニスボールをラケットで打ち返すとき、ラケットがボールに及ぼす力は、ボールがラケットに及ぼす力に比べて



1. 大きい
2. 同じ
3. 小さい
4. 大小関係は、条件によって異なる

0% 0% 0% 0%

大きい 同じ 小さい 大小関係は、条件によって異なる

図 C.15: 形成的テスト第 15 問 [107]

## 出題の意図

作用反作用の法則がいつでも成立することを確認して欲しかったので出題した。

## 各選択肢を解答した生徒へのコメント

1. 「ラケットがボールに及ぼす力の方が大きくないと、ボールを打ち返せない」と考えましたか？台車が衝突する際に及ぼし合う力を力センサで測定したことを思い出しましょう。作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立します。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合うのでした。
2. 正解 作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立します。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合うのでした。
3. 「ボールは勢い良く飛んで行くから、力は大きい」と考えましたか？力と速度を勘違いしていることとなりますので注意が必要です。台車の衝突実験より、作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立します。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合うのでした。
4. 台車が衝突する際に及ぼし合う力を力センサで測定したことを思い出しましょう。作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立します。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合うのでした。

表 C.15: 形成的テスト第 15 問

%	A	D	E	全体
1	27.8	16.0	23.8	23.2
2	38.9	48.0	61.9	47.6
3	16.7	16.0	0.00	12.2
4	16.7	20.0	14.3	17.1

## 解答結果について

この「形成的テスト」の直前の授業で、作用反作用の法則について扱っているが、それでも正答率は低かった。ボールをラケットで打ち返すには大きな力が必要であると考え選択肢 1 を解答したり、衝突前後でのボールの速度に力の大きさが依存すると考え選択肢 4 を解答したりしていた。



## 付録 D 中等教育学校での授業実践の詳細

運動学授業（4時間）運動学授業1～3時間目までは、公立高校での実践と同様に、人の歩行運動の  $x-t$  グラフ、 $v-t$  グラフについての議論と、水平面と斜面を下る台車の運動を記録タイマーと記録テープで測定し、グラフ化する実験、およびその分析を行った。生徒の実態を踏まえ、人の歩行運動は ILDs ではなく PI で、台車の運動のグラフ化は記録テープの切り貼りではなくグラフ用紙への描画で、それぞれ行った。

運動学授業4時間目は、斜面上を下る・上る・上り下りする台車の運動に関する ILDs で行った。速度が向きを含む量であること、速度と加速度を区別すること、それぞれの量の符号は座標軸に基づき決まることなどを学習した。

形成的テスト①（1時間）運動学に関する問題を11問実施した。各問題について、ARS 個別学習票で各生徒にフィードバックした、出題の意図、各選択肢を解答した生徒への学習コメント、そして各クラスの解答結果についてまとめる。

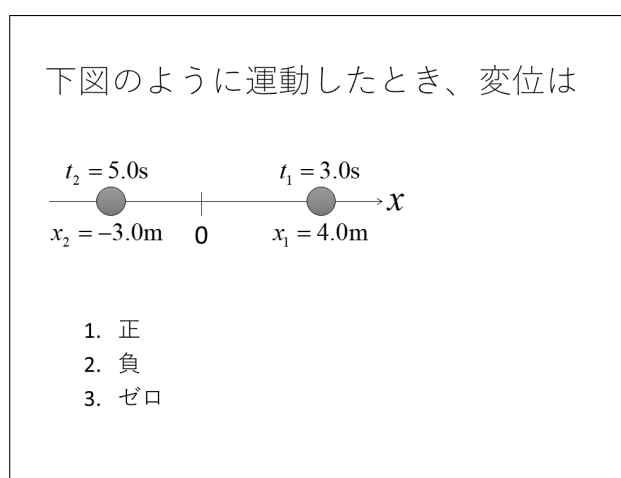


図 D.1: 形成的テスト①第1問

### 出題の意図

位置の変化量＝変位で、変位はベクトル量であることを理解して欲しかったので出題した。

### 各選択肢についてのコメント

1. 変位は「どちら向きにどれだけ位置が変化したか」を表す量です。そのため、向き（正・負）が関係しています。そのため「距離」とは違います（距離はいつも正）。この問題では、物体は左向き（負の向き）に位置が変化したので、変位は負ですね。
2. 正解 物体は左向き（負の向き）に位置が変化したので、変位は負ですね。

3. 物体の位置が変化しているので、変位はゼロではありません。この問題では、物体は左向き（負の向き）に位置が変化したので、変位は負ですね。

表 D.1: 形成的テスト①第 1 問

%	W	X	Y	Z	All
1	33.33	48.00	20.69	26.92	31.52
2	50.00	48.00	75.86	69.23	63.04
3	16.67	4.00	3.45	3.85	5.43

下図のように、12:00に車に乗って家を出てから、一度駅に寄り、商店に12:30に着いた。この車の12:00~12:30の間の変位はいくらか。ただし東向きを正の向きとする。

図は省略

1. 8km
2. 5km
3. 3km
4. 0km
5. -2km

図 D.2: 形成的テスト①第 2 問 [115]

### 出題の意図

位置の変化量=変位で、変位はベクトル量であることを理解して欲しかったので出題した。

### 各選択肢についてのコメント

1. 距離を答えてしまいましたね。変位は“結局、位置がどちら向きにどれだけ変化したのか”を表す量でした。結局、家から商店まで位置が変化したので+3kmが正解です。
2. 問題文を読み間違えてしまいましたか？片道だけで終わっていません。結局、家から商店まで位置が変化したので+3kmが正解です。
3. 正解 結局、家から商店まで位置が変化したので+3kmが正解です。
4. 問題文を読み間違えてしまいましたか？片道だけで終わっていません。結局、家から商店まで位置が変化したので+3kmが正解です。
5. 問題文を読み間違えてしまいましたか？片道だけで終わっていません。結局、家から商店まで位置が変化したので+3kmが正解です。駅から商店までではありません。

### 出題の意図

表 D.2: 形成的テスト①第 2 問

%	W	X	Y	Z	All
1	7.69	0.00	7.41	14.81	7.45
2	15.38	11.11	3.70	7.41	8.51
3	76.92	85.19	81.48	70.37	78.72
4	0.00	0.00	0.00	3.70	1.06
5	0.00	3.70	7.41	3.70	4.26

速度は  $\text{速度} = \frac{\text{変位}}{\text{時間}}$  と定義されるが、  
この速度について正しい記述を選べ。

1. いつも正である
2. 位置 $x$ が負のときのみ速度は負になる
3. 位置 $x$ が正のときのみ速度は正にも負にもなる
4. 位置 $x$ の正負に関わらず、速度は正にも負にもなる

図 D.3: 形成的テスト①第 3 問 [114]

速度は大きさだけでなく向きも合わせ持つベクトル量であることを理解して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. 「速さ」と「速度」の区別ができていません。「速さ」は大きさだけの量、「速度」は大きさと向きを含む量です。向きは座標軸の正の向きを基準に決めます。自分では前に歩いていると思っても、それが負の向きならば、負の速度ということになります。
2. 「位置」と「速度」の区別ができていません。速度は「1秒でどちら向きにどれだけ動いたか」を表す量です。例えば1秒間で $x = -5$ から $x = -2$ まで動いたときのように、正の向きに位置が変化しているときには、速度 $v$ は $v = (-2) - (-5)/1 = +3\text{m/s}$ と正の値を取ります。
3. 「位置」と「速度」を区別できていない。1秒で $x = -5$ から $x = -2$ まで動くときのように、正の向きに位置が変化しているときには、速度 $v$ は $v = (-2) - (-5)/1 = +3\text{m/s}$ と正の値を取ります。
4. 4. 正解 速度の符号を決めるのは、どちら向きに変位しているかであるから、位置の符号は無関係。

表 D.3: 形成的テスト①第3問

%	W	X	Y	Z	All
1	23.08	25.93	14.81	14.81	19.15
2	30.77	11.11	22.22	55.56	29.79
3	15.38	11.11	3.70	0.00	6.38
4	30.77	51.85	59.26	29.63	44.68

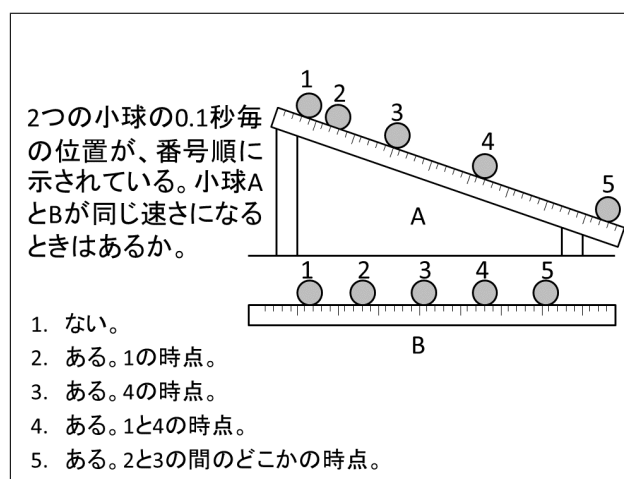


図 D.4: 形成的テスト①第4問 [114]

## 出題の意図

位置と速さの違いを理解して欲しかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

- 2から3の変位が等しいので、この区間の平均の速さは同じ。よって2と3の間のどこかで、同じ速さになっていたといえます。
- 1の時点で等しいのは「位置」で、「速度」ではありません。2から3の変位が等しいので、この区間の平均の速さは同じ。よって2と3の間のどこかで、同じ速さになっていたといえます。
- 4の時点で等しいのは「位置」で、「速度」ではありません。2から3の変位が等しいので、この区間の平均の速さは同じ。よって2と3の間のどこかで、同じ速さになっていたといえます。
- 1と4の時点で等しいのは「位置」で、「速度」ではありません。2から3の変位が等しいので、この区間の平均の速さは同じ。よって2と3の間のどこかで、同じ速さになっていたといえます。
- 正解 2から3の変位が等しいので平均の速さは同じ。この区間のどこかで同じ速さになります。



表 D.4: 形成的テスト①第 4 問

%	W	X	Y	Z	All
1	0.00	33.33	14.81	11.11	17.02
2	15.38	7.41	7.41	14.81	10.64
3	0.00	3.70	3.70	7.41	4.26
4	0.00	7.41	11.11	7.41	7.45
5	84.62	48.15	62.96	59.26	60.64

物体が負の向きに動いている。この物体が減速しているとき、加速度の符号は、

1. 正
2. 負
3. 速さによる

図 D.5: 形成的テスト①第 5 問 [22]

#### 出題の意図

加速度の定義を確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. 加速度＝速度変化÷時間。負の向きに減速している、つまり、正の向きの速度が増しているということなので、速度変化は正。よって加速度は正。
2. 正解 加速度＝速度変化÷時間。負の向きに減速している、つまり、正の向きの速度が増しているということなので、速度変化は正。よって加速度は正。
3. 加速度＝速度変化÷時間。問題文で「負の向きに減速している」ことが読み取れるので、加速度の符号を決めるには十分。正の向きの速度が増しているので、速度変化は正。よって加速度は正。
4. 加速度＝速度変化÷時間。問題文で速度変化していることが読み取れるので、加速度はゼロではない。この問題では、正の向きの速度が増しているので、速度変化は正。よって加速度は正。

