

マルチエージェント・シミュレーションによる分居現象の分析

— Schelling モデルから ABS モデルへ —

板山真弓*・田村 誠**・山影 進*

Summary

Thomas C. Schelling pioneered multi-agent simulation with his study of social segregation. In recent years, multi-agent simulation has been attracting more scholarly attention, but applications have been limited mainly due to the absence of user-friendly simulator. Fortunately, a general-purpose software for multi-agent simulation, which is named the ABS (Agent Based Simulator), was developed recently. The conduct of multi-agent simulation turned out much easier than before.

This paper aims at re-presenting Schelling's simulation within ABS, and at expanding the horizon of the study of segregation through multi-agent simulation beyond his idea. Specifically, this paper has two purposes. One is to analyze segregation, which is studied in many fields such as Social Psychology and International Relations, through multi-agent simulation by using ABS so as to illustrate new findings that are different from, and unexplored in, Schelling's original simulations. The other is to demonstrate the possibilities of multi-agent simulation of various social phenomena, and to encourage the use of ABS. While ABS used in this paper is for the Japanese language, the English version is now available for non-Japanese users.

* 東京大学大学院総合文化研究科国際社会科学専攻

** 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

はじめに

1. ABSの分居モデルとSchellingの近隣社会自己形成モデル
2. ABS分居モデルによるSchellingの所見の検証
3. 第3種エージェントの導入と若干の考察
4. 移民の新規参入——分居の攪乱（その1）
5. 明白な異分子の参入——分居の攪乱（その2）
6. 仮面の異分子の参入——分居の攪乱（その3）
7. 分居過程の相互依存メカニズム
おわりに——所見のまとめと展望

要 旨

本稿は、2つの目的を持っている。まず、社会心理学から国際関係論にいたる広範な学問分野で重要な研究対象となっているセグレゲーション（segregation：分居）を、エージェント（マイクロ）・社会構造（マクロ）間関係として捉えて、マルチエージェント・シミュレーションによって分析することである。もう一つの目的は、本稿で取り上げる分居現象の多面的分析をひとつの先駆的事例として、さまざまな現象に対する社会科学的に意味のあるマルチエージェント・シミュレーション的分析を促すことである。

具体的には、Thomas C. Schellingが初めて試みた分居のマルチエージェント・シミュレーションを単に追試するだけでなく、関連する様々な仮説を展開、検証する。このことによって、仮説設定や検証に際して操作性の良いシミュレーション技法を紹介し、マルチエージェント・シミュレーションに対する心理的障壁を下げようとするものである。尚、本稿での作業は、マルチエージェント・シミュレーションの汎用ソフトであるABS（Agent Based Simulator）を用いて行っている。

はじめに

社会のマクロなあり方が、必ずしも社会を構成する個々人の好みや意図を直接には反映していない場合は多々ある。言い換えると、個々人の相互作用の結果、各人が意図していないような社会状

態が発生し得る。このようなマイクロとマクロとのギャップは、最近注目されている複雑系、自己組織化、創発性などの概念・用語が捉えようとしているものでもある。分居（segregation）現象は、個々人の選好（異質な隣人に対する相対的な寛容性）と社会全体のあり方（似たもののどうしの集住、結果としての分居）とのギャップの好例である¹。このきわめて興味深い点を、Schelling（1978）は8×8のチェッカーボード上に2種類のコインを多数並べて実験的に示した。彼の用いた方法は、今日、マルチエージェント・シミュレーションないしエージェント型シミュレーションと呼ばれているものに他ならない。規模は小さいし技法は初歩的であるにせよ、Schellingの実験はマルチエージェント・シミュレーションの草分けと言える。

他方、マルチエージェント・シミュレーションに対する関心の高まりは、既にいくつかの実験例を生み出しただけでなく、そのためのコンピュータ言語やソフトウェアを生み出した²。おかげで、Schellingの時代（と言ってもわずか1世代前だが）とは比較にならないほどマルチエージェント・シミュレーションを容易に実行できるようになった。なかでも、本稿で使用するABSは当初より社会科学への適用を想定して開発されたために、他のソフトウェアと比べるとマルチエージェント・シミュレーションの技法に詳しくない者にとっても操作しやすいソフトである³。

上のようにマルチエージェント・シミュレーションを社会科学分野で実行する環境が好転したことを受けて、本稿は、分居現象についてABSを利用したマルチエージェント・シミュレーションで分析し、Schellingが行った実験の追試、彼が提唱はしたが検証できなかった仮説の検証、さらに彼が触れなかったいくつかの問題の分析などを試みる。本稿では、あえて、実際の具体例を暗示させる比喩や解釈は最小限にし、エージェント（個々人）の選好（行動原理）と社会のあり方（分居の現れ方）との関連性に焦点を絞っている。

本稿は大きく分けて、4部分からなっている。最初の部分（1,2節）では、ABSとABS上に移したSchellingの分居モデルを紹介し、彼の実験を追試している。次（3節）は、エージェントの種

類をそれまでの2種類から3種類に増やして、Schellingの実験を発展させるとともに、本稿の中心となる分析の前提を示している。第3の部分(4,5,6節)は、2種類のエージェントによる分居状態が第3種のエージェントの参入によって攪乱される条件を分析している。ここでは、新エージェントの行動原理についても新しい設定を試みている。以上の実験を踏まえ、最後(7節)は、分居現象は個々人の間の相互作用だけではなく集団間の相互依存関係によっても引き起こされるという仮説を検証する。この視点についてSchellingは明確に言及しておらず、分居現象を説明する新たな仮説を提示することになる。

なお、本稿では印刷の都合上、エージェントの種類の識別は灰色の濃淡でしかなされていないが、実際にはカラー(青、赤、黄など)でなされている。カラー版の草稿は<http://citrus.c.u-tokyo.ac.jp/>、<http://sanshiro.c.u-tokyo.ac.jp/~tamura/ABS/paper.html>にpdfファイルとして置いてあるので、ダウンロード可能である。

1. ABSの分居モデルとSchellingの近隣社会自己形成モデル

1.1. ABSの分居モデルについて

ABSによる分居モデルとは、2種類のエージェントたちが、それぞれが自分たちの意思で移動しながら、結果として住み分けが起こっていく過程をシミュレートするモデルである⁴。赤青、2種類のエージェントに性格等の違いはなく、エージェントは自分の周りに自分と違うエージェントが一定数以上いると、居心地のよい場所を求めて空いているスペースへ移動してしまう。以上がこのモデルの基本原則である。行動ルールの概要を示し

たのが図1である。以下、このモデルのルールについて詳しく説明する。

このモデルのエージェントである赤エージェント・青エージェントは、ある空間上に存在するが、その空間はセルで区切られており、1セルには1つのエージェントしか存在できない。また、それぞれのエージェントは、セルが四角形(六角形)の場合は自分の周囲8セル(6セル)にいるエージェントの情報を得て、そのうち自分の種類が何パーセントを占めているか(=幸福度)を知る。つまり、あるエージェントの幸福度 h は以下のよう

$$h = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j} \times 100$$

a_i :視野内にいる自分と同色(i)のエージェント数

n :エージェントの色の総数

ただし、 $\sum_{j=1}^n a_j = 0$ のときは $h=0$ とする。

これは具体的には、

$$\text{赤エージェントの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる赤エージェントの数}}{\text{視野内にいる赤エージェントの数} + \text{視野内にいる青エージェントの数}} \times 100$$

と表される。幸福度100とは、周囲が全て同種類のエージェントで囲まれている状態で、幸福度0とは周囲に同種類のエージェントが皆無であることを意味する。閾値は、各エージェントが満足する最低限の幸福度を示し⁵、自分の幸福度が閾値以下の不幸なエージェントは、近くの空いているセルに移動することになっている。逆に閾値よりも

幸福度の高い幸福なエージェントは移動しない。尚、本稿では変数の表記を以下のように統一していることに注意されたい。幸福度はパーセント表示にしてある。一方、閾値はモデルにおいて外生的に与えられる値であ

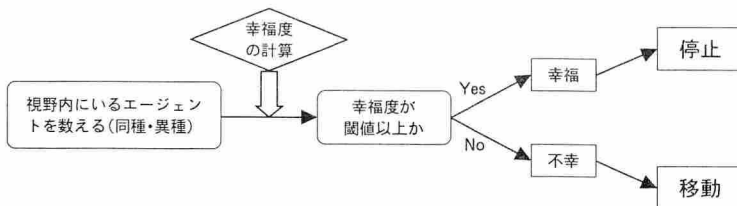


図1 分居モデルにおける各エージェントの行動ルール

り、小数表示にしている。具体的には、閾値 0.6 の場合には、各エージェントは自身の幸福度が 60 を越えるまで移動し続けるような設定となっているのである。また、全てのエージェントの幸福度が閾値を越えたところでシミュレーションは終了することになっている。シミュレーションが終了した時点でのエージェント全体の平均幸福度は、

$$\text{平均幸福度} = \frac{\text{全エージェントの幸福度合計}}{\text{全エージェントの数}}$$

で示される。完全な分居状態（つまり同色エージェント同士がぎっしりと集住し、色の異なるエージェントは互いに接してさえいない状態）では、平均幸福度は 100 に近づき、完全なモザイク状態（二色の場合はチェッカーボードのような模様）では色の数の逆数（二色の場合は 50）に近づく。また、全エージェントが孤立状態（視野内に誰もいない）ならば平均幸福度は 0 になる。したがって、平均幸福度はエージェントの分居の程度を示す一つの目安となる。もちろん、平均幸福度以外に分居の程度を表す指標は幾つか考えられるかもしれない⁶。しかし、本稿では議論を複雑にするのを避けるため、基本的には平均幸福度を用い、補足的に実際のシミュレーション図を提示する方法を採用することを予め断っておく。

以上がこのモデルのルールであるが、このようなルールの下で実際にシミュレーションを行ってみると、一般的に、時間の経過とともに不幸なエージェント数は減少する一方で、全体的なエージェントの配置は、それぞれのエージェントが群集を形成することで分居化（segregated）されていく。そして不幸なエージェントがいなくなった段階でシミュレーションは終了する（均衡に到達する）。閾値が高すぎると不幸なエージェントがいなくならずシミュレーションが終了しない（均衡に到達しない）。例えば、閾値が 0.3 程度である場合の最終的な（シミュレーションが終了した時点での）平均幸福度は、約 65 となる。つまり、個々のエージェントがそれほど大きくない嗜好傾向を持っている場合でさえ、相対的に有意な全体的分居を導く。これがこのモデルの基礎となった Schelling の知見である。

1.2. Schelling モデル

1.2.1. Schelling モデルの概要

まず ABS 分居モデルの基礎となった Schelling のモデルについて概説する。

Schelling は個人の嗜好（micromotives）とそれによってもたらされる社会全体の分居のあり方（macrobehavior）との関係を説明すべく、近隣のエージェントの配置によって自らの満足／不満足を決するエージェントと、そのエージェントの行動によって社会全体がどのような状況になるかを表したモデル（A Self-Forming Neighborhood Model）を提示した。そのモデルの基本的な内容は、8×8 の枠目にランダムに配置された 2 種類のコイン（コイン総数 45 個：コイン A が 22 個、コイン B が 23 個）が、自ら満足な環境を求めて行動する、つまり、自分の幸福度が閾値より低い場合は「自分の要求に合う最も近い空場所に移る⁷」が、そうでない場合（幸福度が閾値以上）には移動しない、というものである。Schelling は、それぞれのコインの閾値についての設定を変化させた 3 つのモデル、そしてそのモデルを実際にシミュレーションした結果について言及している。

以下、具体的にその 3 つのモデルについて述べる。最初のモデルでは、コインの閾値は 0.33（「全員が自らと同種類の隣人を 1/3 以上欲する⁸」）となっている。Schelling がシミュレーションした結果は、2 回の試行で平均幸福度が 69、73 ということであった⁹。次のモデルでは、2 種類のコインの閾値を異なったもの（一方は高く、他方を低く）としてシミュレーションしている。結果は、平均幸福度は前のモデルの結果とほぼ同様であったが、エージェントが分布する密度に違いが見られた。つまり、閾値が低いエージェントが広がって存在している（エージェント密度が低い）一方、閾値が高いエージェントは密集して存在した（エージェント密度が高い）。第 3 のモデルでは、同種類のコインが自分の周囲に 3 つ存在すると満足する（つまり閾値が $3/8=0.375$ ）、というように満足の条件を変化させている。結果は、最初のモデルと平均幸福度も分居の仕方もほぼ同様、というも

のであった。

1.2.2. ABSによる予備実験

ABSモデルにおいて空間を 8×8 に設定しSchellingと同様の実験を、ABSを用いて試行した。ここではエージェント数を青(コインA) 22、赤(コインB) 23、そして移動範囲を3とした¹⁰。まず、最初のモデルに関してはSchellingのシミュレーションとほぼ同様な結果が得られた。次に、赤と青の閾値を変化させ分居の違いを観察した。Schellingは、閾値の低いエージェントと高いエージェントが存在する場合、閾値が高いエージェントの方が密集し閾値の低いエージェントは広がる、と指摘している。図2に示す通り赤(灰色)の閾値を0.6、青(濃灰色)の閾値を0.3にした場合は確かにSchellingの指摘と同じ結果が得られた。しかし、図3のように赤の閾値を0.8に上げると、均衡状態が現れず、同様の結論を導くことができ

