

発達性及び後天性読み書き障害例の障害メカニズム及び訓練法の効果に関する計算論的研究

三益亜美*

伊集院陸雄**

筑波大学大学院人間総合科学研究科*, 東京都健康長寿医療センター**

<要 旨>

本研究では、これまでの日本語話者の音読モデルを発展させた構造を有し、定型発達児の音読特徴、後天性の音韻失読症状を再現可能なひらがな・カタカナの音読に関する最新のシミュレーション・モデルを構築することを試みた。本研究の音読モデルを用いて、定型発達児の音読特徴、後天性の音韻失読症状の一部をコンピュータ上に再現することが可能であることが示唆された。しかし、モデルの構造上の問題から再現できる音読症状に限界があることも示された。また、この音読シミュレーション・モデルを用いて、日本語話者の発達性読み書き障害におけるひらがな、カタカナの音読障害に関して、各障害仮説（音韻障害説、視覚情報処理過程障害説、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説）の妥当性を検討した。その結果、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程の障害が合併した場合、特に音韻障害と視覚性記憶障害が合併した場合に仮名の音読障害が生じる可能性が高いことが示唆された。さらに、本研究は試験的にはあるが、訓練効果に関する計算論的研究を行った。シミュレーション結果から、コネクショニスト・モデルを用いて、日本語話者の読み書き障害例に関する訓練効果を計算論的研究から検討することが可能ではないかと思われた。

<キーワード>

計算論的研究、発達性読み書き障害、後天性の失読、訓練効果

【はじめに】

近年、英語の音読に関して、計算論的研究から音読に必要な情報処理過程、音読の発達特徴、後天性の失読、発達性読み書き障害の障害メカニズムなどが検討されている。さらに、発達性読み書き障害児に対する英語の音読訓練の効果についても計算論的アプローチが行われている。日本語の音読に関しては、健常成人の音読過程、定型発達児の音読、後天性の失読例の障害メカニズムに関する計算論的研究が報告されている。これらの国内外の計算論的研究によって、臨床現場で用いられている健常な音読過程のモデル、後天性の失読や発達性読み書き障害の障害機序に関する仮説の一部の妥当性が示され、論争中の事柄が解明されつつある。しかし、日本語の音読研究における計算論的アプローチでは、用いられているモデルの構造が十分でなく、発達性読み書き障害の障害機序が検討されていないために、定型発達児の音読特徴のコンピュータ上での再現性、発達性読み書き

障害の原因となりうる要素的な認知機能障害が十分に明らかにされていないと思われる。また、訓練効果の検討がされていない。

そこで、本研究では、これまでの日本語話者の音読モデルを発展させた構造を有し、定型発達児の音読特徴、後天性の音韻失読症状を再現可能なひらがな・カタカナの音読に関する最新のシミュレーション・モデルを構築することを目的とした。そして、このひらがな・カタカナの音読シミュレーション・モデルを用いて、日本語話者の発達性読み書き障害におけるひらがな、カタカナの音読障害に関して、各障害仮説（音韻障害説、視覚情報処理過程障害説、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説）の妥当性を検討することを目的とした。さらに、本研究では試験的にこれまで日本で報告されているシミュレーション・モデルと同様の手法で構築した書字モデルを用いて、発達性読み書き障害児に有効であると報告されている仮名文字

の書字訓練の効果をコンピュータ上で再現可能か否かを検討することを目的とした。

研究 1

小学校1年生から3年生の定型発達児のひらがな、カタカナの音読過程をあらわすシミュレーション・モデルの構築を試みた。

【方法】

1. ネットワークの構造

Dual Route Cascaded モデル (DRC モデル: Coltheart et al, 2001) の3経路 (lexical semantic route、lexical non-semantic route、sub-lexical route) と類似した処理過程をもつコネクショニスト・モデルを構築した (Fig1)。各経路は層構造になっており、各層は神経細胞を模した多数の処理単位 (ユニット) で構成されている。そして、各ユニットは次の層内の全ユニットと結合している。

各ユニットの活性値の決定方法は、三盃ら (2008) と同様の方法を用いている。

2. 各経路の情報処理過程

Input 層から Orthographic Word 層に至る経路は文字列の文字を 1 文字ずつ視覚的に知覚することで、文字列の形態を捉える過程に相当する。Letter Unit 層で、文字列内の文字が 1 文字ずつ同定され、その情報が Orthographic Word 層に伝えられる。

そして lexical route (Orthographic Input Lexicon 層から Output 層へ至る経路) と sub-lexical route (Grapheme 層から Output 層へ至る経路) の並列処理によって文字列が音韻列に変換される。DRC モデル同様に、lexical route と sub-lexical route では音に変換する際の方略が異なる。すなわち lexical route では whole word 処理 (単語レベルでの処理) が行われるのに対し、sub-lexical route では文字、モーラ単位での処理が行われる。大きくはこれら 2 経路が並列的に働くことで最終的な音韻列 (発音) が Output 層から出力される。

3. 表象の表現方法

1) 入出力表現

ネットワークに入力される文字列表現、出力される音韻表現は、三盃ら (2008) と同様の方法を用いた。

2) 意味表現

「日本語語彙体系」(NTT コミュニケーション科学研究所, 1997) の意味属性に従って、各単語の意味を表現した。例えば、「日本語語彙体系」では、「パン」の意味は、「具体」という開始ノードから「パン」という終始ノードまでの「具体、具体物、無生物、人工物、食料、

