

中学生の力学概念学習におけるコンピューターシミュレーションの活用の効果 Effectiveness of Using Computer Simulation for Middle School Students' Learning of Mechanics Concept

○吉村聡貴^{*1}, 隅田学^{*1}, 掛水高志^{*1}, 佐藤栄治^{*1}

YOSHIMURA Satoki^{*1}, SUMIDA Manabu^{*1}, KAKEMIZU Takashi^{*1}, SATOU Eiji^{*1}

^{*1}愛媛大学教育学部,

^{*1}Faculty of Education, Ehime University,

【要約】本研究は中学第三学年、仕事とエネルギーの単元学習において、生徒が扱うことができる操作が簡単な力学シミュレーション教材を開発し、それを用いた授業の学習効果を検討することを目的とした。中学校理科の力学概念の学習においては、物理現象を生徒自身が制御することを通して、科学的な視点や思考力・表現力・判断力を養うことも重要である。日常生活で発見した課題を解決していく取り組みを学習内容として取り扱い、急速に科学技術が発展していく社会の中で貢献していく人材の育成へとつなげる要素を授業に取り入れた。授業実践に基づく結果と考察から、自ら条件を整理して力学シミュレーションを制御することで、生徒は収集したデータから根拠を示しながら、仕事とエネルギーには密接な関係があること発見したことから、力学シミュレーションは生徒が科学的な深い考察するための促進剤になるということが分かった。これまでコンピューターシミュレーションの多くが高等学校の理論学習で多く活用されており、中学校理科の力学分野での実践例は少ない。本研究の結果より、力学シミュレーションの活用が、科学的な資質・能力を中学生に獲得させるための一助になりえるということが分かった。

【キーワード】課題発見力、課題解決力、力学シミュレーション、主体的・探究的な学び

I. はじめに：研究の目的

現在、中学校では理科離れする生徒が全国的に増加しており、科学に対して否定的な意識を持つ生徒が以前より多くなってきている。

令和4年度全国学力・学習状況調査 調査結果資料【全国版/中学校】(国立教育政策研究所, 2022)によると調査の対象となった国語・数学・理科の三教科において最も正答率が低かったのは理科であり、学習領域別に正答率を分類すると、最も得点できていなかった領域は「エネルギーを柱とする領域」であり、これは物理学にかかわる内容である。その他の領域については、得点率の高い順に「生命を柱とする領域」、「粒子を柱とする領域」、「地球を柱とする領域」であった。このような結果になった理由として、物理学の領域では光や音、力やエネルギー、電気など目に見えない事象を扱うことが多く、実験を行ったとしても着眼点が分からないことや、授業を聞くだけでは具体的にイメージするのが難しいということが挙げられる。

加えて、同資料に記載されている生徒の理科学習に対する意識調査アンケートの結果について一部紹介する。「理科の勉強は好きですか」や「理科の勉強は大切だと思いますか」、「理科の授業で学習したことは、

将来、社会に出たときに役に立つと思いますか」という三つ質問に対して“当てはまる”、“どちらかといえば当てはまる”と回答した生徒の合計は全体の60%以上であり、肯定的な意見を持つ生徒は一定数いるということが分かった。一方で「将来、理科や科学技術に関係する職業に就きたいと思いますか」という質問に対しては“当てはまる”と解答した生徒の合計は全体の約20%にしか満たなかった。このことから、生徒は理科や科学技術に対して学校教育の段階では肯定的に捉えているが、実際に自分の将来の夢や目標など、キャリア教育の視点から考慮したときには、科学と関わっていきたいと考える生徒は少ない。

次に、近年のギガスクール構想における生徒のICT機器の活用状況について、小中学校の学習指導に関する調査2021 中学校版基礎集計表(ベネッセ教育総合研究所, 2022)から、生徒の一人一台端末活用の実施状況について知ることができた。ICT機器を活用して行っている学習内容とその頻度に関する設問で分かったことは、インターネットを用いた情報収集や実験を行うときの記録としての動画や写真の撮影、結果と考察などの意見を整理して学級で共有することには比較的高い頻度で活用されていた、しかし、資料・作

