数理解析研究所講究録 1409 巻 2005 年 224-233

拡張 Hogg-Huberman モデルの情報の不確かさが エージェントに及ぼす影響の分析

柴田淳子 *, 坂和正敏, 加藤浩介, 片桐英樹
広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻
*shibata@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

1 はじめに

近年，複雑化，多様化してきている現代社会においてしばしば見受けられる複雑系とよばれるシステムに対して，その分析手法として自律的に行動する主体を多数含むマルチエージェントシステムと呼ばれるボトムアップ的なアプローチが注目されている [1]．マルチエージェントシステムは，社会現象などの複雑な振る舞いを分析するために，対象となるシステムをコンピュータ上の仮想空間に再現し，その結果得られたデータを解析することで，実際の社会現象を詳細に解析するための手法であり，さまざまな分析に用いられている [2][3]．しかし，エージェントの合理的な行為（ミクロ行為）の結果として生じるシステムの振る舞い（マクロ行為）は創発的であるので予測が困難であり，マクロ行為を予測し，それら 2 つの行為をうまくコントロールするための方法論はまだ確立されていない．

一般に，社会現象の分析に用いられるマルチエージェントシステムは，人間を抽象化したエージェントによって構成されるため，エージェントは自己の目的を最適化する個人合理的な行為を選択する．実際の社会システムには古い情報や不必要な情報及び偽の情報が存在するので，エージェントが行動を選択するときに用いる情報には不確実性や時間遅れが含まれると考えられる．しかし，これらを取り扱った研究は少ない [4]．このような状況のもと，Hogg と Huberman は，計算生態学の見地からエージェントが不確かで時間遅れのある情報をもとに複数の資源の中から自己の目的を最も改善する資源を繰り返し選択して利用するようなエージェントモデルである Hogg-Huberman モデルを考案した [5][6]．

一方，人間は社会全体を含む何らかの集団に属するため，自己の目的だけではなく所属する集団全体の目的を最適化する集団合理的な行為を選択することが集団全体として望ましい場合がある．エージェントのこのような行動をパラメータによりコントロールすることが可能な状況が存在することが示されている [7]．しかし，このモデルでは情報の不確かさと時間遅れなどが考慮されていないため，捉えきれない現象が存在する．

そこで，本研究では情報の不確かさと時間遅れを考慮した Hogg-Huberman モデルを拡張し，各エージェントが自己の利益の最適化を目指す行為を選択する場合のみならず，集団全体の利益を最適にすることを目指す行為を選択する場合について考察し，システムに与える影響を調べる．

2 マルチエージェントシステム

2.1 マルチエージェントシステムの概要

エージェントとは，自律的な存在であり，ある目的を達成するために自らの価値基準に基づいて合目的な行動を行う主体である [7][8]．全体の振る舞いから個々の振る舞いを分析する従来のトップダウン的なシステム設計法と異なり，マルチエージェントシステムは，個々の構成要素に着目したボトムアップにシステムを設計する手法である．そのため，このシステムは，個々の構成要素が複雑であり，それらが合理的に振る舞うことによって形成されるシステム全体の振る舞いがさらに複雑であるようなシステム，つまり社会システムを分析する上で非常に有効である．

2.2 個人合理性と集団合理性

システムの構成要素であるエージェントは合理的であると仮定する．つまり，エージェントは自己の価値基準に基づいて選択可能な行為に選好順序を付け，それを定量的に表した効用関数を最適にする行動を選択する．あるエージェントと他のエージェントの間の相互作用が無視できるほど小さい場合，その効用関数は自己の行動にのみ依存するため，最適な行動を選択するのは比較的容易である．しかし，自己の効用関数が他のエージェントの行動に依存する場合，自己の行動だけでなく相互作用するエージェントの選択を考慮しながら行動の選択を行わなければならない．

システムを構成するエージェントの一部もしくは全体が集団や社会を形成するとき，それを構成するエージェントが自己の目的や利益の最適化を目標とすることを個人合理性，集団全体の目的や利益の最適化を目標とすることを集団合理性いう．功利主義の立場から，個人合理性は自らの効用を最適にすることであり，これを満たす集合行為によって得られる均衡解を競争解という．また，集団を構成するエージェント全体の効用の総和の最大化を目的とする集団合理性に基づく集団行為によって得られる均衡解を協調解という．また，この条件を満足するエージェントの行為を協調的行為という [7]．

