

はじめに：脳における双方向情報処理

川人光男

A T R 人間情報通信研究所

科学技術振興事業団、創造科学推進事業、川人学習動態脳プロジェクト

アブストラクト

言語などのヒトの高次認知機能を神経科学の研究対象とするためには、サルなどの動物実験で得られた神経科学のミクロなレベルの知識を、計算理論を媒介として、ヒトを対象にした脳活動の計測データや、言語学などの研究と統合する必要がある。このための新しい計算理論とそれを支持するデータを解説する。我々の提唱するアプローチの対極となる、Chomsky が構築した生成文法研究で大前提とされる仮定に対する批判を行いながら、その全体像を俯瞰する。

はじめに

コミュニケーション、言語、意識などのヒトで著しく発達した高次認知機能が脳科学、神経科学の真面目な研究対象になるとは15年前には予想さえできなかった。当時は、神経科学者がそのような高次機能について語ると、真面目な研究に飽きたと思われるのが落ちだった。しかし状況は大きく変わって、例えば、ヒトと動物のコミュニケーションの違いの理解、非言語的なコミュニケーションの理解、言語の獲得過程の理解などが、日本の脳研究の長期戦略目標にあげられるようになった。これは、主に4つの駆動力によると考えられる。

第1は実験的神経科学の急速な進歩である。脳に関する我々の知識は、場所（例えば脳のどの部位にどのような機能が局在しているかなど）と物質（遺伝子、タンパク質など）については、多重電極や光学システムによる神経活動の計測や、分子生物学の手法など新しい実験技術の導入によって、目覚ましく拡大した。

第2は計算論的神経科学の勃興である。場所と物質に関する知識が積み重ねられるほど、それだけでは脳の機能、さらにいえば情報処理の理解には単純に繋がらないことが、明らかになった。その結果、脳の計算原理、情報表現、アルゴリズムなどを真正面から研究する計算論的研究が進展し、システムレベルの実験神経科学との緊密な協同研究が行われるようになった。まだ歴史は浅いが、脳の特定の機能（視覚、運動制御）や特定の部位（小脳、大脳基底核、大脳皮質視覚野）については素晴らしい成果が得られた^{(1), (2)}。

第3は脳活動を外から、脳を傷つけずに測る手法（非侵襲計測法）の著しい発展である。20年前には、空間的解像度のほとんどない脳波が唯一の手段であったが、脳磁計、PET（陽電子断層撮像法）、fMRI（機能的核磁気共鳴画像法）など新しい方法が次々に開発されてきた。これらを用いて、新しい発見が相次いだ。言語に関する例を3つだけあげよう。ヒト小脳が言語などの高次認知機能で活動することがわかった。2か国語を流暢に喋れるヒトのうち、11歳より若くに学習したヒトでは、2つの言語の表現がブローカ野で入り交じっているのに対して、それより遅くに習得したヒトでは、2つの言語が違う場所に表現されていた。より複雑な構造の文章を理解する時に、ブローカ野とウエルニッケ野の脳活動がより大きくなることがわかった。

第4は、心理学、認知科学、言語学、哲学などと、脳神経科学の境界が、ぼやけながら、より高次へと移動する、研究者の心理と人気のある研究トピックスの動きである。例えば Trends in Cognitive Sciences という最近創刊された認知科学のレビュー誌では、記事の1/3が神経科学、1/3が計算理論に関わる。一昔前には、意志決定、感情、注意、意識などは、神経科学などの自然科学が扱える対象ではなく、人文系学問だけが研究していたことを思いだすのさえ困難になって来た。

このように、神経科学がヒトの知性と心の問題に真正面から取り組む気運が盛り上がりつつあるが、いまなお、それは大変困難である。最大のチャレンジは、ヒトに対しては、電気生理学の単一細胞記録の手法や、トレーサーを用いた神経回路同定の解剖学的手法などが用いられない条件の下で、如何にして心と物質を繋ぐかという点にある。非侵襲脳活動計測の手法は、進歩したとはいえ、上の手法とは較べ様もないほど、得られる情報が限られている。非常に多数のニューロンの活動を空間的、時間的に平均化し、それが2次的にひき起こすだろうと思われる、電場、磁場、血流などの変化を間接的に観測するだけなのであるから。ヒトの知性に関わる、個々のニューロンが、例えば言語課題の遂行中にどのように興奮しているか、それを含む神経回路はどのようになっているか、従って1個のニューロンの情報処理がどのように行われているかを観測することは、すくなくとも近い将来は不可能である。現在では想像もできないような方法が開発されない限りは、未来永劫に渡ってそうになってしまう。

