

A-009

相手の「協力度」を考慮する戦略と、ネットワーク上での協力の進化  
 The strategy considering the opponent's "cooperativeness"  
 and the evolution of cooperation on the network

岩田 学十 秋山 英三<sup>\*</sup>  
 Manabu Iwata Eizo Akiyama

キーワード: Prisoner's Dilemma, Evolutionary Game theory, Network Structure, Evolution of Cooperation

### 概要

囚人ジレンマゲームが行われる集団の例として、特に国家関係に着目し、協力の進化を分析した。これに際し、相手の「協力度(相手が自分や他者にどの程度協力的か)」を考慮したプレイヤーの意思決定方針ならびに集団のネットワーク構造という2つの観点から協力進化のメカニズムを分析した。

その結果、相手を裏切るメリットが大きい時でも、相手の「協力度」を考慮した意思決定は協力の進化を促すことが分かった。また、複雑ネットワークの構造を持つ集団において、相手の「皆に対する」協力度を考慮した意思決定方針が特に協力の進化を促すことが分かり、プレイヤーの戦略と空間特性が国家関係における協力の進化を分析するための一要因として妥当であるという結論を得た。

### 1. はじめに

現実の社会集団における協力的行動の進化については、様々な分野において研究が成されているが、その1つにゲーム理論、特に囚人のジレンマによるアプローチがある。囚人ジレンマ状況にある集団における協力的行動の進化について、集団を構成するプレイヤーの意思決定方針及び集団のネットワーク構造の観点から多くの研究が成されてきた。

プレイヤーの意思決定方針として有名なものに、互惠性[1]の概念がある。代表的なものとして、しっぺ返し戦略(以下、TFTと呼ぶ)[2]等の直接互惠、image score[3][4]等の間接互惠が挙げられるが、これらの概念は現実の集団の関係性を記述するには十分でないと考えられる。

本研究では、現実の社会集団の例として国際関係を念頭に置いている。国家同士の繋がりには基本的には固定的であり、その相互作用は繰り返しのある囚人のジレンマとして考えられる。しかし、他国との付き合いを考える際に、TF Tのように相手が「自分に対して協力的であるかどうか」のみを基に自身の行動を決定することは妥当とは言えない。今の国家関係を考えれば、相手国が「他の国家に対しても協力的であるかどうか」ということまで考慮するのが自然であろう。image scoreの概念は、相手が「皆に対して協力的であるかどうか」という考え方に基づく概念であるものの、集団のネットワーク構造を持つ空間的局所性を考慮していない点に問題がある。

一方、近年では集団のネットワーク構造を持つ空間的局所性が協力の進化に与える影響について、盛んに研究が行われている。空間構造に着目した研究は、Nowak&May[5](格子構造の空間特性が協力の進化を促すことを示した)に始まり、最近では、現実の社会集団の構造を説明し得る複雑ネットワーク[6][7]について、その構造が協力の進化を促すことを示した研究等もある[8]。しかし、これらの研究は空間構造に着目するため、プレイヤーの意思決定方針にはシンプルな仮定を置いており、前述の「相手が協力的かどうか」というレベルの意思決定は前提としていない。

これを踏まえ、本研究では、プレイヤーが「相手が自分または皆に協力的であるか」を考慮して相手に協力するかどうかを決定するものとし、これが空間的局所性を持つ集団

において、協力の進化に如何に影響を与えるのかを分析する。そして、これらの特性が国家関係を記述し得る要因として妥当であるか否かを分析する。

なお、本研究の位置付けは、以下の表1-1のとおり。

表1-1 本研究の位置付け

		相手の行動の考慮範囲	
		「自分」に対する行動	「全対戦相手」に対する行動
相互作用の相手	固定	直接互惠(しっぺ返し)	直接互惠(本研究)
	可変		間接互惠

