

Donor-Recipient Game における様々なジレンマ解消・緩解プロトコルの効果のパラメタリゼーションに関する考察

相良 博喜[†] 谷本 潤[‡]

[†]九州大学大学院総合理学院・博士課程, 日本学術振興会特別研究員・修士(工)

[‡]九州大学大学院総合理工学研究院・教授・工博

E-mail: [†]uminchu@uminchu.jp, [‡]tanimoto@cm.kyushu-u.ac.jp

あらまし Nowak (2006) は, Donor-Recipient Game における互恵メカニズムのうち, 直接互恵, 間接互恵, ネットワーク互恵, 群淘汰を取り上げ, これらが進化出来る条件は, いずれも Hamilton の云う包括適合度で説明される血縁淘汰が ESS となる条件と同様な表式となることを示した. 本稿では, 著者らが検討してきた様々なジレンマ解消・緩解プロトコルを一般化した Donor-Recipient Game に適応したところ, その効果は単一のゲーム構造パラメータ b/c , b/c_d で説明出来ることを示した.

キーワード 互恵メカニズム, 2×2 ゲーム, 進化ゲーム, Donor-Recipient ゲーム

A simple scaling of the effectiveness of supporting mutual cooperation in Donor-Recipient Games by various reciprocity mechanisms

Hiroki SAGARA[†] Jun TANIMOTO[‡]

[†] Research Fellow of JSPS, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, M.Eng.

[‡] Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Dr.Eng.

E-mail: [†]uminchu@uminchu.jp, [‡]tanimoto@cm.kyushu-u.ac.jp

Abstract By means of series of numerical experiments, we proved that the effectiveness of supporting mutual cooperation in Donor-Recipient Games by various reciprocity mechanisms can be expressed by a single game structural parameter; b/c . This fact also implies that the dilemma strength in various Donor-Recipient Games can be evaluated only by b/c . Our findings are consistent with the previous insisting by Nowak (2006), where he found an impressively simple and universal relation among direct reciprocity, indirect reciprocity, network reciprocity and group selection, which is analogous to the so-called Hamilton Rule (1964) explaining how the kin selection could evolve in biological systems.

Keyword Reciprocity mechanism, 2×2 Game, Evolutionary game, Donor-Recipient Game

1. 緒言

協調の創発は進化ゲーム理論により幾つかの説明が試みられてきた. Nowak¹⁾は, それらは血縁淘汰, 直接互恵, 間接互恵, ネットワーク互恵, 群淘汰の5つの理論的枠組みで説明出来るとし, かつ, 囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma, PD) の特殊形である Donor-Recipient ゲームにあっては, これら5つの枠組みは, いずれも, 所謂, Hamilton ルール²⁾と相似な, きわめてシンプル且つ美しい構造を持つことを発見した.

様々な互恵サポートの枠組みによりゲームのジレンマ性は緩解・解消される. 協調が創発し, それが進化的安定 (ESS) となるか否かは, 互恵サポートの有効性とゲームのジレンマの強さとの相対的バランスで決まる. 上記の Nowak^{1),3)}の所説は, Donor-Recipient ゲームでは, ゲーム構造, すなわちジレンマの強さはパラメータ b/c (b と c の意味は後述) で一元的に評価され, これとネットワーク互恵を始めとする5種の互恵

サポートの効率を表すパラメータとを比較することで, 協調の進化が記述されることを意味する. パラメータ b/c は, 後述するネットワーク互恵モデル¹²⁾や Reputation Model¹³⁾でも, ジレンマを克服する条件式内にジレンマの強さを表すパラメータとして出現する. では, パラメータ b/c は他のジレンマゲームモデルでも, ジレンマの強さを表すユニバーサルなパラメータとして用いることができるのだろうか.

本稿では著者が検討してきた様々な互恵サポートの枠組みについて, 同様のパラメタリゼーションが適用可能か否かを系統的な数値実験により検討する.

