

明治大学大学院

2023年度 修士論文

論文題名 基礎的な数式の構造理解を支援するハイライト手法に

関する研究

先端数理科学研究科 先端メディアサイエンス専攻

指導教員名 中村聡史

本人氏名 植木里帆

2023 年度 修士学位請求論文

基礎的な数式の構造理解を支援する
ハイライト手法に関する研究

明治大学大学院先端数理科学研究科

先端メディアサイエンス専攻

植木 里帆

Master's Thesis

Research on highlighting methods to support
structural understanding of basic calculations

Frontier Media Science Program,
Graduate School of Advanced Mathematical Sciences,
Meiji University
Riho Ueki

概要

基礎計算はその後の数学学習の基盤になるものであり、また生活に必要な計算の基本にもなりうる。そのため、基礎計算の習得は重要である。しかしながら、算数から数学への数学的概念の違いによる認知ギャップや、数学不安を抱える人のワーキングメモリの容量不足、数学学習からの期間が空いてしまったこと、注意欠陥などが原因となり、基礎計算でミスをしてしまう。ここで、計算スキルには数式の構造を理解する能力の重要性が明らかになっており、数式の構造理解を支援することが計算ミス減少につながると考えられる。数式と同様に複雑なものとして、プログラミングがある。プログラミングツールには、シンタックスハイライトと呼ばれるソースコードの予約語や区切り記号にハイライトがされる機能が備わっていることが多い。このシンタックスハイライトにより、視覚的にソースコードの構造がわかるようになっている。

そこで本研究では、「数式の一部へハイライトを行うことで、数式の構造が理解しやすくなり、計算ミスが減少あるいは計算が素早くできるようになる」と仮説を立て、数式ハイライト手法を提案する。また、数式の構造理解を支援する適切なハイライト法について実験を通して検討する。

まずは、数式へのハイライトが数式の構造理解を促進し、正確で素早い計算を可能にするかを調査するためのプレ実験を行った。プレ実験では「=」「+」「-」「×」「÷」のような数学記号に焦点を当て、「数学記号へのハイライトが構造理解を促進し、正確で素早い計算を可能にする」という仮説のもと実験を行った。プレ実験は理想的なハイライト状態を擬似的に作りだし、2種類の実験を行うことにより調査した。プレ実験の結果、2種類の実験ともに微小であるが平均得点はハイライトありの方が高かった。また、これらの実験が数式へのハイライトの影響を反映する可能性が明らかになった。

次に、ハイライト対象を数学記号、括弧、同類項、また、ハイライト方法を文字色変え、マーカー（背景色変え）、アンダーラインで組み合わせた複数のハイライト手法において、最適なハイライト法を正誤判定による実験により検討した。実験の結果、マーカーをひくハイライト法が効果的である可能性や数式の構造理解が必要な計算問題タイプにおけるハイライトは効果的である可能性、間違いを含みやすい箇所にハイライトしないと却ってミスを誘発する可能性などが明らかになった。

これらの最適な数式ハイライト法の調査結果およびプロトタイプシステムの課題整理より、数式の構造理解を支援するリアルタイム数式ハイライトシステムの可能性について述べる。

Abstract

Fundamental calculations form the basis for applied mathematics and can also be the basis for calculations necessary in daily life. Learning basic computation is therefore important. However, cognitive gaps due to differences in mathematical concepts between errors arithmetic and mathematics, insufficient working memory capacity in individuals with mathematics anxiety, periods of absence from mathematical learning, and attention deficits can lead to errors in basic arithmetic. Here, the importance of the ability to understand the structure of mathematical formulae for computational skills has been made clear, and supporting the understanding of the structure of mathematical formulae is thought to lead to a reduction in computational errors. Similarly complex to mathematical formulae are programming. Programming tools are often equipped with a function called syntax highlighting, which visually distinguishes reserved words and delimiters in the source code. This syntax highlighting makes it visually easier to understand the structure of the source code.

In this study, I hypothesize that “highlighting parts of a formula can make it easier to understand its structure, leading to fewer calculation errors or faster calculation” and propose a method of highlighting formulae. Moreover, I investigate the appropriate highlighting methods to support the understanding of equation structure through experiments.

First, preliminary experiments were conducted to investigate whether highlighting mathematical expressions facilitates understanding of their structure and enables accurate and quick calculations. In the preliminary experiment, I focused on mathematical symbols such as "=", "+", "-", "×," and "÷." I hypothesized that “highlighting mathematical symbols promotes structural understanding and enable accurate and quick calculations.” Preliminary experiments were conducted by simulating ideal highlighting conditions and performing two types of experiments. The results of the preliminary experiments showed that, although slight, the average scores for the two experiments were higher with highlights than without. The results also revealed the potential for highlighting effects on mathematical formulae.

Next, I investigated the optimal highlighting methods in experiments based on correctness judgment, using multiple highlighting methods that combined mathematical symbols, parentheses, like terms, and highlighting methods such as changing text color, using a marker (changing background color), and underlining. The experimental results indicated the potential effectiveness of highlighting with a marker, the effectiveness of highlighting in calculation problem types that require an understanding of mathematical formula structure, and the possibility that highlighting incorrect areas could inadvertently induce errors.

Based on the results of optimal equation highlighting methods and the organization of issues with the prototype system, I discuss the potential of a real-time equation highlighting system to support the understanding of equation structure.

目次

第1章	はじめに	1
1.1.	基礎計算の重要性	1
1.2.	基礎計算における計算ミス	1
1.3.	数式の構造理解と複雑さ	2
1.4.	シンタックスハイライト	3
1.5.	本研究の目的	3
1.6.	本研究の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1.	基礎計算に関する研究	5
2.1.1.	中学校数学への苦手意識や不安に関する研究	5
2.1.2.	数式の構造に関する研究	5
2.2.	計算支援システムに関する研究	6
2.3.	色付けによる支援に関する研究	7
第3章	提案手法と調査方法	9
3.1.	提案手法	9
3.2.	記号の理解	9
3.3.	数学記号ハイライト手法	9
3.4.	手法の有効性調査のためのプレ実験	10
3.4.1.	プレ実験概要	10
3.4.2.	プレ実験の結果と考察	14
第4章	6条件比較実験	16
4.1.	本章の概要	16
4.2.	目的	16
4.3.	実験	16
4.3.1.	実験概要	16
4.3.2.	数式のハイライト手法の検討	17
4.3.3.	実験システム	18
4.4.	実験結果	19
4.4.1.	分析の前処理	19
4.4.2.	正答率の分析結果	21
4.4.3.	解答時間の分析結果	22
4.5.	考察	23

4.5.1.	正答率と解答時間の結果に関する考察.....	23
4.5.2.	間違ったデータの分析による考察.....	24
第5章	文系対象実験.....	26
5.1.	目的.....	26
5.2.	実験.....	26
5.2.1.	実験概要.....	26
5.2.2.	比較するハイライト手法.....	26
5.2.3.	実験の流れ.....	28
5.2.4.	実験システム.....	29
5.3.	実験結果.....	30
5.3.1.	分析の前処理.....	30
5.3.2.	Baseline 条件の結果.....	30
5.3.3.	B-color 条件と B-marker 条件の結果.....	32
5.4.	考察.....	33
5.4.1.	正答率と解答時間による考察.....	33
5.4.2.	間違ったデータの分析による考察.....	33
第6章	クラウドソーシング実験.....	35
6.1.	目的.....	35
6.2.	実験.....	35
6.2.1.	実験設計.....	35
6.2.2.	実験システムと流れ.....	37
6.2.3.	実験の手順.....	38
6.3.	実験結果.....	38
6.3.1.	分析の前処理.....	38
6.3.2.	各条件における正答率の結果.....	40
6.3.3.	解答時間の結果.....	42
6.3.4.	きれいな字と雑な字の結果.....	42
6.3.5.	問題難易度の差.....	42
6.3.6.	間違い方の違いによる差.....	43
6.4.	考察.....	44
6.4.1.	最適なハイライト手法の考察.....	44
6.4.2.	文字の違いによる考察.....	44
6.4.3.	問題難易度の差に関する考察.....	45
6.4.4.	間違い方による違い.....	46
第7章	クラウドソーシング追実験.....	48
7.1.	追実験の概要.....	48

7.2.	追実験の結果	49
7.2.1.	各条件における正答率の結果	49
7.2.2.	解答時間の結果	51
7.2.3.	きれいな字と雑な字の結果	51
7.2.4.	問題難易度の差	51
7.2.5.	間違い方の違いによる差.....	52
7.3.	前実験と追実験の考察.....	52
第8章	総合考察と今後の展望	55
8.1.	総合考察.....	55
8.2.	リアルタイム数式ハイライトシステム	55
第9章	おわりに	57

第1章 はじめに

1.1. 基礎計算の重要性

基礎計算の習得は重要である。ここでいう基礎計算とは、中学校1年生で学習する正負の数や文字式の計算のことを示している。正負の数について柳本[1]は、「後々、数学の学習を進めていくための基礎的な内容であるから、生徒たちは確実に理解し、習熟しておく必要がある」としている。また、岡崎[2]は「計算技能だけを問題にするのであれば、中学校1年の正負の数の学習指導を殊更問題視する必要はないのかもしれないが、それが代数の導入過程の一過程であるとともに、中学校数学の出発点であることを考えれば、大きな問題となる」と述べている。文字式については、三輪[3]は「文字式は、数学における思考の手段として、類のない価値高いものと言うことができる」と述べている。また、計算能力全般においては、Shapiro[4]は近年の学校カリキュラムでは問題解決能力の指導に重点を置いており、計算能力の指導が減少しているが、計算能力はお金、時間、測定、幾何学などの数学スキルの基礎として役立つとしている。これらのことからわかるように、基礎計算はその後の数学学習の基盤になるものである。

1.2. 基礎計算における計算ミス

前節のとおり、基礎計算は数学学習にとって重要であり、この基礎計算でつまずくと計算ミスを繰り返すことになり、取れたはずの点数を落としてしまうことになる。実際、Gerstenら[5]は基礎計算が身につけていない生徒は、基礎となる数学的概念の理解や問題解決へのアプローチが困難である場合があるとしている。そのため、中学1年生の数学では、正負の数や文字式の計算といった基礎計算の単元を最初に学習することが多い。しかし、基礎計算の習得でつまずく生徒は多い[6]-[8]。それは算数と数学の考え方の違いが大きいことに起因する[9][10]。例えば、小学校では「 $3+5=?$ 」のようにイコール記号は式と結果を結ぶものという認識で学習するが、中学校では同値関係を示す記号であるという認識をしなければならない。Herscovicsら[11]によると、このイコール記号の意味を正しく理解できないと、計算順序の誤解が頻繁に起こると示されている。また、Linchevskiら[12]やLunetaら[13]によると、小学校では「+」や「-」は「足す」「引く」を表す演算記号の認識であったが、中学校では「正の数」「負の数」を表す符号として解釈する必要があるが、ここで認知ギャップが生じるとしている。そのため小学校から中学校に進学した際に数学に対して苦手意識をもつ生徒は多く、こういった生徒は基礎計算において計算ミスを多発してしまうと考えられる。

一方で、前述した中学生以外にも、一度基礎計算を学習した人でも基礎計算のミスをすることは十分考えられる。数学に不安を抱える人は、計算時のワーキングメモリ容量が小さい

という研究報告はいくつかあり[14]-[17], そういった人は不安感を取り除くか, ワーキングメモリ容量を補うような支援が必要である. また, 数学学習から期間が空いてしまったことによる問題も考えられる. 例えば, 高校の文理選択で文系コースを選んだ人はそれ以降数学を学習する機会が少なくなり, 計算順序をミスしてしまう可能性がある. また, 数学を学習する機会が確保されている人でも計算ミスを起こしてしまうことも考えられる. Elena ら[18]は計算などの基本的な学習スキルの習得に関して, 注意欠陥が影響すると明らかにしている. 注意欠陥による計算ミスは経験数や理系文系に関係なく付きまとう課題である.

以上のように数学学習でつまづかないため, あるいはケアレスミスのような惜しいミスをしないためには計算ミスをしないように訓練する必要がある.

1.3. 数式の構造理解と複雑さ

数式には数字の他に符号や演算記号などの数学記号や x , y などの文字が含まれ, 長い式になればなるほど複雑化する. Linchevski[19]は複雑な数式を解くためには, 数式の構造を理解する能力である“構造感覚”が重要であると説明している. また, Maureen ら[20]や Drijvers ら[21]は, 数式の構造感覚に必要な考え方を次のように示している.

- 数式を単純な形で見慣れた構造として認識すること
- 多項式や文字式が含まれる数式において, 特定の複号項をひとつのまとまりとして扱い, 適切な置換を行い見慣れた構造として認識すること
- 認識した構造を用いて数式を解くために適切な操作を選択すること

一つめは, 図1の例1のように「二次方程式は左辺に各項を集め, 降べきの順に並べる」といった因数分解をする手前の“見慣れた形”を作ることができる数式であると認識することを示している. また, 二つめは, 図1の例2のように一見複雑な数式でも同一の形($3x^2 - 4$)が含まれていることに気づき, 置き換えによって例1の最後の行のような見慣れた構造の数式であると認識することを示している.

このように, 数式の構造を理解できなければ, 次に行うべき適切な操作の選択もできず, 曖昧なまま誤った計算をしてしまうことにつながる. そのため, 間違えずに数式を解くには, 数式の構造感覚を掴む練習が必要である.

例1)	$3x^2 - 6 - 8x + 4 = -x^2 - 2x$ $3x^2 - 6 - 8x + 4 + x^2 + 2x = 0$ $\underline{4x^2 - 6x - 2 = 0}$	例2)	$(3x^2 - 4)^2 - 3x^2 + 4 + 6 = 0$ $3x^2 - 4 = X \text{ とおく}$ $\underline{X^2 - X + 6 = 0}$
-----	--	-----	--

図1 数式の構造を適切に認識し操作した例

1.4. シンタックスハイライト

数式のように構造が複雑なテキストの可読性を上げて理解を促進する方法として、シンタックスハイライトというものが知られている。これは一部のテキストや記号の色、フォントをある分類ごとに変えることで、複雑なテキストも明瞭になり、文脈を理解しやすくなることのできる方法である。シンタックスハイライトが多く使用されている場面としてプログラミングにおけるコーディングがある。ここではソースコードの予約語や区切り記号にハイライトがされる。一般的にプログラムのコードは長くなりがちであり、何も色付けのされていないコードをブロック単位で理解するには時間がかかる。また、一箇所でも間違いがあるとエラーが発生しプログラムが動作しなくなってしまう。そのため、プログラムのコードを書く人にとって瞬時にコードを理解でき、間違っている箇所の発見を容易にするシンタックスハイライトは欠かせない機能となっている。Advait[22]はシンタックスハイライトありとシンタックスハイライトなしのコードについてタスクを用意し、被験者内でタスクへのパフォーマンスを比較した。実験の結果、シンタックスハイライトありの方がシンタックスハイライトなしの方よりタスク完了時間が大幅に短縮することを明らかにした。このようにシンタックスハイライトは可読性を上げる手法として様々な場面で役立っている。

1.5. 本研究の目的

1.1 節で述べたように、基礎計算における計算ミスは早い段階で減らすことは重要である。また、1.2 節のとおり数式は複雑であり、構造理解を瞬時にすることは容易ではない。そこで、本研究の問いは、数式の構造理解を深めることが計算能力にどのような影響を与えるかということである。この問いを明らかにすることを目的とする。そのため、1.3 節で述べたシンタックスハイライトのように、「数式の一部へハイライトを行うことで、数式の構造が理解しやすくなり、計算ミスが減少あるいは計算が素早くできるようになる」と仮説を立てた。そこで本研究では、中学校1年生の初頭に学習する正負の数や文字式といった基礎計算を対象に計算ミスを防止するため、数式の特定箇所にハイライトをする手法を提案する。

本研究では、数学記号に焦点を当てた数式ハイライト手法を提案し、プレ実験により提案手法の有効性の調査方法を検討する。次に、数式にハイライトするにはどういったハイライトの仕方が最適かを調査するため、複数のハイライト方法をすでに最後まで計算された計算式の正誤を判定する実験により検証する。最後に数式の構造理解を促進することやそれによる計算ミス減少に効果的である最適なハイライト法の調査結果をまとめ、計算中にリアルタイムでハイライトを行う数式ハイライトシステムの可能性について検討する。

1.6. 本研究の構成

本論文は、本章を含む全 9 章から構成される。まず本章で、基礎的な計算におけるミスを減少させることの重要性と数式の構造理解促進が計算力に影響を与える可能性について述べた。これ以降、2 章では本研究の関連研究について述べる。3 章では数学記号へのハイライト手法を提案し、手法の有効性の調査方法を検討する。4 章では数式の構造理解において最適な数式ハイライト手法を検討するため、理工系大学生を対象に 5 種類の数式ハイライト手法を用いた実験を行った結果について述べる。5 章では 4 章の実験の結果を踏まえ、人文系大学生を対象に 2 種類の数式ハイライト手法に限定した実験を行い、その結果について述べる。6, 7 章では、4, 5 章の結果を踏まえ、大学生より数学に触れる機会が少ない人が多い Yahoo!クラウドソーシングサービスを利用して、ハイライトの色や問題の種類を統一した実験を行った結果について述べる。8 章では、3 章から 7 章にかけて行った数式の構造理解における最適なハイライト調査の総合考察を述べ、数式ハイライトシステムへの応用可能性を検討する。最後に、9 章で本研究のまとめを行う。

第2章 関連研究

2.1. 基礎計算に関する研究

2.1.1. 中学校数学への苦手意識や不安に関する研究

日本では中学校数学は義務教育であり、一般教養としてその知識や技能を使いこなせることが望まれている。しかし、数学の計算を苦手とする人は多い。その実態や原因の調査、解決策を提案する研究は、教育心理学や発達神経科学などの幅広い分野で数多くされている。

荒木ら[23]は、大学生 217 名を対象に数学を苦手と感じる尺度についてアンケート調査を行った。因子分析の結果、39 項目が数学を学習することや数学に関わることにに対して苦手意識をもっていることを表す数学学習行動因子と、数学の能力を日常生活に応用する場面で感じる苦手意識を表す数学日常応用因子で構成されていることを明らかにしている。また、この分析結果から得られた数学苦手尺度を用いて、数学に対して苦手と感じる気持ちの方が、解けない問題に出会ったときに感じる学習性無力感よりも、数学の問題を解く際のパフォーマンスに影響を与えることを明らかにしている。

