

Minority game におけるエージェントの社会的行動に関する一考察

栗原 聡[†] 福田 健介[†] 廣津登志夫[†] 明石 修^{††} 佐藤 進也^{†††}
菅原 俊治[†]

[†] NTT 未来ねっと研究所
〒 180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

E-mail: †{kurihara,fukuda,hirotsu,sugawara}@t.onlab.ntt.co.jp, ††akashi@core.ntt.co.jp,
†††sato@ingrid.org

あらまし 市場における競合現象の解析に利用される Minority game は、これまでエージェント全体としてのマクロな挙動に対して焦点が当てられてきた。我々はエージェントの個々の挙動に焦点を当て、Minority game から汎用性のあるエージェントの協調方式を抽出することを試みる。

キーワード Minority game, マルチエージェント, 市場競合モデル, 分散協調

Behavior of agents in Minority game

Satoshi KURIHARA[†], Kensuke FUKUDA[†], Toshio HIROTSU[†], Osamu AKASHI^{††}, Shihya SATO^{†††}, and Toshiharu SUGAWARA[†]

[†] NTT Network Innovation Labs.
3-9-11, Midori-cho, Musashino-shi, TOKYO 180-8585 JAPAN

E-mail: †{kurihara,fukuda,hirotsu,sugawara}@t.onlab.ntt.co.jp, ††akashi@core.ntt.co.jp,
†††sato@ingrid.org

Abstract Minority game, which is the simulation program to analyze the competitive phenomena of the market economy, has been studying at macroscopic behaviors of agents. So, in our study, we will focus on the behaviors of each agent, and try to acquire a wide use coordination methodology of agents from this game.

Key words Minority game, multi agent, market competitive model, coordination

1. はじめに

市場経済など、多数の自律行動主体で構成される競合モデルを解析するためのシミュレーションプログラムである Minority game [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] は、提案されてほぼ4年が過ぎ、これまでいろいろな角度から研究されてきているものの、そのほとんどがゲーム全体としての挙動に着目するものであり、ゲームを構成する個々の要素(以下エージェントと呼ぶ)の挙動に着目した研究例はまだ報告される段階には至っていない。これはこの研究が主に経済物理を専門とする物理学研究者によって、競合モデル全体を一つの自律行動主体と見立て、その行動を解析しようという姿勢で研究が進められてきたことが主な理由である。

このゲームでは、複数のエージェントがローカルな情報のみを用いて自らの利得獲得を目指して行動するのであるが、エージェントが利用できる情報がある範囲に制約すると、エージェント全体として見た場合においても非常に効率的な行動が発生する。我々の目的は、この原因を解明し、新しいマルチエージェントの協調動作メカニズムを獲得することである。このような背景から、我々は従来研究とは異なり、ゲームを構成する個々のエージェントの挙動に着目し、エージェント全体としての効率的挙動が個々のエージェントのどのような挙動から発生するのかを調査した。その結果、互いに類似する行動選択パターンを有するエージェント集合と、それらと逆の行動パターンを有するエージェント集合が適度に存在することが、エージェント全体としての効率的行動を発生させる大きな要因となることを期待させる実験結果を得た。

2. Minority game

まず、Minority game のルールと、どのような動作結果が得られるのかを説明する。ルールは以下の通りである。 n 個のエージェントが存在し、エージェントは自分の意思で2つのグループ(0と1、または Buy と Sell など)のうちどちらかを選択することができる自律行動主体である。一回のゲームにおいて全エージェントがどちらかのグループを選択し、少数グループとなった方が勝ちとなる。この時、より多くの少数グループとなった方が高い得点を得られるものとする。つまり、仮に201体のエージェントが参加するものとする、

100対101となった時の100体のエージェントが最も高い得点を得ることができる。エージェントがどちらのグループを選択するかに関しては、エージェントの選択行為は自らが保有する戦略テーブルに基づいて行う。戦略テーブルは図1のようなものであり、過去の勝ちグループの履歴(m とする)と、過去の勝ちグループ履歴に応じて、今回どち

	m			↓ 次の手
0	0	0	0	0
0	0	1	1	
0	1	0	1	
0	1	1	0	
1	0	0	0	
1	0	1	1	
1	1	0	0	
1	1	1	1	