2. 基礎理論

N エージェントから成る集団における 2x2 ゲームを考える利得表は Table1(A). ゲーム構造は P, R, S, T の4パラメータで表される.

2.1. ゲーム構造

2x2 ゲームのジレンマ性の有無は, ゲーム構造で決

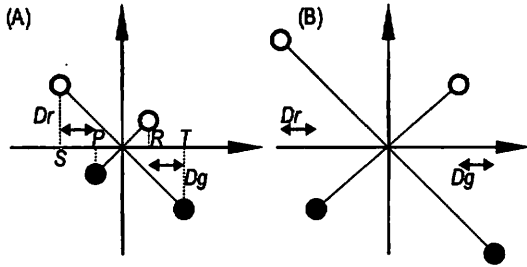


Fig 1. Two Donor-Recipient Games having same $D_r=D_g$ but different $R-P$. (A) larger ($R-P$) case; (B) smaller ($R-P$) case.

まるギャンブル性ジレンマ・ポテンシャル $D_g=T-R$ とリスク回避性ジレンマ・ポテンシャル $D_r=P-S$ で表される⁴⁾。Donor-Recipient Game (以下, DRG) は, ギャンブル性とリスク回避性の双方のジレンマを有する PD のうち, 特に $D_g=D_r$ の条件を満たすゲームを云う。一般には, この $D_g=D_r$ の条件に加えて, $P=0$ を仮定して, Table 1(B)に示すように 4-2=2 パラメータで表される。曰く, c は協調のためのコスト (Cost), b は協調の結果もたらされる利便 (Benefit) である。ここで, 元々 4 パラメータ表記の一般ゲームを DRG に倣った表記にした場合の利得表を考えると Table 1(C) による。この場合, 協調のためのコストは相手の手が協調 (C) か裏切り (D) かで異なり (夫々 c_c, c_d), ゲームには参加コスト f が課されると考えればよい。

2.2. DRG におけるジレンマの強さ

Fig.1 に示すような $D_g=D_r$ が同値な DRG を考える。 N 無限大の well-mixed 集団で One-shot ゲームを行う場合, C か D かの戦略分布は Replicator Dynamics に基づく解析解が規定するように, $D_g=D_r>0$ であれば D 支配が均衡解となる (Tanimoto & Sagara⁴⁾) によれば, 協調戦略が単調増加し得ないダイナミクスを持つこと (すなわちジレンマ) は, 上記の D_g, D_r と戦略分布だけで決まることから演繹的に DRG では D 支配が導かれる。では, 協調をサポートする何らかの互惠メカニズムがある場合 (well-mixed 集団中の one-shot ゲームに対して社会的粘性がある状況), 両者のゲームでジレンマを解消する困難さには差異はないのだろうか? Fig.1 の場合, ジレンマポテンシャル $D_g=D_r$ は (A) (B) とともに等しいが, 定性的には, (B) のゲームは (A) に較べてより Avatamsaka ゲーム⁵⁾ に近くなり, 自分の利得は相手より相手の手に影響されるようになって, 自ら D を出すインセンティブは相対的には低下すると思われる。よって, 何らかの互惠メカニズムがなければ全員裏切りになってしまう $D_g=D_r$ なるジレンマゲームであっても, 互惠メカニズムがある状況下では, (B) より (A) の方がジレンマを克服するのが困難であろうと推量されるでは, ジレンマを克服する困難さはどのような尺度で示

Table 1. Payoff matrix for a 2×2 game.

(A) General description		Opponent	
		Cooperation	Defect
Ego	Cooperation (C)	R	S
	Defect (D)	T	P

(B) Donor-Recipient Game		Opponent	
		Cooperation	Defect
Ego	Cooperation (C)	$b-c$	$-c$
	Defect (D)	b	0

(C) Donor-Recipient Game in general expression		Opponent	
		Cooperation	Defect
Ego	Cooperation (C)	$b-c_c-f$	$-c_d-f$
	Defect (D)	$b-f$	$-f$

されるのであろうか? 緒言で述べたとおり, いくつかのゲームモデルでは, パラメータ b/c がジレンマを克服する困難さの尺度として用いられているが, その他のゲームモデルにおいても, b/c は同様に用いることができるのだろうか?

