

意識の脳幹・脳室・視床での免疫ネットワーク仮説 — 概念・文法・ワーキングメモリーの Latent Dynamics —

得丸 公明*

Abstract: 本稿は、言語の意味のメカニズムに関する分子レベルでの生理現象、細胞レベルの論理構造についての一仮説である。それは脳室内でおきる神経細胞と免疫細胞の相互現象であり、脳神経科学と免疫学の学際領域に位置するため、実証的研究はまだ十分には進んでいないようである。

人の音声言語処理は、哺乳類の音声記号の脊髄反射と同じメカニズムを基盤とする。概念の音韻刺激は、感覚器官から入力された記号刺激が、脳脊髄液接触ニューロン(CSF Contacting Neuron)などを経由して、脊髄にある脳幹網様体において振幅成分や周波数成分としてエピトープ (抗原決定基)提示され、脳脊髄液中の B リンパ球の B 細胞受容体(BCR)や免疫グロブリン(Ig)の超可変領域であるパラトープ(抗原結合基, FAb: Fragment Antibody binding)と抗原抗体反応を起こして、それが前頭前皮質にあるワーキングメモリーに伝達される脳室内免疫ネットワークである。こうして無意識に意味が生まれる。

文法も同じ生理メカニズムを利用するが、BCR/Ig の不変領域である結晶化可能領域(Fc: Fragment crystallizable region)のイディオトープを利用したシグナル伝達メカニズムを利用する。文法獲得以前のヒトおよびヒト以外の動物は、Fc 領域を記号のベクトル成分(方向と速度)に利用するが、文法獲得後のヒトはそれを論理的ベクトルとして文法に転用する。また、ヒト以外の動物は記号反射から直接運動制御の信号が送り出されるが、ヒトは、行動の即応性・反射性を犠牲にして、ワーキングメモリーに情報が送られて複雑な情報処理が行われて、意味が再構築される。このためヒトは、危険を伝える記号を受け取っても、反射的な回避行動をとれなくなった。

Keywords: Immune Network inside Cerebrospinal Fluid/Ventricular System
Hypothesis of Consciousness, FAb/Fc Regions of B-Cell Receptor/Immunoglobulin,
Biophysics of Language, Langage Articulé, Physical/Logical Layers of Digital
Network Automata , Digital Linguistics, Information Theory of Language

1 LD2 での検討: 通信路符号化過程

1.1. 複雑系としての言語の Latent Dynamics

潜在的ダイナミクス(Latent Dynamics)とは、複雑系(Complex System)と呼ばれるものと似ている。筆者の複雑系の定義は「学際的なサブシステムによって構成され、五官で感知できない微小力学現象が運営するシステム」である。「五官で感知できない微小力学」を「量子力学」という言葉で置き換えてもよい。潜在的ダイナミクスにおいてさまざまな理論モデルが提案されるのも、システム内部で起きている現象が五官で感知されないためである。

LD2 の予稿に示したように、筆者もたくさんの理論モデルを用いてヒト脳内の言語処理過程について検討を行った。[1] あくまでもモデルは複雑な現象を整理して理解するための参照モデルであり、究極の目的は意味のメ

カニズムの解明にあり、モデルは目に見えない世界を論理の力で認識するための公理系の役割をはたす。

複雑系の解析がむずかしいのは、第一に学際的知識を統合する必要があること、第二に五官で感知・観測できない微小な力学によって作用しているからである。学際的な研究成果は、読者がついてこないため孤独に耐える覚悟も必要である。

筆者は、地球環境問題をひきおこした現生人類は、生まれながらに邪悪な存在であるのか(性悪説)、本性は善であるのにそれに気づいていないために善なる行いを理解していないためにそれが実践できないのか(性善説)に興味をもち、2007 年 4 月に南アフリカにある最古の現生人類遺跡クラシーズ河口洞窟を訪問して、以来、言語の起源とメカニズムという複雑系に属する問題と取り組んできた。研究成果は 2009 年 10 月以降これまでに、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会のさまざまな研究会で 60 回以上にわたって報告してきた。

その結果、言語メカニズムは、我々の予想をはるかに超えて複雑かつ繊細であり、生命体の進化を生み出した遺伝子の情報メカニズムと同じデジタル・ネットワーク・オートマトン(DNA)であることがわかってきた。人類の存在は善である。言葉の正しい使い方を理解して、科学を発展させ、人類の行動を適正化する必要がある。

1. デジタル言語学の概要:学際統合

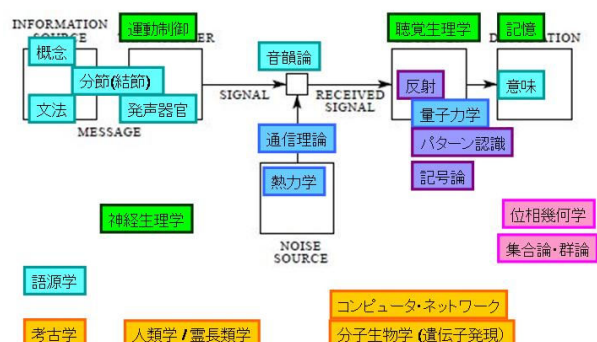


図1 言語の学際性を一般通信モデル上で表現した

1.2. 参照モデルを使った熱力学的解析

2011年6月に開かれた第二回 Latent Dynamics ワークショップでは、シャノンの情報理論への疑念を提示しつつ、同時に遺伝子情報システムとコンピュータ・ネットワークと言語情報システムの相似性に着目しつつ、ネットワーク物理層における情報伝達の解析を行なったつもりである。[2]

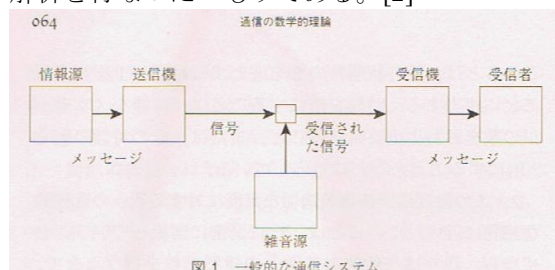


図2 一般的な通信システム [2]

はじめは、「情報源、送信機、回線、雑音源、受信機、到達先」によって複雑系を分析する一般通信モデルを参照モデルとして用いた。

一般通信モデルは、アナログ通信にもデジタル通信にも共通にあてはめることができるモデルであり、雑音の多い回線上をメッセージがどのように相手に伝わるかの解析ができる。回線雑音は、通信工学上は、 $P_n = kTB$ (P_n :雑音電力、 k :ボルツマン定数、 T :絶対温度(K)、 B :帯域(Hz))によって表現される熱力学的存在である。実際、地球上で最大の雑音源は、太陽からの放射であり、昼間聞こえなかった遠方のラジオ放送が、夜間は聞こえるという現象が起きる。

雑音電力の常用対数値 $\text{Log } P_n$ がエントロピーで、これはメッセージの信号を内部から浸食するかく乱因子である。 P_n が熱力学的概念である以上、その対数であるエントロピーも熱力学的概念である。この点で筆者はシャノンの情報理論は根本的に概念を精査する必要があると考えている。[3][4] 代わりに、情報理論は形式論理学と熱力学が合わさったものであると一貫して主張しているフォン・ノイマンのオートマタ理論こそが、情報の伝達・意味復元の複雑メカニズムを解析するために参考にされるべきであり、それによって未完成のまま放置されてきた情報理論を完成させなければならない。[5]

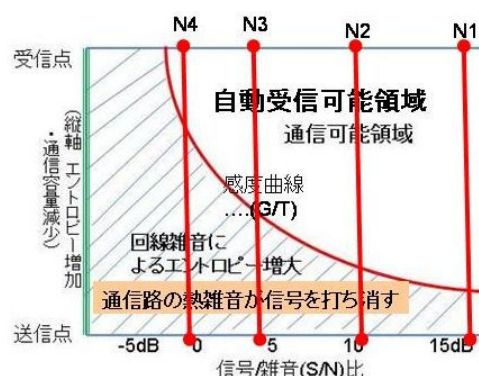


図3 エントロピーは雑音の対数である

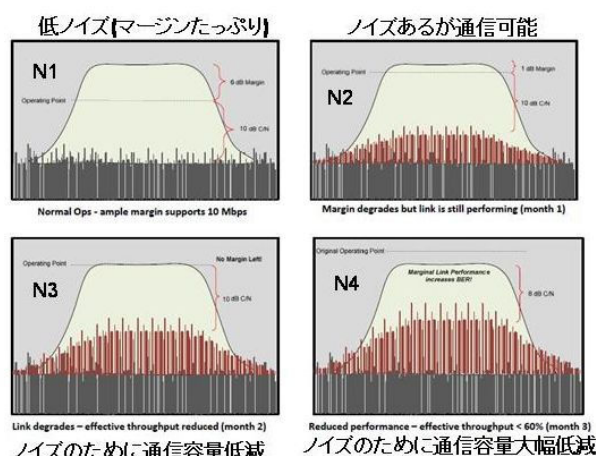


図4 図3のN1~4でのエントロピーの可視化

1.3. 回線雑音が通信に及ぼす影響

回線雑音が通信に及ぼす影響は、アナログ通信かデジタル通信かで、まったく違ったものになる。

アナログ通信とデジタル通信の違いを通信回線上の現象としてみた場合、どちらも搬送波というアナログな波(電波・音波など)の形状をとるが、変調方式と信号の論理性・物理性の違いによって、雑音を除去できるかできないかという違いが生じる。

アナログ通信は、周波数の高低、振幅の大小などの物理量を伝送する通信であるが、回線雑音が熱力

学的な物理量であるために、いったん信号と雑音が混じってしまうと、信号から雑音を取り除くことができない。

たとえば AM ラジオで用いられている振幅変調は、復調時に正弦波によって変調波からベースバンド成分を取り出すために、雑音はすべてベースバンド信号に伝わってしまい、過剰な歪を与えることになる。ヒトの聴覚が歪を除去あるいは相殺することによって、頭の中では聞き取れる場合もあるものの、知らない言葉や知らない楽曲の場合には何が正しいかわからないので、歪除去はむずかしい。

これに対して、デジタル通信は論理値を伝送する。論理値とは、コンピュータ・ネットワークの場合、論理的 0 と論理的 1 であり、回線雑音によって波形が歪んでもそれらが 0.7 や 1.2 として復調されることはない。データが大量に欠落する場合はどうしようもないが、回線歪の影響があっても、必ず 0 か 1 かのどちらかとして復調される。

搬送波が大きく歪んだことによって 0 が 1 として、1 が 0 として復調されるのが信号誤り(ビットエラー)であるが、この場合は、あらかじめ一定の計算方法にもとづいて計算結果を冗長ビット(誤り訂正符号)として付加して送ると、回線上で符号誤りがあつたかなかったかを、受信者が独自に確かめることができるようになっていく。論理的手法によって、誤り訂正符号の半数未満の符号誤りが発生しても、もとの論理値に戻せる。これが誤り訂正符号による前方誤り訂正(Forward Error Correction)である。

フォン・ノイマンは 1949 年に行なわれたイリノイ大学での講義で、ハミングらによる誤り訂正符号技術の重要性に言及している。だが、シャノンも誤り訂正符号についても、デジタル変復調についても、誤り訂正のための冗長性についても、一度として論じていない。

1.4. 信号の誤りのない通信が可能

コンピュータ・ネットワークで用いられるビットは 0 か 1 かの 2 通りしかないため、誤り訂正符号を計算して付加することによって、メッセージは信号間の親和性を表現する冗長性をもつようになり、回線上の符号誤りを検出・訂正できる。

これに対して、アミノ酸を指定するコドンは、3 つの mRNA(メッセンジャーRNA)によって構成される。アデニン(A)、グアニン(G)、ウラシル(U)、シトシン(C)という 4 つのヌクレオチドが 3 つずつ集まって遺伝暗号を形成するので、 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 種類の組合せによって 20 種類のアミノ酸を指定する際に、3 つめのヌクレオチドで誤りが起きても同じアミノ酸に翻訳されるように符号の冗長性をうまく使った「縮重」によって、符号誤りがおきにくくなる。

言語の場合は、音節ごとの送信ではなく、単語として組み立てられたものが、送信される。なかでも日本語の文節のように、常に「概念+文法」構造で送信される言語や、フランス語のようにつねに「文法+概念」(代名詞・冠詞・前置詞が概念語に先行する)構造として伝送されると、誤りが起きにくいのではない。

すべての言語において、単語の音韻構造は音表象性にもとづいているものが多く、これも誤り防止に役立っている。

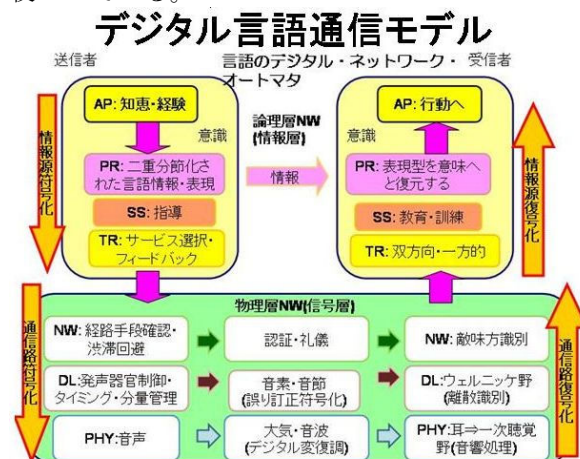


図 5 OSI 参照モデルに準拠して言語を考えてみた

こうして送信者から受信者に、まったく歪のない、ひとつの信号誤りもないメッセージが送り届けられるメカニズムをもつのがデジタル通信の特徴である。

そうすると、メッセージの到達先には、プロトコルスイッチによって細かく指定されたパケットや、ゲノムを非コーディング RNA によって修飾した mRNA や、概念語を文法で接続・修飾した複雑なメッセージが、一信号の誤りなく届けられるようになる。これらの長く複雑なメッセージは、いったいどのようなメカニズムによって、意味へと復元されるのだろうか。

もはや一般通信モデルでは問題解析の役にたたないため、論理層における情報処理を解析するための OSI 参照モデルに、言語現象をあてはめてあれこれと考えてみた。複雑な情報を自動的に意味へと復元するメカニズムを解明することが、本研究のめざすところである

1.5. シャノン理論に欠けるダイナミクス

シャノンは、工学的問題とは無縁であるとして、意味を取り扱わなかった。[2] その結果、情報理論は、無目的で魅力のない、誰からも期待されない学問になってしまったのではないだろうか。情報の意味を問わない情報理論などというものが、そもそもあってもよいのだろうか。

シャノン、送信機から受信機までの通信路だけを論じたわけではない。情報源とあて先(これも情報源である)も含めたモデルを描いている。このモデルにもとづいて考えると、情報源では意味をメッセージに変換しているし、メッセージがあて先に到達するやいなや意味は自動的・反射的に生まれる。モデルと彼の主張の間に矛盾がある。

メッセージを受け取ったときに、反射的・自動的に意味が生まれること(あるいは生まれないこと)にこそ、アナログ、デジタルを問わず、記号メカニズムのダイナミズムがある。意味を問わないと公言するシャノンの情報理論には、ダイナミクスがない。

これに対して、フォン・ノイマンは、「独立した基本単位の構造と機能は、いまのところ生理学における問題とされているが、有機化学と物理化学のもっともむずかしい問題と結びついているので、やがては量子力学の助けを大いに借りることになる」と述べている。[6]

筆者が、複雑系は量子力学と結びついていると解するのは、フォン・ノイマンのこの言葉に由来する。

生命の進化、言語の謎の解明を試みた フォン・ノイマンとイエルネの相補性

研究対象	量子現象	デジタル論理	ツール
脳と 計算機	電子伝 達系	複雑さ の構築	公理系
免疫細胞と神 経細胞	抗原抗 体反応	抗体の 超変異	二分法 二元論

量子現象とは五官
で感知できない微
小な物理現象

図6 フォン・ノイマンとイエルネが参考になった

2 記憶のシステム要求解析

2.1. 記憶メカニズムのシステム要求分析

脳内で言語処理をおこなう論理層のメカニズムが明らかにならないのは、脳内の長期記憶について、そしてそれがどのようにネットワークしているかについて、わかってないことが多いからだ。

たとえば、ワーキングメモリー(作業記憶)が、いったいどこにあって、どのように作用するのか、といった話は聞かないし、作業記憶の定義も定まっていないようだ。それが短期記憶だけを対象としてよいのか、長期記憶も含むのではないかという問題もある。

海馬が記憶に関与することは、海馬に病変をもつ患者の観察によって確認されているものの、では海馬がどのようにして記憶を生み出しているのかはわかっていない。アメリカの行動主義の影響を受けた心理学や認知科学は、なるべく長期記憶について触

れないようにしているように見受けられる。仮に触れたとして、それらの分子構造がどうなっているのかという議論はない。たとえば、エピソード記憶と意味記憶が、どのような分子構造であるのか、どのように刺激と反応するのかといった議論にはお目にかかったことがない。PETやfMRIを使った画像化の研究でも、脳のどの部分に血流があるかという程度のことはしかわかっていない。それでは、言語の複雑・繊細なメカニズムは解明できない。

何がわかったかを報告する論文はあるが、**あと何がわかっていないか、それはどの分野にあるのかを報告しないから、読んでももどかしい。**

実はさまざまな研究成果を総合すれば、かなりのことはわかっているのだが、たまたまそれをシステムの統合できていないだけかもしれない。それくらい**学会や学問領域が細分化**しており、隣接する学会や他の学問領域での研究成果や研究動向が共有化されていない。

筆者は、脳科学、神経科学、心理学、言語学などの専門分野の知識は持ち合わせていないが、システム工学的な観点にたつて、言語システムの要求を考察することはできる。つまり、こんな機能をもつ記憶細胞や記憶分子があれば、言語メカニズムがとりあえず機能するだろうというシステム側からの要求をまとめることはできる。システム要求をつくって、長期記憶にはどのようなものがあって、それらはどのような性質をもっていなければならないか、相互にどうネットワークしなければならないかということを、概観することはできる。

長期記憶	記憶のサイズ・属性	ネットワーク相手先
1. 言語の記憶	数音節	五官の記憶
		言語の記憶
2. 記号の記憶	数音節・五官記憶	所定の運動制御
3. 五官の記憶	様々	言語の記憶
4. 参照記憶	様々な五官記憶	感覚刺激入力
	図式など	
(短期記憶)	(言語記憶一時保管)	

表1 長期記憶のシステム要求解析

おおまかにいって、言語を使ううえで、長期記憶には、1 言語の記憶(言葉の音韻記号の記憶)、2 記号の記憶(反射を生み出す刺激の記憶)、3 五官の記憶(五官で感じた具体的経験にもとづく記憶)、4 参照記憶(目の前の現実と比較するための基準となる記憶)という少なくとも4種類があり、それぞれ記憶の容量や記憶の立ち現れ方が違う。

また、記憶は刺激によって想起されるだけでなく、記憶が別の記憶を想起させることも重要である。

それぞれの記憶が、他のどの記憶を想起させるかというネットワークのやり方や相手方も記憶によって異なっている。たとえばネットワークの仕方にも、アクティブ(能動的に相手を探し求める)か、パッシブ(受動的に見つけられるのを待つ)かの違いがあるように思われる。1は能動的で、自ら他の記憶を探しに行くことができるが、3と4は受動的で、自分から他の記憶を見つけに行くことはできず、ひたすら見つけられるのを待っている。

2.2. 長期記憶の分析

2.2.1. 言語の記憶

2.1で示した言語の記憶と記号の記憶は、言語の記憶が記号の記憶の発展型であり、同じ生理メカニズムであると考えられる。違いは、言語の記憶は、いくつかの音節によって構成されることと、それは五官の記憶や行動の記憶のみならず、他の言語の記憶と結びつくことである。一方、記号の記憶は、まっしぐらに所定の運動制御に結びつける、反射あるいは生得解発機構の一部を構成する。[7]

言語の記憶が五官の記憶と結びつくとき、それがその個人にとっての言葉の意味を構成する。言葉の意味は、個人の体験に根ざしている。たとえば「ラーメン」と聞いて、どの味のスープを想像するかは、その人がどのような地域で生まれ育ったか、これまでにどこでどんなラーメンを食べてきたかという経験・偶然に、決定づけられている。言葉の意味がこの経験的な五官記憶にもとづくというのは、心理学でいう「エピソード記憶」とほぼ同じであろう。

