

数式入力が容易なドリル型数学学習システム 「DigitalWork」の開発と評価

白井 詩沙香^{1,a)} 仲村 裕子^{1,b)} 福井 哲夫^{2,c)}

概要: デジタル教科書やそれと連携する e ラーニングシステムが注目されるなか、数学のデジタル学習においては数式の取り扱いが大きな壁となっている。特に数式を直接回答するような学習システムは数少ない。本研究では、基礎的な数学公式を繰り返し学習できるドリル型 e ラーニングシステム「DigitalWork」を開発した。本システムの特徴は、数式入力が容易な数式エディタ「MathTOUCH」を実装し、数式を直接回答できる点である。このシステムが本当に生徒に受け入れられ、学習がスムーズに進められるか検証を行うため、2013 年 7 月に中学 3 年生を対象とした補習授業で「DigitalWork」による教育実践を行った。その結果、85%の生徒が紙の問題集と比べて本学習の方が楽しいと回答し、70%の生徒がまた授業で使ってみてみたいと回答した。さらに CS 調査を行った結果、より学習が楽しくなるようなデザイン性を高める必要性が見えてきた。

1. はじめに

数学は積み上げ型の知識獲得を特徴とする科目と言われ、基礎知識を定着させ、次の学習に繋げていくことが重要である。2008 年 1 月の中教審答申でも、基礎的・基本的な知識・技能の習得が重要視されており、子どもたちがつまづきやすい内容の確実な習得を図るための繰り返し学習の重要性が述べられている [13]。しかし、限られた授業時間の中で、繰り返し学習に十分な時間を割くことは難しい。

これを補う手段の一つとして、近年インターネットの普及とともに発展してきた e ラーニングが挙げられる。数学の分野における e ラーニングでも学習内容の理解を支援することを目的に様々な教材やシステムの研究・開発が行われている。例えば、数学教材を含む CIST-Solomon では、教科書やテスト以外に繰り返し学習を目的とした演習が用意されている [2]。Flash 動画を用いたわかりやすい説明や取り扱っている教材の豊富さ、高大連携校や地元中学校教諭と連携して制作されたコンテンツの質など、数学教材としての完成度は高い。しかし問題の回答方法は、用意されたテンプレートへの空所補充方式が中心となっており、数

式そのものによる回答は行えない。また、2006 年より高専 IT 教育コンソーシアムのコンテンツ開発プロジェクトのひとつとしてスタートした高専 e ラーニングでは、高専学生を対象に基礎力向上のための自学自習教材が用意されている [8]。PC と携帯電話から学習が可能で、公式や基礎事項の確認、演習を行うことができる。しかし、演習での回答は空所補充方式を採用している。

このように e ラーニングにおけるオンラインテストの回答形式は、空所補充、正誤選択、単一選択、多肢選択、記述、数値入力が多く、数学のような数理系科目の演習で求められる数式を直接回答できるものは少ない。その主な原因として (1)PC やタブレット端末において日本語入力のように手軽に数式を入力できる標準的な入力方法 (以下、数式入力方式) が装備されていないことや (2) 数式の正誤判定の困難さが挙げられる。

本研究のねらいは、(1) 数式入力方式の課題を解決し、数式を直接回答する際の最適な仕組みを確立することにある。これができれば、数学 e ラーニングにおいて一歩進んだデジタル学習が可能となる。

現在、e ラーニングの利用シーンは多様化しており、遠隔講義、教材提供、小テスト、ドリル、試験など様々ある。本研究では基礎知識定着を目的とした数学ドリル学習における数式入力に着目する。ある種の数学ドリル学習では、知識を定着させるために、問題を解いて数式で答える作業を反復練習する必要がある。しかし、現在提案されている数式入力方式では、入力操作がわずらわしかったり、入力

¹ 武庫川女子大学大学院 生活環境学研究所
Graduate School of Human Environmental sciences, Mukogawa Women's University

² 武庫川女子大学
Mukogawa Women's University

a) mw419064 @ mukogawa-u.ac.jp

b) mw419227 @ mukogawa-u.ac.jp

c) fukui @ mukogawa-u.ac.jp

のためのコマンドを学ばなければならず、数学初学者を対象としたドリル学習には最適でないといわれは考えている。

そこで、本研究では数学ドリル学習のための数式入力方式として「数式文字列変換方式」を提案する。本方式は2011年に福井より提案 [3], [4] された数式入力方式の1つで、普段数式を読むように単純な文字列を入力し、仮名漢字変換のように数式候補から該当の数式を選択することで、数式が入力できる。本方式はキーボードのみで数式入力ができるため、キーボードとマウスを併用するわずらわしさが無い。また、特別なコマンドを習得する必要もないため、数学初学者を対象としたドリル学習に有効な方式ではないかと考えた。

本研究の目的は、採用した数式文字列変換方式によって、数式を直接回答できるドリル型数学学習システムが、数学初学者にどれだけ受け入れられるかを教育実践することによって確かめることにある。

