

情報理論における雑音因子—生命体と意識のオートマトンが生まれる環境

The Noise Factors in Information Theories
The Environment where Automata of Living Organism and Consciousness Reside

得丸 公明 (衛星システムエンジニア) Kimiaki Tokumaru (Satellite System Engineer)

1. はじめに：デジタル通信の情報理論

1.1 梗概

本稿ではアナログ通信に比べたデジタル通信の優位性を分析することによって、ジョン・フォン・ノイマン (John von Neumann, 1903-1957) が予言的に述べた熱力学と論理学にもとづく情報理論を解明し、ヒト意識の発生メカニズムの仮説を提示する。以下に梗概を示す。

(1) アナログ通信は物理量を送受信する。アナログ通信において、回線雑音によって搬送波は歪むが、その歪はアナログなベースバンド信号の歪をもたらす。ベースバンド信号も物理量、変調する搬送波の振幅や周波数も物理量であるため、歪は不可分に混じって搬送波の歪がベースバンド信号をも歪ませるためである。

(2) デジタル通信は論理値を送受信する。DNA/RNA の 4 種の核酸による遺伝子発現メカニズム、論理的 0/1 のビットによるコンピュータネットワーク、論理的音節にもとづくヒトの言語はデジタル通信である。デジタル通信のベースバンド信号は情報を伝える論理値であり、論理値は物理的離散性をもつ有限個の符号(水素結合の本数が 2 本・3 本とプリン基・ピリミジン基かによる 4 種類の核酸、2 種類のビット信号、言語共同体ごとに有限個ある論理的音節)によって表現される。

復調回路には有限個ある離散値のどれかを自主的に判定するメカニズムがある。アンチコドンで構成されるトランスファーRNA(tRNA)、論理的 0/1 を判定するフリップフロップ回路、免疫細胞が記憶する記号の記憶が、あらかじめ決められたコドン・ビット・記号として処理を行なう。こうして回路雑音による歪みは消える。

(3) デジタル化によって回線上の誤りはおきにくくなり、仮におきたとしてもそれは歪ではなく、別の符号として判定される符号誤りとなる。信号間の親和性を高めることにより誤り確率を低くできるほか、受信側で独自に誤り検出・訂正ができる前方誤り訂正機能をもてる。

(4) デジタル通信の最大の特徴は、受信回路上に論理層が構築され、複雑な情報処理が自動的に行なわれることだ。情報とは記号が接続法則によって二重に分節化されたものであり、デジタル固有である。本稿の定義ではアナログな情報は存在しない。

このため外界の雑音の影響を受けにくい隔離された空間がつくられ(真核細胞の細胞核、パソコンのマザーボード上の CPU、脳室)、受け取った論理的な情報は、ヒトの五官で感知できないきわめて微弱な力学によって反応する物質(電圧パルスで表現されるビット、反応性の高い RNA、水素結合・ファンデルワールス力・静電力などで反応する免疫細胞受容体や抗体タンパク質など)に復元される。論理処理回路には、複雑かつ繊細なプロトコルス

イッチに反応する信号処理経路(signaling pathway)の反応連鎖(cascade)が構築されて、情報は意味へと変換される。

(5) 情報にもとづいて情報処理経路が形成されることと、情報を意味とする高次情報によって、生命は DNA の一次元情報だけによって進化するというを論じたのがフォン・ノイマンのオートマトン理論であった。これはコンピュータネットワークにも、ヒト言語でもあてはまる。情報は自己再生し、次数をもつのだ。

(6) オートマトン理論は、ネットワーク理論であり、情報理論である。フォン・ノイマンは、情報理論が完成された暁には、論理学と熱力学によって構成されるであろうと予言した。上記メカニズムがそれではないか。

1.2 フォン・ノイマンとは何者か

フォン・ノイマンは、ハンガリー生まれの数学者で、若くしてドイツで活躍していたが、1930 年代にアメリカに移住した。戦時中は原爆開発やデジタルコンピュータ開発に関わり、戦後も戦略ミサイルの開発に関わったが、原爆実験のときに被爆した影響で癌になり、50 代前半で亡くなった。その人柄や天才ぶりを伝える逸話が多い。

軍事技術開発の分野で活躍していたフォン・ノイマンは、戦時中にウィーナー(Norbert Wiener 1894-1964)からマカロックとピッツの「神経活動に内在する思考の論理計算」を薦められて読み、生物現象を情報システムとして扱う可能性をみた[1][2]。

戦争が要求した学際協力の影響により、戦後さまざまな学際会議が開催され、生命科学を物理学や数学と結びつけた。なかでも、1946 年にガモフ(George Gamow 1904-1968)が組織した第 9 回理論物理学ワシントン会議「生物の物理学」は、自己再生の生物オートマタの分野へのフォン・ノイマンの関与を決定づけた。

ガモフは、ロシアからアメリカに亡命した理論物理学者で、フォン・ノイマンと親交があった。1953 年に DNA の二重螺旋構造が発見されると、すぐにそれが 4 元デジタル論理であることを見抜き、ワトソンやクリックらとともに RNA のアミノ酸暗号解読にも参加している[3]。

この会議にはデルブリュック(Max Delbruck)やボーア(Niels Bohr)も参加していた。この後、フォン・ノイマンはとくに遺伝子と酵素の関心に興味を示した。シュピーゲルマン(Sol Spiegelman)との間で、遺伝の生化学と情報理論の研究成果をやりとりし、ウィルスやファージといったできるだけ構造が簡単な生物を使って研究するように提言している。

生物学者や遺伝学者たちとの交流を契機に、フォン・ノイマンは 1948 年 9 月にカリフォルニア工科大学で開催されたヒクソンシンポジウム「行動における脳メカニズ

ム」に参加し、基調講演として「オートマタの一般的・論理的理論」を行なった[4].

