

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月17日現在

機関番号：58001  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22700242  
 研究課題名（和文） 内部ダイナミクスを持つ動的認知主体群によるルールダイナミクスの創発とその安定化  
 研究課題名（英文） Stabilization and Emergence of Rule Dynamics in Dynamic Cognitive Agents with Internal Dynamics  
 研究代表者  
 佐藤 尚（SATO TAKASHI）  
 沖縄工業高等専門学校・メディア情報工学科・助教  
 研究者番号：70426576

研究成果の概要（和文）：複数のルールの複雑な集合によって、それらの安定性が生じるという新制度派経済学者 North（1990）の主張に着目し、複数のルールが共存可能な多人数ゲームを用いて、マクロレベルで創発するルールの動的な変化（以下 RD と呼ぶ）を安定化させるための条件について議論した。シミュレーション実験の結果、RD を安定化させるためには、主体が他のグループ内で創発したルールを直接学習してそのルールを定期的に主体の内部に内在化させること、複雑なルールと単純なルールと一緒に遵守すること、そして、全体的に複雑なルールの方が多い場合、主体のグループ間移動頻度を少なくすることが必要であることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：Based on the North's (1990) claim that rules can be stabilized by complex aggregation of the rules, we discussed the conditions to stabilize rule dynamics (RD), which is a dynamical change of the rules emerged at the macro level, by multi-player games in which many rules can exist simultaneously. The simulation results showed that the following three conditions are important for stabilization of the RD: 1) direct learning of the rules emerged at other groups and internalizing them, 2) conforming both simple and complex rules simultaneously, and 3) reducing frequency of movement of subjects among groups when there are more complex rules than simple ones.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：動的認知主体、内部ダイナミクス、Simple Recurrent Network with Self-Influential Connections、ルールダイナミクス、Multi-Group Multi-Game、Minority Game、N-person Iterated Prisoners' Dilemma Game、ミクロマクロ・ループ

## 1. 研究開始当初の背景

従来のゲーム理論や経済物理学では、確定した構造を持つ原子のように行為主体を静的なものとして非常に簡略化して捉えることが多い。進化ゲーム理論の登場により、学

習や進化の手法を用いて、主体の行動を決定するための内的ルールや構造を動的に変化させるモデルを採用した研究が見られるようにはなったが、その変化が外部からの影響のみならず、自律的にも可能であるモデルを

採用している研究は殆ど見当たらない。しかし、我々人間の行動決定に影響を及ぼす心の「ゆらぎ」は、社会的・経済的活動やそれらの相互作用により創発するマクロレベルの様々な現象を研究する上で極めて重要な要素であると考えられる。90年代に複雑系科学が勃興して以降、このような主体の内的なゆらぎを重要視したゲーム論的枠組みを採用する研究はいくつか見られるが (Taiji & Ikegami 1999, 森本 1999 など)、3人より多くのプレーヤによる多人数ゲームを採用したものは殆ど見られない。

更に、塩沢 (1999) は、マクロレベルで見られる社会・経済現象を捉える場合、マイクロレベルの主体を主体の内外との相互作用を通して内的な思考過程を変化させられる動的な存在として捉えること、そして、マクロレベルで生じる様々な構造や性質がマイクロレベルの主体の振る舞いの単なる寄せ集めではなく、それらが化学反動的相互作用することによって創発するものとして捉えることが重要であると指摘した。また、マイクロレベルとマクロレベルが永続的に影響・規定し合う関係をマイクロマクロ・ループと呼び、その重要性を説いた。このマイクロマクロ・ループを考慮したものには和泉 (2003) の研究などいくつか見られるが、いずれもマイクロレベルの主体に静的なモデルを採用したり、主体の振る舞いの単なる集合としてマクロレベルを捉えているものが殆どで、塩沢が定義したマイクロマクロ・ループを扱っている研究は皆無に等しい。また、マクロレベルで創発した構造やルールが動的に変化するルールダイナミクスの観点からの議論は見られない。

