

系のジレンマ環境解消のための Influencer の導入とその配置法の考察

Introduction of Influencers and Investigation of Method of Deployment Influencers for Improvement of Dilemma Environment

栗山俊通*¹ 荒井幸代*¹
Toshiyuki Kuriyama Sachiyo Arai

*¹千葉大学大学院工学研究科
Graduate School of engineering, Chiba University

This paper provides a solution for social dilemmas, where even if each agent acts rationally, whole system falls into Pareto-inferior equilibrium. In this paper, we focus on the multiple agents that are connected by a network. It is defined payoff matrix which has dilemma structure among linked agents. The purpose of this study is to control multiagent's behavior for the desirable one by introducing a kind of *Influencer*. First, we propose the method which is to manipulate Influencer's payoff matrix. If *Influencer* gains large payoff by manipulating payoff matrices and becomes to take cooperative behavior, then *Influencer* induces linked agents to take cooperative behavior. Through this process, agents become to be able to gain a lot of payoff, and makes whole system nearly converge to Pareto-optimal equilibrium. Finally, we also consider where *Influencers* should be deployed. We focus on four measures of network centrality which can be applied to identify the important nodes to propagate a desirable behavior. We examine the effects of these centrality measures on behavior of each agent and that of whole system.

1. はじめに

インターネット、インターネットを介した人間関係、交通網、電力網など、世の中のシステムが大規模、かつ複雑化し、その挙動予測、制御が困難な状況にある。予測や制御の見通しがなければ、システムの持続可能性や安心、安全の実現はもちろん、システム挙動の低下や停止を回避することもできない。したがって、システムが創発する挙動の解析や、創発メカニズムを説明するためのモデリング、さらには挙動を制御するための方法論が要請される。

そこで本研究では、なんらかの意思決定や行動を実行する主体が複数存在し、それらが影響を及ぼし合うシステム（以下、系とよぶ）を対象として、系の挙動解析、及び、解析に基づいた制御法を提案し、その有効性を評価する。系の構成要素である主体は自律的に意思決定し、主体間の繋がりはネットワークのリンクとして明示的に記述する。また、隣接する主体間には利害関係があることを前提とし、ジレンマ構造をもつ利得行列を用いてこれを表す。系を制御するアプローチとして、「系全体」の挙動に影響のある主体の特定手法を考察し、この主体の意思決定戦略を利得操作によって変化する方法を取り上げる。

2. 問題設定

2.1 他者との利害関係

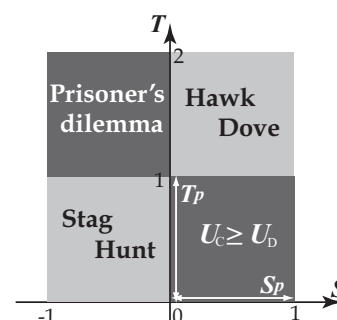
各主体の行動戦略を協調行動 (C; Cooperate) と利己的行動 (D; Defect) とする。このとき、他者との利害関係は表 1 に示す利得行列で定義される。

表 1 において、 S は C を選択するリスクで、 T は D を選択する誘因である。 S, T の値によって複数のゲームを表現できる。本研究で扱うゲームを S, T の値によって図 1 のように分類する。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

連絡先: 栗山俊通, 千葉大学大学院工学研究科, 千葉市稲毛区弥生町 1-33, 043-251-1111(代表), t.kuriyama0317@chiba-u.jp

表 1: 利得行列

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

図 1: S, T によるゲームの分類

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。

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

各主体が合理的であるという仮定の下では、系全体の挙動は $U_C(r_i(t))$ と $U_D(r_i(t))$ の大小関係に依存する。ゲームの構造によって $U_C(r_i(t))$ と $U_D(r_i(t))$ の関係は異なり、それぞれのゲームに対する S, T の値と $r_i(t)$ の値に依存する。以下、本研究で扱うゲームについて、利得の観点からそれぞれの特徴を述べる。

