

細胞集団における波動サイバネティックス

ノートルダム清心女子大学情報理学研究所 治部 眞里

(1990年6月16日受理)

1. 序

我々の脳組織の複雑な機能を与える素過程は、理論的にもまた実験的にも今だに見い出されていない。脳組織に対する感覚入力を受容し、それを処理する記憶過程でさえ、本質的には知られざる世界である。

生理学的にみると、脳組織は2種類の異なった細胞によって形成されている。すなわち神経細胞とグリア細胞である。Waldeyer-Sherringtonによってもたらされた脳の理論、いわゆる神経細胞主義においては、脳内の情報処理に対する唯一の基本は神経回路網と呼ばれる神経細胞集団であると広く信じられている。そこではグリア細胞は神経回路網を形成するための支持細胞、あるいは神経細胞に栄養を与え、イオンの代謝を行ったり、死んだ神経細胞を分解するなどの最小限の維持の役割を果たしていると考えられてきた。これにより多重かつ可塑的に、軸索そしてシナプスを介して連結している神経細胞のみを考慮に入れ、膨大な研究が広範囲に発展してきた。しかしながら神経回路網によるこれまでのアプローチは、いくつかの方向で行き詰まり、理論面においても実験面においても思い切った改革を要求されている。神経回路網によるこれまでの視点の主な欠点は、電気・化学的な反応を組織化する全体的な制御機構が欠けているという事実起因している。このような全体的制御機構なしでは、神経回路網は感覚入力に対するつまらない反応を示し、我々人間はまるでミミズのように、あるいは最近のいわゆるニューロコンピューターと呼ばれている発達したロボットのように振舞うことを強制されるのだ。この神経回路網一つだけでは、人は人間たり得ないのである。

神経回路網における神経インパルスの伝導路に制御可能な新しい自由度を含んだ脳組織の観点を提唱したのは、おそらくプリブラムが初めてであろう。^{1,2)}彼は脳生理学の立場から、神経細胞の半分以上が軸索を持たないものである事実や、そのためそれらが神経インパルスの伝導路には何ら関与していないことを強調した。そこでこれらの軸索を持たない神経細胞が、軸索を持つ神経細胞からなる神経回路網の電気・化学的な活動の制御機構を規定している可能性を見いだすことが自然であろう。樹状突起網と呼ばれるこれら軸索を持たない神経細胞の局所的なネットワークが神経回路網の組織化及び制御の両面において、きわめて重要な役割を担っていることが今日考えられている。しかしながら、そこ

においてもまだ脳内の根源的な情報処理過程としてグリア細胞が入る余地はない。

ごく最近になって、広く信じられていた説とは違ってグリア細胞、特に星状グリア細胞が脳の情報処理の基本過程に寄与していることが発見された。³⁾より正確には、星状グリア細胞がグルタミン酸塩に対する細胞内の即時的で振動的な自由カルシウムの活性を示すことが見い出されたのである。またこのカルシウムは、ギャップ結合を通して隣接星状グリア細胞間及び細胞内の原形質に波状に伝播する。従って星状グリア細胞のギャップ結合を介して細胞から細胞へとカルシウム波が伝播することによって、細胞間相互作用の可能性が開かれた。すなわちここにカルシウム波と星状グリア細胞がもたらす新しい脳の信号系の発見が期待されるわけである。

さて、ここで2つの疑問が持ち上がるだろう。第1に脳の情報処理過程の基本における、この新しい脳の信号系の役割は何か？第2にこれまでの神経回路網に加えて、別な信号系を必要とするのは如何なる理由からか？

一つの可能性としては、ブリブラムが強調したように、既存の神経回路網における神経インパルスの伝導路を制御し組織化する上で、新しい系が役割を担うだろうと考えられることだ。言い換えれば、星状グリア細胞とカルシウム波がもたらす新しい系は、ただ単一の情報伝播を行うのではなく、人を人間にする、すなわち神経回路網の活動の全体的な制御機構を与える本質的な役割を果たすと考えられるわけである。もちろんこれは推測の域を脱していないため、理論的にもまた実験的にも推測から現実へと引き戻す必要性があるだろう。

