

非均質 Image Score に基づくネットワーク形成過程における個体差と戦略模倣の影響分析

Impact of strategy imitation and individual differences in the network formation process based on non-homogeneous Image Score

岡崎 幹^{*1}
Miki Okazaki

赤井 研樹^{*1}
Kenju Akai

西野 成昭^{*1}
Nariaki Nishino

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, The University of Tokyo

Most social issues such as bullying or environmental problems are caused by each person's decision-making of giving priority to personal rationality in the conflict situations between overall social profit and individual rationality. To solve the problem called social dilemma, many researchers investigated the mechanism that promotes the emergence of cooperative action. In this study we construct the model based on Nowak's indirect reciprocity. To describe the psychological changes accurately we introduced the Heider's balance theorem. To focus on human relationships we extracted the cooperative relation through image score and represented it by network that affects decision-making and exchange of information. Based on this model we analyzed the emergence of cooperative relation, especially the effect of strategy imitation and individual differences. As a result we obtained following findings. (1) Individual differences of gain change in the cooperative action cause decrease of cooperative relations. (2) Strategy imitation promote emergence of cooperative relationship.

1. 背景

現在我々が抱える環境問題やいじめ問題等の社会問題の多くは、全体合理性と個人合理性が対立する状況下で、個人の意思決定が個人合理性に傾倒することによって全体利益が損なわれる事で起こっていると考えられる。Dawes(1980)はこの構造を社会的ジレンマと呼び、次の2点の性質によってこれを定義した[1]。

- ① 他の社会構成員の行動に依らず、各個人が裏切り行動によって得る利益は、協力行動によって得る利益よりも多い。
- ② しかし全員が同一に協力行動をとる場合は、全員が同一に裏切り行動をとった場合よりも、全ての個人にとってより多くの利得が得られる。

この社会的ジレンマ解決のために、協力行動の創発を促す仕組みの研究が多くなされてきた。Nowak(1998)は、互恵性理論[2]を発展させ、「image scoring」という評価の概念を導入し、「相手に協力行動をすれば、周囲からの自身に対する評価が上がり、相手以外の他の誰かからも協力行動を返してもらえ」という間接的互恵関係という仕組みによって、協力行動の進化的安定をシミュレーションによって説明した[3]。

本研究では Nowak の導入した間接的互恵関係に基づく協力関係創発モデルを基礎とした上で、より人間の心理変化に忠実なモデルとするため、Heider(1958)の認知的均衡定理[4]との統合を行った。また人間関係に焦点を当てるために、image score を関係性として抽出しネットワークとして協力関係を記述し、またそのネットワークによる意思決定への影響及び情報の不完全性を導入した。

このモデルの下、社会的ジレンマ状況における協力関係の創

発過程に多様な要素、特に戦略模倣と個体差が与える影響の分析を目的とする。

2. モデル

まず n 人からなる社会集団を考える。 n 人から二人が選ばれ、その二者間でのやりとりを1ターンとし、この二人を入れ替えて逐次的にやりとりを繰り返していく。

2.1 意思決定条件と協力・非協力行動

各ターンでは、 n 人からランダムに寄付者が一人選ばれる。このプレイヤーを D と呼ぶ。そして D は、 q の確率で自身と協力関係(後述)を結ぶプレイヤーから、 $(1 - q)$ の確率でそうでないプレイヤーから、ランダムで受領者を一人選ぶ。但し、自身と協力関係を結ぶプレイヤーがいない時など、選ぶ対象が存在しない場合は、全体からランダムで選択する。このプレイヤーを R と呼ぶ。また説明の都合上 D, R 以外のプレイヤーを O と呼ぶ。1ターンが終わると次の D, R が選ばれ逐次的にやりとりが繰り返されていく。

そして D は R に対して取れる行動は協力行動か非協力行動であり、その意思決定は D が R に対して持つ image score である S_{DR} が高い程協力的になる。この image score とは各プレイヤーが全プレイヤーに対して持っている評価を表すパラメータである。そしてその協力非協力の閾値となるパラメータとして各プレイヤーは戦略パラメータ k_i を持っており、その値より相手への image score 高い時に協力行動を取る。その条件と各行動による利得変化及び評価の高低の詳細は表1の通りである。

表1. 意思決定条件と利得変化

条件		$k_D \leq S_{DR}$	$k_D > S_{DR}$
D の R に対する評価		高い	低い
意思決定		協力	非協力
利得変化	D の利得	1減少	変化なし
	R の利得	p_D 増加	変化なし

