

社会的ジレンマ解消に向けたステークホルダの特定と利得操作法

今宿誠己[†] 荒井幸代[‡]

^{†‡} 千葉大学大学院工学研究科

1 はじめに

社会において個人が自身の利益の最大化を追求することによって、社会全体の最適性が実現されない状況がしばしば生じる。本研究では、この状況を複数の意思決定主体が相互に連結されたネットワーク上のゲームとしてモデル化する。ネットワーク上の囚人のジレンマにおける系全体の挙動を解析する研究は、ネットワークの統計的指標の観点から Nowak らの研究 [1] をはじめとして多くの知見が示されている。しかし、塚本ら [2] は同じ指標に対しても相反する主張が存在し、さらなる検討が必要であることを述べている。また、多くの既存研究は主体間の相互作用が系全体の挙動に与える影響の解析や、現象を考察する内容である。

本研究では、現象を解析した上で、系全体の挙動を望ましい状態へと制御することを目的とする。はじめに、相互作用としてゲームの利得構造とネットワーク構造が与える影響を解析する。つぎに、系全体の挙動を左右する主体を特定しステークホルダと定義する。その後、ステークホルダに対して利得行列を操作することによって、系全体の挙動を制御する方法を提案する。

2 問題設定と接近法

2.1 ネットワーク上のゲーム

各主体の行動戦略を協調行動 (C; Cooperate) と利己的行動 (D; Defect) とする。このとき、他者との利害関係は表 1 に示す利得行列で定義される。

表 1 において、 S は C を選択するリスク、 T は D を選択する誘因である。表 1 に示す利得行列において、主体 i ($i = 1, 2, \dots, n$) が時刻 t の意思決定において C と D を選択することによって得られる利得 $U_C(r_i(t))$, $U_D(r_i(t))$ はそれぞれ式 (1) で表される。ただし、 $r_i(t)$ は時刻 t において 2.2 節で述べるネットワーク上において、主体 i の近傍のうち C を選択する主体の割合を表す。

$$\begin{cases} U_C(r_i(t)) = (1 - S)r_i(t) + S \\ U_D(r_i(t)) = Tr_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

$-1 \leq S \leq 0$ かつ $T \geq 1$ をみたま囚人のジレンマでは、常に $U_D(r_i(t)) \geq U_C(r_i(t))$ が成り立ち、全主体が D を選択する状態がナッシュ均衡であるが、全主体が C を選択する状態と比較してこの状態はパレート劣位のジレンマに陥る。本研究では、囚人のジレンマの他にスタグハントゲーム、タカ-ハトゲームを対象としたが、本稿では紙面の都合上囚人のジレンマに限定して説明する。

本稿で扱うネットワーク上の主体の意思決定プロセスを図 1 に示す。

2.2 ネットワーク構造

本研究では 1 次元格子のレギュラーネットワーク、スモールワールドネットワーク、ランダムネットワークを取り上げる。スモールワールドネットワークの代表

1. 2.2 節に基づき、 n 個のノードからなるネットワークを生成する。
2. 各ノードに主体を一体ずつ配置し、確率 $r(0)$ で C 、 $1 - r(0)$ で D を割り当てる。
3. 任意の主体 i は時刻 t で近傍主体 v_i と対戦し利得を獲得する。時刻 t で獲得した平均利得を $U(r_i(t))$ とする。
4. v_i の中で最大の利得を獲得した主体の行動を模倣する。

図 1: ネットワーク上の主体の意思決定プロセス

的な生成モデルとして WS モデル [3] があるが、本研究ではクラスター係数の影響を観察するために、すべてのノードの次数 k が一定となる生成アルゴリズム [4] を用いた。このモデルは、次数 k の一次元格子から 2 本のリンクを選択しそれぞれの端点を交換する、という操作を $\beta kn/2$ 本のリンクに対して行う。ここで、 β は文献 [4] のアルゴリズムにおけるリンクの張替え確率を表す。本研究では、このときに張替えられたリンクをショートカット、リンクを張替えられたノードをブリッジビルダと呼ぶ。

3 計算機実験と考察

3.1 ステークホルダの同定と利得操作

ステークホルダの同定に向けた予備実験として以下の設定で実験する。表 1 の S, T に関して、 $S = -0.5$, $1.0 \leq T \leq 2.0$ とし、 T を 0.1 刻みに変化させる。また、ネットワークとしてノード数 $n = 400$ 、各ノードの次数 $k = 6$ 、 $\beta = 0.00, 0.01, 0.10, 1.00$ として生成したネットワークを用いる。 $\beta = 0.00$ の場合は 1 次元格子のレギュラーネットワーク、 $\beta = 0.01, 0.10$ の場合はスモールワールドネットワーク、 $\beta = 1.00$ の場合はランダムネットワークに対応する [6]。ただし、実験中にネットワーク構造は変化しない。実験開始時に C を選択する主体の割合 $r(0) = 0.5$ とする。実験は $t = 2000$ まで行い、最後の 100 ステップの $r(t)$ の平均 $r(t_e)$ (系全体の協力率) を観測する。ただし、 $r(t) = 0.00$ 、もしくは $r(t) = 1.00$ に達した場合はその時点で終了し、それぞれ $r(t_e) = 0.00, 1.00$ とする。また、 β, T の組み合わせに対して、ネットワーク構造と C を選択する主体の初期配置が異なる 10 回の実験を行い、結果から得られる平均値をその組み合わせに対する結果として用いる。

