

HTML ベースのコンテンツによる数学協調学習の オンラインと対面での差異に関する分析の試み

東邦大学 野田 健夫

Takeo Noda, Toho University

山口大学・教育学部 北本 卓也

Takuya Kitamoto, Faculty of Education, Yamaguchi University

東邦大学 金子 真隆

Masataka Kaneko, Toho University

1 教材システムの目的と教育的意義

オンライン学習環境の普及により、学習者が物理的に同一空間にいない状況での協調活動が一般化している。しかし、オンラインと対面では、視線共有や発話のタイミング、操作の衝突回避といった協調を支える **相互作用の仕組み** が本質的に異なる可能性がある。この違いは教材の設計方針や授業運営のルールに直結するため、**行動ログに基づく比較** が求められる。

本システムの目的は、HTML ベースで実装した統計教材（相関係数の不変性を扱う散布図操作タスク）を用い、**オンライン** と **対面** の協調学習における操作行動の差異を時系列ログから定量比較することである。具体的には下記のものを分析対象とする。

- (i) 点移動回数や操作間隔などの行動量
- (ii) 操作交替の頻度や主導権の移り変わりといった協調指標
- (iii) 相関係数 r の推移や外れ値処理といった学習上の重要挙動

技術的貢献は二点ある。第一に、教材側で `draw` 等のイベントをフックして **操作の微細な変化** をログ化し、クライアントーサーバ同期により多端末間の状態共有を実現した。第二に、取得ログから協調性を表す特徴量（例：操作交替のエントロピー、主導交替周期）を設計し、学習成果との関連を検討可能な実験プロトコルを提示した。

教育的意義として、オンライン協調では対面に比べて操作交替のラグが大きくなる、あるいは同一点への同時ドラッグを避ける暗黙の役割分担が生じる等の **行動上の傾向** が想定される。これらを実証的に捉えることで、UI へのフィードバック（例：同時操作の視覚的通知、操作キュー、ゴーストカーソル）や授業設計（例：役割の明示的交替ルール、ログの形成的評価利用）に還元できる。

2 教材作成フレームワークの概要

本章では、本研究で用いた HTML ベース教材のフレームワークを概説する。設計目標、UI パラダイム（積み上げ式／自由レイアウト式）を順に述べる。

2.1 設計目標

- **操作の可視化と記録性**：学習者の「点の移動」「選択」「記述」等の操作を即時に反映し、細粒度でログ化する。
- **協調編集の安全性**：複数端末からの同時操作に耐える最小限の衝突回避と、状態同期の一貫性を確保する。
- **著者向けの生産性**：教材開発者が新課題を迅速に作成でき、システムの変更にもなるべく容易に対応できるようにする。
- **多様な端末対応**：PC／タブレット／スマートフォンの画面幅で破綻しないレイアウトと入力体験を提供する。

2.2 UI パラダイム：積み上げ式と自由レイアウト式

これまで、システムを構成する方法には下記の2種類のものを場面に応じて使い分けてきている。

- **積み上げ式 (Stacked Layout)**：カード（要素）を縦方向に積み上げる方式で、読み順と操作順が一致しやすく、モバイルでも崩れにくい。問→説明→図→解答欄→確認ボタン、のように線形に並べる教材に適する。
- **自由レイアウト式 (Free Layout)**：キャンバス上にコンポーネントを相対配置する方式で、図とテキスト、表、ボタン等を並列に配置できる。探索的操作やダッシュボード型の可視化で有用だが、画面幅の差やスクロール位置の共有に配慮が要る。

様々なプラットフォームに対応するため、本システムでは積み上げ式を用いている。

3 学習タスク：相関係数オンライン教材の設計

本章では、相関係数 r の**不変性**（平行移動・等方拡大縮小で不変）と**感度**（外れ値に敏感）を体験的に理解させるためのオンライン教材タスクを記述する。相関係数オンライン教材の画面を図1に示す。

