

# 社会規範に関する分析のためのエージェントベース シミュレーション

西崎 一郎\*・片桐 英樹\*・大山 寿久\*

## Agent-based simulation for analyzing social norms

Ichiro NISHIZAKI, Hideki KATAGIRI and Toshihisa OYAMA

With existence of the social custom or norm, Naylor demonstrates a possibility of stable long-run equilibria of support for a strike in a labor market, and this implies that at least some individuals will behave cooperatively and hence the prisoners' dilemma could be escaped. In this paper, by an agent-based simulation model in which artificial adaptive agents have mechanisms of decision making and learning based on neural networks and genetic algorithms, we compare the results from our simulation model with those from the mathematical model by Naylor. Especially, while Naylor's model is based on rationality about maximization of individual utility, our agent-based simulation model employs adaptive behavior, i.e., agents make decisions by trial and error and learn from experiences to make better decisions.

**Key words:** Social norms, reputation, simulation, adaptive agents.

### 1. はじめに

人間の社会的行動を分析するための多くの数理モデルでは、分析する社会的状況に適する個人の効用関数を定め、個人の行動はこの効用関数を最大化する選択肢をとることによって定められる。社会規範と関連する個人の行動を分析するとき、Akerlof<sup>1)</sup>は金銭的な動機付けを与える要素のみならず、社会規範を個人が遵守するかどうかに関わる社会的な評判を考慮するモデルを考察し、とくに適正賃金に対する規範を導入して非自発的な失業を説明している。彼のモデルでは、社会規範に対する個人の嗜好や態度は不均一であるとして、個人が規範に従えばその社会での評判を高め、従わなければペナルティを被るように効用関数を設定することによって、個人にとっては不利益な社会規範でも、必ずしもその規範は廃れることなく維持されることもあるという結論を得ている。

Akerlofの研究に関連した社会規範に対するいくつかのモデルが報告されているが<sup>11, 7, 9, 4, 10, 8)</sup>、とくにNaylor<sup>11)</sup>はAkerlofによって展開されたモデルを集団ストライキ行動を説明する論理として適用し、社会規範を考

慮したアプローチの有用性を示している。Kübler<sup>10)</sup>は、規範追随者の数が大きくなればなる程、規範に従うことで非常に大きな評判が得られる規範であるバンドワゴン規範と、バンドワゴン規範とは逆に、規範追随者の数が大きな状況では得られる評判は小さいが、少数の規範追随者の間で最も大きな評判を呼ぶ規範であるスノップ規範を取り上げて、その消長に関して分析している。Huck *et al.*<sup>8)</sup>は、他の労働者の勤勉な労働がもたらす自己の怠業への不名誉や不効用の甘受のような企業における労働に関する社会規範が存在する場合のチーム生産を行う労働者へのインセンティブについて分析している。

近年、このような社会規範の形成に関して被験者実験を通しての検証が試みられている。Gächter and Fehr<sup>6)</sup>は公共財の供給の中での人々の振る舞いにおける、社会的報酬の効果を被験者実験により研究し、社会的な相互作用が強まれば、社会的な是認による動機付けがより重要になることを示している。Rege and Telle<sup>13)</sup>も公共財ゲームの実験を行い、個人の身元や貢献額を明らかにすることが寄付を増加させる要因であると主張している。Nyborg and Rege<sup>12)</sup>は配慮ある喫煙行動の規範の形成について分析し、聞き取り調査に基づく実証的な研究成果を

\* 広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻

報告している。

また、社会規範や文化の成り立ちをコンピュータシミュレーションで分析するアプローチも発展してきている。Axelrod<sup>2)</sup>は  $n$  人の囚人のジレンマゲームを基礎として規範に背反したプレイヤーを処罰する構造を含む規範ゲームを構成し、進化論的手法を用いて規範のダイナミクスを調査している。さらに、Axelrod<sup>3)</sup>は適応的に行動する多くのエージェントを含むシミュレーションモデルを用いて、文化がどのように確立され、どのように広まり、どのように持続されるかを、文化の類似性と相互作用の観点から分析している。Bowles and Gintis<sup>5)</sup>は、規範を遵守するかしないか、規範に背反したエージェントを処罰するかしないかによって、エージェントをいくつかのタイプに分け、進化論的手法を用いて集団の中の協力関係について調査している。

本論文では、Akerlof<sup>1)</sup>やNaylor<sup>11)</sup>による数理モデルに着目するが、これらの数理モデルでは、エージェントが十分に合理的で、効用の正確な比較に基づいて行動することを前提としているが、実際の人々は効用の正確な比較に基づいて行動するというよりも、試行錯誤的に行動し、その結果に対して適応的な反応をとると考えられる。さらに、これらのモデルでは個人が規範を信奉するかしないかの信念によって、規範を遵守しない場合のペナルティに差のある設定で、個人の1期前の行動で、規範を遵守すれば規範を信奉し、遵守しなければ規範を信奉しないと定義されている。しかし実際には、Akerlof自身が指摘しているように、長期間遵守し続けてきた個人と、1期前だけ遵守した個人では、規範に対する信念が異なることが考えられる。

Akerlof<sup>1)</sup>のモデルは労働市場を扱うため、資本家と労働者の2つのタイプのエージェントを必要とするが、Naylor<sup>11)</sup>のモデルでは、エージェントが1つのタイプのみで表現されている。本論文では規範の消長に焦点を当てるため、より単純なNaylor<sup>11)</sup>のモデルに焦点を当てる。エージェントの適応的行動および過去の行動に基づく信念をモデル化するために、エージェントベースのシミュレーションシステムを構築し、いくつかのパラメータを操作し、規範の消長に関する分析を詳細に実施する。われわれのモデルでは、エージェントにニューラルネットワークによる意思決定機構と遺伝的アルゴリズムによる学習機構をもたせることによって、進化論的な枠組みでエージェントの適応的行動を実現する。2節では、Naylorのモデルを振り返り、要点をまとめる。3節ではシミュレーションモデルを詳述する。4節では、シミュレーションの結果を示し、5節で結論を要約する。

## 2. Naylor のモデル

Naylor<sup>11)</sup>のモデルでは、Akerlof<sup>1)</sup>によって導入された社会的評判による利得の項を含む個人の効用関数に基づいて個人は規範を遵守するか否かを決定する。個人  $i$  の効用関数  $U_i$  は金銭的な利得  $G$ 、評判による利得  $R$ 、規範に対する意思決定変数  $s$ 、規範の信奉に関する状態変数  $b$ 、規範に対する個人的な嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  の関数として以下のように表される。

$$U_i = U(G, R, s, b, \varepsilon_i) \quad (1)$$

個人  $i$  の嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  は、評判に対する敏感さを表し、区間  $[e^L, e^H]$  の範囲に一樣に分布することが仮定され、この意味で異質な個人が取扱われる。仮に、規範を信奉する集団とそうでない集団が存在するならば、信奉する集団はより大きい  $\varepsilon_i$  をもつエージェントの集団である。

Naylorのモデルでは、(1)に示される形式の効用関数を採用し、金銭的な利得  $G$ 、評判による利得  $R$  を以下のように定めている。規範を遵守するときとしないときの利得はそれぞれ  $d, w$  であり、個人が規範を遵守しない場合の方の利得が大きく、 $d \leq w$  と仮定される。とくに規範を遵守しなかった場合には、ペナルティがあり、規範を信奉する個人が規範を遵守しなかった場合、ペナルティ  $\bar{c}$  を被り、規範を信奉していない個人が規範を遵守しなかった場合、比較的小さなペナルティ  $\bar{g}$  を被る、すなわち  $\bar{c} \geq \bar{g}$  が仮定されている。よって、金銭的利得は次のように表現される。

$$G = ds + w(1-s) - b(1-s)\bar{c} - (1-b)(1-s)\bar{g} \quad (2)$$

ここで、 $s$  は規範に対する意思決定変数で、規範を遵守するとき1、遵守しないとき0であり、 $b$  は規範の信奉に関する状態変数で規範を信奉するとき1、信奉しないとき0である。

評判による利得は規範を遵守したときだけ得られ、社会全体での規範の遵守率と個人の評判に対する嗜好パラメータの積の形式で次のように表現される。

$$R = \alpha s \mu \varepsilon_i \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$  は評判の係数で、 $\mu$  は社会全体での規範の遵守率を表す。評判による利得  $R$  は、規範の遵守率  $\mu$  および評判に対する個人の嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  に対する増加関数である。

このとき、個人の効用関数は次のように与えられる。

$$U_i = ds + w(1-s) + \alpha s \mu \varepsilon_i - b(1-s)\bar{c} - (1-b)(1-s)\bar{g} \quad (4)$$

規範を遵守するか否かの個人の行動は、規範に関する信念に依存するが、効用関数 (4) の値の大小によって決定される。すなわち、規範を信奉する個人  $i$  は、規範を遵守する場合、 $U_i^{bs} = d + \alpha \varepsilon_i \mu$  の効用を得て、規範を遵守しない場合  $U_i^{bs} = w - \bar{c}$  を得る。このとき、 $U_i^{bs} \geq U_i^{bs}$  ならば、規範を遵守し、そうでなければ遵守しない。規範を信奉しない個人  $\bar{i}$  の場合も同様に、規範を遵守する場合、 $U_{\bar{i}}^{bs} = d + \alpha \varepsilon_{\bar{i}} \mu$  の効用を得て、規範を遵守しない場合  $U_{\bar{i}}^{bs} = w - \bar{g}$  を得て、 $U_{\bar{i}}^{bs} \geq U_{\bar{i}}^{bs}$  ならば、規範を遵守し、そうでなければ遵守しない。Naylor のモデルでは、これらの行動の臨界点を与える嗜好パラメータによって、個人の行動が短期的には決定される。

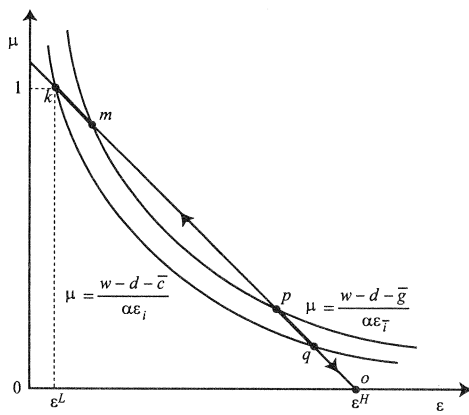


Figure 1: The model by Naylor

Naylor のモデルでは、個人の嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  は  $[\varepsilon^L, \varepsilon^H]$  に一様に分布していることが仮定されている。このとき、Figure 1 に示される 2 つの双曲線は規範の信奉者 (右側) と非信奉者 (左側) の遵守か非遵守かの決定が変わる嗜好パラメータの臨界点と社会全体の遵守率の軌跡を示しており、直線は与えられた社会全体の遵守率に対応する遵守者と非遵守者の境界を示す嗜好パラメータを示している。よって、図に示される特定のパラメータの下では、区間  $k-m$  および区間  $p-q$  では直線で示された境界付近の嗜好パラメータをもつ信奉者は規範を遵守し、非信奉者は遵守しないので、安定な区間となる。区間  $m-p$  では両者とも遵守するので、遵守率は増加し、逆に区間  $q-o$  では両者とも遵守しないので、遵守率は減少する。よって図に示されたパラメータをもつ Naylor のモデルでは、区間  $k-m$ 、区間  $p-q$ 、点  $o$  の 3 つの均衡が存在する。均衡のもとでは社会全体の遵守率が  $\hat{\mu}$  ならば、嗜好パラメータが  $\varepsilon_i \in [\varepsilon^L, \varepsilon^*]$  の個人が規範を遵守せず、 $\varepsilon_i \in [\varepsilon^*, \varepsilon^H]$  の個人が規範を遵守することになる。ここで、 $\varepsilon^* = (\varepsilon^L - \varepsilon^H)\hat{\mu} + \varepsilon^H$  である。