従って、ヒト固有の高次機能の研究は、例えば視覚や運動制御など、ヒトと実験動物で共有される機能にくらべて、著るしく困難になる。このことは次のような研究プログラムに関する思考実験を行えば、明らかであろう。仮に、視覚や、運動制御の研究で、使える手法が、計算理論と、心理学（損傷脳の研究を含む）と非侵襲計測の3つしかないとしよう。その結果、当然我々は、高次の視覚野、高次の運動野の存在も、脊髄や小脳の神経回路も、これらの脳部位でのニューロンの発火パターンも、情報表現も、情報処理も知らないことになる。この条件の下では、我々は脳のなかでどのように視覚や運動制御の情報処理が行われているかについて、何も確からしいことは知り得ない。

高次認知機能解明の新しいアプローチ

言語など『ヒト固有の?』高次認知機能の解明は、この3つの手法に頼るしかないから、神経科学としての理解の見込みはないのであろうか。答えは、必ずしもそうとは限らないことを示すのが、今回の講演の最大の目的である。我々は、ヒトの高次認知機能をになう神経回路や神経計算原理そのものには、ミクロなレベルでは、サルとの不連続がないと考える。そうすると、計算理論主導で、サルの神経生理学的研究を、ヒトを対象にした脳活動非侵襲計測研究、認知科学、心理学、言語研究などと結びつけるアプローチが有効となる。この考えの下に、20以上の研究機関による共同研究（目標達成型脳研究）『ヒトを含む霊長類のコミュニケーションの研究』（研究統括、東倉洋一；研究課題提案者、川人光男 <http://www.atr.co.jp/kbp/index.html>）を行ってきた。これは、過去3年間に、数編のナーチャ-論文が発表されるなど、大きな成果をおさめている^{(3), (4), (5), (6), (7), (8)}。その計算理論とそれを支持する幅広いデータを紹介しよう。

我々の立場とちょうど反対の極に位置するのが Chomsky が確立した生成文法理論による言語研究である^{(9), (10), (11)}。生成文法研究の目標は、言語機能の解明、すなわち人間の言語に関し

て生物学的に決定されている機能の解明である。次の4つが具体的なテーマとしてあげられている⁽¹¹⁾。(1) 文法の知識：成人の文法に関する知識はどのような性質をもっているか。(2) 文法の獲得：(1)の知識はどのように獲得されたか。(3) 文法の使用：言語の理解・産出に(1)の知識はどのように使用されるか。(4) ハードウェアの理解：上記の機能はどのように脳内で物質的に実現されているか。

研究の大前提として、次の4つの仮定がなされる。(A) 言語の知識を脳内の音韻、単語、文などのシンボルによる表象とそれに対する離散的、論理的計算と考える(古ぼけた人工知能の古典的計算主義!?)。(B) 言語機能独立仮定=領域固有性：言語機能はそれが無限個の文を産出したり、名詞句の無限の埋め込みを可能にするなど、離散無限を扱うと言う点で、他の認知システムと際立って異なっており、他の認知システムから独立した心、脳のモジュールをなす(言語器官!?)。(C) 言語機能の生得性：生後与えられる言語に関する経験データは非常に貧弱であるので、生得的な言語獲得装置が存在し、これと生後の経験データとの相関から、脳内に個別言語の文法知識が形成される(文法遺伝子!?)。(D) 言語機能の種固有性：この言語機能は人間という種に固有である(『ヒトに固有の』言語はヒトに固有である!?)。ただし、括弧内は、我々がこれらの仮定を批判的にシンボル化して書いたものであるが、後で説明するように、言語器官、文法遺伝子などは実際に使われている用語である。

生成文法の4つの仮定に関する論争

これら4つの仮定((A) 古典的計算主義、(B) 領域固有性、(C) 生得性、(D) 種固有性)に対しては、過去にも多くの批判があり、今なお活発な論争が続いている。例えば良く知られたところでは、種固有性に関する、霊長類のアイやカンジの言語獲得能力にまつわる論争である^{(10), (12)}。今回の講演では、領域固有性と種固有性に対立する新しい仮説、生得性と領域固有性に対立する新しいニューラルネットワーク、そして古典的計算主義を乗り越える新しい計算理論を紹介する。

