

# 社会的ネットワークにおける協調形成に関するゲーム理論分析： ネットワーク・トポロジーに着目して\*

Social Networks and Coordination in Local Community: An Evolutionary Game Theoretic Analysis\*

織田澤利守\*\*・八木亮輔\*\*\*・川松祐太\*\*

By Toshimori OTAZAWA\*\*・Ryosuke YAGI\*\*\*・Yuta KAWAMATSU\*\*

## 1. はじめに

### (1) 研究の目的

昨今、より良い地域生活を目指し、地域内の多様な主体（住民・NPO・企業・行政など）が協働して様々な社会的サービスを提供しようとする取り組み（以降、協働型地域づくり活動と呼ぶ）が全国で展開され始めている。その取り組み内容は、地域交通、環境保全、文化・歴史、観光・交流、医療・福祉、子育て・教育、防災・防犯など多岐にわたり、地域生活の質改善のみならず、新しい雇用の創出など経済効果にも期待が寄せられている。

こうした協働型地域づくり活動は、地域内の主体が広く協働して活動に参加することによって自律的に存続可能となり、活動の成否において、社会的ネットワークを介した人々の協調関係の形成が重要である。「活動がどのように広がっていくか」、また「人々の間で定着するか」といった問いに答えるためには、社会的ネットワークと人々の協調関係の背後にあるメカニズムを深く理解する必要がある。本研究では、特に、社会的ネットワークの位相幾何学的構造（トポロジー）に着目し、そのメカニズムが有するロバストな性質の解明を目指す。

### (2) 既存研究と本研究の位置づけ

近年のネットワーク科学の急速な発展によって、様々なネットワークに共通するいくつかの重要な性質が明らかにされた<sup>1)</sup>。しかし、主に物理学分野で行われてきたこれらの研究では、主体の意思決定は明示的に扱われることがなかった。これに対して、社会科学の立場から主体の合理的な意思決定を組み込む試みがなされ、ネットワーク上における主体間の相互依存関係をゲーム理論を用いて分析する研究が行われている<sup>2)</sup>。ここでは、ネットワークを外生とする (exogenous network) か、内生とする (endogenous network) かで分析の枠組みを大別できる。前者はネットワーク上におけるゲーム (games on graphs)、後者はネットワーク形成ゲーム (network formation games) と呼ばれる。また、主体間の相互依存関係を表すゲーム構造として、主に囚

表-1 ネットワークゲームの枠組みと既存研究

	exogenous network	endogenous network
RPD	Haag&Lagunoff(06) Spagnolo&Lippert(04)	Vega-Redondo(06)
CG (2×2)	Ellison(93) Blume(93) Young(93,98)	Jackson&Watts(02) Goyal&Vega-Redondo(05) Hojman&Szeidl(06)

人のジレンマ (prisoners' dilemma:RPD) と協調ゲーム (coordination game:CG) に関する分析が行われている。

本研究では、ネットワーク上における協調ゲームを分析の対象とする。協調ゲームにおいては、一般的に複数の均衡が同時に存在し、そのうちいずれの均衡が実現するかは均衡選択問題と呼ばれる。均衡選択問題に対して、進化ゲーム理論においてより精緻な均衡概念である確率的安定性 (stochastic stability) が提案されている<sup>3)</sup>。確率的安定性とは、調整ダイナミクスに小さな確率的なゆらぎが介在する場合、ある均衡が他の均衡に比べより長期的に実現しやすくなるというものである。Young(1998)<sup>4)</sup>は、確率的安定性に基づく均衡選択原理を理論的にはネットワークゲームへ適用可能であることを示しているものの、一般的なネットワークに関しては計算が極めて困難であるという問題がある。また、確率的安定性の概念が想定する時間スパンは超長期であり、地域づくり活動においては非現実的といわざるを得ない。したがって、本研究で目的とする、ネットワークのトポロジーが活動の進展や定着にどのような影響を及ぼすかについて、既存研究の分析枠組みでは十分に検討されているとは言えない。以上のような問題意識に基づき、本研究ではモンテカルロ・シミュレーションを用いた分析手法を採用することとする。

