

# 協調行動とネットワーク構造の共進化モデル

加藤 正倫 鈴木 麗壘 有田 隆也

名古屋大学 大学院情報科学研究科

近年の複雑ネットワークの研究の急速な進展に伴い、人間関係のネットワーク構造に関してもその特徴が調べられてきた。さらに、その構造が協調行動に与える影響が指摘されている。現実社会では、それにとどまらず、ネットワーク構造と協調行動は相互に影響を与え、かつ個人レベルで両者に関する戦略は動的に変化しているはずである。そこで、本研究では、 $N$  人版囚人のジレンマゲームにおいて、ゲーム戦略とネットワーク改変戦略を各個体が持ち、模倣により両者を更新する、協調行動とネットワーク構造の共進化モデルを構築した。実験の結果、協調のメリットを調整するパラメータに依存して、2 種類に大別される、協調関係の成立・崩壊の共進化サイクルが出現することが示された。

## Coevolution of Cooperative Behavior and Network Structure of Interactions

Masanori KATO, Reiji SUZUKI and Takaya ARITA

Graduate School of Information Science, Nagoya University

This paper aims at understanding coevolutionary dynamics of cooperative behaviors and network structures of interactions. We constructed an evolutionary model in which each agent not only has a strategy for  $N$ -person iterated Prisoner's Dilemma to play with its neighboring members on the network, but also has a strategy for changing neighboring structures of the network. By conducting evolutionary experiments, we observed the coevolutionary dynamics. Our results showed that coevolutionary cycles of cooperating behaviors of agents and their network structure of interactions occurred, and typical scenarios of coevolution were divided into two classes depending on the parameter setting for the benefit of cooperation.

### 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に関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(互惠的利他主義)の進化に関する研究が古くからなされてきた<sup>1)</sup>。特に、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。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup> やスケールフリー<sup>4)</sup> などの普遍的な特性を持つことが示されている。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 は、 $N$  人繰り返しゲームに一般化されたしつぱ返し戦略と裏切り戦略が グラフ上で進化するモデルにおいて、クラスター係数が十分大きい(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<sup>5)</sup>。

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、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<sup>6)</sup>。彼らは、リンク張替えルールの特性等から、協調集団がクラスター化することで大きな利得を持つ協調者の連鎖で成り立つこと、系全体で最も高い利得を得ている協調者(リーダー)の利得が、最も高い利得を得ている裏切り者の利得を上回っている間において、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、隣接する裏切り戦略との接続を切るかどうか、得られた利得とある閾値と比較することで決めるモデルを構築し、ある閾値の領域において、多数の協調戦略がクラスターを形成し、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<sup>7)</sup>。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、何を基準に誰とつきあうかという相互作用の仕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。

そこで、本研究は、ジレンマゲームにおける戦略と相互作用の仕方の共進化のダイナミクスについて知見を得ることを目的とする。特に、両者の相互作用によって生じる動的かつ周期的な進化のサイクルの創発に焦点を絞る。協調行動の周期的な創発に関連して、Hauert らは自由参加共有財ゲームを提案した<sup>8)</sup>。彼らは、1 回きりの  $N$  人版囚人のジレンマゲームにおいて、協調する、裏切

表 1: エージェントが持つ行動戦略

ジレンマ 戦略	リンク張替え戦略		
	新ノードへの 接続	リンク切断	
		同ジレンマ 戦略ノード	異ジレンマ 戦略ノード
$g_d$	$g_{n(0)}$	$g_{n(1)}$	$g_{n(2)}$
C(協調)	0(しない)	0(しない)	0(しない)
D(裏切り)	1(する)	1(する)	1(する)

るといふ戦略に加えて、ゲームに参加しないという戦略を設け、参加しなかった個体はゲームの結果に左右されない一定の利得を得るものとした。実験の結果、裏切りばかりの集団に参加するよりもゲームに参加しない方が適応的となり、協調、裏切り、不参加の順で支配的な戦略が移り変わるサイクルが生じることを示した。本研究では、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、各エージェントが主催する N 人ゲームへの参加・不参加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張るか切るかを定め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、実験を行った。

## 2 モデル

本モデルは、相互作用に関するネットワークを構成するエージェントが、隣接エージェント群で N 人版繰り返し囚人のジレンマゲーム (NPD) を行い利得を獲得し、隣接エージェントとの利得の合計比較によって、より合計の高いエージェントの行動戦略 (ジレンマゲームの戦略とリンク張り替え戦略) を模倣することで、協調行動とネットワーク構造が共進化するものである。

### 2.1 エージェントとネットワーク構造

ネットワーク上の  $P$  個のノードにより  $P$  人のエージェントが表され、ノードをつなぐリンクは各エージェントを中心に行われる NPD に参加するかしないかを表している。エージェントはそれぞれ、表 1 に示される行動戦略を持つ。行動戦略はジレンマゲームにおける戦略  $g_d$  (協調: C, 裏切り: D) とリンクの張り替え戦略  $g_{n(i)}$  ( $i = 0, 1, 2$ ) に分けられる。 $g_{n(0)}$  は各ステップにおいてリンクを共有していない個体と新たにリンクを張る (1) か張らない (0),  $g_{n(1)}$  は同じジレンマ戦略  $g_d$  を持つすべての隣接個体とのリンクを切る (1) か維持するか (0),  $g_{n(2)}$  は異なるジレンマ戦略  $g_d$  を持つすべての隣接個体とのリンクを切る (1) か維持するか (0) をあらわす。

