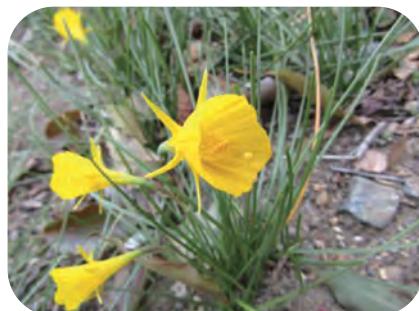


総 論

第1章

人間発達と ライフサイクル



1 人間発達とライフサイクル

人間の発達は、子ども時代だけでなく、成人期、老年期にも継続するというライフサイクル理論を提唱したのは、エリック・H・エリクソン (Erikson EH) である^{1,2)}。詳細は、各論Ⅱ、第2章の発達理論で述べる。その後、1970年代には、生物学的観点からは衰退期とみられていた成人期、老年期における知的作業や精神的変化については、衰退という方向のみでなく、発達するという報告がみられるようになる。つまり、人間は生涯にわたり変化する存在であり、誕生から死を迎えるまで重要な変化を示しているといえる。

ライフサイクルとは、受精から始まり死に至るまでの過程全体を意味する。つまり、人間発達とライフサイクルとは人間の生物学的構造や機能が環境との相互作用によって分化、多様化、複雑化していく人生の全過程での質的変化を意味する人間の適応といえる。そして、誕生から死を迎えるまでの人間の変化を理解する学問である。人間発達学は私たち理学療法士 (PT) や作業療法士 (OT) の養成のための教育課程において、必要不可欠な、基礎的でありかつ、専門的評価学や治療学に直結する学問なのである。そして、さまざまな人生のステージにおいて、身体的、精神的障害があることによって生じる機能障害だけでなく、各ステージで環境因子との相互作用によって異なる活動制限や参加制約が生じることを理解し支援するために、PT・OTの学問的根拠を人間発達とライフサイクルを通して理解することは大切である。

2 発達の定義

受胎から人間は形態や機能において変化し続ける存在である。これらの変化を発達 (development) とも成長 (growth) ともいう。また、生まれた家族や地域などの環境によってもその発達や成長のプロセスや結果が異なる。そのような社会的存在としての変化も網羅した意味が、発達や成長という言葉には含まれている。そして、学問領域の違いにより、これらの定義は異なることが多い。そのため本書において発達とは、生物学的構造や機能が環境との相互作用によって分化、多様化、複雑化していく現象であり、主に質的変化を示す¹⁾ (図1.1)。一方、成長とは生物学的構造や形態、機能の変化する現象であり、比較的測定可能な量的変化と定義づける³⁾ (図3.1 参照)。

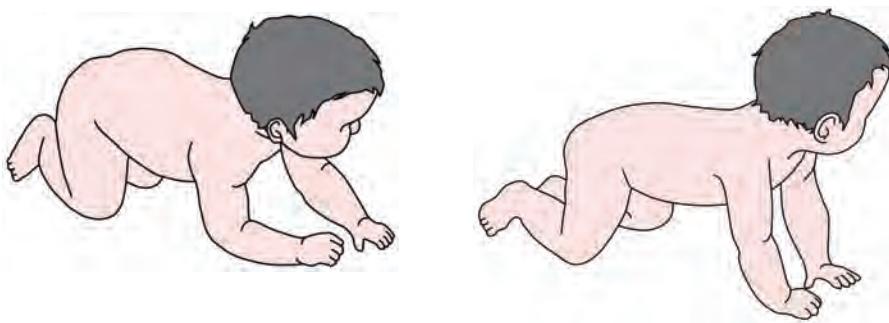


図 1.1 腹這いから両膝両手で体重を支え、四点支持（四つ這い）への質的変化

3 発達におけるいくつかの原則

人間が発達するにあたって個体差は若干あるものの共通する変化がある。この共通性は個の発達で予測できるものである。主にこの共通性は、系統発生的^{*1} (phylogenetic) 特性であり、個人の特性が影響しないものである。例えば、手指の発達において、全体握り、橈側握り、三指握り、ピンセットつまみ、指腹つまみ、指尖つまみなどの順序性⁴⁾ (図 1.2) も反映された変化などである。一方、固体発生的^{*2} (ontogenetic) 特性とは、遺伝子や環境的変動要因による個々の違いが特性となる。発達過程で活動・参加による環境因子の差によっても大きく変化するものである。つまり、乳児期、幼児期、学童期、青年期、成人期、老年期の発達区分に示されているライフステージが進み、活動や参加の質や量が増えるなかで、それらに適応または、不適応を繰り返しながら変化する個の特性といえる。

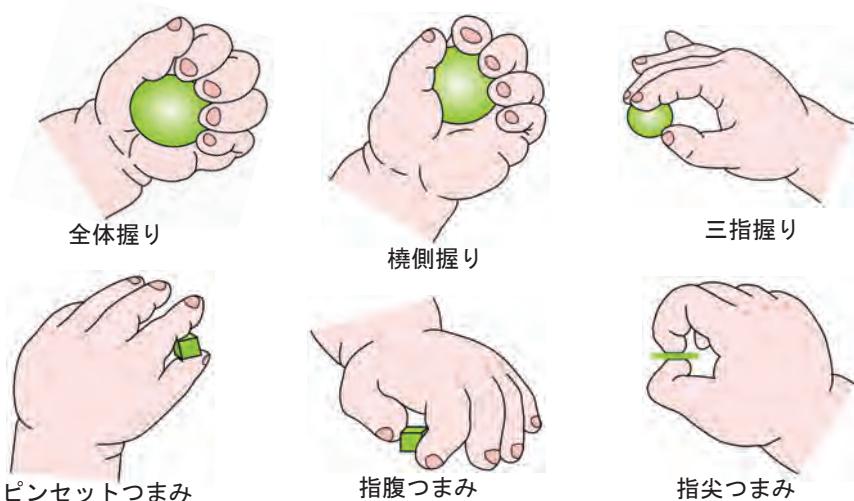


図 1.2 手・指の把持の発達

これらの変化は予測できず、対応手段も該当するライフステージにおける個人因子、環境因子によってさまざまである。しかし、この固体発生の特性は人間が生涯において発達し続ける生体の特性ともいえる。以下、発達におけるいくつかの原則について、発達の方向性と順序性、発達の連續性と非連續性、発達の敏感期、発達の分化と統合、発達の相互作用について解説する。

4 発達の方向性と順序性

系統発生の視点から乳幼児には、中枢神経系の成熟と関連して粗大運動、巧緻運動、認知機能などに一定の方向性と順序性がある。

4.1 発達の方向性

主に身体、運動発達に著明にみられる原則である。

- ①頭部から尾部へ
- ②身体の中枢部から末梢部へ
- ③粗大運動から微細運動へ

①と②は、乳児の運動発達で説明される。頭部から尾部への発達の例を示す。図1.3はランドウ反射の運動反応である。頭部が伸展した後に胸椎、腰椎というように頭部から尾部に伸展（重力に抗した伸展活動）反応が発達する。また、図1.4のように人間は、新生児の頭部の運動から始まり、足（尾部）の交互の運動（歩行）



図1.3 ランドウ反射の運動反応

図1.4 新生児の頭部からの運動の始まり

*1 **系統発生**：それぞれの生物種が成立し、さらに絶滅するまでにたどった形態的な変化（進化ともいう）。

*2 **固体発生**：受精卵が成体に達し、さらには死に至るまでにたどった形態的な変化（発達ともいう）。

（松沢哲郎「相互主観性、発達心理学辞典」pp344-345 ミネルヴァ書房 1996）

と発達する（図1.5）。次に身体の中枢部から抹消部への発達の例を示す。図1.6のような前腕で支えることができるようになってから手掌で支えるようになる（図1.7）。このように中枢の機能から抹消の機能が発達するようになる。粗大運動から微細運動への発達については、手で支えるという粗大な運動を担う役割から座位がひとりでとれるようになると手指でおもちゃを操作できるようになる（図1.8）変化といえる。また、歩くことができるようになってから（図1.9）、ケンケンができるようになることや自転車に乗れるようになり（図1.10）、大きく叩きつけるようななぐり書きから、閉じた丸が描けるようになる。このプロセスは肩関節を主に動かす（図1.11）（粗大）描画から肩関節を動かさずに手関節のコントロールや指での把持コントロール（微細）による（図1.12）描画へと発達することである。

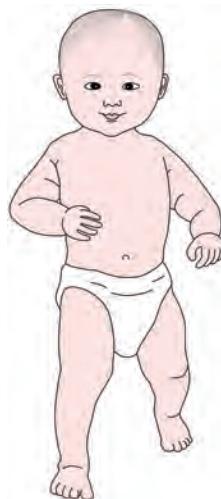


図1.5 足(尾部)の交互の運動(歩行)へ



図1.6 前腕での支え



図1.7 手掌での支え



図1.8 手指でのおもちゃ操作



図1.9 歩き始め



図1.10 ケンケンや自転車乗り

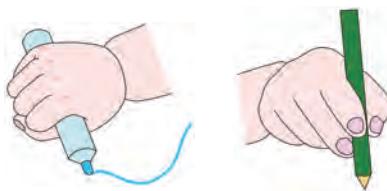


図1.11 粗大描画 図1.12 微細描画

4.2 発達の順序性

粗大運動、巧緻運動、認知機能の質的変化を意味する。分かりやすい例は、図1.6、図1.7のように乳児の運動発達に認められる。肘や前腕で支えられるようになると同時に、頭部のコントロールが獲得され、次に寝返りができる（図1.13）、自ら座位をとることができる、四つ這い（図1.14）、つかまり立ち（図1.15）、ひとり立ち（図1.16）、独歩（図1.17）と、発達に順序がある。しかし、運動発達の順序性においても固体差が認められる。例えば、四つ這いをせずにつかまり立ちをする子どももいる。また、その時期がごく短期間であり養育者の観察経験として認知されていない場合もある。

