

単純化方略を用いた問題解決失敗の自己克服支援システムとその実践的評価——初等力学を対象として——

武智 俊平^{†a)} 林 直也^{††} 篠原 智哉[†] 山元 翔[†]
林 雄介[†] 平嶋 宗[†]

Support System for Self-Overcoming of Problem-Solving Failures Using Problem Simplification and Practical Use in Elementary Physics Exercises

Shumpei TAKECHI^{†a)}, Naoya HAYASHI^{††}, Tomoya SHINOHARA[†],
Sho YAMAMOTO[†], Yusuke HAYASHI[†], and Tsukasa HIRASHIMA[†]

あらまし 問題演習において、問題解決に失敗した学習者に対して行われる活動は一般的にその問題に対する解答・解説などのその問題の解決に関する直接的な教授であった。しかしこれは学習者にとって受動的な学習であったといえる。学習者に能動的に学ばせる上では、直接的にその問題の解き方を教えるのではなく、問題解決失敗を自分で克服させることが望ましいが、解決に失敗している学習者が単独でそれを克服することは難しいことも明らかである。本論文では直接的な教授活動なしで問題解決の失敗を克服する活動を自己克服と呼び、その自己克服を支援する方法として、問題中のできる部分とできない部分を切り分けながら演習を行う単純化方略を提案する。これは個々の問題の構造とその構造に基づく問題間の関係性が明確に定義され、それらの差分の中に学習者の困難が存在すると仮定できる場合に実現可能な方法である。本論文では、このような条件を満たすドメインである初等力学を対象として、この単純化方略を用いて問題解決失敗の自己克服を支援する演習システムをタブレット PC 上で開発し、高等専門学校の正規の授業で利用した。その結果として、本来は難しいはずの自己克服活動が多く観測されたことから、本システムの有用性が示唆されたと判断している。

キーワード 単純化方略, 自己克服, 初等力学, 問題演習, システム

1. ま え が き

ある物事についての学習において、その物事の全てを一挙に学ぶのではなく、その物事についての部分を段階的に学んでいくことは一般的である。また、ある物事の一部分を学ぶ際に、別の一部分を理解していることが不可欠であることも多い [1]。このような段階的な学習活動として本論文では、問題解決能力の育成のために一般的に行われている、問題演習について取り上げる。

問題演習は、数学や物理などの分野で行われる学習

活動である。この活動を行う前には教授者が学習者に対して問題演習に必要な範囲の知識の教授を行っているのが普通であるが、問題解決に失敗する学習者も少なくない。問題解決に失敗した学習者に対して行われる活動としてはその問題に対する解答・解説を見せる、あるいは教授者による指導といった方法が一般的である。しかし一度教授活動を受けた学習者に対して同じように教えた場合、問題解決が必ずしも可能になるとは言えない。また学習者にとっては受動的な学習であるといえる。そこで、一通りの教授活動が行われた後の学習者の場合、出題する問題系列が工夫された問題演習を行うことで、学習者自身が問題について考え、教授活動なしでも自ら問題解決失敗を克服することができるのではないかと考えた。この活動を本論文では自己克服と呼ぶ。Polya はある問題が解けないときに、その問題をいったん解けるように単純化し、その単純化した問題を解いた上で再度元の問題に取り掛かるこ

[†] 広島大学大学院工学研究科, 東広島市
Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-3-2 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, 739-8511 Japan

^{††} 広島大学工学部, 東広島市
Faculty of Engineering, Hiroshima University, 1-3-2 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, 739-8511 Japan

a) E-mail: takechi@el.hiroshima-u.ac.jp

とが、難しい問題を解くための有効な方法であると指摘している [2]. 本研究は、この方法を問題解決失敗の自己克服の方法として捉え、問題の単純化をシステムティックにシステムが行うことで自己克服の支援をする試みの一つと位置付けることができる。

問題解決失敗の自己克服支援に貢献するような問題の単純化を実現するためには、まず、問題間の関係性を明確にする必要がある。問題の関係性を明確にするには、そのベースとして、問題の構造を分析する必要がある [3]. 問題を構造的にみると、問題は求めるべき解法とその問題における状況から成り立つと考えられる。その際、全ての問題が完全に違うものではなく、解法と状況の一部が共通するものもある。それらを包含関係として関係付けることで問題間の差分を明確にした構造化ができる。そして、ある問題に対して解法や状況を増減させることで、異なる問題を生成することができる。つまり、問題は基本的なものを複雑化することで様々な問題に派生するというモデルである。これをここでは「問題の派生的成立モデル」と呼ぶ。このように問題を捉えるとある問題の問題解決に学習者が失敗したとしても、その問題の派生元の問題は解けるかもしれない、もしその派生元の問題が解けた場合には、その派生関係に沿った複雑化が原因となって問題解決失敗したと考えることができる。つまり、解決に失敗した原因は問題全体ではなく、その派生関係に沿った複雑化であるとして、克服すべき対象を焦点化することが可能となる。そして、問題の単純化とは、派生先の問題に戻ることにして定式化されることになる。

筆者らは、先行研究において、問題の自動生成機能の実現を目指して、力学問題を対象とした問題の派生的成立モデルを提案している [4]. このモデルにおける問題の派生関係を用いれば、問題の派生は (1) 特殊化と一般化、(2) 部分化と拡張化、の二種類で定式化され、単純化と複雑化に関しても、特殊化/部分化が元の問題の状況/解法を単純化するもの（より具体的には元の問題の状況/解法に、単純化された問題の状況/解法が、特殊化/部分化として包含される）として決定される。またこの派生に関しても、問題中のどの要素がどう変化したためにその派生が起こったのかについても明示的なものとして抽出可能となっている。本研究では、この問題の派生的成立モデルに沿って、力学の問題演習における単純化方略を用いて、問題解決失敗の自己克服支援システムを開発した。

