

# エージェントのクラスタ化の相互調整モデル

: コンピュータシミュレーションによる検討

高木英至 (TAKAGI, Eiji)

キーワード: 相互調整, 社会的影響, コンピュータシミュレーション

意見や価値観などの態度が類似した者がその態度に応じてクラスタ化 (clustering), あるいは分離 (segregation) を達成することは, 社会の基本的秩序の1つである. こうしたクラスタ化は大別して2つの経路から生じ得る. 第1は移動によって態度が類似したエージェント同士が近接して位置するようになることである. Schelling (1971), Sakoda (1971) の説に従ったコンピュータシミュレーション (Epstein & Axtell, 1996) は, 自分と同じ値を持つ隣接エージェントの比率への選好を個々のエージェントが持つとき, エージェントの移動によってエージェント社会に分離しないクラスタ化が生じることを明らかにしている. 第2は相互の影響によってエージェントの態度変化がおこることでクラスタ化が生じる経路である. Nowak, Latané らの社会的影響 (Social Impact) のシミュレーションモデル (以下, SIMと略) は, セル空間上のエージェント間に距離に応じた影響力が生じることを前提に次の傾向が生じることを示した (Latané, Nowak & Liu, 1994; Nowak & Latané, 1994; Nowak, Szamrei & Latané, 1990; ). (1) 態度ごとのクラスタが生じる. (2) 初期状態での少数派もクラスタになることによって残存できる. しかし均衡時の少数派サイズは初期比率に比べて減少する. (3) 空間に端がある (空間が torus でない) とき, 少数派は空間の端に位置しやすい.

SIMは態度が2値的な場合に限定されるなど, 強い制約の下にある. そこで以下ではSIMをより一般化した「相互調整モデル (Mutual Adjustment Model, MAMと略)」を提示する. SIMとの大きな相違は次の2点である. 第1に, SIMでは態度が2値 (賛成/反対など) であったのに対し, 相互調整モデルでは態度を2進数の組 (例: 1001) と定義する. 従って態

度の値は多数になり得るし, 態度間の距離も定義することができる. 第2に, SIMでは影響力が強い態度をエージェントがそのまま採用すると仮定するのに対し, 相互調整モデルではエージェントが態度の変更を自発的に試み, 現在よりも適合度の高い態度に変化する, と考える. 例えば, SIMでは2つの強力な態度勢力に出会ったときにエージェントは常にその片方を採用することになる. しかしMAMでは, 00 と 11 という勢力が強い態度の間に位置するエージェントは 01 といった折衷的な態度をとることが許される.

SIMとMAMの挙動の間には連続面と非連続面があると想定できる. 連続面とは次の2点である.

第1に, 少数派を含めて複数の態度のクラスタができるという結果は, 影響力が局所的に限定される場合だけのはずである. セル間の影響が距離にかかわらず大域的に働くなら, あるいは距離による限定が少ないなら, セル空間内では最強の態度が全体を支配するはずである. SIMについては, 「距離係数」(後述) が小さければ (大域的な影響が生じれば) 少数派の残存可能性がなくなることが分かっている (高木, 2000). 同様の効果はMAMでも観測できると予想できる.

第2に, 初期の少数派が均衡時により少数になるという傾向もSIMと同様にMAMでも観測できるだろう. この傾向は規模ないし度数に基づく構造効果と見ることができる (Blau, 1977; Mayhew & Levinger, 1976). エージェントが態度にかかわらずランダムに分布するとき, 多数派エージェントは周囲に多くの同類を見出し, 少数派エージェントは多数派に囲まれやすい. 従って改宗によって多数派は増大し少数派が減少する. このような多数派 [少数派] の増加 [減少] は乗数効果のように累積し, 少数派が相互支持的なクラ

