

講演



自然知能と人工知能†

木村 正行†

科学は認識の一形態であって、その本性はモデル化にある。今日の科学を創造してきた人間の脳は、まさに驚異的なモデル化の能力を備えている。厳密な定義は別として、その能力を人間の知能と呼ぶことにしよう。近年、このような人間の知能を実証的立場からモデル化しようとする学問が台頭しつつある。これはかつてない科学の挑戦であろう。この学問に対する認識を深める一つの手掛かりとなればという期待をこめて、まず自然知能とは何かを考え、それを基にして人工知能への道を模索していきたい。

1. は し が き

あらゆる生物は環境との相互作用を通じて、より有利に生きのびるための情報処理システムとして、その組織形態を造り上げてきたということができよう。そこに自然知能の本質が隠されていると思われる。人間もその延長線上にあることはたしかであり、人間の知能を自然知能の頂点に位置付けることができる。人工知能は自然知能のさまざまな働きをモデル化しようとする学問分野の一つであって、コンピュータはその有力な新たな道具である。

大脳とコンピュータ 人間の大脳とコンピュータに共通していることは、両者とも情報処理システムとみることができるということである。コンピュータはソフトウェアによってさまざまな情報処理を行うことができる。人間の大脳では、ソフトウェアに対応するものが遺伝情報と知識であろう。これらは、生物学的ソフトウェアといえるかも知れない。遺伝情報は進化の過程において遺伝子のレベルで創成された先天的ソフトウェアであり、世代を超えて伝達される。知識は神経網

のレベルで学習と自己組織によって造り上げられた後天的なソフトウェアであって個体に固有なものである。両者とも知能の重要な因子であることは間違いない。

知能の源・進化 知能の本質はまだよく分かっていない。そこで、知能のモデル化を考えるまえに、原点に立ち帰って自然知能の源を探ってみよう。そのためには、30 数億年前の生命の誕生にまで遡らなくてはならない。なぜならば、生命は最初から遺伝物質上に表現された遺伝情報をもって生まれてきたからである。まさに、「はじめに言（ことば）ありき」であって、遺伝情報は4種の塩基の配列で表現された言葉である。そこには生命の営みの基になる設計図ともいえるものが書かれている。このように、情報の表現が生命の誕生以前に存在していたことは驚異であり、不可思議の一語に尽きる。知能の源はこのような言葉（言語記号システム）を与えた仕組みにあるのではなからうか。いうなれば、この4種の塩基の配列が30 数億年にわたる壮大な進化のドラマを演出し、人類の成立という最大の知的革命をもたらしたといえよう。

生物の成立を時間尺度でみると図-1 のようになる。ここで注目されるのは、最初の生命である最も単純な前核生物あるいは原核生物と呼ばれる単細胞生物（エオバクテリアなど）から真核生物と呼ばれる単細胞生物に進化するのに約 16 億年という想像を絶する年月を要していることである。

両者の構造上での大きな違いは次のようである。DNA と呼ばれる遺伝物質は細胞の大きさの約千倍もの長さをもつといわれるが、前者では、遺伝物質の DNA が長い2重らせんのヒモのままで細胞質の中に放置されている。後者では、DNA が膜で隔離された核の中に染色体に分割されて格納されている。このことは、約 16 億年の間に DNA の複製など、遺伝子レベルにおける膨大な

† 情報処理学会第 41 回全国大会招待講演（平成 2 年 9 月 4 日）

場所 東北大学

†† 東北大学

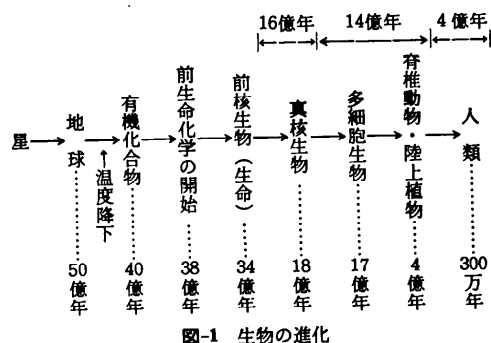


図-1 生物の進化

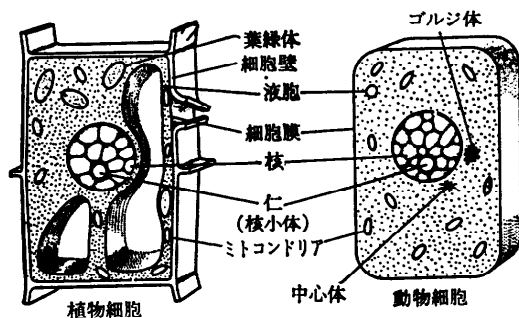


図-2 光学顕微鏡で見た細胞の模式図
NHK 高等学校講座生物 (平成元年4月-平成2年3月)
より転載

情報処理の効率化と高精度化の面で飛躍的發展を実現し、高等な生物への進化を可能にしたとみることができよう。より想像をたくましくするならば、すべての高等な生物を生成できる万能機能素子としての真核生物、つまり細胞を造り上げるのに、16 億年の大半を必要としたといえるのではなからうか。多細胞生物は、その細胞が単細胞時代の真核生物と基本的に同じ構造をしているので、動物でも植物でもやはり真核生物と呼ばれる(図-2)。ちなみに、単細胞の真核生物から脊椎動物に進化するのに要した時間は 14 億年であって、16 億年より短い。

真核生物の発生から 1 億年後には多細胞生物が発生している。この段階で、遺伝情報は遺伝子レベルの情報処理を補完するための神経システムを構築し、多細胞生物の環境への適応を計っている。神経システムは遺伝子レベルの情報処理とは独立に機能するものとみることができ、神経細胞としての機能発現や神経システムとしての基本構造などは、当然、遺伝情報に埋め込まれているのである。

2. 遺伝子レベルの情報処理の概要

遺伝子レベルの情報処理とそれともなう生化学反応のごく概略を図-3 に示す。それは生きている万能機能素子としての細胞の中で行われている生命活動である。

まず分子レベルでみると、DNA と RNA はいわば情報分子であって、細胞の構成成分の生産と代謝に必要な情報を担っている。これに対してもろもろのタンパク質は機能分子であり、生産と代謝の基礎となる数千もの化学反応の一つ一つについて、その反応を調節する酵素としての働きを担っている。ただし、RNA 自体も酵素としての働きをもつことが最近明らかになりつつある。このため、生命の起源の初期には、DNA もタンパク質もなく、RNA が遺伝情報の保持と発現の制御、触媒機能の 3 役を果たしていた“RNA ワールド”の時代があったのではないかと想像する研究者が増えてきている。

また、DNA 上の塩基の全配列は機能上の単位となる多くの部分配列からなっている。そのおのおのは広い意味で遺伝子と呼ばれる。狭い意味で、通常、遺伝子と呼ばれているのはタンパク質の暗号を指定する構造遺伝子のことである。すべての構造遺伝子の塩基配列は全配列の数%にすぎない。広い意味での遺伝子には、遺伝子の機能発現を調整する調節遺伝子が含まれる。調節遺伝子の全貌はまだよく分かっておらず、その解明は分子遺伝学の最重要課題の一つである。

DNA 複製の精度 すべての生命の存続には、遺伝情報の正確な伝達が不可欠である。わずかな誤りも生命を危うくする可能性がある。しかし、

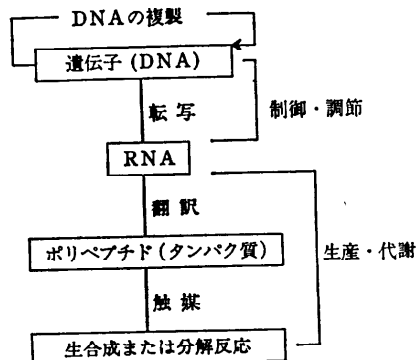
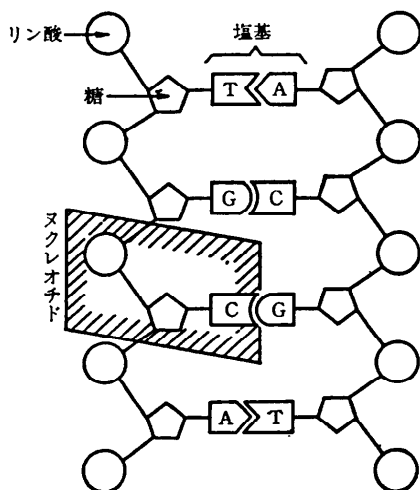