池間[24]は、小学生から中学生に上がるタイミングで数学を好きと感じる生徒が大幅に減少するというデータの原因が、「正負の数」という新しい概念が数学への興味・関心に影響していることであると考えた。そこで、「正負の数」に関して家庭学習の充実を図るため、教科書の読み方とノートの作り方の指導を重点的にすべきという提案をしている。

Ashcraft ら[25]は、数学に対する不安が強い人は、特に計算問題ではワーキングメモリの容量が小さいことを明らかにしている。

中学生の数学学習の機会を増やすことを目的として、数学の成績がいい人と低い人を分けて、成績が低い人に対して特別プログラムを実施する研究も行われている[26]。

本研究はこれらの研究と同様に数学の計算を苦手とする人にも支援を行うものである。

2.1.2. 数式の構造に関する研究

Maureen[27]は、高校数学の計算における数式の構造感覚では、括弧がどのような役割を果たしているのか調査した。92 名の高校生に括弧のない計算と括弧のある計算を解かせたところ、構造感覚を理解している解き方をした割合が、括弧なしでは 6.3%、括弧ありでは 13.6%や 17.7%と増加した。また、中級者より上級者の方が構造感覚のある解き方をしており、正確にすばやく計算できていたことも明らかにしている。

Joseph ら[28]は、高校生の代数学問題の解法を分析した。その結果、十分な数学的知識と計算技術をもっている生徒は計算作業をうまく遂行するのに対し、計算問題の構造的特性を理解していない人は計算結果が曖昧になり、計算ミスにつながったことを明らかにした。

Jupri ら[29][30]は、構造感覚の観点から学生の代数の習熟を調査している。いくつかの実験を行い、その分析結果から、実験に参加した学生の約3分の2は構造感覚が欠如しており、方程式を解く際は構造感覚よりも手続き（操作）を意識している傾向があることを明らかにしている。

Junarti ら[31]は、構造感覚のパターンを調査することを目的とした調査を行った。その結果、数式の構造感覚が代数の理解において重要な要素であることを明らかにしている。

Libenberg ら[32][33]は数学教育で計算に重点を置きすぎるため、記号などの深い構造理解を理解できていない問題点に着目し、構造理解の理解度について6年生のクラスを対象に調査を行った。結果として、多くの生徒が構造理解に苦勞していることを明らかにしている。また、より難しい代数の学習のためには構造理解を理解していることが必要であることを明らかにしている。

本研究も数式の構造理解が計算ミスに影響するという考えのもと、その構造理解を促進するものである。

2.2. 計算支援システムに関する研究

前節のように数学の計算を苦手とする人は多く、様々な解決策が検討されている。また、近年はeラーニングの流行により小学生や中学生の教育においてもタブレット端末を用いた授業スタイルが主流になりつつある。Dong ら[34]は、数学教育における視覚化の重要性により、数学教育におけるコンピュータの役割が増大しているとしている。そのため、電子的な数学の補助を目的としたアプリケーションやシステムが登場するようになった。

Microsoft Math Solver[35]や Photomath[36]というアプリはカメラで計算問題を認識し、読み込み、計算をして答えを提示する。また、計算の仕方をステップごとに表示する機能も搭載している。Saundarajan ら[37]は、Photomath をマレーシアの中学生に2週間利用してもらい、アプリの効果と生徒の反応を調査した。実験の結果、Photomath を利用する前のテストと利用後のテストでは平均点が約1点上昇し、t検定の結果、有意差がみられた。また、Photomath に対する生徒の反応は概ね良好で、これからも使用したいとの意見が得られた。しかしこれらのアプリでは答えが自動で計算されて提示され、計算の仕方を直接的に教えるものであり、自分で考えて計算する力がつきにくいことが問題点としてある。

John ら[38]は中学生の計算ミス进行分析し、生徒が計算ミスを戦略的に発見する能力を身につけるためのBUGGYというシステムを作成した。BUGGYは同じ誤りを含む計算を5問表示し、生徒が5問とも計算ミスを見つければ、次の違う誤りを含む計算を表示していくというものである。このシステムを中学1年生と中学2年生に自由に使用させたところ、最

初は「このような計算ミスをするなんてシステムは頭が悪い」という態度であったが、次第にどうしてその計算ミスに至ったのかには体系的な理由があることを理解するようになった。この結果より、計算ミスを発見することで、自分の誤りを理解する訓練になったことを明らかにしている。

森重ら[39]は手書きの計算過程について、行単位で正誤判定し即座にフィードバックを行うシステムのプロトタイプを作成した。このシステムにより、学習者の習熟度によらない正誤フィードバックが可能となり、問題設定についても複雑な問題設定ツールを用いない設計にすることで問題設定の負担軽減を目指した。また、作成したプロトタイプの試行により手書き数式の誤認識などいくつかの問題点を発見した。同様に、千葉ら[40]はタブレット PC 上での手書き数学 e ラーニングシステムを試作した。ユーザは表示された問題に手書きで途中式を記入し、システムは解答のみ認識を行って正答と比較する。ここで千葉らは、複数行にわたる途中式の認識はまだ研究段階にあるとしている。

他にも電子的な支援の研究は多数行われている[41]-[44]が、本研究はこれらのアプリケーションやシステムとは異なり、自らの計算ミスを発見し、計算スキルの向上を目指すものである。

2.3. 色付けによる支援に関する研究

テキストの色変更やハイライトをつけて強調することにより、文書やプログラムコードの理解を促進する研究は数多く行われている。

Hend ら[45]は、アラビア語の単語を分解（デコード）して単語の理解をやすくするため、アラビア語のテキストに自動で色をつける Web ベースのシステムである Arcode を実装した。実験では 10 人の生徒と 5 人の教師に白紙を配布し、与えられたアラビア語のテキストのすべての接頭語と接尾語を書き出すように指示し、システムを利用した場合と利用していない場合で比較した。実験の結果、システム利用の場合に、生徒も教師も良いスコアを示し、システムの有効性を明らかにしている。

Marco[46]は LATEX でのシンタックスハイライト応用における欠点を示し、その改善策を提案した。また、この研究がシンタックスハイライトを使用するためのガイドラインとしてだけでなく、シンタックスハイライトに対する説得力のない批判に対抗する根拠となると述べている。

Beelders ら[47]はプログラムコードのシンタックスハイライトが学生のソースコードの理解に影響を及ぼすかを調査した。シンタックスハイライトとは、プログラムコードの一部の色が変わることをいう。実験の結果、主観的に学生はシンタックスハイライトのされたプログラムのコードの方がシンタックスハイライトのされていないコードより読みやすいことを明らかにしている。同様に、Advait[22]はシンタックスハイライトありとシンタックスハイライトなしのコードについてタスクを用意し、被験者内で比較した。実験の結果、シンタ

ックスハイライトありの方がシンタックスハイライトなしの方よりタスク完了時間が大幅に短縮し、この効果がプログラミングの経験の増加とともに弱まることを明らかにしている。また、Gerard[48]はプログラムの読みやすさと理解に対する色の影響を調査した。実験では、プログラム内をブロックごとに色付けしたもの（Color-scheme-A）、プログラム内のテキストに色付けしたもの（Color-scheme-B）、白黒のプログラムの3種類を用意し、理解度を評価した。実験の結果、被験者のプログラム理解の平均スコアは、Color-scheme-Bが最も高く、次にColor-scheme-Aが高かった。つまり、色による強調がされている方がプログラムの理解をしやすいたことが示唆された。Tappら[49]は色付けとフォントサイズの変更ではどちらがプログラムの理解に役立つかを調査した。実験では、強調部分に色をつけたプログラムコードとフォントサイズを変更したプログラムコードに対して、被験者はそれぞれコード最適化タスクを行った。実験の結果、色付けによりコード最適化タスクの実行にかかる時間が短縮し、好まれること、また、フォントサイズの変更は大きな影響を与えないことを明らかにしている。

本研究はこれらの研究のように、数式の一部に色付けを行い、見やすくすることで数式の構造理解促進をするものである。

また、Kercoodら[50]は、注意問題をもつ小学生が計算問題に自らハイライトを施した場合に精度や態度がどの様に変化するかを調査した。結果として、操作（演算記号）にマーカーをした生徒の数学計算の精度が向上し、課題外の行動が減少したことを明らかにしている。この研究は数式にハイライトをしたものであるが、自分でハイライトをしており、システムなど自動でハイライトがされるものではない。また、構造理解や代数的な計算を対象としてハイライトの調査は行っていない。

第3章 提案手法と調査方法

3.1. 提案手法

中学生が間違えやすい計算として、符号間違いや計算順序の誤り、数字と文字のまとまりに対する意識の不足などがあげられる。例えば、交換法則による数式の順番の入れ替えや、負の数の分配をする際には間違いが起りやすい。こうした間違いを低減するには、数式の構造を理解することが重要である。

ここで IDE などを用いてプログラムを書いている際、括弧や予約語などに自動で色がつくシンタックスハイライトがされる。こうしたシンタックスハイライトは、コードが見やすくなり、間違いに気づきやすくなるため、プログラミングにおいて欠かすことができないものである。

そこで、本研究では数式の構造の理解促進を目的とし、中学校1年生の初頭に学習する正負の数や文字式といった基礎計算を対象に計算ミスを防止するため、数式の特定箇所にハイライトをする手法を提案する。

3.2. 記号の理解

基礎計算の中でも、数学の計算を苦手とする生徒によって、特に苦手とする部分が異なる。例えば、四則計算の計算順序を苦手とする生徒や、暗算や筆算を苦手とする生徒などが存在する。ここで、藁科ら[17]は数学の苦手意識の要因が数学記号にある可能性を述べている。従来数学では、「1000 円の本と 100 円のボールペンを購入するときの合計金額」のように日常的にイメージのつきやすい計算を主としていた。しかし、数学記号が採用されてから、どんな計算も機械的に行えるようになったものの、「面積と体積を足す」のような本来ありえない計算までも行うことができるようになり、計算の目的がわからなくなることがある。つまり、数学記号が計算時に混乱を招く原因になる。また、数式の移行によって、符号の扱いがより複雑になるので数式の構造理解を把握することも重要である。よって、数学記号の意味を意識して計算する必要がある。

3.3. 数学記号ハイライト手法

ここで、1.2 節でも述べたように、計算スキルの習得には、注意欠陥が影響すると明らかになっている。また、3.2 節にも示したように、数式に含まれる記号の理解は重要であり、計算が不得意な生徒は計算問題を解く際に、符号などの気をつけるべき箇所の見落としが多い。そのため、ユーザが記入した数式に対して、符号や演算子、括弧などの記号をメインに自動で色付けを行うことにより、ユーザは視覚的に計算の方針を立てやすくなり、構造を

意識した計算をすることで計算ミスが減少すると仮説を立てた。また、記号に色がつくことでミスのしやすい符号や計算順序に意識が向きやすくなり、見直しをするときの要点を押さえることができるようになると考えた。そこで、数式の中でも主に数学記号をハイライトする手法を提案する。具体的に「=」「+」「-」「×」「÷」のような数学記号にハイライトを行うと、「=」は途中式の「=」を縦に揃えて書くようになり、「+」「-」は符号に意識が向き、「×」「÷」は計算順序に気をつけるようになると期待される。

3.4. 手法の有効性調査のためのプレ実験

数学記号へのハイライトが数式の構造理解を促進し、ユーザの計算にどのような影響を及ぼすのかを調査するため、2種類のプレ実験を実施し、プレ実験が手法の影響を反映するのかを検討する。

3.4.1. プレ実験概要

すでに色が付与された状態の数式を見て計算した際にどのような影響があるのか、理想的なハイライトがされた状態を擬似的に作ることで調査を行った。調査のための実験は2種類である。1種類目の実験は、途中まで書かれた計算式の数学記号にすでに色が付与された状態で、最後の答えを計算させるものである。問題は計10問で、問題によって何行か途中式が書かれている。この理由は、プレ実験ではリアルタイムで数式に色を付与することができないため、最初から計算をさせても途中式に色につかない。そのため、途中式に色が付与された状態を擬似的に作るため、途中まで計算がされた式が色付与ありの状態で行われている。また、途中式が書かれておらず問題のみのものである。この実験では、数学記号に色が付与されることで数学記号に対して気をつけるべきこと（符号を変えるなど）に素早く反応し、正答することができるかを調査する。2種類目の実験は、すでに答えまで計算された式の数学記号に色を付与し、答えが誤っているものを探し出すものである。解答については、すでに最後まで計算された10問の中から答えが誤っている問題番号をすべて、また、何行目の途中式から誤っているかを解答してもらう。この実験では、数学記号への色の付与により見直しが容易になるかを調査する。2種類のそれぞれの実験で色が付与されたものと付与されていないものを用意し、その正答率とかかった時間で比較する。以降、1種類目の実験を「解答実験」、2種類目の実験を「間違い探し実験」と表記する。

ここで、MacGregorら[51]は代数を習ったばかりの代数初級者の解答アプローチは、代数の知識を使いこなせるようになった人と異なることを明らかにしており、Maureen[27]は代数の知識がある者でも高度な代数学（三角関数、微分積分など）の問題を解く際に基本的な代数的知識の応用ができないことがあると述べている。そこで、中学校・高校を経た大学生や大学院生についても分配法則や同類項をまとめるといった基礎計算の手順は変わらずに

計算する必要があるため、実験は大学生 11 名、大学院生 10 名に協力を依頼した。大学生に解答実験の色あり、間違い探し実験の色なしを、大学院生に解答実験の色なし、間違い探し実験の色ありを行ってもらった。色をつける数学記号は、今回は「=」「+」「-」「×」「÷」に限定し、図2のような色で示すこととした。なお、色の設定においては、頻繁に使用する記号「=」「+」「-」ができるだけ似通った色にならないように注意した。

準備として手元に紙とペン、時間が計測できるものを用意してもらい、実験の概要ややり方などの説明と注意事項、実験の問題が記載されたパワーポイントあるいは PDF をダウンロードして実験を行ってもらった。注意事項には解答方法や時間を計測するタイミング、フルスクリーンにする指示などを記載した。実験で使用した問題を図3-6に示す。

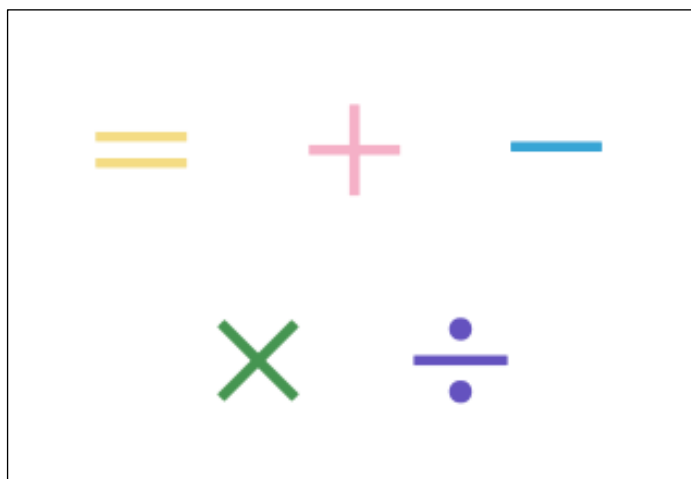


図2 数学記号の色

① $7 - (-2) - 4$ $= 7 + 2 - 4$	② $-2(5a + 2 - 8a - 1)$ $= -2(-3a + 1)$	③ $(31a - 4) \times (-3) + 6a$ $= -93a + 12 + 6a$
④ $9a \times 5 - 2a \times (-2)$ $= 45a + 4a$	⑤ $3(7k - 5) - 4k$ $= 21k - 15 - 4k$	⑥ $(-6) - (-13) + 7$ $= -6 + 13 + 7$
⑦ $5 - (-6b) \times (-3)$	⑧ $38 - 2a - 17 + 5a - 4 - 7a$ $= 38 - 17 - 4 - 2a + 5a - 7a$ $= 38 - 21 - 9a + 5a$	⑨ $(5b + 3) - 2(8 - 7b)$ $= 5b + 3 - 16 + 14b$
⑩ $(4a + 9) - (a - 5)$ $= 4a + 9 - a + 5$		

図3 解答実験色ありの問題

① $7 - (-2) - 4$ $= 7 + 2 - 4$	② $-2(5a + 2 - 8a - 1)$ $= -2(-3a + 1)$	③ $(31a - 4) \times (-3) + 6a$ $= -93a + 12 + 6a$
④ $9a \times 5 - 2a \times (-2)$ $= 45a + 4a$	⑤ $3(7k - 5) - 4k$ $= 21k - 15 - 4k$	⑥ $(-6) - (-13) + 7$ $= -6 + 13 + 7$
⑦ $5 - (-6b) \times (-3)$	⑧ $38 - 2a - 17 + 5a - 4 - 7a$ $= 38 - 17 - 4 - 2a + 5a - 7a$ $= 38 - 21 - 9a + 5a$	⑨ $(5b + 3) - 2(8 - 7b)$ $= 5b + 3 - 16 + 14b$
⑩ $(4a + 9) - (a - 5)$ $= 4a + 9 - a + 5$		

