

n 人囚人のジレンマゲームにおける 2 種類の互恵的協力行動の進化

鈴木 真 介[†] 秋 山 英 三[†]

非血縁個体間でみられる協力行動の進化は、しばしば直接的互恵性の理論と間接的互恵性の理論によって説明される。本研究では、直接的互恵性に基づく協力行動の進化と間接的互恵性に基づく協力行動の進化を比較した。計算機シミュレーションによる分析の結果以下のことが分かった: (1) グループの人数が多いとき、間接的互恵性に基づく協力行動は直接的互恵性に基づく協力行動に比べて進化しにくい; (2) グループの人数が少ないときは、「一人でも評判の悪いメンバーがいるグループ内での裏切りを正当な行為とみなす」評判基準 (*standing*) を用いることで、間接的互恵性に基づく協力行動は直接的互恵性に基づく協力行動と同程度に進化しやすくなる。

Evolution of two kinds of reciprocal cooperation in n -person prisoner's dilemma game

SHINSUKE SUZUKI[†] and EIZO AKIYAMA[†]

The evolution of cooperation among unrelated individuals is often explained using direct reciprocity or indirect reciprocity. In this study we investigate the relation between direct and indirect reciprocity. The results of the computer simulation show the followings: (1) for large group size, indirect reciprocity cannot facilitate cooperation as effectively as does direct reciprocity; (2) for small group size, indirect reciprocity can facilitate cooperation as effectively as does direct reciprocity if a reputation criterion (*standing*), under which an individual who has defected in the group with some individuals whose reputation is bad does not change, is adopted.

1. 背 景

非血縁個体間でみられる協力行動の進化は、しばしば 2 種類の「互恵性の理論」によって説明される。直接的互恵性の理論と間接的互恵性の理論である。

直接的互恵性の理論⁽¹⁾では、協力行動は「協力行動をするならば、その相手からも協力行動を返してもらえる」というメカニズムにより進化し得ると主張している。Axelrod⁽²⁾はこの直接的互恵性の概念を元に、「繰返し 2 人囚人のジレンマゲーム」を用いて協力行動の進化を分析した。Axelrod は、「2 者が繰返し対戦する」する時、「しっぺ返し戦略 (IFT)*」に基づく協力行動が社会に広がり安定化することを示した。しかし、現実社会での相互作用は同じ相手と何度も繰

返されるとは限らない。

同じ相手との相互作用が繰返されない状況における協力行動の進化は、間接的互恵性の理論⁽¹⁾によって説明される。間接的互恵性の理論では「相手に協力行動をすれば、その相手以外の誰かから協力行動を返してもらえる」というメカニズムにより協力行動は進化し得ると主張している。Nowak&Sigmund⁽³⁾は 2 人寄付ゲームに評判の効果を導入し、「同じ相手と何度も相互作用しない」ケースでも、「*Discriminating* 戦略^{☆☆}」により、間接的互恵性に基づく協力行動が進化し得ることを示した。彼らのモデルでは、各プレイヤーの評判は「image scoring 評判基準」に従って変化する。image scoring 評判基準の下では、プレイヤーが協力すると評判が良くなり、裏切ると悪くなる。その後、間接的互恵性の進化に関して様々な研究が行われた。特に、Ohtsuki & Iwasa⁽⁶⁾らは image scoring 評判基準の下では協力行動が進化的に安定な戦略 (ESS) で実現されないことを示した。さらに、彼らは「裏切

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科, 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan.

E-mail: suzuki92@sk.tsukuba.ac.jp

* 対戦の初回は協力し、以降は相手に裏切られたら裏切り、相手が協力したら協力する戦略。

☆☆ 評判の良い相手には協力し、評判が悪い相手には協力しない戦略。

者に対する裏切り」を正当な行為とみなす評判基準 (standing⁷⁾) を導入することで協利行動が ESS により実現されることを示した。

上記の直接的、間接的互恵性に関するモデルは 2 者間の相互作用のみを扱っている。しかし、現実社会で見られる相互作用、そしてそこでの協利行動は必ずしも 2 者間とは限らない (e.g. 会社の同僚、友人関係など)。Joshi⁴⁾、Boyd & Richardson³⁾ は Axelrod の直接的互恵性のモデルに基づいて「繰返し n 人 4 人のジレンマゲーム (n-IPD)」を分析した。また、Suzuki & Akiyama⁸⁾ は Nowak & Sigmund⁵⁾ の間接的互恵性のモデルに基づいて「評判付き n 人 4 人のジレンマゲーム (n-RPD)」を分析した。その結果、直接的、間接的互恵性両方のモデルで、グループの人数が増加すると協利行動の進化は困難になることが分かった。

