

先史人類学への数理モデルによるアプローチ  
The possibility of theoretical and computational model utilization  
for prehistoric anthropology

鎌倉 快之

Yoshiyuki Kamakura

大阪工業大学 工学部, 大阪市旭区大宮 5 丁目 16-1

Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology, 5-16-1 Omiya, Asahi-ku, Osaka

あらまし: 人類の文化や社会は複雑系のひとつとされており, 予測不可能でダイナミックな振る舞いをとる。これら文化や社会の時間的・空間的な変化を, 遺物の形状の再現や復元, 遺跡や周辺景観の復元といった静的な情報の積み重ねから読み取ることは困難である。生物現象も複雑系のひとつとされており, 静的な情報の積み重ねによる現象の解明の他に, 現象全体をひとつの系と捉え, その系をあらわす理論モデル(幾つかの基礎的な理論とその相互作用を定義したモデル)を用いたシミュレートから現象を解明する試みがある。本稿では, 文化や社会をひとつの系と捉え, 実際の遺跡情報と, 人口の増加と移動に関する数理モデルを相互作用させるモデルを構築し, シミュレートを行った結果について述べる。この結果から, 文化や社会を復元し, その動態を捉えることの可能性について検討したいと考えている。

**Summary:** Human culture and society regarded as one of the complex systems show chaotic and. It's difficult to see spatiotemporal in its behavior from information obtained from the static data. The life phenomena are also regarded as one of the complex systems. There is an attempt to see the phenomena as one system elucidate phenomena from the simulation using theoretical and computational models which is constructed using some primary theories and their interaction. In this study, we simulated the interaction between actual information from the remains and theoretical and computational models of growth and migration of population. From the results, we want to discuss the possibility to consider dynamic behavior in Human culture and society.

**キーワード:** 理論的モデル, コンピュータシミュレーション, エージェントモデル, 相互作用, 社会環境復元

**Keywords:** theoretical model, computer simulation, agent model, interaction, restoration of social environment

## 1. はじめに

人類の文化や社会は, 特定の理論・法則で一意に決定されるのではなく, 文化や社会を形成するヒトや環境といった因子の相互作用と, 時空間的な蓄積・連鎖作用によって予測不可能でダイナミックな振る舞いをとる(複雑系)という考え方が一般的になりつつある。これら文化や社会の時間的・空間的な変化は, 遺物の形状の再現や復元, 遺跡や周辺景観の復元といった静的な視覚情報の積み重ねから読み取ることは困難である。

生物科学分野では, 複雑性や多様性を持つ生物現象を, 現象を形成する個々の因子を詳細に調べ上げ, 枚挙しようとする手法のほか, 現象全体をひとつの系として大局的に捉えてモデル化し, モデルの振る舞いから現象の意味を解釈し, 理解しようとする試みが存する。

本稿では, 本研究では, 実際の遺跡情報を GIS に格納して“人類史の舞台”を復元し, これに基づいて社会の相互作用と遺跡や文化の動態がどのような実体であったかを, 数理モデルの構築と利用を通して検

討した結果について報告する。数理モデルの構築に際しては、生物の形態や紋様にみられる多様なパターンの生成過程のモデルを用いた解明の試みにも利用されている反応拡散モデルを基とし、生態学的な簡単な特性を持ったヒト(エージェント)と、実際の GIS データを基に構築した疑似的な環境(静的な情報)との相互作用モデル(エージェントモデル)を構築した。このモデルを利用したシミュレート結果から、文化や社会を復元し、その動態を捉えることの可能性について検討したいと考えている。

## 2. 生物現象のモデル化と Turing パターン

### 2.1 生物現象のモデル化

生物の最も基本的性質としての固有性と多様性がみられる。その固有性と多様性を解明するための試みとして、対象となる個々の生物現象を単純な共通のルールによって捉え、その細部にはとらわれず、現象全体をひとつの系と扱うことで、その意味を解釈し、理解するという手法が考えられる。この手法は、多様な現象から、ある特定の条件(視点)の下での骨組みだけを取り出すものであり、多様な現象のある特定の条件の下で単純化して捉えることは、現象をモデルとして把握し、表現することと同義的である。そして、そのモデルから読み取ることのできる、多様性の中に存在する規則性や法則が示すものは、多様性の中に潜在する普遍的なものであると考えられる。多様性の中にみられる共通した普遍的な情報は、すなわち、その生物現象の持つ多様性を生み出す基礎となるものであり、その現象の持つ意味を読み取り、理解する要因となるものである。

