

スケールフリーネットワークにおける協調の進化と崩壊

Evolution and Collapse of Cooperation in Scale-Free Network

石田 芳文 電気通信大学 大学院情報システム学研究科
 Yoshifumi Ishida Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications
 山本 仁志 立正大学 経営学部
 Hitoshi Yamamoto Faculty of Business Administration, Rissho University
 岡田 勇 創価大学 経営学部
 Isamu Okada Faculty of Business Administration, Soka University
 太田 敏澄 電気通信大学 大学院情報システム学研究科
 Toshizumi Ohta Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications
 キーワード: scale-free network, cooperation, Iterated Prisoner's Dilemma, agent-based approach

概要

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、協調関係のメカニズムについて論じることである。IPD において、協調関係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ド・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。その結果、スケールフリーネットワークにおける協調の崩壊は、シミュレーションの結果により、IPD を用いた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で生じるという観察結果を得ている。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。

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等の利害対立がある。Axelrod(1984)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ン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次元トラス上のノイマン近傍と仮定しており、その場合における協調関係が安定することを示している。しかし、現実社会のコミュニケーションチャンネルは、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ン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、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ため、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り、利己的なエージェントの戦略の振舞いを議論する。

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ため、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、エージェントの次数分布がべき法則で、新しい頂点が次々に参入してもネットワークの次数分布が変化しない、フラクタル性をもっているネットワークのことを言う。頂点が k 個の頂点と接続する確率 $P(k)$ を(1)式に示す。

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

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、実際に次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。本論文でもこれにならい、(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 k に依存する。

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

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の事例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次数とする。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、次数分布がべき法則に従うことを確認した。図 1 に次数分布表を示す。この結果から、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に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。

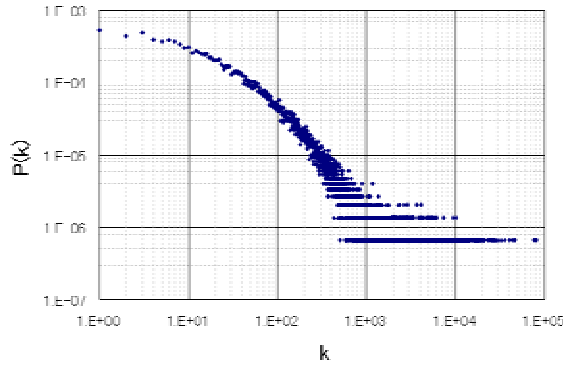


図1 ネットオークションの次数分布

3. シミュレーション

本節では、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ため、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。本シミュレーションではエージェントをネットワークの頂点として扱う。

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、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(1984)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(非協調)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(エージェント1の利得, エージェント2の利得)を表現すると、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、 $A_p = 0$ であることは非協調、 $A_p = 1$ 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)はしっぺ返し(TFT)、(0,0)は常に非協調(ALL-D)、(0,1)はアンチしっぺ返し(A-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」「利得の正規化」「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、既定回数対戦を行う。
- 正規化： 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(Ap,Aq に、平均 0、標準偏差 0.4 のガウスノイズを加える)を発生させる。

3.3 実験結果

本シミュレーションでは、ネットワークのエージェント数 $N = 256$ とする。また、2DK の次数 $k = 4$ とし、SF における新規エージェントの次数 $m = 2$ 、初期エージェント数 $m_0 = 2$ とし、エージェント数 $N = 256$ まで成長させたネットワークを使用する。1期間における対戦回数を4回、コピーエラー及び突然変異を発生させる確率を、共に 0.1 とする。利得パラメータを $B = 5, S = 3, T = 1, W = 0$ としている。

各々のネットワークにおいて 100 回のシミュレーションを実行した結果を表3に示す。1回のシミュレーションにおける期間は 2,500 とする。母集団の平均利得は、 $P = 1$ 及び $R = 3$ の間で変化する。我々は協調が達成される利得の閾値 $T_H = 2.3$ とし、協調が崩壊する閾値 $T_L = 1.7$ とする。

