

本田財団レポート No. 134

「 脳 の 世 紀 」

～未開の地に向かう脳研究の今～

東京大学名誉教授

(独)理化学研究所脳科学総合研究センター 特別顧問

伊 藤 正 男

財団法人 本田財団

講師略歴

伊藤 正 男 (いとう まさお)

東京大学名誉教授
(独) 理化学研究所脳科学総合研究センター 特別顧問



《略 歴》

- 1928年 愛知県生まれ
- 1953年 東京大学医学部医学科卒業
- 1954年 熊本大学医学部文部教官助手
- 1963年 東京大学医学部助教授
- 1970年 東京大学医学部教授
- 1986年 東京大学医学部長併任
- 1989年 東京大学名誉教授
- 1989年 理化学研究所国際フロンティアプログラム・チームリーダー
- 1994年 日本学術会議会長
- 1995年 南カリフォルニア大学名誉博士
- 1997年 理化学研究所脳科学総合研究センター所長
- 2003年 理化学研究所脳科学総合研究センター特別顧問

《主な受賞歴》

- 1986年 学士院賞・恩賜賞
- 1996年 日本国際賞、文化勲章
- 1998年 レジヨン・ドヌール勲章 (仏)
- 2006年 ピータ・グルーバー神経科学賞 (米)

《主な著書》

- 1967年 『The Cerebellum as a Neuronal Machine』 Ecclec, J. C., Ito, M. and Szentagothai, J., Springer-Verlag.
- 1980年 『脳の設計図』 中央公論社
- 1984年 『The Cerebellum and Neuronal Control』 Raven Press, New York.
- 1998年 『脳の不思議』 岩波書店 ほか多数

このレポートは平成22年6月3日東京會館において行われた第114回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。

今日は本田財団の懇談会にお招きいただき、ありがとうございます。川島理事長をはじめ関係各位、ご来場の皆様に厚く御礼申し上げます。今日掲げた題は、実は財団の方からいただいた大変な題で、こういう大きな題で皆様にお話しするというのは、大変勇気のいることですが、確かに今はそういうことを考える時期でもありますので、あえてお話をさせていただきます。

脳科学 10 年の進化

「脳の世紀」というスローガンの下に、脳の研究を格段に推進しようという動きが起こったのは、もう 15 年ぐらい前のことで、それが軌道に乗ったのが 10 年から 12 年ぐらい前です。十年一昔と申しますが、一昔たって一体どうなったのか。十年間どういうことが進んで、今後どうするつもりなのか。そういうご質問を受けることが少なくありませんので、それに対して私なりの答えを申し上げたいと思います。

十年前、脳科学を推進するにあたって、三つのスローガンを立てました。「脳を知る」「脳を守る」「脳を創る」、少し遅れて「脳を育む」という第四のスローガンも立てました。脳科学や神経科学という分野が、どういう社会的な意味を持っているかが一目で分かるということで大変好評でした。当時はこういう分野それぞれについて、それぞれの専門家がてんでんバラバラに研究しているという状態でした。それを統合して、一つに融合した脳科学という大きな分野にしようとして懸命でした。

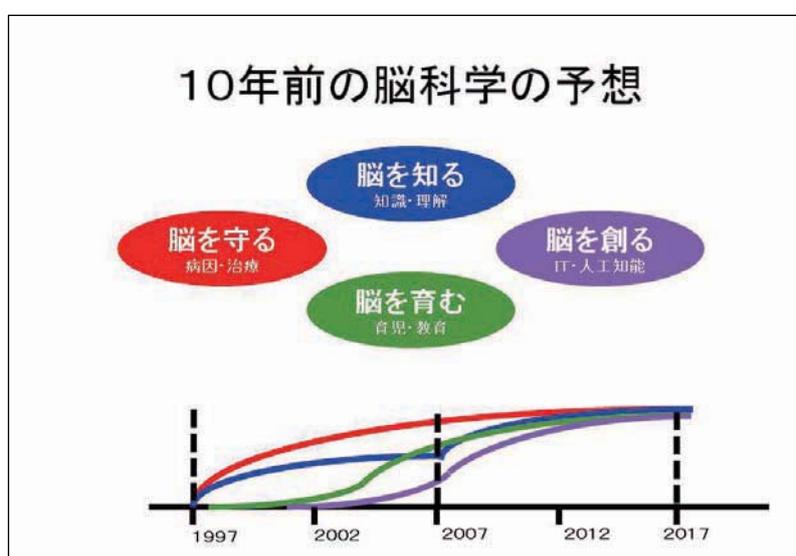


図-1

〈図-1〉 下のグラフは何かとお思いになると思いますが、各分野は多分同じスピードで並行しては進歩しないことを予想して描いた図です。「脳を守る」と言うのは、病気の原因を明らかにして治療法につなごうという活動です。これが一番早く立ち上がって、真っ先に成果を上げてくれるだろうと期待しましたが、実際にそのように進んできています。

また、「脳を知る」と言うのは内容に二通りあります。ミクロのレベルで知るというのと、マクロのレベルで知るというのでは進度が違っているので、多分 2 段階構えで進んでいくだろ

うと予想しました。「脳を創る」というのは難しいので、多分遅れて急に上がってくれるのではないかと。「脳を育む」もなかなか難しく、実際に遅れて発足しています。

10年前、脳科学の研究全体を強力に推進するため脳科学委員会が作られました。省庁の再編成でなくなってしまったのが、最近また再発足していました。その脳科学委員会から「脳科学研究ルネッサンス」という報告書が出ています。

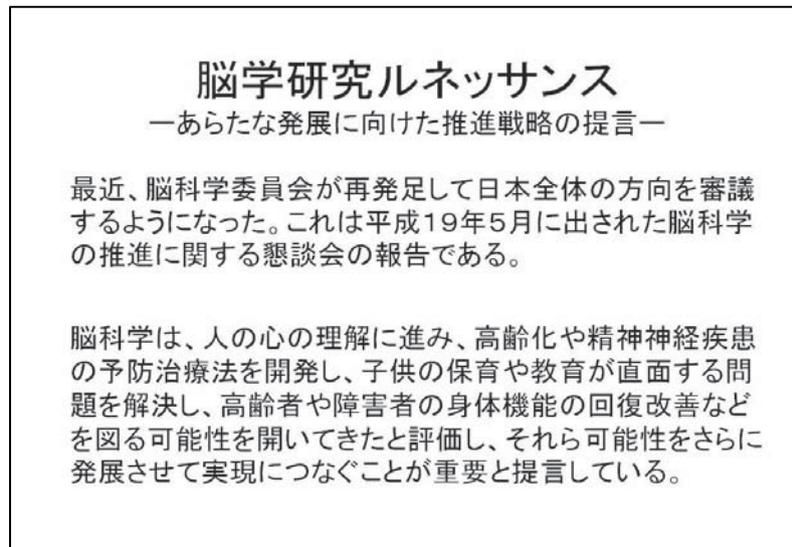


図-2

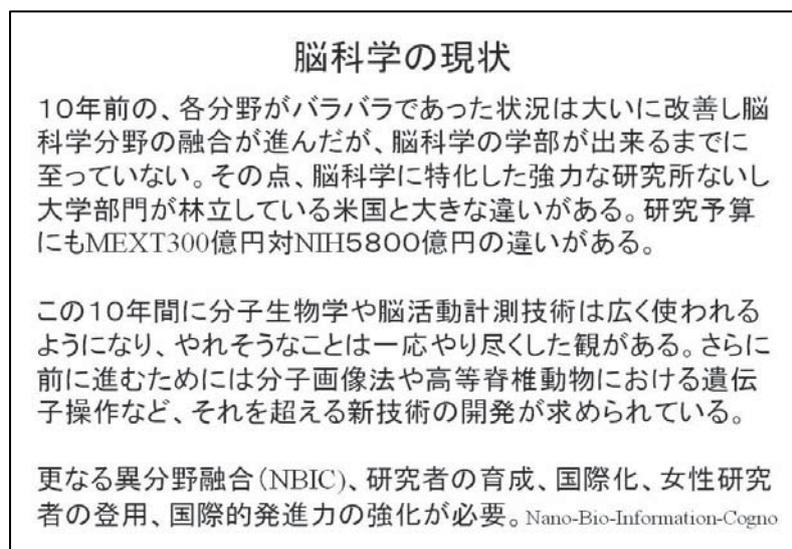


図-3

〈図-2〉 〈図-3〉 平成19年5月に出たものですが、そのレジユメをごくかいつまんで申しますと、「この十何年の間に脳科学は人の心の理解に進んできた。高齢化や精神疾患の予防・治療法を開発し、子供の保育や教育が直面する問題を解決し、高齢者や障害者の身体機能の回復・改善などを図る可能性を開いてきた」と評価し、それらの可能性をさらに発展させ、実現につなぐことが重要であると提言をしています。私もこれに賛成です。

では、10年経って、どんな進歩があったのでしょうか。10年前、脳科学の中にいろいろな

分野があって、バラバラにやっていた。何か機会があると一緒になってやるけれども、またすぐバラバラになる。そういった状況は非常に改善してきて、脳科学全体の融合が進んできました。基礎医学、臨床医学、理学、工学といった垣根がはずれて融合してきました。

しかし残念なことに、脳科学を標榜するような学部はどこにもありません。米国では、脳科学に特化した研究所や大学部門がいくつもあります。こういうものと比べるとまだ差があります。全体の脳科学の研究予算も、MEXT（文部科学省）の扱っている年間 300 億円に対して、NIH（アメリカ国立衛生研究所）の年間 5,800 億円という大きな違いがあります。そういう不満はありますが、とにかく、この「脳の世紀」のおかげで研究体制はずいぶん進んできました。

学問的に見ると何が進んだかという、やはり分子生物学や人間の脳活動計測技術が非常に一般化したということが大きいと思います。もう一つ正直な感じを申しますと、現状で手に入る研究技術でやれることはほとんどやり尽くした感があります。これからは新しい研究技術を開発するということが大事になってきます。そのためには分子画像法、あるいは高等脊椎動物における遺伝子操作などに新しい道を開こうと、懸命に努力がされています。

今後の方向としては、「脳科学研究ルネッサンス」の主張のとおりで、異分野をもっと融合する。ナノ、バイオ、インフォメーション、コグノ（認知科学）を融合した一つの分野（NBIC）を大きく発展させなければいけません。それに適合するような研究者を育成し、国際化の道を開き、女性研究者を登用し、国際発信力の強化が必要である。このように報告書は締めくくっています。