ここでの単純化方略とは、学習者が問題解決に失敗した場合、学習者が解決可能な問題を見つけるまで、取り組んでいる問題を単純化していく方法である。そして解決可能な問題が発見されれば、解決された問題と、その問題の単純化前の問題、つまり解決に失敗した問題を比較させ、解決に失敗した問題の解決を促す方法である。この方法において、学習者に問題間の比較を行うことを促す機能を本システムでは特に差分注視機能と呼んでいる。この単純化方略では単純化された問題を出題するのみで、教授活動は行われないことが特徴であり、自己克服支援と捉えることができると判断している。このような自己克服支援のシステム化はこれまでに行われておらず、新規性が高いと筆者らは判断している。

ここで、このような方法による問題解決失敗の自己克服支援が成立するのは、学習者が元々その問題を解く上で必要な知識をもっていたことが前提となる。このような学習者がいれば、単純化方略による支援で自己克服の活動を観察されると期待できる。つまり、ある問題が解けない場合に、解ける問題を確認させ、その解ける問題と解けない問題の差分に焦点を当てることで、元の問題のままでは適用できなかった知識を適用できるようになることを期待していることになる。したがって、問題解決の失敗の原因が必要な知識の欠落であったり、たとえ必要な知識をもっていたとしてもその知識を適用する能力をそもそも全くもっていないといった場合には、単純化方略による支援を行っても自己克服の活動は観察されないと予想される。このような学習者においては、自己克服支援としての効果は期待できず、本研究の範囲外ではあるものの、克服できない問題間の差分や単純化したにもかかわらず解けない問題が見つかることで、教授すべきことの焦点化が可能になることを期待できると考えている。

単純化方略によって問題解決失敗の自己克服が促進されることについての直接的な理論的裏付けはないが、Polyaの方法はこの方法を含んでいると解釈できる。また、前の問題の解決方法がそのまま次の問題の解決に活用できるように問題系列を組み立てることで、そのように問題を系列化しない場合よりも、より難しい問題を解けるようになることはこれまでも指摘されており [5], また、難しい問題を解かせる場合に部分問題に分割して段階に解かせたり、関連問題を事前に与えるといったことは経験的に行われていることである。また、ブルームは認知的領域の教育目標の分類におい

て、知識を知っていることとそれが適用できることは異なるとしており [6], 知っているけど適用できない学習者が適用できるように支援する本研究は, この適用の段階を指向したものと位置付けることができるといえる。

以下本論文では, 2. で先行研究である派生問題について述べ, 3. で単純化方略の方法と作成した初等力学における自己克服支援システムについて述べる。また, 高等専門学校の教員によるシステムの評価と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

先行研究では問題を「力学的状況」及び「解法」から構成されるとし, それぞれの観点で関係しているような問題を派生問題と定義している [4]。派生問題は, 特殊化問題, 一般化問題, 部分化問題, 拡張化問題の四つに分類される。以下それぞれの問題について具体例を用いて説明する。

2.1 特殊化問題・一般化問題

特殊化問題とは, 問題のある属性を特殊化することで元の問題に比べて力学的状況を単純化した問題である。特殊化とはある属性の値を特定の値にすることである。それによりその属性及びそれに関連する幾つかの属性を省略することが可能となり, 計算が容易な状況を生む。例えば, 摩擦のある斜面に関する問題において, 斜面と物体の間に働く摩擦力を 0 とすることで, 問題で考えるべき属性や属性間の関係が省略され単純化されている (図 1)。また, 特殊化問題は元の問題のある要素を特殊化して計算をしやすくした問題であるので, 解法は元の問題と同様の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されている問題であるといえる。このことから, 元の問題が解ける学習者は特殊化問題を必ず解くことができる。

一般化問題は特殊化問題の逆であり, 考慮されていないある属性を付加することで力学的状況を複雑化する。例えば, 「摩擦力を 0 とする」と明記されている問題に対して, 摩擦力を考慮させることで問題は元の問題よりも考えるべき属性が増加し, 複雑化する (図 1)。一般化問題は元の問題を包含している。このことから, 元の問題が解けない学習者は一般化問題を解決することはできない。

ここでの力学的状況の推移はマイクロワールドグラフと呼ばれるモデルを用いて表現する手法を採用して

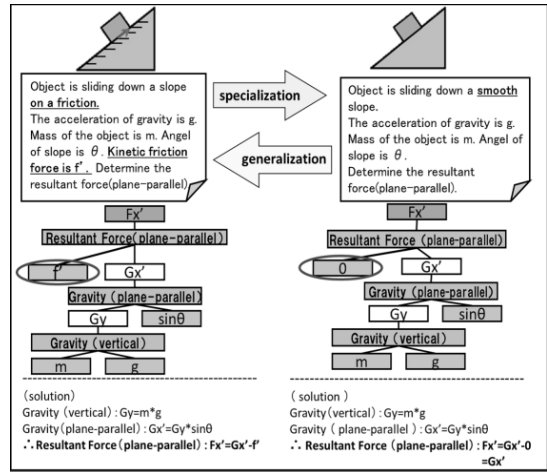


図 1 特殊化問題・一般化問題の例
 Fig. 1 Example of specialization-generalization.

