

単純化方略を用いた失敗克服型演習と失敗要因の抽出機能

Support for Error-Selfovercoming Using Problem Simplification and Extraction Function of Failure Factor

林 直也*¹ 武智 俊平*¹ 篠原 智哉*¹ 山元 翔*¹ 林 雄介*¹ 平嶋 宗*¹
Naoya Hayashi Shumpei Takechi Tomoya Shinohara Sho Yamamoto Yusuke Hayashi Tsukasa Hirashima

*¹ 広島大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Hiroshima University

As a support for learners who failed to solve a problem, teaching the way to solve to the problem is general method. However, in order to realize active learning, it is promising way to let learners overcome the failure by themselves. Because it is usually difficult for the learners to do by themselves, we have proposed “problem simplification” that is a way to support the self-overcoming by dividing a problem into the part that can be solved and not solved. This is a feasible support, in case it's assumed that there is learner's difficulty between problems by defined the structure of the problem and between problems. In this paper, we report a support system for error-selfovercoming using a problem simplification targeting elementary mechanics. In addition, we report a practical use of this system in classes of a technical high school and its results.

1. はじめに

問題演習は、教授活動により獲得した知識を正しく使えることが出来るか確認するために、一般的に行われる活動である。その際、問題解決に失敗した学習者に対する支援として、その問題に対する解答・解説や教師による指導が一般的である。こういった活動は、学習者にとって受動的な活動であると言える。可能ならば、外部からの教授なしに、学習者が解決に失敗した問題を自身で考え、克服することが望ましい。このような活動を自己克服活動と呼ぶ。一般的な問題演習では、学習者がこの活動を自力で行うことはしばしば難しいとされている。また、問題が系列として意義をもつことで、学びを効果的に助けることがある[松居 10]とされている。そこで、本研究では自己克服の支援のために、初等力学を対象として、問題間の関係に着目した演習方法を提案する。

この演習を実現するためには、問題間の関係を定義する必要があるが、それには課題の構造を分析する必要がある[平嶋 13]。これに対して、先行研究では、力学の問題を「状況」と「解法」で定義しており、これらをそれぞれ複雑化・単純化することで、問題間の関係を定義している[大川内 12]。この際、複雑化・単純化された問題というのは、まったく違う問題になるのではなく、解法や状況が一部共通している。よって、問題間の関係を包含関係として関係付けられているので、問題間の差を明確にできる。このように、問題は単純な問題から派生的複雑化することで成立するという考えを「問題の派生的成立モデル」と呼んでいる。派生的複雑化された問題は、より単純な問題を包含しており、複雑化された問題が解けると、元の単純な問題も解けるという関係性がある。このように問題を捉えると、学習者は不正解した問題の全てが出来なかったのではなく、その一部が出来なかったと言える。また、正解した問題と不正解した問題の差分は、学習者にとって困難な部分であり、克服すべき部分になっている。

上記で述べた、学習者の克服すべき部分である問題間の差分を認識することが自己克服の支援につながると考えられる。

連絡先: 林 直也, 広島大学大学院工学研究科 学習工学研究室, 東広島市鏡山一丁目4番1号, (082) 424-7505, naoya@lel.hiroshima-u.ac.jp

そこで本研究では、ある問題が出来なかった場合、その問題を単純化し、差分について考えさせ、元の出来なかった問題を自己克服させる、といった仕組みを提案する。この方法では、問題の解き方を直接教えるのではなく、単純化した問題を与えることで学習者自身に誤りを克服させることを目指している。単純化方略による誤りの自己克服支援と呼ぶ。

ここで、本提案演習の対象者について述べる。ブルームは認知的領域の教育目標の分類を定義しており、その中でいわゆる丸暗記レベルの「知識」、表現を変えて自分の言葉で表せるレベルの「理解」、具体的な課題に適用できる「応用」の段階に区別している[Bloom 71]。「理解」レベルに達していない者にはその内容を教授する必要がある。しかし、「理解」レベル以上「応用」レベル未満の者は、知識は持っている、活用を試行錯誤しながら適用することを体験し、それを身につけることができると考えられる。このことを本研究に照らし合わせると、本研究の対象は、「理解」レベルには達しているが、「応用」レベルには達していない者となる。よって、この支援の対象は、一通り対象の知識を持っているが、問題を解くことに難しさを感じる学習者とする。

