

誤り修正のための内発的動機付け --- Error-Based Simulation による誤りの可視化 ---

平嶋 宗 堀口知也 柏原昭博 豊田順一

大阪大学 産業科学研究所
〒567 茨木市美穂ヶ丘8-1
e-mail: tsukasa@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

本稿では、力学の立式問題における学習者の誤った立式を具体的な対象として、その誤りを挙動シミュレーションに写像することによって誤りであることを顕在化し、認知的葛藤を発生させることによって誤り修正への内発的動機付けを与える方法について述べる。さらに、誤りを反映した挙動シミュレーション(本稿ではEBS: Error-Based Simulation と呼ぶ)が認知的葛藤を喚起するのに十分であるためには、EBSと正常な挙動シミュレーションとの間に速度あるいは加速度において定性的差異が存在している必要があるとの仮定に基づき、そのような差異の有無を定性推論の手法を用いて診断する方法、およびそのような差異を引き出すための工夫(本稿では演出と呼ぶ)についても述べる。

A Method to Motivate a Learner to Correct an Error --- Error-Visualization with Error-Based Simulation ---

Tsukasa Hirashima Tomoya Horiguchi Akihiro Kashihara Jun'ichi Toyoda

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1, Mihogaoka, Ibaraki, 567 JAPAN
e-mail: tsukasa@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

This paper describes a method to motivate a learner to correct an error in an erroneous equation for a mechanical problem. The method visualizes the error by mapping the erroneous equation to the behavior simulation. The behavior simulation reflecting the erroneous equation is called Error-Based Simulation, EBS for short. This paper also proposes a framework to diagnose and control the effectiveness of EBS to visualize the erroneous equation by using qualitative reasoning techniques. A prototype system to generate and control EBS has implemented and evaluated through an experiment.

1. 序論

人間の学習を考える上で、内発的動機付けの問題は非常に重要となる [稲垣 82]。まず、人間の学習は情報さえ与えれば自動的に行われるものではなく、ある種の内的な緊張の持続が必要となる。さらに、人間の学習は非常に選択性が高いので、何に注目し、何のために学習するかを考慮しなければならない。また、学習の結果に対する満足度がその後の学習活動にも大きな影響を与える。つまり、適切な内発的動機付けであるためには、学習者自身が学習の必要性を認識でき、さらにその認識した学習の必要性が適切な学習の方向を示唆しており、また、その方向の学習によって学習者自身が満足を得られるものである必要がある。このような観点より、内発的動機付けを与えるもっとも有力な方法の一つとして、認知的葛藤 (Cognitive Conflict) の喚起をあげることができる。認知的葛藤は、既有知識やそれに基づく期待と、新しく得られた情報との間にズレがあることを学習者自身が認識できた場合に発生する内的な緊張であり、この認知的葛藤を解消することを動機として学習が行われることになる [稲垣 71, 稲垣 82, Gagne 85]。つまり、認知的葛藤自体の存在が学習を促進する内的緊張を持続させ、ズレの解消として学習が方向付けられ、さらに、その学習の報酬として内的緊張が解消されることになる。

本稿では、「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容易となる別のメディアに写像することによって誤りであることを顕在化し、認知的葛藤を発生させる手法 (Creating Cognitive Conflict by Error-Mapping)」について述べる [平嶋 96]。具体的には、学習者が誤った立式を行った場合に、その誤った式を挙動シミュレーションに写像し、学習者の式に基づく挙動が予測に反したおかしなものとなることから認知的葛藤を発生させ、誤り修正への内発的動機を与える。ここでは、数式というメディア上では学習者にとって認識困難であった誤りを、挙動シミュレーションというメディアで表現することによって顕在化できるとしている。この際、学習者が正しい挙動を知っていることが前提となるが、初等力学の立式の問題の多くは、既知の力学的現象を数式で表現することを求めるものであることから、この前提は妥当と考えられる。この誤りを反映した挙動シミュレーションは、単に誤りを顕在化しているだけではなく、式の誤り方が反映されたおかしさを含んでいる。した

がって、挙動上でのズレと式上でのズレが対応しており、修正への方向付けが期待できる。さらに、式上での修正は正しい挙動の生成として直ちにフィードバック可能である。

さらに、この誤りを含んだ挙動シミュレーション (以下では EBS (: Error-Based Simulation) と呼ぶ) を認知的葛藤の発生に適切に利用するための制御法とその実現について述べる。認知的葛藤の有効性や生成法に関しては多くの研究があるが、その制御に関してはまだほとんど検討されていないことから、この制御法の提案は重要といえる。また、3. において、関連研究について考察する。