### 2.1 Thompson の理論的モデル化手法

モデルの構築と利用によって生物現象の解明の糸口としようという試みは、D'Arcy Thompson によって広く一般化された[1]。Thompson は、生物の形態について注目し、それを物理化学的要因と生物の機能的要

因から理論的に捉え、形態の多様性と複雑性に共通する普遍的な性質を読み取ることを試みた。

生物の持つ形態は、外形と生物の体を構成する各要素の形や位置、各要素間の相互関係の総和として構造的に形成されている。形態は、それ自身が持つ役割のひとつである機能と相互に関係しており、その形態と機能の相互作用によって生物的性質が既定されていると考えられる[2]。Thompson の理論的モデル化手法は、生物の形態を、既知の物理化学的な法則を組み合わせた簡単なルール(条件)によって捉えることで、その機能を検討し、性質の予測を試みるものである。この手法は、生物の形態を解析するだけでなく、発生仕組みの解明や系統進化の解析など、様々な現象の解明にも有効であると考えられ、その後の様々な研究に応用されてきた。

### 2.2 Turing モデルとパターン形成

生命現象の中でも、発生や成長に伴う形態形成では、遺伝情報の時間的発現に対応した細胞間コミュニケーションによる自己組織化(自律的な形成)によって種々のパターンが形成されており、そこには散逸的な構造と繰り返し構造が認められる。一方、生命現象には、心拍や呼吸、生物時計に代表される種々の規則的な時間的リズム(パターン)の存在も知られている。これら生命現象の中に存在するパターンの形成は、前者は空間的パターン形成、後者は時間的パターン形成と呼ばれている。この繰り返しパターンの形成には空間的、時間的な振動(波)の仕組みが必要なことが知られている[3]。

Aran Turing は、この生命現象にみられる空間的パターンは、生体内での化学反応と反応によって生成された物質の拡散によって説明しようと考え、空間的パターンに類似するパターンを形成する理論的モデルの構築と利用を通しての解明を試みた[4]。Turing は形態形成についての理論的考察を発表したが、あまり関心を示されることはなかった。その後、Turing の理論は計算機科学の発展と共に再考されるようになり、2次

元の非平衡反応として代表的な、時間的に変化する、動的な空間パターンを形成する化学反応にみられる移動する波(BZ波)の発見以来、その先見性が再評価されることとなった。現在、Turingの理論とそのモデルは、複雑性を持った生命現象の中に見られる繰り返し(パターン)構造の解明を試みる数多くの研究に利用されている。その最も代表的なものとして、以降にも述べるKondoらによる熱帯魚の縞模様シミュレートが挙げられる[5]。

Turingは、細胞内に存在するとされるモルフォゲンと呼ばれる化学物質が拡散しながら相互に反応(相互作用)するというモデルを用いて生物の発生、形態形成を表現した。Turingのモデルでは活性化に働く因子であるモルフォゲン(X)と阻害的に働く因子であるモルフォゲン(Y)が仮定されている。このとき、化学反応によるモルフォゲンXの生成と、モルフォゲンYによるXの生成の阻害による相互作用、モルフォゲンのXとYの拡散現象による移動が、因子の空間的な不均一を生じ、因子の非一様な分布を形成し、維持される。Turingは、この因子の濃度の不均一さ(非一様性)によって形成されるパターンが、生物の発生、形態形成にみられるパターン形成の要因であると結論付けた。この現象は拡散不安定化と呼ばれ、現象を数理モデルとして表現したときの因子の濃度変化を示す微分方程式を反応拡散方程式、それによって形成されるパターンをTuringパターンと呼ぶ。

Turingパターンの形成理論は、形体形成や紋様生成などをはじめとする生命現象にみられるパターンの形成機構の解明、また、非一様なパターンがみられる生物現象以外の種々の現象の解明など、様々な研究に広く用いられてきている。Turingのモデルをより一般化してあらわしたMurrayの式を式(1)に示す[6]。この微分方程式はTuringモデルをより明確に表現するものとして用いられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= f(x, y) + D_x \nabla^2 x \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= g(x, y) + D_y \nabla^2 y \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで、 $x, y$ は、モルフォゲンX, Yの濃度を、 $f(x, y)$ ,  $g(x, y)$ はX, Yの生成を、 $D_x, D_y$ はX, Yの拡散係数をあらわす。

