

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

植木里帆¹ 中村聡史¹

概要：基礎計算は数学学習の基盤となるため、符号間違えのようなケアレスミスは早い段階で修正したほうが良い。そのためには数式の構造理解が重要であることから、我々はその支援を目的とし、計算中の数式の特定箇所へハイライトをすることで計算ミスを減らす手法を提案してきた。また、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、6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。しかし、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。そこで本研究では、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、括弧にマーカーを引いたようなハイライト手法が数式の構造理解を促進する可能性や、文字のきれいさ、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。

キーワード：中学校数学、基礎計算、数式の構造、シンタックスハイライト

1. はじめに

中学校に進学してすぐに学習する正負の数や文字式の計算といった基礎計算は、その後の数学学習の基盤となる[1-3]。この基礎計算を間違わずに解くスキルを早い段階で習得しなければ、他の複雑な計算ができない、文章題等で立式しても答えまで導けないなどの問題がある。

ここで、小学校で学習する算数と中学校以降で学習する数学では、数を捉える概念や記号の意味が異なるため、中学校に進学したタイミングで数学へ苦手意識を感じる生徒は少なくない[4-6]。その結果、計算ルールの把握が曖昧になり、計算ミスが多発する。また、一度基礎計算を学習しても、高校の文理選択で文系コースを選んだために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や、数学を学習し続けていてもその記述の分かりにくさなどによって計算ミスを起こしてしまうことも考えられる。Elenaら[7]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。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。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。

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。Maureen[8]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“構造理解”が重要であると説明している。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、数式の構造感覚を把握する練習が必要である。

数式と同様に、プログラミングにおけるコーディングでは構造の理解が重要である。構造を視覚的にわかりやすく

するため、プログラミングではコードへ色付けするシンタックスハイライト機能が多く用いられている。また、テキスト中やプログラムのコードの一部の文字色を変えたり、背景色をつけたりすることで可読性が向上し、理解促進することが明らかになっている[9][10]。我々はこれまでの研究において、計算中の数式の特定箇所へハイライトをすることによる数式の構造理解促進と計算ミスを防止する手法を提案し、手書き計算中に数学記号へ色を付与するプロトタイプシステムの実装[11]や、最適なハイライト法を調査する実験を行ってきた[12][13]。しかし、これまでの実験では、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。

そこで本稿では、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、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ため、今回はYahoo!クラウドソーシングサービスを利用し、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。

2. 関連研究

2.1 数学支援システムに関する研究

数学の計算を苦手とする人は多く[4-6]、様々な解決策が検討されている。また、近年はeラーニングの広がり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。そのため、電子的な数学の補助を目的としたシステムが提案されている。

Photomath[14]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

¹ 明治大学
Meiji University.

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[15]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。

森重ら[16]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ている。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明らかにしている。

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、自らの計算ミスを見出し、計算スキルの向上を目指すものである。

2.2 数式の構造理解に関する研究

Hoch ら[17]や Drijvers ら[18]は、数式の構造理解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、特定の複号項を一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

また、Maureen[8]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。

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。

2.3 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[19]は、アラビア語の単語を分解（デコード）して単語の理解をしやすくするため、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。

Beelders ら[9]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、Tapp ら[10]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理解促進をするものである。

3. 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。

3.1 実験設計

先述の通り、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回答してもらう。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回答の仕方は、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。

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, 我々の過去の実験[12][13]では, 問題画像は筆頭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 1 に示す. 用意した 10 問のうち 6 問は図 1 の(a)のように一度分配法則を行なって計算が終了するものと, 残り 4 問は図 1 の(b)のように分配法則を行な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 1000 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[20], 数学から離れて時間が経った人が多いと考えられる.

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, 不真面目な回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, 多くの人が回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.

3.2 実験システムと流れ

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 2 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 3.1 節で記述した 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

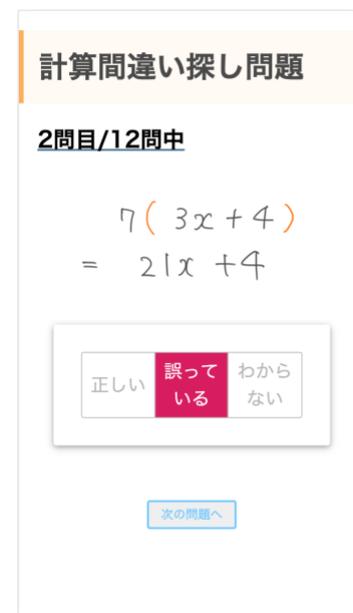


図 2 計算実験画面の例

	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>	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$
雑な字	$4(x-2)$ $= 4x-8$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$	$4x-3-2(-x+6)$ $= 4x-3+2x-12$ $= 6x-15$

図 1 出題問題例

最初と最後に簡単な問題を1問ずつ全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、問題解答毎に、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。

