

# 人工社会における秩序形成とコミュニケーション

中村太戯留 池田信夫

tagiru@mag.keio.ac.jp ikeda@mag.keio.ac.jp

慶応義塾大学大学院 政策・メディア研究科

〒252 神奈川県藤沢市遠藤5322

## 要旨

個人の合理的な選択によって社会的に非効率な結果が生じる「囚人のジレンマ」を遺伝的アルゴリズムをもちいて計算機上に実装し、不特定多数のエージェントがランダムに出会う「人工社会」で相互協力が成立する条件を実験した。

コミュニケーションによって自分の仲間を判別して選択的に協調する「秘密の握手」によって秩序が形成されるが、このような閉鎖的なエージェントは、よそ者の方が多く場合にはかえって孤立して不利となる。

これを克服するには、一度協力した相手とはずっと交友関係を結ぶことが有効だが、このようなしくみは友人のふりをして裏切る寄生的な戦略に搾取されてしまう。それを防ぐには、参入障壁を設けることが効果的となる。

## Evolution of Order in an Artificial Society with Communication

NAKAMURA, Tagiru IKEDA, Nobuo

Graduate School of Media and Governance, Keio University

5322 Endo, Fujisawa City, Kanagawa, 252 JAPAN

### Abstract

We implemented the Prisoner's Dilemma to a program for simulation by genetic algorithms. The dilemma can be saved by repeating games by the same agents, but cooperation fails when anonymous agents meet each other at random.

Agents can form a social order by such strategy as called *secret handshake(SHS)*, cooperating only with their friends who are identified by pre-play communication. But if such agents are minority, they are isolated and ostracized themselves.

While it is useful to stick to close friends for SHS, they are exploited by the *parasites* who mimic the same message as SHS but defect them. They can be expelled by the social custom to impose "admission fees".

個人の合理的な行動の集計が社会全体としては非効率的な結果をもたらすというパラドックスをゲーム理論によってあらわしたものが、有名な「囚人のジレンマ」である。これを救うための工夫は、計算機科学の分野でもオートマトンを使って数多く試みられてきたが、そのほとんどは同じエージェントどうしのくり返しゲームにおいて「評判」の形成を考えるものであった。

しかし、特定のエージェント同士が継続してゲームを続けるという条件は不特定多数が出会う分権的な社会においては例外的なものであり、実は協力の成立にとっての必要条件でもない。われわれは遺伝的アルゴリズムをもちいて計算機上に多数のエージェントがランダムに出会う「人工社会」を実装し、相手とのコミュニケーションによってどのように秩序の形成が変化するかシミュレーションを行なった。

## 1 人工社会

以下で用いるのは、図1のような利得行列であらわされる囚人のジレンマである。ここでC（協力）とD（裏切り）はエージェントの戦略を、欄内の数字は順に行と列のエージェントの利得をあらわす。

|   |      |      |
|---|------|------|
|   | C    | D    |
| C | 1,1  | -1,2 |
| D | 2,-1 | 0,0  |

図 1: 囚人のジレンマ

よく知られているように、このゲームの唯一のナッシュ均衡は (D,D) であり、これは進化的安定戦略 (Evolutionary Stable Strategy=ESS) でもあるから、両者がともに裏切る非効率的な均衡が進化的にも選ばれる。しかし、同じエージェントどうしでゲームが長期的にくり返される場

合には、相手の「評判」についての情報がおのずから蓄積され、それによって Tit for Tat (TFT) などの「善良」なエージェントが高い利得を上げることができる [1]。しかし、不特定多数のエージェントがランダムに出会うランダム・マッチングにおいては、相手に報復される心配がないため評判を維持するインセンティブはない。事実、多くの種類のオートマトンを互いにランダムに組み合わせた実験では、むしろつねに裏切る All D などの「邪悪」なエージェントが優勢となる [2]。

