

ワーキングペーパーシリーズ人工社会研究 No.2

新型シミュレータ開発プロジェクト

Project for New-Type Simulators

ワーキングペーパー・シリーズ

Working Paper Series

Working Paper No.2

Schelling 分居モデルを超えて

---- A B S モデルの検討 ----

板山 真弓* 田村 誠**

1999年12月

(*東京大学大学院総合文化研究科国際社会科学専攻修士課程)

(**東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻修士課程)

「シミュレータ開発プロジェクト」は、研究・教育を目的としたマルチエージェント型や繰り返しゲーム型のシミュレータやソフトの開発を目指しています。このワーキングペーパー・シリーズは、プロジェクトの活動・成果の一端を公開するものです。

“Project for New-Type Simulators” is developing a multi-agent based simulator and a simulator of iterated cognitive games, among others, for scientific and/or educational purposes. This working paper series aims at disseminating interim but interesting outcomes of this on-going project.

科学研究費補助金・基盤研究（B）（1）展開（10552001）

東京大学大学院総合文化研究科国際社会科学専攻 山影 進 研究室

お問い合わせ：tasuke@waka.c.u-tokyo.ac.jp

1 はじめに

本研究では、ABS(Agent Based Simulator)¹を用いて分居モデルを操作・拡張し、その性質について明らかにすることを試みた。まず ABS 分居モデルを用いて、そのモデルの原型となった Schelling(1978)の議論の妥当性を検討し、さらに Schelling モデルを改良することで、より詳しく分居モデルの性質を理解することに成功した。

議論の構成は以下の通りである。2 章では、分居モデルについて簡単に説明する。そこでは、分居モデルを構成する重要概念の説明が主となる。3 章では、ABS 分居モデルの基礎となった Schelling のモデルについて概説し、Schelling が行ったシミュレーションを ABS 上で行った上で、Schelling モデルの問題点について言及する。4 章では、ABS モデルを用いて、Schelling の議論の検証、並びに Schelling モデルの応用・発展を試みた結果を報告する。具体的には、①分居を促す要因の特定、②エージェント密度と閾値がシミュレーションの均衡に及ぼす影響、③3 エージェントモデルを2 エージェントモデルの比較、④エージェントの閾値とエージェント密度との関係、⑤選好を導入した場合の3 エージェントモデルの試行結果、⑥途中から第3 のエージェントを入れるモデルの試行結果、といった6つの論点についての報告がなされる。最後に5 章では、本研究で得られた知見、そして、それを Schelling の議論と照らし合わせることで、本研究にどのような意義があるのかについて簡単に言及する。

¹ 詳しくは、構造計画研究所による Agent Based Simulator のホームページに <http://www2.kke.co.jp/abs/index.html> に記載している。

2 分居モデルについて

ABSによる分居モデルとは、二種類のエージェントたちが、それぞれが自分たちの意志で移動しながら、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²。赤青、二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理である。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。

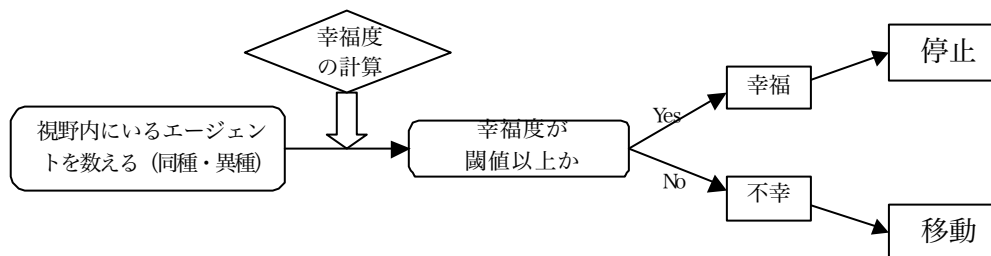


図 1 分居モデルにおける各エージェントの行動ルール

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セルあたり1つのエージェントが存在することになっている。つまり、複数のエージェントが1つのセルに同時に存在することはできない。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、エージェント i の幸福度 h_i は以下のように定義される。

$$h_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

a_i : 視野内にいるエージェント i と同色のエージェント数 ($i=1..n$)

n : エージェントの種類の総数

² ここでの分居モデルは、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ものを使用。入手方法は、構造計画研究所の ABS ホームページ (<http://www2.kke.co.jp/abs/index.html>) よりダウンロード。

これは具体的には、

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

と表される。閾値は、各エージェントが最低満足する幸福度を示すが³、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。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ュミレーションは終了することになっている。シュミ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、

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

で示される。これは、エージェントの分居の程度を示す一つの目安となる。

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ュミ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の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。例えば、閾値が30%程度である場合の最終的な (シュミ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。

³ 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

3 Schelling モデル

3.1 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) との関係を解明すべく、近隣のエージェントの配置によって自らの満足／不満足を決定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→22 個／コイン B→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⁴⁾」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⁵⁾」) 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⁶⁾。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、という風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。

⁴ Schelling (1978) pp.148

⁵ Schelling (1978) pp.148

⁶ 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著者が推計した。

3.2 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。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。ここではエージェント数を赤 23、青 22、そして視野を 3 とした。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 に示す通り赤の閾値を 0.6、青の閾値を 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なかった。

