

生物と情報

原 慶 太 郎*

1. はじめに

近年、生物学の諸分野において、情報概念を取り入れた記述が多用されるようになってきた。国内に限っても『情報生物学』の類の名を冠する成書が相次いで出版されている¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、情報概念の多様さに反して、これらの扱っている範囲は、主として生体における情報の受容、伝達の分野に限られている。この分野は、未解明の部分が多い生体内の情報処理機構の中でも研究が進んでおり、かつ、もっとも基本的なところでもあるから、それもうなずける。が、『情報生物学』というタイトルの書物としては、「情報」のとらえ方が一面的すぎる感は禁じえない。

1940年代の情報理論の確立に伴い、生物学の中でも遺伝学においては、Watson と Crick の DNA 二重らせん構造の解明、およびその後の遺伝暗号の解明以降、遺伝情報 (genetic information)⁴⁾ という概念が多用されるようになった。そして、この情報の流れの基本則であるセントラル・ドグマ⁵⁾が提唱され、分子生物学の成果によってこれが原則として正しいことが確かめられている。

また、発生学の分野では、形態形成の問題について、古くは勾配説⁶⁾が唱えられたりしたが、1960年代に入ってから位置情報 (positional information)⁶⁾の考えに基づく理論によって、この問題の解明に進展がもたらされている。

一方、コンピュータ・サイエンスの目覚まし

い発達に伴い、この分野から脳の情報処理機構の解明に挑む者も多くなってきている。脳とコンピュータの間の溝も、以前ほど広く深いものではなくなってきた。しかし、ここにきて改めて脳とコンピュータとの違いが指摘され、再認識されるに及んでいる。現在の von Neumann 型の直列、論理演算型コンピュータが抱える根本的な問題 (von Neumann ボトルネック) が指摘されて以来、これを解決する一つの方途である並列、分散処理を実際に精緻にこなしている脳のシステムに学ぼうという動きがみられるのである。バイオコンピュータやニューロ (ニューラル) コンピュータなどの語が新聞や雑誌の紙面を賑わし、これをタイトルとする書物^{7)~11)}が数多く出版されているのもこのことの反映であろう。

このように生物と情報をめぐる問題は、単に神経系の情報処理機構の問題に留まらず、多様な側面を持っている。そして、生物と情報を取り巻く現在の状況は非常に活性的である。この多様な情報概念を整理して、かつ生命現象全体にわたる議論がなされる必要性を強く感じる。わが国の清水博¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾は、多方面からこの問題に取り組み、新しいパラダイムを構築しようとしている数少ない研究者の一人である。清水の考えは社会現象にまで及び、いくつかの成果¹⁵⁾がみられるようである。もっとも、構造主義の立場から清水のアプローチに異議を唱えている柴谷¹⁶⁾のような考えがあるのも事実である。

著者は本学の総合科目の講義の中でこの問題

をテーマにしたが、生命現象の理解には情報概念を整理して積極的に取り入れる必要性を感じた。論議が不十分なところもあるが、本紙に試論としてこの小文を発表する。

2. 情報とは

高度情報社会の突入とともに、われわれの生活の周りには「情報」という語が満ちあふれている。この語の指す意味は多様であるが、単に知識、ニュース、記事、通信などの語の置き換えとして用いられていることが多い。これは、坂本¹⁷⁾が的確に指摘しているように、「情報」という語が対象の内容を限定するのではなく包括することによっている。しかし、在来語ではとらえられずに「情報」という語によってはじめて明確になる事項もある。コンピュータや電気通信の分野がこれにあたる。このことは、自然科学における情報概念の成立と深くかかわっている。

1940年代後半、Wiener はサイバネティクス (cybernetics)¹⁸⁾ という制御 (control) と通信 (communication) に関する新しい学問をつくりあげた。この中で Wiener は、制御は本質的に情報の問題であることを指摘した。また、通信技術の理論化に取り組んだ Shannon は、その著書 "The mathematical theory of communication"¹⁹⁾ の中で、伝達されるもの (こと) として情報 (information) の概念を提示した。

以上のことから明らかなように、情報がまず最初にあったのではなく、制御にかかわる諸事象、および通信において処理される対象として、情報の概念が誕生したのである。さらに、コンピュータの開発に伴って、制御、通信だけではなく、計算、分類などの処理を含んだ情報概念が成立したといえよう。von Neumann 方式のプログラム内蔵式のコンピュータによって、まさに対象化されたものとしての「情報」の処理が実現したのである。そして、現代は情報通信と情報処理とが融合しつつある²⁰⁾時代である。

ところで、これらの発達によって対象化されたのは、情報のもつ記号的な面に限られることに留意しなければならない。Shannon の前掲書の共著者である Weaver²¹⁾ は、通信の問題には3段階のレベルがあることを指摘している。すなわち、

レベルA: [技術的問題の段階]

通信される記号 (symbols) が、いかに正確に (accurately) 伝達されるか。

レベルB: [意味論的 (semantic) 問題の段階]