図4 解答実験色なしの問題

$\begin{aligned} \textcircled{1} & 6a^2b \times (-8b) \div 2b \\ &= 6a^2b \times (-4b) \\ &= -24a^2b^2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{2} & -(a-2b) + 4(2a+b) \\ &= -a+2b+8a+4b \\ &= -a+8a+2b+4b \\ &= 7a+6b \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{3} & x^2-3x+1+4x-x^2 \\ &= x^2-x^2-3x+4x+1 \\ &= x^2+x+1 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{4} & 2(3a+b)-3(a-5b) \\ &= 6a+2b-3a-15b \\ &= 6a-3a+2b-15b \\ &= 3a-13b \end{aligned}$
$\begin{aligned} \textcircled{5} & \frac{2a-b}{3} - \frac{5a+3b}{2} \\ &= \frac{4a-2b-15a-9b}{6} \\ &= \frac{4a-15a-2b-9b}{6} \\ &= \frac{-11a-11b}{6} \\ &= -\frac{11a+11b}{6} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{6} & 10-4 \div 3 \times 6 \\ &= 10 - \frac{4}{3} \times 6 \\ &= 10-8 \\ &= 2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{7} & \frac{5}{3}x^2y \div \left(-\frac{4}{3}xy\right) \\ &= \frac{5}{3}x^2y \times \left(-\frac{3}{4}xy\right) \\ &= -\frac{5}{4}x^2y^2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{8} & \frac{7a+b}{4} - \frac{a-4b}{4} \\ &= \frac{7a+b-a+4b}{4} \\ &= \frac{6a+5b}{4} \end{aligned}$
$\begin{aligned} \textcircled{9} & 3x^2-9x+2x+x^2 \\ &= 3x^2+x^2-9x+2x \\ &= 4x^2-7x \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{10} & -\frac{3}{2}x^2 \div \frac{3}{4}x \\ &= -\frac{3}{2}x^2 \times \frac{4}{3x} \\ &= -2x \end{aligned}$		

図5 間違い探し実験色ありの問題

$\begin{aligned} \textcircled{1} & 6a^2b \times (-8b) \div 2b \\ &= 6a^2b \times (-4b) \\ &= -24a^2b^2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{2} & -(a-2b) + 4(2a+b) \\ &= -a+2b+8a+4b \\ &= -a+8a+2b+4b \\ &= 7a+6b \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{3} & x^2-3x+1+4x-x^2 \\ &= x^2-x^2-3x+4x+1 \\ &= x^2+x+1 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{4} & 2(3a+b)-3(a-5b) \\ &= 6a+2b-3a-15b \\ &= 6a-3a+2b-15b \\ &= 3a-13b \end{aligned}$
$\begin{aligned} \textcircled{5} & \frac{2a-b}{3} - \frac{5a+3b}{2} \\ &= \frac{4a-2b-15a-9b}{6} \\ &= \frac{4a-15a-2b-9b}{6} \\ &= \frac{-11a-11b}{6} \\ &= -\frac{11a+11b}{6} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{6} & 10-4 \div 3 \times 6 \\ &= 10 - \frac{4}{3} \times 6 \\ &= 10-8 \\ &= 2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{7} & \frac{5}{3}x^2y \div \left(-\frac{4}{3}xy\right) \\ &= \frac{5}{3}x^2y \times \left(-\frac{3}{4}xy\right) \\ &= -\frac{5}{4}x^2y^2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{8} & \frac{7a+b}{4} - \frac{a-4b}{4} \\ &= \frac{7a+b-a+4b}{4} \\ &= \frac{6a+5b}{4} \end{aligned}$
$\begin{aligned} \textcircled{9} & 3x^2-9x+2x+x^2 \\ &= 3x^2+x^2-9x+2x \\ &= 4x^2-7x \end{aligned}$	$\begin{aligned} \textcircled{10} & -\frac{3}{2}x^2 \div \frac{3}{4}x \\ &= -\frac{3}{2}x^2 \times \frac{4}{3x} \\ &= -2x \end{aligned}$		

図6 間違い探し実験色なしの問題

3.4.2. プレ実験の結果と考察

解答実験と間違い探し実験における得点とかかった時間の平均と分散を表1に示す。解答実験における得点は1問正解するごとに1点加算される10点満点である。間違い探し実験では、問題番号1, 3, 4, 7が誤答であり、問題番号と間違えはじめの途中式が何行目かの両方が合っていて1点とし、最大で4点である。また、正答であるのに誤答であると解答されたものに関しては1点減点している。なお、今回の実験で正答であるのに誤答であると解答した問題番号が2つ以上ある実験協力者はいなかった。かかった時間の単位は秒である。

表1から解答実験では、僅差ではあるが色ありの方が色なしより平均得点が高く、平均時間が短いという結果となった。このことから色ありの方が短時間で正答率が上がる可能性がある。問題別に比較すると、色なしでは問7番の誤答が6名いたのに対し、色ありでは2名しかいなかった。問7番の問題は「 $5 - (-6b) \times (-3)$ 」で、色なしの間違いはほとんどが「 b 」を「6」と見間違えて計算したことによるものであった。数学記号への色の付与は、このような数字と文字の見間違いに効果的である可能性がある。

表1から間違い探し実験では、色ありの方が平均得点は高いが、平均時間が長くなる結果となった。このことから色ありの方が誤答を探すのに慎重になり、時間はかかるものの誤答を見つけやすくなる可能性がある。一方で、問1番の誤答を発見できなかった人は色なしで1名、色ありで3名であった。問1番での誤答は「 $(-8b) \div 2b$ 」を「 $(-4b)$ 」と計算しているもので、数学記号とは関係のない部分の計算ミスである。これより数学記号への色の付与

表1 解答実験と間違い探し実験における
得点と時間の平均と分散

解答実験	色なし	色あり
平均得点	9.30	9.38
分散 (得点)	0.21	0.91
平均時間 (s)	107.60	105.25
分散 (時間)	757.24	1019.54
間違い探し実験	色なし	色あり
平均得点	3.25	3.40
分散 (得点)	0.41	0.64
平均時間 (s)	165.88	168.00
分散 (時間)	847.32	1180.80

は、数学記号へ意識が向くが、そのせいで数学記号とは別の部分で起こる計算ミスを発見しづらい可能性がある。また、色数が多いことが負荷となった可能性もある。

しかし、これらの実験は理系の大学生・大学院生の計21名に実施したものであり、人数を増やした場合、また問題数を増やした場合にどうなるのかはわからない。そのため、人数を増やして追加で同様の実験を行うことを検討している。

第4章 6条件比較実験

4.1. 本章の概要

3章では計算ミス防止のため、数式の構造理解に着目し、数式の数学記号へハイライトをする手法を提案した。またプレ実験により数学記号へのハイライトが計算間違いを低減することが示唆されたが、どういったハイライトが適切かについて検討が不十分であった。また、人数や問題数が少ないことが課題としてあがった。そこで本章以降では、計算においてどのようなハイライト手法が効果的であるかの調査をシステムを作成して行う。まず本章では5種類のハイライト法を用いて、3.4節の「間違い探し実験」のように、すでに計算された数式の正誤を判定する実験を行い、適切なハイライト手法について検討を行った。

4.2. 目的

3章において、計算中の数式の特定箇所へハイライトをすると間違いやすい箇所へ注意が向き、計算ミス防止できるのではないかという仮説を立て、「=」「+」「-」「×」「÷」のような数学記号にハイライトを行う手法を提案し、2種類のプレ実験を行うことにより手法の有効性調査に適した実験設計を検討した。プレ実験の結果、2種類のプレ実験どちらもハイライト効果を一部反映するような結果は見られたものの、人数や問題数が少ないといった課題があった。また、数学記号へのハイライトによる弊害の可能性もいくつか浮上し、数式への適切なハイライト手法についての検討が不十分であった。

そこで本章の目的は、計算においてどのようなハイライト手法が効果的であるかをシステムを用いることで多くの問題数を同時に大人数に調査することである。

4.3. 実験

4.3.1. 実験概要

数式構造理解による計算ミス防止のため、最適なハイライト手法の調査を行う。3章のプレ実験から、実験はすでに最後まで計算された計算問題の正誤を判定する「間違い探し実験」を採用した。この理由としては、システムを作成するには「解答実験」では人により計算過程が異なってしまう、ハイライト効果がまちまちになる可能性があることや、結局答え合わせが人手になることがある。「間違い探し実験」を正誤判定実験としてシステムを作成し、実験を行う。正誤判定実験は計算の答えが正しいと判定した場合は「正」を選択してそのまま進み、誤っていると判定した場合は「誤」を選択した後、その計算式の何行目から誤って

いるかを解答するものとした。問題は中学1年生で学習する基礎計算の正負の数の計算と文字式の計算とした。実験はPCとスマートフォンのどちらからでも参加できる。実験協力者は明治大学に通う理系大学生または大学院生の29名であった。

4.3.2. 数式のハイライト手法の検討

最適なハイライト手法を調査するにあたり、考慮すべき点が多数ある。まず、何を対象にハイライトするかである。3章では、符号ミスや計算順序のミスは数学記号の認識がしっかりとできていないことが要因であると考え、数学記号へハイライトをしていた。しかしプレ実験の結果、計算ミスは分配法則のし忘れや同類項の認識など数式のまとまり意識ができていないものもみられ、数学記号へのハイライトだけではカバーしきれない可能性が示唆された。

次に考慮すべき点として、どういったハイライト手法を用いるかである。大久保ら[52]は、文字色を変えるより文字の背景色を変える方が目立つことが明らかにしている。また、魚崎ら[53]はテキストの下線強調は下線部分の再生を高めると明らかにしている。これらの研究を加味すると、数学記号へのハイライトでは文字色を変えるというハイライト手法を用いていたが、他にもマーカーペンのように数式を囲うようなハイライト方法やアンダーラインをひくといった方法がある。どういったハイライト手法がどのような数式、あるいは計算ミスに有効なのか調査する必要がある。

最後に考慮すべき点として、視認性の問題がある。3章の実験でも意見があったとおり、複数色を同時に提示すると却って見づらくなる場合がある。また、ひとつの数式に複数のハイライト方法が混在することによる影響についても考える必要がある。

ここでまず、正負の数の計算では負の概念による計算ミスや文字式の計算とは異なり、掛ける・割るの演算記号が省略されないことによる計算順序のミスが多くみられる。負の数は括弧で囲う決まりがあるため、括弧へのハイライトが有効であると考えた。また、計算順序のミスでは剰余を先に計算すべきところを忘れてしまうため、太字にすることで意識が向くのではないかと考えた。文字式の計算では、文字が登場することで同類項という概念が生まれることや、掛ける・割るの演算記号が省略されることにより、分配法則など新たな計算ルールが追加される。他にも、数学における文字の理解に関する研究は数多くされており[54]-[60]、文字のまとまり意識の重要性も研究されている[61]。これらのことから、同じ文字式の項を同じ色にすることで文字のまとまりを意識しやすくなると考えられる。また、Maureen[27]は括弧の有無が数式の構造感覚に影響を与えることを明らかにしている。以上のことから、文字式の計算では括弧と同類項へのハイライトが有効であると考えた。

これらの点を考慮して選定したハイライト手法（ハイライト条件）を図7に示す。まずBaselineは通常のハイライトなしのものである。また、正負の数の計算には「括弧の色を変える（B-color）」、「括弧でくくられた数式へマーカーをひく（B-marker）」の2種類のハ

$8 + 9 \times (-2)$ $\textcircled{1} = 8 + (-18)$ $\textcircled{2} = 8 - 18$ $\textcircled{3} = -10$ $\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>Baseline 条件</p>	$8 + 9 \times (-2)$ $\textcircled{1} = 8 + (-18)$ $\textcircled{2} = 8 - 18$ $\textcircled{3} = -10$ $\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>B-color 条件</p>	$8 + 9 \times (-2)$ $\textcircled{1} = 8 + (-18)$ $\textcircled{2} = 8 - 18$ $\textcircled{3} = -10$ $\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>B-marker 条件</p>
$\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>L-color 条件</p>	$\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>Mix (B-marker+L-underline) 条件</p>	

図7 正負の数および文字式の計算へのハイライト条件

イライト手法を選定した。なお、掛ける・割るの演算記号（「×」「÷」）に対しては太字にしている。一方、文字式の計算では正負の数の計算同様に「括弧の色を変える（B-color）」と「括弧でくくられた数式へマーカーをひく（B-marker）」に加えて「同類項の色を変える（L-color）」と「括弧でくくられた数式へマーカーをひき、同類項へアンダーラインをひく（B-marker+L-underline の Mix）」の4種類を選定した。

4.3.3. 実験システム

実験システムは JavaScript と PHP で実装した。実験システムのスクリーンショットを図8に示す。

システムでは問題画像が表示されたら、問題下の正誤を選択しないと次の問題へ進めないようになっている。ここで、「誤」を選択した場合は、その下に最初に誤りはじめたと思う行を選択するインターフェースが出てくるようになっており、行を選択すると次の問題へ進めるようになっている。

問題は正負の数の計算を40問、文字式の計算を66問用意した。この中から計算式が正解である問題と不正解である問題が40問ずつ、各ハイライト条件が適用された状態で表示される。ハイライトは8条件各10問ずつの出題で、ランダムな順序で出題した。ここで、80問連続で解答すると集中力がもたず、不適切なデータになってしまう可能性がある。そこで

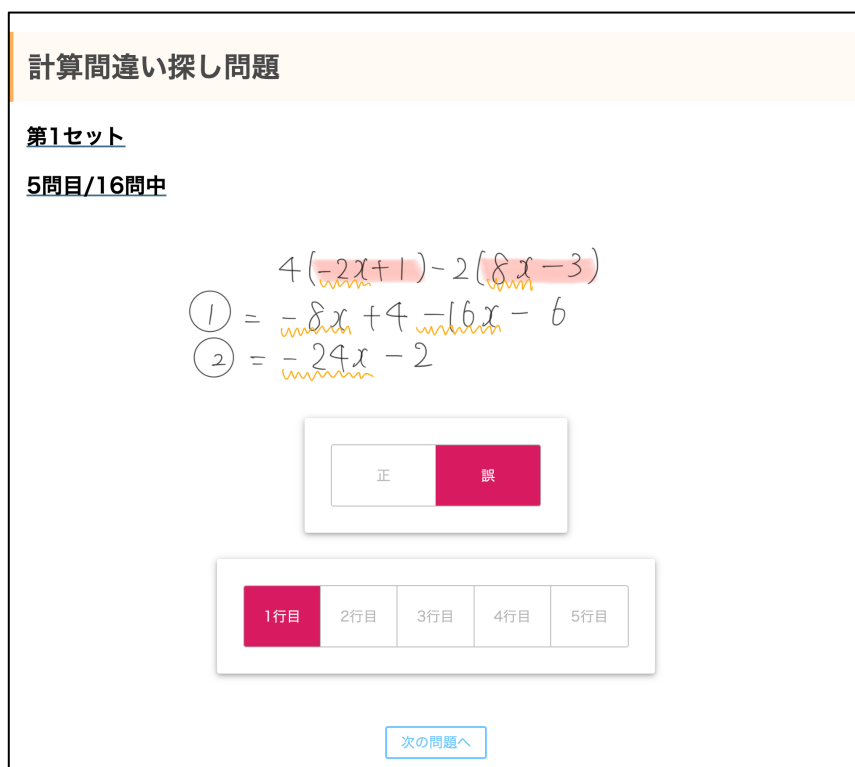


図8 計算実験画面のスクリーンショット

16問で1セットとし、計5セットの出題形式にした。実験協力者はセットの切り替えタイミングで任意に休憩をとってよいものとした。

実験開始時点でユーザIDに加え、現在のセット数、出題問題の情報（問題の種類、ハイライト条件、正誤、問題番号）、解答にかかった時間、使用デバイスを取得した。

4.4. 実験結果

4.4.1. 分析の前処理

理系大学生および大学院生29名分のデータを分析するにあたり、まずは外れ値を除外するため、全データの時間分布と条件ごとの箱ひげ図を図9、10に示す。図10の白丸は外れ値のデータを表している。図9、10から1問の解答時間が60秒以上かかったデータは外れ値であり、実験が何らかの要因で中断されたなど不適切な可能性がある。

ここで、1問の解答時間が60秒以上かかったものは28件あり、そのうち12件が文字式の計算65番のもの（図11）であった。この問題にのみ小数点が含まれる複雑な計算であったため、難易度として適切ではなかった可能性がある。以上のことから1問の解答時間が60秒以上かかったデータと文字式の計算65番のデータの計35件を分析対象から除外した。

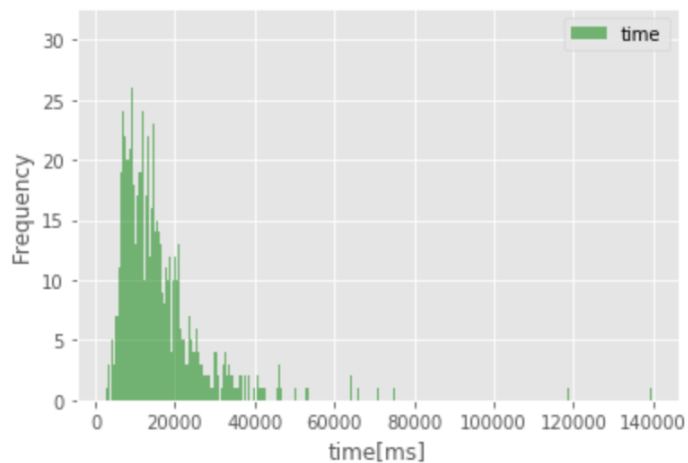


図9 時間分布

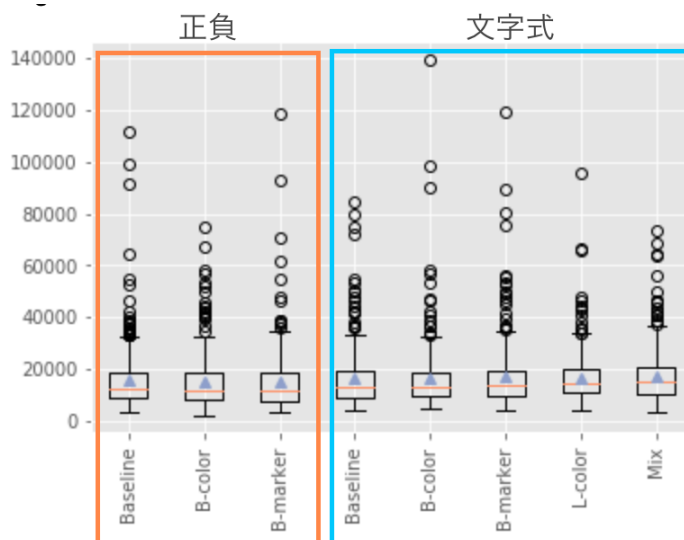


図10 条件ごとの時間の箱ひげ図

$$\frac{3}{4}x - 3.2 - 0.5x + \frac{7}{2} + \frac{2}{3}x - 2.9$$

$$\textcircled{1} = \frac{3}{4}x - \frac{32}{10} - \frac{5}{10}x + \frac{7}{2} + \frac{2}{3}x - \frac{29}{10}$$

$$\textcircled{2} = \frac{3}{4}x - \frac{16}{5} - \frac{1}{2}x + \frac{7}{2} + \frac{2}{3}x - \frac{29}{10}$$

$$\textcircled{3} = \frac{9}{12}x - \frac{6}{12}x + \frac{8}{12}x - \frac{32}{10} + \frac{35}{10} - \frac{29}{10}$$

$$\textcircled{4} = \frac{11}{12}x - \frac{26}{10}$$

図11 文字式の計算 65番

4.4.2. 正答率の分析結果

本実験における「間違い」には、「正解している問題が提示されているのにどこかが間違えていると解答する間違い」と「不正解している問題が提示されているのに正解であると解答する間違い」の2種類がある。以降それぞれの間違いにおける正答率を「正解提示の正答率」と「不正解提示の正答率」と呼ぶ。