図1 戦略テーブル

らのグループを選択するかが予め書かれている。図1は過去3回の履歴を元に次の選択グループを決定する戦略テーブルの例である。すると、その戦略テーブルは 2^m 個の{履歴, 次の手}のエントリから構成されることになる(例は $m = 3$ なので8個のエントリから構成される)。各エージェントはゲームを開始する前に s 個の戦略テーブルを戦略テーブルプールからランダムに選択することができる(エージェントすべて同数を保有する)。戦略テーブルプールにはすべての組み合わせ分の戦略テーブル、つまり 2^{m^2} 個の戦略テーブルがそれぞれエージェント数だけ置かれている。一度選択した戦略テーブルは以降変更することはできない。そして、各エージェントは s 個の戦略テーブルを次のように利用する。初回はランダムに一つの戦略テーブルを選択し、もしその時のゲームで勝つと、その戦略テーブルに1点が与えられ、負ければ1点減点される。2回目のゲームからは常に最も得点の高い戦略テーブルが選択される。このルールに従って予め設定した回数だけゲームを繰り返し、最終的にエージェント全体としてどれだけの得点を獲得したか、そして各エージェントがどれだけ勝てたかがゲームの結果となる。

3. ゲームの特徴

実際にゲームプログラムを作成しエージェント

の挙動を検証した。まずは従来研究でも検証されているエージェント全体の挙動について我々も検証を行った。以下、図2から図14においてエージェントが選択するグループは「0」と「1」を用意し、ゲームで使用したエージェントは201体である。

まず、図2は勝負に関わらずグループ「0」を選択したエージェント数の標準偏差を示したものである。エージェントが保有する戦略テーブル数 s を $\{2, 3, 5, 10, 32, 64\}$ とした時の各 s につき、戦略テーブルの履歴の深さ m を $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}$ とした時の各設定ごとに次に述べる回数だけゲームを行った。一組の $\{s, m\}$ の設定につき10000回のゲームを行って1回の試行とし、これを10セット試行した。また、結果は図2と類似しているが図3は実際に勝組となったエージェント数の標準偏差を、そして、図4は同じく勝組となったエージェント数を表示したものである(注1)。

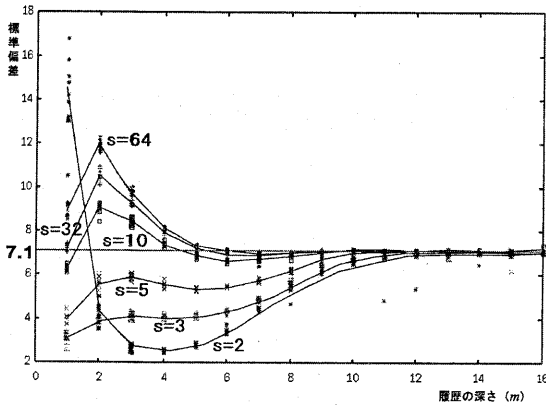


図2 グループ「0」を選択したエージェントの標準偏差

図2、図3共に興味深い結果が得られている。それぞれのグラフにおいて水平線はそれぞれ全エージェントがランダムにグループを選択した時の標準偏差を示しているのであるが、 m が3, 4, 5を中心としてランダム時よりも小さい標準偏差となつ

(注1)：図2と図3は結果は類似するものの重要な違いがある。なぜなら、図2はエージェントの挙動の軌跡を表示したものであるのに対し、図3はゲームの結果を表示したものである。ゲームの特徴や性質を調べるためにはまず、図3を検証する必要があるが、そのような特徴や性質の原因を調査するためにはエージェントの行動の軌跡である図2を検証する必要がある。