#### 出題の意図

加速度の定義を確認して欲しかったので出題した。

表 D.5: 形成的テスト①第 5 問

%	W	X	Y	Z	All
1	53.85	22.22	40.74	37.04	36.17
2	30.77	74.07	37.04	48.15	50.00
3	15.38	3.70	22.00	14.81	13.83

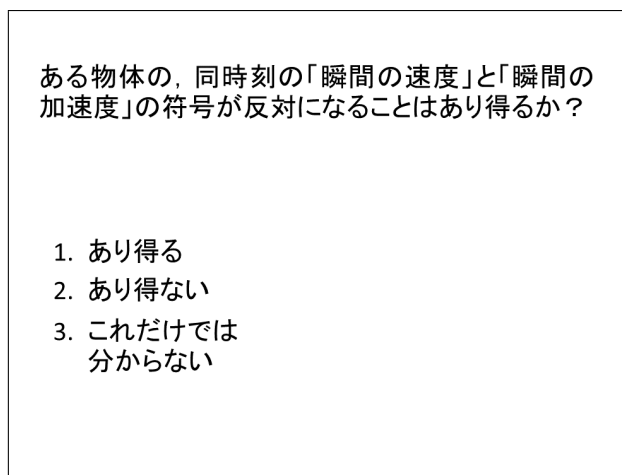


図 D.6: 形成的テスト①第 6 問 [22]

#### 各選択肢についてのコメント

1. 正解 加速度の定義は単位時間当たりの速度変化だった。物体が減速しているならば、速度の向きと、速度の増す向きは逆になる。
2. 速度と加速度が違うものだという事はわかっていますか？加速度の定義は単位時間当たりの速度変化だった。物体が減速しているならば、速度の向きと、速度の増す向きは逆になる。
3. 速度と加速度の定義が理解できていれば解ける。加速度の定義は単位時間当たりの速度変化だった。物体が減速しているならば、速度の向きと、速度の増す向きは逆になる。

表 D.6: 形成的テスト①第 6 問

%	W	X	Y	Z	All
1	46.15	51.85	74.00	62.96	60.64
2	46.15	25.93	18.52	11.11	22.34
3	7.69	22.22	7.41	25.93	17.02

#### 出題の意図

加速度の大きさは、時々刻々の速度変化の大きさであることを理解して欲しかったので出題した。問題で提示された図より、物体の運動の様子をイメージし、速度の変化の大きさを読み取る。そして加速度をその物体の運動と結びつけられるようにして欲しい。

ある物体が、下図の摩擦の無視できる滑り台を、A点からC点まで滑り降りる。物体の進行方向の加速度の大きさは、AB間に比べてBC間の方が

(図は省略)

1. 小さい
2. 同じ大きさである
3. 大きい

図 D.7: 形成的テスト①第7問 [22]

## 各選択肢についてのコメント

1. 正解 速度の大きさは AB 間に比べて BC 間の方が大きい、速度の変化は斜面の傾斜が急な AB 間の方が大きい。よって AB 間の方が加速度は大きい。
2. 物体の速度がどのように変化していくのかをもう一度考えてみよう。速度の大きさは AB 間に比べて BC 間の方が大きい、速度の変化は斜面の傾斜が急な AB 間の方が大きい。よって AB 間の方が加速度は大きい。
3. 加速度は速度変化を表していることに注意しよう。速度の大きさは AB 間に比べて BC 間の方が大きい、速度の変化は斜面の傾斜が急な AB 間の方が大きい。よって AB 間の方が加速度は大きい。

表 D.7: 形成的テスト①第7問

%	W	X	Y	Z	All
1	69.23	51.85	67.00	88.89	69.15
2	15.38	37.04	14.81	0.00	17.02
3	15.38	11.11	18.52	11.11	13.83

## 出題の意図

$x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを相互に行き来できるようになって欲しかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. 速度の符号に注意しよう。
2.  $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを区別できていない。縦軸にとっての物理量が「位置」と「速度」ではグラフの形は違う。同じ運動でも見方や表し方が変わっている。

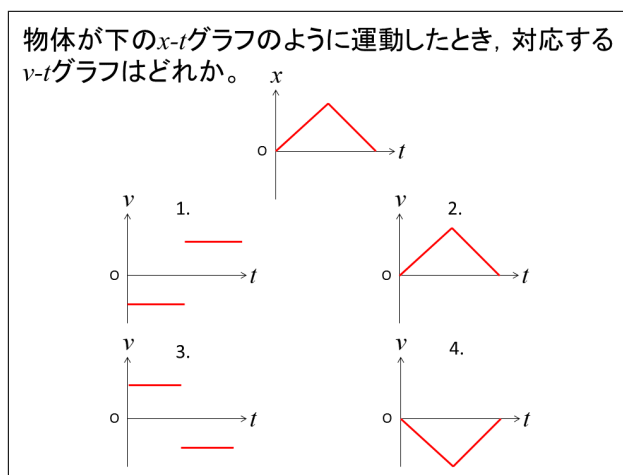


図 D.8: 形成的テスト①第 8 問

3. 正解  $x-t$  グラフの傾きが速度を表している。前半は正で一定の傾き、すなわち正の一定の速度である。後半は負で一定の傾き、すなわち負の一定の速度である。
4. 「形が似ている」「 $x-t$  グラフから  $v-t$  グラフだから逆にした」と考える人は多いが、よく考えて欲しい。 $x-t$  グラフの傾きは速度である。前半は右上がりの直線、正で一定の傾き、すなわち正の一定の速度。後半は右下がりの直線、負で一定の傾き、負の一定の速度。

表 D.8: 形成的テスト①第 8 問

%	W	X	Y	Z	All
1	0.00	11.11	3.70	7.41	6.38
2	7.69	18.52	14.81	11.11	13.83
3	76.92	55.56	74.07	66.67	67.02
4	15.38	14.81	7.41	14.81	12.77

### 出題の意図

$v-t$  グラフの面積が変位であることを確認して欲しかったので出題した。

### 各選択肢についてのコメント

1. グラフが右上がり＝常に正の向きに運動，ではないことに注意。
2. 1. と同様。縦軸が速度であることに注意しよう。
3. 正解  $v-t$  グラフの面積＝変位で，二つの三角形の面積が等しいことから，正と負同じだけ変位したということになり，元の位置に戻る。
4.  $v-t$  グラフの面積の大きさを比較しよう。同じ大きさなのだから，元の位置まで戻る。
5. 4. と同様。

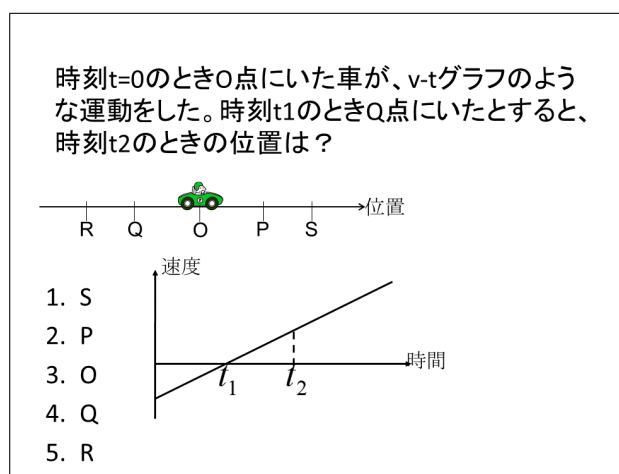


図 D.9: 形成的テスト①第9問

表 D.9: 形成的テスト①第9問

%	W	X	Y	Z	All
1	7.69	14.81	0.00	0.00	5.32
2	30.77	22.22	22.22	25.93	24.47
3	23.08	25.93	48.15	44.44	37.23
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	38.46	37.04	29.63	29.63	32.98

出題の意図

物体の運動とグラフを結びつけられるようになって欲しかったので出題した。

各選択肢についてのコメント

1. 正解 水平なレールを走っている時は速度一定、つまり横軸に平行な直線であり、坂を登るときには一定の割合で減速するので負の傾きの直線、坂を下るときには一定の割合で加速するので正の傾きの直線となる。
2.  $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを区別できていない。2. はこの運動の  $x-t$  グラフの形になっている。縦軸の物理量が位置なのか速度なのかを注意しよう。
3.  $x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを区別できていない。二つのグラフの考え方が混ざっている。縦軸の物理量が位置なのか速度なのかを注意しよう。
4. 問題に出てくる坂の形を意識し過ぎている。 $v-t$  グラフの問題なので、大事なものは「物体の時々刻々の速度（どちら向きにどれだけの速さ）で運動しているか」である。

出題の意図

$x-t$  グラフについての理解を確認したかったので出題した。

各選択肢についてのコメント

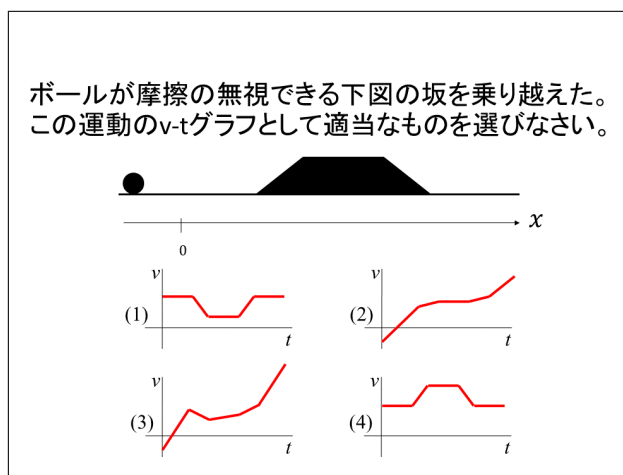


図 D.10: 形成的テスト①第 10 問 [22]

表 D.10: 形成的テスト①第 10 問

%	W	X	Y	Z	All
1	61.54	66.67	70.37	77.78	70.21
2	7.69	11.11	0.00	14.81	8.51
3	23.08	11.11	14.81	7.41	12.77
4	7.69	11.11	14.81	0.00	8.51

1. グラフが右上がり＝加速，ではないことに注意。縦軸は位置なので，速度はグラフの傾きである。
2. 正解  $x-t$  グラフの傾きがだんだん小さくなっている＝速度がだんだん小さくなっている＝減速
3. このグラフから考えればよいので，静止しているところから始まるわけではない。
4.  $x-t$  グラフの傾き＝速度なので，傾きが変化しているということは，速度が変化しているということである。

表 D.11: 形成的テスト①第 11 問

%	W	X	Y	Z	All
1	30.77	40.74	22.22	18.52	27.66
2	53.85	37.04	40.74	44.44	42.55
3	0.00	11.11	33.33	25.93	20.21
4	15.38	11.11	3.70	11.11	9.57

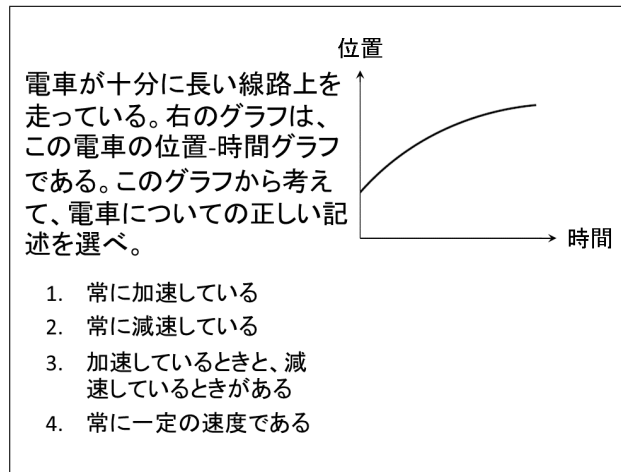


図 D.11: 形成的テスト①第 11 問 [22]

