マイノリティゲームにおける資産分布の現実化

徳 岡 聖 二† 田中 美栄子††

人工市場モデルとして，Minority Game（MG）を行うエージェント群を考える．MG はそのままでは資産分布がパレート指数の実測値に合わず，Gini 係数も現在の日本や各国の値とは異なっている．戸田・中村は MG を拡張し「投資」という要素を加えることで資産分布に不平等性を持たせようとした．しかし結果として実際の資産分布と比較すると不平等すぎるものとなっている．そこで，本研究では，新たに「税の徴収」という要素を加えることで，MG における資産分布をより現実の値へと近づけた．

Realistic Wealth Distribution in the Minority Game

Seiji Tokuoka† and Mieko Tanaka-Yamawaki††

We consider an artificial market in which agents play the Minority Game (MG, hereafter). MG, in its original form, derives the wealth distribution almost flat. Accordingly the Pareto's index and Gini's coefficient do not match the observed values. Toda and Nakamura attempted to remedy this contradiction by introducing 'investing' activity to MG. Although their result successfully created inequality among agents, the derived value of Gini's coefficient seems too large compared to the currently reported statistics in Japan, and other countries. In this paper we added a new element of 'tax collection and re-distribution' to their model and performed simulation by varying tax-rates and investment-rates. The results are in good agreement to the real values.

1. 序 論

経済・金融活動や人間社会に起きる様々の現象を，エージェントベース・シミュレーションによってボトムアップに理解しようとする，人工市場のアプローチが社会科学の新しい潮流となっている．これにより，実際の市場では実験できない様々な状況や現象をシミュレーションによって再現し，市場の様相を実験的に解析するための土台とすることができる[1),2)]．そういった人工市場モデルの 1 つである少数派ゲーム（Minority Game）[3),4)]（以降 MG）は単純な構造にもかかわらず，金融市場に生起する自己組織化現象をはじめとする，様々な現象を引き出すことができる豊かな可能性を持つ．しかし一方では，モデルの構造があまりに単純すぎる点に修正を加えて現実と合わせようという動きも多く，様々な意味で近年注目を集めている．

† 鳥取大学大学院工学研究科知能情報工学専攻
Department of Information and Knowledge Engineering, Graduate School of Engineering, Tottori University
†† 鳥取大学工学部知能情報工学科
Department of Information and Knowledge Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University

MG の基本ルールは，奇数人のエージェントが個々の保有する戦略のうち最良のものに従って二者択一の選択をし「少数派」になれば勝ち，とする．エージェントごとに保有する戦略セットが異なり，保有する戦略セットを途中で変えることはできないが，実際に用いるのは，その時点で最高スコアを持つものであり，勝てばその戦略のスコアに加点し負ければ減点する，という形で学習効果を取り入れる仕組みになっている．戦略とは，過去 M 回において 0 または 1 のどちらが勝ったかという履歴に対して，次の選択を 0 と 1 のどちらにするかというすべての組合せの中から S 個をランダムに選んだものである．M と S は全エージェントに対して同じとし，これらが比較的小さくとってあることが限定合理性の表現となっている．二者択一をするという行為は現実社会での「売るか売らないか」，または「買うか買わないか」に対応する．市場での投資家の行動は究極のところ，この選択に尽きる，と仮定しているのである．少数派になることは一見，不利なようにも見える．多くの投資家は人気商品を買い，人気が落ちる前に売り抜ける，という形で多数派に寄り添っているように思えるからである．しかし本当の投資の醍醐味は「先読み」にあるのだという立場に立

てば，少数派ゲームの意図が小さい儲けを積み重ねる手法にあるのではなく，人気が出る前の商品を買い，人気が出たら売り抜ける，という投資家心理をモデル化したものだと理解できる．よくいわれる，「ゴールデンクロスが出たら買い」等の投資格言も人気が出る前に，つまり少数派であるうちに人気株を買うチャンスをとらえるための一方法と解釈できる．

MG は単純な仕組みが一番の魅力ではあるが，投資市場モデルとしては 1 つ大きな欠陥がある．少数派になれば勝ち，というだけで「何人で勝っても各人が同じ報酬を受け取る」という点がいかにも不自然である．「より少ない人数で少数派になりたい」という投資家心理が欠落しているのである．少数派になればなるほど大きな報酬が得られるようにするにはどうしたらよいか？