この論文においては、理論的な面から星状グリア細胞とカルシウム波の新しい系に関する神経回路網の全体的制御機構の可能性について探っていくことにする。

2. 背景

我々はこれまでに細胞集団における集団的組織化の全体的、即時的制御機構のモデルを提出した。⁴⁾そこでは全体的制御情報は細胞から細胞へと伝播する自由カルシウムの振動的活性の位相波によって伝播される。このような位相波は、カルシウム振動の1または2周期の間に細胞集団全体に散乱され、その結果自由カルシウムがギャップ結合を通して位相波の空間勾配に比例した標速で移動する。カルシウム移動の位相波によるこの制御機構の存在のため、全細胞集団の各細胞は細胞集団全体の上に変調された位相波に誘導された自由カルシウムの流れにより統制され、正確に制御された活性を得るのだ。そして全細胞集団は体系化された秩序を示すのだ。逆に全細胞集団の各細胞の活性は、各細胞の自由カルシウムの即時的で振動的な活性に影響を与え、そのため全細胞集団上のカルシウム振動の位相波は、細胞の活性分布に従って変調されるのである。まさに制御機構の中にフィードバック効果を引き起こすのである。

この細胞集団における集団組織化の全体的即時的な制御機構の理論的モデルは、小島らによるアメーバ様単細胞の細胞質の集団運動の全体的、即時的制御機構の実験的発見と、保江によって提唱されたこのような全体的制御機構の数学的枠組みである「波動サイバネティックス」により多くの示唆を得た。^{5,7)}従ってこれを「細胞集団の波動サイバネティックス」と呼ぶことにするのは自然であろう。

我々はここで再び小島らの実験的発見と保江の数学的枠組みの概略を繰り返すことはせず、すぐさま細胞集団の波動サイバネティックスの観点により、星状グリア細胞とカルシウム波の新しい系による神経回路網の全体的制御機構の理論的モデルを展開することにする。

3. 神経細胞と星状グリア細胞の波動サイバネティックス

我々は、神経細胞とグリア細胞の巨大な細胞集団としての脳組織を考える。模式的に言えば、脳組織として N 個の神経細胞と M 個の星状グリア細胞の細胞集団を考えるが、ここにおいて N と M は、それぞれ神経細胞と星状グリア細胞の数を示す同じオーダーの大きな自然数である。神経細胞の軸索と樹状突起は、星状グリア細胞に沿って発達することは脳組織の生理学が示すところである。この事実は神経細胞膜の接着タンパク質よりもグリア細胞膜のそれの方が多く存在することによって説明されるだろう。事実、初期の脳組織の発達段階において、神経細胞は神経管によって生成され、グリア細胞沿いにアメーバ細胞のように動く。従って神経細胞は、星状グリア細胞の全範囲に埋め込まれ支えられており、星状グリア細胞沿いに動く。すなわち脳組織の神経回路網の位相的形状は、星状グリア細胞全体の幾何学的形状によって必然的に導かれる。

この事実を基に、我々は星状グリア細胞全体を星状グリア細胞の標構と呼ぶ。よって星状グリア細胞標構の幾何学は、完全に神経回路網の全体的、位相的結合性を決定づける。しかし、まだそこにはシナプスの可塑性に基づく電気・化学的な結合性を表出する自由度が残っている。後者は神経回路網に何らかのランダムな効果を生起する。もちろん、このような自由度は、神経回路網が星状グリア細胞標構内及びそれ沿いにのみ形成されるように、神経細胞周囲の星状グリア細胞によって明らかに束縛を受けている。この意味において、神経細胞は星状グリア細胞標構の背景による幾何学的な束縛の下で回路網を形成する。