今回、検証用に開発したシステムはドリル型の数学学習に特化したもので「DigitalWork」と名付けた。2013年7月に中学3年生を対象とした補習授業で実践し、一定の成果を得たので報告する。

2. 関連研究

数学eラーニングにおける数式の取り扱いを困難とさせる主な原因として数式入力方式と数式の正誤判定の問題があげられる。本章では、従来の代表的な数式入力方式（「コマンド記法入力方式」、「GUIテンプレート方式」、「手書き入力方式」）の長所と短所を考察し、従来方式と本研究が提案する「数式文字列変換方式」との違いを述べる。さらに、数式の正誤判定を実現したeラーニングシステムにおける各数式入力方式の利用状況について概観し、本方式が有効に使えるeラーニングの利用シーンについて述べる。

2.1 数式入力方式

(1) コマンド記法入力方式

コマンド記法入力方式は、 \LaTeX や MathML などのマークアップ言語や CAS の文法に従って、数式を入力する方式である。長所は、2次元で表現される数式を1次元形式で表現できるため、キーボードのみで入力が可能な点である。短所は、使用するためにマークアップ言語や CAS の文法などコマンドを覚えなければならないことや WYSIWIG ではないため、自分が入力した数式をイメージしづらい点である。

(2) GUIテンプレート方式

この方式は、キーボードとマウスを使って、分数やルート、べき乗といった数式構造や特殊な数学記号をツールバー上のテンプレートから選択し、数式を作図するように構築する方式である。長所は、WYSIWYG であるため、入力した数式がイメージしやすい点とエディタの使い方に慣

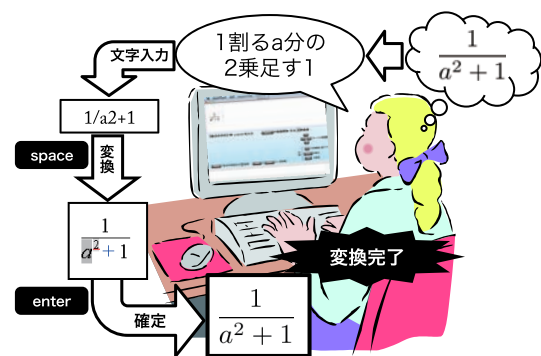


図1 数式文字列変換方式の概念図

れる必要があるもののコマンド記法入力方式のように新たにコマンドを覚える必要がない点である。

GUIテンプレート方式を採用したエディタの1つに WIRIS editor [11], [21] があり、Blackboard や Moodle をはじめ、多くの LMS で利用できる。WIRIS editor は HTML5 と JavaScript をベースに作られており、タブレット PC を含む Web ブラウザ上で動作する。

このように GUIテンプレート方式は、数学初学者にとって理解しやすく、ワープロやeラーニングにおける数式入力の主流の方式であるが、短所としてキーボードとマウスを併用する入力操作のわずらわしさがあげられる。また、ツールバー上の多数のテンプレートや特殊記号から所望のものを見つける作業もわずらわしさに繋がっている [19]。さらに、式を入力する前に式の構造を把握してからテンプレートを選択する必要があり、こうした作業は、学習以外の部分でユーザに負担をかける可能性が高い。

(3) 手書き入力方式

手書き入力方式は、ポインティングデバイスを使い、紙に数式を記入するのと同じように書いて入力する方式である。長所は、文字を書く動作と同じであるため、新しい入力手順を学ぶ必要がない点である。Anthony らの研究では、認識やエラー補正等のシステムの技術的制限から切り離した際の本方式の評価は、GUIテンプレート方式より入力時間もエラー率も低く、ユーザの満足度も高い結果となった [1]。

手書き入力方式を採用した入力システムの例として Web Equation [20] がある。出力結果を \LaTeX , MathML として出力できるほか、WolframAlpha [23] と連携することで、グラフ表示や様々な計算処理の結果を得ることができる。

しかし、手書き入力方式は、手で書くスピード以上に効率が上がらない上に、あくまでも認識方式であるため機械が正しく認識したかどうかを確認しながら入力しなければならない。また、誤認識などの技術的な課題もまだあり、人間が起こしたミスの修正が困難であるという短所がある。

(4) 数式文字列変換方式

我々が提案する数式文字列変換方式は、図1のように、 x^2 と入力したい場合は、"x2" と普段数式を読むように入

力し、仮名漢字変換と同様に Space キーを押し、変換候補の中から所望する数式を選択することで、数式を入力する方式である。本方式は、GUI テンプレート方式と同じく、使い始めは操作手順に慣れる必要があるものの、コマンド記法入力方式に比べ、覚えることが少ない。また、数式も WYSIWYG であるため、入力している数式をイメージしやすい。さらに、キーボードとマウスを併用する必要がないため、操作毎にデバイスを持ち替えるわずらわしさが少ない。実際、Microsoft Office の数式エディタとのユーザビリティ比較調査で、入力効率の高さが示されている [3]。