## 2. 分析の枠組み

### (1) ゲーム

$N(\geq 2)$  人のプレイヤーをノード、プレイヤー間の繋がりをリンクとする社会的ネットワーク  $g$  を想定する。本モデルではネットワーク構造は与件とする。各プレイヤーは2つの行動  $X = \{0, 1\}$  を選択する。行

\*キーワード：社会的ネットワーク、協調ゲーム、協働型地域づくり

\*\* 東北大学大学院情報科学研究科

\*\*\*UR 都市機構

(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06,  
TEL: 022-795-7508; FAX: 022-795-7500)

動1は協調する (e.g. 地域づくりに参加する), 行動0は協調しない (e.g. 地域づくりに参加しない) を意味する. 各々のプレイヤーはリンクで繋がっているプレイヤーと毎期ゲームを繰り返す. 本モデルのゲーム構造には戦略的補完性が働くものとする. 戦略的補完性とは, 自分と同じ行動を取るプレイヤーが増加 (減少) すると, 自分の限界効用が増加 (減少) する性質をいう. プレイヤー  $i$  の効用関数  $u_i(X)$  は式 (??) のように与えられるとする.

$$u_i(1) = \frac{m_i}{d_i(g)} \alpha - c \quad (1)$$

$$u_i(0) = 0 \quad (2)$$

ここで,  $d_i(g)$  はプレイヤー  $i$  の次数,  $m_i$  はプレイヤー  $i$  のネイバーのうち行動1を取っているプレイヤー数,  $c$  は行動1を取る為のコストを表す.

各プレイヤーには, 行動変更の機会がランダムに到着するとし, 行動1をとるプレイヤーが行動変更の機会を得る確率を  $\mu_1$ , 行動0のプレイヤーが行動変更の機会を得る確率を  $\mu_0$  で表す. 行動変更の機会を得たプレイヤーは, 変更後の行動をロジット選択する. プレイヤー  $i$  が行動1を選ぶ確率  $\sigma_1$ , 行動0を選ぶ確率  $\sigma_0$  は以下の式に従う.

$$\sigma_1 = \frac{\exp\{\eta^{-1}u_i(1)\}}{\exp\{\eta^{-1}u_i(1)\} + \exp\{\eta^{-1}u_i(0)\}} \quad (3)$$

$$\sigma_0 = 1 - \sigma_1 \quad (4)$$

ただし,  $\eta > 0$ : プレイヤーの異質性パラメータである.

本来, 状態とは, ある一時点における各プレイヤーが取っている行動のすべての組み合わせによって定義される. プレイヤーが  $N$  人の時, 状態数は  $2^N$  となり,  $N$  の増加に伴い指数的に増えていく. 一方で, 地域づくり活動を想定した本モデルにおいては, 各プレイヤーのとり行動の組合せは問題ではなく, 何人のプレイヤーが協調行動をとっているのみが活動の成否 (経済効率性) に影響を及ぼす. そこで, 行動1を取っている人数を集約化した状態として再定義し, 状態数を  $N + 1$  (全員が行動0の場合を含む) とする. 初期状態において, すべてのプレイヤーは行動0を取り, 状態0とする. 状態  $n$  からある一人のプレイヤーが行動を0から1へ変更すると, 状態は  $n + 1$  となる. 逆に, 状態  $n$  からある一人のプレイヤーが行動を1から0へ変更すると, 状態は  $n - 1$  となる. このような過程により, 状態は状態0から, 状態  $N + 1$  までの間を推移する.

## (2) ネットワークの指標

本節では, ネットワークに関する4つの指標について説明する.

### a) 次数 (Degree)

あるノードの次数とは, そのノードのもつリンク数である. ノードの次数が確率変数であるとき, その分

布を次数分布といい, 横軸に次数, 縦軸に次数を持つノードの割合を取った分布である.

