

# 神経科学にかかわる心理学

古賀 義亮

Psychology Related to Neuroscience

Yoshiaki Koga (Professor Emeritus of National Defense Academy, Japan)

## ABSTRACT

In this paper, a subject of psychology related to neuroscience is discussed with human brain functions based on computer memory behaviors and control.

## I. はしがき

人間を個体すなわちヒトととらえ、ヒトの知的活動について、コンピュータ分野での成果を背景に神経科学にかかわる心理学の今後の展開について考察する。

ヒトの知的活動は、ヒトの脳の機能と活動に大部分が依存している。脳の機能は、記憶、判断、創造と分類できる。この分類に従えばコンピュータには創造の機能はないといえる。その理由として、コンピュータには創造する意志、あるいは創造する動機が存在しないためと解釈できる。ここでもヒトの創造に関する知的活動については考察の範囲外とする。

## II. 記憶機能

ヒトの記憶はどのように機能しているのだろうか。

記憶に関しては潜在記憶(石投, 2004)など記憶の保持様相の側面から研究が進められている。Longstaff(2003)の著書において、記憶機能は神経回路の配線の変化(可塑性)によると記述されている。しかしながら、記憶がどのように構成されて、蓄積されるかという解答はいまの科学の成果からは得られていないようである。著者はコンピュータに関する研究開発に従事していたことから、コンピュータの記憶機能については、多くの知見を得ている。一言でいえば、コンピュータの記憶には物理的なポテンシャル・エネルギーを用いる。従ってコンピュータで記憶を蓄積し、またこれを取り出すときには、ポテンシャル・エネ

ギーと運動エネルギーの変換が必要である。

このコンピュータに関する記憶機能の知識を基にしただけでは、ヒトの記憶機能について明らかに説明できない。しかしながら、記憶機能に関わる様相については、ヒトがもっている記憶機能とコンピュータの記憶機能に類似的な機能が存在する。いずれにも共通する機能は、記憶としての蓄積(store)、保存、呼び出し(read)である。ここで保存について、コンピュータの場合は蓄積することで消去しない限り保存されるのでstoreすることだけでよい。ヒトの場合、記憶には忘失が伴うことから可塑性ともいわれている。コンピュータの場合は不測の消去を避けたインテグリティ(integrity)すなわち統一性という用語があり、これが保存に対応している。またコンピュータの記憶の蓄積と呼び出しにはアクセス(access、接近と日本語訳できるが適切な訳語と思われないのでアクセスということにする)という操作が必要である。当然のこととしてアクセスという操作がヒトの記憶機能にも存在すると考えられる。

ここからの記述は、著者のコンピュータの記憶機能に関する知識とヒトの脳についての知見をもとにして仮説をたてて記述する部分もあるが、今後の研究によっては、異なる結果をもたらすであろう。

## III. 新生児の記憶

ヒトの記憶には遺伝子に組み込まれている先祖伝来のものがある。出産直後に産声をあげるがこの産声で胎盤との血流が変更されるという。また教わることなく母乳を飲む。これは遺伝子の中に

組み込まれている記憶が基底にある。最近になってヒトの遺伝子の解読がすべて終わったといわれているが、新生児のこのような行動記憶がどのように遺伝子が関わっているかについては不明である。

コンピュータでも立ち上げの時に特殊なプログラムを必要とする。このプログラムのことをブートストラップ (boot strap) という。ブートストラップとは米国の俗語に由来し、「自分自身でやれ」と言う意味である。コンピュータの分野ではブーター (booter) という略称で呼び重要な役割を果たしている。従ってこれがウィルスに汚染されるとコンピュータは立ち上がることができない。極めて脆弱な部分であり、重要な研究分野であるが最近はあまり注目されていない。これに比べるとヒトのブーターは二重三重と嚴重に警護・保護されていると思われる。

