



Title	デジタルデバイスを用いた学習効果は紙とインクペンに匹敵するのか —N400脳波を用いた検討—
Author(s)	大杉, 清之
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92130
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

令和 4 年度 博士論文

デジタルデバイスを用いた学習効果は紙とインクペンに匹敵するのか

—N400 脳波を用いた検討—

Is the learning effect using digital devices comparable to paper and ink pens?

—Study using N400 electroencephalogram—

大阪大学 大学院

生命機能研究科 生命機能専攻

大杉 清之

2023 年 3 月

要旨

The introduction of digital devices is progressing along with the digitization of educational scene in recent years. In this study, I investigated the learning effect by using them. I compared the learning effects using an analog pen and a digital pen for two linguistic learning tasks, which were learning Kanji characters and learning Indonesian, within 1 hour. In addition, in order to examine the effect of proficiency of digital pen on learning, the participants were divided into two groups, a digital pen proficiency group and a digital pen beginner group. I investigated the number of memorized words, the performance of the correct/incorrect judgment task, and the N400 component, which is an electroencephalogram component generated during the correct/incorrect judgment task and thought to reflect the latent progress of linguistic learning. The number of memorized words and the performance of the correct/incorrect judgment task for learning Kanji characters were significantly higher than those for learning Indonesian. Similarly, the amplitude of N400 for learning Kanji characters was significantly larger than that for learning Indonesian. Moreover, the amplitude of N400 of the participants who were able to remember more words tended to be larger. These results indicated that the N400 was able to measure the effects of learning, even if it took only 10 minutes of learning. Furthermore, it was clarified that the same learning effect as the ink pen can be obtained with the digital pen regardless of the proficiency level. However, the N400 repetition effect learned with the digital pen was significantly higher than that learned with the ink pen in the digital pen proficiency group. On the other hand, this difference was not observed in the digital pen beginner group. This indicates that learning is more effective when the digital pen is used after the user has mastered the use of the digital pen.

概説	5
ニューロエルゴノミクスについて	6
使用する脳活動計測方法の検討	7
背景知識	8
脳機能計測について	8
脳波計測について	9
N400	11
導入	13
背景	14
方法	17
参加者	17
学習内容学習活動のための単語の選択	17
脳波実験の刺激	19
実験手順	20
学習前および学習後のテスト	22
学習活動	22
脳波測定	23
データ解析	26
行動データ	26
脳波データ	26
統計解析	28
行動結果	28
脳波指標	28

結果	29
記憶語数	29
判別課題正答率	30
RT(反応時間)	31
脳波指標	32
考察	36
研究全体のまとめと将来の展望	39
まとめ	39
将来展望	39
参考文献	40
謝辞	48
業績リスト	49

概説

成熟した社会では、日常生活において、様々なタスクを行わなければいけない場面が発生する。例えば、書類作成、文章や口語の理解、車などの乗り物の運転、業務上の機械やソフトウェアの操作方法の習得など、実に多様に存在する。その様な、タスクに対する習熟度を高めることは、日々の生活を効率化させ、生活の質（quality of life: QOL）を向上させることにつながる。習熟度を高めるには、訓練に時間を費やす上、肉体的もしくは精神的な労力をかけることが必要である。つまり、タスクに対する習熟までの過程を効率化させる事で、訓練時にかかる時間と肉体的もしくは精神的な労力を削減することができ、更なる技能の獲得や、余暇の時間の増加につながるなど、人々のQOLを高めることに貢献できる。

このような技能獲得訓練を効率的に行うために、集中力を高めて訓練を行うことや、定期的な反復練習期間を設けるなど、これまでに一般的に周知されている方法論は存在するが、より科学的な視点に基づき、介入方法や評価指標を検討することは出来ないだろうか。

このテーマを検討する際には、訓練者ごとに習熟に対するアプローチは個人毎について差があることを考慮する視点がある。例えば、習熟に対しての障壁となる課題が1人1人違うと可能性がある。これは、各人の経験の違い、遺伝的特性など、原因が様々であるからと考えられる。それらの要因が作用することにより、技能獲得に対する障壁は個々人ごとに異なってくる。一方で、それから生じる現象を一般化し、客観的に評価することで、技能獲得に対する習熟段階を知ることができる。それらを組み合わせることにより、何がわかっているか、何が出来ていないかなどの障壁について区別ができる、一人一人の適切な指導などの介入方法を最適化することが可能である。最適化が行われれば、個々人の技能獲得の効率化を行うことは可能であると考えられる。

技能獲得において、習熟段階を客観的かつ詳細に調査する手法は進化を遂げている最中でありその状況を以下に解説する。

これまでには、主に、行動結果により習熟段階は評価されていた。人のタスクに対するパフォーマンスの結果をスコア化することや、観察者が技能に対する動作について分析して評価を行う方法である。これらは、技能に対し外的に現れる結果に対し、特定の基準を用いて評価を行っている。人がタスクを遂行する際には、脳から指令を出すと言うことは一般的に知られているため、近年では、特に生体計測の中で、脳活動計測の技術も発展により、習熟に対する人の認知を脳活動から調べることができるようになった。

更には、脳活動を計測することで新たな介入方法論が発展してきている。例えば、脳機能の向上を目指した磁気刺激治療（TMS治療）の方法は、疾患のある人に対し、脳に磁気刺激を与えることにより脳活動を向上させ、問題となっていた行動を改善させる方法論である。これは脳の活動に直接的に影響を与え、タスクの習熟の問題点を改善する研究分野である。

一方、脳活動の変化を観察することで、行動結果からでは判別不可能だが、脳活動には変化が起こっているとすれば、その違いにより、タスクに対するより詳細な習熟がわかり、その方法に対するフィードバックが出来、より効率的な方法を探索することができる。つまり、脳活動を調べ、指標として用いることにより、習熟をこれまで以上に素早くさせることができれば、それはこれまでになかった効果的な指標になると考えられる。

この様な考え方はニューロエルゴノミクスという分野に代表される。ニューロエルゴノミクスでは、人間工学と神経科学の手法を組み合わせ、人が使用する装置のインターフェースを設計する際に、操作時や、操作前後の脳活動を観察することで、脳活動から人のタスクに対する習熟やストレスの状態を知り、よりタスク遂行に対し作業効率的で、快適であるインターフェースを作ることを目的とした研究分野である。つまりニューロエルゴノミクスでは、脳活動とタスク遂行活動が持つ関係性の知識を適用して、作業環境の設計を最適化し、習熟を快適に加速できることを示唆している (Kramer, 2007; Parasuraman, 2005). R Parasuraman (2003)らはこの理論を詳細に述べている。

ニューロエルゴノミクスについて

ニューロエルゴノミクスとは、一言で表すと、脳活動を計測することにより、人が機械やコンピュータを操作する際に、その目的に応じて、より適切に人の活動を効率化、最適化を行うための研究分野である(R Parasuraman., 2003). 近年の、磁気共鳴機能画像法(fMRI), 脳波(EEG), 脳磁図(MEG), 近赤外分光法(NIRS)に代表される脳機能計測法の進歩を発露とした神経科学の台頭と、特にコンピュータ技術進歩に伴う人間工学分野の進展により、これらを組み合わせたニューロエルゴノミクスの発展は密接に関係しており、急速な進展を遂げている。

R Parasuraman(2003)の報告によると、ニューロエルゴノミクスの主要な目標は、脳機能と人のパフォーマンスから得られるデータを活用して以下 2つを目指すことである。

- (1)安全で効率的な操作を行うための技術と作業環境を設計する
- (2)人間のパフォーマンスの根底にある脳機能の理解を深める

ニューロエルゴノミクスは、現実世界のテクノロジーとシステムに関連して、見る、聞く、意識を向ける、覚える、決定する、計画するなどの感覚および認知機能の神経基盤の調査に焦点を当てている。

これまでに、ニューロエルゴノミクスの研究分野を出発として、様々な検討がなされている。脳が視覚、聴覚、触覚などの情報をどのように処理するかについての知識と、脳活動計測から得られる知見は、提示された情報を処理し、判断し、遂行を行うまでのタスク設計に重要な判断材料となる。例えば、人の活動における負荷を測定することで、その負荷を下げる様なインターフェイスを設計する試みがある(Dehais, Frédéric, et al., 2020, Nuamah, J. K, et al., 2020). このような研究は、本研究の目的である、タスクに対する習熟を効率化させる時にも応用が可能であると考えられる。脳活動を調べることは、タスク習

熟時の、手先の運動や言語処理などを行う際の認知活動の状態について客観的に評価する指標と出来る。

使用する脳活動計測方法の検討

脳波計測は、日常生活の1シーンで行うようなタスクに対し、脳活動を観察するには適切で便利な計測方法である。

MRI, MEG は計測装置が大型で、計測環境が限定されてしまうが、脳波計測を用いることで、日常生活空間で行うタスクに対し、手軽に脳活動計測を行い、習熟を評価することができるようになれば。例えば、飛行機や車を運転したり、ゲームをしたり、スポーツをしたり、勉強をしている際の脳活動も調査を行うことが、より簡単になる。

日常生活中で計測が比較的可能なものとして他に NIRS がある。NIRS は、血中の酸素飽和度の変化を調べ、脳活動が盛んに行われている場所を特定する(Lloyd-Fox, S et al., 2010)。つまり、血液の流れを観察した方法であるため、時間分解能が低く、日常生活中の複雑なタスクで、どのイベント(情報提示、操作など)が直接影響を与えるかを考えたときには、時間経過から、脳活動との因果関係を考える上で不利である。

以上の理由により、本研究では、脳波計測を用いて、タスクに対する習熟を評価し、評価指標として効果的かを評価し、調査を行なった。

詳細な議論を以下で述べる。

背景知識

脳機能計測について

これまでに、脳機能を計測する手法として、様々な方法論が開発されてきた。代表的な計測法として、本研究で使用した脳波(Electroencephalogram: EEG)を始め、脳磁図(Magnetoencephalography: MEG)、磁気共鳴画像法(Magnetic resonance imaging: MRI)、近赤外分光法(Near infra-red spectoroscopy: NIRS)などがある。

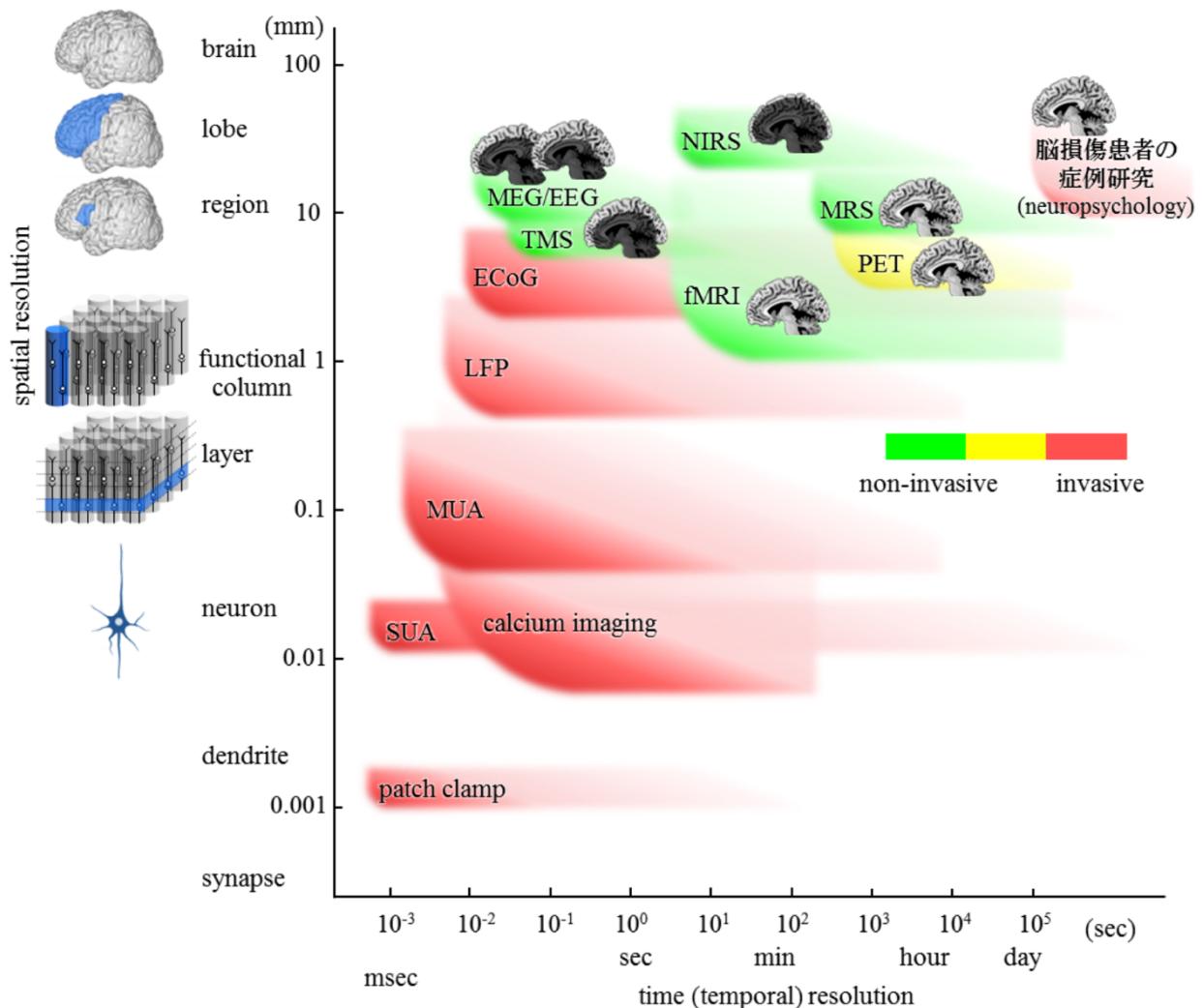


図 1. 脳機能計測の概観(宮内 1997)

図 1 に脳計測装置の概観を示した(宮内 1997)。特にここでは非侵襲脳機能計測である EEG, MEG, MRI, NIRS について述べる。脳波は頭皮上に電極を接地させ、各接地点で