伝達された記号が (送信者が) 伝えたい意味を、(受信者に) いかに的確に (precisely) 伝えるか。

レベルC: [効果の問題]

受け取られた意味が、期待された行為に、いかに効果的に影響を与えるか。

情報のもつ二つの側面——syntactic な面と semantic な面——が議論されることがある。情報のもつ syntactic な面は、記号間の関係であるから容易に対象化されうるが、semantic な面は受信者、送信者の価値観という問題を含め、容易に対象化されえない。したがって、自然科学、特に工学の分野で扱われる「情報」は、通信のレベルAの問題、すなわち情報のもつ syntactic な面に限られるのが普通である。しかし、このことは「情報」についての数学的扱いを容易にし、情報理論という現代科学の大きな流れを形成するのに貢献した。

一方で、生物に目を転じてみると、特に神経系の発達した動物では、通信の問題におけるレベルAの段階はもちろんのこと、レベルB (意味論的問題)、レベルC (効果の問題) の段階までの情報交換を実際に行なっている。生物においては、情報の semantic な面がまさに問題となる。ここに、生物の情報交換を取り上げるに際しての大きな問題が生じる。情報の意味は、各々の生物が置かれた状況によって変わってくるのである。以下に、よく知られたヤドカリと

イソギンチャクの例²²⁾を紹介しよう。

ある種のヤドカリは、貝の殻の上にイソギンチャクを付着させて生活している。ヤドカリにとっては、イソギンチャクが付着することによってイカなどの外敵から身を守ってもらえるという利点がある。今、二つの状態のヤドカリ（一方は通常の状態、他方は空腹状態）の殻からイソギンチャクを実験的に奪いとる。そのようにしたヤドカリに改めてイソギンチャクという情報を与えると、前者では、早速イソギンチャクを植えつけるという行動に移るのに対して、後者はイソギンチャクを食べ始める。Uexküll²³⁾は、これをヤドカリの生理的気分（Stimmung）に応じて対象物の意味が変わると説明している。

このことから明らかなように、生物における情報伝達では、送信者と受信者の置かれている状況によって、情報の意味がまったく異なってくる。これは、通信のレベルBの問題であるが、レベルCの効果の問題となると、議論はさらに複雑になる。生物における情報は意味を抜きにしては論じることができない。

3. 生物における情報の問題

——階層性の観点から——

生命現象を論じる時、分子—細胞—器官—個体—個体群という階層性（hierarchy）²³⁾²⁴⁾の問題は、特に重要である。ある階層で成立する法則が、別の階層で成り立つとは限らない。生物における情報の問題も、この観点から整理して再考する必要がある。

そこで、この問題を個体以上のレベルと個体以下のレベルとに分けて議論したい。個体以上のレベルにおける情報の問題は、まさに Weaver の通信のレベルCまでの問題である。ここでは情報交換（コミュニケーション）という語で以下の議論を進めるが、syntactic な情報の正確な伝達、その意味論的問題、そして効果の問題がここに含まれる。

個体以下のレベルにおける情報の問題については、本稿では次の四つの面に分けて論じるこ

とにする。すなわち、(1)遺伝情報の伝達機構（分子レベル）、(2)形態形成（細胞～個体レベル）、(3)受容情報の処理機構（分子～器官レベル）、(4)神経・ホルモンによる制御機構（分子～個体レベル）。この四つは、それぞれ情報の内容も異なっており、個別の議論が必要であろう。

次に個体以上のレベルとそれ以下のレベルにおける情報の問題に分けて詳述することにする。

1. 個体レベルより高位の階層における情報の問題

ここで議論するのは、生物個体間の情報交換（コミュニケーション）で、前述した Weaver のレベルCまでの問題である。

生物進化の途上、どの生物群からこのコミュニケーションがみられたかということは、非常に興味ある問題である。しかし、これはひとえにコミュニケーションの定義にかかわることである。コミュニケーションの意味を個体間の相互関係にまで範囲を広げれば、有性生殖の成立にまでその起源を遡ることができよう。それまでは、単に自身の一部を出芽させたり分裂によって増殖していたものが、互いに特定の相手を識別してこれと接着し、遺伝的組み換えを行なうようになる。その過程で異なった性のものが互いに近接する機構は、コミュニケーションとして考えることも可能である。このような生殖法は、真核生物²⁵⁾の出現以降とされている²⁶⁾から、この意味でのコミュニケーションの起源は十数億年前ということになる。性の定義を見直し、原核生物であるバクテリアにも性を認める考え²⁷⁾がある。これに基づけば、バクテリアは雄菌と雌菌との間で細胞接合が認められ、遺伝的組み換えを行なうので、真核生物の出現以前にもコミュニケーションがみられることになる。こうなるとコミュニケーションの起源は一段と古くなる。もっとも、これは、古代のバクテリアが現在のバクテリアにみられるような性を持っていたという仮定の上での話であるが。

また、植物にも個体間の情報交換があるという考えがある。特にアレロパシー（他感作用）と呼ばれる化学物質を介しての相互作用は古くから知られており、最近では「植物情報物質」²⁸⁾という呼称を与えられて、新しい研究分野が開拓されつつある。