「脳を知る」領域

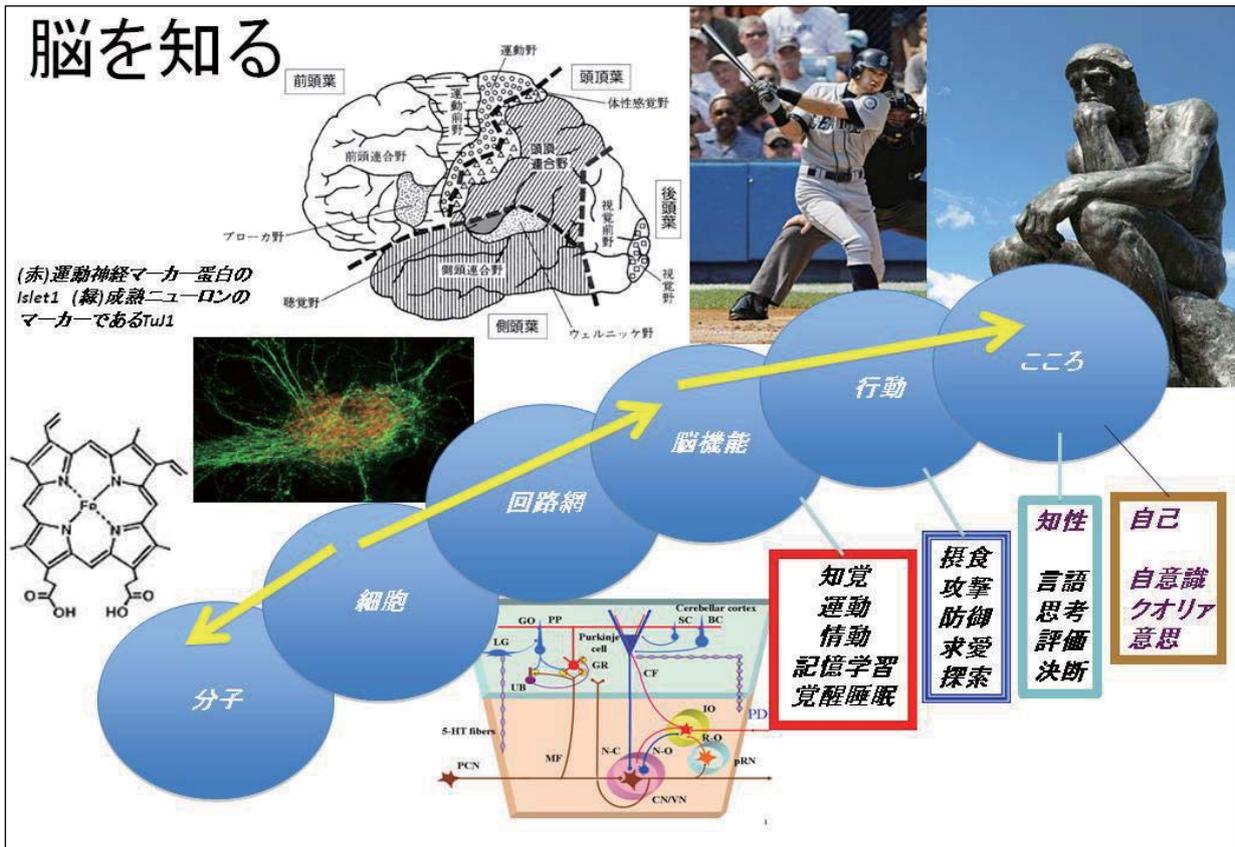


図-4

〈図-4〉 我々はとにかく脳について知りたいと考えています。脳に関する知識は最近、爆発的に増えています。しかし、脳について非常に難しい点は、ほかの学問分野にはあまりないことだと思いますが、階層性が非常に強い。普通、神経細胞を起点にいろいろ考えますが、細胞がいろいろな分子を持っていて、これだけで非常に複雑な系を作っていて、精妙な働きをします。

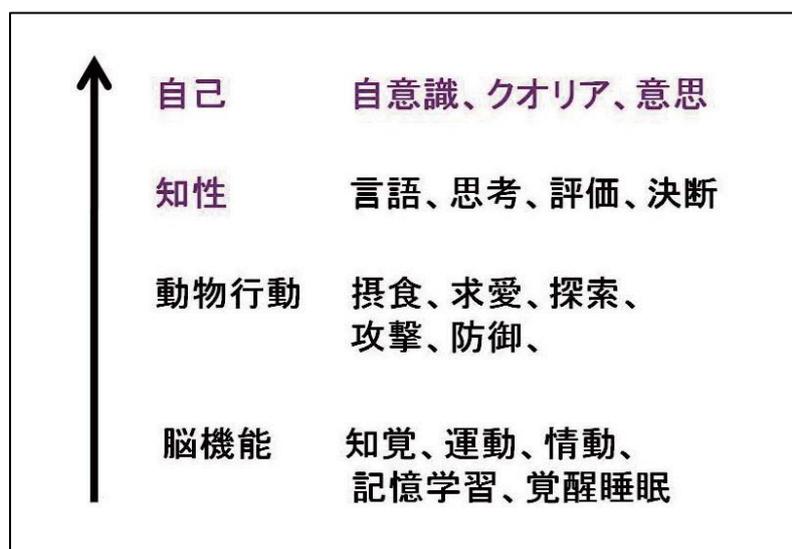


図-5

〈図-5〉 また、たくさんの細胞がつながりあって、いわゆる神経回路網を作ります。作った回路網が脳の基本的な働きを発揮します。これはネコでもイヌでも、いろいろな動物が共通して発揮する脳機能であって、知覚、運動、情動、記憶・学習、覚醒・睡眠という五つに分けて考えるのが普通です。そういう脳機能をうまく組み合わせて、動物はいろいろな行動をします。ものを食べたり、敵を攻撃したり、身を防いだり、あるいは求愛、生殖活動をしたり、あるいは未知の場所へ置くと盛んにクンクン嗅ぎまわるといふ探索行動を起こす等の生きるために意味のある行動をします。これはどんな動物でも持っている働きですが、人間になるとその上の知性が発達してきて、言語を使い、深い思考をし、高等な評価をし、重大な決断をします。そういう働きが出てきて、普通はこれを「心」と呼んでいます。

その上で、脳科学で一番やっかいなのは、自己というものがどこかで出ています。その内容は、自意識、クオリア、意思という知情意に対応する三つの成分に分かれます。これはサイエンスではなかなか歯が立たない分野で、これが脳科学の頂点にあります。

もう一度まとめ直してみると、神経細胞から回路網ができて、回路網から「心」に至る道筋というのは図-4のようになっています。たくさんの神経細胞が回路網を作って、脳の至るところに詰まっています、それらが働いてこういう基本的な脳機能を発揮します。そういうものが組み合わされて動物行動を構成しています。ここまではどんな動物でもほとんど同じです。ところが、霊長類になって、特に人間になると知性が発達してきて、さらにその上に、自己という主観でしか捉えられない、客観的に捉えることができない、非常に難しいものが出てきます。脳科学は正直言ってこのレベルのことまで解明できるとはいいい難いが、ギリギリのところまでは行けるはずですが、昔はこういうことを全部ひっくるめて「心」といっていましたが、今はそうではありません。「心」の内容をどんどん分解して行って、到達できる部分とできない部分の境界を引きはじめています。現在の脳科学では、動物の行動の仕組みの研究が非常に多いですし、人間での研究も増えてきています。脳の階層構造をとにかく上へ上へと上がって行って、ギリギリの境界まで接近しようというのが、「脳を知る」という分野の主要な考え方です。

その境界をいきなり突破できるとは思えませんが、10年、20年経った時に、おそらく我々はこの限界ギリギリのところまで来るでしょう。来た時にどうなるかというのは私自身も目撃したくてしようがありません。サイエンスそのものが変質するのではないかとよくいわれます。客観の世界から主観の世界に切り替わる瞬間があるはずです。それがどんなものかというのが、脳を知る分野の最終問題といえます。

神経回路網の研究

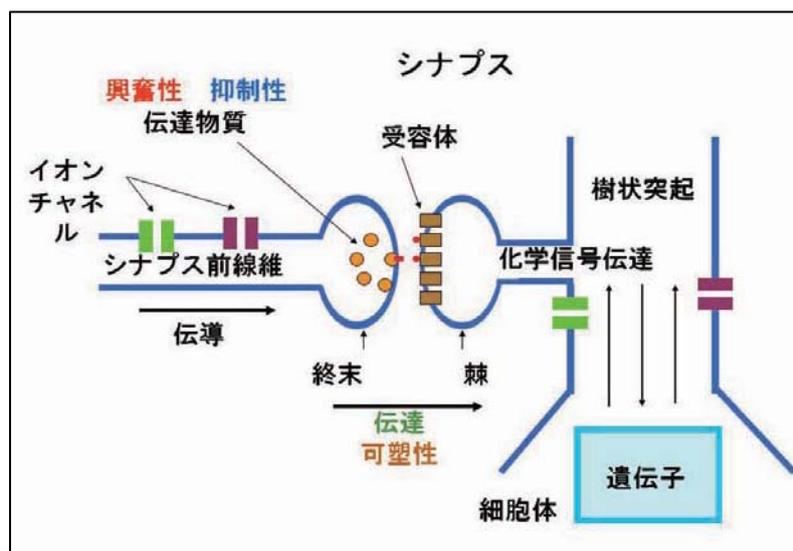


図-6

〈図-6〉 神経細胞と神経細胞の間のシナプスという微細構造を中核に、神経回路網の働きが詳しく分析されてきています。そういうシナプスが一つの神経細胞にたくさんあります。

