

数式表示に特化した動的ウェブサイトの構築

About the road net maintenance that Japanese forestry IT should support

山下 伸男, 江見 圭司

(京都情報大学院大学)

Nobuo Yamashita, Keiji Emi

(The Kyoto College of Graduate Studies for Informatics)

Abstract

There is MathML as the markup language which does numerical formula indication. The markup which does very small definition is the feature, but interpretability of source code isn't a cross-browser badly, it isn't also a multi-device. So TEX, AsciiMath in addition to MathML could be indicated now by a cross-browser and a multi-device by MathJax in the JavaScript library where numerical formula indication is supported. The site as which MathJax is adopted is increased, and TEX is used on the web. Interpretability has often developed it using TEX with a lot of users by this project.

1. はじめに

1-1 現状

本稿は、ウェブ上の数式の表示後に再利用する方法を考察し、インタラクティブな操作が可能な動的ウェブサイトを構築した。

現在、PCのみならず、スマートフォンやタブレットが普及し、技術的に「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」ネットワークの恩恵を享受できるユビキタス社会 [1] となっている。ウェブ上のコミュニケーションや文書において、見栄えの良い数式を手軽に扱える環境は十分ではない。たとえば、eラーニングや質問投稿サイトでは数式表示は普及していない。そこで、数式に特化したインタフェースを実装することで、手軽な数式入力だけでなく、ウェブページ上の数式に対するインタラクティブな操作が可能になることを示す。その上、入力した数式を対象とした検索機能や数式の再利用をしてウェブ上の数式を含むコミュニケーションの質を充実させることが可能にした。

ウェブ上で数式を扱う際に、数式を使って学問上の問題を解決する数式処理やグラフなどの可視化を

行うサイトがある。開発したインタフェースには、表示された数式とこれらのプログラムを連携する機能を実装した。

数式処理やセマンティックウェブへの対応は詳しくは扱わなかった。また、数式に関する先行事例はウェブサイトの文献 [2] の最後の付録において示している。

1-2 ウェブ上の数式表示

数式の望ましい利用形式を視認性や再利用性の観点から考察する。ウェブブラウザ（以下、単にブラウザとする）で数式表示を行う方法はいくつか種類があり、それを表 1-1 にまとめた。A～Dまでの方法はすでに先行研究などがあるので、そちらを参考にしてほしい [2][3]。ここでは E や F を用いた方式を採用した。

ここでは、視認性はウェブページ上で表示された数式を人間が認識しやすく、自然で美しい見栄えを意味する。再利用性は表示された数式を対象とした再利用の可能性であり、そのためのデータ形式で表現されていることを意味する。数式の再利用性により、人間とウェブページの間インタラクティブ性

表 1-1 ウェブ上の数式表示の方法と視認性・再利用性

分類	表示方法	具体例	視認性	再利用性
A	プレーンテキスト	$\int [0, \infty] (1-x) / \sqrt{(1+x)} dx$	×	○
B	タグ利用	HTML の <code><table></code> で分数を表現, CSS など		△ ○
C	画像	mimeTex (CGI) など画像生成	○	○または×
D	PDF や動画	作成後, サーバにアップロード	○	×
E	ウェブ入力	MathJax, MathML	○	○
F	フリーハンド	フリーハンドの数式の画像や動画	△	×

やウェブサイト間の相互運用性が生じる。

1-2-1 数式のウェブプログラミング

表 1-1 の E の方法で数式の精巧な表現をウェブプログラミングで実現する方法である。ウェブページ上で数式を表示するための JavaScript のライブラリやプログラミング言語の具体例を述べる。

MathJax[4] は美しい数式表示を行う JavaScript のライブラリである。ウェブページ上で TEX[5] の数式コマンドや Presentation MathML[6] や AsciiMath[7] を記述すると, HTML と CSS, Presentation MathML, SVG のいずれかに変換してブラウザがレンダリングする。ブラウザで JavaScript が有効であれば, PC だけでなくタブレットやスマートフォンでも表示可能である。MathJax はクロスブラウザ・マルチデバイスの数式表示サポートのライブラリであり, 現在, ウェブページ上での数式表示のデファクトスタンダードとなっている。

普及状況について, 黒木玄 [8] によると“世界最大の数学論文データベース MathSciNet[9] は MathJax を採用した。ここで MathJax が採用されたということは少なくとも数学研究の世界ではウェブでの数式表示に関して MathJax が標準になったことを意味している。これからは数式も書けるサイトであることを売りにしたいならば MathJax への対応は必須になったと考えられる。”とある。ほかに, 理系の論文サイトの arXiv[10] やカリフォルニア工科大学のオンライン版のファインマン物理学 [11], 海外の数学掲示板の MathOverflow[12] で採用されている。また, Wikipedia[13] でアカウントを作成すると, 個人設定で数式表示を MathJax に設定できることから, その範囲は情報系の分野に留まることなく普及していると言える。また, MathJax を採用するサイトでは TEX が利用されている場合が多い。MathJax が TEX の数式コマンドから数式表示を行う例を記しておく。非常に簡潔な数式であり, 後

に示す MathML と対比すると簡潔なコマンドである (図 1-1 参照)。

$$2^{-x}$$

$$\backslash [2^{-x}]$$

図 1-1 MathJax と TEX による数式

MathJax は数式に関して種々の設定を行うメニューを用意している。表示した数式のコマンドの出力, 数式表示の出力形式 (HTML-CSS, MathML, SVG) の変更, ズームの設定, メニューの言語設定などがある。また, 図 1-2, 図 1-3 に示すように, 数式のコマンドを出力する機能がある。ユーザはコマンドをコピーして編集することで, 新たに数式を記述する際に再利用することができる。



図 1-2 MathJax による数式の TEX コマンドの表示

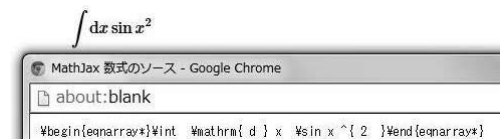


図 1-3 MathJax により表示された TEX コマンド

MathML (Mathematical Markup Language) は 1998 年に W3C 勧告となった数式表示のためのウェブプログラミング言語であり, 2014 年 4 月に MathML3.0 2nd Edition が勧告となっている。数式の表示に着目した Presentation MathML のほか, 数式の意味付けに着目した Content Markup があり, セマンティックウェブの数式に関する研究

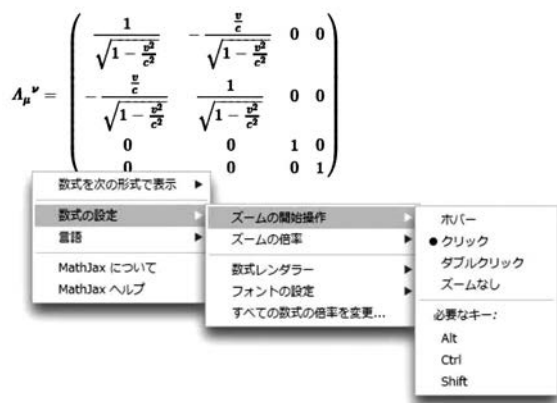


図 1-4 MathJax の数式メニュー

の中心となると考えられるが本プロジェクトでは扱わなかった。

1-2-2 フリーハンドによる入力

表 1-1 の F の方法において、ペンやマウスのドラッグにより手の動きで数式を記述する方法である。mixi などの SNS における数式の表示方法として、紙にペンで書いた写真をアップロードして質問する方法が見られる。また、数学の講義の動画や数学の解説動画が YouTube にアップロードされている。

コンピュータを使う方法としては、PC のマウスやタブレットやスマートフォンのタッチパッドで描画した画像を利用する方法がある。Windows のペイント、HTML5 関連技術の Canvas API を使ってウェブアプリで実現できる。デバイスへの数式の入力方法として、エディタの利用方法を理解する手間が無く、フリーハンドによる入力は非常に有用な方法である。

これらの方法は、基本的に視認性は悪くないが、C の方法で述べたように画像として保存する場合には再利用性はない。また、図 1-5 の「第 1 行」「第 1 列」のように、通常の数式表示には現れない補足説明などを記述することが可能である。

図 1-5 Canvas API を用いてフリーハンドで描いた数式の例

以上で述べた方法を視認性と再利用性の観点から評価した結果を表 1-1 に示す。両方の観点からは数式のウェブプログラミングの方法が最適であると結論付ける。この方法により、ブラウザ上で非常に美しい見栄えの数式を表示でき、表示した数式のコマンドを再利用して処理を行うことが可能となる。

1-3 数式エディタによる入力

ウェブ上で数式を使用することと数式表示のウェブプログラミングを習得することは目的が異なる。数式表示のプログラムを入力すると数式表示がなされる日本の数式掲示板 [14] はあるが、エディタなどの入力サポートがなく、数式表示機能を利用するユーザも多い。e ラーニングの問題への回答やブログへの投稿に際して、プログラミングを行うことは HTML と同様に不要なステップと考えられる。そのため、プログラミングの知識やエディタの使用方法の理解などの数式入力時の負担が極力少なくなるようなサポートが望まれる。

ここで、数式エディタの先行研究は文献 [2] を参照してほしい。

1-4 ユースケース

本プロジェクトでは、ユーザの数式の入力サポートを行うエディタや機能を実装し、ウェブページ上に表示された数式に対する検索などの操作ができるウェブサイトとして掲示板を開発した。また、TEX ファイルをウェブページに変換する機能も実装した。これらの数式に関する機能を利用する度に数式表示を更新することで、数式表示に特化した動的ウェブサイトを実現した。これにより、数式をウェブ上で記述することの有用性を示す。

講義におけるシステム導入を例にとると、図 1-5 における管理人とユーザは教員と学生である。学生による発言の管理を教員が行うという形で利用する。

エディタで利用する言語について、現時点で MathJax を採用して数式表示するサイトは数式の保存に TEX を採用している場合が多い。また、エディタで入力した数式の TEX コマンドを人間が読む場面を考慮すると、TEX を習得したユーザが MathML に比べて多い。それらの現状を根拠に、数式エディタで入力する数式の言語として TEX を採用した。