しかし、これらは広義のコミュニケーションには含めることができるであろうが、実際に生物のコミュニケーションを研究している学者は、もう少し厳密な定義を与えている。Lewis と Gower は、その著書“Biology of communication”²⁹⁾の中で、コミュニケーションの定義を次のように与えている。

「コミュニケーション：信号の発信、受信ともに選り好みができる生物個体間で信号が伝達されること。」

この定義における選り好みを文字通りの能動的な選択とすれば、コミュニケーションの範囲は一段と限定される。原始的な真核生物の雌雄間や、高等植物の個体間で行なわれる情報交換は、受信者側に選択の自由はなく、上記の意味でのコミュニケーションの成立には、多少とも情報の処理機構の備わった神経系の発達が必要となる。腔腸動物では受容器（感覚細胞）－効果器（筋細胞）の分化がみられ、その間を介するニューロンが認められる。扁形動物では、さらに神経系が発達し、集中神経系を構成するようになる。これをもって中枢神経系の出現とみることができる。時代的には今から数億年前のことであり、これが狭義のコミュニケーションの成立である。

近年、動物行動学（ethology）という分野の研究が飛躍的に進展し、昆虫から脊椎動物に至る様々な動物群の行動が解析されつつある。この分野の三人の先駆者：Tinbergen, Lorenz, Frisch は、1973年度ノーベル生理学・医学賞を受賞している。この分野の一連の研究によって、人間のような音声による情報伝達手段を持たない動物間にも、それに劣らない種々のコミュニケーションがあることが明らかになってきた。詳細は他の成書³⁰⁾³¹⁾に譲るが、その中で

コミュニケーションの本質に関すると思われる興味深い一例を紹介したい。

一般に、同種動物間では互いの利益になるために情報交換を行なうと考えられている。しかし、厳密に言うと、動物が信号を発するのは自分にとって利益がある場合であって、ほかの者に利益を与えるか否かは通常問わない。進化生物学の知見によれば、生物は基本的に利己的であって自身の包括適応度³²⁾を最大にするように行動しているという。動物は、情報を共有していると考えよりも、互いを操作していると考えた方が良いのである。ミツバチでは、良く知られているように、ダンスによる複雑なコミュニケーションを行なっている。この場合は、間違いなく互いに利益をもたらしている。しかし、ある種のホタルの場合³³⁾はそうではない。ホタルの雌雄は、相互に信号（種によって決まっている発光パターン）を交換して交尾する機会をうかがう。ところが、*Photuris* 属の雌はほかの種の雄の信号に応答し、その雄が近寄って来たところを捕食してしまう。このような偽りの信号の例が、ほかにも多数知られている。

最近、この動物行動学の分野は、後述する神経系の情報受容後の処理機構まで統合した形で、“neuroethology”³⁴⁾という研究分野を開拓しつつあり、より解析的な方向に進んでいる。この方面からの進展が期待される。

2. 個体レベルより下位の階層における情報の問題

(1) 遺伝情報の伝達機構

生物は、時間が経過すれば代謝によって物質的には変わってしまうが、個体としては同一性を保っている。この「同一」は、物質としての同一性ではなく、情報としての同一性である³⁵⁾。この情報を担っているのが遺伝子である。遺伝学、特に分子遺伝学の発達によって、遺伝情報の分子レベルでの解析がなされ、その実体が明らかにされた。生物学の中で、情報という概念

がいち早く取り入れられたのは遺伝学の分野ではないだろうか。科学史の問題としても興味深いところである。

さて、Watson と Crick が遺伝子の本体としての DNA の構造を解析し（1953年）、1960年代には遺伝暗号が DNA 塩基の3連符（triplet code）であることが明らかになった。遺伝子の持つ情報が DNA の塩基配列に符号化されているという事実は、その頃すでに広く知られるようになっていた情報理論を、この研究分野に組み入れることを大いに刺激した³⁶⁾。Crick によってセントラル・ドグマ（図1）が提唱され、その考えに基づいた遺伝情報の伝達機構が明らかになると、その枠組みの中に情報理論を積極的に採り入れることが試みられた。たとえば通信（communication）における雑音（noise）を、DNA の複製（DNA → DNA）、転写（DNA → RNA）、翻訳（RNA → タンパク質）の各過程における誤りとする考えなどである。

図1のような遺伝情報の伝達機構が明らかになると、DNAこそが生物における情報の根源であり、DNA の解析によって生命現象の問題がすべて解決するという見方もされるようになった。しかし、真核生物の遺伝情報発現の研究が進むに従って、転写の最初の段階で遺伝子の組み換えが起こることが明らかになり、単に DNA の塩基配列の解析だけでは、問題の解明にはならないことが指摘されている。次に述べる形態形成の問題に至っては、特にそのようなこ