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

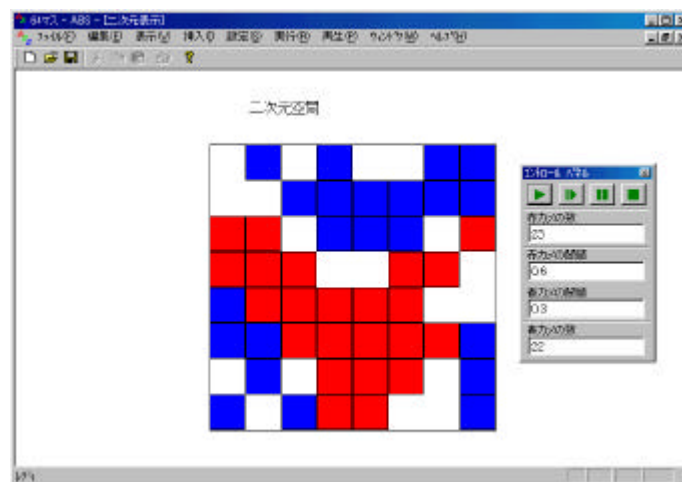


図 2 赤、青の閾値をそれぞれ 0.6、0.3 に設定した

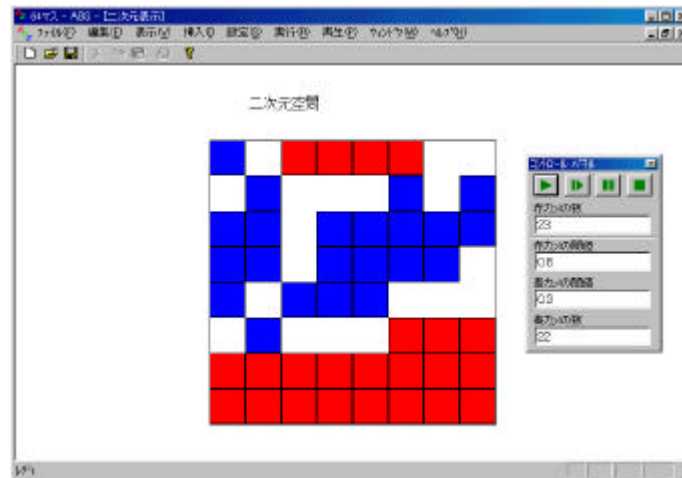


図 3 赤、青の閾値をそれぞれ 0.8、0.3 に設定した

3.3 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見つけるのか、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だと思われる。ちなみに ABS モデルでは、エージェントの視野を固定し、視野の範囲内でランダムに配置されることで、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対応していない可能性がある。だが、4.2 節で詳しく述べるが ABS モデルにおける視野と分居の関係を見る限り、視野が 3 以上になったときの影響はそれほど大きくなかった。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（閾値の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 1 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、それに言及するには 8×8 の空間では狭すぎるのではな

いだろうか、と感じられた。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が、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であると考えられる（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。

4 ABS モデルによる Schelling モデルの発展

4.1 はじめに

ここでは、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・発展を試みた結果を報告する。議論の仕方としては、まず論点を提示し、それを ABS モデルでシミュレーションした結果を報告する、という形を取る。論点の中には、Schelling の議論を検証するものもあれば、Schelling が論じていなかった点を指摘するものも含まれる。

本章における議論の概略を述べておく。まず4.2節では、分居を促す要因を特定する。ここで検証される要因は、エージェントの数・空間の広さ・閾値・エージェントの形・視野といった要因である。4.3節では、エージェント密度と閾値がシミュレーションの均衡に及ぼす影響について示す。具体的には、エージェント密度と閾値という要因が、シミュレーションが均衡する形で終了する／しない、という現象にどのように影響しているか、ということについて考察する。次の4.4節では、3エージェントモデルを2エージェントモデルと比較し、4.5節では、エージェントの閾値とエージェント密度との関係について考察する。また、4.6節では、3エージェントモデルのそれぞれのエージェントに選好を導入した結果を報告する。最後に4.7節では、途中から第3のエージェントを入れるモデルの分析結果について報告する。

4.2 分居促進要因の特定

第一の論点は、エージェントの数・空間の広さ・閾値・エージェントの形・視野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であろうか、ということである。Schelling 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、エージェントの数 800 (赤、青それぞれ 400)、閾値 0.3、空間 35×35 (1225 セル)、視野 3、エージェントの形は 4 角形、というものである。その場合の結果 (5 回試行) の平均は、(不幸なエージェント、平均幸福度、ステップ数) = (0, 70, 14) であった。

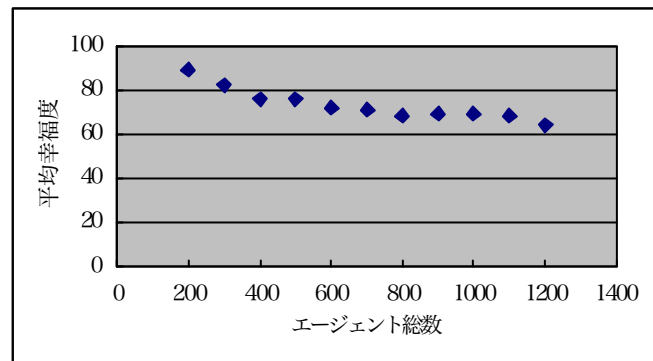


図 4 エージェントの数と平均幸福度との関係

全体のエージェントの数を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、エージェントの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、エージェントの数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、エージェントの数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。エージェントの数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、空間の広さを狭くすると、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、空間が広くな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。