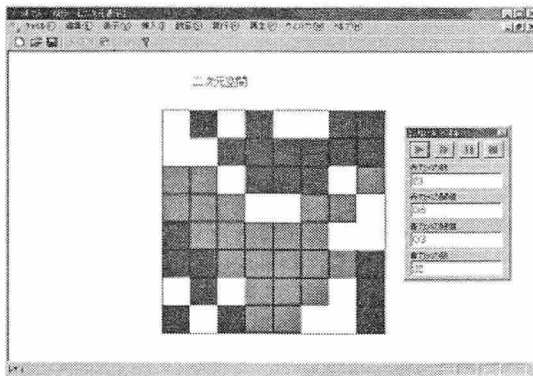


図2 赤、青の閾値をそれぞれ0.6,0.3に設定した

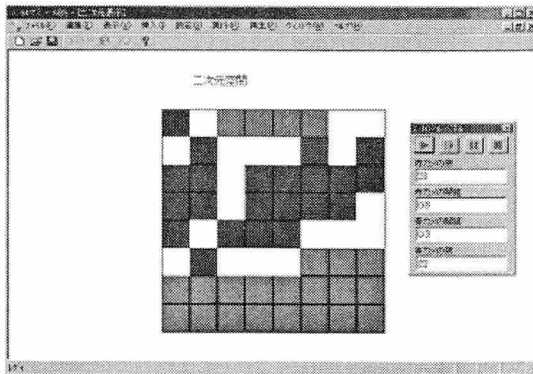


図3 赤、青の閾値をそれぞれ0.8,0.3に設定した

なかった。

3番目のモデルについてはSchellingのシミュレーションと似た結果が得られた。

1.2.3. Schellingモデルの問題点

SchellingのモデルをABSで追試する上で、いくつかの問題点が存在することが明らかになった。ここではそれらの問題点について簡単に記述する。

Schellingのモデルでは、エージェントを左上から1個ずつ動かし(同様に中央からも行っているが結果は同じ)、空き地の中で一番近い最適な場所に移動する、とされている。しかし、近いところを選んでから最適な場所をみつけるのか、最適な場所を探してから一番近くを選ぶのか、といった最適化のアルゴリズムについての記述が存在しない。これが第一の問題点である。ちなみにABSモデルでは、エージェントの移動範囲を固定し、その移動範囲内でエージェントがランダムに移動することで、ステップ数を重ねて試行錯誤的に最適な場所を探す構造となっている。つまり、両モデルにおける最適化アルゴリズムが完全には対応していない可能性がある。だが、2.1節で詳しく述べるがABSモデルにおける移動範囲と分居の関係を見る限り、移動範囲が3以上になったときの影響はそれほど大きくなかった。ゆえに、1ステップごとの計算時間を短縮するためにもABSモデルのアルゴリズムは妥当であると思われる。

また、Schellingの第2のモデル(閾値が高いエージェントと低いエージェントを導入した場合)において、閾値に関する具体的な設定が記述されていないことも、もう一つの問題点として挙げられよう。

さらに、Schellingの記述には、エージェントの広がり方(エージェント密度)について言及された部分が存在したが、それを言及するには 8×8 の空間では狭すぎるのではないだろうか。Schellingは実験より「閾値が高いエージェントは密集し、閾値の低いものは広がる」という仮説を導いた。しかしこれは、閾値が低すぎるとエージェントはすぐ満足して動かなくなるため、閾値の低いものが広がって存在するのは、最初にランダムに配置された場所からあまり動かないため

あると考えられる（つまり、閾値の低いエージェントが拡散する、というよりも現状に近い状態に止まっている、ということ）。このことについて検討するためにも、より大きな空間とエージェント数で試行する必要があると思われる。

2. ABS 分居モデルによる Schelling の所見の検証

2.1. 分居促進要因の特定

本節では、ABS モデルを用いて、Schelling の議論を検証する。まず、第一の論点は、エージェント数・空間の広さ・閾値・エージェントの形・移動範囲といった要因のうちどの要因が社会全体の分居を促すのか、ということである。Schelling (1978) では、エージェントの閾値のみが分居を促す要因として特定されていたが、本当にそれだけが分居を促す要因なのか、ということについて考えてみたい。

ここでの基本設定は、エージェント数 800（赤、青それぞれ 400）、閾値 0.3、空間 35×35 (1225)、移動範囲 3、セルの形は 4 角形、というものである。その場合の結果（5 回試行、以下同様）の平均は、（不幸なエージェント、平均幸福度、終了までのステップ数）= (0, 70, 14) であった。

全体のエージェント数を 200 から 1200 まで変化させた結果が図 4 である。図 4 より、全体的には、エージェント数を多くすると平均幸福度が低くなり、少なくすると平均幸福度が高くなる傾向が読み取れる。また、分居の様子に注目すると、エー

ジェント数 400 ぐらいまでは密度が低いために、赤青がそれぞれ間隔を空けてバラバラに存在する状況であるが、エージェント数 500~1100 では、徐々にエージェントの集団が大きくなり、最終的には集団間の接点も少なくなり、分居が進展する。エージェント数が 1200 になると、かなり密度が高くなるので均衡しにくくなり、分居の度合いがややゆるやかになる。

次に、空間の広さを変化させた。その結果が図 5 であるが、空間を狭くすると、平均幸福度が低くなり、広くすると平均幸福度が高くなる傾向が見られる。分居の様子は、空間が狭い場合は分居の程度が高く、空間が広がると密度が低くなるために、赤青がバラバラに存在する状況になる、ということが言える。

エージェント数を増大する実験（図 4）、空間を拡大する実験（図 5）の結果より、密度がかなり低い場合には、エージェントがバラバラに存在する状況になるため、また、密度がかなり高い場合には、均衡しないために分居の度合いが低くなる、ということが分かった。また、中程度の密度の場合に最も分居が促されることがシミュレーションより明らかになった。

図 6 では、閾値を変化させた場合には、あまりに閾値が高すぎると均衡しなくなって平均幸福度も低くなるが、閾値 0.7 までは、閾値が高くなればなるほど平均幸福度が高くなる、という傾向が見られる。また、分居の様子に関しても、閾値 0.7 までは閾値が高くなればなる程分居の度合いが高くなる、と言えるが、閾値 0.8 になると均衡しにくくなるために、中くらいの大きさの集団が存在

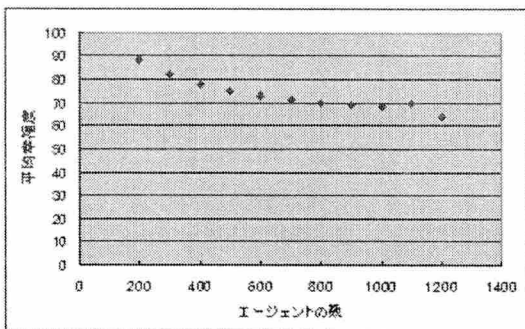


図 4 エージェント数と平均幸福度との関係

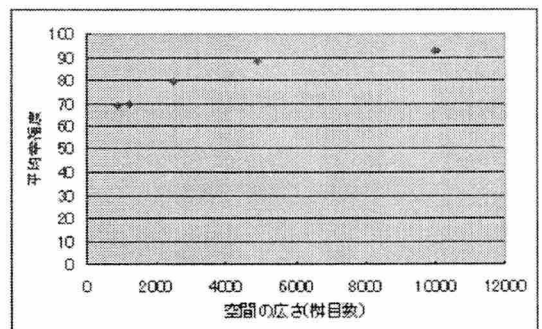


図 5 空間の広さと平均幸福度との関係

する一方、かなり雑居した状況になる。以上の結果より、閾値はその値がかなり大きくなるまで、分居を促す要因であると言える。

図7は、エージェントの移動範囲を変化させた場合の平均幸福度を示したものである。移動範囲が極端に狭い場合（移動範囲1）には、周囲を他のエージェントに囲まれて、不幸なのに動くことができないエージェントが存在するために均衡せず、結果的に集団のあまりできない雑居した状況となっていた。移動範囲2～10にかけては移動範囲を大きくするごとに少しずつではあるが、できる集団の大きさが大きくなった。しかし、分居はしていない状況（雑居状況）であった。移動範囲が10以上になると、平均幸福度に関しても、分居の状態に関しても変化はほとんど見られなかった。

また、セルの形を4角形から6角形に変化させた場合、それぞれのエージェントの周囲に存在するエージェント数が減少するが（8→6）、シミュレーションの結果に注目すべき変化は見られなかった。したがって以下ではセルの形を4角形に固定

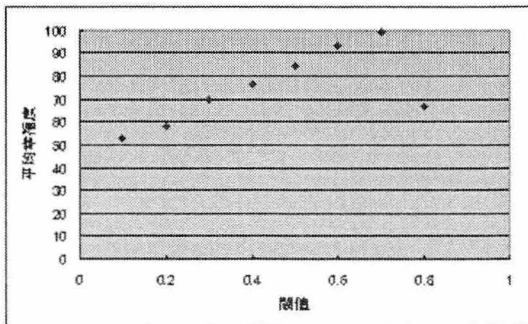


図 6 閾値と平均幸福度との関係

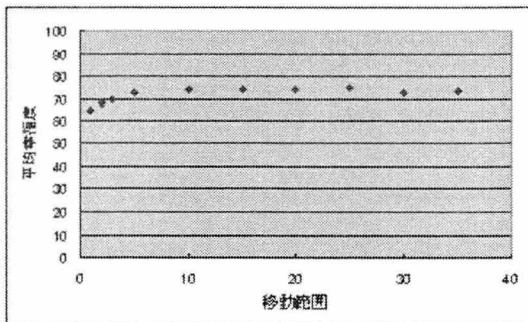


図 7 移動範囲と平均幸福度との関係

してシミュレーションを続行する。

以上の結果より、セルの形、移動範囲に関しては、分居に関してあまり影響を与えないと考えられる。まとめると、密度・閾値は分居に影響を与えていると考えられるが、エージェントの形・移動範囲といった要因は、分居にそれほど大きな影響を与えていないということが言える。

2.2. 均衡とエージェント密度、閾値との関係

次の論点は、エージェント密度と閾値が均衡にどのような影響を与えるか、ということである。Schelling の議論におけるシミュレーションは、全て均衡する結果で終わっていたが、ABS のモデルにおけるそれでは均衡しないものも存在した。ここでは、均衡する／しないという結果とエージェント密度、そして閾値がどのような関係にあるのかについて考察する。

ABS モデルにおいてシミュレーションが終了する、つまり均衡状態に至るには、全てのエージェントが幸福になる、つまり全てのエージェントの幸福度が閾値以上になることが必要である。次の図 8 はシミュレーションの終了とエージェント密度・閾値の関係を表したものである。

図 8 より閾値とエージェント密度によってシミュレーションが終了する条件を読み取ることができる。それによると、比較的閾値が高くかつ密度が

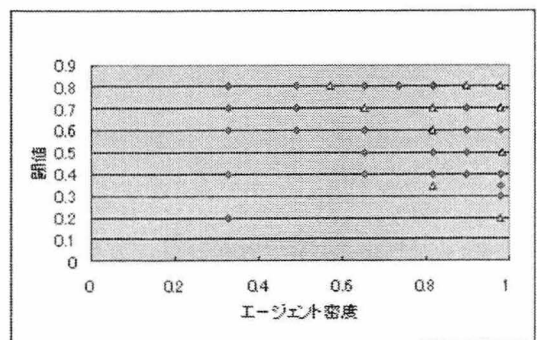


図 8 閾値とエージェント密度と分居との関係。次のタイプをプロットしたもの。

- ◆タイプ1：エージェントはみな満足しシミュレーションが終了する。
- ▲タイプ2：不満をもつエージェントが残りシミュレーションが終了しない。

高い（エージェント数が多い）場合、シミュレーションが終了しにくい。この条件は各エージェントが満足しにくい状況だと考えられる。また、閾値とエージェント密度が共に低い場合には、各エージェントは現状に満足するため、すぐにシミュレーションが終了する。密度と閾値がそれらの中程度（密度約:0.6~0.8、閾値約:0.4~0.7の範囲）の場合においては、終了するかどうかは、初期状態のエージェント配置に依存すると考えられる。

2.3. 空間に障害物があるモデル

本節では「空間に障害物があるモデル」を作成し、2.1、2.2節とは別の角度から空間による影響を検証する。具体的には空間に道を作り、エージェントは道を自由に横断できるもののそこに立ち止まることができない、というモデルを作成した。筆者は、道を設定すると赤青といった集団が道をはさんで大きく分居するのではないかと予想した。例えば道の西側は赤の集団、東側は青の集団が形成されるのではないかと考えた。

そこでまず35×35の空間の中央に縦5マス分の横断道路を設けた。エージェント数は赤青各350ずつにした。閾値0.6のときが図9である。図9において中央上下に格子状に描かれている部分が道である。

実際に試行してみると、結果はこれまでのモデルと同様で、道の影響はほとんど観察されなかった。閾値を上下させても、単純な2種エージェントモデルで道の部分にエージェントが存在しないだけ、という結果になり有意な差は見られなかった。

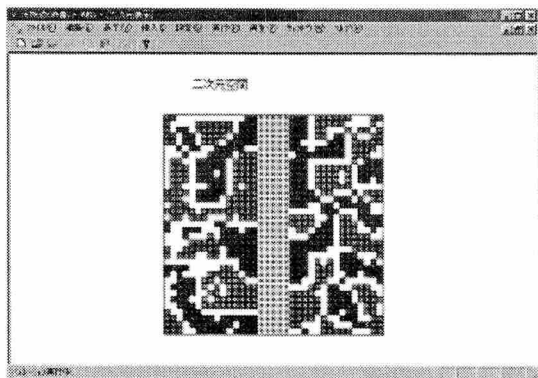


図9 横断道路モデル（閾値0.6:赤350,青350）

この他、道路を縦二本設ける（図10）、あるいは十字路にしたモデルを作成した。しかし筆者が予想したような分居状態は形成されなかった。

これらより、集団形成において閾値や数といった属性が強く作用し、空間の形などの性質による影響が小さいことが確認された。

3. 第3種エージェントの導入と若干の考察

3.1. 3種エージェントモデルへの拡張

さて、エージェントの種類を3種にした場合、どのような状況が出現するだろうか。Schellingの議論では、2種エージェントのみしか想定しておらず、3種エージェントに関する議論は皆無である。しかし、Schellingの想定する分居——肌の色による分居、を考えるならば、白人と黒人というだけではなく、黄色人種についても考察すべきなのであろう¹²。よって、ここでは3種エージェントを想定し、それが2種エージェントの場合とどのように異なるのか、ということについて考察することにする。

本節では、閾値・数ともに同じ3種類のエージェントが存在する場合のシミュレーション結果について述べる。基本設定は、2種エージェントの場合と同様、エージェント数801（赤、青、黄それぞれ267）、閾値0.3、空間35×35（1225）、移動範囲3、セルの形は4角形、である。

