

Quantum Brain Dynamics

梅沢の量子脳力学における細胞間量子信号伝達

ノートルダム清心女子大学 治部真里 (Mari Jibu)

保江邦夫 (Kunio Yasue)

要 旨

梅沢らによって提案された場の量子論の理論的枠組みの視点に立って、脳における細胞間信号伝達についての新しい機構の可能性が示される。ここでは細胞外マトリックスを構成するタンパク質フィラメントとその周りの結合水分子における、電気双極子配位の秩序状態でのゴールドストーンボソンが本質的な役割を果たす。細胞外マトリックスのタンパク質フィラメント上に沿って微少なエネルギーで伝播する長距離相関波、すなわちゴールドストーンボソンを交換することによって、神経細胞やグリア細胞は、長距離秩序を持つことが示される。

1. はじめに

いわゆる神経細胞主義においては、脳の信号伝達及び情報処理に対する唯一の基本要素は神経伝導路における神経インパルス伝導であると広く信じられている。しかしながら、そのような盲信はいくつかの点で問題が多いことが分かりつつあり、理論的なアプローチにおいても少なからず思い切った改革が要求されている。一連の論文の中で梅沢らは、場の量子論の枠組みの中で脳力学の全く新しい理論を発展させた。⁽¹⁾⁻⁽³⁾ ここでは脳は古典的なニューロン系と非古典的な系から構成される混合物理系として仮定されている。前者は神経インパルスの伝導を示し、後者はこのような古典的ニューロン系と相互作用する二つの異なった要素からなる量子力学的多体系であると仮定されている。第一の要素はコーティコンと呼ばれ、非古典的な系における基本的な力学的要素と考えられている。これはニューロンの内側や外側に分布する量子であり、パウリのスピン行列によって記述される自由度を持つ。もう一つの要素は脳組織に全体的に拡がったボーズ場の量子であり、単にボソンと呼ばれている。ボソンをコヒーレントに放出、吸収することによって、コーティコンは場の量子論の枠組みで十分理解できる全体的な

協同現象を示す。特に、記憶を非古典的な系の真空状態における巨視的な秩序状態として与える単純なモデルを得ることができる。

梅沢らの混合物理系の理論は、場の量子論において知られた基本物理法則に基づいて、初めて脳の基本的な物理素過程を抽象的に理解したアプローチである。そこで我々はこの理論を量子脳力学 (Quantum Brain Dynamics) と呼び、QBDと略記してもよいであろう。QBDは記憶の安定性と非局在性、さらにはその機構を説明できる論理的な可能性を示すことに多大な貢献があったが、コーティコンやボソンの非古典的な系は抽象的で概念的な存在のままとなっている。もしコーティコンやボソンの真の性質が明らかになり、かつ完全な物理的イメージが与えられたならば、QBDは脳力学の現実的な理論として将来さらに重要な貢献をするに違いない。

この論文において、我々はコーティコンそしてボソンに対する一つの可能な物理像を示す。それらは細胞外マトリックスの蛋白質フィラメントにおける非局在電子により引き起こされた集団的な双極子振動と、蛋白質フィラメントの周りに結晶化した結合水分子の双極子フォノンである。梅沢らも指摘しているようにコーティコンやボソンの非古典的な系は真空状態におい

て長距離秩序を示す。そこではほとんどエネルギーを要しない長距離相関の波が細胞外マトリックスの蛋白質フィラメントに沿って伝播する。言い換えれば、ゴールドストーンボソンを媒介とする量子論的な信号伝達機構が細胞間に存在する。我々はそれを梅沢メカニズムと呼ぶことにする。このようなゴールドストーンボソンの生成にはエネルギーを必要としないため、梅沢メカニズムは脳の全体的な情報処理についての理想的な枠組みを提供する。ゴールドストーンボソンによる信号伝達は速く、しかもマックスウエルの悪魔、即ち熱的雑音に乱されることはない。

