

電子コンパスの開発とそれを用いた作図調査

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
 株式会社ワコム 朝倉 僚
 Tomo Asakura, Wacom Co., Ltd.
 株式会社ワコム 宮澤 寛
 Hiroshi Miyazawa, Wacom Co., Ltd.
 株式会社ワコム 堀江 利彦
 Toshihiko Horie, Wacom Co., Ltd.
 株式会社ワコム 土田 洋一
 Yoichi Tsuchida, Wacom Co., Ltd.
 株式会社ワコム 伊藤 雅充
 Masamitsu Ito, Wacom Co., Ltd.
 株式会社ワコム 山本 高廣
 Takahiro Yamamoto, Wacom Co., Ltd.
 東京農工大学 中川 正樹
 Masaki Nakagawa, Tokyo University of Agriculture and Technology

1 はじめに

本研究は、前報[11]に引き続き、電子コンパスの開発および改良を行い、それを数学教育における作図活動に活用することを提案するものである。わが国の算数・数学では、現行の学習指導要領[6, 8]において、小学校第3学年からコンパスの利用が明記され、中学校段階では定規とコンパスを用いた本格的な作図が行われる。一方で、デジタル技術の進展、普及に伴い、デジタル教科書の整備やGIGA(Global and Innovation Gateway for All)スクール構想による1人1台端末の導入がなされた。しかし、現行のデジタル教科書に搭載されているコンパスツールは操作性に課題があり、また、動的幾何学ソフトウェア(DGS)におけるコンパスツールについても改善の余地が残されている。そこで本研究では、電子ペンおよび電子情報を取得できる針を装備した電子コンパスを試作し、それを用いた作図課題調査を実施し、その結果の分析についても報告する。

2 研究の背景と目的

2.1 現行の学習指導要領の下での作図の取り扱い

わが国の算数・数学教育における作図は、現行（平成29年告示）の学習指導要領の下で、小学校〔第3学年〕の「内容の取り扱い」の(6)において、「内容の「B図形」の

(1)の基本的な図形については、定規、コンパスなどを用いて、図形をかいたり…」[6, p.75]と、コンパスの利用がはじめて明記される．内容「B図形」の(1)ア(ウ)の解説では、「コンパスは単に円をかくだけでなく、等しい長さを測り取ったり移したりすることができる道具で、長さを比べたりする場面などでも活用できる」[7, p.162]というように、道具の特徴が明確に示されている．さらに、[第5学年]では、「正多角形の学習では「正多角形は円に内接すること」を基に定規とコンパスなどを用いてかくことを指導する」[7, p.331]となっている．さらに、中学校へ進むと、[第1学年]の内容の「B図形」の(1)ア(ア)において、「角の二等分線、線分の垂直二等分線、垂線などの基本的な作図の方法を理解すること」[8, p.67]として示され、小学校算数科では物差しや分度器も使って作図指導が行われていたが、中学校数学科では物差しや分度器を用いずに定規とコンパスによる作図の指導が本格化する．学習指導要領解説には、「図をかくという操作は、図形に対する興味や関心を引き起こし、図形の性質や関係を直観的に捉え、その論理的な考察を促すという意義をもつ。」[9, p.75]というように、図をかくという技能の意義についての言及がなされている．続けて、「数学において作図とは、定規とコンパスだけを用いて、一定の条件を満たす図形をつくることを意味し、定規は2点を通る直線をひく道具として使い、コンパスは円をかいたり長さを写し取ったりする道具として使う」[9, p.75]と明記されている．

2.2 幾何ソフトウェアの出現

教育で用いられる幾何ソフトウェアに目を向けてみると、1980年代に、Geometric Supposerが開発され、その後、対話式幾何学ソフトウェア (Interactive Geometry Software) として、ヨーロッパでCabri Geometly(1986-)、Cinderella(1998-)が出現し、これらは現在、動的幾何学ソフトウェア (Dynamic Geometry Software: DGS) ともよばれるようになり、教育現場ではGeoGebra(2001-)などが国内外で広く利用されている．

それらDGSは、ツールとしてコンパスを有しているものも多く、半径を与える線分を指定するか、中心と周上の2点を指定すると円が描かれる．道具としては同じ機能であるが、円弧ではなく円が一気に描かれるものが主流である．

