

スケールフリーネットワークにおける協調の進化 ～繰り返し囚人のジレンマゲームによる分析～ Evolution of Cooperation in a Scale-free Network

～ Analysis based on the Iterated Prisoner's Dilemma Game ～

石田芳文† 山本仁志‡ 太田敏澄†
Yoshifumi Ishida † Hitoshi Yamamoto ‡ Toshizumi Ohta †

† 電気通信大学 大学院情報システム学研究科
‡ 立正大学 経営学部

† Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications

‡ Faculty of Business Administration, Ritssho University

要旨:

本論文の目的は、繰り返しのジレンマ(Iterated Prisoner's Dilemma: IPD)ゲームの対戦相手の構造にスケールフリーネットワークを用い、協調の進化のメカニズムについて論じることである。IPDにおいて、協調行動が成り立つことはいくつかの先行研究によって論じられているが、現実社会における取引やコミュニケーションの関係を表現できていない。そこで我々は、スケールフリーネットワークを用いたエージェントベース・アプローチを採用し、エージェントの戦略の振舞いを議論する。シミュレーションの結果から、スケールフリーネットワークを有する IPD において、協調は接続数の少ないエージェント同士が協調することを発端に進化すること、ネットワークの中心となる寛容なエージェントが搾取されることを発端に崩壊することがわかった。これは、現実社会における中心人物が、厳格である必要があることを示唆する。

Abstract:

The purpose of this paper is to observe the mechanism of evolution in the cooperation, employing a scale-free (SF) network as a structure among players in the iterated prisoner's dilemma (IPD) game. The evolution of cooperation has been discussed in the 2-Dimension Keeping (2DK) structure, however, the scale-free network structure must be a better representation of relations among people in our society. We employ the agent based approach to simulate the evolution of cooperation among agents in the scale-free network, and discuss a strategy of agents in the IPD. Of the results of simulation, the evolution of cooperation in the SF network is observed that the cooperation can evolve in a cooperation taken at the end in the SF network, and that the tolerant strategy of agent in a hub results in a collapse of cooperation in the SF network. These results suggest that a focal person in the social network has to employ a strict strategy to deal with his/her social relations.

1. はじめに

現実社会に見られる、組織間及び個人間の「関係」には、近所づきあい、ビジネスにおける取引関係、軍拡競争や関税障壁等の国際間の問題、地球温暖化等の環境問題、その他様々な利害対立がある。Axelrod(1987)は、このような法律・道徳・規範等による中央の権力に、組織及び個人が強制されない場合、協調関係は互いに自己の利得を追求する結果、生じるものであるとしている(以下、利己的な組織及び個人をエージェントと表記)。

Cohen et.al.(2001)は、協調関係が保持された状況を「cooperative regime」と呼び、エージェントのチャネルによってこの状況を保持できる社会構造を示している(以下 Cohen モデルと表記)。Cohen モデルは、相互作用空間を2次元トーラス上のノイマン近傍と仮定している。しかし、現実社会のコミュニケーションチャネルは、組織及び個人により異なる性質を持つ。近年の研究では、多くのコミュニケーションチャネルがスケール

フリーネットワークと呼ばれる構造を持つことがわかり始めた。

スケールフリーネットワークとは、エージェントの次数分布がべき法則という特徴を持つ。Barabási et.al. (1999)は、WWW や映画俳優のネットワークを解析し、各エージェントの次数分布がべき法則に従うことを明らかにしている(以下 Barabási と表記)。

安田(1997)は、ネットワーク構造がエージェントの行為や思考に多大な影響を及ぼし、行為を決定するのは、エージェントを取り囲む関係構造としている。我々は、この関係構造を相互作用空間とし、ネットワーク構造を考慮する必要があると考える。本論文では、相互作用空間にスケールフリーネットワークを用い、繰り返し囚人のジレンマゲームによる、利己的なエージェントの戦略の振舞いを議論する目的でモデル化を行い、ネットワーク構造と協調の進化の相互関係を明らかにする。