一方、本方式に近いシステムとして Suim[9] がある。Suim は JavaScript ベースの数式入力システムで、本方式と同様に英数字を入力した後に Space キーを押すことで数式に変換する方式をとっている。しかし、 x^2 と入力したい場合は、"x^2" と入力しなければならず、 $\frac{b+c}{a}$ と入力する場合は $b+c$ を中括弧で囲い " $\{b+c\}/a$ " と入力する必要がある。また、多重根号 (例: $\sqrt[3]{x+y}$) を入力したい場合は " $\text{sqrt}[3]\{x+y\}$ " もしくは " $\text{root}[3]\{x+y\}$ " と入力する必要がある。つまり WYSIWYG ではあるが、コマンド記法入力方式と同様、新たな入力コマンドを覚える必要がある点が本方式とは異なる。

2.2 数式を回答できる e ラーニングシステム

数式による回答を実現するには、数式を解釈し、正誤判定させる必要がある。例えば、 $x^2 + 2x + 1$ と $2x + x^2 + 1$ など、多項式における降べきの順、昇べきの順、もしくはその他の順をすべて同一の式と判定するには、それぞれを正解として準備しなければならない。この方法では、式が複雑になると正解パターンも増え、全て準備することは容易でない。しかし、数学的に等価であることが判定できれば、一つの正解式を準備するだけで正誤判定ができる。

既に、CAS (数式処理システム) と連携させることで実現した e ラーニングシステムがいくつか存在する。代表的なものとして STACK[18] がある。STACK は英国バーミンガム大学の Christopher Sangwin が中心となって開発したフリーのシステムである。CAS には Maxima が、LMS には Moodle が使われており、全てオープンソースで開発されている。ポテンシャルレスポンスツリーという機能を利用して、学生の回答に対して正誤評価や任意のコメント、採点結果などのフィードバックを与えることができる。STACK3.0 以降は Moodle の問題タイプの 1 つとして組み込まれ、インストールが容易になった。中村らにより日本語化作業が進められている [15]。また、STACK はオープンソースのため、STACK の成果を応用した e ラーニングコンテンツ [7] や STACK 用問題作成支援ツール [24]、再利用可能な問題バンク [14] についても研究が行われている。

STACK では数式そのものを回答する場合の数式入力方式にコマンド記法入力方式と GUI テンプレート方式を採

用している。

コマンド記法入力方式を採用している他の e ラーニングシステムとして、webMathematica[22] を利用した大阪府立大学の数学学習支援サイトがある [17]。しかし、この方式は前述したように各システム毎に採用しているコマンドを覚えなければならず、入力した数式もイメージしづらいため、数学初学者にとっては不向きである。

一方、Waterloo 大学や Guelf 大学など様々な教育機関で利用され、実績をあげている MapleT.A.[10] では GUI テンプレート方式も採用している。しかし、この方式はキーボードとマウスを併用しながらテンプレートを使って数式を作図するので、ドリル学習のように多くの問題を繰り返し解き、数式を入力する必要がある場合はわずらわしく感じる可能性がある。

2.3 本研究の位置付け

上記で紹介した既存の数学 e ラーニングシステムは、そのほとんどが大学数学のような数学問題を考えさせる高度な事例として報告されている。そこで学習するユーザモデルは次の [ユーザモデル 1] を想定しているといえる。

[ユーザモデル 1]

- (1) 画面上で数学問題が与えられた後、
- (2) 机上の紙の上で途中計算を鉛筆で記録しながら答えを考え、導きだし、
- (3) システム画面に戻って回答の式を入力する。

すなわち、考えるのは机上であって、自分の出した答えの正誤チェックのために e ラーニングを使っている。教育的に重要なのはこの正誤判定の後のフィードバックの仕方であり、STACK ではどの部分が間違っていたのか細かく助言させることができ (そこまで作り込むための教員側の負担を無視すれば) 優れた学習支援になっているといえる。

しかし、中等教育のように数学そのものを学び始めた初学者にとっては、上記のモデルの (3) 回答式をデジタル入力する際の負担が、既存の入力方式では大きいのではないかと我々は考える。そこで本研究では、この数式回答の手順において初めて数式文字列変換方式を試みる。

それでも数学を考えさせる問題のように、机上で考える時間の方が圧倒的に長い学習タイプであれば数式のデジタル入力の手間も大きな問題ではないかもしれない。しかも、いくら本方式によって数式入力の手間を改善できたとしても [ユーザモデル 1] のままでは、画面と机上の往復がとれない、わずらわしさは従来方式と変わらない。

そこで本研究では、数学の基本公式の使い方を反復練習するような暗算で答えが出せるタイプのドリル問題に限定して議論する。この場合のユーザモデルは次の [ユーザモデル 2] のようになり、学習操作が e ラーニングシステムだ

けで完結する。しかも、数式文字列変換方式であればキーボードのみで数式入力ができるため、テンポよく反復学習が進むものと期待できる。

[ユーザモデル 2]

