

情報の普遍的概念を求めて (2) : 脳神経系に基づいて情報量を考える
Searching for a Universal Concept of Information, Part 2:
An Idea to Quantify Information Based on Brain Nervous System

竹村 彰 祐*
Shosuke Takemura

ABSTRACT

This paper describes an idea of quantifying information on the basis of electric signal transmission from one neuron to others. Strong correlations are found among matter, energy, and information.

The equations on the amount of information presented by C. E. Shannon and T. Stonier are rather mathematic and thermodynamic, and are not adequate enough to quantify the amount of semantic information.

Any information comes into sensory organs. Each sensory organ has a number of terminal neurons to receive information as stimuli. One neuron is activated by only a very small portion of the stimuli. This means that the information is resolved into its minimal units which cannot be more divided. This unit is unable to regard as information. Here, the term of elementary unit of information is proposed to this unit. A highly ordered integration of the elementary units constructs information. The amount of energy being consumed by one transmission of the elementary unit from neuron to neuron is then named elementary amount of information. Hence the information content can be expressed in terms of energy.

The minimal unit of semantic information can be defined as the information which is treated with once in a column structure on the cerebral cortex.

* 愛知淑徳大学文学部図書館情報学科

Department of Library and Information Science, Aichi Shukutoku University
JOURNAL OF LIBRARY AND INFORMATION SCIENCE. Vol. 12, p. 27-42(1998)

はじめに

前報において、遺伝情報系と言語情報系との間のきわめて高度な類似性について考察をした[01]。その類似性は遺伝情報系を遺伝言語系と呼んでも何の違和感も感じさせないほどのものである。遺伝物質DNAの構成分子である塩基は書物の中の文字のように列になって機能している。しかも音声も、文字も、塩基も、情報を記号化したものである点に変わりはない。この認識のもとに「DNA言語」という語が生まれて、次第に広く使用されるようになってきている。また遺伝情報系の発生の歴史が言語情報系のそれよりはるかに古い事実を考慮して、現在我々が使用している言葉はまだ十分に進化していない幼稚なものであることにも言及した。こうした遺伝情報の概念的把握は、分子遺伝学と情報学と言語学を結びつける学際的な分野の展開を促している。このことに関連して、前報に記さなかった若干の文献と考察を本報の最後に補遺として追加することにした。

情報を自然科学の面から普遍的に捉えようとする場合、その視野は非常に広く、膨大な作業を要するであろう。生物は、前報に記した遺伝情報系のみならず、生体全体にわたって実に数多くの情報システムで構築されている。19世紀のフランスの生化学者Louis Pasteurは“生命なくして発酵なし”という有名な言葉を残した(後に生命のないところで酵素によって発酵現象が観察されたが)。情報は生命のないところにも実在し得るが、生体が受容し解読して、はじめて情報の存在とその意味を認識できるのである。この意味をこめて、私は“情報なくして生命はなく、生命なくして情報はない”と云いたい。

ところで、一般には、情報とは人が生産し、人に伝達し、人が受容するというように、生物の中でも特に人に着目して情報を考えている。この視野からみても、情報の生産と受容に働くのは人の脳であり、情報概念の考察には脳内で

のできごとに焦点を当てる必要がある。このことは前報の考察において指摘しておいた。情報を人に伝えようとするときに、まず伝える内容を考える。その思考は日本人なら通常日本語でなされる。思考の過程ですでに逐次日本語に記号化している。それをさらに音声に記号変換して伝達するか、文字記号に変換して文章として伝達するか、あるいは象形として絵画や彫刻などに変換して伝達するか、いずれにしても情報の記号化の前にまず思考がある。

本報では、まず物質とエネルギーと情報との間の相関を例示し、ついで、不確定性あるいは秩序性ないしはエントロピーと情報とを関連づけたClaude E. ShannonやTom Stonierの情報量の定義について触れ、その上で脳神経系の構造と機能について少しばかりの説明をしつつ、脳内における情報伝達とそれに伴うエネルギーの消費から、情報量に関する初歩的な考察を試みた。すなわち、情報をもはや情報と云えなくなるまで細分化したものを情報素単位と呼び、この単位が1回の伝達によって消費するエネルギーを情報素量とすると、情報量はエネルギー単位で表現できるであろう。情報素単位は神経細胞(ニューロン)1個が伝達する不可分な単位で、情報を構成できる基本的な要素と考えることができる。また、情報と云い得る最小の単位を何にするかについても言及した。

1. 物質 - エネルギー - 情報の相関

生命は自然界にありながら、自然が無秩序に向かうのに逆らって、その構成分子や構造のレベルにおいても機能においても、秩序を形成して維持している。そのために、生体は“物質”と“エネルギー”を外界から取り入れて、物質代謝やエネルギー代謝によって自己の体を構成し、生命活動に必要なエネルギーを得ている。こうした反応は酵素と呼ばれるタンパク質の触媒作用によって生命のあるかぎり秩序正しく行われているが、それには反応の制御を含めて当

然ながら“情報”が必要である。生体は物質、エネルギー、情報に関して開かれた“開放系”である。

酵素は特定のある物質を他の特定の物質に変換する反応を促進する。これはその酵素がどの物質をどんなやり方でどのようにするかという情報を担っていて、その情報に従って物質変換が起きるのである。物質変換にはエネルギーを必要とする。各酵素はそれぞれの遺伝子をもつ情報によって生成される。またあるホルモンはそのホルモンを受容する細胞だけに、その担っている情報を伝達する。例えば、脳下垂体で生産される濾胞刺激ホルモンは、体液中に分泌されて体内を循環して多数の細胞に接触するが、女性では卵巣の卵胞細胞にのみ、男性では精巣の細胞にのみ受容されて性細胞の成熟を促す。受容細胞内での情報伝達にはエネルギーの消費が伴っている。Ca²⁺は脳の海馬にある神経細胞の末端(シナプス)では短期記憶の成立(長期増強)に働くが、骨髄細胞に取り込まれると骨形成に役立ち、骨格筋細胞では筋肉の収縮・弛緩に働いている。Ca²⁺を受け取る側がそれぞれ違った情報として受け取るのである。

このように、人が情報を言葉や文字や映像などで伝えるように、生体内では情報は物質やエネルギーによって伝えられる。そして生体情報にも送り手と受け手が存在し、情報は受け手によって受け取る意味が異なり得るという情報の一般的性格が見られる。

エネルギーと物質と情報との間には相互変換を含めて深い相関があることを広く自然界を眺めながら少し具体的に述べよう。超高密度のエネルギーの点が約150億年前に爆発的に膨張をはじめて宇宙が誕生した(ビッグ・バン)。その後膨張しつつある宇宙での生命の発生と進化の過程で、エネルギーは粒子ニュートリノに、ついで陽子と電子を経て、水素原子に変換している。また原子核の融合・分裂によって他のより複雑な原子が生じる(原子進化)とともに一部はエネルギーになるので、物質とエネルギーは相互変換する(図1a, b)。

