HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	法と人の細胞の働き ： 序説
著者	小山，昇
引用	北海学園大学法学研究，42(1)：219-286
発行日	2006-06-30

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究ノート

法と人の細胞の働き ── 序説

小山　昇

目次

序
第一章　細胞
第二章　情報の伝達
第三章　神経細胞の働き ── 食の過程に絞って ──
第四章　電気信号への変換とその伝達
終りに

序

法の研究者には、法がどのようにして、発生し、機能し、消滅するのか、をつきとめるという根本の課題がある。これに答えるには法は人において人とともに人に対して存在するという認識から出発せざるを得ないであろう。法が人において在るというが、人は細胞の集合体であり、人の肉体的精神的活動はすべて細胞の働きである。だから、法が人において在るということは法は人の細胞の働きであるといわざるをえないであろう。そこで、法の研究者は、人の細胞の働きと法とのかかわりを追求しなければならない。そこで、筆者はまず人の細胞の働きを調べてみた。これが本稿である。次いで、法は社会関係を規制するものであるから、社会関係を刺激として人の細胞がどのように作用するかを調べてみた。これは次稿において発表する。いずれも十分でなく、未熟で、未解決の問題を残している。それでもこれを公表するのは、法の研究者が、この問題に関心をもって、筆者が解決できなかった問題を解決して欲しいと思うからである。

第一章　細胞

1　ヒトがいつ発生したか、どのようにして発生したか、私は知らない。しかし、ヒトにオスとメスがあり、このオスとメスからヒトが誕生することは知られている。オスがもつ精子がメスがもつ卵と結合して、この受精卵がヒトになるのである。精子は細胞である。精子細胞がどのようにして生ずるか十分には解明されていない（石川・藤原編細胞生物学一七二、一七五頁）。精子は頭部、頸部、尾部を区別することができ、頭部には染色体を含む（広辞林）。卵も細胞である。卵が受精すると、卵子と精子の核が合体する。核の合体がどのようにして行われるか、平凡社世界

大百科辞典「受精」石川・藤原編細胞生物学一八一―一八六頁により知ることができる。受精卵はただちに分割を始める(広辞林)。受精卵細胞は増殖のために分裂する。分裂した細胞は互に離れ離れになるのではない。カドヘリンというタンパク質の一種が分裂した細胞をつないでいる。受精卵は分裂のさいにいろいろの種類のカドヘリンを作る。そのメカニズムを私は知らない。ある種のカドヘリンはある種の細胞をつなぐ。つながれた同種の細胞はそこに組織として存するに至る。皮膚組織、神経組織がその例である。[1] カドヘリンの質とそのカドヘリンによってつながっている細胞組織とが、どのような質の関係にあるか、私は知らない。とにかく、この細胞分裂によってヒトが存在するに至る。だから、ヒトは細胞の集合体であるといってよい。ヒトの働きはすべて細胞の働きがその基にあるだろう。なお注目すべきは、受精卵から成人に至る過程は、化学物質の化学的反応の過程であるということである。[2]

(1) 平凡社世界大百科辞典「卵割」によれば、こうである。受精卵はDNA合成と細胞分裂を繰り返す。卵の細胞質に不均一がある場合には、さまざまに異なる細胞質環境をもった細胞が生ずることになる。表皮、神経、筋肉などである。これらは細胞の組織である。分裂した細胞(割球と呼ぶ)において、そのいくつかをカドヘリンがつないで組織が形成されるのであろう。カドヘリンは日本人の発見であるといわれる。

(2) 石川春律・藤原敬己編「細胞生物学」一―二三頁。

2　イ　生体の構造単位は細胞とよばれる(広辞林「さいぼう」)。つまり、ヒトは細胞から成る。細胞は原形質が原形質膜(リン脂質を主成分とする。石川二五頁)で囲まれているもので、原形質は、細胞質と核とから成り、タンパク質や脂質の粒子を中心とし水を媒体としたコロイドをなしていて、その中で物質交代が絶えず行われている(広辞林)。原形質は最外側は薄い原形質膜を作っており、細胞質内部にはその分化によって生じたミトコンドリア・色素

体・中心体などがある（広辞林「さいぼうしつ」[1]）。

（1）植物細胞においては、原形質の表面を、セルローズ・ペクチンから成る膜がおおう。これを細胞膜という。動物細胞にはこのような細胞膜はないが、動物学者、医学者は、原形質膜を細胞膜と呼ぶことがある（広辞林）。これらの細胞膜はリン脂質でできている（石川ほか編細胞生物学二五頁）。

ロ　すべての細胞は、核様体をもつ原核細胞と核をもつ真核細胞に分類される。両者の中間は見られない。真核細胞は動物細胞と植物細胞に分類される（世界大百科「さいぼう」、石川ほか編細胞生物学二〇頁）。

原核細胞は、「大きさが一μm程度）」（同上）。真核細胞は、「通常原核細胞に比べて体積で三桁以上は大きく、ヒトの細胞の体積は二〇〇―一万五〇〇〇μm^3の範囲にある」（世界大百科「さいぼう」）。（一ミクロンは一メートルの百万分の一）。

真核細胞の原形質は区分（核膜によって囲まれる）をもつが、原核細胞にはそういう区分がない（世界大百科「さいぼう」。細胞質内に膜構造が多量存在する――石川二一頁）。

「原形質の一般的な化学組成は、水(75-85%)、タンパク質(10-20%)、脂質(2-3%)、ＲＮＡ(0.7%)、ＤＮＡ(0.4%)、その他の有機物(0.4%)、無機物(1.5%)である」（世界大百科「げんけいしつ」。原形質はコロイドをなしている（広辞林「げんけいしつ」）、タンパク質や脂質は粒子である（広辞林「げんけいしつ」）。原形質の「物理的特性として、弾性・粘性があり、膨潤しやすく、流動複屈折を示すことがある」（同上）。「すべての細胞の内部では原形質は流動している」（世界大百科「げんけいしつりゆうどう」）。どんな流動のしかたか。流動を起こす仕組みはどんなものか、流

動によってなにが起こるか。後で調べてみよう。

細胞は常時アデノシン三リン酸（ＡＴＰ）を作り出し、（作られかたについては石川二八頁）、これが細胞にエネルギーを供給し、このエネルギーが化学反応に必要である（石川二五頁）。

ハ　真核細胞

真核細胞の原形質は「二重の核膜によって囲まれる核質[1]とその外側にある細胞質とに区分されている」（世界大百科「さいぼう」）。核質は核を構成する物質である（広辞林「かくしつ」）。

核質には染色質（塩基性色素によく染まる物質。クロマチン（広辞林「せんしょくしつ」）クロマチン＝染色体。細胞分裂のとき核の中にみられる糸状の物質。中に遺伝子を含む（以上広辞林）があり、染色質は染色糸が位置するところであり、染色糸は、「遺伝子ＤＮＡ[2]がヒストンというタンパク質８分子でつくるヌクレオソームコアに巻きとられたビーズ状の構造を基本構造にして、スーパーコイルなどの高次な折りたたみ構造をとる」（世界大百科「さいぼう」）。

また、核質には、核小体が通常一ないし数個分布している（世界大百科「さいぼう」）。核小体はＲＮＡ[3]に富み、容易にそれとわかるボール状である（同上）。核質において「細胞質のリボソーム[4]に含まれる三種類のＲＮＡ分子（18S, 5.8Sおよび28Sr. RNA）はつながった前駆体ＲＮＡとして」転写されている（同上）。

核は「ゲノム[5]ＤＮＡが結合する多数の染色体を保護し、遺伝情報の発現につごうのよい環境を形づくっている」（同上）。

核が傷つくことは細胞の死につながるが、細胞質は細胞の生活活性の場であり、核があれば細胞質は損われても残りの細胞質の物質代謝[6]によって再生や成長が行われる（同上）。

細胞質は、細胞内の原形質の中で核以外の部分。普通粘りけのある半流動体で、最外側は薄い原形質膜を作ってい

る（広辞林）。

細胞質は各種の代謝機能をもつ。それぞれの代謝機能は細胞質の部分構造が発揮する。その部分構造を細胞小器官と称する。細胞小器官が分業して代謝機能が効率的に行われる（以上平凡社大百科「さいぼう」）。細胞小器官として、ミトコンドリア[7]、小胞体膜系、各種小胞（体）、ゴルジ体[8]などがある（同上）。これらの成分はなにか。後で調べよう。植物細胞の葉緑体や色素体も、細胞小器官である。

（1）細胞核＝細胞の中で、薄膜（核膜）によって細胞質と区別された原形質の一塊。細胞を構成する部分のうち最も重要なもので、遺伝や物質交代に重大な関係がある。普通球形で一細胞内に一個存在するが、特殊な細胞には二個以上存在することもまれではない。細胞分裂の際は核膜は失われ、内容物の一部は染色体を形成する（広辞林）。

（2）DNA＝デオキシリボ核酸。生物の遺伝子を構成している高分子化合物。遺伝形質が組みこまれていて、リボ核酸（RNA）がこの形質を運ぶ（広辞林）。

（3）RNA＝リボ核酸。糖成分としてのリボースを含むものをいう。たんぱく質と結合して細胞質中のリボソームの重要成分をなす（広辞林）。

（4）リボソーム＝細胞に普遍的に存在する直径一五〇―三〇〇Aの微粒子から成る細胞小器官で、細胞質内のタンパク質合成の場となっている。その構成がRNAタンパク質複合体であるところからこの名がある（詳細は世界大百科「リボソーム」）。

（5）ゲノム＝ある生物固有の染色体の一組。その種の生物の生存に必要な遺伝子の最小限度を含んだもの。普通生殖細胞がこれをもつ（以上、広辞林）。

生殖細胞＝単独または受精により新しい個体に発展する働きをもつ。おもに配偶子（精子と卵）をさすが、胞子を含めることもある（広辞林）。

（6）物質交代＝新陳代謝・物質代謝・メタボリズムなどともいう。生物体を通して出入りする物質が変化して行く過程をいい、物質を体内に取り入れ、体物質にする同化の過程と、それを分解・酸化して排出し、その際生ずるエネルギーを生命活動に利用する異化の

過程がある。光合成・呼吸をはじめ生命現象の基礎となる多くの化学変化を含んでいる。

エネルギー代謝＝生物体の物質交代と同時に行われるエネルギーの変化のこと。生物体は一つのエネルギー転換系をなし、動物では体外から摂取した栄養分は化学的エネルギーをもつ有機物であり、また緑色植物では日光エネルギーが光合成により化学的エネルギーとして同化され、さらにこれらが呼吸によって生命活動のエネルギーに転換する。

(7) ミトコンドリア＝動・植物細胞の細胞質の中に多数見られる。棒状または粒状の、二ミクロン内外の小体。組織呼吸に関係のある多種類酵素が含まれていて、原形質内のエネルギー発生の場とされている。コンドリオゾーム（以上、広辞林）。

酵素＝生体内の生理化学反応を触媒する重要化合物。たんぱく質から構成され、結晶として取り出されたものもあるが、加熱・薬品の作用などで変化しやすい。広く生物界に存在し、その物質交代に重要な関係を持つものが多い。消化酵素、呼吸酵素などに分けられる。（広辞林）

タンパク質＝細胞にある有機化合物の中ではタンパク質が最も多く、細胞重量のほぼ一〇％にあたる。タンパク質はアミノ酸がいくつもつながってできた生体高分子である。タンパク質の種類は膨大である。アミノ酸の数の違い、アミノ酸の種類（二〇種類ある）の並び方の違いの組合せによる。自然界には億単位の種類のタンパク質がある。その大部分が酵素とよばれるもので、酵素は生体化学反応を触媒するタンパク質である（以上、石川二六頁）。

アミノ酸＝窒素化合物。タンパク質の構成単位、溶水性・結晶性。

(8) ゴルジ体＝動・植物の細胞質にみられる複雑な網状または粒状の細胞内器官。分泌物、排出物、脂肪などの形成につながりがあるとみられる（広辞林）。理化学研究所などが、新型レーザー顕微鏡システムを開発し、ゴルジ体でたんぱく質が運ばれる仕組みも解明できた（二〇〇六年五月一五日朝日新聞朝刊）。

3　細胞の発展

イ　細胞の分化 ── 多細胞生物の場合

一個の卵細胞の受精（精子という生殖細胞と結合する）によって生物が発生を開始する。それから細胞が分裂して数が増える。細胞は、細胞質の物質代謝によって再生し生長する。真核細胞の細胞分裂はまず核が分裂しついで細胞

質が二つに分裂する。多細胞生物の場合は、生物は、組織であり、組織においては構造と機能が分化している。それぞれの細胞は、この組織を構成する。つまり、細胞分裂により細胞は組織細胞になる（以上、平凡社世界大百科「さいぼう」、「受精」）。

核分裂の際には、複製したＤＮＡをもつ染色分体の分離のために、（コンパクトな染色体構造と紡錘糸がつくる）分裂装置によって、遺伝子セットは両娘細胞核に正確に分配される（世界大百科「さいぼう」）。

分化した（真核）細胞には、細胞小器官のほかに、分化した機能を発揮するための細胞表層や内部形質に特異的な微細構造が発達する場合が多い。筋細胞に発達する筋原繊維と筋原繊維に興奮を伝達する筋小胞体とトリアド、神経細胞の軸索突起や樹状突起および多数のシナプス、腸上皮細胞の微細繊毛、精子の先体構造と鞭毛構造、色素細胞のメラノソームなどはその例である（世界大百科「さいぼう」）。（神経細胞は真核細胞である）。

細胞は物質交代（代謝）によって生きつづける。細胞の物質交代は、酵素反応によって行われ、化学エネルギーを効率的に利用するために、きわめて巧妙に制御されている（世界大百科「さいぼう」）。（酵素＝前掲２ハ（７））。その鍵を握るのは多くのアロステリック酵素。この酵素は（基質以外の作用物質によって）代謝系ごとに、また代謝系の間で、細胞環境に適応したエネルギー代謝の調節を行っている（同上）。

糖の代謝やアミノ酸の代謝は細胞質の可溶性酵素で行い、タンパク質合成はリボソーム上で、脂質の代謝は主として小胞体膜系とミトコンドリアで行う（同上）。

生体物質の合成に必要なエネルギーはＡＴＰによって与えられる（ＡＴＰ＝アデノシン三燐酸。筋肉や酵母中に含まれる高エネルギー化合物。加水分解により燐酸が離れればエネルギーを放出し、再結合すればエネルギーを蓄える。生体内のエネルギーの貯蔵・供給・運搬のすべての活動に関与する（広辞林））。ＡＴＰはいくつもの酵素の連携した

はたらきにより細胞の中で合成される（石川・藤原編細胞生物学三九頁）。大部分のＡＴＰはミトコンドリアの酸化的リン酸化と、植物では、光合成における葉緑体の光化学反応によって合成される（なお、石川ほか編細胞生物学四四―四七頁。光合成＝光のエネルギーによって二酸化炭素と水から糖類を合成する一連の化学反応の過程をいう。広辞林）。

ロ　細胞内膜系と細胞骨格

真核細胞は、原形質によって細胞の基本的な代謝機能を果たしているが、そのほかにさらに高次な構造をもち、高次な制御系をもっている。とくに、細胞内膜系とよばれる構造と細胞骨格とよばれる構造がある。

細胞内膜系は網目状に発達した複雑な膜構造である。それは分化した細胞の機能と密接な関係がある。この網目はいわば運河で、真核細胞の原形質が細胞外液との間の物質交換の機能を高める。真核細胞の核の内腔は小胞体系を経て細胞外へ通じている。細胞内膜系自体は、親油性、疎水性物質の代謝系を結合しており、脂質、とくにリン脂質、コレステロール、ステロイドホルモン、プロスタグランジン、ロイコトリエンなどの合成の場所になっている（世界大百科「さいぼう」）。

動物細胞の細胞質に、網目状に発達した繊維構造があり、細胞骨格とよばれる。

細胞骨格の組成 ── 細胞骨格を組成する繊維には三つのグループがある。それぞれ、微小管、マイクロフィラメント、中間繊維と名づけられる。

微小管 ── 二五〇nm（ナノメートル、一〇億分の一メートル）の中空の繊維構造。微小管タンパク質としてチューブリンα、βが重合してできたもの。これに、γ（ガンマー）タンパク質（微小管の重合や他の繊維構造との相互作用に必要）や微小管結合タンパク質（ＭＡＰ）などが加わっている。

真核細胞が分裂するときは、微小管が染色体分離の役割を果たす。それは微小管が染色体の動原体に結合することによってである。この結合は、微小管が（紡錘体の両極に位置する中心粒から発する）紡錘糸として行う。

真核細胞の分裂間期には、微小管は（核に近い細胞質に位置している）微小管形成中心から発して、放射状に細胞周縁に向かって走る。また、同時に細胞核を網目の竹籠のように包み込み、それを宙づりにするような骨格構造に発達する。つまり核が細胞の中心に位置するように係留する。広く真核細胞に見られる鞭毛や繊毛（精子などの運動器官（広辞林）は微小管が構成繊維となっている。鞭毛・繊毛の根もとに基粒体があり、基粒体は中心粒と同じ構造をもつ自己増殖系である。（中心体＝動物の細胞やある種の藻類・菌類の細胞中にある透明の小体で、細胞分裂の際に核の近くに見られる。きわめて小さい粒（中心粒）とそのまわりに放射した繊維状の星状体からでき、核分裂の力学的支点に位置していて重要な役割をすると見られている（広辞林））。

