

“心”への科学的アプローチ(2)

——ブレインサイエンスが明らかにしたこと——

木 暮 信 一

1 はじめに

『東洋哲学研究所紀要』第8号に「“心”への科学的アプローチ(1)―臨床医学・神経心理学的研究の概観¹⁾」を掲載させていただいた。本稿はその続編であるが、タイトルの「“心”への科学的アプローチ」について前稿では何ら言及を加えなかったのが、ここでそれについてふれておきたい。そもそも、「心」という問題に対して科学がアプローチできるのか、という基本的な疑問があるだろうからである。

村上陽一郎氏は「科学で人間は判ったか²⁾」という論考で、そのあたりの事情を歴史的に明解に説明している。すなわち、近代ヨーロッパ科学の出発はやはりデカルトを起点とし、その「延長」と「思惟」という二元論に基づいているとするのである。しかも、少なくとも人間一般に関してはこの二元論は必然的であり、人間以外に関しては「延長」一元論ですむとした。「客観性」を最重視する科学がこの「延長」としての物質系を追求する学問となったのは、ごく自然の成り行きであったというのである。以後、科学は現代われわれが理解しているような姿を明確にするとともに、人間や生物に対しても次第に「延長」としての理解を指示するようになったという(近年の分子生物学もこうした理解を強力に再確認している)。しかし、もとよりデカルト主義は「人間は単なる物質系ではなく、思惟という側面を合わせもつ」ことを主張していたはずである。したがって、思惟という側面をも科学的に探求しなければ、人間は科学的に明らかとはならないはずである。ところが、科学的という概念には「客観

的」ということが含まれており、「客観的」であるためには「延長」を本質としなければならないから、そこに「延長」ではない「思惟」は対象とはなり得ない、すなわち、「思惟」または「こころ」を科学的に追求することは不可能である、というのである。かろうじて、ワトソンの行動主義(「こころ」を客観的に観察可能な「振る舞い」や「行動」に置き換えるという考え方)によるS(刺激: stimulus)―R(反応: response)心理学はそれを免れたかのようなのであるが、結果、「こころ」を単なる「行動」や「振る舞い」という最も狭い部分へ追い詰めてしまったとし、この伝統が現代の分子生物学や生理学、さらには行動主義の心理学のなかにも厳然と存在していると指摘している。こうした指摘をもとに考えると、本来的に「“心”への科学的アプローチ」は十全足るものにはなり得ないといえようか。

前稿でもふれたように、われわれの「脳」の損傷が失語や失行など、さまざまな精神的症状に関係することは、前世紀末より次第に明らかとなってきた。そして、今世紀の前半は生理学から細分化した神経生理学・神経解剖学・神経化学・神経薬理学などが、それぞれの手法をもとに、中枢神経系の中心である「脳」へと迫りつつ、それぞれの側面をそれなりに解明してきたといえる。しかし、一向に「精神」や「心」はその姿を明瞭に現わすことはなく、したがって、今世紀の後半では「脳科学」(ブレインサイエンス)と、それまでの細分化したものから統合した科学として装いも新たに、さらに強力な分子生物学的手法をも加え再出発したといえよう。

本稿では、「“心”への科学的アプローチ」は十全足るものにはなり得ないという基本的立場に立ちながらも、少なくともその「心」の座であると考えられている「脳」に対し、脳に関する諸科学ががどのように立ち向かってきたか、そして今またブレインサイエンスがどのように立ち向かおうとしているかについて言及してみたい。

2 時代を画した「脳」研究

前稿で述べた臨床医学や神経心理学といった研究が19世紀後半より盛んにな

ったのと同様に、脳に関する科学、とくに動物を用いた実験科学もその頃より開始されたといってよいだろう。その後、方法論上の数々の機器の開発・改良にともなう、膨大な研究業績が蓄積されてきた。ここでは1980年代に至るまでの間、脳に関する諸科学の中で、時代を画するようになった研究業績を取り上げてみたい。取り上げた人たちの研究は、いずれも「ノーベル生理学・医学賞」に輝いたものである。

1) ゴルジとカハールの神経解剖学—「網状説」と「ニューロン説」

まず最初に、脳研究はその機能的側面より形態的側面から開始されたといえるだろう。それは後に述べるように、機能を反映すると考えられた微弱な電気活動や化学物質の変化をとらえることが、当初においてはかなり困難であったためと推測できる。対して、解剖学は遠く16世紀のベサリウス (Andreas Vesalius: 1514-64, ベルギーの解剖学者) の時代まで遡れるように、時代とともにさまざまな研究方法が開発されてきたからである。

なかでも、ゴルジ (Camillo Golgi: 1843-1926, イタリアの解剖・病理学者) により開発された鍍銀法は、脳小片を硝酸銀溶液中に浸しておく、脳の神経細胞 (ニューロン) が黒色に染色されるというものであった。浸潤させる時間をコントロールすることにより、ニューロン数個だけの染色にさせることが可能になり、しかも細胞体だけでなく、ニューロンの突起である樹状突起や軸索 (神経繊維) をも染めだすことができるので、ニューロンの全体像が観察できるようになったわけである。ゴルジはこの方法を用いて脳の観察を行ない、「My preparations showed a "diffuse nerve network," in which the fibers gradually lose their individuality while dividing to become extremely fine filaments. (私の組織標本に基づけば、神経系は広がりながらつながる神経回路網で、神経繊維の先端は次第にフィラメントのように細く分岐しながら、個という状態を失うものと見える)」という「Reticular theory (網状説)」を展開した³⁾。すなわち、ニューロンは1個という状態では存在せず、他のニューロンとその突起を介して融合しているという、言わば「クモの巣」(交点が細胞体) を神経系として考え

ていたようである。

一方、ほぼ同時代に生きながら、スペインの神経解剖学者であるカハール (Santiago Ramón y Cajal: 1852-1934) は、しかもゴルジの開発した鍍銀法を用いながら、それを改良発展させる中で、神経系に対して対照的な考え方に到達していた。それは「Neuron doctrine (ニューロン説)」といわれ、「The nervous system consists of many independent cells rather than a single network. (神経系は一つのつながった網状のものではなく、個々の独立したニューロンから構成される)」というものである⁴⁾。しかも、カハールによれば、樹状突起が情報の入力部であり、軸索は出力部であるということも構想されていた (目や鼻の神経細胞の樹状突起は外界に向いており、軸索は脳内の方向へ向いているという観察から考えだされた)。こうした考えは、その後約50年間のさまざまな電気生理学的な研究や、最終的には電子顕微鏡の開発を得て見事に証明されるわけである (ニューロンとニューロンの継目が「シナプス」とシェリントンにより命名されたが、電子顕微鏡でそこには500オングストロームの間隙があることが確証された)。それにしても、カハールの着想また洞察力には間断なき丹念な実験観察の積み重ねが伺われ、そうした努力の中で標本の脳と観察者の脳が共鳴を起こしたかのように想像できて興味深い。