■ スタグハントゲーム (以後図中では SH): 表 1 の利得行列において、 $-1 \leq S \leq 0$ かつ $0 \leq T \leq 1$ が成り立つゲームをスタグハントゲームと呼ぶ。このゲームでは、主体 i の合理的行動は $r_i(t)$ の値によって変化する。 $U_C(r_i(t))$ と $U_D(r_i(t))$ の大小関係が変化する点、すなわち $U_C(r_i(t)) = U_D(r_i(t))$ をみたとす $r_i(t) = \frac{S}{T+S-1}$ を閾値 θ_i と定義する。主体 i の合理的行動選択は、 $r_i(t) < \theta_i$ のとき D、 $r_i(t) \geq \theta_i$ のとき C となる。全主体が C を選択する状態、もしくは全主体が D を選択する状態がナッシュ均衡である。また、全主体が C を選択する状態はパレート最適である。

■ **タカハトゲーム** (以後図中では HD): 表 1 の利得行列において, $0 \leq S \leq 1$ かつ $T \geq 1$ が成り立つゲームをタカハトゲームと呼ぶ. このゲームでは, 主体 i の合理的行動は $r_i(t)$ の値によって変化する. 主体 i の合理的行動選択は, $r_i(t) \leq \theta_i$ のとき C, $r_i(t) > \theta_i$ のとき D となる. 半数の主体が C, 残りの半数が D を選択する状態がナッシュ均衡である. また, 全主体が C を選択する状態はパレート最適である.

■ **囚人のジレンマ** (以後図中では PD): 表 1 の利得行列において, $-1 \leq S \leq 0$ かつ $T \geq 1$ が成り立つゲームをジレンマゲーム (囚人のジレンマ) と呼ぶ. このゲームでは, 常に $U_D(r_i(t)) \geq U_C(r_i(t))$ が成り立つため, 主体 i は任意の $r_i(t)$ に対して D を選択することが合理的である. したがって, 全主体が D を選択する状態が唯一のナッシュ均衡である. 一方, 全主体が D を選択する状態は, 全主体が C を選択する状態と比較してパレート劣位である.

2.2 ネットワーク構造

本研究では, 相互作用を及ぼし合う主体間の関係をネットワークを用いて表す. 本研究ではネットワーク生成モデルのうちの一つである WS モデル [Watts 98] のうち, 次数の違いにより主体に差をもうけないために, 全てのノードの次数 k が一定となるネットワーク [Maslov 02] を設定した (図 2). なお, 図中の $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ はリンクの張替え確率を表す.

1. n 個のノードを環状に配置し, それぞれのノードについて左右 $k/2$ 個までのノードとリンクを張る.
2. 張替えの行われていないリンクをランダムに二つ選択.
3. 2 で選択したリンク張り替えによって既存のリンクが二重にならないように末端を張り替える.
4. 張り替えたリンク数が $\beta nk/2$ になるまで手順 2, 3 を繰り返す.

図 2: 次数一定 WS モデルの生成アルゴリズム

本研究では図 2 により生成されたネットワークにおいて, 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.

2.3 主体の意思決定規範

本研究では, 以下の意思決定規範を用いる.

■ **BestTakesOver**: BestTakesOver [Tomassini 06] は, 相互作用を及ぼす他主体のうち, もっとも高い利得を獲得している主体の行動を模倣する戦略である. 以後, BestTakesOver を BTO と表記する.

3. 提案手法

本研究では, 隣接する主体間の利得行列に 2.1 節に示した性質がある場合をジレンマ構造といい, 個々の最適な選択が全体として最適な選択とはならない状況をジレンマ環境と呼ぶ.

本章では, 2. 章に示したネットワーク構造, 意思決定規範の環境下で相互作用する主体の間のゲームにジレンマ構造がある時, 系全体がジレンマ環境に陥る場合に, 周辺主体に協調行動を選択させ, ジレンマ環境を改善する働きを持つ利得行列の異なる Influencer を導入し, その改善度を計算機実験によって算出した. ここでのジレンマ環境の改善とは, 全主体が獲得する利得の平均を増加させることを指す.

3.1 Influencer の導入

文献 [今宿 10] では, 一部の主体の利得行列を操作してその主体から C を伝播させることを目標としている. 利得操作を行った主体を Influencer と定義する. 本研究ではそれに加え, Influencer を系全体に C を促すように配置する手法の考察を行う. C を伝播させる場合, ネットワークにおけるブリッジビルダによって伝播が阻害されるという性質 [今宿 10] から, プ

リッジビルダを Influencer とするような Influencer の配置が有効であると考えられる. 本研究は, 主体のネットワークにおける中心性を図る尺度としてネットワーク中心性指標 [金 09] を用いて Influencer の配置問題に着手する.