このような「万人の万人に対する闘い」を避けるためのしくみとしては、さまざまな工夫が提案されているが、中でも単純で強力なのが、対戦する前にメッセージを發して、相手も同じメッセージを發した場合には協力し、それ以外には裏切る秘密の握手 (secret handshake=SHS) と呼ばれるクラスの戦略である [4]。SHS は裏切るエージェントとは同等に闘え、協力するエージェントも搾取でき、そして仲間どうしでは協力によって高い利得を得られるので、ほとんどの戦略を支配し、ランダム・マッチングのもとでも進化的安定戦略となる。これは、エージェントが言語の使用を通じて意味や秩序を内生的に形成してゆく Wittgenstein の「言語ゲーム」の定式化ともみなせよう。

しかし、SHS が無敵の強さを示すのは、すべての個体と同じ条件で当たる理想的な条件のもとでの解析結果であり、個体数の違いやマッチング・ルールなどの条件を変えると、エージェント間の複雑な相互作用が生じて pre-play communication の有効性がそがれ、また嘘つきによってメッセージの信頼性が失われると、社会全体が混乱する。われわれは、囚人のジレンマのもとでのコミュニケーションの効果と限界をさまざまな条件のもとで検証するため、以下のようなモデルを使って計算機上の実験を行なった。

## 2 モデル

今 SHS の個体数を  $N_s$  とし、SHS 以外の戦略 S をもつ  $N_s$  個体と対戦させたとしよう。戦略と

しては以下の8種類を用意した。

**Trigger (G/TRG)** 最初は協力(C)し、その後は相手が裏切る(D)まで協力し続ける。しかし、一度でも裏切った相手に対してはその後は一切裏切り続けるという戦略。

**Tit for Tat (T/TFT)** 最初は協力(C)し、その後は前回の相手の結果を真似するという戦略。

**Neo Tit for Tat (N/NTT)** 最初は協力(C)し、その後は直前に相手が1回だけ裏切った場合には60%の確率で裏切り、2回続けて裏切った場合には80%の確率で裏切り、3回以上続けて裏切った場合には100%の確率で裏切るという戦略。

**仏の顔も3度まで (3/THR)** 最初は協力(C)し、3回までの相手の裏切りは許容するが、4回以上の裏切りに対しては裏切るという戦略。

**All C (C/ALC)** 終始一貫して協力するという戦略。

**All D (D/ALD)** 終始一貫して裏切るという戦略。

**Random (R/RND)** 終始一貫して協力するか裏切るかをランダムに決めるという気まぐれな戦略。

**Secret Handshake (H/SHS)** メッセージ  $M$  を発して、相手も同じメッセージ  $M$  を発した場合には協力し、それ以外は裏切るという戦略。但し、ここでは偽のメッセージや適当なメッセージを発して裏切るという戦略の存在やメッセージが正確に届かないという事態は排除して考えてゆくことにする。

SHSは同個体数の相手と個別に対戦した場合には必ず勝つことが知られており、実際に今回のシミュレーションでもそうだった。例えば、SHSとTFTの対戦は図2のようになった。しかし、

