

Error-Based Simulation を用いることによる概念変容の分析 -概念マップの変化としての概念変容の分析-

Analysis of conceptual transformation by using Error-Based Simulation -Analysis of conceptual transformation as change of concept map-

西岡佳希¹ 長曾一樹² 林雄介² 平嶋宗²

Yoshiki Nishioka¹, Kazuki Nagaso², Yusuke Hayashi², and Tsukasa Hirashima²

¹広島大学工学部

¹Faculty of Engineering, Hiroshima University

²広島大学大学院工学研究科

²Graduate School of Engineering Hiroshima University

Abstract: Many learners have many incorrect scientific concepts before learning. This concept is called naive concept. EBS system is considered effective for eliminating the concept. There is a change in thinking to the learner before and after system use if the effect of cancellation of naive concept by EBS is obtained. We observed and analyzed learner's thinking changes by using concept map which is said to be useful as an organizing activity of knowledge.

1. はじめに

学習者が一定の情報得て、それらを整理することは重要であると言われている。概念マップは、得た情報を整理する手法の1つとして教育の文脈でよく知られている。概念マップでは二つの概念とそれらの関係から構成される命題を複数相互連結することによって意味構造を図的に表現する[1]。この概念マップの知識や理解の外化や整理活動としての学習効果があり、また、学習者の理解の共有や評価においても有効であることが知られている[2]。

一方、学習者には学習する以前に科学的に正しいとされている概念とは異なる誤った概念を獲得してしまっていることが多くみられる。このような概念は素朴概念と呼ばれる。この素朴概念は日常生活の経験から得られ、科学的に正しい概念の理解の妨げになるので、その修正が困難であると言われている[3]。またこの素朴概念の中でも特に多くの学習者に見られ、また修正が困難なものとして、初等力学の分野における Motion Implies a Force (MIF) 素朴概念がある[4]。この MIF 素朴概念は運動している物体には運動している方向に力が働いているという誤った概念のことである。この誤概念の修正は、学習支援における重要な研究トピックとなっている[5]。この MIF 素朴概念修正のためには対象としている系に働く力の把握が必要であるとされており、その学習支援の1

つとして、Error-Based Simulation(EBS)[6-12]が提案されている。EBS では、学習者の考えが正しいと仮定した場合にどのような現象が起こるのかをシミュレーションするシステムのことである。システム上ではある力学の問題に対して学習者が力・速度・加速度を作図する。そしてその作図結果をシミュレーションし、正解の挙動と比較するものとなっている。学習者の間違った作図から生じる運動と正しい挙動との差異を示すことによって、自らの誤りへの気づきを促す効果がある。またその EBS の実践利用を通して MIF 素朴概念修正に効果的であるという結果が得られている。

この EBS の実践利用において学習者の MIF 素朴概念が修正されたという結果から EBS 利用前後ではその学習者には何か考え方の変化が生じているはずである。本研究では、その考え方の変化を観察するために、概念マップを用いて EBS 利用前後の学習者の力に関する認識を測定した。

2. Error-Based Simulation による誤りからの学習

2.1. 素朴概念

学習者は学習以前に科学的に正しいとされている

概念とは異なる誤った概念を獲得してしまっていることが多くみられる。このような概念は素朴概念と呼ばれる。この素朴概念はボールを投げたり、自転車を漕いだり、ミニカーを動かしたりなどの日常生活の経験から形成されるものである。そのためこの概念は大変強固となっており通常の教授では、その修正が困難であると言われている。

2.2. MIF 素朴概念

素朴概念の中でも初等力学の分野では Motion Implies a Force (MIF)素朴概念と呼ばれるものが存在する。MIF 素朴概念とは運動している物体には運動の向きに力がはたらいているという誤った考え方のことであり、この概念は多くの学習者に見られる。これらの経験のほとんどは日常生活から得られ長い時間をかけて自分の知覚・認知系と強固に結びついてしまうため、自身の中でのこの概念に対する信頼度は高く、容易に修正することはできない。MIF 素朴概念には3つの誤答パターンがある[4]。

- (1) 運動の維持には等速であっても運動を引き起こす運動の向きの力が必要。
- (2) 特に明確な抵抗力があるときに運動を継続するには、抵抗より大きい力が必要。
- (3) 運動の向きの力は、物体の速度に応じて減ったり増えたりする。