一方、言葉の記憶が他の言葉記憶と結びつくのは、たとえば「サルトル」と聞いて、「実存主義」という言葉が思い浮かぶようなものである。サルトルの著作を一冊も読んでいなくても、実存主義とは何かを言えなくても、「サルトル⇒実存主義」というネットワークが生まれる現象が、言葉と言葉のネットワークである。言葉が言葉を想起させる場合も、意味と呼ぶことができる。これは心理学の「意味記憶」に近い。

2.2.2. 記号の記憶

ヒト以外の動物の記号記憶には、生得的な長期記憶もあれば、後天的な長期記憶もあるが、所定の運動制御を生み出すという点で「記号性」をもつところに特徴がある。

通常の言語記憶は直接行動を生まない。これは言語の欠点といえる。言語はもともと記号がもっていた行動性を失ってしまったのだ。一方で、言語の利点でもある。なぜなら、言語のおかげで、より深い

分析的な思考が可能であり、物語や詩歌を生み出すこともできるからだ。

記号がもつ行動への直結は、もしかするとその生理メカニズムが本来もっているネットワーク機能を部分的にしか使っていないのかもしれない。動物は記号のネットワーク機能を生かしきるだけの進化を遂げるにいたっておらず、記号をたまたま回避行動などの本能的反射にかぎって使っているのだ。

ヒトの言語記憶が記号性をもつ場合もある。たとえば、2011年3月11日の地震のときに、「地震だ!」という言葉で、亡くなった父親の「地震のときは船を沖に出せ」という言葉を思い出し、「考えるよりも先に体が動いて」漁船を沖に出した漁師や、避難訓練の成果を生かした釜石の小学生は、言語記憶を記号の記憶に高めた例といえる。[8]

日常的になにげなく使っている言語を、論理的思考・科学的思考のツールとして正しく使うという点で、人類はまだその使用法を身につけていないとはいえない。同様に、言語を直接行動を生み出す記号として使うにあたっても、いざというときに備えて普段からどのように言葉を使わなければならないのか、何に気をつける必要があるのか、ということの検討はまだ十分ではない。禅の修行や禅問答は、この試みである。

状況に応じて言葉を論理ツールとして、記号として、臨機応変、自由自在に使い分ける能力を身につけることが大切であろう。

2.2.3. 五官の記憶

五官の記憶も、言語の記憶とネットワークする。しかし、どちらかというと、受動的であり、しばしば五官の記憶は鮮明であるのに、「名前だけがどうしても出てこない」、度忘れ現象がおきる。逆の事例、名前は鮮明に覚えているのに意味を忘れることは少ない。これは五官の記憶は受動的で、言語の記憶は能動的だからではないか。

五官の記憶は、海馬でつくられていると考えられるが、まだどのような仕組みかは明らかになっていない。大事なことは、それが長期保存のために大脳皮質(側頭葉)に伝えられる(送られる)ことと、言語(記号)記憶と言葉のインデックスによってネットワークするメカニズムをもつことである。

2.2.4. 参照記憶

参照記憶というのは、一般的な用語ではないかもしれないが、何かの感覚入力に対して、「オヤ、これはどこか間違っている」、「ちょっと変だぞ」、「何か変わったかな」といった反応を生み出すものになる記憶である。

たとえば、M.デュシャンの「泉」は、男性用小便器を美術展に展示した作品である。普通の人は美術館を訪れて、はじめてこの展示を目にすると「これはなんだ。人をバカにするのもいいかげんにしろ」とか、「これは一体なんなんだ」、「ん、なんか変だ」と思う。それは、頭の中に、「小便器はトイレにあるものだ。それに大量生産品だから、美術館に展示すべきものではない。小便器から学ぶことなど何一つない」という価値基準あるいは信念をもつからだ。この作品は、奇をてらったわけでも、意表をつくためでもなく、日常生活では意識しない参照記憶を意識化するためのツールであったと考える。

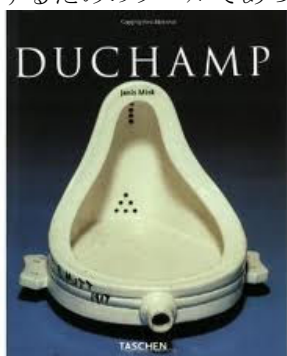


図 7 泉

あるいは、住み慣れた自宅の居間を、出かけている間に奥さんが模様替えしていると、帰宅したときに「おや、模様替えしたのか」と思う。これも参照記憶があるから、変化を見つけ出せるのだ。

この記憶は五官の記憶だけであり、文章には存在しないようだ。別の言い方をするならば、参照記憶には、概念は存在しても、文法がない。たとえば、百人一首の和歌を誰かが口にしたときに、それが正しいか間違っているかを言語的・論理的に判断するのではなく、アナログ音韻パターンとして、なんとなく正しい、なんか違うと感じる。これは言語の参照記憶というものは存在せず、アナログ音韻パターンとしての参照記憶しかないからだろう。詩歌が韻を踏む規則をもつのも、アナログ的にパリエーチェックを行なって、記憶を正しく保つためではないか。

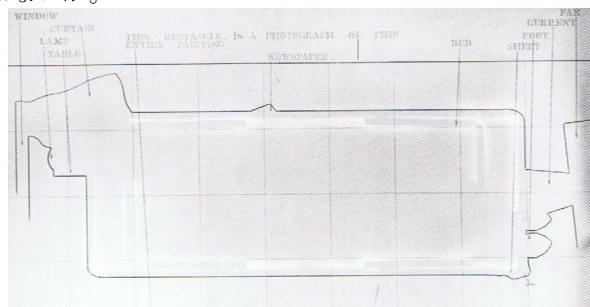


図 8 ARAKAWA 分割された連続体(1966)[9]

一方、単語レベルでは、参照記憶の一部を構成するようだ。荒川修作の初期の図式絵画作品に、脳内

にある部屋のレイアウトがどのように記憶されているのかを描いた作品群がある。「分割された連続体」(1966)はそのなかの一点である。ベッドやランプやカーテンやFAXという言葉が、きわめて単純な地図あるいは線上に並んでいる図である。[9]

「最後のつぎ」(1966-67)は、イエス・キリストの最後の晩餐が、我々の参照記憶として、どのように記憶されているのかを示している。[9] 非キリスト教徒には想像しがたいことだが、この参照記憶は、21世紀においても、キリスト教国の国家的価値観を支配している。

2005年にフランスのジーンズ・ブランドであるマリテ+フランソワ・ジルボーの広告がイタリアやフランスの裁判所から使用禁止の措置を受けるという事件があった。この絵画のパロディーを、現代国家の司法機関が許さなかった、そしてそれを誰も問題にしなかったということが重要である。この図式は、今でもキリスト教徒の意識(価値基準)の中枢にある神聖な部分を構成しているのだろう。

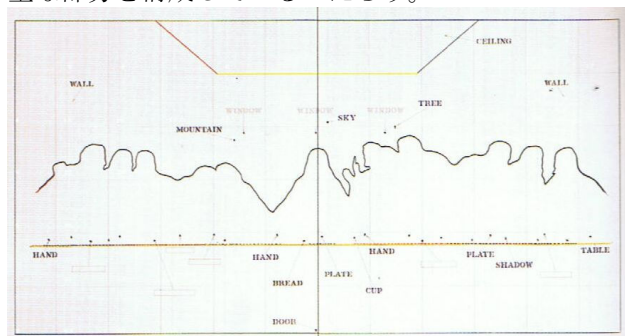


図 9 ARAKAWA 最後のつぎ(1966-67)

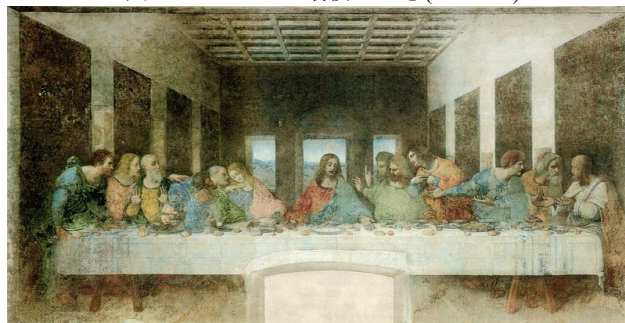


図 10 レオナルド・ダ・ヴィンチの最後の晩餐(1495-98)



図 11 マリテ+フランソワ・ジルボーの広告(2005)

最後の晩餐のパロディーは、他にもいくらでも作られているだろうに、どうしてこのポスターは使用禁止になったのかと考えてみた。もしかするとオリジナルよりも美しく印象的であり、大衆へのアピール性をもつため、参照記憶としてオリジナルの存在が霞んでしまうと判断されたのかもしれない。大衆がダビンチの原作を完全に忘れ去り、ジーンズメーカーが掲示するパロディーを本物と信じることを、教会が恐れたというのも大いにありうることである。

また、同じく「双子(対)の習作—話しているあるいは歩いている」(1969)という作品は、「頭」と「空」、「首」と「太陽」、「腕」と「川」といったかなり距離をもった対が示されている一方で、「脚」と「脚」、「靴」と「足」と「●●(移動する実体)」が対になっている。[9] ●●は、足元のさまざまな音や床や地面を踏む触感を指すものと思われる。

今起きている現象の処理も、我々は参照記憶によって行なっている。歩いているときには、意識は脚や足先でおきる現象に多く注がれていて、その他のところは遠景として処理されているためにこのような図式になるのだろう。

これらの参照記憶は、上の部分ではどちらかというと受動的・静的であり、足元ではより活性化されていること、動的であることがわかる。足元で感覚刺激が入力されると、参照記憶に照らした反応(違和感)が立ち上がる。

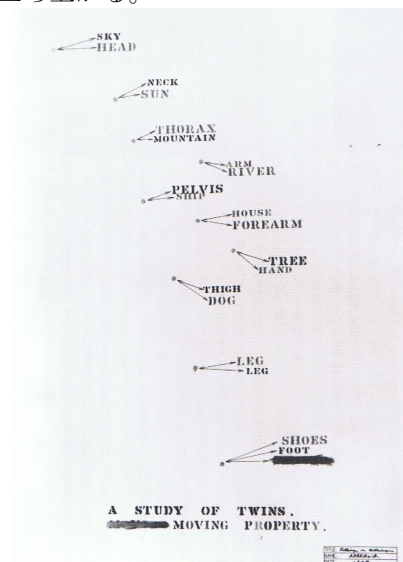


図 12 ARAKAWA 双子(対)の習作—話しているあるいは歩いている(1969)

2.3. 長期記憶の神経免疫ネットワーク

2.3.1. 免疫学は理解不能な理論なのか

LD2の3.1で免疫学者ニールス・イェルネのことを紹介した。朝日新聞に掲載されたイェルネの伝記、トーマス・セデルキスト著『免疫学の巨人イェルネ』(医学書院)の書評に、「免疫学の理論は医学・生物学でも極めて難解な領域であり、理解することは最初から放棄するのが無難だ」と書いてある。書評を書いたのは渡辺正隆つくば大学教授であり、掲載した朝日新聞は多くの人々に信頼されている新聞である。だがどうして「理解することは最初から放棄するのが無難である」ということになるのだろうか。理解を放棄するということは、人類の科学の発達を自らあきらめることであり、現在未解明な諸現象について盲目的に信じるしかなくなり、科学以前の暗黒時代に逆戻りするのではないか。

これは渡辺教授だけの問題ではない。立花隆が利根川進博士に行なったインタビュー『精神と物質』(文芸春秋、1990)の中でも、免疫はわからないという言葉があったように記憶する。

しかし、もし誰かが免疫システムや免疫メカニズムをたとえ途中までであっても解明したのであれば、他の人だって、時間をかけて丁寧に理解する努力をすれば、ひとつひとつの概念の定義をきちんと押さえて他の概念との関係性も明らかにして、論理的に追いかければ、理解できないわけがないではないと筆者はきわめて楽観的に考える。言語はそのような深遠なるもの、ラテント・ダイナミクスを包む幾重にも重なった神秘のヴェールを、一枚一枚剥ぎ取ることを可能にする道具である。フラクタルな自然現象の複雑さ(あるいは幾重にも重層化したロシアのマトリョシカ人形のような生命の不思議)に対して、擬似フラクタルな概念の階層的論理構造によって迫ることができるのではないだろうか。

そのためには、すべての科学者が、概念を使用するにあたって、「いかなる概念も、明示された段階的な論理操作によって、具体的な物質と現象から論理的に構築されたものでなければならず、また、逆の操作によって物質と現象に還元されなければならない」というルールを遵守する必要がある。

LD2の「3.2 神経と免疫のネットワーク理論」で筆者は、イェルネの「免疫システムのネットワーク理論に向けて」の最後の部分を紹介した。それが問題解決に直結するという確信はもっていなかったが、イェルネが言い残したことがもしかしたら言語のメカニズムを解明するヒントになるのではないかというおぼろげな予感があった。

以下にその一部を再掲する。2.1で簡単に述べた4種類の長期記憶と感覚刺激・言語刺激のネットワークを想像するうえで参考にならないだろうか。

(神経と免疫の)この2つのシステムは、ともに他の多くの身体組織の中に侵入するが、それぞれはいわゆる「血液と脳のバリア」によって分けられているようにみえる。

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、数が多いのである。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、あるいは彼らが放出する抗体分子によって相互に作用する。

イエルネは「血液と脳のバリア」によって神経細胞と免疫細胞は「分けられているようにみえる」と言っている。けっして分けられていると断言していないところが、彼の論理的なところであり、彼の言葉に信頼性を与える。実は、脳室内で、神経細胞と免疫細胞が相互にシグナル伝達を行なっているようなのである。この分野は、教科書・入門書レベルではまだどこにも紹介されていない。研究レベルではどこまで研究されているのだろうか。

リンパ球は体内で脳以外のほとんどの細胞の間を、血液とリンパ液内で移動し、脾臓・リンパ節・盲腸・胸腺・骨髄内に集中する。しかし脳の毛細血管をグリア細胞が取り巻いていて、白血球が脳内に入ってくないよう血液脳関門を形成しているから、リンパ球は脳からは排除されていると、長い間考えられてきた。ところが最近になって、健康なヒトの脳内で、活発な免疫調節が行われていることが明らかになったのである。一部の学者は、この脳脊髄液中のリンパ球が脳内の免疫監視をしているという意見を述べているが、まったく別の任務をするために、血液脳関門・血液脳脊髄液関門をつくって、脳室内部を低雑音環境にしたと考えることもできる。

2.3.2. 脳室と脳脊髄液

脳室(Ventricular System)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(Cerebrospinal Fluid: CSF)で満たされた空間である。脳科学の教科書を読んでも、これら脳室と脳脊髄液について、あまり詳しい説明が行われていない。

たとえば「CSFは脳の表面を循環しており、物理的衝撃に対する緩衝材の役目を果たすほか、神経組

織に対して活動に好都合な化学的環境を提供している」といった表現が一般的である。[10]

まずは脳の成り立ちと、CSFの循環経路から、簡単に概観することにした。

「脳を含む中枢神経系は中腔性の神経管から形成される。神経管の中腔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、中腔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る。[11] 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。

「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。」[11] 室傍器官は、哺乳類では室傍核と呼ばれる神経核に発達しているようである。

脳脊髄液(CSF)接触ニューロンについて、言及している教科書もない。網膜の刺激を脳室内の脳脊髄液に伝えるこのニューロンは、脳脊髄液中では繊毛を伸ばしていて、パルス伝達ではなく、免疫応答をしていると考えられる。おそらく神経細胞と免疫細胞がシグナル伝達を行なっている神経免疫相互作用という研究領域がまだ存在していないから、研究が進んでいないのかもしれないと思われる。

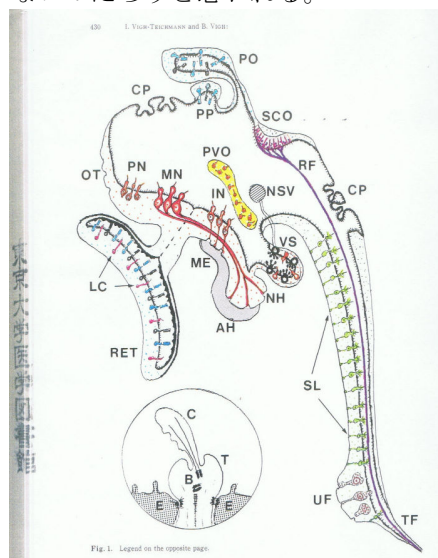


図 13 脳脊髄液(CSF)接触ニューロン[12]

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一般的であるが、本当に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。また、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。教科書に書かれていることは、不十分なのではないだろうか。

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。脳の一番奥にあり、神経細胞と免疫細胞という2種類の異なった細胞間のシグナル伝達とネットワークというもつとも複雑で難しい領域だ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だと思われる。

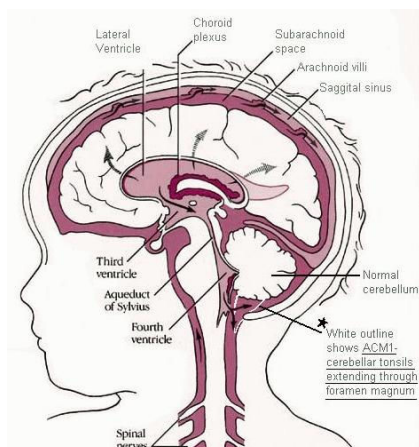


図14 脳脊髄液の循環する場

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、側頭葉と接点をもつ。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。脳室システムは、脳内の「情報スーパーハイウェイ」なのだろうか。

脳脊髄液の分泌は、心臓から送られてくる脈絡叢動脈の動脈血によって、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のもこのためではないか。

2.4. 記号反射と言語処理のメカニズム

脳室内の免疫ネットワークによって記号反射や言語処理が行なわれると想定すると、どのような生理メカニズムが考えられるか。具体的には記憶を司っている細胞や分子のどこどこがネットワークするのか。

長期記憶	賦活系の接触	抗原・抗体	場所	細胞
1. 言語の記憶	有り	抗原・抗体	脳室内脳脊髄液中	Bリンパ球
2. 記号の記憶				
3. 五官の記憶	無し	抗原	側頭葉	グリア細胞
4. 参照記憶	有り	?	前頭前皮質	?
(短期記憶)			前頭前皮質	?
*賦活系とは、視床や脳幹網様体を想定				

表2: 長期記憶のシステム基本インターフェイス

2.1 で考えた4つの長期記憶(言語、記号、五官、参照)について、それぞれどのような機能が必要か、そしてそれが脳室・脳脊髄液内での免疫ネットワークと整合性をもちえるかを検討して、表2にまとめてみた。(公理的手法には、参照モデルのほかに、比較対照表というツールがあり、概念の整理や、認識されていないメカニズムについて考えるきっかけとして有効である。表1や表2はその例である。比較対照表は、とにかく具体的に項目を並べてみるのが大切であり、空欄(あるいは「?」)があってもかまわない。観察・考察しているうちに、空欄が埋まることもあれば、項目の分類が改まることもある。)

2.4.1. 賦活系との接触の必要性

賦活系との接触というのは、視覚や聴覚などの記号を感知する感覚器官から、刺激を受けるメカニズムが必要か、刺激に対して何か対応するようになっているのかを検討した。

記号記憶は、危険や餌を伝える記号に対して、即座に所定の行動をとるために、賦活を受ける必要がある。そして、活性化された記憶が、行動を生みだすために、運動制御の神経を刺激する必要がある。

言語記憶は、記号記憶の発展したものであり、それ自体、状況や訓練次第で記号として作用する。したがって、当然、言語刺激も賦活を受ける必要がある。

これに対して、五官の記憶は、賦活を受けても具体的な行動は生まない。何かを食べて(何かの匂いを嗅いで)、昔味わった味(嗅いだ匂い)であることを、確かにあるいはおぼろげに感じることもある。ノスタルジーと呼ばれる現象である。それは、ときとして当時のことを思い出すかもしれないが、具体的に何か行動が生まれるわけではない。ノスタルジーは、

昔の記憶にひたるだけで、一種の行動停止状態である。

これに対して、参照記憶は、入力された刺激に対して、「ちょっと待って、どこがおかしい」、「何か変だ。時間をかけてよく観察してみて」という警告、内なる声を発する。具体的に何をしろとか、どこがおかしいとは言わないが、異常や変化を報せる機能をもっているの、賦活系と近い必要がある。