「生物体は複雑さがなにも減少していない新しい生物体を生産する。さらに、長い進化の時期には、その複雑さが増加しさえする。」この「『複雑さ』を構成するものの厳密な概念を形づくる方向」で、「オートマトンについての系統的な理論の建設を目標とし」た。オートマトン研究は、生物体の自己増殖と進化を可能にする情報メカニズムの解明を目指す情報理論である。

2. アナログ通信における雑音因子

2.1 一般通信モデルを分析ツールとする

20 世紀の通信理論・情報理論は、ともに学際的な広がりをもつ複雑な現象である一方で、我々の五官では感知できない不可視の現象を対象としているために、理論が妥当か、完成しているのかの判断すらむずかしい。

ペルシャの民話によれば、三人の盲人が象を撫でたとき、大工は足を触って象とは柱のようなものといひ、じゅうたん屋は耳を触ってじゅうたんのようものといひ、ペット屋は象の鼻に触ってへびのようだといひ、お互いに譲らず大喧嘩になったという。

この説話にならえば、姿形がないものを論ずるとき、議論はより一層混乱し錯綜することが予想される。またこの話は、我々の言語化能力は、自分たちがあらかじめ知っていることは言語化できるが、未経験のことは言葉にできないことを暗示している。情報とは何であり、なぜ情報理論が必要かが理解されていないため、誰も話題にせず、未完であることすら問題にならない。

我々の認識能力を超えた複雑さをもつ目に見えない現象を理解するためには、参照モデルをつくって分析することが有効である。このためシャノン(Claude E. Shannon, 1916-2001)が紹介する「一般通信モデル」を用いる[5].

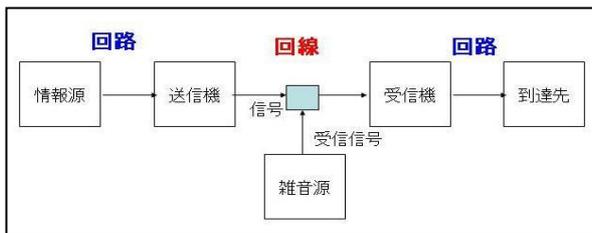


図1 シャノンの一般通信モデル

アナログ通信であろうとデジタル通信であろうと、回線をはさんで送信機と受信機がある。送信内容は情報源で決め、受信内容は到達先に届く。通信回線上に雑音源があり、メッセージを熱力学的に劣化させる。たったこれだけの分化でも、通信メカニズムの解明に役立つ。

通信回線上を伝わるメッセージにもとづいて通信を分類すれば、人間の話し声、手紙、電子メール、古代の石碑から、動物の鳴き声、ミツバチのダンス、メッセンジャーRNA、シナプス励起、コリン系神経伝達物質、インターロイキンなど、ありとあらゆる通信について情報源、到達先、雑音源を考えることができる。

2.2 熱力学：雑音とエントロピーの可視化

情報理論が広がらない理由のひとつは、シャノンが使う「量子」や「エントロピー」の用語が、量子力学や熱力学と別の意味であると説明されることにある。なぜ別の意味を表わすためにそれらの言葉を選んだのかをシャノンは説明していない。もしかするとシャノン以外の誰かがそれらの言葉を選び、シャノンはそれらの用語をわけもわからず苦しませに説明しただけだったか。情報理論の父と呼ばれる割に、おぼつかない用語使いである。

一方フォン・ノイマンは 1949 年にイリノイ大学で行なった連続講義の中で、「もし情報理論というものが見つけれられたときには、それはすでに存在している 2 つの理論と似たものであるだろう。2 つとは、形式論理学と熱力学である。情報理論という新しい理論が形式論理学のようなものであることは驚くに値しない。しかしそれが熱力学と共通のものをたくさんもつことは驚くべきことである。[6]」と述べた。

この言葉を念頭において図 1 を見直すと、熱雑音の式がよみがえってきた。「受信アンテナをある方向へ向けたとき入ってくる雑音の有能電力を P とすれば、 P は kTB に等しい。ただし k はボルツマン定数、 B は受信機の帯域幅である。このときの $T[k]$ はアンテナが照射した方向の物体が持つ温度であり、これを雑音温度という。[7] 雑音は絶対温度に比例する熱力学的存在である。

横軸を信号対雑音(S/N)比とし、縦軸を雑音(N)あるいはエントロピー($\log N$)とすると、図 2 のようなグラフが描ける。カーブは雑音温度を表し、雑音温度が低いとき左下に、高いと右上に移動する。

図 2 は、信号強度が一定のとき、S/N 比とエントロピー増大($\log N$)は反比例の関係にあることを示す。図 3 は、図 2 において、S/N 比が $N_1 \sim 4$ にあるときに、雑音が信号を打ち消すことによって通信帯域(あるいは通信容量)が減っていく状況を可視化したものである。

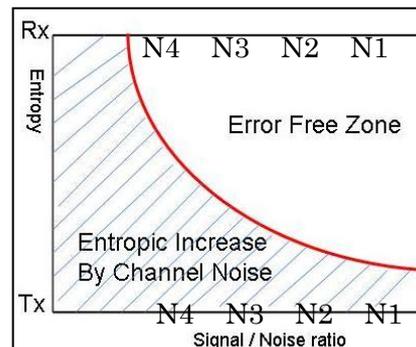


図2 S が一定の時の S/N 比と $\log N$ の関係

S/N 比を表すことから明らかなように、雑音およびエントロピーは、信号強度を打ち消す負の値である。シュレディンガーは、無秩序の目安となる量(N)の逆数(1/N)は秩序の大小を直接表わすとして、「生物体は負のエントロピーを食べて生きている」と述べた[8]。だが図 3 に示すように無秩序は逆数にしても信号内部に使用不能部分を作る。彼の主張は間違っていないか。

シャノンは、エントロピーが熱力学的な概念であることを否定した。「熱力学の第二法則を正しく理解すると、情報との関係が必要になると信じている学者もいる。しかし、これらの物理学的な関連性は工学ならびに情報理論の他の適用においては考慮する必要がない[9].」シャノンは回線雑音が熱の関数であることを知らなかったのか。彼は図 1 を自分の頭で考えたのだろうか。

シャノンは情報の意味も否定した。情報理論における雑音因子の検討は、これまで考えられてこなかった情報と情報理論の意味を問い直すことを要求する。「私は情報理論が必要である、必要とされているものうちほんのごく僅かなものしかまだ存在していないという思いを正当化すべく努力してきた。」というフォン・ノイマンの思いを理解し、情報理論を完成する必要がある[6].