マイクロフイラメント（極小繊維）――直径五〇nmほど。その構成タンパク質はFアクチン。

筋細胞では、筋原繊維の細繊維がαアクチンの重合によってできており、これと平行に走る太いミオシン繊維との間の相互作用によって力を発生し、筋収縮が起こる。

非筋細胞にも広く同族タンパク質のβアクチンおよびτアクチンが分布していて、マイクロフラメントを形づくって、細胞のダイナミックな形態変化を引き起こしている。

細胞の形態変化や運動にとって重要なことは、マイクロフイラメントが細胞膜にも結合点をもつことである。アクチン繊維の特色は、分化した細胞形態や機能にかかわって、それぞれ異った繊維構造の成分タンパク質と相互作用することである（以上、世界大百科「さいぼう」）。

細胞表層にあって、赤血球では、スペクトリンがアクチン繊維と相互作用し、赤血球以外ではフォドリン、αアク

チニン、ビンキュリンがアクチン繊維と相互作用する。これらの相互作用には細胞膜と細胞表層のアクチン繊維の結合が関係する。

中間繊維 ── 一〇〇nmの太さ（微小管とマイクロフィラメントの中間）ほどの網目状の繊維構造。細胞の形態保持、細胞形態のゆがみにかかわる。細胞間接着構造の中間繊維を介して張力、弾力が細胞内および細胞間に伝播すると考えられている。

中間繊維の構成タンパク質は、細胞種によって異なる。たとえば、上皮細胞にはサイトケラチン、間充識細胞その他の細胞にはビメンチン、筋細胞にはデスミン、神経細胞にはニューロフィラメントタンパク質、グリア細胞にはグリア細胞特異的フィラメントタンパク質がある。

中間繊維の網目状構造は、まず核を取り囲む籠状の構造を形づくり、一方では細胞膜上の付着点に発し、離れた細胞膜上の付着点に至るかすがい状に走る網目状の構造を形づくっている。細胞膜上の付着点は隣接細胞間の接着斑にある。

以上の三種の繊維構造の間にも相互作用があり、細胞全体の構造ならびに機能に対して調節し合っていると考えられる。

ハ　細胞外液に面している細胞膜表面 ── そこに糖鎖が突き出してできる親水性の層がある。糖鎖は、各種の単糖の配列の違いによって、生物種や細胞種の違いをよく表わす。動物細胞は、（細胞が合成し分泌したタンパク質である）コラーゲン、フィブロネクチン、ラミンなどによって覆われる。これらのタンパク質は細胞膜と相互作用し、もって細胞の形態や機能に影響を与える。ラミンはコネクチンを介して細胞表層のアクチン繊維と結合でき、フィブロネクチンは細胞膜を貫く結合タンパク質を介してアクチン繊維と結合でき、結合の結果細胞骨格と連動する。

ニ　細胞間のコミュニケーション――隣接細胞の間には、多数の筒形タンパク質集合体がセットされている（このセットをギャップ結合とよぶ）。この集合体は隣り合う細胞膜部分を貫いている。筒形の中心は、隣り合う細胞の細胞質に通ずるトンネルになっており、分子量一〇〇〇以下の分子は自由に通過できるので、このような低分子物質の往来が情報となりうる。ギャップ結合は、低分子イオンによる通電性を高くしている（化学物質の往来とイオンによる通電性に筆者は注目する）。

遠く離れた細胞間のコミュニケーションには、体液（＝細胞や組織の間を占める体内の液状部分。閉鎖血管をもつものは血液と組織液に区別される。物質循環や呼吸・排出などに重要な役割をもつ。広辞林）の循環によって運ばれるホルモンや栄養物質が、標的器官の細胞にキャッチされるしくみがあり、この受容体が、細胞膜の外側に分布しており、それはそれぞれの物質に特異的である。つまり、受容体が分布する細胞だけがその物質を情報として受け入れられる。（物質は情報であるのであろう）。インシュリン、βメラノトロピン、絨毛性性腺刺戟ホルモン、神経成長因子、上皮細胞増殖促進因子、ソマトメジンCなどのペプチドホルモン、また、栄養物質の輸送タンパク質として、低比重リポタンパク質、卵黄タンパク質（ホスピチン、リポピテリン）、ハフトグロビン、トランスフェリンなどは、細胞膜上の特異的受容体に結合して（レセプトソームとよばれる細胞膜の陥入によってできた）小胞とともに、細胞質に取り込まれていく。この機構によれば、10^{-8}～10^{-10} molという低濃度の情報物質をも濃縮して標的細胞に伝えられる（以上、世界大百科「さいぼう」）。

多細胞生物の場合は、直接に隣接する細胞間の物理的結合や情報の伝達だけでなく、拡散するが、化学的に特異性の高い情報物質と結合する受容体によって遠くの細胞間にコミュニケーションを成立させ、個体の統合を果たす機構を著しく発達させている（以上、世界大百科「さいぼう」）。

4　神経細胞

神経細胞の数は数千億と多いのだが、実はその大多数は小脳の顆粒細胞とよばれる神経細胞であり、大脳、新皮質の神経細胞数は一五〇億前後と考えられている。そのうち概念や事物に対応していると考えられる部位にある神経細胞数はさらに少ない（以上、平野丈夫「脳と心の正体」四四、四五頁）。

イ　神経細胞のかたち ── 神経細胞は樹状突起と呼ばれる神経情報の受け手にあたる部分と、核を含む細胞体、および神経情報を伝える軸索と神経終末とから成る。軸索は隣りの神経細胞の樹状突起や細胞体に接近する。ただし接触結合するのではなく、狭い間隙がある。これをシナプスとよぶ（以上、仙波純一「脳と生体統御」一六頁）。細胞体の直径は数ミクロンから数十ミクロンである（桜井芳雄「ニューロンから心をさぐる」一一頁）。

ロ　核 ── 核は、核質から構成される（2ハ）。核の外側、細胞体の内側に、リボソーム、ミトコンドリア、ゴルジ体などの小器官およびたんぱく質、酵素などの化学的成分がある（2ハ）。細胞体では、神経細胞が必要とするすべての高分子が合成される。その情報は核のなかにあるＤＮＡに遺伝情報として含まれており、必要なときに必要な部位でこの遺伝子情報が解読され、メッセンジャーＲＮＡを介して必要となるタンパク質が合成されるのである（仙波前掲一六、一七頁）。細胞体で合成されたタンパク質などの高分子は神経細胞の末端まで、小胞とよばれる構造物のなかに蓄えられて、軸索に沿って輸送される（仙波前掲一七頁）。逆に神経末端から取り込まれた高分子が細胞体まで運ばれ分解されることもある（仙波前掲一七、一八頁）。（情報は化学物質であることに注目する）。

ハ　軸索 ── 軸索はいわば管である。神経細胞の軸索には、髄鞘（ミエリン）（さや）によって覆われている（グリア細胞が巻きついている ── 仙波一七頁）もの（有髄軸索）とそれがないもの（無髄軸索）とがある（ヤリイカは後者の例）（石川前掲二一〇頁、仙波前掲一七頁）。髄鞘は軸索を電気的に絶縁し、神経インパルスの電動伝播速度を早

める働きをする（石川前掲二一〇頁、仙波前掲一七頁）（筆者は電動伝播に注目する）。

細胞体から神経終末へ向って、シナプス機能や構造に直接関係するもの（したがって伝達物質など）が小胞体などの膜成分に組み込まれて高速（〜5 μm／s）で、ミトコンドリアが中速で（〜〇・五 μm／s）、細胞骨格関連タンパク質（チューブリン、アクチン、ニューロフィラメントトリブレットなど）などが低速で（〜〇・〇五 μm／s）で、運ばれる（石川前掲二一六頁）。輸送の路はいくつかの微小管である（石川前掲二一六頁）。微小管には極性があり、神経終末方向がプラス、細胞体方向がマイナスである、モータータンパク質が動く。その一つのキネシンはマイナスからプラスに向って動き、細胞質タイニンはプラスからマイナスに向って動く。キネシンと結合した膜顆粒や細胞小器官は軸索の先端部（神経終末、プラス）へ運ばれる（石川前掲一一〇頁）。

ニ　神経伝達物質――細胞内で神経伝達物質が合成される。ペプチド以外の神経伝達物質の合成とペプチド類の合成とは過程が異なる（仙波前掲三二頁。合成の過程については仙波前掲三二頁）。合成された神経伝達物質は、シナプス小胞とよばれる細胞内の構造に蓄えられる（仙波前掲三二頁）。シナプス小胞は軸索に沿って神経終末まで運ばれる（仙波前掲三四頁）。

神経伝達物質は、神経終末のシナプスの脱分極とともに、細胞内にカルシウムが流入し、放出される（仙波前掲三三頁）。放出された神経伝達物質は隣の神経細胞の樹状突起に接するシナプスにある受容体に作用して情報を伝える（仙波三三頁）。その一部は、シナプス間隙にある分解酵素により壊されたり、トランスポーター（再取込みの機構でアミノ酸の配列である。細胞膜を貫通する構造をもつ）を介して再びシナプス内部（神経終末）に取り込まれて分解されたり再利用されたりする（仙波前掲三二頁、四〇頁）。

ホ　神経伝達物質の受容――シナプスに接する樹上突起の膜の上に受容体がある。受容体は、カルシウムなどのイ

オンチャンネルと複合体を構成するものと、Gタンパク質と共役しているものとに分けられる(仙波前掲三六頁)。前者の例として、ニコチン性アセチルコリン受容体とナトリウムチャンネルの複合、GABA－A受容体と塩素イオンチャンネルの複合。後者の例は、ムスカリン性アセチルコリン受容体、α・βアドレナリン受容体、セロトニンI・A受容体(仙波前掲三六頁)。ニコチン性アセチルコリン受容体のある部分(サブユニット)にアセチルコリン(神経伝達物質である)が結合すると、ナトリウムイオンチャンネルが開き、細胞外から細胞内にイオンが流入する(仙波前掲三六頁、四六頁)。神経伝達物質の受容によりイオンチャンネルが開き膜電位の変化が起こるのであろう(筆者は化学物質と電気の関係に注目する)。

ヘ　神経細胞回路網

a　ニューロンはシナプスを介して互に結びつくがそれがさらに組み合わされることで、膨大で緻密な回路網を作っている。一つのニューロンは、だいたい数千から一万ものシナプスつまり他のニューロンからの信号入力部を持っている。そのようなニューロンが、人の脳では百億以上もある。単純に計算しても、脳は数百兆(一〇の一四乗)近い接続をもつ回路網になる(桜井前掲一四頁)。

b　ニューロンは出生前の胎生期中から活発に分裂し、妊娠二〇週齢頃には最多となり、生後に分裂し増えることはない(桜井一五、一六頁)。最多になった後は、ニューロンの死滅が始まり、ニューロン数は急速に減少していく(桜井一六頁)。このプロセスは遺伝子によりすでに設計されている(桜井一五頁参照)。だが、遺伝子は、ほぼ一〇の九乗種類の組み合わせ、つまり情報しか持ち得ないため、回路網すべてを設計することは、とうてい不可能である。そこで、まず遺伝情報により、ラフスケッチとでもいうべき大まかな回路が作られ、それが生後の環境におけるさまざまな学習や経験により、複雑で意味のある回路網へと整備されていくと考えられている(桜井前掲一八頁)。たとえば、

入力信号の伝達に使われるシナプスはより強固になり、使われないシナプスは弱体化したり消えたりする、というメカニズムがあるらしい（桜井前掲一八頁）。

c　神経細胞回路網の構成――情報を表現するニューロン集団は同じようなニューロンの集団であるという考え方は採用されていない。「異なる個性を持つニューロンの協調による集団的表現」の可能性を示した実験が報告されている（桜井前掲四五頁）。専門家は大脳新皮質を五二個の「領野」に分けている（沢口俊之「脳と心の進化論」一〇五頁）。各領野は幅〇・一～一㎜高さ二～三㎜の円柱状の単位構造、つまり「コラム」からなる（沢口前掲一〇七頁）。一個のコラムは数万個のニューロンを含む（沢口前掲一〇七頁）。コラムの中で、大脳新皮質に大脳新皮質以外の脳部分から情報を伝える求心線維と、大脳新皮質からそれ以外の脳部分に情報を送り出す出力ニューロンと、大脳新皮質の内部で情報のやりとりをする内在ニューロンが一定の規則で統合している（沢口前掲一〇七頁）。

d　神経細胞回路網の働きは情報の処理である。

神経細胞がスパイクを起こしたとき、このスパイクを電気信号として人為的に測定することができる（桜井前掲二二頁）。ニューロンは、それぞれ特定の刺激に、刺激が動く特定の方向に、特定の運動に、反応してスパイクを出す（選択性がある）（桜井前掲二五頁）。顔を見たときだけ活動するニューロンがサルのＩＴ野などから見つかっている。これは顔という複雑な刺激に対するきわめて特殊な選択性といえる（桜井前掲二八頁）。

e　脳が情報を処理するためには、処理すべき情報、つまり刺激や運動などの事象を、脳が扱える形に変換し表現しなければならない（桜井前掲三七頁）。つまり、事象としてはこうであるが、それが脳においてはこうであるという表現をもたなければならないはずであるということであろう。では特定の事象を表現する単位はなにか。これについて、単一ニューロン説、おばあさん細胞仮説などが出たが（桜井前掲三八―四四頁、平野前掲四四頁）、いまでは、複

数の個性的なニューロンからなる集団が、互いに協調的に働くことにより情報を表現する、という考え方が優勢である（桜井前掲四四頁以下、平野前掲四四―四六頁）。では、どのような集団か、どのように協調するのか。

f　コラムのありよう――コラムはコラム内でニューロン集団が図形特徴を表現し、さまざまな図形特徴ごとに数多く存在し、さまざまな図形特徴が互に協調することで、あらゆる物体の表現が可能になるのではないかと考えられている（桜井前掲四七頁図形アルファベット。）。協調するとはどういう状態か。異なる個性を持つニューロン間の協調を、より具体的に表す実験がすでになされている（桜井前掲四八―五〇頁）。

コラムの幅は〇・五～一㎜、高さ（皮質の厚さ）は二～三㎜である（沢口、一〇七頁）。ひとつのコラムに数万個のニューロンが集っており、片半球の側頭連合野のTE野全体でおよそ二〇〇〇個あると試算されている（沢口前掲一二九頁）。二〇〇〇個のコラム＝「図形アルファベット」があれば、その組合せは無限に近いので、どんな視覚対象も認知・識別できるというわけである（沢口前掲一二九頁）。

コラムは、大脳新皮質の表面に対して垂直に並んでいる（沢口前掲一〇七頁）。コラムは多数まとまって群を成す。脳の各領野は互いに似た特徴をもつコラム群であるとされている（沢口前掲一〇九頁）。コラムは、はっきりした境界をもつコラムとして配置されているのではなく、類似した図形特徴について、連続的にある程度重なりながら並んでいることがわかった（桜井前掲四七頁）。しかし、最上位の領野といわれる前頭連合野内では、異なる機能をもつニューロン群による層状の情報処理が進行するらしい（沢口前掲一三一頁）。

g　コラムの働き――コラムは、求心線維から伝わった特定の情報を内在ニューロンの相互作用によって変換し、変換した情報を出力ニューロンによって他の脳の部分へ送り出している（沢口前掲一〇九頁）。これがコラムを単位とする情報処理であるが、変換とは具体的にはどういうことなのか。たとえば、視覚情報は網膜から外側膝状体（視床

核の一つ）とよばれる中継地点を通過して、後頭葉にある第一次視覚野に到達する。このとき、視覚情報はいったん線分や色の三原色などへと分解される（沢口前掲一〇八頁。線分のみを選択するニューロンや各原色を選択するニューロンの働きのことか。一つのコラム内の出来事ではなく、いくつかのコラムのなすことであろう）。

第一次視覚野でいったん分解された視覚情報が上位の視覚野群で段階的に再構成される（沢口前掲一一〇頁）。第一次視覚野のニューロンは線分などの要素的な視覚情報に反応し、受容野（そのニューロンが受けもつ空間領域）も小さいが、一方、側頭連合野にある高次視覚野になると顔や複雑な物体などに選択的に反応するニューロンが多くなる（沢口前掲一一〇頁）。これと併行して受容野も広くなる。第一次視覚野でいったん分解された情報が再構成されることにより顔や複雑な物体の知覚の認知へといたるのである（沢口前掲一一〇頁）。

コラムの内部でニューロンが集団をなしている。つまり多くのニューロンがなんらか結びついている。どういう結びつきなのか？　桜井と平野が述べているところ（桜井前掲五一―七〇頁、沢口前掲一〇二―一三五頁）をまとめてみよう。たとえば、視覚的認知についていえば、これにかかわるコラムは、その組合わせは無限に近いので、どんな視覚対象も認知・識別できる（前述f）。だが、たとえば、あらかじめ五重の塔を認知するコラムの組み合わせが構造上存在するわけではない（桜井前掲五二頁参照）。認知のためにコラムはどのように結びつくのか。側頭連合野内では、似たような視覚対象物に視覚応答を示すニューロンがコラム状に集まっている（沢口前掲一二八頁）。コラムは視覚対象物の構成要素に応ずる。種々の異なる構成要素にそれぞれ応ずる。そのようなコラムが側頭連合野内で規則正しく配列している（沢口前掲一二八頁）。それぞれ異なる構成要素が一つにまとまれば一つの情報を再構成したことになる。それは右のようなコラムが多数同時に活動することによってである（沢口前掲一二八頁）。この活動の相関により情報が表現される（桜井前掲五二、五六頁）。相関とはどんな現象か。桜井は「振動現象」で説明し（五三頁）、沢口は「神