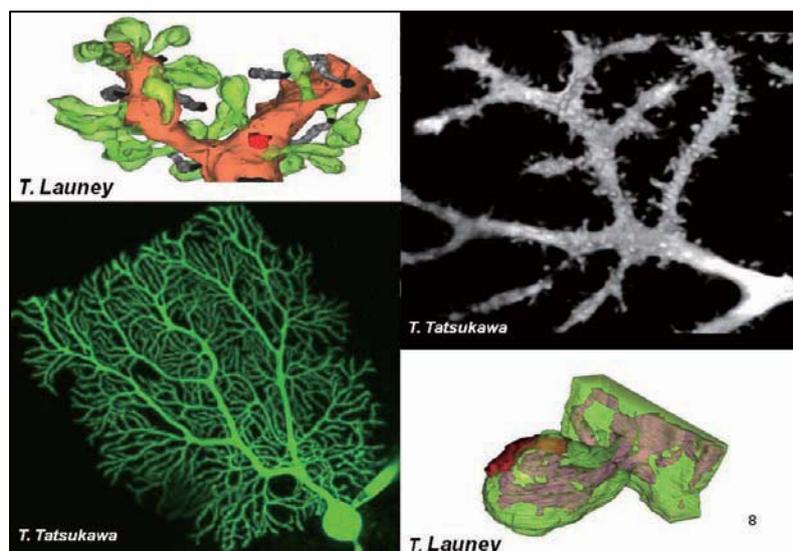


図-7

〈図-7〉 これは小脳のプルキンエ細胞と呼ばれる細胞ですが、拡大するとこういう枝に

小さな棘があって、もっと拡大してみると、この棘がこん棒みたいな形をしていて、その横に外から来た線維がくっついて、ここでシナプス結合を作ります。これは理研の T. Launey 博士が樹状突起を電顕トモグラフィーという方法を使ってスライスしたのから再構成したのですが、直径 1 μm ぐらいの大きさの棘が脳の一番基本になる構造です。そこで信号がやり取りされます。その信号をやり取りするために非常に複雑な分子過程が、そこで営まれているということが分かってきています。

そんな非常に微細なレベルから「心」のレベルまで、大変な階層を持った分野ですので、それぞれみんなどこかに取り付いて研究をしています。そして、また時代とともに焦点があっちへ行ったりこっちへ行ったりします。過去の 10 年間はミクロのレベルに重点がありましたが、そろそろマクロの方向に振り子が動き出したという感じもします。

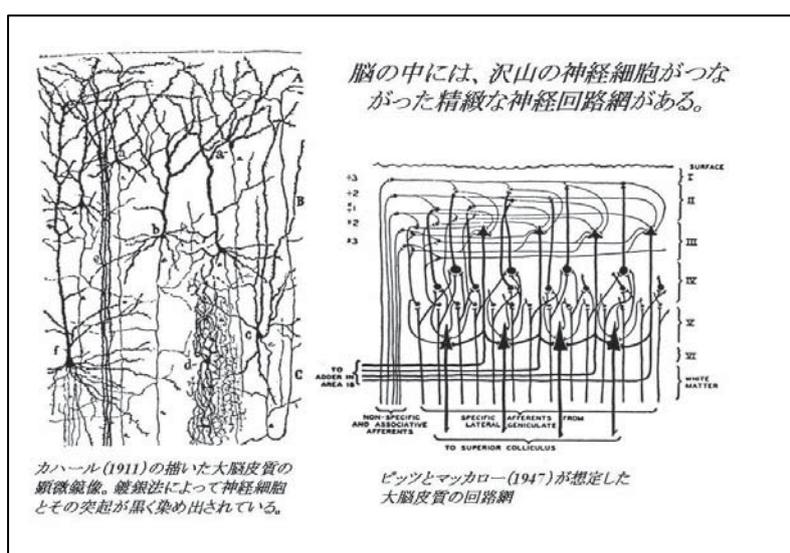


図-8

〈図-8〉 神経細胞がたくさん網の目状につながって、いわゆる回路網を作っています。それを手掛かりに上の方へ上の方へ上って行こうという方向が打ち出されてきています。これは大脳の表面を顕微鏡で見たところですが、たくさんの細胞が網の目のようにつながっていますが、一方は小脳の方で過去 20 年間に調べられた神経細胞のつながり方です。約 10 種類の違った神経細胞が、興奮性と抑制性の 2 種類のシナプスでつながって回路網を作っています。

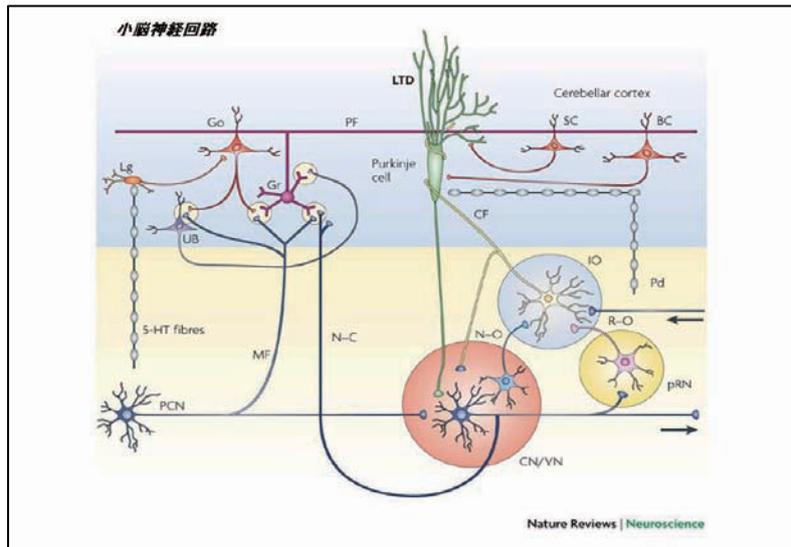


図-9

〈図-9〉 さて、こういう神経回路がどう動くのか？ そして何をやるのか？ 我々は過去 20 年から 30 年の月日を費やしてそんなことばかりやってきました。やっと最近、こういうものの働きを表現するモデルみたいなものができるようになってきました。コンピュータの方も進歩して、大規模なシミュレーションも段々できるようになってきているということで、この分野も順調に進歩していると思います。

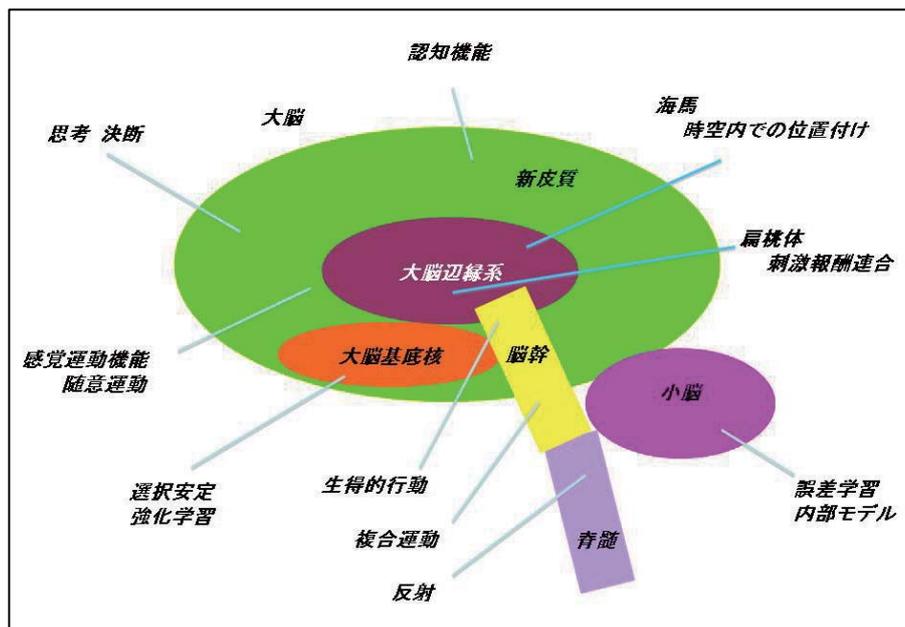


図-10

〈図-10〉 そういう回路網が脳の至るところにあります。脳というと、手をつけられないように感じられるかもしれませんが、大きく言うと六つか七つの部分に分けることができます。脊髄があって、その先が脳幹といわれる部分になります。それがマツタケの柄みたいになっていて、その先端に大脳と小脳という二つの傘があります。

脳幹の付け根を取り巻くようにしてあるのが、大脳辺縁系と呼ばれる進化的に古い部分で

す。また、ここには大脳基底核と呼ばれる大きな神経細胞の集団があります。これらの構造が一体どういう回路網を持っていて、それがどう動いて、何をやっているのかということを追求するために、脳科学では大勢の人が営々と努力をしているとあってよいのではないかと思います。

昔、フロイトが心の中には「イドと自我と超自我」があって、互いにせめぎ合っていると考えたようなことが、今は別の言葉で語られているようになってきています。例えば、脳の前部には随意運動の信号を出すところがあります。扁桃核は、刺激と刺激に対する報酬の意味を設定するところです。大脳基底核というのは、大脳皮質で起こる雑多な信号から選択して系を安定させるという働きを持っていて、そこに強化学習という過程があります。小脳の方は、いわゆる誤差学習をして、それによって内部モデルというものを大脳に対して提供します。このようないろいろな仮説が提案されるまで理解が進んできました。

「脳を守る」—アルツハイマー病

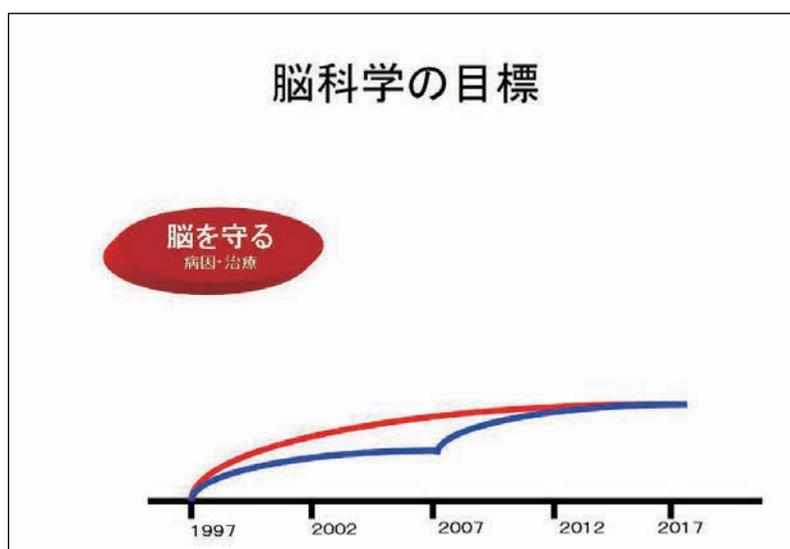


図-11

〈図-11〉 では、「脳を守る」の方はどうか？ 例えばアルツハイマー病というのは、10年ちょっと前は どうして起こるのかよく分かりませんでした。ところが、この研究が立ち上がってからはいろいろな新しい成果が出て、「何故そういうことが起こるのか」「治療や予防はどうしたらよいのか」そういう問題を語るできるようになってきました。

アルツハイマー病の発症頻度は高齢になるにつれて急速に増加します。米国エール大学の Golomb 博士らが 2000 年に発表したデータによると、85 歳の人の約 30%が発病します。発病前に軽くぼけたという状態が起こりますので、これを全部入れると 60%近くになってしまいます。つまり 85 歳になると、生きている人の半分以上が、多かれ少なかれ影響を受けるということで、放って置くと社会的にゆゆしい事態が起こります。

