

囚人のジレンマゲームにおけるネットワーク構造の影響

小野真裕

1 はじめに

これまで囚人のジレンマゲームにおいて協調戦略の創発メカニズムが研究されてきた。合理的な個人ならば裏切を選択する利得構造のゲームで協調がどのように発生するか、というものである。これに対して、個体間の空間的な構造を考慮することによって、一つの説明が可能である。一方、実際の間人関係はスモールワールドネットワーク構造になると考えられている。本研究では、ネットワーク上での囚人のジレンマゲームのシミュレーションを行い、ネットワークの構造の影響を考察する。

2 背景

2.1 囚人のジレンマゲーム

1950年代に Albert Tucker によって定式化された囚人のジレンマゲームは、多くの現象を説明する社会生活の本質的なモデルとして扱われることも多く、ゲーム理論において最も有名なゲームの一つである。

表 1 に示す 2 人対称ゲームの利得行列を見ると、それぞれのプレイヤーが合理的であるならば、両プレイヤーとも裏切を選択するため、パレート劣位な唯一のナッシュ均衡 (D,D) となる。にもかかわらず、現実の社会に目を向けると協調行動が観察されるのはなぜかという疑問が発生する。

その疑問に対する一つの説明が空間構造の導入である。ゲームを行うプレイヤーを空間上に配置し、近傍のプレイヤー同士で対戦させ、プレイヤー集団を進化させていくことにより、初期には裏切戦略が支配的であった集団の中に協調戦略が発生する。

空間構造を扱った従来の研究には、2 種類の単純な戦略 (All C, All D) を行う個体によるもの [1]、メタ戦略を持つ個体によるもの [2] などがある。

2.2 スモールワールドネットワーク

1998 年に Duncan Watts はパス長とクラスタ係数の二つの特徴量を用いて、それまで経験的に知られていたスモールワールドネットワークを定式化した [3]。ここで、パス長とは「全ての 2 ノードの組み合わせにおける最短パスの長さの平均値」であり、クラスタ係数と

表 1: 囚人のジレンマの利得行列

		Player2	
		C	D
Player 1	C	R, R	S, T
	D	T, S	P, P

*C:協調, D:裏切, また $T > R > P > S$, 且つ $2R > T + S$

は「あるノードが n 個のノードと結ばれている時、それら n 個のノード間のあり得る組み合わせのうち実際に結ばれている割合の平均値」である。ノード数とエッジ数を固定し、ランダムさのみを変化させると、ネットワークは次のような特徴を持つ。

それぞれのノードが近傍のノードとのみ結ばれている、ランダムさが全くないネットワークでは、パス長、クラスタ係数とも大きい。逆に、全てのエッジがランダムに決定される、完全にランダムなネットワークでは、パス長、クラスタ係数とも小さい。スモールワールドネットワークはこの中間領域であり、パス長は小さく、クラスタ係数は大きいという特徴がある。

3 ネットワーク構造の影響

ここではネットワーク構造の囚人のジレンマゲームに与える影響を調べる。

現象の原因を構造に求めるか個人に求めるかは、これまで様々な分野で論争されているが、我々はそれら単独ではなくそれらの相互作用が重要であると考えている。つまり、個人の行為によって構造は影響を受け、構造によって個人の行為は影響を受けるというモデルである。しかし、ここでは一旦構造を固定し、構造からの個人の行為への影響に絞って考えることとする。

3.1 シミュレーション内容

ノードを囚人のジレンマにおけるプレイヤーとして、ネットワーク上でエッジで結ばれたノード同士を対戦させる。ノードは遺伝子として表 2 に示されるようなメタ戦略を一種類持つ。対戦では 100 回ゲームを繰り返す。全てのエッジについて対戦が終了すると、その世代において取得した利得に応じて、1 割のノードが確率的に死亡し、近傍のノードのうち最も利得の大き

いものがコピーされる。ただしコピー時には0.2%の割合で突然変異が発生する。

ノード数を400, エッジ数を1200に固定した, ランダムさの異なるネットワークに対し, それぞれ5回ずつ試行した。ただし, 表1において $(T, R, P, S) = (5, 3, 1, 0)$ とした。