コーティコンとボソンの非古典的な系についての我々の物理像は、麻酔に対する全く新しい理論を提供し、これまで知られていなかった麻酔の機構を理解する糸口となる可能性も持っている。麻酔の原因は、麻酔分子によって準結晶化された水分子が解放され、コーティコンとボソンの長距離秩序状態が破壊されることによる。即ち、麻酔分子の親水性の部分が蛋白質フィラメントの電気双極子の周りに結合し、それらと水分子による長距離秩序を破壊する。その結果ゴールドストーンボソンによる細胞間信号伝達が実現されず、神経細胞やグリア細胞が全体的組織として働かなくなる。これが麻酔の源である。

2. 梅沢のコーティコンについての物理像

古典的な神経細胞系は神経細胞膜上の神経インパルス伝導路の総体である。神経インパルスの生成及び伝導についての制御機構は、各神経細胞の膜輸送蛋白質分布によって与えられる。言い換えれば、神経細胞を通しての神経インパルスの伝導は、完全にその神経細胞の近接部位における局所的な物理現象によって決まるのである。梅沢らによって強調されたように、古典的な神経細胞だけではその巨視的な振舞いが長距離秩序状態や脳の自己組織的な情報処理に必要な動力学的な要素についてのコヒーレントな共同的交換を支配する制御原理あるいは法則を体系的に理解することができない。特に古典的な神経細胞主義の枠組みの中では、記憶が示す長期安定性や非局在性を理解することはできない。一方では記憶の非局在性は動力学的要素間の長距離相関の存在を示唆している。また他方において、記憶の安定性はこの長距離相関が関係のない神経的興奮の連続的活性に対して耐え得るほど十分に強いものであることを暗示している。

これらの神経細胞主義の欠点を熟慮することによって、梅沢らは脳力学の全く新しい枠組みを作った。それによると脳は古

典型的な神経系とコーティコンとボソンの量子力学的多体系から成る混合物理系であると仮定される。我々はそれを量子脳力学と呼ぶ。梅沢らは、神経細胞の膜輸送の性質を考えるならば、神経細胞はその動力学的面においては、空間的境界を持たないものとして考えられるべきであるとしている。そして神経細胞の理想的な動力学構造として動的な交換相互作用の中心即ちコーティコンが、交換相互作用の雲、即ちボソンが何かあいまいに拡がった領域によって囲まれていると提案している。

ここで二つの疑問が生まれるであろう。すなわちコーティコンは何かということと、そのコーティコンと相互作用するボソンが何かということである。

我々はこの章でコーティコンの可能な物理像を提唱する。次章においてはボソンの可能な物理像にまで進めていくつもりである。コーティコンの実体的な物理像を探すための解決点は、それが神経細胞膜の内外を動く動的な変換相互作用の中心に違いないということである。今日、細胞内外両方の領域に共通な唯一の物理的構造は、微視的な蛋白質フィラメントの3次元ネットワークとして知られている。これらは神経細胞膜では、細胞骨格ネットワーク、またその外側では細胞マトリックスと呼ばれている。細胞骨格ネットワークは主にアクチンフィラメン

トとミオシンフィラメントより成り、他方細胞外マトリックスはコラーゲンフィラメントより成っている。細胞骨格ネットワークと微視的な蛋白質フィラメントの細胞外マトリックスは互いに膜輸送蛋白質を通して互いに連結していることに注目する必要があるだろう。さらには、このような微視的な蛋白質フィラメントのネットワーク構造は、神経細胞に限られたものではなく全ての生物学的細胞に共通のものである。

脳組織は膨大な数の脳細胞の集合体である。しかしながら脳細胞にはわずかの種類が存在するだけである。そのうちのひとつがグリア細胞であり、次が神経細胞である。脳組織においてグリア細胞は神経細胞の約10倍も存在しているにもかかわらず、神経細胞主義においては単にグリア細胞が神経インパルスの伝導路に寄与していないという理由によって脇に追いやられている。しかしながらグリア細胞も神経細胞同様、微視的な蛋白質フィラメントのネットワーク構造を備えている。仮に微視的な蛋白質フィラメントのまさにそのネットワーク構造においてコーティコンの場の量子的自由度を探すならば、グリア細胞はQBDの非古典的な系に含まれることになる。我々は、脳組織において全神経細胞及びグリア細胞の内外に拡がった微視的な蛋白質フィラメントの巨大なネットワーク構造を、コーテ