図-3 細胞内の生命活動

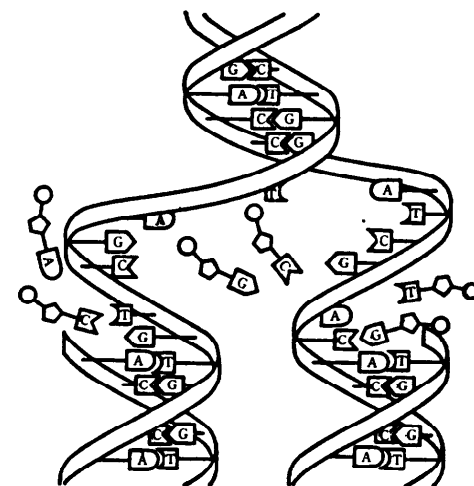
誤りがすべて破滅的な結果を与えるわけではなく、まったく影響を及ぼさないものもあり、また有益な結果をもたらすものさえある。とは言え、ほとんどすべての遺伝情報は正確に伝達されなくてはならない。

人間のような複雑な生物では、遺伝情報の伝達には途方もない正確さが要求される。人の遺伝情報は約 30 億個の塩基対の配列で表されている。いまかりに誤りが 100 万個の塩基対につき 1 個だとしても、1 回の複製ごとに 3,000 個の誤りが生じる。1 個の受精卵から人が完成するまでに約 1,000 兆回の複製が必要ということなので、この程度の誤り率では人類は存続できないだろう。実は、複製は誤りが 100 億個に 1 個程度という驚異的な正確さを維持しているのである。

DNA は図-4(a)に示すとおり、4 種の塩基のいずれか一つと糖 (dR) とリン酸 (P) からなるヌクレオチドという物質が多数結合した、2 重らせんと呼ばれる鎖状の分子構造をしている。DNA の複製は 2 重らせんの一部が分岐して二つの 1 本鎖になり、それぞれが新たな DNA 鎖を合成するための鋳型として働く (図-4(b))。DNA 上では、4 種の塩基のうち、アデニン (A) とチミン (T)、グアニン (G) とシトシン (C) が、それぞれ相互に鋳型となる相補的な塩基対をなし、それらが 2 重らせんの背骨を形成するリン酸と糖からなる 2 本の鎖をつなぐ梯子段のような形態で配列されている。



(a) DNA の分子構造



(b) DNA の複製

図-4 DNA の分子構造と DNA の複製

NHK 高等学校講座 生物 (平成元年 4 月-平成 2 年 3 月) より転載

複製の正確さは 3 種類の酵素反応系によって維持されている。

第 1 の系では、選ばれた塩基が相手の鋳型と相補的となるときにエネルギー的に最も安定な結合が得られる。相補的でない場合には反応は逆に進み、そのヌクレオチドは再び解離する。このような仕組みでエラーが回避されるが、この段階ではエラーは約 10 万塩基対に 1 個程度になる。

第 2 の系では、非相補的なヌクレオチドの取り込みというエラーが起こると、それは次のヌクレオチドの取り込みの大きな障害となり、DNA の合成がわずかの時間休止状態となる。すると、この休止の間に、ヌクレオチドを取り除く酵素が働いて誤って取り込まれた非相補的なヌクレオチドを除去し、再び DNA 合成反応が行われる。このような校正過程が終了した段階では、エラーは約 1,000 万塩基対に 1 個程度となる。

これらのエラー回避機構における酵素反応は、エネルギー的に安定な方向に進行するというだけの比較的単純な反応である。これに比べると第 3 の系で行われるミスマッチ修復機構はかなり複雑である。修復機構の存在が提唱されたのは約 25 年前で、長い間この機構の解明が行われ、現在では、かなりよく分かっている。ミスマッチ修復機構というのは、DNA 鎖が合成された後に行われるエラーの訂正機構のことで、図-5 に示すような二つのモデルが提案されている。

図の左側のモデルについて説明しよう。まず

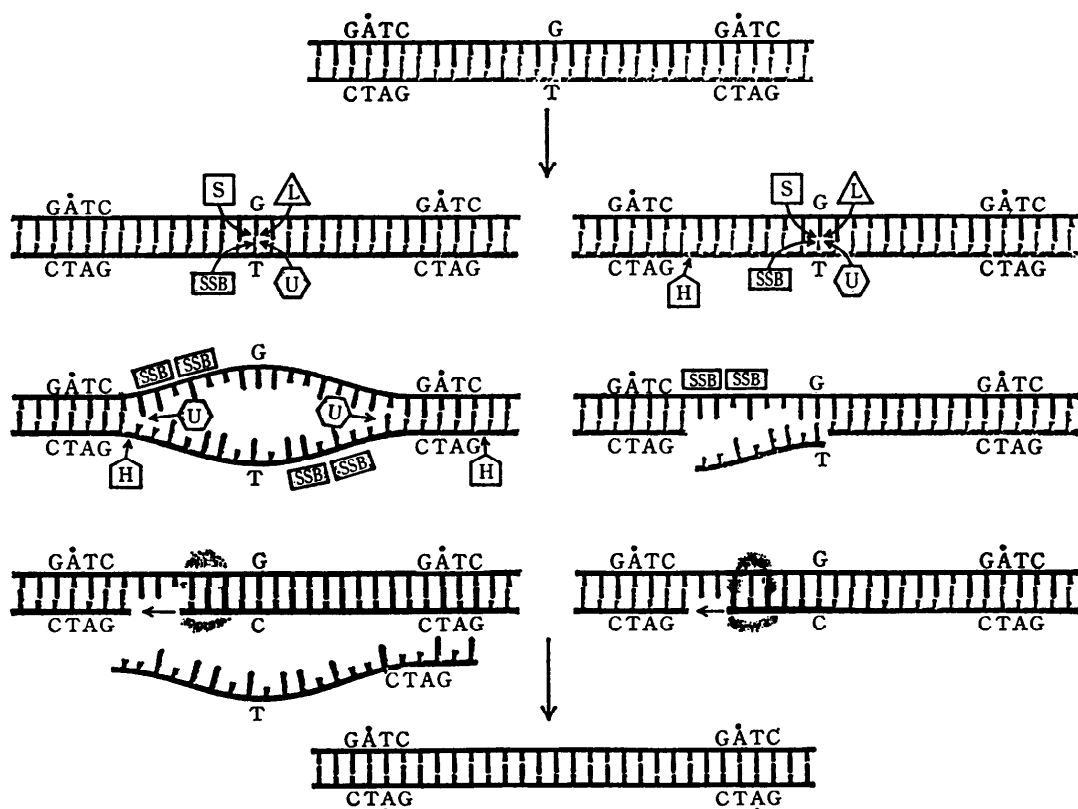


図-5 DNA複製におけるミスマッチ修復機構

(日経サイエンス社 別刷サイエンス 遺伝子の発現と制御 (1990年5月) より転載)

2種類のタンパク質SとLが組になってミスマッチ部分に結合する。すると、別のタンパク質Uがミスマッチを含むある定められた区間を1本鎖に分離する。分離された1本鎖にはさらに別のタンパク質SSBが結合してそれぞれを安定に保持する。そして、タンパク質Hが新しく造られた下側の1本鎖DNAをある区間にわたって切除する。そして、改めてその部分の合成が行われる。この過程が終了するとエラーは約100億塩基対に1個程度という驚異的な精度になる。しかし、1本鎖が切除される範囲などについてはいまだ問題が残されていて、図-5の右側と左側のいずれが正しいのかこれまでの資料では未定である。

転写・翻訳 転写は次のようになる(図-6、-7参照)。RNA合成酵素(RNAポリメラーゼ)によって、塩基対がほどこたDNAの1本鎖を鋳型としてメッセンジャRNA(mRNA)が合成され遺伝情報の転写が行われる。この際、mRNA

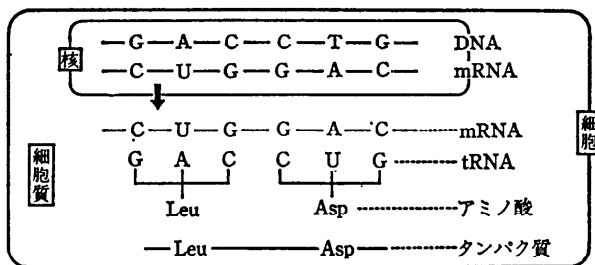


図-6 転写・翻訳の図式

NHK 高等学校講座 生物 (平成元年4月-平成2年3月) より転載

ではチミン(T)の代わりにウラシル(U)がアデニン(A)と相補的に結合する塩基として用いられる(図-6)。

ところで、真核生物のDNAでは遺伝子、つまり遺伝暗号をもつ塩基配列(エクソン)が、遺伝暗号をもたない塩基配列(イントロン)によって寸断されていることが最近明らかになっている(図-7)。それをそのまま転写したものはmRNA前駆体と呼ばれ、それからイントロン部分を削除