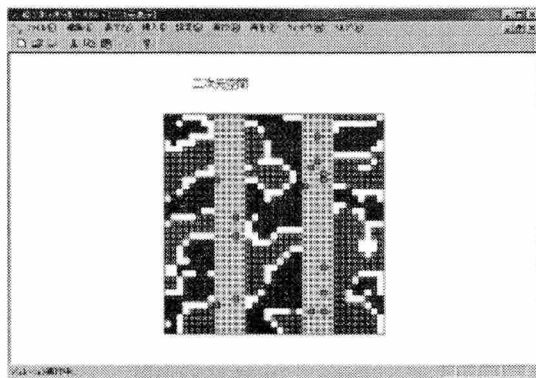


図10 縦二本の横断道路を設置したとき（閾値0.6:赤350,青350）

図 11 から図 13 までの結果から分かる通り、エージェント数・広さ・閾値・移動範囲を変化させた場合、全ての終了ステップ数に関して2種エージェントのその方が3種エージェントのそれよりも少ないことが分かる。このことより、エージェントの種類が増えたことで均衡しにくくなった、といえることができる。なお、実行ステップの上限を100に設定してあるので、100ステップとあるのはそれまでに均衡せず、強制終了したものである。

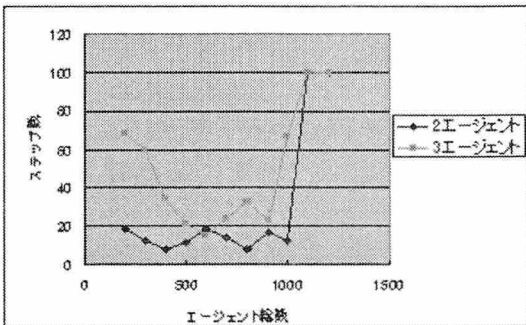


図 11 エージェント数と終了ステップ数との関係

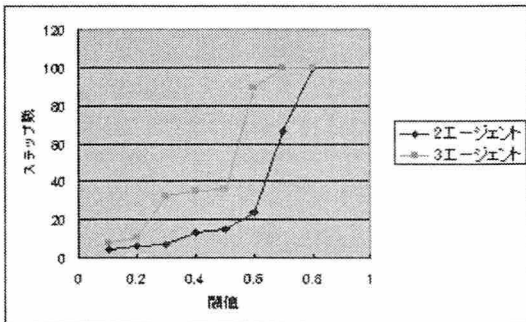


図 12 閾値と終了ステップ数との関係

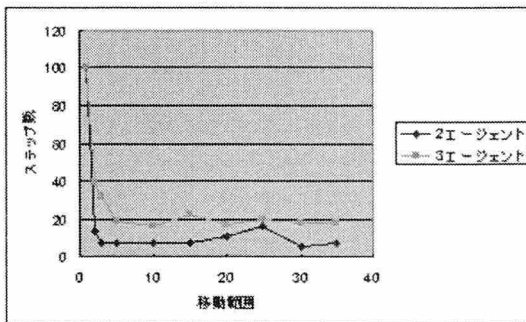


図 13 移動範囲と終了ステップ数との関係

図 14 から図 16 より平均幸福度に関しては、エージェント数・移動範囲・広さを变化させた場合、2種エージェントの場合と3種エージェントのそれではほとんど変化は見られない。しかし、閾値を变化させた場合にのみ違いが見られる (図 17)。具体的には、2種エージェントの場合より3種エージェントの場合の方が、より低い閾値の下で均衡しにくくなる。また、3種エージェントの場合の方が、均衡しにくくなった場合の平均幸福度がよ

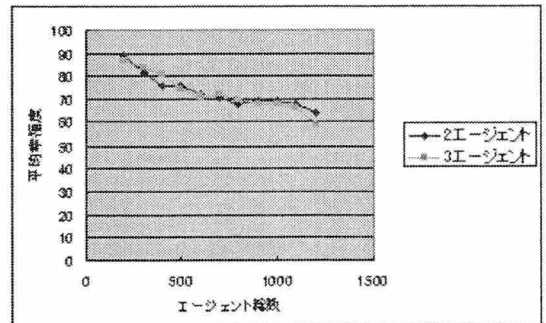


図 14 エージェント数と平均幸福度との関係

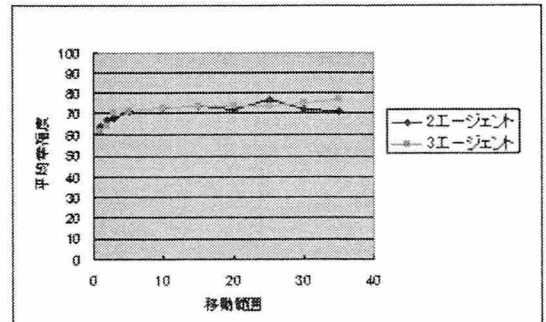


図 15 移動範囲と平均幸福度との関係

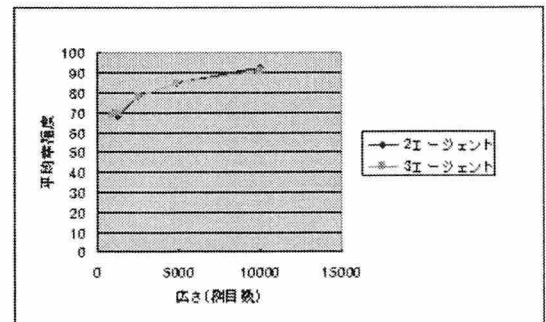


図 16 広さと平均幸福度との関係

り低くなる。これは1) エージェントの種類が増えたことで均衡しにくくなったこと、2) 自分と同種類のエージェントの比率（2種エージェントの場合は1/2、3種エージェントの場合は1/3）が減ったことにより均衡しない状況でのそれぞれのエージェントの幸福度が減少したこと（均衡した状況では、全てのエージェントが閾値以上の幸福度を保持しているので、平均幸福度が2種エージェント時も3種エージェント時も同様な結果になる）ということ、よりもたらされる帰結である。

3.2. エージェントの閾値とエージェント密度の関係

本節では、エージェントが異なる閾値を持っていた場合、閾値が低いエージェントが広がって存在する（エージェント密度が低い）一方、閾値が高いエージェントは密集して存在する（エージェント密度が高い）、という Schelling のシミュレーション結果について検証する。Schelling の議論を極端なものにすれば¹³、エージェントの閾値が高ければ高いほど分居が促され、逆にエージェントの閾値と密度が低ければ分居しにくい、ということになる。

3.2.1. 2種エージェントモデルでの試行

最初に、Schelling の設定と同様の2種エージェントの場合で追試してみよう。青の閾値を一定（0.3）にして赤の閾値を0.3から0.9まで変化させた場合（他の条件は同じ）の結果を図18に示す。この場合は、ある一定の閾値（この場合は0.7）までは、全体的に赤の閾値が大きくなればなる程

分居の度合いが進展した。それ以上の閾値になると、均衡しにくくなるために、できる集団の大きさが小さくなり、分居の度合いも小さくなる傾向にあった。平均幸福度について見てみると、かなり均衡しにくくなるまで（赤の閾値0.7まで）、赤の閾値が大きくなればなる程、平均幸福度も高くなる傾向が見られる。だが、それ以上の閾値になると平均幸福度が逆に下がる傾向にあることが分かる。つまり、赤の閾値がかなり大きい場合には、均衡しにくくなって分居の度合いが低下する。一方、赤の閾値が適度に大きい場合には、分居の度合いがかなり大きくなる。

3.2.2. 3種エージェントモデルによる試行

次に、3種エージェントのモデルを用いたシミュレーション結果について報告する。それは、3種エージェントモデルを用いることで、3.2.1節で得られた知見（エージェントの閾値が高いまたは低い場合には分居の度合いが小さく、中程度のときに最も分居の度合いが高い）を確認できると考えたからである。ここではエージェントの閾値を低中高に（具体的には0.3,0.55,0.8）、エージェント数を全て400にした。すると図19に示す通り次のような結果が得られた。すなわち、閾値が高い（0.8）赤（灰色）エージェントと、閾値の低い（0.3）青（濃灰色）エージェントが小集団を形成したのに対して、閾値が両者の中間（0.55）の黄（淡灰色）エージェントが最も大きな集団を形成した。

閾値が高すぎると不満を持つため動き回り、閾値が低いと周りにいる同種のエージェントで満足

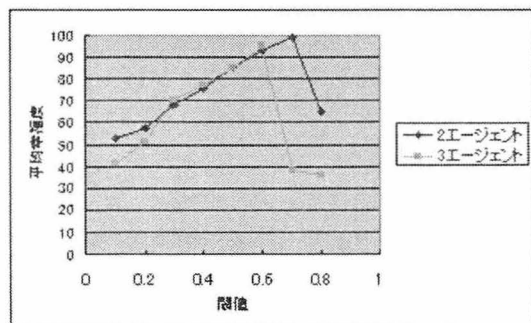


図17 閾値と平均幸福度との関係

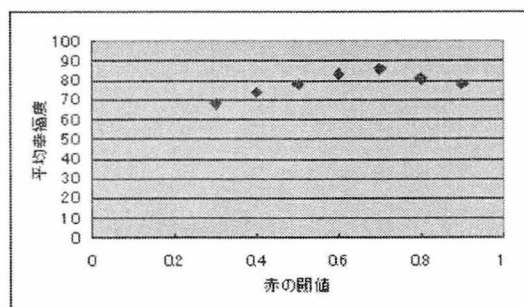


図18 青の閾値を一定（0.3）にした場合の赤の閾値と平均幸福度との関係

してしまうため双方とも小集団になる。一方、閾値が中程度のエージェントにはそういう属性がないために一番大きな集団を形成する、と思われる。この結果は3.2.1節で論じた、2種エージェントモデルでの結果を支持するものである。以上のシミュレーション結果より、Schelling の仮説が適切でないことが証明された。

3.3. 選好順序のある3種エージェントモデル

本節は、エージェントが他のエージェントに対する選好（例えば、赤は青を黄の2倍嫌い）を持っていた場合、どのような状況が出現するか、という問題に焦点を当てる。ここでは、3種エージェントのうちの2つが他のエージェントに対する選好を持っていた場合のシミュレーション結果について考察する。

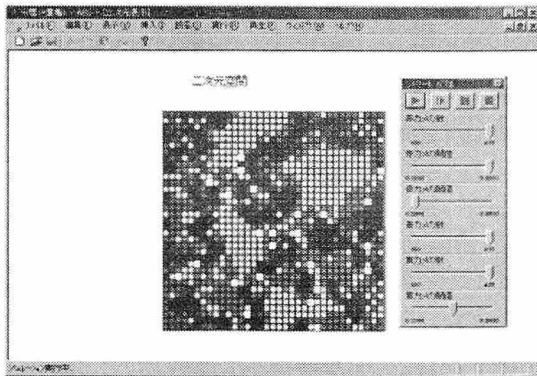


図 19 3種エージェントモデル（選好なし）

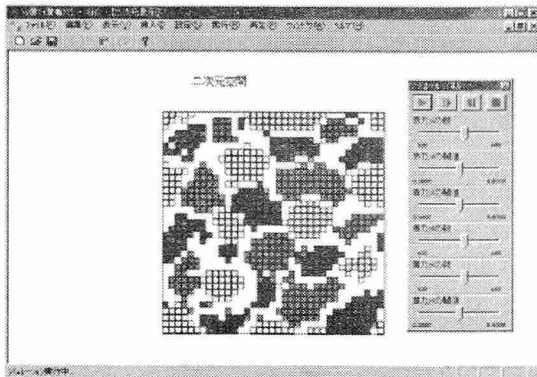


図 20 選好順序モデル（エージェント数 267×3, 閾値 0.55）
エージェントの違いによる集団形成に差は見られない

具体的にこのモデルでは、赤は青を黄の2倍嫌い、青は赤を黄の2倍嫌い、と想定されている（黄は特に区別しない）。各エージェントの幸福度の計算方法は次のようなものである。

$$\text{赤エージェントの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる赤の数}}{\text{視野内にいる赤の数} + 2 \times \text{視野内にいる青の数} + \text{視野内にいる黄の数}} \times 100$$

$$\text{青エージェントの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる青の数}}{2 \times \text{視野内にいる赤の数} + \text{視野内にいる青の数} + \text{視野内にいる黄の数}} \times 100$$

$$\text{黄エージェントの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる黄の数}}{\text{視野内にいる赤の数} + \text{視野内にいる青の数} + \text{視野内にいる黄の数}} \times 100$$

最初は全エージェントの閾値を同じにしてシミュレーションを行った。その時の予測は、黄は赤と青を区別しないので、黄はどこにいてもあまり気にしない、したがって小集団を形成するのではない、というものであった。結果は、閾値が比較的低い場合（閾値が0.55程度まで）にはそれぞれの集団の大きさに差は見られなかったが（図 20）、閾値が0.6以上になると黄が大集団を形成した（図 21、図 22）。特に図 22のようにエージェント数を減らし閾値を0.6にした場合、黄エージェントの大集団が顕著に出現した。これらは当初の予測と反する結果であった。以上のように閾値と

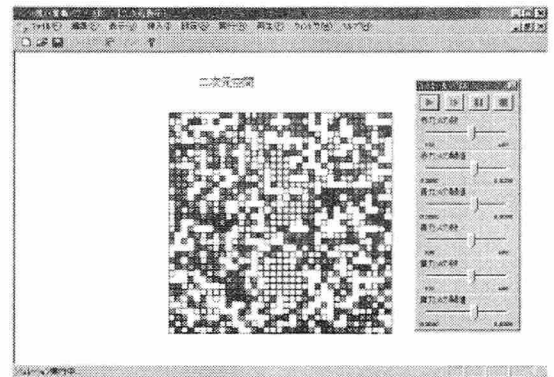


図 21 選好順序モデル（エージェント数 267×3, 閾値 0.6）
黄エージェントがやや大きな集団を形成

各エージェントの平均幸福度との関係を示したのが図 23 である。

この反直感的な結果が生じた原因は、以下のようなものであると考えられる。閾値が低い場合には、選好が導入されても、その要因が全エージェントの行動にもたらす影響が小さいため、エージェントの種類によって集団の大きさが異なる、という現象は見られない。逆に、閾値が高い場合には、選好という要因が赤と青の行動に与える影響が大きくなる（つまり、赤青は反発の度合いを強める）。したがって、赤と青はなかなか最適な場所を見つけない。一方、黄には選好がない分、幸福な場所に落ち着く確率が高くなる。一旦、小さな黄の集団ができると、それを拠点に他の黄が集まるため、中間的な黄がもっとも大きな集団を形成するのである。よって、この場合には、図 23 に見られるように、赤と青と比較すると黄の平均

