

認知の創発的性質

生成性、冗長性、局所相互作用、開放性

Emergent Nature of Cognition

Cognition as a Generative, Redundant and Open System without Central Controls

鈴木 宏昭
HIROAKI Suzuki

青山学院大学 文学部
Department of Education, Aoyama Gakuin University
susan@ri.aoyama.ac.jp, <http://www.ri.aoyama.ac.jp/~susan/>

keywords: emergence, generativity, redundancy, local interaction, open system

1. はじめに

この論文では、認知が創発的性質を持つと主張する。この主張をより具体的に言うと、当面必要なものも必要でないものも含めて、いくつもの小さな認知的部品が相互に内部的に、あるいは身体を通して外部と相互作用を行うことにより、協調的な、しかし揺らぎを持ったパターンを作り出すことが認知である、というものである。認知が創発的であるということは、認知がいつでも on-line でつくり出されているということになる。したがって、創発認知の仕組みを明らかにすることは、知の起源を明らかにすることに直結する。

本論文では、認知の創発的性質を

- (1) 生成性
- (2) 冗長性、重奏性
- (3) 局所相互作用性
- (4) 開放性

の4つの側面から捉える。そして、これらに関連する1990年以降認知科学、人工知能研究を伝統的な認知観と対立させつつ紹介し、その意義と今後の展望を述べる。

2. 生成システムとしての認知: 表象の再検討

認知科学は、1950年代から心理学、工学、言語学的なアプローチを複合的に用いることにより、知の性質、起源の解明について多くの貢献を行ってきた。この学問の伝統的な見解は、知は表象に対する計算として定式化できるというものである。ここで表象とは、外部世界の情報をもとに作り上げられた世界の統一的なモデルであったり、そのモデルを作り出す、あるいは変更するためのプログラムであったりする。初期の（あるいは今でも多くの）認知研究では、表象があたかもハードディスク内に蓄えられたデータ、あるいはプログラムであるように考えてきた。すなわち off-line でも信頼して利用できる固定した状況の表象に対して、固定したプログラムが作

用するというわけである。しかし1990年代辺りから、このような表象観について様々な分野の研究から批判がなされるようになってきた。

2.1 知覚

我々は環境の情報を知覚し、何段にもわたる視覚系の処理機構を通して外部世界についての明確な表象を最終的に構築すると、多くの教科書には書かれてある。また実際我々の直観もそう告げている。しかし近年の知覚研究はこうした見解を根底から揺るがす驚くべき結果を提出している。代表的なものの一つに Change blindness と呼ばれる現象がある。ある実験では、ある画像とそれの一部をだけを変更した画像を1秒程度の間隔で切り替える。被験者はこの2枚の画像のどこが異なるかを指摘するよう求められる。2つの画像の違いは並べてみればきわめて明白であり（たとえば画像中央部の極めて大きな物体が出たり、消えたりする）、なぜ気づけないかが理解できないほどののだが、こうした条件下ではこの変化を知覚することが極めて難しい。画像にゆっくりとした変化が生じるような場合にもその知覚は困難である。1つの画像の約1/5をも占める領域の色だけが20秒の間にゆっくりと赤から青、そしてまた赤に戻るというコンピュータ画像を見せられても、その変化になかなか気づくことができない（通常、その20秒の動画を数回見てもその変化に気づくことはできない）[O'Regan 01]*1。

従来、知覚表象は外界を忠実に再現したものであり、視覚情報処理はその再現をできるだけ正確に行うものであるかのように捉えられてきた。しかし、上記の研究は、実際の視覚表象、およびその生成プロセスはそれとは全く異なっていることを示している。知覚表象ですら、安定的で、統一的で、明確で、詳細なものでは全くないのである。

*1 <http://www.usd.edu/psyc301/ChangeBlindness.htm> や <http://nivea.psych.univ-paris5.fr/> に上記のデモが存在している。ぜひ読者自身で試してみることをお勧めする。

それではなぜそうした表象を作り出さないのだろうか。人間は 1 秒に数回程度、急速な眼球運動 (saccade) を行い、外界の情報を取得している。我々にとって、こうした運動の認知的コストはほぼ 0 に等しい。また眼球運動ほど速くもなく、またコストも高めだが、首を回すことも、体の向きを変えることもでき、それによって状況についての新たな情報を簡単に得ることができる。こうしたきわめて低いコストで得られる情報を何も内的に保持しておかねばならない理由は存在しないだろう。

視覚表象が安定的で、包括的なものであるという我々の主観はどこから生まれてくるのだろうか。これは、我々の視覚システムの補填作用、眼球のそれも含めた運動と身体、および外界の安定性に関する信念との協調作用の結果、産み出されるものなのではないだろうか。

2.2 記憶

上記のように知覚表象ですら不安定で、世界の忠実なモデルではないとすれば、それよりも高次の表象である記憶表象はいつそう歪みが大きくなることは予想に難くない。この予想は実際に当たっており（やや不正確な言い方かもしれないが）記憶はほとんどなんでもありの状態であり、いったい記憶とは何なのかがほとんどわからなくなるくらいである。

近年、虚偽の記憶 (false memory) と呼ばれる領域の研究が盛んに行われている。我々の記憶が単に外界の情報を頭の中の箱に放り込んだものではなく、その人の様々な過去経験との相互作用の結果であり、それゆえ多少の歪みが生じることは古くから知られていた。しかし虚偽の記憶とは、多少の歪みなどとは言えない、ほとんど作話のようなことをあたかも実際にあったかのように、鮮明に「思い出す」ことを指す。これが注目を浴びたのは、幼児虐待裁判における証言の信頼性がアメリカで問題にされたことに深く関連している [Lofuts 94]。軽度の心理的問題を抱えたクライアントがカウンセラーのもとに相談に行く。するとカウンセラーは、その問題が幼少期の親の養育から生じたトラウマが原因であることを示唆し、それを思い出すようにクライアントに促す。こうしたことを何度か繰り返すと、ある日突然、とてつもない虐待の経験が「思い出される」のである。とてつもない経験とは、20 年も前の幼少期に起きた極めて暴力性の高い性的虐待であったり、その結果の妊娠であったり、何人もの乳児を生け贄にする悪魔的儀式であったり、父親による友人の殺害であったりする。

