

# ネットワーク上の同類的な繋がり の促進が囚人のジレンマゲームにおける協調進化に与える影響

宮地浩平<sup>1</sup>, 谷本潤<sup>2</sup>, 萩島理<sup>2</sup>, 池谷直樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

<sup>2</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門

## 概要

本稿では、ネットワークと混合戦略の共進化モデルを提案する。混合戦略の場合、戦略  $s_i$  は 0 から 1 の間の実数値で表記され、各エージェントは保有する戦略値  $s_i$  に応じた確率で自分の振る舞いを決定する。そのため、混合戦略の場合エージェントが取り得る戦略は多様である。そこで本稿では、このような多様なエージェントが存在する集団において、戦略の同類性と協調の進化の関連性に注目する。各エージェントは自分の保有する混合戦略と似通った戦略を持つエージェントとのみネットワークの接続を許容することで、戦略同類性の高いエージェント同士との繋がりを促進する。この実験の結果、同類的な繋がりを促進することで、より強固な協調が創発することが分かった。また、ネットワーク適応速度が相対的に遅い場合において、戦略適応の際に適切な確率でコピーエラーを生起させることがネットワークの不均質性を増加させ、協調がよると分かった。

## Assortative attachment promotes cooperation in the prisoner's dilemma game

Kohei Miyaji<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>2</sup>, Aya Hagishima<sup>2</sup>, Naoki Ikegaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy and Environmental Engineering Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>2</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

A co-evolutionary model of both network and mixed-strategy is proposed in this study. The assigned strategy of agent  $i$ ;  $s_i$  is defined by a real number within 0 to 1, which probabilistically ordains a subsequent action of either cooperation or defection as the agent's offer. We assume a network dynamics, where an agent severs a link with one of the neighbors who has dissortative strategy, maintaining the interactions only with resemblant neighbors. A series of numerical simulations reveals that our framework concerned on "assortative grouping" enhances cooperation. Interestingly, when a low network adaptation speed and a certain extent of strategy copy error are presumed, phenomenal network heterogeneity is evolved that realizes more significant cooperation than error-free cases.

### 1. Introduction

社会に偏在する協調行動を説明するための理論的かつ普遍的ツールとして進化ゲーム理論がよく用いられる[1]. とりわけ、囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma; PD) ゲームは現実の相互作用を比喻するモデルとして数多くの理論的、実験的研究のフレームワークとして用いられる。PD では、集団全体で考えたとき最適な行動は全員が協調戦略 (C) をとることであるのに対し、個人にとって最適な戦略は常に裏切り戦略 (D) をとる

ことである。そのため、社会粘性の無い無限 well-mixed 集団を対象にゲームを行うと全員が裏切り戦略をとるようになる。このように個人の利益追求のための選択と社会の利益追求のための選択が乖離している状況を数理ジレンマという。以降研究では、このジレンマを緩和・解消し、協調の進化を促進するために数多くの機構が提案されてきた。これらの協調創発機構はすべて5つに分類できることがわかっている[2]. 特に、ネットワーク互惠と協調進化の関係について多くの研究

が行われてきた。近年は、ネットワーク互恵に対して、どのような付加機構を加えると協調が更に強固に出来るかについて関心が集まっている[3]。本稿では、相互作用する相手が常に固定されている静的ネットワークの代わりに動的ネットワークを導入し、その影響を考察する。人や生物の繋がりや生涯を通じて常に一定とは限らないため、ネットワークの変性を考慮することは妥当な仮定である。ネットワークの進化を規定するにあたって、Zimmermannら[4]やTanimotoら[5]に代表されるように、自分と隣人の戦略の組み合わせや、利得の大小比較によってリンクの切断を決定するのが一般的である。本稿では、これらの既往研究とは視点を換え、戦略の同類性に注目する。具体的には、戦略が同類である者同士のリンクを維持し、そうでないものとのリンクを切断するものである。本稿では、この提案ネットワーク進化ルールによって同類的な繋がりを促進することが、囚人のジレンマゲームにおける協調の進化にどのような影響を及ぼすのかを検討する。

