

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特性評価

大 場 保

I 特性評価の目的

先史人口集団の移住・拡散過程を推測するためにシミュレーションモデルを開発したことは既に報告した^{1), 2)}。前報告²⁾では、あわせてセルの人口支持力を変化させた場合のモデルの特性についても調べた。しかしながらプログラムが扱える人口数や計算速度の点で不十分な面があったため、まだ十分に特性を調査できなかった。

その後、プログラムの改良等により計算速度、扱える人口数などの点で大きく向上させることができた。そこで今回さらにこのモデルの持つ特性を調べることとし、加えて他の研究との比較を行った。

調べる箇所としては、このモデルではいくつかのパラメータを仮定しているが、それらが拡散速度及び人口増加速度にどのように影響を与えるかが挙げられる。これによりモデル化された拡散過程の性質が明らかとなり、モデル化された拡散の各ステップが拡散速度にどう影響するのかなども分かってくるため、実際の人口集団に当てはめた場合もそれがどういう性質を持つモデル上でシミュレートされているかという観点での評価が可能となる。また、あまり必要のないパラメータがあることが分かればモデルの簡略化と計算速度の向上が期待できる。さらに、人口集団が新天地に移住・拡散していく際にはどのような移住規則を持てば効率的なのかも分かってこよう。

調べる方法は、まず最初に各条件に対して適当と思われた値を設定したうえでこれを基準とし、次に条件の中の1つについて値を変化させたら拡散速度はどう変化するか、途中で総人口が消滅する頻度はどのように変化するかをそれぞれの条件について調べることにした(実験1)。次いで得られた結果の中で最も拡散する条件を組み合わせ、そのときの移住・拡散について調べた(実験2)。

II モデルの概要

前報告²⁾においてモデルの概要は明らかにしてあるが、議論を分かりやすくするために敢えてモデルの概要を簡単に述べておく。

- 最小の構成要素は個々の人間である。
- 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。

1) Ohba T., Masaki M., Ohtsuka R., "A Simulation Model for Migrations and Dispersals of Prehistoric Human Populations.", *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, Vol.98, No.4, 1990, pp.513-520.

2) 大場保, 「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」, 『人口問題研究』, 第46巻4号, 1991年1月, pp.49-60.

- 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。)
- 今回は、仮想的な島状の正六角形の地形に対してセルが配置されている。また、島の外へ移出は行わず、島の外からの移入もない。
- セルには人口支持力 (Carrying Capacity; 以下CCと略す) が設定されている。
- このモデルで言うCC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CCの何割に達したらNRRの水準をいくつにするとか、移住をするとかを決定する。簡単のため、以下ではこの「セル人口数/セルCC」の値をRと略す。
- 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。
- 人口の推移は、セルの人口数がCC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、するとなれば、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。
- 移住可能な周辺セルは、移住元を距離0、隣接セルを1と数えて3セルまでとする。また、移住先を決める際には、距離の2乗の逆数による重みづけを行う。

III 実験1

シミュレートする対象は仮想的な半径が20セルの六角形状の地形とし、全てのセルのCCは100とした。

そしてこの中心のセルから出発し、外縁のセルに到達するまでの年数を記録した。繰り返しの回数は外縁のセルに達するまでの回数が20回になるまで行い、その間に総人口が消滅した場合については、消滅に要した年数をその度に記録した。また、100年毎の人口の空間的分布も記録した。ここで、死亡確率、出生確率の設定については、前報告²⁾と同様に死亡確率はBrewis³⁾、出生確率はWeiss⁴⁾より導出して用いた。

各条件の基準とした値 (と変化させた値) を以下に示す。これらにおいて、A~Fの各条件は、以下のように下線を引いて示した値を基準とした。そして例えば条件Aについて調べたいときはAだけかっこ内の値を順次与え、B~Fの条件は基準値のままにしておいた。

人口増加率に関連する条件 (下線を施した値が基準値)

(A) 人口増加時のNRR

[$1.05^{1/4}=1.012$, $1.05^{1/2}=1.025$, 1.05, $1.05^2=1.103$, $1.05^4=1.216$]

3) Brewis, A. A., "Reconstructions of Prehistoric Maori Fertility", *Man and Culture in Oceania*, Vol.5, 1989, pp.21-36.

4) Weiss, K. M., "Demographic Models for Anthropology", *Memorie 27 of the Society for American Archaeology*, 1973, Washington.

(B) Rがどの水準までなら、人口増加のNRRとするか。

[0.2, 0.4, 0.6, 0.8]

人口移動に関連する条件

(C) Rがどの水準以上なら、そのセルが移出可能とするか。

[0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0]

(D) Rがどの水準までなら、そのセルが移入可能とするか。

[0.2, 0.4, 0.6, 0.8]

(E) Rが移出可能な水準に達し、かつ、周辺に移入可能なセルがあるとき、その年にセルとして移住を行う確率。

[0.25, 0.5, 0.75, 1]

(F) セルとして移住することが決まったとき、移住元のセルの住人各人が移住先へ移動する確率。

[0.15, 0.3, 0.6, 0.9]

基準値の設定は次のような考え方によって行った。

(1) 人口増加時のNRR=1.05は、狩猟採集民における一つの値として妥当な範囲の値ではないかという大塚⁵⁾の私信によった。

(2) Rがどの水準までなら人口増加のNRRとするかは、ロジスティック曲線に沿った人口増加を想定した場合、K値の半分より上までは人口増加するとみなしてよいのではないかと考え、0.6を基準とした。

(3) 人口移出可能となるRは、当初は人口減少圧力がかかる水準の少し手前で人口移出が起き始めるのではないかと考えたため0.9とした。

(4) 他のセルからの移入を可能とするRとセルとして移住することになったときの個人が移住先へ移動する確率は次のように考えて基準値とした。まず、

(a) 移住元はCCに近い人口数を抱えている、

とした。これは(3)で設定した条件による。次に、

(b) 移住が行われた後も移住元の方が移住先よりも人口数は大きい事が期待される、

とした。最後に、

(c) 移住後は双方のセルにおいて人口増加の水準が期待される方がよい。

とした。このように仮定すると、 $CC=1$ とする比率で考えて、条件(c)より両セルの人口数は $0.6+0.6=1.2$ を得る。(a)より移住元は1とすると移住先は0.2となるが、実際には人口数0のセルもあるわけだから大まかに平均して0.2であれば良い。そこで0.4とした。即ち他のセルからの移入を可能とする $R=0.4$ である。こうすると(b)より、 $(1-0.4)/2=0.3$ を得る。これを個人毎の移住確率の基準値とした。

得られた結果は、PC-SASにより平均、分散等を求めるとともに、一元配置分散分析およびDuncan法による多重比較を行った。

IV 実験2

実験1の結果を見て、追加的な試行を行った。

条件のAとBは天から与えられる性質の値であるのに対して、C~Fは移動の規則であるからヒト集団の意志によって制御可能である。人口増加および拡散に対して、ヒト集団が最も有利な移動規則

5) 大塚柳太郎，東京大学医学部人類生態学教室。

を採用している可能性は否定できない。

そこで今回試した中で特に差の見られた条件CとFについて平均の到達年数が最も小さかった条件を組み合わせて試行することにより、100年毎の人口の空間的分布を観察するとともに、外縁までの到達年数はどのように変化するかを調べた。

他の条件は実験1と同様である。

V 結果

1. 得られた年数および総人口の平均の取り方

年数および総人口数の平均の取り方として相加平均にするか相乗平均にするかを3次および4次の積率から吟味したところ、対数を取った方が良いと判断されたので、以下においては常用対数を取ったものを結果として示した。また同様に分散分析においても常用対数を取った値について分析した。

なお、以下の表1～3においては、基準値の場合を縦の罫線で囲って示した。

2. 基準値の場合の総人口の経時的变化とセル人口の空間的分布

図1はすべて基準値の場合の試行を20回行ったうちで、外縁に達した時点での総人口が小さい方から10番目の試行から抜粋したものである。これからは、総人口がほぼ単調に増加していく様子が見て取れる。