### b) 平均距離 (Average Distance)

ノード  $i, j$  間を結ぶために必要な最小リンク数と距離と呼び,  $l_{ij}$  と表す. すべてのノードのペアに関する距離の平均値が平均距離である.

$$\langle l \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N l_{ij} \quad (5)$$

### c) 近接性 (Closeness Centrality)

ノード間距離に対して, 距離1の場合には  $\delta$  を, 距離2の場合には  $\delta^2$ , 距離  $t$  の場合には  $\delta^t$  といった具合に割引をおこなったものをすべてのノードのペアに関して平均したもの. ネットワーク全体として, ノード同士が近接していることを示す指標である.

$$\langle l_d \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta^{l_{ij}} l_{ij} \quad (6)$$

### d) クラスタ係数

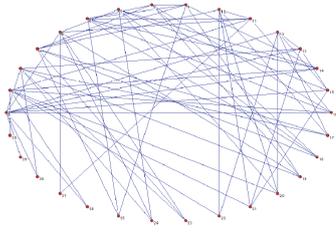
あるノード  $i$  にとって,  $i$  を頂点とする三角形の数をノード  $i$  と繋がっているノードの総対  $d_i(d_i - 1)/2$  で割った値をクラスタ係数と呼び,  $C(i)$  で表す. あるノードと距離1で繋がるノード同士が何割距離1で繋がっているかを示す指標である. ネットワーク全体のクラスタ係数  $C$  は, すべてのノードのクラスタ係数の平均で表す.

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C(i) \quad (7)$$

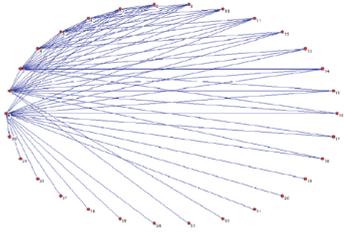
## (3) 社会的ネットワーク

本稿では, 社会的ネットワークの重要な特性である **スケールフリー性** と **スモールワールド性** に着目して分析を行う. スケールフリー性とは, 少数のプレイヤーは多くのプレイヤーとリンクを持ち, 大きな次数を持っている一方で, 大多数のプレイヤーはごくわずかなプレイヤーとしか繋がっておらず次数が小さいという特性であり, 指標 a), c) と関連する. また, スモールワールド性とは, 平均距離が短く, クラスタ係数が大きいネットワークの特性であり, b), c) に関連する. 具体的に, 分析に用いるネットワークは, 以下の通りである. なお, スモールワールド・ネットワークについては, すべてのプレイヤーの次数が等しいレギュラーネットワークを基に, Watts&Strogatz (WS) モデルに倣って3つのネットワークを作成した.

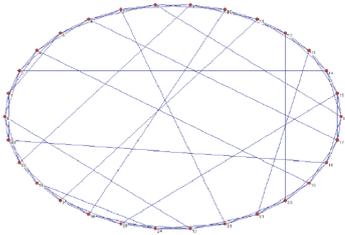
- エルデシュレイニー (ER) ネットワーク: 次数をポアソン分布 (8) に従うように与え, リンクをランダムに繋いだネットワークであり, 平均次数に



(a) エルデシュ=レイニー・ネットワーク



(b) スケールフリー・ネットワーク



(c) スモールワールド・ネットワーク

図-1 社会的ネットワークの例

近いプレイヤーが多く、次数が大きいプレイヤーや小さいプレイヤーも少数存在する。

$$p_z(d) = \frac{e^{-z} z^d}{d!} \quad (8)$$

$z$ : 全プレイヤーの平均次数

- スケールフリー (SF) ネットワーク: 次数をべき則 (9) に従うように与え、リンクをランダムに繋いだネットワークであり、スケールフリー性を持つ。

$$p_\gamma(d) = \frac{1}{\mathcal{R}(\gamma)} d^{-\gamma} \quad (9)$$

$d$ : デGREE数,  $\gamma$ : decay パラメータ

- 1WS ネットワーク: ローカルな相互作用を持たず、グローバルな相互作用のみを持つネットワークである。平均距離が短い、クラスター次数は低い。
- pWS ネットワーク: ローカルな相互作用 (左右のプレイヤーと結ぶ割合  $(1-p)$  のリンク) とグローバルな相互作用 (ランダムに結ばれた割合  $p$  のリンク) を併せ持つネットワークである。平均距離が短く、クラスター次数が高いスモールワールド性を有する。

