

コンピュータとしての脳

— 脳はどのようなコンピュータなのか? —

The Brain as a Computer - But what type of?-

高橋 晃

Takahashi Akira

本論文は、脳とコンピュータの関係を「脳の特
特性」「各種コンピュータの特性」「それらを踏
まえた上での脳研究のレイヤ」「現在の脳研究の
問題点」の4点から検討し、脳研究に対する展
望を述べるものである。

「脳はコンピュータである」という喩えは昔から
頻繁に用いられている。しかし、そこから一歩
踏み込んだ「脳がどのようなコンピュータであ
るのか」についての考察は少ない。

現在のコンピュータの主流は「中央処理装置」
がほぼすべての処理を行う方式であり、一つの
処理装置に対してプログラムで定められた順番
にデータを流し込む。そのため、中間解データ
やプログラムのストック場所として電子回路に
よるメモリやハードディスクといった各種記憶
装置が存在する。コンピュータの情報処理は、そ
の中央処理装置にいかにして適切にデータを流
し込むかという「制御」を中心としてなされて
いる。

一方、脳には単一の中央処理装置が存在せず、
脳全体に処理装置が分散している。そのため、処
理の中間解を番地記録によって統一的に保持す
るという意味での“一時記憶装置”は、演算用
の中間解保持専門のデバイスとしては存在して
いないとされる（そもそも脳は番地管理という
概念を採用していないと予想される）。そうした
側面一つとっても、脳は「現在のコンピュータ」
とはまったく似ていない。

以下に、さまざまな論拠から推測される脳の
「情報処理システムとしての特性」を挙げる。

1 脳の各種特性

ノイズを含んだ情報処理

脳の情報処理システムとしての特性として、
伝達物質としてのホルモンなどの“液性情報”に
よる、ほぼランダムな分子運動による情報伝達
がその設計の基本として存在しているため、ノ
イズが大変に多いシステムであることが伺える。
現在のコンピュータは、基本的には処理を行う
対象の情報は「正しい」ものとして設計されて
いる。もしも何らかの理由でデータにノイズが
混入した場合、それは「誤ったデータ」である
とみなされ、そのデータをさまざまなエラー訂
正機構で「処理前に正しいものに戻すことをシ
ステム的に保証する」ことで処理を行っている。
もしもそのエラー訂正機構をもってしてもデー
タの修正が出来なかった場合には、情報処理は
意図したようには行われなくなり、場合によ
っては処理が停止したり、あるいは誤った情報
を「正しいもの」として処理が進んでしまい、エ
ラーとなる。

一方、脳の情報処理においてはデータにはノ
イズが乗っているのが「当たり前」である。分
子運動の不確実性はもちろん、ニューロンとい
う単位で観察しても、ランダムな「自発放電」と
いう「勝手な結果」が脳内に頻繁に出力されて

いる。こうしたシステムでは「データの正しさ」は確率的にしか保証されないため、ミクロな観察においては脳全体の情報処理の様相は見えにくいものとなる。

数量の扱い

ここから、脳の情報処理において、数や大きさを扱う際に「 n 進数」として扱うシステムを採用することが不可能なことも予想される。たとえば、2進数を採用したと仮定した場合、桁の最上位にノイズが混入した場合には、値が一気に半減（ないしは倍増）してしまう。これではシステムとして正しい情報処理が保証されない。 n 進数の n をさらに大きくした場合には、この誤差がさらに大きくなる（10進数ならば最上位にノイズが乗ると値は $1/10$ ないしは10倍になる）。こうした誤差をなるべく少なくする必要から予想される脳の計数システムとしては「カウンティング」があり得る。これは、ある値を伝達する際には、その値そのままの数をインパルスで伝達する仕組みである。すなわち、10という値を送る場合には10のインパルスを送る場合、100を送る場合には100のインパルスを送るというものである。この仕組みを採用した場合には、たとえ信号系列のどこにノイズが混入したとしても、信号の大きさに対しては影響を与えにくい。ニューロンのインパルスのプロトコルははまだ明確ではないが、比較的単純にそのインパルスの数や頻度を用いて数量を伝達していると予想することができる（品川、1984）¹⁾。

