

# 協調ネットワークの生成と崩壊に関するエージェントベースモデル

## An agent-based model on the emergence and collapse of cooperative networks

鈴木 麗璽  
Reiji Suzuki

名古屋大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science  
reiji@nagoya-u.jp, <http://www.alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~reiji/>

加藤 正倫  
Masanori Kato

NTT コミュニケーションズ株式会社  
NTT Communications Corporation  
m-kato@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp

有田 隆也  
Takaya Arita

名古屋大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science  
arita@nagoya-u.jp, <http://www.alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~ari/>

キーワード: cooperation, network structures, coevolution, prisoner's dilemma, artificial life

### 概要

協調行動の進化に対して相互作用のネットワーク構造がもたらす影響について議論されてきた。従来、静的なネットワーク上において、協調行動がいかに進化するかに焦点が当てられてきたが、現実世界における個体間の相互作用を考えると、相互作用のネットワーク構造も同時に変化していると言える。さらに、ネットワークの近傍の構造の変え方自体も個体毎に様々であり、それが進化する状況も考えることができる。本研究は、協調行動とネットワーク構造の共進化ダイナミクスについて知見を得ることを目的とする。そのために、囚人のジレンマゲームの戦略に加え、ゲームの結果をもとに近傍のネットワーク構造を改変する戦略を各個体が持ち、両者が同時に進化するモデルを構築し、実験を行った。その結果、集団の挙動は裏切ることのメリットとゲームを行うことのコストに依存し、両者ともある程度存在するとき、協調者の割合と平均次数が交互に増減する共進化サイクルが生じ、協調関係のネットワークが生成と崩壊を繰り返すことが明らかになった。

## 1. はじめに

人間や他の動物における協調社会の成立過程を明らかにするアプローチとして、囚人のジレンマゲームを用いた利己的な個体間における協調行動(互恵的利他主義)の進化に関する研究が古くからなされてきた [1]。その中でも、個体間の相互作用の構造が与える影響について様々な議論がなされてきた [2, 3, 4, 5]。例えば、Nowak らは、個体を二次元格子上に配置し、隣接個体とのみゲームを行う局所的な相互作用を導入すると、1 回きりのジレンマゲームであっても協調行動が集団に侵入しうることを示した [2]。また、Grim は、繰り返し囚人のジレンマゲームにおける記憶長 2 の混合戦略の進化において、2 次元格子上で相互作用を導入した場合、局所性が無い場合と比較してより協調的な個体が集団を支配可能であることを示した [3]。一般には、規則的で均質な相互作用の局所性の導入は協調行動の創発を促進することが指摘されている。

一方、社会における人間関係を含んだ自然界に存在する相互作用のネットワークは、上記のように単純ではなく、より複雑であり、スモールワールド [7] やスケールフリー [8] などの普遍的な特性を持つことが知られている。そこで、複雑ネットワークの特性がその上で行われる協調行動の進化に及ぼす影響について議論されている。例えば、Watts らは、N 人版繰り返しゲームに一般化されたしっぺ返し戦略が グラフ上で進化するモデルにおいて、クラスタ係数が十分大きい(レギュラーネットワークからのリンクの張り替え確率が十分小さい)場合には、協調的な戦略が侵入可能であることなどを示している [9]。また、Masuda らは、1 回きりのジレンマゲームにおける戦略のネットワーク上での進化を解析し、スモールワールド特性を持つネットワーク上では、高いクラスタ係数と平均経路長の影響により協調戦略が急速に多数派となれることを示している [10]。

以上の研究は、相互作用の構造が固定された静的なネットワークを用いた研究であった。しかし、現実社会では、

表 1 戦略を表す遺伝子

遺伝子 (戦略) \ 値	0	1
$g_{pd}$	裏切り (D)	協調 (C)
$g_{na}$	何もしない	未接続の個体からランダムに選択した一体とリンクを張る
$g_{ns}$	何もしない	同じ手を出した近傍の個体とのリンクをすべて切断する
$g_{nd}$	何もしない	異なる手を出した近傍の個体とのリンクをすべて切断する

ネットワークは構成要素間の相互作用によって形成されており、協調行動の進化と共に構造自体も変化していると言える。そこで、協調関係の構築と集団が形成するネットワーク構造の変化を包括した議論が近年なされている。例えば、Zimmerman らは、一回きりの囚人のジレンマゲームの戦略が進化すると同時に、各個体 (ノード) がどの相手とゲームをするか (リンク) が一定のルール (裏切り合う個体同士のリンクが切られる) によって変化するモデルを構築した [11]。彼らは、リンク張替えルールの特性等から、協調集団は、クラスタ化した協調者の連鎖で成り立つこと、協調者のうちで最も高い利得を得ている個体 (リーダー) の利得が、裏切り者のうちで最も高い利得を得ている個体の利得を上回っている間、協調者の連鎖が徐々に増加し続けることなどを示した。また、Luthi らは、同様な一回きりのゲームにおいて、各個体がゲームの戦略を変更するかどうかと、隣接する裏切り戦略との接続を切るかどうかを、得られた利得と与えられた閾値を比較することで決定するモデルを構築し、閾値がある範囲の場合、多数の協調戦略がクラスタを形成し、少数の裏切り者が孤立する状況が生じることを示している [12]。これらは各個体の自律的なネットワークの改変が系全体の協調行動の創発に大きな影響を与えることを明確に示しているが、すべての個体が共通のリンク張り替えルールを持つという強い仮定に基づいている。しかし、実世界を考えると、誰とつきあうかという相互作用の相手の選び方は個体によって多様であると同時に、ゲームの戦略と同様に進化しうるといえる。

本研究は、囚人のジレンマゲームにおける戦略と近傍のネットワーク構造改変戦略の共進化ダイナミクスについて知見を得ることを目的とする [13]。そこで、個体をノードとするネットワーク上でのリンクの有無が各個体間でジレンマゲームが行われるかどうかをあらわすものとし、ゲームの戦略に加えてゲームの結果に応じてリンクを新たに張るか切るかを決定する戦略を遺伝子として持つ個体群が進化するモデルを構築した。実験の結果、集団の挙動は裏切ることのメリットとゲームを行うことのコストに依存し、両者ともある程度存在するとき、協調者の割合と平均次数が交互に増減する共進化サイクルが出現することが明らかになった。本研究では、このサイクルを実世界における協調関係のネットワークの生成と崩壊の一端を示すものにとらえ、そのダイナミクスに

表 2 囚人のジレンマゲームの利得行列

自分 \ 相手	協調	裏切り
協調	$(R - \sigma, R - \sigma)$	$(S - \sigma, T - \sigma)$
裏切り	$(T - \sigma, S - \sigma)$	$(P - \sigma, P - \sigma)$

(自分の利得, 相手の利得)

$$T > R > P > S$$

ついて詳しく解析を行った。

## 2. モデル

各個体が囚人のジレンマゲームの戦略に加え、ネットワークの近傍の構造を変更する戦略を持つ、次の進化モデルを構築した。

$N$  人の個体はネットワーク上のノードとして表される。ノード間のリンクの有無は個体間において相互作用、もしくは、つきあいがあるかどうかを表しており、具体的には囚人のジレンマゲームが行われるかどうかを表している。各個体は表 1 に示される 4 つの遺伝子 (もしくはミーム) を持ち、 $g_{pd}$  はジレンマゲームの戦略 (協調が 1, 裏切りが 0) を表し、 $g_{na}$ ,  $g_{ns}$  および  $g_{nd}$  (いずれも 0 または 1 の値をとる) は近傍のネットワークを改変する際に用いる戦略を表す (詳細は後述)。

各ステップは次の 3 つのフェイズからなるものとする。

- (1) 各個体はリンクの繋がった近傍の個体すべてと戦略  $g_{pd}$  を用いてジレンマゲームを行い、利得を得る。利得行列は表 2 を用いる。ここで、 $\sigma$  は個体がゲームと行った場合と、ゲームを行わなかった場合の利得差を決める定数であり、ゲームすることそのものにかかるコストと見なすことができる。なお、 $\sigma$  は Hauert らによる自由参加型共有財ゲームの進化モデルにおける、ゲームへの不参加者が得る利得に対応する [14]。適応度は各個体がすべてのゲームで得た利得の合計とする。
- (2) フェイズ (1) での対戦結果において、もし近傍に自身よりも適応度が高い個体が存在する場合、最も適応度の高い個体 (複数いる場合はその中からランダムに選んだ 1 個体) の遺伝子すべてが自身の遺伝子にコピーされる (もしくは模倣する)。このとき、それぞれの遺伝子について確率  $p_m$  で突然変異 (値の反転) が生じる。なお、この操作はすべての個体に

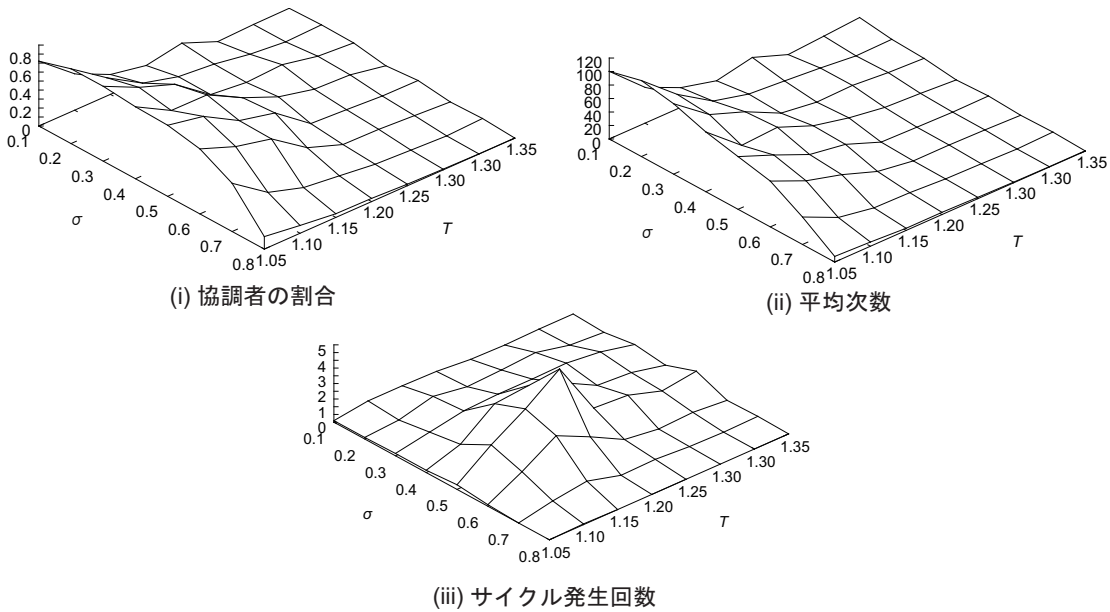


図 2 協調者の割合, 平均次数, サイクル発生回数に対する  $T$  と  $\sigma$  の影響

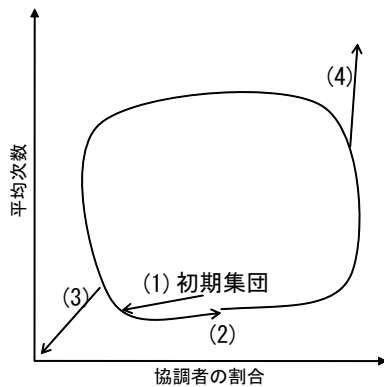


図 1 典型的な進化の過程.

ついて同期して行われる (すべての個体についてそれぞれコピーが生じるかどうかを決めておいて, 最後に同時にコピーを行う) もとする.

- (3) 各個体はフェイズ(1)でのゲームの結果と現在のネットワーク改変戦略を用いて近傍のネットワーク構造を改変する. 実世界において, 自分自身を基準にして相手がどのように振る舞ったかは, その相手とつきあい続けるかどうかを決める判断材料の一つであると言える. そこで, 本モデルでは, ゲームの際に出した自身の手と相手の手が同じかどうか依存して, 次のようにネットワーク構造の改変を行う. 各個体の持つ  $g_{nd}$  が 1 の場合, 出した手が自身と異なったすべての個体とのリンクを切断する.  $g_{ns}$  が 1 の場合, 出した手が自身と同じだったすべての個体とのリンクを切断する. さらに,  $g_{na}$  が 1 である個体は, フェイズ(1)の時点でリンクを張っていなかった個体の中から 1 個体ランダムを選んでリンクを張る. 以上の操作についても, すべての個体が各

リンクを張るか切るかを決めた後にリンクの更新を同時に行うものとする.  
以上のフェイズからなるステップが繰り返される.

### 3. 実験結果

実験は  $N = 1000, p_m = 0.005, R = 1.0, P = S = 0.0$  の設定で行った. また, 初期集団では, 各個体の持つ遺伝子をすべてランダムに設定し, ネットワーク構造は近傍の 6 個体が接続された 1 次元のレギュラーネットワークとした.

#### 3.1 基本的な挙動

はじめに, 利得行列のパラメータである  $T$  と  $\sigma$  の値の組み合わせを網羅的に設定し実験を行い, 両者が協調行動とネットワーク構造の進化に与える影響について解析する.

図 1 は各ステップでの協調者の割合と個体毎のリンク数平均の軌跡で表される典型的な進化の道筋を图示したものである. 初期集団から (1) 裏切りので孤立する傾向のある戦略が集団中に広まることで両指標が共に減少する. その後, 集団は (2) 両指標が交互に増減を繰り返すサイクリックな遷移を示す. しかし, この遷移は過渡的に安定であり, 最終的にはサイクルを抜け出し, 両指標が (3) 小さくもしくは (4) 大きくなった状態で収束する.

これら (1) から (4) の道筋がどれくらいの期間, 頻度で生じるかはパラメータ  $T$  と  $\sigma$  に依存する. 図 2 は, 各パラメータ設定において 500 ステップの実験を 20 試行ずつ行った時の, (i) 協調者の割合 (ii) 平均次数 (リンク数) (iii) 共進化サイクル発生回数の平均を示したものである.  $x, y$  軸はそれぞれ  $T$  と  $\sigma$  の条件,  $z$  軸がそ

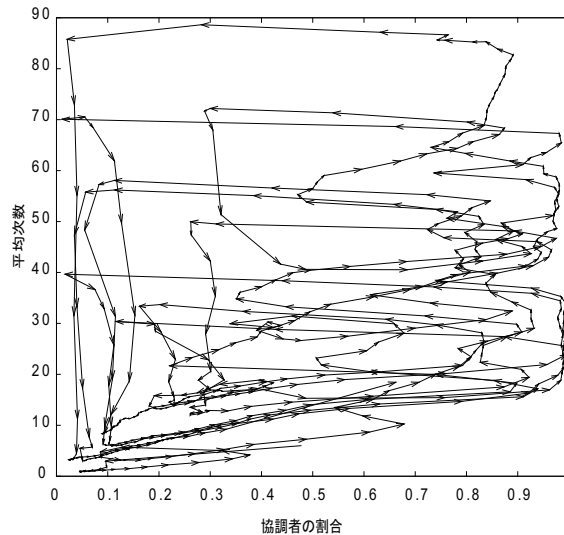


図 3 協調行動とネットワーク構造の共進化サイクル ( $T = 1.20$ ,  $\sigma = 0.5$ )

それぞれの指標に対応する。

図 2 (i) (ii) から,  $T$  については小さいほど,  $\sigma$  については比較的小さな値のとき, 協調者の割合と平均次数が大きい傾向があった.  $T=1.05$ ,  $\sigma=0.3$  のとき協調者の割合が最大値 0.83 となり, このときの平均次数は 104 であった.  $T$  は裏切る事のメリットであるため, 小さいほど協調者にとって有利なのは自明である.  $\sigma$  はゲームを行うことのコストであり, これが小さい方が協調裏切りに関わらずゲームを行った場合の方がゲームをしない場合より適応的となるが, 同時に裏切り合いになった場合とゲームを行わなかった場合の相対的な利得差という意味で大きい方が裏切り者にとって不利に働く側面もあるため, 両者のバランスで比較的小さな値が協調者にとって最も有利だったと考えられる. 一方, 両パラメータが大きい場合には, 逆の理由により裏切って孤立することが適応的となるため (1) の過程からすぐに (3) の過程をたどり, 協調者の割合と平均次数は共に最も小さくなった.

また, このパラメータ範囲において, 両パラメータが中程度の場合にも協調者の割合は比較的高い値を示した. このとき (2) の共進化サイクルが最も頻繁に生じていることが判明した. 図 2 (iii) は各試行での共進化サイクルの発生回数<sup>\*1</sup>の平均を示したものである. 図 2 (iii) から, 振動回数は両パラメータが中程度の場合に最も大きくなり,  $T=1.20$ ,  $\sigma=0.5$  の場合に 4.9 回で最大 (協調者の割合 0.40, 平均次数 26) となった. この条件では, 500 ステップを通して安定して共進化サイクルが持続する試行が多く確認された.

この過程は, 次のような主に 3 種類の遺伝子を持つ個体が入れ替わることで成り立っていた. 同種同士のリン

クをすべて切断して孤立する裏切り者である D110<sup>\*2</sup>が集団のほとんどを占める疎なネットワークから, わずかに存在する C100 という現在のネットワーク構造を維持しつつ毎ステップ積極的に他個体に接続する協調戦略が徐々に集団中に広がり, 比較的死で協調的なネットワークができあがった. C100 はその後もリンクを増やし続け, ネットワークが密になると, C100 の突然変異個体である D100 が侵入し急速に広まるために, ネットワーク構造はほぼ変わらないまま裏切り者ばかりの集団になった. その後, 孤立する裏切り戦略である D110 が再び集団中に広まり, サイクル初期の状態に戻った.

### 3.2 協調行動とネットワーク構造の共進化サイクル

前節では, 協調行動とネットワーク構造の共進化サイクルが, 裏切ることのメリットとゲームを行うことのコストが共にある程度存在する場合に生じることが明らかになった. 現実の人間関係を考えた場合, 単にネットワークの規模が成長し永続的に存在するばかりでなく, 安定して存在していた協調関係が何かをきっかけに突然崩壊する, また, そこから新たなネットワークが発生するといった動的な側面もあると言える. そこで, 前述の共進化サイクルが現実世界における協調的な人間関係の発生と崩壊のメカニズムの一端を示すものととらえ, その仕組みについて詳しく解析を行った.

図 3 は,  $T=1.20$ ,  $\sigma=0.5$  の場合での典型的な試行における, 協調者の割合と平均次数の空間上の軌跡を示したものである. 同図の軌跡は, 図 4 に示すような (a) から (d) の 4 種類の典型的な状態を遷移する過程からなると見なすことができる. なお, 状態 (c) から (d) への遷移が起こるタイミングについては各サイクルで異なる

\*1 具体的には, 図 1 (もしくは図 3) のような協調者の割合と平均次数の軌跡を描いた時, 協調者の割合 0.3, 平均次数 20 の点を中心として, 左下の領域から, 右下, 右上, 左上の領域に順に到達し左下に戻った場合を一回のサイクルの発生と見なし計測した.

\*2 最初の文字はジレンマゲームの戦略  $g_{pd}$  (C は協調 (1), D は裏切り (0)), 残りの 3 ビットはネットワーク改変戦略の遺伝子  $g_{na}$ ,  $g_{ns}$ ,  $g_{nd}$  の値である. 以下, 同様の記述法で個体の持つ戦略を表す.



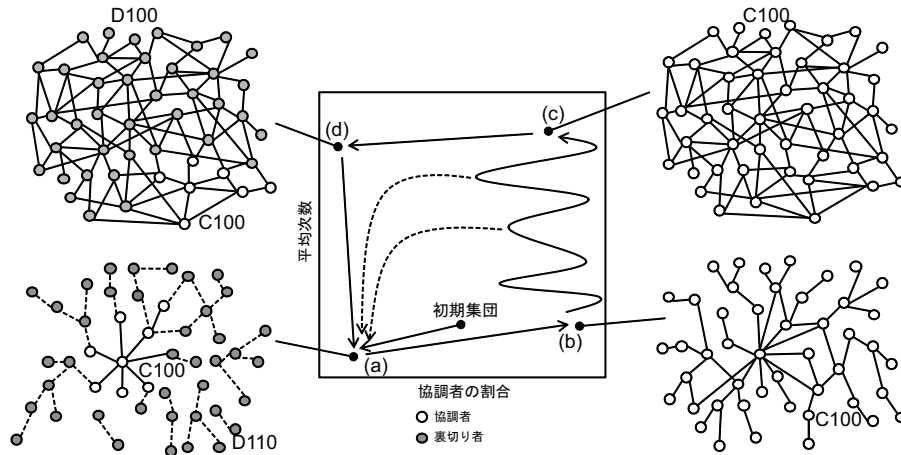


図 4 共進化サイクルの仕組み

り、その際の平均次数によって破線で示すような軌跡も生じた。図中の4つのネットワークは、各状態でのネットワーク構造の特徴を模式的に表したものである。また、図5、図6は、このときの両指標の推移と戦略の分布をステップを通して示したものである。ここでは、典型的な過程が見られた389ステップから471ステップにかけてのサイクルを取り上げ、その過程を解析する。

まず、図5、図6からわかるように、状態(a)に相当する389ステップ付近では、D110が集団の大半を占めると同時に少数のC100が存在している。D110は、同種同士のリンクをすべて切ると同時に新たに1本リンクをランダムにつなぐため、結果として各ステップでリンクを1本ランダムにつなぎなおすことを繰り返している(図4(a)の破線で描かれたリンクに相当)。図7、図8はそれぞれ(a)から(d)に相当する各ステップでの度数分布と、各度数の個体に関する適応度の平均を、協調戦略と裏切り戦略に分けて示している。同図から、裏切り戦略はわずかなリンクを持った個体が極めて多く、リンク数が多いほど適応度が低いことがわかる。これは、リンクを張ってもほとんどの場合裏切り合いになってしまうためである。

協調戦略C100に関して、図8(a)からリンク数が多いほど裏切り者とゲームをする場合が多くなるために適応度が下がる傾向があるが、ごく少数の比較的多くのリンク(この場合は11と35本)を持つ個体が高い適応度平均(2.0程度)を得ていることがわかる。これらの個体は協調者と多く接続することで高い適応度を得ており、この意味で協調者のハブとなって安定して存在する。ハブに接続した協調個体は、これらが裏切り戦略に接続された(もしくは自ら接続した)場合でも、裏切った個体の適応度よりもハブ個体が協調することで得る適応度の方が高いため、結局ハブ個体の協調戦略に置き換えられる。このため、ハブを中心とする協調個体群の構造は安定して存在することができる上に、接続した裏切り戦略の適応度が低い場合にはそれを取り込むことができる。その結果、次第に415ステップ付近の(b)のような協

調者ばかりからなる比較的疎なネットワークを持つ集団に至る。

協調個体が集団中を占めた場合、図8(b)からわかるように、(a)の状態とは逆にリンク数が多い方が協調し合うことで適応度が高くなる。このため、集団を占めたC100は安定してリンクを増やし続け、462ステップ周辺の図7(c)のように協調者の平均次数のピークが次数の高い位置に移動する。この過程で、図6からわかるように、突然変異によって生じた裏切り戦略であるD100の一時的な侵入が見られた。図8(c)から、裏切り個体は主にリンク数が相対的に少ない協調戦略に侵入していることがわかる。これはリンク数が少ない協調個体の方が適応度が相対的に小さく、裏切り者の侵入が容易なためである。リンク数が少ないと、裏切り戦略が侵入後に集団に広まっていく影響も小さく、リンク数の多い協調戦略に侵入するまでには至らない。しかし、平均次数が増加するに従いその影響が大きくなり、また、リンク数が多い協調戦略であってもすでに侵入した裏切り戦略が自身の周辺に多く存在すると適応度が小さくなるため、最終的にはリンク数の多い協調個体も裏切り戦略に侵入を許してしまう。その結果、D100がネットワーク構造をほぼ変えないまま集団全体に急速に広まり、471ステップ付近の(d)のような裏切り集団からなる密なネットワークへと進化する。

裏切り者が大半のネットワークでは、図8(d)が示すように(a)の場合と同様にリンク数が多いほど裏切り合いになってしまう適応度が小さくなるため、同種同士の接続を切る裏切り戦略であるD110が集団中を占め、集団は(a)の状態に戻る。なお、このとき、次のサイクルが発生するには(a)の段階において前述のような協調者の小集団が必要であるが、必ずしも前回のサイクルにおける小集団と同一の協調個体からなるとは限らず、新たな個体が協調者の小集団を形成していた。共進化サイクルは以上のような仕組みで生じていることが判明した。

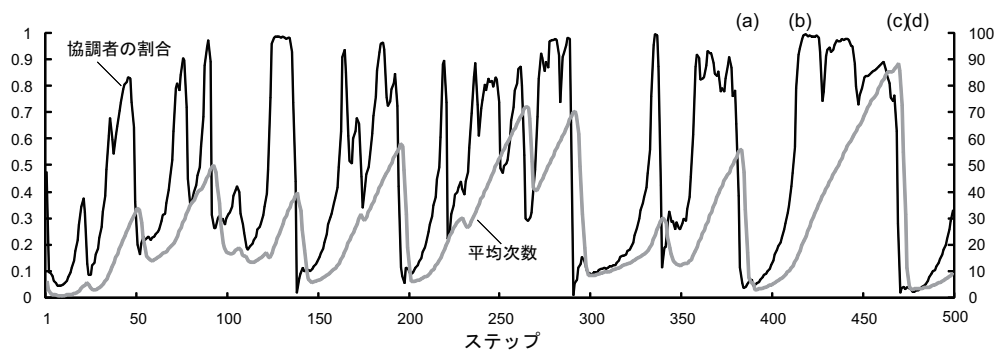


図5 協調者の割合と平均次数の推移

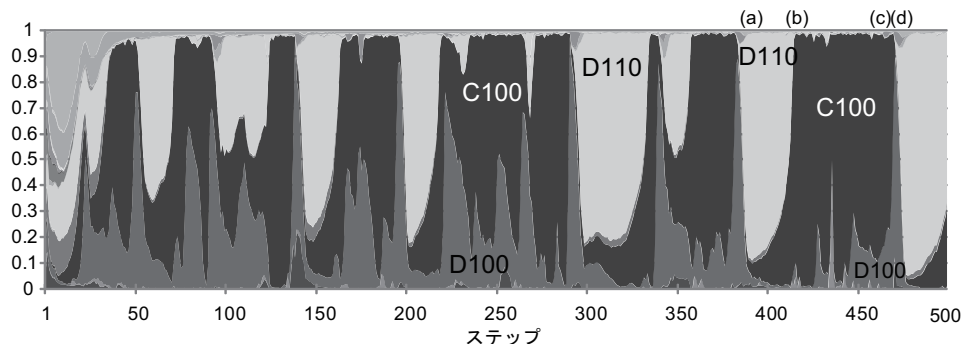


図6 戦略の分布の推移

#### 4. おわりに

本稿では、協調行動とネットワーク構造の共進化ダイナミクスを明らかにするため、協調行動に関する戦略に加え、各個体が対戦結果に応じて近傍のネットワーク構造を改変する戦略を持ち、同時に進化するエージェントベースモデルを構築し、実験と解析を行った。

その結果、裏切ることのメリットとゲームを行うことのコストがある程度存在する場合において、協調者の割合と平均次数が交互に増減する共進化サイクルが比較的安定して生じることが明らかになった。言い換えれば、相手と共同すること自体にある程度の負担が生じるが、互いに協調すれば双方にとって十分なメリットが得られる一方で、逆に出し抜かれて損をしてしまう危険も存在する意志決定の難しい状況において、協調関係のネットワークが生成と崩壊を繰り返したと言える。

その過程を実世界の人間関係を念頭に置いて要約すると次のことが言える。人間関係が疎な場合、わずかな人間を中心にして構築された小規模な協調関係が徐々に広がり、集団全体に広まる。しかし、互いに協調しあうメリットから人間関係のネットワークが密になって成熟するに従い、ネットワークの周辺においてただ乗りの振る舞う人間がはびこり始める。そのような人間が蓄積した結果、ネットワークの中心的な協調者も裏切り者になることをきっかけに集団全体は裏切り合いばかりの密な人間関係となるが、裏切り合うよりは他人と関わらない方が良いために最終的にネットワーク全体が崩壊し、疎な人間関係に戻る。

小規模なグループではうまくいっていた協調関係が、規模の拡大がきっかけとなって関係全体の崩壊を招くことは実世界でも少なからずあり得る状況であると考えられる。本研究で得られた知見は極めて単純なモデルに基づいているが、そのような協調関係とネットワーク構造の生成と崩壊のメカニズムの一端を示していると言えよう。

今後の課題として繰り返しゲームやより一般的なネットワーク改変戦略を採用した進化メカニズムの解析などを検討している。

#### ◇ 参考文献 ◇

- [1] Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, 1984.
- [2] Nowak, M. A. and May, R. M.: Evolutionary Games and Spatial Chaos, *Nature*, 359: 826–829, 1992.
- [3] Grim, P.: Spatialization and Greater Generosity in the Stochastic Prisoner's Dilemma, *BioSystems*, 37: 3–17, 1996.
- [4] Lindgren, K. and Nordahl, M. G.: Evolutionary Dynamics of Spatial Games. *Physica D*, 75: 292–309, 1994.
- [5] Suzuki, R. and Arita, T.: Evolutionary Analysis on Spatial Locality in N-Person Iterated Prisoner's Dilemma, *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 3(2) 177–188, 2003.
- [6] Suzuki, R. and Arita, T.: Interaction between Evolution and Learning in a Population of Globally or Locally Interacting Agents, *Proceedings of the Seventh International Conference on Neural Information Processing*, pp. 738–743, 2000.
- [7] Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective Dynamics of 'Small-World' Networks, *Nature*, 393: 440–442, 1998.
- [8] Barabási, A. and Albert, R.: Emergence of Scaling in Random Networks, *Science*, 286(5439): 292–309, 1994.
- [9] Watts, D. J.: *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*, Princeton University Press,

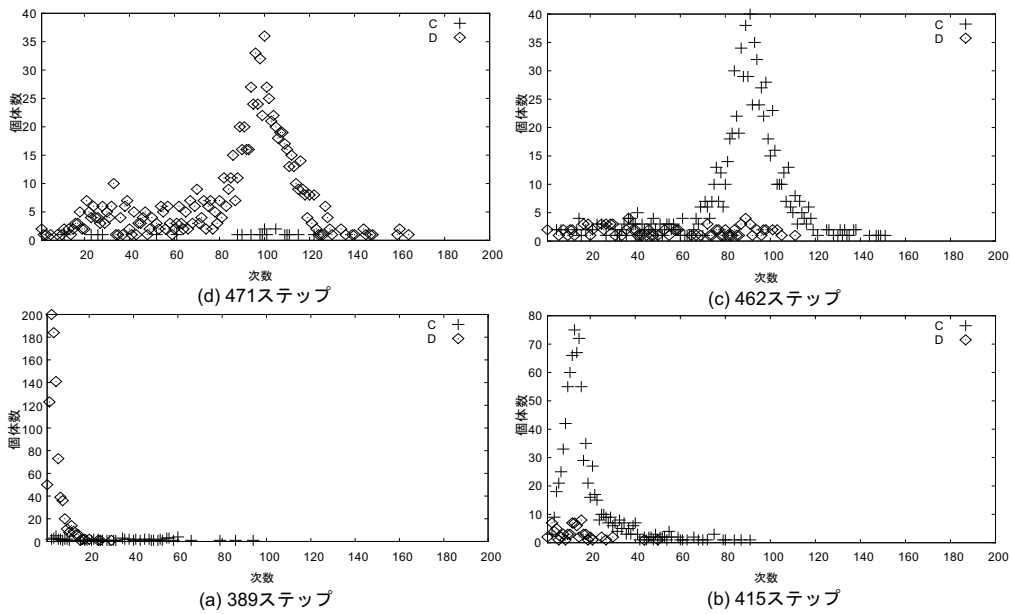


図 7 度数分布

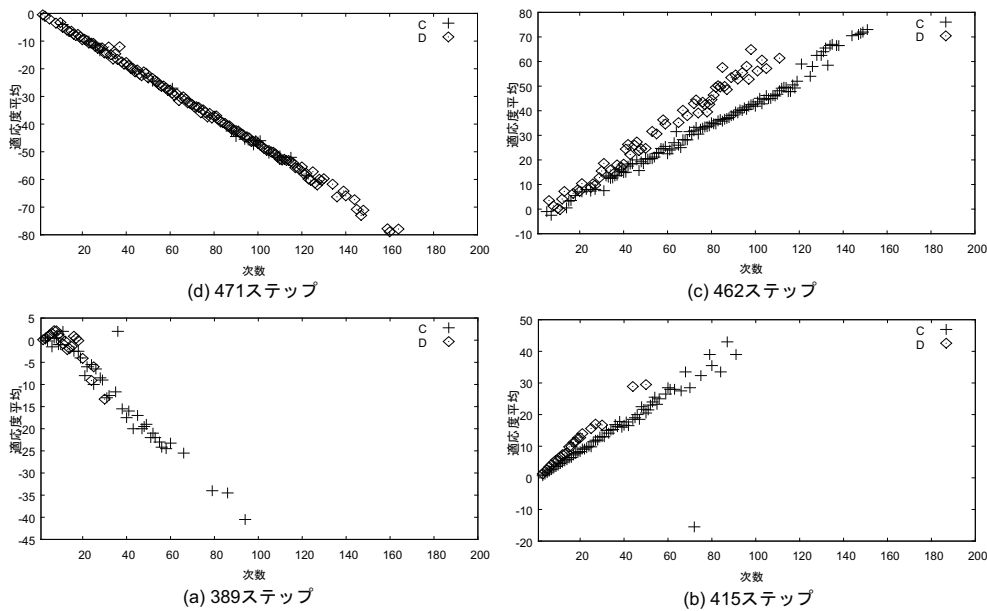


図 8 適応度分布

1999.

- [10] Masuda, N. and Aihara, K.: Spatial Prisoner's Dilemma Optimally Played in Small-world Networks, *Physics Letters A*, 313: 55–61, 2003.
- [11] Zimmermann, M. G., Eguiluz, V. M.: Cooperation, Social Networks, and the Emergence of Leadership in a Prisoner's Dilemma with Adaptive Local Interactions, *Physical Review E*, 72: 056118, 2005.
- [12] Luthi, L., Giacobini, M. and Tomassini, M.: A Minimal Information Prisoner's Dilemma on Evolving Networks, *Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pp. 438–444, 2006.
- [13] 加藤正倫, 鈴木麗瑠, 有田隆也: 協調行動とネットワーク構造の共進化モデル, 数理モデル化と問題解決シンポジウム論文集, pp. 155–162, 2006.
- [14] Hauert, C., De Monte, S., Hofbauer, J. and Sigmund, K.: Volunteering as Red Queen Mechanism for Cooperation in Public Goods Games, *Science*, 296: 1129–1132, 2002.