

優れたメタ戦略の伝播と共有化に及ぼすネットワーク構造の影響

防衛大学校 田浦紀子, 生天目章

1. はじめに

従来のゲーム理論や進化ゲームは、ランダム、または全数対戦モデル(あるいは Means-field Model)を前提にしていた。1990年代の後半には、格子モデル上での局所モデルが考えられ、Means-field Model にはない数多くの興味深い性質が発見されてきた。近年の複雑系ネットワーク研究に啓蒙され、さらにさまざまなネットワーク構造の下でゲーム理論や進化ゲームを扱う気運が高まりつつある。本報告では、格子モデルと Small-world Networks 上で、ゲームモデルを比較する。一般には、Means-field Model より、格子モデルの方が、優れた戦略が浸透し、そして持続する上で有利なことが知られている。本報告では、局所モデルよりも Small-world Networks の方が、優れた戦略が浸透し、持続していく上でさらに有利なことを明らかにする。また、繰り返しゲームでは、ノイズや誤りが優れた戦略が浸透する上で重要な役割を果たすことが知られている。Small-world Networks 構造の下では、ノイズや誤りと似た効果をもたらすことを明らかにする。

2. 共進化モデルの設定

2.1 共進化の定義

個体間の相互依存関係は、競争関係(一方が利益を受けると他方は損をする)、協調または共生関係(両者ともに利益を受ける)、片利共生関係(一方は利益を受けるが他方は受けない)の上に成立していることが多い。同種あるいは他種同士が、お互いの影響を受け合いながら同時に進化していくプロセスを「共進化」として、一般には定義される。本報告では、共進化を個体と集団が全体で望ましい方向に進化するプロセスとして扱う。望ましい進化とは以下の三つの基準を満たすような状態に進化していくことをいう。

- (1) 安定性: 進化プロセスがある均衡状態に収束すること。
- (2) 効率性: 集団全体の適応度が最大になるか、または一人あたりの平均適応度が最大になること。
- (3) 平等性: 一人ひとりの平均適応度が等しくなること。

2.2 相互作用の範囲

人間社会では、近傍にいる相手と相互作用(局所的な相互作用)することが多く、空間構造の有無によって重要な違いが現れることが考えられる。本研究では、局所モデルならびにランダムモデルと局所モデルの中間的な性質をあわせもつ Small-World 構造をもつ空間配置のもとでシミュレーションを行い、比較・考察する。

二次元格子を用いた局所モデルの例を、図1に示す。局所モデルでは、各エージェントは近傍に位置するエージェントとだけ相互作用を行う。

Small-World モデルは、局所モデルとランダムモデルの特徴をあわせもつモデルとして考案されたものである。図2に、Small-World の概念図を示す。ここでは、1次元に配列されている n 個のノード

が、それぞれ近傍の k ノードにリンクが張られているモデルを示している。各リンクに対して確率 p でリンクのつなぎ変えを行う。 $p=1$ のとき、つなぎ変えの全くない局所モデルと等価となり、 $p=0$ のとき、すべてのリンクをランダムに結ぶランダムネットワークとなる。

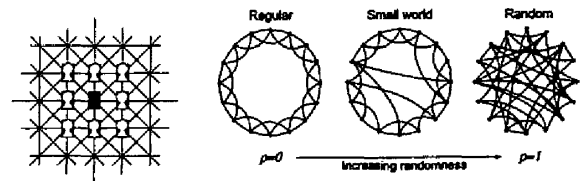


図1 局所モデル

図2 Small-World モデル

2.3 エージェント社会

エージェント社会は、 $N \times N$ の格子モデルとして構成される。本研究では $N=50$ とし、2500 人のエージェントで構成される社会を考える。 $N \times N$ の格子のセルの一つ一つがエージェントを示し、各エージェントは、隣接する 8 人エージェントと相互作用を行う。両端のエージェントは、それぞれ反対側の端のエージェントと相互作用することを想定する。

エージェント間の相互作用を利得行列として表す。ここでは、エージェントは行動上の二つの選択肢 S_1, S_2 を戦略として持つものとし、2 人のエージェント間の相互依存関係を表1に示す利得表で一般的に表現することが出来る。この利得行列の4つのパラメータ a, b, c, d がとる値の組み合わせから相互依存関係は全部で78種類に分類できる。本研究では、この中から最も基本的な3つのタイプについて扱う。

表1 相互依存関係を表す利得行列

Agent B S_1 S_2	S_1	S_2
Agent A S_1	a b c	a b c
S_2	c d	c d

2.4 エージェントの学習

本研究では、各個体の戦略決定ルールを遺伝子列として表現する。リンドレン(K.Lindgren)は、履歴に依存して次回の手を決定する戦略決定表を考案した。戦略 S_1 を 0, 戦略 S_2 を 1 として以下のような2進数で表される履歴 hm をもつことを記憶長 m として定義する。

$$h_m = (a_{m-1}, K, a_1, a_2)_2 \quad (1)$$

a_1 は前回の相手の手、 a_2 は前回の自分の手、 a_2 は前々回の相手の手...とする。ある履歴 k に対応して、次回の戦略を P_k (0 ま

たは1)とすると、記憶長を m とする戦略決定ルールは

$$G = [P_0 P_1 \wedge P_{n-1}] \quad (2)$$

と表す。各エージェントの内部メモリの構造を図3に示す。エージェントの内部メモリは遺伝子列として表現され、この遺伝子列に基づくことで戦略履歴の関数として次回にとるべき戦略が表される。

