

特集 高等学校数学科における CBT の展望

国立教育政策研究所・教育課程研究センター・基礎研究部 総括研究官 安野史子

1. はじめに

近年、生活のあらゆる面でデジタル化が進む中、教育分野においても同様である。新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の感染拡大で、政府が推し進める GIGA スクール構想に拍車がかかり、海外に比べて遅れをとってきた教育現場でのデジタル化は、否応なしに前進することになった。通常の授業での電子黒板、1人1台端末、デジタル教科書が当たり前になっていく中、初等中等教育の現場では、高等学校の数学科での ICT 活用に苦慮しているという現実は一般的にはあまり知られていない。高等学校学習指導要領「第4節 数学」の中で、コンピュータという用語が、平成21年告示は4か所であったのに対し、平成30年告示は8か所に増え、「コンピュータなどの情報機器を用い…」ということが明示されている。現実には、(電子)黒板の進化版の双方向提示装置としての授業支援ツールが増えたという側面が強く、数学の指導や評価での活用場面は他教科よりも少ない。そもそも本当に必要なのか、という疑問を抱いている先生方も多い。その根底には、高等学校で扱う数学の内容は、既に前世紀に体系化され成熟しており、教科書や教材の質も高く、論理的思考力や問題解決能力を養うための、基本的な概念や原理・法則、技能が学べるように設計されているからであろう。また、大学入試問題の数学がコンピュータを活用することを前提としていないことも要因であろう。

このような状況下で、コンピュータを利用したテスト、すなわち CBT (Computer-Based Testing) は、国際学力調査や全米学力調査 (NAEP) 等で既に導入されている。わが国においても、全国規模の大学入学者選抜や学力調査での導入に向けた議論

がなされるようになった。そこで、本稿では筆者らが調査研究を行った経験をもとに、高等学校の数学科における CBT の展望について考えたい。

2. システムとデータの標準化

わが国で知られているシステムとしては、OECD による PISA 調査や文部科学省の CBT システム (MEXCBT) で使われている CBT プラットフォーム TAO が挙げられる。また、既に、高等学校で高等教育機関と同じ学習管理システム (Learning Management System; LMS) を導入している都道府県もあり、LMS に標準的に備わっている「小テスト (クイズ)」機能でも CBT ができる。いずれのシステムも Web プラットフォームが標準であるため、HTML に組み込めるものなら大体組み込めると考えてよい。したがって、問題の表現に関してはシステムの仕様由来する制限はほとんどないといってもよい。また、これらのシステムの多くは、国際標準規格である QTI 規格の問題構造を有している。具体的には、1) 問題の情報、2) 解答の情報、3) 採点情報、4) 問題本体部分 (説明、指示、インタラクション)、5) 処理情報の五つの部分から成る XML (Extensible Markup Language) 形式である。

システムには、問題を作成・編集していく機能が備わっているため、それを使って問題を蓄積していくことができる。問題をアイテムバンクにストックし、それらから問題を組み合わせることでテストとして配信する。一部のシステムでは、紙筆テストと同じように、問題作成をしながら、複数問題を組み込んでいくタイプもある。当然、期日、制限時間、出題順 (指定順、ランダム順)、正答や正誤・得点・フィードバックといった情報の開示

のタイミング等、さまざまな設定が可能である。

3. 数学問題の表現

紙筆における数学の試験は、問題は紙に印刷され、受験者は紙上に鉛筆で解答を記入する形式であるのに対し、CBTはコンピュータを使用し、問題はデジタル画面上に表示され、受験者はマウス、キーボード、電子ペンといった入力機器を使用して解答を入力する形式となる。つまり、従来型の紙筆テストの数学の問題は、紙で表現が可能なテキスト(含:数式)と画像(図,表,グラフ等)で構成されるが、これらの要素はデジタル表現であるCBTにおいても全て表現可能である。

数学の問題の特徴は、数式を有することである。Webにおける数式表現は、MathJaxを利用して、LaTeXやMathMLで記述された数式をWebブラウザ上に表示可能である。多くのCBTプラットフォームやLMSではMathJaxを採用している。では、問題作成者がどうやって入力していけばよいかである。ワープロソフトで分数の入力をした経験がない、あるいは入力方法を知らない社会人は意外に多い。数学の先生方はご存じのとおり、ワープロソフトでは、数式挿入機能により、用意されているパーツのボタンがツールバー上に示され、それを利用して入力する。それとほとんど同じように、CBT等のシステムには、問題作成・編集のオーサリングツールがあり、その中に数式エディタが具備されている。なお、システムによっては、TeXのソース入力に切り替え可能なものもある。数式以外にも、表、画像、動画、音声、リンク、H5P(HTML5Package)等を挿入することができる。それらを用いた新しい問題については、5に記載する。

4. 数学問題の解答形式

CBTでは、当然、自動採点が想定される。その際の解答形式としては、選択肢による解答、具体的には、ラジオボタンやチェックボックス、あるいはリストボックスを、片手でポチポチと、スマホ操作で解答することをイメージする方が多い

