

# 波動場を用いた生命体モデル

— 巡回セールスマン問題への適用 —

横井 浩史, 水野 敬文, 滝田 正寿, 嘉数 侑昇\*

This paper presents one approach to modeling life using a field technic, so called as vibrating potential field.

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 adept 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 shows the behaviors of artificial life that conservates its own energy level and tunes its configurations or location of its parts.

## 1. はじめに

生体は化学物質の結合およびその組み合わせにより構成された物質であるゆえ、生体を構成する原子またはその化合物の組成や状態を知ることにより、局所的相互作用の集大成として理解することが可能であり、ボトムアップ的手法によりモデル化できるものと考えられてきた。このようなボトムアップ的なアプローチは生体を構成する要素（原子、分子）の精密な状態を観測し、再構成することが現在の技術ではかなりの困難を伴うなどの問題点を抱えており、別の視点からのアプローチが必要とされてきた。特に生体の恒常性を説明するために仮想的ではあるが、大局

的境界条件や制約条件などの重要性なども指摘されており、生体の大局的な状態、たとえばエントロピーの変化などに着目した有力なモデルなどが提案されている。これら2つのアプローチは本来、相補的關係にあるはずであり、独立に議論されるべき課題ではないと考える。よってここでは、これら局所的相互作用と大域的状態保存の考え方を融合させることにより、生命体のモデル構築を試みる。モデル化の目的のために、生体の動力的状態が場所と時間の関数であることを重視して、生体の存在する場を用いることとする。用いた場は、生体の処理対象となる情報の多様性を保証するために、多重ポテンシャル場を提案するものとし、ここではこれを波動場と呼ぶものとする。波動場については2章以

Hiroshi YOKOI, Takafumi MIZUNO,  
Masatoshi TAKITA, Yukinori KAKAZU\*  
生命工学工業技術研究所, \*北海道大学工学部

降で、その詳述を行うものとする。また、波動場を用いることによって、細胞性粘菌（アメーバ）を対象として粘菌の探索行動のモデル化を試みる。

ところで近年では、生物の物質的/情動的柔軟性のモデル化に対する工学的要請も強くなってきている。生物の多くが自律分散システムを形成することなどの理由から、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特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。生物の柔軟な特性を工学的システムとして利用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。情報媒体としての場の役割が重要となる。生物では結合を介した情報交換は、処理対象が局所的に特定されてしまう性質を有するため、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。これに対して、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の多くは、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はなく、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。

具体的なモデル化の対象として、ここでは粘菌（キイロタマホコリカビ、図1の探索行動を対象とする。粘菌の基本的特徴として、

- 1) 活環に単細胞の時期と多細胞体（あるいは多核体）の時期が存在する。
- 2) 栄養摂取はファゴサイトーシスによる。
- 3) 栄養増殖体は発達した細胞壁を持たず、多くの場合アメーバ状である。
- 4) 耐性型の細胞（孢子）を形成する。

すなわち、粘菌はプロトプラスの状態においてはアメーバ状の探索行動様式をとりファゴサイトーシスを行うと形態及び行動学的特

徴づけされており、図に示されるように糸状仮足（ディクチオ型細胞性粘菌）を細胞表面から延ばすことにより周囲の探索と歩行を実現している。このような行動様式は細胞の移動や捕食行動などの基礎機能であるという重要な特性を持っている。アメーバ以外の生物にも共通する代表的な特性をアルゴリズムを併記しながら列挙すると表1のごとくなり、空間的な相互作用と場の情報処理過程として統一的にアルゴリズム化することが可能であることがわかる。

ここでは表1に示された基礎行動を表現し得るような特性のモデル化の方法を模索するものとする(図2)。アメーバ行動のモデル化のために必要となる基礎行動として次の4モデルが考えられる。

2.1 粒子群モデル

細胞内部には栄養分、老廃物、水、タンパ



図1 粘菌アメーバ（キイロタマホコリカビ）の顕微鏡写真

表1 アメーバの行動とアルゴリズム

アメーバの基礎行動	アルゴリズム
仮足（またはべん毛）による運動	幾何的変形と移動
捕食	エネルギー源への接近と栄養の獲得
分泌	情報の授受（空間的情報伝播）
接触	干渉（幾何的相互作用）
代謝	排熱（空間的熱拡散）

ク質、核酸などの機能粒子の集合体であるゆえ、仮想空間上に設定された複数粒子の空間的ポテンシャル相互作用として数理表現される(図3)。

2.2 弾性ネットモデル

アメーバの細胞表面はその形状を自由に變形しながら移動するという特性を持つゆえ、この特性をモデル化するためには、隣接する粒子間に弾性ポテンシャルを定義することによって仮想的な弾性リングとして細胞表面のモデル(図4)が数理表現される。

2.3 エネルギー輸送モデル  
(恒常性の維持モデル)

アメーバに限らず、すべての細胞は代謝によって内部のエネルギー状態を一定に保っており、このエネルギー代謝機能が細胞の恒常性の維持といわれる生命体の最も重要な性質を実現している。ここではこの代謝機能を輸送機能、変換機能、調整機能に分解して表現されるものとし、これら輸送、変換、調整機能を仮想空間上のエネルギーの移動、変換、エネルギーの変化に基づくシステムパラメータの調整により数理表現することによって、恒常性の維持機能をモデル化する(図5)。

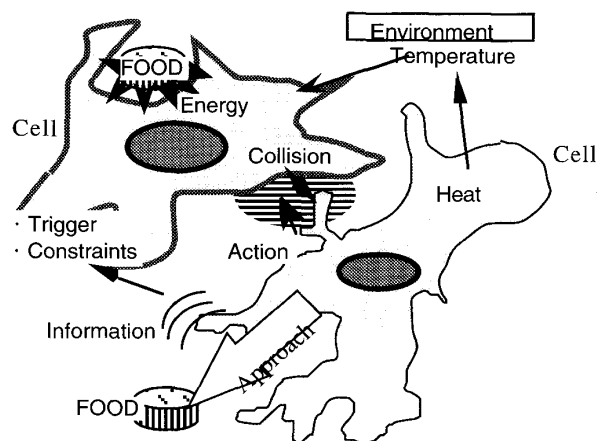


図2 粘菌アメーバの行動

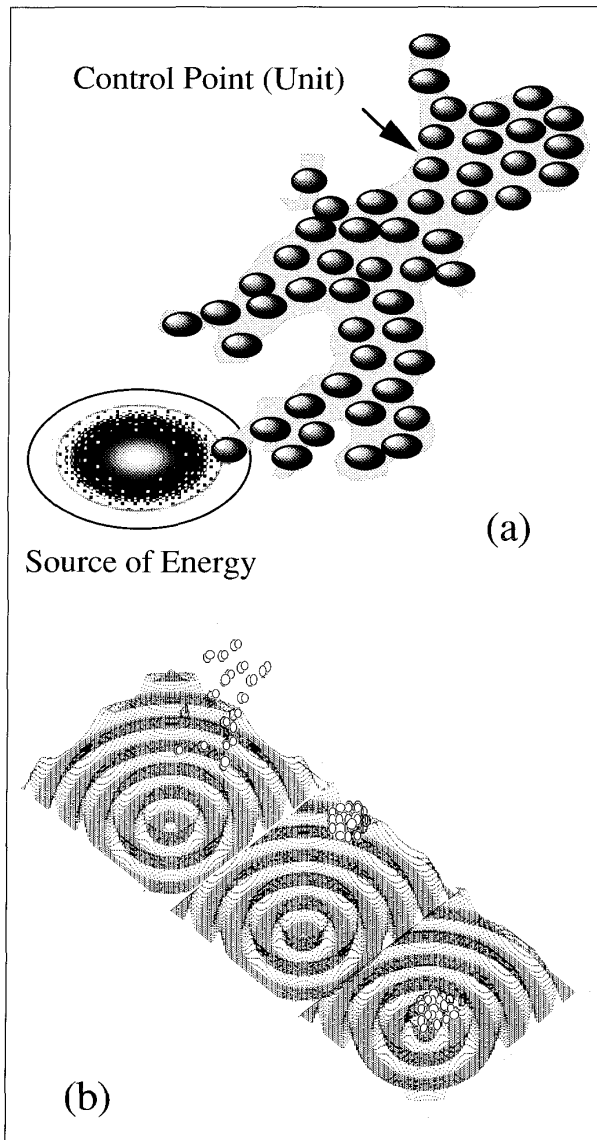


図3 ユニット群モデル

2.4 合成モデル

上記粒子群モデル, バネモデル, 恒常性の維持モデルの3モデルを合成することによってより精密なアメーバモデルが構築される. これら3モデルを同一空間上で統一的に処理するためには, そこで必要となる表現方法を整理する必要がある. すなわち, モデルを構築するために必要となる要素は情報伝播のための場 (Field), 情報処理主体である粒子 (Unit), 情報の授受 (Interaction), 情報処理の目的関数 (Adaptation) の4項目に要約される (図6).