まず考えられる方法は使われた戦略のスコアに加点や減点をする際に「少数派度」を考慮することである．しかし何が一定に保たれるのかを考えると，より少数で勝って大きな利益を得るのは戦略ではなくそれを使用したエージェント個人であることに気づく．より少数の勝ちエージェントが出た場合，個人あたりの儲けが大きくなるのは一定資産をその人数で分けるからである．したがって，勝った場合に戦略に加点減点をするだけでなく，エージェント個人も利得を得るという機能をモデルに加味する必要がある．すなわちエージェントの資産という属性をモデルが持たなければならない．

本研究では以上のような方向で MG の改良を試みる．2 章で MG の概要を述べ，3 章で MG の特徴としての協調行動について概説したあと，3.2 節において個々のエージェント勝ち回数がほとんど均等となることを指摘する．この点を改良する方法として 3.3 節では得点の付け方を変えて，勝ち戦略により多くの報酬を与えるモデル（RMG）を考える．その結果，エージェント間の勝ち回数には差がつくものの，資産分布を表す Gini 係数は実測値よりはるかに小さいため，得点の付け方の非対称だけではない，もっとほかの要素がモデルに必要であることを指摘する．3.4 節ではエージェントに資産を持たせたモデルを文献 6) に従った形で投資モデル（IMG）として導入し，その限界について述べる．4 章で IMG を改良した再分配モデル（TMG）を導入し，5 章にそのシミュレーション結果を Gini 係数と Pareto 指数の両面から示す．6 章では本研究で導入した TMG において，どのようなエージェントが利益をあげているのか，市場のどの要素が関係して資産分布が作られているのかを考察し，7 章に結論を述べる．

表 1 各エージェントの保有している戦略テーブル（$M=3$, $S=4$ の場合）
Table 1 An example of strategy table owned by an individual agent (case of $M=3$, $S=4$).

履歴			戦略 1	戦略 2	戦略 3	戦略 4
0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0	1
0	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	1	1
1	1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	0	0

2. MG の概要

まず，N 人（N は奇数）のエージェントが 2 つの選択肢（「0 グループ」と「1 グループ」または「売る」と「売らない」，あるいは「買う」と「買わない」）のうち，どちらか一方を選択する．そして，少数エージェントとなった集団が勝ちとなる．二者択一による勝敗の決定を 1 回のゲームとし，これを多数回繰り返して終了する．

MG における戦略と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に他のエージェントの動向を見ることはせず，自己の保有する戦略セットとそのスコアを記した戦略テーブル（**表 1** 参照）のみを使用して自分の戦略を決定する．戦略テーブルはゲーム開始前にランダムに作られ，過去 M 回の勝ちグループの履歴と各履歴に対応した「次の手」を保有している．また，戦略は途中で変更することはできない．過去の履歴は 2^M，戦略は 2^{2^M} 種類存在するが，各エージェントはこのうち S 個の戦略しか保有することができない．また，戦略テーブルは得点を保有でき，各時点において最も得点の高い戦略を選択することにより次の手を決定する．勝てばそのとき用いた戦略に 1 点を加点し，負ければ 1 点を減点する[5]．また，初回の履歴はランダムに生成され，以降は勝ったグループによって内容を更新してゆく．この MG を Standard MG（SMG）と呼ぶことにする．

3. MG の特徴

3.1 意図しない集団行動の出現

MG のエージェントは互いに相談せず，また全体の利益も考えていないにもかかわらず，集団行動をとるかのように見える[4),5)]．**図 1** は次のパラメータでその状況を再現したものである．エージェント数 $N=201$，保有できる戦略数 $S=2, 4, 8, 16, 32$，参照する履

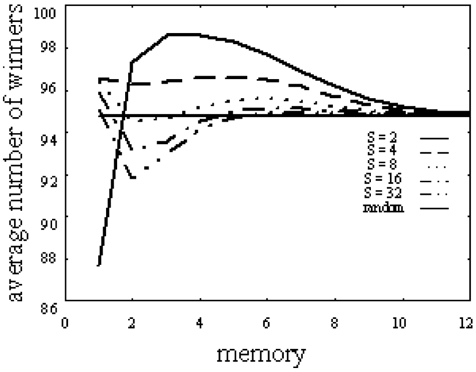

図 1　メモリ値 $M \leq 12$，戦略数 $S = 2$，4，8，16，32 における エージェントの平均勝ち人数（SMG）

Fig. 1　Average number of winning agents as a function of memory length, $M \leq 12$ for various numbers of strategies, $S = 2$, 4, 8, 16, 32 (SMG).