これらの論争に関わる最近のトピックスを紹介しながら、なぜ生成文法研究と非侵襲脳活動計測を単純に組み合わせるだけでは、言語の脳研究となりえないのか、そして我々が目指す新しいアプローチが必要となるのかを説明していこう。まず(B) 領域固有性、(C) 生得性、(D) 種固有性すべてにかかわる『文法遺伝子』の研究の最新動向を紹介しよう。Pinker のベストセラー⁽¹³⁾では、ネーチャ-、サイエンスなどにも喧しく宣伝された『文法遺伝子』の研究を、次のように紹介している。KE家と言う家系の成員の約半数に見られる言語障害は、活用語尾の使用に限定された障害で、言語以

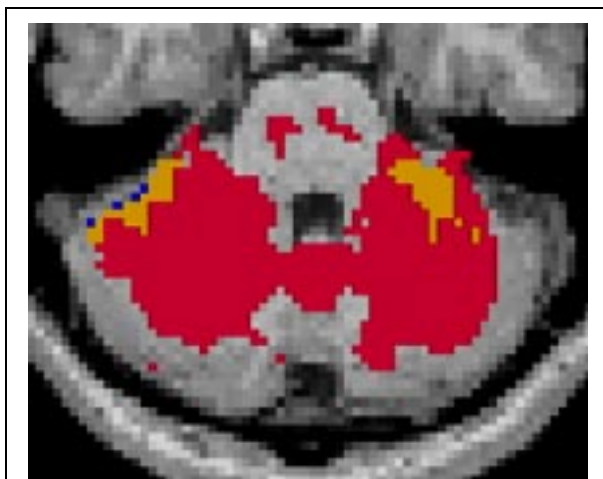


図1 ヒト小脳の道具使用の学習にともなうfMRI活動⁽⁵⁾。図は水平断面を示し、上が前、下が後ろに相当する。被験者は新しい道具の操作方法を学習した。学習初期には赤と黄で示した広い範囲で、道具操作の誤りを表現する信号が計測されたが、十分な学習後は青と黄で示したごく一部に道具の内部モデルが獲得された。これは多重順逆内部モデルの予測と良く一致するデータである。

外の認知能力には異常が見られず、言語のみに障害が見られるいわゆる言語特定性障害である。しかも、系図から、この障害をもたらす遺伝子は、単一の常染色体上にあることが示唆された。これこそ、(B)領域固有性、(C)生得性、(D)種固有性を証明する『文法遺伝子』の証拠であるとマスコミでも大騒ぎされたというのである。ところが最近出版された、より精密で包括的な行動研究、遺伝学研究⁽¹⁴⁾そして非侵襲脳活動計測研究⁽¹⁵⁾は、これとちょうど逆の結論を導いている。障害は、文法のすべての側面に及ぶだけでなく、知能指数など一般的な認知機能、さらには、言語とかかわりのない、顔と口の系列的な運動能力全体に渡っている。PETで観測された脳活動の異常は、前補足運動野、帯状回運動野、補足運動野、感覚運動野、側頭葉、腹側前頭前野、運動前野、尾状核、ブローカ野などなど実に広い範囲に渡っている⁽¹⁵⁾。しかも、構造MRIで発見されたもっとも顕著な脳の構造的な異常は、大脳基底核の尾状核が両側に小さいことだった⁽¹⁵⁾。また、異常がある遺伝子の座は、自閉症に関連する遺伝子がある範囲と一致していた⁽¹⁴⁾。このデータは、文法と言う言語機能を支える遺伝子から神経機構までのハードウェアが、時系列的な感覚運動統合から、コミュニケーションを含む様々な認知機能に関わっているという連続性を強く示唆している。KE家のデータは、(B)領域固有性、(C)生得性、(D)種固有性とはむしろ矛盾していたのである。

我々は『大脳皮質、小脳、大脳基底核がなす閉ループは、時系列的な感覚運動統合から、非言語コミュニケーション、言語までの様々の情報処理を、脳内のミクロなレベルでは同じ神経計算原理に基づいて解いている』という仮説を提案する。最近5年間に、小脳と大脳基底核が高次認知機能(言語、想像、自閉症、分裂病)に関わっていることを示す沢山の非侵襲脳活動計測と臨床的なデータが得られて、小脳と大脳基底核が、運動制御だけに限られる脳部位であるという古い考えはすてられつつある。それにかわって、大脳皮質、小脳、大脳基底核はそれぞれ、異なる学習アルゴリズムを実行していると考えれば、なぜ感覚運動統合から、言語などの高次認知機能まで、3つの脳部位が役割分担をするのか理解できる⁽²⁾。特に小脳は、系統発生的に新しい部分も古い部分も皮質の神経回路は同じで、シナプス可塑性も場所によらないので、同じ神経計算原理が、運動制御から言語まで働いていることが分かる。小脳の系統発生的に古い部分は、身体など運動制御対象の内部モデルを学習で獲得する⁽¹⁾のに対して、小脳の系統発生的に新しい部分は、道具⁽⁵⁾、他者、他の脳部位のモデルを獲得すると考えられる(図1)。この研究成果によって、小脳の内部モデル仮説は高次認知機能へ拡張されることになった。コミュニケーションで重要な役割を果たす『心の理論』とは、ヒトが他人の心の状態を推定したり、操作したりする時に使うと考えられる、シミュレータ、エミ

