

[特集：音楽療法]

脳とは？

中田 力

Fundamentals of Human Brain Function

Tsutomu Nakada, M. D., Ph. D.

I 人間の条件

ヒトという種が他の哺乳類より傑出して持つ脳の部分は、前頭葉と小脳である。もう少し正確に言うと、前頭葉の前頭前野(prefrontal)と小脳の新皮質(neocortical)である(図1)。小脳の進化が運動機能の進化に関係しているであろうことは容易に理解されるが、前頭前野の進化はどのような機能と関連しているのであろうか？

脳神経科学者はその答えを一人の患者さんから頂いた。

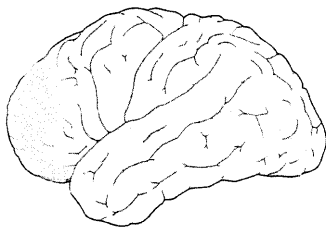
1848年9月13日、米国ヴァーモント州キャベンディッシュ(Cavendish, Vermont)の郊外で脳科学の歴史を変える事件が起きた。鉄道工事の現場監督がとんでもない事故に遭遇する。被害者の名はフィネアス・ゲイジ(Phineas Gage)、爆風に飛ばされた長さ30センチの鉄棒が、彼の前頭葉を貫通したのである。ゲイジは前頭前野

(prefrontal)を殆ど失いながらも、一命を取り留めた。

驚いたことに、生き残ったゲイジにはこれといった機能障害が見られなかった。麻痺も感覚障害もなく、普通の人と全く変わらない「正常な人間」だったのである。ただ、その性格だけは一変したのである。

事故前のゲイジは、責任感の強い優秀な働き手として上司からの信頼も厚く、多くの人に慕われるリーダーでもあった。事故後、同じ顔で、同じ声で、同じように動き回るゲイジは、全く別人であった。つまらない冗談ばかりを並べ、卑猥で、周りの人間に全く気を使う様子もない。頑固で、すぐに切れる。しかし、いざとなるとうじうじと決断が付けられず、やることには悪意が満ちていた。

ゲイジの症例は、前頭前野がどのような役割を果たしているかを我々に教えてくれた貴重な存在となった。そして、ゲイジが教えてくれた「人間の条件」とは「理性を持ち、感情を抑え、他人を敬い、優しさを持った、責任感のある、決断力に富んだ、思考能力を持つ哺乳類」であった。面白いことに、ここには言葉を使うことは入っていない。言語機能はヒトという種の特徴を現す脳の高次機能ではなかったのである。



Anterior

Posterior

図1 前頭前野

II 音楽と言語

カナリヤは歌を歌う鳥の代表として名高い。ただし、成熟すると、オスしか歌わない。

性差があるということは生殖機能にとっての重要性はあるが、カナリヤという種にとって歌うことがそれほど重要な高次脳機能ではないことを意味している。

脳科学の立場から興味深いことは、カナリヤが歌を歌うために用いる脳に優位があることと、その内容が学習によることである。カナリヤは人間の言語同様に、片側の脳を優位に使って歌を歌い、父親から最初の歌を習う。鳥類は恐竜の生き残りとする説が有力であり、哺乳類とはかなり違った進化を遂げた種である。なのに、非常に似通った進化を遂げている。

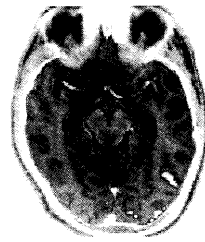
言語と音楽とは殆ど同一の脳機能である(図2)。カナリヤの歌のように、言葉を話す鳥はいくらでもいる。オウムも、九官鳥も、カラスも、驚くほどヒトと同じ言葉を話す。人間の真似をしているだけではあるが、確かに言葉は話す。

鳥類で傑出している脳は小脳である。その点で、人間と共通している。言語における小脳の重要性は臨床的にも良く知られており、自閉症 (autism) の中でも、とくに言葉を発しない子供達は共通して小脳が未成熟である。

ヒトの言語が鳥の「オウム返し」の言語と違うところは、高度の知性に基づいていることである。つまり、ヒトの持っている言語とは単なる言語ではなく、「知性の高い言語」なのである。

鳥類は運動機能としての言語機能は高度化させたが、残念ながら、知性は高度化しなかった良い例である。その結果、歌を歌う能力と、オウム返しの言語能力は手にしたものの、空を飛ぶヒトの新種、鳥人は誕生しなかったという訳である。