細菌の膜に存在する受容体タンパク質(レセプター)は、熱、誘引物質、忌避物質などの物理的・化学的刺激を受け取るとその構造を一時的に変化させ、刺激はすぐに離れてレセプターはもとの形に戻る。このレセプターの構造変化

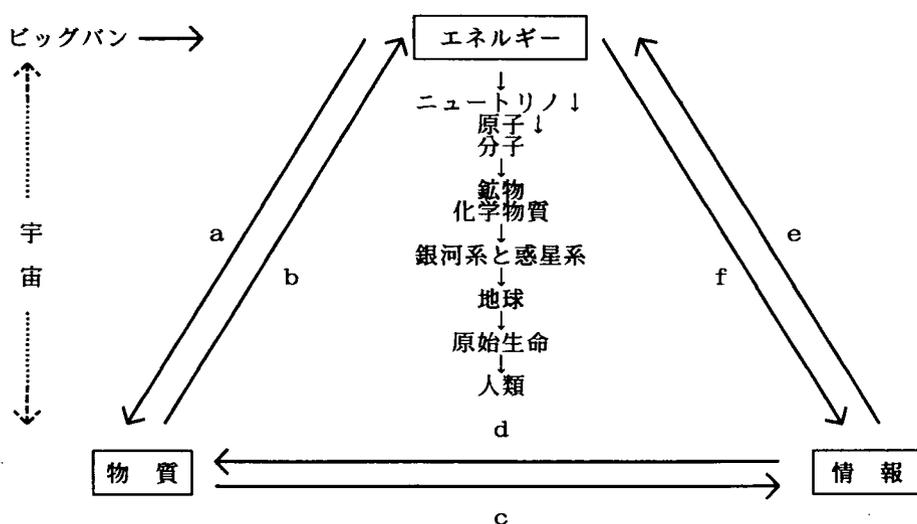


図1 エネルギー、物質、情報の相関

は菌体に情報が与えられたという信号である。信号は細胞内の一連の生化学反応によって鞭毛のモーターに伝えられ、そこで高エネルギー物質のATPを消費して、すべてのモーターを同一方向に回転させ、鞭毛は束になって回転して推進力を得て、菌はよりよい環境へ移動していく。物質は情報を与え、情報はエネルギーを発生させている(図1c, e)。また、遺伝子が担っている情報は必要量のmRNAに転写され、コピーされた情報によってタンパク質がつくられる。mRNAはタンパク質が必要量つくられると分解消失する。情報に代わって物質ができていく(図1d)。もとの遺伝子の担っている情報は転写されても保存されたままである。

文字列や音声や絵画・彫刻などどんな形をとっている情報も、目や耳やその他の感覚器官を経て脳に達する。感覚器では入力情報の質と量に応じた電気信号が発生する。情報の電気エネルギーへの変換が起こっている(図1e)。また人が何かを考える、つまり情報を生産するときには、思考に関与しているニューロンでは必ずATPを分解・消費してその化学エネルギーが供給されている。エネルギーは思考に必要であり、エネルギーを消費して情報が発生するのである(図1f)。緑色植物の葉緑体内では、太陽の光エネルギーを用いて水と二酸化炭素とから糖などの有機化合物を光合成して、光エネルギーを化学エネルギーに変換する。動植物細胞内のミトコンドリアでは、糖を分解して使い勝手の良い高エネルギー物質であるATPをつくっている。ATPのもつ化学エネルギーはもともとは水素原子の融合で生じた太陽の光エネルギーなのである(図1b)。

電気時計が時を刻み、時刻の情報を生産して発信しているとす。この場合に電気エネルギーは時計の針を動かし、絶えず時を知らせている。情報の発生に伴ってエネルギーの消費がある(図1f)。時計は時刻を気にして時計を見た人だけに時刻の情報を発信するのではなくて、時計を見た人だけが、発信し続けている時刻の情

報を得るのである。もし停電で針が止まっていれば、エネルギーの消費なしで時刻情報を発信していることになる。しかし、これは偽の情報(false information)であり、それを見た人は一旦は受け取ることもあり得るが、やがて偽の情報と気づいて脳の記憶を消すか、真の情報(true information)に書き換えるであろう。偽情報と本当の情報に関しては、情報の概念や定義にかかわる一つの論点でもあり、情報の選択や受容の面から別に議論する必要がある。

情報はこのように抽象的で多様な形をとり、物質やエネルギーと強い相関がある。情報は何かのメディアに乗らない限り目に見えないし聞こえないが、確かに実在している。その点で情報はエネルギーの性質とよく似ている。エネルギーか物質かが存在すれば情報の存在を認識できるが、それらが存在しない無の世界を仮定すると、そこには果たして情報は存在するだろうか。情報は我々の意識としてのみ存在するだけで、あたかも影のように実体がないのであろうか。しかし情報を意識すれば脳はエネルギーを消費するので情報は確かに実在する。ただし、情報がエネルギーや物質との間に強い相関があるということは、必ずしも定量的な相互変換があることを意味してはいない。

2. エントロピーと情報

2.1 熱力学的エントロピーと情報エントロピー

熱力学第1法則は巨視的な現象に適用するエネルギー保存の法則としてよく知られている。熱力学第2法則は巨視的な現象が一般に不可逆であるという経験則である。熱が高温の物体から低温の物体に移動するときに、熱の移動以外の変化を起こさない限り、その過程は不可逆である。またさまざまなエネルギーの相互変換は一方向にのみ起こり、熱エネルギーとして散逸する傾向にある。この法則はまたエントロピー増大の法則ともいわれる。エントロピーは物質

または場からなる系の状態量の一つで, Rudolf Clausius (1854) が導入した概念である。平たくいえば, エネルギーや物質は秩序化された状態から無秩序化された状態へ, あるいは使用可能なものから使用不可能なものへと変化する。これは, 自然界は全体として絶えず無秩序化に向かっていることを意味する [02]。熱力学第3法則によってエントロピーの絶対値が定まる。

Ludwig Boltzmann (1877) は統計力学的なエントロピーの定義を与えた。彼は一つの巨視的な状態に含まれる微視的な状態の総数を W としたとき, エントロピー (S) を, $S = k \log_e W$ という方程式で示した。 k はボルツマン定数で, 絶対温度あたりの熱量単位 ($1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) で示される比例定数である。エントロピーは系の取り得る状態の数が多いほど大きくなり, 系の状態の多様性を示す指標である。 Boltzmann によるこの定式化は, 無秩序の指標であるエントロピーが '形を与える' という秩序化の性質の意味を語源にもつ情報 ([01] p. 1 参照) について考察するきっかけを与えた。