個人合理性と集団合理性の条件が一致するのは完全な競争原理が働く場合であり，各個人の自己にとって最適な選択が集団にとっての最適な選択になっているので，個々のエージェントは自分自身のみを考慮すればよい．しかし，両方の条件が一致する場合は少なく，現実世界のほとんどの状況においてこれらの条件は一致しない．このような場合において，エージェントは他のエージェントや集団全体の利益を無視して自己の利益を得るか，もしくは集団の一員として自己の利益よりも集団の利益を優先させるかのどちらかを選択しなければならない．また，他のエージェントと相互依存しているマルチエージェントシステムを仮定しているため，この選択は他のエージェントの目的が自己の利益の最適化であるか，または集団の利益の最適化であるのかに影響される．

2.3 情報の不確実性と時間遅れ

人間は何らかの意思決定を行う際，それに関係する様々な情報を用いて判断を行う．効率的市場仮説などの従来の経済理論では,「全市場参加者が市場に関係する全ての情報を，迅速かつ的確に自分の意思決定の中に取り入れる」ことが仮定されている．

しかし，現実世界において，インターネットなどＩＴ産業の急速な発達に伴い，人間はたくさんの情報を利用することができるようになったが，全ての情報が正確とは限らないとともに，その中から人間が自分の意思決定に必要な情報のみを選択するのは非常に困難である．さらに，情報を用いて意思決定を行っている間も情報は変化している．そのため，意思決定を行う際に用いた情報は，意思決定を行った時点において，時間遅れを含んでいる．したがって，人間が意思決定の際に用いる情報には何らかの不確かさと時間遅れが存在すると仮定することが妥当である．

以上のことを考慮して，Hogg と Huberman は，次節で述べるような，意思決定の際に不確実性と時間遅れが含まれる情報を利用するエージェントによって構成されるマルチエージェントシステムを構築している．

3 2資源系 Hogg-Huberman モデルの概要

2つの資源（資源1，資源2）が存在し，エージェントが時間遅れや不確かさを含む情報を用いてどちらの資源を利用するかという意思決定を行うマルチエージェントシステム[5][6]について説明する．

時刻 t において，資源1を利用するエージェントの割合を $f_1(t)$ $(0 \leq f_1(t) \leq 1)$，資源2を利用するエージェントの割合を $f_2(t)$ $(= 1 - f_1(t))$ とする．各エージェントは，資源1もしくは資源2を利用することにより，その資源を利用するエージェントの割合に依存する利益 G_1, G_2 を得る．例えば，G_1 と G_2 は次の式のように与えられている．

$$G_1(f_1(t)) = 4 + 7f_1(t) - \frac{16}{3}\{f_1(t)\}^2 \tag{1}$$

$$G_2(f_2(t)) = 7 - 3f_2(t) = 4 + 3f_1(t) \tag{2}$$

$G_1(f_1(t))$ は上に凸の関数であり，資源1を利用するエージェントに関しては $f_1(t)$ の値が0から増加するにつれて利益が大きくなるが，$f_1(t)$ がある値以上になると $f_1(t)$ の値の増加に従い利益が減少するという性質をもつ．資源2は，利用するエージェント数が増加すればするほど利益が小さくなる性質を有する資源である．また，システム全体として得られる利益を表す指標として，以下の式で定義されるシステムの規模に依存しない量 $B(f_1(t), f_2(t))$ を採用する．

$$B(f_1(t), f_2(t)) = \sum_{r=1}^{2} f_r(t)G_r(f_r(t)) \tag{3}$$

時刻 t において，まず全エージェントのうち割合 α のエージェントが利用する資源の再評価を行い，次の時刻 $t+1$ において利用する資源をあらためて決定する．残りの割合 $(1-\alpha)$ のエージェントは，再評価を行わず次の時刻 $t+1$ でも時刻 t で利用した資源と同じ資源

を利用する．このとき，再評価を行ったエージェントは，確率 $\rho_1(t)$，$\rho_2(t)$ $(=1-\rho_1(t))$ で次の時刻 $t+1$ においてそれぞれ資源 1，資源 2 を選択する．

$$\rho_r(t) \;=\; \frac{1}{2}\left[1+erf\left(\frac{U_r(t-\tau)}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right] \tag{4}$$

$$U_r(t) \;=\; \begin{cases} G_1(f_1(t))-G_2(f_2(t)), & r=1 \\ G_2(f_2(t))-G_1(f_1(t)), & r=2 \end{cases} \tag{5}$$

