

波動場による人工生命へのアプローチ

横井 浩史, 嘉数 侑昇

In recent years, modeling of life is drawn much attention in many fields. The behavior of life is complex and interesting. All life must have some intelligence for making its own life cycle stable and adapt to changing environment. It will be very useful if we can draw this life's know how. This study tries to model mathematically the formation of a specific part of living cells. For this purpose, we prepare an adequate mathematical model of physical interactions on many different properties. The mathematical model presents parallel distributed processing system that exchanges information through vibrating potential field (VPF) and life's kinetics. Using VPF and life's kinetics, the computer simulations show the behaviors of artificial life that conserves its own energy level and tunes its configurations or location of its parts.

1. はじめに

近年, 生物の物質的/情動的柔軟性を科学的に解釈し, 有用な特性を工学に応用しようとする試みが盛んに行なわれている。生物の多くが自律分散システムを形成可能であることから, 柔軟性, 高速性, 信頼性の高いシステムが構成できる可能性を持つことに期待が寄せられている。このような試みの一環として生物の挙動をモデル化することを目的として自己組織的性質を計算機上で表現する分野が Artificial Life という名前で知られるようになってきた。A-Life の分野では L-system, GA, Celler Automaton, フラクタル, カオスなどの技術を用いて生体を模倣することが提案されているが, これらは情報の処理又は処理過程のモデルである。生物を柔軟な工学

的システムとして構築する目的のためには, 情報の通信と処理さらには処理構造を規定する必要がある。

従来の合目的的システムは, 木構造によって制御されてきた。そのようなシステムでは根にあたる処理装置 (ユニット) が枝葉のユニットの状態を観測しながら随時制御目標を与える必要があった。このような制御構造は中央管理型として, その制御の容易さから広く用いられてきたが, 構造的な理由から各処理装置に固定的な役割分担を要求するために処理装置が特殊化され, 柔軟な役割の交換が困難となってきた。結果的に部分的な故障がシステム全体の処理能力を大きく減退させる脆弱さを含むこととなり信頼性に乏しいシステムとなることが問題とされている。これらの問題を解決するために, 処理装置を並列化して相互に管理可能な構造を取るシステムが提案されてきた。このシステムはユニットを

全結合状態にすることによって実現可能ではあるが、生物では結合を介した情報交換は、処理対象が確定しているか又は、すでに柔軟性を失っている場合が多い。対して、全結合を要するような基礎的な相互作用、すなわち、多様な情報を必要とする場合は、場を介している。これは、通信先を特定する十分な能力を持たない場合や、通信先を特定しない場合などに見られる。そこで、ここでは新たな方法として場を用いることを提案する。

2. 情報処理機構 (情報交換と運動法則)

物理学的には空間的に隔たりを持つ2体以上の物質に働く相互作用を媒介するものとして場の概念は導入されている。例えば、基本的なものとして電磁場、重力場などがあり、物体間の力学的相互作用の媒体としてだけでなく、それぞれ、静的な量(電気量、磁気量、質量、慣性質量)と動的な量(運動量)の媒体としても機能している。このような、物理的な対象とは異なり、生物は柔軟であるゆえ、計測対象としては静的な量のみでは捉え難い側面を有している。そこで、生物をモデリングするためには、個体、環境条件などの静的な量と同時に、これらの相互作用によって生じる運動などもあわせてモデル化する必要が生じる。このような要請から個体間や環境と個体間の相互作用を場を用いて統一的に表現することを提案する。ここで相互作用とは、情報の交換及びその処理を意味する。さて、生物の情報媒体となる場は、光、音、臭い、磁気、重力、電気などさまざまなものが考えられる。もちろん、それぞれに対して、一過性の信号としてだけでなく、意味論的な観点からも分解が可能ではあるが、ここではこれらをまとめて大きく2つに分類することを考える。すなわち、重ね合わせと分解の容易な波動的性質を持つ場と、重ね合わせは可能

でも分解の困難な物質濃度的性質を有する場である。本論文では場と場を用いた情報処理機構を定義することによって生物の部分機能や挙動をシミュレートすることを試みる。

ここで提案する情報処理機構は、基本的には並列分散処理機構であり、それは、次の要件を満たすような状態空間からなるものと仮定する。

要件 a) 各情報処理装置間の非結線性：情報処理装置群間の双方向または一方向通信をも含む結線による情報伝達方式を前提条件としないような情報処理機構。

要件 b) 情報処理モデル表現の統一性：処理対象モデルは一様に統一的に数式表現されるもののみを扱う。

要件 c) 各情報処理装置挙動の自律性：情報処理の場に設定された因果律に従って、各情報処理装置は自律的に、全体としては並列分散的に問題解決に向かう挙動を示す。

これらの要件を満足するような情報処理機構の一つとして考えられる状態空間を図1に示す。すなわち、

i) 情報処理の場

ここで提案する情報処理構造では、すべての情報処理装置への情報の入出力は、各装置と場との相互作用によって媒介されるものであるため、情報処理の場を明示することが要求される。ここではこの場を2つに分けて設定する。すなわち、全ての装置の物理的存在が認識される場、いわゆる全体の間(ここではこれを波動場と呼ぶ)および、個々の情報処理装置の張る場(ここではこれをポテンシャル場と呼ぶ)を考える。

ii) 情報処理装置

各情報処理装置は、処理すべき対象問題に固有に設定された対象問題表現形式にしたがって自律的に動作するものとする。また、空間的相互作用能力を損なわないで情報の入出力を可能とすることを目的として、それぞれの処理装置は装置に固有の間を持ち、この

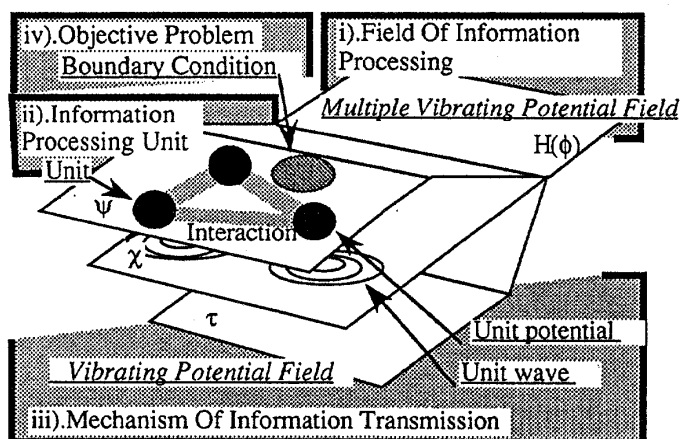


図1 状態空間

場を通して，全体の間と相互作用をするようにする。以降ではこれら処理装置を便宜上“ユニット”と呼ぶ。

iii) 情報伝播機構

伝達を前提としない伝播に力点を置いた場に於ける情報は，複数の情報が重畳された状態で同時に存在する。これを統一的に演算処理することを可能とすることを目的として，ここでは，その伝播媒介機構を波動とし，その表現に必要とされる座標系を各々のユニットに対して固定とする。これにより，例えば波動場上の波動の相互干渉によって情報の伝播，装置への入出力は統一表現され，各ユニットは所定の演算によって，各ユニット座標上における場の状態を観測することができる。

すなわち，ユニット間，ユニットと場の相互作用は全て2者間相互作用で置き換えられることになり，情報処理システムとして完全な分散管理方式が構成される。

iv) 目的関数

問題解決の過程で，波動情報に対するユニット群の自律的動作を保証する必要性が生じる。ユニット群は運動方程式にしたがうとしたので，その相互作用の過程で相互作用エネルギーを算出することが可能であるため，相互作用エネルギーの収束状態に対する寄与率をエントロピーの増加量として観測することが可能であろう。そこで，エントロピーの増

加量が最小となるように目的関数を設定することを試みる。さらに自律的問題解決は，ユニットの情報伝達・情報処理などの相互作用により，波動場上のすべてのユニットの局所的安定状態を探索することによってプログラムレスにこれがなされるものとする。

なお，以後では各ユニットの持つ情報空間表現式を“ユニットの支配関数”，全ての各ユニットに固有な場で情報交換を媒介する最も基本的な単位を“ユニット座標軸”と呼ぶことにする。

以下，ここで提案する情報処理機構の構築に必要とされる4項の構成要素について，数理表現の形式で順次記述する。

2.1 情報処理の場（全体の間）

本論で提案する情報処理の持つ期待特徴の一つは，前述の要件a)にも示したように，あるユニットが他のユニットとの関係の一つ一つをすべて把握するのではなく，伝達される情報の正確さを失うことなく，各ユニットは場との関係を把握するだけで，他のユニットとの相互作用を間接的に把握できる様な機能を持たせることである。このことを実現するためには種々の方法が考えられるが，本数理モデルに於ける場は，上記の要件a)を容易な記述で満足できるよう，式(1)に示すように各ユニットに固有な場の重ね合わせ（ここ

ではこれを支配関数と呼ぶことにする)として構成し、各ユニットは設定された様式にしたがって情報を受け取るように構成する場合を考える。すなわち、各ユニットにはそれぞれ適当なポテンシャル関数とユニット座標軸を定義することにより、式(1)のごとく全体の場 H は数式表現することが可能となる。

$$H(r, n, \phi) = \sum_i \{h_i(r, n) \cdot \Psi(\Phi) + w_i(r, n) \cdot \chi(\phi)\} \quad (1)$$

ここで、

$H(r, n, \phi)$: 場の関数、

ϕ : 全体座標軸

i : ユニット番号 ($i=1, 2, \dots, n$)

$h_i(r, n)$: ユニット支配関数

r : 位置ベクトル $r(t) = (r_x, r_y, r_z)$

n : 方向ベクトル $n(t) = (n_x, n_y, n_z)$

$w_i(r, n)$: ユニットから場への出力波動

$\psi(\phi), \chi(\phi)$: ユニットの種類に固有なユニット座標軸

なお、 $h(r, n)$ に関する詳述は3章でこれを行なうが、これはユニットの発生する情報であり、この様に H を設定することによって、ユニットは $\psi(\phi)$ 上では支配関数 $h(r, n)$ により他のユニットと相互作用し、 $\chi(\phi)$ 上では $w(r, n)$ の波動により、他のユニットの支配関数に影響を与えられる性質を持つことが期待できる。

2. 2 情報伝播機構 (固有の場)