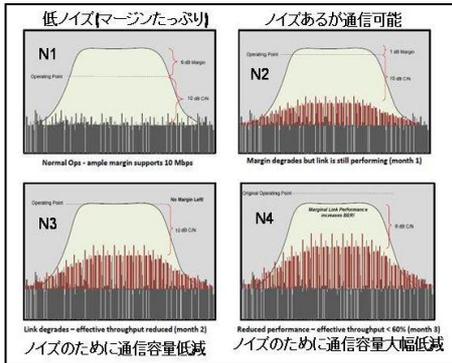


図 3 図 2 の N1~4 における信号と雑音の状態

3. デジタル通信は論理値を送受信する

3.1 アナログ物理信号とデジタル論理信号

フォン・ノイマンはデジタル計算機とアナログ計算機の原理の違いを説明した上で、両者の決定的な違いは S/N 比だと論じた[4]。デジタルとアナログの違いを論じた資料は珍しく、筆者は他には目にすることがない。

「計算機は例外的なオートマトンの一つである。この人工オートマトンは、10 億またはそれ以上のステップを短時間に実行しなければならないばかりでなく、進行中の重要な部分[これは、前もって厳密に指定された部分であるが]において、ただ一回でも間違いをしてはならない。

欠くことのできない指導原理は、通信理論全体のなかでも古典的な原理の一つである「信号雑音比(SN 比)」であり、これなしには状況を理解することはできない。

10 桁 10 進式計算機においては、[丸めによる]相対的雑音レベルは $1/10^{10}$ (百億分の 1)である。デジタル方式の真の重要さは、どんなほかのアナログ方式によっても完全には得られないところまで、計算結果の雑音レベルを減らすことができるという点にある。その上さらに雑音レベルを減らすことは、アナログ計算機ではますますむずかしいが、デジタル計算機ではますます容易である。

アナログ計算機では、 $1/10^3$ の精度に達するのは容易であるが、 $1/10^4$ はいくぶんむずかしく、 $1/10^5$ (10 万分の 1)になると非常にむずかしい。そして、現在の工学のレベルでは $1/10^6$ (百万分の 1)は不可能である。

デジタル計算機では、右の精度は単に 10 進法でそれぞれ 3, 4, 5, 6 桁の計算機を作るといふことしか意味しない。デジタル方式が重要なのは、実にこの点に」ある[4].

計算精度や S/N 比の違いだけなら量的な差、相対的な差である。しかしデジタル方式は桁数を増やせば増やすだけ精度がよくなるというならば質的な差である。

フォン・ノイマンは、情報の理論の半分が論理学、残り半分が熱力学だと語った。一般通信モデルでは単純すぎるので、コンピュータネットワークの OSI 参照モデルに照らして考えて、物理層を超えた次元に存在するまったく別の特性をもつ論理層の現象と考えるべきではないか。

デジタルとアナログの違いは、アナログは物理層上の記号のやりとりだが、デジタルは 1 信号の誤りもなく論理信号がやりとりされ、二重分節化した長く複雑なメッセージが受信者の論理層上で情報処理される。これがデジタルの最大の長所である。

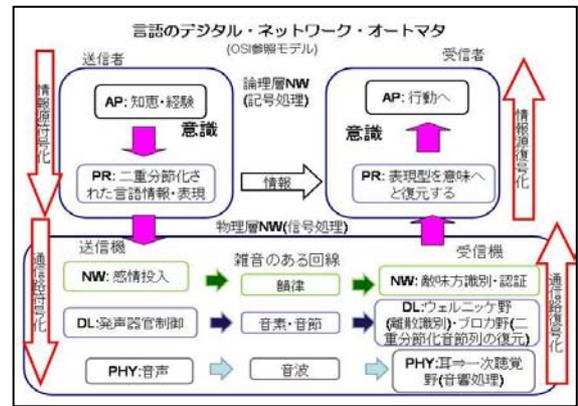


図 4 言語は論理層の現象である

3.2 物理的歪みによって論理信号は歪まない

アナログ通信は物理量を送受信する。物理量は回線上を伝搬する物理的存在によって受信機に伝わる。回線上の雑音によって物理的に歪んだ搬送波は、復調過程で検波されると、ベースバンド信号の歪として復調される。

一方、デジタル通信においては、論理値である 0/1 のビット、4 つの核酸、言語共同体ごとに有限個ある音節が交換される。

Hjelmslev(イエルムスレウ)は「音節とはアクセントをひとつ、ひとつだけ含む一連の音韻表現である」と語った[10]。アクセントとは母音である。音節とは母音をひとつ(二重母音を含む)もつ音韻表現である。V, CV, VC, CVC, CCVC, CVCC などすべて 1 音節である。したがって音節は「母音ひとつとその前後に接続する子音(群)によって構成される音韻表現」と定義できる。

音節は、論理性を表現するために、周波数成分の物理的離散性を要件とする。離散的だから論理的なのではなく、論理的だから離散的に表わしているのである。

物理層上の音節は、論理的音節を物理的に表現したものである。音節は物理的存在ではなく、論理的存在であるから回線上の物理的な歪みによって歪まない[11].

3.3 論理信号を誤りなく復調するメカニズム

シャノン、受信機は「送信機によって行なわれた操作とは逆の操作を行なう」と述べたが、これは物理量を別の物理量に変換するアナログ通信の変復調原理である。アナログ変調は、ある物理量で搬送波の振幅や周波数成分を増減させ、復調にあたっては変調と逆の操作によってもとの物理量を抽出するメカニズムである。

デジタル復調メカニズムはまったく別の原理である。デジタル受信機は、受信したアナログ搬送波から位相成分や振幅成分や周波数成分を抽出して、デジタル判定回路を通過させ、新たにデジタル値を算出する。

論理値を物理量に変換するデジタル変調方法として、ビット信号には位相偏移キーイング(Phase Shift Keying)や直交振幅変調(quadrature amplitude modulation: QAM)がある。DNA の遺伝情報はメッセンジャーRNA(mRNA)に、言語情報は物理的な音素列に変換されて、回線上を伝搬する。

