

学習障害の脳科学に関する近年の知見

中井智也

東京大学大学院総合文化研究科

概要：近年、脳科学を教育に応用する神経教育学 (Neuroeducation) という概念が提唱されている。学習障害は、全般的な知能には問題はないが、特定の認知機能、特に読み書きと計算に著しい困難をもつ発達障害であり、その根底には中枢神経系の機能異常があることが想定されてきた。近年活発になった神経イメージング技術により、従来知られていなかった学習障害の神経学的基盤が明らかになってきた。読み書き障害は左半球の紡錘状回の異常と関連があり、他方計算障害は両半球の下頭頂小葉の異常との関連が報告されている。どちらの学習障害に関しても、数週間のトレーニングにより成績改善が見られ、対応脳領域の異常が減少することが報告されている。今後学習障害の支援強化のため、より一層の教育現場、研究機関、医療機関での連携が望まれる。

キーワード：脳科学；神経教育学；学習障害；発達障害

A review of the recent brain science studies on learning disability

Tomoya Nakai

Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

Abstract: *Learning disability (LD) is a developmental disability in which specific cognitive skills such as writing/reading or calculation are disturbed, while general intelligence is intact. It has been considered that LD is a consequence of functional abnormality in the central nervous system. Recent neuroimaging researches have shown that dyslexia is associated with the disturbance of the left fusiform gyrus, while dyscalculia is related to the bilateral inferior parietal lobule.*

Furthermore, recent studies showed that the several-weeks cognitive training enhanced the scores of dyslexic and dyscalculic children, with the modulation of corresponding brain regions. To construct better support systems of LD, future cooperation of educators, research institutes, and medical institutes is necessary.

Keywords: *Brain Science; Neuroeducation; Learning disability; Developmental disability*

1. 導入

21世紀は「脳の世紀」であるといわれているが、脳科学／神経科学の応用が最も期待される領域の一つが教育であり、文部科学省も2002年に「脳科学と教育」の検討会を設置するなど、多くの教育関係者が脳科学に注目していることがうかがわれる(文部科学省, 2002)。神経科学の目覚ましい発展により、神経経済学 (Neuroeconomics) や神経倫理学 (Neuroethics) など多くの境界領域に神経科学の応用が試みられているが、教育学においても、神経教育学 (Neuroeducation) という概念が提唱されている (Carew & Magsamen, 2010)¹。このような脳科学の教育学への応用として挙げられるのが、脳科学的データに基づいた学習障害・発達障害児の早期発見である。

発達障害者支援法によれば、発達障害とは「自閉症、アスペルガー症候群その他の広汎性発達障害、学習障害、注意欠陥多動性障害その他これに類する脳機能の障害であつてその症状が通常低年齢において発現するものとして政令で定めるもの」と定義される。すなわち発達障害は学習障害だけでなくアスペルガー症候群 (もしくは高機能自閉症) や注意欠陥多動性障害 (attention deficit hyperactivity disorder, ADHD) を含む上位概念であるが、一般的にはこれら概念間の関係は明確に区別されておらず、また、医学の分野においても自閉症や ADHD と比べて学習障害に関する知見は多くない。しかしながら、学習障害は義務教育課程のみならず、その後の人生全般に対する困難さをもたらす可能性があり、基礎研究も含めより一層の理解が必要な障害である。

これら発達障害に共通する特徴として、それらが脳機能の障害であるということが明示されていることは重要である。それらが脳機能の障害であるならば、それら障害の機序の理解および支援において、脳科学が本質的な役割を果たすことになるからである。本論考では発達障害の中でも特に学習障害に焦点を当てる。まず学習障害の定義を述べ、それが中枢神経系すなわち脳に器質的原因が求められていることを確認する。続いて脳機能を測定するための神経イメージング技術を概説し、それら最新技術によって明らかになった学習障害の神経科学的機序を、読み書き障害と計算障害それぞれに関して紹介する。その上で今後の日本における学習障害児の教育・研究に関する提言を行う。