3.3 実験の流れ

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。

4. 実験結果

4.1 分析の前処理

データベースには1117名分の実験データと、1096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1000名分のデータを照合し、1000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問いづ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、全ての問題に同一の解答をしている人4名を抽出し、除外した。また、実験システムの不備により12問分全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3に示す。図3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。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4に示す。

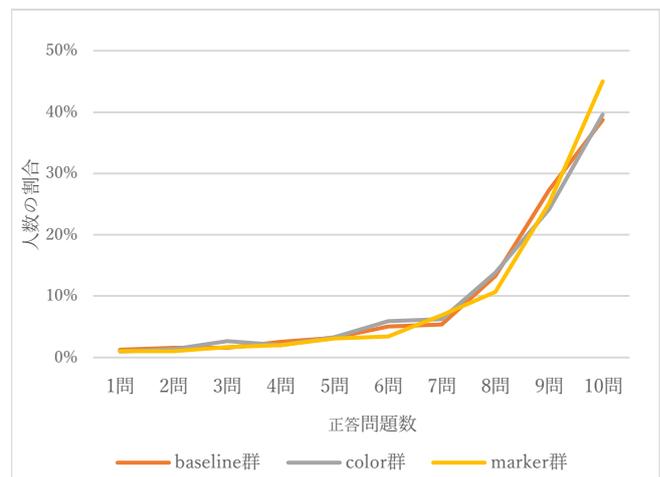


図3 正答問題数ごとの人数の割合

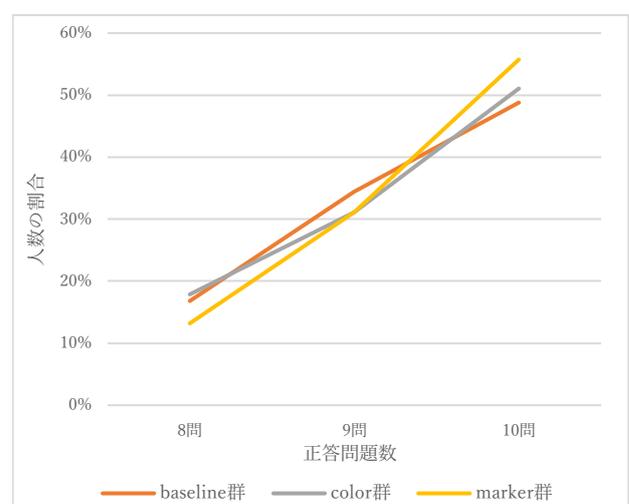


図4 正答数8問以上の正答問題数ごとの人数の割合

以上の分析データの前処理を行い、818名分のデータを分析対象とした。そのうち baseline 群は 283 名、color 群は 270 名、marker 群は 265 名であった。

4.2 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 1 に示す。表 1 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。なお、「わからない」と解答したものについては誤答として扱っている。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 48.8%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 2 に示す。表 2 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 48.7%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 2 から、marker 条件の不正解の問題に対して「正しい」と回答する誤りが約 6%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 条件より間違え箇所を発見しやすかった可能性が

表 1 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	90.9%	48.8%
color 群	91.2%	51.1%
marker 群	92.3%	55.7%

表 2 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	48.4%	7.5%
誤っている	1.6%	42.5%

color 条件		
	正	誤
正しい	48.4%	7.2%
誤っている	1.6%	42.8%

marker 条件		
	正	誤
正しい	48.3%	6.0%
誤っている	1.7%	44.0%

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」と回答した誤りが 1.6%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う“見誤り”を防ぐ可能性がある。

4.3 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 3 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 3 より、平均解答時間は baseline 条件、color 条件、marker 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 3 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]	9.25	8.82	8.59
標準偏差	5.12	4.71	4.24

4.4 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 4 に示す。表 4 から baseline 条件と color 条件では、きれいな字の方が正答率は高かった。一方で、marker 条件では雑な字の方がきれいな字より正答率が高くなり、marker 条件における雑な字の正答率 91.4%は全体で最も高い結果となった。

表 4 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	90.4%	89.5%
color 条件	90.4%	89.0%
marker 条件	90.9%	91.4%

4.5 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 問が分配法則を行な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 5 に示す。表 5 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

表 5 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%	79.8%
color 条件	96.9%	78.9%
marker 条件	96.5%	83.1%

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条件の正答率が最も高いという結果になった。

4.6 間違え方の違いによる差

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6に示す。表6より、符号ミスのある問題における正答率は87%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、符号ミスの方が分配忘れより間違え箇所を見つけるのが難しかったことがわかる。

また、条件ごとにみると、color条件はbaseline条件に比べて符号ミスにおける正答率が同程度なのに対して、分配忘れにおける正答率は低下している。

一方で、marker条件はbaseline条件に比べて符号ミス、分配忘れのどちらにおいても正答率は増加している。

表6 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	86.5%	93.4%
color条件	86.7%	92.7%
marker条件	87.6%	94.7%