上記のように直接、間接的互恵性の進化に関しては数多くの研究が行われているが、両者にはどのような関係があるのだろうか？ 本研究では、直接的互恵性に関するモデルである「n-IPD^{3),4)}」と間接的互恵性に関するモデルである「n-RPD⁸⁾」の進化的振舞いを比較することで、両者の関係を調べる。

2. モデル

本研究では、n-RPD と n-IPD について分析と比較を行う。本節では、n-RPD, n-IPD の順にモデルの詳細を説明する。

2.1 評判付き n 人 4 人のジレンマゲーム (n-RPD)

まず、 N 人のプレーヤーからなる集団を考える。1 世代は m 回のラウンドから構成される。各ラウンドでは、各プレーヤーが $n (\geq 2)$ 人ずつのグループをランダムに形成し、 n 人 4 人のジレンマゲームを行う。なお、本研究では $N = 2400$, $m = 10$ とする^{*}。

n 人 4 人のジレンマゲームでは、それぞれのプレーヤーが「協力」か「裏切り」を選択する。協力者の利得、 π^C 、裏切者の利得、 π^D 、はそれぞれ以下の通りである^{**}：

$$\pi^C = (i/n)b - c \quad (1)$$

$$\pi^D = (i/n)b, \quad (2)$$

$c > b/n$, $b > c > 0$ 。ここで、 i はグループ内の協力者数である。なお、本研究では $b = 0.75 \times n$, $c = 1$ とする。

^{*} $m > 2$ であれば、モデルの定性的な振舞いは変わらないことが確認できる。

^{**} n 人 4 人のジレンマゲームの利得関数としては他の形も当然考えられるが、先行研究^{3),8)} に倣ってこのように仮定した。

各プレーヤーには過去の行動に応じて評判、Good (G) か Bad (B)、が付けられる。世代の開始時の評判は全員 G であり、各プレーヤーの評判は集団のメンバー全員に正確に知られているとする。本研究では、評判を決める基準として image scoring 評判基準 (IMAGE) と 2 種類の standing 評判基準 (STAND1, STAND2) を考える。それぞれの評判基準の下で、各プレーヤーの評判は以下のように決められる。

- **IMAGE**: 協力すればそのプレーヤーの評判は G になり、裏切れば B になる。
- **STAND1**: 協力すればそのプレーヤーの評判は G になる。グループ・メンバーの半分以上 が評判 G のとき、裏切ると評判が B になる。グループ・メンバーの半分以上 が評判 B のとき、裏切っても評判は変わらない (裏切者への裏切りは正当な行為と評価されるから)。
- **STAND2**: 協力すればそのプレーヤーの評判は G になる。グループ・メンバー全員 が評判 G のとき、裏切ると評判が B になる。グループに評判 B のメンバーが 1 人でもいる とき、裏切っても評判は変わらない (裏切者への裏切りは正当な行為と評価されるから)。

また、各プレーヤーの戦略として、 $ALLC$, $ALLD$ と 2 種類の Discriminating 戦略、 DIS_{n-1} , $DIS_{(n-1)/2}$ を考える。 $ALLC$ を採用するプレーヤーは常に協利し、 $ALLD$ を採用するプレーヤーは常に裏切る。また、 DIS_{n-1} を採用するプレーヤーはグループ・メンバー全員の評判が G のときのみ協力する。つまり、最も厳しい Discriminating 戦略である。一方、 $DIS_{(n-1)/2}$ を採用するプレーヤーはグループ・メンバーの半分以上が評判 G のときのみ協力する。