2. 学習障害の定義と頻度

文部科学省によれば、学習障害 (Learning Disability, LD) とは「基本的には、全般的な知的発達に遅れはないが、聞く、話す、読む、書く、計算する、推論するなどの特定の能力の習得と使用に著しい困難を示す、様々な障害を指すものである。」と定義されている (文部科学省, 1999)。学習障害という用語自体は1962年に Kirk によって提唱されたものであるが (Kirk, 1962)、この文部科学省の定義は基本的に Kirk が定義した内容を踏襲している。学習障害は他の発達障害等と併発することが多いが、特定の認知能力のみが困難を示すという点が基本になっており、全般的な知的能力に影響が見られる知的障害や、身体の器質的原因が明らかであるような視覚障害、聴覚障害とは区別される。

このような定義は、世界的に利用されている精神障害の診断と統計マニュアル (Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, DSM-V) における名称にも表れている (American Psychiatric Association, 2013)。DSM-IV では学習障害 (Learning Disability) と

¹ただし、このような表現は2つの異なる意味で用いられることに注意が必要である。例えば神経倫理学は、神経科学の倫理 (ethics of neuroscience) と倫理の神経科学 (neuroscience of ethics) という使われ方をする。同様に神経教育学も、神経科学の知見に関する教育という意味と、教育学への神経科学の応用という意味で用いられる。本稿では、主に後者の意味で神経教育学という語を用いる。

されていたものが、DSM-V では限局性学習症 (Specific Learning Disorder) と改称された。DSM-V によれば、限局性学習症は読み書き、意味理解、綴字、書字表出 (文法等)、数概念および計算、数学的推論のいずれかに困難を持ち、それが 6 か月以上継続しているものとされる。また、その困難さは知的障害、視力または聴力、他の精神または神経疾患、心理社会的逆境等の環境要因では説明されないとされる点でも文部科学省の定義と大方一致する。一方、世界保健機構の国際疾病分類 (International Classification of Diseases, ICD-10) によれば、学習障害に対応する項目は学習能力の特異的発達障害 (Specific Developmental Disorders of Scholastic Skills) であり、限局性の障害であることが強調されている (World Health Organization, 2016)。その内容は特異的読字障害、特異的書字障害、算数能力の特異的障害、学習能力の混合性障害、その他の学習能力発達障害からなり、また学習機会の欠如や全般的な知的障害の結果ではないという規定が含まれている。

上記のいずれの定義においても共通しているのは、主に想定されているのが読み書き障害と計算障害であることである。これは、読み書きや計算能力が現代社会で必須の基礎的な能力であり、どちらを欠いた場合でも、その後の学習や人生において重大な影響を受けうることを示している。

2002 年に文部科学省が小中学校の通常学級を対象に実施した質問紙調査によれば、知的発達に遅れはないものの、「学習面又は行動面で著しい困難を示す」生徒の割合が 6.3%、また「学習面で著しい困難を示す」生徒の割合は 4.5%であり、2012 年に実施された同じ質問紙を利用した調査では、前者は 6.5%であり、後者は 4.5%であったという (柘植, 2016)。行動面での困難は例えば ADHD や高機能自閉症の児童が含まれていると考えられるが、4~5%という数値は、おおむね他の国々で報告されている同種の調査における頻度と一致している。例えば米国では、読み書き障害は人口の 4~8%、計算障害は 3.5~6.5%と報告されている (Butterworth & Kovas, 2013)。しかしながら、文部科学省の調査は小中学校教員に対する質問紙調査という形で行われているため、回答者の主観的な判断が入り込む可能性を排除できず、今後のより詳細な調査が必要であると考えられる。

3. 神経イメージング技術の応用

従来、学習障害は児童の行動面によって規定されてきたが、現在の心理学および脳科学においては、行動に現れる異常は中枢神経系すなわち脳になんらかの器質的原因があることが想定されている。文部科学省の定義においても「学習障害は、その原因として、中枢神経系に何らかの機能障害があると推定される」とあるが (文部科学省, 1999)、具体的にどのような脳領域や脳機能が学習障害に関わっているかということは言及されていない。文部科学省による上記の定義付けがなされた 1999 年時点では学習障害の脳機能研究の報告はかなり少なかったが、その後神経イメージング研究により、学習障害を持つ児童の脳の特異的な性質が明らかになってきた。

