

高等学校数学の内容を中心とした CBT の検討

国立教育政策研究所・教育課程研究センター・基礎研究部 安野 史子

Fumiko Yasuno, Department for Curriculum Research, Curriculum Research Center,
National Institute for Educational Policy Research

1 はじめに

筆者らは、Computer-Based Testing(CBT)の総合的研究の一環として、コンピュータの特性を活かした教科・科目ベースの問題を試作し、CBTで測れる能力を明確にすることを目的として研究を行ってきた[7, 8, 9, 10, 11, 17]。また、開発した問題を用いて、高校生等を対象としたパイロット調査を実施し、開発初期段階は、解答用紙による解答方式を採用し、問題や解答形式の検討を行った[7, 8, 9, 10]。その結果を受けて改良を重ね、一部の問題(解答形式が選択肢式と短答式の設問)については、タブレット端末やPCに解答を入力するシステムの開発を試み[6, 11]、モニター調査[12, 13, 14, 15]の実施を重ねた。本稿では、高等学校数学の内容を中心としたCBTの有効性と課題を探る。

2 CBTのシステム

最初から既製システムを活用することを前提にデジタル配信による問題の開発を行うと、そのシステムの仕様によって、問題の表現や解答形式が制限を受けることが考えられる。そのため、筆者らは、まずは独自開発[7]、あるいは既存のアプリケーションの組み合わせによる開発[12, 13]を選択した。その開発過程を経て、既存システムへの移行へと進んだ。現在、既製システムでCBTが容易に実施できるシステムは、ルクセンブルグで開発されたTAO (Testing Assisté par Ordinateur; Computer Based Testのフランス語の頭文字)のようなCBT専用のプラットフォームを用いるか、一般的な学習管理システム(Learning Management System; LMS)に備わっている「小テスト(クイズ)」機能を用いるかであろう。いずれのシステムも、Webプラットフォームが標準で、オープンソースのもの多くある。奇しくも、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染拡大を契機に、日本国内でLMSが急速に認知されるようになった。LMSの多くは小テスト機能を具備していて、CBTへの敷居はかなり低くなった。また、選択式や短答式のような客観性の高い問題は、採点から簡単な分析まで自動化されているため、特に、高等教育機関においてその簡便さを実感できた教員も多くなった。既製システムはWebプラットフォームであることから、HTMLに組み込めるものなら大体組み込めるということが前提となり、問題の表現に関してはシステム仕様に由来する制限はほとんどないといえる。むしろ制限を受けるのは解答形式である。このことは、後述する。

3 数学のデジタル問題開発

はじめに、CBTでの数学の試験は、これまでのPaper-Based Testing(PBT)による試験とどのような違いがあるのかについて整理する。まず、媒体と形式について考えたい。PBT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。それに対し、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、PBTでの数学問題は、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、デジタル表現であるCBTにおいても、これらの要素すべて表現可能である。特に、数学で多く用いられる数式は、多くのLMSやCBTのシステムでは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。デジタルの場合、紙と比べてレイアウト構成に制限があるが、全体を画像で表現すれば、デジタル画面上に紙での表現と同じものを表示することが可能である。

逆に、CBTでの数学の問題は、PBTよりも可能性が広がる。PISA等の国際調査においても、問題がデジタル配信になることにより、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、様々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指摘されている [5]。

まず、数学で用いるツールについてみると、例えば、PBTだと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1に示すような形で組み込むことが可能となる。また、電卓についても、CBTでは使用を前提とした場面に配備できる。

PBTの問題は静的であり、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可能であり、グラフや図形を操作することもできる。それらの操作は、シミュレーションやドラッグアンドドロップなどの要素を含めることが可能である。このことは、CBTでの問題の大きな特徴ともいえる。

筆者らは、これまで高等学校学習指導要領 [2, 3] の数学の科目で、履修率が比較的高い数学 I, II, A, B の4科目の内容で、デジタルに特化したCBTならではの問題を数十題開発し、紹介してきた [7, 8, 9, 10, 11, 17]。これら開発した数学のデジタル問題の多

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




図 1: 三角関数の表

くは、紙では表現できない動きがある(あるいは動かせる)図形や関数グラフを具備している。これらの問題の中には、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。実際にモニター調査で解答した高校生からは、数学での想像する力を発揮できなくなるという意見もあった。しかし、問題は様々で、その力までも含めた評価をするのであればなくても構わないが、その代わり難度が上がり、特定の層のみの評価でしか使えなくなる。動的な図形やグラフを付与することによって、高等学校学習指導要領(平成30年告示)解説 数学編 理数編に示されている「算数・数学の学習過程のイメージ図」[4, p.26]の算数・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り、より広範な評価のために使用することができるようになる。また、PBTでは、特定の場合について求めさせて、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、CBTによるデジタル問題では、その類とは異なり、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。さらには、高等学校学習指導要領[3]の内容に、「コンピュータなどの情報機器を用いてグラフをかくなどし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図形を表すなどして、図形の性質や作図について統合的・発展的に考察すること」といったことが多く明記されているが、それに対する評価でもあるともいえる。

次に、開発した問題がどういった問題であるかについて考えていきたい。OECDのPISAにおけるComputer-based Assessment of Science(CBAS)の報告書の中に、以下のような記述がある。

「コンピュータベース評価は、リアルタイムで観察することが難しい科学の現象をスローモーションやスピードアップなどで再現、肉眼では見えない科学現象のモデル化(気体の分子の動きなど)、限られた試験時間内で繰り返し試行する機会を生徒に提供、本来なら危険であったり厄介であったりする実験を仮想実験室で安全に実施するために特に有用である」[5, p.13].

これを基に、筆者らは開発した数学問題を以下の四つに大別した。

- (1) **現象や変化の観察**. 例: 定数の変化とグラフの挙動(二次関数).
- (2) **実時間や肉眼で見るのが難しい現象や変化**. 例: 4次式の因数分解(図形と計量), 対数関数と指数関数のグラフ(対数関数・指数関数).
- (3) **モデル化**. 例: 線形計画法(図形と方程式), 葉の成分の体内残量(数列).
- (4) **試行の繰り返し**. 例: 正八角形に内接する三角形の面積(図形と計量), 偽物の判別(データの分析), 正十二角形の頂点からなる三角形(場合の数), 玉の取り出し(確率).

(1)には、変数を変化させてグラフや図形の変化を観察する問題が多く該当する。(2)は、デジタルの特性をうまく利用するものが含まれ、グラフの拡大・縮小を伴うものがこのカテゴリーの代表的な問題である。グラフを縮小して全体の概形を捉え、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。一例を挙げると、図2は、対数関数・指数関数に関する問題での動的グラフである。 $f(x) = \log_a x$, $g(x) = \frac{a^x}{2}$ のグラフについて、

自由に拡大・縮小をしたり，表示領域を変えたりすることができる．なお， a の値は右下に配備されたスライダーで変化させることができる．例えば， $a = 2.2$ のとき，不等式 $f(x) \geq g(x)$ を満たす整数値の個数をこれを用いて求めるには，初期状態 $a = 5$ (左上) から， $a = 2.2$ に設定 (右上) し，グラフを拡大して $f(x)$ と $g(x)$ の2交点の座標を読み取る (左下，右下) という手順を想定している．最終的には， $a = \sqrt{2}$ のとき，等式 $f(x) = g(x)$ を満たす整数値が少なくとも2個存在することを示す設問となっている．(3) には，数学的モデリングの問題が該当し，内容は多岐にわたる．最後の(4)は，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．図3に示すアプリケーションを用いる問題を例示する．問題文は，「赤玉，緑玉，青玉合わせて12個が一つの袋に入っている．(このアプリケーションでは) この袋の中から2個の玉を同時に取り出す試行を続けて100回ずつ繰り返し行うことができる．袋の中に入っている赤玉，緑玉，青玉の

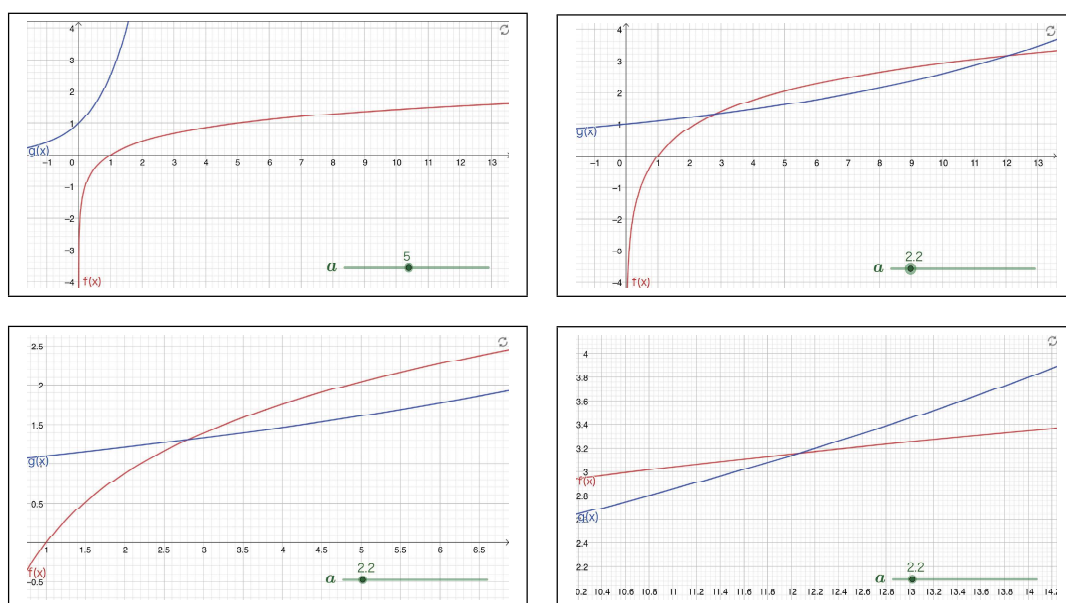


図 2: 対数関数と指数関数のグラフ

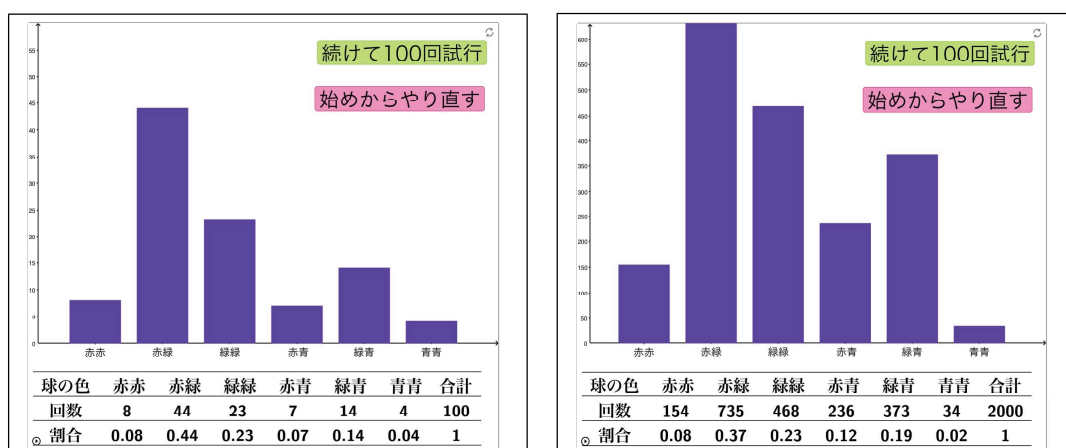


図 3: 玉の取り出し

個数はそれぞれ何個か求めよ。」である。これまで、「場合の数と確率」で取り扱ってきた既存のPBTの問題は、袋の中に入っている赤玉、緑玉、青玉のそれぞれの個数が示されていて、特定の色の組合せが出る確率を求めさせる設問が典型的な問題である。このようなアプリケーションを用いることで、PBTでの典型的な問題の逆問題が出題可能となる。図3の左図が初期状態で、100回の試行を何度でもやり直したり、100回試行を継続的に繰り返したりすることが可能である。図3の右図が試行を2000回続けて行った結果である。既存のPBTの問題は、論理的な確率に終始し、頻度確率を扱うことは皆無である。しかし、コンピュータにより、短時間でシミュレーション可能となるため、CBTではこのようなタイプの問題も出題可能となる。

4 数学問題の解答形式

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。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1次学力試験においても、検討段階で、数学研究専門委員会から、マークシート方式(多肢選択式と穴埋め式の両方を含む)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のか、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」[1]ということが指摘されていたが、最終的には、数学では穴埋め式が採用され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。

一方、CBT専用システム、LMSの「小テスト(クイズ)」機能のいずれにおいても、国際標準規格であるQTI規格に準拠した問題タイプが標準となっている。正誤、(多肢)選択、並び替え、組合せ、穴埋め、(テキスト入力による)記述式といったように、わが国の数学の試験問題ではそのままでは利用できない問題のタイプがほとんどである。数学では、(多肢)選択式は、それほど多くの利用は見込めないが、大学入学共通テストでは、大学入試センター試験よりも多用されている傾向が見られる。CBTにおいて(多肢)選択式を出題する場合、単一選択式の設問は、ラジオボタン、あるいはプルダウンリストによる解答入力となり、複数選択式の設問は、チェックボックスによる解答入力となる。ここで、いくつか注意が必要である。まず、プルダウンリストの内容は、テキストに限定され、数式表現は使えない。また、筆者らが行ったモニター調査において、プルダウンリストは、見直しの際に、いちいちプルダウンリストを開かないと選択肢の内容が確認できない、さらには確認の際に、誤って別の選択肢を選択してしまうという声があった。数学でのプルダウンリストは、数値の入力に対して、範囲が限定される整数値等に対しては有効である。

実際には、数学では数式表現で答えさせる問題が多く、システム的には、数式エディタを具備していて、それを利用すれば数式入力が可能である。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。筆者らの開発研究においては、手書き数式認識による解答入力を試みた[6, 13, 15]。既製システムでは、標準化されておらず、プラグイン(plugin)を独自開発し、システムに組み込んだ。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ため、認識エンジンの精度に完全に依存するものではない。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り、それに対する分析も行った [15] が、何度も書き直しているという事例は皆無に近く、ほとんどが、1,2回で正しく認識されている。PBTにおいて、手書きでも読めない解答も当然あることから鑑みても、手書き数式認識入力は、解答者の入力ストレスがなく、非常に有効な入力方法であると思われる。手書き文字認識に関しては、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、すでに多くの場面で実用化されている。しかしながら、数学の求答式あるいは短答式の設問で、例えば、「 $x = -3$ のとき極大値 $-\frac{a^3}{3} - a^2 + 3a + 3$ 」といったテキストと数式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。最後に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、電子ペンによるストロークのデジタルインクデータ (JSON データ) の蓄積そのものは容易になってきている。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のみならず図も混在していることから、確度の高い認識は困難である。したがって、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、コストやリスクを考慮すると、数学の記述式はPBTの紙上への記入の方が優位であるといえる。

5 CBTの利点

高等学校の数学の内容を中心としたCBTにおける、問題の可能性については第3節で、解答入力の現状については第4節で述べてきた。では、わざわざシステム構築や実用端末といった経費をかけてまでコンピュータでテストを行う利点は何であろうか。ここでは、時間制御、適応型 (adaptive)、自動採点といった三つの点について取り上げる。

まず、時間制御について考える。PBTでは制限時間が設定されていることが多いが、それは複数の問題の組合せによる試験に対して設けられていることがほとんどである。それに対して、小問ごと、大問ごと、あるいは複数の問題セットごとに、CBTでは厳格な制限時間を設定することができる。したがって、受験者は問題を解決する際にPBTと異なるタイムマネジメントのスキルが必要となる。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付いているが、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。

次に、適応型についてである。PBTでは、複数の問題を組合せて、出題側が問題の順番を決めて冊子化するが、解答者は任意順に解答することが可能であることが多い。CBTでは、PBTと同じような実施も可能であるが、受験者ごとにランダムに問題を出題したり、順番を変えたりすることが可能である。また、受験者の解答結果によって、その後の問題を変えることも可能である。e-ラーニング的利用であると、個々の学習進捗や解答の正誤情報などの蓄積・分析によって、受験者に合った問題を提供可能である。

最後の自動採点については、現状できることとできないことがわりとはっきりしている。QTI規格に準拠している、正誤、(多肢)選択、並び替え、組合せ、穴埋めといった

客観性の高い設問タイプは、自動採点可能である。短答式の数式に対しても、複数の正答や準正答を設定したり、数式処理をかませれば、表現が異なる数値数式の同一判定も可能である。しかし、数学のいわゆる記述式といわれるタイプは、実施前にきめ細やかな採点規準さえも設定しにくく、採点者の採点スキルに依存する側面が高い。

これら3点すべては、評価の場面によって使い分けていく必要があると考えられる。

6 今後の課題

一般的に、CBTにおける解答入力の問題点は、テキスト入力において、各端末の学習機能、推測変換・連想変換機能によって、単純な知識を問う際に注意が必要であるということが挙げられるが、数学はその心配があまりない。むしろ、初等中等教育において、数式入力をどのようにさせていくかが問題である。筆者らの実践研究では、手書き数式認識入力の有効性を検証したが、まだ、汎用的な段階にまでには到達していない。また、第4節で述べたように、テキストと数式の混在型については不十分である。

採点の問題は、自動化可能なものと、手動によるものを、使い分ける必要がある。自動化までに至らなくても、解答方略等による解答類型分類の自動化は、人を介しての採点に有益と考えられる。また、CBTの特徴として、様々なログを取得し蓄積することが可能である。しかし、これらのログを数学の評価においてどのように活用できるかについての研究は不十分である。例えば、アプリケーションの操作ログ、解答の書き換えログ等が比較的容易に取得できる。後者について筆者らは、[16]において時系列解答データログ分析を行ったが、可視化のみで、評価に活かすところまでには至っていない。学習者評価への活用あるいは指導改善のための活用について、検証が必要である。

最後に、高等学校の数学においては、CBTがPBT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ことを付記する。

謝辞

本研究はJSPS科研費17H00822, 22H00085の助成を受けている。

参考文献

- [1] 国立大学協会 入試改善調査委員会：「国立大学入試改善調査報告書 附属報告書」，1975.
- [2] 文部科学省：「高等学校学習指導要領（平成21年告示）」，2010.
- [3] 文部科学省：「高等学校学習指導要領（平成30年告示）」，2019.
- [4] 文部科学省：「高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説 数学編 理数編」，学校図書，2019.
- [5] OECD：PISA Computer-based Assessment of Student Skills in Science. OECD-Publishing, 2010.

- [6] 矢嶋遼, 安野史子, 中川正樹, 清水郁子:「オンライン LMS のための手書き入力 CBT の設計と実装」, EICE technical report, ET2021-45(2022-01), pp.13–18, 2022.
- [7] 安野史子:「高大接続を視野に入れたタブレットを用いる評価問題の試作 —映像や動的オブジェクトを含む問題—」, 『大学入試研究ジャーナル』 Vol. 27, pp.71–79, 2017.
- [8] 安野史子, 西村圭一, 根上生也, 浪川幸彦, 三宅正武:「高大接続に資する動的オブジェクトを含む数学の評価問題の開発」, 京都大学数理解析研究所 講究録 No.2022, 「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」, pp.177–184, 2017.
- [9] 安野史子:「高大接続を視野に入れたタブレットを用いる評価問題の試作 (2) —映像や動的オブジェクトを含む問題—」, 『大学入試研究ジャーナル』 Vol. 28, pp.155–162, 2018.
- [10] 安野史子, 西村圭一, 根上生也, 祖慶良謙, 高橋広明, 浪川幸彦, 伊藤仁一, 三宅正武:「動的オブジェクトを有する CBT 数学問題の開発」, 日本数学教育学会誌, 第 100 巻 第 5 号, 『数学教育』 72-3, pp.2–14, 2018.
- [11] Yasuno,F., Nishimura,K., Negami,S. and Namikawa,Y. : Development of Mathematics Items with Dynamic Objects for Computer-Based Testing Using Tablet PC, International Journal for Technology in Mathematics Education, 26(3), 132–137, 2019.
- [12] 安野史子:「電子書籍を利用したタブレット端末による CBT の数式入力システムの検討」, 京都大学数理解析研究所 講究録 No.2142, 「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」, pp.71–78, 2019.
- [13] 安野史子:「電子書籍を利用したタブレット端末による CBT の数式入力システムの検討—手書き認識入力を中心に—」, 『大学入試研究ジャーナル』 Vol. 30, pp.221–226, 2020.
- [14] 安野史子:「タブレット端末利用型 CBT の開発とモニター調査による評価」, 『大学入試研究ジャーナル』 Vol. 31, pp.146–153, 2021.
- [15] 安野史子:「タブレット端末利用型 CBT における解答入力方法の検討」, 京都大学数理解析研究所 講究録 No.2178, 「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」, pp.21–30, 2021.
- [16] 安野史子:「タブレット端末利用型 CBT による時系列解答データログ分析の一考察」, 『大学入試研究ジャーナル』 Vol. 32, pp.29–34, 2022.
- [17] 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.