3.1 学習目標

- （概念）Pearson の相関係数

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

の定義と、 x, y の**平行移動**および**等方拡大縮小**で r が変化しないことを操作を通して確認する。

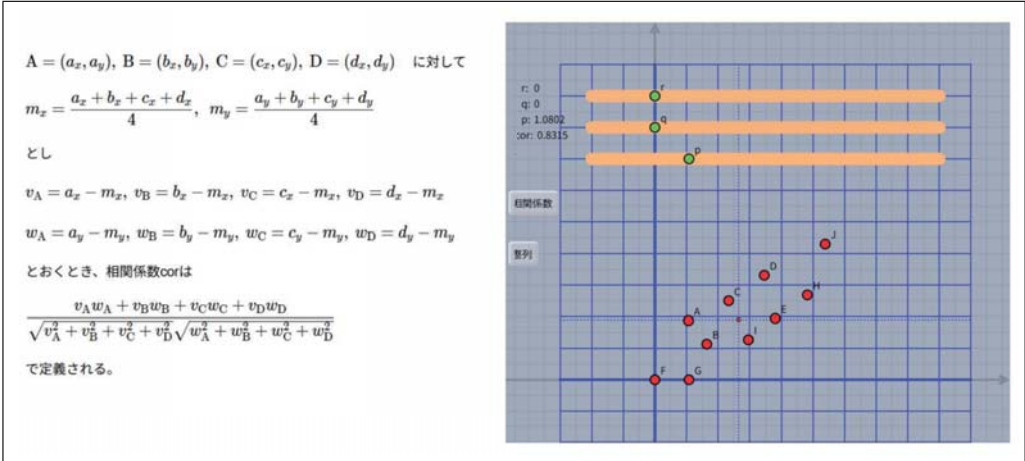


図 1: 相関係数オンライン教材の画面

- (メタ認知) 同一の r 値でも点群の形状が異なりうることを述べ、 r 単独評価の限界を述べられる。

3.2 タスク設計の概略

T1：不変性の確認（導入） 初期点群 S_0 ($n = 10$) を提示し、学習者は (i) 全点の等方拡大縮小, (ii) 全点の平行移動を行う。システムは操作のたびに r を再計算し、画面上に表示する。

3.3 インタフェース要件

教材の画面を図 1 に示す。各コンポーネントの説明は下記の通りである。

- **散布図キャンバス**（散布図上の各点はドラッグ可能）。
- **r の即時計算表示**（散布図上の点の位置が変化するたびに再計算され、画面に表示される）。
- **整形操作**（全点の拡大縮小スライダー、平行移動ハンドル、格子点上に整列させる）。

3.4 ログと学習行動指標

画面上上の点を学習者が動かした時、つぎのデータがログに集積される。

- **時刻**：点が動いた時間（UNIX タイム）

- **動いた点または操作されたスライダ、ハンドル**：散布図上の点が動いた時は動いた点の ID、拡大縮小スライダ、平行移動ハンドルが動いた場合はそのスライダやハンドルの種類
- **相関係数**：点が動いた後の相関係数の値。

ログデータは一旦、ブラウザ上のテキストエリア（学習者には非表示）に書き込まれ、定期的にサーバーへ送信される。

4 データ取得と同期メカニズム (Instrumentation & Sync)

本章では、教材側でのイベント計測（インスツルメンテーション）、ログ形式、クライアントーサーバ間の時刻同期、および提出処理の流れを記述する。

4.1 Cinderella の図のデータの書き出し

図のデータを取るには次の 2 種類の方法が考えられる。

- （方法 1）一定時間ごとに点の位置を書き出す。
- （方法 2）図の操作するたび（図が変わるたび）に、新しい点の位置を書き出す。

本教材では（方法 2）を使っている。その方法の長所は、「データの取りこぼしが少なく、必要のないデータが少ないため、データ量が少なくてすむ」ことである。逆に短所は「図が変わるたびに関数を呼び出す仕組みが必要で、システムを選ぶ」ことである。幸い Cinderella にはイベントが発生した時に実行するプログラムを設定する機能があるため、これを用いている。具体的には draw（画面描画）が発生した時に実行するプログラムを設定している。実際のプログラムを図 2 に示す（これは Cinderella のプログラミング言語である CindyScript のプログラムである）。

