



Title	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
Author(s)	豊巻, 敦人
Citation	北海道大学大学院教育学研究院紀要, 124, 33-47
Issue Date	2016-03-25
DOI	10.14943/b.edu.124.33
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/60999">http://hdl.handle.net/2115/60999</a>
Type	bulletin (article)
File Information	AA12219452_124 (6).pdf



[Instructions for use](#)

# 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—

豊 卷 敦 人\*

**【要旨】** 発達性ディスレクシア (developmental dyslexia) は知的発達に問題が無いにも関わらず、読字と書字が困難である学習障害である。これまで読み困難の背景に文字に対応した音韻表象を想起する音韻意識の障害が関与すると考えられてきたが、それ以外にも大細胞系視知覚や聴知覚、単語知覚、眼球運動、作業記憶なども深く関与することが報告されてきた。こうした基本的障害がどのように読み困難に寄与するか詳細に明らかにすることは、新しい学習支援のアプローチを開発することに寄与する。本論文では特に発達性ディスレクシアに関する大細胞系視知覚や聴知覚についての知見を俯瞰し、それぞれの感覚の符号化における時間分解能が読み能力の各段階に関与することについて述べる。そして我々が行った定型発達者を対象とした聴知覚、大細胞系視知覚処理の相関、読み能力への寄与に関する検討を紹介する。

### 1. はじめに

発達性ディスレクシア (developmental dyslexia) は読字障害にしばしば書字表出障害が合併する学習障害の代表的な表現型である。読字・書字の困難さは知的発達や情緒的問題、感覚器官の障害によるものではなく、また脳の器質的障害による後天的な障害ではない (高橋三郎, 染矢俊幸, & 大野裕, 2003)。国際dyslexia協会の定義を宇野らが訳したものでは「dyslexiaは、神経生物学的原因に起因する特異的学習障害である。その特徴は正確かつ/または流暢な単語認識の困難であり、綴りや文字記号の音声化に問題があることにある。こうした困難さは、典型的には言語の音韻的要素の障害によるものであり、工夫された介入が行われたとしても、それとは関係なしに存在する。二次的には、読解能力の低下や読む機会の減少といった問題が生じ、語彙の発達や背景となる知識の増大を妨げるものとなりうる」とされている (宇野彰, 春原則子, 金子真, & Wydell, 2006)。

発達性ディスレクシアの有病率は用いる診断基準やそれぞれの国・文化における言語構造によって異なるが、おおむね5~10%程度である (マーガレット, 加藤醇子, & 宇野彰, 2008)。日本では仮名文字の場合はモーラと文字が規則的に対応するので読み書き困難の頻度は少ないが漢字や英語は読みとの対応規則が複雑なため読み書き困難が顕在化しやすい。宇野の大規模な調査によると、読み書きの平均得点の-2標準偏差を基準値とした場合は、平仮名、カタカナの音読と書字に関しては約1%, 漢字に関しては音読で約3%, 書字では約5%, -1.5標準偏差を基準値とした場合は、平仮名、カタカナの音読、平仮名の書字に関しては約1%, カタカナの書字に関しては約2%, 漢字に関しては音読で約5%, 書字では約8%の頻度であった (笹沼澄子 (編), 2007)。ディスレクシアの診断は、国際的診断基準では具体的な評価

\* 北海道大学大学院医学研究科精神医学分野・特任助教  
DOI: 10.14943/b.edu.124.33

法は記されておらずそれぞれの言語圏で読み書き能力を直接的に評価するスクリーニング検査を用いることが多い。

発達性ディスレクシアは一種の認知機能障害として捉えられることから、介入は読み書きスキルを向上させる学習的介入が必要になる。Gabrieliは就学前後という早い時期にディスレクシアのリスクがある者への読みスキルの学習的介入が望まれると述べており、実際に複数の研究において小学校入学前後でディスレクシアのスクリーニング検査を行い、リスクが高いとされた児童へ集中的な読みスキル向上の介入を行ったところ、多数の児童がその後、読みスキルが平均的なレベルに達した (Gabrieli, 2009)。このようにディスレクシアの早期診断・早期介入は強く望まれるが、スクリーニング検査だけで評価する場合は、他の発達障害 (広汎性発達障害や注意欠陥/多動性障害など) が合併している症例の場合、それから由来する読み書き困難と区別することは容易ではない。例えば音韻表象の操作に関与する言語性ワーキングメモリは多くの発達障害で発揮困難である頻度が高いので二次的な読み困難に寄与することが考えられる。スクリーニング検査に加え、より発達性ディスレクシアの中核的な基本障害を評価する必要がある。

## 2. 症候群としての発達性ディスレクシア

近年、発達性ディスレクシアは全ての者で共通する1つの基本障害に由来するというのではなく、複数の読みスキルに寄与する基本障害がそれぞれの個人間で異なって生じていると考えられるようになってきた。国際ディスレクシア協会でも、ディスレクシアを症候群として捉えており (Dyslexia refers to a cluster of symptoms, which result in people having difficulties with specific language skills, particularly reading.), 多様なサブタイプが存在することは疑いがない。一般的にサブタイプは観察される臨床像について類型化されたものを指すことが多く、例えば読みの二重経路モデルに則した表層性ディスレクシア、音韻性ディスレクシアといった分類があるが、読み困難の背景にある基本障害やその生物学的基盤を踏まえた分類はまだなされていない。

読みスキルの基本障害については、読んでいる文字列の書記素に対応する音韻表象を想起する音韻意識の障害とする説が有力であり、これまで多数の報告がなされてきた (マーガレット et al., 2008)。音韻意識処理は言語優位半球である左側の角回を含んだ側頭-頭頂領域に局在することが知られており、ディスレクシアで読字課題遂行時に神経活動の賦活が低下する知見が繰り返し報告されてきた (Shaywitz et al., 1998; Temple et al., 2001)。近年のMRIの拡散テンソル画像を用いた白質の異常や走行線維の描出の検討から成人のディスレクシアにおいて左側頭-頭頂領域の白質の異常が存在することや (Steinbrink et al., 2008)、児童における検討でこの領域の信号低下と読みスキルと相関することが示されており (Deutsch et al., 2005)、この領域の神経発達の異常が音韻意識に影響する可能性が高い。

