

言語進化を手がかりとした人工生命研究で明らかになるヒトの独自性

Human uniqueness revealed by artificial life research focusing on language evolution

有田 隆也^{*1}
Takaya Arita

^{*1} 名古屋大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

The origin and evolution of language is one of the most difficult topics to investigate in contemporary science. Recently, artificial life researchers including us have successfully adopted constructive approach to the mystery based on computational models. We have also been investigating the evolution of cooperation, phenotypic plasticity and the theory of mind. This paper demonstrates that these are tightly coupled with each other to create human uniqueness by focusing on three fundamental problems in the origin and evolution of language after discussing the methodology for ensuring the constructive approach based on artificial life models.

1. はじめに

人工生命とは、生命の振舞いや機能に関する原理を抽出し、コンピュータなどの人工的なメディアによってそれに基づく現象を再現することにより、生命に関する普遍的知見を得ようとするアプローチである[有田 02]。ただし、研究領域の立上がり当初から、生命系にとどまらず、知能、心、社会、言語、…と、創発的現象が本質の意味をもつと考えられる様々な複雑系を対象としている[有田 07]。そこでは、分解すると本質が見えなくなる現象をもつ複雑系を対象とするため、還元論的手法ではなく、作って理解する構成論的手法が必然的に採られる[有田 09a]。特に、人間のアイデンティティに関わる、魅力的で、かつ科学の抱える困難な問題である、言語の起源や進化を対象とする人工生命研究は、言語やコミュニケーションを多数の個体間の相互作用から創発する動的システムと捉える立場(動的言語観)から、言語、コミュニケーションの創発性に対して、計算論的モデルに基づく構成論的手法によってアプローチする[有田 09b]。

以降では、まず、人工生命研究の基づく構成論的手法がいかなる方法論的根拠をもつか、「モデル」の意味に焦点を合わせて論じた上で、言語の起源や進化に関わる根本的な問題を3つ提示し、同時にその解決の糸口に触れる。そして、それぞれに対して、どのような人工生命アプローチが可能か、我々の最近の試みを紹介する。

2. 人工生命研究の方法論

人工生命研究は構成論的手法に基づくが、作って理解する科学の方法論的な根拠は自明ではない。従来の伝統的な自然科学の研究手法、つまり、具体的な現象やデータを観察し、そこから一般性をもつ仮説、法則、理論を帰納的に推論する方法(枚挙的帰納法)や、逆に、仮説、法則、理論を立て、実験や観察を行うことにより妥当性を裏付ける方法(仮説演繹法)とは異なり、自分で構成した人工生命モデルの挙動を、具体的な現象やデータと直接的に比較検証するプロセスが付随しない場合が少なくないからである。そこで、その方法論の根拠に関して考えることにする[有田 09a]。

初期の人工生命で最も有名なデジタル生命の生態系進化

連絡先: 有田 隆也, 名古屋大学 大学院情報科学研究科 複雑系科学専攻, 〒464-8601 名古屋市千種区不老町, arita@nagoya-u.jp

モデル Tierra[Ray 92]を考えてみる。言うまでもなく、Tierra で観察されるプログラム間の相互作用を自然の生態系の寄生や共生の現象と直接的に比較検証する余地はない。つまり、人工生命モデルは対象を持たない、あるいは、モデル=対象という立場である。ただし、この立場からの「モデル」という言葉の使用は誤用に近い。また、率直に言って、人工生命モデルには対象がないと言い切るには抵抗がある。いかなる事象との整合性もなく、人工生命モデルを考えているわけではないからだ。では、どのような作業を人工生命研究者が行っているかと言えば、それは、概念レベルにおける検討である。

一般に、何かを理解する場合、その理解にはいろいろなレベルがありうる。Tierra で言えば、計算機で起こっていることは、進化の模倣ではなく、進化そのものである。そもそも C. Darwin は、進化を概念レベルで考え、提唱している。物質的、あるいは分子生物学的メカニズムと独立に概念レベルでの進化の理解は可能である。Tierra を始めとする多くの人工生命モデルは、概念レベルでのモデルである。この立場では、人工生命研究は、現象やデータとのつながりは必ずしも強く維持せず、仮説、法則のそれぞれの意味、あるいはそれらの間の関係を、計算論的モデルの抽象世界にマッピングし、哲学における思考実験に相当する作業を計算機という道具を用いて行うものということになる。ただ、この立場でも、人工生命は“fact-free”な科学であるという批判に必ずしも正面から応えていると言えないかもしれない。従来の自然科学の手法がもつ科学的検証のループが存在しないように見えるからである。

