

# 量子力学が明らかにする脳の機能

Quantum Mechanical Approach to Brain Function

小島 比呂志

Hiroshi KOJIMA

玉川大学 工学部 脳・神経システム科学研究室, 194-8610 東京都町田市玉川学園6-1-1  
Laboratory for Cellular and Molecular Physiology, College of Engineering, Tamagawa University,  
6-1-1 Tamagawagakuen Machida-shi Tokyo 194-8610, Japan

## Abstract

Understanding how the brain works, for example, consciousness and qualia, is the great challenge facing modern science. How mental world is based on the contemporary neurobiology of the brain is essentially fascinating and significant subject which has been intensively under investigation recently. Many researchers from a variety of scientific backgrounds such as physiology, neurology, physics, engineering and mathematics are being drawn to this field named neuroscience. Historically, descriptions about the brain function could go back to the ancient Egyptian era when the surgical operations to prepare mummies were conducted for the funeral ceremony of Pharaohs. The millstone of the history for searching mind was originated from the philosophical view point introduced by René Descartes who proposed “Cartesian dualism” in 17<sup>th</sup> century. In the present article, we cast light on the results of recent investigations concerning the brain function such as consciousness and qualia which are being carried out specially by applying Quantum Mechanics. One of the most important topics in these fascinating researches was proposed in a book entitled “Emperor’s New Mind” written in 1997 by English physicist Roger Penrose. He proposed that the Gödel’s Incompleteness Theorems and Quantal Mechanics play important roles in the consciousness by developing his idea in comparison with the strong Artificial Intelligence (strong AI). However, his unique idea still remains under discussion. Recently, several interesting studies about biological phenomenon such as photosynthesis, enzyme function etc. have been partly succeeded by applying Quantal Mechanics to their microscopic mechanisms. Especially, ion channels, which are composed of proteins and the elementary functional units for producing electrical signals (action potentials and synaptic potentials) that are basic substrates for the functions of the central nervous system, are investigated. Ionic channels inserted in the neuron membrane have several characteristic properties, for example, ion permeability, selectivity, and conductance that are usually examined experimentally by electrophysiological techniques.

Furthermore, the inside of the ion channel through which ions pass from outside to inside of the neuron and *vice versa* has been surrounded by atoms and molecules located at the inner wall of channel proteins. Bernroider performed a quantum mechanical simulation of an ion passing through an ion channel, and discovered that the ion is delocalized when it travels through the channel: more of a coherent wave than a particle. Other possible examples of neural processes that could be treated by quantum mechanical approach are presented in this article.

Keywords: Neuroscience, René Descartes, Roger Penrose, Gödel's Incompleteness Theorems, Quantum Mechanics, Microtubule, Ion Channel

## 1. 序論

現代の脳科学は多くの関連分野を含んだ複合領域を形成しており「神経科学」とよばれている。ここでは、生理学者、臨床神経学者、理工学者、哲学者など様々な分野の研究者による複数の視点からの研究が行われている。しかし、これら研究の基礎科学としての最終目的は、「脳内の神経生物学的プロセスがどのようにして主観的意識を生み出すのか、という問題」であり、さらに踏み込んで表現すると「物理法則によって支配されている物質の世界がこころの主観的経験を生み出すメカニズムの解明」である。一方、人口増加やテクノロジーの発達に伴う複雑化した現代社会では、うつ病や精神疾患が大きな課題となっている。また高齢者の増加とともにアルツハイマー病のような認知症なども社会問題化している。この側面から臨床医学としての神経科学に対しても大きな期待が集まっている。

この神経科学における最近の研究のなかでも理論的方面からのユニークな研究として、「量子力学」で意識などのメカニズムを解明しようという研究がある。実験的検証もあまり進んでいないが、面白い考え方を提唱している。この論説ではこれらの新しい研究内容の一部を検討した。

## 2. 心と体の科学的考察の端緒

### 2.1. デカルト以前の脳に対する考え方

文献として最も古く脳に関する記述があるのは、紀元前 16~15 世紀にパピルス上に記された古代エジプト医学書である『Edwin Smith Papyrus: エドウエイン・スミス・パピルス』や『Ebers Papyrus: エーベルス・パピルス』である<sup>(1)</sup>。古代エジプトではミイラを製作していた関係上、ヒトの解剖がおこなわれ脳の存在も知られていたようである。このヒトの解剖の伝統はヘレニズム時代のアレキサンドリアに受け継がれ、ここではヒトの脳の解剖も行われていたとの記録が残っている<sup>(2)</sup>。



図 1. ガレノスの肖像画  
(Pierre Roche Vigneron による)

エジプト以後、ギリシャの代表的自然哲学者のひとりであるアリストテレスなどは、心の働きは心臓にあるとする考えを述べていた。しかしギリシャの医学者で後世のヨーロッパ医学に大きな影響を与えた Hippocrates (ヒポクラテス、BC460-BC370) は、脳の重要性を既に認識しており、脳の働きに関しては現代においても通用する記述を残している<sup>(3)</sup>。さらにローマ五賢帝の一人で『自省録』の著者もある Marcus Aurelius Antoninus (マルクス・アウレリウス、121~180) の典医であった Claudius Galenus (クラウディウス・ガレノス、129-260) は複数種の動物の解剖を行い、脳を含む生体の生理学的メカニズムについて考察した。ガレノスの思想は、その後継者によってヨーロッパの中世やアラビア社会までも続く大きな権威として伝えられた。かれらの心の働きは脳にあるとの考えは、体液を中心にして各臓器で生成される3種類のプネウマ(精神プネウマ、生命プネウマ、自然プネウマ)などの実態のない概念を持ち込み医学的観点から言えば正確ではなかったが、アリストテレスと比較すると現代的視点で見ても十分に通用する考えであった。ここでのプネウマとは、日本語の「精気」のようなものと考えられる。またガレノスはヒトの脳を解剖しなかったので、ヒツジの脳に見られる「怪網」とよばれる部位で、体液に精神プネウマが与えられ特殊な働きを行うと考えていた(図1, 2. 参照)<sup>(2)(4)</sup>。

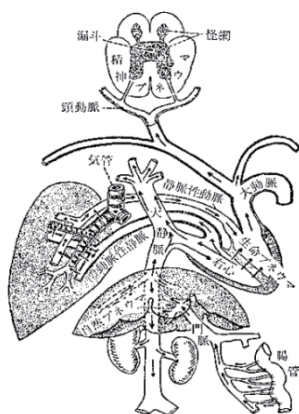
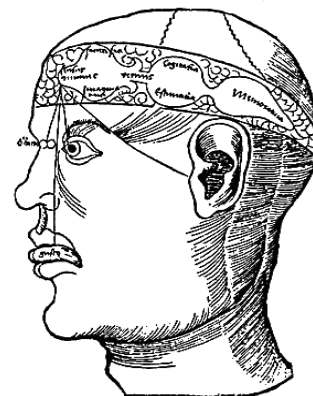


図 2. ガレノスの考えた人体構造

以上のような経過を踏まえ、脳と心の関係を論じる際、歴史的にみるとフランスの哲学者 René Descartes (ルネ・デカルト、1596-1650) が一つの節目となる。デカルト以前は、心身問題が突き詰めて考えられたわけではなく、それ以後中世にいたるまで、彼ら(ヒポクラテスやガレノス)のプネウマと体液説が権威ある定説としてよしも悪しきにもつけ受け入れられていた。中世の脳の記述では、脳はひょうたんのような3つの球状の部屋に分かれている構造をしており、それぞれにおいて感覚情報による共感覚、判断や感情、記憶などが行われているという単純なものであった。フライブルグ大学で学んだ Gregorius Reisch (グレゴリウス・ライシュ、1407-1525) が1503年に刊行した『哲学の真珠』という書籍<sup>(5)</sup>にも脳の構造を示した図が載っているが、この3つのひょうたん構造が描かれている(図3参照)<sup>(2)</sup>。かの高名なイタリアの画家である Leonard Da Vinci (レオナルド・ダ・ヴィンチ、1452-1518) は、多くの人体解剖図を残しているが、初期のものは想像で描かれた部分があり、図4のように、脳の解剖図では、哲学の真珠と同じ3つのひょうたん構造を無批判に取り入れている。ただし、彼は後期においては医学者とともに解剖に立ち会い比較的正確な人体解剖図を残している。

LIBER.X, TRAC.II. DE POTENTIS



【哲学の真珠】の頭部

図 3. 中世でのヒト脳構造(哲学の真珠より)



図 4. ダ・ヴィンチの脳構造スケッチ

これらの経緯を経て、ようやくベルギーの解剖学者 Andreas Vesalius (アンドレアス・ヴェサリウス、1514-1564) が、脳を含む中枢神経系の正確な解剖図を 1543 年刊行の著書『De humani corporis fabrica、ファブリカ』やその付録である『Epitome、エピトーム』のなかで残すようになってきた (図 5, 6. 参照)<sup>(6)</sup>。