アイコンがそこを動く背景としての最適な候補として考えている。このように、混合物理系に対する梅沢理論において、コーティコンの非古典的な系は古典的神経細胞系の少なくとも $10 - 100$ 倍以上の動力学的相互作用の容量を持つであろう。もちろんこれは神経細胞と微視的な蛋白質フィラメントの分布が同じであると仮定することによって、かなり過小評価したものである。実際には後者は $10^{10} - 10^{23}$ のオーダーで前者よりも多い。従って、コーティコンの非古典的系における動力学的相互作用の容量はやはり同じオーダーで古典的な神経細胞系のそれよりも多いと考えられる。神経細胞の数は約 10^{10} であるから、古典的神経細胞系における神経インパルスの伝導路の全密度は、たった一つの神経細胞あるいはグリア細胞周辺にのみ広がっている微視的な蛋白質フィラメントのネットワーク構造においてのコーティコンのそれに匹敵する。つまりこの枠組みでは、たった一つの神経細胞、あるいはグリア細胞が古典的神経細胞系全体と同じオーダーの動力学的な相互交換を示すことになる。

我々は全ての神経細胞及びグリア細胞の内外に広がった微視的な蛋白質フィラメントの巨大なネットワークの中を動いている量子としてコーティコンを具体化できる。事実、フレーリッヒは1次元の蛋白質分子鎖、すなわち微視的な蛋白質フィラメ

ントに沿って双極子振動が存在することを示している。⁽⁴⁾ その双極子振動は蛋白質分子の準1次元的な鎖、ないしはそこに繰り返して現れる水素結合に補足された非局在電子によって維持されている。フレリッヒの計算によると、双極子振動は毎秒 $10^{10} - 10^{12}$ の間の周波数領域の縦波のモードを実現している。我々はそれをフレリッヒ周波数と呼び ω_F と表示する。これに対応して ω_F にプランク定数 h をかけたものをフレリッヒエネルギーと呼びそれを $E_F = h \omega_F$ と示す。微視的な蛋白質フィラメントに供給される E_F 以上のエネルギーは完全に熱化するのではなく、より秩序だったエネルギーとして蓄えられることに注意しておかなければならない。

同じような結果は、ダビドフによっても行われている。彼は電荷ソリトンのコヒーレントな励起は、蛋白質フィラメントのような準1次元的で準周期的な生体分子系に沿ってそのエネルギーを乱雑な熱運動のエネルギーに変換することなく移動することを示した。⁽⁵⁾ フレリッヒやダビドフの機構は完全に量子力学的なものであり、コーティコンの物理的像を完成するにも十分である。以下において我々は QBD におけるコーティコンとして、微視的な蛋白質フィラメント上に非局在的に分布したフレリッヒの縦波モードの量子を考える。すなわち脳組織に

おける全神経細胞及びグリア細胞の内と外に拡がった細胞骨格及び細胞外マトリックスの巨大なネットワーク上のこの微視的蛋白質フィラメント上にコーティコンが存在していることになる。3次元的な微視的蛋白質フィラメントのネットワークは、決して静的な構造ではなく、蛋白質フィラメントの再結合、変形、生成、消滅などを示す動的な構造である。それは固定されたものというよりも、むしろランダムに結合された巨大な動力学的ネットワークであり、従ってその動的構造は分子環境に影響を受けるのである。

我々は梅沢のQBDにおける非古典的系についての物理像の半分を得たことになる。コーティコンは一つの微視的蛋白質フィラメント上に拡がった双極子振動の縦波モードの量子であるから、量子論的な変数 $\gamma = \mu_c \sigma$ によって十分記述できる。 μ_c は、コーティコンの双極子モーメントの大きさを表す何らかの定数であり、 $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ はパウリスピン行列を成分とする3次元のベクトルである。仮に個々の微視的蛋白質フィラメントを一意的な正の整数 $j = 1, 2, 3, \dots, N$ でラベル付けをすると、我々はN個の独立な変数 $\gamma_j = \mu_c \sigma_j$, $j = 1, 2, 3, \dots, N$ を得る。ここでNはコーティコンの総数である。(Nは、多粒子系の場の量子論で通常考えられ

