

パフォーマンス課題を取り入れた物理学授業の開発と実践 — 初年次力学授業における試み —

宮川 貴彦* 石田 智敬**

*理科教育講座

**京都大学大学院 教育学研究科 教育・人間科学講座

Development of a Physics Class using Performance Tasks — Practice in an Introductory Mechanics Course —

Takahiko MIYAKAWA and Tomohiro ISHIDA*

*Department of Science Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

** Graduate School of Education, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

1. 研究の背景と目的

1. アクティブラーニング論の興隆と課題

2008年の中央教育審議会（以下、中教審と略す）答申「学士課程教育の構築に向けて」では、知識・理解に加え、「論理的思考力」「問題解決力」「コミュニケーションスキル」などの「汎用的技能」や「創造的思考力」の育成が学士課程における共通目標の一つとして掲げられた（中教審, 2008）。また、2012年に出された答申「新たな未来を築くための質的転換にむけて」では、求められる能力観の変容から、「アクティブラーニング（AL）」をキーワードとした高等教育の質的転換が求められている（中教審, 2012）。このように、より高次の認知能力や汎用的技能をも含むコンピテンシーの育成や、それらを育成するための学習法を強調する流れは、近年、世界的に見られる傾向である。

このような潮流の中、ALという学習法は高等教育においても急速に広がりつつある。しかしながら、一部ではALの導入は必ずしも期待された成果を生まず、むしろ期待と相反する結果を生む状況にもあると指摘されている（松下, 2015）。そこで、松下佳代は外的能動性のみならず、内的（認知的）能動性をも重視するディープ・アクティブラーニングの必要性を提起している（松下, 2015）。つまり、頭もアクティブに動かそうというわけである。ディープという接頭語の付加には、外的活動における能動性を重視するあまり、内的活動の能動性がおざなりになっているAL型授業を批判する意味合いが込められている（松下, 2015）。つまり、ディープ・アクティブラーニングとは、学習の形態にとどまらず、学習の質に焦点を合わせる試みである。

2. パフォーマンス課題への注目

ディープ・アクティブラーニングを充実させていく手段の一つとして、パフォーマンス課題（performance task）への取り組みが注目されている。パフォーマンス課題とは、「リアルな状況で、さまざまな知識や技能を総合して使いこなすことを求めるような課題」を指す（松下, 2012）。また、「ある特定の文脈のもとで、さまざまな知識や技能を用いながら行われる、学習者自身の作品や実演（パフォーマンス）を直接的に評価する方法」をパフォーマンス評価（performance assessment）と言う（松下, 2012）。すなわち、パフォーマンス課題は、パフォーマンス評価において、学習者の振る舞いや作品などのパフォーマンスを引き出すために与えられる課題である。そして、引き出されたパフォーマンスは、ルーブリック（rubric）という評価基準表に基づいて評価される。このような「パフォーマンス評価」「パフォーマンス課題」「ルーブリック」などの考え方や技術は、1980年代の米国における標準テスト批判、そして、評価対象とする学力の範囲を拡張しようとする流れの中で開発された（石井, 2015）。つまり、パフォーマンス課題への取り組みは、知識や技能の習得に焦点を合わせた授業を乗り越え、知識・技能を総合的に活用する力（高次の認知能力）に、光を当てるものとなる。

パフォーマンス評価や課題という言葉自体が耳馴染みのないものであっても、高等教育においては、これらに類するものは、レポートや口頭発表による評価など、当たり前が存在する。また、教員養成分野における模擬授業などの実技や実演はまさにその典型例であろう。しかし、こうした評価の多くは、評価方法として十

分に構造化されているわけではなく、パフォーマンス評価として自覚化されていない。加えて、近年では、パフォーマンス評価のいちツールであるルーブリックのみが一人歩きするなど、パフォーマンス課題といったパフォーマンス評価における他の重要な要素がおざなりにされているとも指摘される(松下,2012)。実際、パフォーマンス課題に焦点を合わせた、高等教育(特に理数分野)における実践例は管見の限り乏しい。そこで、高等教育におけるパフォーマンス課題についても、パフォーマンス評価論の視点から、開発を進めていく必要がある。

3. 物理学授業におけるパフォーマンス課題への期待

伝統的な講義形式の物理学授業では、物理法則の概念が定着しない、学習した知識を身近な物理現象と関連付けて考える力が身につかない、などの問題点が指摘されている(Mazur,1997)。つまり、物理学の概念理解が表層的であったり単なる暗記にとどまったりなど、深い理解に至らない点、また、活用力といった高次の認知能力の育成といった点に課題があるということである。加えて、高等教育の物理学授業においては、微分積分を用いた複雑な数式変形にとらわれて、数式の表す意味を適切に読み取るといった学習まで至らない状況も珍しくない。先述の通り、パフォーマンス課題は、高次の認知能力に焦点を合わせるものである。そして、知識・技能を活用するパフォーマンス課題への取り組みは、概念の再解釈や知の構造化を促し、深い理解へともつながりうる。よって、パフォーマンス課題への取り組みを物理学授業に取り入れることで、指摘される物理学授業の諸問題を乗り越えることが期待される。

4. 本研究の目的と構成

以上から、本研究は、高等教育の物理学分野において、知識・技能の総合的活用を求めるパフォーマンス課題を取り入れた授業を開発・実践し、その成果や課題について検討することを目的とする。実践研究を行うことで、パフォーマンス課題やルーブリックのあり方、またそれらを取り入れた授業の方法を提案するとともに、実践における諸課題を抽出し整理する。

以下の章は、次のように展開する。まず、II章では、授業実践の概要や特徴について概括する。III章では、開発したパフォーマンス課題やルーブリック、また、それらの開発手続きについて述べる。IV章では、授業実践の学習成果について、成果物の直接評価と学生アンケートによる間接評価の2つの方法を用いてアプローチした結果を提示する。V章では、IV章の結果を踏まえて、パフォーマンス課題や授業実践が、どのような学習成果を生み出したのかについて検討する。最後に、VI章では、本研究の成果と課題について整理し、今後の展望や論点を提示する。

II. 授業実践の概要

1. 授業構成とねらい

授業実践を行なった「物理学I」は、愛知教育大学教育学部の初年次で開講されている、中学校・高等学校(理科)の教員免許取得を目指す学生の必修科目である。本授業の目標は、1.力学の基礎的な知識・技能の習得、及び2.それら知識・技能を総合的に活用していく能力の育成であった。目標1.は、計4回の小テストと期末に実施された筆記試験により評価した。目標2.は、3つのパフォーマンス課題への取り組みから総合的に評価した。授業は、「運動の法則」「振動現象」「仕事とエネルギー」の3つのテーマによって構成されている。各テーマの最後に、一連の講義で学んできた知識・技能を総合して活用することを求めるパフォーマンス課題に取り組むことが求められた(図1)。パフォーマンス課題を取り入れた授業を、教員養成課程において行うことの意義は、将来学生たちが教師となったときに、本授業の経験を生かすことができることにあると考える。