ハイライト条件ごとの各正答率の結果を表2, 3に示す。なお、本実験では練習フェーズを設けなかったため、本実験システムや計算に慣れておらず、またハイライトされた数式に慣れていない可能性もあった。そのため第1セットは練習とみなし、第2セット目以降を分析に用いた。

表2から、正負の数の計算ではB-color条件の正答率が最も高く、その他は同程度の正答率であった。正解提示、不正解提示ともに全体の正答率とほぼ同じ傾向にあった。また表3から文字式の計算では、B-color条件とL-color条件の正答率が高く、その他は同程度の正答率であった。正解提示と不正解提示では不正解提示の正答率の方が高い傾向になっており、Mix条件のみあまり差がない結果となった。

表2 正負の数の計算における条件ごとの正答率

条件	正解提示の正答率	不正解提示の正答率	全体の正答率
Baseline	0.940	0.940	0.940
B-color	0.965	0.972	0.968
B-marker	0.928	0.935	0.932

表3 文字式の計算における条件ごとの正答率

条件	正解提示の正答率	不正解提示の正答率	全体の正答率
Baseline	0.932	0.981	0.955
B-color	0.941	0.992	0.967
B-marker	0.926	0.991	0.956
L-color	0.948	1.000	0.972
Mix	0.957	0.952	0.955

4.4.3. 解答時間の分析結果

正答率分析同様に第1セットは練習とみなし、解答時間の分析を行った。全体の平均解答時間を図12に示す。図12から正負の数の計算ではB-color条件の平均解答時間が最も短く、その他2つの条件は同程度であり、正答率と同じような結果が得られたことがわかる。また文字式の計算ではB-color, Baseline, B-marker, L-color, Mix条件の順で平均解答時間が短くなっており、Baseline以外の条件ではB-color条件のみがBaseline条件の平均解答時間より短かった。

次にセットごとの条件別平均解答時間を図13に示す。図13から正負の数の計算におけるB-marker条件と文字式の計算におけるB-color, B-marker条件の平均解答時間はセット別でも比較的安定していることがわかる。また全平均はセット数が増すにつれ短くなっていることから、正誤の判定速度がだんだん速くなっていることがわかる。

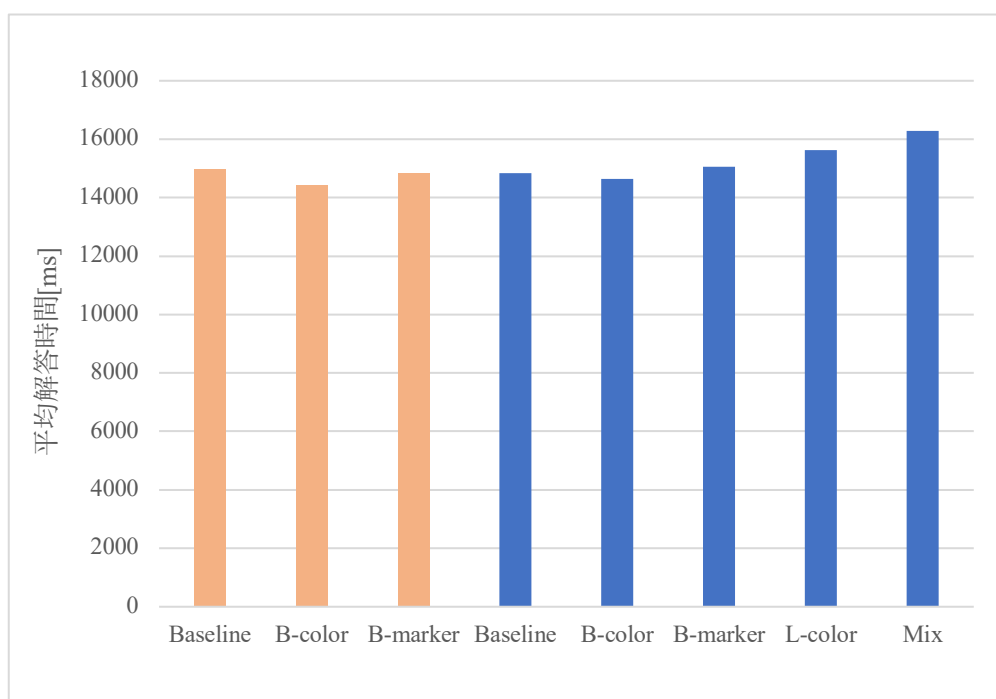


図12 条件別平均解答時間

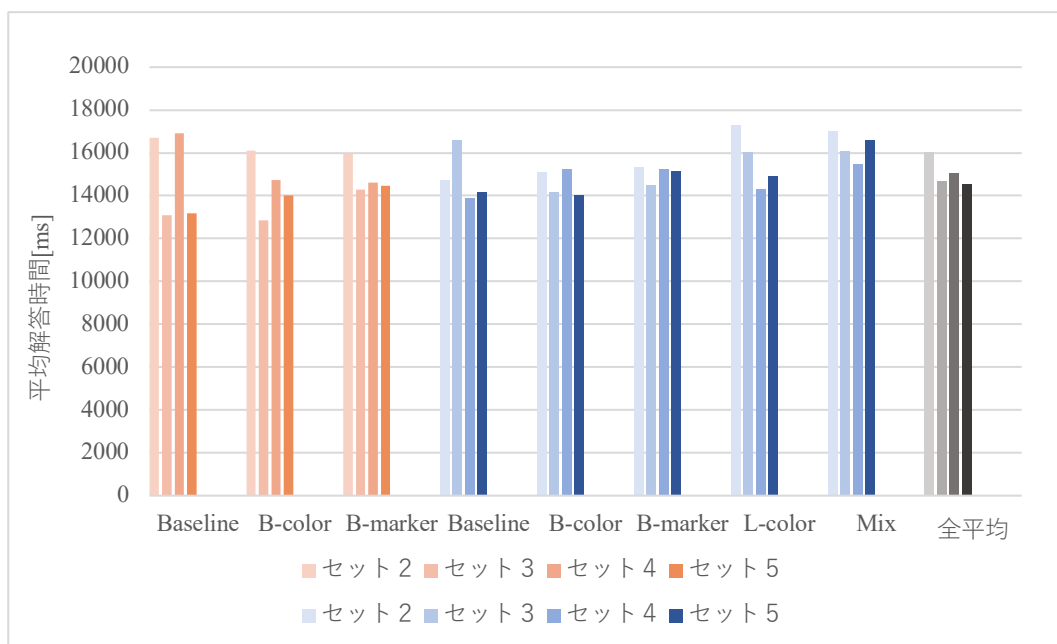


図13 セットごとの条件別平均解答時間

4.5. 考察

4.5.1. 正答率と解答時間の結果に関する考察

数式の構造を理解すると、符号や計算順序など計算中の留意すべき点を瞬時に認識することが期待される。そのため、平均解答時間は短く、正答率は高くなると考えられる。正答率と平均解答時間の結果から、正負の数の計算においては **B-color** 条件が最も良いことがわかった。大久保ら[52]の研究より、本実験においても括弧に色付けをするよりマーカーをひいた方が目立つと予想していた。しかし、数式における間違いは必ずしもハイライトをした場所にあるとは限らず、誘目性の高いマーカーの条件はマーカー外の間違いを気付きにくくした可能性がある。一方で **B-color** 条件は、目立たせはするものの他の部分への注意もできるほどの誘目性であることが示唆された。また掛ける・割るの記号を太字にしていたことに関してアンケートからは何も言及されていなかったため、視認性を阻害することなく注目させることができた可能性がある。ただし、掛ける・割るの記号を太字にしただけの条件がなかったため、追加検証を行う必要がある。

文字式の計算において、正答率が最も高かった **L-color** 条件は、平均解答時間が2番目に遅い結果であった。それに対し、**B-color** 条件は、正答率が2番目に高く、平均解答時間は最も短い結果であり、総合的には **B-color** の条件の方が良いことが示唆された。しかし **B-color** 条件は **Baseline** 条件と正答率、平均解答時間ともに大きな差はないため、一概に良い

手法とは言えない。また唯一2種類のハイライト手法を組み合わせた Mix 条件は、正答率が最も低く、平均解答時間は最も長い結果であった。またアンケートからも「波線とハイライトが両方付いているものは少し見づらく感じた」という意見も得られた。これらのことから、複数のハイライト手法を組み合わせることにより注目すべき箇所へ誘導されるが、その箇所が多くなってしまい混乱を招いた可能性がある。現在の検定教科書は4色刷りが義務付けられており、カラフルな色分けが多い。しかし、多色使用はどこに注目したら良いのかわからなくなる可能性がある。ただし、今回は同類項にアンダーラインをひいただけの条件がなかったため、アンダーラインが影響したのか、ハイライト手法を組み合わせたことが影響したのかはわからない。そのため、アンダーライン手法やその他の複数ハイライト手法の組み合わせを用いた実験を行う必要がある。

4.5.2. 間違っただデータの分析による考察

全部で107の間違ったデータから問題の種類や間違い方によって条件がどのように影響するかを分析した。間違えた人数が4人以上いた問題番号を抽出し、特徴のあった問題画像を図14, 15に示す。これらのほとんどが間違っただ問題を提示しているのに正解であると解答されたものであった。図14の12番, 28番の問題では、ハイライト部分に注目してしまい、ハイライト外の間違いに気づきにくかった可能性がある。また図15のように、単なる写し間違いのようなミスはハイライト効果が薄い可能性がある。今回の実験協力者は理系大学生および大学院生だったため、図15のようなミスはあまり問題数を用意していなかった。将来的に数式ハイライトによって支援したい対象としては、数学に携わりはじめたばかりの中学生や、大学生であっても数学を苦手とする人も想定しているため、図15のようなミスがあることも十分に考えられる。そのため、今後はこのような単純ミスにも効果的なハイライト手法を調査することも検討する必要がある。

本実験の実験協力者は数学に慣れ親しんだ理系大学生および大学院生であった。そのため、正答率の差や平均解答時間の差は大きく出なかったが、中学生や数学に触れる機会が減少した文系の人に実験を実施した場合は、今回とは異なった結果が得られる可能性がある。また、色については複数色を用いてのランダム提示であったため、相応しい色に関する調査ができなかった。アンケートでも「濃い色(赤など)の時は問題が見にくかった」「括弧の部分やラインマーカーの色が毎回違っていて途中からそっちが気になってしまった」という意見がみられたため、適切な色については調査を行う必要がある。

実験で提示した問題画像は、著者によって解かれた計算式であったが、普段の自分の計算の仕方と異なっていることにより混乱させてしまった可能性がある。また、本実験は計算問題を解き終わった後の見直し作業を想定していたため、計算中におけるハイライトの効果は検証できていない。このことについては8章で数式ハイライトシステムの可能性について述べる。

$(-4) \times 5 - (-3^2)$ $\textcircled{1} = -20 + (-9)$ $\textcircled{2} = -20 - 9$ $\textcircled{3} = -29$ <p style="text-align: center;">12番不正解提示</p>	$-1 \div 8 \times (-4)^2$ $\textcircled{1} = -1 \div 8 \times 16$ $\textcircled{2} = -1 \div 128$ $\textcircled{3} = -\frac{1}{128}$ <p style="text-align: center;">28番不正解提示</p>	$27 \div (-3^2)$ $\textcircled{1} = 27 \div 9$ $\textcircled{2} = 3$ <p style="text-align: center;">35番不正解提示</p>
---	--	--

図14 正負の数の計算における特徴のあった間違えた問題画像

$\frac{3x+1}{8} \times (-32)$ $\textcircled{1} = (3x+1) \times 4$ $\textcircled{2} = 12x+1$ <p style="text-align: center;">25番不正解提示</p>	$\frac{3x-2}{5} + \frac{-2x+3}{4}$ $\textcircled{1} = \frac{4(3x-2) + 5(-2x-3)}{20}$ $\textcircled{2} = \frac{12x-8-10x-15}{20}$ $\textcircled{3} = \frac{2x-23}{20}$ <p style="text-align: center;">54番不正解提示</p>
---	---

図15 文字式の計算における特徴のあった間違えた問題画像

第5章 文系対象実験

5.1. 目的

4章の6条件比較実験では、数式の構造理解を促すには、どのようなハイライト法が効果的であるかを調査するため、5種類のハイライト法を用いて、すでに計算された数式から間違えている箇所を見つけ出す実験を行った。実験の結果、正負の数の計算では括弧に色付けする手法が優れていることや、文字式の計算では複数のハイライト手法を組み合わせると同時に提示すると混乱を招く可能性が示唆された。しかし、実験では、ひとりの実験協力者がランダムに提示される5種類すべての手法について解答する形で実施したため、各手法の効果を十分に検証できなかった。

そこで本章では、手法を2種類に限定し実験協力者ごとに提示する手法を固定する。また、これまでの研究では理工系の大学生を対象としており、正答率が高すぎるという問題があった。中村[62]は高校2年生93名（文系42名、理系51名）を対象に、数学指導における文系と理系の生徒の現状を調査した。調査の一部である数と式という単元の計算問題では、文系の正答率は45%、理系の正答率は76%と差が大きく開き、文系の誤答原因は計算力の不足等であることを明らかにした。このことから、今回は計算問題の正答率は理系に比べ低くなると思われる文系であり、カリキュラムの都合で数学に触れる機会が減少している人文系の大学生を対象に実験を行い、適切な数式ハイライト手法について検討を行うことを目的とする。

5.2. 実験

5.2.1. 実験概要

4.3.1項と同様の実験用システムを用いて、すでに最後まで計算された計算問題の正誤を判定する実験を行う。また、実験協力者はカリキュラムの都合上、理工系大学生に比べ数学との接点が少ない人文系大学生を対象とした。

5.2.2. 比較するハイライト手法

4章の6条件比較実験では、最適なハイライト手法を調査するため、視認性の問題を考慮し、以下に示す5条件を選定していた。

- Baseline 条件：ハイライトなし
- B-color 条件：括弧の色を変える（正負の数のみ）
- B-marker 条件：括弧でくくられた数式へマーカーをひく（正負の数のみ）

- L-color 条件：同類項の色を変える（正負の数，文字式の計算）
- B-marker+L-underline の Mix 条件：括弧でくくられた数式へマーカーをひき，同類項へアンダーラインをひく（正負の数，文字式の計算）

なお，正負の数における掛ける・割るの演算記号（「×」「÷」）に対しては太字にしていた。これらの条件すべてを各実験協力者に提示していたが，B-color と L-color のようにハイライトする対象が違う手法が混在しており，単純に比較することが難しかった。また，1問ごとにランダムで違う条件が提示されるため，連続的に同じ手法が提示された際の学習効果や慣れの影響が調査できなかった。そこで本実験では，過去の実験結果を踏まえハイライト対象を括弧に固定し，B-color 条件と B-marker 条件に限定した。各条件と Baseline 条件を図 16 に示す。なお，数式の手書きは著者によるものとした。

$8 + 9 \times (-2)$ $\textcircled{1} = 8 + (-18)$ $\textcircled{2} = 8 - 18$ $\textcircled{3} = -10$ $\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>Baseline 条件</p>	$8 + 9 \times (-2)$ $\textcircled{1} = 8 + (-18)$ $\textcircled{2} = 8 - 18$ $\textcircled{3} = -10$ $\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>B-color 条件</p>	$8 + 9 \times (-2)$ $\textcircled{1} = 8 + (-18)$ $\textcircled{2} = 8 - 18$ $\textcircled{3} = -10$ $\frac{1}{3}(9x-15) + \frac{1}{4}(8x+12)$ $\textcircled{1} = 3x - 5 + 2x + 3$ $\textcircled{2} = 5x - 2$ <p>B-marker 条件</p>
---	--	---

図 16 正負の数および文字式の計算へのハイライト条件

5.2.3. 実験の流れ

まず実験協力者を、B-color 条件を利用する B-color 群、B-marker 条件を利用する B-marker 群に分ける。ここで、実験実施にあたり、基礎的な数学の力による差が大きくなっていくことが予想されたため、B-color 条件や B-marker 条件の手法を提示する前に、実験協力者全員に固定の問題を Baseline 条件で解いてもらうことにより、基礎的な数学力を測ることとした。各群の実験の流れは図 17 のとおりである。

本実験では明治大学に通う、理工系に比べカリキュラムの都合で数学の講義が少ない人文系大学生 30 名に実験協力を依頼した。実験協力者 30 名のうち、15 名を B-color 条件を利用する B-color 群、残りの 15 名を B-marker 条件を利用する B-marker 群とした。



図 17 実験の流れ

5.2.4. 実験システム

実験システムは基本的には4章と同様であり、JavaScriptとPHPで実装した。実験システムのスクリーンショットを図18に示す。

問題は正負の数の計算を40問、文字式の計算を66問用意した。この中から正負の数、文字式の計算を10問ずつ選定し、実験協力者全員に固定でBaseline条件を提示した。その後Baseline条件で提示した問題以外から正負の数、文字式の計算を20問ずつ、各ハイライト条件が適用された状態で表示するようにした。また、正解の問題と不正解の問題が半数ずつ、ランダムな順序で出題されるようにした。

ここで、60問連続で解答すると集中力がもたず、不適切なデータになってしまう可能性がある。そこで20問で1セットとし、計3セットの出題形式にした。実験協力者はセットの切り替えタイミングで任意に休憩をとってよいものとした。