複数の同個体数の相手と一度に対戦した場合には、無残にも敗退してしまった(図3参照)。

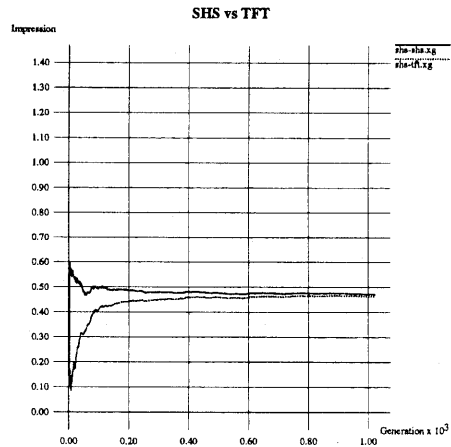


図2: SHSとTFT

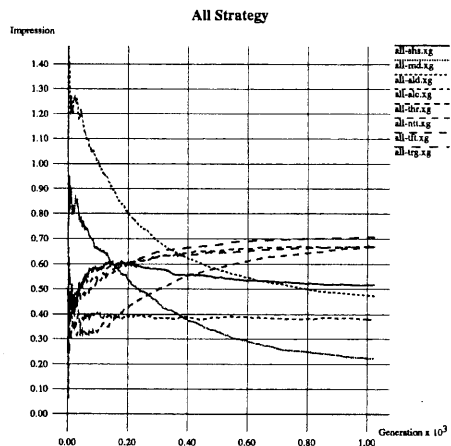


図3: 8戦略のマッチング

### 3 SHSの限界

その原因を突き止めるために、同個体数の全ての戦略と個別に対戦を行ない、その結果をまとめた。ここでは、あくまで第三者の視点を入れられないようにするために、自分が相手から受けた〈印象 (impression)〉を対戦した相手ごとに記憶するようにした。相手の行動  $i$  と自分の行

動  $j$  に対する自分の印象を  $I_{ij}$  と表記することにより、印象を表すベクトルは

$$I_m = \{I_{CC}, I_{CD}, I_{DC}, I_{DD}\}$$

と表現できる。具体的な数値としては、囚人のジレンマの Payoff Matrix で用いられる値を使用する。

$$I_m = \{1, 2, -1, 0\}$$

また、各個人ごとに印象の累積を見た場合、その値が高いほど親しさの度合いも高いと考えられる。ここでは、そのような親友がたくさんいるほどその人は元気であると考え、個別の印象 ( $I_t$ ) の平均によってその人のエネルギー ( $E_t$ ) が定まることにしよう。

$$E_t = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t I_k$$

さらに、戦略  $S$  の時刻  $t$  における平均エネルギー ( $\bar{E}_t$ ) をプロットし、他の戦略のそれと比較しながら傾向を探っていくことにする。

$$\bar{E}_t = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} E_{tk}$$

この時の勝敗は以下に示す結果となった。但し、○は  $\bar{E}_t$  が相手よりも高いことを表し、△は  $\bar{E}_t$  が相手と同じであることを表し、×は  $\bar{E}_t$  が相手よりも低いことを表す。また、自分の結果は表を横方向に見るものとする。

|   | G | T | N | 3 | C | D | R | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| G | - | △ | △ | △ | △ | ○ | ○ | × |
| T | △ | - | △ | △ | △ | ○ | ○ | × |
| N | △ | △ | - | △ | △ | ○ | ○ | × |
| 3 | △ | △ | △ | - | △ | ○ | ○ | × |
| C | △ | △ | △ | △ | - | × | × | × |
| D | × | × | × | × | ○ | - | ○ | × |
| R | × | × | × | × | ○ | × | - | × |
| H | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - |

ここで注意したいのは、 $\bar{E}_t$  が相手と全く同じという現象が多発している点である。例えば、TFT と NTT の  $\bar{E}_t$  の推移をプロットしたのが図 4 である。

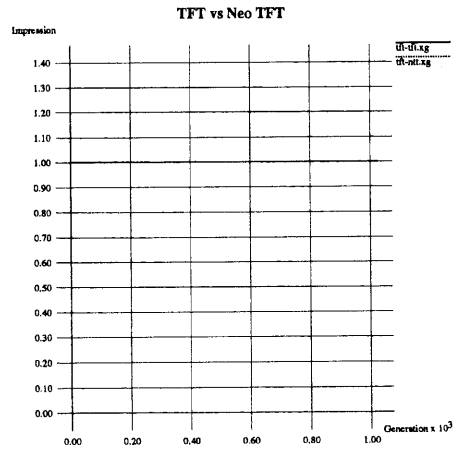


図 4: TFT と Neo TFT

これは、最初は協力 (C) し、その後は前回の相手の結果を真似するという戦略の特性に由来している。最初はお互いに C を出し合い、その後は前回の相手の結果、即ち C を出し続けるので、結果として全て C となり、 $\bar{E}_t$  は常に 1 となるわけである。この性質は TRG, TFT, NTT, THR の 4 つの戦略に共通しており、また ALC も結果として同じ現象をひきおこしており、これらの戦略同士の対戦結果は全て常に 1 で一定となっていることはこのメカニズムがもたせて生じていたわけである。