経投射」で説明するようである（一一二頁）。

桜井も沢口も「ワーキング・メモリ」を語る（桜井前掲五九頁、沢口前掲一三〇―一四三頁）。桜井は、ラットに高低二種類の音のどちらかを五秒間隔ごとに聞かせ、そのとき提示されている音がその五秒前に提示された音と異なるときだけ（低→高、高→低）パネルを押す課題を課した。この課題をこなすには、五秒前に提示された音をそのつど記憶し直さなければならない。このような記憶を桜井は作業記憶（ワーキング・メモリ）という（五九頁）、沢口は、一般化して、ワーキング・メモリとは行動や決断に必要な情報を一時的に保持しつつ操作して答えを出すはたらきであると定義する（一三〇頁。なお平野前掲五九頁は、何かを考えるとき、その思考に関連して即座に使えるような概念の集まりをワーキング・メモリと呼んでいるという。）。この記憶機能は、思考をはじめとして、言語、計画、意思など、ふつうにいう「精神活動」に欠かせない（沢口前掲一三〇頁）。

第一次視覚野でも、側頭連合野のＴＥ野でも、似た視覚刺激に応じるニューロンが皮質のほぼ全層にわたって存在して機能的コラムを形成している（沢口前掲一三一頁）。ところで、ワーキング・メモリ過程は、そのはたらきの性質上、情報の受容と保持、そして行動出力という、少くとも三つの過程から成っている。最高次の領野である前頭連合野のなかの46野には、これら三つの過程のそれぞれに関係するニューロンが存在し、その分布は皮質の層によって異なる。つまり上層には視覚受容にかかわるニューロンが多く、下層には出力に関係したニューロンが多い。メモリ（保持）に関係するニューロンは上層にも下層にもある（沢口前掲一三一頁）。つまり異なる機能をもつニューロン群が層状に存して情報処理をしている（沢口前掲一三一頁）。46野では、各コラム内で情報の受容→保持（操作）→行動決定という統合過程が層状に進行する（沢口前掲一三二頁）。

ｈ　一方で、桜井は、音を出しているスピーカー（音源）をサルの回りで動かし、そのとき大脳皮質の聴覚野から

複数個のニューロンを同時記録した実験（五五頁）から、音源の位置の違いにより活動を変えるニューロンのほかに、同時に、音源の変化に対し個々のニューロンの活動は変化せず、それらニューロン間の活動相関のみが変わることもあったことを認めた(五六頁)。つまり、音源をマイナス一五度からプラス一五度の位置に動かしたときのみ、二つのニューロンが相関して活動することを示すデータが得られている(桜井前掲五六頁)。音源を逆に動かしたときは見られない相関である(同上)。つまり、マイナス一五度からプラス一五度へという動きの情報は、個々のニューロンの活動で表現されるのではなく、これらニューロン間の活動相関（一方のニューロンの発火に続いてもう一方のニューロンが発火するという相関）で表現されているのである（桜井前掲五六頁)。（一方の発火と同時にもう一方も発火するという相関もある――桜井前掲五二頁)。

桜井は、右（g）に述べたラットに課した課題のほかに、高い音のときだけパネルを押す課題も課した。この課題ではいったん覚えれば毎回有効な記憶があればこれをこなせる(五八頁)。つまり、ラットは記憶情報処理を二種類行うのである。課題が違うとこれに対応するニューロンの活動相関もちがう(桜井前掲六〇頁)。活動相関は、音刺激が高いときと高いけれど五秒前の音とちがうときでは活動相関が変化する(桜井前掲六〇頁)。この活動相関は記憶情報処理の種類を表現するもので、こういう事象も、活動相関が表現するのである(前掲六〇頁)。このような活動相関は、きわめて短時間（刺激の提示後数ミリ秒から数十ミリ秒という）の間に生じ変化していく（桜井前掲六〇頁)。このような時間経過に伴う活動相関の推移（出現パターン）が、特定の事象や情報と対応している場合もあるといわれている(桜井前掲六〇頁)。情報はニューロン間の活動相関で表現されるときがあるが、それは短時間で刻々と変化しているものである（桜井前掲六二頁)。活動相関が処理すべき情報に合わせて次々と生じ変化していく（同上)。特定の情報処理のため、活動相関する特定のニューロン集団が、次々と形成されていく（同上。特定の情報の入力のさいに、

ニューロン集団が対応して特定していくプロセスはどういうものか?)。

桜井は、このようなニューロン集団は、ヘップが半世紀ほど前に、脳内での情報表現の単位として仮説的に提唱した「セル・アセンブリ」そのものであるという(前掲六三頁)。

現在の技術でも、構造的ではなく、機能的結合(活動相関)に基づく柔軟なニューロン集団というものを、そのまま測定することはほとんど不可能である(桜井前掲六三頁)。しかし、セル・アセンブリが働いていることを実験的に示すことはできる(桜井前掲六五—六六頁)。

セル・アセンブリと呼ぶべきニューロン集団は、異なる個性つまり働きを持つニューロンが重複して協調している集団である(桜井前掲六八頁)。個々のニューロンを基本とする情報表現(個々のニューロンまたは同じ機能をもつニューロンの加算的集合)と、セル・アセンブリを基本とする情報表現とが、どのように協力し合い、なおかつ役割を分担しあっているのかを知ることが、今後の最大の研究目標であろう。ニューロンの個性は他のニューロンとの関係の中で随時変化するものであり、一つのニューロンが異なるセル・アセンブリを介し、いくつもの情報表現に参加することにより、いくつもの異なる個性を持ちうるのである(桜井前掲六九、七〇頁。ニューロンの選択性も変化するのか?)。

第二章　情報の伝達

生体は刺激を受けると反応する。刺激を情報ととらえれば、情報を受けとり伝達するのが反応の第一歩である。情報を伝達するしかたに二通りがある。一つは、神経細胞で受けとりこれを他の神経細胞に伝えるしかたである。他の一つは、化学物質が受けて、これが体液によって運ばれることによって伝わるしかたである。ホルモンはその化学物

質の一つで、内分泌線で作られ、体液の一つである血液によって全身に運ばれ、標的細胞（情報を受けとる必要のある細胞）でその作用があらわれる（石川ほか編「細胞生物学」一八七―一八九頁）。すなわち、標的細胞に受容体（タンパク質でできている）とよばれる分子が備わっていて、それが情報の受皿である（石川前掲一八九頁）。あるホルモンはある受容体しか受け皿としない。（同上）。

受容体はタンパク質でできている（石川前掲一九三頁）。多くの受容体は細胞膜にある（石川前掲一九四頁）。ある特定の分子に特異的に結合する分子は総称してリガンドと呼ばれる（石川前掲一九四頁。ホルモンはその一つである。）。リガンドに脂溶性のものと水溶性のものとがある。脂溶性リガンドは、細胞膜がリン脂質であるので、細胞膜に溶け込み、膜を通過することができる（石川前掲一九四頁）。そこである種の脂溶性リガンドの受容体は細胞内にある（石川前掲一九四、一九五頁）。水溶性リガンドは膜に溶け込むことができないので、細胞膜を透過できない（石川前掲一九五頁）。そこで、細胞膜にあるタンパク質が受容体となり（細胞膜受容体）このタンパク質は膜貫通型である（石川前掲一九五頁）。リガンドが結合する部分は、細胞の外側に露出している。この部分にリガンドが結合すると、受容体が活性化され、情報が細胞質内部に伝えられる（石川前掲一九五頁、一九六頁）。細胞膜受容体は大別して三つのタイプがある（詳細は石川前掲一九七―二〇〇頁）。チロシンキナーゼ型受容体、Gタンパク質共役七回貫通型受容体、イオンチャンネル複合型受容体である（石川前掲一九七―二〇〇頁、仙波前掲四五―五六頁）。神経伝達物質は後二者にかかわる（仙波前掲五五頁）。

本章では神経細胞による伝達をとりあげる。

1　神経細胞が受ける刺激と電気信号

イ　たとえば、光は視細胞により電気信号に変えられて、信号は脳にまで伝達されて、視覚が成立する（くわしく

は第三章第二節3)。物の形や色を認知するのは脳である。このように、情報は神経細胞内では電気信号として伝わる。この信号を活動電位という(平野前掲九八頁)。電気信号の実体はどのようなものか。

細胞はいわば細胞膜で空間を囲った袋で、膜の外側は体液である。体液の主成分は塩化ナトリウムである。体液中にはカリウムイオンが含まれているが、濃度は塩化ナトリウムよりかなり少ない。細胞内はカリウムイオンが多く、細胞内のナトリウムイオンは濃度は低い。(細胞外の濃度の一〇分の一以下)。細胞外は、ナトリウムイオン、塩化物イオンが多く、カリウムイオンの濃度は少ない(平野前掲九九頁)。濃度が異なるイオンが隣接する場合、高濃度側から低濃度側へ濃度差を無くするような拡散が起こる。細胞膜の内と外でイオン濃度に差がある場合、細胞膜がその種のイオンを通すときは、この拡散が起こる。細胞膜はカリウムイオンをよく通し他のイオンをほとんど通さない(平野前掲九九頁)。

細胞膜は通常カリウムイオンをよく通す。またカリウムイオンは細胞内に多い。そこでカリウムイオンは細胞の内から外へと拡散する。ところが、カリウムイオンが流出すると、カリウムイオンは正の電気を帯びているので正の電荷(物体が帯びている静電気の量)が細胞外に移動したことになり、細胞内には負の電位が生じる。つまり細胞内電位は細胞外電位より通常五〇―九〇ミリボルト低い(静止電位)(平野前掲九九頁)。この負の細胞内電位はカリウムイオンの流出を抑え流入をひき起こす静電気力を生み出す。濃度差によるカリウムイオンの流出の流れと、流出を抑える静電気力に基づく流れはやがて大きさが等しくなる(平衡電位という)(平野前掲九九頁)。静止電位はほぼカリウムイオンに対する平衡電位となっている。[1]

(1) 原子は、陽子、電子、ヘリウムイオンなどの素材から構成される。原子が外部に電子を放出すると正の電気を帯びた陽イオン粒子

となり陰極に向かう。外部から電子を取り入れると負の電気を帯びた陰イオン粒子となり陽極に向う。

ロ　ナトリウムイオンは細胞内よりも細胞外で多い。濃度は、細胞内が細胞外の一〇分の一以下である。このため、ナトリウムイオンについての平衡電位は、細胞内が細胞外より六〇ミリボルトくらい高い。

ところで、神経が刺激されるとナトリウムイオンの膜透過性が一過性に上昇し、膜電位がナトリウムイオンの平衡電位に近づく(平野前掲一〇一頁。カリウムイオンの透過性も上昇する平野前掲一〇三頁)。濃度の高い細胞外ナトリウムイオンが細胞内に流入することになる。正の電荷が細胞内に移動し、細胞内の負の電位をゼロに近づける(＝脱分極)。つまり、細胞内電位を正の方向に動かす(平野前掲一〇一、一〇二頁)。樹状突起内部のできごとである(伊藤正男「脳の不思議」五九頁)。すると、ナトリウムチャンネル分子内のナトリウムを通す孔付近の電荷移動が起こり、孔を塞いでいた部分(活性化ゲート)が開き、ナトリウムイオンが通過できるようになる(平野前掲一〇一頁)。

ハ　ナトリウムイオンが細胞内に流入し、カリウムイオンは細胞外に流出する。前者により細胞内電位は正に向い、後者により細胞内電位は負になる。前者の流入が後者の静止時の流出を上回ると(閾値電位に達したという)、つまり、脱分極が閾値電位に達すると一部のナトリウムチャンネル(タンパク質である――平野前掲一〇五頁)が開き、ナトリウムイオンの細胞内への流入が起こる。(一ミリ秒間に約二万個のイオンが流入する――一〇六頁)。この流入はさらなる脱分極をひき起こす。それは、さらに多くのナトリウムチャンネルを開かせる。こうして膜電位はナトリウムイオンに対する平衡電位に急激に近づく(平野前掲一〇一、一〇二頁)。つまり細胞内が三〇―四〇ミリボルト程度正の電位となる[1](世界大百科「かつどうでんい」)。これを活動電位の立ち上りという(伊藤前掲五九頁)。別にいえば、細胞内で通常七〇(五〇～九〇)ミリボルトの負の電位が三〇ミリボルトの正に変わる、すなわち内外の電位差が一

〇〇ミリボルト約一ミリ秒間に変化する現象である(平野前掲二二頁、九八頁)。これが、神経細胞内で、神経情報が電気信号となったものである。つまり、情報(刺激)が電気信号に変換されるとは、刺激が活動電位を起こしたことをいう。その実体は膜電位がナトリウムイオンに対する平衡電位(正)に向うことである。だから、電気でないものが電気になったのではなく、電気であるもの(膜電位)が状況を変えたものである。

(1)「細胞体の内部は、ふだんは電気的にマイナスとなっている。他のニューロンからの信号をシナプスを介して受け取ると、その内部電位(膜電位)が一時的に少しだけプラス側へと変動する。入力信号が短時間の間に多数到達することにより、このプラス側への変動がある大きさ(閾値)以上になると、約一ミリ秒だけ、内部電位がゼロあるいはプラスに変化する。この一過性の電位をスパイク、あるいはインパルス、活動電位、神経興奮、脱分極などと呼び、それが発生することをニューロンの発火と呼ぶ」(桜井前掲一一頁)。膜電位(細胞膜の内と外の電位差)の変化が活動電位であるといってよいであろう。

ニ　活動電位は一ミリ秒程度しか持続しない(平野前掲一〇三頁)。活動電位が立ち上がるとは、膜電位がナトリウムイオンに対する平衡電位に向うことであり、活動電位が終了するとは膜電位がカリウムイオンに対する平衡電位に向うことである(平野前掲一〇三頁)。終了の原因は、ナトリウムチャンネルに脱分極により閉ぢるゲート(不活性化ゲート)があってこれが活性化ゲートよりもゆっくり閉ぢて透過性を減らすこととカリウムイオンの透過性上昇である(平野前掲一〇三頁)。

ホ　活動電位が発生すると、ナトリウムイオンの流入およびカリウムイオンの流出が起こる。そのため、細胞内外のイオン濃度が変化する。このイオン濃度の変化は復元される。これを復元するのは細胞膜に存するナトリウム―カリウムポンプである。ナトリウム―カリウムポンプは、タンパク質で、生体においてエネルギーを蓄える分子である

アデノシン三リン酸（ＡＴＰ）のエネルギーを使用して、ナトリウムイオンとカリウムイオンを濃度勾配に逆らう方向に輸送する（平野前掲一〇四頁）。

2　活動電位の伝導

活動電位が神経細胞を軸索に沿って伝わっていく（仙波前掲一九頁、三五頁）。軸索にナトリウムチャンネルとカリウムチャンネルが散在する（石川前掲二一一頁）。ともに電圧依存性イオンチャンネルである（同上）。軸索の情報機能はインパルス伝播と物質輸送である。前者は情報をインパルスの形で非減衰に細胞体から神経終末に伝えることである（石川前掲二〇七頁、後者については第一章4ハ）。つまり活動電位（「神経インパルスとよばれる電気的な情報」仙波前掲一七頁）が、細胞体（樹状突起と軸索がつながる部分。初節といわれる――石川前掲二一六頁）から軸索を伝わるのであろう（伝わりかたのメカニズムはどういうものか？）。

活動電位は軸索を伝わっていく。正への電位変化は隣接する膜面との間に局所的回路を作り、隣接面を脱分極に導く。その結果、新しい部位のナトリウムチャンネルの活性化・開口をひき起こす。この過程が次々と起こることが伝わるということである。ナトリウムイオンチャンネルの開口は一ミリ秒程度しか持続しない。それは数ミリ秒以内に不活化され、ナトリウムイオンチャンネルに少し遅れて開口するカリウムイオンチャンネルからの細胞内カリウムの流出により脱分極が解消され、負の膜電位が回復される。つまり興奮の伝導は一方向である（早石修・伊藤正男編「精神活動の流れを遡る」九三頁）。

3　活動電位とシナプスにおける伝達

イ　シナプス前神経細胞（神経終末）の活動電位がシナプスに到達すると神経伝達物質[1]とよばれる化学物質を放出する（仙波前掲二五頁、伊藤前掲五九頁）。これがシナプス後神経細胞（シナプス間隙を挟んで隣接する神経細胞）の

樹上突起や細胞体上にある受容体を刺激し、シナプス電位がつくられる(仙波前掲二五頁)。つまり、受容体と連動している膜のチャンネルが開いてイオンを選択的に透過させ、イオン電流が流れてシナプス後部の細胞膜に電位変化を起こす(伊藤前掲五九頁)。すなわち、このシナプス電位の集合がシナプス後神経細胞の活動電位をひき起こす。このようにして、シナプスを介して神経の情報が伝わっていく(仙波前掲二五頁。シナプス前活動電位―神経伝達物質―シナプス後活動電位)。

ロ　神経細胞の興奮は軸索起始部で活動電位として発生し、それが有髄神経では、ランビエ絞輪部に集積したナトリウムイオンチャンネルとカリウムイオンチャンネルによるナトリウムの流入とカリウムの流出により前述のように、軸索を伝わり、シナプス終末部に至る(早石・伊藤前掲九六頁)。