- (1) 画面上で数学問題が与えられた後、
- (2) 答えを暗算し、
- (3) そのままキーボードを使って回答の式を入力する。

3. システムの仕様

ここでは DigitalWork の仕様について述べる。

3.1 支援対象と利用目的

2.3 節の議論を踏まえ、ドリル型数学学習システムの数式入力に数式文字列変換方式を採用することによって、キーボードのみで学習操作が進められ、数学の基本公式などの使い方をマスターするような練習問題の反復学習を支援できるものと考えられる。

したがって、本システムが支援する学習者の対象は中等教育の指導を受けている数学の初学者とし、利用目的は基礎知識定着のためのドリル学習とする。

3.2 学習サイクルと各機能

ドリル型数学学習の学習サイクルを次のように設計する。

リスト 1 ドリル型数学学習の学習サイクル

- Step1 提示された問題の確認
 - Step2 (必要なら) ヒントの確認
 - Step3 答えを考え、回答入力
 - Step4 enter キーで答案提出
 - Step5 正誤結果確認
 - Step6 enter キーで次の問題へ
- ※ドリルが終わるまで Step1~6 を繰り返す

学習者はまず提示された問題を確認し、必要であれば問題と共に表示されているヒントを確認する。そして数式回答エリアに回答を入力する。入力後は enter キーで答案を提出する。すると正誤結果が表示されるため、さらに enter キーを押すことで次の問題に進む。予備調査にて、多くの e ラーニングシステムが採用している回答提出ボタン (回答を入力した後、提出ボタンを押してから正誤判定に移ること) がわずらわしいという意見があったため、enter キーで正誤判定し、次の問題へ移行できるようにした。こうすることで、数式文字列変換方式の特性を活かし、ドリル学習中は全ての操作をキーボードで行えるようになっている。

また、ドリル学習に必要なと思われる次の3つの機能を実装した。

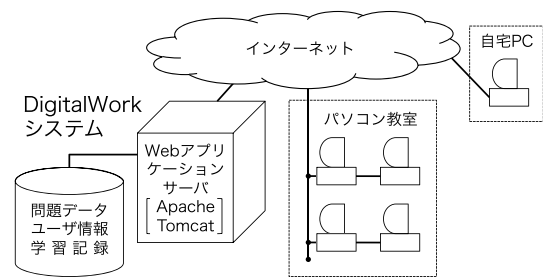


図 2 システム構成図

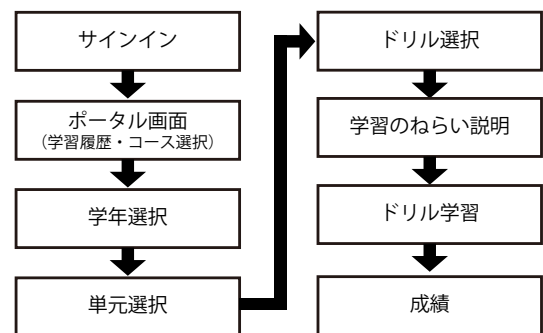


図 3 画面遷移図

学習履歴機能

個人ページにて自分の学習履歴 (学習日時、学習内容、点数、間違えた問題) を閲覧できる。

ミス問題の再学習機能

ドリル終了後、間違えた問題の再学習ができる。また、学習履歴からも過去に間違えた問題を再学習できる。

ランダム出題機能

ドリルを行う毎に、用意された複数の問題の中からランダムに出題される。特に数学公式の使い方練習をするような場合は、ランダム出題機能は重要であると考えた。

3.3 システム構成

本研究の e ラーニングシステム DigitalWork の構成図を図 2 に示す。

本体は Web サーバ (Apache) と連携する Web アプリケーション (Tomcat, MySQL) として構築しており、インターネットを経由してほとんどのパソコン端末で動作する Web ブラウザ上で数学のドリル学習が行える。これにより学校のパソコン教室だけでなく自宅のパソコンからでも学習ができる支援システムを実現している。DigitalWork の画面遷移図を図 3 に示す。まず始めにトップページで自分の ID とパスワードでサインインし、マイページに入る。ここでは、学習履歴の確認と利用できるコースが選択できる (図 4)。今回利用できるコースは、数式入力変換方式の練習ができる「MathTOUCH 基礎練習」コースと「学習ドリル」コースである。「学習ドリル」コースを選択すると学年選択画面に移り、学年を選択するとさらに単元を選択する画



図 4 マイページ



図 6 授業風景

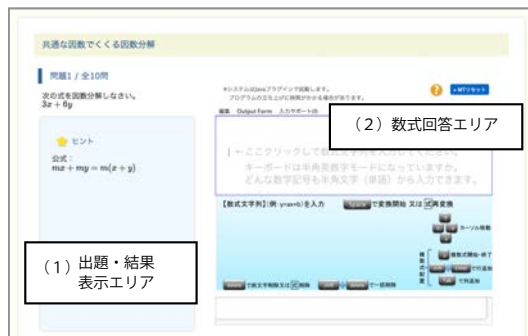


図 5 ドリル学習画面

面に移る。単元および学習内容は文部科学省検定済教科書である中学校数学 3[16] の科目を参考に作成した。単元を選択すると練習ドリル一覧が表示される。そして最終的に 1 つのドリルを選択するとそのドリルで学ぶ学習のねらいが表示され、開始ボタンを押すとドリル学習が開始する。