熱力学的エントロピーに対して, Shannon はメッセージの起こり得る確率からみた情報の尺度を情報エントロピーと名づけた (1948)。実現確率 p_i の種々のメッセージの1つがもつ平均情報量を情報エントロピー (H) とすると, $H = -\sum_i p_i \log_2 p_i$ という式によって表され, 実現可能な状態の集合に対してどれだけ知識をもっているかという程度を示す。与えられた情報の量 (知識) が多いほど, H は小さくなり, $H = 0$ のときには知識が十分にある。可能な状態の数が多いときは知識が乏しく, H は大きいことになる。一方, Boltzmann の式において, 微視的な各状態の出現確率が一定でないとき, ある状態 i の出現確率を p_i として表現すると, $S = -k \sum_i p_i \log_e p_i$ となり, 形の上では H と同じ式になる。それで情報エントロピーという言葉が生まれた。しかし, 熱力学的エントロピーはエネルギー単位で示されるが, 情報エントロピーは物理量の単位をもたない [03]。

2. 2 Shannonの情報の定義に関して

2. 2. 1 情報と情報量の定義

Shannonの情報に対する考え方は次のように表現される。系の予想し得るいくつかの可能性を限定して, 不確かさ (uncertainty) を除くものが情報であり, 情報の量はその除かれる不確かさの度合いである [04]。可能性の数を M とすると, それは実現確率の (P) の逆数だから, どの可能性も等確率で実現するとすれば, 実現したことから知り得る情報量 (I) は次の式で与えられる。

$$I = \log M = \log 1/P = -\log P$$

このShannonの式によると, 不確かさが減るほど, すなわち確率が1に近づくほど, 情報量は少なくなる。情報量は実現した事象が含む情報含量 (information content) の意味である。この式では通信の場合に, メッセージの起こり得る確率が低い, つまりノイズが多いほど伝送される情報量が多く, 極端に云えばノイズばかりのときに一番情報量が大きという矛盾が起きる [03] [05]。もともとShannonの情報量の式は通信理論の数学的取り扱いから導かれたものだから, 通信する情報の構文的な (syntactic) あるいは記号的な側面の定量には有用である。しかし, 意味の伝達を考えたものではないから, メッセージの意味的 (semantic) 側面の定量化には役に立たないといわれる [06]。しかし情報は記号として伝達される。情報の意味内容を考慮しなければ, Shannonの情報の定義は有効であろう。

2. 2. 2 記号的情報と意味的信息との関係

Shannonの情報の定義と意味的信息との関係を見るために, 文字記号の集合した系で考えてみよう。図2aに示した全て異なる文字記号10個を全部使って, 意味を全く考えないで10文字からなる文字列を作るという情報によって作業するとする。どれか1文字を無作為的に文字列

の一番目の座位に置く。その文字記号の選択肢は10通りある。続いて残りの9文字の中から1文字を無作為的に二番目の座位に置く。以下同様にしていくと、文字列は $10 \times 9 \times 8 \times \dots \times 1 = 3,628,800$ 通り可能である。どの文字列も等確率で生じ得るので、ある文字列から知り得る情報量はShannonの式によると、

$$I = -\log P = \log 3,628,800$$

少しでも意味を念頭に置けば、実現確率は文字列によって異なってくるが、意味を考えなければ、3,628,800通りのどの文字列を作るのに必要な情報量も同じである。Shannonの情報の定義と情報量の式とを合わせると、不確かさを減らすために系に与えられた情報の量は、その結果実現した系から知り得る情報量と等しいことになる。

さてそれでは、「私は」という語が文字列の先頭にあり、「情報学」と「研究」という語があって「情報学」の方が「研究」よりも前方にある」という情報が与えられる（知識を持っている）とする。これによって可能な文字列は60通りに絞られる。さらに、「する」が列の最後に来る」という情報を与えれば、わずかに3通り（図2bの1, 3, 5）に絞られ、そのうちの1つが意味のある通常の日本語である。ここ

に ‘ ’ で示した2つの知識の含む情報量は、

$$I = \log 3,628,800 - \log 3$$

であり、それは残りの可能な3通りの文字列全体の含む情報量でもある。この3通りの文字列を1つに絞るための情報量は、その情報によって生じる1つの文字列の含む情報量と同じで、 $I = \log 3$ である。生じた1つの文字列の情報量は、randomな系を基にすれば $\log 3,628,800$ である。

ここに述べた例では、文字を記号として扱いながら、実はすでに意味をもった文字列を作るための情報が与えられて作業していることである。意味を全く無視して、文字を単なる記号として扱うのみでは意味のある文字列を見いだすのは容易な作業ではない。それは、例えば日本語を全く知らない人にこの文字列を作る作業をさせればわかることである。

上に情報量はどこを基準にするかにより異なる相対的な量であることを示した。randomに散らばっている文字(図2a)は文字列をなしていないから、文字列という点から見れば図2aの含む情報量はゼロということになるが、果たして絶対量はゼロであろうか？ いや、そうではない。この文字は左傾しているとか、逆さになっているとか、複雑な記号であるとか、いろいろな情報を知り得る。そうすると、情報絶対量がゼロという状態はあり得るのだろうか？

情報量とは、系に情報が与えられることによって増えた正味の情報量を示すと言い換えることができよう。このことは3. 1節に示した考え方につながっていく。

さて、図2bの文字列を見て、我々は意味のある文字列と意味のない文字列とを区別できる。上の2列は意味があり、次の2列も日本語としては少々変だがまあ意味があるでしょう。さらにいえば、一番上の文字列は、私以外の他の人はともかくとして、私は情報学を研究するのであり、二番目はいろいろの学問分野の中でも情報学というものを私は研究するのであって、意味が多少異なる。こうした意味の違いは文字を

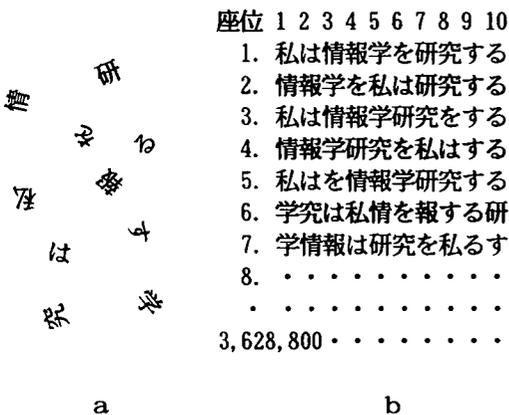


図2 全て異なる10個の文字記号から10文字の列をつくる

単に記号として取り扱う限りは分からない。

2. 2. 3 情報は文学の解釈を限定する

Shannonの情報の定義は意味の情報と全く関係がないといえるであろうか？

以下は松尾芭蕉の「おくのほそ道」の中の旅立ちの場面である。

彌生も末の七日明ほの空朧々として月は在明にて光おさまれる物から不土の峯幽かにみえて上野谷中の花の梢又いつかはと心ほそしむつましきかきりは宵よりつとひて舟に乗て送る千しゅと云所にて船をあかれは前途三千里のおもひ胸にふさかりて幻のちまたに離別の泪をそゝく