本研究では、「相手が協力的かどうか」を考慮しない場合(従来の研究)、「相手が自分に対して協力的かどうか」(これを1次情報と呼ぶ)まで考慮する場合、「相手が皆に対して協力的かどうか」(これを2次情報と呼ぶ)まで考慮する場合の3ケースについて、集団のネットワーク構造も踏まえ、協力の進化に与える影響を分析する。

### 2. モデル

#### 2.1 モデルの概要

本研究では、進化ゲームの枠組みに従い、囚人のジレンマゲームのシミュレーションを行う。シミュレーションの処理手順は以下の図2-1のとおり。(1)~(4)の処理を1試行とし、これを定められた回数だけ繰り返し、各試行における最終出力値の試行平均を本モデルの最終出力値とする。

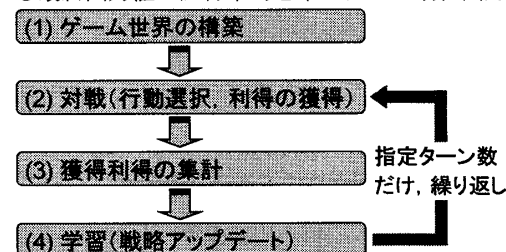


図2-1 進化ゲームの枠組みによる処理手順

(a) ゲーム世界の構築

N人のプレイヤーから成る平均次数(リンク数) $\langle k \rangle$ の集団を構築する。なお、集団のネットワーク構造については、1次元 Regular Network, Lattice Network, Small World Network, Scale Free Networkの4種類とする。なお、ネットワークの平均次数 $\langle k \rangle$ は次式で与えられる。

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad k_i: \text{プレイヤー}i\text{の次数}$$

(b) 対戦(行動選択)

プレイヤーiは、自分と繋がりを持つ全てのプレイヤーと囚人のジレンマゲームを行う。なお、プレイヤーiの対戦相手に対する戦略については、「相手が協力的かどうか」を考慮しない場合(従来の研究)は(b-1), 「相手が自分に対して協力的かどうか」(1次情報)まで考慮する場合は(b-2), 「相手が皆に対して協力的かどうか」(2次情報)まで考慮する場合は(b-3)の式で表される。

(b-1)プレイヤーiは、前のターンに決定した行動(協力または裏切)を、全ての対戦相手に対して取る。

$$s_{it} = \{C, D\} \quad C: \text{協力}, D: \text{裏切}$$

$s_{it}$ : プレイヤーiのターンtにおける戦略

(b-2)プレイヤーiが相手jに協力するか否かについて、自身の許容閾値と相手の前ターンにおける「自分に対する」協力度に基づき決定する(協力度、許容閾値については後述)。

$$s_{ijt} = \begin{cases} C & \text{if } \theta_{ji,t-1} \geq PT_{it} \\ D & \text{if } \theta_{ji,t-1} < PT_{it} \end{cases}$$

$s_{ijt}$ : プレイヤーiのターンtにおける相手jに対する戦略

$\theta_{ji,t-1}$ : 相手jのターンt-1におけるプレイヤーiに対する協力度

$PT_{it}$ : プレイヤーiのターンtにおける許容閾値

(b-3)プレイヤーiが相手jに協力するか否かについて、自身の許容閾値と相手の前ターンにおける「皆に対する」協力度に基づき決定する。

$$s_{ijt} = \begin{cases} C & \text{if } \theta_{j,t-1} \geq PT_{it} \\ D & \text{if } \theta_{j,t-1} < PT_{it} \end{cases}$$

$\theta_{j,t-1}$ : 相手jのターンt-1における協力度

なお、協力度とは、あるプレイヤーがあるターンでの対戦において「どれぐらい協力したか」を割合で表したものであり、そのプレイヤーが「協力的であるかどうか」の判断指標である。協力度については以下の式で与えられる。

$$\theta_{ijt} = \frac{c_{ijt} I_{ij}}{(c_{ijt} + d_{ijt}) I_{ij}}, \theta_{it} = \frac{\sum_{j \neq i}^N c_{ijt} I_{ij}}{\sum_{j \neq i}^N (c_{ijt} + d_{ijt}) I_{ij}}$$

