

関係的理解を指向した問題間比較タスクの 設計開発および実践評価

Design and Experimental Evaluation of Comparison Task between Problems for Relational Understanding

志水規祥¹ 林雄介¹ 平嶋宗¹

Noriyoshi Shimizu¹, Yusuke Hayashi¹, and Tsukasa Hirashima¹

¹ 広島大学大学院工学研究科

¹ Graduate School of Engineering Hiroshima University

Abstract: When people are going to understand a problem, it is said useful to think it in comparison with other close problem. In this research, we support relational understanding of problems with the relation of simple / complexity in the elementary dynamics. We design and develop a system to exercise the comparison between problems. This paper also reports an experimental use and its evaluation.

1. はじめに

ある問題を理解するといった場合、その問題自体の解き方について知ることを指す場合と、その問題とその問題と関連している他の様々な問題との関係を知ることを指す場合がある。本研究では後者を関係的理解と呼び、高校程度の初等力学の問題を対象として、この関係的理解を促進する演習を設計・開発し、実践的に運用したので、結果を報告する。

学習を進める上では今まで解いたことがあるような問題、あるいは目の前の問題と似た別の問題を引き合いに出し、比較しながら考えることはしばしば用いられる方法である。例えば問題解決に行き詰った際、問題を少しずつ単純化して、解ける問題を探すといった方法が存在する。自分の解ける問題と直前の解けない問題を比較することにより、行き詰っていた原因を明らかにすることが可能である。先行研究では、高校程度の初等力学の問題を対象として、学習者が問題解決に行き詰まった場合、その問題を学習者が自力で解決できるまで問題を単純化し、そのうえで再度徐々に元の問題に向かって複雑化するという演習システムを設計・開発し、実践的に運用した結果、単純化した問題を解くだけで、元の問題を解けるようになるといった自己克服がしばしば観測できることを確認している。これは、この演習が問題同士の比較・検討を促すことで、問題解決に対する自己モニタリングと自己調整といったメタ認知的活動を促進しているからであるということができる。ここで自己モニタリングとは、単純化前や単

純化後の問題に対する問題解決について考えることであり、自己調整とは自己モニタリングを踏まえたうえで、自身の問題解決等の変更することである。このような活動を行う能力を習得していれば、行き詰まり原因の特定を始めとし、問題系列を意識した漸進的かつ自律的な問題演習など、様々な有効とされる学習方略をより効果的に用いることが可能になると考えられる。問題単純化に関する先行研究で開発された演習システムでは、学習者の自己克服を促進するために単純化された問題を提供する機能を持つてはいるものの、このような問題同士の比較・検討を明示的な課題として学習者には行わせていなかった。

そこで本研究では定義された初等力学の単純/複雑関係に基づき、問題の関係的理解を指向した問題間比較・検討自体を課題とする演習システムをタブレット上で動作するアプリケーションとして実装した。さらに、システムの改良を行いながら、2度の実践利用を行った。一度目の高等専門学校利用の結果、システムが問題の比較説明を支援するものであるとともに、フィードバック機能の有用性が示唆された。さらに効果の向上を目指し、問題比較の思考プロセスをより段階的に支援するべく、解法組み立て演習と振り返り機能を改良・実装した。二度目の高等専門学校利用を行った結果、学習効果およびシステム演習のさらなる向上と、拡張した機能の有用性を示唆する結果を得た。

2. 単純・複雑による問題間関係

2.1. 単純・複雑の関係

問題に対する考え方として、ポリアが述べるには『もしも、与えられた問題がとけなかったならば、何かこれと関連した問題を解こうとせよ。もっと易しくてこれと似た問題は考えられないか。』という言葉がある[1]。この考え方をベースに、元問題に解き方が包含されている問題を単純な問題、逆に元問題の解き方をすべて必要とした上で α が必要な問題を複雑な問題としている。本研究では単純/複雑関係を扱い、問題間の比較説明が可能となるような支援を行う。

2.2. 単純化の定義

先行研究では、力学の問題を「状況」と「解法」で定義している[2]。「状況」は質量 m や角度 θ などの属性と、属性を結ぶ数量関係(重力 $G=mg$ など)を持っている。「解法」は問題文中の属性を「状況」の持つ数量関係で繋ぎあわせることで定義される。これは解法構造と呼ばれ、木構造で表すことが出来る[3]。この「状況」「解法」それぞれを操作することで単純な問題を生成できる。

