



Title	文字や単語に対する早い処理過程とその発達 : 事象関連電位を用いた検討
Author(s)	宇野, 智己
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(教育学)
Dissertation Number	甲第14852号
Issue Date	2022-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14852
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90950
Type	doctoral thesis
File Information	Tomoki_Uno.pdf



北海道大学 大学院教育学院

博士学位論文

文字や単語に対する早い処理過程とその発達

—事象関連電位を用いた検討—

宇野 智己

要約

熟達した読み手は、文字や単語を素早く流暢に読むことができる。この高速な読みを行うためには、個々の文字を同定し音韻に変換する「文字レベル」の読みだけでなく、文字列を一塊のまとまりとして捉える「単語レベル」の読みを十分に熟達させる必要がある。しかしながら、こうした読みスキルの背景にどのような皮質処理過程があるかは明らかになっておらず、さらに日本語平仮名を学習した読み手においてどのように発達するかについても十分な知見が得られていない。本研究はこうした問題の一端を明らかにするため、文字や単語の早い処理に関連する事象関連電位（event-related potential: ERP）成分である「文字刺激に対する N170」および「既学習文字列に対する P1」に着目し、平仮名を十分に学習した成人や学習途上の学童期児童におけるそれらの様相を検討した。

本研究は全 3 部から構成される。第 1 部では、これまで提案されている文字や単語の処理過程についての認知神経学的・発達のモデルや、関連する ERP 研究を概観した。その中で、N170 が文字レベルの書記素—音素変換処理に、P1 が単語レベルの処理に関わる可能性を議論した。第 2 部は、これらの可能性を検証するための 3 つの実験研究を行った。結果として、左半球優勢な N170 は文字レベルの音韻変換処理を反映し（実験 1）、それは必ずしも学童期中に成人と同程度まで発達するわけではないことが示唆された（実験 2, 3）。さらに、文字や単語を音読する際の眼球運動との相関から、P1 が全語読みの能力の発達と関連することが示唆された（実験 3）。第 3 部ではこれらの実験結果が既存のモデルにどのように位置づけられるかを考察した。すなわち、文字レベルの処理が N170 段階から、単語レベルの処理が P1 段階から生じることが新たに提案された。また平仮名学習者の読み発達については、文字レベルの処理が成人と同程度まで熟達する前に単語レベルの処理の発達が開始されることが示唆された。これらの知見は、視覚単語認知について提案されてきた既存の認知神経学的モデルを精緻化し、さらに平仮名学習者における読みスキルの発達の順序性について新たな視座を提供すると考えられる。

目次

要約.....	2
第1部 序論.....	6
1章 読みの背景にある処理過程とその発達.....	6
「読み」とは.....	6
読みの認知神経学的基盤.....	7
読みの発達過程.....	10
2章 読みの電気生理学的基盤.....	13
事象関連電位.....	13
文字や文字列に特殊化されたN170.....	14
学習された文字配列に特殊化されたP1.....	17
文字列や単語に対するERPの発達的变化.....	19
読みスキルの発達とERP.....	21
3章 本研究の目的.....	22
第2部 実験研究.....	25
実験1 透明な平仮名文字に対する電気生理学的応答の検討.....	25

1.1. 目的.....	25
1.2. 実験 1-1.....	27
方法.....	27
結果.....	28
1.3. 実験 1-2.....	30
方法.....	31
結果.....	31
1.4. 考察.....	32
実験 2 平仮名の学習者における N170 の発達的变化.....	35
2.1. 目的.....	35
2.2. 方法.....	37
2.3. 結果.....	39
2.4. 考察.....	42
実験 3 早い ERP 成分と読みスキルの発達.....	45
3.1. 目的.....	45
3.2. 方法.....	47

3.3. 結果	51
3.4. 考察	54
第3部 総合考察	58
1章 実験1～3から得られた知見の要約	58
2章 文字や単語に対するERPの、読み処理過程やその発達研究における意義....	59
<i>読みに関する認知神経学的モデルとの関係</i>	59
<i>平仮名学習者における、文字・単語レベルの処理の発達</i>	61
<i>読みの評価に対する視座</i>	62
第3章 今後の課題	64
第4章 結論	65
引用文献	67

第1部 序論

1章 読みの背景にある処理過程とその発達

「読み」とは

私たちは日常生活において、数多くの文字に晒されている。本や交通標識、ニュースのテロップなど、文字を媒介した情報伝達が行われている機会を取り上げれば枚挙に暇がない。また学校場面においても、児童が教科書や黒板に書かれた文章を正しく、そして学年が上がるにつれて素早く読めるようになることが、すべての教科教育の前提となっている。こうした中で文字や単語を正確かつ流暢に読めることは、十全な日常生活や学習を行う上でも必須の能力であると言える。文字を読む能力がどのような心理学的・神経学的機序によって支えられているのか、そして読みの学習に伴ってどのような熟達していくのかを検討することは、文字学習の新たな教育方法や、あるいは読みに困難がある児童や成人のための評価・介入方法を提言していく上でも重要な課題である。

「読み」という行為は、視覚的な記号である文字の連なり（単語、文章）から、音韻情報や意味情報を抽出する過程であると定義でき、それには階層的な複数の段階が存在する（北, 2018）。最も基礎的な要素は、「文字レベル」の読みである。私たちが「読む」ためには、今現在見ている曲線や線分といった単純な特徴から、文字の形態（“あ”という視覚的形態）を素早く同定しなければならない。さらに、同定された文字形態から音韻情報（/a/という音声）を抽出する処理過程（書記素—音素変換）も必要である。私たちは、たとえ見たことのない文字の並びであっても正確に読むことができるが、それは一つ一つの文字と音の間の対応規則を学習しているためであると考えられる。

一方で私たちは、文字の連なりを読む際に、上述の「文字レベル」の処理を必ずしも一文字ずつ順番に行っているわけではない。もし単語を一文字ずつ順番に読んでいたならば（逐

字読み, letter-by-letter reading), 文字数に比例して読みに要する時間は増加し, また単語を読む際により多くの注視を行うはずである。しかしながら熟達した読者においては, よく学習された文字の並びを文字数に依存せず一定の速さで, かつ一回の注視で読めることが示されている (レビューとして, Barton, Hanif, Eklinder Björnström, & Hills, 2014)。こうした単語を読む際に特有の読み方は「全語読み (whole/sight-word reading)」と呼ばれ, よりまとまった「単語レベル」に特有の処理が存在することの証拠として見なされてきた。

さらに, 文やその組み合わせの文章レベルの処理では, 単語と単語の関係性を理解する統語理解の能力や, 単語から抽出した情報を一時的に保持し操作するワーキングメモリの能力も不可欠になる。文章を正確かつ流暢に読むためには, これらすべての水準において処理を効率的に行うことが必要になるが, 本稿では特に, 文や文章レベルの読みの基礎となる文字や単語レベルの処理過程に焦点を当てる。本研究は, 日本語の平仮名を学習した, あるいは学習途上の読み手における, 文字・単語レベルの読みの背景にある認知神経学的基盤やその発達過程の一端を明らかにすることを目的とした。

読みの認知神経学的基盤

熟達した読み手の大きな特徴は, 単語を素早く流暢に読めることである。前述のように, 流暢な読みを達成するには個々の文字レベルの処理を効率化させるだけでなく, 数個の文字を一塊のまとまりとして読む全語読みを獲得することが不可欠である。

読みの処理過程に関する最も有名な説明モデルの一つとして, Colthert et al. (2001) によって提案された二重経路カスケードモデルが挙げられる (Figure 1)。読みにおいてはまず, 網膜に投射された断片的な視覚的特徴 (方位や線分など。Figure 1 では視覚的特徴ユニットに

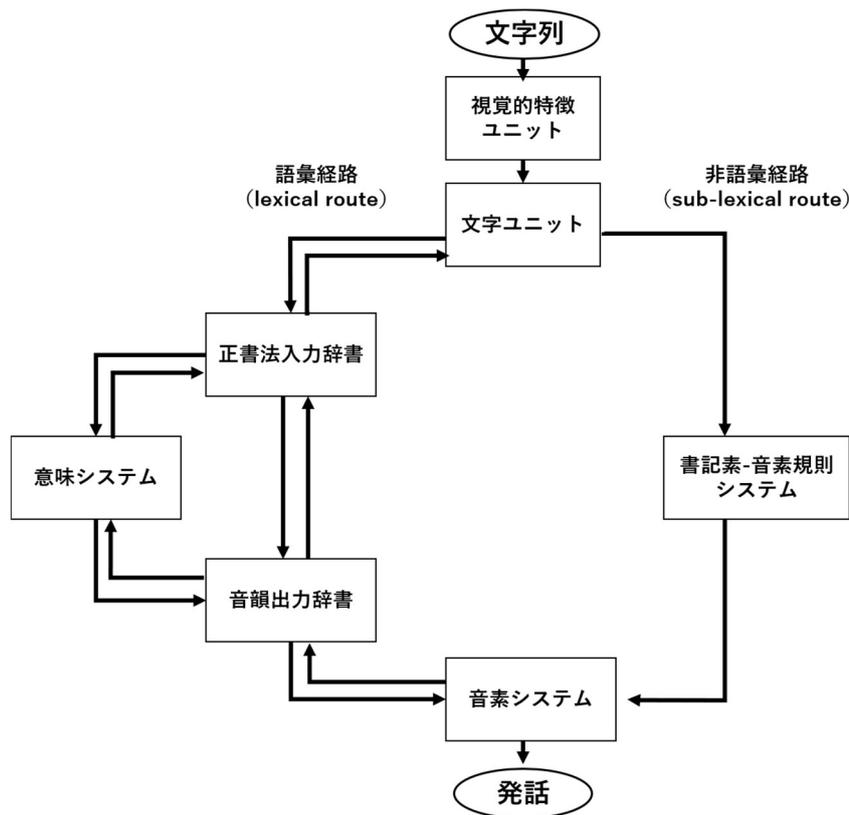


Figure 1. 読みの二重経路カスケードモデル (Coltheart et al., 2001 より和訳・改変)。左側が語彙経路, 右側が非語彙経路を示す。

相当) から, 大きさ, フォント, そして視野位置によらない抽象的な文字形態 (文字ユニット) を同定する必要がある。その後, 文字列に帰属する音韻・意味情報が活性化することで読みが達成されるが, それには以下の2つの経路のいずれか, もしくはその両方が関わりとされている。まず一つ目が, 「非語彙経路」である。この経路では, 文字と音韻の対応規則 (書記素-音素規則システム) を利用して, 一文字ずつ音韻情報が活性化される。もう一つが, 文字列の視覚的形狀 (正書法入力辞書) から音声単語情報 (音韻出力辞書) や意味情報 (意味システム) を直接活性化させるための「語彙経路」である。全語読みは, 語彙経路において文字が単語全体として処理されることで, 単語に含まれるすべての音韻情報が同時並列的に素早く活性化されていることを反映する (Barton et al., 2014; Sambai et al., 2012)。

特定の単語を読む際にこれらの語彙・非語彙経路のどちらが優位に関わるかは, 文字列が

有意義であるか無意味であるかだけでなく、それがどれだけ学習されたかにも影響される。Weekes (1997) は、印刷物における出現頻度が低い単語を読む場合、無意味な非単語と同じく文字数に比例した音読潜時の増加（語長効果）が生じたことを報告した。さらに、単語を読む際の視線計測を用いた研究からも、このような低頻度単語に対する注視回数が増加したことが見出されている (Inhoff & Rayner, 1986; Just & Carpenter, 1980; Rayner & Duffy, 1986)。語長効果の出現や注視回数の増加は、読み手が文字列を逐字的に読んでいた（すなわち、非語彙経路の依存度が高まった）ことを反映するため、語彙経路を利用した流暢な読みは、特定の文字配列に対する学習の産物であると考えられる。

文字や単語の読みに関わるこれら 2 つの異なる経路は、脳機能画像研究から得られた知見を基に対応する脳部位が同定されている (Jobard, Crivello, & Tzourio-Mazoyer, 2003; Kearns, Hancock, Hoeft, Pugh, & Frost, 2019; Turker & Hartwigsen, 2021)。語彙経路、そして非語彙経路に相当する皮質領域とそれらの間の機能的結合を Figure 2 に示す。まず非語彙経路については、左半球の後頭側頭領域（occipito-temporal region: OT）から始まり、上側頭回（superior

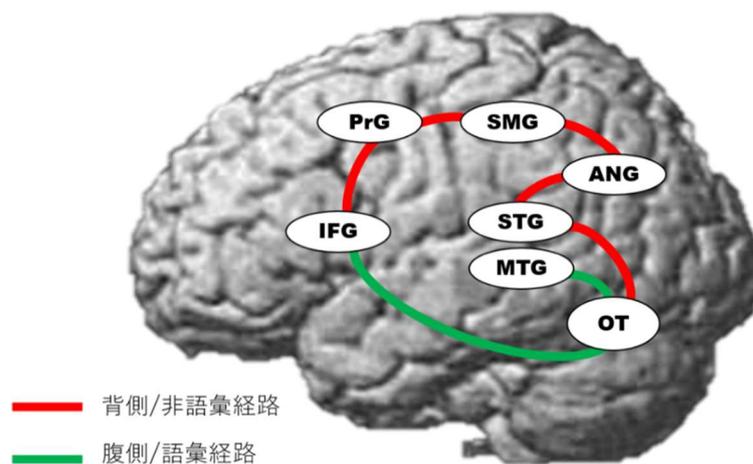


Figure 2. 語彙・非語彙経路に相当する皮質領域 (Kearns et al., 2019, Turker & Hartwigsen, 2021 より作成)。OT:後頭側頭領域(occipito-temporal region), MTG: 中側頭回 (middle temporal gyrus), STG: 上側頭回 (superior temporal gyrus), ANG: 角回 (angular gyrus), SMG: 縁上回 (supramarginal gyrus), PrG: 中心前回 (precentral gyrus), IFG: 下前頭回 (inferior frontal gyrus)

temporal gyrus: STG), 角回 (angular gyrus: AG) や縁上回 (supramarginal gyrus: SMG) を経由して左下前頭回 (inferior frontal gyrus: IFG) へと投射する「背側経路 (dorsal pathway)」が相当する。この経路では、まず文字形態の視覚処理に特殊化された OT が活性化した後、音韻処理の責任部位である STG や SMG に活性化が伝播することで、文字と音韻の対応関係が個別に処理される。その後、発話や音韻性ワーキングメモリに関連する IFG が活動し、個々の音韻表象が一時的に保持・統合されることで、見慣れない文字列の読みが行われると考えられている (Jobard et al., 2003)。一方で語彙経路は、OT から意味処理に関わる中側頭回 (middle temporal gyrus: MTG), そして IFG への直接の投射を有する「腹側経路 (ventral pathway)」が相当する。この経路において、良く見慣れた単語は IFG で表象される発話・構音情報を直接的に活性化できるとされており (Levy et al., 2009), 文字の逐字的な分析に依存しない全語読みが行われる。

読みの発達過程

文字や単語の読みは生まれついて持っている能力ではなく、児童が家庭や学校場面で繰り返し指導を受けることで習得される。読みの発達研究は、文字や単語を単位とした読み能力が、公的な読みの訓練が開始される前後でどのように熟達していくかについての知見を提供してきた。

読みの発達過程について、Ehri (2005) は児童が 4 つのフェーズ (phase) を経て読みを習熟させることを想定した発達モデルを提案している。まず一つ目が、「前文字フェーズ (pre-alphabetic phase)」である。これは幼稚園に入学する前の児童 (3~5 歳) に相当し、文字の並びからその名前を発話し始める。しかし、この時期では児童は文字列の視覚的特徴 (例えば、「McDonald」のロゴやラベルなど) を利用して推測しているにすぎず、必ずしも文字を読んでいるわけではない。文字の知識は、その後の「部分文字フェーズ (partial alphabetic phase)」において獲得される。ここで児童は、ほとんどの文字を見分け、その名前を答えることがで

きるようになる。特にこの段階において文字に関する知識をどれだけ獲得したかが、その後の読み発達を予測する因子となり得る (Badian, 1998)。一方でこの段階の児童は、語頭の文字から推測して読む方略をとるなど (例えば, “kit” を “kev” と誤読する), 獲得した文字の知識を単語の読みに利用できるわけではないことも示されている (Mason, 1980)。

小学校等の公的な読みの訓練が開始されるとすぐ (小学 1~2 年生), 児童の読み能力の急速な習熟が生じる。「完全文字フェーズ (full alphabetic phase)」では、個々の文字と音の対応関係を学習することで、新しい単語や未知の文字の並びを読めるようになる (Ehri, 1999)。さらに、その後の「統合文字フェーズ (consolidate alphabetic phase)」では、よく見る文字の並び (例えば, 英語における “ing”) や単語全体を一つの単位として読む能力を習熟させていく。Samuels et al. (1978) は英語を母語とする小学 2, 4, 6 年生と大学生を対象とし、3~6 文字から構成される単語の意味カテゴリー (無生物か生物か) を判断することを求めた。その結果、小学 2 年生では文字数の増加に伴い反応時間が増加した一方、4 年生以降の児童と大学生は文字数によらず反応時間が一定であったことが見出された。この結果は遅くとも学童期の中盤から後半にかけて、より大きな単語を単位とした読み方を児童が獲得していることを示唆している。

児童が読み能力をどのように発達させるかについては、上記の Ehri (2005) によるもの以外にも、単語の音読における方略の変化に着目した Marsh et al. (1981) のモデルや、読みと書字の相互的発達に着目した Frith (1985) のモデルなど、様々な段階的モデルが提案されている。ただし、初期段階では文字知識や文字—音韻の対応規則を利用した文字レベルの読みが獲得され、その後により大きな単位、すなわち形態素や単語レベルの読みが習熟していく点では概ね一致している。

しかしながら従来の発達モデルは、主に英語を始めとするアルファベット書記体系の読者を想定して考案されたものであり、他の書記体系の学習者における読みの発達的变化は必ずしも同じでない可能性がある。読み発達に影響する要因として、書記体系の持つ「粒性」

と「透明性」という特性が挙げられる (Wydell & Butterworth, 1999)。粒性とは一文字に含まれる音韻単位の大きさを指し、例えば英語のアルファベットでは最も小さい単位である音素（粒性が細かい）、日本語の平仮名・片仮名ではそれよりも大きな単位である音節（粒性が粗い）がそれぞれ含まれている。それに対し透明性とは、文字と音がどれだけ規則的に対応するかを示す概念である。例えば英語は文字と音の対応関係が一对多である（不透明である）のに対し、日本語の平仮名は一对一で規則的に対応する（透明である）ことが知られている。Figure 3 に、書記体系ごとの粒性と透明性の程度を示す。

一般的に、粒性が粗く、そして透明性が高い書記体系の方が、児童の読みの習得に困難が生じにくい (Wydell & Butterworth, 1999)。さらにこうした特性は、児童の読みの発達の段階にも影響することも指摘されている (Wimmer, 1996; Wimmer & Hummer, 1990)。例えば不透明な英語を母語とする児童の特徴として、書記素—音素対応を利用した読みの習得がドイツ語母語児よりも2年程度遅くなることや (Frith, Wimmer, & Landerl, 1998)、単語レベルの知識（語彙・意味に関する知識）の影響が透明な書記体系を学ぶ児童よりも早い段階で生じることが示唆されている (Wimmer & Hummer, 1990; Seymour, 2005)。したがって、児童がどのように文字レベル、単語レベルの読みを発達させていくかを検討するためには、書記体系ごとに知見を蓄積していくことが重要である。