2. EBS による内発的動機付け

2.1 誤り可視化の枠組み

学習者がある力学の問題に対して誤った立式を行ったとする。これに対する最も一般的な対処法は、誤りを指摘し、正しい解およびその導き方を教えることである。しかしながら、このような対処では多くの学習者は自分自身で誤りについて理解しようとせず、単に正解を受動的に受け入れているに過ぎない場合が多く、たとえ当面は誤りが解消されても、再び同じ誤りを犯す可能性が高いといわれている [Resnick 82, VanLehn 88]。

誤りを根本的に修正するためには、学習者自身が能動的に誤りを修正することが必要となる。したがって、誤りを修正するための内発的動機付けを与える方法は、誤りの修正支援にとって非常に重要な課題といえる。認知的葛藤を与えるのは、内発的動機付けをする最も有用な方法の一つであり、その具体的な手法の一つとしてソクラテス式教授法 [池田 92] がある。この教授法では、学習者が誤りを犯したのと同じメディア (記述世界) において学習者の誤りを指摘しようとする。しかしながら、認知的葛藤は、矛盾や知識のズレが指摘されれば必ず発生するものではなく、学習者自身が解消すべきものとして認識できて初めて発生するものである。このことから、力学の立式における誤りの多くは、学習者にとっては数式が現象と切り離された抽象的なものであるために発生したものであること [White 93, Laullard 93] を考慮すれば、数式レベルでの誤りの指摘は認知的葛藤を引き起こすほど効果的でない場合が多いと考えられる。

実験やシミュレーションは、認知的葛藤を発生させる最も有力な手法の一つとなっている [Osborne 85, Johsua 87, Glynn 91, 森本 93]。これらの多くは学習者が持っている不適切な知識から予測されるものと違った現象を提示

することにより認知的葛藤を発生させるものである。人間は数式などの抽象性の高い記述世界での矛盾やズレに関してはあまり敏感ではないが、実際の現象などの具体性の高い記述世界での矛盾やズレについては敏感であるといわれており [Resnick 82], このような認知的葛藤の生成手法は、知識や予測のズレが顕在化する記述世界, つまり他のメディアへの写像を利用しているということができる。

この手法を図式化すると図 1 a のようになる。本稿では、この手法を正解の写像による誤りの可視化と呼ぶ。たとえば、記述世界 1 を力学的概念の世界, 記述世界 2 を力学的現象の世界とする。学習者が何らかの誤った知識や概念を持っている場合に、学習者がそれらの誤りに対応した誤った現象を予測していることを前提として、正しい現象を見せることになる。そして、その正しい現象と学習者の予測している誤った現象とのズレを学習者に認識させることによって、認知的葛藤を発生させる。この手法は、いわゆる力学の誤概念のように、誤りと写像対象となる現象が非常に密接であり、誤概念を持つことが即現象に対して誤った予測を持つことに対応する場合に有効であると考えられる。

しかしながら、本稿が対象としている立式の問題の場合には、学習者にとって既知の現象を数式で表すのが普通であり、誤りを犯した学習者も現象については正しく予測している、あるいは少なくとも正しい現象を認識できる場合が多いと考えられる。つまり、現象と数式が結びつけられていないために、現象としてはあり得ないことが直ちに分かるような誤りでも、数式上では認識されないことが立式の誤りの大きな原因となっているといえる。

このような考察を踏まえて、本稿では、学習者が誤って立てた式を現象の世界に写像し、その誤った式に基づく挙動シミュレーションである EBS を用いることによって、学習者が

予期している正しい挙動とは異なった挙動が学習者の立てた式より生成されることから、認知的葛藤を発生させる手法について述べる。この手法を図式化すると、図 1 b のようになる。本稿では、この手法を誤りの写像による誤りの可視化と呼んでいる。記述世界 A を力学に関する数式の世界, 記述世界 B を力学的現象の世界とすると、学習者が誤った立式を行い、かつ現象において正しいものを知っている場合に、その誤った方程式に対応する現象を提示することによって、学習者の予測していた正しい現象と学習者の立てた式より作られた誤った現象とのズレを認識させ、認知的葛藤を発生させる。図 1 a では正しいものを写像していたのに対して、本手法では、誤りを写像することが特色となる。この誤りの写像を Error-Mapping と呼び、また Error-Mapping により Cognitive Conflict を生成することを、Creating Cognitive Conflict by Error-Mapping と呼んでいる。