ユニット間の情報交換は、式(1)によって媒介される全体の場 $H(r, n, \phi)$ を媒介して行なわれる。式(1)の記述は各ユニットの波動場の重ね合わせから構成されているゆえ、その可制御性を保証することが要求されるので各波動場を直交化して設定することが必要となる。ここでは、各ユニット座標軸 $\psi(\phi)$ 、 $\chi(\phi)$ について式(2)の波動方程式でこれを定義する。

$$\frac{\kappa(a)}{2} \frac{d^2 \xi(\phi)}{d\phi^2} + E_\phi \xi(\phi) = 0$$

$$(\xi(\phi) = \Psi(\phi), \chi(\phi)) \quad (2)$$

$$\xi(\phi) = 0, (|\phi| = a, b) \quad (3)$$

ここで、

$\kappa(a)$: ユニット座標軸のエネルギー空間上に於ける距離に関するパラメータ。

E_ϕ : 全相互作用エネルギー (以下に詳述)

a, b : ユニット座標軸 $\psi(\phi)$ 、 $\chi(\phi)$ の境界条件

$\psi(\phi)$ 、 $\chi(\phi)$ の境界条件は、式(3)の a, b を適当に設定すれば、相互に直交する波動場を与えることができる。

式(2)、(3)によりシステムの可制御性は保証されるが、各ユニットの状態の全体の場に於ける同定は、各ユニットの自律機能を発現する際に必須となる。すなわち、全体の場(あるいは環境中)における自己の客観的認識のための情報を提供するような機構が必要となる。このため、各ユニットが環境のどの様な状態の所に位置しているかを測る一つの判断手段として、相互作用エネルギー E_ϕ を導入する。

$$E_\phi = \frac{q}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(r, n) \Psi(\phi) d\phi \quad (4)$$

さらに、 E_ϕ によって波動のモードは変化するので、ユニットの情報交換軸は、周囲のユニットの性質や密度の変化に依存することは注意を要する。最後にシステム全体系の安定性をいかに保証するかをも考慮する必要がある。このことを意識して、ここではユニットの近傍の相互作用エネルギーの微小な変化を無視できるような $\kappa(a)$ を定義することによりこれを保証する方法を以下に示す。そのため、まず、ユニット座標軸 $\psi(\phi)$ に関する波動方程式は式(2)および(3)に関して相互作用エネルギー E_ϕ を

$$E = k\phi^2 \quad (5)$$

と置くと、 $\phi = a$ で境界条件を満たす解は以下に示す2つが存在する。すなわち、 n を自

然数として,

$$\Psi_{2n} = A \sin(k_{2n}\phi)$$

$$ak_{2n} = n\pi \quad (6)$$

$$\Psi_{2n+1} = A \cos(k_{2n+1}\phi)$$

$$ak_{2n+1} = (2n+1)\pi \quad (7)$$

これらをまとめると

$$k_n = \left(\frac{\pi}{2a}\right)n \quad (8)$$

ゆえに, エネルギーの可能な値は,

$$E_n = \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2 n^2 \quad (9)$$

つぎに,

$$\kappa(a) = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \quad (10)$$

と置けば, 式(9)から特定の周波数上に設定された相互作用エネルギーは, $\kappa(a)$ の n^2 倍のみがユニット座標軸として有効となるエネルギー値であり, 近傍の相互作用エネルギーの微小な変化を無視でき, その安定性が保証される. 以上の議論は提案している場の性質に関するものであったが, そのような特性を持つ場に於ける情報処理法そのものの理論展開を以下の節で行なう.

2. 3 情報処理装置 (ユニットの動作規則)

ここでは, 全てのユニットに共通な情報処理法の設定を模索する. 理想的には全ユニットに対して共通な処理法が存在すればいかなる処理法でも選択可能ではあるが, ここでは, これまで展開してきた理論の統一性を考慮して, 式(1)で設定した場の関数 $H(r, n)$ をポテンシャルと見做すことを考える. するとその数式表現式としてラグランジェの運動方程式が自然に式(11)のように導入される.

$$L = \left(\frac{1}{2}\nu(t) \cdot p(t) + \frac{1}{2}\omega(t) \cdot q(t)\right) \cdot \Psi(\phi) - H(r, n, \phi) \quad (11)$$

運動方程式は(12)式となる.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\vartheta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \vartheta} = 0,$$

$$\{\vartheta = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)\} \quad (12)$$

さらに, 運動量 $p(t)$ および角運動量 $q(t)$ は (13), (14)式のごとく求められ,

$$\dot{p}(t) = M \cdot \frac{\partial \oint H(r, n, \phi) \Psi(\phi) d\phi}{\partial r} \quad (13)$$

$$\dot{q}(t) = I \cdot \frac{\partial \oint H(r, n, \phi) \Psi(\phi) d\phi}{\partial n} \quad (14)$$

(13), (14)式により処理された情報にしたがって情報処理装置としてのユニットは相互作用することになる.

ただし, 式(11), (14)に於て,

$$M = (m_x, m_y, m_z) : \text{慣性}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ I_{xy} & -I_y & -I_{yz} \\ I_{xz} & -I_{zy} & -I_z \end{bmatrix} : \text{慣性テンソル}$$

$$\nu(t) = \dot{r}(t) : \text{速度ベクトル}$$

$$p(t) = M \cdot \nu(t) : \text{運動量ベクトル}$$

$$\omega(t) = \dot{n}(t) : \text{角速度ベクトル}$$

$$q(t) = I \cdot \omega(t) : \text{角運動量ベクトル.}$$

2. 4 目的関数

ユニット群の目的関数を設定するために, 生体の力学の概念を導入する. 周知のごとく, 生体の研究においては古くから生体を熱力学的システムとしてとらえることにより, 生体内部に発生するエントロピー増加量を最小化する方向に動く力学が存在することが提唱されている. これらのアナロジーを考えて, ユニット群を生体群と見なして, 力学系を構成することとする.

さて, ユニット群を駆動する熱量 (運動エネルギー) は, 全て波動により伝達されるゆえ, あるユニット群に流入する熱量 E_{in} は形式的に(15)式と書かれる.

$$E_{in} = \oint_{r=z} \oint H(r, n, \phi) \chi(\phi) d\phi dz \quad (15)$$

この時ユニット群の熱量 $E_{g.o.u.}$ はユニット i の運動量 p_i 及び角運動量 q_i に対して(16)式となる。

$$E_{g.o.u.} = \sum_i \left(\frac{p_i^2}{M_i} + \frac{q_i^2}{I_i} \right) \quad (16)$$

今、ユニット群の運動量を P 、角運動量 Q とすると、ユニット群のなす仕事量 $W_{g.o.u.}$ は(17)式となる。

$$W_{g.o.u.} = \frac{P^2}{\sum_i M_i} + \frac{Q^2}{\sum_i I_i} \quad (17)$$

よって、ユニット群から流出する熱量 E_{out} は(18)式となる。

$$E_{out} = E_{g.o.u} - W_{g.o.u} \quad (18)$$

さらに、ユニット群が熱源 E_{in} に接していると考えたとエントロピーの変分は(19)式となる。

$$dS = \frac{dE_{out}}{E_{in}} \quad (19)$$

そこで、ユニット群を支配するパラメータ α_1 に対して、(10)式がユニット群の目的関数として導出される。

$$\frac{\partial dS}{\partial \alpha_1} \leq 0 \quad (20)$$

(20)式を満たすように α_1 を調整することによって、ユニット群はより大きな波源(熱源)に向かって進むことになり、同時にユニット群の挙動に対する各ユニットの無効エネルギーを少なくするように、パラメータを調整することを意味する。

以上、情報処理の場、情報伝播機構、情報処理機構、目的関数により本モデルによる情報処理が実現される。次章では、個々のユニットの支配関数を設定し、ユニット群の振る舞いを検証することによって、モデルの基礎的な性質を明らかにする。

3. ユニットポテンシャル関数

具体的に複数ユニット間の相互作用を表現

するために、ユニット間の情報伝播による情報処理の実現に必要な各ユニットの出力する情報を、ユニット支配関数としてその標準形を以下の式で仮定する。ユニット支配関数はユニット間の物理的相互作用と情報交換を見通しのよいものとするために、すべての支配関数は仮にユニット間の物理的距離に依存するとして(21)式でレナードジョーンズ型ポテンシャルを用いて $h_i(r, n)$ 、ユニット波動関数は(23)式で波動型ポテンシャルを用いて $w_i(r, n)$ と置く。また、場の状態をユニット支配関数にフィードバックするために、環境観測因子 $k_i(r, n)$ を(22)式で設定する。

$$h_i(r, n) = \sum_{k=0}^3 \frac{(-1)^k B_k(r, n) \cdot \alpha_k}{C_k + (r_1 - r)^{2n/K_i(r, n)}} \quad (21)$$

$$k_i(r, n)$$

$$= k_0 + \frac{k_1}{2\pi} \left| \frac{d}{dt} \int H(r_1, n_1) \cdot \chi(\phi) d\phi \right| \quad (22)$$

$$w_i(r, n)$$

$$= (W^{|r_1 - r|}) \exp(j \cdot \omega_0 |r_1 - r| - \kappa_0 t) \quad (23)$$

ここで、

$B_k(r, n)$: 影響係数。

α_k : 相互作用の強さを決定する定数。

C_k : 初期設定時の定数。

$k_i(r, n)$: 環境観測因子。

k_0 : k の基準値。

ω_0 : 波数。

κ_0 : 角周波数。

実際の具体的問題における情報処理では、これらのパラメータを問題向きに設定することになる。ここでは、ユニット群の基本的な挙動を調べるために、ユニットの支配関数は場の状態を(22)式によって取入れ、その影響範囲を変化させるように設定することを試みている。また、(23)式はユニットの発生するユニット波動を表わしている。(21)式は、場を局所的に大きく歪ませ、その歪が減衰しながら全空間に渡って伝播する形になっているために、ユニットの存在を全空間に渡って認識させることができる。本数理モデルに於て、この特

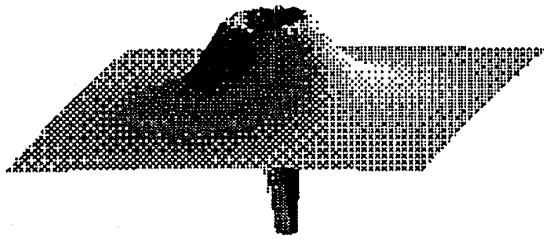


図2 ユニット支配関数の一般形

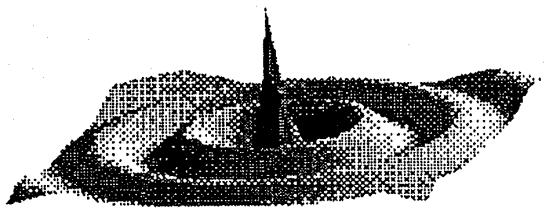


図3 ユニット波動

性は、このユニットを基礎としてユニット群を構成した場合にできる、ユニット群の形態・性質を決定する点に於て重要な役割を果たしている。

また、ユニット波動については、ある地点 r_i を中心にして場に対し波動を出力し場のポテンシャルに振動的な微小変位を与えるものとしてここでは定義した。ユニットの出力する波動は係数 W に依存した減衰を示し、周囲のユニットに対してユニット波動の中心とユニットの中心間距離に応じた影響をする。ここで設定した波動場内のユニット波動は、音波、光波、臭いなどとアナロジーがある。処理系に対するこれらの入力は、直接動作させるエネルギーとなることは少ないが、処理系の挙動を決める直接的、または間接的な原因になっていることが多いので、この様に設定した。