脳の基本過程に対する従来のアプローチにおいては、グリア細胞はイオンや神経伝達物質の代謝、神経細胞の生存、神経回路網を形成するための神経細胞の支持としての役割を保持するものであると考えられていた。グリア細胞は、脳内の情報処理の基本を担うのではなく、支持あるいは背景標構として、不活性な役割を担うと信じられていたわけである。しかしながら、ごく最近 Smith と Cornell-Bell らによって、星状グリア細胞がグルタミン酸塩に誘導された細胞内の自由カルシウムの即時的、振動的活性によって反応しているこ

とが発見された。そしてこのカルシウム振動は、星状グリア細胞の細胞質内、また隣接細胞間を波状に伝播しているのである。³⁾この発見は、直ちに我々の星状グリア細胞に対する認識を変える可能性を開いてくれた。この新しい、即ち第2の脳の信号系に対する多くの可能性の中の一つとして、この論文において我々は波動サイバネティックスの見地から神経回路網の位相を全体的、即時的に制御する可能性を強調したい。

脳組織内の星状グリア細胞標構の空間的拡がりを記述するために、我々は M 個の空間領域 $A_1, A_2, \dots, A_M$ で、各々は一つの星状グリア細胞の空間的拡がりを表すものを導入する。そして星状グリア細胞標構を領域の和集合 $\mathcal{A} = \bigcup_{j=1}^M A_j$ で表す。これは複雑多岐に連結したものであるが、これもまた空間領域である。ここで $\mathbf{x} = (x^1, x^2, x^3)$ を星状グリア細胞標構 $\mathcal{A}$ 内の任意の位置のデカルト座標とする。時刻 t における星状グリア細胞標構 $\mathcal{A}$ 内の任意の位置 $\mathbf{x}$ の近傍の自由カルシウムの濃度を $n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ とする。Smith と Cornell - Bell らの発見によると、自由カルシウム濃度の時間発展は、振動成分を備えているので次のようになる。

$$n_{Ca}(\mathbf{x}, t) = N_{Ca} + \delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$

ここで N_{Ca} は自由カルシウムの濃度の平均平衡値を示す正の定数であり、 $\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ は平均平衡値からの偏りである。我々はこの偏りを

$$\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t) = B \cos \{ \theta(\mathbf{x}, t) \}, \quad (2)$$

とかく。 B は振幅、 $\theta(\mathbf{x}, t)$ は振動成分の位相を表す。全星状グリア細胞標構 $\mathcal{A}$ 上のカルシウム振動の分布 $\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ は、空間領域 $\mathcal{A}$ を伝播する波である。よって、我々は $\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ をカルシウム波と呼ぶことにする。このカルシウム波 $\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ は、グルタミン酸塩によって誘導された自由カルシウムの即時的、振動的活性の伝播を表している。

細胞内の自由カルシウムによって制御され、ATP に誘導されたアクチンの収縮—弛緩の過程が存在することを思い起こそう。殊に小畠らがアメーバ様細胞で実験的に発見したように、細胞膜は ATP に誘導される収縮—弛緩過程によって、カルシウム振動に共鳴した膜振動を起こす。この論文において、我々はこれを星状グリア細胞の場合にも仮定するが、もちろんこれは自明の事ではない。この仮定をより現実的なものとするには、さらに多くの実験的確認を待たなければならない。一つの好都合な事実としてはアクチン分子は、神経細胞の中に発見され、ATP が誘導するアクチン分子の収縮—弛緩過程はクリックによって現在では記憶過程の本質的な役割を担っていると予想されている。⁸⁾

