

# リンクの評価指標に基づくネットワーク構造改変戦略が 協調進化に与える影響

Effects of network modifying strategies based on topological measures of  
links on evolution of cooperation

名古屋大学大学院情報科学研究科

寺田 誠

鈴木 麗瑩

有田 隆也

Makoto Terada Reiji Suzuki Takaya Arita

Graduate School of Information Science, Nagoya University

**Abstract:** We propose a coevolutionary model of cooperative behaviors and network structures in which the network modification process is based on the topological measures of links. The stability of each link is defined as the weighted sum of the several indices of connected agents which include their topological property on the network. Then, we searched for the set of weights for indices which facilitated the evolution of cooperation. As a result, in the case of higher noise rate, we observed the emergence of adaptive network structure which had a large hub agent. The detailed analyses showed that such a network was generated by a rule which stabilized the links which had the higher clustering coefficient, the lower average path length and the intermediate degree.

## 1 はじめに

利己的な個体間において協調行動がどのように進化してきたかという問いに対し、囚人のジレンマゲームを用いた進化ゲームに基づく研究が様々になされてきた [1]. ジレンマ状況においても協調行動が創発する仕組みに関する議論として、プレイヤーの相互作用を規定するネットワーク構造に注目したものが [2][3]. Nowak らは、協調もしくは裏切り戦略をとるプレイヤーを 2 次元正方格子に配置し、隣接しているプレイヤーとのみゲームと戦略の模倣を行う設定では、協調行動が進化することを示した [4]. これは、局所的な相互作用が協調者同士・裏切り者同士の対戦頻度を増加させ、協調者がクラスターを形成しながら集団中に広まることのできるためである.

その後、実社会のネットワークはスモールワールドやスケールフリーなどの特性を持つことが明らかになってきたことを受けて、静的な複雑ネットワークの特性が協調行動の創発にどのような影響を与えているかという研究がなされてきた [5][6]. たとえば、スモールワールドネットワークはハブノードの個数が中程度の場合に協調行動を促進すること [7] や、スケールフリーネットワークはゲームに参加すること自体にかかる参加コストが無い場合には、協調戦略のハブノードが安定して存在し、協調行動を促進する働きがある [8] が、ゲームにコストがかかる場合にはむしろ抑制する [9] ことなどが示されている.

以上のように、固定されたネットワークを用いた研究は盛んに行われてきたが、実社会の人間関係のネットワーク構造は常に変動しており、それによって各主体がとる行動

も変化していると言える. そこで近年、プレイヤーがネットワーク構造を改変することによって、行動戦略とネットワーク構造が共進化する状況を想定した研究がなされている. このような研究の先駆けとして、Zimmerman らのモデルでは、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、各個体がどの相手とゲームをするかを表すリンクが一定のルール (裏切りあう個体同士のリンクが切られる) によって変化する [10]. 彼らは、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. Luthi らは、各ノードが自分の行動戦略の更新と、自分の近傍のネットワーク構造の改変 (隣接する裏切り戦略との接続を切るかどうか) をゲームで得られた利得とある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ーを形成し、少数の裏切り者が孤立する状況が生じうることを示している [11]. 谷本らは、リンクの更新方法として、各個体について一定の確率でリンクの切断を行うかどうか決定され、切断を行う場合は保有するリンクの最低利得が閾値以下のリンクの切断を行うモデルにおいて、張り替え先個体の選択方法をランダム、高次数エージェント、隣人の隣人という 3 種類の方法でそれぞれ実験した. その結果、隣人の隣人と接続する場合は最も協調が促進され、得られたネットワーク構造はスケールフリー的性質と負の次数相関をとる傾向があることを示した [12]. また、Pacheco らは、ある種類の戦略を持つ個体が別の戦略を持つ個体へ確率的に接続したり、一旦生じたリンクがその相互作用で生じる利得に応じて確率的に消滅したりする active linking と呼ばれ

る仕組みを導入し、この影響を局所性の無い状況での進化ゲームにおける利得の変換として解釈できることを示している [13]. さらに、鈴木らは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妥当な設定であるという視点から、囚人のジレンマゲームの戦略に加え、対戦結果の組み合わせ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た。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、両者共に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を示した [14].