5. 考察

5.1 最適なハイライト手法の考察

表1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条件の順で高くなっていった。また、4.3節の結果より、各条件における平均解答時間も同様の順で短くなっていった。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[21]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、これまでの理工学系大学生対象の実験[12]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、人文系大学生を対象にした実験[13]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、さまざま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。

5.2 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。我々は、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を立てていた。表4より、きれいな字における各条件の正答率の差はないものの、雑な字において、marker条件はbaseline条件より約1.9%正答率が高くなった。これはmarker条件では前述した仮説を支持すると考えられる。

一方、color条件は雑な字において、baseline条件より正答率が低くなった。これはcolor条件はmarker条件より目立たないことや、雑な字をそのまま色付けしているため文字の区別はつきにくいまだだったことが原因として考えられる。

問題画像は筆頭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。

他の2条件に比べ、marker条件において正答率の高かった問題を図5、6に示す。

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

図5 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6 雑な字のNo.10の不正解問題(marker条件)

5.3 問題難易度の差に関する考察

4.5 節の結果より、単純な問題の難易度は低く、問題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 2 より、正解問題に対して「誤っている」と回答する誤りより、不正解問題に対して「正しい」と回答する誤りの方が多かったため、不正解問題の間違え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 5 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った。ここで、複雑な問題の問題ごとにおける誤答率を表 7 に示す。表 7 より、marker 条件の誤答立率が他の条件に比べて低かった問題番号 9 と 10 の問題画像を図 7、8 に示す。このことから、ある程度複雑で、間違え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 7 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	24.6%	25.8%	22.9%
No.8	6.7%	7.7%	6.0%
No.9	16.5%	19.2%	12.4%
No.10	33.5%	31.7%	27.4%

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

図 7 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 8 No.10 不正解問題 (marker 条件)

5.4 間違え方による違い

4.6 節より、符号ミスの方が分配忘れより正答率が低く、間違え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、分配忘れの方が条件ごとの差が大きく、marker 条件の正答率が高かった。このことより、分配忘れにおいて、マーカーを引くハイライトが効果的な可能性がある。color 条件に絞ってみると、分配忘れにおける正答率は下がっていることから、分配忘れにおいて括弧の色を変えるのは良くない可能性がある。

6. まとめ

基礎計算は数学学習の基盤となるため、計算ミスは早い段階での修正が望まれる。そこで、数式の構造理解を促進させることを目的に、我々はこれまで計算中の数式の特定箇所へハイライトをすることで計算ミスを減らす手法を提案してきた。しかし、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。そこで本研究では、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引く手法の 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引く marker 条件において、数式の構造理解へ効果的な可能性がある結果が得られた。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。

今後は、分配法則以外の数式の構造理解を必要とする問題を用いた実験や、より雑な字を用いた実験を検討している。また、リアルタイムにハイライトした場合の効果についても検証していく予定である。

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, vol.72, no.9, pp.325-335, 1990.
- [2] 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, vol. 81, no. 3, pp. 29-38, 1999.
- [3] Shapiro, E. S.. Academic skills problems: Direct assessment and intervention (3rd Edition). New York: The Guilford Press. 2004.
- [4] 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, pp. 52-

- 57, 1988.
- [5] Herscovics, N., Linchevski, L.. Acognitive gap between arithmetic and algebra. *Educational Studies in Mathematics*, vol. 27, pp. 59-78, 1994.
 - [6] 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*, vol.30, pp. 39-65, 1996.
 - [7] Elena, C., Melina, D.B.. The role of the different components of attention on calculation skill. *Learning and Individual Differences*, vol. 32, pp. 225-232, 2014.
 - [8] 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, vol. 3, pp. 49-56, 2004.
 - [9] 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*, vol. 9, no. 1, pp. 1-11, 2016.
 - [10] R. Tapp, R. K.. Determining the usefulness of colour and fonts in a programming task. *IEEE 3rd Workshop on Program Comprehension*, pp. 154-161, 1994.
 - [11] 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.
 - [12] 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.
 - [13] 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.
 - [14] Photomath. <https://photomath.com/>, (参照 2023/12/13).
 - [15] 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)*, vol. 15, no. 16, pp. 123-133, 2020.
 - [16] 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) , vol.126, no.13, pp.1-5, 2014.
 - [17] Hoch, M., 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.
 - [18] Drijvers, P., Stiphout, I. V., Gravemeijer, K.. The development of students' algebraic proficiency. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, vol. 8, no. 2-3, pp. 63-80, 2014.
 - [19] Hend, S. Al-Khalifa.. A System for Decoding and Coloring Arabic Text for Language Learners. *IEEE*, vol.7, pp.104810-104822, 2019.
 - [20] 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, vol. 56, no. 9, pp. 886-890, 2015.
 - [21] 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, pp. 1-65, 2015.