品を作成することやシミュレーションを用いた取り組みに対しては ICT 活用の頻度は低い結果であった。学校教育で一人一台端末が標準設備になる中、生徒自身でコンピューターを制御して科学現象を再現したり、データを収集して科学的な解析をしたりする「シミュレーション」の活用が見られていなく、そもそもそういった授業実践があまり行われていないことが分かった。「シミュレーション」を活用した学びは、より探究的な課題解決学習の一つと考え、まずはその開発に着手することにした。

以上のことから、操作が簡易で生徒が直感的に扱うことが可能な、力学的な解析を行うことができるシミュレーション教材を開発し、その学習効果について検討することを本研究の目的とする。

II. 先行研究の特質と課題

中学校理科のエネルギーを柱とする領域における、コンピューターシミュレーションを用いた授業実践に関する先行研究について調べたところ、力と運動などの単元、凸レンズによる回折などの光の単元での研究報告を見つめることができたものの、「仕事とエネルギー」の単元を取り扱い、実際に生徒に制御させる教材はほとんど見られなかった。

Processing という物理シミュレーション教材を用いた凸レンズの授業研究の論文(吉田氏ら, 2020)では、物体と凸レンズの距離、凸レンズとスクリーンの距離を自由に生徒自身が変えることができ、光路がその都度表示されるシミュレーションであり、光源から出た光の光路を求める問題を実施したところ、生徒の作図能力が大きく向上していた。学力としてのスキルとその意義を統合したシミュレーションが求められることが分かった。

「力と運動」単元として、Error-based Simulation を用いた授業実践研究(今井氏ら, 2008)では、生徒が画面上で自由に物体を生成し、どの方向から力を加えるのかを設定でき、加わっている力を表示できるシミュレーションが活用されていた。物体を重ねたり並べたり、その座標も設定できるが力の大きさなど画面上で数値化されている部分は少なく、従来の理科実験のような集めたデータから法則や規則性を見出すといった数学的・物理学的な考察の材料が少ないシミュレーションであった。このことは PhET というシミュレーション教材を活用した授業実践(國仲氏ら, 2018)でも同

様だった。しかし、定性的な科学概念の学習としては非常に高い効果が示されていた。授業前後に実施するテストと3カ月後に実施する遅延テストの三つの試験で学力を評価した結果、3カ月後も授業内容の8割以上を覚えていることが分かり、生徒に根深く内容が残るということがわかった。自らシミュレーションを制御して学習する方法は、生徒にとって印象的で頭に残りやすいということが分かる。その他、宇宙旅行シミュレーションを活用した事例研究(磯本氏ら, 2000)でも、高校生対象ではあるが人工衛星の打上げとドッキング、月や火星旅行といったシナリオの中で、ニュートン力学の応用場面を体験できるシミュレーションを使って、生徒の興味関心を最大限に引き出すことにより、長期間にわたって授業内容を忘れさせないことに成功していた。

最後に、最も本研究と内容が類似している実践論文として、物理シミュレーションでブランコの運動の軌跡を追跡することでエネルギーの変遷を考察するという実践(野崎氏ら, 1993)があった。ここでは、ブランコのひもの長さを変数として単振り子の運動方程式をコンピューターが数値的に解き、ブランコの位置を次々とディスプレイ上に描かせるようにしていた。また、そのブランコには人が乗っていることを想定し、ブランコに周期的な力が加わるように設定されており、より現実世界の挙動に近くなるように工夫されている。このシミュレーションでは、生徒はひもの長さだけに注目すればよく、操作は簡易で、遊び感覚で行えるという点を高く評価した。課題としてはエネルギー変遷のグラフや各点における高さや速さの数値が表示されず、生徒が自らデータを収集して規則性を導くといった、振動のメカニズムを理解するという観点に難点がある。