これらの動的なネットワークにおける協調行動の進化では、リンクの切断、接続の条件やタイミングなどが様々に設定されており、どのようなネットワーク構造の改変方法が協調行動を促進しうるかについて、未だ十分な知見が得られていない。また、従来研究では、単にリンクでつながった個体の戦略や利得のみが改変の指標とされてきたが、実社会では、より多様な評価指標に基づいて相互作用が維持されたり、新たに生じたりすると言える。例えば、人付き合いの多い人同士のつきあいは生じやすく維持されやすいなど、ネットワーク上の特徴に基づいて相互作用が新たに構成されたり、解消されたりすることが考えられる。

そこで本研究は、ネットワーク構造の変化を、個体のリンク操作の観点ではなく、個体間の相互作用（リンク）の安定性という観点から把握し、その安定性を決める指標が集団レベルの協調行動をいかに促進しうるかを明らかにすることを目的として、次のモデルを構築した。具体的には、個体間の相互作用の安定性を示すリンク評価指標を用いて、リンクの切断と接続に関する改変戦略を統一的に表現する。各リンクにつながるノードの持つネットワーク指標の重み付き総和をそのリンクの評価指標として定義し、評価値の高いリンクほど発生しやすく維持されやすいものとした。本研究では、構築したモデルにおけるリンク評価指標（重みの組み合わせ）について、より協調行動が維持されやすいものを遺伝的アルゴリズムを用いて探索し、得られたリンク評価指標とそれに基づく協調行動とネットワーク構造の共進化ダイナミクスを解析する。そして、どのような構造改変戦略がどのような特性を持つネットワークの創発をもたらして協調行動の創発に寄与するか、を明らかにする。本稿では、特にジレンマ戦略を反転させるノイズの発生確率の影響に注目し、固定されたネットワーク上での進化実験との比較や、各条件において探索された構造改変戦略の役割について論ずる。

## 2 リンク評価指標を用いたネットワーク構造と戦略の共進化モデル

次のようなリンク評価指標を用いた構造改変に基づく協調行動とネットワーク構造の共進化（以下、系の進化）モデルを構築した。

### 2.1 エージェントとネットワーク構造

ネットワークを構成する  $N_{agent}$  個のノードはそれぞれエージェント（個体）を表し、各エージェントはそれぞれ協調（C）、裏切り（D）のどちらかのゲーム戦略を持つ。ノードをつなぐ有向リンクはその向きを問わずエージェント間に相互作用があることを表している。各エージェントは自身が始点となるリンクを  $L$  本持ち、それらに限って自分から張り替えが可能であるものとする。なお、エージェント同士の双方向のリンク、自分自身へのリンクはできないものとする。

以下のゲーム、戦略の更新、リンクの更新を繰り返し行うことにより、系の進化が行われる。

### 2.2 ゲーム

各エージェントはリンクの向きにかかわらずネットワーク上で直接隣接しているエージェント全てと、各自の持つゲーム戦略を用いて Table 1 で示される囚人のジレンマゲームを 1 回ずつ行い、総利得を適応度とする。

Table 1 利得行列

自分 / 相手	協調 (C)	裏切り (D)
協調 (C)	R	S
裏切り (D)	T	P

ただし、 $T > R > P > S$ ,  $2R > T + S$ .

