

## 自己意識の創発と脳・神経細胞・シナプスの神経回路網構造

齋藤基一郎<sup>[1]</sup> 植草学園大学保健医療学部

### The Emergence of Human Self-Consciousness in Cerebral Cortex based on Neuronal Networks of Excitatory and Inhibitory Synapses

Kiichiro SAITO Faculty of Health Sciences, Uekusa Gakuen University

ヒトの脳と自己意識の創発に関して、神経回路網構造、特に神経細胞の数と抑制性・興奮性シナプスの超微形態や形態計測学的自験例のデータをもとに分析した。

Descartes R.は、脳という実体とヒトの意識の存在を2つの異なる実在として、分けて取り扱い、400年前に二元論を提唱したが、現代の自然科学では一般的には、自己意識は脳の活動の中から生まれると考えられている。最近、Eccles は二元論相互作用説の中で脳の超微細構造と自己意識の相互作用について、量子力学のレベルまで掘り下げ、独自の仮説を提起している。そこで、本論ではEcclesの仮説をベースとして、神経回路網上でのシナプス微細構造の数量的解析を背景としたデータをもとに、脳と言う物質と精神の相互関係について考察する。

キーワード：自己意識の創発、大脳皮質、神経回路網、興奮・抑制性シナプス、超極微細小胞粒子の量子的放出

Regarding the emergence of self-consciousness in humans, data based the writer's own morphological experiments on the make up of neuronal networks, especially the number of nerve cells and the measurement of the extremely small configurations of excitatory and inhibitory synapses, was analyzed.

Descartes analyzed and dealt with the differing realities between the entity called the brain, and human consciousness and suggested a dualism 400 years ago, however in modern science, self-consciousness is generally thought to born from activity in the brain. Recently, within the dualistic theory of mutual co-action, Eccles has posed a unique hypothesis at the level of quantum mechanics regarding the mutual effects between micro structure of the brain and self-consciousness mutual co-action theory.

With this hypothesis of Eccles as a base, and drawing from our data in the context analyzing of number of synapses neural network ultra-microstructures, I consider the reciprocal relationship between the physical and the psychological.

Keywords : Emergence of self-consciousness, Human cerebral cortex, Neuronal network circuits, Excitatory and inhibitory synapses, Releasing of synaptic vesicles by quantum theory

---

[1] 著者連絡先：齋藤基一郎

## 1. はじめに

神経系は目、耳、鼻、舌などの感覚諸器官と皮膚や筋肉などの受容器で受け入れた外界の刺激、及び身体の内部で起こった内界の刺激を脳に神経伝導路で導き、これと反応する適切な興奮を大脳に惹き起させ統合し、その興奮命令を身体各部の筋と腺などの効果器に伝える装置である。すなわち、神経系とは体内諸器官の連絡と調和をはかり、これらを有機的に統合し、外界の状態に適応した生命・生活反応を営む系である。加えて、神経系はこの様な反射や反応系の働きのみならず、ヒトの大脳皮質では自我（自己意識）の創発とクオリア（質感）などの高次な精神活動が営まれている。

実存の意味とは外界に対する自己意識であり、自己意識は何処から生じてくるのかを脳の超微細構造との関係で考察してみる。

## 2. 神経系の伝導路

神経系伝導路の機能は、末梢諸器官の感覚受容器からくる刺激を中枢に導き、統合、判断し、その興奮を中枢から末梢の筋・腺などの効果器に伝えることにある。末梢部の受容器により感受される各種の体外・内環境からの感覚刺激は求心性伝導路で上行し、大脳へ最終的には伝えられ、知覚を引き起こす。その結果が、ヒトの最高中枢であるごく薄い高次の大脳皮質層内で統合され、大脳皮質に生じた総合的な刺激結果は運動性神経である遠心性伝導路で下行し、最終共通路として下位の運動神経細胞に終わり、頭部では脳神経を、体幹と手足では脊髄神経を介して、筋肉や腺などの効果器に伝えられる。遠心性伝導路には骨格筋に随意運動を伝える錐体路と錐体外路に大別される。求心性伝導路には、深部感覚に参与する内側毛帯系、脊髄小脳路、浅部感覚に参与する脊髄視床路、視覚伝導路、聴覚伝導路、嗅覚伝導路、味覚伝導路等がある。

これらの上行性伝導路の他に、脳幹にある上行性網様体賦活系伝導路は新皮質を含む大脳の広い領域に分布し、大脳の賦活化や睡眠と覚醒に参与している。

まず、感覚器から刺激が、求心性伝導路の知覚神経を経由して、中枢神経系の大脳に集中的に向かう。これらの興奮性インパルスは電氣的に後索の上行性

軸索線維束内を伝導し、さまざまなシナプスの中継接続核を経由して、最終的には大脳皮質（厚さ $0.28 \pm 0.04\text{cm}$ ）のごく薄い神経細胞層（6層）内で、特徴的な電氣的パターンが空間・時間的なパターンに変換される。これらの神経回路網内を伝導してきた電気信号は、記号化されたパターンであり、大脳皮質や灰白質の内部で引き起こされる神経細胞同士のシナプスを介する化学的伝達機序の空間的・時間的パターンとは異なっている。

我々はこの大脳皮質内のパターンの結果を知覚し、認識し、経験する。これが自己意識の創発と意識的経験の統一である。それは身体の表面か、内部か、あるいは、視覚、聴覚、嗅覚、味覚のような外部世界の諸感覚入力との統合された結果のこともある。つまり、我々が外部世界に存在する実在物として信じ、認識しているものは、結局のところ、それらは脳内現象（脳の中の劇場）であり、実存とは大脳皮質内に生じた神経細胞とシナプスの活動による空間的・時間的な動的パターンにほかならないと一般的には考えられている。

ヒトの脳（脳重 $1350\text{g}$ ）の中に、どのようにして、このような自己意識なるものが生じるのであろうか。ヒトの脳における神経細胞・シナプスの動的神経回路網構造の中から、ヒトの自己意識の創発と、ヒトの持つ、言語機能などの多様な諸能力を説明することが可能なのであろうか。

## 3. 自己意識と脳幹網様体賦活系

脳を構成している神経組織は灰白質（神経細胞、シナプス）と白質（神経線維）とに2大別できるが、網様体とは、中枢神経系内で神経線維が縦横かつ複雑に交叉し、その中に神経細胞体が散在し、灰白質と白質が混じりあっている脳内の場所を言う。

脊髄では、前角基底部の背外側の領域で灰白質と白質が入り乱れている脊髄網様体があるが、延髄を上行するにつれて、この網様体は次第に発達し、中脳に至るまで続き、脳幹網様体を形成する。脳幹網様体はその存在する部位によって延髄網様体、橋網様体、中脳網様体と呼び、網様体内部に散在するニューロン群を網様体核と名付けている。これら脳幹に広く分布する網様体核からは上行する投射線維が大脳皮質の働きに対して、常時的に賦活（網様体賦

活系：Magoun) し、抑制（網様体抑制系：Moruzzi) したりしている<sup>1)</sup>。

高等哺乳動物では、自己意識の創発に必要な覚醒状態を維持する働きがこの脳幹の網様体賦活系と中心灰白質の周辺部にある。

大脳皮質と皮質下位中枢との結合が遮断されると、深い意識の消失が生じる（失外套症候群：apallische Syndrom)。このような事実から、大脳皮質のいろいろな領域が意識に関与しているが、自己意識そのものを支える不可欠な基盤は大脳皮質に有るのではなく、下部組織である脳幹網様体系にあり、その内でも、上行性網様体賦活系が大脳皮質へ広範囲に興奮性の投射線維を送っている。

一方、中脳を介する視床非特殊皮質投射系も、大脳皮質での覚醒状態と自己意識の発現に重要な役割を果たしている。

脳幹網様体賦活系が損傷を受けると、意識を失って眠り込む昏睡に陥る。覚醒の障害はその深さによって傾眠、昏蒙、昏迷、昏睡とに分類される。

脳幹網様体賦活系は生物進化や系統発生学の観点から見ると、明らかに原始的領域に属し、この系は爬虫類以下まで遡ると脳の働きの中心的な役割を果たしている。

これとは別に、脳幹に存在するセロトニン(5HT)含有ニューロンは、モノアミン(MA)含有ニューロンと共に、大脳、間脳、脊髄への極めて広い範囲に投射線維を送っている。鬱病時の患者は大脳のセロトニン含有量が減少している。この患者に脳内セロトニン濃度を上昇させる薬を投与すると鬱病が解消することなどからして、この系も精神状態や自己意識に対して、脳幹網様体賦活系と共に大きな影響力を持っている。

#### 4. ヒトの高次・最高中枢としての大脳皮質内の神経回路網構造（ニューロンとシナプス数）

ヒトの大脳新皮質が唯一の自己意識を生み出す「心の座」であり、脳と心の事象がお互いに作用し合っている場なので、大脳皮質にはヒトの自己意識を生み出す構造があるはずである。しかしながら、現在までの研究成果をもってしても、「心の座」があるとされているヒト大脳皮質内に特別な構造物が発見されたという報告はない。我々の電子顕微鏡に

よる各種脊椎動物の観察結果でも、大脳皮質と脊髄灰白質のニューロンとシナプス構造、およびその内容物である細胞内小器官（図1）の超微構造は質的に見れば定性的にはすべて同じであり、極めて類似した形態を示していた<sup>27~50, 56~63)</sup>。

数量的に見れば、大脳皮質のニューロンとシナプス数は脊髄のものとは比較にならぬ程、高密度に存在し、それらのサイズも微小である。また、抑制性シナプス数も興奮性シナプスよりはるかに多く、系統発生的にも増加するようであり、より緻密な神経回路が進化の過程で大脳皮質には組み込まれてくることが解っている<sup>39,63)</sup>。

一方、神経生理学的研究によっても、脊椎動物と無脊椎動物の多様なシナプスにおいても、そのシナプスの電気的活動の本質的な様相には驚くべき画一性があり、これはEccles (1964) によって認められている<sup>2)</sup>。

すでに19世紀の後半、脳解剖学者や精神医学者によって、脳が多数の極めて微小な神経細胞（ニューロン）の集団から出来ていることは判明していたが、そこではニューロンの数（細胞体数）が知能の優劣を握る鍵として研究されてきた（写真4a, b, c)。しかし、現在でもヒト大脳皮質内にどの位の神経細胞があるかとか、そこに結合する正確なシナプス数は解っていない<sup>62, 63)</sup>。ヒトの大脳皮質の細胞数を詳しく調べたvon EconomoとKoskinas (1925) の計算では、左右の両半球を合わせるとおよそ140億個前後であろう<sup>34)</sup>としているが、Sholl (1956) の100億個からThompson (1899) の184億個まで、その値<sup>56)</sup>にはかなりのバラツキがある。この細胞数の大きな開きはヒトの大脳皮質が皺により複雑に入り込む立体構造（写真1,2,3）から出来ており、しかも脳の部位によっても細胞密度が異なり、神経細胞以外の神経膠細胞との区別が付きにくいことなどの理由による。そこで、ヒトの大脳皮質の構造を見てみよう。ヒトの大脳皮質の全表面積の95%を占めるのが新皮質(Neocortex)で、残りの僅か5%が嗅脳と関係を持つ異種皮質(Allocortex)である。新皮質の薄い表層内には、これと平行するさらに薄い6層(I~VI)のはっきりした神経細胞層（写真4a, b）が区別出来るが、異種皮質には6層の形成はない。知能に最も関係が深いとされている大脳新皮質の広さと

厚さ、その中に含まれている、肉眼的には感知できない極めて微小で微細な神経細胞（直径5~60 $\mu\text{m}$ ）の数は、進化と共に系統発生的に次第にその数量とシナプス（直径1.5~2.0 $\mu\text{m}$ ）の数を増加してきたと考えられる<sup>27-28,31-33,35,38-41, 48, 56,62,63</sup>。