むろん、これらが事実である可能性も原理的には否定できないわけだが、虚偽の記憶は実験的に産み出すこともできるという事実は重要である。たとえば、ありもしなかった、デパートでの迷子の記憶を鮮明に「思い出」させることができる。この実験でも上記のカウンセリング場面同様、被験者ははじめ、その出来事の内容を否定するのだが、繰り返し誘導的な質問、暗示を受けることで、

徐々にその出来事があったような気になり、さらには鮮明な出来事の記憶が作り出してしまおうのである。

ラットを用いた実験でもこれと関連する事実が明らかになっている。数週間にわたってラットにある音と電気ショックを連続して与え条件づけを行う。このようにして学習を完全に成立させたラットに、その音を聞かせ、その記憶が活性化した（つまり思い出した）直後に恐怖記憶の中枢部位に蛋白質合成を阻害する物質を注入すると学習内容が消えてしまうのである。ちなみに音を聞かせていないときに、この阻害物質を注入してもラットの恐怖記憶に影響を与えることはない [Nader 00]。この結果は、記憶表象と想起時の情報とが相互作用することを示している。

以上の結果は、我々の記憶、想起は、ハードディスクに貯蔵されたデータを RAM に読み込むようになされているわけではないことを示している。記憶表象は決して安定的なものではなく、断片化され、その断片化された表象が他の類似した表象の断片と相互に関連しあっている。そして想起の場面では、そうした表象の断片が想起場面の持つ情報とさらに相互作用し、我々は「思い出す」のである。

2.3 思考、類推

1980 年代に膨大に蓄積された文脈、状況依存性についての証拠から、思考の分野では状況込みの知識をどのように利用するかという点に注目が集まった。その結果、類推や転移の研究が 1990 年近辺に集中的に行われることになった。この時期に行われた類推の研究は、過去経験 (base domain) の持つ構造のみに依存するという理論や、そうした構造も含めた複数の制約の同時充足として捉える理論などを産み出すことになった [Gentner 83, Holyoak 95]。

しかしながら、これらの理論は致命的な欠陥を抱えていることも徐々に明らかになってきた。それは表象の動的性格に関わる問題である。一般に類推の理論では、類推のベースとなる我々の経験は、その状況込みの巨大な表象として長期記憶に存在している、と仮定されている。しかし、こうした仮定が誤りであることは以下の簡単な例を考えれば明らかである [Suzuki 98]。理科で電気回路を教える際に水流のシステムを用いることがある。こうした類推を多くの被験者は自然に用いているように思える。実際、プロトコル分析などを行うと、水やその他の液体が流れるかのように電気回路を捉えていることを示す発言が多くみられる。しかし、よく考えてみれば水流のシステムの経験など私たちには存在していないはずである。特に、水が閉回路の中を流れたり、そのためのポンプが並列につながっているシステムなどについての経験がある人は極めて稀だろう。したがって、電気回路の類推で用いられる水の流れというベースは、タスクの要請に応じてその場で作り出されたものであると考えざる

を得ない*2。実際、実験者が類推のベースを与えた場合の類推はきわめて困難なことが知られているが、被験者に自発的に類推を生成させる実験を行うと、人間は極めて頻繁に、かつ上手に類推を行うことも明らかになってきた [Dunbar 01]。こうした知見は、我々が日常生活において比喩を極めて巧みに使用しているという知見 [Lakoff 93] と一致する。

る。

以上のことが示唆するのは、そもそも人間は深く巨大な構造の下に経験を組織化しているわけではないこと、また類推においては当面の目標の下でより小さな単位の知識を動的に組み合わせてベース、ターゲット表象の生成を行いながら類推をしている、ということである。こうしたアプローチは、相互作用的メタファー論 [Indurkha 92]、Copycat [Hofstadter 95]、準抽象化理論 [鈴木 96] などに端的に表されている。

我々が off-line でも安心して認知を行える安定した状況の表象をつくっているという仮説、記憶がハードディスクに記されたデータの読み込みのようなものであるという仮説、類推が確固たる過去経験の表象に基づくという仮説は、以上の結果からすれば放棄する方が賢明だろう。近年の脳科学の知見も表象の生成的(可塑的)な性質を明らかにしてきている。たとえば、生後まもないイタチの視覚入力を聴覚野に達するようにすると、線分の傾きに対応して反応するニューロンが聴覚野に形成されるという [Sharma 00]。また、体性感覚と視覚情報の両方に反応する bimodal ニューロンは、道具の使用によってその受容野を動的に変化させることも明らかになっている [入来 00]。つまり表象は外界の写しでもなければ、我々の認知・行為を支配する固定した設計図でもない。状況、あるいは過去の断片的な表象が、現在の状況、主体の目標、活動、身体に応じて、その場その場で動的に組織化されたものと考えらるべきであろう。

3. 冗長で、重奏的なシステムとしての認知: モジュール説の再検討

科学的研究は分析的である。分析的とは、研究の対象を分割し、他との相互作用がない、あるいはないと見なしてもよいレベルにまでおとし、その振る舞いを検討するというものである。たとえば、知覚という現象は存在するが、だれも知覚そのもの、その全体を研究することはできない。よって、それを視知覚、聴覚などと分ける。

*2 むろん、上記の結果についてはそもそもベースを明示的に与えていないからであるという反論もできる。実際、多くの実験では類推を行う前に何らかの形でこの経験を与えて、こうした経験の存在を実験的にコントロールする。しかし、このような形で行われた実験が一貫して明らかにしたことは、人は与えられたベースをそのまま使って類推するのはきわめて苦手という不思議な結果である。

