

運動する物体にはたらく力を対象とした Error-based Simulation の
 中学校理科における実践利用

篠原 智哉^{†a)} 今井 功^{††} 東本 崇仁^{†††} 堀口 知也^{††††}
 山田 敦士[†] 山元 翔^{†††††} 林 雄介[†] 平嶋 宗[†]

Experimental Use of Error-based Simulation for Force on Moving Object in Science
 Class at Junior High School

Tomoya SHINOHARA^{†a)}, Isao IMAI^{††}, Takahito TOMOTO^{†††},
 Tomoya HORIGUCHI^{††††}, Atsushi YAMADA[†], Sho YAMAMOTO^{†††††},
 Yusuke HAYASHI[†], and Tsukasa HIRASHIMA[†]

あらまし 初等力学の問題解決においては、対象としている系にはたらく力の把握が必要であるが、この過程が最も難しいとされており、学習支援の対象として重要といえる。筆者らはこれまでに、このはたらく力を対象とした学習支援として、物体が速度をもたない静止系における力の把握を対象として、学習者の誤りに基づくシミュレーションである Error-based Simulation (EBS) の利用を試みており、授業での利用を通して学習効果の確認も行っている。本研究では、物体が速度をもつ運動系を対象とした EBS による学習支援効果の調査を授業での利用を通して行った。結果として、事前テストにおける成績と、利用方法により効果が異なることが示された。キーワード 力学、はたらく力、誤りの可視化、Error-based Simulation

1. ま え が き

初等力学においては物体の運動を知るために、運動方程式を立て、それを解く必要がある。筆者らはこれまでに、この立式を段階的に外化させ、そこでの間違いを抽出し修正することを試みてきた [1]。一方で、こ

の立式を行う前の段階として、系にはたらく力を正しく把握することが必要となるが、この力の把握がしばしば多くの学習者にとって最も困難な段階であることが指摘されている [2]~[4]。このため、このはたらく力の把握の段階を対象とした学習支援を行うことには意義があると言える。

このような運動系でののはたらく力に関する学習支援はこれまでもさまざまな形で試みられている。山崎ら [5] は、水平面や斜面上で運動する台車を対象とし、振り子を用いた装置でののはたらく力の可視化を行っている。また加藤ら [6] は水平面や斜面上で運動する台車に対し、電子的なセンサを用いた力の計測による可視化を行っている。また南ら [7] は、センサによるはたらく力の計測と LED によるその大きさと向きの提示を行う実験装置を開発し、直線運動や落下運動にてはたらく力の提示を行っている。これらの試みにおいては、物体にはたらく正しい力が可視化されており、学習者が誤った考えをもっていた場合に、自身の考えが正しいものと異なっていることによって、誤っていることに気付くことを促している。一方で、学習者の誤

[†] 広島大学大学院工学研究科, 東広島市
 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, 739-8527 Japan

^{††} 千葉市立花園中学校, 千葉市
 Hanazono Junior High School, 4-1-1 Hanazono, Hanamigawa-ku, Chiba-shi, 262-0025 Japan

^{†††} 東京工芸大学工学部コンピュータ応用学科, 厚木市
 Department of Applied Computer Science, Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, 1583 Iiyama, Atsugi-shi, 243-0297 Japan

^{††††} 神戸大学大学院海事科学研究科, 神戸市
 Faculty of Maritime, Kobe University, 5-1-1 Fukaeminamimachi, Higashinada-ku, Kobe-shi, 658-0022 Japan

^{†††††} 近畿大学工学部情報学科, 東広島市
 Department of Informatics, Kinki University, 1 Umenobe, Takaya, Higashihiroshima-shi, 739-2116 Japan

a) E-mail: sinohara@lel.hiroshima-u.ac.jp
 DOI:10.14923/transinfj.2015JDP7058

りを修正する上で、学習者自身に誤りであることを納得させることの重要性が指摘されているが[8]~[10]、そのためには学習者の誤りに応じた学習支援が必要となる。このような観点に立つと、どのような誤りに対しても、同じ正解を提示することになる上記のような学習支援は、学習者の誤りに応じた学習支援を目指すものではなかった。そのため、これらの学習支援は、学習者の考えが正しくないことを指摘してはいるものの、どのように誤っているかは示しておらず、誤りであることを納得させる上で必ずしも十分ではないといえる[11]。

また Tao ら [12] はコンピュータプログラム上での運動のシミュレーションを利用した教授を行っている。ここでは幾つかの物体（宇宙船、モデルカー、スカイダイバー）の運動を対象とし、その運動とはたらく力の予想と観察を行っている。このため、学習者が誤った考えをもっていた場合、予想と違う運動が現れるため、誤りに対する納得性の高いフィードバックが与えられると期待できる。しかしながら、そこでは力について答える際、学習者は力の原因（エンジンが起動しているか否か等）で答えており、実際に力自体を記述してはいない、また運動方向以外の方向の力を扱わないなど、学習者の力の把握を十分に捉えられてはいない。

これらの考察に基づくと、学習者による力の把握を運動系に対して直接的に表現させたいという考えを運動に反映させることが有力な方法であると考えられる。そのような方法として、学習者による力の把握の直接的な表現を運動に反映させ、その把握が誤っている場合にそれらに応じた不自然な運動を生成する Error-based Simulation (EBS) が提案されている [11], [13]~[18]。この方法の実践的な利用及びその有効性についての検証は、静止系に対する力の把握の誤りに対しては既に行われているが [17], [18]、運動系に対しては行われていなかった。静止系においては静止している状態が正しく、そこから外れた動きは全て間違っていると判断可能であるのに対し、運動系においては、正しい運動と間違った運動との差を判断することが必要となるため、静止系での EBS の実践的な有効性をもって、運動系でも同様に有効であるということではできない。そこで本研究では、この運動系に対しての EBS の効果の検証を行った。

以下、2. においては、本研究で用いた運動系に対する EBS システムについて詳説する。次に 3. において

は、上記システムを用いて行った実践利用について述べる。更に 4., 5. においては、上記実践的利用の結果とその分析について述べる。

2. Error-based Simulation

本章では、本研究で用いている Error-based Simulation (EBS) に関して述べる。

2.1 Error-based Simulation の概要

EBS は学習者の立てた運動方程式中の誤りを、方程式の世界から、物体の挙動の世界へと反映することによって生成される運動のシミュレーションである。すなわち EBS は、力学系を構成する物体の不自然な振舞いを提示し、物体の正しい挙動（以下、Normal Simulation : NS）との差異として誤りを可視化する。先行研究 [11] ではこの可視化の条件を顕在化条件と呼び、

(1) EBS と NS との間において対象とする物体の速度が定性的な差異を示す

(2) 対象とする物体の速度が定性的な差異を示さない場合、何らかのパラメータ摂動に対する速度の変化率において、EBS と NS との間に定性的な差異を示す

の二つの条件を顕在性として設定している。更に「(1) と (2) の両方を満たす」「(1) のみを満たす」「(2) のみを満たす」の順に、顕在性が大きいとしている。