ヒトの脳には沢山の皺があり非常に複雑である。全体として観ると個人差がはなはだしく、まったく同じ形をした脳皮質はなく、これは同一人物の左右半球間についても言える（写真3）。脳はこの皺のお陰で、外部に見える表面積を著しく減らし、皮質全体の僅か1/3が表面に見えるだけで、残りの2/3は脳溝の深部に隠れて見えず、狭い頭蓋腔内（1,480 $\text{cm}^3$ ）に納まっている<sup>62, 63</sup>。いずれにせよ、脳皮質の複雑な表面積、容積、重量、細胞数を正確に計測する方法がこれまでなかった（写真1, 3, 4a）。

ヒトの脳皮質に関する我々のMRI画像（写真2a,b）による立体計測値<sup>7-9</sup>では、もし脳溝の皺を伸ばし、脳皮質を薄いシート状にした場合として考えると、脳の表面積は新聞紙見開きの一頁分の広さに相当する2,304.3 $\text{cm}^2$ （右脳:1,136.7 $\text{cm}^2$ 、左脳:1,167.6 $\text{cm}^2$ ）を占める値なので、その厚みの平均値0.28 $\pm$ 0.04 $\text{cm}$ の総容積量は645.2 $\text{cm}^3$ （右脳:318.3 $\text{cm}^3$ 、左脳:326.9 $\text{cm}^3$ ）となる。そこで、1 $\text{cm}^3$ 毎の神経細胞数（写真4a）を25 $\times 10^6$ 個（von Economoらのデータ）として計算すると、全皮質内の神経細胞の総数は161億3000万個（右脳:79億5750万個、左脳:81億7250万個）となる。ヒト脳皮質内のニューロン数は140~160億個（錐体神経細胞と多形大型細胞は0.8 $\times 10^{10}$ 個）あり、円形の小型顆粒細胞（直径5 $\mu\text{m}$ ）は0.6 $\times 10^{10}$ 個で、全細胞の容量は20.4 $\text{cm}^3$ 、その重量は21.5 $\text{gm}$ とvon Economoらは計算している<sup>34</sup>。これに加えて、神経回路網の構成で大切なシナプス小頭（写真4d, e, 図2）は光学顕微鏡の分解能（脚注1）を遥かに超えるほど超極微細な構造物（サイズ、 $d = 1.28\mu\text{m}$ ）で、その数はまさに、10兆個以上もあり、3種類の神経膠細胞が脳組織内の神経回路網を支え、お互いが狭い空間・間隙130~200Å（20 $\text{nm}$ ）を隔て、超高密度に詰まり、極微細な神経回路網構造（機能円柱）を極めて薄い脳皮質内（0.28 $\text{cm}$ ）に造っている（写真4c, 5A）。

比較解剖学的には、脳皮質の構造は進化に伴っ

て、皮質内に含まれる神経細胞の密度は減少し、ニューロピル（脚注3）の容積率が拡大し、増加する傾向にある。

光学顕微鏡のみによる古典的観察時代には、このニューロピルは中空な灰白質のなにも無い部分として無視され、見過ごされてきた。近年では、脳皮質を含む灰白質の大部分を占めるニューロピルはまさしく突起のジャングルであり、多数の神経終末と分岐を繰り返す樹状突起との間で一大網状構造を形成するシナプス結合の場であることが初めて電子顕微鏡の観察結果から明らかにされた<sup>54</sup>。

##### 5. ニューロン間のシナプス連結の仕組み、「ニューロン説」か「網状説」か？

脳皮質内を占める140~160億個を超す膨大な数のニューロンは、そこから起こる神経突起によってお互いに連絡している（写真4c）。その連絡の仕組みは神経突起の接触によるとするCajalの「ニューロン説」と、連続しているとするGolgiの「網状説」との間で、古くから激しい論争があった<sup>10</sup>。

電子顕微鏡の出現とその研究成果から130~200Åのシナプス間隙（溝）が発見され（写真8）、電気生理学的にも化学的伝達場でシナプス遅延（0.5 $\text{msec}$ ）が証明され、現在では「ニューロン説」が確立された。これによれば、神経細胞は、形や働きの上で一つの神経単位と見なされ、樹状突起と神経細胞体で神経情報を受け取り、軸索突起、ついで、その遠位末端である神経終末を介して、次の神経細胞にその情報を化学的に伝達している。この接触部位がシナプスsynapseと呼ばれるところである。

Sherrington（1897）によって、「神経細胞間の連絡が機能的かつ形態的に果たされている部位」として、初めてシナプスと命名された<sup>11</sup>。一般的にはニューロン同士の接触（結合）部位で、インパルスの伝達を行う場所とされているが、必ずしもニューロン間同士ではなく、ニューロンと他の組織（筋の運動終板や支配臓器細胞）などにも名付けられている。

神経生理学者、Eccles（1964）は「一方向の興奮または抑制作用が伝達される機能的に分化した部位」としている<sup>2</sup>。

シナプス研究の歴史を振り返ってみれば、ニューロンの接触部位であるシナプス小頭（直径1.5~

2.0  $\mu\text{m}$ ) が形態学的に発見されたのは古く、19世紀後半に鍍銀学派のCajal (1897) らが光学顕微鏡ですでにこれを観察している<sup>12)</sup>。その後、Held (1897) は軸索末端部の膨らみをみてEndfüsse, Endkolbenと名付け<sup>13)</sup>、Auerbach (1898) がフランス語でboutons terminaux<sup>14)</sup>と言ってから神経終末という言葉が一般的に用いられるようになった。これらの神経終末の可視化はいずれも鍍銀染色によったものであるが、他の染色法によっても、神経終末が付着するシナプス後部位(細胞体、樹状突起、軸索突起、軸索小丘、軸索初節部、神経終末部)とか、その形と大きさについてのおよその知見が得られたものの、光学顕微鏡の分解能の限界( $d = 0.61 \lambda / n \sin \theta$ )と硝酸銀染色の不安定さからシナプス小頭部の詳細な研究はなされなかった。つまり、当時の光学顕微鏡の解像力では、シナプス小頭部の微細構造を神経生理学的機構の説明に必要なレベルまで掘り下げて明らかにすることが出来なかった。その後、油浸技術などの改善で、ますますシナプス小頭部はシナプス後膜に密着しているように見え、ついにはシナプス前膜と後膜は融合しているとBodian (1952) によって考えられてしまった<sup>15)</sup>。これはその当時では網状説が主流を占め、微細な神経原線維によってニューロン間は連続していると強く信じられていたことによる偏見であった。

しかし、その後、電子顕微鏡が出現し、これが脳組織の研究に用いられるようになって、初めて脳内のシナプスの構造に関する詳細かつ正確な知見が得られるようになった。その驚異的な分解能と拡大率によって、初めてシナプス間隙synaptic cleftとシナプス小胞synaptic vesicleの存在が明らかにされた<sup>16,17)</sup>。これによると、シナプス前膜とシナプス後膜は二枚の離れた厚さ70Åの膜であり、両者はシナプス溝(幅約130~200Å)という間隙によって隔てられており、シナプス前膜側であるシナプス小頭部の神経終末内には、神経伝達物質を含むシナプス小胞(500Å)が平均して100個から300個位含まれている(写真8, 9A, 10, 図2)。このシナプス間隙(溝)の発見(1954)は「網状説」と「ニューロン説」の長い歴史的論争<sup>10)</sup>に決着をつけたばかりでなく、これまで手がつけられなかった神経突起で絡み合う超複雑なニューロピル(神経組織細線維網:脚注3)内に

「ニューロン」と言う形態学的にも、機能学的にも独立した神経細胞の構成単位を発見したことでその後の分析を容易にさせた。このニューロン説は、神経系が神経細胞(ニューロン)によって組み立てられており、その各々のニューロンがシナプスによって機能的に神経回路網上でつながっているという形態学的事実によって支えられている。同時に、このニューロン説では、Eccles (1964) らの微小電極法によるニューロンの抑制性・興奮性シナプスの伝達機序の解明<sup>2)</sup>と相俟って、脳は膨大な数の興奮性と抑制性の機能を異にするニューロン(神経素子)集団から組み上げられたシナプスを介するシステム回路網構造からなるとする考えを生じさせた。

## 6. 興奮性シナプス (EPSP) と抑制性シナプス (IPSP) の発見

Ecclesは、今では通常となっているが、シナプス伝達は電気的か、化学的かと言う論争に対し、哺乳動物の中樞神経系のシナプスは化学的伝達であることを証明し、決着をつけた。その後、微小電極による細胞内記録法を脊髄運動ニューロンに応用して一連の精力的研究を行い、偉大なる反射生理学の父、Sherringtonの言う中樞興奮状態を細胞レベルの研究から興奮性シナプス後電位(EPSP)として、また中樞抑制状態を抑制性シナプス後電位(IPSP)として実証した。この功績により1963年にノーベル医学生理学賞を受賞した<sup>2, 51~53, 55)</sup>。神経科学の歴史の中でノーベル賞を師弟が揃って受賞した例は極めて珍しく、その数々の偉業は不朽不滅であり、Cajalの「ニューロン説」と相俟って、近代的な神経機構解明のため、神経細胞レベルでの基礎を築いた<sup>55)</sup>。

これまでの「ニューロン説」では、Lorento De N6, R. (1935) もそう考えていたが<sup>19)</sup>、ニューロン間のシナプスを介する刺激伝達は興奮性か又は零であると説明されていた(写真4c)。しかし、Ecclesはここに抑制性シナプスの存在を細胞レベルで動かぬ証拠をもって示した。現在、この抑制機構の考え方の導入無しでは全神経系の機能を説明できない程の大発見であった。

## 7. シナプスの神経伝達機序

シナプスを機能的に見れば、神経線維上を伝わる

インパルスはランビエルの絞輪を跳躍伝導する電気的な活動電位の信号として運ばれているが、神経線維の末端部は神経終末となって他の神経細胞と接触して終わる。このシナプス部での神経情報の伝わり方は、高等哺乳動物の脳では、主として化学的なものがシナプス伝達に関与しているの、ここで精神現象を考える場合に、シナプス小胞内に含まれている神経伝達物質が130~200Åのシナプス間隙を隔て対峙し、介在していることは注目すべき点である。高等哺乳動物のシナプスは、ほとんどすべてが化学的なものであるが、両生類、魚類などには良く電気的シナプスが見つかる。近年、ネコの外側膝状体で同一神経終末内に電気・化学的シナプスの両形態を持つmixed typeの報告<sup>18)</sup>がある。

まず、神経終末に活動電位がやってくると、シナプス小胞内に貯えられていた神経伝達物質がシナプス間隙に放出され、それが次の神経細胞の表面にある受容体と結合し、神経細胞膜の興奮と抑制の物質代謝に変化を引き起こす。神経伝達物質は神経終末内にある超極微細な粒子であるシナプス小胞の内腔に貯えられており、その分泌機構はシナプス小胞膜と次の神経細胞の膜であるシナプス後膜への開口放出による（図2、写真8~11）。まず、活動電位は約1ミリ秒幅の短い脱分極の信号が神経線維を伝わって行き、神経終末に至る。ここに生じてくる活動電位は、脱分極により膜のCaイオンの透過性を増大させ、その結果、Caイオンは神経終末内に流入し、これが引き金となってシナプス小胞膜とシナプス前膜とにオメガ状の融合が起こり、シナプス小胞の中身にある神経伝達物質（脚注2）がシナプス間隙に放出される（写真8）。この神経伝達物質はシナプス間隙を横切り、シナプス後膜側の特殊な受容体部位に作用する。その時に、初めてシナプスを介した情報の化学的伝達が起こる。開口放出は化学的シナプス伝達の基本単位である。この開口放出機構によって神経伝達物質が低い確率で量子的にシナプス間隙に放出される。前シナプスの活動電位一発につき一本の神経終末内の一個のシナプス小胞（サイズ：500Å、伝達物質の量子：約10-18g質量）が放出される確率は1より小さいことが一般的に認められている。このシナプス部にあるシナプス前小胞格子の見事な準結晶性構造物はシナプス前膜から神経終末