そうやっても研究できない場合は、立体視、運動視、視覚的注意、相貌認知などとさらに分割が進むことになる。研究者は通常、あまりに多くのことを考えたくはないので、また研究が自己完結的になるのを望んでか、こうして分割したものは他と相互作用がないと考える傾向がある。こうして出来上がるのがモジュールという考え方である。認知発達心理学においてもこの傾向は顕著であり、物理、心理、言語、数などが独立した認知領域を形成していると考え、相互の関係を(少なくとも発達初期には)認めないものが多い。

こうしたモジュールのようなシステムが全くないとは言いきれないが、人間の認知は少なくとも高次の機能になればなるほど、モジュール的な性質を失っていくことが明らかになってきている。認知は、使えるリソースは何でも使うという意味でどん欲であり、一つのことを行うにも多くのやり方を持っているという意味で冗長であり、ある認知のパターンが支配的な場合でもその裏には協調する、あるいは競合するパターンが並列的に動いているという意味で重奏的である。

3.1 感情と認知

Embedded Figure Test (以下 EFT) と呼ばれる課題が心理学の中にある。これは複雑なパターンの中に、ある単純な図形が存在しており、それを指摘するというものである。この課題を行う際に、机の上に手を置き、机を上から押すようにして行う場合と、机の下に手を置き、机を持ち上げるようにして行う場合では、大きな違いがあることが報告されている。前者では埋め込まれた図形を指摘できるまでに平均で7分程度要するのに対して、後者は4分少ししかかからない [Friedman 00]。Friedman らによれば、机を押す時は伸筋を用いるが、これは通常拒否、回避と結びついている。一方、机を持ち上げる場合には屈筋を用い、これは受容や接近という態度と結びついているという。固定した見方ではなく、様々な見方が必要とされる EFT の遂行には、そうした多様なアプローチを受容することが必要であり、屈筋を使う場合にはそれに結びついた受容の態度が implicit に生成され、それが課題の解決を促進するという。つまり、伸筋や屈筋を使うというそれ自体は感情的な意味を持たない身体的情報が、ある種の感情的な状態を生起させ、それが EFT というこれまた感情とは一見無関係な問題解決に影響をおよぼすのである。

また、カブグラの妄想と呼ばれる非常に稀な障害がある。他に特にこれといった障害はないのだが、自分に親しい人だけを別人(その親しい人のそっくりさん)だと思い込んでしまうという。通常、親しい人を認識したときには生理学的なレベルで特定の情動反応が観察される。しかしながら、カブグラの患者に親しい人の写真を見せ、その生理反応を計測しても、通常ならば観察されるはずの変化がみられなかった。Ramachandran はこれを対象

認識系 (IT 野) と情動系 (扁桃体) の働きの不調和によって説明している。つまり、対象認識系は正常に動作し、親しい人をその人と告げるが、その系と辺縁系とのつながりが断たれているため、その対象の認識に通常付随するはずの情動反応が産み出されない。視覚認識はその人を親しい人と告げるが、辺縁系はそう認めない。こうした事態の合理的解決は「そっくりさん」とするしかないだろう [Ramachandran 98]。

また Damasio らは、前頭前野腹内側部に障害を受けた患者の非常に奇妙な振る舞いを報告している [Damasio 94]。こうした患者は一見認知的にはほぼ完全に見え、いわゆる「認知」の働きに関するテストをいくつ行っても、異常は発見されない。しかし、いわゆる性格がおかしくなり、通常の社会生活を送ることが困難になってしまうという。たとえば、簡単なことを決断するのに異常なほど時間がかかり、一度何かを始めると過度の集中を示し、他のことを考慮できなくなるなど、通常の社会生活を行うことが困難になる。また、興味深いことにこの種の患者は感情的な反応が一般的に鈍くなる。逆に言えば、冷静沈着であり、いかなるショッキングな事態にも何ら動ずることがない。以上の事実は、意思決定という、いわゆる認知的なもの、感情との間に緊密な関係があることを示している。Damasio は以上の結果と関連する脳内各領域の投射関係についての知見を組み合わせ、somatic marker 仮説を提案している。この仮説は、身体感覚に関わる体性感覚野からの信号、およびこれと結びついた辺縁系に由来する情動的な信号が前頭前野腹内側部に到達し、意思決定における様々なオプションをフィルタリングし（あるいは重みづけし）、決定を円滑にする役割を果たしているというものである。

このように、思考なのだから、思考に関係する部位だけが関与するわけではないのである。いわゆる「認知」の背景（前景かもしれない）にも、感情、情動、身体的なシステムの関与がある。そしてこれらは重奏的に作用しあい、認知を産み出している。

3.2 認知の発達

認知発達の研究は、Piaget のような汎用の知能から説明しようとする試みがうまくいかないことがわかり、領域固有の知識の役割が強調されるようになった。さらに領域固有の知識の獲得の基盤となる「理論」の存在に注目が集まるようになってきている。ここでいう理論とは、物理、心理学、生物学、言語、数などの各領域において、存在可能な対象、それらの間に許される関係を一貫した形で規定する、コアとなる知識の体系である [Wellman 92]。こうした理論は、各々が独立に発達、あるいは生得的に存在しているという意味で、モジュールをなしていると考えられており、その進化的基盤が議論されることもある [Mithen 96]。たとえば、子供の語意 (word meaning) の獲得には、新奇な単語は事物のクラス一般を指すとい

う分類学的制約、またそれは事物の特定の部分ではなく、その事物全体を指すという事物-全体制約、二つの異なる語が同じ事物を指すことはないという相互排他性の制約などが関与していると主張されている [Markman 89]。

しかしながら、このような考えと対立する研究成果も数多く挙がるようになってきている。たとえば Tomasello は 2 歳程度の子供を被験者として、上記の制約が作用しない条件下で、語意の獲得実験を行った。言語の制約が使えないため、この実験で非常に重要なことは、実験者の発する単語の対象を確定するためには、実験者の意図（何を探しているのか、どんな動作をしようとしているか）を観察しなければならないということである。その結果、子供は大人が意図した対象や行為を正しく特定できるがわかった。Tomasello は一連の実験の結果から、子供は大人を「意図を持った存在者」と理解し、当該場面での大人の意図を特定し、それを用いて新たな語を獲得していると結論づけた [Tomasello 99]。こうした他者の意図や心的状態の理解は、通常「心の理論」と呼ばれる理論が担当するものである。そうした他領域の理論が言語の獲得に関与しているという事実は、伝統的な「理論」アプローチとはマッチしない。