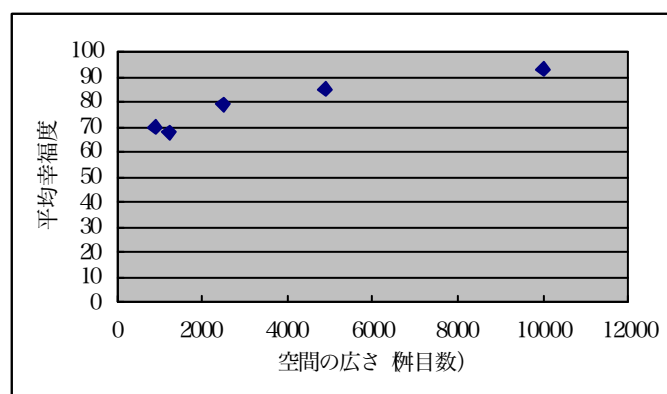


図 5 空間の広さと平均幸福度との関係

以上、図 4、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。

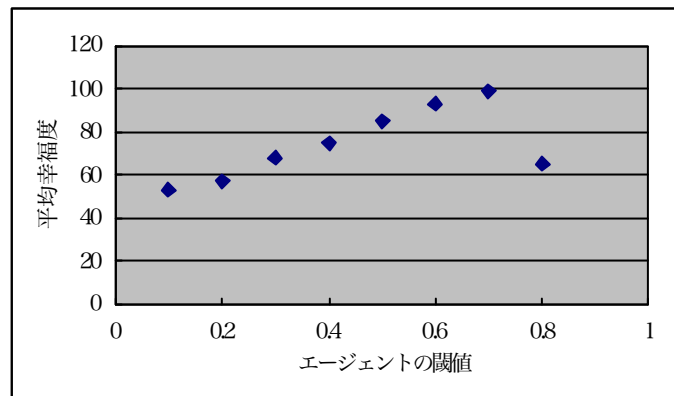


図 6 閾値と平均幸福度との関係

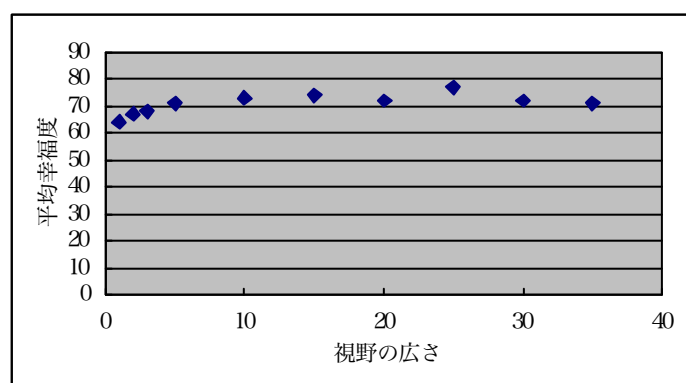


図 7 視野と平均幸福度との関係

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する一方、かなり混住した状況になる。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に示すようにエージェントの視野を変化させた場合⁷、視野が極端に狭い場合（視野

⁷ この場合、エージェントの移動できる範囲が拡大する

1) には、周囲を囲まれて、不幸なのに動けなくなるエージェントが存在するために均衡せず、結果的に集団があまりできない混住した状況となっていた。視野 2~10 にかけては視野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（混住状況）であった。視野が 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。

以上の結果より、エージェントの形、視野に関しては、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・視野といった要因は、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。

なお、エージェントの形を 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の数が減少するが (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エージェントの形を 4 角形に固定してシミュレーションを続行する。

4.3 均衡とエージェント密度、閾値との関係

第二の論点は、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。

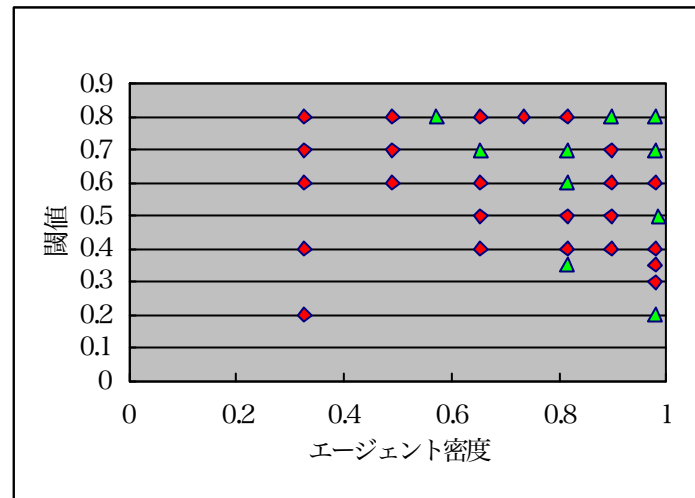


図 8 閾値とエージェント密度と分居との関係。次のタイプをプロットしたもの。

- ◆タイプ 1：エージェントはみな満足し分居が終了する。
- ▲タイプ 2：不満をもつエージェントが残り分居が終了しない。

図 8より閾値とエージェント密度によってシュミ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高い（エージェント数が多い）場合、分居が終了しにくい。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、すぐにシュミ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。

4.4 3 エージェントモデル

第三の論点は、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か、ということである。Schelling の議論では、2 エージェントのみしか想定しておらず、3 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⁸。よって、ここでは 3 エージェントを想定し、それが 2 エージェントの

⁸ これについて、Schelling (1978,pp.138) 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、米国国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。」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 エージェント

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。2 エージェントの場合と同様、基本設定は、エージェントの数 801 (赤、青、黄それぞれ 267)、閾値 0.3、空間 35×35 (1225 セル)、視野 3、セルの形は 4 角形、というものである。

図 9 から図 11 までの結果から分かる通り、エージェント数・広さ・閾値・視野を変化させた場合、全ての終了ステップ数に関して 2 エージェントのそれの方が 3 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、ということができる。図 12 から図 15 より平均幸福度に関しては、エージェント数・広さ・視野を変化させた場合、2 エージェントの場合と 3 エージェントのそれでほとんど変化は見られないが、閾値を変化させた場合にのみ違いが見られる。具体的には、図 15 より 2 エージェントの場合より 3 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 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 エージェントの場合は $1/2$ 、3 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 エージェント時も 3 エージェント時も同様な結果になる) という事、よりもたらされる帰結である。