行春や鳥啼き魚の目は泪

是を矢立の初として行道なをすすます人々は途中に立ちならひて後ろかけのみゆる迄はと見送なるへしことし元禄二とせにや奥州長途の行脚只かりそめに・・・

(岩波文庫「奥の細道」, 伊藤松宇校訂より)

これは源氏物語や漢詩その他古今東西の多くの作品の表現を借り、芭蕉が心血を注いで5年も後に完成した紀行文である [07] [08]。現在はほぼ研究し尽くされてその解釈は定まっている。

表1 元禄2年3月27日朝の太陽と月の方位^{a)}

1. 元禄2年3月27日に相当するグレゴリー歴 = 1689年5月16日^{b)}
2. 上記の日付けの太陽と月の方位^{c)}

時刻	太陽		月	
	方位	高度	方位	高度
月の出 2時35分頃	ほぼ北東	-20°	東5°北	0°
夜明け 4時00分頃	北東15°東	-7°	東7°南	17°
日の出 4時38分頃	ほぼ東北東	0°	東13°南	25°

注^{a)} 本データは、元京都大学花山天文台勤務の友人 斎藤澄三郎氏より提供を受けた。

^{b)} 内田正男, 日本歴史原典, 雄山閣, 昭和50年。

^{c)} Bretagnon, P., Simon, J.-L. Planetary Programs and Tables from -4000 to -2000. William-Bell Inc., 1986. の概算式による。

るが、それを全く知らないとして読むと、例えば西方に富士を見たのなら、そちらに近い方角に月は見えたのか、あるいはどの位の高さに月は見えたのか、上野の桜は見たのかなど、いろいろと想像をめぐらすことができる。そこで文中のアンダーラインをつけた箇所について、表1のデータから得た情報を用いて解釈してみることにしよう。

昔の人は早起きで早立ちしたに違いない。あけぼの=夜明けは午前四時で、月は三日月程度に細く、その高度は17°で太陽に近い方角にのぼる。従ってよい気象条件でないと月は見えないであろう。しかも空は(朧々と)おぼろに霞んでいる。またこの時期には桜の花はすでにない。芭蕉は西に目をやれば、江戸の街並みの上のまだ薄暗い空に富士の頂上は見えたであろうが、有明の月は見なかった可能性が高い。

芭蕉の研究者の見解では、芭蕉が実際の見聞にとらわれずに創作した部分が多く、同行した曾良の日記とも食い違いがあるという。この天文学のデータからの推論は、その見解と一致している。

ここで云いたいのは文学的解釈ではない。情報がないと解釈にいろいろな選択肢が可能であるが、表1のデータから得た情報を入力すると選択肢が大幅に減る、つまり意味が限られてくる。ということは、Shannonの情報の定義は意味の情報と間接的ではあるが関係があるということになる。しかし、情報量はどのように算出できるであろうか？

仮に研究者の解釈を知らないで、しかも表1のデータもないときには、文の至るところにおいて、人により解釈が違い得るであろうから、可能な解釈の組み合わせはかなり多くなる。さらに、情報量を求める基準をどこに置かかは人によって異なるので定まらない。Shannonの式を適用して意味的情報量を定量的に表現することは非常に困難である。

2. 3 Stonierの情報の定義に関して

従来の物理学は、自然現象を物質とエネルギーを基盤にした法則で説明してきたが、それでは不十分であった。Stonierはそこに「情報」の概念を導入して、情報物理学という新たな分野を構築しようとしている [05] [06]。

彼の考えをごく簡単に記すと、情報は宇宙に基礎的なもので、物理的に実在するとの仮定から情報理論を考え、組織化されているシステム(系)はすべて情報を含み、系の組織化の状態の変化はエントロピーの変化として表される。またエントロピーの変化は、それ自体系の情報量 (information content) の変化を定量的に示している。すなわち、系が組織化されていればいるほど、その系にはより多くの情報が蓄積している、とする。したがって彼の考えている情報量は、Shannonの言うところの、系の不確定な要素を情報を与えることによりどれだけ減らすか、という量とは違う。

少し具体的に述べると、Erwin Schrödingerは、Boltzmannの方程式のW(系の取り得る微視的な状態の数)が無秩序(disorder)と等価であり、かつ、秩序は無秩序の逆数であると仮定して、Wを無秩序の定量的尺度D(=1/order)に置換した。ここに秩序(order)は系の組織化の度合いを表すとする。このSchrödingerの式 $S = k \log D$ を出発点として、それにさらに仮定を置いて、Stonierはエントロピーと情報とを関係づけた。

情報(I)は秩序(=組織性)の関数であり、情報量と組織化の度合いとは直線関係にある、

$$I = c(\text{order}), \text{ または } \text{order} = I / c$$

したがって、 $D = c / I$ であるとする。ここに定数cはエントロピーがゼロのときの系の情報含量を示し、 $c = I_0$ である。Schrödingerの式より、

$$S = k \log c / I = k \log [I_0 / I]$$

が得られる。すなわち、無秩序はエントロピーがゼロのときと任意のエントロピー(S)の

ときの系の情報含量の比として定量的に示されることになる。

Stonierはさらに、膵臓のタンパク質消化酵素トリプシンが活性状態(秩序ある構造)から変性して不活性(崩れた構造)になった場合のエントロピー変化、

$$\Delta S = S_d - S_n = 891 \text{ J/K/mol}$$

(Fruton & Simonds, 一般生化学, より)

を用いて、

$$\Delta S = 148 \times 10^{-23} \text{ J/K/molecule}$$

$$\log [W_d / W_n] = \Delta S / k = 107 \text{ molecule}$$

$$W_d / W_n = I_n / I_d = 2^{155} / \text{molecule}$$

$$\log [I_n / I_d] = \log 2^{155} / \text{molecule} \\ = 155 \text{ bits/molecule}$$

したがって、変性による情報量の減少は1分子あたり155ビットと計算した。これによれば、1分子あたり1ビットの情報は約6 J/K/molであり、1エントロピー単位(1 J/K/mol)は約 10^{23} ビット/molとなる。これが正しいとすると、これはエネルギーの情報への変換の定量的基礎を与えることになる [05] [06]。

