

# マイノリティ・ゲームにおける大規模エージェントシミュレーションの解析

○増田知昭 山田隆志 山本学 吉川厚 寺野隆雄 (東京工業大学)

## Analysis of Large-scaled Simulation in Minority Game

\*T. Masuda, T. Yamada, G. Yamamoto, A. Yoshikawa and T. Terano  
(Tokyo Institute of Technology)

**Abstract**— Agent-based simulation has been used for the analysis of social and economic systems. However, several studies report that the simulation results depend on the number of agents. This study investigates whether the number of agents really affects the simulation results by taking up the Minority Game which is often applied to real systems such as financial markets and resource allocation. Our simulation results show that both strategy space and the number of agents may affect the cooperative behaviors of agents as the simulation scale becomes larger.

**Key Words:** agent-based simulation, large-scaled simulation, minority game

### 1 背景と目的

従来エージェント・ベース・シミュレーション (Agent-based simulation; ABS) は交通<sup>1)</sup> や金融市場<sup>2)</sup> のような社会や経済を対象として、交通に関する人や乗り物、金融市場の参加者などをエージェントとして記述するモデルとして使われてきた。近年はサイバーセキュリティのためのソフトウェア開発<sup>3)</sup> のような参加者だけでなく、開発のモデルにまでシミュレーションの手法として用いられるようになってきた。このような中で、ABSを行うに当たり適切なエージェント数の設計が課題となってきた。

一方、ABSをリアルな状態に近づけるための大規模化を実現するハードウェアやソフトウェアの基盤的研究がなされている<sup>4)5)</sup>。そこでは1億エージェントといった大規模なシミュレーションも可能になってきた<sup>6)</sup>。このような技術を利用して、ビッグデータ利用において大規模なABSが用いられている場合もでてきている<sup>7)</sup>。

しかしながら、エージェント数の規模によりシミュレーション結果が異なるという報告がなされている<sup>6)</sup>にもかかわらず、適切なエージェント数でABSを設計する手法が確立していない。ABSは実対象をシンプルにモデル化するというKISS原理に従っている<sup>8)</sup>ので、パラメータの数は少ない。そのパラメータにおいて大規模化がシミュレーションの結果にどのような作用があるのかを分析し、大規模化が必要なモデルを明らかにしていく必要がある。本論文においてはエージェント数を大規模化することによる影響を分析する。

先行研究としては、Yamamotoら<sup>8)</sup>はオークションモデルにおいて、エージェント数を大規模化させると落札価格が上昇するという報告がある。オークションモデルではエージェントが落札価格という系全体で共有するパラメータに直接アクセスできるので、エージェントの大規模化が落札に可能なエージェントを増やす事になり、シミュレーション結果に影響を与えたものと考えられる。

本論文ではマイノリティ・ゲーム (minority game; MG)<sup>9)</sup> について実験的に検討を行うことにした。MG

は金融市場のシミュレーション<sup>10)</sup> だけでなく、輻輳制御<sup>11)</sup> や資源配置問題<sup>12)</sup> などに用いられるモデルである。このモデルではオークションモデルの落札価格とは違って、全体で共有する情報に各エージェントが直接的にアクセスすることができない。しかも、他のエージェントに直接的に影響を与えることもできない。

エージェントは二者択一で2つあるグループから所属するグループを選択する。それ集計して少数派のグループとなったエージェントが勝者となり利得を得るというゲームをステップ毎に繰り返すゲームである。全体で共有する情報は二者択一の内、勝者がいずれを選んだのかという過去の履歴のみである。すなわち、エージェントの増加が、オークションモデルとは異なりすぐに全体に影響を及ぼすファクターはないため、挙動が異なることが予想される。MGとオークションモデルを対比することで、エージェント数の大規模化とモデルについて考察する。

### 2 マイノリティ・ゲーム

MGではエージェントは2つのグループのいずれに属するかを選択する。この時、2つのグループをグループ $\{0, 1\}$ とする。そして、選んだグループが少数派だったエージェントは勝者となって利得を得る。多数派となったエージェントは何も得られない。これを定められたステップ毎に繰り返していく。

また、直近 $m$ ステップまでで少数派のグループがいないグループだったのかを履歴とし、これをエージェントで共有する。この履歴の初期値はランダムで与えられ、ステップ毎に更新されていく。 $m$ は履歴の長さと呼ぶ。仮に履歴の長さが3のゲームで1のグループが3回連続で少数派になっている状況では履歴は“111”と決められる。