以下では、EBS の生成法および認知的葛藤を発生させるのに十分かどうかの基準について述べる。さらに、その基準を満たすかどうかの診断法と EBS を効果的に利用するための工夫 (演出法) について述べる。

2. 2 EBS の生成 [野田 95]

現在実現されている EBS では、学習者の誤った立式に基づいて速度あるいは加速度を計算し、その式の対象となっているオブジェクトをその速度あるいは加速度で動かすことによって、誤りを反映した挙動を生成している。たとえば図 2 の問題で学習者が (2) の式に対して「 $m \times a = T$ 」と間違ったとする。この場合、この式を用いてこの式の対象となっているブロック 2 の加速度を計算することができる。EBS では一回のシミュレーションでは一つの誤りを一つのオブジェクトの誤った動きとして反映させることしかせず、系に含まれる他のオブジェクトは正しく

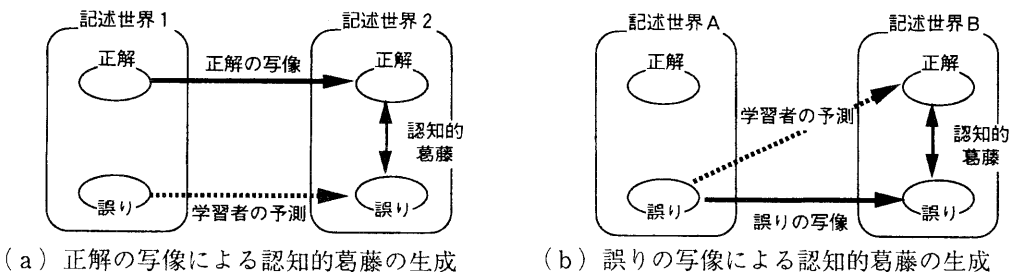


図 1 写像による認知的葛藤生成の図式化

振る舞わせる。この場合も他のブロックは正しく動き、ブロック2だけが正しい場合よりも大きな加速度で動くので、ブロック1とブ

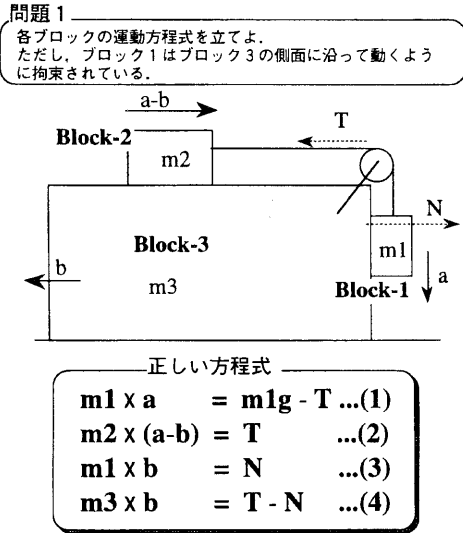


図2 力学の問題例(1)

