

新型シミュレータ開発プロジェクト

ワーキングペーパー・シリーズ

Project for New-Type Simulators

Working Paper Series

Working Paper No. 7

Schelling 分居モデルを超えて 3

---- 色盲エージェントの新たなルールの影響 ----

板山真弓*・田村誠**

2000年4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(E-mail) : tasuke@waka.c.u-tokyo.ac.jp

ホームページ(URL) : <http://hachibei.c.u-tokyo.ac.jp/users/yamakage/ntsp1.html>

はじめに

1.1. 概要

Schelling(1978)は、エージェントの嗜好 (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を提示した。それが分居モデル¹である。Schelling の試行によると、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、という結果が得られた。

板山・田村(2000)では、赤青黄という 3 種類のエージェントが空間に存在し、そのうち黄エージェントが色盲であるモデルを ABS(Agent Based Simulator)を用いて作成した²。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) に色盲の黄エージェントを侵入させ、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した。その結果、エージェントの閾値が中程度の場合には (0.4 ~ 0.65 程度) 色盲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がより促される結果になった一方、エージェントの閾値がそれより大きい場合には (0.7 ~ 0.8 程度) 色盲エージェントが侵入したことで分居状態が攪乱されることが明らかになった。また、分居状態を攪乱するのに必要な個体数も同時に特定した。

上の実験では、色盲エージェントが黄エージェントであるので、赤青エージェントは色盲である黄エージェントを異種のエージェントとして区別した。そこで本稿では、エージェントの種類は赤青 2 種類にして青エージェントの一部が色盲であるモデルを作成し分析した。つまり今回のモデルでは、色盲の青エージェントを色盲でない青エージェントは区別しない。その点が前回のモデルと異なる点である。

本稿における議論の方法としては、まず色盲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する。次に色盲青エージェント侵入モデルと、色盲黄エージェント侵入モデルとを比較する。そして色盲という性質が分居に及ぼす影響、加えて分居のメカニズムについて考察する。

1.2. 色盲エージェントとは

本稿では板山・田村(2000)と同様に、色盲エージェントを二通りに解釈している。「引越し好きエージェント」と「寂しがり屋エージェント」の二つである。前者は、周囲に満足せず常に動き回る (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) エージェントである。後者はエージェントの種類に関わらずある一定値以上周囲に存

¹ Schelling 自身はこのモデルを A Self-Forming Neighborhood Model と呼んでいる

² ABSは構造計画研究所ホームページ <http://www2.kke.co.jp/abs/index.html> にて入手可能である(2000年3月現在)。

在しないと満足しない（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だと判断する）エージェントである。

2. 問題：分居状態の攪乱は可能か

2.1. 変数設定

本節では、色盲青エージェントが赤青エージェントによる分居状態を攪乱するかどうか、ということについて分析する。各エージェントは視野内に存在する同種のエージェント数を視野内にいるエージェントの総数で割り幸福度を算出する³。平均幸福度は各エージェントの幸福度の総和をとり、エージェントの総数で割って平均値を算出したものである。平均幸福度は分居状態を示す指標となる。

空間は 35×35（1225 マス）の大きさ、エージェント数はそれぞれ 350（350×3）、エージェントの視野は 3 で固定した。

2.2. 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 1）。逆に図 2 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。