## 2. Model

### 2.1 共進化 2人 2戦略 (2x2) ゲーム

2x2 ゲームモデルを用いる。提案モデルでは、実数値からなる混合戦略  $s_i \in [0, 1]$  を導入する。各エージェントは確率  $s_i$  で協調戦略 (C) をとる。2人 2戦略ゲームでは  $s_i \in \{0, 1\}$  のようにバイナリーに戦略を付与する離散戦略が一般的な戦略定義であるが、提案モデルでは人のランダムな振る舞いをモデル化するため、確率的な意思決定方法として実数値戦略を用いる。各エージェントは、戦略によって決定される自分と相手の振る舞いのに応じて利得を獲得する。もし、自分と対戦相手共に C 戦略を選択した場合、Reward (R) を、両者共に D を選択した場合、Punishment (P) をそれぞれ利得として得る。もし、一方が C、他方が D 戦略を用いた場合、前者は Sucker (S)、後者は Temptation (T) を得る。これら利得 R, S, T, P の大小関係を変化させることで、様々なジレンマ構造をモデル中に再現できる。ここで、先行研究[6]に倣い  $R=1, P=0$  と固定することで、

$$\begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -r \\ r & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

とする。この操作によって囚人のジレンマゲームを  $0 \leq r \leq 1$  の範囲で表現できる。

### 2.2 シミュレーション手順概要

シミュレーションは以下に示す手順で行われる。各エージェントは初期に次数 4 の 2 次元正方形格子ネットワーク (ラティスネットワーク) 上に隙間なく配置される。集団からランダムに選ばれたエージェント  $i$  はネットワークで繋がった隣人とゲームし利得を獲得する (2.2.1 節で詳述)。その後、確率  $w$  でネットワーク適応 (2.2.3 節で詳述) を行い、そうであれば戦略適応

(2.2.2 節で詳述) を行う。ここで  $w$  はネットワーク適応速度パラメータであり、 $w$  が大きいほどネットワークの進化速度が大きく、 $w=0$  の時、戦略のみが進化することを意味する。この適応プロセスを均衡に至るまで繰り返し、最終 100 ステップの平均協調率  $p_c$  (集団中での C 戦略をとるエージェントの割合)、平均戦略値を獲得し、考察する。

#### 2.2.1 ゲーム

ネットワーク上からランダムに選ばれたエージェント  $i$  はネットワークで規定された全隣人  $j$  とゲームを行う。エージェント  $i$  は隣人  $j$  と対戦するとき、確率  $s_i$  で協調戦略 C をとり、対戦相手  $j$  は確率  $s_j$  で協調戦略 C をとる。確率で決定された各々の振る舞い C または D に応じて利得表に基づいた利得が積算される。全対戦でエージェント  $i$  は自身の持つ戦略に応じた確率で振る舞いを更新していくため、同一ステップ中の対戦であっても隣人  $j_1$  に対する振る舞いと隣人  $j_2$  に対する振る舞いが必ずしも一致するとは限らない。隣人  $j$  も同様に各々その隣人  $k$  とゲームを行い、利得を獲得する。

#### 2.2.2 戦略適応

戦略適応が行われる場合、エージェント  $i$  とその隣人集団  $j$  の利得が確定後、エージェント  $i$  は、隣人集団の中から最も高い利得を獲得している隣人  $j$  を一人選択し、その戦略を無条件にコピーする (Imitation Max; IM と呼ぶ)。

戦略をコピーするとき、確率  $\mu$  でコピーしてくる戦略が 0 から 1 の間の実数値にランダムに変異する。これをコピーエラーと呼ぶ。

#### 2.2.2 ネットワーク適応—同類的接続

ネットワーク適応が行われる場合、エージェント  $i$  は隣人エージェント  $j$  を一人ランダムに選択する。もし  $s_j < s_i - \alpha$  または  $s_i + \alpha < s_j$  の場合、エージェント  $i$  は  $j$  とのリンクを切断し、現有隣人以外の新たな隣人と再接続をし、 $j$  はリンクを 1 本失う。一方  $s_i - \alpha \leq s_j \leq s_i + \alpha$  のとき、 $i$  と  $j$  のリンクは保持される。

ここで、 $\alpha \in (0, 1)$  は許容度パラメータである。 $\alpha$  が小さいほどエージェントは同類な隣人を好むようになり、非同類的な戦略を持つエージェント同士のリンクは排除されることで、結果的に同類的な繋がりを持つグループの形成が促進される。本稿ではこの同類的な集団形成を促す接続機構を Assortative attachment (AA) と呼称する。

