

先史人口集団の移住・拡散過程の シミュレーションモデルの開発

大 場 保

I はじめに

先史人口集団，なかでもモンゴロイドが，アジアやアメリカ大陸，オセアニアへどのように拡散して行ったかは，不明な点が多い．考古学的研究，遺伝学的研究，古植物学的研究，化石サンプルなどの分析方法の研究等から得られた知見からさまざまな推定がなされているが¹⁾，これらの多くは断片的であり，また，人口学的な視野を欠いていたりして，いつ，どこに，どれだけの人類集団が分布していたかという量的な把握が乏しかった．ましてや大集団の長期にわたる統合的な研究はこれまで例がなかった．そこで，これまでの知見と人口学的考察に基づくシミュレーションにより，いつごろ，どれくらいの間がどこへ拡散していったかを推定することを試みるため，その第1段階として，マイクロシミュレーションモデルの開発を行った．

ところで先史人口集団について人口学的事実として判明していることは極めて少ない．たとえば遺跡から出土する人骨などは数が限られているうえ，欠落している部分が多いのが普通であり，遺跡自体の数も大変限られている．とりわけ死亡水準と出生水準を決定する際に重要となる若年人口の人骨に関しては，きわめて不確定なデータしか得られないといわれている²⁾．したがって，そこからは人口学的分析に必要な遺跡集団の人口構造や人口規模さえ不確定な値しか得られない．ましてや年代別地域別の性年齢別の死亡確率や出産確率などははっきりした値はとうてい望めない．そこで，これらの値をいかに推定するか，あるいはこれらのパラメータを用いずに済ませるモデルをどのように作成するかが大きな課題となる．

なぜなら，人口学的マイクロシミュレーション³⁾を行う際には，基本的には性年齢別死亡確率，年齢別出産確率が必要であり，さらにシミュレーションの目的により，年齢別結婚確率，移住確率等も必要となる．これらの値は場合によってはもっと簡単なものでもよい．例えば性年齢死亡確率は各歳毎でなくてもよい場合もあろうし，性別でなくてもよいかもしれない．あるいは，出生時に出産，死亡といったイベントをすべて決めてしまうのも一つの方法であろう．しかし，いずれにしても出生，死亡の水準を決定する値をモデルに与える必要はある．ところが先史人類集団に関してはこれらの値を正確に得る見込みがないのである．モンゴロイドのように，広大な地域に何万年もかけて拡散して

1) 例えば，Birdsell, J. B., "Some population problems involving Pleistocene man", *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, Vol.22, 1957, pp.47-69.

Kirk, R. and Szathmary, E. [Eds], "Out of Asia: Peopling the Americas and the Pacific.", *The Journal of Pacific History*, Canberra, 1985.

Greenberg, J. H., Turner II, C. G., and Zegura, S. L., "The settlement of the Americas: a comparison of the Linguistics, dental, and genetic evidence.", *Current Anthropology*, Vol.27, 1986, pp.477-497.

2) 小林和正, 「人口人類学」, 小林和正編, 『人類学講座 11 人口』, 雄山閣, 1979年.

3) 例えば, Dyke, B. and MacCluer J. W. [Eds.], *Computer Simulation in Human Population Studies*, Academic Press, London, 1973.

いった集団の任意の時点、地域における死亡確率や出産確率など得られるはずもない。死亡水準と出生水準差が人口増加率に反映されるのであるから、これらの値があやふやだとシミュレートされた結果が、大変不確定なものにならざるを得ない。

本研究では、純再生産率（以下NRRと略）⁴⁾をモデルに与えることでこれらの問題を回避することとした。すなわち、年齢別死亡確率は先史モンゴロイドの研究から得られている生命表の一つを与え、これに加えてNRRとWeissのモデル生命表で与えられた出産確率のカーブを与えることにより、希望するNRRとなるような出産確率を得るしかけである。このようにすれば、死亡確率と出産確率が直接的に人口増加速度に影響を与える心配はなくなる。NRRの水準については、人口支持力をモデルに導入し、その時点における集団の人口数と集団が居住する地域の人口支持力との大小関係から決めることにした。人口支持力を求める方法であるが、生態系が極相に達していればその人口密度がすなわち人口支持力であると考えられる。先史人類は、狩猟採集民と考えられているから、人類学的研究より知られている現代の狩猟採集民の人口密度を当てはめることも可能であろう⁵⁾。一方で、地理学的研究により、古環境すなわち気候や植生がわかれば、それに相当する現代の狩猟採集民のデータを用いることが可能と考えられる。また、人口拡散の基本となる人口移動については、人間が増えたからその分が近傍地域へ移住し、結果としてそれが人口の拡散になるという考えに基き、集団の人口数が人口支持力に近づいたら隣接した地域へ一定の確率でランダムに移住することとした。ここでは、人類集団が本来有している移住の複雑な仕組み、すなわち集団内あるいは集団相互間での人のやりとり、例えば結婚の姉妹交換のような仕組みは省略した。なぜなら、これらの要素は、人口増加の速度には大きく影響を与えないであろうし、また、集団全体としての人口増加を伴わない集団間の人口移動は、拡散の最前線の動きに大きく影響するとは考えにくい。また、現存の狩猟採集民でおこなわれている結婚等に絡んだ多種多様かつ複雑な人間の移動の仕組みを広域かつ長期にわたる先史人類のモデルに取り入れることは不可能でもある。