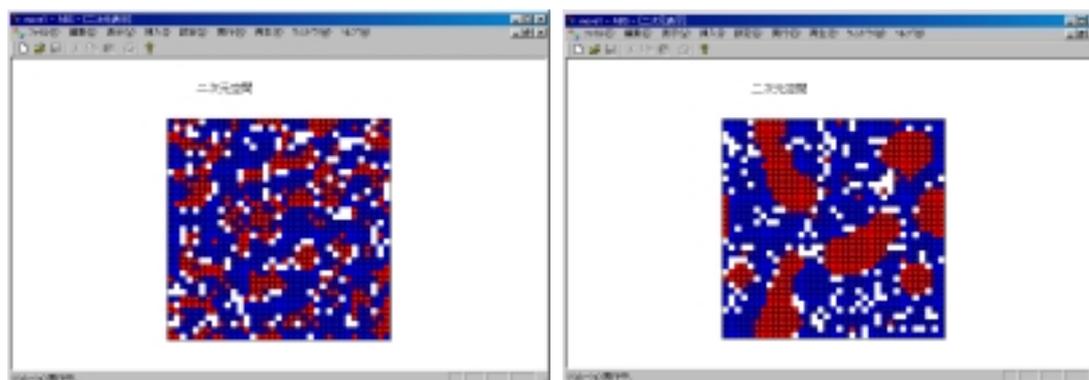


図 1 引越し好き青エージェントが入った瞬間(7 ステップ後)と 100 ステップ後（閾値 0.5）

³ 式で表すと以下のように表される。

$$\text{エージェントAの幸福度} = \frac{\text{視野内にいる同種のエージェントの数}}{\text{視野内にいるエージェントの総数}} \times 100$$

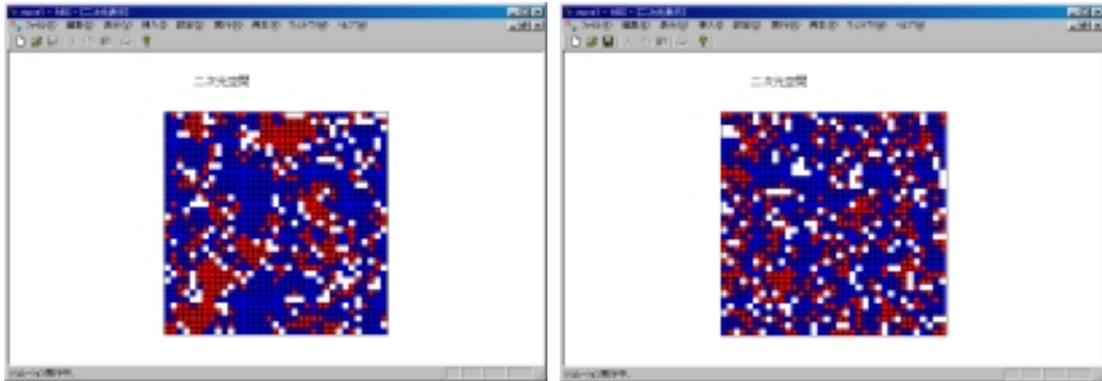


図 2 引越し好き青エージェントが入った瞬間(83 ステップ後)と 200 ステップ後 (閾値 0.8)