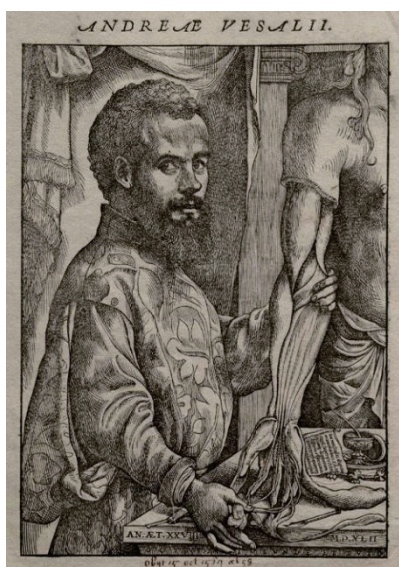


図 5. ヴェサリウスの肖像画 (ファブリカ)

彼はイタリアのパドヴァ大学で博士号を取得した後、ここで解剖学と外科学の教授に任命された。

従来解剖学の講義は大学の教授がガレノスのテキストを読み、実際の解剖は床屋・医者が行っていたが、さらに彼はその講義スタイルを変えた。すなわち自らが講義と解剖も同時に学生の前で行った。ガレノスの解剖図がヒトの解剖によるものではなく、動物の解剖によるものであることをヴェサリウスは最初に指摘した。彼のその解剖学者としての名声が上がるにつれ、囚人の死刑執行を行う際は、死体を解剖できるようにするために、裁判官がヴェサリウスのスケジュールに合わせて死刑執行をしたとまで言われている。



図 6. 1543 年刊行の「ファブリカ」の表紙

デカルトは、生体の働きを物理学や化学といった自然科学の方法で機械論的 (メカニズム中心) に明らかにできると考えたが、一方で、この機械であり物質でできている身体を物質とは別のものである心が、どのような作用によって動かしているのか、について考察も試みた。そこから心と身体は別のものであるという考えに至り、今日まで大きな影響を持つようになった心身二元論を唱えた。

## 2.1. デカルト以後の脳に対する考え方

デカルトはこのように人間の論理的思考能力に注目し、自然やものをこの思考能力をたよりにあくまでも理性に従って理解しようとした。このようなデカルトの考え方は、英国の Francis Bacon（フランシス・ベーコン、1561-1626）とともに近代以後の自然科学の方法論の基礎的概念となり、以後の Issac Newton（アイザック・ニュートン、1642-1727）や Claude Bernard（クロード・ベルナール、1813-1878）などの自然科学者に大きな影響を与えた。特に同じフランス人であるクロード・ベルナルの「実験医学序説」などの著書にはその影響を直接的見ることが出来る。以後、生体を自然科学の対象として取り扱うことが一般的になったが、彼の心身二元論の影響で心の問題のみは、自然科学の対象としてあつかうことを回避する傾向が生まれた。



図 7. ルネ・デカルト（Frans Hals 画）

デカルトのこの生体機械論に影響を与えた自然科学上の発見として、同時代の英国の医師 William Harvey（ウイリアム・ハーヴェイ、1578-1657）の血液循環説がある。これは、ガレノス以来の不完全な体液説に基づく生理学を覆し、血液が心臓から送り出され動脈そして全身を経由して静脈を通じて心臓にもどるような循環をしているとする純粋に科学的な発見であった。

またデカルト自身も生体のメカニズムに興味をもっており、近所の肉屋から牛の眼球をもらって来て、視覚の研究のためにこれを自身で解剖してそのメカニズムを研究したりしている。その結果、ヒトは二つの眼を持っているのにもかかわらず、実際に認識する像は一つであることから、脳内に二つの眼球から入ってくる外界の像を統一する場所が存在すると考え、「松果体」をその場所と推測した<sup>7)</sup>。さらにこの松果体は心と物理的基盤をもっている身体が相互作用する場所としても捉えられていた（図 7, 8. 参照）。

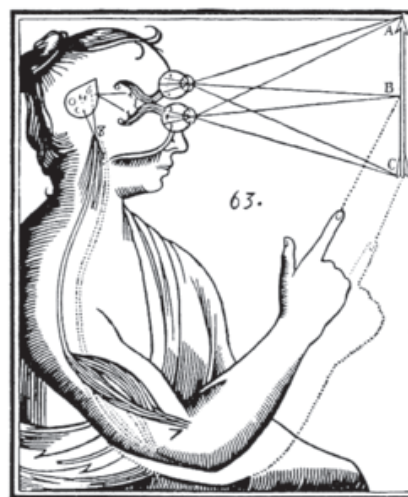


図 8. 人体機械論と松果体（人間論 1648 年刊）

当時のプファルツ公女エリーザベト（プファルツ選帝侯フリードリヒ 5 世の長女）は、彼の著作を読んで疑問に思う点があり、これをよく理解しようとデカルトに手紙を書いた。この手紙の趣旨は、物質でない精神がどのようにして物質である肉体に働きかけこれを動かすことができるのか、という素朴であるが本質的な疑問であった<sup>8)</sup>。これをきっかけとしたお互いの書簡のやり取りは、デカルトが心身問題について深く考える契機となった。このようにデカルトは、科学的に記述可能な「物理的実在」と科学的研究の対象にはなりえないと彼が考えた心という「精神的な実在」を明確に区別して、心身二元論を定式化した。しかしこのデカルトの心身二元論が、精神や意識を自然

科学の対象の外に置くという現代まで強い影響を及ぼす原因となった<sup>(9)</sup>。

現代に入ると大多数の神経科学者は意識やクオリアなどの心の働きは脳にあるとの考え（一言で表現すると一元論とよばれる）を受け入れている。しかしその詳細な生理学的メカニズムとなると現在でもよく理解されていない。このような状況の下で、脳の働きそのものがはたして現在手にすることができるサイエンス（生物学、化学、物理学、数学など）で理解できるものかどうか、というより基本的な問いかけをする研究も現れてきた。これは、上記の神経科学者以外に哲学者、数学者や心理学者なども含まれる。これらのうち、大きな論争を引き起こし、従来の視点とは異なる視点から論じられ、一つの契機となった考え方を提出した研究者として、英国オックスフォード大学の数理物理学者 Roger Penrose（ロジャー・ペンローズ、1931～）がいる。以下の節で彼の提唱した考えを取り上げる。

### 3. 物理学と脳科学

#### 3.1. ペンローズによる問題提起

ペンローズが、『皇帝の新しい心 --- コンピュータ・心・物理法則』を1989年に出版して、意識や心を物理法則で理解しようとする試みが注目されるようになった<sup>(10)</sup>。彼は、アインシュタインが提唱した相対性理論の専門家である。ここでペンローズは三つの議論を展開している。一番目は「ルーカス - ペンローズ議論」であり、二番目は「ペンローズの予想」ともよべる彼独自の考えである。三番目は、二番目との関連で「ニューロン内の微小器官を意識の具体的な場」として展開した議論である。これらは上記の著書とその続編である『心の影』の中で同時に展開されているが<sup>(11)</sup>、一番目と二番目の論点は、基本的には別の問題である。後者（二番目）において現在の量子力学を完成させることが意識などを自然科学で明

らかにするためのポイントになると強調して、以後の多様な分野の専門家を巻き込んだ論争の引き金となった<sup>(12), (13)</sup>。

一番目のルーカス - ペンローズ議論とは、オックスフォードの哲学者 John R. Lucas (ジョン・ルーカス、1929-) によって最初に提唱された1960年代の論文にまで遡ることができる<sup>(14)</sup>。このルーカスの議論を再度復活させたのがペンローズである。これは、数学基礎論においてオーストリアの数学者 Kurt Gödel (クルト・ゲーデル、1906-1978) が1930年に発表した「不完全性定理」とよばれる数学の基礎論に関する定理に関連している。このゲーデル不完全性定理を一言で表現すると「ある算術論理体系の中には、公理から出発して証明できないのに「真」であるような命題が、その算術体系の中に存在する」という根本的な限界を示したことである。これは、「たとえばある一連の法則のもとでつくられたある命題が証明不可能であることをゲーデルの定理が示している、別の一連の法則（人間の脳など）には、その命題の真偽が別の一連の法則（直観など）より判定可能である」ことを示唆している。すなわちアルゴリズムを実行する「チューリング・マシーン」によっては決定できないような命題が存在し、人間の脳はそれが判定可能であるということを主張している。これにより、人間の脳や意識は、「強い人工知能: strong Artificial Intelligence (strong AI)」である一種のコンピュータアルゴリズムだとする見解を否定することが可能になる。ここでいう強い人工知能とは、適切にプログラムを組まれたコンピュータは、心的状態をシミュレーションできるだけでなく、意識やクオリアなどの心を持つことが出来ると定義される。このペンローズの議論によれば、人間の脳はコンピュータではありえないということになる。しかし、これには現在でも論争が続いており決着がついていない問題である。