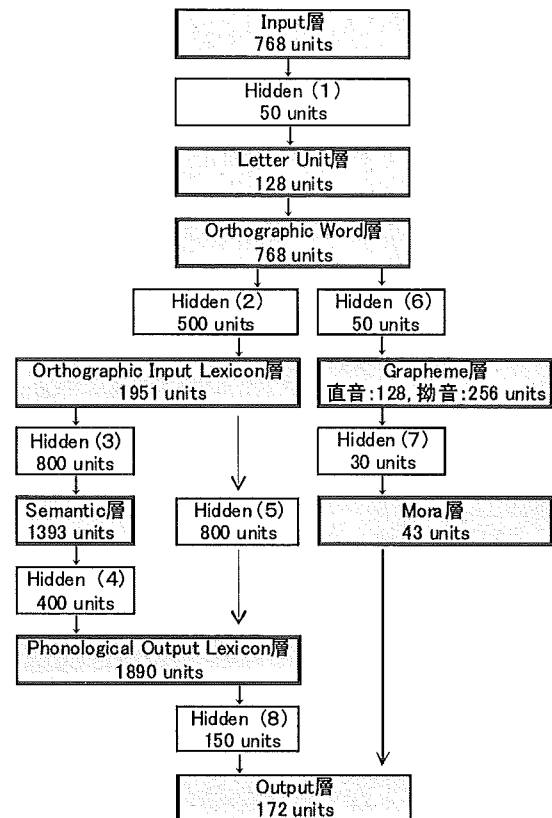


Fig1. 構築したモデルの構造

料理、パン」という順序で階層構造になっている。単語の意味を表す Semantic 層のユニットは、意味の階層構造における各ノードに対応させた。各単語の意味を表現する際には、該当する意味属性に対応するユニットの活性値を 1 にし、それ以外のユニットの活性値を 0 にした。

3) lexicon (心的辞書) の表現

lexical route において文字列の lexicon に相当する Orthographic Input Lexicon 層、音韻列の lexicon に相当する Phonological Output Lexicon 層の出力表現は、他の層とは異なり、1 ユニットで 1 単語を表す局所表現とした。

4. 学習

1) 学習単語

ネットワークに学習させた単語は、6 モーラ以内かつ 6 文字以内のひらがな単語 1084 語、カタカナ単語 227 語である。教科書出版会社 3 社の小学校国語教科書の中から、上記のモーラ数、文字数の条件を満たす初出学年 1 年生から 3 年生までの単語を選択した。また、「小学生の読み書きスクリーニング検査」(宇野ら, 2006) のひらがな単語を全て学習単語に含めた。これらの単語に加えて、50 音図、拗音の各行のひらがな表記とカタカナ表記 (あ行、ア行、か行、カ行、しゃ行、シャ行など) を学

習させた。以上の方法で学習単語を選定した結果、本実験で学習させた文字列数は、ひらがな文字列 1110、カタカナ文字列 253 の計 1363 となった。

2) 手続き

子供たちは、音読学習の前にすでに単語の音韻表象と意味表象を獲得している。そこで、本実験においても実際の子供たちの学習に類似させて、音読学習を開始する前に、音韻表象と意味表象を獲得させることを目的にした学習を行うことにした。まず、音韻列を出力する (Phonological Output Lexicon 層→Output 層) 学習を行うことで、音韻表象を獲得させた。次に、意味表象と音韻表象のマッピング、すなわち、意味から音韻列を出力する (Semantic 層 → Phonological Output Lexicon 層 → Output 層) 学習を行わせた。これらの学習が終了した後に音読学習に相当する学習、すなわち、文字列からその文字列に対応する音韻列を出力することを学習させた。

三盃ら (2008) と同様に学習前の結合強度にはランダム値 (-0.3 から +0.3) を与え、学習規則には誤差逆伝播学習規則 (Rumelhart ら, 1989) を用いた。ネットワークの学習に出現頻度を反映させるために、本実験では各単語の出現頻度の自然対数変換値に比例するように結合強度の変更量を調整した。また、音読学習時には lexical semantic route の結合強度の変更量に単語の出現頻度だけではなく、文字単語心像性の影響も反映させるために、頻度と文字単語心像性値の両者に比例するように Orthographic Input Lexicon 層から Semantic 層間の結合強度の変更量を調整した。

5. 音読学習における学習終了基準

島村 & 三神 (1994) の報告によると、ひらがな 71 文字 (清音、濁音、半濁音、撥音) 中、年長児で平均 65.9 字 (92.8%)、年中児で 49.7 字 (70%) を読める。そのため、就学前から子供たちはひらがなの読み方がある程度獲得しているといえる。そこで、本研究では音読学習の段階を大きくは、就学前から小学校 1 年生、2 年生、3 年生と分けることにした。さらに、就学前から小学校 1 年生までの学習を 6 段階に分けた。Table 1 に各段階の学習内容及び学習終了基準を示す。

6. 評価手続き

次の手続きに従って、ネットワークがどのように入力した文字列を音読したかを決定した。Output 層のそれぞれのスロット内で最大活性化値を示したユニットが促音ユニットまたは撥音ユニットであればそのスロットの出力を促音または撥音とみなした。また子音ユニット群と母音ユニット群それぞれの最大活性化値が促音ユニットおよび撥音ユニットの活性化値よりも高ければそのスロットの出力を C(C)V 構造のモーラまたは単母音とみなした。またそれぞれのスロット内の 43 ユニットすべての活性化値が 0.5 未満であれば、そのスロットの出力を空とみなした。

7. 構築したモデルの妥当性の検討方法

小学生の学習到達度、文字と音の対応関係の習得特徴 (① ひらがなの読みの完成順: 清音・撥音、濁音・半濁音、拗音、② カタカナの音読学習初期での清音・撥音と濁音・半濁音の読みの習得率の程度、③文字の出現頻度と習得の容易さの関係、④文字形態の複雑さと習得の容易さの関係) を有したモデルであるか否かを評価した。