音韻意識の障害とは別にこれまでディスレクシアを対象とした多数の検討から、眼球運動、大細胞系視覚、高時間解像度を要する聴覚、Visual Word Form Area (紡錘状回が寄与する単語認知処理)、小脳などの神経生物学的な異常に由来する認知機能の偏りが読み障害に

寄与することが報告されてきた。こうした認知機能障害に関して、これら全てを包括的に計測している報告は無く、1つの認知領域に注目しディスレクシアのある者と対照群を比較するグループ研究が多いので、一人のディスレクシアのある者でこれらの認知機能障害の偏りがどの程度顕在化しているかは不明である。ディスレクシアの読み障害は音韻意識障害に限らない複数の認知機能障害が個人ごとで異なるパターンで発現しており、症候群を形成していると言える。

発達性ディスレクシアの臨床的背景にある基本障害を解明していく病態論研究は、新しいアセスメント法による診断への応用や新しい学習的介入の開発に貢献する。これら基本障害のあり方を包括的に評価出来るアセスメント法と、それに基づく個別の介入法が開発されることで、個人個人の認知特性に応じた介入が可能になる。現在発達性ディスレクシアで考えられている基本障害のうち、音韻意識や眼球運動、単語知覚などは直接的に読みスキルに寄与する認知機能であるが、視知覚や聴知覚レベルの処理についてはどのように読みスキルに影響しているか分かりにくい。本稿では、大細胞系視知覚と高時間分解能を要する聴知覚に関する発達性ディスレクシアにおける知見について俯瞰し、私達の検討、および学習的介入に貢献する認知神経科学的アプローチについて論じたい。

### 3. 大細胞系視知覚と読み能力の相関

視神経は網膜の神経節細胞から発し中継核である視床の外側膝状体に投射し、大半の線維が後頭葉の一次視覚野に投射する。視神経は大細胞系神経と小細胞系神経に分けられ、外側膝状体でそれぞれ層構造を成す。大細胞系神経は一次視覚野の4C $\alpha$ 層や4B層に投射し、小細胞系神経は4C $\beta$ 層に投射する。大細胞系神経に伝達される視覚情報は最終的に頭頂葉のMT野などに入力され、小細胞系神経に比べて伝達速度の速さと受容野の広さにより、高い時間分解能を要する処理（運動視や速度弁別に寄与）、低い空間解像度の処理（周辺視に寄与）に優れている（Kandel, Schwartz, & Jessell, 2000）。

発達性ディスレクシアではこうした大細胞系視知覚が低下しておりそれが読み困難に寄与すると考えられている（Stein & Walsh, 1997）。これまでの多くの研究では、大細胞系視知覚を評価する行動課題と各種読みスキルを評価しているものが多い。例えばWilmerらは、大細胞系視知覚を評価する課題として2種類の刺激の移動速度や移動方向の弁別、刺激コントラストの変化を検出させる課題、ランダムドット内に同期して移動するドットの方法を弁別させるコヒーレントモーション課題などを実施し、一連の読みスキルを評価する課題を実施した（Wilmer, Richardson, Chen, & Stein, 2004）。コヒーレントモーション課題で評価される運動視能力は、読みの速さ、正確さと高い相関があることを報告している。コヒーレントモーション課題に限らず、ディスレクシアを対象とした大細胞系視知覚を評価するために用いられる課題は数多くある。コントラスト感度や時間分解能、空間分解能を評価するために、刺激のコントラストや空間解像度を操作した刺激（ドット刺激や輝度がサイン波状に変化するグレーティング刺激を用いることが多い）を用いて、静止画像で呈示したり、動的に呈示したり、フリッカー課題のように点滅して呈示して弁別閾値を算出するものなどがある。

Boden and Giaschiは、視知覚課題と読みスキルとの相関を報告してきた先行研究に関して、具体的にどのように大細胞系視知覚が読みの認知処理過程に関与するかを詳細に述べているものが少ないと批判し、Morrisonの読み過程のモデルを踏まえて大細胞系視知覚の関与について、7つの仮説を立てて詳細に考察している (Boden & Giaschi, 2007; Morrison, 1984)。以下にBoden and Giaschiが提案する大細胞系視知覚と読みの認知過程における7つの仮説を要約する (Boden & Giaschi, 2007)。

第1の仮説。文字列の正確な視覚像を成立する過程。最適なコントラスト感度と空間解像度処理が必要になり、低いコントラスト感度と低い空間分解能の処理が困難なディスレクシアのある人では視覚像の成立に時間を要し注視時間 (視線の停留時間) が長くなり読み速度の低下に寄与する (De Luca, Spinelli, & Zoccolotti, 1996)。しかしながら、著者は一般的に接する文章の文字列は文字と背景のコントラストが高く、ディスレクシアで見られるコントラスト感度の低下は軽度であるので、この仮説だけで読み困難を十分に説明できないと述べている。

第2の仮説。単語の文字列に注意を定位する過程 (Position Encoding)。読字において単語を発見し系列的に注意を定位する必要があるが、大細胞系視知覚の障害があると注意を定位すべき文字列の同定に混乱が生じやすくなる。例えばCornelissenらは、文字列への注意の同定の困難さは、書かれていない文字を発音する誤り (letter errors) の増加として捉えられるとし、その誤答数とコヒーレントモーション課題と有意な相関があったことを報告している (Cornelissen et al., 1998)。