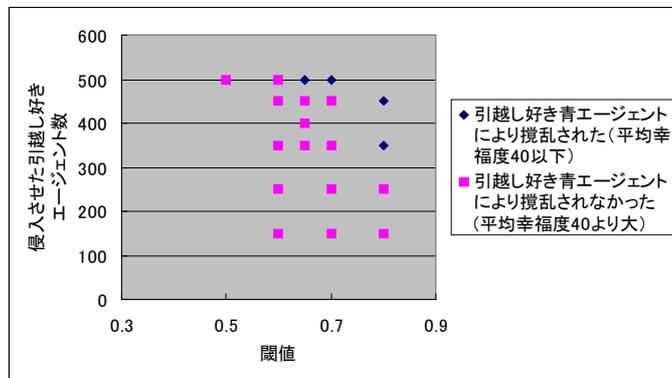


図 3 閾値と攪乱に必要な引越し好きエージェント数との関係

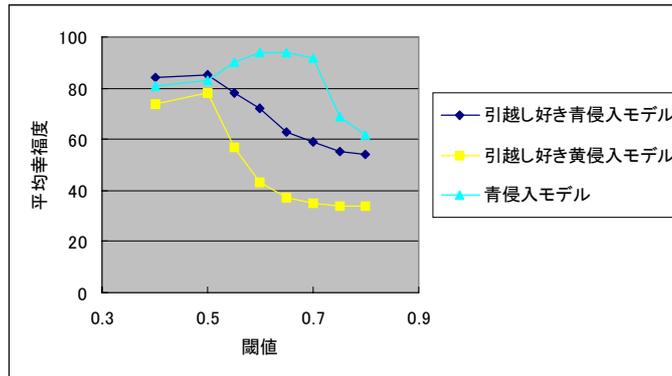


図 4 閾値と平均幸福度の関係

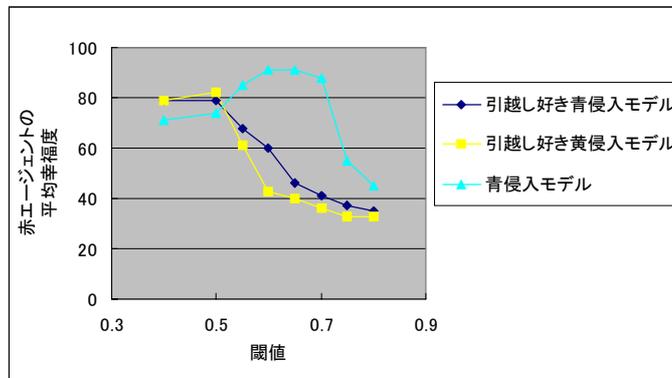


図 5 閾値と赤エージェントの平均幸福度との関係

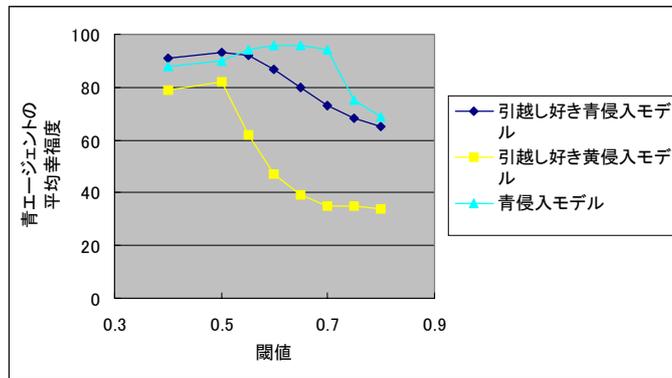


図 6 閾値と青エージェントの平均幸福度との関係

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 3 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、板山・田村(2000)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の数がかかなり多くないと、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、色盲という性質を持たない青エージェントを侵入させるモデルのことである。

図 4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、「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做し⁴、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 5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、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 5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

⁴ 侵入してきた引越し好き青エージェントは色盲なので、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

出るのはどうしてなのか。これについては3節で考察する。

図 6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。

2.3. 寂しがり屋モデル

色盲エージェントとして本節では寂しがり屋の青エージェントが侵入するモデルを作成した。ここでは寂しがり屋エージェントが満足しう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は周囲のエージェントの種類にこだわらず 8 エージェントが存在しないと満足せずに動き回る。

図 7、図 8、図 9、図 10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 7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 8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 9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 10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。

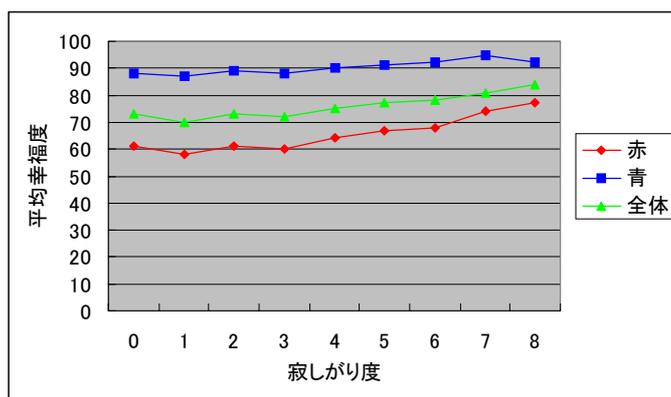


図 7 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値 0.5:赤 350、青 350、色盲青 350)