世代の終わりには各プレーヤーは子孫を残す。各プレーヤーが残す子孫の数は、その世代で各プレーヤーが獲得した利得の合計 (適応度) によって決まる。適応度が高いプレーヤーほど、子孫をたくさん残せる可能性が高くなる。なお、第 1 世代のプレーヤーの戦略はランダムに決まり、以降の世代では親の戦略をそのまま継承する。

2.2 繰返し n 人 4 人のジレンマゲーム (n-IPD)

次に n-IPD について説明する。まず、 N 人のプレーヤーからなる集団を考える。各世代では、各プレーヤーが $n (\geq 2)$ 人ずつのグループをランダムに形成し、 m ラウンド繰返し n 人 4 人のジレンマゲームを行う。n-RPD とは違い、n-IPD では毎ラウンド同じ相手とゲームを行うことに注意が必要である。なお、n-RPD の場合と同様に $N = 2400$, $m = 10$ とする。

n 人四人のジレンマゲームの利得は、n-RPD の場合と同様に設定する (式 (1)(2) 参照)。

また、各プレイヤーの戦略として、 $ALLC$ 、 $ALLD$ と 2 種類の TFT 戦略、 T_{n-1} 、 $T_{(n-1)/2}$ を考える。 $ALLC$ と $ALLD$ に関しては n-RPD と同様である。また、 T_{n-1} を採用するプレイヤーは始めは協力し、それ以降は前回のラウンドでグループ・メンバー全員が協力したときのみ、次のラウンドで協力する。つまり、最も厳しい TFT 戦略である。一方、 $T_{(n-1)/2}$ を採用するプレイヤーは始めは協力し、それ以降はグループ・メンバーの半分以上が前回のラウンドで協力したときのみ次のラウンドで協力する。この T_{n-1} は n-RPD の DIS_{n-1} に、 $T_{(n-1)/2}$ は $DIS_{(n-1)/2}$ にそれぞれ対応している。

さらに世代の終わりには、n-RPD の場合と同様に、各プレイヤーは適応度に応じて子孫を残す。

3. 結果

計算機シミュレーションは、n-IPD と 3 種類の評判基準 (IMAGE, STAND1, STAND2) の下での n-RPD の合計 4 つのケースそれぞれについて行った。なお、3 種類の評判基準の下での n-RPD をそれぞれ n-RPD (IMAGE), n-RPD (STAND1), n-RPD (STAND2) と表す。

3.1 グループの人数と協力率

まず最初に 4 つのケースそれぞれにおけるグループの人数と協力率の関係を比較する。図 1 から、グループの人数が多い時 ($n > 18$) には、協力率は n-IPD で一番高く、その後は n-RPD (STAND1), n-RPD (IMAGE), n-RPD (STAND2) の順に低くなっていることが分かる。ただし、グループの人数が少ない時には ($n < 18$)、n-RPD (STAND2) における協力率が高く n-IPD に匹敵する。

つまり、グループの人数が多い時、間接的互惠性に基づく協力行動はどのような評判基準を用いても直接的互惠性に基づく協力行動に比べ進化しにくい。また、グループの人数が少ない時は、「一人でも評判の悪い者がいるグループ内での裏切りを正当であるとみなす」評判基準 (STAND2) を用いることで、間接的互惠性に基づく協力行動は直接的互惠性に基づく協力行動と同程度に進化しやすくなる。