の電位変化を表す。この方法は、計測が比較的簡易で、装置の小型化が可能であるため、近年では実社会での応用が期待されている。時間分解能は約 10^{-2} sec、空間分解能 10mm レベルである。脳磁図は、脳内で起こる電気的活動による磁界変化を検出する。現在のところ、脳磁図の計測には、大型の装置が必要であり、磁界シールドがある部屋で計測装置全体を覆う必要がある。時間分解能は約 10^{-2} sec、空間分解能は 10mm レベルである。核磁気共鳴画像の計測にも大がかりな装置が必要である。脳内の構造や病理診断に用いられ、最近では血流の変化を測定し、脳機能の診断を行う fMRI と呼ばれる脳機能計測法が盛んに行われるようになった。特に fMRI の時間分解能は約 1~10sec、空間分解能は 1~10mm レベルであり、脳波や脳磁図よりも高い空間分解能で脳内活動を調べることができる。近赤外線分光法は、血流変化を近赤外線の反射の状態によって判断、計測を行なう。比較的小型の装置を用いて計測が可能であり、時間分解能は約 1~100sec、空間分解能は 10~100mm レベルである。

以上のように、脳機能を計測するためには様々な方法があり、用途も長所短所によって使い分ける必要がある。その特性を知り、解明すべき脳機能メカニズムに合わせて適切な装置選択を行う必要がある。本研究ではこの中で、脳波を使った脳機能計測実験を行なった。次節で、その詳細について述べる。

脳波計測について

脳波計測は、病院や大学の研究室レベルの大掛かりな測定環境を必要とせず、一般的には脳波アンプと電極によって脳波の電位が計測可能である。そのため、非侵襲脳活動計測法のなかでも、計測において技術的な制限が少ない。よって、現時点では最も日常生活における脳活動計測として導入が容易であると考えられる。

脳波計は近年、さらなるモバイル、ウェアラブル化が進められている。本研究室でも、日常空間における脳波を計測するため、誰でも簡単に脳波計測を実現できる脳波計測システムを開発している(植田ら 2016)。

図 2 にそのウェアラブル脳波計を示す。この装置は小型無線脳波計、ドライ電極、脳波ヘッドギアから構成されており、かぶるだけで簡単に脳波計測ができることが特徴である。ドライ電極は、バネによりフレキシブルな接地が可能で、被験者の髪の毛をかき分けて電極の先端が頭皮に設置する構造になっている。これに対し、通常の脳波計では、伝導性ジェルが必要なウェット電極の使用が一般的である。このジェルは、市販の整髪料と同じく、粘着性があり、計測後に洗髪が必要であるため、日常空間における利用は非常に手間かかる。一方でドライ電極では、その必要性を取り除き、計測に対しての手軽さがある。脳波ヘッドギアは、被験者の頭の形や大きさのばらつきを吸収しつつ、誰にでもフィットする構造になっている。さらに、電極位置の調節も改良によって可能である。また、ウェアラブルヘッドギアに装填されている小型の脳波計は、無線通信が可能なシステムとなっており、コードレスで、自由に計測者の移動が可能になっている(Yokota et al., 2017)。

本研究では、脳波における事象関連電位と呼ばれる成分の中の、N400 を解析対象としている。そこで、次節ではこの脳波成分について、SJ Luck ら(2012)のテキストを元に説明を行う。

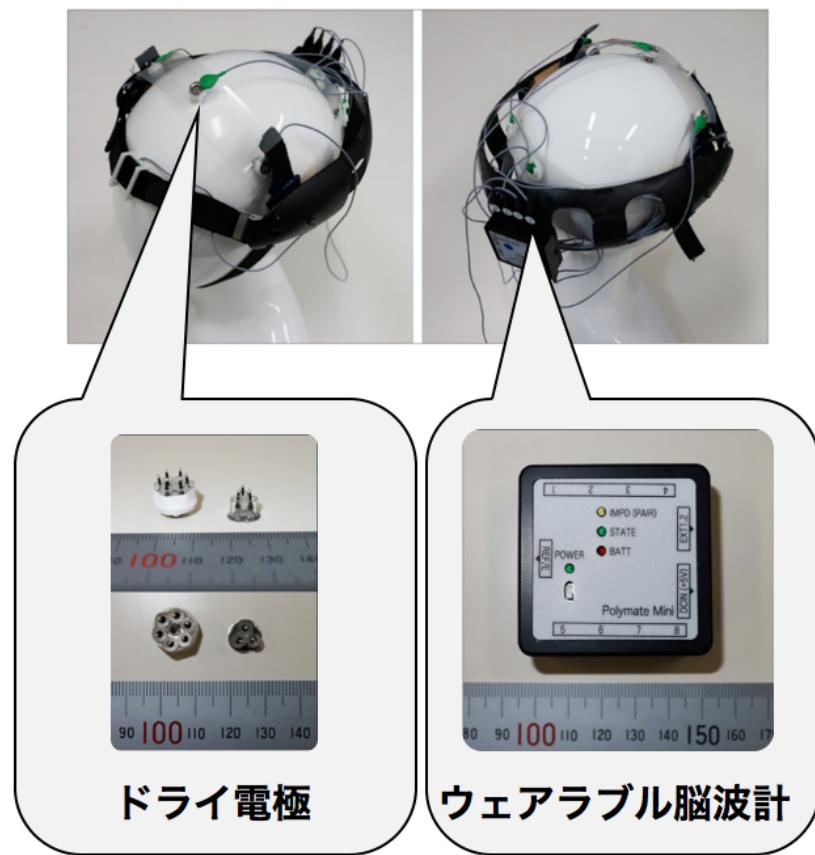


図 2. 使用したウェアラブル脳波計

N400

概観

N400 は、MartaKutas ら(1980)によって初めて報告された。彼らは、参加者に文章を読むように指示をした。この実験では、事象関連電位(ERP)の研究として、現在は一般的である方法であり、決まった位置に 1 単語ずつ順番に単語が表示される形式であった。この実験の中で、文章に意味的な異常があった際に、単語を表示してから約 400ms 後に、頭頂葉中心電極部位で最大となる陰性の ERP が発生することを明らかにした。初期研究により、N400 の効果は、書かれたもの、話されるもの、記号化されているものなど、刺激の様式に依存せず発生することがわかった (Holcom et al., 1990)。N400 は、反復プライミング操作にも見られる。プライミング効果は、前に提示された刺激などの影響が、後の刺激が提示された際に、心理的な影響を及ぼす効果のことである。単語の意味に関するプライミング効果を観察した研究では、N400 の振幅は、先行する文脈に関連する単語と意味的に関連する単語の場合に減少することを明らかにした (Chwillia et al., 1998)。内側側頭葉に損傷がある患者で、同じ刺激に対する認識記憶がチャンスレベルにある場合でも、プライミングによる効果が示された (Hamann, et al., 1997)。

また、頻繁に使用される単語は、まれに使用される単語よりも小さな N400 の振幅を示す (Barber et al., 2004)。さらに、イメージしやすい具体的な単語(バナナなど)の方が、イメージのしにくい抽象的な単語(正義など)よりも、より陰性電位が増加することが観測された。この効果は、前述した一般的な N400 の潜時で起こるが、イメージのしやすさ、つまり、より具体性がある単語での発生位置については、標準的な N400 の発生位置である頭頂葉中心部より前頭で発生していた (West & Holcomb, 2000)。

上述した N400 の発生は、前後の単語による文章を形成しない様な単語リストが連続した場合でも見られる。これらの N400 効果は、意味的プライミング実験、反復プライミング実験で観察される。意味的プライミング実験では、前のプライム刺激に意味的に関連する単語をターゲット刺激にすると、N400 が小さくなる (例えば、医師-看護師では小さくなり、テーブル-看護師では大きくなる)。幾何学的な線型図などはプライミング実験による繰り返し効果により、N400 の時間窓で、陰性電位の減少は観察されなかった。一方で、この繰り返しによる N400 の発生は、それぞれ視覚的、聴覚的な刺激形態、さらに視覚と聴覚を組み合わせた刺激形態でも観察された。 (Domalski et al., 1991; Rugg et al., 1993)。

波形的特徴

N400 は通常、刺激の開始後 400ms から ±50ms の間に最大振幅に達する。 (Kutas & Hillyard, 1980)。

発生源について

左側頭葉と、寄与は少ないが、右側頭葉が、N400 の発生に関係しているとされる (Nobre & McCarthy., 1995). これらの皮質は、意味情報の表現と探索に対して重要であるとされてきた(Beeman & Chiarello, 1998). 一方で、fMRI, MEG の研究では、左下前頭皮質に発生源があることも示唆している (Hagoort et al., 2004)

意味的処理においても左下前頭皮質の機能が関係している (Gold & Buckner, 2002). この領域は意味的探索自体に敏感ではなく、状況に対する選択応答時 (Kerns et al., 2004) や、意味的な特徴に対する語彙の選択またはその競合が起こった際 (Thompson-Schill et al., 1997), 意味的に統一を行う際 (Van Berkum et al., 2005), さらに意味的な情報に対する選択応答時 (Gabriel et al., 1998) での活動が観察された.

以上の特徴を持つ脳波成分である N400 を用い、以下の実験を行なった.

導入

近年、ICT 教育によって、デジタルデバイスの導入が進んでいる。GIGA スクール構想では、2019 年より全国の児童・生徒 1 人に 1 台のコンピューターと高速ネットワークを整備することを目指している(令和元年度 文部科学白書より)。デジタルデバイスが学習においてどれほどの効果があるかは、その様な背景から、興味を持たれる分野である。

特に、デジタルデバイスのメリットは、一元管理ができ、電子化して保存することで、膨大なデータを整理し、物理的な保管スペースが必要なくなることや、先生が見廻らずとも、画面上で、学習の管理ができ、生徒へのフィードバックも行い易くなる。また、データ分析により、各生徒の習熟スピードや癖など、新たな知見を得ることによる指導改善も可能になると考えられる。

その様な、効果が見込まれる一方で、実際の学習活動に対しては、アナログのデバイスが与える質感などは記憶定着に良い影響を与えるといった長所も考えられるため、デジタルデバイスが学習に全面的に良いと考えることは難しい。また、デジタルデバイスのインターフェース自体も今後も更なる改善の余地が残されている。

行動結果を指標として、習熟度を評価するには、その差が明確になるまでに時間がかかる可能性がある。学習に対する影響を、早期に調べることで、その様なインターフェースの改善が早期に行えると考えられる。

McLaughlin, J ら (2004). の研究では、第二外国語を平均 14 時間学習した際に、擬似語かどうかを識別するタスクにおいて、正答率はチャンスレベルである一方、N400 は学習時間の増加に伴い振幅が増加することが明らかになった。言い換えると、N400 では、学習が行動結果に現れる前から、習熟の違いによって差を観察できる可能性を示唆しており、明確に判別ができるなくとも、脳波では違和感を感じていることが示唆される。これは、行動結果に現れる前に、脳波による指標を用いて、学習に対する習熟度を早期に判別できる可能性があることから、ニューロエルゴノミクスの分野の考え方を利用して利用できる脳波指標であると考えられる。よって、本研究では、漢字の読み方や外国語の意味を学習する際に、使用するデバイスの違いで生じる習熟度のわずかな違いが脳波に影響するという仮説を立て、それらの習熟度に対して、脳波から判別ができるかどうかを実験によって検証した。

背景

デジタルデバイスは教育現場でより一層の導入が進められており、学習への影響についてアナログデバイスの使用との違いを理解することは、効果的な教育の実践につながる可能性がある。つまり、効果的な教育システムを検討するには、デジタルデバイスの使用が学習に与える影響を評価することが重要である。

これまでの行動結果を調べた研究では、手書きでの学習がキーボードでタイピングを使用する学習よりも効果的であることが示されている。行動研究によると、パソコンでメモを取った大学生は、手書きでメモを取った大学生よりも内容理解を問う質問に対する成績が悪いことが示された。タイピングのこのネガティブな影響は、タイピングが講義の逐語を書き出す傾向がある一方、手書きでは、情報の処理と言い換えによるアウトプットが必要であることを示唆している (Mueller and Oppenheimer, 2014)。

同様に、Longcamp(2005)らは 未就学児のアルファベット文字の認識を行う学習でも、手書きのトレーニングの方が、タイピングを用いたトレーニングよりも優れていることを示した。Kiefer(2015)らも同様の報告をしている。さらに、アルファベットの手書きを練習した未就学児の子供は、タイピングのトレーニングを受けた子供よりも、自由記述で正確に書き出せた単語の数、そして、指示を受けて書き出した単語を正確に書く確率が高かった (Kiefer et al., 2015)。

成人での実験では、手書きで書かれた単語の方が、従来のキーボードやタッチキーボードで入力した単語よりも、自由に思い出す課題の場合、思い出した単語の数が多かった (Mangen et al., 2015)。成人の参加者では、キーボードで入力するよりも紙に書き留めて見慣れない文字を学習した後の認識精度が高かった (Longcamp et al., 2008)。

タイピングに対し手書きが有利であることは、脳波 (EEG) (van der Meer and van der Weel, 2017) および核磁気共鳴画像法研究(MRI) (Longcamp et al., 2008; Vinci-boohner et al., 2016)の研究結果での説明により、動作と認知の結びつきに由来すると考えられる(Kiefer et al., 2015)。

これらの研究は、従来の手書き、つまり紙にペンや鉛筆で書くことに焦点を当てていた一方で、タブレットにデジタルペンで書くことの学習への影響を調査した研究が複数存在する。事実、最近の研究では、タブレット上のデジタルペンを使用した手書きの動きは、紙上のインクペンを使用した場合と同じではないことが報告されている (Alamargot and Morin, 2015; Gerth et al., 2016a, b; Wollscheid et al., 2016; Guilbert et al., 2019)。Alamargot and Morin (2015) は、学齢期の生徒の手書きの運動は、タブレット画面に対し先端がプラスチックのペンで書くときは、紙にボールペンで書くときと異なっており、その学習効果は年齢によって異なることを示した。