いる [7], [8]。マイクロワールドグラフとは物理状況間の関係を, その状況を成立させている力学的な仮定の変化とし, ある状況から派生しうる状況を網羅的に記述したものである。これは, 力学における物理状況を, 物理状況単体の特徴及び, 他の物理状況の特徴との差分から導かれる, 関係の特徴を表現するためのモデルである。一段階の特殊化・一般化の場合このマイクロワールドグラフが一段階変化する。

2.2 部分化問題・拡張化問題

部分化問題とは, 問題を解く過程で必要となる要素を求めさせる問題で, 解法を簡単にした問題である。ここでは解法について, 解法構造と呼ばれる表現方法で記述している [9]。解法構造は葉の部分である入力属性ノード, 根の部分である出力属性ノード, それ以外の中間属性ノードとそれらをつなぐ式ノード及びエッジからなる。入力属性は問題文中に明示的に与えられている属性のことであり, 出力属性はその問題が入力属性を用いて求めたい属性のことであり, 中間属性は問題の解決過程で得られる属性である。部分化問題は解法構造の中間属性を出力属性に変更することによって生成される。例えば, 摩擦のある斜面上の物体に働く合力を求める問題を部分化すると, 物体の面平行に働く重力を求める問題が生成される。図 2 のように部分化問題は元の問題の解法構造を部分的に取り出して, よって部分化問題は元の問題に包含されている問題であるといえる。このことから, 元の問題が解ける学習者は必ず部分化問題を解くことができる。

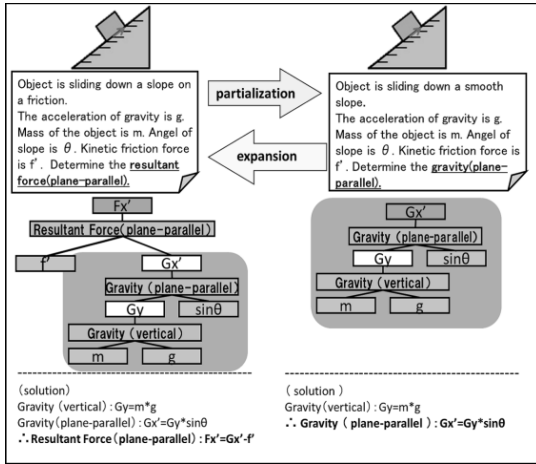


図2 部分化問題・拡張化問題の例
Fig.2 Example of partialization-expansion.

拡張化問題は元の問題の解法構造の出力属性を中間属性として別の属性を出力属性とする問題のことである。例えば、摩擦のある斜面上の物体に働く面平行の重力を求める問題を拡張した場合、物体に働く合力を求める問題が生成される(図2)。拡張化問題は元の問題を包含している。このことから元の問題が解けない学習者は拡張化問題を解決することはできない。

一段階の部分化・拡張化の場合では解法構造が一段階変化する。

2.3 関連研究

派生問題の定義によって関係性をもった問題の系列を自動生成することが可能である。これにより、問題間の関係性に注目した問題演習が可能となった。派生問題の生成機能を用いた有効な演習方法として漸進的問題演習をシステムで実現している[10]。これはある問題に対して正解の場合は一段階複雑な問題を出題し、不正解の場合は一段階単純化した問題を出題する演習方法である。教育現場で実験的に利用したところ、想定された振る舞いは見られたものの、学習者の意識が十分に問題間の関係性を捉えているとは言い難いものであった。

また、誤りに着目したシステムを用いた演習の研究として、小野寺らは拡張オーバレイモデルと帰納推論を利用したJavaの文法教材を作成している[11]。また、畑本らはバグモデルと手続きネットワークから算術演算の演習を行うシステムを作成している[12]。これらの研究は「教授する順序」や「問題の難易度でのレベル分け」を基に、演習を通してわかる「学習者の

不足している知識」に従って次に出題する問題を決定している。モデルと学習者の振る舞いに従い、システム化することでできるようになる演習方法である点は本研究もこれらの関連研究と共通している。一方出題する問題は、問題の構造に着目し、その構造の明確な複雑化・単純化を行った問題でのみで構成されている。

問題の構造に関する議論は、ガニエやウェージャー、メリルなどを代表に様々なところで議論されている[13]。また、一般的に、学びの順序を考慮することで、その学びの効率や学び取れること自体に影響を与えるといわれている。Scheiterらは問題の系列がランダムに並べられた場合よりも徐々に複雑になっていくように配置された問題の系列の方が問題解決パフォーマンスにより影響を与えること、その効果を得るためには学習者が、問題が系列化されていることに気づくことが重要であることを明らかにしている[5]。また、星野は、問題構造の本質をメタ認知として学習者に意識させながら問題系列を経験させることによって手続きを容易に抽出でき、それは意図的な問題系列を組織することで可能となると報告している[14]。これらに基づき、本研究は出題する問題とその前後の問題の関係が密接であり、その関係性を学習者に意識させようとしている点が通常の問題演習と異なるところである。

[1]では、問題演習に関する系列の分類が行われており、中でも本研究は問題指向型の出題方法の演習にあたる。

3. 単純化方略

3.1 演習方法

問題演習の目的の一つに、学習者の不足している知識、誤った知識を発見することがあげられる。これには問題解決に失敗した場合に学習者が自分にとって困難だった部分はどこにあるかを認識することが重要である。ここでは、前述した問題の派生的成立モデルの考え方をを用いる。これは問題を構造的に考えたとき、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としている考え方である。本研究での派生的に複雑化しているとは、複雑化された問題が元となる問題を完全に包含している状態のことを示す。このモデルに従うと問題は階層的にできているといえる。つまり、ある問題は問題より単純な問題を重層的に包含していることになる。

このように問題を捉えると、問題解決に失敗した学

習者は失敗した問題の全てについてできないのではなく、その問題の一部が困難であるため、問題解決ができなかったと考えられる。一方で、その学習者が、どの一部分が自分にとって困難であるかを必ずしも認識しているわけではない。そこで、困難である一部分を認識しやすく示すことで、できない問題とできる問題の関係性に気づき、その問題の解決につながる可能性が考えられる。解決につながらなかった場合においても困難である部分を中心に再び学習を行えばよいので、効率的な学習にもつながる。その困難である一部分を認識しやすくするためにはできる問題とできない問題の差分に気づきやすい問題系列で問題を出题する必要がある。そのため、問題解決失敗の際には問題を一段階単純化することを繰り返し、学習者ができる問題を発見する。できる問題を見つけた場合、単純化した問題と単純化の元になった問題の差分に、学習者の困難は存在している。このようにして学習者のできる部分できない部分を切り分けながら行う演習方法を本研究では単純化方略と呼ぶ。単純化方略では学習者が自分自身で困難である部分を発見することが失敗した問題を克服することにつながると仮定している。単純化した問題から元の問題に戻る際の要素の組み合わせの難しさは残るが、学習者自身の困難な部分の発見は行いやすくなっている。

