

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20980

研究課題名(和文) 論述を伴う中学校数学科授業におけるリアルタイム教育支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a Real-time Education Support System for Mathematical Lessons with Logical Explanation in Junior-high Schools

研究代表者

平井 佑樹 (HIRAI, Yuki)

信州大学・学術研究院総合人間科学系・講師

研究者番号：80640945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、数学科授業における生徒の論述問題解答状況から生徒の支援必要度をリアルタイムに推定するシステムを開発し、教師/生徒が効率よく指導/学習できるようにすることを目的とした。

1年目では授業時間内に証明問題解答支援システムを使うことの有効性を検証し、証明を結論から考える「後ろ向き推論」が有効であることを明らかにした。また、生徒が支援を必要とする場面をいくつか明らかにした。2年目では大学生のべ60名を対象としてプロトタイプシステムを評価し、問題点や改善点を洗い出した。また、生徒がシステム利用中に考えていることを表出させる方式を検討し、それを本課題で開発するシステムに組み込む方法を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have developed a real-time system that estimates the necessity of support in their solving of mathematical proof problems. Then, we expect that students/teachers can study/teach methods of those problem-solving effectively. In the first year, we have verified the efficacy of using a system that supports students' proof-problem solving in mathematics lessons. Then, we identified the efficacy of backward-chaining, which starts with the given conclusion and generates pre-conditions that are required to be true in order for the conclusion to follow. In addition, we also clarified several situations where teachers should support students. In the second year, we have conducted an evaluation experiment using a prototype system with 60 undergraduates and found issues which we should address. On the other hand, we have examined the revelation method of students' thought in their system using and considered a design of our real-time system incorporated the method.

研究分野：教育工学

キーワード：教育支援システム 証明問題 トリアージ

## 1. 研究開始当初の背景

2014年度現在、日本の中学校の生徒は、三角形合同証明のような論述を必要とする問題解決手法を初めて学習する。三角形合同証明を例とすると、三角形の「合同」という概念自体は小学校高学年で学習する。しかし、それは合同という言葉の意味や、合同な三角形の組に成り立つ性質の直感的な理解に過ぎず、演繹的に合同を証明する作業は、中学校に入って学習する。中学校で学ぶ、このような論述につながる学習内容として、生徒は小学校在学中から自分の考えを他者に「説明する」という活動を行っている。しかし、説明に具体的根拠を付け加えて論述する活動は挑戦的な課題の1つであり、簡単に達成できる課題ではない[引用文献]。

文部科学省が毎年実施している全国学力・学習状況調査の報告書(以下、調査報告書)によると、演繹的な証明に係る問題の正答率は、他の問題の正答率と比較すると、低い傾向にあることが伺える。例えば、文部科学省国立教育政策研究所(2012)によると、帰納的に正しいと予想できる命題を証明する問題(2008年度出題)の正答率は49.2%であり、解答欄が空欄であることを示す無回答率は36.1%であった。三角形合同証明問題(2010年度出題)の正答率も48.2%であり、文部科学省は事柄が成り立つ理由を説明することに課題があるとしている。この傾向は2014年度調査においても変わっていない。

これを受け、文部科学省は調査報告書において、証明の方針を立てるためには、「結論を示すためには何が分かれば良いか」、「仮定から言えることは何か」、「これらを結びつけるにはあと何が言えれば良いか」について考える場面を設定することが大切であると提言している。また、授業時間内に教師と生徒間でのやり取りで、こうした活動を取り上げ、育むことを想定している。

しかし、授業時間内のやり取りでは、時間制限があり、すべての生徒が教師とのやり取りに参加できるとは限らない。そのため、授業中にそのやり取りをうまくできなかった生徒は、授業外などの復習時間帯にこうした解決方法の学習に取り組むことができれば良いと考えられる。この支援環境は研究代表者らの提案を含めて、いくつか提案されている[引用文献]。