スタに縮小するまで続くだろう。同じ過程はMAMにおいても生じるはずである。

他方でMAMにはSIMにない要素が入っている。最も重要な要素は態度間の距離である。態度は単に2値的に異なるのではなく、その間に何らかの距離を想定することは自然な仮定のはずである。かけ離れた態度はその保持者相互に適合度(後述)の低下をもたらす。従ってかけ離れた態度の一方が優勢になる状況ではもう片方の態度が特に劣勢になることが生じるかも知れない。また、かけ離れた態度がともに優勢なクラスタを作るとき、両者は牽制し合って中間的な態度がニッチを見出して生き残りやすくなるかも知れない。SIMではまだ検討されていないこうした側面に検討を加えることが本研究の重要な目的である。

### 相互調整モデルの前提と手順

MAMは以下の前提と手順に従う。

1.  $50 \times 50$  のセル空間を仮定する。各セルが1人のエージェントを表すと考え、エージェントは移動しない。セル空間は torus であり、上端と下端、右端と左端はつながっている。
2. セルの座標を行と列の順番で示す。左上のセルは(1, 1)、右下のセルが(50, 50)である。
3. セル間にブロック距離を定義する。座標  $(x_1, y_1)$  と  $(x_2, y_2)$  の距離を次式で表す。

$$d[(x_1, y_1), (x_2, y_2)] = \min |x_1 - x_2| + \min |y_1 - y_2| \quad (1)$$

「隣接するセル」とは距離が最小(1)の他のセル、つまり上下左右4つのセルである(ノイマン近傍)。

4. セル(エージェント)の態度の値を2進数の組(例:'1001')で定義する。任意のセル間の適合度を、態度の要素の値が一致する数で定義する。'01' と '10' 間の適合度は0, '11' と '10' の適合度は1である。不一致の要素数が態度間の距離を指す。
5. セル  $i (= (x_1, y_1))$  の態度の適合度を次式で表す。

$$\text{Fitness}(i) = \sum_{j \in A} f_{ij} \cdot s_j / d_{ij}^n \quad (2)$$

ただし、 $A$ はセル  $i$  が「相互作用」するセルの集合、 $f_{ij}$  はセル間の適合度、 $s_j$  はセル  $j$  の強さ、 $d_{ij}$  はセル間の距離である。 $s_j$  は全セル同一(1.0)と考える。記定式はSIMの accumulative influence model (Latané, Nowak & Liu, 1994) に対応している。

6. (2)式の  $n$  を距離係数と呼ぶ。セル間の距離と影響力の潜在的な大きさの関係を表したのが図1である。 $n = 0$  のときは、任意のセルは距離にかかわらず他のセルから等しい影響を受ける。 $n$  が大きくなるほど遠いセルからの影響は小さくなる。

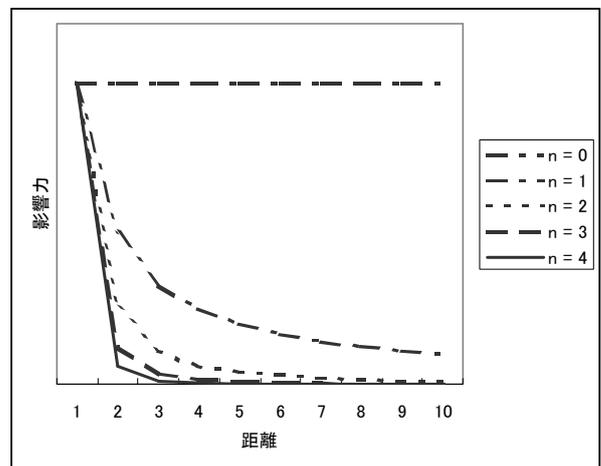


図1: 距離係数の効果

7. 現在の状態の「慣性」を考慮するため、SIMにならって $A$ には自分自身も含める。自分自身との距離には 1.0 以下の数値を当てはめる(後述)。
8. 各セルは自分のターンが来たとき、態度の各次元を確率 0.5 で探索的に変化させてみる。この仮の態度値の適合度が現状より高いときだけ、その仮の態度値に変更する。
9. シミュレーションは離散的なラウンドによって進行する。セルのターンはラウンドごとに乱数で決める。全セルの初期の態度値も乱数で決める。態度値を変化させるセルが全く出現しないラウンドが3回続いたとき、均衡にあると考えてシミュレーションを打ち切る。

