

子どもの脳と発達

— 神経発達心理学序論 (I) —

Brain and development in the child

— Introduction to neurodevelopmental psychology (I) —

永江 誠司

NAGAE Seiji

第四部 学校教育講座

(2001年8月21日 受理)

神経科学と認知科学が融合して誕生した認知神経科学は、脳と心にかかわるあらゆる研究分野に浸透し、影響を及ぼしつつある (Gazzaniga, 1995; 永江, 1999, 2000; Nagae & Moscovitch, in press; Nelson & Luciana, 2001)。本論では、こうした文脈に沿って、脳の発達が子どもの精神発達とどのようにかかわっているのかについて論じてみたい。もちろん、脳についての知識は現在でも十分ではない。わからないことのほうが、まだ多い。したがって、論の展開に限界のあることも十分に認識しつつ、脳の発達の視点からみた子どもの高次精神機能の発達の形成について考察してみたい。

本論では、高次精神機能の発達を脳機能の発達との関連において研究するものとして「神経発達心理学」を定義し、この枠組みから新しい発達心理学の基礎論を提案してみたい。

脳の進化

MacLean (1990) は、脳の進化の視点から人間の脳が3つの層からなっていることを示している。最下層の爬虫類脳、その上に下等哺乳類脳、さらに最上層の高等哺乳類脳の三層構造として人間の脳を図式化したのである。これを、三位一体脳モデルという。脳の進化は、爬虫類などの原始的な脳に下等哺乳類の古い脳が覆いかぶさり、さらにその上に高等哺乳類の新しい脳がつけ加わるようにして進められてきた、と MacLean (1990) は考えている。こうした人間の脳は、他の動物の脳と比較してどのような特徴をもっているのだろうか。

脳の重さ

脊椎動物の脳の重さを比較すると、下等動物か

ら高等動物に進化が進むにつれて脳は大きく、重くなっていく。人間の脳は男子で平均1350グラム、女子では平均1250グラムあるが、それは350グラムのチンパンジーの脳に比べても3~4倍も重く、高等哺乳類の中では群を抜いて重い脳となっている。確かに、脳重量からみれば人間よりはるかに重い脳をもっている動物はいる。例えば、ゾウは4000グラム以上、マッコウクジラは9000グラム以上の脳をもっている。ただ、ゾウの脳は体重の560分の1、マッコウクジラの場合は1400分の1にすぎない。人間の脳が体重の38分の1であるのと比較すると、たいへん小さな脳であることがわかる。

脳の形

脳の形も進化のレベルで違っている。それぞれの動物の脳は、その行動特性に応じて各部分の発達特徴が違ってくる。例えば、トリやネズミなど敏捷な運動をする動物では、姿勢や運動の調整を営む小脳が特に発達している。しかし、各動物の脳を比較してみると一番違うのは大脳半球であろう。他の動物に比較して人間の大脳半球は著しく大きく発達しており、しわも多く表面積が広がっている。

さらに、人間では大脳半球の中の前頭葉領域が著しく発達しており、大脳全体の3分の1以上を占めている。この前頭葉の前方を前頭連合野という。人間では大脳皮質のおよそ30パーセントを占めている。しかし、ネコでは2~3パーセント、イヌでは6パーセント、そしてサルでは12パーセント、チンパンジーでは17パーセント程度となっている。ここから、人間の前頭連合野は、生物進化の中で最も近い関係にあるチンパンジーと比べても著しく大きいことがわかる。したがって、人間の脳と他の動物の脳の決定的な違いは前頭連合

野にあるといえ、それが人間と他の動物との機能的差異を作り出しているのだ、とも考えられるのである。

脳の発達

脳の発生

個体発生は系統発生を繰り返すといわれる。人間の脳の発達の様子、特にその初期の発生過程には、このことがよく当てはまる。

個体の発生は、精子と卵子の受精から始まる。人間の胎生期間は280日で、最初の8週までを胎芽（胚子）期、それ以後を胎児期という。脳の形状が最初に現れるのは、受精後約3週間たった頃である。身長が3ミリ程度の胎芽の時期である。脳は、まず神経管の一端がふくらむという形で芽生え始める。5週間後には脳幹の発生がみられ、7週間で大脳半球が出現し始める。そして、5か月を過ぎると急速に大きくなり、人間の脳らしく見えてくる。7か月頃になると、一段と大きさを増した大脳に溝や回がみられるようになり、いわゆる脳のシワが現れ始める。9か月になると、正常な大人の脳とほぼ同じ形を見せるようになる。

胎生期における脳の発達をみると、最初の2か月は主として形の変化が次々と起こり、その後は容積の増大が急速に起る、とまとめることができる。胎生期間の脳重量の変化をみると、4か月めの頃には20～30グラムぐらいしかないが、その後急速に増加して出生時にはおよそ400グラムぐらいになる。この時期の脳重量の増加は、主として神経細胞（ニューロン）の分裂・増殖によるものである。ちなみに、出生時の大脳皮質の表面積はおよそ680平方センチメートルくらいである。

神経細胞の分裂・増殖は、胎生期に完了し出生後には起こらず、さらに神経細胞は再生しないとされている。だから、約140億個という大脳皮質の神経細胞の数は、出生時で最も多く、その後は減少するだけとなる。ただ、最近の研究では、サルの前頭連合野、頭頂連合野、側頭連合野の神経細胞は増殖して数が増えると報告されており、これまでの考え方とは異なる見解が示されている。これは、きわめて大きな問題であるが、現在のところこの見解を支持する研究はまだ限られており、今後の研究が注目されるところである。