ここで協力行動の際に R が受領する利得 p_D は D が持つ能力と捉えることが可能であり、現実において能力とは人それぞれ異なるはずである。本研究ではこの能力値が各プレイヤーで $\{1,2,3\}$ の異なる値を取る設定を「能力差あり」とし、一律で2となる設定を「能力差無し」として記述する。

2.2 image score

image score が現実の評判を表すならば、その評判は各人の行動に応じて変化していくはずである。本研究では D の行動に応じて他プレイヤーから D への image score が更新される。また Nowak の間接互惠理論においては、協力行動を取ったプレイヤーに対する image score は上がり、非協力行動に対しては下がる。本研究においてもそれを基礎としつつ、image score を更新する。

(1) R からの image score S_{RD} の更新

Nowak の用いた仕組みを基礎とし、協力行動をしてくれた相手に対しては評価が上がり、非協力した相手には評価が下がるという仕組みを用い、 S_{RD} を次の値に更新する。

- ① D が協力した場合： $S_{RD} + (p_D - 1)\Delta S$
- ② D が非協力した場合： $S_{RD} - \Delta S$

(2) O からの image score S_{OD} の更新

R からの場合と異なり、このケースでは3人の対人関係を対象にすることとなる。Nowak のモデルでは、協力なら一律で評価をあげるという仕組みであったが、現実の対人関係においてはそこまで単純ではない。嫌いな人への協力はそこまで高評価できないと考えるのが自然である。それを説明するのが Heider の認知的均衡定理である。この定理では、まず2者間の関係を正負のいずれかとして表現する。好意や信頼、協力などは正の関係、嫌悪や不信、裏切りなどは負の関係の具体例である。この2者関係の表現を用いて、3者関係を構成する3つの2者関係に符号を与えていく場合、その組み合わせは図 1、2のように8通り存在する。3つの符号の積は正負に二分される。この積が正の場合を均衡状態、負の場合を不均衡状態と呼び、人の心理は不均衡状態よりも均衡状態を選好するというのが、認知的均衡定理である。

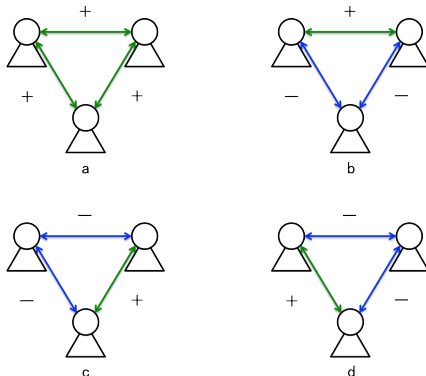


図 1. 認知的均衡定理におけるバランス状態

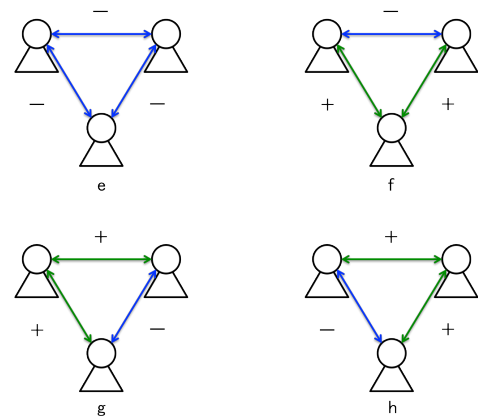


図 2. 認知的均衡定理におけるインバランス状態

この Heider の認知的均衡定理を応用するために、3者間関係を構成する3つの2者関係を次のように捉える。

- O-D 間の関係: O からの D への image score 変化
- O-R 間の関係: O からの R への評価
- D-R 間の関係: D から R への行動

このもとで O からの image score 更新時のバランス状態は、図 3 の4パターンとなる。

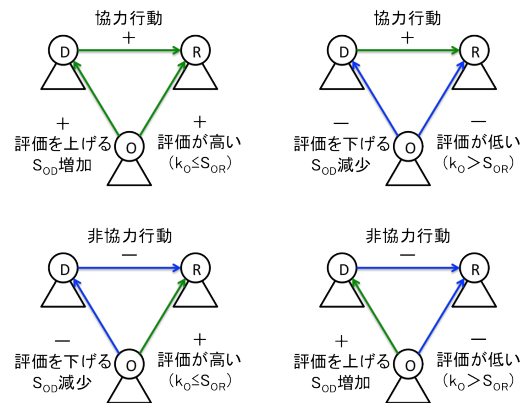


図 3. image score 更新のバランス状態

これに基づいて O からの image score S_{OD} は次の値に更新される。ここで a_{OD} とはネットワーク上の距離に応じて image score 更新の変化量を小さくしていく関数である(後述)。