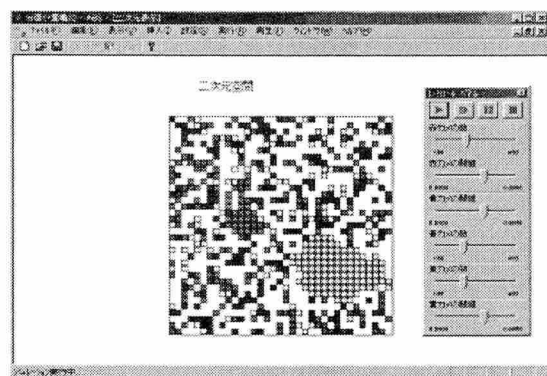


図 22 選好順序モデル（エージェント数 200×3 、閾値 0.6）

黄エージェントが大集団を形成

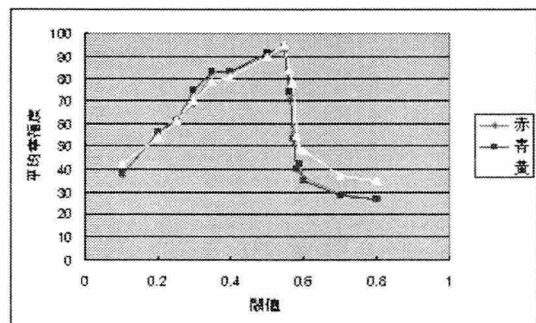


図 23 選好順序モデルにおける閾値と各エージェントの平均幸福度
(エージェント数は 267×3)

幸福度が高くなる。しかし、エージェント数が増えたり大きくなると、黄でも満足するスペースが見つからず、シミュレーションが終了しなくなることが考えられる。

4. 移民の新規参入一分居の攪乱 (その1)

4.1. 途中から第3種のエージェントが参入するモデル

3節での3種エージェントモデルは、3種類のエージェントが全てシミュレーションの開始時点から存在する場合を考えた。それは比喩的には、白人、黒人、黄色人種が最初から混在している状況に似ている。それとは別の状況として、2つの人種がある程度分居した状態で、さらにもう一つの他の集団が参入（移住）する場合が考えられる。本節ではこれまでの3種エージェントモデルを改良し、2集団で分居の進んだ状態にさらに第3種のエージェントが参入するモデルを作成し、その試行結果について考察する。

4.2. モデルの概要

このモデルの平均幸福度、エージェントルール等は従来のものと同じである。改良したのは、赤と青2種類のエージェントの平均幸福度を算出し、それが一定値を超えると黄が発生するようにした点である。平均幸福度を分居状態の指標として利用し、2集団が分居してから、第3種のエージェントが参入するように設定した。概要を図示すると図 24 のようになる。ここで参入点とは、第3種のエージェント（ここでは黄エージェント）が発生するときの平均幸福度を示している。例えば、参入点が60とは、最初に存在する2種類のエージェント（ここでは赤・青エージェント）の平均幸福度が60を超えると黄エージェントが空間に出現することを意味している。

ここでは、3.3節同様、選好順序があるモデルを使用し、参入点は赤と青の平均幸福度が90を超えるとき、と設定している。つまり、より性格が温厚な黄エージェントが、赤エージェントと青エー

ジェントのみで構成された、かなり分居の進んだ世界に侵入するとどうなるか、ということについて注目するのであるが、ここでは、参入点における赤エージェント・青エージェントの分居の度合いをなるべく高くすべく、参入点を90にしている。

4.3. 参入の影響

図 25、図 26、図 27 はエージェント数を各350、閾値を全て0.55に設定した時の試行結果を示している。図 25 は参入点を超えて黄エージェントが入った直後の状態だが、赤・青エージェントの間では、かなり分居が進んでいることが分かる。そして図 26 を経て図 27 のように赤・青・黄エージェントがはっきりと分居するようになる。エージェントの閾値によって分居の程度は異なるものの、これはエージェントの閾値が0.4~0.55の場合のシミュレーションに見られる一般的傾向である。

このシミュレーションでは、赤・青エージェントは黄エージェントが入った後に、より大きな集団を形成した。これは、次のように説明できると思われる。黄エージェントが入ることで、赤・青エージェント集団の端を構成している赤・青エージェントの幸福度が低下し、それらのエージェントは動かざるを得ない状況になる。それらのエージェントは、幸福な場所を求めて移動し、自らが幸福となる地点に落ち着く。黄エージェントが入った場合には、それ以前の場合よりも密度が高くなることから、自然とエージェント集団が大きくなる。これが、この場合の分居原理の説明である。

以上で述べた黄エージェントが参入したことによる赤・青エージェントの分居状況の変化は、一つにはエージェント数の増加による密度の上昇により、もう一つには赤・青エージェントとは異なる種類の黄エージェントが参入したことによりもたらされたと考えることができる。ここでは後者

(黄エージェントが参入したことによってもたらされた効果)にのみ注目するために、黄エージェントの代わりに赤・青エージェントが同数(各175エージェントずつ)参入した場合(密度が上昇した場合)の結果と比較する。結果は図28、図29に見られる通り、赤・青エージェントが同数参入した場合にも、参入後により大きな集団が形成されるということになった。しかし、集団の大きさを比較すると、赤・青エージェントを参入した場合の方が、黄エージェントが参入した場合よりも小さいことが指摘できる。これは、赤・青エージェントが参入した場合の方が、全てのエージェントがより満足しやすい状況にあるために(全てのエージェントにとって自分と同種類のエージェントがより多い状況)、より早く均衡しこのような結果がもたらされたのだと考えられる¹⁴⁾。つまり、この場合には黄エージェントが参入したことにより、より大きな集団が形成されるという効果もたらされた、と言える。

次にエージェント数を各350、各エージェントの閾値を全て0.6とした(閾値のみを変化させた)結果が図30、図31、図32である。図30は図25と同様黄エージェントが参入した直後を示しているが、各エージェントの閾値が高いために、図25と比較すると赤エージェントと青エージェントが大きな集団を形成している。それから図31のように一度かなり混在した状況になり、最終的に図32で見られるような、黄エージェントのみが大きな集団を形成する結果となった。これは、次のように説明できると思われる。

参入点を超えて黄エージェントが入ることで、前の場合と同様に、赤・青エージェント集団の端を構成している赤・青エージェントの幸福度が低下し、それらのエージェントは移動せざるを得ない状況になる。しかし、前の場合と異なり、閾値が高い赤・青エージェントはなかなか幸福になることができる場所を見つけることができない。ゆえに、赤・青エージェントはさまよい続けることとなるが、その間に移動した赤・青エージェントが集団の端を構成しなくなったために新たに集団の端を構成することとなった赤・青エージェントも同様の動作をすることになる。つまり、ほとん

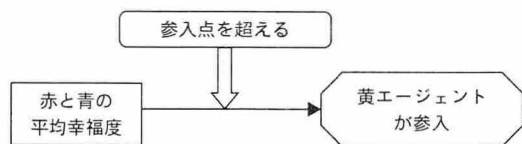


図 24 途中から第3種のエージェントが参入するモデル

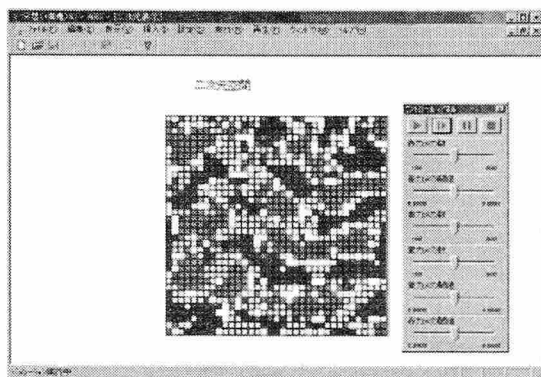


図 25 エージェント数 350×3 , 閾値 $0.55 \times 3:26$ ステップ後
黄エージェントが参入した時点

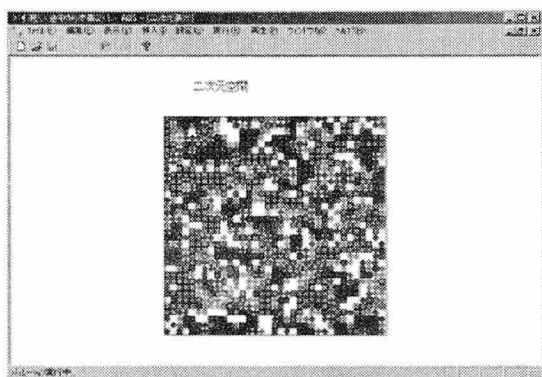


図 28 エージェント数 525×525 , 閾値 $0.55, 6$ ステップ後
(参入した時点)
(うち最初から存在する赤青各 350, 途中から参入する赤青各 175)

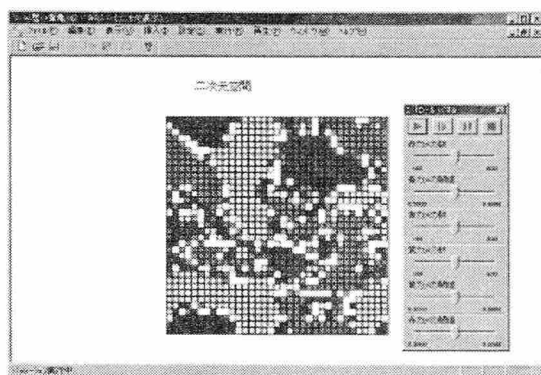


図 26 エージェント数 350×3 , 閾値 $0.55 \times 3:180$ ステップ後
赤青平均幸福度 71, 黄平均幸福度 78

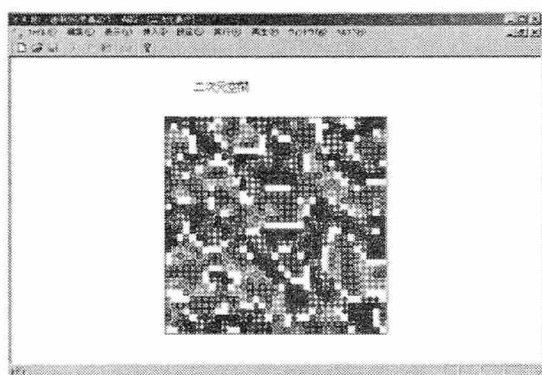


図 29 エージェント数 525×525 , 閾値 $0.55, 101$ ステップ後
(均衡した時点)
(うち最初から存在する赤青各 350, 途中から参入する赤青各 175)

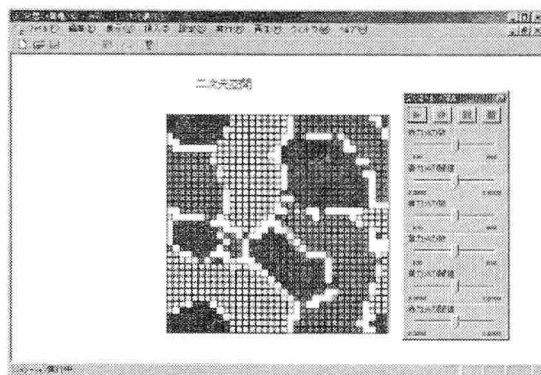


図 27 エージェント数 350×3 , 閾値 $0.55 \times 3:500$ ステップ後
赤青平均幸福度 93, 黄平均幸福度 93

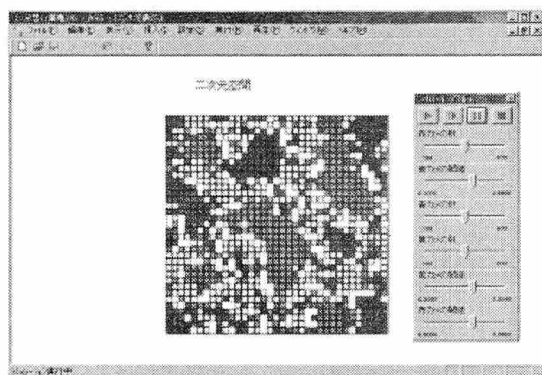


図 30 エージェント数 350×3 , 閾値 $0.6 \times 3:235$ ステップ後
黄エージェントが参入した時点

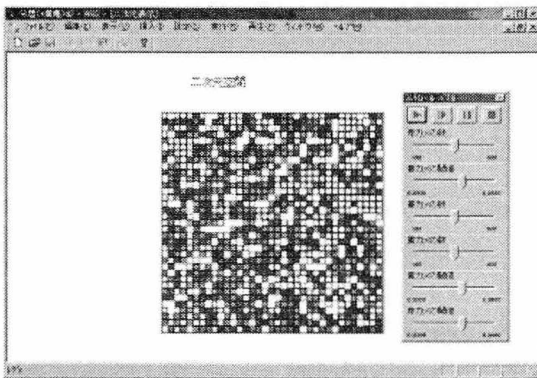


図 31 エージェント数 350×3 , 閾値 $0.6 \times 3:500$ ステップ後
赤青平均幸福度 30, 黄平均幸福度 42

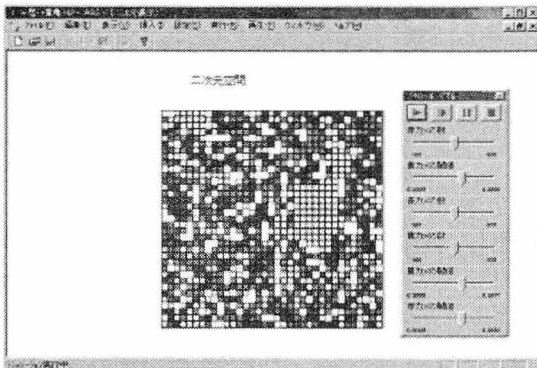


図 32 エージェント数 350×3 , 閾値 $0.6 \times 3:589$ ステップ後
赤青平均幸福度 34, 黄平均幸福度 50

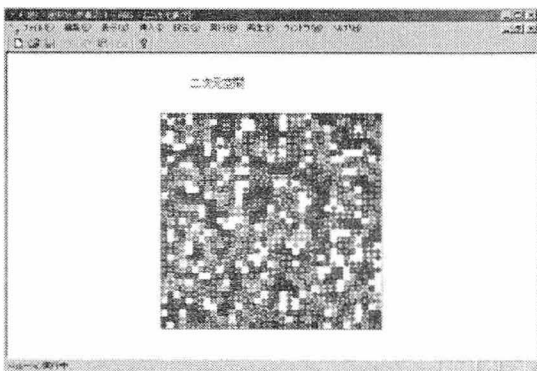


図 33 エージェント数 525×525 , 閾値 $0.6, 6$ ステップ後
(参入した時点)
(うち最初から存在する赤青各 350, 途中から参入する赤青各 175)