二人は脳神経系に対し相反する考え方をもっていながらも、1906年「神経系の構築に関するすぐれた業績」でノーベル賞を分かち合った。二人により切り開かれた脳の形態学的研究は、その後の研究結果と相俟って、確かに生きている状態そのものを反映しているとはいえないが、脳が機能するとき、少なくともその機能というものはニューロンという単位を基本とした神経回路網という物質的基盤の上に成立しているだろう、という考え方を研究者のみならず広く一般の人々の間にも定着させた。

2) シェリントンの「脊髓反射学」

脳をはじめとした神経系の形態学的研究が進む過程において、実際、生きている状態ではそれらがどのように機能しているのか、という疑問への研究はむ

しろ自然な展開といえるであろう。シェリントン (Charles Scott Sherrington: 1857-1952, イギリスの神経生理学者) の研究歴は、それをよく反映している。

当時、脊髄に出入りする神経の形態学的特徴については、ほとんど何もわかっていない状態であった。シェリントンは脊髄の各レベルの前根や後根を部分的に切断しながら失われる機能を探索したり、逆にそれらの根部を電気刺激したとき現れる現象を詳細に検討した。そうした結果、各筋肉に存在する神経の約3分の2が脊髄から出て筋の運動を支配する運動神経であり、残りは筋の緊張状態を脊髄の方向に送る感覚神経であること、前根から出る運動神経は1つ以上の筋を支配すること、1つの筋は1つ以上の前根から出る運動神経の支配を受けることなどを明らかにした。これらも単に形態学的研究ではなく筋の運動や感覚といった機能の探求を含むものであったが、彼はさらに、よく知られた「Knee-jerk reflex (膝蓋腱反射)」などの脊髄反射に注目し研究を進めたのである。そして、各脊髄反射に関係する神経一筋からなる組織、いわゆる「Reflex arc (反射弓)」を同定するだけでなく、その後非常に重要な概念となった「The reciprocal innervation and inhibition of antagonistic muscles (相反性支配すなわち拮抗筋の抑制)」を提案した。われわれの運動は筋の収縮に基づいて起こっているわけであるが、全筋肉が収縮したのでは運動はうまく行なわれない。屈筋が収縮するとき(ある部分を曲げるとき)はそれと対をなす伸筋は弛緩する必要がある、逆に伸筋が収縮するとき(伸ばすとき)は屈筋は弛緩するという具合に、対となる筋は相反的な運動神経の支配を受けており、どちらかの運動が起こるときその一方は「抑制」される、ということを示したのである。つまり、神経と筋がどのように結合しているかという単なる形態学的レベルを超えて、それがまさに生きているときにはどのように働くのかという機能的側面までに迫ったといえる。こうした一連の研究が評価され、彼の「ニューロンの機能に関する偉大なる発見」に対し、1932年ノーベル賞が贈られた。

シェリントンは後にその考え方を敷衍させ、「The whole quantitative grading of the operations of the spinal cord and brain appears to rest upon mutual interaction between the two central processes, *excitation and inhibition*, the

one no less important than the other. (脊髄および脳における、全体としての機能発現の量的調節は、興奮と抑制という二つの中心的な過程での相互作用に依存しているようで、どちらか一方の過程が他よりも重要であるというものではない)」と述べている⁵⁾。しかしながら、晩年「Man's analysis of his sensible world seems to have outstripped his analysis of his mind. (人間の感覚できる世界に対する探求は、心の解明をますます取り残してしまうように思える)」という表現を好んだといわれるように⁶⁾、「脳機能解明」の究極に「心の解明」をイメージしていなかったようである。

3) オットー・ローウィーによる「神経化学伝達」の証明
 いわゆる「生物電気」に関して、それを最初に記載した人はイタリアの解剖学者ガルヴァニ (Luigi Galvani: 1737-98) であるとされる。彼は1791年、カエルの脚を実験に用いる際に、偶然にも動物組織には電気性のあること(何らかの原因で「生物電気」が発生した結果、カエルの筋が収縮すること)を発見したのである。「それは単にカエルの脚を吊っていた銅と窓枠の鉄という異種金属の間に電流が流れたため」と主張したボルタ (Alessandro Volta: 1745-1827, イタリアの物理学者) との間の論争はあまりにも有名であるが、その後100年以上にわたる生理学的研究の中で、神経や筋肉という組織が電気刺激に対して被刺激性をもつことや、それら自体が電気パルスが発生することのできる興奮性細胞であることが確かめられた。(その詳細は、次に述べるエクルスや、エクルスと同時にノーベル賞を分かち合ったホジキン [Alan Hodgkin: 1914-, イギリスの生物物理学者] とハックスレー [Andrew Huxley: 1917-, イギリスの生理学者] などにより明らかにされた。)したがって、今世紀の初めの頃は、鎖状に連なった神経細胞の間を電気パルスが次から次へと伝導すると想像されていた。ところが、すでに述べたように、カハールによって「ニューロン説」が提案されたり、シェリントンにより「興奮と抑制の統合」という概念が提出され、さらにニューロンとニューロンの継目に対し「シナプス (synapse)」という命名がなされると、次第に「網状説」

そのものやニューロン間の「電気パルス伝導」という説明には疑問がもたれるようになった。代わって、広く考えられるようになってきたのが、「Chemical-transmission hypothesis (化学伝達仮説)」である。すなわち、ニューロンはあくまでも独立しており、ニューロン間の信号伝達は電気パルスの伝導ではなく、何らかの化学物質の関与した伝達方式が用いられているとする仮説であり、そう仮定した方が興奮や抑制という多様性を、また、ニューロンの細い終末突起の高い抵抗という壁を乗り越えての信号伝達を、合理的に説明できるとしたのである。