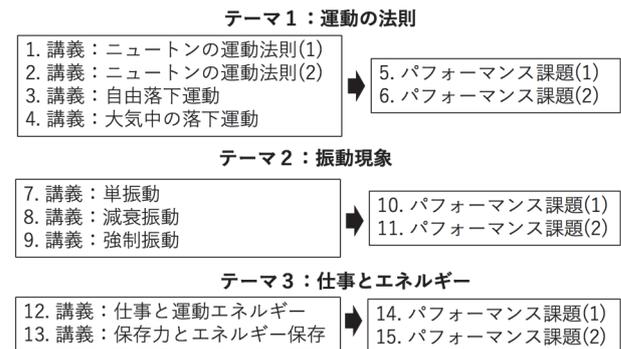


図1. 全15回の授業構成

2. パフォーマンス課題授業の進行

パフォーマンス課題に取り組む一連の授業は、2週連続で行われ、図2に示される手順で進行した。パフォーマンス課題に取り組む1回目の授業の初めに、課題とルーブリックが学生に提示された。個人で課題を検討する時間が設けられた後に、グループベースで検討が行われた。これらの活動を踏まえて、学生は課題解決に向けての方向性を定める。そして、1週間後に行われる2回目授業の始めまでに、個人単位で仮作品を仕上げることが求められた。

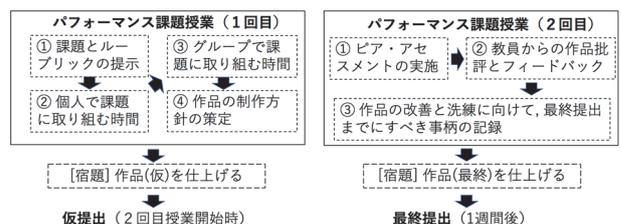


図2. パフォーマンス課題授業の進行

2 回目の授業は、仕上げてきた仮作品について、その改善を目的としたピア・アセスメント（以下 PA）を軸に展開される。PA では、学生同士がそれぞれの作品の良い点・改善できる点について、ルーブリックに基づいて指摘したり、課題解決の方略などについて検討したりした。PA の後、教員が、いくつかの学生の作品を取り上げながら、その作品の強みや弱みを指摘し、その改善方略を含むフィードバックを学生全体に向けて行なった。なお、作品の最終提出期限は、2 回目授業の 1 週間後に設定された。

講義やパフォーマンス課題に取り組む上で前提となる数学技能については、反転授業の形式を採用し、オンラインで講義動画を事前に視聴する予習を求めた。そして、こうした数学技能については、講義授業の初めに行う計 4 回の小テストで評価した。

3. 形成的アセスメントの実施

本実践は、学生の学習を助けることを目的とした形成的アセスメント (formative assessment) を、授業に組み入れている点に特徴づけられる。ここでの形成的アセスメントでは、主にオーストラリアの教育学者 D.R. サドラーの提唱した理論を参考とした (Sadler, 1989)。他にも P. ブラックや D. ウィリアムによる所論も参考にした (William, 2009)。先述の通り、授業中に形成的アセスメントとして、PA と教員から学生全体へのフィードバックを行ったが、更に、教員から学生個人に対するフィードバックも提供した。例えば、最終提出された課題は、作品の到達度をルーブリックに線引きする形で明示し、次の課題につながるアドバイスやコメントを記入して返却している。加えて、各テーマの最後にそれまでの授業を振り返り、次回課題の再検討や授業内容・構成の修正などの指導調節を適宜行った。

Ⅲ. パフォーマンス課題とルーブリックの開発

1. パフォーマンス課題の開発

本授業では、合計 3 つの課題を開発した。各パフォーマンス課題の題名は、テーマ 1 「小型航空機による大気中の物資投下」、テーマ 2 「逆さ振り子モデルによる建物の共振現象と制振機構の探究」、テーマ 3 「力学的エネルギー保存則の応用に関する授業の設計」である (図 3, 4, 5)。

これらパフォーマンス課題の開発においては、G. ウィギンズと J. マクタイによる「逆向き設計論 (backward design)」に基づく西岡 (2016) の理論や実践を参考にした。具体的には、妥当性 (評価したいものを実際に評価しているか)、真正性 (現実世界との関連があり、学習の意義を喚起させるものか)、レディネス (学習した知識・技能で解析可能なモデルであるか)、多様性・柔軟性 (学生の多様で自由な思考・表現

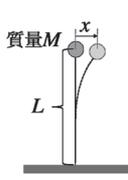
あなたは小型無人航空機による救援物資の運搬システムを開発する技術チームの一員です。あなたの役割は、上空を飛ぶ航空機から地上にある目標地点に向けて物資を投下する際の適切な投下位置について調査することです。第 1 段階として、適切な投下位置の物資の質量依存性を明らかにします。航空機が上空 60m を 36km/h で飛ぶ場合を想定して調査し、調査内容をまとめた報告資料を作成しなさい。物資が落下する間、物資には次式で表される速度 v に比例する空気抵抗と重力のみが作用するとします。

$$F_R = -av$$

上式に現れる定数 a は物資の大きさなどによって決まる正定数で、ここでは物資の質量によらず、 $a = 1.53\text{kg/s}$ であるとします。

図 3. テーマ 1 のパフォーマンス課題

大きな地震が起きると、建物が激しく揺れて倒壊するなどの大きな被害が生じます。地震の特性によって、高層ビルのような高い建物が大きく揺れることもあれば、戸建住宅のような低い建物が大きく揺れることもあります。どうしてこのような違いが生じるのか、地震動による建物の振動と建物の高さとの関連性について探究しましょう。また、地震動による建物の振動を低減する制振機構についても探究しましょう。具体的な議論を行うために、右図にあるような逆さ振り子模型を考えることにします。この模型の運動方程式は次のように与えられます。ここで、 M は棒に付けられた物体の質量、 L は支点から物体の重心位置までの高さ、 C は棒の剛性の強さをそれぞれ表します。ただし、棒の質量は無視でき、物体に働く重力も棒による弾性力に比べて弱く無視できるとします。この模型をもとに調べた内容を A3 用紙 (表裏面使用可) にまとめてください。