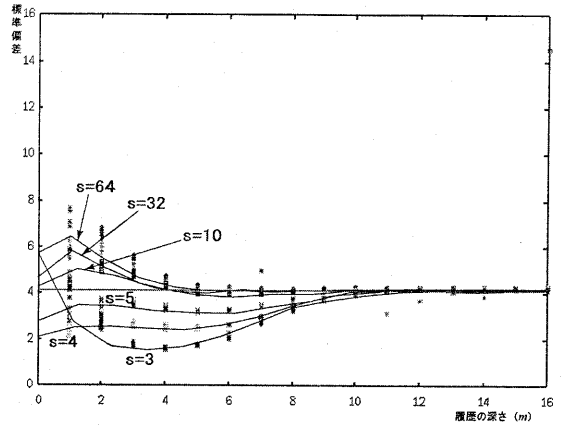


図3 勝ったエージェント数の標準偏差

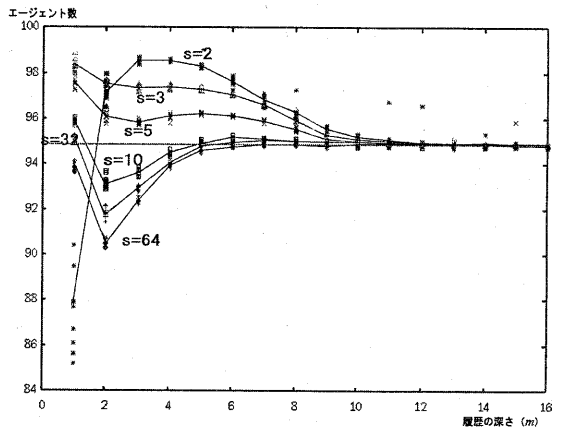


図4 勝ったエージェント数の平均

ている。これは意図的に100:101に近い勝組が生成された、つまりエージェント間において何らかの協調行為が行われたことを示すものである。しかし、個々のエージェントは他のエージェントの挙動を知ることはできず、過去の勝グループ履歴が分かるだけである。ただし、勝グループの履歴とはエージェント全体の挙動の結果を反映するものであるから、間接的にエージェント間の挙動の間には協調もしくは競合関係が存在していると考えられる(注2)。特徴的なのは、より過去の履歴に基づいて行動した方が成績がよいと推測されるのとは異なり、過去3回程度の履歴を利用した時の方が成績がよく、過去10回以上の履歴を利用した場合はランダムに行動した場合と同等の成績しか得られていないことである。まさに「状況

(注2)：stigmergyであると言える。

が複雑な場合はあまり過去に捕らわれず、適度とその場その場の状況で判断した方がよい」という結果が得られる。ただし、標準偏差が小さいことが、本当に意図的に 100:101 に近い勝組が生成されているのかを確認するために、実際に勝組となったエージェント数をプロットしたのが図??である。その結果、標準偏差が小さい時には勝組となったエージェント数は 100 対近くとなっており、確かに標準偏差が小さい時には意図的に 100:101 に近い勝組が生成されていることを確認することができる。

個々のエージェントはローカルな情報のみで行動するにもかかわらず、全体として秩序ある効率的な挙動が発生するしくみが市場経済モデルにおける株価の変動と合致し、しかも Minority game 自体ルールが簡潔であることが経済物理の分野で盛んに研究が行われている要因である。しかし、これら従来研究ではエージェント全体としての挙動の解析が中心であり、この観点においてエージェントの動作ルールを拡張するなどの研究例も見られるが、やはりエージェント全体の挙動を中心として解析を行っている。

4. エージェントの挙動

我々の目的は個々のエージェントの挙動に着目し、図 2 に示す結果が得られる原因を明らかにすることである。理想的には本ゲームから汎用性のあるマルチエージェント協調メカニズムを獲得することが目的である。

4.1 組織的行動の可能性

まず、標準偏差が最小の時とランダムの際の個々のエージェントの挙動を比較することから解析を開始した。図 5、図 6 はそれぞれ $m = 3$ 、 $m = 9$ での 1 セット 10000 回のゲームの各回の勝負において、勝ちから負けもしくは負けから勝ちに転じたエージェント数をプロットしたものである。その結果、ランダムな挙動に近い $m = 9$ の場合は、常に 100 体近いエージェントにおいて勝ち負けが変化している、つまり 201 体のおよそ半分のエージェントが連勝もしくは連敗していることがわかった。これに対し、標準偏差が小さい $m = 3$ では、すべてのエージェントが連勝もしくは連敗する現象(グラフにおけるエージェント数が 0 近辺)と、その反対で全てのエージェントにおいて同時に勝ち負けが変化する現象(連勝もしくは連敗するエージェントがほとんど現れない)が見受けられ、