シナプスではどういうふうに伝わるのか。伝達をする細胞の軸索の終末部と伝達を受ける細胞の樹状突起の間の隙間がシナプスである。シナプスには、化学的伝達物質を用いないものと用いるものとがある。化学物質を介して情報を伝えるとはどういう現象か。それは神経伝達物質[1]を放出し(放出のメカニズムは早石・伊藤前掲九六頁)、これを運搬し、これを受容することである。神経伝達物質を含む小胞と放出された神経伝達物質を再吸収するトランスポーター(早石・伊藤前掲一〇六頁)はシナプス前部に、受容する器官である受容体(早石・伊藤前掲二〇六頁)はシナプス後部にある(早石・伊藤前掲一〇四頁、平野前掲二四頁、受容体に神経伝達物質が作用すると、細胞膜のイオン透過性が変わり、シナプス電位が生じる。シナプスは多数ある。シナプス電位の総和がある一定の値(閾値)以上になったとき神経細胞は脱分極して活動電位を生ずる(仙波前掲二六頁)。神経伝達物質は一〇〇種近くある(早石・伊藤前掲一〇四頁。化学物質であるその例は早石・伊藤前掲一〇四頁)。受容体も多様なものがある(同上一〇四―一〇六頁。化学物質から成る。早石一〇〇―一〇三頁)。大分類すれば、イオンチャンネル受容体とG蛋白質共役受容体とある(早

石・伊藤前掲一〇〇頁)。イオンチャンネル受容体の主要な機能は神経細胞間の早い情報伝達である。G蛋白質共役受容体の主要な機能は情報伝達の制御にあると考えられている(早石・伊藤前掲一〇二頁)。制御はどういうことか。①カリウムチャンネルやカルシウムチャンネルの制御を介する、活動電位の持続時間や発生頻度、伝達物質放出の制御、②受容体や伝達物質合成酵素を含む種々の蛋白質のリン酸化による機能調節、③CRE (cyclic AMP responsive element) などを介する、転写制御因子や機能蛋白質の発現制御、④光や匂物質の受容あるいは自律神経の標的器官での情報伝達、などがある。(同上一〇二頁)。

神経伝達物質は、イオンチャンネル受容体[2]を介して一ミリ秒以内で興奮の伝達を行うと同時に、G蛋白質共役受容体を介して興奮伝達の制御系を始動させ、一秒後、一分後、あるいは一時間後の興奮伝達を調節していると考えることができる(早石・伊藤前掲一〇二頁)といわれている。[制御や調節をさせるしくみ、どういう場合にどんな制御か、明らかにされていない]。

シナプス後膜上の受容体でキャッチされた神経伝達物質による情報は、受容体内蔵の化学物質(リガンド)作動型イオンチャンネルにより電気信号に変換されて後シナプス電位を脱分極方向に変化させる(早石・伊藤前掲九一頁。詳細は同上一〇〇―一〇三頁)。この変化を感知して開閉する電位作動型イオンチャンネル(その分子構築は(早石・伊藤前掲九一頁。各イオンチャンネルは固有のイオン選択性をもつそれぞれ異った膜蛋白質分子である)が開口すると濃度が高い細胞外のナトリウム(またはカルシウム)が急速に細胞内に流入する。その結果この電位変化がある閾値を超えると神経細胞膜に活動電流が発生する。活動電流は軸索膜上を速やかに伝播していき、軸索終末部で次の神経伝達物質の放出をもたらす(早石・伊藤前掲九一頁)。

(1) 神経伝達物質

a 神経細胞からは、他の神経細胞に電気信号を伝える際に、神経伝達物質とよばれる化学物質が放出され、この物質を介した情報伝達が行われる(平野丈夫「脳と心の正体」二〇頁)。刺激を樹状突起が受けると軸索起始部で活動電位が生じ、これが軸索を末端に向って伝わって行く(平野前掲二八頁、二一頁)。軸索は多くの場合末端で枝分かれして、他の神経細胞に近接していてそこをシナプスという(ひとつの空間である)。この末端の枝分かれに活導電位が伝わってくると、これが引き金となって、神経伝達物質がシナプス空間に放出される(平野前掲二二頁)。

b 神経伝達物質は直径五〇ナノメートル程度の小胞内に濃縮されている顆粒である(平野前掲一三頁、世界大百科「しんけいでんたつぶっしつ」)。それは軸索の末端にある。シナプス小胞が軸索の末端の細胞膜と融合すると神経伝達物質が放出される(平野前掲二三頁)。前シナプスに活動電位が到着すると、細胞膜が脱分極し、カルシウムがカルシウムイオンを介して細胞内部に流入する。するとシナプス小胞は細胞膜に近づき融合して、内部の神経伝達物質は細胞外へと放出される(仙波前掲三二頁)。

c 神経伝達物質の候補として現在知られているものは、アセチルコリン、アミノ酸類(γアミノ酪酸(GABA)、グリシン、グルタミン酸、L―アスパラギン酸)、モノアミン(セロトニン、ヒスタミン)、カテコールアミン(ノルアドレナリン、アドレナリン、ドーパミン)、ペプチド(バソプレシン。いくつかのアミノ酸からなる)などがある。しかし、伝達物質として確立しているものは上記のうちでもまだ少ない(世界大百科「しんけいでんたつぶっしつ」。その例は、平野前掲一〇七頁、仙波前掲三〇―三一頁)。

(2) 受容体には、イオンチャンネル内在型受容体と代謝共役型受容体とがある。前者の例は、細胞膜に受容体としてイオンチャンネルがあって、このチャンネルに神経伝達物質と結合する部位(タンパク質)があって、そこにアセチルコリンが結合すると、受容体タンパク質の構造が変化し、チャンネルが開き、またグルタミン酸が結合するとチャンネルが開く(平野前掲一〇八頁、仙波前掲四六頁)。グルタミン酸を受容してチャンネルが開けた場合、カルシウムイオンが流入し、興奮性のシナプス後電位をひき起こす(平野前掲一〇九頁)。後者には――Gタンパク質と共役してアデニル酸シクラーゼという――酵素を活性化するものがある。アデニル酸シクラーゼはアデノシン三リン酸(ATP)をcAMPに変換する(つまりcAMPは小型の分子で、各種の酵素と結合してその活性を変化させこれにより細胞内の濃度が変化する(平野前掲一一〇頁)。この作用により特定のタンパク質がリン酸化し、たとえばカルシウムチャンネルが開く、そして細胞内の濃度が変化する。つまり電位の変化が起こるのだろう。これらの化学反応により、細胞内で情報が伝達される。(その他の例の詳細は仙波前掲三六頁、四六頁―五五頁)。

この伝達過程を光情報についてみよう。

光受容細胞には杆体と錐体がある。光が杆体に到達すると、杆体細胞内のディスク膜において、その一部がロドプシンというタンパク質に吸収される。一つのロドプシンは光を受けるとその構造を変化させて、いくつものトランスデューシンとよばれるGタンパク質を活性化する。一つのトランスデューシンはいくつものホスホジェステラーゼという酵素を活性化する。一つのホスホジェステラーゼは細胞質内のいくつものcGMPを分解する。cGMPはcAMPと似た小型分子であり、細胞内酵素などの活性調節をするセカンドメッセンジャーの一つである。(cGMPが分解するとどうなるのか?)。杆体の細胞膜にはcGMPにより開くイオンチャンネルが存在する。このイオンチャンネルはナトリウムイオンとカリウムイオンを通すが、静止電位ではおもにナトリウムイオンを流入させている。ホスホジェステラーゼが活性化すると、(cGMPは分解し)cGMP濃度が下がる。するとcGMP依存性チャンネルが閉じ、ナトリウムイオンの流入が減少する。すると細胞膜電位は過分極する(平野前掲一一二頁。過分極するとは、カリウムが細胞外に流出し、電位が下がり、短時間静止時よりもやや電位が下がることをいう――仙波前掲一九頁)。つまり、杆体(錐体でも同様だが)では、光刺激によって膜電位が過分極するという。これが光・電気信号変換である。この変換は何段階もの化学反応を介している。それは、それにより信号が増幅されるからであると考えられている(平野前掲二一三頁)。

ハ　神経情報の伝達は細胞から細胞への伝達である。伝達を受ける細胞から見れば、細胞外情報が細胞内情報に転換することである。情報は化学物質がひき起こした活動電位であるといってよい。神経伝達物質は化学物質であり、細胞外情報物質である(早石・伊藤前掲一二〇頁。ファーストメッセンジャーといわれる)。細胞外情報物質がもたらす情報を細胞内情報(セカンドメッセンジャー)に転換する機構が細胞膜受容体である(早石・伊藤前掲一二〇頁)。神経伝達物質受容体にはイオンチャンネル受容体とG蛋白質共役受容体とがある(早石・伊藤前掲一〇〇頁)。前者については、チャンネルを透過するイオンが細胞内情報物質であると考えられる。だから、イオンチャンネル受容体蛋白質だけで情報転換機構を成している(早石・伊藤前掲一二〇頁)。後者はGTP結合蛋白質受容体で、情報をGTP結合蛋白質に送るだけなので、そのようにいわれ、情報の転換はGTP結合蛋白質が勤める(早石・伊藤前掲一二〇頁。

G蛋白質共役受容体の分子機構は早石・伊藤前掲一〇二頁、一二〇頁)。GTP結合蛋白質の作用を受ける蛋白質がある(効果器とよばれる)。この効果器として最も古く同定されたのはcAMP生成酵素アデニル酸シクラーゼである。これが細胞内物質情報である(早石・伊藤前掲一二一頁)。つまり、細胞外情報物質のもたらす情報がGTP結合蛋白質の作用を受けてアデニル酸シクラーゼになることが転換であるのであろう。(なお、平野丈夫「脳と心の正体」一一〇頁)。

ニ　シナプスにおいて、受けた刺激の情報が、神経において、シナプスにおいて伝達される。シナプスの伝達の効率は変化する(早石・伊藤前掲一四六頁)。シナプスの伝達効率はそのシナプスの使用頻度などにより変化する(平野前掲七二頁)。この現象はシナプスの可塑性とよばれる(同上七二頁)。学習は、刺激の繰り返しにより脳が変化することをいう(酒井「心にいどむ認知脳科学」三三頁)。シナプスの可塑性がすなわち学習であることになろう。(「シナプス可塑性を起こしやすくすることにより学習能力が向上する可能性が考えられる」── 平野前掲八〇頁)。シナプスの可塑性つまり、脳の変化がどういうふうにして起こるか、それが伝達効率の変化であるというのはどういう現象か。

4　電気信号と化学反応

イ　外界からの刺激によりイオンの膜透過性が変化する(化学反応というべきか)。イオンが細胞膜の内から外へ外から内への流動して変化する。やがて、活動電位が発生する(電気信号)。活動電位は発生したところから細胞の軸索末端に伝導する。これが引き金となり神経伝達物質が放出され、別の細胞の受容体(樹状突起や細胞体)分子と結合する(化学反応)。結合によりイオンチャンネルが開く。チャンネルが開くと、カルシウムイオンが流入して電位を起こし(シナプス電位)、他方でカルシウムイオンが細胞内の濃度を変化させる。その膜電位変化(シナプス電位が集合して)が十分に大きいと活動電位が発生する。(仙波純一「脳と生体統御」三五頁もみよ)。ある神経細胞で発生した活動電位が、神経伝達物質を放出させ、それと他の神経細胞の受容体と結合してその化学反応の結果として他の神経

細胞に活動電位が発生する。これが情報の伝達なのであろう。

ロ　刺激とこれが電気信号に変換された場合の活動電位との間に、その種類が、Aという刺激の場合には、○○ボルトという活動電位という対応関係はあるのか。ちがう刺激だが起きた活動電位の規模は同じということはないのか。伝達の過程において、右の対応関係がはっきりしてくるのか。質問すべきことが多い。

第三章　神経細胞の働き――食の過程に絞って――

序

第一章において、細胞について包括的な勉強をした。第一章において、神経細胞において、また、神経細胞間において、情報がどのように受けとられ、どのように伝導され、また伝達されるかを勉強した。いずれも素人の勉強である。先人専門家の業績を理解し消化することに努めたに止まる。この努力が同じく神経細胞の働きを勉強したいと思っている（そう思って欲しいのだが）読者の参考になれば幸いである。

神経細胞は受けとった情報を処理する。情報を処理してどういうことが起こるのか。ある対象物を認識する。認識したところを言語により表現する。認識したところに対し反応を起こす。反応は肉体の行動または精神的な行為として姿を表わす。そこで、情報を処理するからくりと、処理された情報に対する反応のからくりを勉強しなければならないことになる。そこで反応が肉体の行動に表われた例として物を食するという行動をとりあげる（本章）。

1　人は飲食する。生命維持に不可欠の行為である。食の過程をできるだけ細かく分析してみよう。私が一個のリンゴを食する過程を例にとろう。

2　なにかを食するには、食するという決断をまずする。この決断には動機ないし原因がある。空腹感、なにか食すべきであるという感じ、うまそうだから食してみたいという欲望、そのいずれかである場合もあり、そのいずれでもあるという場合もあろう。

3　なにかを食するという決断の後に、なにを食するかの選択が続く。リンゴを選択した。選択の決断の基礎には二種の判断がある。一は、リンゴが食に適するものであるという判断、他は、他に食に適するものがあるのにリンゴに決めた根拠になる判断。

イ　前者の判断は、リンゴに関する知識のおかげでできるものである。リンゴを知ることはリンゴを食した経験またはリンゴが食に適する情報をもったことに基づく。食するとは口に入れる、噛んで細かくする。飲み込むという行動の連続である。胃で消化し腸で吸収する。リンゴについては、ナイフを取り、皮を剝き、適当の大きさに切り分け、切り分けた一つをフォークで口に入れる筋肉の働きといきなり噛って噛りとった部分を口に入れ、噛んで飲み込むという筋肉の働きとがありうる。噛んでいる時間帯において味を感得する。これらの経験を通してリンゴの実がどういうものであるかを知り、知ったことがらが記憶に残る。この記憶が、食の対象の一つであるリンゴを見てそれが記憶されたリンゴの記憶を呼び起こし、この両者が同一の種類であることを認識し、対象物であるリンゴが食に適するものであると判断するのである。人の経験は情報化され、情報を得た人はこの情報を記憶に止める。対象物を見て人はこの情報を記憶から取り出し、対象物が食に適すると判断する。

ロ　後者の判断は、なにかを食する欲望をもった時の人の状態に左右される。それは一様ではない。食することを勧められた、必ずしも空腹ではないがうまそうに見えた、など、リンゴに決める判断の根拠は一様ではない。

4　リンゴを食することを選択したときは、リンゴを食することができる状態を作らなければならない。現代社会

は自給自足ではない。物は各人が所有し、これを侵すことは許されず、自分が所有せず他人が所有するものは、貨幣経済の社会においては、これと貨幣を交換して自分の所有としなければならない。これが今日の社会関係の基本である。それが社会的環境である。これは人類が長年にわたって築きあげた規範の関係であって、人々はこれに適応してきたし適応すべく促されているものである。ヒトはこのような社会的環境を認知する。

私はスーパーに行き、リンゴ一個を取り、カウンターで代金一〇〇円を支払い、リンゴをもって帰る。法律的にいえば、スーパーとの間で、リンゴの所有権を一〇〇円の貨幣で買い取る合意をして、所有権を私に移転する手続を実行したのである。この私の行動は、物を手に入れて自分が自由に処分することができるようにするための行動規範を学習により知り、この規範に従っていることである。これが、前述の適応である。

学習は知るための手続を経ることである。知ることは経験するまたは観念としてもつことである。規範を知るとは、どういう命題があり、それが人の社会的行動を規制する圧力をもっているかを認知することである。規範に従うとは、規範を良しとしこれに拘束されることを良しとすることに気づく場合と、規範に拘束されない行動は社会(他の人々)に受けいれられないから社会に受けいれられることを良しとすることに基づく場合と、規範に反する行動に対しては制裁を受けるから制裁を避けることを良しとすることに基づく場合とあり、実際にはそのいずれかであることもあり、そのいずれでもあることもある。

5　スーパーで手に入れたリンゴを私は、手に取り、皮を剝き、細かく切り、口に入れ、噛み、飲み込む。これはいずれも筋肉の運動である。

6　こうして、リンゴを食べるには、その動機づけ（空腹感、食の誘惑など）が先行し、リンゴの認知があり（リンゴの概念、リンゴという言語が関係する)、リンゴの記憶があり、リンゴを選択するということがあり、その間に思

考するという働きがあり、ある特定のリンゴを食するという意思決定があり、そのリンゴを手に入れるという社会関係上の行動があり、その実現として食するという運動がある。

以下そのひとつひとつを解明しよう。社会関係上の行動は別に考えることにする（次稿）。

第一節　食への動機づけ

ヒトがなにかを食したいと感ずるようになる原因は、まず、体内感覚である空腹感であろう。その他にも、かならずしも空腹でなくても、あれを食べたいと思うことがあろう。過去に美味であった記憶が食への欲望を誘うということがあろう。ここではもっとも根原的な空腹感のみを取り上げる。