更に、エージェントはこの意思決定の際にそれぞれに予めランダムに与えられた戦略表を用いる。戦略表とは2列で、左側に履歴、右側に属すべきグループ $\{0, 1\}$ のいずれか)が定められた表である。履歴は $2^m$ 通り存在するので、戦略表の組み合わせは $2^{2^m}$ 存在することになる。

例えば履歴の長さを $m = 3$ とした時の戦略表は Table

1 になっている。エージェントがこの戦略表を使い、かつ  $m = 3$  で 3 回連続でグループ 0 が少数派となっていた場合、このエージェントは 1 のグループに属することになる。ただし、エージェントは戦略表を  $s$  個持っており、最も点数のよい戦略表を使う。戦略表の点数は初期値が 0 で少数派となった場合には +1, そうでなければ -1 と更新される。点数が同じ戦略表が複数あった場合にはその中からランダムに選択される。なお、この戦略表はランダムに与えられているので、同じ戦略を複数個持っているエージェントが存在する可能性もある。

Table 1: Example of strategy table

履歴	グループ
000	0
001	1
010	0
011	0
100	1
101	1
110	0
111	0

### 3 実験

シミュレーションによる実験では、エージェント数  $N$  は  $N = 10k + 1, 100k + 1, 1000k + 1, 20001, 30001, 40001, 50001$  ( $k = 1, 2, \dots, 9$ ) とし、履歴の長さ  $m$  を  $m = 1, 2, \dots, 14$  とし、エージェントが持つ戦略表の数を  $s$  ( $s = 2, 3, \dots, 10$ ) とした。ゲームの繰り返し回数は 10000 ステップとした。試行回数はそれぞれの組み合わせで 30 回ずつ行った。

勝者の割合を時系列に対して見たのが Fig. 1, 2, 3 である。なお、 $s = 2$  としており、割合と移動平均 (Standard Moving Average; SMA) を付してある。履歴の長さが長いとエージェント数が多い方が勝者の割合が高くなるように思われる。また、ステップが進む毎に勝者の割合は上昇している。集団内で協調行動が起きていることが示唆される。

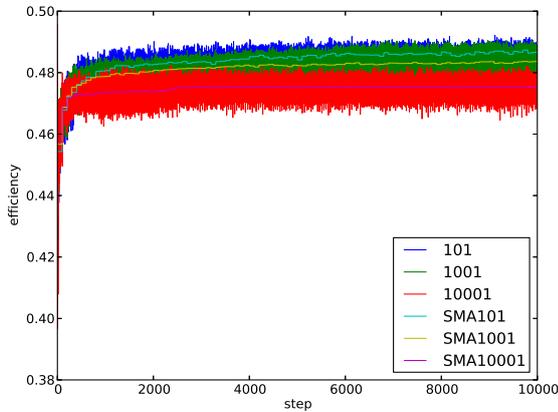


Fig. 1: Mean of ratio of minority group ( $m = 2, s = 2$ )

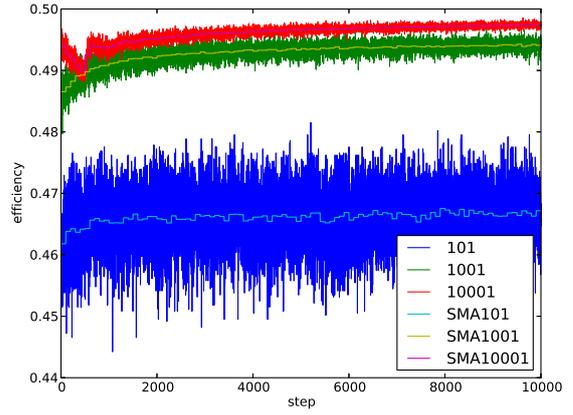


Fig. 2: Mean of ratio of minority group ( $m = 8, s = 3$ )