さらに、ユニット間の幾何学的相互作用を記述するために影響係数 $B_k(r, n)$ を定義する。

$$\cos\Theta = \frac{n^* \cdot (r^* - r)}{|n^*| \cdot |r^* - r|} \quad (24)$$

$$\sum_{k=0}^3 \frac{2k \cdot B_k(r, n) \cdot (r - r^*)^{2k-1}}{C_k + (r - r^*)^{2k-1}} = 0, \quad r = z \quad (25)$$

長方形の場合には影響係数 $B_k(r, n)$ は基準対角線長 D , 中心角 τ , 相互作用角度 Θ , 制御点 z (26)式とすると、任意の点 r に対して、相互作用角に対する場合分けが必要となるが、(26)式のごとく任意の点 r に対して、(25)式を満たす方程式の解となる。

$$z = \begin{cases} \frac{D}{2} \cos\Theta, & -\tau + n\pi \leq \Theta < \tau + n\pi \\ \frac{D}{2} \sin\Theta, & \tau + n\pi \leq \Theta < -\tau(n+1)\pi \\ (n=0, 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (26)$$

同様に楕円形の場合には(27)式となる

$$z = \frac{D}{\sqrt{\cos^2\Theta + \frac{\sin^2\Theta}{a^2}}} \quad (27)$$

4. ユニット間の基礎的相互作用様式

ここでは、本モデルの基礎的な性質を明らかにするために、波動場に於けるユニットの挙動を簡単な場合について、位相平面法を用いて解析することを試みる。ユニットの挙動は(1)式から(27)式の方程式にしたがうことを前提とする。また、ユニット支配関数をユニット中心に対して対称な関数として次のように設定する。

$$h_i(r) = \sum_{k=0}^3 \frac{(-1)^k \cdot q_k}{1 + (r_i - r)^{2k}} \quad (28)$$

$y=0, z=0, M=1$ とすれば、 x 軸に関する一次元の場に於ける n 個のユニットの挙動は、以下の連立方程式の解となる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{d}{dx} \sum_{i=0}^n h_i(x_i) = 0, \quad x = x_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (29)$$

ここで、 $\xi = x_1 - x_2, \eta = \frac{d\xi}{dt}$ と置くことにより、式(30)が得られる。

$$\frac{1}{2} \eta^2 = - \sum_{n=0}^3 \frac{4n(-1)^n q_n}{1 + \xi^{2n}} \quad (30)$$

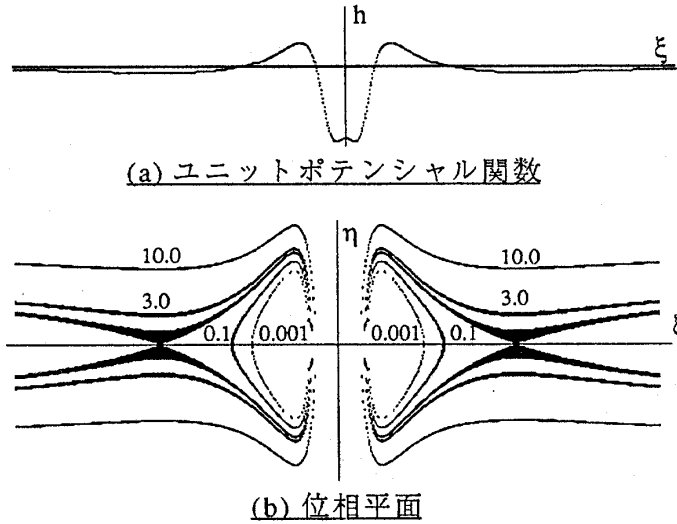


図4 位相平面法による解析

これを η を縦軸に、 ξ を横軸に取って位相平面を描かせると図4に示す挙動を示す。

この結果より、初期の運動エネルギーが小さい場合にはユニットは相互に拘束しあい、また、大きい場合には発散することが分かる。

5. ユニット群の挙動

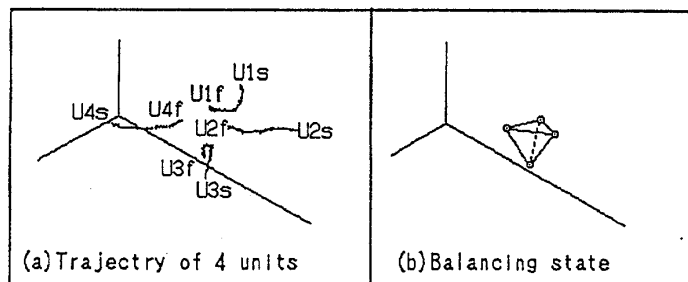
前節では、構築した数理モデルに対してユニット支配関数のパラメータを適当に設定することで、ユニット間の相互作用が吸着と発散の現象として表現できることを示した。そこで、ユニットの性質に依存したユニット群の性質について計算機実験により調べる。

5. 1 ユニット波動を持たない場合

計算機実験に於て、まずユニットに対する相互作用力を系の安定・非安定の評価値として考える。また、実験に用いたユニット支配関数のパラメータは、 $q_0=250.0$, $q_1=250.0$, $q_2=250.0$, $W=0.0$, に固定して、ユニットの個数とユニットの初期配置を変えて、4種類について実験・考察している。

計算機実験 A

4個のユニットを適当に配置し相互作用させた場合のユニットの軌跡とユニット群の安定構造を示す。計算機実験Aに用いたユニットの初期位置は、互いのユニットの作り出すポテンシャル場の影響が十分に感知できる位置に置いた。上記初期条件の下でシミュレーションを行なった結果、4個のユニットは



$U_{iq}; q=s$ ・Initial position, $q=f$ ・Balancing position

図5 ユニット間相互作用

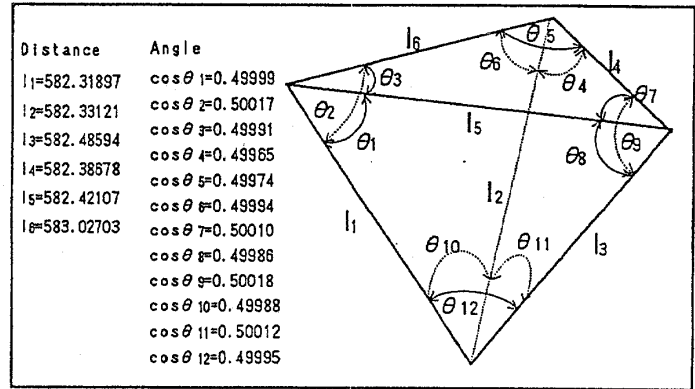


図6 ユニットの安定状態

(a)のような軌跡を描いて(b)にある正四面体構造をとって安定したことを示している(図5)。

また、(b)の状態に於けるユニットの間隔と3つのユニットの作る中心角を調べた結果、ユニット間隔、角度ともに誤差は1%以下であり、正確に正四面体の頂点の位置で安定していることが分かる(図6)。

計算機実験 B

35個の粒子を適当な距離をおいて環状に配置して相互作用させた場合、ユニット間の相互作用により(a)の状態のユニット群は(b)の状態を経て、(c)の状態で安定する。また、(c)のユニット群の安定後の配置は、ある程度の広がりを持つが環状をしている。

この実験の結果より、安定後の配置は、ある程度は初期状態に依存していることが分かる。また、ユニット支配関数の重ね合わせによって、ユニットの存在可能な領域と不可能な領域が生成されていることを示している(図7)。

計算機実験 C

28個のユニットを適当に配置して相互作用させた場合の安定状態を示す。ユニット間の相互作用によって(a)の状態のユニット群は(b)の状態で安定する。この過程で起こる凝集・拡散の機構によって安定状態に於ては、最密充填構造が形成されるが、この実験では、初期設定に於てユニットの配置が一様でなく、対象性もないために、安定状態に於ても各ユニット群に属するユニットの数が一様で

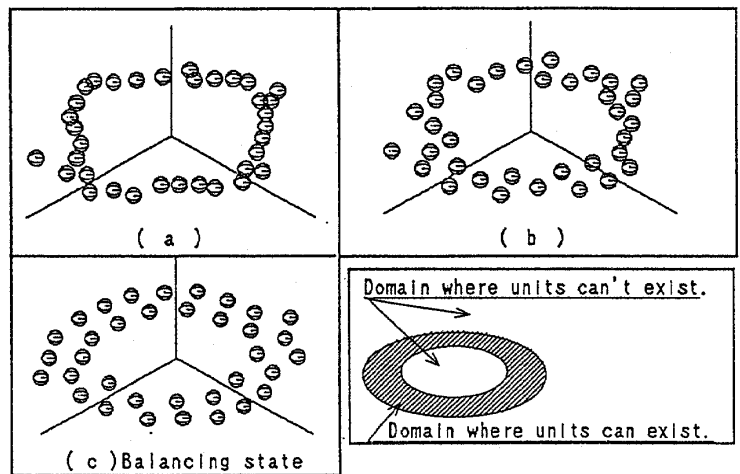


図7 ユニット間相互作用

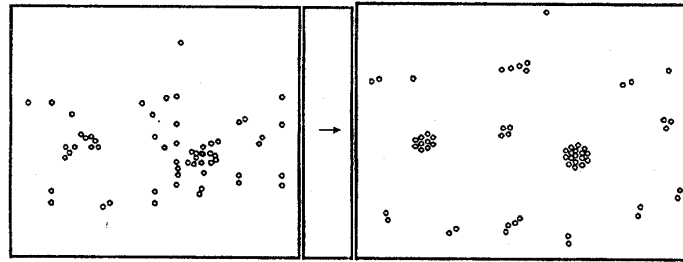


図8 凝集・拡散過程のシミュレーション

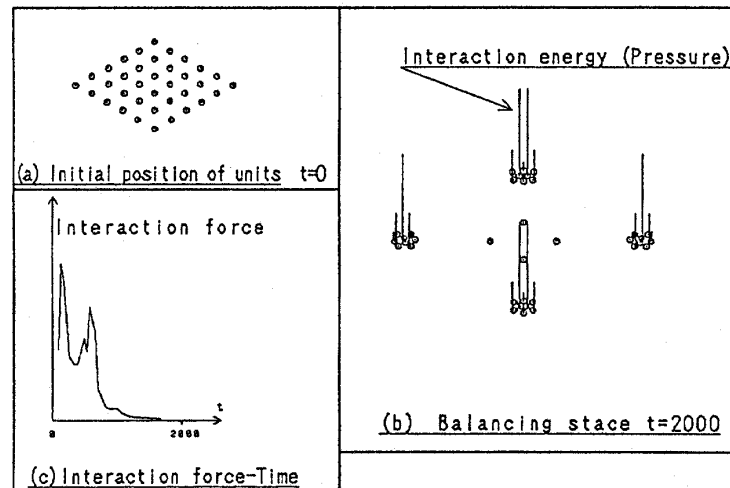


図9 凝集・拡散過程のシミュレーション

はない。また、全体系の形状も対象性を持たない(図8)。

計算機実験 D

36個のユニットを正確に 6×6 の升目状に配置した場合、ユニット間の相互作用によって、(a)の状態のユニット群は(b)の状態で安定する。この実験では、初期状態に於けるユニットの配置が幾何学的配置をとっているため、安定状態に於ても対象性を持った幾何学的位置関係をとった(図9)。