また EBS は、単に顕在性が大きいだけでなく EBS に対する信頼性である「もっともらしさ」を伴っている必要があり、顕在化のためのパラメータ変動に影響を受けるとしている。更にスムーズな学習のために、EBS によって顕在化された差異が学習者の学習すべきことを適切に示唆しているという「示唆性」が重要になるとしている。この示唆性は誤りの原因と示唆されるものが一致するかということの意味する。EBS の有効性はこれら三つの要因に影響を受ける [11]。

先行研究においては、静止が正しい運動となる物理系を対象とした EBS の利用を行っている。ここで用いられたシステムにおいては、学習者は物体にはたらくと考える力を実際に作図し、その作図に基づく物体の運動のシミュレーションをシステムが提示する。そしてこのシミュレーションを、学習者にとって既知である現実での物体の運動と比較することで、それらの間の矛盾に気づき、学習者の誤りの修正につながる、という学習活動が行われている [17], [18]。このような静止系においては、力の正誤が運動の有無として表れ、

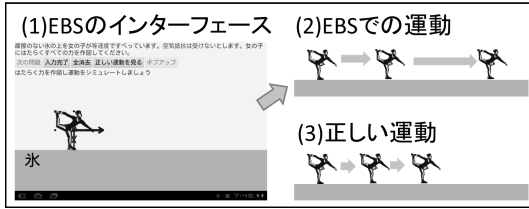


図1 システムのインターフェース
Fig. 1 System interface.

またそこでの EBS の効果が確認されている。

先行研究で対象とした静止系における EBS の場合、速度及び速度の変化率の二つの顕在性条件を両方満たすことになる。これに対し本研究で対象とする運動系では、時間というパラメータ摂動に対する速度の変化率、つまり加速度という形で顕在化条件の(2)のみを満たすことになり、(1)と(2)の両方を満たす静止系よりも顕在性が劣ることが予想される。例えば、運動系で多く見られる間違いとして、図1の(1)のように運動の向きに余剰の力を描くというものがあるが、これは加速度として顕在化される。一方、もっともらしさに関しては、静止系においても運動系においても、時間というパラメータを変動させることで顕在化を行っており、この点については違いはない。また示唆性に関しても、誤りの原因である余剰な力や欠落は、運動の向きで示唆されるため、やはり静止系の場合と同様である。これらより、「もっともらしさ」「示唆性」の2点に関しては、EBSを運動系において利用した場合でも静止系と同様であるといえる。したがって本研究の目的は、顕在性において劣る運動系でのEBSの効果を実践的に検証するためのものと位置付けることができる。

また、先行研究においては該当範囲の履修の3か月後にEBS利用を行っており、これは忘却するに至る一定期間後に行われたものとなっている。そこで、本研究においても忘却に至る十分な時間をとり、また授業内で行うというスケジュールの都合からも、該当範囲の学習から8ヶ月後に利用を行った。

2.2 使用した EBS システム

本研究では、運動系に対する EBS システムを、Android タブレット上に実装した。図1の(1)は EBS システムのインターフェースを示す。システム画面は、上段の問題文、中段の各種ボタン群、そして下段の作図領域、という構成になっている。このシステムには、学習者による力の作図と EBS による誤りの修正の促

進という二つの機能が実装されている。本節ではこのシステムについて、行う演習やそこでの操作を概説する。

本システムにおける演習において学習者は、まず提示された問題について、与えられた図に力の作図を行う。この作図機能は、学習者が一般的に行われる矢印での力の作図と同様の作業を、画面上で行えるよう設計されている。具体的な作図作業として学習者は、力の矢印を描き始めたい場所を指で押さえ、描きたい方向に指を動かし、任意の長さになったときに指を離すことで、矢印が作図される。力の矢印の長さはその力の大きさを表すが、本システムでは矢印は3段階の長さで作図可能であり、実際の長さとともに色によって識別できるよう表現される。また力の矢印の向きはその力のはたらく向きを表すが、本システムでは鉛直方向、水平方向、物体の運動方向とそれに対して垂直な方向に作図することができる。力の矢印の始点はその力のはたらく場所を表すが、本システムでは物体の上下左右と中心から描くことができる。また、一度作図した矢印を消去したい場合には、その矢印の先端をロングタップすることで、消去することができる。図1の例では、等速直線運動する人物に関する課題を示しており、人物の中心から下向きと右向きの矢印を、また足元から上向きの矢印を作図している。このような作図は、運動の向きに力がはたらくという典型的な誤りの一例である。

作図の完了後、学習者はボタン群から「入力完了」ボタンをタップすることで、自身の作図に基づく運動のシミュレーションを見ることができる。例えば図1の(1)のような誤った作図の場合には、鉛直方向には正しくつり合った力が作図されているが、運動の向きに本来は存在しない力が作図されているために、人物は図1の(2)に図示するような加速度運動をインターフェース上で行うことになる。現実での正しい運動は図1の(3)に図示するような等速直線運動であり、学習者にとって既知であるため、このシミュレーションを観察することで、学習者は自身の誤りに気づき、修正することが期待できる。作図結果の正誤は診断されており、作図結果が正しければ次の問題に進むことができる。なお、各問題での物体の正しい運動は、その問題の開始時に一度提示され、また「正しい運動を見る」ボタンをタップすることで、作図中にいつでも確認することができる。また、自力で正答できない場合には、「ギブアップ」ボタンをタップすることで、次の

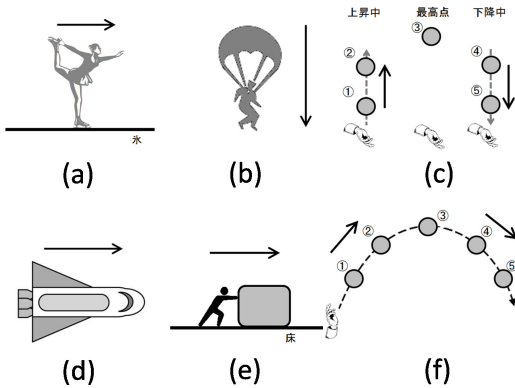


図2 実装された課題 (運動系)
Fig.2 Implemented problems (kinetic system).