3.2 差分注視と差分接続問題

単純化方略では取り組む問題に不正解の場合、その問題に対して一段階単純化した問題が出题される。出題された問題は前の問題との関係性は強いいため、出題された問題に正解した場合、その問題を利用して次の問題に取り組む活動も期待できる。しかしそのためには学習者が問題間の関係が強いことを認識する必要がある。そのため、問題間の差分の認識に対して意識を向けるための活動がワンステップ必要である。その活動として正解した問題と直前の不正解だった問題を見比べるという活動を学習者に行ってもらう。これを単純化方略では差分注視活動とする。

差分注視活動だけでは差分の認識に至らない、あるいは克服に至らない学習者がいることも考えられる。そこでそれらの学習者に対して問題間の差分について、より考慮しやすく、できた問題とできなかった問題をつなぐための問題を出题する。この問題を差分接続問題と呼んでいる [15]。問題を解けない学習者は、できない問題の解法のどこか一部ができていないと言える。接続問題は、このできない部分を解法にもつことによ

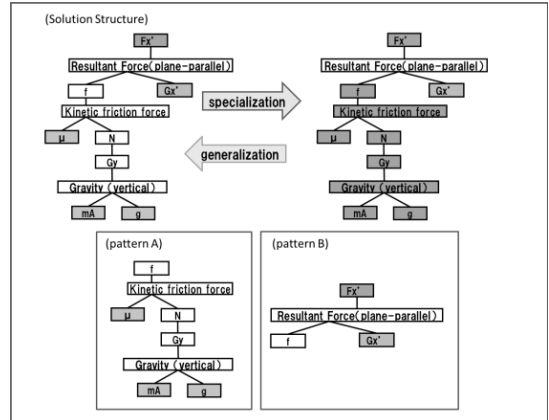


図 3 差分接続問題の例
Fig. 3 Example of delta connection problem.

り、この部分に着目させる問題である。できない問題の解法のできる部分は、より単純でできる問題の解法に一致する。そのため、接続問題は、できる問題の解法構造とできない問題の解法構造の差分を取ることで生成される。

接続問題は 3 種類ある。できる問題とできない問題の関係が部分化/拡張化の場合、(1) 部分化により、なくなった解法構造をもつ問題となる。部分化は、解法構造の中間属性を出力属性に変更することであり、変更された属性の先祖ノードは全て解法からなくなる。接続問題はこのなくなる部分を解法にもつ問題であるため、できない問題の解法構造において変更された属性を入力属性にすることで生成される。

できる問題とできない問題の関係が特殊化/一般化の場合、(2) 省略される属性を求めさせる問題、(3) 変化する数量関係を使わせる問題となる。特殊化は、ある属性を 0 などの特殊な値にすることである。このとき、他の属性も省略される。また、省略されたことにより、数量関係の一部が変化する。よって、その省略される属性を求めさせる問題と変化する数量関係を使わせる問題が接続問題となる。例えば、動摩擦係数 μ を 0 にすると、動摩擦力が省略され、運動方程式が変化する。このとき、動摩擦力を求めさせる問題と運動方程式を使わせる問題 (例えば、合力 F を求めさせる問題) が接続問題となる。(2) は、できない問題の解法において、特殊化で省略された属性を出力属性にすることで生成され、(3) は、省略された属性を含む数量関係の親ノードを出力属性にすることで生成される。



図 4 初期問題選択画面
Fig. 4 Screen of selection first problem.

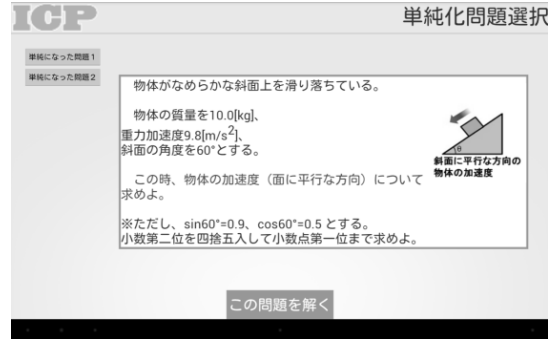


図 6 単純化問題選択画面
Fig. 6 Screen of selection simplify problem.

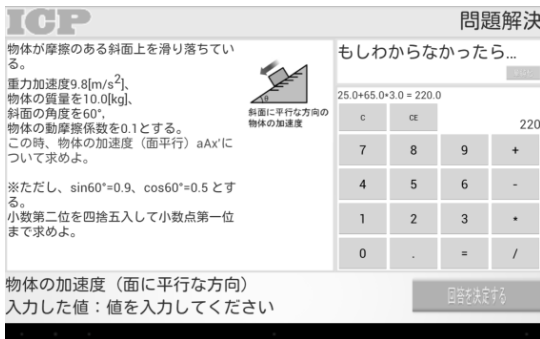


図 5 問題画面
Fig. 5 Screen of problem.

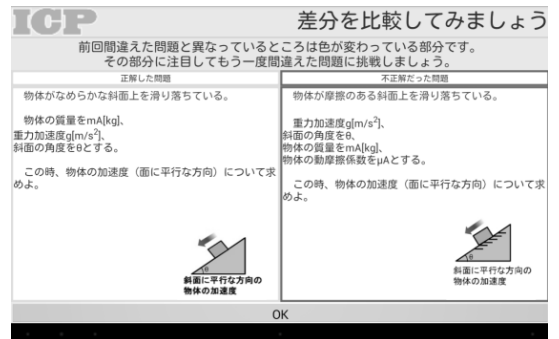


図 7 差分注視画面
Fig. 7 Screen of delta gaze function.