2. スケールフリーネットワーク

我々は、ネットワーク構造をモデル化することを目的とし、スケールフリーネットワークを作成するアルゴリズム、及び事例について調査する。

2.1. スケールフリーネットワークのモデル

スケールフリーネットワークとは、エージェントの度数分布がべき法則で、新しいノードが次々に参入してもネットワークの形状が変化しない、フラクタル性をもっているネットワークのことを言う。

$$P(k) \propto k^{-\gamma} \quad (1)$$

Barabási は、現実に見られるネットワークを解析し、べき法則の指数 γ が、WWW では $\gamma = 2.1 \sim 2.45$ 、映画俳優のネットワークでは $\gamma = 2.3$ であることを見出した。

では、実際に度数分布がべき法則になるスケールフリーネットワークを作り出すにはどうしたらよいのであろうか。Barabási は、スケールフリーの特徴は以下の統括的メカニズムの結果であるとしている。本論文でも(2)式を用いてモデル化を行う。

(i) ネットワークは、新しい頂点の追加によって連続的に拡大する。

(ii) 新しい頂点は、既に接続されている頂点に優先的に接続する。新しい頂点が既存の頂点 i に接続する確率 Π は、既存の頂点の接続数に依存する。既に接続されている頂点の数を j としている。

$$\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j \quad (2)$$

2.2. スケールフリーネットワークの事例

我々は、現実社会における相互作用空間がスケールフリーネットワークであるか調査を行う。ここではネットオークションの取引数をエージェントの度数とする。調査条件を表1に示す。

表1 ネットワーク調査条件

調査日時	2005/01/12 22:00
サイト	http://auctions.yahoo.co.jp/
オークション ID	c79000000 ~ c79099999

本調査では、100,000 オークションから 31,183 ユーザを抽出し、度数分布がべき法則であることを確認した。図1に度数分布表を示す。

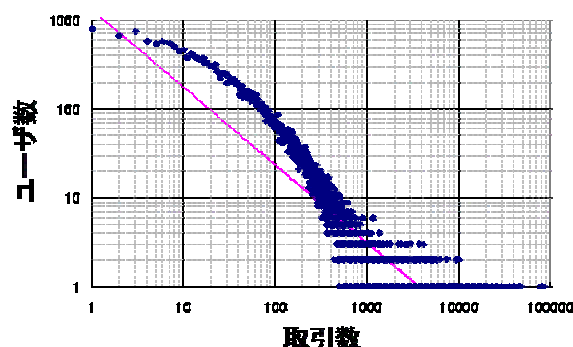


図1 ネットオークションの取引数の度数分布

上図からネットオークションの取引数は $\gamma = 0.88$ となるスケールフリーネットワークであった。そのほか Ebel et.al.(2002)は、Kiel 大学のメールサーバのログを分析し、メールアカウントのトラフィックが $\gamma = 1.81$ のスケールフリーネットワークであることを示した。Aiello et.al.(2001)は、ある一日の電話トラフィックを調べ、電話番号ごとのトラフィックが $\gamma = 2.1$ のスケールフリーネットワークであることを示した。このことから、現実社会の相互作用空間はスケールフリーネットワークが多く存在すると考えられる。

3. シミュレーション

本節では、スケールフリーネットワークを用いた繰り返し囚人のジレンマゲームを提案し、シミュレーションモデルを構築する。利己的なエージェントの戦略の振舞いを観察し、ネットワーク構造と協調の進化の相互関係を明らかにする。

3.1. 囚人のジレンマゲーム

繰り返し囚人のジレンマ(Iterated Prisoner's Dilemma: IPD)ゲームは、抽象化された状況でありながら利己的なエージェントの協調関係に対する説明として知られている。Axelrod(1987)が行なった、繰り返し対戦トーナメントは有名であり、このトーナメントでは TFT(Tit for Tat: しっぺ返し)戦略が二度にわたって優勝し、TFT が繰り返し囚人のジレンマゲームにおいて安定であることを示した。

囚人のジレンマゲームとは、一般に次のように定義できる。エージェント1とエージェント2の両エージェントは、それぞれ2つの戦略、C(協調)、D(裏切り)を選択できる。その組合せによって生ずる4つの状態に対する利得を(エージェント1の利得, エージェント2の利得)で表現すると、表2のような利得行列によって表される。