$c_{ijt}$ : プレイヤーiのターンtにおける相手jに対する協力回数

$d_{ijt}$ : プレイヤーiのターンtにおける相手jに対する裏切回数

$$I_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if プレイヤー}i\text{と}j\text{が繋がっている} \\ 0 & \text{if プレイヤー}i\text{と}j\text{が繋がっていない} \end{cases}$$

また、許容閾値とは、「どれぐらいの協力度のプレイヤーを許容できるのか」を示す指標であり、プレイヤーiのターンtにおける許容閾値は $PT_{it}$ で表される。各プレイヤーは、相手の前ターンにおける協力度が自身の許容閾値を超えていれば協力するので、許容閾値が大きいプレイヤーほど厳格(裏切的)であり、許容閾値が小さいプレイヤーほど寛容(協力的)であるということになる。

(c) 対戦(利得の獲得)

ターンtにおいて、プレイヤーiがプレイヤーjとの対戦で得る利得を $\pi_{s_{ijt} s_{jti}}$ とする。

表 2-1 囚人のジレンマの利得行列

	協力	裏切	
協力	(R, R)	(S, T)	$T > R > P > S$
裏切	(T, S)	(P, P)	$2R > T + S$

囚人のジレンマゲームにおける利得行列は表 2-1 のように表されるので、プレイヤーiの獲得利得は次式のようなになる。

$$\pi_{CC} = R, \pi_{CD} = S, \pi_{DC} = T, \pi_{DD} = P$$

(d) 獲得利得の集計

プレイヤーiは、自分と繋がりを持つ全ての相手との対戦で得た利得を足し合わせ、その総和を自身の総利得とする。ターンtにおけるプレイヤーiの総利得 $\pi_{it}$ は、以下の式で表される。

$$\pi_{it} = \sum_{j \neq i}^N \pi_{s_{ijt} s_{jti}} I_{ij}$$

(e) 学習(戦略のアップデート)

プレイヤーiは、自分と繋がりのあるプレイヤーのうち、最も高い総利得を持つプレイヤーの戦略を模倣する。なお、戦略の模倣については、相手の協力度を考慮しない場合(従来の研究)は(e-1), 考慮する場合は(e-2)の要領で戦略のアップデートを行う。

(e-1)プレイヤーiは、模倣対象(プレイヤーmとする)がターンtに取った行動(協力または裏切)を模倣し、これを次ターンにおける自身の行動とする。

$$s_{i,t+1} = \begin{cases} C & \text{if } s_{mt} = C \\ D & \text{if } s_{mt} = D \end{cases}$$

(e-2)プレイヤーiは、模倣対象(プレイヤーm)のターンtにおける許容閾値を模倣し、これを次タ

ーンにおける自身の許容閾値とする.

$$s_{ij,t+1} = \begin{cases} C & \text{if } \theta_{jt} \geq PT_{i,t+1} \\ D & \text{if } \theta_{jt} < PT_{i,t+1} \end{cases}$$

$$PT_{i,t+1} = PT_{mt}$$

(f) 繰り返し処理

(b)~(e)の処理を, 定められたターン数だけ繰り返し実施する.

2.2 数値実験

(a) 各種パラメータ

本研究では, 四人のジレンマモデルにおいて以下のパラメータを使用した.

- ・プレイヤー数:  $N=2500$
- ・平均次数:  $\langle k \rangle = 4$
- ・利得値:  $R=1, P=S=0,$   
 $T=1.1 \sim 2.0$  (0.1刻み)
- ・許容閾値:  $0 \leq PT_{it} \leq 1$  (実数値)
- ・ターン数:  $Term=2100$
- ・初ターンの行動分布:  
各プレイヤーについて, 確率 1/2 で協力または裏切を割り振り
- ・初ターンの許容閾値分布:  
各プレイヤーについて,  $0 \sim 1$  の一様乱数を割り振り

(b) 出力値

シミュレーションの各試行について集団協力度(プレイヤーの協力度の集団全体の平均値)を求め, その試行平均を最終出力値とする.