一般的に、特定の脳領域に関わる認知機能を調査する手法は 2 種類ある。一つは神経心理学的手法であり、脳に損傷を受けた患者に対する一連の行動検査と、死後脳の解剖もしくは磁気共鳴画像法 (Magnetic resonance imaging, MRI) や Computed tomography (CT) による解剖学的画像とを組み合わせられて議論される。健常者に対しても、経頭蓋磁気刺激 (Transcranial magnetic stimulation, TMS) のように、外部から磁気刺激を与えることによって一時的に特定の脳領域の機能をノックアウトさせる手法もあり、これは疑似的な脳損傷の神経心理学的実験であると考えられる。もう一つは近年発達した神経イメージング技術を用いる手法である。神経イメージング技術の代表的なものは機能的磁気共鳴画像

法 (functional MRI)、陽電子断層撮像法 (positron emission tomography, PET)、脳波 (electroencephalography, EEG)、脳磁図 (magnetoencephalography, MEG)、近赤外線分光法もしくは光トポグラフィー (near - infrared spectroscopy, NIRS) であり、それぞれ空間分解能、時間分解能や装置の維持費用などに違いがある。

特に後者の神経イメージング技術は、被験者に対して大きな負担をかけることなく実施することが可能であり、発達障害や学習障害の鑑別に適している。非侵襲的な脳領域の同定という点で最も空間分解能に優れている手法は functional MRI である。これは脳活動に伴う血流変化を、血中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンによる信号強度の差として可視化する技術であり、何らかの心理学的課題実行に関わる脳領域を特定するために利用される。同じく MRI 装置を用いた手法として、拡散テンソル画像法 (Diffusion tensor imaging, DTI) や VBM (Voxel-based morphometry) があるが、前者は水分子の拡散による信号変化を利用し脳の神経線維を可視化する手法であり、後者は脳の解剖学的体積を測定する手法である。この技術を応用することで、特定の脳領域における活動のみならず、脳領域の解剖学的な変化や、異なる脳領域間のネットワークの結合の強さを調べるのが可能となった。MRI は大がかりな装置を必要とするため、MRI 撮像が実施できる施設はかなり限定される。その点では、NIRS や EEG は簡易的な神経イメージング技術として有用である。実際に、NIRS に関しては日本で先進医療としてうつ病などの診断に導入されているため (福田, 2012)、将来的には他の発達障害や学習障害にも適用できる可能性がある。

4. 読み書き障害の脳科学

以下、学習障害として主に想定されている読み書き障害および計算障害に関して、近年の脳科学研究を紹介する。発達性読み書き障害 (Developmental Dyslexia、以下単に読み書き障害と表記) は上述の学習障害の中でも、特に読み書き能力に著しい困難を示す障害であり、有名な米国俳優が自身の読み書き障害を告白したことで話題になった²。読み書き障害は言語機能の障害であるが、成人が脳損傷等によって後天的に言語機能に影響を受ける失語症 (aphasia) とは区別される。右利きの健常者においては、言語機能をつかさどる脳領域は脳の左半球に局限しており、特に下前頭回 (inferior frontal gyrus, ブローカ野)、角回を含む下頭頂小葉 (inferior parietal lobule)、上側頭回後部 (posterior superior temporal gyrus, ウェルニッケ野)、紡錘状回 (fugiform gyrus) などが中心的な役割をはたしているとされるが、読み書き障害においてはこれらの脳領域に機能的・解剖学的異常がある可能性が考えられる (図 1)^{3,4,5}。失語症の中でも、純粋失読 (pure alexia) は左半球側頭葉の損傷によって引き起こされることが知られている (藤田, 2015)。書字に関しては、純粋失書として左運動前野の Exner 書字中枢や、左半球下頭頂小葉の角回の損傷が原因であるということが主張されているが、読字ほど明確に領域が限定されているわけではないようである (藤田, 2015)。

読み書き障害を持つ子供においては、健常児と比べて側頭葉や頭頂葉の活動に低下がみられるという報告がある。Temple *et al.* (2001) では、文字綴り課題と文字マッチング課

