

# 小学生の読みにおける音韻処理の発達的变化

— 語彙判断・押韻判断における脳処理からの検討 —

佐藤 裕<sup>1)</sup>, 山根 直人<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 (<sup>2)</sup> 理化学研究所 BSI 言語発達研究チーム)

## <要 旨>

我々の日常には文字が溢れており、文字理解や読みに障害があると、教育・就労をはじめ日常生活において様々な困難が生じる。本研究は、障害例を含めた小児の読みの発達過程を明らかにすることを目的とし、その第一段階として、二重経路モデルに基づく読みに関する脳内処理機構の健常発達を明らかにすることを目的とし、近赤外分光法を用いて健常小学生を対象に語彙判断処理・音韻（押韻）処理課題遂行中の脳反応を測定した。その結果、小学校低学年から高学年にかけて、語彙判断処理及び押韻処理の行動反応成績が上がることを示された。また、脳反応は、高学年にかけて減少することが示され、特に高学年では語彙判断課題において音韻処理に関する脳反応がほぼ出現せず、単語の形態的情報に基づき直接心内辞書にアクセスして意味処理が進む直接経路が獲得されつつあることが示唆された。本研究で得られた結果が、障害例における読みの認知処理や脳機能の解明につながり、効果的な訓練方法の開発等、臨床へ応用されることが期待される。

<キーワード> 読み 二重経路モデル 語彙判断 押韻処理 近赤外分光法

## 【はじめに】

我々が言語を獲得する際、発達初期では音声入力に基づく聴性言語処理がすすみ、その後、文字情報と音韻情報との対応を学習し読みが習得され、最終的には視覚的に提示された文字から意味処理することが可能となる。具体的には、次のような発達段階が想定されている。聴性言語発達として、まず生後1年程度、母語に特化した音韻知覚が発達し、1歳を過ぎると語彙処理が進み音声と意味との結びつきが学習される。次に、音韻意識が発達し、幼児は音の連鎖からなる語を言語学的な音節・拍などの音韻的構成要素に分節化し、それぞれの語音を同定する能力を獲得し、読み書きの習得に先立ち音韻表象を形成していく（原，2001）。例えば、日本語を母語とする幼児は、4・5

歳程度で音声入力された単語を拍（モーラ）単位で分節化することが可能となり（伊藤・辰巳，1997）、「リンゴ」と発話された語が「リ」「ン」「ゴ」に分節化され、3つの音から構成されることを認識する。その後、文字の習得が始まると文字と音韻表象とを結びつけ、日本語においては通常かな一文字と一モーラ音との対応が学習される。文字の習得初期には、一文字ごとに音韻変換して読む逐次的な読みがなされるが、読みが習熟すると、音韻変換を経ずに単語の文字形態情報のみで意味処理が可能となる（小泉，2011）。ただし、これらの発達において、聴覚障害や音韻認識障害が存在すると、読みに困難が生じたり、健常例とは異なる方略を学習したりする場合がある。

読み書きに特異的に困難が生じる障害として例えば、発達性ディスレクシアがあり、その特徴として、単語の読み書きにおける正確さと流暢性、文字と音の結びつきの理解、における障害が挙げられる。ディスレクシアは神経学的な要因で生じると推定されているが、その実態は不明であり、病態生理に基づく早期発見・診断方法の確立や治療・訓練・教育システムの構築等の対策を施すことが、特に学校や教育に関わる分野で強く望まれている。そこで、本研究では、ディスレクシア等の障害例を含めた小児の読みの発達過程を明らかにし、臨床応用することを最終的な目標とし、その第一段階として読みに関与する神経基盤の健全発達過程を明らかにすることを目的とした。

読みの発達過程の解明にあたり、本研究では単語認知モデルの一つである二重経路モデルに基づく単語処理における脳機能発達を調べることとした。文字で書かれた単語の理解における脳内処理に関して、二重経路モデルが提唱されており (e.g., Jobard et al., 2003)、文字の視覚的処理から心内辞書へアクセスする経路として、文字素・音素変換を通して得られた音韻表象を用いて処理が進む間接 (文字音韻) 経路と、単語の形態的情報に基づき直接心内辞書にアクセスする直接 (語彙意味) 経路があるとされている。小児における文字言語の習得過程では、音読の練習を通して文字と音との対応学習が進むことでまず間接経路の発達が進み、後に、黙読の向上に伴い直接経路の処理が進むようになると想定されている。各経路での処理に寄与する神経基盤は成人を対象とした研究から明らかにされつつあり、まず文字刺激は視覚野を経て左紡錘状回で単語形状の処理がなされる。間接経路では、文字情報と音声・音韻情報との変換が必要となるが、この機能