## 3. Results

### 3.1 Assortative attachment と協調の進化

戦略と Assortative attachment (AA) によるネットワークの共進化が協調の進化にもたらす影響について考察していく。図 1 にネットワーク適応速度  $w=0.1, 0.5$ ,

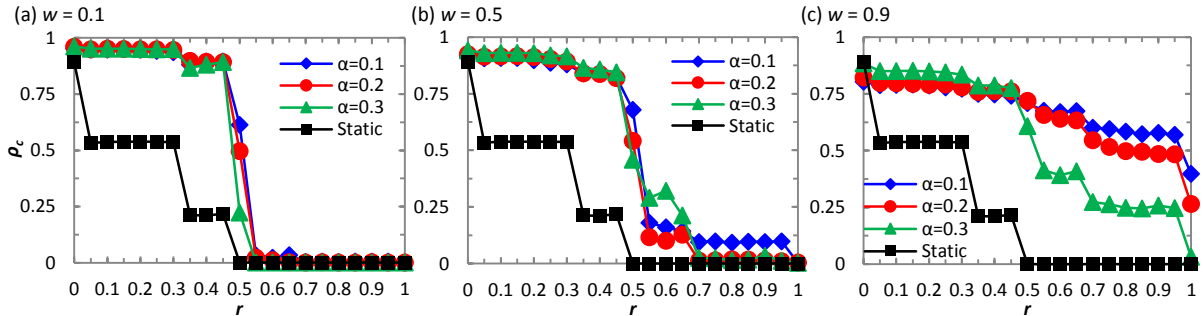


図 1 : (a)  $w = 0.1$ , (b)  $w = 0.5$  and (c)  $w = 0.9$  それぞれの場合における均衡協調率  $\rho_c$ . "Static" は  $w=0$  すなわち戦略適応のみ生起する状況の結果を表している. 戦略適応時のコピーエラーは考慮されていない.

0.9 それぞれの場合の均衡協調率を示している. コピーエラーは考慮されていない. AA を加味した場合は常に従来の固定ネットワーク上でのゲームよりも協調が進化している. 許容度  $\alpha$  の影響に注目すると, ネットワーク適応速度  $w$  が大きくなると,  $\alpha$  が小さいほど  $r$  の大きな強ジレンマ域でも協調を維持できるという違いが観察される. このことからネットワーク適応が早い頻度で行われるならば, 許容度を小さくして同類隣人の集合を促進した方が, 強ジレンマ域での協調創発に有効であると言える.

図 2 に示す, 均衡時の戦略値分布をみても. 図 2(a) に示す弱ジレンマの場合に注目する.  $w$  が小さい時, 均衡時の戦略分布幅は  $s_i = 0.8 - 1.0$  付近にまとまっているが,  $w$  が大きい時, 中途半端な協調戦略を保持するエージェントの存在比が増加することで均衡戦略値の分布幅は大きくなる. 図 2(b) に示す強ジレンマの場合を見てみると,  $w$  が小さい場合は裏切り相に転落し, ほぼすべてのエージェントが完全な裏切り戦略である  $s=0$  付近の戦略をとるようになる. 一方,  $w$  が大きい場合, 完全に近い協調戦略をとるエージェントの割合は非常に少ないものの, 中途半端に協調する戦略が適度に生き残り, 裏切りの戦略と共に協調的戦略が共存する. AA は混合戦略の特性をうまく利用して協調者同士の緩やかなグルーピングを促進することで強ジレンマ域での協調の維持を達成するものの, 同時に弱ジレンマ域での裏切り型戦略同士のクラスターの形成を許してしまうという逆効果もある.

### 3.2 戦略コピーエラーの影響

次に, 図 3 に示す, 戦略適応プロセスにおいてコピーエラーを加味することによる影響を見てみよう. コピーエラーを加味した場合, 提案モデルでは, 協調が強化される. 図 4 に  $r = 0.55$  のときの各コピーエラー率における均衡協調率を示す. 特に  $w$  小の時, コピーエラーを加えすぎない程度の最適な頻度で生起させることで協調が劇的に強化される.  $w$  が大きいときは, コピーエラーを加味することによる協調のさらなる創発は見られなくなり, 寧ろ協調率を減少させる.