3.3 自己克服支援システム

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、もち運びに優れた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 (図 4)。問題に解答する画面を図 5 に示す。出題された問題に不正解だった場合は派生問題の枠組みに従った一段階単純化した問題に取り組む。この際候補が複数ある場合は学習者自身が次に解く問題を選択する (図 6)。この演習の目的は、学習者のできる問題とできない問題の境界線がどこにあるかを明確にし、その問題間の差分について考えてもらうことである。そのため、できる問題まで単純化を繰り返す行動、つまり不正解が連続してしまうことは特に問題ではない。与えられた初期問題に正解した場合はその問題とその問題が包含する問題について理解しているとみなすことができるため、別の初期問題を選択してもらう。

初期問題、あるいは差分接続問題ではない問題に正解した場合、正解した問題と、その直前で不正解だった問題の差分に着目し、問題解決に失敗した原因を学習者が自分自身で見つけて、それを焦点化することで解けなかった問題を解けるようになることを期待するのが、自己克服支援である。解けた問題と解けなかった問題を見比べる活動を差分注視活動と本論文では呼んでいるが、この活動自体必ずしも簡単な活動ではない。そこで本システムでは、この活動の補助として、差分注視機能を提供している (図 7)。この機能では、できた問題と直前の不正解だった問題を単に提示するだけでなく、問題中の異なる部分が赤字で強調して表示される。これにより学習者は問題間の差分に注目することが容易となる。その後、直前のできなかった問題に再び取り組むことをシステムが促す。差分注視機能を経て再び挑戦した問題を克服できなかった場合、差分に着目した差分接続問題を生成、学習者に出題する。差分接続問題に正解した場合は再びできなかった問題に挑戦する。差分接続問題に正解できなかった場合は

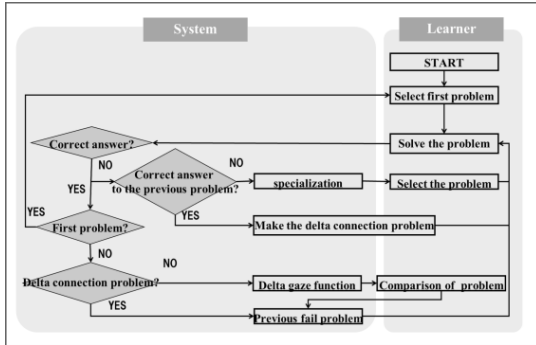


図 8 システムによる演習のフロー
Fig. 8 Flow of the system.

その問題の単純化を行う。学習者自身は通常の単純化した問題と差分接続問題を認識する必要がないため、システム画面は単純化した問題と同様のものを使用している (図 6)。学習者はこの流れを繰り返し、自分のできる問題とできない問題の間の差分について考えながら学習することを促す。なお、「もう一度同じ問題を解く」も選択できるようになっている。この選択肢は、慣れないシステムを使う上でのミスを回復するうえでも必要な機能であると判断している。また、計算能力を測るための演習ではないため、システム内に電卓機能を内蔵した。システムを用いた演習のフローを図 8 に示す。

システム上で、

(1) ある問題に対して不正解だったため、その問題の単純化を行う。

(2) 単純化された問題に対して正解し、差分注視機能を経て元の問題に取り組む。

(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、このよう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。

本システムでは、リアルタイムの個別フィードバックを返すことができ、VanLehn の種類分けに従うと、正誤フィードバックである、Flag Feedback を実現している。また、直接的ではないものの、誤り箇所学習者の注意を向けることができることから Pointing Hint を実装しているといえる [16]。

表 1 高等専門学校教員へのアンケート

Table 1 Questionnaire to the technical high school teachers.

No.	Question
(1)	問題演習で問題が解けないと、演習に対する学習者の動機づけが下がると思うか？
(2)	通常の問題演習において、問題間の関係を意識することが有用だと思うか？
(3)	通常の問題演習においては、問題間の関係を意識することができていると思うか？
(4)	このシステムを用いた問題演習では、問題が解けなかった学習者の演習に対する動機づけは、通常の問題演習に比べて大きいと思うか？
(5)	このシステムを用いた問題演習では、通常の問題演習と比べて、問題間の関係を意識できるようになると思うか？
(6)	このシステムを用いた問題演習では、通常の問題演習と比べて、より多くの時間がかかると思うか？
(7)	このシステムを用いた問題演習は、問題解決をスムーズに行える学習者には不必要か？
(8)	単純化方略は問題演習に行き詰った学生に対して効果的な演習方法だと思うか？
(9)	差分注視機能で、問題間の差分についての学生の理解が促進されると思うか？
(10)	差分接続問題は、実際にできなかった問題とできる問題をつなぐ手助けになっていると感じたか？

4. 高等専門学校教員による評価

4.1 目的と評価方法

本研究で提案した単純化方略に従った自己克服支援システムが教育現場の教授者の立場から見て効果的な演習方法であるか、及び本システムを用いた演習を実際に学生に行わせた場合有効であるかの検証を行った。被験者は商船系の高等専門学校の物理専門担当教員 5 名。著者が派生問題についてと差分接続問題について、またそれらを用いた単純化方略の目的と方法の説明を行った後、実際に教員らにシステムを使って約 30 分間自由に問題演習に取り組んでもらった。その後アンケートに回答してもらっている。アンケート内容を表 1 に示す。質問 (1), (2), (3) が通常の問題演習に対する質問項目で、質問 (4), (5), (6) が本システムと通常の問題演習を比較した場合どう思うかを問う質問項目、質問 (7), (8), (9), (10) が単純化方略及び本システムの機能が効果的かどうかを問う質問項目である。

4.2 結果

アンケートの結果を図 9 に示す。質問 (8) の結果が

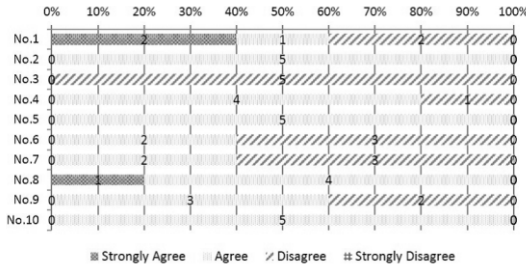


図9 高等専門学校教員へのアンケート結果

Fig.9 Result of questionnaire to the technical high school teachers.