先行研究から分かったこととして、コンピューターシミュレーションは目には見えない現象のイメージ化を行うことに長けており、実際に物体を運動させ、その軌跡をたどりながら、物的なデータを収集・解析する取り組み、数値やデータをグラフや表にまとめ、そこから規則性を見出させるための教材として適切である。一方で、力学解析が可能なシミュレーションを導入しようとする、その分、操作や表示も難しくなる。このため高校での理論学習にシミュレーションが用いられている例が多かったのではないかと考えた。また、WEB 上のものは数値化や法則の発見を目的とす

る授業にはあまり適さないが、生徒の興味関心を引き出す点で非常に優れている。

Ⅲ. 研究の方法

本研究の力学シミュレーションの開発には新興出版社啓林館の「interactivePhysics」というソフトウェアを活用し、下図1のような滑らかな斜面を下り降りて摩擦のある床の上を移動してやがて運動が停止する運動を再現した。

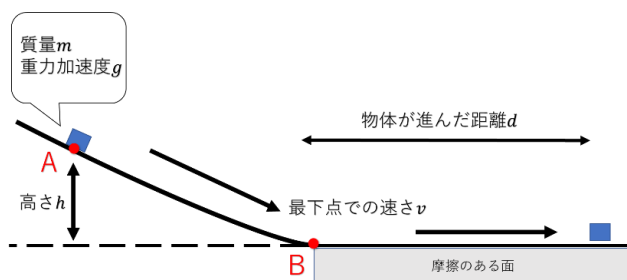


図1：取り扱う物理現象

注意事項として、物体の初期位置(高さが最大の点)を点 A、斜面の最下点(物体の速さが最大の点)を点 B とすること、斜面では摩擦は0であり、床の上のみ摩擦が働くということである。このように設定した理由は、仕事とエネルギーの関係を理解させる上で、力学的エネルギーの保存が成立する箇所とそうでない箇所を、生徒自身がシミュレーションを通して気づいてほしいという狙いがあったためである。

また、授業実践を行ったのち、このシミュレーションの効果について、知識・技能、思考力・表現力・判断力、主体的に学びに向かう態度の三つの観点からアンケートを実施し、生徒の理解度や学習意欲を調査した。表1はアンケートの質問の一覧である。

この質問に、「当てはまる」「どちらかといえば当てはまる」「どちらかといえば当てはまらない」「当てはまらない」の四つの選択肢で回答させた。問1~8は知識・技能に関する設問、問9~13は思考力・表現力・判断力に関する設問、問14~19は主体的に学びに向かう態度に関する設問である。問20と21は自由記述となっており、力学シミュレーションに対する印象や生徒の意見やアイデアを問うものとなっている。

表1：生徒用アンケートの質問内容

1.物体の質量が大きくなると物体の持つ運動エネルギーはどうなるのか理解できた。
2.物体の位置が高くなるほど物体の持つ位置エネルギーはどうなるのか理解できた。
3.運動エネルギーと位置エネルギーは移り変わっていくということが理解できた。
4.摩擦が働いていない斜面では、力学的エネルギーの保存が成り立っているということが理解できた。
5.摩擦が働くときと働かないときの運動の違い、及び摩擦力の力の方向が理解できた。
6.滑り降りる物体の持っていた力学的エネルギーは最終的に何に変換されたのか理解できた。
7.滑り降りる物体に対して摩擦力が「仕事をする」ということはどういう意味なのか理解できた。
8.科学において一般的に「仕事をする」とはどういう意味なのか理解できた。
9.力の方向や大きさ、物体の運動の様子を頭の中でイメージしやすくなった。
10.物体の持つエネルギーが移り変わっていく様子を頭の中でイメージしやすくなった。
11.力と運動、仕事とエネルギーについて自分の考えや理解したことを他者に伝えることができると思う。
12.力と運動、仕事とエネルギーの因果関係について、理由や根拠をもとに説明できるようになったと思う。
13.その他の物体の運動を分析するとき、どこに着目すればよいのか予測がつくと思う。
14.力学シミュレーションは日常生活の力学的な現象を理解するための道具として役立つと思う。
15.コンピューターシミュレーションは科学的な課題を解決するための道具として役立つと思う。
16.さらに詳細な条件を加えて力学シミュレーションを使ったらどのような運動になるのか気になった。
17.力学シミュレーションを休み時間や家庭学習などの授業以外でもっと使ってみたいと思う。
18.授業の振り返りやテスト前の復習などに力学シミュレーションを使いたい。
19.仕事とエネルギーの内容を学習するとき、力学シミュレーションを使うと全体として理解しやすかった。
20.今回使った力学シミュレーションは他にどのような現象に活用できると思いますか。
21.今回の授業で感じたことや意見を教えてください。