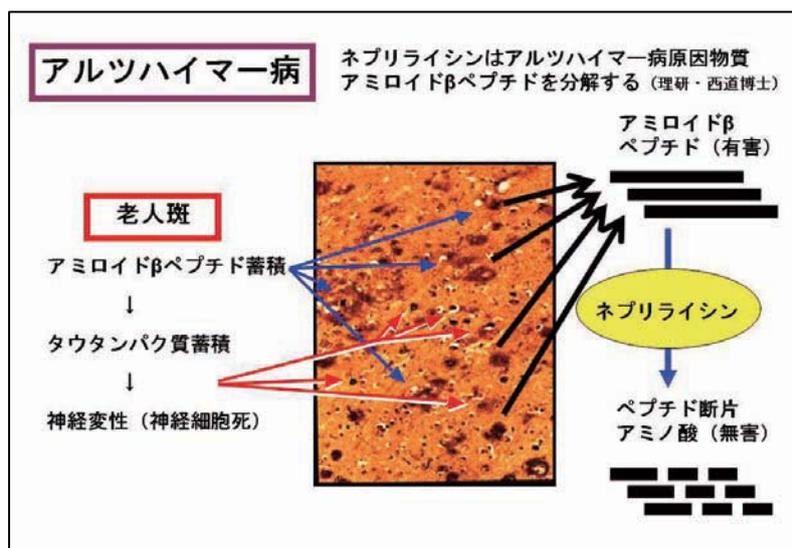


図-12

〈図-12〉 アルツハイマー病の起こり方が詳しく調べられてきました。脳を顕微鏡で見た像に、アミロイドβペプチドというものが蓄積した老人斑というしみが出てきます。また、アミロイドβは細胞の外にありますが、細胞の中の端にタウ蛋白というのが溜まってきます。今の理解では、老人斑が出てきてアミロイドβが蓄積すると、それに伴ってタウ蛋白が蓄積してきて、それで神経細胞が変性して死んでしまいます。このように考えられていますが、これが本当に直列に起こるのか、並行して起こるのか、あるいはどっちが大事かということで重要な論争があって、完全には決着がついていません。

理研の西道博士らが、10年ほど前に見つけたことですが、脳の中にあるネプリライシンという酵素が、蓄積するアミロイドβを壊し、バラバラのアミノ酸にして無害にして除いてしまいます。孤発性と言われて遺伝性のない一番多いアルツハイマー病では、ネプリライシンの活性が落ちていて、いわばごみの掃除がよくできていないということを見つけだしました。そのごみの掃除を活発にすれば治療につながるということで、ネプリライシンを中心にした色々な研究が進んでいます。

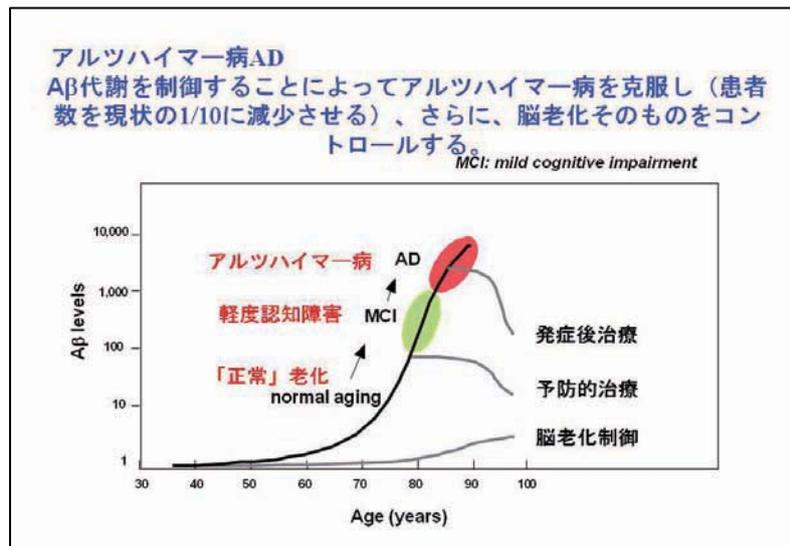


図-13

〈図-13〉 βアミロイドの溜まり方をこういうグラフで表すと、溜まり始めてから症状が出るまでの間かなりの時間があります。20年とか30年の間、βアミロイドがどんどん増えているけれども症状が出ていません。またアルツハイマー病になってしまったという状態の前に軽くぼけている状態があります。この間に何とか手を打って発症しないようにすれば、アルツハイマー病は防げるのではないかと考えられてきました。

「軽くぼける」というのは、軽度認知障害 (mild cognitive impairment) といわれて、今注目されています。この時期だったら治療の可能性がまだあると思われます。重要なのは、発症していない段階でどうやってそれを見つけ出すかです。

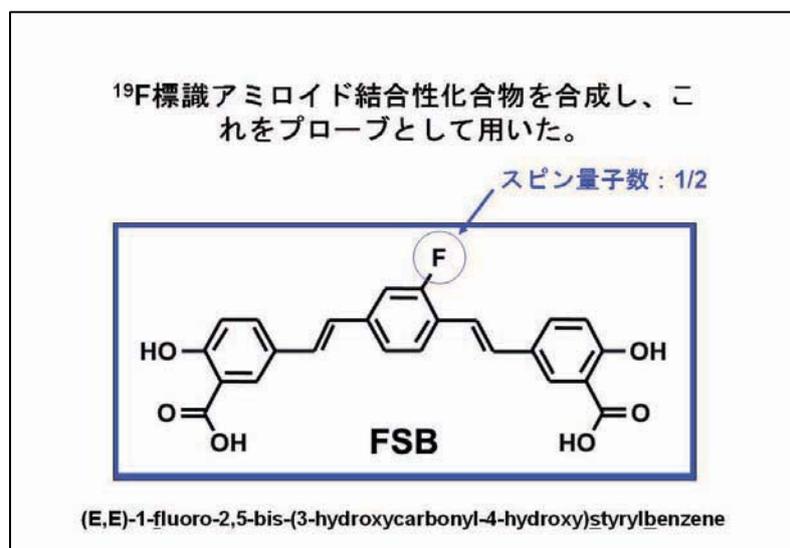


図-14

〈図-14〉 今工夫されているのは、アミロイドβが頭の外から見えるようにする方法を開発することです。Fのくっついたプローブ物質を注射すると、これが脳へ行ってβアミロイドとくっついて、このFが核磁気共鳴装置で検出できます。

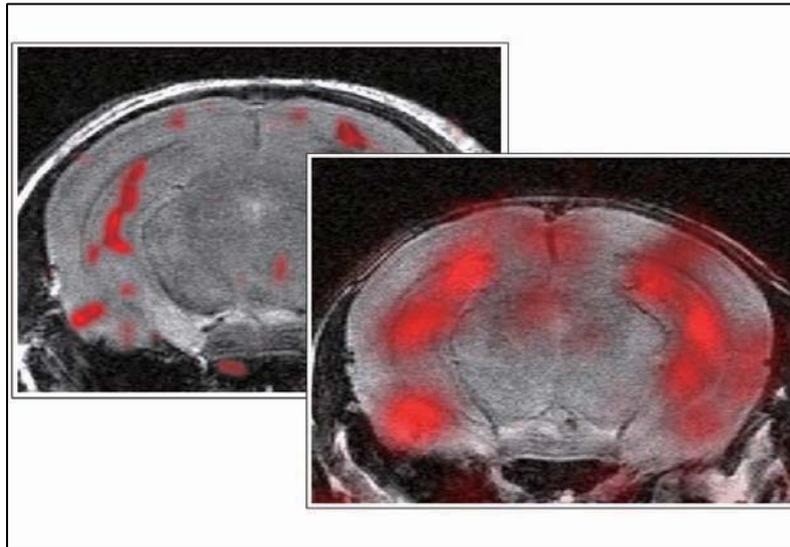


図-15

〈図-15〉 これは、アルツハイマー病のように、アミロイドβが脳の中に蓄積してくるマウスの脳の核磁気共鳴の像ですが、進行するとβアミロイドがものすごく蓄積してきます。それを外から撮影して知ることができます。これはまだ発病していないけれども大分溜まってきたということで、これを治療するということができるようになります。人間についてのこういう試薬の開発は非常に重要な発展です。

「脳を育む」— 臨界期という概念の確立

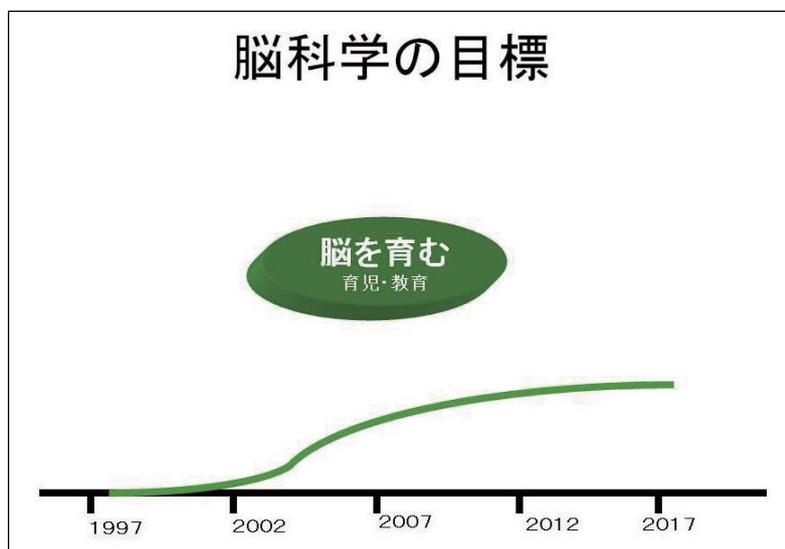


図-16

教育現場における医学的な問題 (1)

教育現場の問題とは？

教育改革国民会議「教育を変える17の提案」2000年12月
「日本の教育の荒廃は見逃せないものがある。いじめ、不登校、校内暴力、学級崩壊、凶悪な青少年犯罪の続発など教育をめぐる現状は深刻であり、このままでは社会が立ちゆかなくなる危機に瀕している

原因は？

1. 子供の行動異常
注意欠陥多動症、自閉症、精神遅延
感情の制御ができず衝動的行為
2. 高度情報化社会の悪影響
情報過多
ゲーム脳
インターネットによるコミュニケーション
3. 少子高齢化社会の歪み
家庭内教育の崩壊（躰け、動機付け）
高齢者介護の負担
4. 競争・国際化社会の要請
教育競争
ストレス