ら、被験者らが単純化方略は問題演習に行き詰った学生に対して有用であると感じていることがわかった。これは本研究が目指すところである、質問(2)の通常の問題演習では問題間の関係を意識することが有用であるという問いに全員一致で肯定的意見であることからもうかがえる。一方、質問(3)の通常の問題演習では問題間の関係を意識することができているかという問いには否定的意見で占められている。通常の問題演習では時間の関係上系統立てて問題演習を実施することはできず、基礎問題の後、いきなり難解な応用問題に突入することになってしまうため、全く別物に捉えてしまう学習者も多いということだった。一方で質問(5)の結果は肯定的意見で占められており、本システムが通常の問題演習では実現しにくい問題間の関係に意識を向けた演習を行わせることができていることが示唆されている。また、質問(1)、質問(4)の結果から通常の問題演習に比べて学習者の演習に対する動機づけは大きくなるよう改善される可能性が高い。

単純化方略のデメリットとして、問題の推移数が高くなることから、通常の問題演習と比べてより多くの演習時間がかかること、またこの演習方法は通常の問題演習をスムーズに行える学習者には不必要なものである可能性が考えられた。しかし質問(6)、質問(7)の結果から、必ずしもそうではないという意見が得られた。質問(6)に関してはシステムにある電卓機能が学習者の計算時間短縮につながるが考えられる。質問(7)に関しては、演習をスムーズに行える学習者にも復習や再確認として役に立つ、問題解決の過程を整理するのに効果があるように思うというコメントを得られた。

システムの差分注視機能については質問(9)の結果のとおり、肯定的意見を得られたものの、理解の促進までには至らないと考える教員の方も2名ほど見られ

た。一方、差分接続問題ができる問題とできなかった問題の手助けになる可能性に感じては質問(10)のとおり肯定的意見で占められた。システム内では差分注視機能で不十分な学習者に対しては差分接続問題が話題されるようになっており、差分に対するサポートは妥当なものであると判断している。

5. 高等専門学校生による実践的利用

前章の結果を踏まえて、高等専門学校の学生を対象とした実践的利用を行った。

5.1 目的と実践方法

商船系の高等専門学校生を対象に実践的利用として物理の授業において1時限の利用を行った。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。

被験者は商船系の高等専門学校1年生の学生、3クラス130名。実践利用はタブレット化したため、教室で利用することができ、授業時間1時間を使い実施した。まず学生に対し著者がシステムの操作方法について事前説明を行い(10分)、システムを用いて問題演習を行い(20分)、最後に事後アンケートを実施した(10分)。システムによる問題演習の流れは3.で説明したとおりである。初期問題に関してはあらかじめ教員に確認してもらい、同意を得ているものを用いている。

事後アンケートの内容は表2に示す。アンケートの回答は質問(7)のみ自由記述で回答してもらい、そのほかは全て「4. とてもそう思う」から「1. 全くそう思わない」までの4段階評価である。質問7に関しては使用していない学生もいることから「0. 使用していない」の項目を付加している。質問(1)、(2)は学習者の力学の印象を問う項目、質問(3)は本演習の有用性を問う項目、質問(4)~(6)は問題間の関係性を意識できているかを問う質問項目、質問(7)はシステムの特徴を問う項目、質問(8)は学習者の動機付けに関する項目、質問(9)~(11)はシステムを通しての所感を問う項目となっている。

5.2 結果

演習前にはクラスと出席番号を入力して個人特定を行っていたが、その番号が重複しているためログデータから個人を特定できないものを被験者130名のデータから除外し、103名のデータを有効データとした。

表 2 高等専門学校生へのアンケート
Table 2 Questionnaire to the national college students.

No.	Question
(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)	正解した後に出題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役に立ったか？
(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？

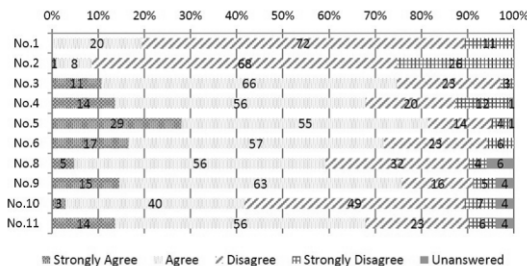


図 10 高等専門学校生へのアンケート結果

Fig. 10 Result of questionnaire to the national college students.