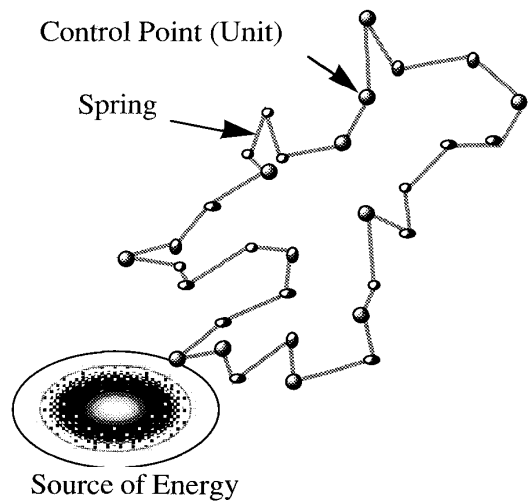


図4 弾性ネットモデル

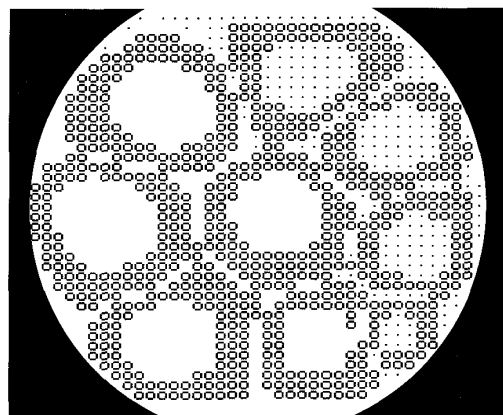
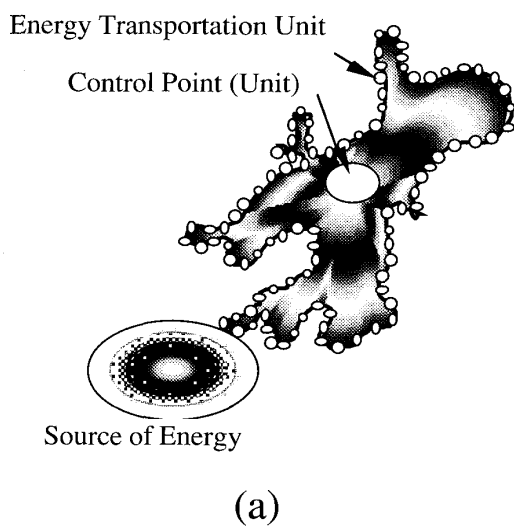


図5 恒常性維持モデル

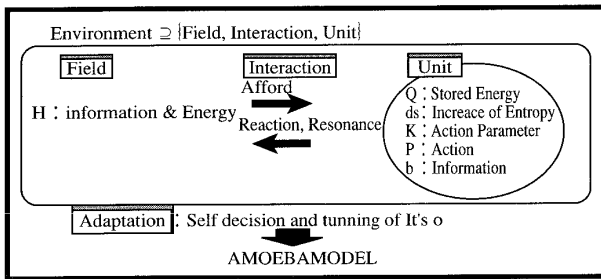


図6 アメーバモデルの構成要素

以下3章において、これらの4項目の数理表現について詳しく述べる。

### 3. アメーバモデル

アメーバモデルは2章で提案した3モデル(粒子群モデル, バネモデル, 恒常性の維持モデル)を合成することにより構築される。モデル合成のために必要となる4要素について、それぞれ、3.1 情報伝播の場, 3.2 ユニットの場, 3.3 情報, 3.4 目的関数の順で述べる。

#### 3.1 情報伝播の場

本数理モデルに於ける情報伝播の場は、ユニット間の相互作用に固有な場の重ね合わせ(ここではこれを固有の場と呼ぶことにする)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(図7)。

すなわち、各ユニットにそれぞれ適当な情報(h, w, E, hl)と情報の伝播するユニット座標軸(Ψ, χ, τ, Φ)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。ここで、情報とは他のユニットから振動的に伝播する信号を意味し、ポテンシャル関数を用いて記述されるものとする。

$$H(r, \Phi, t) = \sum_i^{\text{Unit number}} \{h_i(r, t)\Psi(\Phi) + W_i(r, t)\chi(\Phi)\}$$

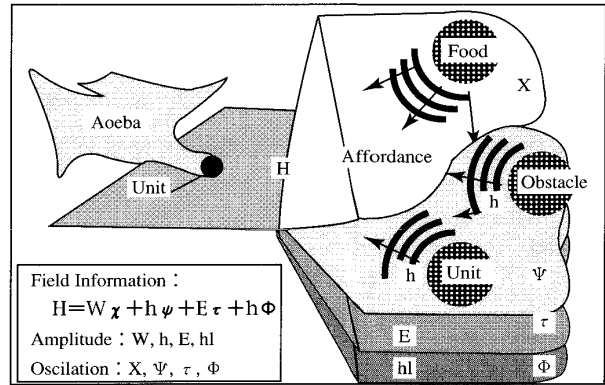


図7 情報伝播の概念

$$+ \sum_j h_{lj}(r, t) \varphi_l(\Phi) \varphi_j(\Phi) \} + E(r, t) \tau(\Phi) \quad \text{---(1)}$$

ここで、

- H(r, Φ, t) : 場の関数 Φ : 全体座標軸
- i : ユニットの番号 (i = 1, 2, …, n)
- r : 位置ベクトル r(t) = (r<sub>x</sub>, r<sub>y</sub>, r<sub>z</sub>)
- h<sub>i</sub>(r, t), w<sub>i</sub>(r, t), h<sub>lj</sub>(r, t) : ユニットの出力する情報 (ポテンシャル関数)
- E(r, t) : 環境のエネルギー状態
- ψ(Φ), χ(Φ) : ユニットの種類に固有なユニット座標軸

なお、ユニットの発生する情報h(r, t), w(r, t), hl(r, t)と環境のエネルギー状態E(r, t)を用いて、この様にHを設定することによって、ユニットはユニットに固有な座標軸上ψ(Φ), χ(Φ), φ(Φ)上において固有の場h(r, t), w(r, t), hl(r, t)により他のユニットと相互作用し、他のユニットに影響を与える性質を持つことが期待できる。固有の場h(r, t), w(r, t), hl(r, t)は、空間的な情報の伝播状態を表現する必要があるゆえに、これらを代表してu = u(r, t)とすると偏微分方程式を用いて(2)式のごとく数理表現される。

$$\alpha \frac{d^2u}{dt^2} + \beta \frac{du}{dt} + \gamma \nabla^2 u + \delta \nabla u + \epsilon u = 0$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r_x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r_y^2} + \frac{\partial^2}{\partial r_z^2}$$

—(2)

たとえば  $u$  が散逸的特性を持つような場 (濃度の場) では,  $a = 0, b = 1, c = -1, d = 0, e = 0$  とすると(3)式の拡散方程式で記述される.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla^2 u \quad \text{—(3)}$$

また, 実際の計算において(3)式は数値解法(4)式を用いることにより反復的に求められる.

$$u_{x,y,t,\Delta t} = u_{x,y,t} + \frac{u_{x+\Delta x,y,t} + u_{x,y,\Delta x,t} + u_{x-\Delta x,y,t} + u_{x,y-\Delta x,t} - 4u_{x,y,t}}{\Delta x^2} \Delta t \quad \text{—(4)}$$

さて, ユニットの間の情報交換は, 式(1)によって媒介される全体の間  $H(r, \Phi, t)$  を媒介して行われる. 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(5)の波動方程式でこれを定義する.

$$\frac{k(a)}{2} \frac{d^2 \xi(\Phi)}{d\Phi^2} + E_{env}(r_i, t) \xi(\Phi) = 0, \quad (\xi(\Phi) = \Psi(\Phi), \chi(\Phi), \varphi(\Phi), \tau(\Phi)) \quad \text{—(5)}$$

$$\xi(\Phi) = 0, \quad (|\Phi| = a, b, c, d) \quad \text{—(6)}$$

ここで,

$k(a)$ : ユニットの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.

$E_{env}(r, t)$ : 環境のエネルギー

$a, b, c, d$ : ユニットの座標軸  $y(\Phi), c(\Phi), \varphi(\Phi), \tau(\Phi)$  の境界条件

$\psi(\Phi), \chi(\Phi)$  の境界条件は, 式(6)の  $a, b, c, d$  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(5), (6)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間

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, 全体の間 (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ような状態の場所に位置しているかを測る一つの判断手段として, 環境のエネルギー  $E_{env} = E_{env}(r, t)$  を導入する. この時, 環境のエネルギー  $E_{env}$  はユニット群から流出するエネルギー  $E_{out}(r, t)$  の関数として(7)式となる.

$$dE_{env} = \sum_i^{\text{Unit number}} E_{out}(r_i, t) dt \quad \text{—(7)}$$

ここで,  $E_{out}$  はユニットから流出するエネルギーを表わしており, 詳しくは 3.4 説で述べる. しかしながら,  $E_{env}$  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.

