

はじめに

生物物理が、物理を基盤として生命現象の基本的理解を目指すものであるとすれば、大沢文夫先生がこの分野の黎明期から述べているように、「生命はどこで積木細工を超えるか」が最も基本的な問題であろう。そして、脳の研究は、この問題に最も深く関わっていると考えられる。現在の神経科学では、分子・細胞・回路・個体レベルのあらゆる階層を含んだ膨大な研究が進行している。しかし、個別事象の知見が増加しても、脳というシステムがどのように「生きていること」を担っているのかという全体像を把握することは、依然として難しいままである。近年の神経科学の潮流の一つは、非侵襲脳機能計測手法を用いた人間を対象とした研究の発展であるが、行動学や心理学の研究も重要な役割を果たしている。人間の行動や認知は、モノに還元できず、常に曖昧さを含む状態である。そこで、客観性を確保するために、測定量の平均値が条件間で統計的に異なるかどうかに関心がかたかれ、本来重要であるはずの、現象の動的な側面に関する理解は深まっていない。行動や認知をマクロなレベルの現象と見なせば、それらの「熱力学」に相当する普遍性の高い理解の仕方が必要とされる。ここでは、人間の乳児が様々な行動や認知を獲得する過程の現象論や、脳の機能的活動の発達をマクロな領域のレベルで明らかにすることを旨とした研究を紹介する。生物物理が初期から掲げていた精神のもと、脳を解明するための方向性を議論する機会になればと思う。

生得性と発達

二足歩行すること、言葉を理解したりしゃべったりすること、野球をして楽しむこと、計算をすること、10年前のことを思い出すこと、これらはいずれも個体発生で獲得された能力である。発達研究は、あらゆる行動や認知の獲得の原理の解明を目指している。近年、乳児が運動、知覚、認知に関わる洗練された機構を備えていることが明らかにされている。そこで、新生児がヒトの遺伝子によって規定された能力の集合体であるという生得説と、発達期の環境との相互作用こそ様々な能力の獲得に不可欠であるという主張とをどのように統一するかが大きな課題となっている。その手掛かりとして、U字型発達という現象に注目する(1)。これは、ある機能が漸進的に発達するのではなく、一時期に低下・消失した後再び発現するという非線形な発達を示すものである。人間の発達では生後数ヶ月ごろから急激に大脳皮質が発達すると考えられているが、それまでは皮質下の神経系によって統合された機能が、大脳皮質の働きによって再統合されることが、U字型発達と関連しているかもしれない。私は、神経系での再帰的な結合を持った構造形成が、人間の自己言及的な性質を含む高次の認知機能の獲得に関わっているという仮説を持っており、それを実証的に検証したいと考えている。

運動や知覚の発達における分化

知覚や行動のモデルには、工学的なシステム論の影響を強く受けているものが多い。例えば、環境からの入力を、様々なセンサーが検出し、個々のモダリティーで特徴が分析され、それらを連合し、統合された知覚を得て、得られた情報から行動を計画し、最終的に特定の運動を実行するといった、個々の過程を機能モジュールが担う。しかし、発達を考えた場合、機能モジュールをうまく組み合わせ、階層的に統合するという工学的発想は、根本的に誤っている可能性に気づかされる。そもそも、機能的に異なる役割を担う細胞群は、発生過程では一つの細胞から分化したものであり、ばらばらな部品を組み立てたものではないからである。むしろ統合から分化へと機能モジュールのネットワークが構成されると考えるのが自然である。そして、分化してもシステム全体としての統合は維持される。乳児の視覚系の行動研究で、物の知覚における色や形のような特徴の処理に関して、非モジュール的な知覚からモジュール的な知覚へと発達が進むシナリオを支持する結果が得られている(2)。また、仰向けの姿勢で自発運動を行う乳児の手に紐をつけて、吊るしたモビールを動かして遊ぶ課題での動作の変化を調べた研究では、生後2か月から4か月にかけて、モビールを動かすための運動が一般的なパターンから特異的なパターンへと分化する(3)。さらに、モビールを自分で動かして遊ぶ行為と、他者が動かすのを観察することとが、