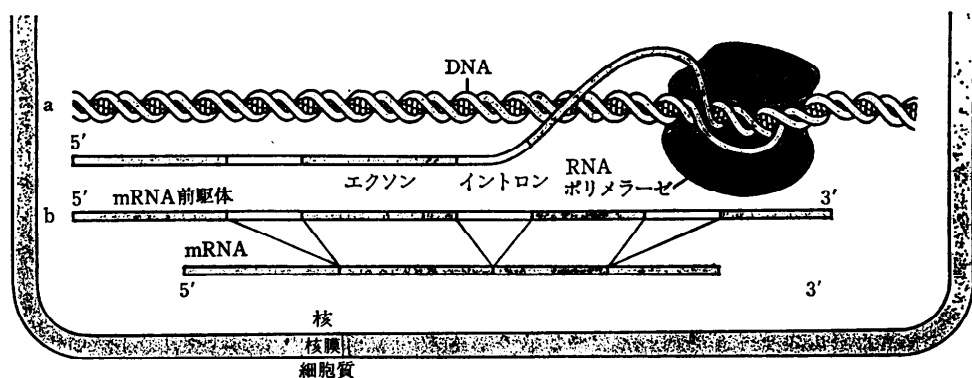


図-7 mRNA の転写と編集
(日経サイエンス社 別刷サイエンス 遺伝子の発現と制御 (1990年5月) より転載)

してエクソン部分のみをつなぎ合わせた mRNA が作られる。このような編集過程(スプライシング)は細胞の核の中で行われる。そして、スプライシングを経たものだけが核の膜を通過することができる。一方、原核生物、少なくとも現在研究の進んでいる大腸菌では、スプライシングが起こらないという事実が分かっている。

どんなタンパク質を作るかは構造遺伝子の塩基配列(遺伝暗号)で指定されている。この情報を転写し細胞質中のリボソームにおいて、タンパク質合成の鋳型となるのが mRNA である。リボソームはリボソーム RNA (rRNA) とタンパク質からなる微小な粒子で、いわばタンパク質の合成工場である(図-8)。mRNA の暗号領域の相続く三つの塩基配列はコドンと呼ばれる。コドンは 20 種類のアミノ酸の一つ、あるいは終止符のいずれかに対応する。しかし、異なるコドンの数は、 $4 \times 4 \times 4 = 64$ あるので、一般に複数のコドンが同一のアミノ酸あるいは終止符に対応している。たとえば、UUA, UUG, CUU, CUC, CUA, CUG の 6 種類のコドンはアミノ酸ロイシンに対応する。また、UAA, UAG, UGA はいずれも終止符に対応する。

コドンに対応するアミノ酸を運んでくるのは、アンチコドンと呼ばれる塩基配列をもつトランスフェ RNA (tRNA) である。ここで、アンチコドンとは、コドンと相補的な塩基の配列であって、たとえば、コドン UUA に対するアンチコ

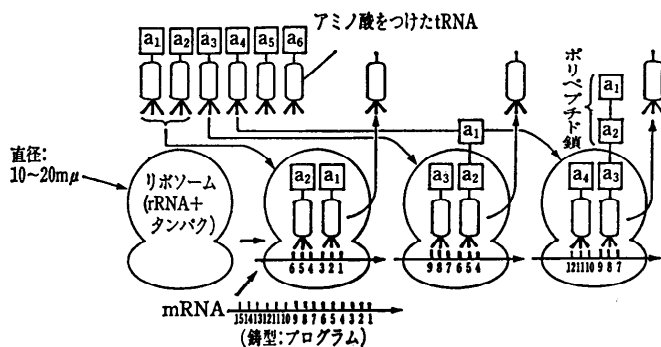


図-8 翻訳過程 (タンパク質の合成)
平凡社 世界大百科事典 2 (1974 年版) より転載

ンは AAU であり、CUG に対するそれは GAC である。

tRNA は 80 個前後の塩基の配列で構成されている RNA である。その頭の部分にコドンに対応するアンチコドンとしての 3 個の塩基が配列されている。また、その尾の部分の塩基配列は CCA で、すべての tRNA に共通しており、最後の A のところに対応するアミノ酸をくっつけて運ぶ。このように mRNA を鋳型にして、リボソームにおいてアミノ酸がペプチド結合してできたポリペプチド鎖つまりタンパク質が合成される。このようにして、mRNA の暗号領域がタンパク質に翻訳される(図-8)。終止符はアミノ酸の鎖の合成がそこで終わることを意味する。

重要なことは遺伝暗号は、すべての生物で基本的には同じだということである。つまり、遺伝子のレベルではカビも人も同類なので、人の遺伝子を一つ取り出してくれば、その遺伝子とカビの遺

伝子とのあいの子の遺伝子を作ることができる。それをカビに入れてやれば、カビは増殖によってそのコピーをいくらかでも作ることができる。このことが分子生物学の発展に大きな役割を果たしてきたことはいうまでもない。

遺伝子スイッチ DNA の2重らせん構造の発見を契機として、怒濤の進撃を続けてきた分子生物学は、「遺伝情報は基本的にはどのように発現するのか」という段階から、たとえばオタマジャクシが蛙になるときのように、「遺伝子発現はどの

ように調節されているのか」の段階に移りつつある。そして、生物が示す合目的制御過程も核酸 (DNA や RNA) とタンパク質との必然的な相互作用として捉えられ、物理化学的原理に基づいて解明される時代へと向かっている。そこで、遺伝子レベルの情報処理の最後に遺伝子発現の制御・調節の1例を紹介しておく。

ラムダ・ウィルスの DNA 分子は約 45,000 塩基対からなっていて、35~40 個の遺伝子を含んでいる。このウィルスは大腸菌に感染すると、休眠状態のウィルスとなる溶源化と呼ばれる過程と、ウィルスが増殖して細胞が破裂する溶菌と呼ばれる過程のいずれかをたどる (図-9)。そのどちらになるかを決めるスイッチがウィルス DNA のライトオペレータ (O_R) という領域にある (図-10)。その両側にはそれぞれリプレッサと *cro* と呼ばれる2種類の調節タンパク質の遺伝子が並んでいる。休眠の状態では、リプレッサ遺伝子がオンに、*cro* 遺伝子がオフになる。増殖の初期には逆にリプレッサ遺伝子がオフ、*cro* 遺伝子がオンになる。オン状態では遺伝子の転写が行われる。

ところで、環境が一時的に変わった結果、細菌に感染したウィルスが増殖を始める現象を誘導という。誘導を起こす因子としては紫外線照射のほかにもある種の物質などいろいろあるが、すべての因子に共通する点はこの因子も DNA を破壊し、そのため宿主細胞の生存を脅かすものということである。要するに、誘導現象はウィルスが死にかけた宿主細胞から避難脱出する仕組みであるといえよう。そうだとすると無生物と生物の中間的存在としてのウィルスにさえも生きのびの原理が働いているとも考えられるのである。

さて、遺伝子スイッチのメカニズムは次のようになっている。スイッチの領域 O_R は、それぞれ 17 塩基対からなる O_R3 , O_R2 , O_R1 の三つの領域に分かれている。まず、これら三つの領域とリ

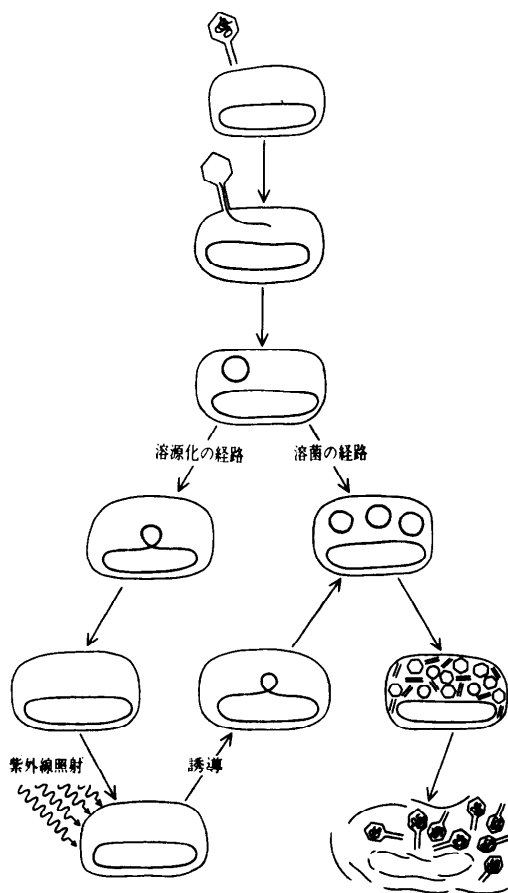


図-9 ラムダ・ウィルスの大腸菌への感染
(日経サイエンス社 別刷サイエンス 遺伝子の発現と制御 (1990年5月) より転載)