しかし、同個体数の SHS と他の戦略が個別に対戦した時には必ず SHS が高い  $\bar{E}_t$  の値を獲得するのに、複数の同個体数の相手と同時に対戦するとやがて TRG, TFT, NTT, THR に敗れてしまうのはなぜだろうか。結論からいえば、はじめは C で後は相手の反応に追従するタイプの戦略を有する個体の個体数が SHS の個体数を上回った時、ランダム・マッチングを続けていればやがて SHS の  $\bar{E}_t$  を追いついてしまうというのが原因となっていたわけである。例えば、SHS の個体数を  $N_s$ 、TFT の個体数を  $N_t = N_s + 1$  として両者を対戦させた場合の結果は図 5 のようになる。

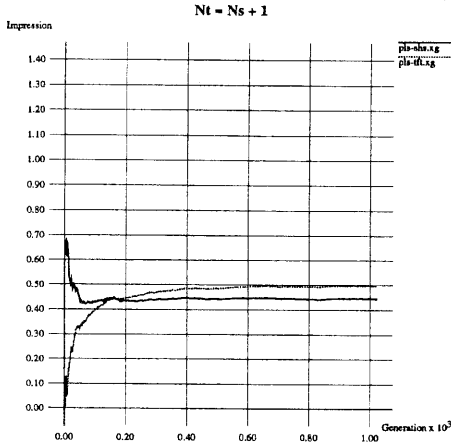


図 5: SHS と個体数の多い TFT とのマッチング

#### 4 解析

ではつぎに、この現象に対して解析的なアプローチを試みてみることにしよう。今、ランダム・マッチングによって相手を選ぶ確率が同様に確からしいとするならば、 $m$  人の相手と対戦する最小の回数 ( $N_m$ ) は以下のように表現できる。

$$M(m) = \begin{cases} m & (\text{奇数の場合}) \\ m - 1 & (\text{偶数の場合}) \end{cases}$$

となる。この間の結果を、1 フェーズ ( $F_n$ ) とした場合、 $F_1$  は以下のように表現できる。

$$F_1 = \begin{pmatrix} \vdots & \dots & N_s & \dots & N_t \\ \vdots & - & ICC & \dots & ICD \\ N_s & \dots & - & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & IDC & - & ICC \\ N_t & \dots & \dots & \dots & - \end{pmatrix}$$

フェーズ 2 以降も同様にして以下のように表現できる。

$$F_n = \begin{pmatrix} \vdots & \dots & N_s & \dots & N_t \\ \vdots & - & ICC & \dots & IDD \\ N_s & \dots & - & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & IDD & - & ICC \\ N_t & \dots & \dots & \dots & - \end{pmatrix}$$

ところで、フェーズ 1~ $n$  のそれぞれの個体の  $E_s, E_t$  は以下のように表現できる。

$$n(N_s + N_t - 2)E_s = (N_s - 1)ICC(n) + (N_t - 1)(ICD + IDD(n - 1))$$

$$n(N_s + N_t - 2)E_t = (N_t - 1)ICC(n) + (N_s - 1)(IDC + IDD(n - 1))$$

今、TFT が SHS の値を越える場合を知りたいので、

$$E_t - E_s > 0$$

となる条件を調べてみることにしよう。

$$\begin{aligned} n(N_s + N_t - 2)(E_t - E_s) &= n(N_t - N_s)(ICC - IDD) \\ &+ IDC(N_s - 1) - ICD(N_t - 1) \\ &- IDD(N_s - N_t) \end{aligned}$$

(1)  $N_t = N_s = N$  の場合。

$$(N - 1)(IDC - ICD) \geq 0$$

$N$  は個体数なので  $N - 1 \geq 0$ 。よって、

$$ICD \leq IDC$$

これは、 $I_m$  の条件と矛盾するため、この条件は棄却される。従って、 $N_t = N_s$  のときには  $E_t < E_s$  となる、つまり常に SHS の方が高い値をキープするということがわかる。