Table 1. 各段階の学習内容及び学習終了基準

	学習内容	終了基準	
就学前-1年生	第1段階	ひらがな単語534語の音読学習	sub-lexical routeの正答率が90%以上に達する
	第2段階	ひらがな単語534語とカタカナ単語68語の音読学習(学習量の比率: ひらがな:カタカナ = 3:1)	sub-lexical routeのひらがな単語音読正答率が95%以上に達する
	第3段階	ひらがな、カタカナそれぞれ104文字(拗音を表す文字を1文字とカウント)の音読学習(学習量の比率: ひらがな:カタカナ = 30:1)	sub-lexical routeのひらがな104文字音読正答率が95.25%以上に達する
	第4段階	ひらがな単語534語とカタカナ単語68語の音読学習(学習量の比率: ひらがな:カタカナ = 1:1)	sub-lexical routeのひらがな単語音読正答率が99%以上に達する
	第5段階	ひらがな、カタカナそれぞれ104文字(拗音を表す文字を1文字とカウント)の音読学習(学習量の比率: ひらがな:カタカナ = 1:5)	sub-lexical routeのカタカナ104文字音読正答率が95%以上に達する
	第6段階	ひらがな単語534語とカタカナ単語68語の音読学習(学習量の比率: ひらがな:カタカナ = 1:1)	sub-lexical routeの学習中の全単語音読正答率が99%以上に達する
2年生	小学校2年生の音読学習(初出学年2年生の単語を追加)	sub-lexical routeの音読正答率が、ひらがな単語99.5%以上、カタカナ単語97.75%以上に達する	
3年生	小学校3年生の音読学習(初出学年3年生の単語を追加)	sub-lexical routeの音読正答率に変動がなく、lexical routeの正答率が50%以上に達する	

【結果】

1. 学習到達度：「小学生の読み書きスクリーニング検査」(宇野ら, 2006)

「小学生の読み書きスクリーニング検査」(宇野ら, 2006)のひらがな、カタカナの1文字音読課題と単語音読課題を各学年の学習終了時のモデルに実施した。その結果、各学年終了時のモデルはひらがな、カタカナの1文字課題、単語課題において、全ての検査文字、検査語を正答した。この成績は、各学年の小学生の標準範囲内に相当する。

2. 学習の完成期

「小学生の読み書きスクリーニング検査」(宇野ら, 2006)のひらがな、カタカナの1文字の音読課題において、小学校1年時でも平均正答数が20字中19字を超えてはいるが、平均-1SDの正答数が19字以上に到達するのは小学校3年時である。また、Frith et al.(1998)によるドイツ話者と英語話者の子供たちの非語の音読成績の比較結果においても、文字と音の対応関係が規則的なドイツ語の場合、9歳で非語の音読正答率が約95%になり、それ以降で音読正答率の上昇があまりみられない。したがって、文字と音の対応関係がドイツ語と同様に規則的なひらがな、カタカナの場合、小学校1年時でひらがな、カタカナの読みが獲得されてはいるが、小学校3年時ではほぼ獲得が完成されるのではないかと考えられた。

本研究において構築したモデルのひらがな、カタカナ各104文字(拗音を1文字としてカウント)の音読課題において、1年生と2年生、2年生と3年生の学習終了時点での正答数間でMcNemar検定を行ったが、学年間の正答数の差は統計的には有意ではなかった。しかし、小学校2年生の学習終了時においても本モデルは、ひらがな拗音、カタカナ拗音の一部の文字を読み誤っていた。ひらがな、カタカナ拗音の音読が100%に到達したのは、小学校3年生の学習中においてであった。

3. 文字と音の対応関係の習得特徴

1) ひらがなの読みの完成順

国立国語研究所(1954, 1956)の調査から、ひらがなの音読は、清音・撥音、濁音・半濁音、拗音の順で獲得されると考えられている。清音・撥音46字、濁音・半濁音25字、拗音33字(1文字としてカウント)の音読正答率が90%以上に初めて到達した学習回数はいずれも、22回、48回、170回だった。

2) 学習初期のカタカナの音読

国立国語研究所(1972)の調査結果では、清音・撥音46字の音読正答率が90%未満であ

った時期では、清音・撥音46字と濁音・半濁音25字の音読正答率間には統計的な差は認められていない。本モデルにおいて、就学前から1年生までの音読学習での第4段階終了時(126 epoch時)のカタカナ清音・撥音46字、カタカナ濁音・半濁音25字の音読正答率はそれぞれ71.74%、68%であった。清音・撥音、濁音・半濁音の正答率に関して χ^2 検定を行った結果、この正答率の差は有意ではなかった。

3) 文字の出現頻度と習得の容易さの関係

(1) ひらがなの習得について

先行研究(国立国語研究所, 1954;河合ら, 1980;堀田, 1984)から文字と音の対応関係の習得の容易さに関与する要因の一つに文字の出現頻度が挙げられている。本モデルにおいて、各文字の音読が可能になった学習回数(以下、習得期)と文字出現頻度の相関係数を算出した。その結果、ひらがな清音・撥音、ひらがな濁音・半濁音、ひらがな拗音における相関係数はそれぞれ、-0.72($p < 0.01$)、-0.49($p < 0.05$)、-0.74($p < 0.01$)であり、全ての項目において、有意な相関係数が得られた。

(2) カタカナの習得について

国立国語研究所(1972)の調査では、毎日新聞大阪本社「本社使用活字・使用度数調査表」(昭和28年)による使用度数とカタカナ清音・撥音の読みの正答率順位間の相関係数を算出したが、有意な相関係数は得られていない。本モデルにおいても、カタカナ清音・撥音46字の各文字の出現頻度と習得期との間に有意な相関係数は得られなかった。