問題に進むことができる。

2.3 システムで用いる課題

本節では、本研究で使用したシステムに実装されている課題について説明する。

本研究では、初速度をもった物体の運動 (以下、運動系) についての演習を主な目的としている。対象となる最も単純な種類の運動系としては、①運動方向に力がはたらいっていない等速直線運動、が考えられる。次に、同様に等速直線運動であるが、はたらいっている力が異なる②運動方向で力がつ合っている等速直線運動、が挙げられる。更に③加速度をもった運動、が考えられる。

上記①～③を含み、中学校で対象とする具体的な課題として、

- (a) 摩擦のない氷の上で等速直線運動する人 (①)
- (b) パラシュートを開いて等速で落下する人 (②)
- (c) 垂直に投げ上げられたボール (③)

の3問を基本課題として実装した。また、上記①～③

に対応し、より複雑なはたらく力の応用課題として、

- (d) 宇宙空間で等速直線運動する宇宙船 (①)
- (e) 摩擦のある水平面上で物体を等速で押す (②)
- (f) 斜方投射されたボール (③)

も実装している。

また、静止系についての学習が運動系についての学習の前段階であり、力学系における力の復習を行う上で、先に静止系を行い、次に運動系を行うのが望ましいという現場の要望を取り入れ、先行研究 [16] にて用いられた課題の一部である以下の三つを実装している。これらの静止系については、本研究においては先行研究の追試の位置づけとなる。

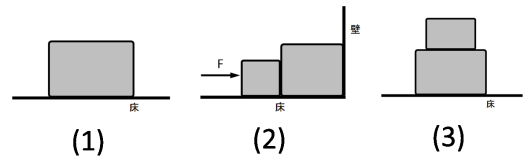


図3 実装された課題 (静止系)
Fig.3 Implemented problems (static system).

- (1) 床の上に静止するブロック
- (2) 壁に向かって押され静止する二つのブロック
- (3) 床の上に積み重ねられた二つのブロック

実装されている課題を図2と図3に示す。

3. 実践利用

本研究では、前章で述べたEBSシステムの効果の確認のため、実践的な利用を行っている。本章ではこの実践の詳細について述べる。

3.1 利用計画

本研究では、運動系における力の把握課題に対するEBSシステムの効果を調査するために、中学校理科における授業での利用を行った。事前に該当の公立中学校に赴き、理科担当教員にEBSシステムとその課題を見せた上で、同中学校の理科の授業に利用可能であることを確認し、教員との相談の上で利用計画を立てた。この利用においては、(1) EBSシステムを用いて演習課題を解く自習を主に行い、残り時間で演習課題の正解を教員が説明した群 (EBS単独群)、(2) EBSシステムを用いて力と動きの関係を見せながら授業を行った群 (EBS利用授業群)、(3) 通常行っている形式で演習課題を題材とした講義を行った群 (通常授業群)、の3群を設けて、それぞれ1クラスを割り当てた。(1)と(2)がそれぞれ異なった形でのEBSシステムの利用となり、実験群に相当する。(3)は統制群となる。(1)と(3)については、EBSの利用が初めての同一教員が担当した。(2)については、本論文の共著者であり静止系のEBSシステムの利用経験のある教員が担当した。生徒は該当範囲を8ヶ月前に受講済みの3年生であり、今回の授業は復習と位置付けて行われた。

また、本研究の目的は運動系のEBSの効果の検証であるが、本実践に当たり、担当の教員より、実践の手順としては教科書の順序に沿って静止系の力についての授業を行った後で、運動系の授業を行うのが実践においては妥当であるという見解を得たためそれに従った。

表 1 事前テストの平均正解数
Table 1 Mean number of correct answer at pre-test.

	運動系 (3 点満点)	静止系 (3 点満点)
EBS 単独群 (N=35)	mean=0.286 SD=0.511	mean=0.257 SD=0.498
EBS 利用授業群 (N=33)	mean=0.394 SD=0.600	mean=0.273 SD=0.565
通常授業群 (N=37)	mean=0.541 SD=0.825	mean=0.297 SD=0.513

この場合、静止系の学習が運動系の成績に与える影響が問題となることが考えられたが、(1) 初等力学において静止系と運動系は明確に区別して教えられている現状を考えると、静止系の学習に伴う運動系の成績向上は比較的速い転移になるといえること、(2) 担当教員らの見解は、静止系の学習を行うだけで運動系の成績が向上することはほとんどないというものであったこと、の 2 点から検証結果を左右するほどの大きな影響は与えないであろうと判断した。また、いずれの群についても静止系の授業と運動系の授業の両方をこの順で行ったことについては同等であるため、群間に現れた差はその演習方法によるものといえることができる。これらのことから、今回の実践の流れは最適であったとはいえないものの、実際の学校現場で実践的にシステムを用い、その効果を確認するうえでは妥当であったと考えている。

利用手順としては、上のような判断に基づき、また 2 週間という期間の中で行う必要もあり、事前テスト (25 分)、事前テストと同じ週 (EBS 単独群：3 日後、通常授業群：1 日後、EBS 利用授業群：3 日後) に第 1 回の授業 (静止系)、その翌週 (EBS 単独群：6 日後、通常授業群：7 日後、EBS 利用授業群：5 日後) に第 2 回の授業 (運動系)、第 2 回の授業の後 (EBS 単独群：1 日後、通常授業群：2 日後、EBS 利用授業群：1 日後) に事後テスト (30 分)、という構成で実施した。また、全群に関して事後テストの 33 日後に遅延テストを実施した。間隔がずれているのは、時間割の都合である。なお 1 時限は 45 分であった。また演習やテストでの欠席を考慮した結果、分析対象は EBS 単独群が 35 名、通常授業群が 37 名、EBS 利用授業群が 33 名となった。また詳細は次節にて述べるが、事前テストの課題のうち分析に用いた課題の成績 (運動系 3 問、静止系 3 問) は、表 1 に示したとおりであり、各群で差は見られなかった。

3.2 各群の演習方法

本節では、(1) EBS 単独群 (2) EBS 利用授業群 (3)

通常授業群の各演習方法について述べる。

3.2.1 EBS 単独群

EBS 単独演習群では、生徒全員に対し、1 台ずつタブレット PC を配布し、EBS システムを利用することで演習活動を行った。演習時間内においてまず、約 10 分間を使ってシステムの操作方法の説明を実験者 (システム作成者) が行った。その後約 30 分間、生徒に 1 人 1 人のペースでのシステムでの演習を行わせた。その際、システムの使用方法等に関する質問には実験者が対応したが、演習内容や解答に対する質問には答えなかった。

EBS 単独での演習には、作図、シミュレーションの観察、誤りの発見、修正といった過程が必要であり、一般的な演習よりも時間を要する。また、正解が提示されることもないため、最終的に解けた課題数が学習者ごとに異なることが予想される。それとともに、前述のように、単純な運動系での運動は三つに大別でき、それぞれについて学習する必要がある。これらのことから、運動系の演習に関しては、前述の (a)~(c) の基本課題 3 問を解くことを目標とし、それらが解けた者に対しては (d)~(f) の応用課題 3 問にも取り組むことを許した。結果として、基本課題を全問解くことができなかった生徒は 2 名であり、基本課題を全問解くことができた生徒は残りの 33 名であった。応用課題に取り組んだ生徒は全員が少なくとも 1 問を解いており、応用課題全てを解いた生徒は 29 名であった。静止系の演習に関しては、(1)~(3) の 3 問の完了を目標とした。生徒の 33 名が少なくとも 1 問を解いており、11 名は 3 問全問を解いていた。