さらに、ニューロンが閾値によって発火を決定することは、ニューロンが直列に接続して連続して信号を処理することによって、自然にデータ量の対数変換（情報圧縮）がなされることを意味している。これは、ノイズに対して頑健な処理を行えるメリットがあることと同時に、各種の感覚器官が、外界に存在する大きな幅を持つ刺激エネルギー量の対数値に比例した主観的感覚量を持つこと（ステューブンスの法則）をうまく説明する。これは、統計処理的に解釈した場合、数値を「順序尺度」的に扱っているこ

とを意味する。

生体としてのニューロン

脳は常に外界と接している。生存のためには、外界と接している間中、休むことなくデータの処理を流れ作業的に行う必要がある。つまり、次々と流れてくるデータを、大きな時間遅れを発生させることなく実時間で連続処理し続ける必要がある。少なくとも、データ量が増えることで動作が停止する、あるいはデータ量が増えると指数的に計算量が増加して計算爆発が発生してしまうような処理システムであってはならない。

脳は元来生物の生存戦術を決定するための情報処理装置であるため、たとえば謎の対象に突然出会った際に、その危険度を「大まかでよいのでできるだけ素早く」計算する必要がある。そういった緊急事態において、結果の精度を求めて時間のかかる処理を行う情報処理システムは、生物として滅びてしまう可能性が高い。つまり、生物学的な脳の情報処理の重要性は、結果の精度ではなく処理速度におかれていると考えてよいだろう。これは、巨大なデータが入力された際に処理が遅れてしまうような現在のコンピュータとは性質を大きく異にしている。

現状のコンピュータにおいても「リアルタイムOS」と呼ばれるものは存在する。しかし、それらは一般に限定的なタスク処理に対して、スケジューリング処理などによって無応答期間をできるだけ短くするように工夫されたものであり、リアルタイムの意味はあくまで要求仕様によって相対的に定義されるものである。その点で、生体ニューロンの原理的な即応性とは本質的に異なっている。

また、ニューロンはそれ自身が「生きている」情報処理システムである。つまり、データが入力される・されないにかかわらず、ニューロンそれ自身の生存のために常に何らかのエネルギーを消費し、その結果として情報処理を行わざるを得ない（長期間にわたって情報処理がなされない場合にはニューロンは廃用萎縮すると

予想される)。外界からの情報が極めて少なくなる「感覚遮断実験」などにおいて、被験者はしばしば幻覚を体験するが、これは脳にデータ入力がない環境におかれた場合でも、ニューロン自体は常に情報処理を続けているため、脳内部で生成された情報が脳の感覚領域に流入してしまうことによるのではないかと予想される。情報処理がなされない回路は生存に対して無駄なものとして切り捨てられる。その代わりに、必要になった場合にはそれに応じて回路は再構成される。

これらの脳の特性を鑑みると、少なくとも脳は「なんらかの情報処理システムである」とはいえ、それは現在利用されている「コンピュータ」とは多くの側面において異なった性質を持ったものであることがわかる。

2 さまざまなタイプのコンピュータ

現在主流になっている「シリコン回路」「デジタル数値処理」「中央処理装置による集中処理」「プログラム内蔵型」タイプのコンピュータ以外にも、さまざまなカテゴリーのコンピュータが存在する。そうしたコンピュータの性質を情報処理システムとしてアナロジー的に考察することは、脳についての理解を促進すると考えられる。なお、以下のカテゴリーには分類の切り口自体が異質なもの(物理的組成や構造的な相違、あるいは情報処理方式それ自体の相違など)が重複・混在していることをあらかじめ記しておく。

分子コンピュータ

まず「分子コンピュータ」というカテゴリーが存在する。これは、分子の化学結合の過程を計算とみなし、莫大な並列処理計算を行うものである。遺伝子や分子それ自体を計算デバイスとして利用することから、細胞内での生体情報処理や脳内の高機能分子による液性情報処理とのアナロジーを考えることもできるだろう。現在「アドレナリン」「アセチルコリン」などの各分子の名で呼ばれている処理系も、その分子構

造から計算特性を推定し、脳内において総合的にどのような計算目的で利用されているのかを考えることができるようになるかもしれない。

ニューロコンピュータ

「ニューロコンピュータ」は、文字通りニューロンをモデルにし、それをネットワーク状に構成することで情報処理を行うものである。古典的な「パーセプトロン」などに代表されるもので、外界と対応させての「学習」が可能である。機能的限界も指摘されているが、しかし実際にニューロンを模しているだけに、アナロジーとしては有効である。