### 2.2 N 人版囚人のジレンマゲーム

エージェントごとに全隣接エージェント (距離 1) とグループを構成し (グループ数  $P$ ), それぞれにおいて各エージェントがジレンマ戦略  $g_d$  を用いてゲームを行い、得点を得る。本モデルで用いる NPD は、図 1 に示されるように、協調者と裏切り者の利得が傾き ( $r$ ) と切片 ( $c$ ) によって定まる利得関数によって表される。図中、横軸は協調者の割合、縦軸は利得を示す。グループの人数を  $S$ , グループ内の協調者の人数を  $N_C$  とすると、裏切り者が得る利得は  $P_D = rN_C/S$ , 協調者が得る利得は  $P_C = P_D - c$  と表される。NPD には、ある個体にとって協調者の割合

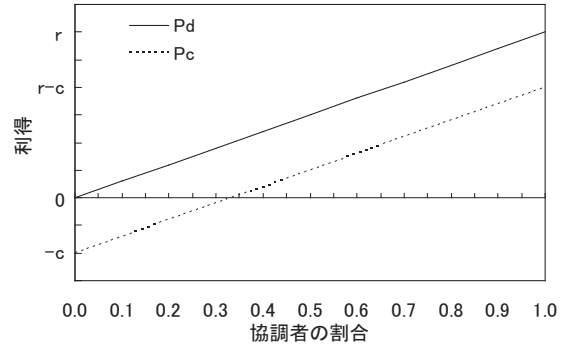


図 1: N 人版囚人のジレンマゲームにおける利得

がどの値をとっても裏切り者の利得の方が高いため自分としては裏切った方が良いが、その結果、全ての個体が裏切り者になってしまうよりも全ての個体が協調者であるときの方が利得が高いというジレンマがある。

本モデルでは、各ゲームに参加しなかったエージェントも  $\sigma$  の利得を得る (もしくは、参加したエージェントの利得から一律に  $\sigma$  の利得が減算される) ものとする。 $\sigma > 0$  のとき、全員が裏切り者の集団に参加して得る利得よりも、そのゲームに参加しない時に得る利得の方が高くなる。各エージェントがすべてのゲームで得た利得の合計を、各エージェントの適応度とする。

### 2.3 進化

エージェントの行動戦略及びネットワーク構造の進化は 1 ステップに含まれる次の 3 つのフェーズにより行われる。

#### 1. 対戦フェイズ

現時点で持つジレンマ戦略  $g_d$  を用いて隣接エージェント群と対戦し、利得を得る。

#### 2. 行動戦略進化フェイズ

隣接エージェント群との適応度比較により、最も多くの利得の合計を持つエージェントの行動戦略を模倣することで行動戦略の更新を行う。このとき、戦略の各値には突然変異が一定の確率で起こる。突然変異はジレンマ戦略とリンク張替え戦略それぞれに確率  $P_{dilemma}$ ,  $P_{rewire}$  で各値を反転させるものとする。

#### 3. ネットワーク進化フェイズ

2 で模倣した行動戦略により、1 の時点での戦略分布を用いてリンクの張替えを行う。まず、各エージェントは模倣したリンク張り替え戦略  $g_{n(1)}$  が 1 である場合、模倣したジレンマ戦略と、現ステップにおけるジレンマ戦略が同じであるエージェントとのリンクをすべて切断する。同様に、リンク張り替え戦略  $g_{n(2)}$  が 1 である場合、自身と異なるジレンマ戦略を持つエージェントとのリンクをすべて切断する。すべてのエージェントがこれらを行った後、リンク張り替え戦略  $g_{n(0)}$  が 1 である各エージェントは、その時点で接続していない他のエージェントをランダムに 1 体選び、リンクを張る。以上の過程でできあがったものを次ステップにおけるネットワークとする。

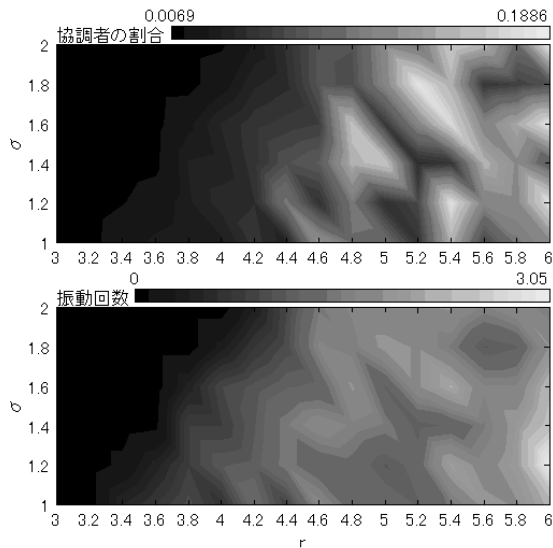


図 2: 全ステップにおける協調者の割合の平均 (上) と協調者の割合の平均振動回数 (下)

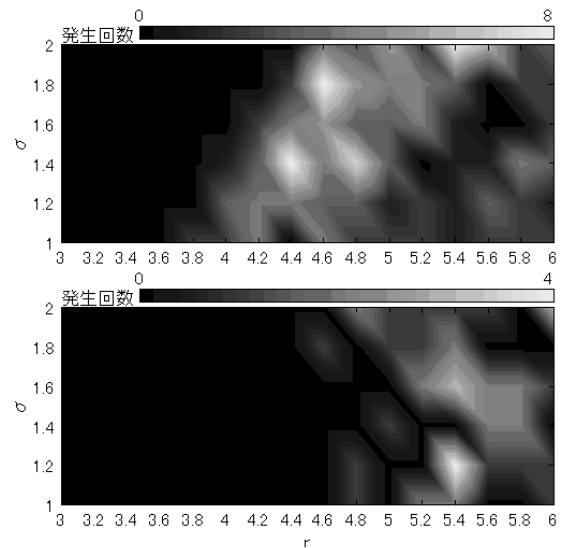


図 3: 各設定における共進化サイクルの発生回数  
(上) 行動戦略 C000 が進化するサイクル  
(下) 行動戦略 C101 が進化するサイクル

### 3 実験

ネットワークを構築するエージェント数  $P = 1000$ , エージェント一人当たりが持つ初期リンク数  $K = 6$ , NPD を行うときの協調者が負担するコスト  $c = 1.0$ , エージェントが持つ戦略に対しての突然変異確率  $P_{\text{dilemma}} = 0.005$ ,  $P_{\text{rewire}} = 0.005$  とした. 以上を共通設定とし, 囚人のジレンマゲームによる協調行動が共進化に与える影響を把握するため NPD を行うときの  $r = 3.0, 3.2, \dots, 6.0$ , ゲームに参加しないときに得る得点  $\sigma = 1.0, 1.2, \dots, 2.0$  それぞれにおいて各 500step, 20 試行実験を行い, 挙動を観察した.