オットー・ローウィー (Otto Loewi: 1873-1961, ドイツ生まれでアメリカに帰化した薬理学者・生理学者) は、そうした時代にあって、その「化学伝達仮説」を初めて実験的に証明したのである。ケクレ (Friedrich Kekulé von Stradonitz: 1829-1896, ドイツの化学者) の「ベンゼン環」や、湯川秀樹の「中間子説」がそうであったように、彼の実験アイデアも夢からのヒントに基づいているといわれる。いわゆる、二つのカエルの心臓の活動をリンガー液中で観察する「二連灌流実験」である。一方の心臓には副交感神経である迷走神経が付けたままになっており、この神経を電気刺激するとその心臓の拍動は遅くなるのである。ところが、同じリンガー液で灌流されている迷走神経のついていない第2の心臓の拍動もまた、少し遅れるのであるが、遅くなってくるのである。第2の心臓は電気刺激されているわけではないから、ローウィーは、拍動が遅くなった理由を「not nerves but the chemicals they release directly affect the heart (神経そのものではなく、神経が放出する化学物質が直接、心臓に作用しているのである)」としたのであった⁷⁾。これは迷走神経と心筋との神経—筋接合部 (一種のシナプス) での「化学伝達仮説」を見事に証明したものであり、後にその物質がアセチルコリンであると同定されるに及び、シナプスでの化学伝達は確固としたものとなったのである。ローウィーは1936年、この分野でやはり大きな貢献をなしたデール (Henry Hallett Dale: 1875-1968, イギリスの生理学者・薬理学者) とともに、「神経インパルスの化学伝達に関する発見」でノーベル賞を受けた。

以後、脳や脊髄など、中枢神経系のシナプスでの化学伝達も次々と証明され、多くの神経伝達物質が発見されるようになった。それらの物質が、大まかには興奮性神経伝達物質 (次のニューロンに電気インパルスの発生を促すような、興奮性の影響を与える) と抑制性神経伝達物質 (次のニューロンの興奮が起こりづらくなる、抑制的な影響を与える) に分けられることから、それはシェリントンのいう「中枢神経系による興奮と抑制の統合」にも適合し、脳機能発現に対し、一重深い意味での物質的基盤を与えたといえよう。最近では、神経伝達物質に加えて神経調節物質なるものも現れ、さらに受け手側のレセプター (受容物質) にも様々な種類があることがわかり、シナプスをめぐる物質には百花繚乱の感がある。こうした脳の化学物質探求の端緒を開いたローウィーは、ノーベル賞金をナチスに渡したためにアメリカへ逃れることができたのであるが、「心の多様性は、レセプターを含む脳内化学物質の多様性と関係づけて説明できる」とする現状をいかに評価するであろうか。

4) エクルスによる「抑制の機序」

シェリントンによって脳の機能的側面に「興奮」と「抑制」という過程が存在し、それらが後にそれぞれの神経化学伝達物質およびそのレセプターによるとして裏づけられたのであるが、ちょうどその橋渡し役をエクルス (John Carew Eccles: 1903-, オーストラリアの生理学者) が果たしたといえるだろう。

彼はメルボルン大学で医学を学びながらも、強く「the nature of the mind and consciousness in relation to brain activity (脳の活動に即した心や意識の本質)」に惹かれていたようで⁸⁾、その解明にはシェリントンに師事する以外ないと決め、それを実行したのである。そこでニューロンを学び、シナプスを学び、興奮と抑制という概念を学んだことが、その後の研究方向を決定付けたようである。しかし、その頃、エクルスはローウィーらの「化学伝達」には「the impulse in the synapse moved too rapidly to be caused by chemical diffusion (シナプスを通したインパルスの発生は速過ぎて、とても化学物質の拡散によるものとは考えられない)」というように疑問をもっていたのである⁹⁾。そうしたエ

クルス自身の「Electrical hypothesis of synaptic transmission (シナプス電気伝達仮説)」を反証へと導いたのが、今世紀最大の科学哲学者の一人ポッパー (Karl Raimund Popper: 1902-, ニュージーランドの哲学者) との邂逅であり、ポッパーの「the disproving of hypotheses to have a central place in scientific progress (仮説の反証こそが、科学の発展過程での中心軸である)」という考え方があった¹⁰⁾。エクルスはネコの脊髄・運動ニューロンでの詳細な実験を繰り返し、シナプス前終末で発生したインパルスが、シナプス後部のニューロンに興奮性シナプス電位 (EPSP) を発生させること、それが一定の大きさに達すると約0.1ボルトのインパルス (活動電位) を発生させることを明らかにした。さらにある実験系では、シナプス前終末で発生したインパルスによって、シナプス後部には抑制性シナプス電位 (IPSP: ニューロンがより興奮しづらくなる状態をもたらす電位変化) が発生することがわかり、それが「電気伝達仮説」では説明できないとし、自らの仮説の反証をもって「シナプス化学伝達」を支持したわけである。もちろん、それだけではなく一歩進んで、シナプスにおける EPSP や IPSP 発生の「イオン機構」も解明したのである。そして、そうしたシナプス電位が脊髄のみならず、小脳や大脳皮質・海馬などのニューロンでも発生していることから、まさにシェリントンの「興奮」と「抑制」という概念を電気生理学的に証明したといえよう。

1963年、エクルスは、活動電位の発生機序を詳細に解明したホジキンとハックスレーとともに、「末梢および中枢のニューロンにおける興奮と抑制に関するイオン機構の解明」という業績で、ノーベル賞を受賞した。受賞後も、彼は小脳や大脳皮質連合野の機能に関する研究を精力的に続けたが、次第に若い頃に抱いた哲学的課題の方へ専心するようになった。シェリントンの弟子として「二元論」の立場に傾倒していたようであるが、むしろポッパーの影響を強く受け、「I fully accept the philosophical achievements of Sir Karl Popper with his concept of three worlds. I was a dualist, now I am a trialist! Cartesian dualism has become unfashionable with many people. They embrace monism in order to escape the enigma of brain-mind interaction with its perplexing prob-

lems. But Sir Karl Popper and I are interactionists, and what is more, trialist interactionists. (私は、ポッパーのいう三元的な哲学的世界観 [第1世界: 物理的客観世界の対象やその対象の状態, 第2世界: 主観的意識・心の状態, 第3世界: 客観的感覚に対する知識] を完全に受け入れられる。私は二元論者であったが、今や三元論者である。デカルト流の二元論は多くの人々にとって時代遅れのものとなってきた。多くの人々は、複雑極まりない問題を含む脳と心の相互作用という難題に対し、そこから逃れるために超越的な一元的世界観を抱いている。しかし、ポッパーと私は相互作用論者で、もっと言えば三元的相互作用論者である。)」と述べているくらいである¹¹⁾。しかし、彼のこうした考え方は、晩年の「グルコース代謝法を用いた前頭葉連合野における随意運動中枢に関する研究」(意志に従う運動をイメージしたとき、補足運動野のグルコース代謝量が増したところから、そこが「意志」という「心」の一部とつながる部分であると示唆した研究) を除けば、ほとんどが哲学的思索や議論に基づいているので、ここではこれ以上の言及はさける。