ここでさらに、様々な複雑系に普遍的に見られる中核的現象とみなして我々が追究する創発現象を考える必要があるだろう。たとえば Tierra では、最初に行う命令 80 個からなる「先祖」プログラム自体に生命の意義を見るのではなく、プログラム間相互作用から創発する現象に生態系の本質を見るのだ。しかも、興味深い創発現象を計算機で起こすのは容易ではない。その意味では、少なくとも真つ当な創発現象かどうかという厳しい検証過程は付随している。人工生命研究者は何らかの仮説や法則を制約として概念レベルにおいてモデルを構成する。それは、システム構成要素間の関係や動的特性を計算論的数学的に記述したものだ。そして、計算機の中で時間発展させる試行の中で創発現象を起こし得たときに、その挙動を従来の仮説や法則の中に位置付けながら解釈し、複雑系の理解を深める。

ちなみに、さらに過激な立場として、人工世界の性質を明らかにする人工生命の作業と、この世界の法則を与えられたもの

としてその性質を自然科学が究めてきたことは同等であり、人工世界に関する科学も同等の科学とみなす立場がありうるだろう。

方法論の独自性を踏まえた上で、人工生命研究をする際の留意点を2つあげる。第一に、人工生命研究では実際の現象やデータとの照合を無闇に目指すべきではない。もちろん、うまく符合することは悪くないが、基本的にはレベルが異なることをわきまえるべきである。パラメータを増やしていけば、望む現象に近いものを起こすことができるが、そのために、目指していることがぼけていく。第二に、モデルを動かすと何らかの定量的データが得られるが、その数値に過剰な意味づけを行ってはいけない。人工生命モデルは、概念や現象の動的特性に関する定性的議論に真価を発揮する。全パラメータが現実と直接対応するというわけではないなら、定量的議論は難しい。

3. 言語進化に関わる3つの根本的問題

3.1 言語進化のダイナミクス

動的言語観に基づく言語進化のプロセス全体の概要を図1示す[有田 09b]。ダイナミクスの基本は、脳と言語の共進化である。言語はそれを使用する脳という環境が選択圧の一部となり、高効率、高表現力、学習容易なものへと進化する。世界中の言語に普遍な特徴(言語普遍性)はこのダイナミクスに深く関係する。逆に、脳は言語という環境が選択圧の一部となり、言語処理に適する方向に進化する。ヒトの脳が備えているメンタル文法の一部は、このダイナミクスに基づき、Chomsky の普遍文法のような生得的システムを有するように至った可能性がある。

基本的に、脳は生物進化という長時間スケールのプロセスに支配されており、言語は文化進化というそれより短い時間スケールのプロセスに支配される。それらがお互いに選択圧に影響を与え合い「共進化」する。さらに、個体の生涯というさらに短い時間スケールで学習(表現型可塑性)のプロセスも働く。この3プロセス間の相互作用は複雑で、研究者のスタンスに応じて様々な言語進化のシナリオが描けてしまうことが問題を難しくしている。

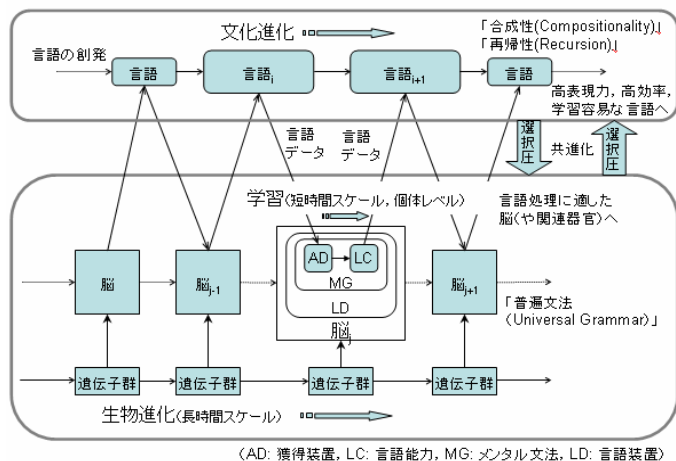


図1 言語進化プロセスの全体像

脳の進化に関しては、1) 先述の選択圧、2) 別の認知能力の進化の副産物、3) ランダムな変化(中立進化)、のいずれかに基づくものとする見解が、言語の進化に関しては、1) 先述の選択圧、2) 他の文化的発明(の副産物)、3) ランダムな変化、4) 言語間の相互作用、のいずれかに基づくものとする見解がありうる[Nowak 02]。短い時間スケールの文化進化を対象とするならば、生物進化とは独立に考えるのは妥当である。