3.2 Influencer の配置

本研究では, Influencer の配置法として, ネットワーク中心性指標に着目する. ネットワーク中心性指標には以下に示す 4 つの指標が挙げられる.

■ **媒介中心性: Betweenness-Centrality**: 任意の二つのノード間を結んだときに, 中継地点になるノードを高く評価する. 具体的には, 2 ノード間を結ぶ最短経路上に位置する程度を中心性指標としたものである. ネットワークに含まれるノード i の媒介中心性は次のように定式化される.

$$C_i^B = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}$$

- g_{jk} : ノード j とノード k の間の最短経路数
- $g_{jk}(i)$: ノード j とノード k の間の最短経路のうちノード i を通る経路数
- **情報中心性: Information-Centrality**: 2 ノード間の全ての経路の長さに応じて (短いほど高く評価されるように) 重み付けし, 中心性を算出する.

$$C_i^I = \frac{n}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{l_{ij}}}$$

- n : ノード数
- l_{ij} : ノード対の情報量 (2 ノード間を結ぶ経路が複数あった場合, その経路長の逆数をその経路の情報量とし, それを経路数だけ足したもの)

■ **離心中心性: Eccentricity-Centrality**: 任意のノードから他の頂点への距離の最大値 (離心数) が小さければ, そのノードはネットワークにおいて中心性が高いとした中心性指標である.

$$C_i^E = \frac{1}{\max(d_{ij})}$$

- d_{ij} : ノード i と j を結ぶ経路長
- **近接中心性: Closeness-Centrality**: 離心中心性が離心数の最大値にしか着目しなかったのに対し, 近接中心性では, 離心数の合計に着目し, その合計値が小さければ中心性が高いとした中心性指標である.

$$C_i^C = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}}$$

上記の中心性指標はどれもある任意の 2 主体を結ぶ経路長を評価尺度として持っているため, ネットワークにおいてショートカットを形成するブリッジビルダが中心性の高い主体として Influencer になることとなる. 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, C の伝播を阻害する [今宿 10] ブリッジビルダの中心性が高くなる性質を利用しており, この配置法が有効であることが予想される. Influencer として, 上記の 4 つの中心性指標において中心性の高い上位 r_I ($r_I = 0.20$) の割合の主体を選択する.

3.3 Influencer 導入による最適な意思決定の誘発

本節では, 隣接する主体に C を選択させるよう利得操作を行った Influencer を導入することでジレンマ環境を解消することを目的とする. また, Influencer の配置法についても前述のネットワーク中心性指標を用いて考察する.

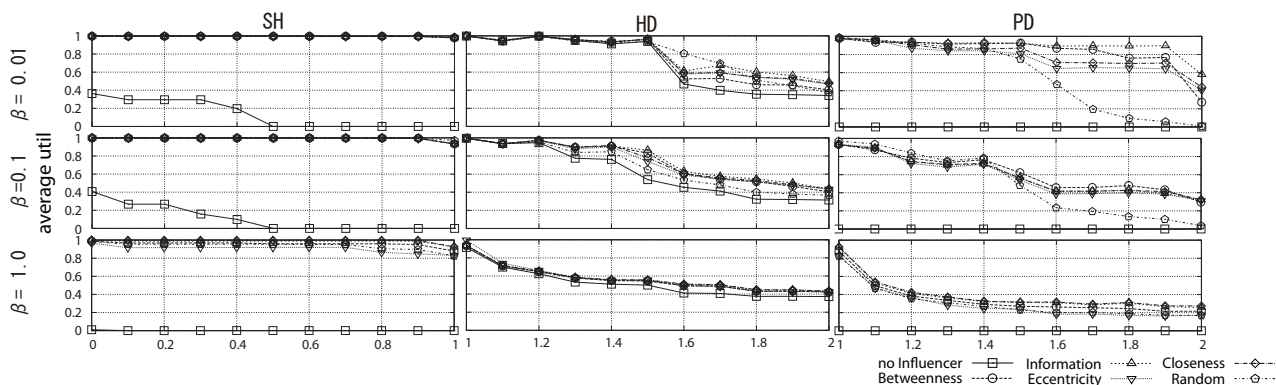


図 3: 中心性指標の違いと平均獲得利得との関係

3.3.1 実験設定

■ **Influencer** の利得操作: Influencer の利得行列において, S, T それぞれの値を操作して 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, Influencer が常に $U_C(r_i(t)) > U_D(r_i(t))$ を満たすように, $S_p = 0.5, T_p = 0.0$ とする. 図 1 に示すように, $S_p = 0.5, T_p = 0.0$ では常に $U_C(r_i(t)) \geq U_D(r_i(t))$ をみたく. ただし, 利得操作は他の主体の C 選択のための操作であり, 実際に隣接する主体と対戦して獲得する利得は他の主体と同様に表 1, 及び式 (1) に従うものとする. これは, 利得操作が主体の獲得する利得に影響を及ぼすことを防ぐためである.

