

力と運動に関する誤概念の修正を目的とした Error-based Simulation の開発と中学校での実践的利用

Development and Practical Use at Junior High School of Error-based Simulation for Remediation of Misconception about Force and Motion

篠原智哉¹ 今井功² 東本崇仁³ 堀口知也⁴ 山田敦士¹ 山元翔¹ 林雄介¹ 平嶋宗¹
Tomoya SHINOHARA¹, Isao IMAI², Takahito TOMOTO³, Tomoya HORIGUCHI⁴, Atsushi YAMADA¹, Sho YAMAMOTO¹, Yusuke HAYASHI¹ and Tsukasa HIRASHIMA¹

¹ 広島大学大学院 工学研究科

¹Graduate School of Engineering, Hiroshima University

² 千葉市立花園中学校

²Hanazono Junior High School

³ 東京理科大学 工学部第二部 経営工学科

³Faculty of Engineering Division 2, Tokyo University of Science

⁴ 神戸大学大学院 海事科学研究科

⁴Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

Abstract: In our research, we developed the learning system with Error-based Simulation for correction of MIF misconception which about moving objects. Also, we held the practical use of this learning system at junior high school, and verified the effects. In this paper, we report about this use.

1. はじめに

子ども或いはある分野に関する初学者は、学習分野に対して、学習前や初期段階に、科学的には正しくないと思われる知識や考え方を持っている場合がある。このような知識は誤概念と呼ばれ、(1)その分野の専門家の持つ知識とは異なる(2)多くの人に共通している(3)少なくとも従来の教育方法では変えにくい(4)しばしば論理的な信念体系を構成している(5)その分野の初期の指導者の考えに似ている場合がある(6)「神経系のハードウェアや遺伝的プログラミング」「多くの人に共有される経験」「学校などの指導」によって構築される、といった特徴があるとされている[1]。これらの特徴からこの誤概念の存在は学習・問題解決の妨げとなり得るため、これを正しいものへと変える「概念変容」[2]の方法が必要であると言える。

この誤概念の中でも、「運動する物体にはその運動の向きに力がはたらいっている」という「Motion Implies a Force (以下、MIF 誤概念)」[3]と呼ばれるものがある。この MIF 誤概念は初学者に、また既学

習者であっても広く見られるとされ[4]、これまでも多くの研究においてその修正が試みられてきた。

以上の点から本研究では、この MIF 誤概念を具体的な対象とし、「概念変容」の方法の提案を行っている。以下、本稿ではまず第 2 章において、本研究の提案する概念変容モデルやそこで用いる Error-based Simulation について説明する。次に第 3 章において、具体的な概念変容のための方法として本研究で用いる Error based-Simulation システムについて説明する。第 4 章においては、この EBS システムの実践的な利用について報告し、また第 5 章においてその結果に関する考察を行う。

2. 概念変容モデル

2.1 先行研究での概念変容モデル

概念変容には認知的葛藤の生起とその解消が必要であるとされており、Hashweh はこれをもとに、概念変容のモデル化を行っている[5]。ここでは学習者が持っている誤った概念 C1 とそれでは説明できない事例 R2 との間に生起する 1 つ目の認知的葛藤で

ある Conflict1, そして学習者の概念 C1 と R2 を説明できる科学的な概念 C2 との間に生起する認知的葛藤である Conflict2, の 2 つが生起し解消されることが必要であるとされている (図 1).

このような認知的葛藤について, 実際の学習や問題解決に関して考えると, ある事象に対し学習者が誤った概念を適用した結果と, 科学的な概念を適用した結果との間の矛盾に気付くことで, 認知的葛藤が生起し, またそれを解消することで概念変容が起こると考えられる. しかしながら, 既に誤った概念を持っている学習者が適用結果の矛盾に気付いたとしても, 正しい概念の適用結果を正しいものと受け入れられないために認知的葛藤が起こらない, 或いはなぜそのような矛盾が起こるかを理解できないために認知的葛藤が解消されない, といった可能性があり, このような場合には概念変容が起こらないと考えられる. このような観点に基づくと, この認知的葛藤, 及びその解消を促進することは, 学習者の概念変容への補助になると考えられる.