脳重量の発達

脳重量の発達曲線 出生時、約400グラムの重さをもつ新生児の脳は、その後、25歳頃まで増加

を続け、男子で平均1350グラム、女子では1250グラムまでに成長する。男女の脳重量差は体重差によるもので、脳の働きの差を示すものではない。

脳重量は、生後6か月頃に出生時の約2倍となり、その後も成長し続けて4～6歳になると成人の約95パーセントに達する。そして、20歳を過ぎて25歳頃に脳重量のピークを迎えるのである。こうした増加は、神経細胞の分裂・増殖によるのではなく、神経細胞の軸索や樹状突起が伸びて成長すること、あるいは神経細胞に栄養を運んでその働きを助けているグリア細胞が増加することなどによっている。

脳重量の発達曲線をみると、まず乳幼児期の増加が急激であることがわかる。「三つ子の魂、百まで」とよくいわれるが、脳の一生にとってもこの時期の発達が大切な意味をもつことを示している。したがって、3歳くらいまでの子どもの学習と経験、教育と環境条件が、子どもの脳の発達を特徴づけていくということは考えられるであろう。ただ、3歳以降の発達がそれまでの経験によって全て決定されると考えるのは正しくない。例えば、頭の良し悪しは脳の重さ、大きさによって決まるのではない。それは、神経回路のネットワークの違いによって決まるのである。神経回路は、3歳以降の発達過程でより緻密なネットワークが形成されていく。それは終生続けられ、知能を形成していくのである。

20歳の半ばすぎから、脳重量は少しずつ減少しはじめる。20歳から80歳になるまでの間に、新皮質にある神経細胞の数はおよそ30パーセント減少し、表面積もおよそ10パーセント減少すると推定されている。計算上は、20歳すぎから毎日10万個の神経細胞が脳の中で死んでいることになる。神経細胞の数だけで脳の働きの良し悪しを判断することはできないが、脳の成長期に豊かで最適な学習をすることで、脳の神経回路を発達させることができる。それによって、脳の働きを高齢になっても維持することができるのである。「鉄は熱いうちに打て」というが、脳も若いうちに鍛えることが大切といえるだろう。

傑出脳 脳の重さと知能の発達について「重い脳をもっている人が、高い知能をもっているのではないか」と考えられ、傑出脳の研究が行われたことがあった。例えば、政治家の桂太郎の脳は1600グラム、宗教家の内村鑑三の脳は1470グラム、作家の夏目漱石の脳は1425グラム、ドイツの政治家のビスマルクの脳は1807グラム、哲学者のカントの脳は1650グラム、フランスの皇帝ナポレオン

の脳は1500グラムとかなり重かったが、物理学者の湯川秀樹の脳は1370グラム、思想家の中江兆民の脳は1310グラム、植物学者の南方熊楠の脳は1260グラム、ドイツの化学者のブンゼンの脳は1295グラム、フランスの文学者のアナトール・フランスの脳は1017グラムなど、平均的な脳の重さであったり、かなり軽いケースもあったのである。優れた人物でも、平均かあるいはそれよりかなり軽い脳をもっていることも示されているのである。脳は重い方が優れているという説は、その後、一般の人を対象にしても検討され、今日では信憑性のない説と考えられている。

脳梁の発達

左右の大脳半球を結ぶ神経繊維を交連繊維というが、その中で最も大きな束を脳梁という。およそ2億本の神経繊維からなっている。脳梁の交連繊維は、新皮質の連合野につながっている。したがって、左右半球の連合野の情報を交換する重要な連絡路となっており、思考など高次精神活動に大切な役割を果たしている。さらに、左右半球はその働きの上で違いがあるが、例えば右半球に入った情報で言語処理をする必要のあるものは、脳梁を通して左半球の言語中枢に送られることになる。

このように、脳梁は脳がより高次に、また効率的に働くために重要な役割をしているが、脳梁も子どもの成長に伴って発達していく。Springer & Deutsch (1997) は、脳梁の発達についての見解をまとめ、脳梁が最も急速に発達するのは胎児期であること、出生時から2歳までの期間にかなり急速に発達することを示している。2歳以降の脳梁の発達については十分なデータがないが、脳梁はゆっくり発達して15~16歳の頃に成人の大きさに達すると考えられている。ということは、この年齢の頃に左右半球は最も効率的に連携し、協調しながら働くようになると推定することができる。

神経細胞のしくみ

神経細胞の構造

脳を細胞レベルの構造としてみると、それは神経細胞とグリア細胞からなっていることがわかる。神経細胞は脳の働きを支える細胞であり、精神活動に直接かかっている主役の細胞といえる。これに対し、グリア細胞は神経細胞に栄養を供給したり、老廃物を分解したり、あるいは神経繊維に巻きついて髄鞘（ミエリン）を作る働きをしている。

神経細胞の構造は、細胞体、複数の樹状突起、

そして1本の軸索からなっている。細胞体は、栄養の中心で神経細胞の生命を保っている。樹状突起は、接合する神経細胞から送り込まれた電気的信号（神経パルス）を受信して細胞体に運ぶ働きをしている。つまり、神経情報の入力にかかっているのである。樹状突起は、太くて短いのが特徴である。長くても1センチメートル程度しかない。軸索は、電気的信号を細胞体から他の神経細胞へ送信する働きをしている。つまり、神経情報の出力にかかっているのである。軸索は、細くて長いのが特徴である。長いものでは1メートルを超えるものがある。

