

## 特集①

## 「脳科学と教育」 研究の動向

ライフサイエンス・医療ユニット 茂木 伸一\*、庄司真理子



## 1. はじめに

脳は現在もなお未知の部分が多く、今後のライフサイエンス分野における重要な研究対象の一つである。さらに脳科学は、自然科学的な知識の拡大、医療・福祉、情報科学・ロボット工学への貢献だけでなく、教育学、心理学、社会学、言語学等の人文・社会科学への応用など適用範囲が広がってきており、研究の意義がさらに大きくなっている。

脳科学研究の重要性から、米国では1990年代を「Decade of the Brain (脳の10年)」と定め大規模に研究を推進してきたほか、欧州においても、米国の動きに呼応して積極的に脳科学の研究に取り組んできている。

我が国においても、脳科学への取組は科学研究費補助金の重点領域研究や特定領域研究などをはじめとして積極的に行われてきた。さらに、「脳に関する研究開発についての長期的な考え方」(科学技術会議ライフサイエンス部会脳科学委員会、1997年5月)において、「脳を知る」(脳の働きの解明)、「脳を守る」(脳の病気の克服)、「脳を創る」(脳型コンピュータの開発)という戦略目標が掲げられた。そして、脳科学研究の中核的機関として理化学研究所脳科学総合研究センターの発足(1997年10月)や科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業における「脳機能の解明」プロジェクトなどの

取組がなされてきている。

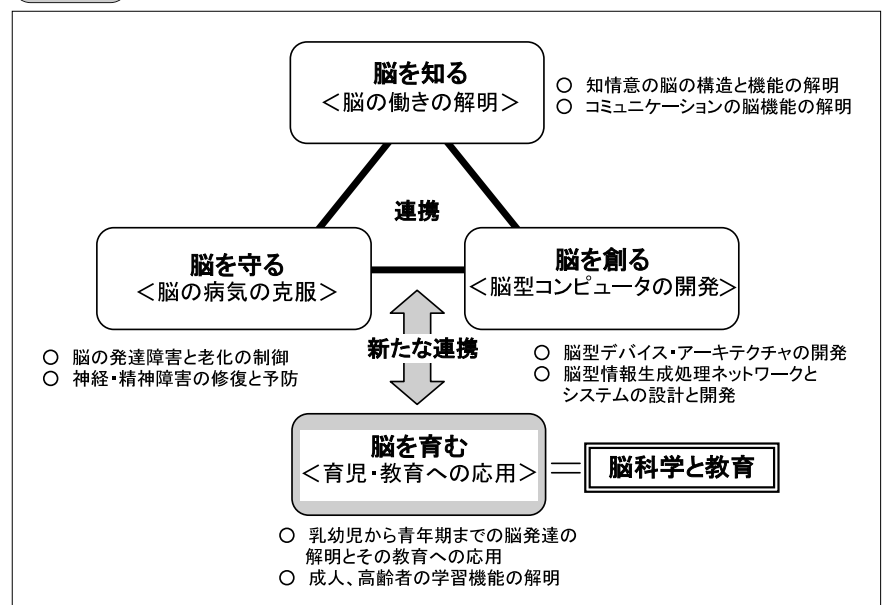
こうしたこれまでの成果によって、記憶や学習といった高次脳機能に関わる機能分子や神経回路網などについて多くの知見が得られてきている。また近年、人の非侵襲的脳機能イメージング法が飛躍的に発展してきており、より精度の高い安全な技術が開発されてきている。一方、少子高齢化社会を迎える我が国においては、脳科学研究での知見を、育児、学校教育、社会生活、高齢者介護など種々の面に応用することの期待も高まっている。

これらを背景として、脳科学研究の新しい戦略目標である「脳を育む」が、「ライフサイエンスに

関する研究開発の推進方策について」(文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、2002年6月)で提案された。「脳を育む」では、乳幼児から青年期までの脳発達の解明とその教育への応用や、成人、高齢者の学習機能の解明を目指すことを目標としている(図表1)。また文部科学省では、2002年3月より「脳科学と教育」研究に関する検討会を設置し、この領域の具体的な施策を検討しているところである。

