

解説動画作成のための数学文書読み上げテキストへの変換

武庫川女子大学・生活環境学研究科 福井 哲夫

Tetsuo Fukui, Graduate School of Human environmental Sciences, Mukogawa
Women's University

武庫川女子大学・情報メディア学科 長谷川 陽和, 原 知鈴

Hiyori Hasegawa, Chisuzu Hara, Department of Informatics and Mediology, Mukogawa
Women's University

1 はじめに

近年STEM教育が重要な課題とされている。また、新型コロナ禍の影響から、教育においてもオンライン化が進み、2021年度からは中学・高校でGIGAスクール構想によって、デジタルデバイスが全面導入されてきている。文部科学省はデジタル教科書の特徴の一つに、音声読み上げ機能を挙げている [1]。数学を学習する際に、目で読んで学習するだけでなく、音声でも確認することによって、より理解が深まる可能性がある。しかし、オープンな数学文書では、そこに含まれる数式を音声で読み上げることができないのが現状である。

そこで我々は、高校数学範囲の LaTeX をベースに記述された数学デジタル文書の音声読み上げツールの開発に取り組んだ [2]。本ツールの特徴は、LaTeX ベースの任意の数学デジタル文書のソースから読み上げテキストに変換して、それを音声で読み上げさせることを可能にしている。

本研究では、完成した数学デジタル文書の音声読み上げツールを活用した数学解説動画作成への応用事例について報告する。その目的は、数学学習者が教材として提示された数学デジタル文書を対話的に読み上げ音声を聴きながら、文書を目で追って意味を理解し、学習することを想定している。システムが教材を音声でも読み上げることにより、学習意欲を維持しやすくなる効果が期待できるのではないかと考える。

2 数式読み上げの課題と先行研究

ここでは、数学文書のデジタル化事情を音声読み上げの観点で紹介し、数式の読み上げの解決すべき課題と方法について議論する。

2.1 数学文書の現状

数学文書のデジタル化は、ワープロソフトの普及と共に始まってはいるが、数式入力の煩わしさから、中学・高等学校の数学教育ではプリント教材作成などで使われる程度で、本格的数学文書のデジタル化は大学の数学者などの専門家以外はあまり進んでいな

かった。数学教材や数学系論文作成などのための数学文書デジタル化技術として多くの数学・理学・工学研究者が LaTeX を利用している。一方、2020 年度から文部科学省が推奨し、教科書出版業者によるデジタル教科書が教師による電子黒板提示用に広がり始めている。しかし、音声読み上げに関してはデジタル教科書ごとに読み上げを工夫しているものの、特に数式読み上げのための統一規格が無く、課題も多い。

一方、インターネット上では、数学文書のデジタル化が急速に進んでおり、2020 年度はコロナ禍の影響もあり、オンラインの数学文書が急速に普及しつつある [2]。その多くの Web コンテンツでは数式表示に MathJax というライブラリーが使われている。例えば、MathJax を使った数式混じりの公開 Web ページとして「高校数学公式解説集」 [3] などが検索できる。しかし、そこに含まれる数式を音声で読み上げることはできない。

また、反転授業やオンデマンド型の授業では、対面授業やライブ型授業の肉声による講義と同等の質を維持するため、講義の解説動画コンテンツをあらかじめ作成しておき、LMS や動画配信サイトにアップロードして利用するようになってきた。

【LaTeX 文書について】

LaTeX とは、Donald E. Knuth 教授が開発した数式の組版ソフトウェアを、Leslie Lamport 氏が数学文書をデジタル化しやすくするために機能強化したソフトウェアを指す [4]。LaTeX を使って数学、特に数式表現を記述するために、特有の文法が定められており、数学文書テキストの一部に組版のための命令が埋め込まれたソーステキストを作成し、コンパイラ方式によって組版されたデータを生成する仕組みになっている。組版された数学文書は主に PDF 形式で出力し、利用されることが多い。LaTeX の文法に従った数式表現の例を表 1 に示す。表 1 の 2 列目の数式を LaTeX 形式で表現したのが 3 列目である。本研究では、この LaTeX 形式のソースコードを字句解析して読み上げテキストに変換する。それについては第 3 章で議論する。