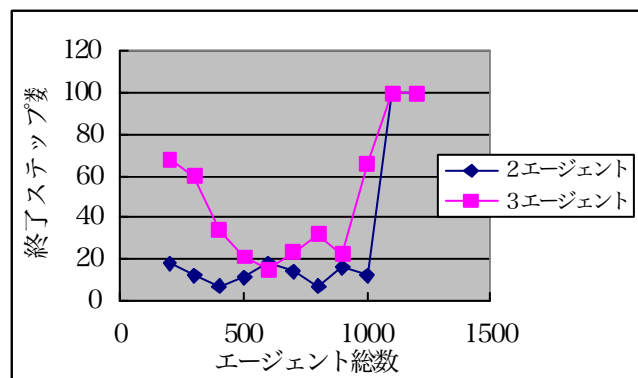


図 9 エージェント数と終了ステップ数との関係
ただし 100 ステップを示すのはシミュレーションが終了しなかったものである。

エージェントに限ったのは、分析を複雑にしたに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。

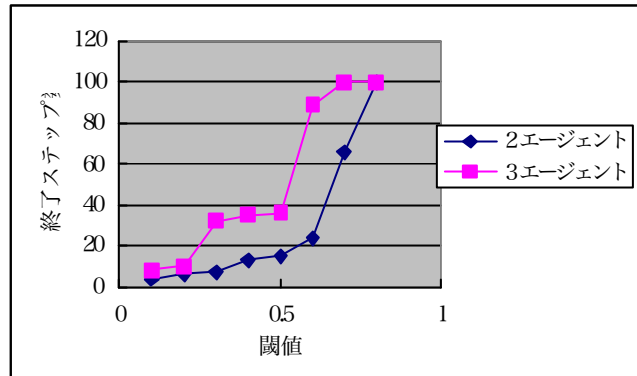


図 10 閾値と終了ステップ数との関係
ただし 100 ステップを示すのはシミュレーションが終了しなかったものである。

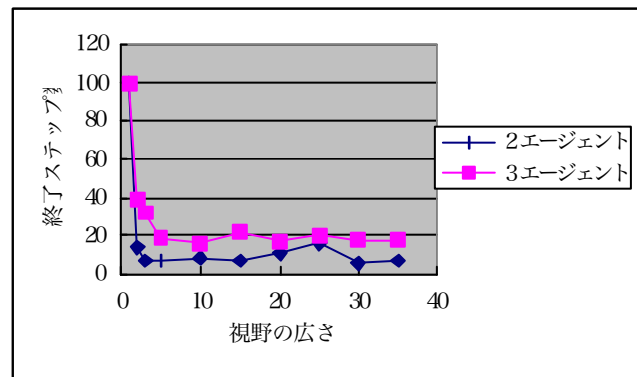


図 11 視野と終了ステップ数との関係
ただし 100 ステップを示すのはシミュレーションが終了しなかったものである。

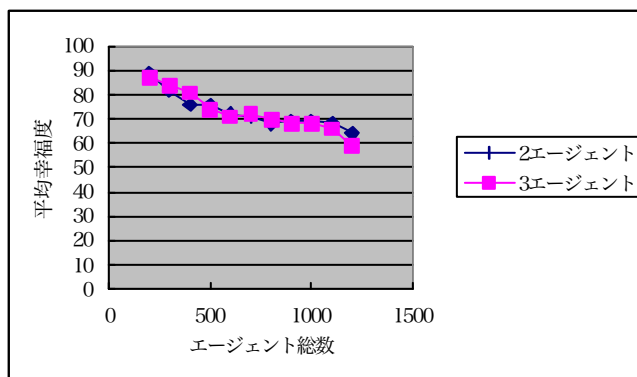


図 12 エージェント数と平均幸福度との関係

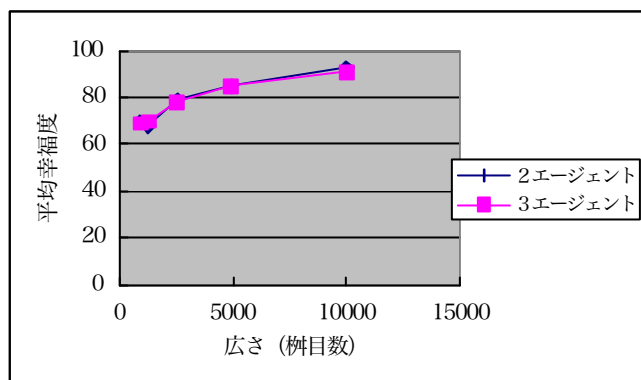


図 13 広さと平均幸福度との関係

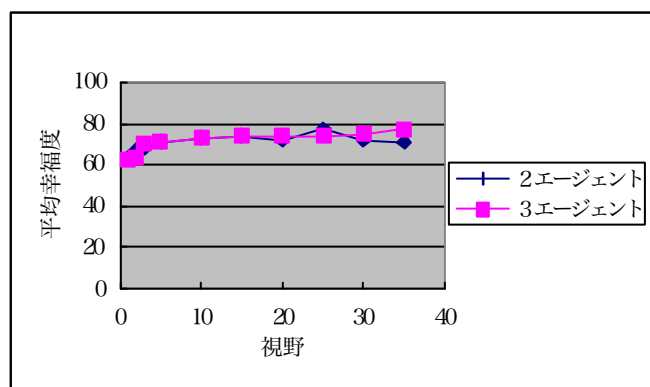


図 14 視野と平均幸福度との関係

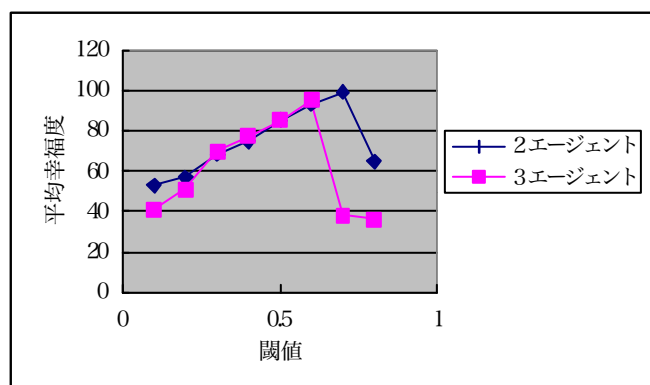


図 15 閾値と平均幸福度との関係

4.5 エージェントの閾値とエージェント密度の関係

4.5.1 2 エージェントモデルでの試行

第四の論点は、2つの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である。Schelling の議論を極端なものにすれば⁹、エージェントの閾値が高ければ高いほどエージェント密度が高くなる、つまり分居が促され、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。本節ではそれについて検証する。

最初に、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 16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。分居の度合いを直接示すものではないものの、ある程度示すと思われる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。