本稿では、国家的な戦略的取組として世界的にも新しい「脳科学と教育」研究について概要を紹介し、今後の展望を述べる。

図表1 我が国における脳科学研究の概要



(文献<sup>1, 2)</sup>を参考に科学技術動向研究センターにて作成)

## 2. 「脳科学と教育」研究の概要

「脳科学と教育」研究は、学習のメカニズムを明らかにすることで、人が本来有している能力の発達・成長や維持およびその障害を取り除くことを目的としている。

文部科学省では、当面（5年程度）の計画と概ね10年を見通した長期計画を策定するため、2002年3月より「脳科学と教育」研究に関する検討会を設置した。本検討会は、教育学、教育心理学、行動学、生物学、小児神経学、脳科学などの専門家によって議論が進められている。現在も具体的な研究計画は議論の途中にあり、2002年7月に中間取りまとめを発表した段階である。また、2001年度より始められた科学技術振興事業団の社会技術研究推進事業（現戦略的創造研究推進事業）において、研究領域の一つに「脳科学と教育」が設置され、現在6課題のパイロット的な研究が進められているところである。

図表2には、これまでの議論などによって想定される「脳科学と教育」研究の概要を示した。当該

研究における「教育」は、人の胎児期を含む生涯を通じた広義の概念である。

ここでは、研究対象としてキーワードとなる脳の可塑性および臨界期についてその内容を紹介する。また、研究手法として重要である非侵襲的脳機能イメージング法について概要を紹介する。

### 2-1

#### 脳の可塑性（シナプス可塑性）

可塑性とは、何らかの外乱に対応し正常状態を保持するのに示される変化的な性質を言い、脳においてはシナプス可塑性が学習と記憶の基礎的な過程と考えられている。

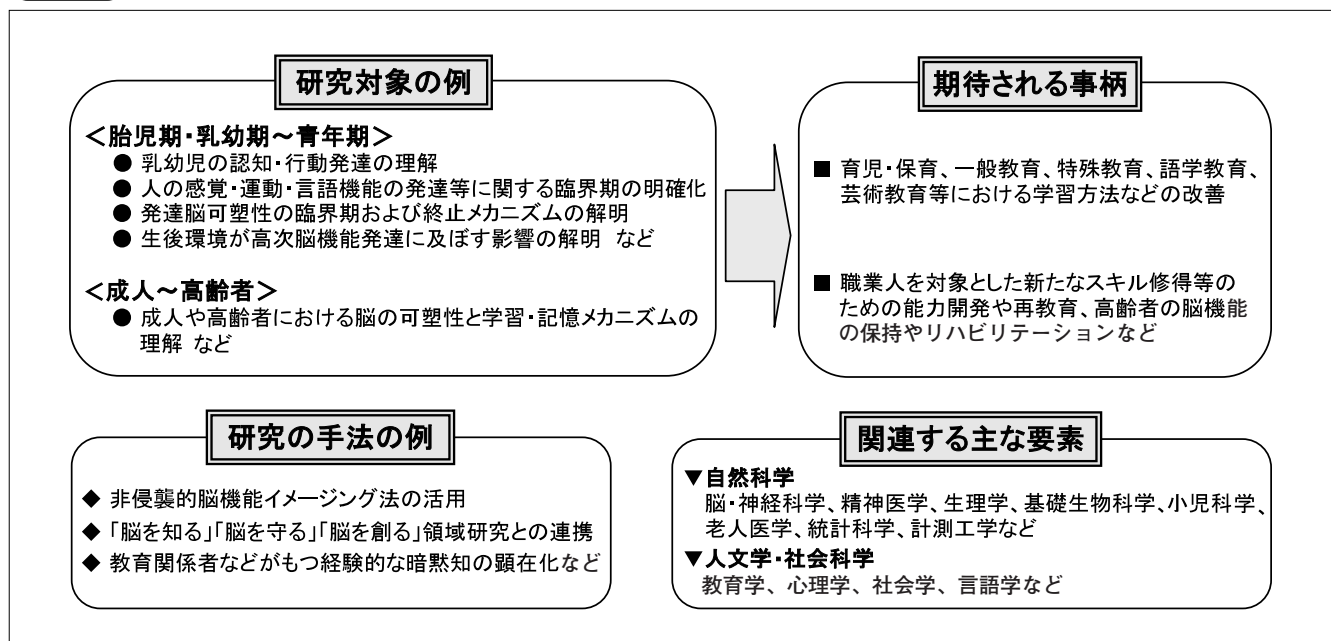
脳は多数の神経細胞（ニューロン）とグリア細胞から成っている。神経細胞は脳の神経回路網の素子として信号を伝達する重要な細胞であり、グリア細胞は神経細胞のサポートを行っている。近年の脳科学においては、これら脳細胞における化学的な信号伝達過程とその背後にある遺伝子制御過程の詳