ウェブ上で数式を扱える時代になっていることで、コミュニケーションシステム [15] での利用が

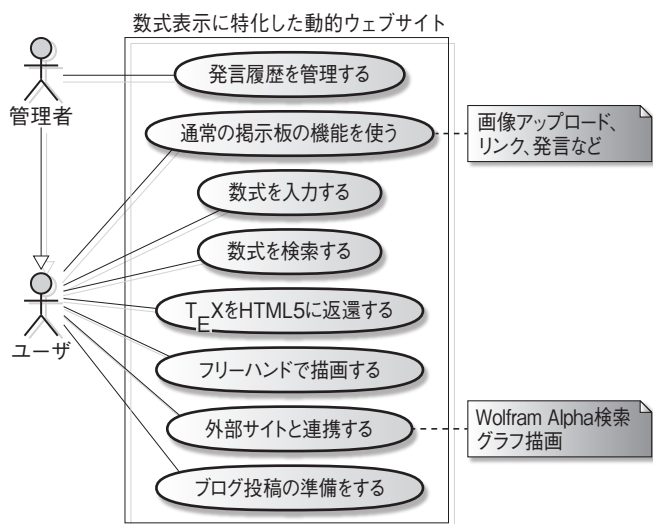


図 1-6 数式表示に特化した動的ウェブサイトのユースケース図

提案されている。すなわち、掲示板やチャットや LMS や情報投稿サイトとしての Wiki やブログで、数式に関して利用の幅が広がっている。そこで、本プロジェクトで開発したウェブサイトの利用例、応用例を提案する。

1-4-1 ウェブ上の数式を使ったコミュニケーションと e ラーニング

コミュニケーションに関する解説 [16] を元に、ウェブ上の数式を利用するときのコミュニケーションのサポートへの可能性を考える。数式掲示板のユーザが数式コマンドや数式に関する解釈という情報のやりとりを行う場面を想定する。ユーザ同士のコミュニケーションについて、次のような効果が考えられる。

1. 発言履歴内の数式を転用する機能があると、コピーできることでコミュニケーションを行いやすくなる。また、数式のコマンドを正確に転用できることでコミュニケーションにおける数式という情報を正確に伝えることができ、正確なコミュニケーションが期待される。
2. 閲覧者が発言履歴内を数式検索すると、関連した他の発言箇所を探すことができる。また、数式検索エンジンやグラフ描画で数式について調べる操作により、発言者が意図したことが正確に伝わる可能性が高まる。それらの操作によって、発言者と閲覧者の間で当該の数式に関する解釈の共通化が進む。

このように、ウェブ上の数式の利用をコミュニケーションの観点から考えることができる。

また、LMS 内の数式を扱う講義のコースにおいて、数式掲示板のページをコース内に設置するか、数式掲示板へのリンクを貼ることで、講義と併用して利用することができる。LMS 内の掲示板において、学生による質問などの発言に際して数式エディタを使用することで、発言の文章の中に自然に数式を記述することができる。

数式に関する操作が容易かつ多様になることで、e ラーニング [17] への貢献が考えられる。

1-4-2 数式の検索

ウェブページ上で検索できることにより、数式の再利用が利便性を持つ場面の例を示す。

- ・探している数式に関する記憶があいまいな状況で、掲示板の発言履歴を検索する場面を想定する。数式に関して完全一致検索でなく、あいまいさを持たせた検索手法によって、目当ての数式を見つけられる可能性が高まる。また、記憶が明確な場合では、検索してリンクをクリックすることにより、当該数式への移動が早くなると考えられる。
- ・ウェブページ上に記述された数学の公式集から有用な公式を探す場面を想定する。出版された本の公式集と比較すると、公式の候補を絞った検索結果を目視で確認することができる。また、公式集の想定外の場所からも、検索した数式と関連する数式が候補が表示されるという本の場合には無い可能性が考えられる。

1-4-3 e ラーニングの教材作成

TEX 文書のウェブページへの変換機能の利用例を挙げる。e ラーニングにおいて、画像形式の数式をウェブページ上で表示するか PDF の形式で教材を作成する場合がよく見られる。教材を PDF で作成する場合と比べると、教材をウェブページで作成するときには次のような新たな利用例が挙げられる。

1. LMS と併用した掲示板において、学生がウェブページの教材の数式について質問する目的で発言する際に、数式を再利用する機能を使うことができる。
2. ウェブページ上で表示した数式を再利用して、グラフ描画などのインタラクティブ性を持たせた教材を作成することができる。また、HTML5 の <video> タグを用いて動画の埋め込みや、CSS を使えるようになる。

3. 数式を含む問題を出題する際、問題中の数式のコマンドをコピーできると、回答者が与式として回答の中で問題の中に現れる数式を複数箇所ですることが出来る。

1-4-4 協調学習におけるコミュニケーションの多様化

現時点での e ラーニングにおける数学の問題の回答方法は入力フォームに英数字を入力する形式である。しかし、数式エディタを使うと、e ラーニングにおいて証明問題や式変形の手順を問う計算問題を出題することができる。

そして、協調学習においてコミュニケーションを支援することで学習活動の支援となる。数式掲示板を講義で導入した場合、それは学習者間の教え合いや学習者と指導者の間での質問回答の形である。また、暗黙知を共有することができる。例えば、数式の入力サポートやフリーハンド描画を用いて、複雑な構造の数式の計算の仕方や暗算する際の思考のテクニックなどの会話をしやすくなる。

1-4-5 ウェブ上での情報発信

MathJax を有効にできるブログへの投稿のほか、TEX 文書からウェブページへ変換する手順のウェブページとして保存する部分を用いると、数式エディタを用いて入力した数式や文章をウェブページに保存できる。そこで、保存したファイルをアップロードできる無料サーバへのリンクもまとめた。

1-4-6 共同研究ができる

大学の研究室のメンバーや共同研究のメンバーのみの間で数式を含む議論が行われるときに、数式に特化した掲示板が有用である。例えば、数式エディタやグラフ描画や Wolfram Alpha 検索が数式を扱う際に研究のサポートとなると考えられる。また、数式の検索機能を用いて過去のノートを振り返り、公式集を利用することができる。それによって、研究する際のアイデアを数式から得ることが可能となる。インタフェースに資料などへのリンクを貼ると便利である。また、個人の研究日誌としても有用となる。

2. 開発の概要

本プロジェクトで開発概要を本節で述べて、実装結果を第4節で述べて、発展的な実装内容は第5節

で述べることにする。構成は以下の通りである。

- 2-1, 4-1 数式エディタ
- 2-2, 4-2 数式の検索
- 2-3, 4-3 既存 TEX 文書のウェブページへの変換
- 2-4, 4-4 フリーハンドによる描画
- 2-5, 4-5 外部サイトとの連携
- 2-6, 4-6 ウェブ上への数式の発信
- 2-7, 4-7 管理者モード

2-1 数式エディタ

数式入力の際に、数式の記号をボタンクリックなどで直感的に入力する方式をとる。そのため、TEX などのウェブ上で数式表示を行うためのプログラミングを行わなくても数式を入力できる。

数式を編集する方法として、数式の中に1つのカーソル「|」を用いた。カーソルを操作することで記号を消去したり、カーソルの位置にボタンクリックによる記号を挿入したりすることで数式を編集する。カーソルを制御するためのカーソル移動のボタンや「1文字消去」のボタンを実装した。発言内容を編集するテキスト領域に対して JavaScript で文字列処理を行うが、カーソルが無いときは、新規の数式を入力することでカーソルを出現させる。

表示されている数式から TEX コマンドを取得する技術は MathJax に実装されている。コピーした TEX コマンドを入力フォームに貼り付けると、発言内容のテキスト領域内に挿入する機能を実装した。これにより、TEX コマンドを読まなくても、ウェブページ上で表示された数式を転用することができる。

2-2 数式の検索

数式には分数などの構造があり、記号を分類できる可能性があるため、数式に特有な検索手法が考えられる。検索手法に関する論文 [18] によると、学生の数式検索への需要に関して、あいまいさを持った検索手法が望まれている。このことから、数式の完全一致検索の他にも、記憶に残りやすい数式の構造などで検索する手法を実装するとよいことが分かる。

次に数式の検索手法として、完全一致検索の他に考えられる手法を表 2-1 に示す。これらの検索手法について述べる。ここで、検索する数式を検索数式と称する。

・数式の構造検索

例えば検索数式を分数とすると、構造の引数であ

表 2-1 数式に特有な検索手法

検索手法	入力	ヒットする例
構造検索	$\frac{A}{B}$	$\frac{\pi}{6} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$
タグ検索	積分	$\int f$
名称検索	三平方の定理	$c^2 = a^2 + b^2$
類似記号検索	<	$\ll \leq$
式変形の回数検索	2 回	$\frac{d}{dx} \sin(x^2) = \frac{dx^2}{dx} \cos(x^2) = 2x \cos(x^2)$
数式検索	3 以上 4 以下	$\pi \quad 3.14 \quad 3.14159$

る分子や分母が他の数になった分数や、平方根などの構造と組み合わせた分数も検索結果として表示する。

分数における分子や分母など、数式内の構造以外の部分を引数と呼ぶと、構造検索は引数の任意性を許す検索手法である。また、その引数が数式の構造を含む場合にも対応する。表 2-1 の例では検索数式の構造は単純な分数であるのに対し、同じく分母の中に平方根がある構造を持つ数式もヒットする。

数式の構造に着目した検索手法について考えるために、数式の構造のクラス図を図 2-1 に示す。ここで、ある構造を含む構造を親とし、ある構造の中にある構造を子としている。例えば、平方根の中に平方根があるとき、外側の平方根が親であり、内側の平方根が子である。数式において、ある構造が一番外側のとき、その構造に親はない。また、ある構造の親があるとき、必ず 1 つの構造に含まれている。これは、数字が分数の分子と分母の両方に入ることがないことから分かる。ある構造の中に構造がないとき、構造の個数は 0 である。例えば、1 つの平方根の子はない。構造の子の最大数について、平方根は 1、分数は 2 というように、構造の種類によって異なる。



図 2-1 数式の構造のクラス図

$$\frac{1}{\sqrt{x^y}} \rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

図 2-2 数式の構造検索

構造を工夫して検索した結果、引数の任意性が利便性を持つ具体例を示す。例えば、同じ概念を表す数式が異なる構造を持つ場合に両方検索できる。

検索数式の例として、図 2-2 の左側の検索数式のように「分数の分母に平方根があり、その平方根の中にベキ乗がある」構造を考える。そこで、検索領域の中に 1 つ目の検索結果のように、物理学におけるローレンツ因子が表示されているとする。これは検索数式と同じく、「分数の分母に平方根があり、その平方根の中にベキ乗がある」構造の数式である。また、2 つ目の検索結果の数式は別の形式のローレンツ因子であり、「分数の分母に平方根があり、その平方根の中に分数があり、その分子と分母にベキ乗がある」構造の数式である。