の内側に向かって伸びる約1000Å間隙の電子密度の高い三角形の突出構造物である（10Å = 1nm）。三角形に並んだ濃い突出構造物はシナプス間隙と向き合っており、シナプス小胞はこの準結晶状構造をした六角形状のグリッドの中に整然と配列している<sup>20)</sup>。このグリッドがシナプス小胞の内容物である神経伝達物質分子（約5千~1万分子）の量子的塊（quantum）を単位的に放出作動させ、嵌まり込む場所である（図2、写真8）。1本の軸索を伝導してきたシナプス前インパルスは神経終末内のシナプス小胞に毎回開口分泌の引きがねを引くのではなく、多くの場合は3度に一回か、4度に1回の放出である。このシナプス小胞の開口放出・分泌の制御機構は準結晶状のシナプス前小胞格子と後述するサイコンと仮説上名づけられている非物質的なものとの量子物理学的反応によるものだろうとしている（Eccles C.1998）<sup>51-53,72)</sup>。

## 8. 興奮性と抑制性シナプスの超微細構造

最近のシナプス小頭部（神経終末）の電子顕微鏡的研究によれば、興奮性と抑制性シナプスを超微形態学的に区別しうるかも知れないという希望をもたらした。これらの機能に対応するシナプスの分類には、Gray (1959) の Type1と Type2のシナプスがあり<sup>21)</sup>、シナプス小胞の型を中心とする内園 (1966,1975) とBodian (1966) のS type (球形小胞) とF type (楕円形小胞)<sup>22-24)</sup>、またColonnier (1968) のシナプス前・後膜下の肥厚を基準とした非対称性asymmetryと対称性symmetryシナプスの分類がある<sup>25)</sup>。

前者を興奮性、後者を抑制性シナプスとしている（図2、写真8~10A, B, 11A）。

一方、微小電極法による神経生理学的研究によれば、シナプス伝達には興奮性シナプスとシナプス後抑制性とシナプス前抑制性の三つの基本型があり、超微形態学的にも、現在ではこれらの機能的シナプスに構造学的に対応できる<sup>23,26,31,35)</sup>。シナプス前抑制に対する超微形態学的裏づけはaxo-axonicシナプスである。微小電極法によって既にシナプス前抑制は確かめられていた<sup>2)</sup>が、このシナプスは主として脊髄レベルでは、第一次求心性入力（Group I a）が終わる脊髄前角運動性神経細胞の基幹樹状突起基始部

やクラク柱の背核ニューロン上への巨大神経終末に小型神経終末が対称性シナプスを形成している。また、脊髄後角にも大脳皮質から下行した抑制性シナプスが第一次求心性入力を抑制(シナプス前抑制)するためにaxo-axonicシナプスを形成している。これらの電気生理学でいう前シナプス抑制<sup>2)</sup>はEccles (1964)によって、超微形態学的axo-axonicシナプス構造<sup>31)</sup>はSaito (1974)によって初めて明らかにされた<sup>52)</sup>。近年では神経伝達物質やその関連物質を免疫組織化学的手法で直接染色し、視覚化できるようになった(写真10B, 11A)<sup>26)</sup>。

最近の電子顕微鏡による研究データでは、ネコ大脳皮質の第5層にある1個の大型錐体細胞(Betz cell)は平均して103~104個の興奮性・抑制性シナプス入力(S type 10.9% : F type 89.1%)を受けている<sup>26)</sup>ので、大脳皮質全体では驚くほど多数の抑制性シナプス結合があると推定できる。ヒトの場合、ネコと比べて大脳皮質の容積が極めて大きいのでGABAなどの抑制系伝達物質を含む抑制シナプス数は極めて多いはずである(写真10B, 11A, 図6A)。興奮性・抑制性シナプスは哺乳動物大脳皮質にある錐体細胞の基本的な活動単位である。全か無の開口分泌はそれぞれの結果としては短期間持続する興奮性・抑制性シナプス後膜の脱・過分極の興奮性・抑制性シナプス後電位(EPSP, IPSP)を生ずる。EPSPが十分大きくなって錐体細胞がインパルスを発射出来るようになるためには、つまり上位の運動細胞(写真4~7)の興奮を惹起するには、その総数和が数千個~数万個以上あるシナプス入力の微小EPSPとIPSPの総合計、つまりプラス効果とマイナス効果の代数和が、脊髄前角運動細胞と同様に、錐体細胞の持つ閾値を超える必要がある。

## 9. 自己意識の創発と大脳皮質神経回路網構造の微小作用点の仮説(二元論・相互作用説)

今から、400年前、Descartes R. (1630)は“我思う、故に我あり”「Cogito ergo sum」で有名な実存主義的な格言を残したが、彼は脳という実体とヒトの意識の存在を2つの異なる実在として分けて取り扱い、二元論<sup>64)</sup>を提唱した。それによると、精神と物体とは別個の実体であり、物体の始元的属性は延長であり、精神のそれは思惟であるとしている。今世

紀の初頭までは、この物心二元論は極めて成功したものと取り扱われたが、近年、Eccles (1994)は脳と心の相互作用説を主張している<sup>51~53,72)</sup>。この概念の中心にあるものは大脳皮質の構造的背景として、皮質の下層(III層とV層)を占めている膨大な数の錐体細胞の上行性尖頭樹状突起束(デンドロン)がサイコンと名づけられた仮説上の心的単位とシナプスの微小作用点で単位結合することによって、左脳にあるリエゾン領域で心と脳の相互作用が生じて、自己意識が創発されている(相互作用説)<sup>51~53,72)</sup>とするものである。非物質的事象である意図がサイコンを通じてデンドロンに作用し、意志(心)が運動や行動を引き起こす。それぞれのデンドロンの棘突起上に約10万個のシナプス、つまり伝達の単位束(200個のニューロンから成る微小単位)であるデンドロンが、ヒトの大脳皮質には約四千万個あるという。これらの微小作用点は、質量とエネルギーを持たない量子物理学の確率場、ハイゼンベルグの不確定性原理に似た取り扱いが出来ると考えられるとしている<sup>53)</sup>。非物質的で、物質とエネルギーの世界とは別の世界に属する心的経験(サイコン)をシナプスの微小作用点と結び付けて、意識の創発を提起している<sup>51~53,72)</sup>。

神経結合の鍵となる大脳皮質内の神経終末(シナプス小頭部)はフラスコ円錐型の錐体構造を呈し、脊髄で観察されるものより、やや小型の神経終末である(図2、写真9A, 10B)。この小型の神経終末内には2~3個の糸粒体とシナプス小胞(サイズ: 500Å)を100個~300個を含み、錐体細胞の尖頭樹状突起や細胞体と主として神経伝達物質がGABAの対称性シナプスを形成している<sup>26)</sup>。従って、全シナプス小胞の総数は千兆個~三千兆個もの巨大な数となる。

ヒトの自己意識の創発は、この化学伝達物質を含む超極微粒子(500Å)で高密度に満たされている、ごく薄い大脳新皮質6層(0.28±0.04cm)内シナプスの動的神経回路網活動の中に生じている。

そこで、脳の高次機能について神経回路網構造を背景としてみると、次の様な概念が得られる。ヒトの極めて薄い大脳皮質内には何千、何万というニューロンと興奮性・抑制性シナプスで結合された精緻なる動的神経回路網構造が多列的に重層し配列して

いる。その中を多数のチャンネルを持つ神経伝達のインパルス波形が通る。この波形は1秒間に少なくとも10万個以上ものニューロンと $10^2$ 万個のシナプスを通過する。これらニューロン同士の動的神経回路網の中を縦横無尽、かつ連続的に走るインパルス波形の伝導活動と、驚異的な数のシナプスでの超極微粒子（シナプス小胞）の放出による興奮性・抑制性の化学的伝達過程が織りなす中で、自己意識が時間と空間の内に紡ぎ出されてくる。これが自己意識の創発である。この超極微な世界のイベント・パターンの驚くべき超複雑性、精緻性、統合性について、まだわれわれには解からない（アミダバ・無量光明の世界）。

しかし、Eccles C. (1998) によれば、ヒトの脳はこのような超複雑な神経系の集積回路を介して、意識を単に読み取っている検出器にすぎず、ヒト各自がそれぞれに享受している自己意識の経験的統一性と自我の唯一性はヒト脳のニューロンやシナプスによる神経回路網活動の本質ではないと量子力学論を用いて主張する<sup>51~53,72</sup>。つまり、脳は宇宙に開かれ、宇宙と繋がっている解放された系なのである。

この開放系について、チベット仏教の古くからの学説（死者の書）<sup>65</sup> 中では、大脳神経叢上にあるブラフマンの孔（小児の大泉門や小泉門のことか？）が宇宙に開かれた系（頁174, 図）であるとする。また、インドなどの東南アジア諸国で信じられているヒンズー教では、輪廻転生を説く。しかし、現在の多くの自然科学の研究者達<sup>66, 67</sup> は、脳は頭蓋腔内にある閉ざされた系であり、自己意識は死によって終わり、死の先は無であると考えている。

## 10. ヒトの左大脳半球に局在する自己意識と言語中枢

哺乳動物の主要な解剖学的特徴は左右に二つある大脳半球である（写真3）。この左右の半球間同士の大脳皮質は皮質下にある脳梁（第3層錐体細胞から出る2億本以上の交連線維）によって相互に連結されている。この右脳と左脳に分かれている大脳は、利き手である右手を使えば左脳が、左手を使えば右脳が、伝導路が延髄で交叉しているので働く。

Sperry (1969,1982) は癲癇予防の為に、脳梁（交連線維）を完全に切除した患者を観察し、身体の一

般的動作は交連切断（分離脳）では影響されず、左右は依然として正確に連動しており、分離された左半球脳（優位脳）は自己の意識的存在感と心的統一性を保っていた。しかし、反対側の右半球脳（劣位脳）の働きは動物のそれと同じか、それ以下であり、視覚的で、非言語的、非数学的、非継続的方面のみにしか働いていないことを発見した<sup>68,69</sup>。

この実験結果は、自己意識の自覚の場は左大脳半球皮質内の神経回路網構造の中にあり、それが、自己独自のものであることを見出した。ヒト以外的高等哺乳動物とか、鳥類（わずかに大脳皮質がある）の行動を観察すると、脳内に微かな意識もどきものはある<sup>71</sup>。

しかし、ヒトの左半球の大脳皮質内には限局して、他の高等哺乳動物にはない、自己意識の創発と言語中枢の局在が確認されている。ヒトの自己意識は行動や随意運動表現、言語活動など、肉体のナビゲーターとして、意思決定をするために脳の大切な働きである。なお、ヒトでは大脳の左右半球間の皮質に形態計測学的に有意差が見出せなかった<sup>7~9,63</sup> が、皮質の一部では有意差がある<sup>70</sup>。

Ecclesによれば、ヒトの左大脳半球が意識的人格の座であり、精神が脳の構造と相互に連絡（リエゾン）する場（二元論相互作用説：Eccles C.1989）<sup>51~53,72</sup> がヒト左脳の大脳皮質内に限局されている（サイコンとデンドロンの仮説）。ヒトの95%は右手利きなので、左半球が優位脳であり、そこに自己意識と言語中枢（Brocaの前言語野とWernickeの後言語野）が局在している。ヒトの左側半球大脳皮質の除去は、幼児期を除き、深刻な言語障害を引き起こすが、劣位脳半球の大脳皮質の除去（この場合、右半球脳）は身体の運動消失（片麻痺）と左視野の半盲を引き起こすのみで、その影響は左脳ほど深刻ではない。多分、ヒト以外の他の高等哺乳動物の脳は、ヒトの劣位大脳半球（右半球）の働きと同じか、それ以下と考えられる。

