

Moodle上でのCindyJSを用いた探求学習における ログデータのアナリティクスから学習支援へ

東邦大学・薬学部 金子 真隆

Masataka Kaneko, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Toho University

合同会社三玄舎 中原 敬広

Takahiro Nakahara, Sangensha LLC

東邦大学・理学部 野田 健夫

Takeo Noda, Faculty of Science, Toho University

1 はじめに

昨年の本共同研究の中で、CindyJS(<https://cindyjs.org/>)により生成される動的コンテンツを学習管理システム Moodle 上で提示し、学習者に PC やスマートフォンなどを用いて操作させた上で、その途中経過に関するログを取得するシステムについて紹介した [1]．これを用いて行った試みが、大学教養課程の数学で代表的なテーマの一つである、関数の多項式近似に関する事例である．試行にあたっては図 1 にあるコンテンツを用意し、 $x = 0$ の周りで関数 $y = \sqrt{1+x}$ の 3 次近似式

$$\sqrt{1+x} \sim a + bx + cx^2 + dx^3$$

を探索させた．

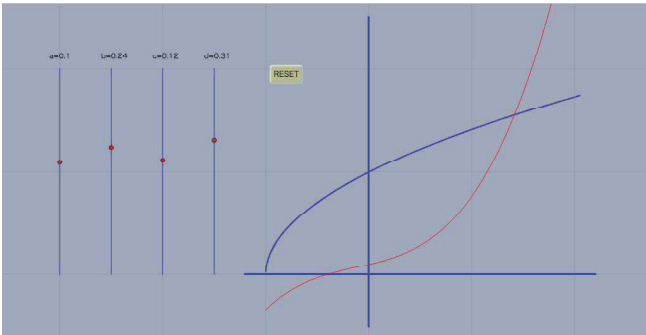


図 1 使用した CindyJS によるコンテンツ

図 1 において、左側に配置された 4 つのスライダーを指で操作することにより、係数 a, b, c, d を動かすことができ、対応した 3 次関数のグラフが即時に描画される仕様になっている．この場合、1 次以下の項 $a + bx$ が接線の方程式を与える形 $f(0) + f'(0)x$ と異なっていると、2 次以上の係数をどのように調整しても $x = 0$ の周りでの近似が良くならず、このような状況を観察することによって、近似の剰余項 $o(x^2)$ が 2 次の無限小となる状況が理解されることが期待されている．一方で、「 $x = 0$ の周り」というのが具体

的にどの範囲を指すのかということが必ずしも分明ではなく、実際、 $x = 0$ を中心としたどこまでの範囲で近似を良くするかによって、最適な係数の取り方が変わってくる。このような違いは、学習者がコンテンツを操作した際の操作パターンの差異として現れることが考えられる。実際、グループでこのコンテンツを操作させた際の、操作パターンとメンバー間の対話内容とを対照した先行研究において、大域的な近似を目指している場面では、局所的な近似を目指している場面と比べ、低次の係数の操作頻度が高くなることが示唆されている [2]。さらに、数学的な学力に大きな差がある学習者集団の間で操作パターンを比較した先行研究では、全プロセスの中盤までは差異がそこまで大きくない一方で、後半部分で高学力の集団による低次の係数の操作頻度が低いことが観察されている [3]。この背景には、数理的関心の強さという情意的な面に加え、新たな数学的概念の獲得に向けた知識構築基盤の差異を反映していることが想定される。このように上述の Moodle プラグインは、学習者の思考プロセスやその傾向性を推定する上でキーとなるシグナルを抽出する有力な手段となり得るが、こうした操作ログの解析結果を学習支援に結び付けるためには、教員による教育的介入を含めたさらに立ち入ったアプローチが必要である。本稿では、操作ログの解析と学習支援とを結び付けることを目指した試行事例について紹介した上で、それを基に、COVID-19 感染拡大に伴って志向されるハイブリッドな数学教育における、ひとつのワークフローを提案する。その中には、対面授業における学習者の操作ログデータと言語的・非言語的な行動データとを対照して学習者の状況に応じた支援方略を立案する一方、その方略を大人数を対象としたオンライン授業に適用し、操作ログデータを解析することによって有効性を検証するという相補的なフローが含まれる。