## 距離係数の効果

次のようにパラメータを特定してMAMのシミュレーションを行なった。第1に、意見値ごとのクラスタのサイズが小さくなり過ぎる可能性を考慮し、態度値を2次元の2進数で定義する。態度値は 00, 01, 10, 11 の4種類である。第2に、各セルの自己との距離を、Latané, Nowak & Liu (1994) を踏襲して 0.84 と仮定した。

上記の特定の下で態度初期比率と距離係数を要因として(2×6)、条件ごとに20の run を実行した。態度初期比率は、態度の各次元の初期値が 1 となる確率が  $p[1]=0.4$  か  $p[1]=0.5$  によって操作する。P=0.4 のとき、態度値の '00', '01', '10', '11' が初期状態で出現する確率はそれぞれ、0.36, 0.24, 0.24, 0.16 である。距離係数要因は距離係数の  $n$  を0~4で 1.0 刻みに変化させて操作する。また統制条件として、セルの状態が自分自身と隣接する4セルだけで決まる隣接条件を用いる。隣接条件では距離係数の値を  $nb$  と表わし、自分との距離を 1.0 とおく。

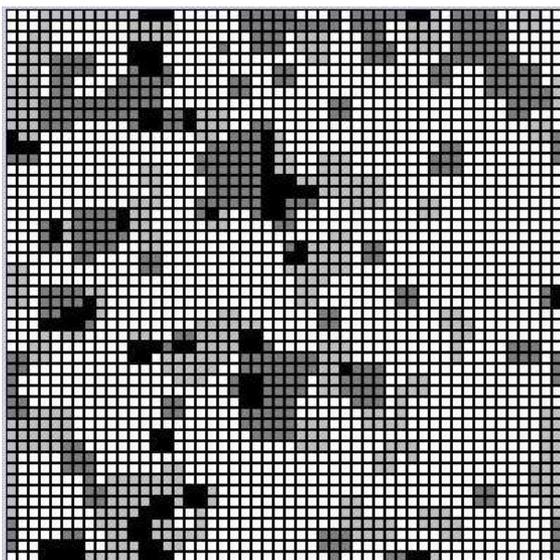


図2:最終ラウンドのセル空間の例

(色が薄い方から濃い順に 00, 01, 10, 11 を指す.)

SIMの結果と直接比較できるのは態度値の初期出現率が異なる条件である ( $p[1]=0.4$ )。図2は  $p[1]=0.4$  で  $n=4$  のときの最終ラウンドでのセル空間の様子を例示している。ランダムな態度値の分布から出発しながら態度値ごとのクラスタが出現しているのが分かる。

図3は最終ラウンドでの態度値ごとのセル度数の平均値を表す。距離による影響の差が少ない条件 ( $n=0\sim 2$ ) では初期の最大多数派がほぼ全体を制圧している。逆に、影響が近隣に限定されるほど少数派の残存率が高まる。なお、SIMの結果と同様に、初期の少数派 (01,10,11) は初期比率に比べて、最終の比率は条件にかかわらず低くなっている。初期比率が 01 や 01 より小さい 11 は、減少率が 01 や 01 よりも大きい。

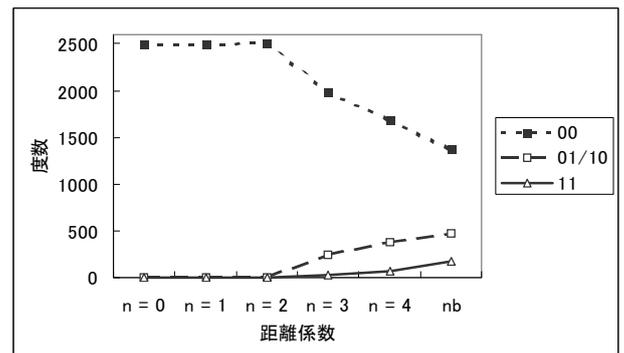


図3:最終ラウンドでの平均セル度数

(‘01/10’ は 01 と 10 の平均である.)

