

Error-based Simulation (EBS) と概念マップを用いて

メタ認知活動における抽象化操作を促すシステムの開発と評価

久世 泰成^{*1}, 東本 崇仁^{*1}

^{*1} 東京工芸大学工学部

Using Error-based Simulation (EBS) and Concept Maps Development and Evaluation of a System to Promote Abstraction Operations in Metacognitive Activities

Taisei KUZE^{*1}, Takahito TOMOTO^{*1}

^{*1} Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

In order to facilitate meta-cognition, "instantiation", "modification", and "abstraction" operations are required. Instantiation and modification operations can be prompted by EBS. However, in the past, there was no explicit support for abstraction operations to reflect on one's own answer series. Therefore, we develop a system that visualizes the sequence of the learner's answers as a sequence of the concept map, and adds the function to support the organizing activity to the conventional EBS. As a result of the evaluation experiment, it was suggested that this system promotes abstraction operation.

キーワード: メタ認知, Error-based Simulation, リフレクション支援, 抽象化操作支援, 知識マップ

1. はじめに

学習の場面においてメタ認知を促すには、「具体化」「修正」「抽象化」の3操作が必要である⁽¹⁾。Error-based Simulation (EBS) は、誤答に対してシミュレーションを生成することにより学習者の誤りに気づかせる学習支援システムであり、EBS がメタ認知活動を促すことが報告されている⁽²⁾。しかし、EBS においては抽象化操作の支援不足が指摘されている。この支援のためには、学習者の概念構造をマップ形式で確認でき、過去の知識の振り返りや知識の整理ができる概念マップが有効であると考えられる。

そこで本研究では、EBS と概念マップを用いることで、メタ認知活動における抽象化操作を促すシステムの開発と評価を行う。

2. メタ認知活動

2.1 メタ認知の困難さ

まず、メタ認知のモデルを図1に示す。このモデルは

もっとも一般的に紹介されている Nelson のモデルである。メタ認知は、問題解決者としての自分に関する知識と、自分の思考過程を客観的に観察し目標に到達するように調整するスキルから成る⁽¹⁾。また、認知を「観察」および「制御」の対象とする認知であるとされている⁽²⁾。しかし、学習者がメタ認知という能力を向上させることは難しく、自分自身の学習状況を客観的に見ることは難しい。また、メタ認知が行われるためには、認知においてメタ認知の対象となる行動が行われている場合や、その産物としての情報が保持されていることが必要となり、それと同時にその行動や情報を対象としたメタ認知活動が行われることとなる⁽²⁾。この二重の活動であることもメタ認知の困難さの原因であるとも言える。そのため、自分の考えていること、考えたことを何かしらの方法で可視化させ、それを学習者が客観的にモニタリングすることで、学習者が自分の考えを把握することは容易になると考えられる。そのため、本研究では“自分の考え方を客観的に観察