第3と第6の仮説。共に眼球運動の調節に関わる仮説であり、大細胞系視知覚による眼球運動の調節困難により、定位すべき文字列への視線のサッケードの開始が困難になる (第3の仮説) ことと、サッケードの抑制が低下し視覚像の成立が不鮮明になる (第6の仮説) ことに関連している。ディスレクシアにおける眼球運動の調節障害は数多く報告されており、例えば読字においてサッケード数が多い、停留時間が長い、左から右へ文章を読む場面に左方向へサッケードする頻度が高いなどの、不適切な眼球運動のパターンが報告されている (Lennerstrand, Ygge, & Jacobsson, 1993; Poblano, Cordoba de Caballero, Castillo, & Cortes, 1996; Rubino & Minden, 1973)。眼球運動のサッケードの調節にはMT/MST野を含む後頭-頭頂領域が関与することから、大細胞系視知覚が優位に関与すると考えられる (Fischer & Hartnegg, 2000; Stein, 2001)。他方で、Hawelka and Wimmerはディスレクシアで適切な眼球運動の調節に関わる視覚記憶課題と、代表的な大細胞系視知覚課題であるコヒーレントモーション課題との間に相関が見られなかったことを報告している (Hawelka & Wimmer, 2005)。大細胞系視知覚を必要としないと考えられる場面での眼球運動の調節の障害もディスレクシアで観察されることや (Elterman, Abel, Daroff, Dell'Osso, & Bornstein, 1980; Pavlidis, 1981)、読字時における眼球運動異常の出現頻度は高くないとする報告もあり、眼球運動の調節障害が大細胞系視知覚に由来するか、独立した障害であるかは不明である。

第4の仮説。中心視で捉えている視線を次の文字列へ転導する視空間的注意過程。中心視は中心窩で捉えた視覚像で詳細な視覚分析処理が行われるが、同時に傍中心視による情報 (parafoveal text; 中心窩周辺から入力される視覚情報) に基づいて次に視線を定位すべき位置を決定するために潜在的な視空間的注意が駆動される必要がある。潜在的な視空間的注意のシフトは、大細胞系神経を通して後頭-頭頂皮質 (posterior parietal cortex; PPC) において中心的に処理されることが知られている。視空間的な注意の定位や解放については、ディス

レクシアでは非言語的素材を用いた行動課題でも異常があり、読みスキルと相関することが知られている (Buchholz & Aimola Davies, 2005; Facoetti, Paganoni, Turatto, Marzola, & Mascetti, 2000)。

第5の仮説。文字列の認知において、傍中心視によって単語の最初と最後の文字や、単語の長さや形態的特徴を理解することで、中心視による情報と統合して効率的な文字認知を実現する過程 (Rayner, Inhoff, Morrison, Slowiaczek, & Bertera, 1981)。傍中心視から得られる視覚情報は空間解像度が低く、また効果的な読みの実現には高速な処理が必要となるために大細胞系視知覚が関与すると考えられる。この仮説によれば、中心視由来の情報は小細胞系で詳細に分析されるが、時間的には傍中心視による情報が小細胞系によって粗雑であってもより速く処理されることを示しており、大細胞系視知覚の高時間分解能処理の優位性が重要であることを示唆している。そして小細胞系視知覚と大細胞系視知覚の相対的処理速度がディスレクシアで異常である (つまり大細胞系による処理が遅い) ことを評価するために、メタコントラストマスキングを用いた課題について言及している。これは標的刺激の呈示後に空間的に近傍の位置にマスク刺激を呈示する状況で、SOA (stimulus-onset-asynchrony; 2つの刺激の時間間隔) が短い場合は標的刺激の認知が困難になる現象であり、大細胞系が物体視に関わる小細胞系視知覚を抑制するためであると考えられる。ディスレクシアでは通常発達児よりも大細胞系処理の相対的速度が遅いことが示されており、傍中心視、周辺視に対する大細胞系処理の優位性の低下に寄与すると考えられる (Edwards et al., 2004)。

第7の仮説。サッケードの途中において短時間保持されている視覚像を消去する過程。サッケードのたびに先の視覚像を消去 (表象の活性化の抑制) することで、注意を向けた新たな文字列の視覚像との重畳を防ぎ、正確に文字列を符号化する過程である。当初は大細胞系視知覚はサッケード中に活性化する一過性の神経細胞集団を抑制すると考えられていたが、後にそうではなくサッケード中は小細胞系視知覚は選択的に抑制され、大細胞系視知覚が促進されることが分かった。しかし、この仮説を支持する知見はなく、また詳細な検討が困難な仮説であるため、除外されるべきであると著者は述べている。

このように大細胞系視知覚は、音韻表象の想起までに至る各視覚情報処理過程に関わる可能性が高い。今後、Boden and Giaschiが考察したそれぞれの仮説に関する詳細な検討や、複数の過程が障害されているのか、特定の過程だけが障害されているかについての検討が望まれる。

他方で、ディスレクシアの視知覚の低下は必ずしも大細胞系視知覚だけによらないという指摘もある。このことについて本稿では詳しく紹介しないが、最近Skottunは小細胞系神経や第3の神経系である顆粒細胞系神経 (koniocellular系) もMT野へ視覚情報が入力されることから、運動視に寄与する可能性があることを指摘している (Nassi, Lyon, & Callaway, 2006; Skottun & Skoyles, 2010)。さらに、顆粒細胞系神経は外側膝状体から直接MT野に投射しており、光の吸光度の違いによる三種類の網膜錐体細胞 (L-cone, M-cone, S-cone) の中のL-cone, M-coneの顆粒細胞系神経への入力割合がMT野での運動知覚に影響する可能性があることも指摘している (Sincich, Park, Wohlgenuth, & Horton, 2004)。結論として大細胞系視知覚と小細胞系視知覚の能力を区別するためにコントラスト感度を評価する課題を加えるべきであると指摘している。