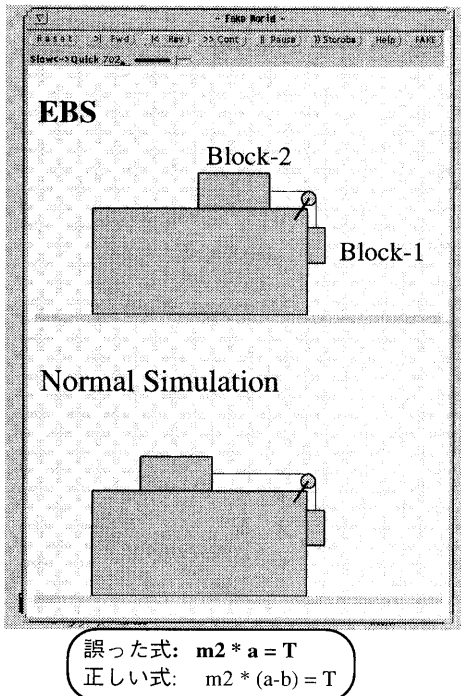


図3 EBSの例

ロック2の間が徐々に狭くなる現象が提示される。現在実装しているEBSの生成機能では、誤りであることをより明示的に示すために、図3のように通常の挙動シミュレーションと並べてEBSを表示している。また、(4)の式を「 $m3 \times b = -N$ 」としたような誤りの場合は、ブロック3が通常とは逆の方向に進み、その他のブロックは正規の方向に動くので、ブロック1がブロック3にめり込むようなEBSが提示される。また、(4)の式を「 $m3 \times b = T$ 」とするような場合には、ブロック3は通常より大きな加速度で進むために、ブロック1とブロック3が離れてゆくシミュレーションが提示される。

EBSは図2の問題に対する上記のような誤りに対しては修正への動機づけとして有効であることが確かめられている。しかしながら、EBSは単純に学習者の誤った式に基づいて生成されているだけであり、生成されたEBSと正常なシミュレーションとの間にある差異が認知的葛藤を発生させるのに適しているかどうかについては判断されていない。2.3では認知的葛藤を発生させるため条件と、その条件に従ったEBSの制御について述べる。

2.3 EBSの制御 [堀口95]

図4の問題に対して式bのように誤れば、EBSにおいてブロックは斜面をのぼっていくことになるので、誤りであることを顕在化するのに十分であると考えられる。これに対して、式cのような誤りの場合、ブロックは正規のものとは異なる加速度を持つことになるが、運動方向は同じであり、このようなEBSは誤りであることを顕在化するのに十分ではない。しかしながら、式cの場合でも、 θ を摂動してやれば、 θ に対するブロックの動きの変化において誤りを顕在化することができる。つまり、式cに対するEBSでは、 θ の大きい斜面のブロックの方が、 θ の小さい斜面のブロックよりも遅く動くことになる。したがって、 θ の変更前後のEBSを比較することができるように演出すれば、誤りであることを顕在

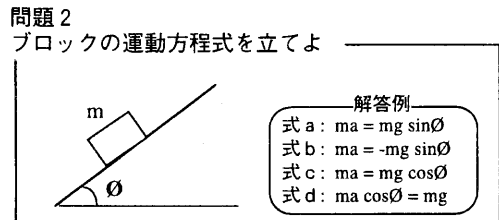


図4 力学の問題例(2)

化できる。また、式dの場合では、単に θ を増減するだけでは不十分であるが、たとえば、斜面における θ の上限下限である90度および0度を用いれば、ブロックは無限大の速度で動いたり、また平面上で動いたりすることになる。このような演出により、誤りを顕在化できることとなるが、用いた演出によってはその顕在化がもっともらしくない場合もあると考えられる。上記の例においても、 θ の変化前後の差異によって誤りを顕在化する場合は、そのもっともらしさの点で、単純に挙動だけを見せる場合よりも劣ると考えられる。また、 θ の上限下限を用いる方法は、 θ を摂動する方法よりもさらにもっともらしきで劣るといえる。

以上のような考察より、筆者等はEBSを用いて認知的葛藤を発生させるために、(1)どの力学的属性の定性的差異が現れているのか、(2)演出のもっともらしさ、の二つの要因を考える必要があると考えている。それぞれについて以下ではさらに検討する。本稿では、誤りが顕在化される属性を速度とし、速度の定性差あるいは速度の変化率の定性差のいずれか一方あるいは両方が存在することを誤りが顕在化されるための条件としている。この条件を誤り可視化条件と呼んでおり、以下のようにまとめることができる。

(I) 誤り可視化条件1: EBSと正規の挙動において対応するオブジェクトの速度が定性的な差異を示すこと、すなわち、オブジェクトの速度の定性値(正、0、負)が異なる値を持つこと。たとえば、式bに対するEBSではブロックは斜面下方向に負の速度を持つが、式aに対する正規の挙動では、ブロックは斜面下方向に正の速度を持つ。したがって、速度において定性的差異が存在することになる。また、式dに対するEBSで θ を0度とすると、ブロックは正の速度を持つが、正規の運動では速度は0であり、速度において定性的な差が存在する。ちなみに、式cに対して θ を増減させても、それぞれの θ においてはEBSと正規の運動では速度において定性差は存在しない。