4) 文字形態の複雑さと習得の容易さの関係

先行研究(国立国語研究所 1954, 1972)から、ひらがな、カタカナ音読の習得の容易さに文字形態の複雑さの影響は少ないことが示唆されている。本研究のモデルにおいても、ひらがな、カタカナの両者において、各文字の習得期と文字形態の複雑さを表すドット数の間には有意な相関係数は得られなかった。

【考察】

実験1では、3経路から成るコネクショニスト・モデルを用いて、就学前から小学校3年生までの縦断的なひらがな、カタカナの音読学習を行い、定型発達児のひらがな、カタカナの音読に関するシミュレーション・モデル(以下、健常モデル)を構築した。

構築した健常モデルは、「小学生の読み書きスクリーニング検査」におけるひらがな、カタカナの1文字音読課題、単語音読課題において、各学年での学習到達度が標準範囲内であった。したがって、健常モデルの学習到達度は

実際の児童の学習到達度に対応していたのではないかと思われた。

また、「小学生の読み書きスクリーニング検査」に対する実際の児童の音読成績、Frith et al.(1998)の研究から仮名の音読は、小学校1年時でほとんど獲得されてはいるが、小学校3年時ではほぼ獲得が完成されるのではないかと考えられた。1年生と2年生の学習終了時における健常モデルのひらがな、カタカナ各104文字(拗音を1文字とカウント)の音読成績に有意差が認められなかったのは、1年時においてすでに90%以上の音読正答率を示していたことから天井効果が生じていたためであったと考えられる。したがって、1年時にはほとんどの読みを獲得していたと考えられる。そして、全ての文字を正しく音読できるようになったのは小学校3年時の学習中であった。これらの結果から、本実験のモデルと実際の小学生において音読獲得の完成期が対応していたのではないかと思われた。

さらに構築したモデルにおいても実際の定型発達児のひらがな、カタカナの音読発達で観察される特徴(①ひらがなの読みの完成順:清音・撥音、濁音・半濁音、拗音、②カタカナの音読学習初期での清音・撥音と濁音・半濁音の読みの習得率の程度、③文字の出現頻度と習得の容易さの関係、④文字形態の複雑さと習得の容易さの関係)を有しているか否かを検討した。その結果、本研究で設定した上記の特徴を全て満たしていたように思われた。したがって、本モデルは音読発達の過程でみられる音読特徴においても実際の小学生の音読特徴に対応していたのではないかと思われた。

以上の結果から、本モデルは、実際の小学生の学習到達度、文字と音の対応関係の習得特徴を有した仮名の音読モデルであったと考えられた。したがって、構築した健常モデルは、小学校1年生から3年生の定型発達児のひらがな、カタカナの音読を表すシミュレーション・モデルであったのではないかと思われた。

研究2

研究2では、後天性の音韻性失読を本研究のモデルで再現可能か否かを検討した。後天性の音韻失読は実在語ではなく非語の音読に障害を示す。その原因として、sub-lexical routeの損傷が考えられている。そこで、本研究では、研究1のモデルを用いて、学習終了後のネットワークにおけるsub-lexical routeを損傷させた際に、非語の音読が困難

になるか否かを検討することを目的とした。

【方法】

研究1で構築した定型発達児の音読モデルに、学習単語の音読正答率が変動しなくなるまで、音読学習を継続して行うことで、熟達した音読モデルに成長させた。その結果、学習回数が500回を超えてから、正答率に変動がみられなくなった。したがって、学習回数500回時のsub-lexical routeの一部、すなわち、Hidden(7)層とMora層の間の結合強度にノイズ(各epoch(学習回数の単位)の学習前に、乱数を発生させ、発生させた乱数に変数を乗算した値)をかけた。この損傷モデルに、カタカナ実在語、カタカナ非同音非語、カタカナ同音非語を音読させた。

【結果】

カタカナ実在語、カタカナ非同音非語、カタカナ同音非語に対する障害モデルの誤読率は、それぞれ、13.3%(15語中2語)、100%(15語中15語)、100%(15語中15語)であった。

【考察】

本研究のシミュレーション結果は、Patterson et al.(1996)が報告した音韻失読例における実在語、非同音非語の音読特徴を表しているように思われた。しかし、カタカナ同音非語の誤読率に関してはPatterson et al.(1996)の症例とは対応しておらず、本モデルの誤読率の方が高かった。その理由の一つとしては、本研究で構築したモデルの構造上の限界があるのではないかと考えられた。本研究では、全ての経路の処理過程が一方向であり、要素間の相互作用が生じない構造となっている。そのため、カタカナ同音非語を音読する際に、lexical routeからの助けを得られないために、sub-lexical routeからの誤った出力が修復されず、カタカナ同音非語とカタカナ非同音非語の誤読率の乖離がみられなかったのではないかと考えられた。

研究3

研究3の目的は、研究1でのネットワークを用いて、ひらがな、カタカナの音読障害に関して、これまで提唱されている発達性読み書き障害の障害メカニズムに関する仮説の妥当性を検証することであった。今回、対象とした障害仮説は、発達性読み書き障害の原因を主に音韻障害と考える音韻障害説(大石ら、1999;小

林ら,2003; 田中ら,2006)、視覚認知障害や視覚性記憶障害などを主な原因とする視覚情報処理過程障害説(宇野ら,1995,1999)、そして、音韻障害と視覚情報処理過程双方を原因とする説(以下、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説: 宇野ら,2002; 栗屋ら,2003)である。

【方法】

1. 各要素的な認知機能障害の構築方法

1) 音韻障害

想起した文字形態に対応する音にアクセスする過程に損傷を与えた。すなわち、lexical route では、Hidden(5)層と Phonological Output Lexicon 層の間の結合強度にノイズ(各 epoch (学習回数の単位)の学習前に、乱数を発生させ、発生させた乱数に変数を乗算した値)をかけた。さらに、sub-lexical route の Hidden(7)層と Mora 層の間の結合強度にもノイズをかけた。