#### 4. 大細胞系視知覚障害の神経生理学的知見

大細胞系視知覚の障害について行動課題だけでなく、脳波の誘発電位・事象関連電位や脳磁図、fMRIを用いた報告も多い。例えば、大細胞系視知覚が優位になる低コントラストで、高速に反転するチェッカーボードパターン刺激に対して誘発されるsteady-stateの視覚誘発電位が、ディスレクシアでは低下する。他方、高コントラストで反転速度が遅い条件では、通常発達者と変わらなかったことが報告されている (Galaburda & Livingstone, 1993; Livingstone, Rosen, Drislane, & Galaburda, 1991)。グレーティング刺激を動的に呈示した際の脳磁図の事象関連磁界では、MT野の反応はディスレクシアのある人と通常発達者と変わらない反応であったが、反応の潜時が遅延していた (Vanni, Uusitalo, Kiesila, & Hari, 1997)。ドット刺激を用いた運動視課題やコントラスト、空間解像度を操作したグレーティング刺激を用いた課題の遂行時のfMRIでも、MT野を含む頭頂領域や一次視覚野などがディスレクシアで低下していた (Demb, Boynton, & Heeger, 1997, 1998; Eden, VanMeter, Rumsey, & Zeffiro, 1996)。

このように様々な大細胞系視知覚が優位となる視知覚課題において、複数の神経活動の計測からディスレクシアで異常が存在することは明かである。大細胞系視知覚障害の解剖学的基盤として、MT/MST野を含む上頭頂領域の白質や形態の異常に関する報告はない。他方で、大細胞系視神経が中継核を形成する外側膝状体における大細胞層、小細胞層から神経細胞数を計測した剖検脳の報告がある。大細胞層は通常発達者群に比べて平均して27%減少していたが、小細胞層は変わらなかった (Livingstone et al., 1991)。興味深いことに同じ対象者を用いた聴神経の中継核である内側膝状体の層構造の神経細胞数を計測した検討では、通常発達者で見られる左内側膝状体で細胞数が多いという非対称性がディスレクシアのある者では見られず、さらにディスレクシア群では左内側膝状体の細胞数が減少していることが分かった (Galaburda, Menard, & Rosen, 1994)。聴神経においても視神経と類似して大細胞神経と小細胞神経があり内側膝状体でそれぞれ層構造を成していることが知られている (Gazzaniga, 1995)。また、MRIの高解像度のプロトン密度強調画像を用いた若年成人の発達性ディスレクシア群の外側膝状体の体積を計測した最近の報告によると、IQと年齢を一致させた対照群よりも左外側膝状体の体積が有意に小さいことが示された (Giraldo-Chica, Hegarty, & Schneider, 2015)。画像研究では大細胞神経層と小細胞神経細胞層を区別出来ないが、死後脳研究を踏まえると大細胞神経層に特異的に、定型発達者と同程度に細胞数が上昇しないと言えるだろう。

#### 5. 高時間分解能を要する聴知覚と読み能力

音韻意識は文字列の書記素に対応する音韻表象を想起する過程であるが、正確で流暢な読みの実現には、言語音が適切に符号化され長期記憶として学習されていなければいけない。ディスレクシアにおける読み困難には言語音の音声知覚の障害があり、それが適切な音韻表象の形成、学習を阻害する要因である可能性があり、これまで多くの検討がなされてきた。特にディ

スレクシアの音声知覚の特徴として、高速で呈示される音声の知覚や短時間の音声刺激の音響的特徴の符号化が困難であることが挙げられている (Farmer & Klein, 1995)。このような高時間分解能を要する聴覚がディスレクシアで低下していることを最初に明示的に報告した Tallalらは、2つの異なる聴覚刺激 (100 Hzと305 Hzで、それぞれ持続時間は75 ms) をペアとして呈示し、刺激間間隔を多段階で操作し、実験参加者に音声の異同の有無や呈示順序を答えさせる課題を行った (Tallal, 1980)。ディスレクシアのある人では刺激間間隔が短い場合 (305 ms以下) では2つの聴覚刺激の弁別が困難である結果であった。

他方で、短時間の音声刺激の音響的特徴の符号化に関する行動課題ではフォルマント遷移の検出が困難であるなどの報告がある (Reed, 1989)。さらに非言語音を用いて、神経生理学的指標として脳磁図を用いた興味深い報告がある。Renvallらは、短時間で音響的特徴が変化する刺激としてホワイトノイズと矩形波が連続する音声刺激を用いて聴覚刺激呈示時の聴覚誘発磁界を計測した (Renvall & Hari, 2002)。刺激はホワイトノイズの持続時間が0, 50, 100, 200 msの4種類でその後に400 msの矩形波 (250 Hz) が呈示された。通常発達者ではホワイトノイズの立ち上がりに対して約100 ms後に聴覚誘発反応であるN100m成分 (両側の聴覚皮質を起源とする成分) が惹起し、さらに矩形波の立ち上がりに対してもN100m'成分が惹起した。N100m'成分はホワイトノイズの持続時間が長いほど振幅が増大したが、ディスレクシアのある人ではどの持続時間でも減少していた。このことからディスレクシアにおいては、短時間での音響的特徴の変化の符号化に関わる聴覚野の応答が低下していると考えられた。著者らはこの結果について、大細胞系聴神経は視神経と機能的に類似して分化し、高速の音声知覚の低下に寄与する可能性がある」と論じている。

## 6. 大細胞系視知覚と聴知覚の関連

ディスレクシアで観察される大細胞系視知覚や聴知覚の障害は共に時間的処理の低下として捉えられることから、視覚、聴覚を超えた一般的な時間的処理の障害が存在するという仮説がある (Farmer & Klein, 1995)。前述した同一のディスレクシアのある人の死後脳の外側膝状体と内側膝状体の細胞数が減少していたという神経解剖学的知見から、共通の病因により視神経、聴神経の神経発達の偏奇が生じ、それが各感覚モダリティにおける軽度の認知機能障害に寄与する可能性がある。このことを検討する方法として、例えば大細胞系視知覚課題と聴知覚課題を同一実験参加者で評価し、関連性を分析することが考えられる。しかしながら現在のところ、大細胞系視知覚と聴知覚の関連を検討した報告は少なく、結果は一致していない。Ingelghemらはノイズ音に無音のgapを挿入した刺激の弁別課題と、短いISIで連続するフラッシュ刺激を弁別させる課題を行い、両課題ともディスレクシアのある者で低下することを報告している (Van Ingelghem et al., 2001)。この報告では両課題間の相関については報告していない。またWittonらは周波数変調刺激を用いた聴覚弁別課題とコヒーレントモーション課題を計測し、ディスレクシア群でも通常発達者群でも両課題間で高い相関があったことを報告している (Witton et al., 1998)。しかしながら、Edwardsらはコヒーレントモーション課題を含めた2つの大細胞系視知覚課題と周波数変調刺激を用いた2つの聴知覚課題を行い、