であろう。実際、システムによっては、モバイル端末と連携ができるアプリも既に存在している。

しかし、わが国の数学の試験は、多肢選択式を出来る限り避ける傾向があり、求答式あるいは記述(論述)式による出題と紙上に鉛筆で解答を記入する方式が長きに渡って採用されてきた。試験の大きな変革期は、1979年より導入されたマークシートを利用した機械式採点による共通第一次学力試験といえる。導入検討段階で、数学研究専門委員会から、マークシート方式(含:多肢選択式と穴埋め式の両方)での解答の採点に当たっては、前後の脈絡が判らないので、「正しく得られた正解であるか、まぐれ、あるいは要領のよい戦術で得られたものであるかの区別がつかない」という指摘があったことが国立大学協会の国立大学入試改善調査研究報告書附属報告書(1975, p.83)に記載されている。そして、数学のみが穴埋め式を採用したという歴史がある。それでも、数学は、記述式と比較して多肢選択式や穴埋め式では正しい評価ができにくいという意見が依然としてある。それから半世紀近くの時を経て、CBTという新たな変革期を迎え、数学もそれに対応していく必要がある。

現在、数学の(本来の意味での)記述式がCBTでは、自動採点までを視野に入れると、実現できていないことは既知のことであろう。すると、次に望まれる形式は、数式表現で答えさせる求答式(あるいは短答式)となる。問題作成・編集で用いるのと同じエディタで解答者が入力することも可能である。しかし、わが国の高校生がこれを使って入力することは現状ほぼ無理である。これを使うくらいなら、紙に書いた方がよいという不満が続出するであろう。そこで期待できる入力方法は、手書き数式認識による入力である。それには、端末のディスプレイがタッチパネル方式であるということが前提条件にはなる。現時点では、手書き数式認識入力は、既製システムでは標準化されておらず、開発されたプラグイン(plugin)あるいは独自開発したプラグインをシステムに組み込む必要がある。手書きの文字認識や数式認識

表1 数式手書き認識例

	数式の手書き	認識結果
例 1-1	$\frac{1}{2}a < x$	$\frac{1}{2}ai < x$
例 1-2	$\frac{1}{2}a < x$	$\frac{1}{2}a < x$
例 2-1	$\frac{1}{3}x^3 - \frac{7}{2}x^2 + 10x$	$\frac{1}{3}x^3 - \frac{\pi}{2}x^2 + 10x$
例 2-2	$\frac{1}{3}x^3 - \frac{7}{2}x^2 + 10x$	$\frac{1}{3}x^3 - \frac{7}{2}x^2 + 10x$

そのものは、既に実用化されて、特定のアプリや端末で利用できるようになってきているので、入力経験がある人も多いであろう。それらと同じように、電子ペンによるストローク（筆跡）のデジタルインクデータ（JSON データ）を、認識エンジンで認識させ、その結果データを受け取るという方法である。筆者らの開発研究において、独自開発したプラグインにより、CBT における手書き数式認識入力による数式解答入力を試みた。高校生を対象に行ったモニター調査では、電子ペンを用いた手書きであるため紙上への記入と同じ感覚でストレスなく入力ができ、認識精度も高く好評であった。また、解答者自身が、認識結果を確認し、誤認識であれば再度書き直すという手順をとった。表1は、高校生が書いた筆跡と認識結果の実例である。例1-1では、 a が ai に認識され、例1-2に書き直し、例2-1では、 7 が π と認識され、例2-2に書き直している。解答者によっては、なかなか認識されない書き方をする場合もあるのではという懸念もあるが、手書きでも採点者が読めない筆跡も当然ある。筆者らの調査では、ほとんどが、1、2回で正しく認識されている。このことから鑑みても、手書き数式認識入力は、非常に有効な入力方法であると考えられる。手書きのテキストに関しては、日本語のみならず多言語において、その認識率は数式以上に精度が高く、既に多くの場面で実用化されている。しかし、数式とテキストが混在している解答入力は、文字認識と数式認識の認識モデルが異なり、現時点では研究はなされているものの実用化までには至っていない。

数学の記述式の解答入力に関しては、タブレッ

ト端末と電子ペンの進展により、デジタルインクでの入力とデータの蓄積そのものは既に可能である。しかし、記述式の解答自体が、自由度の高いレイアウトでの数式とテキストに加え図も混在していることから、現時点では書き直しのデータログが記録される以外には、アドバンテージが少ない。しかし、解答類型の自動分類、自動採点といった研究が進み、今後、人を介さない記述の採点が少しずつ可能となっていくであろう。