2.4.2. 言語記憶のネットワーク用コネクタ

さまざまな長期記憶のネットワークが、精密な結合・接続を行なうためには、コネクタが必要となる。10万種類もある言葉の種類に対応できるのは、抗原と抗体の特異的結合のほかには思いつかない。

教科書の挿絵をみると、通常、抗原は突出部(オス型のコネクタ)として、抗体はその突出部を包み込むカバー(メス型のコネクタ)として描かれている。イエルネは、抗原と呼ぶかわりにこのオス型の結合部分をエピトープ、メス型結合部をパラトープと呼ぶことを提案している。[13]

したがって、Bリンパ球受容体に対する賦活は、オス型コネクタである抗原提示として行なわれると考える。実際の言語刺激がもっている物理的特性、言葉の強弱や周波数の高低であるアクセントの形状も、オス型のコネクタとして機能するのに適している。下の図は、「母音」の研究で世界的に有名な千葉勉博士が、母音の研究をする前に行なっておられた「アクセント」の研究から。[14]それぞれ言語によって強弱と高低のバランスが違っていることがわかる。

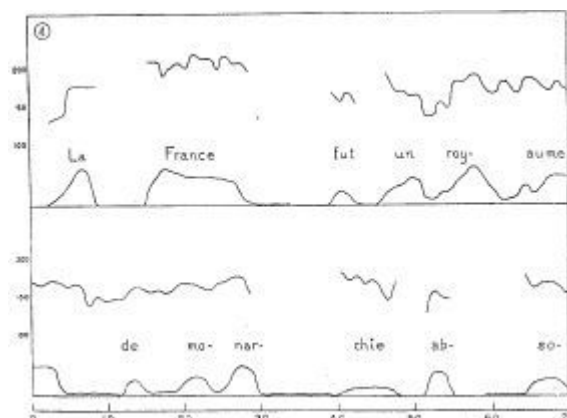
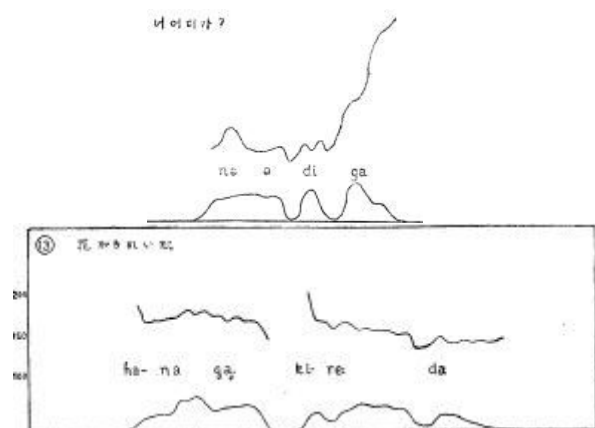


図 15 高低・強弱のアクセントの形状
(朝鮮語、日本語、フランス語の例)

音韻刺激がこのアクセントを反映して抗原提示されるなら、それを待ち受ける言語の記憶は、パラトープによって、賦活を受けることになる。

実際のところ、抗体は、パラトープとイディオトープをもち、パラトープがBリンパ球受容体と結合すると、もとの抗原と類似した抗体が産生され、イディオトープがBリンパ球受容体と結合すると、その抗体と同じ抗体が産生される。エピトープもパラトープもイディオトープもその物理的形状はペプチド配列によって決定される。パラトープからの情報はアナログ情報(あるいはアナログ⇒デジタル変換)であり抗原に類似した抗体を産生する。一方、イディオトープからの情報はデジタル情報(あるいはデジタル⇒アナログ変換)であり、まったく同じ抗体を産生する。

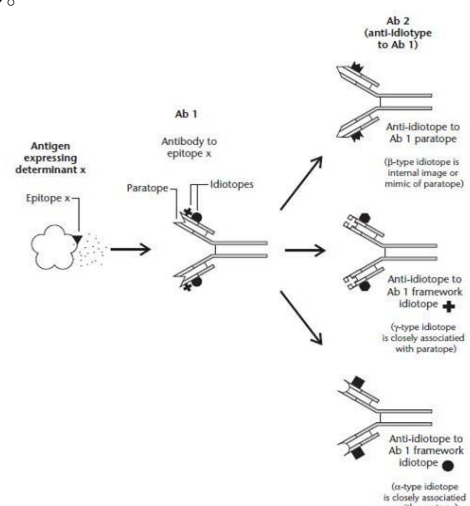


図 16 イディオティピック・ネットワークの例

イエルネは、ノーベル講演である「免疫システムの生成文法」[15]の中で、抗体がBリンパ球受容体とシグナル伝達するにあたって、アナログなパラトープを提示することも、デジタルなイディオトープを提示することもあると述べている。抗体はアナロ

TD 抗原

分子表面
不連続ペプチド
エピトープ

抗体

分子表面
連続ペプチド
エピトープ

分子内ペプチド
エピトープ

TI 抗原

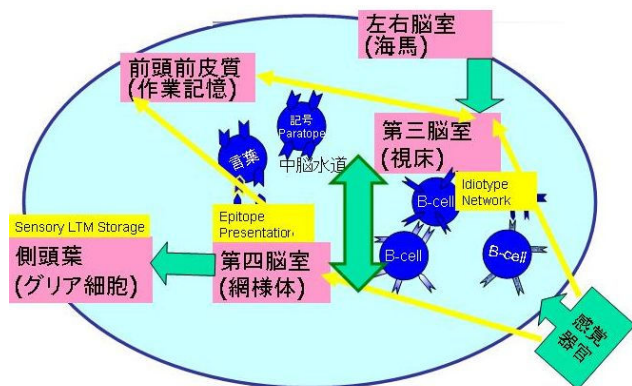
抗体

MHC

TCR

スーパー
抗原

このネットワーク能力があるから、言語記憶は、
 五官の記憶と結びつくだけでなく、別の言語記憶と
 もネットワークできる。言葉の連想が生まれるのも
 このためだろう。

[illegible]

では、五官の記憶はどのような結合領域を、どうやってもつののだろうか。そもそも五官の記憶はどこでどう記銘され、どこにどう保持されるのか。ネットワークのためのコネクタはどのようにして記憶に埋め込まれるのか。

LD2 の 4.2.2 でも紹介した脳外科医 Penfield は、カナダのモントリオールにあるマギル大学附属モントリオール神経学研究所所長として、1934 年から 30 年にわたって 700 人以上の脳腫瘍性てんかん患者の腫瘍部分の切除手術を行った。

反応があった場所には数字が書かれた札を置いて、実験の最後に写真を撮影している。なかでも興味深いのは、記憶の領域が、視覚野と聴覚野の中間にある側頭葉にあるということの発見である。

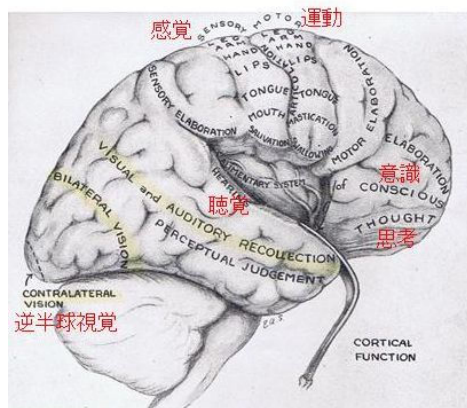


図 20 大脳皮質の機能別地図 [19]

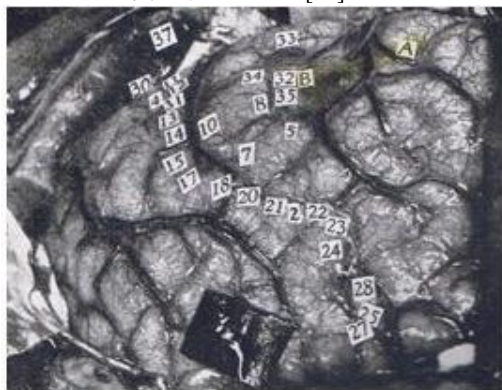


図 21 刺激を与えて反応があった場所を記録 [19]

「側頭葉には無数の神経細胞パターンがあり、記憶の記録となっている。電極は患者に過去の出来事の記憶など心理的経験をもたらし、患者は手術台でそれを説明できる。こうして生み出される幻覚は、視覚か聴覚かその両方であるが、決して単音や静止画ではない。これらの心理的幻覚は、大脳皮質の聴覚野や視覚野を刺激したときに生み出される視覚や聴覚の感覚経験とは著しく異なっており、秩序だっていない。

これは体験記憶であり、患者が聴いた歌の再生かもしれない。もしそうならば、患者はそれを始まりからお終いまで「聴いている」のであって、一度に全部を聴くわけではない。患者にとっては正確な記憶というより夢のようなものにうつる。しかしこの夢には、なじみの場所が登場し、親しい人々が話しかつ行動する。このような幻覚、記憶、あるいは夢が、電極がそこにあてられている間中、ゆっくりと展開する。

これは驚くべき発見である。これによって心理現象は生理学となった。もし我々が記録を正しく読み取れるなら、心理研究においても重大な意味をもつだろう。(略)

明らかに電極の下の部分には出来事の記憶を記録するメカニズムがある。しかしこのメカニズムは単純な出来事を記録する以上のことをしているように

みえる。活性化すると、元の経験に付随する感情も再生する。さらに、神経節のメカニズムは、その出来事を思い出したときに感じる感情の記憶やその出来事の重大性に関する論理判断の内訳を、あらたにその記憶に付け足すのである。

過去の出来事の記憶を思い出すときには、中枢神経システム内部の神経細胞メカニズムを作動させなければならない。回想において、記憶は片側の脳半球で見える片眼失明的な像ではない。単一の感覚器官からの素材に限られているわけでもなく、むしろその逆である。(略)

両半球に届く視覚刺激と聴覚・体性感覚がすべてひとつにまとまっている。それに加えて、原初の体験のときに個人が感じた感情や、その経験に関してその人が行った真か偽かの推論ももたらすことがある。

刺激によって生み出される記憶の場合も同じである。側頭葉には、まちがいなくたくさんの神経節パターンがあるが、刺激が活性化するのはたったひとつのパターンだけであり、ひとつだけの回想が意識に提示される。

記録は出来事の記録だけではない。その経験に関する個人の思考の内訳やそのときの感情も記録されている。脳外科手術の最中に我々が遭遇し、おそらく2つの半球の対応する領域にも同じメカニズムがある神経メカニズムは、1) 記憶された出来事や経験、2) その出来事に関連した思考、3) それが引き起こす感情を再生する機能をもつようである。(略)

この記憶パターンの再生は、両半球を通過するすべての神経刺激(つまりその出来事に関連するすべての神経刺激)の調整あるいは統合なしには、大脳皮質上で形成されえない。記録されているものは統合された全体なのである。」[19](P142-4)

2.5.2. 五官の記憶を処理するメカニズム

これらの側頭葉の記憶は、どのようにして記録され、その場所に保存されるのだろうか。一般的に記憶の形成には海馬が関与していると言われている。また、エピソード「記憶の処理には、大きく分けて3つの情報処理の要素が含まれている。」それは、(i) 符号化(encoding)または記憶(memorization)と呼ばれる「覚える」段階の処理、(ii) 貯蔵(store)または保持(maintenance)と呼ばれる「維持する」段階の処理、そして(iii) 検索(retrieval)または想起(remembering)と呼ばれる「思い出す」ための処理である。[20]

これらの3つの処理がうまく行なわれるためには、
 記銘にあたって、見出し(インデックス)付けが必須
 である。インデックスのない記憶は、思い出すのに
 大変苦勞すると思われる。万一首尾よく思い出した
 としても、それが正しいマッチングであることを確

かめることができない。したがって、言語の記憶と五官の記憶の間に、選択性・特異性をもつインデックス対応が絶対に必要である。それはどのようなインデックスであり、どのようにすれば取り付けられるのかということも含めて検討する必要がある。

海馬に関するネットワークとしては、パペッツの回路として知られる神経回路があり、「海馬⇒脳弓⇒乳頭体⇒視床前核⇒帯状回⇒海馬」という回帰的な構造であるといわれている。[20]しかしながら、この回路には、側頭葉が登場しない。海馬で記録された記憶が、側頭葉に送られるメカニズムがなければならない。

ここで比較的最近話題になっている重要なことがある。大脳皮質にあるマイクログリアは、中胚葉由来の造血細胞で、マクロファージの一種、つまり免疫細胞であるということだ。マクロファージは、「免疫システムの一部をになうアメーバ状の細胞で、生体内に侵入した細菌、ウイルス、又は死んだ細胞を捕食し消化する。また抗原提示を行い、B細胞による抗体の作成に貢献する」とある。

脳内で、ニューロンとグリアの新生は、海馬の歯状回の顆粒下帯(subgranular zone: SGZ)と、その側の側脳室の脳室下帯(Subventricular Zone: SVZ)から嗅球上衣下(subependymal zone of Olfactory Bulb)で行なわれている。これら3箇所が、脳内における胚中心(germinal center)である。ひとつ可能性として考えられるのは、その際に概念記号の音韻記号がエピトープのペプチド列として組み入れられて、エピトープの突起を示すようになり、五官の記憶が記録されて、脳室内(または別の経路)を経由してしかるべき記憶の保存場所に送られて、マイクログリア細胞の形で長期記憶として保持されるというものである。[21]

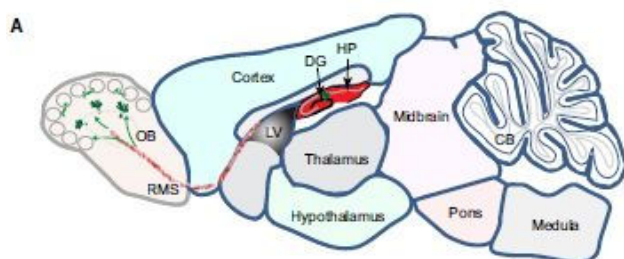


図 22 海馬(HP)歯状回(DG)、側脳室(LV)、嗅球(OB)の胚中心でニューロンとグリア細胞が成熟する [21]

海馬で発達させるグリア細胞にエピソード記憶とインデックスを埋め込んで、それを脳室の脳脊髄液の経路によって大脳皮質に送れば、記憶の記録・保持・検索が可能にならないか。

2.5.3. 記憶はDNAの書き換えによって?

LD2の4.2.1では、記憶のシナプス説を批判して記憶の分子説を唱えたフォン・ノイマンの言葉を紹介した。後になって、記憶の分子説は、H.ヒデンも唱えたが、あまり注目されなかった。[22][23]

我々の体内でもっとも安定的な記憶手段・記憶媒体は、DNAの二重螺旋構造による記録・保持であろう。神経細胞あるいは免疫細胞のなかで、新たな記憶を記録するためにDNAを置き換えるものは存在しているのだろうかウェブ検索したところ、胚中心でBリンパ球が行なっているというNeubergerの報告を発見した。[24]

Neubergerによれば、免疫グロブリンのV遺伝子の再構成メカニズムに比べると、体細胞超変異と重鎖のクラススイッチの生化学的基盤についての我々の知識は初歩的なものでしかないという。しかし、それでも、胚中心で増加するBリンパ球が、一定の時期に限って、およそ2000塩基対のDNAを置き換えることは、きわめて重要な報告である。

「抗原に出会って、胚中心(germinal center)でのB細胞の増加の間に、生産的に置き換えられた免疫グロブリンV鎖のセグメントを含んだDNA(およそ2000塩基対)の短い領域でヌクレオチドの置換がおきる。この超変異は、ゲノムのわずかな領域に限っておきるだけでなく、おきるタイミングも、B細胞の発達のごく限られた時間帯に限っておきる。」

胚中心でBリンパ球のDNAの置き換えが起きるのであれば、マイクログリアやその他の免疫細胞で起きたとしても不思議ではない。

胚中心とは、二次リンパ組織であり、「抗原にさらされるまでは、一次濾胞(primary follicle)と呼ばれ、樹状細胞(dendritic cell: DC)や休止B細胞(small resting B cell)からなっている。一旦抗原に暴露されると、一次濾胞は胚中心(germinal center: GC)を形成し大きな二次濾胞(secondary follicle)になる。そこでは辺縁から入り込んだ樹状細胞やヘルパーT(Th)細胞からの影響を受けB細胞を中心とした活性化が起きている。」[25]

2.5.4. インデックスはエピトープを埋め込む

では、検索のためのインデックスはどのようにして埋め込むのだろうか。そもそも何をインデックスとしているのだろうか。

パブロフは、条件反射の形成にあたって、「第一のそして基本的な条件は、以前に無関係であった要因の作用と一定の無条件反射をひきおこす無条件要因とが時間的に一致して作用することである。」という。[26]そして第二の重要な条件は、「条件反射の形成にあたって無関要因は、無条件刺激の作用よ

りいくらか先行しなければならない。もし逆に無条件刺激の作用をはじめてから無関要因を結合させようとしても条件反射は形成されない。」と述べている。(ここで無関要因は、ベルやメトロノームの音や特定の形である視聴覚刺激のことであり、無条件要因・無条件刺激とは、餌や毒の口内への投入のことを指している。)

つまり条件反射の形成にあたって、記号刺激がまず提示されて、それから餌や毒性物質が口内に投入されることが必須であるという。おそらく動物が新たな記号を獲得するときにも、先に示された記号の刺激(無関要因)が、後から与えられる無条件刺激の記憶のインデックスとして埋め込まれるのであろう。

そしてその記号のインデックスは、おそらく餌や毒などの五官の記憶(エピソード記憶)にも埋め込まれているはずである。そうしないと、餌や毒の記憶を後から思い出すことができなくなる。あるいは、記号刺激を受け容れたときに、餌や毒の記憶と結合して、記号を強化できなくなる。

賦活がエピトープという抗原性の刺激であり、それに反応する記号記憶がパラトープという抗体性の受容体であるとき、エピソード記憶はどちらの形をとるのが妥当かと考えてみると、五官の記憶は賦活される必要はなく、受け身的に認識されることを待っているの、エピトープではないかと思われる。

顔は覚えている、味は覚えているけど、名前だけどうしても出てこないという度忘れがおきるのも、五官の記憶は記号(言語)の記憶によって認識される受動的なメカニズムであるからではないか。

2.6. 参照記憶のメカニズム

2.6.1. 作業記憶は短期と長期と両方ある

2.2.3 で論じた参照記憶は、短期記憶というよりは、むしろ長期記憶に属する記憶であろう。そのことについての記憶を持っていることの自覚がなくても、違和感のある光景やなつかしさを覚える光景によって、記憶が活性化されて、「オヤ、どこか変だ」、「ああ、この景色どこかで見た記憶がある」といった言葉以前の感情がわいてくる。

したがって、参照記憶が存在することについて異論はあまりないと思われるが、この参照記憶について議論しづらいのは、認知科学の世界では作業記憶は短期記憶として扱われるからである。以下では、作業記憶(作動記憶)には、短期記憶も長期記憶もあるものとして議論するので混同されないようにご注意願いたい。

2.6.2. 参照記憶の在り処：前頭前皮質

前頭前皮質は、「視床の背内側核からの投射を受けている大脳皮質部位」と定義されている。[27] 参照記憶は、視床に入る視覚刺激の変化抽出を行なうので前頭前皮質にあると考えられる。

また、前頭前皮質は脳幹の網様体賦活系(RAS: Reticular Activating System)と、大脳辺縁系の両方との間に強い相互接続が存在する。脳幹網様体からの刺激も、前頭前皮質で処理されているのだろう。

「前頭皮質全体が、前頭前領域を含めて、広い意味で「運動」皮質である。それは有機体のなんらかの動作に関与する皮質である。その動作は、骨格運動、眼球運動、感情表出、発話、あるいは内臓運動であっても、またそれが、われわれが論理的推論と呼ぶような内的、心的動作であっても同じである。」[27]

2.6.3. 参照記憶の不可視性

参照記憶は、決まりきった日常を送っているとなかなか出会うことがなく、活性化されない。異文化体験をするときに喚起される。自分が常日頃慣れたやり方と違ったものを目にとると、それだけで違和感を覚えて嫌な気分になることがある。ここに、禅の不条理な公案や現代芸術作品の存在意義がある。