図2-1から図2-4は図1の途中の時点でのセル人口の空間的分布を示したものである。図2-1は、1辺が21セルの6角形状の仮想的な地形の中心に、年次0において初期人口100人が配置されている。ここからシミュレートが始まる。

セルの人口数はメッシュの濃淡で示しており、白抜きであればそのセルの人口数は0、10、25、50、75、100人を超える毎にメッシュは濃くなり、125人を超えると真っ黒となる。

図2-2は2,000年後、図2-3が4,000年後、図2-4は外縁（6角形の右斜め下の辺の真ん中）のセルに移住が行われたため、この回の試行が終了した年である。このように次第に人口が増加し、それとともに周辺へ拡散していく過程が表現される。

3. 実験1：到達年数の比較

外縁のセルに達した場合について、それまでの年数を比較した場合について条件ごとに述べる（表1）。また、各条件での移住・拡散の違いの空間的な特徴を記すために、

- ・条件値の一番小さい値と大きい値の場合で、
- ・20回の試行のうちで、外縁に到達した時の総人口数が少ない方から10番目のものの、
- ・外縁に到達したとき、

の分布を図3に示す。

図1 外縁に達するまでの総人口の推移
(すべて基準値の場合、100年毎)

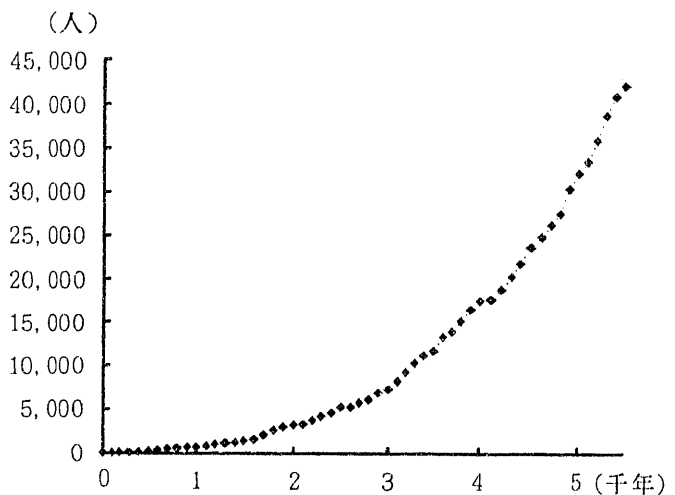


図2 すべて基準値の場合のセル人口の空間的広がり

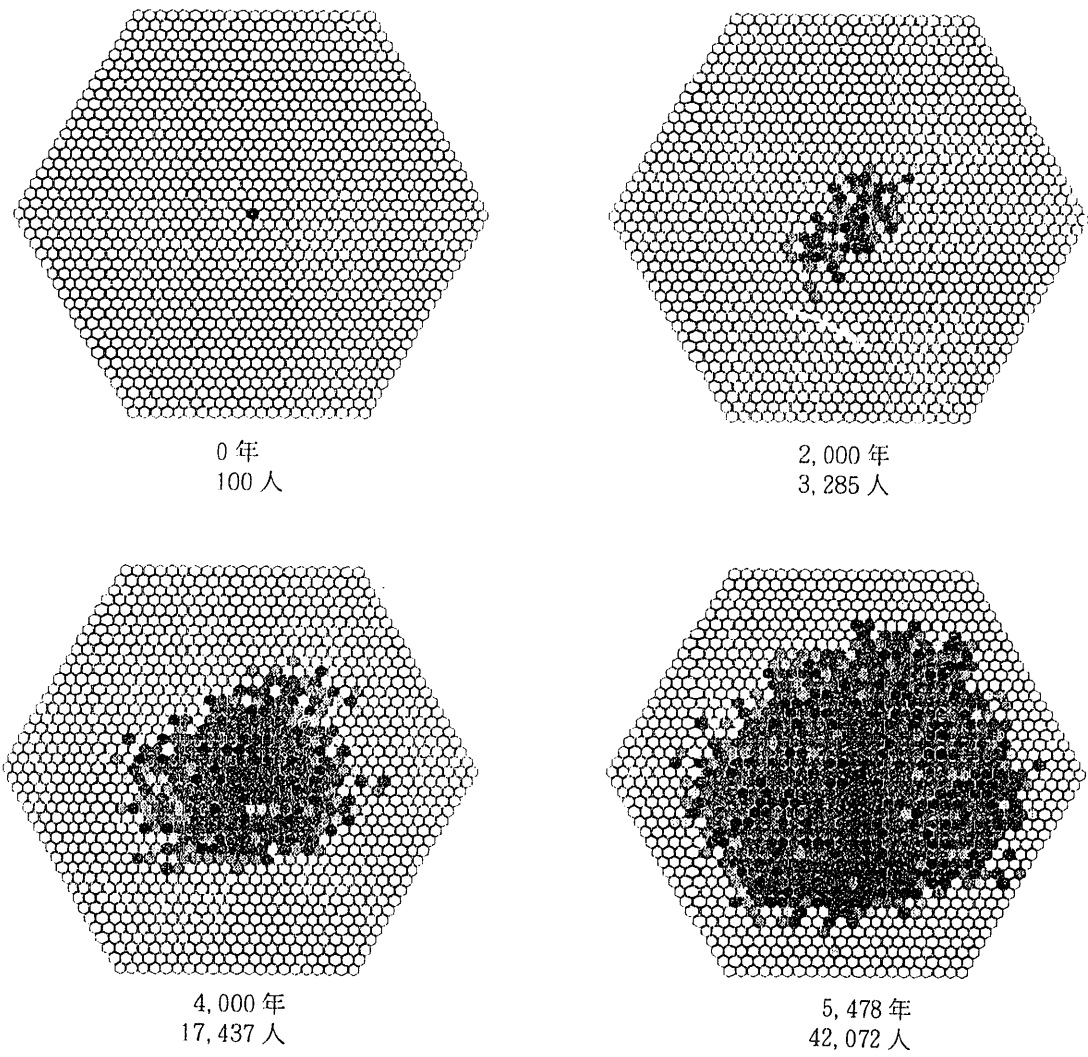


図2, 3, 5, 6の凡例

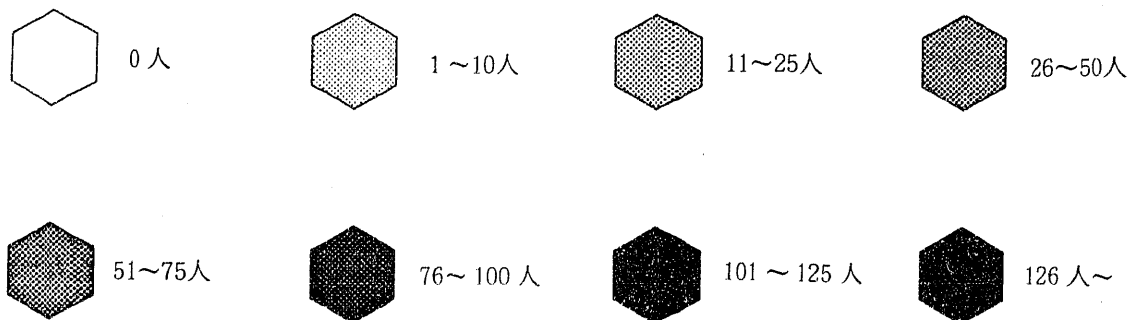
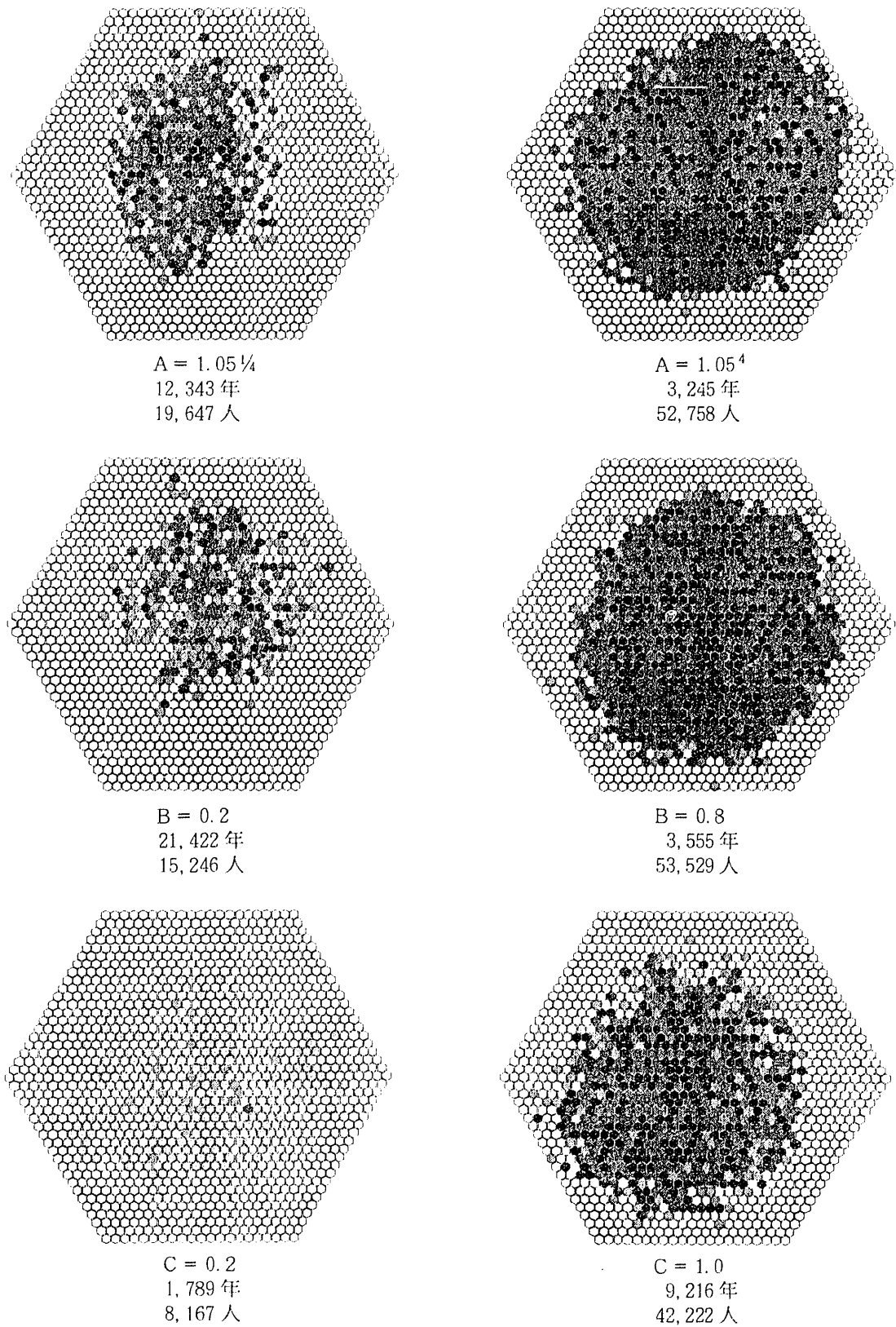
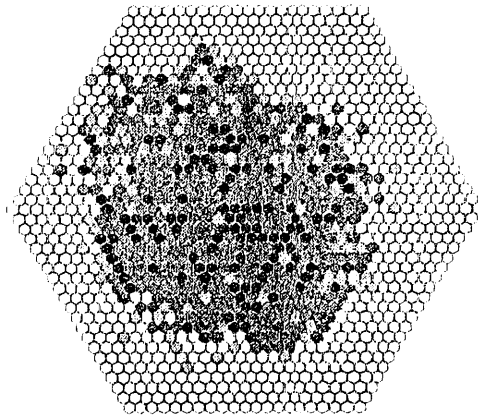


