

# 人類集団の拡散に関する 数理モデル研究

瀬野裕美

## はじめに

ここでテーマにする数理モデルはデータに基づくものではなく、まずこれまで得られた事実を念頭において、その上で仮定をおいて構成されてゆくものである。モデルという実験の世界（思考実験）をつくり、そのモデルがどういうことを結果として導き出すのかという知識を得ることが目的となる。したがって、できるだけ現実のデータや知見に合うように様々な要因を次々と組み入れて構成される、所謂シミュレーションモデルとは性質を異にする。

数理モデルが考えるのは、現象を支配している要素の現象における役割、あるいは、効果のようなものを質的に考察しようとするものである。いきおい、モデルから結論される結果がデータや知見と合わない場合も多々ある。その場合でも、そのモデルは遺棄されるものではない。モデルから結論される結果がデータや知見と合わない、ということから、モデル構成における仮定（それは、既存のデータや知見に基づく）についての議論、あるいは、従来のデータや知見を見直すための議論のテーマを提出できるのである。また、様々なフィールドからのデータ・知見の間で「ずれ」が生ずることはおおいにありうるだろう。そのような場合に、その「ずれ」のある

者同士で互いに自分の方法はこうでこういう結果が出たと言っているだけではなく、このような仮定をおいて理論的に考えたらこのような結果になるという知見が一つでもあれば、（たとえ、それが、フィールドからのデータ・知見と「ずれ」を持つ結果であろうとも）その知見の存在によって、「ずれ」に関する議論が実りある議論として発展してゆく機会が与えられることもあろうし、そう期待できるのである。

ここでは、そのような数理モデルを、先史モンゴロイド集団の拡散という問題に対して適用しようとしたとき、どのようなことが導かれるのか、ということについて紹介する。

## 「拡散」

ものが広がっていくときにしばしば「拡散」という言い方をする。たとえば、コップの中の水に赤いインクをばたっと落とす。赤いインクは初めは固まりだけでも、しばらくするとだんだん広がって行って全体に広がる。そういう現象を、特に「物理拡散」という。

図1は、マスカラットと呼ばれる動物が20世紀に分布を広げていったときの観測データである。このような動物や植物の場合は、増殖の効果によって空間的に徐々に（連続的に）広がっていくという扱いができ、データさえあれば、その広がりスピードから、その動物がどのようなプロセスで広がるのかを議論することも可能になる。このように、ものの空間分布がある**連続的な**分布をとっており、時間とともに分布の前線の波がだんだん広がっていく形の拡散がある（本稿では、連続拡散と呼ぶ）。それでは先史モンゴロイド集団の場合にこの扱いが可能なのであろうか。つまり、このような考え方でモデルをつくり、そのモデルを考えることで先史モンゴロイド集団の拡散を考えることができるのであろうか。これには問題が幾つかある。

先史モンゴロイド集団の分布拡大は、動物のそれのように連続的に広がっていくものではないと思われる。先史人類は当然集落とか村といったコロニーをつくりながらだんだんと空間分布を広げていったと考えるほうが自然である。それでは連続拡散モデルは全く役に立たないかということ必ずしもそうではない。たとえば、いわゆる海峡とか大陸を渡るといったような局所的な分布拡大に着目する場合には、そのようにだんだん連続的に広がって行ってようやく到達した、という考え方が適用可能な場合がある。そのような連続拡散モデルを構成し、海峡を渡って