5) ヒューベルとヴィーゼルによる「視覚系の情報処理機構」

1960年代頃までで、脳を構成するニューロンの形態学的特徴や、活動電位やシナプス電位の発生機序という電気生理学的側面、さらにはどのような化学物質が使われているのかという神経化学的側面は、あらかた解明されてきたといっていよう。世界中の生理学者・解剖学者・生化学者・薬理学者などが、いろいろな動物種の脳におけるニューロンをターゲットにして、それぞれの専門的角度から分析につぐ分析を繰り返した時代である。そうした時代は、またコンピューターが考案され、情報理論が注目されるようになってきた時代でもあったので、コンピューターとの比較や情報処理の仕方という観点から、ニューロンレベルではなく「系としての脳機能を解明する」という研究が勢力的になされるようになった。

ヒューベル (David Hunter Hubel: 1926-, アメリカの神経生物学者) とヴィーゼル (Torsten Nils Wiesel: 1924, スウェーデンの神経生物学者) は、そうした研究者の代表である。彼らはともに「視覚系の神経生理学」の世界的権威であったク

フラー (Stephen William Kuffler: 1913-80, アメリカの神経生物学者) のもとで、まさにチームを構成しなければ成果を達成できなかったであろう、精力的な研究を重ねたのである。クフラーによる網膜レベルの研究を土台として、ヒューベルとヴィーゼは「the receptive fields of other nerve cells in the visual nervous system, specifically those in the visual cortex of the brain (視覚系の他の神経細胞、とくに脳の視覚野の神経細胞の受容野)」に着手した¹²⁾。ネコの視覚野に微小電極を刺入させ、1個1個のニューロンから自発発射活動を記録するわけであるが、いろいろなパターンの視覚刺激を網膜上に与えた場合に、それらのニューロンがどう応答するか(自発活動が高まれば興奮性応答、低下すれば抑制性応答という具合)を非常に丹念に調べたのである。そして、「Whereas Kuffler's retinal cells responded to circular images, the nerve cells in the visual cortex responded to linear patterns. (クフラーが発見した網膜の細胞は円状の形に応答を示したが、視覚野の神経細胞は線状のパターンに応答した)」という発見をなした¹³⁾。彼らは、そうした応答特性をもとに、視覚野に存在するニューロンが「simple, complex, and hyper-complex groups (単純型、複雑型、超複雑型)」に分類されること、また視覚野の構造に「ocular dominance column and orientation column (左右の眼球のうちどちらかの入力が優位であることを示す柱状構造と、円状の受容野を線状のものへ変換する柱状構造)」が存在することを究明したのである。彼らの業績に対する解釈には理解の困難なものも含まれるが、少なくとも、網膜で受容された視覚情報が脳皮質・後頭葉の第1次視覚野においてはまずその要素に分解される、ということを明らかにしたと言えよう。

クフラーが受賞しなかったのは意外であるが、ヒューベルとヴィーゼは1981年、「視覚系の情報処理に関する発見」でノーベル賞を受賞した。この年のノーベル生理学・医学賞を分かち合ったのが「左右大脳半球の機能差に関する発見」という業績をあげたスペリー (Roger Wolcott Sperry: 1913-、アメリカの神経学者) であったから、彼らの研究が非常に細かいレベルでの「脳機能局在論」への契機となったのではないと思われる。事実、その後の研究では、第1次視覚野のまわりの第2次視覚野でも視覚情報の分析的処理ということが

明らかとなる一方、情報の流れという点でそれに続く頭頂連合野や側頭連合野では、視覚情報が空間情報と融合されたり、記憶と照合されたりする、という複雑な統合機能の一端も解明されつつあるようである。

3 「Decade of the brain (脳の10年)」-ブレインサイエンスの時代

前節で述べたことは、基本的にノーベル賞の受賞年代順を意識して取り上げたものであったが、奇しくもそれは、順に「神経解剖学」「神経生理学」「神経化学あるいは神経薬理学」「電気生理学」、そして「感覚生理学」という、それぞれの専門領域を代表する業績でもあったといえよう。それらは「the science concerned with the normal vital processes of organisms (生物が普通に生きているという様々なプロセスに関係した科学)」である「Physiology (生理学): physis (growth, nature) + logos (study)」¹⁴⁾から、時代とともに細分化されてきた学問領域である。

今世紀に入り、科学は急激な進展をなしたわけであるが、幾分か経験主義的な側面を含む医学もまた、「客観性」や「要素還元主義」を柱とする自然科学の強力な影響を受けたことは疑いのないことであり、医学の一分野である生理学が時代とともに細分化してきたことが、如実にそのことを物語っている。生理学の出発点においては(それがいつの時代であったかは定かではないが)、その定義からすれば、デカルトの範疇の「思惟」の側面の方を解明しようとする傾向性がより強かったといえよう。したがって、全体的な、そして観察に基づいた(症例報告のような)記述が多かったわけである。しかし、その後の発展過程で(医学もまた科学の仲間入りをしようとする力が働いたのか)、主観的観察に基づく記述よりも客観的証拠の提示、全体的な関連性ではなく根本的な原因を形成している要素の究明、へと向かったのも無理からぬことかも知れない。それは、どちらかと言えば「思惟」から「延長」への方向転換であり、科学の常套手段である「仮説の実験による証明」を指向するものであったといえる。

「生きている状態」の解明を目指した「生理学」が、その状態というものが主として神経系によってコントロールされているということで「神経生理学」

に、その神経系の形態や使われている化学物質を究明するという事で「神経解剖学」や「神経化学」に、という具合に細分化を重ねてきている様は、そうした自然科学への接近を思わせるのに十分である。しかし、それがさらに、1953年のワトソン (James Dewey Watson: 1928-, アメリカの分子生物学者) とクリック (Francis Harry Compton Crick: 1916-, イギリスの分子生物学者) による「DNAの二重らせん構造の解明」以来の分子生物学によって強い影響を受け、「Molecular and cellular neuroscience (分子細胞神経科学)」 「Molecular brain research (分子脳研究)」 などという分子レベルでの様々な研究分野へと発展してみると、それはもう「延長」としての物質そのものを対象とする自然科学そのものに容れられた感を抱かせる。したがって、初期においてはカハールやシェリントンのように、たとえ死後の神経系の形態や動物を用いた脊髄反射を究明しながらも、常に「思惟」すなわち「精神」や「心」という側面を強く意識していた研究者が多かったにもかかわらず、今世紀後半では、次第にそうした面が薄れ、ただひたすら物質を求めるといふ「延長」のなかに埋没してしまう傾向が強くなったようである。むしろ、シェリントンが感じた「人間の感覚できる世界に対する探求は、心の解明をますます取り残してしまう」ということを全く感じる時間さえないくらい、完全に埋没しきっているのかも知れない。もちろん、そうした研究傾向からも、ヒューベルとヴィーゼルの研究やそれに続く研究のように、「脳機能」の一端に迫る研究が続出してきただけでなく否定できない。