2 教育工学的背景

本事例が対象とする学習者を ill-structured かつ open-ended な問題に取り組ませるアプローチは、教育工学では inquiry based learning と呼ばれるが、得られたデータに省察を加えたり、背景となる因果関係について予想を立てたりする上で、コンピューターツールが多用される点が指摘されている [4]。実際、その主要な役割としては、学習者自身による探究活動のプランニングを補助したり、試行的にモデリングを行う舞台を提供する点が挙げられている。コンピューターツールを用いた inquiry based learning の枠組みは幅広いが、本研究の事例の場合、操作プロセスの中盤までで大域的な近似が局所的な近似と整合しないという「失敗」を経験してもらい、それによって高次の無限小の概念が把握されると同時に、プロセス後半の焦点が局所的な近似に絞られることが期待されていることから、Kapur らによって主唱された productive failure instructional design の一環として理解される [5]。これを敷衍して言うならば、利用されるコンピューターツールによって、solution space を十分に探索することを学習者に促し、特に「正解」以外の（あるいは「正解」に至るプロセスの中で体験する「余分な」）解釈の可能性を十分に吟味することを可能にすることが期待されている [6]。

こうした inquiry based learning をベースとした教育的アプローチは、世界的にみると物理・化学や工学を含む幅広い分野で見られるようになっているが、コンピューター

ツールとの親和性が高いはずの数学教育については、学習プロセスの分析事例があまり多くない。実際、学習プロセスの時系列データを解析し、これを学習支援に活用することを目指した Learning Analytics の分野において数学に関する実践事例を見ると、その多くが短答式の問題に対する解答パターンの推移をもとに、学習者の最終的なパフォーマンスを予測するといった方法論が主流であり、探求学習をターゲットにしたものが非常に少ない。このような実態の背景として、Lakoff 達が指摘する、数学における概念獲得に関する複雑性が存在するものと想定される。すなわち、数学は文字による記述やそれに基づく対話に加え、概念的メタファーとしてのジェスチャーや、デジタルメディア上での可視化など、多くの人工物をリソースとして成り立つ multi-semiotic な活動であり、学習者の探究活動における思考プロセスを解釈したり、それに基づいて足場架けを行ったりということが決して容易ではない [7]。加えて、こうした人工物を構成する言語・数式・ビジュアルイメージといった要素が単体として存在するのでは不十分で、これらを interlock するネットワークが必要となるために、数学的な概念獲得がとりわけ複雑なものとなることも指摘される [8]。本稿で紹介する事例における学習支援方略の立案に際しては、このような認知言語学からの知見も踏まえている。

3 事例研究の方法と結果

CindyJS によるコンテンツを用いたこれまでの分析事例では、必要な「ライブラリ」を iPad に取り込んでおき、オフラインの状況でブラウザ上の操作を行わせ、画面録画を基にして操作プロセスを分析することがほとんどであった。これは、対面の状況でまとまった人数に操作させる場合、大学のネットワークの安定性に十分な信頼をおけないという事情による。しかし本年度は、COVID-19 感染拡大による遠隔授業の実施により、学生が BYOD の環境で各自の通信回線を通して Moodle にアクセスし、PC 上で操作を行わざるを得ないという、劇的な環境の変化があった。詳細は省略するが、対面授業の場合に必要な大学の認証サーバーへのログイン動作が省けたことから、データの逸失がほとんどない状態で実験を完了することができた。このことは、ネットワーク環境が十分に保証されれば、操作プロセスに関するビッグデータの取得が可能で、学習者の操作方略を適切に解釈したり、教授者による介入の効果を検証したりする上で、十分な基盤が与えられる可能性があることを示している。その一方で、本年春学期の完全な遠隔授業の場合、オンデマンド型の動画視聴などを時間割通りに行うよう学生に求めるのは無理があり、対面の授業におけるような全対象者一律の時間管理が不可能であるという問題が発生する。本来であれば、学習者の操作を教授者が観察しながら、その状況に応じて適切に教育的介入を行うことが望ましいが、遠隔の場合は誰が何時該当のコンテンツにアクセスしてくるか事前に推定できず、これが非常に困難である。このため本試行では、ランダムに分けた 2 群の学生に対し、操作法のみに関する動画（統制群）と準備介入用の動画（実験群）とをそれぞれ視聴させたのちにコンテンツを操作させ、各群間のログデータを比較するというシンプルな設計を取らざるを得なかった。