このドリル学習がリスト 1 に示した学習サイクルをドリル問題の数だけ繰り返す。ドリル学習の画面を図 5 に示す。主に次の 2 つのエリアから構成される。

出題・結果表示エリア

出題・結果表示エリアには、ドリルの問題と回答後は正誤判定結果が表示される。文中の数式は MathJax で表示しており、問題文とヒントには図を付けることも可能である。ヒントについては、表示・非表示をドリル学習開始前に選択できる。

今回は範囲が多項式と簡単なため、正解式と代数的に等価な回答を独自の処理プログラムを使って正解と判定できるようにした。また、結果表示には模範回答として 1 つの問題に対し、5 つまで異なる正解が登録できる。

数式回答エリア

数式文字列変換方式を実装した数式エディタ MathTOUCH[12] が表示される。MathTOUCH は他の e ラーニングシステムでも利用できるよう JavaApplet として開発されている。

数式を入力し、確定した段階で enter キーを押すとシステムに数式が送られ、正誤判定の結果が出題・結果表示エリアに表示される。

4. 本システムの実践と評価

2013 年 7 月 22 日、23 日に武庫川女子大学附属中学校で行われた中学 3 年生の数学補習授業 2 コマ × 50 分において、本システムを導入し、DigitalWork を利用してドリル学習を行った。今回実施した被験者は当該中学校の 3 年生約 400 人の内、夏休みに補習が必要と判断された生徒 21 人である。なお、内 1 人が初日の補習授業を欠席したため、分析には欠席者を除く 20 人のデータを使用した。本章では、実践授業の概要と評価方法および授業の最後に行ったアンケート結果、CS 調査の結果について述べる。

4.1 実践授業の概要と評価方法

授業の初日は、DigitalWork の紹介と MathTOUCH を使った数式入力の練習を行った。数式入力練習は、プロジェクタに教師の画面を映しながら説明し、足し算、かけ算、分数、べき乗の一通りの練習を一齐に各 PC で行った (図 6)。2 日目は補習範囲である中学 3 年の 1 学期に学んだ単元「多項式の計算」の範囲をそれぞれのペースで DigitalWork を使い学習してもらった。ドリル学習に使った問題例を表 1 に示す。

授業の最後にアンケートを取り、主観満足度の評価を行った。調査項目は、DigitalWork と MathTOUCH に関する 9 項目と総合評価を設定した。DigitalWork については、主観的な学習効果と各機能 (ミス問題の再学習機能、結果表示)、デザイン、そして紙の問題集との比較満足度について質問した。MathTOUCH については、ヤコブ・ニールセンが提唱したユーザビリティ 5 原則 [5] から、学習しやすさ、効率性、記憶しやすさ、間違えにくさの 4 項目について主観満足度を質問した。アンケート内容を表 2 (2 列目) に示す。回答は「とてもそう思う」(5 点)、「ややそう思う」(4 点)、「どちらともいえない」(3 点)、「あま

表 1 問題例

単元	問題例	回答例
単項式と多項式の乗法	$-3(2x + 3)$	$-6x - 9$
$(x + a)(x + b)$ の展開	$(x + 1)(x + 4)$	$x^2 + 5x + 4$
$(x + a)^2, (x - a)^2$ の展開	$(x - 5)^2$	$x^2 - 10x + 25$
$(x + a)(x - a)$ の展開	$(x + 1)(x - 1)$	$x^2 - 1$

りそう思わない」(2点), 「全然そう思わない」(1点) の5件法ではあてはまるものを選ぶよう求めた。

分析には, CS ポートフォリオの改善度を用いる [6]. CS ポートフォリオは, アンケート調査の各項目に対する満足率偏差値を縦軸に, そして各項目の満足度がどれだけ総合評価に寄与しているか(相関の強さ)を示す独立係数偏差値を横軸にプロットしたものである. 各項目がCS ポートフォリオのどの象限にプロットされたかにより, 改善・維持の必要性を把握することができる. さらに, 改善順位を数値で明確に判断する為に改善度を算出する. 値が負(マイナス)の項目は改善が不要となる.

4.2 生徒に対する意識調査の結果

表 2 (3-4 列目), 図 7 に補習授業終了後のアンケート結果を示す. 図 7 は, 「とてもそう思う」, 「ややそう思う」を「良い」に, 「どちらともいえない」を「普通」, 「あまりそう思わない」, 「全然そう思わない」を「悪い」とし, 回答者数の割合を示したものである.

DigitalWork に関する質問では, 平均が 4.12 となった. 1 が最低点で 5 が最高点の場合の主観評価満足度の平均は 3.6 が目安のため [5], 主観満足度は高いことがわかる. 実際に, 「デザインの良さ」を除く全ての項目で 8 割以上の生徒が良いと回答している. 特に, 紙の問題集との比較満足度を問う質問では 85% の生徒が DigitalWork を使って公式の練習をするのが楽しいと回答した.