5. 数学のデジタル問題

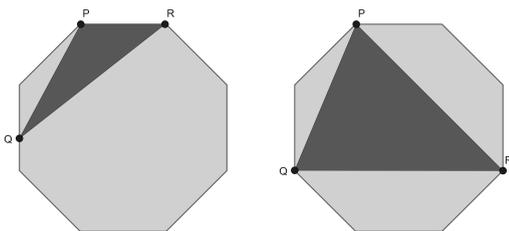
問題がデジタル配信になると、音声、動画、アニメーションといったマルチメディアを用いた問題、シミュレーション問題やインタラクティブな問題、さまざまなデジタルツールを組み込んだ新しい問題への可能性が拓ける。例えば、理科での動画を用いた問題、英語での音声を用いたりリスニング、スピーキング問題等は、容易に想像がつくであろうが、数学の内容で、デジタル配信に特化した問題はどのようなものが考えられるであろうか。紙筆による問題は静的であり、紙上に図形やグラフが印刷されていて、受験者は紙上で解決する必要があるが、CBTの問題はインタラクティブとすることができ、グラフや図形を操作することも可能である。このことは、CBTでの数学の問題の大きな特徴ともいえる。筆者らは、数年間この課題に取り組み、PISAの科学的リテラシーでのコンピュータによる評価に関する報告書を参考に、数学のCBTならではの問題を以下の(1)～(4)に分類できることを示した。

- (1) **現象や変化の観察**：変数を変化させながらグラフや図形の変化を観察し、解答する問題が多く該当する。
- (2) **実時間や肉眼で見るのが難しい現象や変化**：デジタル特性をうまく利用するものが含まれ、グラフの拡大・縮小を伴うものがその代表である。縮小してグラフ全体の概形を捉え、拡大して値を正確に読み取る、といった往還が可能となる。
- (3) **モデル化**：数学的モデリングの問題が該当し、内容は多岐にわたる。

(4) 試行の繰り返し：試行の繰り返しを行いながら問題解決していく問題が該当する。

動的な図形やグラフがなくても、問題として成立するものもある。しかし、高難度で特定の層の評価でしか使えなかった問題が、動的な図形やグラフを付与することによって、「算数・数学の問題発見・解決の過程」の一部分を補助したり、プロセスに分解した評価が可能となったりし、同一の問題でもより広範な評価のために使える。例えば、東工大 2007 年後期第 3 問は、一辺の長さが 1 の正八角形の周上を 3 点 P, Q, R が動くときの $\triangle PQR$ の面積に関する問題であった。この問題の図を図 1 に示すような動的で、 $\triangle PQR$ のおよその面積をインタラクティブに示すアプリにすることが考えられる。

また、従来の紙筆による問題では、まず、特定の場合について求めさせ、一般化させるというスタイルの設問構成がよく見られるが、デジタル問題では、まず、図形やグラフを動かして、大まかな状況を把握し、一般化へというプロセスに変えて出題ができる。また、確率の問題は、コンピュータで試行を繰り返すことができるため、ある条件の確率を求める問題の逆問題、すなわち試行結果から設定条件を求めさせるといった出題ができる。これらは、高等学校学習指導要領に示されている「コンピュータなどの情報機器を用いて…多面的に考察すること」「コンピュータなどの情報機器を用いて…統合的・発展的に考察すること」に対する評価でもあるといえる。



△PQRの面積 = 0.65 △PQRの面積 = 2.06

図 1 問題に付与するアプリの例

角 θ	正弦 $\sin(\theta)$	余弦 $\cos(\theta)$	正接 $\tan(\theta)$
15°	0.2588	0.9659	0.2679



図 2 ツールの例(三角関数の表)

6. CBT 利点を活かす

CBT の利点を以下の (1) ~ (5) に絞って述べる。

(1) ツールの配備：紙媒体では、1 ページ丸々紙幅が割かれていた三角関数の表(三角比の表)、常用対数表、及び正規分布表は、必要に応じて、図 2 に示すような形で組み込み可能である。また、電卓も、使用を前提とした設問のみに配備できる。

(2) 時間制御：CBT は、小問ごと、大問ごと、あるいは複数の問題セットごとに、厳格な制限時間の設定が可能である。ただし、わが国の高校生は、複数の問題セットに対して設けられた制限時間に対するタイムマネジメントのスキルは身につけているが、小問あるいは大問ごとに時間をコントロールされることは現状不得手である。

(3) 出題順：同じ問題セットから、受験者ごとに 出題順を変えたり、問題セットからランダムに指定した問題数を出題したりすることができる。また、他の問題の正誤によって、その後出題する問題を変えることもできる。

(4) ログの蓄積：タイムスタンプも併せて、解答の状況を記録することが可能である。紙筆では、消しゴムで消した箇所は判らないが、デジタル解答であると、消去や変更した記録も残せる。

(5) 自動採点：前述の通り、答えのみは、ほぼ自動採点可能である。特に、短答式の数式に対しても、複数の正答や準正答を設定できる。また、表現が異なる数値数式の同一判定ができるプラグインは、利便性が高い。

最後に、高等学校の数学においては、CBT が紙筆テストに取って代わるものではなく、それぞれの長所を活かして、評価の場面によって使い分けていく必要があるであろう。なお、紙幅の都合上、筆者らが開発した問題の紹介ができなかったが、以下の参考文献に、問題事例を掲載している。

参考文献

安野史子 編著：「先生のための CBT 問題事例 & 作成ガイドブック 高等学校 数学・理科」, 学事出版, 176pp, 2023.