認知的葛藤の促進として平嶋らは, あるメディアを用いて表されている学習者の誤りを, それが誤りであることを認識することが容易となる別のメディアへと写像することで誤りであることを顕在化し, 認知的葛藤を起こさせる手法「Creating Cognitive Conflict by Error-Mapping」を提案している[6]. 本研究ではこのような, 学習者の誤りを別のメディアへと写像し, 認知的葛藤の発生を促すという考えを基に, 3 段階の概念変容モデルを提案する.

2.2 3 段階の概念変容モデル

本節では, 本研究で提案する 3 段階の概念変容モデルについて概説する.

まず概念とは, 抽象化され, 様々な具体的な事例に対して適用できる考え方であるといえる. このような観点から, 本研究で提案する概念変容モデルにおいては, 概念をある理論についてのクラスである「理論クラス」であるとし, 科学的に正しいものを「正理論クラス」, 正しくないものを「誤理論クラス」と呼ぶ. そして, 具体的な事例に対して概念を適用した結果とは, その理論のインスタンスであると考え, 「理論インスタンス」と呼ぶ. ある事例に対し正理論クラスが適用された結果を「正理論インスタンス」, 誤理論クラスが適用された結果が「誤理論インスタンス」となる.

このような観点に立つと, 先述の概念変容モデルにおける事例 R2 に対する認知的葛藤とは, 自身の持つ誤った概念の適用結果である誤理論インスタンスと, 科学的に正しいとされている概念の適用結果である正理論インスタンスとの間の矛盾に気付くこ

とによって起こるものであると考えることが出来る.

このような理論インスタンスのレベルでの矛盾の発生による認知的葛藤の生起が行われている例として, 一般的な教授・学習活動として行われている問題解決が挙げられる. 問題解決において学習者が, 誤った考え方, 即ち誤理論クラスを持っていた場合, 間違った解答という誤理論インスタンスを生成することになる. 一方, 教授者側からは, 正しい解答という正理論インスタンスの提示が行われる. これら 2 つのインスタンスは矛盾しているため, この理論インスタンスのレベルでの矛盾の発生による認知的葛藤の生起が行われているといえる.

しかしながら, このインスタンス間の矛盾に気づき, そして正理論インスタンスを受け入れ, 理論クラスへの修正を行うことは容易ではないと考えられる. そこで本研究では, 理論インスタンスを, それによって起こる現象である「挙動」へと写像することを考える (図 2). このような写像を誤理論インスタンスについて行った結果である誤挙動は, 正理論インスタンスの写像結果である正挙動と矛盾するものであるが, ここで正挙動は科学的に正しい現象であり, 学習者にとって既知であるため, 学習者にとって正しいものがより受け入れられやすいと考えられる. またこの挙動への写像により, 学習者の考えが具体化され, 間違いがより明確になると言える. そのためこの挙動のレベルでは矛盾について気づき易くなる, 即ち認知的葛藤の生起が促進されると考えられる.

2.3 Error-based Simulation とその利用

本節では, 本研究で理論インスタンスの挙動への写像の具体的な手法として用いる, Error-based Simulation (以下, EBS) [6-8]について概説する. EBS とは学習者の誤りに基づいて生成されるシミュレーションであり, 誤りを反映した現実とは異なる動作として表れる. これまでにも物理・力学分野における, 物体にはたらく力の学習のために EBS を実現するシステムが用いられている[9]. それらシステムにおいて学習者は, 物体にはたらくと考える力を実際に作図し, その作図に基づく運動のシミュレーションをシステムが提示する, という学習活動が行われている. この活動にて学習者が用いる考え方が理論クラスに相当し, その具体化である作図が理論インスタンスであると言える. そしてその作図を反映し, システムによって提示されるシミュレーションが挙動であるといえる. そしてこのシミュレーションを, 学習者は既知である現実での物体の運動と比較することで, 矛盾に気づき, 認知的葛藤が生起される.