Stonierは、系は組織化されるほどより多くの情報を含むとして、組織化すること、あるいは組織されたもの(organization)に物理的意味を与え、組織化を介して、秩序の度合いとエントロピーとの関係に情報を結びつけている。ここで組織性と秩序とはほぼ同じ意味に受け取れるが、organizationは行為ないし行為の結果生じる構造であるし、組織化された系は情報を与え伝達する能力があるとStonierは定義しているので、能動的な系でもある。ところが、秩序(order)ないし秩序正しさ(orderliness)は状態を定性的に示す語であるので、organizationとorderlinessとは厳密には等置できない。秩序とか無秩序という定性的な状態を物理的な尺度で定量的に測定できるのであろうか? 系の状態量は無秩序の程度と等価にしたSchrödingerの式を出発点に置いたことは、一見論理的であるが、果たして妥当であらうか。例えば、ある人の住む狭い一室に多数の書物が雑然と積み重

なって置かれているとする。それを他人が見ると、まさに無秩序であると感じるであろう。しかし、その住人はその状態に慣れていて、どこにどの本があるかを熟知しているので、他人が勝手に整理するとかえって本の所在が分からなくなるという場合がしばしばある。秩序の度合いは本来定性的なもので、ある人には無秩序に思っても別の人には秩序が成立しており、共通認識のもとに定量的に表現できないものではなからうか、との疑問が生じる。

3. 脳神経系と情報量

前章に述べたShannonらの情報量の式は、熱力学的エントロピーの式に形式上類似し、またStonierの式は、Boltzmann, Schrödingerの線に戻って発展させたもので、熱力学的エントロピーに直接基礎を置いている。

ところで、遺伝情報系においては、遺伝子の働きは脳からの直接間接の影響下にある。例えば、甲状腺刺激ホルモンは脳神経系の支配下に生産され、その刺激を受けた甲状腺内では特定の遺伝子が働いて必要なタンパク質を生産し、結果として甲状腺ホルモンが生産分泌される。

脳神経系では、感覚を受容する神経細胞(ニューロン)が外部からの情報を知覚する。情報は要素に細かく分解され、それぞれの感覚野に伝達されて分析、記憶される。想起した記憶や外部情報に基づいて情報は生産されて、音声記号や文字記号に変換され、あるいは画像化したメッセージとして発信される。

脳神経系や遺伝情報系はもとより、生体情報系は情報の受容と生産に深く関わっているため、熱学的エントロピーとか不確かさの度合いに基づいて情報量を考えるよりも、脳の実質やその働きの面から考えていく方が、ずっと現実的であり、少なくとも意味的信息を取扱うには妥当であろう。

3. 1 情報の定量化を考える

思考は解 (solution) を生む。解は決定でも推理でも、あるいは文学作品でも画像や彫刻でも何でもよい。解は思考の結果であり、情報を含み、情報を発する。最も単純化して考えると、思考過程がリニアであろうと枝分れしていようと、あるいはループになっていようと、どんな過程を経るにしても、思考の末に得た解を含む情報量 (I) は思考に必要な情報量 (I₀; 情報の初期値) を用いて得たのだから、新たに生じた正味の情報量 (I_N) は、I から I₀ を差し引いたものとなる。ここに I₀ は記憶を想起した情報や、思考の開始時や途中で必要になって新たに入力した情報も含むことにする。解は選択され、不必要なまたは正しくない解は捨てて、必要なまたは正しい解のみが記憶されるものとする。しかし最終解に至る途中で、それほど重要ではないかまたは思考目的から外れているので最終解からは除かれたが、いずれ何かの役に立つこともあろうかと記憶に残したというマイナーな結果もあろう。それを I₁, I₂, I₃, ... I_n とすると、全情報量 (I_T) は、

$$I_T = I + I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$\therefore I_N = I_T - I_0$$

となる。

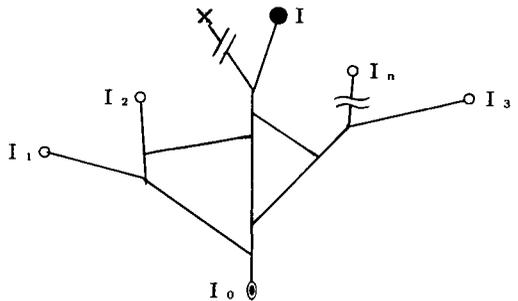


図3 情報量生成のパターン

I : 思考の結果得られた解に含まれる情報量

I₀ : 思考に必要な情報量 (外部からの入力情報を含む)

I₁, I₂, ..., I_n : 記憶したminorな結果の情報量

図3は、ごく単純化した情報の生成パターンであるが、実際の情報生産の状況を図示することは現状では不可能である。この図式は、同一の解を得るに至る途中の過程は情報量の見積りには関係しないことを意味している。すなわち、途中でどれだけ回り道をしてエネルギーを消費しようと、それは情報量として評価されず、最終的に記憶装置に入った解の含む情報だけが情報量として見積もられるとするのである。さらにいえば、記憶が成立することにより消費されるエネルギーが情報量の定量的基礎を与えるものと考えたい。

3. 2 情報を細分化する

自然科学の研究手段の一つは、ものを細分化して調べることである。例えば、遺伝の法則を発見した Gregor Mendelは、遺伝現象を、これ以上小さくできない個々の遺伝的特徴（遺伝形質）の単位にまで分けて、それぞれの単位形質を支配する要因が親から子へ受け渡されるとして把握した。またアミノ酸がいくつもつながった高分子物質であるタンパク質を細分化して得られる個々のアミノ酸は、もとのタンパク質とは別の性質を示すが、タンパク質同様分子である。アミノ酸をさらに細分化すると、C, H, O, N, Sなどの数種類の原子になる。原子はすべての分子を構成する普遍的な単位物質で、各原子の性質は特定の分子の性質を示さない。原子はさらに陽子、電子、中性子などに細分化され、それらはさらに小さい各種の素粒子に細分化でき、しだいにエネルギーと物質との区別が判然としなくなる。物質は細分化するにつれて、もとの物質のもつ特長は失われて、より普遍的な特長をもつものになっていく。

それでは情報を細分化したらどうなるであろうか。図2に示した文字列‘私は情報学を研究する’は、誰もが同様に解釈できるある一つの普遍的な意味情報を含んでいる。これを私、情報学、研究などの単語に細分化すると、各単語

はそれぞれ独自の意味を持ち、どの単語も単独ではもとの文字列の表現する意味を示さない。それらをさらに細分化すると、例えば情と報と学のようにそれぞれ単独では何らかの意味を持つ文字になる。これらの文字はさらに直線や曲線などに細かくなるし、最終的にはそれらは光波として、個々の網膜細胞へ入力する刺激にまで分解できる。人はこのような形で情報を細分化し、それらを関連づけて受容し、脳内で再組立てして意味を受け取る。文字列をタンパク質とすると、単語はアミノ酸に、個々の文字は原子に、そして直線や曲線などの文字の構成要素は陽子や電子などに相当し、個々の網膜細胞に入力する刺激は物質の根源をなす素粒子群に相当すると対比し得る。網膜のニューロンの数は一億数千万個もある。個々のニューロンの働きから情報の最小単位を想定してみよう。