むろん、はじめに挙げた言語的制約がいかなる語意獲得場面でも、全く関与しないわけではなからう。重要なポイントは、使えるものは何でも使うという認知の性質である。考えてみれば、他の知識を用いれば直接的にわかることを、わざわざ領域を限定し、その中でのみ考えるという方が不思議なくらいである。

上記のように領域をまたぐ理論が使われるというわけではないが、子供の推論や判断には多様な知識が用いられている。たとえば、同じ温度の熱い（あるいは冷たい）液体を 2 つ用意して、これを第 3 の容器に注いだときの温度を比較させるという実験を行う。このような課題を幼稚園児や小学生に行えば、「（第 3 の容器の液体の温度は）もっと熱くなる」と答える反応が多いように思われるが、実際には就学前の子供であっても一貫してこのように間違える子供は 10% 未満である。ところが「変化しない」という反応はさらに少なく、「温度が（少し）下がる」という反応が大半を占める（冷たいもの同士の混合では「少し熱くなる」）。これは明らかに熱伝導を考慮した結果と思われる。そこで 2 つの液体を混ぜるのではなく、単に 1 つの容器の液体を別の容器に移し変えるという状況で温度の変化を尋ねてみると、就学前の子供はほとんどが熱伝導を考慮した反応を示した。一方、興味深いことに就学児童、特に 2,3 年生は熱伝導を考慮せず、「温度は変化しない」という反応が 5 倍程度増加をする。1 年生から 3 年生くらいの子供では 2 つの等温液体の混合で「変化なし」と答える子供がだいぶ増える。しかし、1 年生くらいであると、一貫して「もっと熱くなる」という加法的エラーをおかす子供の数が増加する。また informal な実験では、もし温度を表現するのに上記のような質的

なタームではなく、数字を用と（つまり 50 度のお湯など）加法エラーが激増することがわかっている。最後に強調しておきたいのは、少なくとも 2 つの液体を混合する課題の場合、一貫して正解とか、一貫して熱くなる（あるいは冷たくなる）と答えるのは、小学 2 年生でさえもごくごく少数であるという事実である [鈴木 02]。

こうした複雑なパターンの背後には、少なくとも異なる起源を持つ 3 つほどの知識が関与しているようである。一つは明らかに熱伝導に関わるものである。この知識はむしろ formal な熱伝導の教育を受けているからではなく、「あっちだから、こっちのコップに移して冷まそうね」などという、日常経験から得られたものと推定される。もう一つは小学生にみられる加法的エラーを導き出す、formal な算数の教育から得られる知識であろう。さらに、「変化-変化バイアス」とでも呼ぶような一般的なバイアスも関与していると考えられる。これは、「ある変化が生じたら、別の部分にも変化が生じる」という因果性に関わる、一般的な期待を表現するものであり、発達のかなり初期から子供の中に存在していると考えられる。

重要なことは、これらの知識が役割分担をしているというよりも、同時並列的に作用し、互いに競合、協調を繰り返しながら、ある特定の判断をサポートしあうという形になっていることである。たとえば、年少児の場合は、算数の加法的な知識はそれほどアクティブにはならず、一般的なバイアスである「変化-変化バイアス」のような一般的な弱い知識が、温度の変化をサポートする。すると変化の方向が問題となる。むしろ、幼児といえども加法的知識がないわけではないから、「より熱くなる（冷たくなる）」という反応も一定のサポートを受けるが、それよりも具体的日常的な経験からの「冷める（ぬるくなる）」という判断がより強いサポートを受け、結果としてそれが選択される。小学生になっても問題状況によっては当然変化-変化バイアスは強く作用してある変化をサポートするし、年少児同様経験的な知識も作用する。こうしたことが彼らの反応の一貫性の欠如と見なされる、柔軟性を支えている。

系統発生的に、あるいは個体発生的にみて、それより以前に使っていたものは簡単に捨てない、また使えるものは何でも使う、一つの活動の背後にいくつものシステムの関与がある、こうした認知の姿はモジュール・アプローチが示唆する認知の姿とは全く異なるものである。むしろ、理論や領域固有の制約が全く存在しないとされているわけではない。したがってここでのポイントは [波多野 03] が指摘するように、これらは弱い制約として、他の資源と協調、競合しながら働くのであり、決して何かを一方向的に「支配」しているわけではない、ということである。こうした見解は脳科学が明らかにしてきた脳の持つ尋常ならざる冗長性とも親和的である。ニューロン間の結合はきわめて密であり、冗長であるし、領野間にもき

わめて複雑な双方向的な結合が存在している。また、皮質を持たない、あるいはほんの少ししか持たない生物であっても、きわめて賢く、適応的に振る舞っている。脳の進化を考えてみれば、このレベルでの知性が果たしてきた役割が完全に削除され、皮質、前頭葉にすべて置き換えられたとは考えがたい。こうした冗長性が情報の欠損や、一部素子の不良に由来する障害に対する、ある程度までの安定性を保証し、一方でシステム全体の柔軟性、揺らぎを可能にしているのだろう。

4. 局所相互作用システムとしての認知: 中央制御の再検討

プログラムを書いたり、より一般的には何かを作り出すとき、必ず課題分割というストラテジーが用いられる。プログラムの場合で言えば、入力部（どのように入力を受けつけるか）、メインの計算部分、出力部という形の分割が行われる。また、メインの計算部分についても default の処理、例外処理、エラー処理などに分割される。このように初期の大きなタスクを、より小さく簡単に処理できるサブタスクに分割しつづけることは、何かを作り出すときの基本である。認知のモデルを作る際にも基本的にこのような図式が用いられている。興味ある認知現象が組み込み関数 1 つで実現できるなどと言うことはあり得ないから、こうしたやり方自体は問題ではない。