5.2 ユニット波動を持つ場合

あるユニットから出力される波動(これをユニット波動と呼ぶ)によって周期的な振動が場に作られている場合のユニット群の挙動を示す。

計算機実験 E

ユニット数14個、ユニット波動 $\omega_0=7$ 。初期状態(a)でユニット波動の近傍にユニット

を適当に配置する。約1,500回の計算後に(b)の状態になる。ユニット群のこの状態はユニットの性質に基づく安定状態であり、最密充填構造をとる。さらに約3,000回の計算後(c)の状態となり個体の重心は、ユニット波動の中心と重なる(図10)。特に、ここではユニットと波動に関するパラメータ $[q_0, q_1, q_2, w]$ を固定して実験を試みたが、次の計算機実験Fにおいてパラメータに依存したユニット群の動特性を示す。

計算機実験 F

ユニット波動の空間周波数とユニット支配関数のパラメータによってユニットの挙動の様式が変化するために q_n と ω をいろいろに変えて実験を試みた。その結果、ユニット波動に対する反応は q_n が大きくなるほど活発になるが、その方向性については、 q_n, ω に依存していること以外の相関関係は得られなかった(図11)。

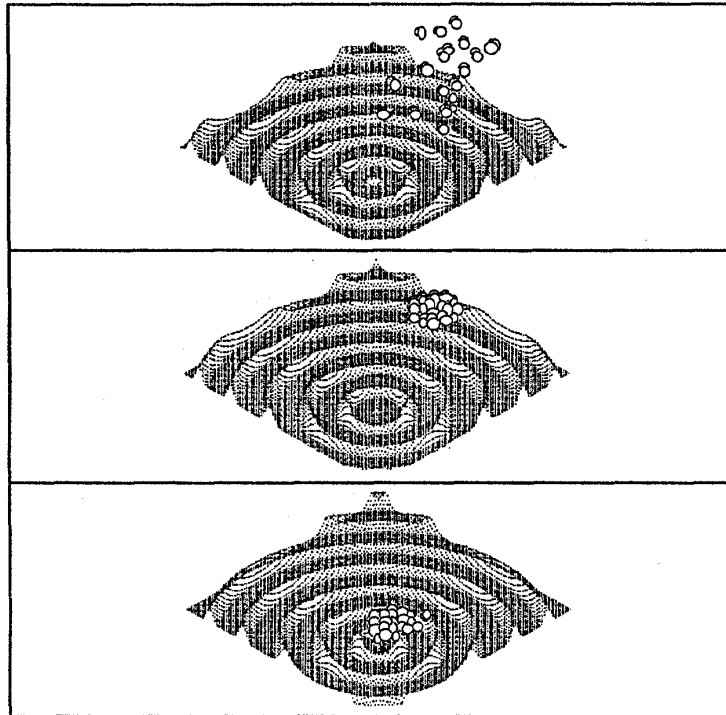


図10 ユニット波動に対するユニット群の挙動

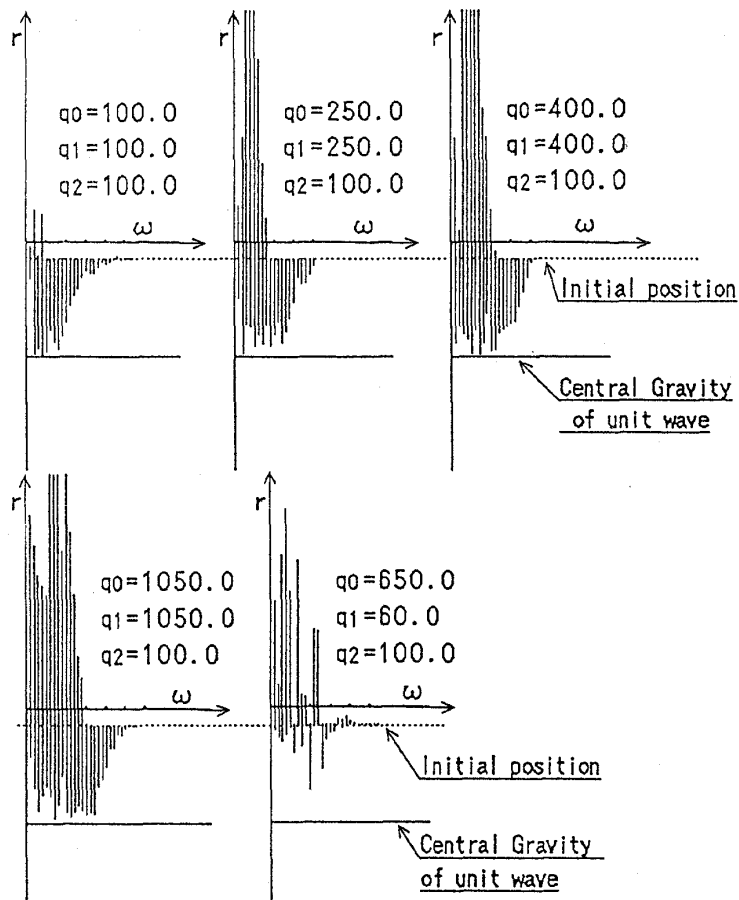


図11 ユニット波動に対するユニット群の挙動

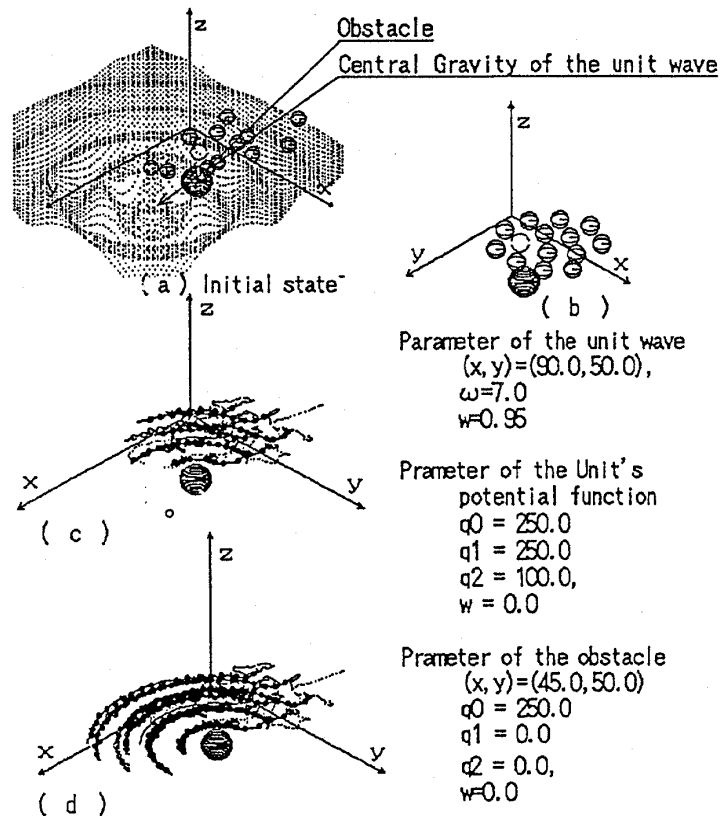


図 12 障害物回避シミュレーション

計算機実験 G

ユニット波動の近傍に障害物を置いた場合を図 12 に示す。シミュレーションではユニットの相互作用によって形成されたユニット群が障害物を迂回してユニット波動の中心まで到達することを示している。

ここまでの議論により、ここで提案する数理モデルについて次のような基本的性質を得た。

1) 各ユニットの性質は式(21)-(23)のポテンシャル関数により任意に与えることができる。

2) ユニット間の情報伝達は波動場を媒介することにより全てのユニットに対して一様に伝達され、かつ、情報の種類毎に独立して伝達される。

3) 各ユニットにおいて、情報はラグランジェの運動方程式にしたがって処理されるため、ユニット群は最密充填構造をその収束解とする。

4) 本数理モデルは入力をポテンシャル関数、遷移関数をラグランジェ運動方程式、入力に対する出力を収束解とするので、情報処理構造と見なすことができる。

5) また、波動情報に対するユニット群の挙動として、式(22)の効果により、分散管理されたユニット群は場の波源に向かって漸近することが確かめられた。

次章では、ユニットの支配関数を適当に設定することによって、Artificial Worms の集団行動のシミュレーションを試みる。集団行動とは集合、整列、接近、逃避などを対象とする。

6. Artificial Worms の集合行動のシミュレーション

昆虫などが周囲の局所的状況を観測することによって自己の行動決定を行ないながら、ある目標に向かって移動する性質をモデル化

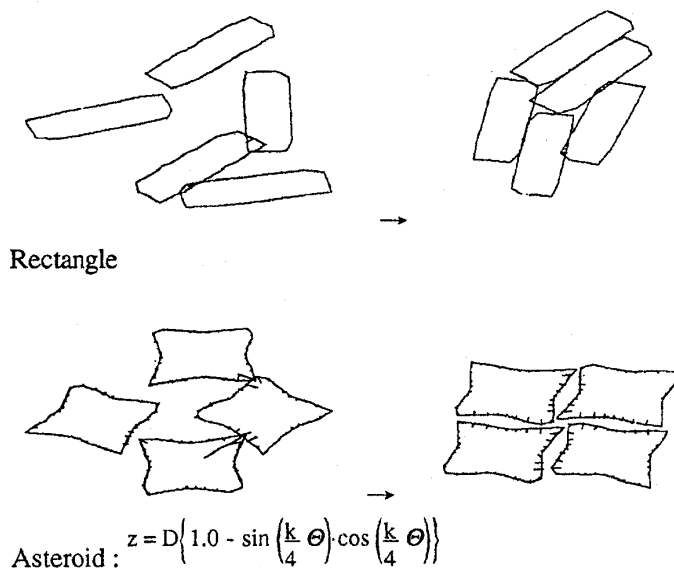


図 13 凝集過程のシミュレーション

することを試みる。対象とする性質は、生体の移動/変形に基づく接近/捕獲挙動であり、具体的には次のような例がある。菌類などの走化性、軟体動物による吸着動作、棘皮類などの触手による把持動作、細胞分裂による増殖などである。これらの挙動を表現するために、本モデルは各虫に対して周囲の局所情報を認識させる必要がある。そこで、波動の振動モードによって対象とする空間の目標と障害物を表現し、その空間に於てシミュレーション実験によって worm の挙動を表示するものとする。また、各 worm は自己の形状と環境の障害物の形状に依存した回避経路を算出する必要があるため、実際に解決すべき問題として自由形状物体間の相互干渉回避問題が生じることになる。以下ではまず相互干渉が生じる条件下での集合と整列のシミュレーションについて示す。実験では長方形形状またはアステロイド形状を持つ worm が互いを拘束し合うことによって、動作自由度を減少させながら位置調整を行ない、結果的に整列動作が実現されている。

