

リンクの太さの不均一性が，協力の進化を促進する条件

The condition that the heterogeneity of link weights promotes the evolution of cooperation

岩田 学*¹ 秋山 英三*²
Manabu Iwata Eizo Akiyama

*¹筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

*²筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

In the real world, when each individual interacts with others, it's natural that frequency or amount of these interactions isn't identical. For example, one individual may interact with his friend often, but he may not do so with other individuals with the same frequency level. Heterogeneity of "link weights" between individuals have the strong effect on many kinds of human activities. Precedence researches have shown that there are many networks constructed by individuals with links with heterogeneous weight, and lots of studies have been done to analyze the effect of the heterogeneity on various behaviors. We investigate how the heterogeneity of "link weights" between individuals affects the evolution of cooperation. By operating theoretical calculation and computer simulation, we derive the condition of link weights to promote cooperation in the society. Our result shows the mechanism that heterogeneity of "link weights" penetrate cooperation, which has not been revealed ever before.

1. はじめに

現実社会における協力行動の進化については様々な分野で研究が成されているが，その1つにゲーム理論，特に囚人のジレンマを用いた研究がある．囚人のジレンマの状況下でも協力の進化を可能にするメカニズムの1つとして，ネットワーク互恵が知られている．これは，空間的制約等により特定の相手のみと付き合う場合に，集団内に協力者同士の塊が生じ，協力行動が進化するものである．

ネットワーク互恵に着目した研究は数多くある ([Nowak 92] 等) が，これらの多くは，プレイヤー同士の付き合いの頻度や量を皆均一であると仮定しており，現実的ではない．一方，最近では，付き合いの頻度や量 (ネットワークにおけるリンクの太さ) が不均一であるときに協力が進化するか否かを調べた研究もある ([Du 08] 等)．しかし，これらの研究では，プレイヤー間のリンクの太さの不均一性が如何にして協力の進化を促すのか，そのメカニズムについては解明されていない．

以上を踏まえて本研究では，上記のメカニズムを解明するため，協力の進化を促すためのリンクの太さの条件を導出する．

2. 計算モデル

本研究では，進化ゲームの枠組みに従い次の手順で囚人のジレンマゲームのシミュレーションを行い，集団における協力の進化を分析する．なお，協力の進化のメカニズムの解明を可能とするため，集団のネットワーク構造はシンプルな1次元レギュラーネットワークとする．

(a) 10,000人のプレイヤーを1次元レギュラーネットワーク上に配置する．各プレイヤーは太さ w の太リンクと太さ $2.0-w$ の細リンクを1本ずつ有し，隣接した2人の相手と繋がる．また，リンクの太さ (w 及び $2.0-w$) は，全プレイヤーが同一の値を取るものとする．

(b) 各プレイヤーは「協力」または「裏切」の戦略を取り，隣接した相手とゲームを行う．プレイヤーは，表1の利得行列に従う利得に相手とのリンクの太さを乗じた値を得るものとし，全対戦の獲得利得の合計をプレイヤーの総利得とする．

表 1: 囚人のジレンマの利得行列

	協力	裏切
協力	(1, 1)	(0, b)
裏切	(b , 0)	(0, 0)

(c) 全対戦終了後，プレイヤーは隣接したプレイヤーのうち最も総利得の高いプレイヤーの戦略を模倣し，自身の次ラウンドでの戦略とする．

(d) (b) ~ (c) までを1ラウンドとし，これを (a) の後に定められたラウンド数だけ繰り返し行う．

(e) 協力者を裏切るときに得る利得を b とする ($b=1.1, 1.2, \dots, 1.9$)．プレイヤー間のリンクの太さは， $w \in [1.0, 2.0]$ とする．太リンクの太さが w ，細リンクの太さが $2.0-w$ であるため， $w=1.0$ の場合はリンク太さが均一なネットワークとなり， w が 2.0 に近づくほど太さの不均一性が大きくなる．

3. シミュレーション結果

各試行において，1,000 ~ 1,100 ラウンド間の協力率 (集団における協力者の数の割合) の平均値を算出する．これを1試行における結果とし，100試行の平均を最終出力値とする．

計算結果を図1に示す．理由は後述するが，リンクの太さと協力率の関係は， $b=1.6$ の範囲と $b=1.7$ の範囲で異なる．そこで， $b=1.6$ の例として $b=1.2$ の場合の結果を， $b=1.7$ の例として $b=1.8$ の場合の結果を記載する．グラフの横軸は，太リンクの太さ w である．縦軸は，リンクの太さが不均一な場合に，均一な場合よりも協力率がどの程度高いのかを示す．

図より， $b=1.2$ ($b=1.6$) の場合，リンク太さ w が大きいほ

連絡先: 岩田学, 筑波大学大学院秋山研究室, 茨城県つくば市天王台 1-1-1, 029-853-5571, miwata@sk.tsukuba.ac.jp

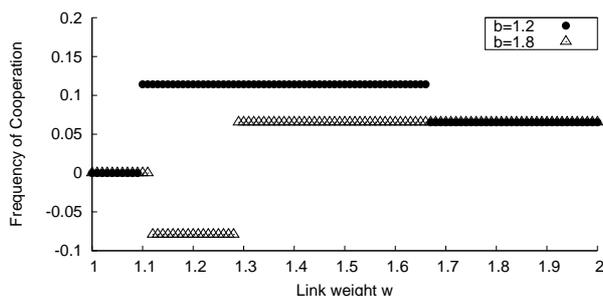


図 1: 太リンクの太さ w と協力率 ($b=1.2, 1.8$)