1980年代は、一方では分子生物学的手法を取り入れながらの脳研究が急速に展開され、他方では、そうした新しい方法を用いたからといっても、所詮「精神」や「心」への領域へは迫れないと忤怩たるものを感じながら従来通りの研究を進める、という二極に分かれた状況であったといえようか。そうした状況に一石を投じたのが、「Decade of the Brain—Answers through Scientific Research (脳の10年—科学研究を通した解決)」と題する、「The National Advisory Neurological and Communicative Disorders and Stroke Council (神経学的な疾病、コミュニケーション不能な障害や脳卒中に関する連邦諮問委員会)」から1989年1

月に刊行された報告書である¹⁵⁾。しかも、それがアメリカ連邦議会において翌年度から予算をとまうかたちで認められたことから、「1990年代はブレインサイエンスの時代」という認識が脳研究者の間に広がったのである。以前からもそれを用いていた人もいたようであるが、この頃より、わが国ではとくに頻繁に「Brain sciences (脳科学)」ということばが使われるようになったようである。

わが国では、それを契機として脳研究予算が増加しはじめ、また細分化していた状況からブレインサイエンスという名のもとに統合を意図する動きも出てきた。実際に、それぞれの学問領域を超えた学際的なシンポジウムが数多く企画されるようになったことも事実である。しかし、これは常に欧米の科学を追いかけながら、その本質的なところよりも実際的なところを取り込んできたわが国の学術界らしい反応といえるかもしれない。なぜなら、従来の細分化してきた脳に関する諸科学を(統合ということの意味は不明であるが)「統合」さえすれば、再び「延長」から「思惟」へのアプローチが可能になるという安易さが見え隠れするからである。

当のアメリカはどうかといえば、その流れのもとをつくった「報告書」の冒頭を見れば一目瞭然であるので、ここに引用する。

「This report on the forthcoming “Decade of the Brain” concludes that a considerable national scientific effort is currently focused on the nervous system's fundamental workings. In addition, clinical scientists are rapidly advancing knowledge of convulsive, developmental, and neuromuscular disorders, as well as of diseases characterized by demyelination, atrophy, and dementia. Major research efforts are under way to learn more about stroke, traumatic injury to the central nervous system, and disorders of speech, hearing, and language. This work holds promise for improved methods of prevention, diagnosis, and treatment. (来るべき“脳の10年”に備えるこの報告書の結論は次の通りである。すなわち、現在、神経系の基礎的な研究に対し、膨大な国家的規模での科学的努力がなされていること、加えて臨床に携わる科学者は、けいれん発作・発達障害・神経筋障

害・脱髄疾患・萎縮症・痴呆症などに関する知識を急速に進展させつつあること、脳卒中や中枢神経系に対する外傷性障害、失語・聴覚障害・言語障害に対しても多大な研究努力が払われつつあるということである。したがって、この報告書はそうした種々の疾病の予防・診断・治療に関する「従来と比較して」一段と進んだ方法を提供するであろう。[また、“脳の10年”にふさわしい研究援助がなされるならば、そうした方法はさらに向上し、それらの疾病と闘っている4,800万人の国民の苦痛を軽減させるものとなる]—[]内は報告書の内容からの著者の類推)』というものである¹⁶⁾。

そして、その内容からは、過去10年間の研究状況を詳細に検討し、現状に関連する大学や病院において聴き取り調査し、それらをもとに今後10年間を予測するというように、まさに科学研究の予測には科学的調査を以てするという強い姿勢が伺われるのである。何より、「脳の10年」の主眼を、脳や神経系に起因する難病の克服というところに置いている点が注目される。それは見方によっては、そのために学際的な研究協力は絶対に必要なことで、そうした研究の統合によって難病も解明され、その過程において必然的に「脳機能」の解明や「精神」「心」の解明もなされる、というように受け取れないこともない。しかし、むしろそうした解釈を強調しているのではなく、ブレインサイエンスといえども医学の原点に立ち返ること、あまりにも自然科学に傾斜してしまった研究方向を「病氣」という「人間の病」と対座する方向へ是正させること、を眼目としているのではないかと思われる。すなわち、「思惟」をも「延長」の延長で説明できるなどと豪語するのではなく、医学者をして必然的に謙虚にさせる難病そのものを直視せよ、と警鐘を乱打しているように思われてならない。その意味からも、1990年代の脳研究が注目されるところである。

4 最近のトピックス

「脳の10年」もすでにその半ばを越えようとしているわけであるが、果たして当初の目的にそのような研究成果があがっているのだろうか。一部には十分に期待のもてる研究もあるが¹⁷⁾、難病克服への道のり、さらには「意識」「心」へのアプローチには程遠いものがあるようである。ここでは、いくつか

の分野での最近のトピックスについて言及する。

1) 「記憶」のメカニズム

「記憶」に関する問題は古くして、また新しい問題でもある。臨床医学のなかでも、コルサコフ症候群(コルサコフ[Sergei Sergeevich Korsakov: 1854-1900, ロシアの神経科医]によって記載された、アルコール中毒や極度の栄養不足に起因する精神障害で、逆行性健忘を含む)や痴呆症などに代表されるように、「記銘障害」と「想起障害」に大別される「記憶障害」は重要な課題であり、一方、ブレインサイエンスにおいても、解明すべき「脳の高次機能」の中心的なテーマであり続けてきた。

約100年の間に、臨床医学は、まさに患者からの症状と死後の解剖学的所見との対応関係を蓄積させながら、大脳皮質・側頭葉と海馬・扁桃体という大脳辺縁系の変性が「記憶障害」に密接に関連することを突きとめてきた。もちろん解剖学的所見だけでなく、そうした研究の中には、前稿でもふれたペンフィールドによる「側頭葉の電気刺激による記憶の想起」という、ヒトでの電気生理学的研究結果も含まれる¹⁸⁾。