$P[1]=0.4$  の条件では初期状態で平均 1210 のクラスタが存在していた。ここにクラスタとは、その内部の何れかのセルと隣接関係でつながれたセルの集合を意味する。1セルでも1つのクラスタと数える。このクラスタ数は最終ラウンドでは  $n=0\sim 2$  で平均で 1.6~2.2 に減少する。  $n=3$  で 35.9,  $n=4$  で 85.1,  $nb$  で 127.6 である。図4は態度値ごとの平均クラスタ数を示す。最大多数派の 00 は度数が高く相互につながっているため、距離係数にかかわらずクラスタ数は少ない。距離が影響力を遮断する条件では、少数派のクラスタ数が増える。すなわち、距離が障壁となるときには少数派は多数の小さいクラスタを形

成しやすい。このことは次の図5でも確認できる。図5は態度値ごとの最大クラスタサイズの平均を示す。

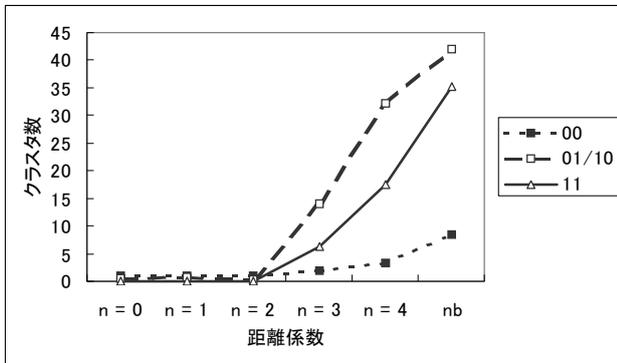


図4: 平均クラスタ数

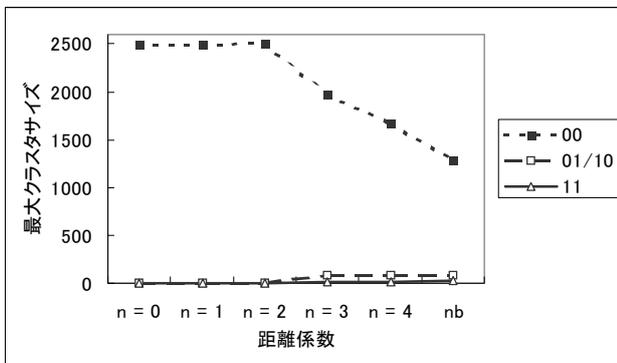


図5: 最大クラスタサイズの平均

以上の結果はSIMで観測された2つの傾向がMAMの前提でも確認できることを意味する。つまり第1に態度ごとにクラスタが生じている。第2に、距離の影響が適当な範囲にあることを前提に、初期比率での少数派もクラスタになることによって残存できる。しかし均衡時での少数派サイズは初期比率に比べて減少する。なお、距離による影響の障壁が小さければ少数派が存在できないことは、同様に距離係数を操作すればSIMでも確認できる(高木, 2000)。

各態度値の初期出現確率が等しい条件( $p[1]=0.5$ )の結果は次のようだった。距離係数  $n$  が0のときはすべての run で、何れか1つの態度値のクラスタがほぼ全体を支配する。 $n$  が1と2のときも基本的には同じことが生じる。が、 $n=1$  のときは30%の run で、 $n=2$  のときは50%の run で、セル空間は2つの大

きなクラスタによって分割されている。 $n=0\sim 2$  でのクラスタ数の平均は2前後である。が、 $n$  が3か4、および隣接条件下では、4つの態度値の度数がほぼ等しい状態で均衡する。クラスタ数の平均は135.4( $n=3$ ), 134.3( $n=4$ ), 192.0(nb)だった。以上の結果も、距離係数が小さいときは全体を統合する傾向が生じることを表している。