1　空腹感とはなにのどんな働きか。早石修・伊藤正男編「精神活動の流れを遡る」（一九九五年）に依存しよう。人において摂食を司る部位は脳にある。脳の視床下部にある満腹中枢（VMH）と摂食中枢（LHA）である（早石・伊藤前掲六八頁）。摂食中枢にはブドウ糖感受性ニューロンが、満腹中枢にはブドウ糖受容ニューロンが存在する。両中枢の真中はそれぞれカテコラミン、セロトニン、アセチルコリンなどの伝達物質を含有する神経繊維束が通過している。

2　血中に遊離脂肪酸、インスリンなどがあり、遊離脂肪酸はブドウ糖受容ニューロンの活動を抑制し、ブドウ糖感受性ニューロンのそれを促進する空腹物質である。インスリンは両ニューロンに作用して満腹物質として作用する（以上早石・伊藤前掲六八頁）。

血中の遊離脂肪酸は空腹時に高く、摂食とともに減少する。摂食により血中のブドウ糖とインスリンが上昇し、そのため脂肪細胞に取り込まれ脂肪に合成されるからである。血中のブドウ糖濃度が上昇すると、摂食中枢のブドウ糖

感受性ニューロンの活動が抑制され、この上昇によって満腹中枢のブドウ糖受容ニューロンの活動が促進される（以上早石・伊藤前掲六八頁）。一方、遊離脂肪酸はブドウ糖受容ニューロンの活動を抑制し、ブドウ糖感受性ニューロンの活動を促進する空腹物質である（同上、六八頁）。

3　ラットを絶食させると、血中の空腹物質である2, 4, 5TPは一二時間目にピークになり、その後徐々に減少してくる。それは満腹物質とともに、ブドウ糖受容ニューロンおよびブドウ糖感受性ニューロンにそれぞれ作用して摂食行動を調節している。

4　ブドウ糖受容ニューロンとブドウ糖感受性ニューロンは視床下部以外にも存在し、血中物質の変動をモニターし満腹中枢および摂食中枢に送る。これらのニューロンは、大脳辺縁系および前頭前野の連合野と相互に密接に結合している。したがって、最終的な化学情報は、辺縁系と連合野に送られて、ここで高次の意識すなわち空腹感や満腹感が起こってくることになる。また満腹および摂食中枢は、大脳運動野および錐体外路系と相互に密接に結合しているから、連合野での高次の判断のもとに適切な摂食行動が調節できるのである（以上早石・伊藤前掲六九頁）。

5　私が確認したいのは以下のことである。空腹感の意識は辺縁系と連合野にある細胞におけるできごとである。このできごとは、血中に存する空腹物質がブドウ糖感受性ニューロンに作用してその働きが摂食中枢から辺縁系と連合野に伝達されて起こる。空腹物質は化学物質である。空腹感は化学情報である。空腹物質のブドウ糖感受性ニューロンへの作用の実態を知らせる文献にはまだ接していない。化学的反応か。多分、電気信号が起こるのであろう。伝達は伝達神経細胞の働きである（第二章）。

注　「血糖値はモニターされており、血糖の低下は空腹感をひき起こす」（平野丈夫「脳と心の正体」二〇〇一年五二頁）。

第二節　認知

1　なにかを食する欲望があるとき、この欲望を満たす物を物色する。物色するという行動は脳細胞からの指令によるものであろう。物色しているうちに、たとえば、リンゴという言語符号が与えられている対象物（＝リンゴ）に眼が止まる。眼に見える対象物がリンゴという言語が与えられている物であると認識する。リンゴという言語が付与されている対象物についての記憶といま眼で感知した対象物とが同類のものであると判断するのである。[1]この認識は、その対象物に触れることによって確かなものとされ、この対象物の匂いを嗅ぐことによって確かなものとされる。リンゴという言語符号の物の触感および匂いの記憶が言語符号によって呼び起こされ、それが現にある対象物から得られる触感および匂いと同一であることの判断によって確かめられるのである。

（1）「たとえばリンゴという言葉が作られ、百科辞典にはリンゴとはどういうものかが綿々と書いてあります。しかし、机の上にリンゴがあれば、誰も百科辞典など思い浮かべたりせず、それはリンゴであると判断します。そのとき脳のなかでは何か「リンゴ」に相当する活動が起こっているはずです。この認識がどうも今まで抜け落ちていたのではないかという気がします。外界にあるリンゴという対象と、リンゴという言葉と、リンゴという言葉を作り出している脳内の活動、この三つがあることは、生理学的にも証明できます。われわれはリンゴというイメージを上（脳）から下ろしてくることもできるし、末梢（網膜）から入れることもできます。この両方向性によって、目の前にリンゴがなくてもリンゴについて考えることができるのです。そしてヒトは、脳内で起こっていることについてアプリオリに「同じだ」と見る癖がある。それ以外に私は「同じ」ということの根拠を考えられないのです。同一性というのは、どうも、脳という情報系が持っている根本的な性質の一つであるらしい。」（養老孟司「情報化社会と若者」学士会会報No.八三二平成一三年七月一〇日発行九八頁）。

2　リンゴを認知するのは、見る、触れる、嗅ぐ、味わうなどの、視覚、触覚、嗅覚、味覚などの作用による。

3　見ること

ヒトは、見ることによって対象物の存在を認知する。有形物の存在は有形物がある空間を占めている状態である。有形物は形と色をもつ。形は線と面によって成り立つ。だから有形物の存在の認知は、線と面と色を認知することの綜合である。これらはどのようなプロセスを経て認知されるのか。

イ　見ることは光の情報を受けとることである。光の情報は、角膜、瞳孔、レンズ、硝子体から成る眼球光学系を経て網膜に結像する。網膜で光は錐体と桿体の二種類の視細胞により物の形や色の電気信号に変換される[1]。網膜には視細胞のほか、双極細胞と神経節細胞がある。変換された信号は双極細胞を経由して神経節細胞に伝えられる。信号は、この細胞の軸索を伝わって、視神経乳頭に集まり、視神経を通って脳に送られる。

ロ　脳では、電気信号に変換された情報は、視床の外側膝状体核に送られ、そこでより鋭くされ分離され明瞭にされ大脳新皮質に送り出される。大脳新皮質においては、二〇以上の領野で信号を受けとる。それぞれの領野で、情報が分析され解析され、多分、下側頭葉皮質において統合され、統合された情報が視覚として成立し、下側頭葉皮質、扁桃体、海馬の大脳辺縁系を通じて情動と結びつき、脳のどこかに記憶されると考えられている[2]（以上、「驚異の小宇宙・人体II、脳と心」伊藤正男監修ＮＨＫサイエンススペシャル別巻四三―四七頁、早石修・伊藤正男編「精神活動の流れを遡る」三〇頁）。

電気信号の伝達には、細胞が放出する神経伝達物質が作用し、神経伝達物質は化学物質である。このことについては第二章。筆者は、電気信号への変換と、信号の伝達が化学物質の作用によることに注目する。

情報が分析され、解析される姿はあるていど明らかにされている（平野丈夫「脳と心の正体」二六―四九頁）。各領

野で分析され解析された情報が統合されるという統合がどのようにして行われるかはまだ明らかにされていない。視覚と情動が結びつくといわれるが(見ただけで、うまそうだという情動が起こることをいうのか)、結び付くしくみもまだ明らかとはいえない(どんな電気信号が生じどんな化学物質がこれをどこに伝達するかを示す文献にまだ接していない)。

(1) 桿体(錐体でも同様)で光刺激によって膜電位が過分極するという光・電気信号変換が行われる。それは何段階もの化学反応を介する。その詳細は平野丈夫「脳と心の正体」二〇〇一年一一一―一一三頁。第二章3ロ(2))。

(2) 見るということについてのより詳細は、平野丈夫「脳と心の正体」二〇〇一年二六―四九頁。光情報は、網膜内の光受容細胞で受容されて電気信号に変換される(平野前掲三〇頁)。(第二章3ロ(2))。光受容細胞(杆体および錐体)の情報は、シナプスを介して双極細胞へと伝わる。双極細胞は神経節細胞にシナプス結合する(オン細胞は光刺激に応答し、オフ細胞は光が消えたときに応答する。双極細胞にも神経節細胞にもオンとオフの二種がある(平野前掲三三頁)。神経節細胞の情報は、視床にある外側膝状体を介して後頭部の大脳皮質へ送られる(平野前掲三五頁)。この大脳皮質領域を一次視覚野とよぶ。一次視覚野の神経細胞は、傾きのある線分に応答する。ある神経細胞は縦線に、ほかは横線や斜めの線に応答する。応答のからくりはわかっていない(平野前掲三五頁)。一次視覚野の情報は、他の視覚関連大脳皮質領野(二次視覚野、三次視覚野、四次視覚野、MT野、MST野 ── 桜井前掲二六頁)へ送られる。この情報の流れは、頭頂方向へと、側頭方向へとに大きく分かれる。頭頂方向では図形の動きや奥行きなど位置の情報が処理され、側頭方向では形の認知のための情報処置がなされる(平野前掲三六頁)。顔のように複雑な図形をも認知する神経細胞が大脳皮質側頭葉にある(平野前掲三八頁、桜井前掲四七頁)。顔の認知のときには活動電位の発火頻度が高くなっている(平野前掲三七、三八頁)。(活動電位の大きさと図形との対応関係ははっきりしない。平野前掲四四、四五頁)。しかし、顔の絵をいくつかの部分に分け並べ換えた図形や手には応答しない(平野前掲三八頁。認知は全体をまとめて、ということか)。要するに、視覚系では、情報が脳の中枢へ伝わるに従って図形の特徴抽出が行われていく(平野前掲三七頁)。脳は部分情報から特徴を素早く抽出し事物を認知する仕組みをもっていて、こういった働きの少なくとも一部は脳の神経回路内に埋め込まれたものなのである(平野前掲四三頁。コラムのことであろう)。図形の特徴抽出のからくり、特徴から事物を認知するからくり、それはコラム(第一章4へe〜h)の協調的な働き

というに止まり、その働きの実態はまだ明らかにされていないように思われる。

色について――後頭葉の下側に、紡錘状回という領域がある。紡錘状回は、視覚前野の一部であり、四次視覚野を含んでいる（酒井邦嘉「心にいどむ認知脳科学」三三、三四頁）。ここが色覚の中枢である。

運動を見ること――MT野のニューロン群が運動視の判断にかかわっている（酒井前掲三〇頁）。

顔をみること――顔であれば誰の顔であっても反応するニューロンもあれば、特定の人の顔にしか反応しないニューロンもあって、その選択の幅は、ニューロンごとに開きがある（酒井前掲三二頁）。いずれにせよ、顔ニューロンは、顔のもついろいろな情報を処理して、顔の再認に必要な役割をはたしていると考えられている（酒井前掲三二頁）。顔の再認には、大脳の後部（舌状回）のはたらきがとくにたいせつである（酒井前掲三一頁）。

ハ　ある物について視覚が成立し脳のどこかに記憶される。それにリンゴという言語符号が与えられる。後に、同様の視覚が成立したとき、記憶との一致を感知する。そこで、その物をリンゴと認知する。こういうことであろう。

4　触わること

イ　ヒトの皮膚が外界の対象物に接触したとき接触したことを感ずる。そして、同時に、温冷、硬軟、滑らかごつごつ、振動、圧などを感ずる。痛を感ずることもある。これらの触覚、温覚、冷覚、痛覚などを体性感覚という（伊藤正男監修「脳と心」六八頁をみよ）。このことは皮膚のどの部分でもほぼ同じである。

この接触を感ずるところを触点という。触点の下には、マイスナー小体、メルケル盤、ルフィニ終末、バチニ小体、毛盤、毛包受容器、自由神経終末などの受容器があり、それらが、皮膚への異なる刺激に対して、それぞれ、反応する（つまり、神経細胞が興奮する）。たとえば、マイスナー小体は、接触による皮膚変形の速さを検出し、メルケル盤は、軽い圧刺激を検出し、振動覚に対応する。ルフィニ終末は皮膚がひっぱられることを検出し、バチニ小体は接触

のときに最初に反応すると考えられ、毛包受容器は毛根にあって毛幹の傾きの変化をとらえる（伊藤正男監修「脳と心」六七頁）。

ロ　運動の感覚、関節の位置覚も、体性感覚である。これらの感覚の受容器は、筋紡錘、腱器官、靱帯、関節嚢などである。

ハ　感覚を覚えるというのはこれらの受容器細胞が興奮し、この興奮が第一次知覚神経によって伝達され、脊髄を上行して、視床で中継され[1]、大脳皮質の頭頂葉の体性感覚野に達することである。体性感覚野は、大脳皮質頭頂葉最前部の中心後回にある。そこでは、手にふれた物体の形や材質の識別に関係するニューロンの興奮を捉えることも可能である[2]。

(1)　上行路系において、途中の中継核でニューロンが交代し、そのたびにエレメントの数が増える。また中継核では、入力同士あるいは大脳皮質からの下降性干渉による信号の修飾も行われる。

(2)　これを能動的感覚という。体性感覚野には、体の各部についての情報を扱うもののほかに、ふれる対象の特徴を取り出せるようなニューロンがある。硬いものにふれたときだけ反応するニューロンや、ザラザラしたものに反応するニューロン、角に反応するニューロンなどさまざまなニューロンがある。そして、それらのニューロンが受けた情報は体性感覚野ですでに統合され、能動的に獲得する感覚をもたらしている。高次の触覚認知はすべてこのような能動的な触覚であるといえよう。手でリンゴに接触した瞬間に、形、表面の滑かさ、硬さ、などの特徴も知覚するのであろう。

ニ　体性感覚情報は大脳皮質以外にも広く脳のいろいろな部位に投射する。たとえば、深部感覚は脊髄から直接に小脳に投射し、姿勢や運動の調節に役立つ。また、痛覚は脳幹から視床下部に、さらに脳幹網様体から視床をへて辺

緑皮質に到達する。これらの部位は意識や情動に深くかかわっていて、怒り、恐れなど情動行動の引き金となり、自律系の活動に大きな影響を及ぼす。

ホ　以上、前出「脳と心」六七頁、早石修・伊藤正男編「精神活動の流れを遡る」三八頁に依存した。

ヘ　筆者は以下に注目する。体性感覚は、ニューロンが刺激を電気信号に変換し、これが化学物質である神経伝達物質により伝達され（そのメカニズムは第二章）ることにより、生ずるものであり、伝達の途中で、修飾されること（そのメカニズムは第二章）があるということである。そして、いかなる電気信号が、またいかなる化学反応が、特定の認知対象物に対応するかがまだ明らかにされていないことである。

5　嗅ぐこと

イ　匂い分子は四〇万種類もあり、人間は三〇〇〇―一万種類の匂いを嗅ぎ分けられるという。ただ、それでも犬の一〇〇万分の一の能力しか備わっていないといわれる。

ロ　匂いの分子がまじった空気を鼻から吸い込むと、その空気の一部が鼻腔の上の部分にある嗅裂というところに流れていく。嗅裂の上三分の一ほどの場所は、粘膜に覆われている。その部分が匂いをとらえるところで、嗅上皮（嗅粘膜）と呼ぶ。嗅上皮には、匂いの分子を受け取る二〇〇〇万から五〇〇〇万の嗅細胞があって、粘膜の表面まで細い突起を伸ばしている。その突起から、さらに細い嗅線毛が粘液内に枝を伸ばしていて、線毛の先にある、匂い分子の受容体（蛋白である。種類は約一〇〇〇）が粘液に溶け込んだ匂い分子をとらえる。

ハ　匂い分子が受容蛋白に結合すると、G蛋白を介してアデニル酸シクラーゼを活性化し、嗅細胞のアデノシン環状リン酸の濃度を上昇させる。このアデノシン環状リン酸は細胞内二次メッセンジャーとして働き、嗅細胞表面膜上の陽イオンチャンネルを開いて電気信号を発生させる。この信号は、嗅細胞の軸索である嗅神経を介して（つまり、

嗅神経が、嗅上皮の上の篩骨の穴を通って嗅球に入り、神経組織のかたまりである嗅糸状体に連絡する）嗅球へ送られる。嗅細胞の軸索は集合して、嗅球の特定の糸球（球形の神経嚢。嗅糸球体）へと投射し、この糸球に樹状突起をのばしている嗅球ニューロンと選択的にシナプス連絡している。

糸球と接している僧帽細胞は一つの糸球へのみ主樹状突起をのばし、そこから入力情報を受ける。この僧帽細胞は、特定の受容蛋白によって認識されるような立体化学的構造を共有する匂い分子群に選択的にチューニング（調律）されている。僧帽細胞は、嗅神経から入力を受けるとともに、水平方向に長くのばした副樹状突起や、顆粒細胞との樹状突起間相互シナプスを介して、周囲の僧帽細胞とお互いに連絡をとりあっている。そして僧帽細胞は軸索を嗅皮質へと投射し[1]、嗅覚情報を嗅皮質ニューロンへと伝えている。この伝達により嗅覚が完成する。

（1）嗅糸球体は僧帽細胞に接していて、さらに高次の中枢へと情報が送られる。その経路は、外側嗅索という神経路を通って前梨状皮質と扁桃体に向かう。ここで中継された情報の一部は、視床の背内側核に届き、ほかは視床下部を経て前頭葉眼窩面皮質外側後部に達する。嗅覚情報と脳各部との分析機能などはまだ未知の部分が多い。

ニ　以上は伊藤正男監修「脳と心」六二、六三頁、早石・伊藤編「精神活動の流れを遡る」三四頁に依存した。

ホ　私が注目するのは以下のことである。匂いの情報は、刺激が化学物質によって電気信号に変えられ、これが化学物質によって伝達されて嗅覚に至ることである。ある特定の匂いが、どの特定の化学物質によってどんな特定の電気信号に変えられ、どんな化学物質によって伝達されて、最上位の領野で、どのような状態となるのかは明らかにされていない。