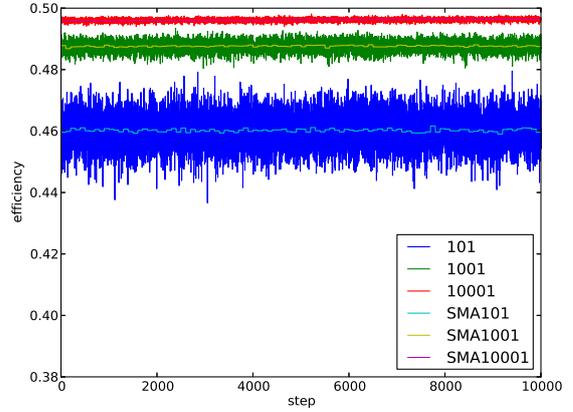


Fig. 3: Mean of ratio of minority group ( $m = 14, s = 3$ )

10000 ステップ目で履歴の長さとおエージェントの持っている戦略表に対して少数派の割合を示したグラフが Fig. 4 である。エージェント数が  $N = 11, 101, 1001, 10001$  の場合のグラフを積層している。エージェント数が増加すると、勝者の割合が上昇していくことが分かる。中でも  $N = 101, 10001$  の場合を示したのが Fig. 5, 6 である。特にエージェント数の増加による履歴が長い場合の勝者の割合の向上がよく分かる。エージェントの持つ戦略表の数に比べて、履歴の長さによって大きく値が変化しているようである。

そこで履歴の長さの影響を見るために示したのが、Fig. 7 である。これは 10000 ステップ目で  $N = 101, 1001, 10001, s = 10$  の場合での履歴の長さに対する勝者の割合の平均のグラフである。同様にしてその標準偏差を示したのが Fig. 8 である。履歴が長くなってもエージェント数が十分に大きければ系として協調行動が生まれ、勝者の割合が増加したものと考えられる。エージェント数が増えた結果、系全体としては情報の有効活用ができるようになったという見方もできる。

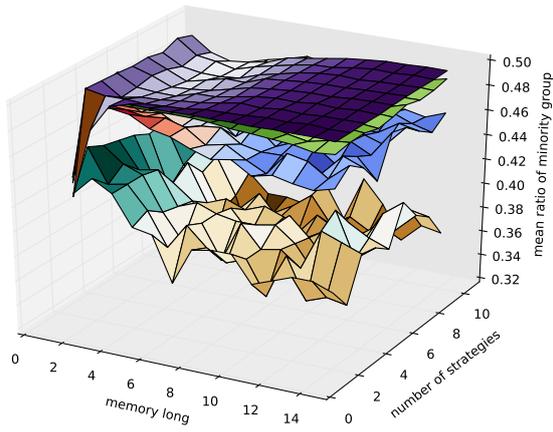


Fig. 4: Mean ratio of minority group for memory long and number of strategies in 10000 time step ( $N = 11, 101, 1001, 10001$ )

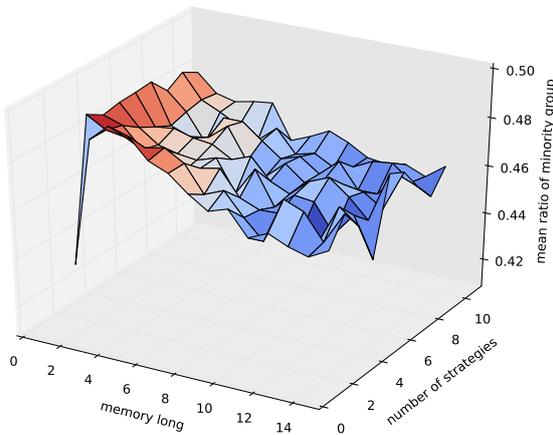


Fig. 5: Mean ratio of minority group for memory long and number of strategies in 10000 time step ( $N = 101$ )

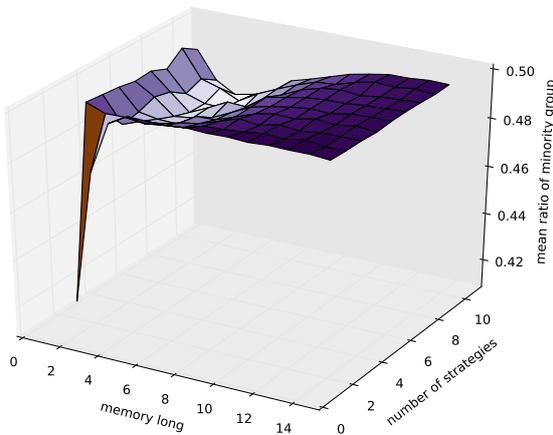


Fig. 6: Mean ratio of minority group for memory long and number of strategies in 10000 time step ( $N = 10001$ )