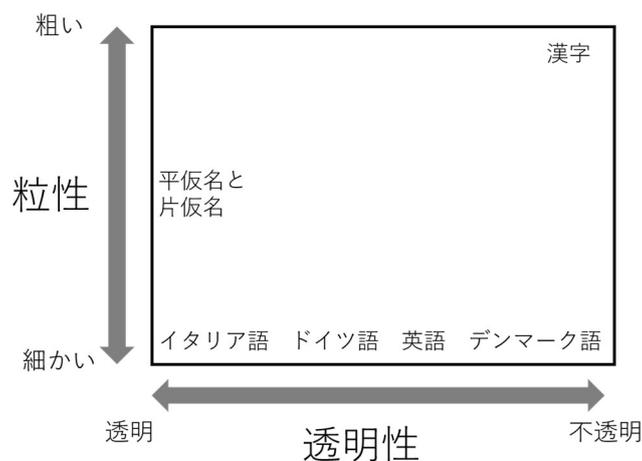


Figure 3. 書記体系ごとの粒性・透明性の程度 (Wydell & Butterworth, 1999 より和訳・抜粋)。

2章 読みの電気生理学的基盤

事象関連電位

熟達した読み手が有する特徴の一つとして、読みの流暢性、すなわち文字や単語を極めて短時間のうちに読むことができることが挙げられる。より具体的には、一つの単語を読むのにかかる時間は 250 ms 程度であることが眼球運動を計測した研究から報告されている (Rayner, 1993; Sereno & Rayner, 2003)。したがって、文字や単語に対する処理過程の詳細を検討するためには、このような極めて短い時間幅で生じる処理過程に着目することが重要であると考えられる。本研究では、刺激提示後およそ 200 ms 以内に生起する処理過程を「早い」処理として定義し、主要な対象として取り扱う。

これまでの多くの研究は、事象関連電位 (event-related potential: ERP) を用いることで、文字や単語の早い処理過程の解明を試みてきた。ERP とは、外的、あるいは内的な事象に同期して生じる脳の一過性の電位変動であり、頭皮上で観察された脳波 (electroencephalogram: EEG) を複数の事象の生起時点に揃えて加算平均し、事象に同期していない脳活動の影響を相殺することで導出される。ERP の最大の特徴は、ミリ秒単位の優れた時間分解能を有することであり、文字や単語レベルといった複数の処理段階を可視化できる指標である。

これまでの研究から、文字列や単語の提示から 200 ms 以内に生起する早い処理に関連する ERP 成分として、およそ 140-200 ms 付近において後頭側頭部で生起する N170¹、そしてより早い 80-140 ms で惹起する P1 が報告されてきた。これらの成分は、文字刺激や特定の文字の組み合わせに対して特異的な振る舞いを示すことが知られている (Figure 4)。ERP の

¹ この ERP 成分の名称については、いくつかの先行研究では視覚誘発電位 N1 (視覚刺激の提示後、後頭側頭部で生じる最初の陰性波) に重畳して観察されており、N170 ではなく単に N1 と表記される場合もある (例えば, Maurer et al., 2006 など)。ただしこれらは同義の成分として議論されていることから、本稿では N1 ではなく一貫して N170 と表記する。

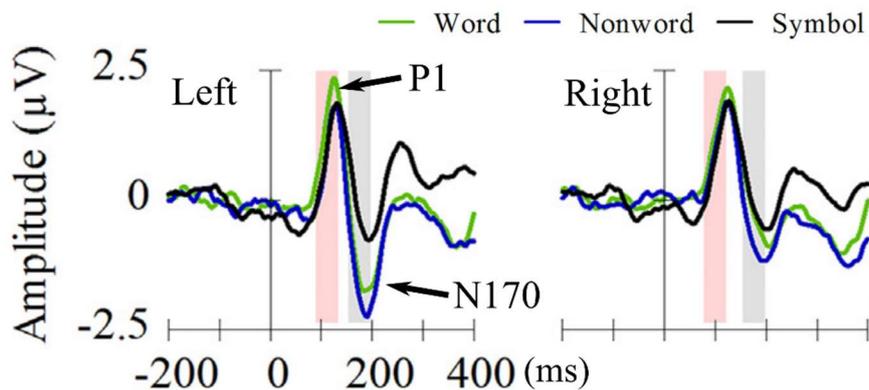


Figure 4. 左右半球の後頭側頭部における単語 (word), 非単語 (nonword), そして記号列 (symbol) に対する総加算平均 ERP (Uno et al., 2017 より作成)。赤色の帯で示す時間 (刺激提示後 80-120 ms) では単語が他の刺激よりも大きな陽性電位 (P1) を, 灰色の帯 (150-200 ms) では単語と非単語が記号列よりも大きな陰性電位 (N170) を惹起させている。

信号源推定を用いた研究から, N170 や P1 の生起には, 左半球の OT の中部に位置し, 文字列の形態処理に関連する紡錘状回 (fusiform gyrus: FG) の活動が関わることを示唆されている (Brem et al., 2006, 2009; Hauk et al., 2006)。本稿ではまず, これらの ERP 成分について, これまで研究が盛んに行われてきた成人を対象とした研究における現状を概観する。その後, それらが学童期の間でどのように変化するかを調査した研究を紹介する。

文字や文字列に特殊化された N170

文字や文字列の早い処理に関連した ERP 成分として最も有名なものが, 刺激提示後 140-200 ms で明瞭に観察される陰性電位である「N170」である。文字や文字列に特殊化されたこの成分の存在は, Bentin et al. (1999) によって最初に発見された。彼らはフランス語母語話者に対し, 文字列 (単語, 非単語, 子音文字列) と非文字列 (記号列, 図系列) をランダム順で提示し, それらの大きさの判断を行うように求めた。その結果, 刺激提示後 140-200 ms の左半球の後頭側頭部において, 文字列が非文字列よりも陰性に増強する ERP が観察された。この陰性増強は, 文字列の種類 (単語や非単語) によっては差が無く, また刺激の大

きさの判断のような直接読みを求めない課題においても生じたことから、文字刺激をそれ以外（文字以外の記号や幾何学図形）と潜在的に区別する「知覚的カテゴリー化」を反映すると解釈された。その後の様々な言語や課題を用いた研究からも、文字列に対して増強する N170 の存在は繰り返し報告されており(中国語: Lin et al., 2011; 英語: Maurer, Brandeis, & McCandliss, 2005; ドイツ語: Maurer et al., 2006; 日本語: Okumura, Kasai, & Murohashi, 2015), 読み手の意図によらず生起する潜在的な知覚的カテゴリー化は、書記体系によらず生起することが示唆されている。

文字列に特殊化された N170 について注目すべきもう一つの特徴は、右半球よりも左半球の後頭側頭部で優勢に生起するという点である。興味深いことに、複数の書記体系を比較した実験から、この N170 の左半球優位性は文字と音韻の対応関係が規則的な(透明性が高い)書記体系の文字列で明瞭であることが報告されている。例えば同じ課題下(同一の刺激が 2 回連続した際にボタン押しをするワンバック反復検出課題)であっても、比較的透明なドイツ語の偽単語²では N170 の左半球優位性が見出された一方 (Maurer, Brem, Bucher, & Brandeis, 2005), 例外的な読み方が多い不透明な英語の偽単語では見出されなかった (Maurer, Brandeis, et al., 2005)。こうした N170 の半球非対称性の違いは書記体系の透明性の違いから説明され、N170 の左半球優位性は文字列に対する「書記素—音素変換処理」を反映すると解釈された(音韻マッピング仮説) (Maurer & McCandliss, 2007)。音韻変換処理と N170 の左半球優位性との因果性は、人工書記体系において文字—音韻対応を学習した群でのみ左半球優位な N170 が生起したことや (Yoncheva, Zevin, Maurer, & McCandliss, 2010), 聾話者では左半球優位性を欠いた N170 が観察されたこと (Emmorey, Midgley, Kohen, Sehyr, & Holcomb, 2017) からも支持されている。まとめると、N170 が反映する機能的意義は大きく 2 つあると考えられる。すなわち、文字列特異的な増強に反映される知覚的カテゴリー化、

² 本稿では、発音可能である(≡正書法に則った文字配列を有する)が、意味を持たないアルファベット文字列(e.g., roze)を偽単語(pseudoword)と定義する。

そしてその左半球優位性に反映される書記素—音素変換処理である。

重要な点は、多くの実験状況において N170 の振幅や左半球優勢な頭皮上分布は、単語 (例えば、「あいさつ」) と発音可能な非単語 (例えば、「あいたる」) の間で差が無いことである (Bentin, Mouchetant-Rostaing, Giard, Echallier, & Pernier, 1999; Maurer, Brandeis, et al., 2005; Maurer, Brem, et al., 2005; Okumura et al., 2015)。N170 の振幅増強やその半球優位性が文字列の種類を区別しないという特性は、この成分が特定の文字配列に対する処理を反映するというよりもむしろ、「文字」を単位とした知覚的カテゴリー化や音韻変換処理に関わる可能性があることを示唆している。この可能性に基づけば、単一文字に対してもこれまで文字列に対して見出されてきた N170 が同様に生じることが予想される。しかしながら、これまでの研究のほとんどは「文字列」を対象としており、この予想と合致する結果は十分に得られていない。一般的に、単独で提示された文字は文字列中の文字よりも容易に同定されることが知られており (Pelli, Palomares, & Majaj, 2004; Pelli et al., 2007)、文字同士が隣接することで生じる知覚的妨害が起こらないためであると考えられている (Grainger, Tydgar, & Issele, 2010; Pelli et al., 2004)。さらに、脳機能画像研究は、単一文字に対する皮質応答は文字列に対するものよりも腹側後頭皮質の後部の領域で見出されることを報告しており、文字を単位とした形態処理が文字列よりも早い処理段階で生じ得ることが示唆されている (Thesen et al., 2012)。これらの知見に基づく、「文字列」と「文字」に対する処理は異なることも考えられ、したがって文字を単位とした処理が N170 に必ずしも反映されない可能性もある。N170 潜時帯で生起する処理の単位を明らかにするためには、単一文字に対する ERP を検討することが重要である。

単一文字に対する ERP を検討した研究は極めて少ないものの、英語のアルファベット単一文字に対しても、刺激提示後 150-180 ms において統制刺激 (疑似文字) と比較して陰性に増強する N170 が生起することが報告されている (Stevens, McIlraith, Rusk, Niermeyer, & Waller, 2013)。この結果は、N170 潜時帯で生じる陰性電位が反映する知覚的カテゴリー化が、

文字を単位とした処理過程であるという可能性を支持するものである。重要なのは、英語の単一文字に対して見出された N170 が左半球優位性を欠いていたことである。先述の通り N170 の左半球優位性は書記素—音素変換処理に関わることから (Maurer & McCandliss, 2007), 単一文字に対する両側性 N170 の生起は、文字が複数の音素と対応する英語の単一文字において、音韻変換処理が自動的に生起しないことを反映すると解釈された (Stevens et al., 2013)。この解釈に基づけば、平仮名のような書記素と音素が規則的に対応する (透明性の高い) 書記体系の単一文字に対しては、左半球優勢な N170 が見出されることが予想されるが、それを支持する証拠は得られていない。

学習された文字配列に特殊化された P1

Bentin et al. (1999) による文字列特異的な N170 の発見以降、この刺激提示後およそ 140 ms 以降に生起する ERP 成分は、読みの最初の知覚処理を反映する指標として見なされてきた (Maurer et al., 2007; Yoncheva, Wise, & McCandliss, 2015)。しかしながら、この時間帯に最初の文字レベルの処理が生起すると仮定した場合、熟達した読者における読みの速さを十分に説明できるわけではない。なぜならば、熟達した読者が一つの単語を読むのに要する平均時間は約 250 ms とされているが (Rayner, 1993; Sereno & Rayner, 2003), この時間から次の単語に対する眼球運動に要する準備時間を差し引くと、およそ 150 ms 以内に読みに必要な語彙情報の活性化が生じなければならないとされているためである (Sereno & Rayner, 2003; Sereno, Rayner, & Posner, 1998)。したがって、熟達した読者の読み速度を考慮すると、N170 よりも早い時間帯において語彙・単語レベルの処理過程が生起している可能性が高い。それに部分的に関連し得る ERP 成分が、いくつかの研究から見出されている。

刺激提示後およそ 80-140 ms 区間において生起する陽性電位「P1」は、意味の有無や文字列の親近性によって異なる振る舞いを示すことが報告されてきた (Hauk et al., 2006; Segalowitz & Zheng, 2009; Sereno, Rayner, & Posner, 1998; Uno, Okumura, & Kasai, 2017)。例え

ば Sereno et al. (1998) は、提示された単語が実在するかどうかを判断する課題（語彙判断課題）において、英語の子音文字列と偽単語に対する P1 が単語よりも増強したことを報告した。P1 は文字列の物理特徴の違い（フォントサイズなど）によっても修飾されるものの (Bayer, Sommer, & Schacht, 2012), 既学習文字列に対する P1 増強は、単語と非単語を同一の平仮名によって構成した場合においても見出されている (Uno, Okumura, & Kasai, 2017)。したがってこの現象は、文字列の間の物理的な違いによっては説明できない、文字配列に対する学習に依存した神経応答であると見なせる。

既学習文字列に対する P1 の機能的意義については合意が得られていないが、語彙表象の活性化か (Sereno et al., 1998), あるいは学習された文字配列の視覚形態処理を反映すると考えられている (Hauk et al., 2006; Segalowitz & Zheng, 2009)。さらに興味深いことに、この時間帯で生じる後頭側頭部の皮質活動が、全語読みに関わるという知見も得られている。Skarratt & Lavidor (2006) は参加者が語彙判断課題を行っている際に、特定の脳部位の神経活動を一時的に抑制する経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation: TMS) を、刺激提示後 20-200 ms (60 ms ごとに 4 段階) で両半球の後頭皮質に与えた。その結果、左後頭に対する 80 ms 時点の磁気刺激により、文字数の増加に伴う反応時間の延長（語長効果）が生じたことを見出した。語長効果の出現は全語読みが行われなかったことを反映するため、左後頭皮質におけるこの早い活動が、全語読みに対して因果的な役割を有することが示唆された。これらの知見は、P1 潜時間帯で生起する処理が、文字ではなくむしろ単語を単位としたものであることを示唆している。

ただし、既学習文字列に対する P1 は実験状況によっては観察されない場合もあり (Bentin et al., 1999; Maurer, Brandeis, & McCandliss, 2005), またその極性は実験間で一貫していないことには留意すべきである。この効果を観察した初期の研究は、偽単語が単語よりも (Sereno et al., 1998), あるいは正書法的典型性の低い文字列が高い文字列よりも (Hauk et al., 2006) 大きな P1 を生起させたことを報告した。よく見慣れた文字列の方が小さな神経応答を惹起

させたことから、学習された文字列に対する処理が効率化したことを反映すると解釈された (Hauk et al., 2006)。しかしながらより最近の知見では、単語に対する P1 が偽単語、あるいは非単語よりも増強することが報告されており (Segalowitz & Zheng, 2009; Uno et al., 2017), こうした解釈に疑問が投げかけられている。このような P1 における既学習文字列特異的な増強の極性の違いには、課題や実験状況、実験に用いた文字列など、様々な要因が関わる可能性がある。

文字列や単語に対する ERP の発達的变化

成人の読者を対象とした ERP 研究を総合すると、刺激提示後 140-200 ms で生起する N170 が文字レベルの処理に、そして 80-140 ms で生起する P1 が単語レベルの処理にそれぞれ関わるという可能性が導かれる。一方で、文字や単語を読む能力は文字刺激に対する学習によって獲得されることから、公的な読み訓練の開始前後の児童において、文字や単語を読むための認知神経学的機序に発達的变化が生じるかを検討することも重要である。これまでの ERP を用いた発達研究では、文字刺激に対する N170 と既学習文字列に特有の P1 が、読み能力の急激な変化が起こる学童期に生起することが報告されている。

Maurer et al. (2006) はドイツ語を母語とする未就学児 ($M=6.47$ 歳)、小学校 2 年生児 ($M=8.26$ 歳)、および成人 ($M=26.5$ 歳) における N170 の発達的变化を検討した。彼らは参加者にワンバック反復検出課題を遂行することを求め、単語、および記号列に対する ERP を記録した。結果として、公的な読み訓練を受けていない未就学児では文字列と記号列に対する N170 に差がなかったが、小学 2 年生児と成人ではそれらの差が観察されることを見出した。このことは、文字列特異的な陰性増強に反映される知覚的カテゴリー化が、読み発達の早い段階で獲得されることを示唆している。N170 が読み訓練の開始から 2 年以内に生じることが、その後の研究からも支持されている (Eberhard-Moscicka, Jost, Fehlbaum, Pfenninger, & Maurer, 2016; Hasko, Groth, Bruder, Bartling, & Schulte-Körne, 2013; Kast, Elmer, Jancke, &

Meyer, 2010)。

一方で、アルファベット書記体系を学習する学童期児童で見出されてきた N170 の多くは両側後頭側頭部に分布しており、成人において典型的に観察される左半球優位性を欠いていた (Eberhard-Moscicka et al., 2016; Hasko et al., 2013; Maurer et al., 2006, 2011; Tong et al., 2016)。例えば2年生から5年生にかけての N170 の発達的变化を検討した縦断研究からは、小学5年生の児童であっても、N170 の文字列と記号列の差の大きさは左右半球間で異ならなかったことが示されている (Maurer et al., 2011)。こうした結果は、少なくともアルファベット言語を母語とする学童期児童は、N170 の左半球優位性に反映される書記素—音素変換処理を (Maurer & McCandliss, 2007)、必ずしも成人と同程度まで発達させているわけではないことを示唆している。

これまでの発達的研究の関心は主に N170 に向けられており、学童期における P1 に着目した研究は非常に少ない。しかし、学童期児童においても既学習文字列に対する P1 が生じることは、Coch et al. (2012) による7歳と11歳の英語母語児を対象とした研究から発見されている。彼らは視覚的マスクングがかけられた単語、偽単語、そして子音文字列に対する ERP の発達的变化を検討した。その結果、偽単語に対する P1 が子音文字列よりも増強する効果が11歳の児童で生じた一方、7歳の児童では観察されなかった。この効果は、11歳の児童が特定の文字配列に特化された早い自動的処理を獲得していることの証拠として解釈できる。

まとめると、文字や単語レベルの処理に関わり得る一連の早い ERP 成分は、学童期の児童においても見出されている。すなわち、文字刺激に対する N170 は読み訓練の開始後すぐの児童で (およそ8歳まで)、既学習文字列に対する P1 は遅くとも11歳までの児童で観察されている。

読みスキルの発達と ERP

読みの発達に関する段階的モデル (Ehri, 2005) は特に学童期以降の変化について、まず文字—音韻対応の規則を利用した文字レベルの読みが獲得され (完全文字フェーズ)、その後により大きな単位、すなわち形態素や単語レベルの読みが習熟していく (統合文字フェーズ) を想定してきた。しかしこうした読み発達の段階的モデルに対して、学童期児童において見出されてきた一連の早い ERP の出現や発達的变化がどのように位置づけられるかは明らかではなかった。もし N170 が文字レベルの、そして P1 が単語レベルの読みスキルの発達にそれぞれ関わるのであれば、これらの ERP 成分が読み発達の各段階を評価する電気生理学的指標として利用できる可能性がある。

読みスキルの発達と ERP の関連については、Maurer らによる未就学児から小学 5 年生までの学童期児童を対象とした縦断研究で示されている。Maurer et al. (2006) は小学 2 年児を対象とした研究から、単語の音読速度が速い児童ほど、文字列と非文字列に対する N170 の振幅差が大きいことを示した。さらに、未就学児から小学 2 年生にかけて N170 振幅が増加した児童ほど、2 年生時点での音読速度が速かったことも示された (Maurer et al., 2007)。こうした結果は、N170 に反映される早い文字処理が、読みの流暢性の発達に関連することを示唆している。しかし興味深いことに、その後の小学 5 年生時点では N170 の振幅と音読速度の間の相関は見出されなかった (Maurer et al., 2011)。

このように 2 年生と 5 年生の時点で異なる結果が得られるのは、児童の読み発達を単語の音読速度から評価したことに由来するかもしれない。単語の音読速度は、文字レベル (素早い文字形態の同定や、音韻変換) や単語レベル (全語読み) など複数の読みスキルの熟達によって高速化する。しかしながら読み発達の段階モデルが示すように、文字レベルの読みは就学前後の非常に早くから、単語レベルの読みは数年の読み訓練を経て獲得されることも知られている。したがって、低学年時における単語音読の流暢化は主に文字レベルの読みの熟達に依存していたため、未就学児から小学 2 年生時点でのみ N170 と音読速度の相関が