Japanese



Music



R L

図2 「読む」機能画像
日本語を「読む」ために使われる脳(A)と楽譜を「読む」ために使われる脳(B)とは、95%以上一致する。

音楽においても同様のことが言える。鳥類は高度な音楽機能をもつが、音楽に含まれた感性の高度化は人類にしか備わっていない。人類の音楽における高い感性の表現には、言語の高度化における知性とと同じく、高い情報処理能力を持つ脳構造が必須なのである。

III 局在論からの脱皮

近代脳科学の歴史はフランスの脳外科医 Pierre Paul Brocaによる失語症の記載に端を発する。以来、ヒトの高次脳機能の脳科学的探究はある特異的な脳機能を司ると考えられる脳の部位を同定することに重点が置かれた。局在論である。この機能局在が脳機能構築の基本ユニットであると考えた局在派 (localizationist) は、高次脳機能すべてを機能ユニットの線形集合として捉えることを目指した。

現象論から見て、脳機能にある程度の「局在」が存在することに異論の余地はない。しかし、脳の最小単位がニューロンであるという central dogma を容認したとしても、母細胞 (grandmother cell) が存在しないことが明らかな現在、局在論的アプローチがある時点で限界に達することには必然性がある。複雑系の代表とされる脳が機能ユニットの線形集合として理解される可能性は

極端に低く、局在論があくまでも現象論に立った実践のための理論であることにも、疑問の余地が無い。

明らかに「感性」の世界は局在論を大きく超えた場に位置する。「感性」の直接的な機能局在が存在する可能性は皆無である。

それでもなお、生体としての脳が実存する以上、動態系としての機能にもそれに適合した構造が存在しなければならない。生物学的実存 (biological realization) である。脳科学が感性へのアプローチに挑みながらも、「心理学」、「行動学」の範疇から抜けきれなかった事実も、また、ニューラルネットで示された機能構築理論が (少なくとも「感性」に関しては) 「理論家の空論」の域を脱しきれなかった事実も、これまで、「感性」に適合できる、実存する構造で保証された脳の動態的活動理論が存在しなかったことに由来する。「感性」の概念は、(そして、恐らくはすべての脳機能は)、ニューロンのネットワークという決定論的記載で説明することが不可能な存在であることは、自明の事実である。

IV 複雑系と自己形成

絶頂期を迎えている染色体科学の進歩は、「染色体にすべてが記載されている」という多大なる誤解を招く結果となった。残念ながら、自然界に登場するどのような構造も、その構造に支えられた機能ユニットも、決定論的単位ユニットの線形集合として捉えることは不可能である。

20世紀末は線形物理学が終焉を迎え、複雑系をキーワードとする非線形物理学が主役の座を勝ち取った躍動の時代であった。これはまた、複雑系の代表格である脳機能が真の意味で物理学の対象となりつつあること意味している。

この時代はまた、詳細な組織形成、機能統合の構築に対する概念に革命的な変化が

見られた時代でもある。それまで詳細なブループリントの存在が必須と考えられていた高度な組織統合構築が、実は、単純な基本ルールに則った基本ユニットの局所的相互作用の結果、自然と完成されるものであることが理解されたのである。いわゆる、自己形成 (self-organization) である。その代表例が雪の結晶である。

自己形成の過程で大切な法則は、マルコフ連鎖 (Markov chain) と呼ばれるものである。マルコフ連鎖では、現在置かれた状態 (M_n) から次の状態 (M_{n+1}) への移行だけを対象とし、現在自分が置かれた状態にどのようにして到達して来たかは問わない (図3)。ただ、次の状態に移行する法則 (Rule M) だけが決められており、同じことを何度も何度も繰り返すのである。ある環境のもとに置かれた粒子の系は、マルコフ連鎖だけで、自ずと形態を形成する。単純な規則だけで美しいパターンを作り上げるのである。

脳は複雑系の代表格であり、染色体に記載された法則に従って自己形成を行う Markovian system の代表でもある。言い換えれば、脳機能とはDNAという初期条件から出発し、成長と環境という境界条件、特に、情報によって決定されていく、パターン形成のようなものである。その機能構築は二つの自己形成の原則に従うと考えられる。形態の自己形成とネットワークの自己形成である。

$$M_n \xrightarrow{\text{Rule M}} M_{n+1}$$

図3 マルコフ連鎖

V 脳形態の自己形成

脳形態の自己形成の原則は、熱対流の法則に従うと考えられている。従って、Boussinesqの偏微分方程式：

$$\begin{aligned} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\nabla \frac{P^*}{\rho} - \beta \theta \mathbf{g} + \mu \Delta \mathbf{v} \\ \mathbf{v} \cdot \nabla \theta &= \chi \Delta \theta \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \end{aligned}$$