表 3 実験結果

NW	Payoff(S.D)	Retention(S.D)	FracLow
2DK	2.61(0.008)	0.98 (0.005)	0
SF	2.52(0.016)	0.93(0.018)	20
t 値	48.9 ***	28.6 ***	-
p 値	0.000	0.000	-

- Payoff： 各エージェントの平均利得。協調の達成を表す。
- Retention： 閾値 $T_H = 2.3$ を超えた確率。協調の達成を表す。
- FracLow： 閾値 $T_L = 1.7$ を下回った回数。協調の崩壊を示す。(100 回試行における積算値)

Payoff(平均利得)、Retention(協調の達成)、FracLow(協調の崩壊)にて、いずれの結果も両ネットワークに差が存在する。Retention(協調の達成)に注目すると、2DK は常に高い平均利得を保っているが、SF ではそれが若干不安定である。さらに FracLow(協調の崩壊)を比較すると、協調の崩壊が 2DK では一度も発生しないが、SF では多数発生している。

図2は2DK、図3はSFにおけるそれぞれの、一回試行における結果のグラフであり、縦軸はエージェントの平均利得(Payoff)、横軸は期間(Period)である。両ネットワークの共通の結果は、初期に協調の崩壊が発生し、比較的短期間に協調が進化していることである。2DKでは、高い確率で閾値 $T_H = 2.3$ を超え、協調が安定している。SF では閾値 を度々下回り、更に閾値 $T_L = 1.7$ を下回ることもあり、協調が不安定であると考えることができる。

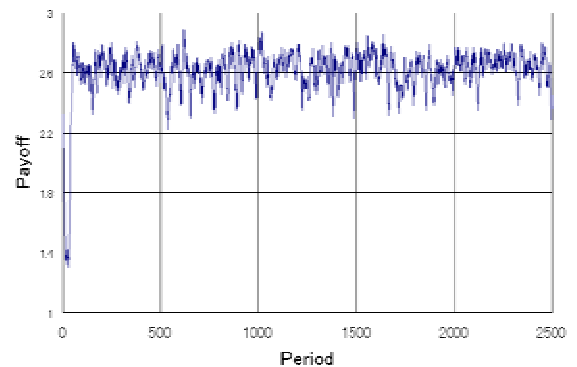


図 2 平均利得: 2DK

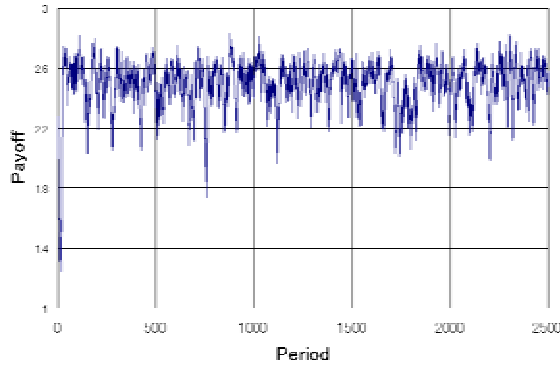


図3 平均利得:SF

図4は2DK、図5はSFにおけるそれぞれの、一回試行における結果のグラフであり、縦軸は A_p 、横軸は A_q ある。両ネットワークの共通の結果は、初期に ALL-D コーナー ($A_p = 0, A_q = 0$) に接近し、比較的短期間に TFT コーナー ($A_p = 0, A_q = 1$) 付近に位置していることから、協調が達成されていることを示している。SF では、TFT コーナーから ALL-D コーナーへ向かおうとした形跡があり、これは協調の一時的崩壊を示している。