#### 3.1 基本的な挙動の解析

はじめに, 系全体の基本的な進化の過程について, 協調者の割合と平均リンク数の推移を元に概説する. 初期ステップから, 系は初期分布の影響を含んだ過渡的な推移を経て, 安定なサイクル状の軌道に入り, 協調者の割合と平均リンク数が増減を繰り返す共進化サイクルが生じた (例えば, 図 4, 9 を参照). しかし, サイクルの中で協調者の割合が極めて少なくなったとき, 確率的な影響で裏切り者ばかりになる場合が生じ, 最終的に孤立した裏切り者ばかりの集団に収束した. ただし, 実験のパラメータ  $r$  と  $\sigma$  の条件に応じて, 初期集団から共進化サイクルに入る頻度や, サイクルにおいて集団を占める協調者の持つ戦略の種類は大きく異なった. 以下, 両パラメータが協調行動の創発と共進化サイクルの出現に与える影響について説明する.

図 2(上) は各設定における全ステップを通じた協調者の割合の平均を示した図, 図 2(下) は各設定において全試行を通して協調者の割合が増加減少を繰り返した数 (協調者の割合 60% を越えた後に割合 40% を下回ったときに 1 回とカウント) の平均である平均振動回数を示した図である.

$r$  が最も小さい  $r = 3.0, 3.2$  付近では, ジレンマゲームにおいて協調することで得る利得が小さいために裏切り

者の利得が相対的に高く, 初期状態から急速に裏切り者が侵入し, 孤立した裏切り者ばかりの集団へ収束した. 孤立した集団になるのは, すべての個体が裏切り者ばかりの場合には,  $\sigma$  が正であることから, 裏切り合うよりも孤立した方が得る得点が高くなるためである.

$r = 3.4 \sim 4.2$  周辺にかけて  $r$  が大きくなるにつれ,  $\sigma$  が小さいほど協調者の割合が高くなる傾向があった. 図 2(下) も同様に振動回数が高くなる傾向が見られた. これは初期状態から過渡的に一度だけ協調者の割合が増加した後に孤立した裏切り集団に収束する場合が生じたことを示している.  $\sigma$  が小さい場合, 協調者同士でつながるエージェントと, リンクをつなぐにゲームに参加しないエージェントとの相対的な利得差が大きくなり, 協調者が侵入しやすいためである. しかし, この状況では系が安定した共進化サイクルに入ることはほとんどなかった.

$r$  がさらに大きくなると, 図 2(上)(下) の協調者の割合と平均振動回数がさらに増加した. これは, 初期集団からの過渡的な遷移を経て, ネットワーク構造の変化と共に協調者の割合が増減する共進化のサイクルが複数回発生した後に裏切り集団に収束する過程が多く発生した結果を示している. なお,  $r$  が最も大きく  $\sigma$  が比較的小さい  $(r, \sigma) = (6.0, 1.2)$  で平均振動回数が高かったのは,  $r$  が大きいことは協調者にとって極めて有利な条件であることと, 前述の通り  $\sigma$  が小さいことが孤立した裏切り集団からの協調行動の出現にとって有利であることから, 完全な裏切り集団から協調集団が例外的に再発生しやすかったためであると考えられる.

#### 3.2 2種類の共進化サイクル

以上のように, 本モデルでは協調行動が維持される状況において, 系は比較的安定な軌道である共進化サイクルを遷移することが判明したことから, 共進化のダイナミクスは協調行動の維持をもたらすメカニズムとして重要であると考えられる. そこで, 各条件において生じた



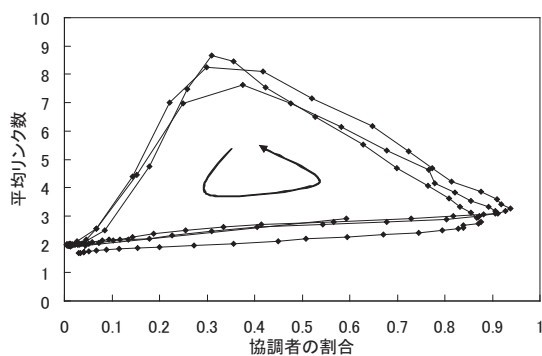


図 4:  $r = 4.0, \sigma = 1.2$  の協調者の割合と平均リンク数の相関

共進化のサイクルの様子を調査したところ、そのダイナミクスは協調関係が構築される過程で C000 という協調戦略が進化して集団中を占める場合と、C101 という協調戦略が進化して集団中を占める場合に大別される事が判明した。図 3 は各設定において行われた 20 試行のうちそれぞれが現れた試行をカウントした図である (協調者の割合が増加している最中で割合が 60 % を越えたときのネットワークに占める最も多い戦略を基に判別)。同図から、前者は  $r$  が比較的小さい場合、後者の場合は  $r$  が比較的大きい場合に頻繁に生じる事がわかる。