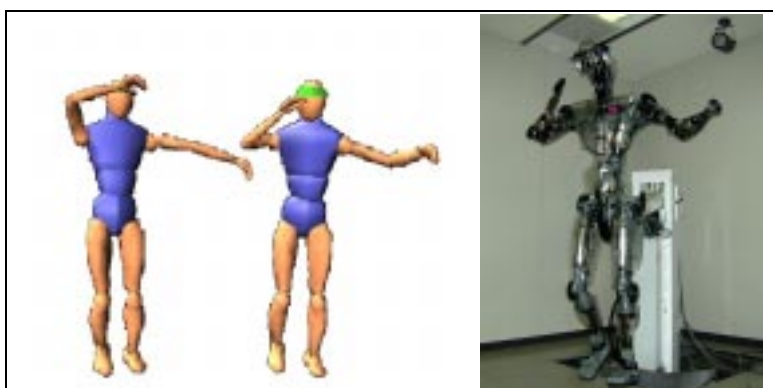


図2 沖縄舞踊カチャーシを見まねで踊る人間型ロボットDB (<http://www.erato.atr.co.jp/DB/>)。ロボットの視覚に相当するシステムで計測された先生の踊り(左)はロボットに可能な動き(中)に変換され、実際に踊られる(右)。見まねはコミュニケーションの最も基本的な素過程であり、様々なレベルでの内部モデルを必要とする。

ユレータ、あるいは他人の心に関する科学の仮説のような『理論』である。小脳内部モデル仮説に従えば、『心の理論』は他者の脳の内部モデルとなる。これが学習で獲得できることを示そう。見まねの能力は、このような様々なレベルでの内部モデルに依存している（図2）

大脳基底核は行動の評価に関わり、将来の行動の方向付けをする⁽²⁾。一方、大脳皮質のブローカ野などを含む前頭葉の役割は、必要な情報を一時的に保持するワーキングメモリであり、これは統計的学習と連想記憶ダイナミクスで実現されている。ヒト知性に関する我々の考えの新しい点は、これまで高次認知機能を前頭前野など大脳皮質だけにおいてきた考えを排し、小脳、大脳基底核との多重で階層的なループこそが、ヒト知性の神経機構の秘密だと考える点に有る。Pinker が、言語器官と呼んだ⁽¹³⁾ ブローカ野、ウエルニッケ野を含むシルビウス溝周辺領野は、決して言語と言う機能に固有のハードウェアではないことが、サルの脳の解剖学と電気生理学の研究からも^{(16), (17), (18)}、ヒトの非侵襲脳活動計測⁽¹⁷⁾からも明らかになってきた。それは、むしろ運動系列を制御し、予測し⁽¹⁹⁾、計画し、認知するための一般的な感覚運動統合のための器官なのであり、それがコミュニケーションから言語へと転用されたと考えられるのである。