演習の終了後、約 5 分間を利用し、授業担当の教員によって正解となる作図の説明を行った。説明には、大型のディスプレイを用い、EBS システムの画面上での正解となる作図とその場合の運動を表示して行った。またこの際、運動系の演習では後述の通常授業群で対象とした (a)~(c) の 3 問のみ、静止系の演習では全 3 問を説明の対象とした。

3.2.2 EBS 利用授業群

EBS 利用授業群においても、生徒全員に対し、1 台ずつタブレット PC を配布し、EBS システムを利用した授業を行った。この群の演習では、実装された課題を 1 問ずつ、まず EBS システムを用いて生徒が自身で演習を行い、その後教員が EBS システムの画面を大型のディスプレイに表示して生徒に見せながら、全員に対して解説を行う、といった形式での授業を行っ

た。またその際、正しい作図では正しい運動が行われることとともに、多く見られる間違っただけの作図を取り上げ、その場合に起こる間違っただけの運動も提示した。

このような方法では、各課題において注意すべき点を EBS を用いて端的に説明できることもあり、運動系においては予定していた 6 問全てを、静止系では 3 問全てを取り扱うことができた。

3.2.3 通常授業群

通常授業群では、一般的な授業の形での説明を行った。授業時間内では最初の約 10 分間を用い、生徒はプリントで作図を行った。その後、約 30 分を利用して、担当教員がはたらく力を課題ごとに解説した。この解説の内容については、担当教員に委任したが、EBS との比較という観点から、何らかの誤った力の作図を取り上げ、そのような力が実際にはたらいっている場合にどのような運動をするか、といった仮定を用いる説明は行わないものとした。この制限は、通常の授業においては元々このような説明は行わないため、特に問題がないとのことであった。最後に、約 5 分間を用いて、復習として各課題の正解を再度説明した。またその際、授業最初に用いたものと同じプリントを復習プリントとして配布し、確認の作図を行わせた。これは、授業のまとめとして行ったものであるが、EBS 単独群における正解の説明に対応するものとなっている。

この通常授業群では、全被験者が確実に課題に正解できることを目標とし、様々な角度からの詳細な説明を行った。その結果、このような説明には 1 問あたりにかかる時間が長く、説明できる課題数が限られた。このことから、運動系の演習で取り扱うことができたのは上記の 3 種類の運動に対応した基本課題 3 問であり、静止系の演習では課題 3 問全問であった。

3.3 評価テスト

今回の利用では、効果測定のための筆記テストを行った。各テストは演習と同様、与えられた図に対し、力の矢印の作図を行うというものであり、演習とは別の時間にて行われた。

事前テストでは前述の運動系の (a)~(f)、及び静止系の (1)~(3) の 9 問を用い、25 分間で解答した。

事後テストでは事前テストの課題 9 問に加え、更に転移課題として運動系の 4 問、及び静止系の 2 問の 6 問を用い、30 分で解答した。運動系の追加の 4 問はそれぞれ、

- (g) 摩擦のない斜面上と水平面上を運動する台車
(h) 摩擦のない水の上で押されて加速するそり

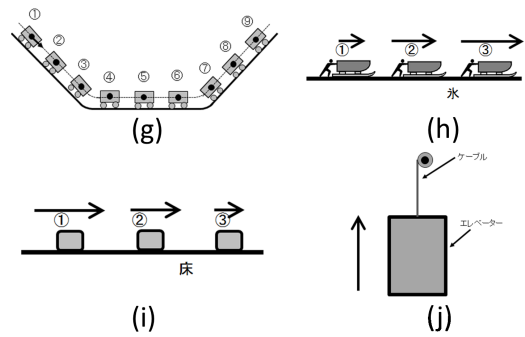


図 4 転移課題 (運動系)
Fig. 4 Transfer problems (kinetic system).

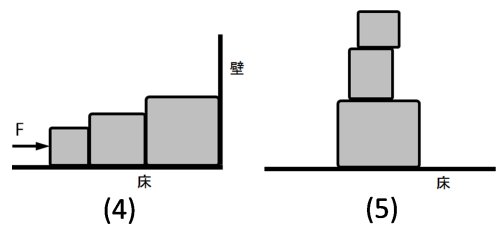


図 5 転移課題 (静止系)
Fig. 5 Transfer problems (static system).

- (i) 摩擦のある床の上を減速しながら滑ってゆく箱
(j) 等速度で上昇するエレベータ
である。また、静止系の 2 問は、
(4) 壁に向かって押され静止する三つのブロック
(5) 床の上に積み重ねられた三つのブロック
である。

利用した転移課題を図 4 と図 5 に示す。

遅延テストは事後テストから 1ヶ月後に実施され、課題や方式は事後テストと同様であり、解答時間も同様に 30 分で行った。これらテストの結果等については、次章にまとめる。

4. 運動系の結果と分析

本章では、今回の実践での目的である運動系におけるシステムの効果を見るために行った、テスト結果の分析について述べる。今回の分析には、正解した課題数を用いている。また、運動系の学習課題 (d) は何も力がはたらいっていないため、いかなる矢印も作図しないのが正解だが、無記入との識別ができなかったため、今回の分析では除外した。

更に、上記のような理由から、運動系においては授業において扱われた課題数が群によって異なる。このため、運動系における学習課題の分析は、全学習者が

取り組んだといえる基本課題 3 問に絞って行うことにする。転移課題については、4 問全てを分析対象としている。

EBS を用いた演習では学習者に正解が示されることはなく、シミュレーションを基に自身の間違いに気づき修正する、といういわば発見的な学習が行われる。そのため、そこには学習者の事前の知識や能力が影響すると考えられる。そのため分析の際、学習者の事前知識を考慮する必要があった。そこで、事前テストでの運動系の正解数を分析したところ、対象とした全 3 問中の平均が 0.410 となっており、このことから少なくとも 1 問は解けており、ある程度の理解はあると考えられる者と、全く解けておらず、あまり理解できていない者に被験者を大別できることが分かる。そこで、この正解数を基準に生徒を少なくとも 1 問は解けた上位者と全く解けなかった下位者の 2 組に分け、事前テストでの成績の差による効果の差を含めた分析を行った。なお、正解数は低いものの、記入された力は 3 問全体で一人当たり平均 8.610 本であり、これは分析対象とした学習課題 3 問の正解となる矢印の総数 9 本 ((a) 2 本 (b) 2 本 (c) 5 本) に近い。このような解答、また、事前テストの監督を行った教員も、通常の課題と同様に取り組んでいたとの感想を得ていることから、テストへの取り組みには問題が無かったと判断している。

以下に正解数の分析を行うが、統計処理は「ANOVA4 on the Web」[19] を用いて行った。

4.1 上位群

EBS 単独群では 9 名、EBS 利用授業群では 11 名、通常授業群では 14 名が上位者に該当した。システムログの分析の結果、EBS 単独群の上位群 9 名のうち 8 名が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正解でき、EBS 利用授業群の上位群では 11 名全員が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正しい作図を行っていた。また通常授業群の授業最後に復習として同じ課題にもう一度作図を行ったが、そこでは上位群 14 名全員が授業内で用いた運動系の 3 問全問に正解していた。

4.1.1 学習課題

学習課題においては、どの群についても、事前・事後間で統計的に有意に正解数が向上しており、また事後・遅延間で有意な低下は見られなかった。また、群間での成績の有意な差はどの時点においても無かった(表 2, 図 6)。

表 2 平均正解数 (上位群, 学習課題)

Table 2 Mean number of correct answer (higher group, learned problem).