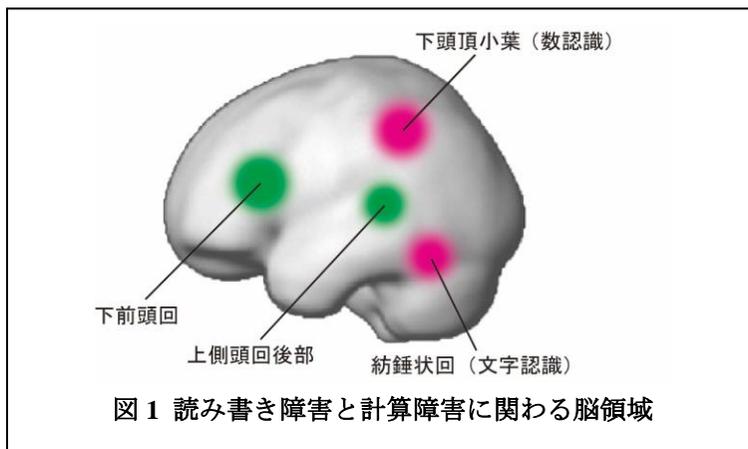
²日本語ではディスレクシア、読字障害といった用語が使用されることもある。

³画像は Statistical Parametric Mapping (SPM) 12 の標準脳テンプレートを基に作成した。

⁴下頭頂小葉を角回とは分けて記述する場合がある。また下頭頂小葉前部を縁上回 (supramarginal gyrus) と表記する場合もある。

⁵紡錘状回は後頭側頭回 (occipitotemporal gyrus) と表記されることもある。

題実行中の脳活動を fMRI で測定し、読み書き障害児は健常児と比べ、側頭頭頂領域の活動がみられないということを報告している。このような傾向は成人になってもみられる。Paulesu *et al.* (2001) では、フランス、イタリア、イギリスと、異なる言語を持つ三カ国で読み書き障害をもつ成人と健常者を比較したところ、読み書き障害をもつ成人では、単語を読みあげる際の左半球側頭領域における脳活動が言語の違いによらず健常者より有意に低下していた⁶。これらの研究で報告される脳領域には、一見一貫性がみられないように思われるが、その原因としては読み書き障害と認定する基準の違いや、読み書き障害にも文字認識の障害から、低次の視覚認知による障害と様々なレベルが混在していることが考えられる。失語症学においては、文字の音韻化過程には視覚的分析システム、視覚的単語形態システム、音韻システムという 3 つのシステムが想定されており (藤田, 2015)、読み書きの障害がこれらのどのレベルで生じているのかを見極めることが重要である。



28 本の読み書き障害者の神経イメージング論文に基づくメタ解析によれば、論文ごとに報告領域のばらつきはあるものの、最も読み書き障害に影響がある脳領域は左半球の紡錘状回に含まれる視覚的単語形態領域 (visual word form area, VWFA) であるという (Martin *et al.*, 2016)。この領域は、特に文字認識に関わるとされる領域である。Richlan *et al.* (2013) のメタ解析研究によれば、読み書き障害によって一貫して体積が減少していた領域は左半球の上側頭回後部であると報告されているものの⁷、引用されている先行研究の半数においては紡錘状回に灰白質体積の減少がみられており、同じ論文における読み書き障害児の脳活動に関するメタ解析では紡錘状回が共通領域であった。また、van der Mark *et al.* (2011) では、読み書き障害児では VWFA と他の言語関連領域との間の機能的結合性が全般的に弱いことが報告され、話す、聞くなど他の言語能力が文字認識に結びついていないことが考えられる。さらに、Krafnick *et al.* (2011) では、8 週間のトレーニング後に読み書き障害児の読解成績が上昇し、さらに左半球紡錘状回の灰白質体積が増

⁶2 群の直接比較では紡錘状回に活動はみられないが、健常者でのみ紡錘状回に活動があることから、側頭領域に隣接する紡錘状回にも群間での活動の差があると考えられる。

⁷論文中では上側頭溝と表記されている。

大していたという報告がなされている⁸。この結果は二重の意味で重要である。まず、介入によって読み書き障害児の読解力に明らかな改善が見られたことである。第二に、神経イメージング技術によって、介入の有効性が脳の器質レベルで証明されたことである。