歴の長さ $M \leq 12$ のすべての組合せにおいて多数回（10,000 回を 1 試行とし，それを 100 回）ゲームを行う．このときの勝ち人数の平均を図 1 に示す．SMG では各エージェントは勝ちグループの履歴とランダムに生成された戦略のみを参照して意思決定しており，他エージェントの動向を考慮していない．それにもかかわらず特に $S = 2$〜8，$M = 2$〜8 では，いかにも各エージェントが示し合わせているかのように，ランダムな場合（平均勝ち人数 = 94.8）と比較して平均勝ち人数が高い．これをエージェントたちが協力して集団行動をとり，全体として利得を得ていると見立てることができる．

3.2　平等すぎる資産分布

最初に，SMG における資産分布について検証する．戸田ら[6] は MG における資産分布が平等すぎることに注目した．資産分布は Gini 係数（G で表す）を用いて評価される．完全平等のとき，つまり全員が同じ資産を持つ場合に最小値 $G = 0$ をとる．逆に完全不平等のとき，つまり 1 人がすべての富を独占しているときは最大値 $G = 1$ をとることになる．G が大きいほど富の分配はより不平等となる．

ここで，とりあえず SMG における富を「勝ち回数」と定義すると次のような結果が導き出される．**図 2** は，SMG における Gini 係数の時間変化を表したものである．時間変化にともない G は減少しながら 0.01 付近に収束する．

一方，厚生労働省の所得再分配調査報告書[7] によると現実社会の Gini 係数の値は日本ではおよそ 0.5 である．さらにここ 10 年では，およそ 0.06 増加しており，資産分布の不平等さは大きくなる傾向にある．これと比較した場合，MG における「勝ち回数」と定義した場合の資産分布は非常に平等であり，現実の社会の値とは大きくかけ離れているという問題点が見られる．

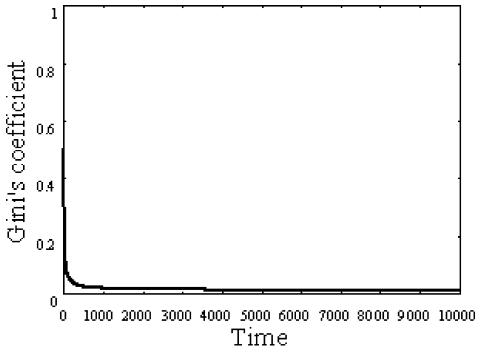

図 2　Standard MG における Gini 係数の時間変化

Fig. 2　Time evolution of Gini's coefficient in the case of standard MG.

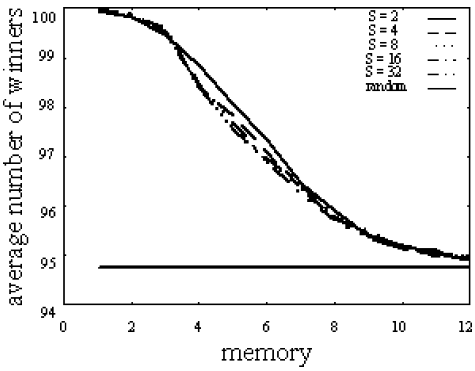

図 3　メモリ値 $M \leq 12$，戦略数 $S = 2$，4，8，16，32 における エージェントの平均勝ち人数（RMG）

Fig. 3　Average number of winning agents as a function of memory length, $M \leq 12$ for various numbers of strategies, $S = 2$, 4, 8, 16, 32 (RMG).