表 1: 数式読み上げテキストの例

No.	数式例	LaTeX 形式	読み上げテキスト
1	a	<code>a</code>	エー
2	π	<code>\pi</code>	パイ
3	$ax^2 + bx + c = 0$	<code>ax^2+bx+c=0</code>	エー エックス 2 じょう プラス ビー エックス プラス シー イコール 0
4	$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$	<code>x=\frac{-b\pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}</code>	エックス イコール 2 エー ぶんの マイナス ビー プラス マイナス ルート ビー 2 じょう マイナス 4 エー シー
5	$\cos(\theta + \frac{\pi}{4}) = \frac{1}{2}$	<code>\cos(\theta+\frac {\pi}{4})=\frac{1}{2}</code>	コサイン カッコ シータプラス 4 ぶんの パイ イコール 2 ぶんの 1
6	${}_5C_3 = 10$	<code>{}_5\mathrm{C}_3=10</code>	5 シー 3 イコール 10
7	$\log_{10} \frac{n}{n+1}$	<code>\log_{10} \frac{n}{n+1}</code>	ログ 10 エヌ プラス 1 ぶんの エヌ
8	$\int_a^b f(x)dx$	<code>\int_{a}^{b}f(x)dx</code>	エックスにおけるエーから ビーまでの エフ カッコ エックスの積分

【MathJax について】

MathJax は Web ページに数式表示を可能とする JavaScript ライブラリーである。HTML ソースファイルに MathJax を読み込む `<script>` タグを含み、数式部分は “`\(`” と “`\)`” あるいは “`\[`” と “`\]`” で囲まれた中に LaTeX の文法に則って作成する。表 2 は MathJax の利用例である。

表 2: MathJax の例 (左: html ソース、右: 組版された表示)

<pre><body> 一次方程式 \(\ ax+b=0 \) の解は \[x = -\frac{b}{a} \] です。 </body></pre>	⇒	<pre>一次方程式 $ax + b = 0$ の解は $x = -\frac{b}{a}$ です。</pre>
--	---	--

2.2 数式の読み上げについて

1996 年に山口らは数式の音声読み上げについて検討を始めている [5]。その中で、欧米の数式の読み方のルールについてはきちんとした教科書があり整備されていることが報告されているが、日本における数式の読み方には基準がなく問題であると述べている。それを受け、1997 年に日本語における数式の読み方について検討が始まった [6]。そこでは、補助音声を導入した数式の聞き取り実験が行われている。補助音声とは、数式全体や根号などの中の式の構造の情報を事前に予告する音声のことである。しかし、補助音声はある程度の効果をもっているだけで、数式の聞き取りにくさを解消できるほどの効果はないと結論づけられている。

その読み上げ法に基づき、2001 年に Windows 用汎用画面読み上げソフトウェア「95Reader」を利用して、数式部分を含めた LaTeX 文書ファイルを音声出力する試作システムが開発されている [7]。そこでは、LaTeX 文書中の文字列を印字制御用コマンドタグを含め、その文字通りに全て読み上げる逐次読みモードと、数式の構成がきちんと把握できる日本語文字列に変換する数式読みモードの 2 種類の音声読み上げ方法が搭載されている。さらに、単に数式を頭から読み上げるだけでなく、数式細部への音声によるある程度自由なアクセスや、ユーザー辞書などの機能を追加されている。また、理数系専門教育を受けた数名の視覚障害者を被験者として評価実験が行われており、一定の数学的知識があれば、このシステムを利用して大学一般教育程度の数学教材の内容を音声のみで理解することが可能であると示されている。しかし、文書ごとに適切な読み上げ方法はケースバイケースであり、ひとつの標準の読み方を決めるのには無理がある点や、複雑な分数・根号式の場合、式の構成が正確に把握できないことがある点、また、ある程度 LaTeX の知識を有していることが必要である点が問題点としてあげられている。

それに引き続き、2003 年には新たなアーキテクチャーの数式読み上げシステムとして数式エディターの音声化の企画・製作が行われている [8]。2001 年の試作システムに加

え、新たに特殊文字と記号の「簡易読み」とその簡易読みでは区別できない記号を必要に応じて説明的に読み上げられる「詳細読み」の定義を考案し、その読み上げ方法の切り替えを可能としている。さらに、数式部分と非数式部分の切り替わりを音声で伝える機能を追加している。正確には評価実験により判定する必要があるものの、LaTeXに熟知していなくても音声ガイドにより数式を含む文書の作成・編集を行うことができると推察され、この音声インターフェースによって、大学理数系専門科目の教科書の内容を音声だけでほぼ完全に理解できることが確認されたとされている。

現在2021年には、ChattyInfty2という視覚障害者でも使える理系文書編集ソフトが有料で公開されている [9]。Windows 限定のソフトウェアで、複雑な数式の編集機能やカーソルキー操作による数式の音声読み上げ機能が搭載されている。