一方、申請者は、内部ダイナミクスを持つ動的認知主体の構造として Elman (1990) が提案した単純再帰型ネットワーク (以下 SRN と呼ぶ) を基にしたモデル提案 (後述) し、それを用いた研究をこれまで行ってきた。具体的には、主体間相互作用として、非常に単純化した株式市場のモデルとして見なすことができる Challet & Zhang (1997) によって提案された Minority Game (以下 MG と呼ぶ) を採用し、シミュレーション実験を行った。その結果、カオス的振る舞いを示す個体が集団の約9割を占める場合、ルールダイナミクスが創発し、そのダイナミクスの維持にはマイクロマクロ・ループが必要であることが分かった。しかし、マクロレベルで創発する複雑なルールを単純化・安定化するための条件はまだ分かっていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、マイクロレベルの動的認知主体の内部ダイナミクスと、マクロレベルで見られるルールダイナミクスとの循環的相互作用、

すなわち、マイクロマクロ・ループを構成する2つのレベルの関係性を明らかにすることを目標としている。

ここで内部ダイナミクスとは、ゲーム理論や経済物理学で多くの場合簡略化される、主体の行動決定等に影響する内部状態の自律的变化のことである。また、ルールダイナミクスはマクロレベルで創発する制度や規範等のルールの動的な変化を指す。

North (1990) は、憲法、法律などをフォーマルな制度と呼び、それらは様々なルールと複雑に依存し合い、階層性があるために変更が困難であると論じた。このことから、複数のルールが共存可能で依存し合うならば、ルールを維持させられる可能性があると考えられる。また、多くの制度は、互いに支持し合い、更に、それらの機能は他の制度によって強化されると説いた Aoki (2001) はこの制度の効果「制度的補完性」と定義した。

一方、Nishibe (2006) は「複数の制度が相互作用し、人々の認知・行動の変化を通じて生成・変化する動的システム」として「制度生態系」を提案している。また、Nishibe は、制度間相互作用が非線形であるため、制度生態系が複雑系となり、制度の多様性が維持されると主張している。

上述の通り、制度は安定性と不安定性の両面を持ち得るものであると考えられる。では、いったいどのような条件が整った場合に、制度は安定化、または不安定化するのだろうか。

そこで本研究では、North (1990) の主張に着目し、複数のルールが共存可能な多人数ゲームを用いて、ルールダイナミクスが生じる中で社会的ルールが安定化するための条件を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、内部ダイナミクスを持つエージェントとして、Elman (1990) の SRN に過去の自身の行動が直接影響を及ぼすように変更した Simple Recurrent Network with Self-Influential Connections (以下 SRN-SIC と呼ぶ; 図1) を提案し、それを採用した以下の3種類のモデルを用いてシミュレーション実験を行う。

