

## 頭を使った場の量子論

ノートルダム清心女子大・情報理学研 治部眞里, 保江邦夫

(1990年2月2日受理)

### 1. はじめに

素粒子論の三種の神器と言え、場の量子論と対称性、それにこれが最も重要かもしれませんが頭のひらめきがあげられるでしょう。ディラックやファインマンを思い出していただければ充分でしょうが、頭のひらめきは個性における独創性と大きく関わっています。同じ現象を見ても、他の多くの人とは全く異なった認識を得る人が独創性があると言われるわけですが、その背景には遺伝子のちがひ、胎内も含めた発達環境のちがひ、長年受けた教育のちがひなどがあるのではないのでしょうか。即ち脳及び脳の記憶の違いが頭のひらめきを呼び、場の量子論や対称性を道具として独創的な素粒子理論を生み出していると言ってもよいでしょう。

では、もしここで脳の記憶の素過程が実は場の量子論と対称性で記述されるかもしれないとしたら、より本質的なものはいったい何になるのでしょうか。対称性の破れの偶然の系譜が頭のひらめきを呼ぶのでしょうか。我々の脳における記憶の基本的なメカニズムについては、高名な物理学者による研究もことから、潜在的に物理学者の興味を引きつける課題のようです。実際、ファインマンはこの問題に多大な関心を寄せていたと聞き及びます。古くはパスカルからヘルムホルツ、最近ではシュレディンガー、ボーム、パウリ、ジョセフソン、クーパーなどが有名でしょうか。またホップフィールド等によるニューロンの神経回路網理論をスピン系の統計力学とのアナロジーから解析する手法も一時期もてはやされていたようですが、あまりにもニューロンとシナプスについての古典的なモデルに基づいていたために、現実の脳の素過程からはかけ離れた並列計算システムとしてのニューロコンピューターの方向に流れてしまったようです。しかし、我々がここで言う場合の脳の記憶の素過程が場の量子論と対称性で記述されるという主張は、単なるアナロジーによるものではありません。まさに現実の脳における記憶の素過程が、本質的に場の量子論と対称性によってのみとらえることのできる如きものだと言うわけです。このように申しますと多くの方からは笑われてしまいそうですが、実はこのアイデア、何を隠そう場の量子論の世界的大家でいらっしゃる高橋・梅沢両先生が1978年に出版された論文に展開されています<sup>1)</sup>。その後1979年には物理学者向けの第2論文が出版されましたが、残念ながら素粒子論、とりわけ場の量子論の研究者でこの独創的な脳の理論に目がとまった方は少なかったようです<sup>2)</sup>。

この3年間、我々はスタンフォード大学神経生理学研究所の所長で大脳生理学者のカール・プリブラムと共同研究を続けてまいりました。プリブラムは1960年代に脳の記憶の非局在モデルとして有名な神経ホログラフィー理論を提唱した人ですが、現在なお現実的な大脳生理学における最新の知見を基礎として、具体的な脳の記憶素過程のモデルを研究しています。一昨年スタンフォードにまいりました折にプリブラ

ムから教えられていなければ、多分我々もスチュアート・高橋・梅沢の論文<sup>1),2)</sup>に気づかずに終わっていたと思います。秋の夜長、遠くの星空を望み大統一理論による宇宙生成のシナリオを想うかべるにつけ、それにもまして不可思議なのは、それを想うことのできる我々の意識のからくりそのものではないでしょうか。この意味からも、より多くの方々に高橋・梅沢両先生の脳の記憶の量子場理論とプリブラムの脳生理学的な記憶モデルの共通部分について知っていただいても良いのではと思います、ここに御紹介する次第であります。我々の拙い文章では原論文<sup>1),2)</sup>や最近の脳生理学の成果をまとめた原著<sup>3)</sup>の持つ奥行きをお伝えできないのではと心配です。皆様の御批評をいただければ幸いと存じます。

## 2. 脳細胞と大脳皮質

発生学的には我々の脳は次のような過程により形成されると考えられています。まず、人の発生のごく初期に胚の表面の一部が細長く落ち込み、一本の管が形成されます。これは神経管と呼ばれますが、その内壁において神経細胞(ニューロン)が増殖により作られていくわけです。神経管前部ではニューロンの発生が活発な為、内腔が大きくなり複雑な変形を受けて脳を形成します。後部は神経管の原型を保って脊髄となるわけです。もちろんこれは脊椎動物における場合で、無脊椎動物においては胚から発生したニューロンの塊自体が脳になります。脊椎動物の中でも、殊に人の場合には神経管前部の変形が最も著しく、従って脳は高度に分化した様相を示します。神経管前部の内壁で作られるニューロンは、そこから外部へと放射状に伸びたグリア細胞に沿ってアメーバのように移動し、脳の外表面を覆うように大脳皮質を形成するため、脳の内部は発生の初期から存在する「古い脳」と考えられます。外表面の大脳皮質は、発生の後期から形成された「新しい脳」であり、人の記憶と意識を生み出す機能を持つわけです。その為、人のみが持つ高度な記憶と意識のメカニズムは「新しい脳」である大脳皮質の構造の中に見出されなければなりません。そこで我々は大脳皮質について見てみることにしましょう。