には聴覚野を含む左上側頭領域 (Brodmann Area (BA) 22/41/42) や縁上回を含む左頭頂部位 (BA 40)、左下前頭領域後背部 (BA 44) が関与する。それに対して、直接経路では、文字形状処理後、音韻情報処理を経ずに意味処理 (左中・下側頭領域後部や左下前頭領域前腹部 (BA 45/47)) がなされる。しかし、2種の経路の発達に関して、関連する脳領域が年齢や読みの習熟度によりどのような発達的变化を示すかは不明である。また、アルファベットや漢字 (中国語) を用いた研究は成人を対象として多くなされているが、日本語を用いた読みの脳機能発達研究は少ない。そこで、本研究では健全小学生児童を対象とし、近赤外分光法 (NIRS: Near Infrared Spectroscopy) を用いて、二重経路モデルの探索に適している語彙判断課題及び音韻 (押韻) 処理課題遂行中の脳反応を測定した。

作業仮説として、押韻課題において、低学年から高学年にかけて音韻情報処理が熟達すると考えられ、音韻情報処理に関与する脳部位の活動が減少すると予想された。また、語彙判断課題においては、低学年では文字処理の際に音韻変換が多くなされ、音韻情報処理部位 (間接経路での処理) と意味処理部位の両方に活動がみられるが、高学年になるにつれて、特に有意味単語に対して音韻情報処理部位の活動は減少し意味処理部位のみの活動が残る (直接経路の確立) と予想された。

## 【方 法】

### 1. 被験者

右利き小学 1-5 年生 26 名が実験に参加した。全ての被験者に読み書きスクリーニング検査 (STRAW) (宇野ら, 2006) を実施し、学年・年齢に応じた能力を確認した。各学年での学習課程

の修了を考慮し 3 月に測定した 22 名のデータを解析に用いた。小学 1-3 年生 12 名 (年齢: 7 歳 10 ヶ月 - 9 歳 11 ヶ月, 女児: 6 名) を低学年、4-5 年生 10 名 (年齢: 10 歳 2 ヶ月 - 11 歳 11 ヶ月, 女児: 4 名) を高学年とし、低-高学年間での脳反応や行動反応の相違を検討した。なお、実験はすべての被験者の保護者に十分な説明と書面による同意を得た後、理化学研究所の倫理ガイドラインに沿って実施された。

## 2. 装置

脳反応の測定には NIRS (ETG-4000, 日立メディコ) を用い、両側の前頭部から頭頂部、及び、側頭部を測定できるよう、光照射・検知プローブを配置した (図 1)。

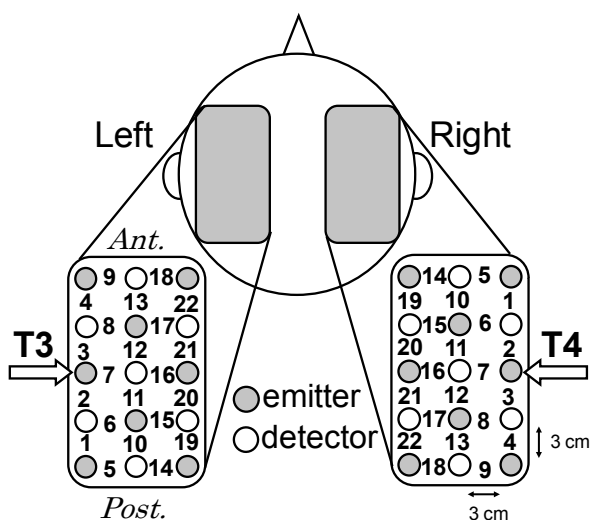


図 1 NIRS 計測におけるプローブ配置

灰丸が光照射プローブ、白丸が光検知プローブ、間の数字が測定チャンネルを示す。両側において、T3 と T4 がチャンネル 2 と 3 の間に位置するよう配置した。

## 3. 実験手続き

実験は防音室で行い、被験者は、室内の椅子に楽な姿勢で着座し、椅子前方の机に置かれた PC にて各課題を遂行するよう教示された。実験状況はビデオカメラとマイクにて室外からモニター