たとえば、家具か大型家電製品を配送にきた運送業者が、靴を脱がずに部屋の中に土足で入ってきたら、普通の日本人は嫌な気分になる。しかしこれはパリに住むフランス人の家庭では当たり前のことである。もしパリに住んでいる日本人のアパートに、業者が土足で部屋の中に入ってきたら住人は不機嫌になるだろうし、逆に業者の人間にとっては、なぜこの家の人間が不機嫌な顔をしているのか、さっぱりわからないだろう。これが異文化衝突である。

パリの生活に慣れればそれは文化の違いであるから、業者が家に入るときに丁寧に靴を脱ぐようお願いするか、あるいは土足で入られても大丈夫なように新聞紙でも敷き詰めておくようになる。要するに、だんだん様子がわかってくれば、対策を立てることができるようになり、不機嫌な思いをしなくなる。異文化摩擦に対して対策を取れるようになる。

実際に外国に生活すると、毎日のように異文化体験を重ねるので、少々のことでは驚かなくなる。見た目ではわからないけれども、ヒトは生まれ育った文化によって、それぞれ違った価値基準や参照記憶をもっていることに気づくようになる。だんだん異文化衝突や異文化体験を楽しめるほどに心のゆとりがもてるようになり、成長する。

だがもし異文化体験を経験しなかったら、参照記憶は受動的に作用するため、おそらくその人は、自分が身につけている参照記憶や文化について自覚す

ることなく、自分の生まれ育った文化の枠でしかものごとを考え、判断できないまま、死んでいくのではないだろうか。

参照記憶の研究は、まだ十分に行なわれていない。それがどのようにして外部からの感覚刺激と比較されるのか、それがどのような記憶の形態をとっているのか、まだ解明されていないようである。

3 文法を可能にした記号の量子力学

3.1. 20 世紀における量子力学の位置づけ

20 世紀の量子力学は、けっして多くの市民に愛された、市民の役に立ったとはいえないのではないか。大学教育を受けていて、一般的には知識層と思われる人たちのなかでも、量子力学のこととなると、手も足も出ない、語ることがないという人が多い。

筆者もその一人であり、フォン・ノイマンの「やがては量子力学の助けを大いに借りる」という表現を読んだときも、それが具体的に何を意味するのかさっぱりイメージがわいてこなかった。フォン・ノイマンの言葉も、正直なところ、頭の上を素通りしていった。筆者は当時、量子力学が何であるのかさっぱりわかっていなかった。

筆者が量子力学に興味をもったのは、今年の Latent Dynamics-2 Workshop のすぐ後のことだった。2011 年 7 月に開かれる人工知能学会情報編纂研究会に向けて予稿を準備しているとき、最新の科学哲学になにかおもしろいヒントはないだろうかと、ステイグレルやバスカーの著作を参考にしたことがきっかけである。[28][29][30]

ステイグレルの著作に参考となる言葉を見つけることはできなかったが、バスカーからは貴重なヒントをもらった。

経験則の壁を乗り越える、「科学を僭称する実証主義に取って代わる新たな見方を提案」するにあたって、「認識の主体の意識構造を問う」哲学こそが、「科学の下働きとして、また時には産婆役としてその下地づくりに寄与する」とバスカーはいう。[30]

「経験論的实在論が重視する経験的世界という概念自体、人間を基点にして物事を捉える人間中心的な認識論に立脚しており、結果としていわゆるカテゴリー錯誤に陥った。」そのため、科学哲学のコペルニクスの転回によって、超越論的实在論を提供するという。

超越論という言葉には形而上学の匂いを感じるが、20 世紀の科学が超えられなかった経験則の壁をそれで乗り越えられるならと、議論の展開に期待した。ところがここで述べられた威勢のよい宣言は、第 2 章の歯切れの悪い言葉で一気に帳消しとなり、冷めた気分引き戻されてしまった。

「なお、最初に断るべきであったが、本書では量子力学には言及しないつもりである。哲学では往々にして科学(とりわけ物理学)の最新の研究動向に基づいて議論を組み立てようとする傾向が見られる。しかし、私の考えでは、これはいついかなる時も間違ったやり方である。」

1900 年のマックス・プランクの研究を発端とする量子力学が、100 年以上たった 21 世紀に最新の研究であろうか。この言葉に深い違和感をおぼえた。

量子力学は、半導体、レーザ、光通信、太陽電池、発光ダイオード、磁気共鳴(MRI)から電子レンジにいたるまで幅広く実用されている。これを最新の研究動向とよぶのか。たとえ量子力学の理論がむずかしくても、ものづくりの領域ですでにかなりの知見が蓄積されているはずだ。バスカーの排除の決め付けぶりに、筆者は逆に、量子力学こそが重要なカギを握るような気がした。フォン・ノイマンの「やがては量子力学の助けを大いに借りることになる」という言葉は、筆者の思いが間違いでないことの予言であり、筆者を勇気づけてくれた。

3.2. 記号の物理学:カッシーラーの予測

ドイツの哲学者カッシーラーが、亡命先のアメリカで 1945 年に行なった講演「現代言語学における構造主義」の中で、「言語学は自然科学か」という問いを発している。そして自分なりの答えを示した。

「言語学は自然科学かという問いに対する私の答えはきわめて単純である。自然科学とは何か。物理的対象を取り扱う科学である。

物理学者や化学者は、それらのものの属性を記録し、それらの変化を研究し、その変化を引き起こす法則を発見する。言語現象も同様に研究することができるかもしれない。我々は音を大気の振動とみなし、音声の生理学を様々な音声を生みだす器官の運動として表現できる。しかし、これらをすべて行なっても、ヒト言語を物理世界から分け隔てる境界線を越えるに至らない。言語は「記号的形態」である。それは記号からなり、記号は物理世界には属さない。それらは対話(discourse)というまるで異なる宇宙に属している。自然の物性と記号は同じ基準で扱えない。言語学は記号学の一部であり、物理学の一部ではない。」[31]

カッシーラーが物理的対象と呼ぶのは、五官で観察可能なニュートン力学の世界であり、彼は量子力学に思い及ばなかったのだ。電池がなくなると携帯電話もスマートフォンもパソコンも動かなくなるように、エレクトロニクス機器であっても、最低限の電力を必要とする。記号の現象にも、五官で感知することができない量子力学現象を起こすために、微小なエネルギーが必要である。

3.3. 量子力学現象のための低雑音環境

微小な力学で行われる量子力学現象が起きる環境に要求されるのは、雑音レベルが低いことである。雑音が多い環境では、微小エネルギーにもとづくミクロな現象は、誤りが多発する。

デジタル・コンピュータの著しい発達は、電力をたくさん必要とする真空管が、半導体(トランジスタ)に置き換わったことによる。電力消費量も熱発生量もけた違いに少なくなったことが、寿命や信頼性も集積化も高まることにつながった。

生命体においては、原核生物から真核生物への進化を、つまり細胞質内に遺伝子を保存し転写がおきる場として核膜が形成されたことを低雑音環境の提供と考えられる。核膜のおかげで、DNA からの転写後、非コーディング RNA による転写後修飾が可能になり、生命進化が加速した。

脊椎動物の記号処理においては、脳室が低雑音環境である。脳室内は、脈絡叢で濾過された血漿成分からなる脳脊髄液(CSF)で充満している。わりと最近まで、CSF の中は免疫パラダイスになっていて、B リンパ球も免疫グロブリンも存在しないと言われていた。しかしながら、血液中に比べると 2 桁ほど量は少ないが、脈絡叢のおかげで低雑音環境となった CSF の中に、B 細胞受容体(BCR)を表面にもつ B リンパ球と免疫グロブリン(Ig)が存在し、自由に巡回していることが明らかになった。[32]

3.4. 五官の記憶の分子構造

Penfield の行なった観察結果の中で、本稿にとってとくに重要であるのは、これだけの観察を行なった結果、「1 記憶された出来事や経験、2 その出来事に関連した思考、3 それが引き起こす感情」などの記憶はよみがえったが、言語記憶はよみがえらなかったことである。Penfield は主な半球の側頭葉か前頭葉に言語野があること、左半球の後部側頭葉にも言語のための領域があることは観察しているが、それ以上は観察できていない。

「おそらく出来事を思い出すという意識作業は、話したり読むための意識作業とは別のものなのであろう。皮質を刺激したときに患者が人々の話し声を聴いたりその話を理解することはできたが、刺激によって患者が話したり、個別の単語を思い出すということはなかった。」[19]

大脳皮質に損傷がなくておきる超皮質性失語は、ほとんどの言語モダリティー(聞く、話す、読む、書く)は良好であるが、名詞の呼称が重度に障害される失名詞失語(健忘失語)の症状を示す。言語野が健全であるのに、言語記憶だけ失われる現象があるということも、言語記憶が大脳皮質にないことを裏付ける。[33]

言語記憶が大脳皮質上にないとするれば、脳室内の免疫細胞ネットワークであると考えられるのも、荒唐無稽ではない。

3.5. 概念の分子構造とデジタル進化

免疫細胞である B リンパ球とそれが産生する抗体の免疫グロブリンが、概念装置に必要とされる条件をみたしていることを確認しておく。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では思いつかない。[15]

- (i) 抗原と抗体が選択的・特異的に結びつくカギと鍵穴の構造をもつ
- (ii) 抗体の抗原結合領域(Fab)のアナログ形状が相補性決定領域(CDR1~CDR3)のペプチドのデジタル配列によって表現される D/A 変換機能をもつ(アナログな形状からデジタル配列を決定する A/D 変換機能をもつ)
- (iii) B 細胞の数によって決定され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、何日かけてそれに対応する新たな抗体をつくることができる
- (v) 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現象を示す
- (vi) 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、相互にネットワークする(「サルトル」⇒「実存主義」といった言葉の音韻記号だけのネットワークが生まれる)

超可変領域である B 細胞受容体や免疫グロブリンの抗原結合領域(Fab: Fragment Antibody binding)が、視覚や聴覚から CSF 接触ニューロンによって送られてくる記号刺激をパターン一致で処理している。一致が起きると活性化して、しかるべき行動をとるように、視床や脳幹網様体に伝える。このメカニズムは、ヒト以外の動物の記号活動と変わらない。ヒトは論理的な音素(クリック子音や音節)を獲得したために、自由に記号を生みだすことができるようになった。これが概念のデジタル進化である。

3.6. 概念から文法への進化は喉頭降下による

人類にとって「母音の前の言語」というものを考えることは、人類の最古の言語とみなされているコイサン語でのみ可能である。コイサン語以外では考えられない。コイサン語は、クリック子音だけが使われた時代があると思わせる。「クリックは、軟口蓋気流による吸気音を含む子音である。それが使用されている地域と言語は、コイサン語とアフリカの

わずかな数の言語に限られる。」[34] この南アフリカのインド洋沿いの地域で現生人類が生まれたことが、SNP 解析によって解明された。

「クリックと非クリックを比較解析すると、これらはひとつの一貫性のある音韻システムとしては統合されえない。」[35] この一貫性のなさは、クリック子音から母音をともなう音節への進化が、時系列上で相前後する進化だからだ。南アフリカの中期石器時代には、スティルベイ(Still Bay, 71.9–71.0ka)とホイソンズプールト(Howiesons Poort, 64.8–59.5ka)の2時期に大きな文化的発展があったことが確認されている。[36]

この2時期が、クリック子音の獲得と、母音の獲得に対応していると考えられる。そして、母音の発生が、デジタル通信システムである言語の最後の仕上げとして文法を生んだようである。Westphal は、「いくつかのコイサン語において、ほとんどの内容語はクリックで始まるが、機能語でクリックを使うものはほとんどない」と報告する。[37] 内容語とは、記号(言葉)が記憶と結びつく概念であり、機能語とは記号が法則と結びつく文法である。ここで文法語(機能語)は、「意味の接続や変調規則を示す、主として単音節語の付加あるいは変化」として定義する。

肺気流を用いる母音の発声は、窒息や誤嚥を防ぐために複雑な喉頭の運動制御を必要とする。そのため Lieberman は、「現生人類が声道(Supra-Laryngeal Vocal Tract)の進化を遂げる前に、話し声を生み出す運動パターンの発生装置を配列する神経回路基板が存在していたにちがいない」と述べている。[38]

ヒトははじめ文法をもたずにクリックだけの単語による二語文・三語文を静謐な音響暗室のような洞窟の中で話していた。数千年経過して喉頭が降下し、母音を発する声道を獲得して、音節が生まれ、それが論理的存在になったと考えられる。**論理的存在とは、自動的な処理を実行するだけの微小エネルギーをもつ存在である。**口から吐き出される息のもつエネルギーが、文法処理にとって重要である。

母音は力もち、雑音に強く、洞窟外で会話できる。また文法を処理するための神経回路基板と反応して、無意識に意味の論理的ルーティングを行う。

たとえば、“and”、“or”、“but”、“if”などの単音節の接続詞は、隣接する単語や意味チャンクがどのような意味つながりにあるかを示す論理的記憶と結びついている。これらの単音節の文法スイッチがメッセージの中に埋め込まれることによって、最小意味単位は、次々と論理的ベクトルを付されて作業記憶領域にほうりこまれ、意味が再構築されていくのである。

3.7. 文法の分子構造

3.7.1. 文法はベクトル

概念の分子構造が、B 細胞受容体(BCR)や抗体分子(Ig)の可変領域であるということは、イエルネの説明から類推できた。だが、文法の分子構造となると、いったいどんな仕組みになっているのか、さっぱり想像できなかった。

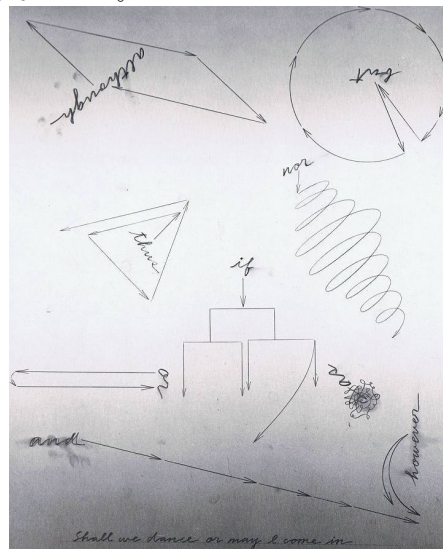


図 23 踊ろうかそれとも入ってもいい? [17]

荒川修作とマドリン・ギンズがつくった「意味のメカニズム」の図式絵画の9は「逆転可能性」という項目である。

その一枚は「踊ろうかそれとも入ってもいい?」と題されて、“and”、“or”、“if”、“thus”、“as”などの接続詞がベクトルとして表示されている。接続詞と無彩色のベクトルだけで構成されたこの絵は、何を表わすのだろうか。

もともと色彩の魔術師と呼ばれたアラカワの色づかいのみごとだ。他の図式絵画や三鷹やニューヨークの住宅の壁や床や天井に使われた色は、カラフルだけどけっして原色ではない。自然の中にある木々や花々や大地を特徴づける色が選び抜かれてそこにある。庭の野草や屋上庭園の灌木や花の記憶と、壁や天井の色が呼応するから、部屋の中にいてもまるで花畑の中にいるような仮想現実感覚が生まれる。

それらと比べてこの無彩色な矢印の集合は、アラカワ作品としてはじつに珍しい。なぜ無彩色でなければならなかったのかと考えたところ、文法は感覚記憶を伴わない純粋な論理・法則の記憶、論理スイッチの記憶だからではないかと思いついた。ヒトの記憶には、色彩や形をもつ五官の記憶のほかに、論理の記憶がある。論理には色彩や形はない。アラカワはそれを直観したのである。

ではなぜそれがベクトルとして表現されているのか。接続詞は、意味接続の論理スイッチであり、それぞれの接続詞の論理的接続構造はベクトル表示に適しているからだ最初は考えた。我々の脳内で、接続詞はベクトルとして記憶されている。

しかしなぜヒトは文法をベクトル処理できるのか。これを説明するために、文法の分子構造、文法の生理メカニズムを想像しなければならない。

3.7.2. 不変部のイディオトープ

実は言語のデジタル性を分子生物学や免疫学の最新知識と比較するために教科書を買った。「シンプル免疫学」という薄手の教科書だが、そこに書かれてあることは、筆者の知らないことだらけである。[16]

この教科書を読んでいたところ、免疫抗体の不変部分に Fc 受容体(Fc: Fragment crystallizable)と呼ばれるものが存在していることを知った。

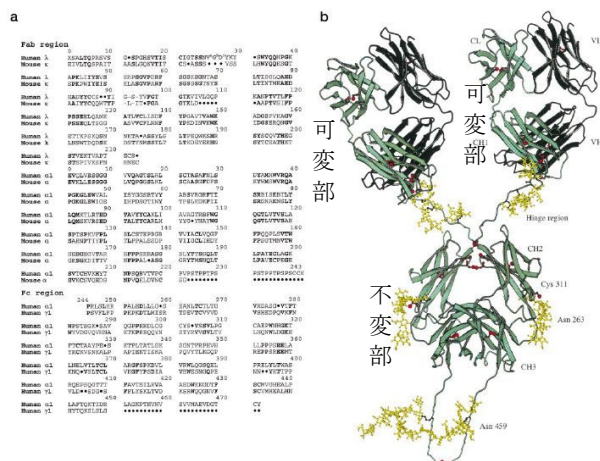


図 24 免疫グロブリンの可変部 Fab と不変部 Fc 領域[39]

この Fc 受容体は、動物の記号のシグナル伝達においてベクトル成分を伝達し、どの方向にどの速度で移動するかを伝えるのではないかな。そしてそれがヒトの言語では、文法として論理ベクトルを伝達しているのではないだろうか。

簡単にいうと、脊椎動物は、記号を処理するときに意味とベクトルを同時に処理する。たとえば「敵だ、逃げろ」という記号を受け取る時は、「どちらの方向に、どの速さで」というベクトル情報も付随する。ヒトはこのベクトル情報処理能力を、文法のために転用して、長くて複雑なメッセージのやりとりを可能にしたのではないかな。だから人間は視覚刺激や聴覚刺激が危険を伝えても、即座に自動的に逃げなくなったのだ。これが言語の脳生理メカニズムの核心部分ではないかな。

3.7.3. 文節と langage articulé

しかし、概念と文法は都合よく、自立語の概念と付属語の文法がペアになって、表現されているのだろうか。

すべての言語でこのような構造が見て取れるかどうかの確認はしていないが、日本語文法における文節と、フランス語における langage articulé(ランガージュ・アルティキュレ)を比較して考察してみたところ、日本語ではほとんどが「自立語(概念)+付属語(文法)」という構造になって配列されていることがわかった。[40] そして、フランス語の場合は、それと真逆で、「文法+概念」という構造が最小の意味単位となって、メッセージが紡がれていることが見て取れた。英語の場合には、日本語やフランス語の場合ほど、構造が明確ではない。

言語刺激が聴覚に入力されると、文節構造がつぎつぎと処理されて、作業記憶に送りこまれて、意味が再構築されるのではないだろうか。

Oku no Hosomichi C+g structure

(TSUKIHwa)(HYAKUDAIIno)(KAKAKUUnishite)(YUKIKAU)(TOSHImo)(mata)(TABIBITONari)(FUNEno)(UEni)(SHOUGAIwo)(UKABE)(UMAno)(KUCHI)(TORAEte)(OIwo)(MUKAURU)(MONOha)(HIBI)(TABInishite)(TABIwo)(SUMIKAtoS U)(KOJINmo)(OOKU)(TABIni)(SHISEru)(ARI)(Yomo)(IZUREno)(TOSHlyorika)(HENUNno)(KAZEni)(SASOWAREte)(HYOHAKUIno)(OMOI)(YAMAzU)(KAIHInni)(SASURAE)(KOZOIno)(AKI)(KOJono)(HAOKUIni)(KUMOno)(FURUSUwo)(HARAite)(yaya)(TOSHImo)(KURE)(HARU)(TATERu)(KASUMIno)(SORAni)(SHIRAKAWAno)(SEKI)(KOEnto)(SOZOROGAMIno)(MONOni)(TSUKite)(KOKORow o)(KURUWASE)(DOSOJINno)(MANEKIni)(Aite)(TORU)(MONO)(Teni)(TSUKAZU)(MOMOHKIno)(YABUREwo)(TSUZURI)(KASAno)(O)(TSUKEKAte)(SANRIni)(KYU)(SURUyori)(MATSUSHIMAno)(TSUKI)(MAZU)(KOKOROni)(KAKARite)(SUMERU)(KATAwa)(HITOni)(YUZURU)(SANPUga)(BESSHOni)(UTSURUni)(KUSAno)(TOMo)(SUMIKAWARU)(YOzo)(HINAno)(IE)(OMOTEHAKKUwo)(IORIno)(HASHIRAni)(KAKEOKU)

図 25 日本語の文節構造

Descartes『Discours de la méthode』

“g+C” Structure = Langage articulé

「Or」「par」「ces deux」「mêmes」「moyens」,「on peut」「aussi」「connaître」「la différence」「qui」「est」「entre」「les hommes」「et」「les bêtes」,「Car」「c'est」「une chose」「bien」「remarquable」「qu'il」「n'y a」「point」「d'hommes」「si」「hébétés」「et」「si」「stupides」「sans en excepter」「même」「les insensés」,「qu'ils」「ne soient」「capables」「d'arranger」「ensemble」「diverses」「paroles」「et」「d'en composer」「un discours」「par lequel」「ils fassent」「entendre」「leurs pensées」,「et」「qu'au contraire」「il」「n'y a」「point」「d'autre」「animal」「tant parlait」「et」「tant heureusement」「né」「qu'il」「puisse」「être」「qui fasse」「le semblable」.