とがいえるのである。ある見方に立てば、「DNA の情報は生体の外部環境および内部環境³⁵⁾がもたらす情報にくらべて無限小である。」という言い方もできよう。

(2) 形態形成

セントラル・ドグマに示された DNA → RNA → タンパク質という情報の流れの具体的な機構が明らかにされ、生物の構築材料、および生体内化学反応の触媒（酵素）となる各種タンパク質がつくられるまでの過程の概要は、ほぼ解明されたといつてよい。しかしながら、タンパク質が集合して生物の体（その一部）が形成されていく機構については、明快な説明ができるまでには至っていない。もっとも単純な構造のウイルスの一つであるバクテリオファージでは、DNA の情報に従っていくつかのサブユニット（タンパク質）がつくられると、その後は自発的に自己の体制が構築される。DNA は、構築材料の構造までを指令して、その後はタンパク質の相互作用によって形態が形成される。ここでは、タンパク質自体が情報を持っていると考えることができる。

真核生物、特に多細胞生物の場合は議論は一段と込み入ってくる。発生学は embryology（embryo = 胚）の名のもとに、胚発生の記載的研究から始まった。1950年代には、より実験的、解析的色彩の強い発生生物学（developmental biology）に統合されて現在に至ってい

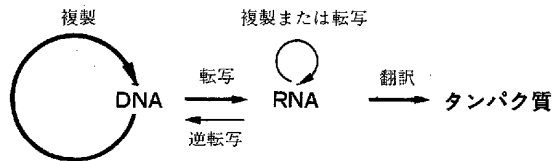


図1 セントラル・ドグマ

1958年、Crick によって提唱された遺伝情報の流れに関する一般原理（太線で示したもの）。その後の逆転写酵素の発見によって、1970年 Crick 自らが細線を含んだ形に修正した。しかし、核酸からタンパク質への流れは一方方向だけで、逆には流れないという基本原則は変わっていない。

る。一個の卵細胞が受精とともに卵割（細胞分裂）を開始し胚発生を進めていく過程は、細胞レベルから個体レベルへ至る階層を上がっていく過程でもあり、その観点からも興味深い現象である。その過程で、細胞が分化して形態形成を行なう機構については、Spemann の形成体（organizer）の発見（1924年）以来、形態形成を統括して指令を行なう物質の解明に、研究の目標が設定されてきた。しかし、多数の研究がこの問題に取り組んだにもかかわらず、そのもくろみは未だ成功していない⁶⁾。

分子生物学の発展とともに、この形態形成の問題も、DNA の情報が時間的、空間的にどのように発現していくかという観点からの研究が進められている。ところが、このアプローチでは、タンパク質のできる機構は分かっても、生物の「かたち」が形成される仕組みについての答えを導き出すのは困難であると思われる。発生生物学における位置情報（positional information）概念の導入は、この問題に対する研究の一つの方向性を示すものであろう。位置情報とは、Wolpert により1968年に提唱された概念である。彼は多細胞系の発生を次のようにとらえる。

「個々の細胞が全体の中における位置を認識して、各々の位置に応じて挙動することによって、調和ある形態が形成される過程。」

ここで、細胞が受け取る、位置に関する情報を位置情報と呼ぶのである。形態形成においては、各細胞は位置情報を解読して分化していくと考えることもできる。1976年、77年に French^{ら³⁷⁾³⁸⁾} がゴキブリやイモリの肢の再生実験を行ない、この考えに基づく説明が正しいことを指摘した。

そうではあるが、この理論に基づく形態形成の機構についても、情報伝達の実体については不明であり、未だ仮説の域をでない。今後の研究に負うところが大きいのが現状である。

遺伝情報発現の問題は、がん（cancer）や免疫における抗体産生の機構にもかかわり、現在、生物学の中でもっとも精力的に研究が行な

われている分野である。1987年度ノーベル生理学・医学賞が、抗体産生時における遺伝子組み換えの発見によって利根川進教授に授与されて大きなニュースとなった。生物の発生過程で遺伝子是不変であると考えられていたことが、この研究によって覆され、遺伝子の再構成が起こることを明らかにした業績は大きいものである。

また、最近、形態形成に強く関与する遺伝子——ホメオティック遺伝子（homeotic gene）³⁹⁾——の発見が話題になっている。この遺伝子は、ショウジョウバエの突然変異遺伝子の解析によって明らかにされたものであるが、この遺伝子の塩基配列の共通部分（ホメオボックスと呼ばれる）が、カエルやヒトなどのほかの生物（しかも系統のまったく異なった生物群）にも存在することが相次いで報告され、一躍注目されるようになった。

これらの研究の進展によって、それほど遠くない将来、遺伝情報発現、そして形態形成に関する確実な理論の枠組みが構築される可能性が高まってきた。

(3) 情報の受容、処理——特に脳の機能——について

動物にみられる高度な運動能力、調節機構、そして思考、感情などの機能は、神経系の発達に伴って獲得されていったものである。19世紀半ばには、神経における興奮の伝導機構が電気信号によるものであることが明らかにされ、さらに20世紀中葉には、神経—筋接合部、および神経—神経接合部（シナプス）における化学物質による興奮伝達機構が解明された。この結果、情報の受容、伝達の問題は、受容細胞の興奮、ニューロンにおける興奮の伝導、シナプスにおける興奮の伝達という一連のシステムとして認識されるようになった。さらにそれらの情報が、中枢神経系と呼ばれる部位に伝達され、そこで種々の情報の処理が行なわれる。情報の受容、伝導、伝達に関する問題の解明が進んでいるのに対し、中枢神経系、とりわけ脳における情報