2.3 高等教育で巻き起こった議論

定規とコンパスの作図とDGSとの関係と類似した問題が、すでに高等教育においてあった．コンピュータ支援設計 3D-CAD(computer-aided design)の出現により、2000年頃、高等教育の工学系において、「設計にとって図学は必要か？」という議論が巻き起こった[12]．その後、工学系の多くでは「図学」から「図形科学」「CAD教育」へ移行し、一部、「図学」が継続されている場合においても、内容は「投影法」「透視図」「立体構成」「空間認識」など、古典的な図学の体系をベースに、デジタル技術を組み合わせた教育に進化している．

2.4 作図におけるデジタル技術の活用

学校教育において情報技術の活用が推奨され、政府が推し進める GIGA スクール構想により、1人1台端末が実現し、デジタル教科書の整備も進んだ。現行の学習指導要領からは、学習者用デジタル教科書が制度化され、これまでの紙の教科書を主たる教材として使用しながら、必要に応じて学習者用デジタル教科書を併用することができることとなった。算数・数学のデジタル教科書には、ツールとしてコンパスが備わっているが、実物のコンパスの動きを模しているが2次元であることから、デジタル特有の移動、回転操作により、実物のコンパスよりも操作性に課題があると言わざるを得ない。

こうした状況をふまえ、初等教育段階の算数・数学における作図学習のあり方について再検討していく時期かと考えられる。現在は、従来の定規とコンパスによる作図と、DGS による作図の双方を適切に位置づけ、その調和を図ることが求められている。

本研究では、アナログ技法とデジタル技法の二極化を超える第三のアプローチとして、両者を融合した電子コンパスを提案する。提案する電子コンパスは、手書き情報をデジタルデータとして扱える利点と実物のコンパスに近い操作感の双方を兼ね備えており、作図学習過程の把握や指導支援に新たな可能性を開くものである。

3 電子コンパス

3.1 電子コンパスの要件

筆者らは、[10, 11] に示したように、手書き解答の自動採点を目標として、学習ドリルのデジタル化と筆記解答の収集を行ってきている [1, 2]。オフラインによるスキニングデータよりも電子ペンを用いて筆記したストロークデータの方がより多くの情報量を得られるため、手書きの解答データは、電子ペーパーにおける電子ペン入力 [3] を採用している。一連の研究の中に、コンパスを使った作図問題が含まれており、筆者らは、図1の左図に示すように、一般的なコンパスの脚部の筆記側に電子ペン、針側に可動域がある吸盤を装着したものでデータ収集を行った [4, 5]。これは、実物のコンパスを利用した作図と極めて近い環境であり、さらにデジタルの特徴である描画の手順が記録されるという利点がある。しかし、これは、コンパスの針の位置情報のみならず、コンパスの使用の有無の電子的記録も得られていない。紙筆による作図問題の採点では、必要に応じて、コンパスの針による用紙にできた穴の確認が行われたりしている。測長のために用いた場合も考慮すると、コンパスの使用に関する電子情報のみならず、コンパスの針の位置情報も取得した方が、データをさまざまな用途に利用できると考えられる。そこで、コンパスの針の電子的位置情報も、取得できることを要件としている。

3.2 電子コンパスの試作

コンパスの針の位置情報を取得するために、初期に試作した電子コンパスは、図1の中図に示すように、筆記側は電子ペン、針側は電子ペンを改良した電子情報が取得でき

る針を装着したものである。前報 [11] のとおり，電子コンパスのペンと針を交互にサンプリングして，円弧の描き始めのタイミングで針の座標を InkML に残す仕組みとしていたが，今回は 3.3 に示す表記に変更した。構造的には，この段階でほぼ完成していたが，実用的には電子ペーパー上で針が滑りやすいという問題があった。そこで，図 1 の右図に示すように，電子ペーパーの表面の材質及び改良に用いている市販コンパスを変更し，針部分の改良も行った。加えて，ソフト的には，Undo 機能を追加し，直前のストロークを消去可能とした。