図-17

〈図-16〉 〈図-17〉 さて、「脳を育む」ですが、これも非常に大事な問題です。育児あるいは教育に何かよい助言はできないかということ、我々もしょっちゅう考えています。ちょうど10年ぐらい前、2000年前後にこの問題は日本中で非常にさかんに議論されました。教育を改革する国民会議というのができて、いじめ、不登校、校内暴力などを何とかしなければいけないということで、17の提案をしました。

どうしてこういうことが起こるのかということで、いろいろな原因が分析されました。ゲームのやり過ぎとか、家庭の中の教育が行われなくなって、しつけが出来ていない。あるいは高齢者の介護にエネルギーを取られてしまって、子供の面倒が見切れない。あるいは教育競争という社会的なストレスが強すぎる。このようにいろいろな議論がされました。

教育現場における医学的な問題

注意欠陥多動症(ADHD)
学習障害(失読など)
広範性発達障害
自閉症
Asperger症候群
Rett症候群
Tourette症候群(チック)
ダウン症候群
脆弱X染色体型精神遅滞

大気汚染との関係
小児神経科医、小児精神科医の不足

図-18

〈図-18〉 脳科学ではしょうのない問題もたくさんありますが、病気といってよい医学的

な問題がかなりたくさんあるということもよく認識されました。医学的な原因で起こっていることは解決することができます。非常に多い例が注意欠陥多動症です。子供が全然落ち着かなくて、こういう子供が1人いると学級崩壊が起こるとよくいわれました。

自閉症も非常に発生頻度が高くなっています。昔は1,000人に1人ぐらいしかいませんでしたが、今は100人に1人ぐらい見つかるといわれています。ほかにもいろいろな病気があります。そういう場合には、学校へ行かないで病院へ行きなさいといわないといけないと思いますが、普通の人にはその見分けができない場合がたくさんあります。

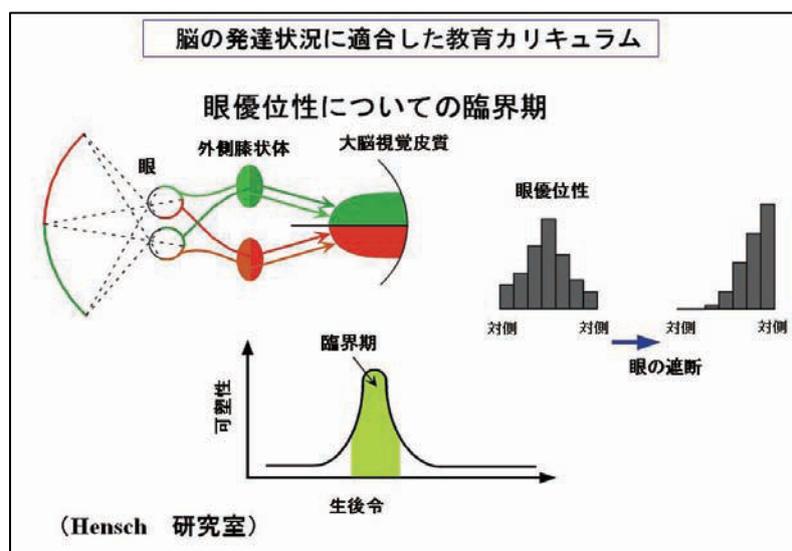


図-19

〈図-19〉 この「脳を育む」領域で非常に目覚しかったのは、臨界期という概念の確立です。これは目について非常にはっきりした成果が上がりました。マウスの図ですが、二つ両方の目から入った信号が脳の一部に重なって入ってきています。そういう両眼視をする部位の神経細胞の活動を調べると、どっちの目から入れた信号に反応するかという反応の仕方が、普通は左右対称性になっています。

ところが、生まれて1週間たってから、2～3日間、片方の目だけ閉じておいて、それがすんだら目を開けてもう一度調べると、この対称性が破れて、開いていた目の方の刺激にはよく反応するけれども、閉じた目に対しては反応しなくなってしまいます。これは大変だということで、眼科の先生方が子供についての記録を調べてみると、1歳半ぐらいまでの間に片方に眼帯をした子は、後でみんな弱視になっています。ですから、1歳半よりも小さい子供には決して眼帯をしてはいけないということになってきました。

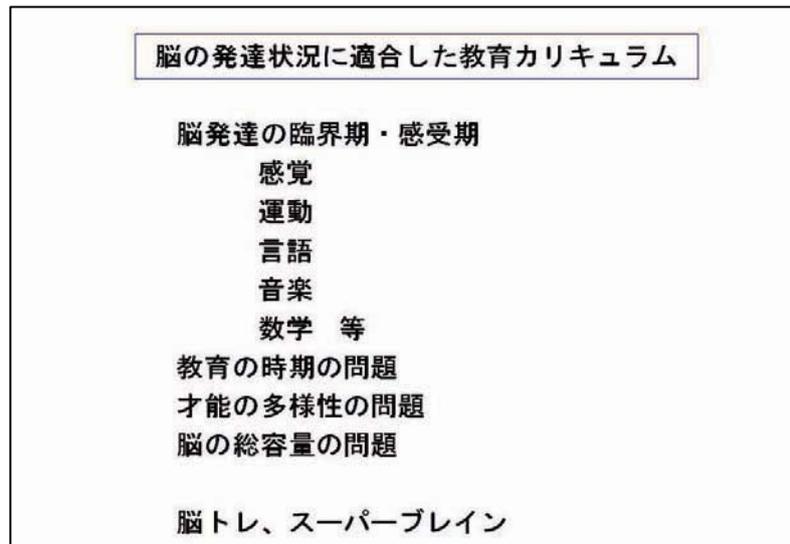


図-20

〈図-20〉 マウスでは 1 週間たってから何日かという非常に短い限定された時期に、脳の神経細胞が環境からの影響に敏感な感受性の高い時期があります。これを臨界期と呼ぶようになりました。視覚だけでなくいろいろな脳の働きについて、みなある種の臨界期があるのではないかと考えられています。スポーツ、外国語、音楽、数学というのは、あまり年を取ってからやったのではだめだとよくいわれます。例えば外国語は、12 歳を超えると覚えるけれども外国語として覚えていて、母国語として獲得することができなくなるといわれます。これも臨界期的一种です。臨界期というとシャープに感じるので、少し和らげて感受期という言葉もよく使われています。

脳科学と教育学の融合の必要性

育児・教育に際して、こういう臨界期に対する理解があるのとないのでは、ずいぶん違ってきます。しかも、才能というのは多様ですので、その多様性をちゃんと見分けて、それぞれに一番よい教育を施すというのが理想ですが、そういうことはなかなかできません。何でもかんでも教えればよいかというと、そうではない。才能がありますし、脳の全体の容量には限界があって、何でも教えれば無限に上手になったり利口になったりするわけではありません。一つを伸ばせば、ほかはできなくなるということも理解しないと危ないようです。ですから、脳トレやスーパーブレインというのもよくよく注意してやってくださいと我々はいっております。こういうことはネズミやマウスを使ってかなりよく調べられています。臨界期に目を塞いだために、目が見えなくなっているマウス的大脑にある細胞を調べてみますと、先ほど申し上げた樹状突起の棘に変化が認められます。正常な側と比べて、刺激を遮断した側の細胞では棘が減っています。ただ、働きが落ちたというだけではなくて、構造的な障害も起こっているのです。



図-21

〈図-21〉 脳科学では、「脳を育む」という領域も何とか開拓したいと思い、私自身もずいぶんいろいろなことをやったつもりですが、残念ながらあまり成功しませんでした。粛々と進んではいますが、大きな動きをするところまでは行きませんでした。例えば OECD（経済協力開発機構）に CERI（教育研究革新センター）という教育機関があって、その発案で、学習科学と脳科学の融合について教育政策、実践、応用の可能性を探るといった一種の班研究のようなものを行ったこともあります。

8 年間にわたってそういう活動をしました。最初は国際シンポジウムをやりましたが、2 期目には思い切って世界的な研究ネットワークを三つ作りました。米国には「脳の発達と読み書き」、ヨーロッパでは「脳の発達と計算」、日本では「脳の発達と生涯にわたる学習」というテーマで、班研究を組織して、10 人ぐらいの研究者を国際的に集めてやりました。こういう問題に関する理解はおおいに深まったと思いますが、それを実地に応用していくという点で、めどがつかず、残念ながら中断してしまっています。

こういう問題をあまり短絡的に捉えるのはよくないと思います。例えば先ほど外国語の学習には 12 年が限度だと申しましたが、12 年を超えても学習できるように何とかする薬はないのかといわれても、すぐポケットから出せるわけではありません。ただ、移民を受け入れた場合に、その国の言葉を教えるのに、最も効率のよい年齢や方法を研究する手はあるだろうと思います。



図-22

〈図-22〉 日本でも JST（科学技術振興機構）がこういう事業をやったこともありますし、縦断的研究計画として、子供のコホート研究というのが発案されました。これは 0 歳児と 5 歳児の 1 万人を 5 年間追跡して、脳がどのように発達するのかをきれいな型で捉えようという試みで、我々も非常に期待しましたが、いかんせん非常に高額な費用と大勢の人を動員しなければいけません。一番難しかったのは、保健所の協力を得ることでした。これだけのことをやろうと思うと、全国の保健所の協力がないととてもできません。そういう点で、組織するのが難しかったということもあって、中断してしまっています。

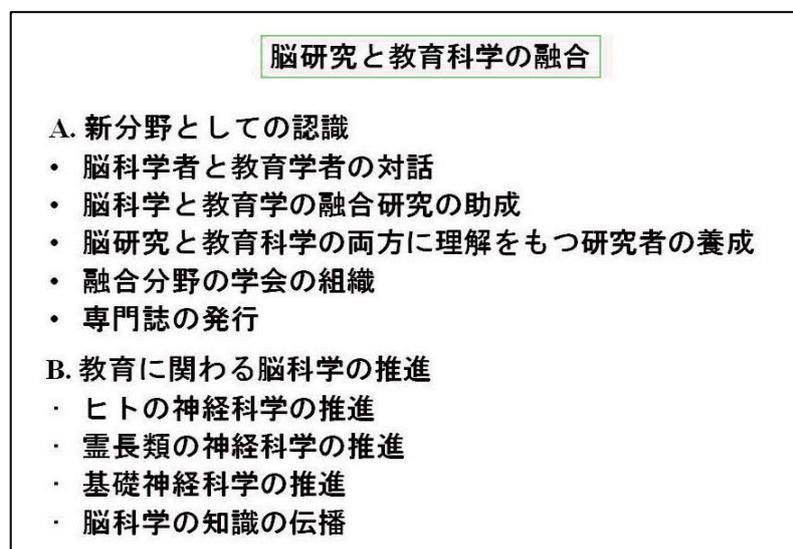


図-23

〈図-23〉 私もすいぶん一生懸命にやったつもりですが、この問題はいろいろな隘路がありました。大事なことは、こういうものを新しい分野だと認識して、脳科学者と教育学者の対話をしなくてはいけません、この対話が極めて難しいのです。では、脳科学と教育学の融合研究に、研究費をたくさん出して助成すればよいのかというと、そういう融合研究がそんなにたくさんあるわけではありません。かなり難しい種類の研究になります。