1. 教材化の視点

今回の力学シミュレーションの開発に活用したソフトウェアの特徴として、下の図2に示された様々な物理因子を簡単なつまみの上下操作で調整・制御できるということが挙げられる。

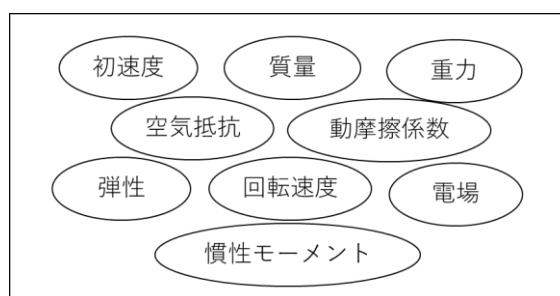


図2：つまみで制御可能な物理条件

当然、シミュレーションではこれらの物理条件が同じである場合、得られる結果は必ず同じであり、複数回の試行において誤差は完全に0になる。このシミュレーションの教材化において、仕事とエネルギーの関係について特に焦点化をするため、実際に生徒が扱うシミュレーションの画面には質量と床の荒さ(動摩擦係数)のつまみのみを表示させた(下図3)。また操作をより単純化させるために、その他の操作する箇所としてはシミュレーションの「実行ボタン」と初期位置に

物体を戻す「リセットボタン」の二つのみとし、四ヶ所のボタン操作だけでシミュレーションを制御できるようにした。

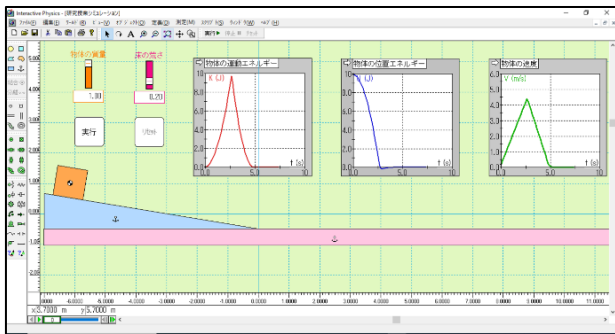


図3：デバイスに表示される
実際のシミュレーション画面

図3内の三つのグラフについて、全て横軸は時間を示す。左側の赤色グラフは縦軸を物体の運動エネルギーとし、中央の青色グラフは縦軸を物体の位置エネルギー、左側の緑色グラフは縦軸を物体の移動速度を表している。シミュレーションを実行することで、各エネルギーと速度の時間変化のグラフが自動的に描画される仕組みとなっている。

質量の調整つまみと運動する物体の色を橙色、床の荒さの調節つまみと床の色を桃色、斜面は青色、背景を緑色と色分けを工夫した。摩擦力が働く面とそうでない面の説明を行う際、便宜上の理由で斜面の色も変更した。さらに画面下部に定規を設置し、物体が床の上をどのくらいの距離を進んで停止するのか一目で分かるようにした。