軸索は、髄鞘といわれる被膜をもっている。髄鞘は、軸索の中を通過する電気的信号が外に漏れないように、絶縁体の役割をしている。軸索が髄鞘化されていることによって、神経情報はより速く、漏れなく転送されることになる。軸索の先端は、細かく枝分かれして小さな神経終末をつくっている。この神経終末から、他の神経細胞の樹状突起や細胞体に信号を伝える接合部をシナプスとよんでいる。

シナプス部分は連続しているのではなく、切れて接触しているかたちになっている。このすきまをシナプス間隙という。シナプス間隙の距離は、およそ20ナノメートルである。髪の毛の直径の4000分の1から5000分の1ほどの距離である。軸索を通して伝えられてきた電気的信号は、シナプス部分で止まってしまう。では、どうやって信号が次の神経細胞に伝えられるかということ、終末ボタンに含まれている多種多様な神経伝達物質により化学信号に変えられて運ばれるのである。

神経伝達物質

神経伝達物質は百数十種類あるとみられている。このうち、攻撃性や創造性、あるいは精神分裂病やパーキンソン病にかかわるとされるドーパミン、幸福感や不安、あるいはうつなどの情動にかかわるとされるノルアドレナリン、覚醒や睡眠などの生体リズムや情動にかかわるとされるセロトニン、記憶にかかわり、アルツハイマー病の治療薬として注目されているアセチルコリン、さらに痛みの緩和や幸福感にもかかわるとされるエンドルフィンなど、はっきりその働きが確認されているのは25種類くらいである。心の働きは、脳内の神経細胞間を駆けめぐらした神経伝達物質の働きによって決められている、ということもできるのである。

神経細胞の成熟

大脳皮質には、約140億個の神経細胞があると推定されている。神経細胞は、出生後に数は増えないし、また壊れたり死んだりしても再生されることはないと考えられている。したがって、生後、脳の重さや大きさが増えていくのは神経細胞が増えていくからではなく、それ自身が成熟していくこと、グリア細胞が増えていくからである。

脳機能の発達との関係でいえば、神経細胞の成熟が特に注目される。神経細胞が、細胞体、樹状突起、そして軸索からなることはすでにふれた。神経細胞の成熟というとき、樹状突起と軸索の発達がその中心となる。樹状突起の発達は、その分枝が伸びて複雑になることと、その先端に形成されるシナプスが増えることを意味している。また、軸索の発達はそれ自身が伸びることと、髄鞘化が進むことを意味している。

樹状突起の発達

神経細胞は成長するに伴って変化していくのだが、その最も顕著な変化が樹状突起に表れる。発達に伴って樹状突起が伸びて複雑になり、数も増えて広がりが大きくなっていく。樹状突起の発達は胎生期に始まり、出生してから1年までの間に急速に進み、さらにその後も青年期まで進められていく。樹状突起の伸びは成人期以降もその可能性を残しており、学習と経験の影響を受けてその発達が継続されると考えられている。

樹状突起は神経情報を受け取る役割をしている。したがって、樹状突起の発達は、受信する神経情報の量が増えることを意味している。樹状突起は、伸びて広がることによって他の神経細胞とつながっていき、複雑な神経回路を形成していく。

神経回路の形成

神経回路が形成されていく過程は、時実（1970）によって3つの発達段階に分けられている。第1段階は生まれてから3歳頃まで、第2段階は4歳から7歳頃まで、そして第3段階は10歳前後の頃である。この後の神経回路の形成はゆっくり進み、20歳の頃にピークに至る。こうしてみると、第1段階は乳児期から幼児期前期に、第2段階は幼児期後期から児童期前期に、第3段階は児童期後期から思春期に、さらにそれ以降は青年期に、それぞれ大まかに対応しているといえる。

3つの発達段階における神経回路網の形成は、大脳皮質全体に均質に行われるのではなく、生まれ

てから3歳までと、4歳から7歳までの神経回路形成の部位は異なっている。4歳から7歳と10歳以降でも異なっている。つまり、異なる精神活動を営む神経回路が、3つの異なる時期に形成されているということになる。これらの時期は、心身の発達の節目にあたる時期といえる。例えば、感覚運動的段階から前操作的段階、そして操作的段階へとこの知能発達の節目や、第1反抗期と第2反抗期の発生する時期に該当している。

シナプスの増加

シナプスの発達 神経細胞の発達に伴って、シナプスとよばれる神経細胞間の接合部の数が増えていく。人間の脳大脳皮質前頭連合野のシナプス数の発達の变化をみると、生後5歳頃までシナプス数は増加し、7歳前後にピークとなり、以後減少することがわかっている。だいたい15歳の頃に成人のシナプス密度に近くなる。成人の大脳皮質には約140億個の神経細胞があるが、各神経細胞には数千から2～3万のシナプスがあると推定されている。

神経細胞は、出生前に細胞分裂を完了しているが、過剰に作られているために細胞密度が非常に高く、そのために出生前から出生後にかけて数がかんたん減少するという現象が起こる。およそ半数の神経細胞が、生まれるまでに消失すると推定されている。これをアポトーシス（自然細胞死）という。これは、正常に発達する脳に必ず起こる現象である。