また, DRG を Table 1.(C) の様に拡張することにより, 一般的な PD ゲームを表現することができるが, 同様に $b/c_c, b/c_d$ も困難さの尺度として用いる事が可能であろうか?

本稿では, 様々なゲームモデルにおいて, これらの点を検討していく。

3. モデル

ゲーム構造は以下の式で表される。

$$P = -1 - \delta, \quad (1-1)$$

$$R = 1 + \delta, \quad (1-2)$$

$$S = P - D, \quad (1-3)$$

$$T = R + D. \quad (1-4).$$

$0 \leq \delta \leq 2, 0 \leq D \leq 2$ で変化させる。

以下の著者がこれまで検討してきた社会的粘性, すなわち, 協調をサポートする互惠メカニズムを考慮した数値実験を行い, 十分な時間ステップ経過後のある時間ステップ平均を疑似均衡解とし, これを 10 試行アンサンブル平均を取る。解析対象は協調率とする。

3.1. ネットワーク互惠

平均次数 $\langle k \rangle$ の固定ネットワーク上で, C か D かの戦略を有するエージェントがシンクロにネットワークで繋がる隣人中の最大利得エージェントの戦略をコピーする (Imitation Dynamics). $\langle k \rangle = 4, N = 2500$ とする。ネットワーク互惠では, エージェントはメモリのない 1bit 戦略 (C か D か) しか持たないが, 対戦相手の限定により, R 互惠⁶⁾ (互いに C 出し合い R を取り合うことによる互惠関係で, PD, Chicken, Stag Hunt に対して有効) が創発することが分かっている。

3.2. Image Scoring に基づく間接互惠⁷⁾

エージェントは以下に述べる戦略更新を行う間の期間 (世代) 中に平均的には M 回の one-shot ゲームを

行う。各エージェントには、前手で C 出したか、D 出したかに応じてイメージスコア IS が付けられ、この IS (前手 C なら 1, D なら 0) は全エージェントに開示される。エージェントは独立に戦略 Str を有し、対戦において、

Agent offers C only if $IS_{opp} \geq Str_{focal}$.

ただし、添字 opp , $focal$ は対戦相手、自分を表す。戦略 Str は世代ごとに、1 点交叉、突然変異 (確率 p_{mut}) を適用した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) によって適応的に進化させる。 $N=500$, $M=10$, $IS \in \{0,1\}$, $Str \in \{0,1,2\}$, $p_{mut}=0.05$ とする。Image Score による間接互恵システムにより、 R 互恵が創発することが分かっている。

3.3. Tag System に基づく間接互恵⁶⁾

エージェントは以下に述べる戦略更新を行う間の期間 (世代) 中に平均的には M 回の one-shot ゲームを行う。各エージェントには、実数連続値の Tag が付されていて、この Tag は全エージェントに開示される。エージェントは独立に実数連続値で定義される戦略 Tol (許容の程度を表す) を有し、対戦において、

Agent offers C

only if $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| < Tol_{focal}$.

Tag と Tol は世代ごとに GA により適応的に進化させる。ただし、夫々、 Tag の突然変異は定義域内で一様分布、 Tol のそれは現在値を中心とする Gauss 分布に従う乱数により付与する。 $N=500$, $M=10$, $Tag \in [0,1]$, $Tol \in [0,1]$, $p_{mut}=0.05$ とする。Tag System による間接互恵システムにより、 R 互恵が創発することが分かっている。

3.4. 2次元 Tag System に基づく間接互恵⁷⁾

エージェントは以下に述べる戦略更新を行う間の期間 (世代) 中に平均的には M 回の one-shot ゲームを行う。各エージェントは、実数連続値の Tag_1 と Tag_2 を有し、いずれも全エージェントに開示される。エージェントは独立に実数連続値で定義される戦略 Tol (許容の程度を表す) を有する。エージェントが実際の Tag として意志決定に用いるのはいずれか一方であり、対戦において、

Agent offers C

only if $|Tag_{focal,t(focal)} - Tag_{opp,t(focal)}| < Tol_{focal}$.