見出された可能性がある。学童期における読み発達と ERP の関係をより詳細に検討するためには、学童期の読みの流暢化の背景にある個々の読みスキルの熟達（文字同定の効率化や全語読みの獲得）を分離することが重要であると考えられる。

3章 本研究の目的

前章で概観したように、これまでの ERP 研究は、文字列が提示されてから 200 ms 以内に生起する一連の ERP 成分は、文字刺激や単語に対して異なる応答特性を示すことを見出してきた。すなわち、刺激提示後およそ 140—200 ms 程度で生起する N170 は文字の組み合わせによらず増強するのに対し、それよりも早い 80—140 ms で生起する P1 は既学習の文字配列に特有の振る舞いを示すことが報告されている。これらの知見は、N170 が文字を単位とした、P1 が単語を単位とした処理をそれぞれ反映するという可能性を示唆するものである。さらに発達研究からは、こうした早い ERP 成分が、読みスキルの著しい発達が生じる学童期において生起することも見出されてきた。

一方で、これらの ERP 成分が読みという行為にどのように関わり、それが学童期を通してどのように発達するかについては明らかではない。また、これまでの ERP を用いた発達の研究は、ドイツ語を始めとするアルファベット書記体系を学習した児童を対象としたものが主流であった。しかしながら日本語の平仮名はアルファベット書記体系と比較して、透明性が高くかつ粒性が大きいという特徴があることから (Wydel & Butterworth, 1999) (Figure 3)、これまで蓄積されてきた知見がそのまま当てはまるとは限らない。異なる特性を持った幅広い書記体系において、文字、単語レベルの皮質処理の様相と読みスキルの発達に伴う変化を検討することは、読みの背景機序や発達過程を説明する既存のモデルを精緻化するだけでなく、読み能力評価のための新たな指標を作り上げる上でも重要な課題である。

本研究は、文字列特異的な N170、および既学習文字列に対する P1 という二つの成分に

ついて、読みにおける機能的意義と、日本語平仮名を学習した児童における発達的变化を明らかにすることを目的とした。第2部ではERPを用いた実験研究を行い、これまで未解明であった以下の3つの問題について検討する。まず第1の問題は、これまで「文字列」に対して見出されてきた左半球優勢なN170が、「単一文字」に対する書記素—音素変換処理に関わるかどうか明らかでないことである。これまで単一の文字に対するERPを検討した知見は限られており、文字と音韻の対応が不規則な英語の単一文字が両側性のN170を惹起することが示されているのみであった (Daffner, Alperin, Mott, & Holcomb, 2014; Stevens et al., 2013)。そこで実験1では読みに熟達した成人を対象とし、文字と音が規則的に対応する平仮名单一文字に対するERPの様相を検討する。

第2の問題は、平仮名の読者のN170の発達的变化が明らかではないことである。アルファベット言語を対象とした研究からは、文字列N170の左側性化は、多くの場合において読み訓練の開始から5年以内には生じないことが報告されており、音韻変換処理の習熟には時間がかかることが示唆されている (Maurer et al., 2006, 2011)。一方で、文字と音韻の対応関係がより明瞭な平仮名の学習者は、より学童期の中に潜在的な音韻変換処理を獲得しているかもしれない。実験2ではこの可能性を検証するため、平仮名を学習した小学校4～6年生の児童と大学生における文字列N170を比較した。

第3の問題は、N170とP1が、読みを構成する下位スキルの発達と関わるかどうか明らかではないことである。従来の発達研究は、単語の音読速度が速い児童においてより大きな文字列N170が生起されたことを示しており、ERPが読み発達を評価する電気生理学的指標となり得ることが示唆されている (Maurer et al., 2007, 2006, 2011)。しかし単語の音読速度は、文字同定の高速化や全語読みの獲得といった複数の読みスキルの熟達によって高速化することから、これらを分離したうえでERPとの関係を検討することも重要である。実験3では、小学校1～6年生の児童における単語に特殊化されたP1、そして文字刺激に特殊化されたN170と、眼球運動測定によって定量化された読みスキルの発達の間関係性を検討

した。

本研究のいずれの実験においても、文字列に対する N170 や既学習文字列に対する P1 を測定するにあたり、平仮名文字列に対する ERP を検討した先行研究 (Okumura et al., 2015) と類似の高速提示パラダイムを実施した。この課題では、平仮名文字刺激やそれと比較する統制刺激が高速で提示され、参加者は高頻度で提示される黒色刺激の中から低頻度の青色刺激を検出するよう求められる (27 頁, Figure 5 参照)。この課題は短時間で多数の加算回数を得られ、意識的な音韻・意味処理を求めないことから、文字や単語に対する早い知覚処理の発達的变化を検討するのに適していると考えられる。本研究はこの高速提示パラダイムを上述の 3 つの実験で行い、文字列に対する N170 と既学習文字列に対する P1 の機能的意義と、平仮名を学習した児童における発達的变化を検討する。その中で、得られた知見が第 1 部で概観した読みの認知神経学的モデルや発達のモデルに対してどのように位置づけられるかを考察する。

第2部 実験研究

実験1 透明な平仮名文字に対する電気生理学的応答の検討³

1.1. 目的

文字刺激に対して特異的に生起する左半球優勢な N170 は、これまで早い文字列処理を反映する電気生理学的応答であると考えられてきた (Bentin et al., 1999)。熟達した読み手においてこの ERP 成分は、文字列に対して文字以外の統制刺激よりも陰性に増強することが報告されており、早い処理段階における知覚的カテゴリー化に関連すると考えられてきた (Simon, Bernard, Largy, & Lalonde, 2004)。発達研究からは、この文字刺激に特化された N170 が読み学習の開始後すぐに出現することや (Maurer et al., 2006)、発達性ディスレクシアを有する児童では定型発達児よりも出現する年齢が遅くなることが示されている (Maurer et al., 2011)。これらの結果は文字列特異的な N170 が、文字刺激に対する知覚的熟達の程度を反映することを示唆している。

この文字列特異的な陰性増強は左半球の後頭側頭部で明瞭に生起するという特徴があるが (Maurer, Rossion, & McCandliss, 2008; Simon et al., 2004)、この N170 の左半球優位性は文字と音の対応の規則性を示す「正書法的透明性」によって修飾されることが示唆されている。例えば Maurer とその共同研究者らは一連の実験から、透明なドイツ語偽単語が左半球優勢な N170 を惹起した一方で (Maurer, Brem, et al., 2005)、不透明な英語偽単語が両側性 N170 を惹起したことを報告した (Maurer, Brandeis, et al., 2005)。こうした半球優位性の違いは、書記体系間の透明性の違いから説明され、N170 の左側性化は書記素—音素変換処理を反映することが示唆された (音韻マッピング仮説) (Maurer & McCandliss, 2007)。音韻変換処理と

³ 実験1は発表されている以下の論文を日本語に訳し、加筆修正を加えたものである。Uno, T., Kasai, T., & Seki, A. (2019). Electrophysiological correlates associated with involuntary processing of single letters in the Japanese hiragana script. *Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, **37**, 157-165.

N170 の左半球優位性の因果関係はその後、人工言語の書記体系を学ぶ際に文字と音韻の対応規則に着目した参加者のみが、左半球優位な N170 を生じさせたこと (Yoncheva et al., 2010) から支持されている。

英語のアルファベットを用いた研究からは、後頭側頭部において単一文字に対する ERP が偽フォントよりも陰性に増強する効果が、刺激提示後 150-180 ms で生じることが示されている (Stevens et al., 2013)。この効果が生じた潜時と頭皮上分布は文字列に対する N170 に類似するものであったことから、N170 に反映される知覚的カテゴリー化は、単一文字に対しても同様に生じると考えられる。重要な点として、この単一文字に対して生起した N170 は両側後頭側頭部で優勢であり、この左半球優位性の欠如は、英語の正書法の不透明性により音韻変換処理が自動的に生起しなかったことを反映すると解釈された (Stevens et al., 2013)。一方でこの解釈は、音韻マッピング仮説が単一文字に対しても拡張され得ることを前提としている。もしこの可能性が正しければ、日本語平仮名は個々の文字が規則的に音韻へと変換可能であるため、平仮名の単一文字は左半球優勢な N170 を惹起することが予想される。実験 1 ではこの可能性を検証することを目的とした。

本研究では 2 つの異なる統制刺激を用いて、日本語平仮名の単一文字に対する ERP を検討した。まず実験 1-1 では、日本語平仮名における単一文字、および文字ではない記号（例えば、@、&、# など）に対する ERP を比較した。このような学習された文字刺激とあまり学習されていない記号との比較は、先行研究でもよく用いられてきたものである (Bentin et al., 1999; Maurer, Brandeis, et al., 2005; Maurer, Brem, et al., 2005)。しかし英数字記号は意味的、あるいは数的情報を含んでおり、文字に対するものとは異なる特有の神経応答を惹起させる可能性もある。したがって実験 1-2 では、日本語読者にとって音韻や意味情報のいずれも含まない統制刺激として、親近性の低い外国語文字（タイ文字）を用いて、平仮名单一文字に対する ERP を検討した。

1.2. 実験 1-1

実験 1-1 では、透明性の高い日本語平仮名における単一文字に対する ERP を検討するため、先行研究と同じく英数字記号を統制刺激として用いた。

方法

13 名の大学生、大学院生（男性 4 名、20-34 歳、平均 21.8 歳）が実験に参加した。全ての参加者は右利きで、正常な視力もしくは十分な矯正視力を有しており、これまで読み困難の診断を受けてはいなかった。参加者からは書面でのインフォームド・コンセントを得た。この実験は北海道大学大学院教育学院の倫理審査委員会の承認を得て行った。

刺激は 14 種類の平仮名文字（い、う、お、か、く、こ、し、た、つ、と、に、ま、み、り）と記号（@, &, #, %, ∇, +, =, \$, ♀, ♂, 〒, \$, ¥, §）から構成された。Figure 5 に示すように、全ての刺激（視角にして $0.9^\circ \times 0.9^\circ$ ）は灰色画面の中央に提示された。刺激の出現位置を示すため、画面中央に長形状の枠（ $2.7^\circ \times 7.1^\circ$ ）を常に提示し続けた。観察距離は 70 cm であった。刺激提示時間は 100 ms、刺激間隔は 300-600 ms（50 ms ごとに 7 段階）であった。刺激の提示と行動反応の測定は E-prime 2.0 (Psychology Software Tools, Sharpsburg, Pennsylvania, USA) を用いて行った。実験の開始に先立ち、参加者はまず短い練習を実施した。実験中、黒色の刺激（非標的刺激）が高頻度で、紺色の刺激（標的刺激）が低頻度で提示された。参加者は画面中央の長方形に注視し、標的刺激が提示された際に可能な限り素早く正確にボタン押しをするように求められた。実験全体は 2 つのブロックから

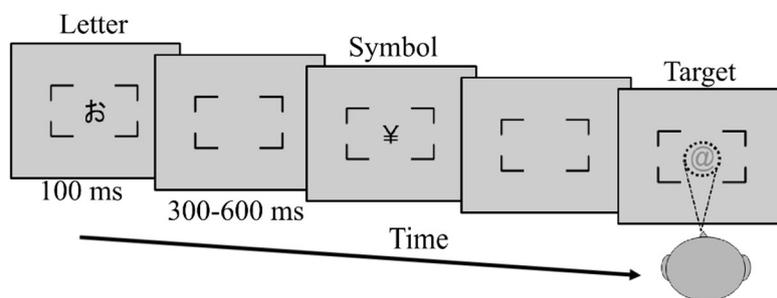


Figure 5. 刺激系列と実験手続き。実験 1-1 では、参加者は高頻度で提示される黒色の平仮名や記号（非標的刺激）の中から、紺色の刺激（標的刺激）を検出するよう求められた。実験 1-2 では記号がタイ文字に、標的刺激の色が青色に変更された。

構成され、それぞれの平仮名文字と記号は各ブロックで 7 回繰り返された。各ブロックは 175 個の非標的刺激と 21 個の標的刺激から構成された。

脳波 (electroencephalogram: EEG) は、拡張国際 10-20 法に基づく頭皮上 25 か所 (Fp1/2, F7/8, F3/4, Fz, T7/8, C3/4, Cz, P7/8, P3/4, Pz, PO7/8, PO3/4, POz, O1/2, and Oz) から、銀-塩化銀電極を装着した電極帽 (Easycap GmbH, Herrsching, Germany) を用いて記録した。基準電極は鼻尖であった。垂直眼電図 (VEOG) は Fp1 と左眼窩下から、水平眼電図 (HEOG) は両眼眼角に設置した電極からそれぞれ双極導出し、瞬きなどの眼球運動を記録した。脳波と眼電図は SymAmps (NeuroScan, Sterling, VA, USA) を用いて増幅し、電極と頭皮の間の電気抵抗値は 10 k Ω 以下を保った。バンドパスフィルタは 0.1-30 Hz, サンプリング周波数は 500 Hz であった。

電極および刺激条件ごとに、脳波を刺激提示前 200 ms から提示後 800 ms までの 1000 ms 区間を加算平均した。刺激提示前 200 ms 間の平均電位をベースラインとして補正した。自動アーチファクト除去基準は $\pm 75 \mu\text{V}$ とした。運動や意思決定の影響の少ない非標的刺激に対する ERP を分析対象とし、標的刺激および標的刺激の直後の試行は分析から除外した。平均加算回数は文字で 109 回 ($SE = 8$), 記号で 110 回 ($SE = 8$) であった。

分析に用いる平均振幅の区間と電極部位は、総加算平均 ERP と差波形 (Figure 6a) から視察により同定した。その結果、刺激提示後 140-180 ms, および 200-300 ms 区間において、平仮名文字と記号の間の差が見出された。この文字と記号の差はいずれも、PO7 と PO8 で最大であった。これらの 2 つの潜時帯の平均振幅について、半球 (左, 右) と刺激 (文字, 記号) の 2 要因参加者内分散分析を実施した。効果量は偏イータ 2 乗 (η_p^2) を指標として示す。

結果

標的刺激検出にかかる平均 RT は、文字で 446.72 ms ($SE = 9.23$), 記号で 441.47 ms ($SE =$

10.60) だった。Hit 率は文字で 75.91% ($SE=5.52$), 記号で 73.38% ($SE=6.41$)とやや低かったものの、非標的に対してボタン押しをした割合である FA 率が全ての参加者においてゼロだったことから、参加者が課題を注意深く遂行していたことが示唆された。RT と Hit 率の両方において、文字と記号の間に有意な差はなかった ($ps > 0.1$)。

実験 1 の ERP の結果を、Figure 6 の左側に示す。文字と記号の差波形から、刺激提示後およそ 160 ms を頂点とする陰性電位が後頭側頭部 (PO7, PO8) で観察されており、左半球でより明瞭であった。この効果を 140-180 ms の平均電位から分析したところ、半球と刺激の交互作用が認められた [$F(1, 12)=6.98, p < 0.03, \eta_p^2=0.37$]。下位検定の結果、刺激の単純主

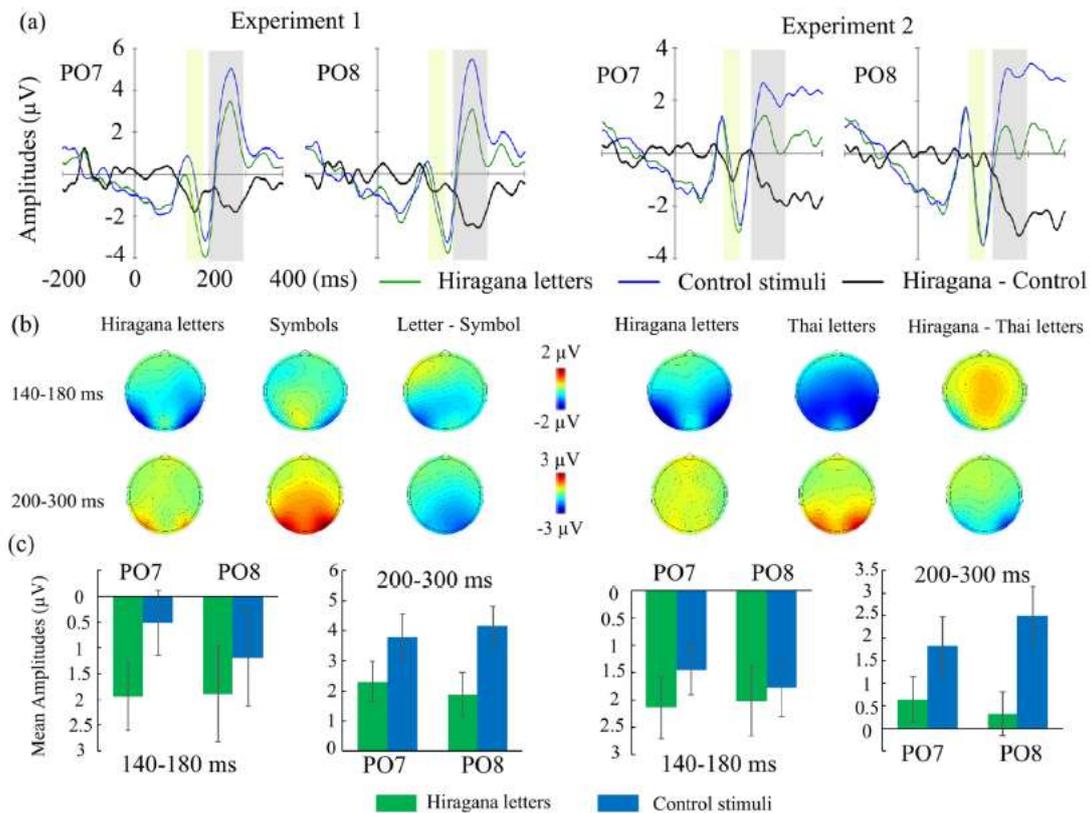


Figure 6. (a) 後頭側頭部における非標的の文字、および統制刺激（実験 1-1 では記号、実験 1-2 ではタイ文字）に対する総加算平均 ERP。文字と統制刺激の引き算波形（黒線）も重ねて示されている。黄色の帯（140-180 ms）と灰色の帯（200-300 ms）はそれぞれ、分析に用いた区間を示している。(b) 各刺激、および引き算波形の等電位マップ。(c) 後頭側頭部の電極における平均電位。エラーバーは標準誤差を示す。

効果が左半球の電極 (PO7) では有意であったが [$F(1, 12)=6.94, p < 0.03, \eta_p^2=0.37$], 右半球 (PO8) では認められず [$F(1, 12)=1.99, p > 0.1, \eta_p^2=0.14$], 左後頭側頭部でのみ平仮名文字に対する陰性電位が記号に対するものよりも増大したことが示された。半球の単純主効果も同様に検討したが, 文字・記号のいずれについても有意な効果は無かった [文字: $F(1, 12) < 0.01, p > 0.9, \eta_p^2 < 0.01$; 記号: $F(1, 12)=0.73, p > 0.4, \eta_p^2=0.05$]。

さらに, より前方の電極 (P7/P8) でひらがな文字列に特異的な陰性増強を観察した先行研究 (Okumura et al., 2015; Uno et al., 2017) と比較するため, この単一文字特異的な効果が P7 と P8 においても生じたかどうかを検証した。その結果, 刺激の主効果が有意であったが [$F(1, 12)=5.58, p < 0.04, \eta_p^2=0.32$], 半球と刺激の交互作用は有意水準に達しなかった [$F(1, 12)=3.23, p = 0.1, \eta_p^2=0.21$]。

左半球における文字に対する陰性増強に加え, より遅い潜時帯 (200-300 ms) における陽性電位 P2 についても, 文字と記号の差が同定された。この 200-300 ms 区間においては, 刺激の主効果が有意であり [$F(1, 12)=8.13, p < 0.05, \eta_p^2=0.40$], 文字に対する ERP が記号に対するものよりも陰性であった。刺激と半球の交互作用は認められなかった [$F(1, 12)=2.70, p > 0.1, \eta_p^2=0.18$]。