実験開始時点でユーザIDに加え、現在のセット数、出題問題の情報（問題の種類、ハイライト条件、正誤、問題番号）、解答にかかった時間、使用デバイスを取得した。

なお、実験はPCとスマートフォンのどちらからでも参加できるようにしたが、ほとんどの実験協力者が自身のスマートフォンから実験に参加した。

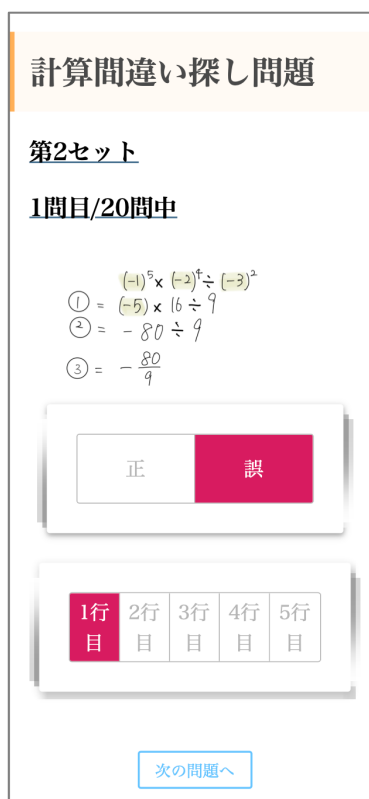


図18 計算実験画面のスクリーンショット
(iPhone 12 mini)

5.3. 実験結果

5.3.1. 分析の前処理

実験協力者 30 名分のデータを分析するにあたり、まず各実験協力者の解答時間を求めた。その結果、B-color 群の 1 名の実験協力者の解答時間が著しく長かったため、この実験協力者のデータは分析対象から除外した。その結果、B-color 群 14 名、B-marker 群 15 名が分析対象となった。

5.3.2. Baseline 条件の結果

Baseline 条件における B-color 群、B-marker 群の平均正答率の箱ひげ図を図 19 に示す。この結果より、B-color 群の平均正答率より B-marker 群の平均正答率の方が低いことがわかる。具体的な数値としては、B-color 群の平均正答率は 93.9%、B-marker 群の平均正答率は 91.3% であった。また、B-marker 群の分散は大きいこともわかる。なお、この 2 群において対応のない t 検定を行ったところ、両群の平均正答率に有意な差は認められなかった($t(22)=0.93$, $p=.36$)。

次に、ベースライン条件における B-color 群、B-marker 群の実験協力者ごとの平均解答時間(秒)の箱ひげ図を図 20 に示す。この結果より B-color 群の平均解答時間は B-marker 群の平均解答時間より長いことがわかる。なお、平均解答時間において対応のない t 検定を行ったところ、有意な差は認められなかった($t(27)=0.87$, $p=.39$)。

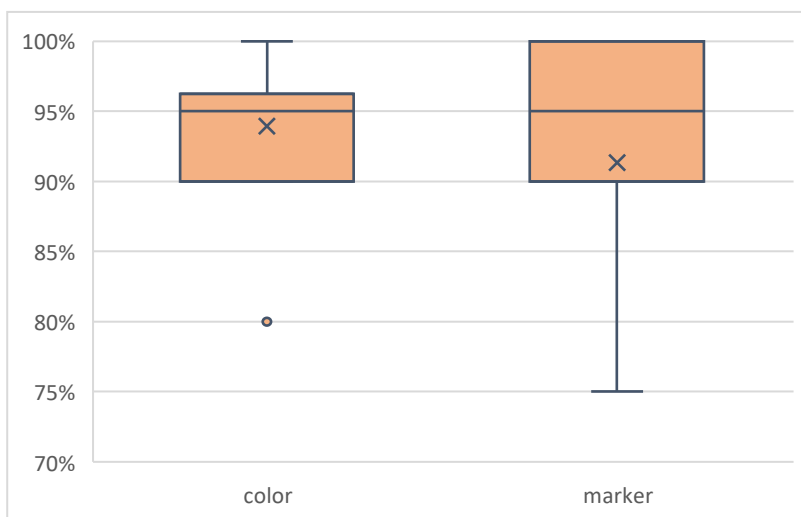


図19 各群の平均正答率の箱ひげ図

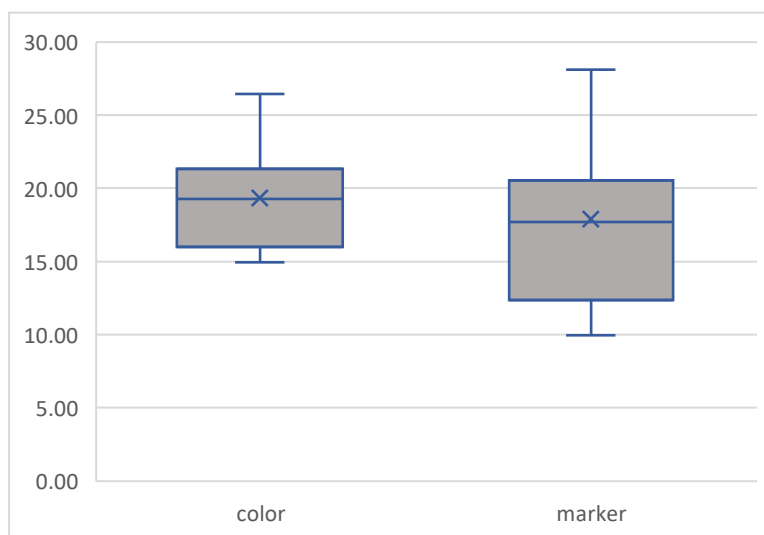


図20 各群の平均解答時間の箱ひげ図

5.3.3. B-color 条件と B-marker 条件の結果

B-color 群と B-marker 群のセットごとの平均正答率を表4に示す。ここで、第一セットは Baseline 条件、第二セットと第三セットは B-color 条件や B-marker 条件のハイライト手法を提示していたため、第一セットは Baseline、第二セットと第三セットはハイライト手法の set1, set2 としている。表4から、B-color 群の set1 と set2 の平均は B-marker 群のそれよりやや高い結果となった。また、Baseline の平均正答率は set1, set2 より高くなっていることがわかる。各群内で Baseline, set1, set2 の3群間における多重比較をボンフェローニ法を用いて行ったところ、B-marker 群の Baseline と set1 において有意な差がみられた ($p=.047$)。

B-color 群と B-marker 群のセットごとの平均解答時間を表5に示す。表5から B-color 群の set1, 2 の平均解答時間は B-marker 群のそれよりやや長いことがわかるが、差はわずかであった。また、両群において Baseline→set1→set2 の順に平均解答時間が短くなっていることがわかる。正答率と同様に各群内で Baseline, set1, set2 の3群間における多重比較をボンフェローニ法を用いて行ったところ、B-color 群の Baseline と set2 に有意な差が認められた ($p=.030$)。

表4 B-color 群と B-marker 群のセットごとの平均正答率

	Baseline	set1	set2	Avg (set1,2)
B-color 群	0.939	0.911	0.904	0.907
B-marker 群	0.913	0.877	0.887	0.882

表5 B-color 群と B-marker 群のセットごとの平均解答時間

	Baseline	set1	set2	Avg (set1,2)
B-color 群	19.32	17.86	16.84	17.35
B-marker 群	17.88	17.33	16.07	16.70

5.4. 考察

5.4.1. 正答率と解答時間による考察

5.3.2 項の Baseline 条件の結果より、B-color 群、B-marker 群の両群間における平均正答率と平均解答時間に大きな差はみられなかった。一方、B-marker 群は分散が大きいいため、その点に留意する必要がある。

ここで、4章の6条件比較実験では、理工系大学生の Baseline 条件における平均正答率は94.8%であったが、今回対象とした人文系大学生の平均正答率は92.6%とそれよりやや低い結果であった。しかし、満点の学生も数名おり、カリキュラム上数学に触れる機会が少ない人文系大学生にとっても本実験で扱った基礎計算は簡単であった可能性がある。

表4からB-color群の方がB-marker群に比べ、set1, set2の平均正答率が高いという結果となった。しかし、5.3.2項のBaseline条件の平均正答率においてもB-color群の方が2.6%ほど高い結果となっており、その影響が出ている可能性がある。解答時間についても同様のことがいえる。また、B-color群はBaselineからset2にかけて平均正答率は減少しており、B-marker群はBaselineとset1, 2で平均正答率が減少していることがわかった。この結果から、Baseline条件のようにハイライトがされていない数式とB-color条件やB-marker条件のようにハイライトされている数式では、ハイライトされていない方が良い可能性がある。著者がハイライト手法が数式の計算ミス防止につながると考えたのは、プログラミングで可読性の向上のために用いられるシンタックスハイライトに着目したからであった。4章の6条件比較実験に参加した理工系の学生は、大学の授業のカリキュラムにプログラミングの講義があり、プログラミングのコードや数式にハイライトされている場面を経験していたため、ハイライト条件が計算ミス防止に効果的に働いたことが考えられる。

表5の結果より、B-color群、B-marker群ともにBaselineからset2にかけて平均解答時間が短くなっていることがわかった。これは数式にハイライトがされることで正誤の判定速度が上昇した可能性が考えられる。一方、ハイライトに頼った正誤判定になってしまったため、正答率がBaseline条件に比べ低くなった可能性がある。

5.4.2. 間違っただータの分析による考察

全部で121の間違えたデータから問題の種類や間違い方によって条件がどのように影響するかを分析した。B-color群では正負の数の計算において間違えた問題の総数は32問、文字式の計算においては18問であった。一方、B-marker群の間違えた問題の総数は、正負の数では36問、文字式の計算では35問であった。図21に特徴のあった間違えた問題画像を示すが、正負の数の問題番号3では、B-color群には間違えた人が5名いたのに対し、B-marker群では2名しかいなかった。また、問題番号12では、B-color群には間違えた人が2

$4 - (-6) \div 2$ $= 4 + 6 \div 2$ $= 10 \div 2$ $= 5$ <p>問題番号 3 (正負)</p>	$(-4) \times 5 - (-3^2)$ $= -20 + (-9)$ $= -20 - 9$ $= -29$ <p>問題番号 12 (正負)</p>
---	---

図 21 特徴のあった間違えた問題画像

名しかいないのに対し、B-marker 群では 5 名が間違えていた。問題番号 12 はこれまで同様、ハイライトされた部分の誘目性が高いことによりハイライト外の違いに気づきにくくなった可能性や書き写しミスのような間違いには気づきにくい可能性が考えられる。また、今回 B-color 条件で間違いやすい問題として問題番号 3 (正負) があがったが、これは割り算を先に計算することを示すために割る演算記号を太くしたことで、「4+6」がグループ化されて見えてしまった可能性がある。こうしたグループ化の問題については今後さらに検証する必要がある。

第6章 クラウドソーシング実験

6.1. 目的

4章や5章では計算においてどのようなハイライト法が効果的であるかを調査するため、すでに計算された数式から間違えている箇所を見つけ出す実験を理工系大学生や人文系大学生を対象に行った。しかし、間違い方が複数種類あったことや様々な色を用いてハイライトを行っていたことより、こういった要因が正答率や解答時間に影響するのかが明らかにできていなかった。そこで本章では、実験の問題を数式の構造理解が必要な分配法則を利用して解く問題に限定し、これらの問題に効果的だと考えられる2種類のハイライト手法を用いた実験を実施する。また、4章や5章では理工系や人文系の大学生を対象としており、文理の違いはあっても、まだ学習の機会がある学生を対象に実験を行っていたため、本章ではYahoo!クラウドソーシングサービス[63]を利用し、幅広い層を対象に実験を行い、適切なハイライト手法について検討を行うことを目的とする。

6.2. 実験

数式に登場する括弧自体の色を変える手法と括弧内の数式の背景色を変え、マーカーのように色をつける手法のどちらのハイライト手法が、何もハイライトしないベースライン手法に比べ計算ミスを防止できるかを、計算問題に対する計算過程および計算結果を提示し、その正誤を判定する実験により検証する。

6.2.1. 実験設計

先述のとおり、実験システムにおいて計算問題に対する計算過程および計算結果を示し、その計算過程および計算結果が正解しているか誤っているかを解答してもらう。そのため、提示された最後まで計算された計算問題への正誤の解答の仕方は、計算の答えが正しいと判定した場合は「正しい」を、誤っていると判定した場合は「誤っている」を、正誤の判定ができない場合には「わからない」を解答するものとした。4章や5章の実験では、間違い箇所が問題によって違っており、正確に間違い箇所を発見できているかを把握するため、何行目から計算誤りを含んでいるかも解答してもらっていた。しかし、本章の実験では、ハイライト部分に誤りがある場合に限定しているため、行数の選択はしないものとした。また、実験協力者が計算の解き方をそもそもわからない場合の選択肢がなかったため、「わからない」選択肢を追加した。

数式の構造を理解する必要がある基礎的な計算問題として、分配法則を利用して解く問題があげられる。分配法則を利用する問題では「 $3(2x - 1)$ 」のように括弧でいくつかの項

がまとめられている。この括弧でまとめられた項をひとつのまとまりとして意識できなければ、符号ミスや括弧内の後方の項に掛け算を忘れる分配忘れが発生する原因となる。そこで実験では、数式のまとまりを意識させるため、括弧をハイライトする2手法を含めた3条件を選定した。それぞれの条件を以下に示す。

- baseline 条件：ハイライトなし
- color 条件：括弧の色を変える
- marker 条件：括弧内の数式へマーカーをひく

なお、ハイライト手法に利用する色は、色覚多様性に配慮し、オレンジ色に統一した。

また、4章や5章の実験では、問題画像は著者が実験用に読みやすい字を意識して手書きしたものであるが、実際に計算を解く際は速記になり、雑な字になる可能性がある。雑な字のような読みにくい文字は、きれいに整った字に比べ、認識しづらく、数式の構造理解も遅れると考えられる。そのため、雑な字ではよりハイライト手法が数式の構造理解に効果的に働くのではないかと考えた。そこで、本実験では意識的にきれいに書いた問題と雑に書いた問題の2種類を用意した。

問題は分配法則を利用して解く問題10問を用意した。一部の問題例を図22に示す。用意した10問のうち6問は図22の(a)のように一度分配法則を行って計算が終了するものと、残り4問は図22の(b)のように分配法則を行った後に同類項をまとめて計算が終了するものの2種類があった。また、ハイライト手法による効果を測るため、誤っている問題では分配法則による符号ミスを含むもの、分配忘れを含むものをそれぞれ5問ずつ作成した。

これまでの実験は理工系大学生や人文系大学生など、文理の違いはあっても、まだ学習の機会がある学生を対象に実験を行っていた。そこで、本実験はYahoo!クラウドソーシングサービスを利用して幅広い年齢層や職業に就く人を対象に1,000名に実験協力を依頼した。Yahoo!クラウドソーシングサービスの利用者には40代、50代のユーザが多くいるため[64]、数学から離れて時間が経った人が多いと考えられる。

	baseline条件	color条件	marker条件	
きれいな字	$4(x-2)$ $= 4x-8$ <p>(a)</p>	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$ <p>(b)</p>	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$
雑な字	$4(x-2)$ $= 4x-8$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$

図22 出題問題例

ここで、クラウドソーシングのような実験環境では監督者が直接監視できないため、不真面目な解答がされる可能性がある。そのため、本実験では分析に用いる 10 問の問題とは別に、多くの人が解答可能である極端に簡単な問題を 2 問用意し、これらの問題を間違えた場合は不真面目な回答者とする事とした。

6.2.2. 実験システムと流れ

実験システムは 4.3.1 項と同様に JavaScript と PHP で実装した。実験システムのスクリーンショットを図 23 に示す。

実験システムが問題画像を表示すると、実験協力者は「正しい」「誤っている」「わからない」のいずれかを選択しないと次の問題へ進めないようにした。

問題は 6.2.1 項で記述した 10 問の分配法則を利用する問題を割り振られた条件でランダムに提示するようにし、その最初と最後に簡単な問題を 1 問ずつすべての実験協力者に固定で出題した。また、簡単な問題を除く 10 問の問題は、正解の問題と不正解の問題が半数ずつ出題されるようにし、各問題についてきれいな字と雑な字がランダムに割り当てられるようにした。また、実験協力者は Yahoo!クラウドソーシングの画面から実験システムにアクセスし、color 条件が提示される color 群、marker 条件が提示される marker 群、baseline 条件が提示される baseline 群にランダムで割り振られるようにした。

実験システムは、実験開始時点で各実験協力者において一意なユーザ ID を生成し、問題解答ごとに、ユーザ ID、何問目の問題か、問題番号、字のきれいさ、条件、ユーザの解答、実際の問題の正誤、解答にかかった時間、使用デバイスを取得した。

また、実験協力者が 12 問の問題解答後に、アンケート画面を提示し、性別（女性、男性、回答しない）、年代（10 代以下、20 代、30 代、40 代、50 代以上）、数学の好き嫌い（好き、嫌い、どちらでもない）、普段数学に触れる機会の有無（数学に触れる機会はない、仕事で使う、家族に教える、その他）、ハイライト条件が提示された場合はその見やすさ（見やすかった、どちらでもない、見にくかった）を回答してもらった。アンケート回答が終わると回答内容をユーザ ID と共にデータベースに送り、正常に終了したことを示す実験コードとユーザ ID を提示する実験終了画面を提示した。

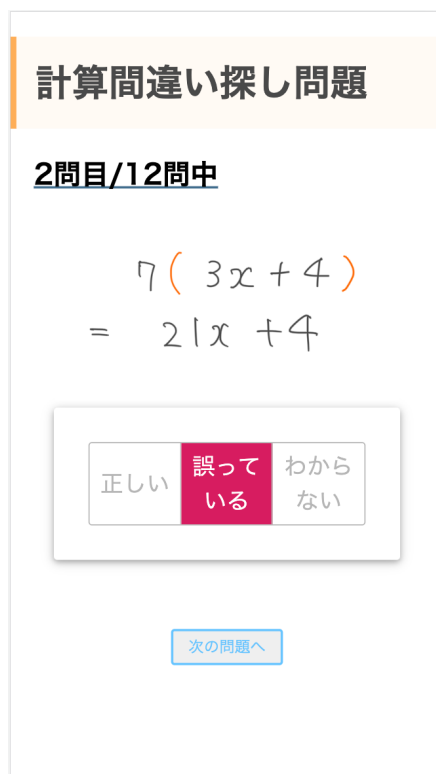


図 23 計算実験画面の例

6.2.3. 実験の手順

実験協力者は Yahoo!クラウドソーシングの画面から実験システムにアクセスし、color 条件が提示される color 群、marker 条件が提示される marker 群、baseline 条件が提示される baseline 群にランダムで割り振られる。次に実験協力者は 10 問の問題とその最初と最後に 1 問ずつ出題される簡単な問題の計 12 問に解答した。

12 問解答後、アンケート画面に遷移し、アンケート回答が終了すると実験協力者に当てられる一意の ID と正常に実験が完了したことを示す実験コードが表示され、それを Yahoo!クラウドソーシング画面に戻り、入力することで実験が終了とした。

6.3. 実験結果

6.3.1. 分析の前処理

データベースには 1,117 名分の実験データと、1,096 名分のアンケートデータが集まった。この中には、途中で離脱し十分なデータが集まっていない人や、実験コードを誤り Yahoo!