Murrayは、Turingモデルにより示された「阻害物質の反応速度が活性化物質のそれより遅く、阻害物質の拡散が活性化物質のそれより速い条件において、定常的な空間パターン(非一様平衡)が現われる」という結果を用いて、モルフォゲンの拡散しうる領域の大きさと形状がパターンの形成に与える影響の違いについて検討した。また、Hans Meinhardtは、Turingモデルにおけるモルフォゲンに対して、活性(activator)と抑制(inhibitor)の2種類の因子を仮定し、これら2つの因子の合成、分解、拡散などを、一般的な生化学的特性を基礎として定義してTuringモデルに適用した、反応拡散モデルを提唱した。なお、活性因子と抑制因子の特性は以下のとおりである。

- ・活性因子は自己触媒的に増殖する
- ・活性因子は抑制因子を作り出す
- ・抑制因子は活性因子の増加を抑える
- ・抑制因子はそれ自身減衰する

反応拡散モデルでは、モデルを構成する方程式のパラメータの微小な差異や、局所的なルールの違いだけで、生成されるパターンがダイナミックに変化する。Meinhardtは、この特性を利用し、反応拡散モデルを巻殻表面にみられる紋様の持つパターン形成に適用することで、巻貝紋様が持つパターンの多様性が、共通した機構によって生成することが可能であることを示した[7]。Fig.1に拡散反応方程式によって形成されたパターン(右)と実際の巻貝紋様パターン(左)の比較結果を示す[8]。

### 3. エージェントモデル・シミュレーション

#### 3.1 エージェントモデル・シミュレーション

エージェントモデル・シミュレーションは、ある特定のルールに従って活動する「エージェント」を定義し、エージェントを人工的な「場」に多数配置した際に起こる相互作用について検討するシミュレート手法である。本稿では、Meinhardt の反応拡散モデルを基に、増・減少し、移動するエージェントを定義し、統計的手法を用いて復元した古環境(場)に配置するというモデルを構築し、利用した。

本モデルでは、エージェントと、エージェントが存在する「場」の環境利用度をそれぞれ定義し、以下のような特性を与えた。

- ・エージェントは自己触媒的に増加する(人口の増加)
- ・エージェントは「場」の環境利用度を低下させる(環境の悪化)
- ・「場」の環境利用度はエージェントの移動(流入)を阻害する
- ・「場」の環境利用度は能動的に変化しない

#### 3.2 エージェント

##### 3.2.1 エージェントの増加

エージェントは、生物の一般的な個体増加と同様に指数的に増加することとし、ヴェアフルストの人口モデル(マルサスの人口増加モデルに、人口の増加に伴って増加の抑制が生じるという制限を加えたモデル)を基に下記のように定義した。

$$\frac{dN}{dt} = a \left(1 - \frac{N}{N_{max}}\right) N \quad \dots(2)$$

- $N$  : 現在の人口
- $N_{max}$  : 人口の収束点  
(生死が一定になる点, 定数)
- $a$  : 人口増加の加速度

また、人口の増加に伴い、人口がある閾値(mv\_threshold)を超えた場合には、一定の割合(mv)で周辺地域へ移動すると仮定した。

$$\frac{dN_{mv}}{dt} = mv \times N(N > mv\_threshold) \quad \dots(3)$$

- $N_{mv}$  : 移動する人数
- $N$  : 現在の人口
- $mv$  : 移動係数
- $mv\_threshold$  : 移動閾値

さらに、エージェントは、ある確率で不確定要因により死滅すると仮定した。

#### 3.3 エージェントの活動の場

エージェントの活動する「場」については、DEMを基盤とした古環境属性値[9]を利用することとし、これを説明変数とした重回帰モデルから得られた点数(環境利用度)がエージェントの活動に影響すると仮定した。環境利用度が高い場合にはエージェントは活発に活動し、低い場合には活動が低下する。エージェントが活動する際の最小区画(セル)を50mメッシュで定義し、説明変数と遺跡(集落)の関係を相関係数として次式で求め、変数の有意性をt検定で評価するステップワイズ重回帰モデルとした。

$$r = \frac{\sum_x \sum_y \{(A(x,y) - \overline{A(x,y)}) \cdot (B(x,y) - \overline{B(x,y)})\}}{\sqrt{\sum_x \sum_y (A(x,y) - \overline{A(x,y)})^2} \times \sqrt{\sum_x \sum_y (B(x,y) - \overline{B(x,y)})^2}} \quad \dots(4)$$