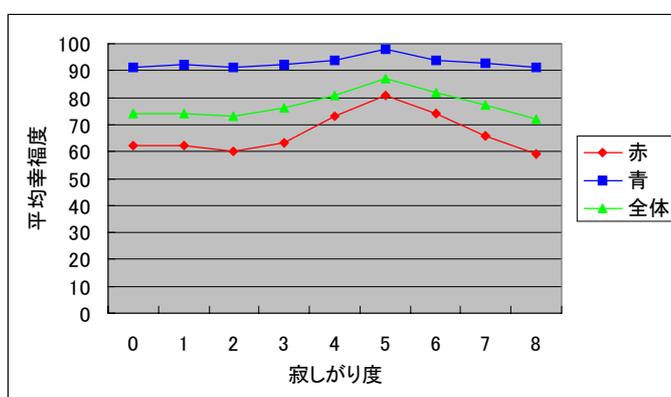


図 8 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値 0.6:赤 350、青 350、色盲青 350)

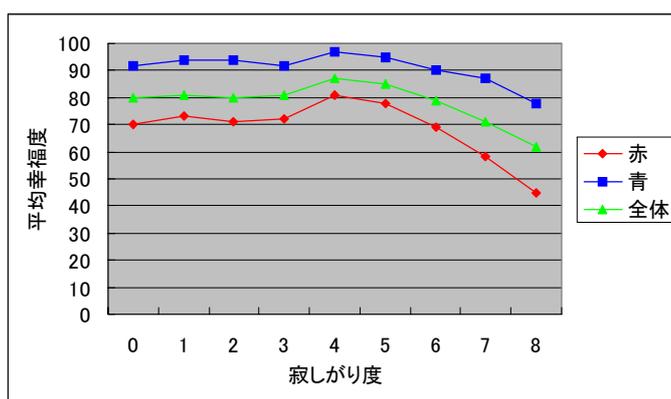


図 9 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値 0.7:赤 350、青 350、色盲青 350)

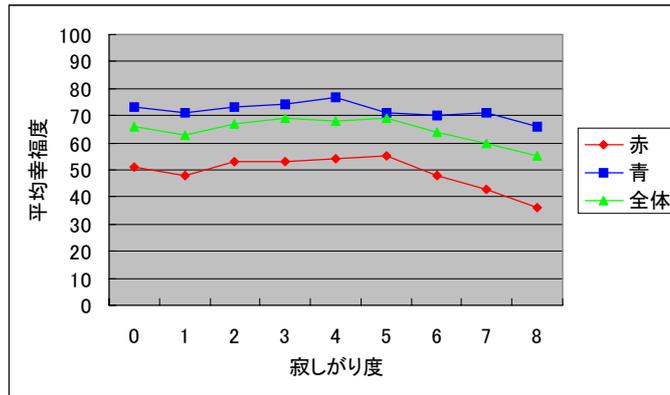


図 10 寂しがり度と平均幸福度との関係
(閾値 0.8:赤 350、青 350、色盲青 350)

板山・田村(2000)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 11、図 12、図 13、図 14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色盲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 11、図 12、図 13、図 14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。特に図 11、図 12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 13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。

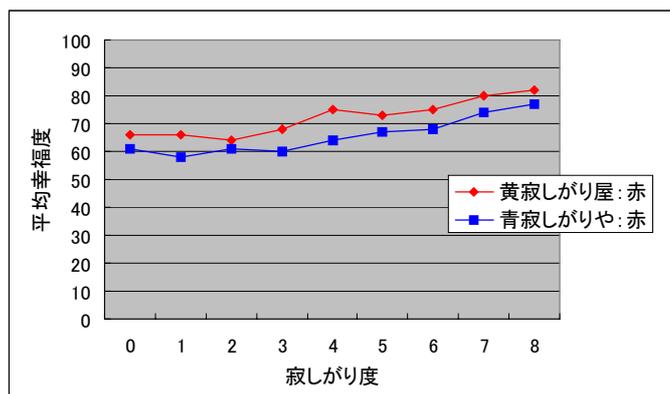


図 11 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値 0.5:赤 350、青 350、寂しがり屋の青または黄 350)