ど、即ち太さが不均一であるほど協力率が高い。一方、 $b=1.8$ ($b=1.7$) の場合は w がある値に達するまでは太さが均一な場合の方が協力率が高いが、それを超えると不均一な方が協力率が高くなる。また、全般的に、リンクの太さ w がある値に達するまで協力率は一定であるが、その値を超えると協力率が階段状に変化している。このことから、リンクの太さ w には協力率の増減を決定する明確な閾値が存在すると考えられる。

4. リンク太さの不均一性が、協力を促す条件

何故リンクの太さ w に対して協力率が階段状に変化するのかわかるため、まず例としてプレイヤー数 6 人の小集団を考える。その中で 1 人のプレイヤーに注目し、彼の戦略が「裏切から協力に変化する」(協力戦略が拡大) 場合と、「協力から裏切に変化しない」(協力戦略が維持) 場合がどのようなときに発生するかを調べる。協力戦略が拡大/維持されるか否かはプレイヤー間の利得の大小関係に依存するため、大小関係がリンクの太さ w により異なるケースを抽出して調べる。

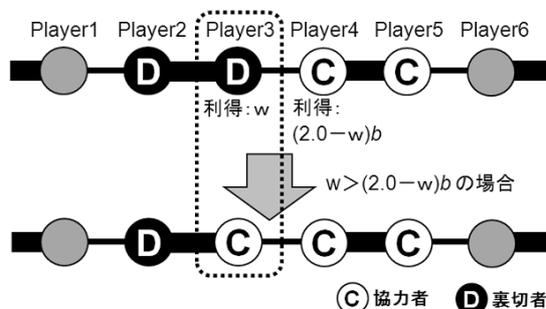


図 2: 協力戦略の拡大

図の Player3 に着目し、彼の戦略が裏切から協力に変化する(協力戦略の拡大) ときの集団の状況及び w の条件を図 2 に示す。同様に、Player3 の戦略が協力から裏切に変化しない(協力戦略の維持) ときの状況及び w の条件を図 3 に示す。これらの図より、協力戦略が拡大するためのリンクの太さ w の条件として「 $w > (2.0 - w)b$ 」と「 $2.0 > wb$ 」の 2 通りが考えられ、これらを整理して「拡大条件: $w > 2b/(b+1)$ 」及び「維持条件: $w < 2/b$ 」が得られる。

次に、上記の 2 条件がプレイヤー数の多い大集団での協力の進化にも対応するのかわかるかを調べる。拡大条件 $2b/(b+1)$ 及び維持条件 $w < 2/b$ の大小関係については、 $b=1.6$ のときには $2b/(b+1) < 2/b$ となり、 $b=1.7$ のときには $2b/(b+1) > 2/b$ となる。そこで、図 1 と同様に、 $b=1.6$ の例として $b=1.2$ の

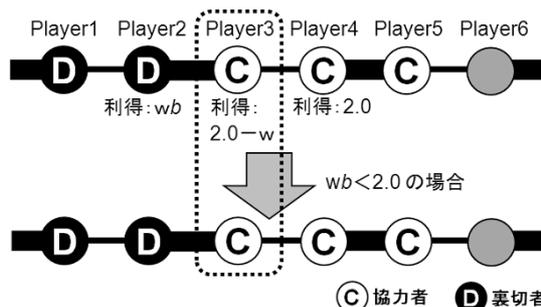


図 3: 協力戦略の維持

ときの協力率を、また $b=1.7$ の例として $b=1.8$ のときの協力率を図 4 に再掲する。

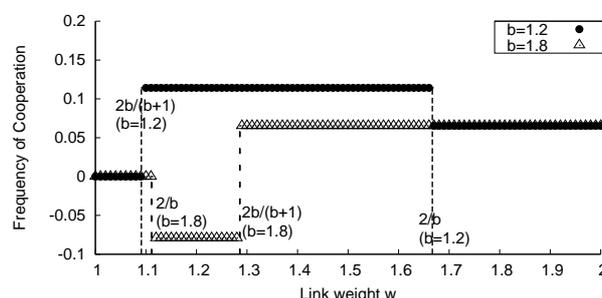


図 4: 太リンクの太さ w と協力率 (再掲)

図より、 $b=1.2$ では拡大条件及び維持条件の両方を満たす w の範囲で協力率が高く、 $b=1.8$ では 2 つの条件のいずれかを満たす w の範囲で協力率が高い。つまり、上述した「小集団において、あるプレイヤーの協力戦略が拡大/維持される」ような w の範囲で、集団の協力率も高くなるといえる。以上より、協力の進化を促進するためのリンクの太さ w の条件が、「 $w > 2b/(b+1)$ 」及び「 $w < 2/b$ 」で表されることを示した。

5. おわりに

本研究では、1 次元レギュラーネットワークにおいて、プレイヤー間のリンクの太さの不均一性が協力の進化に与える影響を分析した。その結果、太さが不均一である方が、均一な場合よりも協力が進化しやすいことが分かった。また、協力者を裏切る利得 b が小さい場合はリンク太さの不均一性が大きいほど協力率は高く、 b が大きい場合は協力率が最も高くなるようなリンク太さの最適値が存在することが分かった。

この結果について、プレイヤー数の少ない小集団での協力戦略の伝播を分析し、協力が拡大/維持されるためのリンク太さの条件を導出した。また、プレイヤー数の多い大集団においても、上記のリンク太さの条件で協力の進化を説明できることを明らかにした。

参考文献

- [Nowak 92] Nowak, M. A, May, R. M.: *Nature*. Vol. 359, pp. 826–829 (1992).
- [Du 08] Du, W., Zheng, H., Hu, M.: *Physica A*. Vol. 387, pp. 3796–3800 (2008).