ここで、 β による T に対する $r(t_e)$ の変化を図 2 に示す。横軸と縦軸はそれぞれ T と $r(t_e)$ を表す。

図 2 より、 β の増加にしたがい $r(t_e)$ が低下することがわかる。これは、ブリッジビルダが C の伝播を阻害することが原因である。ブリッジビルダが C の伝播を阻害する様子を図 3 に示す。

図 3(a): ブリッジビルダのリンクが協調コア (協力者同士のリンクだけで構成される連結部分グラフ [7]) 内部の主体から協調コア外部の D を選択する主体に張替えられた場合、ブリッジビルダは協調コア内部において高い利得を獲得する主体を模倣する機会を失う場合である。このとき、ブリッジビルダは D を選択する主体を模倣し、 C の伝播を阻害する。 β が大きくなるほどブリッジビルダの数は増えるため $r(t_e)$ は低下する。

表 1: 利得行列

	C	D
C	1, 1	S, T
D	T, S	0, 0

Resolving Social Dilemmas by Identification of Stakeholders and Payoff Manipulation

Masaki IMAJUKU[†], Sachiyo ARAI[‡]

^{†‡} Graduate School of Engineering, Chiba University

263-8522, Chiba, Japan

[†]imajuku@graduate.chiba-u.jp, [‡]arai@tu.chiba-u.ac.jp

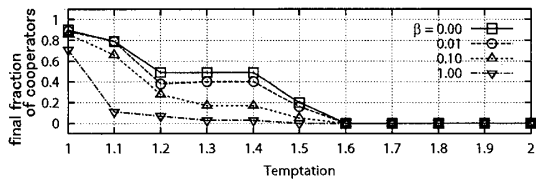


図 2: β による T に対する $r(t_e)$ の変化

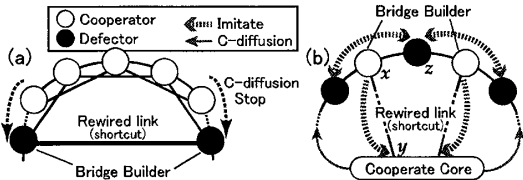


図 3: ブリッジビルダによる C 伝播の阻害

図 3(b): ブリッジビルダ x とショートカットによって接続された主体 y が協調コアの内部において $r_y(t) = 1.00$ の状況で高い利得を獲得しているとき、ブリッジビルダ x は主体 y の C を模倣する。これによって、ブリッジビルダ x は協調コアが到達するよりも早く C を選択する。一方、ブリッジビルダ x の近傍の主体 z を考えると、ブリッジビルダ x が C を選択したことによって $r_z(t)$ が向上し、D を選択することで高い利得を獲得する。ブリッジビルダ x の獲得する利得は、 $r_x(t)$ が低い状況において C を選択するため、近傍で D を選択する主体と比較して低い利得となる。これによって、ブリッジビルダの近傍主体は互いに D を模倣し合うため、C の伝播が阻害される。

図 3(a)(b) は、ブリッジビルダが C の伝播を阻害し、系全体の協力率を低下させる典型的な例である。

ステークホルダの導入: 協力率を低下させる原因となる主体をステークホルダとして同定し、これらの主体に対して合理的に C を選択できるように利得操作を行うことでジレンマを解消することを考える。ここで、ジレンマの解消とは系全体の協力率を向上させることを指す。ステークホルダとして、Betweenness Centrality [8] (以後、 C_i^B と表記) の高い上位 r_p ($r_p = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) の割合の主体を選択する。主体 i が任意の 2 主体間の最短経路に多く含まれるほど C_i^B が高くなる。スモールワールドネットワークでは、ショートカットが系全体の平均経路長を小さくするのに貢献するため、ブリッジビルダの C_i^B が高くなる性質を利用している。また、ステークホルダの利得行列の S, T を操作して S_p, T_p とすることによってジレンマの解消を試みる。具体的には、ステークホルダが最適反応戦略にしたがい行動選択を行う場合に常に C を選択するように、 $S_p = 1.0, T_p = 0.0$ とする。

3.2 実験設定

実験設定は予備実験と同様である。ただし、 $\beta = 0.00$ の場合は主体ごとの C_i^B が一定のため実験の対象としない。また、 $r(0) = 0.1$ とする。