両場合における戦略の進化の様子はおおまかには次の通りであった。前者では、「... (自ら他個体と接続しないという意味で) 消極的で、現在の接続を維持する協調戦略 積極的に接続し、協調者を採択する裏切り戦略 ...」という進化を繰り返した。一方、後者では、「... 積極的に接続し、同種のみとの接続を維持して協調関係を築く協調戦略 積極的に接続し、現在の接続を維持する裏切り戦略 ...」という過程を繰り返した。両者においてジレンマゲームの戦略とネットワーク張り替え戦略との関係が大きく異なっているのが興味深いと言える。また、協調行動の創発の過程に関して、前者における協調戦略 C000 は、孤立した裏切り戦略が大半を占める集団において、自らは積極的にリンクを増やすことはせず外部から接続してきた裏切り者を待つことで、協調することのメリットが低い状況でも、近傍の協調者の割合を下げずに疎なネットワークをつくりつつゆっくり拡大していった。一方、後者における協調戦略 C101 は、全域的に密につながった裏切り集団において、協調することのメリットが高いことを生かして積極的に裏切り個体と接続し、侵入すると同時に、裏切り者とのリンクのみ切断することで、協調者ばかりの密なネットワークをつくっていった。しかし、両者共に、協調集団を維持することは難しく、最終的には裏切り者の侵入を受け、改めて協調者集団が構築される過程が繰り返された。

以降で、両者の共進化ダイナミクスの典型的な遷移を取り上げ、それぞれの過程について詳細に解析を行う。

### 3.3 $r$ が比較的小さいときに見られる進化サイクル

ここでは  $r$  が比較的小さいときに見られた C000 が集団中を占める進化サイクルが典型的に現れた  $r = 4.0, \sigma = 1.2$  の結果を取り上げる。図 4 は、協調者の割合とネット

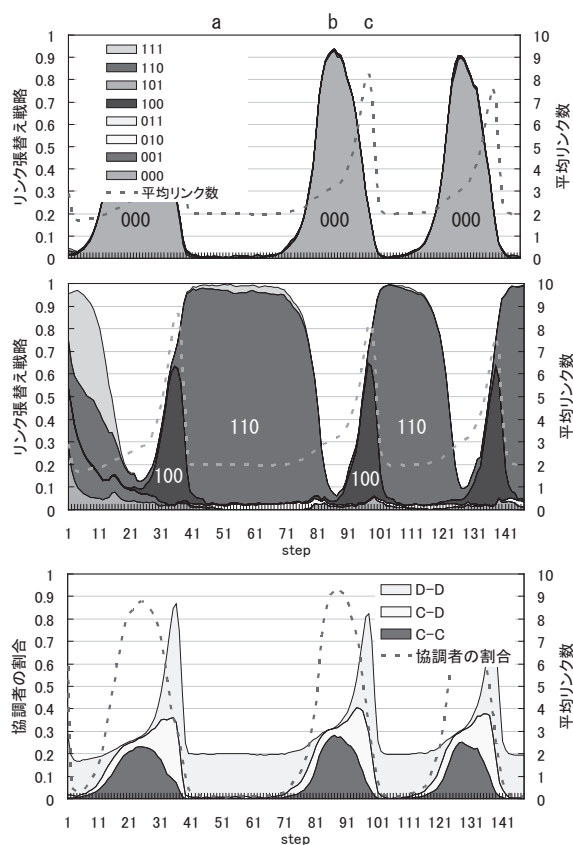


図 5: リンク張替え戦略の推移 (上: 協調者, 中: 裏切り者) とリンク種別の推移 (下) ( $r = 4.0, \sigma = 1.2$ )

ワークの平均リンク数の相関図である。協調者の割合と平均リンク数が相互に影響して増減しており、a: 協調者の割合が小さく・平均リンク数が少ない b: 協調者の割合が大きく・平均リンク数が少ない c: 協調者の割合が小さい・平均リンク数が多い、というような状態遷移により三角の軌跡を描いている。

以下に約 50 ステップから見られた共進化のメカニズムについて説明する。

#### 3.3.1 a から b への過程

図 5(上)(中) は協調者と裏切り者のそれぞれが持つリンク張替え戦略の割合の推移を表した図、図 5(下) はネットワーク中の C-C(協調者同士のリンク)、C-D(協調者と裏切り者の間のリンク)、D-D(裏切り者同士のリンク)、それぞれの平均リンク数を類別して積み上げグラフとして表した図である。図 6 は共進化のサイクルにおける各段階の度数分布であり、その協調者と裏切り者の積み上げグラフを示し、左下、右下、左上のグラフがそれぞれ a, b, c の段階のものに相当している。a 段階に位置している 50 ステップから 70 ステップ付近では D110 が 90 % 以上を占める。多数を占める D110 が度数 1, 2 に集中し、平均リンク数が 2 本でその 90 % 以上が D-D である。

D110 は各ステップで、つながっている裏切り者とのリンクを全て切り、ランダムに選んだ 1 エージェントにリンクをつなぐ。ネットワーク中のリンクはほとんどが D-D(裏切り者同士のリンク) であるために、ステップ毎にほぼ全てのリンクを切って別のエージェントへとつな

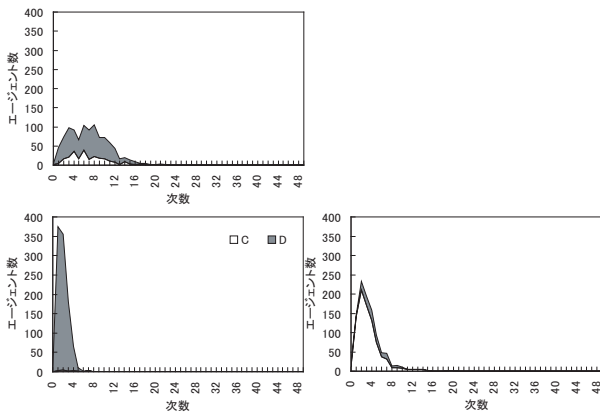


図 6:  $r = 4.0, \sigma = 1.2$  の度数分布  
(c の段階: 左上)100step  
(a の段階: 左下)50step (b の段階: 右下)90step