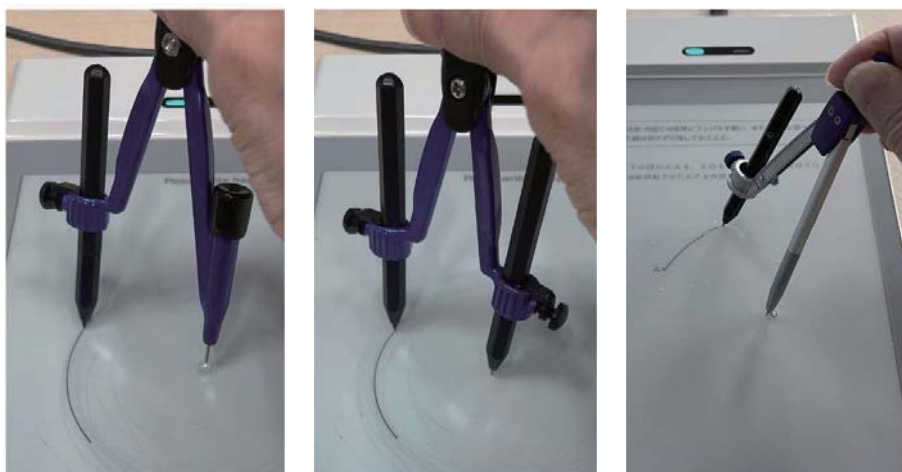


図 1: 電子ペーパーにおける電子コンパスの描画

3.3 InkML の表記

InkML の表記は W3C の推奨仕様 [13] に準拠し，XML 要素の定義は以下である。

- 電子ペン <inkml:brush xml:id = “br_pencil_1.1” >
- 消しゴム <inkml:brush xml:id = “br_eraser_1_FF” >
- 電子コンパス <inkml:brush xml:id = “br_compass_1.1” >

```
<inkml:trace contextRef="#tx0" type="penDown" timeOffset="131"
brushRef="#br_compass_1.1" >
6996 10051 308 0 1400 -2600 336 131,10864 12411 4095 0 600 -3100 0 132,
6995 10052 330 0 1400 -2700 336 133,10864 12410 4095 0 600 -3100 0 134,
6992 10052 340 0 1400 -2700 336 135,10864 12410 4095 0 600 -3100 0 136,
6991 10052 355 0 1400 -2700 336 137,10864 12410 4095 0 600 -3100 0 138,
6994 10052 360 0 1500 -2700 336 139,10864 12410 4095 0 600 -3100 0 140,
...
6998 10050 284 0 1700 -3000 336 295,10864 12410 4095 0 500 -3200 0 296
</inkml:trace>
```

図 2: 電子コンパスの InkML 表記例

また、ストロークデータのチャンネル定義は、(X, Y, F, Z, OTx, OTy, W, T) の 8 チャンネルで、それぞれ、X: x 座標, Y: y 座標, F: 筆圧, Z: z 座標 (ペンの高さ), OTx: x 軸に沿って傾けた角度, OTy: y 軸に沿って傾けた角度, W: ストローク幅, T: タイムスタンプである。具体的には、図 2 に示すように、電子コンパスで書き始めた瞬間のペンと針を交互にサンプリングして、InkML に残している。

4 作図調査

本研究では、電子ペーパーに筆記された解答の筆跡 (時系列の筆点座標列) を機械で認識して自動採点することを目指している。また、作図過程が正しいのか、どの程度試行錯誤したのか、どこで行き詰っているかといった解答行動を明らかにすることも狙っている。そのため、本調査の目的は、それに向けた解答の筆跡データである InkML データの収集をすることである。以下、4.1 に調査の概要、4.2 に結果の概要を示す。

4.1 調査の概要

4.1.1 作図調査の時期

2025 年 6 月 25 日～2025 年 7 月 15 日。

4.1.2 作図調査の対象者

全国の高校生 100 人。

4.1.3 作図調査の内容

表 1 に示す中学校数学科の作図に関する問題 20 題と、性別、学年、利き手、卒業した中学校 (設置者、都道府県) 及び調査で使用した電子文具について尋ねる簡単なアンケート。

4.1.4 作図調査の方法

電子ペーパー、電子消しゴム付き電子ペン、電子コンパス、(電子データの取得機能を有しない) 目盛なし定規等の調査一式を自宅に配送し、各自自宅で解答を行う。インターネット経由で指定された Web にアクセスし、ID とパスワードを入力後、個人情報に関する文書に同意し、Web に記載されている指示にしたがって電子ペーパーを自宅の PC に USB 接続する。その後、電子ペーパーに問題が順に表示され、被験者は配布された文具を使って電子ペーパーに直接解答をしていく。1 題解答終了ごとに、データはサーバにアップロードされるようになっている。

表 1: 作図問題の概要

問題 ID	問題内容	図形・操作の種類
Q_01	線分 AB を一辺とする正六角形を作図	正多角形 (六角形)
Q_02	線分 AB の垂直二等分線	垂直二等分線
Q_03	$\angle AOB$ の二等分線	角の二等分線
Q_04	点 A を通り直線 ℓ に垂直な直線	垂線 (点上)
Q_05	点 P を通り線分 AB に垂直な直線	垂線 (外点)
Q_06	直線 ℓ 上に $AP+BP$ が最短になる点 P	反射・最短経路
Q_07	点 A を通り直線 ℓ に平行な直線	平行線
Q_08	点 A を O を中心に 30° 回転	回転移動
Q_09	$\triangle ABC$ を A を中心に 90° 回転 $\rightarrow \triangle ADE$	回転移動
Q_10	$AP=BP$ かつ $\angle BAP = \angle CAP$ となる点 P	内心関連
Q_11	円の中心 O を作図	円の中心
Q_12	3 点 A,B,C を通る円	外接円
Q_13	直線 ℓ と 2 点 A,B から接する円の中心 O	接円 (外接条件)
Q_14	2 半直線に接し, AB 上の点 D で接する円の中心 O	接円 (角の内接条件)
Q_15	四角形 ABCD の折り目 (BC が AD に重なる)	対称線・折り線
Q_16	$\triangle ABC \rightarrow \triangle XYZ$ の回転中心 O	回転の中心
Q_17	円 O の点 A における接線	円の接線 (接点)
Q_18	円 O の外部の点 A を通る接線	円の外部接線
Q_19	$\triangle APB \rightarrow \triangle ADB$ となる P を AC 上に	円周角の定理関連
Q_20	一辺が 1 の正方形 ABCD を用いて $\sqrt{3}$ を作図	長さの作図

4.2 結果の概要

4.2.1 調査被験者

調査被験者 100 人の属性は、以下のとおりであった。

- 性別 男子: 56 人 女子: 44 人
- 学年 高 1 : 57 人 高 2 : 39 人 高 3 : 4 人
- 利き手 右利き: 95 人 左利き: 4 人 不明: 1 人
- 卒業した中学校の設置者 公立: 82 人 国立: 5 人 私立: 12 人 不明: 1 人
- 卒業した中学校の所在地 47 都道府県中 21 都道府県 (最大 東京都 24 人)

4.2.2 解答結果

図 3 に示すように、正答率 80% 以上の問題が 7 題で、基本的な作図 (Q_02, Q_03, Q_04, Q_05, Q_12, Q_17) と、小学校の正三角形の作図の応用としての正六角形の作図であった。次に、正答率 50%~80% の問題が 9 題で、基本的な作図を複数組み合わせる作図す

るものが主であった。最後に、50%未満の問題が4題で、対称性に関連する問題 (Q_06, Q_15), 円周角に関連する問題 (Q_19), 長さ $\sqrt{3}$ の作図 (Q_20) であった。

多くの問題は、図3において左上から右下にかけて分布しており、既知のことであるが正答率が低いものほど作図時間が長い傾向にあることが確認された。

また、ストローク数が多い問題は、正答率70%付近に多く分布しているが、ストローク数が多く正答率が80%以上の問題は Q_12 及び Q_01, ストローク数が多く正答率が50%未満の問題は Q_19 及び Q_20 であった。これらは被験者が試行錯誤を重ねる様子が確認され、前者は試行錯誤の後に正答にたどりつく被験者が多いが、後者は試行錯誤をしたものの正答にはたどりつく被験者が少ないということを示している。Q_06 及び Q_15 は、どちらも対称性に関連する問題で、いずれも正答率が低くストローク数も少ない、つまり何を作図すればよいのかわからない被験者が多い問題であるという特徴が確認された。