細胞膜に隣接する星状グリア細胞標構の空間領域 $\mathcal{A}$ における位置 $\mathbf{x}$ を考えてみよう。

$f(\mathbf{x}, t)$ を ATP に誘導されたアクチン分子の収縮—弛緩過程に制御された細胞膜の振動成分とする。それは自由カルシウムに感応し、カルシウム振動 $\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ に共鳴した変調振動パターンを表す。そこで

$$f(\mathbf{x}, t) = F \cos \{ \theta(\mathbf{x}, t) \} \quad (3)$$

とおく。 F は振幅を表す。小畠らの実験結果、そして保江の波動サイバネティックスの理論的枠組みによって、細胞内の細胞質は振動パターン(3)の位相 $\theta(\mathbf{x}, t)$ の勾配ベクトルに比例した標速によって流れる。言い換えれば、細胞質の空間分布密度 $\rho(\mathbf{x}, t)$ は連続方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{j}) = 0, \quad (4)$$

によって記述され、標速 $\mathbf{j}(\mathbf{x}, t)$ は、位相勾配によって与えられる。

$$\mathbf{j}(\mathbf{x}, t) = D \nabla \theta(\mathbf{x}, t), \quad (5)$$

ここで、 D は拡散係数の次元を持つ定数であり、 ∇ は勾配ベクトルを表す。方程式(4)と(5)は、如何に星状グリア細胞の細胞質が星状グリア細胞の全標構上に変調されたカルシウム波の位相 $\theta(\mathbf{x}, t)$ によって、全体的に制御されるかを表している。カルシウム波 $\delta n_{Ca}(\mathbf{x}, t)$ は、星状グリア細胞標構内のグルタミン酸塩の全分布によって、制御された自由カルシウムの即時的、振動的な活性波の総計であり、その位相 $\theta(\mathbf{x}, t)$ は常に星状グリア細胞標構上への全ての感覚入力の全情報を伝播するのである。それ故に各局在点における細胞質は、協同的な標動を示し、方程式(4), (5)で与えられる局所的な運動方程式にのみ従うのではあるが、全星状グリア細胞集団の全体的な組織化に寄与している。各星状グリア細胞内の細胞質の協力的標動は、細胞の歪を生起し、星状グリア細胞に占められた空間領域 $\mathcal{A}$ は、異なった幾何立体配置を示すことに、注意を向けよう。即ち星状グリア細胞の全標構の幾何立体配置は、星状グリア細胞間及び内を伝播するカルシウム波の制御下で変化するのである。さて、神経回路網については何が起きているのだろうか？神経細胞は自らの軸索と樹状突起を星状グリア細胞膜沿いのみに発展させるため、神経回路網の結合性の位相幾何は本質的に、シナプスの可塑性を残して星状グリア細胞の全標構の結合の位相幾何によって決定づけられるのである。言い換えると、よく知られたシナプスの可塑性に加えて、神経回路網は、星状グリア細胞内のカルシウム波の制御により間接的にその位相幾何を変化させるのである。この意味において、我々は、神経回路網の活性に対する全体的制御機

構の本質的な役割を果たす星状グリア細胞とカルシウム波の新しい系の可能性を強調するものである。

Bellman と Wiener によりそれぞれ創始された制御理論とサイバネティックスにおいて良く知られているが、制御策略が制御系からのフィードバックを受けていなかったならば、如何なる制御機構も達成されないのである。よって、神経回路網の活性のフィードバックとしての何らかの制御策略が、カルシウム波による全体的制御機構の中に期待されるわけである。

次の章では、このフィードバック制御策略について紹介する。

4. 星状グリア細胞とカルシウム系の秩序パラメーター

神経回路網の神経細胞の活性は、細胞間空間内への神経伝達物質の放出を意味する。グルタミン酸塩及びこれら神経伝達物質は、星状グリア細胞周囲に分布し、その星状グリア細胞は、細胞内の自由カルシウムの即時的、振動的活性を表出する。これらのカルシウム振動が、隣接細胞間及び星状グリア細胞の細胞質内を波として伝播する。これらの波の重ね合わせが星状グリア細胞機構全体の上に拡がっている変調したカルシウム波となる。そして各星状グリア細胞の細胞質はカルシウム波の位相の勾配に比例した流速で流れる。