処理の問題は、生命科学最大の難関でもあり、数多くの研究がなされているにもかかわらず、未解明の部分が多い。脳がそれだけ複雑なシステムということであろうが、そのほかにも、脳研究に特有の問題がある。人間の思考、記憶などは、通常、言語をもって表現することができ、客観的記述が可能である。しかしながら、人間の脳を実験材料に供することは許されない。一方、脳の実験に用いられるネズミ、ネコ、サルなどの動物は、通常の意味での言語機能を持たず、何を考え、記憶しているかを人間が知ることは困難である。ここに大きなジレンマが生じる。

また、システムにおける個と全体の問題もある。脳を構成する一つ一つのニューロンについては良く研究され、その構造と機能の解明は進んでいる。しかし、I Cの構造、機能をいくら調べてもコンピュータの機能を理解することができないと同様に、ニューロンのつくりと働きとをいくら解析したところで、脳の解明には

つながらない⁷⁾。

したがって、脳の情報処理の究明には、多方面からのアプローチが求められ、実際に、今までは別々の学問分野でなされていた研究——たとえば心理学、精神医学、神経生理学——などが互いの優れた点を取り入れて発展しようとしている。

また、数理科学、数理工学の分野からの脳研究の成果⁴⁰⁾にも目覚ましいものがある。コンピュータ・サイエンスの立場から脳研究を行なう者も目立つようになってきた。ある意味でもっとも優れたコンピュータといえる脳の機能に学ぼうというものであろう。

表1に、脳とコンピュータの比較を示す。von Neumann 型のコンピュータのハードウェアがCPUによる直列情報処理なのに対して、脳ではニューロン回路網による並列情報処理、分散情報処理であることが大きな違いである。また、ソフトウェアに関しても、コンピュータがアルゴリズムに従って論理演算を行なうのに

表1 コンピュータと脳の比較*

	コンピュータ	脳
基本素子	半導体素子	ニューロン
素子数	$10^5 \sim 10^7$	$10^{10} \sim 10^{11}$
動作速度	10^{-8} s.	10^{-2} s.
信号	電気パルス	活動電位
記憶容量	10^{10}	$10^{18} \sim 10^{20}$
熱発生・論理 操作エネルギー (erg.)	4×10^{-6}	3×10^{-8}
故障率	5×10^{-22}	5×10^{-21}
得意とする 情報処理	高速で正確な数値計算	パターン認識、総合判断
記憶方式	線形番地	連想・内容番地
製作	設計図+ソフトウェア	遺伝子+自己組織
性能向上	ソフトウェア	学習・機能代償
睡眠	不要	不可欠
耐ノイズ性	低い	高い
耐故障性	低い	高い
再現性	完全	不完全
アーキテクチャ	直列処理	並列処理
情報表現	デジタル・集中	アナログ・分散

* 注記11) の文献より。

対して、脳では学習および自己組織化によって自動的に作製する。前述したように、最近、わが国でもバイオコンピュータやニューロコンピュータの名を冠する書物が多数出版されたが、コンピュータの将来像の一つの方向として、関係者の関心を呼んでいるからにはかならない。

もっとも、von Neumann 型のコンピュータにも高速の論理演算のように得意とする分野も存在するわけで、将来は、直列情報処理コンピュータと並列情報処理コンピュータの相互作用による情報処理——たとえば、並列マシンで方向の発想、直観的な解を生み出して、論理マシンで修正——が指向される⁷⁾ものと思われる。

(4) 神経・ホルモンによる生体の制御機構

生体は、外的および内的な諸変化に対して、形態的・生理的状态をある一定の範囲に保とうとする。これが、ホメオスタシス(homeostasis)である。この概念は、1926年、Cannon によって提唱された。Cannon は、Bernard の「内部環境の恒常性による生命の維持」という考えをもとに、自らの交感神経・副腎系の研究成果を導入して、この考えを定式化した。すなわち、生体内の定常状態は、単に生理学的反応によってではなく、より複合的な反応過程によって保持されると主張した。

当時、すでに、Sherrington によって神経系の統合作用という考えが提示されていたし、脊椎動物における内分泌現象もそのほとんどが明らかにされていた。さらに1948年には、Wiener によって“Cybernetics”が上梓され、この観点からホメオスタシスの機構に関する研究が進むことになる。そして、生体における神経系と内分泌系とによる制御機構が明らかにされたのである。

よく知られた制御機構に生体内の血糖量の調節システムがある。ここでは、交感・副交感神経系と、インシュリン、グルカゴンをはじめとする内分泌系との見事な調節機構により、体内