図 26 フランス語の文節構造

- 「The first」 part of 「the problem」 is 「at present」 the dominant 「one」 in physiology. 「It is」 closely connected with 「the most difficult」 chapters of 「organic」 chemistry 「and」 of physical chemistry, 「and」 may 「in due course」 be greatly 「helped by」 quantum mechanics. 「I」 have 「little」 qualification 「to talk」 about it, 「and」 it is 「not」 this part 「with which」 I shall 「concern」 myself 「here」. 「The second」 part, 「on the other hand,」 is 「the one」 which is 「likely」 to attract 「those of us」 who 「have」 the background 「and」 the tastes of 「a mathematician」 or 「a logician.」 (John von Neumann “The General and Logical Theory of Automata”)

図 27 英語のやや不明瞭な文節構造

4 概念の記号論理学

4.1. ピアジェの記号論理的な発想

日本の認知科学や自然言語に関する研究には、比較的簡単な実験を比較的多数の被験者に対して行なって統計解析するアメリカ行動主義心理学の影響が根強い。フランスや欧州の哲学・言語学・心理学の影響を受けた発表は多くない。

仏語圏スイスで生まれ育って活動したジャン・ピアジェ (Jean Piaget, 1896-1980) は、「20 世紀の認知科学の基盤を整備し、もっとも著名で影響力のある科学者」といわれる巨人である。[41] そのわりにピアジェの業績は後続研究者にあまり利用されていない。ひとつにはピアジェがあまりに多作であったことがあげられる。「生涯に、少なくとも、論文 483 篇 (10,157 頁)、著書 57 冊 (16,186 頁)、計 26,343 頁に及ぶ原稿を書いている」.[42] ピアジェ紹介者として知られる波多野完治氏も「ピアジェが生きているあいだ、わたしは、ピアジェを読むことが精一杯で、ほかの仕事にまで手が回らなかった。『これはたいへんな怪物にとっとかまってしまったものだ。』」ということばを残している。[43] そのためもあつてか、ピアジェには全集や著作集がない。

ピアジェは、心理学・論理学・認識といった目に見えない意識内部のことを論じている。論じ方もデカルト以来のフランス哲学・論理学の伝統に慣れていないと読みこなせない。論理的な発想や理屈をこねることを嫌う日本人にとって、フランスの論理学・哲学は考え方が対極にあるといえる。論理的すぎて手に負えない、頭が受け付けられないという日本人は多いだろう。

これは単なる叙述の方法の違いではなく、実際に頭の中での概念の動かし方も違うことがある。たとえば日本人は引き算のとき、同じ桁の引かれる数より引く数の方が大きかったら、引かれる数のひとつ上の位から 10 借りてきて、上の位を 1「繰り下げる」が、フランスでは引かれる数に 10 を足して、その分引く数のひとつ上の位を「繰り上げる」。フランスの小学生の教科書でこの筆算術を目にしたとき、筆者はそれがいったい何を意味するのかすぐには理

解できなかった。しかしこれがデカルトやパスカルを生んだ国の算数なのである。

このように、目に見えないところで概念や論理操作の仕方が違っている以上、ピアジェの書いたものを読むにあたって、思考法や論理装置が日本人と違うかもしれないと覚悟しておくべきである。実際にガードナーは、フランスにおいては「デカルト的な物の見方と思想の傾向」が「長い生命を保っている」ことを指摘する。[44]

それは「自分自身の精神を観照することが真理への第一の道である」という確信、人文主義的な哲学と芸術の蔑視ならびに論理—数学的かつ幾何学的推理の尊重、動物は精神を欠いており、それゆえ生産的創造的思考が不可能だとする見解、理解および思考における人間の言語の中心的役割の強調、全ゆる知識を統一しようとする熱望、そして人間の本性に対する変ることのない関心」などである。[44] 構造主義者たちもこの伝統から自由ではなく、もちろんピアジェにも上記の伝統を感じる。

「サルとヒトは、毛が三本(の違いにすぎない)」という日本とは考え方が大きく異なるのだ。

4.2. 意識を形成する生得的論理装置

ピアジェは「論理は思考の鏡である。その逆ではない」という。[45] 思考するために論理を持つてくのではなく、論理があらかじめ存在していて論理にしたがった活動・作用・操作が行なわれた結果が思考だという。

「どんな人も、各自の心の中に、分類、系列化、説明体系、自分一個だけの空間、時間、価値尺度」、たとえば「コレハナンダ、ソレハ大キイカ、小サイカ(オモイカ、カルイカ、遠イカ、近イカ)、ドコダ、イツカ、ドンナ原因デカ、ナンノ目的デカ、ナンボヤ等々」といった基準をもっていて、「われわれは、子どものときから事物がでてくればそれを分類し、比較し(同じか、ちがうかの双方)、時間および空間の中に秩序だて、説明し、目的と手段とを評価し、計画し」ている。[45]

そうしてつくられた群性体は、合成性、可逆性、結合性といった条件を保ちつつ、他の群性体と相互に調整しあつて均衡し、個人の意識内でひとつの概念体系を構築する。そしていざ体系が構築されると、それ自体で自律的に均衡を維持するようになる。

「思惟がいったん操作の段階に達してワクが形成されてしまうと、分類のワク、系列化のワク、時間や空間のワクは、発達の段階では実にゆっくりと成立したにもかかわらず、成立した後は、新しい要素を実になめらかに自分の身内に吸収することができる。一つ二つの特殊な部分が新しく発見されるとか、補充されるとか、またはバラバラな源泉からまとめ上げられるとかいう事実は、ワクの体系の全体として

の堅固な斉合性をおびやかすことにならず、かえってこれを調和してしまう」[45]

ピアジェは、もっとも単純な組み合わせにしたがって作られた8つの基本的な論理の群性体を紹介している。8つというのは、2種類ずつ3つの異なる要素を掛け合わせたものだ。

まず加法的か乗法的かという要素は、適用される論理の違いであり、加法はブール代数のOR、乗法はANDである。残りの2つの要素は、概念や操作の特性の違いによって群性体の性質が変わるということのようである。

類か関係性かというのは、概念の性質の違いである。類とは、物の性質を問題にしており、名詞的である。関係性とは比較可能な状態を問題としており、形容詞的な要素が加わる。3つめの要素をピアジェは「組み合わせ・系列化・単純対応」か、あるいは「相補性・複雑対応」かという。これは、群性体内部あるいは群性体相互の操作が、一対一対応や単純な二次元のかけ合わせ行列であるのか、もっと複雑な関係かを問題にしているのか、筆者は十分には理解できなかった。筆者はさまざまな概念に対して、ANDやORの操作を試みて、概念体系の構築を試みた。

ここで問題にしたいのは、我々が生得的にもっている論理装置にもとづいて意識を構築していることよりも、その論理装置とは何かということである。筆者は、ピアジェがそれについて論じたものにはまだ出会っていないが、イェルネの講演の中にヒントをみつけた。それは神経細胞と免疫細胞がもっている二分法と二元論の論理であり、LD2の予稿の3.3と3.4のところで、それぞれ二分法と二元論として紹介している。

4.3. 意味は記憶のネットワーク

我々の意識を構築する論理装置は、神経細胞と免疫細胞の二元論と二分法論理であり、それらの論理的演算の結果がどこかに記憶されているから、個別の概念の集合として概念体系が構築されるのだろう。

個別の概念の意味も、記憶の集合、記憶のネットワークである。同じ音韻記号に対して、たくさんの記憶が生まれると、それぞれの記憶が認識し、認識されて、記憶のネットワークを構成する。概念の意味は、このさまざまな記憶のネットワークである。ある概念が聴覚刺激として入力されると、それと関係するさまざまな記憶が想起される。そのときに生まれた感情や思考結果の記憶も、その概念の意味として記憶されるのではないか。

4.4. 概念とは演算するための論理記号

概念とは、音韻記号と五官の記憶・論理の記憶を結びつける装置である。その音韻記号は、音節を1以上いくつか結びつけて恣意的につくられる。

概念がほぼ無限の種類の音節列(音韻記号)と記憶を結びつける装置であることが重要であるのは、その音韻記号を論理回路に投入できるからである。

「AはBかBでないか」という二分法処理をするにあたって、Aのところにも、Bのところにも、概念は投入できる。この二分法の処理によって、類の概念はどこまでも細分化することができる。[46]

また「 $A+B=C$ 」という二元論の論理において、AやBのところにも概念を投入して、Cが具体的な行為・行動であるのが、通常の記号論的な二元論である。

もしAにフランス、Bにパリと入れれば、CはAとBの関係性を表し、その関係性に名前を与えると関係性概念「首都」が生まれる。

二元論理にもとづく思考結果の類概念や関係性概念などの論理概念をAやBに投入し、その結果に新たな名前を与えることによって新たな抽象概念(論理概念)とすることができる。すると、直接的には物質や現象とむすびつかない抽象度を高めた概念となり(高次抽象概念・高次論理概念)、それをさらに別の二元論理に投入することもできる。

4.5. 科学概念の段階的高次化と還元原則

こうして次々に論理の抽象度を高めた概念をつくることで、人類は文化的に進化した。しかし、そのことによって、抽象概念というものを現実存在と無縁な存在として考え、取り扱う悪しき慣行が広まった。フォン・ノイマンは、論理的概念の高次化を想像していたが、同時にそれが現実との関係性を完全に喪失して、バロックの装飾に陥る危険性も予見していた。[47]そして、経験に戻ること、起源に戻ることが、科学を無意味な形式主義・審美主義から抜け出すための唯一の救済策であると述べている。

フォン・ノイマンの救済策の提言は、言語学的に言えば、すべての抽象概念・科学的概念は、物質と現象の次元に立ち返って、その次元から単純な論理を積み重ねることで、確かで、共有できる概念にして使わなければならないということだ。

逆にいうと、すべての抽象概念は、何段階かの還元プロセスを経ることによって、物質と現象という言葉以前に還元されなければならないということである。

言葉を正しく使うことだけが、混迷から人類を解放しうる。

4.6. 量子力学と情報理論の混迷を乗り越えろ

20 世紀の量子力学と情報理論における理論と利用の著しい乖離は、科学的な概念を適正に取り扱えなくなったために起きたのではないだろうか。

量子力学と情報理論はいくつかの類似性をもつ。

- a. とともに 20 世紀に生まれた科学である
- b. 目に見えない現象を対象とする
- c. 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。
- d. その後の理論の発展がない。
- e. 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った。[3]

同じことがシュレディンガーのネグエントロピーという概念にもあてはまる。「生物は負のエントロピーを食べて生きる」ということをシュレディンガーは言い、この言葉は K. ローレンツを含む多くの科学者が引用している。[48][49]しかし、本稿の図 3, 図 4 で示したようにエントロピーはマイナスの値として、正の値である信号強度を内部から朽ちさせるべく作用する。マイナスになれば栄養というわけではない。シュレディンガーのこの言葉を誰も正さないまま、今も彼の著作は書店で売られている。これはまずいのではないか。

そもそも生物は、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。[50]フォン・ノイマン同様に、短く、明快な文体で彼はいう。

「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。」[51]

「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： $(En) \rightarrow (E3) \rightarrow (E2) \rightarrow (E1) \rightarrow E^* \rightarrow h\nu$ 」

[52] (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。」[52]

ヒトの意識を含む生命現象は、光と水の量子生物学によって解明されるのではないだろうか。イエルネ、フォン・ノイマン、セント・ジェルジら碩学の思考結果を受け継ぐことで、人類は知的ゲノムの誤り訂正を行なって、知的な進化を遂げる時期にきているのではないだろうか。

5 むすび：言語情報処理という研究手法

言語という情報システムの情報源符号化過程をめぐって、やや駆け足ではあったが、記憶のネットワークと生理メカニズム、文法の生理メカニズム、論理的概念の複雑化といったことを論じてみた。十分に時間をかけていないために、まとまりの悪いところがあるが、ワーキング・ペーパーということでご容赦いただければ幸いである。

本研究において筆者がとった手法は、言語というシステムが機能するために構成要素に要求されることは何かという視点から分析する、システム要求解析であった。システムの構成要素を、少ないながらも、明確に分離することによって、システム内部でのダイナミズムを感じ取り、脳の生理メカニズムとの対比によって、言語の生理メカニズムを特定するという手法である。

この解析にあたって、筆者は何一つ独自の実験は行っていない。必要と思われる機能や、関連しそうな脳の部位の名前をウェブ検索エンジンに投入することによって、検索の結果出会った論文や書物に書かれている言語情報をひたすら読み解くという手法である。図書館 OPAC や電子ジャーナルなど、インターネット社会が実現したおかげで可能となった新しい手法である。

脳神経科学や免疫学が、急速に深化し、複雑化する一方で、隣接する諸科学との対話は十分に行なわれていない。そのような時代に、システム要求解析は、神経細胞と免疫細胞の相互作用についての解析

が必要であるということを感じさせてくれただけでも、多少なりとも有効な手段であったと思われる。

人工衛星の製造会社において、システムエンジニアとは、専門を持たないことを専門とする技術者、人工衛星に関するありとあらゆる技術について専門家から情報を仕入れて、全体的に衛星がうまく機能するように段取りを組むことを専門とする技術者のことである。[53] ますます専門分化していく現代科学の諸分野を統合するために、システム工学的アプローチは有効かもしれない。

言語情報だけによって、科学的考察を行なうことはできる。諸科学を統合することによって、予想もしなかった成果を生み出す可能性もある。そのためには、たくさんの文献の中から有用な文献を選び出す検索能力と、学際的な個別の論文に書かれていることを、正しく理解する読解力が求められる。さらに、シャノンの情報理論や、シュレディンガーのネグントロピーのように、素人目にもおかしい科学概念・言語情報を読解対象から除外する誤り検出能力も求められる。

本来であればこれらの怪しい理論は、学会によって誤り訂正されるべきであるのだが、残念なことにまったく誤り訂正されないまま何十年もまかりとおっている。そのため、個々の研究者が自力で誤り検出、誤り訂正することが求められており、科学研究の発展を阻害している。この現状は、一日も早く正すことが望まれる。 ©K. TOKUMARU 2012

参考文献

- [1] 得丸 デジタル・ネットワーク・オートマトンという思考枠組みとその有効性について 第二回 Latent Dynamics Workshop
- [2] Shannon C.E. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal 1948;27:379-423 and 623-656. 「通信の数学的理論」植松友彦訳,ちくま学芸文庫 2009
- [3] 得丸 シャノン情報理論へのいくつかの疑問, 信学技報 IT2011-34(2011.9)
- [4] 得丸 情報理論における雑音因子, FIT2012 第11回情報科学技術フォーラム A-039(2012.9)
- [5] 得丸 フォン・ノイマンの考えていた情報理論 信学技報 IT2011-33(2011.9)
- [6] von Neumann, J. 「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 The General and Logical Theory of Automata, Lecture at Hixon Symposium 1948
- [7] 得丸 記号と言語と条件反射 ～ 鈴木孝夫の『鳥類の音声活動—記号論的考察』に刺激されて～ 信学技報 TL2012-1 (2012.6)
- [8] 得丸 言語情報の獲得と前方誤り訂正手法～シャノン情報理論の誤り検出と誤り訂正～信学技法 IA2012 (2012.10)
- [9] マドリン・ギンズ+荒川修作 ヘレン・ケラーまたは荒川修作、新書館、2010 年
- [10] デルコミン F.、ニューロンの生物学、トッパン 1999 年
- [11] 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
- [12] Vigh (1983) The System of Cerebrospinal Fluid-Contacting Neurons (日本組織学記録 46:4)
- [13] Jerne, N.K. (1974) Towards a network theory of the immune system, Ann. Immunol. (Inst. Pasteur) 125C, 373-389
- [14] 千葉勉 Research Into the Nature & Scope of Accent in the Light of Experimental Phonetics, 音声と言語研究叢書 I, 富山房 1935
- [15] Jerne, N.K. The Generative Grammars of the Immune System, Nobel Lecture 1984 (付録 A)
- [16] 中島・高橋・吉開 シンプル免疫学(改訂第4版) 南江堂、2011
- [17] 荒川修作 マドリン・ギンズ 意味のメカニズム リポート 1988
- [18] Penfield W., Rasmussen T. The cerebral cortex of man: a clinical study of localization of function, New York, Macmillan, 1952 第1章において手法の詳しい説明が行われている
- [19] Penfield, W., Jasper, H. Epilepsy and the functional anatomy of the human brain, Boston Little 1954
- [20] 渡辺・岡市、比較海馬学、ナカニシヤ、2008
- [21] Guo-li, et. al. Adult Neurogenesis in the Mammalian Brain: Significant Answers and Significant Questions, Neuron 70, May 26, 2011 Elsevier

*衛星システムエンジニア・自然思想家

158-0081 東京都世田谷区深沢 2-6-15 tel. 03-3702-0404

e-mail: tokumaru@pp.iij4u.or.jp

Satellite System Engineer & Natural Philosopher

2-6-15, Fukasawa, Setagaya-ku, Tokyo 158-0081 Japan

- [22] Hydén, H. The Question of a Molecular Basis for the Memory Trace, in Ed. Pribeman, K., Broadbent, D., "Biology of Memory" Academic Press, 1970
- [23] Rose, S.P.R., Holger Hyden and the biochemistry of memory, Brain Res. Bulletin, Vol.50:p443 (1999)
- [24] Neuberger, M.S., Memory in the B-cell compartment antibody affinity maturation, Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. (2000) 355:357-360
- [25] 子安重夫編 免疫学最新イラストレイテッド、羊土社、2003
- [26] パブロフ, 大脳半球の働きについて 条件反射学(上), p51, 岩波文庫, 1975
- [27] Fuster, J.M. 前頭前皮質: 前頭葉の解剖学, 生理学, 神経心理学, 新興医学出版社, 2006
- [28] スティグレール, B. 向上心について 新評論 2009
- [29] スティグレール, B. 偶有からの哲学新評論 2009
- [30] バスカー, R. 科学と実在論, 法政大学出版局 2009
- [31] Cassirer, E.A. Structuralism in Modern Linguistics, Word 1:1945, pp99-120
- [32] Trbojević-Čepe, M., Vogrinc Ž., Inflammation and Humoral Immune Response within the CNS Compartment, BIOCHEMIA MEDICA, Zagreb, siječanj—lipanj 2004. Godište: 14: pp1-36
- [33] 毛束真知子 絵でわかる言語障害 言葉のメカニズムから対応まで, 学研, 2002
- [34] Nakagawa, H. (2007) Integration of the clicks and the non-clicks Area and culture studies / Tokyo Univ. of Foreign Studies 75:87-96
- [35] Traill, A. (1997) Linguistic phonetic features for clicks. In R.K. Herbert (ed), African linguistics at the crossroads: papers from Kwaluseni (1st World Congress of African Linguistics, Swaziland, 18-22, July, 1994), pp.99-117
- [36] Jacobs, Z. et al. (2008) Ages for the Middle Stone Age of Southern Africa: Implications for Human Behavior and Dispersal, Science 322: 733-735
- [37] Westphal, E.O.J. (1971) The click languages of Southern and Eastern Africa, in Sebeok, T.A., Current trends in Linguistics, Vol. 7: Linguistics in Sub-Saharan Africa, Berlin: Mouton
- [38] Lieberman, P. (2002) On the Nature and Evolution of the Neural Bases of Human Language, Yearbook of Physical Anthropology 45:36-62
- [39] T.S. Mattu, et al.(1998) The Glycosylation and Structure of Human Serum IgA1, Fab, and Fc Regions and the Role of N-Glycosylation on Fcα Receptor Interactions, J. Biol Chem 273:2260-2272
- [40] 得丸 井筒俊彦「分節」概念の誤り訂正と鈴木言語学の発展的継承, 『鈴木孝夫の世界—ことば・文化・自然』第4集, 2012, 富山房インター
- [41] Fischer, K., Kaplan, U. "Piaget, Jean" in Encyclopedia of Cognitive Science/Nature Pub. Group, London, 2003
- [42] 大浜幾久子, ピアジェ理論の展開, Ann. Rep. Educational Psychology in Japan, 36:144-155, 1997
- [43] 波多野完治全集 第4巻 p410, 1990年, 小学館
- [44] H. Gardner, (1972) ピアジェとレヴィ=ストロース 第2章, 誠信書房 1975
- [45] Piaget, J. (1947) 知能の心理学 みすず書房 1967
- [46] 得丸 概念体系構築と概念操作を行なう生命のブール代数 人工知能学会 知識ベースシステム研究会 KBS 90, 37-42, 2010-10-14
- [47] von Neumann, J. The Mathematician, in "the Works of the Mind", 1947 Univ. of Chicago Press (付録 B)
- [48] 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
- [49] K・ローレンツ 鏡の背面 人間的認識の自然誌的考察, 谷口 茂訳, 思索社 1989
- [50] 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
- [51] セント・ジェルジ 生体の電子論, 1973 広川書店, p63
- [52] セント・ジェルジ 生体とエネルギー 1958 みすず書房, p18
- [53] 得丸 ヒト話し言葉デジタル通信システム研究の学際的性質概観と, 発話と聞き取りを結びつけるエントロピー利得(情報理論)について 情報処学会研究会報告 人文科学とコンピュータ 2010-CH-88-5 (2010年10月)