本研究での EBS の, MIF 誤概念の修正のための具

体的な利用については、次章にて述べる。

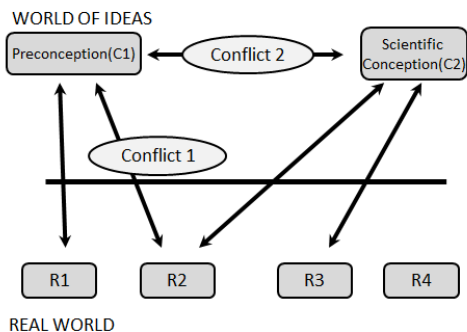


図 1 : 概念変容モデル

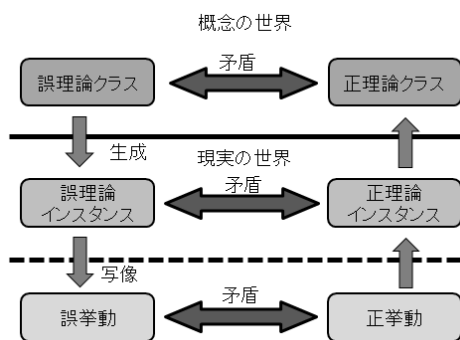


図 2 : 3 段階の概念変容モデル

3. 本研究での EBS システム

本章では、本研究にて用いる EBS システムについて概説する。

3.1 本研究のシステムで用いる課題

EBS を学習のために用いるうえで、本研究では、先行研究にて用いられた、MIF 誤概念が適用されるとされる事例を具体的な課題として利用する。そのためには、それら多くの事例のうち、どれを用いるかを決定する必要がある。

ここで、先行研究にて MIF 誤概念は、以下の 3 つの特性としてまとめられている。

1. 運動の維持は、等速であっても、運動を引き起こす、運動方向の力という思い込みを引き起こしうる
2. この力は特に、明確な抵抗力があるときに継続する運動の説明で一般的である。この力が抵抗より大きいために物体は運動を維持すると仮定される
3. この力は物体の速度に応じて減ったり増えたりすると考えられるかもしれない

このことから、これら 3 つの特性が解消されていけば、MIF 誤概念は修正されたということが出来る。

そこで本研究では、これまでに用いられた事例をこの 3 つの特性のいずれに対応するかで分類した。

まず、特性 1 は、MIF 誤概念の最も根幹となる考え方であるといえる。このような考え方が適用される事例として、「水平面での台車の運動」[10]「氷の上をスケートで滑る」[11]といったものが考えられる。特性 2 としては、物体に何か抵抗力と、それに釣りあう力がはたらくような場合であり「等速度で落下するスカイダイバー」「摩擦力と押す力が釣り合うモデルカー」[12]などが挙げられる。特性 3 は、速度の変化をはたらく力の変化と捉えるものであり、斜面での運動[10]など、一定の力がはたらくことで速度が変化する事例が挙げられる。

このような分類を行った上で、3 つの各特性を演習できるように、課題の選択を行った。その結果、まず 3 つの特性に対応する基本的な、はたらく力の問題として、

- (a) 摩擦のない氷の上を等速直線運動する人物（特性 1）
 - (b) パラシュートを開いて等速で落下する人物（特性 2）
 - (c) 垂直に投げ上げられた物体（上昇中・頂点・下降中）（特性 3）
- の 3 問を用いる。また、上記 3 つの特性に対応する、別のはたらく力の問題として、
- (d) 宇宙空間で等速直線運動する宇宙船
 - (e) 摩擦のある水平面上で物体を等速度で押すとき
 - (f) 斜方投射された物体（上昇中・頂点・下降中）
- も用いる。

3.2 システムの設計開発

本研究では、学習者による作図と EBS による認知的葛藤の生起の促進という学習活動を実現するための学習システムを、Android タブレット上で開発した。本節ではこのシステム（図 3）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。ここでは学習者が一般的に行われる矢印での力の作図と同様に、画面上での作図を行うことを目指している。具体的な作図作業として、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、実際の長さと共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出来る。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出来る。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チすることで、消去することが出来る。