このような考えで作成したのが以下のマイクロシミュレーションモデルである。本稿では、このモデルの概要を述べるとともにその実行例を上げることとする。

II モデルの概要

上述のような要求を可能な限り満たす方法として、以下のような規格を持つシミュレーションモデルを開発した。

- 最小の構成要素は個々の人間とする。
- 各人の属性は、性、年齢（各歳ごと）である。
- 毎年の各人の生死は、年齢各歳毎の死亡確率と一様乱数 r ($0 < r < 1$) との大小比較により決定する。
- 出産可能年齢女子は、年齢各歳毎の出産確率と乱数により毎年の出産の有無を決定する。
- 出生性比は1.05とし、乱数により新生児の性別を決定する。
- 個々の人間が集まって集落を形成し、所属する集落のリストに登録される。
- 1つの集落は、蜂の巣状〔正六角形状〕のセルの1つに配置される。（以後、集落のこともセルと呼ぶ。）
- 現時点では、仮想的な長方形の島状の地形に対してセルが配置されている。また、島の外への移住は行わない。

4) 例えば、小林和正、「人口分析の方法と人口モデル」、前掲（注2）書。

5) 例えば、Hassan, F. A. (1981), *Demographic Archeology*, Academic Press, New York.

- セルには、人口支持力が設定されている。
- このモデルで言う人口支持力とは、セルの人口増減の程度を設定する際の基準となる整数値（単位：人）であり、また、セルへの移住を決定する条件を決めるときの基準となる値でもある。セルの人口数がこの人口支持力の何割に達したらNRRの水準をいくつにするとか、移住をすとかを決定する。
- セルの人口増加速度を決めるパラメータとしてNRR（Net Reproduction Rate；年齢別出生・死亡確率が一定の条件下での世代間の人口の置き変わり率）を用いる。設定されたNRRを実現するために、死亡確率とNRRにより出産確率の水準を変化させる。死亡確率は、先史人類集団の死亡確率について推定されている既存の値のいずれかを採用し、また、出産確率の密度曲線は、同じく既存の値を採用する。この密度曲線に適当な定数を乗じて出産確率とし、これと死亡確率から必要とするNRRが得られるように乗ずる定数を調整する。
- 人口の移住は、セルの人口数が人口支持力の何割かを越えた段階で、隣接したセルに受け入れる余裕のあるセルはあるかを調べ、あれば一定の確率でセルとして移住するかどうかを判定し、すとなれば、セルの各住人に対して一定の確率で移住するかどうかを決定する。
- 扱えるセル数は、現時点では集落の最大人口を200人とすると70セル程度までである（メモリの制限；拡張可能）
- プログラムはPC-9801上のTurbo-C Ver. 2.0で作成した（約900行）。

次に、プログラムについて説明する。フローダイアグラムを図1に示す。はじめに画面の初期設定等を行う。ついで初期人口の生成を行い指定されたセルに配置する。初期人口は、配置するセルと人口数を指定した上で、与えられた死亡確率と出生性比より得られる生存数曲線を人口ピラミッドと見立て、期待値としての曲線が得られるように重み付けを行って、乱数により性年齢各歳別人口を必要とする人数分生成する。

初期設定が済んだら、メインループ（②と③に囲まれた部分）に入っていく。これは、各国の毎年の生死の決定と出産の有無を決定する生死・出産ループとセルの移住を行う移住ループの2つのブロックからなる。

生死・出産ループに入ってから、処理するセルの順序をランダムに入れ換える。ついで最初のセルの住人からID（各人の通し番号）順に出産の有無と生死の決定を行っていく。出生の有無は、出産可能年齢女子に対してのみ判定され、年齢別出産確率 $f(x)$ と一様乱数 r とを比べて $r < f(x)$ であれば出産とする。生まれた子供の性は、次の乱数 r と出生性比の逆数 $(1/1.05)$ を比べて、 $r < 1/1.05$ ならば女とし、さもなければ男とする。生まれた子供は、翌年の人口に登録する。生死の判定は、出産の場合と同様である。すなわち、年齢別死亡確率 $q(x)$ と r を比べて、 $r < q(x)$ ならば死亡、さもなければ生残として翌年の人口に登録する。これをセルの住人すべてについて行った後、セルの人口数と人口支持力の大小関係に従ってNRRの再設定を行う。ここではセルの人口数が人口支持力の80%未満であればNRRを人口増加に設定し、80~100%であれば現状維持、100%以上ならば、人口減少となるNRRが設定される。こうして設定されたNRRが実現されるような出産確率が次の年に用いられることになる。出産・生死の決定を行った結果、セルの性別人口数に変動があれば、これを画面に表示する。次のセルの住人についても同様の処理を行う。こうしてすべてのセルについて処理を行ったら、移住ループに移る。