発達の方向性、順序性はゲゼル（Gesell）を始めとする観察記録による研究で一定の成果を修めており、発達心理学の領域において発達検査のベースになるものであり、日本においても多くの発達検査が開発されて、リハビリテーション領域において臨床や研究で使用され応用されている。



図1.13 寝返り

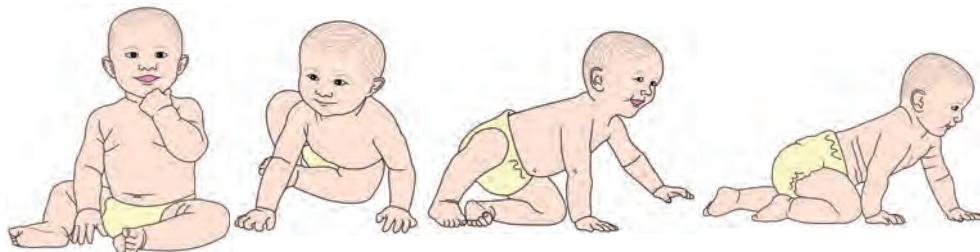


図1.14 座位から四つ這い



図1.15 つかまり立ち



図 1.16 ひとり立ち



図 1.17 独歩

4.3 発達の連続性と非連続性

前述したゲゼル (1880–1961 Gesell)^{5,6)}、ピアジェ (1896–1980 Piaget)^{7,8)}、フロイト (1856–1939 Freud)⁹⁾、エリクソン (1902–1994 Erikson)¹⁰⁾ らは、発達には質的变化としていくつかの段階があるということを示した発達段階説を提唱した。発達段階とは、共通した個（例えば、生後 1 カ月など）の特徴をまとめた枠組みのことである。現発達段階の前段階から個に共通の変化と個によって異なる多様な変化があり、それらが統合され、さらに共通項の現れとして発達段階がある。図 1.18 のように新生児の子どもの頭部の位置と運動は、左右どちらかに向いているが、そこから頭部を持ち上げて反対側に回旋する（頭部の保護的回旋運動）。この回旋運動に伴って、頭で支えていた重みが尾部に移動する。この運動により上肢が体幹から外に広がり（外転）、肘で支えることにつながり、さらに頭部の回旋に伴い体幹の伸展活動を盛んにする。結果として、頭部の中間位保持と自由な回旋運動ができる段階である「首がすわる」につながる。このような現象を連続性という。

つまり、その発達の現象が何故現れたかを知るヒントは、その前の発達段階とプロセスにある。しかし、個特有の発達に注目した場合、連続性ばかりではなく、段階説では説明のつかない個固有の現象もあり、連続して捉えられない非連続性の要素があることを理解しておくことが臨床場面では重要である。



図 1.18 新生児の子どもの頭部の位置と運動

4.4 発達の敏感期

人間の発達が最も促されやすい時期を敏感期 (sensitive period)¹¹⁾ という。この時期は外的な条件や刺激に対して反応しやすい時期でもあるので、それらが発達へ負に働くことで正常な発達が妨げられることがある。妊娠初期（8週～26週）に風疹ウイルスに感染すると風疹症候群として胎児に障害が生じるなどの危険性がある。また、乳児期の母子関係の確立の弱さから、その後の子どもの感情のコントロールの弱さや対人コミュニケーションに影響を与えることがある。

また、脳性麻痺を中心とする運動障害がある子どもの運動の円滑さを支援する時期の判断を誤ると変形拘縮が進行して、活動・参加の制限や制約が助長される可能性もある。発達障害がある子どもについても、二次的な対人コミュニケーション障害へと発展する可能性が大きい。定型発達児、発達障害児のそれぞれの敏感期は多くの縦断的研究が必要である。臨床家は研究結果への理解を深めて治療、支援にあたる必要がある。

4.5 発達の分化と統合

分化とは、粗大なものから巧緻なものへの変化をいう。この概念は前述した発達の方向性とも関係する。図1.19は手全体で大きなものを握る。図1.20は、指先で小さなご飯粒のようなものをつまむことができる。単純に手の全体握りから指尖つまみへと手指の機能が分化するだけではない。子どもが10カ月過ぎると四つ這いができるようになり、移動範囲が広がり床上のものに注意を払えるようになる。たまたま落ちているご飯粒に気づき、一旦座ってからつまみ上げる。この何気なくみかける光景に環境因子と個の発達の統合がある。しかし、例えば機能的に分化した指でつまむ手段を持ち合わせていても、そのご飯粒周辺に移動するという環境へ働きかける能力と床のご飯粒を認知する能力とが統合されなくては、ご飯粒をつまみ上げるという行為にはたどりつかない。



図1.19 全体握り

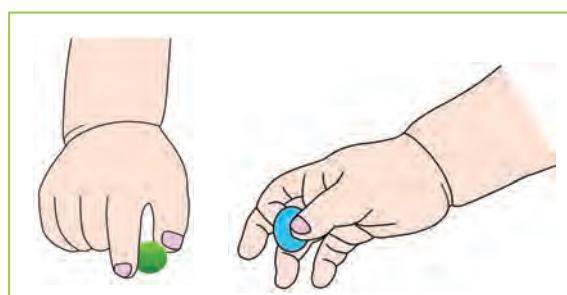


図1.20 指尖つまみ

また、生後 6 カ月の子どもの食べる機能は、スプーンを口に近づけると唇、顎、舌が同時に動き口腔内に食べ物が入った後も同じ運動で処理をして嚥下する。それから成長とともに徐々に分化して、12 カ月にはスプーンを近づけると口唇のみが動き、顎と舌は静止している。取り込んだ後に舌が回旋して食べ物（若干、形のある食べ物）を奥歯に移動させて噛んでいる間は、口唇は閉じて、顎は咀嚼運動に必要な最低限の動きのみを行う。これが分化した機能であるが、食べ物の形状によって口唇、顎、舌の動かし方は異なるため、食べる機能においても、機能の変化のみでは分化に止まり、食事をする（食べ物の形状）という行為によって統合的機能へと発達する。

4.6 発達速度の多様性

発達の速度は機能の種類や時期によって異なることが、スキヤモンらによって報告されている⁴⁾。図 1.21 は、20 歳のときの身体部位、器官の重さを 100 と設定したうえで 20 歳になるまでの各発達時期のその重さの割合を曲線で示したものである。

固体内においても、粗大運動、巧緻運動、感情などは神経型であり、発達初期に急速に発達する。それに比べて、認知機能や社会性の発達も神経型をベースにして緩やかに持続的に伸びてゆくので一般型といえる。

4.7 発達の相互作用

発達には固体内で各機能や同一の機能が相互に影響を与え合うという相互作用がある。図 1.22 のように養育者との情動交流が確立する（情動的コミュニケーション）がゆえに子どもは養育者の変化に気づき、同じ方向を見てその事象を共有することができるようになる（共同注視）。また、頭部を自由に動かし、関心のあるものを見ることができることでさらに、人に向かっての発声が増えるなど継時的な相互作用が働くようになる。また、図 1.23 のように仰臥位にて肩甲骨周辺で支える機能が発達することで、中枢部と抹消部との相互作用により、腕（上肢）で胸上の玩具を把持することができるようになる。

❖ 本書における発達の区分

発達区分は、発達の段階説を唱えた研究の数と同等の数があるので本書の目的に適した区分を用いる。表 1.1 は、エリクソンの情緒・社会的発達¹⁾の観点から捉えた発達段階を基本にして本書の目的に沿って、一部改編し年齢の区分を明記したものである。本書で扱われている定義を記載する。