このカルシウム波の位相に対する細胞質の流れ運動を記述する方程式として(4)と(5)を得た。ここで星状グリア細胞周辺の神経伝達物質とグルタミン酸塩の分布に対して、如何にカルシウム波の位相が活性化するかを記述する方程式を見いださなければならない。そこで星状グリア細胞標構 $\mathcal{A}$ 内の任意の点 $\mathbf{x}$ の近傍において、ある時刻 t におけるグルタミン酸塩と神経伝達物質の分布濃度 $U(\mathbf{x}, t)$ を考えてみよう。もちろん神経伝達物質とグルタミン酸塩は細胞外に分布しているため、分布濃度 $U(\mathbf{x}, t)$ は、細胞膜に近接する所でのみ 0 でない値を持つ。

ある時刻 t における星状グリア細胞の任意の点 $\mathbf{x}$ の近傍におけるカルシウム波の位相 $\theta(\mathbf{x}, t)$ を考えてみよう。ここで細胞質は方程式(5)で与えられた流速 $\mathbf{j}(\mathbf{x}, t)$ によって流れる。よって細胞質の時間変化は流体力学の運動方程式

$$\mu \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{j}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{j}(\mathbf{x}, t) \nabla \mathbf{j}(\mathbf{x}, t) \right\} = -\nabla P(\mathbf{x}, t) + \mathbf{F}_{\text{ex}}(\mathbf{x}, t), \quad (6)$$

によって記述される。ここで μ は細胞質の質量密度を表す定数であり、 $P(\mathbf{x}, t)$ は細胞質の圧力を、 $\mathbf{F}_{\text{ex}}(\mathbf{x}, t)$ は外力を表している。一般に前者 $P(\mathbf{x}, t)$ は細胞質の分布密度 $\rho(\mathbf{x}, t)$ の関数であり、後者 $\mathbf{F}_{\text{ex}}(\mathbf{x}, t)$ は神経伝達物質とグルタミン酸塩の分布密度 $U(\mathbf{x}, t)$ の関数である。 $\mathbf{F}_{\text{ex}}(\mathbf{x}, t)$ の $U(\mathbf{x}, t)$ に関する一次の展開を用いると

$$\mathbf{F}_{\text{ex}}(\mathbf{x}, t) = -\lambda \nabla U(\mathbf{x}, t), \quad (7)$$

を得る。ここで λ は一次の展開係数である。

方程式(5)と(7)を代入することにより方程式(6)は

$$\mu \left\{ D \frac{\partial}{\partial t} \theta(\mathbf{x}, t) + \frac{D^2}{2} |\nabla \theta(\mathbf{x}, t)|^2 \right\} = -P(\mathbf{x}, t) - \lambda U(\mathbf{x}, t)$$

または

$$-\frac{\partial \theta(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \frac{D}{2} |\nabla \theta(\mathbf{x}, t)|^2 + \frac{1}{\mu D} P(\mathbf{x}, t) + \frac{\lambda}{\mu D} U(\mathbf{x}, t), \quad (8)$$

となる。この方程式は、神経伝達物質とグルタミン酸塩の分布 $U(\mathbf{x}, t)$ に関するカルシウム波の位相 $\theta(\mathbf{x}, t)$ の時間変化を決める。細胞質の圧力 $P(\mathbf{x}, t)$ は、その分布密度 $\rho(\mathbf{x}, t)$ に依存するため、方程式(8)は星状グリア細胞全体の細胞質の分布に確かに結合している。細胞質は局所的に熱力学平衡状態にあると仮定すれば、圧力 $P(\mathbf{x}, t)$ は局所平衡状態方程式を通して密度 $\rho(\mathbf{x}, t)$ によって決定される。このような局所状態方程式の多くの可能性の中で大腸菌の細胞質の圧力に対して長沢が提唱した

$$P(\mathbf{x}, t) = -\frac{\mu D^2}{2} \frac{\Delta \sqrt{\rho(\mathbf{x}, t)}}{\sqrt{\rho(\mathbf{x}, t)}}, \quad (9)$$