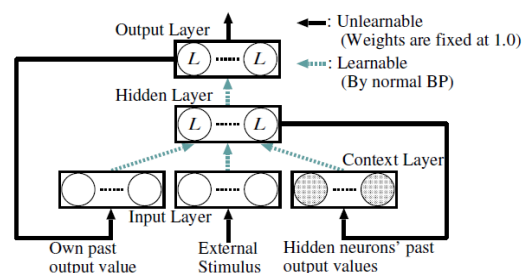


図1: 内部ダイナミクスを持つエージェントの構造 (SRN-SIC)。

### (1) Multi-Group MG モデル

MG を複数のグループで独立にプレイさせる。図2に示すように、3種類の相互作用のルールダイナミクスへの影響を調べる。

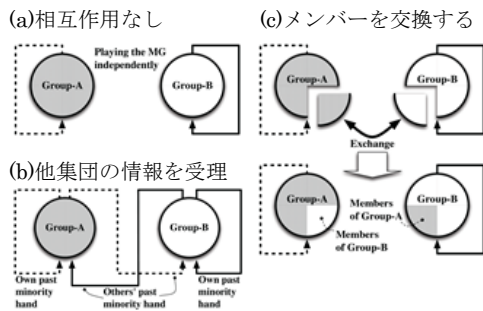


図2：3種類の相互作用。

図2(a)のモデルは、グループそれぞれで独立にMGをプレイするだけで、グループ間相互作用はない。すなわち、このモデルが基準となる。図2(b)のモデルは、同時に他グループで形成された勝者の手の時系列データを受け取る形で相互に作用し合う。図2(c)のモデルは、一定間隔おきに各グループの複数のエージェントをランダムに選び、それらを交換する。これは全エージェントの行動を通して形成されるマクロレベルのルールを各エージェントが学習し、内在化させ、そして、エージェント内で複数のルールを相互作用させることでルールダイナミクスにどのような影響があるのかを調べる。

### (2) Single-Group Multi-Game モデル

1つのグループの中で複数の異なるゲームを同時にプレイさせる。これはエージェントに内在化する複数のゲームに対応するルール同士を相互作用させることが目的である。ここでは、MGの他に社会的ジレンマのモデルとして有名な囚人のジレンマゲームを複数人版に拡張したN-person Iterated Prisoners' Dilemma Game(以下NIPDGと呼ぶ)を採用する。

### (3) Multi-Group Multi-Game モデル

このモデルは上記(2)を(1)と同様に他グループ版に拡張したものであり、個体の内外での複数の異なるゲームに対応するルール同士の相互作用によりルールダイナミクスにどのような影響があるのかを調べる。

## 4. 研究成果

### (1) Multi-Group MG モデルを用いたシミュレーション実験の結果

グループ同士が全く干渉しない場合(以下MGMG-aと呼ぶ)、自分のグループと他のグループの両方の少数派の手を受け取る場合(以下MGMG-bと呼ぶ)、そして、一定期間毎に各グ

ープの一定数のメンバーを入れ替える場合(以下MGMG-cと呼ぶ)という3種類の実験を行った。その結果、異なるグループのマクロレベルで形成されたルール(ここでは少数派の手の時系列パターン)の周期が同期する現象が見られ、MGMG-aよりMGMG-bの方が同期頻度は高くなることが分かった。また、MGMG-bより、グループ内の3分の1以上のメンバーをランダムに選択して比較的頻繁に入れ替える場合のMGMG-cの方が更にその同期頻度が高くなることが分かった(図3)。

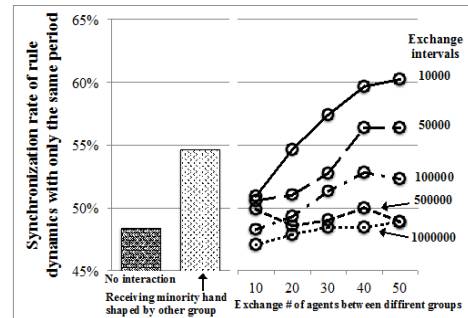


図3：異なるグループ間で観察された同じ周期数を持つルールの同期頻度の相互作用の仕方による違い。

更に、周期のみならず、ルールの位相とパターンの全てが異なるグループ間で一致する場合の頻度を調べた(図4)。この場合、MGMG-aとMGMG-bの間の差はごく僅かとなる一方で、MGMG-cはメンバーの入れ替え頻度がある程度高い場合にはMGMG-aおよびbよりもルールの同期頻度は高くなり、入れ替え頻度をより高めた時には、入れ替え人数を増やすにつれてルールの同期頻度が急激に高まることが分かった。