ディスレクシア群での成績低下を認めたが、視知覚課題と聴知覚課題間では有意な相関を認めなかった (Edwards et al., 2004)。

時間的処理の障害を感覚処理の時間分解能として、すなわち単位時間あたりの感覚表象の符号化 (低次の特徴分析) と知覚経験を成立させる能力と捉えるならば、これらの先行研究で用いている課題は高い時間分解能処理を要する過程の他にも様々な認知処理で課題を遂行できてしまう要素がある。例えば、コヒーレントモーション課題は、凝視点を注視して画面全体的に把握するように見ることが望まれるが、局所的な注意によって光点を走査すればランダムドットと一定速度で移動する光点を弁別できるため、何らかのトップダウン的な方略による課題成績への影響が排除できない。より時間分解能能力に特化した課題を用いた検討が望まれる。これまでの大細胞系視知覚に関する研究では、Ternus illusionを用いた視覚課題、聴知覚では Auditory stream segregation課題が適切な課題と考えられる。それぞれディスレクシアを対象とした検討もなされており、以下に紹介する。

Ternus illusion課題は、コントラスト感度や空間解像度に関わりなく大細胞系視知覚の時間解像度を評価することに優れていると考えられる。Ternus illusion課題は、図1に示すように、例えば正方形3つが狭い間隔で並んでいる静止画 (フレーム1) と、同じ3つの正方形が並んでいるが1個分右側にずらした静止画 (フレーム2) が交互に呈示される。2つの図形が反復して呈示されるが、フレーム間には背景色と同じブランクが挿入される。その持続時間 (ISI) が長い場合 (50 ms以上) には、1フレーム目と2フレーム目の3つの正方形は1つのゲシュタルトとして知覚され、フレームの変化によって左右交互に移動する仮現運動として感じられる (group motion)。ISIが短い場合 (50 ms以下) には、素早くフレームが変化して3つある図形の両端 (1フレーム目の左の図形と2フレーム目の右の図形) が素早く点滅するように感じられ、1つのゲシュタルトとして感じられなくなる (element motion)。このようにgroup motionとelement motionの知覚が交替するISIは、時間分解能に関わる大細胞系視知覚の測度となり得る。Cestnick and Coltheartらの報告では通常発達と表層ディスレクシアが類似する結果となり、音韻ディスレクシアではgroup motionとelement motionの弁別閾値のISIが延長せず、長いISI条件でもelement motionに見える頻度が高いという非典型的な結果が得られた (Cestnick & Coltheart, 1999)。この課題を用いた報告はその後みられないが、試行数を増やしgroup motionとelement motionの弁別がチャンスレベルになる閾値を算出するなどの手続きの修正で有用な検査課題になりうるであろう。

Auditory stream segregation課題はTernus illusion課題と構造的に類似する聴知覚課題である。図2に示すように、この課題では2つの異なる周波数の音声 (1000 Hzと400 Hzで持続時間が49 ms) が呈示され、SOAが長い場合は、2つの音声が入れ替わって1つの音系列に由来すると感じる (connected) が、SOAが短い場合は交互に交替するのではなく、2つの音系列が分離して併存しているように感じる (segregated)。1つの音系列に由来する感覚は、音声刺激が同じ音源に由来する場合に組織化されるバイアスによるもので、SOAが非常に短い場合は聴知覚処理が組織化された知覚に追いつかないことを意味する。その結果、音声刺激が2つの音系列に由来するよう感じられる。connected知覚とsegregated知覚はそれぞれ明確な聴覚経験であり、この経験がいずれにも感じられるような弁別がチャンスレベルになるSOAは、聴知覚の時間分解能の測度になりうる。Heleniusらの報告ではディスレクシアのある人では閾値となるSOAが延長しており、さらにSOAと読み速度と有意な相関が認めら

れた (Helenius, Uutela, & Hari, 1999)。

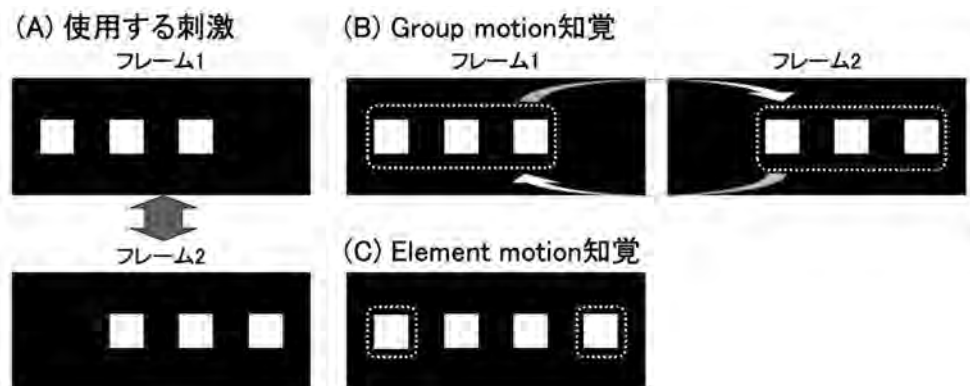


図1 Ternus illusion課題の概要

(A) 3つの正方形を配置したフレームが2枚、交互に呈示される。刺激間隔 (ISI) を操作することで知覚体験が異なる。(B) ISIが長い場合は3つの正方形が1つのゲシュタルトとして、左右に仮現運動するように知覚される。(C) ISIが短い場合には中央の2つの図形が持続的に存在し、両端の正方形が交互に点滅して感じられる。