2) 視覚性記憶障害

視覚性記憶障害を構築する際の損傷方法は上記の「音韻障害」を呈したネットワークと同様である。ただし、損傷させた結合強度が異なる。文字形態の記憶にアクセスする過程の結合強度にノイズをかけた。すなわち、lexical route における Hidden(2)層と Orthographic Input Lexicon 層の間の結合強度、sub-lexical route における Hidden(6)層と Grapheme 層の間の結合強度にノイズをかけた。

3) 視覚認知障害

他のモデルには0か1の値を Input 層の各ユニットに入力した。一方、視覚認知障害を呈したネットワークを構築する際には、0から1の範囲の実数値を各ユニットに入力した。

2. 構築した障害モデル

1) 音韻障害説に対応する障害モデル(音韻障害単独モデル)

音韻障害説に対応させて、音韻障害のみを呈したネットワークを構築した。

2) 視覚情報処理過程障害説に対応する障害モデル(視覚認知障害単独モデル、視覚性記憶障害単独モデル)

視覚情報処理過程障害説に対応させて、視覚認知障害のみを呈したモデル(以下、視覚認知障害単独モデル)と視覚性記憶障害のみを呈したモデル(以下、視覚性記憶障害単独モデル)を構築した。

3) 音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説に対応する障害モデル(音韻+視覚認知障害モデル、音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル)

音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説に対応させて、以下の3つの障害モデルを構築した。第1が音韻障害と視覚認知障害を呈したモデル(以下、音韻+視覚認知障害モデル)、第2が音韻障害と視覚性記憶障害を呈したモデル(以下、音韻+視覚性記憶障害モデル)である。第3が音韻障害、視覚認知障害及び視覚性記憶障害を呈したモデル(以下、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル)である。

3. 学習手続き

研究1と同様の方法で、各障害モデルの結合強度を変更させた。ただし、各障害モデルを構築する際には、ネットワークの上述した部分(「各要素的な認知機能障害の構築方法」)を損傷させながら学習を行わせた。また、各学習段階での学習内容は、就学前から1年生の学習における第5段階を除いて、すべて研究1と同様である。研究3では、第5段階の学習時にはひらがな、カタカナ各104文字(拗音を1文字としてカウント)の学習回数を等しくして学習を行わせた。障害モデル構築時には、各学習段階の学習終了基準を設けずに、研究1での健常モデルが各学習段階の学習終了基準を満たすのに必要だった学習回数で音読学習を行わせた。

【結果】

1. 学習到達度

1) 小学生の読み書きスクリーニング検査(宇野ら,2006)

ひらがな単語音読課題、ひらがな1文字音読課題において、実際の小学生の平均-1.5SDの正答数を示した障害モデルは、2年生の学習終了後、3年生の学習終了後の音韻+視覚性記憶障害モデル(単語音読課題正答数:2年生19語,3年生19語;1文字音読課題正答数:2年生18字,3年生19字)であった。

カタカナ単語音読課題において、実際の小学生の平均-1.5SDの正答数を示した障害モデルは、2年生の学習終了後では音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル(正答数16語)、3年生の学習終了後では音韻+視覚性記憶障害モデル(正答数16語)と音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル(正答数15語)であった。カタカナ1文字音読課題において、実際の小学生の平均-1.5SDの正答数を示した障害モデルは、3年生の学習終了後の音韻+視覚性記憶障害モデル(正答数16字)と音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル(正答数17字)であった。

2) ひらがな、カタカナ各104文字(拗音を1文字としてカウント)の音読

研究1での健常モデルと本研究の障害モデ

ルの正答数に関して、 χ^2 検定または Fisher の直接確率計算法を行った。

ひらがな 104 文字の音読においては、各学年の学習終了後に健常モデルと障害モデルの正答数を比較した。その結果、各学年の学習終了時において、音韻+視覚性記憶障害モデルと音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデルの正答数は有意に健常モデルの正答数よりも低かった(音韻+視覚性記憶障害モデル：1 年生 $\chi^2(1)=4.02, p<0.05$; 2 年生 $\chi^2(1)=9.93, p<0.01$; 3 年生 $\chi^2(1)=7.24, p<0.01$; 音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル：1 年生 $\chi^2(1)=8.76, p<0.01$; 2 年生 $\chi^2(1)=6.72, p<0.01$; 3 年生 $\chi^2(1)=5.12, p<0.05$)。その他の障害モデルと健常モデルの正答数は、どの学年の学習終了時においても有意差は認められなかった。

カタカナ 104 文字の音読においては、2 年生、3 年生の学習終了後に健常モデルと障害モデルの正答数を比較した。その結果、両学年の学習終了時において、音韻+視覚性記憶障害モデルと音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデルの正答数は有意に健常モデルの正答数よりも低かった(音韻+視覚性記憶障害モデル：2 年生 $\chi^2(1)=11.92, p<0.05$; 3 年生 $\chi^2(1)=18.51, p<0.01$; 音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル：2 年生 $\chi^2(1)=15.26, p<0.01$; 3 年生 $\chi^2(1)=20.91, p<0.01$)。その他の障害モデルと健常モデルの正答数は、どの学年の学習終了時においても有意差は認められなかった。

2. 集中的な 1 文字の音読学習によるひらがな、カタカナ各 104 文字の正答数の変化

就学前から 1 年生の学習における第 3 段階では 1 文字呈示によるひらがなの集中的な音読学習を行い、第 5 段階では 1 文字呈示によるカタカナの集中的な音読学習を行った。そこで、第 3 段階の学習前後におけるひらがな 104 文字の音読正答数、第 5 段階の学習前後におけるカタカナ 104 文字の音読正答数に関して、McNemar 検定を行った。