ここで $erf(x)$ は誤差関数であり，次式のように定義される．

$$erf(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt \tag{6}$$

また，$U_r(t)$ は時刻 t で資源 r を利用するエージェントの効用であり，2 つの資源から得られる利益の差で定義されている．

このモデルは，時刻 t において再評価を行ったエージェントは，時刻 t における情報に基づいて個人合理的に次の時刻 $t+1$ の行動を決定する．具体的には時刻 t で，時間遅れと不確実性を含む情報に基づいて，より多くの利益を与える資源を選択する．情報には τ 時間の遅れがあり，エージェントは時刻 t において時刻 $t-\tau$ の情報 $G_r(f_r(t-\tau)), U_r(t-\tau), r=1,2$ に基づいて時刻 $t+1$ で利用する資源を決定するが，不確実性を考慮して，$U_r(t-\tau)$ に依存した確率 $\rho_r(t)$ で資源 r を選択する．また，σ は情報の不確かさの度合いを表わすパラメータであり，$0<\sigma\ll 1$ の場合に情報は正確で信頼できる一方，$\sigma\to+\infty$ の場合は不正確で全く信頼できない．

システムにおける全エージェントが上述のように振る舞うことにより，資源 r を利用するエージェントの割合 $f_r(t)$ の時間発展は次の式で記述される [9].

$$f_r(t+1)=f_r(t)+\alpha\{\rho_r(t-\tau)-f_r(t)\}, \qquad r=1,2 \tag{7}$$

ただし，このシステムでは $f_1(t)$ が得られれば $f_2(t)$ は $f_2(t)=1-f_1(t)$ により容易に求められるので，以下では $f_1(t)$ $(r=1)$ について考える．

4 Hogg-Huberman モデルにおける協調解

上述したように式 (7) の均衡解は各エージェントが自己の利益の最適化のみを目的としているため競争解である．また，利益関数が式 (1),(2) により与えられる Hogg-Huberman モデルにおいては，エージェントの目的を個人の利益の最適化から集団の利益の最適化に変化させた場合でも均衡解は変化しない．すなわち，システムにおける競争解と協調解，個人合理性の条件と集団合理性の条件が一致している．しかし，このような理想的な状況が生じることは少なく，ほとんどの場合において競争解と協調解は一致しない．すなわち，個々が最善となる行為を選択した場合においても，システム全体として望ましくない結果が生じるような状況も数多く存在する．

そこで，本論文では，各エージェントは集団の一員であることを認識し，自己の目的だけでなく集団の目的を考慮することにより，自己の目的を最適化するという個人レベルと

集団の目的を最適化するという集団レベルの2つの異なる観点から資源選択を行うものとする．それにより，各エージェントは自己の行為が他のエージェントに与える影響を考慮しながら，これら2つの目的の調和を図ることになる．文献[7]では，他のエージェントに与える影響を自己の価値体系に内在化させることは，社会性に基づく行為，または思いやりに基づく行為として定義されている．このような行為を選択することにより，個々のエージェントが個人合理性に基づいた行為を選択した場合でも，合理性の罠を回避することができ，その結果均衡する状態は全体にとって最適である．

Hogg-Huberman モデルにおいて，エージェントの資源の選択に対して個人合理性だけでなく集団合理性も考慮するために，式(5)における資源1を利用するエージェントの効用 $U_1(t)$ を以下の式のように変更する．

$$\begin{aligned} U_1(t) &= G_1(f_1(t)) - G_2(f_2(t)) \\ &\quad + \lambda z_1(f_1(t), f_2(t)) \end{aligned} \tag{8}$$

ただし，λ はエージェントの思いやり係数であり，$0 \le \lambda \le 1$ である．$\lambda = 0$ の場合，上式は式(5)に一致し，このときの均衡解は競争解となる．$z_1(f_1(t), f_2(t))$ は資源1を利用するエージェントがもつ思いやりの項であり，以下の式によって与える．

$$\begin{aligned} z_1(f_1(t), f_2(t)) &= \sum_{r=1}^{2} \frac{dG_r(f_r(t))}{df_1(t)} f_r(t) \\ &= \frac{dG_1(f_1(t))}{df_1(t)} f_1(t) + \frac{dG_2(f_2(t))}{df_1(t)} f_2(t) \end{aligned} \tag{9}$$