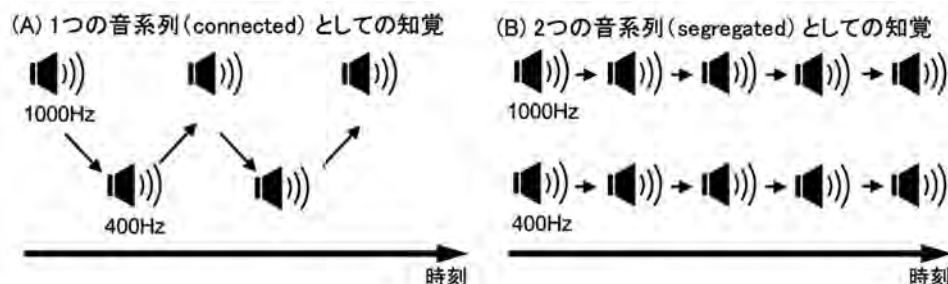


図2 Auditory stream segregation課題の概要

(A) 異なる2つの周波数の聴覚刺激が長い試行間隔 (ISI) で呈示されると、1つの音系列に由来すると知覚される (connectedな知覚)。(B) ISIが短いと2つの聴覚刺激が交互ではなくほぼ同時に呈示されているように感じられ、2つの音系列が存在するように知覚される (segregatedな知覚)。

## 7. 成人定型発達者を対象とした我々の検討

前節までに述べた知見を踏まえると、発達性ディスレクシアでは神経発達に関わる要因により、大細胞系視神経、聴神経の線維形成不良が生じ、それが大細胞系視知覚や聴知覚の偏倚に

寄与し、種々の読字処理過程に影響すると言える。我々は、発達性ディスレクシアでは共通する要因により視神経と聴神経の神経発達障害が生じ、視知覚、聴知覚においてより低次の処理である高速で連続的に呈示される刺激の時間的処理能力の異常が存在するのではないかと考えた。そこでAuditory stream segregation課題とTernus illusion課題で評価される視知覚、聴知覚処理能力を同一の被験者で計測し、相関の有無を検討した。当初は発達性ディスレクシアのある児童・成人と、対照群として定型発達児・成人を対象としていたが、研究期間中に十分な例数の発達性ディスレクシアのある児童・成人と定型発達児をリクルートすることが困難であったので定型発達成人16名を対象とした検討を報告する。市内専門学校生16名（女性5名、男性11名）、平均年齢21.4歳（標準偏差4.6）が研究に参加した。心理物理課題はTernus illusion課題、Auditory stream segregation課題、その他Coherent motion課題などの心理物理課題を実施したが詳細は割愛する。Ternus illusion課題はColtheartらの手続きを修正し、課題の最初はISIを十分に長くし、明確にgroup motionとして知覚される条件（3つの正方形がゲシュタルトとして左右に移動するように知覚される）から開始した。そしてどのように知覚されたかをボタン押し反応させ、group motionであると判断した場合は次試行ではISIを短縮し、element motionであると判断した場合（両端の正方形が点滅するように知覚される）は、ISIを延長するという、階段法の手続きでgroup motionとelement motionの知覚が交替する閾値の潜時を評価した。

Auditory stream segregation課題はHeleniusらの手続きと全く同じ課題を再現した。両課題とも最初は高時間分解能処理を要さない明確な知覚経験を生じさせる条件からスタートし、ISIが短縮するにつれて刺激の切り替えが高速になり、感覚表象のゲシュタルト化が困難になり知覚経験が変容するという課題構造に揃えた。図1に結果例として、参加者1例の両課題における試行の進行によるISIの変化について示した。この被験者の場合は、先行研究の定型発達者群と、知覚経験が交代する試行間間隔が類似していた（Ternus illusion課題では55.0 ms, Auditory stream segregation課題では79.0 ms）。

読みスキルとしては平仮名RAN (Rapid Automatized Naming) 課題、単語音読課題、音節削除課題、スプーナリズム課題などを行った。その他、将来的に発達性ディスレクシアのある者と比較検討を行う際の統制すべき要因として知能指数(WAIS-IIIの簡易版)や作業記憶(語音整列課題、視空間作業記憶課題)、発達障害・学習障害の既往の有無(LDI-R)なども評価した。

結果について、平仮名RAN課題の15秒間の音読文字数を従属変数とし、Auditory stream segregation課題とTernus illusion課題の知覚交代が生じるISIの潜時を独立変数とした重回帰分析では、Ternus illusion課題のISIが有意に平仮名RAN課題の成績を予測した ( $R^2=.277$ ,  $p<.05$ )。Auditory stream segregation課題とTernus illusion課題の相関について、それぞれの課題のISIについてPearsonの相関係数を算出したところ、有意な相関は見られなかった ( $r=.282$ ,  $p>.05$ )。

これらの結果から、高時間分解能を要する大細胞系視知覚と聴知覚処理は互いに関連しない独立した神経基盤に由来する知覚処理であることが示された。また先行研究とは手続きを改変したTernus illusion課題で評価される視知覚機能は成人の定型発達者群でも読みスキルを予測することから、発達性ディスレクシアのある者の評価に有用であると言える。