二番目のペンローズ予想とは、脳を科学的に理

解するためには、従来の自然科学的手法では不十分であり、量子力学（現在でもまだ不完全な要素を含んでいるが）にかかわり、それを超えるような新しい科学が必要であるとの主張である。このペンローズ予想は、さらに3つの構成要素からなっている。(1) 脳の働きを理解するためには、ニュートン力学のような古典的な物理学と量子力学との中間領域の物理学が関わっているとする部分。(2) 次にその中間領域の物理学がどのようなものであるかとの推測で、重力を含む統一場の理論が完成するとこの量子力学と古典物理学との間のスムーズな橋渡しができるとの主張している部分。(3) 実際の脳の中で量子力学的な過程が起こっている場所あるいは器官を示した部分。

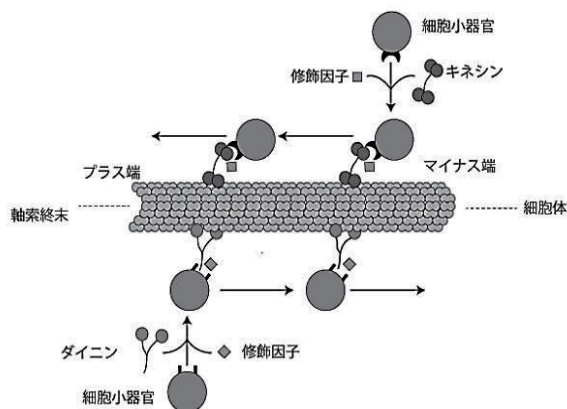


図9. 脳内の微小管とモータ・タンパク質  
(図は Chloé OKUNO による)

彼の議論の最後の三番目に相当する部分は、上記二番目の「ペンローズ予想」の小項目(3)と同じ内容であるが、生物学的内容に深く関連しているので、独立に分類している。ここでは、脳のニューロン内にある幾何学的に整った形状をもつ「微小管：マイクロ・チューブル」とよばれる構造が、量子力学とそれによって説明されるメカニズムによって働く意識などとの関連を示唆する場所であるとの主張をしている部分である。特に、この考えは米国アリゾナ大学の麻酔学者 Stuart Hameroff (スチュアート・ハメロフ、1947~) と

共同で提出した仮説である。すなわち、このニューロン内の波動関数の収縮過程が意識の発生と関連していると彼らは提唱している。図6にニューロン軸索内の微小管の働きとその構造を大まかに示している。ここでは、キネシンやダイニンとよばれるモータ・タンパク質がレールに相当する微小管上を移動することで、ニューロン内で神経伝達物質や代謝産物などの物質の輸送を行っている(図9参照)<sup>(15)</sup>。

### 3.2. 脳科学における量子力学の必要性

ここまで見てきたようにペンローズの主張には、意識に量子力学がかかわっているとする考え方である。ただしここでいう量子力学とは現在の未完成な形式での量子力学という意味ではなく、現在の量子力学を超えたところに存在するより完成された意味での量子力学を示唆している。ここまでの根拠をもう一度整理すると以下のようになる。

「意識には広い意味での計算不可能なプロセスがかかわっている。」  
 ---→「物理の古典的な法則には、この広義の計算不可能なプロセスは含まれていない。しかし、量子力学には広義の計算不可能なプロセスが含まれている可能性がある。」  
 ---→「量子力学のほかに広義の計算不可能なプロセスが存在する可能性がないので、意識には、量子力学がかかわっている。」

このように「計算不可能性」ということをキーポイントにして、量子力学と意識という問題が論理上必然的に結びついてきている。さらにこの量子力学において計算不可能なプロセスとして考えられるのが波動関数の崩壊(収縮)である。従って、意識の本質とは波動関数の収縮が計算不可能性であることと関連している。

次に、実際に脳の中で量子力学が関連しそうな(特に波動関数の収縮)構造や現象はどんなものであるかという問題が起こってくる。この点についてペンローズは先に出てきたニューロン内部

の微小構造物である微小管がそれに相当すると提唱した。しかしながら、この仮説に対しては、生物学者から物理学者（生物の内部では、周囲に存在する多数の分子からのランダムな作用やまた室温に近い温度環境によってデコヒーレンスが起りやすいなど）までを含む多くの批判があり問題点の多い仮説である。

### 3.3. 量子力学の日常感覚からずれた奇妙な性質

ここまで波動関数の収縮などを含む量子力学について言及してきたが、ここで行っている神経生物学の議論に最低限必要な程度の日常生活からはずれた量子力学の性質についてまとめておく。この日常感覚からずれた奇妙な性質とは以下の4つである。

- (1) 波動と粒子の二重性
- (2) トンネル効果
- (3) 重ね合わせ
- (4) エンタングルメント：量子もつれ

以上の概念について説明を加える前に量子力学の成り立ちについて簡単に説明を以下を行う<sup>(16)</sup>、<sup>(17)</sup>。

19世紀の終わりに物理学における重要な発見が4つほど連続して起こった。それらは、X線、電子、ゼーマン効果、放射能である。これらはどれも実験的発見であるが、この発見を契機として微視的なスケールでの物理学への関心が一気に高まり、原子に対するアイデアが現実のものとなってきた<sup>(18)</sup>。一方、20世紀の初めに完全な黒体を熱した際に輻射される光スペクトルの温度依存性を説明する主に工学的必要性から、ドイツのMax Plank（マックス・プランク、1858-1947）は、1900年にプランクの公式を導き出した。ここでは彼自身も認められなかった「エネルギー量子」という考え方が導入された<sup>(19)</sup>、<sup>(20)</sup>。これによって、それまで物理学は電磁気学、ニュートン力学、熱力学によってほとんど完成されたと思われていた常識に大きなほころびをもたらす契機となっ

た。このアイデアを支持するような光量子仮説が、光電効果を説明するために当時スイスの特許局に勤務していたドイツ系ユダヤ人の Albert Einstein（アルバート・アインシュタイン、1879-1955）によって1905年に導入された。

さらに1819年にフランスの Pierre Louis Dulong（ピエール・デュロン、1785-1838）と Alexis Thérèse Petit（アレクシス・プティ、1791-1820）は、「あらゆる単体の原子は厳密に同じ比熱をもつ」という法則を見出していたが、これに例外が見出された。この矛盾を上記のアインシュタインがエネルギー量子を導入することで定性的に証明することに成功した。この業績がドイツ・ベルリン大学の Walther Hermann Nernst（ヴァルター・ネルンスト、1864-1941）の認めるところとなった。これらの議論は1911年の第1回ソルヴェイ会議で議論された。さらにニュージーランド出身で英国ケンブリッジ、キャベンディッシュ研究所の Ernest Rutherford（アーネスト・ラザフォード、1871-1937）は、1911年に $\alpha$ 粒子の散乱実験結果に基づいてラザフォードの原子模型を考え出した。この模型はその後様々な影響を宇宙物理学などをはじめとする物理学の各方面へ影響を及ぼした<sup>(21)</sup>、<sup>(22)</sup>。

以上の経緯においてデンマークの Niels Henrik David Bohr（ニールス・ヘンリック・ボーア、1885-1962）がラザフォードの原子模型に量子仮説を導入してボーアの原子模型を提唱し、不完全ながら「前期量子論」を作り上げた。このボーアの原子模型は水素原子の線スペクトル（バルマー系列など）を物理的に説明するために考え出された理論であった。ここでは、水素原子核の周りを円軌道で回る電子の軌道を量子化して一つの定常状態から別の定常状態へ電子が遷移する際にその定常状態間のエネルギー差に相当する光を放出するというアイデアを示した。さらにこのボーアの原子模型をドイツの Arnold Johannes Sommerfeld（アルノルト・ゾンマーフ



ェルト、1868-1951) が楕円軌道をもつモデルへと、その3年後に一般化した。ここで彼らは、この光のスペクトルを説明するために三つの量子数  $(n, k, m)$  を導入した。さらにこの模型は原子内電子の配置を考慮した殻模型へと対応原理に従いながら拡張された。この対応原理は、古典物理学の巨視的なスケールで得られる観測結果と、原子の微視的なレベルで成立している量子規則から導かれる結論の間には、矛盾がないことを要請するものである。ただしこの時点でのボーア・ゾンマーフェルトの原子模型は、実験結果を説明するために導入された模型であり、古典物理学に大きな変更を加えうるような新しい物理学の基礎的な考えから導出されたものではなく、不完全なものであった。