図3 各条件において最小値と最大値を与えた時の外縁に到達した時点でのセルの人口の空間的分布

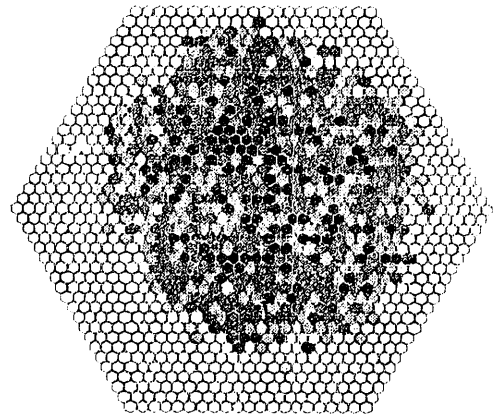


(注) 各図の横の数字は順に条件値, 到達年次, 総人口を表す.
 また, ここに示したものは, 各条件下での20回の試行のうち, 到達時の総人口が少ない方から10番目のものである.

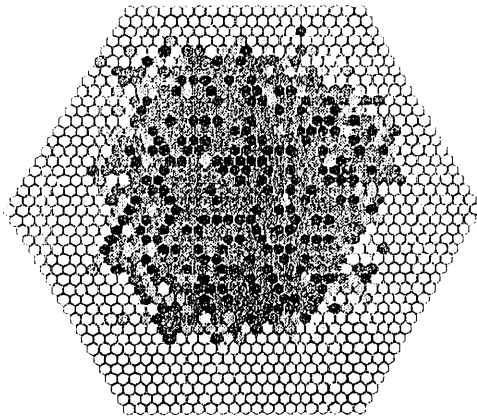
図3 (続き)



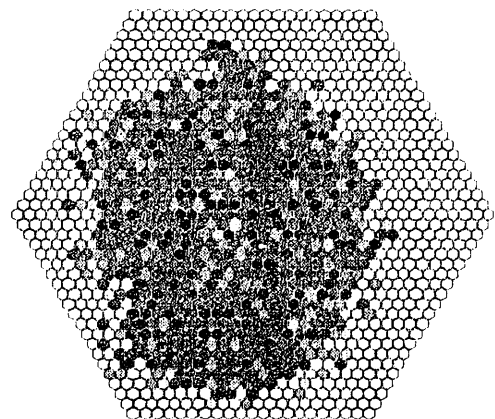
$D = 0.2$
7,066 年
38,297 人



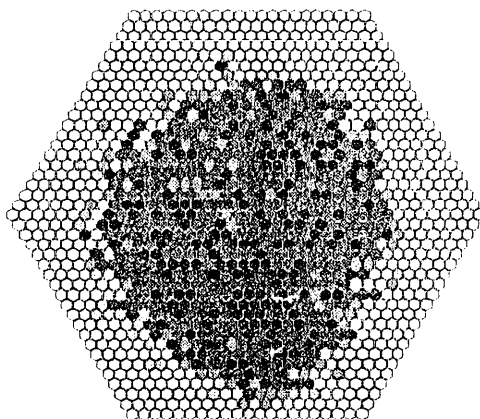
$D = 0.8$
5,803 年
39,300 人



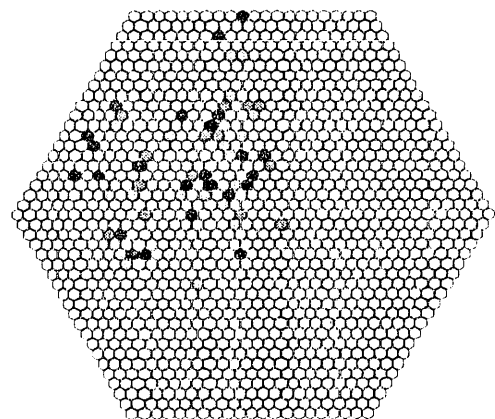
$E = 0.25$
8,260 年
41,131 人



$E = 1.0$
5,880 年
41,311 人



$F = 0.15$
7,732 年
42,205 人



$F = 0.9$
2,611 年
2,693 人

条件A. 人口増加時のN R Rを変化させた場合

最も小さいN R R = $1.05^{1/4}$ (=1.0123) の場合の平均は 10^{413} (=13,500)年, $1.05^{1/2}$ (=1.0247) で 10^{398} (=9,600)年, 1.05で 10^{380} (=6,800)年, 1.05^2 (=1.1025) で 10^{360} (=4,000)年, 1.05^4 (=1.2155)年のときで 10^{346} (=2,800)年であった。