添字 $t(focal) \in \{1,2\}$ は focal エージェントが意志決定に用いる Tag の種類を意味する。もし、ゲーム時に相手に食られた (S の利得を獲得した) 場合は、意志決定

に用いる Tag の種類をもう一方に切り替える。 $Tag_{t(focal)}$ と Tol は世代ごとに GA により適応的に進化させる。ただし、夫々、 $Tag_{t(focal)}$ の突然変異は定義域内で一様分布、 Tol のそれは現在値を中心とする Gauss 分布に従う乱数により付与する。 $N=500$, $M=10$, $Tag_{t(focal)} \in [0,1]$, $Tol \in [0,1]$, $p_{mut}=0.05$ とする。2次元 Tag System は Tag System と Win-Stay & Lose-Shift⁸⁾ を組み合わせた枠組みと考えられ、通常の Tag System より頑強な R 互恵が創発することが分かっている

3.5. ネットワーク互恵における利得行列のノイズによる resonance 効果⁹⁾

ネットワーク互恵の枠組みに加えて、各ゲーム対戦における利得行列にノイズを印加する。ノイズは標準偏差 σ , 平均値 0 の Gauss 分布に従う乱数とし、 P, R, S, T に同時に同値のノイズを与える。すなわち、ゲーム構造は平均的には元々仮定した P, R, S, T に一致するが、揺らぎが存在することになる。この揺らぎは P, R, S, T に同じものが付与されるから、ゲームクラスが変化することはない。基盤となるネットワークは 1次元 (リング) 構造で $\langle k \rangle = 4$, $N=2500$, $\sigma = 0.1 \cdot (R-P)$ とする。利得行列へのノイズ印加は、主として R 互恵に有効であることが分かっており、格子振動により結晶構造の相変化が助長されるの resonance 効果との相似性から物理化学の分野で注目されている。

3.6. ネットワークと戦略の共進化モデル¹⁰⁾

平均次数 $\langle k \rangle$ のランダムネットワーク上で、C か D かの戦略を有するエージェントがシンクロにネットワークで繋がる隣人中の最大利得エージェントの戦略をコピーするとともに、自リンク中最低利得しか挙げられなかったリンクを確率 p_{rew} で切断し、切断した以外の隣人の隣人 (友人の友人) 集合中の任意のエージェントに再接続する (戦略とネットワークを共進化)。 $\langle k \rangle = 12$, $N=3000$, $p_{rew}=0.05$ とする。共進化モデルにより、固定ネットワーク上のゲームよりも頑強な R 互恵が創発すること、ネットワークは Scale-Free 的なヘテロネットワークへと進化することが分かっている。

3.7. ライト点灯にコミュニケーションモデル¹¹⁾

エージェントは以下に述べる進化操作を行う間の期間 (世代) 中に平均的には M 回の one-shot ゲームを行う。エージェントは個別に 2つの 4bit 状態機 (Finite State Machine, FSM) を有する。一方は前手のゲーム帰結 (P, R, S, T) を入力信号に、現ステップの自ライトのオン、オフを行動出力する。いま一方は、現ステップの自他ライトの点滅状態を入力信号に、現