脳科学と教育科学の両方に理解を持つ研究者を養成して欲しいのですが、しかし、よほどモチベーションを上げる理由がないとうまくいきません。そういう学会を作ったらどうか。専門誌を作ったらどうか。さんざん議論しましたが、結局あまりうまくいかなかったというのが実情です。

では、脳科学の中で、教育に役立つような部分の研究に力を入れてやったらどうでしょうか。ヒトに重点を置いた新計画をやったらどうでしょうか。少なくとも霊長類を研究したらどうでしょうか。あるいは社会の理解を得るために、研究で得た知識を広く発信するという事を考えなくてははいけません。そういうことも随分議論し計画しました。この点は誠に心残りですが、また将来そういうことを進める時期が来るのかもしれない。

「脳を創る」－人工知能の研究

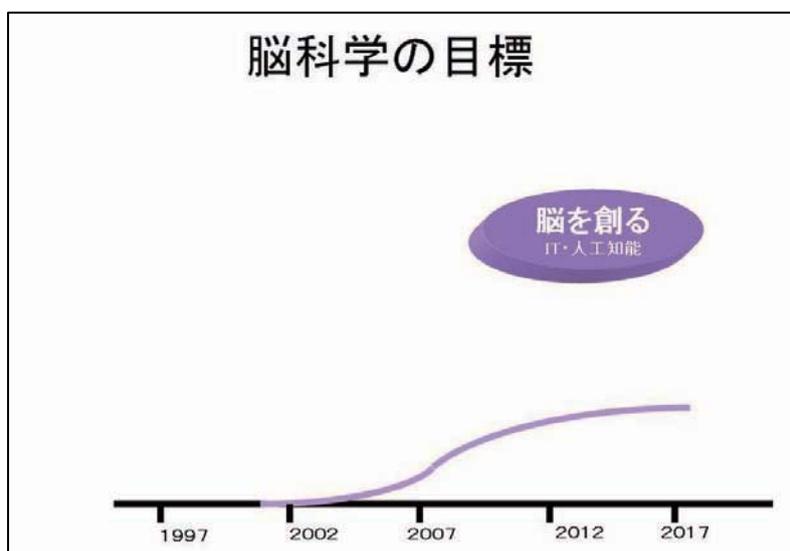


図-24

人工知能の夢は今？

1955年8月、ミンスキーやシャノンを含む4人がロックフェラー財団に対して、次の年の夏にニューハンプシヤのダートマスカレッジで人工知能研究をするための助成を要請した。「学習のあらゆる観点あるいは知能の他のどのような特徴も原則として正確に記述でき、機械でそれをシミュレートすることができる」。「機械が言語を用い、抽象や概念を形成し、人類だけに解けるような問題に解答し、自分自身を改善する、そのような道を見出す努力をする」。

図-25

〈図-24〉 〈図-25〉 さて、「脳を創る」の領域ですが、これも紆余曲折がありました。この分野はもともとこういう背景があります。人工知能という言葉が作られたのは約 50 年前です。1955 年にミンスキー、シャノンといったコンピュータの基礎をつくった有名な科学者が、ダートマス・カレッジというところに集まって会議を開いて、次の年の夏に人工知能研究をするから、お金を出してくれとロックフェラー財団に提案した申請書が残っています。

『学習のあらゆる観点、あるいは知能の他のどのような特徴も、原則として正確に記述できるという理解の下に、機械でそれをシミュレートすることができるはずだと考えます。機械が言語を用い、抽象や概念を形成し、人類だけに解けるような問題に回答し、自分自身を改善する。そのような道を見いだす努力をする。』こういううたい文句で、ロックフェラー財団になんと翌年の夏、2 カ月間、10 名の科学者を雇ってくれという提案をしています。

この頃はコンピュータの基礎研究が一段落ついた段階で、この分野の人たちは非常に意気盛んでした。人工知能なんてあつという間にできてしまうという調子だったのだと思います。2、3 年前、これの 50 年を記念するシンポジウムがまたダートマス・カレッジで行われたと聞いていますが、残念ながら 50 年間でどこに人工知能があるのかというような具合で、いかにこの問題が難しいかをよく示しています。



図-26

〈図-26〉 確かにコンピュータは進歩しました。今のスパコンの演算速度や容量を比べると、ほとんど脳と匹敵します。脳は、毎秒 1,000 億個のニューロンが活動して、各結合で毎秒 200 回の演算をしているとすると、全体で 100 テラフロップスという演算速度を持っていると推定されます。メモリもまた 100 テラバイトあると推定できます。最近の IBM のスパコンも 100 テラフロップスで 100 テラバイトの能力を持っています。

実際にスパコンを使って、97 年にチェスの世界チャンピオンと IBM の「ディープ・ブルー」というチェスコンピュータが戦って、コンピュータの方が勝ってしまいました。2 年後にドイツで「ディープ・フリッツ」というドイツ製のスパコンが、ドイツのチェス名人とやって 7 番勝負で引き分けました。そういうことで、コンピュータ自身はかなり進歩してきてい

ます。

しかし、同じ大きさの演算速度やメモリを持つために、大きな建物いっぱいに入るようなスパコンと、我々一人ひとりが持っている脳が対応しているというのですから、脳の方がはるかにすごいのです。コンピュータはその辺までは来ていますが、脳がやっていることでできないことはいくつもあります。

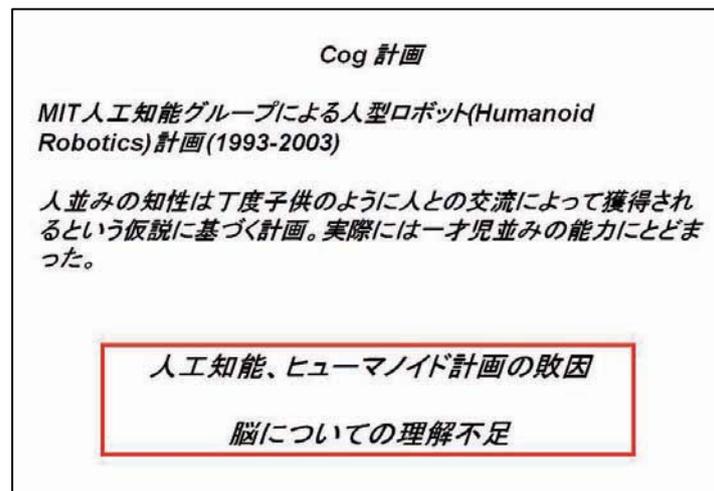


図-27

〈図-27〉 COG 計画という有名な計画があります。これは、MIT（マサチューセッツ工科大学）の人工知能グループが NIH の予算でやった人型ロボットの計画で、93年から2003年まで10年間続きました。これは、人並みの知性はちょうど子供のように、人との交流によって獲得されるという仮説に基づく計画です。上半身だけのロボットですが、一応見かけは人間くさく作ってあります。人が部屋へ入ると、COG という名前のついたロボットがチラッと見て「やあ」と言う。だから部屋へ入った人はびっくりして、「人間そっくりだ」ということで感激して大勢の人が押しかけました。

このロボットに子供に言語を教えるプログラムを使って、言語を一生懸命に教えた。しかし、教えても覚えるわけがないのです。どうやって覚えるかという脳の仕組みをまったく知らないでやって、結局10年経って、実際には1歳児並みの能力に留まったということで、この計画は完全に敗北に終わりました。

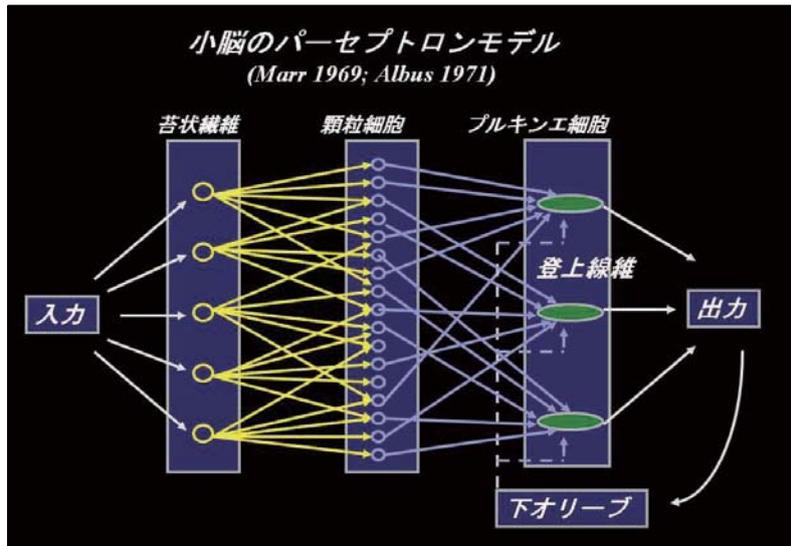


図-28

〈図-28〉 「脳を創る」という方向でものになったのは、パーセプトロンという 3 層構造を持った学習回路です。これはもともと網膜にある 3 層構造を真似して、米国の心理学者ローゼンブラット博士が作ったものですが、学習する機械として一世を風靡しました。これがもとになって 1980 年代に今の多層性のニューロコンピュータができました。

パーセプトロンでは、情報が 1 層目で受けられて、2 層目にばらまかれて、それを 3 層目の細胞がピックアップして回答を出します。外部に先生がついて見ていて、正解が出るとその時働いていた 2 - 3 層間の結合を強め、間違えると結合を弱めます。そういう操作をしていくと、100% 正解に近づいていくという機械です。ローゼンブラットは網膜を真似て作りましたが、実際には小脳にそっくりの回路があるということが分かって、1970 年ごろに、英国の人工知能科学者マー博士、米国のコンピュータ工学者のアルブス博士らから有名な小脳のモデルが出ました。これは歴史に残るような出来事でした。