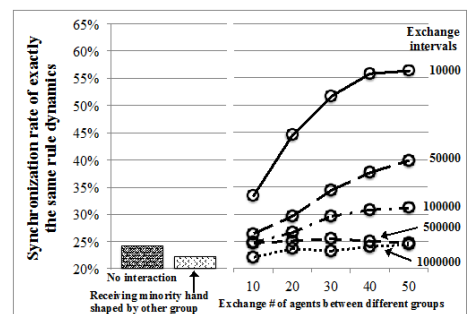


図4：異なるグループ間で観察された同じ周期数・位相・パターンを持つルールの同期頻度の相互作用の仕方による違い。

これらの実験結果から、異なる国や地域が相互作用することで混乱せずに、それぞれが安定化するためには、主体が他の文化や制度などを現地で直接学ぶことを通じてそれらを定期的に主体の内部に内在化させることが必要であることが示唆された。

(2) Single-Group Multi-Game モデルを用いたシミュレーション実験の結果 エージェントに内在化した複数のルール同士の相互作用によって、エージェントたちの行動がどのように変化し、更にそれらの行動から形成されるルールダイナミクスがどのように影響されるのかを調べた。

シミュレーション実験より、複雑なマクロダイナミクスが創発する際には、図5に示されるようなストレンジアトラクタに似た形状で表される複雑なルールが主体に内在化することが分かった。

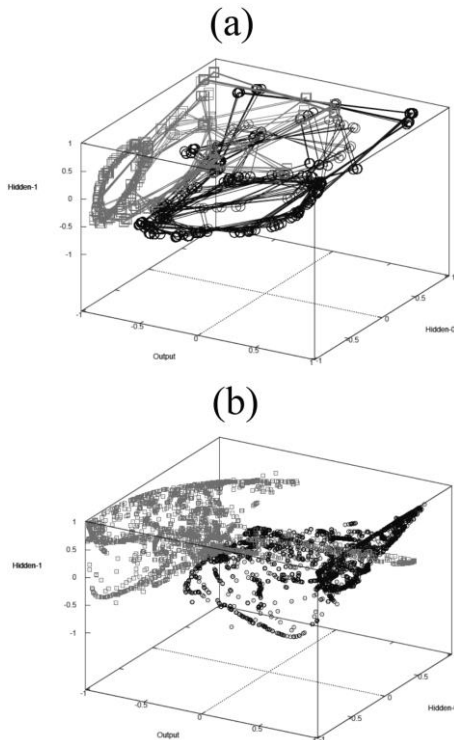


図5：エージェントに内在化した複雑なルールの例。x、y、そしてz軸はそれぞれエージェントのSRN-SICの出力および隠れニューロンの出力値である。灰色と黒色で表された2つの異なるゲームに対応するルールが別々に内在化していることが分かる。(a)リミットサイクルと多くの状態を持つ有限オートマトンの組み合わせ、(b)ストレンジアトラクタの組み合わせ。

更に、図6に示されるように、主体に内在化したMGとNIPDGのルール同士の相互作用によって、複雑なルールを形成しやすいMGで形成されるマクロダイナミクスであっても単純な低周期となり、安定化することが確認された。

これらの結果から、複雑な制度や法とそれらより単純なルールを同時に遵守させるような制度設計をすることにより、社会全体としての安定化に繋がる可能性があることが示唆された。

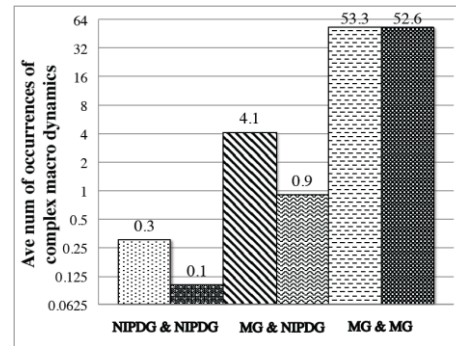


図6：各ゲームの組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数の違い。

(3) Multi-Group Multi-Game モデルを用いたシミュレーション実験の結果

Single-Group Multi-Game 実験と同様、NIPDGを組み合わせることでMGの不安定性を抑えられることが確認された(図7~12)。なお、ここでは、図2の(b)と(c)の2種類の相互作用を採用し、NNNN、MNNN、MNMN、MMNN、MMM、そして、MMMMの6種類のゲームの組み合わせの違いによるルールダイナミクスへの影響を調べた。ここで「NNNN」は、2つのグループがそれぞれ独立に2つのNIPDGを同時にプレイすることを意味する。