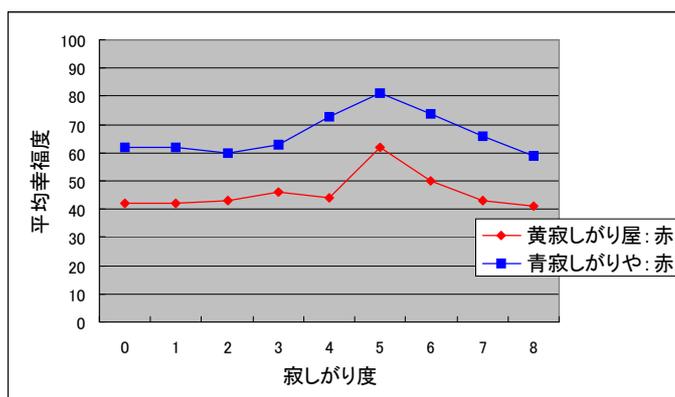


図 12 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値 0.6:赤 350、青 350、寂しがり屋の青または黄 350)

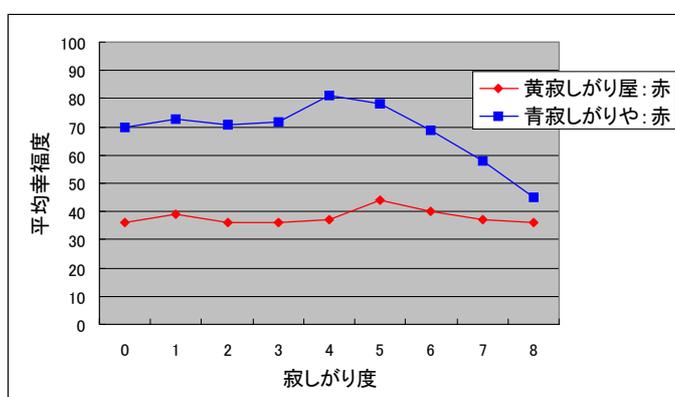


図 13 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値 0.7:赤 350、青 350、寂しがり屋の青または黄 350)

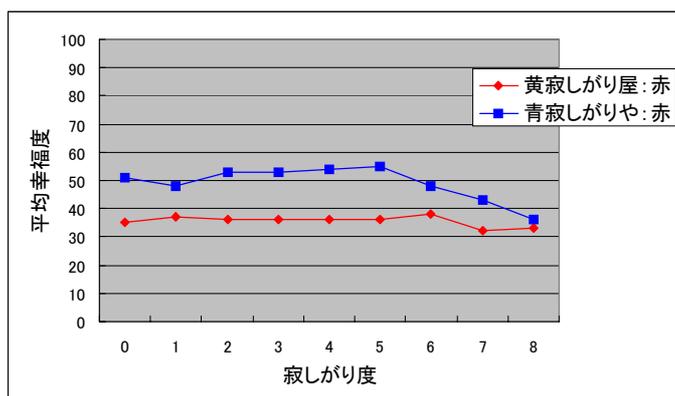


図 14 青寂しがり屋モデルと黄寂しがり屋モデルとの比較
(閾値 0.8:赤 350、青 350、寂しがり屋の青または黄 350)

黄色盲モデルと比べて、青色盲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、周囲が黄色盲エージェ

ントか青色盲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、青色盲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、青色盲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、次節で更に議論する。

3. 分居のメカニズム

第2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色盲エージェントの影響に関して、色盲青エージェントを侵入させた場合よりも色盲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、色盲青エージェントであっても色盲黄エージェントであっても、自らと異なる色盲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。

まずは、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 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 15、図 16、図 17はエージェントの数をそれぞれ 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福度になる、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%、エージェントの数はそれぞれ 300）の結果について考察する。なぜなら、図 15、図 16、図 17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、と考えたからである。結果は図 18、図 19、図 20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。