生後2か月では区別できない形で生じるが、3か月になると明瞭に分化した形で現れることもわかってきた。このように、行動や認知の発達には、統合から分化という方向に進むというのが、現時点での仮説である。

大脳皮質の初期発達

これまでの神経科学は、機能モジュールを、大脳皮質の低次の感覚野、高次の感覚野、運動野、連合野等にマッピングできることをおおむね支持している。しかし、その発達に関しては、低次の領域がまず機能しはじめて高次の領域ほど後から発達するという階層説と、様々な領域が一斉に機能し始める共時説とがあり、まだ解決されていない。我々の研究グループでは、多チャンネル近赤外分光法（光トポグラフィ）を用いて、乳児期の大脳皮質の機能的活動の発達を調べている(4)。現時点までにはっきりしてきたことは、生後3か月の時点で、低次の感覚野だけでなく高次の感覚野や連合野も、機能的な活動をしていることである。さらに、予備的な結果では、生後2か月で、より広い領域で非特異的な活動が見られる傾向を見いだしている。このことは、低次から高次へと順番に成熟した領域が機能的活動を開始するのではなく、低次と高次の領域が共時的に相互作用しながら、より特異的な機能を担うように分化していくというストーリーを支持している。今後、さらに現象を明らかにするための実証的なデータの蓄積と、階層的なシステムを形成するための理論的な研究が必要である。

言語発達

乳児期初期に、言語が他の認知とは独立に発達するのか、非言語的な認知を基盤として発達するのかは、言語発達に関する重要な論点の一つである。我々のグループでは、言語の知覚がどこまで聴覚処理系に一般的な機構に依存し、どこから個別言語に特異的な処理が行われるのかを皮質の活動を調べることで明らかにしようとしている。皮質活動の一部が生後早い時期からあらゆる音の周波数の変動による抑揚情報に敏感であるが、生後10か月までには、個別言語の抑揚を学習した結果が影響する活動へと変化することを示唆する結果を得ている(5)。このように、言語音の知覚に関しては、一般的な聴覚処理から、言語に特異的な処理が分化するというストーリーが考えられる。ただし、他の行動や認知の発達に比べて極めて早い時期から、高度な処理が可能であることも事実である。

発達と学習

発達の現象で最も興味深い点は、異なる時間スケールが干渉しているように見えることである。例えば、ある時期までに学習しないと生涯その機能を獲得できなくなるという臨界期（感受性期）の性質は、リアルタイムの行動がある条件内で発達に影響を与えることを意味している。一方、誰もが同じような道筋で行動や認知が発達する事実は、発達のタイムスケジュールでその時点で可能な機能が規定されていることを意味している。このように短い時間スケールと長い時間スケールの出来事が相互に関連しあっていることが発達の本質的な特徴である。我々のグループは乳児の馴化脱馴化の現象に注目し、生後3か月の乳児で、繰り返し与えられた聴覚刺激には感覚野は毎回反応するが、前頭前野は新奇な刺激のみに対して大きな活動を生じることを見いだしている(6)。このように大脳皮質では早くから刺激への反応の時間スケールの分離が起きており、そのことが学習の機構と関連していると考えられる。学習したことを記憶し、以後の行動の利用する側面は、前述のモビール課題を用いた研究でも調べることが可能であり(3)、記憶形成の動的性質を明らかにするのに寄与すると考えられる。

- 1) 多賀巖太郎：脳と身体の動的デザイン：運動・知覚の非線形力学と発達、金子書房、2002
- 2) G Taga et al.: Visual feature binding in early infancy. *Perception* 31, 273-286, 2002
- 3) H. Watanabe, G Taga: General to specific development of movement patterns and memory for contingency between actions and events in young infants. *Infant Behavior and Development* 29, 402-422, 2006
- 4) G Taga et al.: Brain imaging in awake infants by near infrared optical topography, *PNAS*, 100-19, 10722-10727, 2003
- 5) F. Homae et al.: Speech perception in the developing brain. *Neuroscience Research* 59, 29-39, 2007
- 6) T. Nakano et al.: Prefrontal cortical involvement in young infants' analysis of novelty. *Cerebral Cortex* (in press)