クラウドソーシングで報酬が支払われなかった人のデータが含まれている。これらのデータと、Yahoo!クラウドソーシング上で正常に実験が終了した実験協力者 1,000 名分のデータを照合し、1,000 名分のデータを得た。

次に、分析するにあたり、不真面目な回答者を分析対象から除外した。具体的には、出題した簡単な問題 2 問いずれも不正解だった人 1 名、Yahoo!クラウドソーシングに入力したユーザ ID に誤りがある人 12 名、すべての問題に同一の解答をしている人 3 名を抽出し、除外した。また、実験システムの不備により 12 問分すべてのデータがない人やアンケートの回答データがない人についても分析対象外とした。

本実験の目的は、数式の構造理解を促進するための最適なハイライト手法を検討することであり、そもそも計算方法自体を覚えていない場合は分析対象にはならない。ここで、各群における簡単な問題 2 問を除いた 10 問中の正答数をとった人数の割合を図 24 に示す。図 24 より、正答問題数が 7 問までの人数の割合は群によって差が少なく、割合自体も 10% を下回っている。また、正答数 7 問は平均点から 2SD 以下に該当する。そのため、出題した問題の難易度も考慮し、正答数が 8 問未満の人は分析対象外とした。8 問以上の正答問題数の分布表を図 25 に示す。

本実験の選択肢に「わからない」が含まれていたが、1 問でも「わからない」を解答した場合についても、計算方法自体を覚えていない可能性がある。そのため、「わからない」解答を 1 問以上した 103 名分のデータも分析対象外とした。

以上の分析データの前処理を行い、785 名分のデータを分析対象とした。そのうち baseline 群は 280 名、color 群は 252 名、marker 群は 253 名であった。

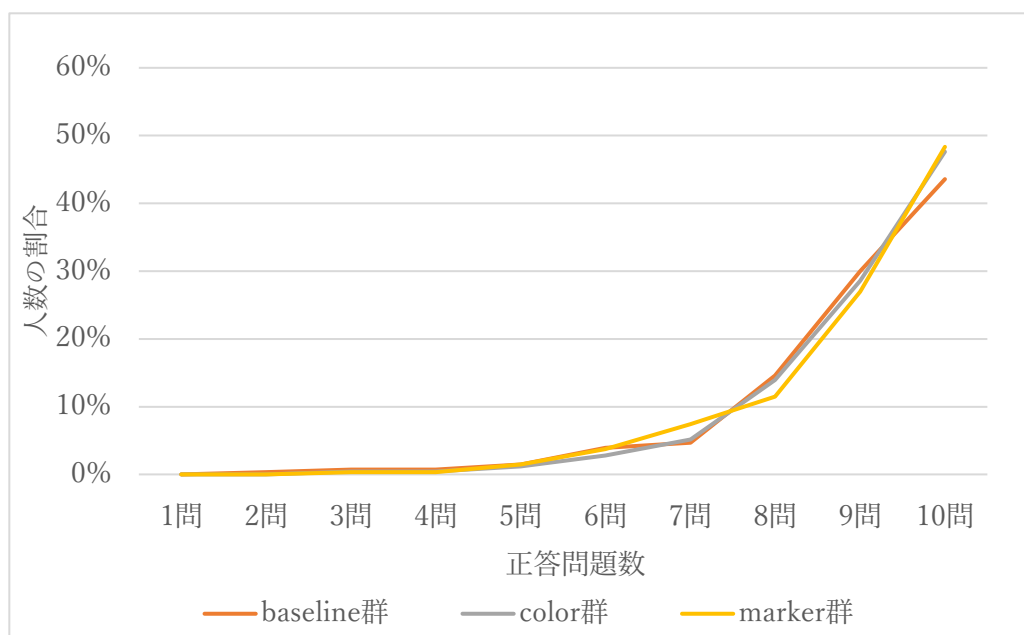


図 24 正答問題数ごとの人数の割合

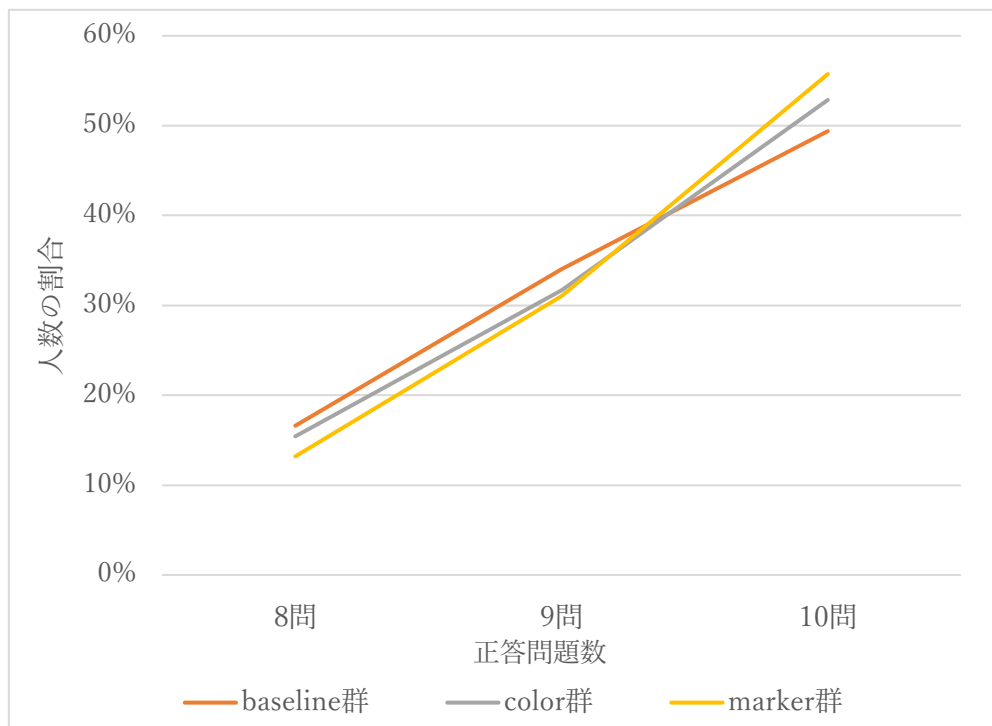


図 25 正答数 8 問以上の正答問題数ごとの人数の割合

6.3.2. 各条件における正答率の結果

baseline 条件, color 条件, marker 条件それぞれの平均正答率と全問正解者数の割合を表 6 に示す。表 6 より, すべての条件において正答率は 90%を超えており, 高い順で marker 条件, color 条件, baseline 条件であった。分析にあたって, 正答数が 10 問中 8 問未満の人は除外しているため, 全体的に正答率は高くなる。また, 全問正解者数の割合は, marker 条件が 55.7%と最も高く, baseline 手法が 49.4%と最も低い値となっていた。

各条件における詳細な正答率を表 7 に示す。表 7 は実験協力者の解答と本来の問題の正誤の混同行列になっている。例えば, baseline 条件において, 正解の問題に対して実験協力者が「正しい」と解答できた割合は 48.3%ということとなる。正解の問題と不正解の問題は各実験協力者に 5 問ずつ出題しているため, 表の左上と右下に当たる正答率は最大で 50%となる。表 7 から, marker 条件の不正解の問題に対して「正しい」と解答する誤りが 5.8%と他の 2 群に比べて低いことがわかる。これは marker 条件が baseline 条件と color 条件より間違い箇所を発見しやすかった可能性がある。また, color 条件において, 正解の問題に対して「誤っている」と解答した誤りが 1.2%であり, 微小であるが他の 2 群より低くなった。これは color 条件が, どこにも間違っている箇所がないのにどこか間違えていると思ってしまった“見誤り”を防ぐ可能性がある。

表6 各群における正答率と全問正解者数の割合

	正答率	全問正解者数の割合
baseline 群	90.8%	49.4%
color 群	91.7%	52.9%
marker 群	92.6%	55.7%

表7 実験協力者の解答と問題の正誤の混同行列

baseline 条件

	正	誤
正しい	48.3%	7.5%
誤っている	1.7%	42.5%

color 条件

	正	誤
正しい	48.8%	7.2%
誤っている	1.2%	42.8%

marker 条件

	正	誤
正しい	48.4%	5.8%
誤っている	1.6%	44.2%

6.3.3. 解答時間の結果

各条件における平均解答時間と標準偏差の表を表8に示す。なお、第一四分位数と第三四分位数から四分位範囲の1.5倍より離れているデータに関しては外れ値として除外している。表8より、平均解答時間はmarker条件、color条件、baseline条件の順に短いという結果となった。最も差のあるbaseline条件とmarker条件との平均解答時間の差は約0.65秒である。標準偏差も同様の順に小さくなっていることがわかる。

表8 各群における平均解答時間と標準偏差

	baseline 条件	color 条件	marker 条件
平均解答時間[s]	9.32	8.92	8.67
標準偏差	5.21	4.73	4.32

6.3.4. きれいな字と雑な字の結果

文字の違いによる差を分析するため、各条件におけるきれいな字と雑な字の場合の正答率の表を表9に示す。表9から、きれいな字ではbaseline条件に比べ、color条件とmarker条件の正答率が高くなった。一方で、雑な字においては、baseline条件とcolor条件に比べmarker条件の正答率が高い結果となった。

表9 2種類の文字タイプに分けた正答率

	きれいな字	雑な字
baseline 条件	90.9%	90.7%
color 条件	92.6%	90.7%
marker 条件	92.6%	92.7%

6.3.5. 問題難易度の差

用意した問題のうち、6問が分配法則を一度行って計算が終了する問題、4問が分配法則を行った後に同類項をまとめて計算が終了する問題であった。前者を単純、後者を複雑な問題とする。これら2種類の問題難易度に分けた各条件における正答率を表10に示す。表10からわかるとおり、単純な問題はどの条件においても正答率は96%を超えており、難易度

は易しい問題だったことがわかる。一方で、複雑な問題は 80%前後の正答率で、単純な問題より条件ごとの差が大きくなっていった。また、marker 条件の正答率が 86.5%と最も高いという結果になった。

表 10 2種類の問題タイプに分けた正答率

	単純	複雑
baseline 条件	96.7%	72.0%
color 条件	97.5%	82.9%
marker 条件	96.7%	86.5%

6.3.6. 間違い方の違いによる差

用意した問題の不正解問題におけるミスの仕方は、分配法則に伴う「符号ミス」と「分配忘れ」の2種類があった。この2種類の計算ミスで分けた各条件における正答率を表 11 に示す。表 11 より、符号ミスのある問題における正答率は 88%前後、分配忘れのある問題における正答率は 95%前後であった。このことから、符号ミスの方が分配忘れより間違い箇所を見つけるのが難しかったことがわかる。

また、符号ミスのある問題では baseline 条件に比べ、color 条件と marker 条件の正答率が高くなった。一方で、分配忘れのある問題においては、baseline 条件と color 条件に比べ marker 条件の正答率が高い結果となった。

表 11 2種類の計算ミスタイプに分けた正答率

	符号ミス	分配忘れ
baseline 条件	87.3%	94.3%
color 条件	89.3%	94.1%
marker 条件	89.3%	96.0%

6.4. 考察

6.4.1. 最適なハイライト手法の考察

表6より、各条件における正答率、全問正解者数の割合は marker 条件, color 条件, baseline 条件の順で高かった。また、6.3.3 項の結果より、各条件における平均解答時間も同様の順で短かった。実験に使われた問題は数式の構造理解を要すると考えられる分配法則を利用する問題であったことも踏まえ、ハイライト手法が数式の構造理解に効果的に働いたことが考えられる。また、本実験で扱った2種類のハイライト条件の中では marker 条件の方が効果は大きかったと推察される。この理由としては、color 条件は括弧に色付けされるだけであり、marker 条件ほど目立たなかったことが考えられる。大久保ら[52]によると、文字色を変えるより文字の背景色を変える方が目立つことが明らかになっており、同様の結果になったのではないかと考えられる。また、4章の6条件比較実験では括弧に色付けをする手法、本実験の color 条件にあたる手法が効果的である可能性があり、5章の文系対象実験の実験では、ハイライト手法による効果がみられなかった。その原因として、様々な色を使ってハイライトを行っていたこと、不正解問題の計算ミスのパターンが多すぎたことがあげられた。実際に誤りの多かった問題を抽出してみたところ、ハイライトのしていない箇所に計算ミスがある場合や、そのときのハイライトの色によって、ミスの箇所を見つけづらくなる例があった。そのため、本実験ではハイライトの色を色覚多様性に配慮し、オレンジ色に統一したが、一般色覚者にとってより目立つ色にすることで color 条件のような括弧の色を変えるハイライト手法も数式の構造理解に効果的に働く可能性がある。

6.4.2. 文字の違いによる考察

実際に自らが筆記し、計算する場面では、頭の中で考えたことを早く書き記したいと思うため雑な字になってしまいがちである。そこで、「雑な字では文字の区別がつきにくくなり、ハイライト手法による数式構造理解の効果が大きく働く」という予想を立てていた。しかし、表9より、baseline 条件と marker 条件ではきれいな字と雑な字における正答率に差はなく、color 条件ではきれいな字における正答率の方が雑な字における正答率より高くなった。これは予想に反する結果となった。一方で、marker 条件において一部雑な字の方がきれいな字における正答率が高い問題があった。これらの問題を図26, 27に示す。図26, 27に示した問題は複雑な問題であり、複雑かつ雑な字の場合により構造が分かりにくくなり、ハイライトが効果的に働く可能性がある。

問題画像は著者が意識してきれいな字や雑な字で書いたものであり、著者の字の癖がどちらの字に対しても出てしまった可能性がある。そのため、他者のより雑な字を用いた場合、正答率の差が大きくなることも考えられる。

$$\begin{aligned}
 & 4x - 3 - 2(-x + 6) \\
 &= 4x - 3 + 2x + 12 \\
 &= 6x + 9
 \end{aligned}$$

図 26 雑な字の No.7 の不正解問題 (marker 条件)

$$\begin{aligned}
 & -8 - 8x - 5(3x - 6) \\
 &= -8 - 8x - 15x + 30 \\
 &= -23x + 22
 \end{aligned}$$

図 27 雑な字の No.10 の不正解問題 (marker 条件)

6.4.3. 問題難易度の差に関する考察

6.3.5 項の結果より、単純な問題の難易度は低く、複雑な問題の難易度は単純な問題に比べて難しいことがわかった。ここで、実験システムでは正解の問題と不正解の問題を半数ずつ出題していたが、実験システムに誤りがあり、問題番号 1~5 に正解の問題、問題番号 6~7 に不正解の問題が固定で出題されていた。つまり、もともと易しいと想定していた問題に正解問題が多く提示され、難しいと想定していた問題に不正解問題のみが提示されていた。表 7 より、正解問題に対して「誤っている」と解答する誤りより、不正解問題に対して「正しい」と解答する誤りの方が多かったため、不正解問題の間違い箇所を見つけ出す方が難しいと考えられる。以上のことから単純な問題は易しい問題、複雑な問題は難しい問題といえる。それを踏まえて、改めて表 10 をみると、より難しい問題であった複雑な問題における正答率には条件によって差があり、marker 条件が最も正答率が高くなっていた。ここで、複雑な問題の問題ごとにおける誤答率を表 12 に示す。表 12 より、marker 条件の誤答率が他の条件に比べて低かった問題番号 9 と 10 の問題画像を例として図 28, 29 に示す。これらことから、ある程度複雑な問題においては間違い箇所を発見するのにマーカーをひくハイライト手法が効果的である可能性がある。

表 12 複雑な問題における問題ごとの誤答率

問題番号	baseline 条件	color 条件	marker 条件
No.7	21.8%	19.8%	18.6%
No.8	4.3%	4.0%	2.8%
No.9	13.9%	17.1%	8.3%
No.10	29.6%	25.8%	22.9%

$$\begin{aligned}
 & -1 + 7x + 4(-8x - 4) \\
 = & -1 + 7x - 32x - 4 \\
 = & -25x - 5
 \end{aligned}$$

図 28 No.9 の不正解問題 (marker 条件)

$$\begin{aligned}
 & -8 - 8x - 5(3x - 6) \\
 = & -8 - 8x - 15x - 30 \\
 = & -23x - 38
 \end{aligned}$$

図 29 No.10 不正解問題 (marker 条件)

6.4.4. 間違い方による違い

6.3.6 項より、符号ミスのある問題の方が分配忘れのある問題より正答率が低く、間違い箇所の発見が難しいことがわかった。符号ミスとは具体的に、負の値を掛け算した際に符号が変わるところを変え忘れるミスである。一方で、分配忘れは括弧の後方にある項への掛け算を忘れるミスである。つまり、符号ミスは符号の違いで、分配ミスは数字の違いがある。掛け算をする際、数字に気を取られてしまうため、符号の違いの方が気づきにくかったことが考えられる。また、符号ミスのある問題では baseline 条件に比べ、color 条件と marker 条件の正答率が高くなった。このことより、ハイライトをすることで符号ミスに気づきやすく

なった可能性がある。一方で、分配忘れのある問題においては、color 条件は baseline 条件と同程度の正答率となり、marker 条件の正答率が最も高い結果となった。このことから分配忘れにおいて括弧の色を変えてもあまり効果が得られない可能性があるが、ハイライト色をより目立つ色に変更することや字の太さを変えて強調度を調整することで color 条件が baseline 条件より正答率が上がる可能性も考えられる。