### 3.2 ユニットの

ここでは, アメーバモデルをユニットの集合体として構成することを考え, 全てのユニットに共通な行動の決定法を模索する. ユニットの行動は情報の伝播する方向と大きさ, および場とユニット自体のエネルギー状態に依存して決定されるはずであり, さらにこれらのユニットに対する外界からの刺激をユニット内部のパラメータにしたがって変換操作を施した結果として現われる (図 8). よって, ユニットの行動を決定するために必要

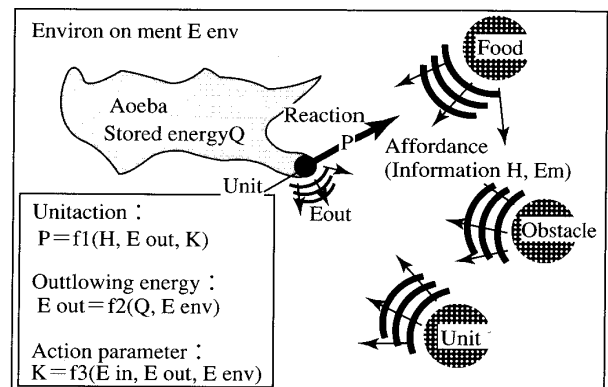


図 8 ユニットの行動

となる変数はユニット行動  $p(t)$ , 場の関数 (情報)  $H(r, \Phi, t)$ , ユニットから環境へ流出するエネルギー  $E_{out} = E_{out}(r, t)$ , ユニットパラメータ  $K(t)$  より構成されることとなる。

アメーバの行動は, ユニットの空間的な変位によってモデル化することを考える。そこで, 第一近似としてユニットに対するポテンシャルが  $H(r, \Phi, t)$ ,  $E_{out}$ ,  $K(t)$  と比例関係にあるものと仮定することにより, ユニット行動をユニットの運動量  $p(t)$  として導出する。するとその数式表現式としてラグランジャンが自然に式(8)のように導入される。

$$L = \left( \frac{1}{2} v(t) \cdot p(t) \right) \cdot \Psi(\Phi) - H(r, \Phi, t) \cdot E_{out} \cdot K(t) \quad \text{---(8)}$$

(8)式よりユニットの運動量  $p(t)$  は, 情報  $H(r, \Phi, t)$ , 排出できる熱量  $E_{out}$ , ユニットパラメータ  $K$  の関数として(9)式のごとく求められる,

$$p(t) = M \cdot \nabla \oint H(r, \Phi, t) (\xi(\Phi) + \varphi(\Phi) d\Phi \cdot E_{out} \cdot K(t)) \quad \text{---(9)}$$

(9)式によりユニットの行動が決定されることになる。

ただし, 式(8), (9)に於て,

$M = (m_x, m_y, m_z)$  : 慣性質量

$v(t) = r(t)$  : 速度ベクトル

$p(t) = M \cdot v(t)$  : 運動量ベクトル

$E_{out}(r, t)$  : ユニットから環境へ流出するエネルギー

$K(t)$  : ユニットパラメータ

### 3.3 情報(ポテンシャル関数)

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, ユニット情報としてその標準形を以下の式で仮定する。

特に, 空間的に伝播する情報としては臭気

濃度など空間的に拡散しながら減衰するような種類の情報と, 光, 音など空間的に減衰は受けるものの境界条件によっては共鳴や反射, 屈折などを起こす波動的特性を持つ種類の2種類の情報を対象とする。そこで, ユニット支配関数はユニット間の物理的相互作用と相互に作用するユニット間の情報交換を数理表現するために, すべての支配関数は仮にユニットから発生しその強度が物理的距離に応じて減衰する伝播情報として設定する (図9)。数理表現のために(2)式に示した偏微分方程式を用いる。(2)式のパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  を適当に設定することにより, 濃度的特性を持つ伝播情報として(10)(11)式を用いて  $h(r, t)$ ,  $E(r, t)$ , 波動的特性を持つ情報として(12)式を用いて  $w(r, t)$  とおく。また, ユニット間の弾性ポテンシャルを(13)式を用いて  $h_l(r, t)$  とおく。これにより, 4種類の情報の場が設定される。

$$h(r, t) = u_{h,1}(r, t) - u_{h,2}(r, t) \quad \text{---(10)}$$

$$E(r, t) = E_{env}(r, t) \quad \text{---(11)}$$

(10), (11)式で, 情報の場  $u$  と(2)式のパラメータを次のように設定することにより, 濃度的特性を有する場を得る。

$$u = u_{h,1}(r, t), \alpha = 0, \beta = 1, \gamma = -1, \delta = -1, \varepsilon = 0$$

$$u = u_{h,2}(r, t), \alpha = 0, \beta = 1, \gamma = -1, \delta = -2, \varepsilon = 0$$

$$u = E_{env}(r, t), \alpha = 0, \beta = 1, \gamma = -1, \delta = -1, \varepsilon = 0$$

境界条件として, 各ユニットの位置  $r_i$  に振

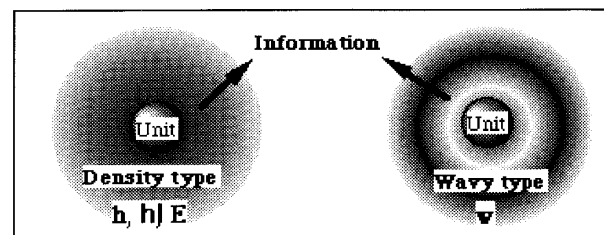


図9 ユニットからの情報伝播様式

幅  $u_{h,1}(r_i, t), u_{h,2}(r_i, t)$  をセットする.

$$u_{h,1}(r_i, t) = \oint H(r_i, \Phi, t) \chi(\Phi) d\Phi,$$

$$u_{h,2}(r_i, t) = 2 \oint H(r_i, \Phi, t) \chi(\Phi) d\Phi$$

$$w(r, n) = u_w(r, t) \quad \text{---(12)}$$

(12)式で、情報の場  $u$  と(2)式のパラメータを次のように設定することにより、波動的特性を有する場を得る.

$$u = u_w(r, t), \alpha = 1, \beta = 1, \gamma = -1, \\ \delta = -1, \epsilon = 0$$

境界条件として、各ユニットの位置  $r_i$  に振幅  $u_w(r_i, t)$  をセットする.

$$u_w(r_i, t) = \exp(jabt)$$

$$hl_{ij}(r, t) = I_{ij}(t) (r - r_i) \quad \text{---(13)}$$

アメーバモデルのシミュレーション実験では、ユニット群に対する入力エネルギーは環境にセットされる必要があるゆえ、環境の振幅を適当に設定することによりアメーバモデルの環境をセットすることになる.

### 3.4 目的関数

問題環境下においてユニット群の適応的行動を実現するために、ユニット群の目的関数として生体の力学を導入する. 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 (図 10).

さて、以下ではユニットと環境のエネルギーの入出力関係からエントロピーの変化量  $ds$  を定義した上で、ユニットパラメータを  $K(t)$  として  $K(t)$  の調整法を提案する. エネルギーの入出力関係はユニットの状態変数と環境変数によって記述され、ここでは状態変数としてユニット  $i$  に流入する熱量  $E_{in} = E_{in}(r_i, t)$ , エネルギー蓄積量  $Q = Q_i(t)$ , ユニッ

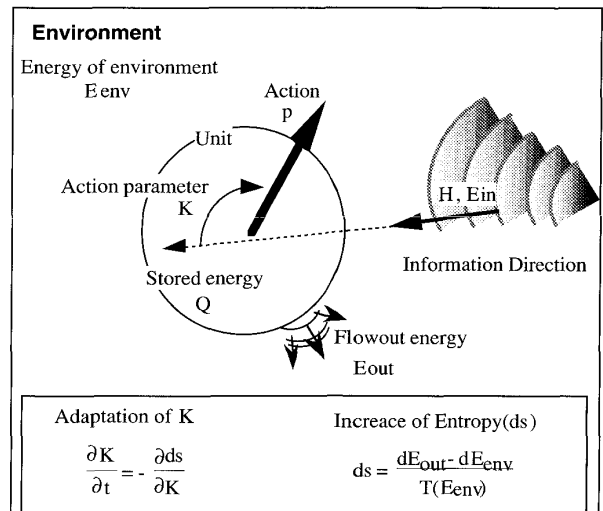


図 10 波動環境に対するユニットの適応行動

トのなす仕事量  $W = W_i(t)$ , ユニットから流出する熱量  $E_{out} = E_{out}(r_i, t)$  の 4 個, 環境変数として環境の熱分布  $E_{env} = E_{env}(r, t)$  を用いる.