6　味わうこと

ヒトがリンゴを食する運動は、細かく切る、細片を口に入れる、噛む、飲み込むである。噛んで飲み込むさいに味わう。味も形もその他と同じくリンゴという言語とともに記憶される。味は初めてリンゴを食したときに認知されるが、その記憶は、リンゴを選ぶかどうかを決するさいに、決断のための情報として、決断を誘うものとして働くであろう。ここでは、初めて食したさいにおける認知の一局面として取り上げる。

イ　味覚は、甘味、鹹味、酸味、苦味、うま味を覚えるものである。ヒトには味刺激を受ける受容器があり、味蕾という。ヒトでは、舌上に約五〇〇〇個、舌以外に約二六〇〇個の味蕾がある。味蕾は、舌、口蓋、咽頭、喉頭に広く分布する。舌の上では乳頭にある。舌前半では茸状乳頭に、舌後部では葉状乳頭と有廓乳頭にある。口腔内では有廓乳頭で最も多い。味の刺激は味覚神経が受ける。舌前半は鼓索神経、硬口蓋は浅在性大錐体神経、舌後半と軟口蓋は舌咽神経、咽頭、喉頭は迷走神経で支配される。

ロ　味の情報は、味覚神経によって延髄の孤束核という神経核の集まりに伝えられ、そこから最終的に大脳新皮質(中心後回最下部と弁蓋)に伝達される。味蕾には五つに分類される細胞があり、このうち味細胞は明るいⅢ型である。味細胞の先端は味孔から微小絨毛を出していて、絨毛上の受容部位に味刺激が作用すると考えられている。

ハ　味刺激受容の結果、味細胞には受容器電位が発生する。甘味や苦味刺激に対してはアデノシン環状リン酸またはcGMPが関与し、Kチャンネルを抑制して受容器電位を生じるものがある。味細胞は、基底部で、味覚神経線維とシナプスを形成している。

ニ　末梢味覚神経は延髄孤束核最吻側部に終止する。この部位から第二次ニューロンが出て、第一次味覚野に伝えられる。第一次味覚野は外側溝吻側端近くで島との移行部にある顆粒性皮質である。この第一次味覚野から高次の第

二次味覚野に伝えられる。高次の味覚野として前頭弁蓋部のP_rCOおよび前頭眼窩野が挙げられている。第一次味覚野のニューロンは比較的少数の味刺激に応答する。高次味覚野のニューロンは第一次味覚野までのニューロンと異なり、感覚特異性満腹を示す。一次および高次味覚野では味覚ニューロンは口腔内に受容野をもつ触ニューロンと混在しているが、味覚情報処理上の意義は未だ不明である。

ホ　以上は、前掲「脳と心」五八、五頁、前掲「精神活動の流れを遡る」三六、三七頁に依存する。

へ　私は以下のことに注目する。味刺激は電位の変化として現われ、これが化学物質によって伝達され、味覚が完成されることである。どんな電位の変化が、どんな化学物質により、どんな伝達が行われ、それがある特定の味覚に対応するのか、ははっきりとされていない。

第三節　概念・言語・記憶

1　ヒトは体性感覚によりある対象物を認知する。[1] それは神経回路網の働きである。認知の瞬間に人は認知の対象物を概念でとらえる。そして概念を符号（言語）で表わす。そして認知したところを記憶に止める。

(1)　感覚を通してとりこまれた情報は、過去にたくわえられた情報と照合されて、それが何であるかという「認知」が生ずる（酒井邦嘉「心にいどむ認知脳科学」一九九七年一七頁）。

大部分の人は左大脳半球に言語野をもつ。言語は動物のなかで人間だけがもつもので、思考にとって非常に重要な要素だ。言語野のある左半球は言語的、分析的、論理的に働き、計算や字を書くことなどは主にこちら側が受けもつ。それに対し、反対側の右半球は、非言語的、綜合的、直観的に機能している。音楽や図形的なパターン識別はこちらが優れている。私たちの思考にも言語的・論理的な思考と、非言語的で直観的な思考があるが、左右の大脳半球の構造に違いがあるかどうかは、まだわかっていない（以上、伊

藤正男監修「脳と心」一一五―一一四頁。法にかかる思考は大脳の両半球における働きであろう――筆者)。

言語は、意思伝達の手段であり、思考を支える。自己の感情を表現する、遊ぶなどの手段である。しかし、言語が具体的にいつどのように成立したかを知ることは、現時点での知識からは不可能である(平凡社世界大百科一九八八年「げんご」)。ただ言語が成立するための条件としては、認識能力、概念化能力ならびに音をある観念に対応させることを可能にする能力と、音をかなりの種類発音し分ける能力の発達およびそれに対応する聴覚の発達が考えられる(同上)。

2　ヒトはリンゴを初めて認知したとき認知した対象物について概念を構成する。そしてこの構成物をたとえばリンゴという言語符号で表現する。

ヒトが概念を構成するのは細胞のどんな働きであるか。これに言語をつけることは細胞のどんな働きであるか。これを示す文献に私はまだ接していない。

(注)　現在神経回路網の性質としてすぐには説明できないことがたくさんある。例えば、言葉は大脳の言語野の回路にどのように埋めこまれているのか(伊藤正男「脳の不思議」一九九八年五四頁)。

3　ヒトはリンゴを認知したとき、それを記憶に止める。記憶は学習と不可分であるといわれる。リンゴを学習するとは細胞のどんな働きか。

イ　学習とは、同じ感覚刺激(入力)をくり返し受けとったり、同じ反応(出力)をくり返し行ったりするときにおきる、脳の変化の過程(プロセス)である(酒井邦嘉「心にいどむ認知脳科学」一九九七年三三頁。第二章3ニ)。今の神経科学では、脳の神経回路網がシナプス可塑性により組み直されて信号の通り方が変わることが学習である(伊

藤正男「脳の不思議」一九九八年五八頁)。ここでは、学習を「経験により生物の反応性が適応的に変化すること」、また、記憶を「学習による変化が保持され続けること」と定義したい(平野丈夫「脳と心の正体」二〇〇一年七二頁)。

ロ いったいどのように変化するのか。「信号の伝えやすさ」が変化するのが学習であるらしい。神経細胞と神経細胞をつなぐシナプスを信号が通る場合、その効率は固定している場合と活動により変わる場合がある(伊藤「脳の不思議」五八頁)。シナプスには、シナプスがある条件で活動するとその結果シナプスにおける信号伝達の効率が ── 長い時間にわたり ── 変化する性質がある。(伊藤「脳の不思議」四四頁)。いったん変わるとそれが長い間持続する場合がシナプス可塑性である(同上、五八頁)。シナプスの伝達効率が変わるしくみは、伊藤正男「脳の不思議」五九―七二頁。早石・伊藤編「精神活動の流れを遡る」一四六、一四七頁。要するにそれは化学反応である。

(注) 平野丈夫「脳と心の正体」二〇〇一年から。
人は外界からの情報(刺激)を目・耳といった感覚器で受容し、その情報に対して適した応答を行っている。そして、脳は外部情報の取得から応答までの仲立ちをしている(三一頁)。
ヒトには、感覚を受容するための細胞(受容器細胞)と応答をするための細胞(筋細胞などの効果器細胞)、この両者をつなぎ情報の伝達を担う神経細胞が分化して存在する(五頁)。眼という受容器官は同種の感覚受容器細胞の組織的集合であり、筋組織は筋細胞の集合であり、中枢神経系は多数の神経細胞の高密度の複雑な回路網である(五頁)。

4 記憶

イ 人が空腹を覚え、食欲を発生し、なにを食べるかを決めようとするとき、リンゴを想い出すことがあり、また店頭でリンゴを認知することがある。リンゴを想い出すのはリンゴの記憶をとり出すことである。また、店頭でのリ

ンゴの認知は、眼の前にある対象物を認知し認知したところが記憶されていたリンゴのイメージと一致したことによる。ここでもリンゴの記憶がとり出されたのである。

ロ　リンゴの記憶はとり出されることに意味がある。逆にいえば、想い出す必要が記憶をする原因となる。意識して想い出す必要がある記憶は、頭に在る(体にあるのではない。ただし、体で覚える記憶もある)。リンゴの記憶は認知されたところの記憶である。この記憶は持続する（ヒトの顔の認知の記憶は、持続する場合とすぐ忘れる場合とある)。想い出す必要の度が高いからであろうか。このような記憶は、どのようにして起こるのか、またそれが持続するというのは、あるいは忘れるというのはどういう状態か、また、想い出すというのはどういう作用なのか。

ハ　外界からの情報は、大脳新皮質のそれぞれの感覚野で分析された後海馬に入ってくる（伊藤監修「脳と心」八六頁)。約四〇〇〇万個の神経細胞から成る海馬は、中心に歯状回があり、それをとりまくように環状にCA_3、CA_2、CA_1という神経細胞群が並ぶ。大脳新皮質から流れてきた情報は、まず歯状回に入り、そこからCA_3、CA_2、CA_1と一周して、再び大脳新皮質へと送り返される（同上八六頁)。

海馬のCA_1領域の錐体細胞におけるグルタミン酸受容体には、AMPA受容体とNMDA（Nメチル Dアスパラギン酸）受容体の二種類が共存している。NMDA受容体はカルシウムイオンのチャンネルを伴っており、膜が脱分極(興奮)した状態ではカルシウムイオンを通す。高頻度の刺激を受けて、AMPA受容体が刺激され、樹状突起に十分な脱分極が起こると、NMDA受容体のふだんはマグネシウムイオンによって閉ぢられている記憶専用のNMDAレセプターが開かれて、カルシウムイオンがシナプス後部に流入する。このカルシウムイオンに駆動されて、カルモジュリン依存性蛋白キナーゼ、蛋白キナーゼCなどにリン酸化（カルシウム依存性蛋白質リン酸化酵素の働き）が起こる（同上、八七頁)。この状態がシナプス伝達の増強（回路の通りがよくなる）であり、長期増強（ＬＴＰ）と名づけられる（同

上八七頁)。その原因は、伝達物質の放出の増加とAMPA受容体の感度の増加との両者が組み合っていることであるとされている。そのためのシナプス後部から前部へ信号を伝えるメッセンジャーは、アラキドン酸や酸化窒素などであるといわれる(同上八七頁および伊藤「脳の不思議」六五、六六頁)。その詳細はまだわからない(「脳の不思議」六六頁)。

右の蛋白質リン酸化が海馬における記憶であり、このリン酸化がシナプス伝達の増強であり、それは興奮性シナプスにおける可塑性の長期間持続である(平野「脳と心の正体」七九頁)。これは情報が途絶えた後も数週間続くが数週間で消える(伊藤監修前掲八七頁)。これに比し、大脳新皮質に留められた記憶は長期間にわたって残る(伊藤監修前掲同上、八七頁)。どのように記憶情報を保持しているかはわかっていない(平野「脳と心の正体」七五頁)。

右の蛋白質リン酸化現象は記憶の痕跡であり、記憶はこれらを綜合したもののようである。

ニ　どうして、大脳新皮質では長期間の記憶情報の保存が可能なのか。大脳新皮質においては、シナプスの発芽によりシナプスの数や面積を増やしているらしい(伊藤監修前掲八九頁)。(感情を伴った特別な記憶が長期に保存されることのしくみについては、同上八九頁)。つまり、大脳皮質がどのように記憶情報を保持しているかはわかっていない(平野「脳と心の正体」七五頁)。シナプス可塑性が起こる過程はあるていどわかっている。しかし、神経伝達物質の放出の増大が長く続くのを説明することはまだなされていない。シナプス可塑性がさらに長時間続くためには遺伝子を巻き込んだ過程が起こらなければならないと推定されている(伊藤「脳の不思議」七〇頁)。

(注)　感作 ── アメフラシは無脊椎動物。鰓の近くにある水口を刺激すると鰓を収縮する防御反射をする。この防御反射が頭に強い刺激を加えると、大きくなる。これを感作という(シナプス可塑性の一つ)。頭部に加えた強い刺激により、介在神経細胞が活動電位を発

生し、一定の過程（平野「脳と心の正体」一一五、一一六頁。伊藤「脳の不思議」六二―六四頁に詳しい）を経て、感覚神経細胞から運動神経細胞へのシナプスにおいて伝達物質放出量が増加しシナプス伝達が増強される（平野前掲一一六頁）。これがシナプス伝達効率の変化（増強）である。シナプス伝達の増強の結果、反射自体も増強される（同上一一六頁）。感作による反射の増強は長く持続する（同上一一四頁）。シナプス伝達の増強が保持されて持続されこれが基になって反射の増強が持続する。伝達の保持が「記憶」なのであろう（同上一一六頁参照）。

海馬――シナプスの伝達効率が増加し、長く続くのが長期増強である。これもシナプス可塑性である。海馬のCA1領域の錐体細胞は、多数の入力線維をうけているが、ある数以上の入力繊維が高頻度刺激を受けると、シナプスの伝達効率が増加する（早石・伊藤編「精神活動の流れを遡る」一四七頁）。シナプスの高頻度刺激によりシナプス応答の時間的加重が起こる（平野「脳と心の正体」一一七頁）。そうすると、シナプス後細胞では大きな脱分極によりシナプス後膜のNMDA型グルタミン酸受容体チャンネルのマグネシウムイオンブロックがはずれ、チャンネルが開きカルシウムイオンが流入する。そしてそのカルシウムイオンがカルモデュリン依存性プロテインキナーゼなどを介して、シナプス伝達の増強をひき起こす（平野「脳と心の正体」二七、二八頁）。カルモデュリン依存性プロテインキナーゼがどのようにしてシナプス伝達増強をひき起こすか、二説がある（平野前掲一一八頁、二説の紹介も一一八頁）。

グルタミン酸受容体に、NMDA受容体とAMPA受容体が共存している（早石・伊藤編「精神活動の流れを遡る」一四七頁）。AMPA受容体が、高頻度の刺激を受けて、刺激され樹状突起に充分な脱分極が起こると、NMDA受容体に伴うチャンネルを通してシナプス後部にカルシウムが流入する（早石・伊藤編前掲同一四九頁）。これにより前述のようにシナプス伝達の増強をひき起こす。シナプスの高頻度刺激によりシナプス応答の時間的加重が起こるからシナプス伝達の増強が長く続き長期増強といわれるのであろう。

小脳――小脳皮質神経回路網における主要な情報の伝達経路は、「苔状線維」（入力）→顆粒神経細胞→プルキンエ神経細胞（出力）である（平野「脳と心の正体」七八頁）。小脳のプルキンエ細胞（その樹状突起に約一〇万個の棘がある――伊藤「脳の不思議」六六頁）は、一部の棘に多数の（八万個――伊藤監修「脳と心」八九頁）平行繊維からと、他の一部の棘に一本の登上繊維から興奮性のシナプスを受ける（早石・伊藤監修前掲一四六頁）。（プルキンエ神経細胞には、顆粒神経細胞のほかに下オリーヴ核という部位から出ている登上線維とよばれる軸索もシナプスを形成している――平野前掲七八頁）。

この両シナプスが入力を同期してくり返し受けるとどうなるか。登上繊維の伝達物質（それはまだ判然としない）は、プルキンエ細胞と登上繊維の間の数百から数千の接合点を通して働き、プルキンエ細胞に大きな興奮性のシナプス電位を起こす（早石・伊藤編前掲一四七頁）。このためプルキンエ細胞の樹状突起の膜にカルシウム依存性のスパイク電位が発生し、カルシウムの流入が起こる。

一方平行繊維の伝達物質はグルタミン酸であり、その受容体はAMPA選択性をもっている。カルシウムの流入とグルタミン酸のAMPA受容体への作用が同時に起こると、AMDA受容体の感度が低下する（くわしくは、伊藤「脳の不思議」六七、六八頁）。

この低下が長く続くのが長期抑圧（登上繊維からくる信号と平行繊維からくる信号が重なると、登家繊維からくる信号が通り、この信号と衝突する平行繊維の信号は通らなくなる ── 伊藤監修「脳と心」八九頁。顆粒神経細胞からプルキンエ神経細胞への情報伝達を弱くする ── 同上七九頁。平行繊維・プルキンエ細胞間のシナプス伝達が長期間にわたって減弱する現象である ── 平野前掲七九頁）である。持続的な変化はもっぱらシナプス後部に起こる。カルシウム流入に続いて起こる複雑なメッセンジャー過程はまだ十分には解明されていない（早石・伊藤前掲一四七頁）。

第四節　思考

1　空腹感を覚えた私は何か食べたいと意欲する。何を食べるかを決めるのには、思考と決断（意思決定）の作用がある。

2　言語による思考も言語によらない思考（平野「脳と心の正体」五七頁）も、その本質は、事物を指し示す概念間の関係を整理することではなかろうか（同上五七頁）。ヒトの元来の思考の目的は、外界からの情報と体内部からの情報を記憶された概念・情報と関係付けて現状の把握を行うことにより、最適な行動を選択するということであろう。ただし、日常において何が最適かの判断は困難なことが多い（同上、五八頁）。