アナログコンピュータ

「アナログコンピュータ」は、電圧の変化を計算値として、アンプや抵抗、コンデンサー等の部品を用いて、ある特定の計算(微積分等)を行う電気回路を構成するものである。扱う値は量的にも時間的にも連続的であり、そのため構造上計算精度には限界があるが、電気回路であるため、入力された数値(問題)に対しては一定の時間内に必ず何らかの応答が出力される。データ量の増加に対しても(ハードウェアの増加が必要とされるが)基本的には計算爆発が発生することはない。

データフロー型コンピュータ

「データフロー型コンピュータ」とは、処理を行うハードウェアの間をデータが流れることで情報処理がなされるタイプのコンピュータである。歴史的には比較的古くから存在しているが、実装した場合のサイズの問題などから現在ではハードウェアとしてはあまり利用されていない。

この種類のコンピュータの場合には、中央処理装置という概念は存在せず、いくつかの用途に応じた情報処理装置が連結されている。プログラムは、それらの処理装置を処理順に適切に組み合わせることでなされる。また、そうした情報処理装置の間をデータが流れる事自体が処理の進行を意味するため、中間解を保持する必要がない。

この「データフロー型コンピュータ」は、そ

の構成イメージが脳に似ている。特に、各所に目的に特化した処理装置が存在し、データをそれらの処理装置に適宜流していくことで処理が行われる、といった仕組みは、各皮質や基底核に別個の情報処理特性が機能分化して情報を処理している脳の情報処理システムそのままである。こうしたデータフロー型コンピュータの構造は、各部分においては機能局在でありながら、同時に全体論的に機能しているという脳の特性と相似している。

このデータフロー型コンピュータは、現在主流のプログラム内蔵・中央処理タイプのコンピュータに比べて「処理待ち」が少ないという特製も備えている。これは、現在のコンピュータが基本的に一つの処理装置がすべての情報を順番にスケジューリングして処理することから発生する現象であり、その一つの処理装置があるデータの処理を終えるまでは他の処理は進まない。しかし、データフロー型コンピュータにおいては、プロセッサに流れ込むデータは基本的に処理が可能になったものから順番に処理され、他の処理装置からの結果待ちは存在しない。したがって、時間遅れが少なく、またデータ量が増えた場合においても計算爆発は発生しにくい。

このように、さまざまなタイプのコンピュータが存在する。各々の特性を考えることで、それと比較検討して脳の特性を考察することができる。

3 脳研究のレイヤ

脳研究は、扱う対象のスケールにおいて、いくつかのレイヤ(層)に区分することが出来る。

“シナプス” レイヤ

最も小さな層は、ニューロンの末端での「シナプス」での分子レベルでの情報伝達を扱うものである。シナプスはニューロン間を接続する部分であり、その末端では機能性高分子による情報伝達・情報処理がなされている。元来、

ニューロンは、発生的にとらえれば、各種の情報伝達のための機能性高分子を分泌する細胞が、その伝達性能の向上のために軸索という「電線」を伸ばしたものである(大木, 1988)²⁾。その意味では、脳の情報処理の根底には分子による情報処理と情報伝達があると解釈できる。ここから脳は高密度な「分子コンピュータ」であるといえる。

“ニューロン” レイヤ

その次のレイヤが「ニューロン」を一つの単位とするものである。脳は、ニューロンと呼ばれる情報処理細胞の集積体である。その数は大脳皮質と基底核部分に約140億、小脳に約1,000億と言われている。ニューロンは他のニューロンなどから神経インパルス(パルス状の電流)という形で信号を受け取る。ここでは、分子単位ないしはシナプス単位の情報処理は捨象される。ニューロンは、受け取った信号の蓄積/加算システムと、その累積値がある値(閾値)を超えた場合に、入力と同様に離散的な出力を行う判断システムから成り立っている。パーセプトロンなどの「ニューラルネット」は、このような機能を持つニューロンを模した単純な判断を行う処理装置を連結することで情報処理を行うものである。この意味では、脳は「ニューロコンピュータ」であるといえる。

“コラム” レイヤ

次のレイヤとして、ニューロンが数万単位でまとまって一つの機能単位を構成していると考えられているのが「コラム」である。このレベルでは一つ一つのニューロンの振る舞いは捨象され、コラム全体での振る舞いが問題となる。たとえば、古典的なものでは「ある角度の線分だけを解釈する」といった機能コラムが存在している。こうした単機能プロセッサは脳全体で数千から数万単位存在すると考えられている。さらにこれらのプロセッサは階層的に連結され、さらに複雑な機能を果たすことができるように結合されていると考えられている。たとえば「顔だけを解釈する」高次のハイパーコラムが存在

