

1. はじめに

書字活動は、情報を記録し、情報を表現する手段として重要な活動である。小学校において、子どもたちが過ごす毎日の活動の半分はこの書字活動がかかわっているという報告 [1]があるように、書字技能は学校生活での学習の前提となる重要な能力である。また、学齢期の書字に関する困難さは児童の自己効力感・学習意欲の低下につながるなど情動面においても、負の影響があると考えられる。実際に文部科学省(2022)の調査[2]では、小学校・中学校の通常学級において「読む」または「書く」ことに困難のある子どもは、3.5%と増加傾向にあることが報告されており、学齢期の書字困難への対策は重要な課題であると言える。学齢期以降でも、書字技能は実社会でも必要とされる場面が多くある。例えば、絵画や建築図面などで求められるデッサンでは、ただ線を引くのみならず、濃淡、陰影など細やかな描画技術が必要となる。書字技能はこういった描画技術の基礎としての側面もあり、学齢期において書字に関する困難を解消することは生涯にわたって、良い効果を与えると考える。

書字困難児童の背景には、視覚機能（眼球運動や追視など）、認知機能（視空間認知、音韻認識、ワーキングメモリなど）ならびに感覚・運動機能（運筆コントロールや協調運動など）の上で、多様な課題がある。Danna & Velay (2015) は、運筆コントロールには固有感覚、視覚、聴覚の感覚フィードバックが重要であることを示し、特に固有感覚が運筆をコントロールする役割を果たしていることを指摘している[3]。書字の運筆コントロールに関する先行研究においては、運筆を止めやすくするために紙やすりを下敷きを使用する研究や、線を描きやすくするために紙滑り止めシートを下に敷く研究の報告がある。また、新庄ら(2019)は、運筆コントロールが不良な児童に対して、紙面上の抵抗を増大するような固有感覚をフィードバックする支援の有効性を報告している[4]。しかし、これらの先行研究では、特定の条件(紙やすりの下敷き、すべり止め)によって固有感覚のフィードバックが運筆コントロールに有効であることを示すだけに留まっており、固有感覚のフィードバックによって対象児が運筆コントロールの感覚を獲得できたのかについては言及していない。学校現場においては、ただ「スムーズに書けた」という結果ではなく、「どのくらいの力で書くとスムーズに書けるのか」というようなスムーズに書ける感覚を獲得することが重要になってくる。

一方で、書字が困難である原因については明らかになっていないことが多い。実際に、通常学級の中には、漢字を書くことが苦手だと悩みを抱えている子どもが存在するが、文字を書く機能のどこに問題があり、困難を抱えているのかについては分からないまま指導を受けている場合もある。しかし、本来は、個々の児童の状況に合わせた指導をすべきである。そのためには、書字困難の原因すなわち課題のある書字機能を明らかにして、改善するための教材を提供することが必要である[5]。

書字には、文字の認識、文字の形態表象の記憶、形態表象から運動プログラムへの変換、運動の実行といった複数の処理プロセスが関与する[6]。書字困難の原因と困難の程度を評価するためには、複数の処理プロセスのどの段階に問題があるのかを明らかにするとともに、困難の程度

を表す指標を示すことが必要である。

我々は書字動作における困難を構成する大きな要素として次の2点を考えた。第一は固有感覚の問題である。固有感覚が鈍すぎる場合は、書字の際に自分がどれだけの力を紙に加えているか、上手く感じるができない。そのために、筆記具を通して必要以上の力を紙に加えてしまい、適切な運筆ができずに、極度に大きい、あるいは太い文字や、形状の崩れた文字を書くことにつながるものと予想している。一方、固有感覚が鋭すぎる場合には、書字を通して手指が受ける刺激が不快なものとして知覚され、必要な力を紙に加えることができない。そのため、極度に薄い文字となるものと考えている。第二に運動機能・感覚統合の問題である。目から入った情報に基づいて、書字動作は行われる。書字は手から入った感覚、目から入った情報と肩、肘、手首、指の連動した動きを統合して行う。これらの感覚統合がうまくいかず、適切な書字が行われないのではないかと考えた。実際に発達障害の特性として感覚の統合が難しいことは既によく知られている。本研究では第一の要素に着目し固有感覚の観点から書字動作へアプローチする。

