

血縁淘汰による「種」の分化と利他行動の獲得

木下和絵† 武藤敦子†
中村剛士† 伊藤英則†

生活空間を共有する動物種は、種特有の信号パターンの交換によって同種内の協同関係を維持している。本稿では、信号の発信を一種の利他行動と考え、利他行動の発生理論として有力な「血縁淘汰説」²⁾に基づいたアルゴリズムを用いることでコミュニケーションを進化させる。さらに、血縁淘汰と並列 GA によって種分化のメカニズムを構築し、シミュレーションにより集団を各々異なる信号パターンを持つ複数の種の複合体に進化させる効果を実証した。

Evolution of Altruistic Behavior and Specialization of "Species" by Kin-Selection

KAZUE KINOSHITA,† ATSUKO MUTOH,† TSUYOSHI NAKAMURA,†
and HIDENORI ITOH,†

Some species, which live in same space, cooperate among same species by exchanging their specialized signal patterns. In this paper, a behavior of sending signal is regarded as one of the altruistic behavior. So we take "kin-selection"²⁾ in genetic algorithm, which is popular theory of altruistic behavior, to be evolved a communication. Moreover, the speciation mechanism is realized by parallel GA and kin-selection. The efficiency of this algorithm is proved by a simulation that a group is evolved to a complex of some species which have original pattern of signals.

1. はじめに

動物集団は各々特有の方法で情報、意思等をコード化した信号を送受信し、同種間のコミュニケーションを確立する。しかし、個体は情報を独占することで他の同種個体よりも有利に行動でき、自分が子孫を残す確率(適応度)を高めることができる。逆に、情報を種内に広めれば多くの同種個体の適応度が上昇し、種全体としては勢力を拡大できるが、発信者自身の適応度は相対的に高くならない。情報を獲得するために費やしたコストが高い場合や、警戒音の発信のように信号発信行為自体に危険が伴う場合は、むしろ発信者の適応度は低下する。このように、自分の適応度を上げることを犠牲にし、種全体の適応度を上げる行為を利他行動と呼ぶ。一般的な遺伝的アルゴリズム(GA)

は高い適応度を獲得できる個体を進化させるため、利他行動を行う個体を淘汰する性質を持つ。

一方、利他行動は自分以外の多数の近親者*の適応度を高め、結果的に自分と同じ遺伝子を持つ子孫を増やす戦略と考えられている²⁾。自分と同じ遺伝子を持つ子孫が残る確率を包括適応度と呼び、包括適応度による個体の選択、淘汰を血縁淘汰²⁾と呼ぶ。GAにおいて一般的な適応度の代わりに包括適応度を使用することで、個体が染色体パターンの類似した他個体に対し利他行動を行なう有利性が生じ、利他行動を行なう個体が進化できる。

本稿では、利他行動を進化させる効果に加え、集団を幾つかの染色体パターンが類似した小集団(以降種と呼ぶ)に分割して進化させる効果を持つ新しい包括適応度を定義した。この包括適応度をGAの個体選択に用い、集団を信号送受信によっ

† 名古屋工業大学知能情報システム学科
Department of Intelligence and Computer Science,
Magoya Institute of Technology

* ここでは血縁関係者のみでなく、染色体パターンの類似した個体すべてを「近親者」と呼ぶ。

表 1 問題の表現方法

個体の染色体長	L
個体 \mathbf{a}_i の染色体	$\mathbf{a}_i = (g_i^1, \dots, g_i^L)$ $g_i^j \in \{0, 1\}, g_i^j$ は遺伝子
集団サイズ	M
集団 \mathbf{A} の表現	$\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M\}$
個体 \mathbf{a}_i の獲得利益	b_i
集団 \mathbf{A} の獲得利益	$B_A = \sum_{i=1}^M b_i$

