

創発された系への意図的介入の可能性に関する考察

栗原 聡[†] 福田 健介[†]

[†] 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}@t.onlab.ntt.co.jp

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 では、秩序が形成される際に個々のエージェントの振る舞いに Power-law が見られる。そして、Power-law の傾きと各エージェントの利得順位との間に一貫した傾向があることが分かった。そこで、この特徴を利用してエージェントの利得を更に向上できるか試み、実際に向上させることが可能であることが認められた。

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

Possibility of intentional control on the emerged order

Satoshi KURIHARA[†] and Kensuke FUKUDA[†]

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

E-mail: †{kurihara,fukuda}@t.onlab.ntt.co.jp

Abstract In this paper we analyze a simple adaptive model of competition called the Minority Game, which is used in analyzing competitive phenomena such as the operation of the market economy. The Minority Game is played by many simple autonomous agents, which develop collective self-organization as a result of simple behavioral rules. Many algorithms that produce the desired behavior in the game have been proposed. In all work to date, however, the focus has been on the macroscopic behavior of the agents as a whole. We focus on the behavior of individual agents, paying particular attention to the original form of the Minority Game. We suggest that the core elements responsible for the development of self-organization are (i) rules that place a good constraint on the behaviors of individual agents and (ii) the existence of rules that lead to effective indirect coordination. We also show that when efficient organization is formed, a power-law can be seen among behavior of individual agents.

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

1. はじめに

本質的に利己的に振舞う我々人間によって構成される社会や、我々が構築した市場経済において、社会全体や市場全体が高い利得が得られるしくみは存在し得るのだろうか？このような、共通のルールに従いつつも皆が自分の利益追求のみを目的として行動する社会モデルのためのシミュレーション環境として、Minority Game (MG) が提案されている [1]。MG は、経済学における複雑系研究の代表的な研究者である W.B.Arthur が考案した El Farol 's bar 問題に大きな影響を受けた D.Challet と Y.-C.Zhang によって 1997 年に発表された。MG は非常に単純化された金融市場のモデルであり、発表以後、特に米国の経済物理研究者において大いに注目され、数年の間に様々な角度から多くの研究が行われた(ここ数年日本においても MG に関する発表を見かけるようになっていく)。

2. Minority game

MG とは次のようなものである (図 1(a))。n 人のプレーヤー (エージェント) が 2 つのグループ (「0 グループ」と「1 グループ」や、「買いグループ」と「売りグループ」など) の内、どちらか一方を選択し、少数グループとなったエージェント集団が勝ちとなるという簡単な少数派ゲームを行う。少数が勝ちとなる点が味噌である。なるべく多くが勝者となるためには少数グループを選択した人数が多くならなければならない。つまり、仮に 101 人でゲームを行った場合、少数グループを選択した人数が 50 人である場合が最も好ましい状態となる。ゲームは、一回の二者択一による勝敗の決定を 1 回のゲームとして、これを多数回 (100 万回など) 繰り返して終了とする。そして各エージェントがどれだけ勝つことが出来たのかを評価する。さて、各エージェントはどのようなルールに基づいて行動するとよいだろうか？ 全てのエージェントが均質なルー

ルを保有するモデルから非均質なモデル、また他のエージェントの行動を観察しつつ各エージェントが学習を行い自分のルールを更新させるモデルなど、MG に関するこれまでの研究においては様々なルールに関するシミュレーションが行われている [2][3][4][5][6]。

これに対し、本稿では Challet らが MG を提案した際のルール (Standard MG) を基本とする。Standard MG ではエージェントのルールは均質であり簡潔、そして他のエージェントの動向を知ることは出来ず、常に利己的に行動するというものである。にもかかわらず、ゲームを繰り返す過程で、エージェント間において、あたかも綿密な調整が行われたかのような協調的行動が発現する。Standard MG のルールは次のようなものである。