2.3. 状況の単純化

「状況の単純化」とは、問題の状況が持つ摩擦や張力といった属性をデフォルト化することで問題を単純にすることであり、特殊化と呼んでいる。デフォルト化とは、摩擦係数を 0 にするなど、属性の値を特定の値にすることである。特殊化は属性のデフォルト化を行っただけなので、解法に用いる数量関係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、特殊化された問題は元の問題に包含されていると言える。

2.4. 解法の単純化

「解法の単純化」とは、元の問題を解く過程で必要となる中間属性を求めさせるようにすることであり、部分化と呼んでいる。部分化は解法構造の一部を抜き出すことで、例えば加速度を求める問題を、加速度を求めるために必要な合力を求める問題に変更するといった操作を指す。部分化された問題も元の問題に包含されていると言える。

3. 差分説明演習システム

3.1. システムの概要

現在取り組んでいる問題と、他の問題に関連付け

て比較検討できることは、複数の問題を扱う学習方略の基礎的なスキルである。しかし一般的に問題とは解くものであり、問題間の関係や比較そのものが学習対象となることは少ない。また従来のシステムでも、能力そのものを習得させることを目的とはしていなかった。そこで本研究では、まず1ステップとして単純・複雑関係で結びついた問題同士において、比較活動を可能とする環境を整え、経験学習として支援を行う課題設計を行った。

問題比較の活動をプロセスごとに、(1) 問題同士が単体としてだけでなく単純・複雑の関係によって結びついていることを認識する。(2) 問題に含まれる要素やパラメータレベルの差異を確認する。(3) 問題解決レベルの差異を見つけて表現する。(4) 結果や問題の成否から自身の活動を評価、応用する。以上の4つとして捉えた時、本研究では特に(1)～

(3)の段階を可視化・演習化して学ばせることで問題間の比較の支援を行う。(1)については、元問題、および派生問題群がどのように関わりあっているかを示す問題間構造の可視化、(2)(3)については、各問題ペアにおける比較活動を通し、差分を抽出、表現する説明演習を設計する。(4)については応用させる段階であり、今回は詳細には行わないが、学習者が比較説明を容易に行えるようになった場合、今後の展開として拡張が見込まれる。以上をタブレット上で動作するアプリケーションとして開発した。

3.2. 問題間構造図の可視化

単純化の定義より、単純な問題はそれぞれ構造に従って派生生成される。状況の単純化ではマイクロワールドグラフの一部、解法の単純化では解法構造に基づいている。この構造からは複数の問題が個々に存在するだけでなく、段階的な関係付けにより結びついていることを認識できる。本システムでは問題選択画面において、問題間の関係性を表した構造図の可視化を行った。状況の単純化で提示される構造図の例を図1に示す。各問題間にブロックを表示しており、タップすることで上下にリンクした問題同士の比較説明演習に移る。後述する説明演習に正解すると、始めは隠されていた主な状況要素が表示される。学習者は演習によってブロックを埋め、構造図を見ることで、初期問題がどのように単純化されているか、また問題から状況要素を省略・追加することで新たな問題が構成されることを確認できる。解法の単純化においても、解法構造を利用した問題間構造図を提示する。

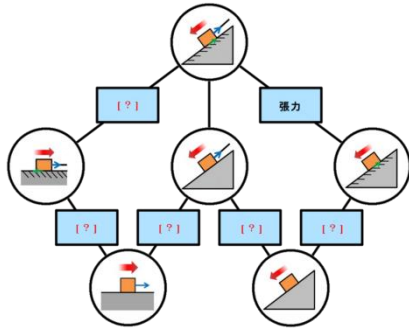


図1 「状況の単純化」による問題間構造図

3.3. 差分説明演習

次に問題同士の関係がどのような内容になっているかについて具体的な比較を行う。その手法として選択形式の説明演習を用いている。説明演習とは、事物や発生した変化について学習者に記述させることでその理解を深める手法であり、ここでは単純化によって変化した問題間にある差分を説明させることで、その理解を促すことを狙いとしている。説明演習は状況・解法の単純化ともに、求める対象や問題状況の変化である表層の変化、問題の解決過程の変化である深層の変化の二段階の差分について説明させる。説明させる内容の詳細を以下に示す。