被験者は微分積分学の授業を履修中の大学 1 年生で、統制群・実験群とも各 60 名ほどであった。この中で、Moodle に記録された動画の視聴時間とコンテンツの操作の時

間とを対照し、きちんと動画を視聴していないと判断される被験者のデータを除外した結果、分析に利用できたのは統制群53名（男子19名・女子34名）・実験群51名（男子15名・女子36名）であった。事後のアンケート調査で、全員がスマートフォンではなく、PCで操作を行っていたことが確認されている。2群に視聴させた動画は、Moodleの「利用制限」の機能を用いて指定された群の被験者にしか見られないように設定されていた。実験群用の解説動画の作成にあたっては、先行研究で得られた、数学的な学力が高い学習者群の操作状況の観察がもとになっている。具体的には、多項式関数のグラフの概形を把握するために増減表を利用すること以前に、単項式関数のグラフの概形や関数の重ね合わせに関する経験値が高く、一部の学習者についてはこれがさらに数式表現に密接に結びつけられていることが想定された。これは、前節で触れた、認知言語学的アプローチによる数学の概念獲得モデルとも符合するものである。これに対し、学力レベルが平均的な学習者群の場合は、最終的に良好な近似が得られる場合でも、もっぱら「実験的」にのみ操作を展開し、ある程度近い近似が得られてしまうとそこからあまり動かない事例が多いことが確認されていた。そこで実験群用の動画では、単項式関数の重ね合わせに関する可視化と、次数の差が単項式関数の大小に与える影響の数式説明を提示することとした。図2は、実験群用の動画のカットである。