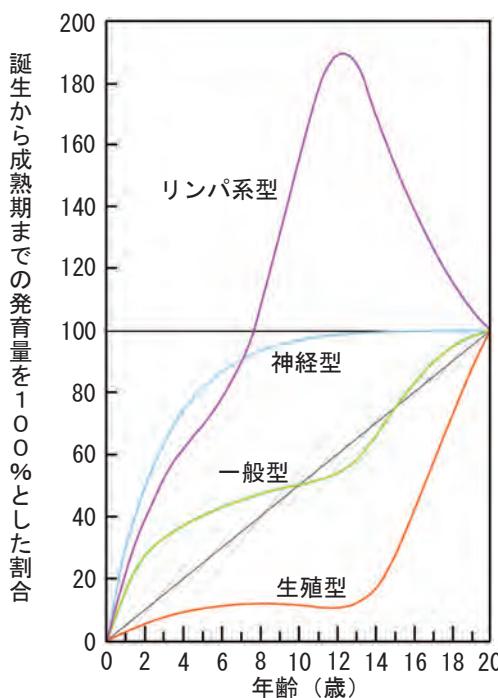


図 1.21 スキヤモンの臓器別発育曲線



図 1.22 共同注視



図 1.23 上肢での玩具の把持

表 1.1 本書における発達の区分

- ①出生前と出産（胎児期）···養育者のお腹にいる時期の発達と養育者の特徴、出産時とその時期の養育者の特徴。
- ②乳児期···新生児から生後 12 ル月。養育者の全面擁護と母子関係の確立によりその後、情緒と社会性の発達の基盤を形成する時期。
- ③幼児期前期···1歳児から3歳。家庭養育が中心で子どもの基本的生活が育ち、家族の中で役割（お手伝い）が遂行できる。それに伴い自我が芽生えて、自尊感情が形成される。また、情動面での自己コントロールができるようになる。
- ④幼児期後期···4歳から6歳。ことばの発達に伴い、向社会的行動が育つ時期。また、子どもの社会的組織により役割を意識して、遂行する努力ができる。
- ⑤学童期···7歳から15歳。小学、中学教育の時期で小学高学年から思春期に入る。家族以外の大人や子ども集団の自治により、より社会化が進む。
- ⑥青年期···16歳から24歳。高校、大学、大学院教育の時期で、心身ともに親からの自立を形成する時期。また同時に社会的存在としての自身の存在を確認する時期。
- ⑦成人期前期···24歳から50歳。（young adulthood, middle adolescence）仕事と家族をもち、次のライフサイクルに入る。
- ⑧成人期後期···50歳から64歳。（late adulthood）生理的機能の変化を受け入れながら、後継者の育成を担う。
- ⑨老年期···65歳から死まで。人生の総括と受容の時期。

引用文献

- 1) 上田礼子「生涯人間発達学」p15 2005
- 2) Erikson EH: Childhood and Society. Norton, New York, 1950.
- 3) 上田礼子「リハビリテーション医学講座 第2巻 人間発達学」p28 医歯薬出版 1985
- 4) 福田恵美子 著、福田恵美子 編「人間発達学」中外医学社 p136 2014
- 5) Gesell A : The First Five Years of Life : The preschool years. Harper & Brothers, New York, 1940
- 6) ゲゼル, A. 著、山下俊郎 訳 「乳幼児の心理学」家政教育社 1966
- 7) Piaget J&Inhelder B 波多野完治 他訳 「新しい児童心理学」pp2-20 白水社 1969
- 8) 波多野完治 編「ピアジェの発達心理学」国土社 1967
- 9) Freud S:An Outline of Psychoanalysis Hogarth Press, London, 1938.
- 10) エリクソン EH、仁科弥生 訳「幼児と社会位置」pp285-301 みすず書房 1977
- 11) ボウビイ, J. 著、黒田実郎 訳「乳児の精神衛生」岩崎書店 1962
- 12) 森直樹 著、福田恵美子 編「人間発達学」p136 中外医学社 2014

参考文献

- 1) Kaplan PS: The Human Odyssey Life -span Development. West Publishing Co, New York, 1993
- 2) 大日向達子 編「発達心理学」pp20-34 並木博「発達の一般的原理」朝倉書店 1992
- 3) Erikson EH: Childhood and Society. Norton, New York, 1950
- 4) Santrock JW (今泉信人、南 博文、編訳)「成人発達とエイジング」pp68-70 北大路書房 1985
- 5) Skolnick A: Early attachment and personal relationship across the life course. Lerner R &Featherman D(eds) : Life-span Development and Behavior, Vol. 7. Hillsdale, Erlbaum, New Jersey, 1986.
- 6) ハーロック, E. B 著、小林芳郎、相田貞夫、加賀秀夫 訳「児童の発達心理学(上)」誠信書房 1971

- 7) 内山喜久雄、上出弘之、高橋清純他 編「児童臨床心理学時点」岩崎学術的出版社 1974.
- 8) Gesell, A. L. : The Mental Growth of the Pre-School Churchill Livingstone 1975.
- 9) 東 洋、繁多 進、田島信元「発達心理学ハンドブック」福村出版 1992
- 10) Erikson EH: Childhood and Society. Norton, New York, 1950
- 11) Erikson EH 著、仁科弥生 訳「幼児期と社会」pp332-335
- 12) グールド, S. J. 著、仁木帝都、渡辺政隆 訳「個体発生と系統発生」工作舎 1987
- 13) ウエルナー, H. 著、鯨岡峻、浜田寿美男 訳「発達心理学」ミネルヴァ書房 1976
- 14) 上田礼子「生涯人間発達学」三輪書店 1996
- 15) 黒田実郎 監修「乳幼児発達時点」p406 藤田保「発達」岩崎学術出版社 1985
- 16) Gesell, AL. :The Mental Growth of the Pre-School Child. Reprint Service, 2000.
- 17) Skinner, L. : Motor Development in the Preschool Years. Charles C Thomas, 1979
- 18) Illingworth, R. S. :The Development of the Infant and Young Child:Normal and Abnormal. 6th ed., Churchill Livingstone, 1975.
- 19) Erikson EH: Childhood and Society. Norton, New York, 1950
- 20) ゲゼル, A. 著、山下俊郎 訳「乳幼児の心理学」家政教育社 1966
- 21) 波多野完治 編「ピアジェの発達心理学」国土社 1967
- 22) Freud S:An Outline of Psychoanalysis Hogarth Press, London, 1938.
- 23) Piaget J & Inhelder B 著、波多野完治 他訳「新しい児童心理学」白水社 1969
- 24) Santrock JW 著、今泉信人、南 博文 編訳「成人発達とエイジング」pp68-70
北大路書房, , 1985.
- 25) 岩崎清隆、花熊 晓、吉松靖文「人間発達学」pp3-19 医学書院
- 26) 辛島千恵子:情動的コミュニケーションを基盤にした働きかけと現象学的分析.
小児保健研究 68(6), 2009.
- 27) 辛島千恵子:事例研究, 自閉症スペクトラム児の行為の改善と2者関係の育成,
児の志向性から作業療法の成果を問う第2報. 小児保健研究 71(1), 2012.
- 28) 辛島千恵子:社会性の発達と小コミュニケーション, 作業の意味を共有すること
の大切さ. 作業療法ジャーナル 49(5), 2015.

総 論

第2章

脳機能の発達と 人間発達



1 はじめに

子どもの行動や情動、社会性の発達の背景には、脳機能の発達がある。一方、発達障害がある子どもたちは、何らかの脳機能の問題があることが多い。ここでは、リハビリテーションを実施するうえで、知っておく必要があると考えられる脳の発達とその障害に関することについて説明する。

2 脳の発達

2.1 脳の構造や機能

脳の発達について触れる前に脳の構造や各部位の主な機能について説明する。

(1) 大脳皮質

大脳皮質は、左右の大脳半球に分かれている。左右の大脳半球はそれぞれ、前頭葉、側頭葉、頭頂葉、後頭葉に分かれている（図2.1）。

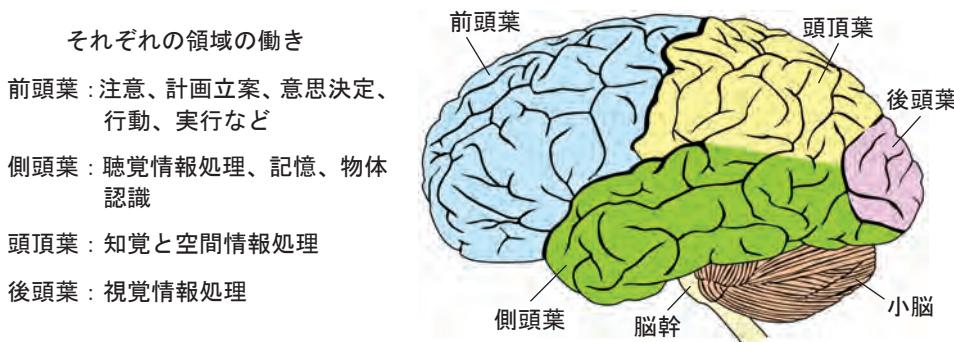


図2.1 成人脳の表面構造とその働き

(2) 大脳皮質下の構造

大脳皮質下の構造について説明する（図2.2）。

1) 延髄

脊髄の上には延髄がある。ここは脳からの下行性の伝達路であり、呼吸中枢・反射中枢などが存在する。

2) 橋

延髄の上には橋がある。ここには多くの脳神経核が存在し、三叉神経、外転神経、顔面神経、聴神経といった脳神経が出る部位である。

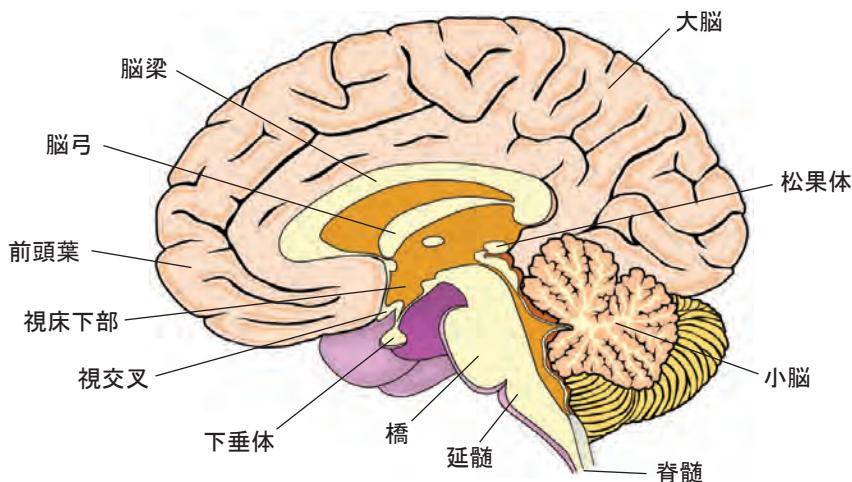


図 2.2 脳の矢状断面

3) 中脳

橋の上には中脳があり、その上丘は視覚反射の中継を下丘は聴覚の中継をする。

4) 延髄と橋

中脳をあわせて脳幹とよぶ。

5) 小脳

脳幹の背側には小脳がある。ここは平衡感覚などの運動に関する機能を司っている。

6) 間脳

中脳の上には間脳がある。間脳は自律神経の中権である視床下部、種々のホルモンを分泌する脳下垂体、体性感覚などの大半の感覚を司る視床などに区分される。2つの視床体が結合する溝に松果体がはさみ込まれている。間脳は自律神経の中権であり、松果体は概日リズムを制御しているとされている。