ひらがな 104 文字の音読においては、第 3 段階の学習前よりも第 3 段階の学習終了時の正答数の方が有意に高かったモデルは、健常モデル(両側検定： $p<0.01$)、音韻障害単独モデル(両側検定： $p<0.01$)、視覚認知障害単独モデル(両側検定： $p<0.05$)、視覚性記憶障害単独モデル(両側検定： $p<0.01$)、音韻+視覚認知障害モデル(両側検定： $p<0.01$)であった。一方、音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデルでは、有意差は認められなかった(両側検定： $p>0.1$)。

カタカナ 104 文字の音読では、健常モデル

及び全ての障害モデルにおいて、第 5 段階の学習前よりも第 5 段階の学習終了時の正答数の方が有意に高かった(健常モデル、音韻障害単独モデル、視覚認知障害単独モデル、視覚性記憶障害単独モデル、音韻+視覚認知障害モデル：両側検定 $p<0.01$; 音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル：両側検定 $p<0.05$)。しかし、音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデルの正答数の増加数は、両モデルとも 14 字であったのに対し、他の障害モデルは 21 字以上であった。

【考察】

本研究で構築した障害モデルのうち、1 年生から 3 年生まで一貫して、ひらがな、カタカナの音読障害を呈していたと思われた障害モデルは、音韻障害と視覚性記憶障害の合併モデル(音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデル)であった。これら両者のモデルは、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説で述べられている要素的な認知機能障害を呈したモデルである。したがって、本研究における障害の重症度の範囲内においては、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程双方の障害説を支持する結果が得られたのではないかと思われた。しかし、本研究では、実際の発達性読み書き障害児と障害モデルの音読特徴を検討していない。そのため、音読障害を呈していると思われた音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデルが、障害機序の一致する実際の発達性読み書き障害児を質的にも表しているかは不明である。今後の検討課題であると思われる。

また、音韻+視覚性記憶障害モデル、音韻+視覚認知+視覚性記憶障害モデルは、他の障害モデルとは異なり、1 文字の音読学習の効果が小さかった。この結果は、仮名 1 文字と音の単純な 1 対 1 対応の練習を行っても仮名の習得ができない場合に、音韻認識能力以外の機能障害も反映されている可能性があるとする宇野(2004)の仮説を支持しているのではないかと思われた。特に本研究のシミュレーション結果では音韻障害と視覚性記憶障害が合併した場合に、単語を用いた学習を十分にを行い、1 文字の音読学習を行っても、標準範囲内までの習得を望めない恐れがあることが示唆された。1 文字の音読学習を行っても仮名の音読の困難さが残る場合には、音韻表象の曖昧さだけでなく、視覚情報処理過程の障害、特に視覚性記憶障害が関与している可能性があることを考慮する必要があるのではないかと思われた。

研究 4

日本語話者の発達性読み書き障害例に対する訓練としては、障害メカニズムに基づく方法が有効であるという報告が多い。その中でも、近年、良好な機能を活用させて障害されている機能を迂回させる方法（バイパス法）が開発され、通常の学習方法との客観的な比較結果から、その有効性が科学的に実証されている（宇野ら、2003）。その一つに 50 音表を活用したひらがな書字訓練がある。

50 音表を活用したひらがな書字訓練とは、50 音表を見ずに音だけの学習で 50 音表の音系列を記憶させ、次に 50 音表の音系列に沿って、書きとれるようにする方法である。実際の発達性読み書き障害児には、以下の手続きで 50 音表を活用したひらがな書字訓練が行われている。

まず、第 1 段階として「あ、か、さ、た、な、は、ま、や、ら、わ、を、ん」とスムーズに言う練習をし、50 音表の各列の最初の音系列とわ列（わをん）の音を記憶させる。その後、第 2 段階として「あ、あいうえお、あか、かきくけこ、あかさ、さしすせそ、・・・、あかさたなはまやら、らりるれろ、あかさたなはまやらわをん」と各列の最初の音を必ずあ行から言い、目標の列に達したら、あ段からお段へと言う練習をする。これが可能となった時点で、音系列に沿って 50 音表の書字を行わせる。50 音表がすべて正しく書けるようになったら書字の自動化を図ることを目的に、目標時間以内で 50 音表を全て書くという練習が行われている。

私が知る限り、日本では初となる計算論的研究の試みとして、発達性読み書き障害のひらがな書字に焦点をあてることにした。具体的には、計算論的研究により、何らかの要素的な認知機能低下によって、通常の音から文字に変換する経路が損傷を受けている経路が学習されなかった場合に、50 音表を活用した書字訓練同様に迂回路を構築することによって、ひらがな 1 文字の書字成績が向上するか否かを検討した。

【方法】

応用行動分析学の AB デザインにしたがって、ベースライン期となる損傷モデルを構築し、損傷モデルに訓練を実施し（訓練期）、ひらがな書字訓練の効果を検討した。具体的には、ベースライン期では、ネットワークに損傷を与えながら、通常の音から文字への変換学習を行わせた（損傷モデル）。訓練期では、損傷モデルに 50 音表に類似した迂回路を形成させ、この迂回路を用いた音から文字への変換学習を行わせた。

1. 損傷モデルの構築（ベースライン期）

1) ネットワークの構造

フィードフォワード・ネットワークをコンピュータ上に構築した。このネットワークは 3 層からなり、音韻層 43 ユニット、隠れ層 50 ユニット、文字層 128 ユニットで構成されている。音韻層の各ユニットを隠れ層の全てのユニットと結合させ、隠れ層の各ユニットを文字層の全てのユニットと結合させた。音韻層に音が入力され、隠れ層を介して、入力された音に対応する文字に変換して、文字層より出力する。