明らかにランダムな挙動とは異なる組織的な行動の存在が推測できる。

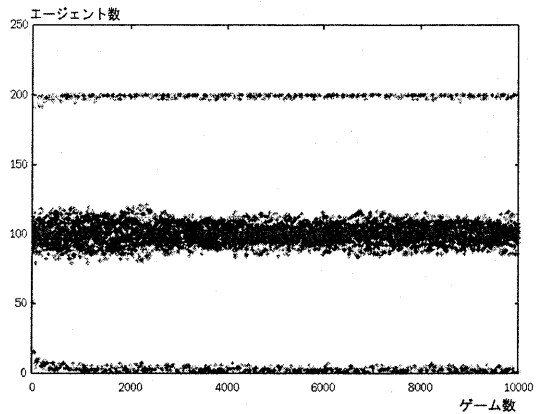


図 5 $m = 3$ でのエージェント数の勝敗変化

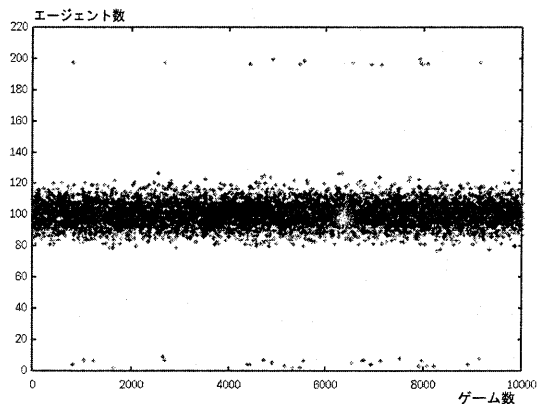


図 6 $m = 8$ でのエージェント数の勝敗変化

4.2 エージェント間の優劣の存在

3.1 節の結果から、標準偏差が小さい状況においては、ゲーム開始段階においてはすべて等しい条件であったエージェントの挙動に何らかの違いが生じていることが推測できる。そこで、図 2 の検証の時と同じ条件(1 セット 10000 回の勝負を 10 セット)において、201 体の個々のエージェントが獲得した得点を順位付けした結果を図 7 に示す。

ランダムにグループを選択した場合は、すべてのエージェントが約 4750 点を獲得できている。これに対し、標準偏差が小さい時は平均得点が高い水準となり、多少の貧富の差は見られるものの、全てのエージェントが安定して得点を獲得できていることが分かった。そして m が増加するに従い、ごく少数のエージェントに関して大勝するものと

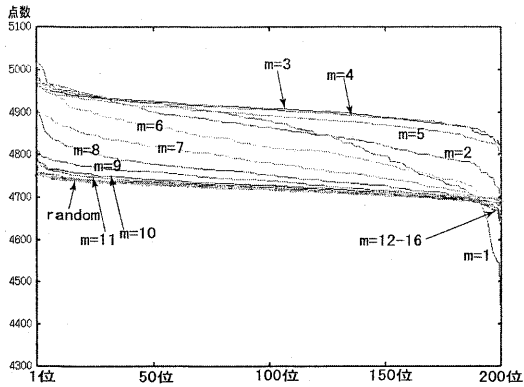


図7 エージェントの優劣

大敗するものが発生し、同時に平均獲得得点が減少し、 m が12を越えるとランダムとほぼ同等の水準へと推移した。

大勝するエージェントと大敗するエージェントが発生する要因は、個々のエージェントが保有する戦略テーブルに存在するはずである。そこで、 $m = 3$ と $m = 9$ の時の順位付けられたエージェントにおいて、各エージェントに与えられた s 個の戦略テーブル間の相関と、エージェント間での戦略テーブルの相関をそれぞれ調べた結果を図8、図9に示す。エージェント間の相関では、成績1位のエージェントと2位以下200体のエージェントとのそれぞれの相関を、2位のエージェントと3位以下199体のエージェントとのそれぞれの相関を求めた。