この章の最後に、これまでの数式の読み上げの研究は、主に視覚障害者支援を中心に議論されることが多かった。しかし、本研究の目的は、第1章でも述べたように、通常の数学教育におけるデジタル学習教材の意欲を高めるために音声読み上げを可能にすることにある。したがって、本研究では、数式読み上げ方法として、教材の目視と音声を併用して学習するための「簡易読み」を対象として議論する。

3 数学デジタル文書音声読み上げツールの開発

本研究の数学デジタル文書の読み上げツールは、LaTeX ベースの数学文書を対象に読み上げることが可能である。ここでは読み上げツールの概要および処理プロセスと評価テストについて解説する。

3.1 数学文書読み上げツールの概要

本研究における読み上げの対象は、数式混じりの数学文書である。これにより、表1.2に示したような LaTeX をベースに作成されたデジタル文書の構築元であるソーステキスト (.tex ファイルや.html ファイル) を組版表示し、音声で読み上げさせることが可能となる。図1は本研究で開発した数学文書音声読み上げツールの実行画面である。

【全体構成】

数学デジタル文書読み上げツールの全体構成は図1のように、(1) ソース入力部、(2) 数学文書組版表示部、(3) 読み上げテキスト出力部、(4) 操作部からなる。

【利用方法】

本ツールを利用する手順は、まず、数学文書を構成している LaTeX または HTML ソースの読み上げさせたい部分テキスト (文字列) をコピーし、ソース入力部 (図1(1)) に貼り付ける。次に、操作部 (図1(4)) にある読み上げ変換ボタンを押すと変換が開始され、組版表示部 (図1(2)) に数式等が教科書通りに組版された数学文書が表示され、指定したハイライト行を音声により読み上げさせることができる。その際、「読み上げテキスト」が図1(3)の出力部に表示され、どのような読み方をしているのかが記述を見ればわかるようになっており、テキストは独立して再利用可能である。「読み上げテキスト」とは、表1の4列目に示すように、 a は「エー」、 π は「パイ」などと、数式の読み

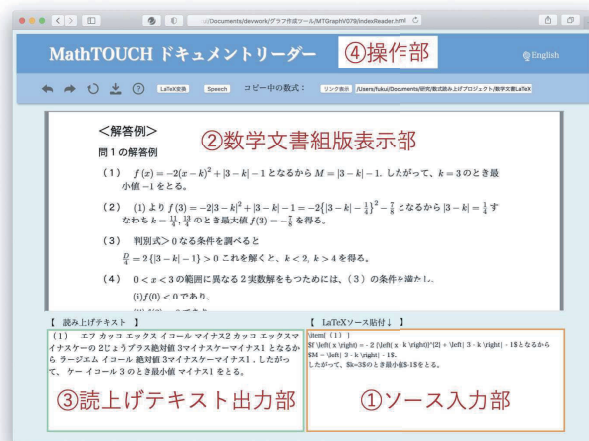


図 1: 数学文書読み上げツールの実行画面

上げを想定していないような通常の日本語音声読み上げエンジンでも読み上げられるように、数式を日本語の読み言葉に変換したものを指す。「読み上げテキスト」のルールは文献 [10, 11]などを参考に、本研究において独自に開発したものである。

3.2 システムの処理プロセス

本システムの、数式混じりの日本語デジタル文書を音声で読み上げさせる処理プロセスは次の(処理1~5)からなる。

(処理1) テキスト処理により日本語と LaTeX 命令の分離を行う

(処理2) LaTeX 形式の数式部分は独自の LaTeX パーザーによって数式(木)内部表現に記録する

(処理3) 数式(木)内部表現を「数式読み言葉」に変換

(読み上げテキスト変換エンジン)

(処理4) (処理1)で分離した数式部分を「数式読み言葉」に埋め戻す

(処理5) 音声合成エンジン(Text-to-Speech API[12])を操作して、音声で読み上げる

【読み上げテキスト変換エンジンについて】

数式を(処理3)の「読み言葉」に変換するため、本エンジンには変数および特殊記号に対する「読み言葉」テーブル(辞書)が登録されている。加減乗除や関数・積分などの演算子構造をもつ複雑な数式は、7つのタイプの演算子構造(前置単項型、後置型、括弧、内挿2項型、前置2項型、前置3項型、行列)に分けて対処する仕組みになっている。様々な数式の「読み上げテキスト」変換例は表1の4列目を参照されたい。

