

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21758

研究課題名（和文）ペン入力データと解答過程を考慮したハイブリッド型学習データ解析手法に関する研究

研究課題名（英文）Research on a hybrid learning data analysis method that takes into account pen-input data and the solution process

研究代表者

中村 泰之（Nakamura, Yasuyuki）

名古屋大学・教養教育院・教授

研究者番号：70273208

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：LMS上で得られた「解答結果」と、計算など思考過程の現れとしてのペン入力データとを融合したハイブリッド型の学習データ解析手法の確立を目的とした。数学の問題を取り上げ、解答だけでなく、タブレットに入力された、思考過程を記述した手書きノートから、筆記イベント時刻、消去イベントなどのログを収集し、そこから得られた、筆記速度、「消しゴム機能」の利用回数、筆記停滞時間などの特長料をもとに、機械学習を用いて解答に対する自信度を推定することを行った。また、筆記データから推測された問題の難易度と、項目反応理論により推定された問題の難易度との関連性の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オンラインテストの「解答」情報だけでなく、学習者がどのような誤答、準正答を経て正答に至ったかという解答過程、および、どのような計算過程、思考様式（筆記速度、書き直しなど）に基づき解答を得たかというペン入力データは相互に密接に関連しているはずである。両データを考慮したハイブリッド型の学習データ解析手法は確立されていなかったが、本研究課題により、機械学習を利用した、ペン入力データと解答過程データを連携させて分析する手法を提案することができ、特に手書きノートデータを活用した、今後の学習データ分析の方向性に一つの可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project was to establish a hybrid learning data analysis method that combines "answer results" obtained on an LMS and pen input data as a manifestation of thinking processes such as calculations. We took a math problem and collected logs of writing event times, erasure events, etc. from handwritten notes that describe the thinking process, which were input to a tablet, as well as the answers. The results were used to estimate the level of confidence in the answers to the questions using machine learning. In addition, we examined the relationship between the difficulty level of problems inferred from the writing data and the difficulty level of problems estimated by item response theory.

研究分野：教育工学

キーワード：数式自動採点システム 手書きノートデータ分析

### 1. 研究開始当初の背景

大学教育における数理・データサイエンス教育の重点化や、現実世界の問題との関わりの中で数理的な思考力を養う観点から、数学教育の重要性は今後も高まってくると考えられる。一方で、時間的、人材的な制限もある中で、幅広い数学教育を効率的に提供することが求められ、オンライン教育はその為の一つの解決策であると考えられる。オンライン教育を実施するための環境として学習管理システム(LMS)が多くの機関で導入され、その機能の一つであるオンラインテストを活用して、学習者の理解度の確認などが行われている。その際、蓄積された学習データを解析することにより、学習者の理解達成度や将来的な能力の評価を行う、ラーニング・アナリティクス(LA)が重要となる。

しかし、オンラインテストの学習データは立式、計算、検討などの思考過程を経て得られた「解答結果」であることに注意が必要である。一方で、学習者の視線入力データ、オンライン教材の操作データ、ペン入力データなど身体的なデータを用いて、学習者はどのように学習しているのか、つまり「思考過程」について解析を行う研究も注目されている。このアプローチにより、学習者の学習特性を知ることができる。

冒頭に言及した数理的な思考力が養われているかどうかを確認するには、解答結果だけでなく、その解答を得るまでの学習者の思考過程についても注視していく必要がある。そのためには、これまで独立に解析が行われてきた解答結果と解答に至るまでの思考過程とを融合した形で解析することが効果的であると考えられるが、現在のところそれに関する有効な方法論はまだ確立されていない。

### 2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえて、本研究ではオンラインテストを用いた数学教育に焦点を絞り、誤答、準正答、正答などの解答過程を含む結果としての解答データと、計算など思考過程の現れとしてのペン入力データとを融合した、ハイブリッド型の学習データ解析手法の確立を目的とする。この土台の上で、ハイブリッド型学習データ解析による学習者の数理的思考力の正確な評価を目指す。

### 3. 研究の方法

まず、数学用オンラインテストシステムとして、オープンソースのLMSの一つであるMoodle上で動作し、我々が日本語化を手がけ利用実績のある、STACK (System for Teaching and Assessment using a Computer Algebra Kernel) を活用して研究を進める。我々は、STACKで数学の問題に解答する際、解答だけでなく、デジタルペン入力によりタブレット上に思考過程を記述した手書きノートも併せて提出することのできる機能を、STACKの新しい「解答タイプ」プラグインとしてすでに実装済みである。この手書きノートデータから、筆記速度、消去回数、筆記停止時間など、有効な特徴量を特定し、解答データとともにレポートとして出力する仕組みをMoodleのプラグインとして構築する。その上で、解答データとペン入力データの特徴量との関係性の精査を行いながら、ハイブリッド型データ解析手法の指針を明確にする。