細な分析が進んだ。

一般に神経細胞は細胞体、樹状突起、軸索から成っており、神経細胞同士はシナプスによって連絡している（シナプス伝達）。軸索に信号が伝達されると興奮性伝達物質や抑制性伝達物質などの神経伝達物質がシナプスで形成され、信号を伝える側の樹状突起上の受容体にその信号を伝える（図表3）。それにより複雑な化学反応が起こり、その信号はまた次の神経細胞や筋肉など外界に働きかけるための細胞に伝えられる。近年この信号伝達機構の研究が非常に進み、イオンチャネル、受容体、伝達物質など100種類以上の分子がこの過程に関与していることが分かっている。

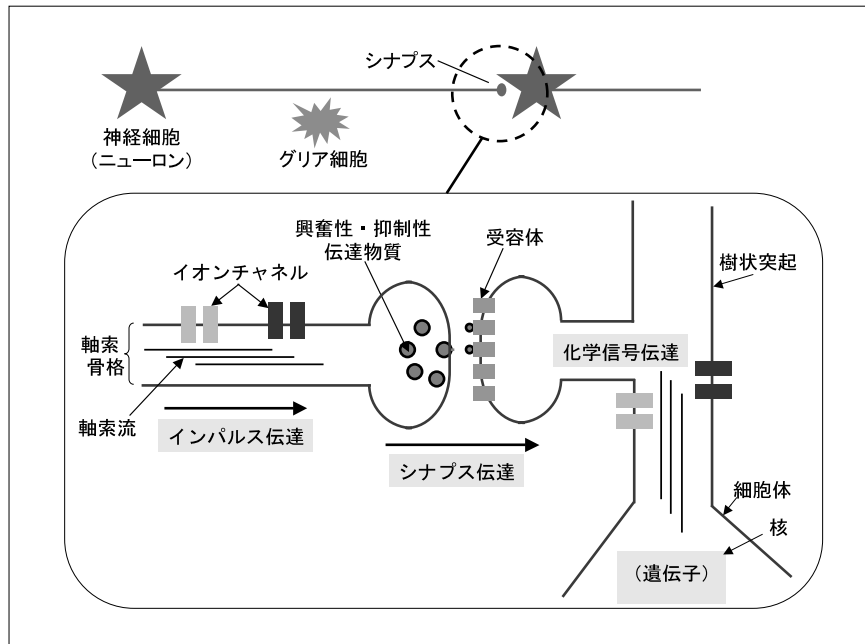
シナプス伝達の効率や形状が活動に依存して持続的に変化することをシナプス可塑性と呼び、これが脳の記憶や学習をする時の最も基本的なプロセスと考えられ、世界的にも非常に研究が進んでいる。シナプス可塑性は、発見された1970年代頃から現在まで