以下本稿では、第 2 章で先行研究である派生問題について述べ、第 3 章で単純化方略の詳細と作成した初等力学における失敗克服型演習システムについて述べる。また、4 章では高等専門学校の力学の授業内で学生を対象に行った実践的利用とその結果について報告する。

2. 派生問題

先行研究では、物理の問題を「状況」と「解法」で定義している[大川内 12]。これを図 1 に示す。問題は状況に基づいて定義されており、状況は重力加速度や質量などの属性と属性間の関係である数量関係を持っている。解法は問題文中の属性を、状況で定義されている数量関係によってつなぎ合わせることで定義される。これを解法構造と呼ぶ[平嶋 95]。解法構造は木構造であり、葉は入力属性、根は出力属性、それ以外の中間属性、属性を結ぶ式ノード、および枝であるエッジから構成される。入力属性は問題文中に明示的に与えられる属性であり、出力属性は入力属性を組み合わせることで学習者が求める

べき属性である。中間属性は、問題の解決途中で得られる属性である。

状況と解法の観点から関連性を持った問題を、派生問題と呼ぶ。[大川内 12]。次節からは、これらについて述べる。

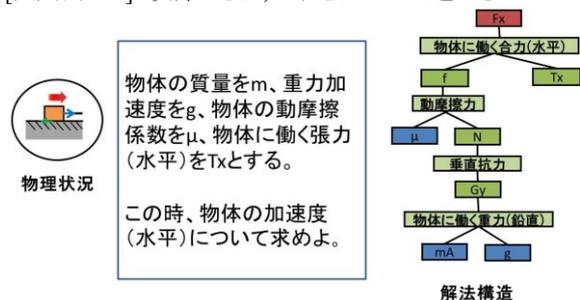


図 1 問題と解法構造

2.1 特殊化問題・一般化問題

特殊化問題は、問題の「状況」が持つ属性(傾斜角、摩擦など)を特殊化することにより、元の問題と比べて状況が単純になった問題である。特殊化はある属性を特定の値にすることである。特殊化問題は、元の問題のある属性を特定の値にしたものであるため、解法は同じものを用いることができる。そのため、特殊化問題は元の問題に包含しており、元の問題が解ける学習者は特殊化問題も解くことが出来ると言える。

一般化問題は、問題の「状況」にある属性を付加することで、状況を複雑化した問題である。一般化は部分化の逆である。一般化問題は、元の問題を包含しており、元の問題が解けない学習者は一般化問題も解けないと言える。

力学的状況の推移には、ある物理状況から派生しうる状況を網羅的に記述したマイクロワールドグラフと呼ばれるモデルを用いている[東本 08]。

2.2 部分化問題・拡張化問題

部分化問題は、ある問題の解法構造の一部を解法に持つ問題である。部分化問題は解法構造の中間属性を入力属性化、もしくは出力属性化することで生成される。このように、解法の一部を抜き出すことを部分化という。部分化問題は、元の問題に包含されており、元の問題が解ければ、部分化問題も解ける関係がある。

拡張化問題は、問題の解法構造の入力属性や出力属性を中間属性化することで生成される問題である。拡張化は部分化の逆である。拡張化問題は元の問題を包含しているため、元の問題が解けなければ、拡張化問題は解けないという関係がある。

3. 単純化方略

3.1 単純化方略の概要

問題演習の目的の一つに、学習者の不足した知識や誤った知識を発見することが挙げられる。これには、学習者が問題解決に失敗したとき、自分にとって困難な部分はどこにあるのかを認識することが重要である。これに対して、前述した問題の派生的成立モデルの考え方を用いる。問題を構造的に考えた時、問題は単純なものから状況、解法が派生的に複雑化して成立している。よって派生的複雑化された問題は、より単純な問題を包含しており、複雑化された問題が解けると、元の単純な問題も解けるという関係性がある。このモデルに従うと、問題は階層的にできていると考えることができる。