一元配置分散分析および Duncan 法による多重比較によれば, N R R水準の違いにより外縁に達するまでの平均年数に有意差が認められた。

条件B. 人口増加とするRの上限を変化させた場合

Rの値が0.2, 0.4, 0.6, 0.8と変化するにつれ, 到達年数は 10^{422} (=16,400)年, 10^{397} (=9,400)年, 10^{380} (=6,800)年, 10^{356} (=3,600)年と有意に減少した。

条件C. 人口移出可能となるRを変化させた場合

Rの値が0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0と変化するにつれ, 到達年数は 10^{335} (=2,200)年, 10^{344} (=2,800)年, 10^{349} (=3,100)年, 10^{373} (=5,400)年, 10^{380} (=6,800)年, 10^{391} (=8,000)年と有意に増加した。

条件D. 他のセルから移入可能となるRを変化させた場合

到達年数は 10^{373} (=5,400)年~ 10^{380} (=6,400)年の間であった。各水準毎の比較では, Rの値が0.2と0.4の間には差はなく, また0.6と0.8の間にも差はなかったが, 0.2または0.4と, 0.6または0.8の間には有意差が認められた。

条件E. セルとして移住する確率を変化させた場合

確率を0.25~1の間で変化させても有意差は見られなかった。

条件F. セルとして移住するとなったときの個人が移住先へ移住する確率を変化させた場合

確率を0.15, 0.30, 0.60, 0.90と変化させるにつれ, 到達率は 10^{390} (=7,900)年, 10^{380} (=6,400)年, 10^{367} (=4,600)年, 10^{346} (=2,900)年と有意に減少した。

図2を見て分かるように, 外縁到達時におけるセル人口の空間的分布パターンは多くの場合は基準値の場合のものと酷似していた。しかし, 4つだけそうでないものがあった。A = $1.05^{1/4}$ および B = 0.2の時は人口密集の中心部から外れるにしたがい疎らなセルが目立つ。C = 0.2の場合は, ほとんどのセルの人口数が少ない事が特徴的である。F = 0.9の場合は, 人口が密集している箇所がほとんどなかった。

4. 実験1: 1,000年後の人口数の比較 (表2)

条件A. 人口増加時のN R Rを変化させた場合

最も小さいN R R = $1.05^{1/4}$ (=1.0123) の場合の総人口の平均は 10^{224} (=180)人, $1.05^{1/2}$ (=1.0247) で 10^{234} (=220)人, 1.05で 10^{241} (=260)人, 1.05^2 (=1.1025) で 10^{291} (=810)人, 1.05^4 (=1.2155)人のときで 10^{319} (=1,540)人であった。

一元配置分散分析および Duncan 法による多重比較によれば, N R R水準の違いにより1,000年に達したときの平均総人口に有意差が認められ, N R R = 1.05^2 のときはそれ以下のときより多く, また 1.05^4 のときはそれ以下の場合よりも多かった。

条件B. 人口増加とするRの上限を変化させた場合

Rが0.2, 0.4, 0.6, 0.8と変化するにつれ, 1,000年後の総人口は 10^{223} (=170)人, 10^{224} (=170)人, 10^{241} (=260)人, 10^{280} (=630)人となった。このうち0.8の場合は他に比べて有意に多かった。

条件C. 人口移出可能となるRを変化させた場合

Rの値が0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0と変化するにつれ, 1,000年後の総人口数の平均は 10^{273} (=540)人, 10^{267} (=460)人, 10^{275} (=560)人, 10^{241} (=260)人, 10^{241} (=260)人, 10^{234} (=220)人となった。

分散分析の結果, 平均に有意差が見られた。水準が0.2および0.6の場合は0.8, 0.9, 1.0の場合よ

表1 各条件下での外縁に達するまでの年数の比較

A：人口増加時のNRR						
NRR	1.0123	1.0247	1.05	1.1025	1.2155	
試行数	20	20	20	20	20	
平均 (log ₁₀ (年))	4.13	3.98	3.80	3.60	3.46	
標準偏差	0.10	0.05	0.06	0.04	0.04	
一元配置分散分析	Pr < 0.0001					
Duncan 法による多重比較	A	B	C	D	E	

B：人口増加とする水準（セル人口数／セル人口支持力）の上限						
水準	0.2	0.4	0.6	0.8		
試行数	20	20	20	20		
平均 (log ₁₀ (年))	4.22	3.97	3.40	3.56		
標準偏差	0.12	0.10	0.06	0.06		
一元配置分散分析	Pr < 0.0001					
Duncan 法による多重比較	A	B	C	D		

C：人口移出可能となる水準（セル人口数／セル人口支持力）						
水準	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1
試行数	20	20	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	3.35	3.44	3.49	3.73	3.80	3.91
標準偏差	0.08	0.10	0.08	0.05	0.06	0.05
一元配置分散分析	Pr < 0.0001					
Duncan 法による多重比較	A	B	C	D	E	F

D：他のセルから移入可能となる水準（セル人口数／セル人口支持力）				
水準	0.2	0.4	0.6	0.8
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	3.80	3.80	3.76	3.73
標準偏差	0.05	0.06	0.05	0.05
一元配置分散分析	Pr < 0.0001			
Duncan 法による多重比較	A	A	B	B

表 1 (続き)

E :セルとして移住をする確率

確率	0.25	0.5	0.75	1
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	3.83	3.80	3.81	3.80
標準偏差	0.06	0.06	0.05	0.07
一元配置分散分析	有意差なし			

F :セルとして移住するとなったときの個人が移住先へ移住する確率

確率	0.15	0.3	0.6	0.9
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	3.90	3.80	3.67	3.46
標準偏差	0.06	0.06	0.06	0.17
一元配置分散分析	Pr < 0.0001			
Duncan 法による多重比較	A	B	C	D

(注) Duncan 法においては、すべて $\alpha = 0.05$ とした。
 また、同一のアルファベットが付いたグループ内では平均値に有意差はない。
 基準値を縦の野線で囲んで表した。

り多く、また、1.0 の場合は他の水準の場合より少なかった。

条件 D. 他のセルから移入可能となる R を変化させた場合

1,000 年後の総人口数の平均は 10^{241} (=260) 人 ~ 10^{256} (=360) 人の間であった。各水準毎の比較では、有意な差は見られなかった。

条件 E. セルとして移住する確率を変化させた場合

1,000 年後の総人口数の平均は 10^{238} (=240) 人 ~ 10^{251} (=320) 人となり、有意差は見られなかった。

条件 F. セルとして移住するとなったときの個人が移住先へ移住する確率を変化させた場合

確率を 0.15, 0.30, 0.60, 0.90 と変化させた場合の 1,000 年後の総人口数の平均は 10^{228} (=190) 人, 10^{241} (=260) 人, 10^{258} (=380) 人, 10^{253} (=340) 人となった。分散分析および多重比較によれば、確率が 0.15 の場合は 0.60, 0.90 の場合より少なかった。

表 2 各条件下での 1000 年後の人口数の比較

A :人口増加時の N R R

N R R	1.0123	1.0247	1.05	1.1025	1.2155
試行数	20	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	2.24	2.34	2.41	2.91	3.19
標準偏差	0.32	0.28	0.44	0.23	0.21
一元配置分散分析	Pr < 0.0001				
Duncan 法による多重比較	C	C	C	B	A

表2 (続き)

B : 人口増加とする水準 (セル人口数/セル人口支持力) の上限

水準	0.2	0.4	0.6	0.8
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	2.23	2.24	2.41	2.80
標準偏差	0.29	0.47	0.44	0.25
一元配置分散分析	Pr < 0.0001			
Duncan 法による多重比較	A	B	B	B