まず、調整法を記述するために必要となる種々のユニットの状態変数の定義をおこなう. 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、あるユニットに流入する熱量  $E_{in}$  は形式的に(14)式とする.

$$E_{in} = \oint H(r, \Phi, t) \chi(\Phi) d\Phi \quad \text{---(14)}$$

$$\text{個々のユニットのエネルギー蓄積量 } Q \text{ を} \\ dQ = (E_{in} - E_{out} - W) dt \quad \text{---(15)}$$

ユニットのなす仕事量  $W$  は(16)式となる.

$$W = \frac{1}{2} Mv(t)^2 \quad \text{---(16)}$$

よって、ユニットから流出する熱量  $E_{out}$  は(17)式となる.

$$dE_{out} = (Q - E_{env}) dt \quad \text{---(17)}$$

これらの状態変数は互いに関数関係にあるゆえ、実際の計算では数値計算法によって求める必要がある.

さて、上記 4 個の状態変数から、ユニット群が熱源  $E_{env}$  に接していると考えるとエントロピーの変分は(19)式となる.



$$ds = \frac{dE_{out} - dE_{in}}{T(E_{env})} \quad \text{---(18)}$$

そこで、情報に対するユニット行動を支配するパラメータ  $K(t)$  に対して、(19)式がユニット群のパラメータ調整法として導出される。

$$\frac{\partial K(t)}{\partial t} = - \frac{\partial ds}{\partial K(t)} \quad \text{---(19)}$$

(19)式にしたがって  $K(t)$  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、ユニット、情報、目的関数により本モデルによるアメーバモデルが構築される。次章では、個々の環境のエネルギー源、ユニットの情報、ユニットパラメータの調整規則を設定し、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。

## 4. アメーバの探索行動シミュレーション

### 4.1 ユニットポテンシャル関数の設定

3.3節で設定した情報は、波動、濃度、バネの3種類であった。波動的特性を持つ情報による通信を用いると、ユニット群は単純ポテンシャル相互作用の様相を呈し、隣り合うユニット同士にバネ結合要素を設定すると、バネモデルとしての特性が付加されることとなる。また、さらに粒子群に対する周囲の環境からのエネルギーの流入流出とユニット群内部のエネルギーの散逸状態をシミュレートすることによって輸送モデルの特性が付加される。これにより、3種類のモデルの合成モデルが構築され、アメーバモデルの探索的挙動がシミュレーションにより実現される。

このモデルではランダム歩行などの機能が付加されていないゆえ、エネルギー源からの情報のみに依存してアメーバモデルの移動

方向が決定される。よって、アメーバモデルに移動方向を与える目的で、探索空間として複数のエネルギー源が一面にばらまかれた状態を考え、空間を振動的に伝播する情報によって探索方向が呼びかけられることになる。そのために必要となる個々のエネルギー源  $i$  の境界条件  $w(r_i, t)$  で設定する。ここで、 $\omega_0$  は周波数とし、 $NUT_i$  は振幅を与える係数とする。

$$w(r_i, t) = NUT_i \exp(j\omega_0 t) \quad \text{---(20)}$$

次に、隣接するユニット間の距離を適正に保つために、各ユニット  $i$  にユニットポテンシャル関数  $h(r_i, t)$  を設定する。

$$h(r_i, t) = \oint H(r, \Phi, t) \chi(\Phi) d\Phi \quad \text{---(21)}$$

さらに、探索空間における効率的なエネルギー獲得のためにはユニット群のシステムパラメータの探索空間の特徴に依存した適応的調整が必要となる。よって、ここでは環境の特徴をシステムに取り入れるために、ユニットパラメータの調整法を定義することによってシステムの構造を可制御とする。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(22)式と書かれる。

$$E_{in} = \oint H(r, \Phi, t) \chi(\Phi) d\Phi - TH \quad \text{---(22)}$$

(15)式よりユニット  $i$  の状態量  $dQ(r)$  は(23)式となる。

$$dQ = \left( \oint H(r, \Phi, t) \chi(\Phi) d\Phi - TH - E_{out} - \frac{1}{2} Mv(t)^2 \right) dt \quad \text{---(23)}$$

ユニット  $i$  から流出する量  $E_{out}$  は隣接するユニット  $j$  との距離関数  $lij$  に比例するものとして(24)式とする。

$$dE_{out}(r) = lij(Q - E_{env}) dt \quad \text{---(24)}$$

よってユニットパラメータ  $lij$  に対するエントロピーの変化量  $ds$  が(25)式が導出される。

$$ds = \frac{lij(Q - E_{env}) - dE_{in}}{T(E_{env})} \quad \text{---(25)}$$

このユニットパラメータ  $lij$  の調整法は(26)式となる。

$$\frac{\partial lij}{\partial t} = \frac{\partial ds}{\partial lij} \quad \text{---(26)}$$

次に、ユニット群の構造決定のためにユニットポテンシャル強度と結合角に対する調整法が必要となる。ここで結合角度は局所的な情報交換によるほうほうでは直接調整することはできないことから、ユニット間結合角度  $\theta$  に対するポテンシャル関数によって間接的に調整することを考える。ユニット間結合角度  $\theta$  に対するポテンシャル関数は、相互に結合された3個のユニットによって定義される内積に対して定義することを考える。いま、相互に結合された3個のユニット  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$  を対象として、その空間配置を  $ri-1$ ,  $ri$ ,  $ri+1$  とすると内積  $I_i$  は(27)式となり、結合角  $\theta$  は(28)式となる。

$$I_i = (r_{i-1} - r_i) \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad \text{---(27)}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{I_i}{|I_i|} \right) \quad \text{---(28)}$$

さらに、結合角とユニット間距離の変化率の関係  $V(\theta)$  を(29)式とすると、 $V(\theta)$  はユニット群を取り巻く環境の都市配置(構造)と都市を結んだ長さとの関係を表わす関数と考え

られる。ゆえに、 $V(\theta)$  の短くなる方向に結合角  $\theta$  を調整するという指針を与えることを意味する。そこで、 $V(\theta)$  を用いて結合角に対するポテンシャル関数  $\Theta(\theta)$  を(30)式とし、 $\Theta(\theta)$  を含めてユニットポテンシャル関数(13)式の  $hl(ri, t)$  を(31)式で再定義する。

$$\frac{dV(\theta)}{dt} = \frac{d(l_{i,i-1} + l_{i,i+1})}{dt} \quad \text{---(29)}$$

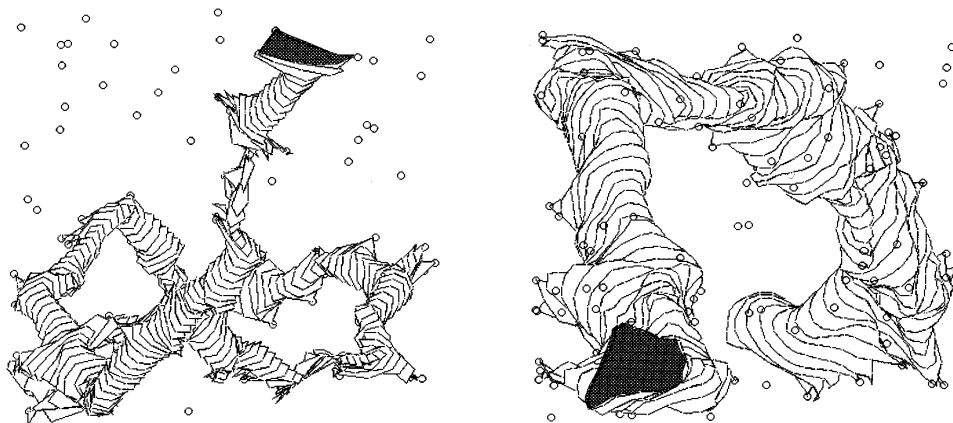
$$\Theta(\theta) = \frac{\partial V(\theta)}{\partial \theta} \quad \text{---(30)}$$

$$hl_{ij}(r, t) = I_{ij}(t)(r - r_i) + \Theta(\theta) \quad \text{---(31)}$$

さて、これら設定したポテンシャル関数とユニット群を用いてアメーバ運動のシミュレーションを実行ものとする。ところで、しきい値  $TH$  がユニットに対するエネルギーの流入の原点を定めるゆえに、ユニット群の解探索の様相は  $TH$  の正負によって大きく異なることがわかる。よって、ユニット群の運動の様相には大きく分けて次の2通りが存在する。