- ① D が協力した場合
 - a) $S_{OR} \geq k_O$ の時： $S_{OD} + (p_D - 1)\Delta S \cdot a_{OD}$
 - b) $S_{OR} < k_O$ の時： $S_{OD} - (p_D - 1)\Delta S \cdot a_{OD}$
- ② D が非協力した場合
 - a) $S_{OR} \geq k_O$ の時： $S_{OD} - \Delta S \cdot a_{OD}$
 - b) $S_{OR} < k_O$ の時： $S_{OD} + \Delta S \cdot a_{OD}$

2.3 協力関係ネットワーク

先に述べた協力行動の条件をお互いに満たす2者間の関係は協力関係と見なすことができる。これをリンクとして表現する。任意の2プレイヤー*i-j*間が以下の条件を満たす時協力関係を表すリンクを形成あるいは切断していく。

- $S_{ij} \geq k_i, S_{ji} \geq k_j$ の時:リンクを形成する。
- $S_{ij} \geq k_i, S_{ji} \geq k_j$ でない時:リンクを切断する。

また人間関係において自身と関係の遠い相手の評価の変化は比較的小さくなるのが自然である。そのためネットワークによる情報の不完全性を、D の行動に対する O の認知精度 a_{OD} として式(1)で定め、これを image score 更新の変化量に影響させる。

$$a_{OD} = \exp(-(L_{OD} - 1)^2) \quad (\text{OD 間経路が存在する})$$

$$a_{OD} = 0 \quad (\text{OD 間経路が存在しない}) \quad (1)$$

(但し L_{OD} は OD 間最短経路長)

これによって D からネットワーク上で到達可能でないプレイヤーは D の行動を認識できず、また到達可能であってもその最短経路が長い程、D の行動に対する認識が弱くなり、image score の変化量が小さくなる。

2.4 戦略の模倣

その後 D はネットワーク上で到達可能なプレイヤーの中で利得最大のプレイヤーの戦略パラメータを模倣する。しかし現実においては完全な模倣は不可能であり、自身と模倣対象の間になると考えるのが自然である。この戦略模倣の不完全性を導入し、模倣完全度パラメータ im を用いて模倣対象の戦略を k' とした時、自身の戦略を $im \cdot k' + (1 - im)k_D$ に更新する。またこの im は全プレイヤー共通の値とし、シミュレーション毎に設定する。

2.5 モデルの手順

n 人のプレイヤーを設定した後、以上で述べた、プレイヤー選択・意思決定と行動・image score 更新・ネットワーク形成・戦略模倣の5ステップを「1ターン」と呼び、それを t ターン繰り返す試行を「1セッション」と呼ぶ。

2.6 パラメータ設定

以上で述べてきた、モデルにおいて各プレイヤー i が持つパラメータを表 2 に示す。

表 2. プレイヤーの持つ変数パラメータ

要素	記号	意味	初期値
image score	$S_{ij} (-5 \leq S_{ij} \leq 5) (i \neq j)$	プレイヤー i が j に対して持つ評価	0
戦略	$k_i (-5 \leq k_i \leq 6)$	プレイヤー i の非協力度を示す指標	乱数 (整数)
利得	f_i	プレイヤー i の利得	0
能力	$p_i (p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max})$	プレイヤー i が協力した際の相手の利得の増加量	乱数 (整数)

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション設定

以上のモデルに基づいて、戦略模倣と能力差の影響分析(シミュレーション A)、戦略模倣の不完全性の影響分析(シミュレーション B)の2つを行った。表 3 に一般的なシミュレーション設定を示し、表 4、5 にシミュレーション A、B のパラメータ設定を示す。

表 3. シミュレーション設定

設定変数	意味	値
n	プレイヤー数	40
t	ターン数	15000
s	セッション数	150
q	協力関係者から R を選ぶ確率	2/3
ΔS	Image score の基本変化量	1

表 4 シミュレーション A のパラメータ設定

	$im=1$	$im=0$
能力差有り	ケース1	ケース2
能力差無し	ケース3	ケース4

表 5 シミュレーション B のパラメータ設定

ケース	1	2	3	4	5	6
完全模倣度 im	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
能力差	有り					