する。また、さらに大規模には、「視覚野」「言語野」といった「機能領域」として位置づけられる (Fox (1996) においてはこの機能領域の研究スケールを「マップ」と呼んでネットワーク的構造の研究と区別したが、本論文では規模が異なるだけで本質的に同構造であるとみなして区別しない)³⁾。これらは、一つずつでは単純な機能しか持たない処理装置をまとめ、さらに階層を作ってネットワーク的に接続してデータを流し、全体で複雑な機能を実現している。この意味では、脳は多くの階層をなす「多階層データフロー型コンピュータ」であるといえる。

現在、このレイヤの研究が最も遅れており、また必要ともされている。単機能をまとめて複雑な機能を構成する具体的な構成方法と、それらを階層的なネットワークとして合理的に運用する理論が求められている。

“脳” レイヤ

最後に、脳全体を一つのシステムとして統合するレイヤが存在する。このレベルでは、一つ一つの機能領域の働きは捨象され、脳全体としての目的的振る舞いや精神の働きに言及することができる。この視点では、脳は「脳的コンピュータ」である。

“社会” レイヤ

ここからさらに、個人の脳を離れて社会的な構造をとらえ、社会全体を一つの巨大な情報処理装置とみなすレイヤも考えられるだろう。人間の脳が発生した理由は主として生物学的生存のためであると考えられるが、それが人間独自の「社会」を作ることによく用いられているとしたら、脳を研究する際にこの「社会的視点」も無視することはできない。現在こうしたタイプのコンピュータは存在しないが、強いて言えば、単体で高度な機能を備えた独立エージェントが多量に存在し、互いに高密度で高速な相互作用をしながら情報処理を進める「マッシュアップマルチエージェント型コンピュータ」といえるだろう。

このように、脳を研究対象として扱う場合にはさまざまなレイヤでの扱いが可能である。し

かし、各レイヤは機能面において独立していると考えることが望ましい。すなわち、たとえばニューロンがインパルスを送るという事象は分子レベルでの振る舞いを必然的に内包しているが、そこでは分子レベルの構造をあえて捨象する必要がある。また、言語野の活動は言語を運用することに関与しているとして、あえてその内部の個々のニューロンの活動には言及すべきではない。すなわち、そのレイヤ以下の構造は上位レイヤに対して独立しており、たとえ下位のレイヤの物理的内容が変わっても、上位レイヤに対する機能として等価であれば、システム全体として変化はないものと見なすべきである。この考え方はネットワークの階層的プロトコルの考え方を援用している。こうした考え方の利点は、あるレイヤのシステムの振る舞いが明白になれば、それ以下のレイヤのシステムについては生体脳であれ、コンピュータによるシミュレーションであれ、機能的に等価と見なすことができることにある。すなわち、機能的な「脳シミュレーション」を行うことができる。

4 脳のデータフロー的制御の様相を示すデータ

現在、脳研究では主として「活動部位」がターゲットとなっている。すなわち、被験者がある課題を行った際に、脳の「どの部分」が「活動しているか」を追求する。しかし、脳をデータフロー型の処理システムと見なす場合には、その反対の側面からデータをとらえる必要も見えてくる。

脳が非常に高密度な結合を備えた分子回路およびニューロン回路であることは既に述べた。一つのニューロンあたりの他ニューロンへの接続は数百から数千におよび、分子的な情報伝達においては、速度こそ遅いものの、一つの信号の影響範囲は脳の一領域全体に及ぶ。こうした高密度相互接続のプロセッサにおいては、あるニューロンに対する情報がその他の広大な範囲

のニューロンに伝達される。そのようなシステムにおいては、情報はデータ駆動処理的に「勝手に流れてゆく」ものである。

しかし、情報が勝手に数多くのプロセッサに流れてゆく場合には、必要とされる処理以外の余計な情報処理がなされ、そこから発生したデータが必要な情報処理に悪影響を与える可能性が想定される。例えば、視覚情報処理などから生成されるデータが聴覚情報処理の回路に流入してしまうと、幻聴といった形での聴覚的混乱が発生する可能性が高い。そこで、情報を流すべきプロセッサと流さないプロセッサを何らかの仕組みでコントロールする必要がある。こうした制御は、「どこを活動させるか」という制御と同時に「どこを活動させないか」という制御も行う必要があることが予想される。