シナプスとアポトーシス アポトーシスがどうして起こるかという点、過剰に作られた神経細胞を整理することによって細胞密度を低くし、残った神経細胞の発達を促進するところにある。つまり、神経細胞の間引きが起こってはじめて、残された細胞の樹状突起の発達がしやすくなり、その結果、シナプスも急速に増えることができるのである。シナプスの形成は、したがって人間の場合は生まれる前から始まっているわけである。アポトーシスには、この他に本来結合されてはならない神経細胞間にできた結合、例えば視覚野と聴覚野の神経細胞間にできたような異常な結合（異所性の結合）が淘汰されるという意義もある。

このアポトーシスが起きる時期の後半から以降にかけて、シナプスが急速に形成されるようになる。神経細胞は樹状突起を伸ばして神経回路網を広げていくが、それに伴ってシナプスの数も大きく増えていく。そして、先に示したように、だいたい15歳頃になると急速に減少し成人の密度に近

づいていく。シナプスの形成は、脳の機能的側面をよりよく反映すると考えられている（津本，1986）。そのシナプス形成は、前頭前野が最も遅く成熟に達するが、それに該当する15歳頃という年齢は、精神発達の面でも大きな変化の起こる年齢といえる。

大量のアポトーシスとシナプスの急速な増加と減少が、出生から幼児期、さらに思春期にかけて起こることの意味はどこにあるのだろうか。こうした発達の変化は遺伝によってあらかじめ決められているものだ、というのが1つの説明である。しかし、もう1つの説明は、適切に結合した神経細胞とシナプスが環境要因によって選択されるためだ、というものである（澤口，1999）。つまり、適切で有効な神経細胞とシナプスを選ぶために、脳は多量にその候補者を作ってしておくのだ、と考えるわけである。脳は、身体内外の環境にさらされることによって不適切で無効な神経細胞とシナプスを淘汰し、適切に結合された神経細胞とシナプスだけを残すのである。

ここから、発達初期の環境、成長過程の教育環境が脳を育てる上で重要な意味をもっていると考えられる。発達心理学が見い出してきた子どもの発達における初期経験や臨界期のもつ意義は、脳における神経細胞の成長やシナプスの形成に密接にかかわっているのである。

髄鞘の役割

出生時の神経細胞の数は、成人と同じかそれ以上にあるものの、全体としてはまだ働いていない神経細胞が多い。しかし、脳の成長に伴い樹状突起が伸びて神経細胞間のつながりが増え、それとともに軸索が髄鞘化されて神経細胞の働きが始めるのである。それでは、軸索の髄鞘化はどのようにして行われるのだろうか。また、軸索が髄鞘化されるということは何を意味しているのだろうか。

髄鞘化 神経細胞の軸索は、髄鞘という膜で覆われている。髄鞘は、オリゴデンドログリアというグリア細胞の一種が、軸索にその細胞膜を層状に巻きつけることによって形成される。髄鞘にはランビエ絞輪という切れ目があり、数ミリ間隔で刻まれている。そこは、軸索が露出している。

髄鞘をもつ軸索を有髄神経繊維、もたないものを無髄神経繊維という。両者を比較すると、神経細胞内に伝えられる電気的信号が軸索を通過する速度に大きな差がみられる。無髄神経繊維の信号伝導速度は、秒速30センチメートルから2メートルというスピードであるのに対し、有髄神経繊維

の信号伝導速度は、秒速120メートルくらいのスピードになる。時速に直すと430キロメートルになるから、有髄神経繊維の伝導速度は、無髄神経繊維に比べて非常に速いスピードで神経情報を伝達することができる。

これは、髄鞘が電気を通さない物質でできているために絶縁体の役目をしており、神経情報が漏れたり、また他の神経情報と混信したりといったことを防いでいることによる。さらに、髄鞘化した軸索では、電気的信号が絞輪から絞輪へとジャンプしながら伝わっていく。これを跳躍伝導という。これによって、軸索内での伝導速度がさらに速くなる。髄鞘化には、このように軸索内の電気的信号を確実に伝える働きと、より速く伝える働きがあるといえる。したがって、髄鞘化は脳の発達にとって重要な意味をもっているといえるだろう。

髄鞘化の発達

出生時には、髄鞘化された軸索をもつ神経細胞は一部にしかすぎない。髄鞘化は、その後の脳の発達過程で急速に形成されていく。髄鞘化の発達の变化をみると、まず脳の部位によって違う。脳幹と小脳が一番早く髄鞘化される。これに比べ、大脳皮質の髄鞘化はずっと遅れる。大脳辺縁系の髄鞘化は新皮質より早いことがわかっているが、新皮質では髄鞘化が場所によって違うことが示されている。これらのことは、最近の脳の画像診断法、例えば磁気共鳴画像法（MRI）を用いた研究でも指摘されており、胎生期から生後約2年くらいまでに脳幹、小脳、大脳へと髄鞘化が進み、その後、成人期まで引き続き起こることがわかっている。ただ、この期間でも胎生6か月から生後2年までの髄鞘化が最も著しいとされている。

フレクシヒの発達モデル Flechsig (1896) は、大脳皮質が髄鞘化される時期を詳しく調べている（図1）。図1の上の方は大脳皮質の外側面、下の方は内側面である。図1の中の1から45までの番号は、髄鞘化される順序を示している。小さい番号ほど髄鞘化が早いことを示している。運動や各種の感覚を司る部位の髄鞘化が早く、したがってその機能も早い時期から働きはじめるが、記憶や理解、思考や情操など、高次精神活動を営む部位（連合野）の髄鞘化は遅く、その機能は発達のより後期で働きはじめる。図1の白抜き部分は連合野にあたるが、このうち前頭連合野と側頭連合野は最も遅く髄鞘化が完了する。