3.3.1. 状況の単純化における説明演習

摩擦を必要な要素として持つ問題に対して、特殊化を行うと、元問題から摩擦が省略された単純な問題になる。このような問題の持つ要素に対する変化を表層的变化と呼び、説明演習の一段階目として、元問題に含まれる要素の一覧からどの要素が変化・省略されたかを選択させる。また摩擦が省略されたことにより、問題解決にも変化が生じ、動摩擦力や合力を求める計算に変化・省略が発生する。このような解決過程における変化を深層的变化と呼び、二段階目の差分として学習者に説明させる。

3.3.2. 解法の単純化における説明演習

加速度を求める問題に対して、部分化を行うと、合力を求める単純な問題になる。解法単純化における表層的变化は出力属性の変化であるため、説明演習の一段階目ではそれぞれの求める対象を選択させる。また解法単純化においても、表層的变化により解決過程への省略・変化が起こるため、二段階目として同様に深層的变化についての説明を行わせる。

3.4. 予備実験

3.4.1. 目的・手順

初等力学を習得済みである工学系の大学生、および大学院生計 16 名を対象に予備的な実験的利用を行った。手順は、事前テスト (10 分)、システム演習 (20 分)、事後テスト (10 分) である。またシス

テム演習時に関するアンケートを行った。評価テストは初等力学の単純な問題を作るかどうかを測る内容である。この実験的利用の目的は、本研究で開発されたシステムが扱えるものであるかの検証である。

3.4.2. 結果・考察

システムログから被験者の利用状況を表 1、表 2 に示す。まず表層変化の説明演習について、各演習の取り組み率と正解率が同じ割合であることから、取り組みさえすれば正解できていたことがわかる。また 1 問あたり平均 2 回程度の試行回数であったことから、問題を見比べ表層の要素を答える演習は困難過ぎる課題ではなかったことが確認できた。深層変化の説明についても取り組んだ問題において、ある程度の正解率を見ることが出来た。選択肢の全パターンは 1 問あたり平均 7943 通りであったのに対し、被験者が行った試行回数は平均 5.66 回と非常に少ない値のため、被験者が無作為に選択を繰り返しているのではなく、考えを持った上で回答していると言える。状況・解法モード共に、取り組んだ問題に対しての正解率はほぼ同様であるため、片方の演習が困難であった訳では無いことも確認できた。

両テストの結果として、システム前後において点数の有意な上昇を確認することができた。このことから、本システムを用いた演習が問題単純化に関する学習効果を得られるものだったことが確認できた。またアンケートの結果からも、問題間構造図の妥当性や、説明演習の可用性など、概ねの項目に対して肯定的な意見を得られた。

深層変化の説明についてさらに分析し、間違いのループに陥り正解にたどり着けなかった被験者にどのような特徴があるのかを調べた。その結果、元問題の持つ解き方の中からどれが変化したかを選択する被験者と、解き方を意識せず間違い続ける被験者に分類することができた。比較対象である解決過程に無いような式を選び続ける人は、適切な比較活動が行えていない場合が考えられる。そこで被験者が元問題の解法に用いる式の中からのみ選択し回答した頻度を 1 つの指標とし、解法内選択率として測定したところ、解法内選択率が高い人ほど正解率も高いという相関が有意に示された。またその内で何度回答したかは関係しないことも確認できた。

以上の結果から、開発したシステムが実施可能なものであることが示唆された。また被験者の思考活動の質を解法内選択率という観点から定量化したことにより、問題の解決過程についての認識を支援するという課題点も発見された。

表 1 システム演習状況（表層変化の説明）

	全体	状況	解法
取り組み率	67.22%	85.71%	41.33%
正解率	67.22%	85.71%	41.33%
1問あたり試行回数	2.12	2.20	1.49
総試行回数	16.60	13.47	3.13

表 2 システム演習状況（深層変化の説明）

	全体	状況	解法
取り組み率	65.00%	84.76%	40.00%
正解率	49.44%	62.86%	30.67%
1問あたり試行回数	5.66	6.13	3.30
総試行回数	40.40	35.07	2.67
解法内選択率	30.46%	29.78%	57.32%

4. 実践的利用

4.1. フィードバック機能

前述の予備利用の結果を踏まえて、深層変化の説明が適切に行えていない学習者に対する支援としてフィードバック機能を追加した。正誤判定とともにシステムが回答内容を検査し、元問題の解法に用いない式が含まれていた場合、問題の解決過程に注目するようフィードバックを返す。これにより学習者の思考活動を改善し、効果的な演習が行える事を期待した。