されており、NIRS 測定の制御はすべて防音室外で実施された。実験は 2 セッションに分かれており、1 セッションでは、語彙判断課題と図形探索課題が行われ、もう 1 セッションでは、押韻課題と図形異同判断課題が行われた。各セッションの実施順序は被験者ごとにランダムであった。

### 3.1. 語彙判断課題

ひらがな 4 文字 (4 モーラ) からなる単語 26 語を単語刺激として使用した。小学生低学年を含む被験者を対象とすることを考慮し、小学 1 年生用の教科書・ドリルに記載された単語を選定した。また、無意味単語刺激として、単語刺激の文字をランダムに並び替えて作成したひらがな 4 文字 (4 モーラ) の文字列を 26 語作成した。語彙判断課題の統制課題として、図形探索課題が行われ、○・△・□等の図形が刺激として使用された。

語彙判断課題は、11 のブロックから構成され、各ブロックの持続時間は 25 秒間であり、各ブロック中において文字あるいは図形刺激が 5 つ提示され、計 5 試行実施された。一試行中、まず、画面の中央にプラスマーク 4 個 (++++) の注視点を 1 秒間提示した。その後、注視点の位置に、刺激を 3 秒間提示した。刺激が提示された後には 1 秒間の空白画面が提示された。

11 ブロック中、3 ブロックは図形探索課題であり被験者は提示された図形列に“○”が存在するかどうかを判断して、対応するボタンを押すように教示された。反応は、できる限り速く、かつ正確に行うことが強調された。残り 8 ブロックでは、語彙判断課題が実施され、被験者は画面に提示された文字列が意味のある単語かそうでないかを判断して、対応するボタンを押すことを教示された。なお、8 ブロック中 6 ブロックは有意味

語もしくは無意味単語のみ出現するブロックであり、残り 2 ブロックは両種類の単語が混ざって出現するブロックから構成されていた。図 2a に、語彙判断課題の模式図を示す。

### 3.2. 押韻課題

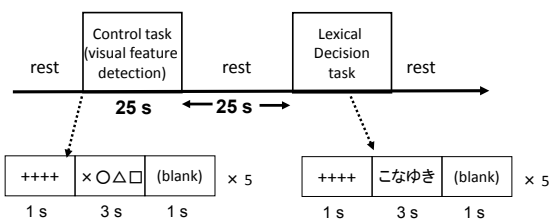
Sato et al. (2009) で用いられたひらがな 3 文字 (3 モーラ) の刺激対を用いた。刺激は全て非単語であり、1 モーラ目の文字、2 モーラ目の文字の子音および母音の異同が操作された。3 モーラ目は撥音「ん」または「い」であり、2 モーラ目と 3 モーラ目で重音節が構成されることを意図した。一組の刺激対が押韻しているかどうかの判断は 2 モーラ目の母音と 3 モーラ目全体が関わるが、3 モーラ目の文字は一組の刺激対に共通の文字使用されていたため、2 モーラ目の母音の判断が重要であった。例えば、「のたいーのかい」は押韻条件の刺激、「ぬさんーぬこん」は非押韻条件の刺激となる。押韻課題の統制課題として、図

形異同判断課題が行われ、○・△・□等の図形が刺激として使用された。

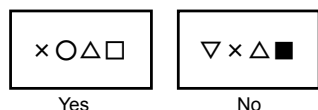
押韻課題は、11 のブロックから構成され、各ブロックの持続時間は 25 秒間であり、各ブロック中に文字あるいは図形刺激が 5 つ提示された。一試行では、まず、画面を左右 2 分割した各中央にプラスマーク 3 個の注視点 (+++ +++) を 1 秒間提示した。その後、注視点の位置に、刺激を 3 秒間提示した。刺激が提示された後には 1 秒間の空白画面が提示された。