	事前	事後	遅延
EBS 単独群 (N=9)	mean=1.111 SD=0.314	mean=2.778 SD=0.416	mean=2.556 SD=0.685
EBS 利用授業群 (N=11)	mean=1.182 SD=0.386	mean=2.818 SD=0.386	mean=2.727 SD=0.445
通常授業群 (N=14)	mean=1.429 SD=0.728	mean=2.714 SD=0.452	mean=2.643 SD=0.811

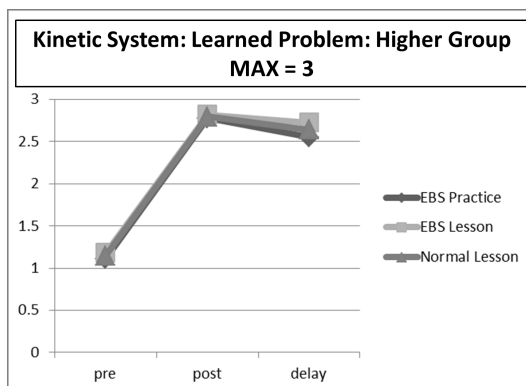


図 6 平均正解数の推移 (上位群, 学習課題)

Fig. 6 Transition of mean number of correct answers (higher group, learned problem).

4.1.2 転移課題

転移課題においては、どの群も事後・遅延間での正解数の有意な差は見られなかった。群間に関しては、遅延テストにおいてのみ、EBS 単独群と通常授業群の間 ($p = 0.0410 < 0.05$) において、正解数の有意差が見られた(表 3, 図 7)。

4.2 下位群

EBS 単独群では 26 名、EBS 利用授業群では 22 名、通常授業群では 23 名が下位群に該当した。システムログの分析の結果、EBS 単独群の下位群 26 名のうち 21 名が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正解しており、EBS 利用授業群の下位群でも 22 名のうち 21 名が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正解していた。また通常授業群の授業最後に復習として同じ課題に行った作図では、下位群 23 名全員が運動系の課題 3 問全問に正解していた。これらのことから、どの授業においても生徒が少なくとも指示に従った活動は行っていたと判断している。

4.2.1 学習課題

学習課題においては、事後テストにおいて通常授業群と EBS 単独群の間 ($p = 0.0431 < 0.05$) 及び通常

表 3 平均正解数 (上位群, 転移課題)

Table 3 Mean number of correct answer (higher group, transfer problem).

	事後	遅延
EBS 単独群 (N=9)	mean=2.222 SD=1.227	mean=2.667 SD=1.563
EBS 利用授業群 (N=11)	mean=1.636 SD=1.432	mean=1.636 SD=1.367
通常授業群 (N=14)	mean=1.571 SD=1.178	mean=1.429 SD=1.237

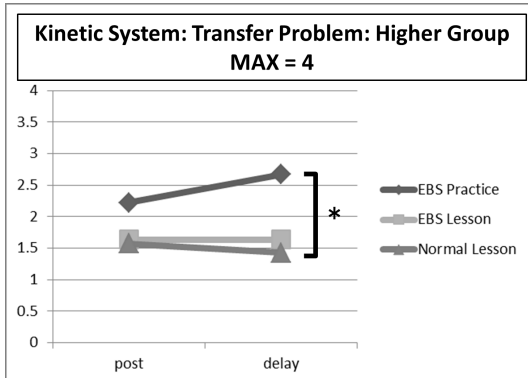


図 7 平均正解数の推移 (上位群, 転移課題)

Fig. 7 Transition of mean number of correct answers (higher group, transfer problem).

表 4 平均正解数 (下位群, 学習課題)

Table 4 Mean number of correct answer (lower group, learned problem).

	事前	事後	遅延
EBS 単独群 (N=26)	mean=0 SD=0	mean=2.269 SD=0.811	mean=1.308 SD=1.029
EBS 利用授業群 (N=22)	mean=0 SD=0	mean=2.045 SD=1.021	mean=1.727 SD=1.008
通常授業群 (N=23)	mean=0 SD=0	mean=2.696 SD=0.460	mean=2.261 SD=0.792

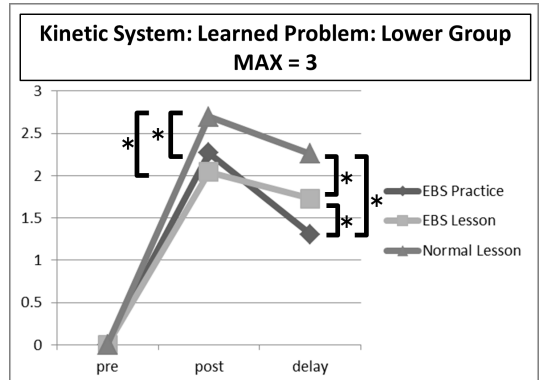


図 8 平均正解数の推移 (下位群, 学習課題)

Fig. 8 Transition of mean number of correct answers (lower group, learned problem).

授業群と EBS 利用授業群の間 ($p = 0.00324 < 0.05$) に正解数の有意差が見られた。更に、遅延テストにおいては通常授業群と EBS 単独群の間 ($p = 0.0000092 < 0.05$), 通常授業群と EBS 利用授業群の間 ($p = 0.0153 < 0.05$), EBS 利用授業群と EBS 単独群の間 ($p = 0.0492 < 0.05$) それぞれに正解数の有意差が見られた (表 4, 図 8)。

4.2.2 転移課題

転移課題では、どの群についても、事後・遅延間での正解数の有意な差は見られなかった。一方で群間に関しては、遅延テストにおいてのみ、EBS 利用授業群と EBS 単独群の間 ($p = 0.0521 < 0.10$) にのみ、正解数の差に有意傾向が見られた (表 5, 図 9)。

4.3 考察

今回の実践では、事前テスト成績の上位群の学習課題では、各群において事後及び遅延において差が見られなかった。EBS 単独群では、時限の最後には正解を伝えたものの、演習中は EBS のみを用いた活動であったにもかかわらず、事後だけでなく遅延においても EBS 利用授業群、通常授業群と同等の成績であったことから、EBS 単独利用で通常授業及び EBS 利用

表 5 平均正解数 (下位群, 転移課題)

Table 5 Mean number of correct answer (lower group, transfer problem).