運動の第 1・2 法則の授業 1 時間目で、加速度と力と質量の定量的な関係を探る生徒実験を行った。輪ゴムの伸びを一定に保ったまま台車を引っ張り続け、その運動を記録タイマー・記録テープで測定し、 $v-t$  グラフを作成し、傾きから加速度を求めた。伸びは変えずに、輪ゴムの本数を変えることで力の大きさを変え、台車におもりを載せることで質量を変えた。2 時間目で実験の分析を行い、運動方程式を実験結果から導いた。そして運動方程式を使って考える PI を実施した。運動の第 1 法則についてもここで簡単に解説した。

形成的テスト② (1 時間)

運動学と運動の第 1・2 法則に関する問題を 8 問実施した。各問題について、ARS 個別学習票で各生徒にフィードバックした、出題の意図、各選択肢を解答した生徒への学習コメント、そして各クラスの解答結果についてまとめる。

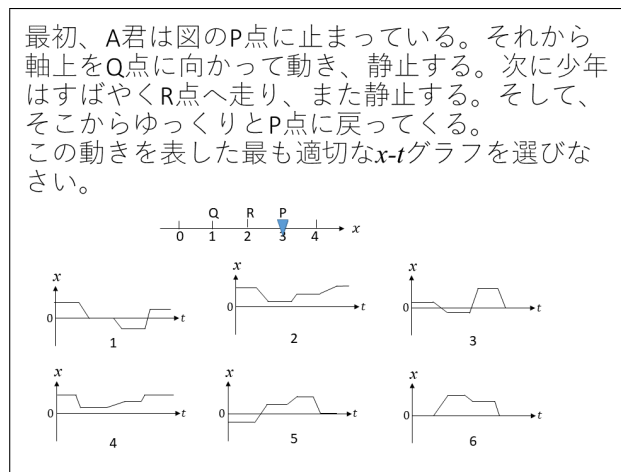


図 D.12: 形成的テスト②第 1 問 [22]

出題の意図

$x-t$  グラフについての理解を確認したかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. A君はP～Q点の間を動いているので、位置が負になることはない。よく観察しよう。
2. 正解 「すばやく」と「ゆっくり」を正しく表せている（グラフの傾き）。またP～Q点の正の位置だけの動きであることも正しい。元の位置まで戻っていることも正しい。
3. A君はP～Q点の間を動いているので、位置が負になることはない。よく観察しよう。
4. 「すばやく」と「ゆっくり」が問題文と逆になってしまっている（グラフの傾き）。気をつけよう。
5. A君はP～Q点の間を動いているので、位置が0になることはない。よく観察しよう。

表 D.12: 形成的テスト②第1問

%	W	X	Y	Z	All
1	7.69	15.38	8.00	3.85	8.89
2	61.54	57.69	68.00	61.54	62.22
3	15.38	7.69	12.00	3.85	8.89
4	0.00	3.85	4.00	11.54	5.56
5	0.00	7.69	4.00	11.54	6.67
6	15.38	7.69	4.00	7.69	7.78

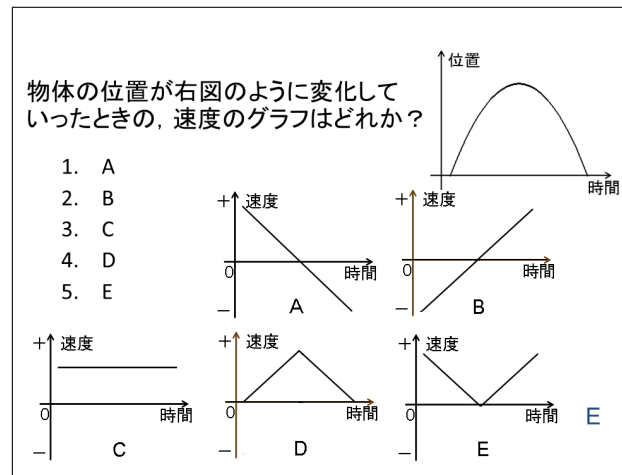


図 D.13: 形成的テスト②第2問 [114]

## 出題の意図

$x-t$  グラフと  $v-t$  グラフを行き来できるようになってほしかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. 正解  $x-t$  グラフの傾きが速度。はじめ正の傾きで、だんだん傾きが小さくなり、頂点を越えるとだんだん負の向きに傾きが大きくなっていく。



2.  $x-t$  グラフの傾きの大きさは正しく考えられているが、向きが反対になっている。はじめは正の速度、最後は負の速度になっている。
3. 加速度-時間グラフと間違えた？確かに加速度の大きさは一定である（ただし向きは負）。 $x-t$  グラフの傾きが速度であることを確認しよう。
4.  $x-t$  グラフの形に似た  $v-t$  グラフを選んでいませんか？ $x-t$  グラフの傾きが速度。縦軸にとる物理量が変われば、グラフの形も当然変わる。
5. 速度の大きさの変化は正しく考えられているが、向きまで考えられていない。例えば右向きを正とするならば、右向きに動いていれば正の速度、左向きに動いていれば負の速度となる。

表 D.13: 形成的テスト②第 2 問

%	W	X	Y	Z	All
1	38.46	30.77	34.62	38.46	35.16
2	0.00	3.85	7.69	19.23	8.79
3	0.00	3.85	3.85	15.38	6.59
4	38.46	23.08	23.08	7.69	20.88
5	23.08	38.46	30.77	19.23	28.57

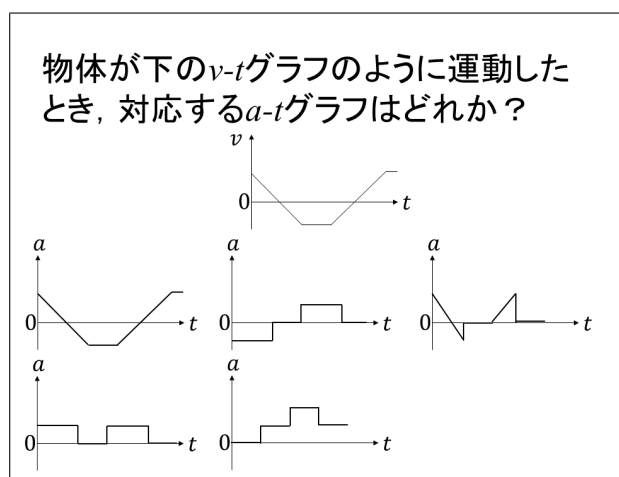


図 D.14: 形成的テスト②第 3 問 [107]

出題の意図

$a-t$  グラフと  $v-t$  グラフの関係を確認して欲しかったので出題した。

各選択肢についてのコメント

1.  $v-t$  グラフとは縦軸にとる物理量が違うのだから、形は同じにはならない。
2. 正解  $v-t$  グラフの傾きが加速度だった。

3. 真ん中の速度変化していない部分は合っているが、他の部分が間違っている。
4. 加速度はベクトル量なので、符号は + -両方ある。  $v-t$  グラフの傾きで判断しよう。
5.  $v-t$  グラフの傾きが加速度だった。

表 D.14: 形成的テスト②第 3 問

%	W	X	Y	Z	All
1	15.38	11.54	7.69	23.08	14.29
2	53.85	34.62	65.38	57.69	52.75
3	30.77	23.08	15.38	7.69	17.58
4	0.00	23.08	11.54	3.85	10.99
5	0.00	7.69	0.00	7.69	4.40

摩擦が無視できる水平な平面上で、物体を一定の力で引き続けた。このときの物体の運動の特徴として正しいものはどれか。

1. 移動距離が一定の割合で増す
2. 一定の速度で進む
3. 一定の加速度で進む
4. 加速度が時間に比例して変化する

図 D.15: 形成的テスト②第 4 問 [108]

#### 出題の意図

運動の第 2 法則（運動方程式）について確認してほしかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. これは速度が一定であることを意味するので、選択肢 2. と同じですね。
2. 力と関係するのは加速度です。一定の大きさの力が加わるならば、一定の大きさの加速度が生じます。
3. 正解
4. 一定の大きさの力が加わるならば、一定の大きさの加速度が生じます。力の大きさが変化しないなら、加速度の大きさも変化しません。

表 D.15: 形成的テスト②第 4 問

%	W	X	Y	Z	All
1	0.00	3.85	11.54	15.38	8.79
2	23.08	73.08	34.62	42.31	46.15
3	46.15	23.08	50.00	34.62	37.36
4	30.77	0.00	3.85	7.69	7.69

摩擦の無視できる水平面上で、質量の異なる2物体A、Bそれぞれを、等しい力で押した。Bに比べてAのほうが質量は大きいものとする。この運動についての正しい記述はどれか。

1. 生じる加速度はともに等しい
2. ともに同じ速度で運動する
3. はじめは加速し、やがて一定の速度で運動するが、Bが達する速度のほうが大きい。
4. 止まっている状態から、ある速さになるまでの時間は、Aの方が長い。

図 D.16: 形成的テスト②第 5 問 [108]

## 出題の意図

運動の第 2 法則（運動方程式）について確認してほしかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. 加速度と質量は反比例の関係にあったので、質量の大きな A の方が、生じる加速度は小さい。
2. 力と関係しているのは速度ではなく、加速度である。大きさが同じ力ならば、生じる加速度が同じなのである。そしてこの問題のポイントである、加速度と質量が反比例関係にあったことを忘れずに。
3. 力が加わり続けるならば、加速度が生じ続ける、つまり速度は変化し続ける。
4. 正解 質量が大きい A の方が加速度は小さいので、速度変化の割合も小さい。よって長い時間をかけないと、速度はなかなか大きな値にはならない。

## 出題の意図

運動の第 1 法則（慣性の法則）について確認してほしかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. 正解 物体に力が加わらない、または力がつり合っているとき、静止または等速直線運動する。つまり加速度は生じない。等速直線運動しているならば力は必要ない。

表 D.16: 形成的テスト②第 5 問

%	W	X	Y	Z	All
1	23.08	7.69	11.54	26.92	16.48
2	15.38	11.54	7.69	11.54	10.99
3	30.77	30.77	50.00	19.23	32.97
4	30.77	50.00	30.77	42.31	39.56

次の記述で間違っているものを選び。

1. 物体を動かし続けるためにはいつでも、力が必要である。
2. ある速度で運動している物体を加速させるためにはいつでも、力が必要である。
3. ある速度で運動している物体を減速させるためにはいつでも、力が必要である。
4. 動いている物体を止めるためにはいつでも、力が必要である。

図 D.17: 形成的テスト②第 6 問 [12]

2. 運動の第 2 法則より正しい。力は加速度を生じさせるものである。
3. 2. と同じ。減速するということは、速度変化しているので加速度が生じており、よって力が必要である。
4. 動いている物体が止まるということは、速度が変化しているため、2. 3. と同じく力が必要。

表 D.17: 形成的テスト②第 6 問

%	W	X	Y	Z	All
1	69.23	46.15	30.77	65.38	50.55
2	0.00	11.54	19.23	7.69	10.99
3	15.38	23.08	19.23	15.38	18.68
4	15.38	19.23	30.77	11.54	19.78

#### 出題の意図

等速直線運動しているとき、物体に働く力がつり合っていることを確認してもらいたかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