ア 1試行におけるシミュレーション

ある試行  $s$  ( $s=1 \sim 1500$  とする) におけるターン  $t$  での集団協力度  $\theta_{s,t}$  は, 以下のよう求められる.

$$\theta_{s,t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{it}$$

これを用いて, ターン 2000 までを過渡期間とし, ターン 2000~2100 までの集団協力度のターン平均を求め, これを試行  $s$  における集団協力度の最終出力値とする.

$$\Theta_s = \frac{1}{100} \sum_{t=2000}^{2100} \theta_{s,t}$$

イ 最終出力値 (集団の平均協力度の試行平均)

各試行  $s$  における出力値 (集団協力度のターン平均) について, 全試行 (1~1500 試行) 分の出力値の試行平均を取り, これを本シミュレーションの最終出力値とする.

よって, 最終出力値である集団協力度 (の試行平均)  $\Theta$  は次式のようになる.

$$\Theta = \frac{1}{1500} \sum_{s=1}^{1500} \Theta_s$$

3. 結果と分析

シミュレーションの結果を, 図 3-1 及び図 3-2 に示す. 図 3-1 はプレイヤーが相手の協力度を考慮しない場合の集団協力度を, 図 3-2 はプレイヤーが相手の協力度を考慮する場合の集団協力度を示す. なお, グラフの横軸は誘惑値  $T$  の値, 縦軸は集団協力度である. なお, 図 3-2 上のマーク無しの破線は相手の協力度について「相手が自分に対して協力的かどうか」(1次情報)まで考慮する場合の結果を表し, その他の線は「相手が皆に対して協力的かどうか」(2次情報)まで考慮する場合の結果を表す.

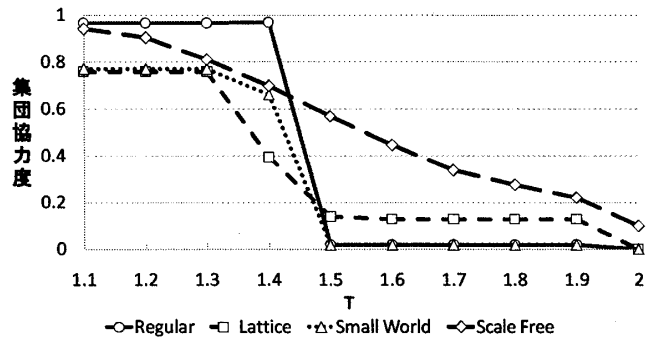


図 3-1 相手の協力度を考慮しない場合の集団協力度

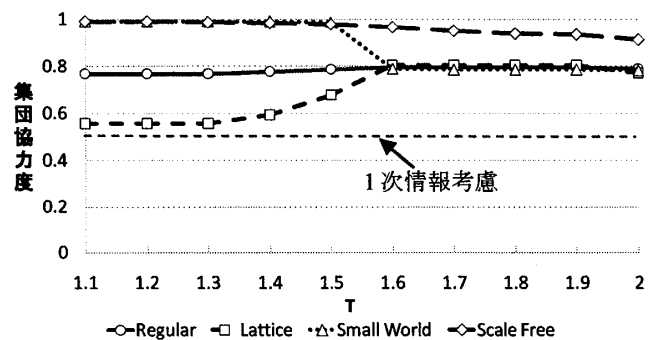


図 3-2 相手の協力度を考慮する場合の集団協力度

3.1 相手の協力度を考慮することの効果

図 3-1 に示したとおり, プレイヤーが対戦相手の協力度を考慮しない場合, 誘惑値  $T$  の増加に伴い集団全体の協力度は低下する. このことは, 我々の直感にも反しておらず, Nowak[5], Santos[8]等の先行研究の結果にも従う.

しかし, 図 3-2 より, プレイヤーが対戦相手の協力度を

1 対戦相手の協力度について1次情報まで考慮する場合, 各ターンにおける相手の「自分に対する」協力度は, 常に0または1のどちらかとなる.