3.3.1 ビット信号の復調メカニズム

回線雑音によって、搬送波の位相や振幅が一定程度歪んだとしても、復調にあたって設定されたマージンに吸収されるので、ビット誤りの確率は低くなる。マージンを越えた歪によって、信号誤りが起きると 0 が 1 に(或いは 1 が 0 に)なり、この確率をビット誤り率(Bit Error Rate: BER)という。携帯電話や無線 LAN などでは、数秒ごとに BER を計算して、誤り訂正符号率や変調方式を最適化している。(ACM: Adaptive Coding Modulation)

3.3.2 コドン翻訳の誤り防止策

遺伝情報の符号語であるコドンは 4 種類の RNA が 3 つ集まってつくられる。したがって $4 \times 4 \times 4 = 64$ 通りの順列から、20 種類のアミノ酸と 1 つの終止コドンを指定するという冗長性を利用した誤り防止策がとられている。

RNA の論理信号は、アデニン、グアニン、シトシン、ウラシルという 4 つのヌクレオチドで構成されている。アデニンとグアニンはプリン基、シトシンとウラシルはピリミジン基である。プリン基とピリミジン基が水素結合するが、ペアはアデニンとウラシル(水素結合 2 本)、グアニンとシトシン(水素結合 3 本)と決まっている。

例えば、万が一ウラシルがシトシンと置き換わるトランジション変異がおきたとしても、それがコドンの 3 番目の塩基であるかぎり、翻訳するアミノ酸は変わらない。

また、グルタミンは CAA, CAG, グルタミン酸は GAA, GAG, アスパラギンは AAU, AAC, アスパラギン酸は GAU, GAC というコドンで表現されており、1 番目で誤りがおきても、似たアミノ酸に翻訳される。

3.3.3 音素の冗長性

離散的発声能力と離散的聴覚能力の間に伝送レート上のギャップがあることは Liberman らが指摘している。[12] 「音響アルファベットにともなう困難のうちで、最大のもはレートである。会話においては、最大限 1 分間に 300 単語の理解が可能である。それぞれの英単語が平均 4 から 5 の音素であるとする、1 秒間に 30 の音素が生み出されていることになる。しかしながら、聴覚心理物理学の研究によれば 30 音素/秒というのは耳の時間分解能力

を超えている。そのレートでは離散的音響イベントは分析不能なひとつのうなりとして融合してしまう。聴覚者はそのうなりの音程から、話者がどれくらい速くしゃべっているのか判断できるかもしれないが、何がしゃべられたかはほとんど認識できない。通常の会話でめずらしくない 15 音素/秒であったとしても、耳は音素を離散的な音響イベント列として取り扱う能力をもたない。[12]

音声の音素レートは、通常の会話速度でも、耳の離散的処理能力を超えている。しかしこれは冗長性であり、誤りない伝送を保証する。聴覚神経生理学の専門家によれば、単語(概念語)の聞き取りは、アナログな音響刺激のパターン認識によって行なわれているようである。

「周波数局在地図が、刺激の表現において正確に何を意味するのかについては議論の余地があるかもしれないが、聴覚刺激情報の中核『処理』が周波数にもとづいて行なわれていることは疑いがない。(略)最近明らかになったことは、話し声信号においてもっとも重要な時間的成分はよりゆっくりとした振幅の包絡線であって、正確な波形構造ではないということである。(略)話し声の皮質上での表現は、音声的というよりもむしろ音響的であり、声の絶対音程とも無縁である。[13]

絶対音程と無縁とは、一次聴覚野ではない器官が、言葉の音響パターンに反射するのだろうか。

3.3.4 単語の音表象性・同音異義語排除

西欧の語源論(Etymology)は古代ギリシャ語や古代ペルシア語やラテン語などに言葉のルーツを求めるのが常で、そもそもの初めにどうやって言葉が生まれたかは問題にしない。言葉そのものが現象ともつ音響的親和性についてあまり論じられることはない。擬音語や擬態語がもつオノマトペ性はすべての言語にみられることであり、現象と親和する音表象性が聞き取り時の誤りを防止するメカニズムとなっている。日本語は漢字のおかげで同音異義語が多いが、一般には同じ分野には同音異義語はもたないことも、誤り防止メカニズムとして作用している。

3.3.5 概念という記号のメカニズム

音響刺激のパターン記憶にもとづいて記号を処理するのは、ヒトに限らない。犬や猫は言葉を声にできないが、彼らの日常生活に関わる言葉は聞き分けるようである。

パブロフの条件反射実験を丁寧に読むと、彼が犬に感情や理性がないという前提で実験をしていたことがわかる。だから大脳皮質感覚野から運動野に直接シナプス接続が生まれて条件反射が起きると想定したのだ。実験の結果、「分化抑制」の形成過程や「相互誘導実験」のように前提と相いれない実験結果が得られたが、彼は読者が矛盾に気付かぬようごく簡単に紹介して深く追求しなかった[14]。

大脳皮質上でのシナプス接続に代わる条件反射現象の説明としては、脳室内脳脊髄液中の B リンパ球の免疫記憶と脊髄反射がある。B リンパ球は、胚中心(Germinal Center)で、抗体のクラス転換(Class Switch)や、親和性成熟(Affinity Maturation)、体細胞超変異(Somatic Hyper Mutation)などを起こして、新たな記号に対応する。脊髄反射のメカニズムはまだ医学的には解明されていないが、

脳幹上向性網様体賦活系 (ARAS: Ascending Retinal Activating System) が関与していると考えられている。

3.3.6 概念を文法で一次元状に紡ぐと情報

一度の発声で確実に伝わる音節を順列によって組み合わせると、記号(概念)の数を無限かつ恣意的に作れる。送信順序が意味を持つようになり、複数の記号を一次元状に並べ、その並べ方やつなぎ方に複雑な意味を割り振れるようになった。一次元状に紡いだメッセージ、二重分節化された論理信号列を「情報」と定義する。