点を動かしたときに、ログがブラウザ上のテキストエリア（学習者には非表示）に書き込まれるまでの流れは下記の通りである。

1. 点を動かす
2. draw イベントが発生する
3. 必要ならば updatep() を呼び出して点の位置を調整
4. logp() ⇒ printtextarea() ⇒ append.textarea() を順次を呼び出してログをテキストエリアに書き出す
5. 相関係数を再計算して画面に表示する

```

if ([A-pa]>eps,updateab():pa=A+[0,0];prob=2:logp("A",A,x,A,y));↵
if ([B-pb]>eps,updateab():pb=B+[0,0];prob=2:logp("B",B,x,B,y));↵
if ([C-pc]>eps,updateab():pc=C+[0,0];prob=2:logp("C",C,x,C,y));↵
if ([D-pd]>eps,updateab():pd=D+[0,0];prob=2:logp("D",D,x,D,y));↵
if ([E-pe]>eps,updateab():pe=E+[0,0];prob=2:logp("E",E,x,E,y));↵
if ([F-pf]>eps,updateab():pf=F+[0,0];prob=2:logp("F",F,x,F,y));↵
if ([G-pg]>eps,updateab():pg=G+[0,0];prob=2:logp("G",G,x,G,y));↵
if ([H-ph]>eps,updateab():ph=H+[0,0];prob=2:logp("H",H,x,H,y));↵
if ([I-pi]>eps,updateab():pi=I+[0,0];prob=2:logp("I",I,x,I,y));↵
if ([J-pj]>eps,updateab():pj=J+[0,0];prob=2:logp("J",J,x,J,y));↵
if ([VA-pva]>eps,if(prob==2,savp():prob=1):updatep():logp("VA",VA,x,VA,y));↵
if ([VB-pvb]>eps,if(prob==2,savp():prob=1):updatep():logp("VB",VB,x,VB,y));↵
if ([VC-pvc]>eps,if(prob==2,savp():prob=1):updatep():logp("VC",VC,x,VC,y));↵

updatecor():↵
drawtext(OH+[0,0,0.5], "cor:");↵
drawtext(OH+[0.7,0.5],rat);↵
a=VA,x-0A,x-2;↵
b=VB,x-0B,x-2;↵
c=VC,x-0C,x-2;↵
drawtext(OH+[0.2,1.0], "p:");↵
drawtext(OH+[0.2,1.5], "q:");↵
drawtext(OH+[0.2,2.0], "r:");↵
drawtext(OH+[0.6,1.0], a);↵
drawtext(OH+[0.6,1.5], b);↵
drawtext(OH+[0.6,2.0], c);↵

```

図2: イベント draw (画面描画) が発生した時に実行されるプログラム

4.2 2つの教材システムでの図のデータ同期

本システムで、ネットワークで接続された2つの教材システムで、切り替えボタンなしで図のデータの同期を行っている。このデータ同期は次のように行っている。

- 2つの教材システムでデータを定期的にタイムスタンプをつけてサーバーに送信。また同時にサーバーの同期データを取得。
- このとき、サーバーのデータの方が新しければ自分の教材システムのデータを更新。自分の教材システムのデータの方が新しければサーバーのデータを更新する。

例えば、次のようになる。

- サーバーのデータのタイムスタンプ:173942, 教材システム1のデータのタイムスタンプ:173942, 教材システム2のデータのタイムスタンプ:173942 の場合: どのデータのタイムスタンプも同じなのでデータの更新は行われない。
- サーバーのデータのタイムスタンプ:173942, 教材システム1のデータのタイムスタンプ:173943, 教材システム2のデータのタイムスタンプ:173942 の場合: 教材システム1のデータのタイムスタンプがサーバーのものより新しいため、教材システム1のデータをサーバーに送信したときに、サーバーのデータを教材システム1のものに更新する。その後、教材システム2のデータ送信が行われた際にサーバーのデータのタイムスタンプの方が新しいので、教材システム2のデータをサーバーのものに更新する (これでデータの同期が行われた)。