小脳の内部モデル

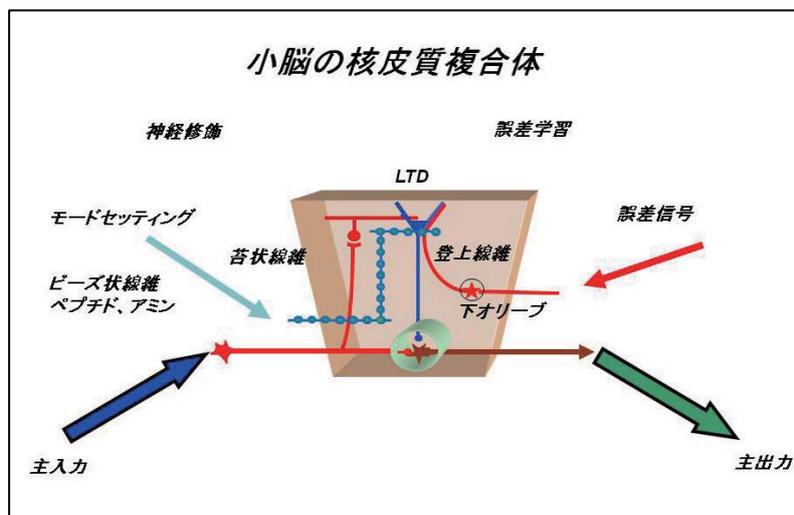


図-29

〈図-29〉 こういう回路網モデルもさることながら、実は脳を考える時にはシステム制御系のモデルも非常に有用であるということを、私どもは前から指摘してきました。例えば小脳に関しては、今のようなネットワークを含んだ一種の小脳チップを想定して、小脳チップがいろいろなところに挿入されて、適応制御をするという基本的な考え方を提案しています。

小脳のチップを、手や腕を直接動かす回路と並べて一緒に走らせるとか、同じ信号をどんどん打ち込んで、出てきた信号の違いを戻してやって、小脳回路の中の結合に組み換えを行わせるとか、モデル的にそういうことが起こると予測できます。ですから、これを続けてやっていると、大脳回路のモデルが小脳回路の中に作られてきます。小脳がそれを使っているいろいろなことをやるのです。一つのチップの大きさから計算して、人間の小脳には 1 万個ぐらいのチップがあって、それがいろいろなことに使われています。基本的な血液の流れの調節から始まって、我々の高等な認知機能にまで、こういうものが使われていると考えられます。

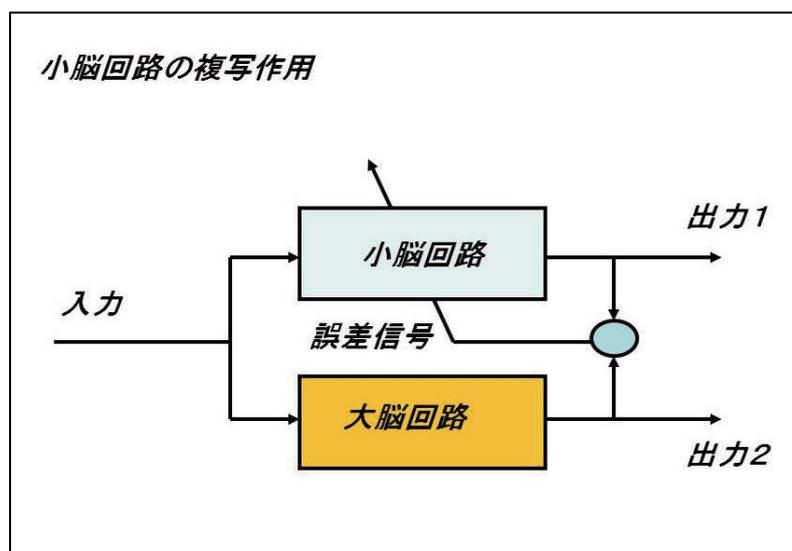


図-30

〈図-30〉 例えばコップがあるのを取ろうとしたとします。最初は目で見ながら取って、確かに取ったと目で確認して動作が終わるわけです。しかし、何時もいちいち目で見て確認していたら何もできません。ですから、我々は見もしないでパッといろいろなものを取ることができます。そういうことが小脳のチップを使ってできるのです。

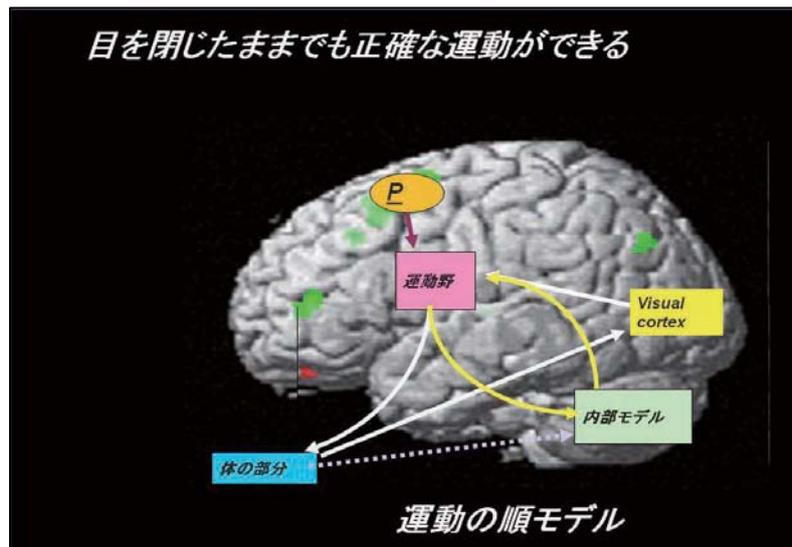


図-31

〈図-31〉 大脳の前頭野から「コップを取りなさい」という指示信号を受けて、運動野で手の筋肉に対する司令信号が作られて、脊髄に送られてコップを取り、それを視覚系を通して確認する。これで完結します。しかし、こんなことを毎回やっていたら何にもできません。そこで、信号が小脳の内部モデルにできた手や腕のモデルを通して脳の中でフィードバックします。そうすると、手や腕からのフィードバックはいりません。運動野は内部モデルだけを参照しながら、正確な運動ができるようになります。これが運動を練習して上手くなるということです。サッカーでも、テニスでも、皆そうでしょう。いちいちフィードバックしていたら間に合わないようなことばかりです。野球でも、速いボールを打つというのは、内部モデルを使ってやっていると思えません。



図-32

〈図-32〉 一つの身近な例として、くすぐりということがこういうことから説明されています。我々は人に触られるとくすぐりたい。ところが、自分でやると全然くすぐたくありません。これはどういうわけでしょう。これはイギリスの学者の研究ですが、自分でやる時

には内部モデルからのフィードバックでそれが起こることが分かっています。だから驚かないのです。人にやられる時には、いきなり皮膚刺激を受けるので、強く感じてしまうということです。

メンタルモデルの内部モデル

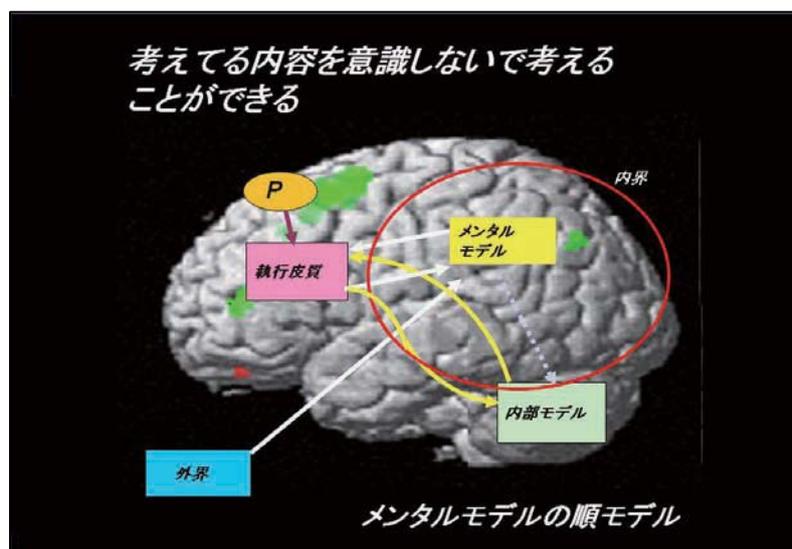


図-33

〈図-33〉 最近、非常に大胆極まる考え方が出てきました。私も提案する側なので、散々たたかれています。ものを考える時も同じ機構が働くのではないかということです。我々は外の世界から情報を受け取って、表象 (representation) といいますが、頭の中にそれに対応する何かを作り上げます。これは心理学でメンタルモデルといいます。外界への一種のミニチュアを頭の中に作り上げます。それが我々の頭の中の内界を構成しています。

我々がものを考えるというのは、前頭前野の執行皮質といわれている部分がメンタルモデルを操作し、あっちから見たり、こっちから見たり、ひっくり返したりして操作します。そういう操作をするというのが、ものを考えるということだと想定します。そうすると、先ほどと同じようにそういうことを続けてやっていると、小脳にメンタルモデルの内部モデルができてきて、そういうものが一旦できると、我々は内部モデルだけを使ってものを考えることができるようになります。



図-34

〈図-34〉 それで何が違うのかというと、小脳と大脳の間には境界があって、大脳で起こることは原則として意識に上ってきますが、小脳で起こることは意識に上ってきません。小脳を電気で刺激しても何をやられているのか分からないというのは事実です。ですから、最初は意識してメンタルモデルを相手にウンウンうなって考えますが、内部モデルが小脳にできると、考えていることが意識の下に入ってしまう、考えている内容を意識しないで考えることになります。

皆さんも多分ご経験があると思います。難しい問題を抱えてウンウンうなって、そのうちいやになってしまっていて忘れてしまい、2日ぐらいした時に正解がポッと出てきて、「ああ、あれか」ということになります。アインシュタインもそんなことをいっています。

あるいはポワンカレというフランスの有名な数学者が、ある公式を考えて、いくら考えてもできないのであきらめて、郊外にピクニックに行こうと思って馬車のステップに足をかけた途端にパッとひらめきました。家へ帰ってずっとそのひらめいたことを書いて辿ってみると正解でした。そういう直感的な思考、あるいはインスピレーションといわれる現象が、何故起こるのかと言うと、こんな仕組みが脳の中にあるとすると説明しやすいのです。