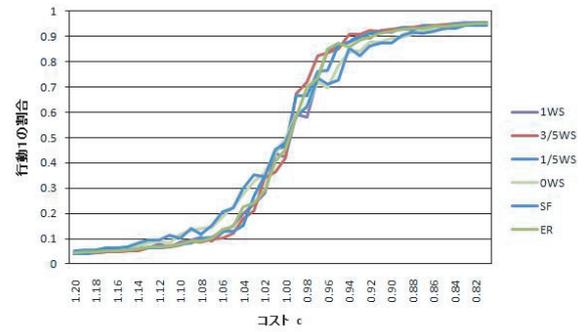


図-2 リスク支配的行動と均衡選択

- 0WS ネットワーク (サークルネットワーク): ローカルな相互作用しかなく、近所同士のみが繋がっているネットワークである。クラスター次数は高いが、平均距離は長い。また、0WS+ $\alpha$  ネットワークは、0WS ネットワークに  $\alpha$  本のリンクをランダムに繋いで作成したネットワークである。

### 3. シミュレーション分析

#### (1) 設定

モデルに共通のパラメータを次のように設定する：  
 $\rho = 0.01$ ,  $\mu_1 = 0.05$ ,  $\mu_2 = 0.05$ ,  $\eta = 3$ ,  $T = 50000$ .

また、いずれのネットワークにおいても、ノードの平均次数が5となるようにパラメータを設定した。

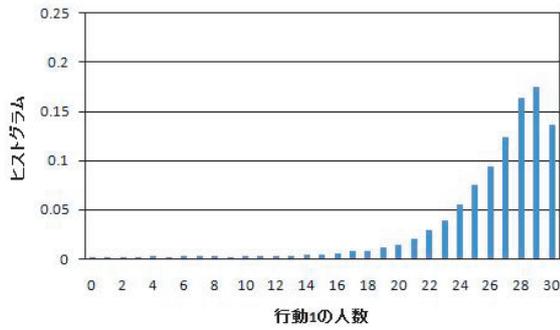
#### (2) 結果と考察

##### a) リスク支配的行動と均衡選択

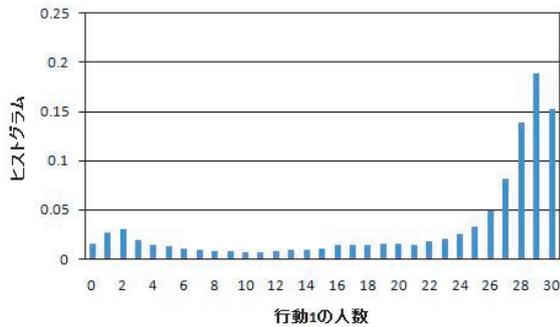
コスト  $c$  を区間  $[0.8, 1.2]$  の間で変化させた時の行動1を取るプレイヤーの割合に着目する。なお、上記区間において、常に行動1がパレート効率的な行動である。一方、 $c > 1$  の場合、行動0がリスク支配的であり、 $c < 1$  の場合、行動1がリスク支配的となる。図-2は、横軸にコスト  $c$ 、縦軸に全プレイヤーによって行動1が選択された回数の割合を表している。これより、いずれのネットワークにおいても、リスク支配的な行動が選択される可能性が高いことが明らかとなった。この結果は、均衡選択に関する既存の研究と整合的である。

##### b) ネットワーク・トポロジーが協調形成に与える影響

ネットワーク・トポロジーが協調形成にどのような影響を与えるのかについて考察する。 $c = 0.95$  とし、協調行動が効率的かつリスク支配的な行動である場合を想定する。図-3は、行動1の人数 (状態) に関する頻度分布 (ヒストグラム) を1WS ネットワークとSF ネットワークについてそれぞれ示している。1WS ネットワークにおいては、効率的な均衡に対応するピークが1つであるが、SF ネットワークにおいては、非効率的な均衡に対応するピークが同時に存在している。表-2は、