の血糖量がほぼ一定に保たれている。Wiener が指摘するように、制御を司るのが情報であるならば、神経情報とホルモン情報とによってホメオスタシスが成立しているとみることができよう。

生体内化学反応におけるホルモンの作用機構については、酵素作用に働きかけることが知られている。Sutherland は、ホルモンは直接的に酵素を活性化するのではなく、第一次メッセンジャー (first messenger) として、サイクリック AMP と呼ばれる物質の合成を促し、それによって酵素作用を活性化することを明らかにした。第二次メッセンジャー (second messenger) としてのサイクリック AMP の役割は、以来、遺伝子発現の調節や細胞膜の機能、さらに細胞の増殖や分化にも関与することが明らかにされ、情報伝達物質として注目されつつある。

4. 自己組織性について

生物と情報の問題を論じる際に、自己組織性 (self-organization) のことにも触れておく必要がある。この自己組織性 (自己組織化) の問題は、広義の情報論においても情報の自己組織化という重要なテーマとなっており、また一方で、社会科学の立場でも盛んに議論されている⁴¹⁾ようである。

自己組織性の問題にも関連のある、生命現象とエントロピーについて論じよう。Schrödinger⁴²⁾は、「生命はネジェントロピー (negentropy : 差し引き負のエントロピー) を食べている。」という有名な言葉で生命を論じた。彼は、生命がエントロピーの減少、または増大を防ぐ現象を含んでいることを指摘した。しかし、渡辺³⁵⁾が言うように、このことはすでに Bergson が、著書『創造的進化』の中で、Clausius や Boltzmann を引用しながら論じていた。Bergson によれば、生命は物質とは逆の性質を備えており、生命の持続が「中絶」してはじめてエントロピーが増大する系となる。それゆえに、物質は「自らを壊滅する」ものののに反して、生命は「自

らを形成する」ものであるという。

このようなエントロピー減少に関わる問題は、現在では Prigogine 学派の散逸構造 (dissipative structure) 論⁴³⁾ や Haken らの共同現象論 (synergetics)⁴⁴⁾ となって発展している。前者の理論は、化学反応におけるエネルギーや物質の散逸にともなう Belousov-Zhabotinsky 反応の発見によって実証され、また、後者の理論は、レーザー光の自己組織機構の研究に基づいて形成された。

生命現象においては、卵細胞から個体が形成されるまでの過程が、そもそも自己組織現象である。発生学では、「形態形成のパターンが、外部の因子によって規定されず、自身の固有の条件によって定められる現象」を self-organization (自律形成) と呼ぶ。形態形成の問題については、3-2-(2)で位置情報に基づく理論を紹介した。この問題では、情報というものを、自己組織化するシステムを制御する要因と考えることができよう。

生物における自己組織現象におけるもう一つの代表的な例は脳のシステムである。脳も生物体の一部であるから、その神経回路網の形成は、基本的には DNA の遺伝情報によって構築されている。しかし、百数十億個あるといわれるニューロンの結合を規定するには、この百兆倍もの情報量が必要であり、DNA の持つ百億 bit の情報量では到底まかないきれない⁷⁾。すなわち、DNA はニューロン相互の大まかな結合を規定しているに過ぎず、その後のネットワークの構築には学習という過程が不可欠である。この例は、Blakemore と Cooper⁴⁵⁾ の実験にみることができる。彼らは、生まれたばかりのネコを縦縞だけが描かれた円筒の中で飼育した。そのような環境で育ったネコは、縦の模様にはしか反応を示さなかった。横の棒を感じるニューロンが形成されなかったのである。また、認識細胞の形成においても、ある信号に対して漠然としか反応しなかったのが、反復して信号を与えることによって、その信号だけに特有に反応するニューロン (群) が形成されるという。福島⁴⁶⁾

はこの考えに基づいて、自己組織能力を持つパターン認識装置 “Cognitron” をつくりだしている。このような脳の働きは、コンピュータでは自己のソフトウェアを自動的につくるということであり、並列化とともにコンピュータ (設計者) が脳に学ばなければならない重要な点であろう。

自己組織現象の第3の例として免疫現象をあげることができる。免疫とは、外来性 (細菌、ウイルスなど) および内因性 (がん細胞など) の異物に対する生体の防御機構であるが、その根本原理は自己 (self) と非自己 (not self) の識別である。免疫機構の解明は、Burnet の抗体産生についてのクローン選択説や、それに基づくネットワーク説によって理論的な研究が進み、さらに分子生物学的研究によって、その理論の実証が続いている。