■ **ゲームの利得構造**: ゲームの利得構造として「タカハトゲーム」「スタグハントゲーム」「囚人のジレンマ」を用いる. また, 表 1 の S, T に関して, タカハトゲームでは $S = 0.5, T \in [1.0, 2.0]$, スタグハントゲームでは $S = -0.5, T \in [0.0, 1.0]$, 囚人のジレンマでは $S = -0.5, T \in [1.0, 2.0]$ とし, それぞれのゲームにおいて T の値を 0.1 刻みに変化させる.

■ **ネットワーク構造**: ネットワークは図 2 に示したネットワーク生成法を用いて生成する. 主体数 $n = 400$, 各主体の次数 $k = 6$ として, $\beta = 0.01, 0.10, 1.00$ として生成したネットワークを用いる. $\beta = 0.01, 0.10$ 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. 実験中にネットワーク構造は変化しないものとし, 生成したネットワークの各ノードがそれぞれの主体に相当し, 2 ノード間のリンクが 2 主体間の相互作用を及ぼし合う関係を表す.

■ **意思決定規範**: 個々の意思決定規範として「BTO (Best-Takes-Over)」を用いる. ただし, 各主体は同一の意思決定規範に従うとする.

BTO: 主体 i は時刻 t で近傍の全ての主体と各 1 回のゲームを行い, $t + 1$ において式 (2) をみたく行動を確率 $P = 1$ で選択する. ただし, \mathcal{V}_i は主体 i の近傍主体の集合を表し, s_j は主体 j が時刻 t において選択した行動を表す.

$$\arg \max_{s_j, j \in \mathcal{V}_i} U_{s_j}(r_j(t)) \quad (2)$$

■ **パラメータ設定**: 実験開始時に C を選択する主体の割合 $r(0)$ を $r(0) = 0.1$ とし, 各主体に対して $t = 0$ において確率 $r(0)$ で C, 確率 $1 - r(0)$ で D を選択するとする.

実験は, $t = 2000$ までを行い, 全試行終了までに獲得した 1 主体あたりの利得 (平均獲得利得) を表 1 の利得行列及び, 式 (1) に基づき算出する. また, $\langle \beta, T, r(0), \text{意思決定規範} \rangle$ 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 100 回の実験を行い, 100 回の獲得利得の平均値を変数の組み合わせに対する評価値とする.

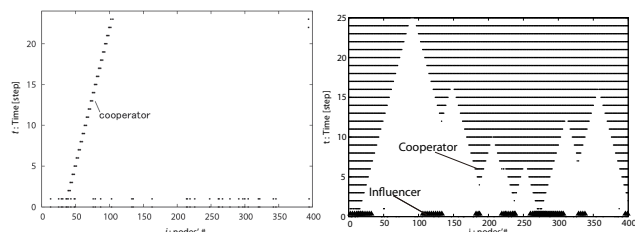
■ **平均獲得利得の正規化**: 1 主体が獲得する平均利得の最大値が 1 になるよう式 (3) によって正規化した. U_{all} は全試行終了後に全主体が獲得する利得の合計, t_{max} は試行回数, n はノード数をそれぞれ表している. u_{max} は表 1 のゲームで 2 主体間がパレート最適な行動を選択した時の 1 主体が獲得する平均利得で $u_{\text{max}} = \max\{1, \frac{S+T}{2}\}$ である. ここで 1 はリンクする 2 主体がともに協調行動 C を選択した場合の 1 主体が獲得する利得である. 一方 $\frac{S+T}{2}$ はリンクする 2 主体が一方は協調行動 C, もう一方が利己的行動 D を選択した場合の 1 主体が獲得する平均利得である.

$$U_{\text{norm}} = \frac{U_{\text{all}}}{n \cdot u_{\text{max}} \cdot t_{\text{max}}} \quad (3)$$

3.3.2 実験結果

Influencer の配置法による T に対する平均獲得利得の変化を, ゲームの利得構造とネットワーク構造ごとに図 3 に示す. 図において, 横軸と縦軸はそれぞれ T と平均獲得利得を表し, ゲームの利得構造とネットワーク構造の組み合わせによる 9 つのグラフから成る. 1 段目から 3 段目の順に $\beta = 0.01, 0.10, 1.00$ の場合, 1 列目から 3 列目の順にゲームの利得構造が SH, HD, PD の各場合に対応する.