表2 囚人のジレンマゲームの利得行列
エージェント2の戦略

エージェント1 の戦略	C	D
C	(S_1, S_2)	(W_1, B_2)
D	(B_1, W_2)	(T_1, T_2)

このとき、利得の大きさが(3)式の関係を満たすとき、囚人のジレンマゲームという。また、(4)式の関係を満たすとき、標準的囚人のジレンマゲームという(鈴木,1994)。

$$B_i > S_i > T_i > W_i \quad (3)$$

$$2S_i > B_i + W_i \quad (4)$$

3.2. シミュレーションモデル

各エージェントは戦略 $Act = (A_p, A_q) \in [0,1]^2$ を持つ。 A_p は第一回目の対戦及び前の対戦で相

手が協調したときに協調する確率で、 $A_p = 0$ であることは裏切り、 $A_p = 1$ は協調を表す。 A_q は前の対戦で相手が非協調であった場合に協調する確率であり、 $A_q = 0$ であることは厳格、 $A_q = 1$ は寛容を表す。この記述法は、繰り返し囚人のジレンマゲームにおける基本的な戦略を含んでいる。 (A_p, A_q) が(1,1)であることは常に協調(ALL-C)、(1,0)はしつぺ返し(TFT)、(0,0)は常に非協調(ALL-D)、(0,1)は寛容型しつぺ返し(G-TFT)を表す。

エージェントのそれぞれ対戦可能な相手は、2次元トラス上のノイマン近傍(2DK: 2-Dimensions Keeping)、スケールフリーネットワーク(SF: Scale-Free Network)の2通りとする。

Cohenモデルは、エージェントが協調を進化させる基本的な先行研究と考えられる。そこで、シミュレーション手順やパラメータはCohenモデルを採用する。本シミュレーションは、「対戦」「利得の標準化」「進化」「エラー」の手順で行われる。

対戦: エージェントは対戦可能な相手と、規定回数対戦を行う。

標準化: 各エージェントの総利得を対戦回数で除算し、1対戦あたりの利得を算出する。算出した値を各エージェントの利得とする。

進化: 対戦可能なエージェントで最も高い利得を獲得したエージェントの戦略をコピーする。

エラー: 既定確率において、コピーエラー(利得に関係なく戦略をコピー)、突然変異(A_p, A_q を0~1の一様分布)を発生させる。

3.3.実験結果

Cohenモデル(2DK)の特徴は、相互作用空間に2DKを用いており、SFを用いたケースと比較検討するために、予備実験としてCohenモデル(2DK)を追試する。図2は $Generation \leq 300$ 、図3は $Generation \leq 2500$ 、グラフの横軸は世代であり、縦軸はすべてのエージェントの (A_p, A_q) の平均である。 $Generation \cong 10$ において、 $AvgA_p \cong 0.2$ 、 $AvgA_q \cong 0.2$ となり、ALL-Dが支配的になっている。一方、 $Generation \geq 50$ において、 $AvgA_p \cong 0.7$ 、 $AvgA_q \cong 0.2$ となり、TFTが支配的となっていくことから、協調が進化していると考えられることができる。

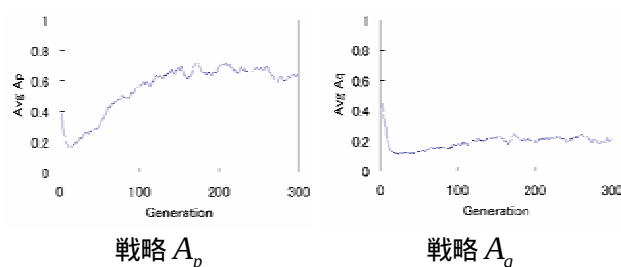


図2 2DKにおける戦略の進化(Generation: 0~300)