Naylor のモデルでは、次の 3 つの主たる結果が述べられている。

1. 特定のパラメータの下では、Figure 1 のように、区間  $k-m$  に対応する規範が高い水準で存続する場合、区間  $p-q$  に対応する規範が低い水準で存続する場合、点  $o$  に対応する規範が完全に衰退する場合の 3 つの均衡が存在する。
2. 個人が規範を信奉するしないに関わらず、規範を遵守しない場合のペナルティ ( $\bar{c}$  または  $\bar{g}$ ) の増加は、社会における規範の遵守率の上昇を引き起こし、ペナルティの減少は規範の遵守率の低下を招く。
3. 規範を遵守するときの利得  $d$  の上昇は規範の遵守率の上昇を引き起こし、 $d$  の減少は規範の遵守率の減少を招く。逆に、規範を遵守しないときの利得  $w$  の上昇は規範の遵守率の減少を招き、 $w$  の減少は規範の遵守率の上昇を引き起こす。

Naylor は、社会的規範の存在により、社会的関心をもつ個人は規範に违背することを躊躇するので、少なくともある程度の個人が協力的に行動し、その結果囚人のジレンマの回避や公共財の供給の可能性があることを示唆している。

### 3. シミュレーションモデル

前節で述べた Naylor<sup>11)</sup> のモデルでは、個人にとっては不利益な社会規範でも、必ずしもその規範は廃れることなく維持されることもあるという結論を導いているが、個人の行動の合理性と信念の二者択一性を仮定している。すなわち Naylor のモデルでは、エージェントが十分に合理的で、効用の正確な比較に基づいて行動することを前提としているが、実際の人々は効用の正確な比較に基づいて行動するというよりも、試行錯誤的に行動し、その結果に対して適応的な反応をとると考えられる。さらにこのモデルでは、個人が規範を信奉するか否かによって、規範を遵守しない場合のペナルティに差があるが、個人の信念は 1 期前の行動で、規範を遵守すれば規範を信奉し、遵守しなければ規範を信奉しないと定義されている。しかし現実的に考えれば、長期間遵守し続けてきた個人と、1 期前だけ遵守した個人では、規範に対する信念が異なることと考えることは妥当である。この信念の表現に関する二者択一性の拡張の必要性は Akerlof<sup>1)</sup> 自身も指摘している。

本論文では、プレイヤーの行動形式の基礎を適応行動とし、適応行動を実装するための自然な枠組みとしてマルチエージェントシステムを採用し、シミュレーションによる分析を試みる。シミュレーションモデルでは、人工適応型エージェント  $i$  は区間  $[\varepsilon^L, \varepsilon^H]$  に一様に分布する自己の嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  をもち、ニューラルネットワークによって意思決定を行い、ニューラルネットワークを

特徴付けるシナプス結合加重と閾値さらに嗜好パラメータは遺伝的アルゴリズムによって高い効用を得たエージェントが生残るように更新される。とくにエージェントは自己と類似した嗜好パラメータをもつエージェントと相互作用すると仮定し、嗜好パラメータの値によって複数のグループに分け、そのグループ内で進化するものとする。

### 3.1 ニューラルネットワークによる意思決定

エージェントはニューラルネットワークに対応している。ニューラルネットワークは主として、各ノード間のシナプス結合荷重、各ノードの出力に関するパラメータである閾値によって特徴付けられる。ネットワークの構造を、1番目の入力層と2番目の隠れ層のノード数を固定し、3番目の出力層を2ノードとしたフィードフォワードの3層階層型ネットワークに限定すれば、エージェントは定められた個数のパラメータによって規定されるので、われわれのモデルではこれらのパラメータの値が記録された文字列をエージェントの染色体と考える。すべてのエージェントは各期に規範を遵守するか否かを決定し、得られた効用を適合度として進化する。すなわち、より高い効用を得たエージェントが次期に生残りやすくなるという進化論のモデルに基づいてエージェントの人工社会は進展する。ニューラルネットワークと染色体の構造を Figure 2 に示す。

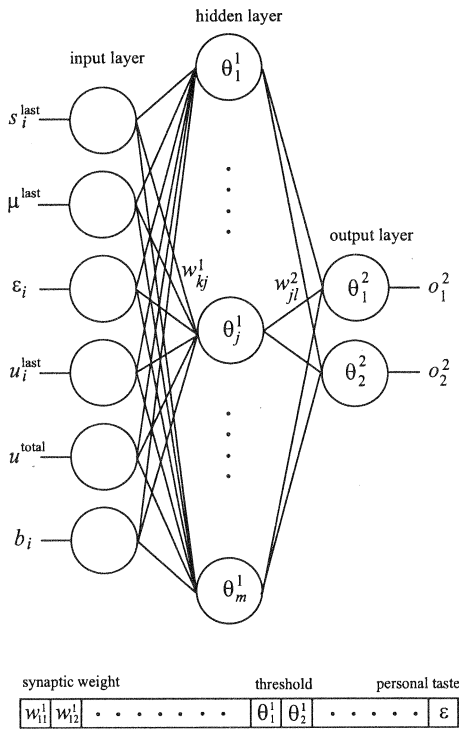


Figure 2: A neural network and the corresponding chromosome

Figure 2 に示されるようにエージェント  $i$  のニューラルネットワークの入力には次の 6 つの数値が与えられる。

- (1) 前期での行動 :  $s_i^{\text{last}}$
- (2) 前期での社会全体の規範遵守率 :  $\mu^{\text{last}}$
- (3) 嗜好パラメータ :  $\epsilon_i$
- (4) 前期で得た効用 :  $U_i^{\text{last}}$
- (5) 前期での社会全体の効用 :  $U^{\text{total}}$
- (6) 規範に対する信念 :  $b_i$

意思決定に際して自己の過去の行動や他者の行動を参考にすることは自然である。そのため、われわれのモデルではエージェントの (1) 前期の行動および他者の行動の集約情報としての (2) 社会全体の規範遵守率が与えられる。前期の行動  $s_i^{\text{last}}$  はエージェント  $i$  が 1 期前に規範を遵守したか否かを示し、遵守した場合は 1、遵守しなかった場合は 0 が入力として与えられる。前期の社会全体の規範遵守率  $\mu^{\text{last}}$  は、すべてのエージェントの行動の集約情報であり、現在の社会での規範に対する評価の指標と考えられる。評判に対するエージェント  $i$  の (3) 嗜好パラメータ  $\epsilon_i$  は、遵守した場合の効用に影響を与えるため、入力データとして取り入れる。エージェントの行動は適応的になされ、以前に得られた効用に依存する。さらに、エージェントの行動は自己の効用のみならず、社会の状況に依存すると考えられるため、エージェントが (4) 前期で得た効用と (5) 社会全体の効用を入力情報に加えている。また、規範を遵守しない場合のペナルティは規範に対する信念に依存するように設定しているので、(6) 規範に対する信念も入力データの 1 つの要素としている。

エージェントの規範に対する信念は、Naylor のモデルでは、直前の期で規範を遵守すれば規範を信奉し ( $b = 1$ )、遵守しなければ規範を信奉しない ( $b = 0$ ) ものとされていた。われわれのモデルでは、過去の行動に依存して規範の信奉率を定めるという観点から、以下のように規範の信奉率  $b$  を定義する。

$$b = \left( \sum_{t=1}^n s_t \delta^{t-1} \right) / \left( \sum_{t=1}^n \delta^{t-1} \right) \quad (5)$$

ここで、 $\delta$  は割引率であり、 $s_t$  は  $t$  期前の意思決定を表し、 $s_t = 1$  ならば規範を遵守し、 $s_t = 0$  ならば遵守しない。 $\delta = 0$  のとき  $\delta^0 = 1$  とすると 1 期前の行動だけで信奉率が定まり、Naylor のモデルと一致する。 $\delta$  が大きくなると、過去の行動が信奉率により大きく影響する。この信奉率をエージェントの効用に反映させるために、効用関数を次のように定義し、シミュレーションでのエージェントはこの関数に従って効用を獲得する。

$$U_i = ds + w(1-s) + \alpha \mu \epsilon_i - (1-s) \{ b(\bar{c} - \bar{g}) + \bar{g} \} \quad (6)$$

この効用関数のもとでは、規範を遵守しないときのペナルティがエージェントの信奉率に依存することになる。

ニューラルネットワークの隠れ層 ( $p = 1$ ) および出力層 ( $p = 2$ ) のノード  $j$  における入力を  $z_k^p, k = 1, \dots, m^p$  とし、それぞれに対応するシナプス結合荷重を  $w_{kj}^p, k = 1, \dots, m^p$  とし、閾値を  $\theta_j^p$  とすると、その出力値  $o_j^p$  は

$$o_j^p = f \left( \sum_{k=1}^{m^p} w_{kj}^p z_k^p - \theta_j^p \right) \quad (7)$$

となる。ここで、 $f$  は伝達関数で、シグモイド関数  $f(z) = 1/(1 + \exp(-z))$  を用いている。Figure 2 に示されるように出力層には2つのノードがあり、これらの出力値に基づいてエージェントは意思決定する。すなわち、出力値  $o_1^j$  が出力値  $o_2^j$  に比べて大きい場合、そのエージェントは規範を遵守し、そうでない場合に、遵守しないとする。

上述したように、各エージェントに対応するニューラルネットワークは、入力層のノードが6つで、出力層のノードが2つであるので、隠れ層のノード数を  $m$  とすると、シナプス結合荷重が  $8m$  で隠れ層と出力層のノード数が  $m+2$  となる。よって、1つのニューラルネットワークは、シナプス結合荷重  $w_l, l = 1, \dots, 8m$  および閾値  $\theta_l, l = 1, \dots, m+2$  で表現できる。これらのパラメータと入力データとによって、エージェントの行動は決定されるが、より適切な行動、すなわちより高い効用を獲得したエージェントを進化的に発展させるために、われわれのモデルでは遺伝的アルゴリズムを用いる。

### 3.2 遺伝的アルゴリズムによる進化的学習

与えられた数のエージェントは每期、規範を遵守するか否かの2種類の選択肢のうちどちらかを選択する。その結果、各エージェントは(6)で示された効用を獲得する。この意思決定を每期繰返し行う過程で、エージェントは各期に獲得した効用を適合度として進化していく。シミュレーションの流れはFigure 3に要約される。

#### 3.2.1 初期個体群生成

エージェントの染色体は、シナプス結合荷重  $w_l, l = 1, \dots, 8m$ 、閾値  $\theta_l, l = 1, \dots, m+2$ 、嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  からなるFigure 2のような文字列で表現される。 $N$ 体のエージェントからなる初期個体群の生成時において、 $w_l \in [-1, 1], \theta_l \in [-1, 1]$  はシミュレーションのパラメータである初期の規範遵守率  $\mu_0$  を実現するように調整され、 $\varepsilon_i$  については  $[0.2, 1.2]$  の区間に一様に分布するように初期化される。

シミュレーションでは、社会の初期遵守率  $\mu_0$  をパラメータとするため、与えられた遵守率  $\mu_0$  をもつ人工社会を構成しなければならない。初期状態で、高い嗜好