付録

A. 免疫システムの生成文法(1984年12月8日)

ニールス・K・イエルネ ノーベル講演

文法は2000年来の科学だが、免疫学はわずかこの百年間、生物学の中で尊敬されるべき地位を得たにすぎない。どちらの科学もいまだに難題が解けていないが、これから言語学と免疫学、言語表現と免疫システムの間の相似性を指摘してみたい。

まず、私の専門領域である免疫システムにおける重要な要素をいくつか思い出してみよう。1890年にフォン・ベーリングと北里は、はじめて、免疫した動物の血清の中に抗体を発見し、これらの抗体がジフテリアの毒素や破傷風の毒素を制圧することを示した。彼らは、抗体の**選択性(特異性)**も示した。対破傷風毒素の抗体はジフテリアを制圧できないし、逆もまた然りである。これらの発見の後、30年間あるいはそれ以上にわたって、免疫学者の多くは、我々の体のすべての細胞が抗体をつくりだすことができると信じていた。1950年代になってようやく明らかになり、1960年に示されたことは、リンパ球と名付けられた白血球細胞だけが抗体をつくりだすことができるということだ。リンパ球の総数は、動物の体重の1%より少し多いほどである。したがって、我々の免疫システムは、およそ1兆個のリンパ球によって構成される器官であるといっても間違いではない。

(ヒト) 免疫システム = 1兆個のリンパ球

我々の3000分の1の大きさであるネズミの場合は、

(ネズミ) 免疫システム = 3億個のリンパ球

この免疫システムについての簡単な説明の中では、リンパ球が体内の他のほとんどの細胞と相互に作用するという事実は顧慮しない。それは私の定義においては、厳密な意味での免疫システムとは考えない。

この免疫システムにおけるリンパ球の数は、神経システムにおけるニューロン(神経細胞)の数より少なくともひと桁大きいという事実に注目いただきたい。また、リンパ球は体内で脳以外のほとんどの細胞の間を、血液とリンパ液内で移動し、脾臓・リンパ節・盲腸・胸腺・骨髄内に集中することも留意しておくべきである。しかし奇妙なことに、リンパ球は脳からは排除されているようだ。1960年代は免疫学的な発見によって非常に実りある時期であった。いくつか紹介すると、60年代はじめには抗体分子の一次構造が明らかになった。(14, 15) ついで、あるひ

とつのリンパ球によって生み出されるすべての抗体分子はまったく同一であるというバーネットの見解が正しいことが示された。そして、60年代の終わりになって、リンパ球にはT細胞とB細胞の2種類があり、どちらもほぼ同数あることが示された。(17, 18, 5) Bリンパ球あるいはB細胞だけが抗体分子を分泌する。

この様子を図1に示す。

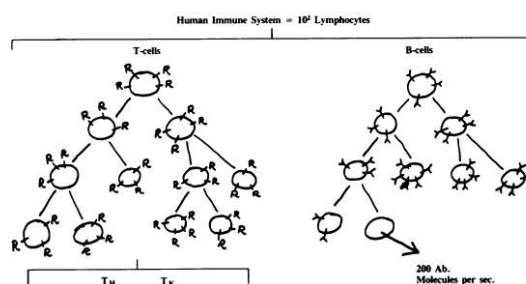


Figure 1.

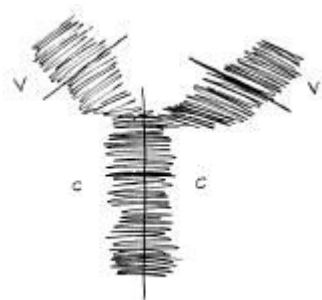
この図から覚えておいてほしいのは、我々が知っていることと、我々が今の時点では知らないことの両方である。我々の知識は速度を速めながら増えている。昨日わからなかったことが明日わかるかもしれないし、今日正しいことが明日間違っているとわかるかもしれない。このように、Bリンパ球は受容体と呼ばれる分子を表面上(B細胞ひとつあたり約10万個の同一の受容体)に付けて運んでいることが知られている。そのような「休息中の」B細胞がしかるべく刺激されて分裂し成熟すると、その子孫は休息していたB細胞がもともと示していた受容体とまったく同じ抗体を1秒間に2000個分泌する。抗体をつくりだすクローン的な性格は、1970年代初頭に明快に示された。(19, 20) しかしながら、外部からの抗原に対する動物の通常の抗体反応は、非常にたくさんの異なるクローンが使われる。そしてこれはふつう数100種類の異なる抗体分子の製造という特徴をもつ。(21) Tリンパ球も表面上に受容体分子をもっていることが知られている。しかし、まず、これらの分子は2年前に発見されたばかりでまだ解明されていないし、第二に、T細胞はそれらの分子を分泌しているわけではない。これらのT細胞受容器は、抗原認識分子であり、B細胞だけが生みだす自由に巡回している抗体分子の数に貢献するわけではない。さらに、T細胞には少なくとも2種類の異なった型があり、そのうちのひとつはB細胞が刺激を受けた状態になるのを手助けするのでヘルパー細胞(T_H) (22)と呼ばれている。(彼らがいないときには、彼らはB細胞が適切な刺激を受けることを防止する); もうひとつのT細胞はTキラー細胞(T_K) (23)と呼ばれている。なぜなら彼らは望ましくないと考える他の細胞(ウイルスに感染した細胞や、他の人から移植さ

れた細胞など)を殺すことができるからだ。さらに、抑圧細胞として、彼らはB細胞が刺激を受けることを予防する。(6)

こうして、B細胞は抗体言語を表現したいという一途な願いをもっている構図を示すが、それを促進あるいは抑制するT細胞に従属しているのである。

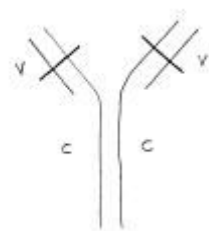
文法を眺める前に、抗体分子の構造について簡単に触れておかなければならない。生物学において何かを調べれば調べるほど、それはますます複雑な様相を示すようになる。これは抗体分子の構造においてもあてはまる。すべての抗体分子の基本的な要素は、分子重量がおよそ15万ダルトンのY字型をしたタンパク質の構造をもつ。(26)

これは三次元構造であり、すべての分子や細胞について生物学が扱わなければならない対象である。我々の意識は一次元の直線配列を扱うことには慣れているのだが、三次元的なものをみると戸惑う。しかし、図2として二次元のラフなスケッチを書いてみることにする。



この分子はいくつかの重要な方向から分断することができる。垂直に分断するとシンメトリ(左右対称)になる。そうすると抗体分子は同じ形に二分される。さらに切断すると、いわゆる「不変」(C)部分と「可変」(V)部分とに分ける。「不変部分」と呼ぶのは、異なる抗体特異性をもつ分子であってもこの部分を共通にもつからである。(たとえば、ジフテリアの抗毒素と破傷風の抗毒素が、共用するということだ。)

可変部分というのは、ここで抗体分子のこの部分がその抗体の特異性を決定づけるということである。2か所の可変部分はまったく同じであり、これは特異性という点では分子は2価であるということだ。我々が困難に感じているのは、二次元のスケッチを直鎖状の一次構造に変換することではなく、三次元の三次構造に変換することである。一次構造は解明されている。(14, 15) 図3で示すように、半分の分子は、214アミノ酸残基の軽いポリペプチド鎖と、400アミノ酸残基よりも少し多い重たいポリペプチド鎖から構成される。



異なる特異性をもつ抗体分子は、カルボキシル末端部分では同一のアミノ酸配列をもつが、アミノ酸末端部分では重鎖でも軽鎖でもアミノ酸配列が異なることがわかった。(24) このことから直ちに明らかになったのは、抗体分子の膨大なる多様性、抗体が認識できる膨大な数の異なった分子、言葉を変えれば、抗体特異性の膨大なるレパートリーは、可変部分のアミノ酸配列の莫大な数の多様性に起因するであろうということである。しかしながら、この直観は、我々の問題を解決しない。これでは、言語における単語や文の莫大な多様性は、文字や音素の配列の莫大な多様性のおかげであるといっているようなものだ。

免疫学における解釈は実質的には伝統的なままであった。つまり、この抗体分子の可変部分が三次元の「結合部位」を形成し、「特異性」とは単純にこの結合部位が抗原分子の三次元的な外形と相補関係の形状であるということだ。抗原とは、免疫システムに、これらの抗原を認識することができる特異的な抗体を生みださせるように誘導するものに与えられた名であり、今もそのまま使われている。抗体結合部分は、抗原分子の外形の突出部分を認識する裂け目として想像されており、すべての抗体はそれらが認識する抗原にもとづいて名づけられている。たとえば、ジフテリア抗毒素、対羊赤血球細胞抗体、対TNPといった具合だ。(25) さてここで、この抗原システムと特異性をもつ抗体分子の大きさがどれくらいであるのかをざっと示してみる。

まず、分子重量が1万ダルトンを超える高分子について考えてみる。これらは、多糖類、タンパク質、リポタンパク、核酸、ウィルス、バクテリアであり、この世に存在するどのような分子あるいは粒子であろうと、免疫システムが特異的な抗体を作り出せる抗原となる。そればかりではない。ニトロフェノールやアルソン酸、あるいは思いつくかぎりのいかなる有機・無機の分子であろうとも、タンパク質などの搬送分子と結びついたときには抗原性である。そのとき免疫システムは、たとえそれらの分子が世界中にいまだかつて存在したことのない化学実験室で合成されたものであったとしても、それらを認識する特異性をもつ抗体を産出する。(1) どうしてこんなことが可能なのだろうか。たとえば、ネズミの免疫システムは1億個ものBリンパ球を保有しており、

それがその抗体分子の可変部分の最大限利用可能なレパートリーである。「認識」は完璧なものである必要はなく、同じ「結合部位」はある程度の精度で多くの類似した抗原を認識できるようなのである。

さて、これはこの25年の間に明らかとなった注目に値する発見であるが、抗体分子の可変部分はそれ自身が抗原となり、抗抗体(anti-antibody)の産生を促すのである。Kunkel (27)は、モノクローンの骨髄腫抗体を、別の動物に注射したとき、使用されたその特定の抗体を認識する特異性をもった抗体を産出するが、それが他の骨髄腫患者から取り出された別の骨髄腫抗体のどれも認識しないことを明らかにした。この仕事は別の学者たちによっても継続されたが、主にはパリの Jacques Oudin とその同僚たちが行ない、免疫を受けた動物の普通の抗体分子が抗原となって、特異性をもつ抗抗体を産出することを示した。(28, 29, 30, 31) 言い換えるならば、ある抗体分子の可変部分は、その「結合部位」を構成するのみならず、他の動物において対イディオタイプ抗体を生みださせる(そのイディオタイプと名付けられた)抗原性の性質を示す。さらにわかったことは、ある特定の抗体分子の可変部分である抗原的なイディオタイプのプロフィールは、単一の場所ではなく、いくつかの離散的な場所から構成されていて、それらをもとにさまざまに異なった種類の対イディオタイプ型抗体分子がつくりだされるのだ。これらの個々の場所のことを、今、イディオトープと名づけることにする。これが意味するのは、ひとつの抗体分子のイディオタイプは、一式の異なる免疫原生のイディオトープによって表現されえるということである。そして最後に、ある一匹の動物の免疫システムは、あるひとつの抗原に対して特定の抗体を産生したあと、ひき続いて自分自身がつくりだした抗体のイディオトープにもとづいて抗体を産生し続けるということが明らかになった。後者の対イディオトープ抗体も、同様に、新しいイディオタイプのプロフィールを示すので、免疫システムはイディオタイプ相互のネットワークを表現しているということが明らかとなった。(7, 8, 9, 10, 11).

ここにお見せる図4は、我々が漠然と想像しようとしている、ひとつの抗体分子の可変部分の予想形状図である。

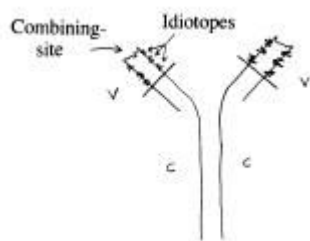


Fig-4

この絵は歴史的な妥協の産物である。我々は抗原中心の伝統をひっくり返して(25)、抗体分子がその産生を促した抗原分子を認識する「結合部分」という概念として残している。そして我々は単純にいくつかのイディオトープを同じ可変部分に書き足したが、それらはこれらのイディオトープを認識する「結合部分」をもつ他の抗体分子の産生を誘導することができる。

さて、この我々の実験結果を解釈しようとする、問題に巻き込まれてしまう。すでにお話したように、活性化していない状態のBリンパ球は、表面上におよそ10万の同じ受容体分子を示しているが、それはBリンパ球とその子孫が抗原によって刺激されると産生する抗体分子の型を示す。

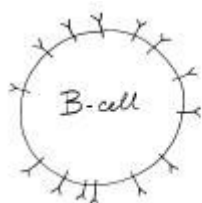


Fig-5

しばらくの間、図5として示されたこの絵に戻ることにする。そして、B細胞の表面の微小部分の拡大をおこなって、単一の受容体分子だけに注目するために図6で示す。いつもどおり、線を入れて、可変部分と不変部分を分ける。

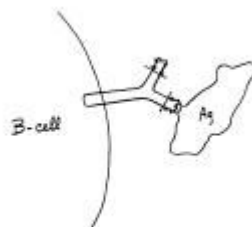


Fig-6

ご覧のとおり、抗原を認識する結合部位と、いくつかの抗原的なイディオトープを、分けて示している。抗原分子の想像図も書き入れたが、その一部はB細胞受容体の結合部位によって認識される。これは抗体産生の選択理論の基本的な図柄であり、バーネット(16, 2)によって明快に構築された。抗原は、それによって認識されるリンパ球を「選択し」、それらの細胞が増殖し、成熟し、適合する結合部位をもつ抗体を産生するように刺激する。明らかにT細胞による制御も関与するし、成長因子や成熟因子などもあるが、この図式が抗体産生の基本的構図であることは変わらない。図7は、これらの抗体分子のひとつを示すが、これが抗原の表面特性(「エピトープ」)を認識する。

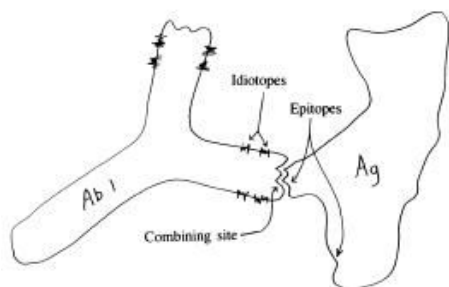


Fig-7 Figure 7.

ここで、しかしながら、結合部位と抗原的なイデオトープの両方を表現しているこの抗体分子(Ab1)が、抗原として用いられることを想像してほしい。すると、2つの状況 α と β を思い描くことができる。

図8が図式的に示すのは、自由に回遊するAb1分子が、(抗原を)認識し、B細胞の受容体にくっつく。この図は、ふたつの異なるB細胞が、抗原として機能しているAb1分子によって刺激されている図である。 α の事例では、B細胞の受容体の結合部位がAb1のイデオトープを認識し、細胞はそれに対応した抗イデオトープ抗体(Ab1)を産生するように刺激を受ける。 β の事例は、しかしながら、Ab1分子の結合部位がB細胞の受容体を認識し、もとの抗原が示したエピトープに似た形をもつイデオトープをもつ抗体を産生するよう刺激を受ける。

実験の結果、これらの状態はどちらも起きることが示された。たとえば、もしももとの抗原がインシュリンであり、Ab1が抗インシュリン抗体なら、 β 型の抗イデオトピック抗体(Ab2)は、インシュリンへの類似性を示し、SegeとPatersonが示したところによれば、インシュリンのように機能する。(32)他のシステムにおいても、同様の結果がCazenaveとRoland、Strosberg、Urgainおよび彼らの同僚、その他の研究者によって得られている。(33, 10, 39, 35)

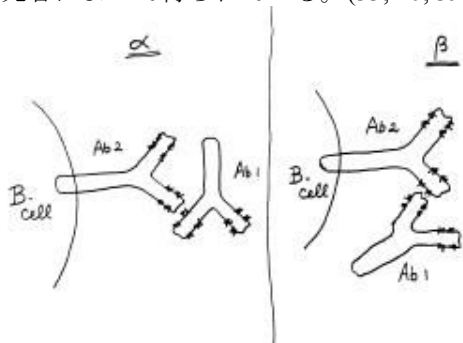


Fig-8

しかし私がここで問題にしたいのは、これらの α と β の2つの状況は本質的に違うのか、そうでないのかというものの検討である。Ab1がAb2を認識するというのと、Ab2がAb1を認識するというものの間に違いはあるのか。この三次元の分子レベルで、我々は「認識する」というのと「認識される」ということを別のものとして識別できるのか。もしそう

でないというなら、イデオトープと結合箇所を別のものとしてみることに意味がないことになる。そして、我々が言えることは、いかなる抗体分子の可変部も、いくつかの同等の結合部位あるいは一式のイデオトープを示しており、すべての抗体分子は複数の特異性をもつということだ。この点に関してはくりかえし指摘されているので(36, 37, 38, 25)、私があらためて言う必要はない。その代わりに、私はここでこの議論にある種の数霊術をもちこんでみたい。

ヒトであろうとネズミであろうと、ある一個体の動物の免疫システムがつくりだせる異なる種類の抗体の数はどれくらいだろう。どちらかといえば乏しい証拠にもとづいて、過去の二、三十年この数字の推定を行なったところ、一千万以上あると推定される。この莫大な多様性は、Bリンパ球のレパートリーと呼ばれてきた。この「レパートリー」は、Coutinhoによって「完璧」(39)と呼ばれた。「完璧」とは、免疫システムは、特異性をもつ抗体を産生することによって、世界中に存在するいかなる分子にも対応できる。そしてさきほど私が触れたように、一度も出会ったことのない分子に対しても対応できるということである。

免疫学者は、ときどき「免疫応答」のように言語学から用語を借りてくる。言語をみれば、どの言語も十萬語かそれ以下の数の語彙でまかなっていることがわかる。つまり、語彙の大きさは、免疫システムがもっている抗体のレパートリーの大きさに比べて100倍ほど小さい。しかし、もし我々が、抗体分子を特徴づける可変部分が、それぞれが100アミノ酸残基長からなる2つのペプチドによって構成されており、その三次元構造が一式の結合箇所を示していると考えるならば、我々は言語と免疫システムの間にもっと妥当と思える相似を見つけることができる。つまり、ある抗体分子の可変部分を単語としてみるのではなく、文あるいは節としてみるのだ。そうすると、免疫システムの莫大なレパートリーは、単語の集合である語彙ではなく、免疫システムが出会うかもしれない抗原の多様性によって表現されたいかなる文にも対抗することができる文例目録ということになる。