4.2. 高等専門学校での実践的利用

4.2.1. 目的・手順

初等力学を習得済みの高等専門学校生計 70 名を対象に実践的利用を行った。目的は、本システムが問題の比較説明に効果があるかの検証と、フィードバック機能について評価することである。

手順は、事前調査としてメタ認知調査[4](5分)、力学の理解度調査(FCI 調査)[5](20分)、当日にはイントロダクション(5分)、事前テスト(15分)、システム操作説明(5分)、システム利用(状況単純化モード)(25分)、システム利用(解法単純化モード)(20分)、システム演習時に関するアンケート(5分)、事後テスト(15分)を行った。また、約 1 ヶ月後に遅延テストを実施した。評価テストは前回から内容を変更し、問題間の差分について説明させる課題を課した。問題の単純化習得支援システム

本研究では例題ベースに則り、問題単純化の手順と単純化による問題の変化について学ばせ、その後、単純化演習と、行った単純化に対する自己説明を行わせることで、問題の単純化を習得させるシステムを設計・開発した。

4.2.2. テスト結果の分析

データに不備があった被験者を除く、64 名を有効データとした。

各テストの結果を図 2 に示す。平均値に差があるかを検定するため、分散分析および Shaffer の多重比較検定を行ったところ、事前事後間で 1% 有意 ($p < 0.001$)、事前・遅延間で 5% 有意 ($p = 0.021$) の差が得られ、事後遅延間では差は見られなかった ($p = 0.387$)。この結果から、本システムを利用することで問題の比較説明に学習効果があること、さらに遅延テストでの点数維持から、一時的な記憶ではなく考え方に作用するものであったことが確認できた。

また、テストにおける表層の差異、深層の差異による得点率の内訳を図 3 に示す。システム利用以前では、問題間の差異について説明しようとする時、見た目から判断できる要素については比較的容易に答えられるものの、解決過程がどのように変化するかはうまく答えられない様子が見られる。しかし本システム演習によって問題比較の経験を行うことで、問題の解決過程についても正確な説明ができるようになったと考えられる。

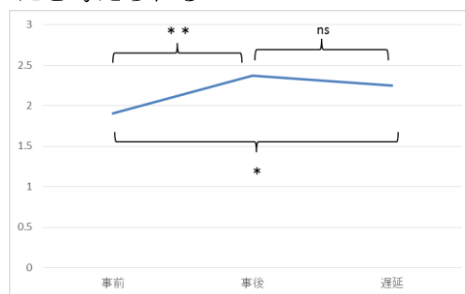


図 2 評価テストの結果

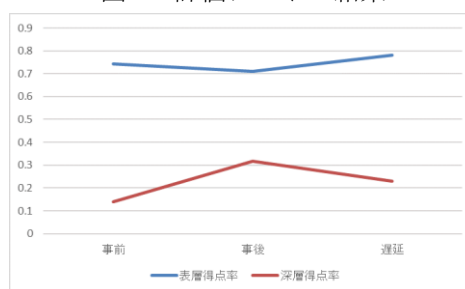


図 3 評価テストの得点率の内訳

4.2.3. 演習活動の分析

システム演習について、深層変化の説明演習の利用状況を表 3 に示す。状況・解法ともに多くの問題へ取り込まれていたことが確認できる。今回実装したフィードバック機能は、演習中うまく考えることが出来ていない学習者に方向を示すものであるため、回答の選び方に変化が見られると思われる。そこでシステム全体の解法内選択率について、予備利用時と比べると 30.46% から 38.28% への上昇が見られた。これについてウィルコクソンの順位和検定を行った

ところ 5%有意($p=0.045$)であることを確認できた。このことから、フィードバック機能が演習中の思考活動の改善に効果を持つものであったことを確認できた。

表 3 システム演習状況 (深層変化の説明)

	全体	状況	解法
取り組み率	88.67%	86.61%	91.56%
正解率	77.86%	73.44%	84.06%
1問あたり試行回数	8.63	8.70	8.93
総試行回数	87.38	49.78	37.59
解法内選択率	38.28%	32.75%	58.61%