3.2 「原初的言語性の萌芽」問題

多くの計算論的な言語進化研究では、a) コミュニケーション成立で両者の適応度が同等に増加し、b) 話し手と聞き手の役割が時間的に分かれ、c) 離散的情報が伝達されることを前提とする。しかし、言語起源の本質的理解には、これらの前提を取り払い、a') 個体間に様々な関係が可能な中で、b') 同時双方向的シグナルから聞き手・話し手の役割分担が創発し、c') 音や仕草など連続値を取る媒体で伝えられる信号から離散の記号が表出した、と考え、これらの創発自体を問うことが必須であろう。この問題意識を「原初的言語性の創発問題」とここでは呼ぶ。

4.1 で示す研究事例では、話し手と聞き手の関係をゲーム理論的状况に縮約する一方で、この3項目を検討できるダイナミカルなシグナル交換をゲーム前の交渉として行うという枠組みを設定する。これにより、どのようなコミュニケーションが両者のどのような関係において創発するか検討可能である。

3.3 「適応度の会話相手依存性」問題

言語能力の適応度は他個体に依存するので、適応的体系(たとえば構文の改良)をもつコミュニケーションをする突然変異体であっても、それを他者が理解不能であれば適応的でないという言語に本質的な問題があり、言語の適応進化の説明にはこの問題の解決が必要である[Pinker 94]。これを「言語における相手依存の適応度の問題」とここでは呼ぶ。この問題は、基本的には進化と学習の相互作用によって解決できると考えている。基本的なアイデアは、学習による見かけ上の適応度の増加により、適応度地形の谷間を横断することが可能となり、その後、遺伝的同化によって学習で獲得していた形質が遺伝子に獲得される、というものである。従来の進化と学習の相互作用の研究のほとんどが単純な適応度地形を前提とするものであったが、我々は、頻度依存の動的な適応度地形上での進化シナリオを示すのに成功してきた。言語的な突然変異体との適応的コミュニケーションが可能な学習個体が広まり、さらに遺伝的同化によって生得的な形質へ進化することの繰り返し言語進化をもたらすというシナリオを4.2 で検討する。

3.4 「発話者の利他性」問題

話し手と聞き手は基本的に非対称であり、聞き手に有用な情報を伝えるとき、話し手にメリットがない場合がヒトでは典型的である。この状況では聞き耳を立てる沈黙個体が適応的であろう。さらに、話し手が嘘で聞き手を欺くこともありうる。したがって、単純な個体レベルの適応進化だけで言語起源を説明するのは容易ではない。沈黙個体のような利己的個体(言語的フリーライダー)も進化可能な中でいかに利他的に話す個体が進化し、会話が成立するのかわかという問題を「発話者の利他性」問題とここでは呼ぶ。一般に利他性の進化の説明として、自然選択を集団レベルに適用する「グループ選択」のアイデアは古い歴史を持つが、最近、血縁選択も包含する「マルチレベル選択」という現代理論[Sober 98]として再構築されている。グループ間に多様性があると、グループ内選択を上回るグループ間選択の力が働きフリーライダーが排除されるというものである。ただし、最大の問題は、グループ間に多様性が存在しても、各グループは最終的にはグループ内選択でフリーライダーが占有する点である。これに対し、我々は環境に応じた移住(環境応答移住)を提案し、環境悪化に加速的に移住確率を高める応答が重要であることや、進化メカニズムを導入した上で「創始者効果」が相乗的に働き、協調進化を促進することを示した[Ichinosé 08]。ただし、言語の文脈で、この理論が適用できるか4.3 で検討する。