移住ループでも最初に処理するセルの順序をシャッフルする。これは、処理する順序が一定だと、移住する方向に一定の傾向が現れる可能性があるためである。ついで、最初のセルから順に、人口数が人口支持力（図ではCCと略）の90%を超えているかを調べる。次に隣接しているセルの中に移住を受け入れる余裕（人口支持力に対して人口数はどれだけ空いているか）のあるところはあるかを調

図1-1 フローダイアグラム

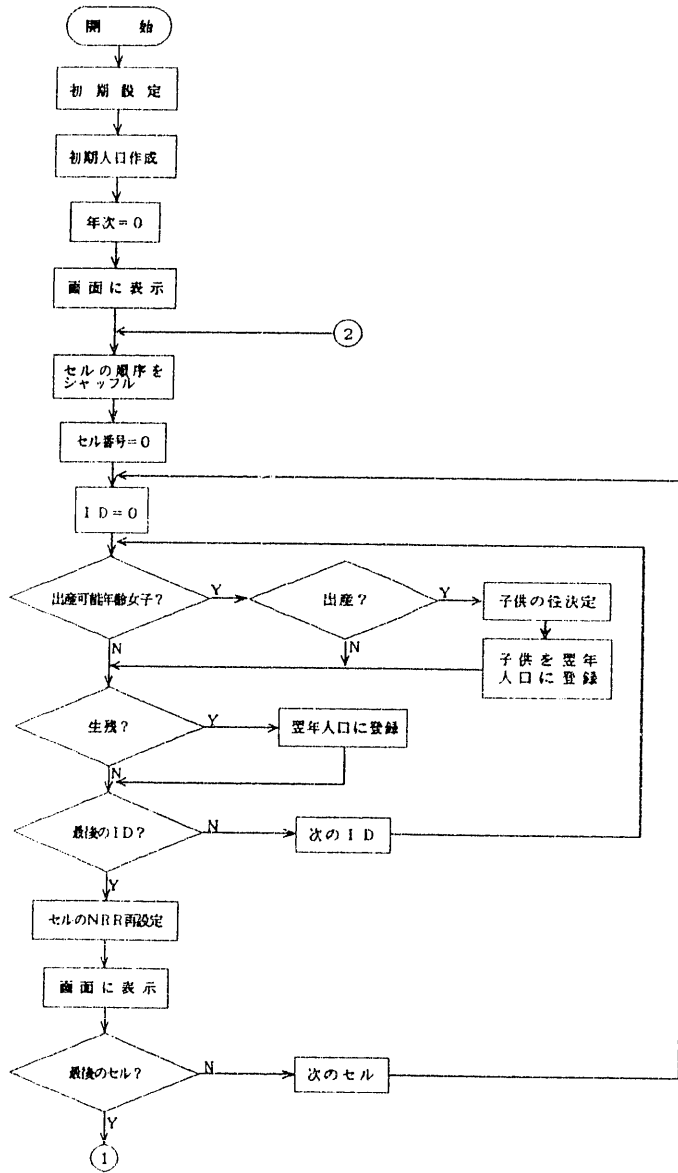
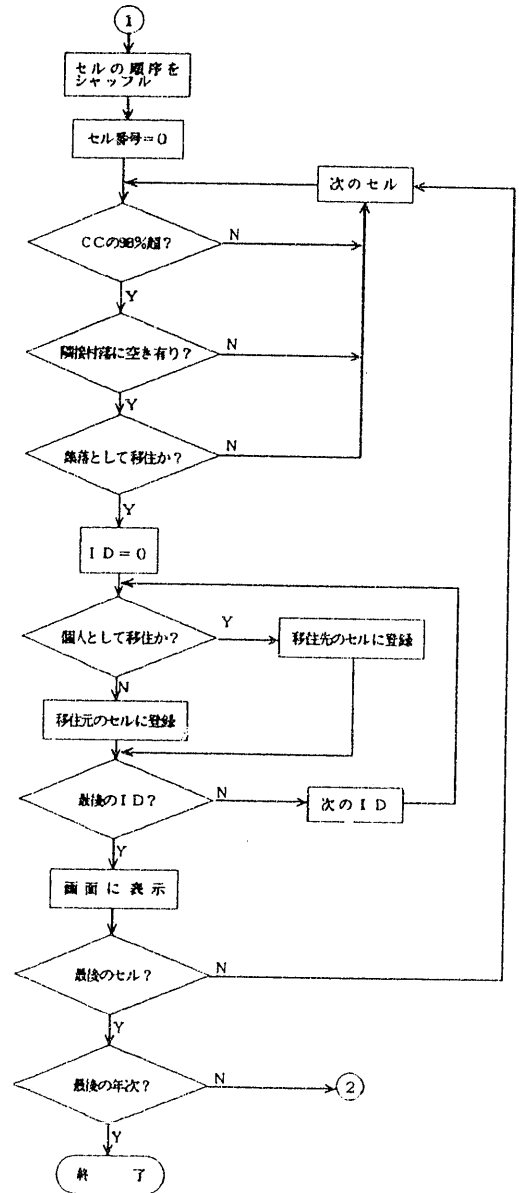


図1-2 (続き)



べ、複数個存在すればその中の一つをランダムに選ぶ。さらにセルとして移住を行うかを決定する。こうしてセルとして移住することに決まったら、個人ごとに移住するか否かを決められた個人移住確率と乱数との比較により順次決定していく。セルの住人全員について処理を行い、移住の結果を画面に表示する。すべてのセルについて移住の有無の処理を行ったら、翌年次の処理に移る。