ヒトのブーターについては、新生児を見ると息をすること摂食することから始まる。この他に眠ること、泣くこと、排泄することもある。心理学が記憶に関わるという見地からすると、環境に順応するための潜在記憶が起動開始される。ヒトの記憶にもブーターが機能しているといえる。

#### IV. 記憶内容と記憶機構

コンピュータにおいて記憶内容は2進数 (binary digit) で表される。これをコーディングといい、コーディングされた記憶内容のことを意味 (semantics) とする。ある意味を持つ記憶を蓄積し、取り出す操作としてアクセス (access) がおこなわれる。アクセスのために記憶単位 (2進数表現による一定の長さを持つ) の位置、すなわちロケーション (location) があらかじめ定められている。コンピュータでは記憶の読み書きにあたり、記憶単位についてのアクセスを行う。この動作は記憶単位の位置の指定、すなわちロケーションニングを行ったあとに、蓄積もしくは読み出しが行われる。記憶内容の意味は処理過程 (processing) において決定づけされる。

ヒトの記憶には2進数に相当するものは見あたらない。記憶内容の意味と記憶のアクセスは同時に行われていると見なすことができる。このような記憶構造は、脳が神経細胞から構成されていることがわかっているので、神経細胞のシナプスによる接続接合による経路網であると解釈でき

る。

このことから記憶の蓄積は神経細胞の経路構成によるものと思われる。つまりある始点と終点との神経細胞による経路構成が記憶の位置と意味の蓄積を行う。記憶の蓄積では、記憶をするための刺激が始点となり、蓄積の場合、終点はない。記憶を取り出す操作は、思い起こしの刺激によりコンピュータでいうアクセスを始点から行うことで記憶の読み出しを開始し、その結果が終点に現れて記憶内容の再現がおこなわれる。

コンピュータでは、ある記憶内容による別の記憶内容の検索機構とその操作 (Knuth, 2004) がある。大容量の記憶装置になるとアクセスに時間がかかる。そこでアクセス時間を短縮する手段として様々な方式が提案されている。コンピュータの場合は、記憶はすべて記憶するロケーション、すなわち位置が定まるので、その位置を特定することで記憶内容の取り出しができる。大まかにいって、「並べ替え」、「ハッシュ符号化」、「ポインタ」に分類できる記憶方式があり、このうち大容量の記憶にはポインタ方式が最も優れた方式として用いられている。これは記憶した情報の一部に関連のある別の情報の位置をポインタとしてつけくわえておく手法である。ある記憶を読み出したあとに関連した情報を読み出すにはポインタで指し示された位置の情報にアクセスする。

ここである情報を単語とし、それ自身意味を持つものとしよう。ヒトの記憶の場合、単語に独立した意味を持たせるのみではなく、単語と単語の関係から意味が生じると考えられる。単語と単語の関係を定めることを言語論 (都倉, 1995) では文法といっている。言語論の立場からいえば、いかなる単語も関係なく文章として構成できる文法体系を文脈自由文法 (context free language) という。これに対して単語と単語の関心に依存して文章を構成する文法体系のことを文脈依存文法 (context sensitive language) という。ヒトの記憶の場合も文脈依存文法が存在する記憶単位と考えられる。つまりある記憶単位の呼び出しが関連した記憶の呼び出しにつながる。コンピュータの場合は文脈依存関係をポインタに持たせることができるが、ヒトの記憶にはポインタに相当する機構がどのように構成されているか疑問である。記憶の接続、つまり連想は神経経路を伝搬する刺激の分枝伝搬と見なせばこの疑問も解決できるよう