7) 大脳辺縁系

脳の深層に位置し、海馬、扁桃体などを含んでいる。記憶や情動、意欲の発現などに関わっている。

8) 脳梁

大脳縦列の底には脳梁がある。左右の大脳半球は脳梁によって連結している。

(3) 神経伝達物質

脳内では、ドーパミン、アドレナリン、ノルアドレナリン、セロトニンなどさまざまな神経伝達物質が存在し、代謝されている。脳の構造の異常がなくとも、神経伝達物質の働きに異常が生じるとさまざまな行動や情動の障害が起こることが知ら

れている。

それぞれの神経伝達物質に関わる神経系の分布は異なっている。神経伝達物質の働きや脳内の分布を知ることは、発達障害の理解に役立つことがある。

中脳皮質系ドーパミン神経、特に前頭葉の基底核などに分布するものが報酬系などに関与し、意欲、動機、学習などに重要な役割を担っているといわれている。セロトニン神経系は脳のほぼ全領域に分布している。それによって調節される中枢機能は、摂食行動や性行動などの本能行動から情動、認知機能まで多岐にわたる。後述する注意欠如・多動症（ADHD）の治療薬は、ドーパミン神経系（図2.3）を標的にしたものが多い。一方、向精神薬にはセロトニン神経系（図2.4）を標的にしたものが多い。

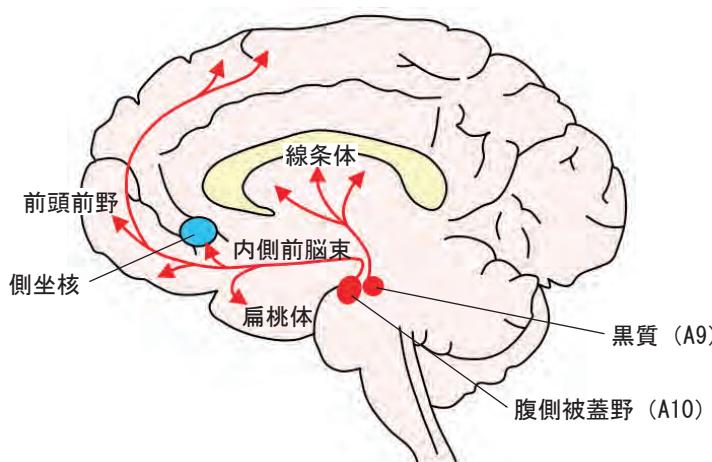


図2.3 ドーパミン神経系

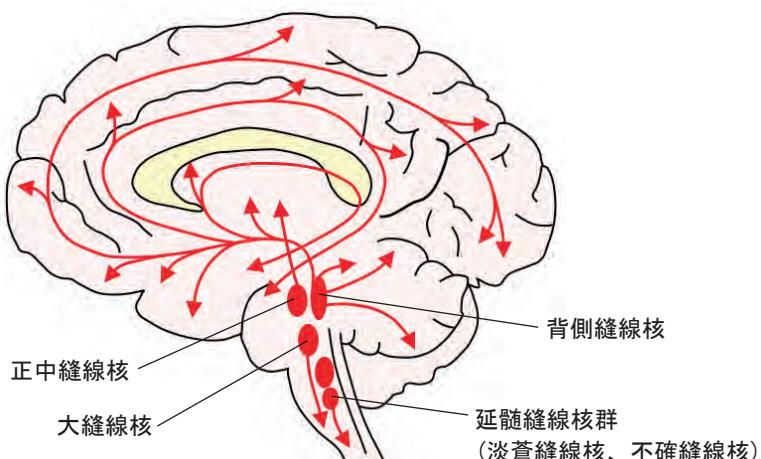


図2.4 セロトニン神経系

(4) 脳の神経細胞の数

ヒトの大脳皮質の神経細胞の数は数百億個あるとされている。小脳だけでも1,000億以上の神経細胞があるという概算もある。したがって、中枢神経全体の神経細胞の数は千数百億個とされている。神経細胞の数は胎児期に最大となり、その後は細胞死（アポトーシス）によって約半数の神経細胞が脱落することが明らかになっている。神経細胞は、一部の脳領域（海馬など）では成人後も産生されることが報告されているが、それ以外では受胎後約7カ月頃までに産生され、その後増えないとされている。しかし、成長に伴い脳の容積が増すのは神経細胞の樹状突起の枝分かれとシナプスの増加がその理由とされている。

2.2 発達に伴う脳の変化

次に発達に伴う脳の変化を説明する。

(1) 脳の重量の変化

成熟や発達はその部位によって速さが異なる。Scammonは、神経系は6歳の段階で既に成人の90%の重量をもつが、それに対して睾丸や卵巣などの性器は12歳頃の思春期に入るまではほとんど重量が変化しないことを説明している（図1.21参照）。

(2) 発達に伴う脳の形態的変化

胎生期にヒトの脳はダイナミックな形態的変化を示す。受胎後、2～3週間で神経板ができ、4～5週頃に神経管ができる。11週頃になると神経管のくびれが、大脳、小脳、延髄などに分かれしていく。大脳、白質、深部灰白質、小脳、脳幹の各容積は在胎期間に応じて、直線的に増加する。脳容量は22週の100mL程度から40週の300～400mLへと直線的に増加する。また、人の脳は皺をつくることで脳表面積を増大させる。新生児期の脳表面積は、皺がないと仮定した場合の約2倍にまで指數関数的に増加する。受胎後22週の脳にシルビウス裂のみ観察されるが22～25週で中心溝や鳥距溝が観察され始める。その後、脳回や脳溝の形成が活発となり、40週頃にはヒトの基本的な脳回・脳溝パターンは確立する。図2.5は、23週から30週の間に生まれた早産児の出生時から48週までの皮質表面積と脳の容量の変化を示す。

受胎後30週以降は容量の増加に比べ、表面積の増加が顕著となる（図2.6）。この時期には、脳回や脳溝の形成が活発になり、いわゆる脳の皺（折り込み）がより多く、深くなっていく。これが脳容量がそれほど大きくならなくても、脳の表面積が増える理由である。皮質の6層構造は受胎後32周で既に観察され、40週ではほぼすべての神経細胞が脳室帶からの皮質への遊走を終える。