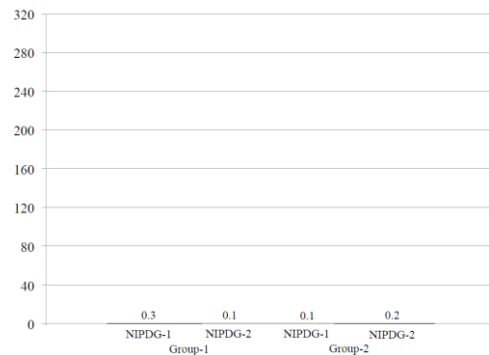


図7：移動無し NNNN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

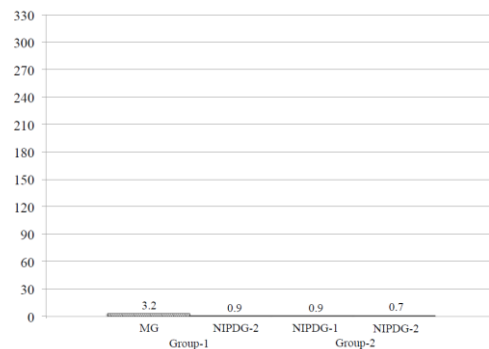


図8：移動無し MNNN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。



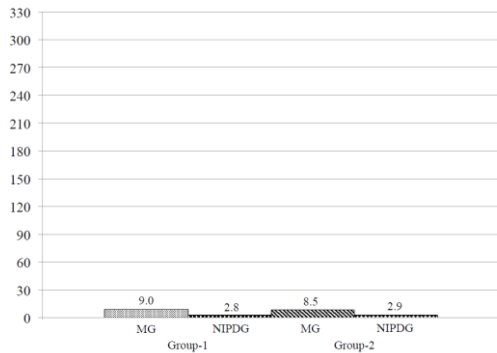


図9：移動無し MNMN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

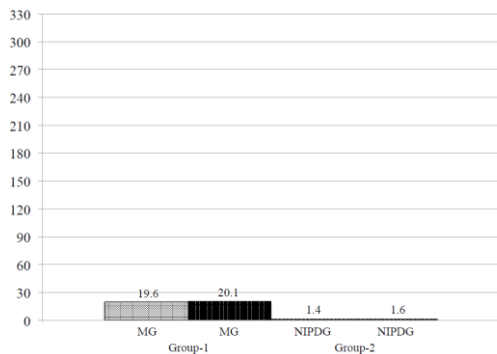


図10：移動無し MMN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

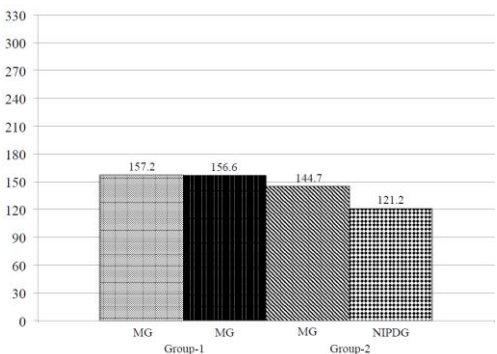


図11：移動無し MMMN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

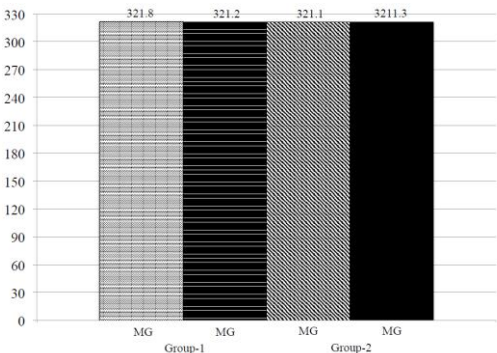


図12：移動無し MMMM の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

また、プレイするゲームが NIPDG よりも全体的に MG の方が多い場合、主体のグループ間移動頻度を少なくすることでルールダイナミクスが安定化することが分かった (図13~18)。なお、図13~18までの横軸に示されている「ExInt」とは各グループでランダムに選択したエージェントの交換間隔 (ステップ数) である。ここでも、Multi-Group MG モデルの時と同様、10,000 ステップ毎、50,000 ステップ毎、100,000 ステップ毎、500,000 ステップ毎、そして、1,000,000 ステップ毎の計5種類の交換間隔の影響を調べた。