(a) 1WS ネットワークのヒストグラム



(b) SF ネットワークのヒストグラム

図-3 ヒストグラム

表-2 各ネットワークにおけるヒストグラムの平均と分散

ネットワーク	SF	ER	0WS	1WS
平均	22.83	24.07	22.42	24.97
分散	62.90	37.80	35.24	22.18

各ネットワークにおけるヒストグラムの平均と分散を表している。各ネットワークとも、平均はほぼ同水準であるのに対し、SF ネットワークの分散が大きいことがわかる。次に、図-4 は近接性 (Closeness Centrality) と分散の関係を示している。以上より、次数の大きなプレイヤーが存在し、そのためにネットワークの近接性が高いとき、次数の大きなプレイヤーの選択に周りのプレイヤーが引きずられ、ネットワーク全体として非効率的な均衡に落ち込む可能性があることが推察できる。結果として、SF ネットワークでは、非効率的な行動が選択される、すなわち協調形成に失敗する確率が他のネットワークと比較して高いといえる。

表-2 より、0WS ネットワークと 1WS ネットワークを比較すると、1WS ネットワークの方が平均が高く、分散が小さいことが分かる。図-5 は、WS モデルにおける平均距離 (の逆数) と分散の関係を表している。平均距離が短いほど、分散が小さい (それに伴って平均は大きくなる) ことがわかる。したがって、WS ネットワークでは、平均距離が短い程、効率的な行動が選択される確率が高い。一方、クラスター性については、

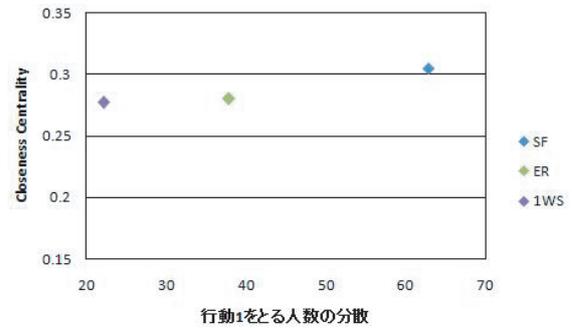


図-4 近接性 (Closeness Centrality) と分散の関係

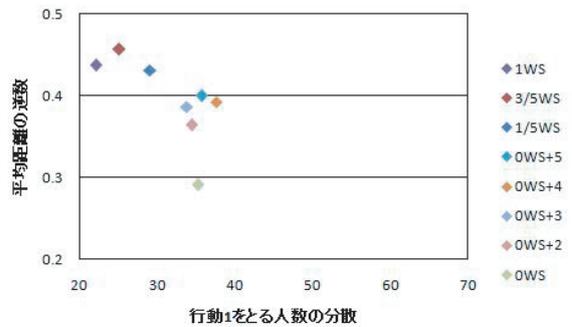


図-5 平均距離の逆数と分散の関係

分散との相関関係は見られなかった。

#### 4. 結論

本研究は、協働型地域づくり活動を念頭に置き、社会的ネットワークと人々との協調関係の構築について、そのメカニズムの解明を試みた。分析を通じて、ネットワーク・トポロジーが協調形成に以下のような影響を及ぼすことが明らかとなった。

1. スケールフリー性を有するネットワークにおいては、協調形成に失敗する可能性が他のネットワークと比較して高い。
  2. スモールワールド・ネットワークにおいては、平均距離が短い程、協調が形成される可能性が高い。
- 以上の結果から、地域づくり活動においては、少数のカリスマ的存在に頼るのではなく、地域全体がより密なコミュニティを形成することが重要であるといえる。なお、ネットワークの形成を内生的に扱うモデルへの発展は、今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 増田直紀, 今野紀雄 (2005): 複雑ネットワークの科学, 産業図書.
- 2) Jackson, M.O.(2008): *Social and Economic Networks*, Princeton University Press, Princeton NJ.
- 3) Foster, D.P., Young, H.P.(1993): Stochastically Evolutionary Game Dynamics, *Theoretical Population Biology*, 38, 219-232.
- 4) Young, H.P.(1998): *Individual Strategy and Social Structure: An Evolutionary Theory of Institutions*, Princeton University Press, Princeton NJ.