	事後	遅延
EBS 単独群 (N=26)	mean=0.769 SD=0.973	mean=0.538 SD=0.843
EBS 利用授業群 (N=22)	mean=1.182 SD=1.154	mean=1.136 SD=1.217
通常授業群 (N=23)	mean=0.783 SD=0.778	mean=1.000 SD=1.180

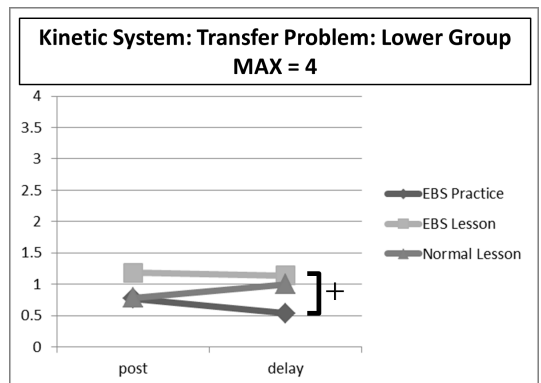


図 9 平均正解数の推移 (下位群, 転移課題)

Fig. 9 Transition of mean number of correct answers (lower group, transfer problem).

授業と同等の理解に到達していることが示唆された。転移課題においては、図 7 に示されたように、事後、遅延において、EBS 単独群が、通常授業群、EBS 利用授業群よりも高い成績を示した。統計的に差がいえるのは、EBS 単独群と通常授業群の遅延テストにおける有意差のみであった。この結果については、以下の下位群の検討の後、更に考察する。

事前テスト成績の下位群の学習課題においては、事後テストにおいては通常授業群のみが有意に点が高く、遅延においては通常授業群、EBS 利用授業群、EBS 単独群の順に高く更に各群の間に有意な差があるという結果となった。また、転移課題に関しては、通常授業群及び EBS 利用授業群の正解数の推移、また両群間の正解数の関係については、正解数が低いことを除けば、上位群と同様とみなすことができるが、EBS 単独群に関しては、遅延において上位群と異なり、EBS 利用授業群の成績より低いことが、有意傾向として示されている。EBS は学習者に、自身の解答に誤りがあることに気付かせることを目的としているが、それらがどのように間違っているのか、それらをどう修正するのかを積極的に示すものではなく、それらは学習者が自身で見出す必要がある。そのため EBS 単独群は、EBS システムからのフィードバックに基づいて、自身で誤りに気づき、修正することが求められる。つまり、自己調整学習 [20], [21] を促すものになっていると位置づけることができる。自己調整学習は一般に、うまく学習が進んだ場合は高い効果が期待できるものの、学習者に高い能力を要求するものになっている。実際に、今回の実践では EBS 単独群の被験者は、1 人当たり平均 66.7 回の解答をシステム上で行っており、間違いに気づきそれを修正しようと試みていたことが見て取れ、誤りに気付くという点は満たしていると考えられる。更にこの回数は、事前テスト上位群では平均 55.3 回、下位群では平均 70.6 回となっており、下位群であっても間違いに気づき修正を試みることができていたと考えられる。一方で、EBS では正解の提示や教科書的な説明は行っていないため、間違いの存在には気づいてもどう間違っているか、またどのように修正すべきかを見出すには高い能力が必要となり、必ずしも全員が修正には至らなかったと考えられる。このような、間違いに気づくことよりもそれを修正することのほうが難しいことは、下位群が上位群よりも有意に ($p = 0.0336 < 0.05$) 多くの解答を行っていること、つまり解答の修正が困難であったことから考え

られる。

この観点からすると、(1) 転移課題の遅延という最も深い理解が求められる場合において、EBS 単独群の上位群が高い成績を上げていることは、高い能力を求める学習方法が合致した学習者が高い効果を得たことを示唆している。また、(2) 学習課題の遅延において下位群では通常授業群、EBS 利用授業群、EBS 単独群の順に得点が高かったことから、まず EBS を用いた演習は下位群にとって容易ではなかったこと、また授業と EBS との組み合わせにより EBS 単独よりは改善されることが示唆された。更に、(3) 転移課題の遅延において、下位群では EBS 単独群が最も低い成績であり、高い能力を求める学習方法が合致しない学習者が低い効果しか得られなかったが、同時に EBS 利用授業群では通常授業群と同等の成績であり、他の問題に転移ができるレベルでの理解の程度に関しては、差がなかったことを示唆している。

なお今回の分析においては、学習課題に関しては全群で共通して取り扱った基本課題 3 問のみを分析の対象とした。そのため、この 3 問に関する以上のような下位群の結果は、通常授業群では 3 問に集中し、丁寧な説明を行ったことの効果によるものであるとも考えられる。またこの効果は、転移課題にて EBS 利用授業群と通常授業群に差がなかったことから、必ずしもより深い理解につながっていない可能性が示唆されている。しかしながら、今回の実践ではこれらの可能性の検証は十分に行われていないため、厳密な検証が今後の課題の一つであるといえる。

以上のことから、運動系における力の把握という事例においてははあるが、EBS を単独で利用することが、通常授業との比較において、成績上位の生徒に大きな効果をもたらすが、下位の生徒にもたらす効果は小さいということが示唆された。また、EBS を授業と組み合わせることで、成績下位の生徒への効果を大きくすることができるとともに、成績上位の生徒への効果が小さくなる可能性があることも示唆された。この示唆を踏まえた EBS の単独利用の適用法、及び授業への組み込みへの工夫が、今後 EBS を有効活用する上での重要な課題となっている。

4.4 静止系での結果と分析

今回、実践授業の中で EBS システムを利用したため、まずは静止系についての授業を行い、その後で運動系の授業を実施するという手順を踏んだ。このため、静止系に関しても、追試的な位置づけで、データ

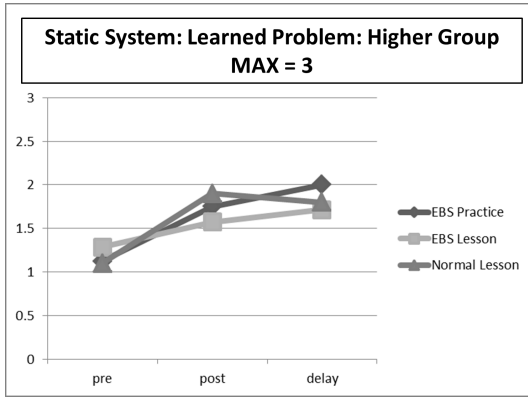


図 10 平均正解数の推移 (上位群, 学習課題)

Fig. 10 Transition of mean number of correct answers (higher group, learned problem).