3.3 実験結果

r_p による T に対する $r(t_e)$ の変化を図 4 に示す。横軸と縦軸はそれぞれ T と $r(t_e)$ を表す。また、図 4 は β の違いによる 3 つのグラフから成り、1 段目から 3 段目の順に $\beta = 0.01, 0.10, 1.00$ の各場合に対応する。図 4 より、ステークホルダの利得操作によって、操作なしの場合と比較して $r(t_e)$ が向上し、ジレンマが解消されたことがわかる。これは、ステークホルダが存在する箇所から C が創発するためである。図 5 は $T = 1.3, \beta = 0.01$ の場合の、ステークホルダに対する利得操作の有無による系全体の挙動の差異を表す時空間プロットである。横軸と縦軸はそれぞれ主体番号と時刻 $t[\text{step}]$ を表し、時刻 t において C を選択する主体を \bullet で示す。つまり、図中の黒い部分は協力率が高いことを意味する。また、ステークホルダを $t = 0$ に \blacktriangle で示す。図 5(a)(b) はネッ

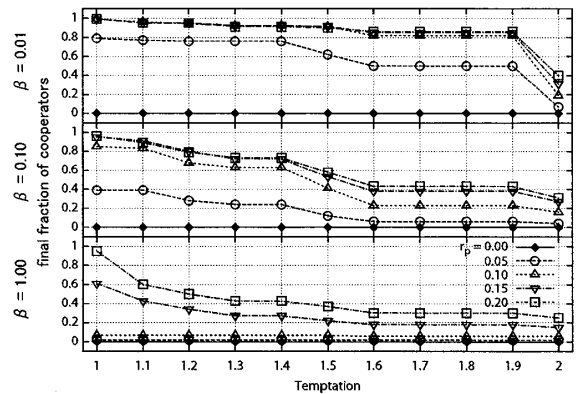
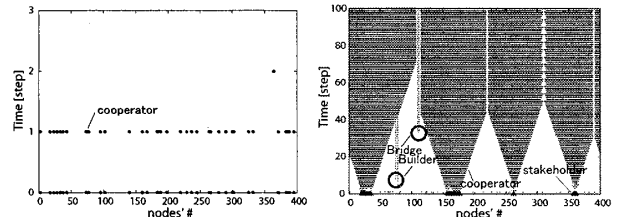


図 4: r_p による T に対する $r(t_e)$ の変化



(a) $r_p = 0.00$ (b) $r_p = 0.05$

図 5: ステークホルダによる C の創発 ($T = 1.3, \beta = 0.01$ の場合)

トワーク構造と C を選択する主体の初期配置が同一の場合の結果である。

図 5(a)(b) の比較によって、ステークホルダに対する利得操作なしの (a) では、 $t = 3$ で C を選択する主体数が 0 となるが、操作ありの (b) では時刻 t が早い段階においてステークホルダの周辺において C が創発され、時間経過とともに C が伝播することがわかる。これは、ステークホルダに対する利得操作が系におけるジレンマ解消に有効であることを示す。

4 まとめと今後の課題

本研究では、ネットワーク上の囚人のジレンマにおいてブリッジビルダが系全体の協力率を左右することを確認した。つぎに、系全体の協力率を左右する主体として、ネットワークの重要なノードの評価尺度である Betweenness Centrality が高い主体から順にステークホルダとみなし、ステークホルダの利得を操作した。また、これによって系全体の協力率が向上することを確認した。

今後の課題として、本研究で提案したステークホルダ同定法の妥当性を考察する必要がある。このためにはステークホルダに与える利得値や T, r_p が系全体の協力率に与える影響を定量的に評価する必要があると考える。

参考文献

- [1] M. A. Nowak, R. M. May, "Evolutionary games and spatial chaos", *Nature*, Vol. 359, pp. 826-829, 1992.
- [2] 塚本鋭, 内田誠, 白山晋, "協調の進化に与える初期ネットワーク構造の影響", 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 5, pp. 397-404, 2009.
- [3] Duncan J. Watts, Steven H. Strogatz, "Collective dynamics of 'small-world' networks", *Nature* **393** pp.440-442, 1998.
- [4] S. Maslov, K. Sneppen, "Specificity and Stability in Topology of Protein Networks", *Science*, Vol. 296, No. 5569, pp. 910-913, 2002.
- [5] P. Taylor, L. Jonker, "Evolutionary Stable Strategies and Game Dynamics", *Mathematical Biosciences*, Vol. 40, No. 1-2, pp. 145-156, 1978.
- [6] M. Imajuku, T. Hiyama, S. Arai, "A Preliminary Analysis of Interactive Effects Between Network Structure and Decision Criteria on the Global Behavior", *ICCAS-SICE 2009*, pp. 1178-1183, 2009.
- [7] J. Gómez-Gardenés, M. Campillo, L. M. Floría, Y. Moreno, "Dynamical organization of cooperation in complex topologies", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 98, No. 108103, 2007.
- [8] Ulrik Brandes, "A Faster Algorithm for Betweenness Centrality", *Journal of Mathematical Sociology*, Vol. 25, pp. 163-177, 2001.