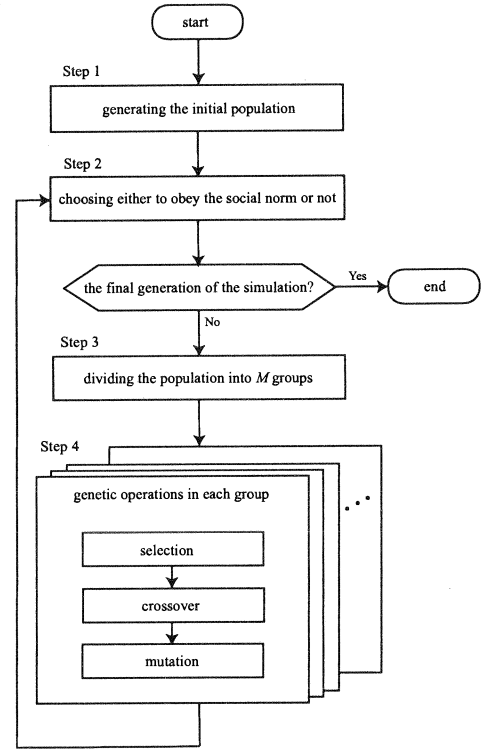


Figure 3: Flowchart of the simulation

パラメータをもつ  $N\mu_0$  エージェントが規範を信奉するエージェントで、かつ規範を遵守する。一方、低い嗜好パラメータをもつ  $N(1-\mu_0)$  エージェントが規範を信奉しないエージェントで、かつ規範を遵守しないように、ニューラルネットワークのシナプス結合加重および閾値を調整する。

そのために、全エージェントを、高い嗜好パラメータをもつ  $N\mu_0$  エージェントの集団と低い嗜好パラメータをもつ  $N(1-\mu_0)$  エージェントの集団に分ける。次に、Table 1 に示す入出力データを用いた誤差逆伝播法により、シナプス結合加重と閾値を改訂することによって、エージェントのシナプス結合加重  $w_l$  と閾値  $\theta_l$  が調整される。

#### 3.2.2 遺伝的操作

一般に、嗜好パラメータは規範に対する個人的な嗜好を示すので、この値が大きく異なるエージェント間の相互作用の可能性は比較的小さいものと考えられる。この状況をシミュレーションモデルに取入れるために、エージェントをいくつかのグループに分け、そのグループ内だけで相互作用させる。すなわち、 $N$ 体からなる全エージェントを  $M$  グループに分け、それぞれのグループごとに以下の再生、交叉、突然変異の遺伝的操作を行い、次世代の個体群を生成する。

Table 1: Teacher signals for the error back propagation algorithm

|                     | believers  | non-believers     |
|---------------------|--|-------------------|
| $s_i^{\text{last}}$ | 1.0  | 0.0               |
| $\mu^{\text{last}}$ |  | $\mu_0^*$         |
| $\varepsilon_i$     |  | $\varepsilon_i^*$ |
| $U_i^{\text{last}}$ | $d + \alpha\mu_0\varepsilon_i$                             | $w - \bar{g}$     |
| $U^{\text{total}}$  | $\sum(d + \alpha\mu_0\varepsilon_i) + \sum(w - \bar{g})^*$ |                   |
| $b_i$               | 1.0  | 0.0               |
| $o_1$               | 1.0  | 0.0               |
| $o_2$               | 0.0  | 1.0               |

\* The teacher signals of  $\mu^{\text{last}}$ ,  $\varepsilon_i$  and  $U^{\text{total}}$  are the same both for believers and for non-believers

**再生** ルーレット選択を用いて次世代の個体を選択する。各グループの個体数を  $N' = N/M$  とする。個体  $i$  の次期個体群への選択確率を  $p_i^s = U_i / (\sum_{i=1}^{N'} U_i)$  とする。ここで、 $U_i$  は当該世代でのエージェント  $i$  の効用であり、これをそのまま適合度としている。

**交叉** 順に2個体を選択し、定められた確率  $p^c$  で、2つの個体を交叉させる。交叉は1点交叉で、文字列の位置をランダムに1点選択し、2つに区分された部分文字列を交換する。生成された子孫の前期に得た効用は、親の前期に得た効用と交叉点にしたがって定められる。すなわち、親から受け継いだ部分文字列の長さの比率に従って計算する。生成された子の過去の行動についても親の過去の行動と交叉点に従って定められる。すなわち、両親の行動のどちらかが交叉点によって定められる比率に従って確率的に選択される。交叉操作の終了後、新たに生成された  $N'$  体の個体に対して世代間ギャップ比率  $g$  に従い、現在の個体群と入替える。

**突然変異** 定められた確率  $p^m$  で、各遺伝子を突然変異させる。突然変異が適用される遺伝子が、シナプス結合荷重  $w_l$  または閾値  $\theta_l$  の場合には、 $[-1, 1]$  の範囲の乱数に書換え、嗜好パラメータ  $\varepsilon_i$  の場合には、 $[0.2, 1.2]$  の範囲の乱数に書換える。

## 4. シミュレーション結果

### 4.1 シミュレーションの種類

本論文では、数理モデルの結果とシミュレーションでの結果を比較した後、規範の信奉の度合いを考慮した場合、規範を遵守しなかった場合のペナルティを変動させた場合、規範を遵守した場合または遵守しなかった場合の利得を変動させた場合、エージェント間の相互作用の範囲を変動させた場合についてそれぞれ規範の遵守率が

長期的にどのように振舞うかを調査する。すなわち、以下の種類のシミュレーションを実施する。

シミュレーション1：適応モデルでの収束結果

シミュレーション2：規範の信奉率

シミュレーション3：ペナルティ

シミュレーション4：利得

シミュレーション5：エージェントの相互作用の範囲

シミュレーション1では、同様の設定のもとで、数理モデルの均衡とシミュレーションでの収束先を比較する。とくに、数理モデルで示された3つの均衡がシミュレーション結果で得られるかについて焦点を当てる。

シミュレーション2では、過去の長期間の行動を考慮したときの規範に対する信念とそれに基づくペナルティがエージェントの意思決定にどのような影響を与え、規範の消長にどのような変化をもたらすかを調査する。

シミュレーション3では、エージェントが規範を遵守しないときに被るペナルティに着目する。数理モデルでは、ペナルティの減少が規範の遵守率の低下を招き、ペナルティの増加が規範の遵守率の上昇を引起こすと結論付けられている。この結論をシミュレーションの結果が支持するかどうかを検証する。

規範の遵守あるいは非遵守により、エージェントの金銭的利得は異なるが、シミュレーション4では、これらの利得に着目する。数理モデルでは、規範を遵守するときの金銭的利得の上昇は規範の遵守率の上昇を引起こし、その減少は規範の遵守率の低下を招き、一方規範を遵守しないときの利得の上昇は規範の遵守率の低下を招き、その減少は規範の遵守率の上昇を引起こすと結論付けられている。この結論をシミュレーションの結果が支持するかどうかを検証する。

現実世界の人々は周囲の人々との相互作用による影響を受け、この相互作用は個人の嗜好や信条に共通性がある人々の間でより頻繁に交されると考えられる。この観点から、規範の時間的推移のモデル化を考える場合、相互作用の範囲を限定することは妥当である。本シミュレーションでは、エージェント間の相互作用を進化過程での遺伝的操作として実装し、その範囲を嗜好パラメータによって限定させる。シミュレーション5では、エージェント間の相互作用の範囲の変動が、規範の消長にどのような変化を及ぼすかについて調査する。

各シミュレーションでの基準となるパラメータの設定を以下に示す。シミュレーションでの効用関数は(6)および(5)で表現され、そこに含まれるパラメータを以下のように設定する。

利得： 遵守  $d = 0.1$  ; 非遵守  $w = 1.0$

ペナルティ： 信奉者  $\bar{c} = 0.7$  ; 非信奉者  $\bar{g} = 0.6$

評判の係数：  $\alpha = 1.0$

割引率： $\delta = 0.0$

嗜好パラメータ：区間  $[0.2, 1.2]$  の一様分布

エージェントの意思決定はニューラルネットワークの出力に従い、エージェントの染色体は遺伝的アルゴリズムによって更新される。そこで使用されるニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムのパラメータは以下のように設定される。

ニューラルネットワークのノード数：入力層：6；隠れ層：8；出力層：2

個体（エージェント）数： $N = 10000$

遺伝的操作のグループ数： $M = 100$

遺伝的操作のパラメータ：突然変異率： $p^m = 0.01$ ；交叉確率： $p^c = 0.6$ ；世代間ギャップ： $g = 0.5$

#### 4.2 シミュレーション 1：適応モデルでの収束結果

パラメータは前述の基準の設定を用いる。初期遵守率  $\mu_0$  を 0.0 から 1.0 まで 0.1 ごとに変化させるが、同じ設定で収束先が分散するような初期遵守率の区間では、詳細な変化を見るために、より細かく区分して実行する。同一の設定に対して 100 回ずつ実行し、長期的な社会の状況の変化を分析するために、規範の遵守率の推移や収束するまでの期間などのデータを取得する。事前のテスト試行で確認したところ、各試行で遅くとも 1500 期間までには規範が衰退してしまうか、ある一定の割合で規範が遵守され続ける状態に到達することが確認されたため、各試行のシミュレーション期間を 2000 期とした。

Figure 4 は、シミュレーションでの収束先を特徴付ける 4 種類の初期遵守率  $\mu_0 = 0.2, 0.3, 0.4, 1.0$  に対応する結果が示される。各  $\mu_0$  に対する左側のグラフには社会全体の規範の遵守率の推移を示している。 $\mu_0 = 0.2, 0.4, 1.0$  の場合、100 試行中のある 1 試行を例として示し、 $\mu_0 = 0.3$  の場合のみ収束先が 2 種類あったのでそれぞれの試行の推移を示している。右側のグラフは黒の線で示される 100 期間後と灰色の線で示される最終段階である 2000 期間後の嗜好パラメータに対する規範の遵守率を示しており、示されるデータは 100 試行の平均値である。

初期遵守率が 20%、すなわち  $\mu_0 = 0.2$  の場合、初期状態では嗜好パラメータが  $0.2 \leq \varepsilon_i \leq 1.0$  となる 80% のエージェントが規範を信奉せず、嗜好パラメータが  $1.0 < \varepsilon_i \leq 1.2$  となる 20% のエージェントが規範を信奉する状態を、シミュレーション前に誤差逆伝播法を用いてシナプス結合荷重および閾値を調整することによって構成している。Figure 4 (a) に示される例のように、100 試行のすべての試行で、規範は衰退し、その遵守率はほぼ 0% となっている。Figure 4 (b) からわかるように、100 期間後の時点ですでに、規範を遵守していた嗜好パラメータが  $1.0 \leq \varepsilon \leq 1.2$  のエージェントの 2 割弱が規範を遵守しないようになり、2000 期間後にはほぼすべてのエージェ