このため, 全プレイヤーは許容閾値に関わらず, 前回協力してくれた相手には協力し, 前回裏切った相手には裏切ることになり, 実質的に TFT プレイヤーのみで集団が構成されることになる.

TFT 戦略を取る者同士で対戦を行った場合, 各ターンにおける全協力回数と全裏切回数は常に一定となる. 本シミュレーションでは, 初期に全プレイヤーについて確率 1/2 で協力または裏切を割り振っているため, 初期の協力行動の割合は 0.5 に近い値となり, 最終的な集団協力度もこれと等しくなる.

考慮する場合、誘惑値  $T$  の値が増加しても、協力度を考慮しない場合と比べて集団全体の協力度はほとんど低下しなくなる。

いくつかのネットワークについて特徴を見ると、相手の協力度を2次情報まで考慮するとき、Scale Free Networkにおける集団協力度は、 $T=1.1$  のときにほぼ1に近い値を示す。さらに、 $T$  の値が増加しても集団協力度はほとんど低下せず、 $T=2.0$  のときでも集団協力度は90%を超える。一方、Lattice Networkでは、誘惑値  $T$  が増加することにより、集団協力度は逆に上昇する。

次に、誘惑値  $T$  の値の増加に伴う集団協力度の低下が緩和される原因を考えるため、集団協力度の時間変化を見る。

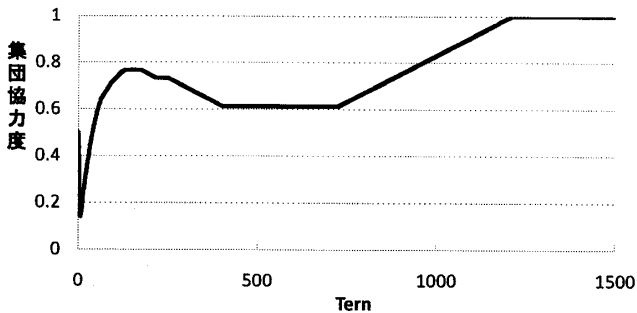


図 3-3 相手の協力度を2次情報まで考慮する場合の、集団協力度の時間変動 (Lattice,  $T=1.9$ )

図 3-3 は、プレイヤーが対戦相手の協力度を2次情報まで考慮する場合について、Lattice Networkにおいて誘惑値  $T=1.9$  としたときの、時間経過に伴う集団協力度の変化を示したものであり、グラフの横軸はターン数を、縦軸は集団協力度を示す。

この図のとおり、初めの数ターンの間は急激に裏切行動が進化し、集団協力度は著しく低下する。これは、ターン開始時点では各プレイヤーについて協利行動と裏切行動が一樣に割り振られるため、裏切が進化しやすくなるからである。しかし、更に数ターン経過すると、集団協力度は上昇を始める。このときにどのような戦略が進化しているのか確認するため、時間経過に伴う各プレイヤーの許容閾値の変化を調べる。

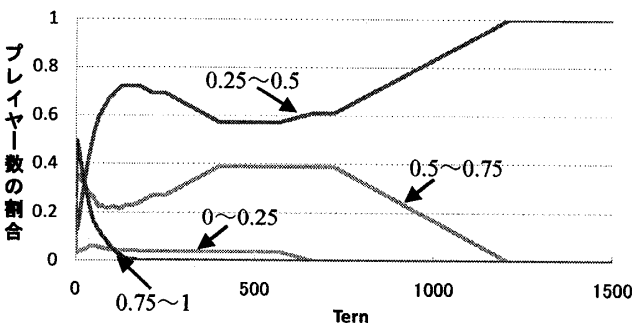


図 3-4 各許容閾値区分におけるプレイヤー数の割合の時間変化

図 3-4 は、時間経過に伴うプレイヤーの許容閾値の変化を示したものである。0~1 の区間を取る許容閾値を「0~0.25」、「0.25~0.5」、「0.5~0.75」、「0.75~1」の4区分