このように、教材システム上のパソコンでは図のデータをテキストエリアに書き出すモジュールと、テキストエリアのデータとサーバー上のデータとの同期を取るモジュールが独立に動いている。これを図で表したものを図3に示す。

この方法の課題は次の通りである。

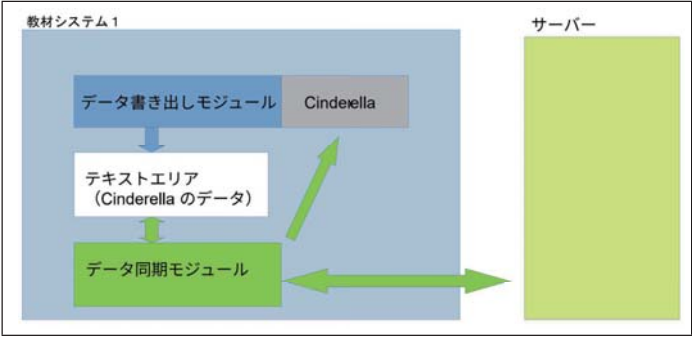


図 3: 2つの教材システムでの図のデータ同期

- プログラムが CindyScript や JavaScript で書かれているため、動作が若干低速で同期に若干の遅れが発生する。
- データを送信する間隔がネットワーク環境やブラウザ依存である、現時点では手で調整する必要がある。

これらの課題の解決は今後の課題である。

5 オンライン協調学習実験の試行

本章では、この教材を用いて試行的に実施したオンライン協調学習実験について、実験実施の概要および得られたデータについて説明する。

5.1 オンライン協調学習実施概要

被験者のプロフィール 今回の実験の被験者となる学習者は大学2年生4名で、2名ずつ2グループに分かれて別の日に協調学習を実施した。4名全員が理学部所属の女子学生で、相関係数については高校および大学1年時の授業で学習済みである。しかし学習タスクである相関係数の平行移動・等方拡大縮小による不変性について、実験開始時には認識していなかったことを事後のインタビューで確認している。

実験のフロー 最初にグループの2名を同室に集め、相関係数の定義と意味を講義形式で解説する。そしてブラウザ上のコンテンツを見せて操作方法を説明し、ワークシートを配布して次の課題を与える。

与えられた p, q, r に対し、各データ点 (x, y) を

$$X = px + q, Y = py + r$$

で定まる (X, Y) に一斉に変更する操作を行うとき、

- (1) 相関係数がどのように影響を受けるか
- (2) どうしてそのような現象が起こるのか

について、コンテンツを2人で協力して操作しながら議論し説明してください。

その後2名が別々の部屋に移動し、課題に取り組むことになる。各部屋にはノートPCが設置され、ブラウザ上のコンテンツが表示されている。4章で説明したメカニズムにより2名が見ているコンテンツの状態は常に同期される。また、2名はZoomを用いて会話を行うことができるが、カメラは非表示にしてある。この状況で課題の解決を目指し、制限時間は設けず両者が同意した時点で終了とする。

取得データ この実験で取得できるデータのうち、主に分析対象とするのは次のものである。

- **操作ログ**：コンテンツが変化したとき、関与する点の座標とタイムスタンプが被験者別に記録される
- **対話テキスト**：Zoomの自動字幕機能により、対話の文字起こしの記録が得られる

この他に、次のデータも保存した。

- Zoomによる音声録画
- Zoomによる画面録画
- ユーザ別に背後から撮影したビデオ録画
- ワークシートに残された筆記

後述するように、Zoomの字幕機能による文字起こしテキストは誤りが多く含まれ、その修正に音声・画面録画やビデオ録画が役立った。

5.2 実験結果

実験は課題が解決したと被験者2名が同意するまで続けることになっていたが、実際は開始から30分程度経過しても解決の糸口が見えず停滞しているように見受けられたので、実験者である著者が介入してヒントを与えて解決に誘導することとなった。なお、対面で同じ課題を取り組ませた別の実験では、12グループのうち半数の6グループは助力なしに解決に至っている。