### 2.3 戦略の更新

各エージェントは、直接隣接するエージェントそれぞれと適応度を比較し、その中（自分も含む）で、最も利得の合計が高いエージェントのゲーム戦略を模倣する。この時、一定の確率  $P_{dilemma}$  でノイズが発生し更新したゲーム戦略が反転される。

### 2.4 リンクの更新

各リンクはそれぞれ (1) 式によって決められるリンクの評価値  $E$  を持つ。この評価値は、接続するノードの持つネットワーク上の性質を表すいくつかの評価指標の重みつき総和で表される。本稿では、4 種類の評価指標を用いる。

$$E = \alpha \times C + \beta \times D + \gamma \times L + \delta \times B \quad (1)$$

ここで、 $C$  はリンクの終点ノードのクラスタ係数、 $B$  は終点ノードのリンク 1 本毎の獲得利得の平均、 $D$  は終点ノードの次数、 $L$  は終点ノードの平均最短経路長である。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  はそれぞれ各指標に掛ける係数（後述する探索過程では各個体の遺伝子によって決定）である。これは、各指標に対応する係数が大きいほど、その指標が高いことがリンクの評価（安定性）に寄与するという設定である。

各リンクの評価値  $E$  を用いて、次の手順でリンクの更新を行う。まず、各リンクについて、(2) 式で与えられる確率  $P_{linkchange}$  を用いて更新が行われるかどうかを確率的に決定する。

$$P_{linkchange} = \min(a^{-E}, 1.0) \quad (2)$$

ここで、 $a (> 1)$  は切断率の度合いを調節する定数であり、

評価値が小さいほど指数関数的に更新される確率が高いということを示している。

次に、更新が決定した各リンクについて、その終点ノードのみを次の手順で変更する。更新されるリンクの始点ノードとつながっていないノードの中からランダムに  $N_{change}$  個ノードを選択する。選択した各ノードに仮にリンクが張られた時のリンクの持つ評価値を比較し、その中で最も評価値が大きいリンクを持つノードに接続する。これは、評価値が大きいリンクほど新しく構成されやすいという設定である。

以上の一連の操作を合わせて 1 ステップとし、 $T_{coevolution}$  ステップの間繰り返し行い、系の進化を行う。

### 3 リンク評価指標の進化的探索

リンク評価指標を用いたネットワーク構造と戦略の共進化モデルにおける、リンク評価指標の 4 つの重みの組  $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$  を遺伝的アルゴリズムにおける個体とし、協調行動をもたらすリンク評価指標を実数値遺伝的アルゴリズムによって探索する。

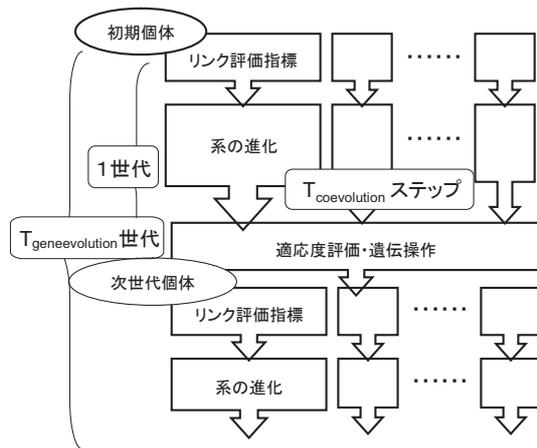


Fig. 1 リンク評価指標探索の流れ

Fig. 1 は、遺伝的アルゴリズムによる探索過程全体の流れである。個体数は  $N_{population}$  個体とし、各個体について、それぞれの持つ遺伝子で決められるリンク評価指標を用いて系の進化を  $T_{coevolution}$  ステップ行い、そのうち最終  $T_{evaluation}$  ステップ間の平均協調者数とその個体の適応度とする。これは評価値における初期状態の影響を少なくするためである。各エージェントは初期世代の戦略として協調、裏切りのどちらか一方を等確率でとり、初期のネットワーク構造はランダムに与えるものとする。次世代の集団は、適応度に比例したルーレット選択により親個体を 2 個体選び、確率  $P_{crossover}$  で交叉を行って子 1 個体を作成する、交叉を行わない場合は初めに選択された親個体の遺伝子を引き継ぐ、この操作を子個体が  $N_{population}$  個体作成されるまで繰り返す。このとき、子個体の各遺伝子に突然変異として確率  $P_{mutation}$  で平均 0.0 標準偏差 0.3 の正規乱数を加算する。交叉は、ブレンド交叉（両親の遺伝子