研究代表者らは科研費助成事業(課題番号25870207)の一環として、文部科学省が提言した証明方針に従った、授業外で利用することを想定した、数学の証明問題解答支援システム開発を行った。生徒がきちんと証明する点でシステムが有効であることを示した[引用文献]。ただし、学習内容をきちんと理解していない生徒が授業外で証明問題解答支援システムを使っても効率よく学習できないことも明らかになった。そこで研究代表者は、そのような生徒は授業時間内に教師の支援を受けながら解答支援システムを用

いることで、より効率よく学習できる(仮説1)と考えた。しかし、教師がある生徒の支援に集中していると、授業時間制限の理由から、その教師が他の支援すべき生徒を見逃す可能性がある。そのため、授業中の生徒の解答状況からシステムを上手く使えていない生徒を推定し、授業時間内に優先的に支援すべき生徒をリアルタイムに教師に伝えることで、教師は効率よく指導できる。また、生徒も効率よく学習できる(仮説2)と考え、本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

研究代表者らの成果を含むこれまでの研究成果を踏まえ、本研究では、論述を伴う中学校数学科授業におけるリアルタイム教育支援システムを開発し、評価することを目的とした。これを受け、研究期間内に次の(1)から(3)の3点を実施することを目標とした。

### (1) 仮説1の検証(以下、研究目標1)

中学校等において、各生徒がコンピュータを利用できる教室環境を設営して仮説1の検証を行う。授業時間内に解答支援システムを利用した生徒が、効率よく学習できるかどうかを確認し、その有効性を明らかにする。仮説1が成り立たない場合も考えられる。その場合、次の(2)で教育支援システムを開発するために、課題点を洗い出す。

### (2) 生徒の解答支援システム利用時における支援必要度の基準設定と教育支援システムの開発(以下、研究目標2)

仮説1の検証時に、生徒が支援を必要としていたかどうかを確かめるために、アンケート調査を行い、それを解答支援システムを利用した生徒の学習履歴と照らし合わせて分析を行い、支援必要度の基準を設定する。支援が必要な場合とは、例えば、「証明の進め方が分からず、手が止まってしまう状態」、「同じ箇所を繰り返し記述している状態」、「ある記述段階に多くの時間がかかる状態」等が考えられる[引用文献]。このように、システムが自動的に測定できる指標を設定し、測定した状態を判断基準として、システムが自動的に支援必要度を推定できるようにする。

その後、生徒の支援必要度を自動的に推定し、それを教師に知らせることができると教育支援システムを開発する。支援必要度を教師に知らせる際、教師が生徒の支援必要度を短時間で把握できるように可視化を行う。また、座席表のようなインタフェースに各生徒の気づきを入力・活用することが円滑な授業運営に有効であることが、研究代表者らのこれまでの研究[引用文献]で明らかになっているため、その機能も組み込む。

### (3) 仮説2の検証(以下、研究目標3)

支援必要度を可視化したものを教師に提

示することで、授業時間内に教師が効率よく指導できたか、また、生徒が効率よく学習できたかどうかを測定する。支援必要度を提示しない場合（仮説1の検証を行うための環境がこれにあたる）と比較し、例えば、座席表のようなインタフェースで緊急と示された座席に座る生徒を優先的に支援できているかどうかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

前述の研究目的および目標を踏まえ、次の(1)から(4)を実施した。

#### (1) 授業時間内に証明問題解答支援システムを使うことの有効性検証

研究目標1に関連して、授業時間内に証明問題解答支援システムを使うことの有効性を検証した。既存研究[引用文献]で開発されたシステムを用いた実験で得られた試験成績データやアンケート結果を詳細に分析した。

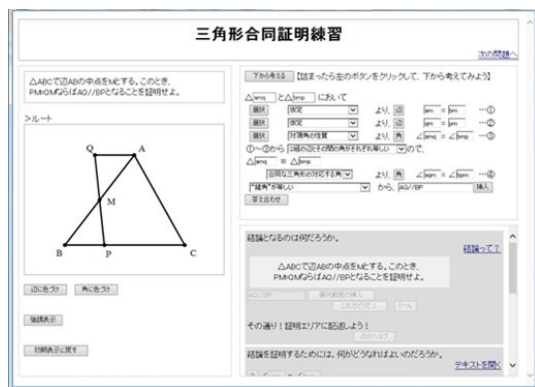


図1 証明問題解答支援システム概観[引用文献]