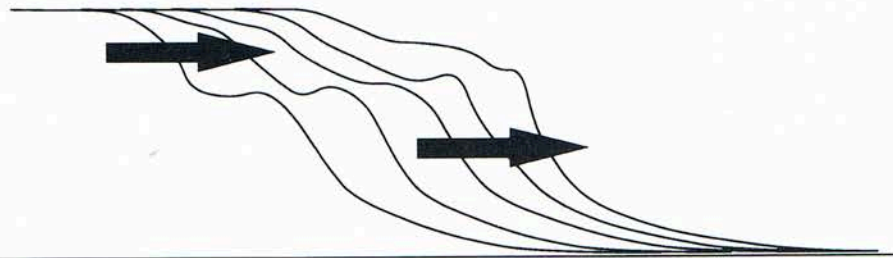
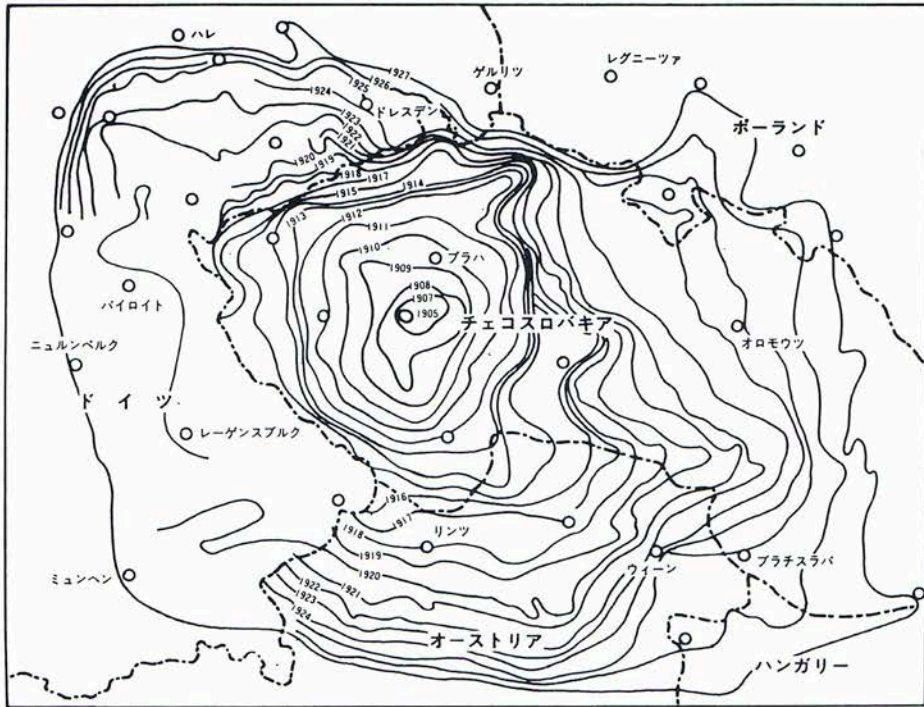


図1. マスクラット空間分布のヨーロッパにおける拡大 Skellam(1951)より。  
 下図は、連続拡散モデルによる進行波解の例。

先史人類が広がっていく場合に必要の条件に関する考察が、東京大学理学部人類学教室の青木健一(1991)によって行なわれている。

**連続拡散モデルによる渡峡条件考察**

青木健一(1991)が扱った数理モデルは次のようなものである。図2は、その概念を示す。左側の領域aが一方の陸地であり、右側のaがもう一方の陸地である。陸地は人類集団の生存にとって好適な環境を提供しているとする。それらの間の部分は、人類の移動は可能であるが、たとえば、陸地がつながっていたのではなく、氷河期に氷が張った海峡であり、人類の生存にとっては不適な環境を表すとする。こ

の状況下で、連続拡散モデルを解析すると、左側の大陸の人類集団の分布の波が海峡にまでだんだん広がるような状況が起こるための条件を考察することが可能である。この海峡の上では環境が悪いために死亡率が非常に高く、その分布の波が対岸に行き着けない場合も考えられるが、ある条件が整えばちゃんと右側の大陸に行き着くことができるのである。行き着いてしまえば、右側の大陸で分布を広げることができることになる。ただし、青木健一の連続拡散モデルでは、分布の波が対岸に行き着けない場合というのは具現できず、劣悪な環境による人口減少が集団全体の存続に対してどのように効くのか、という議論のみが可能であった(青木健一のモデルに