4. 人工生命による研究事例

4.1 「原初的言語性の萌芽」へのアプローチ

本モデル[高野 08]では、各個体は、(交渉期間後にその正負で)戦略を表す実数値 a 、(戦略とは直接関係ないが)相手に観測される実数値シグナル ϕ 、内部状態 I を持つ。2個体間で対戦が行われ、シグナルの送受信を同時双方向に繰り返し行う交渉期間とその結果に基づいたゲームプレイ(戦略の決定と利得獲得)によって構成される(図 2)。各個体は 3 階層リカレント型ニューラルネットワーク(NN)で構成され、交渉期間では、NN に基づき、受信した相手の ϕ と自分の内部状態 I を用いて自分の各状態を更新することを繰り返す。個体間の関係は、動物の資源争いに相当し、表 1 の利得行列で表される($0 \leq \alpha \leq 1$)。両者が異なる戦略を選択したときのみ利得が得られる(ナッシュ均衡解であり、ゲーム「成功」と呼ぶ)。ただし、その場合でも、戦略 B を選択した側は戦略 A の側より $1-\alpha$ だけ利得が小さい(両者間に α の大きさに応じた対立が存在)。総当たりで対戦を行い、結果の平均利得を適応度とした実数値遺伝的アルゴリズムにより NN の重みを進化させる。なお、この相互作用は人がすれ違うときの衝突回避行動に近い。両者が離れている間(交渉期間)は互いに相手の視線や仕草(連続的なシグナル)を観察しあつた後、譲らない(A)または譲る(B)という行動をとる(戦略を決定する)。この場合、たとえば、 a が交渉後の体の方向、 ϕ が視線方向に相当する。

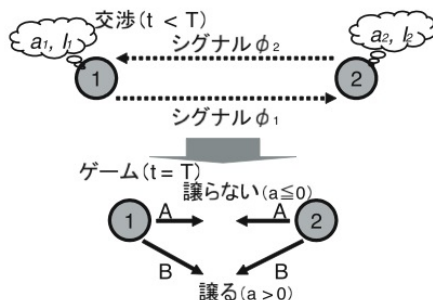


図 2 個体間の 2 段階の相互作用

表 1 個体間の関係を表す利得行列

	A	B
A	0, 0	1, α
B	α , 1	0, 0

シミュレーションの結果、 α が比較的小さい(対立度大)場合でも有効なコミュニケーションが創発し、コミュニケーションなしの設定における進化的に安定な混合戦略だけから構成される集団より、ゲーム成功率が高くなることがわかった。また、情報量に基づく分析により、二種のコミュニケーションが進化することが示された。一つは、衝突直前のタイミングでシグナルの増減方向の変更で譲歩を知らせるものである(収束型)。このタイミングが遅いほど譲られる可能性が高まるので高利得が期待できるが、両者がそうするとゲーム失敗のリスクが高まる。このトレードオフで集団が多様化する。もう一つは、状態の振動を利用し、相手と反対位相を取る状態を維持して調停するものであり(振動型)、鳥の一部に見られる鳴き声のデュエットを連想させるものである。収束型コミュニケーションの創発は、連続値シグナルから合図への記号化、同時双方向の相互作用から一方の合図という話し手と聞き手の役割分担の萌芽と解釈しうるだろう。

4.2 「適応度の会話相手依存性」へのアプローチ

本モデル[Suzuki 08]では、各個体はそれぞれ $2M$ 個の形質(送受信レベルの決定に各 M 個)を持ち、各形質は最大 M の自然数で表される。遺伝情報は、各形質の初期値と、各形質が可塑的であるかどうかを表す。 M 個の形質をその値ごとにグループ分けし、そのグループサイズが形質値以上のものの中の最大の形質値を送信、あるいは受信レベルとする(図 3)：

$$level_{send/receive} = \operatorname{argmax} f(n)$$

$$f(n) = \begin{cases} n & \text{if } s(n) \geq n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、 $level$ は個体の送信あるいは受信のレベル、 $s(n)$ は形質値が n の形質の数を表す。送信個体の送信レベルと受信個体の受信レベルが一致すればコミュニケーション成功とし、両個体の適応度に寄与する。言語的やりとり、身振り手振り、アラームコール、フェロモン分泌など、広義のコミュニケーションをモデル化した。送受信レベルが異なっていることや高レベルほど達成されにくいことが本モデルの特徴であり、前者は、発話や聴覚などの脳の処理の分離、後者は高い機能ほど形質間、あるいは遺伝子間の相互作用の制約が大きくなることを意味する。