さらに、未解決の問題として光の波動論と粒子論が互いに決着のつかないまま当時存在していた。しかしながら、1925年に米国の **Arthur Compton** (アーサー・コンプトン、1892-1962) が、光の電子による弾性散乱であるコンプトン効果を発見して以来、光の粒子説も現実性を大きく帯びてきていた<sup>(23)</sup>。

これらの光の粒子論と波動論の矛盾を説明するために、フランスの **Lois de Broglie** (ルイ・ド・ブロイ、1892-1987) が電子のような従来物質と考えられていた粒子も波動としての性質を持っているとの考えを示した<sup>(24)</sup>。さらに、彼はこのアイデアに導かれ、ボーア・ゾンマーフェルトの原子模型での電子軌道が波長の整数倍になる時に定常状態をとると考えた。一方、ドイツの **Werner Heisenberg** (ヴェルナー・ハイゼンベルグ、1901-1976) は、新しいマトリックス力学を定式化し、ドイツ生まれの英国の物理学者 **Max Born** (マックス・ボルン、1882-1970) などともに、原子が発生する光のスペクトルなどをうまく説明した。ハイゼンベルグはさらに1927年に不確定性原理を提唱した。一方、オーストリアの **Erwin Schrödinger** (エルヴィン・シュレディン

ガー、1887-1961) は、ド・ブロイの提唱した電子のような粒子も波のような振る舞いをするとの考えに着想を得て、1925年にシュレディンガーの波動方程式を定式化した<sup>(25), (26)</sup>。これによって原子内での電子の振る舞いなどをうまく説明することで自らの考えを推し進めた。さらにはこれらの二つの理論形式が数学的には全く同等であることを証明した。また、英国の **Paul Dirac** (ポール・ディラック、1902-1984) は、量子力学の基礎となる理論を構築し、ここに電子や原子などの関与している微小なスケールでの物理現象が従来 of 古典的な物理法則とは異なっていることを示す量子力学が一応の完成をみた<sup>(27)</sup>。特にシュレディンガーの波動方程式は古典的な考え方に慣れ親しんでいた物理学者にとって受け入れやすく、また広範囲の問題に適応されて満足のいく結果を与え、ハイゼンベルクの行列力学より広く受け入れられた。

上記と平行して、1895年ごろから始まっていた原子物理学上の問題は、1920年代の終わり頃までには次から次へと解決されていき、次の関心は原子核の問題へと移っていった。1930年の初めには、ケンブリッジ大学の **James Chadwick** (ジェームス・チャドウィック、1891-1974) が中性子を発見し、イタリア出身の **Enrico Fermi** (エンリコ・フェルミ、1901-1954) が中性子を原子核に衝突させて核分裂の連鎖反応を起こす実験をシカゴ大学で行った。さらに英国のキャベンディッシュ研究所で **John Cockcroft** (ジョン・コッククロフト、1897-1967) とその共同研究者であるアイルランド出身の **Ernest Walton** (アーネスト・ウォルトン、1903-1995) が、最初の加速器を製作した<sup>(17)</sup>。これによって陽子を加速することでリチウム原子核をヘリウム原子核に変換して、最初の人工核反応を起こした。これら一連の研究によって原子核物理学の実験が次々と推し進められた。この量子力学では、粒子に区別を与えており、光子でありスピンの値として整数値(1な

ど)をとる「ボゾン」や電子、陽子、中性子などの多くの粒子でありそのスピンの値として半整数値 ( $1/2$ ,  $3/2$  など)をとる「フェルミオン」などの概念も生み出された。日本の朝永振一郎(1906-1979)なども貢献した量子電磁力学をへて素粒子物理学を開く場の量子論へと発展してきた<sup>(28)</sup>。

さらに、この新しい理論である量子力学の物理的解釈を巡って、アインシュタインとコペンハーゲンのボーアを代表するグループの間で大きな違いが明らかになっていった。これは1927年及びそれに続く1930年の計2回のソルベイ会議などでも大きな論点となった。特に相対性理論や光量子説を定式化したアインシュタインは、上記2回のソルベイ会議において量子力学の「理論的矛盾」をその論破の根拠として思考実験を示したが、これがボーアらによって反論されたため、別の角度から量子力学批判を試みた。そこで、次にこの量子論の「解釈」を巡っての議論に、EPR論文(Einstein – Podolski – Rosen 論文)を発表するなど、彼が力を注いだもう一つの大きな問題である「重力と電磁力の統一場の理論の研究」と共に、亡命後のプリンストン高等研究所での晩年における研究人生の大部分をささげた。ここで、EPR論文の正確なタイトルは、「Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ?」である<sup>(29)</sup>。彼のボーアらの量子論の解釈(コペンハーゲン解釈とよぶ)に対する論点の中心にある考えは「光」よりもはやく伝わるものは存在しないと言う考え方(局所性)であった。さらに不確定性原理、波動関数の確率論的解釈、相補性の原理、波動関数の収縮などでもボーアらは統一見解を持っていた。アインシュタインはボーアらの解釈に最後まで納得しなかった。このボーアとアインシュタインの論争は煎じつめると「量子の世界というものは存在せず。あるのはただ抽象的な量子力学の記述だけである。」という考え方(実証主義)と「観測者と

は独立に因果律に従う世界が存在し、物理学はその存在するものの性質を明らかにすることである。」(実在主義)という物理学に対する二つの対立する考え方をそれぞれ代表している。例えば、前述のペンローズやシュレディンガーなどは、実在主義をとっている。

しかし、アインシュタインらの死後、アイルランド出身の物理学者 John Stuart Bell (ジョン・スチュアート・ベル、1928-1990) がこれら対立する考え方に対して決着を与えうる理論(ベルの不等式)を考え出した。彼以前に、ハンガリー生まれの数学者で29歳にしてプリンストン大学の教授になった Johannes Ludwig von Neumann (フォン・ノイマン、1903-1957) は、その著作『量子力学の数学的基礎』において、「隠れた変数を導入することによって量子力学を完全なものにすることは不可能である」すなわち、「量子力学を拡張することは不可能である」であることを証明したと述べていた。さらにボルンは、このノイマンの証明を「量子力学の非決定論的性質を、決定論的なものに変換するような、隠された変数を導入することは不可能である」ことを示したものと述べ、コペンハーゲン解釈をさらに強固なものにした。

ところが、ベルは、隠れた変数のアプローチが取れることを示した米国の David Joseph Bohm (デビット・ボーム、1917-1992) による論文を読んで、フォン・ノイマンは間違っていると考えるようになった<sup>(30)</sup>。さらに、彼は、ボームのモデルが持つ非局所性は、このモデルに特有の奇妙な性質なのか、あるいは量子力学の結果を再現するために作られた隠された変換理論なら、どんなモデルにもそなわっている性質なのかを明らかにしようと最初に考えた。そこで、局所的な性質をもつ隠れた変数理論を構築することを試みた。しかし、結局これを達成することはできなかった。EPR論文の結論である「物理学の基礎理論は局所的であるはずだと考えられているから、量子力

学の記述を完全なものにしようとする、どうしても非局所性が出てくる」などを考慮しながら最終的に上記のベルの定理に到達した。すなわち、もし隠れた変数が存在するならば成り立ちうる不等式（ベルの不等式）を導いた<sup>(27)</sup>。この理論を検証するために、フランスの Alain Aspect (アラン・アスペ、1947-) らが 2 個の光子を使った実験を行い、ベルの不等式が成立しないこと、すなわち隠れた変数が存在しないことを示した。これによって、アインシュタインとコペンハーゲングループの論争を一応決着させ、コペンハーゲン派に軍配が上がった。

一方、シュレディンガーは、独自の立場からボーアらの考え方に賛成できず、1935 年に有名な「シュレディンガーのネコ」と呼ばれるパラドックスを示して、ボーアらの解釈の矛盾を指摘し、量子力学の根幹に切り込む問題提起を行った。このパラドックスに対しては、今日でもきちんとした決着をみておらず、大まかに分類して以下の 3 つの解釈が存在する。(1) コペンハーゲン解釈、(2) ウイグナーによる解釈、(3) 多世界解釈である。(1) のコペンハーゲン解釈は、上記のハイゼンベルグやボーアらによって提出された解釈である。これによるとネコの生死の状態は箱を開けるまではわからず、箱を開いて観測すると、ネコの波（死んでいるネコと生きているネコの重ね合わせ）が一つの波に「収縮」するので、ネコが死んでいる（または生きている）ことが分かる。観測によってネコの生死の状態が一つに決定される。(2) の解釈は Eugene Paul Wigner (ユージン・ウィグナー、1902-1995) によって 1967 年に考え出された。これによると、意識を持つ人間だけが観測を行って波動関数を収縮させることが可能である。しかし、その観測する人間をさらに観測する観測者（ウィグナーの友人とよんでいる）の存在が必要となり、最終的に「不滅の意識」のような存在が必要になってくる。従って、シュレディンガーが提出したパラドックスを矛盾な