2) 入出力表現

研究 1 と同様の方法で、1 モーラとひらがな 1 文字を表現した。

3) ひらがな 1 文字の書字学習

ネットワークには、1 モーラからそのモーラに対応するひらがな文字を出力することを学習させた。ただし、本研究では清音・撥音 46 字の書字学習のみを行わせた。学習規則には誤差逆伝播学習規則を用い、ネットワークの出力誤差 (CE: cross-entropy) を小さくするよう、各ユニット間の結合強度を徐々に変更した。

健全モデルには、ネットワークを損傷させずに、書字学習を行わせた。一方、損傷モデルには、音韻層と隠れ層、隠れ層と文字層間の結合強度に損傷を与えながらネットワークに学習を行わせることで、通常の音から文字への変換経路が構築しにくい状態にした。

4) 評価

活性値が 1 になるべきユニットの出力が 0.5 以上、0 になるべきユニットの出力が 0.5 未満になっていれば、ネットワークが正しい文字を出力したと評価した。

2. 迂回路（50 音表システム）の構築（訓練期）

1) 迂回路の構造

ネットワークに 50 音表システムを迂回路にした経路を付け加えた (Fig2)。この経路では、音韻層に音が入力されると音系列 50 音表において入力された音に対応するスロット内のユニットが活性し、隠れ層を介して文字系列 50 音表から文字が出力される。

音系列 50 音表には、音韻層同様の 43 ユニットをスロットとして、横に 10 スロット、縦に 5 スロット用意した。各スロットは 50 音表の配列に沿った音に対応する。このようにして、計 2150 ユニット (43 ユニット×50 スロット) で音系列 50 音表を構成した。同様にして、50 音表システムの隠れ層を計 1000 ユニット (20 ユニット×50 スロット) で構成し、文字系列 50 音表を計 6400 ユニット (128 ユニット×50

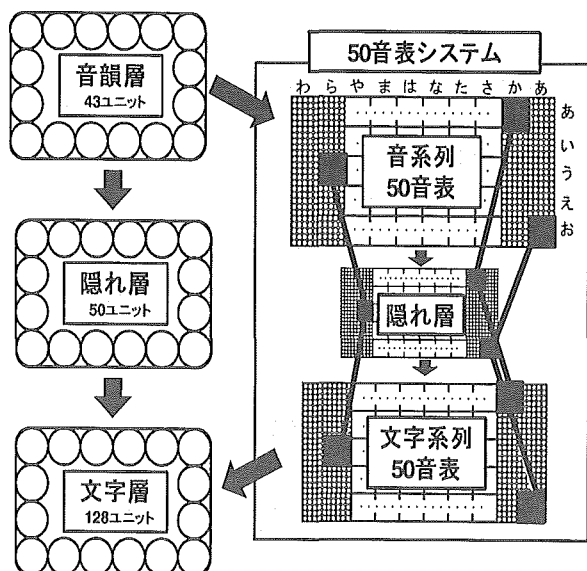


Fig2. 迂回路 (50 音表システム)

スロット)で構成した。また、同位置のスロット内のユニット同士を結合させた。すなわち、例えば、音系列 50 音表において、/ka/にあたるスロット (2 列 3 段目) 内の 43 ユニットを隠れ層の 2 列 3 段目のスロット内の各ユニットと結合させ、さらに隠れ層の当該スロット内の 20 ユニットの文字系列 50 音表における 2 列 3 段目のスロット内の各ユニットと結合させた。

2) 50 音表を活用したひらがな書字訓練

応用行動分析学の AB デザインにしたがって、早期訓練条件、後期訓練条件、非訓練条件を設定し、訓練効果を検討した。早期訓練条件では、健常モデルの正答率が 100%に到達した時点から、損傷モデルに 50 音表を用いた訓練を開始した。また、後期訓練条件では、損傷モデルに 50 音表を用いない音から文字への変換学習 2500 回目に 50 音表を用いた訓練を開始した。非訓練条件では 50 音表を用いた訓練を導入せず 50 音表を用いない音から文字への変換学習のみを行わせた。

【結果】

学習回数 1770 回時に健常モデルの正答率が 100%に達したのに対し、損傷モデルの正答率は 58.7% (習得文字数 27/46) であった。この損傷モデルの成績は実際の小学校 1 年生の平均 2SD 以下の正答率 (宇野ら, 2006) に相当する。さらに、学習を継続しても最大正答率は 87% (習得文字数 40/46) であり、実際の小学校 2 年生の平均 2SD の正答率 (宇野ら, 2006) にしか到達しなかった。

この損傷モデルに、訓練を導入することにし

た。早期訓練条件では訓練学習 30 回目 (ベースライン期通算 1800 回時)、後期訓練モデルは 27 回目 (通算 2527 回時) に正答率が 100%に達した。訓練開始時と訓練終了後の正答数に関して、McNemar 検定を行った結果、早期訓練条件、後期訓練条件において、有意に訓練終了後の正答数の方が訓練開始時の正答数よりも多かった (早期訓練条件: $p < 0.01$; 後期訓練条件: $p < 0.05$)。

【考察】

学習到達度から、構築した損傷モデルはひらがなの書字障害を呈していると考えられた。

早期訓練条件、後期訓練条件の書字正答率は短期間で、清音のひらがな書字正答率が 100%に到達した。これは、宇野ら (2003) が報告した訓練効果を再現している結果であると考えられる。宇野ら (2003) の症例 8 名 (7 歳-12 歳) は、少なくとも視覚性記憶障害を呈し、1 年から 5 年間にわたってひらがなの学習が困難であった。しかし、50 音表を活用したひらがな書字訓練によって、3 週間から 2 カ月でひらがなの読み書きが 100%可能になったと報告されている。50 音表を活用したひらがな書字訓練が訓練開始時期に関係なく、短期間で成果をもたらすことが可能であることが示唆された。