どの赤・青エージェントがさまよう状態になる一方、黄エージェントは赤・青エージェントのように選好を持たないので、幸福になる場所を見つける確率が高くなる。そして、一旦、小さな黄エージェントの集団ができると、それを拠点に他の黄エージェントが集まるために、黄エージェントの集団がより大きくなる、という論法である。

この場合には、赤・青エージェントを各 175 ずつ参入させた結果と比較すると黄エージェントの役割が明確になる。赤・青エージェントを参入させた場合には図 33、図 34 に見られるように新たに参入してきた赤・青エージェントは分居を促進する方向へ作用する。つまり、この閾値の場合には、密度を上昇させることで、赤・青エージェントの分居はより促進されるのである。しかし、それ以上に黄エージェントが参入した効果（赤・青エージェントによる分居を攪乱する）が大きく、結果的に図 32 に見られるような状態になったのである。さらに閾値を大きくすると（0.7 以上）、赤・青エージェントのみが存在する状態において、平均幸福度が 90 以上にならず、黄エージェントが参入する状態にまで達しなかった。

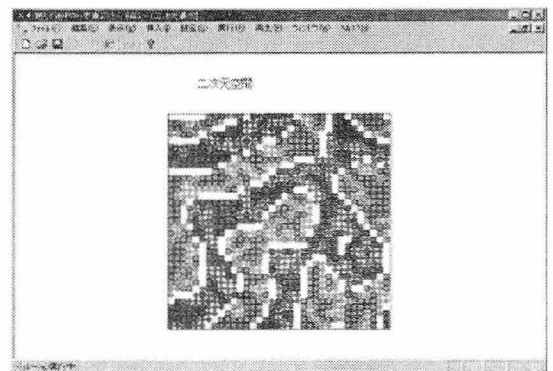


図 34 エージェント数 525×525 , 閾値 $0.6, 220$ ステップ後
(均衡した時点)
(うち最初から存在する赤青各 350, 途中から参入する赤青各 175)

5. 明白な異分子の参入——分居の攪乱（その2）

5.1. 概要

Epstein and Axtell (1996) による『人工社会』には、Schelling が提示した分居モデルについて「一握りの『色盲エージェント』を侵入させることで、分居した人種をかき混ぜることはできるのだろうか。分居パターンを変えるのに必要な個体数はどの程度だろう」¹⁵、という問題が挙げられている。つまり、(1) エージェントが分居して存在する状態の中に一握りの「色盲エージェント」を侵入させた場合に、全体の状況を変化させる、つまり全てのエージェントが雑居する状態を形成することができるのか、(2) もしできるとするならば、それに必要な「色盲エージェントの個体数はどの程度であるのか、という2つの問題である¹⁶。

5節では、ABSによる分居モデルを用いてこれら2つの問題に対する解答を示す。その際には、『人工社会』においては厳密に定義されていない「色盲エージェント」に関して、①満足せず、常に動き回るエージェント（＝「引越し好きエージェント」：周囲の色が見えないゆえに自分と同じ色が分からず、常に満足できないでいる）、②色に関わらず、ある一定数以上のエージェントが自分の周囲に存在すると満足するエージェント（＝「寂しがり屋エージェント」：周囲の色が見えないので、どのエージェントが周囲にいても自分と同じものだ判断）、と定義し、それぞれの定義に基づいてモデルを形成した（「引越し好きモデル」、「寂しがり屋モデル」）。その上で、それぞれのモデルに関して、上に挙げた2つの問題について考察した。

尚、「引越し好き」や「寂しがり屋」と名付けた行動原理は、必ずしも『人工社会』で問題提起しているような「色盲」の定義を必要とするものではない。青や赤といったエージェントの個性を識別できないという意味では、そのようなエージェントは「色盲」とであると解釈できるが、この用語自体が差別的な響きを与えかねないこと、分居を

引き起こす個性（指標）は外見の色とは限らないこと、そしてそのような解釈が不必要であることなどを考慮する。そこで、以下では『人工社会』における記述は原文を尊重して色盲エージェントを用いるが、本稿では「無頓着エージェント」と呼ぶことにする。

5.2. 問題設定①：分居の攪乱は可能か？

本節では、「一握りの『色盲エージェント』を侵入させることで、分居した人種をかき混ぜることはできるのだろうか」¹⁷という問題設定について考察する。具体的には、赤・青エージェントが分居している状態（平均幸福度80以上）に2種類の「無頓着エージェント」（「引越し好きエージェント」、「寂しがり屋エージェント」、画面上では両者ともに黄エージェントとして表される）を導入し、それがどのような結果をもたらすか、ということについて考察する。尚、空間の大きさは35×35（1225）、エージェント数はそれぞれ350（350×3=1050）で固定する。

5.2.1. 引越し好きモデル

「引越し好きエージェント」が、赤・青エージェントによるかなり分居した状態の中に侵入するとどのような結果が導かれるか。

エージェントの閾値を0.1～0.4に設定した場合には、赤青2種エージェントのみが存在する状態において、平均幸福度が80以上にならなかった。つまり、赤青間の分居が進展せず、黄エージェントが侵入する状態にまで達しなかった。エージェントの閾値が0.4～0.6の場合には、黄エージェントが侵入した後に、赤・青エージェントがより大きな集団を形成する傾向が見られた（図35）。逆に閾値が0.65以上の場合には黄エージェントが侵入した後は、赤青黄全てのエージェントが雑居する状態になった（図36）。

ちなみに、全エージェントの平均幸福度は図37のようになっており、閾値が大きくなるごとに平均幸福度が低下することが分かる。また、エージェントが雑居する状況、というのは平均幸福度40以下に対応していることが分かる。

ここで、エージェントの閾値を0.65以上にした

場合に、赤・青エージェントの分居状態が崩れた理由を本当に黄エージェントの侵入に帰することが出来るか、ということについて考察する。つまり、赤・青エージェントの分居状態が崩れたのは、黄エージェントの持つ「無頓着」という特徴によるものだというよりも、単にエージェントの閾値が高くなったことよりもたらされた帰結なのではないか¹⁸、という想定されうる反論に予め答えておく。具体的には、黄エージェントの代わりに途中から赤・青エージェントを参入するモデルと前述の結果とを比較することにする。いずれのモデルもエージェントが参入したときのエージェント総数が1050になるように固定する。

「引越し好きモデル」の黄エージェントの代わりに赤・青エージェント各175が参入した場合、図38が示すように、黄エージェントが参入する場合に比べて平均幸福度が高くなった。つまり、閾値が高くなったことによりもたらされた効果のみでは、赤・青エージェントの分居状態を崩す理由を説明できない、ということが分かる。このことより、黄エージェントの持つ「無頓着」という特質が、赤・青エージェントの分居を攪乱する主な要因となることが明らかになった。

5.2.2. 寂しがり屋モデル

ここでは「寂しがり屋エージェント」が満足する周囲のエージェント数を「寂しがり度」と定義した。例えば、寂しがり度8の場合、「寂しがり屋エージェント」（黄エージェント）は、エージェントの種類に関わらず周囲に8エージェントが存在しないと満足せずに動き回る。逆に、寂しがり度0の時には、周囲にエージェントが全く存在しなくても満足な状態になり、その場所に立ち止まる。

ここでは5.2.1節と同様に、赤・青エージェントがある程度分居した状態の中に、寂しがり屋エージェントを侵入させた。その場合の平均幸福度と寂しがり度の関係を示したのが図39、図40である。ここで図39は閾値0.5、図40は閾値0.7と閾値のみ変化させたものである。ちなみに、赤・青エージェントの閾値が0.4以下の場合には、赤・青エージェントの平均幸福度は参入点（平均幸福

度80以上）を越えず、寂しがり屋エージェントが侵入することはなかった。赤・青エージェントの

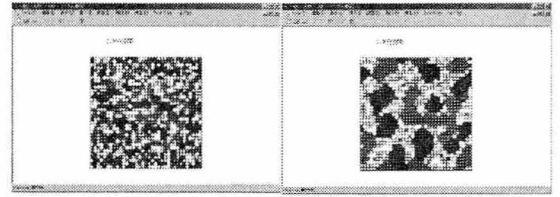


図35 引越し好きエージェント(閾値0.5)。
左:参入した瞬間(7ステップ後), 右:100ステップ後

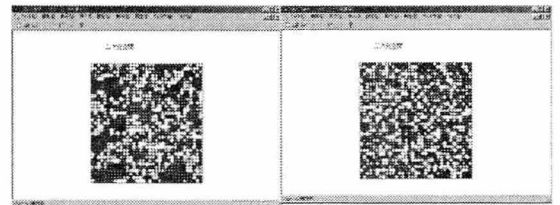


図36 引越し好きエージェント(閾値0.8)。
左:参入した瞬間(244ステップ後), 右:300ステップ後

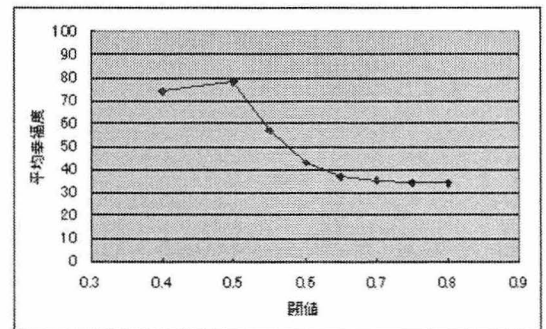


図37 引越し好きモデルにおける閾値と平均幸福度との関係

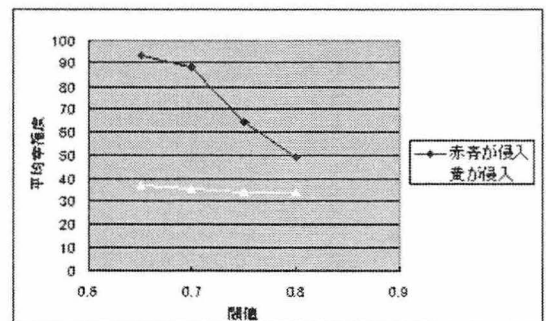


図38 閾値と平均幸福度との関係。赤青同時侵入モデルとの比較。

閾値が0.5の場合には、黄の寂しがり度が増すと平均幸福度も増す結果となった。つまり、寂しがり屋エージェントの寂しがり度が高まるにつれ、寂しがり屋エージェントが分居を攪乱するのではなく、逆に分居を促進する役割を果たしたと言える。さらに閾値が0.6以上になると、寂しがり度が4から6程度でやや平均幸福度が高いものの、全体的に平均幸福度が低い結果になった。すなわち、寂しがり度が低い（0～3）場合又は高い（7～8）場合に、寂しがり屋エージェントの侵入により集団が攪乱されたといえる。

寂しがり度を一定にして、横軸に閾値、縦軸に平均幸福度をプロットしたものが図 41、図 42、図 43である。いずれの図を見ても閾値が0.6程度で平均幸福度が大きく低下している。これらの図からも閾値が0.6以上と高くなると集団が攪乱される状況が観察できる。

さらにここで、5.2.1節で前述した、途中から青エージェントが侵入するモデルと比較する。青エージェントが侵入するモデルでは、寂しがり屋モデ

ルにおいて見られたような攪乱作用が存在しなかった（平均幸福度はどのような閾値の場合でも40以上であった）。したがって、寂しがり屋エージェントが集団の攪乱を促していることが確認できた。

5.3. 問題設定②：攪乱に必要な個体数は？

5.2節より、ある特定の状況において無頓着の黄エージェントが侵入することで、赤・青エージェントによる分居状態が攪乱されることが明らかに

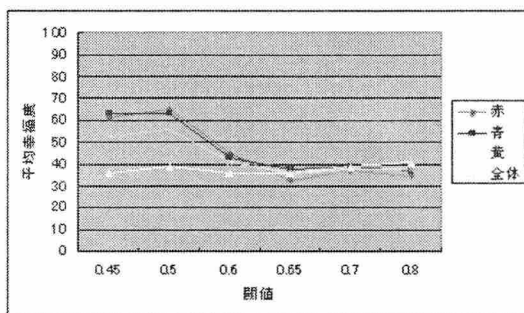


図 41 閾値と平均幸福度との関係(寂しがり度0)

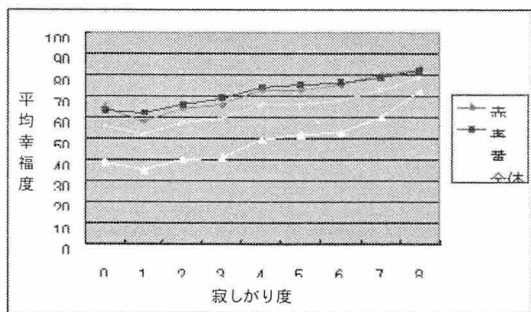


図 39 寂しがり度と平均幸福度との関係 (閾値0.5)

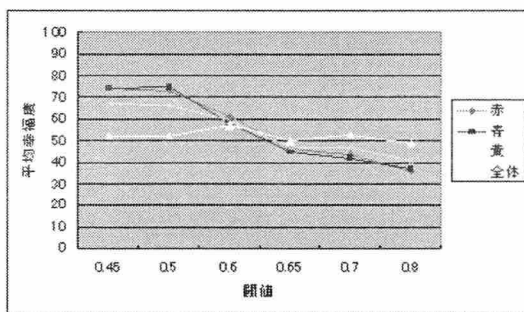


図 42 閾値と平均幸福度との関係(寂しがり度5)

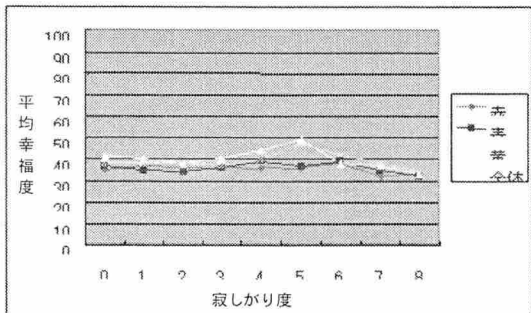


図 40 寂しがり度と平均幸福度との関係 (閾値0.7)