(II) 誤り可視化条件2: 何らかのパラメータの変動に対して、あるオブジェクトの速度の変化率がEBSと正規の挙動において定性的な差異を示すこと、すなわち、オブジェクトの速度の変化率の定性値が異なる値を持つこと。たとえば、時間に対するオブジェクトの速度の変化率は加速度であり、物体がたとえ同じ方向に速度を持っていたとしても、徐々に早くなっている場合と徐々に遅くなっている場合では、速度の変化率において定性差を

持っていることになる。また、式cに対するEBSでは、 θ の変化に対する速度の変化率が負であるのに対して、正規の場合は正である。したがって、この場合には θ に対する速度の変化率において定性的な差異が発生しているといえることができる。

現在完成しているプロトタイプシステムでは、これらの可視化条件のいずれかをEBSが満たすときに、誤りの顕在化として有用であると診断している。直観的には、可視化条件1を満たしている場合の方が可視化条件2の場合よりも誤りの顕在化に効果的であると考えられる。多くの場合、このヒューリスティックスは有効と考えられる。しかしながら、たとえば、上記の式cに対しては θ を0度にすると速度はEBSではmg、正規では0となる。つまり、 θ を0度にする演出によって、速度において定性差を作ることができる。しかしながら、 θ の摂動による速度の変化率の定性差を生成する場合の方が、 θ を0度にする演出によって速度の定性差を生成した場合よりも、説得力があるといえる。これは、誤りの顕在化の有効性が、どの属性を見せるか、つまり速度の定性差かあるいは速度の変化率の定性差か、だけではなく、どのように演出したか、つまり、 θ を摂動させたのか、あるいは上限や下限の値に変更したのか、といった演出のもっともらしさに影響されることを示している。

以上、まとめると、EBSによって認知的葛藤を生成するためには、二つの誤り可視化条件のいずれかをEBSが満たしている必要があり、さらに、より幅広くEBSの用いるためには、 θ の摂動等の顕在化のためのEBSの演出法を用意する必要が出てくる。これに加えて、認知的葛藤を生成する効果を測るためには、その演出法のもっともらしさの考慮も必要となってくる。

現在のところ、定性推論の手法を用いて以下の手順でEBSを生成・制御するプロトタイプシステムが完成している。まず、定性シミュレーション [Kuipers 86] の手法を用いて学習者の誤った式から生成されるEBSと正規の挙動との間に速度あるいは加速度に関する定性的差異が存在するかどうかを診断する。定性的差異が発見されれば、そのEBSは認知的葛藤を発生させるのに有効と判断される。もし発見されない場合には、時間以外の変更可能なパラメータを摂動することによって、速度のそのパラメータの摂動に対する変化率において定性的差異が存在するかどうかを比較解析 [Weld 88] の手法を用いて診断する。差異が発見されれば、そのパラメータが変更可能な環境を学習者に提示し、その変更前後

のEBSを見比べるさせることによって認知的葛藤を発生させる。比較解析によっても定性的差異が発見できなければ、パラメータの上限あるいは下限での状況設定を行い、その設定でのEBSおよび正規の挙動について定性シミュレーションの手法を用いて定性的差異を診断する。現在のシステムでは、以上の診断において定性的差異を発見できなかった場合には、EBSは認知的葛藤を生成するのに不十分であると判断する。

2. 4 EBSの拡張

現在実装されているEBSでは、学習者に対して顕在化するのは速度、および速度の変化率だけであった。これは、挙動を可視化する挙動シミュレーションを用いているからである。一方、物理の概念をより直観的に理解しやすくするためのメタファの研究が盛んに行われている [Murray 90, White 93]。EBSにおいても、物理属性をメタファによって表現すれば、速度以外の属性の可視化が期待できる。

このことを図5を具体例として説明する。力は挙動シミュレーションだけで可視化するのは難しいが、ここでは力のメタファとして矢印を用い、矢印の方向を力の方向、矢印の長さを力の大きさとして表現すれば可視化可能である。つまり、力の定性的差異は矢印の方向の定性差、力の変化率の定性差は、矢印の長さの増減に対応する。図5の問題に対する典型的な誤答は、「 $T = m + M$ 」である。この誤答に基づいて、EBSを生成する場合、定性シミュレーション、各パラメータの摂動による比較解析では、力の定性差を見つけることはできない。この場合、一方のブロック、た