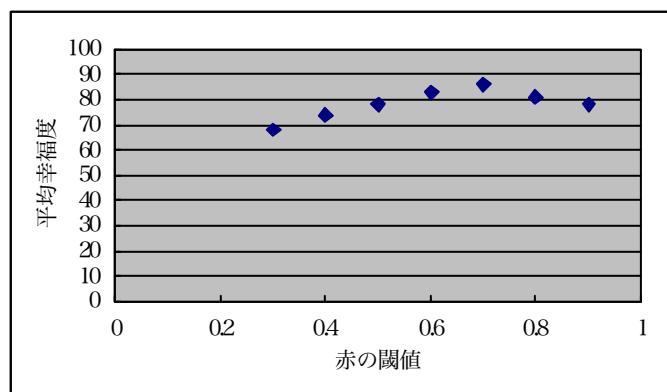


図 16 青の閾値を一定(0.3)にした場合の赤の閾値と平均幸福度との関係

⁹ もちろん、Schelling(1978)にこのような表現は存在しない。

4.5.2 3 エージェントモデルによる試行

以上、2 エージェントによるモデルについて考察してきた。次に、3 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 エージェントモデルを用いることで、4.5.1 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 17 に示す通り次のような結果が得られた。

- 赤：閾値が高い（0.8）：小集団を形成
- 黄：閾値が中程度（0.55）：最も大きな集団を形成
- 青：閾値が低い（0.3）：小集団を形成

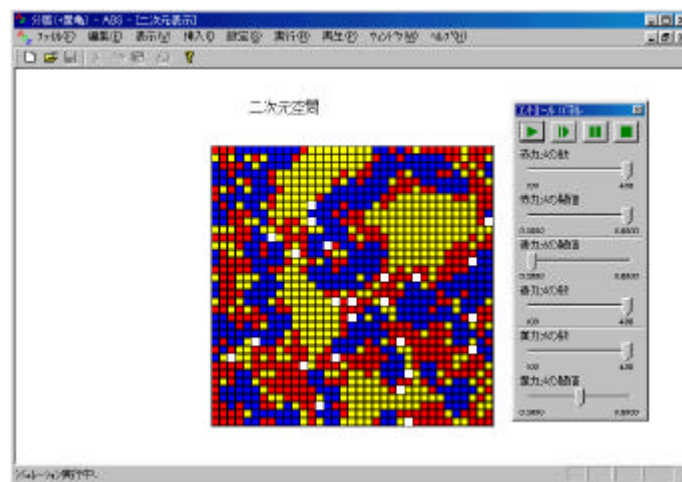


図 17 3 エージェントモデル（選好なし）

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してしまうため双方とも小集団になる。一方、閾値が中庸的な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4.5.1節で論じた、2 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。

4.6 選好順序のある 3 エージェントモデル

第五の論点は、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、ということである。ここでは、3 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。

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 倍嫌う、と想定されている（黄に選好はない）。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。

$$\text{赤カメの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる赤カメ数}}{\text{視野内にいる赤カメ数} + 2 \times \text{視野内にいる青カメ数} + \text{視野内にいる黄カメ数}}$$

$$\text{青カメの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる青カメ数}}{2 \times \text{視野内にいる赤カメ数} + \text{視野内にいる青カメ数} + \text{視野内にいる黄カメ数}}$$

$$\text{黄カメの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる黄カメ数}}{\text{視野内にいる赤カメ数} + \text{視野内にいる青カメ数} + \text{視野内にいる黄カメ数}}$$

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かと、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 18）、閾値が 0.6 以上になると黄が大集団を形成した（図 19、図 20）。特に図 20 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、黄カメ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各エージェントの平均幸福度との関係を示したのが図 21 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ることができない。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、小さな黄エージェントの集団ができると、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 21 に見られ

るように、赤と青と比較すると黄の平均幸福度が高くなる。しかし、エージェント数がか
なり大きくなると、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。