これらの3つの考え方が MIF 素朴概念の存在を示している。つまり上記の3つの誤答を減少させられれば、素朴概念の修正が行われたと判断することができる。

2.3. 誤りからの学習

誤りからの学習とは、学習者自身が自らの誤りを認識し、その誤りを修正するという学習方法である。その学習を可能にする方法の1つが「Error-Based Simulation による誤りの可視化」[10]である。EBS による誤りの可視化では、学習者の誤った考えを肯定した時にどのような事象が起こってしまうのかをシミュレートし可視化する。この誤りの可視化が学習者の誤り修正に効果的であると同時に学習者の誤りの気づきを促す方法として有効であることがすでに検証されている。

2.4. Error-Based Simulation (EBS)

Error-Based Simulation (EBS)では、学習者の考えが正しいと仮定した場合にどのような現象が起こるのかをシミュレーションする。また自らの作図結果に応じたシミュレーションと正しい挙動との差異を比

較することにより誤りの可視化を実現しており、学習者に自らの誤りを気づかせることを可能とする。この EBS が MIF 素朴概念の修正に効果的なのであることの検証が実験的に確認されている[11,12]。この実験的利用では単視点 EBS と多視点 EBS[11]の2種類が存在するので、本節ではそれぞれについて説明する。

2.4.1. 単視点 EBS

単視点 EBS 内では矢印の向きと大きさで表わされた力を物体に作図する。そして学習者の作図に応じたシミュレーションと正しい挙動を同時に表示するシステムとなっている。

2.4.2. 多視点 EBS

単視点 EBS システムの力のシミュレーションを掲示するだけでは十分に効果が得られない学習者も存在した。そのような学習者は、自分が作図した力とその作図におけるシミュレーション結果との関連付けができないことが原因であると考えられた。そこで、力だけでなく、速度・加速度も作図させることで、それぞれの関係性の理解を促すことが提案された。多視点 EBS ではその3要素の作図に応じたシミュレーションと正しい挙動を同時に表示するシステムとなっている(図1)。

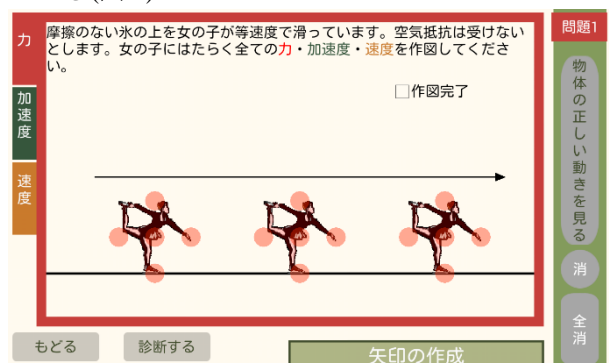


図1 多視点 EBS システム画面

2.5. EBS の実践的利用

MIF 素朴概念解消を目的とした EBS システムの実践的利用については、高等専門学校の生徒に対して行われた。その手法として単視点 EBS と多視点 EBS の演習に対して、筆記方式の事前テスト・事後テスト・遅延テストで分析を行うというものである。テスト内では、システム演習での評価指標として学習課題と転移課題が用意された。学習課題の内容は EBS システム内で設定されたものと同様である。具体的な内容を以下に示す。

○学習課題 6 問

- (1) 摩擦のない氷の上を等速直線運動する人
- (2) パラシュートを開いて等速に落下する人

- (3)鉛直上向きに投げ上げられたボール
- (4)宇宙空間を等速直線運動するロケット
- (5)摩擦のある水平面上において等速で押される箱
- (6)斜方投射されたボール

○転移課題 4 問

- (7)摩擦のない斜面上と水平面上を運動する台車
- (8)摩擦のない氷の上で押されて加速するそり
- (9)摩擦のある床の上を減速しながら滑ってゆく箱
- (10)等速度で上昇するエレベーター

事前テストは学習課題 6 問のみで、事後テストと遅延テストの内容は学習課題に加えて転移課題 4 問が用意された。また事後テストに関しては単視点 EBS に対して 1 回、多視点 EBS に対して 1 回行われた。遅延テストについては事後テスト実施から 1 か月後に行われた。