に思われるが、今後の研究の課題であろう。

## V. 記憶機構の制御

コンピュータではこれまで述べた記憶を制御する機構(富田・村上, 1988)がある。記憶機構はハイラーキー(hierarchy 階層)の構成になっていて、記憶の書き込み、読み出し、ポインタによる接続書き込みとか読み出しなどを制御する。制御には記憶の操作の他にも加算とか乗算の実行指示がありコマンド(command)と呼んでいる。コマンドの組み合わせによる各種制御は、人間が作成した上位層に位置づけられるプログラムにより目的指向の情報処理が行われる。ヒトの記憶に関する機能にもハイラーキー的な上位層に相当する制御があると思われる。このことは心理学の分野でどこまで解明されているか、記憶について調べた範囲では不明確である。

コンピュータの場合のプログラムは、制御記憶としてデータなどと同じ記憶に蓄積され、順次この記憶制御情報を取り出しながら様々な処理をおこなうことから、ヒトの場合もこれに相当する神経経路が構成されているものと考えられる。ここでコンピュータの制御記憶はデータと別の領域を用いる。初期の発展段階では同一の記憶領域をもち、場合によっては制御記憶も変更することも行われたことがあるが誤動作を伴うことから、現在では厳格に領域を分離し、特に制御記憶領域には書き込みを行わないような保護機能が施されている。

環境適応の学習に関してオペラント条件付け(operant conditioning)があり、プログラミングと関連性があるように思われる。ヒトの記憶機能の制御にもオペラント学習が関係していると考えられ、このオペラント記憶についても神経経路の一環として含まれているとの仮説がたえられる。

## VI. 神経経路のモデル化

神経細胞が互いに接続して網、すなわちネットワークを構成していることが定説になっている。ネットワーク・モデルに関して、古くから数学の分野で取り扱われているグラフ理論(服部・小澤, 1974)がある。点(節)を線(弧)で結びつけたネットワークの構成について理論的な検討がなされ、多くの実用上の成果がもたらされている。さらに点と線に機能を付加し、トークン(token)に

より待ち合わせ状態を持たせたペトリ・ネットと呼ばれるグラフ理論(Peterson, 1984)がペトリにより1962年に提案され、様々なシステムの振る舞いを解析する手段として幅広い応用がある。しかしながら神経経路のモデルとしては満足できるものではない。

神経経路に最も近いモデルとして、20世紀後半に成熟したニューラル・ネットワーク(栗田, 2001)があり、工学的な応用を目指した研究が盛んにおこなわれ、多くの実用的な成果もある。しかしニューラル・ネットワークの研究も神経経路の機能・動作とはかけ離れているという指摘が、ニューラル・ネットワークの研究に関する学会レベルで報告されている。

本質的な問題として、以上のモデルには、神経経路の核となる神経細胞の機能がモデル化されていないことにあると筆者は考えている。数学のグラフ理論では神経細胞にあたる点に機能を考えない。ペトリ・ネットも同じである。ニューラル・ネットワークでは点の動作に閾値を設定することで神経経路のモデルに近づけている。しかし生理学的に定説となっているヘッブ則(hebb's rule)とは必ずしも一致しない。このヘッブ則とは2つのニューロンが同時に活動したとき、それらに接続したニューロン間のシナプスが強められることである。ペトリ・ネットではこれをトークンとしてモデル化しようとしたと解釈もできるが、トークン自体が記憶機能を持つことから神経経路のモデルとは本質的に異なる。

生理学の観点からすると、シナプスにはドーパミン、ノルアドレナリン、セロトニン、アセチルコリンなどの神経伝達物質が複雑に絡みあって動作している。数学モデルで扱うグラフ理論でいえば、シナプスである線と線の接合部分に機能があり、また点に相当する神経細胞にも機能がある。

これからの神経経路動作、さらには記憶機能の解明には、より生理学的な側面から得られた成果を反映したモデル化が必要である。心理学の立場からすると神経経路の構築にかかわる学習等にも寄与するモデル化が今後の課題である。

## VII. 脳波について

脳波はヒトの知的活動によって変化する。脳波は周波数領域によって $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\theta$ 波、 $\delta$ 波に分