大脳皮質ではニューロンが大まかな層状に配置されていますが、その数は $10^9$ にも及びます。ニューロンとニューロンの間はグリア細胞で埋められ、各ニューロンは近接するグリア細胞から栄養の補給を受けます。大脳皮質はニューロンとグリア細胞の集合体と言えましょう。このニューロンは人の誕生後に増加することはありません。むしろ成長するにつれて減少し、1日につき10万個以上のニューロンが失われていきます。グリア細胞はニューロンの数の5~10倍あり、ニューロンが減少するにつれて逆に増加します。このグリア細胞は死んだニューロンを分解、除去する機能を持っているようです。

さて、ニューロンですが大きく分けて二種類のものがあります。一つは良く知られている形状のもので、細胞体から軸索と呼ばれる非常に長い神経突起が出ているものです。これは古くから知られていたニューロンの構造で、軸索はパルス状の膜電位変動、即ちインパルスを伝える役割を持ちます。インパルスは軸索を伝播する間に減衰する為、長い距離をインパルス信号で結ぼうとする場合、途中に何らかの増幅器を置いてやる必要があります。この増幅器の役を果すのが細胞体の部分の細胞膜です。軸索の末端は幾つかに枝分かれをし、各末端部はノブ状に肥大した上で別のニューロンの細胞体の膜に接し、そこにシナプスと呼ばれる構造ができあがります。軸索末端部にインパルスが到達した場合にはノブ状の部分から神経伝達物質であるホルモンが放出され、接しているニューロンの細胞膜上に浮遊する受容器タンパク質と反応

することで細胞体の膜電位を変化させます。このように各シナプス部位での膜電位の変化が空間的にも時間的にも重ね合わされて細胞体全体での膜電位が決定され、ホジキン・ハクスレー方程式が教えるように、この膜電位がある閾値を超えたならばインパルスが発生し、軸索を伝わっていくことになります。結局、古くから知られているニューロンの軸索構造はインパルス信号を増幅して伝えるという、中継器のような役割を果しているわけです。もちろん単純な中継器とちがって、場合によってはインパルスを伝えない状況もあり得ます。これは中枢神経系において偶発的に発生した意味のないインパルスを消滅させ、どうしても伝えなければならない意味のあるインパルス信号だけを中継するためのフィルターの役も果していると考えられます。このようにフィルター中継器の役目を持つニューロンが脳の情報処理過程における基本素子と考えられ、大脳皮質においても記憶や意識を生むのは軸索を持つニューロンが複雑にシナプス接続して得られる神経回路網の作用のためであるとする立場が有力視されたこともあったようです。これは古典的ニューロンによる脳のモデルとして知られ、近年になってホップフィールドによりスピン系の統計力学の手法が導入されたことでかなり流行したこともありました。しかしながら、現実の大脳皮質におけるニューロンの神経回路網に見られるシナプス接続は、スピン系のスピン変数が持つ程の自由度を持たず、ホップフィールドが示した統計力学的手法が現実の神経回路網で行われる可能性は無いようです。そのためでしょうか。ホップフィールドによる古典的ニューロンの神経回路網はその後、主に情報工学の立場から並列処理計算機のモデルとして研究され、ニューロンコンピューターという名称を得ているにすぎません。

実は、ニューロンには大きく分けて二種類あると申しましたが、大脳生理学の立場からも大脳皮質にあるニューロンの半数以上は軸索を持たない、もう一方の種類のものであることが判っています。従って大脳皮質における記憶や意識の作用を、古典的ニューロンが作る神経回路網だけに着目して研究を進めるのでは、100メートル先の暗がりでも落とされたものを街灯の直下で探しているようなものです。このもう一方の種類ニューロンには軸索がありません。細胞体からは星状に板状の突起が数多く出ており、これらは樹状突起(デンドライト)と呼ばれます。もちろん軸索を有する古典的ニューロンの場合にも樹状突起があるため、樹状突起の役割としては長い間単に他のニューロンとのシナプス接続の部位を形成するための接触面積を広げていると考えられていたに過ぎません。このため、軸索を持たず樹状突起のみを持つニューロンについては、あまり重要視されなかったのではないのでしょうか。最近の大脳生理学の研究では、これまで軽視されてきた樹状突起そのものや、軸索を持たない星状ニューロンなどが大脳皮質における記憶や意識といった高度な情報処理過程の実現に本質的な役割を果していると考えられています<sup>3)</sup>