こうして最初に指定された年数分の処理を繰り返して一回の試行は終了する。場合によっては、乱数に与える初期値を変更して試行を必要な回数だけ繰り返す。

次に、プログラムがいかなる結果を出力するかについて触れておく。

このプログラムでは、各セルごとの各人が性と年齢という属性を有しているため、各セルごとに男女別の人口ピラミッドを作成してグラフィック画面に表示することが可能である。しかしながら、これには計算時間がかなり割かれてしまうため、標準的にはセルごとの性別人口数を2段にわけて表示

することとした（後述の実行例参照）。また、シミュレート終了時点における数値だけが必要な場合は、性别人口数の表示も省略し、必要な結果だけ画面に表示するようにした。画面に出力された文字情報をファイルやプリンターへ出力することは容易である。

全体のフローダイアグラムのようなプログラムの主な流れには表れてはこないが、マイクロシミュレーションを実行する際に非常に重要なものが乱数発生ルーチンである。実際にプログラムを動かすときにもっとも多く計算時間を消費し、これが結果としてモデルがシミュレート可能な時間的・空間的領域の広さを規定する。また、使用方法を誤れば、偏った結果しか得られない。そこで、若干技術的ではあるが、本シミュレーションプログラムで用いた乱数発生ルーチンを紹介してプログラムの説明の最後とする。

コンピューターによるシミュレーションで用いられる乱数とは正確には疑似乱数である。これは合同法と呼ばれる方法により計算され発生させるもので、以下に本プログラムで用いた方法を乱数発生の原理、実際の計算方法の順に述べる。

まず、種となる自然数 s_1 、素数 p_1, p_2 を決め、

$$s_1 \times p_1 + p_2$$

を求める。これを周期とする自然数 b で割り、余り s_2 を求める。

$$r = s_2 / b$$

により、乱数 r ($0 \leq r < 1$) が求まる。次に s_2 を s_1 に代入して、はじめから同様に計算すれば、次の乱数が求まる。以下同様にこれを繰り返せばよい。

この乱数の性質は、周期 b を持つこと、すなわち、 $b + 1$ 個目には一番最初の乱数と同じ値が得られることと、発生する乱数は、 $1/b$ の整数倍であるということである。

実際にこれを計算する方法であるが、周期 b をうまく設定すると計算時間を大幅に短縮することが可能である。多くの言語コンパイラにおいては符号無し整数は16ビットのデータ幅を持つ。これをかけあわせた場合、16ビットより上位のビットは、型変換するよう指示しない場合は、単にオーバーフローして捨てられてしまい、結果に現れてこない。いいかえれば、16ビット符号無し整数の乗算を行うと、結果は本来の値を2の16乗（=65536）で割ったときの余りになるということである。逆にいえば、周期を65536にしてしまえば、剰余を求める手間が省けてしまうということになる。本シミュレーションのコンピューターシステムの場合、剰余を求める計算を行ったときの計算時間を100%とすると、省略したときは約30%にまで短縮された。この点は大変重要である。また、本プログラムでは、乱数の値域を $0 < r < 1$ とするために $(1/65536)/2$ を加えた。乱数発生ルーチンのプログラム例を Appendix に示す。

III シミュレート例

ここでは、以下のような考えに基づいて、本シミュレーションモデルの性質を知るための試行実験を行ったので、その結果を実行例として紹介する。

本モデルでは、人口の拡散は人口支持力に余る人口の増加の結果、隣接地域へ人が移住し、これが繰り返されることによって起きる現象であるととらえている。したがって、モデルにおける人口増加の水準を決定する要因である人口増加時の NR が大きくなれば拡散速度を増大するであろう。

一方で、移住の頻度に影響を与える人口支持力も、拡散速度に影響を与えられよう。なぜなら、人口数が小さければ偶然変動によって人口数が変動する割合が大きくなると考えられるが、そう

なれば人口支持力に近い数に達する頻度も大きくなり、その結果として移住が行われる頻度も高まるからである。また、本モデルでは、セルの面積はすべて同一としているが、実際的人类集団では人口数はまちまちであるから、その違いによる拡散速度の差もとらえておく必要がある。

本モデルで集団の人口数の大きさと移住の頻度を決定するのは人口支持力であるが、人口密度が等しい場合は、人口支持力が4倍になれば、面積も4倍、距離は2倍となる。したがって、仮に人口密度(人/km²)が等しいとした条件下では移住の速度は変わらないとするなら、本モデルの人口支持力(人/セル)を4倍にすれば、セル間の距離(km)は2倍であるとみなすことができ、したがって拡散速度(km/年)は2倍に、これを年あたりの移動セル数に換算すれば、1/2倍(セル/年)になるはずである。

そこで、実際にモデルの人口支持力と人口増加時のNRRを変えた場合、拡散の速度とそのときの人口数の安定性はどうかを調べた。

モデルにおける拡散の速度を評価する方法としては、初期人口を配置したセルから3つ離れた特定の目的セルに達するまでの時間をみることにし、途中で人口が消滅した場合を除いて目的セルに到達したケースが30回になるまで試行を繰り返した。また、人口数の安定性を評価する方法としては、上述の30回の試行がなされる間に何回途中で総人口が消滅するかと消滅するまでの年数をみることにした。