類され、それぞれについてこれまで多くの研究がなされている。脳波の異常による病理診断として医学的に利用されている。脳波が停止することで脳死の判定が行われている。

著者らが新たに開発したコーエン・クラスによる脳波時間周波数解析システム（古賀他，2005）を用い、記憶との関係について脳波の解析を進めているが、数多くの課題に直面しているのが実情である。

脳は神経細胞から構成されている。神経細胞内の情報伝達は、電気的なパルスによって行われる。神経細胞の静止状態では内外に $-90$  mV程の電位差があり、いわば電池となっている。細胞の外にはナトリウム・イオンが存在し、細胞内部にはカリウム・イオンがある。神経細胞の情報伝達には細胞外部のナトリウム・イオンが細胞内部にはいることで電位が上昇し、ピーク値は $+30$  mVになる。約 $0.5$  m秒後には神経細胞内のカリウム・イオンが細胞外に流失して元の電位にもどる。これらの動作により約 $1$  m秒の幅、 $100$  mVほどの電気パルス信号が形成されて神経細胞の軸索(axon)を伝搬する。神経細胞の刺激によって電気的パルスは複数個発生し、刺激の大きさは電気的パルスの数によってきまる。この電気パルス信号はヒトの皮膚から電気的な端子を接続して観測できる。脳波は脳神経細胞の中を伝搬する電気的パルス信号を観測することで得られる。

脳波の分類の中で $\alpha$ 波は $8$  Hzから $13$  Hzと定義されている。 $\alpha$ 波は、ヒトがリラックスした状態でよく発生する。座禅の瞑想において $\alpha$ 波が発生することも多数の心理学の研究論文（加藤，1999による論文紹介）がある。

脳波時間周波数解析システム KOMA 05では時間的な周波数変動が的確に観測できる特徴がある。このシステムによる観測によると $\alpha$ 波は周波数変動しないことがわかっている。このことから脳波の $\alpha$ 波について、次の様な仮説をたてることができる。

- (1) 電気的パルス発生のための充電動作，すなわち神経細胞内に流入した過剰なナトリウム・イオンを細胞外に排出し、カリウム・イオンを回収するとき $\alpha$ 波が発生する。
- (2) 神経伝達物質のセロトニンの合成にあたり $\alpha$ 波が発生する。セロトニンは脳全体に

分布しており、体外から吸収されたトリプトファンという物質からナトリウムを除去して合成される。除去されたナトリウムはイオンとして神経細胞外のシナプスに蓄えられる。神経の情報伝達にセロトニンが関わるとナトリウムを取り込んでセロトニンは分解される。

- (3) 工学分野での油圧制御装置に関する技術的手法のひとつに、高い油圧がかかっている状態でさらに振動を加えることで制御をなめらかにする手法がある。油圧に振動を加えることでピストンが動作するときの摩擦抵抗がなくなる。このことをディザー(dither ブルブル震えるという意味)方式とっている。ピストンが摩擦によって固着するために生じる過大な過渡応答を防ぐことができ、ピストンはスムーズに動作する。 $\alpha$ 波は、このディザーと同様な働きのために生じるとも解釈できる。すなわち脳の神経経路が速やかに活動することができるように、ディザーを起こさせて固着状態を常に開放しているとの仮説である。

上記の(3)に関連した事項について補足する。心臓の鼓動の周期を調べたことがある。ヒトの心臓の鼓動周期も一定のリズムで変化(和田，1997)している。これは心臓が運動に伴う負荷にいつでも対応できるためであるとの説がある。いわば心臓のディザー動作である。ヒトの活動には様々なディザーが存在すると考えられる。別の用語を用いればバイオリズムである。