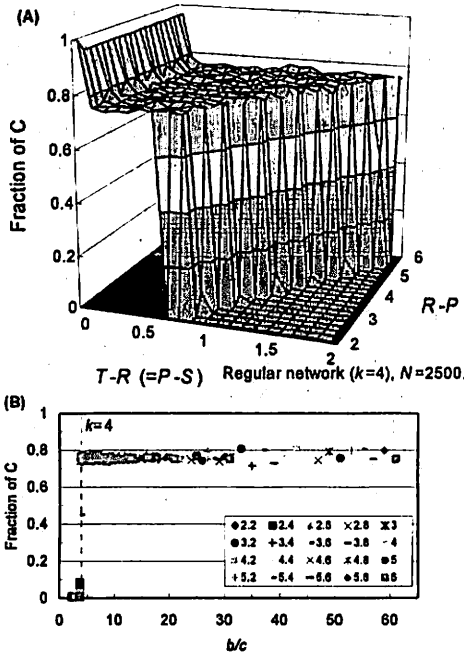


Fig.2 Result of Network Reciprocity Model. (A) cooperation fraction on D -(R - P) plane; (B) relation of cooperation fraction with game parameter b/c .

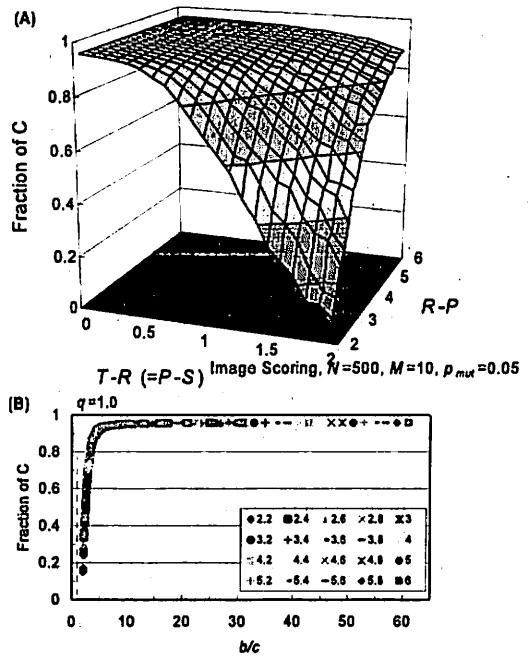


Fig.3 Result of indirect reciprocity by Image Scoring Model.

ステップの相手 (CかDか) を行動出力する。遺伝操作では、2つの4bitのFSMは、夫々、1点交叉、突然変異 ($2 \times 4\text{bit} = 8\text{bit}$ のストリングに対して確率 p_{mut}) を適用したGAにより適応的に進化させる。 $N=500, M=10, p_{mut}=0.05$ とする。コミュニケーションモデルにより構築されるR互恵は脆弱であるが、one-shotゲームの中で時間方向にCとDを交互に出し合せてSとTを互いに取り合うST互恵 (LeaderやHeroに対して有効) には効果的であることが分かっている。

4. 結果

4.1. $D_g = D_r$ が同値なDRGのパラメタリゼーション

Fig.2はネットワーク互恵モデルの結果であり、(A)は $D=T-R=P-S$ と $R-P$ で表した2次元ゲーム構造平面に協調率を表したものの、(B)はこの結果を横軸 b/c で表したグラフに $R-P$ ごとに異なるプロットで描いたものである。Fig.3-Fig.8は3.2から3.7節で述べた各モデルによる結果を同様に示したものである。

Fig.2(B)をみると、Ohtsukiら¹²⁾が演繹した通り、 $b/c > (k) = 4$ で協調への相変化が現れる。また、Nowak & Sigmund¹³⁾の演繹によると、各エージェントがImage Scoreを認識する確度 q としたとき、 $b/c > 1/q$ でImage ScoreによりCとDを出し分ける。Discriminatorが進化出来る、すなわち安定的な協調が創発することが分かっ