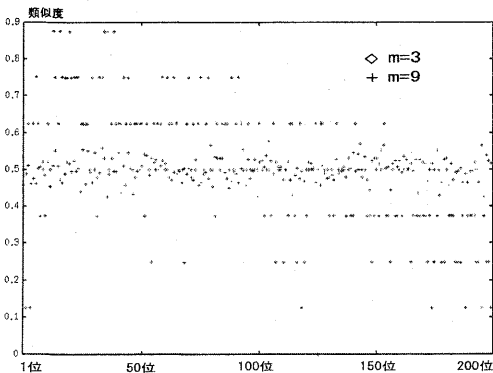


図8 エージェント内の戦略テーブルの相関

その結果、当然ではあるが興味深い事実が明らかとなった。標準偏差が小さい $m = 3$ においては、図8からも分かるように、一つの戦略テーブルは9個のエントリから構成され、戦略テーブルプール

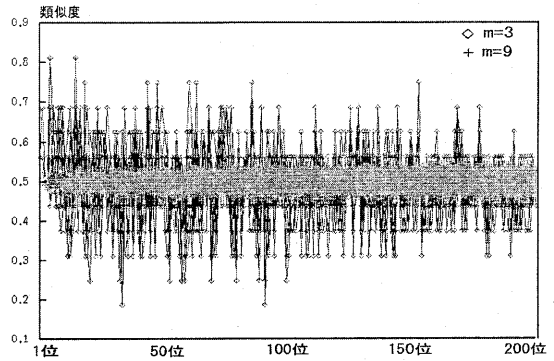


図9 エージェント間の戦略テーブルの相関

にも256個のテーブルしか存在しない、この中から201個のエージェントがそれぞれ2つずつ選ぶのであるから、当然選んだ2つの戦略テーブルは高い相関の組み合わせから低い相関の組み合わせまでかなり等しい確率で発生する可能性が高い。事実、図8からその傾向を確認することができる。これに対し、 $m = 9$ ともなると戦略テーブルプールには 2^9 個という膨大な戦略テーブルが存在することになり、この中から2つを選んだとしてもその相関は常に無相関なものとなる可能性が高くなる。そして、図9に示すように、 $m = 3$ のように高い相関から低い相関を持つ戦略テーブルを保有するエージェントは、当然ながらエージェント間においてもその傾向が見られ、顕著ではないものの、高い相関を持つものと低い相関を持つものが存在することが分かる。

興味深いのは、勝率とエージェント内での戦略テーブルの相関が対応していたことである。つまり互いにより類似する戦略テーブルを保有したエージェントがより高い勝率となっていることである。これはエージェント間についてもその傾向が見られ、勝率の高い上位約20位、全体の約10%のエージェントに関してエージェント間の相関が高くなった。

我々は当初、 m の大きさは単にどれだけ過去を参照するかということの意味するものと考えていたが、そうではなく、 m が小さくなるとエージェントが保有する戦略テーブルの相関にばらつきが生じることになり、このことがエージェント間の挙動に差を生じさせていることが推測できる。そして、保有するエージェント内の戦略テーブルの相関と、エージェント間の相関に適度なばらつきがあることが、エージェント全体としての勝率を

向上させていることと関連性があると考え、
 図2, 図3において, $m = 3$ であっても保有する戦
 略数である s が大きくなると成績が低下し, 標準偏
 差も大きくなるということが説明できる. 例えば $s = 5$ と
 すると, エージェント内における戦略テーブルが
 高い相関となるためには, 5つの戦略テーブルが
 互いに類似しなければならず, 当然そのような戦
 略テーブルをランダムに選び出す確率は低いもの
 となるため, 結局ばらつきのある相関を得るこ
 とはできなくなり, 成績は低いものになってしまう.

4.3 実 験

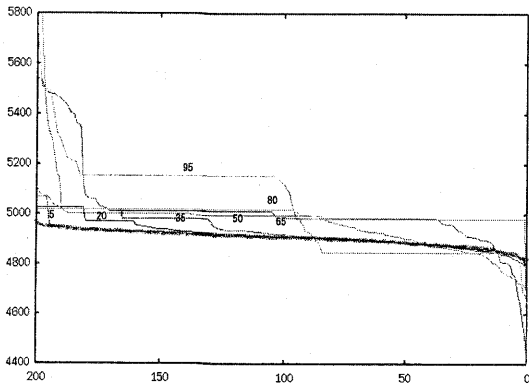


図10 type1($m = 3$)