各エージェントは二者択一を行う際、他エージェントの動向を見ることはせず、ゲームを開始する前にあらかじめ各エージェントがそれぞれ用意した戦略テーブル (図 1(b)) のみを使用してどちらのグループを選択するかを判断を行う。戦略テーブルは、過去 m 回の勝ちグループ履歴と各履歴に対応した次の試行で選択するグループ「次の手」が記載される (図中、0 は 0 グループ、1 は 1 グループを指す)。そして現在の履歴が 010 である場合、全エージェントが戦略テーブルの 010 のエントリと、その次の手を見てどちらのグループを選択するかを決定する。例えば、m=3 という戦略テーブルでは 2³=8 種類の履歴の組み合わせにする次の手が記載される。すると、戦略テーブルとしては全部で (m=3 では 256 種類) 種類が存在することになる。戦略テーブルは各エージェントそれぞれ s 個保有することが出来、ゲームを開始する最初の段階において種類からそれぞれ s 個をランダムに選ぶ。以降、戦略テーブルの内容の変更や、別の戦略テーブルとの交換は出来ない。履歴もゲームを開始する最初の段階においてランダムに生成し、以降

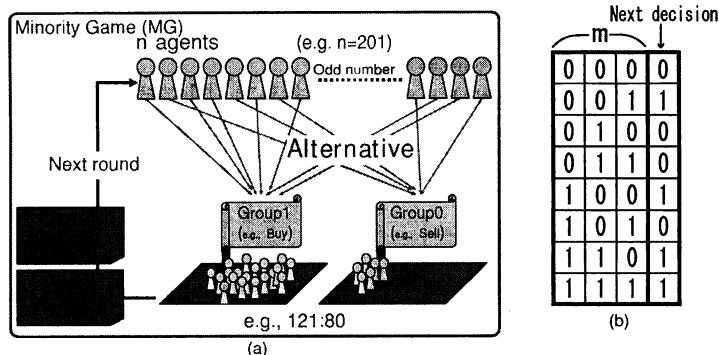


図 1 Rules and strategy table

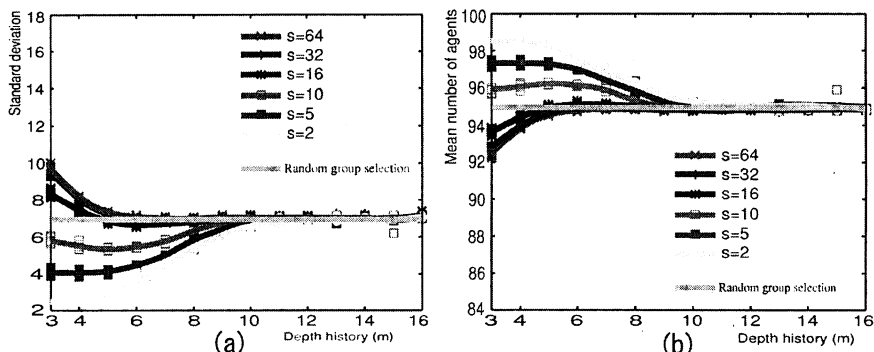


図 2 (a) Standard deviations of the number of winning agents. (b) Mean numbers of winning agents

勝ったグループにしたがって履歴を更新する。戦略テーブルは各プレイヤーにおいて次のように使用される。まず、戦略テーブルは自身に対する得点を保有出来る。そして初回はランダムに s 個の中のいずれかの戦略テーブルを選択し、その戦略テーブルにおいて勝てば、その戦略テーブルに 1 点を加点、負ければ 1 点を減点する。2 回目以降は常に最も高得点の戦略テーブルを選択し続けるものとする^(注 1)。

すると、次に示す協調的行動の発現を見るこ

(注 1) : Standard MG においては、選択しなかった戦略テーブルであっても、それを選択していれば勝った場合にはその戦略テーブルにも加点するルール (Virtual point rule) としないルールがあり、我々は加点しないルールを採用している。2 つの戦略テーブルにおいて、ある履歴において同じ次の手であっても戦略テーブルとしては 2 つは異なるため、Virtual point rule だとその違いから発生する多様性を抑制することになってしまうと考えたからである。