これらの数式の構造をオブジェクト図で表すと、図 2-3 のようになる。ここで、親の構造の中に子の構造がある。

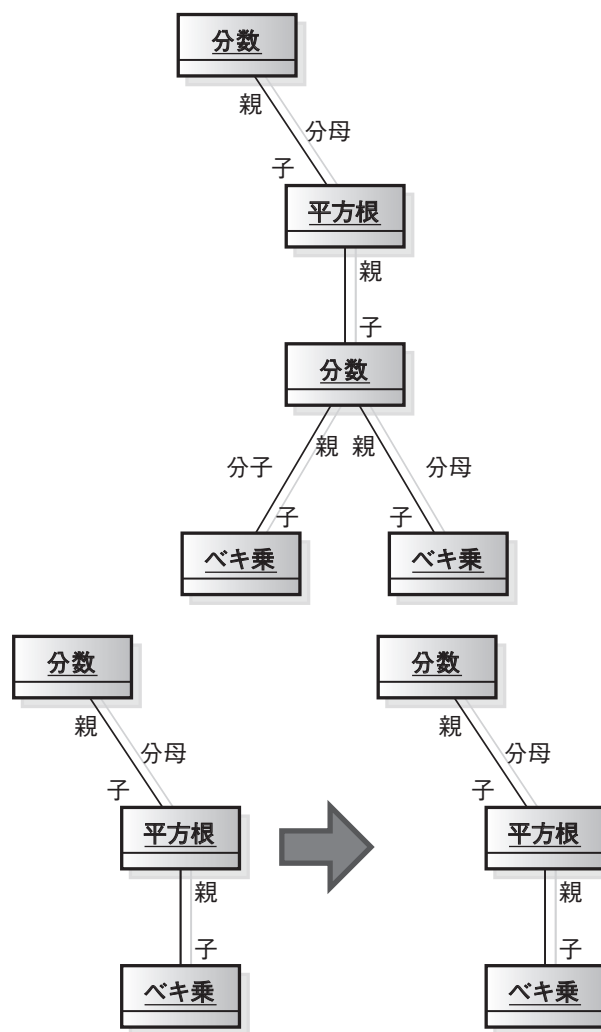


図 2-3 数式の構造のオブジェクト図

図 2-3 において、検索数式の構造と 1 つ目の検索結果が一致しているため、検索でヒットする。また、2 つ目の検索結果の構造を 1 番上の親から辿ると、検索数式の構造が同じ順に見つかるため、この構造を持つ数式もヒットする。

ここで、ローレンツ因子がどちらの形式で表示されているかが不明な状況で検索することを想定する。すると、ユーザが図 2-2 のような検索数式を入れると、異なる形式のローレンツ因子の両方を含む検索結果を得ることができる。この例のように、学問分野に特有な状況に対して、数式の構造検索が有用である。

この構造検索の方法では予め定義した検索数式の構造を抽出した後に、引数に任意性を付加したため、上記のような利点があった。構造検索の可能性として、和「+」や積「×」などの二項演算を構造と見なす検索へ拡張できる。

・タグ検索

記号を数学的な意味合いで分類し、その分類に付けたタグの名称で検索する手法である。例えば、底が e の対数関数「 $\log_e \Omega$ 」と自然対数「 $\ln \Omega$ 」は意味が同じであるが、異なる記号である。そこで、両方を同じ分類「自然対数」として定めておき、どちらも検索結果に表示させる。他に、似た積分記号をまとめた積分という分類や、三角関数という分類も定めることができる。

・名称検索

数学の定理や計算の意味で検索する手法である。数式が単なる記号の集まりでなく、数式中の意味を持っている部分を探す。構造検索における構造や記号を予め分類しておき、名称を付けておく。そのため、構造検索と同様のあいまいさを伴う検索手法となる。

この検索手法は、学問分野に応じてカスタマイズすることが可能である。

・類似記号検索

形が似ている記号を分類して、同じ分類の記号を検索する手法である。この検索手法の実装のために、予め記号を分類しておく必要がある。この手法が有効である理由は、TEX には多くの矢印や不等号などの記号があるためである。タグ検索は検索の際に分類を選択するが、類似記号検索は記号のコマンド

で検索する。

・式変形の回数検索

式変形の回数を入力して、その個数のイコール「=」が式変形として含まれる数式を探す手法である。例えば、複数回の式変形を行っている数式を探すときには、この検索手法を用いて 2 回以上で検索する。また、イコールがない数式を探すときは 0 回で検索する。

・数検索

数を検索する手法である。検索範囲の指定方法は 2 種類あり、「3 以上 4 以下」などの実数の上限と下限を指定して、その連続的な区間に入る数を検索する方法が考えられる。この実数検索は本プロジェクトにおいて実装した。他に、素数やフィボナッチ数などの離散的な数を指定して検索する方法が考えられる。後者の場合、例えば素数の上限を指定して、その数以下の素数を検索する検索例が考えられる。

これらの数式を対象とした検索機能は本プロジェクトで実装する。また、各学問分野における要請に応じて、数式のカテゴリなどを設定して検索機能を実装することができる。

検索範囲、検索対象、検索手法を選択後、数式を検索する（表 2-2 参照）。

表 2-2 数式検索のオプション

設定	選択できる項目
検索範囲	発言履歴、数式エディタで編集した数式のレビュー
検索対象	数式、数式と文章
検索手法	完全一致検索、構造検索、タグ検索、名称検索、類似記号検索、式変形の回数検索、数検索

ここで、検索対象に文章を含めた理由として、数式掲示板のユーザが 0123 や xyz などの英数字を文章中にプレーンテキストの形式で記述する可能性を考慮するためである。

2-3 既存 TEX 文書のウェブページへの変換

PDF を生成するため TEX ファイルを作成してローカルに保存してきたが、ウェブ上の数式として利用しやすいウェブフレンドリーなウェブページとしてウェブ上に公開できるようになる。これにより例えば、数式検索を実行できるようになる。

この変換機能のねらいを述べる。例えば、PDF に記述していた数学の公式集をウェブページに変換し

て JavaScript による再利用の処理の対象とすることができる。それにより、PDF では実行できなかった数式の構造検索などの操作が実現され、その操作をウェブサービスに使えるようになる。この変換により得られる可能性を述べる。

- ・ウェブサイト内で各ページによる階層構造を形成することができる。それにより、SEO 対策や閲覧者がサイトの構造を認識しやすくなる。
- ・TEX の数式コマンドで Google 検索すると、検索結果に表示される可能性がある。
- ・HTML5 のセマンティック要素を使って、セマンティックウェブへの対応や文書のソースコードを整理することができる。
- ・数式の意味を抽出するプログラムがあると、HTML5 のセマンティック要素や <meta> タグを使い、セマンティックウェブに備えることができる。
- ・相互運用性が生じ、異なるページ間の数式や文書の受け渡しを行うことができるようになる。
- ・ウェブ上の数式処理によるウェブサービスで扱うデータとなる。例えば、操作可能なグラフ、数式検索、計算などがある。

1 つ目のメリットに関して、e ラーニング教材をウェブページで表示する際の工夫を紹介する。

中村晃によってリンク・バック・ラーニング [19] が提唱されている。これは、学習の積み重ねの応用的な知識のページから基礎的な知識のページへ戻る学習法である。体系化された知識を学習する教材において、応用のページから基礎のページへ適宜リンクを貼ることで、学習のステップに応じて構造化することができる。例えば、微分に関する教材の場合、合成関数の微分のページから多項式の微分のページへ戻ることで、多項式の微分を復習した後に合成関数の微分の理解に役立つと考えられる。

通常、TEX の数式コマンドは PDF 生成のための TEX ファイルに記述する。しかし、TEX ファイルはウェブページではない。そこで、TEX ファイルから HTML ファイルを生成できると、ウェブ上になかった数式や文書をウェブ上に保存できるようになる。その有用性については 2 章で述べる。その際、自動的に MathJax を読み込む設定をする。

TEX を HTML に変換する際に、TEX の文書構造に関するコマンドは MathJax で扱えないため、HTML タグに変換するプログラムが必要となる。そこで、文書構造に関して、HTML5 のセクション

要素などが有用である。本プロジェクトでは TEX ファイルを読み込み、HTML ファイルなどのウェブページを保存する機能の実装をスコープの範囲内とした。

TEX を HTML タグへ変換する機能について、先行事例は pdf2htmlEX[20]、LaTeX2HTML[21]、Pandoc[22]、LaTeXMathML[23] などがあるが詳細は割愛する。

2-4 フリーハンドによる描画

ウェブサイト为数式エディタが設置されていても、フリーハンドによる描画機能は有用であると考えられる。これにより、数式入力の代替手段となるだけでなく、円や補助線などの図形を描画できる。ここで、フリーハンドとは、PC のマウスのドラッグ、タブレットやスマートフォンのタッチパネルを指でなぞるスワイプにより、滑らかな線を描画することである。

2-5 外部サイトとの連携

ウェブ上には、数式処理や可視化などのウェブサービスを提供するサイトがある。そこで、MathJax を用いて表示した数式から TEX コマンドを出力してコピーした後で、これらのサイトと連携する機能を実装した。例えば、数式検索エンジンの Wolfram Alpha での検索機能との連携を図る。他に、数式を用いてグラフ描画を行う。これらのサイトでは TEX コマンドを利用できるが、サイトに応じて数式の変換が必要な場合がある。また一般的に、既存システムとの連携を図る際には数式の変換技術が重要となる。

Wolfram Alpha での検索については、ブラウザの新しいタブを開いて検索結果を表示する。すると、数式の計算結果や性質が詳しく表示される。

グラフ描画については、発言内容の編集領域内にグラフ描画サイト [24] を埋め込む方法をとった。このグラフ描画サイトでは 2 次元の $x - y$ 平面のグラフが描画され、拡大、縮小、移動の操作が可能である。

2-6 ウェブ上への数式の発信

MathJax を有効にできるブログサイトを選択すると、そのサイトで使えるように、数式エディタで編集した数式や文章を成形して表示する。また、ブログサイトへのリンク、そのサイトでの編集方法の

説明を表示する。

2-7 管理者モード

発言履歴を管理するパスワード付きの管理者モードのページへのリンクを貼る。管理者モードでは、発言履歴の中の問題発言を削除、編集して再保存できる。講義における教員などの管理者が数式掲示板において問題のある発言に対処するために必要となる。