髄鞘化の順序は、脳が機能化していく順序を示唆しており、その点で髄鞘化の発達は精神活動の

発達と密接に関係していると考えることができる。したがって、髄鞘化の発達は脳と心の発達過程を照合するときの少なくとも1つの重要な発達軸として考えることができる。脳の髄鞘化の発達が精神発達と並行的関係にあることは、Werner (1948) によっても早くから指摘されており、その点からも妥当性をもつといえるだろう。Werner (1948) は、Flechsig (1896) の髄鞘化の発達をとりあげ、髄鞘化の時期が実際に脳のその部位が機能しはじめる時期であると考えている。そして、脳の運動野、感覚野、さらに後部連合野、前部連合野の順に髄鞘化が進んでいくのに応じて、低次から高次の精神発達が実現されると指摘している。

ヤコブレフの発達モデル Yakovlev & Lecours (1967) は、発達期の脳の髄鞘化をさらに詳しく調べ、各神経系の髄鞘化の始る時期と完成する時期を明らかにして、その間を髄鞘形成サイクルと

する概念を提案している (図2)。図の中で、各グラフの太さは髄鞘化の程度を表し、右端に何本かの縦線で示されているところは、髄鞘化が完成する大体の年齢範囲を示している。

図でみると、脊髄神経系、脳幹、大脳の順にほぼ髄鞘化が進むことがわかる。つまり、筋肉につながる運動神経 (1)、感覚器から脊髄にくる感覚神経 (2) は、出生時あるいは出生まもなくに髄鞘化が完成している。さらに、脳幹にかかわる神経 (3~11) の髄鞘化も、出生時あるいは生後1年目までに早急に完成していく。これらに比べ、大脳の髄鞘化は遅れて完成していく。このうち、視覚 (13)、聴覚 (15)、体性感覚 (14) へ行く神経は、生まれてからおよそ1年かけて髄鞘化が完成していく。手足を動かす運動野から脊髄へ行く神経 (20) も、生後1年をかけて髄鞘化されていく。

しかし、ものを考えて判断を下し、行動を起こ

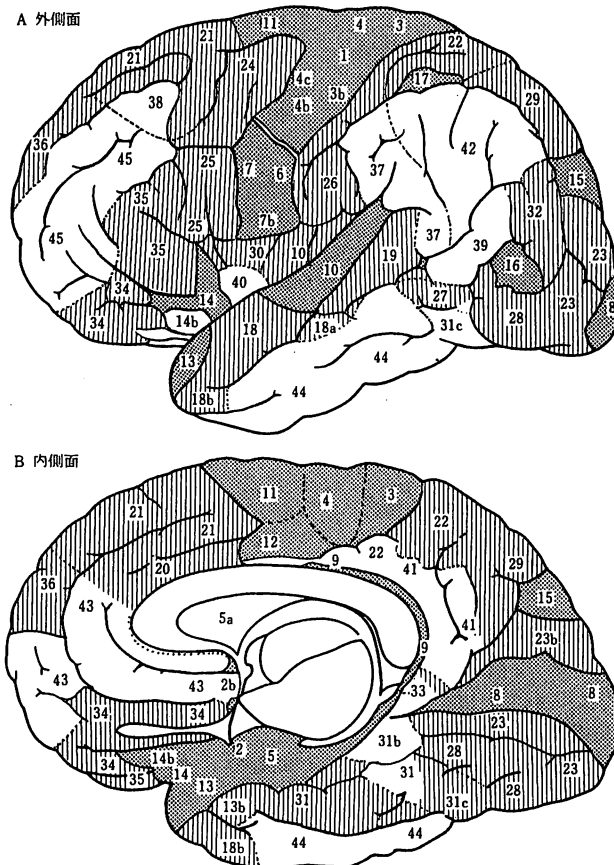


図1 大脳皮質の髄鞘化の順序 (図中の番号は髄鞘化の順序を示す)

すように命令したりといった高次精神活動にかかわる前頭前野に行く神経は、出生時にはまだ髄鞘化されていない。生後4~5か月から髄鞘化が始まり、10歳すぎから20歳頃にかけて完成に近づいていく。

髄鞘化と精神発達 髄鞘化は、乳児期から幼児期を中心に、さらに児童期から青年期を通して、低次の神経系から高次の神経系へと徐々に移行しながら進行していく。この進行の過程は、低次から高次の精神機能の発達過程にきわめて一致していると判断される。ということは、適正な精神発達を促すためには、脳のそれぞれの部位で髄鞘化が起こっている時期に最適な刺激を与えること、言い換えれば最適な環境（教育）と経験を与えることが大切だといえる。子どもの認知課題の処理速度が髄鞘化と相関していることを示した研究のあることから考えても、脳の髄鞘化の発達に則した学習を経験させることが大切だといえるだろう。髄鞘化の時期は遺伝で決まっているので、訓練し

て早めることはできない。だからこそ、髄鞘化されるまさにその時期に、最適な学習経験を与えることが必要なのである。

最後に、人間の脳の髄鞘化は20歳代になって完成に近づくが、それで終了するのではなく、その後も続いていくということを強調しておきたい。つまり、成人期以降も脳は発達していく可能性をまだ残しているのである。