C : 人口移出可能となる水準 (セル人口数/セル人口支持力)

水準	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1
試行数	20	20	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	2.73	2.67	2.75	2.41	2.41	2.34
標準偏差	0.42	0.57	0.49	0.30	0.44	0.34
一元配置分散分析	Pr < 0.0055					
Duncan 法による多重比較	A	A B	A	B C	B C	C

D : 他のセルから移入可能となる水準 (セル人口数/セル人口支持力)

水準	0.2	0.4	0.6	0.8
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	2.45	2.41	2.44	2.56
標準偏差	0.29	0.44	0.35	0.29
一元配置分散分析	有意差なし			

E : セルとして移住をする確率

確率	0.25	0.5	0.75	1
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	2.38	2.41	2.46	2.51
標準偏差	0.28	0.44	0.29	0.32
一元配置分散分析	有意差なし			

F : セルとして移住するとなったときの個人が移住先へ移住する確率

確率	0.15	0.3	0.6	0.9
試行数	20	20	20	20
平均 (log ₁₀ (年))	2.28	2.41	2.58	2.53
標準偏差	0.26	0.44	0.26	0.28
一元配置分散分析	Pr < 0.0183			
Duncan 法による多重比較	B	A B	A	A

(注) Duncan 法においては, すべて $\alpha = 0.05$ とした.

また, 同一のアルファベットが付いたグループ内では平均値に有意差はない.
基準値を縦の罫線で囲んで表した.

5. 実験1：20回外縁に達するまでに人口消滅した試行の回数の比較（表3）

表3から一見してわかるように、人口が消滅した試行の回数が多かったのは、次の2つの場合であった。

①人口増加時の $N R R$ が $10^{1/4}$ ($=1.0123$) のとき。(12回)

②人口増加とする水準の上限を 0.2 としたとき。(18回)

これらのうちで、消滅までに最も時間のかかった場合 ($B=0.2$ のときの1例) について、その100年毎の総人口の推移を図4に、また4,000, 8,000, 12,000, 16,000年次でのセル人口の空間的分布を図5に示す。このように、総人口数は終始高々数百人と少ないま

図4 人口が消滅するまでの総人口の推移。
($B = 0.2$ で、消滅まで最も長時間かかった例。100年毎)

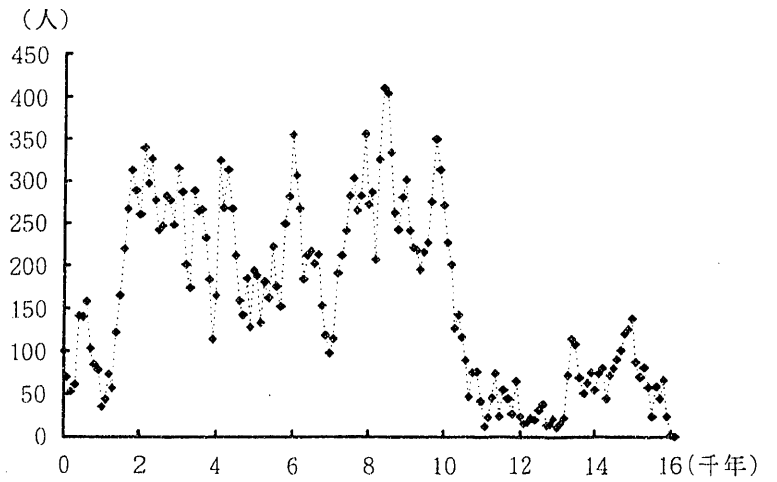


図5 条件 $B = 0.2$ のとき、外縁に到達する前に人口が消滅した場合のセル人口の空間的分布。(16,068年に総人口が0となった。)

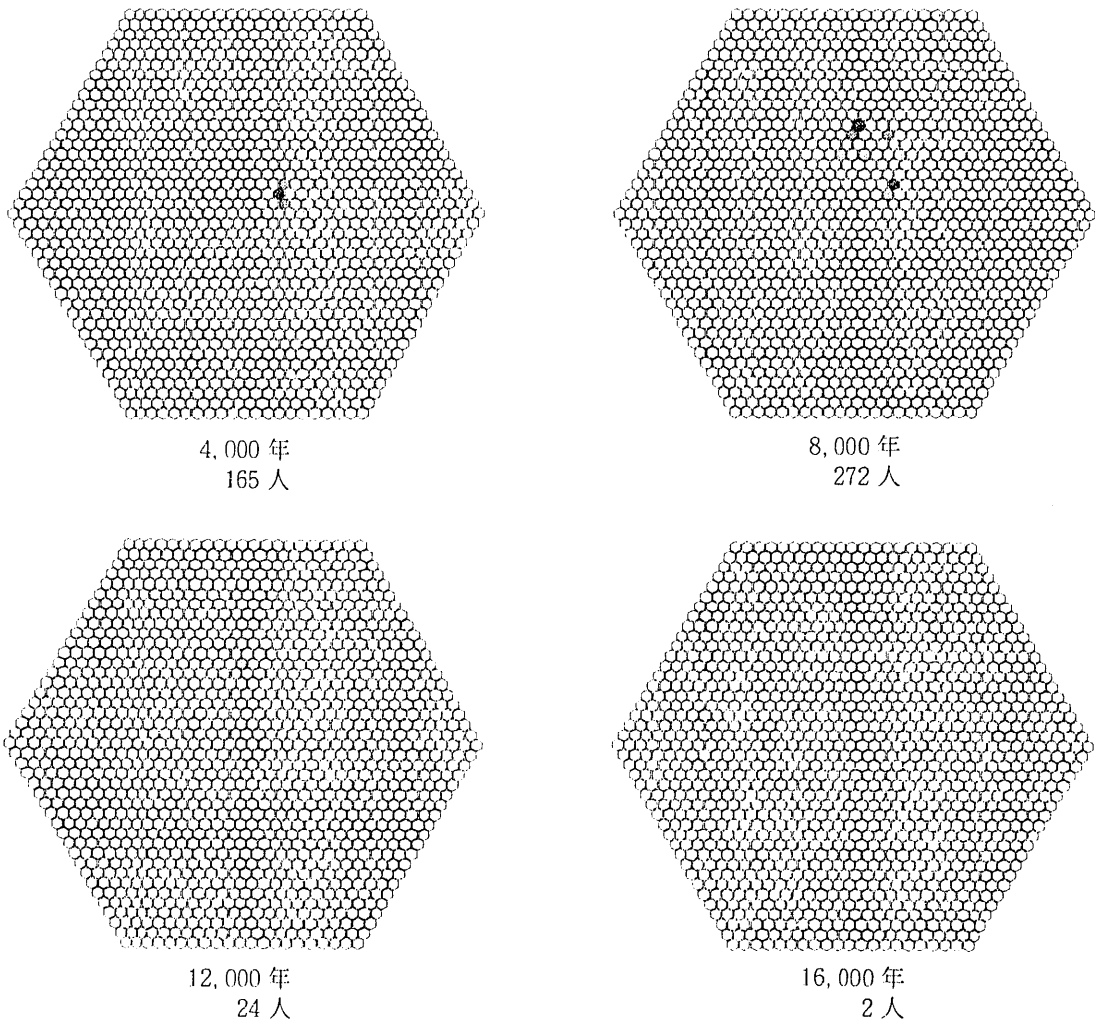


表3 各条件下で20回外縁に到達するまでに人口消滅した回数の比較

A：人口増加時のNRR

NRR	1.0123	1.0247	1.05	1.1025	1.2155
試行数	12	3	1	0	0
平均 (log10(年))	3.00	3.30	3.29	—	—
標準偏差	0.23	0.46	—	—	—

B：人口増加とする水準（セル人口数／セル人口支持力）の上限

水準	0.2	0.4	0.6	0.8
試行数	18	3	1	1
平均 (log10(年))	3.39	2.86	3.29	2.77
標準偏差	0.39	0.72	—	—