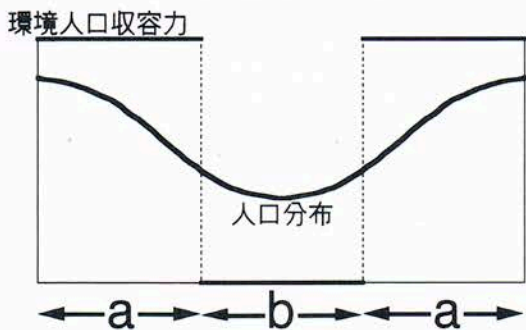


図2. 渡峡を考えるための数理モデルの仮定を表す概念図  
青木健一(1991)より。

おいては、空間分布は必ず至る所で正の値をとる)。しかし、その議論は、人類集団が劣悪な環境である海峡を通過して分布を広げてゆくための条件を考察するための有益な鍵を与えてくれる。彼は、人類集団の移動距離の標準偏差2~4 km/年、好適な環境における人口の内的自然増加率3~4%/年、氷結海峡上の人口減少率50%/年として、人類集団の存続が可能になるような氷結海峡の幅を評価している。その結果として、人類集団は、15~30km程度の氷結海峡なら数100年、数100kmの氷結海峡なら1000年以上で越えられるのではないか、という結論を出し、かなりの時間がかかることを示している。時間がか

かるということは海峡を渡るためのスピードが遅いということになり、人類はその間にこの上でちゃんと生活できるだけの能力をもってなくてはいけなかった。つまり、その上で子どもを産んだり育てたりしながら、渡る途中の人口を保持する能力がなければならなかっただろう、ということになる。

青木健一によるモデル解析は、既に上で述べたように、第1モデルとしての価値を持ち、上に述べたような論点を投げ掛けているのである。今度はこれをフィールドの研究者の知見と合わせて、はたしてそうなのだろうかという議論に向かうことになる。

### コロニーを作りながらの分布拡大

次に、人類集団がコロニー(集落)を作りながら分布を拡大していくという側面を強調して考えてみる。例えば、人類集団は、図3が示しているような人口密度の分布を持ってその分布を広げていっていると考えると、濃いところが集落を表しており、図に示したように集落から集落が分かれて新しい集落ができ、その集落からまた集落が分かれて新しい集落をつくるという形で広がっていった、という考え方でものをみていくのである。前節までは拡散というモデルは連続的にだんだん分布が広がっていくというモデルであったが、そのような連続拡散モデル

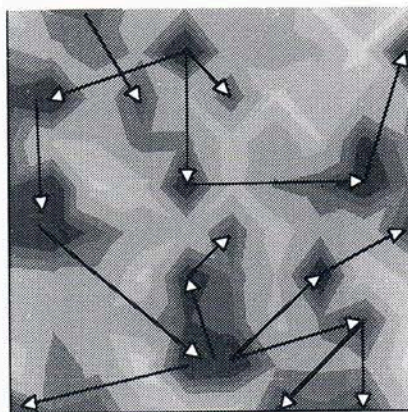
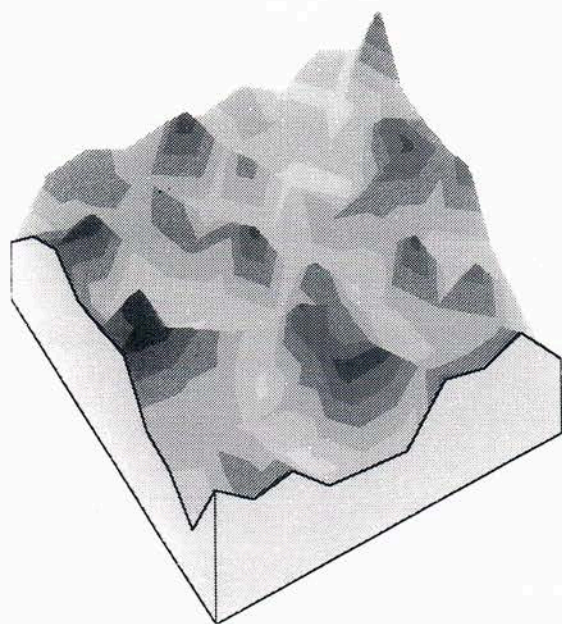