作図の完了後、学習者は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出来る。このシミュレーションが現実での運動と一致しているかを見ることで、学習者は自身の間違いに気付くことが出来る。またこの際、システムによって作図の正誤も診断され、作図が正しければ次の問題に進むことが出来る。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、また作図中にいつでも確認することが出来る。

本システムには、前節での問題の分類に基づく、6問の問題を実装した。

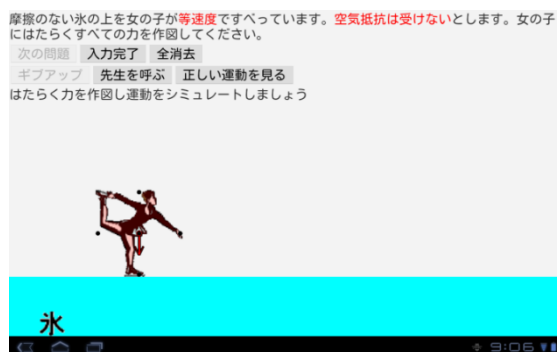


図3：システム画面

4. MIF 誤概念の修正を目的とした

EBS の実践的利用

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。本章ではそのことについて述べる。

4.1 目的と仮説

本研究で用いる EBS システムの目的が、学習者の MIF 誤概念の修正であることから、以下の様な仮説のもと、実践を行った。

仮説1：概念が正しいものへと変容しているため、演習に利用した課題（学習課題）だけでなく、同じ概念を用いる別の課題（転移課題）にも正しく答えることが出来る

仮説2：解答の一時的な記憶ではなく、概念変容が起こっており、遅延テストでも効果が維持される

4.2 対象とした被験者

今回の利用は公立中学校の第3学年生徒9クラス348名を対象に行った。被験者らは全員、当該範囲について学習済みである。効果の比較のため、まず今回検証する運動する物体にはたらく力について、運動する物体にはたらく力の EBS システム（以下、運動 EBS）で演習する群、及び通常の授業の形で演習（以下、通常演習）する群に分類した。さらに、先行研究で用いられた、静止する物体にはたらく力の EBS システム（以下、静止 EBS）の利用が、運動 EBS の効果に影響を与える可能性を考え、静止する物体に関する演習を行い、静止 EBS と通常演習とで条件分けを行うこととした。そのため、今回の実践では静止と運動の両方を EBS で演習する「EBS 群」、静止を通常の方法、運動を EBS で演習する「通常 - EBS 群」、静止を EBS、運動を通常の方法で演習する「EBS - 通常群」、両方を通常の方法で演習する「通常群」の4群での比較となった。また各群へのクラスの割り当ての際、普段の授業を9クラスのうち4クラスを教師 A が、4クラスを教師 B が、残りの1クラスを教師 C が担当していたことから、教師 A と教師 B の担当するクラスからそれぞれ1クラスずつ、各群に割り当てた。なお、教師 C の担当するクラスについては、後述のモデル授業への割り当てを行った。また各演習は、2週間にわたって通常の授業時間1時限（45分間）内に行っており、第1週目には静止する物体について、第2週目には運動する物体について演習を行った。

4.3 各演習で用いた課題

運動 EBS においては、3.2 節で説明した(a)(b)(c)の3問を学習課題として、さらにそれらに正解した者への課題として3.2 節の(d)(e)(f)を実装した。また、静止 EBS では先行研究[8]にて用いられた「床の上に静止する物体にはたらく力」「摩擦のない床の上で壁に向かって押され静止する隣り合った2つの物体にはたらく力」「床の上で積み重ねられて静止する2つの物体にはたらく力」の3問を、学習課題として用意した。

通常演習においては、運動分野に関しては運動 EBS で用いた課題(a)(b)(c)を、静止分野に関してはやはり静止 EBS で用いた3問を用いて演習を行った。

4.4 各演習の手順

ここでは、今回の実践で行われた各群の演習方法について説明する。

4.4.1 EBS 演習

EBS システムを用いた演習では、生徒全員に対し、1 台ずつタブレット PC を配布し、システム利用による演習活動を行った。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が行った。その後約 30 分間、生徒 1 人 1 人のペースでシステムでの演習を行った。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。