2.5.1 結果と分析

EBS の実践利用によって MIF 素朴概念が解消されたかどうかをテストの結果から分析を行った。ここで MIF 誤答というのは MIF 素朴概念で規定される誤りのことで、それ以外の誤りをその他の誤りとしている。分析は学習課題と転移課題に分けて行われた。学習課題については事前テスト、事後テスト、遅延テストの 3 群を比較するために Steel-Dwass 法を用いて分析をした。また転移課題については事後テストと遅延テストの 2 群を比較するためにウィルコクソンの符号順位検定を用いて分析をした。

事前テストの MIF 誤答数が 3.50、事後テストの MIF 誤答数が 1.14、遅延テストの MIF 誤答数が 1.53 である。それらを踏まえて事前テスト、事後テスト間では MIF 誤答数が有意に減少していた ($p=2.54e-05 < 0.05$)。また事前テスト、遅延テスト間においても MIF 誤答数が有意に減少していた ($p=9.56e-04 < 0.05$)。つまり事前-事後間、事前-遅延間で有意差が見られたという結果が得られた。事前テストでの全誤答数に対する MIF 誤答数の割合は 58%であったが、転移課題の全誤答数に対する MIF 誤答数の割合は 28%であり、大幅に減少していた。このことから新規性のある問題に対しても MIF 誤答数が減少していることが言え、EBS システムが MIF 素朴概念解消に有効であることが示唆される。

3. EBS による概念変容の測定

3.1. EBS による概念変容

2 章で説明したように EBS には MIF 素朴概念の修正効果がある。そこで本研究では、EBS 利用前後の

学習者の理解を概念マップで測定し、EBS による MIF 素朴概念の修正について検証することを目指している。概念マップとは二つ以上の概念とそれらの関係から構成される命題の集まりによって意味構造を表す図的表現のことである。概念マップ中に表された概念のことをノード、概念間の関係のことをリンクと呼ぶ。概念マップは知識の整理活動の手法として有用であるとされており、また力学問題を概念マップとして表す先行研究[13]も過去に行われている。従って EBS での学習者の理解を概念マップで表すことを提案する。

3.2. 概念マップによる学習者の理解表現

本研究で作成した力学課題とその問題に関する概念マップを図 2 に示す。図 2 左は対象としている状況とそこに働く力と速度を表しており「パラシュートを開いて等速で落下する人」には図中で下向きの重力とパラシュートによる空気抵抗として上向きの力が働いている。また、速度は下向きであり、等速なので加速度はない。これを概念マップで表現したものが図 2 右である。「重力」「空気抵抗」といった力に関するノード、「速度」「加速度」に関するノードがあり、それらの大きさと向き、力に関しては釣り合いを関係として表現している。図 2 は正しい理解を表しているが、もし学習者が MIF 素朴概念を持っていたら、図 3 のようになる。ここで重要となるのは、「力のつりあい」という概念は物体が動かないという場合だけでなく、等速度運動している場合もあるということである。MIF 素朴概念があると図 3 のように力が釣り合わず、運動している向きの力が大きくなってしまう。