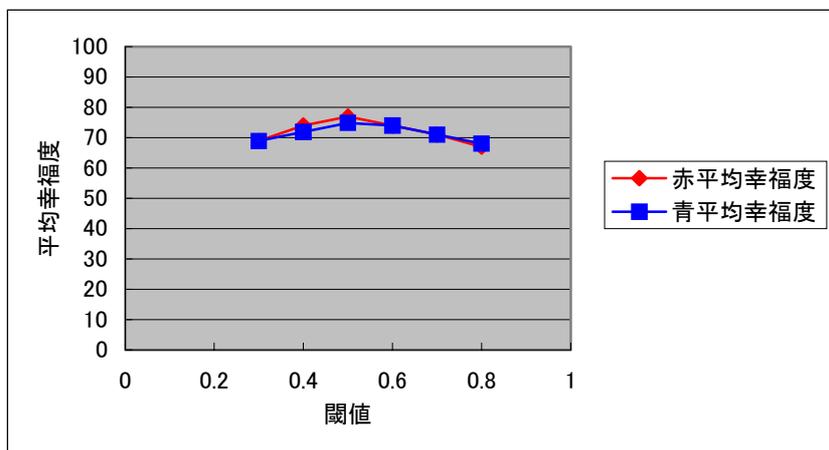


図 15 2 エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係 (赤閾値のみ変化。青閾値 0.3、赤 525、青 525)

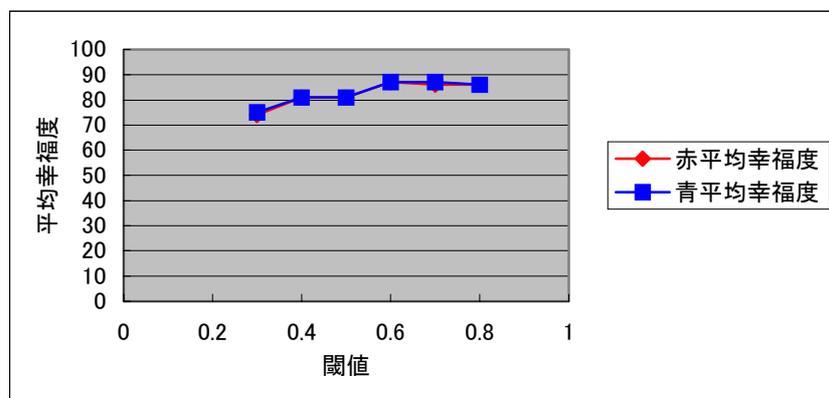


図 16 2 エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係 (赤閾値のみ変化。青閾値 0.5、赤 525、青 525)

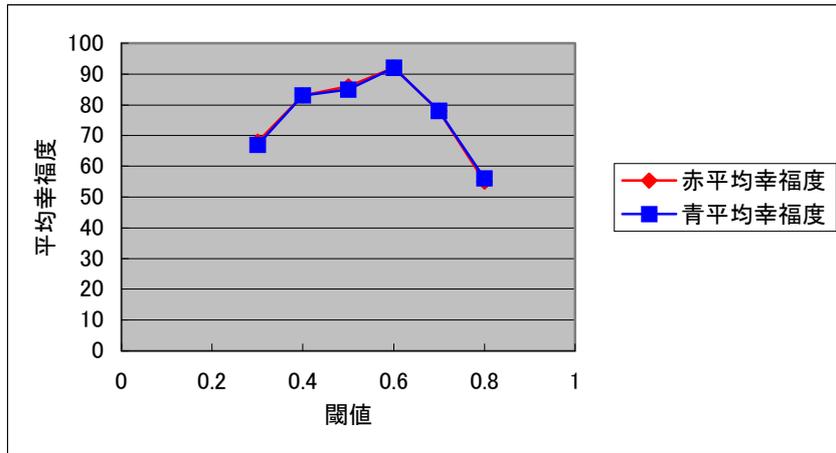


図 17 2 エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
 (赤閾値のみ変化。青閾値 0.8、赤 525、青 525)