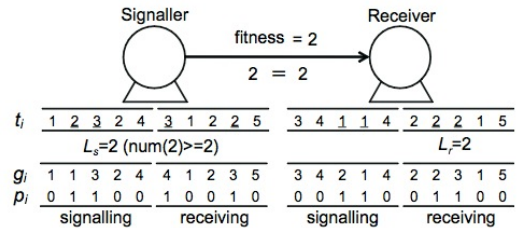


図 3 送受信レベルに基づくコミュニケーション

(t_i, g_i, p_i はそれぞれ形質値、形質の初期値を決める遺伝子、可塑性。本例では、話し手の送信レベルと受け手の受信レベルが一致)

遺伝的アルゴリズムを用いて各形質の初期値と各形質の可塑性を進化実験させた。全個体が総当たりで相互作用するが、一回目は遺伝的に決められた形質値を使い、その後 C 回は、可塑的な形質値として、 $\{-1, 0, +1\}$ からランダムに選んだ値を初期値に足した値を用いる。あるステップにおける得点はそれまでに成功したレベルの最大値とし、全ステップに関する平均得点を適応度とする。実験の結果、 $C=0$ 、つまり学習なしの場合、レベル1のまま停滞した。これは、集団の大多数がレベル1では、2になることは不利だからである。一方、学習ありの場合には、コミュニケーションレベルの適応進化を学習が促進し、適応度は徐々に増加する。その際、学習による適応度の増加を、生得適応度が追いつく過程が次のように繰り返されることを示された。

1) 全個体がレベル L を共有しているが、学習によりレベル $L+1$ のコミュニケーションを成功させるペアが出現し、生得適応度は一定のまま生涯適応度が増加。2) 大多数のペアが学習でレベル $L+1$ を達成できるが、学習に頼らず最初からレベル $L+1$ の個体のほうが、最初から高レベルを達成している分だけ有利なので、送信あるいは受信に関してレベル $L+1$ を先天的に持つ個体が増加。生涯適応度は増加の一方で生得レベルの多様化で生得適応度は減少。3) 両レベルとも $L+1$ の個体の方が学習が不要なので、集団を占める。学習は働かず、生得適応度が生涯適応度に一致。

静的適応度地形において、谷超えのために学習が役立つことは示されていたが、コミュニケーションのように、自分と同じレベルの個体がいればいるほど適応度が高い、地形が動的に変化する場合でも、学習により適応度地形の山や谷を移動させることで進化を促進可能であるというシナリオが初めて示された。

4.3「発話者の利他性」へのアプローチ

本モデル[Sugiura 10]では、総数 N の個体がサイズ不定の M 個のパッチに分かれてそれぞれグループを構成する。各個体は、 n 個の言葉と m 個の意味の間の連想の強さを実数値で表現する $n \times m$ の語彙行列を持つ。行列要素の初期値は、0 から 1 の範囲のランダムな実数値を割り当て、さらに全体の和が 1 になるように正規化したものである。話し手は、ある意味 i に対して、その意味に関連付けられている言葉をその結びつきの強さに比例した確率で選んで発し、聞き手は、受け取った言葉 j に対して、その言葉に関連付けられている意味をその結びつきの強さに応じた確率で選んで解釈する(図 4)。話し手の意図した意味を聞き手が(どの言葉を使おうとも)正しく解釈すると、両者に対して、あらかじめ設定した報酬(正とは限らず)が与えられる。会話は、各グループ内での 1 対 1 の総当たりで、すべての意味に対して行われる。その後、各個体はグループ内の相対的報酬が小さければ小さいほど高い確率で、他のランダムに選ばれたパッチに移住する。次に、報酬に応じた確率で全体から個体を選択してそのパッチに子を誕生させることを N 回繰り返し、突然変異を語彙行列の要素に加えた後、次世代集団を構成する。

会話成功時の報酬として、話し手は負、聞き手は正の値を設定して、話し手の利他性が進化するか実験した。まず、パッチ数が 1、つまり一つのグループで実験して、基本的なダイナミクスを確かめた。この場合、会話成功率はあまり高くならず、捕食(聞き手)-被食(話し手)系の振動(理解されないような言葉にたえず変動していく)など複雑な挙動を繰り返すことがわかった。話し手の報酬が負でも会話が比較的通じるのは、話すときと聞く際に同じ語彙行列を用いることによる、両者の相関があげられる。つまり、グループ内に理解し合える(非明示的)グループができ、話し手と聞き手の報酬を足すと正であるため、理解できないグループより有利となるからである。