$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{C}{L^3} x$$

図 4. テーマ 2 のパフォーマンス課題

あなたは宮川先生の代わりに「物理学 1」の講義を担当することになりました。前回の講義では、保存力に対して位置エネルギーが定義できること、物体が保存力のみを受ける場合には力学的エネルギーが保存することが解説されました。今回の講義であなたは、力学的エネルギー保存則の応用例を示すため、以下の外力 F の作用を受けて運動する質量 m の物体の問題を取り上げて、物体のエネルギーに応じた運動の特徴について解説しなければなりません。

$$F = -F_0 \sin\left(\frac{x}{l}\right)$$

ここで、 F_0 と l は正定数とします。本講義を行う前に、90 分の講義の概要を示す学習展開 (様式あり) と講義全体の内容を示す学生への配布資料 (A4 紙 4~6 枚) を作成し、それらを宮川先生に提出しなさい。

図 5. テーマ 3 のパフォーマンス課題

を促すものか、作品が収束的なものにならないか) といった事柄について、検討している。例えば、学生のレディネスを踏まえ、テーマ 1 のパフォーマンス課題では、本来扱うべき速度の 2 乗に比例する抵抗力 (慣性抵抗) を速度に比例する抵抗力 (粘性抵抗) で置き換えるなど、一部現実性を欠くことを承知の上で、学習した知識・技能で解析可能なモデルを設定した (原, 1988)。このように、題材の現象を表す理想化モデルでさえもその解析は一般に困難であるため、主な受講生が 1 年生であることも考慮し、基盤となるモデルを設定するようにした。その上で、テーマ 2 の課題では論ずる現象に応じて、モデルの拡張を行うことを促した。また、全課題に共通して、より現実的なモデルを導入して発展的な議論を行う余地を残した。

ここで、それぞれのパフォーマンス課題の物理学的な視点からのねらいを簡単に説明する。テーマ 1 の課題は空気抵抗が働くときの落体の平面運動の質量依存性を明らかにする課題である。課題への取り組みを通して、ニュートンの運動法則の理解の深さに焦点を合わせることが本課題のねらいである。

テーマ 2 では、講義において減衰振動や強制振動と

表 1. パフォーマンス課題（テーマ2）のルーブリック

観点	概念的知識(わかる)	手続き的知識(できる)	コミュニケーション(伝える)	考察・解釈(考える)
観点の説明	問題に取り組むための概念的知識(力学的な振動現象に関するもの)が適切に習得されているか。	問題に取り組むための手続き的知識(力学的な振動現象に関する手続きで求められるもの)が適切に実行されているか。	自分の考え方を、数理的(数式等)・言語的(言葉等)・視覚的(図表・グラフ等)手段を活用し、適切に伝えているか。	問題に対して、技術(定性的・定量的に捉える、比較・分類する、関係性・法則性を探る等)を用いて、客観的・論理的に、考察・解釈をしているか。
素晴らしい(5)	力学的な振動現象に関して、以下程度での理解が認められる。 ・建物の振動と逆振り子模型の運動との対応関係を理解している。 ・建物の振動の固有周期と建物の高さの関連について理解している。 ・地震動による建物の振動の特徴について、地震動の周期と建物の固有周期の関係性と結びつけて理解している。 ・制振機構に必要な要素とその役割について理解している。 ・地震動による建物の振動エネルギーの時間依存性について理解するなど、更に発展的な概念的知識の習得が認められる。	・逆振り子模型を表す微分方程式から、固有周期を与える手続きを正しく実行している。 ・地震動による建物の振動を表す適切な模型を定式化して、振動の振幅の周期依存性を明瞭に示す手続きを正しく実行している。 ・制振機構を表す適切な模型を定式化して、制振機構の効果を明瞭に示す手続きを正しく実行している。 ・地震動による建物の振動エネルギーの時間依存性を示すなど、更に発展的な手続き的知識の習得が認められる。	自分の考え方を、いくつかの適切な、数理的(数式等)・言語的(言葉等)・視覚的(図表・グラフ等)手段を活用し、さらに進んだ、あるいは深い理解に寄与するような方法で不足なく説明し、わかりやすく伝えることができる。	問題に対して、いくつかの技術(定性的・定量的に捉える、比較・分類する、関係性・法則性を探る等)を用いて、加えて、角度を変えて捉えたり、類似する現象や応用に関する示唆を示したりするなど、客観的・論理的に、特に洞察に富んだ考察・解釈を行うことができる。
とても良い(4)	力学的な振動現象に関して、以下程度での理解が認められる。 ・建物の振動と逆振り子模型の運動との対応関係を理解している。 ・建物の振動の固有周期と建物の高さの関連について理解している。 ・地震動による建物の振動の特徴について、地震動の周期と建物の固有周期の関係性と結びつけて理解している。 ・制振機構に必要な要素とその役割について理解している。	・逆振り子模型を表す微分方程式から、固有周期を与える手続きを正しく実行している。 ・地震動による建物の振動を表す適切な模型を定式化して、振動の振幅の周期依存性を明瞭に示す手続きを正しく実行している。 ・制振機構を表す適切な模型を定式化して、制振機構の効果を明瞭に示す手続きを正しく実行している。	自分の考え方を、数理的(数式等)・言語的(言葉等)・視覚的(図表・グラフ等)手段を活用し、不足なく説明し、わかりやすく伝えることができる。	問題に対して、いくつかの技術(定性的・定量的に捉える、比較・分類する、関係性・法則性を探る等)を用いて、客観的・論理的に、洞察に富んだ考察・解釈を行うことができる。
良い(3)	力学的な振動現象に関して、以下程度での理解が認められる。 ・建物の振動と逆振り子模型の運動との対応関係を理解している。 ・建物の振動の固有周期と建物の高さの関連について理解している。 ・地震動による建物の振動の特徴について概ね理解している。 ・制振機構に必要な要素とその役割について一定の気づきを示している。	・逆振り子模型を表す微分方程式から、固有周期を与える手続きを正しく実行している。 ・地震動による建物の振動を表す適切な模型を定式化して、振動の振幅の周期依存性を示す手続きを概ね正しく実行している。 ・制振機構を表す適切な模型を定式化して、制振機構の効果を示す手続きを部分的に正しく実行している。	自分の考え方を、数理的(数式等)・言語的(言葉等)・視覚的(図表・グラフ等)手段を活用して、説明し、一部不足があるものの概ね伝えることができる。	問題に対して、技術(定性的・定量的に捉える、比較・分類する、関係性・法則性を探る等)を用いて、客観的・論理的に、概ね適切な考察・解釈を行うことができる。
十分でない(2)	力学的な振動現象に関して、以下程度での理解が認められる。 ・建物の振動と逆振り子模型の運動との対応関係を概ね理解している。 ・建物の振動の固有周期と建物の高さの関連について概ね理解している。 ・地震動による建物の振動の特徴について一定の気づきを示している。	・逆振り子模型を表す微分方程式から、固有周期を与える 手続きを概ね正しく実行している。 ・地震動による建物の振動を表す適切な模型を定式化して、振動の振幅の周期依存性を示す手続きを部分的に正しく実行している。	自分の考え方を、数理的(数式等)・言語的(言葉等)・視覚的(図表・グラフ等)手段を活用して、伝えようとするも、説明が乏しく適切に伝えることができていない。読み手が理解することが難しい。	問題に対して、技術(定性的・定量的に捉える、比較・分類する、関係性・法則性を探る等)を用いて、考察・解釈を試みるも、客観的・論理的に乏しく、一部主観的・直感的なものを含んでいる。
要努力(1)	力学的な振動現象に関して、理解が認められる記述がない。	・地震動による建物の振動状態を示す手続きを実行していないもしくは記述がない。	記述がない。もしくは数理的(数式等)・言語的(言葉等)・視覚的(図表・グラフ等)手段を活用し、伝えようとする試みていない。読手が理解できない。	記述がない。もしくは、問題に対して、技術を用いて、考察・解釈を試みていない。または、著しく主観的・直感的である。