を用いて、脳形態の形成過程を詳細にシミュレーションすることができる(図4)。これは、均一の密度 ρ で分布した非圧縮性の流体が $T + \theta$ (T : 均一) の温度に置かれた状態でのFree Convectionを表しており、 $\chi = k / \rho c_p$ は thermometric diffusivity, β は thermo-Expansion coefficient, μ は kinetic viscosityである。また、過剰の圧力の gradientは $\nabla p^* = \nabla p + \rho g$ で与えられる。

母なる自然の大原則において、脳形態形成が熱対流に依存することは脳に熱対流の原則に依存する機能構造が内圧されていることを意味している。

VI 機能の自己形成

ヒトの脳皮質には少なくとも 10^{11} のニューロンと 10^{14} のシナプスとが存在する。これらすべてのネットワーク配列の決定論的記載には、ヒトの持つ 46 の染色体では圧倒的に少なすぎる。従って、染色体に記載されている事項は「法則」のみであり、詳細なブループリントは存在しないであろうことは容易に理解される。事実、Human Genome Projectはヒトの染色体に含まれる遺伝情報がミミズのその二倍ほどであることを確認した。これは、ニューロンのネットワークの機能構築も形態同様、自己形成の原則に従うことを保証している。

自己形成型のニューラルネット理論のうち、脳科学の現象論と最も一致するものは、近傍核 (neighborhood kernel) を基本とする、コホネンのマップ (Kohonen's map) と

呼ばれるものである。(図5)



Simulation

Schema

図4 熱対流による脳の自己形成

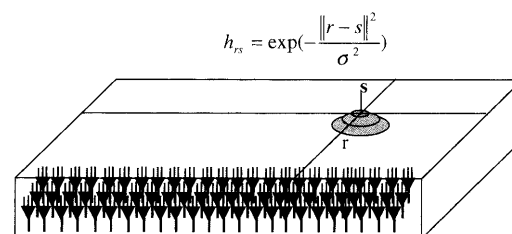


図5 コホネンのマップ

h_{rs} : 近傍核 (neighborhood kernel)

VII 大脳チップ

現象論と線形理論から脱却し脳科学の立場から「感性」にも適合できる脳機能構築を語るには、現象として捉えることのできる局在論を容認しながらも、脳の示す形而上的行動をも記載可能で、かつ、それに対応する機能構造が明らかに脳の構造として実在する、新しい脳理論が必須である。それが、「脳の渦理論 (Vortex Theory of the Brain)」と呼ばれるものである。

渦理論は脳の形態が熱対流の原則に基づいた自己形成よりなることから出発した理論で、脳にはニューロンネットワーク以外にもうひとつ、賦活を司る機能構造を持つことが提唱されている。その構造は LGS (lattice gas shell) と命名され、基本要素として、グリア細胞の足突起によって形成される電子密度の高い層 (Electron-dence Layer) と錐体細胞 (pyramidal cell) の樹状突起 (Dendritic Ramification) とで形成され

るシナプスに似た構造、ELDERをあげている。(図6)

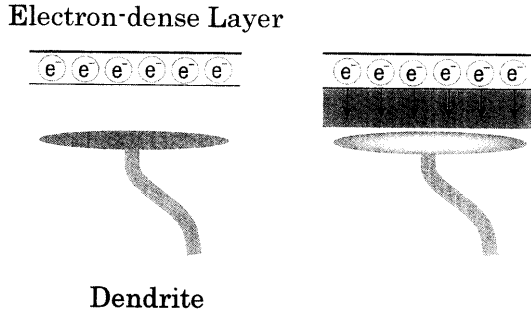
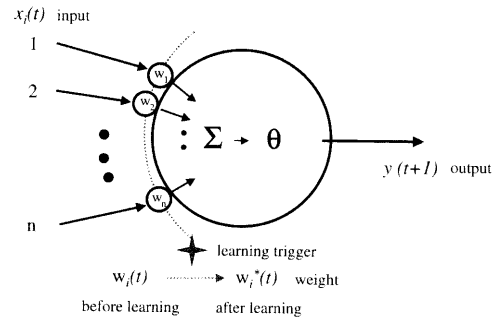