2. 実践の概要

2023年12月6日に松山市内の公立中学校三年生を対象に32人学級を2クラス、合計64人の生徒に授業を行った。生徒の学習状況としては、「エネルギー」を柱とする領域は既習内容であり、中学校理科で学習する物理分野は一通り学んでいた。本実践授業の目的は、力学シミュレーションを用いたデータの収集とグラフの作成を通して、力学的エネルギーの特徴および、その保存と仕事との関係を理解することとした。学習課題を「力学的エネルギーはどこへ行ったのだろうか?」と設定し、生徒自身がこの課題を解決する糸口を発見できるような発問を行った。実践した授業の活動内容(下図4)について、本授業は3人1班

のグループ活動を基本として力学シミュレーションを扱った。

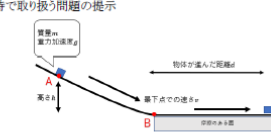
導入	1 既習内容の確認 (7分)	・力学的エネルギーの復習 (1)運動エネルギーと位置エネルギーの特性 (2)力学的エネルギーの保存の法則 (3)仕事をするとはどういうことか ・本時で取り扱う問題の提示	・既習事項や期末テストを踏まえて確認する。
	展開	 発問【力学的エネルギーはどこにいったのだろうか?】	・物体の座標と各点における物理量に留意させる。
展開	2 シミュレーションの実施 (20分)	「予想」持っていたエネルギーはどうなってしまうのか考える。 「実施」質量を自由な値に設定し、独立変数を床の荒さ、従属変数を進んだ距離としてシミュレーションを実施。 「結果」実験データを表に書き込み、グラフを作成させる。	・操作方法の説明に留意する。
	3 力学解析と考察 (15分)	・結果を解析して、根拠を基にした説明を行う。 (1)各種エネルギーが最大なとき物理量はどうなっているか。 (2)保存されているところとされていないところはどこか。 (3)抵抗力(摩擦力)が大きいほど進む距離はどうなるか。 (4)失った力学的エネルギーの行方を説明できるか。	・ブレーキで火花を散らす電車を例に挙げる。
結び	6 振り返り (8分)	発問【保存されない力学的エネルギーの行方は?】 ⇒摩擦力が仕事することによってエネルギーが奪われた。 ⇒他のエネルギーに変換された。	・教科書の仕事に関する資料を示す。

図4：実践研究の活動内容

シミュレーション実践の流れについては、まず各班で運動物体の質量を特定範囲内($m = 0.1 \sim 1.0$ [kg])で自由に決めさせ、床の荒さが0.1, 0.2, 0.3のそれぞれの場合において、物体が床の上を進む距離 d [m]と、点Aでの位置エネルギー、点Bでの運動エネルギーと速度を調べ、収集したデータの考察を通して、仕事とエネルギーの関係を見出していく取り組みを行った(下の写真1~3)。



写真1：生徒がシミュレーションを行う様子



写真2：各グループの話し合いの様子



写真3：生徒による発表の様子

授業で扱ったワークシート左部(図5)のグラフ1とグラフ3を作成させた理由は、斜面上における物体の力学的エネルギーは床の荒さとは関係はないが、点AB間(斜面上)で力学的エネルギーが保存していることをグラフから気づかせるためである。

また、図5内のグラフ2も同様の理由に、運動エネルギーの特徴をつかむために必要であると考えたため用意した。またグラフ1〜グラフ3は各班によって直線グラフの位置が異なるが、質量が違うことによって力学的エネルギーの総和が班によって異なるということに気づかせ、グループ発表で発言させる狙いがある。最後のグラフ4は唯一、他の3つのグラフとは異なる軌跡となり、床の荒さと進む距離の関係に注目させ、本実践の学習課題を解決するための有力な材料として目立つように工夫した。