操作と対話の量的分析 操作ログと対話テキストはタイムスタンプ付きで被験者を分けた記録が残るため、被験者別に操作量および発話量を可視化することができる。これにより、2名の学習者の操作と発話の総量や、学習者の間での操作・発話の主導権の変遷を分析することが可能となる。

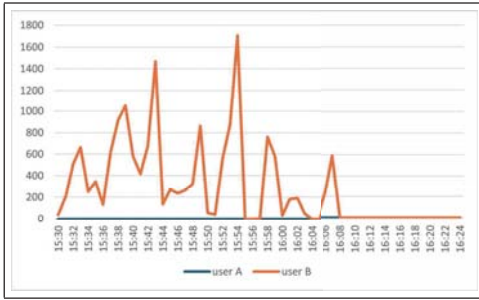


図4: グループ1の操作量

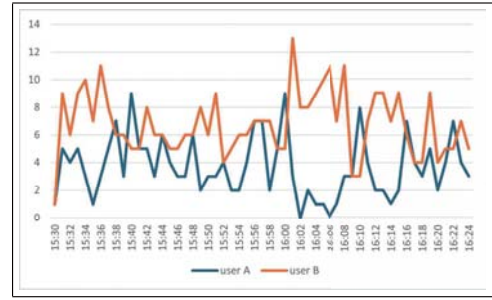


図5: グループ1の発話量

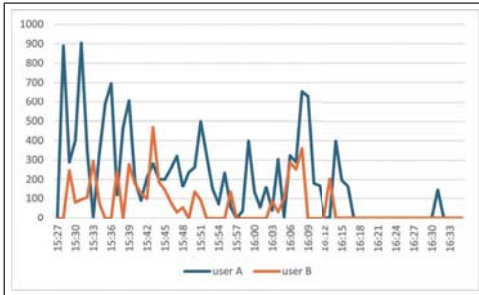


図6: グループ2の操作量

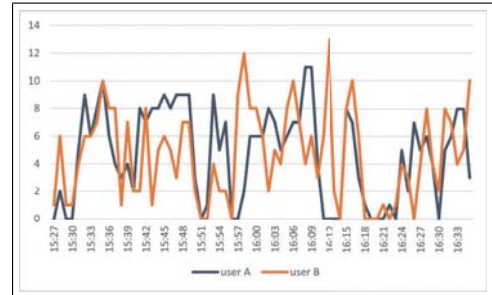


図7: グループ2の発話量

グループ1においては、図4から分かるように一方の学習者 (userB) だけがコンテンツの操作を行っていた。対話内容を確認すると、最初に userA が userB に操作を譲る発言があり、そのまま交代することなく最後までいたっている。図5をみると発話量においても userB が優勢であるように見られるが、Bの一連の発話の合間にAの発話のピークが挟まれる形になっている。実際の対話内容でも、Aが疑問の提示や視点の転換のきっかけを与えてBが考えを述べるやり取りが確認された。

グループ2については図6、7から分かるように、操作も発話も短時間で入れ替わる傾向が見られる。対話内容も途切れがちな短い発話が多く、沈黙が続く瞬間（例えば16:20付近など）もしばしば見受けられた。

これらの分析で操作ログについては総量を可視化したしたが、更に詳しく p, q, r のスライダーを動かしたか、あるいはデータ点を動かしたかなど、要素別に操作量を示すことも可能である。次の図8は、グループ1の userB の操作を、スライダー/データ点に分けて可視化したグラフである。

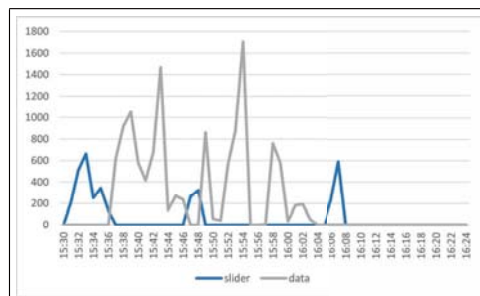


図8: グループ1・userBの要素別操作量

自動文字起こしの精度 Zoomの字幕機能による文字起こしテキストは以前より改善していると感じられるが、それでも修正すべき点がしばしば見受けられ、テキストの内容を分析するためには修正が必要となる。以下は文字起こしテキストの原文の一部である：