(2)  $N_t \neq N_s$  の場合。但し、この場合のもとで一般的に条件を求めるのは複雑な作業を要するので、今回は  $I_m$  の値を代入した上で条件を探ることにする。値を代入して整理すると以下のようになる。

$$(N_t - N_s)n \geq N_s - 2N_t - 3$$

a.  $N_s > N_t$  のとき。

$$n \leq \frac{N_s - 2N_t - 3}{N_t - N_s}$$

この場合、右辺は負の値になるのだが、 $n \geq 1$  という条件と矛盾するため、この条件は棄却される。従って、 $N_s > N_t$  のときには  $E_t < E_s$  と

なる、つまり常に SHS の方が高い値をキープするということがわかる。

b.  $N_s < N_t$  のとき。

$$n \geq \frac{N_s - 2N_t - 3}{N_t - N_s}$$

この条件を満たす  $N_s, N_t$  の値は存在する。例えば、 $N_t = N_s + 1$  のとき、この条件を満たす。この時、

$$n \geq 3N_s - 1$$

となるのだが、この  $n$  の値はフェーズ番号なので、これを時刻  $t$  に直してやる必要がある。ところで、各フェーズにおいて均等に全ての相手と対戦すれば、 $N_s + N_t - 1$  人の相手と出会うことになる。しかし、最短の場合には仲間しか出会わないということも考えられ、この時には  $N_t - 1$  人の相手にしか出会わないことになる。従って、TFT が SHS の値を追い越す最小の  $t$  の値は以下ようになる。

$$t = M(N_t - 1)(3N_s - 1)$$

図 5 は  $N_s = 8, N_t = 9$  という値を用いてシミュレーションした結果である。

$$t \geq 7(3N_s - 1) = 161$$

となり、予測値とシミュレーション結果が一致していることがわかる。

## 5 パートナーの選択

この解析とシミュレーションの結果より、比較的閉鎖的な性質を持つ SHS は、自身の個体数を上回る TFT などと対戦した場合、やがて敗退してしまうことがわかった。この問題点を補強するための対策としては次のようなものが考えられる。

**Neo Secret Handshake** 基本的には SHS と同じ行動をする。仲間を見つけるまでの間はランダム・マッチングによって相手を選ぶが、仲間が見つかった後は、繰り返し同じ相手を選ぶという戦略。

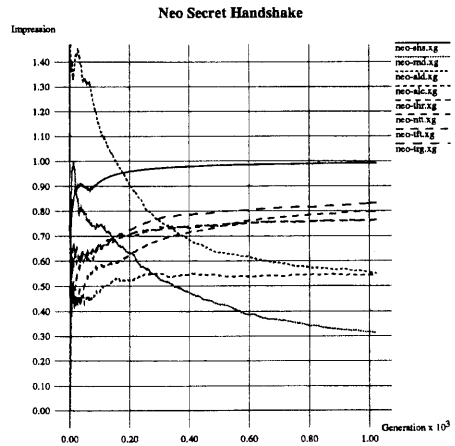


図 6: Neo SHS と 7 戦略

この戦略は、自分の仲間を選ぶまでの間は他の戦略を持つ人の目には ALD に映るため、記憶が蓄積されるに従って孤立化していくが、仲間が見つかった後は (相手が裏切らない限り) 同じ相手と会い続けるため、 $ICC$  の値に漸近してゆく。したがって、この態勢に移行した後は常に一番高い  $E_i$  をキープすることができる (図 6 参照)。このような「パートナー選択」によって協力が実現することは人工生命のシミュレーションでも知られているが、その優位は必ずしも絶対的なものではない [5]。しかし、SHS のようなコミュニケーションと組み合わせることによって強力なコーディネーションが可能になるわけである。