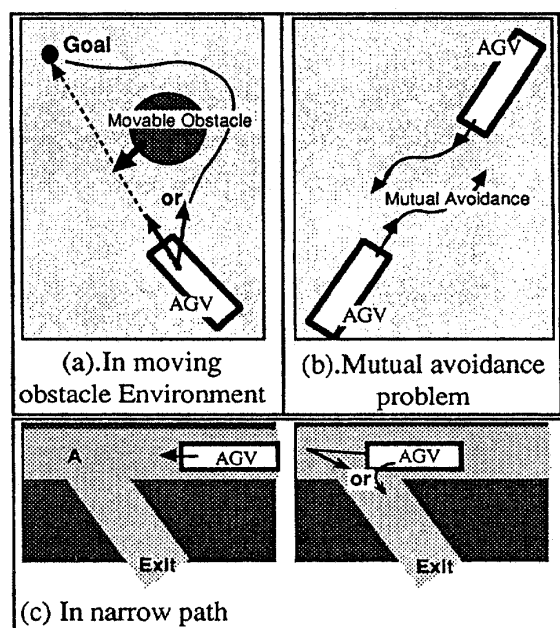


図 14 障害物回避動作のシミュレーション

7. Artificial Worms の障害物環境における挙動シミュレーション

ここでは、障害物環境下における Worm の挙動をシミュレートすることを試みる。Worm の挙動は障害物環境下において障害物との無干渉の状態を保ったまま目標状態を達成するための運動制御/動作計画を行なう

表1 Parameter of unit

		Goal	Obstacle	Unit
Parameter	ai	0	0	Variable
Wave Output	W	1	0	0
Innertia Mass	M	(∞, ∞, ∞)	(∞, ∞, ∞)	(1,1,1)
Observing factor	kl	0	0	1

ことであり、これはロボット制御における障害物回避問題と同値である。さて、シミュレーションでは環境を数値モデルに於ける波動の場で表現し、Worm をユニットとすることにより、図 14 に障害物回避の具体的例を示す。(a)は動的障害物環境下における問題を示し、(b)はお互いが障害物となりうる場合の相互障害物回避問題、(c)は狭路における進入

方向/姿勢の選択の問題をそれぞれ示している。

そこで、これら3種類の障害物環境を用意してWormの挙動をシミュレーション実験によって示す。具体的環境条件として(i)2D空間内にある一定の周期で移動障害物が回遊するような動障害物環境。(ii)ユニット群間の相互回避。(iii)相似型移動物体群の曲がり角を持つ狭路における挙動。また、実験に用いた各ユニットについて表1のごとくパラメータを設定した。

被誘導物体が幾何学的形状を持つ場合に本方法を応用することを試みる。目的のために被誘導物体をユニット群によって表現することとし、安定構造が幾何学配置となるように

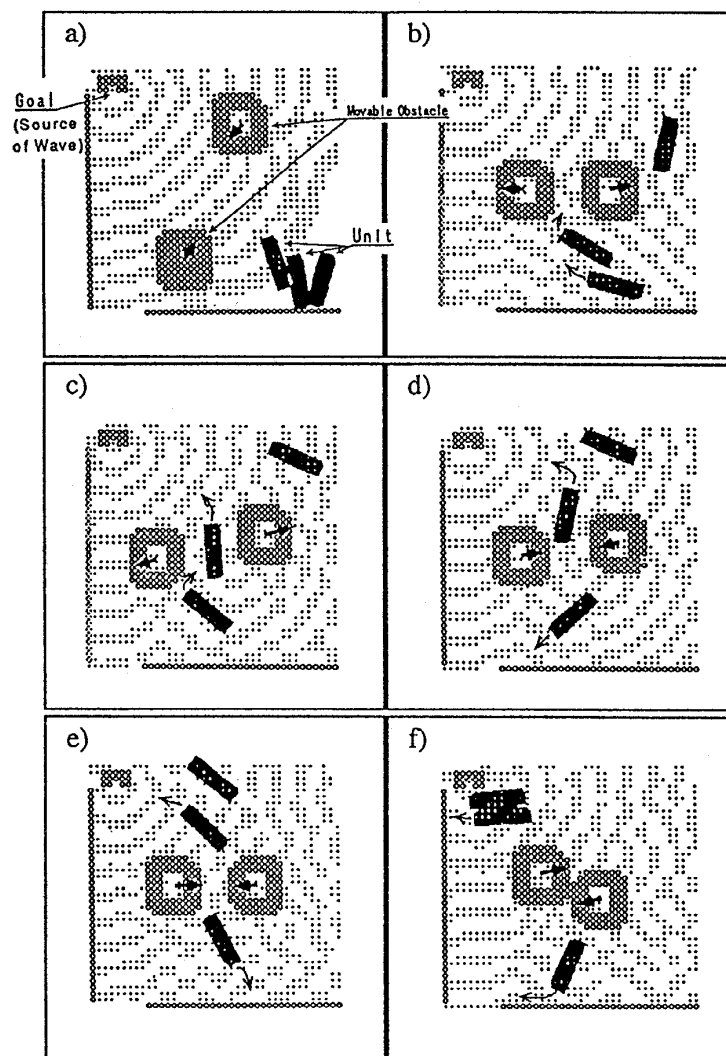


図 15 動的障害物環境下における Worm 群の挙動シミュレーション

(26)式を用いて空間制約を定義する。すなわち、被誘導物体は、空間的制約条件を持つユニットと円形ユニット群の重ね合わせで構成される。よって、(13), (14)式より、被誘導物体の運動量、角運動量は(31)式のごとく導出される。

$$\dot{p}(t) = M \cdot \oint_{r=z} \frac{\partial}{\partial r} \oint H(r, n, \phi) \Psi(\phi) d\phi dz$$

$$\dot{q}(t) = I \cdot v(t) \cdot n(t) \tag{31}$$

ここで、 z は対象とする形状ごとに与えるものとし長方形は(27)式とする。

図 15 は動的障害物を仮定した場合の回避例を示す。実験では、3個の長方形ユニット

と2個の動的障害物を設定した。動的障害物はユニットとは無関係にある一定の周期で空間内を巡回するものとする。a) は初期状態を示しており、b), c), d), e), f) は2個のユニットによる動的障害物からの回避過程を示している。特に、b) は障害物同士が離れる場合であり、その間隙をユニットが通過する直前の状態である。c)以降のシミュレーションは前方のユニットは通過することによってGoalへ到達し、後方のユニットは障害物の間隙が縮小することを周囲の波動情報から感知して迂回路を選択することによってGoalへ向かう挙動を示すことを表してい