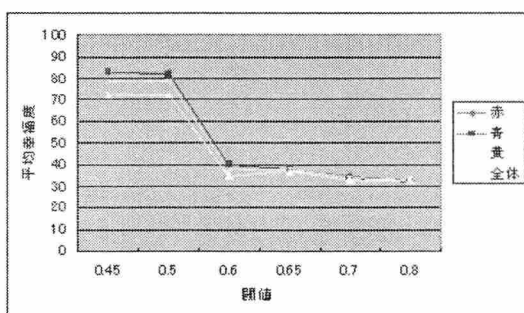


図 43 閾値と平均幸福度との関係(寂しがり度8)

なった。本節ではそれを受けて、攪乱に必要な黄エージェントの個体数がどの程度なのかについて考察することにする。尚、本節でも空間の大きさは 35×35 (1225) である。

5.3.1. 引越し好きモデル

本節では、引越し好きモデルにおいて、侵入させる黄エージェント数を変化させることで、所定の閾値の場合にどの程度の黄エージェントを侵入させれば赤・青エージェントによる分居状態を攪乱することができるか、ということについて考察する。

図 44 より、閾値と侵入する黄エージェント数、そして攪乱との関係が読み取れる。ここでは 5.2 節における結果より、平均幸福度 40 以下を攪乱された結果、平均幸福度が 40 より大きい場合を攪乱されなかった結果、としている。図 44 の①は、赤・青エージェントが十分に分居しなかったために (平均幸福度 80 以下)、黄エージェントが侵入できなかった領域を示している。②は黄エージェントが侵入したものの、それが赤・青エージェントの分居をより促す結果になった領域を示している。また、③は黄エージェントが侵入したことで、赤・青エージェントによる分居状態が攪乱された領域を示している。これより、閾値が高く、侵入する黄エージェント数も多い場合には攪乱されやすい一方、閾値が低く、侵入する黄エージェント数が少ない場合には攪乱されにくい、という傾向が存在することが分かった¹⁹。

以上の結果より、「分居パターンを変えるのに必要な個体数はどの程度だろう²⁰」という 2 番目の

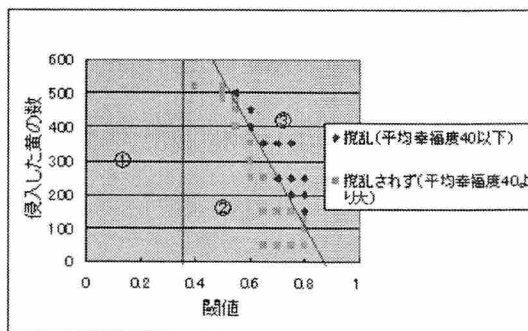


図 44 引越し好きモデルにおける集団の攪乱条件

問題設定に対して解答を述べるができる。それは、エージェントの閾値が高ければより少ない数の、閾値が低ければより多い数の引越し好きエージェントが分居状態を攪乱するために必要である、ということである。具体的には、エージェントの閾値が 0.55 の場合には 500 以上、0.65 の場合には 350 以上、0.75 の場合には 200 以上、0.8 の場合には 150 以上の引越し好きエージェントが必要である。

5.3.2. 寂しがり屋モデル

5.2 節より寂しがり屋エージェントが分居パターンを変化させることが明らかになった。そこでは、寂しがり屋エージェント数をその他のエージェント (赤・青エージェント) と同数の 350 侵入させていたが、本節では、集団形成のパターンを変化させうる寂しがり屋エージェントの個体数を特定する。尚、本節でも 5.3.1 節と同様に、平均幸福度 40 を集団形成のパターンが分居から雑居状態へと変化する目安とする。

図 45～図 47 は 0.5 から 0.8 までの各閾値において、赤・青エージェントによる分居状態を雑居状態へと攪乱するのに必要なエージェント数をプロットしたものである。2.2 節においても述べた通り、エージェントの閾値が 0.4 以下の場合には、赤・青エージェントの平均幸福度が参入点 (80) を越えず、寂しがり屋エージェントが侵入することができなかった。ゆえに本節においても閾値が 0.4 以下の場合には考察の対象となっていない。エージェントの閾値が 0.5 である図 45 では、どの寂しがり度においても、寂しがり屋エージェントを最大限侵入させても (寂しがり屋エージェントを 500 侵入させた状態、全体の密度 98) 平均幸福度が 40 を下回ることがなく、雑居状態は観察されなかった。また図 46、図 47 より、攪乱に必要なエージェント数は、寂しがり度 0～4 においては、寂しがり度が増すにつれて増え、寂しがり度 5 あるいは 6 で最も多くなり、さらに寂しがり度が増すと再び減少するということが分かる。図 46、図 47 では、このような傾向が同様に見られるものの、それぞれを比較すると、閾値が高くなればなる程、攪乱に必要な寂しがり屋エージェント数は少なく

なる、という傾向も観察できる。具体的には、閾値0.6のときには最小300、最大500、閾値0.7のときには、最小150、最大450、閾値0.8のときには最小100、最大450のエージェント数を必要とすることが明らかになった。

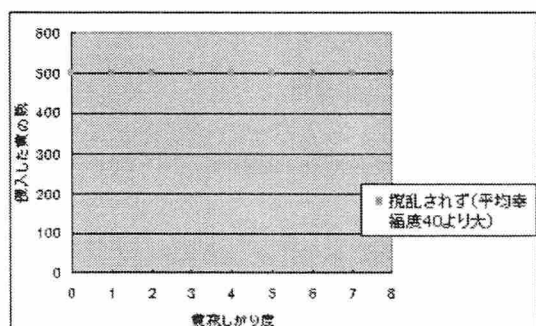


図 45 寂しがり度と攪乱に必要な黄の数との関係 (閾値0.5)

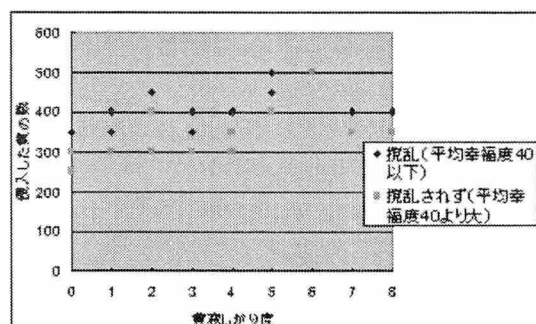


図 46 寂しがり度と攪乱に必要な黄の数との関係 (閾値0.6)

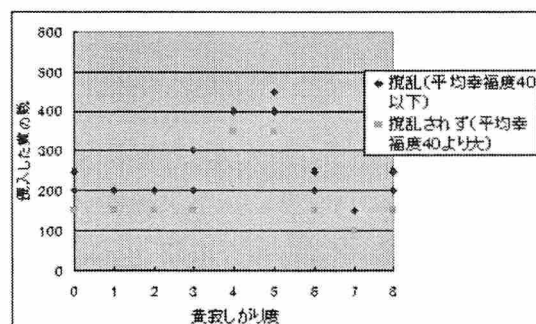


図 47 寂しがり度と攪乱に必要な黄の数と関係 (閾値0.8)

6. 仮面の異分子の参入—分居の攪乱 (その3)

6.1. 概要及び設定

5節では、無頓着エージェント（黄エージェント）は、青エージェントからも赤エージェントからも自分達とは異質であると認識されていた。つまり、「移民の新規参入」モデルにおける黄エージェントのように、無頓着エージェントは新しい別種のエージェントとして見なされていた。

本節では、この前提条件を大きく変える。本来、無頓着エージェントが異質であるというのは、行動原理が異質なのであって、それが明示的に他のエージェントに分かるということではない²¹。そこで6節では、無頓着エージェントは外見上は、他のエージェントから「無頓着」（異質）であると認識されないものとした。具体的には、無頓着エージェントは、無頓着以外のエージェントからは青色であると認識されるように設定した。つまり、無頓着エージェントは、その行動原理は他種のエージェントと異なるものの、青エージェントからは同種であると認識され、赤エージェントからは異質であると認識される。このいわゆる「無頓着青エージェント」の行動原理については、前節と同様、「引越し好き」と「寂しがり屋」の2種類を想定した。

変数設定は、空間の大きさを 35×35 (1225)、エージェント数をそれぞれ350 (350×3)、エージェントの移動範囲を3に固定した。

6.2. 引越し好きモデル

エージェントの閾値を0.1~0.4に設定した場合には、赤・青エージェントの平均幸福度が80以上にならず、引越し好き青エージェントが侵入することはできなかった。また、エージェントの閾値が0.4から0.7の場合には、引越し好き青エージェントが侵入することで、最初から存在した赤・青エージェントの分居がより促される結果となった(図48)。逆に図49などのように閾値が0.75以上の場合には、引越し好き青エージェントが侵入し

た後に、元から存在した赤・青エージェントの集団が攪乱される様子が見られた。

次に、攪乱するのに必要な引越し好き青エージェントの個体数について言及する。図 50 は、閾値と侵入した引越し好き青エージェント数、そして攪乱との関係について示したものである。ここでは、5節に倣い、平均幸福度40以下を攪乱された結果、平均幸福度40より大きい場合を攪乱されなかった結果、としている。かなり閾値が高く、かつ侵入した引越し好き青エージェント数がかなり多くないと、このモデルにおいては攪乱がなされにくい、ということが分かる。

次に、引越し好き青エージェント侵入モデルとその他のモデル（青エージェント侵入モデル、引

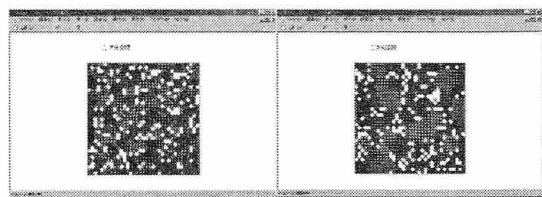


図 48 引越し好き青エージェントが入った瞬間（7ステップ後）と100ステップ後（閾値0.5）

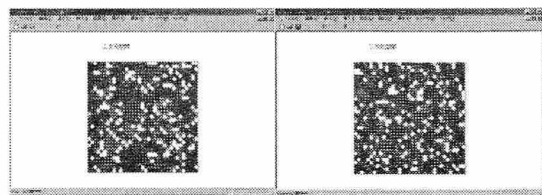


図 49 引越し好き青エージェントが入った瞬間（83ステップ後）と200ステップ後（閾値0.8）

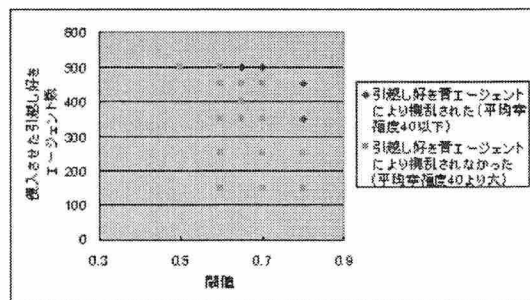


図 50 閾値と攪乱に必要な引越し好きエージェント数との関係

越し好き黄エージェント侵入モデル）の結果を比較する。ここで青エージェント侵入モデルとは、無頓着という性質を持たない通常青エージェントを侵入させるモデルのことである。

図 51 は、閾値と平均幸福度との関係を表したものであるが、閾値が0.4~0.5の場合には、平均幸福度に関してモデル間での差はそれほど大きくない。閾値がそれより大きくなると（0.6以上）、青エージェント侵入モデル、引越し好き青エージェント侵入モデル、引越し好き黄エージェントモデルの順で平均幸福度が低くなる。これより、引越し好きエージェントが侵入するモデルの方が、

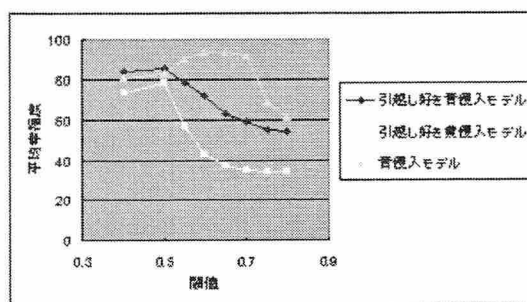


図 51 閾値と平均幸福度の関係

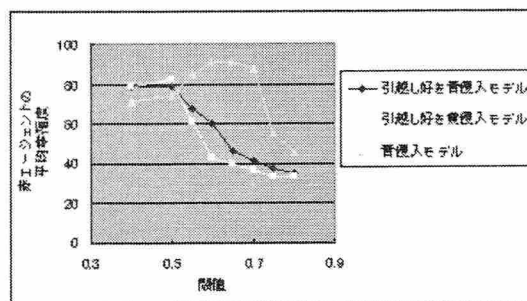


図 52 閾値と赤エージェントの平均幸福度との関係

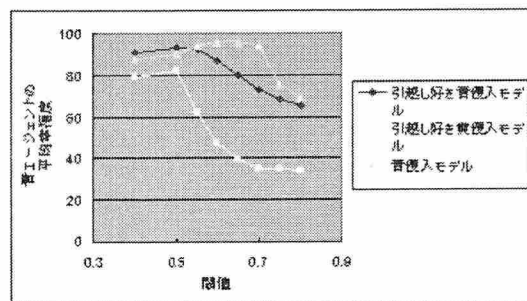


図 53 閾値と青エージェントの平均幸福度との関係

「引越し好き」という性質を持たない普通のエージェントの侵入するモデルより、元から存在するエージェントによる分居状態を攪乱することが分かる。また、同じ引越し好きモデルでも、黄エージェントを侵入させた方が、青エージェントを侵入させたものよりもさらに攪乱の度合いが高い、ということも分かった。これは、引越し好き青エージェント侵入モデルでは、元から存在する青エージェントが、侵入してきた青エージェントを自分と同種類のエージェントだと見なし²²、自らの平均幸福度を高くすることに由来すると考えられる。