とえばブロック1の質量 m をその下限である0とするようにEBSを演出すると、正しい T の値は0になるが、EBSにおける T の値は Mg となり、定性的差異が発生する。実際に、この誤答に対する誤りの見せ方のアンケートでは、この m を0としたEBSの提示の有効性に同意する意見が多かった。このことから、メタファの利用による速度以外の物理属性を用いた誤りの可視化は、有望な手段であると考えられる。

図5の誤りには対しては、もう一つ、質量の総量を保ったまま、一方の側にまとめる、たとえば、左側にあったブロック1を右側に移動させたような演出が考えられる。図6はその例である。このように演出されたEBSでは、単に力において定性差が発生するだけではなく、ブロックを移動する前後の力を比較してみると、EBSでは力の変化率は0であるが、正しい場合には負である。つまり、このようにEBSを演出すれば、誤りの可視化条件の二つとも満たすことになり、誤りの顕在化という点でより強力であると考えられる。しかしながら、アンケートでは、この演出も有効ではあるが、図5で示したようなブロック1の質量 m を0とする演出の方が適切であるとの意見が多かった。これは、誤りの顕在化としてはこの演出が強力であるが、演出のもっともらしさが劣るのが原因であると考えられる。実際に、アンケートにおいても、 m が0になるのは受け入れやすいが、 m が移動するのは作弄的な感じがして、受け入れにくいとのコメントを得ている。

以上のことから、メタファによる物理属性の可視化がEBSの適用範囲の拡大に貢献するであろうことと、さらに、誤りの可視化効果

問題3
滑車をぶら下げている糸にかかっている力 T を求めよ

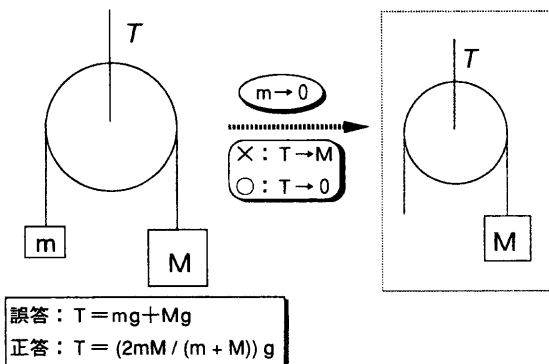


図5 力学の問題例(3)

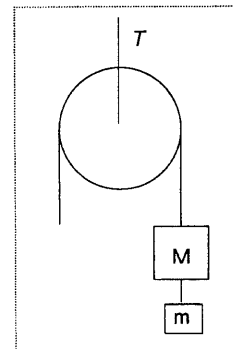


図6 EBSの演出の例

および演出のもっともらしさを考慮することが、EBSの適切な運用に不可欠になるであろうとの展望が得られている。利用可能なメタファの収集及びそれらの効果の整理は今後の課題である [瀬戸 95]。

2. 5 誤りの再配置

EBSとその演出は、学習者に式を修正させるために必要な認知的葛藤を発生させる上で有効であると考えられる。Nussbaumらは誤りを修正するには認知的葛藤を発生させるだけで十分であると述べており [Nussbaum 82]、確かに正しい知識等を受け入れさせるには十分と思われるが、学習者の誤りを単に除去してしまって良いのかという疑問が残る。筆者等は、学習者の誤りはデタラメではなく、何らかの根拠があるものであり、学習者の誤りが正しいものとして成立する状況あるいは問題設定を発見し、その状況あるいは問題設定と現在のものとの違いを学習者に理解させることが、誤りの認識修正において重要であるとの主張を行ってきている [平嶋 90, 平嶋 95]。たとえば、図2の問題に対する「 $m^2 \times a = T$ 」という誤りは、ブロック3が静止している状況では正しい式といえる。したがって、静止している状況で学習者が立てた式と同じ「 $m^2 \times a = T$ 」が成立し、しかも、現在の状況がブロック3が運動している場合であることを示すことは、学習者が自分の誤りを理解する上で大きな助けとなると考えられる。この枠組みも状況あるいは問題設定間に差異があるにもかかわらず解が一致することとして誤りを顕在化させており、認知的葛藤を発生させるための一つの方法であるといえる。この手法の洗練及びEBSとの組み合わせについては今後の課題である。