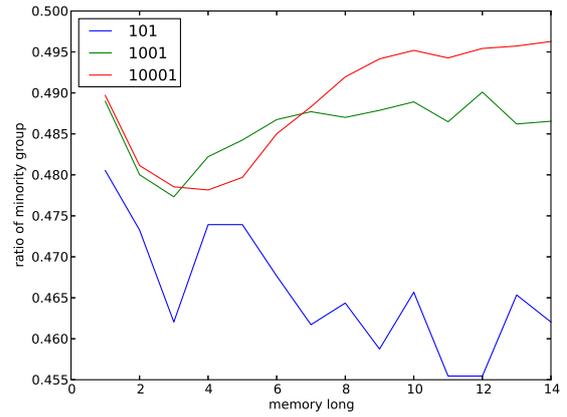


Fig. 7: Mean of ratio of minority group of  $m$  in 10000 time step

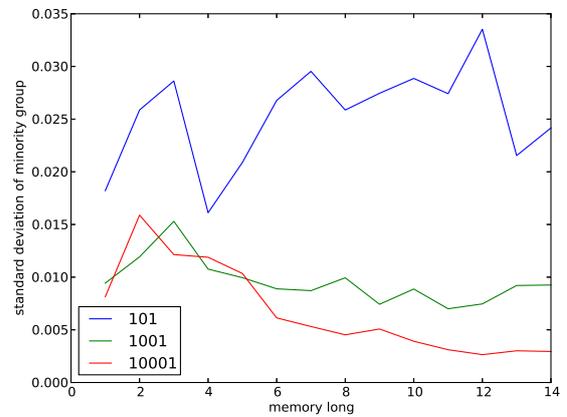


Fig. 8: Standard deviation of ratio of minority group of  $m$  in 10000 time step

次に 10000 ステップ目で 1 を選択したグループの挙動を示したのが Fig. 9 である。ただし、両対数のグラフであり、 $N = 21, 51, 101$ ,  $s = 2$  としている。なお、 $z \equiv 2^m/N$  である。ここで相転移が確認できた<sup>13)</sup>。また、 $N = 10001, 30001, 50001$  とエージェント数  $N$  を大きく増加させた場合のグラフが Fig. 10 である。相転移によるパラメータの上昇はよりゆるやかになっている。ただし、どちらも両対数グラフであり、値に注意する必要がある。

しかし一方で、 $s = 10$  の場合のグラフはそれぞれ  $N = 21, 51, 101$ ,  $N = 10001, 30001, 50001$  において Fig. 11, 12 のようであった。エージェントの持つ戦略表の数によってエージェントがどちらにグループに偏るかが大きく変化するようである。この間の変化はグラフが Fig. 13 である。エージェントが増加する毎に特定の傾向に近づいているようである。

エージェントの持つ戦略表の個数  $s$  を更に変えたものが Fig. 14, 15 である。 $s > 2$  であると、 $s = 2$  で見られた相転移とは異なる現象が生まれている可能性がある。

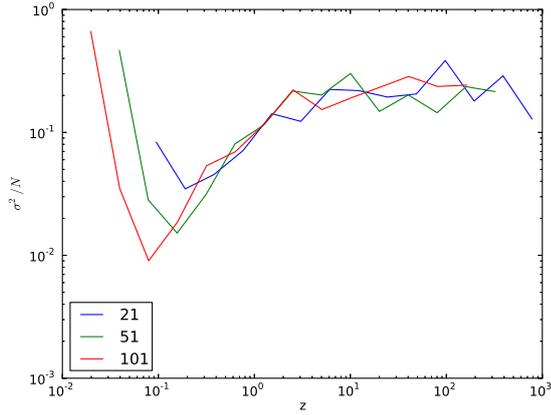


Fig. 9: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 21, 51, 101, s = 2$ )