図6 ELDER

ELDERは軟膜 (pia matter) の直下にあるグリアの突起が形成する電子密度の高い膜と錐体細胞 (pyramidal cell) の基本的な樹状突起 (dendrite) とが作る、シナプスのような構造。通常はグリアのアセンブリーによって水の含有量が低い状態に保たれ、電子の流れは起らない (左)。渦波の到来に伴って、水の含有量が閾値に達すると、電子の流れが起る (右)。詳細は suggested reading を参照のこと。

渦理論で提唱された大脳を構成する機能ユニットは、小脳の機能ユニットとされる小脳チップ (cerebellar chip) に対応した呼称として、大脳チップ (brain chip) とよばれる。これは一次元的構造を持つ小脳チップを二次元に展開し、非線形要素をもたせた構造を持つ学習ユニットである。小脳チップの登上線維 (climbing fiber) に対応する機能構造は、熱対流の原則で形作られた脳形態に保証されるグリア細胞のアセンブリー (aquaporin-4) によって維持される空間と、渦波 (vortex wave) によって賦活されるELDERとによって齎される。(図7)

図7 小脳チップと大脳チップ

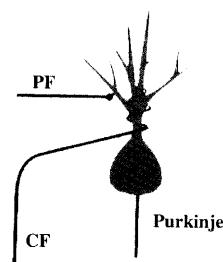


A:

ニューロンの数理モデルはMcCulloch-Pittsの線形閾値モデルを出発点としている (A)。ある時刻におけるインプット信号、 $x_i(t)$ 、はそれぞれ独自の重み (weight)、 w_i 、をかけられた状態でニューロンに伝わり、その合計が閾値 (threshold)、 θ 、に達すると $t+1$ におけるアウトプット信号、 $y(t+1)$ 、が1となるとの概念である。このような単純なユニットの組み合わせにだけでどのような複雑な演算をも為しえることが理解され、ニューラルネットと呼ばれる学問の出発点となった。

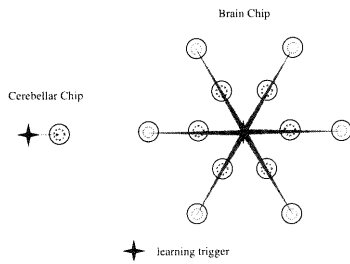
$$y(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum w_i x_i(t) \geq \theta \\ 0 & \text{if } \sum w_i x_i(t) < \theta \end{cases}$$

ニューロンの学習は、特定のインプットにかかる重みを変化させることによって達成されるが、そのプロセスを促すものが、学習トリガー (learning trigger) である。



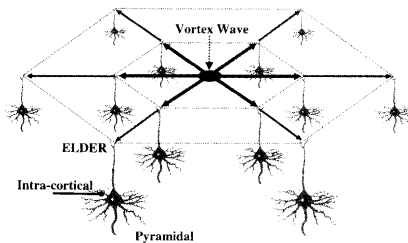
B:

ニューラルネットと同様な機序で学習を行うニューロンのユニットが実際に脳に存在することを証明したものが小脳の研究で、その機能単位は伊藤正男博士の小脳チップとして名高い。インプット信号は平行線維 (parallel fiber: PF) としてアウトプット細胞であるプルキニエ細胞 (Purkinje cell) に伝わる。そのシナプス伝達の efficacy がニューラルネットの weight にあたるもので、学習により変化する (可塑性)。その学習を促すものが、登上線維 (climbing fiber: CF) の発火である。



C :

登上線維の発火が学習トリガーとなる小脳チップ (cerebellar chip) は一次元で線形の形態をしている。これを二次元平面に展開し (この例では二重の六角形)、中心からの距離によってトリガー信号が減衰する構造を持ったものが、大脳チップ (brain chip) である。



D :

大脳チップにおいては錐体細胞 (pyramidal cell) がアウトプット細胞であり、インプット信号を運ぶ皮質内線維 (intra-cortical fiber) とのシナプスの可塑性が学習の対象となる。小脳チップの登上線維に対応する構造がLGS (lattice gas shell) であり、その発火機構はELDERと呼ばれる。登上線維の場合とは異なり、LGSの機構は二次元平面に展開された非線形の発火機構で、同時にいくつもの錐体細胞を中心からの距離によって重みのかかる状態で刺激する。大脳チップはコホネンのマップ (図5) を内在した構造となる。

VIII 社会学的意義

脳機能が自己形成の原則に従って形付けられて行くことは、脳が与えられた環境との干渉の中でその機能構築を行っていることを意味する。言い換えれば、こころは、個が環境と干渉しあうことから生まれてくるのである。