エージェントの増加は各セルの中で式(2)に従って増加し、式(3)に従って隣接するセルへと移動することとした。その際、

- ・8近傍の隣接セルのうち、上記点数が最も高いセルへと移動する
- ・各セルの環境利用度は人口の増加に伴って低下する(エージェントの活動が低下する)

という条件を設定した。

#### 3.3 シミュレートのプロセス

本モデルによるシミュレートは、次の①～③を1回のStepとし、このStepを繰り返すことで離散的な時系列でのエージェントの振る舞いの推移を得るというプロセスを経た。プロセスの概略をFig.2に示す。

- ① 「場」に展開されたすべてのセルにおいて、各セルの人口を更新する
- ② 時間tにおける人口から各セルの環境利用度を更新する
- ③ 人口増加分、

### 4. シミュレート結果

本モデルを利用して、ヒト・環境の相互作用のある貝塚立地と分布を基礎データに、それらが時間どのような相互作用を伴って次の時間の位相となるかを、モデ

ル(パラメータ)の側面から検討することとした。貝塚の立地と分布は、縄文時代中期から後期にかけての千葉県(下総台地)の貝塚遺跡を対象とした。GISに格納した基礎情報は、樋泉らによって構築された遺跡空間データベースを利用した。シミュレーション結果の一例を Fig.3 に示す。

## 5. 考察

シミュレートの初期状態が同じであっても、本モデルで定義したパラメータ(人口増加の加速度、移動係数、移動閾値、死滅確率、人口が各セルの環境利用度に与える影響)の微小な変化で、エージェントの粗密の状態がダイナミックに変化した。エージェントが高密度となる地域は環境が良く、エージェントが集落を形成したと考えられ、環境が悪化すればより良い環境を求めて移動する。パラメータを変化させつつ、集落の形成と移動を繰り返す中で、実際の集落立地に類似した状態も得られたことから、人口増加と環境による移動(移住)の阻害に限定された仮想的な環境下での、人口の増加と移動、集落の形成の過程の解明に向けたエージェントモデルの利用の可能性が示唆された。ただし、本モデルの有効性や、本結果と離散時系列変化、各種パラメータの関係と、実際の集落立地、遺跡の規模や分布のデータとの比較検証などの詳細については今後の検討課題である。

なお、これら数理モデルの利用においては、パラメータの数値そのものに基本的には意味がない。パラメータそのものの意味や各パラメータ相互の関係、モデルの「振る舞い」と導き出された結果を實現象と比較し、一致する部分や異なる部分について考察を行う必要がある。

## 6. 展望

今回の結果は単純な反応モデル(人口増加)に、拡散モデル(環境による阻害)を設定しただけの単純なエージェントモデルであり、ヒト-ヒト、ヒト-社会の相互作用そのものの様態に関するパラメータの導入などの必要性が考えられる。今後は、より階層的な変数の設定、評価、検証により、古環境復原と人類社会・文化復原との関連と定量化を試みていく。

## 参考文献

- [1] Thompson, D'Arcy: On Growth and Form, Cambridge University Press (1917)
- [2] 養老孟司: 形を読む 生物の形態をめぐって, 倍風館 (1986)

- [3] 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋 (共著): セルオートマトン法 — 複雑系の自己組織化と超並列処理 —, 森北出版株式会社 (1998)
- [4] Turing, A.M.: The chemical basis of morphogenesis, Phil. Trans. Roy. Soc. (1952)
- [5] 近藤滋: 振動現象による空間的な周期性(繰り返し構造)の形成, 細胞工学, Vol.22, No.12, p1331-1335 (2003)
- [6] Murray, J.D., How the leopard gets its spots, Sci. Am., 258, p80-87 (1988)
- [7] Meinhardt, Hans, The Algorithmic Beauty Of Sea Shells Enlarged Edition, Springer (1995)
- [8] 鎌倉快之: 生物の形態と紋様のモデル化に関する研究 (2005)
- [9] 津村宏臣: 遺跡立地の定量的解析と遺跡存在予測モデル, 実践 考古学 GIS, NTT 出版 (2006)
- [10] 樋泉岳二・津村宏臣・西野雅人: 東京湾東岸と印旛沼周辺の縄文後期貝塚群の動物資源利用と遺跡立地の諸相, 日本第四紀学会講演要旨集, 32 (2002)