## 11. 倫理的配慮

脳は医学部解剖学教室に献体されたものであり、人体解剖学の有資格者（死体解剖資格認定厚生省第6323号）によって、厳格な法的・倫理的配慮と規定に従って取り扱われた。また、MRIの被験者は大学の倫理委員会で承認され、本人の同意を得て行われたものである。

## 12. 参考文献

- 1) Magoun, HW. The Waking Brain. Charles C. Thomas, Springfield, 1958
- 2) Eccles, C. John The Physiology of Synapse. Springer-Verlag 1964 ; 1 : 1-299
- 3) Economo, C. von und Koskinas GN. Die Cytoarchitektonik der Hirnrinde des erwachsenen Menschen. J. Springer, Wien und Berlin 1925
- 4) Economo, C. Cytoarchitectonic of the Human Cerebral Cortex. Oxford Medical Publication, London. 1929 ; 1 : 1-186
- 5) Sholl D. A. The Organization of the Cerebral Cortex. Methuen, London 1956
- 6) Thompson H. The total number of functional nerve cells in the cerebral cortex of man. J. Comp. Neurol. 1899 ; 6 : 113
- 7) Saito K. Monma M. Kumagai H. Tsukamoto N. 3D-Morphometrical Analysis of Human Brain By Means of MRI. Anatomical Sciences, Sixteen International Congress of Anatomists, Proc. 79 Supplement Kyoto. 2004 ; 1 : 8
- 8) 齋藤基一郎、馬場則男、門間正彦、熊谷英夫、塚本信宏、八重口直樹. ヒト大脳皮質の厚さの三次元定量的研究—MRI画像に対するボクセル処理—機能・形態. 2004 ; 2 (2) : 47-54
- 9) 齋藤基一郎、門間正彦、熊谷英夫、稲垣裕美. ヒト大脳皮質の形態計測学的研究—MRI画像の三次元解析—茨城県立医療大学紀要. 2006 ; 11 : 109-121
- 10) 福田哲夫 (訳) カハール原著、ニューロン説か網状説か、長井書店. 大坂、1960 ; 1 : 1-141
- 11) Sherrington CS. The spinal cord. In : Text of Physiology. (ed.) EA Schafer. Caxton London 1900 ; 2 : 782-788
- 12) Ramon y Cajal , SRP, Histology du systeme nerveux du l' homme et des vertebrates. Paris Maloine, 1909 ; 1 : 1-986
- 13) Held H. Beitrage zu Struktur der Nevenzellen und ihrer Forsatze. Arch. F. Anat. u. Physiol. 1897 ; 1 : 204-207
- 14) Auerbach L. Nervenending in den Centralorganen. Neur. Central. Bl. 1898 ; 17 : 445-451
- 15) Bodian D. Introductory survey of neurons. Cold Spr. Harb. Symp. Quant. Biol. 1952 ; 17 : 1-13
- 16) De Robertis E. Bennett HS. Submicroscopic vesicular component in the synapse. Fed. Proc. 1954 ; 13 : 35
- 17) Palade GE. Palay SL. Electron microscopic observations of interneuronal and neuromuscular synapses. Anat. Rec. 1954 ; 118 : 335-336
- 18) Sotelo C. Palay SL. The fine structure of the lateral vestibular nucleus in the rat. 1. Neurons and neuroglial cells. J. Cell Biol. 1968 ; 36 : 151-179
- 19) Lorento, De Nó, R . The summation of impulses transmitted to the motoneurons through different synapses. Amer. J. physiol. 1935 ; 113 : 524
- 20) Akert K. Peper K. Sandri C. Structural organization of motor endoplasmic and central synapses in cholinergic mechanisms edited by EG. Waser , Raven Press, New York, 1975 ; 1 : 43-57
- 21) Gray EG. Axo-somatic and axo-dendritic synapses of cerebral cortex : An Electron Microscope Study. J. Anat. 1959 ; 93 : 420-433
- 22) Uchizono K. Excitatory and inhibitory synapses in the cat spinal cord. J. Physiology. 1966 ; 16 : 570-575
- 23) Uchizono K. Excitation and Inhibition. Igakushoin Ltd. Tokyo 1975 ; 1 : 1-218
- 24) Bodian D. Synaptic types of spinal motoneurons : An electron microscope study. Johns. Hopkins Hosp.Bull. 1966 ; 119 : 16-45
- 25) Colonnier M. Synaptic patterns on different cell types in the different laminae of the cat visual cortex. An electron microscope study. Brain Res. 1968 ; 9 : 268-287
- 26) Saito K. Niki K. Eins S. JR. Wolff Quantitative Analysis of Synapse Structure with a Semiautomatic

- Interactive Computer System: A Study on Identified Pyramidal Tract Neurons in the Sensory-Motor Cortex of Cat. *J. Electron Microscopy Techniques*. 1986 ; 4 : 241-256
- 27) Saito K. Electron microscopic observation on terminal boutons and synaptic structures in the anterior horn of the spinal cords in the adult cats. *Okajimas Folia Anatomica Japonica*. 1972 ; 48 (6) : 361-412
- 28) Kojima T. Saito K. Kakimi S. Electron Microscopic Quantitative Observations on the Neuron and Terminal Boutons Contacted With It in the Ventrolateral Part of the Anterior Horn (C6-7) of the Adult Cat. *Okajimas Folia Anatomica Japonica*. 1972 ; 49 (4) : 175-226
- 29) Saito K. The Initial Segment of DSCT (Dorsal Spinocerebellar Tract) Neuron in the Cat. *J. of Electron Microscopy*. 1972 ; 21 (4) : 325-326
- 30) Saito K. Bruppacher H. Nodal Synaptic Bouton Arising from Axon in Clarke's Nucleus of the Cat. An Electron Microscopic Observations. *Okajimas Folia Anatomica Japonica*. 1973 ; 50 (2-3) : 107-116
- 31) Saito K. Synaptology and cytology of Clarke cell in nucleus dorsalis of the the cat : An electron microscopic study. *Journal of Neurocytology*. 1974 ; 3 (2) : 179-197
- 32) Saito K. Tezuka M. Morphological differences between the S and F type elongated giant boutons in the Clarke's nucleus of the Cat. *The Nihon Univ. Journal of Medicine*. 1975 ; 17 (4) : 247-254
- 33) Kojima T. Saito K. Kakimi S. AN ELECTRON MICROSCOPIC ATLAS OF NEURONS—A Complete Picture of the Neuron Soma and General Structures of the Neuron—UNIVERSITY OF TOKYO PRESS. 1975 ; 1 : 1-150
- 34) Saito K. Branchings at the central node of Ranvier observed in anterior horn and Clarke's nucleus of the cat. An electron microscopic study. *J. of Neurosciences*. 1979 ; 4 (3) : 391-399
- 35) Saito K. Morphometrical synaptology of Clarke cell and distal dendrites in the nucleus dorsalis. An electron microscopic study in the cat. *Brain Res*. 1979 ; 178 (2-3) : 233-249
- 36) Saito, K. Spheroids and altered axons in the spinal gray matter of the normal cat. An electron microscopic study. *Acta Neuropathol. (Berl.)* 1980 ; 52 (1) : 13-22
- 37) Yamada H. Saito K. Ultrastructure and quantitative study on deveopment of neuropil of d-LGH and SCN around the eye-opening in mice. *Anat. Anz., Jena*. 1981 ; 49 (1) : 113-126
- 38) Murakami F. Katsumaru H. Saito K. Tsukahara N. An electron microscopic study of corticorubral projections to red nucleus identified intracellular injection of HRP. *Neuroscience Letters*. 1981 ; Suppliment (6) : 61
- 39) 齋藤基一郎 脊髓ニューロンの微細構造—シナプスの数量的解析を中心として—(脊髓の基礎と臨床) 神経研究の進歩. 1982 ; 26 (4) : 596-631
- 40) Murakami F. Katsumaru H. Saito K. Tsukahara N. A quantitative study of synaptic reorganization in red nucleus neurons after lesion of the nucleus interpositus of the cat : An electron microscopic study involving intracellular injection of horseradish peroxidase. *Brain Res*. 1982 ; 242 (2) : 41-53
- 41) Saito K. Niki K. Morphometrical synaptology of a whole neuron profile using a semiautomatic interactive computer system. *Cytometry*. 1983 ; 4 (1) : 20-30
- 42) 齋藤基一郎 医学事典. 講談社. 1983 ; (18) : 4-26, (4) 96-123, (32) 70-130
- 43) 齋藤基一郎 小川和明他編集 : 人体組織学, 朝倉書店 1984 ; 1 : 383-395
- 44) 齋藤基一郎 神経細胞とシナプスの定量的解析—コンピューターの形態学への応用—細胞. 1984 ; 16 (5) : 98-205
- 45) 齋藤基一郎 運動ニューロンの疾患を巡って—脊運動ニューロンについて—臨床神経科学. 1986 ; 4 (11) : 12-16
- 46) 齋藤基一郎 ホルモンによる運動神経の可塑性. 医学の歩み. 1986 ; 139 (10) : 816-817
- 47) 齋藤基一郎, 何維為, 王昌立 ネコ足三里相当部のハリ刺激による脊髓シナプスの実験形態学的研究—神経終末の分布とその超微構造の変化—臨床電子顕微鏡学会誌. 1989 ; 22 (3) : 363-376
- 48) Chan Li Wang, Sakamoto H. Saito K. Ultrastructure