手書きを行う際にデジタルツールを使用することの明白な欠点が、最近の行動研究で示されている。Mayer (2020)らは 7 週間の間にアルファベットを学習する未就学児について、

(1) 紙に鉛筆で書く子供, (2) タブレットにデジタルペンで書く子供, (3) タブレット上のタッチキーボードで入力する子供の 3 つのグループに分けて調査した。紙と鉛筆を使用したグループは、タッチキーボードを使用したグループと比較して、文字認識のパフォーマンスが向上し、視覚空間スキルが向上した一方で、デジタルペンとタブレットを使用したグループでは、キーボードと差はなかった。さらに、キーボードでタイピングする子供たちは、デジタルペンとタブレットを使用する子供たちよりも単語の書き取りと読み取り能力が優れていた。したがって、タブレットとデジタルペンを使用することで、運動制御がより多く必要になると考えられるため、識字能力を習得する際に効果的でない可能性がある。

脳活動の計測により、その差を調査した研究も存在する。Hatano (2015)らは、理科の授業に参加する高校生がタブレットとデジタルペンでメモを取っている際と、紙と鉛筆を使用している際の脳波を記録し、紙と鉛筆を使用してメモをとった学生と比較し、タブレットでメモを取っている学生の前頭領域で、シータ波の活動がより活発であることを報告した。これはデジタルペンで書く場合に、慣れないツールであるために発生した可能性がある。しかし、これは、学習中の脳活動であり、学習効果に対しての脳活動変化を見ることが重要ではないかと私は考えた。

そこで、本研究では、脳活動の計測において、単語の学習効果に関連すると考えられる N400 に注目し、デジタルペンとインクペンを使用した手書きの学習効果を測定した。N400 は、単語、写真、およびその他の意味のある刺激（レビューについては、Kutas and Federmeier, 2011 を参照）にさらされた後、約 400 ミリ秒でピークに達する陰性成分であり、脳内での意味的処理過程に関連し、先行する刺激に対する記憶へのアクセスと文脈的意味処理の容易さにより振幅が変化する。この際、記憶へのアクセスや文脈的意味処理が容易であるほど、N400 の振幅は抑制され、一方で、記憶へのアクセスが困難で、意味処理に違和感があるほど陰性が大きくなる（レビューについては、Kutas and Federmeier, 2000 を参照）。その他複数の研究では、N400 が言語学習（Ojima et al., 2005）と発育の進み具合（Friedrich and Friederici, 2004, 2010; Reid et al., 2009）によって変化することを示している。

最も重要なことは、N400 の影響が行動結果による指標よりも学習の初期段階で観察されていることである。（McLaughlin et al., 2004）。第二言語（L2）を学ぶ大人の能力について、McLaughlin (2004) らは、教室での指導の平均時間が 14 時間後に取得した N400 の振幅変調が第二外国語の正しい単語と疑似単語を区別していることを示した一方で、行動結果である 第二外国語の正しい単語・擬似単語の判別を行った課題に対する結果はチャンスレベルであった。これは、N400 が強力な習熟における評価ツールであることを示唆している。そして、特にその初期段階で、学習効果を明らかすると考えられる。

本研究における実験では、デジタルペンに習熟していることによる影響について考察するために、デジタルペンを日常的に使用しているかどうかに応じて、参加者を 2 つのグループに分け、学習効果の指標として N400 を用いた。

学習活動の直後に、反復プライミングパラダイムによる脳波計測実験を実施し、N400 の反復プライミング効果が使用デバイス（デジタルペンとインクペン）、そして、デジタルペンとタブレットの習熟度によって影響を受けるかどうかを調べた。

2 つの刺激が連続して提示され、後続の刺激（ターゲット）が前の刺激（プライム）と同一/関連している場合、ターゲットの N400 振幅は、繰り返されない/関連のないターゲットと比較して減少する (van Petten et al., 1991; Deacon et al., 2004; Matsumoto et al., 2005; Rugg, 1985; Holcomb, 1993)。本研究では、学習の難易度についても区別した 2 つの課題を行なった。漢字学習ではその言葉の意味はよく知っているが、その漢字表記には精通していないような難読漢字を書き、その読み方について学習する易タスク、インドネシア語学習ではインドネシア語の綴りを書き取り、その意味を学習する難タスクとして設定した。学習活動で書かれた単語（プライム）の後に、漢字学習では、音韻的、意味的に同一、インドネシア語学習では意味的に同一である単語（反復条件）、またはそうでない単語（非反復条件）がターゲットとして続いた。学習が進む、つまり習熟が進むにつれて、反復条件と非反復条件の間で N400 の振幅に大きな違いが生じると想定した（これを、N400 繰り返し効果とした）。

McLaughlin (2004) らは 14 時間程度の学習のうちに、N400 の振幅が変化していることを示したが、本研究では一時間以内の学習としており、このような短時間の学習でも N400 が変化するかを調べるという点において新規性の高い研究である。さらに、本研究は、タブレット上にデジタルペンを用いて手書きで学習した後の脳活動が紙にペンを用いて手書きで学習した後と異なるかどうかを調査する最初の研究である。

方法

参加者

本実験は国立研究開発法人情報通信研究機構の倫理委員会の承認を受け、すべての参加者に対して実験内容について事前に十分な説明を行った後、参加者の同意を得て行われた。すべての実験は、ヘルシンキ宣言に記載された倫理基準に従って実施された。参加者は正常な聴力と正常/正常に矯正された視力を持っていた。

漢字学習

参加者は精神疾患の病歴がなく、母国語が日本語である参加者を採用した。脳波実験後に配布されたアンケートの結果により、2つのグループに分けられた。日常生活でタブレットとデジタルペンを用いていた参加者は、デジタルペン習熟群の11人（男性10人と女性1人、年齢26～52歳）（Familiar group）と、それをまったく使用しなかった参加者として、デジタルペン初心者群の17人（男性10人と女性7人、年齢21～47歳）（Unfamiliar group）に分けた。合計で、28人の参加者が参加し、それぞれのグループから得られたデータについて分析を行なった。

インドネシア語学習

参加者は精神疾患の病歴がなく、インドネシア語に触れた経験がない、母国語が日本語である右利きの参加者を採用した。すべての参加者は、日常生活で定期的にキーボードを使用していた。日常生活でタブレットとデジタルペンを用いていた参加者は、デジタルペン習熟群のグループ（Familiar group）と、それをまったく使用しなかった参加者は、デジタルペン初心者群のグループ（Unfamiliar group）に分けた。合計で、39人の参加者（デジタルペン習熟群のグループ：12人、デジタルペン初心者群のグループ：27人）が参加した。脳波実験で60%未満の平均タスク精度であった6人の参加者の測定データを、研究から除外した。それに従い、33人（男性25人と女性8人、年齢21～48歳）；デジタルペン習熟群12人（男性10人と女性2人、平均年齢 37.5 ± 5.9 歳）、デジタルペン初心者群21人（男性15人と女性6人；平均年齢 34.4 ± 10.0 歳）から得られたデータについて分析を行なった。

学習内容学習活動のための単語の選択

漢字学習

学習内容は、ほとんどの日本人が漢字を読めない、一般的にかな（表音文字）で書かれた有名な日本語120字を選んだ。単語自体は、日本人にとってなじみがあり、小学生でもイメージしやすいものであった。実際、高い親密さとイメージのしやすさに関する値は7段階で平均5.7を超えていた（Amano and Kondo, 1999; Sakuma et al., 2005）。120個の単語を、それぞれ20語の6セットに分けた。Kruskal-Wallisテスト（Kruskal & Wallis, 1952）

の結果に基づき、単語の語彙特性がセットの間で有意差がないことを確認した。文字数 ($p = 0.20$)、モーラ数 ($p = 0.98$)、親密度値 ($p = 0.50$)、想像力値 ($p = 0.73$) (Dellantonio et al., 2014)にセット全体で有意差はなかった。学習活動では、各参加者は、参加者全体でランダムに選択された 2 セットの単語を用いて学習した。

インドネシア語学習

動物の名前（トラ、ヒツジなど）、体の部分（脚、口など）、人（母親、先生など）など、インドネシア語でよく使われる 60 の単語を選択した。インドネシア語の日本語訳は高い頻度で使用される単語（100 万回あたりの頻度の常用対数値： 1.7 ± 0.51 ）であり、日本人にとって親しみが高いものである（7 段階評価で 6.3 ± 0.4 ）(Amano and Kondo, 1999)。単語は、1-3 文字の漢字または仮名で書かれ、1-4 音節を持つ。インドネシア語とそれに対応する日本語の単語の 60 ペアを、20 ペアずつの 3 つの学習セットに分けた。Kruskal-Wallis テストの結果に基づいて、日本語の単語の語彙特性がセット間で一致することを確認した。実際に、セット間で頻度 ($p = 0.25$)、親しみやすさ ($p = 0.25$) に有意差はなかった（表 1）。学習活動にて、各参加者は、参加者全体でランダムに選択された 3 つの単語セットを用いて学習を行った。

表 1 3 つの学習セットにおけるインドネシア語に対応する日本語の単語の語彙特性

Lexical property	Set 1	Set 2	Set 3	Kruskal-Wallis test
Common logarithm value of frequency per million	1.6 ± 0.5	1.5 ± 0.7	1.8 ± 0.4	n.s.
Familiarity value (7 grades)	6.4 ± 0.2	6.2 ± 0.4	6.2 ± 0.4	n.s.

脳波実験の刺激

漢字学習

各参加者が学習活動で書いた漢字 40 語（インクペンで 20 語、デジタルペンで 20 語）を反復プライミングパラダイムのプライム刺激として使用した。各プライム刺激の後には、日本語の表音文字（かな）で書かれた単語で構成されるターゲット刺激が続いた。ターゲット単語のタイプに応じて、2 つの条件が設定された。各条件は、ターゲット刺激がプライム刺激の読みを表す反復条件=repetitive condition（意味的および音韻的に同一の条件）と、ターゲット刺激がプライム刺激の読みと一致しない非反復=non-repetitive condition（意味的および音韻的に異なる条件）である。非反復条件下での試行では、1 つのセットの漢字単語と他のセットの読み（たとえば、セット A の漢字とセット B の読み仮名のペア）を使用した。

非反復条件において、プライミング効果による望ましくない音韻的および意味的な影響を防ぐために、2 人の評価者が各ペアのプライム単語とターゲット単語間の音韻的類似性と意味的関係性をチェックした。最後に、両方の評価者が音韻的類似性または意味的関係を持たないと判断した単語ペアが採用された。各参加者が学習した漢字を、実験全体を通して 4 回、反復条件で 2 回、非反復条件で 2 回提示した。したがって、参加者は合計 160 回の試行を行った（プライム刺激はデジタルペンで学習した単語について、反復条件で 40 回、非反復条件で 40 回の試行で、プライム刺激がインクペンで学習した単語について、反復条件で 40 回、非反復条件での 40 回の試行を行った。）

インドネシア語学習

脳波実験では、インドネシア語の単語（プライム刺激）が提示され、その後に日本語の単語（ターゲット刺激）が続く反復プライミングパラダイムを使用した。プライム刺激の単語とターゲット刺激の単語は、意味的に同一である反復条件=repetitive condition（意味的に同一の条件）または同一ではない非反復条件=non-repetitive condition（意味的に異なる条件）とした。非反復条件の単語ペアは、あるセットのインドネシア語と別のセットの日本語の単語によって作成した。非反復条件に対する音韻的および意味論的プライミング効果による望ましくない影響を防ぐために、2 人の評価者が、各ペアのプライム刺激とターゲット刺激間の音韻的類似性と意味的関係性をチェックした。両方の評価者によって承認された単語ペアのみを使用した。各インドネシア語の単語を、実験全体を通して主な刺激として 4 回提示した（反復条件:2 回、非反復条件:2 回）。したがって、参加者は合計 240 回の試行を行なった。つまり、単語刺激について、以下の編成とした。プライム刺激は、インクペンで書いた単語について、反復条件での 40 試行と非反復条件での 40 試行、デジタルペンで書いた単語について反復条件で 40 試行、非反復条件で 40 試行、キーボードで入力した単語について、反復条件で 40 試行、非反復条件で 40 試行を提示した。

実験手順

漢字学習

実験の流れは、(1) 事前学習テスト. (2) 漢字学習活動. (3) 学習後テスト. (4) EEG 測定の順番に行った (図 3).