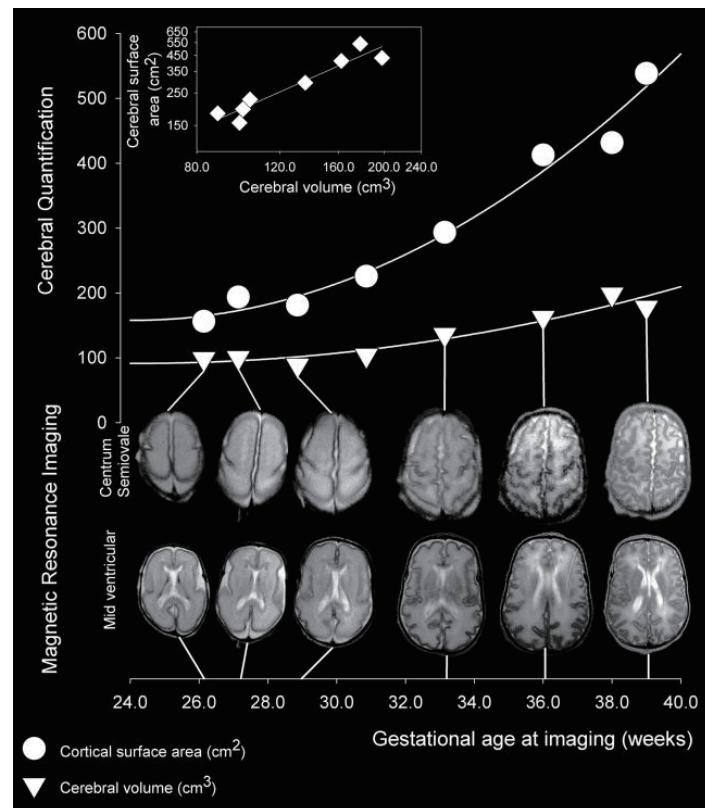


図 2.5 胎生 26 週～39 週の半卵円中心の MR イメージと脳容量(▽)と皮質表面積(○)¹¹⁾

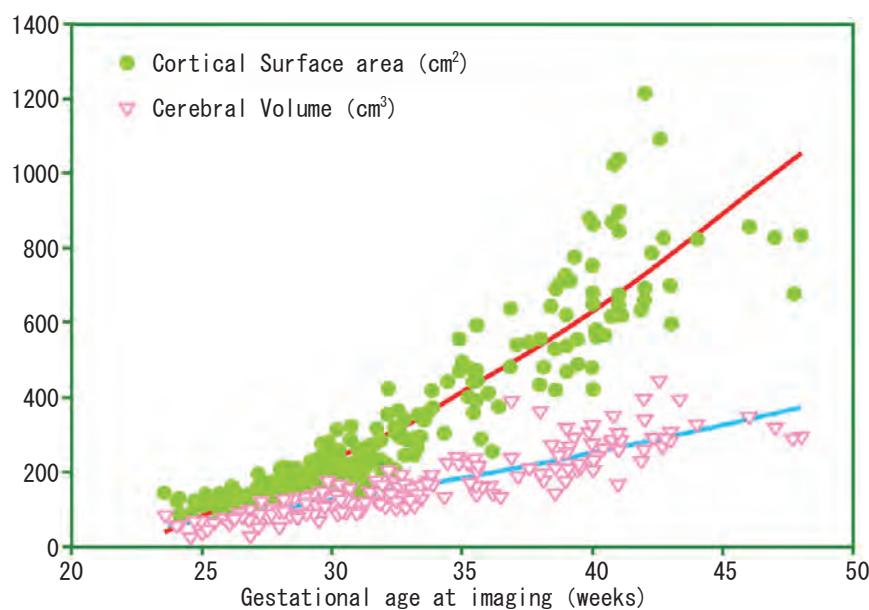


図 2.6 23 週から 30 週の間に生まれた早産児の出生時から 48 週までの皮質表面積(●)と脳の容量(▽)の変化¹¹⁾

(3) 樹状突起の変化 (図 2.7)

神経系の発達において、神経細胞間のシナプス形成が重要である。神経細胞から樹状突起が伸び、他の神経細胞と結合し、シナプスが形成される。胎児期にはシナプスの形成が活発である。樹状突起の伸びとシナプス結合は、部位ごとにスピードが異なり、運動野よりも視覚野は形成が遅い。シナプスは神経細胞間の伝達を可能にし、過去のシナプス伝達によって書き込まれた情報がよび起こされる。

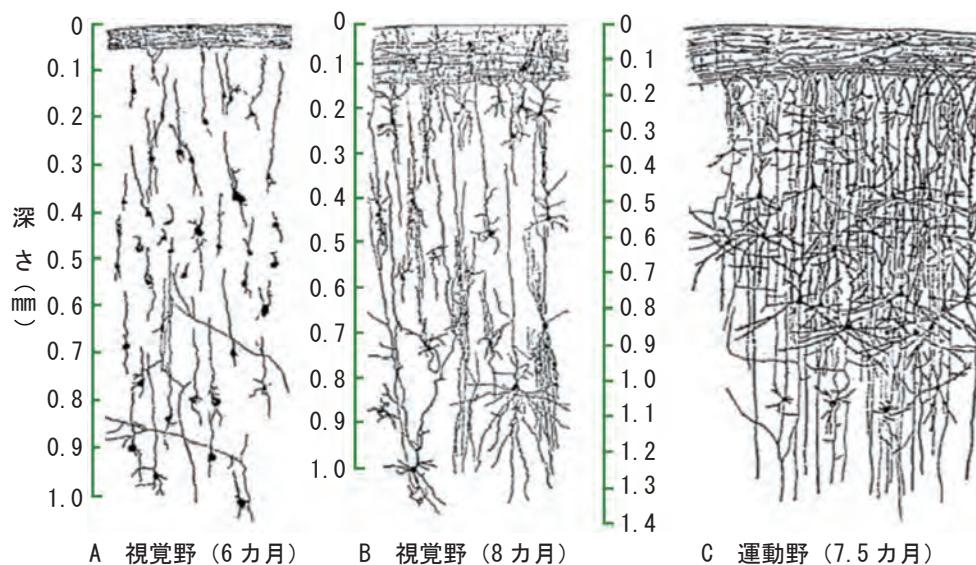


図 2.7 ヒト胎児の大脳皮質視覚野(A, B)および運動野におけるニューロンの発達

(4) 髄鞘化

小児期の脳は系統だった発生段階にあり、胎児期から新生児期、乳児期にかけて刻々と変化する。脳の中で情報のネットワークが進むときにある神経細胞の樹状突起のまわりに「髓鞘」という丸い鞘ができる。この現象を髓鞘化という。それにより、神経細胞内を刺激が伝わる際に、刺激の伝達速度が高速化される。

胎児期および小児期には脳のあらゆる場所で白質の髓鞘化が起こる。一般的に髓鞘化は、脳の系統発生的に古い部分から新しい領域に、また尾側から頭側へ、背側から腹側へ、中心から末梢へと進行する。

MRI によって脳の各部位の髓鞘化を捉えると部位ごとに髓鞘化の時期が異なっていることが分かっている。MRI にて白質の髓鞘化は T1 強調像にて高信号化、T2 強調像にて低信号化として認められる。表 2.1 のように各部位で髓鞘化の時期が異なっている。

表2.1 髄鞘化の出現時期¹⁾

部位	T1 強調像	T2 強調像
中小脳脚	生下時	0~2 カ月
小脳白質	0~4 カ月	3~5 カ月
内包後脚	前部 1 カ月	4~7 カ月
	後部 生下時	0~2 カ月
内包前脚	2~3 カ月	7~11 カ月
脳梁	膝部 4~6 カ月	5~8 カ月
	膨大部 3~4 カ月	5~8 カ月
後頭葉白質	中心部 3~5 カ月	9~14 カ月
	辺縁部 4~7 カ月	11~15 カ月
前頭葉白質	中心部 3~6 カ月	11~16 カ月
	辺縁部 7~11 カ月	14~18 カ月
半卵円中心	2~4 カ月	7~11 カ月

(5) 刈り込み

シナプスを必要以上に形成することが過形成であり、シナプスの数を減らすことが刈り込みである。刈り込みとは、神経細胞を結んでいるいわゆる神経回路が減り、情報伝達が行われなくなることをさす。これは遺伝的なものだけでなく、「学習」などの影響も受けないと考えられている。神経回路網が形成されるときに2つのプロセスを経るとされている。第1のプロセスは、「神経活動非依存性」のもので、胎児期に起こる。外部からの活動や学習などの神経活動に関係なく、無駄な回路が削られる。これは遺伝子によって生得的にプログラムされていると考えられている。第2のプロセスは、「神経活動依存性」のもので、生後にみられる。神経活動という外からの刺激を受けた神経系が活動することで、神経細胞が性質を変化させたり、神経回路が再構築されたりする。この第2のプロセスが「環境に対する適応過程」と考えられている。

2.3 神経発達の臨界期

脳の発達の研究の中で、神経発達の臨界期 (critical period) が注目されてきた。これまでの著名な神経発達の臨界期に関する研究を紹介する。これは、発達のある段階における環境や刺激の重要性を示すものであろう。

(1) Lorenz KZ の刻印づけ現象

ローレンツは行動観察から、ハイイロガ (鳥) が出生直後に見たものを親のように追いかけることを発見した。出生後最初に目に映ったものが脳に刻印され、その鳥の一生の行動に決定的な影響を与えるとし、これをインプリント (刻印づけ現象または刷り込み現象) とよんだ。ローレンツは、生後 5~24 時間のハイイロガに動くおもちゃを見せると、それを母鳥を追いかけるように後についていくようになることを観察した。一方、24 時間よりも後に動くものを見せててもそのような反応は起こらないことも明らかにしている。このようなことから、ハイイロガのインプリントの臨界期は生後 5~24 時間であることが分かっている。

(2) Hubel DH と Wiesel TN の片眼遮蔽実験

先天性白内障にかかっていた子どもたちは、白内障の手術を受けても弱視となったりして失明してしまうことから、脳 (シナプス形成) にその原因があるのではないかと考えられた。

生まれたばかりの子猫の片眼を遮断 (縫合) し、2~3 カ月後に再び開き、皮質視覚野の電気活動を調べた。その結果、ある時期に適切な視覚刺激がないとシナプス形成が阻害されることが示唆された (図 2.8)。