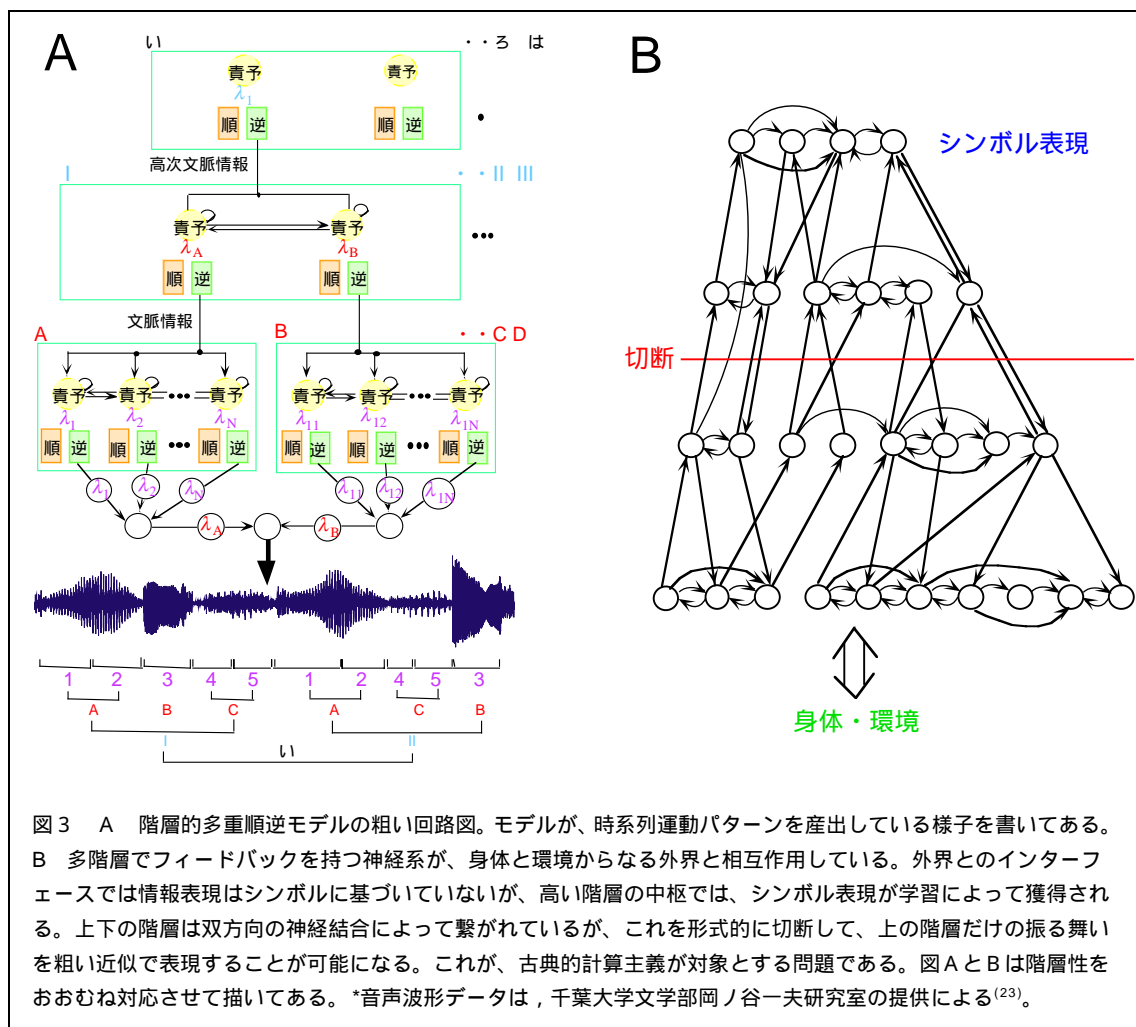


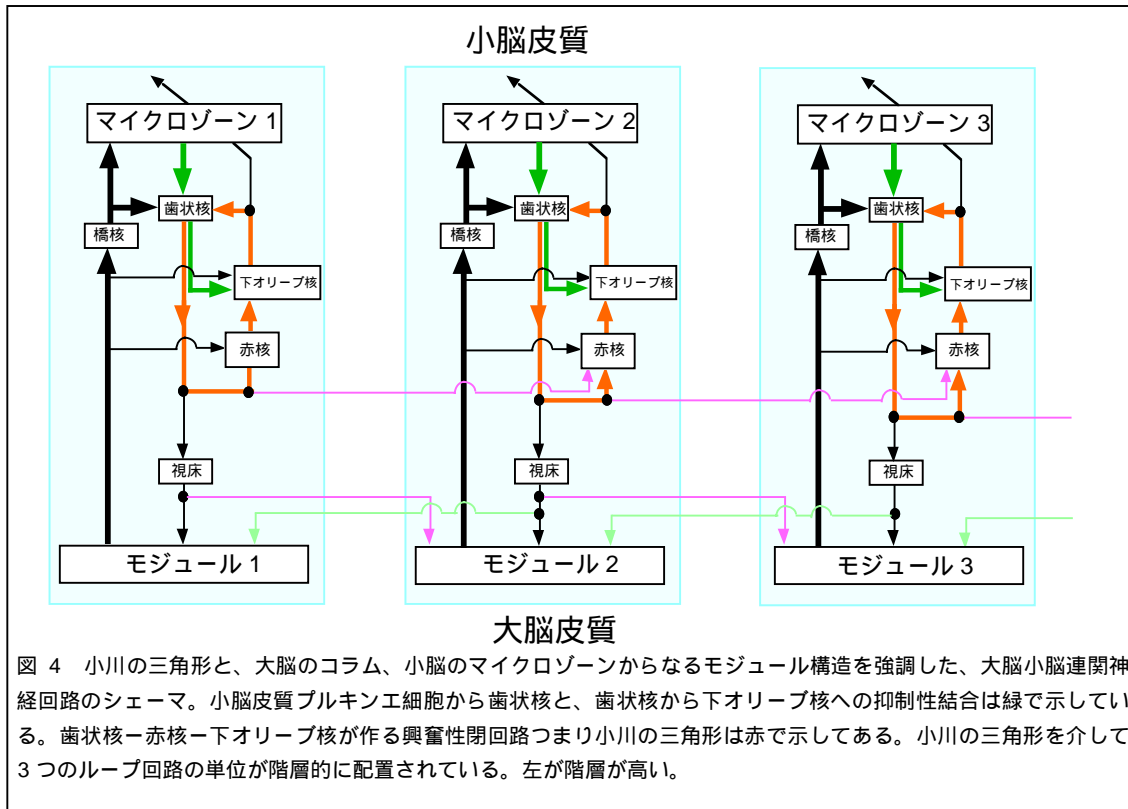
図3 A 階層的な多重順逆モデルの粗い回路図。モデルが、時系列運動パターンを産出している様子を書いてある。B 多階層でフィードバックを持つ神経系が、身体と環境からなる外界と相互作用している。外界とのインターフェースでは情報表現はシンボルに基づいていないが、高い階層の中枢では、シンボル表現が学習によって獲得される。上下の階層は双方向の神経結合によって繋がれているが、これを形式的に切断して、上の階層だけの振る舞いを粗い近似で表現することが可能になる。これが、古典的計算主義が対象とする問題である。図AとBは階層性をおおむね対応させて描いてある。*音声波形データは、千葉大学文学部岡ノ谷一夫研究室の提供による⁽²³⁾。

Chomsky 自身は、生成文法を、原子の構造が発見される以前の化学の周期律表に喩えている。では将来、言語の脳科学がミクロなレベルで大きな進歩を遂げた時に、生成文法は、統計

力学に対する熱力学のように、正しい現象論の役割を果たせるのであろうか。神経科学の例で言えば、視覚や運動制御の計算論的研究で重要な役割を果たした、コンピュータビジョンのアルゴリズム、あるいはロボティクスの理論に相当する役割を期待できるのだろうか。残念ながらそれが甚だ疑わしいのである。最も研究が進んでいる統語論に限っても、生成文法理論はコンピュータによる自然言語処理などの現場で役に立たないのである。正しい構文の可能性を莫大な数生成してしまったり、文法的に誤った文は処理できなかつたりする。生成文法研究の言語学としての成功の最大の理由は、シンボルの離散的・論理的計算に研究の的を絞ったこと（(A) 古典的計算主義の仮定）にある。しかし残念ながら、まさにこれが実際の言語データを情報処理できない本質的理由になっている。