3.3　得点の付け方による振舞いの違い

SMG のルールでは，ゲームに勝てば，そのとき使用した戦略に 1 点を加点，負ければ 1 点を減点する．この得点の付け方を変えてみると，エージェントが使用する戦略が変わり，その結果資産分布も変化すると考えられる．そこで，ゲームに勝ったときと負けたときの戦略への加点を（+1，−1）から（+2，−1）に変え，勝ったときにはより多くの利益が得られるモデルへと拡張することで，資産分布を現実的にすることができないのだろうかということを考えた．この拡張したモデルを Reward-driven MG（RMG）とする．

図 3 に RMG における平均勝ち人数を示す．これを見ると，M，S によらずつねにランダムより多い平均勝ち人数となっている．SMG では，特定のパラメータ領域でのみ協調行動が見られたが，RMG では

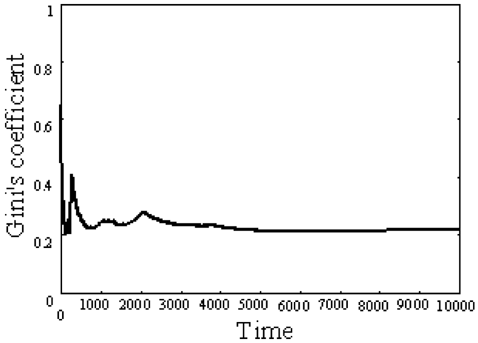

図 4 RMG における Gini 係数の時間変化

Fig. 4 Time evolution of Gini's coefficient in the case of RMG.

協調行動がさらに顕著に表れている．この理由としては，勝ったときにより多くの得点が戦略に加えられ，ゲームの早い段階から特定の戦略を集中して使用する傾向が生じるためと考えられる．これは，戦略数による平均勝ち人数の差が見られなくなっていることからも明らかである．

次に，RMG における資産分布を調べる．富を「勝ち回数」と定義すると次のような結果が得られる．**図 4** は RMG における Gini 係数の時間変化を示したもので，$G = 0.2$ 付近に収束している．実測値 0.5 と比較するとやや小さい値ではあるが，図 2 に示した SMG と比べればかなり現実に近い値が再現された．

得点方式を $(+2, -1)$ のほかに $(+3, -1), (+5, -1), (+10, -1)$ に変更してみると $(+2, -1)$ とほぼ同様の結果となった．逆に負けたときの減点が大きくなるように，$(+1, -2)$ にすると平均勝ち人数は 80〜92 の間となりランダム戦略より低い平均勝ち人数となってしまう．この原因としては，失敗した戦略を捨てて次々と異なる戦略を渡り歩くためであると考えられる．

3.4 投資による格差の拡大

エージェント間に格差をつける試みとして文献 6) では，SMG に投資を取り入れている．このモデルを Investing MG（IMG）と呼ぶことにする．

3.4.1 投資モデル（IMG）

投資モデルの詳細は次のようである．

(1) 初期状態としてエージェントに富を与える．
(2) エージェントは「自分の手」を出す際，それぞれが所有する富の量に応じて投資し，その投資額に応じて報酬を得る．

(2) の方法の詳細は次のようである．時刻 t でのエージェント i の富 $w_i(t)$，投資額を $w_i^I(t)$ とする．投資額は次式のようになる（r：投資率，$0 < r < 1$）．

$$w_i^I(t) = r w_i(t-1) \tag{1}$$

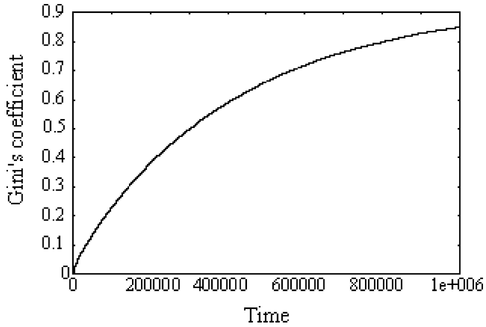

図 5 $r = 0.001$ のときの Gini 係数の時間変化（IMG，$N = 10001$，$S = 4$，$M = 8$）

Fig. 5 Time evolution of Gini's coefficient for $r = 0.001$ (IMG, $N = 10001$, $S = 4$, $M = 8$).

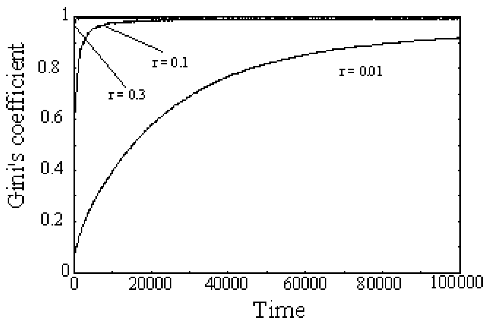

図 6 $r = 0.01,\ 0.1,\ 0.3$ のときの Gini 係数の時間変化（IMG，$N = 10001$，$S = 4$，$M = 8$）

Fig. 6 Time evolution of Gini's coefficient for $r = 0.01$, 0.1, 0.3 (IMG, $N = 10001$, $S = 4$, $M = 8$).