1.3. 実験 1-2

実験 1-1 では, 早い潜時帯 (140-180 ms) において左半球でのみ文字が記号よりも陰性に増強する効果と, それよりも遅い潜時帯 (200-300 ms) における文字に対する両側後頭側頭部で生起する陰性シフトを観察した。このうち前者の結果は, 平仮名の単一文字が左半球優勢な N170 を生起するという本実験の予測を支持する一方, その頭皮上分布は文字列に対して見出されていた N170 よりもやや後部の電極で優勢であった。実験 1-2 では, これらの単一文字に対する陰性 ERP が英数字記号の意味に関連した神経活動の交絡によるものではないことを確かめるため, 日本語母語話者にとって言語情報を有さない外国語文字 (タイ文字)

を統制刺激として用いた。また、実験 1-1 における色判断の Hit 率がやや低かったため、実験 1-2 では紺色の標的の代わりに、より検出が容易な青色の標的を用いた。この変更により、より容易な課題状況においても、単一文字に対して音韻マッピング仮説が拡張されるかどうかを検討できると考えられる。

方法

以下の点を除き、実験 1-1 と同様の手続きを用いた。日本語を母語とし、読み困難を主訴として持たない大学生 12 名（男性 9 名，19-22 歳，平均 20.3 歳）が実験に参加した。統制刺激として、ほとんどの日本人にとって親密度が低いタイ文字（๑, ๒, ๓, ๔, ๕, ๖ など）を用いた。実験参加者がこれらの文字を読めないことは、実験開始前に口頭で確認した。平仮名文字とタイ文字はそれぞれ 42 文字から構成された。標的刺激の色は、実験 1-1 よりも検出しやすい青を用いた。実験は 3 ブロックから構成された。各刺激は 1 ブロックの中で 2 回使用され、1 ブロックは 156 個の非標的刺激と 12 個の標的刺激から構成された。平均加算回数は平仮名で 146 回 ($SE = 10$)、タイ文字で 145 回 ($SE = 10$) であった。

結果

標的検出に要した平均 RT は平仮名文字で 400.83 ms ($SE = 12.68$)、タイ文字で 399.04 ms ($SE = 10.97$) であった。Hit 率は実験 1-1 よりも高く（平仮名文字: $M = 98.06\%$, $SE = 1.02$; タイ文字: $M = 95.34\%$, $SE = 1.83$ ）、FA 率は全参加者でゼロだった。RT と Hit 率については平仮名文字とタイ文字で差は無かった ($ps > 0.08$)。

Figure 6 の右側に、実験 1-2 における ERP の結果を示す。後頭側頭部において、平仮名文字はタイ文字と比較して、刺激提示後約 160 ms を頂点に持つより大きな陰性電位を惹起した。PO7・PO8 におけるこの効果を、実験 1-1 と同様の 140-180 ms 区間の平均電位を用いて検定したところ、半球と刺激の 2 要因交互作用が認められた [$F(1, 11) = 5.36$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.33$]。下位検定の結果、左半球の電極 (PO7) でのみ刺激の単純主効果が認められ、平仮名

文字がタイ文字よりも陰性であることが示されたが [$F(1, 11)=5.65, p<0.05, \eta_p^2=0.34$], 右半球 (PO8) では刺激の効果は認められなかった [$F(1, 11)=0.56, p>0.4, \eta_p^2=0.05$]. 半球の単純主効果は, 平仮名文字でもタイ文字でも認められなかった ($ps>0.4$). また, P7・P8 においても同様の分析を行ったが, いずれの効果も統計的に有意ではなかった ($ps>0.1$).

より遅い時間帯 (200-300 ms) においても, 平仮名文字に対して生じた P2 がタイ文字よりも陰性である効果が観察された。この効果は, 刺激の主効果が有意であったことから支持された [$F(1, 11)=9.06, p<0.02, \eta_p^2=0.45$]. 刺激と半球の交互作用も認められたが [$F(1, 11)=6.73, p<0.03, \eta_p^2=0.38$], 平仮名文字が記号よりも陰性である効果は左半球 (PO7) と右半球 (PO8) の両方で有意であった [左: $F(1, 11)=6.09, p<0.04, \eta_p^2=0.36$; 右: $F(1, 11)=10.21, p<0.01, \eta_p^2=0.48$].

したがって, 実験 1-1 と実験 1-2 で類似した結果が示された。

1.4. 考察

本実験の目的は, これまで文字列に対して観察されてきた左半球優勢な N170 と類似する陰性電位が, 透明な日本語平仮名の単一文字に対しても生起するかを検討することであった。実験 1-1 において, 平仮名文字は記号よりも大きな陰性増強を, 刺激提示後 140-180 ms の間に左後頭側頭部において惹起した。この文字に対して特殊化された効果は, 統制刺激がタイ文字で課題が容易な実験 1-2 においても観察された。この文字に対する陰性増強は, 文字列に対して典型的に生起する文字列特異的な N170 (Bentin et al., 1999; Maurer, Zevin, & McCandliss, 2008; Okumura et al., 2015) と, 左半球優位性と潜時間帯が概ね一致するものであった。どちらの実験においても文字に対する N1 の振幅の絶対値は左右半球で差が無かった。しかしながら, このような左右半球の振幅の絶対値から半球優位性を評価する方法は, 2 つの半球が解剖学的に対称であるという単純化し過ぎた仮定に依存しているという批判もある (Zhao et al., 2014, 2012)。本研究では各半球における文字と統制刺激の差に着目して評価

を行い、統制刺激や課題の要求によらず、単一文字に対して左半球優勢な N170 が生起することを見出した。

従来の研究では、不透明なアルファベットの単一文字に対しては両側性 N170 が惹起されることが報告されている (Daffner et al., 2014; Stevens et al., 2013)。これに対し平仮名单文字は非常に透明性が高いことから、色判断課題においても文字が音韻へと潜在的に変換されており、それが N170 の左半球優位性に反映されたと考えられる。したがって本研究の結果は、左半球優位な N170 が書記素—音素変換を反映するという仮説 (音韻マッピング仮説) (Marure & Mccandliss, 2007) が単一文字に対しても拡張され得ることを示唆する。さらに、本実験における単一文字に対する N170 は後頭の電極 (PO7/PO8) で最大であり、平仮名字列に対して見出されてきた N170 の優勢部位 (P7/P8) よりも後方であった (Okumura et al., 2015; Uno et al., 2017)。この頭皮上分布の違いは、視覚単語認知における皮質階層、すなわち腹側後頭側頭皮質のより後部が個々の文字の処理に関わる一方、前部が文字列の処理に関連するという知見 (Dehaene, Cohen, Sigman, & Vinckier, 2005; Vinckier et al., 2007)とも一致する。重要な点は、本研究で見出された単一文字に対する N170 が、文字列 (単語・非単語) への N170 と類似する潜時 (140-180 ms) で生起していたことである。この結果は、単一文字に対する音韻変換処理が、文字列に対するものと同じ段階で生起し得ることを示唆する。

また左半球優勢な N170 は、これまでワンバック反復検出課題 (Maurer, Brandeis, et al., 2005; Maurer, Brem, et al., 2005) や語彙判断課題 (Simon et al., 2004) で見出されてきたが、本実験では顕在的な「読み」を求めない課題において N170 を見出した。これは、色判断課題で文字に注意が向けられることで、「物体ベースの注意」のメカニズムにより文字に帰属する特徴間で注意が拡散し (Duncan, 1984)、課題非関連の音韻処理が促進されたためと思われる。このことから本研究の課題は、文字に含まれる音韻表象の活性化がどの程度自動的に生起するかを検討するのに有効であると考えられる。

さらに2つの実験の両方で、単一文字に対する左半球優勢な N170 成分に加え、より遅い

潜時帯 (200-300 ms) において後頭側頭部で生起する陽性電位 (P2) が、統制刺激よりも文字で陰性である効果が観察された。重要なことに、この P2 の文字に対する陰性シフトの頭皮上分布は両側後頭側頭部で優勢であり、左側性化した N170 とは明らかに異なっていた。したがって、この文字への遅い陰性シフトは N170 効果の遷延では説明できず、それとは異なる文字処理過程を反映すると考えられる。

文字に対するこの遅い両側性陰性シフトの機能的意義については本研究の目的の範囲を超えるが、書記素-音素変換に関わる更なる処理か、あるいは文字刺激に対する注意資源配分の少なさに関連する可能性がある。例えば、いくつかの研究は発音可能な刺激に対する P2 が減衰することを報告しており (Appelbaum et al., 2009; Sereno et al., 1998)、文字表象と音韻表象の間の相互作用が N170 潜時以降においても生起することが示唆されている。あるいは、顕著な刺激に対する P2 は減衰する (陰性にシフトする) ことも観察されており、顕著性の高い刺激に対して配分される注意資源の少なさを反映していると解釈されている (Straube & Fahle, 2009; Straube, Grimsen, & Fahle, 2010)。N170 よりも遅いこの時間帯で、平仮名单一文字に対してどのような処理が生起しているかを明らかにするためには、更なる検討が必要になるだろう。

本実験は、透明な書記体系における単一文字に対する ERP についての最初の報告である。単一文字の処理は学童期の早い段階で習熟が進むと考えられている重要な要素であることから (Ehri, 2005)、本実験の成果は、将来的な発達研究で単一文字の処理を検討する際の基礎となるデータを提供し、読みの発達的变化を検討する上でも重要な知見であると考えられる。

実験 2 平仮名の学習者における N170 の発達的变化⁴

2.1. 目的

読みという行為の中心的な目的の一つは、文字に帰属する音韻表象を迅速かつ潜在的に活性化させることであるが、これは児童が学童期に身につける重要な能力である。この書記素一音素変換の学習の困難度は、正書法的透明性、すなわち、ある書記体系において文字と音韻がどの程度規則的に結びつくかに依存する。例えば、1つの文字が必ず1つの音に対応する透明な書記体系（日本語の平仮名）では、1つの文字が複数の音に対応する不透明な書記体系（英語）に比べて、書記素一音素変換を習得しやすく、読字障害のリスクが低い(Wydell & Butterworth, 1999)。したがって、読みの発達は書記体系によって異なる可能性が高く、読みの背景にある神経心理学的・発達のメカニズムをより詳細に検討するためには、さまざまな書記体系における知見を蓄積していくことが重要である。

熟達した読み手は、文字や文字列を極めて短時間のうちに処理できることが知られている (Jackson & McClelland, 1975; Sereno, Rayner, & Posner, 1998)。高い時間分解能を有する脳活動の指標である事象関連脳電位 (event-related brain potential: ERP) を用いた研究は、こうした早い文字処理過程について多くの知見を提供してきた。関連する ERP 成分として、刺激提示後およそ 140-200 ms に生起する左半球優勢な N170 が知られている (Bentin, Mouchetant-Rostaing, Giard, Echallier, & Pernier, 1999)。この成分は、文字列であれば意味の有無にかかわらず統制刺激よりも陰性に増強することが繰り返し報告されており、学習された文字をそれ以外の視覚刺激と区別する「知覚的カテゴリー化」を反映すると考えられている (McCandliss et al., 2003)。この成分は典型的に左半球で優勢であるが、重要な点は、この傾向は文字と音韻がより規則的に対応する言語や (Maurer, Brandeis, & McCandliss, 2005;

⁴ 実験 2 は掲載が決定した以下の論文を和訳し、加筆・修正を行ったものである。
Uno, T., Kasai, T., & Seki, A. The developmental change of print-tuned N170 in highly transparent writing systems, *Japanese Psychological Research*. doi: 10.1111/jpr.1239720

Maurer, Brem, Bucher, & Brandeis, 2005), 文字と音韻の対応に注意を向けて文字を学習した場合に明瞭に観察されることである (Yoncheva, Blau, Maurer, & McCandliss, 2010)。これらの結果は、左半球優勢な N170 が文字から音への潜在的な変換過程に関連することを示唆している (音韻マッピング仮説: Maurer & McCandliss, 2007)。さらに、不透明な単一のアルファベット文字に対しては両側性 N170 が惹起されるのに対し (Stevens, McIlraith, Rusk, Niermeyer, & Waller, 2013), 実験 1 では透明な平仮名文字に対して左半球優勢な N170 が惹起されることが示された。このことから、左半球優勢な N170 は文字レベルの音韻変換処理を反映することが示唆される。

アルファベット言語圏における ERP を用いた発達研究は、学童期児童が左半球優位性に反映される書記素—音素変換を必ずしも獲得しているわけではないことを示唆している。例えば、読みを学び始めている未就学児では文字列に対する N170 が生起しないが、2 年生の児童では両半球で増強する N170 が観察されている (Maurer et al., 2006)。この結果から、文字列特異的な陰性増強に反映される知覚的カテゴリー化は読み訓練の開始後早くに獲得される一方、その左半球優位性に反映される文字—音韻変換は 2 年生では十分に習熟していないことが示唆された。その後、左半球優位性を欠いた両側性の N170 は、8~12 歳のドイツ語母語児 (Kast, Elmer, Jancke, & Meyer, 2010) や、12 歳のオランダ母語児 (van Setten, Maurits, & Maassen, 2019) を対象とした研究からも示されており、学童期は音韻変換処理が必ずしも成人と同程度まで発達しきらないことが示唆されている。

一方で、平仮名は文字と音韻が一対一で対応していることから、平仮名を学習する児童は読み発達の早い段階で潜在的な音韻変換処理を獲得している可能性がある。実験 2 では、この仮説を検証することを目的とした。方法として、潜在的な音韻変換処理を評価するのに適した高速提示パラダイム (Okumura et al., 2015) を用い、小学校に在籍する 4~6 年生の児童と大学生の間で文字列に対して生起した N170 を比較した。もし 4~6 年生の児童が自動的に音韻変換処理を獲得しているのであれば、小学生の児童においても大学生と同様に左半

球優勢な N170 が惹起されることが予想される。

2.2. 方法

参加者は、小学校の通常学級に在籍する児童 14 名（男児 10 名, 9.8-12.8 歳, 平均 11.3 歳, 左利き 1 名）と大学生 13 名（男性 10 名, 19-22 歳, 平均 20.4 歳）であった。参加者は全員、日本語を母語とし、正常な視力もしくは矯正視力を有していた。児童は小学校 4～6 年生で、学校や医療機関において発達性ディスレクシアと診断されたことは無かった。すべての児童の保護者および大学生から書面によるインフォームド・コンセントを得るとともに、児童からはインフォームド・アセントを得た。本実験は北海道大学教育学院の倫理審査委員会の承認を得て実施した。

本実験では刺激として、3 文字から構成される平仮名单語、非単語、そして外国語文字列（タイ文字列）を用いた（各 42 刺激）。全ての平仮名单語は小学校の教科書で記載されたものを用い（甲斐・松川, 2005）、音声親密度が高いことを確認した [$M = 6.06$ (7 段階評定), $SD = 0.31$] (天野・近藤, 1999)。これらの単語に促音や拗音は含まれなかった。非単語は、単語に含まれる文字を文字位置ごとに入れ替えて作成し、全て発音可能であった。本実験では日本人にとってなじみが薄く、文字の種類数が平仮名とほぼ同じなタイ文字を統制刺激として用いた。外国語文字列はタイ文字をランダムに並べて作成した。Figure 7 に示すように、全ての刺激はコンピュータディスプレイ上の灰色背景の中央に提示された。刺激が提示さ

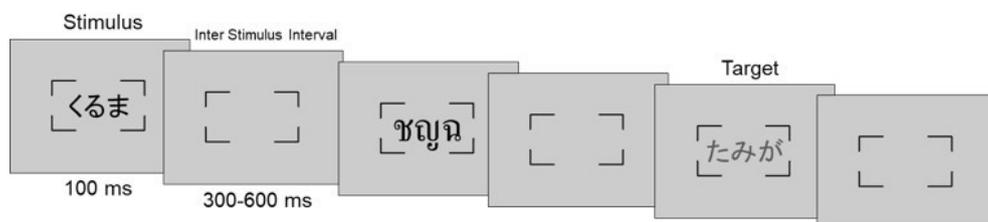


Figure 7. 刺激系列と実験手続き。参加者は高頻度で提示される黒色の単語、非単語、記号列（非標的刺激）の中から、低頻度で提示される青色の刺激（標的刺激、ここでは灰色で提示）を検出するよう求められた。

れる位置を示すため、長方形の枠 ($2.7^{\circ} \times 7.1^{\circ}$) を常に提示し続けた。観察距離は 70 cm だった。各刺激の提示時間は 100 ms, 刺激間隔は 300-600 ms (50 ms ごとに 7 段階) であった。刺激の提示と反応の記録には, E-prime ソフトウェア (version 2.0; Psychology Software Tools, Sharpsburg, Pennsylvania, USA) を用いた。

各ブロックの間, 黒色の刺激 (非標的刺激) が高頻度で, 青色の刺激 (標的刺激) が低頻度で提示された。参加者は画面中央の長方形に注視し, 標的刺激が提示された際に可能な限り素早く正確にボタン押しをするように求められた。各刺激は 1 ブロック内で 2 回繰り返され, ブロックは 252 刺激 (各刺激カテゴリにつき, 78 個の非標的刺激と 6 個の標的刺激) から構成された。どの刺激が標的刺激として提示されるかは, ブロック間でランダムであった。

色判断課題に係る行動指標として, 反応時間 (RT) と標的が提示されてから 150-800 ms で反応が生じた確率 (Hit 率), そして非標的刺激に対して反応が生じた確率 (FA 率) を記録した。これらの行動指標について, 群 (児童, 大学生) と刺激種 (単語, 非単語, 外国語文字列) の 2 要因混合計画 ANOVA を行った。

脳波 (electroencephalogram: EEG) は, 拡張国際 10-20 法に基づく頭皮上 25 か所 (Fp1/2, F7/8, F3/4, Fz, T7/8, C3/4, Cz, P7/8, P3/4, Pz, PO7/8, PO3/4, POz, O1/2, and Oz) から, 銀-塩化銀電極を装着した電極帽 (Easycap GmbH, Herrsching, Germany) を用いて記録した。基準電極は鼻尖であった。垂直眼電図 (VEOG) は Fp1 と左眼窩下から, 水平眼電図 (HEOG) は両眼眼角に設置した電極からそれぞれ双極導出し, 瞬きなどの眼球運動を記録した。脳波と眼電図は SymAmps (NeuroScan, Sterling, VA, USA) を用いて増幅し, サンプリング周波数 500 Hz で記録した。オンラインのバンドパスフィルタは 0.01-100 Hz であった。測定に際し, 電極と頭皮の間の電気抵抗値は 10 k Ω 以下を保った。

脳波データの処理は EEGLAB Version 14.11 (Delorme & Makeig, 2004) を用いた。まず, 脳波データに対して 0.1-30 Hz のオフラインフィルタをかけた。脳波は非標的刺激の提示時前

200 ms から提示後 800 ms 区間でエポッキングされ、刺激提示前 200 ms 区間の平均電位を用いてベースライン補正を行った。次に、体動に伴うアーチファクトを含むエポックを視察に基づいて除去した。その後、眼球運動に由来するアーチファクトを同定し補正するため、これらのデータに対して独立成分分析 (independent component analysis: ICA) を行った。アーチファクト成分の同定には、EEGLAB のプラグインである ADJUST (Mognon, Jovicich, & Bruzzone, & Buiatti, 2011) を用いた。ICA によるアーチファクト補正後、 $\pm 100 \mu\text{V}$ の電位変動を含むか、標的の直後か、あるいは行動反応が混入しているエポックを除去した。児童における平均加算回数は単語で 163.4 回 ($SE = 8.6$)、非単語で 162.7 回 ($SE = 9.0$)、外国語文字列で 157.5 回 ($SE = 9.0$) であった。大学生では単語で 198.3 回 ($SE = 4.5$)、非単語で 200.3 回 ($SE = 4.9$)、外国語文字列で 202.1 回 ($SE = 5.1$) であった。