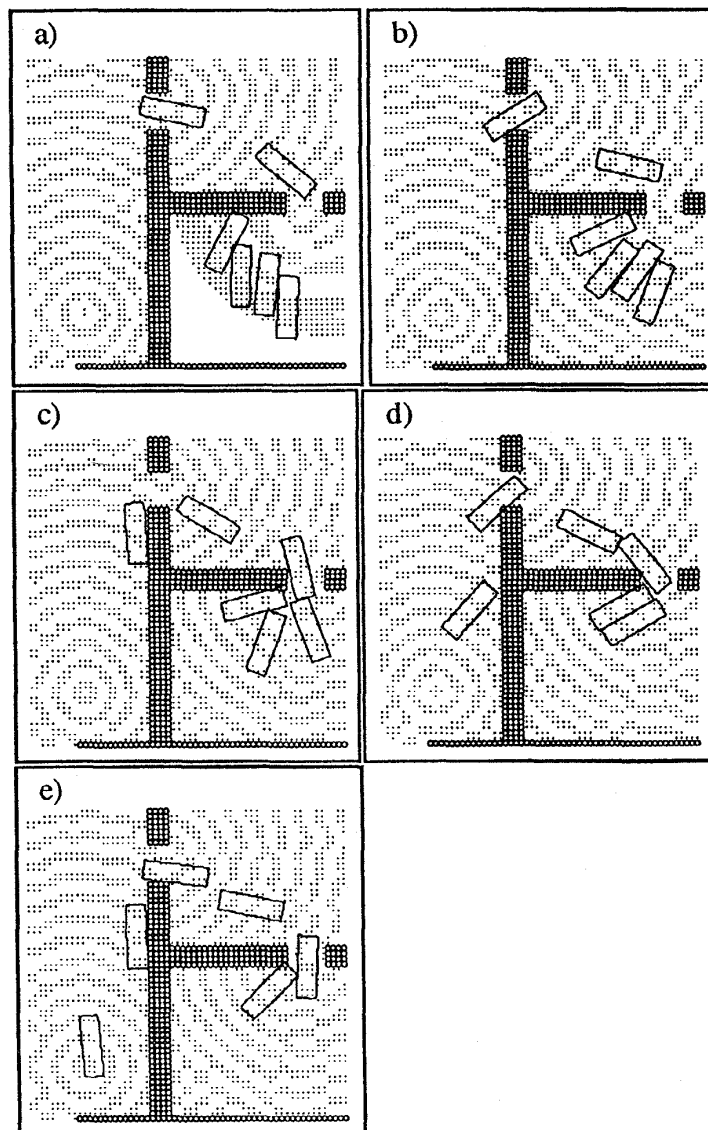


図 16 相互障害物回避シミュレーション

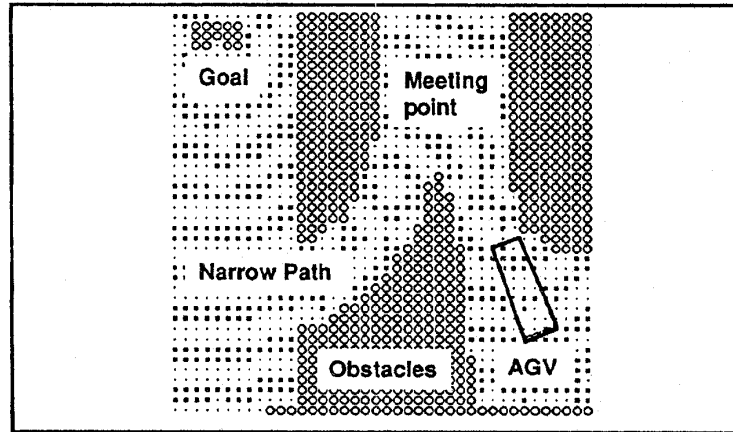


図 17 狭路通過シミュレーション

る。このように、ユニット群は場の波動の状態を観測することにより動的障害物を回避しながら経路決定を行うことが分かる。

次に相互回避問題へのアプローチを示す。図 16 は長方形ユニット群の挙動を示しており、6 個のユニットの相互回避例となってい

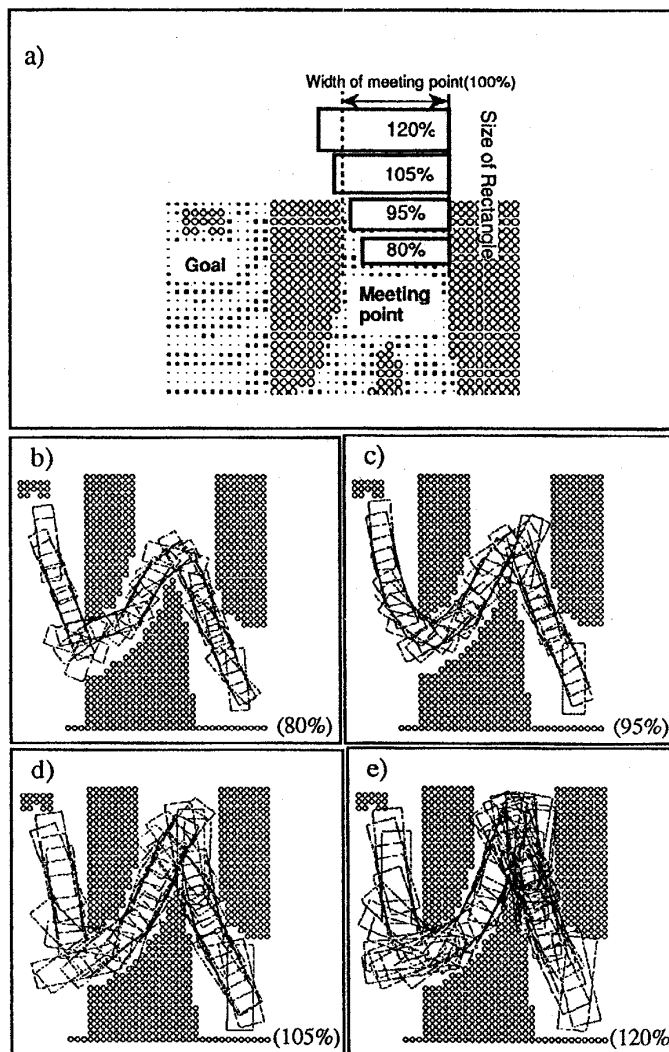


図 18 狭路における Worm の挙動シミュレーション

る。この実験でも全てのユニットが適当な経路を選択しながら Goal に到達可能であることを示しており、この結果は、本モデルのユニットの個数の増加に対する情報処理機構としての安定性を示している。

次に、曲がり角を含む狭路におけるユニットの障害物回避挙動を示す。実験に用いた障害物環境は図 17 に示すごとく、2本の狭路からなっており合流地点の幅が狭路幅の2倍となるようなものを用意した。ユニットの形状は長方形とし、その大きさを変化させることによる回避挙動の変化とシステムの情報処理機構としての安定性を明らかにすることを試みる。

図 18 (a) は実験に用いたユニットの合流地点の幅に対する比率を示しており、それぞれの比率のユニットの挙動を移動軌跡として図 18 (b)–(e) に示す。実験では 80% のユニットでは合流点において回頭することによって通過することを示しており、それ以上のユニットは合流点において後退しながら通過する挙動を示している。このように本手法はユニットの大きさと動作環境に依存した回避動作を自律的に決定可能であることを示した。

場との相互作用を用いた自律的情報処理機構を障害物回避問題へ応用し、以下の結論が得られた。

シミュレーション実験の結果より、用意した3種類の障害物回避条件下に於いて回避挙動を示すことを明らかにした。これらの実験によりユニットの個数/大きさの変動に対する本手法の情報処理機構としての安定性が明らかにされた。さらに、環境が動的障害物を含むような場合にも本手法の有効性が示された。以上、計算機実験の結果は、本手法の障害物回避問題に対する有用性を示すものであり、本手法の障害物回避問題への応用可能性が確かめられた。しかしながら、障害物からの反射波の影響により場に干渉波領域が定在する場合には、そのような領域における動作

計画が困難となり、これは本手法の解決すべき問題点となる。また、動的障害物の任意の時刻における状態は、反射波を観測することにより同定可能である筈なので、積極的に反射波を分離/利用する方法を模索することが課題である。

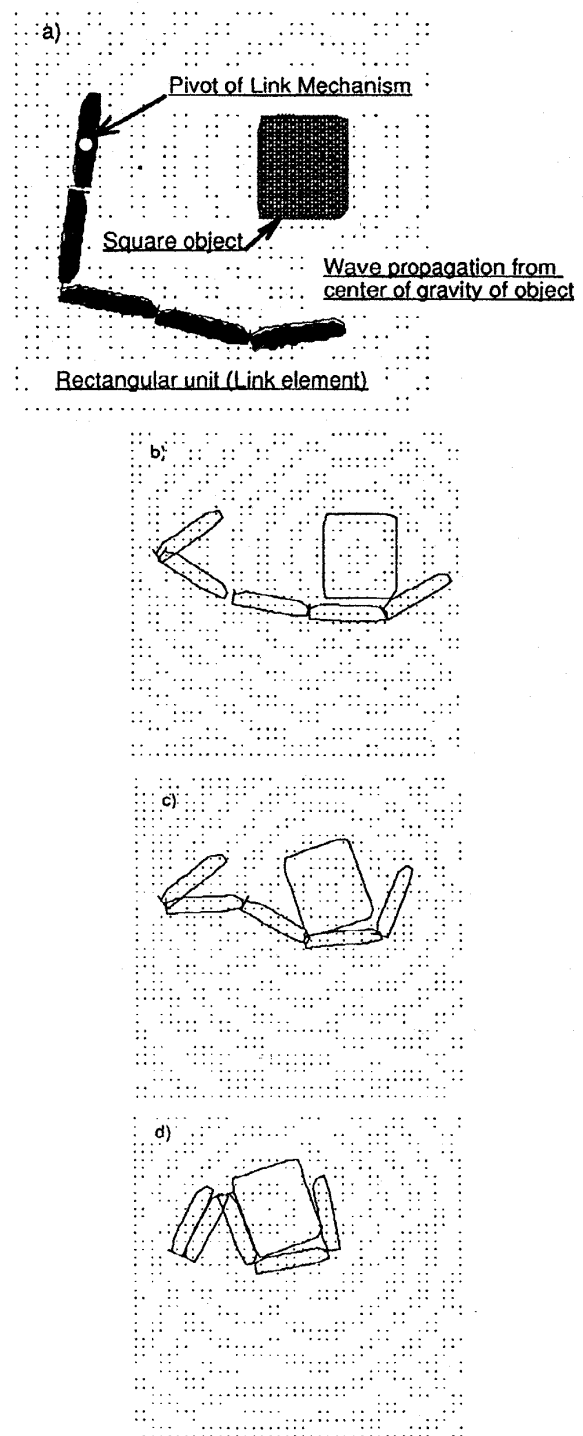


図 19 ユニット群による把持シミュレーション

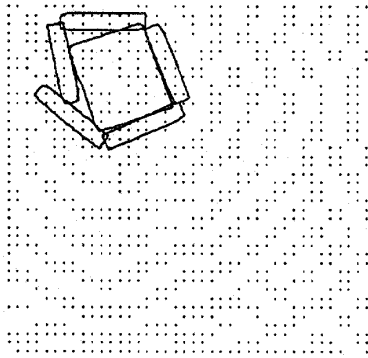


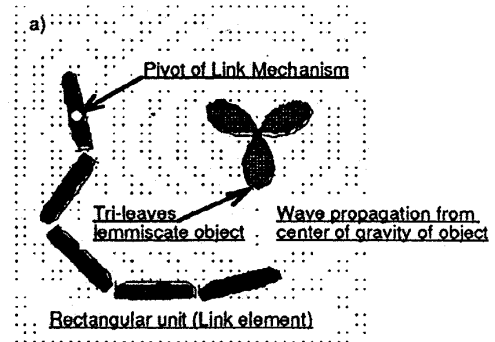
図20 物体表面から波動出力する場合の最終把持状態

8. 把持行動シミュレーション

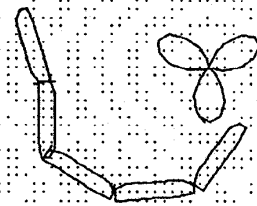
本数理モデルを用いた捕獲動作へのアプローチとして、まずはユニット群が物体を把持する過程を計算機実験によりシミュレートすることを試みた。その結果を図19, 図20, 図21, 図22に示す。ここで、リンクを構成するユニットの形状は長方形とし、被把持物の形状は円として実験を行なった。この実験ではユニット群により構成されるリンク構造が自律的に被把持物体に巻きつくようにして把持していることが分かる。これらの結果は波動場の情報を処理することにより、各ユニットが自律的に動作し、全体としてある収束点に落ち着くことを示している。

9. 探索行動シミュレーション

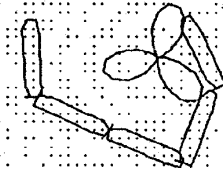
問題空間におけるユニット群の探索的挙動特徴を、TSP問題空間を環境とすることにより示す。TSPは輸送問題の最も単純な場合であり、組み合わせ最適化問題として多くのアプローチがなされてきた。問題は距離(コスト)関数の設定された複数都市間を最短距離で巡回可能な一巡閉路を発見することである。本問題は空間的に点在するエネルギー源を最小表面積で被覆することであり、軟体動



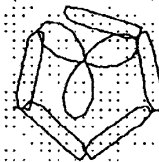
b)



c)



d)



e)



図21 ユニット群による把持シミュレーション

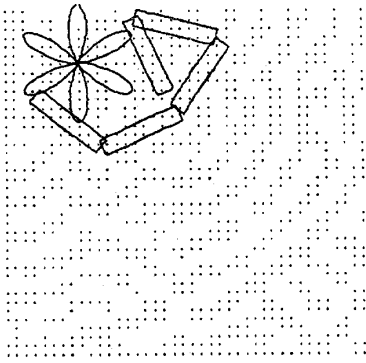


図22 ユニット群による把持シミュレーション

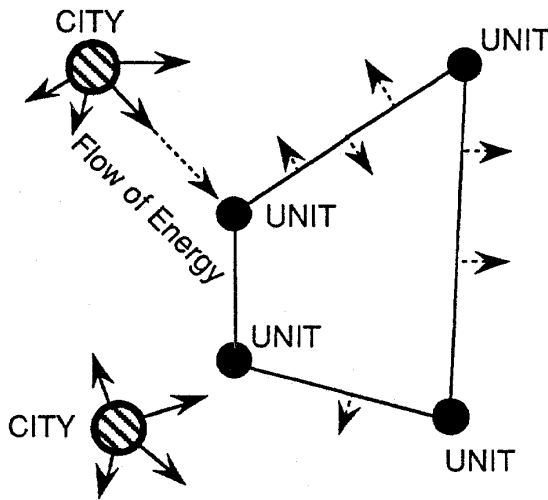


図23 TSP 環境におけるユニット群の探索行動

物が自己の姿勢や形状を変化させながらエネルギー源に吸着する行動とアナロジーがある。ただし、TSPの制約条件として一つの都市は2回以上通過することは許されない。本問題に対するユニット群を用いたアプローチ法は都市からのエネルギー流入とユニット間の距離に比例したエネルギー流出をを仮定し、2次元的に配置された都市間をエネルギー損失を少なくするようにユニット群を配置することである。