文字は人類が約 5000 年前に発明したとされ、また 5000 年という期間は進化的な変化が起こりうる尺度としては短すぎるため、本来であれば文字の読み書きに特化した脳領域は存在しないはずである。しかしながら、Dehaene & Cohen (2007) の提唱している神経再利用仮説 (neuronal recycling hypothesis) によれば、本来別の役割を担ってきた脳領域が、新しい発明を利用することにより、それに特化した機能を新しく分有するようになったのだという。側頭葉内側部の紡錘状回は、物体や顔の認知に関わるとされる領域でもあり、読み書き障害児においては、外界からの経験に基づくこの領域の神経回路の再配置がうまく機能していないことが考えられる。

5. 計算障害の脳科学

発達性計算障害 (Developmental Dyscalculia, 以下単に計算障害と表記) は、主に数概念の理解や計算に著しい困難を示す障害である。成人においても、脳損傷を受けた患者は計算能力を部分的に失う場合があり、これは計算障害とは区別して失計算 (acalculia) と呼ばれる。

数の把握や計算能力に主に関わる脳領域は両半球の下頭頂小葉だと考えられている (図 1)⁹。健常者を対象とした fMRI は、下頭頂小葉に特定の個数に対応した脳活動パターンを報告している (Harvey *et al.*, 2013)。計算に関しても一貫して下頭頂小葉の活動が報告されるが、特に繰り上がりのある計算や代数など、より複雑な計算の実施には下前頭回と下頭頂小葉のネットワークが重要であることが示されている (Tsang *et al.*, 2009)。成人において、この頭頂小葉に損傷を受けた患者が、失計算を呈する例が報告されている。特に、足し算や掛け算のみ、もしくは引き算のみといったように、個別の演算子に特異的な障害がおこる事例があることは興味深く、計算能力が決して一枚岩ではないことを示している (Dehaene & Cohen, 1997)。

計算障害児は、健常児と比べて数をつかさどる頭頂葉の活動に異常が見られることが報告されている。通常、視覚的にドットパターンなどを連続呈示しそれを個数比較する場合、2 つのパターンの個数の差が小さいほど判断が難しくなり、また脳活動は増大する。これは「距離効果」と呼ばれているが、Price *et al.* (2007) は、計算障害の子供では個数比較をするときの頭頂小葉の活動に距離効果がみられないと報告している。ドットパターンを利用した数量比較は、明示的な数記号や四則演算などを使用しないため、就学前の児童にも適用でき、計算障害の早期発見に有用であると考えられる。さらに Mussolin *et al.* (2009) では、アラビア数字を用いた場合でも、距離効果による頭頂葉の活動変化が計算障害児では見られなかったという。

頭頂小葉の異常は解剖学的にもみられ、計算障害児では右半球頭頂小葉に含まれる灰白質体積が減少していたという報告がある (Rotzer *et al.*, 2008)。また、DTI によって白質神経線維を調べた研究では、右半球の側頭—頭頂葉のネットワークを支える神経線維の

⁸灰白質とは、脳において主に神経細胞の細胞体が集まっている領域を指す解剖学用語である。

⁹解剖学的には本来異なる領域であるが、下頭頂小葉に対応する領域を頭頂間溝 (intraparietal sulcus) と表記する場合もある。

異方性比率 (fractional anisotropy, FA) が計算障害児では有意に低下しており^{10,11}、またその値と計算課題成績が相関していることが報告された(Rykhlevskaia *et al.*, 2009)。さらに最近、Iuculano *et al.* (2015) は計算障害児に 8 週間のトレーニングを行い、その前後で脳活動を比較した。その結果、指導前には健常児と比べ全般的に活動が低かった脳活動が、指導後には健常児と有意差がみられないほどに改善された。この研究に関しても、神経イメージング技術によって介入の有効性が脳の器質レベルで証明された例として、神経教育学の大きな成果だと言えるだろう。