分析に用いる平均電位の区間と電極は、総加算平均 ERP、および引き算波形から視察に基づいて選定した (Figure 8)。引き算波形から、平仮名文字列 (単語および非単語) と外国語文字列の間の差が 120-180 ms の間で明瞭であることが示された。また、等電位マップから示されているように、平仮名文字列と外国語文字列の差は P7/P8 で最大であった。この平均電位について、群 (児童, 大学生), 半球 (左, 右), そして刺激タイプ (単語, 非単語, 外国語文字列) を含む 3 要因混合計画 ANOVA を実施した。

行動・ERP 分析の両方において、球面性の仮定が保たれない場合には Greenhouse-Geisser 補正による自由度の調整を行った。刺激タイプの効果に関する多重比較補正には Bonferroni 法を用いた。効果量は偏イータ 2 乗 (η_p^2) を指標として示す。

2.3. 結果

Table 1 に色判断課題における行動成績を示す。RT と Hit 率について有意な群の主効果が

Table 1. 4～6年生の児童と大学生における行動成績

	Children	College students
RT (ms)		
Word	461.98 (13.85)	379.30 (10.70)
Nonword	462.42 (12.63)	381.33 (10.84)
Foreign letter strings	473.77 (16.61)	386.08 (9.34)
Hit Rate (%)		
Word	91.48 (1.58)	97.86 (2.05)
Nonword	89.58 (2.64)	95.68 (1.38)
Foreign letter strings	91.28 (1.72)	95.89 (2.28)
FA Rate (%)		
Word	1.06 (0.77)	0.03 (0.03)
Nonword	0.98 (0.79)	0 (0)
Foreign letter strings	1.38 (1.23)	0.03 (0.03)

注：標準誤差は括弧内に示す。

あり [RT: $F(1, 25)=22.05, p<0.001, \eta_p^2=0.47$; Hit 率: $F(1, 25)=5.05, p<0.05, \eta_p^2=0.17$], 大学生が児童よりも素早くかつ正確に反応できたことが示された。その他の効果は有意ではなかった ($ps>0.12$)。FA についても統計的に有意な効果は無かった (all $ps>0.26$)。

Figure 8 に後頭側頭部 (P7/P8) における総加算平均 ERP を示す。児童と大学生の両群が平仮名文字列 (単語, 非単語) に対して, 外国語文字列よりも大きな陰性電位を示した。この効果は大学生においては左半球で明瞭である一方で, 児童においては両側の後頭側頭部の電極で優勢であった。120-180 ms 区間の平均電位について, 群と半球, そして刺激タイプの有意な 3 要因交互作用が認められた [$F(2, 50)=6.48, p<0.001, \eta_p^2=0.21$]。小学生児童において, 半球と刺激の交互作用は有意ではなかった [$F(2, 26)=2.71, p<0.09, \eta_p^2=0.17$]。刺激

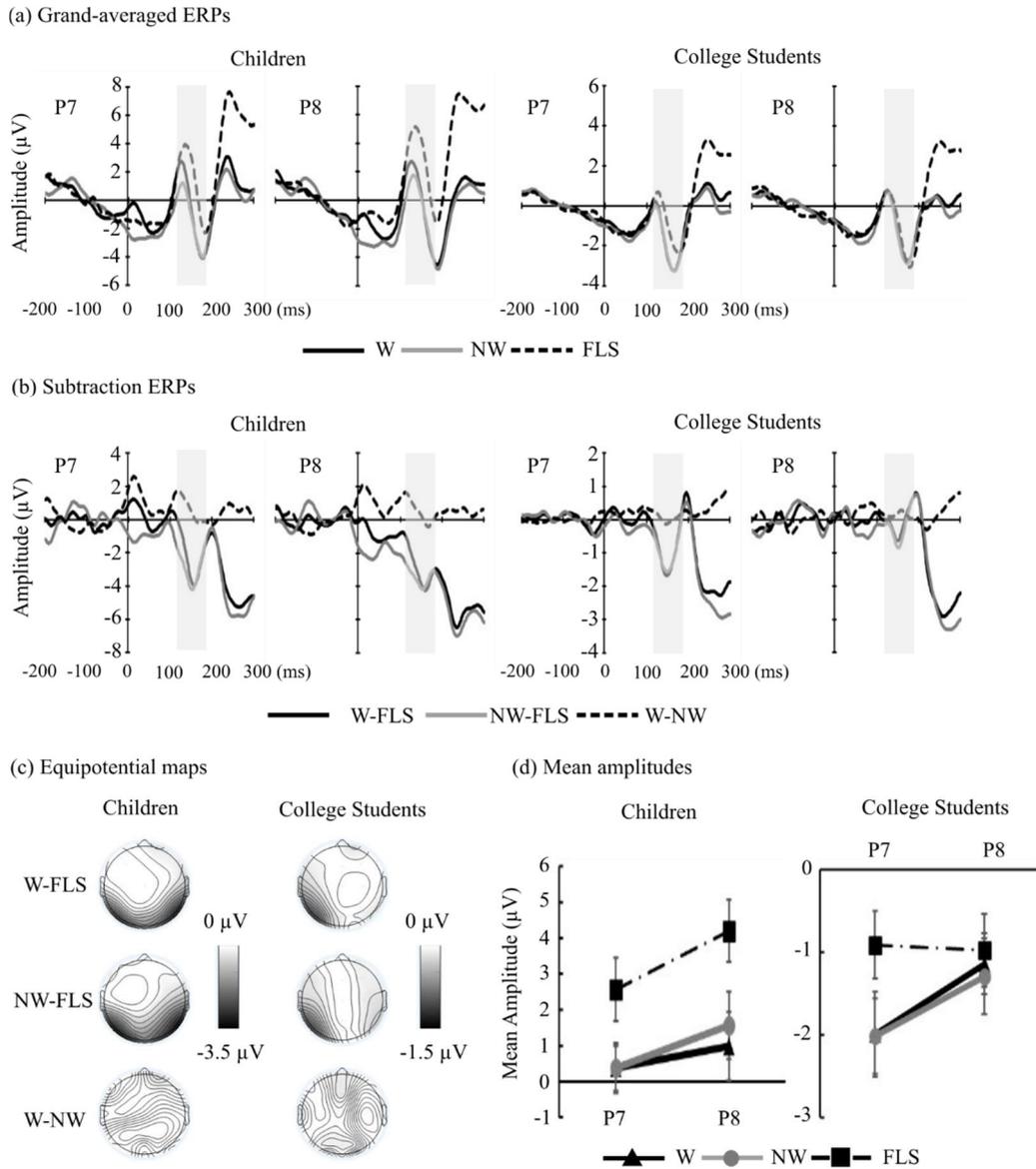


Figure 8. (a) 4~6 年生の児童と大学生の後頭側頭部における単語 (word: W), 非単語 (nonword: NW), および外国語文字列 (foreign letter strings: FLS) に対する総加算平均 ERP。灰色の帯は分析に用いた区間 (120–180 ms) を示す。(b) 各刺激タイプ間の引き算波形。(c) 引き算波形の 120–180 ms 区間の等電位マップ。(d) 後頭側頭部の電極における平均電位。エラーバーは標準誤差を示す。

の主効果が有意であり、単語と非単語が外国語文字列よりも陰性であるが ($p < 0.01$), 単語と非単語の間に差はなかった ($p = 1$)。一方で、大学生においては、半球と刺激タイプの交互作用が有意であり [$F(2, 24) = 5.39, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.31$], 刺激タイプの単純主効果が左半球で

認められたが [$F(2, 24) = 14.52, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.55$], 右半球では認められなかった [$F(2, 24) = 0.77, p = 0.47, \eta_p^2 = 0.06$]. この左半球における単純主効果は, 平仮名文字列 (単語, 非単語) が外国語文字列よりもより陰性であることを示した ($ps < 0.01$).

2.4. 考察

この実験では, 透明性の高い平仮名の読み手における潜在的な音韻変換処理の発達的变化を検討するため, 小学校高学年の児童と大学生における N170 を比較した。結果として両方の群において, 平仮名文字列 (単語, 非単語) に対する ERP は未学習の外国語文字列よりも, 刺激提示後 120-180 ms 区間で後頭側頭部において陰性であることが示された。この陰性電位は, 単語と非単語で差が無かったが, この傾向は文字列特異的な N170 の特性と合致していた (Bentin et al., 1999)。この結果から, 文字刺激に対する「知覚的カテゴリー化」が児童と大学生の両方で生起していたことが示唆された。さらに大学生の N170 は, 左半球優位である点でこれまでの日本語平仮名における知見と一致しており (Okumura et al., 2015; 実験 1), 本実験における成人の読み手が努力を要さず文字を音韻に変換できていたことを反映すると考えられる。

児童においても平仮名文字列に対する N170 が観察されたが, この N170 が両側に広く分布し, 左半球優位性を欠いていたことは重要な点である。この結果は, 平仮名よりも不透明な書記体系を学ぶ児童が両側性 N170 を生起させたという報告と一致しており (Kast et al., 2010; Maurer et al., 2006), 小学校 4~6 年生の児童が大学生と同程度には, 平仮名の音韻変換処理を獲得していないことを示すと解釈できる。従来の読みの発達理論は, 音韻変換処理が透明性の高い書記体系でより早く, そして容易に獲得されることを仮定しており (Ellis & Hooper, 2001; Wydell & Butterworth, 1999), また平仮名に関する行動データは顕在的な読み速度の向上が小学 4 年生で頭打ちになることを示してきた (小林ら, 2011; Yagyu et al., 2021, supplemental data 参照)。これに対し本実験の結果は, たとえ透明な書記体系を学ぶ児童であ

っても、左半球優勢な N170 の発達に長い発達期間を要する可能性があることを示唆する。潜在的な音韻変換処理の発達的变化を検討するには、青年期以降の読みの習熟を迫うためのさらなる研究を要するだろう。

ただし、児童において左半球優位性を欠いた N170 が観察されたことは、文字列に対して十分に注意が向けられていなかったことでも説明され得ることには留意すべきである。単純な色判断課題における児童の行動成績が大学生よりも低かったことから、刺激に対して注意が十分に持続していなかったことが示された。読みが意図を伴わず自動的に生起することについては、行動指標を用いた実験から強調されてきた (Humphreys, Evett, & Taylor, 1982; MacLeod, 1991)。しかしながら近年の神経画像法研究からは、文字形態に関わる後頭皮質から音韻処理に関わる領域へ活性化が伝搬するためには、たとえ文字に熟達した成人の場合であっても、文字に注意が向けられ、意識される必要があることが示唆されている (Kouider, Dehaene, Jobert, & Le Bihan, 2007; Kouider & Dupoux, 2001)。さらに近年の成人を対象とした ERP 研究からも、文字列が無視された場合に N170 の左半球優位性が消失することが見出されており (Okumura, Kasai, & Murohashi, 2014)、それに反映される書記素—音韻変換処理は文字列そのものに注意が向けられる必要があることが示唆されている (Okumura et al., 2014, 2015; 宇野・片倉・河西, 2020)。それゆえ今回の知見においても、N170 の左半球優位性の出現は、音韻変換処理よりもむしろ、文字刺激に注意を持続し続けるための注意機能の発達と関連している可能性がある。この点についてはアルファベット書記体系に関する先行研究についても同様に検討が必要であろう。

本実験から、平仮名の学習者における N170 について、平仮名よりも不透明な書記体系と類似する発達的变化を経ることが示された。すなわち、学童期児童では両側性 N170 が、大学生では左半球優勢な N170 が生起することが見出された。これは、非常に透明性の高い平仮名を学習する児童であっても、学童期には潜在的な音韻変換処理を成人と同程度まで獲得しているわけではないことを示唆している。潜在的な音韻変換処理の発達過程を明らか

にするためには、より広い年齢幅を対象とした更なる検討が必要である。さらに、正書法的に透明な書記体系の特殊性を明らかにするためには、異なる書記体系を直接比較する必要があるだろう。

実験3 早い ERP 成分と読みスキルの発達

3.1. 目的

単語を素早く流暢に読むためには、個々の文字を素早く同定することと、文字列を一塊のまとまりとして読むことの両方を必要とするが、これらは学童期の間を獲得される重要なスキルである。文字を同定する能力は公的な読み訓練の開始後1~2年以内というに獲得され、その熟達度はその後の読み発達を予測し得ることが示唆されている(Badian, 1998; Nazir, Ben-Boutayab, Decoppet, Deutsch, & Frost, 2004)。さらに、数年の読み経験を経たのち、児童は良く学習された文字列を一つの単位として読むようになる(すなわち、全語読みを身につける)ことも知られている(Aghababian & Nazir, 2000; Barton et al., 2014; Zoccolotti et al., 2005)。こうした読みスキルの発達に関わる皮質処理過程を検討することは、読みやその障害の背景要因を評価するための新たな指標を開発する上で重要である。

高い時間分解能を有する事象関連電位(ERP)を用いた研究により、刺激提示後およそ200ms以内に後頭側頭部で生起する一連のERP成分が単語と文字レベルの処理に関わり得ることが示唆されている。刺激提示後80-140msで生起するP1は、よく学習された文字列(単語、高頻度単語、偽単語など)とそうでない文字列(低頻度語、子音文字列など)の間で振幅が異なることが報告されている(Faísca, Reis, & Araújo, 2019; Hauk et al., 2006; Segalowitz & Zheng, 2009; Sereno et al., 1998; Uno et al., 2017)。P1は文字列の物理的特徴(フォントサイズなど)に対しても感度があることが示されているものの(Bayer et al., 2012)、単語と非単語を構成する文字が物理的に同一の場合でさえも、P1における単語と非単語の差が見出されている(Uno et al., 2017)。したがって、この特定の文字列に特有の神経応答は、学習した文字配列か、あるいは正書法構造に対する早期処理を反映する可能性がある(Hauk et al., 2006)。学童期児童におけるこのようなP1効果に関する知見はまだ十分に蓄積されていないが、11歳の児童において偽単語が子音文字列よりも大きなP1を惹起させた一方、7歳の児童では

そうした P1 効果が見出されなかったことが報告されている (Coch, Mitra, & George, 2012)。このことは、文字の学習された組み合わせに対する P1 の特殊化は、学童期の中に生じ得ることを示唆している。

P1 とは対照的に、それに続く N170 は、統制刺激 (記号列, あるいは見たことのない外国語文字列) よりも文字刺激 (単語, 偽単語, 非単語など) で陰性に増強する特徴がある (Bentin et al., 1999; Lin et al., 2011; Maurer, Zevin, et al., 2008; Simon et al., 2004)。文字の組み合わせに対して感度が無いという N170 増強の特徴は、この成分が文字刺激一般に対する知覚的カテゴリー化に関連することを示唆している (McCandliss, Cohen, & Dehaene, 2003)。N170 は単一文字に対しても文字列と同様に増強することが示されており (Stevens et al., 2013; 実験 1), この成分は文字レベルの処理に関連すると考えられる。文字刺激に対する両側性 N170 は学童期児童においても観察され (Maurer et al., 2006; 実験 2), その出現時期は学童期の早期 (小学 2 年生) であることが示唆されている (Maurer et al., 2006)。さらに重要なことに, N170 は加齢だけでなく児童の読みスキルの発達に伴って変化することも報告されている。すなわち小学 2 年生時点で単語を音読する速度が速い児童ほど, N170 における文字列と記号列の間の差が大きいことが見出されており, この成分が読み発達やその障害を評価するのに有用な指標となる可能性がある (Maurer et al., 2006, 2007)。しかしながら, 従来の研究で読み発達を評価するのに用いられてきた単語の音読速度は, 個々の文字を素早く同定することだけでなく, 文字列を一塊として読む全語読みが発達することによっても高速化する。したがって, 単語や文字刺激に対して生起する一連の ERP 成分が, 読みを構成するこれら 2 つの下位スキルの発達と関連するかは明らかではない。

文字の同定や全語読みといった読みスキルの発達を評価するためには, 眼球運動測度を用いることが有効である。例えば学童期児童を対象とした研究は, 一つの単語を読む際の注視回数が小学 2 年生から 6 年生までの間に減少することを報告しており (Rayner, 1986), こうした注視回数の減少は逐字読みから全語読みへの移行を反映すると考えられている (Gagl,

Hawelka, & Wimmer, 2015; Hawelka, Gagl, & Wimmer, 2010)。さらに、単文字を音読する際の注視時間が文字間の音韻的な類似性 (“d”と“v”など) よりも文字の視覚的類似性 (“d”と“q”など) によって増加することも示されており (Al Dahhan, Kirby, Brien, & Munoz, 2017), 一文字あたりの注視時間が文字の知覚的な同定の効率を反映すると考えられる。

実験3の目的は、眼球運動測度を用いて文字の同定と全語読みのスキルを分離し、単語や文字に対する一連のERPとの関連を検討することである。この実験では、実験2と同一の課題を用いて、単語、非単語、および外国語文字列に対するERPを測定した。さらに児童の読みスキルの発達を評価するため、単語と文字リストを音読するよう求め、その間の文字に対する注視時間や単語に対する注視回数を測定する追加の課題を行った。もし全語読みの発達が既学習文字列に対するP1と関連するのであれば、一つの単語を読むのに要する注視回数が少ない児童であるほどより大きなP1単語効果(単語と非単語の振幅差)を示すだろう。さらに、もし文字同定の発達が文字刺激に対するN170と関わるのであれば、一文字当たりの注視時間が短い児童ほどより大きなN170文字効果(単語・非単語を含む平仮名文字列と、外国語文字列の振幅差)を示すことが予想される。

3.2. 方法

参加者

日本語を母語とし、健常な視力、もしくは矯正視力を有する小学1~6年生である38名が実験に参加した。全員が小学校の通常学級に在籍し、本研究の実施までに最低3.5カ月以上の小学校における読み書き指導を受けていた。発達性ディスレクシアの診断を受けたことのある児童はいなかった。また、絵画語彙発達検査(Picture Vocabulary Test-Revised: PVT-R) (上野・名越・小貫, 2008) を実施したところ、全ての児童が年齢相応の言語性知能を有していた(平均標準化得点12.69点, $SE=0.56$, 最低8点)。しかし9名の児童については、実験中の体動によるアーチファクトが大きかったため分析から除外した。最終的に、29名

の児童（男児 17 名，6.8-12.8 歳，平均 9.8 歳，左利き 2 名）を対象として分析を実施した。このうち，4～6 年生の児童（14 名）から計測した脳波データは実験 2 のものと同一である。全ての児童とその保護者から，書面によるインフォームド・コンセント，およびインフォームド・アセントを得た。本実験は，北海道大学大学院教育学院の倫理委員会の承認を得て実施した。

刺激と手続き

眼球運動実験における文字音読課題では，拗音や濁音を含まない 40 文字の平仮名から構成される文字のリストが刺激として用いられた（Figure 9a）。全ての文字（視角にして $1^\circ \times 1^\circ$ ）は白色背景上の格子内に提示された。格子の各区画の大きさは $3.8^\circ \times 3.5^\circ$ であった。単語音読課題では，平仮名 3 文字から構成される 30 個の単語を刺激として用いた。刺激単語は，小学校の教科書に出現し（甲斐・松川，2005），音声親密度が高いもの [$M=6.06$ (7 段

(a)

き	す	は	せ	し	い	ち	て	まぐろ	いのち	つくし
ま	の	つ	ほ	る	ね	こ	な	とびら	こおぎ	せなか
も	く	ら	ろ	お	う	り	た	ばけつ	ひろば	ねぼう
あ	ふ	れ	へ	み	え	め	さ	おしば	ねがい	くらげ
む	ひ	そ	け	ぬ	に	か	と	なみだ	つくり	きこり
								いびき	あいだ	しらせ
								おかず	まいご	いなか
								うなぎ	におい	ひるね
								とまと	なかま	おどり
								かかり	あられ	あした

(b)

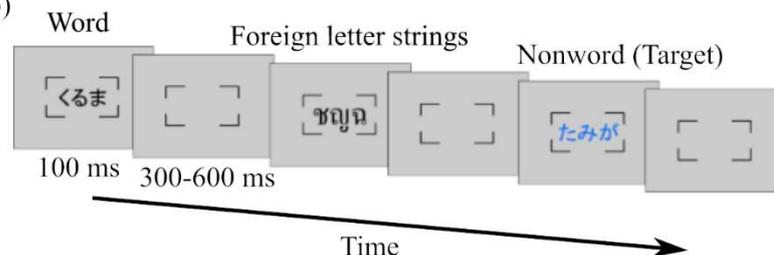


Figure 9. 刺激と実験手続き。(a) 視線計測実験で用いられた文字，および単語のリスト。参加児童は画面中央に提示されるこれらのリストに含まれる単語を，可能な限り素早くかつ正確に音読するよう求められた。(b) ERP 実験で用いられた刺激系列。手続きは実験 2 と同一であった。