し、過去の解答を振り返り、学習者が自分の考え方や誤った原因を抽象化できること”を『メタ認知活動』と定義する。

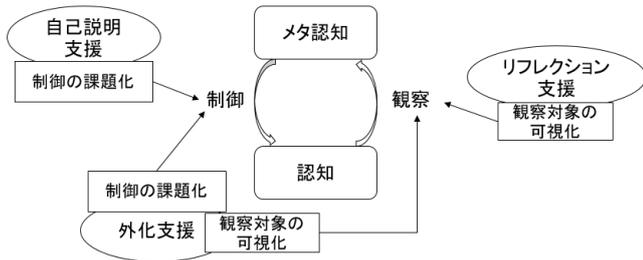


図 1 Nelson のメタ認知モデル

2.2 抽象化操作, 具体化操作, 修正操作

Collins ら^③は、自分の問題解決過程を特徴づけるには 2 種類の抽象化が必要であると述べている。まず 1 つは自分の問題解決過程をオペレータとそれによる状態の遷移といった知覚レベルでの抽象化であり、もう 1 つは知覚レベルで明示された自分の問題解決の特徴を、前向き推論などといった言語レベルで抽象化することである。自分の問題解決過程の特徴を言語レベルで抽象化することは、認知活動とそれらを適用した問題解決の特殊性を捨てさせ、認知活動とそれが適用可能な状況に共有する特性のみを浮き彫りにする。この言語レベルへの抽象化は、インスタンスである自分の問題解決の仕方がどのような「概念クラス」に所属するかを認定することであり、知覚レベルの抽象化と区別するために、「抽象化操作」と呼ぶ。例えば、 $5x^2-3x+4x-7x^2$ を $(5-7)x^2+(4-3)x$ と変形したときに、変形が分配法則というクラスレベルのルール “ $(x-y) \times a=ax+ay$ ” のインスタンス “ $5x^2-3x+4x-7x^2=(5-7)x^2+(4-3)x$ ” であることに気が付き、そこから自分の式変形の特徴をどのように考えたのかを認定することにつながる。逆に自分の式変形の特徴をインスタンスレベルに落とし込むことを「具体化操作」と呼ぶ。このとき、各操作の過程で修正、追加、削除が必須になり行われるが、これを「修正操作」と呼ぶ。そして、これらを適用した学習のことを“メタ認知駆動学習”と呼び、図 2 に示す。

よって、理想的なメタ認知活動を構成させるには『抽象化操作』『具体化操作』『修正操作』の 3 つの操作が必要であると考え、本研究ではこの 3 つの操作活動に

焦点を置きメタ認知活動を考えていくこととする。

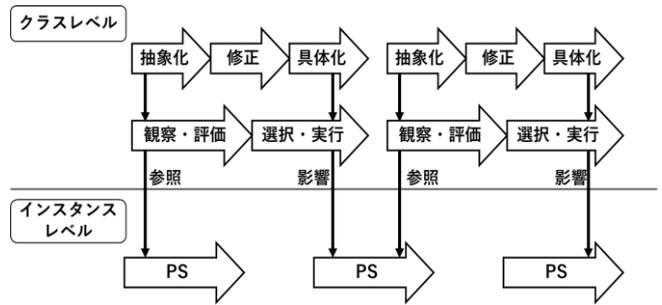


図 2 メタ認知駆動学習

3. 提案手法

3.1 EBS によるメタ認知活動

今井ら^④は、「EBS の目的は、力学の原理(principle)を説明できるようにすることである」としている。EBS システムは学習者が保有する誤った力学的知識を適用しそれを正とした場合に、物体の自然界ではあり得ないような動きをシミュレートするものであり、このシステムを利用することで、現実では起こせない物理的現象を表現することが可能となる。図 3 に示すのが EBS 機能の例である。学習者には、矢印などを用いることによって物体に働く力を作図してもらう。例えば、図 3(a)のような作図の場合のシミュレーション結果は、同図(b)のように黄色い物体が床に沈んでいく。EBS を使うことによって、このような非現実的な振る舞いを可視化することが可能である。

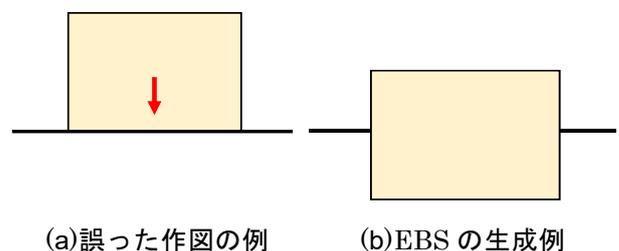


図 3 EBS 機能例

この振る舞いを通して学習者が自分の誤りを可視することが可能となり、そこから解答の自発的な修正を行うことが可能となる。しかし EBS 内で行っているメタ認知活動は力の作図による“具体化操作”と間違えたときに修正する“修正操作”の 2 つであり、抽象化操作についての提案がなされていないケースが少ないため、本研究では 3.2 節で記述する「概念マップ」の

手法を組み合わせることを提案する。

3.2 概念マップによるメタ認知活動

概念マップとは、2 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⁽⁷⁾。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、力学問題を概念マップとして表す先行研究も行われている。従って、本研究にも概念マップのシステムを導入することを提案する。

そして、本研究では学習者が作成した EBS の実行結果に対応する概念マップを、システムが自動で作成する。これは、学習者が考えている概念マップと正解である概念マップの間にズレが生じてしまい、正確な概念の関係性を取得できないと考えたからである。