文字と同様に、数字も約 5000 年前に歴史に登場した。また、数字を利用した数式計算はさらに時代が発展した結果現在のよう形に整備されていったものである。したがって文字と同様に、その脳領域は神経再利用仮説が適用可能だと考えられるが、ドットパターンの比較というだけであれば、乳児や他の動物にも可能である。複雑な計算に下前頭回など前頭葉が関わるという先行研究を含めて考えると、前頭葉脳領域の異常によって、単純な個数把握では顕在化しないまでも、複雑な計算の実行に問題を抱える児童がいる可能性があり、今後の注意深い研究が必要だと考えられる。

6. 今後の学習障害研究の課題

本稿では、学習障害の定義や頻度を概観し、近年発展した神経イメージング技術を利用した学習障害児の研究を、読み書き障害、ついで計算障害に関して紹介した。他方、本稿では各学習障害に関する遺伝的影響に関しては議論してこなかった。双子によって学習障害に関する遺伝的要因を調べた研究では、計算障害に関しては遺伝要因が 47%、読み書き障害は 43% と報告されている (Butterworth & Kovas, 2013)。この結果は、特定の遺伝子座に原因が特定されるものではなく、環境要因もかなり大きいため、直接的に学習障害児の鑑別に役立つものではない。逆に言えば、脳に器質的な問題があり将来学習障害になる可能性がある児童に対しても、適切なケアを行うことにより健常者と同程度の読み書き・計算能力を得られる可能性を示唆している。実際に、神経イメージング技術は介入による成績向上が神経活動にも表れていることを明らかにしている (Iuculano *et al.*, 2015; Krafnick *et al.*, 2011)。

今後必要であることは、学校と病院、大学や研究所が共同して学習障害の調査にあたることである。これには、教員へのアンケートだけでなく、学習障害の可能性のある児童に対する専門医の診断および支援施設との連携、また研究所による学習障害児を対象とした心理学的・神経科学的研究が含まれる。研究所と教育現場との共同によって、これまで個々の教員が対処していた学習障害児の特徴を大規模にデータベース化することで、学習障害児の支援に関して有効な教育法の共有につながるという利点がある。学習障害児のトレーニングに関して、トレーニング前後での心理学・神経科学的検査結果を比較することにより¹²、トレーニングの効果に関して科学的な検証が可能となる。

一方で、現役の教員や、将来教員になる学生の学習障害リテラシーを上げることも必要である。学習障害児は全般的な知的能力に問題がなく、読み書きや計算など特定の認知能力に障害を持つという特徴があるが、そのような知識がなければ、学習障害児を全般的な知的能力が低い児童と誤って判断するか、またはその児童の努力不足を原因とし

¹⁰白質とは、脳において主に神経細胞間の神経線維が集まっている領域を指す解剖学用語である。

¹¹FA 値は神経線維の統合性指標であり、値が高いほど特定の方向に一樣に神経線維が伸びていることを示している。

¹²これには統制条件として異なるトレーニング法を適用する群も必要である。

てしまう可能性がある。学習障害に脳の器質的原因があるのであれば、必要なことはその障害に特化した適切なケアであり、読み書きや計算が出来ないことに対し本人の努力不足などを指摘しても仕方がない。また教員の学習障害リテラシー向上によって、文部科学省が行ってきたような教員に対するアンケート調査の精度が上がるのが期待される。特に計算障害に関しては、残念なことに日本では読み書き障害ほどには一般に注目されていないのが現状である¹³。計算障害が読み書き障害と同程度の頻度で発現することから、より重点的に対策がとられることが望まれる。