図 52 は、閾値と赤エージェントの平均幸福度（以下、赤平均幸福度と略）との関係を示したものである。青エージェント侵入モデルと2つの引越し好きモデルを比較すると、閾値が比較的低い場合（0.4～0.5）には、後者の赤平均幸福度がより高くなっている。逆に、閾値が中程度から高い場合（0.55～0.8）には、青エージェント侵入モデルの赤平均幸福度の方が高い。この説明は以下のように考えられる。閾値が比較的低い場合には、エージェントは周囲に自分と同種類のエージェントがそれほど存在しなくても満足する、満足しやすい状況にあるために、青エージェント侵入モデルだと、全てのエージェントがすぐに満足して平均幸福度が低いまま均衡に近くなる。一方、2つの引越し好きモデルの場合には、途中から侵入してくる引越し好きエージェントは常に満足しない状態なので、赤エージェントがより大きな集団を作るための刺激を与える役割を果たす。また、エージェントの閾値が高い場合には、全てのエージェントが満足しにくい状況にあるため、引越し好きエージェントは元のエージェントの集団を攪乱する方向に作用する。普通の青エージェントを侵入させた場合には、引越し好きエージェントよりも動き回らない分、攪乱する度合いが低く、ゆえに赤平均幸福度も高くなる。

さらに、図 52 の2つの引越し好きモデルを比較すると、赤エージェントに対する引越し好きエージェントの影響については、引越し好き青エージェントを侵入させた場合よりも引越し好き黄エージェントを侵入させた場合の方がより攪乱される度合いが高い、ということが分かる。赤エージェント

にとっては、青エージェントであっても黄エージェントであっても、自らと異なる引越し好きエージェントとして認識する筈であるのに、この差が出るのはどうしてなのか。これについては次の第7節で考察する。

図 53 は、閾値と青エージェントの平均幸福度（以下、青平均幸福度と略）との関係について示したものである。これより、青エージェントを侵入させたモデル（青エージェント侵入モデル、引越し好き青エージェント侵入モデル）の方が黄エージェントを侵入させたモデルより青平均幸福度がかなり高くなることが分かる。この結果が出現する理由は、青エージェントを侵入させたモデルの方が黄エージェントを侵入させたモデルより、全体に対する青エージェントの比率が高い、ということより自明であろう。また、閾値が低い場合には引越し好き青エージェント侵入モデルの方が若干、青平均幸福度が高く、閾値が高い場合には青エージェント侵入モデルの方が青平均幸福度が高い理由は、赤平均幸福度における説明と同様のものであると考えられる。

6.3. 寂しがり屋モデル

図 54、図 55、図 56、図 57 では、閾値を変化させた場合の寂しがり度と平均幸福度との関係を示した。閾値を0.5とした図 54 では、寂しがり度が増すと平均幸福度も増加し赤平均幸福度は最大で77となった。つまり、寂しがり屋青エージェントが侵入することで、分居状態を促す結果になった。閾値が0.6の図 55 では、寂しがり度0のときには閾値0.5と同様に赤平均幸福度62だが、寂しがり度が5前後のとき平均幸福度が最も高くなり81に達した。さらに寂しがり度が増すと赤平均幸福度60に低下する。閾値0.7の図 56 は寂しがり度0のとき赤平均幸福度が70と高い値となり、寂しがり度4のとき最大で81となった。しかし、さらに寂しがり度が増すと急激に平均幸福度が低下し、寂しがり度8のとき赤平均幸福度は45となった。閾値を0.8にした図 57 では寂しがり度0のときから赤平均幸福度51と低めの値となり、寂しがり度5まではほぼ横這いであった。寂しがり度が大きくなると平均幸福度が低下し寂しがり度8の

とき36となった。閾値が0.8と高いとき、青寂しがり屋エージェントが分居状態を攪乱する傾向が見られた。

5節で試行した黄寂しがり屋モデルと今回の青寂しがり屋モデルとを、赤エージェントの平均幸福度を指標にして比較したのが図 58、図 59、図 60、図 61である。ここで赤エージェントの平均幸福度を用いたのは、赤エージェントの条件が無頓着エージェントの種類が異なること以外全く同

じになるためである。

図 59、図 60、図 61 に共通するのは、黄寂しがり屋モデルよりも青寂しがり屋モデルの赤平均幸福度が高くなる点である。また、図 58、図 59 において両モデルの傾向が類似している。一方、違いが顕著なのは閾値0.7の図 60である。黄寂しがり屋モデルは平均幸福度が40前後と低く雑居状

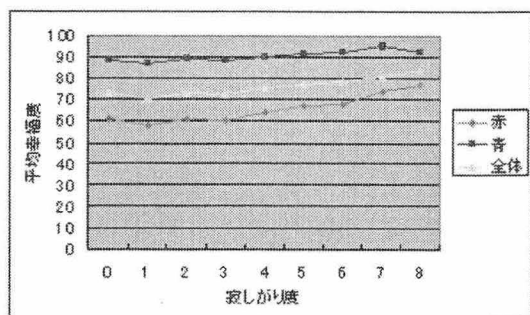


図 54 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値0.5:赤 350,青 350,無頓着青 350)

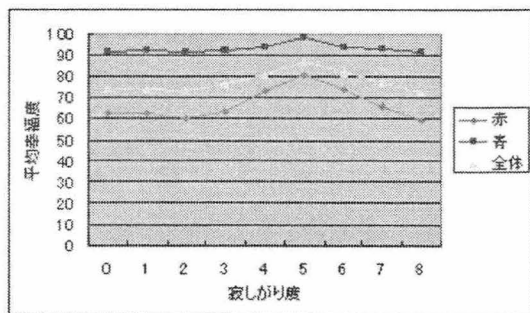


図 55 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値0.6:赤 350,青 350,無頓着青 350)

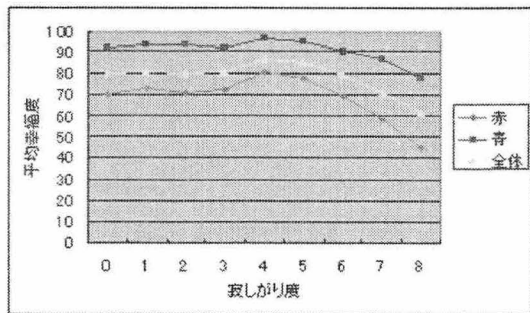


図 56 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値0.7:赤 350,青 350,無頓着青 350)

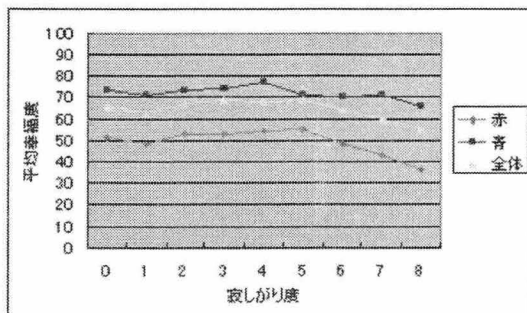


図 57 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値0.8:赤 350,青 350,無頓着青 350)

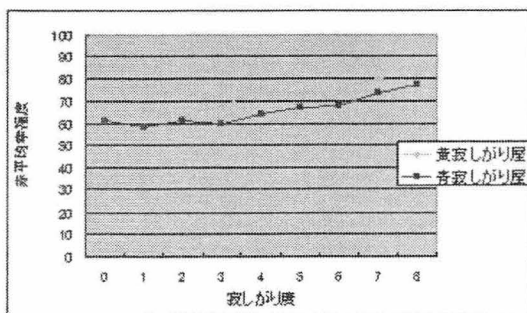


図 58 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値0.5:赤 350,青 350,寂しがり屋の青または黄 350)

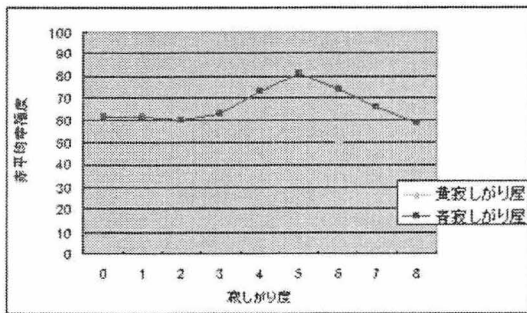


図 59 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値0.6:赤 350,青 350,寂しがり屋の青または黄 350)

態であるのに対し、青寂しがり屋モデルでは、寂しがり度6以上で低下するものの、全般的に平均幸福度が高い。

無頓着黄モデルと比べて、無頓着青モデルは全体の平均幸福度も赤のみの平均幸福度もともに高い。全体の平均幸福度が高いのは青の数が合計700となり、青平均幸福度が高くなることから得られる当然の帰結である。赤エージェントにとっては、周囲が無頓着黄エージェントか無頓着青エージェントであるかは区別せず、両方とも異種のエージェントとみなす点では共通している。それにもかかわらず、無頓着青モデルの方で赤平均幸福度が高くなる理由は以下のように考えられる。

すなわち、無頓着青エージェントが侵入すると、初期状態から存在する青エージェントは自分と同種が増えたと判断する。すると青エージェント同士が集団を形成し分居が進む。青エージェントの分居が進むことにより、赤エージェントも赤エー

ジェント同士が固まりやすい空間環境が整い、分居が促進されると考えられる。このメカニズムについては、次の第7節で更に議論する。

7. 分居過程の相互依存メカニズム

6節における試行では、引越し好きモデル、寂しがり屋モデル双方において、赤エージェントに対する無頓着エージェントの影響に関して、無頓着青エージェントを侵入させた場合よりも無頓着黄エージェントを侵入させた場合の方がより攪乱される度合いが高い、ということが明らかになった。赤エージェントにとっては、無頓着青エージェントであっても無頓着黄エージェントであっても、自らと異なるエージェントとして認識する筈であるのに、この差が出るのはどうしてなのか。本節ではこの理由について、仮説を挙げて検証することにする。

まず、このメカニズムを説明すると思われる仮説を挙げる。それは、「他の条件が同じ場合、自分以外のエージェントが分居しやすければしやすいほど、自らも分居しやすくなる」という仮説である。つまり、エージェントの分居の程度は自らの閾値のみによって決定されるのではなく、他のエージェントによる分居の程度にも影響される、ということである。つまり分居に対してポジティブフィードバックが働くと考えられる。

そこで、この仮説をより単純なモデルで検証する。ここで使用するモデルは、赤・青エージェントによる2種エージェントモデルであり、青エージェントの閾値を一定にした場合に赤エージェントの閾値を変化させることで、青エージェントの分居のあり方（平均幸福度）がどのように変化するか、ということについて観察する。この仮説が正しければ、赤エージェントの閾値が変化し、赤エージェントの平均幸福度が変化するのに合わせて、青エージェントの平均幸福度も変化する、という結果が得られるはずである。

図 62、図 63、図 64 はエージェント数をそれぞれ525にした場合（密度86%）の結果である。これより、青エージェントの閾値がどのような値であっても、赤エージェントとほぼ同様の平均幸

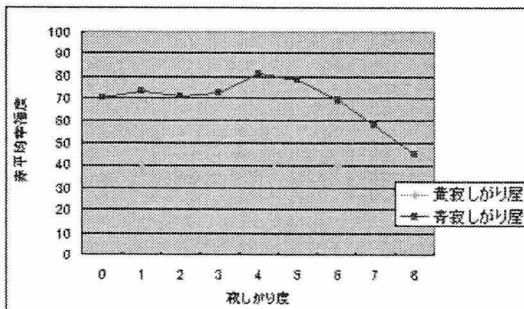


図 60 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値 0.7:赤 350,青 350,寂しがり屋の青または黄 350)

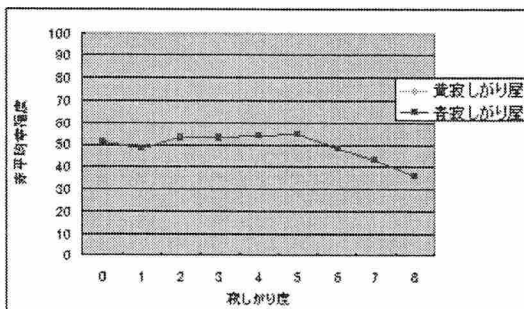


図 61 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値 0.8:赤 350,青 350,寂しがり屋の青または黄 350)

幅度になる、つまりほぼ同様の分居の程度になる、ということが分かる。これは、上の仮説を支持する結果であろう。

ここで、同様の条件で密度を低くした場合（密度49%、エージェント数はそれぞれ300）の結果について考察する。なぜなら、図62、図63、図

64の結果は、密度がかなり高いために発生したのであって（つまり、密度が高いために、赤エージェントがかなり分居してしまうと、青エージェントが存在するスペースが限られてくるために青エージェントも分居する）、密度が低い場合には同様の結果が出ない可能性もある、と考えたからであ

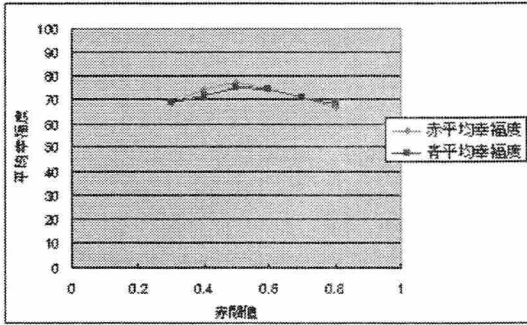


図62 2種エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値0.3,赤525,青525)

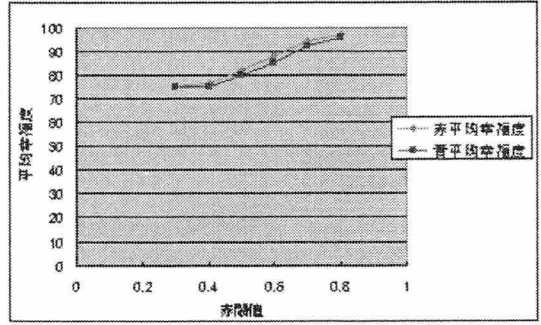


図65 2種エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値0.3,赤300,青300)

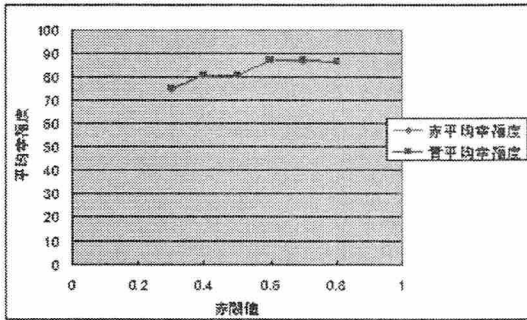


図63 2種エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値0.5,赤525,青525)