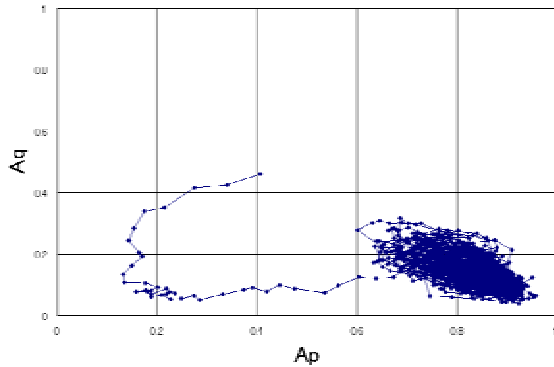


図4 戦略の推移:2DK

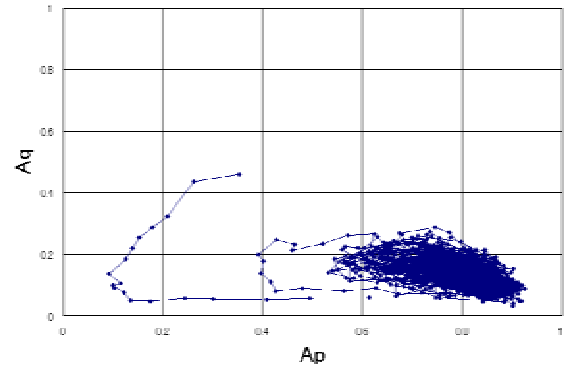


図5 戦略の推移:SF

2DK、SF ネットワークにおいては、いずれも協調の達成が可能であるが、SF ネットワークでは協調が脆弱であり、崩壊が生じやすい。

4. SF モデルの分析

我々は、SF の実験結果について議論するために、協調が崩壊するメカニズムについて分析する。

4.1 脆弱性の考察

SF のエージェントは、各頂点の次数が均一ではないため、以下の 3 タイプを抽出する。全てのタイプにおいて抽出するエージェントの数を5とする。

Hub: 接続数の多いエージェント。ネットワークの中心となるハブと考えられる。

EtoH: 接続数の少ないエージェントで、隣人のエージェントの接続数が多いもの。ハブに隣接する末端エージェントと考えられる。

EtoE: 接続数の少ないエージェントで、隣人のエージェントの接続数が少ないもの。ハブに隣接しない末端エージェントと考えられる。

我々は、どのエージェントが協調の崩壊における発端であるか調査する。100 回の協調の崩

壊において、協調が崩壊する利得の閾値 $T_L = 1.7$ を下回った期で、平均利得が最小の期を $Period = 0$ とし、各エージェントの A_p を図6、 A_q を図7に示す。

図6において、 $Period < 0$ にて、Hub エージェント及び EtoH エージェントの A_p が全頂点と比較すると低い値を示しており、 $Period = 0$ にかけて急激に低下している。

図7において、 $Period < 0$ にて、Hub エージェントが常に高い A_q 値を示しており、 $Period = 0$ にかけて急激に低下している。Hub エージェント及び EtoH エージェントが、高い A_q を持つ Hub エージェントを搾取することで、All-D 戦略を採用するエージェントが増加し、協調が崩壊することが考えられる。また Hub エージェントは多数のエージェントと接続されているため、その影響は大きい。

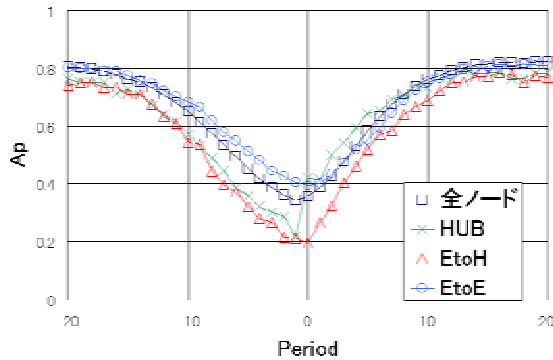


図6 協調の崩壊: A_p

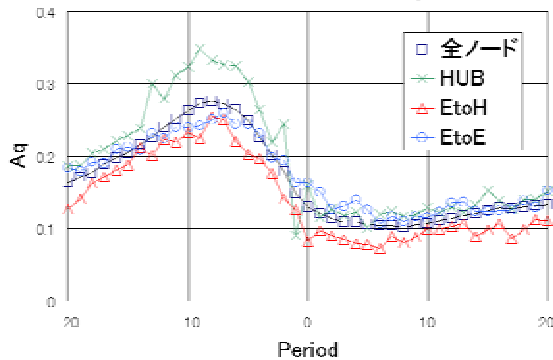


図7 協調の崩壊: A_q

これらの結果から、ハブエージェントの A_q が

上昇することを発端に、協調が崩壊していることが考えられる。

4.2 検証実験

我々は、協調の崩壊はハブエージェントが寛容になることで発生する、(ハブエージェントの A_q が上昇)という仮説を実証するためのシミュレーションを行う。

シミュレーションでは、一定数のあるエージェントに戦略の操作を加える。SF では接続数の多いエージェント(HUB)、2DK では任意に選択したエージェントを操作し、操作を加えるエージェントの数を5とする。また、操作方法を以下の4パターンとする。