3. 関連研究との比較

本稿で述べた誤りの写像による誤り可視化の枠組みに含めることのできる研究として、Dynaturtle [diSessa 82, Sherin 93] や、STEAMER [Wenger 87] をあげることができる。これらの研究では、学習者が比較的自由にパラメータを設定できる環境を作成し、学習者が設定したパラメータに応じた現象を正しい制約関係に従って生成している。つまり、学習者の誤りは、パラメータ設定の誤りであり、力学の数式自体は正しいものが使われており、また現象自体も存在しうるものである。この際、誤りとは、生成される現象が学習者自身が予測していたものとは違っている、あるいはシステム側が学習者に生成するように要求したものと違っていることである。い

いかえると、生成される現象自体はパラメータ設定次第であり得るものであり、それを支配している原理自体は正しいものであるといえる。

これに対して、EBSでは学習者の立式の誤りを対象としている。これは、制約関係自体が誤っていることを意味している。通常、誤った制約関係は他の制約関係と矛盾するので、全体としての現象を生成するのは不可能である。しかしながら、他の制約式と切り離して考えれば、成立する状況を考えることも可能である。EBSでは、学習者の立てた誤った制約式を他の制約式とは切り離して取り扱い、また対象とするオブジェクトも1つに限定し、そのオブジェクトのみを学習者の立てた誤った制約式に従って動かすようにする。また、他のオブジェクトは、正しい制約に従って動かす。つまり、EBSでは、学習者の誤った立式に基づく現象と正しい現象の組み合わせとして誤りを表現していることになる。つまり、部分的には正しい原理に従って挙動が生成されているが、全体としてはあり得ない挙動が生成されることになる。

このように、EBSはあり得ない現象を生成しているので、生成した現象がどのようなものであるかを把握しておくことが非常に重要となる。パラメータの誤りを写像する場合には、原理自体は正しいものが利用されているので、生成される現象が誤りの顕在化として有用でなくても、誤ったパラメータ設定に忠実な例として価値を持つ。しかしながら、EBSではあり得ない現象を提示することになるので、誤りの顕在化として有用でない場合は提示するべきでないと考えられる。したがって、2.3で述べた診断・演出法は、EBS運用する上で不可欠なものであるといえる。

4. まとめ

本稿では、誤り修正のための内発的動機を与える手法としてのEBSの位置づけと、EBSのより高度な利用を実現するための制御について述べた。動機づけの明示的な制御に関連する知的教育支援システムの研究は、外発的動機づけに関する研究が松原等 [松原 95] によって行われているが、内発的動機づけに関するものは、ほとんど見当たらない。しかしながら、より効果的な学習を実現するためには、最も重要な課題の一つであると考えられる。今後は、内発的動機づけに関する心理学及び認知科学等の分野の研究成果を収集分析し、知的教育支援システムにおける内発的動

機付けの制御の実現を目指していく予定である。また、EBSは、誤りの顕在化を目的としたメディアによる制約の顕在化の一つであるが、学習者の振る舞いや思考を制約することによって、誤らせない、あるいは促進することも、メディアによる制約の顕在化の重要な役割の一つである [Collins 88]。今後はこのようなアプローチの研究も進めてゆく予定である [柏原 96]。