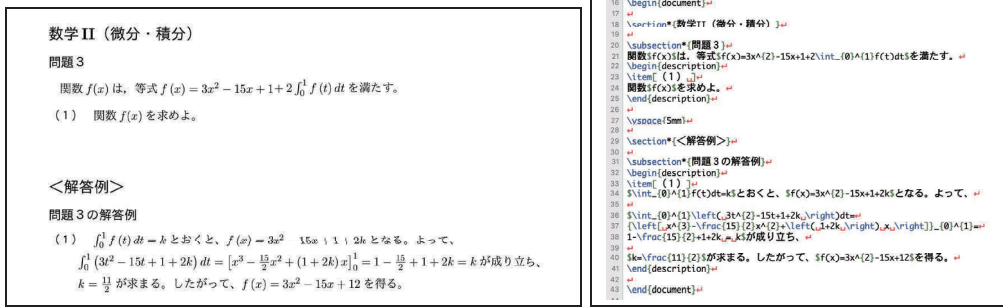


図 2: 数学プリント教材例 (右はその LaTeX 形式のソース)

3.3 評価テスト

まず、数式のみ音声読み上げが正しく実現しているかテストするために、高校数学の教科書『数学I』, 『数学A』, 『数学II』, 『数学B』, 『数学III』 [13] に現れる全ての数式 (約 4000 個) を、インテリジェントな数式入力インタフェース MathTOUCH [14] を使って入力し、音声読み上げエンジンを通じて確認した。次に、大学入試問題 (過去問) の解説文書を LaTeX 形式で作成し、それら約 36 問の読み上げテストによって、高校数学レベルの読み上げが正しいことを検証した [2]。

4 解説動画作成への応用

ここでは、開発した数学デジタル文書読み上げツールを使った応用事例として、本研究の主目的である、動画教材作成手順について解説する。

数学の解説ナレーション付きの動画を作成する手順としては、例えば次の (手順 1~5) を行うとよい。

【動画教材作成手順例】

- (手順 1) LaTeX による数学プリント教材を準備する (目的は動画教材にある)
- (手順 2) 数学デジタル文書読み上げツールにより、「読み上げテキスト」を作成
- (手順 3) テキスト読み上げユーティリティ (OS などに附属) により作成した「テキスト」を読み上げさせ、音声を録音ツール (ユーティリティ) によりデータ化する
- (手順 4) 動画教材用スライドに「プリント文」・「読み上げ音声」を貼付
- (手順 5) 解説動画を録画

例えば、数学プリント教材として、図 2 を考えたとする。図 2 の右側はプリントの LaTeX 形式のソーステキストを表す。このソーステキストを本ツールにより読み上げテキストに変換する (図 3)。

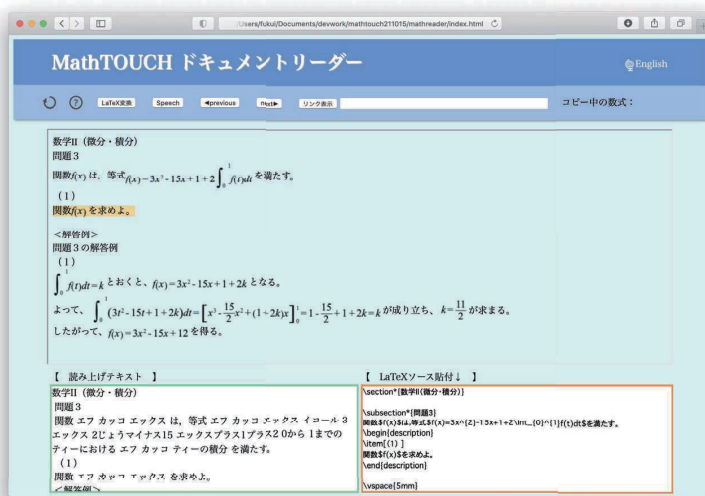


図 3: 数学文書読み上げツールによる読み上げテキスト変換例

作成された読み上げテキスト（図3左下部）をコピーし、テキスト読み上げユーティリティに入力し、OSシステムに読み上げさせて、その音声を録音ツール（ユーティリティ）を通じて、ナレーションのための音声データを作成する。

例えば、MacOS Xの場合であれば、OSの「スピーチ機能」をサポートしている「テキストエディット」アプリケーションを使えば、容易に音声読み上げが可能であり、録音ツールとしてはQuickTime Playerによってm4a形式などの音声データを作成できる（図4）。