に分け、各区分の許容閾値を持つプレイヤーの数の時間変化を調べる。なお、グラフの横軸はターン数、縦軸は各許容閾値の区分におけるプレイヤーの数（の全体数に対する割合）を示している。

この図から分かるとおり、初期の数ターンは許容閾値の高い裏切的なプレイヤーが集団を占めるが、すぐに許容閾値が極端な値でないプレイヤー（つまり、相手の協力度に応じて柔軟に対応を変えるプレイヤー）の数が多くなり、彼らによって裏切的なプレイヤーは駆逐されていく。許容閾値が1に近い盲目的な裏切者に近いプレイヤーは早々に駆逐され、許容閾値「0.25~0.5」及び「0.5~0.75」のプレイヤーが集団において進化していく。相手に応じて行動を変化させる、いわばTFT的な戦略が進化するため、許容閾値「0.5~0.75」のプレイヤーも次第に駆逐されていき、最終的には許容閾値が「0.25~0.5」の比較的寛容なプレイヤーが集団を占め、彼らが協力し合うことによって、集団協力度率は長期的に1に収束する。なお、上の例の場合は許容閾値「0.25~0.5」のプレイヤーが集団を占めたが、ネットワーク形状や初期の行動分布の状況等によっては、許容閾値が「0.25~0.5」の比較的寛容なプレイヤーの数が増加することにより、許容閾値が「0~0.25」である盲目的協力者に近いプレイヤーの数も増加し、こちらの許容閾値が集団を占めることもある。

よって、集団において協利行動が進化するのは、許容閾値が「0.25~0.5」、「0.5~0.75」等の「相手の協力度に応じて柔軟な対応を取る」プレイヤーに依るものと考えることが出来る。ここで単純化して考えると、このような柔軟プレイヤーは協利的な相手に対して協力し、裏切的な相手に対して裏切る。そのため、対戦におけるプレイヤーの行動のペアは「互いに協力」、「互いに裏切」になると考えられる。

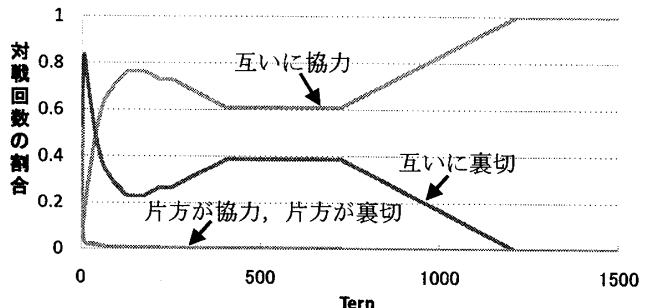


図 3-5 各戦略ペアにおける対戦回数の割合の時間変化

図 3-5 は、各戦略のペア「互いに協力」、「互いに裏切」、「片方が協力、片方が裏切」における対戦の回数の時間変化を示したものである。グラフの横軸はターン数、縦軸は各戦略のペアに該当する対戦の回数（の全体数に対する割合）を示している。

誘惑値  $T$  の値の相違がプレイヤーの獲得利得に影響を与えるのは、対戦において「片方が協利行動を、もう片方が裏切行動を取る」場合のみであるが、この図から分かるとおり、時間経過に伴いTFT的な戦略が進化することによって、このような行動の組が集団においてほとんど見られなくなるため、誘惑値  $T$  の値が増加してもそれ程集団協力度は低下しないのである。

3.2 2次情報考慮と1次情報考慮の違い

図3-2が示すとおり、相手の協力度について2次情報まで考慮するとき、ネットワーク構造や誘惑値Tの値に関わらず、集団協力度は1次情報まで考慮する場合よりも常に高くなる。しかし、これは初期の協力率(集団全体における協力行動の割合)が0.5のときの結果である。前述のとおり、相手の協力度について1次情報まで考慮するときの集団協力度は初期の協力率に等しくなるため、初期の協力率が高い場合はそれに応じて集団協力度も高くなる。そのため、「2次情報まで考慮する場合の方が常に集団協力度が高い」とはいえなくなる可能性もある。