なお、本研究では、グループの人数が 2 から 100 までのケースについて調べた。

3.2 進化ダイナミクスの分類

次に、上記の結果がどのようなメカニズムで生じているのかを明らかにするため、協力率の平均ではなく、

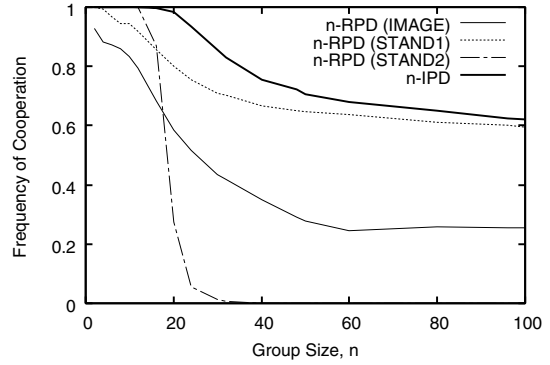


図 1 グループの人数と協力率の関係 (実線:、点線:、一点鎖線:、シミュレーション 1000 回の平均)。

個々のシミュレーション結果に注目する。その結果、4 種類全てのケースで、進化ダイナミクスの収束状態は 3 種類に分類できることが分かった。3 種類の収束状態の 1 つ目は「協力社会」である (図 2(a) 参照)。協力社会では、 $ALLD$ の頻度が 0 となり全員が協力行動をとる^{*}。2 つ目は「安定共存社会」である (図 2(b) 参照)。安定共存社会では、 $ALLD$ と $DIS_{(n-1)/2}$ が安定的に共存する。なお他の戦略の組合せによる共存は起こらない。最後は「裏切社会」である (図 2(c) 参照)。裏切社会では、 $ALLD$ の頻度が 100% に達し、全員が裏切行動をとる。

それでは、これら 3 種類の収束状態はどのような条件で実現するのだろうか? 次節では n-IPD, n-RPD (IMAGE), n-RPD (STAND1), n-RPD (STAND2) それぞれのケースごとに、3 種類の収束状態はどのような条件で実現するのか見ていく。

3.3 各収束状態の実現頻度

3.3.1 n-RPD (IMAGE)

図 3 から、n-RPD (IMAGE) では、グループ人数の増加に従って、最も実現しやすい収束状態が協力社会から安定共存社会、そして裏切社会へと変わっていくことが分かる。この現象は Suzuki & Akiyama⁸⁾ の結果と一致するものである。

3.3.2 n-RPD (STAND1)

次に、図 4 より、n-RPD (STAND1) では、グループ人数の増加に伴って、最も実現しやすい収束状態が協力社会から安定共存社会へと変わっていくことが分かる。このケースでは、裏切社会は実現しない。STAND1 の下では、その定義より、 $DIS_{(n-1)/2}$ の裏

^{*} $ALLC$ 、 DIS_{n-1} 、 $DIS_{(n-1)/2}$ のうち最終的にどの戦略に収束するのは、ランダムドリフトによって決まる。なぜならば、この状況では全員が協力し、利得に差がつかないからである。

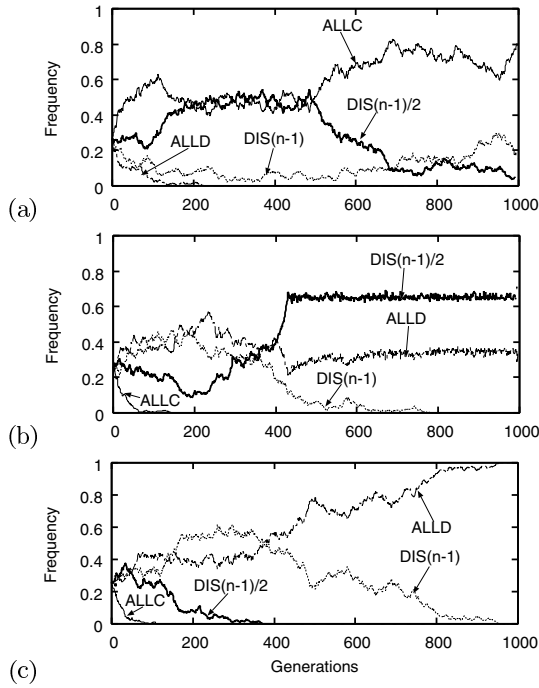


図2 (a) 協力社会に至る戦略頻度の進化ダイナミクスの例 (n-RPD (IMAGE), グループの人数, $n = 8$). (b) 安定共存社会に至る戦略頻度の進化ダイナミクスの例 (n-RPD (IMAGE), グループの人数, $n = 60$). (c) 裏切社会に至る戦略頻度の進化ダイナミクスの例 (n-RPD (IMAGE), グループの人数, $n = 80$).