ところが、こうした戦略に対しては、SHS と同じメッセージを出して D をとる parasite (PRS) と呼ばれる戦略が侵入できる。これは、他の戦略に対しては SHS と同じ利得をあげることができ、SHS に対しては裏切ることによって搾取できるため、非常に強く、図 7 からわかるように、他のすべての戦略を支配する。ここではコミュニケーションの信頼性が崩壊するため、それに頼る SHS は混乱して 5 位に転落し、全体としても利得が大きく下がっている。

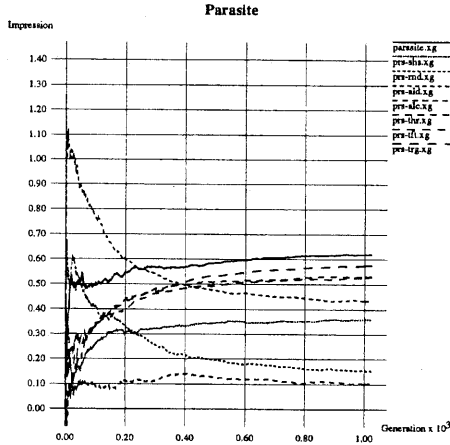


図 7: Neo SHS と PRS を含む 8 戦略

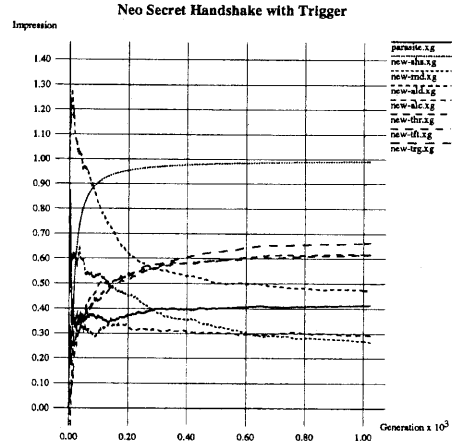


図 8: NSHST と PRS を含む 8 戦略

## 6 学習と記憶

このような詐欺的な戦略に対しては、同じメッセージを出しても過去に1度でも裏切ったことがある場合にはそのメッセージを疑うという対応策が考えられる。このような「引き金」付きのNeo SHS(NSHST)を含む8戦略でシミュレーションを行なったところ、この新しい戦略が最上位となり、PRSは6位に落ちた(図8)。しかし、このような個人の記憶に頼る方法では、寄生的な戦略を完全に駆逐することはできず、またエージェントの数が増えたり、移動が激しくなったりした場合には記憶が継承されないため、秩序を十分維持できない。

## 7 コミュニケーションのコスト

PRSのように偽物のメッセージを出すエージェントを個人の記憶に頼らずに駆逐する方法として、コミュニケーションのコストを導入することが考えられる[3]。新規に新しい人と対話を始めるためには「入会金」1点がかかり、同じ相手とつきあう限り新たなコストは生じないが、信頼を裏切って縁を切られると、次の相手をさがして再び入会金を払わなければならないでしょう。このような状況においては、入会金は固定費用だから、同じ相手とながくつきあうほど

コミュニケーションにかかる平均コストは低くなる。

その結果が、図9である。SHSなどうまく平衡状態に移行できた6つの戦略は、協力関係に入ってコストを払う必要がなくなるため、急速に $ICC$ に漸近するが、毎回コストを払うPRSの利得はALDと同様、 $-0.5$ に漸近している。エネルギーレベルが負になるということは普通死を意味するので、ごく早い段階で淘汰されたことになる。