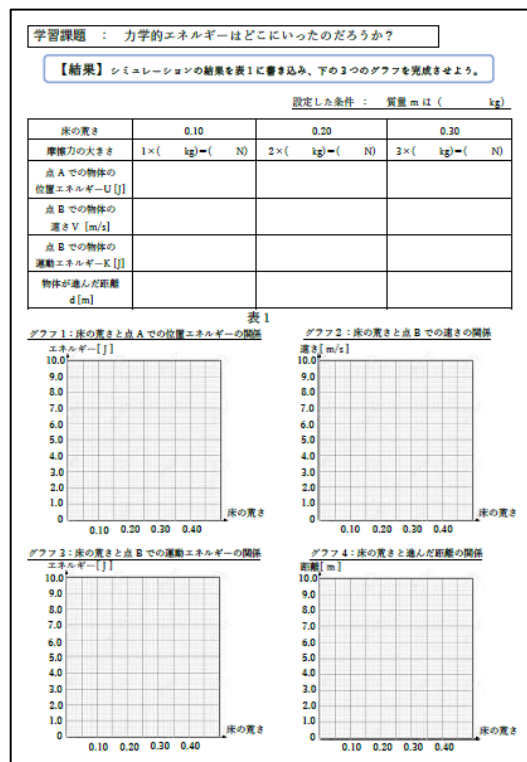


図5：ワークシート左部

ワークシート右部(下図6)に関しては、話し合い活動を通して各班で設問に解答させ、グループ発表で意見の共有を行った。これら設問への解答の様子から力学シミュレーションを活用することによって生徒の思考力・表現力・判断力にどのような効果があるのか調べた。

【結論】 結果の表やグラフを参考にして、物体の運動の解析と考察をしよう。

(1) 力学的エネルギーの保存の法則が成立している箇所とそうでない箇所を探そう。またそのように考えた理由を、根拠を示しながら説明してみよう。

(2) 運動エネルギーや位置エネルギーの特性と関係について気づいたこと・分かったことを、シミュレーション結果を踏まえて自由に書いてみよう。

(3) 床の荒さまたは摩擦力の大きさと進む距離の関係から、床と物体の仕事のやり取りについて、根拠を示しながら説明してみよう。

挑戦してみよう!!

(4) 下の写真のように、レールの上を走る電車が急ブレーキをして、車輪とレールの間でパチパチと火花を散らしながらやがて停止した。電車の持っていた力学的エネルギーは何に変換されているか、あなたの考えを書きましよう。

図6：ワークシート右部

IV. 結果と考察

本授業では授業風景の記録として動画撮影を行ったが、その中の生徒の様子として肯定的な発言と否定的な発言がそれぞれ記録されていた。肯定的なものとしては、「面白い」「楽しい」「こんなことができるんだ」「次はこの設定でやろう」といった興味関心や好奇心を表す意欲的な声であった。一方で、否定的なものとしては「何をしたいのかわからない」「注目する点がわからない」といった、シミュレーションの操作方法や手順、データの収集などの授業進行に関する声がいくつか挙がっていた。

前掲の写真3は、力学シミュレーションを活用して作成した表とグラフから力学的エネルギーの総量が、床のした仕事の大きさと一致していることに気づいた生徒がそのことを発表している様子である。このように、エネルギーと仕事という異なる単元の理解を関連付けて考察した生徒がおり、本授業の学習課題

の解決に直結する物理学的な視点を発見することができていた。

授業の進行上、シミュレーションで誤差がないことは強みの一つであると感じた。力学シミュレーションを使った後、質量の設定が同じであった二つのグループで結果が完全に一致しており、グループ発表の際に円滑な意見共有を可能とした。実験とは異なり、誤差を考慮しなくてよいことはシミュレーションの活用に関して特筆できる点である。