スタンフォード大学のプリブラム以外にも多くの大脳生理学者が注目しているものに大脳皮質表層部に見られる樹状突起網、デンドリティックネットワーク)があります。日本医科大学の品川博士は殊に脳波(EEG)との関連で、この樹状突起網の重要性を強調されています<sup>4)</sup>。脳波と呼ばれるものは、電極を介して頭皮から測定された電位の時間的変動を言うのですが、一応現象論的に人の意識の状態を区別するために使い得るパラメーターになっています。人間の意識が古典的ニューロンの神経回路網の作用で生ずると考えられていた頃には、回路網の中の全てのニューロンが示す膜電位の寄与が脳波に他ならないと思われていましたが、実際にはそのような寄与は全て相殺してしまい、我々が測定するような脳波は出てこない

ようです。<sup>1),2)</sup>脳波として頭皮から測定し得る電位変動は、やはり測定部位に近い大脳皮質の表層部の活動を拾っていると考えるのが自然ではないでしょうか。こう考えれば、現象論的であっても意識の状態を表わし得る脳波が大脳皮質表層部の活動状態を記述していることになり、人間の意識を生むメカニズムが大脳皮質表層部に多く見られる樹状突起網に存在する可能性が出てくるわけです。

### 3. 樹状突起網

大脳皮質におけるニューロン集団の構成を見ますと、古典的ニューロンの神経回路網を覆うように多数の樹状突起網が発達していることが判ります。殊に表層部においては樹状突起網を主とする構造が展開されています。既に見てきましたように古典的ニューロンはインパルス信号の伝播においてフィルター付の中継器の機能を持つにすぎません。従って神経回路網の協同的作用により記憶や意識が生じているとは考えられません。そこでは反射運動に見られるような低次のサイバネティクスが実現される可能性はありますが、高次のものを生むためには自由度に乏しいようです。むしろ記憶や意識などの高次のサイバネティクスの機構は古典的ニューロンの神経回路網を覆うように微細構造を形成している樹状突起網の協同的作用により作られるというのが最近の大脳生理学者の考えになっています。これについては脳波との関連で前にも触れましたが、大脳皮質において樹状突起網が果た役割の重要さを示す知見は脳波の他にも多く見出されています。例えば1981年にノーベル医学・生理学賞を受賞したヒューベルとウィーゼルは大脳皮質の中でも、殊に網膜中心部からの視覚信号インパルスを受信する大脳視覚野と呼ばれる部分が示す、目に写った図形の幾何学的性質に関する高度な情報処理機構の存在を裏づける事実を発見しました。大脳視覚野にある軸索を持つニューロンに微小電極を差し込んで、その膜電位の様子を調べることにより、あるニューロンは45°右上りの直線が目に見た時だけインパルスを発し（発火するとも言います）。またあるニューロンはもっと別の角度を持った直線が目に見た時だけ発火し、また直線が特定の方向に動いた時だけ発火するニューロンなどもあるということを見出したわけです。ヒューベルとウィーゼルだけではなく、時を同じくしてプリブルや他の多くの大脳生理学者達も同様の実験を行い、例えば連合野と呼ばれる大脳皮質の一部などに回転物体を見た時だけ発火するものなどがみつかっています。このように大脳皮質にあって、特定の刺激にだけ発火するニューロンを「おばあさん細胞」と呼んでいます。（もちろん、おばあさんを見た時だけ発火するニューロンという程度の比喩的な名前にすぎません。）

このように、おばあさん細胞の存在が実験的に見出されたわけですが、ではなぜおばあさん細胞と呼ばれるニューロンはおばあさん細胞としての機能を示すことができるのでしょうか。一番単純な考え方をしますと、神経管の内壁で作られた時から各ニューロンの機能が分化していく、おばあさん細胞は発生初期からずっとおばあさん細胞だったと言うことになります。しかし脳のニューロンは誕生後に増殖することではなく、日に103個以上もの割合で死んでいくことを考えるとこの説明では、ある日突然におばあさんを認識できなくなってしまうことになり具合が悪いわけです。（筆者の一人は、もしそうなったら世の中には若い女性しかいないことになり、大変具合が良いと思っています。）

プリブルは殊に大脳視覚野におけるおばあさん細胞の発火パターンと、網膜中心部から外側膝状体と呼ばれるニューロンを中継して大脳視覚野に入ってくるインパルス信号とを分析した結果、問題となって

いるおばあさん細胞の樹状突起を含む形で幾つかのニューロンの樹状突起が複雑にからみ合っ一つ一つの樹状突起網を作り、そこにおける何らかの協同的作用の結果として、あるニューロンがおばあさんを見た時にだけ発火するようになると考えました<sup>3)</sup>。彼の研究所ではミニコンPDP-11を使って、大脳皮質における樹状突起網の機能分布を示す地図(脳図?)を作っています。これらの樹状突起網は大脳皮質の表層部に多く存在し、各種の感覚器官からのインパルス信号を最初に受信するニューロンと神経回路網を形成している古典的ニューロンとの間に拡がって、高度のサイバネティクス機構を生み出しているようです。