概念語と文法語では聞き取りメカニズムが異なると考えられる。概念や記号は音節がなくても作用するが、文法は音節なしには作用しえない論理的存在である。

現生人類が母音を獲得したのは、南アフリカのインド洋沿いで細石器文化時代が始まる今からおよそ 6 万 5000 年前であったと考えられる。7 万 2000 年前に始まるクリックの時代は、雑音の少ない洞窟内で二語文や三語文のチャンクで会話していた。その後喉頭降下によって肺気流を口から吐き出せるようになり、母音によって力強い音節を発声できるようになって文法は生まれた[15]。

文法は一音節からなる意味修飾・意味変容を表現する論理スイッチだから、文中で際立つ必要がある。コイサン語研究者 Westphal によれば、「いくつかのコイサン語において、ほとんどの内容語(概念語)はクリックで始まるが、機能語(文法語)にはクリックで始まるものがほとんどない」[16]。

母音は音節に強さ(アクセント)を与え、雑音の多い屋外でのメッセージのやり取りを可能にただけでなく、概念語を分節し、分節のやり方に法則性をもたせる文法を生んだ。音節と文法は同時発生したともいえる。

一方、文法を捨てて二語文・三語文でのみ会話するブラジルの熱帯雨林に住むピダハンの報告を読むと、野生動物や虫などの危険と日常的に接する密林の中で生活するためには、文法を獲得することによって本能の反射能力をわずかなりとも犠牲にしない選択をしたのではないかと思う[17]。子どもが複雑な文法を処理できるようになるためには、文法を処理するための信号経路が、新たに脳内で形成される必要があり、それが生得記号への反応や反射行動を阻害するのではないか。

文法こそがヒトの分節言語とヒト以外の動物のチャンクを分かち、文法は音節によって可能となった論理スイッチである。これは母語でも何年もかかって覚える経験的手続き記憶であり、発声器官運動制御を行なう運動中枢と、意味変容法則の論理記憶との連合記憶である。

4. 論理層低雑音環境での量子メカニズム

4.1 細胞内部の量子力学的現象の解明

フォン・ノイマンによれば、情報とは何かという問題は、生命がなぜ自動的に自己複製し、さらには進化するのかという謎を解くために必要な研究である。これを解明するために情報理論は必要なのだ。

1948年の講演は以下のように始まる。

「生きている生物、とくに、あのもっとも複雑な生物体である人間の中枢神経系(脳および脊髄)と人工のオートマ

トン(電子計算機)を比べてみるに、次のような制約があることを忘れてはならない。自然界のシステムは非常に複雑であって、それらのシステムが表している問題を、さらにいくつかの部分に細分化する必要がある[4]。」

彼は細分化の手段として、基本単位である細胞の構造と機能を第一の問題とし、その基本単位がいかにして一つの生体に組み立てられるか、生体の機能がいかにしてこれらの素子によって表されるかを理解することを第二の問題とした。つまり、細胞内の諸現象は後回しにして、細胞間のネットワークを先に解決しようとした。第二の問題は、第一の問題をブラックボックスとした参照モデルによって公理主義的に解決し、その後で量子力学の助けによって第一の問題を解明するという。

「第一の問題は現在、生理学において支配的な問題となっている。この問題は有機化学と物理化学のもっとも難解な問題に密接に関連しており、やがては量子力学の助けを大いに受けることになるであろう[4]。」

21 世紀を生きる我々は、20 世紀に発展した量子力学の成果を選択的に受容し、情報理論に役立てる必要がある。

4.2 量子力学における光と水の重要性

量子力学と情報理論はいくつかの類似性をもつ。

- 20 世紀に生まれた科学である
- 目に見えない現象を対象とする
- 量子力学ではシュレディンガー、情報理論ではシャノンという特定個人が脚光を浴びる。二人の方程式が教科書で紹介されるが、由来は示されない。
- その後の理論の発展がない[18]
- 理論と実利用が分裂している。実利用(量子力学：レーザー、電子レンジ、太陽電池など、情報理論：携帯電話、コンピュータネットワークなど)は理論の教科書に登場しない。

筆者はシャノンの論文を虚心に読むことで、少しずつ情報理論についての知識を深めたが、一方でシャノンのエントロピーや冗長性や確率の概念に疑問をもつようになり、2 で示した考察に到達した。

2 の考察は、シュレディンガーのネグエントロピーという概念にも疑問を呈するものである。生物は負のエントロピーを食べて生きることにはできない。だとすると、いったい何を食べているのか。

セント・ジェルジ(Albert Szent-Gyorgyi, 1893-1986, 1937 年ノーベル医学生理学賞受賞)は、光と水であると述べている。彼はフォン・ノイマンと同じくハンガリー人で、第二次大戦後アメリカに移住しており、二人は親交があった[19]。

「生命の燃料は電子である。より正確には光合成において光子からうばったエネルギーである。[20]」

「生物の世界のエネルギーは、光合成とその逆過程とからなっている。

光合成： $h\nu \rightarrow E^* \rightarrow (E1) \rightarrow (E2) \rightarrow (E3) \rightarrow (En)$

発光： $(En) \rightarrow (E3) \rightarrow (E2) \rightarrow (E1) \rightarrow E^* \rightarrow h\nu$ [21]

(h はプランク定数, ν は振動数)

重要なのは水である。「水は構造成分と単独で独立な系をつくり、水なしではほとんどあり得ないような電子の励起を可能にする。(略)生物学的機構は、実際には水の

構造の形成と破壊からなっている。水は単なる生きた機械の媒質なのではなく、その部分でもある。また水の構造と電子の励起との相互作用は“生きている状態”の本質そのものと深く結びついている。

水は単に生命の母であるだけでなく、生命のマトリックスでもある。

三重項は光合成においても、またエネルギーを消費する生物学作用においても、エネルギー伝達の主要な手段であるように思われる。またクロロプラスト中でも、クロロフィルの三重項励起が周囲の水構造によって可能になり、安定化されるように思われる。[21]

ヒトの意識を含む生命現象は、光と水の量子生化学によって解明されるのではないだろうか。

4.3 論理層におけるエネルギー源

人工オートマトンであるコンピュータネットワークの論理層現象は、CPU のレジスタに電圧をかけて演算を実行する。しかし自然のオートマトンには電源がない。細胞内部のエネルギー源について、セント・ジェルジは以下のように述べる。