MathTOUCH に関する質問では, 平均が 3.84 となった. 主観満足度の一般的な平均値よりやや高い結果となった. 全ての項目で 60% 以上の生徒が「良い」と評価した.

総合満足度では, 70% の生徒がまた授業で使ってみたいと回答した.

4.3 改善項目の分析結果

次に, 改善項目を明らかにするために CS ポートフォリオを作成し, 改善度を求めた. CS ポートフォリオを図 8 に, 改善度の結果を表 3 に示す.

DigitalWork については, 「デザインの良さ」を除く全ての項目の独立係数偏差値が高く, 総合評価への影響が高いことが判った. 各項目の満足率偏差値は, 高い結果となり満足度を満たしていることが判る. 改善度を見ると「デザインの良さ」の値が最も高く, 4.83 という結果になった.

MathTOUCH については, 独立係数偏差値が高く, 総合評価への影響が高い項目は「記憶しやすさ」, 「間違えに

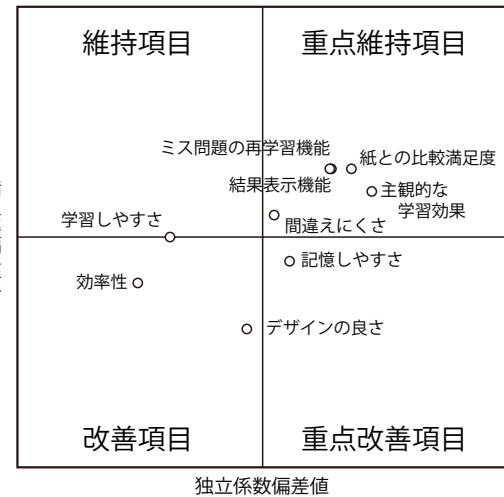


図 8 CS ポートフォリオ結果

表 3 改善度の結果

項目	独立係数偏差値	満足率偏差値	改善度
デザインの良さ	48.07	38.03	4.83
記憶しやすさ	52.76	47.01	3.96
主観的な学習効果	63.29	55.99	3.36
紙との比較満足度	60.85	58.98	0.84
ミス問題の再学習機能	58.43	58.98	-0.25
結果表示機能	58.43	58.98	-0.25
間違えにくさ	51.57	52.99	-0.65
効率性	34.60	44.01	-4.36
学習しやすさ	38.56	50.00	-17.16

くさ」であることが判った. 「記憶しやすさ」は総合評価への影響が高いが, 満足率偏差値は平均よりやや低く, 改善度は 3.96 となった. 一方, 「学習しやすさ」や「効率性」は総合評価への影響が低いことが判った.

5. 考察

DigitalWork に関する質問の平均値は 4.12 となり, 主観満足度は高い結果となった. 実装したミス問題の再学習機能は, 総合評価への影響が高く, 満足率偏差値も高いことから, 有効に機能していたことが判る. 自分の間違えた問題をすぐに確認できる結果表示機能も総合評価との相関が強く, 満足率偏差値も高い結果となった. 85% の生徒が紙の問題集と比べ, DigitalWork を使って公式の練習をするのは楽しいと回答しており, すぐに結果を確認し, 間違えた問題を再学習できる e ラーニングでこそ実現できるドリル学習の機能が生徒の満足度として好評を得ていることが判った.

しかし「デザインの良さ」については, 「良い」と答えた生徒は 50%, 「普通」と答えた生徒は 40% となり, 満足率偏差値は 38.03 となった. 独立係数偏差値は 48.07 であり, 総合評価への影響は低くない. 重点改善項目には入っていないので, 本質的な問題ではないものの, 質問全体で最も改善度が高いことから今後再検討が必要である.

MathTOUCH に関する質問の平均値は 3.84 となり, 主

表 2 アンケート結果 (N=20)

質問対象	アンケートの質問文 (質問の意図)	平均	SD
DigitalWork	公式を覚えることができた (主観的な学習効果)	4.05	1.00
	間違っ問題繰り返し学習できるのが良い (ミス問題の再学習機能)	4.35	1.04
	テスト結果がすぐわかるのでよい (結果表示機能)	4.40	1.05
	デザインがよい (デザインの良さ)	3.55	1.05
MathTOUCH	紙の問題集と比べて、DigitalWork を使って公式の練習をするのは楽しい (紙との比較満足度)	4.25	1.02
	数式の入力手順を覚えるのは簡単だ (学習しやすさ)	3.80	1.47
	スムーズに数式を入力することができた (効率性)	3.65	1.23
	2日間ドリルを使ったが、2日目も数式の入力手順を覚えていた (記憶しやすさ)	3.90	1.07
システム全体	ミスした時のやり直しは簡単だった (間違えにくさ)	4.00	1.03
	授業で DigitalWork をまた使ってみたいですか? (総合評価)	4.05	1.32
DigitalWork に関する質問の平均		4.12	1.06
MathTOUCH に関する質問の平均		3.84	1.20