大脳皮質は記憶や意識など、人の高度な情報処理機構を実現する機能を持つわけですが、その動作原理やメカニズムについては今日でも良くわかっていません<sup>5)</sup>。プリブラムは彼の大脳生理学的研究から、樹状突起網における協同的な現象に目をつけ、そこに記憶の原理を見出そうとしています。大脳皮質に見られる微細構造としては、今の所樹状突起網の存在以外には考えられないからです。そこで、典型的な樹状突起網の構造について見ておくことにしましょう。

樹状突起網は軸索を持つものや持たないものなど、複数のニューロンの樹状突起が複雑にからみ合っ出来ています。樹状突起はニューロンの細胞体の細胞膜が細く樹状に突出した部分に他なりません。電子顕微鏡で拡大して見ると樹状突起の表面には数多くの棘が分布していることがわかります。これはスパインとか樹状突起棘と呼ばれ、1959年にグレイがスパインの先にシナプスが形成されることを発見したことなどから、主に大脳生理学の立場から研究されてきました。大脳皮質に多く見られるスパインは約7割が細いきのこ形状を示し、その平均の長さは $1.7 \mu\text{m}$ 、頭部の直径は $0.6 \mu\text{m}$ 、軸部分の直径は $0.2 \mu\text{m}$ 程度であることが知られています。スパインの頭部には他のニューロンの軸索末端部のノブが接してシナプスを形成する場合や、他の樹状突起のスパインと接してエファプスとかタイトジャンクションと呼ばれるノードを作る場合があり、これらの場合スパインは樹状突起網における結節点の役割を果しているようです。

記憶や意識などの高度な情報処理機能が大脳皮質に見られる樹状突起網の協同的な作用により作られている可能性については、既に幾つかの根拠を御紹介しました。ここでもう一つ、特に樹状突起網の結節点であるスパインについて判明した事実を記しておきましょう。例えばネコやネズミの視覚入力を遮断しておきますと、大脳視覚野においてスパインの数が減少します。さらに、単調な視覚入力の場合に比べ、社会的視覚入力である仲間のネコやネズミの像や動きを視覚刺激とした場合にはスパインの数が増加し、しかもその形状が太く短くなることが判っています。このことから樹状突起網において生起するなんらかの協同現象が、大脳皮質における記憶や意識などの作用原理を与えるのではないかと考えられます。

大脳生理学者であるプリブラムは、このような樹状突起網における協同的な作用としては、スパイン部における電荷分極が作る電気双極子の集団からなる離散的力学系と、スパインが分布している樹状突起の細胞膜上の電位ポテンシャル場である連続的力学系の間に見られる相互作用による何らかの協同現象に目をつけています。双極子集団とスカラーポテンシャル場の登場ということで、そろそろ場の量子論のにおいがしてきました。この辺で一度大脳生理学から離れ、大脳皮質における記憶のメカニズムの物理モデルを場の量子論の枠内で論じた高橋・梅沢の理論について見てみましょう。場の量子論を用いて脳の記憶の素過程を論ずるという非常に独創的なアイデアは1978年と79年に出版されたスチュアート・高橋・梅沢の論文<sup>1),2)</sup>により発表されました。その後、同様のアイデアが再考されたことはなかったようですが、最

近プリブラムから届いた私信によりますと、フレイリッヒなる人物がやはり場の量子論においてポーズ縮退のからくりで脳の記憶の素過程を記述している由。まだ手元に論文を入手していない為、(それにプリブラムは物理学者の名前をあまり知らない為)このフレイリッヒなる人物が構成的場の理論のフレイリッヒなのかどうか判っておりません。もしそうだとしたら、これは面白いことになってきたぞ、というところでしょうか。御存知の方はお知らせ下さい。

#### 4. 大脳皮質の場の量子論

いよいよ高橋・梅沢両先生の脳の場の量子論の話に入りましょう。すぐに場の方程式なりハミルトニアンなりを書き下しても良いのでしょうか、今少し御辛抱下さい。その前に高橋・梅沢両先生がどのような理由から、脳の記憶のメカニズムを場の量子論の枠組において論じられるようになったのかについて、原論文から読み取った範囲で御紹介します。