図1はそのシステムの概観である。システムの画面は問題文エリア、問題図エリア、解答エリア、ヒントエリア、各種機能を利用するためのボタンがあるファンクションエリアの5つで構成されている。問題図エリアで示された図形では、辺に対する色付けや角に対するマークができるようになっている。生徒は色付けやマーク機能を利用しながら解答エリアで解答することができ、テキストボックスやプルダウンメニューなどで構成された解答フォームに記入することで与えられた問題に解答する。

生徒は必要に応じてシステムから問題解答のためのヒントを得ることができ、与えられたヒントはヒントエリアで表示される。ヒントは2つのパターンに従って与えられる。その1つは「前向き推論」に従って与えられるヒントである。前向き推論は、与えられた仮定をもとに結論に向かって順に証明を組み立てる手法である。もう1つのパターンは「後ろ向き推論」に従って与えられるヒントである。後ろ向き推論は与えられた結論をもとに仮定に向かって順に証明を組み立てる

方法である。例えば、「これを証明するためには何が証明できれば良いか」を考えることが後ろ向き推論にあたる。

既存研究では、このシステムの評価を公立中学校2年生の36名を対象として行い、後ろ向き推論が有効か否かを検討した。本研究では、実験結果を詳細に分析することにより、授業時間内に証明問題解答支援システムを利用した生徒が、効率よく学習できるか否かを検証した。

#### (2) 支援を必要とする場面の特定

研究目標2に関連して、本研究で実施する教育支援システムの開発に向けて、授業を受けている生徒がシステム利用中のどの場面で支援を必要としているかについて検討した。前述の既存研究で実施された実験の結果や、学習支援システムを用いた実験[学会発表 - ]の結果を総合的に分析した。

#### (3) プロトタイプシステムの評価

研究目標2に関連して、生徒の支援必要度を自動的に推定し、それを教師に知らせることができる教育支援システムのプロトタイプを開発した。本研究では、授業中にシステムを利用することを想定しているため、教師に支援必要度をシステムから知らせる場合、できるだけ授業の進行を阻害しないようにする必要がある。そこで、本研究では、支援必要度の伝達について、トリアージを参考とした。

トリアージは、本来医療現場で用いられるものである。災害時などで傷病者が多数出る場合に、限られた数の医師が適切に処置できるように、傷病者を色によって区分する。具体的には、赤色、黄色、緑色、黒色などで傷病者を区別し、優先的に治療すべき者を迅速かつ効率よく発見できるようになっている。教育現場では、教室において、限られた教師が限られた時間で効率よく生徒を指導できることが望ましい。そのため、トリアージの色を生徒の支援必要度と考えれば、医療現場におけるトリアージを応用することが可能である。

図2はプロトタイプシステムで利用した支援必要度のカテゴリである。支援の必要がない欠席状態を除けば、危険状態にある生徒が優先的に支援されるべき状況である。そこから、最良状態に向かって優先順位が下がる。また、生徒の状況は授業中に変化する可能性があるため、システムの開発では、この可能性も考慮した。

| 最良 | 良好 | 注意 | 危険 | 欠席 |
|----|----|----|----|----|
|    |    |    |    |    |

図2 プロトタイプシステムで利用した支援必要度



図3 プロトタイプシステムにおける教師用モニター

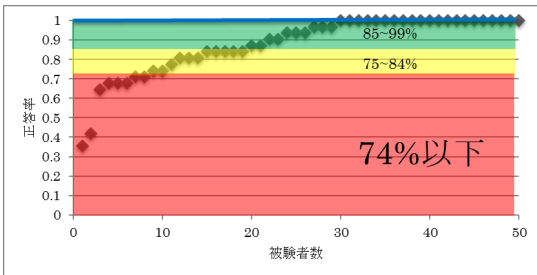


図4 予備調査における正答率

図3はプロトタイプシステムにおける教師用のモニター例である。システムはクライアントサーバシステムであり、C++言語で実装した。本プロトタイプシステムを用いた評価実験（後述）では、被験者である大学生を生徒と見立て、彼らが大学入試センター試験（以下、センター試験）で出題された問題を演習問題として解く状況を設定した。これにより、システムの動作確認をした。