11 ブロック中、6 ブロックは図形探索課題であり、被験者は提示された 2 組の図形列 (各 3 つずつからなる) が同一かどうかを判断して、対応するボタンを押すように教示された。反応は、できる限り速く、かつ正確に行うことが強調された。残り 5 ブロックでは、押韻課題が実施され、被験者は画面に提示された 2 組の非単語対が韻を踏んでいるかどうかを判断して、対応するボタンを押すことを教示された。図 2b に、押韻課題の模式

(A) Lexical decision task and visual feature detection task



(B) Example materials in visual feature detection task



(C) Example materials in lexical decision task

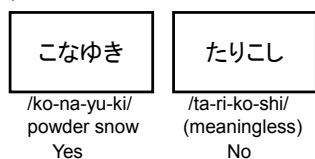
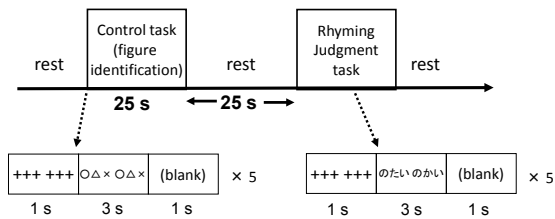


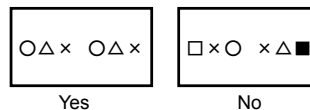
図 2a 図形判断課題実験パラダイム(A)

各課題における刺激例を(B)、(C)に示す。

(D) Rhyming judgment task and figure identification task



(E) Example materials in figure identification task



(F) Example materials in rhyming judgment task

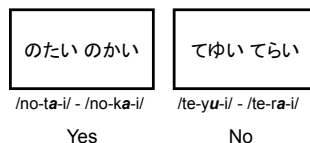


図 2b 図形判断課題実験パラダイム(D)

各課題における刺激例を(E)、(F)に示す。

図を示す。

#### 4. データ解析

語彙判断課題及び押韻課題における各被験者のチャンネルごとに、オキシヘモグロビン (Oxy-Hb) 濃度長反応を、文字課題ブロック・図形課題ブロック別に、アーチファクトが混入したブロックを除外したのち加算平均した。語彙判断課題では、有意味単語・無意味単語・混合ブロックごとに加算平均した Oxy-Hb 濃度長反応から、図形探索課題ブロックにおける反応を引き算した。次に、低学年・高学年ごとに各チャンネルにおいて有意味単語・無意味単語・混合ブロックそれぞれ 25 秒間の平均値と課題ブロック直前 10 秒間の平均値とを比較し、有意に大きい反応が得られたかどうかを判定した。今回の報告では、有意味単語及び無意味単語に対する反応を示す。押韻課題でも同様に、押韻課題中の反応から文字異同判断課題に対する反応を引き算し、課題直前 10 秒のベースラインの反応との比較から、課題中の反応が有意に増大していたかどうか検討した。なお、被験者によっては、多動やプローブの緩みにより、解析不能なチャンネルが存在したため、解析に用いられた人数が解析チャンネルによっては被験者数を下回る場合があった。

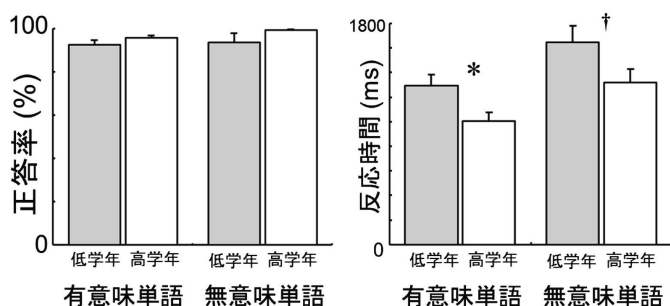


図3 語彙判断課題における正答率 (左) と反応時間 (右)

図中のエラーバーは標準誤差を示す。

行動データ解析として、語彙判断課題では、有意味単語と無意味単語に対する反応の正答率と反応時間を低学年－高学年間で比較した。また、同様に押韻課題成績も、学年間で比較した。なお、正答率に関しては逆正弦変換した値を統計解析に用いた。