て協調的に活動する幾つかの種の複合体へ進化させる。なお、種分化を効率化するため並列 GA を使用する。

ここでは餌の採取を目的とした個体が、餌に関する情報を送受信する実験モデル(採餌問題*)を用いる。餌は数種類存在し、個体の染色体パターンによって餌の好み異なる。どのような餌を好みとしているかを「餌の嗜好」と呼ぶ。ここでは、餌の嗜好が一致する個体の集合は一つの種を形成するものとする。以降、このモデルを用いた実験により、提案するアルゴリズムの利他行動の獲得と種の分化に関する効果を実証する。

2. 血縁淘汰の方法

本稿で用いる緒言の記号は表 1 とする。ここで扱う採餌問題では、集団全体の利益 B は各個体の得た利益 b_i の総和となる。また、以降利他行動を行ない、他者に利益を与える個体を **donor****、利他行動を受けることでより多くの利益を獲得できる個体を **recipinet****と呼ぶ。

2.1 包括適応度

包括適応度は集団内の個体全ての獲得利益に依存する。一般に個体 \mathbf{a}_i の包括適応度 f_i の定義は以下とされる⁸⁾。

$$f_i = \sum_{j=1}^M r_{ij} \cdot b_j \quad \square$$

b_j は個体 \mathbf{a}_j が獲得した利益、 r_{ij} は \mathbf{a}_i と \mathbf{a}_j の類似度を表す。本稿では r_{ij} として、 \mathbf{a}_j と \mathbf{a}_i の染色体パターンが一致するとき 1 となり、染色体パターン類似度の低下に従って 0 に近づく関数*** (定義 2.1) を提案する。

定義 2.1

$$r_{ij} = \alpha^{d'_{ij}}$$

$$r'_{ij} = \frac{d_{ij}}{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M d_{ik}} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

d_{ij} : \mathbf{a}_i と \mathbf{a}_j のハミング距離 (相違度) \square

個体 \mathbf{a}_i と個体 \mathbf{a}_j の染色体パターンの相違度 (ハミング距離 d_{ij}) が相対的に大きいとき、類似度 r_{ij} は 0 に近づく。このとき α が小さい値に設定されていれば、 \mathbf{a}_i の包括適応度 f_i が \mathbf{a}_j の利益 b_j から受ける影響を無視できるほど小さくできる。逆に \mathbf{a}_i と \mathbf{a}_j の染色体パターンの相違度が小さければ、 \mathbf{a}_i が直接獲得した利益 b_i が低くても (\mathbf{a}_i は donor), \mathbf{a}_j の獲得利益 b_j が上昇すれば (\mathbf{a}_j は recipinet), \mathbf{a}_i の包括適応度 f_i も上昇する。このため、類似個体に対して利他行動を行なう donor も子孫は残すことが出来る。

2.2 種の分化

定義 2.1 では、集団が自分と類似の個体によって寡占されると r'_{ij} の分母 (平均的な相違度) が小さくなり、染色体パターンが非常に類似した ($d_{ij} \simeq 0$) 数個体のみから影響を受けるようになる。この性質には集団の極端な均一化を防止すると同時に、集団を相対的に染色体パターンが類似した小集団 (種) に分割して進化させる効果がある。

まず定義 2.1 の使用により、集団内で高い利益を獲得する数個体を中心に幾つかのグループ (種) ができる。個体は自分のみでなく、種全体の個体が利益を獲得できなければ包括適応度が上昇しないため、同種個体とコミュニケーションを計る必然性が生じる。すなわちこの包括適応度の使用は、複数の異なる種が並列に種の利益を増加させる方向に進化することを可能にする。

種は性質を変化させることで未利用の資源が利用可能になる場合、様々な亜種への分化が可能である。但し単純 GA では、全く他と異なる個体の発生は突然変異のみに依存するため、偶然新種を獲得する可能性が非常に低い。