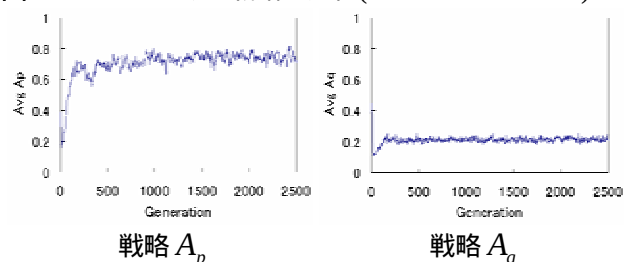


図3 2DKにおける戦略の進化(Generation: 0~2500)

続いて、SFモデルの実験を行う。図4は $Generation \leq 300$ 、図5は $Generation \leq 2500$ 、グラフの横軸は世代であり、縦軸はすべてのエージェントの (A_p, A_q) の平均である。 $Generation \cong 10$ において、 $AvgA_p \cong 0.2$ 、 $AvgA_q \cong 0.2$ となり、ALL-Dが支配的になっている。 $Generation \cong 70$ 以後、 $AvgA_p$ が増加しTFTになると同時に、 A_q が増加し寛容なエージェントが増加している。 $Generation \cong 110$ 以後、急激に $AvgA_p$ が低下し、ALL-Dが支配的となっていくことから、協調が崩壊していると考えられることができる。

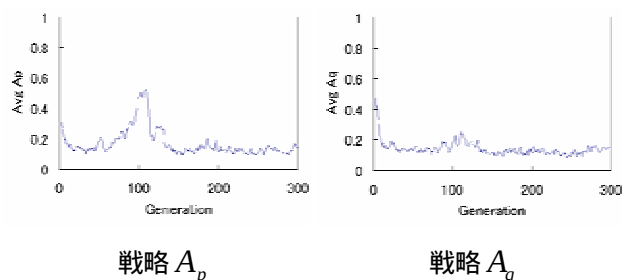


図4 SFにおける戦略の進化(Generation: 0~300)

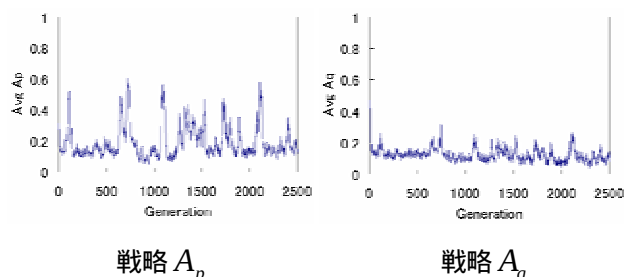


図5 SFにおける戦略の進化(Generation: 0~2500)

4. モデル分析

我々は、2DKとSFの実験結果の差についてまとめる。そして、その違いについて議論するために、協調が進化し、また崩壊するメカニズムについて述べる。説明の単純化のために、エージェント数を8、戦略 A_p, A_q を0 or 1とする。各エージェントの接続数は、2DKは4、SFは2~7とする。

ある戦略のエージェントが、それぞれの戦略のエージェントと4回対戦後の各エージェントの平均利得を、表4に示す。本節では、利得パラメータを $B=5, S=3, T=1, W=0$ とし、SFにおけるエージェントにおいて、接続数の多いエージェントを「ハブ」とする。また、接続数の少ないエージェ

ントを「末端」と表現する。

表4 エージェントの平均利得

戦略	ALLD	ATFT	TFT	ALLC	Avg
ALLD	1	4	2	5	3
ATFT	0.25	2	2.25	5	2.38
TFT	0.75	2.25	3	3	2.25
ALLC	0	0	3	3	1.5

2DK の分析結果を表5 に示す。2DK において ALL-D が支配的な環境下では協調が進化し、TFT が支配的な環境下では突然変異が発生しても協調は安定するという結果が得られた(図6)。

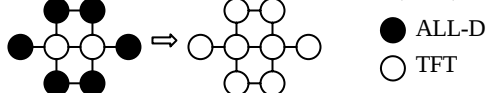


図6 2DK における協調の進化

SF の分析結果を表6 に示す。SF において ALL-D が支配的な環境下では、末端で TFT コロニーが形成される場合、協調が進化するという結果が得られた(図7)。