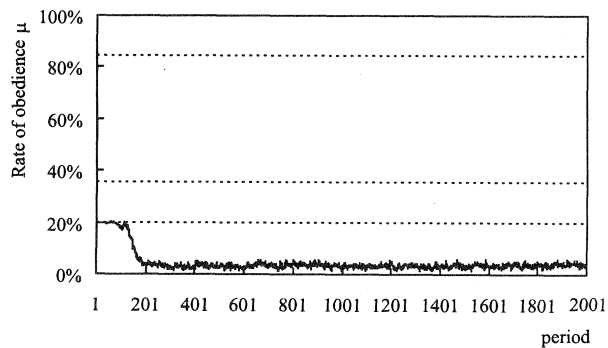
ントが遵守しないという結果になったことがわかる。

$\mu_0 = 0.3$  の場合、Figure 4 (c) に示されるように規範が存続し、80% 弱のエージェントが遵守するような状態に収束した場合と、 $\mu_0 = 0.2$  の場合と同様に規範が衰退し、遵守率がほぼ 0% になる場合があった。ただし  $\mu_0 = 0.3$  の場合、規範が存続した試行は 100 試行中 1 試行においてのみであり、残り 99 試行では規範は衰退している。よって平均的には、Figure 4 (d) からわかるように、100 期間後には嗜好パラメータが  $0.9 \leq \varepsilon_i \leq 1.0$  のエージェントの一部が規範を遵守しないようになり、2000 期間後にはほぼすべてのエージェントが規範を遵守しないという結果になっている。

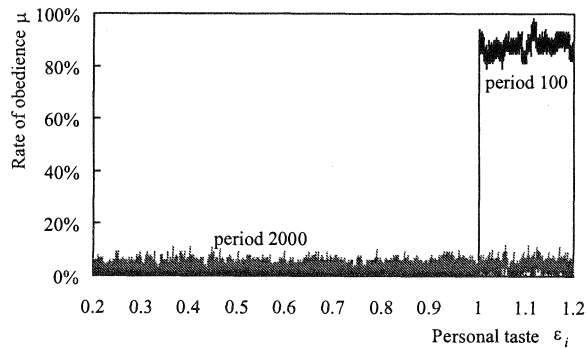
$\mu_0 = 0.4$  の場合、Figure 4 (e) の例に示されるように 100 試行すべてにおいて規範の遵守率が初期の 40% から約 78% まで増加し、高い水準で規範が存続している。Figure 4 (f) からわかるように、初期状態では嗜好パラメータが  $0.2 \leq \varepsilon_i \leq 0.8$  となる 60% のエージェントが規範を遵守していない状態からシミュレーションが始まっているが、100 期間後には嗜好パラメータが  $0.7 \leq \varepsilon_i \leq 0.8$  のエージェントが規範を遵守し始め、2000 期間後には嗜好パラメータが  $0.385 \leq \varepsilon_i$  のエージェントが 80% を超える確率で規範を遵守するという状態に収束している。

$\mu_0 = 1.0$  の場合、Figure 4 (g) の例に示されるように 100 試行すべてにおいて規範の遵守率が初期の 100% から約 78% まで減少したが、それ以下に低下することはなく高い水準で規範が存続している。Figure 4 (h) からわかるように、初期状態ではすべてのエージェントが規範を遵守している状態からシミュレーションが始まっているが、100 期間後には嗜好パラメータが  $0.2 \leq \varepsilon_i \leq 0.3$  のエージェントの一部が規範を遵守しないようになり、2000 期間後には嗜好パラメータが  $0.2 \leq \varepsilon_i \leq 0.385$  のエージェントがほぼ 20% を下回る確率でしか規範を遵守していない状態に収束しており、この状態は上述の  $\mu_0 = 0.4$  から始まる試行の最終状態と同様の状態である。

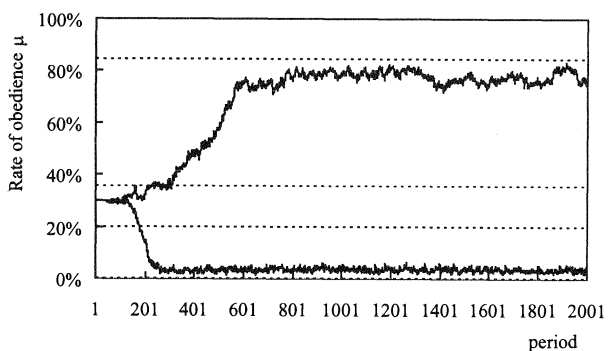
これらの結果から、初期の遵守率が約 30% より低い場合、規範は衰退するが、それより大きい場合は遵守率が約 78% となる高い水準で規範が存続することがわかり、2 種類の収束先が確認された。規範の衰退に対応する収束先を  $\tau^0$  で表し、規範の存続に対応する収束先を  $\tau^*$  で表す。これら 2 つの定常状態へ収束する初期遵守率の分岐点を調べることに、定常状態に到達するまでの時間を調査するために、さらに細かく初期点を与えてシミュレーションを実施した。Figure 5 (a) は、初期遵守率  $\mu_0$  に対して、100 回の試行において規範存続状態  $\tau^*$  に到達する回数を示している。Figure 5 (b) は、初期遵守率  $\mu_0$  に対して、定常状態に到達するまでにかかる時間を示している。ここで、定常状態到達までの時間の



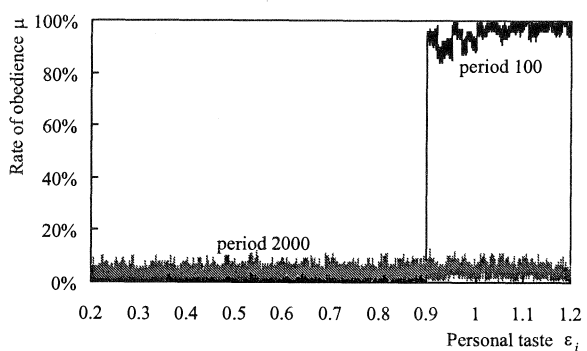
(a) Transition of obedience:  $\mu_0 = 0.2$



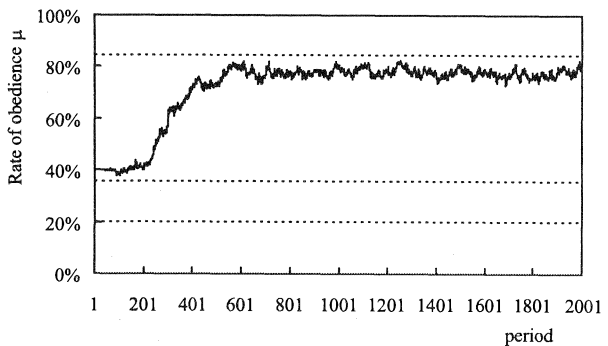
(b) Distribution of obedience:  $\mu_0 = 0.2$



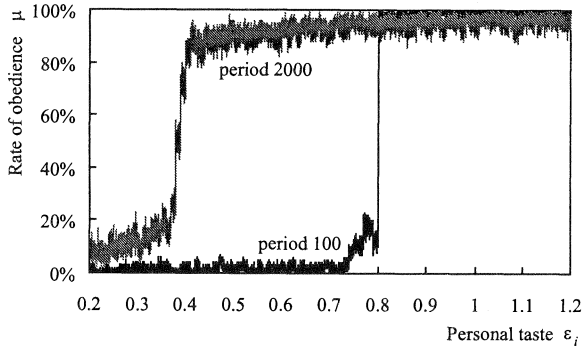
(c) Transition of obedience:  $\mu_0 = 0.3$



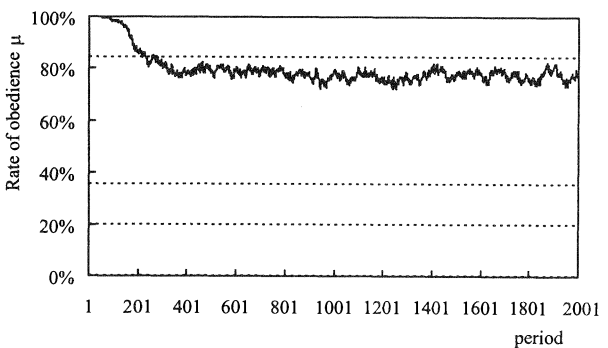
(d) Distribution of obedience:  $\mu_0 = 0.3$



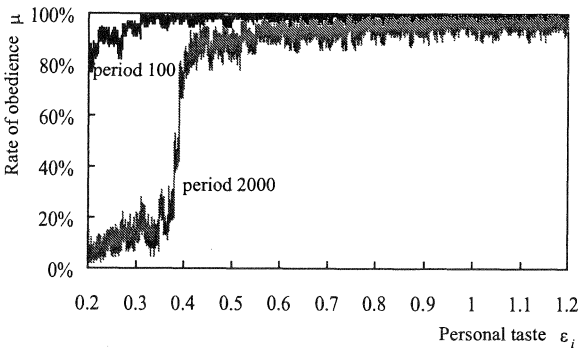
(e) Transition of obedience:  $\mu_0 = 0.4$



(f) Distribution of obedience:  $\mu_0 = 0.4$



(g) Transition of obedience:  $\mu_0 = 1.0$



(h) Distribution of obedience:  $\mu_0 = 1.0$

Figure 4: Equilibria in the long term



計算方法は以下のように与える。100回の試行に対して2000期間後の遵守率の平均値 $\theta$ と標準偏差 $\sigma$ を計算し、 $[\theta - 2\sigma, \theta + 2\sigma]$ の区間に90回以上の試行が到達すれば、定常状態に達したと定義した。

Figure 5 (a) より、 $0.0 \leq \mu_0 \leq 0.28$  では、規範存続状態 $\tau^*$ へ到達する試行はなく、すべて規範衰退状態 $\tau^0$ へ到達している。 $0.30 \leq \mu_0 \leq 0.37$  では、規範が存続する場合も衰退する場合もあり、2つの定常状態 $\tau^*$ 、 $\tau^0$ の両方に到達している試行があることがわかる。さらに、 $0.38 \leq \mu_0 \leq 1.0$  では、規範衰退状態 $\tau^0$ へ到達する試行はなく、すべて規範存続状態 $\tau^*$ へ到達している。定常状態への到達時間に関しては、 $0.31 \leq \mu_0 \leq 0.40$ の区間で500期間以上かかっており、規範が衰退してしまうのかあるいは存続するのか明らかになるまでに時間を要している。別の見方をすれば、この区間では遵守率の低い水準で規範が存続し、短期的には安定しているとも解釈できる。また、 $0.90 \leq \mu_0 \leq 1.00$ の区間も定常状態到達までの時間が300期以上で、 $\mu_0 = 0.80$ 前後と比べて明らかに時間を要し、この区間も短期的には安定しているとも解釈できる。

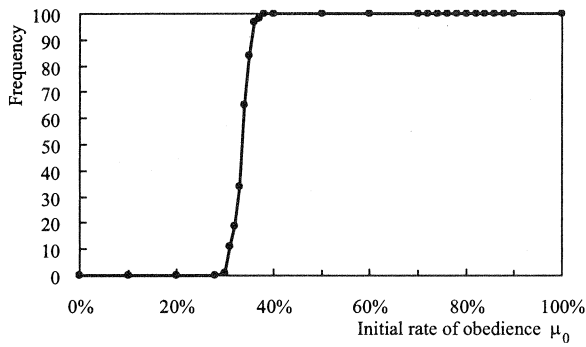
次に、Naylorの数理モデルの均衡と比較するが、最初にシミュレーションでのパラメータの設定での数理モデルにおける均衡を整理する。(1)初期の規範遵守率が $0.0 \leq \mu_0 < 0.20$ であれば、遵守率は低下し、最終的に規範が衰退する均衡 $\mu = 0$ へ収束し、Figure 1の点 $o$ に対応する。(2) $0.20 \leq \mu_0 \leq 0.355$ であれば、遵守率は変わらず、与えられた初期遵守率が均衡となり、Figure 1の区間 $p-q$ に対応する。(3) $0.355 < \mu_0 \leq 0.845$ であれば、遵守率は増加し、最終的に規範が存続する均衡 $\mu = 0.845$ へ収束し、Figure 1の点 $m$ に対応する。(4) $0.845 \leq \mu_0 \leq 1.0$ であれば、遵守率は変わらず、与えられた初期遵守率が均衡となり、Figure 1の区間 $k-m$ に対応する。