#### 4.2 $TH \leq 0$ の場合

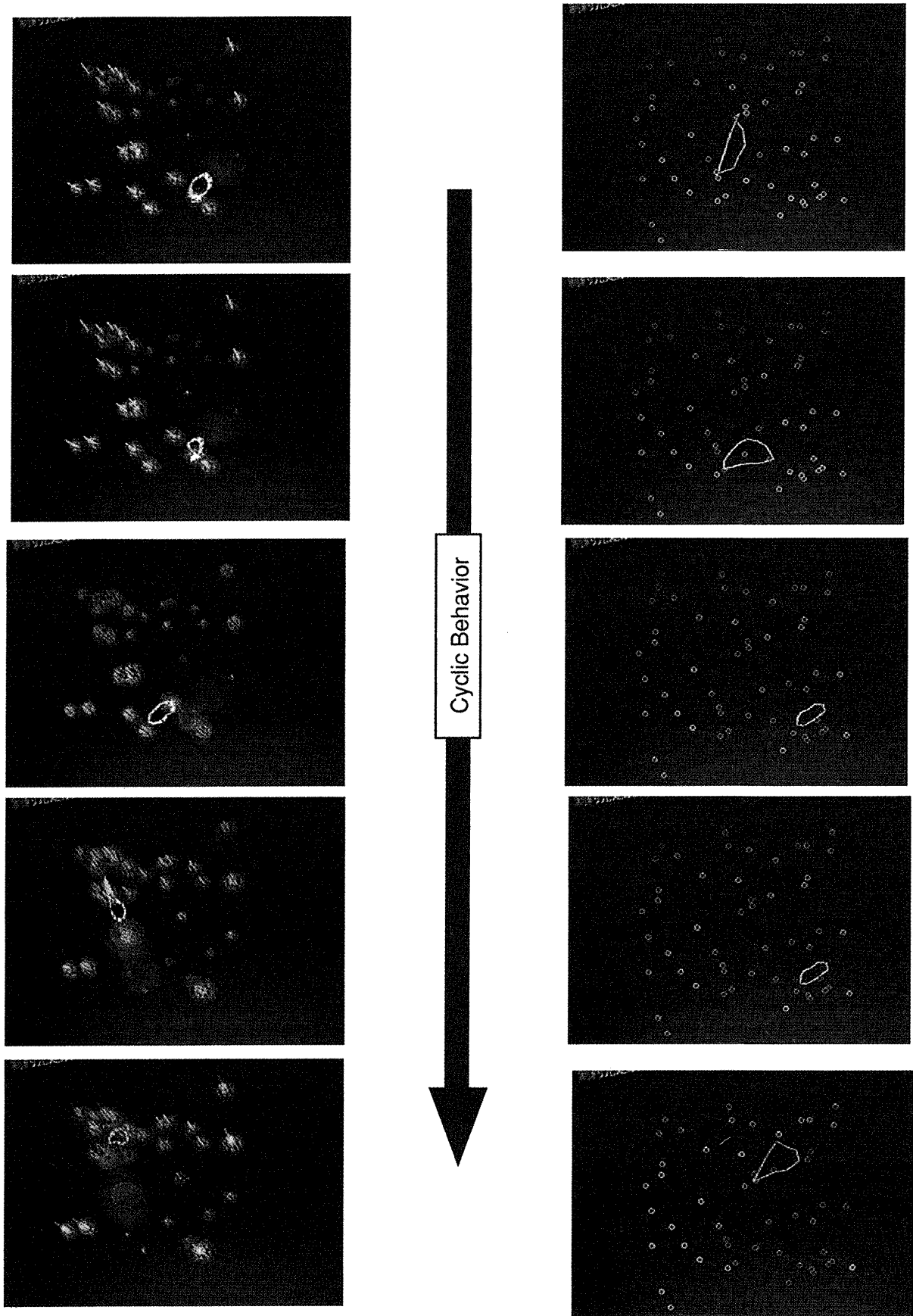
この場合には、ユニット群へのエネルギーの流入量があったところで正となり、常にユニット間の相互拘束力が強まった状態でエネルギー源を巡回するような探索行動をすることとなる。実験では100個のエネルギー源に対する探索様式を図11(a), (b)と図12に示す。



(a) ユニット群の軌跡  
ユニット数 8

(b) ユニット群の軌跡  
ユニット数 25

図11 ユニット群の都市探索行動(100都市)



(a) 波動場における情報伝播

(b) ユニット群によるエネルギー源への近接動作

図 12 アメーバモデルの探索的挙動

図 11 はユニット群の探索軌跡を表示しており, 図 12 はエネルギー源からの情報の伝播様式 (青) とユニット群の発生する熱量による環境の温度変化 (赤) で表示している. Figure 11 の実験(a)はユニット数を 8 個とし, 実験(b)は 25 個のユニットを用いた. (a), (b)に示されるユニット群の軌跡から, ユニット数が多いほど大域的な情報にしたがって巡回することがわかる. また, 図 12 の結果より, 環境の温度の高いところを避けながら, エネルギー源に接近する様子がわかる. このような特性はユニット群が局所最小に囚われることなく全空間を探索できる能力を有することを示している. すなわち, この場合ユニット数を制御変数として空間探索を実行すれば大域的な探索と局所的な最適化の両者を同時に合わせ持つ空間探索法を実現することができる.

しかしながら, このような方法を経路探索問題などに適用する場合には問題固有の制約条件 (一巡閉路) を保証するための問題を残している.

### 4.3 TH > 0 の場合

この場合には, エネルギーの流入量は都市の周囲で正となる以外は負またはゼロゆえ

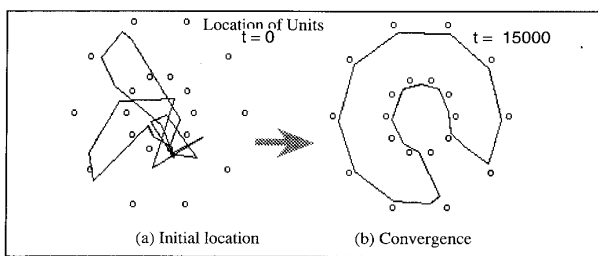


図 13 20 都市問題とユニット位置

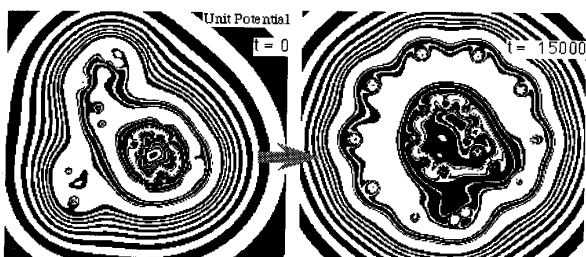


図 14 ユニット群の形成する振動ポテンシャル関数

に, ユニットがエネルギー源に十分接近したときのみユニット間の相互拘束力が強まる. さらに都市数とユニット数を一致させて各ユニットに都市へ収束させることによって探索空間上のすべてのエネルギー源にユニットを到達させることが可能となる. 実験では円形都市配置を探索した事例について, その探索様式図 13, 14, 15, 16 と結合角と経路長の変化率の関係  $V(\theta)$  図 17 を以下に示す.

## 5. 巡回セールスマン問題へのアプローチ

ここで提案したアメーバモデルは大域的情

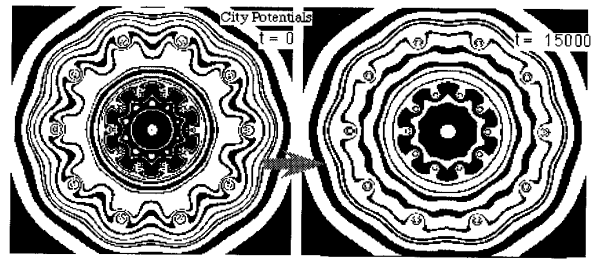


図 15 都市群の形成する振動ポテンシャル関数

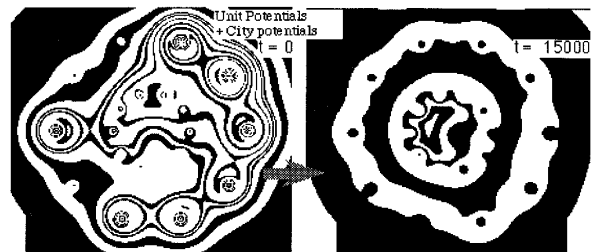


図 16 ユニットから観測される振動ポテンシャル関数

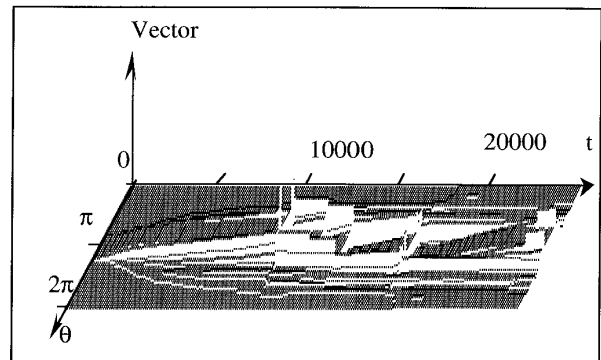


図 17 20 都市問題に対する適応的挙動

報と局所的情報を同時に処理する能力を持つゆえに、工学的問題解決器として十分な応用可能性を持つことが予想される。そこで、本モデルの工学応用の一例として TSP に対する解探索能力を明らかにする。またアメーバモデルを利用した問題解決手法を VPM (Vibrating Potential Method) と呼ぶ。本モデルの解探索特性を示すために TSP の都市配置条件としてランダム都市配置、幾何学的都市配置に対する探索結果を計算機実験により示す。特に探索法としては(22)式で  $TH > 0$  の場合 ( $TH = \text{Max}(NUTi) * 0.5$ ) を用いるものとする。NUTi は(20)式におけるポテンシャル関数の振幅である。ランダム都市配置は 5.1 節において 40 都市と 200 都市を例にとって探索能力を示す。また、5.2 節において幾何学的都市配置として円環状都市配置を例にとり、都市数と直径比を変化させて実験を行う。さらに、5.3 節では幾何学的都市配置でも都市分布がより均一に近い例、すなわち、局所解が多くそれら局所解の評価値が類似しているような場合について示す。