発言履歴はソースコードの中で HTML タグや TEX の数式コマンドというプレーンテキストの形式で記述されるため、発言履歴を数式掲示板と同様に表示した状態で編集できるようにする。

3. 開発技術

3-1 開発技術の概要

ウェブ上で数式を取り扱う操作を示すため、数式表示に特化したインタフェースを開発し、適用するウェブサイトの例として掲示板に設置した。開発環境は以下の通りである。なお、開発環境の詳細は文献 [2] を参照してほしい。

- ・オペレーティングシステム：Windows 7
- ・開発環境：PHP (5.5.15), Apache (2.4.4), MySQL (5.5.32) XAMPP 使用。
- ・開発言語：PHP, HTML, JavaScript, CSS, MySQL, TEX

また、PHP サーバの貸出サービス [25] も使って動作を確かめた。利用した JavaScript のライブラリは以下の通りである。

1. MathJax：数式表示のための入力形式として TEX や Presentation MathML や AsciiMath に対応し、出力形式として HTML-CSS や Presentation MathML や SVG に対応する。
2. jQuery：JavaScript による DOM の操作を簡潔なソースコードで実現できるようにまとめている。
3. jQuery UI：jQuery を利用して、種々のインタフェースの見た目を取り揃えている。
4. その他のライブラリ

3-2 MathJax の概要

MathJax は 2010 年に発表されたウェブ上の数式表示のライブラリである。MathJax プロジェクトの発足時、ウェブ上の数式表示のためのライブラリと

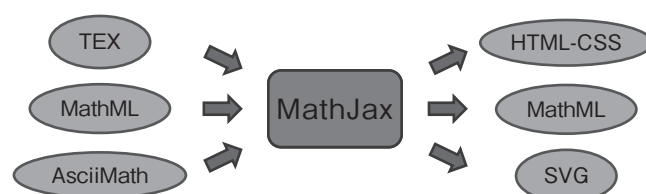


図 3-1 MathJax の入力形式と出力形式

して、AsciiMath と Presentation MathML の入力に対応した ASCIIMathML[26] と TEX の入力に対応した jsMath[27] が存在していた (図 3-1 参照)。MathJax ではそれら 3 種の言語の入力に対応している。また、数式表示が非常に美しく、出力形式として、クロスブラウザかつマルチデバイスの HTML-CSS, W3C 勧告のある MathML のうち Presentation MathML, 拡大しても輪郭がきれいな画像形式の SVG の 3 種類を選択できるようになった。

MathJax が HTML タグか MathML タグか SVG タグを出力した後、ブラウザがレンダリングして数式を表示する。MathML で出力すると、Presentation MathML をネイティブサポートするブラウザでのみ数式表示が行われる。現時点では、きれいに数式表示が行われる主要ブラウザは FireFox のみである。これにより、クロスブラウザかつマルチデバイスの出力形式は HTML-CSS と SVG の 2 種である。

MathJax は TEX や MathML をクロスブラウザかつマルチデバイスで非常に美しく表示できるようにサポートを行うライブラリと言える。

3-3 TEX の概要

TEX は 1978 年に発表された文書組版ソフトウェアであり、美しい数式表示が特徴である。数式などの表現に関する拡張機能をパッケージと呼び、TEX をパッケージに対応させたレスリー・ランポートの頭文字に因み LaTeX と呼ぶ。MathJax では AMS が作成した 2 種類のパッケージに対応している状況であり、本論では TEX と称する。MathJax で取り扱える TEX の数式コマンドの種類は 800 種類を越え、200 種類ほどの AsciiMath をはるかにしのぐ。

全ての TEX のコマンドは半角のバックスラッシュ「 $\backslash$ 」から始まる。また、JavaScript ではバックスラッシュは特殊文字であり、2 本のバックスラッシュ「 $\backslash\backslash$ 」で出力する。古いバージョンの PHP では、バックスラッシュの取り扱いが異なるので、バージョン 5.1.1 以降の PHP を利用することに注意する。

3-4 システム構成

以下のようなことを考慮した構成である、

- ・ PHP ファイルが数式掲示板であり、タブレット版とスマートフォン版もある。
- ・ データベースは今回、phpmyadmin を用いた。
- ・ JS 群はエディタや検索などの機能のために作成した JavaScript ファイル群と jQuery Keypad などのライブラリである。
- ・ HTML 群はフリーハンド描画、利用マニュアル、多くの数式を MathJax で記述した数式ギャラリーの HTML ファイル群である。発言履歴の読み出しや保存を行う（図 3.2 参照）。

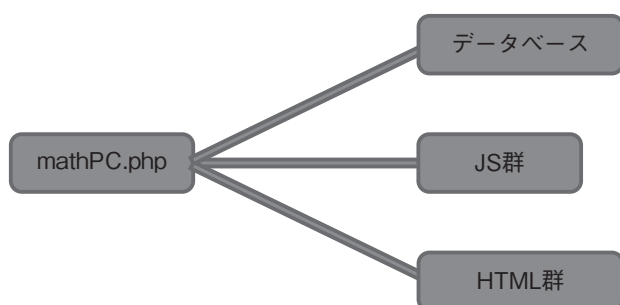


図 3-2 システム構成

発言履歴の読み出しや保存を行う際は、PHP から SQL 文を用いてデータベースを扱う PDO を利用した。また、掲示板サイトや各スレッドへのログインチェックのテーブルを定義し、クッキーを用いてログインのタイムアウトまでの有効時間を 1 時間と設定した。ユーザはユーザ ID とパスワードでサイトにログインし、各スレッドの名前とパスワードでスレッドにログインする。

セキュリティ対策のため、バックスラッシュが自動的に無害化（もしくは、サニタイゼーションと呼ばれる）の対象となるが、バックスラッシュは TEX コマンドで多く使う記号である。そのため、発言する際にバックスラッシュ 1 本を 2 本にして消去されないように変換する機能を JavaScript で実装した。

エディタや TEX 文書の HTML5 への変換機能のみであれば、PHP を HTML に置き換えることが可能である。また、発言履歴の保存場所を HTML ファイルなどの外部ファイルなどに代替すると、データベースが無い環境でも利用できる。

4. 実装結果

第 2 節で述べた順に実装結果を述べていく。

4-1 数式エディタ

まず、開発したエディタの様子を図 4-1 に示す。



図 4-1 数式エディタ

利用するライブラリは jQuery のほか、数式の記号のボタンをジャンルに分けて格納する jQuery Keypad、入力フォームに吹き出しを表示する unitip である。

数式を含む文章を入力するテキスト領域を対象に、ボタンクリックで起動する TEX の数式コマンドの文字列連結により数式編集を実装する。本プロジェクトでは数式の編集にカーソルを導入した。

ここで、数式エディタで扱う数式コマンドの文字列処理について説明する。MathJax で利用可能な TEX の数式コマンドが入力された JavaScript の配列を使い、ボタンクリックで起動する JavaScript の関数から文字列処理を行う。数式の記号の入力時には配列から TEX コマンドを呼び出してテキスト領域内で文字列連結し、1 文字消去するときには配列に入力されたコマンドが見つかるかと消去する。

数式の記号を 1 文字分消去する操作とは、表示された数式を人間が視認した際の 1 文字分を消去することを意味し、表示された記号の 1 文字とコマンドの文字数とは異なる。例えば、ギリシャ文字の「 π 」は「`\pi`」であり、このような TEX コマンドを配列の中に用意する。消去するとき、配列の要素を 1 つずつ調べ、カーソルの左側にある「`\pi`」というコマンドと一致すると、3 文字の文字列を消去するという手順を踏む。また、数式の構造に対応して、消去する手順や構造が空であるかの判定を考慮する必要がある。本プロジェクトで設定した「1 文

字消去」ボタンの連打による消去手順の例を示す。

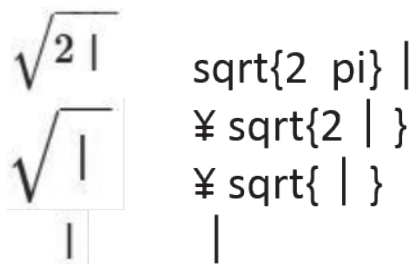


図 4-2 カーソルによる消去手順

図 4-2 の例では、数式の構造の引数に文字がある場合、引数の最後尾を消去し、構造の内部がカーソルのみのとき、構造全体を消去している。他に、空の構造の右隣にカーソルがあるときにも構造を消去するなどの場合分けが必要である。左右へ移動するためにも同様の場合分けが必要である。

数式編集中にボタン以外にも英数字や漢字などをキーボードから入力できる入力フォームを設置した。この入力フォームにプレーンテキストを入力した後、挿入ボタンをクリックするほかに、Enter キーで挿入し、行列の入力時に次の成分へ移動するために Space キーで挿入と右移動するように JavaScript で設定した。また、その旨を説明する文章をツールチップにより入力フォームに表示する。

実は、キーイベントの Firefox では、Enter キーや Space キーの操作で発生する event の取り扱いが異なっていた。詳細は文献 [2] を参照してほしい (図 4-3 が入力画面例)。

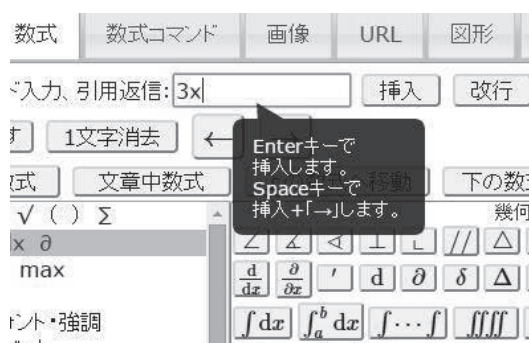


図 4-3 入力フォームに表示するツールチップ

MathJax で表示された数式を右クリックして、TEX の数式コマンドを表示すると、数式の範囲を示すコマンドである数式環境が省略されることがある。例えば、「 $[]$ 」と「 $]$ 」という数式環境で数式を記述したとき、数式の TEX コマンドを出力すると、これらの数式環境が出力されず、数式箇所

のみが出力される。しかし、数式環境が無ければ、MathJax によって数式表示が行われず。そこで、図 4-4 の入力フォームに実装されている数式環境を自動で追加・消去する処理により、転用した数式の編集開始をサポートする機能を実装した。すなわち、挿入する数式コマンドの数式環境の有無と挿入時における編集時の数式の有無を判定して、数式環境の自動追加・自動消去を行ってから挿入する。