しかし上記の課題分割を行う時に、役割分担が行われ、それぞれの機能がモジュール化し、さらにそれが線形に結びつくという仮定が入り込む場合がよくある。たとえば、自然言語理解では、音韻処理があり、それが終わると統語処理が行われ、その後意味処理、文脈・談話処理などと進む、というのがこの典型である。またこのような場合、プロセス全体を制御する中央のメインプログラムが必要となってくる。

しかし自然は人間の知性を発現させるべく部品を作り出し、組み合わせてきたわけではない。もともとはその機能を実現させるために進化したのではない脳のある部位が、環境の圧力、他の脳内部位との関連において、特定の機能を持つようになり、そうしたいくつもの部位が関係しあって、ある知的機能が成立している。我々の認知は優秀な工学者が設計したものではない。手元にあるものを適当に組み合わせ、なんとかその場をしのぐ、進化という「修繕屋」が産み出したものなのである [Clark 99]。以下では、こうした脳科学、進化論の知見により近い設計指針について検討する。

4.1 感覚-運動協応

世の中に興味ある現象が存在すると、それ全体を産み出す何かが存在すると考えなくなる。またそれが複雑であると、そこには複雑な仕組みが関与していると考えなくなる。

しかし、そうした全体を制御するものがなくとも、またそれほど複雑な仕組みを持ったものでなくとも、興味ある現象が引き起こされることはよくある。物体の運動はニュートン力学に従うとして、物体の運動全体をコントロールするようなプログラムが内部あるいは外部に存在しているわけではない。また生命体に話を限っても、このことは成り立つ。よく引き合いに出される白蟻や、蜂などがみせる、非常に複雑で知的と感ぜられる行動は実はきわめてシンプルなメカニズムによって説明できることが知られている。たとえば白蟻は泥をもとにしてアーチ状のものを作り出す。しかし、彼らの内部にアーチをつくるための内部プログラムが存在しているわけではない。泥を積み上げるといった内部的習性と、彼らが泥に付着させるある物質の濃度の勾配があいまって、彼らにアーチをつくらせるのである。

Pfeifer & Scheier は、センサとモータを直接結合する幾種類ものロボットを用いて、一見複雑に見える行動がきわめて単純な仕組みによって実現可能であることを示している [Pfeifer 99]。たとえば、障害物を回避しながら移動する生物をみると、我々は往々にしてそこには知覚や運動を制御する複雑なアルゴリズムが存在しているかのように考えてしまう。しかし、障害物の接近を検知する 2 つのセンサーと両輪に直結したモータの間に交差するよう結線を行い、ある適当なタイムステップで前進するようにしておけば、複雑な迷路を通り抜けることができるようになるという。

これらは、入力された情報が処理され、中央によって解釈された後に、それに適した運動プログラムが働くという図式が必ずしも適切ではないことを示している。ある状況の局所的な刺激に対して、反射的な反応が生じ、それによって状況が変化するために受け取る刺激がまた異なり、その結果が別の反応がなされる。また、場合によっては、その反応に対する評価が与えられ（快-不快など）、学習、すなわち反応の出現確率が変化することもあるだろう。これらの反応自身は局所的な情報に基づく反射的なものであり、中央からの制御があるわけではない。また、学習に関しても単純なフィードバックをベースにしているわけで、探索経路の切り替えのようなメカニズムが直接働いているわけでもない。しかしこれらが運動、またそれによる環境の変化と結びつくことにより、総体として知的な行動を産み出しているのである。

4.2 reentrant な処理

あるサブプロセスにおいて処理が行われ、その結果が次のサブプロセスに渡され、という形で処理が進んでいくというのが、伝統的な設計論の中には存在している。脳において見られる機能の局在はこうした伝統的設計論と親和性が高いようにも思える。しかし、こうした逐次処理とは異なる設計論も存在する。

たとえば、伝統的自然言語処理の図式では、音韻処理、

統語処理、意味処理、談話処理という形で処理が進行する。こうしたモデルでは音韻処理が終わらないと、それ以降の処理は進まない。しかし、ある処理が完全に行われなければその後の処理ができないわけではないだろう。もしそうだとすれば、雑音が入っただけで、あるいは注意をそらしただけで、いっさいの言語理解が不可能になってしまう。こうしたことから、橋田は制約の同時充足というパラダイムを提案した [橋田 90]。ここでは、入力を与えられると、様々なレベルの処理を行う機構が同時に並列的に動作し、その結果を相互にやり取りする。これによって各処理機構の中で不明な部分が、他の処理機構からの入力により解消されることが期待される。

また視覚情報処理は、一次視覚野から腹側、背側経路を通るにしたがって徐々に豊かな表象を作り上げるといわれるが、その情報の流れは単線的ではない。たとえば、線分の向きなどを知覚するニューロンが存在する一次視覚野は物体の動きを検知するといわれる V5(MT 野)からの逆の投射を受ける。またこの reentrant な投射は V1 の当該刺激に反応したニューロンだけではなく、近接するニューロン群に対しても行われるという [Shipp 89]。一般に、初期の視覚領域は詳細な情報を獲得しているが、その受容野 (receptive field) はきわめて限定されていると言われている。したがって、こうした情報が伝わるだけでは外界の認識を得ることはできない。逆方向の投射は仮説をトップダウンに伝え、その仮説に関連する低次視覚情報を再活性化することにより、ある程度まで安定した^{*3}表象を作り出すことに寄与すると考えられる [Di Lolo 00]。また、こうした reentrant な結合により、低レベルの情報マップと高次のそれとの間の相関が作り出されることになり、結果としてカテゴリー認識が可能になるという [Edelman 92]。

我々の知性は、人間的知性を持つデザイナーによって作り出されたものではないのだから、情報を機能ごとに分割されたモジュールによって、逐次的に処理していくわけではないし、その過程が中央にある制御プログラムによって支配されているわけでもない。いわゆる「中央」を介さずに処理が行われるケースもあれば、ある段階の処理とつぎの段階の処理が同時並列的 (reentrant な結合のような)、相互作用的に行なわれる。知性は、局所的な相互作用や、双方向的な結合などを前提としたものであり、「中央」からの制御はそうした複雑な相互作用に参加するひとつの力にすぎない。これらの特徴は、茂木の主張する「周囲の活動パタンの協力」による知性の創発という見解とまったく一致する [茂木 03]。

古典的設計論とは異なる魅力的なアプローチは人工知能の中でもいくつも提案されてきている。ロボティクス

*3 「ある程度まで」という限定をつけるのは、2 章節で述べたように、我々は外界の統一的な、安定した表象を作り出すわけではないという知見もあるからである。

の中には subsumption アーキテクチャ [Brooks 91], などに代表される, 中央制御を必要としない有望なメカニズムがいくつも提案されている. また, 上に挙げた制約論 [橋田 90] は, 情報処理の逐次性の呪縛から, 知性を開放する仕組みと考えることができるだろう.