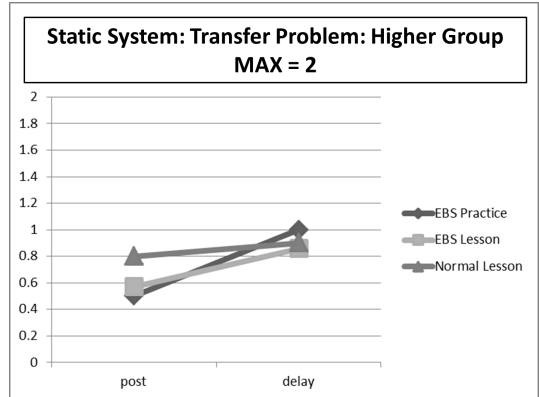


図 12 平均正解数の推移 (上位群, 転移課題)

Fig. 12 Transition of mean number of correct answers (higher group, transfer problem).

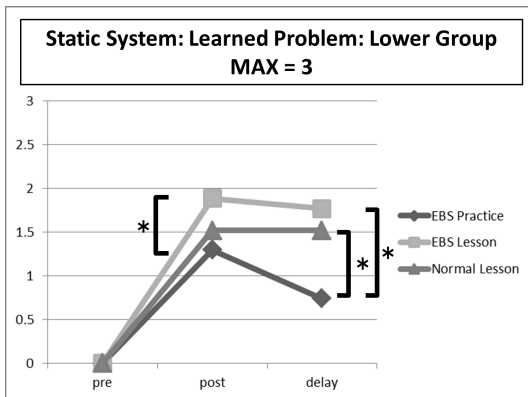


図 11 平均正解数の推移 (下位群, 学習課題)

Fig. 11 Transition of mean number of correct answers (lower group, learned problem).

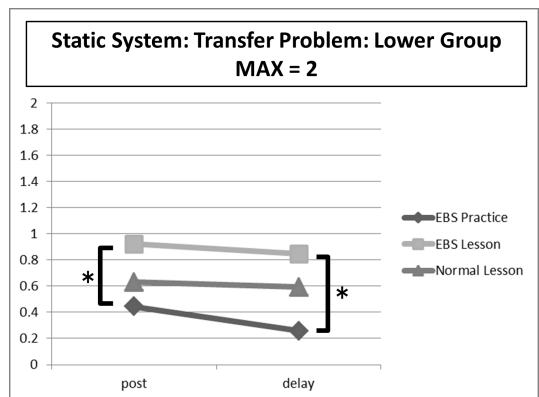


図 13 平均正解数の推移 (下位群, 転移課題)

Fig. 13 Transition of mean number of correct answers (lower group, transfer problem).

収集と分析を行った。結果として、学習課題 3 問に関しては、上位群 (事前テストで静止系に 1 問以上正解)、下位群ともに運動系と同様の結果となった (図 10, 図 11)。また、転移課題については、2 問しか用意しなかったため、少ない課題数での分析となり正確性は低いものの、上位群については差がないが、下位群については EBS 単独群が成績が有意に低いとの結果となった (図 12, 図 13)。

先行研究 [16], [17] においては、EBS 単独群が通常授業群に対して有意に成績が向上し、維持されるという結果が得られていたため、更に分析する必要が生じた。事前テスト中の静止系に関する 3 問は先行研究 [16], [17] における事前テスト 3 問と同じであったため、EBS 単独群のこの 3 問の成績を先行研究 [16] で

の結果と比べたところ、各課題の正解率は図 14 のようになり、特に課題 1 を複雑化した課題 2, 課題 3 については、正解率に大きな差が見られた。運動系の結果に関して考察したように、EBS 単独の利用は、学習者にある程度の事前の理解を要求するものであることが示唆されており、静止系における本利用と先行研究の結果の差は、この事前の理解の影響であることが示唆される。この考察の一般性を確認することは、EBS の利用に関する今後の重要な研究課題となる。

5. むすび

本研究では、初等力学におけるはたらく力の学習支援として、これまで静止系での学習に用いられてきた、学習者の誤りを基にしたシミュレーションである

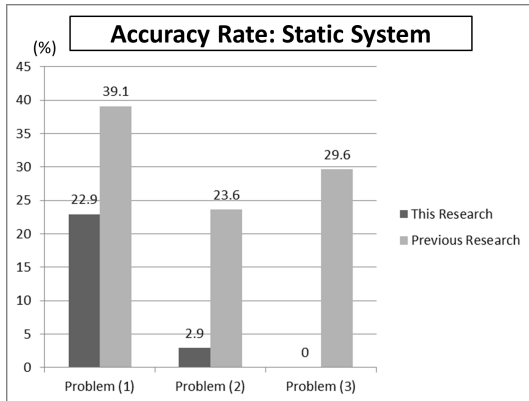


図 14 事前テスト各問の正解率（静止系）

Fig. 14 Accuracy rate of each problem at pre-test (static system).

Error-based Simulation の、運動系への利用、及びその効果の検証を行っている。本論文内においては、運動系を対象とした EBS システムの実装、及びその実践的な利用についての報告を行った。

今回の実践においては、事前テストの成績が上位の生徒に対しては、物体が初速度をもった運動系においても EBS のみを用いた演習が効果的であることを確認することができた。一方で、事前テストの成績が下位の生徒に対しては、EBS のみを用いた演習が適当なものではないという結果が得られた。このような生徒に対しては、本研究で試みた EBS を教材として授業内で使用するという方法が有効であることが示唆されたが、一方この方法では、上位の生徒に対する効果が通常授業と同じレベルとなっていた。これらのことから、事前理解によって EBS の効果的な使い方が異なることが示唆された。EBS が教材として有用性をもつこと自体はこれまでの実践を通して明らかにしており、また、多くの現場教員の同意を得ているが、このトレードオフを踏まえた利用が必要であることが示唆されたことが、重要であると考えている。

今後の重要な課題としては、今回の実践の利用において見られた、システムのみでは十分に効果が得られない学習者への対応が挙げられる。そのための方法として、現在の EBS である運動のシミュレーションとともに提示することで、理解をより促すフィードバックの検討が挙げられる。また、どのような学習者に対して、効果がある、またはないといったことを、更に規模の大きな実験によって確認することも重要な課題となる。より発展的な課題としては、運動系に見られる特

徴的な誤概念とされる MIF (Motion Implies Force) 誤概念 [21] に焦点をあてた学習支援も、重要な課題と考えている。この誤概念に関しては、大学生においても保持し、また、修正が容易ではないことが指摘されており [4]~[6], [22], ある程度理解力がある被験者を対象とした実験を行うことで EBS システムによる修正の可能性を示せるのではないかと考えている。