いう新たな振動現象について学習している。そこで、これらの振動現象に対する知識理解の定着や知識の活用をねらい、現実世界との関連性がある地震動による建物の共振現象を題材に選んだ。ここでも学生のレディネスを踏まえて、建物の振動を解析可能な逆振り子でモデル化した(柴田, 2014)。また、地震動による建物の振動の建物の高さ依存性に加えて、様々な機構を持つ制振機構の仕組みについて探究させることで、物理学の本質的要素を抜き出して抽象化し、それを数式で表現する過程を含めるように工夫した。

テーマ3の課題は、力学的エネルギー保存則を応用することで、物体の持つ力学的エネルギーによって、状態を異なる形態の運動状態(単振り子であれば、振動状態と回転状態)に分類するものである。この課題は、物体が同じ法則、同じ力に従っていても、初期状態の違いから運動の多様性が生まれるという、様々な物理系(例えば惑星運動や固体中の電子の運動)に共通して見られる性質を一般化して捉えることができるかどうかに関心を合わせている。

2. ルーブリックの開発

当然のことながら、パフォーマンス課題は、正解・不正解の2分法で評価することはできない。よって評価基準表であるルーブリックをそれぞれの課題に対応して開発した。ルーブリックは「概念的知識」「手続き的知識」「コミュニケーション」「考察と解釈」の4観点(以下、概念・手続・伝達・考察と略す)と「素晴らしい

」「とても良い」「良い」「あと一歩」「要努力」の5つのレベルで構成される。表1にはテーマ2の課題に対するルーブリックが示されている。

ルーブリックの開発においては、主に、サドラーによるスタンダード準拠評価の考え方(Sadler, 1987)、松下佳代の理論や実践(松下, 2007, 2012)などを参考にしており、英国グラスゴー大学教育学部において実際に用いられているルーブリックも参考にした。また、「与えられたモデルを定式化し、数理的な手法を駆使して解析し、得られた数式について物理学の観点から考察と解釈を行う」という、物理学で要求される知識・技能の活用する力を見取ることができるルーブリックを目指した。

このような考え方にに基づき、4つの観点を設定した。概念的知識の観点は、物理学の基本概念や知識を課題解決に必要な要素と結びつけて理解しているかどうかを見取るものである。手続き的知識の観点は、モデルの定式化の手続き、定式化された方程式の解を得る手続き、得られた解を図表に表す手続きなどの手続き行為を正しく実行しているかどうかを見取るものである。コミュニケーションの観点は、解析結果や物理内容の理解を深めるための表現工夫がされているかどうか、わかりやすく伝えるために論理展開が明瞭であるかどうか、作品全体の様式の一貫性が高いかどうかなど、表現し伝える力を見取るものである。考察・解釈の観点は、定性的・定量的に分析をする、比較・分類をして結果を整理するなどの技術を用いて、解析結果を客

観的・論理的に考察や解釈ができていのかどうかを見取るものである。

概念と手続の項目については、課題文脈に強く依存するため、各課題において内容（記述語）が大きく異なっている。一方、伝達と考察の観点については、課題文脈に大きく依存しないため、全ての課題で同一の内容（記述語）となっている。尺度に関しては、パフォーマンスの質的レベルが明確に異なる段階で各レベルを区切り、5つのレベルを設定した。多くのレベルを設定すると評価者の認知的負担が増大し、また、レベルの設定が少なすぎると、ひとつのレベルに幅広いパフォーマンスが混在するなど問題が生じる。よって、5つのレベルが本課題を評価する上で適切であると判断した。具体的には、尺度「良い」が本授業の目標を達成しているレベルとして設定されている。「良い」のレベルを十分に超えた、つまり授業目標を十分に超えたパフォーマンスが発揮されている場合「とても良い」のレベルに位置付けられる。なお、「とても良い」のレベルを満たした上に、発展的な議論や洗練された手続き・技術が示されている場合に最高レベルである「素晴らしい」の評価が与えられる。

本実践では、学生の利用しやすさを考慮したルーブリックを、学生に事前提示することで、ルーブリックを「質的評価の道具」ととどまらず、「学習の道具」（高い質の作品の持つ特徴は何かを伝え、学びの指針となり導くもの）として機能させることを意図した。

IV. 授業実践の評価と結果

1. 評価手法 - 直接評価と間接評価 -

学習成果、及び、授業要素（ルーブリック、PA、教員フィードバック）の学習成果への寄与について、ルーブリックに基づく作品（成果物）の質的直接評価と、学生アンケートによる間接評価によって確認した。直接評価とは、学生のパフォーマンスを通じて - 「何ができるか」を学生自身に提示させることで - 学生の学習成果を直接的に評価することである（松下, 2012）。一方で間接評価とは、学生の学習行動や自己認識を通じて - 「どのように学習したか」や「何ができているか」を学生自身に答えさせることによって - 学生の学習成果を間接的に評価することである（松下, 2012）。これら2つのアプローチによって、両者から相互補完的に捉えて学習成果の内実を検討した。学生へのアンケート（間接評価）は、図6及び表2の内容で、全15回の授業の後に実施した。各質問項目に4件法（そう思う・ある程度そう思う・あまりそう思わない・そう思わない）で回答させた後に、その具体的内容について自由に記述させた。ここでは、選択項目による回答の誘導性をできるだけ排除するために、自由記述形式を採用した。