図 1-a, b は、functional MRI を用いて 2 種類の記憶想起実験を行った際の脳活性化図である(高橋他 (1999) を再分析。実験詳細は付録 1)*4。

赤色系統は課題試行と脳血流が相関して増加している領域であり、青色系統は脳血流が同様に減少している領域として示されている。通例は、こうした脳機能解析結果は血流量が増加している「活動領域」だけが示されることが多いが、ここではあえて血流量が減少している「抑制領域」をも示した。脳全体の血流量が課題前後で一定と仮定した場合、どこかで血流量の多い活動領域が生じた場合には、その一方で血流の減少が生じる部位がある。もしも抑制システムが存在しない場合には、脳血流は活動部位以外の脳全体で減少することが予想され、はっきりした減少領域は観察されないと考えられる。しかし、図 1 からは、血流増加領域と同じように、血流減少領域もまた明確な「図」として見出されている。また、想起の方略によって増加・減少領域ともに分布が異なる。すなわち、脳は目的とするタスク処理に応じて必要な部位を活動させるばかりではなく、不要な部分を抑制する働きも同時に行っていると見なすことができる。

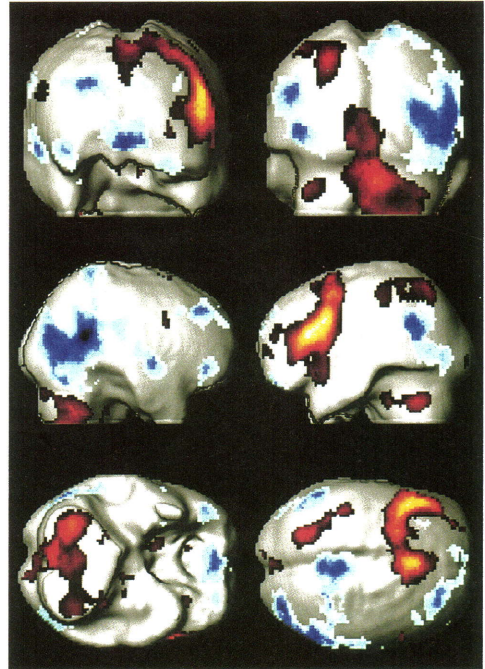


図 1-a 言語的想起方略

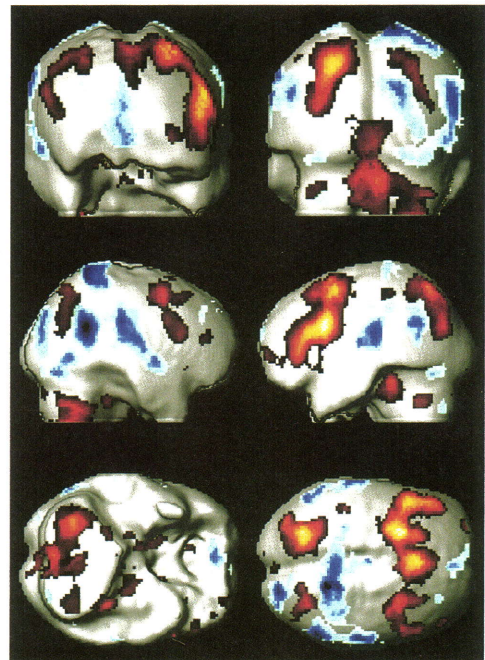


図 1-b 視覚的想起方略

これは、相互結合が密なデータフロー処理システムにおいては必要な仕組みであろうと考えられる。脳の活動様相を調べる場合には、どこが活動しているのか、というデータと同時に、どこが抑制されているのか、を調べることで、そ

の課題の情報処理的特質が見えてくると予想される。

また、想起方略の相違（言語イメージを利用した想起方略（図1-a）と視覚的な想起方略（図1-b））の間で、明らかに脳活動に相違が認められている。これは同じ対象カテゴリーに対する「想起」という目的を持った情報処理であっても、脳がその利用方略によって脳の異なった部位を活動ないし抑制させていることを意味している。すなわち、脳のデータフロー処理は固定されたものではなく、何らかの方法で課題に応じて動的に切り替えられているものであることがわかる。

この実験結果から、脳は各機能プロセッサ群に対するデータフローをタスクに応じて動的に制御しながら、各プロセッサを「フィルタ」的に利用してデータを通過させてゆくことでタスク処理を行うタイプのコンピュータであると推測される。