本研究の目的は書字動作における固有感覚を定量的に評価するための測定装置ならびに測定する方法を提案することである。

2. 固有感覚の測定

書字動作は複数の処理プロセスが存在することから、書字の困難さを引き起こす原因も多岐に及ぶものと考えられる。本研究では固有感覚から書字動作の巧拙についてアプローチをする。

「書字動作における際の固有感覚の鋭さ、鈍さが、書字の巧拙に影響を与える一要因である」

(図1)という仮説を検証するために、本研究では書字の際の固有感覚を定量的に評価する手法について検討を行った。

固有感覚の測定には、いくつかの試みがなされている。例えば、田口らはゴニオメータを用いて書字の際の上肢の各関節の座標情報から、その動作について解析を試みた[7]。硬さの識別検査としてスポンジを握る動作を用いたものがある。非検査対象の手のひらでスポンジAを握らせ、反対側の手のひらでいくつかの硬さの異なるスポンジの中からスポンジAと同じ硬さのものを識別させるものである。これらの方法のうち、ゴニオメータを用いる試みには、測定が大掛かりで、日常の教育現場で用いることが難しく、また、得られた結果から実際の指導への具体的なフィードバックが難しいなどの課題がある。一方、スポンジの場合には、識別検査課題の物理量(硬さ)を細かく設定できないという課題がある。

■書字障害について

現在の教育現場では、ノート記述やテスト解答など、児童に書字動作が求められる場面が多く、「書くこと」は学習において非常に重要である。通常学級においても約6.2%の児童が読む・書くことに困難を抱えており、その一例として筆圧が極端に強いことがある。これは、筆記時に自分がどれだけ力を入れているかを感じにくいという「感覚の鈍さ」が原因とされ、姿勢の崩れや集中力の低下につながる。

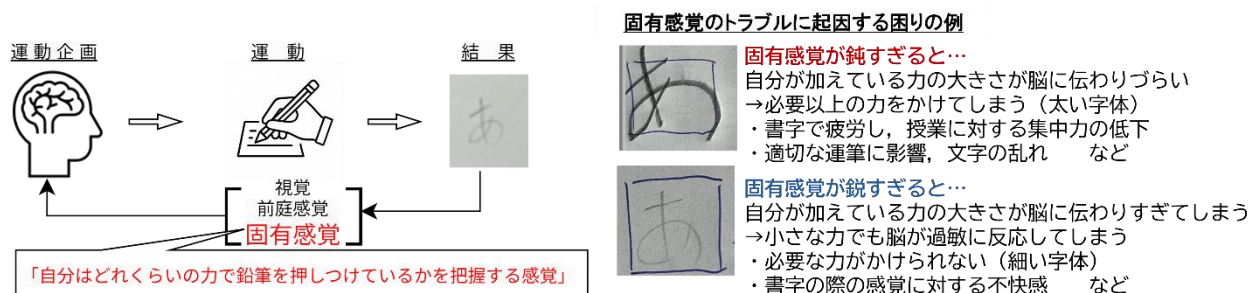


図1 固有感覚と書字障害

3. FRPの活用

固有感覚測定法のための識別検査課題への要求事項として、以下の3点がある。

- ① 個々人の感覚や測定する固有感覚に応じて硬さなどの機械的性質を細かく変更できる事
- ② 見た目や触感、質量などを変化させることなく検査対象とする性質（硬さなど）だけが異なる複数種類の検査ツールを準備することができること
- ③ 検査時の変形に十分耐えうる強度を持つこと