3. 3 情報素単位と情報素量

1個のニューロンは情報処理の素子であり、そこで起きる情報の素過程では、もはや意味のある情報を扱っているとは言えない。それで、1個の細胞が1回の刺激を受けて起こす反応を情報素単位 (elementary unit of information) とし、その反応で消費されるエネルギー量を情報素量 (elementary amount of information) と呼ぶことにする。

ニューロンは刺激を受けていないときは、細胞膜の内は外に比べて約 -70mV の膜電位に保たれており(静止電位)、これに興奮性の刺激が来ると Na^+ イオンが膜内に流入し、膜電位はプラスの方向に脱分極し、抑制性の信号ではマイナスの方向に過分極する。興奮性と抑制性の信号による電位変動の和がある臨界値(約 -40mV)を越えると途端に Na^+ イオンチャンネルが一斉に開き、 Na^+ の細胞内への流入が急激に増加し、 K^+ は外に出る。その結果、膜電位は約 $+100\text{mV}$ にまで上昇し、神経インパルス(活動電位)が発生して、次のニューロンに興

奮を伝達する。インパルスが通過した後は Na^+ が流出して K^+ が流入し、もとの静止電位に戻る [09] (図4)。

細胞は電気の良導体であるから、膜内外の電位差はゼロになるはずのところ、イオンの能動輸送 (active transport) によってエネルギーを消費しつつ静止電位を保っている。これにはイオンの出入りに関与するいくつかの酵素が働いている。その主なものの一つとして、 Na^+ 、 K^+ -ATPaseという酵素がある。この酵素は1 mol (1グラム分子) のATPを分解して生じる約7.8kcalのエネルギーを用いて、3 molの Na^+ を膜外へ、2 molの K^+ を内部へ輸送する。ニューロンにおける能動輸送の詳細は完全にはわかっていないが、将来的には関与する各酵素の機能がすべて明確になり、インパルスの発生に伴う各種イオンの出入りの数から、消費されるATPのエネルギーを計算することが可能になるであろう。

上述のように、情報を受け取ると、脳内では神経インパルスが発生してニューロンを通過するが、その際のニューロンの膜電位の変化は一過性で、直ちに静止電位に戻る。このことは、3. 1に述べた思考の過程でのエネルギーの消

費は情報量に含めないとする考え方に論理的基礎を与える。情報は最終的に記憶装置のニューロンを興奮させ、記憶の痕跡を何らかの形で残す。このときのニューロンにおけるATPの消費量から、情報量はエネルギー単位で示すことが可能になるであろう。従って情報素単位の統合された集積としての情報最小単位 (次節) の情報量 (情報最小量) もエネルギーの単位で表示できることになるであろう。このことは、情報とエネルギーとの間で定量的に相互変換が起きることを、もしかしたらそうかもしれないが、必ずしも意味するものではない。

3. 4 意味的情報の最小単位: 大脳皮質のコラム構造

さきに、意味をもった情報の最小単位や情報量を考える基盤を脳の実質やその機能に求めるのが妥当であろうと述べた。知覚はもともと客観的なものではない。例えば、一人一人が見る世界はまったく同一であるという保証はどこにもなく、個人に独自のものである。だが、人の知的・精神的機能を営んでいる大脳皮質には約150億個のニューロン群があるが、これらはコラム (円柱) 状の構造単位で働いていて、各コラムによって知覚することは違っていても、その情報処理の仕組みは皮質のどこにおいても同じである。そうした客観的事実が知覚に普遍性を与えているのであろう。

視覚情報処理の研究が最も進んでいる。形や色に反応する柱状の皮質細胞群 (コラム) について、米国の生理学者のDavid H. HubelとT. N. Wiesel [10] は、猫の大脳皮質の視覚野の活動を電極で調べていて、線の傾き方の違いに反応する一群のニューロンを発見した (1963)。線の傾きがほんの少し変わると隣接するニューロンが反応する。この線の傾きの違いに反応するニューロンは、ある点を中心にして 180° で一周するように配置されている。それぞれの細胞は縦に強くつながったコラム構造をしている。

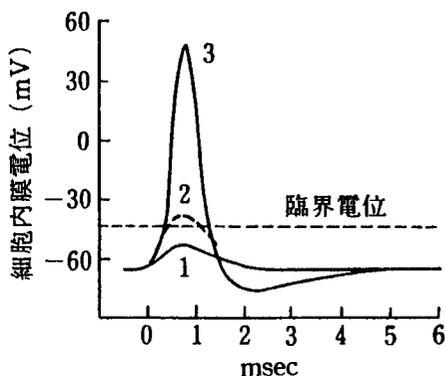


図4 神経インパルスの発生

興奮性信号(1)が加算されて臨界電位を越えると(2)、神経インパルス(3)が発生する。

この発見によって彼らは1981年にノーベル医学生理学賞を受賞した。それ以後、視覚情報処理に関する研究が盛んになった。「見る」ことはまず見る対象の線を分析することであり、ついで丸や三角などの基本的な図形や色や動きなどのいくつかの要素に分解されて、それぞれの要素を知覚するコラムへと伝わっていく。これらのコラムは後頭部の一次視覚野とその前方の視覚前野に広く分布する。

動きを知覚するコラムもある。視覚情報は連続的ではなくて、ある瞬間に取り込んだ情報を数十ミリ秒かかって処理した後に、次の瞬間の情報を同様に処理していくので、あたかも映画のフィルムの一コマずつの静止画像のように断続的である。離れた2点における同一のものをごく短い時間間隔で知覚する能力によって、断続的な画像に連続性を感じ、ものの動きを知るのである。脳血栓で左右両側の後頭側頭部のある領域が損傷したために、遠くにある小さく見えていた自動車が突然近くに大きく見え、その間の動きが見えないという例がある。単位時間にもものが移動する距離によって速度は計算される。この動きを感知する領野でも、線の傾きの知覚と同様に、少しづつ違う方向への動きにそれぞれ反応する細胞が、ある一点を取り囲んで順次配列したコラム構造を形成している。

またものの形に関係なく、右回りか左回りか前後かという回転方向に反応するそれぞれのニューロンや、近くのものや遠くのもの動く方向が反対のときに反応するニューロンなども知られている。

ひとつのコラムには数千から1万個ほどのニューロンがある。こうした事実を前提にして、コラム構造が情報処理の最小単位であり、コラムを刺激する各要素を意味的情報の最小単位と見なすことができよう。視覚野だけでなく他の感覚野もコラム構造をしていて、一つの情報に関するすべてのコラムは互いに関連づけられており、記憶された単位情報は統合して想起されるから、コラムを情報量の算定の最小単位として