とが出来る。参加エージェント数 201 人に対して、各エージェントが保有できる戦略テーブル数 $s=2, 3, 5, 10, 32, 64$ 、戦略テーブルにおいて参照する履歴の深さ $m=3-16$ の全ての s, m の組み合わせにおいて多数回ゲームを行う。図 2(a) は毎回の勝ったエージェント数の標準偏差、図 2(b) は勝ったエージェント数の平均を示したものである。単に毎回ランダムに二者択一を上記回数繰り返した場合の標準偏差は約 4 で、平均は約 95 である (以降ランダムグループ選択と呼ぶ)。つまり、 m が 10 以下、特に $m=3, 4$ においてランダムグループ選択よりも標準偏差は小さく、そして平均が高くなっている。図 3 は同じく 201 体においてゲームを行った際の、各 m 値における全エージェントの勝ちグループに属した回数を

成績順に示したものである。 $m=3,4$ などでは大勝／大敗するエージェントは発生せず、ほぼ全てのエージェントがランダムグループ選択よりもよい成績を収めていることが分かる。

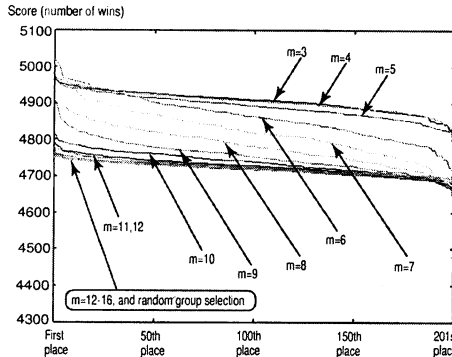


図3 Rankings of 201 agents for each value of m

これは毎回のゲームにおいて各エージェントが互いにほぼ等しい頻度で少数グループに属することが出来、かつ少数グループと多数グループが常に均衡するように調整しつつ行動していることを示すものであり、エージェント間に何らかの意図的な調整、または複雑な協調行為が発生していることを期待させる。言い換えると、MGでは、単純なルールに従って個々のエージェントが利己的に行動するにもかかわらず、エージェント全体としても効率的な振る舞いが出来、ほぼ全てのエージェントが高い利益を獲得できているということである。一見 m 値が大きいく、より多くの過去の勝ちグループ履歴を使用した方が成績が向上するのではと直感的に推測できるところであるが、意外なことに $m>10$ ではランダム選択モードと同等の結果となってしまう。この現象はゲームに参加するエージェント数にかかわらず確認することができ、標準偏差と m 、参加エージェント数 n との間には、 m 値、 n 値にかかわらず一貫した関係が存在することもChallet らによって報告されている。

3. エージェントの挙動

これまで、[7]においてMGにおいて協調行動が発現する主な要因として、(1) 全エージェントが履歴という共通のデータを参照して行動を決定することと、(2) エージェント間の間接的インタラクションを生み出す「戦略テーブルへの加点減点ルール」について検証した。そして、(2)において、オリジナルルール、すなわち協調行動が発現している状況での個々のエージェントの挙動を観測した結果、次の傾向が見られることを確認した。

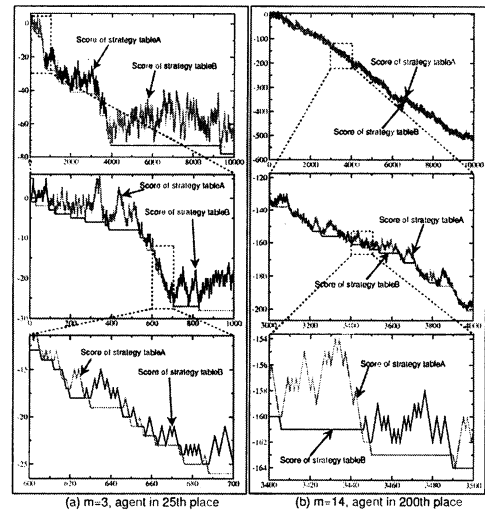


図4 Which strategy table was used? Scores for (a) $m=3$, 25th place agent and (b) $m=14$, 200th place agent in (upper) 10000, (middle) 1000, and (lower) 100 games.