5. 開放システムとしての認知: 「内部」プログラムの再検討

人間の認知に, あるパターンが存在すると, そのパターンを産み出す機構が「内的に」存在していると仮定したくなる. しかし, 「人間がそうやっているのだから, 人間の内部にそれを実現する何かがあるはずだ」と考えるのはやや素朴すぎる仮定ではないだろうか. むろん, 認知現象がまったく内部的なものを必要としない, ということはあり得ない. しかし本当に内部的なものだけで認知のパターンが産み出されるのだろうか. そうではないという証拠は数多く上がってきている. なお, こうした外と内の関係の見直しについては [佐々木 03] が説得的な議論を展開しているので, 以下ではそれ以外の証拠を挙げることにする.

5.1 外への指向

$3/4$ の $2/3$ はいくつですかと, 今この場で尋ねられればだれでも $3/4 \times 2/3$ という計算を行い, なんなく $1/2$ という結果を出すだろう. しかしながら, 目の前に折り紙を置かれて「この折り紙の $3/4$ の $2/3$ の部分に斜線をひいてください」と言われると, 計算をしてその結果 (つまり半分) に基づいて斜線をひくわけではないらしい [Shirouzu 02]. たいていの大人が実際に折り紙を折りながら, この問題を解決しようとする. 折り紙ならば折れるのだが, 折りにくいもの (厚紙) や, 折れないもの (アクリルボード) を用いても結果は変わらない. こうしたことから, 白水らは人間には外的資源に働きかけ, その変化を観察し, 変化した状態に対してまた働きかけるという形で, 外との interplay を基本として認知活動を行う傾向性が存在していると述べている. またこの課題を一人で行う場合と, 二人で行う場合ではその後の類似課題に対するアプローチが異なることが報告されている. 二人で問題を解いたときには, 類似の問題を再度解かせたとき, 半数程度のペアが解き方を数学的なものに変化させるという.

Dunbar は世界的に著名な 4 つの分子生物学の研究室で 1 年に渡る詳細な調査を行なった結果, グループ問題解決の理論にとっても, また実践的にとってもきわめて重要な知見をいくつももたらした [Dunbar 95]. その中でも重要なものは分散推論 (distributed reasoning) である. 通常, 科学の研究室はグループで行なわれ, 彼らは定期的にミーティングを行ない, 実験データの解釈, 仮説の生成などについてディスカッションを行なう. そこでは

一人で仮説を立て, そのまま実験を行ない, 論文などの形の成果にまとめあげるといことはほとんどなかった. 研究者の推論の大半が制限, 拡張, 置換, 棄却などの修正を受けており, 推論が研究グループ全体に分散されて行なわれていたと考えられる.

5.2 分散問題空間

問題解決は教科書的には, 内的に構成される問題空間の探索ということになっている. しかし, 多くの問題解決においては様々なモノが関与する. たとえば古典的なハノイの塔のバズルでもディスク, ペグが関与する. そして我々はそれらを実際に操作しながら問題を解く. Zhang & Norman らは, こうした問題の外的な成分と内的な成分を同時に扱う分散表象空間という概念を提案している [Zhang 94]. 一般に問題の抽象的記述は, 内的に表象される部分と外的に表象される部分を持ち, 各々が表象空間を構成する. そして, この 2 つの表象空間が統合され分散表象空間 (distributed representational space) として具体化される. そして人間はこの分散表象空間を探索することで問題解決を行うという.

彼らの考え方にしたがえば, 問題のどの要素を内的にし, どの要素を外的にするかをデザインすることができる. 特に問題中に含まれる恣意的なオペレータ適用制約はそのままであれば内的にしか表現し得ないが, これを外的な空間に表現すれば我々の優れた知覚探索システムを用いることができるので大幅なパフォーマンスの改善が見られるはずである. たとえば, ハノイの塔では以下の 3 つの制約がある.

- (1) 一度に一枚しか移動してはならない,
- (2) 移動するディスクは移動先のペグにあるディスクよりも大きくなければならない,
- (3) 同じペグに複数のディスクがある時には, その中で最も大きなディスクが移動できる,

通常のハノイの塔では, 制約 1 と 3 はほぼ自明であるわけだが, これはこの制約が外的な問題空間の方に配置されているからである. したがって, これらの制約のいずれかを内的空間に配置すれば, 問題解決は難しくなるだろう. また, 内的問題空間に配置されている制約 2 を外的空間の方に配置すれば問題解決は促進することが予測できる. 実際, 制約 3 を内的にした問題では解決時間が通常のハノイの塔の 1.5 倍程度となるし, 制約 2 を外在化した問題ではエラーなしできわめて迅速に問題解決が可能になる.