階評定), $SD = 0.31$] (天野・近藤, 1999) を選んだ。Figure 9a に示されているように、全ての単語 ($0.8^\circ \times 3.4^\circ$) は白色背景上に、10 単語ずつ縦方向に 1.1° 間隔を空けて 3 列に提示された。各列は水平方向に 3.6° 離れていた。文字、および単語の両方の読み課題において、観察距離は 57 cm を保った。参加者は頭部の位置を固定した状態で、文字と単語のリストを可能な限り早く正確に音読するように求められた。刺激の提示と眼球運動の記録は、Tobii T120 モニタと Tobii Studio 3.4.8 ソフトウェアを用いて行った。

ERP 実験における刺激、および手続きは実験 2 と同一であった (Figure 9b)。眼球運動実験とは異なる平仮名单語を刺激として用いた。ERP 実験は、眼球運動実験の後に実施された。

記録と分析

眼球運動実験において、文字音読課題では音読時間と一文字当たりの注視時間、そして単語音読課題では音読時間と一単語あたりの注視回数を測定した。音読時間として、各リストを画面上に提示してから、児童が最後の文字あるいは単語を読み終えるまでの時間を計測した。眼球運動データは両眼平均から導出され、サンプリング周波数 120 Hz で記録された。その後、速度の閾値を超えたデータをサッケード、その他を注視として分類する Tobii I-VT フィルタがかけられた。注視間隔は最長 75 ms、最大視角度は 0.5° であった。最短注視時間は 60 ms であった。一文字当たりの注視時間と一単語当たりの注視回数を計算するため、関心領域 (areas of interest: AOI) をそれぞれの文字 ($3.8^\circ \times 3.5^\circ$) と単語 ($1.5^\circ \times 4.5^\circ$) に対して設定した。注視が観察されなかった AOI は分析から除外した。音読時間が年齢の増加とともに短くなっているか、また眼球運動がこの音読時間の短縮と関連しているかを確かめるため、音読時間と年齢、および眼球運動における指標の相関分析を実施した。

脳波記録、および ERP の分析は以下を除き実験 2 と同様であった。独立成分分析による眼球運動補正後の自動アーチファクト除去基準 ($\pm 100 \mu V$) は、2 名の児童については ± 125

μV であり、5名の児童については $\pm 150 \mu\text{V}$ であった。平均加算回数は単語で150.14回(53-216回)、非単語で150.55回(54-220回)、外国語文字列で147.66回(55-210回)であった。このうち、加算回数が最も少なかった児童の個人波形においても、単一の頂点をもつ視覚誘発電位 P1 と N1 が惹起していることを視察で確認した。また各刺激タイプの加算回数について刺激(単語、非単語、外国語文字列)の1要因ANOVAを実施したところ、有意な主効果は認められなかった($p > 0.13$)。

本実験の分析に先立ち、後頭側頭部(P7/P8)において観察される最初の陽性電位であるP1、そして陰性電位であるN1が生じる潜時を確認したところ、両成分において最も潜時が短い児童と長い児童の差が大きいことが分かった(Table 2)。実験3ではこうしたデータに対し、ERPと読みスキルの個人差との相関を検討するため、P1単語効果とN170文字効果を定量化するための指標としてP1およびN1の頂点振幅を用いた。P1頂点振幅は刺激提示後70-170ms間の最大振幅から、N1頂点振幅は150-240ms間の最小振幅から評価した。その後、P1単語効果(単語と非単語の差)と一単語当たりの注視回数の、そしてN170文字効果(単語/非単語と外国語文字列の差)と一文字当たりの注視時間の相関を分析した。これらの分析は左と右の電極部位で別々に実施した。眼球運動とERPの相関分析で得られたp値は、Holm法による多重比較補正が行われた。

Table 2. 各刺激に対するP1とN1の頂点潜時

	P1 peak latency		N1 peak latency	
	P7	P8	P7	P8
Word	108-154 (129.9)	110-164 (129.7)	166-224 (187.8)	168-238 (192.8)
Nonword	110-152 (129.7)	104-156 (134.1)	156-232 (186.8)	156-236 (195.8)
Foreign Letter strings	100-148 (131.4)	108-170 (136.7)	168-212 (186.4)	170-222 (188.6)

注：平均は括弧内に示す。

3.3. 結果

年齢と読み速度、及び眼球運動の間の相関

Figure 10 に児童の年齢と読み課題の成績の関係を示す。各年齢の成績には幅があるが、年齢が上がるにつれて音読時間が短縮する傾向があった。年齢と音読時間について中程度の有意な負の相関が単語リスト ($r = -0.53, p < 0.01$), および文字リスト ($r = -0.49, p < 0.02$) の両方であり、年齢が上の児童ほど短い時間で文字や単語のリストを音読できることが示された。さらに音読時間が短くなるほど、一単語あたりの注視時間が少なくなり ($r = -0.65, p < 0.01$), 1文字あたりの注視時間も短くなった ($r = -0.84, p < 0.01$)。したがって、児童の

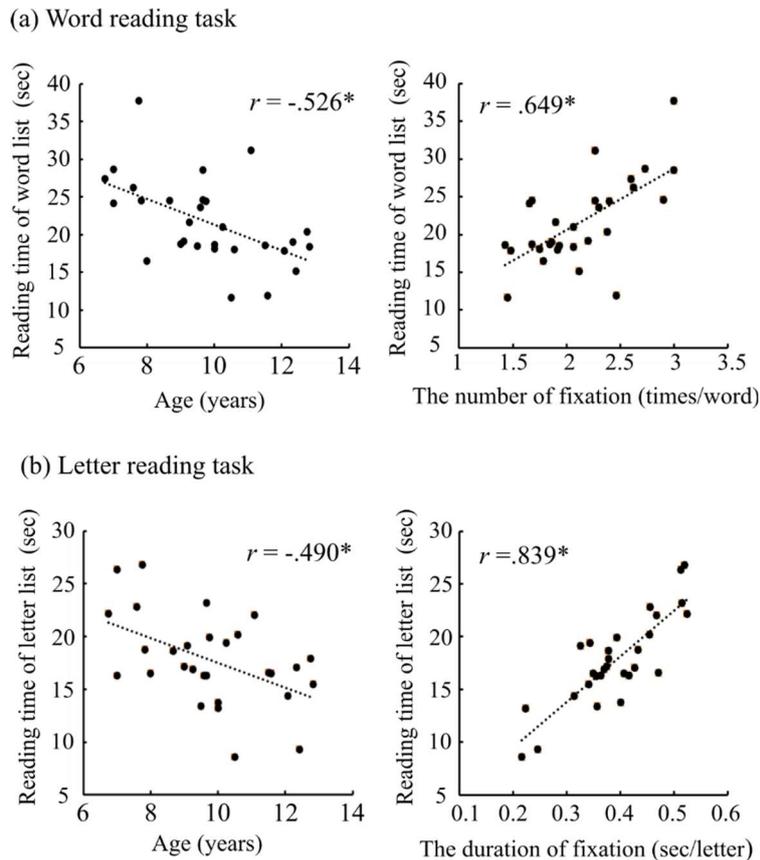


Figure 10. 年齢と読み速度、および眼球運動の関係を示す散布図。アスタリスクはHolm法による p 値の補正後に有意な相関があったことを示す。(a) 単語リストの音読時間と年齢の相関 (左), および音読時間と一単語あたりの注視回数の相関 (右)。(b) 文字リストの音読時間と年齢の相関 (左), および音読時間と一文字あたりの注視時間の相関 (右)。

読み速度は年齢とともに向上し、学童期には全語読みの能力と文字同定のスキルの両方が発達することが確認された。

児童における単語と文字列に対する ERP

まず、P1 単語効果や N170 文字効果が児童の年齢によって異なるかを検討するため、学年別に 2 群のグループに分けた分析を行った（小学 1～3 年生：15 人，小学 4～6 年生：14 人）。この分析では P1 と N1 の頂点振幅について、学年（小学 1～3 年生，小学 4～6 年生），半球（左，右），刺激（単語，非単語，外国語の文字列）を含めた 3 要因混合計画 ANOVA を行った。効果量の指標は偏イータ 2 乗 (η_p^2) であり，刺激の効果に関する多重比較では p 値を Holm 法で補正した。

Figure 11a に示すように，両方の学年グループとも，全ての刺激に対して 130 ms 付近に頂

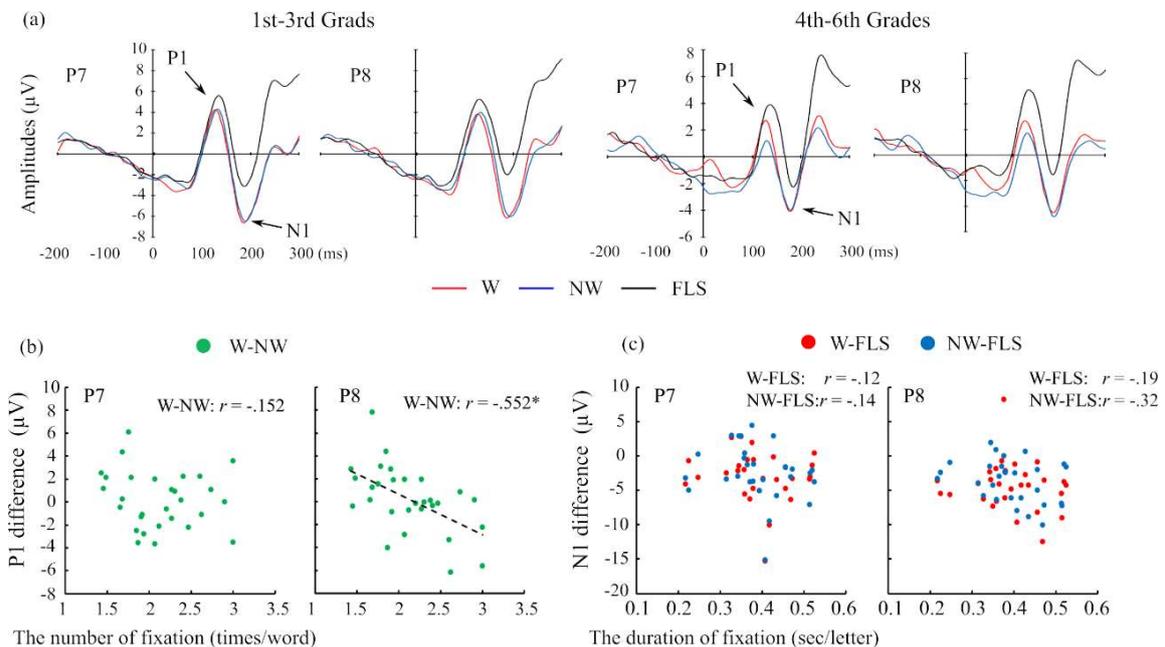


Figure 11. (a) 学年グループごとの，単語 (W)，非単語 (NW)，外国語文字列 (FLS) に対する総加算平均 ERP。(b) P1 単語効果 (単語と非単語の差) と一単語あたりの眼球運動の相関。アスタリスクは Holm 法による p 値の補正後に有意な相関があったことを示す。(c) N170 文字効果 (単語，あるいは非単語と外国語文字列の差) と一文字当たりの注視時間の相関。赤い点が単語と外国語文字列の間の差を，青い点が非単語と外国語文字列の間の差を示す。

点を持つ陽性電位 P1 が後頭側頭部 (P7/P8) において最も優勢に観察された。またどちらの群においても、平仮名文字列 (単語, 非単語) が外国語文字列よりも P1 が陰性である傾向が示された。この傾向は刺激の主効果が有意であったことから支持され [$F(2, 54) = 7.23, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.21$], その後の多重比較では単語と非単語が外国語文字列よりも陰性であることが示された (all $ps < 0.02$)。しかし、単語と非単語の間には差がなかった ($p > 0.63$)。さらに学年と刺激の交互作用は有意ではなく [$F(2, 54) = 0.93, p > 0.91, \eta_p^2 < 0.01$], 半球や学年に関連する効果を含めたその他の効果も有意ではなかった (all $ps > 0.3$)。

N1 頂点振幅については、単語と非単語が外国語文字列よりも陰性であるように見え、そのことは刺激の有意な主効果から支持された [$F(2, 54) = 28.32, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.51$]。P1 と同様、単語と非単語に対する N1 頂点振幅は外国語文字列よりも陰性であったが (all $ps < 0.01$), 単語と非単語の間には有意な差はなかった ($p > 0.1$)。さらに学年の主効果があり [$F(1, 27) = 4.70, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.15$], N1 の振幅は高学年の児童の方が低学年の児童よりも小さいことが示された。しかし、他の主効果や交互作用はいずれも有意ではなかった (all $ps > 0.1$)。

読みスキルと ERP の間の相関

次に実験 3 の主目的である、年齢を跨いだ読みスキルと P1 単語効果、および N170 文字効果の発達との関連を、眼球運動測度と ERP の個人差の相関から検討した。まず P1 単語効果 (P1 における単語と非単語の差) については、注視回数が少ない児童ほど右後頭側頭部 (P8) で単語と非単語に対する P1 の差が大きいことが示された ($r = -0.55, p = 0.02$) (Figure 11b)。左後頭側頭部 (P7) では P1 単語効果と注視回数の相関はなかった ($r = -0.15, p = 1$)。一方で、先述のように単語に対する注視回数は児童の年齢と相関していたことから、右後頭側頭部における P1 単語効果と一単語当たりの注視回数の相関は、読みスキルよりもむしろ児童の年齢の影響によって説明される可能性がある。したがって、児童の年齢を制御変数とした偏相関分析を追加で実施した。この偏相関分析においても、P1 単語効果は注視回数と

有意に相関していた ($r = -0.56, p = 0.002$, 無補正)。

次に、N170 文字効果 (N1 における平仮名文字列と外国語文字列の差) と文字レベルの読みスキル (一文字当たりの注視時間) の相関を検討した。結果として左, および右後頭側頭部における文字列と外国語文字列の差は, 注視時間といずれも相関しなかった (P7 での単語—外国語文字列: $r = -0.12, p = 1$; P7 での非単語—外国語文字列: $r = -0.19, p = 1$; P8 での単語—外国語文字列: $r = -0.14, p = 1$; P8 での非単語—外国語文字列: $r = 0.32, p = 0.99$)。

3.4. 考察

実験 3 の目的は, 単語と文字に対して特殊化された早い皮質応答が読みスキルの発達と関連するか検討することであった。児童を学年で分けた分析では, 低学年, 高学年の児童の両方で P1 単語効果が観察されず, N170 文字効果のみが観察された。より重要なことは, P1 単語効果が一単語あたりの注視回数の減少と相関することが見出された点である。この結果は, 既学習文字列に対して特殊化された早い処理が, 全語読みの発達と関連するという実験 3 の予測を支持する。その一方で, N170 文字効果は文字を読む際の注視時間と相関しなかった。

P1 単語効果が学年別の分析で見出されなかったことは, 参加した児童の年齢や実験状況に由来すると考えられる。例えば, 平仮名单語に対する成人の P1 単語効果は, 単語, 非単語, そして統制刺激を同一のブロックで提示した場合には観察されず (Okumura et al., 2014), それらのうち 2 つを異なるブロックで提示した場合 (すなわち, 単語と非単語, 単語と統制刺激, 非単語と統制刺激の 3 種類のブロックが存在) に見出されている (Uno et al., 2017)。この原因としては, 実験を通して刺激文脈が変化し参加者の注意が高い水準に保たれたことによって, 早い正書法処理が促進されたためであると解釈された (Uno et al., 2017)。一方で実験 3 では, 3 種類の刺激を含む同じブロックが繰り返されたことで文脈変化が生じず, さらに成人よりも注意機能が未発達な学童期児童を対象としたため (実験 2 の

考察も参照) , P1 単語効果が見出されにくかったのかもしれない。それにも関わらず, 単語に対する注視回数の減少と P1 単語効果の相関が見出された。このことは, 学童期における全語読みの獲得が, 単語に対して潜在的に生起する処理の発達と関わる可能性があることを示唆する。重要な点として, この相関は児童の年齢を制御した偏相関分析からも支持された。したがって, 既学習文字列に対する P1 増強は年齢よりもむしろ, 児童の全語読みのスキルの発達そのものと関連することが示唆された。

興味深いことに, 注視回数と P1 単語効果の相関は右半球でのみ観察された。この結果は, 少なくとも学童期児童における全語読みの発達には, 右半球の早い活動に関わる可能性があることを示唆する。一方で成人を対象とした先行研究からは, 全語読みに貢献する早い皮質処理過程が左側性化していることが示唆されている。例えば Skaratt と Lavidor (2006) は, 全語読みが生じなかったことを反映する語長効果が, 刺激提示後 80 ms 時点の単一パルス TMS によって引き起こされたこと, そしてその干渉効果は左後頭皮質に対する磁気刺激でのみ生じ, 右半球では見出されなかったことを示した。推測ではあるが, こうした児童と成人における半球優位性の違いの背景には, 以下のような発達的变化があるかもしれない。学習の初期段階において全語読みは, 例えば右半球に優位性を持つ大域的処理 (Delis, Robertson, & Efron, 1986; Fink et al., 1996) のような一般的な視覚系に依存している可能性がある。その後多くの読み経験を通じて, 単語形態処理に関わる領域 (後頭側頭領域) と高次言語処理に関わる左半球の領域 (左下前頭領域など) の間の結合が強化されることで, 結果として左半球の関与がより強くなる可能性がある (Hannagan, Amedi, Cohen, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2015)。こうした可能性の検証には多くの課題が残されているが, 本実験の結果は全語読みに関連する早い皮質処理過程の半球非対称性が, 学童期児童と成人で異なり得ることを示唆する。

しかしながら, P1 単語効果が大きい児童ほど一単語あたりの注視回数が少ないという現象が, 平仮名以外の他の書記体系を学ぶ児童においても見出されるかどうかについては, さ

らなる検討が必要である。日本語書記体系の独自性の一つに、読み訓練の早い段階に用いられる教材（絵本や小学1年生の教科書）を除き、単語、もしくは文節の境界を示すスペースが存在しないことが挙げられる (Sainio, Hyönä, Bingushi, & Bertram, 2007)。例えば、ある文章（例：わたしはとびらをあげた）を流暢に読むためには、児童は自分自身で文字の系列の中から意味のある単語（例：とびら）を素早く同定しなければならない。そうした自力で単語を分離しなければならないという必要性により、平仮名を学習した児童は、全語読みやその背景にある神経メカニズムを他の書記体系を学ぶ児童よりも発達させている可能性がある。将来的には、他の書記体系における P1 単語効果と全語読みの関係性も検討していく必要がある。

実験3のもう一つの目的は、N170 文字効果と児童の文字同定の発達との関連を検討することであった。まず学年別の分析において、N170 文字効果は実験2で見出された4～6年生だけでなく1～3年生の児童においても見出された。これまでのアルファベット学習者を対象とした研究は、N170 文字効果が読みを学び始めてから2年以内に生起することを報告してきたが (Eberhard-Moscicka et al., 2016; Hasko et al., 2013; Kast et al., 2010)、実験3の結果は平仮名学習者においてもこの効果が学童期の前半から出現することを示唆する。しかしながら、N170 文字効果の大きさと単一文字を読む際の注視時間の相関は見出されなかった。この相関の欠如には、本実験で用いた ERP 課題の性質が関わるかもしれない。例えば、児童の音読速度と N170 の相関を見出した研究では (Maurer et al., 2006)、本実験よりも刺激提示速度が遅く (1 単語につき約 2-3 秒)、同一刺激が反復した際にボタン押しを求めるワンバック反復検出課題が用いられていた。この課題を遂行するためには、児童は一つ一つの単語に十分に注意を向けて記憶する必要がある。一方で本実験では文字列が高速で提示され、かつそれらを意図的に読むことを求めなかったことから、文字列に対する注意が制約された状況であったと言える。こうした課題の違いを考慮すると、少なくとも注意制約下で見出される N170 文字効果は、学童期における文字同定の発達とは必ずしも関わらない可能性が