## 隣接セルの構成

セル空間におけるクラスタ化をマイクロなレベルでとらえるために、各セルがどの態度のセルと隣接しやすいかを調べてみる。セルは4つのセルと隣接する。態度の初期出現率が異なる条件( $p[1]=0.4$ )でその隣接セルの構成をセルの態度値ごとにまとめたのが図6である。どの態度のセルも生き残る3条件( $n=3, n=4, nb$ )だけを分析の対象とした。図6はその3条件の平均を表す。

図6は次の2点を伝えている。第1はどの態度でも距離の近い態度との隣接比率が高いことである。まず同じ態度のセルとの隣接比率が高い。態度が異なるセルの中では距離が遠い態度ほど隣接比率が低い。つまり距離のある態度とは遠ざかるようにクラスタが組織化されている。第2は隣接比率がセル度数の影響を受けていることである。すなわち、最終ラウンドでの度数の高い態度ほど同じ態度のセルと隣接しやすい。初期比率 $\times$ 距離係数( $2\times 3$ )別に、

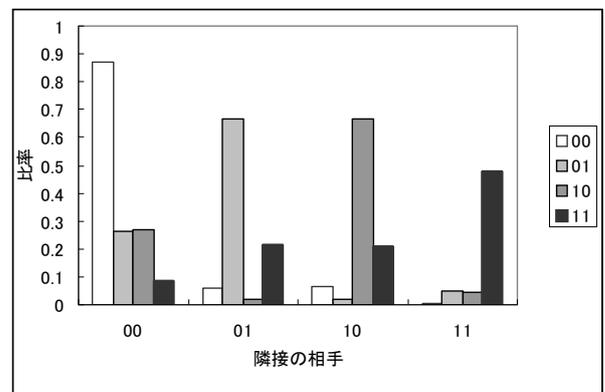


図6: 態度間の隣接比率

4つの態度のそれぞれの度数とその態度の最終度数の相関をとると ( $n=20$ ), 相関係数の値は  $.511(p<.01, 両側) \sim .971(p<.001)$ となる。つまり同じ条件の同じ態度であっても、度数が高いほど同類隣接率は高くなる。

上記の第2点は度数分布を前提にした一種の構造効果と考えることができる。度数が高い態度のセルは、偶然からでも同態度のセルと隣接する確率が高くなる。現実の社会でも一般に、サイズが大きい集団ほど内集団との接触可能性は高い (Blau, Blim, & Schwartz, 1982; South, Bonjean, Markham & Corder, 1982)。

上記の構造効果の影響を除いて態度ごとの隣接しやすさを評価するため、つぎのように「隣接係数」を求める。まず最終ラウンドでの度数分布を前提に隣接セルをランダムに選ぶと仮定したときの、態度ごとの隣接セル数の期待値を求める。隣接する4セルが特定の構成になる確率は多項分布によって求めることができる。この多項分布から隣接セルの態度の出現確率を求め、(態度*j*に対する態度*i*のセルの)隣接係数  $r_{ij}$  を次の式で定義する。

$$\text{隣接係数 } r_{ij} = \ln(F_{ij}/E_{ij}). \quad (3)$$

ただし  $F_{ij}$  は態度*i*のセルが態度*j*のセルと実際に隣接した比率、 $E_{ij}$  は多項分布から求めた期待比率である。実際の比率と期待比率が等しいとき  $r_{ij}$  は0となる。実際の比率の方が大きい[小さい]とき、 $r_{ij}$  は正[負]となる。なお、定義上  $r_{ij} = r_{ji}$  である。

図6と同じ3条件での、この隣接比率の平均を表したのが図7である。図7は次の3点を示している。

第1は態度の距離が近い相手との隣接係数が高いことである。どの態度値でも自分と同じ態度のセルとの隣接傾向は期待値を越え、最も遠い態度の相手との隣接傾向は期待値よりはるかに小さい。中間的な距離にある相手への隣接係数はその中間である。この傾向は初期出現比率が等しい条件 ( $p[1]=0.5$ )でも確認できる。