図4は、201体のエージェントにてゲームを行った際の、 $m=3, s=2$ 時の25位のエージェントと、 $m=14, s=2$ の時の200位のエージェントにおいて、それぞれ2つの戦略テーブルの得点の変化を表示したものである(それぞれ10000回、1000回、100回分のデータを表示した)。すると m の値によって大きく変化が異なることが分かる。 $m=3$ 、すなわち協調的振る舞いが発現してい

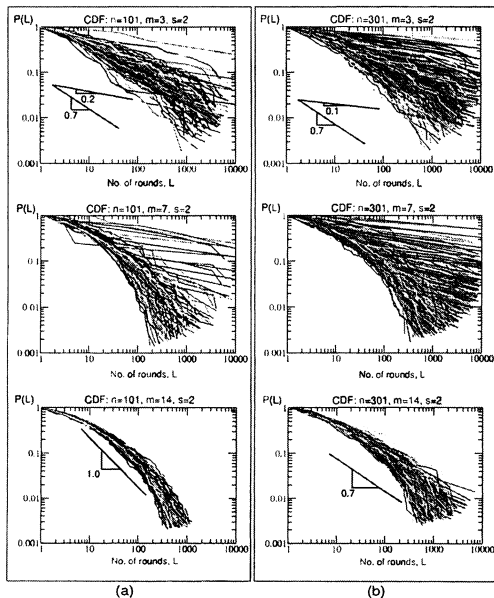


図5 No. of steps L over which either strategy table was in continuous use for (a) $n=101$ and (b) $n=301$ with (upper) For $m=3$ (all 101 agents and 301 agents), (middle) For $m=7$ (all 101 agents and 301 agents) (lower) For $m=14$.

る方では、ゲーム回数に関わり無く、グラフの形状が類似しておりフラクタル性が見られる。これに対し $m=14$, すなわちランダム選択と同様の挙動が見られる方では一方の戦略テーブルが優先的に使用される期間にある上限があり、フラクタル性が見られない。

図5は、一方の戦略テーブルが連続して使用された期間のヒストグラムの累積確率分布を表示したものである ($m=3$, $m=7$, $m=14$ ($s=2$) において、101体で行った場合と301体で行った場合のそれぞれ全エージェントの結果を示した)。

高得点を獲得できるエージェントは、そもそも与えられた戦略テーブルの組み合わせがよかったのであるから、片方が連続して使用される期間が長くなるであろうと予測することはできる。そして、 m 値が小さく (e.g. $m=3$), 組織的行動が発生する状況において、全てのエージェント

において累積確率分布に Power-law が見られた。各エージェントにおいて、ほとんどは短い間隔で使用戦略テーブルの切り替えが発生しているものの、低い確率できわめて長期間に渡って一方のテーブルが連続して使用される状況が発生している。反面、 m 値が大きく (e.g. $m=14$), ランダムグループ選択と同レベルの結果となる状況では、戦略テーブルの使用形態に Power-law は見られず、一方の戦略テーブルが連続使用される期間には一定の上限がある。ここで興味深いのが、 $m=7$ である。過渡期のように $m=3$ と $m=14$ の両方の使用形態が混在している。

そこで、各エージェントの Power-law の傾きと得点順位との関係を調べると、図6に示すように明らかな一貫性があることが分かった。しかも、参加エージェント数に関わり無く、最下位近辺のエージェントにおいて傾きが -0.75 を下回っている。1001体など更に多くのデータが必要であるが、参加エージェント数に依存しない傾向が見込まれる。つまり、戦略テーブルの使用形態を計算することで、各エージェントが周りの状況を知らずして、自分が組織的行動の一員となっているかどうかを判定できるということである。例えば、使用形態にしたがって戦略テーブルを更新するなどして、下位のエージェントが自分の行動に好ましい変化を与えることが可能となる可能性がある。次節では実際にエージェントの成績を向上できるかを検討する。