現状を把握して最適の行動を選択するのは、現状を把握したときに問題の存在を意識し、その解答を探ることではないだろうか。

最適の行動を選択するとき、入力された情報のどの情報に重点を置くかによって判断は異なってくる（平野前掲六

二頁)。行動計画を立てるには、集めた情報を評価してその情報の取捨選択を行うことが不可欠である(同上六三頁)。取捨選択にあたっては、各情報の重要さを過去のデータと比較しながら評価しなければならない(同上六三頁)。評価は価値観による。それはヒトによって必ずしも同じではない(同上六三頁)。

ヒトは多くの情報を同時に受ける。全ての情報に同じウエイトを置くと情報処理が混乱する。そこである事物に注意を向けることにより情報処理の対象を制限する。そしてその事物に対する情報処理を優先的に行う。こういうことではなかろうか(平野同上六三―六七頁)。このような優先すべき情報処理の選択を行うことが「意識」の正体ではなかろうか(同上六六頁)。

ある事物に注意を向けるというが、そのようにさせるものはなんであろうか。

ある事物に注意を向ける、向けないの区別はどのようにして生ずるか。脳内での情報の交通整理ではシナプス抑制が重要な役割を果たすと考えられる(平野前掲六八頁)。二つの意味をもつ図形で一方の形を認知すると、他方の形の認知は抑えられてしまう(同上六八頁、六六頁)。相拮抗するものを抑えるような回路が脳内に存在すると推測される(同上六八頁)。神経系に、興奮性シナプスの入力回路に対して抑制性シナプスの入力回路が存在する(同上六八―七〇頁)。これにより拮抗的抑制が行われる。拮抗的抑制のような神経回路は脳内における情報処理の混乱を防ぐ働きをすると考えられる(同上六九頁)。〔抑制現象のからくりはわかったが、抑制に重点をおくかおかないかの判断のからくりはまだわからない〕。

3　伊藤正男「脳の不思議」によれば、思考と運動は類似する(伊藤前掲八八頁)。運動では手足を動かすのが、思考では観念や概念を動かすだけの違いである(伊藤前掲八八頁)。脳の神経回路網にいったん投影された後は同じレベルで扱ってよいと考えれば、現在運動の脳内メカニズムについて知られている原理を思考にも当てはめて類推するこ

とができることになる(伊藤前掲八八頁)。行動では、目的に向けて複雑な運動が組織されるが、思考においても目的に向けていろいろな要素的思考過程が組織される(伊藤前掲八九頁)。つまり、大脳辺縁系を中心に組み上げられてきた行動の脳内秩序の枠組みを思考についても当てはめることができる(伊藤前掲八九頁)。

4　イ　随意運動の指令信号は大脳運動野で作られて[1]手足の筋肉骨格系に送られる(脳幹脊髄と伝わり、脊髄の運動ニューロンを刺激して骨格筋の動きをもたらす(伊藤監修「脳と心」九八頁)が、その前段階のプログラムを作るのは運動前野である(伊藤前掲八九頁。伊藤監修「脳と心」八九頁)。ヒトの運動前野は運動野の六倍もある(伊藤前掲九〇頁)。運動前野の頭頂よりにはもう一つの運動関連領域である補足運動野がある(伊藤前掲九〇頁)。ヒトで補足運動野を刺激すると、運動を自分で起こす気持ちが誘発される。この領域の活動により随意運動が駆動されるものと思われる(伊藤前掲九〇頁)。いかにして自発的な運動の駆動指令が作られるのかはまだよくわかっていない(伊藤前掲九〇頁)。しかし、補足運動野は帯状回の前部とつながっているので、大脳辺縁系からの動機付けの信号をもとに補足運動野で随意運動の起動信号が作られると考えられる(伊藤前掲九〇頁。伊藤監修「脳と心」九八頁)。

(1)　運動野には動かす体の部位と対応して信号を出す場所が配列されていて、内側から外へ、足、体幹、手、頭の順に領域が並んでいる。体の各部位へ運動の具体的な要素や力の強弱などについての信号が運動野から出る(伊藤監修「脳と心」九八頁)。リンゴとナイフを手に取る、皮をむく、細かく切り分ける、口をあける、口の中にリンゴをいれる。リンゴを噛むなどは指令信号に基づくということであろう。信号の発生、信号の伝達のからくりはどういうものであろうか。よくわかっていないようである。

ロ　思考に関与するのは、運動前野よりさらに前の前頭前連合野で、ブロードマンの四六野とその周辺である(伊

藤前掲九〇―九二頁)。ここから出た思考の指令信号が頭頂側頭連合野に働きかける(同上九一頁)、言語思考では、通常左半球に頭頂葉から側頭葉にかけてのウエルニッケの後言語野があり、ここに言語的な観念や概念が表象されている。

頭頂側頭連合野には外界の事象の要素が集め直されてそのイメージが造られる(伊藤前掲九二頁。伊藤監修「脳と心」は、脳への入力情報を分析するという、一一五頁)。視覚的でない観念や概念も作り上げられる(伊藤前掲九二頁)。これらを総称して思考モデルと呼ぶ(伊藤前掲九二頁)。この思考モデルを操作するのが思考であると考える(同上九三頁)。創造性とは新しい思考モデルを作り出す能力であるということができそうである(伊藤前掲九三頁。創造性については伊藤監修「脳と心」一一二―一一三頁)。

伊藤正男監修「脳と心」によれば、前頭連合野は、分析された情報と記憶とに基づいて計画やプログラミングを行っていると思われる(一一五頁)。

5　イ　大脳と小脳は互に信号のやりとりをしている。大脳から脳幹にある橋核や下オリーブという核を通して、信号が伝えられると、小脳からは視床を中継して大脳に信号が戻ってくる(伊藤監修「脳と心」九九頁)。

大脳は小脳に運動の情報を送るが、小脳には体性感覚や、視覚、聴覚、平衡感覚の情報も入力されている。小脳は運動の情報と感覚の情報をまとめて、運動野などに伝える。

また、運動が行われたときは、どのように動いたかという、結果の情報が神経の末梢からフィードバックされて、小脳は力や範囲、速さなど誤差の修正やいろいろな筋肉の協調を保つために働いている(伊藤監修「脳と心」九九頁)。

ロ　小脳皮質は、縦に細長い多くの微小帯域に分かれている。一つの微小帯域は小脳核・前庭核細胞の小群と対になっている。この対を小脳チップと呼ぶ。(その構造図は伊藤前掲九五頁)。小脳チップにおいて、微小帯域は、これ

と対になった小脳核前庭核細胞の小群にプルキンエ細胞の抑制信号を送るが、他方で脳幹ないし脊髄の小脳前核から苔状線維入力を受け、この苔状線維は枝を出してこの微小帯域に対応する小脳核・前庭核細胞に興奮性のシナプスを供給する(伊藤前掲九四頁)。小脳チップは登上線位の誤差信号により小脳皮質内のシナプスに長期抑圧と呼ばれる可塑性変化を起こしてその入出力関係を変える性質を持っており、いろいろな系に挿入されて適応性を支えるよう働くと考えられる(伊藤前掲九四―五頁)。小脳チップは、反射弓や複合運動系に挿入されて、古典的な制御系を適応制御系に変える(伊藤前掲九五頁。そのシステムは同上九五―九九頁)。

ハ　思考に際しては、前頭前連合野の指令信号が頭頂側頭連合野内の思考モデル(4ロ)に働きかける。この思考モデルの動特性をシュミレートするモデルが小脳の中にできると、前頭前連合野はこの思考モデルの小脳モデルに働いて思考過程を進める(以上伊藤前掲九九頁)。ヒトが心の中にもつ事物のひな型は、まず大脳皮質のなかに形成されるが、思考を繰り返すうちにそのまたシュミレーションモデルが小脳の中に形成されると考えることができる(伊藤前掲九九頁)。このようにして、随意運動について考えられるダイナミックス、逆ダイナミックスの二つの制御系に対応するモデル思考制御系の考えを「脳の不思議」の筆者は一九九三年に提案した(同上一〇〇頁)。ただし、言語、概念、観念といった思考の制御対象が神系回路網においてどのように表現されているかはまだよくわからないし、そのモデルがどう実現するかもわからない(同上一〇〇頁)。

6　要するに、思考がどういう働きであるかはかなり明らかにされている。しかし、思考の基本要素である概念・観念・言語が、神経細胞のどんな働きであるかは明らかでなく、思考そのものが、いかなる電気信号がいかなる伝達物質により伝達されるものなのか、思考の結果到達したところが、いかなる化学物質の状態であるかも明らかにされていない。

第五節　意思決定

1　伊藤正男「脳の不思議」は、こころの成分として、認知、運動制御、情動、記憶・学習、睡眠・覚醒、認知的意識、思考、言語、注意、感情、意思、自意識を挙げている（一〇五頁）。そして、終りの三つ以外については、脳科学の手法が成功、ないし進歩しつつあるということができるといっている（同上）。しかし、感情、意思、自意識を問題にするようになると、状況は極めて困難になる、つまり、その機能局在はわからないし、それを客観的に計る方法がないといっている（同上）。

2　早石・伊藤編「精神活動の流れを遡る」は知・情・意の機能局在について以下のようにいう。「意」という日本語には、意思、注意、意図、意欲、決断の意味が籠められているが、これらはすべて能動的な脳の働きを意味している（早石・伊藤前掲七四頁）。脳のどの部位で働いているのか。「意」は外に向けて働きかける脳の作用で、前頭葉の働きである（早石七四頁）。大脳は中心溝を境に前頭葉と頭頂側頭葉に分かれ、後者には外からの信号が入力するのに対し、前者からは信号が外へ出力する（早石七四頁）。ちなみに、「知」は中心溝の後の働きであり、「情」は大脳辺縁系から視床下部に局在する（早石・伊藤前掲七四頁）。

3　「意」はどのようにして起るか（たとえば、やる気はどのようにして起こるか）。大脳皮質の多数の領野は互いに結合し合い、また大脳辺縁系や視床を介して連絡し合っている。前頭葉の先をたどると帯状回を通じて大脳辺縁系に、また直接視床下部と繋っている（早石・伊藤前掲同上七七頁）。これらの結合により自律系や情動系の信号が前頭葉に流入し、前頭葉はそこに集中する駆動信号を統合し、その統合効果の上に自ら「意」の司令信号を生成し、脳全体を制御する最高の司令塔なのである（早石・伊藤前掲同上七七頁）。〔統合のメカニズム、生成のメカニズムは明ら

かにされていない」。

伊藤正男監修「脳と心」によれば、脳の中にはA―10神経という特別な神経があり、ここが快い情動と結びついて快感という報酬をもたらし、価値判断を左右する。この神経は中枢の腹側被蓋野というところから出て、生きていく欲求をもたらす視床下部と、情を生み出す大脳辺縁系、知能が創出される前頭葉に通っている（伊藤前掲「脳と心」一〇六頁）。快を感じさせ、やる気を出させる神経だ（同上一〇六頁）。このA―10神経が達する部位のひとつに帯状回がある（同上一〇六頁）。帯状回は、すべての本能的な価値判断をまとめるところで、たとえば、扁桃体が行う、刺激に対する満足・不満足といった判断や、視床下部から生まれる生きる欲求などを受けて、補足運動野へ連絡し、随意運動をもたらす行動の意欲をつくり出す。これと同じことが思考にも働き、帯状回から出た「意欲」の信号が前頭葉の連合野に伝えられ、考える気を起こさせたり、積極的にものごとを考えるようになると推測されている（同上一〇六頁）。

4　イ　身体的な随意運動の指令は大脳新皮質から出され、脳幹、脊髄と伝わり、脊髄の運動ニューロンを刺激して体の動きとなる（早石・伊藤編「精神活動の流れを遡る」九八頁）。

ロ　大脳新皮質は、運動の開始のほか、停止やほかの動きへの変換などの指令を出すが、それらの意志がどこで生まれるのかは、まだよくわかっていない（早石・伊藤前掲同上九八頁）。

ハ　また、随意運動が適切に円滑に行われるためには、大脳だけでなく、小脳、大脳基底核、脳幹など、脳のいろいろの部分が関係している（早石・伊藤前掲同上九八頁）。

①大脳新皮質中の運動野は、運動の指令の出口で体の各部位へ運動の具体的な要素や力の強弱などについての信号を出す（早石・伊藤前掲同上九八頁）。

②運動前野は、外界の状況に応じた運動のプログラミングや組み立てを行う（早石・伊藤前掲同上九八頁）。

③補足運動野は運動野の活動水準を調節し、運動開始前に運動野準備段階を整える働きがあるといわれる（早石・伊藤前掲同上九八頁）。〔以上の働きのメカニズム（電気的・化学的過程）については明らかにされていない〕。

④大脳は小脳に運動の情報を送るが、小脳には体性感覚や、視覚、聴覚、平衡感覚の情報も入力されている。小脳は、運動の情報と感覚の情報をまとめて、運動野などに伝える（以上早石・伊藤前掲同上九九頁）。

また、運動が行われたときは、どのように動いたかという結果の情報が神経末梢から大脳にフィードバックされるが、小脳はそれをモニターして記憶し（早石・伊藤前掲同上一〇〇頁）、運動の力や範囲、速さなど誤差の修正やいろいろな筋肉の協調を保つために働く（早石・伊藤前掲同上九九頁）。

ちなみに、小脳が運動パターンを学習してその運動についての適切な動きを記憶すると、大脳からの指令なしに小脳からのコントロールで運動ができるようになる（体で覚える。早石・伊藤前掲一〇〇頁）。

⑤大脳基底核は、感覚と運動の情報をまとめ秩序立てて、つねに体を安定させるように運動の領野に働きかけている（早石・伊藤前掲一〇〇頁）。

⑥脊髄は、脳からの運動の指令を体の各部へ送るとともに、体の末梢から運動に関係のある感覚情報を伝える働きをし、また上位中枢とは関係なく反応する反射という運動を起こす（同上一〇一頁）。

ニ　以上のように、随意運動はこのように、運動野からの信号の一方通行だけでなく、いろいろな感覚の助けを受けながら、大脳と小脳をつなぐループや、大脳と大脳基底核を結ぶ回路、大脳から体の各部位へつながり、再び戻ってくるループなど、いくつものループが複雑に重なりあってできている（早石同上一〇一頁）。〔社会関係上のヒトの行動はヒトの随意運動のしくみの類推により説明できるか〕

運動については、運動の停止やほかの運動への変換がある。これも運動野からの指令による。しかし、それらの意志がどこで生まれるかは、まだよくわかっていない（伊藤監修「脳と心」九八頁）。

5　随意運動は、自らの自由意思に基づく運動である（平野五二頁）。脳・神経系は刺激に対応するための仲立ちをする組織であると考えるならば、自由意思による行動についても、それをひき起こす元になる刺激があるはずである（平野五二頁）。この刺激が脳・神経系への入力である（平野五二頁）。入力には外界からの刺激による感覚入力があり、体内部からの入力（空腹感、痛み、喜怒哀楽など）もある（平野五二、五三頁）。これらの入力と記憶された情報に基づき、ある行動をするか否かの決定がなされると考えられる（平野五二頁）。ある行動を開始することを決めるのは、神経細胞集団であるが、これへの興奮性入力の総合から抑制性入力を差し引いたものが十分に大きければある行動がひき起こされることになるのであろう（平野五二頁）[注]。

（注）　ある行動を決めるには、外部からの情報と内部からの情報と記憶された情報を総合して処理しなければならないであろう（平野前掲五三頁）。処理するとは、最適な行動を選択するために取捨選択してまとめあげることであろう。取捨選択のために記憶された情報をつきあわせることがあろう。記憶された情報は概念化されているから、外界からの情報と内部からの情報を概念と関係づけることによって、現状を把握することになろう（思考。平野前掲五八頁）。取捨選択は、重要な情報を取ることであろう。重要であるかないかの判断基準は、過去の経験により形成されるであろう。快をもたらす情報は重要であろう。痛をもたらす情報も、それをなくする行動を必要としたといういみで重要であろう（平野前掲六三頁）。つまるところ、なにを重要とするかは人により同じではない（平野前掲六三頁）。

外界からの刺激、内部からの刺激は情報である。刺激を受けるとは、情報の入力である。入力によりシナプスが発火する。スパイクには興奮性のものと抑制性のものとある。しかし、個々のシナプス入力は小さい。一つの興奮性シナプス入力一回の情報伝達によってはシナプス後神経細胞は活動電位を発生できず、その情報はそこで立ち消えてしまう。情報が先のシナプス後神経細胞へ伝わるた

めには、入力を受けた神経細胞が活動電位を発生することが必要である。そのためには、いくつかの興奮性シナプス入力が同時に入るか、立て続けに入ってシナプス応答加重が起こらなければならない（平野前掲五五頁より）。

そうすると、随意運動は自由意思に基づく決定によるということの実態は、脳神経細胞の情報処理であり、その情報処理を規定するものは、なにに注目しいかなる情報を重要と判断するかであり、それを規定するものは、つまるところ、遺伝子であり、過去の経験であり、過去の経験とは、刺激に対する細胞の生物的反応である、ということになりそうである。

第三章のまとめ

1　血中に遊離脂肪酸がある。これが増える（増える原因はなんであろうか）。そうすると視床下部にある摂食中枢にあるブドウ糖感受性ニューロンの活動を促進する。〔それは、遊離脂肪酸増の情報を伝達することであろう〕。この活動が摂食中枢から大脳辺縁系と大脳連合野に伝達される。ここに伝達されたことが空腹を意識したことになる。