5 現在の脳研究の問題点と今後の方向性

現在の脳研究の課題を4点挙げる。これらは、どれも現在の脳研究に対してボトルネック化して進行速度を下げている要因であると考えられるものである。

「日常タスク」の微視的分解の必要性

脳が行っている情報処理を、我々が普段日常生活でとらえているままに解釈していると、脳の情報処理は見えてこないと考えられる。例えば「言語処理」は左半球の前頭前野と角回付近、いわゆる「言語野」で担われている、という定説がある。しかし、これでは「言語を担うのが言語野」という名前付けによって機能を表現されており、それ以上の考察の深まりはない。ここでの情報処理特性を知るためには「言語処理」という視点で脳の左半球で行われている情報処理を解釈するよりも、それ以前に「言語」という情報の性質を見極める必要がある。たとえば、

言語の特性として、一次元の時系列的にデータが入力され、解析はその時間順序に従って行われることが多い。また、ある程度のデータは一時的にストックされ、一つのまとまりとして処理されることもあり、また場合によっては構文条件から時間的順序を入れ替えた解釈がなされる場合もある。しかし、視覚入力のように、二次元的に同時に複数の広がりを持ったデータが流入してくることはない。入力される情報は、基本的には音波であり、そこには振幅、ピッチ、波形3つの要素が内在している。その3つの情報が「大きさ」「音高」「音色」として識別された上で、確定された音素から、さらに意味内容の分析が必要とされるため、意味記憶情報への参照アクセスが要求される。ここから、聴覚系統ないしは聴覚野では、3つの音波要素を分類するための回路、さらにそれを統合して一つの「音」や「音素」とする回路も存在するはずである。また、その次に情報が向かう「言語理解を担う」ウェルニッケ野には、確定された音素の連続から「ことば」を認識し、さらに構文を過去のデータを参照しながら構成し、さらに語彙と意味記憶の関連づけや、その瞬間のエピソード情報を照合したうえでの意味的統合などが行われる必要がある。そのために、実時間にあわせて常に流れている情報フローでありつつ、ある程度の情報ストアが必要となる。さらには、会話を行うためには意味記憶を参照して「会話の世界」を把握し、そこから対話出力としての発話の意味構成をし、構文を構成するブローカ領域へ、そこから続けて音声出力運動を構成する口蓋運動野に処理結果を渡す必要がある。

「言語野」という領域では、こうした情報処理がなされる必要があり、そのためにはどのような処理システムが必要であるのか、実際に脳に存在するニューロンないしはコラム単位での情報処理システムでは、どのようにそれをなしているのか、が問題となる。

適切なスケールの設定

脳研究においては、解こうとする問題に対す

る適切な研究スケールの設定を設けるべきである。非常に小さなスケールの研究結果から大きなスケールの問題に対する結論を出すことは、やや理論的に飛躍しすぎるきらいがある。特に「精神」「行動」といった非常に大きなカテゴリーの問題に対して、分子レベルないしニューロンレベルからのみアプローチして説明している例があるが、基本的には上位のレイヤのモデルでの解釈ができない場合には、そこに到るまでのプロセスが不明になるため、主張の妥当性を判定できない。あくまで解決対象に合わせてスケールを切り分け、そのスケールに沿った問題提起とアプローチと結果の解釈が必要である。

また、同時に、あるレイヤでの研究が、その上位のレイヤの研究と「実際の脳において」どのように関連するのか、というインターフェイスを常に考えておく必要がある。各レイヤは機能的には独立しているものと見なす方が研究は進みやすいが、しかし「現実の脳における実装」については常に意識しておくことが望ましい。たとえば、ニューロンを研究する際においても、単体の情報処理がどのように組み合わせられるとある特定の機能が生じるのか、またそれらの機能がどのように組み合わせられるとコラムや機能領域が実現するのか、ということ意識しながら研究を行うことが大事である。あるいは、コラム単位での研究においても、そこでの情報処理がどのようにまとまることで機能領域を形作るのか、そしてその機能領域がどのように組み合わせられることで高次心理機能を実現するのか、というアプローチが必須になる。

こうした「研究レイヤ間のインターフェイス」は、今後さまざまな側面から人間の高次情報処理を扱おうとする上でなくてはならないものである。

塗り絵からの脱却

1990年代から開始された高次脳機能研究は「非侵襲」と呼ばれるさまざまな技法で脳の機能と構造を追求してきた。例えば、PETやfunctional MRIといった脳の代謝や血流を調べる技法、あ