- and synaptic architecture of spinal motoneurons in the frog. A morphometrical analysis. *Acta Anatomica*. (Basel) 1989 ; 134 (1) : 1-11
- 49) 齋藤基一郎、王昌立、後藤保正 医療のための人体解剖学. 廣川書店. 1986 ; 1 : 1-215
- 50) 齋藤基一郎、王昌立 目で見る人体解剖. 廣川書店. 1990 ; 1 : 1-418
- 51) 松田幸次郎監修、土居健郎、吉田哲男 (訳) *The Brain and Unity of Conscious Experience* by Sir John Eccles 著 : 脳と意識的経験の統一、医学書院. 1967 ; 1 : 1-57
- 52) Eccles, C. John *My Scientific Odyssey* *Ann. Rev. Physiology*. 1977 ; 39 : 1-18
- 53) 大野忠雄、齋藤基一郎 (共訳) 自己はどのように脳をコントロールするか. エックル著、シュプリング・フェアラーク東京. 1998 ; 1 : 1-225
- 54) 藤澤浩四郎 神経病理学研究断章 日本学会事務センター. 1996 ; 1 : 1-326
- 55) 齋藤基一郎 John C. Eccles教授 (1903-97) の墓参をおえて—スイス コントラ村—*Neuroscience News*. 2000 ; 4 : 6-9
- 56) Saito K. Matsumura Y. Quantitative analysis of the spinal motoneurons and their synaptic structure in the Teleost (*Carassius auratus*) : morphometrical analysis with special reference to axo-somatic synapses. *J. of Morphometry*. 1993 ; 218 (3) : 281-300
- 57) Matsumura Y. Saito K. Distribution of Muscle Spindles in the Extensor Digitorum and Hallucis Brevis Muscles of the Macaque as Determined By Plastination. *Acta Anatomica* (Basel) .1997 ; 158 : 59-67
- 58) 齋藤基一郎、佐々木薫 電子顕微鏡によるシナプス研究の歩み—その超微細構造と働き— (総説) 茨城県立医療大学紀要. 2001 ; 6 : 23-36
- 59) 齋藤基一郎、王昌立、後藤保正 医療のための脳・神経解剖学の基礎. 元就出版社. 2001 ; 1 : 1-200
- 60) 齋藤基一郎 トートラ人体解剖学 (訳) 丸善株式会社 . 2002 ; 1 : 545-574
- 61) 齋藤基一郎 看護学大事典. 医学書院. 2002 ; (分担執筆) 和田功、南裕子、小峰光博編集、頁230, 321, 669, 714, 733, 126, 1348, 1404, 1408, 1412, 1588, 2141, 2152
- 62) 三澤章吾、齋藤基一郎、山崎健太郎、本田克也 すべてわかる人体解剖図, 日本文芸社. 2011 ; 1 : 1-300
- 63) 齋藤基一郎 ヒトの脳と高等哺乳動物脳の比較機能解剖学—定量形態計測学的研究—, 植草学園大学研究紀要. 2010 ; 2 : 77-92
- 64) Rene Descartes *Euvres de Descartes*, publisher par C. Adam et P. Tannery, 12 vol. 1964-76 「デカルト著作全集4巻」白水社. 1993 ; 1 : 289-462
- 65) 川崎信定 (訳) チベットの死者の書, 筑摩書房. 1989 ; 1 : 1-224
- 66) 養老孟司 唯脳論. 青土社. 1989 ; 1 : 1-269
- 67) 佐藤方彦 感性を科学する. 丸善出版社. 2011 ; 1 : 1-186
- 68) Sperry RW. Gazzaniga MS. Bogen JE. Interhemispheric relationships: The neocortical commissure syndrome of hemisphere in disconnection in PJ. Verken and GW. Bryn (eds.) *Handbook of Clinical Neurobiology*. New York : 1969 ; 1 : 273-290
- 69) Sperry RW. Some effects of disconnecting the cerebral hemispheres. *Bioscience Reports*. 1982 ; 2 (5) : 265-276
- 70) 後藤昇 脳の左右差 : その解剖学的基盤, *Brain Medical*. 2011 ; 23 (2) : 121-129
- 71) 大野忠雄、小川千重子 (共訳) 動物の意識、人間の意識. Derek Denton著、紀伊国屋書店. 1981 ; 1 : 1-286
- 72) Popper K. Eccles JC. *The Self and Its Brain, An Argument for Interactionism*. Springer International. Berlin, Heidelberg, 1977 ; 1 : 1-597

(脚注1)	大脳皮質錐体細胞のサイズ	30~60 $\mu\text{m}$
	脊髄前角大型 $\alpha$ 運動神経細胞	50~80 $\mu\text{m}$
	小型顆粒神経細胞	5 $\mu\text{m}$
	ヒト卵子細胞	200 $\mu\text{m}$
	神経終末のサイズ	1.5~2.0 $\mu\text{m}$
	シナプス小胞のサイズ	0.05 $\mu\text{m}$ = 500 $\text{\AA}$ = 50nm (0.00000005mm)
	ちなみに、ヒトの目の分解能	0.2mm (200 $\mu\text{m}$ ) = ヒト卵子細胞サイズ
	光学顕微鏡の分解能	$d = 0.61 \lambda / n \sin \theta$ 、 $\lambda$ = 波長、 $\sin \theta$ = 開口角

(脚注2) シナプスの動的活動（神経伝達）の背景にはケミカルなプロセスが働いている。化学的な神経伝達物質にはアセチルコリン、ノルアドレナリン、ドーパミン、グリシン、グルタミン酸、 $\gamma$ -アミノ酪酸、P-物質などがあり、これらのシナプス伝達物質によってシナプスは興奮又は抑制させられる。現在、確実に解っているものは10種類に満たないが、将来の候補に挙がっているものを含めると40種類以上になるだろう。

(脚注3) ニューロピル (neuropil) とは、光学顕微鏡のみによる古典的な観察時代には、透明で中腔な灰白質の部分で何も無いものとして見過ごされて来た（写真5B, 7b）。しかし、電子顕微鏡の驚異的な拡大率と解像力によって、この部位は実は神経細胞と神経膠細胞との膨大な細かい突起が密に錯綜し、シナプス結合を含むいろいろな突起が相互に連絡し合う一大網状構造を形成する場（神経組織細線維網）であることが、近年次第に明らかにされ始めた（写真6,7a）。

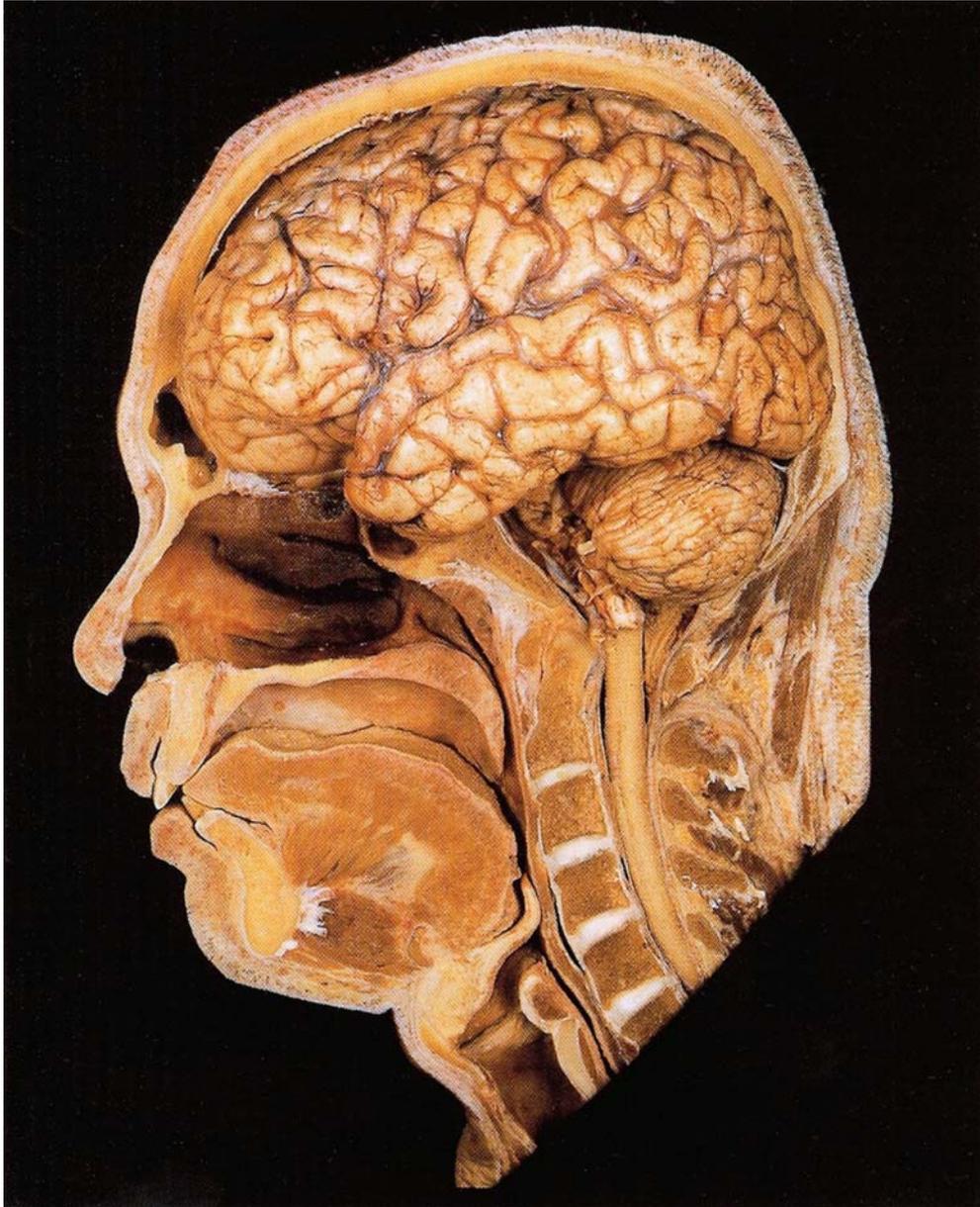


写真1 ヒトの脳と脊髄

脳は軟膜で被われ、顔面部は正中断されている。硬い頭蓋骨のなかにある大脳皮質の極めて薄い灰白質の中に意識の様なものがどのようにして、生じるのであろうか。また、ヒトの神経細胞同士の膨大な量のシナプス結合とその多様性から、ヒトの意識の創発と言語などの諸能力を説明することが可能であらうか。<sup>文献59)</sup>

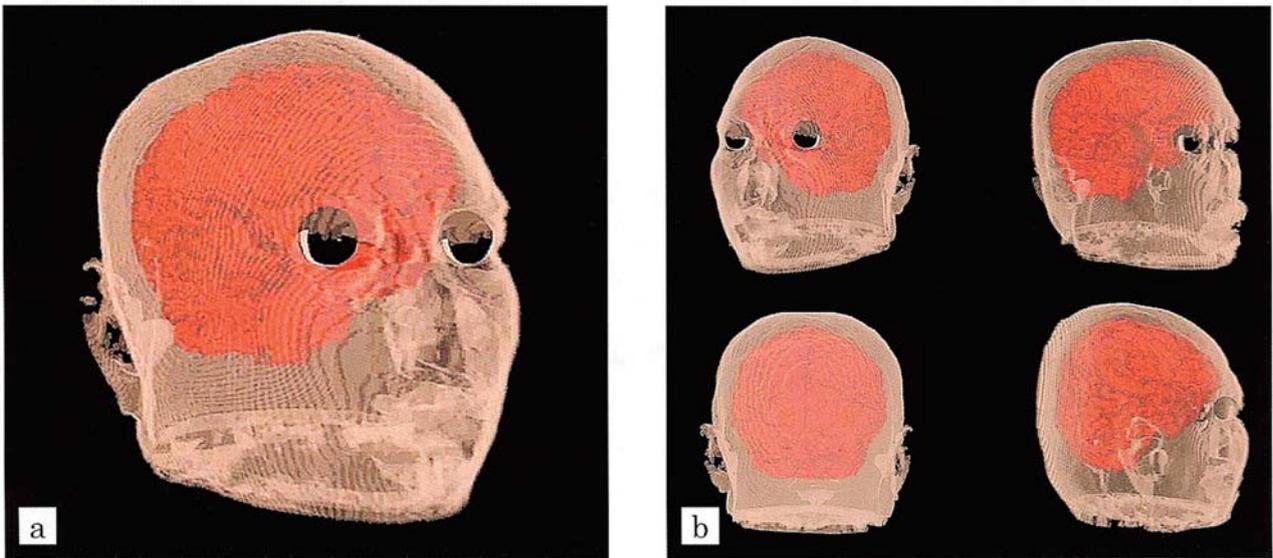
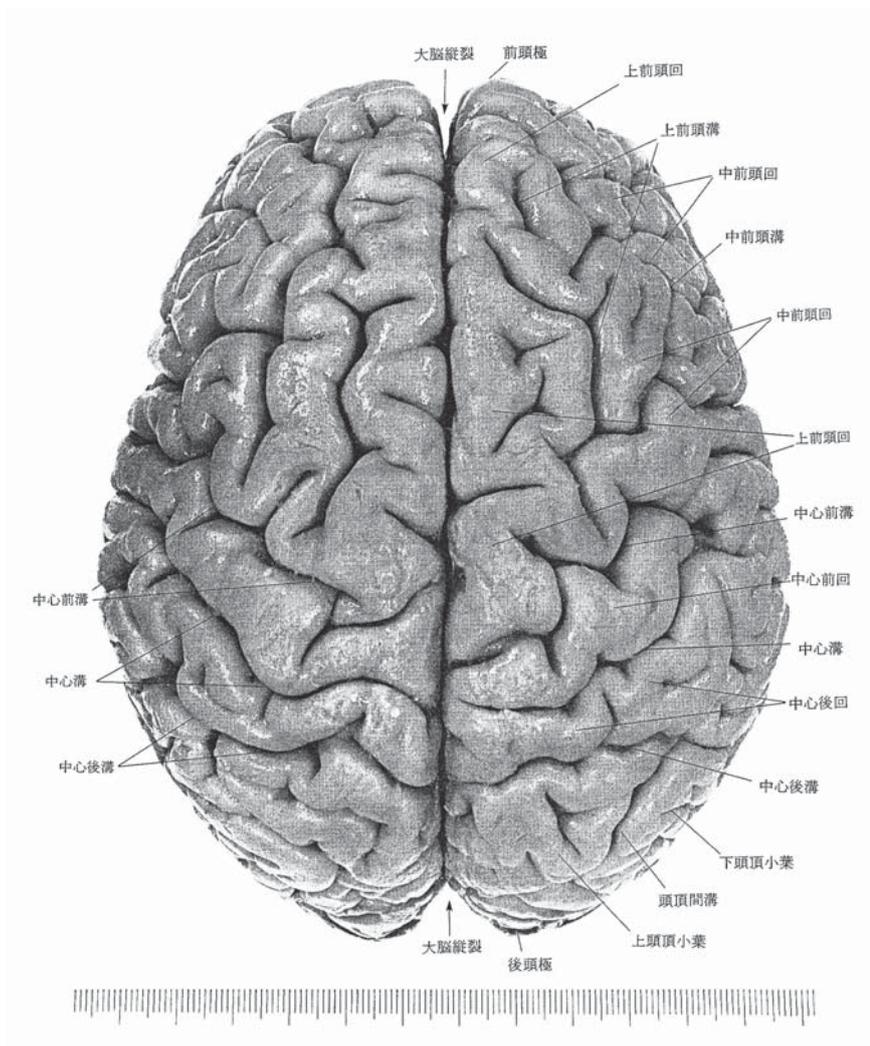