の値を結ぶ区間を一定割合拡大した区間から一様に子個体の遺伝子の値を選ぶ)[15]を用いて行う。各個体に対して系の進化を行い、遺伝操作をする過程を 1 世代とし、これを  $T_{genevolution}$  世代繰り返すことによって、リンク評価指標の探索を行う。

## 4 実験と考察

### 4.1 リンク評価指標の探索

異なるノイズ率の設定のもと、リンク評価指標の進化的探索を行い、ネットワーク構造変化が協調行動に与える影響を解析した。パラメータ設定として、系の進化について  $N_{agent} = 100, L = 2, N_{change} = 10, a = 10, T = 1.7, R = 1.0, P = S = 0.0$  とした。  $P = S$  の設定を用いたのは簡単のためである。探索については、 $T_{coevolution} = 10000, T_{evaluation} = 5000, N_{population} = 32, P_{crossover} = 0.5, P_{mutation} = 0.033, T_{genevolution} = 200$  とした。以上を共通の設定とし、ノイズ率  $P_{dilemma} = 0.01, 0.02, \dots, 0.10, 0.15, 0.20$  の各条件で探索を行った。

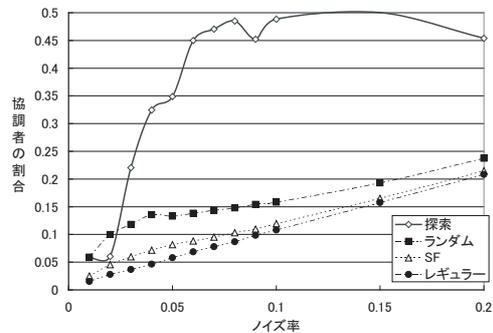


Fig. 2 各ノイズ率に対する協調者の割合. 縦軸：協調者の割合の平均、横軸：ノイズ率

Fig. 2 は、各ノイズ率の設定を用いてリンク評価指標の探索を行い、世代を通して最高適応度を記録した個体の遺伝子を用いて系の進化を 30 試行行った際の、協調者の割合の全ステップでの平均を示したものである。また、比較のため、ランダムネットワーク、スケールフリーネットワーク、レギュラーネットワークにネットワーク構造を固定してゲーム戦略の進化のみを各ノイズ率について各 30 試行ずつ行った。スケールフリーネットワークは優先結合 [6] を用いて、ランダムネットワークは各ノードからランダムにリンクを張って生成した。

はじめに、固定ネットワーク上での進化の傾向に注目する。同図から、3 種類のネットワークのどの条件においても協調者の割合は比較的小さく、ノイズ率が増加するに従って緩やかに増加する傾向があった。スケールフリーネットワークとレギュラーネットワークの場合は協調者の割合がノイズ率とほぼ一致しているため、系は基本的に裏切り個体に占められていると言える。これは、今回採用した  $T$  (裏切り成功時の利得) の値が比較的高く、協調個体にとって厳しい条件であったことが理由の一つとして考えられる。

一方、ランダムネットワークの場合はどの条件でもそれらよりやや高い値を示し、特にノイズ率 0.01 付近ではノイズ率に対して協調者の割合が約 5 倍の 0.05 程度になった。これは、次数が比較的少ない条件では、ランダムに生成されたネットワークに局所的な構造が生じやすく、協調行動の維持に寄与したためと推測される。

一方、探索した遺伝子を用いた系の進化では、ノイズ率が小さい  $P_{dilemma} = 0.01, 0.02$  の場合は、ランダムネットワークに固定した場合と近い値をとったが、それ以外の条件では固定ネットワークの場合と比べ極めて高い協調者の割合となった。 $P_{dilemma} = 0.06$  以上では、協調者の割合は 0.45 から 0.50 付近となり、特にノイズ率 0.06 の場合は固定ランダムネットワークに比べて 3 倍程度の協調者の割合を記録した。これは、ノイズが多少でも存在する現実的な条件では、リンク評価指標に基づく構造変化が協調行動を大きく促進することを示している。