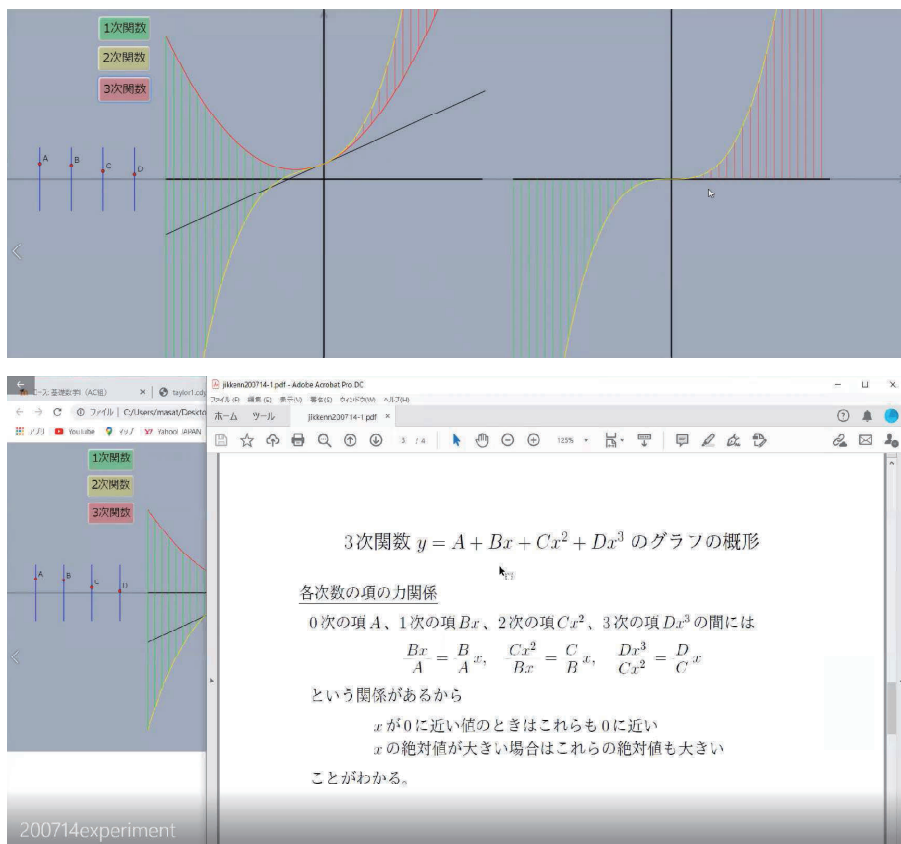


図2 実験群向けの介入動画のカット

Moodle プラグインを通して得られるログデータを JAVA を用いたプログラムによって加工し、各時点でそれぞれの学習者がどのような操作方略をとっているか、ある程度裏付けることができるような特徴量を計算した。具体的には、近似を目指している範囲を見積もるため、3つの区間 $I_1 = [-1, -0.5]$, $I_2 = [-0.5, 0.5]$, $I_3 = [0.5, 2]$ における無理関数と3次関数の差の最大値

$$\text{Max}_{x \in I_i} |\sqrt{x+1} - a - bx - cx^2 - dx^3|$$

を操作中の各時刻で計算した。図3はある被験者について、以上で計算される特徴量の時系列的な推移を可視化したものである。ここで、横軸は左から右に向かって操作開始からの経過時間を表し、1メモリが50秒である。縦軸は1メモリが0.5である。また、黒線・赤線・青線がそれぞれ区間 I_1 , I_2 , I_3 における最大値の推移を表す。

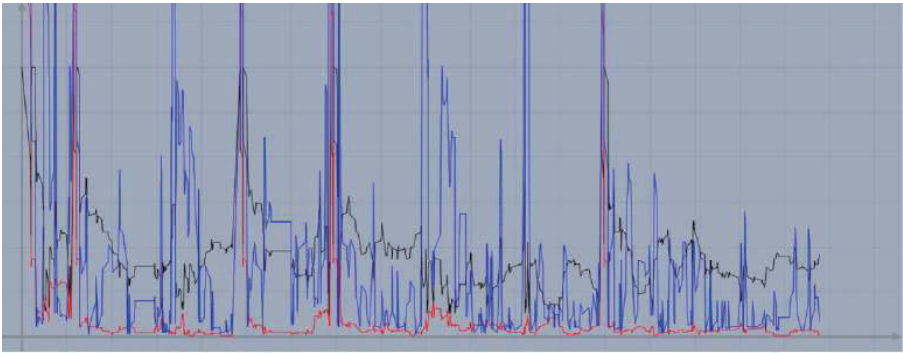


図3 操作プロセスの可視化

現在の Learning Analytics 分野でしばしば行われているように [9][10]，これまでの試行においては、経過時間の要素を捨象し、事象の順番のみに注目した分析を行ってきた。これに対し、ここで得られているログデータは経過時間に関する要素を含んでいてより粒度が高く、時々刻々と変化する探索方略の遷移をより精密に把握できる可能性を有していると考えられる [11]。ここでは、まず前者の粒度の低いデータをもとに2群の比較を行った上で、そこで見いだされる差異の背景を探るべく、後者の粒度の高いデータを用いた2群の比較を試みる。

先行研究 [1] で試行したのと同様に、操作時間の要素を捨象し、係数の操作順序を等分の重みにして可視化したのが図4である。ここで、ひとつの行が被験者1人の操作プロセスに対応しており、係数 a の操作を赤色で、係数 b の操作を黄色で表し、 c, d に関しては色を塗らない形で表示している。左側が統制群、右側が実験群の結果を表しているが、これを見ると、統制群と比べて実験群において、先行研究 [1] の中で示された、数学の学力が高いと想定される高校生の操作プロセスと同様に、終盤で低次の項の操作比率が低下する傾向が強いことが観察される。今後、この比率に関する統計的分析も実施する予定であるが、この結果に対して問われるべきは、こうした操作プロセス終盤におけるパターンの差異がどのような経過で発生したかという点である。このような分析を行う上では、本試行で取得している、粒度の高い操作ログデータが有効に活用できることが期待される。