「細胞内のもっとも強力なエネルギー伝達の部位のひとつは、食物を酸化し、そのエネルギーを ATP に伝達し、 $\sim P$ の形態で安定化するミトコンドリアである。[21]

「細胞膜によって世界は二分されている。すなわち“内部”と“外部”とに。細胞膜は環境からやってくるあらゆる通信を受けとる。その異常な透過性とポンプ作用によって、細胞膜はその機能が依存している細胞内環境の組成を定める。このものは電氣的勾配をもっており、大部分は内部で負、外部で正になっている。こうして細胞膜は、ポテンシャル・エネルギーをもった電氣的二重層の場となっている。[21]

フォン・ノイマンが、第一の問題を量子力学によって解明するといったことは的を射ていたようだ。生命の現象は細胞単位でおきる。細胞ひとつあれば、組織や器官に頼らずに、満足のいく反応が生まれえる。

4.4 論理層における低雑音環境での量子現象

DNA が格納されている真核細胞の細胞核は核膜で保護された環境であり、内部には核液と DNA がある。この中で何が起きているかは最近になるまでわからず、一時は DNA の 98% はタンパク質合成と直接関わりがないジャンクであるということまで言われた。

最近では信号処理経路(signaling pathway)による連鎖現象(cascade)が起きる場であるということがわかってきた。たとえば非コーディング RNA による選択的スプライシング(AS: Alternative pre-mRNA Splicing)が行なわれている。ヒトゲノムの数は 23000 ほどしかないが、それを転写後に自動的に編集して 10 万種類ともいわれるタンパク質を指定する mRNA に作り変える作業が行なわれている。

この繊細な作業を誤りなく実行するために、核膜による保護環境が重要な役割を果たしていると思われる。

5. 意識の生まれる量子場

5.1 神経細胞・大脳皮質・電子伝達現象でない説明

これまで多くの学者によってヒト意識のメカニズムの解明が試みられてきたが、ほとんどは、神経細胞のシナプス接続によって、大脳皮質上で電子伝達が起きるという前提で考えてきたのではないだろうか。その結果、意識や反射が生まれるメカニズムや長期記憶が定着するメカニズムについては仮説ひとつ存在していない。

筆者は、ヒトの意識は論理層ネットワーク現象であると考え。3 で論じたように、ヒト言語は論理値を交換する通信へと進化したことによって、到達先に 1 信号の誤りのない情報が届くようになった。

概念記号を恣意的に生み出すことができるようになり、概念の数が爆発的に増えた。母音が生まれ、信号がアクセントを持つようになり、論理的音節を獲得した。音節をメッセージの途中に論理スイッチとして配置することで、概念を複雑・精巧に分節した情報をやり取りできるようになった。

この情報の組み立てや解読を、どこで、どのように行なっているのかが、意識のメカニズム仮説である。仮説はイエルネ(N.K. Jerne, 1911-1994)の「免疫システムのネットワーク理論に向けて」と「免疫システムの生成文法論」を参考にした[22][23]。

5.2 脳内低雑音環境としての脳室と脳脊髄液

真核細胞の論理層ネットワーク現象は、細胞核の中で行なわれている。ヒトの脳内にそれに相当する器官はあるだろうか考えると、脳室が思い浮かぶ。脳室は脳の深奥部にある雑音レベルの低い環境で、脈絡叢でろ過される脳脊髄液で満たされた空間である。

「脳を含む中枢神経系は中枢性の神経管から形成される。神経管の中枢は閉塞されることなく、発生が進むに連れて、形が変化する。神経管の先端部に膨張部が形成され、これが脳となり、中枢の部分が脳室になる。脳室は脊椎動物の脳に特徴的な構造である。(略)

脳室は脳脊髄液で満たされている。脳脊髄液は弱アルカリ性の透明な水溶液である。この液は脈絡叢で作られ脳室を満たし、中枢神経系を循環し、最終的には第四脳室の菱脳正中口と菱脳外側口よりクモ膜下腔に達し、静脈系統で吸収され、脳脊髄液は、血液やリンパ液と同様の第 3 の循環系である[24]。

「哺乳類以外の脊椎動物には室傍器官と呼ばれている脳脊髄液接触ニューロンの集団が視床下部に存在する。これらの脳脊髄液接触ニューロンはその微細構造から感覚性の細胞であると考えられているが、その機能は定かではない。しかしながら、その形態や局在部位から考えると脳室内の何らかの情報を脳内に伝達していることは想像できる」という[24]。室傍器官は、哺乳類では室傍核と呼ばれる神経核に発展しているようである。

脳脊髄液は、大脳をクモ膜の中に浮べて外部からの衝撃に対して保護するために存在しているという説明が今も医学の教科書に書いてある。しかしそれだけが目的なら、脳脊髄液を分泌する脈絡叢が左右側脳室と第三・第

四脳室の四ヶ所に分かれる必然性がないし、150ml の容量なのに毎日その 3, 4 倍、5~600ml 分泌する必要もない。

脈絡叢は血液をろ過することで、大きな分子が脳室内に入らないようにしている。いわゆる血液脳関門(Blood Brain Barrier: BBB)で、このために脳脊髄液中には白血球や免疫グロブリンは存在しないと思われてきたのだが、血液中に比べると 200 分の 1 ほどの割合でそれらが存在して活発な免疫応答が行なわれているということもわかってきた。脳の一番奥にあるから、まだ十分に研究が行なわれていないだけというのが実情であろう。

左右の側頭室の脈絡叢は、前頭葉、脳梁、尾状核、脳弓、頭頂葉、前角、脳梁、透明中隔、視床、下角(海馬)、後頭葉白質、後角、側頭葉と接点を持ち、第 3 脳室の脈絡叢は、視床と視床下部、視床間橋、第 4 脳室の脈絡叢は小脳と延髄と接点がある。さらに脳脊髄液はクモ膜下で大脳皮質とも接する。つまり脳脊髄液の通路は、脳のほとんどの部分と接点を持ち、新皮質と辺縁系を結びつける。