図 3 を見ると, Influencer を導入しない場合 (図中, no Influencer) に比べ, 主体の獲得する利得が向上しており, ジレンマ環境の改善が実現できた. そこで, ジレンマ環境が改善される様子を主体の挙動の時系列表示にて示す. 図 4 は, スタグハントゲームにおいて Influencer を導入した場合の主体の挙動を時系列表示したものである ($T = 0.1, \beta = 0.01$). 図 4(a) は Influencer を導入しない場合, (b) は導入した場合の主体の挙動を表したものである. 図における横軸はノード番号, 縦軸は時刻 $t[\text{step}]$ を表し, 時刻 t に C を選択する主体をプロット (●) で表す. また, 図中の ▲ は Influencer を表す.



(a) Influencer なし (b) 媒介中心性による配置

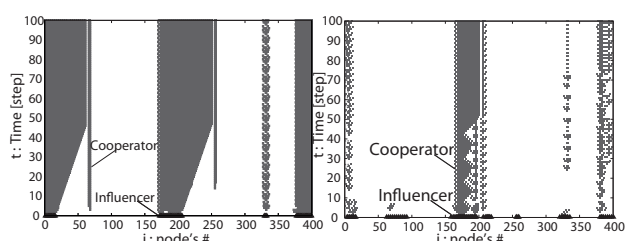
図 4: スタグハントゲームにおけるジレンマ環境の改善

図 4(a) を見ると, Influencer を導入しない場合には, C は伝播しておらず, ジレンマ環境に陥っていることが確認できる. 一方, (b) を見ると, Influencer から C が伝播し, ジレンマ環

境の改善に貢献していることが確認できる。これは、利得操作により、自分が C を選択し、相手の主体が D を選択した際に獲得する利得を $S_p = 0.5 (> -0.5)$ と設定したことにより、C 選択時に獲得する利得値が上昇し、C の伝播につながったと考えられる。

一方、ゲームの利得構造がタカハトゲーム (図中 HD) の場合、図 3 を見ると、他のゲーム時に比べ、Influencer 導入によるジレンマ環境の大幅な改善は確認できない。これは、タカハトゲームにおいて $S = S_p = 0.5$ であり、C 選択時に他の主体に比べ大きい利得を獲得することができないため、利得操作が C の誘発に貢献できていないことが理由としてあげられる。

最後に囚人のジレンマ時において、各中心性による配置によって平均獲得利得に差が生じる場合について述べる。図 3 における $\beta = 0.01, T = 2.0$ の場合を見ると、情報中心性による配置と媒介中心性による配置では、平均獲得利得に大きな差が生じていることがわかる。この二つの配置による C の伝播の様子を時系列表示した図を図 5 に示す。図 5(a) は情報中心性による Influencer 配置の場合、(b) は媒介中心性による配置である。



(a) 情報中心性による配置 (b) 媒介中心性による配置

図 5: 配置法の違いによる主体の挙動の差

二つの図を見ると、情報中心性による配置では協調が伝播しているのに対し、媒介中心性による配置では協調の伝播を確認することができない。これは、C 選択者同士のリンクだけで構成される連結部分 (協調コア) が存在することにより、そこから C が伝播する性質 [今宿 10] が大きく関係している。しかし、 $T = 2.0$ の場合、Influencer を並列に配置し、協調コアを生成する必要がある。本研究では、計算機実験により、Influencer を 9 主体並列に並べて配置することによって協調コアを形成し、C の伝播を発生させることが可能であることを確認した。そこで、Influencer を 9 主体並べた場合 (図 6) の系の挙動について考察する。