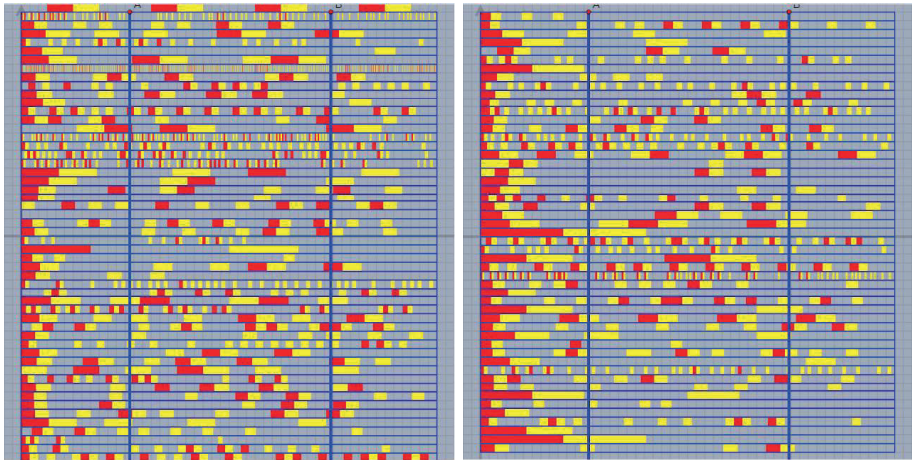


図4 全被験者の操作プロセスの可視化

このため、図5の可視化を全被験者に対して行った上で、2群のデータ間に差がないか、視察による確認を試みた。結果として、区間 I_2 における差が小さい状態で区間 I_1 における差を小さくしてみるトライアルが、統制群に比べて実験群でやや多いのではないかと推測された。該当のケースは、グラフの状態としては下記のような状況に相当する。

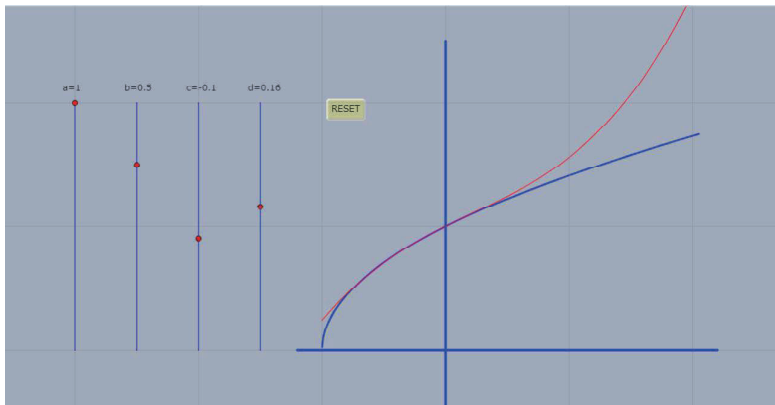


図5 実験群で顕著な操作パターン

ここでは、1次近似式が接線の方程式に近い状態になっているが、 I_1 における差を小さくしようとする、 I_3 における差が大きくなってしまふことが観察される。1次近似式が接線の方程式から外れてしまうと、 I_2 における差が大きくなることから考えて、このような状況を観察することを通じ、学習者が局所的な近似と大域的な近似が両立し得ないことに気づく可能性が想定される。このように考えると、実験群の操作がプロセスの後半で高次の係数に集中したものと整合的だと考えられる。

図3のグラフを用いてこのようなケースが存在するか否か確認するのは、グラフの複雑さから考えて現実的に難しい。また、もともになるログデータから視察によって探すのも、データ量から考えて非現実的である。そのため、やはり JAVA のプログラムを用い

て、 I_2 における差の最大値が0.01以下であり、かつ I_1 における差の最大値がいくつかの閾値（0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40）以下である時点を含む事例を数えた．図6は、2群のそれぞれで、全事例に占める該当の事例の比率を閾値ごとに図示したものである．青色が統制群を、赤色が実験群を表す．