3.2 シミュレーション結果

以上のシミュレーション A、B によって得られた協力関係数の推移及び戦略平均推移の 150 セッション平均を下図に示す。

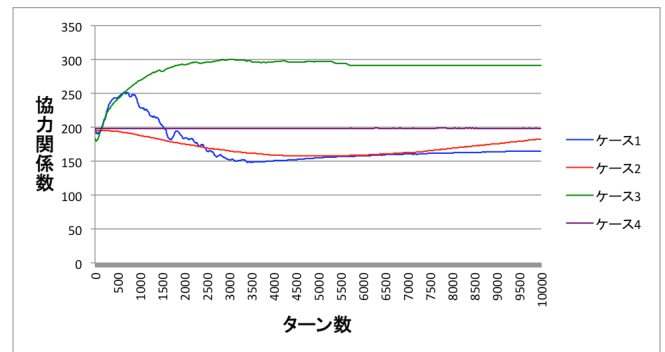


図 4. シミュレーション A における協力関係数推移

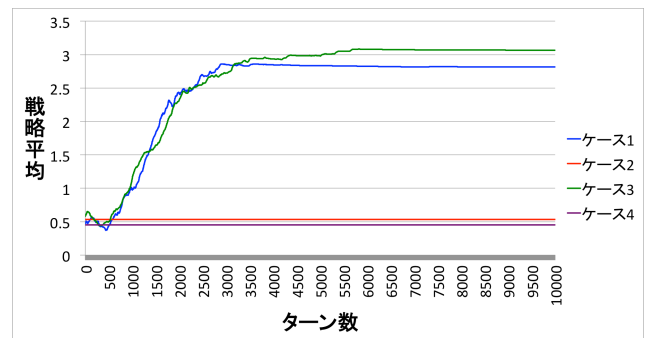


図 5. シミュレーション A における戦略平均推移

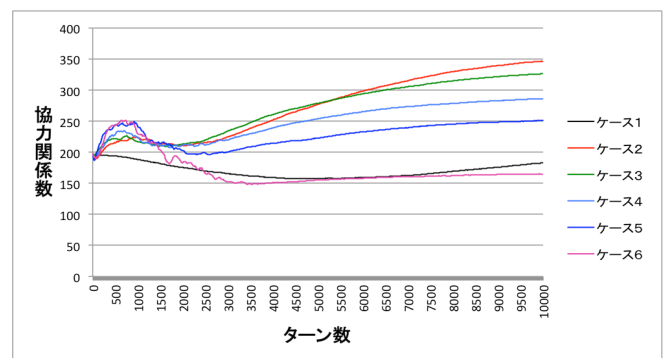


図 6. シミュレーション B における協力関係数推移

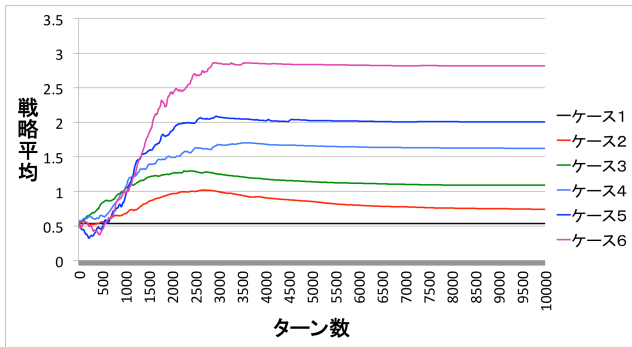


図 7. シミュレーション B における戦略平均推移

図 4 より、能力差がなく戦略模倣ありのケース3が最も協力関係を創発し、図 6 より、戦略模倣が不完全な方が協力関係をより創発することが示された。また図5, 7より戦略模倣の結果、一般的に戦略パラメータは増加する傾向があることが分かる。

4. 考察

以上の結果が示された過程と要因に関して、いくつかの細かい分析をもとに考察を行う。

4.1 戦略模倣の影響

戦略の模倣の影響として、一般的に協力関係を多く創発していることが示されたが、そのプロセスは次のようになっていると考えられる。初期の時点で起こる戦略の模倣による戦略パラメータの減少により同時多発的に協力関係が形成される。それ自体が評価の類似であると同時に、協力関係を結ぶ2プレイヤーが他プレイヤーに対して持つ評価の類似化も徐々に起こっていく。

ある段階で戦略模倣による非協力的プレイヤーの増加が起きるが、評価の十分な類似により非協力行動が協力関係の維持を引き起こしているケースが多くなる。故により多くの協力関係が創発している。ただし評価の十分な一致が起きていないプレイヤーは戦略パラメータ増加の段階でネットワークから分離する傾向を持つ。