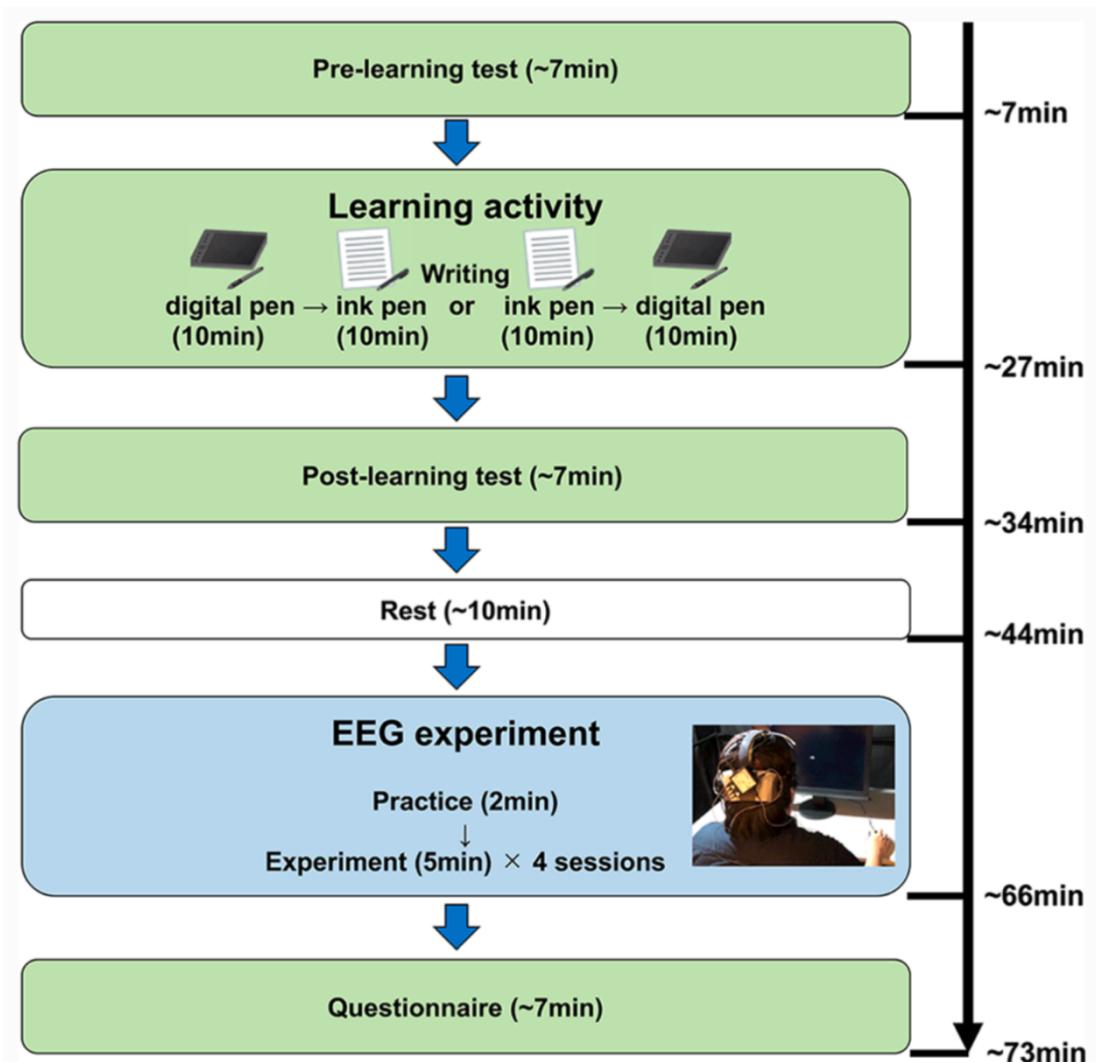


図 3. 漢字学習における実験手順

図は、実験ステップの詳細な順序を示している。まず、参加者は約 7 分の事前学習テストを完了した。学習活動では、参加者は各デバイスで漢字を書くことによって漢字に対する読み仮名を学習した（各 10 分）。デバイスの使用順序はランダムであった。その後、参加者は学習後のテストを受けた。10 分間の休息後、脳波検査（EEG）実験を約 22 分間実施した。

インドネシア語学習

実験の流れは次の通りである。：(1) 学習活動の評価, (2) 学習後のテスト, (3) 脳波測定。これはすべて同じセッションで行った。これらの各ステップのプロトコルを（図 4）に示す。

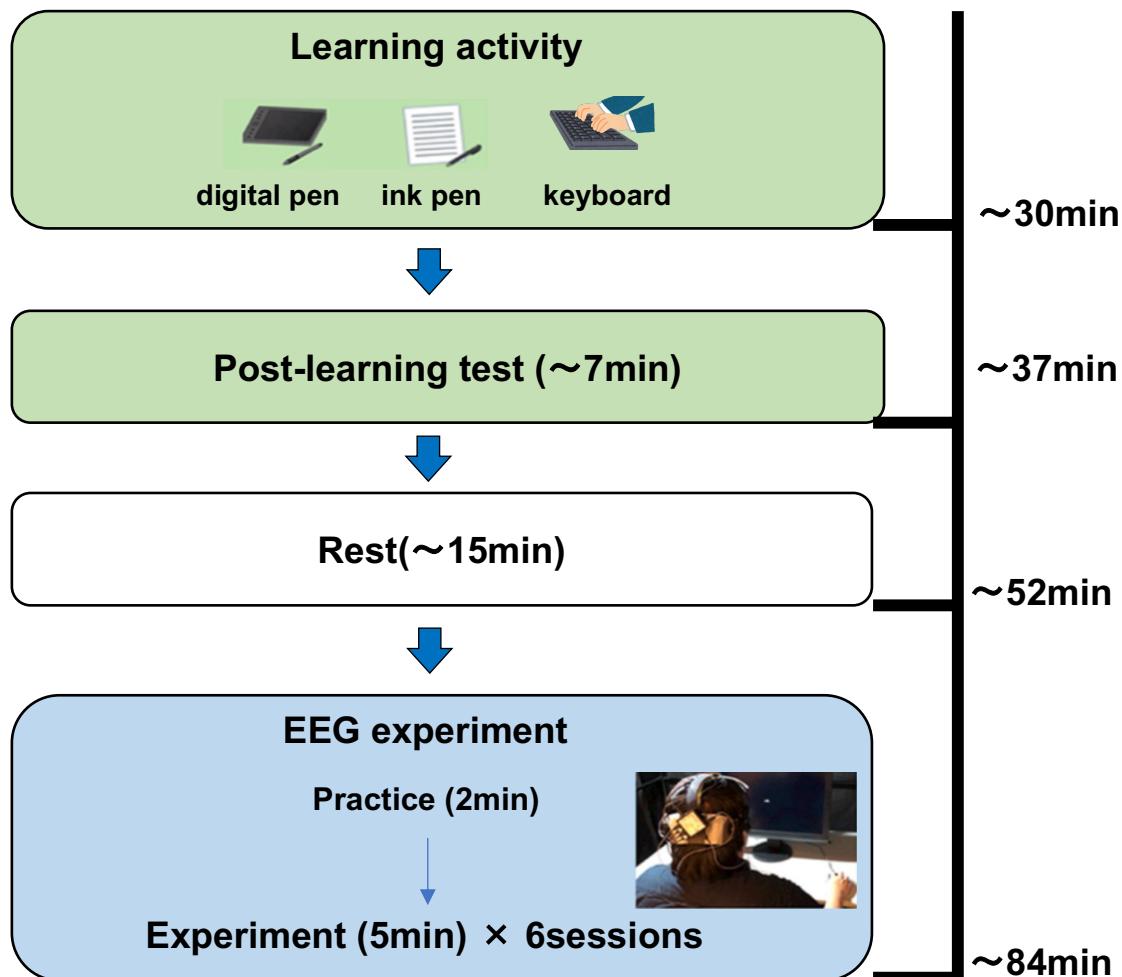


図 4. インドネシア語学習における実験手順

図はインドネシア語学習の実験ステップの詳細な順序を示している。学習活動で、参加者は各デバイスでインドネシア語を書くことによってインドネシア語の意味を学習した（各 10 分）。デバイスの使用順序はランダムであった。その後、参加者は学習後にテストを受けた。15 分程度の休息後、脳波検査（EEG）実験を約 32 分間実施した。

学習前および学習後のテスト

漢字学習

学習活動がテスト結果に与える影響を調査するため、参加者の漢字の読み能力を、学習の前後でテストした。参加者へ渡されたテストシートには学習した全ての漢字が含まれており、参加者はかなで単語の正しい読みを書いて答えた。学習セッションの前に参加者が正解を答えた漢字についてのデータは、行動結果と N400 の結果共に解析データから除外した。

インドネシア語学習

学習活動の後、各インドネシア語に対する日本語での意味をテストした。参加者に渡されたテストシートにはすべての学習したインドネシア語が含まれており、参加者は日本語訳を書いて答えた。

学習活動

漢字学習

参加者ごとに 2 通りの学習方法に対し、受ける順序が均等になるよう設計した。参加者がタブレット上にデジタルペンで繰り返し 20 単語を書いて学習を行うセッションと、紙上にインクペンで繰り返し 20 単語を書いて学習を行うセッションである。各ペンでの学習セッションは 10 分間ずつ行われた。各セッションを、参加者ごとにランダムな順序で実行した。2 つのセッションの間に休憩時間を設けた。各学習シートには、20 組の漢字（表意文字）とそれに対応する読み仮名（表音文字）が書かれている。参加者には、漢字を写し書きして読みを覚えるように求め、学習活動後に読み方をテストすると宣言した。デジタルペン学習セッションでは、学習シートの PDF ファイルがタブレット(Cintiq 13HD Creative Pen Display DTK-1301; 株式会社ワコム)上に表示され、参加者はデジタルペン(Propen; 株式会社ワコム)で書き込んだ。インクペンセッションでは、学習シートをタブレット上(Intuos Pro Large PTH-851; 株式会社ワコム)に置き、参加者にインクペン(株式会社ワコム)で書くように指示した。

インドネシア語学習

参加者の数について、3 通りの学習方法に対し、受ける順序が均等になるよう設計した。参加者がタブレット上にデジタルペンで繰り返し 20 単語を書いて学習を行うセッションと、紙上にインクペンで繰り返し 20 単語を書いて学習を行うセッション、キーボードを用いて、PC 画面上に 20 単語を入力して学習を行うセッションである。参加者には、20 のインドネシア語の単語とそれに対応する日本語訳が書かれた学習シートで書き取り学習を行う様に指示した。各条件で、各シートには同じ 20 組の単語が含まれており、参加者は学習シートに 20 のインドネシア語の単語を繰り返し書いて覚える様に指示をした。10 分の

制限時間に達するまで、参加者は、次シートに移行し、書き取り学習を続けた。インクペンの学習では、ペンタブレット（Intuos Pro Large PTH-85; 株式会社ワコム）に紙の学習シートを置き、インクペン（KP-130-01; 株式会社ワコム）で書き込んだ。デジタルペンの学習では、学習シートの PDF ファイルがタブレット（Cintiq 13HD Creative Pen Display DTK-1301; 株式会社ワコム。）上に表示され、デジタルペン（Pro Pen KP503E; ワコム株式会社）で書くように支持した。キーボードの学習では、学習シートの PDF ファイルが PC ディスプレイ（ColorEdge CX241; EIZO 株式会社）に表示され、キーボード（USB Wired Keyboard 104 Keys Black and Silver KU-0316; HP, Inc.）で入力を行った。

脳波測定

EEG および眼電図（EOG）信号は、8 チャンネルのウェアラブル脳波計（Polimate mini AP108; 株式会社ミユキ技研）を使用して継続的に測定された。乾式電極（株式会社ユーケメディカル）を使用して、国際 10-20 法における Fz, Cz, および Pz 部位に設置した。さらに、眼球運動とまばたきのアーチファクトを検出し、EEG 信号からのノイズ成分を除去するために、電極を左眼の上部と右側に配置して、垂直および水平の EOG 成分を測定した。すべての信号は、左耳たぶをグランド、右耳たぶをリファレンスとして、500Hz でサンプリングされた。

漢字学習

「脳波実験の刺激」のセクションに記載した実験は、脳波信号を記録しながら実施された。図 5 に示したように、プライム、ターゲット、およびキー（###）は、各刺激開始非同期(SOA)を 1,000 ミリ秒に設定して継続的に提示した。プライム刺激とターゲット刺激の提示時間は 300 ミリ秒であったが、キーの提示時間は 500 ミリ秒であった。参加者は、プライム（漢字）とターゲット（カナ）の単語を默読し、キーの提示後にコンピューターのマウスをクリックして、プライムとターゲットの刺激の読みが一致するかどうかを答えるように求めた。次のトライアルのプライム刺激を、キーの開始から 2,000～3,000 ミリ秒後に提示した。MATLAB (MathWorks, Inc.) と Psychophysics Toolbox ver. 32 を使用して、反復プライミングタスクを実行した。

インドネシア語学習

プライム刺激、ターゲット刺激、判別の開始を知らせるキー（###）は、刺激開始非同期(SOA)を 1,000 ミリ秒に設定して連続的にモニターに提示した（図 6）。プライム刺激とターゲット刺激の提示時間は 300 ミリ秒で、キーの提示時間は 500 ミリ秒とした。参加者は、プライム刺激（インドネシア語）とターゲット刺激（日本語）を默読し、キーの提示後にコンピューターのマウスを右手でクリックして意味が一致するかどうかを回答した。次のトライアルのプライム刺激を、キー開始から 2,000～3,000 ミリ秒後に提示した。