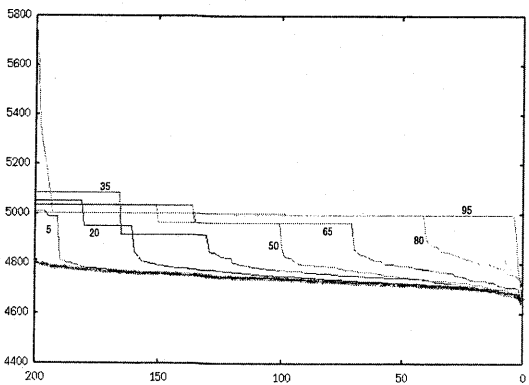


図11 type1($m = 10$)

戦略テーブルに関して, エージェント内および
 エージェント間における相関のばらつきが成績に
 大きく影響するのだと仮定すると, 意図的にばら
 つきを与えることで, エージェント全体の挙動に
 変化を起こせることが期待できる. そこで, 201
 体のエージェントにおいて, n 体のグループを2つ
 (A, Bとする)作成し, 各グループごとにそれぞ

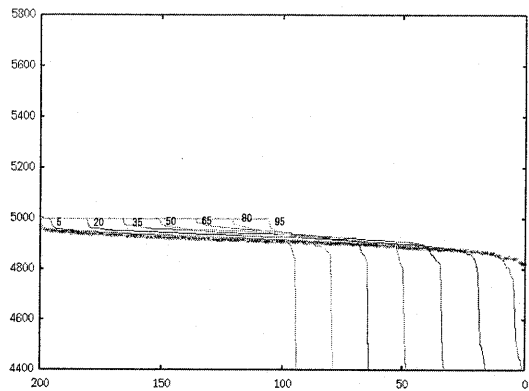


図12 type2($m = 3$)

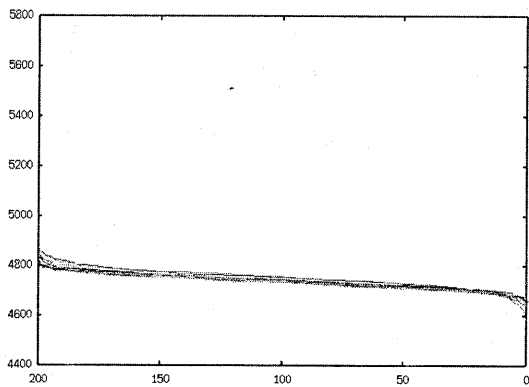


図13 type2($m = 10$)

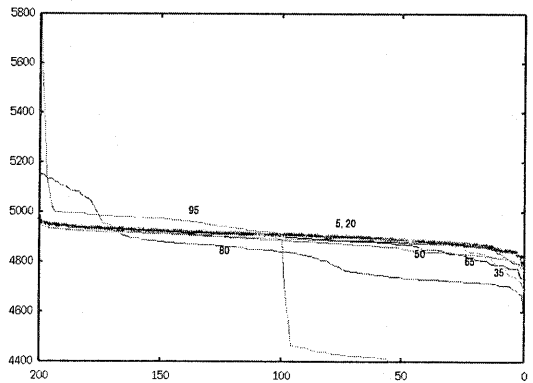


図14 type3($m = 3$)

れ以下に述べる4種類の共通の行動指針を与える
 ことでエージェント全体に種々の意図的なばらつ
 きを与えた. 実験に際しては, いずれも参加した
 エージェント総数は201体, 各エージェントが保
 有する戦略テーブル数は $2(s = 2)$ である. そして
 標準偏差が最小となる $m = 3$ と, ランダムとほぼ

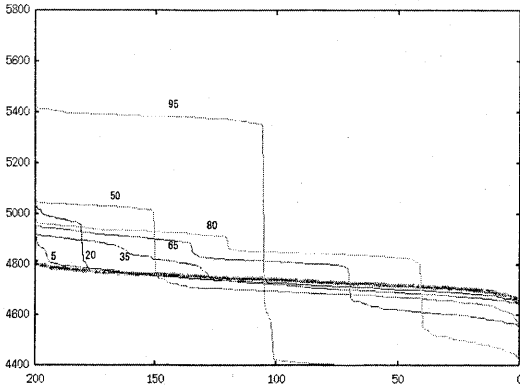


図 15 type3($m = 10$)