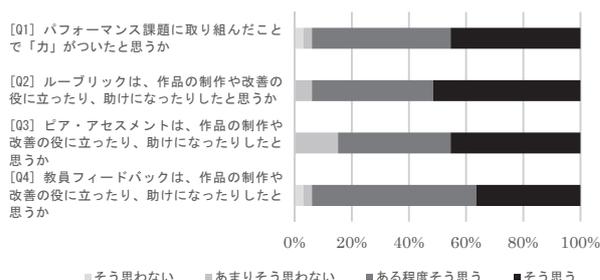


図6. 4件法アンケートの結果

表2. 自由記述の結果

<p>Q1. パフォーマンス課題に取り組んだことで、どんな“力”が身についたと思うか</p> <p>カテゴリ-1: 深く理解する力 [8名]</p> <p>(例) 高校数学・物理で理解していなかったことの理解が深まった。授業で公式を習って終わりではなく、式がどのような意味を持っているのかまで考えられた。</p> <p>カテゴリ-2: コミュニケートする力・対話の中で考えを深める力 [7名]</p> <p>(例) 他人の考え方を取り入れることで、さらなる段階についても考えられるようになった。他人の作品を見て自分とは何が違うのか、何が足りないのか考える力。</p> <p>カテゴリ-3: 現実世界での活用や現象と関連づけ考える力(具体⇔抽象)[7名]</p> <p>(例) 現実世界における活用や身近な物理現象と関連づけて考える力。数式から現実のより具体的な事象に結びつける力が身についた。現実にあるものを数式で表す力。</p> <p>カテゴリ-4: 自ら思考する力・表現する力 [16名, 内訳: 表現3名, 多視点4名]</p> <p>(例) 自分で考えて自分の思ったことを表現できる。自分で深い思考をする力。詳しく考察する力が身についた。多視点から物理現象をみることができる力が身についた。</p> <p>カテゴリ-5: 応用力 [5名]</p> <p>(例) 物理をただ学ぶだけではなく、それを活用する力。学んだことを応用することができ、発展することができた。応用力がとてもついたと思う。</p>
<p>Q2. ルーブリックはどんな点で助けになったり、役に立ったりしたと思うか</p> <p>カテゴリ-1: 課題に取り組む際の方針立て・道筋立て [11名]</p> <p>(例) 課題に取り組むときの取っ掛かりとして助けになった。方針を立てる助けになった。考え方の指針となる点。何から始めていいかわからない時に、あると助かる。</p> <p>カテゴリ-2: 行き詰まった時の方針立て・道筋立て [7名]</p> <p>(例) 考えが行き詰まったとき、助けになった。行き詰まった時に助けになった。つまり迷ったときに目を通して理解することで、かなり進行の役に立ったとおもう。</p> <p>カテゴリ-3: 評価観点や評価基準を知ること・自己評価 [5名]</p> <p>(例) 自分の作品に足りていない要素はなにかわかった。どの観点で述べる必要があるのかわかりやすい。評価のされ方がわかりやすい。</p>
<p>Q3. ピア・アセスメントはどんな点で助けになったり、役に立ったりしたと思うか</p> <p>カテゴリ-1: 自分の作品の改善できる点を知ること [11名]</p> <p>(例) 自分の足りない部分に気付くことができる。他人の意見を聞くことで改善点がわかった点。直さなければいけないところがよくわかった。</p> <p>カテゴリ-2: 他者の作品から、自分の作品改善のための方略や手段を知ること [15名]</p> <p>(例) 他人は、自分とは違う考えを持っているので参考になった。色々なアイディアをきくことができる。レイアウトや考察の着眼点を共有できる点。</p>
<p>Q4. 教員フィードバックはどんな点で助けになったり、役に立ったりしたと思うか</p> <p>カテゴリ-1: 自分の作品のよいところ・改善するところがよくわかる [10名]</p> <p>(例) 自分でできているところできてないところがわかりやすかった。良くなかった点を振り返ることができ、復習に役立った。何が良くて何が悪かったか反省できる。</p> <p>カテゴリ-2: その他 [8名]</p> <p>(例) 他人との交流ではなかった発見や新しい考えのきっかけとなった。専門家の意見は一味違う。次回の課題へ向けて参考になった。心の支えになった。</p>

成果物としてのパフォーマンス課題の作品は、ルーブリックに基づいて質的に評価された（直接評価）。作品の評価は担当教員が単独で行なった。ここで、ある学生のテーマ2の作品を例に、ルーブリックに基づいてどのように質の評価がなされたのか、その手続きを説明する（図7）。本作品の評価は概念・手続・伝達・考察の順にそれぞれ5・4・3・4という評価であった。地震による建物の振動と建物の高さとの関連性と制振機構の仕組みに対して、モデルを定式化し、正しい手続によって解を得て、その解の持つ内容について客観的に考察できていたため、概念・手続・考察がそれぞれ高評価となった。特に概念が5と高い評価であるのは、与えられたモデル（1質点モデル）を超えるモデル（多質点モデル）の性質まで含めて発展的な議論を与えていたためである。

地震動による建物の振動と建物の高さとの関連性を調べるために、逆振り子模型を用いて考察していく。また、地震動以外の外力は無視できるものとして考える。

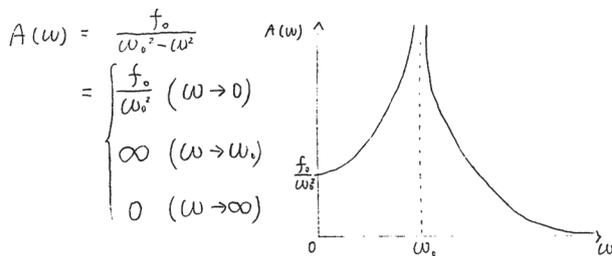
① 運動方程式とその解について

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{C}{L}x + F_0 \cos(\omega t)$$

M : 模型に取り付けられた物体の質量
 L : 支点から物体の重心までの高さ
 C : 棒の剛性の強さ
 $F_0 \cos(\omega t)$: 地震動による外力
 ω_0 : 模型の固有振動数
 ω : 地震動の振動数

$\Rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{C}{ML}x + \frac{F_0}{M} \cos(\omega t)$
 ここで、 $\sqrt{\frac{C}{ML}} = \omega_0$, $\frac{F_0}{M} = f_0$ とすると、
 $f_0 \cos(\omega t) = \frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x$ となる。
 ここで $x = A \cos(\omega t + \alpha)$ とし、代入すると、
 $f_0 \cos(\omega t) = -\omega^2 x + \omega_0^2 x$
 $= (\omega_0^2 - \omega^2)x$
 $\therefore x = \frac{f_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \cos(\omega t)$ となる。