時刻 t で全エージェントが投資した富の合計を $w^S(t) = \sum_i^N w_i^I(t)$ とし，ゲームに勝ったエージェントの投資額の合計を $w^W(t) = \sum_{winner} w_i^I(t)$ とすると，エージェント i の報酬は

$$w_i^R = \begin{cases} w^S(t) w_i^I(t) / w^W(t) & (win) \\ 0 & (lose) \end{cases} \tag{2}$$

となる．つまり，各エージェントは自分が持つ富に応じて投資し，その投資額に応じて報酬を得ることになる[6)]．

3.4.2 IMG の結果

IMG から得られる Gini 係数の時間変化を**図 5**，**図 6** に示す．ここでは，$N = 10001$，$S = 4$，$M = 8$，投資率の下限を $r = 0.001$，上限を $r = 0.3$ として実験を行った☆．

図 5 は投資率 $r = 0.001$，図 6 は $r = 0.01$，0.1，0.3 である．どちらの図も時間変化にともない Gini 係

☆ 通常の投資において，全資産の 30%を超える投資は危険であり，また 0.1%未満はよほどの資産家でないと無意味である．

数は 0.9 付近に収束していることが分かる．SMG での Gini 係数はおよそ 0.01 に収束することから，IMG では確かに SMG とは逆に，不平等な方向へと向かっていることが分かる．IMG では r の値を小さくしていくと 1 回の試行での投資額は少なくなるため，Gini 係数の収束は遅くなる．また，r を小さくすると，Gini 係数は若干小さな値へと収束するが結局はほぼ同じ値に収束していくことが分かる．つまり，IMG では r の値によらず実データと比較して不平等すぎる資産分布を得る．したがって，現実的な資産分布にするためには投資以外に新たな要素を導入し，MG を拡張する必要があると考えられる．

4. MG の拡張：資産分布の現実化

以上のように，SMG は富に関して非常に平等で現実の富の性質を再現していない．そして，IMG では非常に不平等過ぎるという問題点がある．我々が問題にしている人工市場はマイノリティゲームという形で市場を想定しており，実社会の Gini 係数の値[7] がそのままあてはまるとは限らないが，どのような値であれ $G = 0$ や $G = 1$ に極端に近い値ではなく，$G = 0.5$ 近辺であることは間違いないものと思われる．改良の方法はいろいろ考えられるが，SMG と IMG では現実的な値へと近づけることはできなかった．そこで，MG における資産分布をより現実的なものにするため，「税の徴収」という要素を提案する．

- 勝ちエージェントは税率に応じて報酬から税を徴収され，その徴収された税の合計を勝ちエージェントで均等分配する[8]．

上記の方法を IMG に加えることで，MG を拡張する．以下，その方法について説明する．時刻 t での勝ちエージェントに再分配される富 $T(t)$ は，各エージェントが各々の報酬 w_i^R に比例した税 $Z \cdot w_i^R$ を供出し，その総和を勝ち人数 W で均等分配したものとなり

$$T(t) = \frac{Z}{W} \sum_{i=1}^{N} w_i^R(t) \tag{3}$$

で表される．また，エージェントが最終的に得る報酬 $R_i(t)$ は

$$R_i(t) = (1 - Z)w_i^R(t) + T(t) \tag{4}$$

で表される．これによって，各勝ちエージェントは得られた報酬の一部を税率に従って徴収され，その徴収された税金の総額を勝ちエージェントで均等に分配することになる．この再分配される報酬はゲームに勝ったときに，投資額にかかわらず最低限得られる報酬と考えることができる．IMG に「税の徴収」を加えたこのモデルを Taxed MG（TMG）と呼ぶ．

5. シミュレーション結果

5.1 パラメータの設定

シミュレーションには以下のパラメータを用いた．

- エージェント数 $N = 10001$
- 戦略数 $S = 4$
- 過去の履歴 $M = 8$
- 投資率 $r = 0.01,\ 0.05,\ 0.1,\ 0.2,\ 0.3$
- 税率 $Z = 0.01,\ 0.05,\ 0.1,\ 0.2,\ 0.3$