* 文献 3) の「採餌問題」を参考に、文献 9) でモデル化した。3.2 章で説明。

** 文献 7) による。

*** 文献 8) では染色体パターン類似度が低下すると r_{ij} が負の値をとる定義となっている。このとき \mathbf{a}_j が利益を拡大

すると f_i は減少する。しかし本稿のようにコミュニケーションを主眼とした問題を扱う場合、類似度の低い個体の利益増大がマイナスの影響を与えると考えるより、類似度が低ければコミュニケーションが成立しないため、何の影響も与え合わない ($r_{ij} \simeq 0$) と考えた方が自然である。

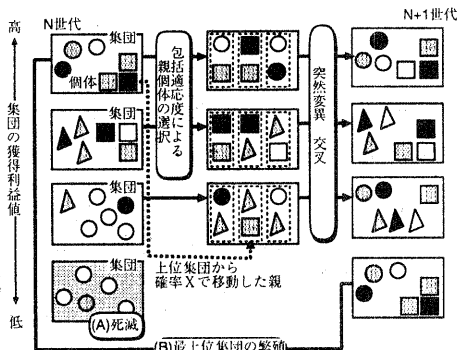


図1 複数集団に対する血縁淘汰

この問題は、文献5)などで研究されている並列GAの枠組を用い、複数の集団を並列に進化させることで解決する。個体群が何らかの形で生殖的に隔離された状態にある場合、祖先が共通でも全く異なる種が進化し得る⁴⁾。まず、複数の集団に対し別々に何世代かの血縁淘汰を行ない、この「生殖的な隔離」を実現する⁵⁾。次に、環境に適した種が存在する可能性が高い、総合的な獲得利益が多い集団を選択し(集団淘汰^{☆1})と呼ぶ)、選択した集団中の個体遺伝子をおある確率で他集団の親遺伝子プールへ侵入させることにより、集団に新しい染色体パターン導入の機会を与える。

2.3 アルゴリズム

本稿で提案するアルゴリズムの装束を以下に示す(図1)。

初期化 N個の集団 A_1, \dots, A_N をランダムに生成
 repeat 集団の利益 $B_{A_i} (i = 1, \dots, N)$ を求める
 各集団 $A_i (i = 1, \dots, N)$ 内部で
 全個体の包括適応度 f_1, \dots, f_M を求める
 repeat 親 a_{p1}, a_{p2} を選択し、
 遺伝的操作により子 a_{c1}, a_{c2} を生成
 until 生成した子が $M - E$ 体に到達
 E体のエリート個体を除く全個体を死滅させ、
 生成した子と世代交替
 until 最終世代
 —親 a_{p1}, a_{p2} の選択方法—
 自分の集団中、 f_i 上位の1体を a_{p1} とする
 a_{p2} の選択
 1. B_{A_i} 上位の集団中、 f_i 上位の1体を選択(確率 X)
 2. 自分の集団中、 f_i 上位の1体を選択(確率 $1-X$)
 なお、総合利益 B が最低の集団は死滅し(図1-

☆ 複数の集団の競争により優れた集団を進化させる手法。異種エージェントの役割分担最適化等、個体の評価が困難な問題に有効である。

(A)), 代わりに B が最大の集団が複製される(図1-(B))^{☆☆}。

3. 採餌問題モデル

本章では、実験に用いる「採餌問題」について説明する。

3.1 個体の遺伝子と機能

血縁淘汰説は「利他行動は近親者に対して行われる」という前提を持つ。生物の遺伝子は大部分が属する種を同定する情報であり、同種個体は一種の近親者である。ここでは、情報を信号化する方法(コード化方法)及び餌の嗜好を決定する遺伝子列が種を同定するモデルを用いる。次の定義3.1に、このモデルにおける染色体 a_i (表1)各部の機能を示す。