問題をこのような関係性を持ったものとして捉えると、学習者は不正解した問題の全てが出来なかったのではなく、その一部が出来なかったと言える。正解した問題と不正解した問題の差分を取ると、その差分が学習者にとって困難な部分であり、また、克服すべき部分になっている。この考えに基づくと、問題が出来なかったらその問題を単純化していき、出来る問題を見つけ、元の出来なかった問題との差分を取ることで、学習者は誤りの原因を認識することができる。このような方略を、単純化方略と呼ぶ。単純化した問題から元の出来なかった問題に戻る際、要素の組み合わせの難しさは残るが、通常の演習方法と比較すると、学習者の誤りの原因の発見は行いやすくなっている。学習者はこの誤りの原因を意識しながら取り組むことで、出来ない問題と出来る問題の関係性に気づき、外部からの教授活動なしに出来なかった問題を自ら克服できると仮定している。また、克服につながらなかった場合においても、誤りの原因となる部分を中心に再び学習を行えばよいので、効率的な学習につながると言える。

3.2 差分注視

単純化方略では問題に不正解したとき、その問題の一段階単純な問題が出題される。単純化された問題に正解した場合、元の出来なかった問題に再び取り組む。出来た問題と出来なかった問題の関係性が強いいため、出来た問題を利用して出来なかった問題に取り組むことが期待される。しかし、そのためには、学習者が問題間の関係を認識する必要がある。そこで、出来た問題と出来なかった問題を並べて、それらの差分をハイライトすることで、学習者にその差分を意識させる。この機能を差分注視機能と言う。差分注視機能により、学習者は問題間の関係を意識し、出来た問題を用いて、出来ない問題に取り組むことを期待できる。

3.3 差分接続問題

差分注視をしても、出来なかった問題を克服出来ない学習者がいることも考えられる。そこで、克服できなかった学習者に対して、出来なかった問題と出来た問題をつなぐような問題として差分接続問題を提示する。

学習者が出来ない問題は解法のどこかに困難な部分があると考えられる。差分接続問題はその解法の困難な部分を解法に持つことで、出来なかった問題の解法と出来た問題の解法をつなぐ問題となる。接続問題の解法は、出来た問題の解法と出来なかった問題の解法、つまり解法構造の差分を取ることで生成される。接続問題は部分化問題の一種であるが、通常の部分化と違い、学習者の困難な部分に着目させるように部分化を行う。差分接続問題を解くことが出来れば、学習者は誤りの原因になっている解法がどの部分にあるかを認識し、出来た問題の解法と繋ぎ合わせることで、出来なかった問題の解決へとつながれると言える。この問題は、差分注視機能を経ても問題を克服できない学習者に出題される。

差分接続問題が解けなければ、単純化方略に基づき、接続問題を部分化/特殊化していく。これを繰り返すことで、より適切に困難な部分を見出すことができる。

接続問題は 3 種類ある。(1)出来る問題と出来ない問題の関係が部分化/拡張化の場合において、部分化されたことで無くなった解法構造を持つ問題(図 2)、(2)出来る問題と出来ない問題の関係が特殊化/一般化の場合において、省略される属性を求めさせる問題(図 3a)、(3)変化する数量関係を使わせる問題(図 3b)である。

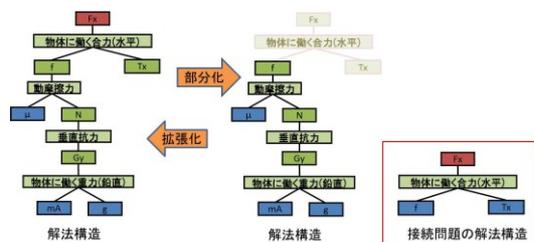


図2 部分化により無くなった解法構造を持つ問題

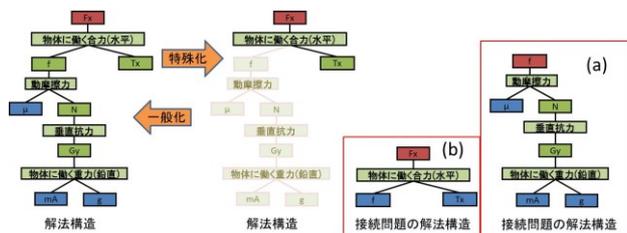


図3 省略される属性を求めさせる問題(a)と変化する数量関係を使わせる問題(b)