5.2 Gini 係数の比較

まず，4 章の手法を加えた結果 MG における資産分布の様子がどのように変わったのかを Gini 係数を用いて見ていく．

まず，**図 7** は $r = 0.01$，$Z = 0.01$〜0.3 のときの Gini 係数の時間変化を示しており，税率が大きくなるほど Gini 係数は小さな値に収束している．また，**図 8** は $r = 0.3$，$Z = 0.01$〜0.3 であるが，図 7 と比較す

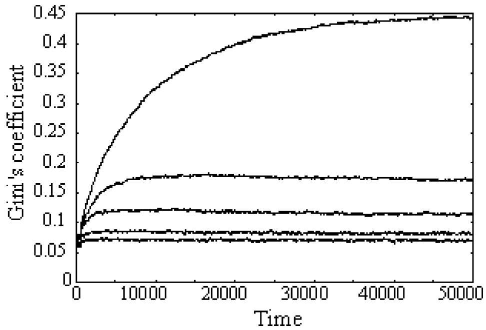

図 7　$r = 0.01$，$Z = 0.01$〜0.3 の Gini 係数の時間変化（TMG，上から $Z = 0.01,\ 0.05,\ 0.1,\ 0.2,\ 0.3$ を表している）
Fig. 7　Time evolution of Gini's coefficient for $r = 0.01$ and $Z = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ (TMG, from top to bottom).

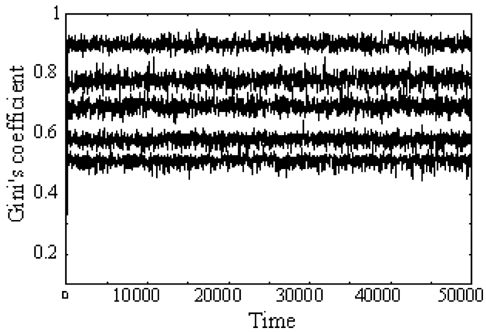

図 8　$r = 0.3$，$Z = 0.01$〜0.3 の Gini 係数の時間変化（TMG，上から $Z = 0.01,\ 0.05,\ 0.1,\ 0.2,\ 0.3$ を表している）
Fig. 8　Time evolution of Gini's coefficient for $r = 0.3$ and $Z = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ (TMG, from top to bottom).

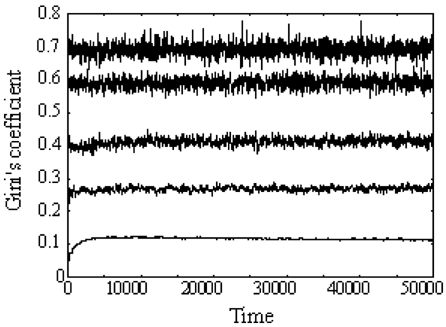

図 9 $r = 0.01$〜0.3, $Z = 0.1$ の Gini 係数の時間変化（TMG, 上から $r = 0.3$, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01 を表している）

Fig. 9 Time evolution of Gini's coefficient for $r = 0.3$, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01 and $Z = 0.1$ (TMG, from top to bottom).

ると r を大きくすると Gini 係数の収束が早くなることが分かる．

また，**図 9** は $r = 0.01$〜0.3, $Z = 0.1$ のときの Gini 係数の時間変化を示しているが，投資率 r の値を大きくすると Gini 係数の値の振動が大きくなる．また，投資率が大きくなるにつれて Gini 係数は大きな値に収束する．このように，「税の徴収」という要素を加え，税率と投資率のパラメータを変化させることで MG における Gini 係数を様々な値に収束させることが可能となった．

5.3 パレート指数

資産分布はまた，パレート指数を用いて表すことができる．富 x の累積確率密度分布関数 $P(x)$ が

$$P(x) = Ax^{-\alpha} \tag{5}$$

という定式が高額所得者の所得分布に対して成立する．ここで，A は正の定数，α はパレート指数と呼ばれるもので，このパレート指数の値が大きいほど資産分布が平等で逆に小さいほど不平等である．