複数のパッチで実験すると、会話成功率は明らかに増加した。マルチレベル選択のためである。また、比較対象としたランダム移住に比べ、貧しいものほど移住したほうが会話成功率は高まった。ごく少数の利他的な個体がグループサイズを増加させるような効果が重要な働きをしていることもわかった(創始者効果)。しかし、この場合でも、安定した会話が持続するということではなく、グループサイズが増加すると、しだいにフリーライダー(正しく理解し、わからないように話す個体)が増え始めて報酬を下げ、グループサイズの減少を招くということが各パッチで繰り返されていることも示された。

さらに、パッチごとに異なった負の値をペナルティとして与えた実験も行った。言語を進化させたヒトのコミュニケーションでは聞き手の利他性が典型的であるのに対し、動物のコミュニケーションでは聞き手の操作という話し手の利己性が典型であるという違いの原因を、ヒトの祖先が生息していた厳しい環境(エサの少なさ、敵の多さ)に見出す立場に基づく設定である。生存が難しい環境で生き延びるためにヒトは利他的言語により協力を進化させたという仮説[Bickerton 08]の検討を狙った。実験の結果は、ペナルティが大きなパッチほど会話成功率が高い傾向を示し、この仮説をサポートするものだった。

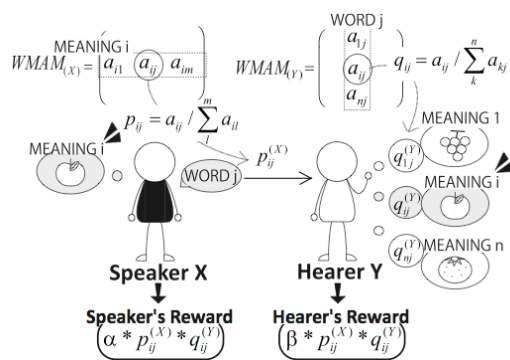


図 4 語彙行列に基づくコミュニケーション

5. おわりに

本稿では、人工生命の方法論の根拠を検討した後、言語を個体間相互作用から創発する動的システムとみなし、言語起源の根本的問題にアプローチする試みについて論じた。言語という大いなる謎の解明のまだ端緒に就いた段階にすぎないのであるが、人工生命研究やその言語進化へのアプローチの可能性や魅力が伝われば幸いである。

参考文献

[有田 02] 有田隆也:人工生命(改訂 2 版), 医学出版, 2002.
 [有田 07] 有田隆也:心はプログラムできるか, ソフトバンククリエイティブ, 2007.
 [有田 09a] 有田隆也:人工生命モデルによる構成的研究の方法論, 人工知能学会誌, 24(2), 253-259, 2009.
 [有田 09b] 有田隆也:コミュニケーションの創発, 計測と制御, 48(1), 39-46, 2009.
 [Bickerton 08] D. Bickerton, D.: Two Neglected Factors in Language Evolution, *The Evolution of Language*, World Scientific, 26-33, 2008.
 [Ichinose 08] Ichinose, G. and Arita, T.: The Role of Migration and Founder Effect for the Evolution of Cooperation in a Multilevel Selection Context, *Ecological Modelling*, 210(3), 221-230, 2008.
 [Nowak 02] Nowak, M.A., Komarova, N.L. and Niyogi, P.: Computational and Evolutionary Aspects of Language, *Nature*, 417, 611-617 (2002).
 [Pinker 94] Pinker, S.: *The Language Instinct*, Morrow (1994).
 [Ray 92] Ray, T.S.: An Approach to the Synthesis of Life, *Artificial Life II*, 371-408 (1992).
 [Sober 98] Sober, E. and Wilson, D.S.: *Unto Others: The Evolution and Psychology of Unselfish Behavior*, Harvard University Press, 1998.
 [Sugiura 10] Sugiura, K. and Arita, T.: Why We Talk?: Altruism and Multilevel Selection in the Origin of Language, *Proc. of the 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 456-459, 2010.
 [Suzuki 08] Suzuki, R. and Arita, T.: How Learning Can Guide Evolution of Communication, *Proc. of Artificial Life XI*, 608-615, 2008.
 [高野 08] 高野雅典, 有田隆也:動的シグナリングの進化に基づく言語の成立基盤の一検討, 情報処理学会論文誌, 48(8), 2890-2899, 2008.