C：人口移出可能となる水準（セル人口数／セル人口支持力）

水準	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1
試行数	0	1	0	0	1	4
平均 (log10(年))	—	2.58	—	—	3.29	3.11
標準偏差	—	—	—	—	—	0.34

D：他のセルから移入可能となる水準（セル人口数／セル人口支持力）

水準	0.2	0.4	0.6	0.8
試行数	3	1	0	2
平均 (log10(年))	3.01	3.29	—	2.91
標準偏差	0.14	—	—	0.06

E：セルとして移住をする確率

確率	0.25	0.5	0.75	1
試行数	0	1	3	1
平均 (log10(年))	—	3.29	2.92	2.48
標準偏差	—	—	0.13	—

F：セルとして移住するとなったときの個人が移住先へ移住する確率

確率	0.15	0.3	0.6	0.9
試行数	2	1	2	1
平均 (log10(年))	2.89	3.29	3.18	2.84
標準偏差	0.29	—	0.15	—

(注) 基準値を縦の罫線で囲んで表した。

図6 条件C = 0.2, 条件F = 0.9とした時の500年毎, 400年後までのセル人口の空間的広がり

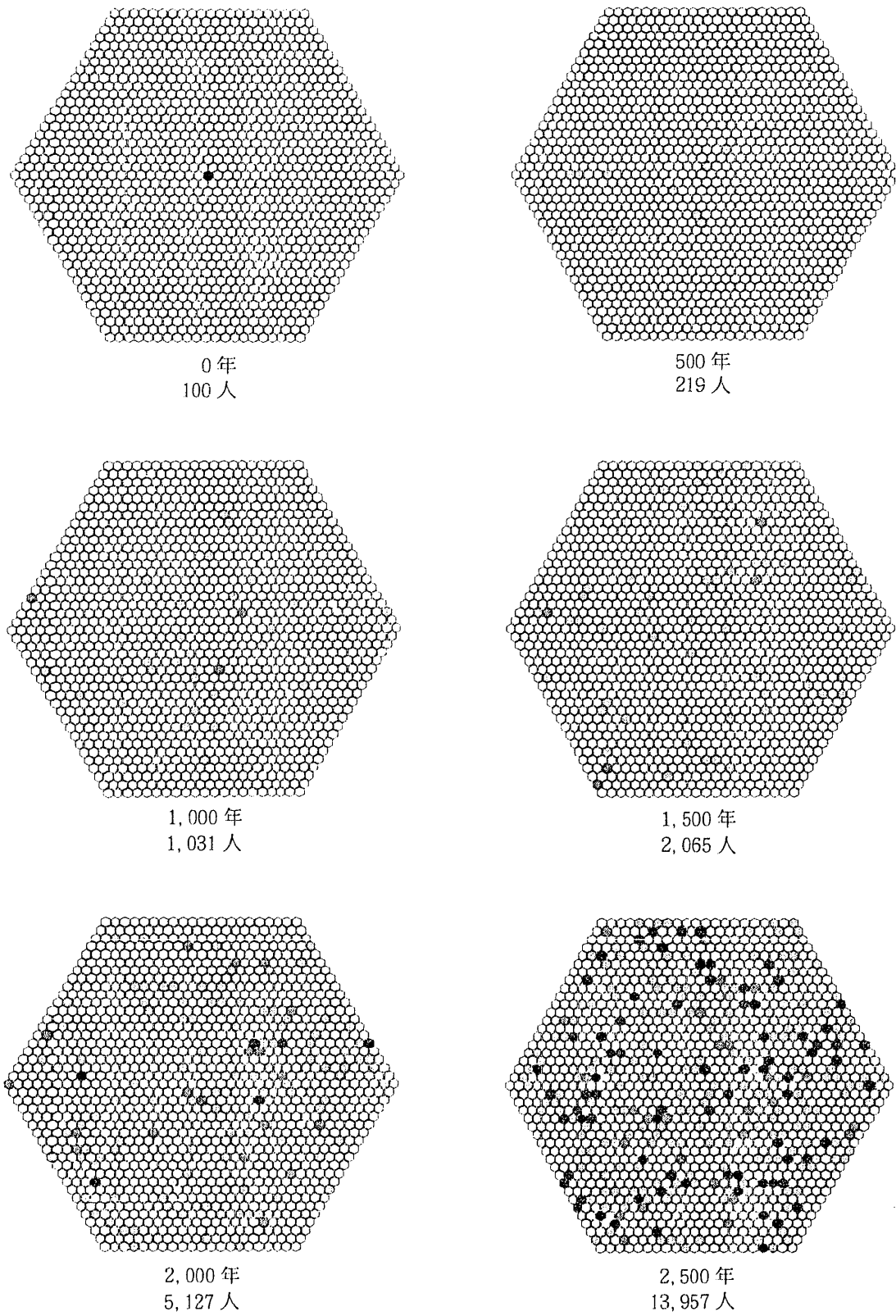
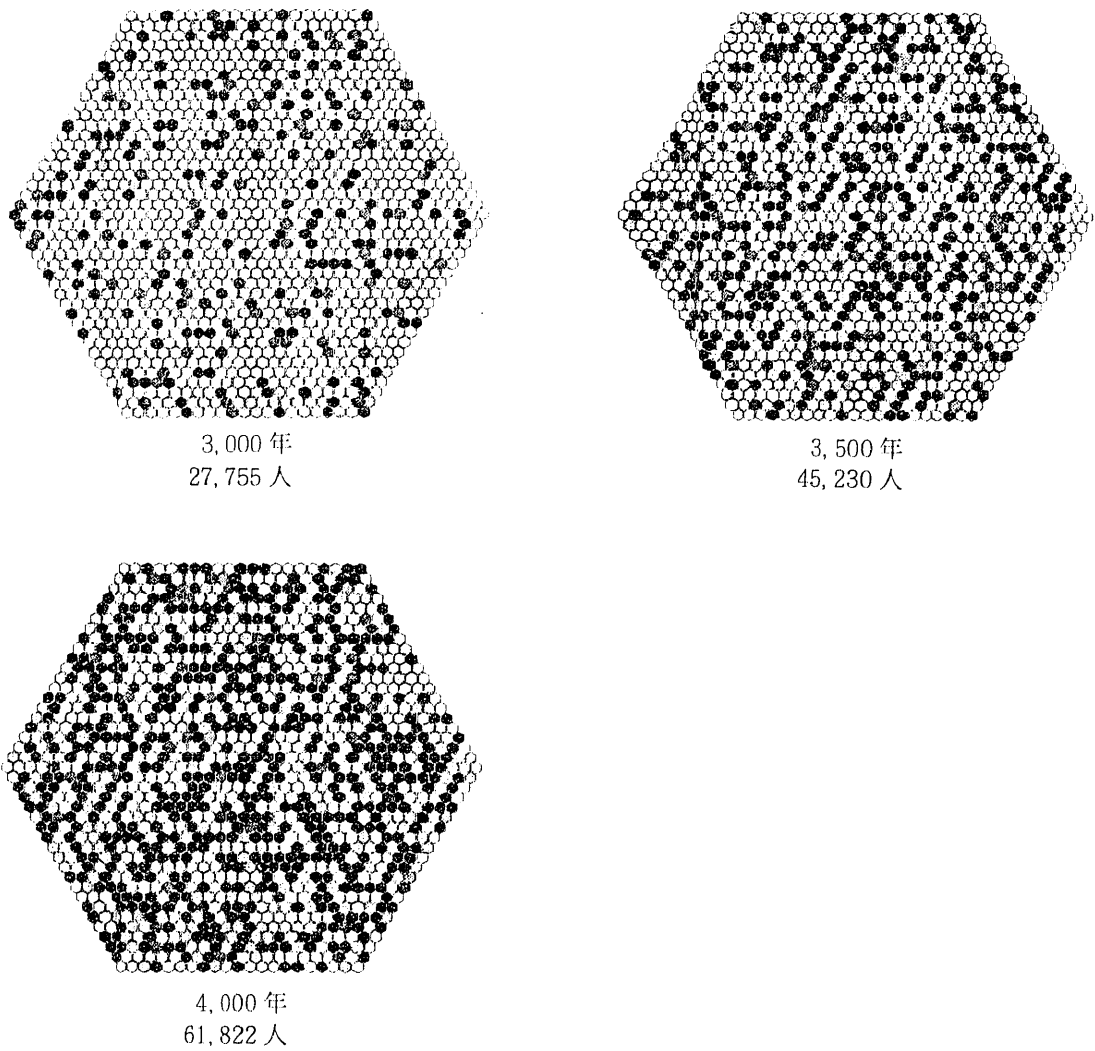