5.2 節の結果がパレートの法則を満たしているかを検証する．このとき，エージェント数が少ないと正確なパレート則が得られないため，$N = 10001$ としシミュレーションを行った．**図 10** は投資率 $r = 0.3$, 税率 $Z = 0.3$ のときの富の累積確率分布の図であり，$1000 < wealth < 10000$ では資産分布の図が直線となっており，TMG の資産分布はパレートの法則を満たす．つまり，現実的な資産分布を再現するモデルであるといえる．そして，この図からパレート指数を評価すると $\alpha = 1.82$ である．同様に SMG でもこのような図からパレート指数を評価するとその値は TMG の数十倍である．一方，日本のパレート指数はおよそ $\alpha = 1$〜2 [9),10)] であり，TMG において現実に近い値をとっている．

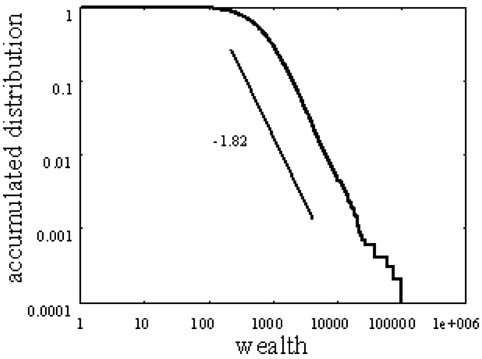

図 10 $r = 0.3$, $Z = 0.3$ のときの富の累積確率分布を両対数プロットした図（TMG, $S = 4$, $M = 8$, $N = 10001$）

Fig. 10 Accumulated probability distribution of wealth in log-log plot for $r = 0.3$ and $Z = 0.3$ (TMG, $S = 4$, $M = 8$, $N = 10001$).

表 2 各投資率，税率のパレート指数の値

Table 2 Pareto's indices in TMG for investment rate, $r = 0.01$–0.3 and tax rate, $Z = 0.01$–0.3.

		税率：Z				
投資率：r		0.01	0.05	0.1	0.2	0.3
	0.01	2.62	6.01	11.27	16.3	16.9
	0.05	2.75	3.05	4.08	4.79	5.77
	0.1	1.96	2.11	2.4	2.74	3.58
	0.2	1.07	1.33	1.65	2.05	2.52
	0.3	0.93	1.21	1.29	1.69	1.82

表 2 は投資率 $r = 0.01$〜0.3, 税率 $Z = 0.01$〜0.3 のすべての組合せにおいて，TMG により得られた資産分布のパレート指数を求め，表にまとめたものである．あるパラメータ領域では現実的な値が得られていることが分かる．この表からも 5.2 節で述べたように，投資率が大きくなるほど資産分布は不平等に，税率が大きくなるほど平等になっていることが分かる．

6. 考　　察

以上のように，「投資」と「税の徴収」の要素を加えることで MG における資産分布は確かに現実的なものになった．では，どの要素によって資産分布の振舞いが変化したのだろうか，またそこから何が分かるのだろうか．

まず，今回拡張した IMG，TMG では投資活動を行うことでエージェントの振舞いが変化することはないことに注意していただきたい．なぜなら，エージェントの二者択一の選択は投資活動や自分の各時点においての資産に影響されないからである．つまり，エージェントの勝ち回数自体は SMG と同等である．しかし，投資をすることでエージェント間には資産の差が現れる．そこで，勝ち回数と資産の関連性を**図 11** に

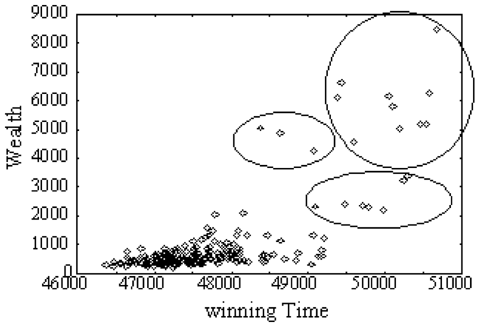

図 11　勝ち回数に対するエージェントの富の量（TMG，$N = 201$）
Fig. 11　Wealth vs. winning rate of agents (TMG, $N = 201$).