図3. 仮想的人口密度空間分布  
より濃度の濃い部分はより高い人口密度をもつ。右図の矢印は、人類集団による移住、コロニー形成の過程の順を示す。

の結果と比べて、このようにコロニー、コロニーでだんだん分布が広がっていくというモデルを構成し、考察した結果はどのように違うのであろうか。移住によってコロニーが生成され、新しい場所に新しい集落をつくるという形でだんだん分布を広げていくモデルを構成する。

#### コロニー集団の拡散に関する確率論的モデル

モデルの考え方は以下のようなものである(図4)。コロニー(集落)の人口は当然時間とともにだんだん大きくなっていく。ある時刻では図のようにコロニーが複数あり、その現存するコロニーの分布する広さが定義できる。現存するコロニーの中から新しいコロニーが1個生まれるときには、その出現は確率的であり、コロニー分布全体の総人口に比例する確率をもつ、という仮定をおく。すなわち、集団の総個体数が大きくなればなるほど、新しいコロニーの生成が頻繁になる。さらに、いったん生成されたコロニーが消滅してしまうことはないとする。一個の新しいコロニーが出現すると、コロニー全体がはる空間分布も広がる。その分布の広がるスピードが一体どのような条件で決まっているのか、ということはこのモデルで考察する。モデルは、次のような確率分布方程式系で記述される：

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P(k,t) = -\mu N(t)P(k,t) + \mu N(t)P(k-1,t) & (1 \leq k) \\ \frac{d}{dt}P(0,t) = -\mu N(t)P(1,t) \\ P(k,0) = \delta_{k,0} \end{cases}$$

$N(t)$ ：時刻 $t$ における集団の総個体数

$\mu N(t)dt$ ：時間 $(t, t+dt)$ において新しいコロニーが生成される確率

$P(k,t)$ ：時間 $(0,t)$ において生成されるコロニーの総数が $k$ である確率

$\delta_{k,0}$ は、クロネッカーのデルタであり、時刻0におけるコロニー生成の数は0であることを表している。ここでは、コロニーが生成されている空間の広がりに着目するために、その空間の広がり、すなわち居住域は、近似的に、集団におけるコロニーの総数に比例していると考えことにする。

このモデルを解析すると、総個体数が指数関数的に増加する場合には、コロニー数が増えてくるにしたがって、新しいコロニーの生成される時間間隔は、短くなってゆく。そして、居住域拡大の期待速度は、コロニーの総数が増加するにつれて指数関数的に大きくなる。一方、総個体数がロジスティック的に増加をする場合、居住域の期待拡大速度は、十分に時間が経つと、一定値に収束する。その場合、コロニーの分布が空間的に広がっていくスピードは、「移住の頻度(単位人口・単位時間当たり新しいコロニーがつくられる確率)」×「環境の人口収容力(環境で許される生存可能な人口の最大の大きさ；環境の好適性を表す)」という積が決めている。結果、コロニーの生成によって分布域を拡大してゆくような集団の拡散は、十分に大きな総個体数を有するようなコロニー集団については、その集団が居住する環境の人口収容力(←環境の好適性)とコロニーの生成率に依存する一定速度をもっているが、総個体数が