第2は、度数が小さい態度のセルは同じ態度のセルと隣接する比率が低いものの(図6)、隣接係数は

むしろ高いことである。つまり期待値と比べれば同じ態度のセルと隣接しやすい。この結果は条件別に ( $n=20$ )態度ごとの度数と隣接係数の相関をとっても確認できる。相関係数は  $-.995 \sim -.897$  である。つまり度数の小さい態度セルほど度数分布を前提とした期待値より同じ態度のセルと隣接しやすい。

この第2の結果は、多数派集団はゆるく構成される (loosely-knit), 少数派集団は「凝集的に」構成されることを意味している。多数派セルは、図2の 00 (白)のセルのように、大きなクラスタを形成しつつも内部に異なった態度のクラスタを含んでしまう。内部の異態度クラスタを外部に押しやれば 00 のセルは

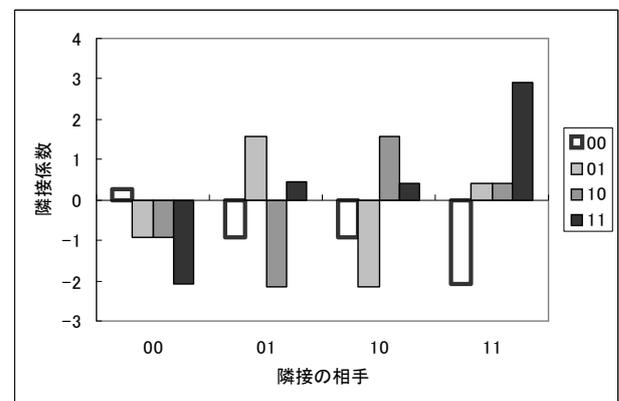


図7: 態度ごとの隣接係数

同態度セルとの隣接係数を高めることができる。しかしそのようにして隣接係数を高めなくても多数派の 00 は自己を支持する影響源(同態度のセル)を数多く周囲に見出して存続することができる。逆に少数派の態度のセルは相互に接触するようなクラスタを形成してはじめて生き残ることができる。

第3は、最大多数派の 00 では異なった態度のセルとの隣接度数がすべて期待値を下回るのに対し、最小の 11 は 00 より距離の近い 01 や 10 との隣接傾向を高めていることである。同じ態度のセルを周囲に見出しにくい 11 は、00 より距離の近い 01 や 10 と接近して 00 の影響を遮断するときにはじめて、生き残ることができると解釈できる。ちなみに、4つの態度がほぼ同数の度数で均衡する、初期出現率が等しい条件 ( $p[1]=0.5$ )では、各態度セル

は上記の 00 と同様の隣接係数のパターンを示している。

## クラスタ化に及ぼす態度間距離の効果

SIMとは異なりMAMでは意見間の距離という要素が導入されている。既述の隣接係数の結果は距離の大きい態度同士は遠ざかる(隣接しにくい)ことを示している。

意見間の距離は隣接傾向以外の点でもクラスタ化の様相に影響を与えるだろう。まず考えられるのは、ある態度が多数派となるときの距離の大きい態度が圧力(適合度の低下)に直面し、度数を減らすであろうことである。

図8は  $p[1]=0.4$ ,  $n=4$  のときのシミュレーション(便宜のためシミュレーション1と呼ぶ)での、各態度の初期度数と最終度数を表す。既述のように初期状態で最大度数をもつ 00 は増加して他の態度は減少する。特に最少数派の 11 の減少率が大きい。11 の度数が落ちる原因の1つは初期度数が 01 や 10 より小さいことである。しかし増加する 00 との距離が大きいことも原因かも知れない。このことを確かめるために、00, 01, 10, 11 の初期出現率を2:1:1:1にして、 $n=4$  でシミュレーション2を実施した。結果を図9に示す。初期出現率が 01,10 と同じでも、増大する 00 との距離が大きい 11 は、01 と 10 の平均よりもはるかに最終度数が小さい(対応t検定,  $df=19$ ,  $p<.0001$ )。