行列の入力や文字のフォントを利用する場合には、行列のサイズやフォントの指定などを入力フォームから選択して、数式に挿入する (図 4-4 参照)。



図 4-4 行列入力のインターフェース

行列のサイズを指定する入力フォームには、HTML5 で新たに入力フォームに追加された type 属性の number という属性値を使用した。これにより、入力フォームに上下の三角の印が表示されて、数値を調整できる。

各学問分野に応じて頻繁に使用すると考えられる記号を用意しておくカスタマイズの例を示す。フォントやアクセントなどの複数の TEX のコマンドで構成される記号をジャンルとしてまとめておくことで入力サポートとなると考えられる (図 4-5 参照)。



図 4-5 物理学にカスタマイズしたインターフェース

Newton の運動方程式など、これらの記号から成る数式に関しては、ボタンとして設置せずに数式ギャラリーとして外部ファイルの中に保存した。ユーザが右クリックで MathJax のメニューから数式コマンドを転用することを想定している。e ラーニングコンテンツが数式表示に MathJax を採用すると、このような数式ギャラリーの役割を持つ。

また、数式エディタによるその他の数式の編集機能や数式の検索の実装において、JavaScript の文字列処理や正規表現の API を用いた。

4-2 数式の検索

数式の検索手法を指定して検索を実行し、検索でヒットした箇所背景色を黄色にする。TEX の数式環境内では TEX のコマンドで黄色にするが、数式環境外でヒットした場合は HTML5 の `<mark>` タグで黄色にする。

数式を検索する際、検索の手法にかかわらず、数式の範囲を示す数式環境がある場合には消去することとする。他に、検索数式内の半角スペースの不定性に対処する必要がある。TEX において半角スペースは表示結果に影響を及ぼさないため、同じ数式で異なる個数の半角スペースが含まれている場合があり得る。そのため例えば、完全一致検索において単純に JavaScript の `indexOf` メソッドなどを用いると半角スペースが 1 個余分に混じり込んでいるだけでヒットしない。そこで、検索数式を意味のあるひとかたまりの TEX のコマンドごとに分割して配列に入れ、それを基に検索を進める方式をとる。その際、数式エディタで利用した配列を基にして、この目的を達成するために文字数の多い順に TEX のコマンドを並べ替えて一意な成分のみで構成された配列を作成する。例えば、検索する数式の中に「`\int`」があるとき、配列の中で「`\in`」より後に「`\int`」を登録すると、「`\in`」と「`t`」に分割される。そのため、配列には「`\int`」より後に「`\in`」を登録する。

検索結果の表示方法を述べる。何度も検索することに対応するため、ウェブページのソースコードの中で発言履歴を 2 箇所読み込んでおく。一方は非表示のテキストとして、検索の際に検索対象とする。もう一方は検索結果を追記して表示する。検索でヒットした数式の箇所へのページ内リンクをまとめて表示するために検索結果の最下部に HTML のコメントでマークし、ヒットするごとにリンクを追記し、そのマークまで検索する。この手順のアクティビティ図を図 4-6 に示す。

検索範囲の違いは「検索対象をコピーして暫定的な検索結果とする」手順に現れ、検索対象と検索手法の違いは「マーク以前を検索する」に現れる。

構造検索に関して、TEX の数式コマンドでは数式の構造とは中括弧「`{`」、「`}`」を含む数式コマンドである。構造の検索として、検索数式の構造を

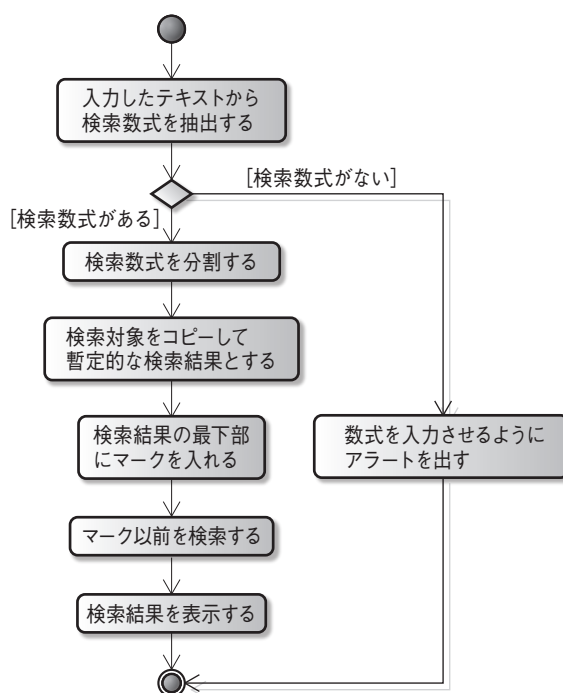


図 4-6 全ての数式検索に共通する手順

抽出し、その構造を含む数式を検索する手法である。検索数式に含まれる TEX コマンドと中括弧の順序と同じ順に並んだ数式コマンドを探すアルゴリズムを実装した。

数式検索を実行したときの検索結果の様子を図 4-7 に示す。ここで、平方根という数式の構造で検索した結果として、例えば「 2π 」を含む平方根がヒットし、黄色く表示されている（図 4-7 参照）。

$$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

√A の検索結果

1件目の検索結果
2件目の検索結果
3件目の検索結果

図 4-7 数式の構造検索の例

4-3 既存 TEX 文書のウェブページへの変換

本プロジェクトで実装した変換機能を利用して、TEX ファイルをウェブページに変換して保存するまでの流れを図 4-8 に示す。

ページ読み込み時に、保存するウェブページの拡張子は .html をデフォルトとし、ダウンロード用リンクも表示する。拡張子はほかに、.php などから選択できる。ユーザが TEX ファイルを選択すると、

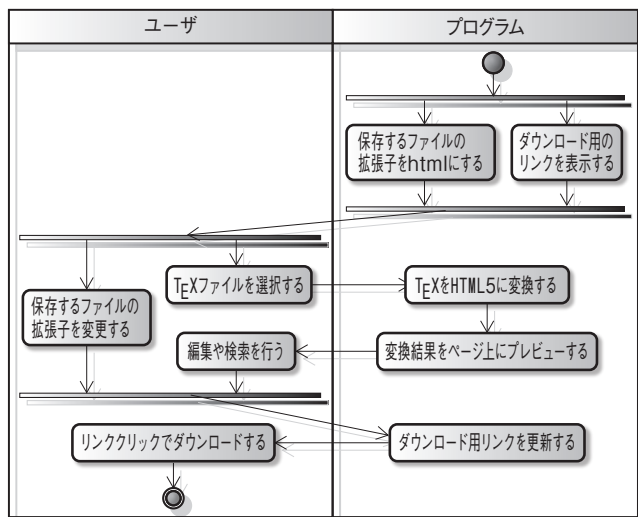


図 4-8 TEX ファイルをウェブページに変換する流れのアクティビティ図

プログラムが文書を読み込み、TEX の文書構造のコマンドを HTML5 のセマンティック要素などのタグに置き換え、MathJax の設定などの HTML タグを追加する。その変換結果を表示した後、ユーザが確認し、文書の編集や数式の検索などの操作を行う。文書の編集や拡張子の変更後、リンクをクリックして、ローカル PC に保存する。

外部ファイルを JavaScript で操作する技術に関しては、HTML5 関連技術である File API が有用である。HTML タグの `<input type="file" />` でファイルを選択する。選択時に `onChange` メソッドで `event` を渡して JavaScript の関数を起動する。関数内では、`FileReader` を起動して、`event` から取り出したファイルオブジェクトを文字コード SHIFT-JIS で読み込む。読み込み完了後に、TEX の文書構造のコマンドを HTML5 のセマンティック要素に置き換えるために定義した関数を起動し、プレビュー欄に表示する。その際、`<a>` タグの属性に次の値を設定する。このときの操作は jQuery の `attr` メソッドでまとめて行うことができる。

変換後に表示された文書を見て、数式エディタを使って編集したり検索を行ったりした後、リンクをクリックしてダウンロードする。ここで、保存するファイルの拡張子はプルダウンメニューから選択し、選択時にリンクの `download` 属性を変更する。デフォルトの拡張子は `.html` とした。

TEX の文書構造のコマンドと HTML5 のタグとの対応に関して、本プロジェクトで開発する範囲を TEX の代表的な書籍 [6] に記載されている文書構造のコマンドに絞った (表 4-1 参照)。

表 4-1 ダウンロード用リンクに設定する属性値

属性	属性値
href	「data:application/octet-stream,」とソースコードの文字列連結
download	タイトルと拡張子の文字列連結

4-4 フリーハンドによる描画

ユーザが線の太さや色を選択して、フリーハンドで自由に線を描画することで、意図した文字の記述や図形を描けるように実装する。その際、フリーハンド描画に関して、HTML5 関連技術の Canvas API が有用である。描画オブジェクトの個数が多いときの表示時間が SVG に優るため、数式掲示板で表示する形式として適切と考えられる。

描画の色や線の設定をインタフェース内に設置し、発言領域内に Canvas 領域を表示して、直接描画する。また、数式掲示板内からリンクを貼り、新しいタブで描画専用のページを表示する。

Canvas API を用いたフリーハンド描画のマルチデバイス対応について説明する。マウスでフリーハンド描画するとき、描画領域内でクリックしたままドラッグすることで `<canvas>` タグの `on` メソッドで JavaScript の関数を起動して、描画する。タッチパネルが搭載されたタブレットやスマートフォンでは、2013 年に W3C 勧告が行われたタッチイベントを利用する。PC でのマウスの操作に対応したタッチパネルに対する指の操作で起動する `on` メソッドを使う。これらの対応を表 4-2 にまとめる。ここで、PC のクリックに対応して、タッチパネルに指が触れる操作で描画開始を行う。マウスのドラッグに対応して、タッチパネルを指でなぞる操作で描画中とする。マウスのクリックの終了に対応して、タッチパネルから指を離す操作で描画終了とする。

表 4-2 PC、タブレット、スマートフォンにおける on メソッドの対応

操作の状態	PC	タブレット、スマートフォン
描画開始	<code>mousedown</code>	<code>touchstart</code>
描画中	<code>mousemove</code>	<code>touchmove</code>
描画終了	<code>mouseup</code>	<code>touchend</code>

4-5 外部サイトとの連携

Wolfram Alpha 検索とグラフ描画について、専用の数式入力フォームを用意して、それぞれの操作を行うボタンを設置した。

Wolfram Alpha 検索の際、入力した数式の TEX コマンドを成形して、Wolfram Alpha の URL の最後尾に追記して、新しいタブで開く。TEX コマンド