5.1 ランダム都市配置

ランダム都市配置に対する探索結果を示す。図 18 は 40 個のランダム都市配置を示しており、隣にその座標値を並記する。この都市配置に対して VPM により探索し、その結果、図 19 に示す解を得た。ユニット群の初期配置もランダムとして与えた。ランダム都市

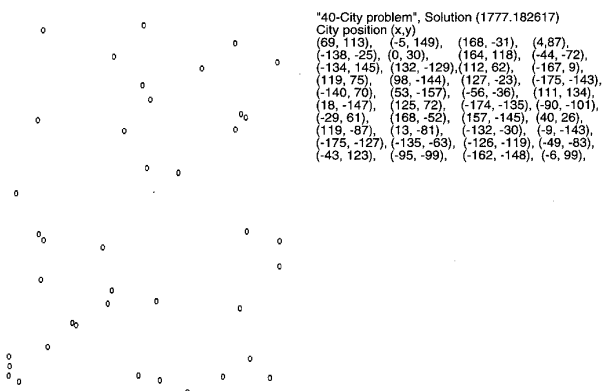


図 18 ランダム都市配置

配置については厳密解を求めることが困難であるゆえ、解の評価は VPM で得られた最適解からの比率で表わすものとする。(a)は最初に収束した解であり、収束に要した時間は 11 分であるが 18%程度の誤差を含んでいる。(b)は再探索後に収束した解であり、5%の誤差と 15 分を要している。以降、随時再探索と収束を繰り返しながら(d)まで誤差 3%, 所要時間は 30 分程度で到達した。しかしながら、(f)までは 12 時間以上を要しており、これは安定解が構造的に大きな変更を要したことが原因と考えられる。

次に 200 都市問題への適用事例を示す。問題は前問題と同様にランダム都市配置とする。図 20 は VPM による解探索の様子を示している。図 20 (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、(17)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。図 21 に探索の結果得られた解を示す。

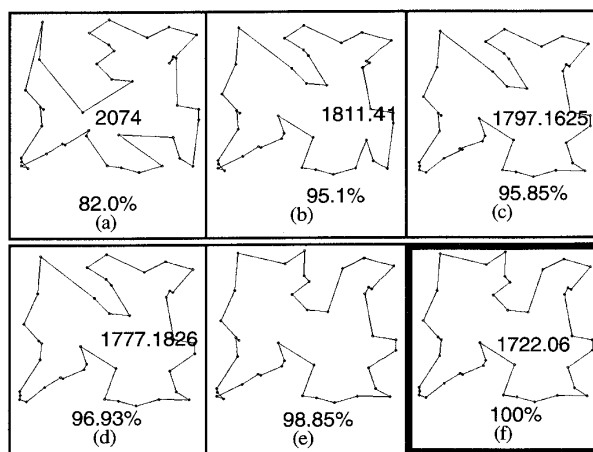


図 19 VPM によって探索された解

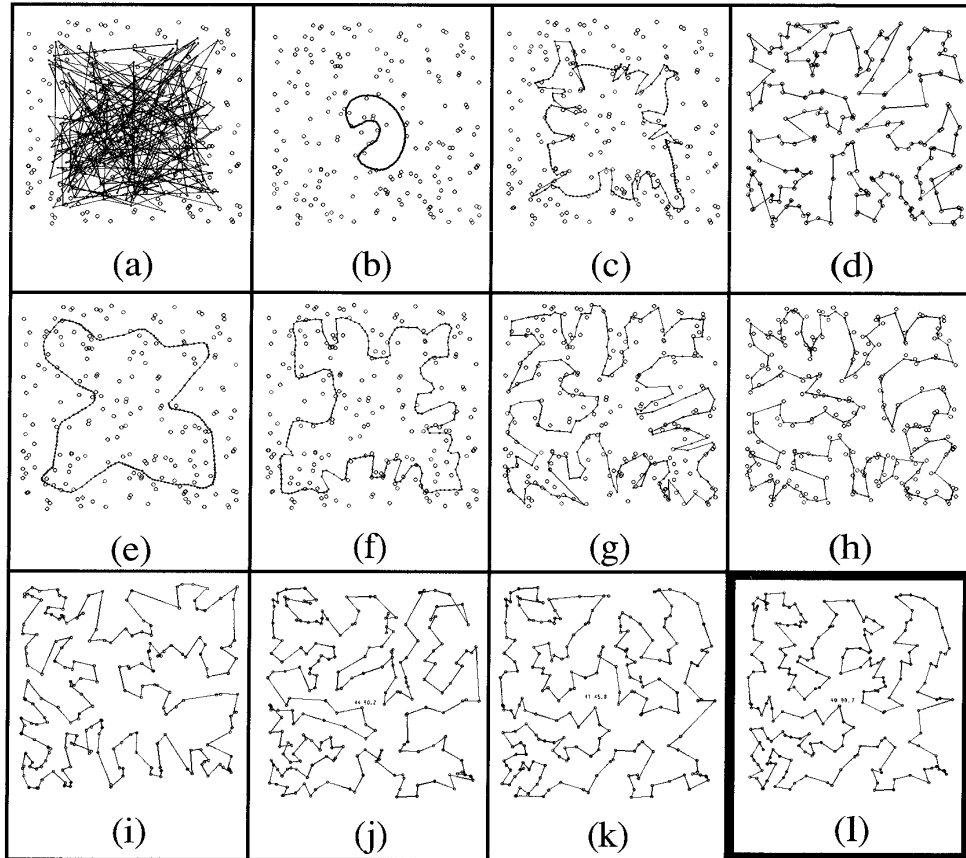


図 20 探索過程

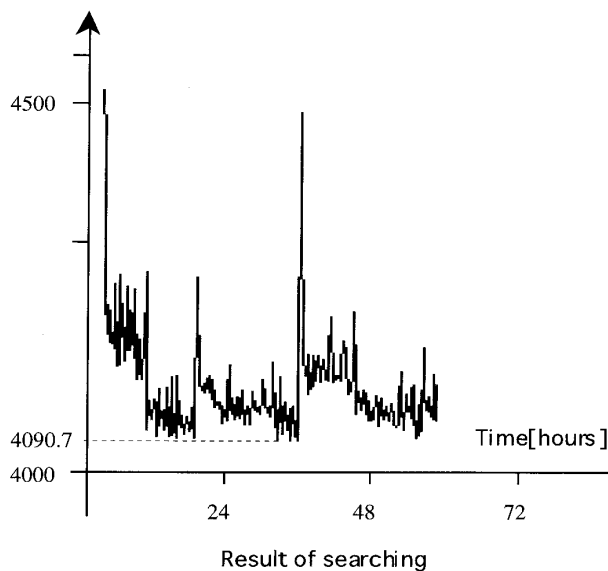


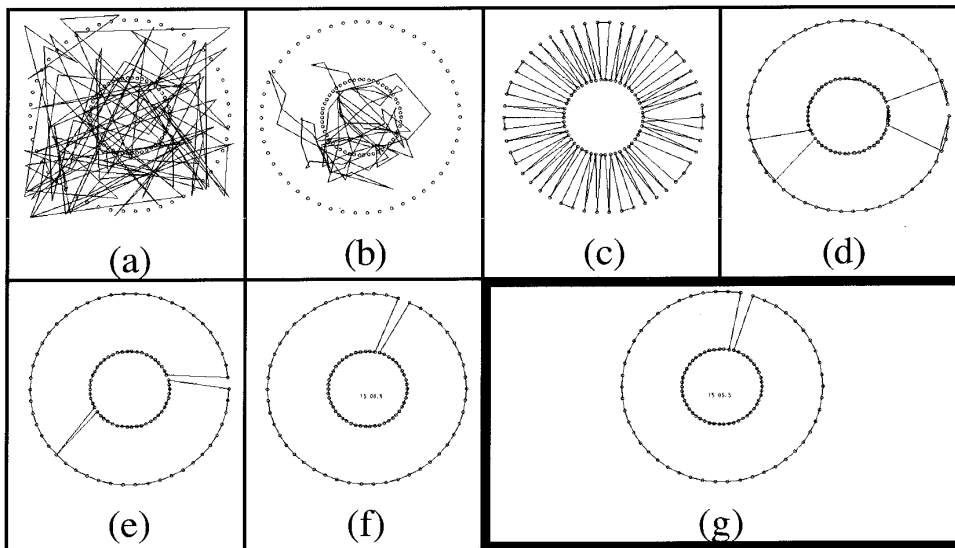
図 21 VPM によって探索された解

### 5.2 円環状都市配置

次に VPM を用いた円環状都市配置に対する探索結果を示す。問題は都市数 100, 円環の直径比 0.43 とした (図 22)。(a)は最初に収束

した解であり、対称型に近い構造をとっている。VPM は探索に用いるすべてのユニットが均一な特性を有することより、対称構造が安定的であることは容易に予測されたが、この結果は実際に VPM が対称的な構造に収束しやすいことを示している。しかしながら、その後はシステムパラメータの適応にともなって非対称な構造にも収束することを示している。