以下に対応するシミュレーションでの結果を要約する。(1)初期の規範遵守率が $0.0 \leq \mu_0 < 0.20$ の場合、Naylorの結果と同様に、規範衰退状態 $\tau^0$ へ到達しており、シミュレーションの結果は数理モデルを支持している。(2) $0.20 \leq \mu_0 \leq 0.355$ の場合、シミュレーションでは、低水準での定常状態は存在せず、 $0.20 \leq \mu_0 < 0.30$ では、すべて規範は衰退( $\tau^0$ へ収束)し、 $0.30 \leq \mu_0 \leq 0.355$ の範囲では規範が衰退するか、高水準で規範が存続する( $\tau^*$ へ収束)かのどちらかで、数理モデルの結果を支持していない。しかし、 $0.31 \leq \mu_0 \leq 0.355$ の区間で定常状態に到達するまでに500期間以上かかっており、数理モデルにおける低水準の均衡はシミュレーションでは短期的には安定しているとも解釈できる。(3) $0.355 < \mu_0 \leq 0.845$ の場合、 $0.355 < \mu_0 \leq 0.37$ の数回の試行で規範が衰退( $\tau^0$ へ収束)するが、その他はすべて高水準で規範が存

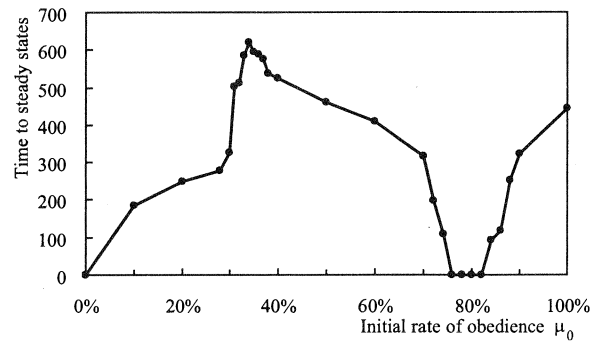
続( $\tau^*$ へ収束)しており、シミュレーションの結果は数理モデルを支持している。(4) $0.845 \leq \mu_0 \leq 1.0$ の場合、シミュレーションではすべての試行で遵守率は減少するが高水準で規範が存続( $\tau^*$ へ収束)しており、規範が存続するという意味では数理モデルを支持するが、初期遵守率がそのまま維持されないという意味では数理モデルを支持しない。

数理モデルにおいて、Figure 1の区間 $p-q$ および $k-m$ で、均衡が生じる理由は、任意の社会の規範遵守率に対して、信奉者と非信奉者の間で、同じ嗜好パラメータをもつ個人でも最適な行動に違いが生じ、微小な効用の差であっても明確に判断して、遵守か非遵守の選択をするためである。一方、シミュレーションでの適応的な行動をとるエージェントは、長期的に効用の大きいエージェントが生残る仕組みであるため、ある程度の期間連続して得られる効用に差がない限り、一時的にわずかに低い効用を得たとしても、その後高い効用を取り始めるとそのエージェントは生残る可能性が高くなる。よって、規範の信奉者が規範を遵守しないときには一時的に大きなペナルティを被るが、次期には非信奉者となり、再び規範を遵守しない場合、ペナルティは小さくなり、この小さいペナルティを受けたときの効用と遵守し続ける場合の効用の差が行動の選択に主として影響するため、区間で示される均衡は長期的には生じないと考えられる。区間 $p-q$ の均衡は、この区間から離れると $m$ や $o$ へ移動する不安定な均衡であり、この区間が小さくなれば、均衡は存在しなくなる。区間 $k-m$ の均衡は、この区間外の点は $m$ へ収束するという安定均衡なので、シミュレーションにおいても高い水準の定常状態が存在すると考えられる。

例として初期遵守率が100%である場合に小さい嗜好パラメータ $\epsilon_i = 0.21$ をもつエージェントの行動を考えよう。このとき、規範を遵守した場合の効用は $U_i = d + \mu\epsilon_i = 0.1 + 1.0 \times 0.21 = 0.31$ であり、遵守から非遵守へ変えた場合の効用は $U_i = w + \bar{c} = 1.0 - 0.7 = 0.3$ であり、非遵守を続けた場合は、 $U_i = w + \bar{g} = 1.0 - 0.6 = 0.4$ となる。数理モデルでは、遵守の場合の効用0.31と非遵守の効用0.30を比較し、エージェントは規範を遵守する。一方、シミュレーションでは試行錯誤的に行動し、得られた効用の大きいエージェントが進化的に生残るので、規範を遵守して効用0.31を得たエージェントが次期に遵守しないで効用0.3を得ることもある。このようなエージェントは次期に再び規範を遵守しないことによって、0.40の効用を得ることもあり、規範を遵守し続けるエージェントにくらべ、長期的には大きな効用を得る。したがって、嗜好パラメータが $\epsilon_i = 0.21$ のように小さいエージェントが規範を遵守し続けることは進化的に明らかに



(a) The maintenance of the social norm



(b) Time to steady states

Figure 5: The maintenance of the social norm and time to steady states

不利となり、死滅する可能性が高くなる。

数理モデルの均衡点  $m$  は  $(\mu^m, \epsilon^m) = (0.845, 0.355)$  である。この点  $m$  は規範の非信奉者の効用が、規範を遵守してもしなくても同じになる点なので、 $\mu^m = 1.2 - \epsilon^m$  より  $d + \mu^m \epsilon^m = d + (1.2 - \epsilon^m) \epsilon^m = w + \bar{g} = 0.4$  から、 $(\mu^m, \epsilon^m) = (0.845, 0.355)$  を得る。一方、シミュレーションでは、遵守と非遵守の境界値  $\epsilon^*$  のあたりの嗜好パラメータをもつエージェントは、遵守と非遵守の割合が 0.5 ずつと考えられ、これより大きい嗜好パラメータをもつエージェントは遵守の割合がより大きく、逆に小さい嗜好パラメータをもつエージェントは遵守の割合が小さくなる。このような嗜好パラメータに対する規範の遵守率は Figure 4 (f) または (h) の 2000 期間後の結果を表すロジスティック関数のような形状の非線形関数  $f(\epsilon; \epsilon^*)$  に近似できる。このとき、社会の規範の遵守率は  $\mu(\epsilon^*) = \int_{0.2}^{1.2} f(\epsilon; \epsilon^*) d\epsilon$  となり、今回のシミュレーションの設定では、 $d + \mu(\epsilon^*) \epsilon^* = w + \bar{g} = 0.4$  を満たす遵守率と境界の嗜好パラメータのペアは Figure 4 (f) および (h) に示されるような定常状態では、 $(\mu^* = \mu(\epsilon^*), \epsilon^*) = (0.78, 0.385)$  となっていた。均衡点  $m$  と比較すると、社会の規範遵守率は若干小さく、遵守と非遵守の境界となる嗜好パラメータの値は幾分大きくなっている。

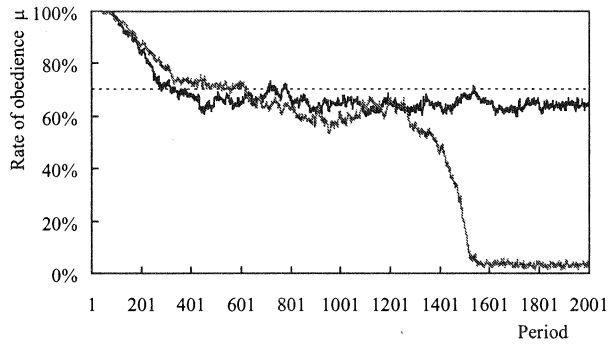
シミュレーション結果は、社会規範が存続したとしても、100%のような遵守率は実現せず、評判をあまり気にしない一部のエージェントによって規範が遵守されず、規範の遵守率はある程度まで侵蝕されうることを示唆している。また、数理モデルにおける  $p$ - $q$  区間のような一部の少数のエージェントによって遵守され続けているような規範は、短期的には存続するかもしれないが、長期的には侵蝕される可能性が高いことを示している。これらの結果は現実世界の状況を適切に説明しうる妥当な結論であると考えられる。

### 4.3 シミュレーション 2：規範の信奉率

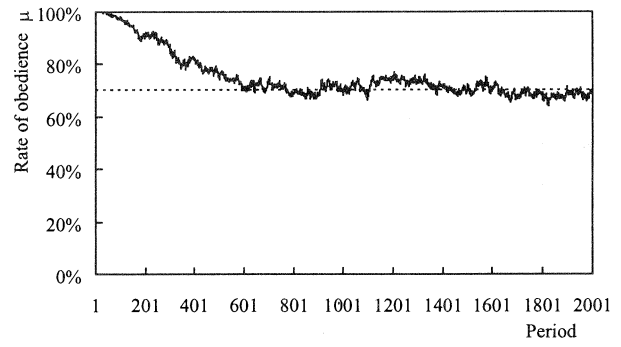
シミュレーションモデルでは、エージェントの過去の行動から規範の信奉率  $b$  (5) が定められ、この信奉率に依存する効用  $U_i$  (6) をエージェントは獲得する。シミュレーション 2 では、信奉率に対する過去の行動の影響の度合いを表す割引率  $\delta$  を変動させて、過去の行動履歴の影響が規範の消長にいかにか影響するかについて調査する。

結果をより明確にするために、本シミュレーションでは、規範を遵守しなかった場合のペナルティ  $\bar{c}, \bar{g}$  の値を基準値の  $\bar{c} = 0.7, \bar{g} = 0.6$  からペナルティの差を若干大きくさせて、 $\bar{c} = 0.7, \bar{g} = 0.55$  としてシミュレーションを実施した。3種類の割引率  $\delta = 0.0, 0.5, 0.9$  のそれぞれに対して、初期遵守率  $\mu_0$  を 0.0 から 1.0 まで 0.1 刻みで変化させ、それぞれの設定で 100 回ずつ試行した。その結果を Figure 6 に示している。Figure 6 では、横軸に初期遵守率をとり、縦軸に 100 試行中規範が存続した回数を示している。Figure 7 では、初期遵守率を 100%、すなわち  $\mu_0 = 1.0$  とした場合の社会全体の規範の遵守率の推移を示しており、 $\delta = 0.0$  の場合には規範が存続する場合と衰退する場合があるので、それぞれの例を左のグラフ (a) に示し、 $\delta = 0.9$  の場合にはすべての試行で規範が存続するので、存続する例を右のグラフ (b) に示している。なお図中の破線は、本シミュレーションのパラメータ設定でのもとで、数理モデルにおける高水準での規範存続均衡の下限である 70% の遵守率 (図 1 の点  $m$  での遵守率に相当) を示している。

Figure 6 から明らかなように、 $\delta$  が大きくなるほど、規範の存続回数が多くなり、 $\delta = 0.9$  では、初期遵守率が 60% 以上であれば、100 試行中すべての試行で規範が存続している。一方、 $\delta = 0.0$  では、初期遵守率が 70% 以上でも、100 試行中 10 試行程度は規範が衰退している。Figure 7 (a) に示される  $\delta = 0.0$  の場合の 2 試行のいずれ