第7章 クラウドソーシング追実験

7.1. 追実験の概要

6章の実験結果より、項数や計算手順が多く複雑な計算問題の方がハイライトの効果が大きくなる可能性があった。また、正解問題と不正解問題の提示が問題によって固定されており、単純な問題と複雑な問題の難易度の差が想定より大きくなってしまった。これらの点を考慮し、計算の種類と問題数を増やし、各問題についてランダムで正解問題と不正解問題が提示されるようにシステムを改善した追実験を行った。以降、6章の実験を「前実験」と記す。

追実験で用意した問題の一部を図30に示す。前実験で用いた計算問題は、一度分配法則を行って計算が終了するもの(図30(a))と、分配法則を行った後に同類項をまとめて計算が終了するもの(図30(b))の2種類があった。追実験ではこの2種類の計算問題に加えて、図30(b)のように分配法則を行った後に同類項をまとめて計算が終了するが、分配法則の位置が違うもの(図30(c))と分配法則を行う箇所が2箇所あるもの(図30(d))を用意した。それぞれの問題種類の問題数は(a)6問、(b)4問、(c)4問、(d)6問で、計20問あった。なお、(a)と(b)の問題は前実験の問題と同じものである。この用意した問題20問からランダムで10問を選定し、前実験同様に極端に簡単な問題2問とともに出題されるようにした。また、極端に簡単な問題2問を除く10問は出題順をシャッフルし、正解問題と不正解問題が半数ずつになるようにランダムで提示するようにした。その他の実験条件は前実験同様である。追実験はYahoo!クラウドソーシングを利用し、1,000名に実験協力を依頼した。

	(a)	(b)	(c)	(d)
問題の種類	$4(x-2)$ $= 4x-8$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$	$-6(x+8)-3x+7$ $= -6x-48-3x+7$ $= -9x-41$	$4(-1+5x)-(-8+4x)$ $= -4+20x+8-4x$ $= 16x+12$

図30 追実験で用意した問題種類の例

7.2. 追実験の結果

データベースには1,143名分の実験データと,1,112名分のアンケートデータが集まった。この中には、途中で離脱し十分なデータが集まっていない人や、実験コードを誤り Yahoo!クラウドソーシングで報酬が支払われなかった人のデータが含まれている。これらのデータと、Yahoo!クラウドソーシング上で正常に実験が終了した実験協力者 1,000名分のデータを照合し、1,000名分のデータを得た。

次に、分析するにあたり、不真面目な回答者を分析対象から除外した。具体的には、Yahoo!クラウドソーシングに入力したユーザ ID に誤りがある人 10名、すべての問題に同一の解答をしている人7名を抽出し、除外した。また、実験システムの不備により12問分すべてのデータがない人やアンケートの回答データがない人についても分析対象外とした。なお、追実験では出題した簡単な問題2問いずれも不正解だった人はいなかった。

前実験同様、追実験の目的は数式の構造理解を促進するための最適なハイライト手法を検討することであり、そもそも計算方法自体を覚えていない場合は分析対象にはならないため、「わからない」解答を1問以上した人と極端に簡単な問題2問を除く10問中合計正答問題数7問以下の人のデータを分析対象外とした。

以上の分析データの前処理を行い、746名分のデータを分析対象とした。そのうち baseline 群は238名、color 群は256名、marker 群は252名であった。

7.2.1. 各条件における正答率の結果

baseline 条件, color 条件, marker 条件それぞれの平均正答率と全問正解者数の割合を表13に示す。表13より、すべての条件において正答率は92%前後であり、各条件間に正答率の差はほとんどなかった。また、全問正解者数の割合は、marker 条件が56.1%と他の2条件に比べて低く、前実験と反対の結果となった。

各条件における詳細な正答率を表14に示す。表14から、不正解の問題に対して「正しい」と解答する誤りは5.7%か5.8%と条件間によって差はないことがわかる。一方で、marker 条件において正解の問題に対して「誤っている」と解答した誤りが2.1%であり、他の2条件より高い結果となった。この正解の問題に対して「誤っている」と解答した誤りの差が表13の全体的な正答率に影響していると考えられる。

表 13 各群における正答率と全問正解者数の割合

	正答率	全問正解者数の割合
baseline 群	92.5%	60.8%
color 群	92.3%	60.1%
marker 群	91.8%	56.1%

表 14 実験協力者の解答と問題の正誤の混同行列

baseline 条件

	正	誤
正しい	44.3%	5.7%
誤っている	1.5%	44.5%

color 条件

	正	誤
正しい	43.7%	5.8%
誤っている	1.6%	44.6%

marker 条件

	正	誤
正しい	42.9%	5.8%
誤っている	2.1%	45.1%

7.2.2. 解答時間の結果

各条件における平均解答時間と標準偏差の表を表 15 に示す。なお、第一四分位数と第三四分位数から四分位範囲の 1.5 倍より離れているデータに関しては外れ値として除外している。表 15 より、平均解答時間は marker 条件、baseline 条件、color 条件の順に短いという結果となった。最も平均解答時間が短かった marker 条件の平均解答時間は 11.65 秒で、baseline 条件と color 条件の平均解答時間はほとんど差がない。また、標準偏差も平均解答時間と同様の順に小さくなっていることがわかる。

表 15 各群における平均解答時間と標準偏差

	baseline 条件	color 条件	marker 条件
平均解答時間[s]	12.31	12.40	11.65
標準偏差	6.53	6.80	6.26

7.2.3. きれいな字と雑な字の結果

文字の違いによる差を分析するため、各条件におけるきれいな字と雑な字の場合の正答率の表を表 16 に示す。表 16 から、きれいな字と雑な字における問題ともに各条件間の正答率の差は大きく見られない結果となった。

表 16 2 種類の文字タイプに分けた正答率

	きれいな字	雑な字
baseline 条件	93.0%	92.0%
color 条件	92.4%	92.2%
marker 条件	92.6%	91.0%

7.2.4. 問題難易度の差

用意した問題は図 30 に示したような 4 種類の問題があった。それぞれの問題種類に分けた正答率を表 17 に示す。表 17 から、(a)→(c)→(b)→(d)の順で正答率が低くなっていることがわかる。また、問題種類(c)における正答率を見ると、marker 条件が他の 2 条件に比べ低い正答率となった。

表 17 4 種類の問題難易度に分けた正答率

	(a)	(b)	(c)	(d)
baseline 条件	95.3%	90.6%	92.6%	89.7%
color 条件	96.4%	90.6%	92.1%	88.2%
marker 条件	95.1%	90.8%	90.8%	88.9%

7.2.5. 間違い方の違いによる差

用意した問題の不正解問題におけるミスの方は、分配法則に伴う「符号ミス」と「分配忘れ」の2種類があった。この2種類の計算ミスで分けた各条件における正答率を表 18 に示す。表 18 より、符号ミスのある問題における正答率は90%前後、分配忘れのある問題における正答率は93%前後であった。このことから、前実験同様、符号ミスの方が分配忘れより間違い箇所を見つけるのが難しかったことがわかる。

また、符号ミスのある問題では baseline 条件、color 条件、marker 条件の順に正答率が高くなった。一方で、分配忘れのある問題においては、baseline 条件、color 条件、marker 条件の順で正答率が低くなるという符号ミスとは反対の結果となった。

表 18 2 種類の計算ミスタイプに分けた正答率

	符号ミス	分配忘れ
baseline 条件	90.7%	94.3%
color 条件	90.9%	93.6%
marker 条件	91.3%	92.3%

7.3. 前実験と追実験の考察

前実験では、各条件における正答率、全問正解者数の割合は marker 条件、color 条件、baseline 条件の順で高く、各条件における平均解答時間も同様の順で短かったことから marker 条件が数式の構造理解に効果的に働いたことが考えられた。しかし、追実験の結果、解答時間は marker 条件が短くなったものの、全体の正答率や全問正解者数の割合は marker 条件が最も低くなった。つまり、追実験ではマーカーにより正誤判定の速度は上がったが、その分正確性が下がってしまった可能性がある。しかし、baseline 条件と marker 条件の正答

率の差は前実験の方が大きく、追実験は前実験に比較して差が少ないことを考えると解答時間が短くなった利点の方が大きいと考えられる。

各条件における2種類の文字タイプに分けた正答率は、前実験と比べ追実験ではきれいな字と雑な字の差が見られなくなった。一方で、きれいな字の正答率平均と雑な字の正答率平均はそれぞれ92.7%、91.7%と約1%の差があり、微小であるが雑な字の方が正答率は低い結果となり、雑な字の場合は構造が分かりにくくなっていったと考えられる。前実験では雑な字におけるmarker条件の正答率が他の2条件に比べ高くなっており、前実験と追実験の結果を組み合わせると、marker条件においては「雑な字では文字の区別がつきにくくなり、ハイライト手法による数式構造理解の効果が大きく働く」という仮説が支持される可能性がある。これは今後、より雑な字を用いた実験やユーザ自身の字を用いた実験により詳細を調査する必要がある。

4種類の問題難易度別に分けた正答率の結果、(a)→(c)→(b)→(d)の順で正答率が低くなっていた。前実験では複雑な問題ほど構造が分かりにくくなり、ハイライトが効果的に働く可能性があったが、追実験では最も難易度が高くなった(d)の問題については各条件間の正答率の差は見られなかった。ここで、(d)の問題6問の各条件における不正解問題提示時の誤答率の表を表19に示す。表19より、marker条件における(d)-6の問題の誤答率が大きくなっているが、(d)-2と(d)-4はmarker条件の誤答率が低くなっている。これより、marker条件においては前実験同様に複雑な問題ほど構造が分かりにくくなり、ハイライトが効果的に働く可能性が考えられる。

表19 (d)の問題における誤答率

	baseline 条件	color 条件	marker 条件
(d)-1	8.5%	10.0%	11.3%
(d)-2	22.2%	21.3%	13.8%
(d)-3	12.5%	19.1%	11.6%
(d)-4	20.0%	26.9%	16.4%
(d)-5	3.1%	7.0%	9.8%
(d)-6	9.4%	9.0%	19.7%

2種類の計算ミスタイプに分けた正答率は、前実験同様に追実験でも符号ミスのある問題の方が低く、分配忘れのある問題よりミスの発見が難しかったことが考えられる。前実験では符号ミスのある問題における正答率はcolor条件、marker条件ともにbaseline条件より高く、追実験では差が縮まったが同じ傾向が見られ、ハイライトが効果的な可能性がある。一

方で、追実験では分配忘れにおける baseline 条件の正答率が他の2条件を上回った。このことから、分配忘れには color 条件, marker 条件ともに効果的ではない可能性がある。

6, 7 章では、構造を理解する必要がある問題として分配法則を利用して解く問題を用いたが、Yahoo!クラウドソーシングのユーザが実験に参加する意欲を削がない程度の難易度を考慮して比較的易しい問題を選定していた。今後はより項数の多い問題や分配法則以外の構造理解が必要な問題を用いて実験を行うことで違う結果が得られる可能性がある。また、普段数学に触れる人であってもハイライトのついた数式を見かけることは少ないと考えられ、ある程度ハイライト付きの数式に慣れてからの方がハイライトの効果が見られる可能性がある。そのため、一人当たりの問題数を増やすことや長期的な実験が必要である。

第8章 総合考察と今後の展望

8.1. 総合考察

3章ではまず、具体的な提案手法について述べ、数式へのハイライトが数式の構造理解を促進し、正確で素早い計算を可能にするかを調査するためのプレ実験を行った。プレ実験では「数学記号へのハイライトが構造理解を促進し、正確で素早い計算を可能にする」という仮説のもと実験を行った。プレ実験の結果、解答実験、間違い探し実験ともに微小であるが平均得点はハイライトありの方が高かった。また、これらの実験が数式へのハイライトの影響を反映する可能性が明らかになった。

4章から7章では、3章のプレ実験を踏まえ、理工系大学生、人文系大学生、幅広い年齢層 (Yahoo!クラウドソーシングサービスのユーザ) による正誤判定実験により、最適な数式ハイライト法の調査を行った。その結果、数式の構造理解が必要な計算問題タイプにおけるハイライトは効果的である可能性や間違いを含みやすい箇所にハイライトしないと却ってミスを誘発する可能性などが明らかになった。

Banerjee ら[65]は構造感覚の発達を目的として「項」という概念を中心とする新しいアプローチを採用し実験を行った。結果として、構造感覚を身につけるには長期的なプロセスを取る必要があることを明らかにしており、本研究においても長期実験を行う必要があると考えられる。また、より構造理解が必要になる問題タイプ、一般色覚者の目をひく色などを用いた実験を行い、より詳細な数式ハイライトの特性を調査する必要があるが、これまでの研究結果を踏まえ、数式ハイライトシステムを実装することにより、計算支援が期待できる。

8.2. リアルタイム数式ハイライトシステム

以降、過去の研究[66]と3章から7章までの実験結果を踏まえた数式ハイライトシステムの設計について述べる。過去の研究[66]では、実際に計算中に数学記号を認識するとそれに対応した色付けがされていくプロトタイプシステムを実装し、中学生や大学生に利用してもらう実験を行った。このプロトタイプシステムでは様々な課題点が明らかになった。プロトタイプシステムでは数式の認識を1ストロークごとに行っていたが、数式の認識精度が不十分であるという課題があった。数式の認識精度改善のため、認識タイミングを1ストロークごとの認識ではなく、1行ごとにする、画像認識にするなどが考えられる。また、最初に提示される問題にハイライトがされていなかったため、1行目の計算は通常どおり自身で行う必要があった。そのため、システムでは最初の計算問題からユーザに書かせる、あるいは最初の問題からシステム側が事前にハイライトをしておく必要がある。また、システムで扱う基礎計算としては構造理解を要する複雑な問題が適しており、ハイライトに使用する色数は少ない方が良い。これまで、数学記号や括弧、同類項に色を変える、マーカーをひく

というようなハイライト手法を提案してきたが、「=」（イコール記号）に色をハイライトすると途中式が縦に揃い、プログラミングのインデックスと同様の効果が得られる可能性があること、文字色自体を変えるより、マーカーをひくようなハイライトの方がミス防止に効果的である可能性がある。また、Venkatesh[67]はモバイル機器を利用した学習について、システムの使いやすさを知覚するには楽しさの知覚が重要になるとしている。その楽しさから内発的動機付けによってシステム使用への意欲が増すため、システム利用者がより楽しさを知覚するようなシステム設計が必要である。

ここまで、数式へのハイライトが数式の構造理解を促進し、計算ミスを減少させる可能性について述べてきたが、家庭学習などの計算場面においてハイライトがある状態で練習をすると、ハイライトがなくなったときその効果が持続しない、あるいは計算力が低下するのではないかという懸念がある。この懸念については、実験による検証が必要である。しかし、プログラミングではシンタックスハイライト機能による視覚的補助が当然のように備わっており、シンタックスハイライトがない場合の記述誤りを心配する必要はあまりない。現在の教育課程では、定期考査や授業内テストではタブレット端末のような電子機器を用いることはほぼないため、中学生や高校生における定期考査で高得点をとることに焦点を当てると、ハイライトのない場合を考慮する必要はある。しかし、大学生や社会人にとっての計算は“手段”として用いられるため、その支援としてはプログラミング同様、ハイライトがない場合の考慮をする必要はそれほどないと考えられる。

第9章 おわりに

本研究では基礎計算の習得は重要であるが、様々な要因が重なり、基礎計算でミスをしてしまう問題に着目した。ここで、計算には数式の構造理解が重要であり、数式の構造理解を支援することが正確に素早く計算することにつながると考えた。数式と同様に複雑なものとして、プログラミングがあり、プログラミングツールには、シンタックスハイライトと呼ばれる機能が備わっていることが多い。このシンタックスハイライトにより、視覚的にソースコードの構造がわかるようになっている。

そこで本研究では、「数式の一部へハイライトを行うことで、数式の構造が理解しやすくなり、計算ミスが減少あるいは計算が素早くできるようになる」と仮説を立て、数式ハイライト手法を提案した。また、数式の構造理解を支援する適切なハイライト法について実験を通して検討した。

3章では、具体的な提案手法について述べ、数式へのハイライトが数式の構造理解を促進し、正確で素早い計算を可能にするかを調査するためのプレ実験を行った。プレ実験では「=」「+」「-」「×」「÷」のような数学記号に焦点を当て、「数学記号へのハイライトが構造理解を促進し、正確で素早い計算を可能にする」という仮説のもと実験を行った。プレ実験は理想的なハイライト状態を擬似的に作りだし、解答実験と間違い探し実験の2種類の実験を行うことにより調査した。解答実験では色の付与をした方が色の付与をしていない方より平均得点が高く、平均時間が短い結果となり、間違い探し実験では色の付与をした方が色の付与をしていない方より平均得点は高いが、平均時間は長くなるという結果が得られた。これらより数学記号への色の付与は一部問題にとっては効果的である可能性が示唆されたが、その差が僅差であったことや理系の大学生・大学院生に実施したという課題点があがった。アンケート結果からは数学記号に色がつくことで、数式のまとまり意識や、符号への注意ができるという意見が多く得られた。このことから工夫次第によっては数学記号への色付与は有効であることが示唆された。また、これらの実験が数式へのハイライトの影響を反映する可能性が明らかになった。

4章の6条件比較実験では、ハイライト対象を、括弧、同類項、また、ハイライト方法を文字色変え、マーカー（背景色変え）、アンダーラインで組み合わせた複数のハイライト手法において、最適なハイライト法を正誤判定による実験により検討した。実験の結果、正負の数の計算では括弧に色付けをする B-color 条件の正答率が最も高く、また平均解答時間が最も短かったことより、正負の数の計算にとって括弧に色付けをするハイライト手法が優れていることが示唆された。また文字式の計算では、2種類のハイライト手法を組み合わせた Mix 条件の正答率が最も低く、平均解答時間が最も長い結果であった。このことから複数のハイライト手法を同時に用いると、注目箇所が多くなってしまい混乱を招くことが示唆された。