図 23 は直径比 0.43 の円環状配置について都市数の変化に対する VPM のロバスト性を示した実験結果である。ここでは都市数を 30 都市から順次減らしてゆくものとした。この種の問題の難しさはある都市数を境にして厳密解を与える順路構造が質的な変化 (C 型から歯車型) をすることであり、安定構造が固定的に定まっている方法では最適解の誤差比率を数%まで低減させることは可能でも、厳



City Number = 100

Boss Ratio = 0.43

図 22 二重円環状都市配置

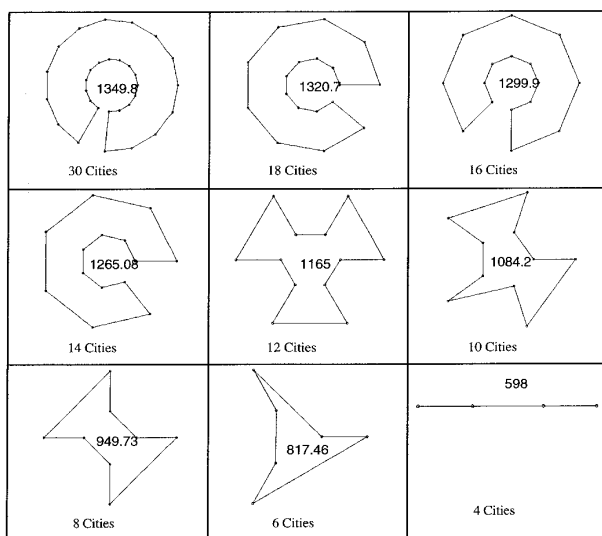


図 23 二重円環状都市配置 (Boss Ratio=0.43)

密解まで到達することは困難である。都市数が偶数となっている理由は、厳密解が計算可能な状態で円環状都市配置を自動生成するアルゴリズムの制約によるものである。探索結果はすべて厳密解と一致した。

次は、都市数を固定して直径比を変化させた場合の実験結果を示す。問題としては設定都市数を 60 都市として臨界直径比をより 1 に近づける。すなわち円環の厚みを薄くして歯車型解とC型解の巡回距離の差を小さくすることにより、より困難な問題を対象とした。

図 24 は直径比 0.73 の配置に対するユニッ

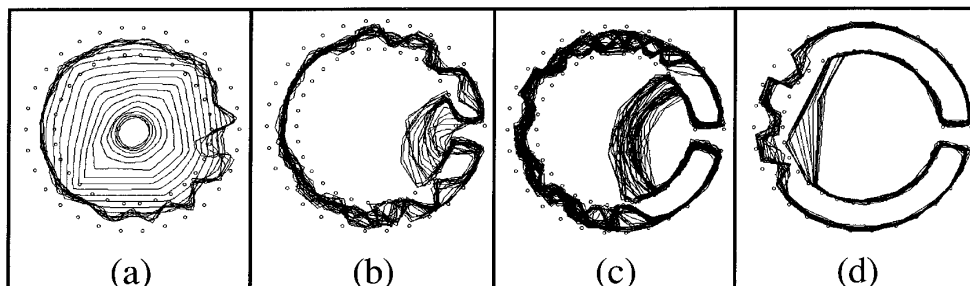


図 24 二重円環状都市配置に対するユニット群の探索軌跡 (City number=60, Boss Ratio=0.73)

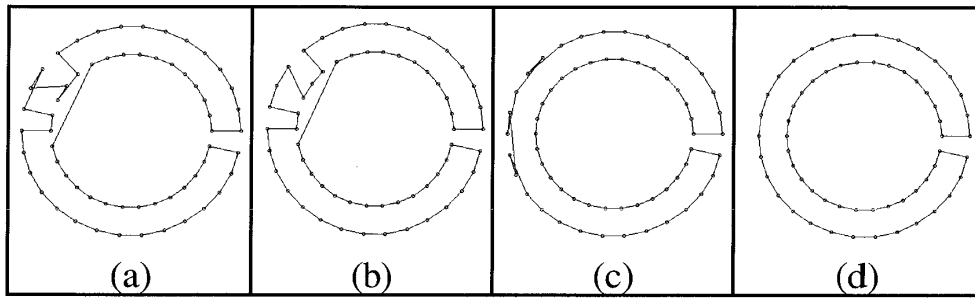


図 25 二重円環状都市配置に対してVPMによって探索された解 (City number=60, Boss Ratio=0.73)

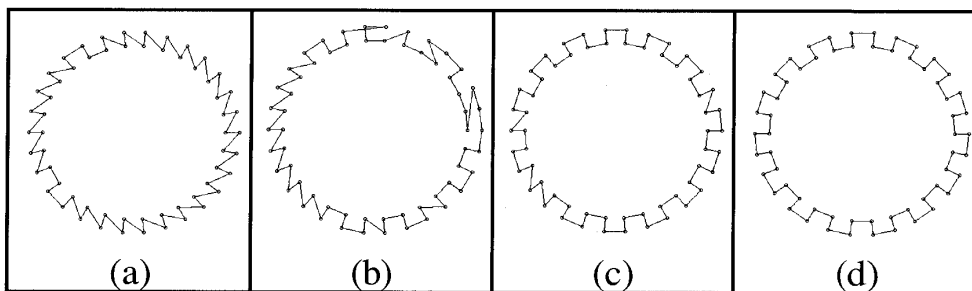


図 26 二重円環状都市配置に対してVPMによって探索された解 (City number=60, Boss Ratio=0.86)

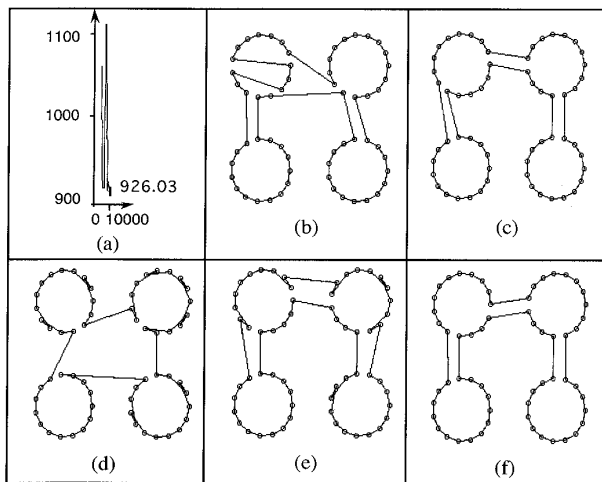


図 27 四円格子状都市配置

ト群の収束過程を示したものである。図より収束の初期段階(a)では同心円状に収束を開始し、周囲が波立つことによって歯車型への収束を開始する。しかしながら、巡回距離の増加に伴い局所的な不安定を生じ、C型の解への収束を試行することがわかる。(b)から(d)まではC型解への収束の過程を示す。このよう

な過程で得た解を図 25, 26 に示す。(d)は厳密解と一致する。

### 5.3 その他の都市配置

設定したポテンシャル関数を用いて二重都市配置よりも難易度の高い問題に対して解探索を試みた。実験において、設定した都市は40個、2次元平面上に円状に配置された10都市のセットを均等に4セット配置するものとする。

図 27(a)はユニット群の発見した解の変化をグラフに表示したものであり、図 27(b)は、最初に見つけた解を示しており、丸印は都市の配置、線分はユニット群の結合状態をそれぞれ表わしている。(c)以降はその後の探索によって発見された解であるが、局所解(b)に到達し安定状態を得た後、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、(26)式が正值で増加傾向をとる。すなわち、ユニッ