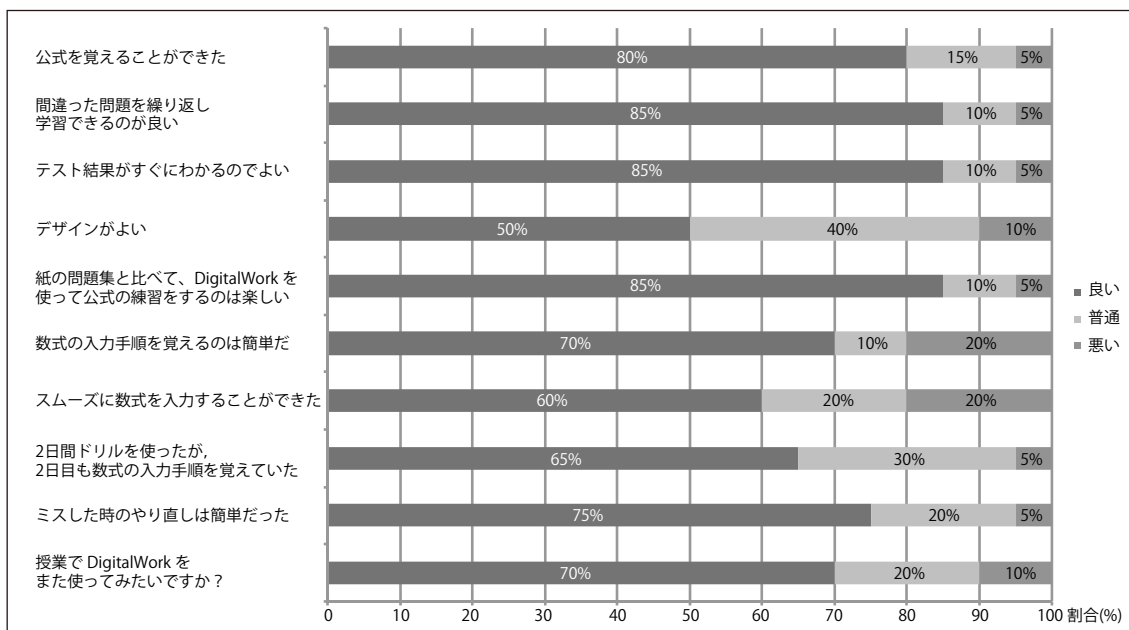


図 7 アンケート結果 (N=20)

観満足度として悪くない結果となった。前述した Digital-Work の結果と MathTOUCH の結果から、数式文字列変換方式による数式入力ドリル学習の妨げにならず、有効に使えていたことが判る。しかし、スムーズに入力できたかどうかの「効率性」については良いと答えた生徒は 60% で、満足率偏差値がやや低い結果となった。ドリル学習中に生徒が enter キーを異常に連打したことでエラーが起きる場面があり、評価が下がった可能性がある。ユーザの思わぬ操作でもシステムが安定して動作するように改善する必要がある。ただ、「学習しやすさ」と「効率性」については、総合評価との相関が低いことから、生徒のモチベーションを低下させるような影響は与えていなかったことが判る。

また、「記憶しやすさ」は総合評価への影響は高いが、満足率偏差値はやや低い結果となった。アンケートの割合を見ると、「悪い」と回答した生徒は 5% だけで、「普通」と回答した生徒は 30%、「良い」と回答した生徒は 65% であった。初日に練習を行ったが、教室移動や点呼、説明に時間

が取られ、実際に生徒が練習した時間はわずかであったため、入力手順を覚えてはいるものの自信がなかったと推察される。手書き入力方式と違い、入力手順に慣れる必要があるため、小テストや試験などでいきなり使用するよりは、事前に操作練習をした上での利用に向いていることが判った。ただし、初日に欠席した生徒は約 5 分ほどの説明と練習で、他の生徒と同様にドリル学習を開始できたため、習熟には時間はかからない。

自由記述の感想欄では、「紙を使ってやるより楽しかった。なんだかスツと考えられた気がする」や「早くこうしたシステムを使って勉強したい」、「とても楽しかったです」などの感想があった。以上のことから、本システムは数学ドリル学習の教育実践へ導入しても受け入れられることが確認できた。

6. まとめと今後の展望

本論文では、数式文字列変換方式を採用した数式を直接回答できるドリル型学習システム DigitalWork を開発し、

教育実践することで、本方式を利用したドリル学習の数学初学者の受容度を検証した。本方式は、数式を普段読むように入力し、仮名漢字変換のように数式候補から所望する数式を選択することで、数式が入力できる方式である。本方式は数式入力のために新たにマークアップ言語や CAS 文法を覚える必要がなく、WYSIWYG に数式を入力することができる。また、キーボードとマウスを併用するわずらわしさが無いため、数学ドリル学習における数式入力方式に有効であると考えた。