ところが、一重深いレベルでの解明を目指すブレインサイエンスの方では、少し異なる成果が、しかも膨大に提出されてきている。それらは「シナプスの可塑性」に関するもので、それこそが「記憶の脳内現象の物質的基礎」であるという考え方で一貫している。したがって、その意味では、記憶が脳のある特定の場所に関係するというよりも、中枢神経系に広がっている全域のシナプスに記憶は関係するという、臨床医学の見解とは異にする結論のようである。現在では、シナプスの一体何が、どのようなメカニズムで可塑性を起こすのかという、詳細な分子レベルの研究が盛んである。

たとえば、LTP(Long-term potentiation 長期増強)という現象がある。最初は大脳辺縁系の一部である海馬で発見されたのであるが、あるシナプスを含めた神経系で、電氣的に頻回刺激を与えておくと、その後の1回の電気刺激に対する応答特性が上昇し、その上昇した応答特性が長い場合だと1ヵ月も続く

いう現象である。「記憶」という現象には脳内での何らかの変化が伴うはずだという仮定で、脳内の変化、すなわち可塑的变化を探索したところ、シナプスを介した応答特性の変化に行き着いたといっただろう。それが発表されたのは1973年のことであったが¹⁹⁾、それからというもの、LTPに関して報告された論文数は優に一万は越えていると推定される。その内容たるや、(今ではブレインサイエンティストの強力な武器となった)分子生物学的な手法を取り入れた、神経伝達物質・神経調節物質・レセプター・イオンチャネル・セカンドメッセンジャー・mRNAなどを含む物質を定量するというものばかりが目立つ。確かに、そうした研究によって「シナプス可塑性のメカニズム」は解明されてきているが、それによって直接的に「記憶のメカニズム」に到達できるかとなると、著者には疑わしく思えるのである。なぜなら、関連する分野で研究していて、無麻酔の状態ではLTPそのものがそれほど安定して起こらないこと、頻回刺激に相当するような活動パターンが自発性には得られないことに気付いているからである。LTPが「記憶」の基礎だとするならば、少なくともそれは日常的に、かつ普通の状態で起こっていなければならないであろう。したがって、足場の危うい基礎の上にいかに強固な建造物を建てたところで自重で倒壊してしまうように、現在のブレインサイエンスにおける「記憶」研究に大いなる危惧を抱いているのである。

むしろそれよりは、海産の軟体動物アメフラシの「えら引き込み反射」に伴う「シナプスの可塑性」を細胞レベル・分子レベルで調べあげたような研究²⁰⁾、さらには「匂いと味の連合学習」を用いた「ナメタジの脳でみる記憶と再認」というような研究²¹⁾の方に、期待がもてるのではないかと考える。下等動物での実験成果をそのまま高等動物の「記憶」に結びつけるには飛躍が大き過ぎるが、究明すべき対象の「行動」が確立した系から得られる神経機序には、記憶や学習を説明するのに十分な示唆が含まれていると考えられるからである。それは、何も「心」は「行動」によってしか客観的観察はできないとする「行動主義」を是認するわけではなく、「行動」と「神経系」との連関が少なくとも「心」の変化や表出過程に機能しているという考えに基づいている。このよう

な観点から考えると、ブレインサイエンスでの「記憶」研究はいまだその端緒にある、と言える言い過ぎであろうか。

2) 「情動」のメカニズム

「心」ということを問題にするとき、それはいわゆる知覚や記憶・学習といった「知」の側面と、喜怒哀楽などの感情からなる「情」の側面、そしてそれらを支えかつ変調させる意識状態である「意」の側面から説明されることが多い。前にふれたように、脳に関する諸科学、そして近年のブレインサイエンスも、どちらかと言えば「知」の側面に関する研究アプローチが多かったように思われる。また「意」に関する研究は、主としてそれは「外界からの刺激に対する反応で知ることのできる意識状態」という意味での意識で、いわゆる「植物状態」や「睡眠」との関連で、臨床医学分野において多く行なわれてきた。

感情という問題は一般に主観的要素が多いということで、長く科学的研究はなされてこなかったといっただい。確かに、感情を「喜怒哀楽」という表現で代表させるが、それとかなりあいまいなものを含んでいるように思える。それが、1960年代より、ネコやサルにも「怒り」や「恐れ」の反応があることがわかり、しかもそれが脳内の特別な部位に対する破壊や電気刺激で消失したり、再現したりするところから、感情といった問題にもアプローチ可能と考えられるようになった。加えて、ラットを対象として「Self-stimulation method (自己刺激法)」が開発され、脳内部位への電気刺激をラットが好むか(レバーを押して自らの脳を刺激する回数が増える)、逆に忌避するか(回数が減るか、押さなくなる)が行動学的に研究されるようになり、「快」「不快」という問題への突破口となったわけである。このように感情という問題のなかでも、行動主義の影響を強く受け過ぎたきらいがあるが、「怒り」「恐れ」「快」「不快」ということが客観的観察に耐え得るということで「emotion (情動)」と呼ばれるようになり、ブレインサイエンスのなかでの重要なテーマとなった。

最近、この「情動」のうち「恐怖」に関連した興味深い研究報告がなされた²²⁾。「恐怖の古典的条件づけ」という方法、すなわち、ラットに音刺激と(痛みを生

じる)弱い電気刺激を組み合わせることで、次第に音刺激だけで(電気刺激から逃避しようとする)恐怖反応が出現するように条件づける、という方法を用いた研究である。条件づけがなされた後に脳の各部位に損傷を与え、恐怖反応が再現されるかどうかを検討したわけである。その結果、大脳辺縁系に含まれる「扁桃体・中心核」という部位がその恐怖中枢であることが判明した。しかも、その神経機序として、①音刺激信号は視床を経て大脳皮質経由から直接的に扁桃体外側核に入り、そこから直接か他の核を経由して扁桃体中心核に到達する、②扁桃体外側核にはグルタミン酸とそれに関連するレセプターが存在するので、情動記憶はそこに貯蔵される、③扁桃体外側核には大脳皮質や海馬からの入力もあるから、それらが恐怖に関する環境情報という「陳述記憶」を提供している、④したがって扁桃体中心核で、それらの音刺激情報・情動記憶・陳述記憶が連合されて、恐怖行動という生理反応が出現する、と説明しているのである。まさに解剖学的手法や電気生理学的方法、さらには伝達物質やレセプターの特定など分子生物学的手法をも取り入れた総合的な研究であるといえよう。報告者は、「恐怖の条件反応」はラットやネコのみならず、意識的な知的過程をもたないと考えられるショウジョウバエやアメフラシでも起こることから、そうした恐怖反応は身体レベルのものであり、通常ヒトが体験するような意識上の恐怖反応とは異なるものであろうと推測している。そして、身体的情動反応を制御する脳神経系を研究することが、やがては主観的な感情そのものを理解するためのカギになるのではないかと考えているのである。