これにより，資源1を利用しているエージェントは次の時刻における集団全体の利益の改善を目指して，式(9)の第1項により資源1を利用しているエージェントに対して思いやりをもち，第2項により資源2を利用しているエージェントに対して思いやりをもつ．また，資源1を利用するエージェントが思いやりを考慮することにより，式(12)および $\rho_2(t)$，$U_2(t)$ が変化するため，資源2を利用するエージェントも同様に思いやりを考慮することになる．

また，Hogg-Huberman モデルは2つの資源から得られる利益が等しくなるところ，つまり $U_r(t) = 0$ の値に均衡する．ここで $\lambda = 1$ の場合，均衡解は以下の式(14)から得られ，これは式(15)の条件を満たすことから分かるように集団合理性を満たす協調解となっている．

$$G_1(f_1) - G_2(1 - f_1) + z_1(f_1, 1 - f_1) = 0 \tag{10}$$

$$\frac{dB(f_1, 1 - f_1)}{df_1} = 0 \tag{11}$$

ここまでのシステムにおいて，システムを構成するエージェントは同じ資源評価式を用いている，つまり一様であった．本研究では，Hogg と Humberman と同じように，エージェントを複数のタイプに分割し，それらによって構成されるマルチエージェントシス

テムについて計算機実験を行う．具体的に，思いやりをもつエージェントともたないエージェントの2種類のタイプが存在するシステムを仮定する．時刻tにおいて資源rを利用するタイプs ($s=1,\ldots,S$)（本研究においては$S=2$である）のエージェントの割合を$f_{rs}(t)$とする．また，タイプsのエージェントの割合を$f_s^{type}(t)$，資源rを利用するエージェントの割合を$f_r^{res}(t)$とし，それぞれ式(16),(17)で定義する．ここで，$f_r^{res}(t)$は3.1節で説明した$f_r(t)$に一致する．

$$f_r^{res}(t) = \sum_{s=1}^{S} f_{rs}(t) \tag{12}$$

$$f_s^{type}(t) = \sum_{r=1}^{2} f_{rs}(t) \tag{13}$$

ただし，上式は常に以下の条件を満たす．

$$\sum_{r=1}^{2} f_r^{res}(t) = \sum_{s=1}^{S} f_s^{type}(t) = 1 \tag{14}$$

5 計算機実験

本研究では，競争解（$f_1^{comp}=0.6666$）と協調解（$f_1^{coop}=0.9249$）が一致しないような2つの利益関数をもつ場合についてシミュレーションを行う．

$$G_1(f_1(t)) = 3+6f_1(t)-3\{f_1(t)\}^2 \tag{15}$$

$$G_2(f_2(t)) = 7-4f_2(t) = 3+4f_1(t) \tag{16}$$

まず，タイプ1として個人合理性に基づいて行動する思いやり（バイアス）をもたないエージェント($\lambda=0.0$)とタイプ2として他のエージェントに対する思いやり（バイアス）をもつエージェント($\lambda=1.0$)の2つのタイプのエージェントが存在するHogg-Hubermanモデルについてシミュレーションを行った．

本実験では，ほとんどのエージェントが資源の再評価を行い($\alpha=0.85$)，1時刻前の情報(時間遅れ$\tau=1$)を用いて繰り返し資源選択を行う状況となるようなパラメータを設定した．また，初期時刻において資源1と資源2を利用するエージェントの割合は同じ($f_1^{res}(0)=0.5$)であると仮定した．最初に，思いやり（バイアス）の効果を見るために，タイプ1の個人合理性に基づいて行動するエージェントのみが存在する場合とタイプ2の他のエージェントに対して思いやりをもって行動するエージェントのみが存在する場合についてシミュレーションを行い，エージェントが比較的信頼できる情報を用いて資源評価を行う場合($\sigma=0.25$)の資源1を利用するエージェントの割合$f_1^{res}(t)$の時間変化を図1に示す．図1において横軸は時刻を表し，図中の2本の点線は競争解の理論値$f_1^{comp}=0.6666$と協調解の理論値$f_1^{coop}=0.9249$を表している．

図1から分かるように，左の図に示されている均衡解が競争解であるタイプ1のエージェントのみで構成されるシステムより右の図に示されている均衡解が協調解であるタイプ2のエージェントのみによって構成されるシステムにおける振動の方がピーク値が高いが，振幅も大きくなっている．ピーク値が高いのは，タイプ2のみのシステムの均衡解f_1^{coop}