そのため、人口支持力は、50, 100, 200の3通り、人口増加時(セルの人口数が人口支持力の80%未満)のNRRを1.05とその1/5乗(=1.0098), 1.05の5乗(=1.2763)の3通りとし、これを組み合わせて全部で9通りを設定した。

その他の条件は、以下の通りである。

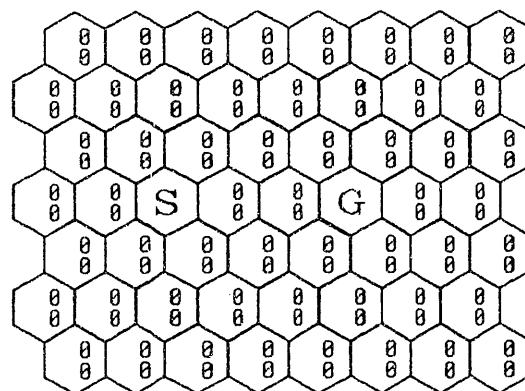
- スタートのセルを左上のセルから横方向に順に数えて27番目のセルとした。
- ゴールとするセルは、スタートのセルから3セル右の30番目のセルとした。
- 死亡確率は、Brewis (1989)⁶⁾に掲載されているPrehistoric New ZealandのMaoriの簡易生命表のうち、乳児死亡率が157/1000としたもの(平均寿命23.49歳)を補間することにより各歳別の生命表にして用いた。
- 出産確率は、Weiss (1973)⁷⁾の先史人類のモデル生命表で用いられた出生率曲線をもとに各歳別の重みを作成し、これにNRRの水準を実現するような係数を乗じて年齢各歳別の出産確率とした。
- 人口支持力とNRRの関係は、セルの人口数が人口支持力の80%未満の時は上述の通りとし、80~100%までは1.00、それより上は0.90とした。
- 移住を行う条件は、セルの人口数が人口支持力の90%を超えたとき、隣接セルのうち、人口支持力が60%未満のものを探し、複数個あればそのうちの一つをランダムに選び、0.5の確率でセルとしての移住を決定する。セルとして移住することが決定したら、各人は0.2の確率で空きのあるセルへ移住する、とした。
- 初期人口数については、初期人口はどこか他の地域から移住してきた出発セルに到達しなものと考えることにし、3水準の人口支持力に移住開始の条件である90%を乗じ、さらに各人の移住確率を0.2としているからこれに乗じた数、すなわち9, 18, 36人を初期人口数とした。
- 計算はPC-H98 model 70(数値演算プロセッサ有り)で行った。

6) Weiss, K. M. (1973), Demographic Models for Anthropology, Memorie 27 of the Society for American Archaeology, Washington.

7) Brewis, A. A. (1989), Reconstructions of Prehistoric Maori Fertility, Man and Culture in Oceania, 5 (21-36).

図2にセルの配置を示す。セルの中の数値は、上段が女子人口数、下段が男子人口数である。セルの配置は、いずれの組み合わせでも同一とした。これは、人口支持力を変えることは人口密度（人/km²）を変えるという考えに基くことを意味する。

図2 拡散速度を調べるためのセルの配置。「S」と記したセルに初期人口を配置し、「G」のセルに達するまでの年数を調べる。



IV 結 果

まず、結果として得られた年数の統計的評価の際に用いる単位として、年数そのものとその対数値をとったものが考えられる。このため、それぞれの組み合わせについての結果について歪度および尖度を調べたところ、3セル離れた地点に到達するまでの年数では歪度および尖度は、年数では0.252～1.902および-1.071～3.138の範囲の値であり、年数対数値では-0.833～0.943および-0.73～1.295であったが、消滅するまでの年数の歪度および尖度は、標本数が少ない場合を除くと、年数では2.101～4.476および4.718～25.936であり、年数の対数値では0.284～1.424および-0.807～1.393であった。このように消滅するまでの年数の場合の歪度と尖度が大きく偏っており、3セル離れた地点に到達するまでの年数とその対数値では大した違いがみられないので、以後の統計処理等では年数の対数値を用いることとした。

次に、拡散速度について述べる。表1に3セル離れた特定セルに到達するまでの年数の対数値について相乗平均と変動係数を示す。明らかにNRRが大きくなるにつれて平均年数は減少し、また、人口支持力が大きくなるにつれて平均年数は増加した。実際、2元配置分散分析の結果は、人口支持力、NRR、およびこれらの交互作用ともに有意（ $p < 0.0001$ ）であった。交互作用の有意性が示すように、NRRが1.2763のときの人口支持力の増加にともなう平均年数の増加は、641.2、711.2、788.9と小さいものであったが、NRRが1.0098の時は、3349.7、5236、7870.5と2倍以上の増加を示した。変動係数は、NRRが大きくなるにつれて小さくなった。

セルの人口数の安定性の指標として調べた、特定セルに到達する前に全人口が消滅した回数と消滅までの年数の相乗平均を表2に示す。明らかにNRRが大きくなるにつれて消滅回数は大きく減少し、

表1 3セル離れた特定セルに到達するまでの平均年数（相乗平均；上段）と変動係数（%；下段）。（n=30）

		人口増加時のNRR		
		1.0098	1.05	1.2763
セルの人口支持力	50	3349.7	1963.4	641.2
		5.615	4.924	3.715
	100	5236.0	2344.2	711.2
		6.177	3.643	3.182
	200	7870.5	2766.9	788.9
		5.205	3.334	2.761

表2 全人口が特定セルに到達する前に消滅した回数（上段）と消滅までの平均年数（相乗平均；下段）



		人口増加時のNRR		
		1.0098	1.05	1.2763
セルの人口支持力	50	371	88	6
		206.1	161.4	58.7
	100	165	42	4
		433.5	282.5	90.8
	200	67	16	1
		743.0	415.0	196

また、人口支持力が大きくなるにつれて消滅回数は減少した。また、NRRが大きくなるにつれて消滅までの年数は減少し、人口支持力が大きくなるにつれて消滅までの年数は増加した。

V 考 察

最初に、実験結果について考察する。拡散速度は予想通りNRRが増大するにつれて大きくなり、また、人口支持力が小さいほど大きくなった。人口支持力が4倍になったら拡散速度は1/2倍になったかどうかであるが、50人と200人では、NRRが1.0098のときは前者が3セルあたり約3350年、後者が約7870年とおよそ1/2の速度を示したのに対して、NRRが1.2763のときは前者が約640年、後者が約790年となった。いいかえれば、集団の占有する面積が4倍、すなわちセル間の距離(km)が2倍になったと考えると拡散速度(km/年)は $(3 \times 2 / 790) / (3 / 640) = 1.62$ 倍になったことになる。交互作用効果が有意に認められた理由はここにある。この原因は次のことが考えられる。今回の実験デザインでは、モデルにおける人口支持力が変化するという事は人口密度が変化するという考えに基づき、セルの総数および配置をどの組み合わせでも同一としたが、人口密度は同一でセルの面積が変わるという考えに基づけば人口支持力が50のときは200のときより4倍のセル数が必要となる。実際にはそうしなかったため、人口増加時のNRRが1.2763のときには多くのセルが人口増加したままに移住可能な隣接セルがないまま飽和状態に達し、結果としてNRRの水準が現状維持あるいは人口減少となったことがあげられる。図3にその1例を示す。移住開始の条件である人口支持力の90%に達しても隣接するセルに40%以上の「空き」がないため、NRRの水準が現状維持である1.00あるいは人口減少である0.90にとどまっているセルが多くなっている。一方で人口増加時のNRRが1.0098の場合は、表2の途中で全セルが消滅した回数数が371回も観察されたように、偶然変動により途中で消滅あるいは「空き」がある水準まで人口数が減少することがままあり(図4)、これが結果として全体のNRRの水準を人口増加の状態にとどめる作用を顕したものと考えられる。したがって、この点に関する問題点をより明らかにするためには、セル数を増やすとか、初期人口を配置するセルを長方形の島の一边に一列に並べる等の他の実験デザインが必要であろう。

次に、ここで得られた拡散速度自体について考察する。ここに距離というものを導入する必要性が生じるが、これは、対象とする人口集団が決定すれば、以下の要領で決められる。まず、人口集団が

図3 NRR=1.2763,
人口支持力=50のときの実行例。
移入者を受け入れる「空き」のないセルを  で示し、また、移出可能となったセルを  で示した。

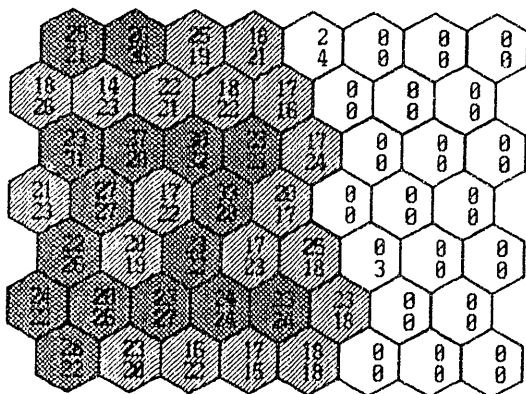


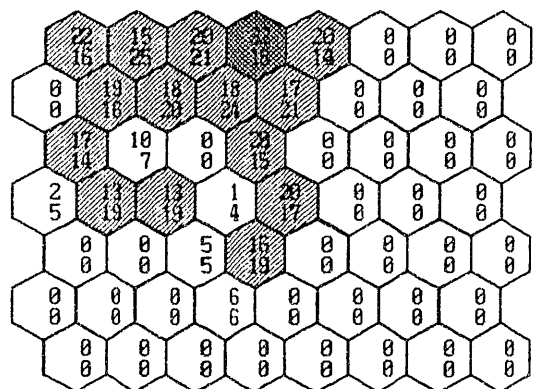


図4 NRR=1.0098,
人口支持力=50のときの実行例。
移入者を受け入れる「空き」のないセルを  で示し、また、移出可能となったセルを  で示した。



彼らを取りまく生態系の中で最大限増加して極相に達した場合の人口密度（人／km²）は、人口支持力（人／km²）と同等であると考えられる。一方で彼らの1つの集団のサイズがわかれば、その人数を養うための面積が決定され、これをセルの面積とすれば良い。これより、セルの中心から隣のセルの中心までの長さが決定される。また、前段で考察したようにセルの長さや拡散速度に線形性があれば、集団のサイズは任意の値でかまわないことになる。

さて、実際の数値をこれに代入してみよう。NRRが1.2763のとき3セル分拡散するのに640～790年という値となったが、簡単のため真ん中の約700年を採用してみる。人口密度を0.4（人／km²）とすれば、人口支持力100人のセルの面積は1000km²となり、これよりセルの中心から隣のセルの中心までの距離は約34kmと算出される。3セルだと約100kmとなる。つまり、この条件下では100km拡散するには700年かかるという値を得る。

モンゴロイドのアメリカ大陸への拡散については、ベーリング陸橋を渡って来たアメリカ大陸の北端に移住してからわずか1000年で南アメリカ大陸最南端まで到達したという説がある⁸⁾。これは、大型の獣を追って狩りを続けた結果として人口拡散が起きると仮定して計算されているため、本モデルとは移住の仕組みが異なる。したがって単純には比較はできないが、今回の試行実験の結果から推計すると、本モデルによれば、1000年間でわずか143km程度しか拡散しないことになるから、結果が大きく異なる。NRRをさらに大きくしてみた場合についても試行実験を行ってみる必要がある。

次に、本モデルの持つ特徴であるNRRと人口支持力について考察する。

まず、モデルにおけるパラメータのうち最も重要でかつ未確定であるNRRについてであるが、これを決定する方法としては、他の分野の研究で得られた値を直接用いることが可能ならば、それが1つの方法であろう⁹⁾。しかし、これが困難な場合が十分想定される。なぜなら、まったく人類がいなかった地域にはじめて移住していった先史人類の場合は、現在の人類が経験しないような非常に高いNRRであった可能性もあるからである。もう1つの方法は、時代ごとの遺跡の分布から、人口拡散の前線の広がる速度を推定し、これを実現するようなNRRを試行を繰り返すことによって求める方法である。これは、実際に可能であろうと思われるが、ここで問題となるのが、得られるNRRは人類生態学的な根拠に基づいて算出されるものではないため、既知の値と比べてあまりに異常な値が出る可能性を残している点である。このような場合には、モデルにおける移住の仕組み自体を再考すべきであるのか、あるいは遺跡の年代測定に問題があるのか、を研究する必要がある。

また今回実験条件では、NRRと人口支持力の関係を例えば人口数が80%未満であればNRRの水準を人口増加というように決定したが、80%で区切ることやそれを超えると離散的にNRRが増加するという設定に関しては根拠はない。離散的にした理由は、モデルを単純化するためである。したがってこの点についてもさまざまな試行実験を行って、80%以外にしたらどうなるか、水準の変化を連続的にしたらどうなるかについて調べてみる必要はあるかもしれない。しかし、この点を複雑化しても、拡散速度は結局は人口増加時のNRRの水準と人口支持力によって決定されるであろうから、本モデルのように単純な仕組みの場合と大きな違いはないものと考えられる。

次に、プログラム作成手法の一部である乱数作成ルーチンについて触れておく。

乱数を発生させるルーチンは、プログラムの開発言語環境で提供されるものを使うことを否定はしきれないが、次のような問題点を持つことになる。まず第一に、多くの場合、言語コンパイラが提供する乱数発生ルーチンはタイマーを用いている。このため、プログラムの実行をするたびに異なる

8) Martin, P. S., "The discovery of America.", *Science*, Vol.179, 1973, pp.969-974.

9) 例えば, Ohtsuka, R., "Low Rate of Population increase of the Gidra Papuans in the Past: a genealogical-demographic analysis.", *American Journal of Physical Anthropology*, Vol.71, 1986, pp.13-23.

乱数を発生する。これでは、プログラムを開発する際にプログラムが正しいのかバグがあるのか非常にわかりにくい。次に、タイマーを使わない乱数発生ルーチンが提供されていて、種数をユーザーが与えられるようなものがあったとしよう。この場合も、ルーチンのソースがわからなければ、乱数の数学的性質がわからず、結果が信用できない。周期はいくつなのか、値域は0あるいは1を含むのかどうか、統計的性質はどのようなものか、等である。ソースが示されていれば、これらの心配については一応の解決をみるであろうが、他のコンピューターシステムへの移植時には、再び問題となろう。このような理由で、乱数発生ルーチンをシミュレーションプログラム自体で備えていることが望ましい。

終わりに、シミュレーションの中で乱数を使う外合の注意点を一つ挙げておく。例えば、本研究では、乱数の種数以外の条件を一定のまま、種数のみを変更して何度もシミュレーションを繰り返すようになっているが、このような場合、乱数発生を2つ用意する必要があるということである。なぜなら、もし1系列しかないとする、ある試行の最後に決定された種数が次の試行の最初の種数に用いられることになるが、これが、前回のもと同じではないという保証がないのである。まったく同じ数でなくとも、発生する順番がいくつか前のものである可能性もある。この場合、プログラムの他の部分にまったく誤りがなくとも、結果は著しく偏ったものとならざるを得ない。(今回の試行実験で実際に起こった。)いくら試行回数を増やしても限られたケースの試行しか計算されないからである。このエラーは、一見なんら問題なくプログラムが動作するため、検出がきわめて困難なものとなるだろう。

VI まとめ

本研究は、先史人類の移住・拡散過程を調べるためのマイクロシミュレーションモデルを開発した。その最小の構成要素は個々の人間とし、それが集落を形成して六角形の地形に居住する。各人の毎年の生死・出産は乱数により確率的に決定し、このときの人口増加の水準は、人口支持力とNRRによって決定する。集落の人口数が人口支持力に対して一定の水準に達したら、隣接集落のうち受け入れる余裕のあるところへランダムに移住する。

このモデルの利点をまとめると、以下の点が挙げられる。

- 人口支持力は、現存の狩猟採集民のデータと古環境のデータからある程度推定可能であると考えられる(例えば、Hassan (1981))。これにより、遺跡から得られた人口学的データの上でシミュレーションを行うのではなく、それを参照しながら行えるようになる。その結果、必要となる遺跡からの人口学的データとしては対象とする地域、時代を網羅するものでなくともよくなる。
 - 死亡確率や出産確率とこれらの本来と値(未知)との違いが人口増加速度に反映されにくい。これは、セルの人口数と人口支持力との大小関係から、人口増加速度を規定するNRRを決定し、このNRRと死亡確率とから出産確率の水準を決定しているからである。
 - 人口数の偶然変動の影響を捉えることができる。
 - 移住・拡散の過程を表示し易く、視覚的把握が行い易い。
 - 個人ごとに運命を決定していく仕組みであることから、遺伝学的パラメータを導入可能である。
- このモデルについての今後の課題として、以下のようなことを考慮中である。
- 移動先を2つ(以上)先まで行けるようにする。
 - 処女地のNRRを大きくする。
 - 根拠となるデータが得られれば、人口支持力の空間的なばらつきを導入する。
 - このモデルで得られた結果をもとに、集団を最小単位とするシミュレーションを作成する。(大

地域でのシミュレーションを行うため.)

このように、まだまだ改良の余地があるモデルではあるが、基本構造自体は先史人類の移住・拡散を模するための用件を備えているものと考えられる。次のステップとしては、必要なデータの得られる人口集団に対して適用してみて、モデルの妥当性を検討することが必要であろう。

VII 謝 辞

本研究遂行にあたり、終始ご指導を賜った昭和大学医学部助教授、正木基文先生ならびに東京大学医学部助教授、大塚柳太郎先生に深く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金、「重点領域研究」「先史モンゴロイド集団の拡散と適応戦略」(#043;代表:赤沢 威)の援助を受けた。

[Appendix]

C言語による乱数発生ルーチンの例。 $0 < \text{random}() < 1$ となるようにするため、 $(1/\text{base})/2$ を最後に加えている。また、高速化のため、変数はすべて静的変数とした。(高速化を望まなくても seed だけは静的変数でなくてはならない。)

(例1) 剰余を求める計算を省略しない場合。baseを変えられる。

```
static unsigned int seed = 100, prime 1 = 331, prime 2 = 887;
static unsigned long int base = 65536;
static float fbase = 65536.0;
float random (void)
{
    seed = (seed * prime 1 + prime 2) % base;
    return (seed / fbase + 0.000007629395);
}
```

(例2) 剰余を求める計算を省略した場合。周期は65536に固定され、変更できない。

```
static unsigned int seed = 100, prime 1 = 331, prime 2 = 887;
static float fbase = 65536.0;
float random (void)
{
    seed = seed * prime 1 + prime 2;
    return (seed / fbase + 0.000007629395);
}
```

Development of a Simulation Model for Migrations and Dispersals of Prehistoric Human Population

Tamotsu OHBA

A new simulation model has been constructed to estimate demographic processes of prehistoric human populations who migrated and dispersed, particularly to uninhabited habitants; this model simultaneously treats fertility, mortality and migration, taking the carrying capacity of the land into account.

The outlines of simulation model are as follows.

1. The minimum component is an individual person, and each individual's properties are sex and age.
2. Each individual's death is determined in each year by comparing between the age-specific probability of dying and a random number, r ($0 < r < 1$).
3. Childbirths of each woman of reproductive age are determined in each year by the age-specific probability of childbirth and a random number, r .
4. Sex ratio at birth is fixed (at 1.05), and each newborn baby's sex is determined by a random number.
5. People live in settlements, and each individual should be an inhabitant of a specific settlement.
6. Each settlement is located in a cell on a hexagonal-likage "land;" the settlement will be referred to as a cell hereafter.
7. Each cell has its own (optimal) carrying capacity.
8. As a parameter of determining the speed of population increase in each cell, net reproduction rate (NRR) is applied. To attain a given NRR of each cell, the probability of childbirth is adjusted.

Preliminary trials have produced satisfactory results. The applicability of this model to historical reconstructions and the techniques to construct micro-simulation model are also discussed.