#### 【結果】

##### 1. 行動データ

図3に、語彙判断課題の正答率と反応時間を低・高学年ごとに示す。なお、低学年の1名が無意味単語に対する反応をしていなかったため、反応時間データは1人欠損している。正答率に関して、統計には逆正弦変換した値を用いたが、図では直感的に分かりやすくするため、正答率を%で縦軸に示す。正答率に関して、有意味単語・無意味単語のどちらの語に対する判断においても小学校低学年と高学年間で有意差はなかった。しかし、有意味単語に対する反応時間の比較において、低学年と比べて高学年の反応が有意に速く ( $t(20) = 2.59, p < .05$ )、無意味単語に対しても高学年で反応時間が速くなる傾向が示された ( $t(19) = 1.86, p < .10$ )。

押韻課題では、低学年と比較し高学年の正答率

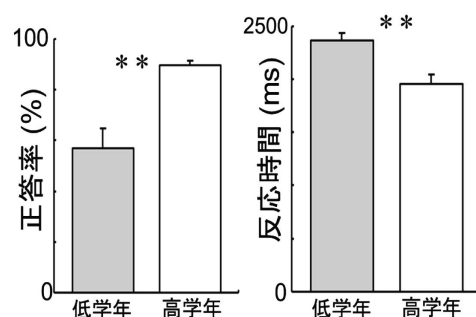


図4 押韻課題における正答率 (左) と反応時間 (右)

図中のエラーバーは標準誤差を示す。



が有意に高く ( $t(20) = 4.45, p < .01$ )、反応時間が有意に速くなることが示された ( $t(20) = 3.85, p < .01$ ) (図 4)。

## 2. 脳反応データ

語彙判断課題: 小学校低学年では、統制課題 (図

形探索課題) に比べて有意味単語の語彙判断において、左下前頭部 (左 13 チャンネル、図 1 及び 5A 参照)、頭頂を含む領域 (左 20 チャンネル)、聴覚野付近 (左 7 チャンネル) で、有意に大きい脳反応が得られた。また、無意味語に対しては、有意味語に対して有意な反応を示したチャンネル以外に