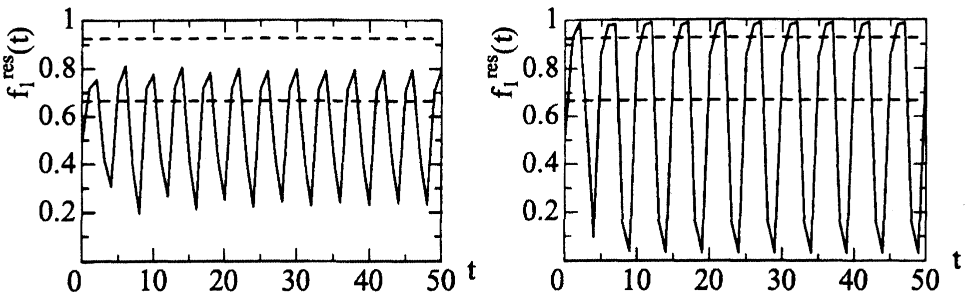

図 1: $\sigma = 0.25$ におけるタイプ1とタイプ2のエージェントの割合が左から 1:0, 0:1 のシステムにおける $f_1(t)$ の時間変化

がタイプ1のみのシステムの均衡解 f_1^{comp} より大きいためであると考えられる．また，タイプ2のみのシステムの方が振幅が大きくなるのは，例えば，τ 時刻前に資源2より資源1から得られる利益が多かった場合，個人合理性に基づいて行動するタイプ1のエージェントは，次の時刻 $t+1$ において資源1を選択する確率が高くなる．このとき，他のエージェントに対する思いやりをもつタイプ2に対しても，資源2より資源1の選択が好ましい状況となるが $U_1(t)$ に $\lambda z_1(t)$ が付加されているため資源1の選択確率がより高くなる．逆の場合も同様であるので，タイプ2の方が状況により敏感に反応し，振れが大きくなりやすいためである．

また，これらの2つの場合における式(3)で定義される全体の利益 $B(f_1(t), f_2(t))$ の時間変化を図2に示す．500期間におけるシステム全体の利益の合計（総利益）$\sum_{t=0}^{499} B(f_1(t), f_2(t))$ を図中の右下に示した．

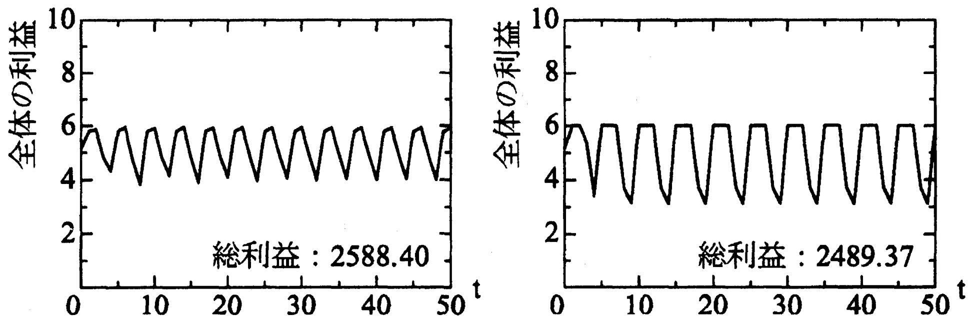

図 2: 左からタイプ1とタイプ2のエージェントの割合が 1:0, 0:1 のシステムにおける $B(f_1(t), f_2(t))$ の時系列

ここで，図2の左の図の均衡解は競争解であり，右の図の均衡解は協調解である．競争解の理論値が $f_1^{comp} = 0.6666$，協調解の理論値が $f_1^{coop} = 0.9249$ であることから，図2の左の図のような均衡解が競争解であるシステムより図2の右の図のような協調解であるシステムの方がシステム全体の利益は大きくなると予想される．しかし，本実験のようにエージェントの利用する情報が比較的信用できる状況においては，図2のようにタイプ2のエージェントによって構成されるシステム全体の利益の合計はタイプ1のエージェントのみのシステム全体の利益の合計に比べて小さくなる場合がある．これは，均衡解が協

調解であるタイプ2のエージェントで構成されるシステムの振る舞いが，均衡解が競争解であるタイプ1のエージェントで構成されるシステムの振る舞いと比べて，振幅が大きくなっているためである．