脳脊髄液の分泌は、心臓から送られてくる動脈血によって、脈打つように行なわれている。体を動かすとアイデアが湧くというのはこのためではないか。

この脳室系路を T/B リンパ球やマクロファージなどの白血球が移動して、モバイル・アドホック・ネットワークを行なうことで、脊髄反射や思考や意味が生まれるほか、海馬から長期記憶は免疫記憶として大脳皮質上に送られて保存される可能性はないだろうか。

5.3 免疫現象としての言語処理

記号の記憶が免疫記憶であると考えるのは、反応の選択性や激しさから妥当といえる。また電気パルスや神経伝達化学物質で複雑な五官の記憶を伝えることは難しく、それができるのは免疫細胞記憶ではないか。

イエルネは、神経細胞と免疫細胞のもつネットワーク機能を指摘するとともに、言語と免疫現象の類似性も指摘した[22][23]。最近になって、大脳皮質の 9 割を占めるグリア細胞が白血球起源であることや、血液脳関門があるのに脳脊髄液中で活発な免疫反応が行なわれていること、また脳脊髄液中で病変があると免疫グロブリン IgA や IgG は増加するが、IgM は不変であることなどがわかってくると、脳内の記号現象は B リンパ球と IgM が担っている可能性を考えるようになった。

免疫細胞の抗原抗体反応は概念という記号装置が必要とする条件をみたしている。他にこれだけの条件を満足しているメカニズムは生体内には思いつかない。

(i) 抗原と抗体が選択的・特異的に結びつくカギと鍵穴のような構造をもつ

(ii) 抗体の抗原結合領域(Fab)のアナログ形状と相補性決定領域(CDR1~CDR3)のペプチドのデジタル配列を結合する A/D 変換機能をもつ

(iii) B リンパ球が表現できる抗体の種類が数百万から数億ある

(iv) 新たな抗原に出会うと、何日かかけてそれに対応する新たな抗体をつくることできる

(v) 抗体自体が抗原の役割をはたして、別の抗体(抗抗体 anti-antibody)をつくりだし、相互に反応する

(vi) はじめは近いもので対応(交差)し、より精密な対応する親和性成熟・体細胞超変異現象を示す

5.4 脳内免疫記憶の集合体としての意識

意識を神経細胞ではなく脳内免疫記憶のネットワークとして考えることは、その細胞数が神経細胞より 2 桁も多いことや、ネットワークの構成に繊維による結びつきを必要としないことから妥当ではないだろうか。

「神経システムはニューロンのネットワークであり、それは 1 細胞の軸索と樹状突起が他の神経細胞群とシナプス結合を築いてできている。人間の体内にはおよそ 100 億個の神経細胞があるが、リンパ球はおよそ 1 兆個存在している。リンパ球はつまり、神経細胞よりも 100 倍、数が多い。

リンパ球はネットワークを構成するために繊維による結びつきを必要としない。リンパ球は自由に動き回るので、直接的な接触か、或いは彼らが放出する抗体分子によって相互に作用する。ネットワークは、これらの要素が認識するのと同様に認識される能力の内部に存在している。神経システムにとってと同様に、外部からの信号によるネットワークの変調は、外部世界への適応を表している。早い段階で受けた刻印は深い痕跡を残す。[22]」

「免疫システムは、主として抑圧的な固有行動によって支配されている機能的ネットワークとして見た場合でも、外部の刺激に対して開放されており、神経システムと驚くほど似ている。神経システムにとってと同様に、外部からの信号によるネットワークの変調は、外部世界へのその適応を表わしている。早い段階で受けた印は深い痕跡を残す。どちらのシステムも経験に学び強化されることによって、持続するとともに絶え間ざるネットワークの組み換えの中に保存される記憶を作り上げるが、それは子孫には伝達されない。[22]」

5.5 ヒト固有の意識作用の使用法が未確立

ここで筆者は、意識を、概念記号と文法によって記憶を処理するヒトに固有の現象を含めた定義とする。ヒト以外の動物の精神活動は意識とよばない。

ヒト以外の動物も、経験によって記号を記憶し、それらの反射によって生きる。経験知識が子孫に伝達されない一代かぎりの記憶ネットワークであることも同じだが、動物は生得記号を失わずに生きる点が違う。ヒトの生得記号は無意識の領域に押し込められて非活性化している。

ヒト固有の意識作用は、あらゆる現象に名前をつけて言葉として認識すること、言葉の音韻記号が別の言葉を連想させること、概念が文法によって分節されて複雑な情報を伝達できること、情報を意味とする情報概念を作れること、情報概念を意味とすればさらに意味を高次化・複雑化した高次情報概念をつくれることなどである。

これらのヒト固有の意識作用は、自然に正しく身につくものではない。言葉の処理は条件反射であるため、情報概念や高次情報概念が正しく反射されるようにヒトの意識を構築することが必要だがそのための教育手法が未確立だ。孔子が論語で示したような真摯な学習を生涯続けることが必要である。

20世紀の量子力学の混迷と情報理論の不毛は、高次情報概念にヒトが対応しきれなかったためではないか。情報概念や高次情報概念の特徴とその正しい使い方については、これまであまり論じられてこなかった。一日も早くその使用法を確立する必要がある。筆者が出会った議論は、ヴィゴツキーが、科学的概念を正しく獲得することが難しいと論じたことや、フォン・ノイマンが、美しい数式も現実に照らして理解しないと不毛な審美主義に陥ると語ったことくらいである[25][26]。

一方で、文法をはじめとするヒト固有の意識作用は、本能の記号を無意識化したために、ヒトは自然の摂理に反する身勝手な考えをもつようになり、自然破壊を招いた。地球環境問題は、ヒトが概念を正しく獲得し使用できなかったために起きたといっても過言ではない。

6. むすび：意識の低雑音化が必要

デジタル通信は論理信号列(=情報)を伝送するため、回線雑音によって搬送波が歪を受けても、1信号の誤りなく情報を受信者に送りどけることができる。そのデジタルな情報をアナログな意味へと変換するために、受信側に雑音レベルの低い区画が設けられ、情報を自動的・連鎖的に処理する信号処理経路がつくられる。情報が届くと、微小な物理力で連鎖反応し、意味が生まれる。