事後アンケートの結果を図 10 に示す。また、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% 有意で意見に偏りが見られた。質問 (1), (2) の学習者の力学に対する印象は全体的に否定的なものが多く見受けられている。質問 (3)~(6) の本演習の有用性を問う項目、問題の関係を意識できているかを問う項目では肯定的意見に傾きがある。質問 (7) については、単純化機能や、問題間の比較ができる、どこが理解できていなかったかがわかる、自分にあった問題ができる等のシステムの演習の意図を感じ取っていることがわかる記述を行った学習者が 33 名存在した。質問 (8) の学習者の動機付けに関する質問項目も

肯定的な意見を得ることができ、統計的処理では有意傾向であった。システムを通しての所感については質問 (10) の力学に対する印象の向上について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な意識をもっている学習者が 8 割以上存在していること、本システムの実践の利用は 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たと捉えることができ、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、出題された問題の種類は 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が、これは取り組んだ問題に対して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ため、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も、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と考えられるため、同様のことが言える。その他、一人あたり換算にすると、一人あたりの正解数 3.49 問 (S.D. = 3.17)、不正解数 18.43 (S.D. = 10.60) 問となる。また、一人あたりが解いた問題の種類は 5.98 問 (S.D. = 2.75) となっている。用意した初期問題 3 問に全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。

5.3 学習者のタイプ分類

問題解決のログを分析することで、本システムが指向した自己克服を行えた学習者が 103 名中 61 名存在することが確認できた。教授活動を行っていないにもかかわらず、解けなかった問題を解けるようになった学習者が 6 割いたことは、本方式による自己克服支援の可能性を示唆していると判断している (以下本論文では、このような学習者を自己克服型学習者と呼ぶ)。また、演習の範囲で最も単純な問題に単純化しても解けなかった学習者が 2 割存在した。このような学習者

表 3 学習者のタイプ分類
Table 3 Type of learner and its distribution.

Type of learner	head-count	percentage
Self-Conquest Learner	61	59.22%
Problem Concept Learner	23	22.33%
Backward Learner	19	18.45%

はこの演習を行う準備が十分にできていなかったと考えられ、その前段階となる知識自体やその使い方の教授を再度行う必要があると考えられる（以下本論文では、このような学習者を後進型学習者と呼ぶ）。解ける問題が見つかって、解けない問題との差分注視まで行うことができたものの、自己克服ができていない学習者が2割存在した。克服すべき差分を明らかにしても自力で克服できないということは、その差分に関する何らかの教授が必要であるといえることができる。取り出せた差分を用いてこのような学習者に対してどのような教授を行うかは、本研究の今後の課題の一つとなる。なお、自力で克服できない差分は学習者にとっての課題であり、また、システムとして支援・教授の対象となることから、本論文ではこのような学習者を「課題顕在型学習者」と呼ぶ。これら三つのタイプの学習者の数は表3のようになる。以下本節では、各タイプの学習者の振る舞いについて概説する。

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)、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)、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。この学習者は本研究で実装した差分注視機能、及び差分接続問題を利用することで、自己克服活動を行えた学習者群である。内訳としては、うち 25 名が差分注視機能のみの利用で自己克服を行うことができ、残り 36 名が差分接続問題までを利用することで自己克服活動を行えた。このように、知識を教授することなく、問題を与えるだけでできなかった問題をできるという自己克服活動を行えた学習者が 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判断している。

後進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)、平均不正解数は 8.31 問 (S.D. = 6.59)、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。この学習者は今回の演習に取り組むうえで必要な知識をもっていない学習者とみなすことができる。単純化方略では事前の知識がない状態の学習者に対して教授活動を行うという活動は想定していないが、実際に問題演習を行う場合には、一定の割合でこのような学習者が含まれていることが予想されるため、実践的にはシステムに知識の教授機能をもたせることが必要であることを示唆する結果となっている。なお、担当教員は、この割合を特に驚くべきものではなく、学習者の能力を反映した結果であろうとのコメントしている。

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)、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)、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。本研究で定義した自己克服活動は見られなかったものの、学習者の解ける問題が見つかり、その解ける問題と解けない問題との差分として学習者が克服すべき課題が顕在化されたといえる。本システムはその課題に対して学習者が自己克服できない場合の対処法をもたないが、問題演習においてこのような学習者が存在することは自然であり、今後のこのような学習者に対処も行うようにシステムを改良することが必要といえる。

また、各学習者タイプ別にアンケートを再集計した。図 11 から図 13 に結果を示す（凡例は図 10 と同様）。自己克服型学習者は全体の結果とほぼ同様となっている。変化した点は質問 (8) の有意差がなくなったことで、これは問題間の関係をしっかり考えながら次に解く問題を自ら選択する活動は負荷の大きい作業であった可能性が考えられる。課題顕在型学習者も全体の結果と大きな変化はなかった。変化している点は質問 (5) の否定的意見が増えているところで、肯定的意見との有意差がなくなっている。このことから問題間の関係性を正しく捉えられなかった学習者が一定数存在していたことが考えられる。このことが自己克服活動に至らなかった一因である可能性も十分考えられる。後進型学習者は全体の結果とは大きく異なり、力学の印象について以外の質問項目で、否定的意見が増えている。それに伴い有意差も消失し、単純化による出題で問題間の関係性を感じられない学習者が多く存在していることがわかる。現在のシステムによる支援が十分では

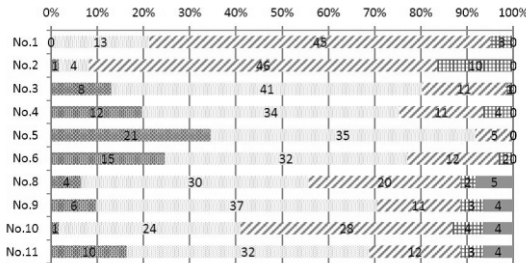


図 11 自己克服型学習者のアンケート結果

Fig. 11 Result of questionnaire to the self-conquest learner.

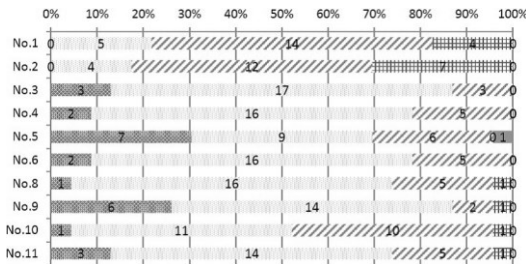


図 12 課題顕在型学習者のアンケート結果

Fig. 12 Result of questionnaire to the problem concept learner.