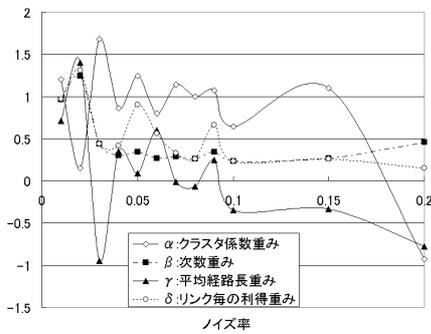


Fig. 3 各ノイズ率に対する探索における最良個体の遺伝子、縦軸が各遺伝子の値、横軸がノイズ率

Fig. 3 は、各条件において最高適応度を記録したリンク評価指標の重みを示したものである。例外は見られるものの、全体の傾向として次のことがわかる。まず、重みの値はノイズ率が小さい場合にはどれも高い傾向があった。たとえば、ノイズ率 0.01 ではどの重みも 0.75 を上回る値になり、ネットワーク指標がどのような値であってもリンク評価値は高い値をとり、実質的にリンクがほぼ常に維持される状態であった。つまり、ノイズ率が低い条件では初期のランダムなネットワーク構造を維持することが、協調者の割合を最大にすることを示している。

それに対し、ノイズ率が大きくなると、全体としてネットワーク指標の重みごとにばらつきが生じていることがわかる。クラスタ係数の重みは特に上下するが、ノイズ率 0.20 で大きく下がる場合以外では 1 前後の高い値をとる。次数と利得の重みはあまり上下せず、0.25 付近の中程度の値になった。平均経路長の重みについてはノイズ率が増加するごとに低下していき、ノイズ率 0.07 程度からは負の値をとる傾向も見られた。リンクの評価値  $E$  はそれぞれの重みに指標を掛けたものの総和で表されるため、重みの値が小さい場合でも、指標の値が大きければ、リンクの評価値に貢献する。特に次数は他の指標に比べ指標の最大値が大きい。