免疫において興味深い現象は、免疫応答と免疫記憶である。免疫機構を担う細胞群は、主として B 細胞と T 細胞と呼ばれるリンパ球である。マクロファージと呼ばれるリンパ球から抗原 (異物) の侵入の指令を受けた T 細胞は、ヘルパー T 細胞とサプレッサー T 細胞に分化し、また、B 細胞はプラズマ細胞 (形質細胞) になって多量の抗体 (免疫グロブリン) を産生する。最初の抗原侵入の時は、抗体産生が時間的に遅れるが、二回目以降の侵入時には免疫記憶が行なわれて、速やかに、かつ多量の抗体がつくられる。この免疫記憶の現象は、脳における記憶との比較からも生物学的に興味ある現象である。体液性免疫 (抗体産生をともなう免疫) では、ある特定の抗原に対しては、それに対応するただ一種類の抗体しかつくられない (抗原-抗体反応)。したがって、多種類の抗原侵入を経験することによって、それぞれの抗原に反応できる免疫応答システムが形成されていく。これは、あたかも学習によって形成されていく脳の神経回路網とよく似たところがある。この免疫応答回路も自己組織現象の一つとして考えることができよう。免疫現象のネットワークシステムは、生体における脳とならぶ情報処理システムと位

置づけられる。

5. おわりに

生物と情報に関する問題を、生命の階層性に注意を払いながら論じてきた。生物は歴史的な存在であるといわれる。三十数億年にわたる長い歴史の中で、様々な情報処理機構を持った複雑な生命システムが形成されてきたのである。細胞、器官、個体、個体群という各生命システムは、それぞれ異なった情報によって巧妙に成立している。システム論については触れることができなかったが、システムと情報の問題も、生命現象を考える上で重要なテーマと思われる。

生命を論じる時の大きな柱として「物質」、「エネルギー」、そして「情報」をあげることができる。生物が物質からできていることは揺るぎない事実であるが、単に物質が寄せ集まっただけでのものではない。エントロピー増大の法則から逃れるために外界からエネルギーを取り入れ、かつ、ある情報のもとに物質が有機的に結合し、自己保存、自己増殖が可能になって初めて生命の誕生がみられたのであろう。渡辺は、「生命の本質は『情報』という概念なしでは理解されず、その情報というものは物理化学的概念ではなく、まさに『脱物質』以外の何ものでもない。³⁵⁾」と述べている。

本稿でも述べたように、「情報」という語は意味を限定するのではなく包括する。実体の不明瞭なもの（こと）に、情報の名をつけて表面だけの議論に留まっている例もみられる。このことには十分留意しつつ、この試論を一つの足掛かりにして新しい生命論を模索していきたいと考えている。

参考文献

生物学および情報科学の科学史的な事項については、以下の成書によった。

1. 沼田真編：新しい生物学史，地人書館（1973）231 pp.
2. 中村禎里編：20世紀自然科学史6／7，生物学（上／下），三省堂（1982／1983）308 pp.，360 pp.
3. 高橋秀俊：情報科学の歩み，岩波書店（1983）237 pp.

注記

- 1) 鈴木英雄・吉岡亨・桐野豊・葛西道生：情報生物学入門 情報生物学シリーズ1，培風館（1986）141 pp.
- 2) 葛西道生・吉岡亨・木島博正・塚原保夫・栗原堅三・鈴木英雄共編：神経情報伝達分子 情報生物学シリーズ2，培風館（1988）175 pp.
- 3) 高木雅行：情報生物学，朝倉書店（1988）107 pp.
- 4) 生物が自己と同じものを複製するために、親から子へ、または各細胞分裂ごとに細胞から細胞へと伝達される情報。DNAの塩基配列として符号化されている。
- 5) Crickにより1958年に提唱された、遺伝情報の流れに関する基本原理。本文199ページの図1参照。
- 6) 勾配説と位置情報の関係については次の文献を参照のこと。
岡田節人：動物の体はどのようにしてできるか，岩波書店（1981）202 pp.
なお、位置情報については本論の3-2-(2)で詳しく論じる。
- 7) 甘利俊一：バイオコンピュータ，岩波書店（1986）140 pp.
- 8) 品川嘉也：バイオコンピュータ，共立出版（1987）140 pp.
- 9) 神沼二真・松本元編：バイオコンピュータ，紀伊國屋書店（1988）351 pp.
- 10) 甘利俊一：ニューロコンピュータ，コロナ社（1988）136 pp.
- 11) 松原一幸：ニューラルコンピュータ，東京電気大出版局（1988）179 pp.
- 12) 清水博・餌取章男：生命に情報をよむ，三田出版会（1986）264 pp.
- 13) 清水博：生命システムと情報，日本放送出版協会（1987）145 pp.
- 14) 清水博：生命の場と情報創造；清水博監修：解釈の冒険，NTT出版（1988）pp. 16-70.
- 15) たとえば次の書物があげられる。
名和太郎：ホロン経営革命，日本実業出版社（1985）261 pp.
- 16) 柴谷篤弘：中央公論，1988，No.5，pp. 173-179.
- 17) 坂本賢三：先端技術のゆくえ，岩波書店（1987）193 pp.
- 18) Wiener, N.: *Cybernetics*, 2nd ed., The M.I.T. Press, 1961. (1st ed. 1948).
池原止戈夫・弥永昌吉・室賀三郎・戸田巖共訳：サイバネティックス 第2版，岩波書店（1962）270 pp.