を仮定する。^{9,10)}ここで $\Delta = \text{div} \nabla$ は、ラプラス演算子を示す。長沢は、これを細胞質の分布圧力と呼んでいる。

最後に方程式(5)と(9)を方程式(4)と(8)に代入することにより、神経回路網の活性によって誘導された神経伝達物質とグルタミン酸塩の分布に対する、星状グリア細胞全体のカルシウム位相波 $\theta(\mathbf{x}, t)$ と細胞質分布 $\rho(\mathbf{x}, t)$ の時間変動を制御する2つの基本方程式を得ることが出来る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -D \nabla \cdot (\rho \nabla \theta) \quad (10)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{D}{2} |\nabla \theta|^2 - \frac{D}{2} \frac{\Delta \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} + \frac{\lambda}{\mu D} U. \quad (11)$$

カルシウム波と星状グリア細胞系の活動の全体を表しているこれらの基本方程式が、圧力項を除いて最適制御理論における基本方程式、すなわち Bellman 方程式の形に類似していることに注意しなければならない。これは一般の工学的な最適制御理論が少数自由度問題

である反面、カルシウム波位相 θ と細胞質濃度 ρ で表される星状グリア細胞とカルシウム波系が本質的に多体問題であるという事実に影響している。不幸にもこの事実が、方程式(9)における分布圧力項の複雑さの為に基本方程式(10)と(11)を解くことを難しくさせている。そこで方程式(10)と(11)を近似、または線形化する必要がある。

脳組織の星状グリア細胞とカルシウム波の系が神経細胞の全体的な制御機構の中に秩序あるいは組織化を表出することを思いだそう。言い換えれば、何らかの協同現象が起きているのである。そこでギンツブルク-ランダウ型の複素秩序パラメーターを導入することが自然であろう。

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \sqrt{\rho(\mathbf{x}, t)} e^{i\theta(\mathbf{x}, t)}, \quad (12)$$

この秩序パラメーターは協同現象に対するギンツブルク-ランダウ理論と同じように、星状グリア細胞全体の秩序あるいは組織化の伝播を表している。秩序パラメーター ϕ を一つの複素変数と考えれば実数変数 ρ と θ についての基本方程式(10)(11)は次の一つの方程式に変換される。

$$i\mu D \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\mu D^2}{2} \Delta \phi + \lambda U \phi, \quad (13)$$

これは星状グリア細胞とカルシウム波の系の協同現象を理論的に表した基本方程式であり、系の秩序方程式と呼ぶことにする。もちろんこれは保江の波動サイバネティックスの数学的枠組みの中で得られた基本方程式とも一致している。また長沢により大腸菌の場合に得られた、定状分布 $U=U(\mathbf{x})$ に対する時間に依存しない方程式にも変形することが出来る。