一定の速度でクルマが進んでいるとき、推進力(前向き)の力と抵抗力(後ろ向き)の力は？

1. 推進力 > 抵抗力  
2. 推進力 = 抵抗力  
3. 推進力 < 抵抗力

図 D.18: 形成的テスト②第 7 問 [107]

1. 力は加速度を生じさせるものである。もし推進力が抵抗力に比べて大きければ、前向きに加速度が生じ、クルマは加速していってしまうので×。
2. 正解 「一定速度」ということは加速度が 0 ということなので、合力 0 である。
3. 物体に働く力の合力の向きと、物体に生じる加速度は同じ向きである。力は「他の物体から及ぼされるもの」なので「クルマの動く力」のようなものは存在しない。よって「クルマの動く力と推進力の和が、抵抗力とつり合っている」という考えは誤りである。

表 D.18: 形成的テスト②第 7 問

%	W	X	Y	Z	All
1	53.85	76.92	61.54	73.08	68.13
2	30.77	19.23	38.46	26.92	28.57
3	15.38	3.85	0.00	0.00	3.30

#### 出題の意図

等速直線運動しているとき、物体に働く力はつり合っていることを確認してもらいたかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. もし重力よりもロープが箱を持ち上げる力の方が大きければ、箱は上向きに加速していってしまうので「一定の速度で」ということに矛盾してしまいますね。力は加速度を生じさせるものです。
2. 正解 「一定の速度で」ということですから、箱の加速度はゼロです。つまり、箱に働くトータルの力はゼロでなければなりません。

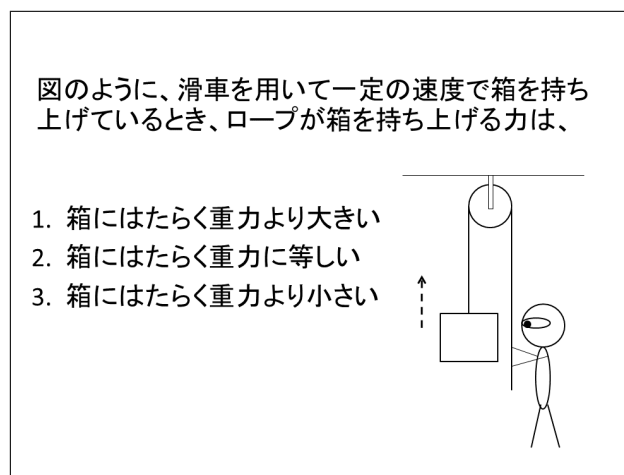


図 D.19: 形成的テスト②第 8 問 [107]

3. もしロープが箱を持ち上げる力よりも重力の方が大きければ、箱は下向きに加速していってしまうので「一定の速度で」ということに矛盾してしまいますね。力は加速度を生じさせるものです。

表 D.19: 形成的テスト②第 8 問

%	W	X	Y	Z	All
1	61.54	61.54	38.46	50.00	51.65
2	30.77	34.62	46.15	23.08	34.07
3	7.69	3.85	15.38	26.92	14.29

### 運動の第 3 法則（1 時間）・落体の運動（3 時間）

運動の第 3 法則の授業は、速度や質量を様々に変えて 2 台の台車を衝突させ、互いに及ぼし合う力の大きさについて議論する ILDs 形式で行った。この際、力の測定には力センサ（Pasco 社製）を用いた。

落体の運動の授業は、2 名の教育実習生がそれぞれ 2 クラスずつ担当した。自由落下、鉛直投射、水平投射を教えた。

### 形成的テスト③（1 時間）

運動の第 3 法則と、落体の運動の力と運動学に関する問題を 8 問実施した。各問題について、ARS 個別学習票で各生徒にフィードバックした、出題の意図、各選択肢を解答した生徒への学習コメント、そして各クラスの解答結果についてまとめる。

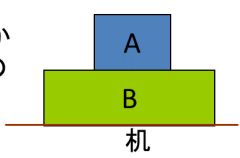
### 出題の意図

作用反作用の法則について確認してほしかったので出題した。

### 各選択肢についてのコメント

1. 正解 作用が「○○が△△を押し力」ならば反作用は「△△が○○を押し力」となる。

机の上に、箱A,Bが重ねて置かれている。机が箱Bを押す力の反作用は



1. 箱Bが机を押す力
2. 箱Aと箱Bが机を押す力
3. 箱Bにはたらく重力
4. 箱Aと箱Bにはたらく重力の和
5. 上のどれでもない

図 D.20: 形成的テスト③第1問 [107]

2. 力は重力以外，接触している物体同士でしか及ぼすことはできない。作用が「〇〇が△△を押す力」ならば反作用は「△△が〇〇を押す力」となる。ここで箱 A は関係ない。
3. 反作用ではなくつりあう力を答えている。作用反作用は，力を及ぼしあっている2つの物体について考える。作用が「〇〇が△△を押す力」ならば反作用は「△△が〇〇を押す力」となる。
4. 4. 力とはどういうものかを勘違いしている。力とは2つの物体が互いに及ぼしあうもの。ここでは机と箱 B のことを考えなければならない。

表 D.20: 形成的テスト③第1問

%	W	X	Y	Z	All
1	17.65	26.67	25.00	18.75	22.52
2	35.29	23.33	21.88	21.88	24.32
3	11.76	13.33	12.50	18.75	14.41
4	23.53	36.67	40.62	40.62	36.94
5	11.76	0.00	0.00	0.00	1.80


#### 出題の意図

作用反作用の法則がいつでも成立することを確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. 「ラケットがボールに及ぼす力の方が大きくなると，ボールを打ち返せない」と考えた？作用反作用の法則は条件によらず，いつでも成立。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合う。
2. 正解 作用反作用の法則は条件によらず，いつでも成立。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合う。

テニスボールをラケットで打ち返すとき、ラケットがボールに及ぼす力は、ボールがラケットに及ぼす力に比べて



1. 大きい
2. 同じ
3. 小さい
4. 大小関係は、条件によって異なる

図 D.21: 形成的テスト③第 2 問 [107]

3. 「ボールは勢い良く飛んで行くから、力は大きい」と考えた？力と速度を勘違いしているので注意。作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合う。
4. 作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合う。

表 D.21: 形成的テスト③第 2 問

%	W	X	Y	Z	All
1	5.88	26.67	18.75	15.62	18.02
2	58.82	70.00	75.00	71.88	70.27
3	11.76	0.00	0.00	6.25	3.60
4	23.53	3.33	6.25	6.25	8.11

### 出題の意図

重力についての理解を確かにして欲しかったので出題した。

### 各選択肢についてのコメント

1. もしすぐに力が働かなくなるとすると、物体は等速直線運動することになるので×。落下物体は手を離れてから着地するまで等加速度運動。よって物体に働く重力は一定の大きさ・下向きである。
2. 正解 落下物体は手を離れてから着地するまで等加速度運動。重力は一定の大きさ・下向きである。
3. 「力=速度」という誤った考えを持っている？運動方程式  $ma = F$  を復習しよう。落下物体は手を離れてから着地するまで等加速度運動。よって物体に働く重力は一定の大きさ・下向きである。



落下している物体に働く重力は、





	1	2	3	4
1. 落ち始めは働いているが、すぐに力は働かなくなる。 2. ずっと一定の力が働いている。 3. 落ちるに従いだんだん大きくなる。 4. 落ちるに従いだんだん小さくなる。				
	⋮	⋮	⋮	⋮

図 D.22: 形成的テスト③第 3 問 [108]

4. もしだんだん重力が小さくなるとすると、物体に生じる加速度も小さくなることになる。落下物体は等加速度運動する事実と反するので×。加速度が一定より重力は一定。

表 D.22: 形成的テスト③第 3 問

%	W	X	Y	Z	All
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	70.59	80.00	87.50	96.88	85.59
3	23.53	20.00	9.38	3.12	12.61
4	5.88	0.00	3.12	0.00	1.80

**出題の意図**

鉛直投げ下ろし運動で、物体にはたらく力について確認してもらいたかったので出題した。

**各選択肢についてのコメント**

1. 空気抵抗は無視できるので、物体にはたらいているのは重力のみ。空気抵抗によって重力の大きさが小さくなると誤解している？
2. 手から離れた後、物体にはたらく力は重力のみ。「手で押す力」は物体と手が接触していないので及ぼすことはできない。
3. 正解 自由落下も鉛直投げ下ろしも、手から離れた後に物体にはたらく力は重力のみ。

**出題の意図**

鉛直投げ上げ運動の加速度について確認して欲しかったので出題した。

**各選択肢についてのコメント**

物体を、自由落下させるときと、下向きに投げ下ろすときでは、手から離れた後に物体に働いている力の大きさは、どちらの方が大きいか？  
ただし空気抵抗は無視できる。

1. 自由落下させるとき
2. 投げ下ろすとき
3. どちらも同じ大きさ

図 D.23: 形成的テスト③第 4 問

表 D.23: 形成的テスト③第 4 問

%	W	X	Y	Z	All
1	11.76	3.33	0.00	0.00	2.70
2	11.76	33.33	37.50	18.75	27.03
3	76.47	63.33	62.50	81.25	70.27

1. 手を離れてから、物体に「手で押した力」がはたらいていると誤解している？物体に触れていないと力を及ぼすことはできない。重力のみはたらいているので加速度は常に下向き。
2. 正解 物体には下向きの重力のみはたらいているので、合力は下向きで、生じる加速度も下向き。
3. 速度と加速度を誤解している？もし加速度ゼロなら、合力ゼロということになるので、最高点だけ重力がはたらかないことになり、おかしい。

表 D.24: 形成的テスト③第 5 問

%	W	X	Y	Z	All
1	11.76	0.00	9.38	3.12	5.41
2	5.88	33.33	18.75	12.50	18.92
3	82.35	66.67	71.88	84.38	75.68

#### 出題の意図

落下運動は質量によらず、加速度が鉛直下向きの重力加速度の等加速度運動することを確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

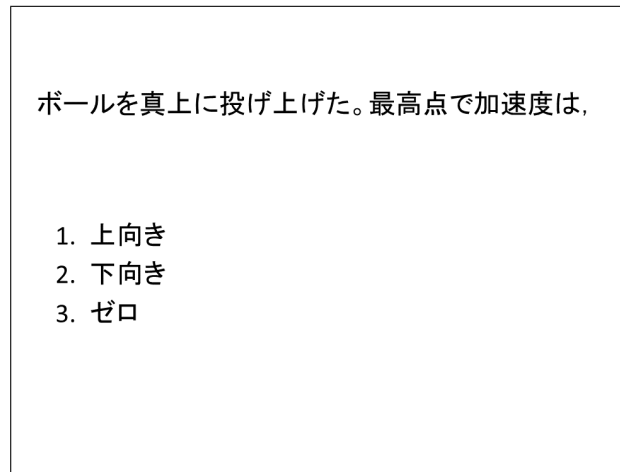


図 D.24: 形成的テスト③第 5 問 [22]