運動 EBS に関しては当初、前半の 3 問の完了を目標と考えていたが、後半 3 問に到達する生徒も見受けられた。

演習の終了後、約 5 分間を利用し、授業担当の教師によって正解となる作図の説明のみを行った。この際、通常演習との条件を揃えるため、運動 EBS では(a)(b)(c)の 3 問、静止 EBS では全 3 問を説明した。

4.4.2 通常演習

通常演習では、各 EBS 演習で用いた 3 問を、プリント上で解答する、という方法を用いた。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、担当教師ははたらく力の解説を行った。この解説の内容については、各教師に委任したが、EBS との比較という観点から、何らかの間違った力の作図を取り上げ、そのような力が実際にはたらくている場合にどのような運動をするか、といった説明のみは行わないものとした。最後に、約 5 分間を用いて、復習のためにもう一度同じ問題での作図を行った。

4.4.3 モデル授業

他の EBS 演習が学習者自身による演習の形にて行われたことに対し、モデル授業においては、教師が授業内で教材として EBS を用いる、という想定での授業を行った。ここでは、運動・静止それぞれ実装された 3 問に対し 1 問ずつ、まず生徒が自身で演習を行い、その後教師が EBS を用い実際に画面を見せながら解説を行う、といった形式での授業を行った。

4.5 事前・事後・遅延テスト

今回の利用では、効果測定のための筆記テストを行った。各テストでは、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。

事前テストは第 1 週目の初めに実施された。ここでは前述の静止 EBS に実装された 3 問、及び運動 EBS に実装された 6 問を、25 分間で解答した。説明の都合上、演習にて用いるという意味で静止の全 3 問、及び運動の(a)(b)(c)3 問を学習課題と呼ぶ。また、運動の残りの 3 問を転移課題 1 と呼ぶ。

事後テストは第 2 週の最終日に実施された。ここでは事前テストの課題 9 問に加え、さらに転移課題として静止に関する 2 問、及び運動に関する 4 問を、30 分間で解答した。静止に関する追加の 2 問はそれぞれ、「摩擦のない床の上で壁に向かって押され静止する隣り合った 3 つの物体にはたらく力」「床の上で積み重ねられて静止する 3 つの物体にはたらく力」であり、学習課題を数量的に増やしたものといえる。運動に関する追加の 4 問はそれぞれ「摩擦のない斜面と水平面を運動する台車」「摩擦のない氷の上で押されて加速するそり」「摩擦のある床の上を減速しながら滑って行く箱」「等速度で上昇するエレベータ」にはたらく力を作図する課題であり、MIF 誤概念が用いられうる課題である。説明の都合上、これら 6 問を転移課題 2 と呼ぶ。

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った。これらテストの結果等については、次章にまとめる。

5. 実践結果

テスト結果とその分析についてここでまとめる。なお、今回の実践的利用は通常の授業時間を利用して行っており、欠席等でテストや演習に一度でも参加できなかった生徒は分析から除いている。そのため、分析対象者は EBS 群 69 名、通常 - EBS 群 69 名、EBS - 通常群 71 名、通常群 71 名、モデル群 33 名となっている。

5.1 MIF 誤概念を含む解答数の変化

本研究では MIF 誤概念への概念変容を目的としている。そこで、今回対象とする 4 群について、MIF 誤概念を含む解答をした課題の数を分析した。

分析は、運動分野の演習方法（通常か EBS か）、静止分野の演習方法（通常か EBS か）、テストの時期（事前・事後・遅延）での 3 要因の分散分析を用いた。またそれら分析は「ANOVA4 on the Web」[13]を用いて行った。

運動の学習課題に関しては、テストの時期にのみ水準間の差が見られた ($p=0.000$)。多重比較の結果、事前・事後・遅延のすべての水準の間に、有意差があるという結果であった。