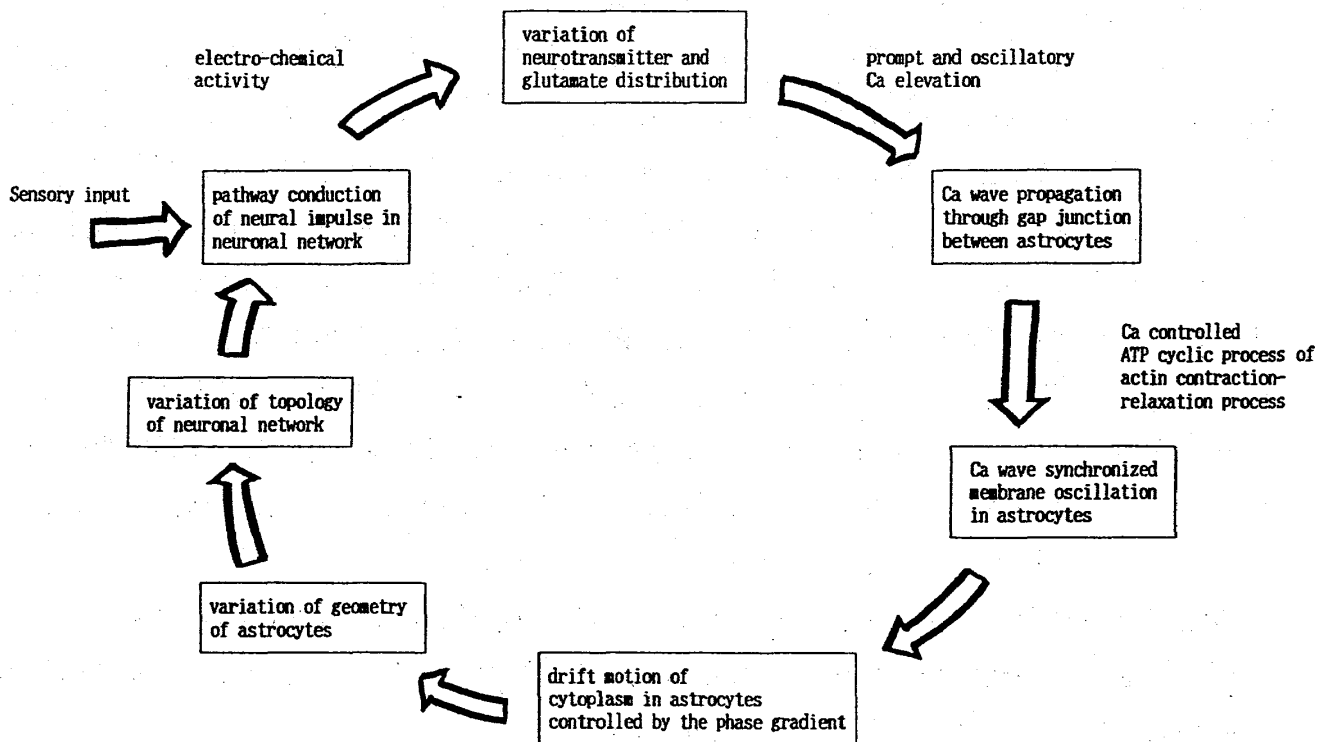
5. 神経回路網に対する星状グリア細胞機構のフィードバック反応

秩序方程式(13)に関する波動サイバネティックスの理論的見地から、神経回路網の活性に対する星状グリア細胞全体の反応機構について考えてみよう。活性化された神経回路網によって誘導された神経伝達物質とグルタミン酸塩の分布密度 $U(\mathbf{x}, t)$ に関する秩序方程式(13)を解く秩序パラメーターを $\phi(\mathbf{x}, t)$ とする。秩序方程式(13)が線型の偏微分方程式であることにより、解の存在は $U(\mathbf{x}, t)$ の関数形の広い範囲で保証される。そこで秩序パラメーターの絶対値 $|\phi(\mathbf{x}, t)|^2$ は方程式(12)によって星状グリア細胞の細胞質の分布密度 $\rho(\mathbf{x}, t)$ を決定するが、これは星状グリア細胞の細胞質によって占められる空間領域の幾何学的形状でもある。言い換えれば秩序方程式(13)で得られるごとく、神経伝達物質とグルタミン酸塩に誘導されるカルシウム波による神経回路網に対するフィードバック反応より星状グリア細胞全体の位相幾何の変化が決まる。これは星状グリア細胞標構による神経回路網の

位相的結合性の全体的制御を司るフィードバック効果である。

我々が前章で強調してきたように、シナプスの可塑性以前の神経回路網の結合性に対する位相は、軸索や樹状突起が星状グリア細胞に浴ってのみ発達するという幾何学的拘束によって制御されている。神経回路網の結合性が幾何学的な制御機構によって変化するとき、神経回路網の活性パターンが、変化することは必然の結果であり、放出された神経伝達物質やグルタミン酸塩 $U(\mathbf{x}, t)$ の密度変化は、秩序パラメーター $\phi(\mathbf{x}, t)$ に対応した変化をもたらす。その結果、星状グリア細胞の全標構の幾何学形は細胞質密度の変化 $\rho(\mathbf{x}, t) = |\phi(\mathbf{x}, t)|^2$ によって表され、この細胞質の密度変化は、細胞グリア細胞標構によって支えられ埋め込まれた神経回路網の結合の変化を起こす。