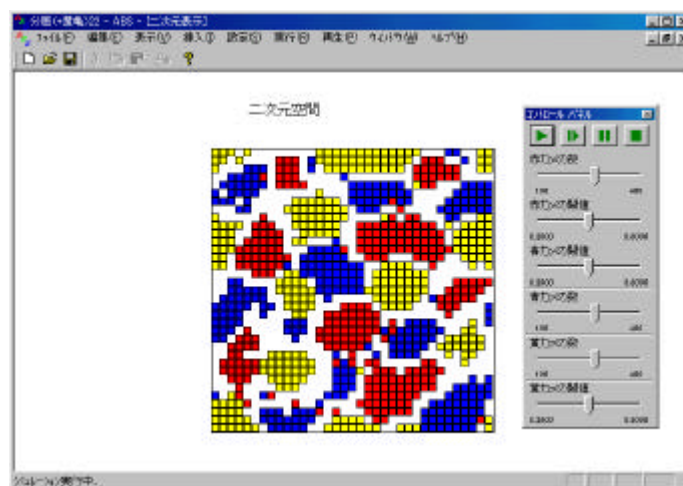


図 18 選好順序モデル (エージェント数 267×3 、閾値 0.55) :
エージェントの違いによる集団形成に差は見られない

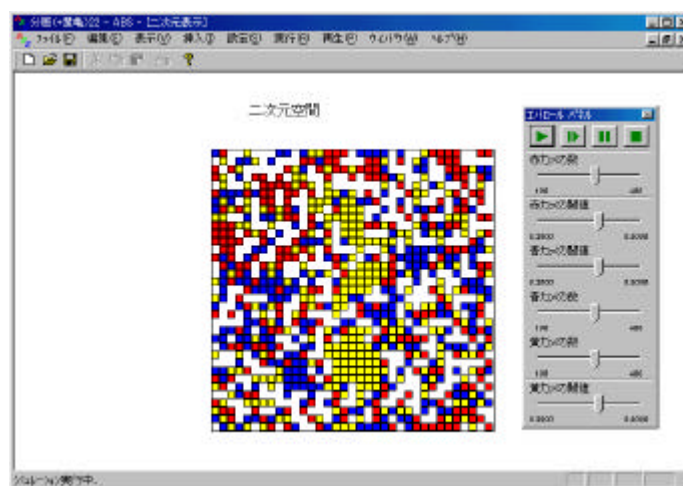


図 19 選好順序モデル (エージェント数 267×3 、閾値 0.6) :
黄カメがやや大きな集団を形成

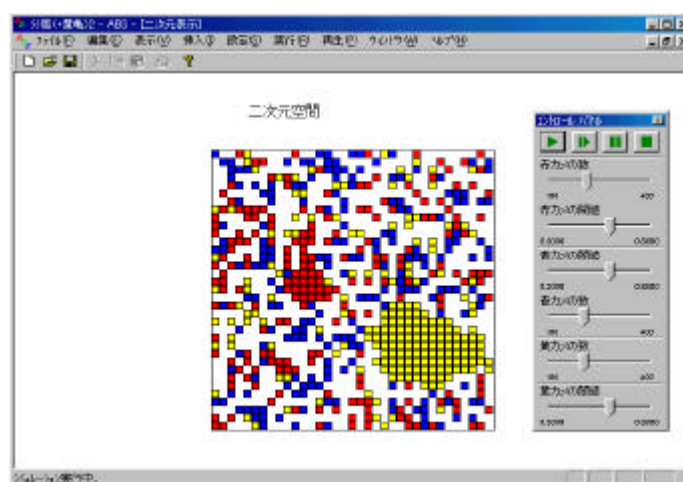


図 20 選好順序モデル (エージェント数 200×3 、閾値 0.6):
黄カメが大集団を形成

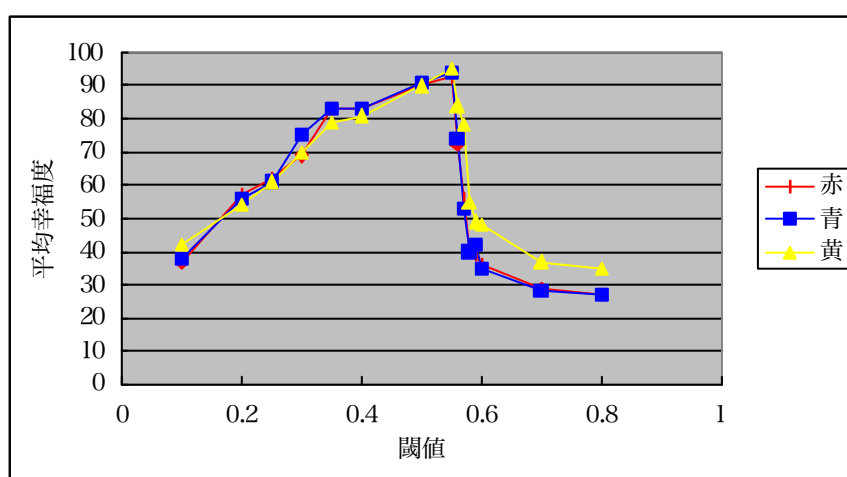


図 21 選好順序順序モデルにおける閾値と各エージェントの平均幸福度
(エージェント数は 267×3)

4.7 途中から第3のエージェントが入るモデル

4.7.1 はじめに

4章での3エージェントモデルは、3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。それは具体的には、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。また、それとは別の状況として、各人種が同時期に移入するのではなく、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移入する場合が考えられる。本章ではこれまでの3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のエージェントが入るモデルを作成し、その試行結果について考察する。

4.7.2 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4章まで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のエージェントが移入するように設定した。概要を図示すると図22のようになる。ここで移入点とは、第3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、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%（移入点60%）を超えると、黄エージェントが空間に出現する。

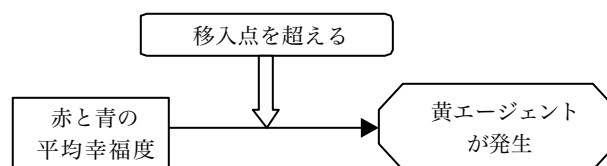


図 22 途中から第3のエージェントが発生するモデル

4.7.3 シミュレーション終了結果の比較

まず最初に、3エージェントが最初から存在した場合と、1エージェントを後から入れた場合のシミュレーション結果を比較する。

図 23、図 24より分かるように、平均幸福度に関しては、3 エージェント間に選好がない場合、ある場合ともに結果にほとんど差が見られなかった。赤・青エージェントの平均幸福度 90%の時点より黄エージェントを導入したものに関しても、終了時に 3 エージェントが存在した場合には同様の結果が出ている。