ぐことになり、裏切り者同士が鎖状につながったネットワークが新たに形成され続ける。その状況の中で、初期状態や前回のサイクルから残った小さな協調者同士でつながったネットワークが存在する場合には、それが次のような過程を経て成長する。

図 7 は協調者のネットワークが成長する過程のイメージである。集団中は裏切り者がほとんどなので鎖状の裏切り者のネットワークがエージェント 2 のような少数の協調者につながる。つながった裏切り者エージェント 4 は隣接する協調者エージェント 2 の行うゲームでは協調者エージェント 2 から利得を搾取し、相対的に利得が高くなるが、一方の隣接する裏切り者が行うゲームでは裏切り者のみしか存在しないために利得を得ることができない。裏切り者に隣接し、搾取された協調者エージェント 2 は一方の隣接する協調者エージェント 1 が行うゲームでは搾取された分を補うことが可能となる。エージェント 2 とエージェント 4 の利得の合計の差分は  $(-c \times 2)$  (お互いが行うゲームでのコスト)  $+ (4/5 \times r - c)$  (エージェント 1 が行うゲームでの利得)  $= 0.2$  でエージェント 2 が高く、その結果、協調者につながった裏切り者エージェント 4 は行動戦略 C000 を模倣し、協調者のネットワークが成長する。C000 は自らは他エージェントへリンクをつなごうとしないため、この過程を繰り返した結果、協調者のネットワークはクラスタ係数が 0 に近い疎なネットワークへと進化する。この性質は先の裏切り者による搾取を他の協調者との協調で補う状況をもたらす。

図 7 のエージェント 1 のような協調者との間の次数が大きい協調者は、エージェント 3 のように裏切り者が 1 つつながってきても、自分が行うゲームにおいて協調者の比率が低下しにくく、そして裏切り者に搾取された分は隣接する協調者が行うゲームにおいて補うことができるために、エージェント 2 よりも確実につながってきた裏切り者を協調者へと取り込むことができる。このような次数が大きいハブのような協調者はさらに次数が大きいハブエージェントへと成長していく。

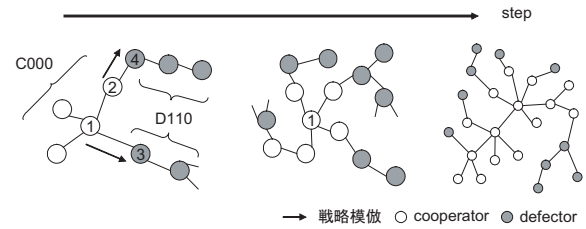


図 7: a から b への過程における協調者のネットワークの成長過程のイメージ

### 3.3.2 b から c への過程

協調関係が構築され、協調者の割合が増加した b 段階に位置している 90 ステップ付近では、C000 が 90% 程度を占めるまで拡大している。協調者、裏切り者に関わらず、多くのエージェントが次数の値が小さな 3 付近に集中している一方で、少数のエージェントが次数が大きい値 10 以上に位置し、平均リンク数が 3 本、そのうちの C-C が約 90%、C-D が約 10% を占める。

協調者のネットワークは C-C を 8~15 本程度持つハブエージェントがわずかに存在する一方で、C-C を 2 本程度しか持たないエージェントが多数を占める。そのような状況から、D100 が次のような過程を経て増加した後に協調者のネットワークへと侵入し、崩壊させていく。

図 8 は協調者のネットワークが崩壊に至る過程のイメージである。この状況では、協調者が大部分を占めるため、D100 はステップ毎にランダムに 1 つずつリンクを増やして、ほとんどの場合協調者に接続する。エージェント 1 や 2 のような次数が大きい協調者のハブエージェントに隣接するエージェント 4 や 5 のような協調者にリンクがつながると、その後もそのエージェントから搾取を続けることが可能となる。これは、協調者のハブエージェントに隣接するエージェント 4、5 よりも D100 であるエージェント 3 の方が利得の合計は高いが、ハブエージェントの利得の合計はさらに高いためにエージェント 4、5 はハブエージェント 1、2 の行動戦略 C000 を模倣し続けるために協調戦略を維持するからである。エージェント 3 のような D100 はまず、協調者のハブエージェントの一次隣接エージェントから搾取を続けながら、協調者のハブエージェントや、その一次隣接エージェント以外の次数が小さな協調者とつながることで、協調者へと行動戦略 D100 を伝播させることで D100 が増加していく。エージェント 3 はハブエージェントの一次隣接エージェントから搾取することで利得の合計を高めていく。エージェント 6 のような、協調者のハブエージェントでもなく、その一次隣接エージェントでもない次数が小さな協調者が D100 へと変化していくと、一次隣接エージェントの行うゲームにおける協調者の比率は下がり、結果的にハブエージェントの利得の合計が下がる。D100 であるエージェント 3 の利得の合計がハブエージェントであるエージェント 1 の利得の合計を上回ったとき、協調者のハブエージェントは裏切り者へと変わる。ハブエージェントが裏切り者へと変化したあとは、その周囲の協調者も一気に裏切り者へと変わり、その結果、90 ステップ以降では協調者のハブエージェントが裏切り者へと変わり