MATLAB (MathWorks, Inc.) と Psychophysics Toolbox ver. 32 を使用して、反復プライミングタスクを実行した。

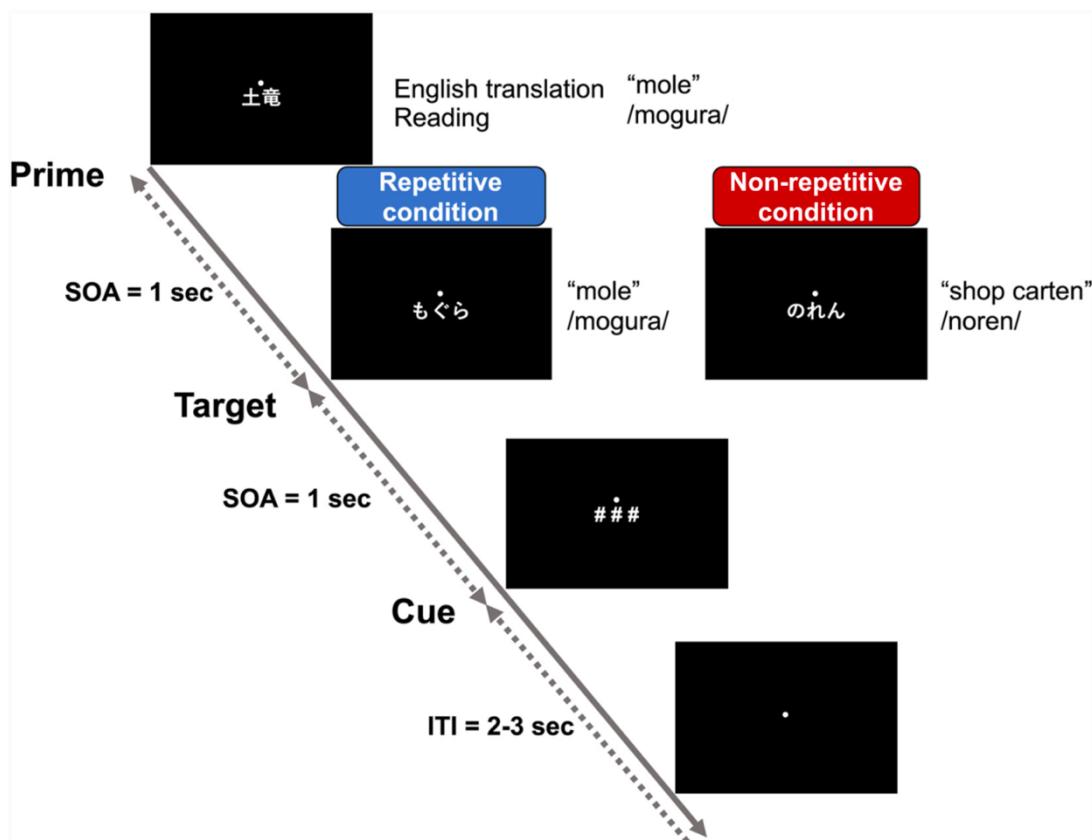


図 5. 漢字学習における反復プライミングパラダイムの概略図

プライム刺激は、参加者が学習活動で書いた漢字(表意文字)で書かれた単語とし、ターゲット刺激は、平仮名(表音文字)で書かれた単語とした。

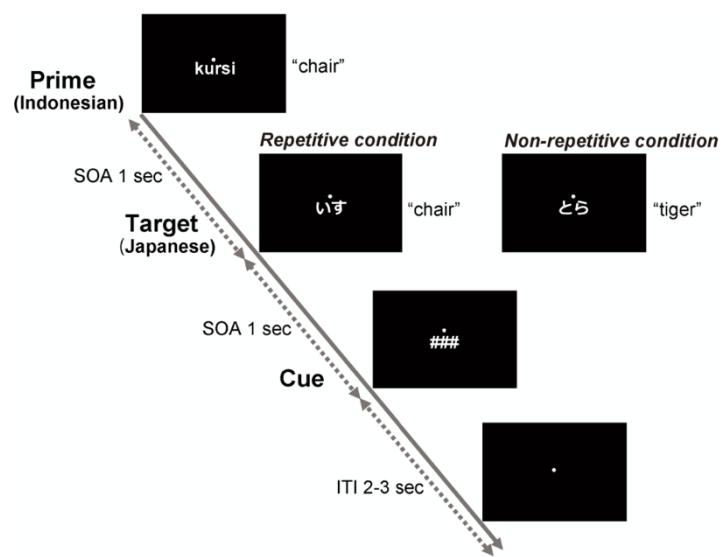


図 6. インドネシア語学習における反復プライミングパラダイムの概略図

プライム刺激は、参加者が学習活動で書いたインドネシア語の単語とし、ターゲット刺激は、平仮名で書かれた意味を表す単語とした。

データ解析

行動データ

漢字学習

学習活動前後のテストの正解数の差を記憶した単語数として参加者ごと、使用したデバイスごとに取得した。また、脳波実験中の判別課題の正答率を、参加者ごと、使用したデバイスごとに取得した。さらに、判別課題時にキュー(###)刺激が表示されてから、参加者がマウスをクリックし、その漢字の読みが正しいか間違っているかを回答するまでの時間を Reaction time(RT)として、反復条件、非反復条件を平均したデータを取得した。

インドネシア語学習

学習活動前後のテストの正解数の差を記憶した単語数として参加者ごと、使用したデバイスごとに取得した。また、脳波実験中の判別課題の正答率を、参加者ごと、使用したデバイスごとに取得した。さらに、判別課題時にキュー(###)刺激が表示されてから、参加者がマウスをクリックし、そのインドネシア語の意味が正しいか間違っているかを回答するまでの時間を RT として、反復条件、非反復条件を平均したデータを取得した。

脳波データ

漢字学習

EEG および EOG 信号の分析は、MATLAB(MathWorks, Inc.)およびツールボックスである EEGLAB (Delorme and Makeig, 2004) を使用した。0.2~30 Hz(3,000 次) の FIR バンドパスフィルターをデータ取得した各 EEG 信号と EOG 信号に適用した。主に眼球運動とまばたきによって引き起こされるアーチファクト成分は、アーチファクト部分空間再構成(Artifact Subspace Reconstruction:ASR)と独立成分分析を用いたノイズ除去処理を行い、EEG 信号の中から除外した。ターゲット開始の 100 ミリ秒前をベースラインとして使用し、補正した。Fz, Cz, および Pz チャネルで $\pm 80 \mu\text{V}$ を超える試行、垂直 EOG および水平 EOG チャネルで $\pm 100 \mu\text{V}$ を超える試行、および事前学習テストに基づいて正解であった単語の試行を取り除いた。次に、ターゲット開始の 100 ミリ秒前から 800 ミリ秒後までの信号を、各条件（反復と非反復条件）および各チャネル、各条件（反復条件、非反復条件）で平均した。反復条件と非反復条件の間の N400 振幅の差 (N400 繰り返し効果) が、各学習が進むにつれて、より大きな差が生じると仮定し、学習の指標として使用した。つまり、N400 繰り返し効果を検出するために、非反復条件の ERP から反復条件の ERP を差し引き、各参加者および各学習デバイスの分析対象の脳波データとして使用した。N400 の脳波は、ターゲットの開始後 300~450 ミリ秒の平均振幅を使用した。N400 に対して大きな繰り返し効果(つまり、繰り返しと非繰り返しの違い)を示す Cz または Pz 電極を、各参加者および各学習デバイスの分析対象の脳波データとして使用した。

インドネシア語学習

EEG, EOGの分析は、MATLAB およびE E G L A B ツールボックスを使用して行った。測定された EEG, EOG 信号には、0.5 ~ 20 Hz (3,000 次) の FIR バンドパス フィルターをデータ取得した各 EEG 信号と EOG 信号に適用した。主に眼球運動とまばたきによって生じるアーチファクト成分は、アーチファクト部分空間再構成(ASR)と独立成分分析によるノイズ除去処理を使用して、EEG 信号から除外した。さらに、Fz, Cz, および Pz チャネルで $\pm 30 \mu\text{V}$ を超える試行、または垂直および水平 EOG チャネルで $\pm 100 \mu\text{V}$ を超える試行を使用するデータから除外した。次に、ターゲット開始の 100 ミリ秒前から 800 ミリ秒後までの信号を、各条件(反復条件, 非反復条件), 各チャネルによって平均した。次に、ターゲット刺激開始の 100 ミリ秒前をベースラインとして補正した。反復条件と非反復条件の間の N400 振幅の差 (N400 繰り返し効果) が、各学習が進むにつれて、より大きな差が生じると仮定し、学習の指標として使用した。つまり、N400 繰り返し効果を検出するために、非反復条件の ERP から反復条件の ERP を差し引き、各参加者および各学習デバイスの分析対象の脳波データとして使用した。N400 の脳波は、ターゲットの開始後 300~450 ミリ秒の平均振幅を使用した。

統計解析

行動結果

グループと学習に使用したデバイス間の行動結果指標の違いを評価するために、実験(漢字, インドネシア語), グループ (デジタルペン習熟群, デジタルペン初心者群), デバイス (インクペン, デジタルペン) を要因として、得られた記憶語数, 判断課題正答率, RT のそれぞれの結果について、3 要因分散分析 (ANOVA) を実行した。この際の有意水準を 5%に設定した。有意な交互作用が得られた場合、各要因について t 検定を実行した。

脳波指標

各参加者の N400 繰り返し効果と行動結果の関連を調査するため、実験(漢字, インドネシア語), グループ (デジタルペン習熟群, デジタルペン初心者群), デバイス (インクペン, デジタルペン), 記憶語数, 判断精度, 年齢, RT をパラメータとして、最適なモデル選択を行った。R の lm 関数を用いた重回帰分析、そして step 関数を用いて AIC(赤池情報量基準)が最小となるモデル選択を行った。

続いて、N400 繰り返し効果に対し、実験(漢字, インドネシア語), グループ (デジタルペン習熟群, デジタルペン初心者群), デバイス (インクペン, デジタルペン) を要因として、3 要因分散分析 (ANOVA) を実行した。この際の有意水準を 5%に設定した。有意な交互作用が得られた場合、各要因について t 検定を実行した。

結果

記憶語数

記憶語数について、3要因分散分析(ANOVA)の結果、実験に主効果が得られた($F(1,121)=20$; $p < 0.01$, $\eta^2=0.174$)。一方で、グループ($F(1,121)=0.489$; $p=0.49$, $\eta^2=0.004$), デバイス($F(1,121)=0.233$; $p=0.23$, $\eta^2=0.012$)に主効果は見られなかった。

交互作用については、実験*グループ($F(1,121)=0.87$; $p=0.35$, $\eta^2=0.008$), 実験*デバイス($F(1,121)=0.01$; $p=0.92$, $\eta^2=0.000$), グループ*デバイス($F(1,121)=0.11$; $p=0.74$, $\eta^2=0.001$)全てに見られなかった。

実験に関する、下位検定を行なったところ漢字の記憶語数が有意に大きかった($t(120)=4.39$, $p < 0.01$, $r=0.37$)。(図7)

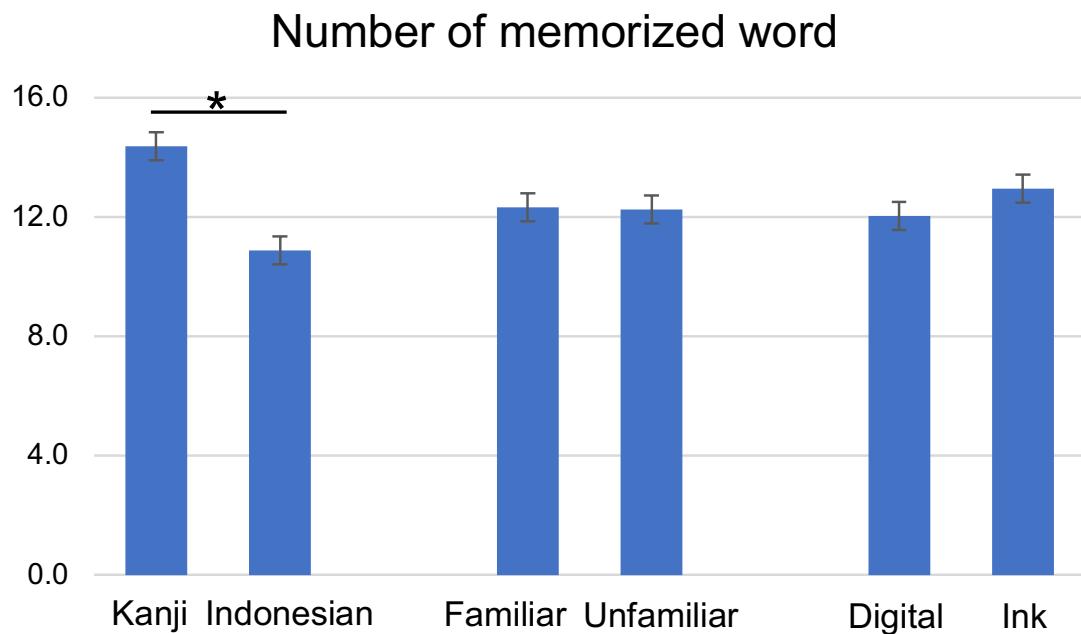


図7. 実験、グループ、デバイスの各要因における記憶語数

判別課題正答率

判別課題の正答率について、3要因分散分析(ANOVA)の結果、実験に主効果が得られた($F(1,121)=29.8$; $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.259$)。一方で、グループ($F(1,121)=0.37$; $p = 0.54$, $\eta^2 = 0.003$)、デバイス($F(1,121)=0.6$; $p = 0.44$, $\eta^2 = 0.005$)に主効果は見られなかった。交互作用については、実験*グループ($F(1,121)=0.07$; $p = 0.79$, $\eta^2 = 0.001$)、実験*デバイス($F(1,121)=0.03$; $p = 0.92$, $\eta^2 = 0.000$)、グループ*デバイス($F(1,121)=0.04$; $p = 0.85$, $\eta^2 = 0.000$)全てに見られなかった。

実験に関する、下位検定を行なったところ漢字の正答率が有意に大きかった($t(120)=5.63$, $p < 0.01$, $r = 0.46$)。(図8)

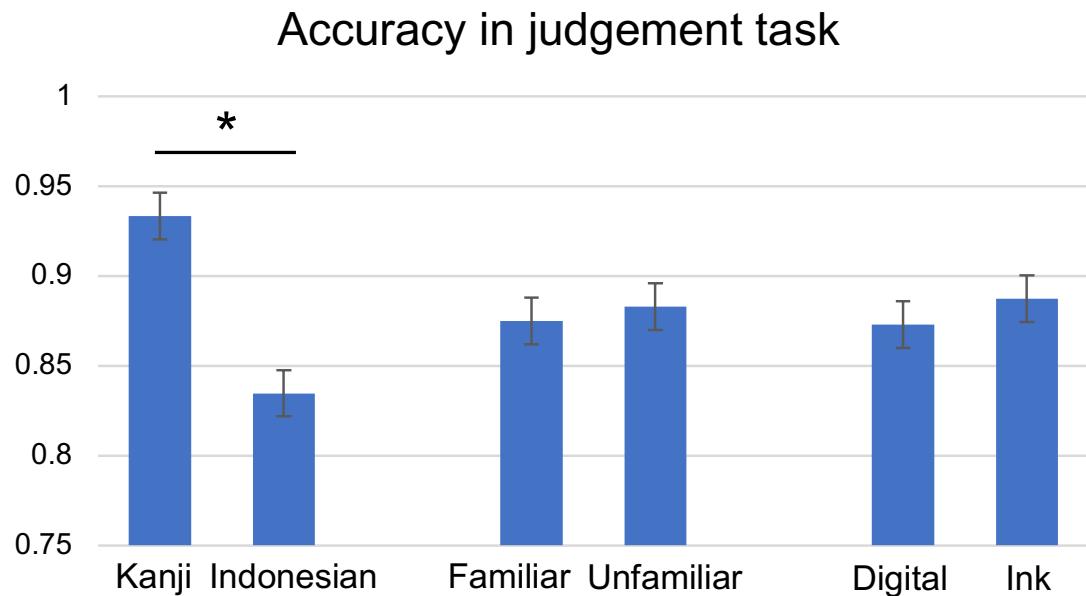


図8. 実験、グループ、デバイスの各要因における判別課題の正当率

RT (反応時間)