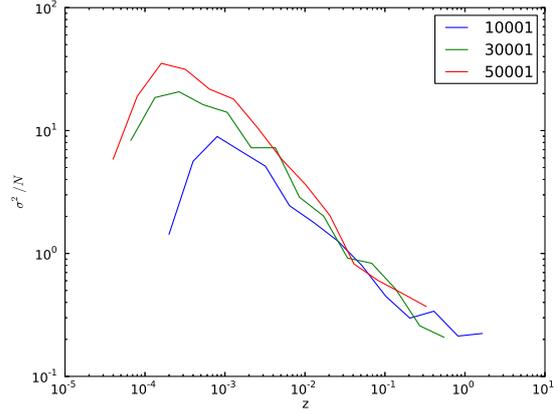


Fig. 12: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 10001, 30001, 50001, s = 10$ )

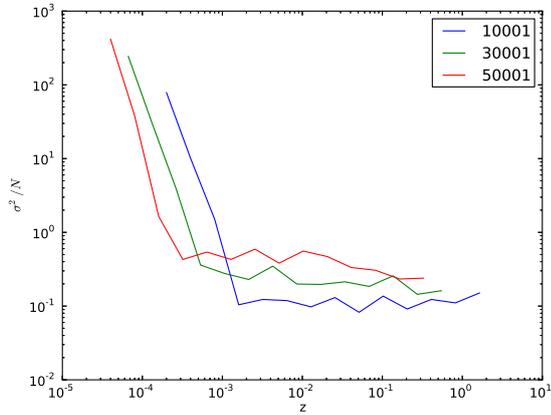


Fig. 10: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 10001, 30001, 50001, s = 2$ )

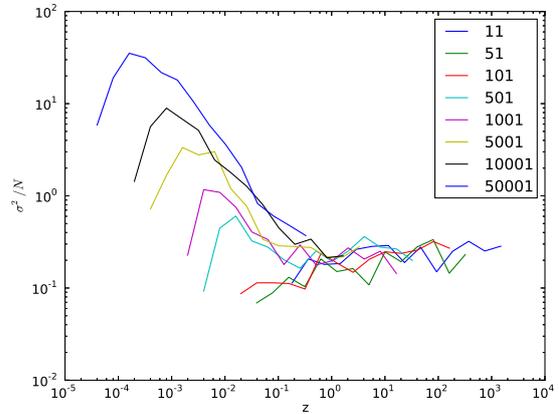


Fig. 13: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 11, 51, 101, 501, 1001, 5001, 10001, 50001, s = 10$ )

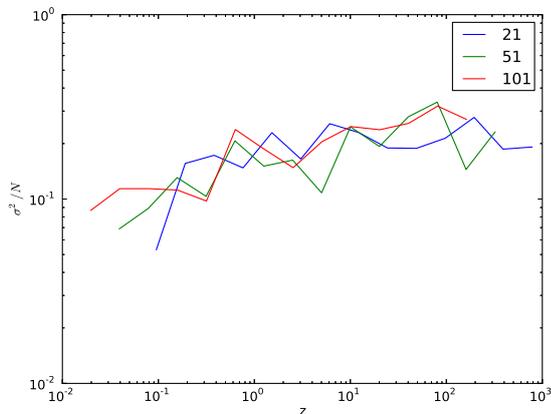


Fig. 11: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 21, 51, 101, s = 10$ )

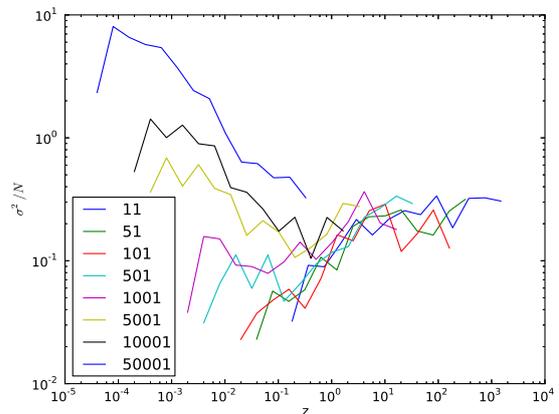


Fig. 14: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 11, 51, 101, 501, 1001, 5001, 10001, 50001, s = 3$ )