その上で、実際に授業で利用しながら、解答データ、ペン入力データ、DGS操作データの収集、蓄積を行う。これらのデータから、解答データとペン入力データとを融合し、学習者の数理的思考力を正確に評価する手法を確立する。その際に、実証実験を行うとともに、教師の経験に根ざした知識(経験知)や学習者へのインタビューを活用する。

### 4. 研究成果

#### (1) ペン入力データの分析と項目反応理論による分析(引用文献)

中村等は、解答だけでなく、計算過程を記したノートを提出し、問題や解答と関連付けて管理できる機能を開発しており、この機能を用いて、学生が数学の問題を解く際に、ノートをデジタルペンでタブレットに書き込んでもらった。図1はノートの例である。ノートの左上には、ノートの終わりを選択するボタン、すべてを消去するボタン、ペン、消しゴムのボタンがある。ペンストロークデータは、生徒が書いたペンのストロークを時系列で記録したもので、書き込み開始、書き込み中、消しゴム選択などのペンの状態、ペン先の座標、その状態の時刻が記録される。

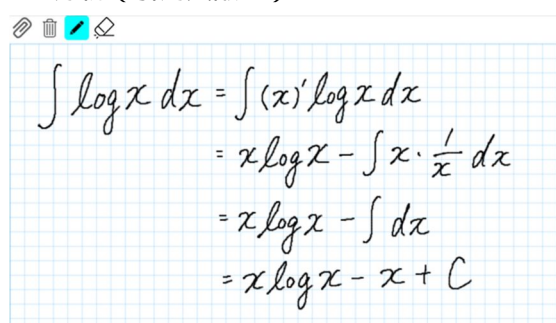


図1 手書きノートの例

このペンストロークデータを用いて、筆記速度と停滞点を可視化した。筆記速度が低いほど青

色、高いほど赤色で表示した。また、1ストロークを終えてから次のストロークを始めるまでに2秒以上経過している場合、停滞後のストロークを太字で表示した。

微分積分の問題6問を解答した3人の学生の解答データに対して、先程紹介した可視化手法を適用した。図2にその例を示すが、文字の色から、書くスピードを頻繁に変えていることがわかる。また、等号の1画目の太さも変化している。このことから、解き方を考えながら問題を解いていることが、スピードの変化が激しく、若干の停滞があることからわかる。その他、消しゴムの使用回数などから、6問のうち、第4、5、6問目が比較的難易度が高い問題であることが予想された。

$$\begin{aligned} \int \log x dx &= \int x' \log x dx \\ &= x \log x - \int x \cdot \frac{1}{x} dx \\ &= x \log x - \int dx \\ &= x \log x - x + C \end{aligned}$$

図2 ノートのログデータの可視化例

次に、このような推測された問題の難易度に対し、項目反応理論を用いて、難易度の推定を行い、手書きデータから推測された結果との類似性を検討した。今回は、STACKの採点が部分点を含んで行われるため、多段階の項目反応理論を用いた。その結果、図3のような項目反応曲線が得られ、第4、5、6問目が比較的難易度が高い問題であると予想されたことと概ね一致することが確認できた。

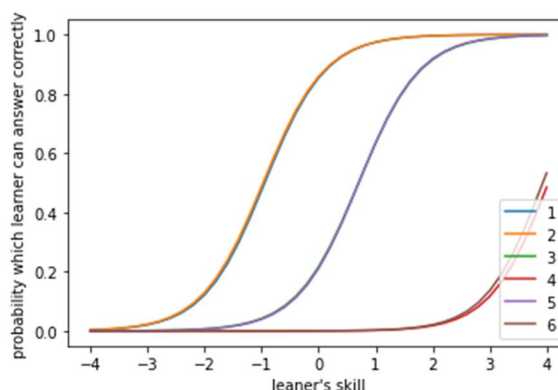


図3 項目反応理論によって得られた項目反応曲線

本研究では、タブレットに書かれた数学問題の解答過程から得られた筆跡データから、解答過程、筆記速度、停滞点を可視化し、学生の能力、問題の難易度を予測した。その結果を項目応答理論の結果と比較し、定性的には一致した結果を得た。しかし、データ数が少ないため、一般的な傾向として認定することは難しく、今後データ数を増やし、より詳細に検証する必要がある。

## (2) ペン入力データによる解答に対する自信度の推定 (引用文献)

計算過程を記したノートのデータを分析することにより、理解度を特定することにつながる、提出された解答に対する自信度を推定することを目的として研究を行った。タブレットPCとタッチペンを使用することで得られるノートの手書きデータから、例えば、学習者の筆記速度、停滞時間、消しゴムの使用回数などの特徴量をもとに、学習者の解答に対する自信度を推定することにより、学習者の弱点や問題の性質を知ることができるようになると思われる。例えば、正解した問題に対して自信がないと推定されたならば、復習するように学習者に促すことができるだろう。また、多くの学習者が自信があるにもかかわらず、不正解となっていた場合、その問題を解く際には注意すべき点があるといえるだろう。