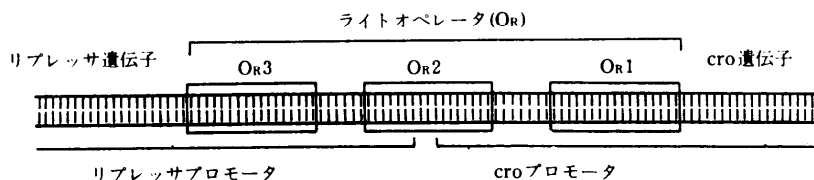


図-10 ラムダ・ウィルスの分子スイッチ
(日経サイエンス社 別刷サイエンス 遺伝子の発現と制御 (1990年5月) より転載)

プレッサ及び cro と呼ばれる 2 種類のタンパク質との相互作用について説明しよう。ここでいうリプレッサは 236 個のアミノ酸からなっていて、図式的に表すと図-11(a) のようになるが、より単純化すると、(b)~(c) のようになる。ただし、(b)、(c)、は二量体分子を表す。二量体分子は O_R1 , O_R2 の順に結合しやすく、 O_R3 とは結合しない。一方、図の(d)に示す cro 二量体分子は O_R3 に最も強く結合し、 O_R1 と O_R2 にも結合する。

溶源化の過程が選ばれるのは、リプレッサ二量体が O_R1 に結合している場合である(図-12(a))。その場合には、リプレッサの協調性によって O_R2 にもただちに別のリプレッサ二量体が結合するようになる。その結果、RNA 合成酵素 (RNA ポリメラーゼ) が cro プロモータと呼ばれる領域と結合して起こる cro 遺伝子の転写開始(図-12(c)) が妨害されることになる。一方、 O_R2 に結合したリプレッサ二量体は RNA 合成酵素とリプレッサプロモータとの結合を促進し、さらに転写が進行して多くのリプレッサが合成され、溶源化の状態を維持することになる。

ところで、紫外線照射によって DNA が損傷を受けると細胞内のある種のタンパク質が変身してリプレッサ単量体を破壊するようになる(図-12(b))。すると、休眠状態のウィルスは誘導を受ける。すなわち、リプレッサの遊離単量体、遊離二量体、結合二量体の平衡関係が単量体の破壊によって、結合二量体がオペレータ部位 (O_R1 , O_R2) から離れる方向(図の長い矢印の方向)へ反応が進み、

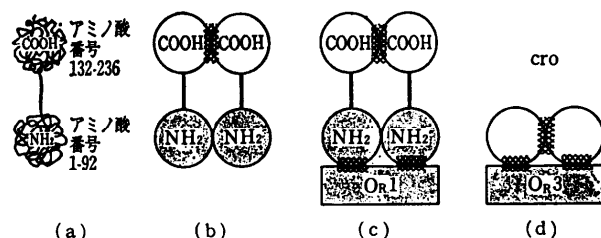


図-11 ラムダ・リプレッサ

(日経サイエンス社 別刷サイエンス 遺伝子の発現と制御 (1990年5月) より転載)

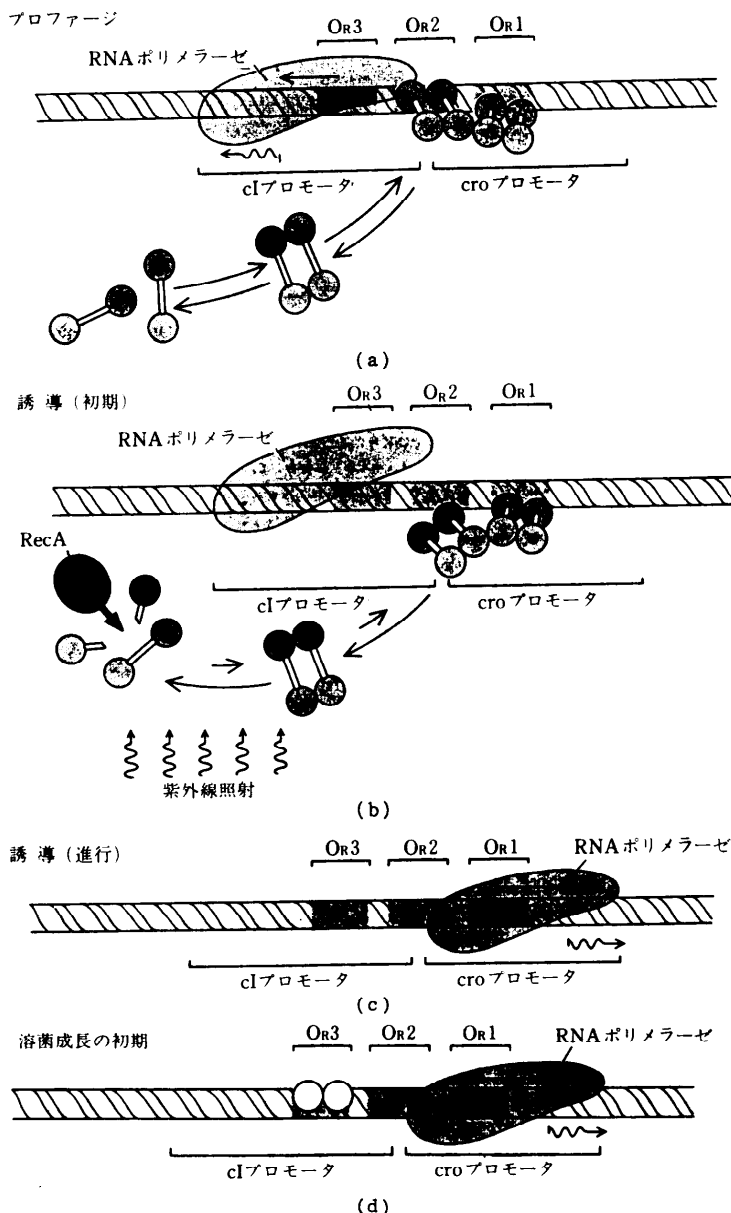


図-12 スイッチの立体構造

(日経サイエンス社 別刷サイエンス 遺伝子の発現と制御 (1990年5月) より転載)

RNA 合成酵素はもはやリプレッサプロモータに結合できなくなり、リプレッサの合成はとまる。その結果、 $O_R 1$, $O_R 2$ にはリプレッサ二量体が存在しない状態となるので、RNA 合成酵素は *cro* プロモータに結合し、*cro* 遺伝子の転写を開始し(図-12(c))、ウィルスの増殖が開始されて溶菌の過程をたどる(図-12(d))。このように、ラムダ・ウィルスの遺伝子スイッチは、リプレッサと *cro* の2種類のタンパク質と核酸(DNA, RNA)との相互作用として理解される。

以上、遺伝子レベルにおける膨大な情報処理のごくごく1部分を紹介した。

3. 神経システムにおける情報処理の概要

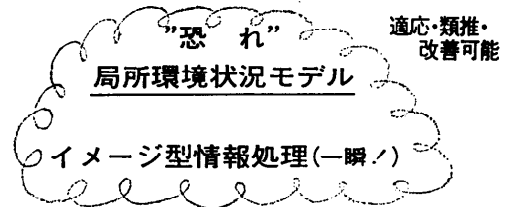
次に人類の成立以後の神経システムにおける情報処理について考えてみよう。進化の過程において、大脳が異常な発達を遂げ、猿から分かれて人類の成立という奇跡をもたらした。それは進化における最大の知的革命である。ここでは、人類が言語を使う以前と以後に分けて認知科学的知見(特に文献 3))を基にして、神経システムについて考察しよう。

感情システム 言語を使う以前では、人類は野生の自然界で他の動物と生存競争をしていた。そのころは生命が危険にさらされる緊急事態が頻繁に発生していたと想像される。そんな状況の中で、生きのびるための戦略として機能したのが感情システムである。