を成形する際、数式環境を消去し、フォントの TEX コマンドを解除し、積分記号「 $\int$ 」と積分測度「 dx 」が被積分関数「 $\sin x^2$ 」をはさむように移動して Wolfram Alpha が数式を解釈できるようにする。そして、JavaScript の encodeURIComponent を用いてバックスラッシュや半角スペースなどを URI にエンコードする。この成形の処理結果の図 4-9 に示す。ここで、成形前の数式のカーソル「|」を消去している。また、成形前の数式のように、物理学では積分記号「 $\int$ 」と積分測度「 dx 」をまとめて記述する記法がよく見られる。この場合、Wolfram Alpha で積分が行われない。そのため、被積分関数の後ろに「 dx 」を移動している。また、積分測度「 dx 」の「 d 」のフォントを解除する。

$$\int dx \sin x^2 | \Rightarrow \int \sin x^2 dx$$

図 4-9 数式の成形

グラフを描画するときは、グラフ描画できるグラフの形式に成形し、入力した数式の TEX コマンドをグラフ描画サイトの URL に追加して、<iframe> タグを用いて埋め込む。すると、発言内容の領域にグラフを描画した外部サイトを埋め込むことができる。

```
<iframe src='http://graph.tk/#x*\sin\left(x\right)' width='600' height='300'>
```

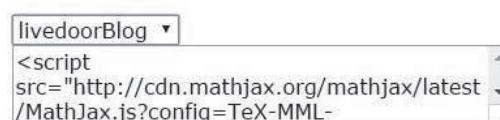
インラインフレームを使用しています。</iframe> グラフ描画の際にも数式を成形する必要がある。例として、「 $x \sin(x)$ 」のように「 x 」と「 $\sin(x)$ 」の間の掛け算の記号を省略した数式の場合、掛け算の記号「 $*$ 」を挿入すると、グラフを描画できるようになる。

4-6 ウェブ上への数式の発信

MathJax が有効なブログサイトをプルダウンメニューで選択すると、サイトへのリンクとともに数式エディタで編集の数式や文章に各ブログで有効な <script> タグを追加して、表示する。ここで、2 つの <script> タグがどちらも有効なサイトと 1 つのみ有効なサイトに応じて表示内容を変更する。MathJax の詳細設定を行う <script> タグが無効である場合、MathJax による文章中の数式の表示ができないため、文章中の数式を通常の数式環境に置き換える処理を行う。投稿の手順を追加して表示した様子を図 4-10 に示す。ユーザはエディタを

使って数式を入力した後、プルダウンメニューからブログサイトの livedoorBlog を選択する。すると、エディタで入力した数式に MathJax の読み込みと設定を行う <script> タグを追記したテキストを表示する。ユーザはそれをコピーし、ブログを投稿する。投稿されたブログの閲覧者は MathJax で表示された数式から TEX コマンドを再利用することができる。

ブログへ投稿



- livedoorBlog にアクセスします。
- 上記の文章をコピーして、「HTML タグ編集」より書き込みます。

図 4-10 数式を含む文章のブログへの投稿準備

4-7 管理者モード

管理者モードのページを PHP と JavaScript で実装した。

管理者モードへのログインの手順を説明する。数式掲示板のロゴをクリックすると、prompt メソッドによりパスワード入力欄が表示されてログインする。パスワードは POST で送信し、管理者モードの PHP ページ内で確認する。ログイン完了後、数式掲示板での発言履歴を読み込み、次の 2 つの方法で発言を削除、編集する。

1. それぞれの発言に削除ボタンが設置する。クリックすると、confirm メソッドで確認のアラートを出す。
2. 発言履歴のソースコードを直接編集できるテキスト領域を設置する。

両者の変更は即時反映し、保存ボタンをクリックして編集後の発言履歴を保存する。発言履歴の保存時は同じ PHP ファイルへの POST の送信時に上書き保存する。

削除するときは数式掲示板での発言毎に行う。

5. 今後の発展形に関する考察

5-1 HTML5 と HTML5 関連技術

HTML5[28][29] は 2014 年 10 月 28 日に W3C 勧告となった、ウェブ上のコンテンツを扱う際の標準技術である。ウェブページに記述した文書の意味に着目したセマンティック要素やマルチメディアを扱うタグが新たに加わった。さらに、Canvas API や Web

Storage などの HTML5 関連技術がある。これらは複数種類ある HTML レンダリングエンジンでも利用できるように、2 種類以上の主要ブラウザでテストされて勧告されている。今後、各ブラウザが HTML5 の仕様を実装すると予想される。また、2015 年 1 月 15 日に W3C へ HTML5 日本コミュニティグループ [30] が設立され、日本でも HTML5 の仕様が問題なく定着していき、今後は W3C 勧告となった HTML5 を利用することが望ましいと考えられる。

HTML5 や HTML5 関連技術について、ウェブ上で数式を扱う際や掲示板で有用な例を示す。

数式エディタに関して <button> タグを多用しているため、ページ内のボタン配置が重要となる。ボタンには数式を編集する用途やデータを送信する用途がある。HTML5 以前はデータ送信のボタンは <form> タグに入れる必要があった。しかし、<button> タグに form 属性で <form> タグの id を指定することで、<form> タグに入れない記述が可能になった。例を示す。

```
<form id="comment"></form>
```

```
<button form="comment"> 送信 </button>
```

```
<button> フリーハンドで描画 </button>
```

```
<textarea form="comment" id="mathInput" ></textarea>
```

この場合、送信ボタンとテキスト領域はフォームで送信するが、「フリーハンドで描画」ボタンはフォーム送信とは関係がない。HTML5 以前であれば、</form> が </textarea> の後にあり、「フリーハンドで描画」ボタンを押すとフォームが送信される。HTML5 では、<form> タグの存在を配慮せずにボタンの配置を決めて、エディタのレイアウトを考えることができる。

掲示板サイトにおいて、ユーザが過去にログインしたスレッドの名称を履歴として表示することとした。それには、HTML5 関連技術の Web Storage のうち、有効期限のある sessionStorage でなく、ブラウザに半永久的に保存できる localStorage を用いた。ユーザのログイン後に自動的に <table> タグを用いて、過去にログインしたスレッド名を一覧表示する。

今回の開発では画像のアップロードのほか、URL の入力フォームとボタンを設置して動画の埋め込みも行えるようにした。そこで、HTML5 関連技術の <video> タグを用いる。YouTube の動画は <iframe> タグで埋め込むが、例えば FC2 サーバに

アップロードした .mp4 や .ogv や .webm などの拡張子の動画を <video> タグによる簡潔なコードを使って埋め込むことが出来る。

```
<video src='http://linesegment.web.fc2.com/html5/v0000.mp4'controls width='400' height='300'></video>
```

PC の主要ブラウザの <video> タグ対応について、利用前に利用者自身で調べてから利用するのが望ましい。

5-2 マルチデバイス対応

MathJax の特徴として、JavaScript が利用できるタブレットやスマートフォンからも扱える点がある。しかし、画面サイズが異なることから、デバイス毎に PHP ファイルを作成した。その際、レイアウトを極力変更せず、MathJax の設定において数式の大きさを調整し、CSS を用いてボタンや入力フォームのサイズを調整した。

動作結果については、タブレット (iPad 第 4 世代 iPad Air) とスマートフォン (Android 2.3.5) で確認した。

タブレットやスマートフォンの特徴として、タッチパネルで入力する際にマウスの右クリックにあたる操作ができないことがある。それにより、MathJax のメニューの表示ができない。しかし、ブラウザの Firefox beta では数式箇所では長押しすると MathJax のメニューが表示され、数式のコマンドをコピーできる (図 5-1 参照)。

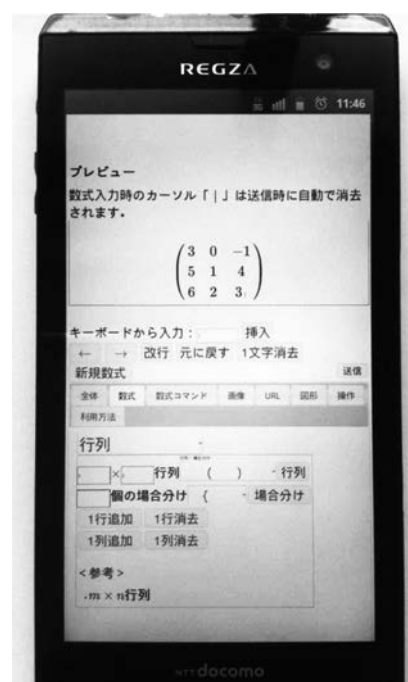


図 5-1 システムをスマートフォンから利用できる

5-3 実際の利用

構築したウェブサイトの利用に向けて、大阪府立大学において数学の講義を担当されている川添 充教授と吉富 健太郎准教授のお力添えを頂いた。数式入力可能なシステムの特徴として行列の入力機能があり、行列を多用する講義の代表である線形代数学での試験的な導入を依頼した。システム内にアンケートへのリンクを貼り、フィードバックを募る。打ち合わせの際に得た事項を述べる。

- ・数式エディタで入力する際、英数字などをキーボードから入力できる入力欄があるとよい。Enter キーや Space キーにより、挿入後に自動的に右移動も行うなどの使い分けができるとよい。
- ・フリーハンド描画が PC からのみ利用でき、タブレットやスマートフォンから利用できない。
- ・利用方法が分かりにくい。
- ・問題発言の削除などができる管理者モードがあるとよい。

1つ目と2つ目について、3.7節で述べた方法で、新たに実装して対応した。3つ目について、マニュアルのページのほか、YouTube にアップロードした動画による説明を試みた。YouTube に動画をアッ

プロードした後の編集において、短い文章を動画中に追記するアノテーションが便利である。それにより、分かりやすく操作方法を説明することができる。

数学の講義における試験導入に際して、本学と異なる状況を述べる。

- ・大学のサーバの PHP のバージョンは少し以前のものであるが、研究室のサーバのバージョンは十分に新しい。
- ・学生は主にスマートフォンから LMS を閲覧する。
- ・学生はスマートフォンから PDF も頻繁に閲覧する。

数式入力の方法としてエディタよりもフリーハンド描画の方が需要がある可能性があり、エディタの利用よりも紙に書いた数式の写真をアップロードする方が簡便である可能性がある。そこで、アンケートで問う内容に数式エディタが使いやすいかどうかのほかに、数式入力の際にエディタを使うという選択肢の有無を入れた。試験導入の結果は未回収の状態である。