切りは全て正当な行為であると評価される。そのため $DIS_{(n-1)/2}$ の適応度が高くなり、グループの人数が多い領域でも $DIS_{(n-1)/2}$ が生き残り、安定共存社会を実現する。

3.3.3 n-RPD (STAND2)

また、n-RPD (STAND2) では、グループ人数の増加に伴って、最も実現しやすい収束状態が協力社会から裏切社会へと変わっていく (図5参照)。このケースでは、安定共存社会は実現せず、一気に協力社会から裏切社会へ変化する。STAND2の下ではその定義より、 $DIS_{(n-1)/2}$ と DIS_{n-1} の裏切りが全て正当な行為であると評価される。そのため、 DIS_{n-1} の適応度が高くなる。また、同時に $DIS_{(n-1)/2}$ の適応度も高くなるが、 DIS_{n-1} の方が厳しい (裏切る機会が多い) 分、高い適応度を得ることができる。そして、 DIS_{n-1} は ALLD と共存できないので、グループの人数が小さいときは協力社会が実現し、大きいときは裏切社会が実現する。

3.3.4 n-IPD

最後に、n-IPD では、グループ人数の増加に従って、

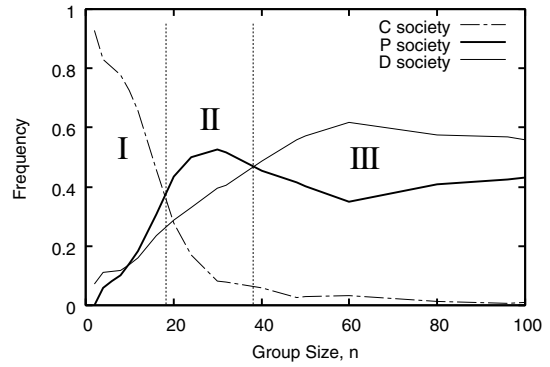


図3 n-RPD (IMAGE) におけるグループの人数と実現する収束状態の関係 (一点鎖線: 協力社会, C society, の実現頻度, 太線: 安定共存社会, P society, の実現頻度, 実線: 裏切社会, D society, の実現頻度, シミュレーション 1000 回の平均)。領域 I では協力社会が実現する確率が一番高く, 領域 II では安定共存社会が, 領域 III では裏切社会が実現する確率が一番高い。

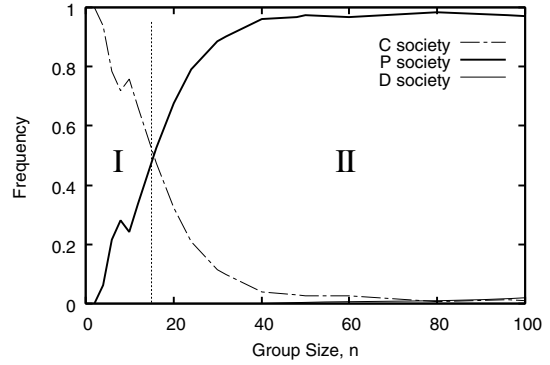


図4 n-RPD (STAND1) におけるグループの人数と実現する収束状態の関係 (一点鎖線: 協力社会, C society, の実現頻度, 太線: 安定共存社会, P society, の実現頻度, 実線: 裏切社会, D society, の実現頻度, シミュレーション 1000 回の平均)。領域 I では協力社会が実現する確率が一番高く, 領域 II では安定共存社会が実現する確率が一番高い。

最も実現しやすい収束状態が協力社会から安定共存社会へと変わっていくことが図6より分かる。しかし、n-RPD (STAND1) のケースとは異なり、グループの人数の増加に伴って、裏切社会が実現する確率が徐々に増加する。

4. 議論

多人数グループにおいて、直接的互恵性に基づく協力行動と間接的互恵性に基づく協力行動の進化にはどのような関係があるのだろうか? 本研究では、前者の進化を扱ったモデルである n-IPD と後者の進化を扱ったモデルである n-RPD の進化的振舞いを比較した。