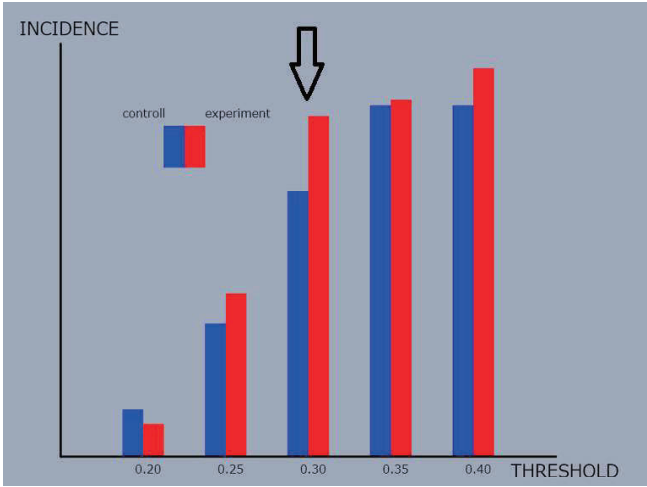


図6 I_1 における差の最大値がいくつか閾値以下である事例の比率

図6からわかるように、閾値が0.35, 0.40などという大きな値の場合は明らかにありふれた事例であり、2群とも発生率が1に近く、有意差がない．逆に、0.20, 0.25などといった小さな値の場合は、図5にみるように I_3 における差が顕著に大きくなる事例であり、2群とも発生率が低く、やはり有意差がない．問題は、これらの中間に位置する閾値が0.30の場合（図中の矢印）で、実験群（51例中42例）が統制群（53例中34例）よりも顕著に高いことがうかがえる．実際、母比率の検定 **prop.test** を適用すると p 値が0.01822となって有意である．

4 総合論議と今後の研究の方向性

前節の図4や図6に示される2群における操作パターンの差は、当然のことながら、被験者が操作前に視聴した動画によってもたらされたものと考えられる．図2に見られる通り、この動画のポイントは、単項式関数の次数に応じ、 $x = 0$ の近傍と $x = 0$ から離れた部分とで「力関係」が変わってくることを、数式表現とグラフによる可視化とを対照しながら理解してもらおうという点である．この動画を視聴することにより被験者は、操作プロセスの中で、上記の2つの領域における無理関数と3次関数の差に着目するように無意識のうちに促され、図6にあるような試行錯誤（productive failure）をあえて行ってみることで、局所的な近似と大域的な近似とが両立しないことに気付けたのではないかと考えられるわけである．このように、探求的な学びにおける思考プロセスを学習ログデータから把握する上で、sequentialな操作パターンのみならず、より時間的な粒度の高いプロセスデータの解析が必要になることがしばしば指摘されるが [12]，

その最大の理由は、学習者がある時点で行った操作の結果を観察し、その結果をそれ以後の操作に反映させている点にある。この観点からすると、図5に示されるようなトライアルが、その後の操作プロセスの中で、高次の係数の操作への集中を招くトリガーとなっているかという点を検証すべきである。これは、2群の比較というよりも、操作プロセスにトライアルを含む事例と含まない事例との比較ということになると考えられ、特にトライアルが発生した前後で操作パターンを比較することが必要になる。本試行で得られたログデータをもとにして、今後検証してみたいと考えている。

本稿のアプローチの限界は、授業全体が完全にオンラインの個別学習として行われ、仮に操作プロセスに特徴的な事象が見出されたとしても、それを学習者の言語的・非言語的な行動から裏付けることが難しいという点である。COVID-19の感染拡大が続く現状では、対面での授業実施に制限が加わることが避けられないので、対面授業と遠隔授業とで、こうした数理モデルの操作をさせる場合の意味づけを明確にし、それらをうまく組み合わせる必要がある。現在筆者が考えているのは、対面授業における学習者の操作はできるだけ協調学習の形をとり、メンバー間の対話や行動を詳細に把握して操作ログと対照することで、操作パターンの変化の意味や、そこから読み取れる学習者の課題に対する支援方略などを検討する材料として生かすのに対し、遠隔授業における学習者の操作は大人数を対象とした個別学習になりやすいことから、こうした支援方略の効果を検証する材料として生かせるのではないかということである。逆に、遠隔授業の際に得られる大量の操作ログから、対面授業の際に学習者の操作・行動を観察するヒントが得られる可能性もある。以上と同時に、そもそもキャンパスの配置の関係などで、対面授業実施が難しい場合も想定しておくべきである。こうした場合に考えられるのは、Zoomなどのオンライン会議システムを利用し、画面共有機能を用いて操作役の学生のPC画面を共有して、操作方針についてマイクを通した音声やチャット機能を用いて相談しながら進行するというフローである。図7は、先行研究において、オンラインでのプログラミングの協調学習の様子を示したもので、画面録画によって被験者の発言や行動が記録されている。