写真2 MRIによるヒト頭部の3D再構築画像 ( a, b )。

プログラムにより前後、左右、上下方向に自由に回転ができ、3次元構造による立体画像計測ができる<sup>文献7~9、63)</sup>



( 写真3 ) 大脳皮質背面の皺。 大脳縦裂によって大脳は左右半球に別れている。

- Fissur longitudinalis cerebri 大脳縦裂
- Gyrus frontalis superior 中前頭回
- Cyrus frontalis superior 上前頭回
- Gyrus precentralis\*1 中心前回
- Gyrus postcentralis\*2 中心後回
- Lobulus parietalis inferior 下頭頂小葉
- Lobulus parietalis superior 上頭頂小葉
- Polus frontalis 前頭極
- Polus occipitalis 後頭極
- Sulcus centralis 中心溝
- Sulcus frontalis medius 中前頭溝
- Sulcus frontalis superior 上頭頂溝
- Sulcus intraparietalis 頭頂間溝
- Sulcus presentralis 中心前溝
- Sulcusparietooccipitalis 中心後溝

\*1 この部位に体運動野がある。  
\*2 この部位に体知覚野がある。

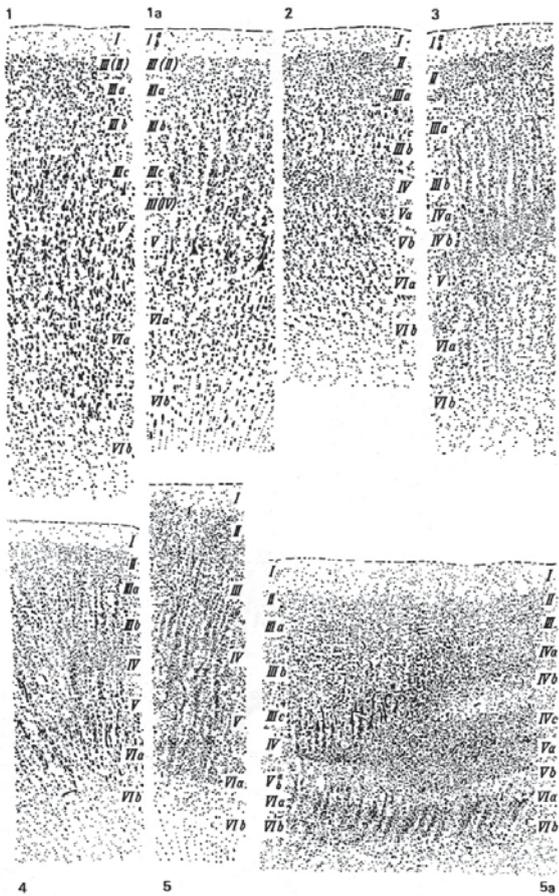


写真4a ヒト大脳皮質の細胞構築 (Nissl染色標本)  
(Economoとその改変, 新見教授による神経解剖学)

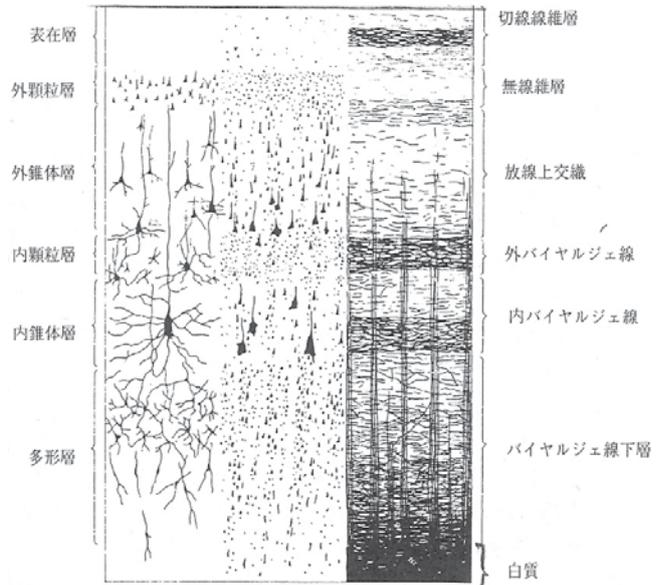


写真4b 大脳皮質(第6層)内の第5層には錐体路の起始となる大型錐体細胞やBetz cellが観察される。  
(小島教授による中枢神経系の解剖)

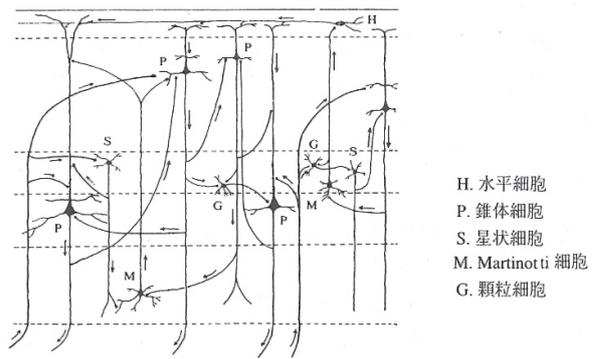


写真4c 大脳皮質構成

ニューロン間のシナプス回路網構造 (Lorente De N6.R.による)<sup>19)</sup>。当時は抑制性神経細胞と抑制性シナプスは発見されていなかった。

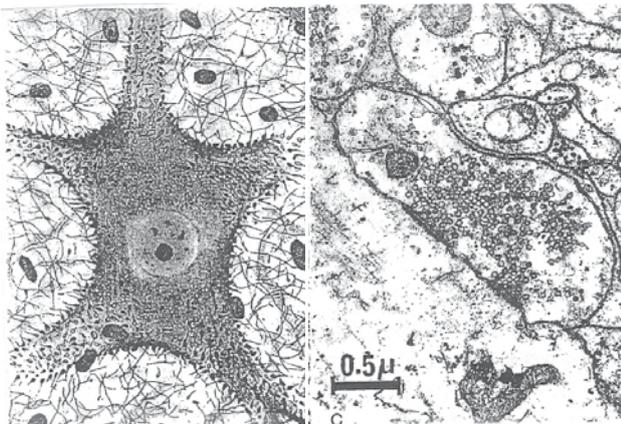


写真4d 神経細胞と  
シナプス小頭部  
(光学顕微鏡)

写真4e シナプス小頭部  
神経終末  
(電子顕微鏡)