く定式化するためには、意識を考慮しなければならないとウィグナーは結論づけた。この考えによると意識は宇宙の根本をなす存在であり、物質世界は移り変わっても、意識は変化せず、意識が現実を生み出しているという解釈になる。これはペンローズとは別の角度からの量子力学と意識とのかかわりを示しているといえよう。(3) の多世界解釈は、1957 年にプリンストン大学の大学院生であった Hugh Everett III (ヒュー・エヴェレット、1930-1982) によって提出された。すなわちボックスの中にいるネコは、蓋が開けられた瞬間に宇宙は二つに分裂し、一つの宇宙ではネコは生きており、もう一つの宇宙ではネコは死んでいる、ということになる。これによると量子的な世界でおこることはすべて、無数の平行な宇宙の中で現実を起こっている、波動関数を収縮させる観測や測定は必要ない。これは最近では量子宇宙論の研究者にも真剣に検討されている<sup>(31)</sup>。

以上の 3 つの解釈があるが、その他の解釈は基本的にこれら 3 つの解釈のどれかに当てはまる。ここではこれ以上これらの解釈の詳細には触れないが、量子力学の根幹にかかわる大きな問題として未解決である。さらに上記のアスペの実験などは、最近盛んに研究されている量子コンピュータへの原理を与えている。

この節の最初に上げた量子力学の奇妙な性質にもどると (1) は、電子など古典的には物質と考えられていたものも同時に光のような波動としての性質を示し、この 2 重性が古典力学では理解できない。(2) のトンネル効果は、電子などの粒子が古典物理学では透過が不可能なエネルギーの障壁を超えて反対側にもある確率で存在するというを示唆している。(3) では、物理的な状態は波動関数で示される可能なりうる状態のどれか一つに決まっているのではなく、それらの複数の状態の重ね合わせとして存在しているということを主張している。(4) のエンタングルメントは、例えば、2 つの系や 2 個の粒子がどれ

ほど遠くに離れていようとも、それらがお互いに分ちがたく深く結びついている場合があるという量子的現象で、このときこの2つの物の間で影響が瞬間的に伝わる性質を持っている。この性質を非局所性とよぶ。このとき影響が伝わる速さは光の速さよりの速く伝わるので相対性理論の要請を満たすことが出来ない<sup>(22), (27)</sup>。

### 3.4. 古典的物理学による意識の理解

以上ペンローズの考え方に従って、意識などの心の問題を自然科学の対象とする場合における量子力学の必要性を提起したが、さらにこの考えを吟味する前に神経における脳内過程を支えている実体についてもう一度考えてみる。これによって古典物理学で記載される従来の脳内メカニズムの限界が理解でき、おのずと量子力学の必要性が要請される理由が浮き彫りになる。

我々の脳内で起こっている生理学的プロセスは、個々のニューロンが、その膜内外の電位差としてイオンの流れによって発生させるパルス状（高さ~100 mV, 時間幅~1 ms）の電位変化である「活動電位」が基本になっている。またこれら各ニューロンを「神経伝達物質」を介して互いに接続しているシナプスという特殊な構造（特にシナプス後部）がある。ここで発生するアナログ信号に相当する「シナプス電位」も電気信号として存在する。脳はこれら3つの要素からなる神経回路網の働きによっている。すなわち、脳の機能単位である神経回路網は、神経伝達物質などによる「化学物質」と活動電位とシナプス電位の「電気信号」の2種類の信号を伝達することで基本的な情報交換が行われている。特にこの電気信号の発生のメカニズムは古典的な物理法則で表現することができ、量子力学を必要としていないと一般に考えられている。ここでは量子力学を持ちだして議論することはほとんどない。実際に多くの神経学者は上記のように考えている。古典的物理法則すなわち、特にニューロン上で発生する活動電

位というパルス状の電位変化の時間的・空間的変化によるダイナミックな変化によって神経回路網の働きが理解されると考え、さらにはこれらを基盤とする脳機能を理解できると推測している。このように活動電位の時系列やその空間的変化パターンによって神経回路網の機能、言い換えると意識などの脳機能が古典的物理法則で表現されると仮定できる。ここで使われている古典的物理法則（特に電磁気学）は因果関係のはっきりした計算可能なアルゴリズムの性質を備えている。従って、脳機能は、必然的に因果関係のはっきりした計算可能なアルゴリズムで究極的にはあらわされることになる。一般にこれを「computational theory of mind、心の計算理論」と呼んでいる<sup>(32)</sup>。

しかし、脳はゲーデルの不完全定理によって示唆されるように、計算可能なアルゴリズムでは証明できない命題でも真偽を判定できる。従って、ここにその原理に量子力学に則った広い意味での「量子コンピュータ」としての脳の特殊な性質が現れてくると考えることができる。そこで、ペンローズとハメロフが提唱したにもかかわらず、非常に分が悪い「微小管」以外に神経系の中のどこにこのような量子コンピュータとしての性質をもった構造ないしは器官などを求めればよいかが次の問題となる。これに関しては、特定の脳やニューロンの内部に存在する器官でこのような量子過程が起こっている場所は現在のところまだ特定されていない。

### 3.5. 複雑系とカオス理論による脳機能

前項でのべた古典物理学に従う決定論に関して、その決定がそれほど単純でないと言うことを言い出したのは19世紀末期のフランスの数学者 Jules-Henri Poincaré（アンリ・ポアンカレ、1854-1912）であった。その後、京都賞（1991年、基礎科学部門）を受賞して日本でもおなじみの米国 Massachusetts Institute of Technology（マサ

チューセツ工科大学、MIT) の気象学者の Edward Norton Lorenz (エドワード・ローレンツ、1917-2008) によってカオス理論が見いだされた。ここで大気の動きを表すために3つの単純な方程式が利用され、この方程式をコンピュータで解く際に見いだされた解が、初期値がわずかに異なるだけで、その後の種々の振る舞いに劇的変化が現れることが分かった。これをローレンツは「バタフライ効果」という言葉で表現した。日本でも昔から、「春風が吹けば、桶屋が儲かる」などという言葉で似たようなことが表現されている。しかしこの一見ランダムにふるまうカオス系は、それを解く方程式の初期値が与えられると決定論的に決まってしまう。従って、初期値が同一であれば、複雑な運動も完全に再現することが出来ると言う意味で量子力学における非決定性とは基本的に異なっている。すなわちカオス系は無限の能力をもつ仮想のコンピュータを使えば原理的には未来の状態を予測することが出来る<sup>(32)</sup>。

これを約 1000 億個のニューロンとさらにその 10 倍もの個数からなるグリア細胞からなる人の脳に当てはめて考える<sup>(33), (34)</sup>。この各ニューロン内にはリボソームや細胞核などのさまざまな細胞内小器官やシナプス膜に存在するタンパク質などの構造物が存在している。これらの小器官や構造物は分子からつくられているが、その周りに存在する膨大な数の他の分子から絶えまない熱運動にさらされている。従ってこの多数の分子の初期状態が決まってさえすれば、その後の分子の状態は決定論的古典物理学に従うので、将来のニューロンの状態は基本的に予測可能ということになる。さらに踏み込んで考えると人の行動やこれらを生みだしている脳内のニューロンにおける電気信号によってつくられるダイナミックな時空間的活動パターンは、我々が生活している地球上でおこり、それはさらにこの宇宙でおこることに一部である。従ってカオス理論に従えば、これらの出来事はすべて決まっているという結論

になる。

このようにカオス理論によって意識のメカニズムを明らかにしようとする定式化はこの意味で量子力学を導入しようとする定式化とは区別されるべきである。

### 3.6. 量子力学が脳の研究に有用である他の理由

量子力学の基本的な原理の一つとして「不確定性原理」があげられるが、この不確定性原理の観点からシステムを考える。この原理によれば、電子の位置はその確率的な分布を計算することは出来るが、ある特定の瞬間に、この電子がどこにあるかその位置を正確に決定することは出来ない<sup>(27), (23)</sup>。この確率をあたえるのがシュレディンガー方程式の波動関数である。個々の電子の波動関数は、同じ波動関数を持っている多くの電子の振る舞いを示す。ある一個の電子が見つかる場所は一か所であるが、多数の電子が存在すると、それらの存在している場所が波のような分布となって表現される。すなわち、波動関数は、電子が最終的にある場所に存在する確率を与えている。このように波を描き出すには多数の電子が必要であるが、量子力学の特殊性は、個々の電子がやはり波によって記述されるという点である。すなわち、電子については何事も「確実」には予測できない。電子の位置を測定すれば、確かに電子はある明確な位置に存在する。しかし、その測定をするまでは、電子が結果的にどれだけの確率でそこにいるかを予測出来るだけである。それが最終的にどこにいるかを明確に決めることは出来ない。不確定性原理は、この「運動量」と「位置」との関係以外にも「エネルギー」と「時間」の関係においても成立している<sup>(22)</sup>。