ヒトでは特に 1 歳以内が視覚機能の感受性が高く、1 週間の遮断でも永続的な弱視が起こることから、神経系の成熟に必要な時期に適切な刺激が必要であるとした。

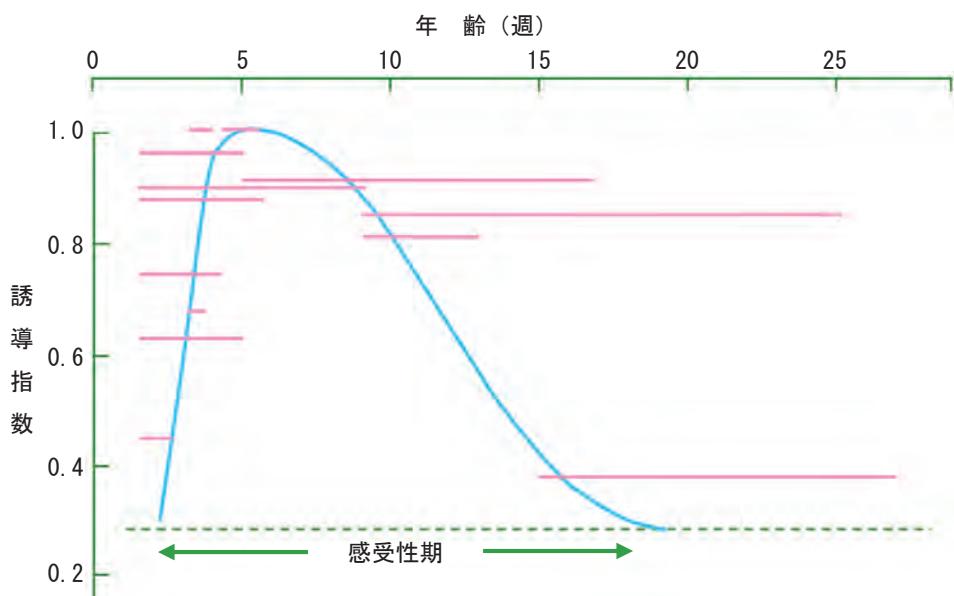


図 2.8 猫の皮質視覚野の感受性期

(3) Blakemore のネコの縞模様の部屋での飼育実験

Blakemore は生まれたばかりの子ネコを縦縞あるいは横縞しか見えない環境で育てた (図 2.9)。そして半年後に Blakemore がネコの第一次視覚野の神経細胞のさまざまな傾きの線分に対する反応を調べたところ、縦方向の線分にしか反応が得られないことを確認した。こうやって育てられた子ネコは縦方向の輪郭を示すものは認識したが、横方向の輪郭はあたかも存在しないかのような行動を取ったことが報告されている。このことから、幼少期の視覚体験によって、シナプス競合 (使われなくなったシナプスが使われているシナプスによって使用不能にされてしまう) が視覚野の神経細胞に起こり、その結果ある特定の視覚刺激にしか対応できないようになってしまったと考えられている。このシナプス競合は生後 4 週くらいから 20 週くらいのときにだけ起こることが明らかになっている。



生まれたばかりのネコを縦縞のみの部屋で育てたところ、第一次視覚野の神経細胞が縦線にしか反応しなくなった。

図 2.9 Blakemore の飼育実験

(4) Newport EL の第二外国語獲得試験

3 歳から 7 歳までの間にアメリカに渡ってきた人は言語機能のテストの成績がネイティブスピーカーと同じであったが、8 歳以上で渡ってきた人では、年齢が高くなるに従って、得点が悪くなることが示された。このことから、完全なバイリンガルになるには 3 歳～7 歳までに第二言語に接することが必須であるとした。

3 脳の障害

3.1 発達の問題・障害と脳の形態・機能の違い

遺伝的要因、仮死、早産など周産期の問題など胎児期、出産時、発達期に問題が起こることで、脳の構造や機能に異常が起こることがある。そして、脳の構造や機能の違いがあることで、脳性麻痺、知的障害、自閉スペクトラム症、注意欠如・多動症(ADHD)、発達性協調運動症などの発達期の問題が起こることがある。発達の障害がある子どもや大人の療育や支援を行ううえで、機能障害や活動障害の背景にある脳機能障害を理解することは重要である。そこで、脳の構造や機能の異常と発達の問題についての知見を紹介する。

(1) 早産と脳の発達 (図 2.10)

前述のように早産児においても、受胎後 40 週までの脳の容量および表面積の増加は顕著である。しかし、超早産児では、脳の劇的変化の時期にさまざまなストレスに晒されることで脳容量の減少のみでなく、脳溝形成に変容をもたらすことも明らかにされてきた。52 人の早期産児(31 週以前)と 12 名の満期産児の脳のしわ(しわが深い方が脳の表面が大きくなる)、表面積を比較したところ、早期産児は明らかに低かったことが分かっている。超早産児のなかに脳機能の発達に問題を示す子どもがいることと、これら脳形成上の異常が関係することがあると考えられる。

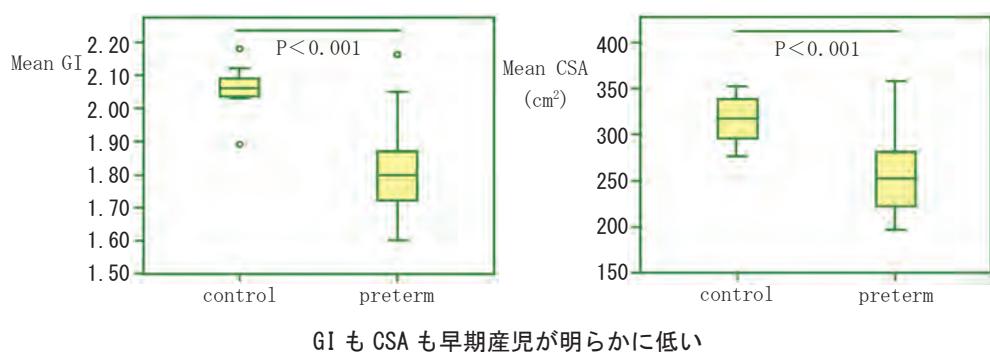


図 2.10 正期産(control)児と早期産(preterm)児の脳の折り畳み(gyrification index : GI)(数値が高いと灰白質の総面積が増える)と皮質表面積(cortical surface area : CSA)の違い

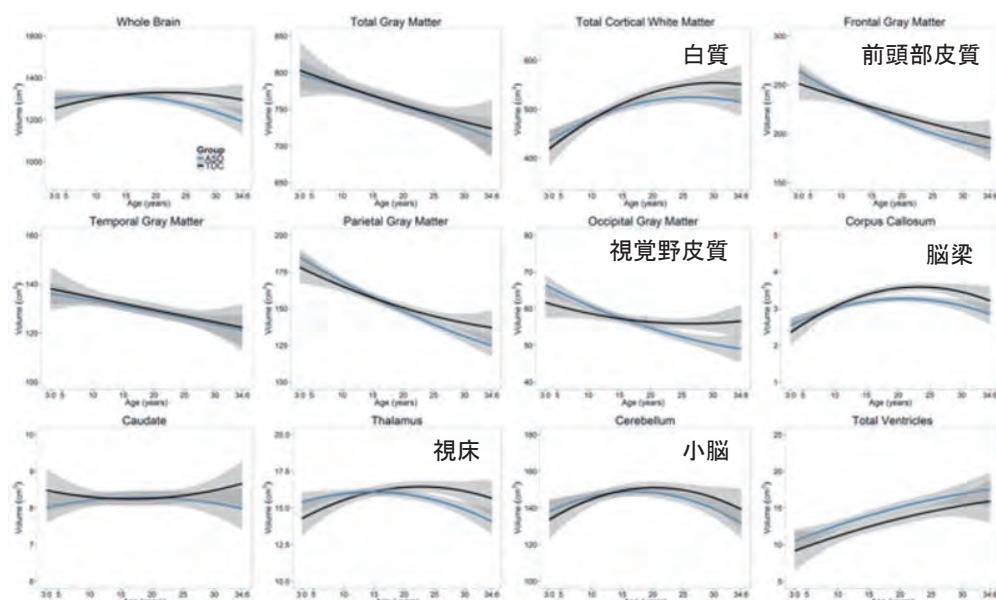
(2) 自閉スペクトラム症 (Autism Spectrum Disorder : ASD) 児の脳の構造の違い

MRI による ASD の研究で脳の構造の異常が報告されている。これまでの研究で大

脳皮質、脳幹、小脳、脳梁、扁桃体、海馬、視床などの構造の異常が報告されている⁹⁾。

ASD児は、幼児期早期に頭囲が大きいことが報告されていた。そして、脳の容量の異常は幼少期と成人期では、異なることが示されている。Langeら(2015)は、100名のASD群と56名の定型発達群の子どもから大人までの8年間のMRIデータを記録した。

脳室の容量は、幅広い年齢域でASD群が定型発達群よりも、大きくなっていた。ASD群では多くの脳領域で、青年・成人期に容量が定型発達者よりも減少していた。脳全体の成長曲線は幼いASDでは増加していたが、続いて思春期の間に減少し、10～15歳の間に定型発達者のものとマッチしていた。ASDサンプルでは、成人期になると脳容量が異常に減少していた。このようにASDでは、幼少期には多くの脳領域において、容量が定型発達児と比較して大きいが、思春期以降になると逆に相対的に小さくなっていくようである(図2.11)。



100名のASD者と56名の定型発達者の脳を8年間測定：青はASD、黒は定型発達

図2.11 脳の各領域の経年的変化の違い¹⁴⁾

(3) 発達障害（自閉スペクトラム症；ADHD）児の脳機能の異常（図2.12）

限局性学習症（SLD）の読み障害児の研究で、読み障害がない子どもも文字を提示した際に左脳の後方領域が活動するのに読み障害児では活動の低下が認められたことが分かっている¹⁷⁾。