これらに対して3Dプリンタによって造形されたCFRPの特長が合致していると考え、固有感覚測定機器の材料として採用した。

3. 1 FRP

FRP (Fiber Reinforced Plastic) とは繊維強化プラスチックの略称である。中でも炭素繊維を用いたものはCFRP (C:Carbon) と呼ばれる。FRPは主に強化材である繊維と母材となるプラスチックから構成されている。繊維の有する高い引張強度をプラスチックで複合化することにより、軽量、高強度、高剛性であるという特徴を持たせることができる。例えば、ハンドレイアップ法ではガラスなどの繊維を金型に沿わせ、その上から刷毛やローラーによってプラスチックの材料である樹脂を塗布・硬化させることにより繊維とプラスチックの複合化をする。重量軽減が大きな課題である飛行機などの輸送機や、スポーツ用器具に使用されてきた。

FRPのユニークな特徴として、テーラリングによって材料に異方性を付与することができる点がある。FRPは図2に示すように複数の繊維層を積層することによって構成されている。これらの繊維層の積層の仕方により、見かけの硬さを変化させることができる。このように同一材料を用いて、機械的特性を変化させることができるのは、FRPの成形が製品形状を作ると同時に、材料の性質も作り出すという成形方法に由来しており、単一の金属やプラスチックにはない特徴の一つである。

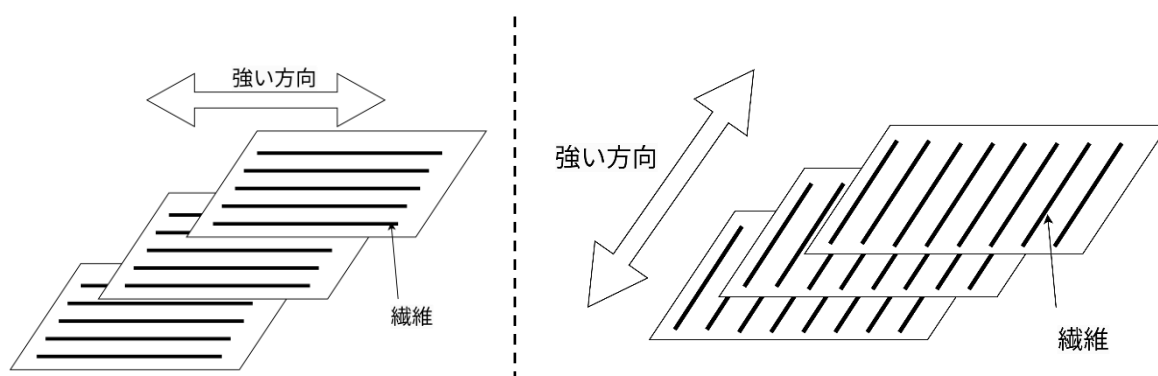


図2 FRPのテーラリング

3. 2 3Dプリンタを用いたCFRPの製造

CFRPの成形法として成形型形状によってオープンモールドやクローズドモールド、使用温度領域によって常温型、加熱型など多くの成形法が開発されてきた。いずれの成形方法も様々な工夫がされていたが、次の要因より多品種少量生産には適さない成形法であった。

- ① 金型や原型などの型を必要とすること
- ② 成形のための付帯設備（加熱炉、真空ポンプなど）が必要なこと

一方で、3Dプリンタは3Dモデルのデータに基づいた成形であり、金型が不要であり多品種少量生産に適している特長を有している。そのため、手軽な成形手段として広まり、とくに、高い機械的特性を必要としないものづくり（例えばラピッドプロトタイピング）の用途で需要を拡大してきた。最も一般的な3Dプリンタは図3に示すFDM（Fused Deposition Modeling）方式であり、図4に示すフィラメント状の熱可塑性樹脂をヒーターで加熱しながら所定の形状に積層をしていくものである。他方で加工法の制約上、使用できる材質が比較的強度の低い熱可塑性樹脂に限られるという欠点があり、高強度が求められる製品の成形での利用は進んでいなかった。

近年、炭素の短繊維を含む高強度の熱可塑性樹脂フィラメントを樹脂とし、図5の連続炭素繊維表面を加熱しながら樹脂内部に融着させることによりCFRPを成形可能なFDM方式の3Dプリンタが市場に表れ始めている。この製品は以下の特長を有している。