さて、ユニットを駆動する環境のエネルギーは都市から流入するものとして環境のエネルギーを都市ポテンシャル関数 $w_i(r)$ で設定する。ここで、 α_i はポテンシャルの曲率を与える係数とし、 $CITY_i$ は振幅を与える係数とする。

$$w_i(r) = \frac{CITY_i}{\alpha_i + (r - r_i)^2} \tag{32}$$

次に、解探索の機構をユニット群によって実現するために、各ユニットにユニットポテンシャル関数 $h_i(r)$ を設定する。ここで、 $w_i(r)$ は問題の制約条件と目的関数を表現する必要がある。問題の制約条件を満足するためにユニットのエネルギー状態に依存した項 $C_i(r)$ として設定する。

$$C_i(r) = \frac{-1}{\beta_i + (r - r_i)^2} \oint H(r, \phi) \chi(\phi) d\phi \tag{33}$$

さらに、問題の目的関数の項 $O_i(r)$ を設定する。ユニット群を駆動するエネルギーは、全て波動により伝達されるゆえ、ユニット i に流入する量 $E_i(r)$ はしきい値 TH に対して(34)式と書かれる。

$$E_i(r) = \oint H(r, \phi) \chi(\phi) d\phi - TH \tag{34}$$

ユニット i から流出する量 $P_i(r)$ は隣接するユニット j との距離関数 ι_{ij} に比例するものとして(35)式とする。

$$P_i(r) = \iota_{ij} (Q_i(r) - \oint H(r, \phi) \tau(\phi) d\phi) \tag{35}$$

エネルギーの流入と流出の収支より、ユニット i の状態量 $Q_i(r)$ は(36)式となる。

$$\begin{aligned} \iota_{ij} Q_i(r) + \frac{dQ_i(r)}{dt} \\ = \oint H(r, \phi) \{ \Psi(\phi) - \iota_{ij} \tau(\phi) \} d\phi - TH \end{aligned} \tag{36}$$

ユニットの仕事による消費量 $W_i(r)$ をユニットの運動エネルギーとすると、

$$W_i(r_i) = \frac{P_i^2}{M_i} \tag{37}$$

(19), (37)式より(28)式が導出される。

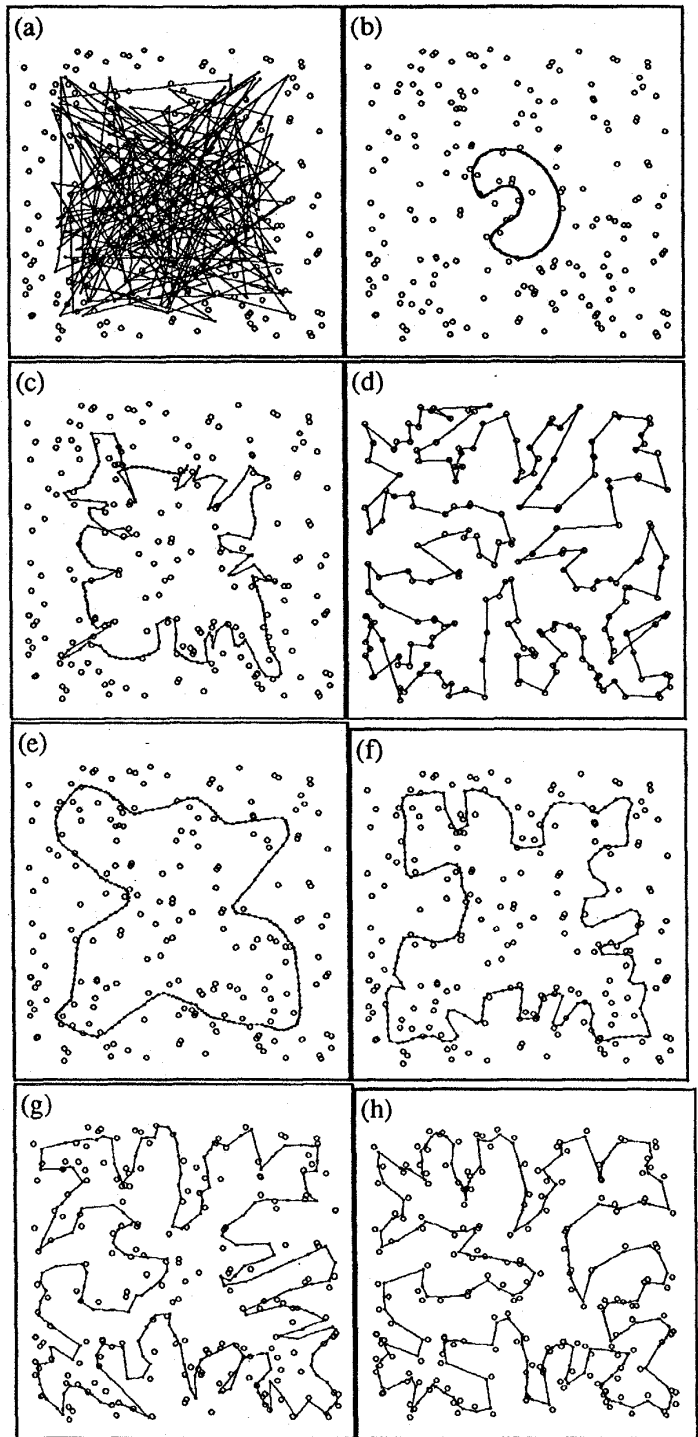


図 24 TSP 環境におけるユニット群の探索行動シミュレーション

$$\frac{dS_i(r)}{dt} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{Q_i(r)(1+u_{ij}) - \frac{p_i^2}{M_i} u_{ij} \int H(r, \phi) \tau(\phi) d\phi}{\int H(r, \phi) \tau(\phi) d\phi} \right\} \quad (38)$$

ユニット群が(20)を満たすようにするために、 $O_i(r)$ を(39)式のごとく設定する。

$$O_i(r) = -\frac{dS_i(r)}{dt} \quad (39)$$

(23), (29)式を用いてユニットポテンシャル関数 $h_i(r)$ を(40)式とする。

$$h_i(r) = C_i(r) + O_i(r) \quad (40)$$

設定したポテンシャル関数を用いて計算機実験により TSP 環境における探索行動を示す。実験において、設定した都市は 200 個、2次元平面上にランダムに配置するものとする。図 24(a)は都市(大丸)の配置とユニット群(小丸)の初期配置と結合状態(直線)を示しており、都市からエネルギーを受け取ることにより探索的挙動を開始する。(c)はユニット群が安定した時点からの探索動作の軌跡を示す。探索の結果、局所解(d)に到達し安定状態を得るが、エネルギー消費量と運動量が減少することによって相対的にユニットの状態量が増加傾向を示すゆえ、(28)式が正值で増加傾向をとる。すなわち、ユニット間の吸着力が増加し、再度探索的挙動を示すことに

なる。このようにして求めてきた結果を(e), (f)に示す。

設定した目的関数は、探索問題のボトルネックとなっている局所解からの脱出を可能にするものであり、実験では再探索によって解が改善されて行くことを示している。しかしながら、局所解の近傍系から開始される再解探索は、係数の設定の仕方に近傍系の半径に依存するゆえ、必ずしも解が改善されるわけではないことが分かった。よって係数に対する解探索の様相を明かにすることが今後の課題である。

10. 細胞分裂のシミュレーション

ここでは、生命活動の重要な要素である分裂/融合の現象をシミュレートすることを試みる。まず、基礎的な物体をユニットと呼ぶことにして、これらユニットの相互作用を波動場を用いて統一的に表現する数理表現することを試みる。その数理的取り扱いと波動場に於けるユニット間の相互作用の様式について示し、波動場上に生成物に対する濃度場を追加することによって生成物濃度に依存した分裂の様式を数理モデルで記述し、シミュレーション実験で表現する。

細胞分裂はすべての生物にとって繁殖行動を支える重要な要因の一つである。実際の生物の細胞分裂は細胞を取り巻く環境の物理的/化学的要因に依存するものであり、それ

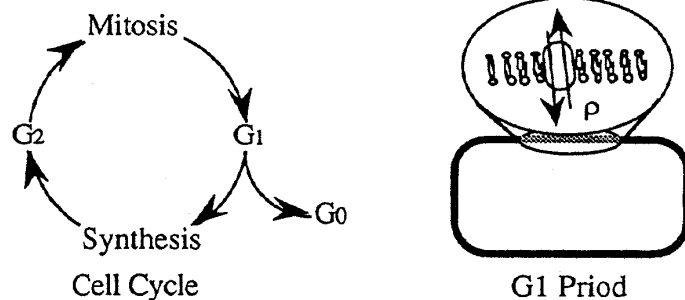


図 25 細胞周期

は主に物理的には Contact Inhibition であり, 化学的には Growth Factor である. また, 生物学において, 一般に生物の細胞周期の長さは G1 期にのみ依存することが明らかになってきている. このことは Rstriction Point が S 期の直前にあり, S 期/G2 期/M 期は環境とは無関係に進行することを意味している. G1 期は環境において細胞の必要とする物質の濃度を観測することによって G1 期以降のプロセスへの進行の可否を決定していることを示している.

G1 期; 細胞内に十分な蛋白質の量が蓄積されるまで.

S 期 (Synthesis); DNA 合成期

G2 期; 染色体の凝集

M 期 (Mitosis); 細胞分裂

よって, ここでは環境 (細胞内/周囲の物質の濃度) に依存した分裂/融合現象を対象として以下議論する.

10. 1 ユニットの目的関数

対象とする分裂/融合現象は, 生物学における細胞周期の考え方によれば細胞内/周囲の物質の濃度に依存してその細胞の総数を変化させるものであると簡略化して見なすことができる. また, 物質濃度を熱量の濃度であるとすれば, 生体の力学の概念を導入できる. よって, 細胞をユニット群としてとらえ, ユニット群のエネルギー収支をエントロピーの指標の下に分裂/融合によって調整すればよ

いことがわかる. そこで, 生体の力学に従えば, このエントロピーの増大量を最小化することによって系は外部環境に対して系の秩序を保存することが期待できる. よって, 時間を軸軸にとり(20)式を書き直すと(41)式となり, 細胞数 N は(42)式となる.

$$dS = \frac{d\xi(t)}{T} \tag{41}$$

$$\Delta N = \frac{dS}{dt} \tag{42}$$

10. 2 ユニットの支配関数

細胞内の物質の移動が細胞分裂に大きく寄与していることは上述の通りである. 物質の移動は拡散方程式と輸送方程式によってモデル化されており, これらの方程式は細胞内の活動をモデル化する場合に不可欠な要素となる.