も、意味のある情報全量を求めることは論理的に可能であろう。

コラムを構成する細胞の数はコラムによって異なるであろうし、一つの情報入力に対してコラム内の各細胞が何度反応するのかわかっていない。また入力した刺激に対してコラム内の全細胞が反応するのか、限られた一部の細胞だけが反応するのかわかっていない。したがって、このアプローチで情報量をエネルギー単位で求めることは、現在はまだできない。脳科学の今後の発展を大いに期待するところである。

4. 考 察

4. 1 情報量と情報概念の多様さ

Shannonの情報あるいは情報エントロピーの定義からすれば、ある系の実現し得る可能性についてどれだけ不確かさを少なくするか、あるいはどれだけ知識があるか、が系に与えられる情報の量であり、またその結果として不確かさが限定された系の内包する情報の量でもある。しかし、系に与えられる情報量または入力情報量 (given (or input) amount of information) と、系の内包情報量すなわち情報含量 (information content) とでは意味が違うので、少なくとも情報の意味内容を考える場合に、与えられる情報量と情報含量とを等置できるであろうか。2. 2. 2 に述べた10文字の系を例にとると、文字列をつくるために与えた ' ' で示した情報と、生じた文字列の与える情報とは、意味が質的に違う。両者の間に意味の上で情報変換が起こっていると言うべきであろう。従って、系に与えられる情報量と系の情報含量とを同一の量とすることには抵抗がある。我々が情報量と言うときは、通常は系の含む情報量のことであり、また実際にそれを知りたいのである。

情報の概念が実に多様であることは、情報の定義を広く文献調査した慶應義塾大学図書館・情報学科の研究報告「‘情報’概念をめぐる基礎的検討」[11] が如実に示している。情報概

念の多様さの原因として、一つには日本語の情報の語源がドイツの兵書のNachrichtの訳語として明治36年にはじめて現れたとする上田の説 [12] や、フランスの兵書から「敵情の報知」を意味する語の訳語として最初に用いられたとする説 (明治9年) [03] のどちらも、戦後情報理論が日本に導入されたときに、語源的に「形とか秩序を与える」の意味のinformationの訳語として再度登場したことにより混乱したという事情がある。もう一つ別の面として、上に述べた情報量の意味の取り方が関わっているのではないかと考えられる。文献 [11] に記載の情報の定義を情報量の考え方の差異のみに着目してごく大ざっぱに見てみると、例外はあるが、二つの流れに分けられそうである。一つはShannonの定義、すなわち不確定性を減らすために系に与えられるものが情報であるとする考え方が底流にあるものであり、もう一つは、系に含まれるものが情報であるとするもので、データまたはデータが与えるもの、あるいは知識が情報であるとするものは、後者に一応は含められよう。情報量の定義を明確にすれば、情報の概念もいくらかは整理できるであろう。

4. 2 情報量絶対ゼロの世界は存在するか？

2. 2. 2の項でShannonの情報量は相対的な量であると述べた。秩序化のために図2aの系に与えられる情報量はまた、その結果として秩序化が進んだ系 (図2b) の含む情報量でもある。図2bの系から見れば、図2aの系は情報量が相対的にゼロということになるが、それは何らかの情報を含んでいるので、情報絶対量はゼロではない。それでは情報絶対量がゼロの世界は存在するのであるか？

Stonierによると、いかなる組織化された構造もすべて情報を含み、ある系に情報を付加すると、より組織化され、また組織化された系は情報を発したり伝達する能力がある。この考え方は、informationの語源的意味に忠実である

といえる。すると原子は陽子や電子から、そしてそれらは素粒子から構成され、組織化された構造をもち、分子は原子から組織された構造体である。これらは情報を含み、情報を我々に与える。我々を取り巻く大気は O_2 , N_2 , CO_2 などの気体分子を含むので、情報を含む。惑星系も銀河系も我々に情報を与える。宇宙には当然のことながら情報が充満していることになる。

すると、もし完全に真空の世界があるとすれば、そこには情報が存在しないであろうか？ また分子の熱運動は温度が低くなれば小さくなり、絶対零度では運動しなくなる。絶対零度の世界では情報は存在するだろうか？ 宇宙の最も低温のところでも絶対温度 $1 \sim 3$ Kほどであるといわれる。現在の宇宙のどこを切り取っても情報の存在しないところはないように思える。

それでは、この宇宙の誕生する以前の世界には情報は存在したであろうか？ Stonierは、エントロピー無限大で情報ゼロの状態をビッグ・バン以前に想定しているようである。つまり宇宙の誕生以前はエネルギーは超高密度の点の状態で、情報はなかったが、宇宙の進化につれてエネルギーは物質や情報に変換して少しずつ変わってきたとする。エネルギーの高密度の点の状態もマクロには一種の組織化とみなされないだろうか？ そうするとそこにも情報が存在していたことにならないであろうか。エネルギーも物質も存在しない絶対無の世界ならば情報は存在しないであろうが、そのような世界は存在し得るであろうか。情報絶対ゼロの世界については著者の思考範囲を超えるので、理論物理学や情報物理学の進展に期待して、ここでは追求しないことにする。

4. 3 脳活動と情報量

情報の普遍的概念を探るには、物理学以外の他の諸科学における情報の捉え方を知らねばならない。従来の物理学では物質とエネルギーで自然現象を説明してきたが、それだけでは不十

分で、情報を考慮に入れる必要が生じた。それは物質やエネルギーに‘形を与える’、あるいは‘秩序を与える’、あるいは‘組織化する’ものである。かくして生物は種それぞれ固有の特定の形を作り、維持することができる。

Stonierは情報量をエントロピーと関係づけて考えているが、意味情報に適用するには問題があった。そのような物理的、数学的論議はさておき、我々は日常脳を使って情報を生産したり、受容して処理したり、生物学的に具体的に情報を扱っている。考えを記号化する過程やメッセージを記号として受け取った後に解読する過程、すなわち、意味と記号との間の変換の過程では、情報の受け取り方や作り方が人によりまちまちである。そこはもはやメディアの問題ではなくて、人の体内の、特に脳の構造と機能の問題である。脳の働きの仕方は各人によって違い、それにより受け取る意味も違って来る。従って、意味の情報量を求めるには、どうしても脳における情報処理の問題の解決が必要である。それを少しばかり具体的な形にして、3章において主張を展開してきた。以下にその主な論点をまとめておく。

1) 意味の情報でも定量的に記述するには、何らかの定式化が必要である。脳活動の末に得た結果を記憶することで、情報を得たとする。その情報含量は、思考に使用した情報量と新たに増加した情報量とからなる。思考の経路がどうであろうと、情報量には関係しない。