$A_p = 0$: 非協調

$A_p = 1$: 協調

$A_q = 0$: 非協調に対して厳格

$A_q = 1$: 非協調に対して寛容

表4は2DK、表5にSFの結果を示す。両ネットワークの共通の結果は、 A_p よりも A_q の値に影響を受けやすいことである。各操作における利得 P を式(5)に示す。

$$P(A_q = 0) > P(A_p = 1) > P(A_p = 0) > P(A_q = 1) \quad (5)$$

2DK においては、Payoff(平均利得)、Retention(協調の達成)が、いずれの操作においても高い値を維持し、Fraclow(協調の崩壊)も発生していないことから、常に協調が安定していることがわかる。

SF においては、特に $A_q = 0$ において Payoff(平均利得)、Retention(協調の達成)が、最も高い値を示しており、Fraclow(協調の崩壊)も発生していないことから、4つの操作において一番協調が安定している。また、 $A_q = 1$ におい

て Payoff(平均利得)、Retention(協調の達成)が、最も低い値を示しており、FracLow(協調の崩壊)も多数発生しており、協調が達成されないことを示している。

表 4 実験結果:2DK

操作	Payoff	Retention	FracLow
なし	2.61(0.008)	0.98 (0.005)	0
$A_p = 0$	2.55(0.009)	0.97(0.007)	0
$A_p = 1$	2.62(0.008)	0.99(0.004)	0
$A_q = 0$	2.63(0.006)	0.99(0.003)	0
$A_q = 1$	2.52(0.01)	0.95(0.012)	0

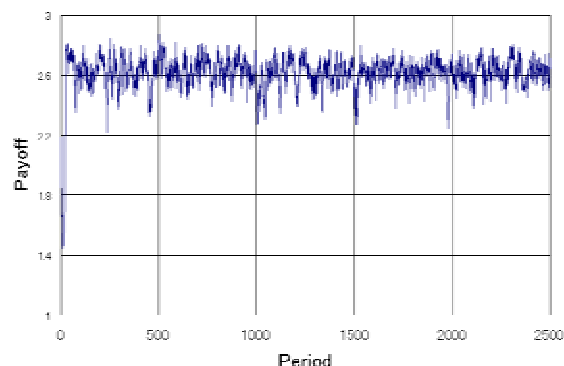
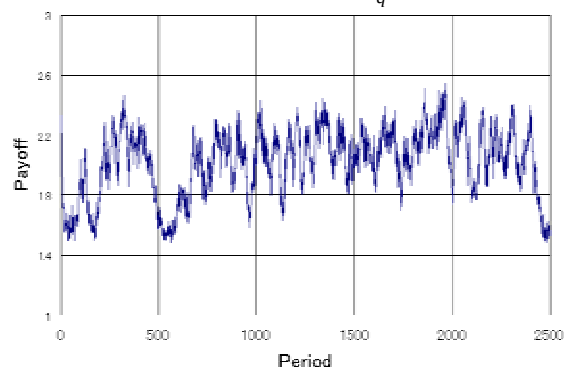
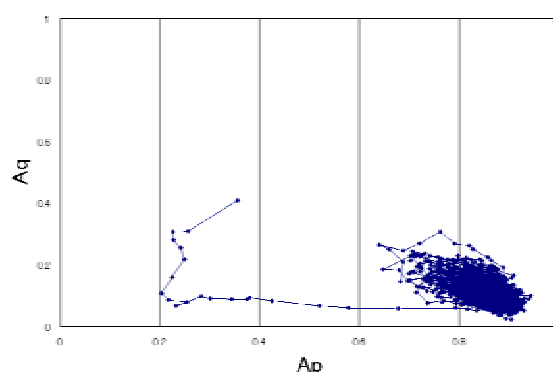
表 5 実験結果:SF