参考文献

- American Psychiatric Association: 'Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Fifth edition', American Psychiatric Publishing (2013)
- Butterworth, B., & Kovas, Y.: 'Understanding Neurocognitive Developmental Disorders Can Improve Education for All', *Science*, 340(6130), pp.300–5 (2013)
- Carew, T. J., & Magsamen, S. H.: 'Neuroscience and Education: An Ideal Partnership for Producing Evidence-Based Solutions to Guide 21st Century Learning', *Neuron*, 67(5), pp.685–8 (2010)
- Dehaene, S., & Cohen, L.: 'Cerebral Pathways for Calculation: Double Dissociation between Rote Verbal and Quantitative Knowledge of Arithmetic', *Cortex*, 33(2), pp.219–50 (1997)
- Dehaene, S., & Cohen, L.: 'Cultural recycling of cortical maps', *Neuron*, 56(2), pp.384–98 (2007)
- Harvey, B. M., Klein, B. P., Petridou, N., & Dumoulin, S. O.: 'Topographic representation of numerosity in the human parietal cortex', *Science*, 341(6150), pp.1123–6 (2013)
- Iuculano, T., Rosenberg-Lee, M., Richardson, J., Tenison, C., Fuchs, L., Supekar, K., & Menon, V.: 'Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in children with mathematical learning disabilities', *Nature Communications*, 6, 8453 (2015)
- Kirk, S. A.: 'Educating exceptional children', Boston: Houghton Mifflin, (1962)
- Krafnick, A. J., Flowers, D. L., Napoliello, E. M., & Eden, G. F.: 'Gray matter volume changes following reading intervention in dyslexic children', *NeuroImage*, 57(3), pp.733–41 (2011)
- Martin, A., Kronbichler, M., & Richlan, F.: 'Dyslexic brain activation abnormalities in deep and shallow orthographies: A meta-analysis of 28 functional neuroimaging studies', *Human Brain Mapping*, 37(7), pp.2676–99 (2016)
- Mussolin, C., De Volder, A., Grandin, C., Schlögel, X., Nassogne, M. C., & Noël, M. P.: 'Neural Correlates of Symbolic Number Comparison in Developmental Dyscalculia', *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(5), pp.860–74 (2009)
- Paulesu, E., Demonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., ... Frith, U.: 'Dyslexia: cultural diversity and biological unity', *Science*, 291(5511), pp.2165–7 (2001)
- Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D.: 'Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia', *Current Biology*, 17(24), pp.1042–3 (2007)
- Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H.: 'Structural abnormalities in the dyslexic brain: A meta-analysis of voxel-based morphometry studies', *Human Brain Mapping*, 34(11), pp.3055–65 (2013).
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T.: 'Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia', *NeuroImage*, 39(1), pp.417–22 (2008)
- Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L., & Menon, V.: 'Neuroanatomical correlates of developmental

¹³例えば、上野 (2006) ではLDの代表例としてディスレクシアのみが中心的に扱われている。

- dyscalculia: combined evidence from morphometry and tractography', *Frontiers in Human Neuroscience*, 3(November), 51, (2009)
- Temple, E., Poldrack, R. A., Salidis, J., Deutsch, G. K., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D.: 'Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: an fMRI study', *Neuroreport*, 12(2), pp.299-307 (2001)
- Tsang, J. M., Dougherty, R. F., Deutsch, G. K., Wandell, B. a, & Ben-Shachar, M.: 'Frontoparietal white matter diffusion properties predict mental arithmetic skills in children', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(52), pp.22546-51 (2009)
- van der Mark, S., Klaver, P., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., ... Brandeis, D.: 'The left occipitotemporal system in reading: Disruption of focal fMRI connectivity to left inferior frontal and inferior parietal language areas in children with dyslexia', *NeuroImage*, 54(3), pp.2426-36 (2011)
- World Health Organization: 'International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision, version for 2016' (2016) (<http://apps.who.int/classifications/icd10/browse/2016/en>) (2017年1月18日現在)
- 上野一彦「LD(学習障害)とディスレクシア(読み書き障害)」, 講談社, (2006)
- 柘植雅義「日本における学習障害の頻度: 文部科学省の実態調査から(学習障害を支援する)」『このころの科学』 187, pp.21-6 (2016)
- 福田正人「心理現象・精神症状の脳機能と近赤外線スペクトロスコピー(NIRS)」『BRAIN and NERVE-神経研究の進歩』 64(2), pp.175-183 (2012)
- 文部科学省「学習障害児に対する指導について(報告)」(1999) (http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/tokubetu/material/002.htm) (2017年1月18日現在)
- 文部科学省「「脳科学と教育」研究に関する検討会の開催について」(2002) (http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/003/toushin/1221595_1623.html) (2017年1月18日現在)