次に、支援必要度の状態遷移について説明する。本プロトタイプでは、「システムにおいてそれまで解答した内容に誤りがある」あるいは「システムにおいて一定時間以上操作がない」場合に、教師の支援が必要であるとした。そのため、(A) どの程度誤答がある場合、もしくは、(B) どの程度操作がない場合に、状態を変化させるかについて予備調査を行った。

上記(A)については、センター試験を受験したことのある50名を対象として、センター試験で出題された問題への解答を依頼し、各人の正答率を調査した（図4）。その結果、50名中21名が全問正解、10名が85%以上の得点、11名が75%以上の得点、8名が75%未満の得点であった。この結果から、ある時点において、教室全体の生徒数のうち、正答率の高いほうから上位40%を最良状態、次の20%を良好状態、その次の20%を注意状態、最後の20%を危険状態として状態を変化させるようにした。これにより、例えば、危険状態である生徒が多すぎて教師が即座に対応できない状況を防いだ。

上記(B)については、上記(A)で状態が定められた時点から一定時間解答が進まなかった場合、上記(A)で定めた状態から1段階、危険方向へ状態を悪化させるようにした。一定時間については、教師により設定できるよ

うにした。

研究目標3に関連して、このプロトタイプシステムを用いて、評価実験を行った。評価は10名の被験者に対して行い、うち5名は教師からの支援があり、もう5名は教師からの支援がない状況でシステムを利用した。

#### (4) リアルタイム教育支援システムの開発に向けた検討

研究目標3に関連して、支援必要度を決定する際の指標：「システムにおいて一定時間以上操作がない」について、この状況は生徒が問題を解くことができない場合の他に、問題を解いている途中、つまり、解答は進んでいないものの紙に途中式を書くなどして考えている最中である場合があることが考えられた。そのため、リアルタイム教育支援システムを開発するためには、生徒が解答を考案中である状況も把握できる必要があることが分かった。

そのため、ある与えられた課題に対して、システム利用者の考えを収集することのできるシステム KIfU[学会発表]を用いて、どのような考えを収集することができるのかについて調査し、本課題で開発するリアルタイム教育支援システムに組み込めるか否かについて検討した。

図5はKIfUのユーザインタフェースである。KIfUはソフトウェア開発におけるER(Entity-Relationship)モデリングのためのシステムである。図5(D)にER図が示されており、実体、属性、実体間の関連性、多重度などが示されている。図5(B)にはER図が完成するまでのイベントが1つずつ示されている。実体を追加する、属性を削除する、実体名を修正するなど、1つの操作が1つのイベントとして管理されている。図5(A)にある「前へ」あるいは「戻る」ボタンを押すことで、イベントの位置を指定することができ、そのイベントまでに対するER図が図5(D)に表示される。図5(C)では、各イベントに対してコメントを入力することができる。本研究ではこのスペースに「そのイベント時に考えていたこと」を利用者に記入させることで、利用者の考えを収集した。

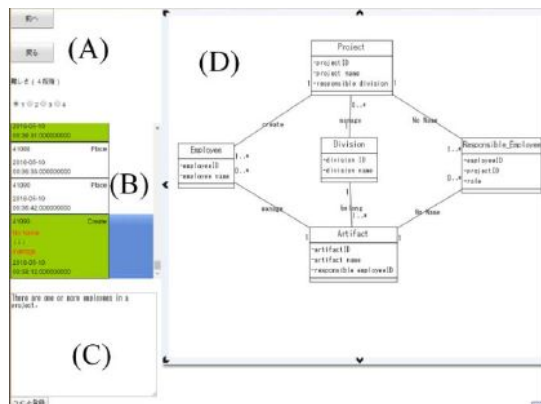


図5 KIfU[学会発表]



#### 4. 研究成果

上記研究の方法で述べた項目(1)から(4)のそれぞれについて研究成果を述べる。

##### (1) 授業時間内に証明問題解答支援システムを使うことの有効性検証

授業時間内に証明問題解答支援システムを利用した生徒が、効率よく学習できるか否かについて検証した結果、システム利用直後に実施した事後テストにおいて満点を取った平均問題数が実験群のほうが多かったことから、開発システムが後ろ向き推論支援をすることが有効であった、実験群の生徒は後ろ向き推論ストラテジーを問題解決にうまく利用していた、生徒が前向き推論と後ろ向き推論を併用して使おうとすることが、問題解決につながったことを明らかにした。

この結果、前述の仮説1について、教師による支援ではなくシステムからの支援ではあるものの、授業時間内に支援を受けながら証明問題解答支援システムを用いることで、より効率よく学習できる手法があることを確認した。この結果は、授業時間外で証明問題解答支援システムの開発に活かされている[学会発表]。

##### (2) 支援を必要とする場面の特定

授業を受けている生徒がシステム利用中のどの場面で支援を必要としているかについて検討した結果、システムにおいて一定時間以上操作がない、システムにおいて同じ解答箇所を何度も修正する、システムにおいてそれまで解答した内容に誤りがある、教師のサポートが欲しいと感じている、の4つに相当する場合、支援を必要としている可能性が高いことが明らかになった。

##### (3) プロトタイプシステムの評価

プロトタイプシステム評価の結果、教師による支援があった5名の平均得点は31点中26.0点(標準偏差5.43)、支援がなかった5名の平均得点は22.6点(標準偏差5.94)であった。このことから、システムから提示された支援必要度が正しく機能していることを確認した。ただし、被験者が少ないため、仮説2の検証については、被験者を増やすなどして、さらに評価実験を重ねる必要がある。

##### (4) リアルタイム教育支援システムの開発に向けた検討

KIFUにおいて、システム利用中における利用者の考えを収集した結果、「実体を追加する必要がある」、「実体の名前を決める必要がある」など、操作内容に直接関わる考えが主として収集された。一方で、利用者の深い考え(例えば、この実体とこの実体の多重度は1対1だろうか、1対多だろうか)を多く収集することはできなかった。これは、考えを

文字として書き出すのは難しいことが原因であると考えられる。この結果から、本課題に開発するシステムにおいて、生徒の考えを表出させる機能を導入することは難しいと判断した。

プロトタイプシステムの評価においては一定の効果が得られたものの、リアルタイム教育支援システムの開発に至るまでには、多くの課題が残されている。今後の課題は次の2点である。

- 支援必要度の段階数に関する検討(4段階では粗い可能性がある)
- 支援必要度を推定するための指標の兼ね合いに関する検討(4指標すべてを使って支援必要度を推定する場合、重みづけをする必要があるかについて検討する必要がある)

予備実験等を行うことによって、これらを検討し、プロトタイプシステムを強化し、実際の教育現場における試用実験を行っていきたい。

謝辞 プロトタイプシステム実装およびその評価に協力いただいた、東京農工大学の近藤恵太氏、関川大地氏に感謝する。

#### <引用文献>

S. L. Senk, How well do students write geometry proofs?, *The Mathematics Teacher*, Vol. 78, pp. 448-456, 1985.

R. Onda, Y. Hirai, and K. Kaneko, Development of a learning system for proving the congruence of two triangles by supporting 'backward chaining', *Proceedings of the 3rd ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC)*, pp. 1-4, 2014.

N. Matsuda and K. VanLehn, Advanced geometry tutor: An intelligent tutor that teaches proof-writing with construction, *Proceedings of the 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED)*, pp. 443-450, 2005.

G. Dimakos, E. Nikolusdakis, S. Ferentinos, and E. Choustoulakis, Developing a proof-writing tool for novice lyceum geometry students, *The Teaching of Mathematics*, Vol. 10, pp. 87-106, 2007.

隠田亮介, 平井佑樹, 金子敬一, 「後ろ向き推論」支援による三角形合同証明問題のための学習システム, *情報処理学会研究報告(CE124-13)*, pp. 1-8, 2014.

T. Tanaka, K. Mori, H. Hashiura, A. Hazeyama, and S. Komiya, Support system for software development exercise that

utilizes activity data collected in real time from the development environment, Proceedings of the 37th IEEE Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), pp. 726-727, 2013.

木下彩, 今野翔太郎, 樫山淳雄, 平井佑樹, 児童・生徒に対する気づきの収集・共有・活用支援システムの開発, 情報処理学会研究報告(CE124-16), pp. 1-8, 2014.

木下彩, 今野翔太郎, 樫山淳雄, 平井佑樹: 児童・生徒に対する気づきの収集・共有・活用支援システムの提案, 情報処理学会情報教育シンポジウムシリーズ, Vol. 2013, No. 2, pp. 69-76, 2013.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計10件)

Takafumi Tanaka, Hiroaki Hashiura, Atsuo Hazeyama, Seiichi Komiya, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko, A Method for Collecting Learners' Thinking Process in ER Modeling Exercises and Its Application Experiment, The 13th IEEE International Conference on Advanced and Trusted Computing (ATC2016), 2016.07.18, Toulouse, France

Tatsuya Sanagi, Koji Otake, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko, Proposal of a Self-Learning System for Solving Problems of Two-Triangle Congruence Proof, The 5th ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC2016), 2016.5.27, Nakhon Pathon, Thailand

田中昂文, 橋浦弘明, 樫山淳雄, 古宮誠一, 平井佑樹, 金子敬一, ERモデリング演習における学習者の思考過程収集手法とその適用, 電子情報通信学会知能ソフトウェア工学(KBSE)研究会, 2016.05.26, 東京

Satjapong Meeklai, Kaede Obara, Kantaporn Sripraprutchai, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko, Development of a Programming Experience System by using Operation Cards, The ISERD 23rd International Conference on Education and E-Learning (ICEEL), 2016.03.15, Oxford, United Kingdom

Mohammad Nehal Hasnine, Yuki Hirai, Masatoshi Ishikawa, Haruko Miyakoda, Keiichi Kaneko, and Lyn Pembarton, An Image Recommender System that Suggests Appropriate Images in Creation of

Self-Learning Items for Abstract Nouns, The ISERD 23rd International Conference on Education and E-Learning (ICEEL), 2016.03.15, Oxford, United Kingdom

Yuki Hirai and Keiichi Kaneko, Ambient Conversation Support in Small Face-to-face Group Meetings, The 6th International Symposium on Information and Communication Technology (SoICT2015), 2015.12.03, Hue, Vietnam

Tatsuya Ishida, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko, A Learning System of Quadratic Functions based on Scaffolding Support, The 14th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET2015), 2015.06.11, Caparica, Lisbon, Portugal

Satjapong Meeklai, Yuki Hirai, Keiichi Kaneko, Le Vinh, Keisuke Kumagai, and Tetsuo Takahashi, CROCOTILE: A Learning Environment for C Language Learners with Tile Programming, The 4th ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC2015), 2015.5.23, Koganei, Tokyo, Japan

Mohammad Nehal Hasnine, Yuki Hirai, Masatoshi Ishikawa, Haruko Miyakoda, and Keiichi Kaneko, Learning Effects Investigation of an On-demand Vocabulary Learning Materials Creation System based on Appropriate Images, The 4th ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC2015), 2015.5.23, Koganei, Tokyo, Japan

Quang Thang Nguyen, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko, A System that Supports Vietnamese Learners to Study Japanese Language with Sino-Vietnamese, The 4th ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC2015), 2015.5.23, Koganei, Tokyo, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.yNkhPpLe.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

平井 佑樹 (HIRAI, Yuki)

信州大学・学術研究院総合人間科学系・講師

研究者番号: 80640945