ただし、この方法は実際には音声言語の長期記憶力が十分高い症例に対して行われている。本実験においては、実際に音系列 50 音表のみを先に記憶させる学習は行っていないが、音韻層から音系列 50 音表に正しい情報が伝達されているため、音系列 50 音表が正しく形成されていることを前提としている。そのため、ひらがな 50 音表を活用した訓練を行う際には、音声言語の長期記憶力が十分高いことを確かめたうえで実際の症例に行う必要があると思われる。

本研究は、私が知る限り、国内外で初となる発達性読み書き障害の書字に焦点をあてた試験的な計算論的研究である。本シミュレーション結果から、コネクショニスト・モデルを用いて、訓練効果を検討することが可能であることが示されたのではないかと考えられた。しかし、本研究では、単純な 3 層構造のフィードフォワード・ネットワークを用いているために、音韻情報処理過程と視覚情報処理過程を明確に区別することは難しい。今後、臨床現場で用いられているモデルをコンピュータ上に構築し、発達性読み書き障害児の障害機序に基づく障害モデルを構築して、詳細に訓練効果をコンピュータ上で再現可能か否かを検討する必要がある。

ると思われた。

【総合考察】

本研究では、Dual Route Cascaded model (Coltheart et al., 2001) と同様に sub-lexical route と lexical route を有した音読シミュレーション・モデルを構築した。本モデルを用いて、定型発達児の音読過程、後天性の音韻性失読の一部の症状を再現することが可能ではないかと思われた。また、sub-lexical route と lexical route 間の相互作用、lexical route における要素間の相互作用が生じないなどのモデルの構造上の問題から再現できる音読症状に限界があることが示された。

発達性読み書き障害モデルの構築時に恣意性が生じているという問題はあると思われるが、本研究での障害モデル構築時の損傷方法及び損傷の程度の範囲内では、発達性の仮名音読障害を生じさせる可能性が最も高い要素的な認知機能障害は、音韻障害と視覚性記憶障害が合併した状態ではないかと思われた。また、試験的な訓練効果に関する計算論的実験結果から、日本語話者の読み書き障害例に関する訓練効果を計算論的研究から検討することが可能ではないかと思われた。

【引用文献】

- 栗屋徳子, 宇野彰, 庄司敦子 他 (2003) 音韻処理能力と視覚情報処理能力の双方に障害を認めた発達性書字障害児の1症例. 小児の精神と神経, 43, 131-137.
- Coltheart M, Rastle K, Perry C et al (2001) DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256.
- Frith U, Wimmer H, Landerl K (1998) Differences in phonological recoding in German and English speaking children. *Scientific Studies of Reading*, 2, 31-54.
- 堀田修 (1984) 文字・音節の使用頻度による平仮名の文字習得要因に関する研究. *教育心理学研究*, 32, 58-72.
- 河井芳文, 堀田修, 間々田和彦 (1980) 幼児用読み物における平仮名、および音節の使用頻度と文字指導への示唆. *東京学芸大学紀要 第1部門*, 31, 21-29.
- 小林マヤ(志帆), 加藤醇子, チャールズ ヘインズ 他 (2003) 幼児の読み能力に関わる認知言語学的能力. *LD 研究*, 12, 259-267.
- 国立国語研究所(1954) 入門期の言語能力.
- 国立国語研究所(1956) 低学年の読み書き能力.
- 国立国語研究所 (1972) 幼児の読み書き能力. 東京書籍.
- NTT コミュニケーション科学研究所 (1997) 日本語語彙体系. 岩波書店.
- 大石敬子, 斉藤佐和子 (1999) 言語発達障害における音韻の問題—読み書き障害の場合—. *音声言語医学*, 40, 378-387.
- Patterson K, Suzuki T, Wydell T (1996) Interpreting a case of Japanese phonological alexia: the key is in phonology. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 803-822.
- Rumelheart D, Hinton G, Williams R (1989) 誤差伝播による内部表現の学習 PDP モデル—認知科学とニューロン回路網の探索—. (Rumelheart D, McClelland J, PDP リサーチグループ編), 産業図書, 321-365.
- 三益亜美, 伊集院睦雄, 宇野彰 他 (2008) シミュレーション研究における小学生用音読モデル作成の試み. *音声言語医学*, 49, 115-123.
- 島村直己, 三神廣子 (1994) 幼児のひらがな習得; 国立国語研究所の1967年の調査との比較を通して. *教育心理学研究*, 42, 70-76.
- 田中裕美子, 兵頭明輪, 大石敬子, 他(2006) 読み書きの習得や障害と音韻処理能力との関係についての検討. *LD 研究*, 15, 319-329.
- 宇野彰, 春原則子, 金子真人 他 (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.
- 宇野彰, 金子真人, 春原則子 他 (2002) 発達性読み書き障害—神経心理学のおよび認知神経心理学的分析—. *失語症研究*, 22, 130-136.
- 宇野彰, 加我牧子, 稲垣真澄 他 (1999) 特異的書字障害児の認知能力に関する神経生理学的および神経心理学的発達. *臨床脳波*, 41, 392-396.
- 宇野彰, 加我牧子, 稲垣真澄 (1995) 漢字書字に特異的な障害を示した学習障害の1例—認知心理学のおよび神経心理学的分析—. *脳と発達*, 27, 395-400.
- 宇野彰 (2004) 発達性 dyslexia. *Molecular Medicine*, 41, 601-603.
- 宇野彰, 金子真人, 春原則子 (2003) 学習障害児に対するバイパス法の開発—機能障害に関するデータに基づいた治療教育—. *発達障害研究*, 24, 348-356.