既に樹状突起網の所で述べましたように、古典的なニューロンの神経回路網におけるインパルスの伝播過程のみが脳における高度な情報処理機能を決定づける要素にはなり得ません。古典的な神経回路網におけるインパルスの動力学だけを仮定したのでは、即ち、高度に構造化されたニューロンの軸索分布は固定化されたものとし、それらの結節部分においてインパルスの伝播に不確定さが生じるとする古典的な体系を考えていたのでは、高度な情報処理機構を実現するために不可欠となる相関の強い協同的な制御律を導くことすらできないわけです。大脳皮質における記憶のメカニズムだけをとってみても、その長期にわたる安定性と非局在性という二つの巨視的性質は、とても古典的な体系から導き出すことができるものではありません。記憶が非局在化し、分散しているという事実は、大脳皮質において記憶の素過程を生み出している体系が長距離相関を持つことを示しています。また、記憶の長期安定性の事実はこの長距離相関が連続的に生起している他の無関係な神経的興奮に対して十分に強固であることを意味していますが、その反面、記憶自体は容易に体系の中に蓄えられなければなりませんし、想起の場合にもすぐに表出しなければなりません。このように記憶の過程が示す一見相反するように見られる諸性質は、古典的ニューロンの神経回路網だけを考えては全く説明がつかないわけです。

記憶や学習の過程が大脳皮質における高度な情報処理機能の中でもとりわけ重要なものであることからしても、高橋先生達が記憶のメカニズムにおける何らかの協同的な作用の存在に目をつけ、協同的な作用を生み出す機構を場の量子論的な量子多体系に求められたことは十分に納得できます。少なくとも物理的体系にあっては非常に安定した秩序は殆んどの場合、巨視的量子効果として生じていることから考えても、記憶が大脳皮質における何らかの量子多体系の秩序化された状態に対応していると考えerことは自然でしょう。このような巨視的量子効果により記憶のメカニズムが説明できるならば、古典的な理論だけからでは相反するとはしか考えられない長期安定性、非局在性、蓄えやすさ、想起しやすさといった記憶の特異性も、量子論的な効果として見ればごく普通のものになってしまいます。

では大脳皮質において、何がどのようにして巨視的量子効果を生んでいるのでしょうか。古典的なニューロンの中にそのような自由度を求めることはできません。スチュアート・高橋・梅沢<sup>1), 2)</sup>ではニューロンについての古典的な描写ではとらえることのできない物理的自由度が細胞外に分布していて、大脳皮質

における記憶の素過程はこの新しい自由度についての協同現象に他ならないとする基本仮説をたてています。この細胞外に分布する新しい物理的自由度はコーティコン, 即ち大脳皮質子と呼ばれます。このコーティコンの自由度はボーズ統計に従う量子を放出・吸収することによって互いに相互作用をすると仮定するならば, 場の量子論の枠組で解析を進めることができるわけです。このような可能性を与える一つのモデルとしては, 第2論文<sup>2)</sup>の巻末においてコーティコンの自由度をスピン変数で表現し, 又相互作用を媒介するボーズ場を有限体積中のスカラー場と考えたものが例示されています。もちろんこれは最も簡単なモデルの一つを示しているにすぎず, より複雑なモデルが他にも多く考えられることは言うまでもありません。しかし, スチュアート・高橋・梅沢<sup>1), 2)</sup>の理論において本質的なのは例示されている具体的モデルそのものではなくて, 大脳皮質における記憶の素過程がコーティコンの集団とボーズ場の間の量子論的相互作用による協同現象に他ならないとする基本仮説にあるわけです。場の量子論における真空の相転移の話など朝飯前という素粒子論研究の読者の方々にはいささか釈迦に説法ですが, ここでそのあらましを見ておきましょう。

大脳皮質におけるコーティコンの集団とボーズ場からなる物理系の全ハミルトニアンがコーティコンの自由度についての一つの変換に関して不変となると考えましょう。言い換えればコーティコン集団とボーズ場の相互作用の中に一つの対称性が存在すると考えます。このとき, 系の全ハミルトニアンの基底状態即ち真空状態としてはこの対称性を破る近似的なものを無数に考えることができます。即ち, コーティコンの自由度が全て同じ様な配位をとるという古典的な状態の回りのコヒーレント状態がそれです。コーティコン集団とボーズ場からなる物理系は, 大脳皮質において孤立しているわけではなく, 古典的なニューロンの神経回路網などと相互作用しています。そこで, 何らかの感覚器官からの刺激が大脳皮質に伝わってきた場合, コーティコン集団とボーズ場の系は外部からの揺乱を受けエネルギー準位の高い状態となりますが, 刺激が消えるとともにエネルギーを失って系の真空状態の一つに落ちつきます。この真空状態が先程の刺激の記憶に他なりません。このように外部からの刺激はコーティコン集団とボーズ場からなる系の真空状態として蓄えられますが, この真空状態においては全てのコーティコンの自由度は一様な配位を示しますので, コーティコンが分布する全域にわたって長距離相関が発生することになります。また真空状態が記憶を表わしていますので記憶の長期安定性も自明となります。このようにコーティコン集団とボーズ場からなる系の巨視的量子状態としての真空状態が大脳皮質における記憶を表わすとすれば, 記憶の特徴である非局在性と安定性が説明できるわけです。また, これとは一見相反する特徴である記憶の蓄えやすさと想起しやすさについて言いますと, 例えば蓄えやすさについては大脳皮質に対する外部刺激がコーティコン集団とボーズ場の系についての外的揺乱として作用する限り, その影響は系がエネルギーを失って落ちつく真空状態の区別の中に残り, 記憶として容易に系の状態の中に蓄えられることが判ります。では, このようにして一度蓄えられ, 安定に存在する記憶を想起する過程はどのように考えられるのでしょうか。