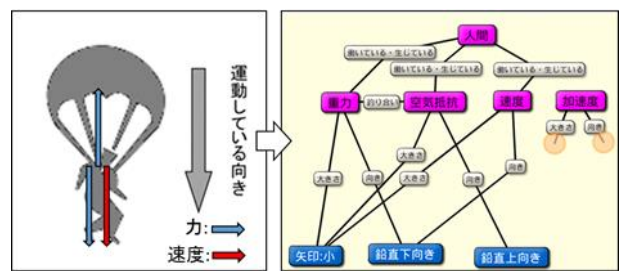


図 2 力学問題の作図と作図に対する概念マップ例 1

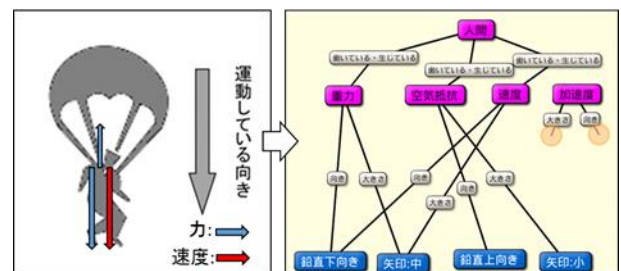


図 3 力学問題の作図と作図に対する概念マップ例 2

3.3 概念マップシステム

これらの概念マップを学習者に描かせる時は、まず学習者にキットを提供し、概念マップを組み立ててもらう形式を採用する(図 4)。図 4 のキット内には繋いではいけないダミーとなるノード、リンクが存在している。つまり力学問題において見られる MIF 素朴概念をダミーノード、リンクとして表現しているということである。学習者の概念マップ作成においてキットビルド概念マップ形式を採用してしまうと学習者の自由度を極端に制限してしまう、つまり力学問題で向きや大きさなどのノードがあらかじめ決まっているとヒントをかなり与えてしまうことになる。このダミーノード、リンクを用意することで学習者の組み立てるマップの自由度を高くすることができる。また図 4 で示されたキットの中の青色ノードとリンクは自由に操作可能、紫色ノードはあらかじめ固定されてある。力学問題の根幹となるノードを固定することで想定にはない誤り、例えば人間というノードに大きさや向きを繋ぐといった意味のない誤りを防止することができる。本研究としてはそのような誤りではなく、力や速度、加速度の大きさや向きが間違っているなどのレベルでの誤りを想定している。そして固定ノードは想定外の誤りの防止だけでなく、学習者の負担軽減にもつながる。

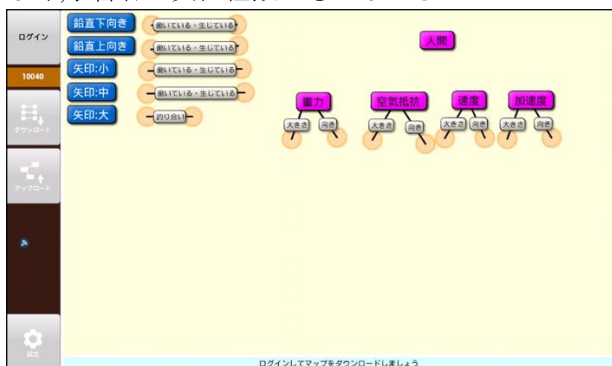


図 4 概念マップキット例

3.4 概念変容分析のための実践的利用

学習者の概念変容の分析を目的とした実践的利用を高等専門学校生徒 34 名を対象に行った。実践的利用のため、多視点 EBS システムと概念マップシステムの 2 種類を用いた。また多視点 EBS の評価指標として事前テスト・事後テスト・遅延テストを行い、概念マップシステムに対しての評価指標はシステム内で学習者が作成したマップとする。概念マップシステムの演習に関しては 2 回、遅延テストに関しては概念マップシステムで行う演習をそのまま紙ベースに落としこんだ筆記テスト形式で行った。遅延テストに関しては両方 1 か月後に行った。具体的な実践の

流れを以下に示す。

--実践的利用の流れ--

- (1) 力学事前テスト (7 分)
- (2) 概念マップ作成 1 (15 分)
- (3) 多視点 EBS 演習 (20 分)
- (4) 概念マップ作成 2 (12 分)
- (5) 力学事後テスト (12 分)
- ↓ 1 か月後
- (6) 力学遅延テスト (12 分)
- (7) 概念マップ作成 3 (18 分)

(1),(5),(6)のテストに関しては 3 章で説明したテストをそのまま使用しており、(3)も同様に同じシステムを採用している。(2),(4)に関しては同じ演習を行っており、その問題に関しては EBS の学習課題に設定されているうちの「パラシュートを開いて等速に落下する人」、「鉛直上向きに投げ上げられたボール」の 2 問を採用し、それらを EBS と同じように三状態に分解したもの、つまり全 6 問用意した。そのうちのパラシュートの問題を以下に示す(図 5)。具体的には図 5 の問題の三状態それぞれに対して図 4 のキットが学習者に与えられ、それをシステム上で組み立ててもらったものが概念マップシステムとなっている。また(7)は概念マップシステムと同じになるように筆記テストを作成し、問題に関しては(2),(4)と同じにした。(2)と(4)を(3)の前後に入れることで本研究の目的である、EBS 利用前後の概念変容を概念マップ表現として分析することができる。