このように「情動」に関する研究もまた、その端緒についたばかりの状況であるといえるかも知れない。しかし、それは一面、本能行動にも密接に関連している部分があるところから、種をこえての共通性も見出しやすく、少なくとも「身体的情動」のメカニズム解明に対しては、十分期待がもてるのではないかと考えられる。それが連鎖的に、意識上の情動反応と推測されている「主観的感情」の解明につながるのかどうかは全く不明であるが、

3)「てんかん発作」のメカニズム

最後に、著者の実験科学的な専門分野である「てんかん」研究についてふれたい。「心」という問題と「てんかん」とがなぜ関係するのかという疑問があるだろうが、多くのてんかん発作の場合、それにともない「意識」や「記憶」が消失する、すなわち「心の失われた状態」とでもいえるような症状を垣間見ることができるからである。したがって、「心」に対して、「心がない」というネガティブな方向からのアプローチであり、「心がない」ときの、つまり発作中の神経機序の解明は、「心がある」とき、つまり正常なときの神経機序と表裏一体の関係にある、という著者の大胆な仮説に基づくアプローチである。

「てんかん病」は古今東西にわたって知られる、脳に起因する病気の代表的なものである。その発症率は今でも依然として人口比0.1%と推定され、その約8割が抗てんかん薬によって症状が抑制されるとするが、根治する方法が確立していない難病の一つでもある。

詳細は省略するとして、「てんかん発作」は脳のニューロンの異常興奮に基づくということはわかっている。脳のどの部位で異常興奮が始まり、どのようにそれが伝搬するのかということで、けいれんや言語・情動反応の出現、また意識や記憶の喪失という具合に、様々なパターンの発作になるわけである。そもそも異常興奮がどのような原因で起こるのかが不明なため(もちろんそれに続く異常興奮の維持や伝搬に関しても不明な点が多いが)、興奮に対する抑制という観点で、対症的に主として抗てんかん薬(抑制性伝達物質に類似した薬剤)による治療がなされているのである。ブレインサイエンスを含めた今までの研究に基づいて、ニューロンの異常興奮の出現に対する有力な仮説が二つ提出されてきた。一方は「興奮性シナプス伝達増強」仮説と呼ばれるものであり、他方は「抑制減退現象の促進」仮説と呼ばれるものである。それぞれ精緻な実験データ、すなわち例を一つずつあげれば、前者では興奮性シナプス電位の増強、後者では抑制性介在ニューロンの消失などという実験的証拠に裏づけられつつあるが、いずれも未だ定説までには至っていない。それはともかく、こうした仮

説から「発作状況」すなわち「意識や記憶が喪失した状態」を説明すると、脳内ニューロンの興奮が異常に増したか、抑制力が異常に低下したか、もしくは両者のバランスが崩壊したことにより、そうした状態は出現しているということになるのか。

著者は近年、この「てんかん発作」発現機序に関して、介在ニューロンの特性という観点から研究を進めてきた。介在ニューロンというのは、脳神経系内にあって主として局所回路の構成にあずかるもので、発生学的には錐体細胞のような大きな投射性ニューロンより遅れて発生し、その細胞死は比較的早いといわれるニューロンである。この介在ニューロンの特徴は、ヒトの乳幼児期における知能などの発達や、逆に老年期における脳機能の低下とも相関しているように考えられる。したがって、遺伝性の要因が少ないと推定されている「てんかん病」にあって、この介在ニューロンの活動様式は非常に重要なのではないかと考えたからである。そして、一連の研究から²³⁻²⁵⁾、海馬という脳内局所において、発作の出現時には活動を停止し終息時に再び活動を示す介在ニューロンと、発作の出現と持続に並行した活動を示す介在ニューロンが存在することを明らかにした。加えて、介在ニューロンの連結相手である錐体細胞においても、その細胞体ではなく樹状突起という部分でスパイクが発生している可能性を示した。これらを総合して、「てんかん発作」の原因は、興奮性および抑制性介在ニューロンの機能的バランスの崩壊と、(通常では見られない)樹状突起スパイクの発生によると、著者は結論づけている。二つの要因がどのようにに関連するのかは不明であるが、一つの可能性として、「樹状突起シナプスの電気シナプスへの変容」と「それと介在ニューロンによって構成される局所性反響回路の形成」を考えている。

このあくまでも推測の域を出ない仮説に基づいて「発作状況」を考察すると、「意識・記憶の喪失」状況では、脳内神経回路におけるインパルスの逆流が生じているのではないかと推測できる。したがって、そこでは正常な方向で伝導してくるインパルスとの衝突が生じてしまったり、秩序あるインパルスパターンにはなり得ないために、様々な異常現象が引き起こされるのではないかと考

えられよう。ただこの説明の中には、「シナプスの可塑性」を凌ぐ「(化学シナプスと電気シナプスの間での可逆的变化という)シナプスの変容」とでも言える、したがって正当なカハールの「ニューロン説」よりゴルジの「網状説」に近い前提が含まれているために、簡単には許容されないと思われる。また、それで説明できたからといって「心」の一端が明らかになるわけではなく、確かに「もの」ではないが、心的空虚な現象を脳内ニューロンのインパルス伝搬の逆流現象という「こと」に関連づけたに過ぎない、という批判は免れないであろう。

5 むすび—ブレインサイエンスが明らかにした「心」?