定義 3.1

$x_i = (x_i^1, \dots, x_i^p)$: 個性決定遺伝子

$s_i = (s_i^1, s_i^2, s_i^3, s_i^q)$: 信号遺伝子

$f_i = (f_i^1, f_i^2, f_i^3, f_i^r)$: 餌嗜好遺伝子

$a_i = (x_i, s_i, f_i) \quad x_i^j, s_i^j, f_i^j \in \{1, 0\} \quad \square$

x_i は種の特性とは無関係な、個々の性質に関する遺伝子である。種としての特性は s_i と f_i に依存する。 s_i と f_i の長さの和 $q+r$ に対し x_i の長さ p が十分短ければ、同種個体を近親者と見なすことができる。本稿の実験では $p=1, q=r=4$ とした。また、ここでは3.2.1章で述べる信号コード化方法を用いるため、 q と r は同じビット数にする。

3.2 採餌問題

多数のセルで構成された空間に、確率 P で餌が存在するセル(餌場)がある。各餌場にはある種類の餌が一定量存在する。餌は K 種類あり、各餌 $F_i (i = 1, \dots, K)$ の表現は次の定義3.2とする。

定義 3.2

$F = \{F_1, \dots, F_K\}$ (餌の全体集合)

$F_i = (F_i^1, F_i^2, F_i^3, F_i^q), \quad F_i^j \in \{1, 0\} \quad \square$

各餌は定義3.1の餌嗜好遺伝子 f_i と同じく長さ q (実験では長さ4)のビット列パターンで表現される。集団の目的は一定ターン^{☆☆☆}内になるべく

☆☆ 集団単位のエリート保存になる。集団(個体)は $B(b)$ の相対値に比例した確率で選択(ルーレット選択)した。

☆☆☆ 1ターンは全個体が1回づつ行動する単位である。

多くの餌を収集することで、個体の利益は各々が採取した餌の量で決定する。採取には採取コストがかかり、採取コストが餌による獲得利益より高い場合には採取できない。各餌 F_j は一定の栄養価 V_j を持つ。個体 a_i が餌 F_j を採取するとき、1ターン毎に得られる利益 b_{ij} 及び採取コスト c_{ij} は次の定義 3.3 に従う。

定義 3.3

$$c_{ij} = \lambda \cdot H(\mathbf{f}_i \oplus \mathbf{F}_j) \quad (\lambda \text{ は正の定数})$$

$$b_{ij} = V_j - H(\mathbf{f}_i \oplus \mathbf{F}_j)$$

$$\mathbf{f}_i \oplus \mathbf{F}_j = (f_i^1 \oplus F_j^1, \dots, f_i^q \oplus F_j^q)$$

$H(\mathbf{X})$ は行列 \mathbf{X} 中の 1 の数 \square

定義 3.3 より、 \mathbf{f}_i と \mathbf{F}_j のハミング距離と採取コストは正比例する。個体は最初一定のエネルギー E_0 を持つが、セルの移動と採取によってエネルギーが減少する。行動エネルギー E は $E = E_0 - \text{移動回数} + \sum (b_{ij} - c_{ij})$ とする。 E が 0 以下になると個体は行動不可能となる。すなわち採餌問題は、個体が獲得利益 $\sum b_{ij}$ に対する、採取コスト $\sum c_{ij}$ と餌場探索に伴う移動コストを最小化する問題である。

3.2.1 信号送受信

個体は餌を発見したとき、餌が自分の嗜好にどの程度合うかを表す内部表現へ変換し、採るべき行動を決定する。また、内部表現をコード化して信号を生成し、集団全体へ送信する (図 2)。

送信者 a_i は餌 F_j を発見すると、情報を内部表現 $A_i = F_j \oplus \mathbf{f}_i$ に変換し、採取コスト $H(A_i)$ を求める。さらに、 A_i をコード化した信号 $S_{ij} = A_i \oplus s_i$ を生成し、自分以外の全個体に向けて放送する。

受信者 a_k は、受信信号 S_{ij} を内部表現 $A_k = S_{ij} \oplus s_k$ に変換し、 $H(A_k)$ を信号発信地に存在する餌の採取コストと認識する。認識したコストが高ければ発信地のセルを避け、低ければ発信地のセルへ移動する。 $s_i = s_k$ のとき、 $H(A_k) = H(S_{ij} \oplus s_k) = H(A_i \oplus (s_i \oplus s_k)) = H(A_i)$ となり、受信者は送信者と同じ解釈ができる。但し、餌嗜好 $\mathbf{f}_i = \mathbf{f}_k$ でなければ、送信者と受信者の採取コストは異なる。すなわち、餌の嗜好 (\mathbf{f}) が異なる個体と同じ信号遺伝子列 (\mathbf{s}) を持つ個体は、自分にとって有益な情報を受信できない。