以上の研究は, 実験者が問題空間の分散の仕方を決めていたが, 学習の過程で人間が自らこれを行うこともある. テトリスという以前流行したゲームがある. このゲームでは上から 4 つの正方形を様々な形に組み合わせた 7 種類の物体が 1 つずつランダムに落ちてくる. それらを適切に回転させたり, 移動させて, 一列のつながった面を作り出せば, その面が消え, 得点が得られるというも

のである。最初のうちは、物体はゆっくりとしたスピードで落ちてくるので、平面をつくることはさして難しくない。しかし、徐々にスピードが上がり、最終段階あたりになると、猛烈なスピードで落ちてくるようになる。初心者が熟達者のこうした行為をみると、なぜこんなに速く操作することができるのかが、理解できないほどである。

このようなパフォーマンスの背後には、epistemic action が存在しているという [Kirsh 94]。epistemic action とは、問題解決に直接的に貢献する pragmatic action とは異なり、より人間が問題を解きやすいように問題の性質を変化させる行為である。たとえば、上手な人間はピースが落ちてくる間に、それを必要な回数よりもよぶんに回転させるという。画面下に様々なくぼみがあり、落ちてくるピースをそのくぼみに適合させようとするとき、もしピースの落下速度が遅ければ頭の中でそのピースを回転させ、どこに落下させるかを計算することもできる。しかしゲームが進み、ピースの落下速度が上がると、こうした方法は適当ではなくなってしまう。むしろ、ピースを回転させ続け、回転の途中で現れるパターンと、下のくぼみのパターンとのマッチングをした方がより効率的である。つまり、ここでは認知的にコストのかかるメンタルローテーション課題を、パターンマッチング課題に変化させているわけである。

我々はあらゆる感覚を遮断された中で認知を行うわけではない。外を見たり聞いたりするし、体を動かすし、他者と話し、文字や図を書いたりすることもある。そしてこうした外との相互作用を行うことにより、人間が受け取るものも変化する。たとえば、右を向くことにより、知覚する風景は異なるし、向いたことにより自らの体の知覚（自己受容感覚）も変化し、その協調関係を知覚する。そうした環境、自身の変化の知覚の中でまた行為を行う。

結果として観察される認知のパターンとは、外との相互作用を前提とした、あるいは外と不可分に結びついたものであり、そのパターン全体を再現する内部プログラムが動いた結果ではない。外のからの反応、サポートがあるのであるから、何も内部にすべて格納しておく必要はないのである。そもそも、人間の知的機能の基盤は進化の産物である。進化とは環境への適応、つまり外を前提としてのことであり、認知の基盤は外の存在、あるいは外からの反応を前提としたものだと考えることは無謀なことではなからう [岡ノ谷 03]。

6. ま と め

興味ある認知現象を観察すると、そこになんらかの一定のパターンを持つことがわかる時がある。すると、そのパターンを生成するためのメカニズムが存在すると考え、

そのモデルを考案し、計算機にインプリメントする。こうしたアプローチは科学の基本的アプローチであり、こうした試みをつづけていくことが知の性質およびその起源の解明につながる。

しかし上記の試みを行う中で実証的な支持が得られない（暗黙の）仮定が入り込む。この仮定は
 固定した表象の仮定： 安定的であり、off-line の利用時にも信頼できる、固定した表象が存在する、
 処理のモジュール性の仮定： 処理は他と相互作用を持たないモジュールの中で行われる、
 中央制御の仮定： 処理は中央のプログラムによって制御、管理される、
 内部プログラムの仮定： 処理プログラムは外部とは独立で、自己完結的である、
 というものである。

本論文では、これらの仮定と対立する実験的証拠を挙げ、その問題を指摘しつつ、新たな知の解明に必要な条件を以下の形でまとめた。

生成性 表象は断片的なものであり、それらが利用時の状況の特性に応じて動的に構成される。
 冗長性、重奏性 一つの知的行為を行うにもいくつもの処理経路が存在し、それらは同時に重奏的に作用する。
 局所相互作用 処理は中央を介さずにローカルなシステム間でなされることもあるし、また状況の特性との関連で、活性化した複数の表象が局所的に相互作用しあう中で進む。

開放性 知的行為は外部の存在、およびそれとの interplay を前提としたものである。

これらの条件を完全に満たすシステムがどのようなものであるかを現時点で特定することはできない。しかし、論文中でも述べたように、構成的アルゴリズム含む動的なニューラルネット、制約プログラミング、サブサンクション・アーキテクチャー、GA、ダイナミカルシステムズ・アプローチなどは、用い方さえ適切ならば、上記の条件の部分的に満足させる可能性を持っていると思われる。これらを用いたモデル化、そして問題点の抽出、改善という、当たり前のステップを踏むことにより、古典モデルの呪縛から解放された、心理学、脳科学との親和性の高い、知のモデルの構築が進められることだろう。

謝 辞

本論文の執筆にあたって、桐朋学園大学の鈴木敦子氏、東京大学大学院総合文化研究科の永井淳一氏から貴重なご意見を頂いた。また、本研究は科学研究費補助金特別推進研究 14001003（代表：吉野一）による援助を受けて行われた。

◇ 参 考 文 献 ◇

[Brooks 91] Brooks, R. A.: Intelligence without reason, *Artificial Intelligence*, Vol. 47, pp. 139 – 160 (1991)

[Clark 99] Clark, A.: *Being There: Putting Brain, Body, and World Together Again*, MIT Press, Cambridge, MA (1999)

[Damasio 94] Damasio, A. R.: *Descartes's Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*, Avon Books, New York (1994), 田中 三彦 (訳)「生存する脳」講談社, 2000

[Di Lolo 00] Di Lolo, V., Enns, J. T., and Rensink, R. A.: Competition for consciousness among visual events: The psychophysics of reentrant visual processes, *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol. 129, pp. 481 – 507 (2000)

[Dunbar 95] Dunbar, K.: How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories, in Sternberg, R. J. and Davidson, J. E. eds., *The Nature of Insight*, MIT Press, Cambridge, MA (1995)

[Dunbar 01] Dunbar, K. and Blanchette, I.: The in vivo / in vitro approach to cognition: the case of analogy, *Trends in Cognitive Science*, Vol. 5, pp. 334 – 339 (2001)

[Edelman 92] Edelman, G.: *Bright Air, Brilliant Fire*, Basic Books, New York (1992), (金子隆芳「脳から心へ: 心の進化と生物学」新曜社, 1995.)