「“心”への科学的アプローチ」というテーマで、前稿の臨床医学・神経心理学的研究の概観に続いて、本稿では脳に関する諸科学および最近のブレインサイエンスの研究業績についてふれた。今回も、その業績の取り上げ方や、その取り上げた研究内容に対する言及の仕方において、著者の恣意が働きすぎたり、不十分であった点は否めない。

脳に関する諸科学、そしてそれを統合するという意図を含むブレインサイエンスが、いかにして「脳と心」の関係性に迫ってきたかを概観した。簡単に整理すると、①ゴルジやカハールの神経解剖学は「心」「精神」の基礎に「脳」という“もの”が存在し、その脳は「ニューロン」という基本単位をなす“もの”で構成されていることを明らかにした、②シェリントンの神経生理学は、「心」「精神」も含む神経系の機能は興奮系と抑制系による調節という“こと”で発現してくるとした、③ローウィーはシナプスにおける信号伝達には化学物質という“もの”が関与していることを証明し、神経化学を進展させた、④エクルスは中枢神経系のシナプスにおいて、興奮伝達や抑制伝達がそれぞれの物質という“もの”に基づいてなされるとともに、それによって興奮性電位や抑制性電位が発生するという“こと”を電気生理学的に証明した、⑤ヒューベルとヴィーゼルは視覚系の情報処理機構を追究し、少なくとも第1次視覚中枢では視覚情報が分析的に処理されているという“こと”を明らかにした、⑥ブレ

インサイエンスにおける「記憶」研究はシナプスでのLTP(長期増強)という“こと”に集中しているが、そこでの“もの”が観測しやすいからである。

⑦「心」の領域により接近した「情動」研究においても、恐怖という“こと”を扁桃体・中心核という“もの”で説明しようとしている、⑧しばしば「記憶」や「意識」の喪失が伴う「てんかん発作」に対して、脳内の神経伝達物質という“もの”の増減で説明されている状況に対し、著者は樹状突起スパイクの発生やインパルスの逆流という“こと”に注目している、ということになるのか。

あえて、「もの」や「こと」を強調しながらまとめてみた。それによって、第一に、取り上げた研究者の立場や研究の意図する方向がより鮮明になると考えたからであり、第二には、シェリントンやエクルス、そしてヒューベル・ヴィーゼルという神経生理学者たちは比較的「こと」の傾向性が強いということ、第三に、最近の傾向は「もの」指向が強いということが理解できると考えたからである。概観してみても、結論的に言えることは、「脳は心の座」であると万人が認めるなかであって、その「脳」を探求しているブレインサイエンスにあっても、まだまだ「心」の実態には迫っていないということである。そして、むしろシェリントンやエクルスの流れの方が時代的には古いのであるが、現状より「心」の実態に接近していたのではないかと、著者には思えるのである。

物理学を引き合いに出すまでもなく、最近の自然科学はそのほとんどが「もの」から「こと」へと転換してきたと指摘する学者が多い²⁶⁾。しかし、生命科学や脳科学の領域では、分子生物学の「DNAの発見」によるインパクトがあまりにも大きく、情報という新しい観念がないと「生命」や「心」は解釈できないとしながらも、いまだに「もの」に執着している向きが強いといえるだろう。むしろ「生命」は生きている「こと」であり、「心」は考える「こと」や感じる「こと」であるのかも知れない。ブレインサイエンスによる「心」へのアプローチには現状では程遠いものがあると言わざるを得ないが、「科学」から「医学」へ、「もの」から「こと」へと視点を変えるならば、シェリントンやエクルスのように、再びそれらに接近できるようになるのではないかと考える。

参考文献

- 1) 木暮信一「“心”への科学的アプローチ(1)——臨床医学・神経心理学的研究の概観」、『東洋哲学研究所紀要』, 1992, Vol. 8, p. 86-104.
- 2) 村上陽一郎「科学で人間は判ったか」、『ミクロコスモスへの挑戦』(石井威望・小林登・清水博・村上陽一郎編), 1984, p. 189-214.
- 3) 『NOBEL PRIZE WINNERS』(Ed. Tyler Wasson) T.W. Wilson Co., New York, 1987, p. 392-393.
- 4) 『NOBEL PRIZE WINNERS』(Ed. Tyler Wasson) T.W. Wilson Co., New York, 1987, p. 852-855.
- 5) 『NOBEL PRIZE WINNERS』(Ed. Tyler Wasson) T.W. Wilson Co., New York, 1987, p. 960-962.
- 6) 同(5), p. 961.
- 7) 『NOBEL PRIZE WINNERS』(Ed. Tyler Wasson) T.W. Wilson Co., New York, 1987, p. 640-642.
- 8) 『NOBEL PRIZE WINNERS』(Ed. Tyler Wasson) T.W. Wilson Co., New York, 1987, p. 277-280.
- 9) 同(8), p. 278.
- 10) 同(8), p. 278.
- 11) Eccles, J.C. 『The Understanding of the Brain』, McGraw-Hill Book Co., 1977, p. 193.
- 12) 『NOBEL PRIZE WINNERS』(Ed. Tyler Wasson) T.W. Wilson Co., New York, 1987, p. 484-486, p. 1123-1125.
- 13) 同(12), p. 485.
- 14) 『Stedman's CONCISE MEDICAL DICTIONARY』(Ed. J.T. McDonough), Williams & Wilkins, 1994, p. 787.
- 15) The National Advisory Neurological and Communicative Disorders and Stroke Council 『Decade of the Brain—Answers Through Scientific Research』, NIH Publication, 1989.
- 16) 同(15), p. 2-4.
- 17) 顧乗林・三浦光彦・川田洋一「てい談・21世紀の科学と大乘仏教」、『東洋学術研究』, 1994, Vol. 33, No. 1, p. 4-31.
- 18) 同(1).
- 19) Bliss, T.V.P. and Lomo, T., Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. J. Physiol., 1973, Vol. 232, p. 331-356.
- 20) カンデル, E.R. ホーキンス, R.D., 「ニューロンレベルでみた学習」, 『日経サイエンス』, 1992, 11月号.
- 21) 木村哲也「ナメタジの脳でみる記憶と再認」, 『日経サイエンス』, 1994, 7月号.
- 22) ルドー, J.E., 「情動・記憶と脳」, 『日経サイエンス』, 1994, 8月号.

- 23) Kogure, S., Functional significance of the hippocampal CA1 interneurons: I. Single unit activities during tetanic stimulation. *Epilepsy Res.* (in submitting)
- 24) Kogure, S., Functional significance of the hippocampal CA1 interneurons: II. Neuronal behaviors during electrically induced paroxysmal discharges. *Epilepsy Res.* (in submitting)
- 25) Kogure, S., Functional significance of the hippocampal CA1 interneurons: III. Single unit activities corresponding to the interictal discharges during the kindling process. *Epilepsy Res.* (in submitting)
- 26) 渡辺慧・清水博「対談・物質の科学・生命の科学」, 『ミクロコスモスへの挑戦』(石井威望・小林登・清水博・村上陽一郎編), 1984, p. 215-244.

(こぐれ しんいち・研究員, 創価大学助教授,
プリティッシュ・コロンビア大学客員研究員)