つまり、シンボルと論理計算だけを取り扱うと言うことは、シンボルにならない神経表現、シンボルと身体及び環境を含む実世界との対応、意識下で行われる様々な情報処理、論理計算では表現できない力学系、統計性などが、すべて切り捨てられているのである。言語の神経科学を指導する理論に、言語情報処理を実際に行なえることを最低の条件として要求すれば、この欠点は致命的である。

言語獲得の生得性の仮定（C）に関して、Elman らコネクショニストの言語学者の研究が大きな論争をまきおこしている^{(20), (9), (10)}。簡単なニューラルネットワークモデルと言う力学系と統計的な学習を組み合わせるだけで、言語学習の一側面が説明できるので、いわゆる『生得性』の一部を仮定する必要がないというのである。つまりこのモデルに、言語と言う領域に固有ではない、ニューラルネットワークの構造や、シナプス可塑性の規則、ワーキングメモリの容量が成長とともに増加することなど、一般的な制約だけを与えて、大量の文を訓練データとして学習させると、ある語系列を提示された時に、次に出現可能な単語が予測できるようになる。最近の研究では、埋め込み文の深さに対応するカウンターが、学習で力学系の中に獲得できることが示された⁽²¹⁾。この結果は、ニューラルネットワークモデルでは、任意の深さの埋め込みを陽に扱うことはできないとする生成文法研究者からの従来の批判が正しくないことを示している。Elman らのアプローチは、古典的計算主義（A）の離散的・論理的計算ではない、力学系と統計的学習を導入すれば、生得性の仮定（C）が必須ではないことを示した点で高く評価できる。しかし、ニューラルネットワークの構成要素であるニューロンの情報表現に単語と言うシンボルを用いていることから、古典的計算主義（A）の最初の呪縛つまりシンボル表現からは抜け出していないところが、致命的な欠点になっている。