感情は人間の独占物ではなく、「恐れ」とか「怒り」などの基本的感情は他の多くの動物にも備わっていて、進化の木を相当に遡ることができる。たとえば、「窮鼠猫を噛む」という諺があるが、獣も、鳥も、魚も追いつめられると強行突破をはかるのが常である。これは人間を含む多くの動物に共通する生きのびの戦略であり、その基本構造は遺伝情報に埋め込まれていなくてはならない。

さらに、認知科学的考察によれば、感情システムは遺伝的に基本構造が決定された状況別問題解決プログラム、言い換えれば、状況別問題解決モデルからなっていると言える(図-13)。たとえば、自分より強い敵が現れると、「恐れ」というプログラムが起動される。そして、敵に出合ったときの状況、追いつめられたときの状況などに応じて、状況別問題解決モデルが起動される。しか

(遺伝的に基本構造が決定された状況別問題解決プログラム)



イメージ自身が変容ルールを内蔵
→意図的制御困難→現実世界を超えた情報処理に不向き

図-13 感情システム

もそれらは緊急事態に対処するものであるから、一瞬のうちに完結するものでなくてはならない。また、感情システムは、時々刻々の状況を表現する知覚、つまりイメージを素材とする情報処理(以後、イメージ型情報処理と呼ぶ)を行っている。これは人間を含む動物に共通する情報処理の基本形式である。

感情システムはさまざまな環境状況の中で、生きのびるための戦略として有効に機能してきたがゆえに進化・発達してきたと考えることができる。したがって、それは異なる状況に対する適応や類推の機能、状況の変化を予測する機能などをそなえ、かつ経験や学習によって改善可能な柔軟な構造をもつなど、知的情報処理システムとしての要素を相当に備えているといえる。

しかし、「たとえば、眠っている猛獣に石を投げつけたと想像してみよう。するとその猛獣は起き上がって牙をむいて突進してくるイメージに変わる。」といったぐあいに、感情システムは基本的にはイメージ自体が形を変えるための自己変容のルールを内蔵していて、その適用によって情報処理が進行すると考えられる。したがって、意図的制御が困難であり、かつイメージ自体を情報処理の素材としているので現実世界を超えた情報処理には不向きである、という欠点がある。しかしながら、現代社会においても感情的要素が判断や決定の重要な鍵となり、理性や論理的判断を圧倒する場合が少なくない。感情システムは今日でもなお生きのびるための有用な戦略として機能しているのである。

言語革命 ところで、人類は「むれ」をつくらせて、相互に扶け合うことを生きのびの主要な手段としてきた。そのために、情報通信手段としての音声的言語記号システムの発達をみたのではな

いかと考えられている。言語の使用によって、仲間同士の協力作業の効率が上がったことは言うまでもない。その結果として、他の動物に対する人類の優位が確立され、頻発する緊急事態とそれとともなう強力な感情支配から解放されて自由な思考を試みる事が可能になったと思われる。

一方、言語の発達は、個々の人間の内的情報処理のためにもきわめて有効な手段として機能したと考えられる。すなわち、イメージ的概念に言語記号が連合することによって、イメージの自己変容の働きを概念として独立させ、それらを整理統合することによってイメージ的概念の世界に安定した蓄積を可能とする秩序をもたらしたと考えられる。また、その結果としてイメージの情報処理の飛躍的効率化が計られたと考えることができよう(図-14)。

さらに、言語を媒体とすることによって、現実世界を超えた自由な思考が試みられるようになり、抽象概念の成立を可能にしたのではないかと考えられる。また、言語による表現には大きな自由度がある代わりに、矛盾した表現を避けるための論理的な判断や検証が必然的に要求されることになる。このことは論理的思考の展開に大きな役割を果たしたものと考えることができる。かくして、人類は言語の使用を契機として、情報の伝達と思考の様式に一大変革をもたらし、今日の文化と文明の基礎を築いたといえよう。

左右脳の機能分化 さて、以上に述べたような大脳の働きにみられる進化の蓄積が大脳それ自体の構造と機能にどのように反映されているのだろうか。これについては、1974年にスペリーが明らかにした左右脳の機能分化が重要な手がかりとなる。すなわち、意識にのぼることや意思の発現

は言語中枢のある左脳で行われ、右脳でやることは意識にのぼらない。また左脳は言語や計算などの論理的解析の情報処理を得意とする。これに対し、右脳は空間の情報処理、包括的理解、非言語的発想などに優れている(図-15)。両者の連係は脳梁を通る約2億本の神経繊維によって行われるが、この連係の仕組みの中に知能の本質に係わる思考や創造などのメカニズムの秘密が隠されているように思われる。

このような左右脳の機能分化を基にして、たとえば次のように想像してみよう。すなわち、右脳が非言語的発想によって問題解決のアイディアを出す。左脳はそれについて論理的解析的に検証を行いその非を指摘すると、右脳は苦悩しながら新たなアイディアを追求する。そして、それをまた左脳に返す。このようなやり取りの中で、両者はあるときには激しく対立しあるときには意気投合して、果てしない思考のドラマが展開される。

このような想像が成り立つとすると、右脳はその背景となるイメージの世界をはじめ知識や概念などのイメージに深く係わる世界を扱うことになり、イメージ型の情報処理を高速に実行することになる。一方、左脳は解析・検証や複雑な論理的判断などの世界を扱うので論理型の情報処理を実

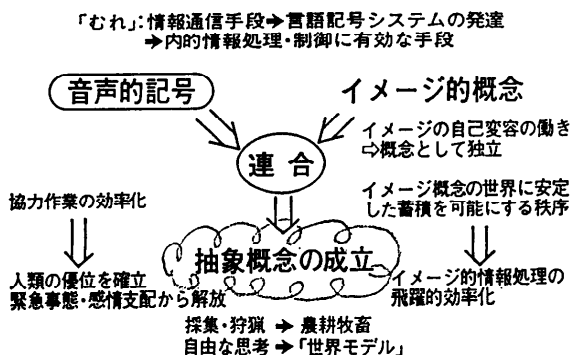


図-14 言語革命

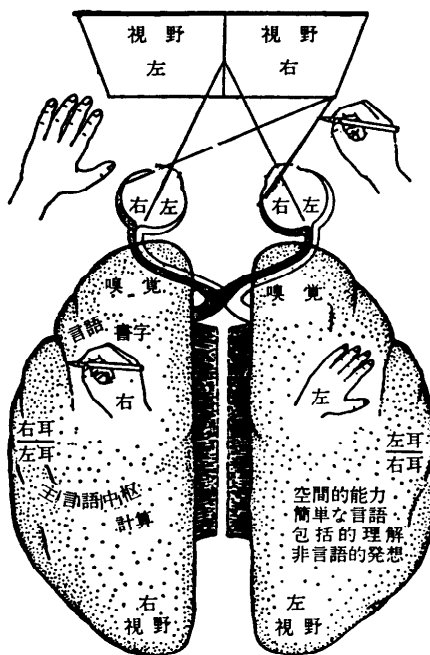


図-15 左右離断脳の働き
伊藤正男著「脳の設計図」(中央公論社)より転載

行することになる。

たとえば、言語理解においても、“知識や意味・概念のレベルでは、高速なイメージ型の情報処理を得意とする右脳が主役であって、文脈の流れや論理性のレベルでは左脳が主役になる。”というような左右脳の相互補完的関係を介して、言語理解が進行するのではないかと想像される。

具体的な神経システムの例 さて、以上に概観したように神経システムでは、左右脳の関係を基にして思考や創造などの超高度な情報処理が行われている。しかし、その具体的なメカニズムについては、基本的にはほとんど未知であるといっても過言ではない。しかし、動物実験のレベルでは、大脳のさらに詳しい構造とその各部位における機能分担や相互関係などについての解明が着実に進展している。ここでは、生体の一大特色であるイメージ型情報処理システムのごく簡単な例を紹介しよう。

コーモリの聴覚野 ヒゲコーモリは 60 キロヘルツ (kHz) の超音波を口から発射し、返ってくるこだま (反射波) に耳を傾けながら森や林の中を飛び廻り、ショウジョウバエなどの獲物を 1 秒間に 2 匹も捕らえるなどの早業を演じる。それはわずか 5 グラムにも満たない真珠色をしたコーモリの大脳の 1 部である生物ソーナー系で行われている (図-16)。図から分かるように、黒丸で示す中心には 60 kHz に鋭敏に反応する神経細胞 (以下単に細胞という) が表面から内部に向けて微細な柱状の領域に密に詰まっている。それを囲むほぼ同心円の曲線上には同じ周波数に鋭敏に反応する細胞が、また点線で示す放射線上には同じ強さの音に鋭敏に反応する細胞が、それぞれ、柱状の領域に密に詰まっている。したがって、62 kHz の同心円と音の強さが 50 デシベル (db) の放射線