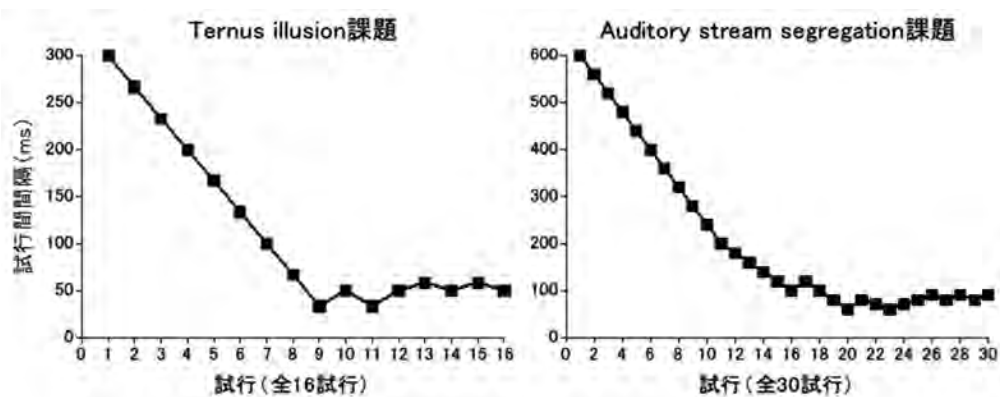


図3 Auditory stream segregation課題の概要

(A) 異なる2つの周波数の聴覚刺激が長い試行間隔 (ISI) で表示されると、1つの音系列に由来すると知覚される (connectedな知覚)。 (B) ISIが短いと2つの聴覚刺激が交互ではなくほぼ同時に呈示されているように感じられ、2つの音系列が存在するように知覚される (segregatedな知覚)。

## 8. 今後の展望

本稿で述べたように視知覚、聴知覚について高時間分解能処理という基礎的な知覚処理を軸として、学習場面での読み能力や、実験室場面で用いられる読み書き能力と関連する各種行動課題との成績との関連を検討することは有用であるといえる。また、こうした基礎的な知覚処理は、視床に投射する聴神経、視神経の神経核の構造と関連する可能性があることから、形態画像研究や遺伝学的研究にも応用することが期待される。形態画像研究では定型発達者で見られる言語優位半球の言語関連領域での灰白質体積の増大、つまり左右非対称性が発達性ディスレクシアでは対称的である可能性が指摘されており、そうした神経構造の発達が臨床的に観察される認知機能に直接的に寄与するか検討する際に、基礎的な知覚処理能力を評価することは有用であろう。

こうした検討を経て、大細胞系視知覚や高時間分解能を要する聴知覚処理の機能を高めるような知覚機能に特化した認知機能訓練の開発、そしてその効果測定の研究が望まれるだろう。私達の発達性ディスレクシアに関する検討は本稿で述べた方向性で継続中であるが最終的には、学習場面において実際の教材を用いた読み能力の学習支援を行いながらも、視知覚・聴知覚機能を向上させる認知機能訓練を併せて行うことで、相加的ではなく、相乗作用による一層の読み能力の向上が期待される認知神経科学的な介入を提案したいと考えている。

## 文献

- Boden, C., & Giaschi, D. (2007). M-stream deficits and reading-related visual processes in developmental dyslexia. *Psychol Bull*, *133*(2), 346–366. doi: 10.1037/0033-2909.133.2.346
- Buchholz, J., & Aimola Davies, A. (2005). Adults with dyslexia demonstrate space-based and object-based covert attention deficits: shifting attention to the periphery and shifting attention between objects in the left visual field. *Brain Cogn*, *57*(1), 30–34. doi: 10.1016/j.bandc.2004.08.017
- Cestnick, L., & Coltheart, M. (1999). The relationship between language-processing and visual-processing deficits in developmental dyslexia. *Cognition*, *71*(3), 231–255.
- Cornelissen, P. L., Hansen, P. C., Gilchrist, I., Cormack, F., Essex, J., & Frankish, C. (1998). Coherent motion detection and letter position encoding. *Vision Res*, *38*(14), 2181–2191.
- De Luca, M., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (1996). Eye movement patterns in reading as a function of visual field defects and contrast sensitivity loss. *Cortex*, *32*(3), 491–502.
- Demb, J. B., Boynton, G. M., & Heeger, D. J. (1997). Brain activity in visual cortex predicts individual differences in reading performance. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *94*(24), 13363–13366.
- Demb, J. B., Boynton, G. M., & Heeger, D. J. (1998). Functional magnetic resonance imaging of early visual pathways in dyslexia. *J Neurosci*, *18*(17), 6939–6951.
- Deutsch, G. K., Dougherty, R. F., Bammer, R., Siok, W. T., Gabrieli, J. D., & Wandell, B. (2005). Children’s reading performance is correlated with white matter structure measured by diffusion tensor imaging. *Cortex*, *41*(3), 354–363.
- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M., & Zeffiro, T. A. (1996). The visual deficit theory of developmental dyslexia. *Neuroimage*, *4*(3 Pt 3), S108–117. doi: 10.1006/nimg.1996.0061
- Edwards, V. T., Giaschi, D. E., Dougherty, R. F., Edgell, D., Bjornson, B. H., Lyons, C., & Douglas, R. M. (2004). Psychophysical indexes of temporal processing abnormalities in children with developmental dyslexia. *Dev Neuropsychol*, *25*(3), 321–354. doi: 10.1207/s15326942dn2503\_5
- Elterman, R. D., Abel, L. A., Daroff, R. B., Dell’Osso, L. F., & Bornstein, J. L. (1980). Eye movement patterns in dyslexic children. *J Learn Disabil*, *13*(1), 16–21.
- Facoetti, A., Paganoni, P., Turatto, M., Marzola, V., & Mascetti, G. G. (2000). Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex*, *36*(1), 109–123.
- Farmer, M. E., & Klein, R. M. (1995). The evidence for a temporal processing deficit linked to dyslexia: A review. *Psychon Bull Rev*, *2*(4), 460–493. doi: 10.3758/BF03210983
- Fischer, B., & Hartnegg, K. (2000). Stability of gaze control in dyslexia. *Strabismus*, *8*(2), 119–122.
- Gabrieli, J. D. (2009). Dyslexia: a new synergy between education and cognitive neuroscience. *Science*, *325*(5938), 280–283.
- Galaburda, A., & Livingstone, M. (1993). Evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Ann N Y Acad Sci*, *682*, 70–82.
- Galaburda, A. M., Menard, M. T., & Rosen, G. D. (1994). Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *91*(17), 8010–8013.
- Gazzaniga, M. S. (1995). *The cognitive neurosciences*: MIT Press.
- Giraldo-Chica, M., Hegarty, J. P., 2nd, & Schneider, K. A. (2015). Morphological differences in the lateral geniculate nucleus associated with dyslexia. *Neuroimage Clin*, *7*, 830–836. doi: 10.1016/