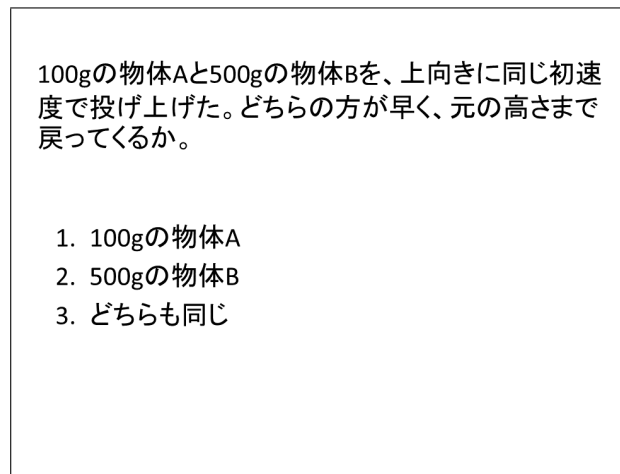


図 D.25: 形成的テスト③第 6 問

1. 「軽い物体の方が早く運動する」と誤解している？落下物体は質量によらず、加速度が重力加速度で一定の等加速度運動。
2. 「重い物体の方が早く運動する」と誤解している？あるいは、速度と力を同じものと考えている？落下物体は質量によらず、加速度が重力加速度で一定の等加速度運動。
3. 正解 落下物体は質量によらず、加速度が重力加速度で一定の等加速度運動。

#### 出題の意図

水平投射の鉛直方向の運動について確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. 「静かに真下に落とすより、水平に飛び出した方が速さは速いから、短い時間で着く」と考えた？水平に飛び出した物体には水平方向に初速度はあるが、鉛直方向には自由落下する。

表 D.25: 形成的テスト③第 6 問

%	W	X	Y	Z	All
1	17.65	3.33	3.12	3.12	5.41
2	23.53	40.00	9.38	15.62	21.62
3	58.82	56.67	87.50	81.25	72.97

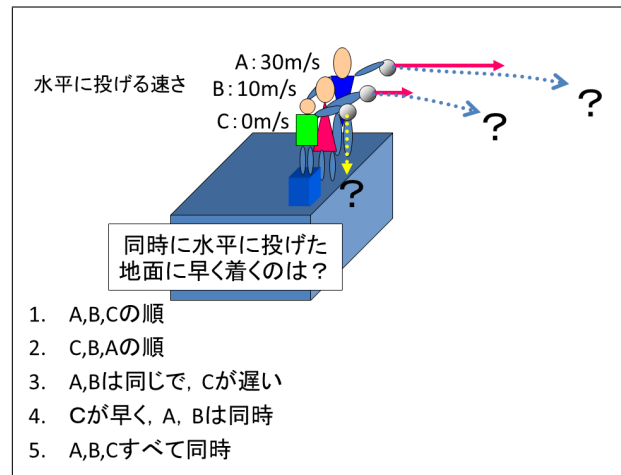


図 D.26: 形成的テスト③第 7 問 [107]

2. 「真下に落下する方が、落下距離は短くなるから早い」と考えた? 水平に飛び出した方も、鉛直方向への移動距離は同じ。水平投射で鉛直方向の運動は自由落下。
3. 「静かに真下に落とすより、水平に飛び出した方が速さは速いから、短い時間で着く」と考えた? 水平に飛び出した物体には水平方向に初速度はあるが、鉛直方向には自由落下する。
4. 「静かに真下に落とすより、水平に飛び出した方が速さは速いから、短い時間で着く」と考えた? 水平に飛び出した物体には水平方向に初速度はあるが、鉛直方向には自由落下する。
5. 正解 真下に落下した物体も、水平に飛び出した物体も、鉛直方向にはどちらも同じ自由落下運動をする。

表 D.26: 形成的テスト③第 7 問

%	W	X	Y	Z	All
1	5.88	3.33	0.00	0.00	1.80
2	11.76	10.00	3.12	3.12	6.31
3	5.88	3.33	0.00	0.00	1.80
4	0.00	10.00	3.12	0.00	3.60
5	76.47	73.33	93.75	96.88	86.49

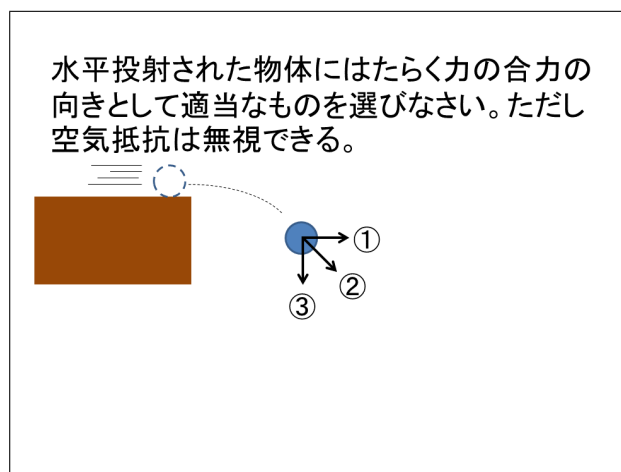


図 D.27: 形成的テスト③第 8 問 [114]

## 出題の意図

水平投射された物体に生じる加速度について確認して欲しかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. 落下物体に生じる加速度は重力加速度のみなので、重力のみはたらく。水平方向の速度を力と勘違いしている？
2. 速度＝力と勘違いしている？落下物体に生じる加速度は重力加速度のみなので、重力のみはたらく。
3. 正解 落下物体に生じる加速度は重力加速度のみなので、重力のみはたらく。

表 D.27: 形成的テスト③第 8 問

%	W	X	Y	Z	All
1	17.65	0.00	0.00	3.12	3.60
2	41.18	56.67	31.25	40.62	42.34
3	41.18	43.33	68.75	56.25	54.05

## 探究活動（3 時間）

ここでは生徒が個人またはグループで、摩擦力または空気抵抗に関する探究活動を行った。それぞれ「滑りやすいものと滑りにくいものの違いは何だろう」「空気抵抗が無視できないのはどのようなときだろう」といったような大テーマから、各自の興味関心に基づき課題と仮説を設定し、検証のための実験計画を立案し、実際に実験を行い、結果をまとめ、考察した。このような一連の探究の過程をレポートにまとめさせた。

## 形成的テスト④（1 時間）

2 学期期末テストの直前に、2 学期の学習の振り返りというねらいで実施した。形成的テスト③と同様に、運動の第 3 法則と、落体の運動の力と運動学に関する問題を 8 問実施した。各問題に

ついて、ARS 個別学習票で各生徒にフィードバックした、出題の意図、各選択肢を解答した生徒への学習コメント、そして各クラスの解答結果についてまとめる。

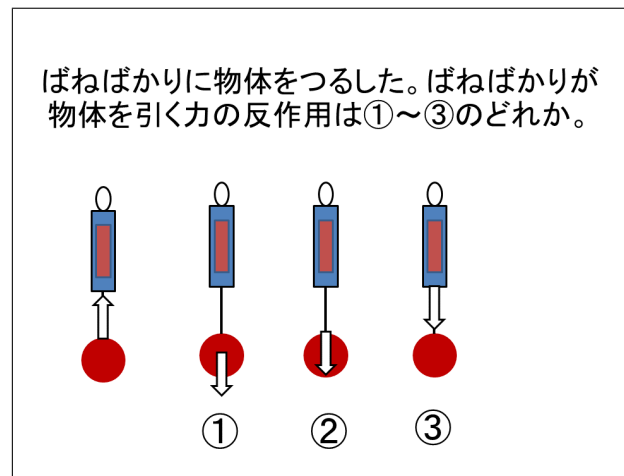


図 D.28: 形成的テスト④第1問 [107]

#### 出題の意図

作用反作用の法則と、力のつりあいについて整理してほしかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. 作用反作用の法則と力のつりあいを勘違いしていませんか？作用反作用は力を及ぼし合っている2つの物体に注目します。作用が「〇〇が△△を押し力」なら反作用は「△△が〇〇を押し力」です。
2. 正解 作用反作用は力を及ぼし合っている2つの物体に注目します。作用が「〇〇が△△を押し力」なら反作用は「△△が〇〇を押し力」です。
3. 「糸がばねばかりを引く力」を選んでしまっています。作用反作用は力を及ぼし合っている2つの物体に注目します。作用が「〇〇が△△を押し力」なら反作用は「△△が〇〇を押し力」です。

表 D.28: 形成的テスト④第1問

%	W	X	Y	Z	All
1	25.00	34.48	9.38	18.75	21.10
2	50.00	37.93	53.12	34.38	43.12
3	25.00	27.59	37.50	46.88	35.78

#### 出題の意図

作用反作用の法則を確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

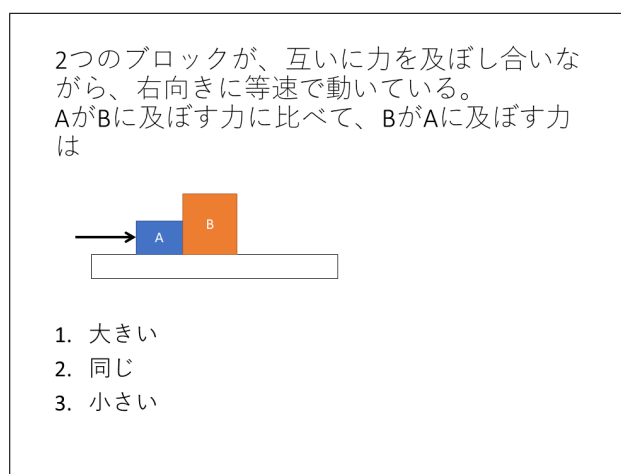


図 D.29: 形成的テスト④第2問 [114]

- 「Bが動きを妨げる」といったイメージでしょうか？作用反作用の法則はいつでも成立することを思い出しましょう。物体同士で及ぼし合う力はいつでも、同じ大きさと向きが逆でしたね。
- 正解 作用反作用の法則は条件によらず、いつでも成立します。大きさが同じで逆向きの力を及ぼし合うのです。
- 「右向きに動いているのだから、右向きの力の方が大きい」という考えでしょうか？作用反作用の法則はいつでも成立することを思い出しましょう。物体同士で及ぼし合う力はいつでも、同じ大きさと向きが逆でしたね。

表 D.29: 形成的テスト④第2問

%	W	X	Y	Z	All
1	12.50	3.45	0.00	3.12	3.67
2	75.00	51.72	78.12	56.25	64.22
3	12.50	44.83	21.88	40.62	32.11

#### 出題の意図

自由落下する物体にはたらく重力について確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

- 軽いほうが先に床に着くと考えた？問題文よりほぼ同時に着くので、生じる加速度は同じ。よって力は質量に比例するので、金属球のほうが大きい。
- ほぼ同時に床に着いたので力は同じと考えた？速度と力を混同しているのでは？生じる加速度は同じなので力は質量に比例する。よって金属球のほうが大きい。
- 正解 ほぼ同時に床に着くので生じる加速度は同じ。よって力は質量に比例するから、金属球のほうが大きい。

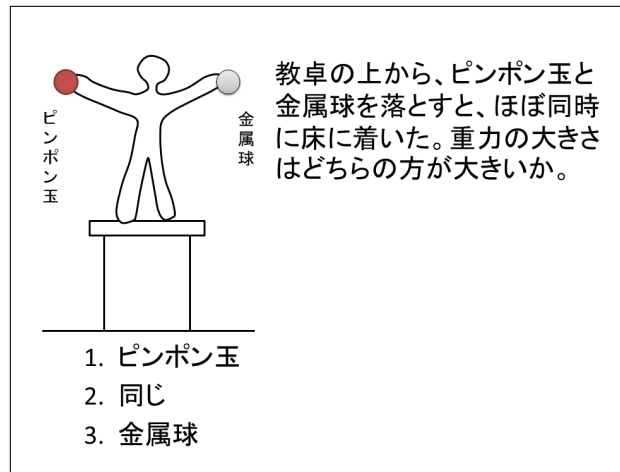


図 D.30: 形成的テスト④第 3 問

表 D.30: 形成的テスト④第 3 問

%	W	X	Y	Z	All
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	75.00	93.10	59.38	78.12	76.15
3	25.00	6.90	40.62	21.88	23.85