脳は生体であると同時に情報処理の精密機械でもある。従って、環境と脳との干渉にも、生体としての脳のそれと情報処理装置としての脳のそれとの二種類が存在する。

形態に依存した機能は全体としての脳形成に影響を与える環境要素に左右され、情報処理装置としての脳は与えられた情報そのものに大きな影響を受ける。

生体としての脳は他の器官同様に恒常状態 (homeostasis) の維持を原則とし、環境の変化への適合性は低く、かつ、遅い。その反面、情報処理装置としての脳はその基本機能としてある程度の迅速性と許容量を持った環境への適合性を内在している。

適度な環境の変化は、同一世代では「順応」として現れ、世代を重ねることで「進化」の要素となる。処理しきれないほど過度の変化は「防御効果」を発動し、それでも処理しきれない場合は「崩壊」となる。生体としての脳にとっては生体としての生存環境の変化であり、情報処理装置としての脳にとっては、過度の情報を意味する。

脳の使い方は10、12歳までに決定されるとされ、臨界時期 (critical time) と呼ばれる。近年、成長期にある学童児の一部には、明らかに過度の情報を扱いきれない存在が目立つようになった。その特徴は、前頭前野の機能低下である。これは、統合失調症患者に見られる行動異常に類似の現象である。

IX 臨床的意義

2001年8月28日付けのニューヨークタイムズ (New York Times) に、最近のリハビリテーション医学の進歩に関する記事が載った。その中に筆者の長年の友人、ポール・バキリタ (Paul Bach-y-Rita) の仕事が紹介されていた。

ポールはカリフォルニア大学で一緒に仕事をしてきた時代から、盲人の人に視覚を提供する努力を重ねていた。目から脳に伝わらない視覚情報を、皮膚から脳に伝達しようと試みていたのである。眼鏡につけられた小さなCCDカメラの画像を皮膚に当て

られた針のシートに伝え、画像に応じて適応する位置の針が皮膚を刺激するものである。針の刺激で皮膚の上に瞬時に描かれる、白黒の画像のようなものである。Sensory Substitutionと総称される研究の一環である。

この試みは、ある程度の成果を得たが、劇的なものではなかった。脳の使い方が生れ付き詳細に決定されていると信じている人ならば、この時点で諦めるだろう。視覚情報を処理する脳と触覚情報を処理する脳は違うから、画像情報を触覚として入れても無駄であると考えるからでもある。しかし、脳がびっくりするほど柔軟性に富んだ装置であることを嫌と言うほど見てきている臨床医である我々にとっては、脳の機能が問題なのではなく、脳に届く情報の精度が問題であるとの結論になる。

ニューヨークタイムズの記事は、彼が、皮膚ではなく、舌に同じような装置を取り付けることで劇的な躍進を遂げたことを報告していた。生まれつき目の見えなかった人が、他人の顔を見分け、ゆっくり飛んでくるボールをバットで打つことができるようになったと言うのである。ヒトは、条件次第では「舌で見る」ことも可能なことを示していた。

脳が与えられた環境との干渉の中でその機能構造を自己形成することは、「脳がどのようになっても使える」ことを意味する。ポールの症例は、その事実を、はっきりと証明している。

ヒトは、脳のそれぞれの部位に決められた機能を持って生まれてくるのではなく、生まれてからの学習の結果、使い方を決めるのである。大脳機能そのものに障害のない症例では、精度の高い情報が脳に届きさえすれば、驚くほどの機能回復を見せる。

脳機能構築のファンダメンタルの正しい理解は、リハビリテーションを長年の呪縛から開放する。新時代の幕開けである。

Further Readings

Von der Malsburg: Self-organization and the Brain. Arbib MA ed, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, MIT Press, Cambridge, 840-843, 1995.

Nakada T: Vortex Model of the Brain: The Missing Link in Brain Science? Nakada T ed, Integrated Human Brain Science, Elsevier, Amsterdam, 3-22, 2000.

Kohonen T: Self-Organizing Maps. 3RD Edition. Springer, Berlin, 2001.

中田 力：脳の方程式 いち・たす・いち 紀伊国屋書店、2001.

中田 力：脳の方程式 ぷらす・あるふぁ 紀伊国屋書店、2002.

¹ある意味でデジタルコンピューターとは、この局在派が目指した脳の機能形態を現実化したものともいえる。それが、実際の脳とは全く違った機能形態を持つことは、明らかである。

²1つの脳機能の執行に責任を持つ、1つのニューロンのこと。

³例えばモーツァルトを理解する脳の局在 (Mozart recognition area) など。