そこで、初期の協力率を変化させ、1次情報まで考慮する場合と2次情報まで考慮する場合とで、どちらがより協力行動の進化を促進するのかを調査した。

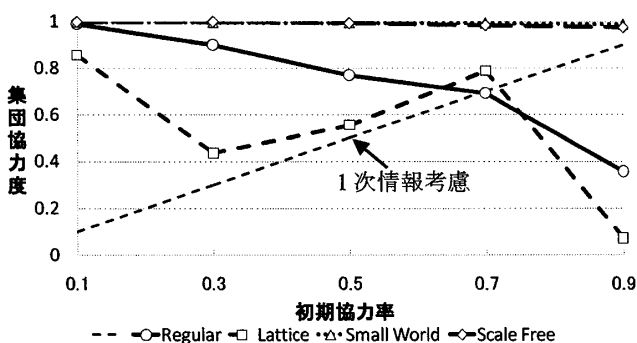


図3-6 初期協力率と集団協力度(最終状態)の関係 (T=1.1)

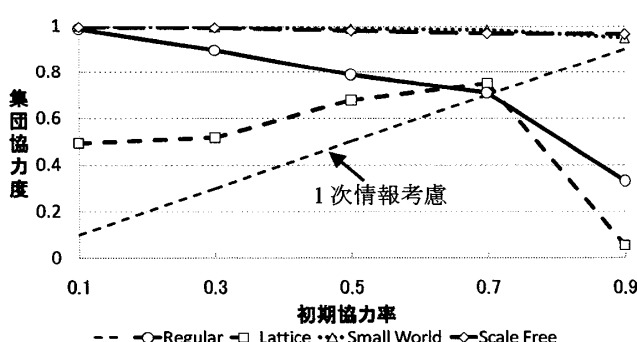


図3-7 初期協力率と集団協力度(最終状態)の関係 (T=1.5)

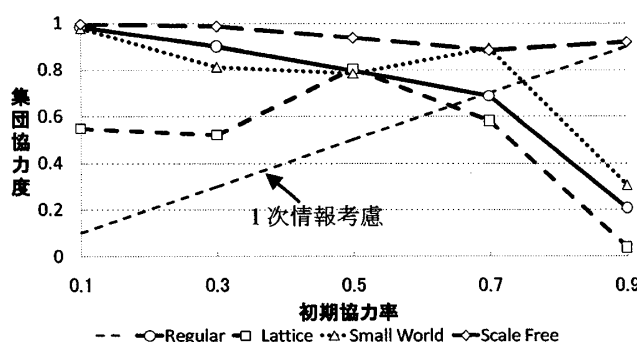


図3-8 初期協力率と集団協力度(最終状態)の関係 (T=1.9)

図3-6~3-8は、 $T=1.1, 1.5, 1.9$ の3ケースについて、初期の協力率を0.1~0.9まで0.2刻みで変化させたときの、最終状態での集団協力度を示す。グラフの横軸は初期の協力率、縦軸は最終状態の集団協力度である。グラフ上のマーク無しの破線は1次情報まで考慮する時の結果を、その他の線は2次情報まで考慮する時の結果を表す。

これらの図から分かるとおり、初期の協力率が高くなると、1次情報まで考慮する場合の集団協力度は同様に高い値を示す一方で、2次情報まで考慮する場合には逆に低い集団協力度を示す。しかし、2次情報まで考慮する場合、 $T=1.1, 1.5$ の場合は Small World Network 及び Scale Free Network が、 $T=1.9$ の場合は Scale Free Network が、初期協力率に関わらず、1次情報まで考慮する場合よりも高い集団協力度を達成している。この結果は、初期の行動分布に関わらず、Scale Free Network 構造を持つ集団においては、相手の協力度について2次情報まで考慮することにより、高い集団協力度を得ることが出来るということを示唆している。