我々が提案するニューラルネットワーク（階層的な多重順逆内部モデル：図3A）は、力学系と統計的学習を計算機構として含み、情報表現としては、環境と接する面では、音韻、単語、文などのシンボル表現を用いないのはもちろん、中枢部においても先験的にはシンボル表現は仮定しない。しかし、学習によって、中枢に階層性とシンボル表現が自動的に獲得されるのである。我々は、シンボルを情報処理の操作対象となりうる神経表現であると定義する。この意味で、単に感覚運動信号を有限個の集合に分節化して、それを代表する表現（例えば自己組織化マップの量子化ベクトルなど）は、それだけではシンボルとはなりえない。階層的な多重順逆内部モデルはもともとは純粋な計算モデルとして提案されたが、小脳と大脳の連関ループ、さらには特にヒトでいちじるしく顕著な、小川の三角形（小脳歯状核、中脳の小細胞性赤核、脳幹の下オリーブ核が構成する興奮性神経結合の閉ループ）を中心とする神経回路と見事に対応する（図4）。



このニューラルネットワークに基づいて、古典的計算主義（A）にとって変わる、しかしさりとて Brooks⁽²²⁾ のような単純な昆虫ロボットにしか使えない相互作用主義（直接知覚論）でもない、新しい計算理論のパラダイムを提案する。言語の問題に即して言えば、言語の神経計算原理を明らかにする時、もっとも本質的な問題は、シンボルが、シンボルのない神経情報表現（例えば、筋肉への運動指令、視覚などの感覚入力）から、どのように系統あるいは個体発生するかと言う点にある。この部分に関してさえ基本的な理解が得られれば、シンボルにならないレベルの情報を切り捨てて、シンボル間だけの法則性を記述すること（統語論）は半ば自動的に理論から派生することになる（図3 B参照）。この時、生成文法理論は、新しい計算理論がシンボルだけのレベルで妥当か否かを検証する試金石の役割を果たせると期待できる。ヒトの知性一般に敷衍すると、シンボルが先験的な表象として存在しない神経回路に、それが身体や外界や他の個体との相互作用をした結果、シンボルが、ハードウェアとして、もしくは力学系のアトラクターの分節化として出現すると言うシナリオである。しかも、下の階層と外界との相互作用を切り捨てて、上位のシンボルが表現されている層だけを観測すれば、一見意味のある規則性が力学系として存在する（図3 B参照）。それは近似的には、離散的・論理的計算で表現できるものになるだろう。この新たな計算理論は、シンボルに基づいていないという意味で、古典的計算主義とは決別し、シンボルを産出すると言う意味で、相互作用主義とも決定的に異なる。

おわりに

言語などヒト固有の知性の脳研究の2つのアプローチをまとめて比較しておこう(表1参照)。第1は、生成文法が代表する、ヒトとそれ以外の動物の間に、ハードウェアから言語現象にい

たるまで、徹底的な不連続を仮定する立場である。第2の、我々が提唱するアプローチは、ヒト知性の生物学的進化を仮定して、ハードウェアのレベルでは、つまり神経機構や神経計算原理としては、質的な不連続はないとする立場である。力学系の分岐現象のように、ハードウェア（遺伝子、たんぱく質、神経回路など）の小さなパラメータの変動によって、結果として、他の動物から不連続に見える並外れたコミュニケーション能力や言語が獲得されたと考えるのである。現時点ではどちらが正しいかの決着はついていない。しかし、第1の立場を取る限り、本稿で述べてきた理由で、ヒト知性を神経科学として理解することはできない。従って、論理的な帰結として、我々は第2の可能性にかけているのである。

核廃棄物の臨界事故を例に取ろう。大事故が起きた後で、その悲惨な結末をいくら詳細に記述しても、臨界現象のメカニズムの本質には迫れない。生成文法の統語論は事故が生じた後の工場の様子を記述することに相当する。また、閾値をこえる最後の一滴の廃棄物には、求める答えはない。文法遺伝子にヒト知性の根源を求めるのは、最後の一滴の廃棄物を詳しく調べるようなものである。一見、的外れのように見えて、臨界以下の現象を精密に調べ、臨界の前後で共通のメカニズムを明らかにすることがもっとも合理的なのである。感覚運動系列の学習や非言語コミュニケーションと言語に共通の原理を調べることがこれに相当する。