これは脳組織の二つの異なった系、すなわち神経回路網の古典的な系と星状グリア細胞とカルシウム波の新しい系の相互作用の中の相互フィードバック機構の存在を表している。これが人を人間たらしめるからくりではないだろうか。以下にこのフィードバック機構を模式的に表した図を示す。



Figure

6. 結び

最近発見された星状グリア細胞とカルシウム波の脳の信号系に対するこの理論的アプローチを結ぶにあたり、脳の基本的な情報処理過程におけるその役割について述べる。

最初に星状グリア細胞機構は不活性であり、その上によく知られた維持の役割、すなわち神経細胞が形成する回路網を支える役割のみを果たすと仮定しよう。この場合、Walden-Sherrington の神経細胞主義が主張するごとく、神経回路網は情報処理の唯一の基本である。ここでは感覚入力に神経インパルスの伝導によって、神経回路網に伝わる。Stuart, 高橋, 梅沢が指摘したように神経インパルスの伝導によって活性化された神経回路網では、意識の基本的過程に表出される秩序あるいは組織の根源を説明することは出来ない。感覚入力に対する神経回路網の反応には、非常な限界がある。仮に各神経細胞の閾値が大きければ、それは決定的なものになるし、反対に小さければランダムになる。さらに神経回路網の位相が感覚入力即ち学習過程のみによって決定されるならば、それはミミズなどのほとんどの反射行動を説明することが出来る。しかしながら我々人間にとって脳の情報処理は、感覚入力のみによって決定されるわけではなく、意識の内的状態によっても決まる。同一の連続的な感覚入力でさえも脳の異なった情報処理を生起するのだ。

このような通常の神経回路網の理論的枠組みは捨てて、我々は脳の情報処理の基本における星状グリア細胞とカルシウム波の系の役割に焦点を当てる。前章までに紹介したように、星状グリア細胞とカルシウム波系は、強く神経回路網と結合している。さらに、星状グリア細胞間及び内に伝播するカルシウム波の位相によって伝播された全体的組織化あるいは秩序を表出する。このような組織化は感覚入力からの作用を受ける。というのも感覚入力は、神経回路網の神経インパルスの伝導路の活性に変化を生起するからである。それによって神経伝達物質とグルタミン酸塩の分布を変え、さらに組織化を表す秩序パラメータ ψ が変化する。ここに星状グリア細胞とカルシウム波の系と神経回路網の間の相互フィードバック機構が存在する。前者の機構が後者の原因となり、神経回路網からの神経インパルスの伝導の出力が整合性を表出する。

最近発見された星状グリア細胞とカルシウム波の脳の信号系の役割は相互フィードバック関係を通して神経回路網に全体的な組織化または秩序化を生み、神経インパルスの伝導路の出力の中に整合性を生み出すと結論出来よう。

参 考 文 献

- 1) K. H. Pribram, *Languages of the Brain*, (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971).
- 2) K. H. Pribram, Book to be published.
- 3) A. H. Cornell-Bell, S. M. Finkbeiner, M. S. Cooper and S. J. Smith, *Science* **247**, 470

(1990).

- 4) 治部眞理, 物性研究, **53**, 431(1990).
- 5) K. Matsumoto, et al., J. Theor. Biol. **122**, 339(1986).
- 6) Y. Mori, et al., Protoplasma **135**, 135(1986).
- 7) K. Yasue, Phys. Rev. **A38**, 2671(1988).
- 8) F. Crick, Trends in Neurosci. **5**, 44(1982).
- 9) M. Nagasawa, J. Math. Biol. **9**, 213(1980).
- 10) M. Nagasawa, J. Theor. Biol. **90**, 445(1981).