次に，これらの2つのタイプのエージェントを同時に含むモデルについて実験を行う．このモデルにおいては，システム内に資源評価のタイプが異なるエージェントが複数存在する，つまり，タイプによって周期や位相の異なる振動が混合することにより，単一のタイプのエージェントで構成されるシステムの場合とは異なる振動が生じ，システム全体の利益が大きくなる可能性がある．本実験では，タイプ1のエージェントとタイプ2のエージェントが1:1の割合で存在するシステムについてシミュレーションを行い，資源1を利用する各タイプのエージェントの割合 $f_{1s}(t)$ と資源1を利用するエージェントの割合 $f_1^{res}(t)$，システム全体の利益 $B(f_1(t), f_2(t))$ の時間変化を図3に示す．ただし，●は資源1を利用するタイプ1のエージェントの割合 $f_{11}(t)$，○はタイプ2のエージェントの割合 $f_{12}(t)$，実線は資源1を利用するエージェントの割合 $f_1^{res}(t) = f_{11}(t) + f_{12}(t)$ を表している．

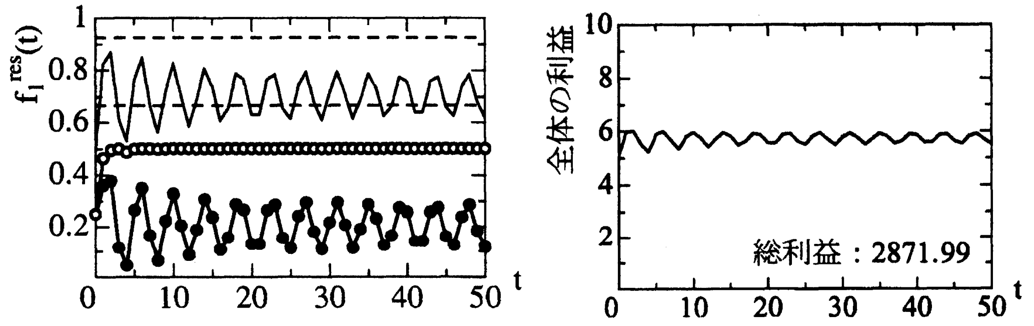

図3: タイプ1とタイプ2のエージェントの割合が1:1のシステムにおける $f_{1s}(t)$ と $f_1^{res}(t)$，全体の利益 $B(f_1(t), f_2(t))$ の時系列

図3の左図から，資源1を利用するタイプ1のエージェントの割合 $f_{11}(t)$ は，小さく振動し続けている．一方，資源1を利用するタイプ2のエージェントの割合 $f_{12}(t)$ が上限値0.5に早期に収束している．つまり，ある時刻以降，タイプ2の全てのエージェントが資源1を利用していることが分かる．これは，両タイプが存在するシステムでは，単一タイプの場合とは異なり，他のタイプとの相互作用が生じるためである．すなわち，タイプ2のエージェントは協調解 $f_1^{coop} = 0.9249$ を目指して資源1だけを利用する一方，タイプ1のエージェントは競争解 $f_1^{comp} = 0.6666$ を目指して行動するが，タイプ2のエージェントが全て資源1を利用する（$f_{12}(t) = 0.5$）ため，資源1を利用するタイプ1のエージェントの割合 $f_{11}(t)$ の振動は図1の左の図に比べて小さくなっていると考えられる．このように，単一タイプのシステムでは激しく振動していた各タイプの振動が異なるタイプとの混合により抑えられ，その結果，資源1を利用するエージェントの割合 $f_1^{res}(t)$ の振動が抑えられている．また，図3の右図の数字から分かるように，システム内にタイプ1とタイプ2のエージェントが1:1の割合で存在する場合におけるシステム全体の利益の合計が図4の2つの場合に比べ，大きくなっている．これは，図2の2つの場合に比べて，資源1を利用するエージェントの振動の幅が小さく抑えられたためにシステム全体の利益の振動も小さくなったためである．また，タイプ2のエージェントがシステム内に存在することで均

衡解が個人合理性を満たす競争解からシステム全体の利益を最大にするような協調解の方向にシフトしたためであるとも考えられる.