本設定では、クラスタ係数、次数、利得が高く、平均経路長は低い個体につながるリンクが安定しやすく構成されやすいことが、協調行動の創発に寄与することを示している。

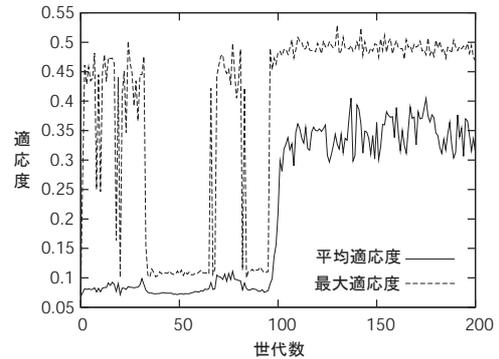


Fig. 4  $P_{dilemma} = 0.06$  の場合の平均・最大適応度

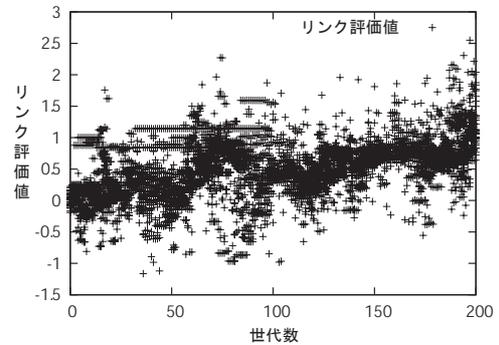


Fig. 5  $P_{dilemma} = 0.06$  の場合のリンク評価値の平均

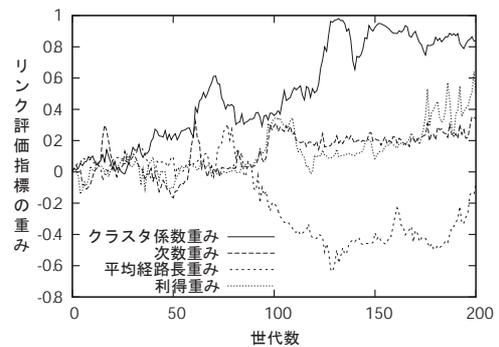


Fig. 6  $P_{dilemma} = 0.06$  の場合の遺伝子平均

Fig. 4, 5, 6 は、ノイズ率 0.06 の条件での遺伝的アルゴリズムによる探索過程の典型例である。横軸は世代、縦軸はそれぞれ各世代での平均・最大適応度、リンク評価値の平均、評価指標の各重みの平均値の推移をあらわす。Fig. 4 から、初期集団から約 100 世代までは平均適応度は 0.06 程度の小さな値を推移した。このとき、リンク評価値の平均値は 0 付近と極めて小さい状態からはじまり、徐々に増加する傾向があった。これは、初期集団のほぼ常にリンクの更新を行う乱雑な状態から、より安定した構造が構築され

る方向へ進化した結果であると考えられる。Fig. 6 では、50 世代付近からクラスタ係数の重みが増加し始め、およそ 100 世代付近では利得の重み、次数の重みが 0.2 付近まで上昇し、平均経路長の重みは負方向へ進化をすることで協調者の割合が大きく増加する。これらのことから、指標だけでなく複数の指標を利用しリンクを評価することと、それぞれの指標の重みが微妙に調整されることによって、協調行動が促進されると考えられる。

このような探索過程は、リンクの更新が適応的であるノイズ率が比較的大きい場合に生じた。一方、ノイズ率が小さい場合には、すべての指標の重みが増加を続け、リンク評価値の値が極めて高い値に至った結果、リンクの更新が全く行われない状態に至った。

#### 4.2 リンク更新が協調行動へ与える影響

前節ではノイズ率が比較的大きい場合に、リンク評価指標に基づくネットワーク構造変化が協調行動を促進することが示された。このような場合の典型例として、ノイズ率 0.06 の場合でのネットワーク構造と協調行動の共進化の様子を Fig. 7 に示す。横軸はステップ、縦軸は協調者の割合の推移である。同図から、初期 3000 ステップ程度までは協調者の割合は 0.05 から 0.9 程度までの値を大きく振動しつつ推移し、基本的には 0 付近の値をとり、高い値をとる頻度はあまり多くない。しかし、3000 ステップ以降では高い値を取る頻度が増加し、最大値も 1 付近まで増加した。