本研究の目的を達成するために、徳島県内の公立高校において、実験を行いデータを収集した。実験では、数学IIIを学習している理系クラスの生徒39名を対象に、数学IIIの内容である微積分の問題6問(計算問題5問、文章題1問)を、学習管理システム(Learning Management System、LMS)の一つであるMoodleを利用して出題し、解答してもらった。その際、解答方法は多肢選択肢式とし、計算過程をデジタルペンをういてタブレットに記述するよう指示した。デジタルペンは、ペン先が細く詳細な計算がしやすいものを実験担当者側で準備し配布したが、タブレットは日頃から利用しているWindowsタブレットを用いることにより、できるだけ日常の学習環境と変わらない状況で実施することとした。また、ノートの提出は、中村、中原によって、Moodleの小テストのレポートタイププラグインとして開発されたノート提出機能を利用した。なお、暗算で解答できる問題に関しては、ノートに記述しなくてもよいこととした。そして、1問解答し終える度に、自分の解答に対して、「自信がある」、「部分的に自信がある」、「自信がない」、「あてずっぽう」の4つの選択肢から自信度を選択してもらった。ただし、「自信がない」と「あてずっぽう」のどちらかを選択している場合は、すべて「自信がない」とラベルづけすることとした。分析には、実験協力者39名の生徒のうち、28名のデータを用いた。残りの11名は、暗算では解くことが難しい問題についてもノートを提出できていない問題があったため、分析対象から除外した。28名のペンストロークデータのうち、一部にデータの欠損があったため、欠損部分は分析対象外とした。

ペンストロークデータから自信度を推定(分類)する際、データおよび関連情報から特徴量を定義する必要がある。その特徴量をもとに、解答者に選択してもらった自信度をラベルとして推

定する。本研究では、特徴量として以下に示す 10 種類のパラメータを使用した：1. 正誤結果、2. 消しゴムの使用回数、3. 全消去の使用回数、4. 途中保存の回数、5. 解答状況（「完答」、「正答の選択肢を選択しているがノートの解答は間違っている」、「誤答の選択肢を選択しているがノートの解答は正しい、または、積分問題において選択肢を微分することにより正答を導き出している（いずれも、計算が正しく行われている）」、「最後まで計算しているが途中で間違っている」、「解答途中で諦めている」、「図や与式だけを書いている、または、白紙」）、6. 平均筆記速度、7. 解答時間、8. 最大停滞時間、9. ペンおよび消しゴムの総移動距離、10. 停滞時間の割合。これらの特徴量から、機械学習（ランダムフォレスト）により「自信がある」、「部分的に自信がある」、「自信がない」のラベルの推定を行った。

モデルの性能評価には層化 5 分割交差検証を行い、評価指標には、正解率（accuracy）、適合率（precision）、再現率（recall）、F1 値（f1-score）、混同行列を用いた。適合率、再現率、F1 値は自信度ごとに算出されている。表 1 に正解率を、表 2 に自信度ごとの適合率、再現率、F1 値の平均値を示している。

表 1 各イテレーションの正解率

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均値
88%	74%	68%	79%	61%	74%

表 2 適合率、再現率、F1 値

自信度	適合率	再現率	F1 値
自信がある	79%	86%	81%
部分的に自信がある	40%	30%	34%
自信がない	84%	79%	80%

また、特徴量の重要度を図 4 に示す。分類する上で最も重要度が高かった特徴量は、解答時間であり、次いで、解答状況、停滞時間の割合であった。解答時間が長くなる理由として、瞬時に解答するのが困難な問題であった、難易度が高かった、解答方法が分からず停滞したなどが考えられる。ゆえに、確実に正答している自信がない確率が高く、重要度が高くなったと考えられる。一方で、正誤結果の重要度が低いことがわかった。自信がある場合に正答であり、自信がない場合に誤答であるのが、自信度と正誤結果が対応している状態である。この場合であれば、正誤結果の重要度が高くなっただろう。ゆえに、今回、正誤結果の重要度が低くなった理由として、自信があるにもかかわらず誤答であった、または、正答であったが、問題の難易度が高く自信が持てなかったなどが推測される。