[userB] 15:42:54

第三象限元だけって。こっちの方に。

[userA] 15:42:56

ああ。そうそうそう。

[userB] 15:43:00

行くと。ふうになる。

[userA] 15:43:08

今井さんがマイナスとマイナスだよね。

音の認識のレベルで不認識や誤認識があり（誤「ふうになる」→正「負になる」，誤「今井さんが」→正「第三が」など），また文字変換の間違いも見られる（誤「第三象限元」→正「第三象限」など）。また上記のテキストでは，userBの1回目の発話の後半の「こっちの方に。」と2回目の最初の「行くと。」の間にuserAの発話が挟まれているが，実際の録音を聞くと，userAの発話の後にuserBが「こっちの方に行くと」と続けて発話しているのが分かる。このように，語順が不自然に入れ替わることがあるのも注意を要する点である。

6 今後の研究の方向性

対面での協調学習とオンラインでのそれとの違いに関する質的分析は，これまでの実施事例がまだ少なく，これから更なる実験を繰り返す中でrobustな知見を得ていく必要があるが，事前の想定に沿った傾向を示唆する事例が見られている。図9は，ある実験授業の際の2人の学習者の様子を記録した写真であるが，対面での協調学習の場合にしばしば見られる，動的コンテンツの画面を指示する行為を伴っている。

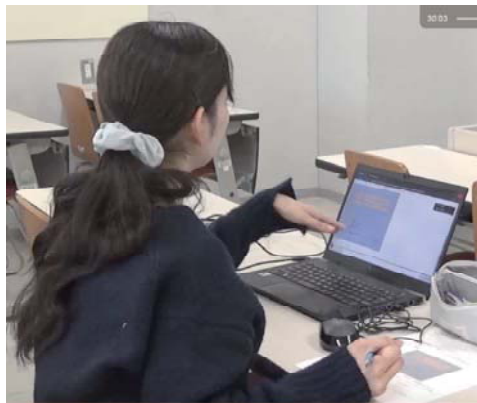


図9: 実験授業の際に見られた学習者の指示行動

容易に想像されるように，該当の行為は学習者が考えている内容を相手に伝える際に，

関連する図形要素等を指示するためのものであることが多いが、オンラインでの協調学習の場合、発語以外の行動が情報共有されず、こうした行為を相手が視認することもできない。結果的に、Zoomを通して伝わる音声によってしか自らの思考内容を伝えることができなくなるわけだが、これは学習者間の情報共有に対して相当の負荷をかけることになると考えられる。実際、図9左側の動作には、「1つだけ動かすから平均は変わっていないのではないか」という戸惑いの発語が伴っており、数式表現と可視化とのつながりを把握することの必要性を理解しつつも、可視化の中で注目すべき点に関する議論が発生せず、データ点全体の分布に議論が傾いてしまっていることをうかがわせている。また、図9右側の動作が発生した時点からしばらく後に、数式表現を伴った発語と筆記が続いたものの、なかなか発話の内容が共有されず、右側の学習者から「伝わりましたかね」、「書いて説明したい」という言葉が発せられている。行動のパターンに関しては当然グループごとの特性があるので、本グループの事例のみから断定的なことは言えないが、全体を通して対面の場合と比較して指示動作の頻度がかなり低く、学習活動により長い時間を要する背景となった可能性が示唆される。