5章の文系対象実験では、カリキュラムの都合で数学に触れる機会が減少している人文系の大学生を対象に、手法を2種類に限定し実験協力者ごとに提示する手法を固定した実験を行った。実験の結果、正答率や解答時間においてB-color群とB-marker群の間に差はみられなかった。これはB-marker群内で基礎的な数学力に差があったことがひとつの要因として考えられた。また、Baseline条件からB-color条件やB-marker条件のようなハイライトされる環境に移ると、解答時間が短くなり、また正答率が下がる傾向があった。これは、ハイライトに頼って正誤判定をしてしまったことが原因として考えられた。

6, 7章では、数式の構造理解が必要とされる分配法則を利用して解く問題に限定し、これらの問題に効果的だと考えられる括弧の色を変える手法と括弧内にマーカーをひく手法の2種類のハイライト手法を用いた実験をクラウドソーシング上で幅広い年代を対象に行い、適切なハイライト手法について検討を行った。実験の結果、括弧内にマーカーをひくmarker条件において、解答時間が短くなる傾向が見られ、数式の構造理解を理解し素早い正誤判定が可能になることが示唆された。また、文字のきれいさや計算ミスタイプによって有効なハイライト手法がある可能性などを明らかにした。

8章では、3章から7章の研究結果をまとめ、数式の構造理解を支援するリアルタイム数式ハイライトシステムの可能性について述べた。今後は8章で述べた数式ハイライトシステムの実装および、リアルタイム数式ハイライトの効果を実験により調査することを予定している。

本研究によって、多くの学生や数学を利用する人々の計算が楽しく、ミスの少ないものになることを望む。

謝辞

本研究に際して、お世話になった方々にこの場を借りて感謝申し上げます。はじめに、研究の方針や論文の執筆について親身にご相談にのってくださり、発表練習等夜遅くまでお付き合いいただいた中村聡史先生に深く感謝申し上げます。国内外の学会発表の経験はとても貴重なものでした。また、研究のご相談や議論にご協力いただいた中村研究室の先輩、後輩の方々に感謝いたします。同期4名には、研究はもちろんのこと、4年間の学生生活を支え合い、協力していただけたこととても嬉しく思います。そして、これまで経済面や精神面で支えてくれた家族に感謝申し上げます。

最後に、ご支援いただいた皆様に感謝いたします。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 柳本成一. 正の数・負の数の四則-3つの指導法の比較-. 日本数学教育学会誌, 1990, vol. 72, no. 9, pp. 325-335.
- [2] 岡崎正和. 全体論的視座からの正負の数の加減の単元構成に関する研究—教授学的状況論と代数的思考のサイクルの視点 から—. 全国数学教育学会誌, 数学教育学研究, 2003, vol. 9, pp. 1-13.
- [3] 三輪辰郎. 改訂学習指導要領と中学校数学の指導. 日本数学教育学会誌, 1999, vol. 81, no. 3, pp. 29-38.
- [4] Shapiro, E. S.. Academic skills problems: Direct assessment and intervention (3rd Edition). New York: The Guilford Press. 2004.
- [5] Gersten, R., Chard, D.. Number sense: Rethinking arithmetic instruction for students with mathematical disabilities. *Journal of Special Education*, 1999, vol. 33, no. 1, pp. 18-28.
- [6] 鈴木敬介. 中学校における文字式指導に関する基礎的研究. —文字式が本当にわかって、使えるために何が大切か—. 上越数学教育研究, 2006, vol. 21, pp. 147-160.
- [7] 浅井昭四, 奥村敏夫, 坂野孝彦, 野々山親, 安田典正, 岡崎徹. 分かりやすい授業を目指した計算指導つまずきの実態調査を踏まえて. 日本数学教育学会誌, 1987, vol. 69, no. 3, pp. 13-20.
- [8] 戸谷亜希子. 正負の数の加法・減法の教科書分析と認知的研究からみえる算数と数学の乖離の様相について. 上越数学教育研究, 2007, vol. 22, pp. 163-174.
- [9] 小山正孝. 算術から代数への移行に関する認識論的考察. 日本数学教育学会, 第 21 回数学教育論文発表会論文集, 1988, pp. 52-57.
- [10] 真野祐輔. 算数・数学学習における概念変容の関する基礎的研究-「数」領域の展開を中心に. 日本数学教育学会誌, 2011, vol. 91, no. R64, pp. 5-14.
- [11] Herscovics, N., Linchevski, L.. Acognitive gap between arithmetic and algebra. *Educational Studies in Mathematics*, 1994, vol. 27, pp. 59-78.
- [12] Linchevski, L., Herscovics, N.. Crossing the cognitive gap between arithmetic and algebra: Operating on the unknown in the context of equation. *Educational Studies in Mathematics*, 1996, vol. 30, pp. 39-65.
- [13] Luneta, K., Makonye, P. J.. Learner Errors and Misconceptions in Elementary Analysis: A Case Study of a Grade 12 Class in South Africa. *Acta Didactica Napocensia*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 35-46.
- [14] 文部科学省, “【数学編】中学校学習指導要領(平成29年告示)解説”. https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2019/03/18/1387018_004.pdf, (参照 2023/12/22).
- [15] 田中紗枝子, 池田丈世, 岡直樹, 宮谷真人. 数学の学習に困難を示す中学生への認知カウン

- セリング：計算問題に関する援助を通して. 学校教育実践学研究, 2013, vol. 19, pp. 29-36.
- [16] 船越咲, 岡直樹, 森田愛子. 図形問題や文章題に困難を示す中学生への学習支援. 学校教育実践学研究, 2016, vol. 22, pp. 35-43.
- [17] 藁科桃子, 古市将樹. 数学記号から視る数学教育—苦手意識の要因としての記号・イメージ—. 教育研究実践報告誌, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 57-66.
- [18] Elena, C., Melina, D.B.. The role of the different components of attention on calculation skill. *Learning and Individual Differences*, 2014, vol. 32, pp. 225-232.
- [19] Linchevski, L, LivnehMaureen, D.. Structure sense: The relationship between algebraic and numerical contexts. *Educational Studies in Mathematics*, 1999, vol. 40, no. 2, pp. 173-196.
- [20] Maureen, H., Dreyfus, T.. Structure sense versus manipulation skills: An unexpected result. In J. Novotna, H. Moraova, M. Kratka, & N. Stehlikova, eds. *Proceedings of the 30th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics*, 2006.
- [21] Drijvers, P., Stiphout, I. V., Gravemeijer, K.. The development of students' algebraic proficiency. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 2014, vol. 8, no. 2-3, pp. 63-80.
- [22] Advait, S.. The impact of syntax colouring on program comprehension. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the Psychology of Programming Interest Group (PPIG 2015)*, 2015, pp. 49-58.
- [23] 荒木友希子, 山口瞳. 数学に対する苦手意識が計算問題における学習性無力感現象の生起に与える影響. *北陸心理学会*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 29-37.
- [24] 池間生子. ノート指導と教科書の使用でひとり学びの可能性を探る:効果的な正負の数の紹介の仕方. *教職実践研究*, 2016, vol. 6, pp. 17-29.
- [25] Ashcraft, M. H., Kirk, E. P.. The relationships among working memory, math anxiety, and performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2001, vol. 130, no. 2, pp. 224-237.
- [26] Zaslavsky, O., Linchevski, L., Hermon, N., Livneh, D., Zodik, I.. Exhausting Students' Potential in Mathematics: A Comprehensive Approach to Promoting Both Struggling and Promising Students. In *K-12 Mathematics Education In Israel: Issues And Innovations*, 2018, pp. 127-134.
- [27] Maureen, H., Tommy, D.. STRUCTURE SENSE IN HIGH SCHOOL ALGEBRA: THE EFFECT OF BRACKETS. the 28th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, 2004, vol. 3, pp. 49-56.
- [28] Joseph G. T., Edelyn C.. Structure Sense in Algebraic Expressions and Equations of Groups of Students. *Journal of Educational and Human Research Development*, 2018, vol. 6, pp. 140-154.
- [29] Jupri, A., Sispiyati, R.Chin, K. E.. An investigation of students algebraic proficiency from a structure sense perspective. *Journal on Mathematics Education*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 147-158.
- [30] Jupri, A., Sispiyati, R.. Students' Algebraic Proficiency from the Perspective of Symbol Sense. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 86-94.
- [31] Junarti, Sukestiyarno, Y. L. Dwidayati, N. K.. The Profile of Structure Sense in Abstract Algebra Instruction in an Indonesian Mathematics Education. *European Journal of Educational Research*, 2019,

vol. 8, no. 4, pp. 1081-1091.

- [32] Liebenberg, R., Linchevski, L., Olivier, A., Sasman, M., July. Laying the foundation for algebra: Developing an understanding of structure. 4th Annual Congress of the Association for Mathematics Education of South Africa (AMESA), 1998.
- [33] Liebenberg, R.E., Linchevski, L., Sasman, M.C. and Olivier, A.. Focusing on the Structural Aspects of Numerical Expressions. Proc. of the 7th annual conference of the South African Association for Research in Mathematics and Science Education, 1999.
- [34] Dong, C, Wenjing, J., Haiju, W.. Research on computer technology for undergraduates in mathematics education. 2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009, pp. 14-17.
- [35] Microsoft. Math Solver. <https://math.microsoft.com/ja>, (参照 2023/12/22).
- [36] Photomath. <https://photomath.com/>, (参照 2023/12/22).
- [37] Saundarajan, K., Osman, S., Kumar, J. A., Daud, M. F., Abu, M. S., & Pairan, M. R.. Learning Algebra using Augmented Reality: A Preliminary Investigation on the Application of Photomath for Lower Secondary Education. International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET), 2020, vol. 15, no. 16, pp. 123-133.
- [38] John, S. B., Richard, R. B.. Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills. Cognitive Science, 1978, vol. 2, no. 2, pp. 155-192.
- [39] 森重湧太, 中川正樹. 手書き数式認識を用いた計算過程の正誤フィードバック. 研究報告コンピュータと教育 (CE) , 2014, vol. 126, no. 13, pp. 1-5.
- [40] 千葉智史, 中川正樹. 手書き数式認識を利用したタブレット PC 上での数学 e ラーニングシステムの試作. 研究報告コンピュータと教育 (CE) , 2014, vol. 127, no. 10, pp. 1-5.
- [41] Wang, A.. Application of modern information technology in mathematics education of elementary and secondary schools. 2009 International Conference on Test and Measurement, 2009, pp. 209-212.
- [42] Judith, H., Markus, H.. Introducing Dynamic Mathematics Software to Secondary School Teachers: the Case of GeoGebra. Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2009, vol. 28, no. 2, pp. 135-146.
- [43] Melanie, T., Markus, H.. Integrating Mobile and Sensory Technologies in Mathematics Education. MoMM2017: Proceedings of the 15th International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia, 2017, pp. 39-48.
- [44] Craig, J, C., Joshua, T, H., Megan, N.. The Roles of Technology in Mathematics Education. The Educational Forum, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 166-178.
- [45] Hend, S. Al-Khalifa.. A System for Decoding and Coloring Arabic Text for Language Learners. IEEE, 2019, vol. 7, pp. 104810-104822.
- [46] Marco, P.. Why Should Anyone use Colours? or, Syntax Highlighting Beyond Code Snippets. arXiv e-prints, 2020.

- [47] Beelders, T.R. du Plessis, J-P.L.. Syntax highlighting as an influencing factor when reading and comprehending source code. *Journal of Eye Movement Research*, 2016, vol. 9, No. 1, pp. 1-11.
- [48] Gerard, K. R.. The influence of color on program readability and comprehensibility. 1986, vol. 18, no. 1, pp. 173-181.
- [49] Tapp, R., R. K.. Determining the usefulness of colour and fonts in a programming task. *IEEE 3rd Workshop on Program Comprehension*, 1994, pp. 154-161.
- [50] Kercood, S., Janice, A, G.. The Effects of Highlighting on the Math Computation Performance and Off-task Behavior of Students with Attention Problems. *Education and Treatment of Children*, 2009, vol. 32, no. 2, pp. 231-241.
- [51] MacGregor, M., Kaye, S.. Students' Understanding of Algebraic Notation: 11-15. *Educational Studies in Mathematics*, 1997, vol. 33, no. 1, pp. 1-19.
- [52] 大久保心織, 三末和男. 文字の視覚属性を利用した強調表現に関する研究. 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, 2015, pp. 1-65.
- [53] 魚崎祐子, 伊藤秀子, 野嶋栄一郎. テキストへの下線ひき行為が内容把握に及ぼす影響. *日本教育工学会論文誌*, 2003, vol. 26, no. 4, pp. 349-359.
- [54] Küchemann, D.. Children's Understanding of Mathematics: 11-16, 1981, pp. 102-119.
- [55] Clement, J.. Algebra word problemsolutions : Thought processes underlying acommon misconception. *Journal for Research in Mathematics Education*, 1982, vol. 13, no. 1, pp. 16-30.
- [56] Stacey, K., MacGregor, M.. Multiple referents and shifting meanings of unknowns in students' use of algebra. *Proceedings of the 21st Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education*, 1997, vol. 4, pp. 190-197.
- [57] Radford, L.. Gestures, speech, and the sprouting of signs: A semiotic-cultural approach to students' types of generalization. *Mathematical Thinking and Learning*, 2003, vol. 5, no. 1, pp. 37-70.
- [58] 藤井齊亮. 児童・生徒の文字の理解とミスコンセプションに関するインタビュー調査. *数学教育学論究*, 1992, vol. 74, no. 58, pp. 3-27.
- [59] 小岩大. 文字式の理解を捉えるための調査問題の開発—process-product に焦点を当てて—. *日本数学教育学会第 37 回数学教育論文発表会論文集*, 2004, pp. 256-264.
- [60] 太田伸也. 文字式に対する認識の発達について. *日本数学教育学会誌*, 1990, vol. 72, no. 7, pp. 2-11.
- [61] 清水宏幸. 文字式とその式における文字の理解に関する研究—式をひとまとまりとみることに焦点を当てて—. *日本数学教育学会誌*, 2019, vol. 101, no. 11, pp. 2-13.
- [62] 中村好則. 高校の数学指導における文系と理系の生徒の現状と課題—テスト調査とアンケート調査の分析を通して—. *数学教育学会誌*, 2020, vol. 61, no. 3, pp. 53-66.
- [63] Yahoo!クラウドソーシング. <https://crowdsourcing.yahoo.co.jp/>, (参照 2023/12/22).
- [64] 清水伸幸, 中川雅史. クラウドソーシングの現状と可能性 : 2. マイクロタスク型クラウドソーシングの現状と課題 -実際の運用の知見から-. *情報処理*, 2015, vol. 56, no. 9, pp. 886-890.

- [65] Banerjee, R., Subramaniam, K, R.. DEVELOPING PROCEDURE AND STRUCTURE SENSE OF ARITHMETIC EXPRESSIONS. Proceedings of the 29 th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, 2005, vol. 2, pp. 121-125.
- [66] 植木里帆, 中村聡史. 中学基礎計算の途中計算を促進する記号ハイライト手法の提案, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 2022, vol. 2022-HCI196, no. 4, pp. 1-8.
- [67] Venkatesh, V.. Determinants of Perceived Ease of Use: Integrating Control, Intrinsic Motivation, and Emotion into the Technology Acceptance Model. Information Systems Research, 2000, pp. 342-365.

研究業績

- [1] 植木里帆, 横山幸大, 野中滉介, 中村聡史. 三択の選択肢における要因の違いが選択行動に及ぼす影響の調査, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2020-HCI-190, No. 23, pp. 1-8, 2020.
- [2] 関口祐豊, 植木里帆, 横山幸大, 中村聡史. 三択の選択肢の色の組み合わせが選択行動に及ぼす影響, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2021-HCI-195, No. 32, pp. 1-8, 2021.
- [3] 植木里帆, 中村聡史. 中学基礎計算の途中計算を促進する記号ハイライト手法の提案, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2022-HCI196, No. 4, pp. 1-8, 2022.
- [4] 木下裕一郎, 関口祐豊, 植木里帆, 横山幸大, 中村聡史. 選択インタフェースにおけるアイテムの遅延表示が選択に及ぼす影響, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2022-HCI-200, No. 27, pp. 1-8, 2022.
- [5] 小林沙利, 植木里帆, 関口祐豊, 中村聡史, 掛晃幸, 石丸築. デジタルペンの筆圧による濃淡表現の有無が筆算の正答率に及ぼす影響, HCG シンポジウム 2022, No. C-5-5, pp. 1-8, 2022.
- [6] 植木里帆, 中村聡史. 数学の基礎計算におけるミス防止のためのハイライト手法の比較検討, HCG シンポジウム 2022, No. C-5-3, pp. 1-8, 2022.
- [7] 関口祐豊, 植木里帆, 中村聡史. PP-Undo: 筆圧の制御により付与されたストロークの確信度に基づく Undo/Redo 手法の提案, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2023-HCI-201, No. 15, pp. 1-8, 2023.
- [8] 木下裕一郎, 関口祐豊, 植木里帆, 横山幸大, 中村聡史. 選択肢の時間差表示が選択行動に及ぼす影響, 信学技報 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS) , 2023.
- [9] 植木里帆, 中村聡史. 基礎計算のミス防止に向けた2種類の数式ハイライト手法の比較検討, 信学技報, Vol. 123, No. 188, HCS2023-64, pp. 41-46, 2023.
- [10] Ueki, R., Yokoyama, K., Nakamura, S.. Does the Type of Font Face Induce the Selection?, International Conference on Human-Computer Interaction (HCII 2023), Vol. LNCS 14012, pp. 497-510, 2023.
- [11] Sekiguchi, Y., Ueki, R., Yokoyama, K., Nakamura, S.. Does the Averaged Color Induce the Selection?, International Conference on Human-Computer Interaction (HCII 2023), Vol. LNCS 14012, pp. 485-496, 2023.
- [12] Kinoshita, Y., Sekiguchi, Y., Ueki, R., Yokoyama, K., Nakamura, S.. Do People Tend to Select a Delayed Item?, International Conference on Human-Computer Interaction (HCII 2023), Vol. 14012, pp. 397-407, 2023.

- [13] 植木里帆, 中村聡史. 基礎的な数式の構造理解に向けた2種類の数式ハイライト手法の比較調査, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2024-HCI-206, No. 20, pp. 1-8, 2024.