るように十分大きい正整数と考えておけば十分であろう。実際に我々は微視的蛋白質フィラメントの膨大な数を考慮に入れて $N = \infty$ としてもよい。) これらの変数 γ_j は、第一近似では準静的な位置に存在すると仮定されているため、我々は空間位置ベクトル x_j でその位置をさらわす。もちろん x_j は細胞骨格及び細胞外マトリックスの巨大なネットワークにおける j 番目の微視的蛋白質フィラメントの平均位置を示していると理解できる。

3. 梅沢の非古典的系に対する物理像

梅沢の脳の混合物理系理論、すなわち量子脳力学 QBD においては、非古典的な系はコーティコンとボソンで構成されていると仮定されている。すなわちコーティコンはボソンを相互交換することによって互いに相互作用しあい、長距離秩序を呈する。そこではコーティコンは動力学的に交換されるボソンの雲のあいまいな領域によって囲まれていると考えられている。この章では、巨大な細胞骨格及び細胞外マトリックスのネットワークに拡がった個々の微視的蛋白質フィラメント上の双極子振

動の縦波モードの量子としてのコーティコンの完全な物理像に立脚し、コーティコンの周りのボソンの物理像を求めることにする。

コーティコンは、電気双極子モーメントをもつ量子として考えられるから、コーティコンは親水性を示し水分子と強く結合することは明らかであろう。水分子は水素結合によって、3次元のネットワーク構造、即ち準結晶結合を作るという性質が重要となる。水分子間の水素結合はあまり強くないため準結晶状態の水分子は歪をつくる。準結晶構造の理想的平衡配置においては、水分子固有の電気偏極は互いに打ち消し合って、全体では電氣的に中性である。このような準結晶構造中の水素分子の局所的な歪の伝播をボーズ-アインシュタイン統計に従う量子、即ちボソンと考えることができることは量子力学からの帰結である。結晶構造が完全に固体となっている時、それはフォノンにほかならない。しかし、水分子の3次元ネットワーク構造の理想的平衡配置は、完全に安定ではないため、我々はその平衡点からの水分子配置の局所的な歪の量子をソフトフォノンあるいは準フォノンと呼んでいる。

水分子の3次元ネットワーク構造の平衡配置からの水分子の局所的歪は、そこで電気偏極が現れることを意味しているため、

ソフトフォノンとは電気双極子モーメントを持つと考えられる。この意味においてそれは双極子フォノンとも呼ばれる。従って、零でない電気双極子モーメントを持つ他のどんな量子も、水分子の3次元のネットワーク構造における双極子フォノンあるいはソフトフォノンと相互作用することになる。我々はコーティコンがこのような量子であることを既に見てきた。即ち、仮に細胞骨格及び細胞外マトリックスの微視的な蛋白質フィラメントの巨大なネットワーク構造が水分子の3次元ネットワーク構造に囲まれていると考えると、蛋白質フィラメント上の双極子振動が平衡点からの水分子の局所的歪を誘導するし、またその逆も可能である。実は、脳組織は現実にこのような物理的状況にある。全神経細胞とグリア細胞の内側と外側は水分子で満たされ、細胞骨格そして細胞外マトリックスの巨視的な近接領域で少なくとも3次元のネットワーク構造を形成すると考えられている。

我々はコーティコンがソフトフォノンを相互交換する、すなわちそれらは場の量子論の力学的法則あるいは物理法則の言葉で言えば、ソフトフォノンを放出あるいは吸収することにより互いに相互作用し合うことを見い出した。これが梅沢らの量子脳力学 Q B D におけるコーティコンとボソンの非古典的な系の

物理像のすべてである。我々が水分子の準結晶構造におけるソフトフォノンをボソンであると特定するならば、ソフトフォノンとコーティコンの量子的運動を制御するハミルトニアンを直ちに得ることができ、それは梅沢らによるものとなる。