の交点にある細胞は 62 kHz で 50 db の強さをもつ音に鋭敏に反応することになる。同心円は中心に近づくほど密になり、中心付近における相隣る同心円の周波数の差は 200 Hz 程度となる。

このソーナー系では、コーモリが口から発射した超音波の周波数とそれが標的 (獲物など) から反射して返ってくる際の周波数との差で標的との相対速度を測っている。また、反射波の強さで標的の立体角の大きさを、左右の耳から入る時間差で標的の方向を検出することができる。さらに、標的の羽の運動などで反射波が変調されている様子はソーナー系の反応パターンに反映されるので、その反応パターンを理解することで標的が何であるかを認識する能力を備えている。この系とは別に、標的との距離を測る専用の神経回路網が存在することも分かっている。

図-16 から分かるように、このソーナー系は 60 kHz 以上の反射波のみを受信できるようになっている。つまり、標的がコーモリより速い速度で遠ざかるときには、それから返ってくる音の周波数は 60 kHz より低くなるので、コーモリはまったく反応しないことになる。また、コーモリは、発射する音の周波数を下げて反射波が中心付近の精度の高い領域にくるように調節している。このようにして、コーモリは聴覚のみを頼りにして自由自在に飛び廻っているのである。

小脳 イメージ型情報処理のもう一つの例として、小脳について紹介しよう。人や動物が運動する場合、操縦者は大脳である。動力系は多くの筋肉とそれを支配する脳幹・脊髄の反射系であって、小脳は反射系を巧みに操り体の各部の動きを有機的に協調させる自動制御装置である。大脳と動力系だけでは、人間は普通に歩くことすらおぼつかない。人間は小脳の働きでほとんど無意識のうちにもごく自然な挙動をする。

ところで、このような動きをする小脳は約 150 億もの神経細胞からできている。その構造はどこをとっても驚くほど一様である。それはあたかも結晶のように美しい (図-17)。細胞の配列が規則正しいので、小脳全体を同じような動きを分担する 6 個の帯状の帯域に分けることができる。さらに各帯域は長さ約 3 ミリメートルで幅が約数百ミクロン、面積で約 1 平方ミリメートルの微小帯域に分けられる。各微小帯域はそれぞれ異なる運動

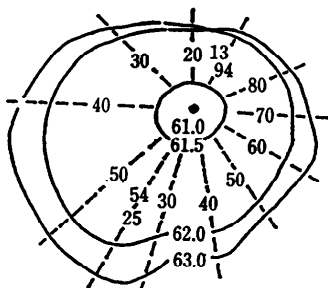


図-16 コーモリの聴覚野 (生物ソーナー系: 実線: kHz, 破線: db)

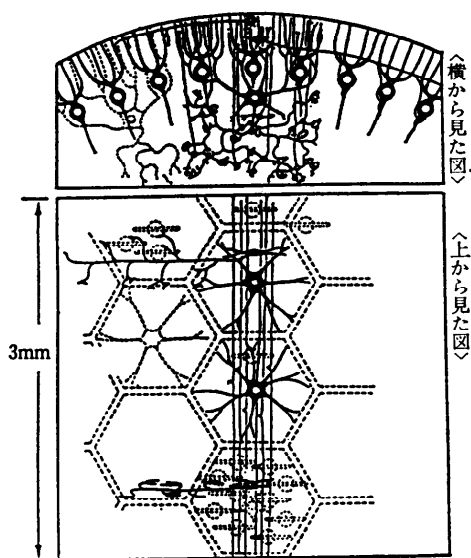


図-17 小脳皮質の神経システム
伊藤正男著「脳の設計図」(中央公論社)より転載

の制御を分担している。しかし、それらの微小帯域は、すべて同じタイプの制御用バイオコンピュータともいうべきものであって、500個のプルキンエ細胞(大型)、50個のゴルジ細胞(大型)、600個のバスケット細胞(中型)、600個以上の浅層星状細胞、及び約50万個以上の顆粒細胞(小型)で構成されている。

したがって、人の小脳は、約三万個と推定される微小帯域と、皮質下にある小脳核、前庭核、下オリブ及び橋核と呼ばれる各細胞群から構成されている。情報処理機械としてみると、小脳は三万個に及ぶ機能素子としてのバイオコンピュータを高密度に集積した巨大な制御用複合コンピュータであって、ごく自然で調和のとれた人の挙動を演出しているのである。

4. 人工知能の課題

人工知能は知能のモデル化を志向する学問分野の重要な柱の一つである。この分野で当面する最大の課題は知識表現の問題であろう。概念と知識が密接に関連することは言うまでもない。大脳の働きからみると、主としてイメージの世界ないしイメージ的概念の世界を扱っていると想定される右脳のモデル化は、知識表現の問題と深い係わりがあるように思われる。左右脳の連係のモデル化も含めて、これらの問題に対する認識を十分深め

ることが基本的であって、モデル化はそのうえで行ふべきであると考え。より基本的には、部分と全体との関係を効率よく表現し、その関係を瞬時に把握できる仕組みをモデル化することが、一つの手がかりになるのではないかと考えている。

文字や音声などの知覚の対象となるものを認識する場合にも、また言語の理解においても、構成要素としての各部分が意味するものと全体が意味するものとの関係を把握することが本質的である。しかし、そのためには対象全体に関する知識や概念の導入が不可欠となってくる。今後は、このことをパターン認識の立場から十分突き詰めて考えてみたいと思っている。

次の研究開発は、その前段階として位置づけられるもので知能のモデル化の第一歩としての試みである。

知的認識システムの研究開発 この研究は文部省科学研究費補助金による特別推進研究(研究代表者: 東北大学教授 木村正行 研究分担者: 東北大学助教授 阿曾弘具, 九州工業大学教授 江島俊朗)で行ってきたものである(昭和63~平成2年度)。

本システムの特色 その特色は次のとおりである。

①文字や音声などの大まかな特徴(統計的特徴量)を一時のうちに把握する右脳的働きをもつイメージ型情報処理システムを開発して、大量の情報処理をとまなう大分類を瞬時に実現する。

②左脳的働きをもつ論理型情報処理システムを開発して、大分類で少数に絞られた候補(文字や単語音声)の構造を解析し、候補としての正当性を検証する。

③両システムの相互補完的統合によって、認識結果を検証する機能を備えた高速・高精度の知的認識システムを実現する。

④高速・高精度の自動文字切出を実現する。

①については右脳的働きの出発点になる第1段階として、前処理(正規化・細線化など)、特徴抽出、及び大分類など、を実現する高速並列処理回路網をLSI化に適したシストリックアレイを用いて実現している。たとえば、文字列の行方向や列方向の黒点のヒストグラムの作成、正規化や行の傾きの補正などは一種のシストリックアレイで実現できるように構成している(図-18)。

一方、大脳視覚野には線分の傾きなどを抽出する方位選択性コラム(図-19)がある。それとの類推から本研究では、文字画像の特徴量として、線素の方位分布を基にした普遍的な特徴量を見出し、方向線素特徴量と名づけた。この特徴量は一般の線画にも適用し得るもので、線素の方位を縦、横、斜め(±45°)の4方向に量子化し、16×16 dotsの小領域ごとに4方向ごとの重み付線素数で表す。図-20に示すように、各小領域はA, B, C, Dの4領域に分割され、その各領域の線素数に対する重み係数として、それぞれ、4, 3, 2, 1が与えられる。したがって、 m 番目の小領域の特徴量をベクトル V_m で表すと、図に示す V_m

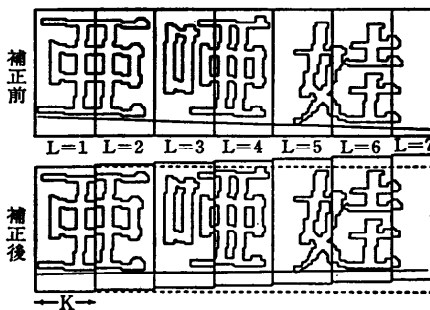
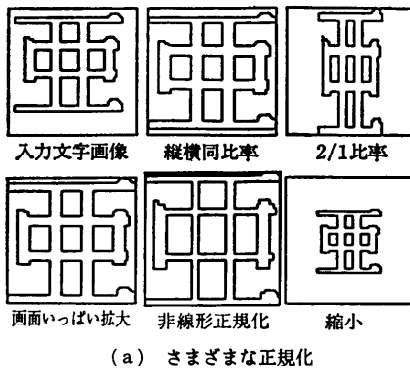