5. 機能拡張と二度目の実践的利用

5.1. 効果の向上を目的とした機能の拡張

一度目の実践利用により、開発されたシステムが問題の比較説明に効果があることが示された。同時に、評価テストにおける深層変化の得点率や、システム演習中の良い思考活動の割合には、未だ向上の余地が見受けられた。そこでシステムの機能を拡張することで、深層変化の説明についてさらに効果的な演習を試みる。第3章で述べた問題比較の思考プロセスのうち、深層変化に相当するのは(3)問題解決レベルの差異を見つけて表現する、である。これをさらに段階的に、(3-A)各問題の解決過程に注目する、(3-B)各解決過程について思考、または書き表す、(3-C)2つの解決過程を見比べ差分を抽出する、以上のステップに分割した。(3-A)に関しては追加実装したフィードバック機能が役割を担う範囲である。そのため2ステップについて、解決過程の組み立て、可視化による機会を与えることで支援を図った。具体的には、(3-B)について解法組み立て演習、(3-C)について振り返り機能を設計・開発しシステムに追加実装した。以下にその内容を示す。

5.2. 解法組み立て演習

問題間の深層変化を比較する際、各問題の解決過程について考えることが求められる。解決過程をどのように表せばよいか分からない学習者に対しては、ある問題について解き方を表現する演習を行うことで支援が可能と考えられる。そこでシステムの初期問題について、初期問題の解決過程が持っている数量関係ごとに、導出のため必要な物理量を選択形式で答えさせる演習を開発した。提示する画面の例を図4に示す。学習者は、通常問題を解くときに用いる知識を適用し、質問を解き進めると同時に、問題全体の解決過程が徐々に組み立てられる様子を確認する。この演習を通して、後の差分比較演習におい

ても解決過程を表現可能となり、適切な比較が行えるようになることを期待した。

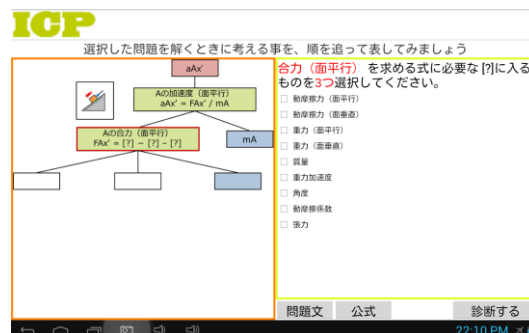


図 4 解法組み立て演習の画面例

5.3. 振り返り機能

学習者は説明演習に取り組むことで、問題差分を抽出できるようになると期待できる。しかし説明演習に正解した場合でも、なぜその回答が正解になるかを納得できない場合、効果的な学習とはならない可能性が残る。経験学習モデルの観点からも、具体的経験だけでなくその後の内省的観察が重要であることが指摘されている[6]。そのため学習者が行った正答の妥当性を確認できることを目的に振り返り機能を開発した。説明演習に正答した後、各問題の解法構造を並べ差分を明示する。この構造については、前節の演習より自ら組み立てたものと同様の表現であるため、十分理解できるものと考えられる。

5.4. 二度目の高等専門学校での実践利用

5.4.1. 目的・方法

初等力学を習得済みの高等専門学校2クラス計72名を対象に実践的利用を行った。初めて利用を行うクラスが35名、約1年前に第4章のシステムを利用した被験者が含まれるクラスが37名である。ここでは特に新規にシステムを行ったクラスの結果について考察する。本実践の目的は、システムが問題の比較説明に効果を持つことの再検証、効果の向上、および新機能について評価することである。

手順は、事前調査としてメタ認知調査(5分)、力学の理解度調査(FCI調査)(20分)、当日にはイントロダクション(5分)、事前テスト(10分)、システム操作説明(5分)、システム利用(状況単純化モード)(30分)、システム利用(解法単純化モード)(25分)、システム演習時に関するアンケート(5分)、事後テスト(10分)を行った。

5.4.2. テスト結果の分析

各テスト結果を前年利用の結果とともに図5に示す。システム利用前後でスコアの上昇が見られ、ウェルチの検定を行ったところ1%有意な差であった

($p < 0.001$). 前年の結果と比べるため、分散分析および下位検定を行ったところ、今回のクラスは事前の段階では有意傾向で点数が低い群であったが、事後では差が無くなるほど上昇していることを確認できた。学習効果を Cohen's d の効果量で測定したところ、前年が $d=0.41$ 効果量小であったのに対し、今回の結果は $d=0.54$ 効果量中であった。これらより、システムが問題の比較説明に効果を持つことを再確認し、前年よりも高い学習効果をもたらすものである可能性が示唆された。