3.4 失敗克服型演習システム

単純化方略により差分を考慮させるための自然な状況として問題演習の形でシステムを作成する。今回は実際の教育現場で使用することを考慮し、持ち運びに優れ、場所を選ばないタブレット上での実装を行った。

学習者はシステムが用意した初期問題から最初に解く問題を選択する。この初期問題は学習者にとって少し難しいものであることが望ましい。もし、問題が出来ないならば、単純化方略に基づき、出来ない問題を一段階単純化(特殊化, 部分化)することが可能である。また、単純化した問題に正解したとき、差分注視機能により差分に着目させ、元の出来なかった問題に再び取り組み、克服を目指す。この際、もし、克服できなかつた場合、差分接続問題を提示する。差分接続問題を解けたら、再び、出来なかった問題に取り組み、克服を目指す。接続問題が解けないときは、単純化方略に基づき、接続問題を単純化(部分化・特殊化)していく。この流れを繰り返す、問題間の差分を考えながら学習することを促す。

システム上で、

- (1)ある問題が不正解だったとき、その問題の単純化を行う。
- (2)単純化された問題に正解した後、差分注視機能や差分接続問題を経て元の不正解だった問題に取り組む。
- (3)以前不正解だった元の問題に正解する。

以上の一連の活動が見られた場合、この間は問題の出題のみが行われており教授活動は行われていないことがわかる。加えて一度できなかった問題を克服しているため、この様な活動が見られた場合、自己克服が行われたとみなすことができる。

4. 高等専門学校生による実践的利用

4.1 目的と実践方法

商船系の高等専門学校生を対象に、物理の授業において1時限のシステム利用を行った。これは本システムによる単純化方略が実際の教育現場の学習者に自己克服活動の支援をするものとして十分なものになっているかどうかをログとアンケートから確認するものである。

対象は、商船系の高等専門学校1年生の学生、3クラス130名。手順は、システムの操作説明(10分)、システム演習(20分)、

事後アンケート(10分)で行った。事後アンケートの内容を表1に示す。

表1 学習者への事後アンケート

質問番号	質問内容
(1)	物理の力学が好きか?
(2)	物理の力学が得意か?
(3)	この問題演習は力学の学習に役立ったか?
(4)	正解した後に出题された問題を解くとき、正解した問題を参考にしたか?
(5)	間違えた後に出てくる問題は、間違えた問題よりも簡単になっていたか?
(6)	間違えた後に出てくる問題を解くことで、間違えた問題を解くのに役立ったか?
(7)	過去に利用したことのある問題集と比べて、このシステムは具体的にどの部分が良かったか?
(8)	次に解く問題を自分で選択できることで、問題演習に取り組む意欲が高まったか?
(9)	このシステムは使いやすかったか?
(10)	このシステムを使ったことで力学に対する印象が良くなったか?
(11)	今後もこのような問題演習を行ってみたいと思うか?

4.2 結果

アンケートに不備がある被験者やログデータから対象を特定出来ない被験者を除いた、103名を有効データとした。図4に事後アンケートの結果を示す。各項目に対して「とてもそう思う」「そう思う」を肯定的意見、「そう思わない」「とてもそう思わない」を否定的意見として扱い、符号検定を行った。結果は質問(10)に関してのみ有意差なし、質問(9)は5%有意、それ以外の項目は1%有意であった。質問(7)では、システムの演習の意図を感じ取っていることがわかる内容の記述をした学習者が33名存在した。システムについては、質問(10)以外は肯定的意見であり、統計的に有意であった。質問(10)に関しては、もともと力学に対して苦手意識を持っている学習者が8割以上存在していること、本システムの実践的利用は1時限のみだったことを考えると、約4割の学習者が本システムの使用で力学の印象が変化しと言え、本演習に対する否定的な結果ではないと解釈している。