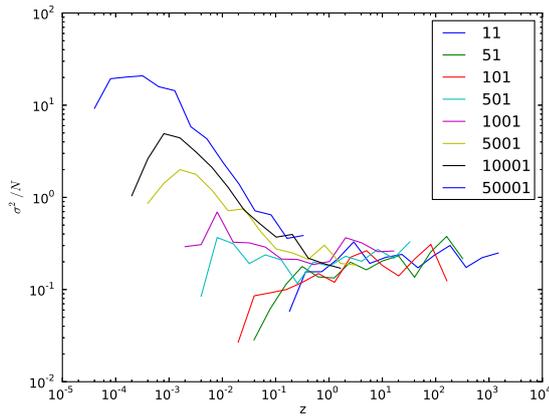


Fig. 15: Behavior of a group of 1 on a log-log scale ( $N = 11, 51, 101, 501, 1001, 5001, 10001, 50001, s = 6$ )

## 4 考察

### 4.1 戦略表の状態空間

戦略表の状態空間は  $2^{2^m}$  である。これをエージェントでどのように満たしていくかによって挙動が変わる。特に履歴が長いことは情報量が多いとも考えることができるが、この場合にはエージェントが多い方が系全体としての効率を上昇する。これはエージェント間で  $N/2$  に別れようとする協調行動<sup>9)</sup>が発生し、時系列が進むことによって勝者の割合が上昇していったものと思われる。

一方で、エージェント数が少ないにもかかわらず履歴が長い場合は系で持て余してしまい、ランダムで選択した場合とあまり変わらない状態になり、分散も大きいままであったと予想される。エージェントの集団の中に存在しない戦略表が多すぎるのである。

勝者の割合や一方のグループの人数の偏りを集団としての効率と考えると、集団として扱える戦略表の組み合わせによって効率が変化すると言える。だから扱える範囲内であれば打ち止めであり、範囲外であればエージェントを増やすと効率が上がる。

大きなデータを扱う際には大人数でそれぞれに配られたデータを担当して処理しているかのような見方もできるだろう。最終的に1人しか品物を得られないオークションとは異なる。

### 4.2 エージェントの持つ戦略表の数

エージェントの持つ戦略表の数が  $s = 2$  の場合には相転移を確認できたが、 $s = 10$  の場合は  $s = 2$  の場合とは明らかに異なる挙動を見せた。これは  $s = 3, 6$  の場合でも同様であった。 $s > 2$  と戦略表が多い場合、エージェントは選択肢を多く持っている状況だと考えられる。しかし選択はランダムなので、エージェントの集団内で安定させようとしてもどれを選択するか分からないのである。これは協調行動の妨げになっている可能性がある。

例えば戦略表が  $s = 2$  場合、あるステップでの行動の修正はもう一方の戦略を使うだけで済むので次のステップでは即座に完了する。特にごく初期では戦略表

の点数に大きな差がないのでこの修正が非常に早く作用する。しかし戦略表が  $s > 2$  である場合には、同点数の戦略が2つ以上存在する可能性がある。このような場合には協調行動が起こるとしても集団としては望ましい戦略を使うとは限らないので、遅延が発生してしまったり、協調行動に反した行動をとってしまう可能性がある。

更に履歴が十分に短い場合には同じ戦略表を複数持つ場合もありえる。仮に持っている戦略表の全て同じ戦略表であった場合には、エージェントがどの戦略表を選んで行動したとしても、その行動は協調行動となっていない。

選択肢が多いことは全体から見ると必ずしもいいこととは限らないと見ることもできるだろう。先述のデータを扱うという見方からすれば、1人辺りの処理の要求水準が上がったと言えるかもしれない。少なくともこのレベルのゲームではエージェントもシンプルな行動しかできないので、選択肢が増えても対応しきれない可能性がある。

### 4.3 MG のシミュレーション結果に対するエージェント数の影響

ここまです踏まえるとエージェント数の影響はそれ単体でシミュレーションの結果にあまり大きな影響を与えないことが分かる。しかし、重要な状態空間である戦略表の種類を満たすにはそのパラメータを持っているのがエージェントなので大きな影響を与える。また、エージェントそれぞれが持つ戦略表の数が3個以上の場合は協調行動の遅延が発生する可能性も相まって相対的に重要なパラメータとして存在しているようである。

戦略表の状態空間をエージェントに扱わせる際に、エージェントはシンプルな行動しか取れない。これを解決するには状態空間のサイズに合わせてエージェントそのものを増やす必要があるのだろう。言い換えれば、戦略表の適切な入れ物としてエージェント数を設定すると考えられる。よって、モデルを作る際には戦略表の状態空間に合わせてエージェント数をモデリングしていかなければならない。