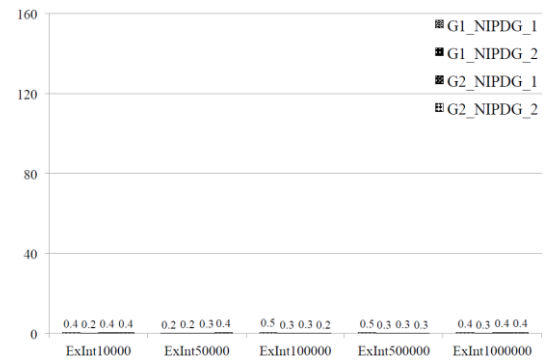


図13：移動有り NNNN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

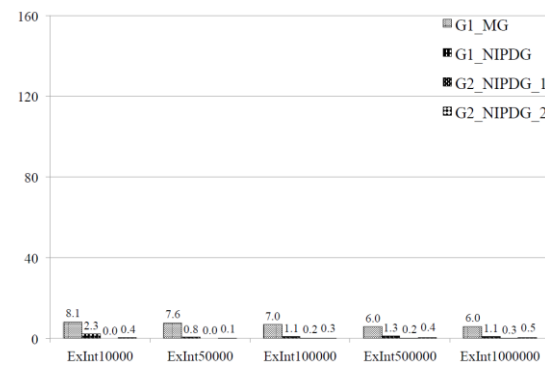


図14：移動有り MNMN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

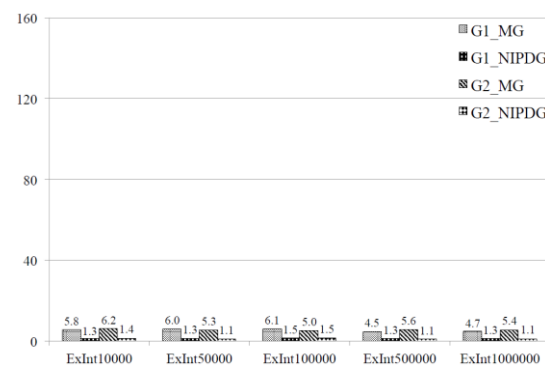


図15：移動有り MNNM の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

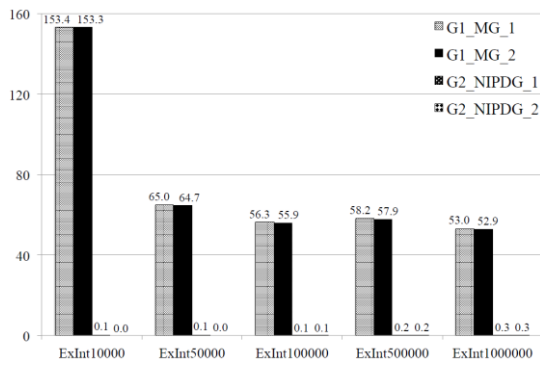


図 16：移動有り MMNN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

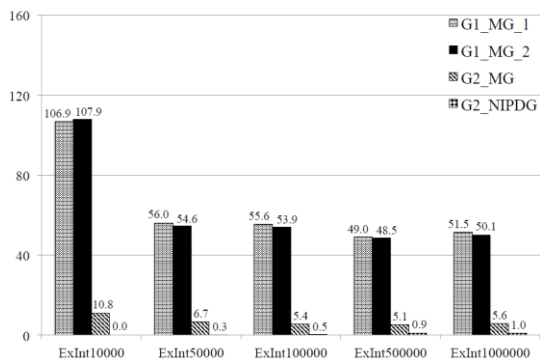


図 17：移動有り MMMN の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

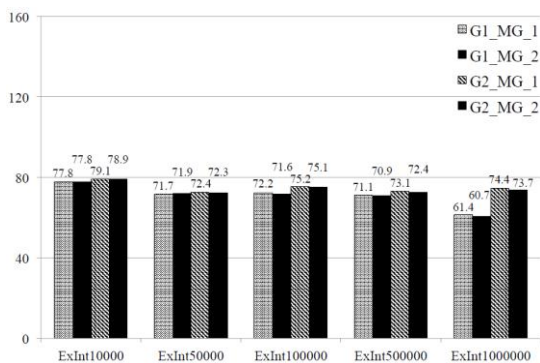


図 18：移動有り MMMM の組み合わせによる複雑なマクロダイナミクスの平均発生回数。

これらの実験より、NIPDG を組み合わせることで MG の不安定性を抑えられるという Single-Group Multi-Game モデルを用いた実験と同様の結果が確認された。また、プレイするゲームが NIPDG よりも全体的に MG の方が多い場合、主体のグループ間移動頻度を少なくすることで複雑なルールダイナミクスは抑えられ、安定化することが分かった。

Single-Group Multi-Game を用いた研究において、MG でもゲームの初期ステージでは単純なルールを形成しやすいことが確認されている。エージェントは複数の異なるルールを同時に学習して内部に取り込み、そして、それらを内在化する。グループ間移動頻度を

少なくすることは、上述の初期に獲得した単純なルールを各エージェントの内部で定着させ、マクロレベルのルールダイナミクスを更に安定化させるポジティブフィードバック効果があると考えられる。

このように、マイクロとマクロの両レベルを解析することにより、ルールダイナミクスの安定化条件の一端を明らかにできたことは、ルールの形成・変化メカニズムを解明する上で非常に意義あることである。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Takashi Sato, Dynamics of rules internalized in dynamic cognitive agents playing a multi-game, *Journal of Artificial Life and Robotics*, 査読有、Vol.17, No.2, 2012, pp.306-311  