この量子レベルでのランダム性が神経回路の振る舞いに反映されて生物の予測不能な不規則な行動が起こっていると言う可能性はある。この意味においても神経研究に量子力学が応用される可能性がある<sup>(32)</sup>。

## 4. ニューロンのマイクロマシン

### 4.1. 量子力学の対象となりうる脳内過程

脳内に量子力学的考えでしか説明できないような現象をさがすことが重要であるが、最近の研究では生物の他の分野においても量子力学でしか説明のできない現象が複数報告されてきている。

例えば、光合成でクロロフィルが受容した光のエネルギーを効率よく「反応中心」とよばれる部位へ運ぶ過程であるエネルギー・トランスファーがその部位と考えられている。このエネルギー・トランスファーにおいて複数の経路を同時にとる「量子的コヒーレンス状態」が起こっているなどの報告がなされている<sup>(35)</sup>。また、生体内で代謝や遺伝子発現など重要な生化学反応を制御している多数の酵素はその機能発揮において「量子的トンネル効果」が重要な役割を果たしているとの研究結果も報告されている<sup>(36)</sup>。

振り返って今問題にしている中枢神経系内で、量子力学が関係しそうな部位として真っ先に想定される代表的なものが、神経の興奮現象に関与している活動電位やシナプス電位のような電気現象の素過程となっているイオンチャンネルである。

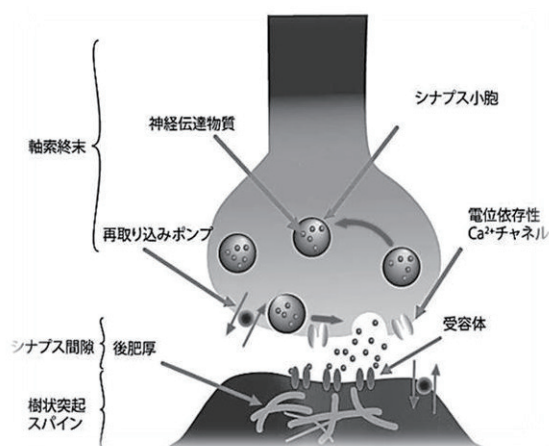


図 10. シナプスの機能と構造  
(図は Chloé OKUNO による)

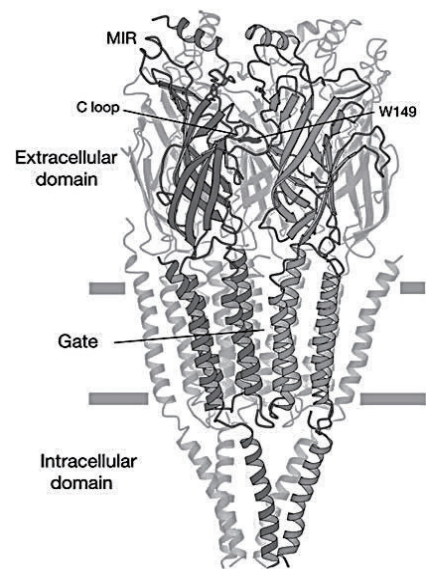


図 11. ACh 受容体チャンネルの 3 次構造

図 10 と 11 に示すように、ニューロンやシナプスにおける種々の電気信号の発生過程は、イオンチャンネルというタンパク質で構成された一種のマイクロマシンの構造変化（この場合タンパク質のコンフォメーション変化とよぶ）を基本としている<sup>(37), (38)</sup>。このイオンチャンネルはその大きさは長さ約 1.2 nm (ナノメートル)、系は約 0.5nm 以下であってニューロン膜に埋め込まれている。このタンパク質の一次構造や膜内で形成している 3 次元的構造は、現在も構造生物学の一分野として、分子生物学の発展とともに明らかになってきている。このイオンチャンネルは、その内部に開閉可能な通路（チャンネル）を有している。問題としているイオンチャンネルが閉状態にある時は、一般にニューロンの膜は、 $K^+$ を主に透過させるため、ニューロン膜の内外に存在するこのイオンの濃度差によって発生する電気化学的な電位差（ネルンストの式によって導かれる）が存在する<sup>(39)</sup>。この値は、標本によって異なるが、ニューロン外を基準として測定すると、およそ -60~-70 mV 程度である。この電位差を静止膜電位とよび、ニューロンの電気信号を論じる際には、この電位差が発点となる。この通路が開状態にあるとニューロン

膜の内部と外部（ニューロンの内側と外側）が空間的につながることで、各種のイオン（ $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  など）がその濃度勾配と電位勾配に従って流れ、ニューロン膜の両側に電気信号が発生する<sup>(39), (40), (41)</sup>。この通路が閉状態になるとイオンの流れが遮断されてニューロンを構成している細胞膜と横切って移動する「イオンの流れ」が消失し、電気信号が変化を受ける。このイオンチャンネルの開閉をゲーティングのカイネティクスとよび、この開閉を制御している生理学的要因の違いによって活動電位やシナプス電位の発生が起こる<sup>(42), (43)</sup>。しかしこの違いは制御方式の違いのみであって電気信号の発生過程がチャンネルの開閉によっている点は同じである。

またこのイオンチャンネルの特徴として、特定のイオンチャンネルは、各イオンに対してその選択透過性が高いことがあげられる。例えば、多くの生理作用を担っているカルシウムチャンネルは、 $\text{Ca}^{2+}$  を選択的に通し、それよりも小さい $\text{Na}^+$ は、半径が小さいにもかかわらず、ほんのわずかしかなら通過させない。

このイオンチャンネルは、ニューロンが発生させる電気信号を生み出す原因となっているので、このイオンチャンネルの状態はニューロンの発生させる電気信号の状態に反映されていると考えられる。また脳の機能単位である神経回路網は、ニューロンがシナプスを介して互いに接続して電気回路網のように構成されているので、この神経回路網の機能はその電気信号によって生み出されていると考えられる。ここでのシナプスの構造とそのシナプス後部膜に埋め込まれている受容体チャンネル（アセチルコリン受容体）の形状は図7を参照<sup>(15), (39)</sup>。

2012年にこのイオンチャンネルに関して以下の研究発表がされた。すなわち、電位依存性イオンチャンネルの内部を通過するイオンを量子力学的にシミュレーションした結果、イオンがこのイオンチャンネル内を通過する時は、このイオンはコヒ

ーレントな波動のようにチャンネル内部に非局所化して拡がっていることが示唆された<sup>(44)</sup>。さらにこのときチャンネル内部のイオンは高い周波数で振動しており、チャンネルの周囲を構成しているタンパク質と一種の共鳴状態にある。その結果、このチャンネル内部のイオンのエネルギーの一部が周りのタンパク質に移動し、イオン自身の持つ運動エネルギーが半分程度に下がる。すなわちイオンチャンネル自体がイオンを冷やすことでコヒーレント状態が保たれ、イオンの非局所的量子状態が維持されたままチャンネルを通過することができる。これは、ニューロンの基本的な電気信号発生過程に量子的効果が発現していることを示す結果である。そのイオンチャンネルによる電気信号によって信号を伝達している神経回路網、さらには脳の機能自体にも量子効果が発現していることを示唆している。また、この考えに従うと、イオンの透過性も上手く説明できる。すなわち、このチャンネル内を通過するイオンが周囲とどのような共鳴状態にあるかでコヒーレント状態を実現するための冷却温度が異なる。このことが特定のチャンネルのイオン透過性を決めている可能性がある。以上が最近の量子力学的効果が脳内の何らかのプロセスに影響を与えているのではないかと考えられる。

## 5. その他の可能性

以上の外に、量子力学が発現する可能性がある脳内プロセスとそれに対する考え方をほぼ箇条書きに示し、その内容を簡単に列挙しておく。

### 5.1. アイリングの絶対反応速度論とチャンネル

従来からイオンチャンネルの透過性を示す理論的モデルとして、アイリングの絶対反応速度論をチャンネル内のエネルギー障壁と通過するイオンの相互作用で説明する考えが提出されてきた<sup>(40), (41)</sup>。この考えではイオンが通過するニューロン膜に埋め込まれている電位依存性ヤリガンド