本プロジェクトの開発の範囲外であるが、数学の講義を行う教員の立場から、対面授業で導入できると便利なシステムの将来像をお聞きした。シーケン

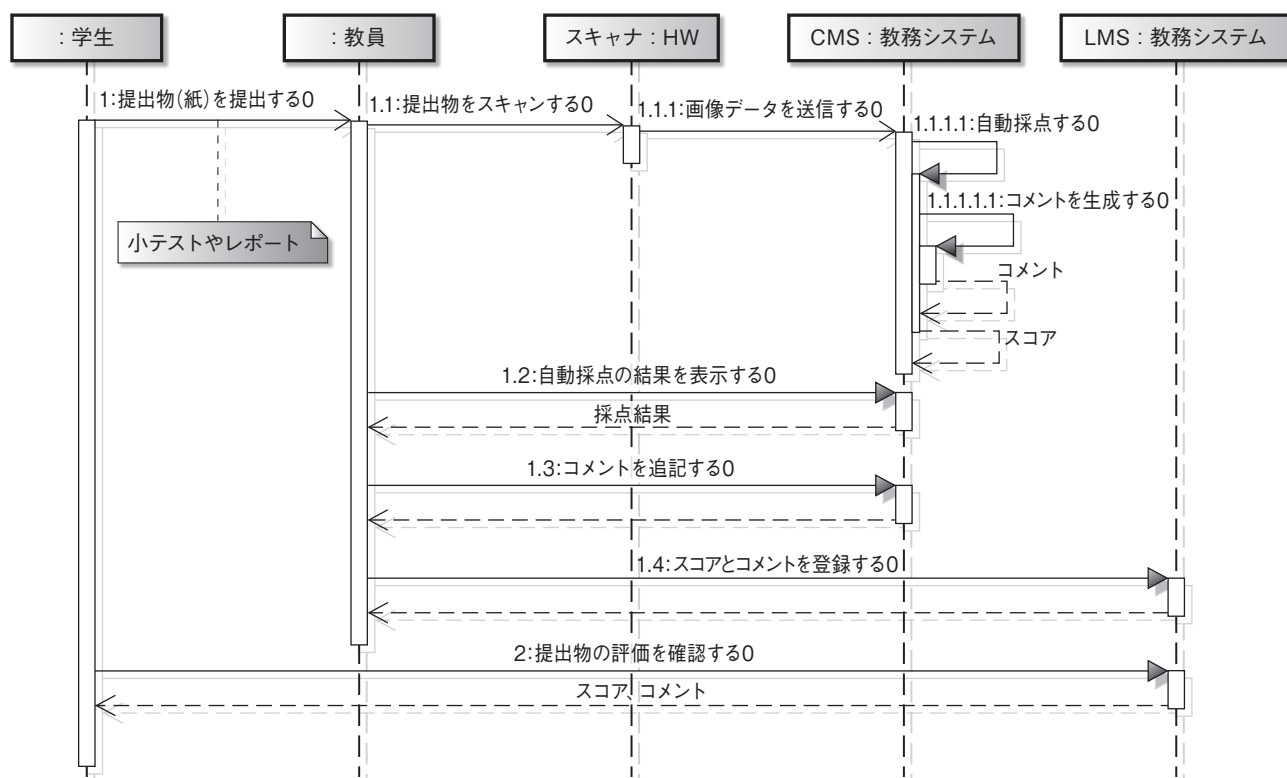


図 5-2 大阪府立大学で聴取した将来的な要望

ス図を用いて説明する。

講義において、学生が小テストやレポートを紙で提出する。回収した提出物を教員がまとめてスキャナに通す。スキャナが提出物をスキャンして画像データとして保存し、CMS (Course Management System) に送信する。CMS において、画像データから数式や文章をもとに自動採点が行われ、スコアとコメントが自動生成される。教員が自動採点の終了を確認後、コメントを追記し、LMS に提出物の採点結果を登録する。そして、提出した日に学生がスマートフォンから LMS にアクセスして結果を確認できるシステムが望まれている。

ウェブ上の数式を扱うシステムが活用される可能性のある箇所は図 5-2 の 2. の LMS 内での学生へのフィードバックを行うタイミングである。例えば、提出物に関して間違っていた箇所の再提出を求める際や、フィードバックを得た学生からの質問の投稿などの目的で、数式エディタなどが活用される可能性があると考えられる。

6. 結 論

6-1 数式について

本プロジェクトでは、MathJax と TEX を用いて、数式表示に特化した動的ウェブサイトを構築した。特徴として、クロスブラウザかつマルチデバイスであり、数式を扱う際に GUI の方式をとる。実装した機能には、数式エディタ、7 種類の数式検索、TEX 文書からウェブページへの変換機能、ウェブ上への発信のサポート、外部サイトとの連携などがある。また、これらのユースケースを組み合わせた利用例、応用例を示すことで、ウェブ上で数式を使用する目的が表示にとどまらず、表示された数式に関する可能性の一部が示されたと考える。ウェブ上で利用するため、数式の再利用や応用の可能性は膨大である。ウェブ上で表示された数式に関する今後の研究テーマとして、セマンティックウェブに関してウェブページの意味を数式からも抽出するプログラムや、人工知能の研究において e ラーニングや数学研究をサポートするプログラムが研究されることを望む。

数式エディタについて、表示された数式に対して、マウスや指により直接選択した後で、コピーやドラッグして数式を移動する操作ができると編集時に便利な操作である。他に数式エディタを使うかフ

リーハンドで数式を入力するかについて、現時点のフリーハンド入力の精度や記述できる数式の長さや数式の修正の問題が解決されれば、エディタのような入力サポートの一部は使われなくなると考えられる。しかし、フォントや数値を指定する空白などのフリーハンドでは難しい数式の入力については使われ続けると考えられる。将来像として、フリーハンドで入力した数式を数式処理できるシステムが考えられる。

6-2 MathJax と TEX

今回採用した MathJax は TEX をウェブページ上で利用できるようにし、MathML をクロスブラウザで利用できるサポートのライブラリである。画像に比べて数式表示に時間がかかる課題があるが、ウェブ上で TEX の数式表示を行うための有用な手段として認識されている。

6-3 MathML の可能性

数式検索に関して、本プロジェクトでは TEX で記述された数式を TEX で検索したが、現時点で数式が TEX で記述されることが多く、それに対し直接検索するためである。将来、処理速度や数式内の記号の意味付けなどによる優位性からウェブ上で MathML が多用されると、MathML で検索するプログラムが普及する可能性もある。将来的にも数式が TEX で記述される場合にも、TEX から数式の意味付けが豊富な Content MathML へ変換して、Content MathML で検索する方法が考えられる。現時点で Content MathML は表示目的の言語ではないが、検索などの処理のために有用なプログラミング言語となる可能性がある。

数式の意味付けについて、MathML と同等かそれ以上であると思われる言語として OpenMath[31] がある。また、Content MathML を用いて Semantic MathML[32] が提唱されており、セマンティックウェブへの対応など、数式の意味付けに関して木構造が特徴の言語の今後が期待される。

6-3-1 グラフ描画

グラフを描画できる数式がウェブページ上にある場合、その数式のソースコードを用いたグラフ描画の可能性が考えられる。表示された数式に対するグラフ描画までの操作の流れの例として、ソースコードをコピーして、グラフ描画サイトへアクセスして

入力する方法がある。また、ウェブページの機能としてグラフ描画ボタンを用意して、ポップアップウィンドウなどで表示する方法も考えられる。これらのような工夫により、数式に人間とのインタラクティブ性をもたせることができる。

数値シミュレーションや精細なグラフ描画に画像形式を利用する場合、Canvas API や SVG (Scalable Vector Graphics) を利用する方法があり、詳細な比較 [33] が行われている。ウェブページ上で多数のグラフを描画するときには Canvas API が速く、非常に精細なグラフを描画するときには SVG が有用である。これらはグラフのパラメータ調整などのインタラクティブな操作が実装可能である。今後の発展として、論文に記述された数式に数値を設定して数値シミュレーションを追試する動的なツールへの需要 [34] もある。その場合には速い描画機能のため、Canvas API が推奨される。また、高精度のグラフを拡大する目的で描画する場合には SVG が推奨される。SVG の利用例として、拡大しても綺麗な描画が行われる地図 [35] がある。本プロジェクトでは、Canvas API を用いた数値シミュレーションや SVG を用いた拡大表示を行う精細なグラフ描画は範囲外とした。

6-3-2 数式処理

数式表示のプログラミング言語を用いると、コマンドと数式の意味を対応させることが可能である。コンピュータの処理能力を活かした CAS (Computer Algebra System, 数式処理システム) や式変形の候補の出力を行う AI (Artificial Intelligence, 人工知能) により、学問上の問題の解決や教育の場面で数式を扱う方法がある。例えば、数学の問題を解決に関する日本数式処理学会や e ラーニングにおける自動採点や学生へのレスポンスに関する STACK など研究が進んでいる。また、「ロボットは東大に入れるか」というプロジェクト [36] も存在する。ヨーロッパで普及している GeoGebra [37] は教育用ソフトウェアである。その他、数多くの数式処理システムがあり、リンクを付録に付す。このような数式処理の実装は本プロジェクトのスキームの範囲外とした。

また、Wolfram Research [38] により、数式を用いたアルゴリズムの研究が進んでいる。その成果の例として、ウェブサイトとして数式検索エンジン Wolfram Alpha [39] が公開されている。検索す

るワードとして Mathematica, TEX, MathML が有効であり、関数の振る舞いや性質について調べることができる。数式の入力サポートと数式表示が行われ、かつ数式処理を兼ね備えているというシステムではない。そこで、ウェブ上で表示された数式のコマンドをコピーできると、数式処理の結果を Wolfram Alpha で調べる形で数式を再利用する方法がある。本プロジェクトでは、Wolfram Alpha で検索できるよう連携した。

6-3-3 セマンティックウェブ

数式もウェブページ内のコンテンツであり、ページの意味を担っている。そこで、ページの意味を把握するためには数式の意味付けも精確に抽出する必要がある。そのようなプログラムを実装して、結果をウェブページの <meta> タグに記述することで、セマンティックウェブへの対応を試みる事が可能である。これは、1つのホームページでなく、ウェブ全体の数式に関する知識や推論により、ウェブ利用者が問題解決へつなげる目的である。AI とオントロジーの研究 [40] やページ内のスキーマの共通認識 [41] により実現に近づくと考えられる。このようなプログラムの実装は本プロジェクトのスキームの範囲外とした。