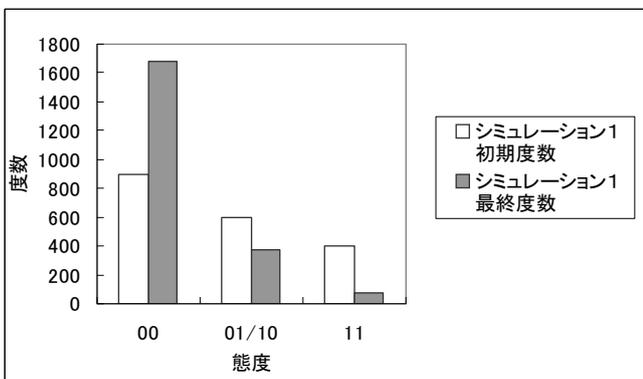


図8:シミュレーション1での態度別度数

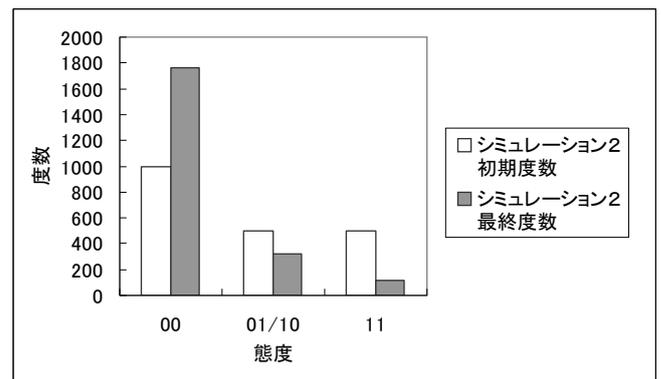


図9:シミュレーション2の態度別度数

意見が2つしかなく意見間の距離も想定していないSIMでは、初期状態での少数派は最終的にはより小さくなるだけだった。しかしより多くの態度間で距離を想定するMAMでは、初期状態での構成によっては少数派が減少しないことも予想できる。例えば距離の遠い態度がともに多数派になるような場合である。このとき、距離の遠い態度が相互に抑制し合うため、少数派が生き残る可能性は高まるだろう。

そこで 00, 01, 10, 11 の初期出現率を3:1:1:3,  $n=4$  としてシミュレーション3を実施した。結果を図10に示す。シミュレーション3では、初期少数派の 01 と 10 は減少するどころかむしろ増加している(対応t検定, 両側でそれぞれ  $p<.005$ ,  $p<.05$ )。注意すべきはこのときの 00 と 11 はともに、シミュレーション1の 00 に匹敵する初期出現率を持ち、01 と 10 はシミュレーション1で著しく減少した 11 よりも初期出現率が低かったことである。

図9の結果は拮抗する態度間の距離が大きいとき

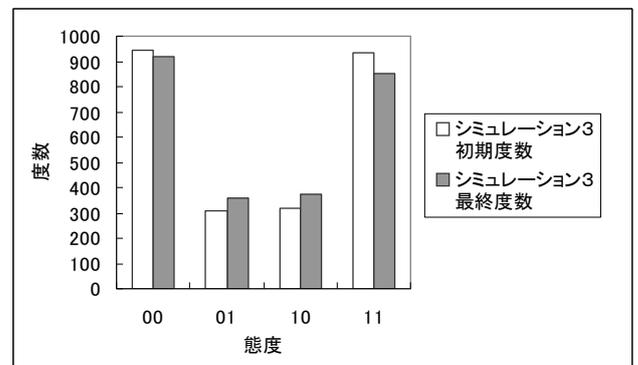


図10:シミュレーション10の態度別度数

に限って生じる。初期出現率が1:1:3:3で、初期状態で大きいのが距離が小さい10と11であるなら、初期少数派の00と01はほとんど消滅してしまう。

## 考察

本研究は態度を多角的に定義するMAMのシミュレーション結果を検討した。結果は次のようにまとめることができる。

第1に、このモデルによるセル空間でのクラスタ化は距離係数、つまり距離に応じて影響力が及ぶ程度の影響を受ける。セル間で大域的に影響が及ぶ場合は1つの態度が全体を支配することが多い。各態度が一定のクラスタとして空間内で存続できるのは、逆に遠くの影響源からの影響を遮断できる場合である。この結果はSIMにおいても確認できる(高木, 2000)。