るいはMEGという脳磁場を計測するものなどがある。各々の計測技法には一長一短があるため、いくつかの技法を重ねて用いる場合もある。しかし、どの技法においても共通しているのは、被験者が行う課題の構造と脳の活動の間に相関関係がある「脳部位」をピックアップすることである。これにより脳の「どこ」がどのような機能を担っているのか、が解明されつつある。一部の計測技法では、活動部位の時間的関連までも調べることが出来る。

だが、その研究の多くは現在に至るまで、脳の「塗り絵」状態になっている感が否めない。むしろ「どこ」を追求することが現実の脳に迫る最初の一步であることは否定できない。しかし、脳は個人差が大きな器官であり、また人種や性別、年齢によっても大きさや活動に相違がある。さまざまな環境や年齢における人類共通の「活動部位」を追求することは、感覚野や運動野、言語野などについてはある程度の共通性が認められているが、それ以上の高次認知機能については明確な部位を示すことが難しい。また、仮に人類共通の脳地図が完成したとしても、「どこ」を追求したその結果は、やはり「脳の塗り絵」に終わる。

むしろ、追求する必要があるのは、ある部位が「なぜ」そうした働きを担っているのか、と言う「なぜ」論であると考えられる。例えば、機能局在の問題がある。一例としては、多くの右利きの人間の運動性言語野の多くが左半球の前頭前野に局在しているとされるが、その理由は明らかになっていない。また、海馬およびその周辺のシステムは記憶に関連していることがわかっているが、海馬の細胞構造がどのような意味で「記憶」を実現できるのか、そのシステムの意味はどこにあるのか、なぜ海馬でなければならないのか、といった問題は、海馬およびその周辺の回路構成を一種の電子回路として工学的に解析することで理解できるはずである。別の例では、視覚野は一次から五次までの細かい機能分化がなされているが、その各々の皮質

において、なぜそうした情報処理が可能になっているのか、あるいは、そうした処理を行うためにはどのような構造のニューロン群がどのように構築されていなければならないのか、という問題を考える必要がある。脳の塗り絵で終わる研究では、そうした「なぜ」に対して答えることができない。

言い方を変えれば、脳の各皮質部位やそれを構成するコラム、あるいは神経核等が、各々どのようなタイプの演算を得意とするプロセッサ群なのか、という問いである。もちろん、脳には一度失われたある部位の機能を他の部位が替って行う機能代替という性質があるため、その意味では、脳の各部位はそれほど特殊化されていないのではないかという印象もある。しかし、そもそも何らかの情報処理特性差がなければ、脳の機能分化は発生しない。実際に活動している脳においては、部分によって必ず何らかの機能分化がなされている。その理由と必然性を追及する必要がある。

代替処理に限らず、脳は固定された回路ではなく、変化することである機能を実現する場合もある。特に海馬など、ニューロンやシナプスの増強や改変が想定されるが、その場合においても、変化の方向は必ずその部位で担う情報処理を促進する方向での変化であるはずであり、そうした変化の方向まで含めた「機能分化」を果たしていると予想される。したがって、実際の脳におけるニューロンからなる回路を観察して機能を想定する場合には、現在ある構成だけではなく、それがどのように変化する可能性を秘めているのかまでを予想しつつ機能を想定する必要がある。小脳についてはすでにそうした構成と計算が行われているが(川人, 1996)⁵⁾、大脳皮質や神経核については一部を除いてあまり進んでいない。特に、高次認知機能分野についてはその扱いの困難さから研究が少ない。

脳を計算する視点

こうした視点からは、各処理領域の脳における相対的配置について、ある処理野がそこに存

在することの合理性も考察することが出来る。さまざまな感覚入力部位が固定されていると仮定した場合、それらの各種感覚器官からの情報を、統合して最も合理的に運用できる処理デバイスの配置を「脳の最適配置」として導出することが可能である。そこから、たとえば、言語野が左半球に存在することの合理性や、あるいは人によっては右半球にも言語機能が分担されていることの、その脳における必然性が与えられる可能性がある。さらに、各人の脳の個人別の条件特性から、その脳の各機能領域分布を計算するといったことも可能になるだろう。こうしたことは、脳に器質的な障害が発生した場合の回復を予測する場合などに有効になると予想される。