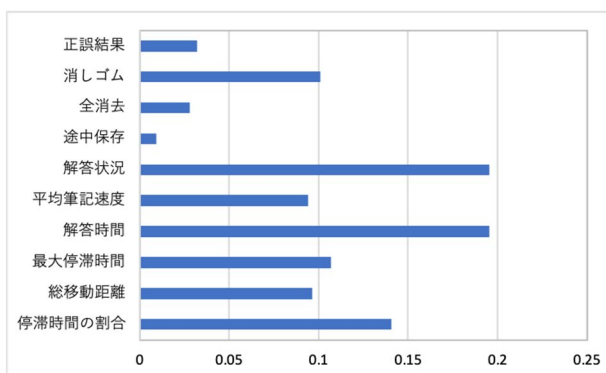


図 4 各特徴量の重要度

#### < 引用文献 >

Yasuyuki Nakamura, Kazusa Fujimoto, Kako Ito, Analysis of STACK Answer Data Using Pen-Stroke Data from a Calculation Notebook and Item Response Theory, International Journal of Emerging Technologies in Learning, Vol. 18, (2023), pp. 279-285

藤本和伶、中村泰之、「数学オンラインテストのペンストロークデータの可視化と自信度の推定」、コンピュータ&エデュケーション、Vol. 54, (2023)、pp. 34-41

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 谷口 哲也、川添 充、吉富 賢太郎、中村 泰之、福井 哲夫、白井 詩沙香、加藤 克也、中原 敬広	4. 巻 48
2. 論文標題 標準仕様による数学オンラインテストの問題実装と実用性の検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンピュータ&エデュケーション	6. 最初と最後の頁 47~52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14949/konpyutariyoukyouiku.48.47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yasuyuki Nakamura, Kazusa Fujimoto, Kako Ito	4. 巻 18
2. 論文標題 Analysis of STACK Answer Data Using Pen-Stroke Data from a Calculation Notebook and Item Response Theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Emerging Technologies in Learning	6. 最初と最後の頁 279-285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3991/ijet.v18i01.36531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤本和伶, 中村泰之	4. 巻 54
2. 論文標題 数学オンラインテストのペンストロークデータの可視化と自信度の推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンピュータ&エデュケーション	6. 最初と最後の頁 34-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Nakamura, Yasuyuki; Higuchi, Saburo; Yoshitomi, Kentaro; Miyazaki, Yoshinori; Ichikawa, Yuko; Takahiro Nakahara
2. 発表標題 Automatic classification of incorrect answers to differentiation questions using Potential Response Tree
3. 学会等名 International Meeting of the STACK Community 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Nakamura, Takahiro Nakahara, Mitsuru Kawazoe, Kentaro Yoshitomi, Tetsuo Fukui, Shizuka Shirai, Katsuya Kato, Tetsuya Taniguchi
2. 発表標題 MATH E-LEARNING QUESTION SPECIFICATION AND XML EXPORTER FOR STACK BY USING VISUAL PROGRAMMING LANGUAGE
3. 学会等名 International Congress on Mathematics Education (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王黎琳, 中村泰之
2. 発表標題 数学オンラインテストの解答データを用いた知識構造の可視化
3. 学会等名 教育システム情報学会2021年度学生研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤可子, 中村泰之
2. 発表標題 数式自動採点システムの解答データへの多段階項目反応理論の適用の試み
3. 学会等名 教育システム情報学会2021年度学生研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本和伶, 中村泰之
2. 発表標題 数学オンラインテストの解答のペンストロークデータの可視化と解析
3. 学会等名 教育システム情報学会2021年度学生研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Nakamura, Takahiro Nakahara
2. 発表標題 Sharing experiences using STACK connected from Sakai through LTI
3. 学会等名 E-Assessment in Mathematical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤本和伶、中村泰之
2. 発表標題 数学オンラインテストの誤答傾向分析による評価指標の検討
3. 学会等名 2020年度JSiSE学生研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤可子、中村泰之
2. 発表標題 数式自動採点システムの解答データを用いた能力推定法の調査と適用例
3. 学会等名 2020年度JSiSE学生研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuyuki Nakamura, Takahiro Nakahara
2. 発表標題 Note-Submission Function for Moodle Quiz and Collecting Pen-stroke Data
3. 学会等名 Special Seminar of Mathematical User Interface (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuyuki Nakamura, Kazusa Fujimoto, Kako Ito
2. 発表標題 Analysis of STACK Answer Data Using Pen-Stroke Data from a Calculation Notebook and Item Response Theory
3. 学会等名 International Meeting of the STACK Community 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Nakamura, Mitsuru Kawazoe, Saburo Higuchi, Yoshinori Miyazaki, Kentaro Yoshitomi, Takahiro Nakahara
2. 発表標題 Analysis of students' answer process based on STACK answer data
3. 学会等名 International conference on E-Assessment in Mathematical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	金子 真隆 (Kaneko Masataka)  (90311000)	東邦大学・薬学部・教授  (32661)	
研究分担者	高遠 節夫 (Takato Setsuo)  (30163223)	東邦大学・理学部・訪問教授  (32661)	削除：2021年3月22日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------