(a)  $\delta = 0.0$



(b)  $\delta = 0.9$

Figure 7: The transition of the rate of obedience

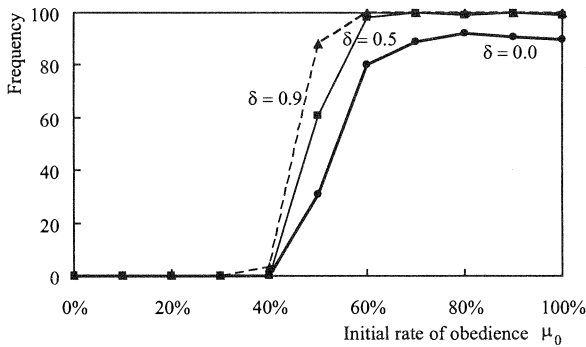


Figure 6: Frequency of maintenance of the social norm with respect to the discount factors

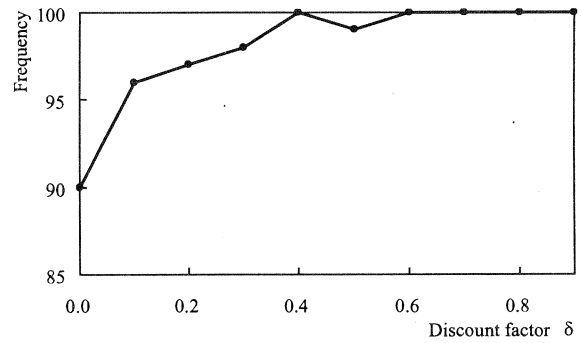


Figure 8: Stability of maintenance of the social norm

もが400期あたりで収束しており、その後一方はそのまま規範が存続するが、他方の遵守率は幾分不安定で1300期あたりから急に遵守率が低下し、最終的に規範は衰退している。(b)に示される $\delta = 0.9$ の場合の方は、600期あたりで収束している。(a)と(b)の図から、 $\delta = 0.0$ の方が $\delta = 0.9$ の場合に比べて、早く収束するが、不安定であることがわかる。

規範の遵守に対する安定性をより詳しく調査するため、初期遵守率を $\mu_0 = 1.0$ に固定し、割引率を $\delta = 0.0$ から $\delta = 0.9$ まで0.1ずつ変動させ、それぞれの場合に対して100回ずつ試行した結果をFigure 8に示す。さらに、規範が存続した試行のみを取り上げ、規範の遵守率の平均と標準偏差をFigure 9に示す。

Figure 8およびFigure 9に示されるように、割引率 $\delta$ が大きい、すなわち過去の行動履歴を考慮すればするほど、規範は遵守されやすく、その遵守率も高く、試行ごとの変動も少なく安定していることがわかる。これは、割引率 $\delta$ が大きい場合、行動の変化による効用の変動が小さくなるためであると考えられる。割引率が $\delta = 0.0$ の場合、すなわち直前の行動によって規範の信奉者であ

るか否かが決定される場合の特徴は、信奉率 $b$ が0か1となるため規範遵守後の非遵守に対するペナルティが大きくなり、短期間に一貫した遵守者あるいは非遵守者の一定の利得のどちらかに落ち着くが、割引率 $\delta$ が大きくなるに従って、信奉率 $b$ の変動が小さいのでペナルティが小さくなり、行動を変えても1期ごとの利得の変動は小さく、一貫した遵守者あるいは非遵守者の一定の利得への遷移には時間を要する。

規範の信奉率に関するシミュレーションの結果を以下に要約する。過去の長期的行動を考慮した規範の信奉率を取入れた場合、規範の遵守率は上昇し、規範の存続が安定している。一方、過去の短期間の行動のみが影響する場合においては、規範の初期遵守率が高い場合であっても、規範が衰退する場合があります。規範が存続する場合でもその遵守率は不安定であるという結果を得た。これは、過去の短期間の行動のみが影響する場合には、エージェントは規範を遵守しないことで、一時的に高いペナルティを被るが、非遵守を続けることで、直ちに高い効用を得ることができる。よって嗜好パラメータの小さい評判を気にしないエージェントは非遵守を続けることで、高い効用が得やすくなる。場合によっては、このような

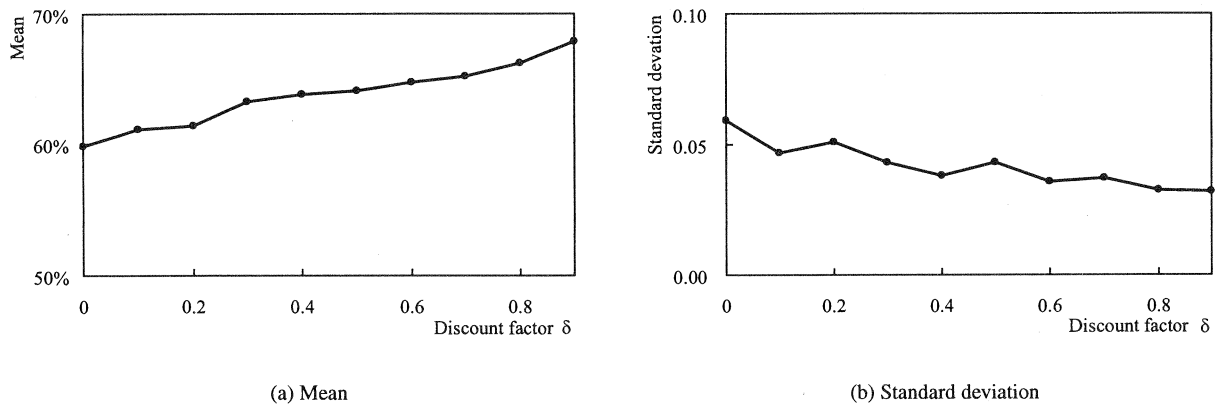


Figure 9: Mean and standard deviation of the maintenance rate of the social norm

エージェントが急激に増加し、社会全体の規範の遵守率を低下させ、一気に規範の衰退が生じたと考えられる。

次に数理モデルの結果と適応モデルのシミュレーション結果を比較する。エージェントが合理的であるとしている数理モデルでは、一時的なペナルティにより、規範を破ることを抑止できるが、エージェントが試行錯誤的な行動をするシミュレーションでは、短期的に大きなペナルティを被ったとしても、偶発的要因(エージェントの効用に従う確率的再生)によって規範を遵守しないエージェントが出現し、仮に規範の遵守率が高い水準であっても、そのようなエージェントが地滑り的に増加していけば、結果として規範が衰退してしまう可能性があるといえる。よって、エージェントの適応的行動のもとでは、エージェントが近視眼的に振舞えば、その度合いが高まるほど規範の消長に関する不確実性や多様性は高まるといえる。

#### 4.4 シミュレーション3: ペナルティ

シミュレーション3では、エージェントが規範を遵守しないときに被るペナルティに着目する。このペナルティには規範を信奉する場合のペナルティ $\bar{c}$ と信奉しない場合のペナルティ $\bar{g}$ の2種類あるが、数理モデルではどちらのペナルティの減少でも規範の遵守率の低下を招き、ペナルティの増加が規範の遵守率の上昇を引起こすと結論付けられている。ここでは、この結論をシミュレーションの結果が支持するかどうかを検証する。

本シミュレーションでは、1期前の行動のみがエージェントの信念に影響を与える割引率が $\delta = 0.0$ となる場合と、過去の長期間の行動がエージェントの信念に影響を与える割引率が $\delta = 0.9$ となる場合の2種類の試行を実施している。 $\delta = 0.0$ と $\delta = 0.9$ のそれぞれに対して、規範をまったく信奉しないエージェントに対するペナルティを $\bar{g} = 0.6$ に固定し、規範を完全に信奉するエージェントの

ペナルティを $\bar{c} = 0.60, 0.65, 0.70, 0.75$ に変動させる場合と、逆に $\bar{c} = 0.7$ に固定し、 $\bar{g} = 0.55, 0.60, 0.65, 0.70$ に変動させる場合の試行をそれぞれ100回実施する。その結果をFigure 10とFigure 12に示している。Figure 10では、横軸に28%から40%までの初期遵守率をとり、縦軸に100試行中規範が存続した回数を示している。Figure 12では、結果の変動が大きいので、横軸に0%から100%までの初期遵守率をとり、縦軸にはFigure 10と同様に、100試行中規範が存続した回数を示している。さらに、Figure 11とFigure 13では、規範が存続した場合の、社会全体での規範の遵守率を示している。

Figure 10からわかるように、 $\delta = 0.9$ の場合には、規範信奉者のペナルティ $\bar{c}$ の増加は、明らかに規範の存続回数を上昇させている。 $\delta = 0.0$ の場合には、わずかに同様の特徴が観測されるが、 $\bar{c} = 0.65, 0.70, 0.75$ の間では明確な差異は出ていない。Figure 11には、規範が存続した場合の社会全体での規範の遵守率が示されており、Figure 10と同様に、 $\delta = 0.9$ の場合により明白に $\bar{c}$ の増加が規範の遵守率を上昇させている。これは、規範を連続して遵守していたエージェントがある期において遵守しないという選択をとると、 $\delta = 0.0$ の場合には1期間においてのみペナルティ $\bar{c}$ の影響があるが、 $\delta = 0.9$ の場合はその後の数期間に渡って $\bar{c}$ に近いペナルティを受ける。したがって、 $\delta = 0.0$ におけるシミュレーションの場合、エージェントは短期的にしか大きなペナルティ $\bar{c}$ を被らないので、 $\bar{c}$ の増減が規範の存続回数や遵守率に大きな影響を与えなかったと考えられる。

Figure 12から明らかなように、 $\delta = 0.0$ および $\delta = 0.9$ のどちらの場合にも、規範非信奉者のペナルティ $\bar{g}$ の増加は規範の存続回数を上昇させている。 $\bar{g} = 0.70, 0.65, 0.60$ の場合、 $\delta = 0.0$ と $\delta = 0.9$ の差異は、ほとんどない。これは、ペナルティの差 $\bar{c} - \bar{g}$ の小さい場合には、割引率の影響は少ないためである。 $\bar{g} = 0.55$ の場合、 $\delta = 0.0$

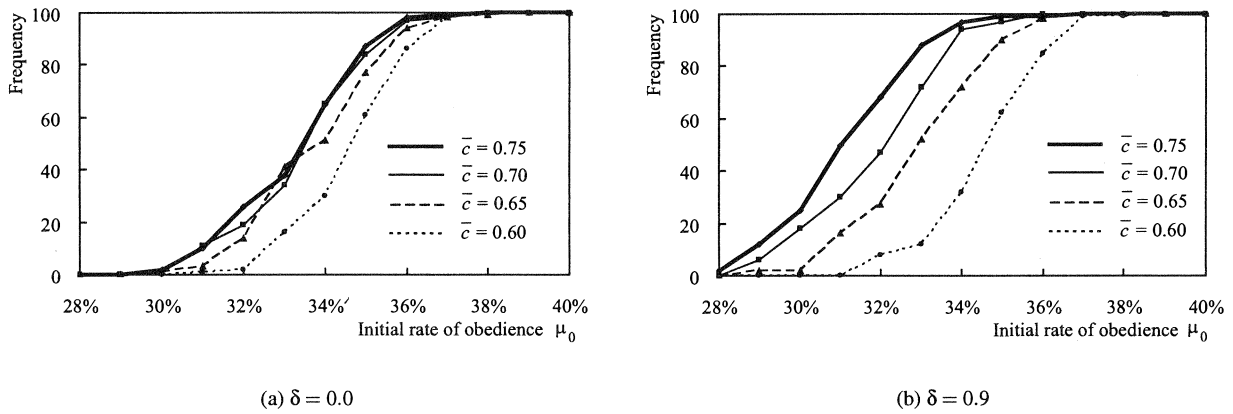


Figure 10: Frequency of maintenance of the social norm with respect to the penalties  $\bar{c}$

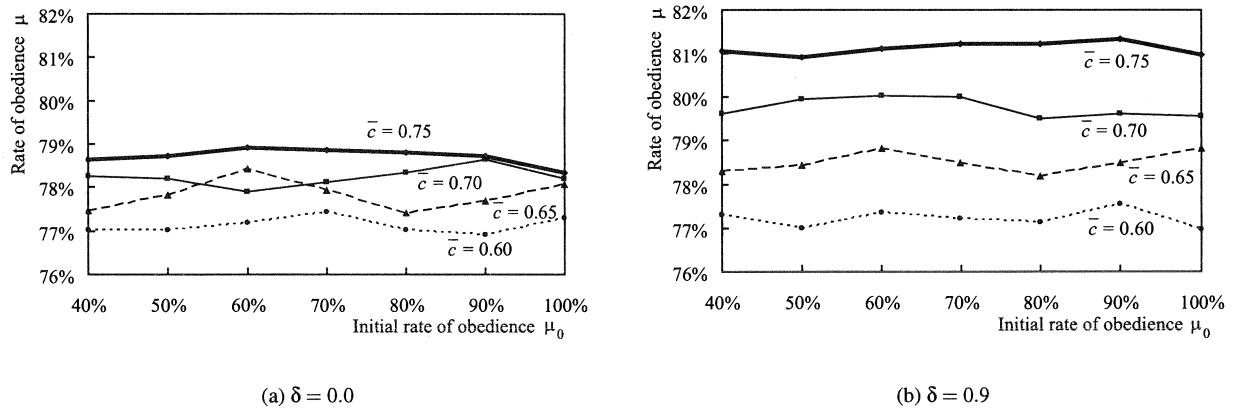


Figure 11: The rate of obedience with respect to the penalties  $\bar{c}$

の規範の存続回数が初期遵守率 60%以上でもかならずしも 100 回に到達していないことが観測できる。Figure 13 から、規範が存続した場合の社会全体での規範の遵守率は  $\bar{g}$  の増加によって規範の遵守率を上昇させており、 $\delta = 0.0$  と  $\delta = 0.9$  の差は  $\bar{g} = 0.55$  の場合のみ生じている。

規範の存続回数や遵守率には、 $\bar{c}$  の変動よりも  $\bar{g}$  の変動による影響の大きいことがわかるが、これを比較するために、初期遵守率  $\mu_0$  が 0% から 100% まで、10% 刻みで行った全試行 1100 回のうち、規範の存続した回数を Table 2 に示す。なお  $\bar{c} = 0.70$  と  $\bar{g} = 0.60$  が基準となるので、対応するデータを Table 2 の同じ列に示している。

Table 2 に示されるように、基準のパラメータである  $\bar{c} = 0.70$  と  $\bar{g} = 0.60$  の場合から、パラメータの値を 0.05 増減させた場合の差異をみると、 $\bar{c} = 0.75$  と  $\bar{c} = 0.65$  の差は  $\delta = 0.0$  および  $\delta = 0.9$  のそれぞれに対して、1 および 23 であるが、 $\bar{g} = 0.65$  と  $\bar{g} = 0.55$  の差はそれぞれ 327 および 213 で、明らかに規範を信奉しない者のペナルティ  $\bar{g}$  の増加は、規範を信奉する者のペナルティ  $\bar{c}$  の増加

Table 2: Fluctuations in frequency of maintenance of the social norm with respect to the penalties  $\bar{g}$  and  $\bar{c}$

| $\bar{c}$      | 0.75 | <b>0.70</b> | 0.65        | 0.6  |
|----------------|------|-------------|-------------|------|
| $\delta = 0.0$ | 702  | 701         | 701         | 700  |
| $\delta = 0.9$ | 725  | 718         | 702         | 700  |
| $\bar{g}$      | 0.70 | 0.65        | <b>0.60</b> | 0.55 |
| $\delta = 0.0$ | 900  | 800         | 701         | 473  |
| $\delta = 0.9$ | 893  | 801         | 718         | 588  |

よりも効果的に規範の遵守率を高めることがわかる。規範を信奉する者のペナルティ  $\bar{c}$  は、規範を遵守し続けることの動機を与える、すなわち規範を遵守していたエージェントが遵守しなくなる時だけに影響する。一方、規範を信奉しない者のペナルティ  $\bar{g}$  は、規範を遵守することの動機を与える。シミュレーションでのエージェントは試行錯誤的な行動をとるため、規範の遵守から非遵守へ行動を変化させやすいため、 $\bar{c}$  のパラメータの影響が比較的小さいと考えられ、 $\bar{c}$  の増減が規範の存続回数

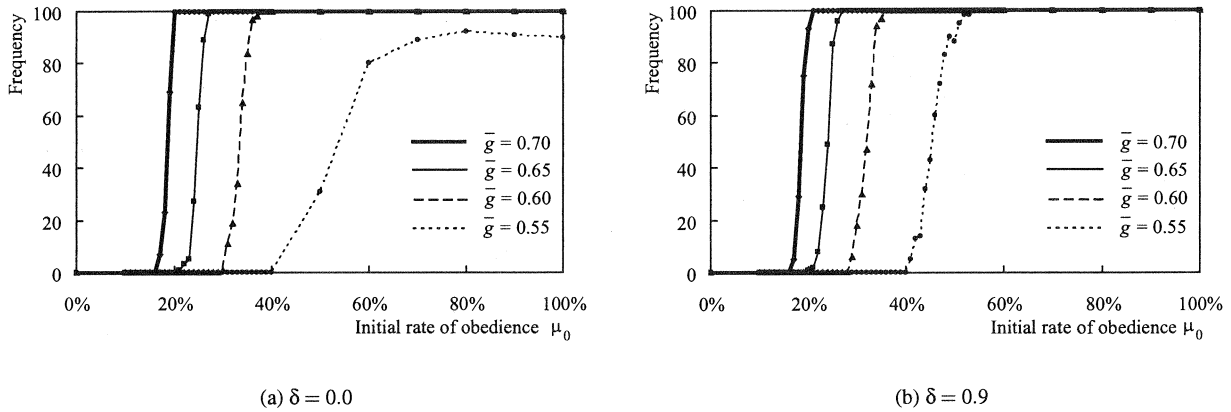


Figure 12: Frequency of maintenance of the social norm with respect to the penalties  $\bar{g}$

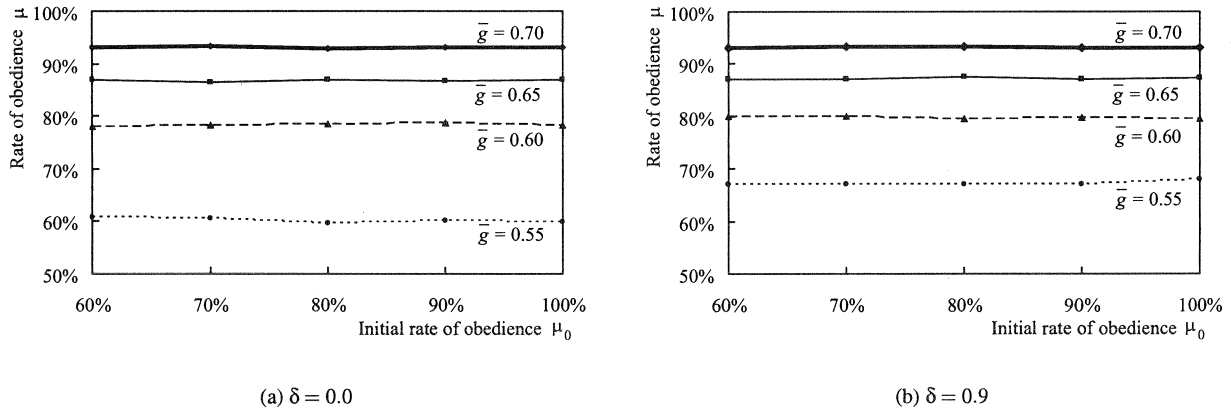


Figure 13: The rate of obedience with respect to the penalties  $\bar{g}$

や遵守率に大きな影響を与えなかったと考えられる。

#### 4.5 シミュレーション4：利得

シミュレーション4では、エージェントが規範を遵守する場合としない場合のそれぞれの利得  $d$  および  $w$  に着目する。数理モデルでは、規範を遵守する場合の利得  $d$  の増加は規範の遵守率の上昇を引起こし、規範を遵守しない場合の利得  $w$  の増加は遵守率の低下を招くと結論付けられている。ここでは、この結論をシミュレーションの結果が支持するかどうかを検証する。

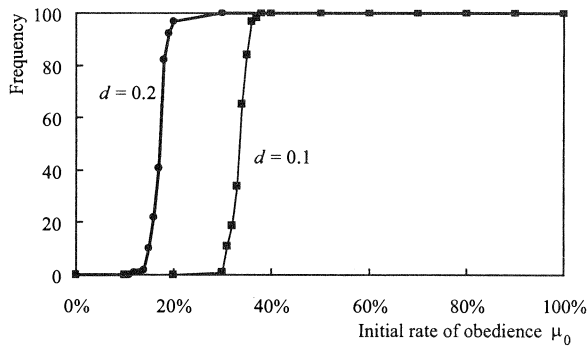
エージェントの効用  $U_i$  (6) において、割引率  $\delta$  は利得  $d$  および  $w$  に関連しないので、本シミュレーションでは、 $\delta = 0.0$  となる場合の試行を実施している。規範を遵守しない場合の利得を  $w = 1.0$  に固定し、規範を遵守する場合の利得を  $d = 0.2, 0.1, 0.0$  に変動させる場合と、逆に、規範を遵守する場合の利得を  $d = 0.1$  に固定し、 $w = 0.9, 1.0, 1.1$  に変動させる場合の試行をそれぞれ100回実施する。その結果を Figure 14 と Figure 15 に示し、横軸に初期遵守率をとり、縦軸に100試行中規範が

存続した回数を示したグラフ (a) と、規範が存続した場合の、社会全体での規範の遵守率 (b) を示している。なお、 $d = 0.0$  の場合と  $w = 1.1$  の場合は、全試行1100回のどの試行でも規範が存続しなかったため、図には示されていない。また、 $d$  を変動させた場合と  $w$  を変動させた場合とを比較するために、初期遵守率  $\mu_0$  が0%から100%まで、10%刻みで行った全試行1100回のうち、規範の存続した回数を Table 3 に示す。

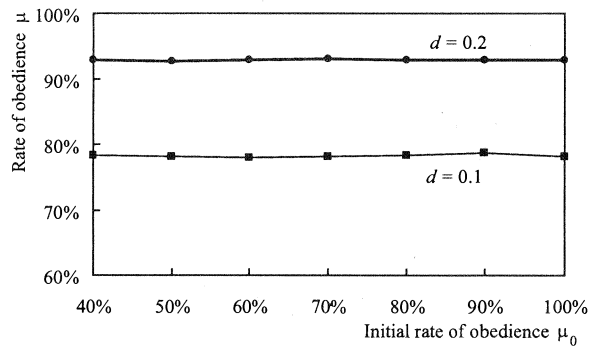
Table 3: Fluctuations in frequency of maintenance of the social norm with respect to the payoffs  $d$  and  $w$

|           |     |            |     |
|-----------|-----|------------|-----|
| $d$       | 0.2 | <b>0.1</b> | 0.0 |
| frequency | 897 | 701        | 0   |
| $w$       | 0.9 | <b>1.0</b> | 1.1 |
| frequency | 900 | 701        | 0   |

Figure 14 から明らかのように、規範を遵守した場合の利得  $d$  の増加は規範の存続回数を上昇させており、規範が存続する場合の社会全体の規範の遵守率も上昇して

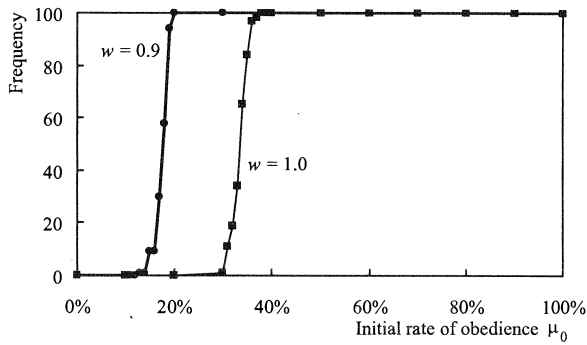


(a) Frequency

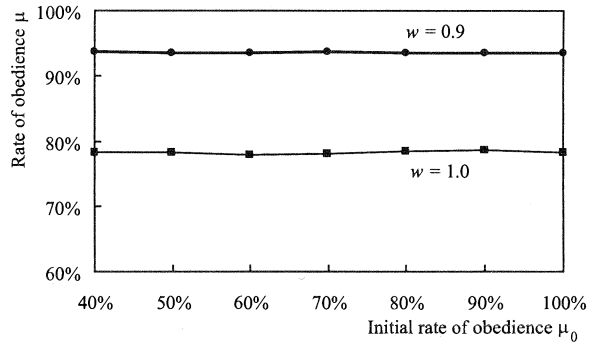


(b) Rate of obedience

Figure 14: Frequency of maintenance of the social norm with respect to the payoffs  $d$



(a) Frequency



(b) Rate of obedience

Figure 15: Frequency of maintenance of the social norm with respect to the payoffs  $w$

いることがわかる。Figure 15 からは逆に、規範を遵守しなかった場合の利得  $w$  の増加は規範の存続回数を減少させ、規範が存続する場合の社会全体の規範の遵守率も低下していることがわかる。これらの結果は数理モデルを支持している。Table 3 からも、 $d$  を変化させた試行と  $w$  を変化させた試行は非常に類似していることがわかり、結局、 $d$  と  $w$  の格差、すなわち規範を遵守しないことに対する金銭的なインセンティブの大きさが規範の消長に対する影響を決定する結果となった。すなわち  $w-d$  が大きい場合には、規範を遵守しないことに対する金銭的なインセンティブが強いことから、規範が衰退しやすくなり、 $w-d$  が小さい場合には、規範を遵守しないことに対する金銭的なインセンティブが弱いことから、規範が存続しやすくなったと考えられる。

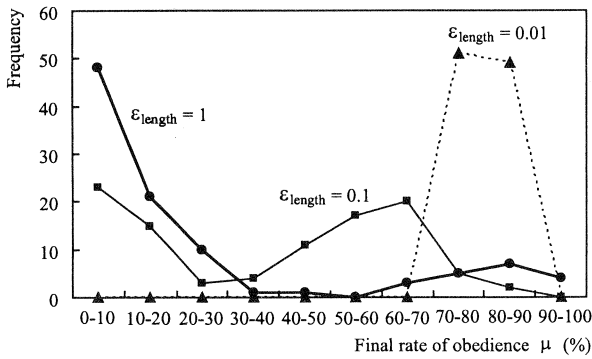
#### 4.6 シミュレーション 5 : エージェントの相互作用の範囲

われわれのシミュレーションモデルでは、エージェント間の相互作用を進化過程での遺伝的操作とみなし、そ

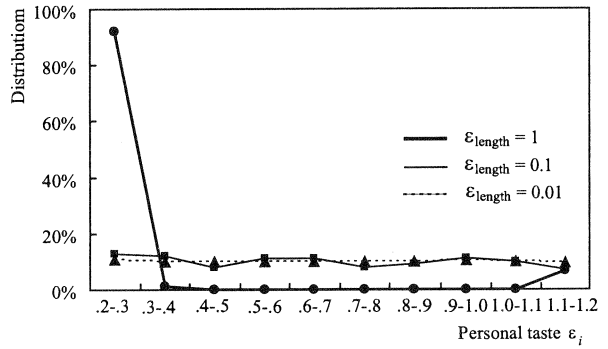
の範囲を嗜好パラメータによって限定させている。シミュレーション 5 では、エージェント間の相互作用の範囲を変動させ、これが規範の消長にどのような変化を及ぼすかについて調査する。

本シミュレーションでは、遺伝的アルゴリズムにおける遺伝的操作の適用を嗜好パラメータの類似したグループ内のみで行っている。このグループの数を  $M = 1, 10, 100$  に変動させ、初期遵守率を  $\mu_0 = 0.5$  とし、それぞれ 100 試行実施する。  $M = 1$  の場合、グループが 1 つだけであり、嗜好パラメータの分布の範囲は  $[0.2, 1.2]$  となる。シミュレーションの初期段階では、嗜好パラメータ  $\epsilon_i$  が一様に分布しているため、  $M = 10$  の場合、嗜好パラメータの領域  $[0.2, 1.2]$  が均等に 10 分割され、  $M = 100$  の場合、100 分割される。したがって、  $M = 1, 10, 100$  のそれぞれに対して、各グループで嗜好パラメータが分布する区間幅は  $\epsilon^{\text{length}} = 1.0, 0.1, 0.01$  となる。Figure 16 に、100 試行分の 2000 期間後の最終的な規範の遵守率の度数分布と嗜好パラメータの分布を示している。

グループの数を  $M = 100$  とし、初期の嗜好パラメータ



(a) The final rate of obedience



(b) The personal taste

Figure 16: The result of simulation 5

の区間幅を  $\epsilon^{\text{length}} = 0.01$  とした場合は、シミュレーション1で詳述したように、シミュレーションの初期遵守率を  $\mu_0 = 0.5$  としているので、2000 期間後の最終的な社会の規範遵守率は70%から90%の間に収束している。また、2000 期間後の嗜好パラメータの分布はグループ数を100に区分していることから、ほぼ一様に保たれていることがわかる。

グループの数を  $M = 10$  とし、初期の嗜好パラメータの区間幅を  $\epsilon^{\text{length}} = 0.1$  とした場合は、2000 期間後の最終的な社会の規範遵守率は0%から20%で0%の方向にピークのある頻度の高い領域と、40%から70%の間に分布し、70%の方にピークのある頻度の高い領域があり、前者では規範が衰退し、後者では規範が存続したと考えることができる。2000 期間後の嗜好パラメータの分布は、 $M = 100$ ,  $\epsilon^{\text{length}} = 0.01$  の場合に比べて、若干低い方向に偏っていることがわかる。100 試行中の約2/3程度の試行では、 $M = 100$ ,  $\epsilon^{\text{length}} = 0.01$  の場合と同様にシミュレーション期間の最後まで、嗜好パラメータが均一に分布し、その結果規範が存続した。残りの1/3の試行では、嗜好パラメータに多少偏りが生まれ、徐々に嗜好パラメータの小さいエージェントが多く再生された結果、規範が衰退していったと考えられる。

グループの数を  $M = 1$  とし、初期の嗜好パラメータの区間幅を  $\epsilon^{\text{length}} = 1$  とした場合は、2000 期間後の最終的な社会の規範遵守率は0%から20%で0%の方向にピークのある頻度の高い領域と、80%から100%の間に分布し、80%から90%の辺りにピークがある頻度の高い領域があり、前者では規範が衰退し、後者では規範が存続したと考えることができる。2000 期間後の嗜好パラメータの分布は、0.2から0.3に集まっているものと、1.1から1.2に集まっているものに分かれている。この場合、相互作用の範囲を社会全体としているため、嗜好パラメータ

タが高く、社会的な評判を尊重するようなエージェントは多くの場合淘汰され、結果として規範が衰退した試行が多かったと考えられる。しかし、逆に様な分布から、嗜好パラメータの高いエージェントが多くなるように進展していった試行が存在したことは興味深い。この場合、多くのエージェントの嗜好パラメータが高くなるので、社会全体の規範の遵守率も高い方にシフトしている。

要約すれば、相互作用の範囲が狭ければ、初期の社会全体の規範の遵守率により、規範が存続する場合と衰退する場合があります、その結果に不確実性は少ないといえる。逆に、相互作用の範囲が広いと、一般的に規範は衰退しやすくなるが、場合によっては規範の遵守率の高い社会ができることもあり、結果の不確実性が高いといえる。

## 5. おわりに

本研究では、Naylorの数理モデルをベースに、エージェントの適応的な行動と学習を考慮した人工適応型エージェントを用いたシミュレーションモデルを構築し、数理モデルの結果と比較すると同時に、過去の行動に基づく規範に対する信念のモデルを導入し、エージェント間の相互作用の範囲に着目したシミュレーションも実施した。その結果、不安定な均衡はエージェントの適応的な行動のもとでは消滅し、またたとえば遵守率が100%のように極端に高い水準の均衡も存続し得ないというシミュレーション結果を得たが、それ以外は数理モデルの結果を概ね支持する結果を得た。規範に対する信念を過去の長期間の行動に基づいて定義した場合、結果は不確実性が減少し、安定的な結果が得られた。また、相互作用の範囲に関するシミュレーションから、相互作用の範囲が広がれば、規範が衰退しやすく、不確実性が大きくなるという結果を得た。



## 参考文献

- 1) Akerlof, G.A., A theory of social custom, of which unemployment may be one consequence, *Quarterly Journal of Economics* **94**, 749–775, 1980.
- 2) Axelrod, R., An evolutionary approach to norms, *American Political Science Review* **80**, 1095–1111, 1986.
- 3) Axelrod, R., The dissemination of culture: a model with local convergence and global polarization, *Journal of conflict resolution* **41**, 203–226, 1997.
- 4) Barron, J.M., and Gjerde, K.P., Peer pressure in an agency relationship, *Journal of Labor Economics* **15**, 234–254, 1997.
- 5) Bowles, S. and Gintis, H., The evolution of strong reciprocity: cooperation in heterogeneous populations, *Theoretical Population Biology* **65**, 17–28, 2004.
- 6) Gächter, S. and Fehr, E., Collective action as a social exchange, *Journal of Economic Behavior & Organization* **39**, 341–369, 1999.
- 7) Holländer, H., A social exchange approach to voluntary cooperation, *American Economic Review* **80**, 1157–1167, 1990.
- 8) Huck, S., Kübler, D. and Weibull, J., Social norms and optimal incentives in firms, Working Paper 565, The Research Institute of Industrial Economics, 2001.
- 9) Kandel, E. and Lazear, E.P., Peer pressure and partnerships, *Journal of Political Economy* **100**, 801–817, 1992.
- 10) Kübler, D., On the regulation of social norms, *Journal of Law Economics and Organization* **17**, 449–476, 2001.
- 11) Naylor, R., Strikes, free riders, and social customs, *Quarterly Journal of Economics* **104**, 771–785, 1989.
- 12) Nyborg, K. and Rege, M., On social norms: the evolution of considerate smoking behavior, *Journal of Economic Behavior & Organization* **52**, 323–340, 2003.
- 13) Rege, M. and Telle, K., The impact of social approval and framing on cooperation in public good situations, *Journal of Public Economics* **88**, 1625–1644, 2004.

2006年 8月24日 原稿受付

2006年10月11日 原稿受理