運動の転移課題 1 に関しては、運動の演習方法とテストの時期の間に交互作用が見られた。多重比較の結果、運動分野を EBS で学習した場合には、事前と事後、事前と遅延の間は有意差があったが、事後と遅延の間には有意差がなかった ($p=0.535$)。一方、運動分野を通常の方法で演習した場合、事前・事後・遅延のすべての水準の間に、有意差が見られた。

運動の転移課題 2 に関しては、2 つの演習方法、

及びテスト時期のいずれについても、効果が見られなかった。

5.2 MIF 誤概念を含む解答の変化

演習活動による MIF 誤概念修正への効果をより詳しく分析するため、演習前後での各課題での、MIF 誤概念を含んだ解答の正しいものへの変化を分析した。演習前後での効果を見るため、両方に共通する課題である運動の学習課題、及び転移課題 1 を分析した。また分析はフィッシャーの直接確率計算法により、2 群間の比較として行った。

EBS の効果の確認のために行った、EBS 群と通常群の比較では、6 問中 1 問において、MIF 誤概念が正しい解答に修正される割合が有意に高いことが示された ($p=7.08E-06$)。次に、静止 EBS が運動 EBS での学習に与える影響を確認するため、EBS 群と通常 - EBS 群で比較を行ったが、ここでは有意差は見られなかった。

5.3 テスト結果まとめ

今回は、被験者の MIF 誤概念を含んだ解答に着目し、分析を行った。その結果、特定の事例では成るが、MIF 誤概念の修正の効果があるのではないかと考えられている。

6. まとめと展望

本研究では学習者の誤概念を修正するための概念変容の手法の提案を行っており、誤概念の中でも特に MIF 誤概念と呼ばれる誤概念の修正を目指している。そのための具体的な方法として、誤りからのシミュレーションである Error-based Simulation の利用を行っている。本論文内においては、MIF 誤概念の修正のための EBS の設計・開発、及びその実践的な利用についての報告を行った。

今後の展望としては、今回の実践的利用に関し、その結果へのさらに詳細な分析を予定している。また、使用したシステムの使用性に関する検討を続けていくことを考えている。

謝辞

本研究に際し、様々なご指導を頂きました平嶋先生に感謝いたします。また今回の実践に際し、ご協力いただいた今井先生、大野先生、曾村先生には感謝いたします。また、システムの設計開発やその利用に際しお力添えを頂きました東本先生、堀口先生に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. M. Fisher: A misconception in biology: Amino acids and translation, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 22, Issue 1, pp.53-62(1985)
- [2] G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson and W. A. Gertzog: Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change, *Science Education*, Vol.66, No.2, pp.211-227(1982)
- [3] Clement, J.: Students' preconceptions in introductory mechanics, *American Journal of Physics*, 50, pp.66-71(1982)
- [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* (50), p.586(2008)
- [5] M. Z. Hashweh, :Toward an explanation of conceptual change, *European Journal of Science Education*, Vol.8, pp.229-249(1986)
- [6] 平嶋宗, 堀口知也, 柏原昭博, 豊田順一: 問題解決の誤りに対する Cognitive Conflict の生成手法, *電子情報通信学会技術研究報告*. ET, *教育工学* 96(16), pp.83-90(1996)
- [7] Hirashima, T., Horiguchi, T., Kashihara, A., Toyoda, J.: Error-Based Simulation for Error-Visualization and Its Management, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol.9, No.1-2, pp.17-31(1998)
- [8] Tomoya Horiguchi, Isao Imai, Takahito Toumoto, Tsukasa Hirashima: Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation, *Journal of Educational Technology & Society*, Vol.17, Issue 3, pp.1-13(2014)
- [9] 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. 113-116(2008)
- [10] 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* 57(3), pp.215-219(2009)
- [11] 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* 15(2), pp.217-229(2004)
- [12] Ping-Kee Tao and Richard F. Gunstone: The Process of Conceptual Change in Force and Motion during Computer-Supported Physics Instruction, *Journal of Research in Science Teaching*, Volume 36, Issue 7, pp.859-882(1999)
- [13] ANOVA4 on the Web, <http://www.hju.ac.jp/~kiriki/anova4/>, 2015.02.08