2　大脳辺縁系は右の情報を受けて情動を生み出す。食欲が満たされたときの快感を求める情動である。この情動に基づき食べることを考える（思考。第四節）。そして、食べることができるものを物色するという行動に出る。物色するとは、外界の物をあれこれと認知し（第二節）、それが食に適するか否かを判別することである。食することができる対象物をあれこれと認知したときは、どの種のものを食するかを選択し、その種のものの中でどれを食するかを決定する。その過程では、記憶（第三節）も認知されたこととともに対象となって、思考（第四節）と決断（意思決定―第五節）が繰り返される。

3　ある特定物（たとえばリンゴ）を食するとの意思決定は、食するという骨格筋の動きとして現われる。

4　食すると決めた対象物を、自由に処分することができる状態にする（手に入れる）のに、社会関係上の行動が

必要なときは、対象物を食する筋肉の随意運動の類推ができるといわれる。この点を章を改めて分析する。

第四章　電気信号への変換とその伝達

ヒトが食するには、ヒトの細胞のレベルで、刺激が電気信号に変換されること、この信号が化学物質により伝達されることが行われている、とみることができるように思われる。外界の刺激や体内からの刺激が電気信号に変換されるからくりと信号が化学物質により伝達されるからくりを知りたいと思う。脳において法がどのような関係をもつかを知るきっかけになると推測するからである。

1　一般に細胞においては、それぞれの細胞の細胞膜の性質によって、その内部環境と外液との間にそれぞれの細胞に特有な大きさの電位差（静止電位）がある（世界大百科「しんけいけい」）。電位差があるとはどういうことか。

電位差とは、電場（帯電体の周囲で電気力の作用するところ ── 広辞林）または導体内の二点間の電位の差をいう（広辞林）。

電気を帯びた二つの導体をつなぐとき、電気がこれに流動することがあり、この現象が見られるときは、この二つの導体は、電位が異なるととらえられ、陽電気が一方から他方に流動するとき、一方の電位が他方の電位より高いといわれる（広辞林より）。

そうすると、二点間の電位の差は、高い低いの差である。その差はどういうふうにして測るのか。

電気が流れるとは、電気の量が移動することであろう。そこでいわれる。単位電荷（電荷の量の単位をクーロンとよぶ。一クーロンは、導線に一アンペアの強さの電流が流れるとき一秒間に通過する電気量である ── 広辞林）が電場から力を受けて点Pから点Qまで移動するとき、電場が単位電荷にする仕事をPQ間の電位差ということになる（大

百科「でんい」)。この仕事は、一クーロンの電気量が二点間を流れて一ジュールの仕事をしたとき、この二点間の電位差を一ボルトとする、という形で測られる(広辞林)。

2　細胞膜の内外に電位差があるということは、細胞膜の内部に静止電位があり外液中にも静止電位があり、一方が他方より高いという状態があるということであろう。そして、興奮していないニューロンでは、細胞内液のカリウムイオンK^+濃度は細胞外液のそれよりも高く、ナトリウムイオンNa^+濃度は細胞外液のほうが高い(同上「しんけいけい」)。これが電位差の例であろう。Aの電位がBの電位より高いときは、AからBに向って陽電気が動く(広辞林)。電位差があるということは、動いていないことであろう。細胞膜の内と外がつながれば電気が流れるのであろうか。細胞膜はイオンを通す性質がある(透過性)。右の「ようなイオン濃度のこう配を保つためには、ニューロンは代謝エネルギーを消費して多くのイオンを能動的に運搬しなければならない」(大百科「しんけいけい」)。

ニューロンが刺激を受けると、細胞膜の透過性を変化させ、いろいろなイオンに対する細胞膜の透過性を変化させると、右の静止電位が変化する(同上)。どんな刺激が、どんなイオンの透過性を変化させ、静止電位がどのように変化するのであろうか。

3　イオンの濃度差により細胞内は通常六〇―九〇mV程度低い負の静止電位を有している[1](世界大百科「かつどうでんい」)。静止電位はいろいろなイオンに対する細胞膜の透過性を変化させると変化する(同上「しんけいけい」)。ニューロンが刺激を受けるとニューロンのある小部分の静止電位が変化する[2](同上)。そうすると、ニューロンが刺激を受けることが細胞膜の透過性を変化させるのであろう。静止電位の変化は、大きさが小さくなることである。静止電位の大きさが一定の値より小さくなり、刺激の強さがある一定の強さ(閾値)以上あるときは、スパイク電位が発生する。これを活動電位という(同上「しんけいけい」)。スパイク電位は一定の大きさと時間的経過をもつ。つまり

一過性である。スパイク電位が発生する電位変化は数ms程度の時間内に回復する。[3] しかし、スパイク電位により膜内外の極性が逆転し細胞内が三〇―四〇mV程度正の電位となる（同上「かつどうでんい」[4]）。この電位変化に伴い高所電流が誘起され（そのからくりはどういうものか？）これにより刺激を受けて起った興奮が減衰することなく伝導される（同上「かつどうでんい」）。伝導速度は細胞により異なり一―一〇〇ms である（同上）。

以上を要約すると、刺激を受けると、細胞膜の透過性が変化し、この変化によりスパイク電位が生ずるという電位変化が起こり、電位変化に伴い高所電流が起こり、この電流が刺激による反応が伝導される現象であるということになる。

（1）この静止電位の発生のからくりはどうか。第二章1イ。平野丈夫「脳と心の正体」によれば、静止電位発生の一因は細胞内外でイオン組成が異っていることである（平野前掲九九頁）。細胞外液の主成分は塩化ナトリウムである。その他に塩化ナトリウムよりかなり少ない濃度のカリウムイオンが含まれている。一方、細胞内ではカリウムイオンが多く、ナトリウムイオン濃度は低い。細胞膜はカリウムイオンはよく通すが他のイオンはほとんど通さない（カリウムイオンを選択して透す性質がある選択的透過性）。こうして、細胞内電位は細胞外より負になっている（同上九九頁）。負になるというのはどういうことか。

一般に、膜の両側で、膜透過性イオンに濃度差がある場合、高濃度側から低濃度側へ濃度差を無くするような拡散が起こる。カリウムイオンは内側から外側に拡散する。カリウムイオンは細胞内に多く存在し、細胞膜は通常カリウムイオンに対する透過性が高いからである（同上九九頁。それは、静止膜電位で開くカリウムチャンネルが存在するからである。同上一〇三頁）。カリウムイオンが流出すると、正の電荷が細胞外に移動したことになり、細胞内には負の電位が生ずる。この負の電位は静電気力を生み出し、カリウムイオンの流出を抑え流入をひき起こす。高濃度側から低濃度側へのイオン流が生じついでこれとは逆方向の静電気力に基づくイオン流が生ずる。この両イオン流はやがて大きさが等しくなる。静止電位はほぼカリウムイオンに対する平衡電位となっている（同上九九頁）。

（2）第二章1ロ、ハ。イオンに対する選択的透過性が生ずるのは、細胞膜にイオンチャンネルがあり、それがそれぞれのイオンを選択

的に通すからであり、イオンチャンネルはタンパク質分子である（平野前掲一〇一頁）。

ナトリウムイオンは、細胞外で多く細胞内では低く細胞外の十分の一以下である（平野前掲一〇一頁）。このため、ナトリウムイオンについての平衡電位は、細胞内が細胞外より六〇ミリボルトくらい高くなっている。このナトリウムイオンの平衡電位に、膜電位が、神経が刺激されると、近づく（平野前掲一〇二頁）。そのからくりはどうか。

神経が刺激されると、ナトリウムイオンの膜透過性が一過性に上昇する（同上一〇一頁）。ナトリウムイオンが細胞外から細胞内に流入するであろう。すると細胞内の通常の負の静止電位が減少する（脱分極。正の方向に変化する）。つまり、ナトリウムチャンネル分子内のナトリウムイオンを通す孔付近の電荷移動が起こる。つまり、孔を塞いでいた部分（活性化ゲート）が開き、ナトリウムイオンが通過できるようになる。脱分極は、刺激が強いとき、ある大きさ（閾膜電位）に達する。閾膜電位は、ナトリウムチャンネルを通るナトリウムイオン流入が静止時のカリウムイオン流出を上回る電位に相当している。（同上一〇二頁）。そうすると、一部のナトリウムチャンネルが開きナトリウムイオンの細胞内への流入（流入数は一ミリ秒間に約二万個――一〇六頁）が起こる。この流入はさらなる脱分極をひき起こす。するとさらに多くのナトリウムチャンネルが開く。こうして膜電位はナトリウムイオンに対する平衡電位に向かって急激に変化する（一〇二頁）。これが活動電位（スパイク電位）の立ち上りである。

（3）第二章1ニ。活動電位は一ミリ秒程度しか持続しない（平野前掲一〇三頁）。ナトリウムチャンネルには不活性ゲートもある。神経細胞軸索が脱分極するとナトリウムチャンネルの活性化ゲートが開き、膜電位はナトリウムイオンについての平衡電位に近づくが、その後不活性化ゲートが閉ぢナトリウムイオンに対する膜の透過性が減少し、カリウムイオンについての平衡電位へと向う。他方、脱分極によるナトリウムイオンの透過性上昇に引き続き、カリウムイオンの透過性も上昇する（同上一〇三頁）。

（4）第二章1ホ。活動電位が発生すると、ナトリウムイオンの流入およびカリウムイオンの流出が起こる。そのため細胞内外のイオン濃度が変化する（平野前掲一〇四頁）。このイオン濃度の変化は細胞膜に存在するナトリウムカリウムポンプにより復元される。このポンプはタンパク質で、生体においてエネルギーを蓄える分子であるアデノシン三リン酸（ＡＴＰ）のエネルギーを使用して、ナトリウムイオンとカリウムイオンを濃度勾配に逆う方向に輸送する（同上一〇四頁）。

4　興奮はニューロンから他のニューロンに伝達される。この伝達は通常、あるニューロンの軸索終末から次のニューロンの樹状突起ないし細胞体へと行われる。（その間の幅は二〇―三〇nm。大百科「しんけいけい」）。この伝達

が行われる部位をシナプスという。シナプスには電気シナプスと化学シナプスがあり、哺乳類のシナプスは通常化学シナプスである（同上）。化学シナプスにおいては興奮の伝達は化学伝達物質を介して行われる。

軸索終末に化学伝達物質を含むシナプス小胞（直径三〇―六〇nm）が集合している（同上）。軸索終末にスパイク電位が到達すると、シナプス小胞に含まれている伝達物質（ノルアドレナリン、アセチルコリン、γアミノ酪酸（略してGABAなど）が分泌される[1]（同上）。伝達物質は、シナプス間隙を拡散して次のニューロンの細胞膜の伝達物質を認識する部位に作用する。すると細胞膜のイオン透過性が変化する。これにより次のニューロンのシナプスを成す部位の膜の静止電位が小さくなる（3参照。脱分極）。すると次のニューロンの興奮性が高められる（同上。そのからくりは？）。つまり、興奮が伝達される。大百科「しんけいでんたつぶっしつ」によればこうである。「シナプス間隙に放出された伝達物質はシナプス後膜に局在する受容体と結合し、シナプス後膜に終板電位を発生させ、続いて活動電位を生じ興奮を伝導することとなる」。化学的興奮の「この過程は、①受容体に伝達物質が結合する。②その結合の結果受容体タンパク質に構造変化を生ずる。③この変化が膜に内在するイオンの透過性に伝わり、イオンの透過性が変化する。④イオンの透過性の変化により電位変化を起こして生理的応答となると考えられ、細部についての生化学的解明が進められている[2]」（世界大百科「しんけいでんたつぶっしつ」）。

（1）神経伝達物質はニューロンの中で合成される（大百科「しんけいでんたつぶっしつ」）。この物質は通常神経前膜付近にある四〇〇―五〇〇入のシナプス顆粒の中に高濃度に蓄積されている（同上）。

（2）どういう刺激がどういう電位変化に対応しているか。その解明はいまだしのようである。平野「脳と心の正体」によればこうである。

神経伝達物質は、これを受けいれるもの（受容体）に受けいれられる。受容体は、イオンチャンネル型受容体と代謝共役型受容体

に大別される。前者は、神経伝達物質の受容によりイオンチャンネルが開き、興奮性のシナプス応答をひき起こすものである。後者は細胞内にある分子の化学反応をひき起こして細胞内の濃度を変化させるものである。

たとえば代謝共役型受容体にはGタンパク質と共役してアデニル酸シクラーゼという酵素を活性化するものがある。アデニル酸シクラーゼはcAMPを合成する。cAMPは小型の分子で、各種の酵素と結合してその活性を変化させる作用をもつ。一般に、受容体の活性化などにより細胞内の濃度が変化する。細胞内酵素などの活性調節をするような分子をセカンドメッセンジャーとよぶ。cAMPやカルシウムイオンなどは、セカンドメッセンジャーとして働く。代謝共役型受容体は、いくつかの細胞内分子群を介して作用するために、イオンチャンネル内在型受容体よりゆっくりした時間経過の反応をひき起こす。代謝共益型受容体は、各種のイオンチャンネルの働きやシナプス伝達効率の制御を行い、神経細胞や神経回路の活動レベルの調節などを行っていると考えられている(以上平野前掲一一〇―一一一頁)。

代謝共役型受容体の化学的組成はどういうものか。まだ私は知らない。イオンチャンネル内在型受容体は、伝達物質と結合してチャンネルを開くものである(平野前掲一〇七頁)。例としてアセチルコリン受容体がある。これは、神経・筋細胞間のシナプスで働く。これはα、β、γ、δのタンパク質がそれぞれ二・一・一・一個結びついたものである。この四種のタンパク質で囲まれた中央がチャンネルとなっている。この四つはそれぞれが細胞膜を貫通する部位をもっている(同上一〇八頁)。アセチルコリンはαと結合する。二つのαにアセチルコリンがそれぞれ一個ずつ結合する。するとアセチルコリン受容体はチャンネルを開くようになる(同上一〇八頁)。もう一つの例としてグルタミン酸受容体がある(同上一〇八頁)。グルタミン酸と受容してチャンネルを開く。AMPA型とNMDA型とがある(同上一〇八頁)。

5　細胞内分子群の化学反応をひき起こすことによって、情報が伝達される例として、光受容細胞が光情報を電気信号に変換する過程の分子機構をみよう(平野前掲一一一頁)。第二章3ロ注2。

光受容細胞は、光刺激を受容し電気信号へと変換する細胞である。錐体と杆体という二種類がある。錐体は明るいところで働き、色を識別できるが感度は低い。一方杆体は感度がよく暗いところでも働くが、色を識別できない(同

上一一一頁)。光が杆体に到達すると、ディスク膜に存在するロドプシンというタンパク質に光の一部が吸収される。ロドプシンは光を受けるとその構造を変化させ、ディスク膜に存在するトランスデューシンとよばれるGタンパク質を活性化する。トランスデューシンはディスク膜に存在するホスホジェステラーゼという酵素を活性化し、ホスホジェステラーゼは細胞内の細胞質内に存在するcGMPを分解する。cGMPはcAMPと似た小型分子で、セカンドメッセンジャーの一つである。他方、細胞膜上にはcGMPにより開くイオンチャンネルが存在する。このチャンネルは、ナトリウムイオンとカリウムイオンを通すが、静止電位ではおもにナトリウムイオンを流入させている。ホスホジェステラーゼが活性化すると、cGMP濃度が下がる。するとcGMPにより開くチャンネルが閉じてナトリウムイオンの流入が減少して細胞膜電位は過分極する。光刺激によって細胞膜電位が過分極するのが、光・電気信号変換である。杆体でも錐体でも同様である。

一つのロドプシン分子はいくつものトランスデューシンを活性化し、一つのトランスデューシンはいくつものホスホジェステラーゼを活性化する。さらに一つのホスホジェステラーゼはいくつものcGMPを分解する。この増幅作用により、ロドプシン一分子の活性化は百万個のものcGMP分解をひき起こすといわれている。この信号増幅により、光受容細胞には一つの光子さえ検出する能力をもつものがある(平野前掲一一二―一一三頁)。

以上において、第二章の叙述の繰り返しが多い。

終りに

本稿に報告する勉強により以下のことを知った。人の食への誘因に空腹感がある。空腹感はある化学物質がブドウ糖感受性ニューロンに作用して起こるものである(第三章第一節)。それはひとつの化学反応である。人は、空腹感を

覚えると、食の対象物を物色する。物を探すことは、空腹感に適応することを目標とする、脳からの指令に基づくものであろう。

人が食の対象物を物色して、あるリンゴという名をもつ対象物を認知したとする。認知は神経細胞の働きである。それは体性感覚、記憶（言語、学習、思考と相互作用する――第三章第三節、四節）などによる（第三章第二節）。体性感覚は、ニューロンが刺激を電気信号に変換し、これが化学物質である神経伝達物質により伝達され（第二章）ることにより生じ、かつ修飾される（第二章）。

本稿において試みた勉強は、次のような課題を自覚させた。①人が外界の物を食する過程における細胞の働きについて知りえたことを、人が外界の社会現象、社会関係、社会的出来事を認識し、これについて思考をめぐらして、判断をし、この判断に基づいて外界の現象に適応する反応をする過程にあてはめることができるか。②細胞の働きは、つまるところ、外界からの刺激を電気信号に変換し、これを最終的に脳のある部分に伝え、その過程において、電気信号が化学物質と反応し化学反応が起こり、これが情報として処理されて脳の最終部位に至るもののようであるが、これらの電気信号や化学反応は自然科学の手段によって測定することができるものか。前者の課題についての勉強を次稿において報告することにしよう。