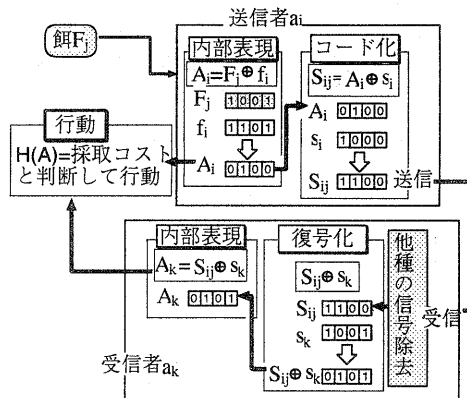


図 2 信号送受信

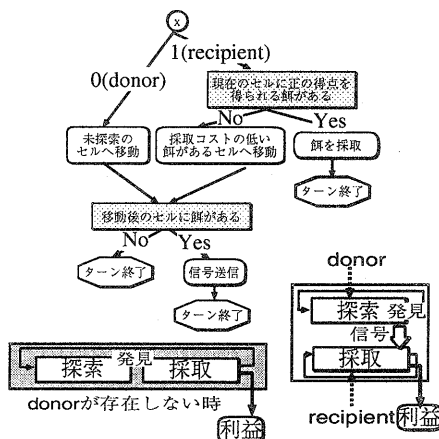


図 3 個体の行動

また、著しく異なる個体からの信号を受信不可能とするため、信号 S_{ij} には送信者を特定するヘッダ s_i が付けられる。受信者 a_k の受信成功確率 $p(a_k, S_{ij})$ を定義 3.4 に示す。

定義 3.4

$$p(a_k, S_{ij}) = \exp\left(-\frac{H(s_i \oplus s_k)^2}{2}\right) \quad \square$$

3.2.2 個体の個性

種の特性に無関係な、定義 3.1 の遺伝子 \mathbf{x} によって決定する個体レベルの性質として、餌の採取を優先する性質 ($\mathbf{x}=(0)$) と、餌の探索を優先する性質 ($\mathbf{x}=(1)$) の 2 種類が存在する。前者は直接的な利益獲得行動 (餌の採取) を行わず、他人の餌探索作業とそれに伴う探索コストを引き受ける。すなわち $\mathbf{x}=(0)$ の個体は利他行動を行う donor, それ

集団サイズ n	36 体
餌存在確率 P	0.05
初期エネルギー E_0	1000
採取コスト	$\lambda = 10, V = 2$
餌の種類	$F_1 = (1111)$ $F_2 = (1110)$ $F_3 = (0000)$
ターン数 T	1000

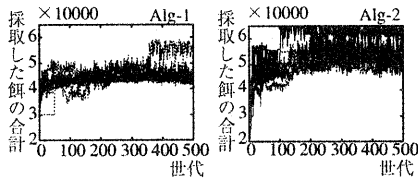


図4 総合利益 B の推移 Alg-1(左)Alg-2(右)

に対し $x = (1)$ の個体は recipient である。

ターン毎の個体の行動は図3のようになる。個体は受信信号から得たセル毎の採取コスト情報を記憶しており、最もコストが低い餌場へ移動する。donor はコストとは関係なく、まだ未探索の場所(信号発信が未確認のセル)へ移動する。受信に成功した信号が無いときはランダムに移動する。

この問題では donor は未探索のセルがある限り採取は行なわないため、獲得利益 ≈ 0 になる。このとき recipient は同量の餌をより早いサイクルで採取でき、一定ターン内に採取する餌は donor 非存在時より多くなる(図3)。