## 出題の意図

斜方投射された物体に働く力について確認して欲しかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

1. ボールは手から離れているので力は及ぼせません。ボールには重力のみ働きます。
2. 正解 ボールには重力のみ働きます。
3. ボールは手から離れているので力は及ぼせません。ボールには重力のみ働きます。
4. 放物運動する物体には下向き重力加速度が生じます。よって重力のみが働きます。

表 D.31: 形成的テスト④第 4 問

%	W	X	Y	Z	All
1	12.50	6.90	0.00	3.12	4.59
2	62.50	44.83	75.00	50.00	57.80
3	18.75	41.38	18.75	46.88	33.03
4	6.25	6.90	6.25	0.00	4.59

## 出題の意図



Aさんはバスケットボールの試合でシュートを打った。手から離れたボールが写真の位置まで上がったとき、ボールに働いている力は次のうちどれか？ただし空気抵抗は無視できるものとする。

1. 手で押した力  
2. 重力  
3. 手で押した力と重力  
4. 力は働いていない

(図は省略)

図 D.31: 形成的テスト④第 4 問

100gの物体Aと500gの物体Bを、上向きに同じ初速度で投げ上げた。手を離れてから元の高さに戻ってくるまでの間に働いている重力の大きさは、どちらの方が大きいか。

1. 100gの物体A  
2. 500gの物体B  
3. どちらも同じ

図 D.32: 形成的テスト④第 5 問

鉛直投げ上げ運動で、質量の違いによる物体に働く力の違いについて確認して欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

1. 「軽い物体の方が早く動くから大きな力」と誤解？物体は質量によらず同じ落下運動。 $ma = F$ より働く力は質量に比例します。質量が大きい程働く重力は大きいということです。
2. 正解 落下物体は質量によらず同じ運動をします。運動方程式  $ma = F$  より物体に働く力は質量に比例します。質量が大きいほど働く重力は大きいということです。
3. 速度や加速度と力を誤解していませんか？運動方程式  $ma = F$  より落下運動の加速度  $a$  は重力加速度  $g$  でどれも同じですが、質量  $m$  が違えば物体に働く力  $F$  は変わりますね。

#### 出題の意図

鉛直投げ上げ運動の速度  $v$  - 時間  $t$  グラフについて確認して欲しかったので出題した。

表 D.32: 形成的テスト④第5問

%	W	X	Y	Z	All
1	12.50	0.00	0.00	6.25	3.67
2	56.25	65.52	71.88	56.25	63.30
3	31.25	34.48	28.12	37.50	33.03

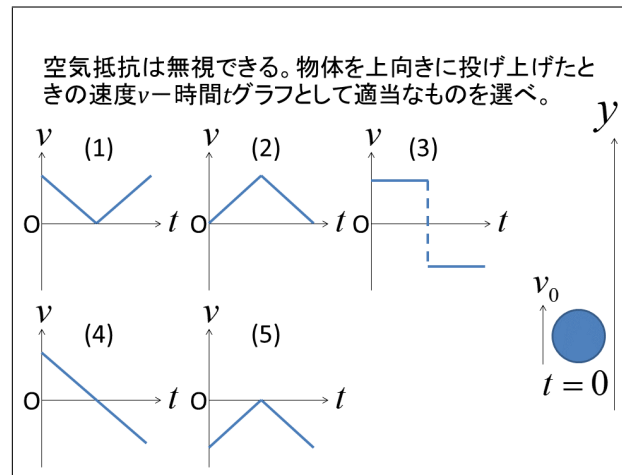


図 D.33: 形成的テスト④第6問

## 各選択肢についてのコメント

1. 最高点で折り返した後のグラフが×。速さと速度を区別できていないのでは？最高点で折り返してからは、下向き（負の向き）にだんだん速くなっていく運動になるので、右下がりの直線ですね。
2. 投げ上げ運動の上昇→静止→下降の動きにつられていませんか？縦軸が速度 $v$ であることを意識しましょう。
3. この選択肢のグラフは「上向き（正の向き）で一定の速度」→「下向き（負の向き）で一定の速度」という意味になります。最高点で不連続になってしまっていますね。
4. 正解 上向き（正の向き）の初速度を持ち、一定の割合で下向き（負の向き）の速度が増えていく（加速度が負で一定）等加速度運動をするので、 $v-t$ グラフは右下がりの直線ですね。
5. 変位 $x$ —時間 $t$ のグラフと誤解していませんか？投げ上げ運動の上昇→静止→下降の動きにつられていませんか？「最高点で速度がゼロ」は合っています。

## 出題の意図

鉛直投げ上げ運動の加速度 $a$ —時間 $t$ のグラフについて確認して欲しかったので出題した。

## 各選択肢についてのコメント

表 D.33: 形成的テスト④第 6 問

%	W	X	Y	Z	All
1	31.25	31.03	25.00	12.50	23.85
2	12.50	17.24	6.25	12.50	11.93
3	18.75	3.45	9.38	15.62	11.01
4	37.50	48.28	56.25	59.38	52.29
5	0.00	0.00	3.12	0.00	0.92

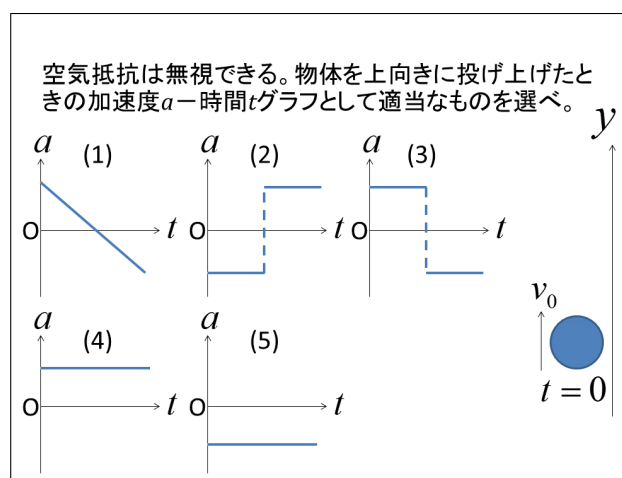


図 D.34: 形成的テスト④第 7 問

1. 速度  $v$ - 時間  $t$  のグラフと誤解していませんか？加速度は単位時間当たりの速度変化で、速度とは違います。働いているのは重力だけなので加速度は常に下向き（負の向き）で一定の大きさです。
2. 最高点を境に、加速度の向きが変わるとするのは誤りです。物体に働いているのは重力だけなので、加速度は常に下向き（負の向き）で一定の大きさです。
3. 最高点を境に、加速度の向きが変わるとするのは誤りです。物体に働いているのは重力だけなので、加速度は常に下向き（負の向き）で一定の大きさです。
4. 加速度が一定の大きさということは理解できていますね。ただし、この問題で正の向きは上向きです。物体に働いているのは重力だけなので、加速度は常に下向き（負の向き）です。
5. 正解 物体に働いているのは重力だけなので、加速度は常に下向き（負の向き）で一定の大きさですね。

#### 出題の意図

落下物体は、質量や初速度によらず、下向きで一定の大きさの重力加速度が生じる等加速度運動することの理解を深めて欲しかったので出題した。

#### 各選択肢についてのコメント

表 D.34: 形成的テスト④第7問

%	W	X	Y	Z	All
1	31.25	13.79	9.38	6.25	12.84
2	6.25	13.79	12.50	18.75	13.76
3	12.50	31.03	25.00	21.88	23.85
4	37.50	6.90	15.62	25.00	19.27
5	12.50	34.48	37.50	28.12	30.28

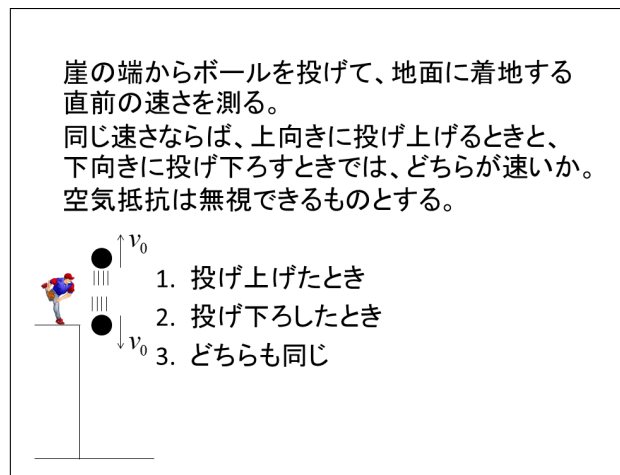


図 D.35: 形成的テスト④第8問

1. 高いところから落下してくるから速くなる、という考え?確かにそうだが、どれだけ速くなるかまで考えよう。高さが同じとき、速度は大きさが同じで向きが反対。
2. 直観的には投げ下ろした方が速くなりそうだが、正解は3。高さが同じとき、速度は大きさが同じで向きが反対。結局、崖の端を下向きに通過するときの速さは同じ。
3. 正解 高さが同じとき、速度は大きさが同じで向きが反対。崖の端を下向きに通過するときの速さは同じになる。

表 D.35: 形成的テスト④第8問

%	W	X	Y	Z	All
1	18.75	13.79	31.25	12.50	19.27
2	12.50	34.48	18.75	28.12	24.77
3	68.75	51.72	50.00	59.38	55.96

## 付 録 E 力学概念調査

問題秘匿のため省略。









## 付録F CLASS

次の42の文は、物理の学習についての、いろいろな考えを述べたものです。それぞれの文の内容について、あなたの考えに最も合う評価を示す番号を1つだけ選択してください。

1. まったく同意しない
2. 同意しない
3. どちらともいえない
4. 同意する
5. 強く同意する

文の意味がよくわからない場合は回答欄を空欄のままにしてください。文の意味は分かっているけれどはっきりした意見がない場合は選択肢3を選択してください。

1. 物理学を学ぶ上での大きな問題の1つは、私が必要とする知識や事実すべてを記憶できなければならないということです。
2. 物理の問題を解いているときに、答えとして妥当な値を見積もろうとします。
3. 日常で経験することを物理学で理解しようと試みます。
4. 問題をできるだけ多く解くことが、私にとっては効果的な物理の学習方法です。
5. 物理で、あるテーマを学習して分かったと思っても、同じテーマの問題を解くのに苦労します。
6. 物理学は、多くの関連性のない内容が集まってできています。
7. 物理学者たちの研究が進むにつれて、現在使われている物理概念の大半が誤りであることが判明するでしょう。
8. 物理の問題を解くときは、問題で与えられた変数が使われている公式を見つけて値を代入します。
9. 私の物理の効果的な学習方法は、教科書をよく読むことです。
10. 通常、1つの物理の問題を正しく解く方法は1通りに限られます。
11. 私は、物事のしくみやはたらきがどうなっているのかを理解するまで満足できません。
12. 先生が授業で上手に教えてくれなければ、私は物理を学ぶことができません。
13. 物理の式が概念の理解に役に立つとは思いません。式は単に計算するためにあるからです。