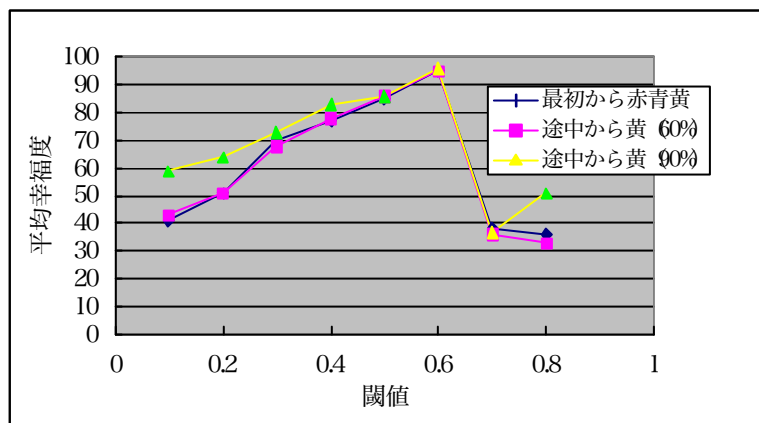


図 23 閾値と平均幸福度の関係（選好なし）
黄エージェントが出現したとき黄色の▲、出現しなかったときは緑の▲で表す

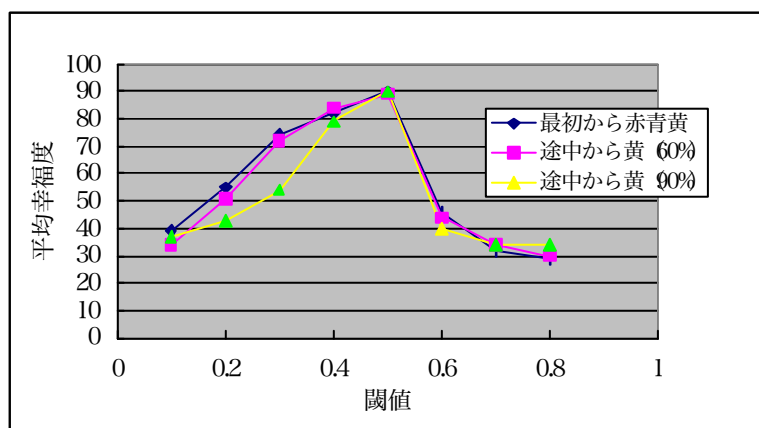


図 24 閾値と平均幸福度の関係（選好あり）
黄エージェントが出現したとき黄色の▲、出現しなかったときは緑の▲で表す

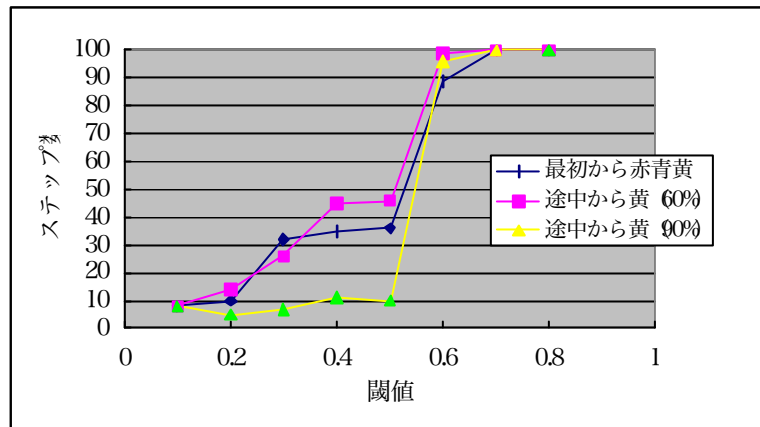


図 25 閾値とステップ数の関係 (選好なし)

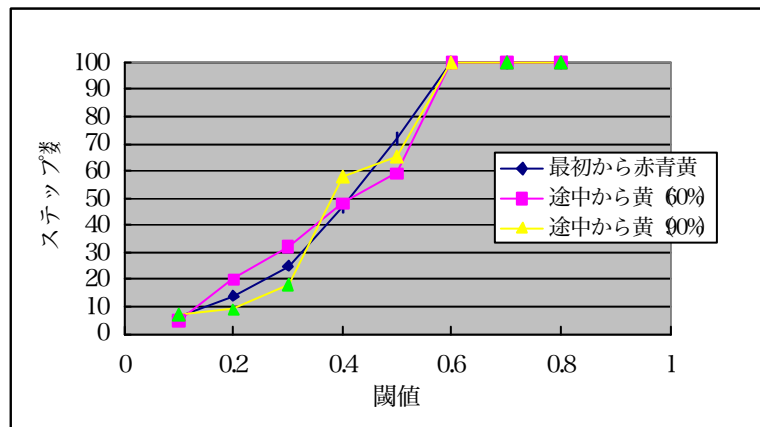


図 26 閾値とステップ数の関係 (選好あり)

また図 25、図 26よりステップ数に関しても、特に大きな差は見られなかった。赤・青エージェントの平均幸福度 90%の時点より黄エージェントを導入したものに関しても同様である。

また、分居の様子に関しても、シミュレーション終了時の様子は、3 エージェントが最初から存在した場合と、1 エージェントを後から追加した場合ともに同様の結果であった。

つまり、シミュレーション終了結果については、3 エージェントが最初から存在した場合と、1 エージェントを後から入れた場合とではほとんど差がない、ということが言える。

4.7.4 プロセスの分析

本節では、2 エージェント間でかなり分居が進展した状態の中に、別の種類のエージェントを入れると、どういうプロセスで分居の様子が変化するか、ということについて報告する。ここでは、4.6節同様、選好順序があるモデルを使用し、移入点は赤と青の平均幸

福度が 90%を超えると、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、移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、移入点を 90%にしている。

図 27、図 28、図 29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 27は移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。これが図 28を経て図 29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 の場合のシュミレーションに見られる一般的傾向である。

このシュミレーションでは、赤・青エージェントが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より、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。

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 27と同様黄エージェントが移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 27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。

移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れ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、動いた赤・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