大規模化によるシミュレーション結果の挙動の変化が報告されたオークションモデル<sup>6)</sup>では、エージェントが入札価格を非常に高額にするという低確率の事象が、エージェント数を大規模化することによって発生した。それによって、落札価格が変わるというシミュレーション全体での結果が変化したと考えられる。つまり、オークションモデルにおいてはエージェント数とは試行回数という見方もできるパラメータであったわけである。

一方で、MG においては戦略表の組み合わせという有限な状態空間を埋めるためにエージェント数の大規模化が必要となるようである。しかし、ただ単にエージェントが多いだけでは協調行動は必ずしも起きないし、増やせば増やすほど協調するわけでもない。戦略表の取りうる状態数やエージェントがそれぞれに持つ戦略表の数によって変わってくる。これを意図してモデルを考えるべきである。特に制御などの分野において協調行動を意図的に起こし、それを利用目的として MG を用いる場合にはこれについても意識をしておか

ねばならないだろう。

## 5 まとめと展望

マイノリティ・ゲームでもエージェントの大規模化により、ゲームの勝者の割合などのシミュレーション結果が変化することが確認できた。勝者の割合や一方のグループへの偏りといった協調行動にエージェント数は作用するようである。これは戦略表の取りうる組み合わせをエージェントの集団全体でどの程度網羅しているかに依存しているものと考えられる。MGにおいても、履歴が十分に長く人数も多いような事象を扱う場合にはエージェント数の大規模化が必要な可能性が示唆されたわけである。

ただし、どの程度の大規模化が必要であるかは明らかになっていないので、今後はMGのより詳細な分析をした上で、状態空間とエージェント数がシミュレーションの結果に与えるのかを明確にする必要がある。そして、そこから抽出されたものを用いることによって、可能な範囲でのモデルの分類していきたい。

更に他のモデルでもエージェント数の大規模化の検討を行い、シミュレーションの大規模化という側面からABSにおけるエージェント数の影響の分析を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) Jörg Esser and Michael Schreckenberg. Microscopic simulation of urban traffic based on cellular automata. *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 8, No. 05, pp. 1025/1036, 1997.
- 2) Thomas Lux and Michele Marchesi. Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market. *Nature*, Vol. 397, No. 6719, pp. 498/500, 1999.
- 3) Igor Kotenko. Agent-based modelling and simulation of network cyber-attacks and cooperative defence mechanisms. *Discrete Event Simulations. Sciyo, Inteh*, pp. 223/246, 2010.
- 4) Dan Chen, Georgios K Theodoropoulos, Stephen J Turner, Wentong Cai, Robert Minson, and Yi Zhang. Large scale agent-based simulation on the grid. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 24, No. 7, pp. 658/671, 2008.
- 5) Tadahiko Murata, Hiroshi Arikawa, S-i Morishita, and Taiyo Maeda. A design of problem solving environments for policy making assistance using mas-based social simulation. In *e-Science and Grid Computing, IEEE International Conference on*, pp. 521/528. IEEE, 2007.
- 6) Gaku Yamamoto, Hideki Tai, and Hideyuki Mizuta. A platform for massive agent-based simulation and its evaluation. *Massively Multi-Agent Technology*, pp. 1/12, 2008.
- 7) Hua Cai and Ming Xu. Greenhouse gas implications of fleet electrification based on big data-informed individual travel patterns. *Environmental science & technology*, 2013.
- 8) Robert M Axelrod. *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton University Press, 1997.
- 9) Damien Challet and Y-C Zhang. Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 246, No. 3, pp. 407/18, 1997.
- 10) Damien Challet, Matteo Marsili, and Yi-Cheng Zhang. Minority games: interacting agents in financial markets. *OUP Catalogue*, 2004.
- 11) Hiroshi Kutsuna, Shigeaki Tagashira, and Satoshi Fujita. A fair and efficient congestion control scheme based on minority game. In *Networks, 2006. ICON'06. 14th IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 1/6. IEEE, 2006.
- 12) Aram Galstyan, Shashikiran Kolar, and Kristina Lerman. Resource allocation games with changing resource capacities. In *Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pp. 145/152. ACM, 2003.
- 13) Robert Savit, Radu Manuca, and Rick Riolo. Adaptive competition, market efficiency, and phase transitions. *Physical Review Letters*, Vol. 82, No. 10, p. 2203, 1999.