[Friedman 00] Friedman, R. S. and Forster, J.: The effects of approach and avoidance motor actions on the elements of creative insight, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 79, pp. 477 – 492 (2000)

[Gentner 83] Gentner, D.: Structure-mapping: Theoretical framework for analogy, *Cognitive Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 155 – 170 (1983)

[橋田 90] 橋田 浩一: 認知科学における制約概念, *科学*, Vol. 60, pp. 459 – 464 (1990)

[波多野 03] 波多野 誼余夫, 稲垣 佳世子: ヒト知性の生得的基盤, *人工知能学会誌*, Vol. 18, (2003)

[Hofstadter 95] Hofstadter, D.: *Fluid Concepts and Creative Analogies: Computer Models of the Fundamental Mechanisms of Thought*, Basic Books, New York (1995)

[Holyoak 95] Holyoak, K. J. and Thagard, P.: *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*, The MIT Press, Cambridge, MA (1995), 鈴木宏昭・河原哲雄 監訳 (1998). 『アナロジーの力: 認知科学の新しい探求』. 新曜社

[Indurkha 92] Indurkha, B.: *Metaphor and Cognition: An Interactionist Approach*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1992)

[入来 00] 入来 篤史: ニホンザル道具使用の脳内機構: シンボル操作の起源に挑む, *認知科学*, Vol. 7, pp. 195 – 201 (2000)

[Kirsh 94] Kirsh, D. and Maglio, P.: On distinguishing epistemic from pragmatic action, *Cognitive Science*, Vol. 18, pp. 513 – 549 (1994)

[Lakoff 93] Lakoff, G.: The contemporary theory of metaphor, in Ortony, A. ed., *Metaphor and Thought (Second Edition)*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1993)

[Lofuts 94] Lofuts, E. and Kecham, K.: *The Myth of Repressed Memory*, St. Martin's Press, New York (1994), 仲真紀子 (訳)「抑圧された記憶の神話」誠信書房, 2000

[Markman 89] Markman, E. M.: *Categorization and Naming in Children*, MIT, Cambridge, MA (1989)

[Mithen 96] Mithen, S.: *The Prehistory of the Mind: A Search for the Origins of Art, Religion and Science*, Thames and Hudson, London (1996)

[茂木 03] 茂木 健一郎: 脳における生成とクオリア, *人工知能学会誌*, Vol. 18, (2003)

[Nader 00] Nader, A., Schafe, G. E., and LeDoux, J. E.: Fear memories require protein synthesis in the amygdala for reconsolidation after retrieval, *Nature*, Vol. 406, pp. 722 – 726 (2000)

[岡ノ谷 03] 岡ノ谷 一夫: 身体「知」の進化と言語的「知」の創

発, *人工知能学会誌*, Vol. 18, (2003)

[O'Regan 01] O'Regan, J. K. and Noe, A.: A sensori-motor account of vision and visual consciousness, *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 24, pp. 939 – 1011 (2001)

[Pfeifer 99] Pfeifer, R. and Scheier, C.: *Understanding Intelligence*, MIT Press, Cambridge, MA (1999), (石黒章夫・小林宏・細田耕「知の創成: 身体性認知学への招待」, 共立, 2002.)

[Ramachandran 98] Ramachandran, V. S. and Blakeslee, S.: *Phantoms in the Brain: Probing the Mysteries of the Human Mind*, William Morrow, New York (1998), 山下篤子 (訳)「脳の中の幽霊」角川書店, 1999.

[佐々木 03] 佐々木 正人: 物/環境を行為で記述する試み, *人工知能学会誌*, Vol. 18, (2003)

[Sharma 00] Sharma, J., Angelucci, A., and Sur, M.: Induction of visual orientation modules in auditory cortex, *Nature*, Vol. 404, pp. 841 – 847 (2000)

[Shipp 89] Shipp, S. and Zeki, S.: The organization of connections between areas V5 and V1 in the macaque monkey visual cortex, *European Journal of Neuroscience*, Vol. 1, pp. 309 – 332 (1989)

[Shirouzu 02] Shirouzu, H., Miyake, N., and Masukawa, H.: Cognitively-active externalization for situated reflection, *Cognitive Science*, Vol. 26, pp. 469 – 501 (2002)

[鈴木 96] 鈴木 宏昭: 類似と思考, *認知科学モノグラフィーズ 1*, 共立出版 (1996)

[Suzuki 98] Suzuki, H.: Justification of analogy by abstraction, in Holyoak, K. J., Gentner, D., and Kokinov, B. eds., *Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from Cognitive, Computational, and Neural Sciences* (1998)

[鈴木 02] 鈴木 宏昭: 幼児期における物理概念の発達: 知識の相互作用の観点から, 平成 9–12 年度 科学研究費補助金特定研究 (A) 成果報告書 (2002)

[Tomasello 99] Tomasello, M.: *The Cultural Origins of Human Cognition*, Harvard University Press, Cambridge, MA (1999)

[Wellman 92] Wellman, H. M. and Gelman, S. A.: Cognitive development: Foundational theories of core domains, *Annual Review of Psychology*, Vol. 43, pp. 337 – 375 (1992)

[Zhang 94] Zhang, J. and Norman, D. A.: Representations in distributed cognitive tasks, *Cognitive Science*, Vol. 18, pp. 87 – 122 (1994)

{ 担当委員: × × }

19YY 年 MM 月 DD 日 受理

—— 著 者 紹 介 ——

鈴木 宏昭 (正会員)

1958 年生まれ。1988 年, 東京大学大学院教育学研究科博士課程単位取得退学。現在, 青山学院大学文学部教授。博士 (教育学)。研究分野は, 人間の学習, 思考, インタフェースに関わる認知科学である。著書に「認知過程研究 (共著)」、「放送大学教育振興会」, 「類似からみた心 (共編著)」、「共立」, 「コミュニケーションと思考 (共著)」、「(岩波)」、「アナロジーの力 (監訳)」、「(新曜社)」、「類似と思考」(共立出版) などがある。日本認知科学会, Cognitive Science Society, 日本心理学会, 日本教育心理学会, 日本教育工学会, 各会員。