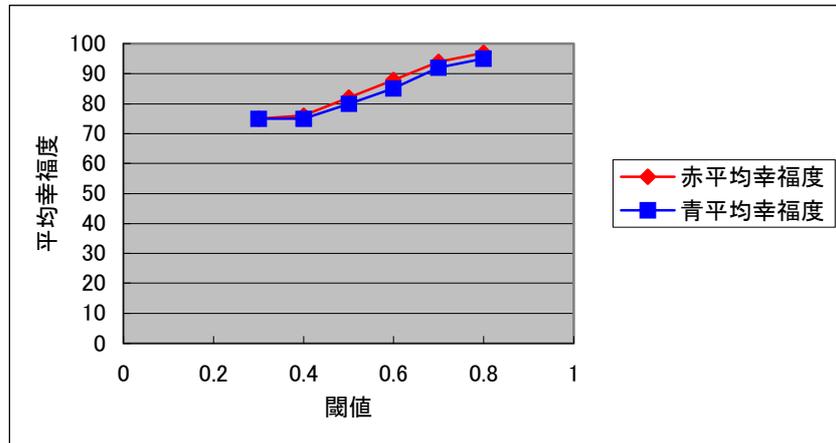


図 18 2 エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
 (赤閾値のみ変化。青閾値 0.3、赤 300、青 300)

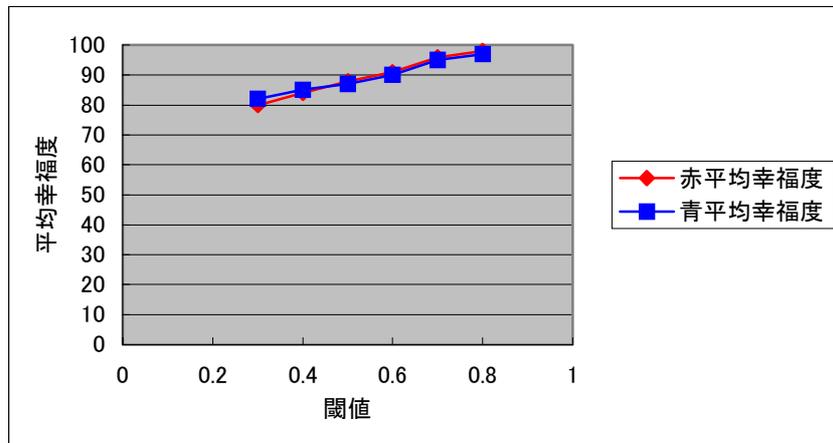


図 19 2 エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値 0.5、赤 300、青 300)

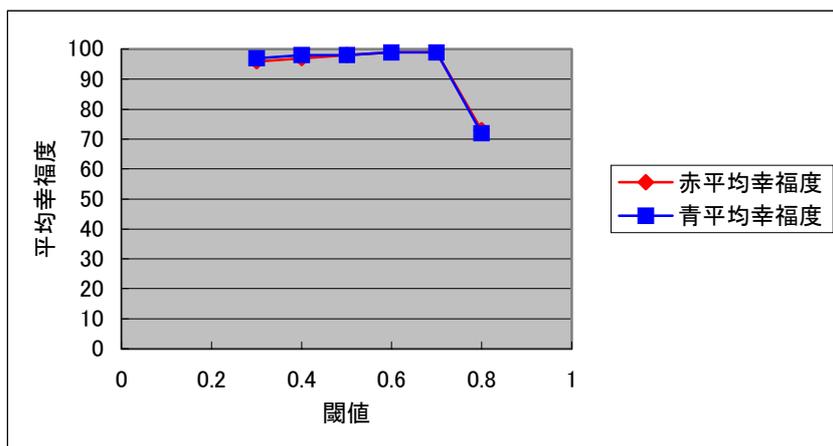


図 20 2 エージェントモデルにおける閾値と平均幸福度の関係
(赤閾値のみ変化。青閾値 0.8、赤 300、青 300)