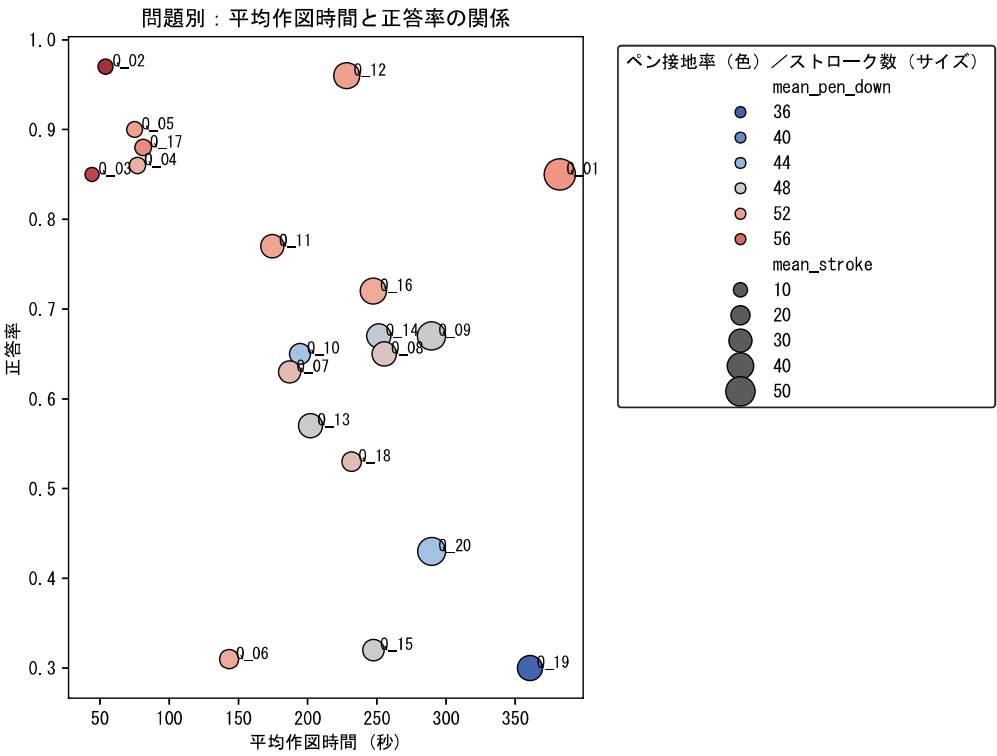


図 3: 問題別平均作図時間と正答率の関係

4.2.3 アンケート回答結果

電子文具の使いやすさについて尋ねたが、それぞれ以下の結果であった。

- コンパス 使いやすい: 32 人 普通: 39 人 使いにくい: 29 人
- 消しゴム 使いやすい: 35 人 普通: 36 人 使いにくい: 29 人

いずれも、30%前後に分かれ、個人差が大きいことがうかがえる。自由記述については、WordCloud による可視化を行ったところ、図??に示すとおりであった。この図からも、電子文具の使いやすさについて、自由記述において再度言及する被験者が多かったことがわかる。電子ペンや消しゴムについては、扱いやすいという意見が多くある一方、デジタルの特徴である1ストローク取り消せるUndo機能は付与したものの、全消去の機能は付与していなかったため、全消去が欲しいといった意見が複数あった。前出のとおり、電子ペーパーの上で電子コンパスの針を滑りにくくするために、表面の素材を変更したが、逆に、定規が画面にひっついて、動かしにくいといった問題も浮き彫りとなった。



図 4: アンケート自由記述の可視化

5 考察

これまで作図問題においては、「作図には定規とコンパスを使い、作図に使った線は消さずに残しておくこと」というような注意を促し、描画結果で評価が行われてきたが、これまでの評価では正答であっても作図順を考慮すると誤答となる解答が数例観測できている。このことは、従来の評価方法では、必ずしも正確な評価が行われていたとはいえない。また、ストローク数やペン接地率から、試行錯誤が多い問題や考えている時間が長い問題などの特徴が明確に把握できた。さらに、電子的な座標データが保持されているため、技能的な側面において、正答とのずれがどのくらいかを数値で評価可能である。このような紙筆では得られなかった情報は、指導への応用が期待される。