これまでに，単一タイプのエージェントが存在するシステムより，2種類のタイプのエージェントが1:1の割合で存在するシステムの方が総利益が大きくなることが分かった．このことより，タイプ1とタイプ2のエージェントの割合を変化させることによって，1:1の場合より更に大きな総利益が得られる割合が存在する可能性があると考えられる．そこで，すべてのエージェントが資源の再評価を行う $(\alpha = 1.00)$ 場合において，情報の不確かさのパラメータ σ のいくつかの値に対して，タイプ2のエージェントの割合を0から1まで変化させた場合のシステム全体の利益の500期間の合計の変化を図4に示す.

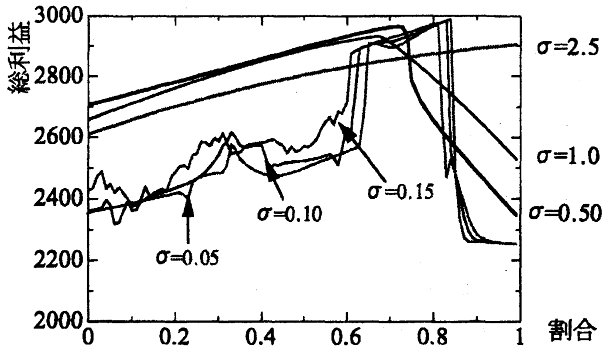

図 4: タイプ2のエージェントの割合に対する総利益の変化

図4から，エージェントが資源を再評価するときに用いる情報が比較的正確である場合は，総利益がタイプ2のエージェントの割合に敏感に反応し，総利益の最大値と最小値の差が大きくなっていることが分かる．さらに，情報が不確かになるにつれて，総利益はある値を境に単峰的になり，さらに不確かになると単調増加になることが分かる．このことから，パラメータ σ のそれぞれの値に対して，総利益が最大となるようなタイプ2のエージェントの割合が存在することが分かる．また，σ が大きくなる（情報の不確かさが増大する）につれて，総利益が最大となるタイプ2のエージェントの割合が小さくなるとともに総利益の最大値も小さくなっている．これは，σ が小さい場合には，タイプ2のエージェントの割合をある程度大きくして積極的に思いやりを導入することにより総利益の最大値を大きくできる一方，σ が大きい場合には，情報の不確かさが増大して，思いやりが総利益に悪影響を与える場合があるために，総利益の最大値およびそのときのタイプ2のエージェントの割合は小さくなるためである.

6 おわりに

本研究では，情報の不確かさと時間遅れを考慮したマルチエージェントシステムのモデルの1つであるHogg-Hubermanモデルに焦点をあて，個人の利益の最大化を図る個人合理性に基づいて行動するエージェントのみの場合の競争的な均衡解に対して，システム全体の利益の最大化を目指す集団合理性に基づいて行動するエージェントを導入することによる協調的な均衡解の導出について考察した．また，均衡解が実現される場合，協調的な

エージェントによるシステム全体の利益は競争的なエージェントによるものよりも大きくなるが，系が不安定になり均衡解が実現されない場合は，システム全体の利益が逆に小さくなりうることが分かった．さらに，これら2つのタイプのエージェントを含むモデルについて考察し，適切な割合で2つのタイプが混合されれば，振動が抑えられるとともにシステム全体の総利益も改善されることが分かった．

参考文献

[1] 伊藤孝行，新谷虎松, マルチエージェントシステムのための実装技術とその応用, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 4, pp. 469–475, 2001.

[2] 森下信, 交通流・人流のマルチエージェントシミュレーション, システム/制御/情報, Vol. 6, No. 9, pp. 532–538, 2002.

[3] 和泉潔, 人工市場の作り方, システム/制御/情報, Vol. 46, No. 9, pp. 547–554, 2002.

[4] 山影進, 服部正太, コンピュータのなかの人工社会, 共立出版, 2002.

[5] B. A. Huberman and T. Hogg, *The Ecology of Computation*, ed. B. A. Huberman, North-Holland, Amsterdam, 1988.

[6] J. O. Kephart, T. Hogg and B. A. Huberman, Dynamics of computational ecosystems, *Physical Review A* Vol. 40, No. 1, pp. 404–421, 1989.

[7] 生天目章, マルチエージェントと複雑系, 森北出版, 1998.

[8] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲, マルチエージェントシステムの基礎と応用, コロナ社, 2002.

[9] 潮俊光, 本中伸嘉, 非線形ダイナミクスによる創発的現象－離散時間 Hogg-Huberman モデルの場合－, SICE'95, 883–884, 1995.