得られた解より、模型が運動するときの振幅は、
 $A = \frac{f_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$ となり、地震動による外力に依存していることが分かる。外力の大きさが増大するにつれ、振幅Aは増大し、比例関係にある。また、振動数への依存は以下のように、極限状態やグラフ化して考察する。



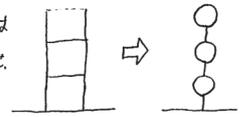
これより、地震動の振動数 ω が、模型の固有振動数 ω_0 に近づくほど、模型の振れは大きくなる。同様に、振動運動の周期は、振動数に反比例するので、地震動の周期と模型の固有周期が近いほど、模型の振れは大きくなることも分かる。

② 建物の固有周期と地震動の関連性

物体の固有周期 T_0 は、その固有振動数 ω_0 と $\omega_0 T_0 = 2\pi$ の関係にあるので、 $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ となる。よって、模型の固有周期 T_0 は $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{ML}{C}}$ となる。このことから、位置が高い物体ほど固有周期は長くなり、反対に、低い物体ほど固有周期は短くなる。また、①の考察より地震動の周期と物体の固有周期が近いときに大きく振れることが分かっているので、地震動の周期が長いとき、高い物体が振動運動をはじめ、反対に地震動の周期が短いとき、低い物体が振動運動をはじめることが分かる。

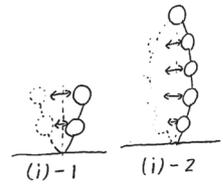
③ 建物の振動と逆振り子模型の運動との対応関係

実際の建物の振動を考えると、建物は様々な形や大きさをもった剛体であるから、複数の質点を用いたモデルに置き換えて考察する。また、用いる多質点モデルは1つの階層につき1つの質点を対峙させてすべて同じ質量とする。



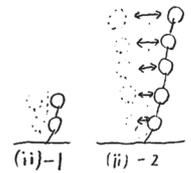
(i) 地震動の周期が短いとき

②までの考察より、地震動の周期が短いとき、低い建物が振動することが分かっている。2階相当の質点が振動する地震動が起きた場合、(i)-2 のような中高層な建物は節と腹ができて、振動する。



(ii) 地震動の周期が長いとき

(i)と比較して、地震動の周期が長くなるときは、2階建ての建物は(ii)-1のように(i)-1に比べて振幅が小さくなる。また、(ii)-2のように、高い位置にある質点がより大きく振れることが分かる。



(i),(ii)より、地震が発生した際は、その地震の周期に分かちず、より高い建物の方が圧壊や崩壊の危険性が高まるということが考察できる。比較的短い周期の地震のときは、高い建物は大丈夫という事はセコなく、尤も、(ii)-2の上の場合には、2階付近に、非常に強い応力がうかがえ、

圧壊する恐れがある。

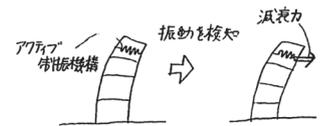
④ 制振機構について

(1) アクティブ制振

アクティブ制振とは、建物の振動を抑制するように、逆向きの減衰力を与えて、振動を相殺することである。減衰力を $G_0 (>0)$ とすると、

①の運動方程式は

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{C}{L}x + F_0 \cos(\omega t) - G_0 \cos(\omega t)$$



$$\Leftrightarrow \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{C}{ML}x + (f_0 - g_0) \cos(\omega t)$$

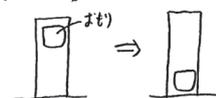
このとき解は $x(t) = \frac{f_0 - g_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \cos(\omega t)$ となり、

振幅 $A = \frac{f_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$ と比較すると振幅が小さくなっていることが分かる。

(2) セミアクティブ制振

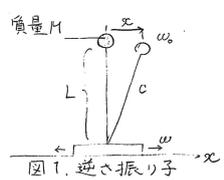
セミアクティブ制振とは、建物が地震動によって振動したときに、固有周期を変化させることで、振動を抑制することである。

例えば、建物の強度を高め、また、非常に質量の大きいおもりを方法がある。固有周期は、建物内で移動させることによって、建物全体の重心を移動させることで、固有周期を変える方法も考えられる。



<調査の趣旨>
地震の特性によって、高い建物が大きく揺れることがあるのは、低い建物が大きく揺れることもある。この違いを、地震動で与える「建物の振動」と「建物の高さ」との関連性について探求する。
※建物の振動とは、角振動数と振幅。

<調査方法>
図1の逆さ振り子模型を考慮して、建物の揺れを調査する。



ここで、Mは棒に付けられた物体の質量、Lは支点から物体の重心までの高さ、Cは棒の剛性の強さとする。ただし、棒の質量は無視でき、物体に釣り重力和棒による弾性力に比べて弱く、無視できるとする。
水平方向にx軸をとり、変位がxの時、物体には $\omega/L \cdot x$ の力が変位と反対向きに αL (α :定数)の抵抗力が働いて、地震によって周期的外力 $F_0 \cos(\omega_0 t)$ が加わる。

<方針>
この調査は、次の方針で進める。

- ① 水平(x)方向の運動方程式を立て解く。
- ② 抵抗力なしについて考察する。
- ③ 「外力なし」の一般解について考察する。
- ④ 「抵抗力なし」と「外力なし」について考察する。
- ⑤ ω 依存性について考察して、振幅・高さ・角速度の関係を導き、建物の振動と建物の高さとの関連性をまとめる。
- ⑥ エネルギーの見方。
- ⑦ 制振機構について考察する。

⑤ 振幅の ω 依存性を考えると、

$$A(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2 \omega^2}}$$

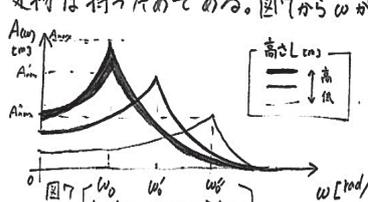
→ 外力の振動数が建物の固有振動数と一致($\omega \rightarrow \omega_0$)した時、振幅が最大値 $A(\omega)_{max}$ をとる。

$$A(\omega)_{max} = \frac{F_0}{2\eta\omega_0} = \frac{F_0}{2\eta} \sqrt{\frac{M}{C}} \times \sqrt{\frac{L}{L^3}}$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_0}{L} = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

$$= \sqrt{\frac{C}{M}} \times \sqrt{\frac{L}{L^3}}$$

建物の高さによりただ一つの振幅をもつ関数として示すことができた。高さに対応する固有振動が存在し、それと同じ振動を外力として地震が建物に与えた時、大きく揺れる。
地震の特性によって、高い建物が大きく揺れたり、反対に低い建物が大きく揺れたりすることがあるのは、高さに応じた固有振動数と建物は持ったためである。図7から ω が小さい(周期が長い)時は長い建物が共鳴し、大きく揺れていることが分かる。