記憶の想起過程は微小な刺激でも十分な引金となり, 多種多様な記憶を一度に連想するという事実を導くものでなくてはなりません。一見して記憶の長期安定性と矛盾しているように写るこの記憶想起過程の特性は, 通常の古典的なニューロンの神経回路網理論などの枠内ではとうてい説明しきれぬ所ではありま

せんでした。脳の古典的理論において最も困難とされていたこの問題の解決のために、高橋・梅沢の場の量子論が展開されたと言っても良いかもしれません。なぜならば、そこでは記憶想起過程は対称性の破れに伴うゴールドストーン・ボゾンの生成過程として考えられているからです。（これこそ脳が示す独創性の最たるものではないでしょうか。私事で申し訳ありませんが、我々がこれを読んだ時は楽しくてしかたありませんでした。禅僧の頭の中においては消える雑念が、実は生成・消滅するゴールドストーン・ボゾンに他ならないわけですから。）

今、大脳皮質におけるコーティコン集団とボーズ場の系において、ある一つの記憶が真空状態の一つとして蓄えられているとしましょう。このとき、系が接している古典的なニューロンの神経回路網から系に対して微小な揺乱が与えられたとします。この微小な揺乱は、例えば真空状態にあるコーティコンの自由度のうちの一つを一様にそろった配位から対称性で許される方向に変位させるように作用します。この変位は隣接するコーティコンに伝播し、系のハミルトニアンが持つ対称性を破る真空状態に伴うゴールドストーン・ボゾンとなるわけです。このように記憶が系の対称性を破る真空状態の一つとして蓄えられているため、どんなに微小な揺乱が外部から系に与えられても系の中にゴールドストーン・ボゾンが発生します。言い換えれば、記憶を蓄えている系は如何なる微小刺激に対しても、その記憶内容である真空状態にみあったゴールドストーン・ボゾンが発生するように応答することになります。これが記憶想起の素過程に他なりません。

もちろん、大脳皮質におけるコーティコン集団とボーズ場からなる系には一つしか記憶を蓄えられないと言うのでは困ります。実際に我々の脳には多種多様な記憶が接続して蓄えられており、わずかの刺激が引金となって互いに関連する諸々の記憶が同時に連想されることは誰もが経験するところでしょう。量子論の枠組はこのような多重、連想記憶についても真空状態の重ね合わせという概念により説明し得る力を持っています。既に見た通り、記憶は系の古典的な一様配位の回りのコヒーレント状態で表わされる近似的な真空状態の一つとして蓄えられます。従って、複数の記憶を同時に蓄えている系の状態は、個々の記憶に対応する近似的な真空状態の一次結合、即ち重ね合わせの状態となっていると考えられます。場の量子論においては状態は無次元のヒルベルト空間の中の一つの単位長ベクトルとして表わされますので、ベクトルの一次結合によって状態の重ね合わせの概念を導くことはごく自然なことです。しかし、単に脳の記憶に見られる多重性や連想といった現象をヒルベルト空間の中のベクトルの一次結合でとらえようというのであれば、脳科学や心理学の通常の研究手法に慣れ親しんだ人達には刺激が強すぎるかもしれません。量子論のおかげでヒルベルト空間に親しんでいる分だけ、我々物理学の人間はこのような定式化を受け入れやすいのではないのでしょうか。プリブラムの原著<sup>3)</sup>の巻末にはスチュアート・高橋・梅沢<sup>1),2)</sup>の理論とは独立に脳の記憶の連想過程を抽象的な表現空間としてのヒルベルト空間におけるベクトルの直和分解による一次結合に基づいた統計的推定過程として記述した我々の仕事がありますが、連想記憶を最も経済的に定式化しようとするればどうしてもベクトルの一次結合の概念を使わざるをえないでしょう。

今、複数の記憶を同時に蓄えている系に外部から微小な揺乱が加えられたとします。このとき、系の状態は個々の記憶に対応する近似的な真空状態の重ね合わせとなっていますので、微小な揺乱に対する系の



応答としてはその個々の記憶を表わす真空状態にみあったゴールドストン・ボゾンが複数発生することになります。これが多重記憶の連想の素過程と考えられるのではないのでしょうか。