ている。本モデルでは $q=1$ であるが、GAによる進化操作に突然変異を考慮しているため、この条件と厳密には一致しない。

各図の(B)から明らかのように、全てのモデルにおいて協調のサポート効果はDRGのゲームパラメータ b/c により普遍的にパラメタライズ出来ることが分かる。つまり、Fig.1で呈した疑問、各モデルで異なる協調のサポート効果は、ジレンマの有無を規定するジレンマポテンシャル $D_g = D_r$ だけで説明されるのではなく、 $R-P$ の大小にも影響を受ける。しかし、これらから求まる b/c をパラメータとすると、ここで検討した全ての協調サポートモデルの有効性が説明できる (プロットはばらつかず、協調率は b/c の関数で記述出来る)。このことは、全ての互恵モデルのDRG上での有効性は、 b/c をパラメータに採って検討することで、相互の比較が可能と云うことを意味する。

4.2. 一般化したDRGのパラメタリゼーション

同様の手法で、一般化したDRGにおいてもパラメタライズが可能かを検討した。利得行列にTable 1(C)を用い、ネットワーク互恵モデルとImage Scoreに基づく間接互恵モデルをシミュレーションした結果をFig.9に示す。一般化したDLGでは、コストを表すパラメータが c_c と c_d の二つになるため、 b/c_c と b/c_d の二つのパラメータでパラメタライズ可能かを検討する。

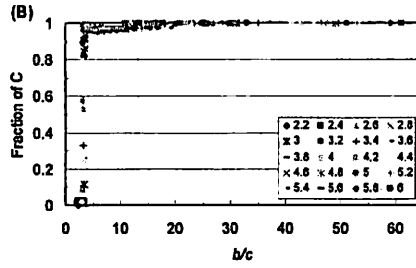
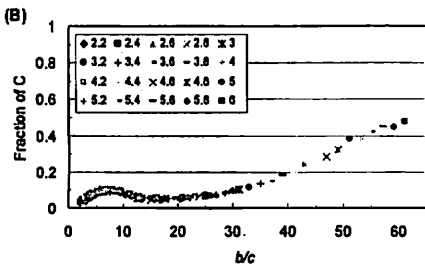
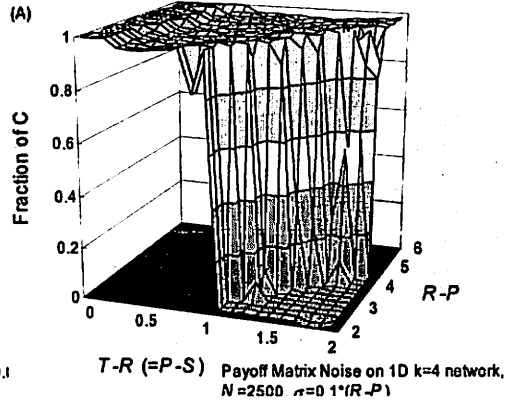
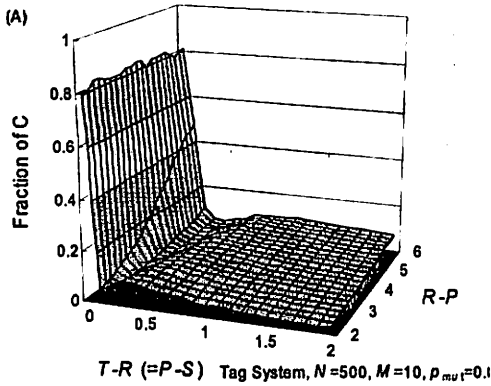


Fig.4 Result of indirect reciprocity by Tag System.

Fig.6 Result of Resonance Model by Payoff Matrix Noise.