ここで私はノアム・チョムスキー(3)から言語学に関して引用しよう。「いかなる言語学理論であろうと、それが重要な理論であるためには、ある重要な事実を説明しなければならない。それは、成熟した話し手は特定の状況において新たな文を生み出すことができ、他の話し手たちはそれが同様に新しい文であるにもかかわらず、即座にそれを理解することができるということである。文法とは、きちんと構成された文章を規定し、その中のひとつひとつの文にひとつまたは複数の構造的記述を指定するための

装置である。おそらく我々はそのような装置のことを「生成文法」と呼ぶべきである。それは理想的には中心となる構文要素をもっており、音韻的要素と意味要素をもっている。」ここまでの私の引用である。言語における文章の組合せが莫大であることから、チョムスキーは「際限のない」という言葉を使う。私もこの「際限がない」という言葉が、抗体レパートリーの「完全さ」を表現するにあたって最適な表現であると思っている。

チョムスキーが指摘する生成文法の要素のことに、我々はいくぶん想像をはたかせることによってこれらの要素がタンパク質構造のさまざまな特性においてもあてはまることがわかる。すべてのアミノ酸配列はポリペプチド鎖であるが、すべての配列がきちんと折り畳まれて形が整った安定したタンパク質分子を生み出すわけではない。疎水性、静電性など、いくつかの文法規則が必要であるように思われる。しかしながら、意味論的な相似性を見つけることはより難しいのではないか。免疫システムは意味ある抗原と意味ない抗原を区別するだろうか。もしかすると、「自己」と「非自己」というのは有効な例かもしれないが。

一見して思えるのは、侵入してくるタンパク質分子が示す文に対する免疫応答とは、莫大な抗体レパートリーの中から、抗原文の一部に適した鏡像を選択するだけなのかもしれない。

ご存じのように、レオナルド・ダ・ヴィンチは手書きの鏡文字で日記を書いた。鏡文字を書いたり読んだりするのは相当の練習を積みなければできないことだ。一例を図9に示す。



Fig-9

続く2つの図で、私は普通の文字を黒で示し、鏡文字を表すために灰色の部分を使っている。

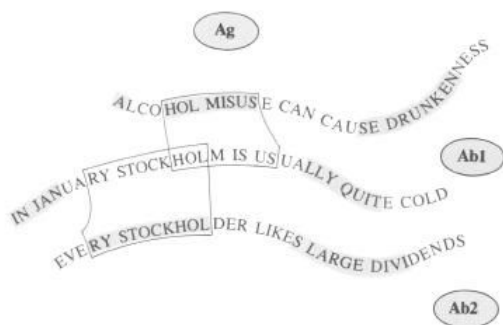


Fig-10

図10は、抗原の「文」を示す。その一部はAb1に鏡像として写し取られている。抗イディオトープAb2はAb1の一部を鏡像にするが、もともとの抗原とは何の接触ももたない。図11は、もうすこし複雑だ。ここではもともとの抗原はインシュリンであり、「OF INSULIN DE」という文字列が活性化した部位を示し、Ab1によって鏡像として写し取られる。抗イディオトープ性の抗体としてAb2αとAb2βの2つがあるが、鏡像を鏡像とするので、インシュリンの活性化した部分を示すことができる。(32)

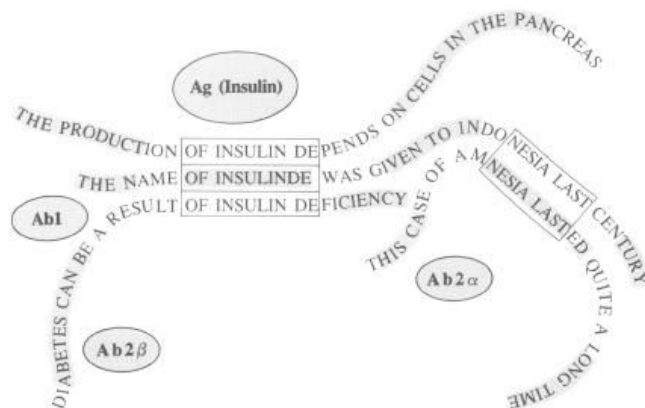


Fig-11

抗体を表現している文には、抗原の文の部分的な鏡像が含まれていることをあらためて強調しておく。これらの抗体は、侵入してくる抗原の反響表現ではなく、抗原がやってくる前からB細胞のレパートリーの中であってその動物が利用できる状態にある。これは、1950年代に選択説による免疫学が導入されたことに追従する重要な見識である。同様に、免疫システムが直面している状況にはもうひとつ重要な量的側面があることを強調しなければならない。ひとりのヒト個体は、一度に1万種類の酵素やホルモンや細胞表面タンパクなどを産生する。同時に、免疫システムは、抗体分子と呼ばれる1000万以上の異なるタンパク質のレパートリーを維持する。

これは他の体内のタンパク質をすべて合わせた数よりも1000倍も多い。ヒトとネズミは、通常、血液1ミリリットルあたり10ミログラムの抗体をもっている。すると、普通のヒトは、免疫グロブリンと呼ばれる自由に回遊する抗体を、50から100グラムもっていることになる。もし、この数字を1000万の異なる特異性で割ると、レパートリーには、それぞれの特異性ごとに5から10マイクログラムあることになり、それぞれの特異性ごとに平均300億の単クローン性の抗体となる。ネズミの場合はこの3000分の1だから、この数字を3000で割ると、1000万種類の特異性をもつ抗体それぞれが平均2から3ナノグラムあることになる。そのようなナノグラム単位の単クローン抗イディオタイプ抗体であっても、それが

ネズミの体内に投入されると、顕著な効果が生まれるということが Rajewsky と同僚たちによって示された。(40, 41, 42).

ここで締めくくりとなるが、我々の免疫システムは、自己中心的(自律的)であり、体内に存在する抗原の圧倒的多数を構成する抗体を、自分の抗体に対して抗イディオタイプ抗体を産生する。このシステムは、他の正常な体の自己成分との不安定な平衡を保ちつつ、突発的にシステムの動的調和を阻害する外来粒子、タンパク質、ウィルス、バクテリアの体内への侵入に対して激しく反応する。

遺伝によって伝えられる免疫システムの「深層」構造は、現在わかっている。抗体ポリペプチドの可変部分を符号化する DNA の部分をもっていて、すべての脊椎動物がある種の染色体にもっている。

さらに、昨今の実験結果が、この生得的なシステムの生成的能力を実証している。B リンパ球が増殖するにあたって、これらの DNA の部分は、身体的変化の標的となり、アミノ酸配列が B 細胞が生まれてきた幹細胞のそれとは異なる抗体可変部分の産生にいたる。(43, 44, 45, 46, 47) この実験は、しかしながら、これらの突然変異を経てきたに違いない元の幹細胞遺伝子を特定することが可能であることを示した。言語学の用語を用いるならば、そのような考察は、免疫システムの語源学に属することになるだろう。

免疫学者として、我々は遺伝可能な遺伝子構造の意味を知りたいと思う。基本的な語彙の意味は何か、抗体・B 細胞受容体・T 細胞受容体の仕様は、胚細胞の遺伝子にどのように符号化されているのか。B 細胞が T 細胞受容体の言語を認識することはわかっている。後者については、T 細胞受容体学が発展のきわめて初期段階にあるためにほとんど何も語っていない。膨大な複雑さをもつ免疫システムは、すべての脊椎動物にある。ある動物から取り出したリンパ球を、適当な組織培養液中に入れて、抗原を加えると、神経細胞が存在していないにもかかわらず、リンパ球は特異性をもった抗体分子をつくりだす。(48) 免疫システムが、表層的といえることから、驚くに値するまでの言語との類似性を示す複雑さを内包すること、そして、この認知システムが、脳の支援なしに進化し機能していることは、驚異的なことである。

小さな子供たちが、彼らの生まれ落ちたどのような環境においても言語を習得することは、奇跡である。チョムスキーが先駆けた文法への生成的アプローチは、この深遠で普遍的な特徴である能力は、人間の脳が生まれながらにしているものであると説明する以外に説明のしようがないという。生物学的に言えば、どのような言語でも学ぶ能力が遺伝すると仮説することは、それは我々の染色体 DNA

の中に符号化されていなければならないということの意味する。もしこの仮説がいつか立証されたならば、そのときから言語学は生物学の一分野ということになるであろう。(拙訳 © K. TOKUMARU 2012)

原文および参考文献は下記 URL を参照のこと

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1984/jerne-lecture.pdf

B. 「数学者」ジョン・フォン・ノイマン

出典：Collected works / John von Neumann ; general editor, A.H. Taub, vol.1 "Logic, theory of sets, and quantum mechanics" (New York ; Oxford : Pergamon Press, 1961)

これは第二次世界大戦が終了した直後、1945-6年にシカゴ大学で行われた連続講演のうちの一回である。ほかに建築家のフランク・ロイド・ライト、画家のマルク・シャガール、作曲家のアーノルド・シェーンベルグなど現代芸術や現代科学を代表するさまざまな分野の講師が同じ「精神のはたらき」というテーマで自分の仕事について講演している。それらすべての講演を所収するのが”The Works of the Mind”(Edited by Robert B. Heywood, © 1947 The University of Chicago Press)

知的作業の性質について議論することは、どのような分野であろうとむずかしい仕事である。たとえそれが我々人類共通の知的営為で今もありつづけている数学のような分野であっても。どのような知的営為の性質についての議論も、本質的に、その特有の知的営為を実行することよりむずかしい。飛行機のメカニズムを理解することは、そして飛行機を浮かせて推進させる力の理論は、単純にそれに乗ることや、そして浮き上がり、運搬されることよりも、あるいは操縦することよりも、むずかしい。あるひとつのプロセスの理解を獲得するためには、あらかじめそのプロセスを運営することや、使うことに深くなじんでおく必要があり、そうすることによってはじめて直観的かつ経験的なやりかたで、それに一体化することができる。

このために、いかなる分野であったとしても、知的営為の性質について議論することはどのような議論であってもむずかしいのであり、議論のためにはその分野について知りつくし、自由自在に使いこなすだけの熟達为前提として求められるのである。数学において、この制約はきわめて厳格に適用されなければならない、議論が非数学的な水準で終始しないようにとくに気をつける必要がある。さもないと、議論は非常にいかがわしい特徴を示すようになる。つまり、指摘された点がけっしてきちんと言語化されないとか、全体的に議論が表面的で上滑りとなることが避けられなくなる。

これから私がお話ししようとするもののなかにも、それらの欠点は含まれているので、どうかご注意ください。申し訳ありません。その点を除けば、これから私がお話し申し上げようとする観点は、おそらく私以外の他の多くの数学者にはすくなくとも全部は共有されていないことである。したがって、皆さんがお聞きになるのは、ある一人の人間の、必ずしもうまく体系化されているわけではない、感想や解釈ということになる。そして、私は皆さんに対して、私がお伝えすることがどこまでの的を射ているのかと

いうことを判断するための材料をお渡しすることはできない。

以上申し上げたようにさまざまな障害があるにはあるが、数学における知的営為の性質についていろいろと考えて、皆さんにお話し申し上げるというのは、じつに興味深く、また難しいけれどもやりがいのある仕事である。私が仮に間違えることがあったとしても、それがひどい間違え方にならないようひたすら祈っている。

数学に関するもっとも重要な特徴的な事実は、私の考えでは、自然科学に対する一風変わった独特の関係性にある。いや、もっと一般的に、経験を、純粋な記述以上の次元へと解釈するありとあらゆる科学に対してといってよいでしょう。

多くの人々は、数学者であろうとそうでなかろうと、数学は経験的な科学ではないということに同意するだろう。あるいは少なくとも、それが経験科学の手法とは、いくつかの決定的な局面で、異なったやり方で実践されているということには同意するであろう。そして、しかしながら、数学の発展は、自然科学の発展と非常に密接にむすびついている。数学の主要な分野のひとつである幾何学は、実際に自然科学、経験科学として始まった。現代数学におけるいくつかの最高のひらめき(最高のひらめきと、私が信じているものということだが)は、明らかに自然科学から生まれている。数学の手法が、自然科学の「理論的」な部分に行きわたり、それを支配しているのだ。現代の経験科学においては、数学的手法あるいは物理学における疑似数学的手法に到達できるかどうか、成功するかどうかを決定づける分かれ目になってきた。実際のところ、自然科学全般において、連続的な疑似形態形成の切れ目のない連鎖が、すべて数学へと向かっていて、それらこそが科学的進歩の理念であると信じられていることが、より一層明らかになってきた。生物学はますます化学と物理学だらけになりつつあり、化学は実験物理と理論物理になっており、物理学はきわめて数学的形態を示す理論物理学になってきた。

実に独特な両面性が、数学の本質にある。まずこの両面性を理解してそれを受け入れ、続いて、それと同化し、対象について考える枠組みに取り込まなければならない。この両面性こそが数学の顔である。ものごとを単純化したりユニタリアン(訳注：キリスト教で三位一体説を否定し、神は唯一であると説く一派)にみると、本質的なものを見落としてしまうことになる。

そこで、私は、ユニタリアンな見方はお示ししないようにする。私は、私の能力の及ぶかぎりにおいて、多面的な現象として数学を描いてみようと思う。

数学における最良のひらめきのうちのいくつかは、ここで数学というのは我々が想像できる純粋数学の分野でということだが、自然科学で生まれたということは否定することはできない。もっとも記念碑的な事実を2つ挙げることにする。

最初の例は、当然のことながら、幾何学である。幾何学は古代数学の主要部分であった。それらの分岐・派生は今日でも現代数学の主要な分野として残っている。疑いの余地なく、古代のその起源は経験的なものであり、職務規律(discipline, 測量技師の訓練)として始まったところは、今日の物理学と違わない。ほかにいろいろと証拠はあるが、「ジオ(大地)・メトリ(測定法)」という名前そのものがそのことを示している。ユークリッドの仮定的な取り扱い、経験主義からは大きく乖離していることを示すが、それが決定的で最終的で絶対的な分離を生み出したのだという立場を擁護できるほど、話は単純ではない。この点において、ユークリッドの公理主義化というものが、現代の絶対的な公理主義の厳格さの要求に適合していない部分があるということは、それほど重要ではない。より本質的であるのは、まごうかたなく経験主義的である工学や熱力学などの学問も、通常は多かれ少なかれ仮説的な扱いによって提示されているので、何人かの著者の示し方をみると、ユークリッドの手続きと見分けがつかない。我々の時代の理論物理学の古典であるニュートンの『プリンキピア』は、文章表現においても、いくつかのもっとも重要な部分の本質も、ユークリッドに似ている。もちろん、これら全ての事例において、仮説的な提示の背後には、仮説を支える物理学的直観と定理を支えている実験的検証がある。しかしながら、ユークリッドを同じように解釈することも可能であるといえる。特に、古代においては、幾何学が今日もっている2000年の安定性と権威を獲得する前であった。権威という点は、現代の理論物理学体系に、明らかに欠けているものである。

さらにいうと、ユークリッド以来、幾何学の非経験化は徐々に進んできたのだが、それは現代においてもちゃんと完成してはいない。非ユークリッド幾何学の議論が、このことをわかりやすく示している。それはまた数学的思考の両面性をも示している。その議論のほとんどは非常に抽象的な次元で行われていたが、それはユークリッドの「第五仮説」は他の仮説の結果であるのかそうでないのかという純粋に論理的な問題を論じていた。そして、公式な論争は、クライン(F. Klein)の純粋に数学的な事例によって解決がついた。それは、いくつかの基本的概念を正式に再定義すれば、ユークリッド空間の一部が非ユークリッド化されることを示した。しかしながら、そこには経験的な刺激が最初から最後まであった。ユークリッドのすべての仮説のなかで、どうして第五

仮説だけが問題にされたかの最大の理由は、そこに介入し、そこだけにしか介入しない無限空間の全体という概念の非経験的な性格によることは明らかだ。数学的・論理的解析にかかわらず、ユークリッドに賛成か反対かの決定は、少なくともひとつの主要感覚器官において、経験的でなければならないという考えが、偉大な数学者であるガウスの心の中にあったことは間違いない。そして、ボーヤイの後、ロバチェフスキ、リーマン、そしてクラインが、もっと抽象的な、今日我々が本源的矛盾の形式的解消と呼ぶところの経験則、あるいはむしろ物理学が、それにもかかわらず最後にものをいうということを理解した。一般相対性理論の発見によって、我々の幾何学の関係性についての見方は、まったく新しい枠組み、そして純粋に数学的な力点のはなはだしく新しい分布へと、見直すことを要求した。ついに、絵の明暗差を仕上げる最終段階に到達したというわけだ。この最終的な発展も、同じ時代に起きたが、ユークリッドの公理的手法を完全に非経験化し抽象化した、現代の公理理論数学者たちの手で行われた。そして、これら2つの見るからに対立する態度は、ある個人の数学的な精神の内部において完全に共存可能なのである。こうして、ヒルベルトは、公理的幾何学と一般相対性理論との両方に重要な貢献を行なった。

第二の例は計算法である。というよりもむしろ、計算から派生したすべての解析というべきだろう。計算法は、現代数学が最初に成し遂げたことであるが、その重要性を過大に評価しないわけにはいかない。計算法ほど明瞭に現代数学の誕生を画定するものはほかにはない。数学的解析のシステムは、計算法の論理的な発展形態であるが、厳格な思考における最大の技術的発展である。

計算法の起源も明らかに経験主義的である。ケプラーの最初の統合の試みは、「長円測定法(dolichometry)」として形づくられ、樽の測定のように、表面が局面である物体の体積測定法であった。これは幾何学であるが、ポスト・ユークリッド幾何学であり、その当時は非公理主義的で経験主義的な幾何学だった。そのことをケプラーはもちろん完全に理解していた。ニュートンとライプニッツの主たる努力と主な発見は、明らかに物理的起源をもつ。ニュートンは「流出の(of fluxions)」計算法を生み出したが、それは本質的には力学のためであった。実際、計算法と力学というこの二つの学問分野を、彼はほぼ一緒につくりあげたのだった。計算法の最初の定式化は、数学的な厳格さすらもっていない。なんと、ニュートン以来の150年間、不正確で、なかば物理的な定式しか存在していなかったのだ。そして、この期間に、解析学においてもっとも重要な進展のいくつかは、不正確で、数学的に不十分な背景

のなかで、生まれている。この時期の指導的な数学精神のいくつかは、オイラーのようにあきらかに厳格ではない。しかし、本流においては、ガウスやジャコビがいた。この発展は、ひどく混乱していて、なおかつ意味が不明瞭であった。それと経験主義との関係性は、抽象化と厳格性に関する我々の今日の(あるいはユークリッドの)考えに即したものではありません。しかし、数学をこれまでのなかで第一級にした期間の業績から、これを除去しようという数学者が一人もいないのだ。そして、コーシーによって厳格さの支配が再び確立された後で、リーマンによって疑似物理的な手法へとじつに奇妙な逆戻りをしてしまったのだ。リーマンの科学的な人格そのものが、数学のもつ2つの性質をみごとに照らし出す。リーマンとワイエルシュトラスの論争がいい例だ。だが、この問題の技術的な詳細に深入りするのは、ここではやめておこう。ワイエルシュトラス以来、解析学は、完全に抽象的で、厳格で、非経験的なものになったようにみえる。しかし、これとて無条件に真であるというわけではない。この60年間行われてきた数学と論理学の「基盤」についての論争は、この譜面(score)についてのたくさんの幻想を吹き飛ばした。

こうして第三の例を紹介することになるが、それは診断と関係がある。この例は、しかしながら、これは数学と自然科学の関係というよりは、数学と哲学や認識論との関係性について取り扱っている。それはじつに衝撃的なやり方で、「絶対的な」数学的厳格性の概念は、不変ではないということを示しているのだ。厳格性の概念がさまざまであることが示しているのは、数学的な抽象化ではない別の何かが、数学の構築に作用しているということである。「基盤」についての議論を分析していて、私自身もまだ確信をもつにはいたっていないのであるが、この外部要因は経験主義的な性質をもつと結論づけられるようなのである。そのような解釈を支持する事例はきわめて強い、すくなくとも議論のいくつかの局面においては。だが、私は、それが絶対的にもっともらしいというふうには考えない。2つのことが、しかしながら、明らかである。第一に、何か非数学的なものが、なんらかのやり方で経験科学または哲学、あるいはその両方と結びついていて、どうしても入ってくるのだ。そしてその非経験主義的な性格は、哲学(あるいはより具体的にいうと認識論)は、経験から独立して存在できるということを前提にしないことには、成り立たない。(そして、この前提は、必要条件でしかなく、それ自体は十分条件ではないのだ。)第二に、数学が経験主義的な起源をもつということは、さきほど示した2つの例(幾何学と計算法)のような事例によっても強く支持されているが、