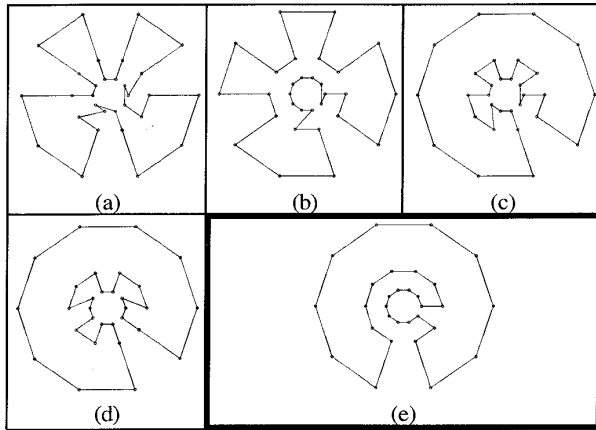


図 28 三重円環状都市配置  
(City number=30, Boss Ratio=1.0 : 0.4 : 0.2)

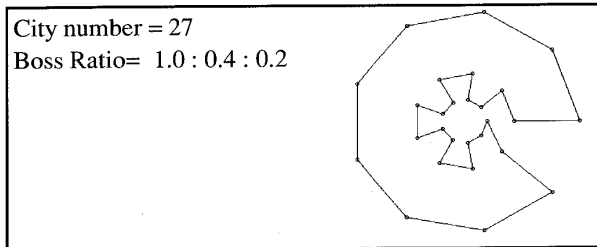


図 29 三重円環状都市配置

ト間の吸着力が増加することによって、再度探索的挙動を示した結果、(c)、(d)、(e)に示す解を発見することに成功している。

さらに、図 28 は三重都市配置 (30 都市、最外郭半径を 1 としてそれぞれ 0.4, 0.2) に対して探索を行った結果であり、図 29 は都市数を 27 都市として外郭が C 型、内郭が歯車型となるような都市配置に対する探索結果である。

さらに図 30 は四重都市配置 (40 都市、最外郭半径を 1 としてそれぞれ 0.4, 0.2, 0.065) の場合であり、図 31 は Boss Ratio を変更して外郭が C 型、内郭が歯車型となるような都市配置に対する探索結果である。いずれの場合も初期の解は歯車形状に近いものが多く見られるが、適応が進むに連れて最適解に徐々に到達するようになっていくことがわかる。本実験により、部分的に C 型、歯車型の構造を同時に包含するような解に対しても精度良

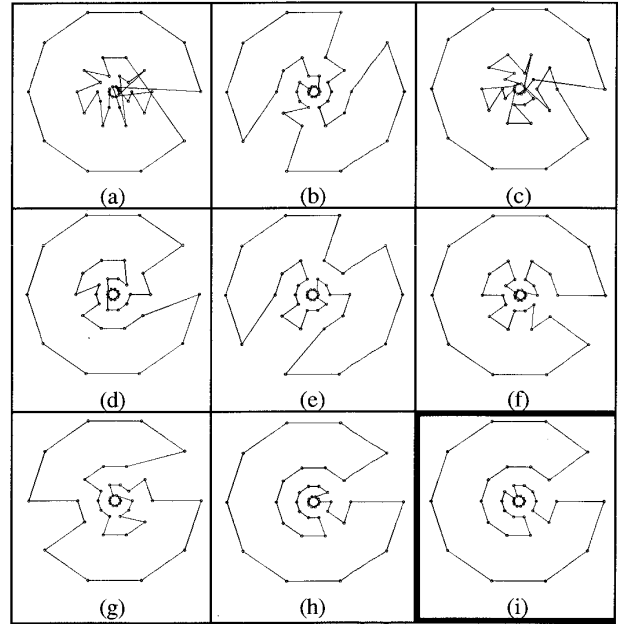


図 30 四重円環状都市配置  
(City number=40, Boss Ratio=1.0 : 0.4 : 0.2 : 0.065)

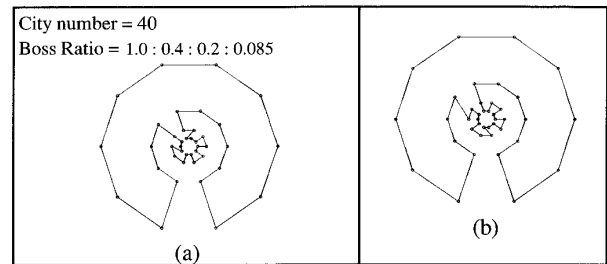


図 31 四重円環状都市配置

く収束することが証明された。

以上 5.1, 5.2, 5.3 節の実験により、VPM による解探索は都市配置の乱雑さ、都市分布の均一さ、対称性の有無にかかわらず、十分な探索能力を有することが示された。

## 6. まとめ

アメーバモデル構築を目的として、多重ポテンシャル場 (波動場) を提案しモデル構築を行い、モデルの探索行動をシミュレーション実験により示した。モデルはアメーバの柔軟な触手の伸展と効率的なエネルギーの獲得行動を基本行動とするものであり、環境からの呼びかけに応じるだけでなく自ら環境を変

更なる探索行動, すなわち自律性と他律性を兼ね備えた探索行動を実現することが示された。同時に, 局所的探索と大域的情報の処理を可能とした空間探索法としての特性を持つことも明らかにされた。また, 大域的探索と局所的探索の利点を包含するような解探索システムとして, 組み合わせ最適化問題の一つである巡回セールスマン問題 (TSP) に対して応用され, その解探索法としての有用性についても示されている。特に, TSP への応用結果からアメーバモデルを応用した解探索システムは, 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繰り返しながら解探索を実行する性質が明らかにされ, 再探索により解が改善される様相が実験的に確かめられている。提案したシステムは問題を局所的にも, または大域的にも観測することが可能となるように情報をセットし, 解の評価値と解を構成する局在構造との関係から局所的, 大域的どちらの情報に基づいて解探索を行うべきかをユニットが自律的に選択評価しながら探索をおこなうような解法であることが確かめられた。さらに, 都市配置の乱雑さ, 都市分布の均一さ, 対称性の有無にかかわらず, 十分な探索能力を有することが示された。

しかしながら, モデル構成の性質上, 計算時間が非常に大きくなることや, 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が依存するゆえ, 必ずしも解が改善されるわけではないなどの問題点も明らかとなった。よって解探索法として利用するためには, 計算の高速化と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となる。また, 本報告では提案されたモデルの工学的適用可能性について示しただけにとどまったが, モデルの生物学的な正当性に関する検討が今後の課題となる。

#### 参考文献

- (1) Hiroshi Yokoi and Yukinori Kakazu: An

Approach to the Traveling Salesman Problem by a Bionic Model, HEURISTICS, The Journal of Knowledge Engineering, pp.13-27 (1992).

- (2) Alexander L. Fetter and John Dirk Walecka: Quantum Theory of Many-Particle System, McGraw-Hill, Inc. (1971).

- (3) 神田慶也: 負のエントロピーの世界, p.190, 九州大学出版 (1993).

- (4) 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, (1992).

- (5) 小林康弘: 事例ベース推論, 人工知能学会誌, 人工知能学会, Vol.8, No.1, pp.26-36 (1992).

- (6) 湯上伸弘: 仮説推論, 人工知能学会誌, 人工知能学会, Vol.8, No.4, pp.399-403 (1993).

- (7) 喜多一: Hopfield型ニューラルネットワークとシミュレーテッドアニーリング, 人工知能学会誌, 人工知能学会, Vol.7, No.6, pp.970-979 (1992).

- (8) 三浦辰男, 松本和夫, 丹羽雅司: 作業順序づけ問題へのニューロの適用—複数セールスマンによる都市巡回問題への高速近似解法—, 生産スケジューリングシンポジウム講演論文集, 機械学会, No.930-80, pp.164-169(1993).

- (9) 波田野寿昭: 遺伝的アルゴリズム, 人工知能学会誌, 人工知能学会, Vol.8, No.3, pp.312-319 (1993).

- (10) Richard Durbin and David Willshaw: An analogue approach to the traveling salesman problem using an elastic net method, Nature Vol.326 16, pp.689-691 (1987).

- (11) D.J. Burr: Learning Spatial Transformations by Elastic Mapping, Neural Networks for Computing, Snowbird Utah, (1988).

- (12) J.J. Hopfield and D.W. Tank: Neural computation of decisions in optimization problems, Biological Cybernetics No.52, pp.141-152 (1985).

- (13) Bernard Angeniol, Gael de La Croix

Vaubois and Jean-Yves Le Texier, Self-Organizing Feature Maps and the Travelling Salesman Problem, Pergamon Press, Neural Networks, Vol.1, pp.289-293 (1988).

- (14) Martin W.Simmen: Parameter Sensitivity of the Elastic Net Approach to the Traveling Salesman Problem, Massachusetts Institute of Technology, Neural computation 3, pp.363-374 (1991).