以上がスチュアート・高橋・梅沢<sup>1), 2)</sup>に展開された脳の中の量子論が教える、大脳皮質における記憶の素過程の全要です。我々のつたない理解でこの雄大な理論について何かつけ加える点などあり得るはずもないのですが、昔ヤン・ミルズ場の古典的真空状態の量子崩壊過程におけるインスタントンの発生<sup>6), 7)</sup>の論文を書いた杵柄で一つだけ述べさせていただきます。それは記憶の忘却過程についてです。スチュアート・高橋・梅沢の論文<sup>1), 2)</sup>では記憶の消失過程は近似的な真空状態を壊してしまう程の大きなエネルギーを持った外部揺乱による状態の遷移のみが考えられますが、記憶がコーティコンの自由度が一様な配位を示す古典的な状態の回りの近似的な真空状態そのものであることから、量子論的なトンネル効果によってこの近似的な真空状態が崩壊してしまい、他の真空状態に移ってしまうことにより記憶が自発的に消滅する可能性が出てきます。このようなトンネル効果による真空状態の自発的消失過程が記憶の忘却に他ならないのではないのでしょうか。記憶の忘却はインスタントンを生むわけですが、インスタント知識はすぐに忘れてしまうということでしょうか。(ここで標語を一つ、思い出すのはゴールドストン・ボゾン、忘れ去るのはインスタントン。)

## 6. コーティコンを樹状突起網

このように場の量子論の大家でいらっしゃる高橋・梅沢両先生の独創性になる脳の中の量子論は、古典的なニューロンの神経回路網のみが大脳皮質における記憶や意識の作用を生み出しているとする立場では理解できなかった記憶の安定性、非局在性、さらには想起過程や連想といった特徴をも説明できる脳の記憶過程のモデルを与える理論となっています。そこで中心的役割をになっているものは、大脳皮質においてニューロンの細胞膜の外部に分布する量子論的自由度と仮定されているコーティコンの存在と、コーティコン間の相互作用を媒介するボーズ場の存在です。コーティコンは、古典的なニューロン像の中には完全に見落とされていた自由度というわけですが、スチュアート・高橋・梅沢<sup>1), 2)</sup>では基本仮説としてコーティコンの存在を予言していると考えられます。もちろん、コーティコンの存在の直接的な検証は大脳生理学の進歩を待たなければなりません。この脳の中の量子論の可能性と関連する幾つかの実験的事実が第2論文<sup>2)</sup>に解説されています。一つは脳波(EEG)に見られる位相相関、即ちコヒーレンスの発現現象でセイヤーズ効果と呼ばれているものです。これは、感覚入力は何もない場合に記録された脳波の位相相関を見ると、位相の間には全くランダムな相関しか存在しない反面、何らかの感覚入力があって大脳皮質においてその感覚に対する記憶過程が作用している場合の脳波には、感覚入力の直後からはっきりとした位相相関が生ずるという現象です。記憶過程における脳波に強い位相相関、即ちコヒーレンズが生まれているということは、大脳皮質において記憶機能が相転移現象によく見られるような何らかの協同効果によって形成されていることを示しています。このような協同効果をもたらす記憶の素過程としては、やはり巨視的量子効果による長距離相関を持つ物理状態が関与するものでなくてはなりません。従って、このセイヤーズ効果の存在は、大脳皮質におけるコーティコン集団とボーズ場からなる物理系の巨視的量子真空状態が記憶の素過程を与えるとする高橋・梅沢理論を間接的に支持するものとなります。

もう一つの実験的事実は、非常に弱い電磁場が脳に与える影響に関するものです。御存知のように、ニューロンの細胞膜を形成する脂質二重層には何種類もの生体高分子が数多く浮遊し、それらの性質が細胞膜の電気化学的性質を決めていると考えられます。従って古典的なニューロン像では、もし脳が弱い電磁場の作用を受ける場合にも、その強度は少なくとも生体高分子をイオン化する程度以上のものでなくてはなりません。しかし現実にはイオン化できない程に弱い電磁場に対しても脳は意味のある応答を示すことが実験的に報告されています。このことは如何に微小な外部揺乱に対しても応答するゴールドストーン・ボゾンの発生機構を持つ、コーティコン集団とボーズ場の間の巨視的量子効果に基づいたスチュアート・高橋・梅沢<sup>1), 2)</sup>の理論を裏づけているとも考えられます。強い位相相関を持つコヒーレントな揺乱であれば、イオン化強度よりも弱いレベルの電磁場であっても十分にコーティコン集団とボーズ場からなる系の巨視的量子状態に作用することができるからです。