14. 私が物理を勉強するのは、学校外での自分の生活に役立つ知識を身につけるためです。
15. 物理の問題を解いていて最初につまずいた場合は、たいてい別の解き方を考え出そうとします。
16. 本気で学べば、ほとんど誰でも物理は理解できます。
17. 物理を理解することは、基本的に、それまで読んだり示されたりしたことを思い出せるということです。
18. ある物理の問題を2つの異なる方法で解いた場合、2つの異なる値が正解になることもあります。
19. 物理を理解するために、友人や他の学生と物理の議論をします。
20. 物理の問題が解けなくてあきらめたり誰かの助けを求めたりするのに、私は5分とかかりません。
21. 試験中に問題を解くのに必要な特定の式が思い出せないときは、他に答えを見つける手立てが私には（合法的には！）ほとんどありません。
22. ある物理の問題を解くのに使った方法を別の問題に適用するときは、問題の設定がよく似ているときに限ります。
23. 物理の問題を解いていて、計算結果が予想と大きく違ったら、問題を見直さずに計算結果を信じようとします。
24. 私にとって物理で大切なことは、公式を正しく使えるようになるより、むしろ公式の意味をよく理解することです。
25. 物理の問題を解くのは面白いです。
26. 物理学の公式は、測定できるさまざまな量の間的重要な関係を表しています。
27. 新しい科学知識は、広く受け入れられる前に、政府に承認されることが重要です。
28. 物理を学ぶと世界の仕組みについての自分の考えが変わります。
29. 物理を学ぶのには、例題の解答を暗記することで十分です。
30. 物理を理解するための論理的な思考法は、日常生活に役立てることが出来ます。
31. この問は読まずに回答している人を識別するために設定してあります。この設問の回答としては選択肢4（「同意する」）を選択してください。
32. 公式がどのように導かれるかを考えるのに長い時間をかけるのは、時間の浪費です。
33. 私にとって物理を学ぶ良い方法は少数の問題を詳細に検討することです。
34. 私はたいていの場合、物理の問題を解く方法を考えつくことができます。
35. 物理学の内容は、私が現実の世界で経験することとほとんど関係がありません。
36. 1つの物理の問題をいろいろな方法で解くと、理解に役立つことがあります。

37. 物理を理解するために、自分の経験について考えたり、分析中のテーマにその経験を関係づけたりすることがあります。
38. 数式を使わなくても、物理の概念を説明することはできます。
39. 物理の問題を解くとき、問題にどの物理の概念を適用するかについてよく考えます。
40. 物理の問題で行き詰まると、自力で何とかして解くということはまずありません。
41. 物理学者が同じ実験を慎重に行って、非常に違う2つの正しい結果がでるということは有り得ます。
42. 物理を学習しているとき、私は重要な情報を与えられたまま暗記するよりはむしろ、その情報をすでに知っていることと関連付けます。



## 参考文献

- [1] 文部科学省: 高等学校学習指導要領 (平成三十年告示), 文部科学省, (2018).
- [2] 文部科学省教育課程企画部会: 論点整理, 文部科学省, (2015).
- [3] Carl Benedikt Frey, Michael A. Osborne: *Technological Forecasting and Social Change*, **114**, (2017), pp. 254-280.
- [4] 西村墨太: *物理教育* **64-1**, (2016), pp. 34-35.
- [5] 中部地域大学グループ・東海 A チーム: “アクティブラーニング失敗事例ハンドブック～産業界ニーズ事業・成果報告～”, 一粒書房, (2014).
- [6] 松下佳代・京都大学高等教育研究開発推進センター編著: ディープ・アクティブラーニング 大学授業を深化させるために, 株式会社勁草書房, (2015).
- [7] 森朋子, 溝上慎一: “アクティブラーニング型授業としての反転授業 [理論編]”, 株式会社ナカニシヤ出版, (2017), p.20.
- [8] Wiggins, G., & McTighe, J. “Understanding by design: Professional development workbook.”, *Alexandria, VA: Association for Supervision and Curriculum Development.*, (2004).
- [9] 佐藤文隆, 小牧研一郎 他: “物理基礎 新訂版 教授用指導書 付録 アクティブ・ラーニング (AL) を行うにあたって”, (2017), pp. 270-271.
- [10] 新田英雄: *物理教育* **60-1** (2012) pp. 17-22.
- [11] D.Hestenes, M.Wells, G.Swackhammer: “Force Concept Inventory” *Phys. Teach* **30** (1992) 141-158.
- [12] E.Redish: “Teaching Physics with the Physics Suite” *Wiley* (2003). 翻訳は, 日本物理教育学会監修: 「科学をどう教えるか」, 丸善出版, (2012).
- [13] 新田英雄: *日本物理学会誌* **71(1)**, (2016), pp. 40-43.
- [14] 仮説実験授業研究会編: “仮説実験授業研究第1集”, 株式会社仮説社, (1981).
- [15] 玉田泰太郎: “理科授業の創造—物質概念の基礎を教える”, 新生出版, (1978).
- [16] 石井登志夫: *大学の物理教育* **22-2**, (2016), pp. 60-63.
- [17] 村山哲哉: “「自分事の問題解決」をめざす理科授業”, 図書文化社, (2013).
- [18] Kyohei Yoshinaga, Miki Kubota and Masahiro Kamata: *Phys. Educ.* **50-1**, (2015), pp. 23-27.

- [19] 新田英雄: 物理教育 **64-3**, (2016), pp. 204-208.
- [20] F. K. Richtmyer: *American Journal of Physics* **1(1)**, (1933), pp. 1-5.
- [21] M.McCloskey and D.Kohl: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* **9** (1983) 146-156.
- [22] E.Mazur: “Peer Instruction: A user’s manual” *Person-Prentice Hall* (1997).
- [23] 安田淳一郎, 植松晴子, 新田英雄: 物理教育 **59-2**, (2011), pp. 90-95.
- [24] R.Hake: *Am.J.Phys* **66** (1998) 64-74.
- [25] 谷口和成: 物理教育 **65-3**, (2017), pp. 170-175.
- [26] 各種概念調査は, Physport で手に入れることができる。ただし, 登録が必要である。  
(<https://www.physport.org/>) 2018年8月12日確認。
- [27] 長谷川大和ら: 日本物理学会第71回年次大会概要集, (2016), 3350.
- [28] 金森大和, 新田英雄: 物理教育 **65-3**, (2017), pp. 139-144.
- [29] 新田英雄, 植松晴子, 森口真靖: 大学の物理教育 **20**, (2014), S53-S56.
- [30] A. Madsen, et al.: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* **11**, (2015), 010115.
- [31] A. A. diSessa, “Toward an Epistemology of Physics”, *Cognition and Instruction* **10**, (1993), pp. 105-225.
- [32] 平本健太, 新田英雄: 物理教育 **62-3**, (2014), pp. 167-170.
- [33] 山崎仁博: 東京学芸大学修士論文 (2011).
- [34] 市川伸一: “学習と教育の心理学” 岩波書店 (1995).
- [35] 鈴木亨: 物理教育 **56-1** (2008) pp. 10-15.
- [36] F.Reif and J.H.Larkin: *J.Res.Sci.Teaching* **28** (1991) pp. 733-760.
- [37] 岸澤, 他: 物理教育通信 **126**, (2006).
- [38] 新田英雄: 日本物理学会誌 **66-8**, (2011), pp. 629-632.
- [39] 西村墨太: じっきょう理科資料 (株式会社実教出版) **No.8** pp. 12-15.
- [40] 植松晴子: 物理教育 **63-1**, (2015), pp. 2-7.
- [41] 金長正彦: 物理教育 **65-3**, (2017), pp. 161-165.
- [42] 西村墨太: 物理教育通信 **166** (2016) pp. 92-97.
- [43] 新田英雄, 塚本浩司: 大学の物理教育, **17-1**, (2011), pp. 16-19.
- [44] 川島愛美: “物理概念調査による授業効果の分析と評価” 東京学芸大学修士論文 (2011).

- [45] W. K. Adams, et al.: Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **2** (2006) 010101.
- [46] 新田英雄, 石本美智: 日本物理学会 2015 年秋季大会概要集, (2015), 3073.
- [47] A. Madsen, S. McKagan, and E. Sayre: Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **9**, (2013), 020121.
- [48] R. D. Knight 著, 並木雅俊監訳: “ FIVE EASY LESSONS 物理を教える 物理教育研究と実践に基づいたアプローチ ”, 丸善出版株式会社, (2017).
- [49] Karen Cummings: “ Understanding Physics: 1st Edition ”, Wiley, John & Sons, (1994).
- [50] David R. Sokoloff, Ronald K. Thornton: “ Interactive Lecture Demonstrations - Active Learning in introductory Physics. ”, Wiley, (2004).
- [51] P. Laws: “ Workshop Physics: Activity Guide, 3 volumes ”, John Wiley & Sons, (1999).
- [52] L. C. McDermott, et al., “ Physics by Inquiry 2 vols ”, John Wiley & Sons, (1996).
- [53] L. C. McDermott, P. S. Shaffer, and the Physics Education Group at the University of Washington: “ Tutorials in Introductory Physics ”, Prentice Hall, Upper Saddle River NJ, (1998).
- [54] M. Wittmann, et al., “ Activity-Based Physics Tutorials ”, John Wiley & Sons, (2004).
- [55] D. R. Sokoloff, R. K. Thornton, and P. Laws: “ RealTime Physics ”, Vernier Software, Portland OR, (1995).
- [56] 西岡加名恵, 石井英真, 田中耕治編: ”新しい教育評価入門 人を育てる評価のために”, 株式会社有斐閣, (2015).
- [57] 安藤輝次: 関西大学学校教育学論集 **3**, (2013), pp. 15-25.
- [58] Scriven, M: “ The Methodology of Evaluation, Perspectives of Curriculum Evaluation ”, edited by Tyler, R. W., Gane, R. M., and Scriven, M., Rand McNally & Company, (1967).
- [59] 梶田叡一: “ 教育評価 [第 2 版補訂 2 版] ”, 株式会社有斐閣, (2010).
- [60] B. S. Bloom ほか著 (梶田叡一, 渋谷憲一, 藤田恵璽訳): “ 教育評価法ハンドブック—教科学習の形成的評価と総括的評価 ”, 第一法規, (1973).
- [61] D. Royce Sadler: *Instructional Science* **18**, (1989), pp. 119-144.
- [62] Ramaprasad, A: *Behavior Science***28**, (1983), pp. 4-13.
- [63] P. Black and D. Wiliam: *Assessment in Education***5(1)**, (1998).
- [64] P. Black and D. Wiliam: *Phi Delta Kappan***80(2)**, (1998).
- [65] P. Black and D. Wiliam: *Phi Delta Pappan***86(1)**, (2004), pp. 10-16.
- [66] P. Black, et al.: *Assessment for Learning*, Open University Press, (2003).
- [67] Assessment Reform Group: *Assessment for Learning 10 Principles*, (2002).