このような行動パターンの差異を定量的に可視化・分析するためには、録画画像をもとにテキスト化するなどといった方法では、データの時間的な粒度が低く、不十分である。現在、我々の研究グループでは、深度つきセンサーカメラを用いて学習者の手指や頭部が教具の上に位置しているか否かを自動的に把握する方法を検討している。すでにいくつかの学習テーマに関する対面での協調学習の実験の際に試しているが、行動分析ソフト Sportscodel(<https://www.hudl.com/products/sportscodel>)を用いた行動の手作業でのコーディング結果と、センサーから得られるログのタイムライン上への可視化との対照により、該当の動作を相当の精度で捕捉できることが判明しつつある[9, 10]。上述のような定量的でかつ時間的な粒度の高い取り扱いを行う上で、このようなセンシング技術を活用することは有力な手段となることが期待され、実際、現在世界的に進展しつつあるマルチモーダルなラーニングアナリティクスについて、多くの研究で同様の手法が追究されている[11, 12]。また、仮にこのような研究の蓄積によりセンサーデータから学習の行き詰り等を示唆するシグナルが検出できるようになった場合、学習が行われる場所にセンサーを設置して、計測データを送信させる方法が考えられる。こうした場合、教員が可視化されたデータを確認し、学習状況を確認する上で、ダッシュボードが必須の手段となってくる[13]。我々の研究グループでも、センサーのログと対話テキストを表示した上で、マルチモーダルな分析を行なうためのダッシュボードを試作しているが[14]、画面の構成や動作などについて検討すべき課題がまだ山積しており、今後、併せて追究していきたいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K02951, 25K06477 の助成を受けている。

参考文献

- [1] 高遠節夫, 濱口直樹, 北本卓也, 1次元表現ルールに基づいた数式の送受と授業実践, 城西大学数学科数学教育紀要 4 (2023), 23-34.

- [2] 高遠節夫, 碓水久, 西浦孝治, 濱口直樹, KeT-LMS の開発と授業実践, 城西大学数学科数学教育紀要 5 (2024), 38–49.
- [3] KeTCindy Home, <https://s-takato.github.io/ketcindyorg/indexj.html>
- [4] T. Kitamoto, M. Kaneko, S. Takato : "E-learning system with Computer Algebra based on JavaScript programming language", Proc. of ATCM 2018, Yogyakarta, 2018, 123-133.
- [5] Cinderella Official Home Page : URL <https://www.cinderella.de/tiki-index.php> (2024 年 11 月 15 日閲覧)
- [6] PyScript Official Home Page : URL <https://pyscript.net/> (2024 年 11 月 15 日閲覧)
- [7] Apache Echarts Official Home Page:URL <https://echarts.apache.org/en/index.html> (2024 年 11 月 15 日閲覧)
- [8] Js spreadsheet Official Home Page : URL <https://jsspreadsheet.com/> (2024 年 11 月 15 日閲覧)
- [9] Kaneko M., Egi H., Kitamoto T., Noda T.: The multimodal analysis of learners' mathematical proof activity in a CSCL environment, Proceedings of CSCL 2024, pp. 383–384, 2024
- [10] Kaneko M., Egi H., Kitamoto T., Noda T.: The use of sensor data for the multimodal analysis of mathematical proof activity in a CSCL environment, to appear in Proceedings of ICCE 2025, 2025
- [11] Blikstein P., Worsley M.: Multimodal learning analytics and educational data mining: Using computational technologies to measure complex learning tasks, Journal of Learning Analytics 3(2), pp. 220–238, 2016
- [12] Cukurova M., Giannakos M., Martinez-Maldonado R.: The promise and challenges of multimodal learning analytics, British Journal of Educational Technology 51, doi:10.1111/bjet.13015, 2020
- [13] Echeverria V., Yan L., Zhao L., Abel S., Alfredo R., Dix S., Jaggard H., Wotherpoon R., Osborne A., Shum S. B., Gašević D., Martinez-Maldonado R.: Team-Slides: a multimodal teamwork analytics dashboard for teacher-guided reflection in a physical learning space, Proceedings of LAK'24, pp. 112–122, 2024.
- [14] 金子真隆, 北本卓也, 江木啓訓, 野田健夫: 動的幾何を用いた数学の探究的協調学習のプロセスを可視化するマルチモーダル LA ダッシュボードの開発, 日本教育工学会 2025 年秋季全国大会講演論文集, pp. 467–468, 2025