研究授業の後に実施したアンケートの調査結果を実施クラス別に整理して図7と8に示す、縦軸は選択肢の回答の割合、横軸は設問番号を示している。

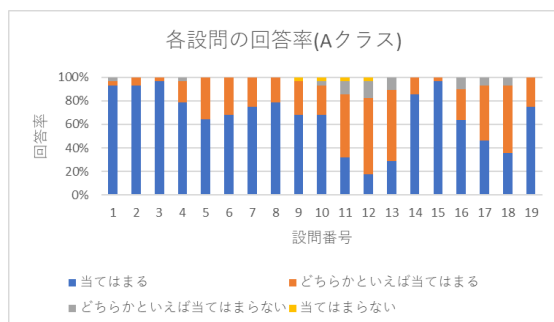


図7：アンケート調査の回答結果（Aクラス）

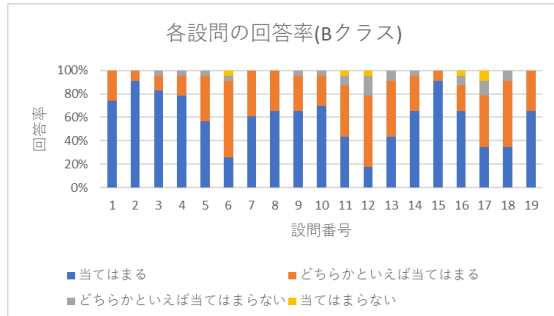


図8：アンケート調査の回答結果（Bクラス）

図7及び8の結果を三つの観点から整理したものが図9である。生徒からの回答について、“当てはまる”を4点、“どちらかといえば当てはまる”を3点、“どちらかといえば当てはまらな”を2点、“当てはまらな”を1点として、各クラスにおける各観点の平均値を算出し、レーダーチャートに整理した。図9より、いずれのクラスにおいても知識・技能に観点では平均値が3.8と高く、生徒自身が深く理解できたと自己評価していた。また、興味関心や力学シミュレーションの活用に対する設問などを含む主体的に学習に向かう態度の観点でも平均点は3.6と高く評価しており、生徒がシミュレーションに対してよい印象を

持っていることが分かる。また思考力・表現力・判断力といった科学的な資質能力などに関しても、他の二つの観点への自己評価と比べると少し低いものの、いずれのクラスでも平均点が3.2以上という高い値であった。力学分野の学習指導でシミュレーションを活用することで、調査した三つの観点全てにおいて高い学習効果があることが分かった。

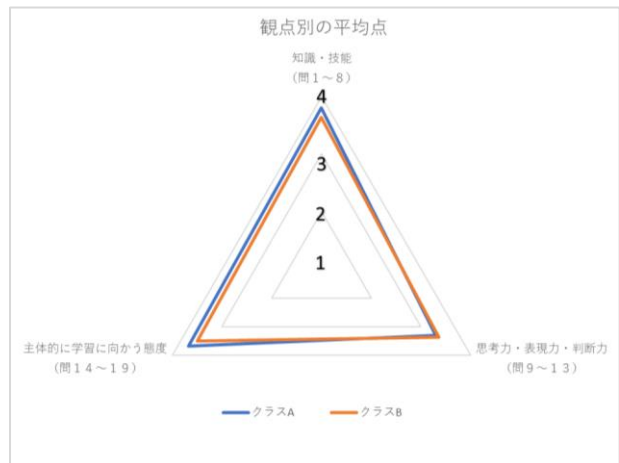


図9：レーダーチャート分析の結果

アンケートへの回答結果やレーダーチャートの分析結果から、力学シミュレーションを活用した授業では、三つ全ての観点における資質能力を伸長する効果が確認でき、特に知識・技能の習得や生徒の学習意欲や態度の向上に大きく貢献できることが分かった。さらに高い思考力・表現力・判断力を身に付けさせるためには、運動物体や床などのワールドそのものを生徒自身に設定させて探究させるといった、より主体的に生徒が自己表現できる機会を提供する授業展開が効果的ではないかと考えた。

授業実践した二つの学級は、今回はじめて理科授業で力学シミュレーションを活用したためか、操作方法や着眼点に対してサポートを有する生徒もいた。シミュレーション活用は一部の生徒には馴染まず、どれだけ操作を簡略化していても、技術的・感覚的に難しいと感じる場合もあるであろう。思考力・表現力・判断力をさらに伸ばしながら、自己評価や達成感を最大限にするためには、教材として恒常的に授業で使用し、生徒が操作に慣れていくことを目指す必要があると考えた。