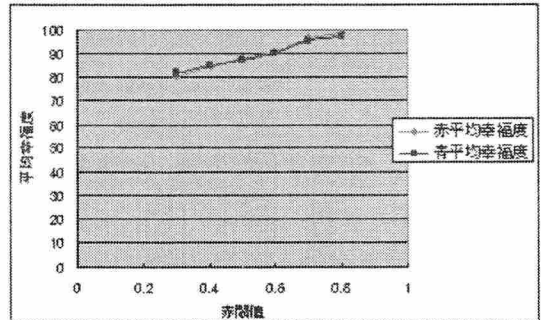


図66 2種エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値0.5,赤300,青300)

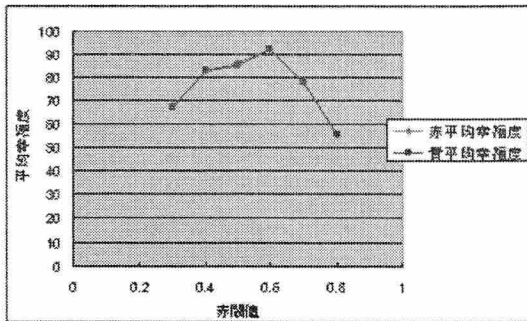


図64 2種エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値0.8,赤525,青525)

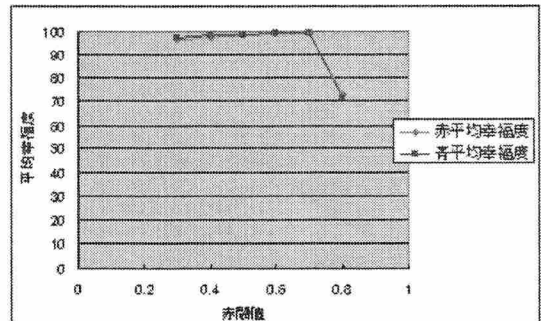


図67 2種エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値0.8,赤300,青300)

る。結果は図 65、図 66、図 67 に示す通りであるが、ここでも青エージェントの閾値がどのような値であっても、赤エージェントとほぼ同様の平均幸福度になる、つまりほぼ同様の分居の程度になる、という結果が得られた。

以上の結果より、密度に関わらず、上に挙げた仮説「他の条件が同じ場合、自分以外のエージェントが分居しやすいほど、自らも分居しやすくなる」が支持されることが明らかになった。よって、6節における結果（赤エージェントの平均幸福度が、無頓着青エージェントが参入した場合より、無頓着黄エージェントが参入した場合の方が低い）の理由が説明できる。すなわち、無頓着青エージェントが参入した場合には、無頓着黄エージェントが参入した場合よりも青エージェントがより分居しやすくなるが、それに影響される形で赤エージェントもより分居しやすくなる、という説明である。これは、1.2.1 節で言及した Schelling の議論では直接的に言及されていないことであり、分居現象を説明する新たな仮説を提示したと言える。

おわりに―所見のまとめと展望

以上、ABS モデルを用いて、Schelling の議論の検証、そして Schelling モデルの応用・発展を試みた。ここでは、本稿で得られた知見、そして、それを Schelling の議論と照らし合わせることで、本稿にどのような意義があるのかについて簡単に言及する。

第2節では、分居を促す要因を探った。分居を促す要因に関しては、密度・閾値は分居に影響を与えていると考えられるが、セルの形・移動範囲といった要因は、分居にそれほど大きな影響を与えていないということが特定できた。Schelling の議論では、閾値が分居を促す要因であることのみが特定されていただけで、他の要因については考察されていなかった。他の要因についての考察もできた点で、この議論は Schelling の議論を越えたものだと言えよう。

また、均衡する／しないという結果と密度、そして閾値との関係については、密度が高くかつエー

ジェントの閾値が高い場合には、均衡しにくい、逆に密度が低くかつ閾値が低いならば均衡しやすいという結論が導けた。均衡する／しないということに関する議論は Schelling の議論に存在しなかったことより、この点においてもこの議論は Schelling の議論より一歩進んだものであると言える。

Schelling の「閾値が高いエージェントは密集し、閾値の低いものは広がる」という仮説は、ABS を用いた本稿でもある程度支持された。しかし、閾値が高ければ高いほど分居が進むとは結論づけられず、分居するための閾値には一定の限度があることが明らかになった。また、ABS モデルでは分居プロセスを詳しく見るができることから、閾値の低いエージェントの行動に関する知見も得られた。閾値の低いエージェントの行動に関しては、それが拡散することで広い範囲に存在するというよりも、小さな集団ですぐにまとまるがゆえに広い範囲に存在すると解釈した方が適切である。なぜなら、閾値の低いエージェントは、周囲に同種が少々存在すれば満足し、移動する必要がなくなるため、積極的に広がるのではなく、現状に満足し結果的に小集団となる、と考えられるからである。

さらに、本稿では Schelling が想定していなかった3種エージェントモデルを導入することによって、2種エージェントモデルでは想定することのできなかった状況（エージェントに選好がある状況、第3のエージェントを途中から導入した状況）について分析することができた。3種エージェントのうち2つのエージェント（赤・青エージェント）が選好を持つ設定では、閾値が0.6以上になると選好を持たないエージェント（黄エージェント）が大集団を形成する、という結果が見られた。これは、選好を持たない3種エージェントモデルでは見られない結果であった。

また、第3のエージェントを途中から導入するモデル（最初から存在する第1、第2のエージェントには選好がある）では、第3のエージェントを途中から参入させることで、既存の第1、第2種エージェントの行動にどのような変化が見られるか、ということを明らかにすることができた。

具体的には、閾値が比較的低い場合（0.4～0.5）には、黄エージェントが参入した後に、赤・青エージェントはより大きな集団を形成した。閾値が中程度（0.5～0.6）の場合には、赤・青エージェントは黄エージェントの入った後に形成していた集団を離れてさまよう一方、黄エージェントは大きな集団を形成した。

第5節では、3種エージェントモデルを用いて、『人工社会』で提起されてはいるものの、著者が解答を提出していない問題…「一握りの『色盲エージェント』を侵入させることで、分居した人種をかき混ぜることはできるのだろうか。分居パターンを変えるのに必要な個体数はどの程度だろう²³」…について解答を提示した。以下では、第5節同様色盲エージェントの代わりに無頓着エージェントという語を用いる。その方法としては、ABSを使用して作った2つのモデル（引越し好きモデル、寂しがり屋モデル）をシミュレートする、という方法を採用した。

無頓着エージェントを侵入させることで分居状態を攪乱することが可能であるのか、という最初の設問に関しては、ある特定の状況において無頓着エージェントが集団を雑居状態へ攪乱する作用を確認することができた。引越し好きモデルにおいては、閾値が0.65以上の場合に攪乱作用が見られた。寂しがり屋モデルにおいては、閾値が0.6以上でかつ、寂しがり度が低い（0～3）場合又は高い（7～8）場合に、寂しがり屋エージェントの参入により集団が攪乱された。

分居状態を攪乱するのに必要な無頓着エージェントの個体数はどの程度であるか、という第二の設問に関しては、引越し好きモデルにおいては、エージェントの閾値が高ければより少ない数の、閾値が低ければより多い数の引越し好きエージェントが分居状態を攪乱するために必要である、という結果が得られた。一方、寂しがり屋モデルに関しても同様の関係が認められた。また、寂しがり屋モデルにおける、寂しがり度と攪乱に必要なエージェント数との関係に関しては、寂しがり度0～4においては、寂しがり度が増すにつれてより多くの寂しがり屋エージェントが攪乱に必要になり、それが寂しがり度5あるいは6で最も多くな

るが、さらに寂しがり度が増すと、攪乱に必要な寂しがり屋エージェント数が減少する関係が認められた。

第6節では、赤青2種類のエージェントが分居している状態に、無頓着である青エージェントを侵入させる、という3種エージェントモデルを作成し分析した。最初に、無頓着青エージェントが分居状態を攪乱するかどうかについて考察したが、5節における無頓着黄エージェント侵入モデルと比較すると、攪乱する度合いが低い、ということが分かった。また、赤エージェントに対する無頓着エージェントの影響に関しては、無頓着黄エージェントを侵入させた場合よりも無頓着青エージェントを侵入させた場合の方がより平均幸福度が高く、攪乱されにくい、ということも明らかになった。

これに関して、赤エージェントにとっては、無頓着青エージェントであっても無頓着黄エージェントであっても、自らと異なる無頓着エージェントとして認識する筈であるのに、この差が出るのはどうしてなのか、という疑問が発生した。そこで、その理由について7節で考察した。

第7節では、「他の条件が同じ場合、自分以外のエージェントが分居しやすければしやすいほど、自らも分居しやすくなる」という仮説を立て、それを簡単なモデルを用いて実証することで、6節における疑問に答えた。それは、無頓着青エージェントが侵入した場合には、無頓着黄エージェントが侵入した場合よりも青エージェントがより分居しやすくなるが、それに影響される形で赤エージェントもより分居しやすくなる、ということである。Schellingはエージェントの閾値が分居の程度に与える影響についてのみしか議論していない。他のエージェントによる分居の程度がエージェントの分居の程度に影響を与える、というエージェント間相互作用に直接言及したこの知見はSchellingの議論を一步超えたものであると考えられる。

Schellingのモデルから出発したABS分居モデルは、エージェントの単純な行動原理と社会全体のあり方との複雑な関係性を容易に分析できることが示された。分居を促進／阻害する要因をめぐ

る作業仮説を設定し、シミュレーション実行結果を確認しながら、再三にわたる修正とシミュレーションの繰り返しを重ねた結果が本稿である。一連の作業の中で、早くも Schelling が指摘している所見や仮説を見直す結果が得られた。研究者が頭の中で組み立てた仮説（個々人の行動原理、集団の相互作用、社会全体の様相）を、シミュレーションを通じて検証することは、社会の複雑性を理解する上で有益であると思ふ。もちろん、こうして得られた本稿の所見を、人間社会の現象にどのように比喩的に結び付けるかは、さらに慎重な考察が必要であるのは言うまでもない。偏見と差

別、都市問題、民族問題、エスニック紛争、国民の同化や分裂といった分居にまつわる様々な研究テーマに関心を持つ研究者が、ABSのようなマルチエージェント・シミュレーションの技法を積極的に活用することを促したい。本稿が、そのような方向への刺激剤になることを祈っている。

付記 本稿は「科学研究費補助金・基盤研究（B）（2）展開研究（10552001）」の研究成果の一部である。本稿の草稿に対し、コメントされた2人の査読者に謝意を表す。

¹ セグレゲーションは普通、集団差別的な分離・隔離として理解されているが、本稿では中立的に捉えて、「分居」としておく。以下で明らかにするように、現象としての分居は、必ずしも意図としての差別を理由（原因）としていない。この点は、先駆的業績をあげた Schelling も指摘している。

² サンタフェ研究所の Swarm やマサチューセッツ工科大学の StarLogo などが代表的ソフトウェアである。

³ ABS は日本語環境の Windows 上で動き、プログラミング言語は Visual Basic に準じたものである。またサンプルモデルもいくつか用意されている。サンプルモデルのプログラムはダウンロードが可能であるが、実行するには ABS 本体が必要である。問い合わせ先は構造計画研究所 ABS ホームページ (<http://www2.kke.co.jp/ABS/index.html>) である。

⁴ 本稿での分居モデルは、ABS のサンプルモデルとして構造計画研究所が既に作成したモデルを基にして、各種の問題設定に必要な修正を行っている。

⁵ 例えば、閾値を 0.3 に設定すれば最低自分の周りに 3 割同種類のエージェントがいなければエージェントは「幸福」にならない

⁶ 例えば、Schelling (1978) では別の指標の例として "the number who had no opposite neighbors." が挙げられている (p.152)。

⁷ Schelling (1978), p.148

⁸ Schelling (1978), p.148

⁹ Schelling (1978) では、「全てのコインのうちで、同種の隣人：異種の隣人の平均比率は 2.3:1」というような表現をしており (pp.151-2)、上の値はそれをもとに筆者が推計した。

¹⁰ Schelling のシミュレーションでは各エージェントは全空間内で「自分の要求に合う最も近い空場所に移る」となっているが、ABS での試行実験では移動範囲 3（つまり中央付近にいれば全体の 7 割以上に移動できる）としている。この問題は 1.2.3 節で論じる。

¹¹ エージェント密度 = 総エージェント数 / 空間の広さ（ここでは 1225）

¹² これについて、Schelling (1978) は「肌の色が何種類存在するかということについては、明らかに 1 種類、2 種類とは考えられないが、米国情勢調査に見られるように、慣習的に 2 種類に区分することになっている。」(p.138) としている。慣習ではなく実際を考えれば肌の色が 2 種類しか存在しない、とするのはおかしい。おそらく Schelling が 2 種エージェントに限ったのは、分析を複雑にしないための操作であろうと思われるが、ここではその前提を崩して議論する。

¹³ もちろん、Schelling (1978) にこのような表現は存在しない。

¹⁴ 実際に赤・青エージェントを参入させた場合には、101 ステップ目で均衡している一方、黄エージェントを参入させた場合には 500 ステップ後にも均衡していない。

¹⁵ Epstein and Axtell (1996), p.175

¹⁶ Epstein と Axtell 自身は、これらの問題を提示するのみで解答を提示していない。

¹⁷ Epstein and Axtell (1996), p.175

¹⁸ 2.1節で指摘したように、エージェントの閾値が高くなると、エージェントが満足しなくなって均衡せず、平均幸福度が低くなる。

¹⁹ 比較実験として500（各250）の赤・青エージェントが参入したときは、攪乱されなかった。つまり、エージェント数の増大効果ではなく、「引越し好きエージェント」の参入効果により攪乱されたことが確認された。

²⁰ Epstein and Axtell (1996), p.175

²¹ もちろんモデルとしては、5節での無頓着エージェントは、他種のエージェントにとって「無頓着」という意味で異質なのではなく、黄色という意味で異質だった。

²² 参入してきた引越し好き青エージェントは無頓着なので、元から存在する青エージェントを同種類だとみなすことはできない。

²³ Epstein and Axtell (1996), p.175

参考文献

Joshua M. Epstein and Robert Axtell, *Growing Artificial Society*, The Brookings Institution Press, 1996,
(服部正太・木村香代子訳, 『人工社会』, 共立出版, 1999年)

Thomas.C.Schelling, *Micromotives and Macrobehavior*, Norton and Company: New York, London, 1978