3.3 EBS と併用することの有用性

既存の EBS だけでは“具体化操作”と“修正操作”を促すことは可能であるが、“抽象化操作”に関してはうまく支援できていないのが現状である。そこで、学習者の EBS での実行結果をシステムが概念マップとして自動生成し、適切なフィードバックを与えることにより、学習者が自分の過去の解答を振り返ることや、誤った知識概念を把握することができると考えられるため、概念マップを併用することが有効であると考えられる。

4. システム開発

4.1 EBS 機能

本研究で使用する EBS 機能に関しては、先行研究の植野らが使用したものをベースに改良を行ったものを利用する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本研究で扱う EBS 機能の画面を図 4 に示す。力の矢印の生成に関しては画面右にある各ラジオボタンで選択し、「矢印の生成」ボタンを押すと物体に矢印が生成される。その後「解答完了」ボタンを押すことで学習者が行った作図に対応したシミュレートが行われる。また、「1 つもどす」ボタンにより、矢印の生成でミスをしてしまったときに 1 つ前の状態に戻すことができ、「すべて消す」ボタンにより、画面上の力を一括で消すことが可能である。また、本研究で扱う問題が 2 物体の力のつり合いのみであるため、学

習者が力の向きや作用点を右や左で入力することは極めて低いと判断し、それぞれのボタンの選択肢から左右に関して削除した。また、正解となる作図が一つとなるように、大きさの選択肢に関しても 3 というボタンを削除した。

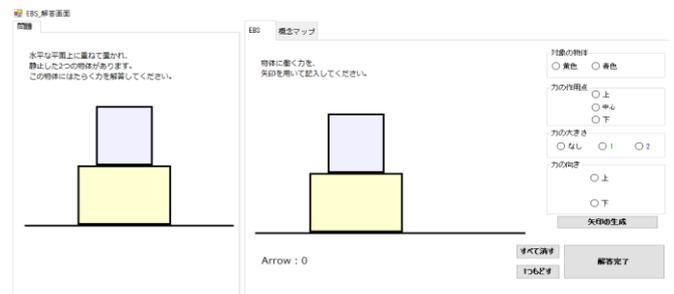


図 4 本研究で使用する EBS システム図

4.2 概念マップ生成機能

本概念マップ機能を図 5 に示す。学習者が EBS で「解答完了」ボタンを押すことによって概念マップタブにその時の作図状況が保存される。その後、概念マップタブ内にある保存された各シミュレート間のボタンを押すことによって、押したボタンの両隣の作図に対応した概念マップが自動生成でされる。詳しいインターフェースに関しては次節で記載する。

4.3 抽象化操作支援機能

4.3.1 インターフェース

学習者には図 5 上部に表示された EBS での解答の流れを辿ってもらい、自分の考えに変化が起きた部分に関して、ボタンを押すことで選択してもらう。その後、図 5 下部に押したボタンの両隣の作図に対応した概念マップをシステムが自動で生成を行い、学習者へ提示する。提示された学習者は 2 つのマップを比べることによって、自分がどのように概念を構成していたかを確認してもらい、思考がどのように変化したのかを考えてもらう。その時学習者には新しく獲得できた力（概念）に関してラベルをクリックすることによって選択してもらう。これを最終的に概念がすべて選択されるまで行う。