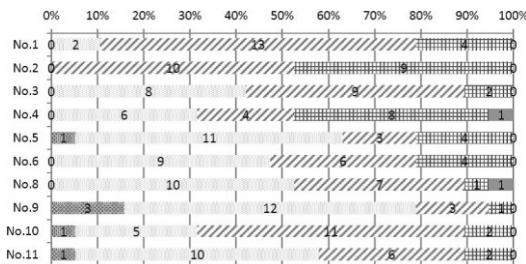


図 13 後進型学習者のアンケート結果

Fig. 13 Result of questionnaire to the backward learner.

なかったことが考えられ、別の方法による支援の必要性が示唆される。

6. むすび

本論文では学習者が自ら考え、問題解決失敗を克服する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ができる演習方法である。この単純化方略を実装した自己克服支援システムを設計・開発し、実際の教育現場である高等専門学校の力学の授業で実践的な利用を行った。結果、高等専門学校教員の評価、実践的利用の結果から、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。自己克服を行うことができた学習者にとって、本システムは一種のスキヤフォールディング [17] の役割を果たしたといえる。フェーディングは必要であるが、その具体的方法については今後の課題であるといえる。自己克服に至らなかった 4 割の学習者群に対する支援は今後の課題ではあるが、単純化方略ではない別のやり方をする必要があることがわかったといえる。

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。

文 献

- [1] 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, March 2010.
- [2] G. Polya (著), 柿内賢信 (訳), いかにして問題をとくか, 丸善, 1954.
- [3] 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.
- [4] 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, vol.27, no.6A, pp.391–400, Feb. 2012.
- [5] K. Scheiter and P. Gerjets, “The impact of problem order: sequencing problems as a strategy for improving one performance,” Proc. 24th Annual Conference of the Cognitive Science Society, pp.798–803, 2002.
- [6] B.S. Bloom, J.T. Hastings, and G.F. Madaus, Handbook on formative and summative evaluation of student learning, McGraw-Hill, 1971. (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.)
- [7] T. Horiguchi and T. Hirashima, “Graph of microworld, “A framework for assisting pro-gressive knowledge acquisition in simulation-based learning environments,” 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education, pp.670–677, 2005.
- [8] 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,” 信学論 (D), vol.J91-D, no.2, pp.303–313, Feb. 2008.
- [9] 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.
- [10] 武智俊平, 平嶋 宗, “漸進的問題演習の実現と実践利用を通じた学習者の振る舞いの分析,” 教育システム情報学会第 37 回全国大会, pp.400–401, 2012.
- [11] 小野寺直樹, 馬場純子, 山本洋介, 中溝昌佳, 古宮誠一, “拡張オーバレイモデルに基づく CAI システム ～教授ロジックと教材の作成事例,” Information Processing

Society Of Japan, CE-78, no.1, pp.1-8, 2005.

- [12] 畑本恵子, 長町三生, 伊藤宏司, 辻 敏夫, “算術演算子の知的 CAI に関する一研究,” 人間工学, vol.23, no.4, pp.257-265, 1987.
- [13] 野嶋栄一郎, 鈴木克明, 吉田 文, 人間情報科学と eラーニング, 第 7 章, pp.104-117, 放送大学教育振興会, 2006.
- [14] 星野将直, “数学的知識の獲得・形成におけるメンタルモデルの役割に関する研究—宣言的知識に基づく手続きの導出場面を中心にして,” 日本数学教育学会誌, vol.82, no.5, pp.3-12, May 2000.
- [15] 林 直也, 武智俊平, 篠原智哉, 山元 翔, 林 雄介, 平嶋宗, “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,” 第 28 回人工知能学会全国大会発表予定, 2014.
- [16] K. VanLehn, C. Lynch, K. Schulze, J.A. Shapiro, R. Shelby, L. Taylor, D. Treacy, A. Weinstein, and M. Wintersgill, “The andes physics tutoring system: lessons learned,” Int. J. Artificial Intelligence in Education, vol.15, no.3, 2005.
- [17] A. Collins, Cognitive apprenticeship: The Cambridge Handbook of the Learning Sciences, R. Keith Sawyer (ed), pp.47-60, Cambridge University Press, 2006.
- [18] T. Hirashima, T. Niitsu, K. Hirose, A. Kashiwara, and J. Toyoda, “An indexing framework for adaptive arrangement of mechanics problems for ITS,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E77-D, no.1, pp.19-26, Jan. 1994.

(平成 26 年 2 月 28 日受付, 7 月 14 日再受付)



武智 俊平

平 24 広島大学工学部第二類情報工学課程卒業。現在, 広島大学大学院工学研究科情報工学専攻の博士課程前期に所属。



林 直也

現在, 広島大学工学部第二類情報工学課程に所属。



篠原 智哉

平 23 広島大学工学部卒。平 25 同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年より, 同大学大学院工学研究科博士後期課程在学。初等力学を対象とした理解内容の外化・修正支援環境の研究に従事。



山元 翔

平 20 広島大学工学部第二類情報工学課程卒業。平 22 3 月同大学工学研究科博士課程前期了。現在, 同大学博士課程後期在学中。知的学習支援システム, 特に問題の解決・作成・変更を行うことによる学習に関する研究に従事。



林 雄介 (正員)

平 10 阪大・基工・システム工学卒, 平 15 同大学院博士後期課程了, 北陸先端大助手。大阪大学特任助教, 名古屋大学准教授を経て, 平 24 より広島大学大学院工学研究科准教授。知識モデリング, 知的教育システムの研究に従事。博士(工学)。



平嶋 宗 (正員)

昭 61 阪大・工・応物卒, 平 3 同大学院博士課程了, 同年同大産業科学研究所助手。同講師, 九工大・情工助教授を経て, 平 16 より広島大学大学院工学研究科教授。人間を系に含んだ計算機システムの高度化に関する研究に従事。工博。