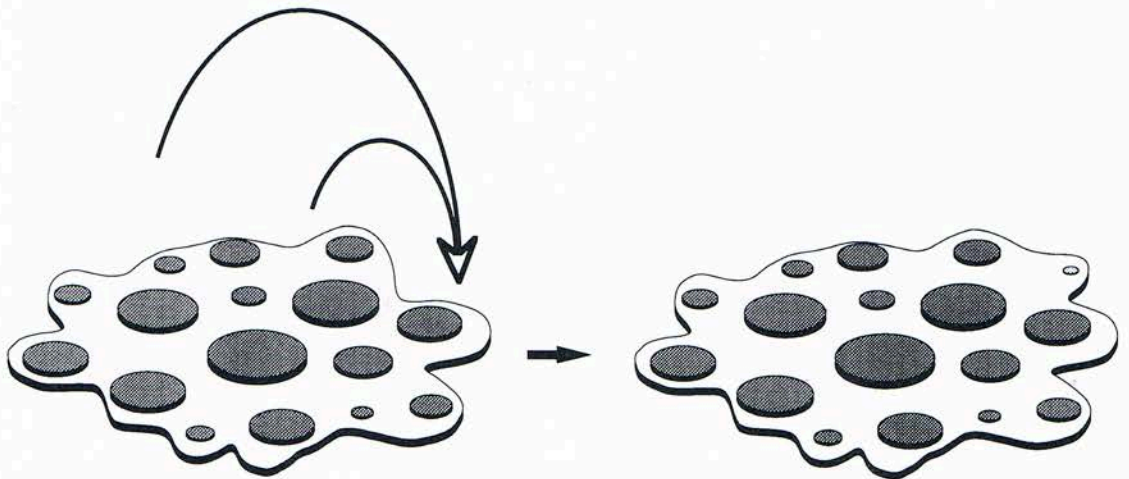


図4. コロニー集団の空間分布拡大に関する確率論的モデルの仮定を表す概念図

コロニー集団全体の総人口に比例した確率で新しいコロニー生成が起こり、コロニー空間分布が広がる。



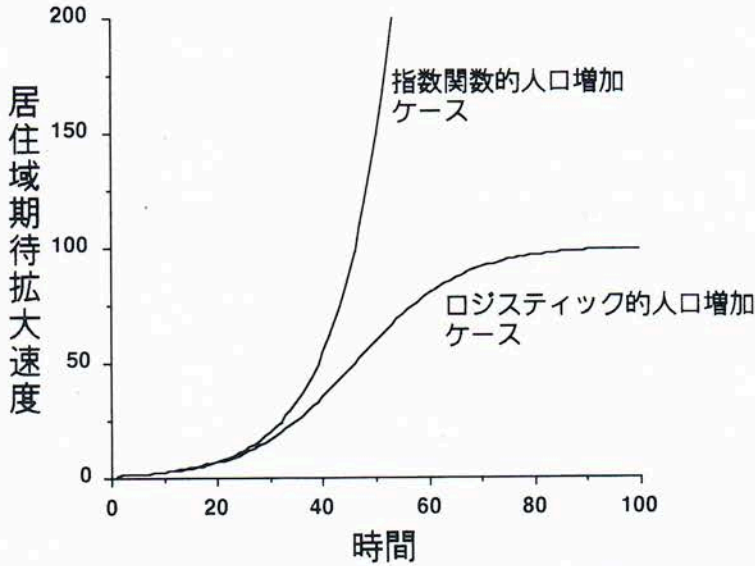


図5. 確率論的モデルから得られるコロニー集団居住域の期待拡大速度の時間変化。  
コロニー集団の総人口がロジスティック的な人口増加を辿る場合には、速度は一定値に近づく。

成長し始めているような段階にある集団についての拡散速度は指数関数的に増加している、ということが示唆された。

従来の連続拡散モデル（例えば、Martin (1973) による北米の人口の広がりモデル）においては、分布が連続的に広がっていくスピードは一定であり、拡散係数（集団の移動距離の分散に対応）と人口の内的自然増加率の積で決まる。二つのモデルにおける本質的な違いは、連続拡散モデルの場合には、環境の良さ・悪さが人口の自然増加率に反映され、コロニー分散モデルの場合では、増加率ではなく、環境が許す最大の人口に反映されて、分布拡大スピードの違いに現れる、ということである。データと合せてみる場合に、結果がどれくらい違ってくるのかというのは今後のテーマである。コロニー生成が分布域拡大において本質的な役割を持つ場合には、従来のそうした連続拡散モデルによる議論を見直す必要があると考えられる。先史モンゴロイドの拡散についても適用される可能性があるだろう。