エラーを加えたとき, 一体エージェントにどのよう

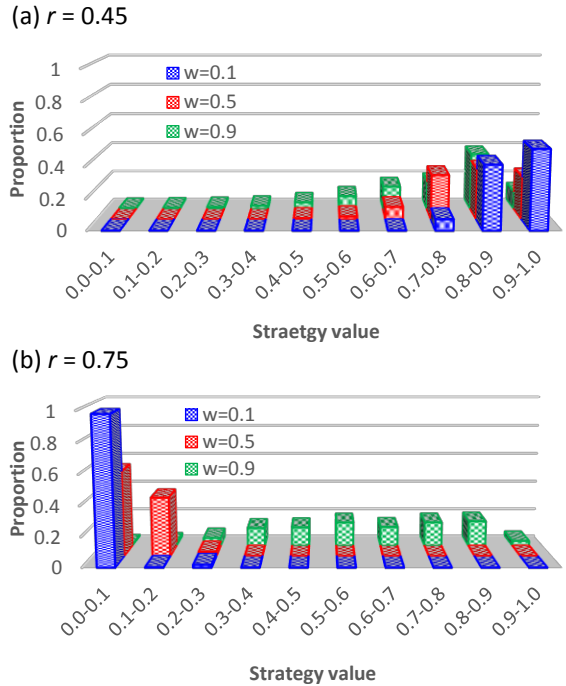


図 2 : (a)  $r = 0.45$  または (b)  $r = 0.75$  における均衡時の戦略分布.

な変化が生じているのだろうか.  $w$  が小さい場合におけるコピーエラーの有無による均衡時のネットワーク進化の違いを見てみる. 図 5 に示す  $r=0.55, w=0.1$  における均衡時の次数分布をみると, コピーエラーを加味した場合, エラーを加味しない場合に比べて最高次数が増し, ネットワークの不均質性[7]が増していることが分かる. 明らかにコピーエラーとネットワークの不均質性に関連性が看取できる.

不均質性増大の理由について検討するために, 戦略適応イベントに内在する要素を整理していこう. コピーエラーは, 戦略適応においてエージェントが戦略をコピーする際に生起するため, 戦略コピーイベントに注目することで系にどのような変化が生じているのかを究明できる. 本シミュレーションでは適応方法として IM (2.2.2 参照) を用いているため, 高利得を獲得しているエージェントは専らコピーされる側となる. ここでいう高利得を獲得するエージェントは, 次数が

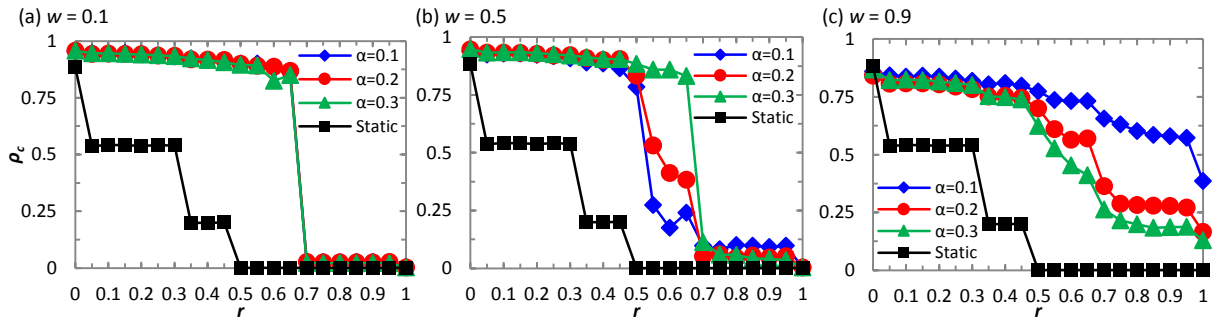


図3 : (a)  $w = 0.1$ , (b)  $w = 0.5$  and (b)  $w = 0.9$  それぞれの場合における均衡協調率  $\rho_c$ . ”Static”は  $w = 0$  すなわち戦略適応のみ生起する状況の結果を表している. 戦略コピーエラーは  $\mu = 0.005$  の確率で考慮されている.