今のような考え方をもっと拡張すると、例えば、ほかの人のことが理解できるというのは、自分の中にほかの人の内部モデルができているから、それを使ってほかの人が何をやるかということを推測できるのではないのでしょうか？ 自閉症の子供さんは、ほかの子供が何をやろうとしているか全然分かりません。だから、喧嘩になります。自閉症のお子さんは、小脳だけではありませんが、小脳に障害が起こっているということが分かっています。

また、精神病で起こる妄想や幻覚というのは、内部モデルのひずみではないのでしょうか？ 内部モデルが間違った信号を送り返してくるので、こういった間違った考えを起こしてしまうと理解できます。統合失調症の患者さんで、自己の消失ということが起こります。自分という気持ちがなくなってしまうと、自分で足を動かしているのに、人が自分の足を動かしたとしか思いません。自分というものがどこかへ行ってしまいます。そういう現象がありますが、統合失調症の患者さんで小脳に何か異常があるというケースが増えています。

ゾンビとホムンクルス

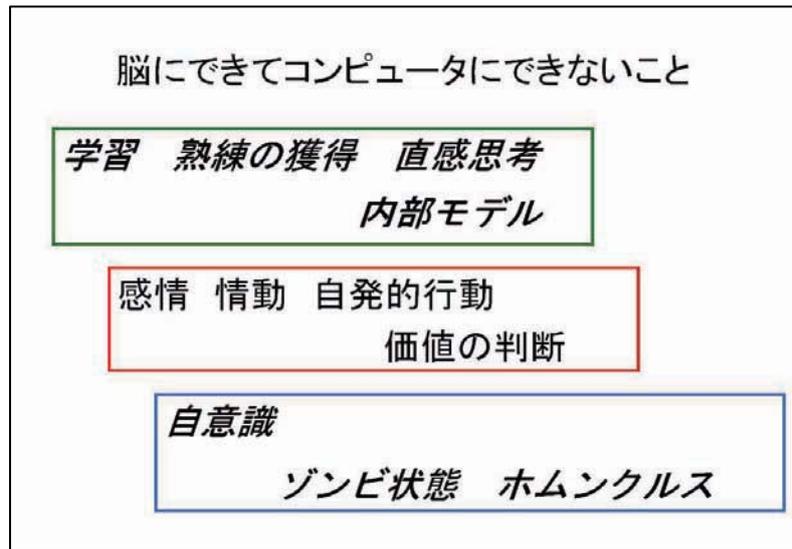


図-36

〈図-36〉 このように、脳は独特の働き方をしていますが、コンピュータにできないことができます。脳には学習能力があって、自分で学習して、できなかったことをできるようにしてしまう。それによって熟練を獲得するし、直感的な思考ができるようになる。これは内部モデルの考えでかなり説明できるのではないのでしょうか。

しかし、突き詰めていくと、コンピュータでもこういうことをやればできるのではないかという考え方が出てきます。今のコンピュータには感情、情動、自発行動という感情にまつわることはできません。コンピュータがこれはいいといたり、あれはいかんといたり、これはけしからんという価値判断をしたらとても大変なので、今のコンピュータには、わざわざ価値判断をさせないようにしています。データはみんなコンピュータに処理させて、それを取り上げて人間が価値判断をしています。しかし、やろうと思えばできないことはありません。この仕組みをコンピュータに入れてやれば、かなりの価値判断はできるかもしれません。それでも難しい価値判断を正確にしようと思うと、大変な情報処理が必要です。簡単にはいきませんが、理論的にはできないとはいえません。

本当にできないのは自意識の世界です。ゾンビとかホムンクルスという言葉でよく表現される主観の分野です。てんかん患者や夢遊病者で見られる状態を、ゾンビという言葉でいいます。最初は漫画の言葉ではないでしょうか。それを哲学者が使うようになって、いろいろな議論を起こしています。いわゆる夢遊病の状態で紋切り型で限定的ですが、非常に直接的に素早い行動をするので襲われると怖いのです。それでこの絵に描いたようなイメージができてしまっていますが、この時には意識がなくなっています。意識して経験したことは、必ず記憶に残るという鉄則がありますが、この場合は記憶に残らないので本当の意識はないとか思えません。そういう状態で身体はちゃんと動いています。非常に不思議な状況ですが、こういうものは今の脳科学では理解できません。

ホムンクルスもご覧になったことがあると思います。ホムンクルスというものが脳の中に住んでいて、このホムンクルスの中に脳がある。ホムンクルスの脳を開けてみると、またホムンクルスが出て、それを開けるとまたホムンクルスがいる。堂々巡りになってしまいます。ですから、ゾンビとホムンクルスというのは、現代脳科学のタブーとされていて、今のところタッチのしようがない問題です。

これからの脳科学の標的

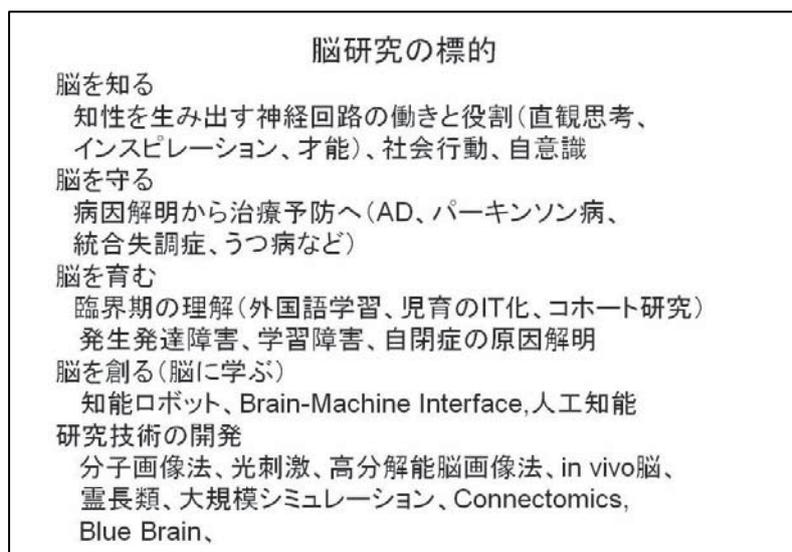


図-37

〈図-37〉 これからの脳科学の標的を考えてみましょう。「脳を知る」領域は、知性のレベルへどんどん肉薄していく段階に来ているのではないのでしょうか。直感思考、インスピレーション、才能、あるいは社会行動、ただし自意識だけはまだ手がつけられないけれども、その前までには何とか今の方法論で手が伸びるようになってきました。これは今後ぜひ発展させて欲しいと思います。

「脳を守る」方もこれからは病因解明から治療・予防へとどんどん進むべきでしょう。アルツハイマー病、パーキンソン病、統合失調症、うつ病など、難しい病気がたくさんありますが、そういうものに果敢に挑戦を続けていく時代になるでしょう。

「脳を育む」の方は、非常にバリアが高いということは我々も実感していますが、臨界期の理解のように、基本的な現象への理解をもとにして、いろいろやることがあるのではないのでしょうか。「脳を創る」の方は「創る」は激しすぎるし、先ほどの人工知能みたいな問題になるので、「脳に学ぶ」とトーンダウンしています。そのように標語がちよっと変わってきていますが、やはり目指すのは知能ロボットです。

現実に今よく動いているプログラムは、ブレイン・マシン・インタフェースです。よくテレビでご覧になるように、脳から信号を取り出して、ロボットの腕を動かしたり、車を動かしたりということが相当できるようになってきた。しかし、やはり人工知能というのは見果てぬ夢であろうと思います。何とか手がかりがつかめないのでしょうか。

こういうことをこれからやるには、研究技術の開発が不可欠です。最初に申しましたように、これまでに手に入るテクノロジーは大体使い果たしています。現在まだ動いているテクノロジーがたくさんありますが、やれるだけのことはやったという感じがあります。これからは新しいテクノロジーが開発されないといけなさと考えています。

例えば分子画像法に非常に力が入っていますが、記憶は何か。記憶が目で見えたら素晴らしい。いつか記憶のトレースが目で見えるようになります。そのために分子画像法は非常に有効でしょう。それから光を刺激に使う。光のセンサーを神経細胞に遺伝子組み換えでどんどん組み込んでいって、光を当てるとその細胞だけを刺激できます。ロドプシンの組み込みが世界中でさかんにやられています。ですから、また新しい局面が開かれてくるでしょう。今の脳の画像法、核磁気共鳴装置の解像力というのは、ミリのオーダーですが、それでは足りません。もっと解像力が上がらないと、本当のことは分からないということを強く感じます。

また、今のように麻酔をしたり、切片にしたりした脳ではなくて、本当に生きて動いている脳を調べなくてははいけません。そのための特殊なテクノロジーも必要です。無線で信号を飛ばすテレメーターなどがさかんに使われるようになってくるでしょう。

マウスも大事ですが、やはり霊長類を使って人間に近い線で研究するというのも、非常に大事になってきます。また、コンピュータがどんどん進んでいますから、大規模シミュレーションに訴えてやるという新しい方法が出てきています。

コネクトミクスというのは、アメリカでさかんにいわれている新しいテクノロジーです。電子顕微鏡連続切片を脳全部について作ろうというもので、電顕レベルで脳中を検索してしまいます。これはものすごい情報量になってしまって、本当に意味のある情報が引き出せるかどうか分かりません。これはヒトゲノムに匹敵するようなプロジェクトだという人もありますが、果たして何が分かるかイメージできません。

スイスでやられているブルー・ブレインという計画は、IBM のブルー・ジーンと呼ばれるスーパーコンピュータを使って、脳の回路を再現しようというものです。脳の回路のつながり方をそっくりブルー・ジーンに移し変えて、何がそこで起こるかを見ようというボトムアップのアプローチです。これもやっている人たちはすごい勢いですが、懐疑的な人も多いのが実状です。セオリーのないボトムアップの研究で何が出てくるか。何かとんでもないものが出てくるかもしれません。しかし、その保証はない。そんな現状です。

皆さんが期待されたようなこととお話しできたかどうか自信がありませんが、正直いって過去十数年かけてよくここまで進歩したと思います。そう思うと同時に、これからが本当の勝負どころで、曲がり角に弱い日本の研究態勢が、これでまた外国に遅れを取ってしまったら困るという気持ちも強いものがあります。どうぞ皆様、応援をしていただきたいと思います。話を終わらせていただきます。ご清聴ありがとうございました。（拍手）

■このレポートは本田財団のホームページに掲載されております。

講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得てください。

発行所 **財団法人本田財団**

104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル

Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103

<http://www.hondafoundation.jp>

発行者 原 田 洋 一