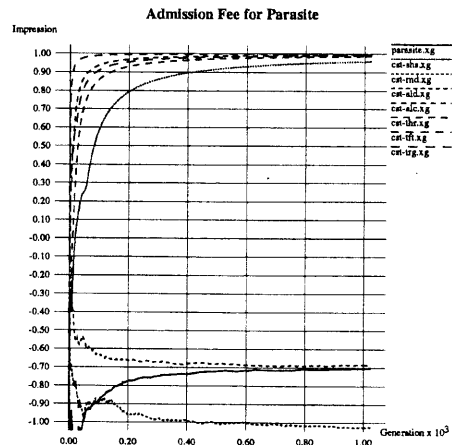


図 9: 入会金のある 8 戦略

共同体の加入者に初期投資を事実上強いるしくみは、人類学では定例的な贈与、成人式の通

過儀礼など数多く知られており [3], 現代の社会においても, 徒弟修行, 入学試験などさまざまな形で見られる. このような投資は集団を離脱しても回収できない埋没費用 (sunk cost) となるため, 人を集団に強く拘束する効果を持つ.

## 8 結論

分権的な社会においては, 盲目的に相手の行動に反応するエージェント同士では互いに裏切りあうホップズ的な状態が生じてしまうが, 言語によって自分の仲間を判別して選択的に協調することによって秩序が形成される. 実際の動物の世界でも, 血縁関係を判別して遺伝子を共有する個体とだけ協調する「血縁淘汰」は進化のもっとも基本的なメカニズムと考えられている [6]. 博愛主義者はエゴイストに搾取され, エゴイストは互いに攻撃して自滅してしまうから, 安定した集団を作るためには, コミュニケーションは重要なコーディネーション装置なのである. 人間の社会でも, ムラやイエの中でだけ一定の規範を共有し, よそ者は排除するしくみが秩序維持にとって大きな役割を果たしている.

しかし, こうした「閉鎖的」なしくみの有効性は, 社会の中でどれぐらい多くのメンバーがムラに属しているかによって異なる. 第3節でも見たように, 多くの人々がムラに帰属している時には, よそ者を排除することによって秩序を維持できるが, よそ者の方が多い場合にはかえって孤立してしまうからである. これを克服するには, ランダムに相手をさがすのではなく, 一度協力した相手とはずっとつきあうという保守的な交友関係を結ぶことが有効となる.

ところが, SHS のような戦略は, コミュニケーションにコストがともなわない場合には, 友人のふりをして裏切る寄生的な戦略に搾取されてしまう. この種の戦略から秩序を防衛するには, 裏切り者のメッセージは信用しないという自衛策もあるが, 十分ではない. このような場合, コミュニケーションのための初期費用 (入会金) が有効である. いったん友人になれば二度と入会金を払う必要はないが, 詐欺師はつねに新しい

相手にコストを払わなければならないからである. 多くのことなる言語が存在するという事実そのものが言語獲得のコストによって参入障壁を築くしくみともいえよう.

さまざまなしくみによって閉鎖性や排他性を高めるほど秩序の維持は容易になるが, 創作的な仕事や対話をしている場合には, 社会が平衡系となってしまえば, やがてアイデアが枯渇してしまうであろう. また, 何らかの外的要因によって系が破壊された場合には, 新しい環境に適応できずに死滅してしまうかもしれない. このような場合, むしろその系を壊して秩序の再組織化を行なうことが必要となる. これは進化の過程では突然変異に相当するが, それによって望ましい均衡が実現するかどうかは一概にはいえない. こうした動的な進化のシミュレーションを行ない, 意味や秩序の再編成の過程を跡づけることが今後の課題である.

## 参考文献

- [1] Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, 1984.
- [2] Binmore, K., *Game Theory and the Social Contract Volume I: Playing Fair*, MIT Press, 1994.
- [3] Carmichael, H.L. and MacLeod, W.B., "Gift Giving and the Evolution of Cooperation", mimeo, Queen's University, 1992.
- [4] Robson, A.J., "Efficiency in Evolutionary Games", *Journal of Theoretical Biology*, 1990(144) 379-96.
- [5] Stanley E. A., D. Ashlock and L. Tesfatsion, "Iterated Prisoner's Dilemma with Choice and Refusal of Partners" in C. G. Langton et al.(eds.), *Artificial Life III*, Addison-Wesley.
- [6] Trivers, R., *Social Evolution*, Benjamin, 1985. (『生物の社会進化』産業図書)