脳波の $\beta$ 波については、よくわかっていない。これは $\beta$ 波が $\alpha$ 波にくらべると振幅が小さく、しかも短時間しか発生しないことにあると思われる。脳波時間周波数解析システム KOMA 05では、この様な特性を持つ $\beta$ 波の観測が容易にできるようになっている。現在すすめている $\beta$ 波の観測とその分析は、いまのところ事例が少ないため、確定的なことはいえないが、これまでよく知られている $\alpha$ 波が停止して $\beta$ 波が出現するという現象，すなわち $\alpha$ 波ブロッキングは意外に少なく、 $\alpha$ 波に伴って $\beta$ 波が出現する事象が多い。 $\alpha$ 波ブロッキングしか注目されていなかったのは、上記に述べたように $\alpha$ 波と $\beta$ 波が同時に出現する場合はこれまでの手法による観測は困難であったためと思われる。

$\beta$  波は継続時間がほぼ 300 m 秒程度を単位として、周波数も変動することが観測される。記憶の呼び出しとか作業記憶にあたり  $\beta$  波が顕著に出現することが観測されるので脳の記憶に関する知的活動にかかわることはほぼ間違いない。仮に 30 Hz の  $\beta$  波が 300 m 秒程度出現するものとするれば、10 波ほどの電気パルスが脳の神経細胞に伝搬していると推測できる。

現在の手法では  $\beta$  波が発生する脳内部の位置は特定できない。この  $\beta$  波発生位置の特定のための技術的な開発は今後の課題であり、知的活動がどのように脳内を伝搬するかわかるようになれば多くの知見がもたらされるものと期待される。

これまでのところ機械的な性能の限界から 60 Hz 程度を上限として脳波の観測をおこなっているが、神経細胞内の電気パルス幅が 1 m 秒であることから数百 Hz 程度の脳波も存在すると考えられる。測定装置の性能向上とともに今後の課題であろう。

### VIII. あとがき

ここでは神経経路に関する生理学とコンピュータ工学の成果を背景として、心理学の課題について評論を行った。コンピュータ工学は、ハードウェアである記憶装置の飛躍的な発展とその制御方式、すなわちソフトウェアの革命的な進歩に支えられて、さらに応用範囲を拡大しつつある。すでにコンピュータの機能は、ある側面では個体であるヒトの能力を凌駕している。

ヒトは生を受けてから、身体的な発達とともに知的成長が行われる。身体的な発達をハードウェアとすれば、知的な成長、すなわち知識の涵養、

知的能力の養成、社会生活の適応などソフトウェアがヒトの生命に多大なウェイトがある。心理学は、コンピュータ工学でいうソフトウェアにかかわるといえる。さらに生理学の研究成果と関連して心理学も飛躍的に進展するであろう。

本文は「神経科学にかかわる心理学」としたが、「生命科学に寄与する心理学」が心理学の今後の使命のひとつであると考えている。

### 文 献

- Longstaff, L. 2003 神経科学キーンノート シュプリンガー・フェアラーク 東京  
投石保広 2004 潜在記憶 臨床脳波 46(7) 177-182  
Knuth, D. E. 2004 The Art of Computer Programming Volume 1 Fundamental Algorithms Third Edition 日本語版, ASCII Addison Wesley Programming Series  
都倉信樹 1995 オートマトンと形式言語 昭晃堂  
富田真治・村上和彰 1988 計算機システム工学 昭晃堂  
服部嘉雄・小澤孝夫 1974 クラフ理論解説 昭晃堂  
Peterson, J. L. 1984 ベトリネット入門 共立出版  
栗田多喜夫 2001 パターン認識とニューラルネットワーク, 脳神経情報研究部門, 産業技術総合研究所 <http://www.neurosci.aist.go.jp/~kurita/lecture/prnn/>  
古賀義亮・軽部幸浩・谷口泰富 2005 脳波の時間周波数解析システムの開発とその解析結果 駒沢大学心理学論集, 7, 17-24  
加藤博己 1999 禅心理学の成立 駒沢大学心理学論集, 1, 99-105  
和田孝雄 1997 生体のゆらぎとリズム 講談社サイエンティフィク