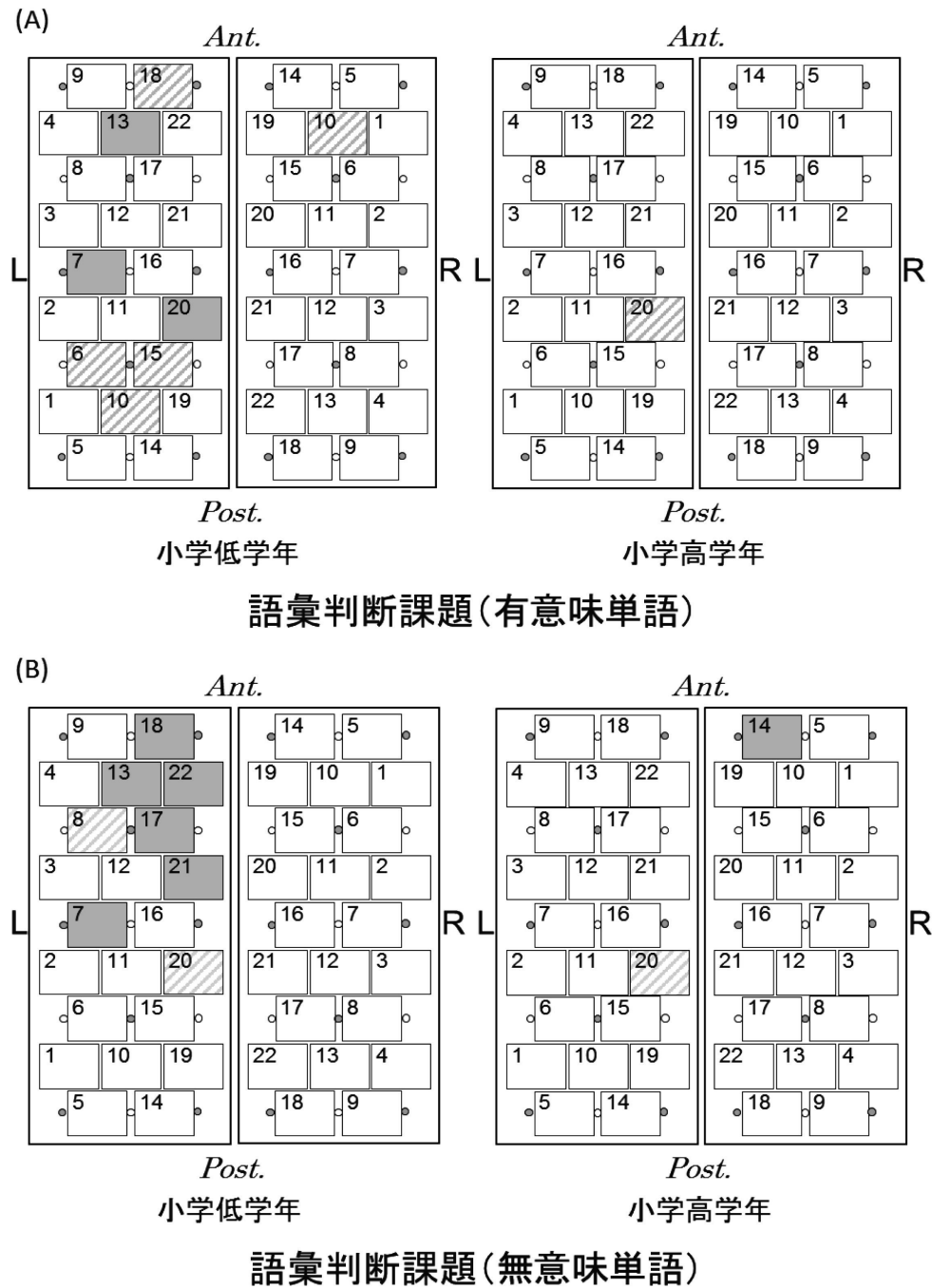


図 5 語彙判断課題における脳反応 (有意味単語: 上 A と無意味単語: 下 B)

図中の各数字は図 1 に示した測定チャンネルを示す。統制課題に比べて語彙判断課題で有意な Oxy-Hb の増加が観察されたチャンネルを灰色で示す (斜線は有意傾向)。灰丸が光照射プローブ、白丸が光検知プローブを示す。

も、左前頭後背部に脳反応が広がることが観察された（左 17・18・21・22 チャンネル、図 5B）。それに対して、小学校高学年では、無意味単語に対して右前頭部に有意に増大した反応が観察されたものの（右 14 チャンネル）、それ以外には左頭頂付近に有意傾向の増加を示すチャンネル（左 20 チャンネル）が存在したのみであった。

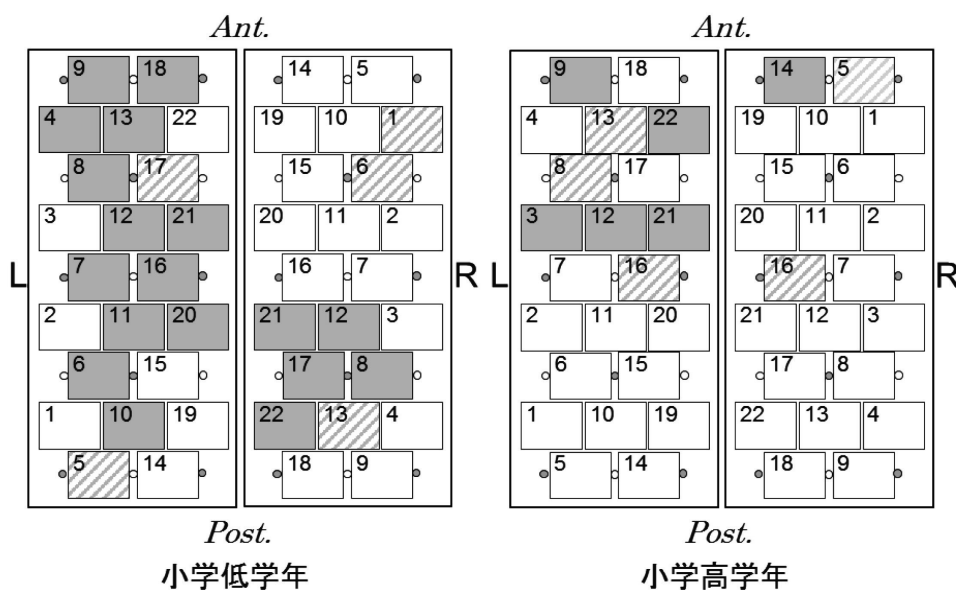
押韻課題：小学校低学年の押韻課題において、左の前頭部や聴覚野、頭頂領域に有意に大きい脳反応の広がりが見られ、右の頭頂領域にも有意に大きい脳反応が複数チャンネルで確認された（図 6）。小学校高学年では、左前頭部の数チャンネルに有意に大きい反応が示されたが、有意に大きな反応を示したチャンネルは低学年と比較し減少していた。