ログデータを集計したところ、有効データの学習者にシステムが出題した総問題数は2432問、うち正解した問題数360問、不正解した問題数1899問、演習時間の最後に取り組んでいたため正誤判定されていない問題、正誤判定の前にシステムトラブルがあった問題があわせて173問であった。また、学習者の解いた問題の種類は53種類であった。1問当たりの問題に取り組んだ平均時間は46.98秒($S.D.=82.25$)であった。1人当たりの取り組んだ問題数が23.61問($S.D.=13.09$)と多いものになった。これは問題に間違えた際、同じ問題を再び取り組むことができるようになっていたことから、学習者により同じ問題の修正を繰り返したり、単純化したりと1問の取り組み方が様々な形態になっているためだと考えられる。1問当たりの問題に取り組んだ平均時間が若干短いことは、解き直しの際、同じ問題に対する修正に関してはそれほど時間がかからないためだと考えられる。用意した初期問題3問にすべて正解した学習者は存在しておらず、今回用意した問題は、被験者にとって適切なレベルの問題であったといえる。

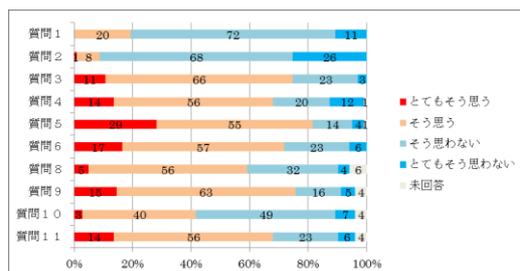


図 4 学習者への事後アンケート結果

4.3 学習者のタイプ分類

ログデータからの学習者の振る舞いを特徴ごとに分類した。単純化方略で目指すところの自己克服活動を行った学習者群を自己克服型学習者、問題に正解することで問題解決可能な問題をわかり、取り組むべき課題が明確になった学習者群を課題顕在型学習者、1問も問題に正解することができなかった学習者群を未解決型学習者とここでは呼ぶ。各学習者の分布を表 2 に示す。

自己克服型学習者の一人あたりの取り組んだ問題数は 29.42 問($S.D.=11.22$) (うち、平均正解数は 5.29 問($S.D.=2.87$), 平均不正解数は 22.37 問($S.D.=9.56$), 残りは解答中に時間切れ, またはシステムトラブルが起こったため, 未解答になった問題), 一問にかかった平均時間は 38.14 秒($S.D.=60.52$)であり, 一人あたりの取り組んだ問題の種類は 6.65 問($S.D.=2.61$)であった。この学習者は全体の約 6 割存在し, 本研究で定義した自己克服活動を行った学習者である。本問題演習では, 単純化方略に基づいて問題を提示しているだけであるため, 最初解けなかった問題が解けたということは, 学習者が自己克服したことを意味すると判断している。このような活動を行えた学習者が全体の 6 割存在していることから, 単純化方略による問題解決失敗克服支援は期待した効果を発揮したと考えられる。他の学習者群に比べ, 問題に取り組んだ数も多くなっている。このような学習者においては, いわゆるブルームの学習目標のタキソミーに照らし合わせると, ある範囲においては, 単に必要な知識を用いて問題を解ける「応用」だけでなく, 問題間の比較を行ることができる「分析」段階まで到達している可能性もある。

課題顕在型学習者の一人あたりの取り組んだ問題数は 19.86 問($S.D.=11.03$) (うち、平均正解数 1.60 問($S.D.=0.92$), 平均不正解数 16.34 問($S.D.=9.73$), 残りは解答中に時間切れ, またはシステムトラブルが起こったため, 未解答になった問題), 一問にかかった平均時間は 58.45 秒($S.D.=82.33$)であり, 一人あたりの取り組んだ問題の種類は 6.34 問($S.D.=2.66$)であった。この学習者は全体の約 2 割強存在し, 本研究で定義した自己克服活動は見られなかったため, 平均正解数は自己克服型に比べ低いものとなっている。少なくともある問題が解けたことにより, その問題を解くために必要な知識を持ち, かつその知識を適用できることは確認できたことになる。そして, その解けた問題と解けなかった問題との差分がこの学習者にとって克服すべき課題となり, この学習者にとっての課題は顕在化されたといえる。本問題演習ではこのような課題に対する直接的な指導を行っていないため, 直接的な効果があったとは言えないが, 克服すべき課題が明示的になったという意味で, 本問題演習の間接的な意義を主張できる学習者群である言え, また, 必要に応じて直接的指導を行う仕組みを組み込むことは, 本問題演習の拡張として重要であると考えている。