4.2 能力差の影響

能力差の存在により、初期ネットワーク内に能力値1のプレイヤーが存在し、そのプレイヤーは協力行動による image score への影響を持たない。故にネットワーク外のプレイヤーからの評価を上げることが出来ず、非協力行動を受け続け、そのプレイヤーと互いに評価の低い関係を形成してしまう。一方で同ネットワーク内の能力値が2以上のプレイヤーはそのようなプレイヤーとも協力関係を結ぶ事がある。この時そのネットワーク外のプレイヤーに対する評価の差異が生じ、徐々に能力値1のプレイヤーに対する評価が下がっていくため、そのプレイヤーはネットワークから分離していく傾向を持つ。

4.3 戦略模倣と能力差の関係

最後に戦略模倣と能力差が互いにどう影響しあっているのかの関係を対象として、以上までの能力差、戦略模倣に関する考察及び 4. 4. 節のケース1の分析結果を組み合わせる考察を行う。

4. 2. 節で述べた評価のばらつきがある状況下において、戦略模倣による戦略パラメータの増加が、評価の一致が十分にできていないプレイヤーをネットワークから分離させる影響を持つこ

と能力差によって評価のばらつきが引き起こされることを組み合わせると、能力差あり戦略模倣ありの条件下では、能力差によって評価の一致する速度にばらつきが生じ、それに伴い戦略模倣による戦略パラメータ増加がより多くの協力関係の切断を引き起こすと考えられる。故に戦略模倣と能力差の組み合わせが相乗的により多くの協力関係の切断を引き起こすと考えられる。

5. 結論

シミュレーション A により、戦略模倣・能力差が与える影響を分析した結果、次の事が分かった。戦略模倣による戦略パラメータ減少が同時多発的に協力関係を形成し、評価の類似化を引き起こす事で強固かつクラスター性の高い協力関係の維持を実現する。しかしその一方で戦略模倣による戦略パラメータ増加は評価の類似化が十分でないプレイヤーをネットワークから分離させる傾向も合わせ持つ。また能力差の存在によって、能力値が1となるプレイヤーが協力行動を活かす事ができないため、ネットワーク外のプレイヤーから非協力行動を受けることが多くなる。その一方で能力値が2以上のプレイヤーはネットワーク外のプレイヤーとも協力関係を形成しうる。故に評価に偏りが生じ、能力値1のプレイヤーはネットワークから分離していく傾向を持つ。さらに能力差と戦略模倣が同時に存在する場合、能力差によって評価の類似化する速度にばらつきがあるために、戦略模倣による戦略パラメータの増加が引き起こす同時多発的な協力関係の切断が能力値1のプレイヤーのみならず、評価の一致が遅れているプレイヤーもネットワークから分離させるため、能力差と戦略模倣は相乗的により多くの協力関係の切断を引き起こす。

シミュレーション B により、戦略の模倣が不完全な状態のほうがより協力関係の創発を促す事が示され、その過程に戦略変化による同時多発的な協力関係創発と模倣完全度の小ささによる低い戦略の維持、戦略変化の遅さによる評価の類似化に掛けられるターン数の増加、が重要な仕組みとして機能していることが示された。

最後にこれらの結論から現実社会の諸問題に対して得られた示唆を述べる。社会問題の一例として環境問題を考える時、先進国と発展途上国の技術面の格差や、安易に先進国の行動を模倣することが非協力社会を引き起こし、環境悪化を引き起こしていると示唆される。また学級等の少数集団において、能力の相違が認識の相違を生み、対人関係を不安定にさせることや、他者の行動や姿勢を真似することが、かえって信頼関係を壊しうる事が示唆された。以上のように、本研究により現実の我々が抱える様々な問題に対する社会的・経済的な示唆が得られた。

参考文献

- [Dawes 1980] Dawes, Robyn M.: Social dilemmas, Annual review of psychology, Vol.31, pp.169-193, 1980.
- [Trivers 1971] Trivers, R.: The evolution of reciprocal altruism, Q. Rev. Biol., vol.46, pp.35-57, 1971.
- [Nowak 1998] Martin A. Nowak & Karl Sigmund: Evolution of indirect reciprocity by image scoring, Nature, Vol.393, pp.573-577, 1998.
- [Heider 1958] Heider, F.: 対人関係の心理学, 誠信書房, 1958.