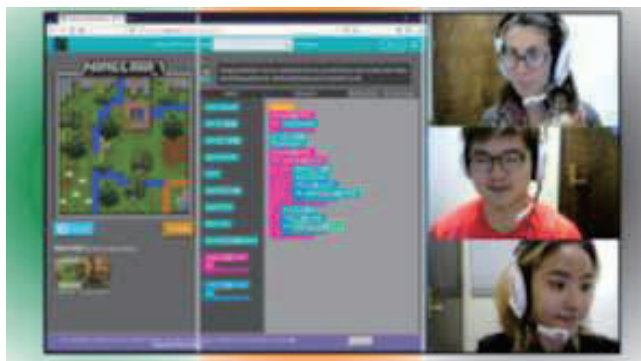


図7 オンラインでのプログラミングに関する協調学習の事例（出典 [13]）

この先行研究では、プログラム内のブロックの操作や実行画面の様子を画面録画で確認し、これと参加者のカメラから確認される発言やジェスチャーなどの記録が対照されているが、操作のログをシステムから自動的に取得するところまでは至っていない。CindyJS

の場合には、操作ログに関しては自動的な取得が可能であるから、データの取得に関する負担はその分軽減されるはずで、大きな利点のひとつである。しかし、対面授業の中で、複数の学習者が隣り合って座り、同じタブレット画面を順不同で操作する場合と、遠隔授業で学習者が相談しながら代表者だけが操作を進める場合とでは、操作や議論の構造に根本的な違いが生じることが想定される。実際、コンピューターをベースとした協調学習の中で、学習者間に構築される知識の構造が、知識を構築する過程の議論における学習者間の関係性に大きく依存することが指摘されており [14]，対面と遠隔という環境の違いはここに大きな影響を及ぼすはずで、その実態を解明するための基礎研究がまず必要になるであろう。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 18K02872, 19K03175 の助成を受けている。

参考文献

- [1] 金子真隆, 中原敬広, 野田健夫: CindyJS によるコンテンツの web 上での操作ログの解析, 京都大学数理解析研究所講究録 2142, pp.23–32, 2020
- [2] 金子真隆, 野田健夫: CindyJS によるコンテンツを用いた協調学習における操作と対話との連関の追跡 (II), 日本教育工学会研究報告集, 18-5, pp.45–52, 2018
- [3] M. Kaneko, T. Nakahara, T. Noda: Temporal analytics of log data derived from students' manipulating math objects, Companion Proceedings of LAK20, pp.86–88, 2020
- [4] C. E. Hmelo-Silver: Problem-based learning: What and how do students learn? Educational Psychology Review, 16, pp.235–266, 2004
- [5] M. Kapur: Productive failure, Cognition and Instruction, 26, pp.379–424, 2008
- [6] B. J. Reiser: Scaffolding complex learning: The mechanism of structuring and problematizing student work, Journal of the Learning Sciences, 13, pp.273–304, 2004
- [7] G. Lakoff, R. Nuñez: Where Mathematics Comes From?, Basic Books, 2001
- [8] K. L. O'Halloran, Mathematical discourse, Continuum, 2005
- [9] S. Knight, A. F. Wise, B. Chen: Time for change: Why learning analytics needs temporal analysis, Journal of Learning Analytics, 4-3, pp.7-17, 2017
- [10] A. Andrade, J. A. Danish, A. V. Maltese: A measurement model of gestures in an embodied learning environment: Accounting for temporal dependencies, Journal of Learning Analytics, 4-3, pp.18-45, 2017

- [11] B. Chen, S. Knight, A. F. Wise: Critical issues in designing and implementing temporal analytics, *Journal of Learning Analytics*, 5-1, pp.1-9, 2018
- [12] P. Reimann: Time is precious: Variable-and-event-centered approaches to process analysis in CSCL research, *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 4, pp.239-257, 2009
- [13] H. Vrzakova, et al.: Focused or Stuck together: Multimodal patterns reveal triads' performance in collaborative problem solving, *Proceedings of LAK20*, pp.295–304, 2020
- [14] P. Kirschner, et al.: From cognitive load theory to collaborative cognitive load theory, *International Journal of Computer Supported Collaborative Learning*, 13, pp.213-233, 2018