ここでスチュアート・高橋・梅沢<sup>1), 2)</sup>が展開した記憶の素過程を与える脳の場の理論の要旨を振り返ってみましょう。そこでは、大脳皮質における高度な情報処理機能を形成する体系としては、古典的なニューロンの神経回路網だけでなく、ニューロンの細胞の外に分布するコーティコンの集団とボーズ場からなる量子論的体系をも考慮に入れます。後者が前者の回路動作を制御し、従ってニューロンの神経回路網は単に情報信号をインパルスの形で効率良く伝えるという電話回線の程度の役割しか持たなくなります。電話回線を使って高度な情報制御過程を実現している主体と言え、後者の量子論的体系になります。

実は同様の考えは、最新の大脳生理学における研究成果を基に、プリブラム<sup>3)</sup>によっても提唱されています。そこでは記憶や意識といった高度な情報処理を生む作用は、大脳皮質において古典的なニューロンの神経回路網だけでなく、その周囲に分布する樹状突起網をも含んだ複合系に起因すると考えられています。中でもニューロンの神経回路網は樹状突起網間に効率良く情報信号を伝えるという機能しか持たず、その回路動作は樹状突起網の作用により制御されています。大脳生理学者プリブラムによる視点とコーティコンとボーズ場についての場の量子論的視点を比べてみますと、後者におけるコーティコン集団とボーズ場からなる系は樹状突起網の周りに存在する可能性が高いと考えられます。一例をあげれば、樹状突起網に多数分布しているスパインの発生の核となるような高分子が存在して、その内部電子状態が示す異なるエネルギー準位がコーティコンの自由度を与えるとすれば、準位間の状態遷移に伴う軟光子の放射、吸収による頭蓋内の電磁場と相互作用が可能であることから、ボーズ場は電磁場に他ならないこととなります。このような物理系が実現されていて、位相相関の強いコヒーレントな協同現象が脳における記憶の素過程を形成しているのであれば、我々の脳は一種の軟光子レーザー装置に似ているのかもしれない。

これ以上は晩年のパウリの親友であった心理学者ユングにおまかせすることにして、我々の脳の場の量子論についての探訪をしめくりたいと思います。

## 7. おわりに

出来るだけ数式を使わないでおこうと考えておりましたが、結局一本も数式を書かずにすんだようです。「素研」の内容としては変わったものになってしまいましたが、読んでおられる方々が場の量子論や真空の相転移などに慣れ親しんでいらっしゃるために、このような特異な解説でもがまんしていただけるので

はないでしょうか。興味をお持ちいただいた方は是非にもスチュアート・高橋・梅沢の論文<sup>1), 2)</sup>やプリブラムの近刊<sup>3)</sup>をお読み下さい。脳の理論は素粒子論にもまして個性あふれる研究の場を与えてくれるかもしれません。

いささかお遊びが過ぎるとおしかりを受けるかもしれませんが、最後の最後に我々の素朴な疑問について書かせていただきます。それは量子論における観測の理論についてです。これについてのフォン・ノイマンによる理論やその他の定式化が昔から議論されています。そこでの本質的な問題点は、ある量子系の状態を測定するためにはその系と相互作用することの可能な別の系を測定装置と考え、測定後の、即ち相互作用後の別の系の状態を知る必要があるからです。もし本当に測定後の測定装置と考えられている別の系の状態が判るのであれば問題ないのですが、別の系もやはり量子論的な系である限りその状態を知るにはさらに別の系を測定装置として測定してやる必要が生じます。この状態測定過程に見られる無限の連鎖は、系や測定装置と考えられる別の系や、さらにはそのまた測定装置である別の系などが量子論的な体系である限り終ることはありません。その為、通常の観測の理論では連鎖のどこかに古典的極限操作を導入することによって測定過程を終了させてしまいます。

もし観測の主体である我々の脳の意識や記憶の状態が、高橋・梅沢両先生の理論によって記述されるとするならば、脳もまた量子論的な体系ということになります。その系における状態そのものが記憶に対応しているのであれば、任意の量子論的な体系の状態を測定する場合に必然的に生まれる被測定系と測定系の連鎖は脳という量子系のところで終わってしまい、観測の理論にとっては好都合となります。このような場合の観測の理論はどんなものになるのでしょうか。興味深いところですが私どもでは役不足の感はぬぐえません。是非にも高林先生や柳瀬先生に御登場いただきたいと願いながら終りにしたいと思います。

#### 参考文献

- 1) C.I.J.M. Stuart, Y. Takahashi and H. Umezawa, J. Theor. Biol. 71, 605 (1978).
- 2) C.I.J.M. Stuart, Y. Takahashi and H. Umezawa, Found. Phys. 9, 301 (1979).
- 3) K.H. Pribram, "Holonomic Brain Theory" (仮題) (近刊).
- 4) 品川嘉也, (私信).
- 5) 伊藤正男, 桑原武夫 (編), 「最新脳の科学」, 同文書院 (1989).
- 6) K. Yasue, Phys. Rev. Lett. 40, 665 (1978).
- 7) K. Yasue, Phys. Rev. D 18, 532 (1978).