大きなエージェントが、C戦略に対してD戦略で対抗した裏切者エージェントである. こういった高利得を獲得するエージェントは自らはコピーを行いたくないため、コピーエラーの影響を大きくは受けない. コピーエラーの影響を受けるのは、こういった高利得者と繋がっている末端の相対的低利得エージェント達である. 彼らは自分よりも利得の高いハブの戦略をコピーしながら安定なクラスターの一端を形成していくが、コピーエラーによってハブエージェントとの許容値  $\alpha$  を超える戦略値に変異してしまうケースが生じる. その場合、この末端エージェントは、その後のネットワーク適応により相手であるハブエージェントから切断されるかもしくは自ら切断することになる. 前者、すなわち高次数C型ハブが戦略変位した末端エージェントとのネットワークを切断した場合、そのハブは新たなエージェントとランダムに再接続する. ハブが再接続した相手がD型のハブではない限り基本的には高頻度で  $R$  を取り合っているC型ハブの方が利得が高いため、新たな隣人エージェントに自戦略をコピーさせて安定なCクラスターを拡大できる. つまり、コピーエラーを加味することで、C型ハブの安定性を損なわずにリンクの再接続イベントが生起し、それによって末端エージェントのネットワーク進化が促進され、C型ハブが成長する可能性がある.

#### 4. Conclusion

本稿では、実数値定義の混合戦略を前提にした、戦略と同類の戦略を持つエージェント同士のクラスタリングを促進するようなネットワーク進化プロトコル *Assortative attachment* を仮定した共進化モデルを提示した. 人や生物の“同種を好む傾向”を組み込んだ本枠組みにおける実験において、同類的なエージェント同士の自己組織化が協調の維持に有効であることが示された. また、 $w$  が小さい時にネットワークの不均質性と協調の進化に関連性が見出された.

**謝辞** 本研究の一部は科研費萌芽研究 (#25560165), ファイザーヘルス研究財団による. 記して謝意を表する.

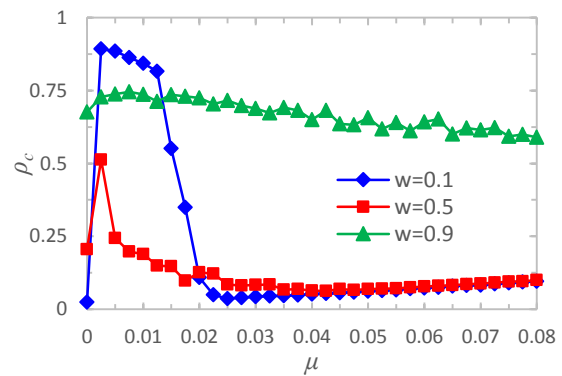


図4 :  $r = 0.55$  における均衡協調率  $\rho_c$  と戦略適応時におけるコピーエラー  $\mu$  の関係.

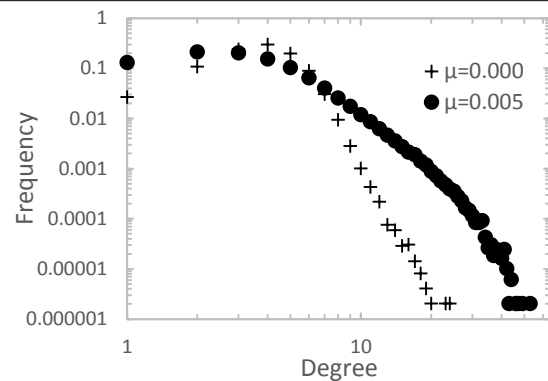


図5 :  $r = 0.55$ ,  $w = 0.1$  の時の均衡時の度数分布図. コピーエラー率  $\mu$  による明らかな違いが現れる.

#### References

- [1] Hofbauer, J. and Sigmund, K., *Evolutionary Games and Population Dynamics* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Nowak, M.A., *Science* 314, 1560-1563, 2006.
- [3] Yamauchi, A., Tanimoto, J. and Hagishima, A., *BioSystems* 103, 85-92, 2011.
- [4] Zimmermann, M.G., Eguiluz, V.M. and San Miguel, M., *Physical Review E* 69, 065102R, 2004.
- [5] Tanimoto, J., *Physica A* 388, 953-960, 2009.
- [6] Tanimoto, J., Sagara, H., *BioSystems* 90, 105-114, 2007.
- [7] 2次元格子グラフのように各エージェントが異なる度数を持っているネットワーク (Homogeneous network) とは異なり、非一様な度数分布を持つネットワークのことを不均質ネットワーク (Heterogeneous network) と呼ぶ.