サイバネティックスの誕生については次の自伝に詳しい。

Wiener, N., 鎮目恭夫訳: サイバネティックスはいかにして生まれたか, みすず書房 (1956) 268 pp.

- 19) Shannon, C. E. and Weaver, W.: *The mathematical theory of communication*, Univ. Illinois Press, 1949, 125pp.

- 20) 甘田早苗: 経営情報科学, 1988, 1, 21-32.

- 21) 前掲書19) の中の次の論文。

Weaver, W.: "Recent contribution to the mathematical theory of communication", pp. 1-28.

- 22) von Uexküll, J. G. K.; 日高敏隆・野田保之訳: 生物からみた世界, 思索社 (1973) 307 pp.

- 23) 延原肇: 生物的自然の構造; 沼田真編: 新しい生物学史, 地人書館 (1973) pp. 23-34.

- 24) Allen, T. F. H. and Star, T. B.: *Hierarchy*, The Univ. Chicago Press, 1982, 310 pp.

- 25) 生物界は原核生物 (procaryote) と真核生物 (eucaryote) に二分される。前者は核膜が不明瞭で DNA 分子がほとんど裸のまま細胞の中心に位置しており、細菌およびラン藻がこれにあたる。後者はそれ以外のすべての生物が属し、核膜を有し核と細胞質が明瞭に区別できる。

- 26) Margulis, L. and Schwartz, K. V.: *Five kingdoms*, W. H. Freeman, 1982, 338 pp.

- 27) 樋渡宏一: 性の源をさぐる, 岩波書店 (1986) 207 pp.

- 28) 水谷純也: 創造科学技術推進事業団 '88研究報告会第1部講演要旨集 (1988) pp. 93-98.

- 29) Lewis, D. B. and Gower, D. M.: *Biology of communication*, Blackie, 1980.

笹川満広・笹川平子訳: 動物たちの情報交換, 理工学社 (1984) 256 pp.

- 30) Halliday, T. R. and Slater, P. J. B. (ed.): *Communication*, Animal behaviour Vol. 2, Blackwell, 1983, 225 pp.

- 31) Slater, P. J. B.: *An introduction to ethology*, Cambridge Univ. Press, 1985.

日高敏隆・百瀬浩訳: 動物行動学入門, 岩波書店 (1988) 240 pp.

- 32) 近縁個体間に適応度上の相互作用をもたらす遺伝形質の、自然淘汰上の有利・不利を判定する尺度として、Hamilton が1964年に提案した概念。自然淘汰は終局

的には遺伝子に働くので、個体間の適応度が下がっても特定の遺伝子頻度が上がるのであれば進化は起こるとする。この考えによって、働きアリや働きバチ (彼女たちは生涯不妊のため子孫を残さない) の持つ利他性の進化を説明できる。詳しくは下記の文献を参照のこと。

巖佐庸: 生物の適応戦略, サイエンス社 (1981) 229 pp.

- 33) Lloyd, J. E.: Science, 1965, 149, 653-654.

- 34) 小西正一: 科学朝日, 1986, No.11 pp. 86-92.

- 35) 渡辺慧: 生命と自由, 岩波書店 (1980) 198 pp.

- 36) Judson, H. F.: *The eighth day of creation*, Simon and Schuster, 1979.

野田春彦訳: 分子生物学の夜明け, 東京化学同人, (1982) 837 pp.

- 37) French, V., Bryant, P. J. and Bryant, S. V.: Science, 1976, 193, 969-981.

- 38) Bryant, P. J., Bryant, S. V. and French, V.: Scientific American, 1977, 237, 67-81.

- 39) Watson, J. D., Hopkins, N. H., Robert, J. W., Steiz, J. A. and Weiner, A. H.: *Molecular biology of the gene*, 4th ed., The Benjamin / Cummings, 1987.

松原謙一・中村桂子・三浦謹一郎監訳: 遺伝子の分子生物学 第4版, トッパン (1988) pp. 790-795.

- 40) たとえば、甘利俊一: 神経回路網の数理, 産業図書 (1978) 330 pp. があげられよう。

- 41) 組織学会編集: 組織科学, 22, No. 3, 1988. では、「組織変動・情報化・自己組織性」を特集している。

- 42) Schrödinger, E.: *What is life?*, Cambridge Univ. Press, 1944, 1948.

岡小天・鎮目恭夫訳: 生命とは何か, 岩波書店 (1951) 180 pp.

- 43) Nicolis, G. and Prigogine, I.: *Self-organization in nonequilibrium systems*, Wiley, 1977.

小島陽之助・相沢洋二訳: 散逸構造, 岩波書店 (1980) 468 pp.

- 44) Haken, H.: *Synergetics*, 2nd ed., Springer-Verlag, 1978.

牧島邦夫・子森尚志訳: 協同現象の数理, 東海大出版会 (1980) 409 pp.

- 45) Blakemore, C. and Cooper, G. F.: Nature, 1970, 228, 477-478.

- 46) Fukushima, K.: Biol. Cybern., 1975, 20, 121-136.