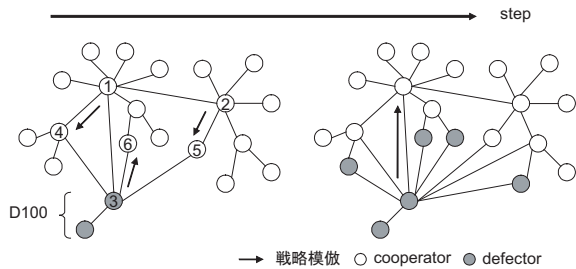


図 8: b から c への過程における協調者のネットワークの崩壊過程のイメージ

始め、協調者のネットワークが崩壊し、裏切り者及び平均リンク数が急激に増えていっている。

b から c への過程の終盤部分である 95 ステップ付近になると、集団中の D100 の割合が 50 % を越え、裏切り者のハブエージェントが多くのエージェントとつながり、ネットワーク全域と相互作用する状況となる。そのため行われるゲームでは、協調者は搾取される、裏切り者は裏切りあう機会が多くなる。そこで次数が小さいエージェントが裏切り者同士のゲームに参加せずに利得  $\sigma$  を得るような行動戦略 D110 を持つエージェントが適応的になり、ここで D110 が突然変異で生じると、次のステップでは、裏切り者とのリンクは切り、一本のリンクを任意エージェントにつなげることで D110 の割合が増加していく。この頃に残っている協調者のハブエージェントはつながってきた D100 でなく、D110 に侵入され始め、D110 が急激に増加する。そして、D100 のリンクを増やす作用と D110 の裏切り者とのリンクを減らす作用のバランスが逆転したとき (100 ステップ付近) に c から a への過程へと移る。また、図 3 (上) において、この種類のサイクルが  $\sigma$  が高い条件で発生する傾向があるのは、D100 から D110 への入れ替わりが、上記の理由で  $\sigma$  がある程度大きい方が生じやすいためであると考えられる。

### 3.3.3 c から a への過程

協調集団に裏切り者が侵入した結果、協調者の割合が減少し、平均リンク数が増加した c 段階に位置している 100 ステップ付近では D100, D110 がそれぞれ約 60 % と約 10 % まで増加し、C000 が約 20 % まで減少する。多くのエージェントが次数 4~12 に位置し平均リンク数は 8 本を越え、そのうちの D-D が約 70 %, C-D が約 20 %, C-C が約 30 % を占める。

D-D のリンクがほとんどである状況で、D110 はネットワーク全域へと急激に広がり支配的になる。D110 は次ステップではつながっているリンク全てを切るため、ネットワークの平均リンク数が減少する。最終的に D110 が 100 % 弱まで広まったところで、図 6 (左下) のようにエージェントのほとんどは次数が 1 もしくは 2 のところに分布するようなネットワーク構造へと進化する。以上の過程を経て 3.3.1 の状況へ戻る。

### 3.4 $r$ が比較的大きいときに見られる進化サイクル

ここでは  $r$  が比較的大きいときに生じた、C101 が集団中を占める共進化サイクルで典型的な結果であった  $r = 5.0, \sigma = 1.4$  の結果を取り上げる。図 9 は、協調者の割合とネットワークの平均リンク数の相関図である。3.3 と同

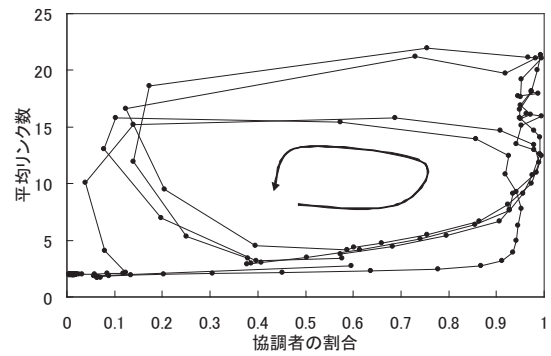


図 9:  $r = 5.0, \sigma = 1.4$  の協調者の割合と平均リンク数の相関

様に協調者の割合と平均リンク数が相互に影響して増減しているが、遷移する状態が異なり、ばらつきは大きい傾向があるものの、a: 協調者の割合が小さく・平均リンク数が多い b: 協調者の割合が中程度・平均リンク数が少ない c: 協調者の割合が大きく・平均リンク数が多い、というような状態遷移により軌跡を描いている。

以下に約 50 ステップからの共進化のメカニズムについて説明する。

#### 3.4.1 a から b への過程

図 10 はこの試行における図 5 と同様のグラフである。図 11 は共進化のサイクルにおける各段階の次数分布であり、その協調者と裏切り者の積み上げグラフを示し、左上、左下、右上のグラフがそれぞれ a, b, c の段階のものに相当している。a 段階に位置している 54 ステップ付近では C101 が 10 % ほどで、D100 が約 70 % を占める。少数である協調者が次数 2, 3 付近に位置し、次数が 20 を越える高いところでは、裏切り者がほとんどである。平均リンク数は 20 本程度で高い値を示し、D-D が約 90 %, C-D が約 10 % ずつを占める。

D100 は各ステップで、ランダムに選んだ 1 エージェントにリンクをつなぐ。ネットワーク中は裏切り者が約 80 % を占める状況であることと、D100 は同種とのリンクを切らないために、裏切り者同士が密につながったネットワークが形成されている。その状況の中で、初期状態や前回のサイクルから残った協調者が、次のような過程を経て協調者のネットワークへと成長する。

図 12 は a 段階から b 段階にわたって、協調者のネットワークが成長していく過程のイメージである。裏切り者同士が密につながったネットワークが形成されているので、エージェント 1 のような多くの裏切り者とつながっている裏切り者が多数存在する。初期状態もしくは前回のサイクルからわずかに残っている C101 は、各ステップで、つながっている裏切り者とのリンクを全て切り、ランダムに選んだ 1 エージェントにリンクをつなぐために、エージェント 0 のように少数の協調者と裏切り者につながる状況が生じる。裏切り者の密なネットワークにより、エージェント 1 の隣接エージェント群の協調者の比率は極めて低く、さらに二次隣接群の協調者の割合も同様となっているために、自分を含めた裏切り者が行うゲームにおいて得る利得はほぼ 0 である。従って、エージェン