4. 意図的な介入

あらかじめ決められたルールに基づいた行動であり、しかも効率よく行動できている時に自己相似性が発生するのは興味深い事実である。実世界での現象においても、例えば TCP/IP というあらかじめ決められたルールによって構築されたインターネットにおいて、ネットワークとして最も効率よくデータが流れている時に、データの流れ方に自己相似性が見られることなどが

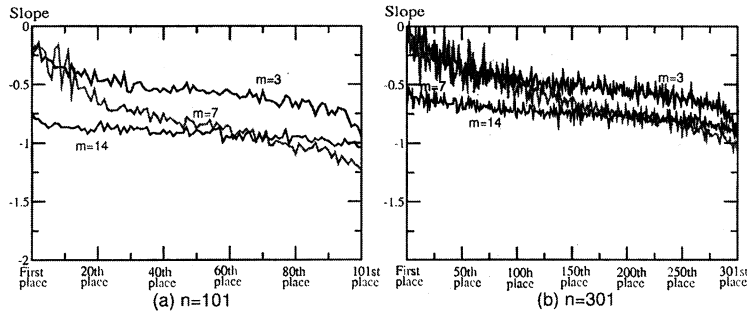


図 6 Slopes of the histograms in Fig. 6.

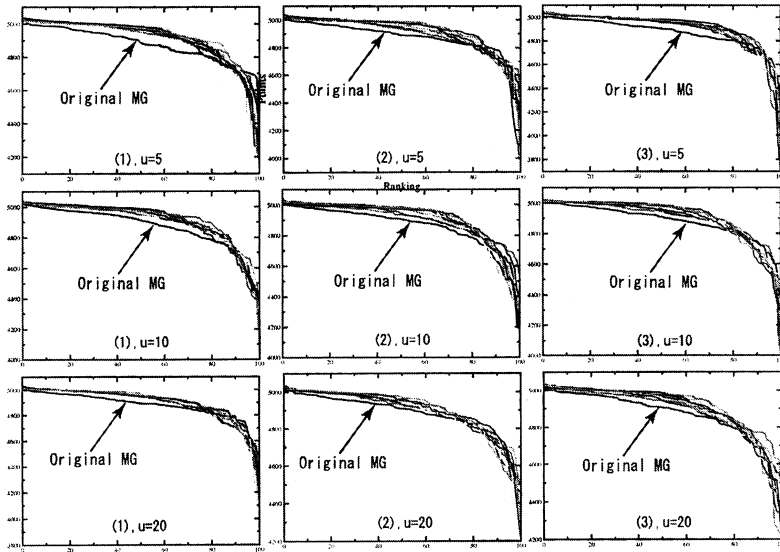


図 7 Slopes of the histograms in Fig. 6.

発見されている [8]. では、この現象を工学的に利用することは出来ないものなのだろうか.

前節で述べたように、MG では協調的行動が発現している際のエージェントの行動に自己相似性が見られ、その際の冪の度合いと得点順位に一貫性がある. MG において、エージェントが実行できる自分の戦略を一新する方法は、新たな戦略テーブルを用意することのみである. 全エージェントの戦略テーブルの組み合わせによってゲームの展開がボトムアップに決定される MG において、一部のエージェントが戦略を一新しても、そもそも戦略テーブルの内容がランダム

に決定されることから大きな変化は期待できないものの、下位のエージェントが戦略を一新することで多少の変化が期待できる. そこで、次の 3 種類の方法で数個のエージェントが戦略テーブルを更新する実験を行った.

101 体のエージェントにてゲームを行う. $s=2$ とし、10000 回のゲームを行うごとに、その時点でのエージェントの成績を下記に基づいて評価、該当するエージェントの戦略テーブルと戦略テーブルの得点を更新、初期化して次の 10000 回のゲームを開始することを繰り返した.