こうした「なぜ」論こそが、今後の脳研究の正しい道筋を示す問題設定であり、そこには情報科学者の関与が必須となる。なぜなら、一般的に生理学や医学、心理学といったジャンルの研究者はコンピュータのハードウェア部分についての基礎知識は少なく、こうした考察を行うための教育を受けていないためである。また、タスクの微視的分解についても、プログラミングを行う際のタスクの分解の考え方が参考になる。情報学の基礎教育を受けた研究者が脳研究に参加することで、こうした領域について本格的に手を付けることが可能になる。その意味で、情報科学者が各種の脳研究に今後積極的に参加することを期待する。

その際に「脳はどういったコンピュータなのか」を考察することは研究の一つの有力な指針となろう。

文 献

- 1) 品川嘉也 1984 意識と脳 紀伊国屋書店
- 2) 大木幸介 1988 脳内麻薬と頭部の健康 講談社ブルーバックス
- 3) Fox, T 1996 Seven layers of brain research. in International Conference of Human Brain

Mapping in Boston.

- 4) 高橋, 兎玉, 山内, 吉田 1999 記憶想起
時の脳内活性領域について 第1回ヒト脳

機能マッピング研究学術集会 浜松アクト
シティコンgresセンター

- 5) 川人光男 1996 脳の計算理論 産業図書

付録 1 fMRIによる想起実験

機器 シーメンス社 Magnetom Impact 1.0T

撮像シーケンス Gradient Echo 型 EPI TE = 66ms Scan = 4.0sec Interval = 0.6sec

撮影 AC-PC 平行 Transvers 方向 4mm 厚 24slice SliceGap = 0 64Scan

手続き 被験者はあらかじめ想起ターゲットと想起方略についての教示を受けてからMRIガントリーの内部に横たわり、実験者からの指示に基づいて想起と休息を繰り返し行った。想起ターゲットは「世界の国」「動物」の2種類であり、その想起方略として「言語的想起方略」と「視覚的想起方略」の2種類が教示された。「言語的想起方略」は想起時に五十音順に探しながら想起し（「アメリカ、イギリス、ウルグアイ…」など）、「視覚的想起方略」は、想起時に視覚イメージを手がかりとして用いて想起を行った（世界地図、動物園など）。2種類の想起ターゲットは一つのスキャン中に混在しており、被験者は実験者の音声指示によって国名か動物名のいずれかを想起した。想起方略はスキャン中で常にどちらか一方を用いるよう教示された。想起内容は発声されなかった。被験者は8スキャンごとに休息と想起を繰り返し、その切り替えのタイミングとカテゴリー（国か動物）は実験者が音声で指示した。スキャンは各想起方略について1回ずつ、計2回行われ、想起後、ガントリーの外部で内省報告がとられた。実験は全部で約90分で終了した。

被験者 大学生 20名

結果 (図 1-a, b)

被験者のうち2名は課題遂行中に睡眠状態にあったため、分析から削除した。分析にはSPM99

を利用した。図 1-a, bは18名の被験者の脳をノーマライズし、全員の平均脳を作成した上に、課題状態と休息状態を0と1のブロック状に表した参照関数と実際の脳血流との相関係数が有意な部位 ($p < 0.00001$) を示したものである。赤色が血流の増加部分、青色が血流の減少部分である。

考察

2種類の想起方略において、血流分布は明らかに異なっている。これは、単に「想起を行う」こと以上に、想起方略によって脳の働きが異なっていることを示していると考えられる。また、増加領域と同時に減少領域についても明確な領域分布が認められ、血流の増加と同様に血流の減少についても何らかの意味を持った情報である可能性が高いと考えられた。

データを詳細に観察すると、いずれの想起方略においても Broca 領域である左半球前頭前野から補助運動野である頭頂にかけての領域で血流が増加している。これは被験者が想起内容を調整しながら内部発話していたことを反映しているものと考えられる。また、言語的想起方略において右半球後頭葉領域において広範囲な血流低下が認められているが、これについては空間的要素の処理を抑制することを意味しているのではないかと推測される。視覚的想起方略においては、同様の領域がやはりある程度の血流低下を示しているが、しかしその中の一部（右半球角回付近）において局所的に血流増加を示している部分もあり、この領域の処理が2つの想起方略の内部システムでの相違を反映している可能性がある。すると、この領域は視覚方略を用いた想起に特徴的な「イメージ化」と強く関連している部分なのではないかと推測される。