依存性イオンチャネル内側に配位している原子や分子によって内部に通過するイオンに対するポテンシャル・エネルギー（主に電氣的ポテンシャル・エネルギーによる）のプロファイルができる。イオンチャネル内を通過するイオンは、このポテンシャル・エネルギーの障壁を超えながら細胞外から内へ、また細胞内から外へと移動する。このモデルにたいして量子力学的トンネル効果を新たに適応することで、電気生理学実験で得られた実験結果を説明できる可能性がある。そうすれば、これもニューロンの電気信号を発生させるメカニズムに量子力学的効果が関与している証拠になる可能性がある。

## 5.2. 麻酔薬とポーリングの水性相理論

ノーベル化学賞を受賞した米国の Linus Carl Pauling (ライナス・ポーリング、1901- 1994) は、マサチューセッツ総合病院科学諮問会の委員を兼ねているとき、麻酔専門医の講演を聴く機会があった。このときキセノンに麻酔薬として使用すると意識がなくなる点に注目した。自分の息子が医者であり彼との議論を通して麻酔薬として作用する化学物質に希ガス多い点に着目した。希ガスはイオン化するために比較的多くのエネルギーを必要とする。また他の原子と科学的に結合させて化合物をつくるのが難しいなどの特徴がある。これら希ガスでは、原子内の電子の配置は安定でいわゆる電子軌道の殻が閉じていると考えられる。図 12 に示されているように、彼は、キセノンは水分子のクラスターを安定させて小さな結晶構造をつくるのではないかと考えた<sup>(45), (46)</sup>。すなわちこの希ガスが脳内の水分子と相互作用をして水分子の周りに配位し水分子を特殊な安定状態にさせる可能性がある。この仮説（ポーリングの水性相理論）は、全身麻酔薬の大気圧依存性という性質も説明することができる<sup>(47)</sup>。脳内の水分子がこのような特殊な安定状態になると意識がなくなるとの仮説を提唱した。しかし、この

説はいまだ証明されていない。

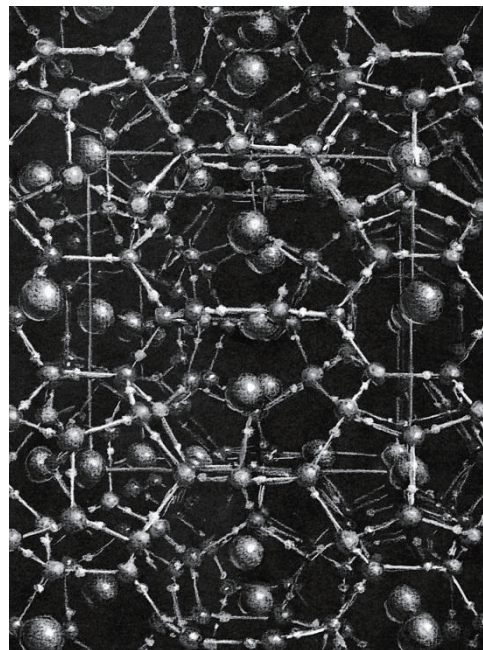


図 12. 水和したキセノン原子と水性相理論<sup>(45)</sup>

## 5.3. 筋収縮のメカニズムと量子力学

脳そのものの働きとは少し異なるが、脳の運動野のニューロン（ベツ細胞）の興奮に始まる筋肉の収縮メカニズムにおいても量子力学で説明可能な現象がある。この脳の運動野から発した活動電位は脊髄内の運動ニューロンへアセチルコリンを神経伝達物質とする化学シナプスを介して伝達される。脊髄内の運動ニューロンで発生した活動電位は体の筋肉に到達する。ここで神経筋接合部であるシナプスを介して筋肉に活動電位を発生させる。これが筋肉内の T-管と伝搬し最終的にこれと連結している筋小胞体膜を脱分極させ、この膜に埋め込まれているリヤノジン受容体チャンネルを活性化させる。この活性化されたリヤノジン受容体チャンネルを通して筋小胞体内に貯蔵されていた  $\text{Ca}^{2+}$  がアクチン・フィラメントとミオシン・フィラメントの存在している筋節内に放出されて収縮が引き起こされる。その後、このアクチン・フィラメントとミオシン・フィラメントが互いに滑り込むことによって筋肉の収縮が始まると考えられている。



このとき、筋小胞体から放出された $\text{Ca}^{2+}$ がアクチン・フィラメントにあるトロポニンのカルシウム結合部位に結合することがトリガーになり、アクチン・フィラメントに接触したミオシン・フィラメントの頭部が曲がることで滑り込みが発生すると考えられている。しかし、このときミオシン・フィラメントの頭部が曲がるメカニズムに関しては、正確にわかっていない<sup>(48)</sup>。この分子機構に量子力学を使ったメカニズムが関与している可能性が考えられる。

さらにこの筋肉収縮の分子機構メカニズムでよく理解されていない点は、収縮に必要とされるエネルギーについてである。すなわち、ミオシン・フィラメントの頭部が ATP アーゼとして働き、この頭部にある ATP と結合する部位は、ポケット構造になっており、このポケット構造内で ADP とリン酸に分解した ATP のエネルギーが一時的にその内部に保存される。一般にこのような ATP が ADP とリン酸に分解する際に生じるエネルギーは一瞬にして散逸してしまい一定時間保存されることはないと考えられている。しなしながらこの場合、ATP が分解された後もその化学エネルギーはある一定時間このポケット内に保存され、その後必要な時に利用されることが分かっている。しかし、このエネルギーがポケット内に保存されるメカニズムは理解されていない<sup>(48)</sup>。ここにも量子力学を適用することでうまく説明できるメカニズムが関与している可能性がある。

#### 5.4. エクルズ・ポッパーの新二元論

抑制性シナプス後電位の発見によってノーベル賞を受賞したオーストラリア出身の生理学者 John Carew Eccles (ジョン・カルー、エックルズ、1903-1997) は、オーストラリア出身で英国の哲学者 Karl Raimund Popper (カール・ポッパー、1902-1994) とともにデカルトの思想に戻るような二元論を提出した。彼らの考えは、3つの全く異なる世界が存在し、それは、「物理的な物とそ

の状態からなる世界」と「意識の状態からなる世界」、さらに「あらゆる形式で表現される文化からなる世界」である。特に前者の二つは互いに相互作用をし合っているとしている。ここでこの第2の世界と第1の世界の相互作用として、シナプスにおける情報伝達に「意識」が直接働きかけることが出来ると考えている<sup>(49), (50)</sup>。特に脳内の体の動きを制御している領域のシナプス伝達に意識が作用することによって、自由な意思が成立しているとしている。すなわちデカルトが主張し、エリザベートが疑問を呈したように、非物質的な魂（ここでは意識と同義で使っている）が物質的基盤をおくシナプスに作用しているという説を唱えている。しかし、現代のエネルギー保存法則を知っている我々から見るとこの考え方には、納得できない点が多い。すなわち、もし魂がシナプスに働きかけることが出来るとすれば、これは物理学で言うところの「仕事」に相当し、仕事が行われると必ずエネルギーが消費される。従ってシナプスの伝達に魂が何らかの作用を及ぼしてエネルギーが消費されると、その物理的痕跡が残っている必要があるが、この痕跡は実際の実験で測定されたことがない。すなわちエネルギー保存の法則という過去に一度も矛盾をきたしたことの無い物理学の大前提から考えると、エクルズ・ポッパーの主張している仮説は成立することが不可能である<sup>(32), (51), (52)</sup>。

## 6. まとめ

脳機能解明を目的とする最近の研究で、微視的な生理学的現象を量子力学が対象とするスケールの物理理論で説明できるとの報告がある。これは新しい測定技術や実験方法の開発に負っている。さらに物理学の根幹にかかわっている量子力学や素粒子論は現代の宇宙論などとも密接に結びついている。よって素粒子のような微視的な世界から、宇宙の構造や生成までも含む現代物理学

の対象中に、物質で構成されている脳も含まれている。従ってこの宇宙の中に物理的実体として存在する脳は、これらを支配している物理法則で説明される可能性が高い<sup>(22), (31)</sup>。

物理学の対象として脳機能解明を行う視点が今後必要と考える。賛否両論はあるが、ペンローズの提唱などはその例であろう。これは、実験による定量的・還元主義的方法論で進歩してきた従来の神経生理学を大きく進める一つの方向性を示唆している。素粒子論や宇宙物理学を専門とする理論物理学者によって書かれた脳科学関連の著書や発言が最近増えている点もこのことを示唆している<sup>(53), (54)</sup>。さらに、自由意志と因果律との関係についての興味深い実験結果も報告されている<sup>(55)</sup>。