図表2 「脳科学と教育」研究の概要



（文献<sup>2, 3)</sup>を参考に科学技術動向研究センターにて作成）

図表3 シナプスにおける情報伝達



(理化学研究所脳科学総合研究センター 伊藤正男所長作成資料より引用)

に約10種類のタイプが見つかった。

「脳科学と教育」研究を進める上で、脳の可塑性と学習や記憶のメカニズムを解明することが重要であることから、今後とも当該分野の研究の進展が望まれる。

## 2 - 2

### 脳の臨界期・感受期

脳の学習や記憶といった高次機能には、臨界期あるいは感受期（ある現象や反応が起こるか起こらないかが決まる時期）があることが知られている。この時期の幅は、生物種毎の寿命の長さとおおよそ比例しており、時期のピークが短いものを臨界期、ある程度長いものを感受期と呼ぶことが多い。例えば視覚系の可塑性の臨界期（感受期）は、マウスやラットでは日の単位、ネコでは週の単位、人では2年程度である。また、いろいろな感覚や刺激の種類によって感受期が異なることが知られている。

例えば、学習の一つの形態である刷り込み現象の臨界期について、これまでに多くの知見が得ら

れている。刷り込み現象とは、動物の生後わずかの時期に起こる特殊な学習であり、雛鳥が孵化して最初に見た、動くものを母親として認識し、その後にしたがって行動する例などがよく知られている。例えば、ハイイロガン（*Anser anser*：カモ科）を用いた実験では、刷り込み現象が可能な期間はきわめて短く、生後15時間付近にピークがあった（図表4）。

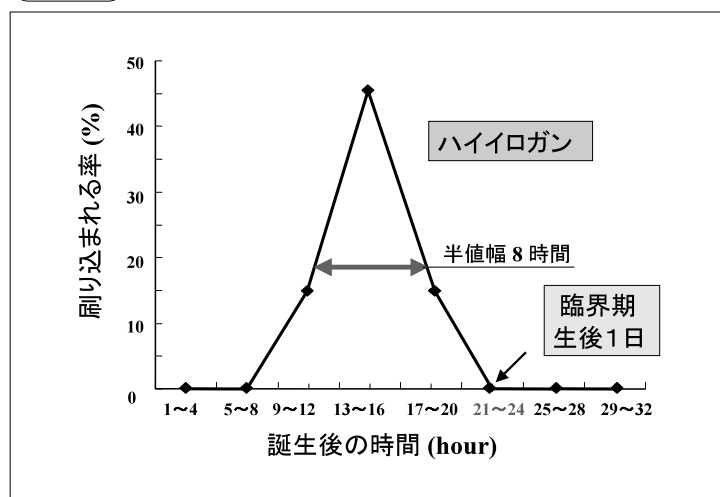
刷り込み現象自体は遺伝子に組

み込まれた過程（genetic process）であるが、最初に目に入る、動く物体の情報、即ち環境からの視覚刺激というような遺伝子に組み込まれていない過程（エピジェネティックな過程（epigenetic process））を経て、刷り込み現象は完成すると考えられている。これは、脳機能の発達に対して生後環境の及ぼす影響が重要な要素の一つであることを示している。

人の場合によく例に用いられるのが言語獲得における感受期である。生後1年以内では、例えばL（エル）とR（アール）の区別のような子音の識別の感受期があることがわかってきた。また、言語獲得における感受期は大体10歳代の前半にあると言われている。このような学習の感受期と環境が及ぼす影響との関係が明らかになれば、人のもつ能力を最大限に引き出すことにつながると考えられる。

人の高次脳機能の感受期と環境との関係については、まだほとんど明確にされていない。今後これらの基礎的研究を進め、その成果を教育などへ応用していくことが「脳科学と教育」研究の目的の一つである。その際、教育の問題はフィードバックに時間を要するた