抜粋部分 ①

抜粋部分 ②

図8. ある学生作品からの抜粋(テーマ2)

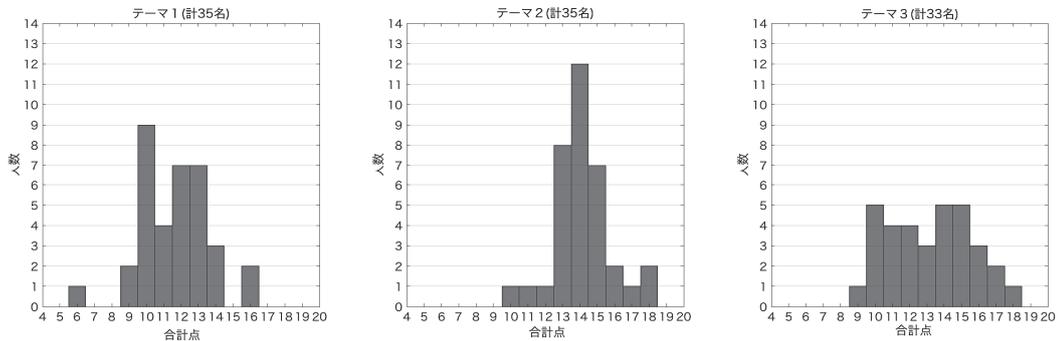


図9. パフォーマンス課題の度数分布図

一方、本作品の伝達が3にとどまっている理由は、地震周期と建物の揺れの振幅の関係において、建物の高さによる比較をわかりやすく説明する工夫が不足していたためである。この点に関して、別の学生の作品を一部抜粋したものを図8に記載する。この学生の作品の伝達は5と評価された。まず、この作品では振幅の地震周期依存性について、建物の高さによる比較を直接示すグラフを与えるなど、解析結果をわかりやすく説明していた(ただし振幅の最大値を得る手続きに一部誤りがある)(抜粋部分②)。また、この作品では、図8(抜粋部分①)のように導入部で課題目的や内容構成を示すなど、作品全体を見通すための工夫がなされていた。

2. 直接評価の結果

以上の方法により、全学生(履修者35名)の作品の

質をルーブリックに基づいて直接評価した。図9はテーマ課題ごとの全観点の合計点の度数分布図を示している。表3は観点別の平均点、標準偏差を各テーマの課題ごとに示している。なお、課題によって難易度が異なるため課題間における点の単純比較はできない。

表3. 観点別平均点(μ)と標準偏差(σ)

観点	概念	手続	伝達	考察
テーマ	$\mu = 3.23$	$\mu = 3.03$	$\mu = 2.63$	$\mu = 2.74$
1	$\sigma = 0.42$	$\sigma = 0.56$	$\sigma = 0.64$	$\sigma = 0.77$
テーマ	$\mu = 4.11$	$\mu = 3.57$	$\mu = 3.31$	$\mu = 3.14$
2	$\sigma = 0.52$	$\sigma = 0.49$	$\sigma = 0.62$	$\sigma = 0.49$
テーマ	$\mu = 3.55$	$\mu = 3.48$	$\mu = 3.03$	$\mu = 3.12$
3	$\sigma = 0.61$	$\sigma = 0.61$	$\sigma = 0.72$	$\sigma = 0.84$

3. 間接評価の結果

学生アンケートの有効回答者数は 33 名であり、本授業履修者に対する回答率は 94%であった。4 件法の結果は図 6 の通りであった。また、表 2 に自由記述による回答を、その類似性によってカテゴリー分けした結果が示されている。

V. 結果の考察

1. 直接評価の考察 - 成果作品に見られる特徴 -

ここでは、成果作品に見られる特徴を抽出し、学習成果の内実について検討する。図 7 に示された作品のように、テーマ 2 の課題では 35 名中 13 名の学生が与えられたモデルを無批判に受け入れるのではなく、そのモデルの妥当性や前提条件などについて検討していた。他にも、テーマ 3 の課題では、モデルに対して多くの学生が単振り子との関連性を見出す中、だるまの運動との関連性を指摘する学生が 33 名中 10 名いた。また、だるまの運動の数理モデルを立てて解析しようとする学生も 2 名いた。これは通常の筆記試験では見られない特徴である。パフォーマンス課題への取り組みによって、学生は現実の現象と照らし合わせた上でより発展的な課題を自ら見出し検討を行っており、これはパフォーマンス課題に取り組むことで得られた学習成果の第 1 の特徴である。

また、同じく図 7 の作品にも表れているように、多くの作品で、様々な形態を持つ制振機構の仕組みについて探究する中で、物理現象としての本質的な要素を抽出する（抽象化）という物理学の視点での深い思考力が発揮されていることが窺える。全体の作品を通じて見ても 35 名中 25 名の学生は何らかの意味で制振機構の仕組みを定式化して理解しようと試みていた。そして、その内 15 名の学生は定式化されたモデルの与える結果について考察と解釈を与えていた。他にも、3 名ではあるが、テーマ 3 の課題において、与えられたモデルとは全く異なる惑星運動と結びつけて、従う法則と力は同じでも初期状態の違いによって運動形態が質的に変化するという共通の性質を見出す学生が見られた。すなわち、現象の本質的要素の抽出という物理学的視点での深い思考力が発揮されていたという第 2 の特徴が指摘できる。

最後に、どの課題にも共通している特徴として、学生たちは自らの考えを説明するために積極的に図表を作成していた点が挙げられる。筆記試験であれば解析結果を示す図を与えることそれ自体が求められがちであるが、パフォーマンス課題では物理内容を説明する上で有効な図を自らが考案する（図 8 参照）。こういった過程を通じて、科学的な視点での豊かな表現力が発揮されている。そして、このような深い理解を伴う豊かな表現力は、視覚的手段（図表など）にとどまらず、

数理的手段（数式など）や言語的手段（言葉など）と効果的に組み合わせられて活用されることで発揮されていた。これは、第 3 の特徴といえよう。

このような 3 つの特徴に鑑みれば、学生が、パフォーマンス課題のねらい通り、学んだ知識・技能を、自ら積極的に総合して活用していたことが裏付けられる。知識・技能の総合的な活用は、認知的に高次なものである。一般には、高次であることが必ずしも学習の深まりを保障するものではない。しかし、本実践では知識・技能の総合的な活用（つまり学習の高次化）が、学習の深まりにも寄与していることが窺える。パフォーマンス課題への取り組みによって、学習の高次化と深化が連動し、統一して達成されていたと考えられる。