6 おわりに

今後、得られたデータを利用して、作図過程の解答行動分析を多角的に分析することを予定している。それと並行し、自動採点や解答方略の自動クラスタリングの検討を行

うことも計画している。

謝辞

本研究は東京農工大学に設置されたワコム－東京農工大学共同研究講座において行われている、手書き解答の自動認識・自動採点に関する研究の一環で実施されたものであり、一部はJSPS 科研費 JP21K18136, JP22H0008, JP24H00738 の助成を受けたものである。

付記

本稿で紹介した電子コンパスは、「自動採点装置、プログラム、及びシステム」として特許出願中である（特願 2024-030402 発明者 宮澤寛，朝倉僚，堀江利彦，山本高廣，土田洋一，伊藤雅充，安野史子，中川正樹，グエン トゥアン フーン，トルン タン ギア，リー ツゥアン ナム）。

参考文献

- [1] 朝倉僚，グエン トゥアン フーン，グエン トゥアン クーン，宮澤寛，土田洋一，山本高廣，伊藤雅充，堀江利彦，清水郁子，中川正樹：手書き解答の自動採点に向けた学習ドリルのデジタル化と筆記解答の収集，電子情報通信学会 信学技報 vol.122 PRMU-314, pp.70-75, 2022.
- [2] Asakura,T., Nguyen,H.T., Truong,N.T., Ly,N.T., Nguyen,C.T., Miyazawa,H., Tsuchida,Y., Yamamoto, T., Ito,T., Horie,T., Yasuno, F., Ishioka,T., Kobayashi,K., Shimizu,I., Nakagawa, M. :Digitalizing educational workbooks and collecting handwritten answers for automatic scoring, iTextbooks@AIED 2023: pp.78-87, 2023.
- [3] 宮澤寛：電子ペーパーにおける電子ペン描画の高速化，情報処理学会 インタラクション 2022 論文集, pp.706-707, 2022.
- [4] 宮澤寛，朝倉僚，グエン トゥアン フーン，トルン タン ギア，リー ツゥアン ナム，安野史子，堀江利彦，中川正樹：手書き幾何図形解答の自動採点に向けた正答例の記述，日本教育工学会 2024 年春季全国大会, pp.663-664, 2024.
- [5] 宮澤寛，朝倉僚，伊藤雅充，堀江利彦，安野史子，中川正樹：数学教育におけるコンパスを使用した作図活動の電子ペーパー入力の特長，情報処理学会 インタラクション 2025 論文集, pp.495-497, 2025.
- [6] 文部科学省：小学校学習指導要領(平成 29 年告示)，2017.
- [7] 文部科学省：小学校学習指導要領(平成 29 年告示) 解説 算数編，2017.
- [8] 文部科学省：中学校学習指導要領(平成 29 年告示)，2017.
- [9] 文部科学省：中学校学習指導要領(平成 29 年告示) 解説 数学編，2017.

- [10] 安野史子, 宮澤寛, 朝倉僚, 堀江利彦, 中川正樹: 電子コンパスを利用した算数・数学教育における作図活動の提案, 日本科学教育学会第48回年会論文集, pp.505-508, 2024.
- [11] 安野史子, 宮澤寛, 朝倉僚, 堀江利彦, 中川正樹: 電子コンパスを利用した数学教育における作図活動の提案, 数理解析研究所講究録 2301, pp.122-132, 2025.
- [12] 吉田 勝行, 加藤 道夫, 鈴木 賢次郎: 第24回図学教育研究会報告 講演・討論会「設計にとって図学は必要か」— 図学不要論に込めて—, 図学研究 34 巻 1 号, pp.49-53, 2000.
- [13] W3C: Ink Markup Language (InkML), W3C Recommendation 20 September 2011, <<https://www.w3.org/TR/InkML/>> (2025 年 11 月 11 日閲覧).