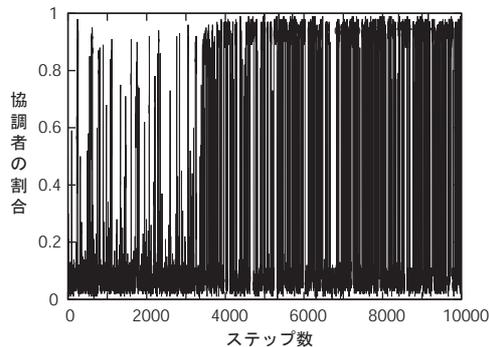


Fig. 7  $P_{dilemma} = 0.06$  の場合の協調者の割合

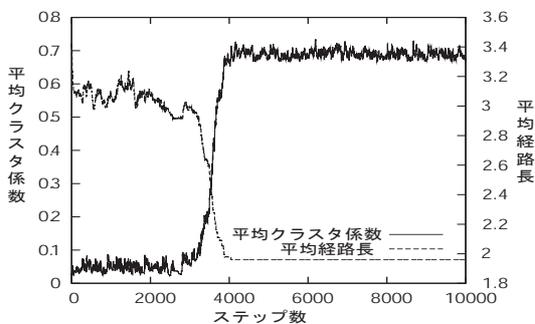


Fig. 8  $P_{dilemma} = 0.06$  の場合の平均経路長・平均クラスタ係数

Fig. 8 は、同じ試行でのクラスタ係数、平均経路長の各

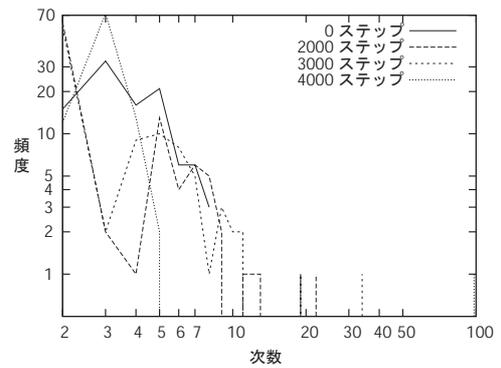


Fig. 9  $P_{dilemma} = 0.06$  の場合のステップ毎の次数分布

平均の推移を示したものである。同図から、初期集団ではクラスタ係数が 0.05 とほぼ最小で、平均経路長は 3 付近の比較的大きな値であったが、協調者が頻繁に増加し始める 3000 ステップ付近から前者が大きく増加し 0.7 程度に至り、後者は 2.0 程度に減少し、収束した。また、Fig. 9 は 1000 ステップごとの次数分布の推移である。同図から、初期ステップはランダムなネットワーク構造だったが、2000 ステップ付近でまず次数が大きいノードが複数現れる。これは、初期ステップは平均経路長が短く、次数が高いことがリンクの評価値に最も寄与したため、次数が高い(平均経路長が短い)リンクが新たに構成されやすかったからである。さらに 3000 ステップ付近では、最大次数のノードの次数のみ増加し、それ以外のノードの次数は減少する。これは、次数がある一定以上のノードが形成された場合、そのノードに接続されるリンクの評価値が高くなることでリンクが安定になり、そのために、最も次数が高いノードにリンクが集中し、ハブ以外のノードの次数が減少するからである。最終的に 4000 ステップでは全結合するハブノードと、それ以外の次数の低いノードという構造が生じた。ここで、ハブに接続されているリンクはハブの次数が高いため安定し、ハブ以外に接続されているリンクはクラスタ係数が高くなっているため更新されにくく、更新された場合も相対的にクラスタ係数が高いノードにつながりやすいので次数が高いノードが出現しにくい。そのため、ハブ形成後にもリンクの更新は行われるが、この構造自体は安定して存在することが確認できた。

このようなネットワーク構造が協調行動の創発に寄与する理由について考察する。先に示したように、今回は裏切り成功のメリットが大きい設定のため、集団は裏切り者ばかりになりがちである。そのような状況で、裏切り戦略のハブノードにノイズが生じ、協調に転じた状況を考える。このとき、その他の裏切り戦略のノードにもノイズが生じうるため、ハブノードの近傍にはほぼノイズ率に比例した割合の協調ノードが生じる。ノイズ率が比較的大きく近傍の協調エージェントが多い場合、協調関係を築くことによる利得によって、ハブノードの適応度がそれにつながる次数の小さい裏切り者の利得を上回ると、協調戦略が一気に広まり集団全体が協調に転ずる (Fig.10)。

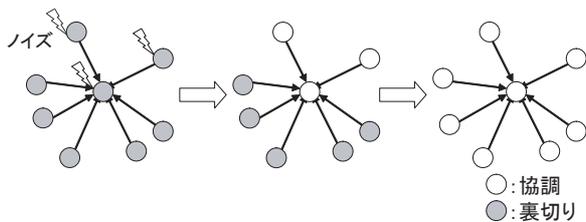


Fig. 10 ハブ構造が与える影響の模式図

一方、ノイズ率が低い場合は、ハブにノイズが入っても、周囲に協調者が出現する確率が低いため協調関係を築くことができず、ハブ構造のメリットが生じない。逆に、協調的な集団において、ハブノードにノイズが生じ裏切りに転ずると、一気に集団中に裏切り戦略が広まる。ノイズ率に関するこれらのトレードオフ関係の結果、平均して0.4程度の協調者の割合となったと考えられる。なお、ハブ構造形成後ネットワーク構造を固定して系の進化を行いハブ構造形成後のネットワークの更新が協調行動に与える影響を解析したところ、ハブ形成後のリンクの更新の影響は比較的小さいことがわかった。