この音声データを図5のように解説動画のためのスライドに埋め込むなどして、動画として書き出せば、解説動画の完成である。

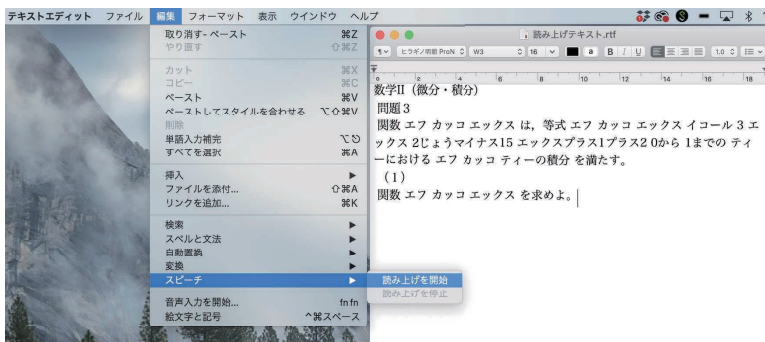


図 4: 「テキストエディット」アプリケーションによる音声データ作成例

数学II (微分・積分)

問3

関数 $f(x)$ は、等式 $f(x) = 3x^2 - 15x + 1 + 2 \int_0^1 f(t) dt$ を満たす。

(1) 関数 $f(x)$ を求めよ。

問3の解答例

(1) $\int_0^1 f(t) dt = k$ とおくと、 $f(x) = 3x^2 - 15x + 1 + 2k$ となる。
よって、 $\int_0^1 (3t^2 - 15t + 1 + 2k) dt = [x^3 - \frac{15}{2}x^2 + (1+2k)x]_0^1 = 1 - \frac{15}{2} + 1 + 2k = k$ が成り立ち、
 $k = \frac{11}{2}$ が求まる。したがって、 $f(x) = 3x^2 - 15x + 12$ を得る。

図 5: 解説動画のための読み上げ音声付きスライドの例

5 まとめ

本研究では、2021年8月に LaTeX ベースの高校数学レベルの数学デジタル文書に対する音声読み上げを実現することができた。本ツールによって、読み上げテキストを貼り付けることで、オンライン数学教材の作成に利用できることを示した。

これにより、初学者が数学デジタル文書による学習時に、音声でも読み上げることによって意欲を高めることが期待され、さらには、数式の読み方の支援にも役立つことが期待できる。

今後は、選択部分の読み上げなど操作性の向上を図りたい。また、現在は読み上げ言語は日本語のみであるため、英語対応にも取り組みたい。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 20K12117 の助成を受けたものであり、加えて国際共同利用・共同研究拠点である京都大学数理解析研究所の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 文部科学省：「学習者用デジタル教科書の効果的な活用の在り方等に関するガイドライン(改)」, <https://www.mext.go.jp/>, 2021.
- [2] 長谷川陽和, 原知鈴, 福井哲夫：「数学デジタル文書読み上げツールの開発」, 第20回情報科学技術フォーラム講演論文集, 音声言語処理 E-020, pp.1-2, 2021.
- [3] 理経ラボ：「高校数学公式解説集」, <https://rikeilabo.com/mathmatics-formula>, 2021.
- [4] 奥村晴彦, 黒木裕介：『改訂第8版 LATEX2e 美文書作成入門』, 技術評論社, 2020.

- [5] 山口雄仁, 川根深, 澤崎陽彦: 「日本語による数式読み上げ法の基本構成について」, 日本数学教育学会誌, Vol.78, No.9, pp.239–247, 1996.
- [6] 渡邊実, 堀内靖雄, 市川熹: 「数式の音声化の検討」, 電子情報通信学会技術研究報告. SP, 音声, Vol.97, pp.17–22, 1997.
- [7] 山口雄仁, 川根深: 「数式を含む文書の日本語読み上げ用試作システムについて」, 電子情報通信学会技術研究報告. SP, 音声, Vol.101, pp.9–16, 2001.
- [8] 山口雄仁, 川根深, 駒田智彦, 鈴木昌和: 「日本語数式エディターの視覚障害者用音声インタフェース開発について」, 電子情報通信学会技術研究報告. SP, 音声, Vol.103, pp.29–34, 2003.
- [9] サクセスネット: 「ChattyInfty2」, <https://www.sciaccess.net/jp/ChattyInfty/ChattyInfty2.html>, 2021.
- [10] 銀林浩, 銀林純: 『基礎から分かる数・数式と図形の英語』, 日興企画, 1999.
- [11] 鷗沼仁: 『知りたいことがすぐわかる数・式・記号の英語』, 丸善出版, 2003.
- [12] Google LLC: 「Cloud Text-to-Speech」, <https://cloud.google.com/text-to-speech?hl=ja>, 2021.
- [13] 俣野博, 河野俊丈, 他 27 名: 『数学 I』, 『数学 A』, 『数学 II』, 『数学 B』, 『数学 III』, 東京書籍, 2012.
- [14] 福井哲夫: 「数式のインテリジェントな線形入力方式」, 京都大学数理解析研究所講究録, Vol.1780, pp.160–171, 2012.