(1) Power-law の傾きが 0 に近いほどエー

ジェントの順位は高いことから、傾きが下がったエージェントの中からランダムに u 個のエージェントを選出、更新を行う。

(2) 最も得点順位の低いエージェントから n 個を選出、更新を行う。

(3) 最も Power-law の傾きが予め設定した値 (-0.75) を下回ったエージェントから n 個を選出、更新を行う。

図 7 は 9 種類の設定における参加エージェント 101 体の成績を記したものである。オリジナルの MG の結果に加えて、上記 3 種類の方法によって 10000 回のゲームが終了する度に、上記 (1)(2)(3) において該当する u 個のエージェントの戦略テーブルを初期化することを 10 回行った各回の順位を表示した。その結果、いずれにおいてもほぼ全てのエージェントにおいて成績が向上することが確認できる。特に (3) の方式における $u=5$ において最も成績が向上した。また、戦略テーブルを更新するエージェント数が増加すると効果が低くなる。 $u=5$ においては、いずれの方式においても 4800 点を下回るエージェント数が他の u 値に比べて少なくなっている。Power-law と成績順位の関係はゲームの回数に関わり無く得られることから、Power-law の傾きは参加エージェント数が不明な状況であっても利用できる点の特徴である。単に得点の変化からも自分の行動を評価できるが、その方法との比較を現在行っている。「行動の結果である得点の変化」に基づいて評価する方法と、「行動の仕方の変化」に基づく評価に関する考察を行う必要がある。

5. ま と め

MG における個々のエージェントの振る舞いに見られる Power-law は、全エージェントが行動した結果ボトムアップに組織化されたものである。よって Power-law が見られる状況をさらに向上させる場合には、エージェント全体が従うルールを変更するなど、ボトムアップな振る

舞いを維持した形で全体的介入が必要であると思われる。工学的には、Power-law が見られない状況において、これを Power-law が見られる状況に変更させることが出来る方が実現が容易であろう。 m 値が大きい場合 ($m=14$) の成績上位のエージェントの獲得得点は $m=3$ などの場合に比べて相対的に低く、単に獲得得点、獲得得点の変化だけでは自分の成績がさらに向上できるのか認識することができない。Power-law が振る舞いに出ているか?、そしてその傾きを見ることで、自らの振る舞いの効率を更に向上させることが可能となることが推察できる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり議論していただいた NTT 未来ねっと研ユビ G の各氏並びに公立はこだて未来大学システム情報科学研究科宮西啓司氏に感謝致します。

文 献

- [1] D. Challet and Y.-C. Zhang, Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game, *Physica A* 246, 407 (1997).
- [2] D. Challet, A. Chessa, M. Marsili, Y.-C. Zhang, From Minority Games to real markets, *Quantitative Finance* (2001)
- [3] A. Cavagna, Irrelevance of Memory in the Minority Game, *Physical Review E*, 1998.
- [4] S. Nakayama, A Cafe Choice Problem: An Agent-Based Approach for the Extended Arthur's El Farol's bar problem, The 6th International Conference on Complex Systems (CS'02), 2002.
- [5] H. Sato and A. Namatame, Minority Game with Local Interaction, The 6th International Conference on Complex Systems (CS02), 2002.
- [6] K. Miyanishi, and K. Suzuki, Minority Game with The Information Controller, The Third International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS'04), 2004.
- [7] S. Kurihara, T. Hirotsu, O. Akashi, S. Sato, and T. Sugawara, How Collective Intelligence Emerge in Complex Environment?, The First International Workshop on Biologically inspired Approaches for Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2004), 2004.
- [8] K. Fukuda, M. Takayasu, and H. Takayasu, Analysis of Minimal Model of Internet Traffic, Traffic and Granular Flow'01 (M. Fukui, Y. Sugiyama, M. Schreckenberg, and D. E. Wolf Eds.), Springer, 2002.