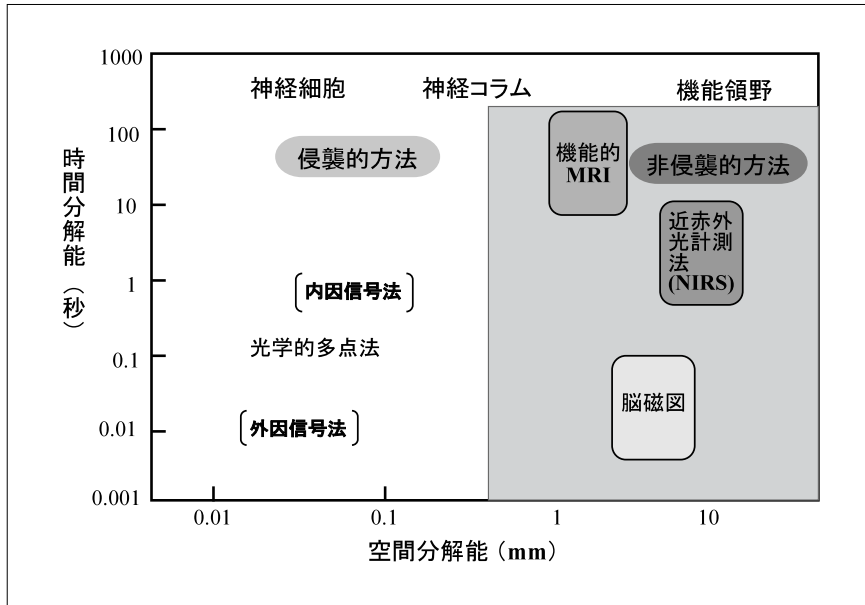
図表4 刷り込み現象の臨界期



注記：図表4では完全に刷り込まれた雛をプロットしている。本研究において、全ての雛が完全に刷り込まれたのではないのでプロットの合計は100%にならない。

(日立製作所基礎研究所・中央研究所 小泉英明主管研究長作成資料より引用)

図表5 高次脳機能イメージング法の比較



注記：数値はおおよその目安であり、各測定方法の概念的な比較を示している。

(日立製作所基礎研究所・中央研究所 小泉英明主管研究長作成資料をもとに科学技術動向研究センターにて一部改変)

め、大規模な縦断的研究および統計解析に加えてその後の追跡調査などを体系的な計画に基づいて進めていく必要がある。

## 2 - 3 高次脳機能の計測法

近年の、人の思考や記憶といった高次脳機能を対象とする非侵襲的計測技術の飛躍的な発展は、「脳科学と教育」研究を進める上での大きな契機となった。一般に

脳研究における非侵襲計測とは、頭蓋骨を開くといった外科的な侵襲を与えることのない方法を指す。臨床上重要な役割を果たしている PET (Positron Emission Tomography、陽電子放射断層法) や SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography、シングルフォトンECT) 等の方法は、脳に外科的な損傷を与えないという意味では非侵襲的計測に含まれるが、放射能を用いるために放射線被爆を伴うという意味で健

常人に適用する場合には制限がある。

現在、人の高次脳機能を計測する上で、安全で有用な非侵襲イメージング(画像)法は、機能的MRI (fMRI、functional magnetic resonance imaging、機能的磁気共鳴描画)、脳磁図(MEG、magnetoencephalography、脳磁計)、近赤外光計測法(NIRS、near-infrared spectroscopic imaging、光トポグラフィー)などである。図表5には、侵襲的方法も含めた各種高次脳機能イメージング法について、空間分解能および時間分解能の関係を示す。

3つの非侵襲的イメージング法について、およその空間分解能と時間分解能、被験者の自由度、計測対象の比較を図表6に示した。

非侵襲的イメージング法のうち、空間分解能に最も優れているのは機能的MRIであり、時間分解能に最も優れているのは脳磁図である。しかしどちらも被験者の自由度は低く、被験者の対象や状態が制限される。なお、近赤外光計測法は空間分解能において改善されるべき余地があるものの、①狭い空間に閉じ込められない、②動くことができる、③騒音がないといった特徴から、新生児や乳幼児の脳活動を自然な環境下で計測することが可能である。