第2に、クラスタ化は初期の態度分布に依存的であり、初期に多数派だった態度がより多数に、初期に少数派だった態度がより少数になる傾向を伴う。この傾向は初期度数分布に基づく構造効果と見ることができる。この傾向もまたSIMでも確認されてきた点である。

第3に、しかしMAMが予測するクラスタ化では態度間の距離の要因が作用する。距離が遠い態度のセルは相互の適合度をより低下させるため、相互に遠ざかるようにクラスタ化が生じる結果になる。そしてある態度が多数派に成長するときには距離の遠い態度のセルが度数を減らしやすい。逆にかけ離れた2つの態度が相対的に多数である状況では、両者が牽制し合うため、両者と態度が比較的近いセルの少数派クラスタが存続し、あるいは成長することがある。

本研究のシミュレーション結果は態度に基づく集団化に対して一定の含意を持っている。MAMが予測する均衡状態では多数派の集団と少数派の集団が異なった構造を持つ、という点である。多数派となる集団のエージェントは近隣に類似した態度のエ

ージェントを多数見出すことができるので、同類と接触する傾向をあまり高めずにクラスタとして生き残る。その結果、空間的には自己の集団の「内側」に異なった態度の集団を位置させる。反対に少数派は、比率の上では同類と隣接することが少ないにもかかわらず、確率的期待値から比べれば同類と隣接傾向を高めたクラスタとして生き残る。また、態度が比較的近い少数派と近づく傾向もある。重要なのは、こうした傾向が、「少数派ほど同類を好む」といった個人レベルの選好を介することなく、構造的な淘汰の結果として生じ得ることである。

態度間の距離がもたらす効果については、本研究では可能な状況の一部を検討したに過ぎない。他の状況でいかなる帰結が導かれるかについては体系的に検討する余地がある。

## 引用文献

- Blau, P.M. (1977). A macrosociological theory of social structure. *American Journal of Sociology*, 83, 26-54.
- Blau, P.M., Blim, T.C. & Schwartz, J.E. (1982). Heterogeneity and intermarriage. *American Sociological Review*, 47, 45-62.
- Epstein, J.M. & Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies*. Cambridge: The MIT Press.
- Latané, B., Nowak, A. & Liu, J.H. (1994). Measuring emergent social phenomena: Dynamism, polarization, and clustering as order parameters of social systems. *Behavioral Science*, 39, 1-24.
- Mayhew, B.H. & Levinger, R.L. (1976). Size and density of interaction in human aggregates. *American Journal of Sociology*, 82, 86-110.
- Nowak, A. & Latané, B. (1994). Simulating the emergence of social order from individual behaviour. In N. Gilbert & J. Doran (Eds.)

*Simulating Societies*. London: UCL Press,  
Pp.63-84.

Nowak, A., Szamrei, J. & Latané, B. (1990).

From private attitude to public opinion: A  
dynamic theory of social impact.

*Psychological Review*, 97, 362-376.

Sakoda, J.M. (1971). The checkboard model of

social interaction. *Journal of Mathematical  
Sociology*, 1, 119-132.

Schelling, T.C. (1971). Dynamic Models of

Segregation. *Journal of Mathematical  
Sociology*, 1, 143-186.

South, S.J., Bonjean, C.M., Markham, W.T. &

Corder, J. (1982). Social Structure and  
intergroup interaction. *American Sociological  
Review*, 47, 587-599.

高木英至 (2000). Social Impact シミュレーショ  
ンのタネと仕掛け. 『日本グループ・ダイナミッ  
クス学会 第48回大会 発表論文集』(予  
定).