RT については、全ての 3 要因分散分析 (ANOVA) の結果、実験($F(1,121)= 3.17; p = 0.08, \eta^2= 0.260$)、グループ($F(1,121)= 0.30; p = 0.58, \eta^2= 0.020$)、デバイス($F(1,121)= 0.00; p = 0.995, \eta^2= 0.00$)全ての要因に主効果が見られなかった。また、実験とグループ($F(1,121)= 1.66; p = 0.20, \eta^2= 0.140$)、グループとデバイス($F(1,121)= 0.02; p = 0.90, \eta^2= 0.000$)で確認された。一方、実験とデバイス($F(1,121)=0.00 ; p = 0.97, \eta^2= 0.000$)の全ての組み合わせの交互作用も見られなかった。(図 9)

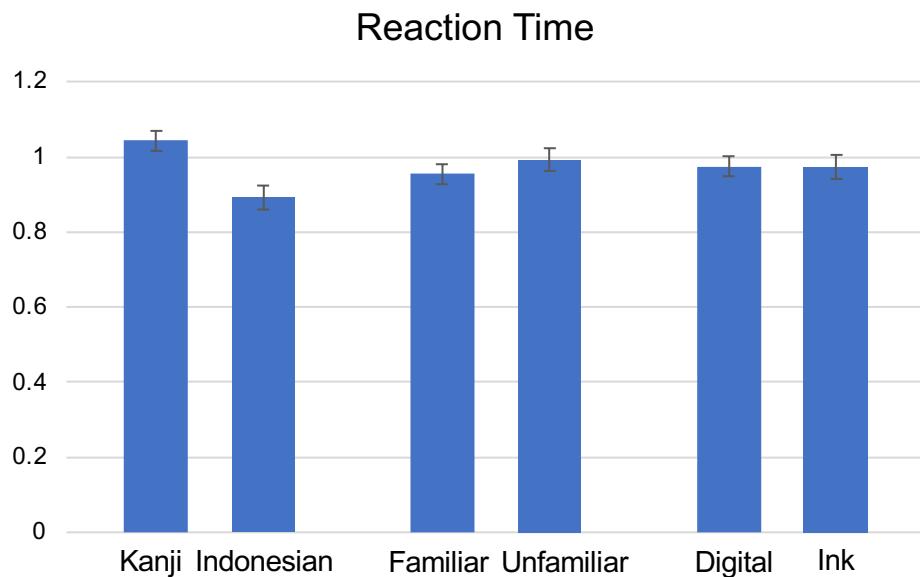


図 9. 実験、グループ、デバイスの各要因における RT

脳波指標

漢字学習、インドネシア語学習において得られた脳波波形を図 10、図 11 に示す。非繰り返し条件から繰り返し条件を差し引いて得られた波形(図 10-B、図 11-B)について、300～450 ミリ秒の区間の平均振幅を脳波指標である N400 の繰り返し効果の値として、以降の解析を行った。

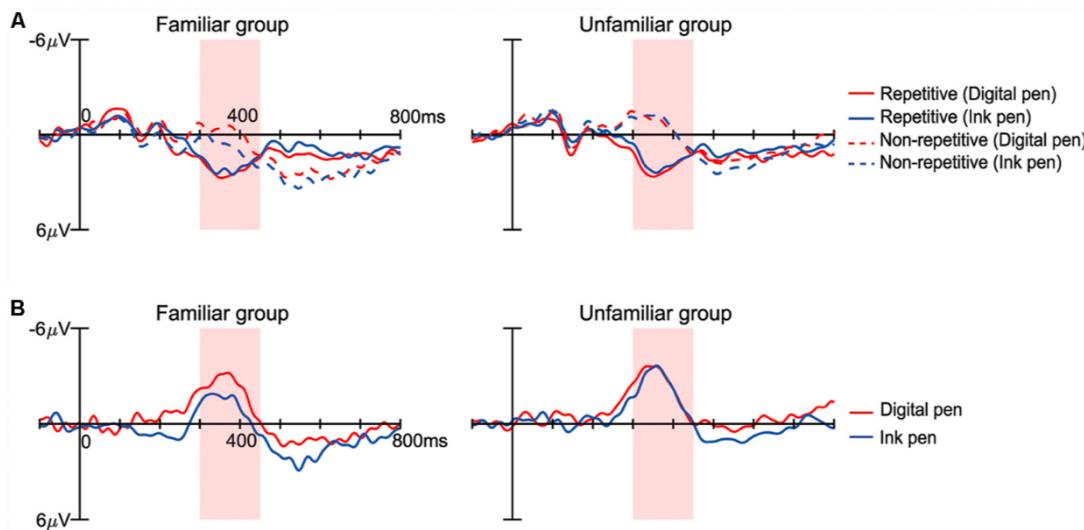


図 10. 漢字学習における反復プライミングパラダイムで測定された ERP

(A) 約 300～450 ミリ秒の ERP は、習熟群と初心者群の両方で、反復条件（実線）と非反復条件（破線）の間で変化があった。赤と青の線は、それぞれデジタルペンとインクペンを示す。

(B) 非反復条件から反復条件を差し引いて得られた波形は、約 300～450 ミリ秒で負のピークを示した。習熟群では、インクペン（青）の方がデジタルペン（赤）よりも振幅が小さかったのに対し、初心者群では違いはなかった。

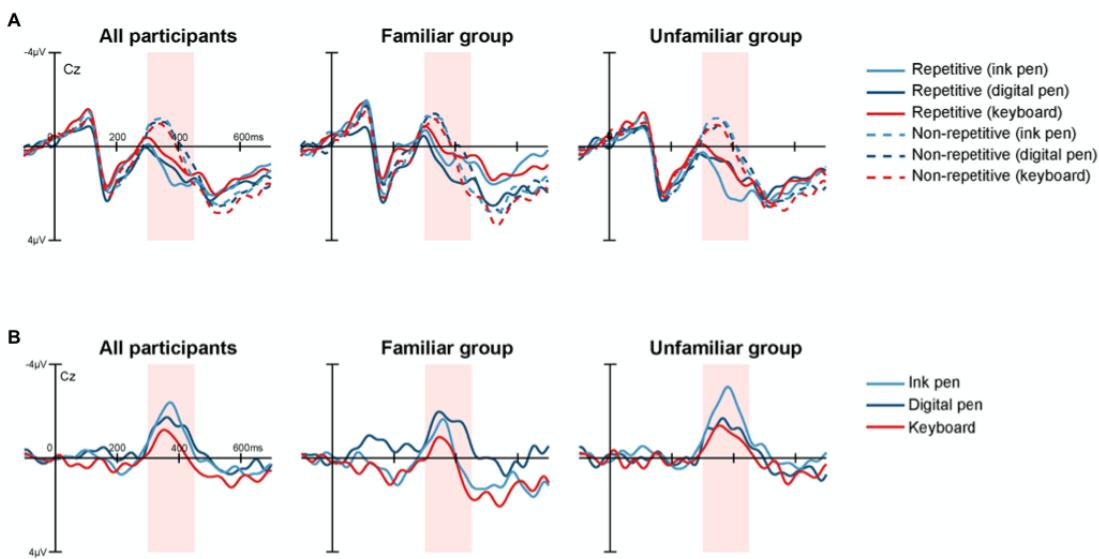


図 11. インドネシア語学習における反復プライミングパラダイムで測定された ERP

(A) 約 300~450 ミリ秒の ERP は、習熟群と初心者群の両方で、反復条件（実線）と非反復条件（破線）の間で変化があった。青色、水色、赤色の線は、それぞれデジタルペンとインクペン、キーボードを示す。

(B) 非反復条件から反復条件を差し引いて得られた波形は、約 300~450 ミリ秒で負のピークを示した。習熟群では、インクペン（水色）の方がデジタルペン（青色）よりも振幅が小さかったのに対し、初心者群ではインクペン（水色）の方がデジタルペン（青色）よりも振幅が大きかった。

R の step 関数を用い、AIC の適切なモデル選択を行った結果、式 : N400 繰り返し効果 ~ 実験 + 記憶語数 + グループが最適なモデルとして選択された。(図 12)

式	AIC
N400 ~ 実験 + 記憶語数 + 判別精度 + 年齢 + デバイス + グループ + 反応時間	89.10
N400 ~ 実験 + 記憶語数 + 判別精度 + 年齢 + デバイス + グループ	87.11
N400 ~ 実験 + 記憶語数 + 年齢 + デバイス + グループ	85.23
N400 ~ 実験 + 記憶語数 + 年齢 + グループ	83.99
N400 ~ 実験 + 記憶語数 + グループ	83.05

図 12. 重回帰分析を用いたモデル選択

続いて、N400 繰り返し効果に対して、3 要因分散分析 (ANOVA) を行った結果、実験 ($F(1,121) = 7.35$; $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.064$), グループ ($F(1,121) = 6.99$; $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.061$) に主効果が得られた。一方で、デバイス ($F(1,121) = 1.93$; $p = 0.17$, $\eta^2 = 0.017$) に主効果は見られなかった。

主効果が得られた実験に関する下位検定を行なったところ漢字の N400 繰り返し効果が有意に大きかった ($t(120) = -2.59$, $p < 0.05$, $r = 0.23$)。さらに、グループに関する、下位検

定を行なったところ初心者群の N400 繰り返し効果が有意に大きかった($t(120)=2.44$, $p < 0.05$, $r = 0.22$). (図 13)

交互作用については、グループとデバイス($F(1,121)= 7.48$; $p < 0.01$, $\eta^2= 0.065$)で確認されたため、交互作用が見られたデバイスとグループ間について詳細を確認した。その結果、デジタルペン習熟群で、インクペンに対してデジタルペンの N400 繰り返し効果が有意に大きかった($t(22)=-3.40$, $p < 0.01$, $r = 0.59$). また、グループ間のインクペンの N400 繰り返し効果について、デジタルペン習熟群に対して、デジタルペン初心者群の学習効果が有意に大きかった($t(22)=-2.77$, $p < 0.05$, $r = 0.34$). (図 14)

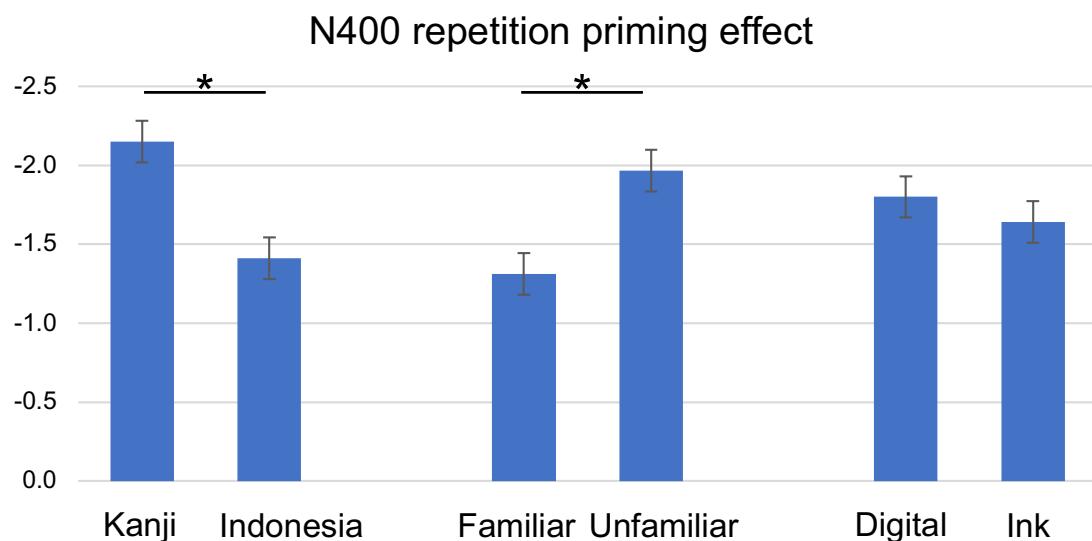


図 13. 実験、グループ、デバイスの各要因における N400 繰り返し効果

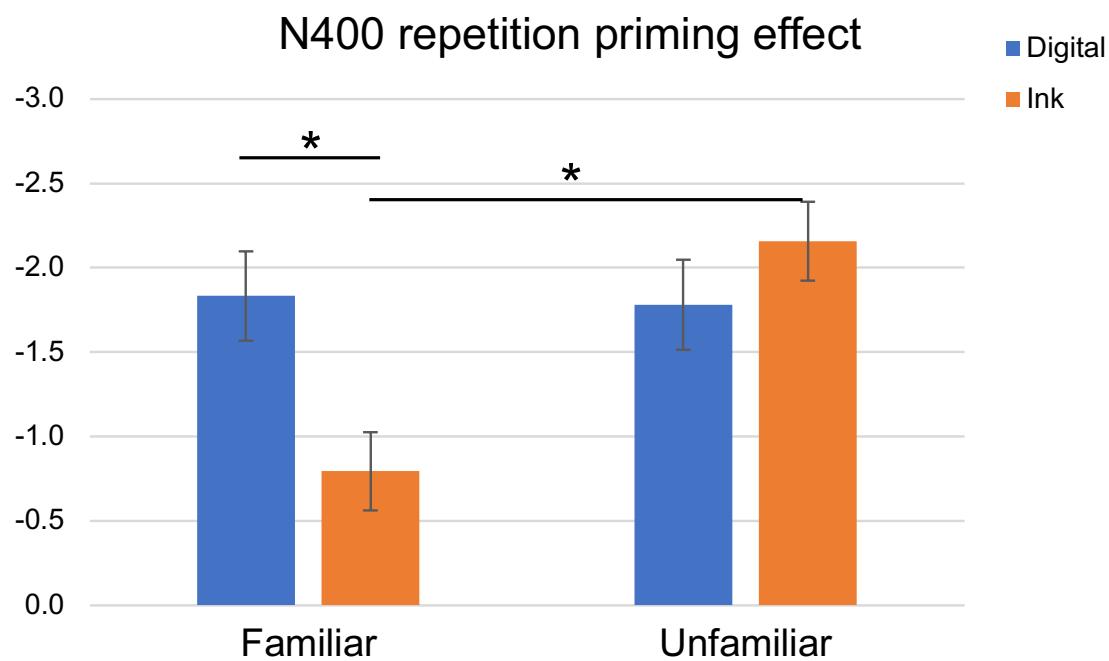


図 14. デバイスの習熟の違いにおける N400 繰り返し効果の違い

考察

本研究では、デジタルペンと従来のインクペンで、難読漢字とインドネシア語を書くことによる学習効果について、行動結果と脳波指標である N400 繰り返し効果を用いて評価を行なった。その中で、デジタルペンに習熟した参加者(習熟群)と習熟していない参加者(初心者群)についてもグループ分けを行い比較した。