4.3.2 フィードバック機能

学習者に思考の変化を順番に追ってもらいながらメタ認知活動を促すために、解答によって概念を獲得し

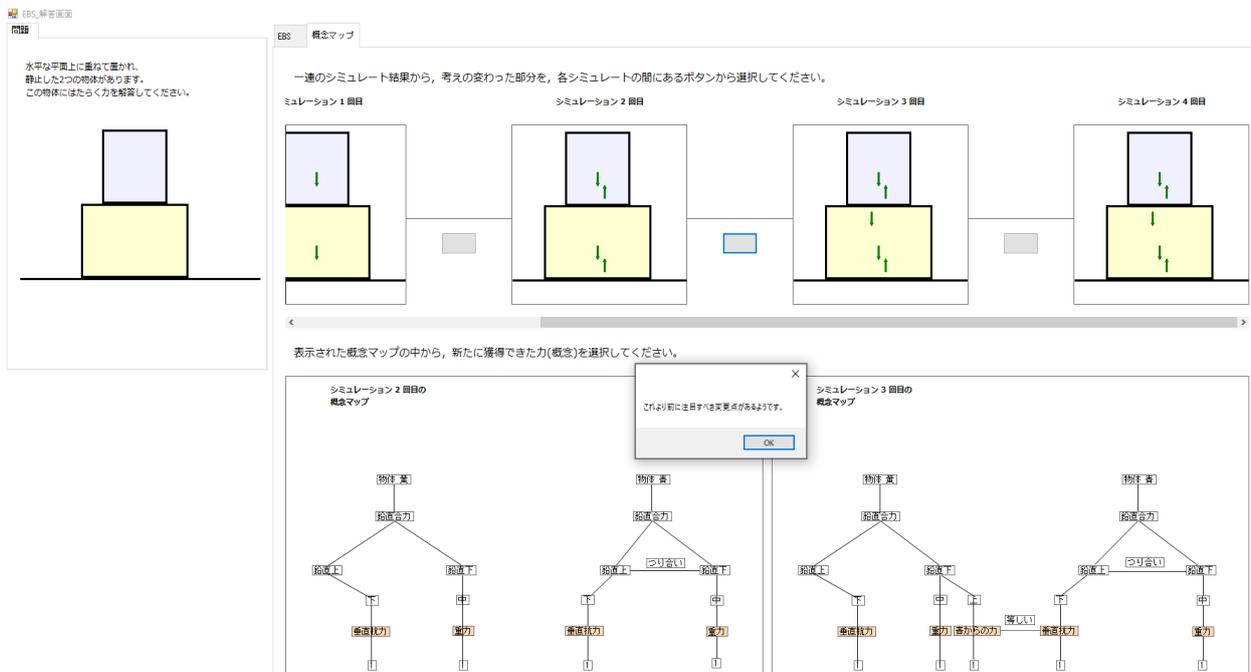


図 5 本研究で使用する概念マップシステム図とフィードバック例

たタイミングを学習者に順に選択させる。もし選択したボタンより前に新規獲得している力がある場合図 5 中央に示すような「これより前に注目すべき変更点があるようです。」というフィードバックメッセージを与える。他にも、前に概念獲得を行っている場合は「ここより重要な箇所があります。」と与え、選択したシミュレート間で変化が発生していない場合は「選択した箇所で変化がありません。」とフィードバックを与える。

5. 評価実験

5.1 実験概要

本実験は、EBS と概念マップを組み合わせたシステムを開発し、それをを用いた実験を行うことで学習者にメタ認知活動、特に抽象化操作を促すことができるかを評価することを目的とする。メタ認知活動における具体化操作と修正操作を促すために EBS システムを実装し、抽象化操作を促すために概念マップシステムも実装した。

EBS システムに関しては植野らのものを一部改良したものを使用し、概念マップシステムに関しては一から作成したものを使用する。本システムの有効性を検討するために、大学生 17 名を対象に評価実験を行った。

5.2 実験手順

最初に事前テストを 15 分間受けてもらう。その後、本システムを用いたシステム学習を 20 分間行う。システム利用が終了したら、利用後の記述調査を 10 分間行ったのち、事後テストを 15 分間受けてもらう。最後に本システムに関するアンケートを回答してもらう。

5.3 実験設定

5.3.1 事前、事後テスト

本実験ではまず、被験者に対して事前テストを実施した。その内容の一部を図 6 と図 7 に示す。意味のある変化点はどこかを「比較ボタン」に丸を付けてもらう。その下の記述欄に、丸を付けた部分のシミュレートを比較し、「どのように変化したのか」と「その結果からどんな力が獲得できたのか」を記述してもらう。これと同じことをシステム利用の事後にも行う。「比較ボタン」の選択や記述の変化から、被験者の気づきの変化を調査した。