冒頭の序論で指摘したように、脳科学に対する社会的要請もますます大きくなってきている事情を反映して、最近、神経科学において米国やEUで大きなプロジェクトが開始された。米国においては2013年4月2日にオバマ大統領が「Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Initiative: 通称 Brain Initiative」いうプロジェクトを立ち上げることを宣言した。これはヒトの脳におけるニューロン間の完全な配線図を得ようとする試みである<sup>(31)</sup>。一方、EUでは、2005年にローザンヌ連邦工科大学のHenry Markramを中心として「Blue Brain Project: ブルー・ブレイン・プロジェクト」が始まった。これは一個のニューロンに存在するイオンチャネルなどの実験データを含むニューロンとそれらからなる神経回路網をBlue Geneというスーパー・コンピュータを利用してシミュレーションしようという試みである。さらにこのプロジェクトは2013年1月から「Human Brain Project: ヒューマン・ブレイン・プロジェクト」として予算の規模も大幅に拡大して10カ年計画で始まっている。このような大型プロジェクトは、脳のリバースエ

ンジニアリングの例であるが、これらの研究は応用面からみても重要である。

しかし、本論説で述べたような基本的であるが地味な研究も脳機能の理解にとって重要な役割を果たしていると考えられる。20世紀中ごろから活動電位の発生メカニズムやシナプス伝達の生理学的解析を行った英国の生理学者ホジキン、ハクスレイ、カッツなどは、手作りの実験装置でヤリイカやカエルなどの下等な動物を実験対象として目覚ましい発見を行い、その解析内容もすぐれたものであった。これらは大型プロジェクトでは達成できない個人の着想と独創的な能力によっている点が多い。本論説で述べた研究も彼らの研究姿勢と相通じるものがある。

## 謝辞

本論文3章の量子力学に関して、佐賀大学 物理学科の米山 博志 教授（素粒子論専攻）にご校閲いただき、さらに、国際イラストレーターChloé Okuno 氏には図を準備していただきました。ここに感謝致します。

## 参考文献

1. 梶田 昭 (2003). 医学の歴史 講談社
2. 坂井 健雄 (2008). 人体観の歴史 岩波書店
3. 小川 鼎三 (1964). 医学の歴史 中央公論社
4. 坂井 健雄 (2014). 図説 人体イメージの変遷：西洋と日本 古代ギリシャから現代まで 岩波書店
5. Gregorius, R., (1503) *Margarita philosophica nova* Anastatic reprint with an introduction (in Italian) by Lucia Andreini, Salzburg: Institut für Anglistik und Amerikanistik, Universität Salzburg, 2002 (3 voll.).
6. Versalii, A., (1543). *Medicorum patauinae professoris, de Humani corporis fabrica*,

- Libri septem. 1543., Medicorum patauinae professoris, sourum de Humani corporis fabrica librorum epitome. 1543. 『解題 坂井健雄、フレデリック・クレメンス、(2015). Explanatory Note for Andreas Vesalius, Fabrica and Epitome』
7. ルネ・デカルト (2008). 情念論 岩波書店
  8. 山田 弘明、訳・解説 (2001). デカルト＝エリザベート往復書簡 講談社
  9. 小林 道夫 (2006). デカルト入門、筑摩書房
  10. Penrose, R., (1989). The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Law of Physics. Oxford University Press.
  11. Penrose, R., (1994). Shadows of the Mind: An Approach to the Missing Science of Consciousness. Oxford University Press.
  12. Trefil, J. (1997). Are we unique ? John Wiley & Sons.
  13. 竹内 薫、茂木 健一郎 (2006). ペンローズの <量子脳理論> : 心と意識の科学的基礎をもとめて、ちくま学芸文庫 筑摩書房
  14. Lucas, J. R., (1961). Minds, Machines and Gödel, in *Philosophy*, vol. 36, pp112-127. Reprinted in A. R. Anderson, *Minds and Machines* (Prentice Hall. 1964).
  15. 小島 比呂志 編著、大谷 悟 他著 (2014). 脳とニューロンの生理学 丸善出版
  16. Dirac, P. A. M. (1947). The Principles of Quantum Mechanics. 3<sup>rd</sup> ed. Oxford University Press
  17. MacFadden. (2000). Quantum Evolution. London : HarperCollins.
  18. Segre, di E., (1980). From X-Rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries. W H Freeman & Co (Sd).
  19. Planck, M. (1900). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum. *Deutsche Physikalische Gesellschaft 2*: 237-245
  20. 朝永 振一郎、(1969). 量子力学 (第2版) I, II. みすず書房
  21. Rutherford, E. (1911). The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Philos. Mag* 21: 669-688.
  22. Randall, R., (2006). Warped Passages – Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions. Harper Perennial.
  23. Messiah, A., (1959). Mécanique Quantique. Dunod, Paris.
  24. de Broglie, L. (1925). Recherches sur la théorie des quanta [On the Theory of Quanta]. *Annales de Physique* 10 (3): 22-128.
  25. Schrödinger, E. (1982). Collected Papers on Wave Mechanics: Third Edition. American Mathematical Soc.
  26. Gribbin, J., (2012). Erwin Schrödinger and the quantum revolution. Black Swan.
  27. Kumar, M. (2008). Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate about the Nature of Reality. Icon Books Ltd.
  28. Singh, S., (2005). Big Bang – The Most Important Discovery of All Time and Why You Need to Know About it. Harper Perennial.
  29. A. Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev* 47 (10): 777–780.
  30. Bohm, D. J. (1952). An Interpretation in Terms of Hidden Variables. *Phys. Rev* 85, 166-193.
  31. Michio, K. (2014). The future of mind: The

- scientific quest to understanding, enhance, and empower the mind. Anhor.
32. Koch, C. (2012). *Consciousness: Confession of a romantic reductionist*. The MIT Press.
  33. 加藤 総夫、小島 比呂志、持田 澄子 翻訳代表 (2009). *ニューロンの生理学* 京都大学学術出版会
  34. McComas, A. J. (2011). *Galvani's Spark – The Story of the Nerve Impulse*. Oxford University Press.
  35. Collini, E., Wong, C. Y., Wilk, K. E. Curmi, P. M. Brumer, P., Shoes, G. D. (2010). Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature. *Nature*. 463, pp644-647.
  36. Al-Khalili, J., McFadden, J. (2014). *Life on the edge: The Coming of Age of Quantum Biology*. Bantam Press.
  37. 藤吉 好則 他著 (2011). *現代生物学入門 3 構造生物学* 岩波書店
  38. Kew, J., Ceri, D. (2010). *Ion Channels from Structure to Function*. Oxford University Press.
  39. Kojima, H. (2014). *Information Processing in Synapses*. In *Handbook of Bio-/Neuro-Informatics*. Ed by Kasabov, N. Springer.
  40. Sakmann, B., Neher, E., Eds. (1997). *Single Channel Recording*. 2<sup>nd</sup> edition. Plenum Press.
  41. Hille, B. (2001). *Ion Channels of Excitable Membranes*. 3<sup>rd</sup> edition. Sinauer.
  42. LeDoux, J. (2002). *Synaptic Self – How Our Brain Become Who We Are* 2<sup>nd</sup> Ed. Penguin Books.
  43. Kuno, M. (1997). *The Synapse*. Oxford University Press.
  44. Bernroider, G., Summhammer, J. (2012). Can quantum entanglement between ion transition states effect action potential initiation? *Cognitive Computation*, vol. 4, pp29-37.
  45. Pauling, L. (1961). A molecular theory of general anesthesia. *Science*, 7 July, vol. 134, pp.15-21
  46. Pauling, L., (1964). The hydrate microcrystal theory of general anesthesia. *Anesthesia*, 43; pp.1-10.
  47. 中田 力 (2006). *脳の中の水分子 --- 意識が  
つくられるとき* 紀伊國屋書店
  48. 杉 晴夫 (2003). *筋肉はふしぎ* 講談社
  49. Chalmers, D. J. (1996). *The Conscious Mind*, Oxford University Press.
  50. Searle, J. R. (1997). *The mystery of consciousness*. New York Review of Books. NYREV.
  51. Tononi, G., (2004). An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience*. 5;42, pp.1-22.
  52. Massimini, M., Tononi, G. (2013). *Nulla di pui grande: Dalla veglia al sonna, dal coma al sogno. Il segreto della coscienza e la sua misura*. Baldini & Castoldi.
  53. 治部 眞里、保江 邦夫 (1998). *脳と心の量子論 : 場の量子論が解きあかす心の姿* 講談社
  54. 保江 邦夫、高橋 康 (2003) *量子場脳理論入門 : 脳・生命科学のための場の量子論* 別冊数理科学
  55. Libet, B., Wright, E. W. Jr., Feinstein, B. and Pearl, D. K. (1979). Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience. *Brain*. 102. pp193-224

---

2016年3月15日原稿受付, 2016年3月29日採録決定  
Received, March 15, 2016; accepted, March 29, 2016