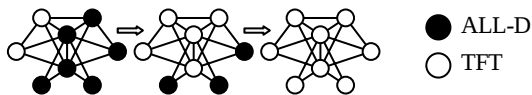


図7 SF における協調の進化

TFT が支配的な環境下では突然変異が末端エージェントで発生、またハブエージェントにおいては一部分突然変異が発生しても、協調が存続するという結果が得られた(図8)。

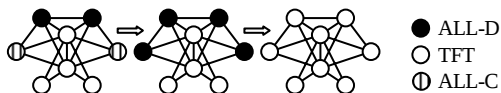


図8 SF における協調の存続

しかしながら、ALL-C と ALL-D のハブエージェントが発生すると、ALL-C が蔓延し、ALL-D に対して脆弱になる。ALL-C が支配的な環境下では、ALL-D エージェントが同時に発生した場合、協調が崩壊するという結果が得られた(図9)。

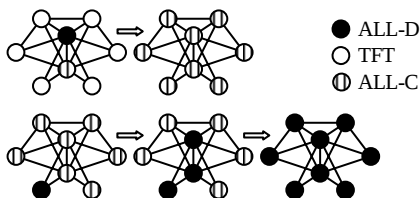


図9 SF における ALL-C の蔓延・協調の崩壊

また、複数の ALL-C のハブエージェントと ALL-D エージェントが同時に発生した場合、協調が崩壊するという結果が得られた(図10)。

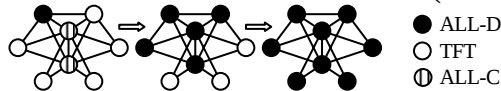


図10 SF における協調の崩壊

表5 2DK の分析結果のまとめ

環境	原因	結果
Random	初期状態	非協調の蔓延
ALL-D	TFT コロニー発生	協調が進化
TFT	ALL-D, ALL-C 発生	協調の存続

表6 SF の分析結果のまとめ

環境	原因	結果
Random	初期状態	非協調の蔓延
ALL-D	末端で TFT コロニー発生	協調が進化
ALL-D	ハブで TFT コロニー発生	非協調が存続
TFT	末端が ALL-D, ALL-C	協調の存続
TFT	単数ハブが ALL-D	協調の存続
TFT	単数ハブが ALL-C	協調の存続
TFT	複数ハブが ALL-C 末端に ALL-D 発生	協調の崩壊
ALL-C	ALL-D 発生	協調の崩壊

5. まとめ

我々は、ハブエージェントが社会における中心人物であると考え、中心人物が厳格であれば協調が安定し、中心人物が非協調でも周囲に罰せられるため協調は安定する。しかし、中心人物が寛容だと協調が崩壊する。この結果は、現実社会は中心人物が寛容になることに対して脆弱性を持つことを示唆している。

近年、インターネットの発展によりコミュニケーションチャンネルが大きく変貌を遂げている。このような、中央の権力に強制されにくいコミュニケーションチャンネルでは、嘘の情報を流して相手をいくらでも騙す事ができる。このような行為を阻止するために、協調が進化するメカニズムを理解し、非協調行動に対して頑健な社会制度を構築する必要がある。

参考文献

- [1] Axelrod, R., "The Evolution of Cooperation", Basic Books, 1987.
- [2] Cohen, M., R. Riolo and R. Axelrod, "The Role of Social Structure in the Maintenance of Cooperative Regimes", *Rationality and Society*, vol. 2001, vol.13, no.1, pp.5-32, 2001.
- [3] Barabási, A. L. and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks", *Science*, 286, pp.509-512, 1999.
- [4] 安田雪, ネットワーク分析, 新曜社, 1997.
- [5] 鈴木光男, 新ゲーム理論, 勁草書房, 1994.
- [6] Ebel, H., L. -I. Mielsch, and S. Bornholdt, "Scale-free topology of e-mail networks", *Phys. Rev. E* 66, pp-035103-1-4, 2002.
- [7] Aiello, W., F. Chung and L. Lu, "Random evolution in massive graphs", *Proceedings of the 42nd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 510-519, 2001