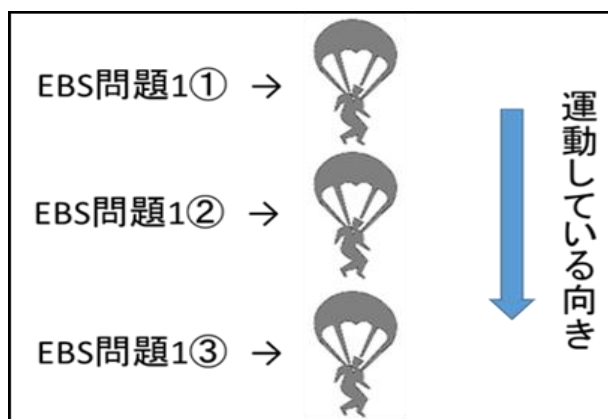


図 5 概念マップ問題

3.5 力学問題テストの結果

まず多視点 EBS の利用によって MIF 素朴概念が解消されたどうかを MIF 誤答数の変化を分析することにより分析した(表 1)。事前事後遅延間のテストで Steel-Dwass 法を用いて検定を行った(表 2,表 3,表 4)。分析の結果、事前テストと事後テスト間、および事前

テストと遅延テスト間で学習課題の MIF 誤答数,その他誤答数,平均正答数に有意差は見られなかった.また転移課題に関しても同様である.従って多視点 EBS の利用によって MIF 素朴概念の解消は見られなかったという結果が得られた.素朴概念解消が得られなかった原因として従来の実験と比較して単視点 EBS 演習をやらずに多視点 EBS 演習のみを行ったこと,そして概念マップ演習においてダミーノードとして表現されている MIF 素朴概念が学習者にそのまま MIF 素朴概念を学習させてしまったことが考えられる.

表 1 力学問題スコアの結果

	学習課題		
	事前	事後	遅延
平均正答数	2.09	2.62	2.21
標準偏差	1.64	1.83	1.75
MIF 誤答	2.88	2.88	3.21
その他誤答	1	0.5	0.59

表 2 学習課題の平均正答数の検定結果

	t 値	p 値
事前テスト・事後テスト間	1.15	0.48
事後テスト・遅延テスト間	0.98	0.59
事前テスト・遅延テスト間	0.14	0.99

表 3 学習課題の平均 MIF 誤答数の検定結果

	t 値	p 値
事前テスト・事後テスト間	0.02	1
事後テスト・遅延テスト間	0.75	0.73
事前テスト・遅延テスト間	0.74	0.74

表 4 学習課題の平均その他誤答数の検定結果

	t 値	p 値
事前テスト・事後テスト間	1.95	0.13
事後テスト・遅延テスト間	0.75	0.73
事前テスト・遅延テスト間	1.41	0.34

3.6 概念マップ演習の結果

力学問題での学習者の理解を概念マップとし表現できているかどうかを実践的利用の中で概念マップ作成 1 を事前テスト,概念マップ作成 2 を事後テスト,1 か月後に行った筆記テスト(概念マップ作成 3)を遅延テストとして分析することにより調べた(表 5).また事前事後遅延間のテストで Steel-Dwass 法を用いて検定を行った(表 6,表 7,表 8).検定の結果,事前テストと事後テスト間,および事前テストと遅延テスト間で MIF 誤答数に有意差は見られなかった.また事前テストと遅延テスト間ではその他誤答数が有意に減少していた($p=0.02<0.05$).従って概念マップ演習においても MIF 素朴概念の解消が見られなかったという結果が得られた.

表 5 概念マップスコアの結果

	事前	事後	遅延
平均正答数	0.24	0.71	0.97
標準偏差	0.65	1.14	1.83
MIF 誤答	3.74	3.68	3.88
その他誤答	1.94	1.59	1.15