図 6 シミュレーション 1 回目から 2 回目の図

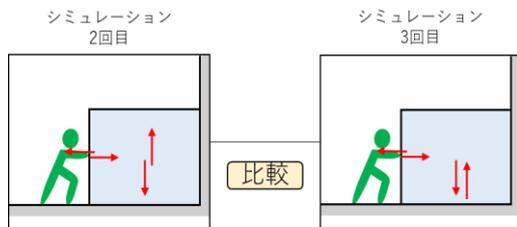


図7 シミュレーション2回目から3回目の図

5.3.2 システム利用

本実験では被験者 17 名を実験群 9 名と統制群 8 名に分けて実験を行った。実験群は本概念マップシステムを組み合わせた学習を、統制群は従来の EBS システムを用いて学習した。

5.3.3 システム利用後の記述紙

システム利用が終了したら、被験者に「システム利用後の記述紙」を配布し、(1) 自分の考えが変化したポイント、(2) どの力に対する考え方が変化したのか、(3) どのような考え方に変化したのかの 3 点を、本概念マップシステムで実際に自分が行った作図の変遷やマップの変化を確認してもらいながら、自由記述の形で記述してもらった。

5.3.4 アンケート調査

実験の最後に「実験評価アンケート」を実施し、評価尺度として 6 件法を設けた。また実験群のアンケートには、本概念マップシステムに関する項目を足したものを用いて調査を行った。

5.4 実験結果

5.4.1 テスト結果

事前と事後に行ったテストの結果について、記述に意味のある変化や気づきの変化が起こったかを調査した。問題 1 (壁と床に静止した物体を、人が一定の力で右方向に押している) についてのシミュレート 1 回目から 2 回目に関して図 6 に示す、実験群のある被験者について、事前テストではシミュレート 1 回目から 2 回目の間に獲得できた力として“垂直抗力”“物体に押される力”と記述していた被験者が、事後テストでは“記入なし”に変化していた。同じく問題 1 のシミュレート 2 回目から 3 回目に関して図 7 に示す。別の実験群の被験者の記述について、垂直抗力に対しての認識が“上向きの力”であったのが、事後テストでは“垂直抗力であることがわかった”に変化していた。このことから、本概念マップシステムを利用すること

で、力(概念)に対して認識の変化を促す可能性があることが示唆された。統制群に関しては事前と事後での記述の変化は見られなかった。

5.4.2 システム利用後の記述紙

実験群と統制群で、先述した 3 点をどのように記述しているかを調査した。実験群の記述には「シミュレート 2 回目と 3 回目のときに、黄色の物体のみに力を書いても間違っていたから、青にも同じように力を追加した。」という記述や、「シミュレート 3 回目と 4 回目のときに上より下の物体のほうが力が加わっていると考えて、下の物体の力を 2 倍にした」という記述がみられた。またどの被験者もシミュレート 1 回目から順番に振り返っていることがわかった。このことから、本概念マップがあることによって“自分がどのように考え方を变化させていったのか”を順番に辿らせることが可能であると示唆された。一方、統制群の記述には自分の考えが変化したシミュレート間や、どの力に関しての記述なのかの部分記述されていなかった。このことから、従来の EBS だけでは自分の考え方の変遷を振り返ることが困難であるとわかった。

5.4.3 アンケート調査

最後に実施したアンケートでは、(1) 本概念マップに関する項目と、(2) メタ認知活動に関する項目の 2 点を中心に評価を行ったものを表 1、表 2 に示す。(1) に関しては本概念マップシステムを利用した実験群にのみ質問した項目である。いずれの項目も高い点数が得られたことから、本概念マップシステムが“自分の中の概念への理解状態の認識”や“自分の考えの整理”

表 1 本概念マップに関する項目

No	質問内容	平均
3.	本概念マップが自分の中にある概念の理解状態を認識するのに有効であると思うか	4.78
4.	本システムが提示した概念マップから自分の考えを整理することができると思うか	5.11
6.	新たに獲得した概念が何であるかを意識することにつながると思うか	5.00

表 2 メタ認知活動に関する項目

No	質問内容	実験群	統制群
16.	本システムは自分が獲得したものを理解するのに有効であると思うか	4.89	3.75
17.	本システムは修正できた誤りを理解するのに有効であると思うか	5.33	4.13
18.	本システムを利用することが自分の考え方を客観的に観察するのに有効であると思うか	4.44	4.88
19.	本システムが過去の解答を振り返るのに有効であると思うか	5.56	2.88