脳波の発達

脳波は、発達年齢を反映するといわれている。体は一人前になっていても、大人の脳波になりきるには18歳から20歳くらいまでかかる指摘されている。

脳波の発達の变化 脳波の発達の变化は、おおよそ次のように起こる（津本, 1986）。まず、脳波は胎生24週頃よりみられるが、新生児期の脳波は不規則な低振幅除波に低振幅速波が重なって律

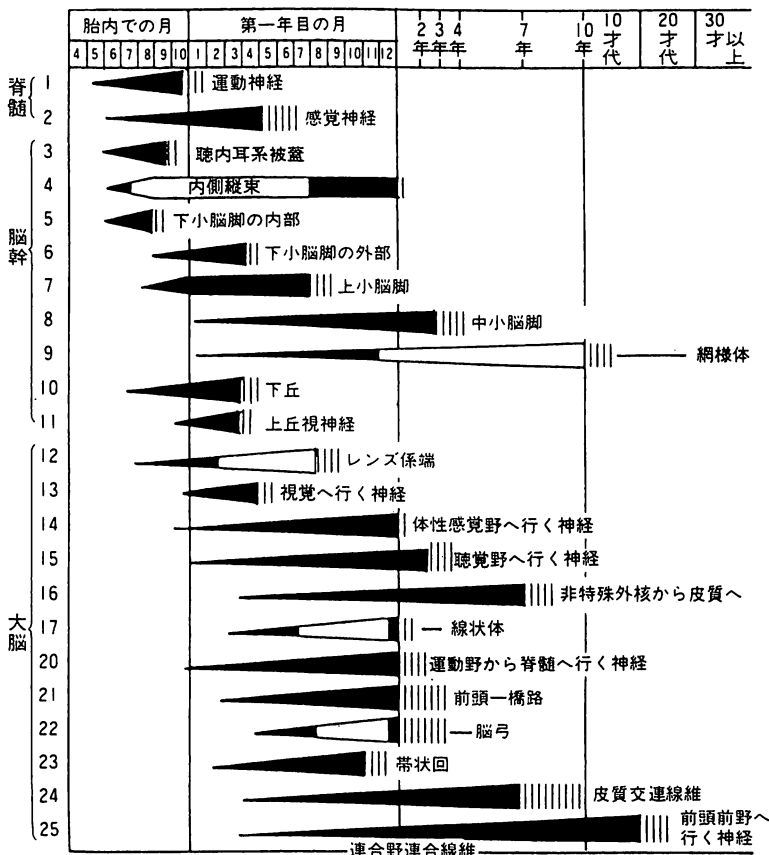


図2 髄鞘化の発達

動性がまだみられない。脳波は、非常に平坦で新生児はおおた眠っているような状態である。1歳をすぎると脳波の律動性が増して、まどろみ状態の時にみられるシータ波（4～7ヘルツ）が優位になってくる。3歳の頃より、覚醒している時にみられるアルファ波（8～13ヘルツ）が多くみられるようになり、6歳をすぎるとアルファ波の周波数がさらに高くなる。8～9歳でアルファ波が支配的となる大人の脳波にかなり近くなっていくが、ほぼ完全に大人の脳波の型になるのは11～14歳頃である。脳波は、脳重量の増加に伴い急速に安定していき、13～14歳の頃に成人型の脳波像になっていく。

睡眠時にみられるゆっくりした脳波のデルタ波（3ヘルツ以下）と覚醒時の脳波のアルファ波が、発達のどう変化していくかを調べてみると、生後1歳までの間にデルタ波が急速に減少していくのに対し、1歳以降にアルファ波が急速に増加し、14歳の頃までそれが続いていく。アルファ波は大人の覚醒時の脳波としてよくみられることから考えると、これらの脳波の発達の変化は、脳の働きが胎生期から乳幼児期にかけて急速に発達し、11～14歳の思春期の頃に大人としての安定した段階に至ることを示しているといえる。

脳波と認知 脳波の中で予期や注意など認知活動に関連して現れる事象関連電位P300の潜時の発達の变化について、計数課題を用いて行われた研究によると、P300の潜時が5歳以降に年齢とともに急速に短縮し、15～17歳で最短値を示し、その後また少しずつ延長することが報告されている（榎, 1990）。この研究では、P300の発達が16歳の頃に完成すると推定されている。P300の発達の变化は、中枢神経系の髄鞘化に関連するものと考えられているが、先にみたように髄鞘化は生後4～5か月から始って、10歳すぎから20歳頃にかけて完成していく。したがって、P300と髄鞘化の発達は、年齢的な変化としても関連していることがわかる。これらのことは、P300が認知発達の神経学的指標として有効であることを示している。

神経細胞と発達

脳の発達を神経細胞の成熟の側面からみてきた。神経回路の形成は、生後急速に進み、10歳から20歳にかけてピークに至る。シナプスの増加は、出生から15歳にかけて急速に進み、その後減少に転じる。神経細胞の髄鞘化は出生から1年までに急速に進み、10歳から20歳にかけて完成していく。さらに、脳波は出生から14歳にかけて安定した大

人の脳波に発達していく。誘発電位のP300も、5歳から16歳にかけて急速に発達していく。

こうしてみると、神経細胞の成熟は出生直後から数年の間に急速に進み、10歳代の半ばから後半にかけてピークに達すると考えることができる。おおまかに、その発達段階を区切れば、第1段階は出生から1歳までの最初の1年間、第2段階は1歳から3歳頃までの幼児期前期、第3段階は3歳から10歳頃までの幼児期後期から児童期前期まで、第4段階は10歳から15歳頃までの青年期前期（思春期）、そして第5段階は15歳から20歳代までの青年期中期から成人期前期までと区分することができる。この5つの発達段階はまだ暫定的なものだが、現時点では脳の発達、とくにその機能の発達を考えていくときの重要な手がかり、指標になるのではないと思われる。