4. 実験

3章で定義した採餌問題モデルを用い、図1のアルゴリズムによる進化実験を行なった。包括適応度による個体選択の有効性を確認するため、個体選択の基準として一般的な適応度(個体の獲得利益)を用いるアルゴリズム(Alg-1)と、本稿で提案する包括適応度を使用するアルゴリズム(Alg-2)の2種類をそれぞれ実験した。なお、実験には表2のパラメータを用いる。

4.1 実験結果

定義3.3より、個体は $H(F_j \oplus f_i)$ が大きい餌を採取すると高いコストがかかり、行動エネルギーの減少により行動不能となる。そのため、どの実験でも最終的には各餌をコスト0で採取する3種(餌の嗜好が $f_1 = F_1$ or $f_2 = F_2$ or $f_3 = F_3$)の

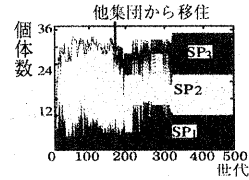


図5 移住の効果

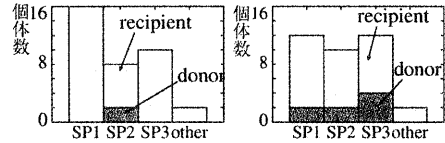


図6 500世代後の集団を構成する種別個体数(Alg-1(左), Alg-2(右))

みが残った。以後この3種をそれぞれ SP_1, SP_2, SP_3 と呼ぶ。図5はアルゴリズム中の移住の効果が見られた実験例で、集団を構成する種の推移を表している。この集団には200世代付近まで SP_1, SP_2 のみが存在し、この2種と全く嗜好が異なる餌 F_3 はほとんど利用されず、この未利用資源を採取する種 SP_3 が分化する余地が残されていた。その状態へ他の集団から種 SP_3 (もしくは SP_3 に類似の個体) が侵入し、100世代程度で繁殖、定着に成功している。

3種に分化後、各種内で信号パターンが統一され、種全体が最も効率よく餌を食べる状態へ進化する(図4で縦軸5~6万*付近)。

Alg-1では種内の信号パターンが非均一であったり、他種と同じパターンを用いているため(図7Alg-1)、種内の信号送受信がうまくいかず、採取できる餌の数は4.5万付近(図4Alg-1)に留まることが多い。図6Alg-1から、Alg-1ではdonor数が少ないことが分かる。これは獲得利益に従って個体選択を行なうため、獲得利益0のdonorは淘汰されやすいためである。さらに、Alg-1の場合は同種個体が理解できる信号を送信すると、自分が発見した餌場の餌を独占できない。このため他人と異なるパターンの信号を発信し、偶然餌を独占できた個体が生き残ることがあり、コミュニケーションが進化しにくい。

* 6万 = $(T \cdot (V \cdot (\text{recipient 数}))$ (図3)。情報伝達が最も効率的に行なわれるとき、recipient数は30から32体程度になる。

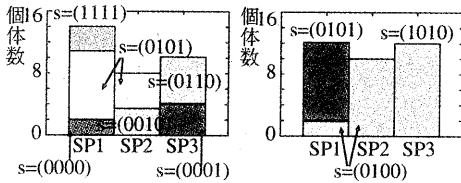


図7 500世代後の種別信号遺伝子列パターン (Alg-1(右), Alg-2(左))

一方, Alg-2 では個人ではなく, 種全体が利益を得られなければ包括適応度は上昇しない. このため同じ餌嗜好を持つ個体の信号遺伝子パターンは統一され, 信号送受信によって種全体が協調する方向へ進化してより多くの餌を採取できる.

また, Alg-2 では餌嗜好が同じ種の内部さらにで包括適応度による集団の分割が発生し, 幾つかの異なる信号パターンを使用する小集団が生まれる. これらの小集団は餌資源が競合しているため共存はできず, 幾つかの小集団中で餌嗜好の全く異なる種に対しては全く異なる信号を用い(図7Alg-2の SP_1 と SP_3), 餌嗜好が類似の種に対しては類似した信号を用いる(図7Alg-2の SP_1 と SP_2)小集団が生き残る.