4. 結論及び今後の課題

本研究における分析対象である国家集団は、近年様々な研究が成されている現実の社会集団の一例であるものの、他の集団とは異なる重要な要素を持っている。国家の判断が我々国民の生活に多大な影響を与えること、1つの国家が多様な国々と同時に付き合いを持つことから、集団を構成する各国は非常に慎重な意思決定を行う必要がある。

本研究では、国家の意思決定方針の1つとして、相手国家が「他の国々とどのような付き合いをしているか」を考慮することを仮定したが、本研究の結果から、この意思決定方針は国際関係における協力の進化に対して大きな意味を持つ要因の1つとなり得ることが分かった。

各国が「他国から搾取されない様に、相手の特性を把握し、そのうえで慎重に意思決定を行う」ようにした結果、たとえ相手を裏切るメリットが大きく、国際関係が悪化しやすいような緊張感のある状況下においても、相手の裏切を抑制し、協力的な国家集団を形成することが可能となることを意味している。これは、現在の複雑な国際関係を理解し、将来を検討していくうえでの重要な知見の1つであると思われる。

また、前節では「Scale Free Network 構造の集団において、相手が皆に対して協力的かどうか(2次情報)まで考慮して意思決定を行う場合、初期の協力率に関わらず、集団協力度が最も高くなる」という結果を得た。このネットワーク構造及び慎重な意思決定方針は国家集団の持つ特性として妥当であると思われる。同時に、この結果から、国家集団における協力の進化を促す要因としても妥当であると考えられる。

当然、これらの要因のみで現実の国家関係を記述することが出来る訳ではなく、実際は様々な要因が複雑に絡み合っているものと思われる。しかし、本研究で得られた結果は、空間的局所性を持ったネットワーク構造及び国家の慎重な意思決定方針は、国際関係における協力行動の進化を説明し得る重要な要因の1つである可能性を示唆しているといえる。

今後は、自国と他国との利害関係等も考慮した分析も行っていきたいと考えている。例えば、ある国家が「相手国家が協力的であるかどうか」を判断するという状況を考える。この時、自国と対立している他国が存在する場合、相手国がその他国に対して協力的であったとしても、自国がその相手を「協力的である」とみなすことは妥当であるとは言い難い。今回の分析では、「相手が協力的であるかどうか」を考慮した意思決定方針の有効性を分析するため、それ以外の仮定をシンプルにしたが、このような国家間の利害関係を考慮することの影響についても検討すべきであろう。また、今回分析した要因以外にも、現実の国家関係における協力の進化を説明し得る重要な要因が存在するものと思われる。これらの要因についても積極的に模索し、我々を取り巻く国際環境への科学的なアプローチを行っていきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] Trivers, R. "The evolution of reciprocal altruism." *Q. Rev. Biol.* Vol.46, 35-57 (1971).
- [2] Axelrod, R. *The Evolution of Cooperation*. Basic Books, New York (1984).
- [3] Nowak, M.A., Sigmund, K. "Evolution of indirect reciprocity by image scoring." *Nature*. Vol.393, 573-577 (1998).
- [4] Nowak, M.A., Sigmund, K. "The dynamics of indirect reciprocity." *J. Theor. Biol.* Vol.194, 561-574 (1998).
- [5] Nowak, M.A., May, R.M. "Evolutionary Games and Spatial Chaos." *Nature*. Vol.359, 826-829 (1992).
- [6] Watts, D.J., Strogatz, S.H. "Collective dynamics of small-world networks." *Nature*. Vol.393, 440-442 (1998).
- [7] A-L, Barabasi, R, Albert. "Emergence of scaling in random networks." *Science*. Vol.286, 509-512 (1999).
- [8] Santos, F.C., Pacheco, J.M. "Scale-free networks provide a unifying framework for the emergence of cooperation." *Physical Review Letters*. Vol.95, 098-104 (2005).

---

† 筑波大学大学院システム情報工学研究科 Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

‡ 筑波大学大学院システム情報工学研究科 Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba