

多様化する学生と多角化する進路に幅広く対応するための 視聴触教材

釜江常好^{1,2} 小出富夫³

概要: 日本の大学では、障害をもつ学生のニーズに答え、支援する組織は、非常に弱体である。障害の有無を問わず、同じクラスで先進的な科学や工学が学び、将来、いろいろな進路に進めるようにすることが、大学に求められている。支援組織が無いに等しい現状は、講義や実習を指導する教官だけで、状況を改善するのは、難しい。障害者を含むクラスで、視覚、聴覚、触覚を使って、専門科目の講義を可能にする教材が必要となる。ここでは、触覚を活用し、インクルーシブな科学・工学・技術・数学 (STEM) の講義・実習を可能にする教材の例を発表する。例えば、数式を、LaTeX や SageMath(Python)で表示し、コピー・ペースト出来るようにする。活用例として、マックスウェル方程式を、座標系を使わないの微分幾何学で展開する。応用問題は、3D メッシュを生成し、数値解を求める。数式処理は、SageMath に習熟することを目指す。これらを駆使できれば、卒業後のキャリアでも、十分活躍できると信じる。

キーワード: アクセシビリティ、インクルーシブ教育、触覚教材

Multi-sensory educational materials adaptable to diversifying students and career options

TSUNEYOSHI KAMAE^{†1,2} TOMIO KOIDE^{†3}

Abstract: Japanese universities are not well structured to meet the needs of students with disability nor have prepared adequate inclusive curricula. Universities are required to teach cutting-edge science and engineering, and enable them to advance to a wide range of promising careers. These requirements are not easy to fulfill by instructors in charge of the course alone. Teaching materials mobilizing visual, auditory and tactile senses will be needed to cover advanced topics in inclusive classes. This presentation proposes to use tactile lines combined with detailed audio descriptions. We plan to develop teaching materials to enable inclusive curricula in STEM along this line. For example, we present equation and formulae in MathJax, LaTeX and SageMath(Python). As a first step Maxwell's electro-magnetism (EM) is taught on the coordinate-free method of differential geometry. For practical applications of the EM theory, combinations of 3D mesh generators and Finite Element Methods are used. Such courses will open a broad range of careers and ensure students to become active members of the society.

Keywords: Accessibility, Inclusive teaching, Tactile text, Auditory text,

1. はじめに

私たちは、Android ベースのユニバーサル・アクセス携帯の開発し、視覚障害者に特化した、音声ベースで動くスマートフォンを開発してきた。そして、障害者に、「技術はここまで進んでいます。試してみませんか」、と言えるものを頒布するとともに、講演などで、広報に努めきた。詳しくは、<http://universal-access.jp> を見て欲しい。

この活動の中で、鈴木昌和氏が運営されている、サイエンス・アクセシビリティ・ネット[1]の、「科学ヘジャンプ・サマーキャンプ」に参加した。そこで、視覚に障害をもつ生徒の多くが、大学進学を想定した勉強が困難な環境にいることを知った。大学でも、健常者と障害者が、同じクラスで講義を受け、実習できる環境は、あまり整えられていない。この状況を改善することは、個々の教官や生徒・学

生だけでは、難しい。自習するにも、教えるにも、適当な教材や機器と訓練されたチュータの助けが必要となる。

情報を、触覚と、視覚あるいは聴覚と同期して伝えることが、学習効率を高め、理解を促進することは、判っている[2]。それを可能にするには、電子メディアだけでは不十分で、触って理解するための触覚図や、立体モデルを用意しなければならない。それらは、一度製作すると、比較的安価に複製できる。これらを頒布することで、インクルーシブな講義や実習に不慣れた教官の支援になり、新しいスタイルの教育が広がることを、願っている。意欲ある生徒や学生が、自習する場合にも、役立つと考えている。

2. 教材の構成

ここで提案する視聴触教材は、全体を統合するデジタル・アプリと、触覚印刷をした紙の教材、理解を助けるために作成した3D 模型からなる。音声は全て、高音質の日本語あるいは英語の合成音声を使う。また、視覚障害者の間に普及している、スクリーン・リーダーでも、読むことができるように、配慮する。

1 東京大学 University of Tokyo.

2 スタンフォード大学 Stanford University.

3 クリエイト・システム開発株式会社
Create System Development Co., LTD

2.1 デジタル出版アプリ

テキスト主体のインクルーシブ出版には、DAISY[3]が広く使われている。しかし、理工系、生命系など、図や表を多用する出版には、向いていない[4]。また、W3Cが進めている、ePUB3[4]も、STEMと呼ばれる分野では、ほとんど使われていない。シンガポールでは、大学レベルの物理教育に向けた試みが、提案されているが、その実態は、いろいろ工夫された JAVA の Applet の集合と考えて良く、視覚障害者が理解できるとは、思えない[5]。

2.2 印刷教材

印刷教材は、文章、数式、表や図を含むと想定している。ここでは、以下のような配慮をする。

- 弱視者や難読者に配慮し、拡大、フォントや背景色変更を可能とする。
- 合成音声やスクリーン・リーダーで、日本語および英語の音読ができるようにする。
- 数式は、視覚が使える人のために、MathJax で提示するが、数式を右クリックすることで、LaTeX、MathML、Python での表現が現れ、音読され、コピーできるようにする。
- 図は、タッチスクリーン上に A4 大で表示し、触覚線付きの立体コピー紙を重ね、線に触ることで、説明が聴ける。
- データ解析の基礎となる以下の数学やプログラムが、説明されている: 数式表示 (LaTeX)、数式処理 (SageMath)、グラフ表示 (Matplotlib)。
- 図は、通常のカラー印刷と、立体プリンタ出力に向けた形式 (黒色輪郭線付き) で出力される。EasyTactix[6]で、重ね印刷することで、触覚線付きの印刷となる。

2.3 インクルーシブ教材となるデジタル出版

デジタル出版が広まりつつある現在、インクルーシブな出版には、幾つかの選択肢があると考えていた。しかし、実装しようと、いろいろな試してみると、全てが、STEM と呼ばれる理系分野には、対応できないことが判明した。今、ブラウザ・ベースの技術、Progressive Web Apps (PWA) が広まりつつある。我々も、触覚本として試してみた。これを、既存のデジタル出版と比較してみる。

- 視覚障害者に使われている、DAISY[3]を考えたが、数式を扱うことが設計の想定外で、音声の同期にも、大変な労力が要求されるので、採用しなかった。
- W3C の ePUB3[4]は、出回っているアプリソフトごとに対応が異なり、広いユーザー層が使えるとは思えなかった。シンガポールで数年前に "Open Educational Resources" として、ePUB3 が公開されている[5]。数式提示がない上、暗視者用の JavaApplet を多用している。Applet のサポートが停止されつつある今、選択できなかった。
- 最新の Web 技術の中から生まれた、Progressive Web Apps (PWA)[6]を選択し、その上で、視聴触覚を活用する、

教材を作ることとした。それでも、不十分な部分も残るので、後で書くように、立体模型も用意する予定である。

2.4 視聴触覚を活用する最初の本、触覚本マンガ 塙保己一

Web ベースの PWA の技術を使った本を、2020 年 11 月に出版した。「マンガ はなわほきいち 触覚本」である。紙の本は、<http://universal-access.jp>にて購入可能である。電子メディア部分は、以下のサイトから、ダウンロードすることができる。試してほしい。

- アンドロイド・アプリ 触覚本リーダー (左の QR)
- iOS、Win、Android 共通 Web ベースアプリ [右の QR]



この二つの中の、右のものが、Progressive Web App (PWA) を利用している。

どちらの触覚本リーダーであっても、A4 大のタッチスクリーンのディスプレイ上に表示し、図 1 のように触覚本のページをバインダーから外し、スクリーンに重ねる。すると、用意したマクロが、指で触れた部分を音声で伝える。

文章は:「辰之助の、髪の中の、ゆい」;「辰之助の、髪の中の。後ろと、上の部分を残し、そられている」;「太い、まゆ」;「閉じた目」;「小さな鼻」;「閉じた口」;「左耳」;「顎の輪郭」と、詳しく伝えてくれる。触覚と、視覚、聴覚と同期して伝えることで、視覚障害者だけでなく、識字障害者、学習障害者にも有効な本となっている。触覚本は、以下のサイトで購入することができる。

<http://universal-access.jp>

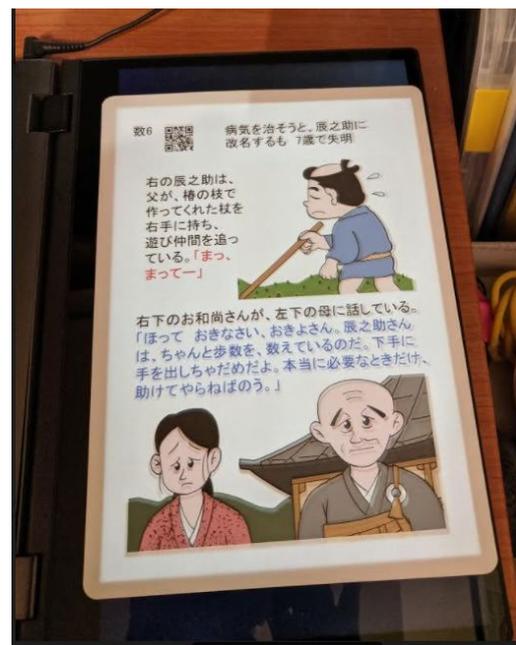


図 1 : マンガ はなわほきいち 触覚本の、6 ページ目を、パソコンの A4 大の、タッチ・スクリーンに重ねた写真。

2.5 STEM 教育への応用例の紹介

「マンガ はなわほきいち 触覚本」で使った、視聴触覚を同期させ、理解を促進させる方法を、広く理工生命系教育に、使う試みが、図2に表示されている。ペンフィールド図と呼ばれる。脳の運動野、感覚野と、身体部位の対応を示すものである。図1と同じように、透明な触覚線が入った立体コピー紙を、タッチスクリーンに重ねて、指で触ると、以下のような説明が聴ける：

「大脳皮質の左感覚野 体の右半分の手を触知している」；「脳の中の、感覚皮質の、左半分」；「下肢。腰から下の部分」；「胴体」；「頭」；「腕、手、指」；「目、鼻、口」；「はぐき、あご」；「舌」のように、触った部分を説明する。

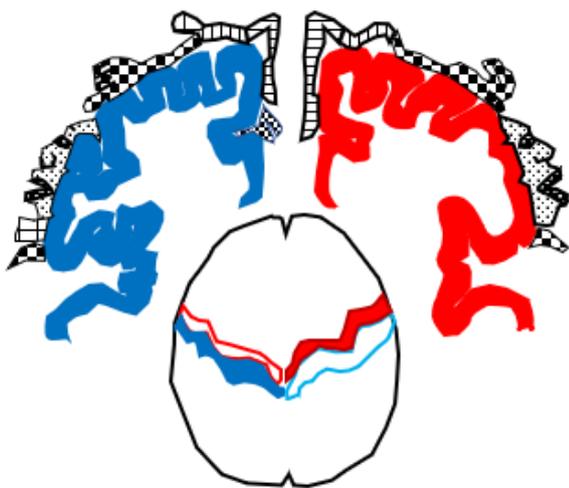


図2：ペンフィールド図。大脳の運動野、感覚野と、身体部位の対応を示す、模式図。青色が感覚野、赤色が運動野

同じようなことを、数学のグラフで試みたのが、図3である。赤や緑の線で領域を定義し、その領域を触ると、代替テキストが聴ける。実際のA4大の立体コピー紙や、スクリーンには、これらの線は、見えないようにしている。

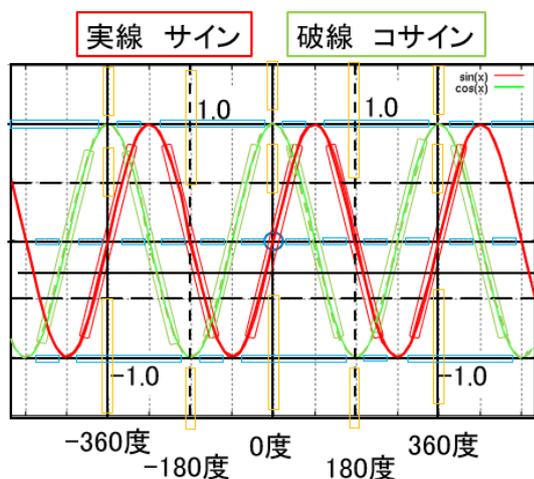


図3 数学のグラフを、触覚図とした例：配布する印刷紙やスクリーン上には、赤や緑の線は、見えないようにする。

3. 数式を表す方式

大学レベルの理工系の教科書では、必ず数式が使われる(eg.[8])。我々が採用するPWAでは、数式は、MathJaxで表示される。しかし、視覚障害者が、式を読み取り、レポートに組み込んだり、プログラムで使えるように、配慮する必要がある。例えば、2次方程式の解は、MathJaxでは、下のように、きれいに拡大・縮小できるScalable Vector Graphics (SVG)で表示される。MathJaxでは、この表示の裏に、Latex表示が隠されている。SVG式を、右クリックすると、それが現れ、音読できるようになっている。

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

数式 1

以下の数式表示方法が、使えるようにした。

- MathJax：アメリカ数学会が管理するJavaScriptのライブラリで、MathML、LaTeXで書かれた数式をブラウザで表示する。右クリックで、MathML、LaTeXなどの表示をみることができる。<https://www.mathjax.org/>
- LaTeX：レスリー・ランポートが、ダン・クヌースの組版ソフトTeX上にマクロパッケージを組み込んだもの。LATEX projectが管理して<https://www.latex-project.org/lppl/> 数式1は
$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$
 となる。
- MathML：XMLアプリケーションの一つで、数式を記述するためのマークアップ言語。単独でなく組み込み使われる。
- SAGEMath(Python)：ウィリアム・スタインが主導して始まった幅広く数学の処理をするソフト。旧名SAGE[9]。数式1は、

```
var('a,b,c,x,')
show(solve(a*x^2+b*x+c==0,x)[0])
```

となる。

3.1 教材「数学・物理の公式」の紹介

数式が、ASCIIコードで、一行内に表示され、音読することは、必修条件である。そして、障害者でも、数式をコピーし、自分が書くレポートやプログラムに、貼り付けが可能なことも、大切である。数学や物理の公式を、この方式で表現した例が、表1である。

3.2 SageMath 他のPythonアプリについて

SageMathは数学の処理を扱うソフトウェアである。扱う処理は計算機代数、組み合わせ、数値計算など多岐に及ぶ。工学的応用に加え基礎科学の研究もカバーする。開発目的は、有料で広く使われているMagma、Maple、Mathematica、MATLABの代替となるフリーかつオープンソースなソフトウェアの提供である[9]。開発は、ウィリアム・スタイン(William Stein)が主導して始まった。SageMathはPython

で書かれている。Python などでも使われる、JupyterNotebook など、ウェブブラウザ経由でも使えし、Windows、Linux、MAC など動くバイナリーがダウンロードできる。数式表示が、SVG と LaTeX の埋め込みを併用していることも便利である。また、多くのユーザが開発したパッケージを利用できる。多くの科学技術アプリが、データ交換用のインターフェースを用意していることも、普及の背景にある。

表 1 数学・物理の公式

名称	MathJax	LaTeX (\$を省く)	Python
三角形面積 b底, h 高	$\frac{b \times h}{2}$	$\frac{b \times h}{2}$	b*h/2
三角関数 加法 tangent	$\tan(a+b) = \frac{\tan(a)+\tan(b)}{1-\tan(a)\tan(b)}$	$\frac{\tan(a)+\tan(b)}{1-\tan(a)\tan(b)}$	$\frac{\tan(a)+\tan(b)}{(1-\tan(a))*\tan(b)}$
ケプラー 第 3 法則	$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M+m}{4\pi^2}$	$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M+m}{4\pi^2}$	$a**3/P**2 = G*(M+m)/(4*pi**2)$
円弧電流 が作る磁場	$B = \frac{\mu_0 i \theta}{2r}$	$B = \frac{\mu_0 i \theta}{2r}$	$B = (\mu_0 i \theta) / (2r)$
行列	$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$	[[a, b], [c, d]]
ベルヌイ の定理	$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = c$	$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{const}$	$P+(1/2)*\rho*v**2+\rho*g*h = \text{const}$

4. マクスウェルの方程式部分の紹介

フリーマン・ダイソン教授がエッセイ[10]の中で書いているように、マクスウェル方程式が「場」の理論として理解されるようになるのに、40 年近く掛かっている。その理由は、理論が「二層構造」をなしていることにあり、考えられる。これは、量子力学にも当てはまる。測定可能な電場や磁場を扱うが、数学的に美しい第二層と、数学的に美しいが、実測にかからない、第一層から成り立つ。広い学生層が理解できるよう、第一層は触覚に訴える微分幾何学で記述し、第二層はプログラムで扱う。

4.1 マクスウェル方程式の微分幾何学的な表示

国際単位系 (SI) に組み込まれている、MKSA 単位系でマクスウェルの方程式を書くと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

式 2

上から、電場に関するガウスの定理、磁場に関するガウスの定理、ファラデーの法則、アンペール・マクスウェルの法則。これらを、微分幾何学[11-15]で、座標と独立に表現する。すると 3 次元内の図形と触覚的に対応させ、理解できる。例えば E は平面群で 1-form、D は角柱群の 2-form となる。

微分幾何を使う、電磁気の教科書は、1970 年から出ている [11-15]。しかし大部分は、数学者や理論物理学者対象で、理解するのは、難しいかもしれない。

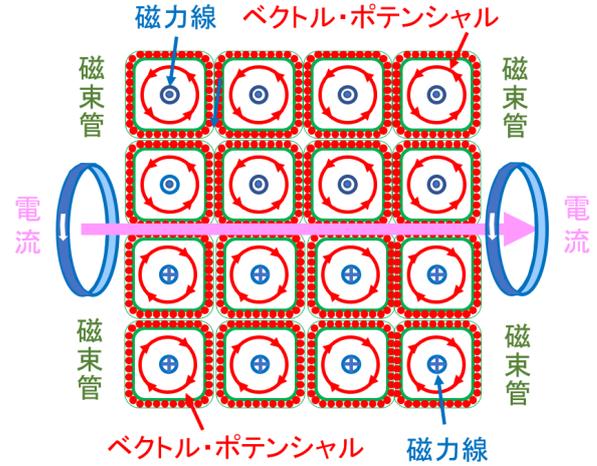


図 4 マクスウェルが考えたアンペールの法則。マクスウェルのスケッチ[16]を、3D 模型作製のため、単純化した。

ダイソン教授のメモによると、マクスウェルの理論が、理解しづらい理由は、他にもある。それは、ニュートンの、「触れて感じる事が出来る」物体が、「遠隔作用する」世界像を変えようとしたからとされる。マクスウェルの理論は、現在では、空間に電荷空間に電荷に作用を及ぼす「場」があり、物体は、その位置で「場」から作用を受けると解釈される。しかし当時の科学者は、マクスウェルを含めて、「場」を、図 4 に示したスケッチのように、力学的なシステムが、電荷と電流に作用を伝えていると、解釈しなかったようだ[16]。図 4 で、ピンク色で示した電流は、青色の矢の先端と十字の磁力線を生み、そこに巻き付く赤色のベクトル・ポテンシャルと共に、ファラデーが提唱した管の中に押し込められている。管と管の間には、茶色で示した小さな粒子が回転していると考えた。それらが電荷をリレーで伝えるとした。ベクトル・ポテンシャルは、ピンクで示す電流を境に、反対向きになっている。

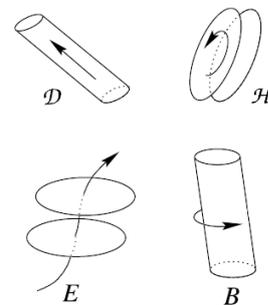


図 5 微分幾何 (3 次元空間) での、E, D, H, B のファラデー・シュハウテン図示法で示す。E: Twist のない 1-form、H: Twist がある 1-form、D: Twist のない 2-form、B: Twist がある 2-form で表される。F.W. Hehl and C. Laemmerzahl [17]より。

この解釈は、今では間違いです。しかし、座標系を指定しないで、マックスウェルの方程式を、微分幾何学で表すと、図4のイメージが、戻ってきます。電場は、図に示すように、電流に沿って並ぶ面の集合、すなわち 1-form で表されます。磁場は、管に閉じ込められた、2-form の磁束密度。そしてベクトル・ポテンシャルは、それに纏わりつく、コイルのようなものです。

磁束密度がゼロで、磁石が力を受けない空間でも、ベクトル・ポテンシャルは、存在できるのです。そして、ベクトル・ポテンシャルは、電子線の量子力学的な位相に、影響を与えます。外村彰博士は、アハラノフ・ボーム効果の実験で、ベクトルポテンシャルの存在を実証しました[18]。

教材には、図4、図5、の立体模型が含まれます。これらに触ることで、微分幾何学的な表示が理解できます。表2に、ベクトル解析で使われる用語と、微分幾何学で使われる用語を、整理しておきます。また図6には、微分幾何学で書いた、マックスウェルの方程式を示します

表2 ベクトルと Twist を含む微分幾何の形式
 From Kitano [13]

untwist/twist	rank	quantities	parity	polar/axial	scalar/vector
untwisted	0-form	ϕ	even	-	scalar
untwisted	1-form	A, E	odd	polar	vector
untwisted	2-form	B	even	axial	vector
twisted	1-form	H, M	even	axial	vector
twisted	2-form	D, P, J	odd	polar	vector
twisted	3-form	\mathcal{R}	even	-	scalar

$$\begin{aligned} \nabla \wedge B &= 0, \quad \nabla \wedge E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0, \\ \nabla \wedge D &= \mathcal{R}, \quad \nabla \wedge H - \frac{\partial D}{\partial t} = J, \\ D &= \epsilon_0 \mathcal{E} \cdot E + P, \quad H = \frac{1}{2} \mu_0^{-1} \mathcal{E} : B - M. \end{aligned}$$

図6 微分幾何学で書いたマックスウェル方程式
 From Kitano[13]

4.2 具体的にマックスウェル方程式を解く

微分幾何学で、直感的に、マックスウェル方程式を、「何とか理解した」と感じて、演習のためにつくられた問題以外、実用的な問題は、一つも解けないのです。そして大学や大学院を終えます。実社会に出て、計算機で、実用的な解法を教わることになります。その際、インクルーシブな配慮した、講義や演習があれば、幸運と考えてください。大抵の場合、特別な考慮がないまま、学ぶことになります。

ここで提示する教材は、将来職場で使うだろう技術を、数学的な表現とセットとして学ぶよう、配慮されています。普通の教科書では、無限空間の中の点電荷が生む電場、無限に伸びた電流が作る磁界しか学びません。この教材では、図7のように、立体にメッシュ (Gmsh[19]) を被せ、境界条件を課し、数値的(Elmer[20])で、解いてみせます。

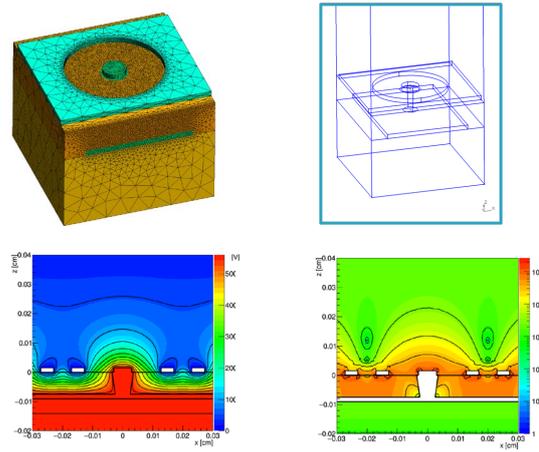


図7 メッシュ作製アプリ Gmsh と有限要素法 Elmer による、左上のドット回りの電位 (左下) と電場分布を解いた図[21]。

5 連立線形・非線形方程式の解法の紹介

行列式の理論は線形代数の一部分として教えられることが多いが、行列式の応用範囲は非常に広い、それ自身で独立した分野をなしている。広田良吾教授によると[22]、歴史的にも行列式の方が線形代数よりも早く、関孝和(1683年)により、発見されている。関孝和は「終結式」の研究をしていたのである。終結式とは何だろうか。

例えば、3次の連立代数方程式が

$$\begin{aligned} f(x) &= a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 = 0 \\ g(x) &= b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 = 0 \end{aligned} \tag{式2}$$

共通の解をもつかを、「定乗附量括」という方法で、議論している。これは、共通解を持つときにゼロとなる、終結式 (Resultant) を求めることになる[22][23]。

連立非線形方程式を、簡単な方程式群に分解する方法が、1965年に、ブルーノ・ブッフベルガーにより発表され、グレブナー基底と呼ばれている[24][25][26]。SageMath で、簡単に解を求めることができる。以下に2つの例を示す。

5.1 グレブナー基底の応用の紹介

多変数の連立多項式の解を求める方法: Win10に入れた、SageMath9.2[9]を利用して。無料で提供されます。

問: $x^2 - 2y^2 = 0$ と $x^2y - 3 = 0$ を同時に満たす x, y は?

```
sage: R.<x,y> = PolynomialRing(QQ, order='lex')
sage: ideal(x^2 - 2*y^2, x^2*y - 3).groebner_basis()
答: [x - 2/3*y^3, y^4 - 9/2]
```

問: $x+y, x^2-1$ と y^2-2x を同時に満たす x, y は?

```
sage: R.<x,y> = QQ[]
sage: ideal(x+y, x^2-1, y^2-2*x).groebner_basis()
答: [1] なし
```

5.2 グレブナー基底の他の応用の紹介

グレブナー基底は、計算機の発達とともに、多くの応用数理学に利用されています。各分野で、特化したプログラムも出回っています。その様子を知るには、開発者である

ブッフベルガー教授[24]や、日本でこの分野を先導してきた、日比教授[25]のレビューを見てほしい。整数計画、グラフの色つけ問題などの基礎となっていることが判る。

(1) グラフの3色分

平面の国別地図は、4色で色分けできるが、3色で色分けできる場合もある。図8のグラフが、どうなるか考える。頂点に対しては、 $x_i^3-1=0$ ($i=1-9$) と辺をなす全てのペアには、 $x_i^2+x_i*x_j+x_j^2$ (辺で繋がっている14のペア) に当てる。

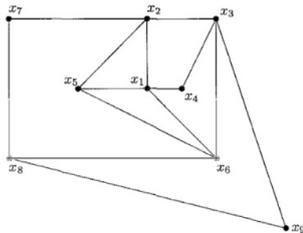


図8：3色問題のグラフの一例

上の例を SageMathV9,2 で解くための入力と、3色分け可能と出た結果を示す。グローバル基底は長いので省略する。

```
sage: R.<x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9> = QQ[]
sage: ideal(x1^3-1,x2^3-1,x3^3-1,x4^3-1,x5^3-1,x6^3-1,
x7^3-1,x8^3-1,x9^3-1,x1^2+x1*x2+x2^2,x1^2+x1*x3+x3^2,
x1^2+x1*x5+x5^2,x1^2+x1*x6+x6^2,x2^2+x2*x3+x3^2,
x2^2+x2*x5+x5^2,x2^2+x2*x7+x7^2,x3^2+x3*x4+x4^2,
x3^2+x3*x6+x6^2,x3^2+x3*x9+x9^2,x5^2+x5*x6+x6^2,
x6^2+x6*x8+x8^2,x7^2+x7*x8+x8^2,
x8^2+x8*x9+x9^2).groebner_basis()
答え：[1]
```

(2) 整数計画問題

応用問題の一つに、Packing Problem がある。A 社から 400kg、2 立米の荷物を、B 社から 500kg、3 立米の荷物を運ぶよう依頼される。A 社が単価 11 万円、B 社が単価 15 万円とする。トラックは重さ 3700kg、容積 20 立米まで積める。最大利益には、何個請け負えばよいか。式で表すと： $4A+5B<37, 2A+3B<20, A>0, B>0$ のもと、 $11A+15B$ を最大にする整数を探す。グレブナー基底を使う[26][27]。

```
sage: var('z1','z2','w1','w2','w3','w4')
sage: R.<z1,z2,w1,w2,w3,w4>=QQ[]
sage: ideal(z1^4*z2^2-w1,z1^5*z2^3-w2,z1-w3,z2-w4).
groebner_basis()
[w3^4*w4^2 - w1, w1^4*w4 - w2^3*w3, w2*w3^3*w4 - w1^2,
w2^2*w3^2 - w1^3, w1*w3*w4 - w2, z1 - w3, z2 - w4]
w1=>z1^4*z2^2, w2=>z1^5*z2^3, w3=>z1, w4=>z2 と置き
換えると、自明な解、 $z1^37*z2^20$  から、 $w1^4*w2^4*w3$  を
得る。答えは、A 社から 4 個、B 社から 4 個となる [26] [27]。
```

おわりに

この報告に興味をもつ、教官や学生が出てくることを願う。

参考文献

[1] サクセスネット (Science Accessibility Net) .
<https://www.sciaccess.net/jp/index.html>
 特定非営利活動法人サイエンス・アクセシビリティ・ネット
https://www.mext.go.jp/a_menu/ikusei/npo/npo-vol3/1316811.htm

[2] Calvert GA, Spence C, Stein BE, editors
 “The Handbook of Multisensory Processes” (Bradford Books)

[3] DAISY Consortium: <https://daisy.org/>
 Inclusive Publishing: “Rethinking Content for Inclusive Higher Education—A Two-Part Article from textBOX”
<https://inclusivepublishing.org/>

[4] W3C “Math Tools”: https://www.w3.org/wiki/Math_Tools

[5] Loo Kang Wee: “epub3 e-Book on Gravity”
 Open Educational Resources / Open Source Physics @ Singapore

[6] SINKA EasyTactix <https://www.easytactix.com/>

[7] Progressive Web Application (PWA)
https://en.wikipedia.org/wiki/Progressive_web_application

[8] F. J. Muriel and C. Galet: “Editing ePub3 for Blended Learning in Mathematics”, *Proceedings* 2018, 2, 1362
 (Multidisciplinary Digital Publishing Institute, MDPI)
www.mdpi.com/journal/proceedings
https://www.researchgate.net/publication/328614763_Editing_ePub3_for_Blended_Learning_in_Mathematics

[9] The Sage Group “Sage チュートリアル リリース 9,3”
<https://doc.sagemath.org/pdf/ja/tutorial/tutorial-jp.pdf>

[10] Freeman Dyson:
<https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/em/dyson.pdf>

[11] K.F.Warnick, R.H. Selfridge and D.V. Arnold, “Teaching electromagnetic field theory using differential forms”, *IEEE Transactions on education* 40, 53–68 (1997)

[12] C. W. Misner, K.S. Thorn, J.A.Wheeler “Gravitation” (Freeman, 1970)

[13] Masao Kitano “Reformulation of Electromagnetism with Differential Forms” https://cdn.intechopen.com/pdfs/33433/InTech-Reformulation_of_electromagnetism_with_differential_forms.pdf

[14] K. F. Warnick, and P. Russer: “Differential Forms and Electromagnetic Field Theory” *Progress In Electromagnetics Research, Vol. 148, 83{112, 2014*

[15] Jonathan Gratus: “A pictorial introduction to differential geometry, leading to Maxwell’s equations as three pictures”

[16] J.C. Maxwell, “On Physical Lines of Force,” *Phil. Mag.*, vol. 21, part II, opposite, p.488, 1861

[17] F.W. Hehl and C. Laemmerzahl “The Revised SI: Fundamental Constants, Basic Physics and Units” *Proceedings of the 670th W. H. Haereus Seminar, May 2018 (Annalen der Physik, 2019)*

[18] 外村彰：解説記事、電気通信学会誌 2000 年 12 月

[19] Gmsh <https://ja.wikipedia.org/wiki/Gmsh>
<https://gmsh.info/>

[20] Elmer FEM solver
https://en.wikipedia.org/wiki/Elmer_FEM_solver

[21] 京都大学理学研究科高田淳史に提供してもらいました。

[22] 広田良吾：“行列式とパフィアン (I)” *日本応用数学会誌* 第 14 巻 2004 年 3 月号

[23] 空間情報クラブ “算聖関孝和の数学”
<https://club.informatix.co.jp/?p=8020>

[24] B. Buchberger: “Gröbner Bases: A Short Introduction for Systems Theorists”
<https://www3.risc.jku.at/people/buchberg/papers/2001-02-19-A.pdf>

[25] 日比孝之：“グレブナー基底の 50 年” *日本応用数学会総合講演* 2009 年
<https://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~hohsugi/hibiGB20090930.pdf>

[26] 大杉英史: 第 55 回代数シンポジウム (2010 年)
<https://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~hohsugi/toric20yearB.pdf>

[27] D.A.Cox, J.Little, D.O’Shea “Using Algebraic Geometry” Springer