ある。

本実験で N170 文字効果と停留時間の相関が認められなかったことに対するもう一つの解釈として、読みスキルの発達に伴う N170 文字効果の増強と、神経系の成熟に伴う神経活動の減衰が重畳した可能性も考えられる。例えば N170 における文字列と非文字列の差は、2 年生のみを対象とした場合では読みの流暢性の向上とともに大きくなる一方で (Maurer et al., 2006), 2 年生から 5 年生になるにつれて逆に減衰することも示されている (Frago-González et al., 2021; Maurer et al., 2006, 2011)。こうした神経活動の変化が何故生じるのかは未だ明らかになっていないが、5 歳から 16 歳にかけて神経応答を減衰させる皮質構造の再組織化 (Holcomb, Coffey, & Neville, 1992), そして文字刺激に対する神経応答を増強させる学習による神経特殊化 (Cohen & Dehaene, 2004) など、複数の要因が複雑に組み合わさって生じている可能性がある。N170 文字効果と読みスキルの発達の関連を検討するためには、全般的な成熟による神経活動の減衰を考慮するための、より大規模な、横断的・縦断的研究が必要になるだろう。

結論として、本実験では P1 単語効果が特定の読みスキル、すなわち全語読みの発達と関連することが明らかになった。全語読みの発達は、読みの流暢性の獲得に重要であるだけでなく、読みの障害を有する児童や成人において困難が残存しやすい要素でもあることも知られている (De Luca et al., 2010)。本実験の結果は P1 単語効果が、全語読みの障害を早期に発見・予測したり、あるいは教育的介入による学習効果を評価したりするための、電気生理学的指標となる可能性を示すものである。

第3部 総合考察

1章 実験1～3から得られた知見の要約

本研究の目的は、文字や学習された文字配列に特殊化された電気生理学的応答の、日本語平仮名の読みにおける機能的・発達の意義を検討することであった。第2部の実験研究は3つの実験から構成された。実験1では、これまで文字列に対して見出されてきた左半球優勢なN170が、文字レベルの音韻変換処理に関わるかを検討した。この実験では、平仮名单一文字に対するERPの様相を2種類の統制刺激(記号, 外国語文字)との比較から検討した。結果として、どちらの統制刺激と比較した場合でも、単一文字に対して左半球優勢なN170が生起することが見出された。この結果は、英語のアルファベット単一文字が両側性N170を生起したという知見(Stevens et al., 2013)とは対照的であり、この半球非対称性の有無は書記体系の透明性から説明される。したがって実験1の結果から、N170の左半球優位性は文字と音の対応の学習の結果生じるという仮説(音韻マッピング仮説)(Maurer & McCnadriss, 2007)が、単一文字に対しても拡張されることが示唆された。

実験2では、小学4～6年生の児童と大学生における平仮名文字列に対するN170を比較することで、平仮名を学習した学童期児童が、N170の左半球優位性に反映される音韻変換処理を成人と同程度まで習熟しているかどうかを検討した。結果として、文字列に対するN170増強は児童と大学生の両方で観察されたことから、これに反映される知覚的カテゴリー化は、平仮名を学習する児童においても、遅くとも学童期後半までに獲得されていることが示唆された。一方で、大学生では左半球優勢なN170が見出されたものの、学童期児童で半球非対称性を欠いた両側性N170が生起した。この結果から、透明性の高い平仮名を学習した児童においても、潜在的な書記素—音素変換処理を反映するN170の左半球優位性は、必ずしも学童期中に大学生と同程度まで発達するわけではないことが示唆された。

実験3では、既学習の文字列に対して特異的な振る舞いを示すP1と、文字刺激に対して増強するN170が、小学校1～6年生の児童における読みスキルの発達と関連するかを検討した。この実験では視線計測を用いて一単語あたりの注視回数と一文字あたりの注視時間を定量化することで、児童の全語読みと文字同定の発達の程度を評価した。その結果、単語を少ない注視回数で読める児童ほど、単語に対するP1が非単語よりも陽性に増強する効果（P1単語効果）が大きいことが示された。この効果は右半球の後頭側頭部で明瞭であり、さらに児童の年齢を制御した後でも同様の結果が得られた。これらの結果は、単語に特殊化されたP1が、流暢な読みに寄与する全語読みの習熟に関連することを示唆する。N170文字効果については実験2で示された4～6年生だけでなく、より早い1～3年生でも生起することが確認された。一方で、その振幅と文字に対する注視時間の相関は認められず、N170文字効果が読みスキルの指標として利用可能であるかどうかは、更なる検討を要することが示された。

2章 文字や単語に対するERPの、読み処理過程やその発達研究における意義

読みに関する認知神経学的モデルとの関係

本研究は、文字列や単語に対して生起するERP成分のN170とP1が、読みに関する既存の認知モデルに対してどのように位置づけられるかについて、以下のような新たな知見を提供する。まず第1に透明性が非常に高い平仮名单一文字に対するERPを検討した実験1から、これまで文字列に対して見出されてきた左半球優勢なN170が、単一文字に対しても同様に生起することが見出された。このことは、左半球優勢なN170が「文字」を単位とした音韻変換処理に関わることを示唆する。左半球優勢なN170が文字か文字列かによらず生起するという特徴を考慮すると、この成分に反映される音韻変換処理は、二重経路カスケードモデル (Coltheart et al., 2001) (Figure 1) における「語彙経路」よりもむしろ、逐字的な音韻変換処理に関わる「非語彙経路」と関連すると考えられる。

既学習文字列に対して特殊化された P1 については、特定の正書法構造に対する早い処理に関わるとこれまで考えられてきたが (Hauk et al., 2006; Sereno et al., 1998), それがどのような読みの行動と関わるかは明らかではなかった。これに対し読みスキルの発達と ERP の相関を検討した実験 3 からは、P1 単語効果が単語を単位とした読みスキル、すなわち全語読みの熟達度と関連することが示唆された。二重経路モデルが示すように、全語読みには学習された文字配列から音声出力辞書や意味システムを高速で活性化させることが関わる (Figure 1)。したがって既学習文字列に特殊化された P1 に反映される正書法処理は、「語彙経路」に位置づけられる可能性が高い。これらを踏まえると、本研究の知見は従来の認知モデルで想定される 2 つの経路について、語彙経路の処理が P1 潜時帯 (80-140 ms) から、非語彙経路の処理は N170 潜時帯 (140-200 ms) からそれぞれ開始される可能性を新たに示唆するものである。

第 1 部で概観したようにこれらの経路に対応する脳部位としては、非語彙経路は左半球の上側頭皮質を介した背側経路が、語彙経路は後頭側頭皮質から左下前頭皮質への直接投射を有する腹側経路がそれぞれ想定されてきた。興味深いことに、いくつかの研究から背側経路に相当する皮質領域が N170 潜時帯で、腹側経路に相当する領域が P1 潜時帯で活動することも見出されている。例えば経頭蓋磁気刺激 (TMS) を用いた研究から、背側経路に位置する左縁上回 (supramarginal gyrus: SMG) の 180 ms 時点の活動が、文字列の読みに対して因果的な役割を持つことが示唆されている (Stoekel, Gough, Watkins, & Devlin, 2009)。さらに脳磁図 (magnetoencephalography: MEG) を用いた研究は、腹側経路に相当する左半球の下前頭回 (inferior frontal gyrus: IFG) が、単語の提示から 130 ms 程度の早さで活性化することを繰り返し報告してきた (Cornelissen et al., 2009; Klein et al., 2015; Pammer et al., 2004; Wheat, Cornelissen, Frost, & Hansen, 2010)。これらの知見は非語彙経路の処理が N170 潜時帯で、語彙経路の処理が P1 潜時帯でそれぞれ生起するという、本研究が示した可能性を支持する。さらに、N170 や P1 は左半球の後頭側頭皮質 (OT) に信号源が推定されていること

を考慮すると、OT と複数の言語関連皮質 (SMG や IFG など) が、異なる 2 つの時間帯において共起的に活性化することがこれらの成分の生起に寄与しているかもしれない。ただし本研究では空間分解能の低い ERP を用いていることから、ここで観察された N170 や P1 と皮質活動の関係について直接的な結論を得ることは難しい。こうした早い皮質情報伝達の様相の解明には、高い時間・空間分解能を用いた MEG や、早い皮質活動と読みの因果性を検討できる TMS を用いることでより精緻な知見を蓄積していく必要があるだろう。

平仮名学習者における、文字・単語レベルの処理の発達

本研究は平仮名を学習する日本語母語児における、文字や単語に対する ERP の発達的变化を示した最初の報告である。本研究の実験 2, 3 からは、単語や非単語に対する N170 が、小学校 4~6 年生だけでなくより早い 1~3 年生の児童においても生じることが見出された。従来のアルファベット言語を母語とする児童を対象とした研究は、文字刺激に対する N170 が公的な読み訓練の開始後約 2 年以内に出現することを報告しており (Kast et al., 2010; Maurer et al., 2006, 2011)、これに反映される知覚的カテゴリー化が学童期の早い段階で獲得されることを示唆してきた。これに対し本研究は、こうした早い文字に対する知覚処理が、平仮名を学習した児童でも同様に早くから獲得され得ることを新たに示した。

より重要なのは、N170 の左半球優位性の発達的变化についてである。本研究の結果は、透明性の高い平仮名を学習した児童であっても他の書記体系を学ぶ児童と同様に (Hasko et al., 2013; Kast et al., 2010; Maurer et al., 2006, 2011)、左半球優勢な N170 が必ずしも学童期中に生じるわけではないことを示す。前節で議論したように、この成分は非語彙経路を介した音韻変換処理を反映すると考えられるが、実験 2 から得られた結果は、この文字レベルの処理が学童期に熟達するわけではないことを示唆している。これまで提案されてきた読み発達の段階的モデルでは、文字レベルの音韻変換処理は学童期の早い段階 (およそ、1~2 年生の間) で獲得されるとしてきたが (例えば、Ehri (2005) における部分文字フェーズから完

全文字フェーズへの移行), それ以降の発達的变化については明らかではなかった。それに対し本研究は、文字レベルの読みの熟達には、学童期中の両側性 N170 の出現に反映される段階と、青年期以降の N170 の左半球優位性が獲得されていく段階の、少なくとも 2 つの段階があることを示唆する。読みの発達的变化については、文字に対する急速な学習が生じる学童期児童を対象とした研究が主流であったが、本研究の知見はそれ以降の発達軌跡を追うことの重要性を示すものである。

既学習文字列に対する P1 は、全語読みのスキルの発達と関連して生起することが見出された。重要な点は、左半球優勢な N170 が生起するようになる前の段階で、読みスキルと P1 の関係性が見出されたことである。これまでの多くの読みの発達モデルは、文字レベルの音韻変換処理が成熟した後に、全語読みが発達していくことを想定してきた (Marsh et al., 1981; Frith, 1985)。これに対し本研究の知見は、少なくとも平仮名を学習した児童は、必ずしもそうした発達の過程をたどるわけではないことを示唆する。すなわち、非語彙経路が完全に熟達するよりも前に、語彙経路の発達が始まる可能性があることが示された。

読みの評価に対する視座

本研究は、文字、単語レベルという異なる水準の処理が、N170 と P1 にそれぞれ反映されることを示唆するものである。このことは、読みの障害である「発達性ディスレクシア」を早期に診断したり、あるいは教育的・治療的介入前後の学習効果を評価したりする指標として、ERP が応用できる可能性を示している。発達性ディスレクシアとは、全般的な知的発達などに問題が無いにも関わらず、文字や単語の正確かつ流暢な読みに特異的な困難を示す学習障害として知られている。近年、発達性ディスレクシアは共通する一つの基本障害に由来するというよりもむしろ、複数の障害がそれぞれの個人間で異なって生じる「症候群」とする見方が有力視されている (豊巻, 2011)。したがって、ディスレクシア一人一人の読み困難がどのような処理過程の不全に起因しているかを正確に評価することが重要であると

考えられる。

ディスレクシアを有する人々の早い処理の非定型性を評価する電気生理学的指標として、これまで注目を集めてきたのは文字列に対する N170 であった。例えば、Maurer et al. (2007) による縦断研究では、定型発達児とディスレクシア児における N170 を、未就学時と小学 2 年生時の 2 点で比較した。その結果、未就学時点から小学校 2 年生にかけて文字列 N170 振幅が増加するのは定型発達児のみであることが見出された。これらの知見は、ディスレクシア児は定型発達児と比較して、文字刺激に対する皮質処理の特殊化が進みにくいことを示唆する結果として解釈された。また、ディスレクシアを有する成人においては、健常者と比較して文字列に対する N170 が小さくなる、若しくは消失することも報告されている (Mahé, Bonnefond, & Doignon-Camus, 2013; Mahé, Bonnefond, Gavens, Dufour, & Doignon-Camus, 2012)。しかし興味深いことに、Mahé et al. (2013) は、読み困難を呈しているものの、文字列に対する N170 増強は健常成人と同程度の一群があることを報告している。さらに、ドイツ語を母語とする 3 年生の児童を対象としたより最近の研究からは、発達性ディスレクシアの診断を受けた児童であっても、健常群と同程度の N170 が生起したことを示す結果も得られている (Kemény et al., 2018)。したがって、N170 の非定型性を検討するだけでは、読みにおける機能障害の全てを説明できるわけではない可能性がある。

N170 が非語彙経路の処理に関連すると仮定すると、語彙経路の処理に関連する P1 に着目することも重要である。特に、ディスレクシアの発達過程の非典型性については、非語彙経路の不全だけでは説明のできない読みの困難、すなわち、逐字読みから全語読みへの移行に困難があることも知られている (三盃ら, 2011)。したがって、全語読みに関わる P1 に着目することで、N170 で捉えることが難しかった読み困難の原因となる早い皮質処理を評価できるかもしれない。ただし第 1 部で議論したように、既学習文字列に特化された P1 成分は必ずしもすべての実験状況で観察されるわけではないことには留意しなければならない。本研究の実験課題や日本語書記体系の特性も、既学習文字列に対する P1 の生起に関わる可

性能がある（実験3の考察参照）。この成分と読みスキルの熟達の関係については、さらに知見を蓄積していくことが望まれる。

第3章 今後の課題

本研究の知見は、読みの習熟度評価へのERPの利用可能性を示すものであるが、解決しなければならない課題も残されている。まず、本研究では平仮名を読む際の早い処理過程に着目したが、日本語母語話者の読み発達過程を解明する上では、漢字に対する処理やその発達を検討することも重要である。平仮名と比較した漢字の特徴に、一文字に対して2つ以上の読み方が混在し、さらに一文字であっても意味のある単語となる場合が多い（例えば、愛、鳥、桃など）ことが挙げられる。こうした特性の違いから、漢字を読む際には平仮名よりも非語彙経路への依存度が低く、語彙経路への依存度が高くなることが指摘されており（Jobard et al., 2003）、本研究から得られた知見が漢字の場合にそのまま当てはまるとは限らないだろう。実際に、日本語母語成人における漢字に対するERPを検討した研究からは、二文字から構成される漢字に対して左半球優勢なN170が生起するものの（Horie et al., 2012; Maurer et al., 2008）、平仮名に対するN170と比較して左半球優位性が減弱する傾向が見出されている（Maurer et al., 2008）。N170が非語彙経路の処理を反映するという本研究の知見に基づくと、漢字に対するN170の左半球優位性が小さかったことは、漢字の読みにおいて非語彙経路への依存度が低いことから説明されるかもしれない。今後は、平仮名と漢字に対する早い処理過程の発達がどのように異なるのか、それが児童の読みスキルの熟達とどのように関連するのかについて、さらなる検討を進める必要があるだろう。

また本研究における実験状況のみでは、通常の読みの場面を捉えきれているとは言えない点にも留意すべきである。すなわち、いずれの実験においても文字や文字列が単独で提示された状況下におけるERPを計測しているが、複数の単語が存在する状況（文や文章のレ

ベル) では、本研究で着目した早い処理が同じように生起するかは明らかではない。通常の読みの場面においては、周辺視野の情報や意味的な文脈を利用することも、読みを高速化させる要素の一つであると考えられる。実際に行動指標や視線計測を用いた研究からは、2つ以上の同時に単語が提示される状況において、中心視野の単語を読むのに要する時間は、その周辺に提示された単語が正書法、音韻、あるいは意味的に類似していた場合に短くなることが報告されている (Chace, Rayner & Well, 2005; Henderson, Dixon, Petersen, Twilly & Ferreira, 1995; Rayner, 1998; Hohenstein, Laubrock & Kliegl, 2010)。一方で、発達性ディスレクシアを有する人々は、こうした周辺視野の情報を利用することに困難があることも知られている (レビューとして、Laycock & Crewther, 2008)。したがって、読みの習熟度やその非定型性を評価するためには、文字や単語レベルのみならず、文や文章レベルにおける読み処理過程に着目した知見も蓄積していくことが望まれる。

第4章 結論

本研究は、全語読みに関わる早い処理、そして文字レベルの音韻変換処理に関わる電気生理学的応答を同定し、それが日本語平仮名を学習した児童においてどのように習熟していくのかを検討するため、平仮名を学習した成人や学童期児童を対象とした ERP 実験を行った。本研究から得られた知見は以下の通りである。まず、左半球優位な N170 は文字レベルの音韻変換処理を反映するが、それは平仮名を学習した児童であっても、必ずしも学童期に生じるようになるわけではないことが示唆された。一方で、既学習文字列に特化された P1 については、学童期における全語読みの能力の発達と関連することが明らかになった。これらの結果は、N170 と P1 が読み処理過程やその発達の異なる側面を反映すること、そして将来的には、これらの成分が読みの困難の原因を評価し、適切な教育的介入法を提案するために利用できる電気生理学的指標となり得ることを示唆している。本研究から得られた知

見により，視覚単語認知について提案されてきた既存の認知神経学的モデルを精緻化し，さらに平仮名学習者における読みの発達過程について新たな視座を提供できると考えられる。

引用文献

- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing normal reading skills: Aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76(2), 123–150.
- Al Dahhan, N. Z., Kirby, J. R., Brien, D. C., & Munoz, D. P. (2017). Eye movements and articulations during a letter naming speed task: Children with and without dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, 50, 275–285.
- 天野 成昭・近藤 公久 (1999). NTT データベースシリーズ日本語の語彙特性 三省堂
- Appelbaum, L. G., Liotti, M., Iii, R. P., Sarabeth, P., Woldorff, M. G. (2009). The temporal dynamics of implicit processing of non-letter, letter, and word-forms in the human visual cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 56.
- Badian, N. A. (1998). A validation of the role of preschool phonological and orthographic skills in the prediction of reading. *Journal of Learning Disabilities*, 31(5), 472–481.
- Barber, H. A., & Kutas, M. (2007). Interplay between computational models and cognitive electrophysiology in visual word recognition. *Brain Research Reviews*, 53(1), 98–123.
- Barton, J. J. S. S., Hanif, H. M., Eklinder Björnström, L., & Hills, C. (2014). The word-length effect in reading: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 31, 378–412.
- Bayer, M., Sommer, W., & Schacht, A. (2012). Font size matters-emotion and attention in cortical responses to written words. *PLoS ONE*, 7(5), 1–6.
- Bentin, S., Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M. H., Echallier, J. F., & Pernier, J. (1999). ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(3), 235–260.
- Brem, S., Bucher, K., Halder, P., Summers, P., Dietrich, T., Martin, E., & Brandeis, D. (2006). Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence. *NeuroImage*, 29(3), 822–837.