図表6 非侵襲的高次脳機能イメージング法の比較

|         | 機能的MRI  | 脳磁図   | 近赤外光計測法  |
|---------|---|---|--|
| 空間分解能   | 1ミリメートル<br>(特に優れている)                                    | 数ミリメートル   | 10ミリメートル   |
| 時間分解能   | 数十秒   | 数ミリ秒<br>(特に優れている)   | 数秒   |
| 被験者の自由度 | 小   | 小   | 大<br>(特に優れている)                                   |
| 原理      | 神経活動に伴う血中ヘモグロビンの磁性の差を磁気共鳴信号に反映させることで、刺激に対応した局所脳血流の変化を解析 | 神経活動に伴って頭表面に誘起される微弱な磁場を高感度磁気センサ(SQUID磁束計)を用いて観測。観測した脳磁図から脳内の電源の局在を推定          | 濃度変化に応じて変化する近赤外光の吸収率を計測することで、刺激に対応した局所脳血流の変化を解析  |
| 主な用途の例  | 視覚や聴覚などの誘発反応、言語認知や記憶などの高次脳機能など                          | 臨床的には、てんかんや異常徐波の信号源の推定に有用とされるほか、睡眠時の自発脳磁図、電気、磁気、光、音などによる刺激に対する誘発磁界とその信号源の推定など | 手術時やてんかんなどの際の脳血流モニターに有用とされるほか、乳幼児の脳機能の測定も試みられている |

(日立製作所基礎研究所・中央研究所 小泉英明主管研究長作成資料および文献<sup>4)</sup>をもとに科学技術動向研究センターにて作成)

しかし、より高い精度で高次脳機能を把握するためには、現在の非侵襲的イメージング法にはまだ多くの技術的課題が残されている。そもそも脳機能計測は技術的に難しい計測法であることに加え

て、「脳科学と教育」研究では被験者の主な対象に乳幼児などが含まれることから、特に安全性の高い計測法が必要とされる。これまで我が国において計測技術開発はあまり注目されてこなかった分野

であったが、特に「脳科学と教育」研究を進める上では最も重要な要素の一つであり、今後の積極的な取組が求められる。

### 3. 「脳科学と教育」研究に関する国際的な動向

1999年、経済協力開発機構（OECD）の教育研究革新センター（CERI）は、「学習科学と脳科学～教育政策・実践への応用の可能性～（Learning Sciences and Brain Research～Potential Implications for Education Policies and Practices～）」というプロジェクトを立ち上げた。これは、加盟先進30カ国で推進を図る国際研究プログラムである。2002年度からは第2期が開始され、脳研究の教育分野への応用について、3つの研究ネットワーク（生涯学習、計算学習、読み書き学習）を形成し、研究が行われる予定である（図表7）。このうち、我が国は理化学研究所脳科学総合研究センターを中心として「脳の発達と生涯に亘る学習」領域の調整役を行うこととなった。

このように、近年国際的にも「脳科学と教育」研究領域が注目され、取組が始められているところである。

米国では、NIH（National Institutes of Health、国立衛生研究所）を中心に脳科学研究を大規模に推進してきている。NIHでは

図表7 経済協力開発機構・教育研究革新センター（OECD・CERI）「脳研究と教育科学の融合」研究プロジェクト

#### 第1期（1999－2002年）

以下の3つの国際フォーラムを開催

- 幼児期における学習科学と脳研究（2000年6月、米国・ニューヨーク）
- 青年期における学習科学と脳研究（2001年2月、スペイン・グラナダ）
- 成人期における学習科学と脳研究（2001年4月、埼玉県和光市）