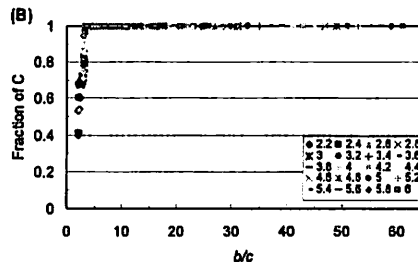
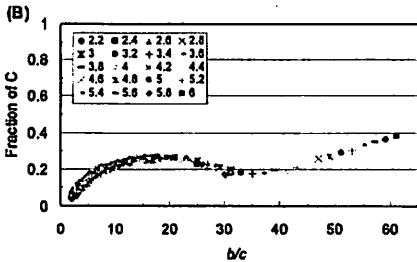
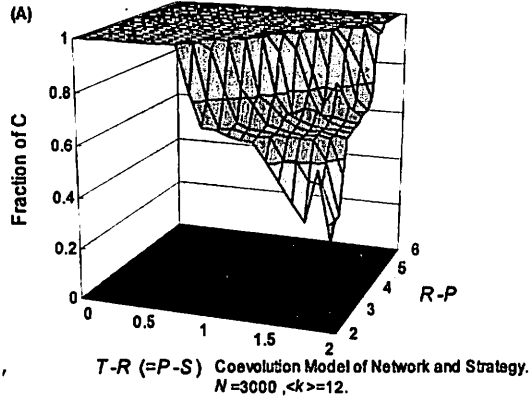
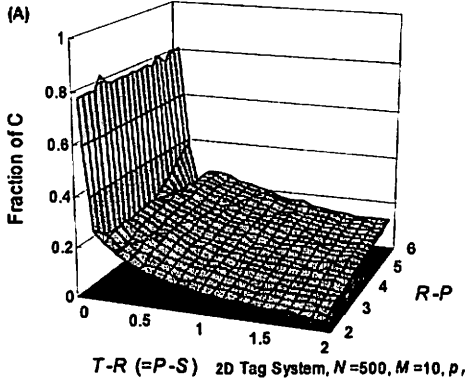


Fig.5 Result of indirect reciprocity by 2D Tag System.

Fig.7 Result of Coevolution Model.

(A), (B)ともにプロットはばらつかず、滑らかな平面をなしており、ユニバーサルな PD ゲームにおいても、拡張した DRG のゲームパラメータ b/c_c と b/c_d により普遍的にパラメライズ出来ることが分かる。また、Image Scoring Model では、 b/c_d の影響は少なく、

b/c_c の影響が大きい。これは、このゲームモデルのジレンマ性は、ギャンブル性ジレンマの影響が大きいことを示し、ゲームモデルによってギャンブル性ジレンマとリスク回避性ジレンマの影響力が異なることを意味する。

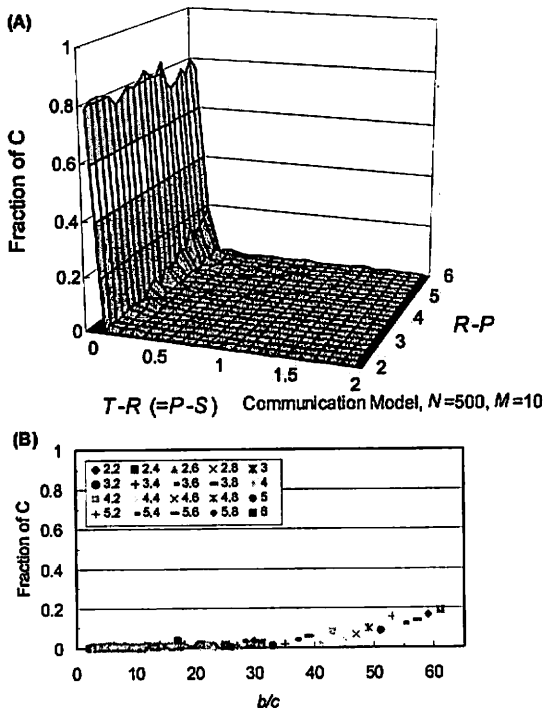


Fig.8 Result of Communication Model.