- Brem, S., Halder, P., Bucher, K., Summers, P., Martin, E., & Brandeis, D. (2009). Tuning of the visual word processing system: Distinct developmental ERP and fMRI effects. *Human Brain Mapping, 30*, 1833–1844.
- Chace, K. H., Rayner, K., & Well, A. D. (2005). Eye movements and phonological parafoveal preview: effects of reading skill. *Canadian Journal of Experimental Psychology, 59*(3), 209–217.
- Coch, D., Mitra, P., & George, E. (2012). Behavioral and ERP evidence of word and pseudoword superiority effects in 7- and 11-year-olds. *Brain Research, 1486*, 68–81.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (2004). Specialization within the ventral stream: The case for the visual word form area. *NeuroImage, 22*(1), 466–476.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review, 108*(1), 204–256.
- Daffner, K. R., Alperin, B. R., Mott, K. K., & Holcomb, P. J. (2014). Age-related differences in the automatic processing of single letters. *NeuroReport, 25*(2), 77–82.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: A proposal. *Trends in Cognitive Sciences, 9*(7), 335–341.
- Delis, D. C., Robertson, L. C., & Efron, R. (1986). Hemispheric specialization of memory for visual hierarchical stimuli. *Neuropsychologia, 24*(2), 205–214.
- 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.
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General, 113*(4), 501–517.

- Eberhard-Moscicka, A. K., Jost, L. B., Fehlbaum, L. V., Pfenninger, S. E., & Maurer, U. (2016). Temporal dynamics of early visual word processing – Early versus late N1 sensitivity in children and adults. *Neuropsychologia, 91*, 509–518.
- Ehri, L. C. (2005). Development of Sight Word Reading: Phases and Findings. In M. J. Snowling & C. Hulme (Eds.), *The science of reading: A handbook* (pp. 135–154). Blackwell Publishing.
- Ellis, N. C., & Hooper, A. M. (2001). Why learning to read is easier in Welsh than in English: Orthographic transparency effects evinced with frequency-matched tests. *Applied Psycholinguistics, 22*(4), 571–599.
- Emmorey, K., Midgley, K. J., Kohen, C. B., Sehyr, Z., & Holcomb, P. J. (2017). The N170 ERP component differs in laterality, distribution, and association with continuous reading measures for deaf and hearing readers. *Neuropsychologia, 106*, 298–309.
- Fáisca, L., Reis, A., & Araújo, S. (2019). Early brain sensitivity to word frequency and lexicality during reading aloud and implicit reading. *Frontiers in Psychology, 10*, 830.
- Fink, G. R., Halligan, P. W., Marshall, J. C., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. J., & Dolan, R. J. (1996). Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature, 382*(6592), 626–628.
- Fraga-González, G., Pleisch, G., Di Pietro, S. V., Neuenschwander, J., Walitza, S., Brandeis, D., Karipidis, I., & Brem, S. (2021). The rise and fall of rapid occipito-temporal sensitivity to letters: Transient specialization through elementary school. *Developmental Cognitive Neuroscience, 49*, 100958.
- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, M. Coltheart and J. Marshall (Eds.), *Surface Dyslexia: Neuropsychological and Cognitive Studies of Phonological Reading* (pp. 301–330), London: Lawrence Erlbaum.
- Frith, U., Wimmer, H., & Landerl, K. (1998). Differences in phonological recoding in German- and English-speaking children. *Scientific Studies of Reading, 2*(1), 31–54.

- Gagl, B., Hawelka, S., & Wimmer, H. (2015). On sources of the word length effect in young readers. *Scientific Studies of Reading, 19*, 289-306.
- Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences, 19*(7), 374–382.
- Hasko, S., Groth, K., Bruder, J., Bartling, J., & Schulte-Körne, G. (2013). The time course of reading processes in children with and without dyslexia: An ERP study. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 1–19.
- Hauk, O., Patterson, K., Woollams, A., Watling, L., Pulvermüller, F., & Rogers, T. T. (2006). [Q:] When would you prefer a sossage to a sausage? [A:] At about 100 msec. ERP correlates of orthographic typicality and lexicality in written word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*(5), 818–832.
- Hawelka, S., Gagl, B., & Wimmer, H. (2010). A dual-route perspective on eye movements of dyslexic readers. *Cognition, 115*, 367-379.
- Henderson, J. M., Dixon, P., Petersen, A., Twilley, L. C., & Ferreira, F. (1995). Evidence for the use of phonological representations during transsaccadic word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21*(1), 82–97.
- Hohenstein, S., Laubrock, J., & Kliegl, R. (2010). Semantic preview benefit in eye movements during reading: A parafoveal fast-priming study. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 36*(5), 1150–1170.
- Holcomb, P. J., Coffey, S. A., & Neville, H. J. (1992). Visual and auditory sentence processing: A developmental analysis using event-related brain potentials. *Developmental Neuropsychology, 8*, 203–241.

- Horie, S., Yamasaki, T., Okamoto, T., Nakashima, T., Ogata, K., & Tobimatsu, S. (2012). Differential roles of spatial frequency on reading processes for ideograms and phonograms: A high-density ERP study. *Neuroscience Research*, 72(1), 68–78.
- Humphreys, G. W., Evett, L. J., & Taylor, D. E. (1982). Automatic phonological priming in visual word recognition. *Memory & Cognition*, 10(6), 576–590.
- Inhoff, A. W., & Rayner, K. (1986). Parafoveal word processing during eye fixations in reading: Effects of word frequency. *Perception & Psychophysics*, 40(6), 431–439.
- Jobard, G., Crivello, F., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Evaluation of the dual route theory of reading: A metaanalysis of 35 neuroimaging studies. *NeuroImage*, 20(2), 693–712.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329–354.
- 甲斐睦郎・松川利広 (2005). 語彙指導の方法 光村図書出版
- Kast, M., Elmer, S., Jancke, L., & Meyer, M. (2010). ERP differences of pre-lexical processing between dyslexic and non-dyslexic children. *International Journal of Psychophysiology*, 77(1), 59–69.
- Kearns, D. M., Hancock, R., Hoeft, F., Pugh, K. R., & Frost, S. J. (2019). The neurobiology of dyslexia. *Teaching Exceptional Children*, 51(3), 175–188.
- 北 洋輔 (2018). 読み書き処理と脳活動 室橋 春光・苧阪 満理子 (編) 生理心理学III巻 (pp. 167-181) 北大路書房
- 小林 朋佳・稲垣 真澄・軍司 敦子・矢田部 清美・加我 牧子・後藤 隆章...小枝 達也 (2010). 学童におけるひらがな音読の発達的变化—ひらがな単音, 単語, 短文速読課題を用いて— 脳と発達, 42, 15–21.
- Kouider, S., Dehaene, S., Jobert, A., & Le Bihan, D. (2007). Cerebral bases of subliminal and supraliminal priming during reading. *Cerebral Cortex*, 17(9), 2019–2029.

- Kouider, S., & Dupoux, E. (2001). A functional disconnection between spoken and visual word recognition: Evidence from unconscious priming. *Cognition*, *82*(1), 35–49.
- Laycock, R., & Crewther, S. G. (2008). Towards an understanding of the role of the 'magnocellular advantage' in fluent reading. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *32*(8), 1494–1506.
- Levy, J., Pernet, C., Treserras, S., Boulanouar, K., Aubry, F., Démonet, J. F., & Celsis, P. (2009). Testing for the dual-route cascade reading model in the brain: An fMRI effective connectivity account of an efficient reading style. *PLoS ONE*, *4*(8), e6675.
- Lin, S. E., Chen, H. C., Zhao, J., Li, S., He, S., & Weng, X. C. (2011). Left-lateralized N170 response to unpronounceable pseudo but not false Chinese characters-the key role of orthography. *Neuroscience*, *190*, 200–206.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of reseach on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, *109*(2), 163–203.
- Mahé, G., Bonnefond, A., & Doignon-Camus, N. (2013). Is the impaired N170 print tuning specific to developmental dyslexia? A matched reading-level study with poor readers and dyslexics. *Brain and Language*, *127*(3), 539–544.
- Mahé, G., Bonnefond, A., Gavens, N., Dufour, A., & Doignon-Camus, N. (2012). Impaired visual expertise for print in French adults with dyslexia as shown by N170 tuning. *Neuropsychologia*, *50*(14), 3200–3206.
- Mason, J. M. (1980). When do children begin to read: An exploration of four year old children's letter and word reading competencies. *Reading Research Quarterly*, *15*, 203-227.
- Marsh, G., Friedman, M., Welch, V., & Desberg, P. (1981). A cognitive developmental theory of reading acquisition. In G. E. MacKinnon and T. G. Waller (Eds.), *Reading Research: Advances in Theory and Practice Vol.3* (pp. 199–221), New York: Academic Press.

- Maurer, U., Brandeis, D., & McCandliss, B. D. (2005). Fast, visual specialization for reading in English revealed by the topography of the N170 ERP response. *Behavioral and Brain Functions*, *1*(13), 1–12.
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., & Brandeis, D. (2005). Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(10), 1532–1552.
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., Kranz, F., Benz, R., Steinhausen, H. C., & Brandeis, D. (2007). Impaired tuning of a fast occipito-temporal response for print in dyslexic children learning to read. *Brain*, *130*(12), 3200–3210.
- Maurer, U., Brem, S., Kranz, F., Bucher, K., Benz, R., Halder, P., Steinhausen, H.C., & Brandeis, D. (2006). Coarse neural tuning for print peaks when children learn to read. *NeuroImage*, *33*(2), 749–758.
- Maurer, U., & McCandliss, B. D. (2007). The development of visual expertise for words: The contribution of electrophysiology. In E. L. Grigorenko & A. J. Naples (Eds.), *Single-word Reading: Biological and Behavioral Perspectives*. (pp. 43–64). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Maurer, U., Rossion, B., & McCandliss, B. D. (2008). Category specificity in early perception: face and word N170 responses differ in both lateralization and habituation properties. *Frontiers in Human Neuroscience*, *2*, 18.
- Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., der Mark, S. van, Bucher, K., Martin, E., & Brandeis, D. (2011). The development of print tuning in children with dyslexia: Evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI. *NeuroImage*, *57*(3), 714–722.
- Maurer, U., Zevin, J. D., & McCandliss, B. D. (2008). Left-lateralized N170 effects of visual expertise in reading: evidence from Japanese syllabic and logographic scripts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(10), 1878–1891.

- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 293–299.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88(5), 375–407.
- Mognon, A., Jovicich, J., Bruzzone, L., & Buiatti, M. (2011). ADJUST: An automatic EEG artifact detector based on the joint use of spatial and temporal features. *Psychophysiology*, 48(2), 229–240.
- Nazir, T. A., Ben-Boutayab, N., Decoppet, N., Deutsch, A., & Frost, R. (2004). Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain and Language*, 88(3), 294–311.
- Neuhaus, G., Foorman, B. R., Francis, D. J., & Carlson, C. D. (2001). Measures of information processing in Rapid Automatized Naming (RAN) and their relation to reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 78(4), 359–373.
- Okumura, Y., Kasai, T., & Murohashi, H. (2014). Early print-tuned ERP response with minimal involvement of linguistic processing in Japanese Hiragana strings. *NeuroReport*, 25(6), 410–414.
- Okumura, Y., Kasai, T., & Murohashi, H. (2015). Attention that covers letters is necessary for the left-lateralization of an early print-tuned ERP in Japanese hiragana. *Neuropsychologia*, 69, 22–30.
- Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature*, 423(6941), 752–756.
- Rayner, K. (1986). Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 41(2), 211–236.
- Rayner, K. (1993). Eye movements in reading: Recent developments. *Current Directions in Psychological Science*, 2(3), 81–85.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.

- Rayner, K., & Duffy, S. A. (1986). Lexical complexity and fixation times in reading: Effects of word frequency, verb complexity, and lexical ambiguity. *Memory & Cognition*, *14*(3), 191–201.
- Sainio, M., Hyönä, J., Bingushi, K., & Bertram, R. (2007). The role of interword spacing in reading Japanese: An eye movement study. *Vision Research*, *47*(20), 2575–2584.
- 三益 亜美・宇野 彰・春原 則子・金子 真人・粟屋 徳子・Wydell, T. N.・狐塚 順子・後藤 多可志・葛森 英史 (2011). 単語長が仮名実在語と仮名非語の音読に及ぼす影響—小学 5・6 年生の典型発達児と発達性読み書き障害児を対象として— 音声言語医学, *52*, 26–31.
- Sambai, A., Uno, A., Kurokawa, S., & Haruhara, N. (2012). An investigation into kana reading development in normal and dyslexic Japanese children using length and lexicality effects. *Brain and Development*, *34*(6), 520–528.
- Sambai, A., Uno, A., Kurokawa, S., Haruhara, N., Kaneko, M., Awaya, N., Kozuka, J., Goto, T., Tsutamori, E., Nakagawa, K., & Wydell, T. N. (2012). An investigation into kana reading development in normal and dyslexic Japanese children using length and lexicality effects. *Brain and Development*, *34*(6), 520–528.
- Segalowitz, S. J., & Zheng, X. (2009). An ERP study of category priming: Evidence of early lexical semantic access. *Biological Psychology*, *80*(1), 122–129.
- Sereno, S. C., & Rayner, K. (2003). Measuring word recognition in reading: Eye movements and event-related potentials. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(11), 489–493.
- Sereno, S. C., Rayner, K., & Posner, M. I. (1998). Establishing a time-line of word recognition: Evidence from eye movements and event-related potentials. *NeuroReport*, *9*(10), 2195–2200.
- Seymour, P. H. K. (2005). Early Reading Development in European Orthographies. In M. J. Snowling & C. Hulme (Eds.), *The science of reading: A handbook* (pp. 296–315). Blackwell Publishing.
- Simon, G., Bernard, C., Largy, P., & Lalonde, R. (2004). Chronometry of visual word recognition during passive and lexical decision tasks. *International Journal of Neuroscience*, *114*(11), 1401–32

- Skarratt, P. A., & Lavidor, M. (2006). Magnetic stimulation of the left visual cortex impairs expert word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(10), 1749–1758.
- Stevens, C., McIlraith, A., Rusk, N., Niermeyer, M., & Waller, H. (2013). Relative laterality of the N170 to single letter stimuli is predicted by a concurrent neural index of implicit processing of letter names. *Neuropsychologia*, *51*(4), 667–674.
- Stoeckel, C., Gough, P. M., Watkins, K. E., & Devlin, J. T. (2009). Supramarginal gyrus involvement in visual word recognition. *Cortex*, *45*(9), 1091–1096.
- Straube, S., & Fahle, M. (2009). The electrophysiological correlate of saliency: Evidence from a figure-detection task. *Brain Research*, *1307*, 89–102.
- Straube, S., Grimsen, C., & Fahle, M. (2010). Electrophysiological correlates of figure-ground segregation directly reflect perceptual saliency. *Vision Research*, *50*(5), 509–521.
- Thesen, T., McDonald, C. R., Carlson, C., Doyle, W., Cash, S., Sherfey, J., Felsovalyi, O., Girard, H., Barr, W., Devinsky, O., Kuzniecky, R., & Halgren, E. (2012). Sequential then interactive processing of letters and words in the left fusiform gyrus. *Nature Communications*, *3*, 1284–1288.
- Tong, X., Lo, J. C. M., McBride, C., Ho, C. S., Waye, M. M. Y., Chung, K. K. H., ... Chow, B. W. Y. (2016). Coarse and fine N1 tuning for print in younger and older Chinese children: Orthography, phonology, or semantics driven? *Neuropsychologia*, *91*, 109–119.
- 豊巻 敦人 (2011). 発達性ディスレクシアの認知神経科学的理解—大細胞系視知覚と聴知覚について— *心理学評論*, *54* (1), 45-53.
- Turker, S., & Hartwigsen, G. (2021). Exploring the neurobiology of reading through non-invasive brain stimulation: A review. *Cortex*, *141*, 497–521.
- 上野 一彦・名越 斉子・小貫 悟 (2008). PVT-R 絵画語い発達検査 日本文化科学社
- 宇野 智己・片倉 崇史・河西 哲子 (2020). 文字列特異的な ERP の左側性化への物体にもとづく注意の役割 *生理心理学と精神生理学*, *38* (3), 139-148.

- Uno, T., Okumura, Y., & Kasai, T. (2017). Print-specific N170 involves multiple subcomponents for Japanese Hiragana. *Neuroscience Letters*, *650*, 77–81.
- van Setten, E. R. H., Maurits, N. M., & Maassen, B. A. M. (2019). N1 lateralization and dyslexia: An event-related potential study in children with a familial risk of dyslexia. *Dyslexia*, *25*(1), 84–102.
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, *55*(1), 143–156.
- Weekes, B. S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, *50*(2), 439–456.
- Wimmer, H. (1996) The early manifestation of developmental dyslexia: Evidence from German children. *Reading and Writing*, *8*, 171-188.
- Wimmer, H. & Hummer, P. (1990) How German speaking first graders read and spell: Doubts on the importance of the logographic stage. *Applied Psycholinguistics*, *11*, 349-368.
- Wydell, T. N., & Butterworth, B. (1999). A case study of an English-Japanese bilingual with monolingual dyslexia. *Cognition*, *70*(3), 273–305.
- Yagyu, K., Hashimoto, R., Shimojo, A., Iwata, M., Sueda, K., Seki, A., Siraishi, H., & Saito, T. (2021). Development of a reading difficulty questionnaire for adolescents in Japanese. *Brain and Development*, *43*(9), 893-903.
- Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U., & McCandliss, B. D. (2010). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, *35*(4), 423–445.
- Yoncheva, Y. N., Wise, J., & McCandliss, B. (2015). Hemispheric specialization for visual words is shaped by attention to sublexical units during initial learning. *Brain and Language*, *145–146*, 23–33.

- Yoncheva, Y. N., Zevin, J. D., Maurer, U., & McCandliss, B. D. (2010). Auditory selective attention to speech modulates activity in the visual word form area. *Cerebral Cortex*, *20*(3), 622–632.
- Zhao, J., Kipp, K., Gaspar, C., Maurer, U., Weng, X., Mecklinger, A., & Li, S. (2014). Fine neural tuning for orthographic properties of words emerges early in children reading alphabetic script. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(11), 2431–2442.
- Zhao, J., Li, S., Lin, S. E., Cao, X. H., He, S., & Weng, X. C. (2012). Selectivity of N170 in the left hemisphere as an electrophysiological marker for expertise in reading Chinese. *Neuroscience Bulletin*, *28*(5), 577–584.
- Zoccolotti, P., De Luca, M., Di Pace, E., Gasperini, F., Judica, A., & Spinelli, D. (2005). Word length effect in early reading and in developmental dyslexia. *Brain and Language*, *93*(3), 369–373.

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導とご鞭撻をいただいた関あゆみ先生、河西哲子先生に心より感謝致します。関先生には、基礎研究だけでなく教育支援においても多大なご指導をいただき、その奥深さを知ることができました。河西先生には、学部時代より永年の間、研究を進める上での考え方や技術を丁寧に、辛抱強くご指導いただきました。

また、北海道大学名誉教授の室橋春光先生からいただいたご助言は、本研究の土台となる大変重要なものでした。学位論文審査においては、国立障害者リハビリテーションセンター研究所の中村仁洋先生に貴重なお指導やご助言をいただきました。深く感謝致します。

島根県立大学の内山仁志先生、北海道医療大学の橋本竜作先生には、日頃より研究におけるご協力とご支援をいただきました。心よりお礼申し上げます。

また、研究室の仲間には公私ともに支えていただきました。学部・修士時代の先輩であった渡辺隼人さん、奥村安寿子さん、竹谷隆司さん、山田優士さん、佐藤史人さん、同期の蒔苗詩歌さん、田中愛子さん、そして後輩の漆原彩花さんと池田陽介さんの存在は、研究を進める原動力でした。特に、奥村安寿子さんからは学部時代からきめ細やかなご指導をいただきました。学習神経心理学研究室の岩田みちるさん、後藤亜矢子さん、柳内景太さん、Junior Kochさんには、研究・教育支援活動の両方において、ご指導・ご協力をいただきました。

本研究の遂行にあたり、快く実験にご参加いただいた皆様に、深く感謝を申し上げます。

最後に、これまで暖かく、励まし続けてくれた家族に、心から感謝を申し上げます。