さらに、脳の発達の方向は下から上へ（脳幹→大脳辺縁系→大脳新皮質）、後ろから前へ（後頭葉→頭頂葉→側頭葉→前頭葉）の原則で進み、これに左右半球化が並行して進んでいくと考えられる。

脳機能の発達

脳の発達過程を神経学の側からみてきた。この発達過程に支えられて脳機能の発達の变化が生じ、それが精神機能の発達として現れる。ここではそれを、上下、前後の脳区分を視野に入れてみたい。

ルリアの脳モデル

脳の機能を上下と前後の区分から理論化したものに、ルリアの脳モデルがある（Luria, 1979）。ルリアは、脳をその構造と働きの視点から3つのブロックに分けている。

第1ブロック このブロックは、脳幹および大脳辺縁系にかかわる領域で、大脳皮質を賦活して緊張を保持する働きをしている。感覚器に入ってきた刺激は、神経インパルスとして皮質の特定領域に伝えられるが、脳幹を通る感覚神経路は側枝を網様体に出しているため、インパルスの一部が網様体に流れこむ。その結果、刺激を受けた網様体の興奮性インパルスが皮質に伝えられることになる。そうすると皮質の緊張が高められて、皮質での処理が促進される。大脳皮質の活動水準が、網様体の活動の強弱によって影響を受けるしくみになっているわけである。第1ブロックは、大脳全体に活性を与え、意識水準を支えるといった、エネルギーのシステムとしての働きをしているの

である。

第2ブロック このブロックは、新皮質の中心溝と外側溝より後ろの領域、すなわち頭頂葉、後頭葉、側頭葉の領域で、外部情報を受容、処理し、さらに貯蔵する働きをしている。この領域には、視覚、聴覚、そして体性感覚など外部情報を受容する感覚野があり、またそうした感覚情報を認知し理解するといった、総合的処理をする感覚連合野もある。さらに、処理された情報を言語に変えたり、それを知識として貯蔵するといった、言語や記憶の高次処理をする領野も含まれている。第2ブロックは、刺激を受容して分析し、さらにそれを言語やイメージに加工して、必要なものを貯蔵するといった、入力と総合のシステムとしての働きをしているのである。

第3ブロック このブロックは、新皮質の中心溝の前の領域、すなわち前頭葉の領域で、行為を計画し、それを実行して、その結果と計画が意図したとおりであったかどうかを判断し評価する働きをしている。この領域は、中心溝から前方に向かって運動野、前運動野、前頭前野の3つの領野に分けることができる。前頭前野は行為の計画、制御、調節を受けもっており、前運動野は運動がスムーズに行なえるように、個々の筋肉運動を調整し、統合する働きをしている。そして、運動野は個々の運動を実行する働きをしている。

第3ブロックは、第1ブロック、第2ブロックと密接な神経連絡路をもっており、第1ブロックから賦活を受けて活動を高めるとともに、第1ブロックの過剰な賦活を抑制する働きもしている。第2ブロックからは情報を受動的に受け取って処理をするだけでなく、ある意図にもとづいて情報を選択的に取り入れるといった能動的な処理もしている。第3ブロックは、行為の意図と計画、さらにその実行と結果の評価といった、計画と出力のシステムとしての働きをしているのである。

ゴールデンの発達モデル

ルリアの脳モデルをもとに、脳の発達を5つの段階に分ける発達モデルがGolden (1981)によって提案されている。5つの脳の発達段階は、それぞれ対応する精神機能の発達段階をもっている(坂野, 1997, 1999)。

第1段階 脳の発達の第1段階は、生後2か月までの時期にあたる。つまり、新生児期としての1か月を含む人生の最初期の発達段階である。第1段階の発達にかかわる脳の領域は第1ブロックで、脳幹および大脳辺縁系ということになる。こ

のブロックは、大脳皮質を賦活して緊張を高め、欲求や意欲を支える働きをしている。

生後1～2か月の乳児は、目覚めと睡眠を交互に不規則に繰り返す。この頃の総睡眠時間は、16～17時間である。また、目覚めているときに少しずつ外の世界に注意を示すようになる。この時の注意は、まだ特定の対象に持続的に向けられるものではないが、覚醒時の意識の高まりを示すものとして注目されるものである。脳の発達の第1段階は、覚醒と睡眠のリズムを確立して、それを規則的なものにしていく時期といえる。

第2段階 この段階も生後2か月までの時期にあたり、第1段階と並行して進行する。第2段階の発達にかかわる脳の領域は、第2ブロックの1次感覚野と第3ブロックの1次運動野ということになる。これらの領域は、視覚、聴覚、体性感覚、味覚、嗅覚の五感と、泣いたり、物をつかんだり、目で追ったりといった基本的な運動を支える働きをしている。

第2段階での五感の働きや運動は1次野によるもので、刺激の受容と反射といった初歩的処理といえるものである。ヤコブレフの髄鞘化の発達をみても、視覚、聴覚、体性感覚、そして運動野などは生後およそ1年をかけて髄鞘化されていく。したがって、これらの機能は第2段階以降により大きな発達的变化を示していくことになる。