5. 結論

本稿では、DRGのパラメータ b/c が多様なジレンマゲームモデルにおけるジレンマの強さを表すユニバーサルなパラメータとして適用可能か否かを検討するために、系統的な数値実験を行い、多様なジレンマゲームモデルにおいて b/c による協調率のパラメタリゼーションを試みた。

結果、DRGでは、様々な互恵サポートの効果は、全てゲーム構造パラメータ b/c で一元的に整理出来ることが示された。

また、ユニバーサルな PD を表現するための拡張 DRG においても、同様にゲーム構造パラメータ b/c_c と b/c_d で一元的に整理できることが示された。

文 献

- [1] Nowak, M. A.; Five rules for the evolution of cooperation, *Science* 314, 1560-1563, (2006).
- [2] Hamilton W.D.; The genetical evolution of social behaviour. I, *Journal of Theoretical Biology* 7, 1-16, (1964).
- [3] Taylor, M., Nowak, M. A.; Transforming the dilemma, *Evolution* 61 (10), 2281-2292, 2007.
- [4] Tanimoto, J., Sagara, H.; Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game, *BioSystems* 90 (1), 105-114, (2007).
- [5] Akiyama E., Aruka, Y.; The Effect of Agents Memory on Evolutionary Phenomena - the Avatamsaka Game and Four Types 2×2 Dilemma Games, *Proc. of 9th Workshop on Economics and Heterogeneous Interacting Agents, CD-ROM*, (2004).
- [6] Tanimoto, J.; Emergence of Cooperation Supported by Communication in a One-Shot 2×2 Game, 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 1374-1381, (2007).
- [7] Tanimoto, J.; Does a Tag System Effectively Support Emerging Cooperation?, *Journal of Theoretical Biology* 247(4), 756-764, (2007).
- [8] Nowak, M.A. and Sigmund, K.; A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the prisoner's dilemma game, *Nature* 364, 65-68, (1993).
- [9] Tanimoto, J.; Promotion of cooperation by payoff noise in a 2×2 game, *Physical Review E* 76, #041130, (2007).
- [10] Tanimoto, J.; Dilemma-solving effects by the coevolution of both networks and strategy in a 2×2 game, *Physical Review E* 76, #021126, (2007).
- [11] Tanimoto, J.; Emergence of Cooperation Supported by Communication in a One-Shot 2×2 Game, 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 1374-1381, (2007).
- [12] Ohtsuki, H., Hauert, C., Lieberman, E., Nowak, M. A.; A simple rule for the evolution of cooperation on graphs and social network, *Nature* 441, 502-505, (2006).
- [13] Nowak, M.A. and Sigmund, K.; Evolution of indirect reciprocity by image scoring, *Nature* 393, 573-577, (1998).

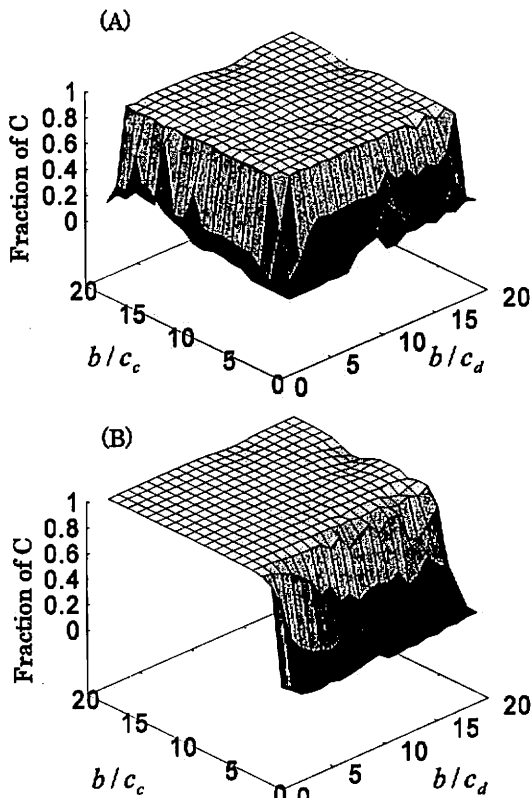


Fig.9 Results of (A) Network Reciprocity Model and (B) Image Scoring Model. This graph shows the relation of cooperation fraction with game parameters b/c_c and b/c_d .