DOI:10.1007/s10015-012-0063-z
- ② Takashi Sato, Effect of interaction between rules on rule dynamics in a multi-group game, *Journal of Artificial Life and Robotics*, 査読有、Vol.16, No.4, 2012, pp.493-496  
DOI:10.1007/s10015-011-0971-3

[学会発表] (計 4 件)

- ① Takashi Sato, Stabilization and emergence of rule dynamics in a multi-group multi-game, 7<sup>th</sup> International Workshop on Natural Computing, 2013年3月21日、東京大学
- ② 佐藤尚, マルチゲームにおける学習エージェントに内在化したルールによるマクロダイナミクスの安定化, 第87回数理モデル化と問題解決 (MPS) 研究発表会, 2012年3月2日、鹿児島県
- ③ Takashi Sato, Dynamics of rules internalized in dynamic cognitive agents playing a multi-game, The 17<sup>th</sup> International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 17<sup>th</sup>, 2012), 2012年1月19日、大分県
- ④ Takashi Sato, Effect of interaction between rules on rule dynamics in a multi-group minority game, The 16<sup>th</sup> International Symposium on ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS (AROB 16<sup>th</sup>, 2011), 2011年1月29日、大分県

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 尚 (SATO TAKASHI)

沖縄工業高等専門学校・

メディア情報工学科・助教

研究者番号：70426576