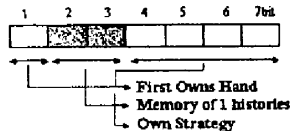


図3 エージェントの内部メモリ

各エージェントは、初期状態でランダムに生成したメタ戦略が付与され、相互作用を繰り返していく中で、近傍で最も多く利得を獲得しているエージェントのもつメタ戦略を学習しながら、自分のそれを逐次更新していく。本研究では各エージェントは明示的に戦略を決定するのではなく、メタ戦略を学習し、とるべき戦略を決定する。エージェントの学習方法には、相手の戦略テーブルの中間一点を交差点としその半分のコピーを交配学習（図4）を考える。

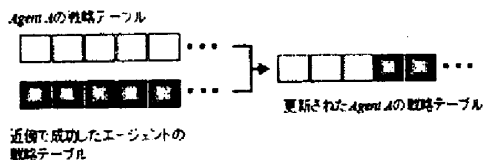


図4 交配学習

3. シミュレーション

3.1 ジレンマ状況における共進化

2人ゲームを拡張した N 人のジレンマゲームでは、相互作用の相手が増す (N の数が多くなる) と望ましい協調関係がうまくいくことが明らかになっている。ジレンマゲームの利得行列として表2を用いる。

局所モデル、small-world モデルともに、社会は全員が協調戦略をとって安定し、かつパレート均衡解である平均利得 3.0 を実現する結果となった。また、初期状態では 2500 種もあった各エージェントのメタ戦略は、局所モデルでは 4 種類、small-world モデルのもとでは 2 種類に、集約されるという結果となった。

3.2 交渉状況における共進化

エージェントの交渉問題を分析するためにタカハトゲームを扱う。利得行列は表3に定義するものとし、 $V=12$, $C=10$ としてシミュレーションを行った。

全てのエージェントがすべてのエージェントがハト派戦略を選択するように推移し、平均利得はパレート最適解である平均利得 6.0 を実現した。また、メタ戦略は 4 種類のルールに集約された。

3.3 協調状況における共進化

$S1$ をパレート最適戦略、 $S2$ をリスク優越戦略とし、本研究では表4に示す利得表を用いる。

全てのエージェントがすべてのエージェントが協調戦略を選択するように推移し、平均利得はパレート最適解である平均利得 1.0 を実現している。また、メタ戦略は、学習によって優れたルールが浸透し、局所モデルでは 4 種類、small-world モデルのもとでは 1 種類に、集約されるという結果となった。

表2 ジレンマゲームの利得表

Agent B Agent A	S_1 協調戦略	S_2 裏切り戦略
S_1 協調戦略	3, 3	0, 5
S_2 裏切り戦略	5, 0	1, 1

表3 タカハトゲームの利得表

Agent B Agent A	altruist S_1	selfish S_2
altruist S_1	$V/2$, $V/2$	V , 0
selfish S_2	0, V	$(V-C)/2$, $(V-C)/2$

表4 協調ゲームの利得表

Agent B Agent A	S_1 (パレート最適戦略)	S_2 (リスク優越戦略)
S_1 (パレート最適戦略)	1, 1	0, -9
S_2 (リスク優越戦略)	-9, 0	0, 0

4. まとめ

局所モデル、Small-world Networks のいずれにおいても、エージェント間の学習により全体にとって望ましい状況に進化し、また優れた戦略が浸透し、持続する上で、Small-world Networks の方が、局所モデルよりも、さらに有利なことがわかった。また、ジレンマゲーム、タカハトゲーム、協調ゲームという3つのゲームでは、協調的な行動をとるよう安定して収束し、パレート最適を実現した。

各エージェントが学習によって獲得した内部モデル（メタ戦略）を調べることによってそれらのメタ戦略の共通性について解析し、個体によるミクロレベルでの学習と全体のマクロレベルに働く進化のメカニズムの関係について解析してみると、ともに同じメタ戦略に集約されることがわかった。今後は、これらのゲームの社会規範の生成に働くメカニズムと、それに及ぼすネットワーク構造の影響について掘り下げていきたい。

5. 参考文献

- [1] Smith, J.M: *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press, 1982
- [2] 松田裕之: 共生とはなにかー搾取と競争をこえた生物同士の第三の関係, 現代所, 1995
- [3] 巖佐庸: 生態学における格子モデル, 日本物理学会誌, Vol.53, pp.319-326, 1998.
- [4] Watts.D. J.: *Small Worlds Princeton*, 1999
- [5] Nowak M. A., May R. and Sigmund K.: *The Arithmetics of Mutual Help Scientific American*, 1995