図6 (続き)



まで推移し、最後に消滅した。

6. 実験2：条件C=0.2, 条件F=0.9とした場合

この場合の到達年数の平均は $10^{2.74}$ (=550)年, 標準偏差は $10^{0.68}$ 年であった。最も速い条件を組み合わせただけでなく, 相乗効果も加わってさらに速い拡散を示した。

また, この場合に限り外縁に到達してからもプログラムを停止させずに4,000年後までシミュレートした。その代表例のセル人口の空間分布を500年毎に示す(図6)。実験1で見られた拡散の空間的な広がりパターンとしては, 図1に代表されるような風船拡大型のものが多かったが, 実験2ではまったく異なり, バラバラに広がってから次第に近傍の空いているセルを埋めていくパターンが見られた。

VI 考察

1. 拡散速度について

最初に拡散速度についての考察を行う。今回の実験では, 拡散速度を中心から外縁に達するまでの

年数としてとらえた。そこでこれを [km/年] という単位で表現するために次の仮定を立ててみる。

まずCCであるが、これを [人/セル] という単位から [km/年] にするために、具体的な値として0.1 [人/km²] としてみる。この仮定より、100 [人/セル] というCCは、セルの面積が1,000 km² であることになる。

一方、セルの1辺をa [km] とすると面積は $3\sqrt{3} a^2/2$ 、隣接するセルの中心間の距離は $\sqrt{3} a$ となるから、隣接するセルの中心間の距離は約34 kmと求まる。今回の実験ではこの20倍の距離を広がったので、約680 kmとなる。よって、これに要した年数が1,000年なら拡散速度 [km/年] は0.68 [km/年]、10,000年なら0.068 [km/年] となる。

この関係に実験1で得られた値を代入してみよう。すべて基準値の場合は $680/6,400=0.11$ [km/年]、最も遅かった条件B=0.2のときは $680/16,400=0.041$ [km/年]、最も速かった条件C=0.2のときは $680/2,200=0.31$ [km/年] となる。さらに実験2のC=0.2、F=0.9の場合は、 $680/550=1.24$ [km/年] である。

ここで前報告と同様にMartin⁶⁾によるモンゴロイドのアメリカ大陸への拡散に関する説について考えてみたい。彼の説は、最後の氷河期に海水面が下降した際ベーリング海峡を渡り、約11,500年前に北アメリカ大陸の無氷回廊を出て現在のEdmunton付近に到達、そして1,000年で南アメリカ大陸の南端にまで急激に拡散して行った、というものである。その際、拡散の前線では、移動速度は16 [km/年]、人口増加率は年率3.4 [%] または20年間で人口が2倍、人口密度は0.4 [人/km²] としている。

これを実験1のC=0.2の場合の拡散速度と比較すると、Martinでは人口密度が4倍となっていることを考慮すると拡散速度は約100倍となっている。この差をNRRを大きくすることで埋めると考えると、表1の常用対数を取った到達年数値がNRRに比例すると見なして概算して、 $\Delta NRR = -\log_{10}100 \times (1.2155 - 1.05) / (3.46 - 3.80) = 0.974$ より、 $NRR = 1.05 + 0.974 = 2.024$ であればよい、これはMartinの20年間で人口が2倍という仮定とほぼ一致する。

さて、この速度の大小に影響する要因として考えられるのは2つある。まず第1にNRRである。これはまさに人口増加速度が大きければ人が増え、周囲の土地に広がって行くから、これが大きければ拡散速度も増加する。条件Aを変化させることにより到達年数に違いが生じたのも当然と思われる。また、条件BおよびCも同様である。人口増加とするRを大きく設定するという事は、平均的なNRRを増加させることも見ることが出来る。同様に、人口増加しないRとなる前に人口の一部が他のセルへ移住していく場合もNRRが大きい状態をなるべく長く経験する方向での設定と言える。

もう一つの要因は、移住頻度であろう。条件Dおよび条件Fを変化させた場合に到達年数に差を生じさせた理由である。条件Dの他のセルから移入可能となるRを下げるということは、近くにある移出可能状態のセルが移住する際の選択の自由度を減少させる。人口の拡散が中心から周りへじわじわと広がっていくように進む場合は、人口を多く抱えるセルが密集した所では人口移動が困難になる。それと同時に人口増加のNRRとなる水準の上限前後まで速やかに人口増加し、以後は増加も減少もあまりなくなる。このため、総人口の増加のうち、多くは拡散の前線部だけでまかなわれるという状態になるわけである。

一方で、条件Fのセルとして移住するとなったときに個人が移住先へ移動する確率を変化させた場合であるが、たとえばこれを基準値の2倍にするということは、2倍の延べ人口が移動するということになる。これを簡単に説明すると次のようになる。今回のモデルでは3セルまでの移住を可能としているから、仮に平均の移住距離を $(1 + 2 + 3 [\text{セル}]) / 3 = 2$ として、1年に1,000人が動いたと

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

すると、延べの移動距離・人〔セル・人〕は2,000となる。条件Fを2倍にすれば、大まかに見て4,000〔セル・人〕になる。したがって拡散速度にもこの効果が表れてくるであろう。ただ、 $F=0.6$ 以下のときでは、 $F=0.9$ で見られたような非常に疎らな空間分布パターンは観察されず、むしろ基準値のそれと同様であった（図は略す。）。したがって、 F が1に近くなると別の効果が現れているように思われる。

上述の点に関連するが、実験2で見られた非常に少ない到達年数即ち非常に大きな拡散速度は大変興味深い点である。実験1で $C=0.2$ とした場合の拡散速度は基準値の2.87倍、 $F=0.9$ とした場合は2.21であるから、これらが相加効果として表れるとすれば $2.87 \times 2.21 = 6.36$ 倍となる事が期待される。実際にはその2倍近い11.7倍も速くなったのであるから、何らかの相乗効果が存在している。

この要因は次のように考えられる。 $C=0.2$ ということはNRRは新しい土地がある限りは常に人口増加の水準にあるという事を意味する。また、 $F=0.9$ ということとはほとんどの人数が移住先へ移ることを意味する。そこで、例えばCCの0.2倍である20人の0.9倍即ち18人が周辺のセルへ移住したとしよう。NRR=1.05であるからすぐに人口は増加して20人に達する。すると再び移住することになる。これを繰り返すため、結果として非常に大きな拡散速度が観察されることになる。ピョンピョンと跳び廻るかのごとく頻繁に移住を繰り返し、種をまいて移って行くというわけである。これが相乗効果の本質であろう。その大きな要素として $F=0.9$ が働いている。

このことは、ヒト集団が効率的に移住・拡散をするならば、人口が少し増えたらその分をその場所に残して大多数が新天地へ移るといった方式が良いことを示している。

2. 人口増加速度について

最初になぜ1,000年後の人口数で集計したかを述べておく、それは、条件によっては2,000年に達する前に外縁に到達したため、以後は壁に突き当たった状態での人口増加を見ることになるためである。そこで、区切りが良く、その中で最大の値として1,000年とした。

人口増加速度を左右する要因はNRRである。したがって他の要因がどのようにNRRに対して影響を与えるかが問題となる、それを念頭においた上で表2で得られた結果を見てみよう。