3.2 シミュレーション結果

進化ダイナミクスの例を図1に示す。この図にも表れているが, 全ての条件において Pavlov 戦略 (表2参照) が生き残りやすく, 協調戦略が発生していることがわかった。

次に, 種の時空間占有率へのネットワーク構造の影響を調べた。全てのネットワークにおいて各種の時空間占有率順位と時空間占有率の関係は, 存在する16種の内10位程度でカットオフされる冪乗則に従う事がわかった (図2)。ただし, ネットワーク構造によって若干傾きが異なる。特に, この傾向は上位の種に顕著であるため, ここでは最も占有率が高い支配種に注目し, クラスタ係数と時空間占有率の関係調べた (図3)。これを見ると, クラスタ係数の低いネットワークの方が支配種の時空間占有率が高いことがわかる。

スモールワールドネットワークの範囲に注目してみると, 減衰が始まる領域に相当する。これから, 支配種の時空間占有率が最も大きくなる範囲で, 空間を越えるコストを最小にするネットワークともいえる。

4 おわりに

ネットワーク構造の囚人のジレンマゲームへの影響について調べた。その結果, Pavlov 戦略が構造に関わらず生き残りやすいこと, クラスタ係数が小さくなると一種類の戦略が支配的になることがわかった。

参考文献

- [1] May R M Nowak M A. Evolutionary games and spatial chaos. *Nature*, Vol. 359, pp. 826–829, 1992.
- [2] K. Lindgren and M. G. Nordahl. Evolutionary dynamics of spatial games. *Physica D*, Vol. 75, pp. 292–309, August 1994.
- [3] D. J. Watts and S. H. Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, Vol. 393, pp. 440–442, June 1998.

表 2: メタ戦略例

前回の自分の手	前回の相手の手	戦略例			
		All C	All D	TFT	Pavlov
C	C	C	D	C	C
C	D	C	D	D	D
D	C	C	D	C	D
D	D	C	D	D	C

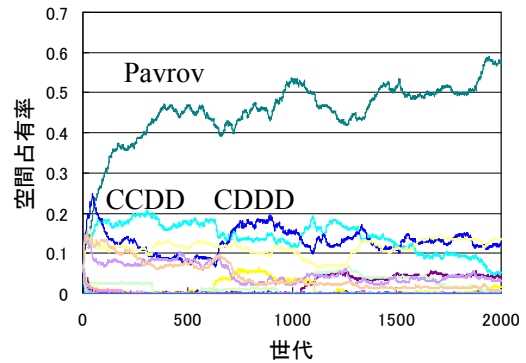


図 1: 世代交代例 (randomness=0.2)

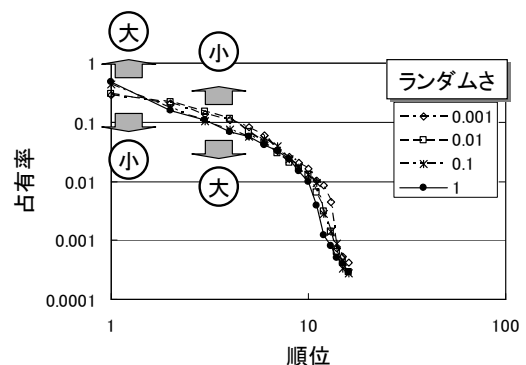


図 2: 時空間占有率と順位の関係

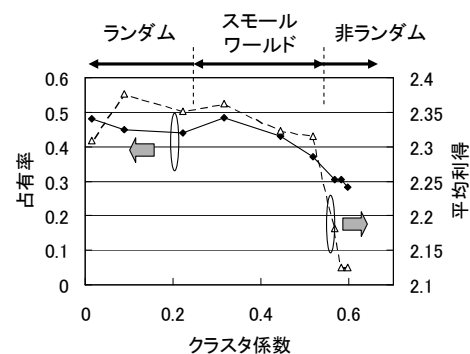


図 3: 支配種の時空間占有率