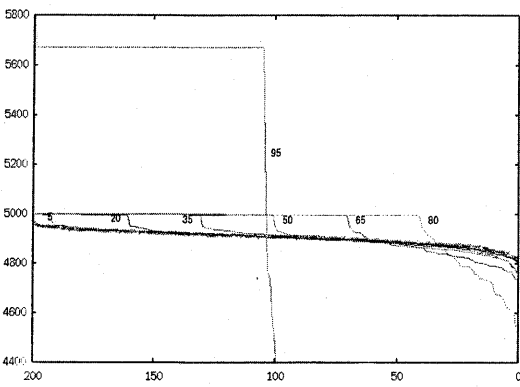


図 16 type4($m = 3$)

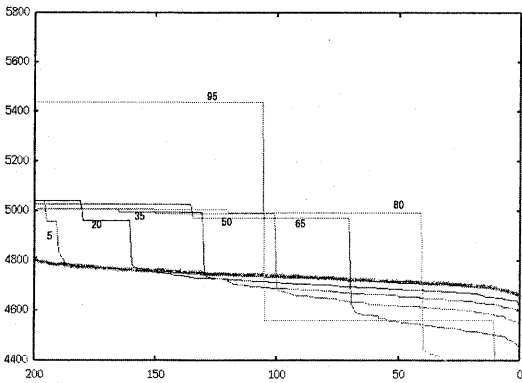


図 17 type4($m = 10$)

同等の結果となる $m = 10$ において実験を行った。

(1) type1: A 全員が同じ 2 種類の戦略テーブルを保有し、しかもランダムな戦略テーブルの選択が必要な際は同じグループを選択する。B 全員は A の戦略テーブルと -100% 相関な戦略テーブルを保有し、A と同様 B 全員が全く同じ行動をする。

これはエージェント間だけに意図的な相関のばらつきを与えることを意味する (エージェントが保有する戦略テーブル間の相関には関与しない)。

(2) type2: A 全員はそれぞれ異なる戦略テーブルを保有するが、エージェント内では同じ戦略テーブルを保有する (つまり、各エージェント一つの戦略テーブルを保有することになる)。B 全員もそれぞれ異なる戦略テーブルを保有できるが、エージェント内では -100% 相関なテーブルであるとする。これはエージェント内だけに意図的な相関のばらつきを与えることを意味する。

(3) type3: A 全員が同一の 2 種類の戦略テーブルを保有するものの、ランダムな戦略テーブルの選択が必要な際は各エージェントが自由に選択できる。B 全員は A の戦略テーブルと正反対 (-100%) 相関な戦略テーブルを保有し、A と同様ランダムな戦略テーブルの選択が必要な際は各エージェント自由に選択できるものとする。これはエージェント間だけに意図的な相関のばらつきを与えるものの、(1) よりも弱い制約とした。

(4) type4: A 全員が同じ 2 種類の戦略テーブルを保有し、しかもエージェント内でも同一の戦略テーブルであるとする。つまり A 全員が同一の一つの戦略テーブルのみ保有する。B 全員は A の戦略テーブルと正反対 (-100%) 相関な戦略テーブルを保有し、A と同様各エージェントはそれぞれ一つの戦略テーブルを保有する。これはエージェント内、間において最も極端な相関のばらつきを与えることになる。

まず以下各図において、太線は意図的なばらつきを組み込まない時の結果である (以下オリジナルデータと呼ぶ)。実験の結果、非常に興味深い結果が得られた。当初の我々の予想は A グループもしくは B グループのどちらかが最高得点を獲得し、もう一方が最低得点を獲得するというものであった。しかし、type1 の図 10, 図 11 において、A, B, それぞれの各エージェント共に高得点を獲得できた。また $m = 10$ では下位のエージェントであってもオリジナルデータと同等のレベルを大きく下回ることがなかった。 $m = 3$ では下位のエージェントにおいて大きく負ける個体が発生している。また A, B の挙動に引き込まれるように 50 位から 150 位くらいのエージェントがオリジナルデータよりも高得点を獲得できている。これに対し、type2 の図 12, 図 13 は $m = 3$ では大きな貧富の差が生じ、 $m = 10$ では大きな変化が見られなかった。