まず最初に条件Aであるが、これはNRRそのものなので差が出て当然である。 $NRR \leq 1.05$ の場合では差が見られなかったのは、水準を選定する際を目盛りの取り方に原因があると思われる。今回は広い範囲で探ることを主眼としたため1.05の $1/4$ 、 $1/2$ 、1、2、4乗を調べたが、対数を取った平均値とNRRは線形に近い関係にある。従って $1/4$ 、 $1/2$ 、1乗の間の差よりも1、2、4乗の間の差の方が当然大きい。観察期間が短いこともあり、 $1/4$ 、 $1/2$ 、1乗の間では差が見られなかったであろう。

また、1乗と2乗の平均の差は $2.91 - 2.41 = 0.50$ であるのに、2乗と4乗の間の差は $3.19 - 2.91 = 0.28$ しかない。この理由としては、移動の条件による制約のため、ある程度人口が増加すると中央部分では人口が密集した状態となるため、そこでの人口増加が見込まれなくなるためであろう。

次に条件Bであるが、1,000年程度ではあまりはっきりした差は生じていない。0.8の場合だけ多かったが、これは条件Aの場合と事情は同様であろう。

条件Cと条件Fでは人口増加速度に差が生じている。これは、頻繁に分裂と移住を繰り返した方がRが小さくなりやすいため、人口増加とするNRRの水準にとどまる時間が長くなるためであると考えられる。

3. 条件Dと条件Eについて

条件D「他のセルから移入可能となるR」を変化させた場合は、到達年数で小さな差が見られたが、

1,000年後の人口数では差が見られなかった。到達年数の差にしても平均での最大と最小の差は $3.80 - 3.73 = 0.07$ とわずかなものであった。

この理由は、半径3セルの範囲には最大で36セルあり、このうちの一つでも条件Dを満たすものがあれば、移住は可能となる点が挙げられよう。条件Dを満たすセルがない状況というのは、周囲のセルがすでに人で満たされている場合であるが、そういう場所はすでに人を受け入れる余裕のある場所は少なく、結果として人口の拡散・移動には大きな関与はできなくなっている。

条件Eのセルとして移住をする確率は、 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 、 1 という刻みで変化させても到達年数、1,000年後の人口数いずれも有意な差が生じなかった。一般に年に r という確率で移住が発生するとして n 年後に移住する期待値は $n(1-r)^{n-1}r$ であることから、 $1 \sim \infty$ 年後での期待値の総和は $1/r$ となる。 $1/4$ という確率では期待値としては4年、確率1では1年で移住するということになる。移住可能な状態になってから3年程度はさらにその土地にとどまるとしても、集団の人口増加あるいは拡散にあまり影響がないと考えられる。

これらDおよびEは、今回の設定値の範囲ではモデルに組み込む必要はないと言える。

4. 人口消滅と偶然変動について

外縁に達する前に人口が消滅したケースは条件 $A = 1.05^{1/4} (= 1.0123)$ のときと同じ条件 $B = 0.2$ の時である。後者の場合も、セルの人口数が $B = 0.2$ を超えた時には $NR = 0$ であるから、移住の水準である $B = 0.9$ まで人口が増加するまでには長い時間がかかる。いずれも人口増加率が小さい場合であり、この水準では確率的な偶然変動により頻繁に人口が消滅する事を示している。

図4および図5に人口が消滅した試行の例を示したが、総人口数は高々数百人（最大で409人）のまま16,000年余りも過ぎていくのが特徴的である。この間に移動を繰り返しながらも、総人口の大きな増加は成されないままに消滅してしまう。

この際に注意すべきは、この集団の人口増加率を一時的に観察するならば急激に増加したり減少したりしていることである。例えば数十年という単位で観察した場合には、集団にバックグラウンドとして暴露されている死亡確率や出産確率は一定であるにも拘わらず、偶然変動が影響した結果としての人口数が観察されてしまうというわけである。

この点は狩猟採集民族に限った話ではなく、集団の人口数が小さい場合には数十年程度の観察期間では人口増加率や出生率に偶然変動の影響が強く現れるため、真の値は見えにくいという事で、これは、小集団におけるセンサスデータなどを処理する際には十分な注意が必要であることを意味している。

5. 本モデルの他分野への応用可能性

本モデルは先史人口集団の移住・拡散過程をシミュレートすることを目的として開発された。しかし、これと良く似た現象は現代でも見られる。

例えば熱帯雨林における焼き畑耕作民による森林消失の過程、あるいはステップ気候地域における薪用の草木伐採による砂漠化の過程などである。これらの現象には、本モデルでは終始一定であったセルの人口支持力を変化させられるように改変すれば応用可能である。

手つかずの原生林を焼いて作物を栽培したときの収量と、再生した森林を再び焼いた場合の収量では違いがある。この収量を人口支持力とみなせば、焼き畑耕作民が移住・拡散していく過程がシミュレートできる。何度も焼かれて人口支持力が低くなったセルがはげ山というわけである。砂漠化に関しても同様の応用が可能であろう。

VIII まとめ

本研究は、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特性評価を行った。評価の方法としては、モデルにおける6つの条件に対してそれぞれ基準値を設定し、他の条件は基準値のまま注目する条件だけ基準値以外に変化させた。対象地域は仮想的な1辺が20セルの正六角形状の島である。この中心に初期人口を配置し、外縁のセルに到達するまでの年数、1,000年後の総人口数等を調べた。その結果、次の事が分かった。

- (1) 到達年数および1,000年後の総人口数に大きな違いをもたらす条件は、A, B, C, Fであった。DおよびEでは差は僅かなものであったか、あるいは差がなかった。
- (2) $F=0.9$ とすると、空間的な拡散パターンが他の設定値とは大きく異なり、頻繁な移住が見られ、疎らに且つ速く拡散した。
- (3) 到達年数が特に小さかった条件CとFの値を組み合わせると相乗効果が見られ、跳び廻るように移住を繰り返し、相加的と考えた場合の倍の速さで拡散した。
- (4) 得られた特性値とその関係を、Martin (1973) のモデルに当てはめて概算すると、ほぼ同様のNRRが必要となると算出された。
- (5) 集団の人口数が数百人の場合は、人口の増加は確率的な偶然変動に大きく影響されるため、短期的なセンサスでは、背景にあると考えられる真の死亡確率や出生確率は見えにくい。
- (6) 本モデルの現代の人口集団に対する応用可能性を示した。

IX 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）」の援助を受けました。

Evaluation of the Characteristics of Simulation Model for Migrations and Dispersals of Prehistoric Human Populations

Tamotsu OHBA

Two types of experiments have been conducted to evaluate the characteristics of the previously reported simulation model for migrations and dispersals of prehistoric human populations. The subject area for the experiments are constructed on the computer, which is a hexagonal "land" consisting of 1261 cells with hexagonal-linkage. An "initial" population made up of 100 persons has been set on the center of the hexagonal land, then the years needed to reach the cells on the edge of the hexagonal land and the total population in each period have been calculated under the conditions determined by the six parameters of the model.

We have obtained the following results ;

1. The following four conditions have been examined : A : NRR when a cell is aligned to the increasing phase ; B : R (=the population size of a cell/the carrying capacity of the cell) to which a cell is aligned to the increase phase ; C : R under which a cell do not migrate ; and F : personal probability of migration to the destinated cell when a cell is going to migrate. They have made apparent differences in the years and the size of population. But the following two conditions do not affect them significantly ; D : R over which a cell does not accept migrants ; and E : probability to migrate when a cell exceeds R of condition C.
2. A unique pattern of spatial dispersal has been observed under the condition, F : $p=0.9$. Cells migrated more frequently and dispersed more rapidly.
3. Under the combined condition, C : $R=0.2$ and F : $p=0.9$, more frequent and rapid dispersal has been observed than under the condition F : $p=0.9$ or C : $R=0.2$. This effect is considered synergistic.
4. Applying characteristic data and their mutual relations hip to Martin's (1973) model, we have found that the approximate value of $NRR=2$ would be needed for human populations to migrate from Edmunton to the southern end of South America under the condition, C : $R=0.2$.
5. When a population consists of a few hundred or so, a random effect caused by the stochasticity of the reproductive process would affect the increase or the decrease of the population. A census data from such a small population should be treated with some care of that effect.
6. The applicability of this simulation model to modern human populations is also discussed.