【考 察】

本研究では、小学生の健常発達例を対象に、語彙判断課題及び押韻課題遂行中の脳反応・行動反

応を測定しその発達過程を調べた。その結果、小学校低学年から高学年にかけて、語彙判断処理及び押韻処理の行動反応成績が上がることを示され、また、脳反応は高学年にかけて減少することが示された。これらの結果から、読みの熟達度が上がるとともに脳反応は減少する関係が示唆され、先に示した仮説に概ね沿う結果が得られた。

語彙判断課題において、小学校低学年では聴覚野や頭頂領域を含む領域での反応がみられ、語彙判断において文字情報を音韻変換し、語全体の音韻表象を構築する処理が行われたと考えられる（小泉, 2011）。また、左下前頭部での反応がみられ、ここは BA 45 を含み、語意味判断処理が実施されたと考えられる。また、無意味単語に対しては左前頭の後背部にかけて活動が広がっており、これらの領域は BA 44 を含む。左前頭後背部は、発話のための調音や内声化、そして音韻符号化や文字－音変換に寄与しており（Fiebach et al., 2002; Fiez, 1997; Fiez & Petersen, 1998; Heim et al., 2005）、無意味な非単語の読みにおいて音



押韻課題

図 6 押韻課題における脳反応 図の見方は、図 5 と同様。

韻情報処理のための負荷がかかったことを反映していると考えられる。それに対して、高学年では有意に増大した反応を示したチャンネルが少なかった。ただし、行動成績は低学年と有意差はなかったものの、正答率が平均 99%あり、また、反応時間は低学年より速くなっていることから、単語に対する読み（語彙判断）の習熟度が上がっていることが示唆される。それにも関わらず有意な脳反応を示したチャンネルが減少しているのは、脳に負荷をかけずに、効率よく語彙判断処理しているためと考えられる。

なお、語彙意味処理に寄与する脳領域に関して、左下前頭領域野の活動が低学年では確認されるが高学年ではみられなかった。また、同じく意味処理に寄与する左中側頭領域において、低・高学年ともに有意な脳反応は示されなかった。左中側頭領域は音声情報に基づいて心内辞書にアクセスする処理を担っているとされ（小泉, 2011）、特に高学年では直接経路の確立に伴いこの領域の反応が有意水準に達しなかったと考えられる。また、左下前頭部は戦力的な意味処理（例えば、予測に基づく意味的活性化の促進や、競合する意味表象の抑制）に関連しているとされるが（小泉, 2011）、本研究では小学 1 年生にも理解され得る語を刺激としていたため、特に高学年では語意味判断に複雑な処理過程を要しなかったため、左下前頭部の反応が有意に示されなかったと考えられる。

押韻課題において、小学校低学年では有意に大きい反応を示したチャンネルが、左上側頭、左頭頂、左下前頭領域を中心に多数出現した。また、右の頭頂領域に有意に大きい脳反応が複数チャンネルでみられた。このような左右での活動の広がり、聴覚障害者を対象とした研究において報告され

ており、押韻課題で必要とされる音韻処理における聴覚欠損を補償する為のメカニズムであるとされている（Aparicio et al., 2007; MacSweeney et al, 2008; 2009; Sato et al., in preparation）。

低学年において、本研究で用いられた押韻課題は困難性が高く、語彙判断課題に比べてより負荷がかかり、左の広い領域だけでなく右での活動も出現した可能性がある。高学年では、右に有意な反応が出現せず、左の反応も低学年に比べて減少し特に後部において有意な反応を示すチャンネルは観察されなかった。言語処理の発達において、後頭から前頭部へ活動がシフトすることが示唆されており、低学年から高学年にかけての反応パターンの変化は、このような発達過程反映したものと考えられる。