- 連続炭素繊維の配向を調整することができるため、成形品の機械的特性（特に硬さ）を変化させられること
- 熱可塑性樹脂と炭素繊維の組み合わせによってアルミニウム並みの強度の成形品を製作可能なこと

これらの特長が本研究で開発する識別検査用プレートの製作に適していると判断した（図6）。



図3 FDM方式3Dプリンタ



図4 熱可塑性樹脂フィラメント

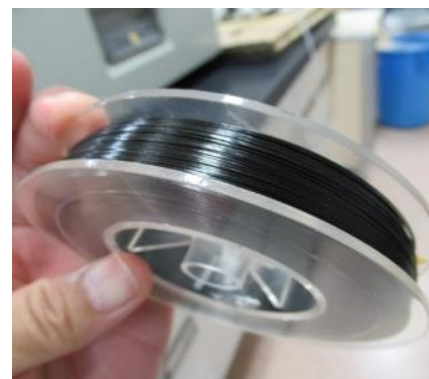
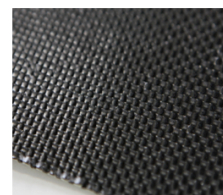
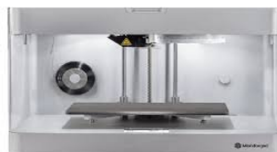


図5 連続炭素繊維

固有感覚の測定法の例

(3Dプリンタ製)CFRPの特長

例：物体の硬さに対する固有感覚の検査方法
硬さが何段階かに異なるスポンジを把持運動にて弁別させる
その弁別成績から固有感覚を測定する



〔識別検査課題に求められる要件〕

- ①個々人の感覚や測定する固有感覚に応じて硬さなどの機械的性質を細かく変更できる事
- ②見た目や触感、質量などを変化させることなく複数の検査ツールを準備することができる事
- ③検査時の変形に十分耐えうる強度を持つこと

- ①金型が不要であり小ロット生産が可能である
- ②高強度、高弾性であり、大きな変形にも耐えうる
- ③内部の繊維の構造設計により成形品の硬さの調整が容易

図 6 固有感覚と書字障害

4. 識別検査

4. 1 識別検査方法

図 7 に識別検査の様子を示す。検査の手続きは以下のとおりである。

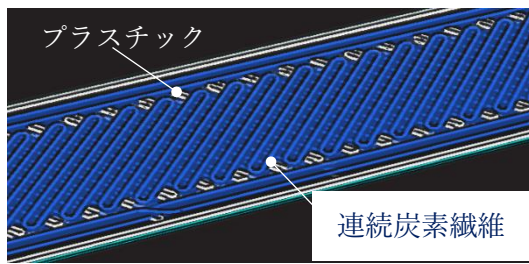
- 1) 基準となる弾性プレート（以下、基準プレート）1 枚を試験台内部に設置された基準プレート受けに設置する。
- 2) 基準プレートとは硬さの異なる 5 枚のプレート（以下、比較プレート）をランダムな順序で弾性プレート受けに設置する。
- 3) 被験者は、提示された比較プレートを鉛筆で押し、基準プレートと比較して「硬い」「柔らかい」「同じ」のいずれに該当するかを判断し、回答する。なお、被験者には各プレートに対する押圧操作を HB の黒鉛筆を用いて行わせた。その際、鉛筆の保持方法および姿勢は通常の筆記時と同様に力を加えるよう指示した。

4. 2 弾性プレート

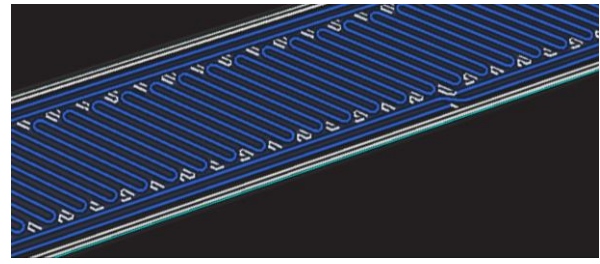
弾性プレートは Markforged 社製 Mark II を用いて図 8 の様に作成した。図 9 の様に弾性プレートは内部に含まれる繊維交差角度（ θ ）を調整することにより硬さを調整した。交差角度ごとのしなり特性を図 10 に示す。0 から 40 度の間で交差角度と反力の相関関係が確認されたので、この範囲で表 1 の様に識別検査課題で用いる比較プレート、弾性プレートを設定した。