ALLD と 1 種類の Discriminating 戦略 (or TFT

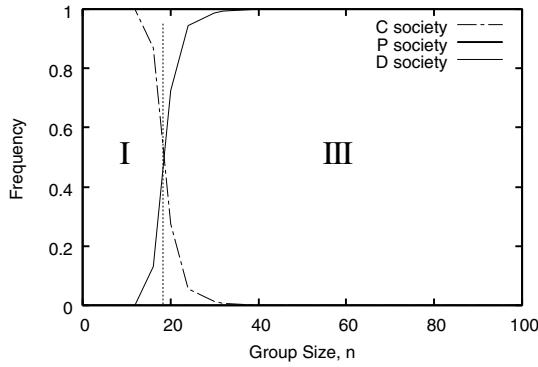


図5 n-RPD (STAND2) におけるグループの人数と実現する収束状態の関係 (一点鎖線: 協力社会, C society, の実現頻度, 太線: 安定共存社会, P society, の実現頻度, 実線: 裏切社会, D society, の実現頻度, シミュレーション 1000 回の平均). 領域 I では協力社会が実現する確率が一番高く, 領域 II Ⅰでは裏切社会が実現する確率が一番高い.

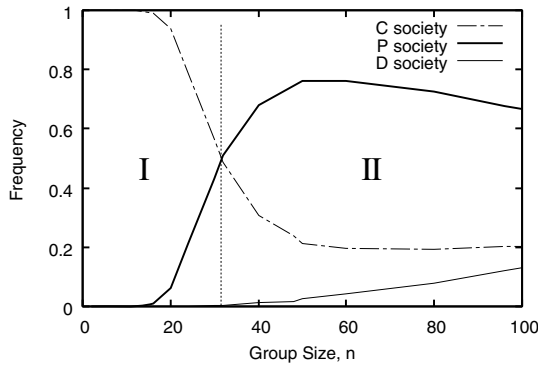


図6 n-IPD におけるグループの人数と実現する収束状態の関係 (一点鎖線: 協力社会, C society, の実現頻度, 太線: 安定共存社会, P society, の実現頻度, 実線: 裏切社会, D society, の実現頻度, シミュレーション 1000 回の平均). 領域 I では協力社会が実現する確率が一番高く, 領域 II では安定共存社会が実現する確率が一番高い.

戦略) のみが存在するケースに関しては, Suzuki & Akiyama⁹⁾ が直接的, 間接的互恵性に基づく協力行動の関係について以下のことを厳密に示している: (1) 「裏切を無条件に悪とみなす」評判基準 (image scoring, IMAGE) が採用されているとき, 間接的互恵性に基づく協力行動は直接的互恵性に基づく協力行動に比べ進化しにくい; (2) しかし, 「評判の悪いメンバーがいるグループ内での裏切は正当とみなす」評判基準 (standing, STAND2) が採用されているときは, 間接的, 直接的互恵性に基づく協力行動の進化し易さは厳密に等しい.

本研究では, Suzuki & Akiyama⁹⁾ のモデルを拡張した. 具体的には, ALLD, 2 種類の Discriminating 戦略 (or TFT 戦略) と ALLC が存在す

るケースについて, 計算機シミュレーションを用いて分析した. シミュレーションは, n-IPD, image scoring 評判基準の下での n-RPD と 2 種類の standing 評判基準の下での n-RPD の 4 つのケースについて行った (n-IPD, n-RPD(IMAGE), n-RPD(STAND1), n-RPD(STAND2)). その結果, 以下のことが明らかになった: (1) グループの人数が多いとき, 間接的互恵性に基づく協力行動はどのような評判基準を用いても, 直接的互恵性に基づく協力行動に比べて進化しにくい; (2) グループの人数が少ないときは, 「一人でも評判の悪いメンバーがいるグループ内での裏切りを正当とみなす」評判基準 (STAND2) を用いることで, 間接的互恵性に基づく協力行動は直接的互恵性に基づく協力行動と同程度に進化しやすくなる.

上記の結果が生じるメカニズムを明らかにするために, n-IPD における協力行動の進化と 3 種類の n-RPD における協力行動の進化を詳しく比較する.

4.1 n-IPD における協力行動の進化

n-IPD では, グループの人数が少ないときは全員が協力する協力社会が形成される. また, グループの人数が多いときは, $T_{(n-1)/2}^*$ と ALLD が共存する安定共存社会が実現する.