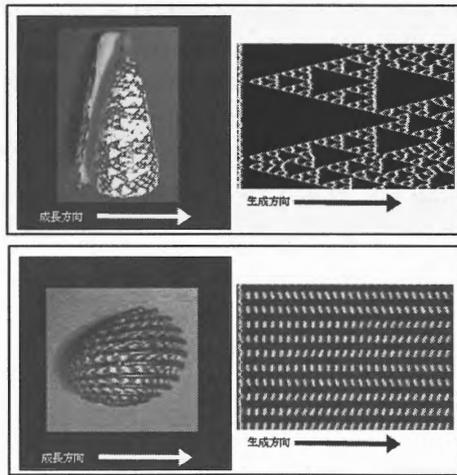


Fig.1 反応拡散モデルで形成されたパターン(右)と  
 実際の巻貝の貝殻に見られる類似紋様(左)

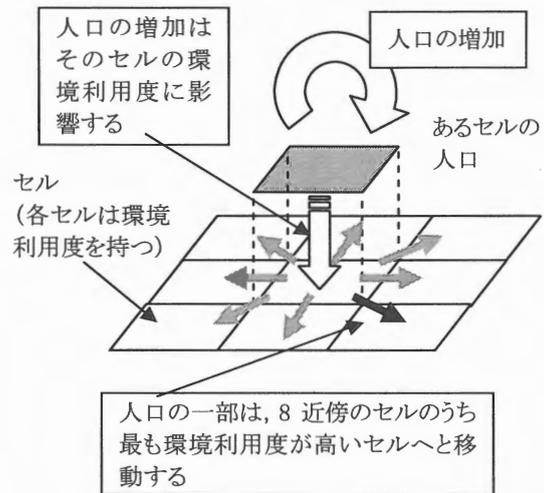


Fig.2 エージェントモデルの相互作用プロセスの概略

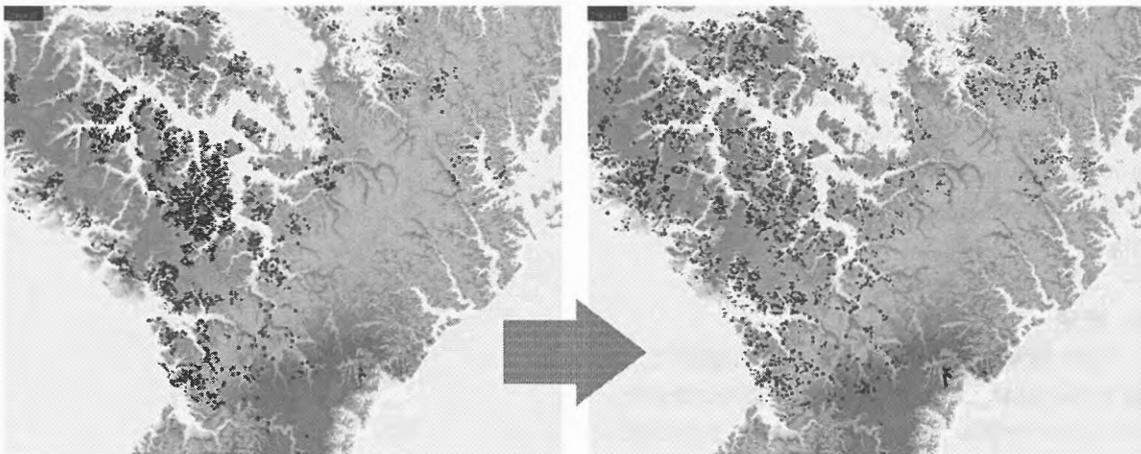


Fig.3 シミュレーションの結果  
 (エージェントの内陸部への拡散)