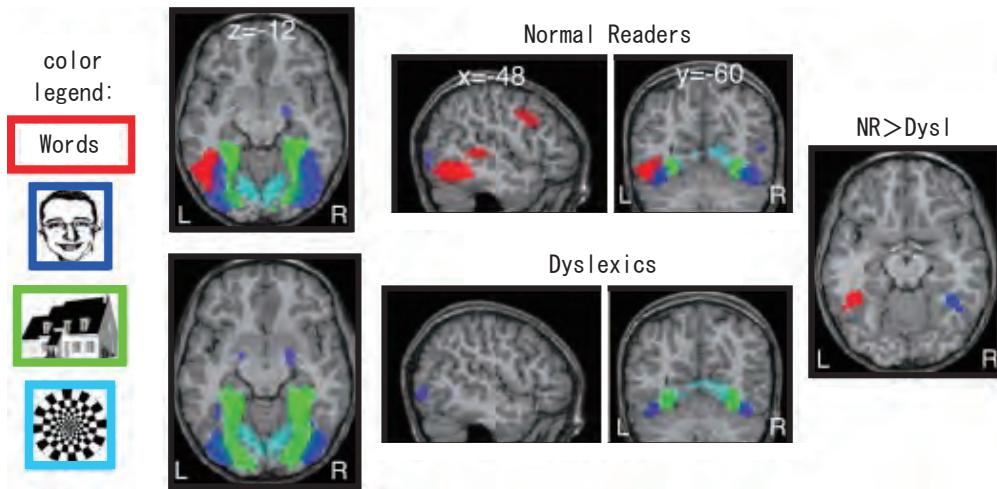


図 2.12 読み障害児と読み障害がない子どもの脳の活動を捉えた fMRI 画像

fMRI を用いた脳の活動の研究で ADHD 者は抑制時に、右下前頭皮質、補足運動野、前部帯状回、線条体一視床領域、注意の際に背外側前頭前野、後部大脳基底核、視床一頭頂領域の活動低下が認められたことが分かっている⁷⁾。

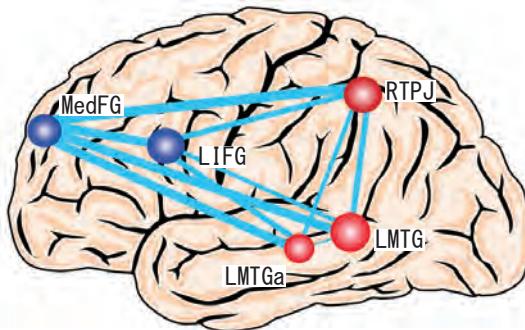
このように脳の各部位の活動を捉える fMRI によって発達障害児の脳の一部の活動異常が報告されている。

(4) 発達障害児における脳内ネットワークの異常

発達障害児の脳研究において、発達障害児では脳の複数の部位の機能的コネクティビティ（連結）が弱いことが明らかになっている。

fMRI などに関するレビュー研究で、ASD 者は前頭領域と後頭領域のコネクティビティがさまざまな認知課題実施時や安静時において低いことが指摘されている¹⁹⁾。

Mason ら (2008) は、自閉スペクトラム症における推論文章理解の課題時の前頭領域と後頭領域の機能的コネクティビティの低さを明らかにしている。つながっている線の太さは、自閉スペクトラム症群と定型発達群の間の機能的コネクティビティの違いの t 値を表している。図 2.13 のように前頭領域の MedFG (内側前頭回) と後頭領域の RTPJ (右側頭一頭頂接合部) は最も群間の差があることが分かっている (Mason et al., 2008)。このように自閉スペクトラム症児では脳内の長い経路の問題が指摘されており、それが社会的交流など、複雑な脳内ネットワークを必要とする場面における問題と関係している可能性が示唆されている。



自閉スペクトラム症における推論文章理解の課題時の前頭領域と後頭領域の機能的コネクティビティの低さを示している。線の太さは、自閉症群と定型発達群の間の機能的コネクティビティの違いの t 値を表している。最も太い線（最も群間の差がある）は前頭領域と後頭領域をつなぐものである。（Mason et al., 2008）

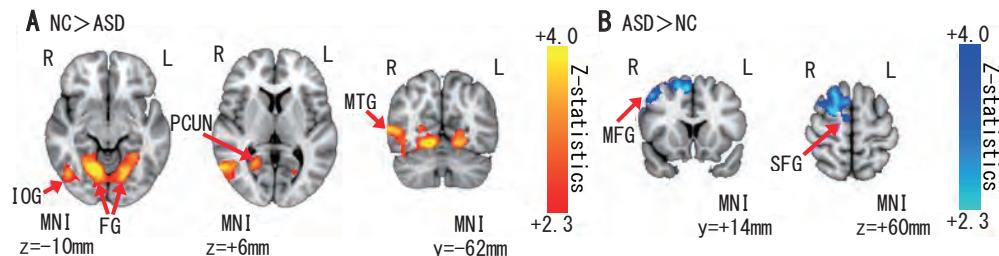
MedFG – 内側前頭回；LIFG – 左下前頭回；RTPJ – 右側頭 – 頭頂接合部；LMTG – 左中側頭回；LMTGa – 左中側頭回前部

図 2.13 自閉スペクトラム症群と定型発達群の間の機能的コネクティビティの違い

発達障害児における脳の白質の異常も報告されている。

小児期の ASD の脳の拡散テンソル画像 (diffusion tensor imaging : DTI) を用いた研究では、脳梁、内包、小脳上中脚のコネクティビティの減少が報告されている⁴⁾。思春期の ASD の研究では、脳梁の容量の低さと上側頭回と temporal stem (側頭葉とその他の領域をつなぐ白質経路の収束部) の白質形成異常が示されている¹⁵⁾。

ASD では、右の上前頭回、中前頭回における局所での過剰連結があり、両側の紡錘状回と右の中頭頂回との局所における連結の低さが明らかになっている¹⁰⁾。



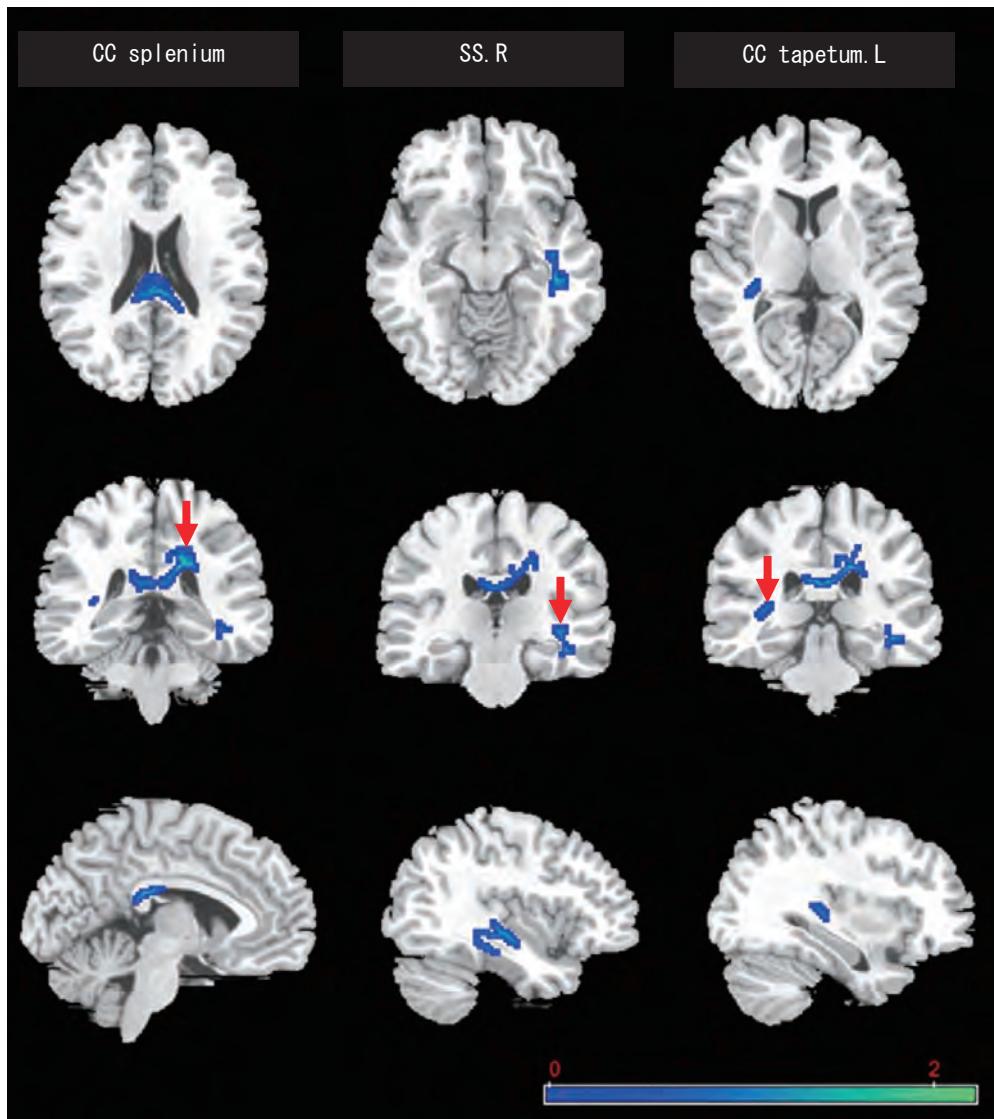
赤と黄色で示された領域は、ASD 群のほうがコントロール群よりもコネクティビティが低いところ、青色は ASD 群のほうがコントロール群よりもコネクティビティが高いところ。