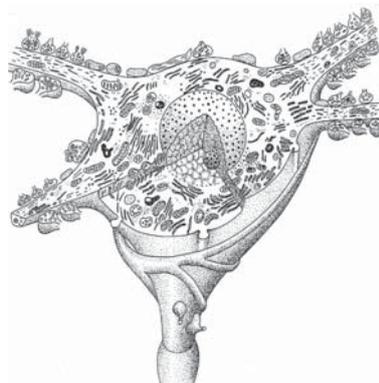


図1 神経細胞とその内部構造、シナプス小頭部の被覆状態。

細胞体内部では核を取りまく細胞小器官(ミトコンドリアなど)が脳の代謝活動にとって豊富である。

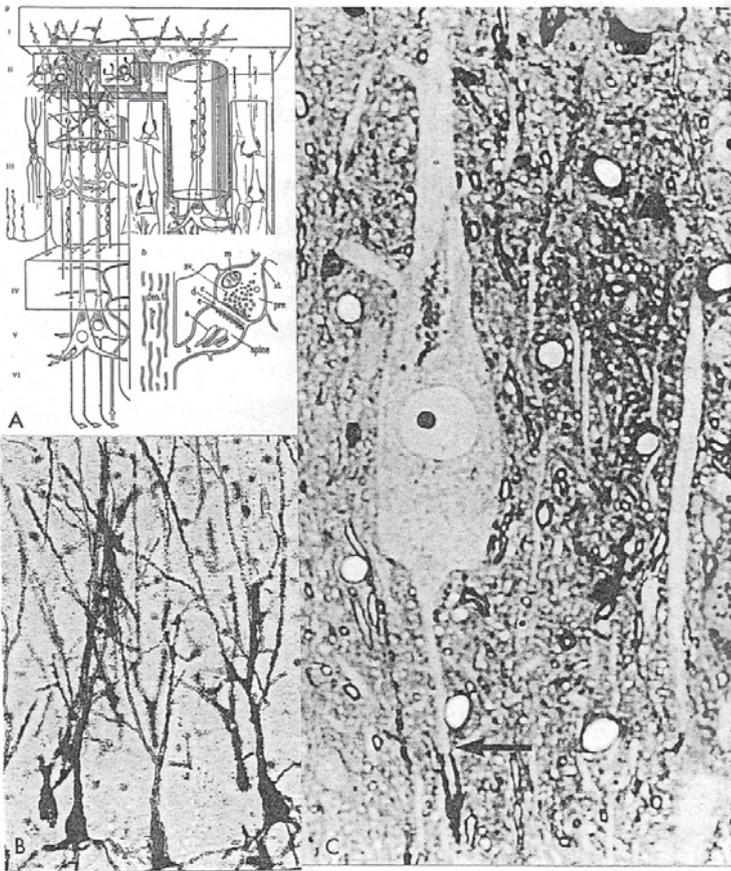


写真 5A いろいろなタイプの大脳皮質内神経細胞とその連絡回路網構造。

5B 第5層にある大型錐体神経細胞の鍍銀染色像と尖頭樹状突起の束。

5C 大型錐体神経細胞,下行する軸索突起初節部の髓鞘化に注目されたし (矢印)。

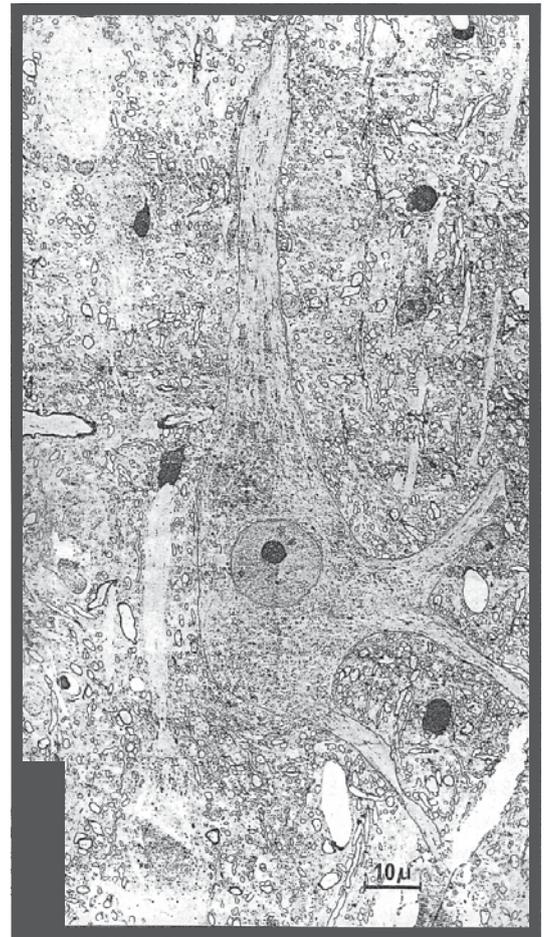


写真6 大脳皮質の第5層：Betz 錐体細胞の超低倍電子顕微鏡モニター写真。

膨大なニューロピル (脚注3) の超複雑さが良く分かる。

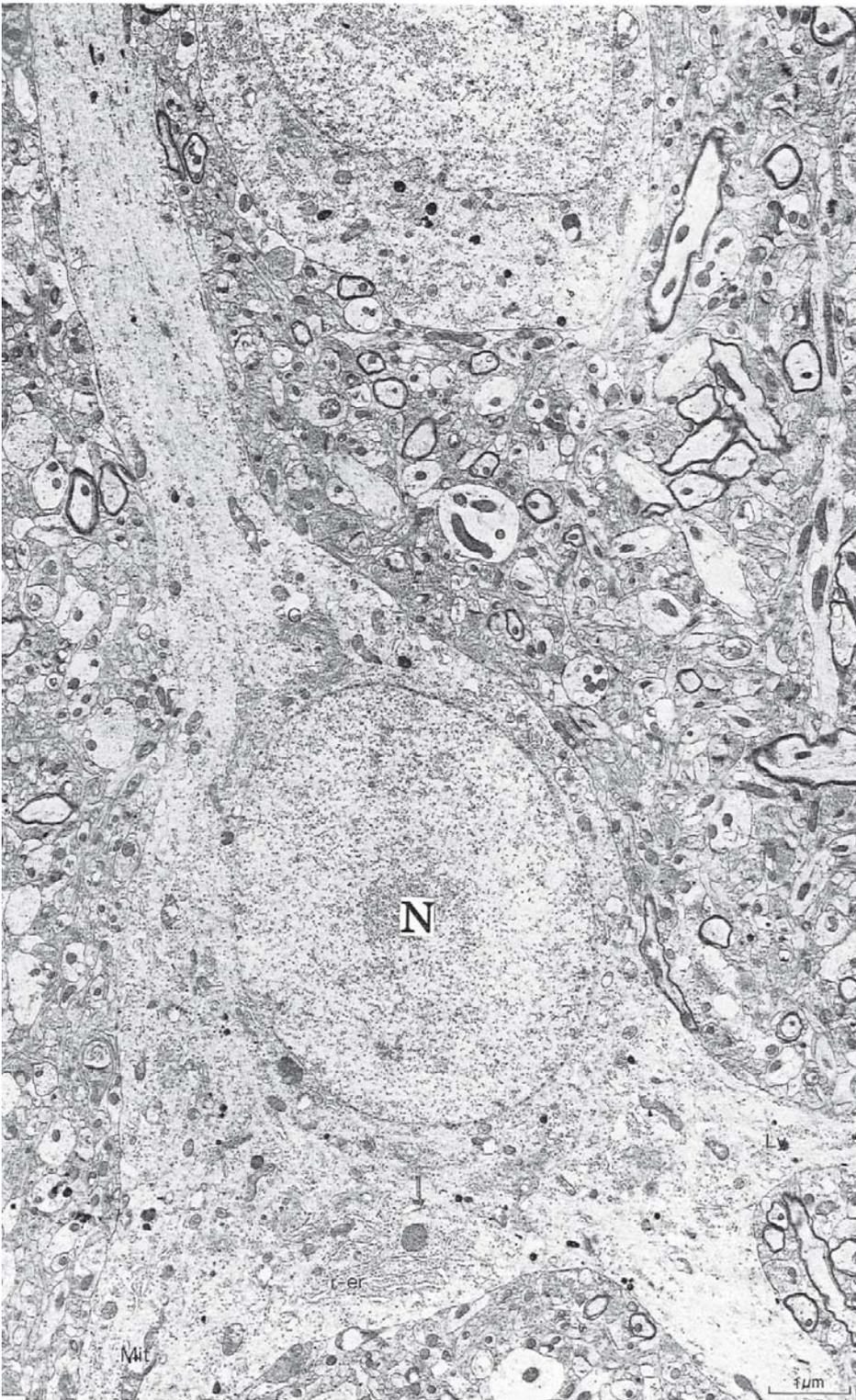


写真7a 小型錐体細胞の電子顕微鏡像。上方に見えるのは顆粒細胞。

ネコ大脳皮質小型錐体細胞。染色質に乏しい大きな核と痩せた細胞質をもつ紡錘形をした細胞である。細胞質の中には遊離リボソームが認められるが粗面小胞体 (r-er) の発育は悪い。良く発達したゴルジ複合体 (G) , ミトコンドリア (Mit) , リソソーム (Ly) などがみられる。細胞周辺には少数のシナプスが認められる。中央下のinclusion body (矢印) に注目されたい。

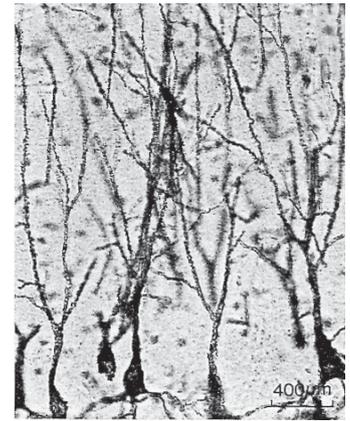


写真 7b ネコ大脳皮質体性運動領。(ゴルジ染色標本)