#### 人類集団拡散についての数理モデルの課題

連続拡散モデルで広い範囲の先史人類の拡散・広がりを考える場合、次のような問題点がある：

- ・地形の影響の問題
- ・集落形成による分布拡大と連続拡散モデルの間の

#### ギャップの解析

コロニー分散モデルについては、コロニーの生成時期、コロニー間の関連性がわかればスピードが評価できる。スピードが評価できれば、コロニーが生成された時期の環境の良さ・悪さについて比較する議論が可能かもしれない。本稿で述べたコロニー分散モデルの仮定も、より現実的なものに変える必要があるだろう。例えば、新しいコロニーが生成する確率は集団全体の個体数に比例すると仮定しているが、コロニーの平均的な大きさに比例するような仮定に変えると、最終的な結果が変わってくる可能性がある。実際に、新しいコロニーはいずれかのコロニー1個だけから生成されるというように考えるほうが自然であろう。この場合、数学的にもかなり煩雑になり、今後の課題である。

人類集団の空間分布拡大に対して大きな寄与を持つと考えられる並行現象の一つとして文化の変遷・伝播がある。人類集団の空間分布拡大は、分布の持つ文化変遷、分布前線における文化衝突によって、そのスピードなどの特徴が影響を受けるという特殊性があると考えられる。したがって、この影響を考察するためには、文化と人類集団との相互作用まで考慮した空間分布拡大を考える数理モデル（例えば、Ammerman & Cavalli-Sforza 1984）が必要である。数

## 定係数拡散方程式モデル

$$\sqrt{(\text{拡散係数}) \cdot (\text{人口内的増加率})}$$

## コロニー分散モデル

$$(\text{移住頻度}) \cdot (\text{環境人口収容力})$$

図6. 連続拡散モデルとコロニー分散モデル、それぞれによって得られる分布域拡大速度の内容。

理研究にとって興味深い今後の課題の一つである。

本稿で述べたような数理モデル解析は、データの見方・考え方や議論の鍵をフィールド研究者に提供する役目を負うものであると考えられる。さらに、フィールド研究者との議論、フィールド研究者からの意見、批判を元に、モデルは進展させられるのである。その上、コンピュータシミュレーションモデルからの知見も加え、モデル研究とフィールド研究がうまく噛み合って研究が進んでいくことが期待される。

\* \* \*

本稿は、重点領域研究「先史モンゴロイド集団の拡散と適応戦略：公開シンポジウム（1992年1月13日・14日・15日 於：東京大学）のトピックV「先史モンゴロイドの拡散モデル」における研究発表である。

### 参考文献

Ammerman, A.J. and L.L. Cavalli-Sforza (1984)  
The Neolithic Transition and The Genetics

of Populations in Europe. Princeton University Press. Princeton. New Jersey.

Britton, N.F. (1986) Reaction-Diffusion Equations and Their Applications to Biology. Academic Press. London.

Martin, P.S. (1973) The discovery of America. Science. 179 : 969-974.

Mosimann, J.E. and P.S. Martin (1975) Simulating overkill by paleoindians, Am. Sci.. 63: 304-313.

Murray, J.D. (1989) Mathematical Biology. Springer-Verlag. Berlin.

Okubo, A. (1980) Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models. Springer. Berlin.

Skellam, J.G. (1951) Random dispersal in theoretical populations. Biometrika. 38 : 196-218.

青木健一(1991) 反応拡散モデルと先史モンゴロイド、モンゴロイド, 11:44-46.

重定南奈子(1986) 不均質環境における生物の増殖と拡散. 数理科学. 277 : 28-34