図 7 識別検査



繊維配向方向 45°



繊維配向方向 135°

図8 3Dプリンタによって成形されたCFRPの内部構造の例

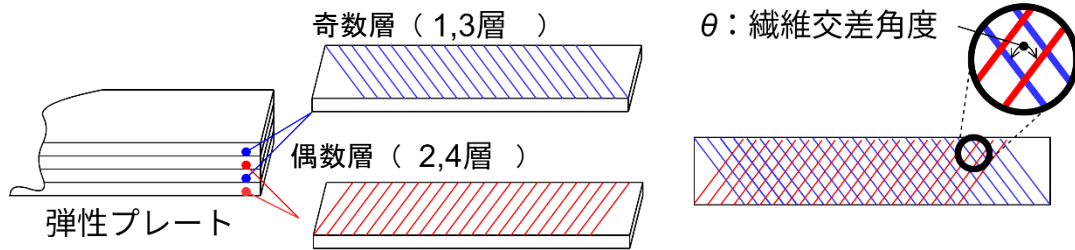


図9 繊維交差角度の設定

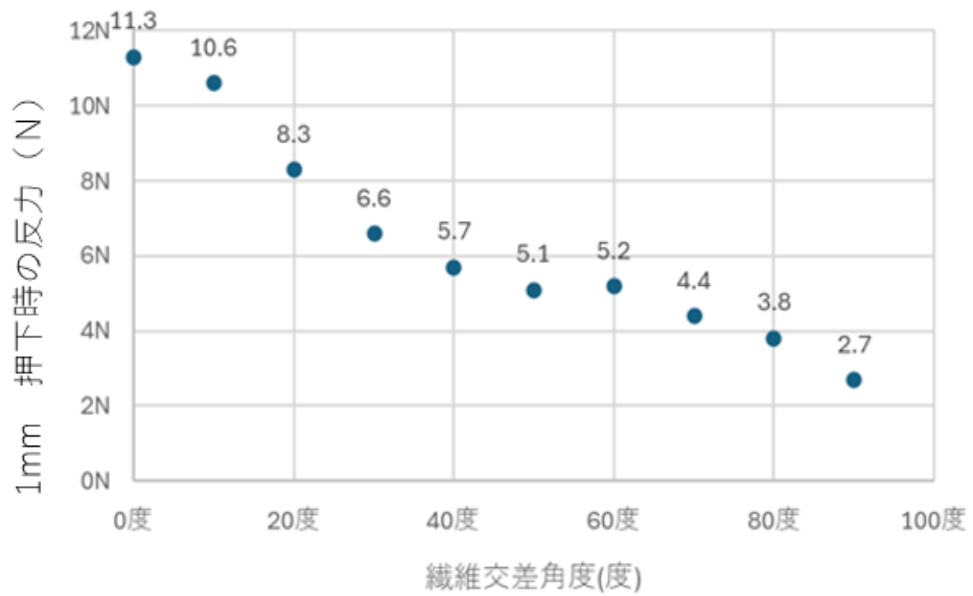


図10 各弾性プレートのしなり特性

表1 識別検査課題の繊維交差角度

セット	繊維交差角度(deg)			
	比較 プレート	基準 プレート	比較 プレート	比較 プレート
A	0	10	20	30 40

← 硬 柔 →

5. 実験

実験の目的は、この識別検査によって、固有感覚の個人差を測定できるか否かを調べることである。書字障害自認の無い7名の成人を被験者として実施した。検査では被験者ごとに3回ずつ弁別をさせた。

6. 結果

被験者ごとの正答数を表2、比較プレートごとの平均正答数を図11に示す。被験者によって、比較プレートが基準プレートより硬い場合の正答率が高い者、逆に、柔らかい場合の正答率が高い者があった。また、基準プレートとの硬さの違いが大きい場合には、正答率が高く、小さい場合には、正答率が低い結果となった。