謝辞：本研究の一部は、文部省科研費一般研究 (B) (No.07458070)。

参考文献

- [Collins 88] Collins, A., Brown, J.S. : The Computer as a Tool for Learning Through Reflection, In H. Mandl, A. Lesgold (Eds.), Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems, Springer-Verlag, pp.1-18 (1988) .
- [diSessa 82] diSessa, Andrea A. : Unlearning Aristotelian Physics : A Study of Knowledge-Based Learning, Cognitive Science, Vol.6, No.1, pp.37-75 (1982) .
- [Gagne 85] Gagne, E.D. : The Cognitive Psychology of School Learning, Little Brown and Company (1985) . (赤堀, 岸 (監訳) 学習理解と認知心理学, パーソナルメディア社 (1989)) .
- [Glynn 91] Glynn, S.M., Yeany, R.H., Britton, B.K. : The Psychology of Learning Science, Lawrence Erlbaum Associates (1991) (武村重和 (監訳), 理科学習の心理学, 東洋館出版 (1993)).
- [平嶋 90] 平嶋, 中村, 上原, 豊田 : 認知的考察に基づく知的C A Iのための学習者モデル生成法, 信学論, Vol.J73-D-II, No.3, pp.408-417 (1990) .
- [平嶋 95] 平嶋, 柏原, 豊田 : 誤りの自己認識・修正支援, 人工知能学会研究会資料, SIG-IES-9501-2, pp.9-16 (1995) .
- [平嶋 96] 平嶋, 堀口, 小出, 柏原, 豊田 : 力学教育のためのリフレクション環境, 人工知能学会研究会資料, SIG-IES-9503 (1996) .
- [堀口 95] 堀口, 平嶋, 柏原, 豊田 : 定性シミュレーションを用いた誤り可視化シミュレーションの制御, 人工知能学会研究会資料, SIG-J-9501, pp.96-103 (1995) .
- [池田 92] 池田, 溝口 : ITSのための汎用フレームワーク FITSの開発, 信学論, Vol.J75-A, No.2, pp.314-322 (1992) .
- [稲垣 71] 稲垣, 波多野 : 事例の新奇性に基づく認知的動機付けの効果, 教育心理学研究, Vol.19, No.1, pp.1-12 (1971) .
- [稲垣 82] 稲垣 : 認知への動機づけ, 波多野 (編) 認知心理学講座 4 --学習と発達, pp.95-132 (1982) .
- [Johsua 87] Johsua, S., & Dupin, J.J. : Taking into account student conceptions in instructional strategy : An example in physics, Cognition and Instruction, 4, 117-135 (1987) .
- Laurillard 93] Laurillard, D. : From Learning Need to Teaching Strategy : What is the Nature of Link?, Proc. of AIED'93, pp.12-14 (1993) .
- [Kuipers 86] Kuipers, B. : Qualitative Simulation. Artificial Intelligence, 29, pp.289-388 (1986) .
- [松原 95] 松原, 平木, 長町 : モチベーションメッセージ生成機能 MOGESの開発, 教育システム情報学会誌, Vol.12, No.2, pp.91-108 (1995) .
- [森本 93] 森本 : 子どもの論理と科学の論理を結び理科授業の条件, 東洋館出版 (1993) .
- [Murray 90] Murray, T, Schultz, K., Brown, D., Clement, J. : An Analogy-Based Computer Tutor for Remediating Physics Misconceptions, Interactive Learning Environment, Vol.1, No.2, pp.79-101 (1990) .
- [野田 95] 野田, 平嶋, 柏原, 豊田 : 力学における誤り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, Vol.10, No.4, pp.151-156 (1995) .
- [Nussbaum 82] Nussbaum, J. and Novick, S. : Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation : Toward a principled teaching strategy, Instructional Science, Vol.11, pp.183-200 (1982) .
- [Osborne 85] Osborne, R., Freyberg, P. : Learning in Science : The Implications of Children's Science, Heineman Publishers (1985) (森本, 堀 (訳), 子ども達はいかにして科学理論を構成するか, 東洋館出版社 (1988)).
- [Polya 54] Polya, G. : いかにして問題を解くか, 丸善 (1954) .
- [Sherin 93] Sherin, Bruce, diSessa, Andrea A. : Dynaturtle Revisited : Learning Physics Through Collaborative Design of a Computer Model, Interactive Learning Environment, Vol.3, Issue (2) , pp.91-118 (1993) .
- [Resnick 82] Resnick, L.B. : A Development Theory of Number Understanding. In H.B.Ginsberg (Ed.) , The Development of Mathematical Thinking. Academic Press (1982) .
- [瀬戸 95] 瀬戸賢一 : メタファー思考, 講談社現代新書 (1995) .
- [VanLehn 88] VanLehn, K. : Toward a Theory of Impasse-Driven Learning, In H.Mandl and A.Lesgold (Eds.) , Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems, Springer-Verlag, pp.19-41 (1988) .
- [VanLehn 92] VanLehn, K., Jones, R.M., Chi, M.T.H. : A Model of the Self-Explanation Effect, Journal of Learning Science, pp.1-59 (1992) .
- [Weld 88] Weld, D.S. : Comparative Analysis, Artificial Intelligence, 36, pp.333-374 (1988) .
- [Wenger 87] Wenger, E. : Artificial Intelligence and Tutoring Systems : Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge, Morgan Kaufmann (1987) .
- [White 93] White B.Y. : ThinkerTools : Causal Models, Conceptual Change, and Science Education, Cognition and Instruction, Vol.10, No.1, pp.1-100 (1993) .