図-18 一つのストロークアレイで処理できる例

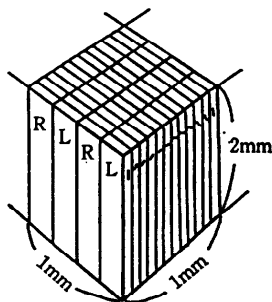


図-19 方位選択性コラム

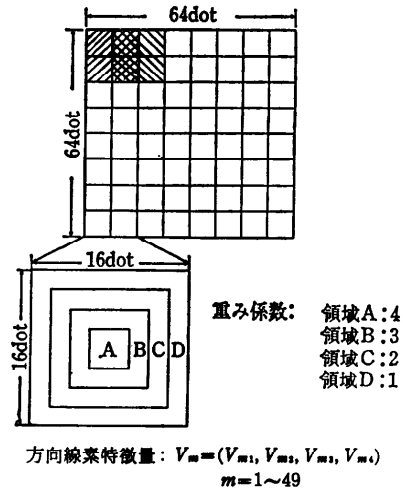


図-20 方向線素特徴量

は小領域 m における4つの方位のそれぞれの重み付線素数を表す4次元ベクトルとなる。たとえば、その第一要素 V_{m1} はA, B, C, Dの各領域内の縦の方位をもつ線素数に、それぞれ、重み4, 3, 2, 1をかけたものの総和で与えられる重み付線素数を表す。以下同様。小領域は半分ずつ重複させてとるので、全部で $7 \times 7 = 49$ 個ある。よって、方向線素特徴量は $4 \times 49 = 196$ 次元のベクトルとなる。

さらに、大分類を高速で実行する連想整合法を開発している。この方法は、まず各小領域における特徴量に基づいて対象となる全字種を適当な数のクラスにクラスタ化する(表-1)。ついで、各小領域について各クラスの代表ベクトルを定める。代表ベクトルには、通常そのクラスの平均ベクトルが用いられる。未知入力の特徴量は小領域ごとに各クラスの代表ベクトルと比較され、類似度の高いクラスから順に得点が与えられる。得点の与えかたは、順位が高いクラスには高い得点をそのクラスのすべての字種に与える。これをすべての小領域について行う。

次に字種ごとに得点の総和を求めて総得点の高い順に並べる。たとえば、JIS 第一水準の漢字印刷文字の場合には、各小領域ごとのクラス数を32、得点は上位5位までのクラスに対して、上位からそれぞれ、5, 4, 3, 2, 1を与え、それ以外はゼロとすると、5位以内に真の候補が入る確率は0.9999以上となる。しかもその処理速度は通常的全数マッチングより約5倍速い。以上の

表-1 小領域を文字画像領域の左上縦 1/2 横 1/2 の領域としたときのクラス化の1例 (教育漢字手書きデータベース ETL-8B の愛から 200 字種; クラス数 40)

1	愛官感宮	15	一	29	横械株旗機規協均
2	悪歌	16	印疑	30	億慣帰
3	庄安困因円応回句区空	17	引永王音下可刊玉	31	課議
4	暗確橋極	18	飲館鏡銀	32	賀禁
5	案害寒完寄客究	19	院階眼	33	会外各久金
6	以化火	20	右求去共九	34	解勤軟観
7	位依往仮何価賃快休旧共	21	岸岩業	35	改開関閥器強
8	委益希季	22	雨画	36	絵紀級給
9	意青老喜貴京君郡	23	宮栄覚字	37	額管
10	易胃員雲園夏家	24	泳液河活漢漁近	38	幹顔競競教勤群
11	異墨果界貝角居魚局具軍	25	英黄花荷芽草基苦	39	気記義急許訓
12	移延科我	26	衛	40	逆挙
13	遠運演遠温過海楽汽	27	塩境興		
14	医駅恩願	28	央加拡期技救球牛曲		

る。このことは文字の潰れに関する知識あるいは概念の一つの利用とみてよいのではなかろうか。いずれにしても知能のモデル化の原点にたつて、パターン認識とは何かを再認識することが肝要であろう。

一方、②の左脳の働きに関しては、潰れがほとんどない文字の場合には、線素の方位分布に基づいて小領域ごとに候補文字の構造を解析し、その正当性を検証できる。それゆえ、誤りを一万字に1個程度とすることが可能である。そのための構造解析用辞書として、類似文字のグループごとにそれに属する文字間の識別に必要な小領域の組(相互識別領域と呼ぶ)

を登録した辞書を作成している(表-2)。この場合には、各小領域ごとの線素の分布という形態で文字の構造に関する知識の活用を計っているのである。その結果、誤りは一万字に一個程度となる。

しかし、手書き文字のようにきわめて多様な変形を受け入れる場合には、文字を構成する線と線との関係を本格的に調べる弛緩法の導入が必要である。そこで本研究では、確率的弛緩法について研究し、従来用いられてきた Rosenfeld のそれよりもすぐれた修正作用素をもつ弛緩法を考案した。しかし、ここで

問題となるのは、弛緩法はノイズに弱いことと同時に文字を構成する線の数が増えると組合せ論的に計算量が増加することである。この二つは弛緩法に原理的につきまとう救い難い難点である。そこで、考えられることは弛緩法の対象となる候補文字数をできるだけ少数に絞ることである。そのためには、文字の構造に関する知識を積極的に活用する途を拓くことがきわめて重要であろう。たとえば、未知入力文字が属するグループを効率よく段階的に縮小していくための知識を、入力文字自体から引き出す解析手法を開発する必要がある。言い換えれば、パターン認識に積極的に推論の手法を導入することである。このための知識データベースを構築しその活用方法を考案するこ

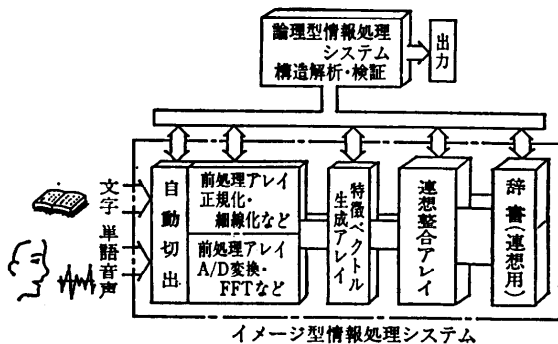


図-21 知的文字認識システム: SEIUN

前処理と連想整合の処理を図-21の自動切出部を除くイメージ型情報処理システムで実行すると、毎秒 500 字程度の処理速度になる。

考察・問題点 しかし、これは処理を高速化しただけであって、知識や概念を積極的に扱ったものではない。ただ知識の活用という点から若干考察を加えるとすれば、連想整合法は類似文字に関する知識を手がかりにしているといえよう。そして、小領域ごとに類似文字のクラスを定義することで、その概念を拡張しているといえるかもしれない。また、文字の潰れが生じる場合には、標準パターンとして潰れを考慮した統計的表現を併用することで、潰れに強い文字認識が可能になる。この場合には、誤りは千字に1個程度とな

表-2 類似文字用細分類辞書（表中の数字は小領域の番号：番号は文字画像領域の上から下へ左から右の順に付す）

クラス	相互識別領域
太犬天	0 1 2 3 4 5 6 45 46
肋防	26 27
体休	38 39 40
永氷水	0 1 2 3 4 8
伶伶	0 1 7 8 9 14 15
王玉	40
又又	10
馬鳥鳥	3 10 12 17 24
騰騰	25 26 31 32 38~41 45~48
士士	14 15 19 20 42 43 47 48
問問	24 31 38
朱未来末	0~20
李季	0~13
鯉鯉	5 6 12 13 19 20 26 27
杏否吉	0~27
遺遺	2~6 9~13 16~20 23~27 30~34 37~41

とは、高度の実用に耐える基礎技術の確立にとって重要な課題となる。

③のイメージ型と論理型の相互補完的統合については、現状では大分類と細分類といった単純な関係にある。しかし、候補文字の正当性の検証をより厳密に行うためには、逆に細分類から大分類へ、そしてもとのイメージデータへと戻ることも含めて両システムの相互補完的統合を考慮しなければならない。これは本システムでは基本的には実行可能であるが、それを知的処理の形態でいかに実現するかは今後の大きな課題である。