具体的に複数ユニット間の相互作用を表現するために, ユニット支配関数の標準形を以下の式で仮定する.

$$h_i(r) = \sum_{n=0}^3 \frac{(-1)^n q_{in}}{\alpha_n + (r_i - r)^{2n/k}} \tag{43}$$

$$AT_i(r, n) = \frac{q_0}{\alpha_1 + (r - r_1)^{2n}} \tag{44}$$

ユニットによって生成された生成物の拡散現象を表現するために濃度場のダイナミクスをセットする.

$$\frac{\partial p(r)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2}{\partial r_x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r_y^2} + \frac{\partial^2}{\partial r_z^2} \right) p(r) \tag{45}$$

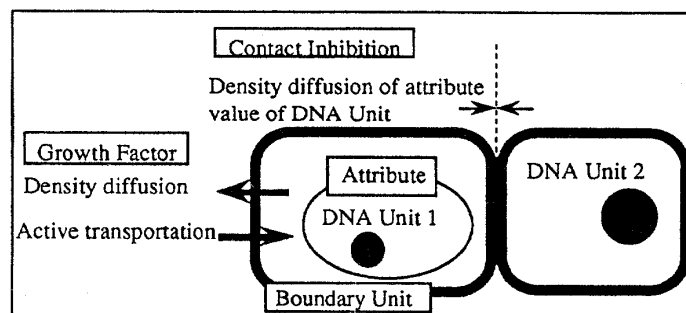


図 26 波動場を用いた細胞モデル

a: 拡散係数, ユニットの生成物濃度が(3)式の境界条件となる. しかし, このままでは細胞境界における排他的相互作用を表現できないために, 濃度の生成消滅を次のごとく追加する. 従来の拡散方程式では場における特定の物質の拡散現象の記述が課題とされてきた. しかしながら, 細胞内の物質の拡散的移動を対象とするだけでも (輸送現象は対象としない) 単純拡散とは異なるさまざまな要因を含んでいる. これらの要因を包含するように拡散現象を記述することがここでの課題となる. また, 対象とする場は量と属性によって表現可能であるとし, 量子力学的見地に基づいて振幅項と周期項によって定義される場を対象とする (VPF).

そこで, 対象とする方程式は単純な拡散現象を表すだけではなく, 場に存在する物質間の化学的な相互作用による濃度変化や細胞膜による栄養の吸収現象も同時に記述することを目指している. このためにはまず,

1. 場を観測する操作と物質間の相違を示す関数 (属性関数) が必要となる.
2. さらに, 化学反応による物質の生成消滅を束縛条件などの形式で導入する必要がある.

そこで, 対象とする物質 i は濃度 r_i と属性関数 y_i によって記述され, y_i は次の波動方程式の解となる.

$$\frac{d^2\Psi_i(\phi)}{d\phi^2} = E_\phi\Psi_i(\phi) \quad (46)$$

場 H の自己の識別関数 Ψ による観測操作は場の観測 α , 対象とする物質の属性関数を Ψ_i に対して, 次のごとく記述される.

$$\alpha = \int_V \Phi(H)\Psi_i^* d\phi$$

$$= \begin{cases} 0, & \Phi(H) - \Psi_i^* \gg \epsilon \\ 1 + \epsilon[\Psi_i]^{-\tau/2}, & \Phi(H) - \Psi_i^* < \epsilon \end{cases} \quad (47)$$

ここで Φ は場の周期項 (属性項) を抽出する関数とする.

この α により拡散方程式は次のように拡

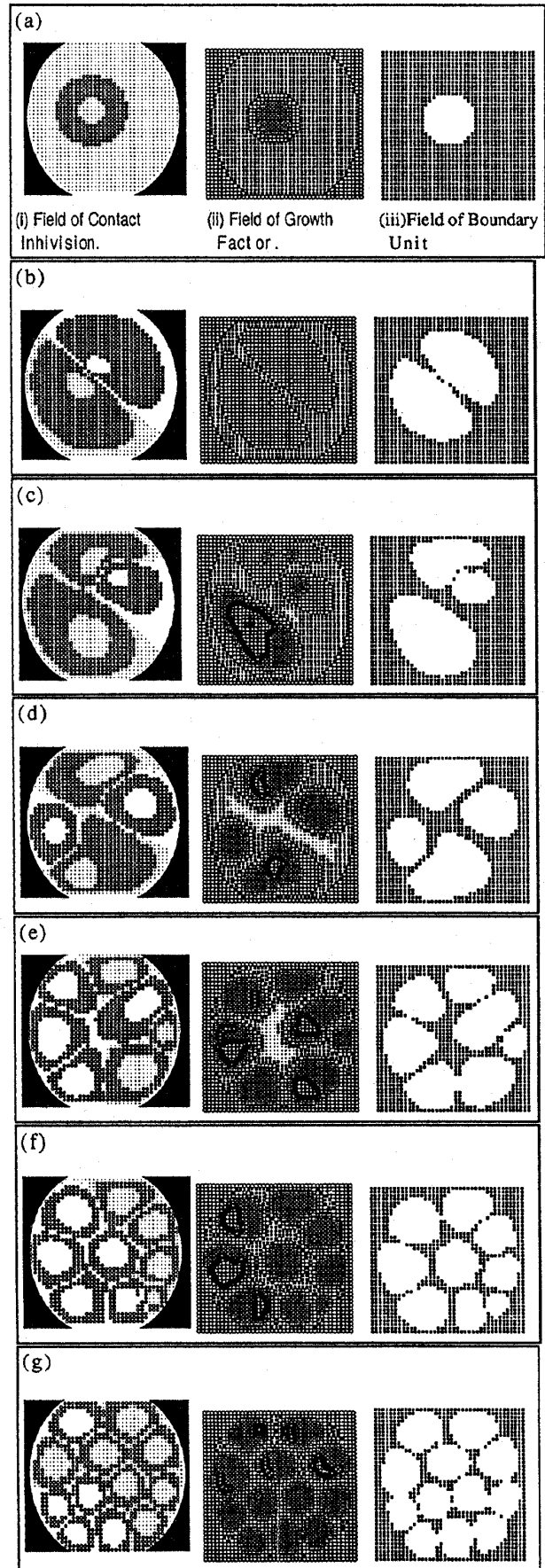


図 27 細胞分裂のシミュレーション

張される。

$$\begin{aligned} & \frac{dp}{dt} \\ &= \frac{k}{c\mu} \left(\alpha = p + \frac{\partial p \partial \alpha}{\partial x \partial x} + \frac{\partial p \partial \alpha}{\partial y \partial y} + \frac{\partial p \partial \alpha}{\partial z \partial z} \right) \\ & - b \frac{d\alpha}{dt} p \end{aligned} \quad (48)$$

ここで、初項は単純拡散、第二項、第三項は異種間接触によって生成消滅する拡散をそれぞれ表している。

これにより相異なる細胞間の排他的相互作用が実現可能となる。(45)式で示される濃度場を数理モデルに追加することで濃度分布が動的に変化する空間に於けるユニット群のダイナミクスが記述可能となる。濃度の拡散過程を追加することによって波動場は次式の如く拡張される。

$$\begin{aligned} H(r, \phi) = \sum_i \{ & (AT_i(r) + h_i(r) \Psi_i(\phi) \\ & + p(r) \tau_i(\phi) \} \end{aligned} \quad (49)$$

実際の具体的処理では、これらのパラメータを問題向きに設定することになる。さて、実験では Contact Inhibition, Growth Factor, Boundary unit の3種類の場を用意した図27は分裂の過程を示しており、Boundary unitの場を表示した。

環境に依存した分裂/融合現象を波動場を用いることによって数理表現し、生成物濃度に依存した分裂の様式をシミュレーション実験で示した。実験から、細胞群が競合的に平衡状態へ向かう挙動を示すことと、自律的に細胞個数と配置の調整を行なうことが示された。

11. まとめ

ここで提案した数理モデルはユニット群と場との情報交換を実現可能としたものであり、ユニット自体を生命体又はその部分と見なすことにより、場との相互作用によって実

現される生体の挙動表現を試みた。計算機実験により、自己の置かれている環境変化を自己処理しつつ自らの動作を決定することのできるユニットにより構成されるときユニット群による分散処理が実現されることが示された。また、接近/回避などのシミュレーション実験より、複雑な環境情報表現として場を用いることの有効性が示された。

参考文献

- (1) Harken, H.: *Synergetics*, Springer-Verlag, Inc.(1977).
- (2) 小出昭一郎：量子力学(I), pp.22-45, 裳華房。
- (3) 藤本博・山辺信一・稲垣都士：有機反応と有機軌道概念, pp.115-155, 化学同人。
- (4) 中井準之助：形態形成と発生工学, pp.137-147, 講談社サイエンティフィック。
- (5) Yokoi, H., and Kakazu, Y.: An Approach to the Autonomous Grasping Problem by the Vibrating Potential Method, Proc. *Intelligent Robots and System'93*, pp.1913-1918 (1993).
- (6) Yokoi, H., and Kakazu, Y.: Autonomous Grasp Control of Link Mechanism by Vibrating Potential Method, Proc. *International Federation of Automatic Control Congress 1993*, pp.313-316 (1993).
- (7) Yokoi, H., Hatakeyama, Y. and Kakazu, Y.: Simulation of Cell Division in the Bionic Model, *Intelligent Engineering System Through Artificial Neural Network*, pp.27-32 (1993).
- (8) 横井浩史・嘉数侑昇：波動場を用いた情報処理に関する基礎研究(多重波動場モデルの構築), 機論C編, Vol.59, No.560, pp.1115-1121 (1993).
- (9) 横井浩史・嘉数侑昇・皆川雅章：波動場に於ける自律機械群に関する基礎研究(ジョブショップスケジューリング問題へのアプローチ), 機論C編, Vol.59, No.564, pp.2584-2590 (1993).
- (10) 横井浩史・嘉数侑昇：波動場を用いた自律的

- 情報処理に関する基礎研究(障害物回避問題へのアプローチ), 機論 C 編, Vol.59, No.564, pp.2346-2352 (1993-8).
- (11) Yokoi, H., Yamada, K. and Kakazu, Y.: Autonomous Design of Gear Train by Vibrating Potential Method, Proc. *ICAM'93*, pp.748-753 (1993).
- (12) Yokoi, H., Kakazu, Y.: An Approach to the Avoiding Obstacle Problem by the Vibrating Potential Method, Proc. *Intelligent Vehicle'93*, pp.235-5 (1993).
- (13) 横井浩史・嘉数侑昇: 波動場に於ける自律機械群に関する基礎研究(ピアノ問題への応用), ロボティクスメカトロニクス講演論文集 (1993).
- (14) 生命体モデル構築に関する基礎研究(幾何拘束条件下における群の挙動表現), FAN シンポジウム講演論文集, pp.375-380 (1993).