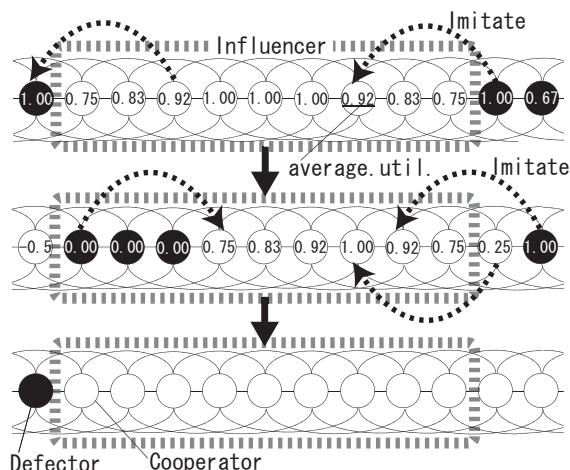


図 6: Influencer を 9 主体並列配置

図 6 に示すように、協調コアから右側に C が伝播していることが確認できる。これが次の試行においても繰り返され、C の伝播が発生している。これは、2 段目の状態で、C が並列に 7 主体並んでいるため、中央の主体が 1.0 の大きな利得を獲得し、その主体が模倣の対象となることが原因である。一方、Influencer を 8 主体並列に並べると、試行を 1 回行った場合、図 6 時に比べ、C を選択する主体数が 1 主体少ないため、C が並列に 6 主体並ぶ。しかし、これではコア内に 1.0 の利得を獲得する主体は存在しなくなり、コアとの境界となる D 主体 (図 6 では 1 段目の右端の主体) が 1.0 の利得を獲得しているため、この主体が模倣の対象となり、C の伝播が発生しないのである。図 6 では、説明の簡便性のため、並列して配置された Influencer は全て C を選択させているが、Influencer のうち 1 主体でも C を選択する主体があれば Influencer 全てが C を選択し、同様の結果が得られることも確認している。

そこで実際に実験に用いたネットワークのうち、ノード番号 150~220 までに着目すると、情報中心性による配置では、ノード番号 172 から 206 までの全てを Influencer として配置している。対して媒介中心性では、ノード番号 158 から 218 まで Influencer が分布しているが、散在した配置となっている。これは、中心性の算出法に原因がある。媒介中心性では、2 ノードを結ぶ最短経路のみに着目し、経路に含まれるノードを高く評価している。このため、ブリッジビルダが極端に中心性の評価が高くなる。一方、情報中心性では、最短経路以外の経路も評価の対象とするため、ブリッジビルダに近接した主体の評価も高くなる。そのため、情報中心性による配置では、並列した配置が多くなるのである。そのため、情報中心性による配置では、並列した Influencer が協調コアとなり、C の伝播を促したと考えられる。対して、媒介中心性による散在した配置では、Influencer ではない主体が D を選択した場合、大きい利得を獲得してしまうため、この主体に隣接する主体は D を模倣してしまい、協調コアとなる連結部が形成できず、C の伝播を発生させることができないと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、主体間に存在する利得行列のジレンマ構造により、ネットワーク全体の最適性が実現されない問題について Influencer 導入により主体の最適な意思決定の誘発を試みた。結果、Influencer を導入しない場合に比べ、主体の獲得する利得を大きく向上させることに成功した。また、Influencer の配置の影響が大きいことを確認した。

今後の課題として、本研究の知見に基づいて、高い利得を獲得する配置法の特徴抽出を行い、Influencer 数を最小に抑えつつ、効果的な配置法を考えることが挙げられる。また、利得操作や Influencer 導入に要するコストを設定し、導入の有意性を検証することも今後の課題である。

参考文献

[Watts 98] Duncan J. Watts, Steven H. Strogatz : Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Vol. 393, No. 6684, pp. 409-410 (1998)

[Maslov 02] S. Maslov, K. Sneppen : Specificity and Stability in Topology of Protein Networks, *Science*, Vol. 296, No. 5569, pp. 910-913 (2002)

[Tomassini 06] Marco Tomassini, Leslie Luthi, Mario Giacobini : Hawks and Doves on small-world networks, *Phys.Rev. E* **73** 016132 (2006)

[今宿 10] 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, 情報処理学会創立 50 周年記念 (第 72 回) 全国大会 講演論文集 (2) 2X-6, pp.557-558, (2010)

[金 09] 金明哲, 鈴木努 : R で学ブデータサイエンス 8 ネットワーク分析, pp. 41-74, 共立出版, (2009)