表2 識別検査結果

被験者番号	比較プレート(deg)				
	0	10	20	30	40
1	3	2	1	1	3
2	3	3	3	0	3
3	3	3	2	2	3
4	3	3	3	2	3
5	1	1	2	3	3
6	3	3	2	1	3
7	3	2	2	3	3

※試行回数：被験者1人当たり各3回

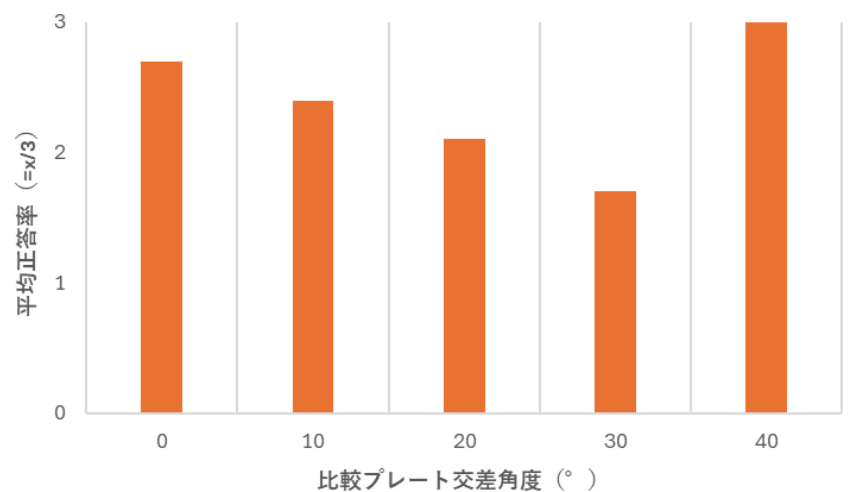


図11 比較プレート別正答率

7. 考察

硬さが基準プレートから離れている比較プレートの弁別では平均正答率が高い傾向が確認された。硬さが基準プレートに対して近い比較プレートでは平均正答率が低い傾向となった。このことから、基準プレートを押しつけた際に感じる硬さと、比較プレートから受ける刺激を押しつけた際に感じる硬さの差は弁別可能な範囲にあったといえ、基準プレートと比較プレートの硬さの差の設定は適切であったと考えられる。また、実験結果からこの検査方法によって個人の固有感覚を測定できることが明らかになった。例えば、被験者番号5は比較プレートが柔らかい範囲では精度良く弁別できるが、硬い範囲ではその精度は低いという固有感覚を有すると考えられる。

8. まとめ

本研究を通じて、以下の成果を得た。

- 1) 3Dプリンタを用いて、硬さを細かく設計したCFRPプレートの製作が可能であることを明らかにした
- 2) CFRPで作成した弾性プレートは、筆記時の筆圧に関する固有感覚を検査する材料として適していることを確認した

9. 今後の課題

- 1) 被験者に行なわせる試行回数の検討
- 2) 硬さの多段階化を図るためにCFRPを用いた弾性プレートの設計ノウハウを蓄積すること
- 3) 学齢期児童を対象とした、大規模なサンプル数の実験を行うこと
- 4) 書字動作に困難のある児童集団と、書字動作に困難の無い児童集団での比較