第3段階 この段階は、生後2か月から5歳の期間にあたる。つまり、乳児期から幼児期という心身発達の変化の大きい時期にあたるわけである。第3段階の発達にかかわる脳の領域は、第2ブロックの2次感覚野と第3ブロックの2次運動野ということになる。これらの領域は、それぞれ感覚系、運動系について1次野より高次の処理を行っているが、第3段階で注目されるのは、2つのブロック間に働きの面で連携が出てくることである。

例えば、乳幼児期の模倣行動はそのことをよく表している。意味のない発声(喃語)を繰り返している乳児は、生後6か月以降、周りから彼らに語りかけられることばの音を模倣しながら母国語を獲得していく。こうしたことばの模倣は、第2ブロックの聴覚野での音韻処理と、第3ブロックの運動野(ブローカ野)での運動処理が連携することによって可能になる。言語機能の発達は、1歳から以降急速に進められていくが、それはコミュニケーション機能だけでなく、第3ブロックにおける思考機能や行動調整機能の側面にも表れてくる。

第4段階 この段階は、5歳から12歳にかかる時期にあたる。ほぼ、児童期がこの時期にあたる。

第4段階の発達にかかわる脳の領域は、第2ブロックの3次感覚野と第3ブロックの3次運動野ということになる。これらの領域は、それぞれ感覚連合野と前頭連合野として情報の理解や言語、イメージへの加工、さらに知識の貯蔵や行為の計画と感情の制御にかかわりをもっている。

したがって、小学校の時期にあたる第4段階は、読み、書き、計算するといった基礎学力の形成に適した時期といえ、また自分の行動を計画して実行したり、感情のコントロールを経験するのにも適した時期といえる。ただ、後者の自律機能の成立は第4段階ではまだ難しく、次の第5段階をまたなければならぬ。

第5段階 この段階は、12歳から20歳半ばの時期である。青年期から成人期前期がこの時期にあたる。第5段階の発達にかかわる脳の領域は、第3ブロックの3次運動野である。つまり、前頭葉前部の前頭連合野ということになる。この領域は、先にふれたように行為を意図的に計画し、それを実行して結果を評価する働きをしたり、思考をプログラミングする働き、さらには感情を統制する働きなどを行っている。

つまり、青年期以降の第5段階は、思考や行為を計画してそれを実行したり、感情の自律を実行する時期にあっている。これは、例えばピアジェの知能の発達段階でいえば形式的操作の知能段階にあたるし、エリクソンの人格の発達段階でいえばアイデンティティ形成の段階にもあたるといえる。

ゴールデンの発達段階を先に示した神経細胞の発達段階に合わせてみると、各発達段階の年齢はそれほど明確に対応しているとはいえない。しかし、出生後の1年間、そしてその後3歳までの期間、さらに12歳前後の時期は、それぞれ脳の各領域の発達において重要な時期、つまり臨界期あるいは敏感期にあたるといえるだろう。したがって、これらの時期を精神発達の節目の時期としてとらえることができると考えられる。

引用文献

- 榎 日出夫 1990 事象関連電位 P300 の発達および加齢に伴う変動に関する研究 脳波と筋電図, 18, 60-67.
- Flechsig, P. E. 1896 *Gehiru und Seele*. Leipzig: Veit und Campagnie.
- Golden, C. J. 1981 The Luria-Nebraska Children's Battery: Theory and formulation. In G. W. Hynd & J. E. Obrzut (Eds.), *Neuropsychological assessment and the school-age child*. New York: Grune & Stratton, Pp.277-302.
- Gazzaniga, M. S. (Ed.) 1995 *The cognitive neurosciences*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Luria, A. R. 1973 *The working brain*. London: The Penguin Press.
- MacLean, P. D. 1990 *Triune brain in evolution: Role in paleocerebral function*. First Plenum Printing. 法橋 登(訳) 1994 三つの脳の進化 — 反射脳・情動脳・理性脳と人間らしさの起源 工作舎
- 永江誠司 1999 脳と認知の心理学 — 左脳と右脳の世界 プレーン出版
- 永江誠司 2000 心はブラックボックスか — 認知神経科学の挑戦 第61回九州心理学会発表論文集, 5.
- Nagae, S. & Moscovitch, M. (in press) Cerebral hemispheric differences in memory of emotional and non-emotional words in normal individuals. *Neuropsychologia*.
- Nelson, C. A. & Luciana, M. (Eds.) 2001 *Handbook of developmental cognitive neuroscience*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- 坂野 登(編) 1997 脳と教育 — 心理学的アプローチ 朝倉書店
- 坂野 登 1999 こころを育てる脳のしくみ 青木書店
- 澤口俊之 1999 幼児教育と脳 文藝春秋
- Springer, S. P. & Deutsch, G. 1997 *Left brain, right brain: Perspectives from cognitive neuroscience (5th ed.)*. W. H. Freeman and Company.
- 時実利彦 1970 人間であること 岩波書店
- 津本忠治 1986 脳と発達 — 環境と脳の可塑性 朝倉書店
- Werner, H. 1948 *Comparative psychology of mental development*. New York: International University Press. 鯨岡 峻・浜田 寿美男(訳) 1976 発達心理学入門 — 精神発達の比較心理学 ミネルヴァ書房
- Yakovlev, P. I. & Lecours, A. R. 1967 The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. A. Minkovoski (Ed.), *Regional development of the brain in early life*. Oxford, Edinburgh: Blackwell.