これまでの研究で、N400 が発達に伴う言語学習 (Ojima et al., 2005) によって変化することが示されており、更に、成人の第二外国語学習で、N400 の効果が行動指標よりも学習の初期段階で観察された (McLaughlin et al., 2004)。これは、N400 が言語学習の習熟における感度の高い指標であることを示唆しており、早期の段階での学習効果を判断するツールとして活用出来ると考え、近年の GIGA スクール構想では、学校にも導入が促進されているデジタルデバイスについて、従来のデバイスと比較して、言語学習を行った際にそれらの評価を行うための指標として活用できるのかを本研究によって検証した。

参加者は、漢字学習で母国語である日本語の単語を書きとり、記憶する一方、インドネシア語の学習では、未知の外国語(インドネシア語)の単語を書き、意味を記憶する必要があった。グループに関係なく、参加者はすべての行動指標(つまり、記憶語数および判別課題正答率)で漢字学習よりもインドネシア語学習でのパフォーマンスが低下した。これは、漢字学習はインドネシア語学習よりも学習課題がより困難であったことを示唆している。一方で、N400 繰り返し効果にもそれに伴う差を観察できた。2つの学習による習熟の違いが、漢字の読み方や、インドネシア語の意味の学習に対して、N400 繰り返し効果の指標によっても正確に表れていると示唆される。計測した脳活動において、脳内で意味処理を行った際、学習が進んでいると、繰り返し条件の単語では、プライム刺激、ターゲット刺激の間で、意味処理がよりスムーズに進むため N400 の振幅は抑制され、非繰り返し条件の単語では、意味処理により違和感を感じ、N400 の振幅が増大する結果、その差である N400 繰り返し効果もより顕著に発生すると考えられる。つまり、N400 繰り返し効果の結果が、行動結果とも相関していることは、N400 繰り返し効果が、学習効果に対する指標となる可能性を補強している。さらに、N400 繰り返し効果を説明するためのモデル選択を行うと、記憶語数を含むモデルが最適なモデルとして選択された。この結果も、習熟の違いにより N400 の繰り返し効果が変化することを示している。McLaughlin (2004) らは 14 時間程度の学習のうちに、N400 の振幅が変化していることを示したが、本研究では 1 時間以内という短時間の学習でも N400 が変化することを示すことに成功し、N400 はニューロエルゴノミクスの観点からも有用な脳波指標であることを示すことに成功したといえる。

さらに、行動結果には違いがない一方で、脳波指標である N400 繰り返し効果では、グループによる脳波指標に違いが見られた。それらについて、使用したデバイスごとに分けて差を見てみると、習熟群では、デジタルペンを用いた方がインクペンで用いて学習した

N400 繰り返し効果が有意に高かった。一方で、デジタルペン初心者群では、この差異が見られなかった。この事実は、デジタルペンを利用する場合は、習熟してから利用した方が、学習効果がより高いことを示している。そして、習熟群と初心者群を比較した場合、デジタルペンを用いた場合は、N400 繰り返し効果が同程度であったが、インクペンを用いた場合は、初心者群の方が習熟群よりも N400 繰り返し効果が大きかった。これらのこととは、デジタルペンの初心者では、十分な訓練を行ったのち、デジタルデバイスを学習に用いることで、インクペンと同様に、デジタルデバイスの学習効果が期待できると考えられる。しかし、インクペンを用いた際の学習効果が下がる可能性も示唆している。習熟群でのインクペンの学習効果が下がることを説明する理由として、Osugi (2019) らの研究では、アンケートにより、デジタルペンを使用して学習した際に習熟群では初心者群と比べ、より楽しさを感じながら学習を行なっていることが分かった。これまでの研究で、気分が学習 (Nadler et al., 2010; Bakic et al., 2014) や言語処理 (Federmeier et al., 2001; Vissers et al., 2010, 2013; Chwilla et al., 2011) に影響を与える可能性があることが報告されている。このことから、デジタルペンでより楽しさを感じ、インクペンでより楽しさを感じられなかったという気分の違いがこの差を示していることが示唆される。

行動結果と N400 繰り返し効果の違いは、学習効果を検出する感度の違いが原因である可能性がある。N400 の効果は、行動評価と比較して、学習初期の段階についてより敏感であることが知られている (McLaughlin et al., 2004)。McLaughlin (2004) らの研究によれば、平均 14 時間の指導の後、疑似単語と比較して、第 2 外国語 (L2) の単語との間で、N400 振幅の違いが報告されたが、それらを判別するタスクでのパフォーマンスの違いを観察するには更に指導時間を必要とした。この結果は、行動指標よりも N400 の振幅の変調がより敏感で、言語学習における段階を反映していることを示唆している。つまり、初めは認知的には擬似語に違和感を感じているが判別課題では正確に答えることができないという段階から、判別課題についても正しい回答できる段階が存在するということを示唆している。

同様の学習について、長期的な観察をした研究も存在する。成人の参加者が 3 週間 (週 1 時間) 手書きまたはタイピングによって新しい文字を学習した研究では、トレーニング終了直後の文字認識精度に差は認められなかった。ただし、手書き文字ではなくタイプピングによって学習された文字の認識精度は、トレーニング後の 3 週間で徐々に低下した (Longcamp et al., 2006)。これは、行動レベルでのタイピングに対する手書きの利点がトレーニング直後には明らかにされなかった明確な例となる。同様の結果は、未就学児を対象に、紙への鉛筆で手書き、タブレットコンピューターへのデジタルペンで手書き、タブレット上の仮想キーボードを使用した文字入力、という 3 つのトレーニングを 7 週間行った際の結果を比較した研究からも示唆されている (Mayer et al., 2020)。トレーニング直後は文字の認識に違いは見られなかったが、トレーニングの約 4 ~ 5 週間後の追跡評価では、タイピングよりも鉛筆による手書きの方が明らかに有利であることが示された。また、学

習内容や評価方法に差はなかったものの、これらの研究のトレーニング期間は、本研究（1時間以内）よりもかなり長い（数週間以上）ことに注意する必要がある。本研究結果では、短期間の使用で学習への影響を検出するのに脳波が有効であることを示唆している。

さらに、本研究では、記憶語数に加え、判別課題の正答率のみでなく、漢字の読み、もしくはインドネシア語の意味が正しいか間違っているかを回答するまでの RT にも、デバイス間、グループ間での差が存在しなかった。本研究において、RT は、学習効果については各要因の差を識別することはできなかった。そして、記憶語数、判別課題は、行なった学習の難易度の違いによる学習効果の差があった。さらに、N400 繰り返し効果は、学習の難易度の違いによる学習効果に加え、デバイスに対する慣れの違いによる学習効果の差を観察することができた。①RT、②行動指標、③N400 繰り返し効果と順を追い、最終的に、N400 という脳波成分を利用して学習効果を調べることの有効性が最も高いことを示しており、ニューロエルゴノミクスの研究分野の観点から、異なるデバイスを使用した際の習熟度の違いを評価することの有用性を示すことができたといえる。

まとめと将来展望

まとめ

本研究では特徴的脳波成分である N400 の特性を活用し、N400 を用いて、漢字学習、インドネシア語学習時にデジタルペンを用いた際の習熟度の違いを学習効果から説明を行なった。つまり、脳波計測手法を用いる事で、デジタルデバイスに対する習熟の違いが与える、デジタルデバイスであるデジタルペン・タブレットと従来のインクペン・紙というアナログ環境を用いた場合の学習への影響について説明ができる事を示唆した。この研究から示唆された成果は、本研究の、概説で説明したように、人が日々の活動を行う際に必要となる学習に対して、脳波計測という手法を用いて評価する事により、デバイスの使用や、訓練への介入をより適切に、細分化させることで、効果的なデバイスの選択と学習指導を行えるようになると考えられる。

将来展望

言語学習をはじめとした、日常生活におけるタスクに対する訓練について、本研究で行なった様な脳波計測を用いた調査を行うことで、適切な学習環境を準備することでそれらを効率化できる可能性がある。その中には、デバイスに対する習熟状況の評価や、作業負荷を減らす適切なデバイスを使用して学習を行うといった工夫に対しても役立たせることができる。実際に本研究では、デジタルデバイスを用いた際に、習熟群と初心者群での気分や作業負荷などの人の内的な違いがパフォーマンスに影響し、それらを用いた学習結果を脳波指標によって説明できた可能性がある。

近年の様々な場面における ICT 導入において、デジタルデバイスの有効性を調べる上で、N400 という特徴的脳波成分を用いた評価を行うことの意義を示す事ができたように、異なる種類の脳波を取り上げて評価指標として用いたり、また心拍や、呼吸、発汗、瞳孔の大きさなど、他の生体計測指標を用いたり、それらを組み合わせることで、行動結果やアンケートなどからでは難しかったニューロエルゴノミクスの観点での評価を行うことができるようになる可能性がある。脳波計測を用いた本研究での検討は、生体計測情報を用いた客観的指標を発見する一助となり、該当分野の有効性を示した上で、それら分野の今後の発展に寄与する事ができたと言える。

参考文献

- Alamargot, D., and Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between Grades Two and Nine. *Hum. Mov. Sci.* 44, 32–41. doi: 10.1016/j.humov.2015.08.011
- Amano, S., and Kondo, T. (1999). NTT Database Series, *Nihongo-no Goitokusei: Lexical Properties of Japanese* (Vol. 1). Tokyo: Sanseido-shoten Co. Ltd.
- An, S., Oh, S. J., Jun, S. B., & Sung, J. E. (2022). Aging-Related Dissociation of Spatial and Temporal N400 in Sentence-Level Semantic Processing: Evidence From Source Analyses. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14.
- Bakic, J., Jepma, M., De Raedt, R., and Pourtois, G. (2014). Effects of positive mood on probabilistic learning: behavioral and electrophysiological correlates. *Biol. Psychol.* 103, 223–232. doi: 10.1016/j.biopsych.2014.09.012
- Barber, H., Vergara, M., & Carreiras, M. (2004). Syllable-frequency effects in visual word recognition: evidence from ERPs. *Neuroreport*, 15(3), 545-548.
- Beeman, M. J., & Chiarello, C. (1998). Complementary right-and left-hemisphere language comprehension. *Current directions in psychological science*, 7(1), 2-8.
- Chwilla, D. J., Hagoort, P., & Brown, C. M. (1998). The mechanism underlying backward priming in a lexical decision task: Spreading activation versus semantic matching. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 51(3), 531-560.
- Chwilla, D. J., Virgillito, D., and Vissers, C. T. W. M. (2011). The relationship of language and emotion: N400 support for an embodied view of language comprehension. *J. Cogn. Neurosci.* 23, 2400–2414. doi: 10.1162/jocn.2010.21578
- Deacon, D., Dynowska, A., Ritter, W., and Grose-Fifer, J. (2004). Repetition and semantic priming of nonwords: implications for theories of N400 and word recognition. *Psychophysiology* 41, 60–74. doi: 10.1111/1469-8986.00120

Dehais, F., Lafont, A., Roy, R., & Fairclough, S. (2020). A neuroergonomics approach to mental workload, engagement and human performance. *Frontiers in neuroscience*, 14, 268.

Dellantonio, S., Job, R., & Mulatti, C. (2014). Imageability: now you see it again (albeit in a different form). *Frontiers in Psychology*, 5, 279.

Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*, 134(1), 9-21.

Domalski, P., Smith, M. E., & Halgren, E. (1991). Cross-modal repetition effects on the N4. *Psychological Science*, 2(3), 173-178.

Federmeier, K. D., Kirson, D. A., Moreno, E. M., and Kutas, M. (2001). Effects of transient, mild mood states on semantic memory organization and use: an event-related potential investigation in humans. *Neurosci. Lett.* 305, 149–152. doi: 10.1016/s0304-3940(01)01843-2

Friedrich, M., and Friederici, A. D. (2004). N400-like semantic incongruity effect in 19-month-olds: processing known words in picture contexts. *J. Cogn. Neurosci.* 16, 1465–1477. doi: 10.1162/0898929042304705

Friedrich, M., and Friederici, A. D. (2010). Maturing brain mechanisms and developing behavioral language skills. *Brain Lang.* 114, 66–71. doi: 10.1016/j.bandl.2009.07.004

Gabrieli, J. D., Poldrack, R. A., & Desmond, J. E. (1998). The role of left prefrontal cortex in language and memory. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 95(3), 906-913.

Gerth, S., Dolk, T., Klassert, A., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., et al. (2016a). Adapting to the surface: a comparison of handwriting measures when writing on a tablet computer and on paper. *Hum. Mov. Sci.* 48, 62–73. doi: 10.1016/j.humov.2016.04.006

Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., et al. (2016b). Is handwriting performance affected by the writing surface? Comparing preschoolers', second graders', and adults' writing performance on a tablet vs. paper. *Front. Psychol.* 7:1308. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01308

Gold, B. T., & Buckner, R. L. (2002). Common prefrontal regions coactivate with dissociable posterior regions during controlled semantic and phonological tasks. *Neuron*, 35(4), 803-812.

Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. (1995). Functional mapping of sequence learning in normal humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(4), 497-510.

Guilbert, J., Alamargot, D., and Morin, M. F. (2019). Handwriting on a tablet screen: role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Hum. Mov. Sci.* 65, 30–41. doi: 10.1016/j.humov.2018.09.001

Hagoort, P., Hald, L., Bastiaansen, M., & Petersson, K. M. (2004). Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension. *science*, 304(5669), 438-441.

Hamann, S. B., & Squire, L. R. (1997). Intact perceptual memory in the absence of conscious memory. *Behavioral neuroscience*, 111(4), 850.

Hatano, A., Sekine, T., Herai, T., Ihara, N., Tanaka, Y., Murakami, S., et al. (2015). Effects of the use of paper notebooks and tablet devices on cognitive load in learning-An Electroencephalographic (EEG) study. *IEICE Technic. Rep.* 115, 39–44.

Holcomb, P. J. (1993). Semantic priming and stimulus degradation: implications for the role of the N400 in language processing. *Psychophysiology* 30, 47–61. doi: 10.1111/j.1469-8986.1993.tb03204.x

Holcomb, P. J. (1993). Semantic priming and stimulus degradation: implications for the role of the N400 in language processing. *Psychophysiology* 30, 47–61. doi: 10.1111/j.1469-8986.1993.tb03204.x

Holcomb, P. J., & Neville, H. J. (1990). Auditory and visual semantic priming in lexical decision: A comparison using event-related brain potentials. *Language and cognitive processes*, 5(4), 281-312.

Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 303(5660), 1023-1026.

Kiefer, M., Schuler, S., Mayer, C., Trumpp, N. M., Hille, K., and Sachse, S. (2015). Handwriting or typewriting? The influence of pen-or keyboard-based writing training on reading and writing performance in preschool children. *Adv. Cogn. Psychol.* 11, 136–146. doi: 10.5709/acp-0178-7

Kramer, A. F., & Parasuraman, R. (2007). Neuroergonomics: Applications of neuroscience to human factors.

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203-205.

Kutas, M., and Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends Cogn. Sci.* 4, 463–470. doi: 10.1016/s1364-6613(00)01560-6

Kutas, M., and Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annu. Rev. Psychol.* 62, 621–647. doi: 10.1146/annurev.psych.093008.131123

Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: the past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(3), 269-284.

Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J. C., and Velay, J. L. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: a comparison between handwriting and typing. *Hum. Mov. Sci.* 25, 646–656. doi: 10.1016/j.humov.2006.07.007

Longcamp, M., Gilhodes, J., Anton, J., Roth, M., Nazarian, B., and Velay, J. (2008). Learning through hand-or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: behavioral and functional imaging evidence. *J. Cogn. Neurosci.* 20, 802–815. doi: 10.1162/jocn.2008.20504

Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T., and Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: a comparison between handwriting and typing. *Acta Psychol.* 119, 67–79. doi: 10.1016/j.actpsy.2004.10.019

Luck, S. J. (2012). Event-related potentials.

Mangen, A., Anda, L. G., Oxborough, G. H., and Brønnick, K. (2015). Handwriting versus keyboard writing: effect on word recall. *J. Writ. Res.* 7, 227–247. doi: 10.17239/jowr-2015.07.02.1

Matsumoto, A., Iidaka, T., Haneda, K., Okada, T., and Sadato, N. (2005). Linking semantic priming effect in functional MRI and event-related potentials. *Neuroimage* 24, 624–634. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.09.008

Mayer, C., Wallner, S., Budde-Spengler, N., Braunert, S., Arndt, P. A., and Kiefer, M. (2020). Literacy training of kindergarten children with pencil, keyboard or tablet stylus: the influence of the writing tool on reading and writing performance at the letter and word level. *Front. Psychol.* 10:3054. doi: 10.3389/fpsyg.2019.03054.

McLaughlin, J., Osterhout, L., and Kim, A. (2004). Neural correlates of second- language word learning: minimal instruction produces rapid change. *Nat. Neurosci.* 7, 703–704. doi: 10.1038/nn1264

Mueller, P. A., and Oppenheimer, D. M. (2014). The pen is mightier than the keyboard: advantages of longhand over laptop note taking. *Psychol. Sci.* 25, 1159–1168. doi: 10.1177/0956797614524581

Nadler, Ruby T., Rahel Rabi, and John Paul Minda. "Better mood and better performance: Learning rule-described categories is enhanced by positive mood." *Psychological Science* 21.12 (2010): 1770-1776.

Nobre, A. C., Allison, T., & McCarthy, G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*, 372(6503), 260-263.

Nuamah, J. K., Seong, Y., Jiang, S., Park, E., & Mountjoy, D. (2020). Evaluating effectiveness of information visualizations using cognitive fit theory: a neuroergonomics approach. *Applied Ergonomics*, 88, 103173.

Ojima, S., Nakata, H., and Kakigi, R. (2005). An ERP study of second language learning after childhood: effects of proficiency. *J. Cogn. Neurosci.* 17, 1212–1228. doi: 10.1162/0898929055002436

Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: Research and practice. *Theoretical issues in ergonomics science*, 4(1-2), 5-20.

Parasuraman, R., Greenwood, P. M., Kumar, R., & Fossella, J. (2005). Beyond heritability: neurotransmitter genes differentially modulate visuospatial attention and working memory. *Psychological science*, 16(3), 200-207.

Parasuraman, R., Warm, J. S., & See, J. E. (1998). Brain systems of vigilance.

Reid, V. M., Hoehl, S., Grigutsch, M., Groendahl, A., Parise, E., and Striano, T. (2009). The neural correlates of infant and adult goal prediction: evidence for semantic processing systems. *Dev. Psychol.* 45, 620–629. doi: 10.1037/a00 15209

Rugg, M. D. (1985). The effects of semantic priming and word repetition on event-related potentials. *Phychoophysiology* 22, 642–647. doi: 10.1111/j.1469- 8986.1985.tb01661.x

Rugg, M. D., Doyle, M. C., & Melan, C. (1993). An event-related potential study of the effects of within-and across-modality word repetition. *Language and Cognitive Processes*, 8(4), 357-377.

Sakuma, N., Ijuin, M., Fushimi, T., Tatsumi, I., Tanaka, M., Amano, S., et al. (2005). *Nihongo-No Goitokusei: Lexical Properties of Japanese* (Vol.8). Tokyo: Sanseido-shoten Co. Ltd.

Sarter, N. B., Woods, D. D., & Billings, C. E. (1997). Automation surprises. *Handbook of human factors and ergonomics*, 2, 1926-1943.

Suzuki T, Hill KE, Ait Oumeziane B, Foti D, Samuel DB. Bringing the brain into personality assessment: Is there a place for event-related potentials? *Psychol Assess.* 2019 Apr;31(4):488-501. doi: 10.1037/pas0000611. Epub 2018 Jun 21. PMID: 29927305.

Thompson-Schill, S. L., D'Esposito, M., Aguirre, G. K., & Farah, M. J. (1997). Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: a reevaluation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(26), 14792-14797.

Van Berkum, J. J., Brown, C. M., Zwitserlood, P., Kooijman, V., & Hagoort, P. (2005). Anticipating upcoming words in discourse: evidence from ERPs and reading times. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31(3), 443.

Vaquero, E., Cardoso, M. J., Vazque, M., & Gomez, C. M. (2004). Gender differences in event-related potentials during visual-spatial attention. *International journal of neuroscience*, 114(4), 541-557.

Vinci-boohner, S., James, T. W., and Karin, H. (2016). Visual-motor functional connectivity in preschool children emerges after handwriting experience. *Trends Neurosci. Educ.* 5, 107–120. doi: 10.1016/j.tine.2016.07.006

Vissers, C. T. W. M., Chwillia, U. G., Egger, J. I. M., and Chwillia, D. J. (2013). The interplay between mood and language comprehension: evidence from P600 to semantic reversal anomalies. *Neuropsychologia* 51, 1027–1039. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2013.02.007

Vissers, C. T. W. M., Virgillito, D., Fitzgerald, D. A., Speckens, A. E. M., Tendolkar, I., van Oostrom, I., et al. (2010). The influence of mood on the processing of syntactic anomalies: evidence from P600. *Neuropsychologia* 48, 3521–3531. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.08.001

West, W. C., & Holcomb, P. J. (2000). Imaginal, semantic, and surface-level processing of concrete and abstract words: an electrophysiological investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(6), 1024-1037.

Wollscheid, S., Sjaastad, J., and Tømte, C. (2016). The impact of digital devices vs. Pen(cil) and paper on primary school students' writing skills—a research review. *Comput. Educ.* 95, 19–35. doi: 10.1016/j.compedu.2015.12.001

Yokota, Y., Tanaka, S., Miyamoto, A., & Naruse, Y. (2017). Estimation of human workload from the auditory steady-state response recorded via a wearable electroencephalography system during walking. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 314.

van Petten, C., Kutas, M., Kluender, R., Mitchiner, M., and Mcisaac, H. (1991). Fractionating the word repetition effect with event-related potentials. *J. Cogn. Neurosci.* 3, 131–150. doi: 10.1162/jocn.1991.3.2.131

van der Meer, A. L. H., and van der Weel, F. R. (2017). Only three fingers write, but the whole brain works: a high-density EEG study showing advantages of drawing over typing for learning. *Front. Psychol.* 8:706. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00706

植田充美 監修 (2016) 『ヘルスケアを支えるバイオ計測』 シーエムシー出版

宮内哲. (1997). ヒトの脳機能の非侵襲的測定. *生理心理学と精神生理学*, 15(1), 11-29.

文部科学省. 令和元年度 文部科学省白書 特集 1「教育の情報化～GIGA スクール構想の実現に向けて～」

謝辞

本研究を行うにあたり、そして論文を作成するまでに、たくさんの人に支えていただきました。所属研究室として、連携研究機関である情報通信研究機構で研究を行うことについて認めていただいております元指導教官の柳田 敏雄 特任教授、現指導教官の北澤 茂 教授。研究の進捗について管理、取りまとめをして頂きました、NICT 脳情報脳解析信融合研究センター脳機能解析研究室 成瀬康 室長。直接、実験に関して、丁寧にご指導をして頂きました横田 悠右 研究員、論文執筆の際に、様々な議論、アドバイスをいただきました研究員の井原 綾さん、渡部 宏樹さん。研究技術員の中島 加恵さん、その他、日頃の生活を支えてくださいました研究室の事務の方々、学生のみなさまには大変お世話になりました。ここにその感謝を表し、謝辞とさせて頂きます。

業績リスト

(A) 学術雑誌

- 1) Osugi, K., Ihara, A. S., Nakajima, K., Kake, A., Ishimaru, K., Yokota, Y., & Naruse, Y. (2019). Differences in brain activity after learning with the use of a digital pen versus an ink pen-An electroencephalography study. *Frontiers in human neuroscience*, 13, 275.
- 2) Ihara, A. S., Nakajima, K., Kake, A., Ishimaru, K., Osugi, K., & Naruse, Y. (2021). Advantage of Handwriting Over Typing on Learning Words: Evidence From an N400 Event-Related Potential Index. *Frontiers in human neuroscience*, 15, 679191.

(B) 国際会議・シンポジウム等における発表

<学会誌>

- 1) Osugi, K., Yokota, Y., & Naruse, Y. (2022, October). Modulation of error-related negativity under construction of internal model. In 2022 IEEE International Conference on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRAINE) (pp. 116-120). IEEE.

<ポスター発表、査読なし>(○は発表者)

- 1) ○Kiyoyuki Osugi, Yuki Mori, Yoshichika Yoshioka.
“Developing method to observe electrical activity in the brain by using MRI.”
Humanware International Symposium, Osaka, Japan 2017
- 2) ○Kodai Satake, ○Kiyoyuki Osugi, ○Xu Xueyan, Yudai Ninomaru. (共同発表)
“Estimating of human emotion by physiological features and behavior.”
Humanware International Symposium, Osaka, Japan 2017
- 3) ○Takuma Saga, Kae Nakajima, Kiyoyuki Osugi, Yusuke Yokota, Yuichiro Higashi, Hiroshi Nakajima, Yasuyo Kotake, Yasushi Naruse “Lambda Response As an Attention Indicator During Visual Inspection”
41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, Berlin, Germany, (2019)
- 4) ○Kiyoyuki Osugi, Yusuke Yokota, Yasushi Naruse
“A Relation between Error-Related Negativity and Player’s Skill on TV Game.”
41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, Berlin, Germany, (2019)

(C) 国内学会・シンポジウム等における発表(○は発表者)

<ポスター発表、査読あり>

- 1) ○Kiyoyuki Osugi, Yusuke Yokota, Yasushi Naruse
“Proficiency in consumer video baseball game modulates error-related negativity caused by swinging-strike.”

日本神経科学会 神戸 (2020)

<口頭発表、査読なし>

1)○大杉 清之, 横田 悠右, 成瀬 康

「コンシューマゲーム中におけるプレイヤーの熟練度に関する脳波成分」

ヒューマンインターフェースシンポジウム 2018, 筑波, (2018)

2)○井原 綾, 中島 加恵, 大杉 清之, 掛 晃幸, 石丸 築, 成瀬 康

「学習におけるデジタルペンの使用の効果—脳波を指標とした検討—」

ヒューマンインターフェースシンポジウム 2018, 筑波, (2018)

3)○大杉 清之, 横田 悠右, 成瀬 康

「エラー関連陰性電位を用いたコンシューマゲームにおけるプレイヤーの熟練度評価」

第 63 回システム制御情報学会研究発表講演会, 大阪, (2019)

4)○大杉 清之, 横田 悠右, 成瀬 康

「コンシューマゲームプレイ中の脳波成分の個人差と瞬き回数との関係性」

ヒューマンインターフェースシンポジウム 2019, 京都, (2019)

(D) その他

研究の記事掲載

1) 発掘！イグ・ノーベル賞 (36) 情報通信研究機構 ゲーム脳波で習熟度判定

日刊工業新聞 2018/12/19 URL : <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00500147>