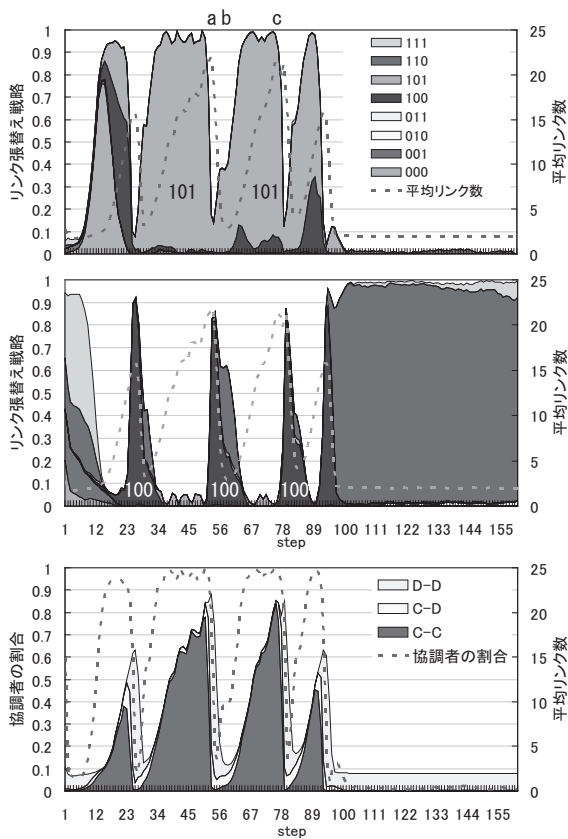


図 10: リンク張替え戦略の推移 (上: 協調者, 中: 裏切り者) とリンク種別の推移 (下) ( $r = 5.0$ ,  $\sigma = 1.4$ )

ト 2 とエージェント 1 の得る利得の差は,  $(-c \times 2)$  (お互いに行くゲームでのコスト)  $+ (2/2 \times r - c)$  (エージェント 2 が行うゲームでの利得)  $+ ((11 - 1) \times \sigma)$  (エージェント 1 がエージェント 0 とのリンク本数の差の分だけ得る利得)  $> 15.4$  であり, エージェント 1 よりもエージェント 0 が圧倒的に高く, エージェント 1 は C101 を模倣する。ただしエージェント 1 は, 現ステップでは D100 であるためにエージェント 0 からリンクを切られる。その後, 次のステップにおいて模倣した行動戦略 C101 により隣接する裏切り者全てのリンクを切り, 同時にランダムに 1 エージェントを選ぶ。その結果, 再度エージェント 3 のような協調者につながると協調者のネットワークが拡大する。ネットワークのリンク数は減少し, C101 の隣接エージェント群の協調者の比率を高く維持したネットワークを拡大しながら協調者の割合が増加していく。

### 3.4.2 b から c への過程

裏切り者とのリンクを切って協調関係を構築し, 協調者の割合が増加し, 平均リンク数が減少した b 段階に位置する 60 ステップ付近では C101 が約 50%, D100 が約 20%, D110 が約 30% を占め, ほとんどの裏切り者が次数 2 に集中する一方で, 協調者は平均的に次数が高く 4 を頂点としている。平均リンク数が 2 本でその約 70% が D-D で, C-D, C-C がそれぞれ約 10% ずつである。

b 段階に位置している図 10(上) の 59 ステップ付近では, 集団中には C101 が 50% 程度まで増加しており, 図 10(中) では, D100 の他に D110 が約 30% まで増加して

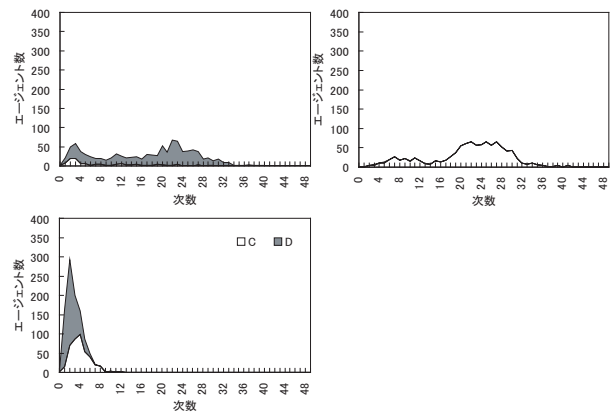


図 11:  $r = 5.0$ ,  $\sigma = 1.4$  の次数分布

(a の段階: 左上) 54step (c の段階: 右上) 75step

(b の段階: 左下) 59step

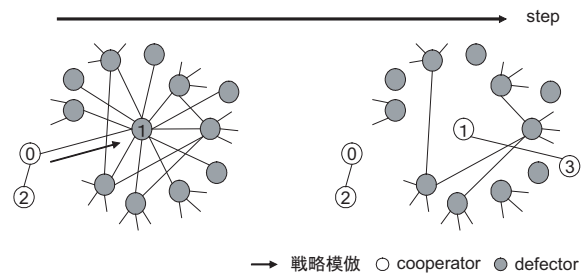


図 12: a から b への過程における協調者のネットワークの成長過程のイメージ

いる。このような状況から協調者のネットワークは次のような過程を経て, ネットワークをさらに成長させていく。

図 13 は b 段階から c 段階にわたって, 協調者のネットワークが成長していく過程のイメージである。エージェント 1, 2 は a 段階から構築された隣接エージェントの協調者の比率の高い C101 同士と多数つながっている状況にある。エージェント 0 はエージェント 0, 1, 2 の行うゲームにおいてコスト  $c$  の分だけ相対的に高くなるが, エージェント 1, 2 は他方の隣接エージェントのゲームにより搾取された分を上回る利得を得ることが可能となる。 $r$  が大きいほど, 協調者の比率が高いゲームで得る利得とゲームに参加しない得点  $\sigma$  の差が大きくなるために, 搾取された分を上回る利得を得やすい状況にあるといえる。エージェント 0 はエージェント 2 の行動戦略を模倣した結果, 隣接する C101 エージェントからリンクを切られ, 隣接する裏切り者とのリンクを切るが, 再び協調者のネットワークへつながることで協調者のネットワークは拡大する。b 段階では, すでに協調者の割合 (C101 の割合) が 50% を超えており, D-D も 10% 程度とわずかしかないため, C101 の新たにつなぐ C-C の本数が切る本数を上回るため, ネットワークの平均リンク数が増加していく。協調者の割合が 90% を越えたあたりから C101 はネットワークに広がる協調者のネットワーク (ほぼ C101 の集団) 内部でリンク数を大きく増やし, ネット

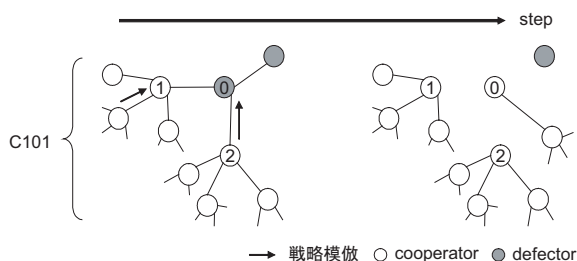


図 13: b から c への過程における協調者のネットワークの成長過程のイメージ

ワークが全域的に相互作用するネットワークへと進化していく。

### 3.4.3 c から a への過程

ネットワーク全域に協調関係が構築され、協調者同士がつながることで平均リンク数が増加した結果、c 段階に位置する 75 ステップ付近では C101 が 90 % 以上を占め、協調者のほとんどが次数の値が 20 を越える高い値を示している。平均リンク数が 20 本を越えるまで増加し、そのうちのほとんどが C-C である。ネットワークは、協調者同士が全域的につながっている状況である。そのような状況で次数が高い協調者が突然変異により D100 へと変化したとき、次のような過程を経て協調者のネットワークが崩壊に至る。

図 14 は c 段階から a 段階にわたって、協調者のネットワークが崩壊していく過程のイメージである。c 段階は 11 (右上) のように、エージェント 0, 1, 2 を含むほとんどのエージェントは次数が 20 以上である。そこへエージェント 0 のように突然変異により D100 が現れる。本モデルでは、利得は協調者の割合に依存して決まるため、ゲームに参加するエージェントが多くなるほど、1 エージェントあたりの戦略が利得に与える影響が小さくなる。この状況のように、次数が十分大きい協調者ばかりの集団では、各ゲームに裏切り者が 1 エージェント侵入したとしても、協調者の割合にはほとんど影響せず、裏切り者はほぼ  $r$  の利得を得ることができる。一方で、協調者は常に  $\sigma$  のコストを支払うため、ほぼ  $r - \sigma$  の利得を得る。もし、エージェント 0 と 1, 2 の次数が同じなら、これらのコストの有無が利得に大きく反映され、利得の合計の差は  $(l + 1) \times c$  ( $l$  はエージェントの次数) でエージェント 0 が高い利得の合計を持つこととなる。エージェント 0 の隣接エージェント全てにおいてもこのような状況であるために、裏切り者の周辺の協調者は D100 を模倣することになる。次ステップでは D100 となった隣接エージェントはランダムに 1 本リンクを他エージェントへとつなぎ、再度同じ状況になることで D100 がネットワーク全体へと広がっていく。このようにして協調者の割合が低く、平均リンク数が多い a 段階へと移行する。以上の過程を経て 3.4.1 の状況へ戻る。

## 4 おわりに

本研究では、ネットワーク上の隣接個体群で行われる N 人版囚人のジレンマゲームの戦略に加え、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つ個体が進化するモデルを構築し、利己的なエージェント間

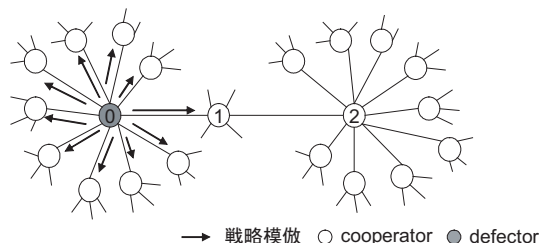


図 14: c から a への過程における協調者のネットワークの崩壊過程のイメージ

における協調行動とエージェントが構築する個体間相互作用ネットワークの共進化シミュレーションを行った。その結果、ゲームのパラメータによって進化のダイナミクスは大きく変わる。特に、 $r$  が中程度以上の時に周期的なサイクルが生じることが判明した。その中でも共進化サイクルは、協調することのメリットをあらゆるパラメータ  $r$  が比較的小さいときに発生するサイクルと  $r$  が比較的大きいときに発生するサイクルに大別された。 $r$  が小さい場合は、自らは積極的にリンクを増やすことはせずに疎なネットワークをつくりながら拡大する協調戦略が出現し、 $r$  が大きい場合は、積極的にリンクを増やす一方で裏切り者とのリンクは切断し、密なネットワークをつくる協調戦略が出現した。

今後は本モデルについてさらに解析を進めると共に、より安定した共進化サイクル (リミットサイクル) が出現する条件を探る予定である。

## 参考文献

- 1) Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books (1984).
- 2) Nowak, M. and May, R.: Evolutionary Games and Spatial Chaos, *Nature*, Vol. 359, pp. 826–829 (1992).
- 3) Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective Dynamics of 'Small-World' Networks, *Nature*, Vol. 393, pp. 440–442 (1998).
- 4) Barabási, A. and Albert, R.: Emergence of Scaling in Random Networks, *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 292–309 (1994).
- 5) Watts, D. J.: *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*, Princeton University Press (1999).
- 6) 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*, Vol. 72, 056118 (2005).
- 7) 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).
- 8) Hauert, C., De Monte, S., Hofbauer, J. and Sigmund, K.: Volunteering as Red Queen Mechanism for Cooperation in Public Goods Games, *Science*, Vol. 296, pp. 1129–1132 (2002).