## 【ま と め】

本研究では、健常発達小学生を対象に、読みの脳機能に関する発達を調べた。聴覚障害や読み書き障害（発達性ディスレクシア）があると、読みの脳機能が健常例とは異なることが指摘されている。今後、障害例の測定を実施し健常例と比較することで、読みの障害における大脳の機能異常に関する発達の示唆が得られる可能性があり、読みに困難を有する小児の病態生理の解明に繋がることが期待される。また、ディスレクシアの障害仮説として、音韻処理障害説や急速聴覚情報処理説、視覚障害説等、複数仮説が挙げられており、サブタイプの存在が指摘され、また、個々のタイプに合わせたプログラムの作成が必要であるとされている（稲垣, 2010; 安東, 2013）。本研究にて用いた手法では、複数の脳領域における語彙判断及び音韻処理機能に関する反応を捉えることができた。そこで、本研究の手法を用いて発達



性ディスレクシアの測定を実施することで、ディスレクシアのタイプ別に異なる活動を捉えられる可能性があり、脳機能測定結果をサブタイプ別の診断の補助材料や訓練効果の判定に用いる等、臨床面へ応用することも期待される。

## 【文献】

- 安藤壽子 (2013). 健常児におけるトライアングル・モデルの検討. *お茶の水女子大学人文科学研究*, 9, 25-36.
- Aparicio, M., Gounot, D., Demont, E., & Metz-Lutz, M. N. (2007). Phonological processing in relation to reading: an fMRI study in deaf readers. *Neuroimage*, 35, 1303-1316.
- Fiebach, C. J., Friederici, A. D., Muller, K., & von Cramon, D. Y. (2002). fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J. Cogn. Neurosci.*, 14, 11-23.
- Fiez, J. A. (1997). Phonology, semantics, and the role of the left inferior prefrontal cortex. *Hum. Brain Mapp.*, 5, 79-83.
- Fiez, J. A., & Petersen, S. E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 95, 914-921.
- 原恵子 (2001). 健常児における音韻意識の発達. *聴能言語学研究*, 18, 10-18.
- Heim, S., Alter, K., Ischebeck, A. K., Amunts, K., Eickhoff, S. B., Mohlberg, H., Zilles, K., von Cramon, D. Y., & Friederici, A. D. (2005). The role of the left Brodmann's areas 44 and 45 in reading words and pseudowords. *Brain Res. Cogn. Brain Res.*, 25, 982-993.
- 稲垣真澄 (編) (2010). 特異的発達障害. *診断と治療社*.
- 伊藤友彦, 辰巳格 (1997). 特殊拍に対するメタ言語的知識の発達. *音声言語医学*, 38, 196-203.
- Jobard, G., Crivello, F., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Evaluation of the dual route theory of reading: a metanalysis of 35 neuroimaging studies. *NeuroImage*, 20, 693-712.
- 小泉政利 (2011). 言語. 村上郁也 (編), *認知神経科学* (pp. 89-106), オーム社.
- MacSweeney, M., Waters, D., Brammer, M. J., Woll, B., & Goswami, U. (2008). Phonological processing in deaf signers and the impact of age of first language acquisition. *Neuroimage*. 40, 1369-1379.
- MacSweeney, M., Brammer, M. J., Waters, D., & Goswami, U. (2009). Enhanced activation of the left inferior frontal gyrus in deaf and dyslexic adults during rhyming. *Brain*, 132, 1928-1940.
- Sato, Y., Jincho, N., Omori, R., Kondo, T., & Mazuka, R. (2009). Brain activation for written word processing in deaf readers. The 34th Annual Boston University Conference on Language Development, Boston, U.S.A..
- Sato, Y., Jincho, N., Omori, R., Kondo, T., Chonan, H., Hayashi, A., & Mazuka, R. (in preparation). Brain activation in deaf readers during lexical decision and rhyming for Japanese kana words.
- 宇野彰, 春原則子, 金子真人, Wydell, T. N. (2006). 小学生の読み書きスクリーニング検査, インテルナ出版.