2) 脳における情報処理の最小単位は、大脳新皮質のコラム構造であり、これが情報量を算出する最小単位であるとする。

3) 記憶装置における1個のニューロンの1回の発火(インパルスの発生)を情報の素単位とし、そのとき消費されるエネルギーを情報素量と呼ぶことにする。

4) 神経インパルス発生の際の Na^+ イオンや K^+ イオンのニューロンへの出入りから、消費されるATPの量を求めることにより、情報素量はエネルギー単位で表すことができるであ

う。

[補遺]

1. DNA言語について

前報 [01] において、遺伝情報系と言語情報系との高度の類似性から、遺伝情報言語論を展開し、R. PollackがDNA言語という言葉を用いていることを紹介した。

大野乾 [13] は、多くの遺伝子DNAの塩基配列について分析し、2塩基の連続配列ではCTとTGが過剰で、CGとTAがごく少ないという塩基配列における法則を見いだした。塩基組成が全く異なる遺伝子間でも同じ法則が当てはまり、極端にAとTの多い遺伝子の場合でも、塩基組成から期待される頻度よりもCGとTAの頻度は低く、CTとTGは高い。これは通常言語の場合でもそうで、英語の各文字は決して均等に使われてはいない。最も頻度の高いのはtheである。これを大野は、‘こうした情報制限は言語の一般的特長である’という言葉で巧みに関連づけている。

このように遺伝子DNAの塩基配列を言語に見立てて分析する研究が次第に増え、「DNA言語」という語が盛んに使われるようになり、DNA言語に関する国際学会を組織する動きがある [14]。

また言語学者のN. Chomskyは、十数年前にDNA塩基配列を文章とみなして理解しようと試みたが、syntaxにこだわり過ぎて失敗したということである [14]。DNA言語は通常の言語とは全く構造が違うので、通常言語のような品詞とか文法を直接探ろうとしても無理な話で、上記の大野のように全く異なった発想で構文の解析をしなくてはなるまい。遺伝子DNAのそれぞれが持つ意味を通常言語に翻訳すれば、当然ながら通常言語の構文が適用できる。

2. DNA言語の音楽への変換の試み

大野 [15, 16] は、DNAの塩基配列を楽譜に転写することを試みている。これは遺伝情報

の音楽情報への一種の情報変換である。DNAを構成するたった4種類の塩基を1オクターブの7音階にどう割り当てるかについての説明はあるが、音符や休止符の長さや、crescendoとかfortissimoとかtremoloとか、あるいは楽譜を広く規制するandante cantabileなどには、どの塩基または塩基の組み合わせを対応させるのか、といったことになると、説明が十分とは言いがたい。多分に音楽についての感性に依存して変換しているように思える。

この変換の法則が明らかにできるならば、という前提のもとに、例えば、脳内の神経伝達物質であるエンケファリンやエンドルフィンやダイノルフィンなどのアヘン様ペプチドに対する遺伝子の塩基配列を音楽に変換して、末期がんの患者に聴かせると、あるいは痛みの緩和に役立って、モルヒネを投与しなくても済むかもしれない。実際に、自閉症や精神障害に対する補助療法として音楽療法が行われていて、若干の効果があることが知られている。こういう空想もあながち夢でなくなるかもしれない。

3. 言語系の進化について

遺伝言語はたった4文字(塩基)からできていて、通常言語に比べて遥かに誤りが少ない。そしてそれが遺伝現象には重要である。また文字数は少なくとも伝える情報は極めて多いことを前報で指摘した。これは、通常言語の進化が遺伝言語に比べてずっと幼稚であることを意味する。

人類が言語を持つようになる以前は、非言語的音声とともに手ぶり身ぶりで互いに意志を伝達していたに違いない。聴覚の不自由な人は手話で会話して情報の受け渡しをしている。またアメリカン・インディアンは多くの部族に分れていて、言語が多様なために、互いに手を用いた数多くの身ぶりで手話をしているという。例えば、右手の上に左手を乗せてから上に持ち上げるとaboveを意味する。William Tomkinsが詳細に研究し、400語以上も集録している [17]。人はたぶん遺伝言語系を基盤にして、手話の時

代を経て通常言語に進化させたのであろう。

文献リスト

- [01] 竹村彰祐. 情報の普遍的概念を求めて (1) : 遺伝情報系と言語情報系. J. Lib. Inf. Sci. Vol.10, p.1-14(1997)
- [02] 藤村淳, 脇岡義人, 江上生子, 兵頭友博. 科学とその歩み. 東京, 東京教学社, 1988, p.177-179
- [03] 立木教夫. 現代科学のコスモロジー. 人間のための物質・生命・情報論. 東京, 成文堂, 1992, p.126-127, p.166-173
- [04] 情報文化研究フォーラム編. 情報と文化. 東京, NTT出版, 1986, p.63-64
- [05] Stonier, T. 情報物理学の探究, 情報と宇宙の内的構造. 立木教夫訳. 東京, Springer-Verlag Tokyo, 1992, p.37-57
- [06] Stonier, T. Towards a new theory of information. J. Inf. Sci. Vol.17, p.257-263(1991)
- [07] 井本豊一, 堀信夫, 村松友次校注・訳. 日本古典文学全集, 「松尾芭蕉集」. 東京, 小学館, 1972, p.76-77
- [08] 富山奏校注. 新潮日本古典集成, 芭蕉文集. 東京, 新潮社, 1978, p.106-107
- [09] 竹村彰祐, 大井龍夫. 新版生物の情報システム. 東京, 講談社サイエンティフィック, 1997, p.91-96, p.103-104
- [10] Hubel, D.H. Wiesel, T.N. Shape and arrangement of columns in the cat's striate cortex. J. Physiol. (London), Vol.165, p.559-568 (1963)
- [11] 慶應義塾大学図書館・情報学科. 「情報」概念をめぐる基礎的検討. 1993, p.111-113
- [12] 上田修一. 情報とinformationの語の意味と変化. 情報の科学と技術. 40巻,1号, p.3-6 (1990)
- [13] 大野乾. 大いなる仮説. 東京, 羊土社,

- 1991, p.76-94
- [14] 大野乾. 続大いなる仮説. 東京, 羊土社,
1996, p.74-75
- [15] Susumu Ohno, Midori Ohno. The all
pervasive principle of repetitious
recurrence governs not only coding
sequence construction but also human
endeavor in musical composition.
Immunogenetics, Vol.24, p.71-78
(1986)
- [16] 大野乾. 生命の誕生と進化. 東京, 東京
大学出版会, 1988, p.125-151
- [17] Tomkins, W. Universal American Indian
sign language. San Diego, Calif.,
published by W. Tomkins, 1966. (友
人丹羽允氏 (大阪市立大学名誉教授) よ
り本文献のコピーの提供を受けた)