- [68] Paul Black, Dylan Wiliam: *Educational Assessment, Evaluation and Accountability 1-(1)*, (2009).
- [69] R. Stiggins, et al.: *Classroom Assessment for Student Learning*, (Educational Testing Service), (2004).
- [70] H. L. Andrade: “Summing Up and Moving Forward”, *Handbook of Formative Assessment*, edited by H. L. Andrade and G. J. Cizek, Routledge, (2010).
- [71] 文部科学省平成 30 年 10 月 1 日教育課程部会資料 1- 3, 平成 30 年 9 月 20 日児童生徒の学習評価に関するワーキンググループの資料より “学習評価に関する資料”, (2018).
- [72] OECD 教育研究革新センサー編 (有本昌弘監訳): “形成的アセスメントと学力-人格形成のための対話型学習を目指して”, 明石書店, (2008).
- [73] 安藤輝次: 奈良教育大学教育実践開発研究センター研究紀要 21, (2012), pp. 55-64.
- [74] 小柏香穂理, 浜本義彦, 王躍, 刈谷丈治, 小河原久治: 情報処理学会研究報告 CE-122-22, (2013), pp. 1-4.
- [75] 渡辺理文, 黒田篤志, 森本信也: 横浜国立大学研究論集 1, (2014), pp. 25-32.
- [76] Rogoff, B.: “Children ’ s guided participation and participatory appropriation in sociocultural activity, Development in context : Acting and thinking in specific environment, R. H. Wozniak and K. W. Fisher (Eds.), Lawrence Erlbaum Associates, (1993) , pp.121-153.
- [77] Brown A L, et al., Distributed expertise in the classroom, In Distributed cognitions: Psychological and considerations, G. Salomon(Eds.), *Cambridge University Press.*, (1993), pp. 188-228.
- [78] 長沼武志, 森本信也: 理科教育学研究 56-1, (2015), pp. 33-45.
- [79] 渡辺理文, 森本信也, 小湊清隆: 理科教育学研究 56-4, (2016), pp. 469-480.
- [80] Olle Balter, Emma Enstrom, Bernhard Kingenberg: *Computer & Education* 60-1, (2013), pp. 234-242.
- [81] Chih-Ming Chen, Ming-Chuan Chen: *Computer & Education* 52-1, (2009), pp. 256-273.
- [82] Robert J. Dufresne, William J. Gerace: *The Physics Teacher* 42-7, (2004), pp. 428-433.
- [83] Clemens Wagner and Andreas Vaterlaus: *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **6**, Suppl. I, (2012), pp. 410-415.
- [84] 森川久雄: “授業のストラテジー 2 評価のストラテジー”, 学事出版株式会社, (1977) , pp. 142-143.
- [85] Chaiphath Plybour: *Dissertations***536**, (2015),
- [86] Ruita Nishimura, Hideo Nitta: *JPS Conf. Proc. (The Physical Society of Japan)* **1**, (2014), pp. 017030-1 - 017030-4.
- [87] 西村壘太, 新田英雄: *物理教育* **62-1**, (2014), pp. 7-12.



- [88] 西村墨太: 物理教育 **66-1**, (2018), pp. 28-31.
- [89] 西村墨太: 物理教育通信 **171**, (2018), pp. 93-104.
- [90] 西村墨太, 新田英雄: 物理教育 **66-4**, (2018), pp. 243-248.
- [91] 西村墨太: 国際中等教育研究 (東京学芸大学附属国際中等教育学校研究紀要) **12**, (2019), (印刷中).
- [92] ARS 機器については, 例えばKEEPAD JAPAN 社 Web ページ <http://www.keepad.com/jp/> (2018 年 6 月 10 日閲覧), 株式会社 IC Brains Web ページ <http://icbrains.com/> (2018 年 6 月 10 日閲覧) .
- [93] 兼田真之: “高校物理教育におけるピア・インストラクションの実践” 東京学芸大学修士論文 (2008).
- [94] 高橋春美, 新田英雄: 物理教育 **57-4** (2009) 297-302.
- [95] H. Nitta: *Phys.Rev.ST Phys.Educ.Res* **6-2** (2010) 020105.
- [96] 新田英雄, 松浦執, 工藤知草: 科学教育研究 **38-1**, (2014), pp. 12-19.
- [97] 後藤敬祐: 東京学芸大学大学院 修士論文, (2017).
- [98] 市川伸一: “教育の羅針盤 1「教えて考えさせる授業」を創る 基礎基本の定着・深化・活用を促す「習得型」授業設計” 株式会社図書文化社 (2008).
- [99] D.P.Ausubel: *Journal of Educational Psychology* **57** (1960) 267-272.
- [100] 統計に関しては, 例えば, 山内光哉: 心理・教育のための統計法 (第 3 版), サイエンス社, (2010).
- [101] Lauren E. Kost, Steven J. Pollock and Noah D. Finkelstein: ”Unpacking Gender Differences in Students’ Perceived Experiences in Introductory Physics” *PERC Proceedings 2009, AIP Press* **1179** (2009) 177-180.
- [102] G.Kortemeyer: ”Gender differences in the use of an online homework system in an introductory physics course” *PRST Phys.Educ.Res.* **5** (2009) 010107-1-8.
- [103] 教育科学総合研究会 HP: <http://www004.upp.so-net.ne.jp/kyoukasouken/index.htm>. (2017 年 8 月 9 日閲覧).
- [104] Chris T.Richardson and Brian W.O’Shea: *Am.J.Phys.* **81** (2013) 231.
- [105] 鈴木亨: 東京学芸大学博士論文, (2009).
- [106] 米国学術研究推進会議編著, 森敏明, 秋田喜代美監訳: “授業を変える—認知心理学のさらなる挑戦—”, 株式会社北大路書房, (2012).
- [107] 東京学芸大学 基礎自然科学講座 物理科学分野 新田英雄研究室で作成。
- [108] 元東京学芸大学附属高等学校 物理科 川角博氏による作成。

- [109] Mechanical Wave Conceptual Survey を参考に筆者が作成 (Physport 参照)。
- [110] 平成 25 年度大学入学者選抜大学入試センター試験物理 I 第 1 問-問 5
- [111] 平成 20 年度大学入学者選抜大学入試センター試験物理 I 第 3 問 B 問 4
- [112] 平成 15 年度大学入学者選抜大学入試センター試験物理 IB 第 4 問 B 問 5
- [113] 平成 23 年度大学入学者選抜大学入試センター試験理科③物理 I 第 3 問 B
- [114] Maryland 大学 PER グループの Web ページ <https://www.physics.umd.edu/perg/>(2018 年 12 月 6 日確認) で紹介されている問題を参考に筆者が作成。
- [115] 佐藤文隆, 小牧研一郎, ほか 16 名: 物理基礎新訂版, 実教出版株式会社, (2018), p. 11.

## 謝辞

本研究を進め、博士論文としてまとめるにあたっては、多くの方々からご指導とご支援を賜りました。心より御礼申し上げます。

はじめに、主旨導教員としてご指導いただいた新田英雄先生（東京学芸大学教授）に感謝申し上げます。新田先生には、学部3年生で新田研究室に配属されてから、大学院修士課程2年間、そして修了後、教員として働き始めてからも、厳しくも温かいご指導をいただけてきました。幅広い物理教育の知識と経験、そして何より教育や研究に対する熱意により、新田先生にここまで導いていただいたお陰で、博士論文として研究をまとめることができました。大変お忙しいお立場であるにも関わらず、多くの時間を指導に割いてくださいました。重ねて、心より感謝申し上げます。

鎌田正裕先生（東京学芸大学教授）には、理科教育の立場から貴重なご指導を賜りました。また、研究者として立ち立つために必要なことは何か、そして、これからの理科教育や物理教育で何をしていくべきかなどを教えてくださいました。大芦治先生（千葉大学教授）には、教育心理学の立場から丁寧なご指導をいただきました。博士論文としてまとめるにあたり、先行研究との関係をより明確にする重要性などを教えてくださいました。伏見陽児先生（元千葉大学教授）には、本研究の方法論について貴重なご意見をいただきました。伏見先生からご指導いただいたことで、曖昧であった研究の目的や方法がより明確になり、ここまで進めることができました。和田一郎先生（横浜国立大学教授）には、形成的評価研究の専門的な見地から丁寧なご指導をいただきました。本研究の成果や課題を生徒の視点から捉える見方を与えてくださり、多くの示唆を得ることができました。植松晴子先生（東京学芸大学准教授）には、物理教育研究の専門的な見地から、貴重なご意見をいただきました。チュートリアルをはじめとした物理教育研究に基づく相互作用型授業の実践とその研究に関して、豊富な知識と経験からご助言いただきました。

本研究を進め、博士論文としてまとめるにあたり、国立大学附属高等学校、公立高等学校、国立大学附属中等教育学校の生徒、教職員の皆様にご協力をいただきました。本研究は、生徒の皆さんのご協力なくしては成立していません。私の授業、研究活動にご協力いただいた、すべての生徒に感謝申し上げます。

川角博先生（NHK 高校講座物理基礎講師）、小林雅之先生（東京学芸大学附属高等学校教諭）、市原光太郎先生（東京学芸大学附属高等学校教諭）、横畠加奈子先生（新宿区立落合第二中学校教諭）には、教材・教具に関することや、授業観、物理教育や学校現場に関する様々なことをご教授頂いたり、学校外での研修会、講習会、サークル活動をご紹介頂いたりしました。恵まれた環境の下で授業実践させていただいたことを感謝致します。

秋山崇先生（神奈川県立逗葉高等学校）からは、本研究に関して多くのご指導、ご助言をいただくとともに、教師として多くのことを学ばせていただきました。社会の変化に注目し、これからの学校教育における評価が、より形成的なものとなるべきであるということなど、様々なことを教えてくださいました。そして、ツールソフトの開発や形成的評価を導入した授業の開発と実践に、協同で取り組んでくださいました。今、教師そして研究者としての私があるのは、秋山先生がいたからです。心より感謝申し上げます。

東京学芸大学附属国際中等教育学校理科の長友結希先生、北岡和樹先生、齋藤淳一先生、鮫島朋美先生、佐藤恵美先生、堀内順治先生、仲沢隆先生、川上佑美先生には、ご指導、ご支援とともに、常に温かい励ましをいただきました。感謝申し上げます。

新田研究室の学友、先輩、OB・OG、後輩の皆様には、本研究に関する議論に快く応じて頂き

ました。特に平本健太先生（神奈川県立茅ヶ崎北陵高等学校）は、修士課程のときから共に物理教育について研究し、互いに切磋琢磨し合う仲間であり、辛いときにはいつも助けてくださる先輩でした。博士課程の先輩である堀井孝彦先生（東京学芸大学附属世田谷小学校）には、ゼミ等の場で貴重な意見をいただきました。また、黒川明さん、森口真靖さん、植松研究室の渡邊耕心さんには、ご多忙のところ、学校へ足を運んで頂き、本研究にご協力いただきました。清水滉大先生（法政大学附属国際高等学校）、後藤敬祐先生（埼玉県立大宮中央高等学校定時制）、宗形操さん、江藤開さんをはじめとする後輩の皆様には、新田研究室の夏合宿などの場で、非常に重要な示唆をいつもくださりました。皆様に感謝申し上げます。

横浜物理サークル（YPC）、物理教育研究会（APEJ）、PEPPER 研究会の皆様には、例会等で授業や実験、学校現場に関する様々なことを、現職教員ならではの視点で御指導頂いたり、授業見学の場で多くのことをご教授頂くだけでなく、本研究に関するご議論、ご意見も頂きました。また、会うたびに本研究の進捗を気にかけてくださり、いつも温かい励ましのお言葉をかけてくださりました。この場をお借りして感謝申し上げます。

そして最後に、私の研究活動を支え、応援してくれた妻に、心から感謝申し上げます。

2019年3月

西村壘太