アンケートの最後の設問20では、生徒に、どんな現象に力学シミュレーションを使うことができそうか

について生徒の意見を問うていた。生徒からの回答には、「自由落下する際のエネルギーの変化」や「滑車を用いた物理現象」「作用反作用の性質を調べること」など、既習内容を改めて試したいという意見が多かった。中には「ピタゴラスイッチを作ってみたい」や「コロナウイルス感染症に関する飛沫のシミュレーションを試したい」といったユニークな意見を書いていた生徒もあり、力学シミュレーションによって生徒の創造性が現れたり、物理学に関する興味関心をより一層深めたりする効果も期待できることがわかった。力学シミュレーションに対して、生徒のほとんどが肯定的な印象を持ち、家庭学習や試験前の復習などの日常生活でも使ってみたいという意見もあったことから、シミュレーションを使って物理的な事象を解析することは力学概念学習を教師からの一方的な説明ではなく、自身の興味関心として捉えさせ、意欲的に学習に向かわせる点から高い効果のある手段ということが分かった。

V. おわりに：本研究の成果と課題

力学シミュレーションは理科室の規模に捉われず、重力加速度や空気抵抗などの高度な現象も、つまみの操作で制御することで簡単に扱うことができる。そして中学校での力学概念学習を通して科学への関心を高め、高校物理への円滑な接続にも貢献できであろう。

また力学シミュレーションは、力の合成と分解、等速直線運動や等加速度直線運動などの他の物理領域の単元でも活用できる。汎用性が高く、生徒が自身で物理現象を制御する様々な機会を提供することができる教材である。今後の展望として、生徒自身が斜面や壁、床などワールドをシミュレーション内で創造できるような授業を検討していきたい。

付記

研究成果の公開に関して、実践を行った研究協力校の学校長・教頭の承諾を得ており、アンケート調査は匿名で実施され、個人情報記載は一切ありません。

謝辞

本研究の実践にあたり、ご協力いただいた松山市立

Y 中学校の先生方、生徒の皆さん、またシミュレーションの作成にあたりご協力いただいた新興出版社啓林館の担当者様、デバイスの貸出を認めてくださった愛媛大学玉井教授の皆様に心よりお礼申し上げます。

文献

- 国立教育政策研究所 (2022)：令和4年度全国学力・学習状況調査結果資料【全国版/中学校】，教科に関する調査の結果，(1)調査結果概況 全国一生徒（国・公・私立）
- 国立教育政策研究所 (2022)：令和4年度全国学力・学習状況調査報告書【中学校/理科】，教科に関する調査の結果（概要），(2) 分類・区分別集計結果，P.10
- ベネッセ教育総合研究所 (2022)：小中学校の学習指導に関する調査 2021 中学校版基礎集計表，P.4，Q18 欄
- 吉田賢二，西澤輝，三野弘文 (2022)：「Processing を用いた物理シミュレーション教材の制作と授業実践-凸レンズの働きを例にして-」，日本科学教育学会年会論文集，46 巻，1 号，381-384
- 今井功，東本崇仁，堀口知也，平嶋宗 (2008)：「中学理科における Error-based Simulation を用いた授業実践-ニュートンに挑戦プロジェクト-」，実践論文集，25 巻，2 号，194-203
- 國仲寛人，荻原彰，後藤太一郎 (2018)：「小中学校の理科の授業におけるシミュレーション教材 PhET の活用」，三重大学教育学部研究紀要，自然科学・人文科学・社会科学・教育科学・教育実践，69-313
- 磯本征雄，宮原一弘，中野宇宙 (2000)：「ニュートン力学シミュレーション教材の構成と教授方略-宇宙旅行シミュレーションによる事例研究-」，電子情報通信学会論文誌 D，J83 巻，6 号，599-609
- 野崎朝之，神志那良雄 (1993)：「ブランコのモデル実験とコンピューターシミュレーション」，日本科学教育学会研究会研究報告，7 巻，6 号，63-66