未解決型学習者の一人あたりの取り組んだ問題数は 9.47 問($S.D.=7.24$) (うち、平均不正解数は 8.31 問($S.D.=6.59$), 残りは

解答中に時間切れ, またはシステムトラブルが起こったため, 未解答になった問題), 一問にかかった平均時間は 111.43 秒($S.D.=185.83$)であり, 一人あたりの取り組んだ問題の種類は 3.36 問($S.D.=1.49$)であった。この学習者は全体の約 2 割弱存在し, 力学の基礎知識を持っていない学習者とみなすことができる。単純化方略では一通りの知識を持っている学習者に対して問題間の関係性理解の活動促進を目指している。未解決型学習者も授業による教授活動は行われていたはずだが, 問題演習を遂行する上で必要な知識自体ができていないか, あるいはその知識を適用する段階に進めていない学習者群であると推測される。この群の学習者には本問題演習が有効であったとは言えないが, 基本的な問題についても解けないことが確認できたことは, 問題演習以外の学習手段が必要であることを示唆しているので, 間接的には十分意味があったと判断している。本研究の範囲を外れるが, 力学学習の支援を全体的に考えた場合, このような学習者群への指導も重要であり, また, 本問題演習と親和性を持って統合することが可能であると考えている。

表 2 単純化方略における学習者のタイプ分類

学習者のタイプ	人数	全体に対する割合
自己克服型学習者	61 人	59.22%
課題顕在型学習者	23 人	22.33%
未解決型学習者	19 人	18.45%

5. まとめと今後の課題

本論文では自己克服の支援方法として単純化方略を提案した。これは学習者にとって何ができて何ができないかを切り分けることで, 自己克服を目指す方法である。この方略を実装した失敗克服型演習システムを設計・開発し, 実際の教育現場である高等専門学校での力学の授業で実践的利用を行った。結果, 単純化方略が実際の問題演習としての使用に耐えうるものであり, また, 自己克服を行う学習者が全体の約 6 割存在することから学習者の問題解決失敗の克服支援として妥当なものであることがわかった。今後の展望としては, 通常の問題演習と比較した場合の単純化方略の学習効果の検証や, フェーディング方法の考案などがあげられる。

参考文献

- [松居 10] 松居 辰則, 平嶋 宗: “学習課題・問題系列のデザイン”, 人工知能学会誌, Vol.25, No.2, pp.259-267(2010).
- [平嶋 13] 平嶋宗, “学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システムの設計・開発: 算数を事例として”, 教育システム情報学会誌, Vol.30, No.1, pp.8-19, 2013.
- [大川内 12] 大川内 祐介, 上野 哲也, 平嶋 宗: “派生問題の自動生成機能の開発とその実験的評価”, 人工知能学会論文誌 27 巻 6 号 A, pp.391-400(2012)
- [Bloom 71] Bloom, B. S., Hastings, J. T., & Madaus, G. F., “Handbook on formative and summative evaluation of student learning.”, McGraw-Hill, 1971.(ブルームほか(渋谷・藤田・梶田訳) “学習評価ハンドブック(上・下)”, 第一法規出版, 1974)
- [平嶋 95] 平嶋 宗, 東 正造, 柏原 昭博, 豊田 純一: “補助問題の定式化”, 人工知能学会誌, Vol.10, No.3, pp.413-420(1995)
- [東本 08] 東本 崇仁, 堀口 知也, 平嶋 宗: “シミュレーションに基づく学習環境における漸進的な知識獲得支援のためのマイクロワールドグラフ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J91-D, No.2, pp.303-313(2008)