表してみた．右上の円は多数回ゲームに勝つことで大きな利益をあげているエージェント，右下は多数回ゲームに勝ってはいるがそれほど大きな利益をあげていないエージェント，左の円はそれほど多く勝ってはいないが大きな利益をあげているエージェントであると考えられる．これにより，TMG ではより少数で勝つことにより，勝ち回数自体は多くなくても，多くの富を得るエージェントが存在することが示される．つまり，投資家はより多数回勝ち，より少数になるような戦略を立てることが望ましいという要素が TMG に組み込まれていることが分かる．

また，投資活動を導入した IMG において図 5，6 に示すように Gini 係数が 1 に近い値に収束していき資産分布が不平等になりすぎるという結果は，現実の市場においても同様に，もし税金を課さなければ，投資家の資産分布は不平等になり一部の投資家に富が集中していくという状況に対応すると解釈できる．

7. 結　　論

本研究では，MG における二者択一の意思決定をもとにした人工市場モデルを考えた．

MG の最初の形である SMG の資産分布は非常に平等で，皆がほぼ同じ資産を保有しており非現実的である．得点の付け方を（+2，−1）に変更した RMG は資産分布に差がつき，$G = 0.2$ 程度になることが分かった．また，各エージェントが定率 r に従って資産の一部を供出する IMG では逆に不平等すぎるという問題点が見られた．そこで，その点を改善し，より現実の社会の資産分布の様子を再現したモデルを作成するため「税の徴収」という要素を加えた TMG を提案した．この「税の徴収」は税金によって徴収された富を再分配することでゲームに勝ったときに最低限の報酬を保証するものである．その結果 MG における資産分布は，Gini 係数，パレート指数という点において，現実の社会の値に近い資産分布を再現することが可能となった．

本研究の TMG において，6 章で述べたように 3 種類のエージェントが観測された．これより，TMG ではより少数になったときにより多くの利益をあげるという要素が組み込まれ，それによって資産分布が作られているということが分かった．

また，税金を課さない IMG において，資産分布は非常に不平等になるという結果から，仮に現実のネット上の取引等を非課税にすると考えるならば，その資産分布は非常に不平等なものへとなっていくのではないかという推論を得た．

参 考 文 献

1) Epstein, J.M. and Axtell, R.: *Growing Artificial Societies*, Brookings Instituion (1996). 服部正太，木村香代子（訳）：人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション (1999).
2) 和泉　潔：人工市場—市場分析の複雑系アプローチ，森北出版 (2003).
3) Challet, D. and Zhang, Y.-C.: Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game, *Physica A*, Vol.246, pp.407–418 (1997).
4) Challet, D., Marsili, M. and Zhang, Y.-C.: *Minority Games-inveracting agents in financial markets*, Oxford University Press (2005).
5) 栗原　聡：Minority Game の不思議，情報処理学会誌，Vol.45, No.4, pp.388–394 (2004).
6) 戸田皓治，中村泰之：Minority Game における富のダイナミクス，情報処理学会論文誌：数理モデル化と応用（TOM14），掲載予定.
7) 厚生労働省：所得再分配調査報告書 (2002). http://wwwdbtk.mhlw.go.jp/toukei/kouhyo/data-kou6/data14/h14hou.pdf
8) Tanaka-Yamawaki, M. and Tokuoka S.: Wealth Concentration Problem in the Minority Game, *Proc. 4th Int. Workshop on Agent-based Approches in Economic and Social Complex Systems*, July 9–13, 2005, Tokyo Inst. Tech., Japan, pp.237–241 (2005).
9) Ishikawa, A.: Pareto law and Pareto index in the income distribution of Japanese companies, *Physica A*, Vol.349, pp.597–604 (2005).
10) Chatterjee, A., et al. (Eds.): *Econophysics of Wealth Distributions*, Springer (2005).

(平成 17 年 10 月 4 日受付)
(平成 18 年 3 月 2 日採録)

徳岡　聖二

1983 年生．2005 年鳥取大学工学部知能情報工学科卒業，同年鳥取大学大学院工学研究科知能工学専攻入学．現在，博士前期課程 1 年在学．主たる研究テーマは人工市場と資産分布．

田中美栄子（正会員）

1950 年生．1974 年京都大学理学部卒業，1979 年名古屋大学大学院満期退学，1983 年 Rochester 大学博士課程修了（Ph.D. in physics）；CCNY，SUNY，NASC，椙山女学園大学，宮崎大学工学部を経て，現在，鳥取大学工学部知能情報工学科知識工学講座教授．主たる研究テーマは経済物理学，複雑系科学．『経済物理学：暴落はなぜ起こるのか？』（Didier Sornette 原著）（PHP 出版，2004）（共訳），『情報科学概論』（講談社，1996）等．日本物理学会，I.E.E.E.（Computer Society），応用数理学会各会員．