動作を取る事となる。つまり、ほとんどの赤・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。

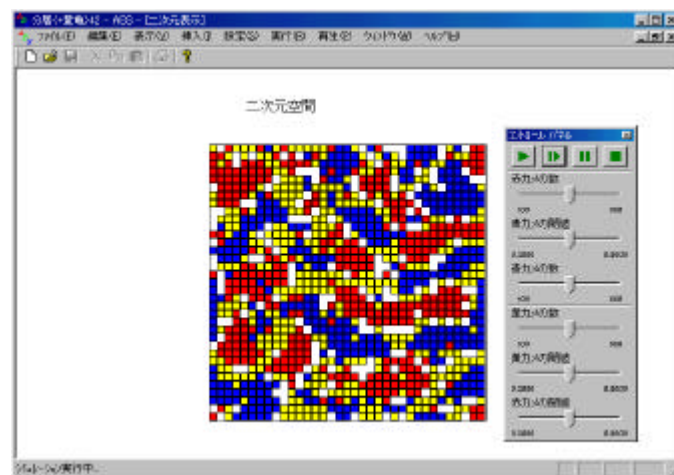


図 27 エージェント数 350×3 、閾値 $0.55 \times 3 : 26$ ステップ後に黄カメが移入した時点

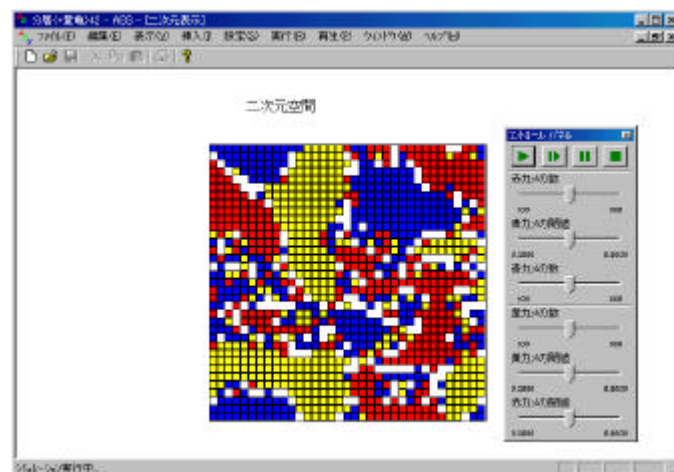


図 28 エージェント数 350×3 、閾値 $0.55 \times 3 : 180$ ステップ目
赤と青の平均幸福度 71 %、黄の平均幸福度 78 %

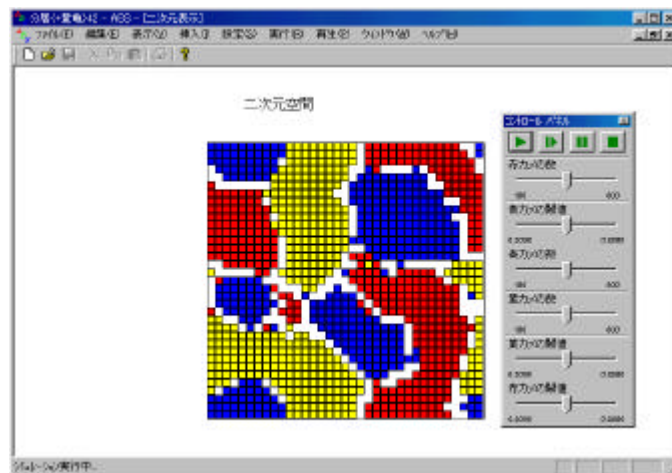


図 29 エージェント数 350×3 、閾値 $0.55 \times 3 : 500$ ステップ目
赤と青の平均幸福度 93 %、黄の平均幸福度 93 %

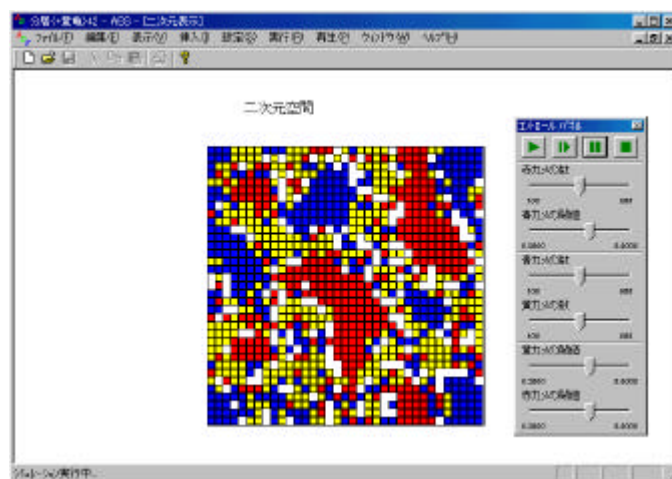


図 30 エージェント数 350×3 、閾値 $0.6 \times 3 : 235$ ステップ目
黄カメ時が移入した点

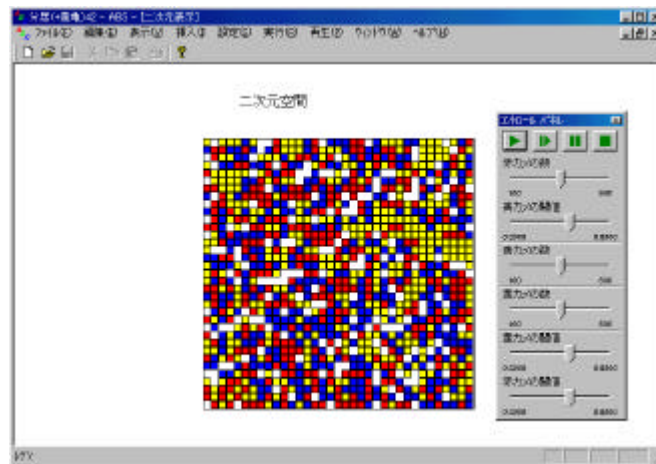


図 31 エージェント数 350×3 、閾値 $0.6 \times 3 : 500$ ステップ後
赤と青平均幸福度 30 %、黄カメ平均幸福度 42 %

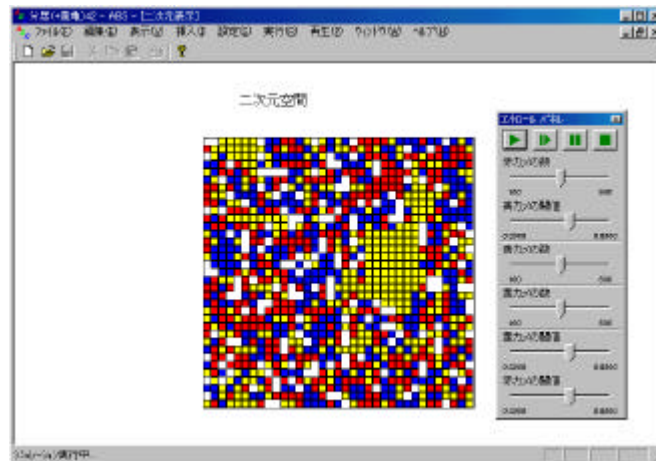


図 32 エージェント数 350×3 、閾値 $0.6 \times 3 : 589$ ステップ後
赤と青の平均幸福度 34 %、黄カメ平均幸福度 50 %

5 結語

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、本研究で得られた知見、そして、それを Schelling の議論と照らし合わせることで、本研究にどのような意義があるのかについて簡単に言及する。

まず最初に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・視野といった要因は、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よう。

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 を用いた本研究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、それが拡散する傾向にあるというよりも、小さな集団でまとま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、本研究では Schelling が想定していなかった 3 エージェントモデルを導入することによって、2 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 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 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移入させることで、既存の第1、第2 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 0.4~0.55 の場合には、黄エージェントの入った後に、赤・青エージェントはより大きな集団を形成した。閾値が 0.55~0.62 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。

以上が本研究の成果であるが、本研究は ABS を用いたモデルを利用することで Schelling の議論を超えたいくつかの知見を得ることができた。また、不透明であった分居のメカニズムについても、ある程度推測することができた点もこの研究の成果として挙げられよう。本研究が ABS をはじめとするマルチエージェントモデルの構築・発展の一助となれば幸いである。

参考文献

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