文 献

- [1] 篠原智哉, 山元 翔, 平嶋 宗, “力学を対象とした問題理解過程の外化環境の設計・開発,” 教育システム情報学会誌, vol.30, no.1, pp.20-31, Dec. 2013.
- [2] 吉永千晴, 田上光輝, 竹内 章, 大槻説乎, “物理の学習環境における因果関係モデルと運動方程式の自動生成およびそのモデルを用いた学習支援,” 信学技報, ET94-115, Dec. 1994.
- [3] 竹中洵治, “物理学習内容の分析と効果的な教授,” 物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集, vol.25, pp.7-8, Aug. 2008.
- [4] 大道一弘, “力の見つけ方に関する学習者の既有知識の検討,” 日本教育心理学会総会発表論文集, vol.50, p.586, Sept. 2008.
- [5] 山崎翔平, 定本嘉郎, 牧井 創, “MIF 素朴概念をなくす教材の開発と中学校での授業実践,” 物理教育, vol.57, no.3, pp.215-219, Sept. 2009.
- [6] 加藤信明, 定本嘉郎, “力の誤概念の解消を促す教材の開発と指導方法の改善,” 物理教育, vol.59, no.3, pp.181-186, Sept. 2011.
- [7] 南 伸昌, 渡邊剛士, 伊東明彦, “力表示器「Fi-Cube」を活用した、中高での授業実践,” 宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要, 33, pp.77-83, July 2010.
- [8] H.J. バーキンソン, 誤りから学ぶ教育に向けて 20 世紀教育理論の再解釈, 勁草書房, 2000.
- [9] 斎藤 裕, “誤概念修正教授方略としての反証法と融合法の再検討,” 人間生活学研究, vol.4, pp.1-12, 2013.
- [10] 阪本司毅, 中村元彦, “誤概念の支持のしにくさと論理的思考力の関係,” 教育実践開発研究センター研究紀要, vol.23, pp.75-80, March 2014.
- [11] 平嶋 宗, 堀口知也, “「誤りからの学習」を指向した誤り可視化の試み,” 教育システム情報学会誌, vol.21, no.3, pp.178-186, 2004.
- [12] P.-K. Tao and R.F. Gunstone, “The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction,” J. Research in Science Teaching, vol.36, no.7, pp.859-882, 1999.
- [13] 堀口知也, 平嶋 宗, 柏原昭博, 豊田順一, “定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御,” 人工知能学会誌, vol.12, no.2, pp.285-296, March 1997.
- [14] T. Hirashima, T. Horiguchi, A. Kashihara, and J. Toyoda, “Error-based simulation for error-visualization and its management,” Int. J. Artificial Intelligence in Education, vol.9, no.1-2, pp.17-31, 1998.
- [15] 堀口知也, 平嶋 宗, “誤りの修正を支援するシミュレ

シオン環境：誤り原因の示唆性を考慮した Error-Based Simulation の制御,” 人工知能学会論文誌 AI 17, pp.462–472, Nov. 2002.

- [16] 堀口知也, 平嶋 宗, “学習支援を指向した誤り可視化のためのロバストシミュレータ,” 人工知能学会論文誌 AI 21, pp.514–525, Nov. 2006.
- [17] 今井 功, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋 宗, “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,” 教育システム情報学会誌, vol.25, no.2, pp.194–203, 2008.
- [18] T. Horiguchi, I. Imai, T. Toumoto, and T. Hirashima, “Error-based simulation for error-awareness in learning mechanics: An evaluation,” J. Educational Technology & Society, vol.17, no.3, pp.1–13, 2014.
- [19] ANOVA4 on the Web, <http://www.hju.ac.jp/~kiriki/anova4/>, 2015.05.10
- [20] バリー・J・ジーママン, デイル・H・シャンク, 塚野州一 (編訳), 伊東崇達, 中西良文, 中谷素之, 伊田勝憲, 犬塚美輪 (訳), 自己調整学習の理論, 北大路書房, 2006.
- [21] デイル・H・シャンク, バリー・J・ジーママン, 塚野州一 (編訳), 伊東崇達, 中谷素之, 秋場大輔 (訳), 自己調整学習の実践, 北大路書房, 2007.
- [22] J. Clement, “Students’ preconceptions in introductory mechanics,” American Journal of Physics, vol.50, pp.66–71, 1982.
- [23] 高垣マユミ, “大学生はいかに力のプリコンセプションを変容させるか,” 発達心理学研究, vol.15, no.2, pp.217–229, Aug. 2004.

(平成 27 年 6 月 17 日受付, 11 月 9 日再受付,
12 月 29 日早期公開)



篠原 智哉

2011 広島大学工学部卒. 2013 同大学大学院工学研究科博士前期課程了. 同年より, 同大学大学院工学研究科博士後期課程在学. 初等力学を対象とした理解内容の外化・修正支援環境の研究に従事.



今井 功

1984 東邦大学理学部卒. 千葉市の公立中学校で理科を教えている. 千葉県の長期研修制度を利用し, 現職のまま 2005 千葉大学大学院教育学研究科理科教育専攻修士課程修了, STS 教育 (科学, 技術, 社会の相互作用) の教育を研究し, 必修理科に組み込むプログラム開発を行っている. また, 理科授業において, 「わかる授業・楽しい教室・夢広がる学校」を目指して, 日々実践している. 更に, EBS 実験を教育現場で実践し, その成果を検証している. 教育学修士.



東本 崇仁 (正員)

2003 九工大・情報工学部卒. 2005 同大学院情報工学研究科博士課程前期課程了. 2008 広島大学大学院工学研究科博士後期課程満期退学. 同年, 早稲田大学人間科学部助手. 既習の公式を用いた間接測定を学習者に要求する実験を対象とした学習支援環境の研究, 学習者の漸進的学習を支援するための適応的な実験系列の提供を可能にするマイクロワールドグラフの自動構築手法の研究, 学習者自身に問題を作成させる作問学習の知的支援システムの研究に従事.



堀口 知也 (正員)

1987 早稲田大学理工学部電気工学科卒. 1989 同大学院理工学研究科博士前期課程了. 1997 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程了. 同年, 神戸商船大学講師. 2001 同助教授. 2003 神戸大学海事科学部助教授. 2007 神戸大学大学院海事科学研究科准教授. 工学博士. 知識工学の教育应用到興味をもち, 知的学習支援, 情報可視化システムの研究に従事.



山田 敦士

2014 広島大学工学部卒. 同年より, 同大学大学院工学研究科博士前期課程在学. 初等力学を対象とした理解内容の外化・修正支援環境の研究に従事.



山元 翔

2008 広島大学工学部第二類情報工学課程卒. 2010 同大学工学研究科博士課程前期了. 2013 同大学博士課程後期了. 同大学院特任助教を経て, 2015 年より近畿大学工学部情報学科助教. 知的学習支援システム, 特に問題の解決・作成・変更を行うことによる学習に関する研究に従事.



林 雄介

1998 阪大・基工・システム工学卒. 2003 同大学院博士後期課程了. 北陸先端大助手, 大阪大学特任助教, 名古屋大学准教授を経て, 2012 年より広島大学大学院工学研究科准教授. 知識モデリング, 知的教育システムの研究に従事. 工学博士.



平嶋 宗 (正員)

1986 阪大・工・応物卒. 1991 同大大学院博士課程了. 同年同大産業科学研究所助手. 同講師, 九工大・情工助教授を経て, 2004 年より広島大学大学院工学研究科教授. 学習工学に関する研究に従事. 工学博士.