「基盤」についての議論をどのように解釈したとしてもそうなるのである。

数学的な厳格性の概念の変わりやすさの分析を行なうにあたって、私は主な力点を先に言及した「基盤」の議論におきたいと思う。私は、しかしながら、まずものごとの第二の局面について簡単に考えてみたい。この局面も私の議論を補強するものであるが、私はそれを二次的であると考え。なぜならば、それは「基盤」議論の分析ほどには決定的ではないだろうと思うからだ。私が言おうとしているのは、数学的な「様式」の変化のことである。数学的な証明がどのように表現されるかの様式が、かなり変動したことはよく知られていることである。この変動について論じるほうが、変化の傾向について論じるよりも有用である。なぜならば、現代の著者と18世紀か19世紀のある著者の間にみられる違いのほうが、現代の著者とユークリッドの間の違いよりも大きいからである。一方で、他の点においては、かなりの一貫性がある。違いがある部分では、表現の仕方の違いであり、何か新しい考えをもってこないと解消できないというものではない。しかしながら、多くの事例において、これらの違いは非常に大きいので、こんなにも発散したやり方で「これらの事例を表現した」著者たちは、様式、嗜好性、教育だけの違いとして分離されてよいものだろうか、彼らは数学的厳格性を構成するものは何かということについて、本当に同じ考えを抱いていたのであろうか、と疑いはじめるようになる。最終的に、もっとも極端な事例においては(たとえば上で触れた18世紀後半の解析作業の多くが該当する)、違いは本質的であり、もしその違いを解消しようとするれば、まったく新しく深淵な理論の助けがなければ不可能であり、その理論を開発するためには100年くらいかかるというものだった。そのような非厳格的なやり方で仕事をした何人かの数学者たち(あるいは、彼らを批判している彼らの現代版の数学者)は、彼らが厳格性を欠いていることを重々承知している。もっと客観的にいうならば、数学的な手順がどのようにあるべきかということに関する彼ら自身の願いは、彼ら自身の行動よりも、現代の我々の考えと一致している。だが、その時代の偉大なる巨匠、たとえばオイラーは、完全なる善意にもとづいて行動しており、彼ら自身の基準に十分に満足していたようである。

しかしながら、この問題については、もうこれ以上立ち入らないことにしたい。それに代わって、完全に明晰な事例である、「数学の基盤」についての議論に移りたい。19世紀後半から20世紀初頭にかけて、抽象数学の新しい部門、カントールの集合論が、むずかしい問題に直面した。それは、ある論法を用いると矛盾に陥るということだった。そして、これらの論法は、中心的なものではなく、集合論の

中でも「便利な」ものでもなく、さらに、ある定式的な基準によってそれらを見分けることがいつでも容易であるにもかかわらず、なぜそれが他の集合論の「成功した」部分よりも、集合論的ではないと判断されるのかの理由が明らかにならなかった。それらは実際に大破局をもたらしたという事後の直観を別にすれば、そもそもの動機に問題があるのか、あるいは状況についての認識の統合に問題があったのか、どうしてそれだけが他の保護されるべき集合理論から除外されてしまうのか、明らかにならなかった。本件の真価(訳注：原文は *merita*。ラテン語 *meritus* の主格女性単数形)についてより詳細な調査が行われた。主に関わったのはラッセルとワイルであり、結論を出したのはブラウワーであったが、集合論だけに限らず、ほとんどの現代数学において、「一般的な有効性」や「存在」という概念の使われ方が、哲学的にみていかがわしいということが示された。これらの望ましくない特徴から免れる数学システムとして「直観主義」*がブラウワーによって生み出された。(*訳注：直観主義 *intuitionism* とは、五官に入ってくる刺激それ自体は正しく、そこに論理の判断基準をおく経験主義的な考え方だろうか。しかしこの考え方は数学者たちには受け入れられなかった。) このシステムにおいて、集合理論のむずかしさや矛盾は生まれなかった。しかしながら、現代数学のざっとみて 50% の、もっとも主要な部分、それまで問題にされることがなかった部分が、特に解析の分野で、この「追放」によって影響を受けることになった。つまり、それらは有効性を失うか、あるいは、非常に複雑な従属的考察によって修正を加えられなければならないのだ。そして、後者の処理を行なうと、通常は目にみえて一般的な有効性と優美な演繹的結論が失われた。

これらの事件の重要性は、もっと深刻に受け止めるなければいけない。20 世紀の第三番目の 10 年(1920 年代)に、2 人の数学者が、どちらも第一級であり、数学とは何か、何のためにあるのか、何を扱うのかということを、誰よりも深くかつ完全に知り尽くしている数学者が、証明を正確に行なうための数学的厳格性の概念は、変わらなければならないと提言したのである。この後に起きた発展も同様に記憶にとどめておくべきことである。

1. きわめて少数の数学者だけが、喜んで、この新しく過酷な標準を日常的に使用することを受け入れた。しかし、大多数は、ワイルとブラウワーは明らかに正しいであろうと認めながら、彼ら自身は、自分たちの数学は古くて「安易な」流儀でやるという逸脱を続けた。おそらく、いつか将来、誰かが、直観主義的な批判に対する答を見つけてくれて、事後的に自分たちの仕事を正当化してくれることを

期待していたのかもしれない。

2. ヒルベルトは、以下のようなまい考えによって、「古典的」(たとえば直観主義以前の)数学を正当化することを考えた。たとえ直観主義システムにおいても、古典的な数学がどのように作用するのかについて、厳しい基準を与えることはできる。もちろん、その作用を正当化することはできないが。もしかすれば、古典的手続きを、直観主義的に表現すると、けっして矛盾や相互対立に陥らないことを示すことができるかもしれない。それを証明することが非常にむずかしいということは明らかであるが、どのようなやり方をとればよいのかということについては、ある程度の見通しがある。もしこのやり方がうまくはたらけば、古典的数学を、それに対抗する直観主義システム自体によって、もっとも明瞭に正当化できることになる！ 少なくとも、このように解釈することは、多くの数学者が喜んで受け入れている数学の哲学システムにおいて、合法的なやり方となるであろう。
3. この試みを実行しはじめて 10 年ほど経過したとき、ゲーデルがもっとも注目し値する結論を導いた。この結論を、きちんと正確に表現するためには、いくつか条件や警告を示す必要があり、ここで話するには技術的になりすぎるのでやめておく。重要なことの本質は、しかしながら、以下のようなことである。もし数学のシステムが矛盾を導かないのであるとすれば、この事実をそのシステム内の手続きによって証明することはできない。ゲーデルの証明は、数学的厳格性のもっとも厳密な基準、直観主義的な基準を満足させた。これがヒルベルトの計画に及ぼした影響は、なんというか、賛否両論の物議をかもしのだった。その理由は、あまりに技術的になるので、ここでは明らかにしない。私の個人的な意見は、多くの人々に共有されているものだが、ゲーデルはヒルベルトの計画が本質的に不可能であるということを示したということである。
4. ヒルベルトやブラウワーやワイルのやり方によって古典的な数学を正当化しようとする大きな希望がなくなったにもかかわらず、多くの数学者はあいも構わずそのシステムを使い続けることにした。結局のところ、古典数学は、上品で便利な成果を上げ続けている。たとえその信頼性を絶対的に確かであると思えることが金輪際できないとしても、それはたと

例えば電子の存在と同じくらい確かな基盤の上に存在している。それゆえに、もし誰かが科学を受け入れようと思うのであれば、その人は古典的数学システムも同様に受け入れるかもしれない。そのような考え方は、直観主義システムのそもそもの提唱者たちのなかですら一部で受け入れられたのであった。現在でも、「基盤」に関する議論は、もちろん結論をみていない。しかしながら、ごく少数の数学者を除いて、数学者が古典的システムを放棄する見込みはほとんどない。

この論争に関するいきさつをかなりこまごまと説明したのは、不動の数学的厳格性をあまりに当然だとして受け取ることに対する、それが最良の注意だからである。これは私の生きている間に起きたことである。このエピソードの期間に、私自身、いかに恥ずかしいくらい簡単に絶対的な数学的真実というものについての私の考えが変化したかということを知っている。そしてそれはなんと三回も続けさまに变化したのだ！。(訳注：ブラウワーたち直観主義の登場、ヒルベルトによる直観主義的な古典主義の証明の試み、ゲーデルによる不完全性定理の証明ということだろう。)

以上の3つの事例によって、私の言いたいことの半分を示すことができたと思ふ。つまり、最良の数学的なひらめき(発想)は経験から生まれたということであり、すべての人間の経験から切り離れたところに、数学的厳格性という絶対的で不動の概念が存在するとはどうい考えられないということだ。この点については、かなり俗っぽい言い方をする。哲学的あるいは認識論的な好みがどのようなものであったとしても、数学者の業界において、数学的厳格性の概念がアприオリに(無条件に、証明不要の前提として)存在するという考えを支持する人は誰もいない。しかしながら、私の言いたいことには後半部分がある。これから第二部に移ろう。

どのような数学者であっても、数学は純粋に経験主義的な科学であり、すべての数学的な考えが経験的对象から生まれていると信じることは非常に難しいものがある。まず第二部の主張について考えてみたい。現代数学のさまざまな重要な部分で、経験主義的な起源の跡をたどることはできない。あるいは、仮に跡をたどることができたとしても、あまりにかけ離れているために、あきらかにその対象は経験的な起源から切り離されてしまったために完全に變形して元の姿をとどめていない。代数の記号化は、家庭内での数学的利用のために生み出されたものであるが、それが強い経験主義的なつながりをもってると断言してもよいだろう。しかしながら、現代の

「抽象」代数は、ますます経験主義的なつながりが少なくなるほうへと発展していつている。位相幾何学(topology)についても同じことがいえる。これらすべての分野で数学者の主観的な成功の基準、彼の努力が報われたかの判断基準は、きわめて自己満足型であるとともに審美的である。そして、経験主義的なつながりを持たない(ほとんど持たない)。(これについては後でもっと述べることにする。) 集合論においてこのことはさらに明瞭となる。無限集合の「指数」と「順序づけ」は、有限の数の概念の一般化かもしれないが、それが無限構造になると(とくに指数において)、この世界とほとんど何の関係も持たない。技術的なことを厭わないなら、たくさんの集合論の事例を挙げることができる。「選択の公理」、無限の「次数」の「比較可能性」、「連続体の問題」などなど。同じことは、実関数理論や実点集合理論にもほとんどあてはまる。2つの奇妙な例が、微分幾何学と群論によってもたらされた。これらもちろん抽象的で、実用と無縁の学問であり、一貫してこの考え方にもとづいて発展してきた。一方では10年が経過したときに、もう一方では100年が経過したときに、これらは物理学において非常に有用であることが明らかになった。にもかかわらず、これらは依然として、今までどおりの、抽象的で実用性のない精神で研究されている。

これらすべての条件の事例ならびにその様々な組合せは、まだまだ紹介できるが、上で最初に述べた点に戻ることにしたい。つまり、数学は経験的な科学であるのか、ということである。あるいは、より正確な言葉を用いるならば、数学は実際に経験科学が実践されているのと同じように実践されているかということである。あるいは、より一般化された表現を用いるならば、数学者とその研究対象との関係はどうあるべきかということになる。数学者にとって成功の基準は何か、望ましいことの基準は何か。どのようなものが影響して、どのような考えが、彼に努力を惜しませないで、彼の努力を方向づけるのか。

ここで、数学者の通常の仕事のやり方と自然科学の仕事のやり方がどう違うのかみておきたい。これらかたや自然科学者ともう片方の数学者の違いは、それが理論的学問から実験的学問になるにつれて、そして実験的学問から記述的(観察内容の)学問になるにつれて、はっきりと拡大する。ということであるから、数学とそれにもっとも近いカテゴリーである、理論的学問と比較することにしたい。なかでも数学ともっとも近いところにいる自然科学を取り上げることにする。皆さま、どうかあまり厳しい評価はしないでください。私は数学的な矜持を制御できなくなって、足すわけではありません。それはすべての理論的科学の中でもっとも高度に発達した、理

論物理学である。数学と理論物理学はかなりのものを共有している。前述したように、ユークリッドの幾何学のシステムは、古典的力学の公理的提示のプロトタイプだった。また、同様の取り扱いが現象学的な熱力学と、電子力学のマックスウェルシステムと特殊相対性理論のある次元を支配している。さらにいうと、理論物理学が現象を説明せず、単に分類し関係づけるという態度も、今日ほとんどの理論物理学者によって受け入れられている。これはつまり、そのような理論にとって成功の基準は、単に、それが単純で優雅な分類および関係づけの構想によって、その構想なくしては複雑で非均質であるとみられた非常に多くの現象を説明できるかどうかということと、その構想が生まれたときには考慮されていなかった、あるいは知られてすらいなかった現象を説明できるかどうかにかかっているということである。(この最後の2つの命題は、もちろん、理論の統一能力や予言力を表しているのであるが。)さて、ここに示された基準は、あきらかに審美的な性質を非常に多くもっている。この理由をもってして、これは数学的な成功の基準によく似ている。それはほとんど全部が審美的である。ここで今度は、数学を、それにもっとも近いところにある経験科学、私がすでに示したような理論物理学との共通点をたくさんもっている経験科学と比べてみることにする。しかし、実際の手続き様式の違いは、大きくて、基本的なところにある。理論物理学の目的は、主として、「外部」から、多くの場合は実験物理学からの必要性によってもたらされる。それらはほとんどいつもむずかしいことを解決する必要性にもとづいている。予言し、統一する業績は、通常、後からやってくる。直喩表現を用いるならば、(予言や統一といった)発展は、なんらかの既存の難題(通常は既存のシステム内部の明確な矛盾)との戦いが先行して、それに追従する形で生まれる。理論物理学の仕事の一部は、そのような障害を探すことにある。それは「ブレークスルー(大発見)」の可能性を約束している。すでにお話したように、これらのむずかしさは、通常は実験結果の中にある。だが、時として、すでに受け入れられている理論そのもののの中のさまざまな部分間の矛盾でもある。それらの事例は、もちろん、たくさんある。

マイケルソン特殊相対性へとむすびついた実験や、量子力学へとむすびついたある種のイオン化電離ポテンシャルやある種の分光構造の難題は、はじめの事例である。特殊相対性とニュートン流の重力理論が一般相対性にむすびついたのは、第二の、めずらしい事例である。いずれにしても、理論物理学において問題は客観的に与えられる。そして、成功したかどうかの判断基準は、前述したように、主に審美的なものである。だが、そもそもの「大発見」

を超えているとみなす基準は、厳しい客観的事実なのである。その結果、理論物理学のとりあげる主題は、ほとんどいつも非常に凝縮したテーマである。ほとんどいつも、すべての理論物理学の努力は、せいぜいひとつかふたつの厳しく限定された領域の内部に凝縮している。1920年代から1930年代初期の量子理論、および1930年代なかば以降の素粒子論と核構造論がその例である。

このような状況は、数学においては、まったく異なってくる。数学は、非常にたくさんの分野に分かれていて、それぞれに性質、スタイル、目的、そして影響が異なっている。理論物理学が非常に凝縮しているのと、まさしく正反対である。立派な理論物理学者であれば、今日でも、彼の専門分野の半分以上の業務知識を持ち続けているだろう。現存している数学者の場合は、四分の一ほどの関連知識も持ち合わせていないだろう。「客観的に」与えられた「重要な」問題が生ずるとしても、数学の下位専門分化が相当に進んでしまった後であるので、にっちもさっちもいかない泥沼にはまってしまって難しい問題になることができない。しかし、そのような状態になっても、数学者は基本的にその問題と取り組むも自由、放置して何かほかのことに向かうのも自由なのだ。理論物理学における「重要な」問題は、通常は論争や矛盾になるために、解決せざるを得ないのと対照的である。数学者は、(訳注:may turnは以下のように解釈できる:数学者は何か難題にぶつかったとしても)転向する多様な分野をもっていて、かなりの自由裁量でそれらを自分の好きなように楽しむことができる。これが決定的に重要なことなのであるが、数学者が研究分野を選択する基準は、そして成功の基準は、主として審美的なものである。このように主張すると、反論を生むかもしれないし、また私の主張を「証明する」ことは不可能である。仮にそれを徹底的に証明しようとするならば、たくさんの個別の技術的事例を分析しなければならない。それには高度に技術的な議論が必要となるので、今ここでそれを論ずることはできない。審美的な性質は、私が理論物理学について述べたことよりも顕著であるとだけ言えば十分であろう。数学的な定理や理論は、一見すると異質なたくさんの特別の事例を、単純で上品なやり方で表現し、分類することだけを求めているのではない。「審美的な」、構造的な見栄えの中に「優美さ」を期待しているのである。問題を語ることは簡単である。その問題をきちんと理解し、解決するためにあらゆる試みを行なうことは、非常にむずかしい。すると突然、非常に驚くべきひらめきが生まれて(きっかけを手にして)、その試み、あるいはその試みの一部が、簡単なものになる、などなど。また、もし演繹が長々となつて、複雑になると、そこでいくつかの一般原則が関わってくる。

それは、複雑さや回り道を「説明する」ものであり、見たかぎりでは法則性のないものをいくつかの単純な指導的動機づけに還元するものだ。これらの基準は、あきらかに、創造的な芸術のすべてに共通のものである。その下層部には、経験主義的で、世俗的なモチーフ(主題)が背後にあって、それらはしばしば背後といっても非常に縁遠いのだが、審美主義的な展開によって覆い隠され、それをたくさんの迷宮のような変化形がおいかけている。これらすべては、経験科学よりも、純粹で単純な芸術に似ている。

すでにお気づきのように、私は数学と実験科学や記述科学の比較には一切触れていない。その比較を行えば、手法の違いや一般的な雰囲気の違いが、もっとはつきりするだろう。

以上は、真実を比較的うまく近似的にまとめていると思う。あまりに複雑すぎるから、近似的なまとめ以外に表現のしようがない。その系図は時として長くはつきりとした姿を現さないが、数学的な発想は、経験から生まれるのだ。しかし、いったんそれらの発想が認識されると、対象はそれ自体の独自の生命活動を始めるようになり、芸術的造形と同じようなほとんど完全に審美主義的な動機づけにもとづくようになる。それ以外に動機はなく、ましてや経験主義科学の影響を受けない。しかしながら、私は、強調しておくべきことがあると思っている。数学は経験的起源から遠く離れるにつれて、さらにそれが『現実』から生まれる発想に間接的にしか触発されない二世代、三世代後の世代になると、重大な危険にさらされる。ますます純粹審美主義的になり、ますます純粹に『芸術のための芸術』に陥る。これとて必ずしも悪いというわけではない。もし研究分野が、関係性のある研究対象に取り囲まれていて、より近い経験主義的な結びつきをもっていれば。あるいは、研究の規律が例外的にセンスのよい人間たちの影響下にあるならばよい。そうでないと、研究分野は、まったく抵抗をしないまま、あまり重要でないバラバラの領域に分裂し、些事と煩雑さの統制を欠いた集積の学問に墮落する危険性がある。言葉を変えるならば、経験的起源から遠く離れてしまうと、あるいは、『抽象的な』近親交配が長く続くと、数学的分野は墮落する危険性がある。はじめたときには、様式は通常古典的である。これがバロック様式(訳注：バロック様式の過剰な装飾)を示すようになったときが、危険信号の点灯である。バロック様式と非常に高度なバロックへの独特な進化を、順を追って例示することは簡単である。しかしこれもあまりに技術的になってしまう。

こうなったときの唯一の治療法は、若返りのために再び起源に戻るることだ。多かれ少なかれ、直接的で経験的な発想を再注入するのだ。これが学問の新

鮮さと活性を保つ必要条件であり、未来においても同じだと私は信じる。(拙訳 © K. TOKUMARU 2012)