④の自動文字切出については、現状では、文字を構成する黒点の縦方向あるいは横方向のヒストグラムを基にして文字切出を行い、分離文字などの切出ができるような工夫がなされている。文字切出は毎秒約 200 字の高速性を達成しているが、これは毎秒約 500 字のイメージ型の処理速度に比べるとかなり遅い。さらに、多様な広範囲の書式に対応するためには知的処理の導入が不可欠であるという困難な問題がある。したがって、認識結果や書式に関する知識の活用も含めて、自動文字切出の高速化と高精度化はきわめて重要な課題である。

単語音声認識 最後に本システムが文字以外の認識にも適用できる例として、単語音声認識を行った結果について述べる。大分類のためのイメージ型の情報処理は文字認識とまったく同じ方式で行うことを試みた。すなわち、認識の対象となる単語音声を、すべて一定の時間長の波形に正規化する。ついで、それを一定数の区間に等分割する。そうすると、単語音声の各区間は文字の場合の各小領域に対応する。音声の特徴量として、十次までのメルケプストラム係数を用い、各区間ごとの特徴量を基にして対象とする全単語音声のクラスタ化を行い、前述の連想整合法を適用した。このようにして、男性十名が発声した 212 単語（東北大学応用情報学研究センター提供）の大分類を行った結果を図-22 に示す。この方法は処理速度が DP 法に比べて約 200 倍、MQ 法に比べて約 40 倍速く、しかも 30 位までの累積認識率は前 2 者と同じで 99.8% である。

このようなイメージ型の処理で得られた候補の正当性を、単語音声の中の音素の配列に基づく構造解析で検証する。しかし、現段階では、単語音声の中の母音系列の認識方法（当研究室で開発）を用いて、母音の配列に基づく構造解析を行っている。この方法で 30 位までの候補単語中の母音の配列を検証し、正当性の高い順に並べ換えると図-23 のようになる。つまり、正しい候補がすべて 10 位以内に入るので、10 位までの累積認識率が 99.8% になる。さらに候補を絞るためには、子音も含めた音素系列の認識が必要になるが、これは本研究では未開拓なので残念ながら DP 法を用いることにした。10 位までの候補に DP マッチングを施すと図-24 のようになる。この段階では 1 位認識率は 98.86% になる。DP マッチングを

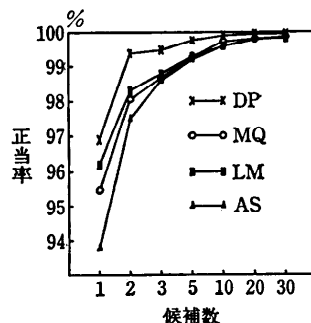


図-22 連想整合法 (AS) と他の手法との比較 (DP: DP 法, MQ: ベクトル量子化法, LM: 線形整合法)

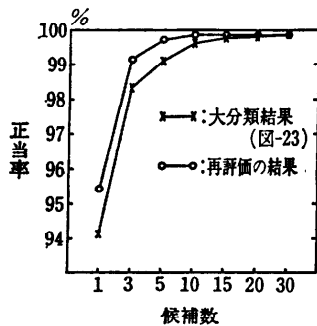


図-23 大分類 (図-22) の 30 位までの候補を母音系列の認識に基づいて再評価した結果

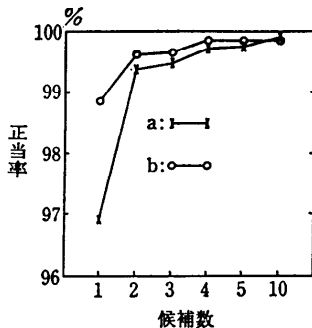


図-24 大分類 (図-23) の 10 位までの候補に DP 法を適用した結果 (a) と最初から全単語に DP 法を適用した結果 (b) との比較

用いる直前までの処理速度は DP 法の約 200 倍だったが、ここで DP マッチングを用いたために全体の処理速度は DP 法の 20 倍程度に下がるが、99.86% の認識率は最初から DP マッチングを施した場合の認識率 96.9% に比べて著しい改善であり、この 212 単語のデータベースについてこれまでの最高の認識率を示している。

本方式による不特定話者単語音声認識の一つの試みを紹介したが、予想以上の好結果であろう。構造解析の最終段階で DP マッチングを一部導入したが、これは精度があがる代わりに時間がかかるので、今後は母音だけでなく子音も含めた音素の配列に基づく効率の良い構造解析法の開発が課題である。しかし、単語音声認識は語彙数が膨大になることは避けられないので、文字認識に比べて知識のより効率的な活用が不可欠となろう。さらに、連続音声認識への拡張など、多くの課題が残されている。

以上のように数多くの課題があげられるが、SEIUN と名付けた図-21 のシステムはそれらの

課題の解決を図るための有力な道具となることが期待される。図のイメージ型情報処理システムでは、自動切出及び前処理の各部分、特徴ベクトルの生成と整合 (マッチング) の各部分を独立に起動して論理型の情報処理と連係できるようになっている。さらに、その各処理をパラメータを変えることにより何通りかに変更することやスキップすることが可能である。たとえば、特徴ベクトルの生成ではパラメータを変えることによって、種々の特徴量を生成できる。またマッチングでは距離尺度や整合方式を変更することができる。したがって、このような自由度を活用して、右脳的なイメージ型の処理と左脳的な論理型の処理及び両者の相互補完的連係や部分と全体との関係を効率よく把握するための処理方式など、基礎技術の確立を目指して今後精力的に研究を進めていく予定である。

5. おわりに

以上、自然知能を中心に知能のモデル化と人工知能に関連する事柄について考えていることなどを取りまとめてお話ししたつもりである。人工知能に関心をもたれている方々にとってなんらかの参考になれば幸いである。なお、その内容については私の独断や不備な点が多いと思われるがご容赦いただきたくお願いする次第である。

参考文献

- 1) J. C. エックルス著 (鈴木二郎訳): 脳と宇宙への冒険, 海鳴社 (1984).
- 2) 遺伝子の発現と制御, 別冊サイエンス (95), 日経サイエンス社 (1990 年 6 月).
- 3) 戸田正直: 知的情報処理と認知科学モデル, 計測と制御, Vol. 25, No. 4 (1986).
- 4) 伊藤正男: 脳の設計図, 中央公論社 (1980).
- 5) 大町真一郎, 阿曾弘具, 木村正行: 高速文字認識前処理用ストリッカラー, 電子情報通信学会論文誌, D-11, J 73-D-11, 2, pp. 167-174 (1990. 2).
- 6) 孫 寧, 田原 透, 阿曾弘具, 木村正行: 方向線素特徴量を用いた高精度文字認識, 電子情報通信学会論文誌, D-11, J 74-D-11, 3 (1991. 3).
- 7) 孫 寧, 阿曾弘具, 木村正行: 連想整合法に基づく高速文字認識アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 3, pp. 404-413 (1991. 3).
- 8) 下平 博, 木村正行: 母音間の相対関係に基づく不特定話者母音系列の認識, 電子情報通信学会論文誌, D-11, J 72-D-11, 12, pp. 2061-2069 (1988. 8).
- 9) 江島俊朗・木村正行: 弛緩法における修正作用素

の検討, 電子通信学会論文誌, Vol. 68-D, No. 4, pp. 2099-2106 (1985. 12).

- 10) イメージ型と論理型情報処理を統合した高速・高精度の知的文字認識システムの研究開発, 平成2年度科学研究費補助金(特別推進研究)研究成果報告書, 平成3年3月 研究代表者 木村正行.



木村 正行 (正会員)

昭和2年生. 昭和29年東北大学電気工学科卒業. 昭和34年同大学院博士課程修了. 工学博士. 同年東北大学電気通信研究所助手. 昭和37年同助教授. 昭和45年東北大学工学部教授. 平成3年3月停年退官(同大学名誉教授). 同年4月北陸先端科学技術大学院大学教授, 現在に至る. 前半では, 電力系統の経済的運用等システム分野の研究に従事, その後, 情報分野に転向, 最近では知能のモデル化を基調とするパターンの認識・理解の研究に興味を持っている. 著書「自己組織系構成論」(共立), 「システム工学基礎論」(丸善), 「しきい値論理とその応用」(昭晃堂) など. 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 人工知能学会各会員.