なお定義3.4より, このとき SP_1 と SP_2 は互いに相手の種の信号を受信する確率が高いが, 餌の嗜好も類似しているため, 相手の餌を採取してもそれほど高いコストがかからない. また, 最終的に獲得した信号パターンは次の定義4.1を満たす傾向が見られた[☆].

定義4.1

ある種 SP_i の f_i, s_i を固定すると

$$\forall j s_j = f_i \oplus f_j \oplus s_i \quad \square$$

5. おわりに

以上の実験において, 包括適応度は利他的な個体の進化的獲得に有効性を示した. また, 血縁淘汰は適用可能なモデルが限定されてはいるが, 前

[☆] このとき, 「発信者にとっての採取コスト」をコード化した他種の信号を受信しても復号過程で「自分にとっての採取コスト」に変換できる.

種 SP_i が餌 F_j を発見すると, 信号 $F_j \oplus f_i \oplus s_i$ を送信する. 種 SP_k の受信者はこの信号から $A_k = (F_j \oplus f_i \oplus s_i) \oplus s_k$ を計算する. ここで, 定義4.1より $s_k = f_i \oplus f_k \oplus s_i$ であるため, $A_k = F_j \oplus f_k$ となり, $H(A_k)$ は受信者 a_k にとっての餌 F_j の採取コストとなる.

提^{☆☆}を満たせば集団内で遺伝子の類似した小集団(種)を発生させ, 種内での協調関係を進化させる効果があることを確認できた.

本稿では, 最終的に他種の信号も互いに有効利用できる遺伝子型を持つ個体が進化した. しかし, 実際の生態系では防衛網(警戒音の共有)など互恵的異種間コミュニケーションのための信号と, 同種内のみの信号とが使い分けられている. この使い分け問題に関しては現在研究中である.

また, 本稿では図2のコード化は単純なXOR計算で実装したが, このブラックボックスにニューラルネットや言語の文法生成規則を用いるとより複雑なメッセージの生成が実現できると思われる.

参考文献

- 1) V.C.Wynne-Edward: Self-regulating Systems in Populations of Animals, Science, 147, 1543-8, 1965
- 2) Dawkins Richard: The Selfish Gene, New York, Oxford University Press, 1978
- 3) 巖佐 庸: 数理生物学入門~生物社会のダイナミクスを探る, HBJ 出版局, 1994
- 4) Ernst Mayr: This is Biology, The Belknap Press of Harvard University Press, 1997
- 5) 堀井宏祐, 國藤進, 松澤照男: 島モデル並列遺伝的アルゴリズムにおける多様な部分集団群による協調探索の効果, 第12回人工知能学会全国大会論文集, 1998
- 6) 北橋昌樹, 山口智浩, 谷内田正彦: 種を単位とした適応度評価による利他的コミュニケーションの進化的獲得, 電気情報通信学会技術研究報告 AI97-62, 1998
- 7) Kenichi Aoki, Marcus W. Feldman: World Social Science Report, Working paper of Santa Fe Institute 98-11-099, 1998
- 8) Ezequiel A. Di Paolo: A Little More than Kind and Less than Kin: The Unwarranted Use of Kin Selection in Spatial Model of Communication, "Advances in Artificial life" Proc. ECAL'99, Springer-Verlag. pp 504 - 513, 1999
- 9) 木下和絵, 鈴木利和, 犬塚信博, 伊藤英則: 選択-淘汰方法による協調的集団の進化的獲得, 第8回マルチエージェントと協調計算ワークショップ, 1999
- 10) 木下和絵, 鈴木利和, 犬塚信博, 伊藤英則: 協調的集団行動の進化的獲得のための選択-淘汰方法, 情報処理学会論文誌投稿中, 2000

^{☆☆} 利他行動は近親者に対して行なわれること