4. ゴールドストーンボソンを介する細胞間信号伝達系

梅沢らによって、提唱された量子脳力学の混合物理系理論におけるコーティコンとボソンの非古典的系についての一つの可能な物理像を得ることができたので、脳組織に関与している物理的現象を探るために彼らの理論的な結果を参照することが許されるだろう。量子脳力学 Q B D のような全く新しい理論の提唱の主な目的は、記憶の安定性と非局在性、さらにはその機構を説明するための論理的可能性を提示することであった。もちろん彼らの目的が達成されてきたことは周知の通りである。我々はここでコーティコンやボソンの場の量子論に基づいた脳の記憶過程に対する彼らの理論的研究を繰り返し述べることはしない。しかし彼らが発見した以下の事実を考慮に入れることにする。

コーティコン及びボソンの非古典的な系は対称性を持つのだが、最小エネルギー状態においてその動力学は系の対称性を破る長距離秩序を示す。言い換えれば、量子脳力学 Q B D における真空状態は自発的対称性の破れを伴っている。

もし我々が上記の事実を我々の物理的枠組みに言い換えるならば、コーティコン及びボソンの非古典的な系に固有の対称性は、全てのコーティコンそしてソフトフォノンの電気双極子モーメントの方向が3次元の回転について対称性を持っていると理解できる。真空状態においては全コーティコンは、真空のゆらぎを除いて電気双極子モーメントの一様な配位におちこみ、長距離秩序を示す。もちろんこのような電気双極子モーメントの一様な配位が3次元回転に対する本来の対称性を破ることは明らかであろう。

梅沢らによって指摘されたように、場の量子論における秩序だった真空状態ではコーティコンやボソンの非古典的な系は、長距離相関波すなわちエネルギー零のゴールドストーンボソンを生成する。真空状態における非古典的な系で自発的に破られた対称性はゴールドストーンボソンの存在によって回復される。つまり、ソフトフォノンを相互交換することによって互いに相互作用する全てのコーティコンが量子脳力学 Q B D の真空状態に

落ち込み、ボーズ-アインシュタイン凝縮を示すときにゴールドストーンボソンが生成され、脳組織内の全ての神経細胞とグリア細胞の内外に拡がった細胞骨格と細胞外マトリックスの微視的蛋白質フィラメントの巨大なネットワークの中を伝播するのである。ゴールドストーンボソンの生成には殆どエネルギーを必要とせず、またそれは全体的な秩序状態における長距離相関波に他ならないため、熱的雑音に妨げられることはない。すなわちゴールドストーンボソンの伝播は熱的損失を受けず、信号の伝播機構を確実なものとする。

脳という細胞集合全体における、ゴールドストーンボソンを使った大域的で高密度な3次元ネットワーク構造の上の信号伝達路の存在は、梅沢らの場の量子論的アプローチからの帰結である。それは熱的な乱雑化にも十分に対抗できる全体的な細胞間量子信号伝達システムをもたらすことができる。ゴールドストーンボソンを使った全体的な細胞内量子信号伝達系が脳力学の非局在的な組織化を導く上で、基本的な役割を果たしていることは、我々の理論からの予測である。このような長距離信号伝達の場の量子論的機構なしでは、脳が意識を創り出すといった組織的な動力学を導き出すことはできない。⁽⁶⁾

参考文献

- (1) L. M. Ricciardi and H. Umezawa, *Kybernetik* 4, 44(1967).
- (2) C. I. J. M. Stuart, Y. Takahashi and H. Umezawa, *J. Theor. Biol.* 71, 605(1978).
- (3) C. I. J. M. Stuart, Y. Takahashi and H. Umezawa, *Found. Phys.* 9, 301(1979).
- (4) H. Froehlich, *Intern. J. Quantum Chem.* 2, 641(1968).
- (5) A. S. Davydov, *Phys. Scripta* 20, 387(1979).
- (6) 治部眞里・保江邦夫「1リットルの宇宙論：量子脳力学への誘い」(海鳴社、1991)