#### 第2期（2002－2005年）

以下の3国際研究ネットワークによる試行的な研究を実施

- 脳の発達と生涯に亘る学習（調整機関：理化学研究所脳科学総合研究センター）
- 脳の発達と算術思考（調整機関：英国オックスフォード大学）
- 脳の発達と読み書きの能力（調整機関：米国サックラー研究所）

（理化学研究所脳科学総合研究センター 伊藤正男所長作成資料より引用）

いくつかの研究所にまたがって脳科学研究が行われているが、特に、2000年12月に設立されたNIBIB（National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering、国立生体イメージング・生体工学研究所）はイメージング技術の開発などを目的としており、脳機能計測技術の面で注目される。小児科学に関しては、NICHD（National Institute of Child Health and Human Development、国立小児保健・人間発達研究所）が中心となって研究が行われている。

またNSF（National Science Foundation、全米科学財団）およびDOC（Department of Commerce、商務省）は、2001年12月に開い

たワークショップをもとに「Converging Technologies for Improving Human Performance（人間の能力改善のための技術の集結）」というレポートをまとめている。ここでは、個人の能力改善などを目的として、学習やコミュニケーションなど人間活動に関わる領域において、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、IT、認知科学を集結させた学際的（multidisciplinary）な研究開発を進める必要性と今後の戦略を提言している。ここで提示された領域には「脳科学と教育」研究に関連するものもあり、今後の米国の動向が注目される。

### 4. おわりに

「脳科学と教育」研究は国際的にも始められたばかりの新領域である。この領域は多くの異分野を架橋・融合したものであり、各分野の連携が重要となる。特に、これまでほとんど接触のなかった育児・教育の専門家と脳科学・医学研究者との対話は欠かせない。

研究を進める上では、脳の学習や記憶といった高次脳機能についての理解を深めるため、「脳を知る」「脳を守る」「脳を創る」領域研究などとの連携が必要である。このような連携に脳機能計測法の発達が加わることが、「脳科学と教育」研究のブレークスルーにつ

ながると考えられることから、自然な環境下で非侵襲的に高次脳機能の動態イメージングができる手法や、大脳の表面だけでなく、例えば記憶に重要な役割を果たしている海馬のような脳の内部についても簡便に計測できるような新たな技術開発に向けた施策が必要で

ある。

また、教育の問題は社会的影響が大きく、かつ仮説の検証に時間を要する。したがって、感受期と学習との関係といった基礎的な研究成果を教育へ応用する際には、体系的な計画に基づいた大規模な縦断的研究とそれに基づく統計解析などを行った上で結論を出す必要がある。

「脳科学と教育」研究は社会的にも重要な課題である一方、他の領域以上に倫理的配慮や社会の理解・協力が必要である。

## 謝辞

本稿は、科学技術政策研究所において2002年9月25日に行われた理化学研究所脳科学総合研究センター所長伊藤正男氏による講演会

「脳科学と教育」および、2002年10月10日に行われた日立製作所基礎研究所・中央研究所主管研究長小泉英明氏による講演会「脳科学と教育」をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。

本稿をまとめるにあたって、伊藤所長と小泉主管研究長には、御指導をいただくとともに、関連資料を快く御提供いただきました。また、国立精神・神経センター神経研究所の金澤一郎所長、新潟大学脳研究所附属統合脳機能研究センターの中田力センター長、金沢工業大学人間情報システム研究所の鈴木良次所長、北海道大学電子科学研究所の田村守教授、島根医科大学の小林祥泰教授には、各種情報をいただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の

意を表します。

## 引用文献・参考文献

- 1) 「脳に関する研究開発についての長期的な考え方」(科学技術会議、ライフサイエンス部会、脳科学委員会、1997年5月)
- 2) 「ライフサイエンスに関する研究開発の推進方策について」(文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、2002年6月)
- 3) 「『脳科学と教育』研究に関する検討(中間取りまとめ)」(文部科学省「脳科学と教育」研究に関する検討会、2002年7月)
- 4) 神谷暲、井街宏、上野照剛「医用生体工学」、培風館、2000年

.....