2. 間接評価の考察

Q1 の結果から、殆どの学生がパフォーマンス課題に取り組むことで「力」がついたと実感していることがわかる。また、表 2（自由記述の結果）で示されている力の特徴からは、学生が、課題への取り組みを通して、高次の認知過程に関与していたことが、直接評価と同様に窺える。Q2 の結果からは、本研究のねらい通り、学習者はループリックを作品制作の指針として機能させ、学習を助けるものとしていたことが窺える。そして、Q3・4 からは、学習者の学習を助けることを意図して組み入れられた形成的アセスメント（ピア・アセスメントや教員フィードバック）に関して、学習者自身の学習状況の把握と作品制作のさらなる改善に役立っていると、学生が感じていたことが裏付けられた。

VI. 本研究の成果と課題

1. 本研究の成果

以上の直接評価と間接評価の結果や考察を踏まえれば、次のことが指摘できる。1 点目は、パフォーマンス課題を物理学授業に取り入れたことで、多くの学生は、深い理解と知識・技能の総合的な活用（拡張的なパフォーマンスを生み出すこと）へ至ることができていたという点である。これは、ディープを意味付ける際に松下が言及していた、ウィギンズらの「理解（understanding）」（解釈や応用のようなより高次の段階も含む包括的な知の働き）やアンダーソンらの高次の認知過程へ、学生の学習が到達していたということであろう。このような学習は、具体的には、V 章で述べたが、より発展的な課題を自ら見出すモデル化やその解析、また、物理現象としての本質的な要素を抽出する深い思考力の発揮（抽象化）などとして指摘できた。2 点目は、学生アンケートの結果などから、ループリックや形成的アセスメントが学習者の学びを支える足場として機能していたということである。また、1 点目であげたような学習を達成するためには、パフォー

パフォーマンス課題ただそのみを授業に取り入れるのではなく、2点目の指摘のように、それぞれの授業要素がうまく結びつき学生の学習を助けるように構造化される必要があることが示唆される。以上2点を踏まえれば、開発したパフォーマンス課題とルーブリックの有効性を一定程度裏付けると共に、実践レベルでの授業とアセスメントの枠組みの一例を提案できたとと言えるだろう。

2. 本研究の課題と今後の展望

本研究を通して、成果と同時にいくつかの課題も残された。まず、ルーブリックやピア・アセスメントのあり方については、より慎重に検討していく必要がある。本実践のルーブリックの特性を踏まえると、これは作品制作の方向性・在り方を少なからず規定する。つまり、作品が収束的になり、創造性が抑制されるという懸念がある。しかしながら、対象が1年生であることに鑑みれば、一定の方向づけは、作品づくりを有効に機能させる効果があったとも考えられる。同様の指摘がピア・アセスメントに対してもなされるだろう。このように、教育実践の際には、ルーブリックの記述やピア・アセスメントの方法について慎重に検討し、学習者の実態を踏まえた臨機応変な対応が求められる。

加えて、ルーブリックの観点・尺度の妥当性や記述語の設定についても、物理学や設定された課題の文脈に即して、さらなる検討が必要となる。例えば、より現実的なモデルは複雑でその解析は困難となる。そのため物理現象の議論は豊富となるが、手続きに不備が現れやすくなるというジレンマが生じてしまう。本実践においては、こうした場合に、場面ごとに手続き的知識の評価基準を設定した。また、ルーブリックの考察・解釈の記述語に、物理学の考察過程で頻繁に行う「極限状態について検討する」を加えるなど、より物理学の文脈に即した記述語への変更が求められる。

また、本実践では作品の評価を単独で行ったために、評価が主観的になりがちである。つまり、比較可能性の程度に関する課題である。これらを克服するには、複数の教員による評価が理想ではあるが、高等教育機関において1科目の評価を複数の教員であたる機会を設けることは容易ではない。そのため、教員の評価スキルの熟達(鑑識眼の発達)が必要不可欠になってくる。最後に、本実践の形式は、教員の負担が少なくなく、認知的負担と労働的負担、両者軽減の視点でさらなる検討と改善が必要になる。

そして、これら実践課題に加えて、さらに研究を進めていくための発展的な論点を、いくつかあげることができる。1点目は、フィードバックの効果や理解度に関することである。学生アンケートではフィードバックの提供を好意的に捉える結果が得られたが、実際に学生がどの程度フィードバックを理解して改善に活かしていたかなど、フィードバック効果の内実につい

てより詳細な検討が求められるだろう。

2点目は、自己評価に関することである。本実践では、自己評価といった取り組みは行われていない。ピア・アセスメントのその先として、自己評価をどのように効果的に実践に取り入れるかについてはさらなる課題として検討したい。

謝辞

本研究の一部は、愛知教育大学の平成29年度大学教育研究重点配分経費の助成を受けて行った。

引用参考文献

- 石井英真『現代アメリカにおける学力形成論の展開 [増補版]』東信堂, 2015年.
- ウィギンズ G・マクタイ J. 著, 西岡加名恵訳, 『理解をもたらすカリキュラム設計「逆向き設計」の理論と方法』日本標準, 2012年.
- 中央教育審議会「学士課程教育の構築に向けて(答申)」, 2008年.
- 中央教育審議会「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて～生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ～」(答申)」, 2012年.
- 柴田明徳『最新耐震構造解析』森北出版, 2014年.
- 西岡加名恵『教科と総合学習のカリキュラム設計』図書文化社, 2016年.
- 西岡加名恵『資質・能力を育てるパフォーマンス評価』明治図書, 2017年.
- 原康夫『物理学通論 I』学術図書出版社, 1988年.
- 掘哲夫・西岡加名恵『授業と評価をデザインする 理科一質の高い学力を保障するために』日本標準, 2010年.
- 松下佳代『パフォーマンス評価』日本標準, 2007年.
- 松下佳代「パフォーマンス評価による学習の質の評価: 学習評価の構図の分析にもとづいて」『京都大学高等教育研究』第18巻, 2012年, pp.75-114
- 松下佳代『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』勁草書房, 2015年.
- 松下佳代・石井英真『アクティブラーニングの評価』東信堂, 2016年.
- 溝上慎一『アクティブラーニングと教授学習パラダイムの転換』東信堂, 2014年
- Mazur, E., "Peer Instruction : A User's Manual", Prentice Hall, 1997.
- Sadler, D.R., "Specifying and promulgating achievement standards", *Oxford Review of Education*, 13-2, 1987, pp. 191-209.
- Sadler, D.R., "Formative assessment and the design of instructional systems", *Instructional Science*, 18-2, 1989, pp. 119-144.
- Wiliam, D., *Assessment for learning: why, what and how?*, University College London IOE Press, 2009.

(2018年9月25日受理)