j.nicl.2015.03.011

- Hawelka, S., & Wimmer, H. (2005). Impaired visual processing of multi-element arrays is associated with increased number of eye movements in dyslexic reading. *Vision Res*, *45*(7), 855–863. doi: 10.1016/j.visres.2004.10.007
- Helenius, P., Uutela, K., & Hari, R. (1999). Auditory stream segregation in dyslexic adults. *Brain*, *122* (Pt 5), 907–913.
- Kandel, E., Schwartz, J., & Jessell, T. (2000). *Principles of Neural Science*: McGraw-Hill Medical.
- Lennerstrand, G., Ygge, J., & Jacobsson, C. (1993). Control of binocular eye movements in normals and dyslexics. *Ann NY Acad Sci*, *682*, 231–239.
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *88*(18), 7943–7947.
- Morrison, R. E. (1984). Manipulation of stimulus onset delay in reading: evidence for parallel programming of saccades. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *10*(5), 667–682.
- Nassi, J. J., Lyon, D. C., & Callaway, E. M. (2006). The parvocellular LGN provides a robust disynaptic input to the visual motion area MT. *Neuron*, *50*(2), 319–327. doi: 10.1016/j.neuron.2006.03.019
- Pavlidis, G. T. (1981). Do eye movements hold the key to dyslexia? *Neuropsychologia*, *19*(1), 57–64.
- Poblano, A., Cordoba de Caballero, B., Castillo, I., & Cortes, V. (1996). Electro-oculographic recordings reveal reading deficiencies in learning disabled children. *Arch Med Res*, *27*(4), 509–512.
- Rayner, K., Inhoff, A. W., Morrison, R. E., Slowiaczek, M. L., & Bertera, J. H. (1981). Masking of foveal and parafoveal vision during eye fixations in reading. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *7*(1), 167–179.
- Reed, M. A. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *J Exp Child Psychol*, *48*(2), 270–292.
- Renvall, H., & Hari, R. (2002). Auditory cortical responses to speech-like stimuli in dyslexic adults. *J Cogn Neurosci*, *14*(5), 757–768. doi: 10.1162/08989290260138654
- Rubino, C. A., & Minden, H. A. (1973). An analysis of eye-movements in children with a reading disability. *Cortex*, *9*(2), 217–220.
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W. E., . . . Gore, J. C. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *95*(5), 2636–2641.
- Sincich, L. C., Park, K. F., Wohlgemuth, M. J., & Horton, J. C. (2004). Bypassing V1: a direct geniculate input to area MT. *Nat Neurosci*, *7*(10), 1123–1128. doi: 10.1038/nm1318
- Skottun, B. C., & Skoyles, J. R. (2010). L- and M-cone ratios and magnocellular sensitivity in reading. *Int J Neurosci*, *120*(4), 241–244. doi: 10.3109/00207450903320313
- Stein, J. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, *7*(1), 12–36. doi: 10.1002/dys.186
- Stein, J., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia.

- Trends Neurosci*, 20(4), 147-152.
- Steinbrink, C., Vogt, K., Kastrup, A., Muller, H. P., Juengling, F. D., Kassubek, J., & Riecker, A. (2008). The contribution of white and gray matter differences to developmental dyslexia: insights from DTI and VBM at 3.0 T. *Neuropsychologia*, 46(13), 3170-3178. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2008.07.015
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain Lang*, 9(2), 182-198.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Salidis, J., Deutsch, G. K., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D. (2001). Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: an fMRI study. *Neuroreport*, 12(2), 299-307.
- Van Ingelghem, M., van Wieringen, A., Wouters, J., Vandebussche, E., Onghena, P., & Ghesquiere, P. (2001). Psychophysical evidence for a general temporal processing deficit in children with dyslexia. *Neuroreport*, 12(16), 3603-3607.
- Vanni, S., Uusitalo, M. A., Kiesila, P., & Hari, R. (1997). Visual motion activates V5 in dyslexics. *Neuroreport*, 8(8), 1939-1942.
- Wilmer, J. B., Richardson, A. J., Chen, Y., & Stein, J. F. (2004). Two visual motion processing deficits in developmental dyslexia associated with different reading skills deficits. *J Cogn Neurosci*, 16(4), 528-540. doi: 10.1162/089892904323057272
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., . . . Green, G. G. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Curr Biol*, 8(14), 791-797.
- マーガレット, J., スノウリング, 加藤醇子, & 宇野彰. (2008). *ディスレクシア 読み書きのLD 親と専門家のためのガイド*: 東京書籍.
- 宇野彰, 春原則子, 金子真, & Wydell, T. N. (2006). *小学生の読み書きスクリーニング検査—発達性読み書き障害 (発達性dyslexia) 検出のために*: インテルナ出版.
- 高橋三郎, 染矢俊幸, & 大野裕. (2003). *DSM - IV - TR 精神疾患の診断・統計マニュアル*: 医学書院.
- 笹沼澄子 (編). (2007). *発達期言語コミュニケーション障害の新しい視点と介入理論*: 医学書院.

# Cognitive neuroscience approach to developmental dyslexia: Contribution of magnocellular visual pathway and auditory perception

Atsuhito TOYOMAKI

## Abstract

Developmental dyslexia is one of learning disabilities of reading, spelling and/or writing, but is not an intellectual disability. Although phonological awareness has been thought to be as core deficit of dyslexia, many previous findings implicate that magnocellular visual pathway, some kind of auditory perception, visual word perception and working memory also contribute to difficulty for reading specifically. How these fundamental deficits affect reading skills respectively have been unclear. To investigate neuropsychological processes contributes to develop new approaches to improve difficulty for reading. In this review I presented findings of dysfunction associated with magnocellular visual pathway and auditory perception and discussed detailed cognitive processes in developmental dyslexia.