や“獲得した概念への意識”を学習者へ促すことが示唆された。

次に(2)に関して、こちらは実験群と統制群のどちらにも質問した項目である。各項目に対して実験群と統制群で得点に差が出ており、実験群のほうが高い点数を得られたが、質問18に関してはあまり差が見られなかった。このことから、本システムを利用することによって、獲得したものや修正できた誤りを理解することが可能になり、過去の解答を振り返りやすくさせたと言えるが、客観的な観察に関しては従来のEBSのみでも行える可能性があることが示唆された。

6. おわりに

本稿では、仕事や日々の生活のなかで必要となるメタ認知に着目し、その活動の促進を目指した支援を試みた。従来のEBSでは、学習者が力を作図し、それに対応したシミュレートが行われ、その結果に応じて学習者が力の作図を再構築するという流れである。したがって、メタ認知駆動学習である「具体化操作」「修正操作」を促すことは可能であるが、「抽象化操作」に関しての支援が足りない。そこで、「抽象化操作」を促すには、“獲得したものや修正できた誤りを理解すること”が重要であると考えた。よって本研究では、従来のEBSに加え概念マップの手法を組み合わせることによって抽象化操作まで含めたメタ認知活動を促すシステムの開発と評価を行った。実施したテストの記述に有効な変化が見られたことから、力に対して認識の変化を学習者へ促す可能性があることが示唆された。

さらに、アンケート結果から獲得したものや修正できた誤りを理解することを可能にし、過去の解答を振り返りやすくさせることが可能であるとわかった。またこれらの結果から、本システムが学習者へ抽象化操作を含めたメタ認知活動を促す可能性が示された。

今後の課題として、現在のEBSで行う学習が“2物体の力のつり合い”のみであるため、左右にはたらく力の運動などのバリエーションを増やしていくことが挙げられる。それに伴い、概念マップシステムも各概念を追加したりする必要がある。また、概念マップを提示させるのみだと学習支援と呼ぶには足りないため、学習者が自ら概念マップを作成する機能を付けるなど

して、より学習者へ思考させることが必要であると考えられる。さらに、被験者数を増やすことによって本システムの妥当性・有効性を高めていくことが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は科研費・基盤研究(B)(17H01839)、基盤研究(C)(18K11586)、および基盤研究(B)(19H04227)の助成による。

参考文献

- (1) 茅島路子, 稲葉昌子, 溝口理一郎: “メタ認知活動の困難さに関するフレームワークの提案”, 教育システム情報学会誌, Vol. 25, No. 1, pp. 19-31 (2008)
- (2) 平嶋宗: “メタ認知の活性化支援 (<特集>「学習支援の新たな潮流-学習科学と工学の相互作用-」)”, 人工知能学会誌, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64 (2006)
- (3) 茅島路子, 溝口理一郎: “メタ認知活動—「抽象化操作」, 「修正操作」, 「具体化操作」”, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 24, pp. 1-4 (2010)
- (4) 堀口知也, 今井功, 東本崇仁, 平嶋宗: “Error-based Simulation を用いた中学理科の授業実践: -ニュートンの第三法則を事例として-”, 日本教育工学会論文誌, Vol.32, No. Suppl, pp. 113-116 (2008)
- (5) 植野和, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗: “速度・重量の観測器による誤りの可視化を目的とした力学学習支援システムの開発と評価”, 人工知能学会先進的学習科学と工学研究会, Vol.82, pp. 73-78, (2018)
- (6) Ueno, U., Tomoto, T., Horiguchi, T., and Hirashima, T.: A Support System for Learning Physics in Which Students Identify Errors Using Measurements Displayed by a Measurement Tool, Workshop proceedings of the International Conference on Computers in Education ICCE 2019, pp. 426-434, (2019)
- (7) 西岡佳希, 長曾一樹, 林雄介, 平嶋宗: “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”, 人工知能学会先進的学習科学と工学研究会, Vol. 85, pp. 70-75 (2019)