A. ASD 群は両側舌状回 (LING)、両側紡錘状回 (FG)、右側頭回 (MTG) を含む大きなクラスター (4360 voxels) ではコネクティビティが低い。

B. 一方、右上前頭回 (SFG)、内側前頭回 (MFG) を構成する小さなクラスター (1809 voxels) では ASD 群のほうがコネクティビティが高い。

図 2.14 ASD 群とコントロール群のコネクティビティ比較

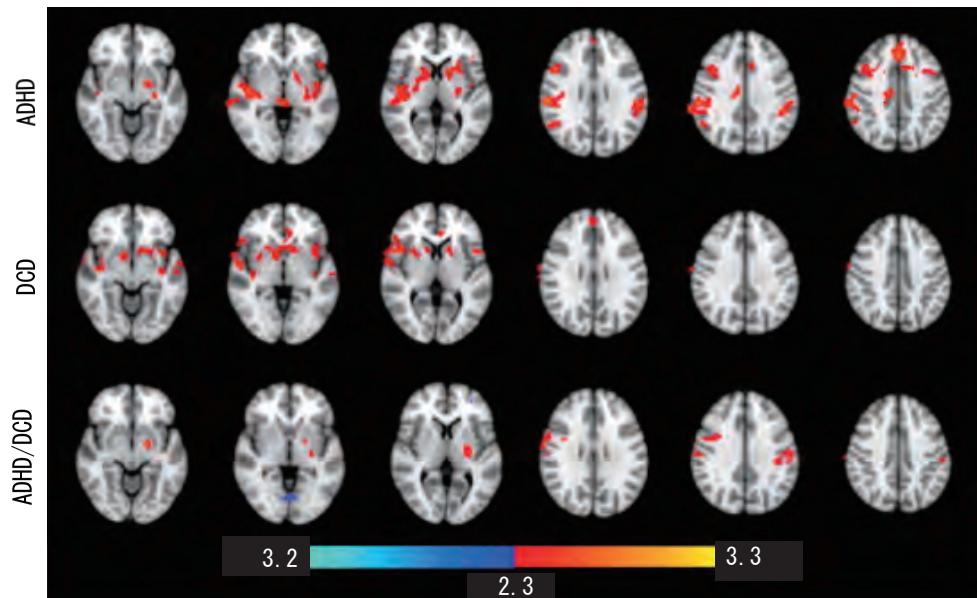
ADHD の研究においても、コネクティビティの問題が示唆されている。ADHD の人の脳の白質の研究において、ADHD の人は、定型発達者に比べ右帯状束、右矢状層、左壁板まで伸びる脳梁の FA (fractional anisotropy) 値が低いことが分かっていることから (図 2.15)、ADHD の人の脳における線維の低形成が明らかになっている⁵⁾。



3 つのクラスターにおいて ADHD 者は定型発達者と比較して FA 値が低下していた。
 the splenium of the CC extending to the right cingulum, the right SS, and the left CC tapetum.

図 2.15 ADHD の人と定型発達者との FA 値の比較

発達性協調運動症と ADHD の脳の安静時 MRI を用いた研究において、DCD と ADHD では定型発達者に比べ、第一次運動野と両側の下前頭回、右縁上回、角回、島皮質、扁桃体、被殻、淡蒼球の間の機能的連結に類似した低下が認められた¹⁶⁾ (図 2.16)。このことから、DCD と ADHD は脳内運動回路に異常があることが示されている。



定型発達者が ADHD (上)、DCD (中)、DCD+ADHD (下) と比較した場合に左の第一次運動野とより強い機能的コネクティビティ (赤) と低い機能的コネクティビティ (青) を示す。

図 2.16 機能的コネクティビティの比較

(5) 発達障害児者の神経伝達物質の異常

セロトニン合成は、定型発達の場合、子どもが大人の 2 倍あり、5 歳頃から減っていくが、ASD ではセロトニン合成が 2~15 歳にかけて大人の 1.5 倍あることが分かっている⁸⁾。また、ASD では前頭眼窩領域におけるドーパミントランスポーターが増加していることも指摘されている⁸⁾。視床におけるセロトニン受容体の低下は、ASD のコミュニケーション障害と関係していたことも明らかになっている。

3.2 おわりに

子どもの脳の発達と発達障害児などにみられる脳機能の問題を説明した。臨床場面において、ここで紹介したような子どもの行動や対人関係の背景にある脳機能障害を思い出すことは重要と考えられる。子どもの脳の機能異常は、脳のある部位の形態の異常だけでなく、他の部位との連結、神経伝達物質の働きの異常などによつ

ても起こることを思い出す必要がある。

参考文献

- 1) Barcovich AJ: Normal development of the neonatal and infant brain, skull, and spine. *Pediatric Neuroimaging*, 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins. 17–75, 2005
- 2) Blanken LME, Dass A, Alvares G, van der Ende J, Schoemaker NK, El Marroun H, Hickey M, Pennell C, White S, Maybery MT, Dissanayake C, Jaddoe VWV, Verhulst FC, Tiemeier H, McIntosh W, White T, Whitehouse A. A prospective study of fetal head growth, autistic traits and autism spectrum disorder. *Autism Res.* doi: 10.1002/aur.1921. 2018
- 3) Bonvicini C, Faraone SV, Scassellati C. Attention-deficit hyperactivity disorder in adults: A systematic review and meta-analysis of genetic, pharmacogenetic and biochemical studies. *Mol Psychiatry*. 21(7):872–84. 2016
- 4) Brito AR, Vasconcelos MM, Domingues RC, Hygino da Cruz LC Jr, Rodrigues Lde S, Gasparetto EL, Calçada CA. Diffusion tensor imaging findings in school-aged autistic children. *J Neuroimaging*. 19(4):337–43. 2009
- 5) Chen L, Hu X, Ouyang L, He N, Liao Y, Liu Q, Zhou M, Wu M, Huang X, Gong Q. A systematic review and meta-analysis of tract-based spatial statistics studies regarding attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neurosci Biobehav Rev*. 68:838–847. 2016
- 6) Engelhardt E, Inder TE, Alexopoulos D, Dierker DL, Hill J, Van Essen D, Neil JJ. Regional impairments of cortical folding in premature infants. *Ann Neurol*. 77(1):154–62. 2015
- 7) Hart H, Radua J, Nakao T, Mataix-Cols D, Rubia K. Meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies of inhibition and attention in attention-deficit/hyperactivity disorder: exploring task-specific, stimulant medication, and age effects. *JAMA Psychiatry*. 0(2):185–98. 2013
- 8) Hwang BJ, Mohamed MA, Brasic JR. Molecular imaging of autism spectrum disorder. *Int Rev Psychiatry*. 29(6):530–554. 2017
- 9) Ismail MM, Keynton RS, Mostapha MM, El Tanboly AH, Casanova MF, Gimel' farb GL, El-Baz A. Studying Autism Spectrum Disorder with Structural and Dif-

- fusion Magnetic Resonance Imaging: A Survey. *Front Hum Neurosci.* 11;10:211. 2016
- 10) Itahashi T, Yamada T, Watanabe H, Nakamura M, Ohta H, Kanai C, Iwanami A, Kato N, Hashimoto R. Alterations of local spontaneous brain activity and connectivity in adults with high-functioning autism spectrum disorder. *Mol Autism.* 24;6:30. 2015
- 11) Kapellou OI, Counsell SJ, Kennea N, Dyet L, Saeed N, Stark J, Maalouf E, Duggan P, Ajayi-Obe M, Hajnal J, Allsop JM, Boardman J, Rutherford MA, Cowan F, Edwards AD. Abnormal cortical development after premature birth shown by altered allometric scaling of brain growth. *PLoS Med.* 3(8):e265. 2006
- 12) 小西行郎 : 赤ちゃんと脳科学. 集英社新書. 2003
- 13) Kuklisova-Murgasova M, Aljabar P, Srinivasan L, Counsell SJ, Doria V, Serag A, Gousias IS, Boardman JP, Rutherford MA, Edwards AD, Hajnal JV, Rueckert D. A dynamic 4D probabilistic atlas of the developing brain. *Neuroimage.* 54(4):2750-63. 2011
- 14) Lange N, et al: Longitudinal Volumetric Brain Changes in Autism Spectrum Disorder Ages 6-35 Years. *Autism Res.* 8(1): 82-93. 2015
- 15) Lee JE, Bigler ED, Alexander AL, Lazar M, DuBray MB, Chung MK, Johnson M, Morgan J, Miller JN, McMahon WM, Lu J, Jeong EK, Lainhart JE. Diffusion tensor imaging of white matter in the superior temporal gyrus and temporal stem in autism. *Neurosci Lett.* 424(2):127-32. 2007
- 16) McLeod KR, Langevin LM, Goodyear BG, Dewey D. Functional connectivity of neural motor networks is disrupted in children with developmental coordination disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuroimage Clin.* 2014 Mar 26;4:566-75. doi: 10.1016/j.nicl.2014.03.010. eCollection 2014.
- 17) Monzalvo K, Fluss J, Billard C, Dehaene S, Dehaene-Lambertz G.: Cortical networks for vision and language in dyslexic and normal children of variable socio-economic status. *Neuroimage.* 2012 15;61(1):258-74
- 18) 丹羽轍、相田典子 : 正常脳 : 成長に伴う変化. 小児科診療. 72(3): 413-419, 2009 2017
- 19) Schipul SE, Keller TA, Just MA. Inter-regional brain communication and its disturbance in autism. *Front Syst Neurosci.* 22;5:10. 2011
- 20) 城所博之. 新生児の脳機能—胎児期からの連續性. 医学のあゆみ. 260(3):226-230,
- 21) 津本忠治 : 脳と発達 - 環境と脳の可塑性 (シリーズ脳の科学) 朝倉書店. 1986