真核生物における量子現象は、細胞核内でおきるDNAの転写や非コーディングRNA(ncRNA)によるmRNAのスプライシングなどである。脳内で細胞核と相似の環境は、脳室とそこを満たす脳脊髄液である。ゲノムに該当するのがBリンパ球の免疫記憶であり、ncRNAに該当するのが脳室内の神経・免疫記憶として保持されているであろう文法規則である。

概念記号を文法スイッチで紡いだ言葉情報が耳から入ると、概念の音響信号は第三脳室(たとえば脳幹上向性網様体賦活系)で脳脊髄液との接点を持ち、脳脊髄液中にあるBリンパ球の概念記号パターン記憶を刺激し、免疫抗体と別の抗体の連鎖反応による条件反射が生まれ、文法の論理記憶に即して意味が構築される。これが意識と意味のメカニズムではないか。

この意味のメカニズムが正しく作用するためには、我々の脳室内ができるだけ雑音の少ない状態にあることが大切である。20世紀以降の大衆消費社会は、あまりに雑音が多すぎる。

日本には古来、禅や禊や祓いの伝統がある。一切の言葉を忘れてひたすら坐り、滝に打たれ、山を歩くというのは、脳神経生理上合理的な行である。言葉を忘れて一匹の野生動物に戻れば、ヒトが動物の一種にすぎないことと、人間の知能の無限の可能性に気づくであろう。

謝辞

本稿で述べたことは、2009年10月から2年半の間に(i)電子情報通信学会のコンピューテーション研究会、思考と言語研究会、パターン認識・メディア理解研究会、インターネットアーキテクチャ研究会、有機エレクトロニクス研究会、情報理論研究会、情報セキュリティ研究会、ライフインテリジェンスとオフィス情報システム研究会、情報論的学習理論と機械学習研究会、

人工知能と知識処理研究会、言語理解とコミュニケーション研究会、データ工学研究会、ヒューマンコミュニケーション基礎研究会、音声研究会、(ii)情報処理学会の音声言語処理研究会、自然言語研究会、データベースシステム研究会、バイオ情報学研究会、音楽情報科学研究会、人文科学とコンピュータ研究会、(iii)人工知能学会の知識ベースシステム研究会、情報編纂研究会などで発表をさせていただき、ご検討いただいた賜物である。この場を借りて各研究会の幹事ならびにご意見ご質問をくださった皆様に感謝します。

参考文献

- [1] Kay, L. E. Who Wrote the Book of Life - A History of Genetic Code. Stanford Univ. Press 2000, pp102-115
- [2] McCulloch, W.S. & Pitts, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics 5(1943):115-133
- [3] Gamow, G. Possible Relation between Deoxyribonucleic Acid and Protein Structure, Nature 173(1954):318
- [4] von Neumann, J. (1951) The General and Logical Theory of Automata, 「人工頭脳と自己増殖」, 『世界の名著 66 現代の科学 2』中央公論新社 1970 所収
- [5] シヤノン, C.E. ウィーバー, W. 通信の数学的理論, ちくま学芸文庫 2009
- [6] von Neumann, J. Natural and Artificial Automata, in Papers of John von Neumann on computing and computer theory, ed. by W. Aspray and A. Burks MIT Press, 1987
- [7] 一之瀬 優 一陸技 無線工学 B [アンテナと電波伝搬]完全マスター, 2007, 電気通信振興会
- [8] シュレディンガー(1944), 生命とは何かー物理的にみた生細胞, 2008, 岩波書店
- [9] Shannon, C.E. Information Theory, pp212-220, Claude Shannon Collected Papers IEEE Press 1993
- [10] Hjelmslev, The syllable as a structural unit. Proceedings of the Third Intern. Congress of Phonetic Sciences, 1938, p266
- [11] 得丸 物理的音節と論理的音節ー言語ネットワークの量子メカニズムー 情処学会研究会報告 SLP91 (2012)
- [12] Liberman, A.M, Cooper F.S., Shankweiler, D.P., Studdert-Kennedy, M, 'Perception of the Speech Code', Psychological Review, 74:6, pp 431- 461 Nov. 1967
- [13] Phillips, D.P. (2000) Introduction to the Central Auditory Nervous System, in A.F.Jahn and J.R. Santos-Sacchi (Eds), "Physiology of the Ear", 2nd Ed. San Diego, CA: Singular, pp613-638
- [14] 得丸 情報論的学習と生命学習 ~ 概念の量子メカニズム (デジタル言語学) 信学技報 IBISML2011-109
- [15] 得丸 言語情報と人類進化~ことばオートマトンのメカニズム: 概念・文法・論理概念 信学技報 COMP2011-47
- [16] Westphal, E.O.J. (1971) The Click Languages of southern and Eastern Africa, in Seboek, T.A. Current trends in Linguistics, Vol. 7:Linguistics in Sub-Saharan Africa, Berlin, Mouton
- [17] エヴェレット, D.L. 『ピダハン 「言語本能」を超える文化と世界観』屋代通子訳, みすず書房, 2012年
- [18] Aspray W. The Scientific Conceptualization of Information :A Survey, Annals of the History of Computing 7:117-140, 1985
- [19] Aspray, W. Origins of Von Neumann's Theory of Automata, The Legacy of John von Neumann, 1990, Providence, R.I. : American Mathematical Society p295 注 10
- [20] セント・ジェルジ 生体の電子論, 1973 広川書店, p63
- [21] セント・ジェルジ 生体とエネルギー 1958 みすず書房, p18
- [22] Jerne, N.K. Towards a network theory of the immune system, Ann. Immunol. (Inst. Pasteur) 125C(1974), 373-389
- [23] Jerne, N.K. The Generative Grammar of the Immune System, 1984 Nobel Lecture
- [24] 保智己, 川野絵美, 拜田由華, 脳室の感覚器官: 室傍器官, 比較生理生化学 Vol.23(2006), No.3 pp143-152
- [25] Vygotsky, L (1934) 思考と言語, 柴田義松訳, 1956 明治書院
- [26] von Neumann, J. The Mathematician, in "the Works of the Mind", 1947 Univ. of Chicago Press