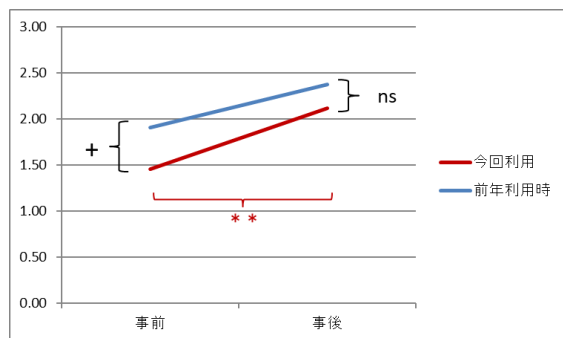


図5 評価テストの結果および前年利用との比較

5.4.3. 演習活動の分析

解法組み立て演習について、用意した演習全てにおいて100%に近い完答を得ることができた。1回の質問につき2回程度の回答で正解できており、当初期待していた通り、解法組み立て演習は被験者にとって困難すぎる課題ではなかったことが確認できた。

システムの利用状況を表4に示す。機能の追加によって、演習中スムーズな思考活動を促すことが出来たかを調べるため、解法内選択率の項目を見ると、上昇が見られた。この結果は状況モードにおいて顕著であり、32.75%から41.32%への上昇および1%有意差($p=0.004$)が確認できた。推移を図6に示す。前年利用時点では状況モードの解法内選択率32.75%に対し、解法モードで58.61%だったことから、正答になかなかたどりつけない回答を繰り返す被験者は状況モードでよく発生し、そのような被験者に対して今回実装した機能が支援になったと想定される。

以上の結果から、学習効果に加え、演習中の思考活動の改善を促す効果を確認できた。従って、改良したシステムが有効に機能したと考えられる。

表4 新規クラス演習状況(深層変化の説明)

	全体	状況	解法
取り組み率	90.95%	87.76%	95.43%
正解率	81.67%	73.47%	93.14%
1問あたり試行回数	7.86	6.66	9.56
総試行回数	84.60	41.00	43.60
解法内選択率	42.81%	41.32%	55.50%

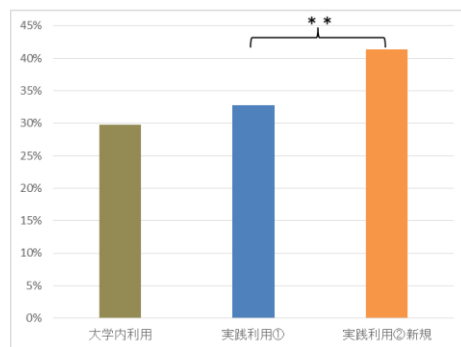


図6 状況モードでの解法内選択率の推移

6. まとめと今後の課題

問題を個々に考えるだけでなく、問題同士の関係性から適切に比較・検討できることは様々な学習方略の基礎となる重要なスキルである。本研究では学習者が経験可能な環境を整備するべく、初等力学の単純・複雑関係において、問題の关系的理解を指向した問題間比較の学習課題を設計・開発した。大学内利用、および二度に渡る高等専門学校における実践的利用を通して、システムが問題の比較説明を支援するものであることが確認できた。また機能の追加を通して、演習中の思考活動の改善に対する効果が示唆された。今後の予定としては、システムの補助無しに解決過程の表現を可能とさせる機能の設計、抽出可能となった問題間の差分を応用した発展的な演習などが挙げられる。

参考文献

- [1] George Polya, “いかにして問題をとくか” 柿内賢信訳, 丸善, (1954)
- [2] 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 卷 6 号 A, pp.391-400(2012)
- [3] 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)
- [4] 清水紀宏. "数学的問題解決における方略的能力に関する研究: 問題解決能力とメタ認知能力の関連の実証的検討を中心として (8. メタ認知, 論文発表の部)." 数学教育論文発表会論文集 29 (1996): 259-264
- [5] 石本美智, 植松晴子, 塚本浩司, 新田英雄, 覧具博義: 力と運動についての概念調査, pp.1-16(2011)
- [6] David A. Kolb. Experience as the Source of Learning and Development, Prentice Hall(1983)