エージェント内よりもエージェント間に相関のばらつきの方が重要であることを期待させる結果となった。type3の図14, 図15では, A, Bそれぞれ同一の戦略テーブルを保有するものの, 個々の判断はエージェント単位であるため, type1のように同期した行動とはならず, 図10, 図11をさらに悪くした結果となった。また $m = 10$ の時の下位のエージェントもオリジナルデータよりも低い獲得得点となっており, 同期した行動が重要であると推測できる。最後にtype4の図16, 図17では, A, Bそれぞれほぼ同レベルで高得点を獲得できているものの, type1の図10, 図11に比べ下位のエージェントにおいてオリジナルデータよりも低い得点の個体数が多く発生してしまった。

これらの結果から, エージェント内よりもエージェント間の各エージェントが保有する戦略テーブルの相関にばらつきが存在することが, 好成績を発生させる要因であることが推測できる。またその際, エージェント内において, エージェントが保有する戦略テーブル間の相関が強すぎると逆に成績が下がる結果となった。type1においてエージェントはランダムに2つの戦略テーブルを選択している。よって, type1において各エージェントが保有する戦略テーブル間の相関を変化させて実験する必要がある。いずれにせよ, 高低両極の相関がある戦略テーブルを持つエージェントの存在がエージェント全体の挙動の効率を向上させる大きな要因である可能性を強く期待させる結果が得られたことは事実である。今後の研究計画としては, 参加させるエージェント数を減らし, Minority Gamesの特徴が発生する最小エージェント数においてより個々人のエージェントの挙動を解析する予定である。また図16, 17など下位のエージェントのみに対しゲーム中の戦略テーブルの変更を許可した場合の挙動なども調査する予定である。

5. ま と め

従来研究において着目されて来なかった Minority gameにおける個々のエージェントの挙動について調査した。その結果, m が小さければ小さいほど最初に各エージェントに与えられる戦略テーブルの相関に似てるものからそうでないものまでばらつきが生じ, 同様にエージェント間の戦略テーブルの相関にもばらつきが生じることが低い標準偏差を産み出している大きな要因である可能性が高いことが判明した。そして, エージェン

ト内, エージェント間それぞれにおいて互いに高い相関があるエージェントが好成績を出していることがわかった。調査を開始する時点における認識であった「状況が複雑な場合は過去に捕らわれず, 適度にその場その場の状況で判断した方がよい」はそれなりにこの結果を説明している。過去の膨大な情報を利用しない分, 判断に利用する情報は少なくなり, それだけ似た行動をとるエージェント, また逆の行動をとるエージェントが出現する確率も高くなるからである。

この知見は, m が大きい時であっても, 各エージェントに配布する戦略テーブルの相関にばらつきを与えられれば $m = 3$ の場合のように好成績を出せる可能性があることを期待させるものであり, 実際に初期実験を行った結果成績を向上させることに成功した。今後さらに解析を進め, 他の競合問題に体して適用できるような汎用性のあるアルゴリズムの確立を目指す。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, ご支援下さった小柳恵一ネットワークインテリジェンス研究部部長, ならびに議論していただいたネットワーク情報処理研究グループの各氏に感謝致します。

文 献

- [1] D. Challet and Y.-C. Zhang, Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game, *Physica A* 246, 407 (1997).
- [2] Y.-C. Zhang, Modeling Market Mechanism with Evolutionary Games, *Europhys. News* 29, 51 (1998).
- [3] D. Challet, A. Chessa, M. Marsili, Y.-C. Zhang, From Minority Games to real markets, *Quantitative Finance* (2001)
- [4] R. Savit et al., Adaptive Competition, Market Efficiency, Phase Transitions and Spin-Glasses (1997), appeared in the Minority Game's web page, <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>
- [5] D. Challet, M. Marsili and R. Zecchina, Phase Transition in a Toy market (1999), appeared in the Minority Game's web page, <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>
- [6] Y. Li et al., Evolution in Minority Games I. Games with a Fixed Strategy Space, appeared in the Minority Game's web page, <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>
- [7] Y. Li et al., Evolution in Minority Games II. Games with Variable Strategy Spaces, appeared in the Minority Game's web page, <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>
- [8] R. D'hulst, G. J. Rodgers, Three sided complex adaptative systems (1999), appeared in the Minority Game's web page, <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>