6-4 数式の利用形式の発展

利用例について、筆者が提案した方法はアプリケーション上での利用のみであった。それに対し、大阪府立大学にて聴取した将来像では、紙からスキャナや自動採点システムを経て LMS まで連携して利用するシステムである。技術を担う情報系にとって、情報システムに対する意見の聴取が重要であることが分かる。ウェブ上の数式を扱う先行研究について、数式の検索機能の論文は情報系の分野で書かれている。そこで、実際に数式を扱う人の要望に応えられるように、物理学の理論出身の筆者が種々の検索機能を考案し実装した。ウェブ上の数式を扱うシステムとして、そのような数式を実際に使うさまざまな分野からの意見が関わることで、ウェブ上の数式のテーマが進展することを望む。

本論で開発したインタフェースでは、数式に対して文字列に関する処理を行うが、微分方程式の数値的解法の計算などの数式処理を行うことは範囲外である。また、CAS の先行研究は進んでいる。それらの間を部分的にカバーしているのが入力サポート

と検索機能に関して SearchOnMath や数式処理機能に関して Wolfram Research である。そこで、将来的に簡単に扱える数式のインタフェースに CAS が実装された数式統合環境が出来上がり、普及すると予想される。その頃には速い数式表示機能や AI、さらにはセマンティックウェブが普及していると考えられる。

数式を扱うとき、数式表示や数式処理やセマンティックウェブへ数式から対応するほか、グラフやシミュレーションなどの可視化への発展が挙げられる。数学の位相幾何学や結び目理論は数式よりも、その見た目が重要であり、高次元空間の物体の 3 次元空間での断面なども需要があると思われる。これらは数式の言葉で表すことができ、そのような数学の概念の可視化の開発・研究が情報系の分野で進み、数式を扱う分野にも手軽なアプリケーションとして広まることを望む。

6-5 最後に

ウェブ上で数式を扱うサイトでは、数式の入力サポート、数式の検索機能、数式を使って計算する数式処理機能などが独立している場合が多い。そこで、再利用可能な形式の数式の入力サポートを実装して、数式に特化した動的なウェブサイトとして掲示板を開発した。入力した数式の保存が可能で、数式を再利用する機能として、発言履歴の中の数式の転用をサポートする機能や数式を検索する機能を実装した。また、数式特有の機能として、グラフ描画など外部サイトと連携し、数式入力の代替手段として、フリーハンドによる描画機能を実装した。さらに、ウェブ上への情報発信を行うサポート機能として、入力した数式と文章を MathJax が使えるブログへ投稿する準備を行う機能や、ウェブフレンドリーでない TEX 文書を HTML5 に則したウェブページに変換する機能を実装した。このように、数式の表示かつ数式に関する種々の機能を備えて、コミュニケーションや e ラーニングや問題解決のサポートを行うインタフェースを実装した。

成果物は Vector で公開しており、成果物の著作権は山下伸男が所有している。

数式 UI 掲示板 $R\mu v$

<http://www.vector.co.jp/soft/winnt/net/se509215.html>

謝 辞

本プロジェクトに際して、以下の方に感謝する。英保茂先生、岡本敏雄先生、山崎聡先生（以上、京都情報大学院大学）、加藤泰久氏（NTT サービスエボリューション研究所）、奥村晴彦先生（三重大学）、福井哲夫先生（武庫川女子大学）

なお、この研究の一部は大阪府立大学の吉富健太郎先生代表の科研費「スマートフォン最適化型 Web ベース教材による大学専門基礎数学用反転授業の開発」15K00926 の補助を受けている。

【参考文献】

- [1] 総務省, u-Japan の理念, 総務省
http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ict/u-japan/new_outline03.html
- Raluca Budiu, モバイル: ネイティブアプリと Web アプリ, ハイブリッドアプリー U-Site, U-Site
- [2] 山下伸男, 江見圭司, 「数式表示に特化した動的なウェブサイトの構築」
http://web1.kcg.edu/~k_emi/math/NewTech2015/MathTech2015.pdf
- [3] 江見圭司, MathML 最先端 2008 春, kcg.edu 江見圭司のサイト
http://web1.kcg.edu/~k_emi/math/NewTech/MathML-tech2008
- [4] MathJax Consortium, MathJax, MathJax
<http://www.mathjax.org/>
- [5] 奥村晴彦, 黒木祐介, “LaTeX2e 美文書作成入門”, 技術評論社, 2013.
- [6] W3C, W3C Math Working Group, World Wide Web Consortium (W3C)
<http://www.w3.org/Math/>
- [7] David Lippman, AsciiMath, AsciiMath
<http://asciimath.org/>
- [8] 黒木玄, MathJax の使い方, MathJax の使い方
<http://genkuroki.web.fc2.com/>
- [9] American Mathematical Society, MR: Search Publications database, American Mathematical Society :: Homepage
<http://www.ams.org/mathscinet/index.html>
- [10] Cornell University, arXiv.org e-Print archive, arXiv.org e-Print archive
<http://arxiv.org/>
- [11] California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer, The Feynman Lectures on Physics, The Feynman Lectures on Physics
<http://www.feynmanlectures.caltech.edu/index.html>
- [12] Stack Exchange, Inc., MathOverflow, MathOverflow
<http://mathoverflow.net/>
- [13] Wikimedia Foundation, Inc., Wikipedia,
- [14] Wikipedia
<https://www.wikipedia.org/>

- [15] Crossroad, 数学ナビゲーター掲示板 [All Thread / Page: 0], 数学ナビゲーター
<http://www.crossroad.jp/cgi-bin/bbs/mathbbs/cbbs.cgi>
- [16] H. Gotoh, M. Sakamoto, K. Emi, "Developing e-Learning and Communication Systems to Support Displaying Math Equations on Web-Pages, in 2009", 日本eラーニング学会 JeLa2009 年度国際シンポジウム, pp3-6, 2009.
- [17] 池田光穂, コミュニケーションの定義: Definition of Communication, 池田 光穂 (IKEDA Mitsuho)
<http://www.cscd.osaka-u.ac.jp/user/rosaldo/090700communication.html>
- [18] 岡本 敏雄, 小松 秀暁, 香山 瑞恵, "情報教育シリーズ eラーニングの理論と実際 システム技術から, 教え・学び, ビジネスとの統合まで", 丸善, 2004.
- [19] 中村 晃, "KIT 数学ナビゲーションを活用したリンク・バック・ラーニング", KIT progress: 工学教育研究 12, pp.29-38, 2007.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110006192083/>
- [20] Lu Wang, pdf2htmlEX by coolwanglu, Lu Wang's Page
<http://coolwanglu.github.io/pdf2htmlEX/>
- [21] Nikos Drakos, The LATEX2HTML Translator, Washington State University - Pullman, Washington
http://www.wsu.edu/UNIX_Systems/tex/latex2html-manual/index.html
- [22] John MacFarlane, Pandoc - About pandoc, John MacFarlane - Home
<http://johnmacfarlane.net/pandoc/>
- [23] Jeff Knisley, A Brief Introduction to LaTeXMathML, n1530link
<http://math.etsu.edu/LaTeXMathML/>
- [24] Anthony Foster, Han, Philippe Latulippe, graph.tk,
<http://graph.tk/>
- [25] ネットオウル株式会社, 無料で使えるホームページサービス! ウェブクロウ, 無料で使えるホームページサービス! ウェブクロウ
<http://www.webcrow.jp/>
- [26] Peter Jipsen, ASCIIMathML opening page, Chapman University | A Top Private University in California
<http://www1.chapman.edu/~jipsen/asciimath.html>
- [27] Davide P. Cervone, jsMath, jsMath: jsMath Home Page
<http://www.math.union.edu/~dpvc/jsmath/>
- [28] W3C, HTML5, World Wide Web Consortium (W3C)
<http://www.w3.org/TR/2014/REC-html5-20141028/>
- [29] W3C, HTML5 勧告ーオープン・ウェブ・プラットフォームの重要なマイルストーンを達成, World Wide Web Consortium (W3C)
<http://www.w3.org/2014/10/html5-rec.html.ja>
- [30] W3C, HTML5 Japanese Community Group, World Wide Web Consortium (W3C)
<http://www.w3.org/community/html5jp/>
- [31] The OpenMath Society, OpenMath, OpenMath
<http://www.openmath.org/>
- [32] MovGP0, Semantic MathML - semanticweb.org, semanticweb.org
http://semanticweb.org/wiki/Semantic_MathML
- [33] Microsoft, SVG と Canvas: どちらを選ぶか (Windows), MSDN - Microsoft Developer Network
[http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/gg193983\(v=vs.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/gg193983(v=vs.85).aspx)
- [34] 橋本 直樹, railmaps/tokyosvg at master · hashcc/railmaps, GitHub
<https://github.com/hashcc/railmaps/blob/master/tokyo.svg>
- [35] ロボットは東大に入れるか。Todai Robot Project
<http://21robot.org/>
- [36] 芦野 俊宏, "科学技術データと電子ジャーナル", 情報知識学会誌 2008 Vol. 18, No.5 20周年記念特別号, pp.487-488.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsik/18/5/18_18-5-27/article-char/ja/
- [37] International GeoGebra Institute, GeoGebra, GeoGebra
<http://www.geogebra.org/>
- [38] Wolfram, Wolfram: Computation Meets Knowledge, Wolfram: Computation Meets Knowledge
<http://www.wolfram.com/>
- [39] Wolfram, Wolfram|Alpha: Computational Knowledge Engine, Wolfram: Computation Meets Knowledge
<http://www.wolframalpha.com/>
- [40] 溝口 理一郎, "知の科学 オントロジー工学", オーム社, 2005.
- [41] Schema.org, Home - schema.org, Home - schema.org
<http://schema.org/>

◆著者紹介

山下 伸男 Nobuo Yamashita

日比谷コンピュータシステム株式会社社員。
 京都情報大学院大学応用情報技術研究科修了, 情報技術修士 (専門職)。

江見 圭司 Keiji Emi

京都情報大学院大学准教授。
 京都大学理学士, 同大学院修士課程修了 (化学専攻), 同大学院博士課程修了 (人間・環境学専攻), 博士 (人間・環境学)。
 元金沢工業大学専任講師。
 ET ロボコン関西地区大会実行委員長, ゲーム学会評議員, 一般社団法人情報処理学会「コンピュータと教育」研究会運営委員。