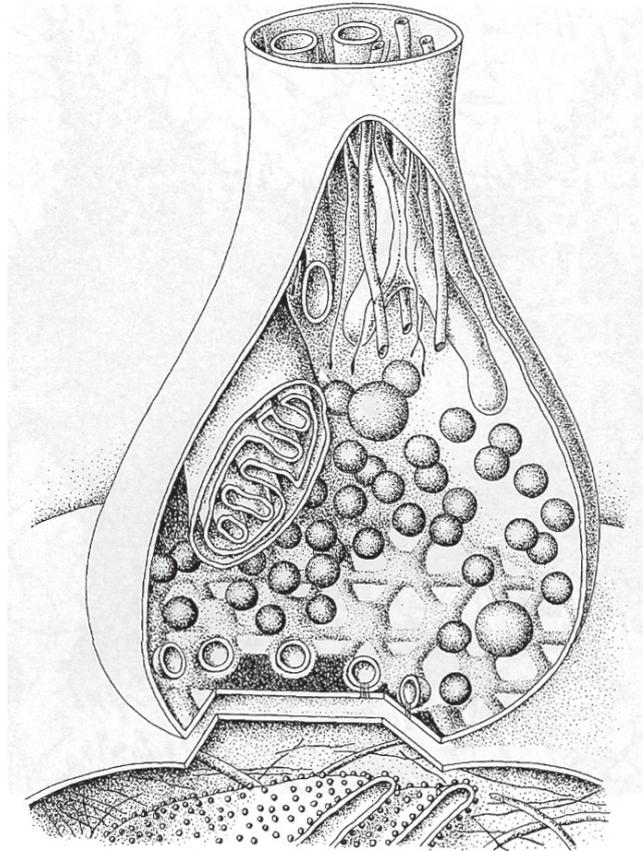


図2 電子顕微鏡観察に基づいたシナプス神経終末部の3次元模型像

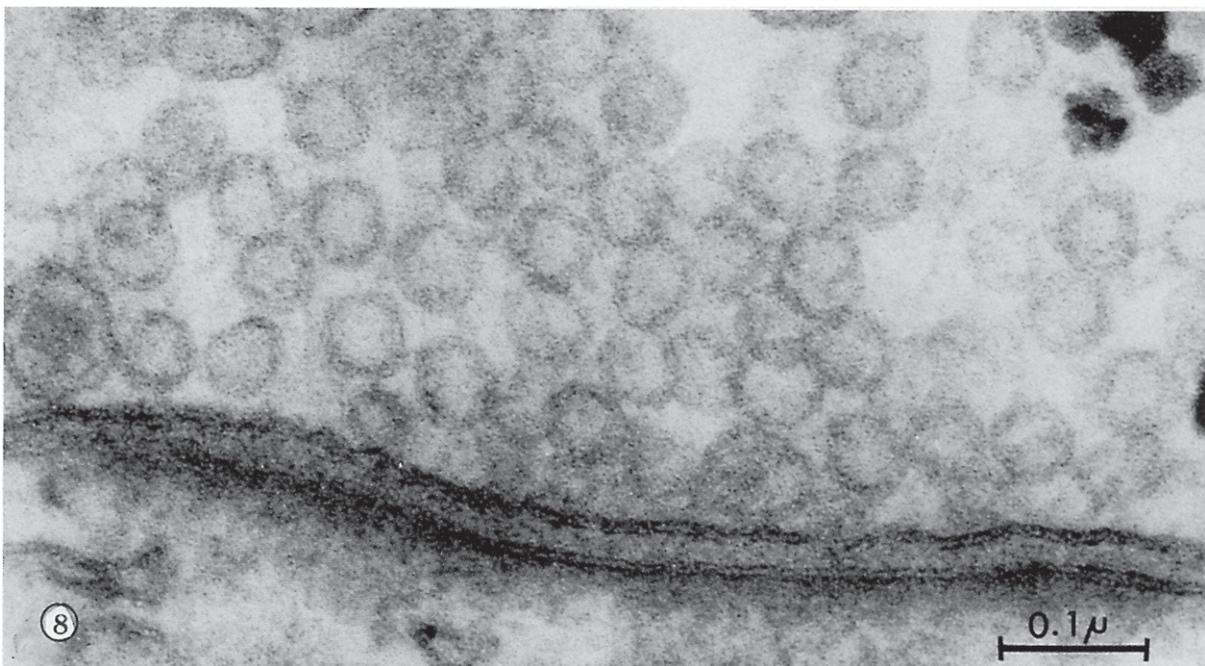


写真8 シナプスの超微細構造 シナプス小胞 (S型)、シナプス溝に注目。



写真9A F型神経終末と楕円形シナプス小胞

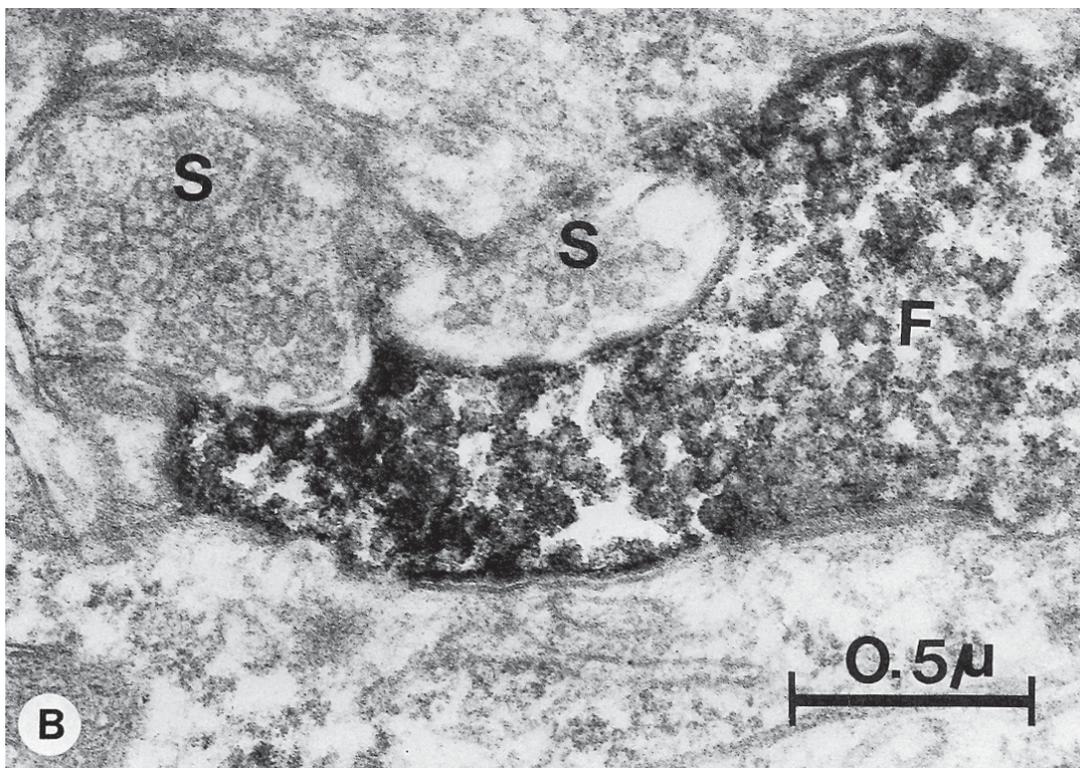


写真10B 神経伝達物質を免疫電顕法で染色し、観察した神経終末 (GABA染色)

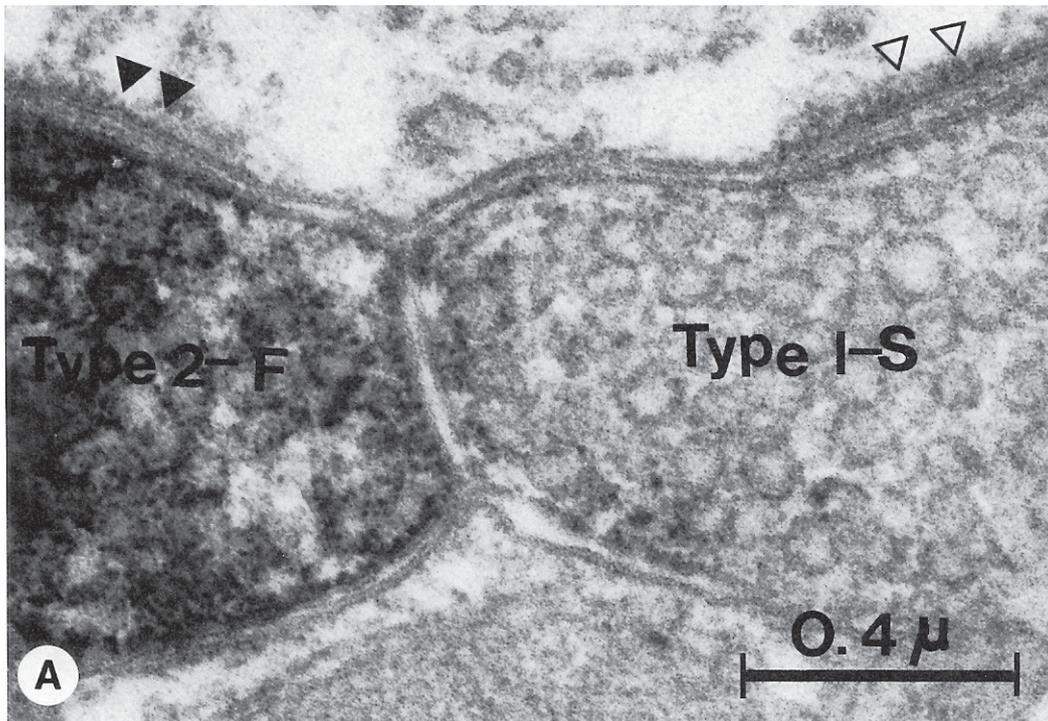


写真11A GABA 染色した F型神経終末 (左) と S型神経終末 (右)  
各々の神経終末は抑制性シナプスと興奮性シナプスとして同定される。

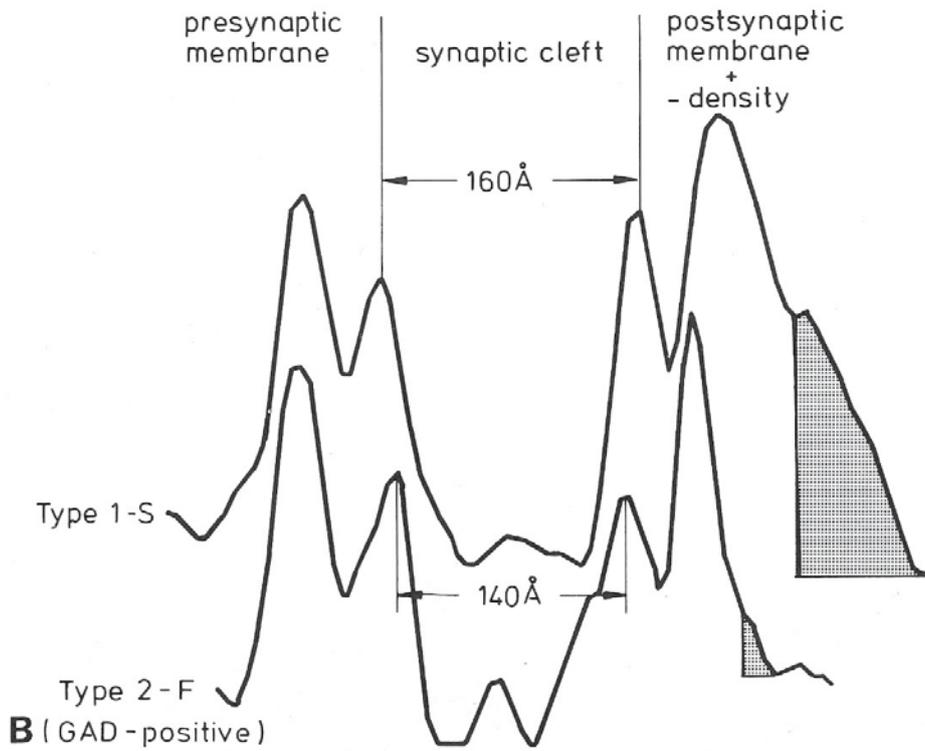


図3B 上記2つのタイプの神経終末の相違は形態計測学的データによってもはっきりと区別できる26)。

SYNAPTIC MORPHOMETRY BY COMPUTER SYSTEM

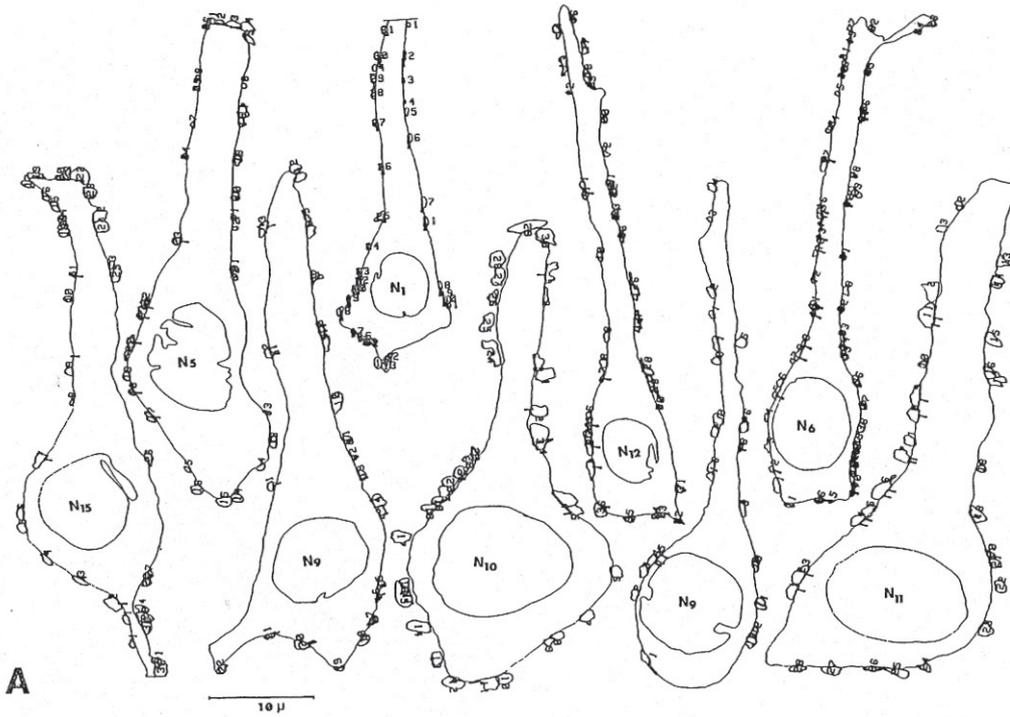


図4A 大脳皮質（第5層）内の大型錐体細胞とGABA陽性シナプス終末の分布状態（モンタージュ電子顕微鏡写真画像の計算機によるトレース像）。

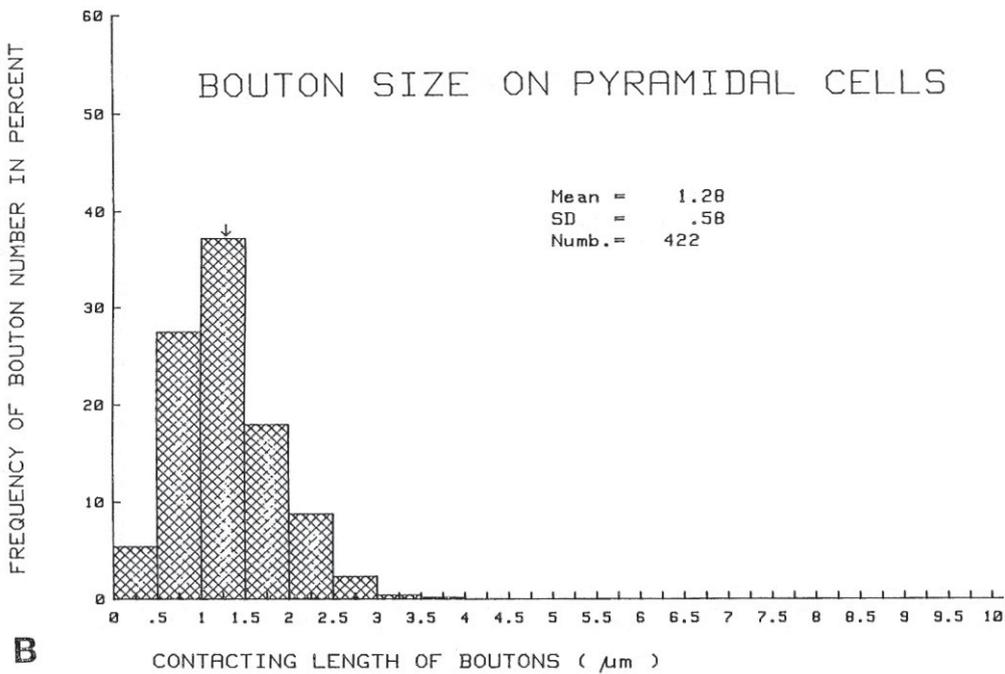


図5B 大型錐体細胞上の神経終末サイズの形態計測値（ヒストグラム）。