10. 展望

本研究を発展させ、書字動作に困難さを有する児童、個々の固有感覚に応じた書字訓練プログラムの開発を目指す(図12)。

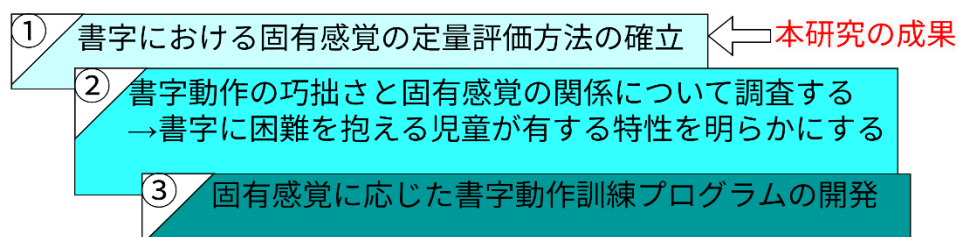


図12 展望

11. 謝辞

本研究は「令和7年度・第64回下中科学研究助成金」を利用いたしました。ここに記して感謝いたします。

1 2. 参考文献

- [1] McHale, Kathleen, and Sharon A. Cermak. "Fine motor activities in elementary school: Preliminary findings and provisional implications for children with fine motor problems." *The American journal of occupational therapy* 46.10 (1992): 898-903.
- [2] 文部科学省初等中等教育局特別支援教育課,通常の学級に在籍する特別な教育的支援を必要とする児童生徒に関する調査結果(令和4年)について
- [3] Danna, Jérémy, and Jean-Luc Velay. "Basic and supplementary sensory feedback in handwriting." *Frontiers in psychology* 6 (2015): 169.
- [4] 新庄 真帆, 加藤 寿宏, 松島 佳苗, 学童期の書字動作に感覚フィードバックが及ぼす影響, LD 研究, 2019, 28 巻, 2 号, p. 241-248,
- [5] 奥谷望, et al. "漢字書字に困難を有する児童の要因に関する研究." 地域学論集: 鳥取大学地域学部紀要 8.2 (2011): 39-45.
- [6] Kelly, Erin. "The fundamentals of handwriting and how to teach them." *Educating Young Children: Learning and Teaching in the Early Childhood Years* 19.1 (2013): 29-31.
- [7] 田口英郎, et al. "ゴニオメータによる書字動作の解析法." *バイオメカニズム* 8 (1986): 119-130.



吉田 圭輔
(よしだけいすけ)

<略歴>

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科 修士課程 機械創造工学専攻終了 修士(工学)

<職歴>

ヨネックス株式会社 新潟生産本部 研究開発室 2009年～2012年

釧路工業高等学校 定時制課程 教諭 2012年～2021年

函館工業高等学校 定時制課程 教諭 2021年～2023年

函館工業高等専門学校 生産システム工学科 講師 2023年

<受賞歴>

Best Presentation, ICET2024

<研究歴>

Acoustic Analysis of the Effect of Educator's Face Direction on Students' Phonetic Recognition

Keisuke Yoshida, Minori Tsuji, Katsumi Hama, Sadayoshi Mikami

2024 4th International Conference on Educational Technology, ICET 2024 481-485 2024

授業者の向きが受講者の音韻知覚に与える影響

吉田 圭輔, 三上 貞芳, 濱 克己, 辻 美祝

日本教育工学会研究報告集 2024(1) 171-176 2024年5月11日

授業者の視線・教授行動が受講者の学習に与える効果

吉田 圭輔, 三上 貞芳, 濱 克己

日本教育工学会研究報告集 2023(4) 6-12 2023年12月4日

授業者の視線挙動が受講者の記憶に与える効果—授業改善システムの開発に向けて—

吉田 圭輔, 三上 貞芳, 濱 克己

日本教育工学会研究報告集 2023(2) 68-74 2023年7月21日

<勤務校> 学校名 函館工業高等専門学校

住所 北海道函館市戸倉町 14-1

<共同研究・競争的資金等の研究課題>

多職種連携による固有感覚の視覚的フィードバックを用いた書字指導プログラムの開発

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C) 2025 年 4 月 - 2030 年 3 月

オホーツク文化の青銅製帯金具はなぜこんなに鉛を含むのか？—古代鑄造技術の再現—

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C) 2025 年 4 月 - 2030 年 3 月

炭素繊維配向 3 D 造形物の熱伝導特性の評価

北見工業大学 川合政人 助教との共同研究 2025 年 4 月 - 2026 年 3 月

書字動作に困難さを有する児童の固有感覚のアセスメント方法の開発

下中記念財団 下中科学研究助成金 2025 年 4 月 - 2026 年 3 月

考古学の常識をデジタル技術で疑う

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C) 2021 年 4 月 - 2025 年 3 月