4.2 n-RPD(IMAGE) との比較

n-RPD(IMAGE) では, Discriminating 戦略の裏切者に対する裏切り (罰) が不当な行為であると判断されてしまう. その結果, 裏切者を罰した Discriminating 戦略自身の評判が悪化し, Discriminating 戦略間で「裏切りの連鎖」が発生してしまう. 例えば, 裏切りに罰を与えた Discriminating 戦略 A の評判が悪化することにより, 別の Discriminating 戦略 B から裏切られ, その結果 B の評判も悪化して, 別の Discriminating 戦略 C に裏切られ, 今度は C が... というプロセスで裏切りの連鎖は生じる. その結果, Discriminating 戦略の適応度が低下する.

以上により, n-RPD(IMAGE) では n-IPD と比べ, 協力行動の進化が困難になる.

4.3 n-RPD(STAND1) との比較

また, n-RPD(STAND1) では, STAND1 の定義より, $DIS_{(n-1)/2}^{**}$ の裏切りは全て正当な行為であると評価される. しかし, DIS_{n-1}^{***} の裏切りの一部

☆ 始めは協力し, それ以降はグループ・メンバーの半分以上が前回のラウンドで協力したときのみの次のラウンドで協力する.

☆☆ グループ・メンバーの半数以上が評判 good を持つときのみ協力する.

☆☆☆ グループ・メンバー全員の評判が good のときにのみ協力する.

は不当な行為であるとみなされる。よって、前述の n-RPD(IMAGE) のケースに比べると少ないが、Discriminating 戦略間での「裏切りの連鎖」が生じてしまう。その結果、n-RPD(STAND1) での協力行動の進化は、n-RPD(IMAGE) での進化に比べると容易だが n-IPD における進化に比べると困難になってしまう。

4.4 n-RPD(STAND2) との比較

最後に、n-RPD(STAND2) では、STAND2 の定義より、Discriminating 戦略の裏切りは全て正当な行為であると評価される。そのため、Discriminating 戦略間での「裏切りの連鎖」は起こらない。このケースでは、最も厳しい Discriminating 戦略間である DIS_{n-1} の適応度が高くなる。そして、グループの人数が少ないケースでは、協力行動が n-IPD における協力行動と同程度に進化しやすくなる。しかし、 DIS_{n-1} は ALLD と共存することができないので、グループの人数がある閾値以上になると、全く進化できなくなる。以上により、グループの人数が多いときは、安定共存社会を実現する n-IPD や n-RPD(IMAGE), n-RPD(STAND1) に比べて協力行動の進化が難しくなる。

参 考 文 献

- 1) Alexander, R.D. *Darwinism and Human Affairs*. University of Washington Press, Seattle. (1979).
- 2) Axelrod, R. *The Evolution of Cooperation*. Basic Books, New York. (1984).
- 3) Boyd, R., & Richarson, P. J. The Evolution of Reciprocity in Sizable Groups. *J. Theor. Biol.* **132**, (1988) 337-356.
- 4) Joshi, N.V. Evolution of cooperation by reciprocation within structured demes. *J. Genet.* **66**, (1987) 69-84.
- 5) Nowak, M.A. & Sigmund, K. Evolution of indirect reciprocity by image scoring. *Nature*. **393**, (1998a) 573-577.
- 6) Ohtsuki, H. & Iwasa, Y. How should we define goodness?-reputation dynamics in indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **231**, (2004) 107-120.
- 7) Sugden, R. *The Evolution of Rights, Cooperation and Welfare*. Oxford: Blackwell. (1986).
- 8) Suzuki, S. & Akiyama, E. Reputation and the Evolution of Cooperation in Sizable Groups. *Proceedings of the Royal Society London, B* **272**, (2005) 1373-1377.
- 9) Suzuki, S. & Akiyama, E. Exact relation between indirect and direct reciprocity in groups of various sizes. *submitted*.

- 10) Trivers, R. The evolution of reciprocal altruism. *Q. Rev. Biol.* **46**, (1971) 35-57.