操作	Payoff	Retention	FracLow
なし	2.52(0.016)	0.93(0.018)	20
$A_p = 0$	2.23(0.042)	0.34(0.143)	63
$A_p = 1$	2.55(0.014)	0.92 (0.018)	0
$A_q = 0$	2.61(0.01)	0.99(0.004)	0
$A_q = 1$	2.00(0.177)	0.16(0.147)	237

図8は $A_q = 0$ 、図9は $A_q = 1$ におけるそれぞれの、一回試行における結果のグラフであり、縦軸はエージェントの平均利得(Payoff)、横軸は期間(Period)である。 $A_q = 0$ ではかなり高い確率で閾値 $T_H = 2.3$ を超え、協調が安定している。 $A_q = 1$ では閾値 $T_H = 2.3$ を達成できないことが多く、更に閾値 $T_L = 1.7$ を下回ることも多数あり、協調が達成できていない考えることができる。

図 10 は $A_q = 0$ 、図 11 は $A_q = 1$ におけるそれぞれの、一回試行における結果のグラフであり、縦軸は A_p 、横軸は A_q ある。両ネットワークの共通の結果は、初期に ALL-D コーナー ($A_p = 0, A_q = 0$) に接近していることである。 $A_q = 0$ では比較的短期間に TFT コーナー ($A_p = 0, A_q = 1$) 付近に位置していることから、協調が達成されていることを示している。SF で

は、TFT コーナーと ALL-D コーナーへの往復を繰り返しており、これは協調が頻繁に崩壊していることを示す。

図 8 平均利得:SF $A_q = 0$ 図 9 平均利得:SF $A_q = 1$ 図 10 戦略の推移:SF $A_q = 0$

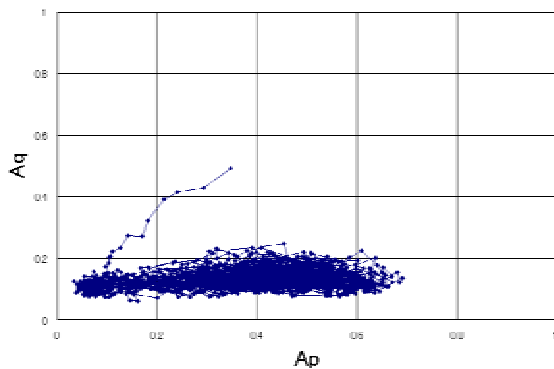


図 11 戦略の推移:SF $A_q = 1$

2DK では、ネットワーク構造が均一なため、エージェント戦略に操作を加えてもそれほど影響が発生しない。SF において HUB に操作を加えた場合、ネットワーク全体に大きな影響が発生する。HUB エージェントがネットワークに与える影響が大きいことを示している。また、各操作における影響を表 6 に示す。

表 6 結果のまとめ:SF

操作	協調達成の影響
$A_p = 0$ (非協調)	—
$A_p = 1$ (協調)	+
$A_q = 0$ (厳格)	++
$A_q = 1$ (寛容)	--

5. まとめ

我々は、相互作用空間がスケールフリーネットワークである IPD において協調は安定的に存続可能なのだろうか、という課題に答えるために、シミュレーション実験をおこない協調が進化的に安定となる条件を探索した。シミュレーション結果から、協調は達成されるが脆弱であり崩壊しやすいことがわかった。

更に、協調の崩壊はネットワーク内で接続次数が高いハブエージェントが非協調に対して寛容になることで生じることがわかった。

ハブエージェントは社会における中心人物で

あると考えられる。シミュレーションの結果から中心人物が寛容だと協調が崩壊し、厳格だと協調が安定することがわかった。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おり、モデルを具体的課題に適用することで風評被害の予防や秩序の維持に対して応用可能であろう。

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、中央の権力による統制が困難な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, 1984.
- [2] Cohen, M., R. Riolo and R. Axelrod, "The Role of Social Structure in the Maintenance of Cooperative Regimes," *Rationality and Society*, 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.