## 5 おわりに

本研究では、個体間の相互作用の安定性を決める指標が集団レベルの協調行動に与える影響に関して知見を得ることを目的とし、リンク評価指標を用いた構造変化に基づく協調行動とネットワーク構造の共進化モデルを構築し、協調行動を促進する評価指標を遺伝的アルゴリズムで探索した。

異なるノイズ率の設定で探索を行った結果、ノイズ率が小さい場合と大きい場合で異なるリンク評価指標が獲得された。特に、ノイズ率が大きい場合では、クラスタ係数の重みは大きく、次数と利得の重みは中程度、平均経路長の重みは小さい接続先のリンクが安定するという結果が得られた。これは、単一の指標だけではなく、重みづけによって調整された複数の評価指標を用いたリンク評価値に基づいてリンクの更新を行うことで、固定ネットワークに比べ極めて高い協調者の割合を維持する評価指標が獲得されたことを示している。ゲーム戦略とネットワーク構造の共進化においては、全てのノードと結合するハブを形成すると同時にハブ以外のノードの次数を小さくすることで、ノイズによって同時に発生する協調戦略を利用して協調者の割合を増加させていることがわかった。

今後の課題としては、より広範囲のパラメータ設定や多様なネットワーク指標を用いて、より動的にネットワーク構造を改変することが協調行動の創発をもたらす条件について明らかにすることなどが挙げられる。

## 参考文献

[1] Nowak, M. A.: Five rules for the evolution of cooperation, *Nature*, Vol. 314, pp. 1560-1563 (2006).

[2] Axelrod, R.: *Evolution of Cooperation*, Basic Books (1984).

[3] 増田 直紀: ネットワーク上の進化ゲーム, 人工知能学会誌, Vol. 28(5), pp. 452-458 (2008).

[4] Nowak, M. A. and May, R. M.: Evolutionary games and spatial chaos, *Nature*, Vol. 359, pp. 826-829 (1992).

[5] Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Vol. 393, pp. 440-442 (1998).

[6] Barabasi, A. L. and Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol. 286, pp. 509-512 (1999).

[7] Fu, F., Liu, L. H. and Wang, L.: Evolutionary Prisoner's Dilemma on heterogeneous Newman-Watts small-world network, *Euro. Physics. Journal. B*, Vol. 56, pp. 367-372 (2007).

[8] Santos, F. C. and Pacheco, J. M.: Scale-free networks provide a unifying framework for the emergence of cooperation, *Physical Review Letters*, Vol. 95, 09814 (2005).

[9] Masuda, N.: Participation costs dismiss the advantage of heterogeneous networks in evolution of cooperation, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 274, pp. 1815-1821 (2007).

[10] Zimmermann, M. G. and 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).

[11] 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).

[12] 谷本 潤, 相良 博喜: 戦略とネットワークの共進化による協調の創発と Assortative mixing, 情報処理学会研究報告 2008-ICS-151, pp. 31-36 (2008).

[13] Pacheco, J. M., Traulsen, A. and Nowak, M. A.: Active linking in evolutionary games, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 243, pp. 437-443 (2006).

[14] Suzuki, R. and Arita, T.: Cyclic coevolution of cooperative behaviors and network structures, *Physical Review E*, Vol. 77, 021911 (2008).

[15] Eshleman, L. J. and Schaffer, J. D.: *Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata*, Foundations of Genetic Algorithms, Vol. 2, pp. 187-202 (1993).