表 6 概念マップ平均正答数の検定

	t 値	p 値
事前テスト・事後テスト間	2.03	0.11
事後テスト・遅延テスト間	0.29	0.96
事前テスト・遅延テスト間	1.47	0.31

表 7 概念マップ MIF 誤答数の検定

	t 値	p 値
事前テスト・事後テスト間	0.11	0.99
事後テスト・遅延テスト間	0.88	0.66
事前テスト・遅延テスト間	0.85	0.67

表 8 概念マップその他誤答数の検定

	t 値	p 値
事前テスト・事後テスト間	1.13	0.5
事後テスト・遅延テスト間	2.16	0.08
事前テスト・遅延テスト間	2.68	0.02

3.7 力学問題と概念マップ間の対応関係

分析

力学問題と概念マップの対応関係を分析するためにまず概念マップと力学問題の回答を 3 種類に分けた.概念マップにおいては(A 間違いであり MIF を含む, B 間違いだが MIF を含まない, C 正解),力学問題においても(a 間違いであり MIF を含む, b 間違いだが MIF を含まない, c 正解)と場合分けを行った.そして A ならば a であるというように全通り 18 個の場合分けを行った.その中の 4 通りピックアップした命題を表 9 に示す.概念マップで MIF 誤答が存在する場合に,力学問題で MIF 誤答が見られる確率と,力学問題で MIF 誤答が存在する場合に,概念マップで MIF 誤答が見られる確率はおおむね高い数字であるため,概念マップにおいても MIF 素朴概念を表現できていると言える.また概念マップが正解である場合に,力学問題は正解である確率が高く,力学問題が正解である場合に概念マップが正解である確率が低い.この結果が表しているのは概念マップがしっかり書いていないと力学問題は解けないことを意味する.従って力学問題における理解を概念マップで表現することの有効性が示唆されている.

表9 概念マップ,力学問題間の条件確率

命題	条件確率(%)
MIF(概念)→MIF(力学問題)	82.62
MIF(力学問題)→MIF(概念)	87.37
正解(概念)→正解(力学問題)	95.24
正解(力学問題)→正解(概念)	44.39

4. まとめと今後の課題

本研究の目的がEBS利用前後での学習者の思考変化を概念マップ変化として分析することであった。そこで従来のEBS演習の前後に概念マップ作成活動を追加して実践的利用を実施し,その分析を行った。しかし実践的利用においてMIF素朴概念解消が見られなかった。EBS演習が誤概念の修正に効果的であることは,中学校から大学まで数多くの実践において検証ができており,修正効果が見られなかったのは今回が初めてである。今回の実践においては概念マップの作成を行っているが,この概念マップにおいてはフィードバックを与えていない。概念マップを作成すること自体が学習者に自身の理解を確認し定着させる効果があることが知られているが,このフィードバックなしの概念マップの作成により,学習者の誤概念の表明と定着を促し,結果として誤概念の修正効果が見られなかった可能性がある。

今回の実践的利用内でMIF素朴概念が解消されなかったこと,そして一部で力学問題の概念マップ表現が上手くできていない学習者が見られたことが問題点として浮かび上がった。従ってMIF素朴概念解消を妨げない,またより多くの学習者が理解を表現できる概念マップキットの作成とキットの与え方の改善が今後の課題として挙げられる。

謝辞

実験にご協力頂いた倉山めぐみ准教授に感謝します。

参考文献

[1] Novak, J.D., Canas, A.J.: "The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct Them", Technical Report IHMC Cmap Tools 2006-01(2006)

[2] 山口悦司, 稲垣成哲, 福井真由美, 舟生日出男: コンセプトマップ: 理科教育における研究動向とその現代的意義, 理科教育学研究, 43(1), pp.29-51(2002)

[3] K.M.Fisher. : "A misconception in biology. Amino acids and translation", Journal of Research in Science Teaching, Volume22, Issue1, pp.53-62, 1985

[4] J. Clement., : "Student preconceptions in introductory mechanics", American Journal of Physics, 50, pp.66-71, 1982

[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 57 卷(2009)3 号 pp.215-219

[6] 野田尚志, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: 力学における誤り修正支援を目的としたフェイクシミュレーションの提案, 人工知能学会誌, 10(4), pp.641-645(1995)

[7] Hirashima, T., Horiguchi, T., Kashihara, A., & Toyoda, J., : "Error-visualization for error-based simulation and its management", International Journal of Artificial Intelligence in Education, 9(1-2), pp.17-31(1998)

[8] Horiguchi, T., Imai, I., Toumoto, T., & Hirashima, T., : "Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation" Journal of Educational Technology & Society, 17(3), (2014)

[9] 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, 12(2), pp.285-296(1997)

[10] 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 21(3) pp.215-219

[11] 山田敦士, 篠原智哉, 堀口知也, 林雄介, 平嶋宗, : 多視点 Error-Based Simulation の設計・開発と実験的評価, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J99-D No. 12 pp. 1158-1161

[12] T Hirashima, T Shinohara, A Yamada, Y Hayashi, T Horiguchi, : "Effects of Error-Based Simulation as a Counterexample for Correcting MIF Misconception", Proc. of AIED2017, pp.90-101(2017)

[13] MICHELENE T. H. CH, PAUL J FELTOVICH, ROBERT GLASER : "Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices", COGNITIVE SCIENCE 5, pp.121-152