	古典的な アプローチ	新しい アプローチ
計算理論	離散的・論理的計算	力学系・統計学習からシンボルへ
情報表現	シンボル	連続表現からシンボルが生成される
領域固有性	固有：言語器官	ハードウェアとしての領域固有性はない
生得性	生得的言語獲得 機構：文法遺伝子	神経機構の大域的構造・可塑性は生得的：後は学習
種固有性	固有	力学系の分岐現象のように現象としては不連続だが機構・パラメータは連続
何を明らかにしたいのか	現象論	神経計算原理

表1 ヒト高次認知機能の研究で可能となる2つのアプローチの比較

参考文献

- (1) 川人光男：脳の計算理論，産業図書（1996）
- (2) 銅谷賢治：運動学習の神経計算機構 - 基底核，小脳と大脳皮質，別冊・数理科学「脳科学の frontline」，141-152（1997）
- (3) Kitazawa S, Kimura T, Yin P: Cerebellar complex spikes encode both destinations and errors in arm movements. Nature, 392, 494-497（1998）
- (4) Sugase Y, Yamane S, Kawano K, Ueno S: Global and fine information coded by single neurons in the temporal visual cortex. Nature, 400, 869-873（1999）
- (5) Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, Sasaki Y, Takino R, P tz B, Yoshioka T, Kawato M: Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a novel tool. Nature, 403, 192-195（2000）
- (6) Inui T, Otsu Y, Tanaka S, Okada T, Nishizawa S, Konishi J: A functional MRI analysis of comprehension processes of Japanese sentences. NeuroReport, 9, 3325-3328（1998）

- (7) Wolpert D, Kawato M: Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11, 1317-1329 (1998)
- (8) Perrett DI, Lee KJ, Penton-Voak I, Rowland D, Yoshikawa S, Burt DM, Henzi SP, Castles DL, Akamatsu S: Effects of sexual dimorphism on facial attractiveness. *Nature*, 394, 884-887 (1998)
- (9) 伊藤正男他編：岩波講座認知科学 7, 岩波書店 (1995)
- (10) 大津由紀雄他編：岩波講座言語の科学 10 言語の獲得と喪失, 岩波書店 (1999)
- (11) 郡司隆男：情報数学セミナー 自然言語, 日本評論社 (1994)
- (12) 松沢哲郎：チンパンジー・マインド：心と認識の世界, 岩波書店 (1991)
- (13) Pinker S: *The Language Instinct*, Harperperennial Library (1994); 日本語版, 言語を生み出す本能, 椋田直子訳, 日本放送出版協会 (1995)
- (14) Fisher SE, Vargha-Khadem F, Watkins KE, Monaco AP, Pembrey ME: Localisation of a gene implicated in a severe speech and language disorder. *Nature Genetics*, 18, 168-170 (1998)
- (15) Vargha-Khadem F, Watkins KE, Price CJ, Ashburner J, Alcock KJ, Connelly A, Frackowiak RS, Friston KJ, Pembrey ME, Mishkin M, Gadian DG, Passingham RE: Neural basis of an inherited speech and language disorder. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 12695-12700 (1998)
- (16) Petrides M, Pandya DN: Comparative architectonic analysis of the human and the macaque frontal cortex. in "Handbook of Neuropsychology 9" Boller F, Grafman J (Eds), Elsevier, pp.17-58 (1994)
- (17) Rizzolatti G, Arbib MA: Language within our grasp. *Trends in Neurosci.*, 21, 188-194 (1998)
- (18) 小嶋祥三：ミラーニューロンと言語の起源. *岩波科学*, 69, 404-408 (1999)
- (19) 乾敏郎：運動系列予測学習仮説. *神経心理学*, 14, 144-149 (1998)
- (20) Elman JL, Bates EA, Johnson MH, Karmiloff-Smith A, Parisi D, Plunkett K: *Rethinking Innateness*, MIT Press (1996); 日本語版, 認知発達と生得性, 乾敏郎他訳, 共立出版 (1998)
- (21) Rodriguez P, Wiles J, Elman JL: A recurrent neural network that learns to count. *Connection Science*, 11, 5-40 (1999)
- (22) Brooks RA: Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47, 139-160 (1991), 日本語版, 表象なしの知能, 柴田正良訳, 現代思想, 18, 85-105 (1990)
- (23) 星野力, 銅谷賢治：生物における系列学習運動に関する考察. 電子情報通信学会技術研究報告, NC99-108, 117-124 (2000)