実践授業を行い、主観満足度を測定した結果、数式文字列変換方式は数式を回答する数学ドリル学習において有効に使用できることが確認できた。また、70%の生徒がまた授業で DigitalWork を使ってみたいと回答し、数学ドリル学習に特化した数式を直接回答する e ラーニングシステムの有効性も確認できた。

本研究は、数式を直接回答する数学 e ラーニングの可能性と数式文字列変換方式という数式入力の 1 つの選択肢を示したにすぎない。今後、被験者数を増やし、本方式を採用したドリル型学習システムでの学習効果を測定し、客観的な評価を行う必要がある。数学 e ラーニングシステムについては、想定外のユーザ操作にも対処できるように安定化させること、ゲーミフィケーション手法を取り入れ「デザインの良さ」を含めた改善を行うことが課題である。

参考文献

- [1] Anthony,L.,Yang,J. and Koedinger,K.R.: Evaluation of Multimodal Input for Entering Mathematical Equations on the Computer, *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI' 2005)*, pp. 1184-1187 (2005).
- [2] 千歳科学技術大学情報・メディア教育センター, 小松川研究室:千歳科学技術大学 e ラーニングシステム CIST-Solomon(online), 入手先 (<http://himemasu.chitose.ac.jp/CIST-Shiva/Index>) (2013.09.17).
- [3] 福井哲夫:数式のインテリジェントな線形入力方式と評価, *数式処理* 18(2), pp.47-50 (2012).
- [4] 福井哲夫:インテリジェントな数式ユーザインタフェース (Web アプリケーション版数式エディタの開発), *情報処理学会シンポジウムシリーズ*, Vol.2013, No.1, 2EXB-50, pp.537-540 (2013).
- [5] ヤコブ・ニールセン:ユーザビリティエンジニアリング原論, 東京電機大学出版局 (2002).
- [6] 菅民郎:すべてがわかるアンケートデータの分析, 現代数学社 (2000).
- [7] 近藤隆司, 後藤善友, 大賀恭, 長屋智之:数式による解答と自動採点を可能とした SCORM 準拠の e-Learning コンテンツの開発 (ネットワークコンピューティングとこれからの教育・学習環境/一般), *教育システム情報学会研究報告* 27(5), pp.41-44(2013).
- [8] 高専 IT 教育コンソーシアム:高専 e ラーニング (online), 入手先 (<http://math.kosen-it.jp/>) (2013.09.17).
- [9] 町野 明德, 黒田 康浩:数式入力システム Suim(online), 入手先 (<http://suim.heroku.com/>) (2013.09.17).
- [10] Maplesoft:Maple T.A.(online),available from (<http://maplesoft.com/products/mapleta/>) (2013.09.17).
- [11] Marques,D.,Eixarch,R.,Casanelas,G. and Martinez,B.: WIRIS OM Tools a Semantic Formula Editor, *Proceedings of the 2006 Mathematical User- Interfaces Workshop*, St Anne's Manor ,Wokingham (2006).
- [12] MathTOUCH プロジェクト, 福井研究室:数式エディタ MathTOUCH(online), 入手先 (<http://math.mukogawa-u.ac.jp/>) (2013.09.17).
- [13] 文部科学省:中央教育審議会答申「幼稚園, 小学校, 中学校, 高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善について」, 文部科学省, (2008).
- [14] 中原敏広, 中村泰之:数式自動採点システム STACK の問題バンク構築にむけて, 2012 PCCONFERENCE 論文集, pp.117-118(2012).
- [15] 中村泰之:数学 e ラーニング数式評価システム STACK と Moodle による理工系教育, 東京電機大学出版局 (2010).
- [16] 岡部恒治, ほか 14 名:文部科学省 検定済教科書 中学校数学 3, 数研出版 (2012).
- [17] 大阪府立大学 高等教育推進機構:MATH ON WEB Learning College Mathematics by webMathematica(online), available from (<http://www.las.osakafu-u.ac.jp/lecture/math/MathOnWeb/>) (2013.09.17).
- [18] Sangwin,C.:STACK(online), available from (<http://stack.bham.ac.uk/>) (2013.09.17).
- [19] Smithies,S.,Novins,K. and Arvo,J.: Equation Entry and Editing via Handwriting and Gesture Recognition, *Behaviour and Information Technology*, 20(1) ,pp. 53-67 (2001).
- [20] VisionObjects:Web Equation(online), available from (http://webdemo.visionobjects.com/home.html?locale=ja_JP#equation) (2013.09.17).
- [21] WIRIS : WIRIS editor(online),available from (<http://www.wiris.com/en/editor>) (2013.09.17).
- [22] WOLFRAM : webMathematica(online),available from (<http://www.wolfram.com/products/webmathematica/>) (2013.09.17).
- [23] WOLFRAM : WolframAlpha(online),available from (<http://www.wolframalpha.com/>) (2013.09.13).
- [24] 袁雪, 原田実里, 浅本紀子:LMS を用いたオンラインテストシステムの活用, 2012 PC CONFERENCE 論文集, pp.67-68(2012).