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ければしやすいほど、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、第2節における結果（赤エージェントの平均幸福度が、色盲青エージェントを侵入させた場合より、色盲黄エージェントを侵入させた場合の方が低い）の理由が説明できる。すなわち、色盲青エージェントが侵入した場合には、色盲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。

4. 結び

本稿では、赤青 2 種類のエージェントが分居している状態に、色盲である青エージェントを侵入させる、というモデルを作成し分析した。第2節では、色盲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、板山・田村(2000)における色盲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色盲エージェントの影響に関しては、色盲黄エージェントを侵入させた場合よりも色盲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、色盲青エージェントであっても色盲黄エージェントであっても、自らと異なる色盲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、その理由について第3節で考察した。第3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検証することで、疑問に答えた。つまり、色盲青エージェントが侵入した場合には、色盲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、という解答が導かれた。

そして色盲黄エージェント侵入モデル、色盲青エージェント侵入モデルの比較分析を行なうことで、分居におけるポジティブフィードバックの可能性が示唆された。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おらず、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言及したこの知見は Schelling の議論を一步超えたものであろう。

参考文献

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

板山真弓・田村誠, 『Schelling 分居モデルを超えて』(「新型シミュレータ開発プロジェクト」ワーキングペーパーNo.2), 1999年

板山真弓・田村誠, 『Schelling 分居モデルを超えて 2』(「新型シミュレータ開発プロジェクト」ワーキングペーパーNo.5), 2000年

Appendix : その他モデルの応用

今回の色盲エージェントモデルとは別に分居モデルに、「空間に障害物があるモデル」を作成した。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。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。閾値を 0.6 のときが図 21 である。図 21 において上下に灰色で描かれている部分が道である。

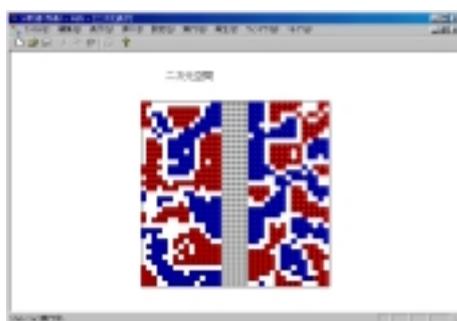


図 21 横断道路モデル (閾値 0.6 : 赤 350、青 350)

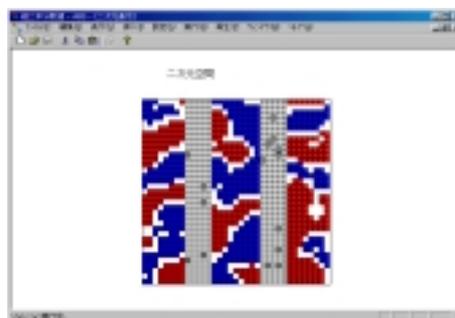


図 22 縦二本の横断道路を設置したとき (閾値 0.6 : 赤 350、青 350)

実際に試行してみると、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 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。

この他、道路を縦二本設ける (図 22)、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と考えられる。

ワーキングペーパー・シリーズ

Working Paper Series

No. 7 (最新号)

板山 真弓・田村 誠 Schelling 分居モデルを超えて 3
---- 色盲エージェントの新たなルールの影響 ----

No. 6

服部正太・玉田正樹・辺見和晃・桑原敬幸
ABS の概要と類似シミュレータとの比較

No.5

板山 真弓・田村 誠 Schelling 分居モデルを超えて 2
---- 色盲エージェントの追加 ----

No. 4

山本 和也 森林火災の拡大と樹木の密度 ---- ABS の使用例 ----

No. 3

阪本 拓人 生物個体群における自然選択と個体数変動の関係
---- ABS を用いたシミュレーション ----

No. 2

板山 真弓・田村 誠 Schelling 分居モデルを超えて
---- ABS モデルの検討 ----

No. 1

鈴木 一敏 空間上の生態系モデルにおける個体密集度と系の安定性
---- ABS によるシミュレーション ----