

## 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

高野 雅典<sup>†1</sup> 有田 隆也<sup>†1</sup>

言語進化研究における計算論的モデルの多くは、離散的表現の記号をやりとりし、話し手と聞き手の役割は明確に分かれ、両者の適応度はコミュニケーション成立によって公平に増加するという前提条件を持つ。本研究は、そのような前提を取り払った、より基本的な立場からの構成論的アプローチとして、言語・コミュニケーション成立の進化的基盤を検討することが目的である。そのために、シグナリングに基づく交渉とゲーム戦略決定という2段階から構成される枠組みを用いたエージェントベースモデルを設計し、ゲームの利得に基づいた進化シミュレーションを行った。その結果、譲る合図を示すタイミングで調停する「収束型」と両者のシグナルの共振で調停する「振動型」という興味深い2つのコミュニケーションの型が創発した。さらに、それらのコミュニケーションを明らかにするために情報量などの指標を用いて分析した。

### Constructive Approach to the Evolutionary Foundation of Language: A Model for the Evolution of Dynamic Signaling

MASANORI TAKANO<sup>†1</sup> and TAKAYA ARITA<sup>†1</sup>

Most of the computational models in the studies of language evolution assume discrete expression of signals, separated roles of a speaker and a listener, and equal increase in fitness of them. This study focuses on the evolutionary foundation of language as a constructive approach by removing these assumptions. We constructed an agent-based model with a framework composed of two stages, negotiation using signals and subsequent strategy decision. We have found that two types of communication emerged in the evolutionary simulations. In one type of communication, agents coordinate by the difference in the timing of sending a concessionary signal. In the other type of communication, they coordinate by resonating their signals. We analyzed the details of the communication by computing information content.

### 1. はじめに

実証的証拠が得にくい言語の起源や進化に関して、計算論的モデルを作り計算機で動かすことにより理解しようとする構成論的アプローチがさかんである<sup>7),18)</sup>。そのような研究の多くは、以下の3つの特徴を前提として持つ。a) 離散的表現の記号をやりとりし、b) 話し手と聞き手の役割は明確に分かれ、c) 両者の適応度はコミュニケーション成立によって公平に増加する。ただし、これらの特徴それぞれに関する、より基本的な見解は以下のようなものである。a') (声や仕草などのような) 連続的表現のシグナルから離散的な記号が表出し<sup>15)</sup>、b') 同時双方向の相互作用から聞き手・話し手の役割分担が創発する<sup>6)</sup>。そして、c') その2者間には公平な関係を含む様々な対立度がありうる。

言語の起源を考える際に参考になる動物のシグナリングに関して、このような見解に基づいて次のように考えることが可能である。動物の個体間コミュニケーションに用いられるシグナルは基本的に鳴き声や仕草などのように連続的に変化するものである。シグナルは、食料、縄張り、配偶者などの資源に関する争いのように、個体間に対立がある場面で用いられることが少なくない。そして、実際に闘わないで、シグナリングにより(一方が資源を獲得し、一方が譲るといふ)不公平な状態に落ち着く場合が多い。この状況では、シグナルは結果的に闘争コストの削減をもたらしており、適応進化でこのシグナルを説明することができる<sup>12)</sup>。このような役割を果たすシグナルの伝える情報としては、闘争能力や空腹度合い<sup>12)</sup>、社会的地位<sup>4)</sup>などが確認されており、進化過程についても近年研究が進んでいる<sup>10)</sup>。

一般に、対立度が小さいほど両者の利害は一致するのでシグナルは進化しやすく、逆に、大きくなるほど相手に譲ることの損が大きくなるのでシグナルは進化しにくくなると思われる<sup>12),13)</sup>。また、進化するシグナルのタイプも対立度に依存するであろう(先の例では闘わない場合に同等の利得を得られるような)公平な場合、シグナルは個体の状態や性質に関する情報を共有させる役割を果たすものになり、それらの違い(たとえば譲りやすさ)を用いた、譲る・譲らないの役割分担が現れることが考えられる<sup>8),19)</sup>。逆に、対立度が大きくなると、高い利得を得るための駆け引きも生まれるであろう。そして、そのようにして獲得されるシグナルはより複雑になる可能性がある。

本研究の目的は、前述の基本的見解(a', b', c')に基づく構成論的なアプローチとして、

<sup>†1</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nagoya University

言語・コミュニケーション成立の進化的基盤を検討することである。そのため、両者の関係をゲーム理論の利得行列で表す単純な関係に縮約する一方で、3つの条件を満たす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持つエージェントベースモデルを考える。このような枠組み自体はいくつかの研究<sup>3),9),16),19)</sup>でも検討されているが、先の3条件とも満たすものは我々の知る範囲では存在しない。そして、本研究では、この枠組みを用い、ゲームで得た利得を適応度とする進化シミュレーションを行いシグナルを進化させる。特に、どのようなタイプのシグナルが進化的に成立しうるか、そして、その進化は両者間の対立度いかに依存するかという点に焦点を合わせて検討する。

## 2. 個体間の関係

本研究では個体間の関係を表1の利得行列を用いて表す ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )<sup>\*1</sup>。この利得行列を用いたゲームでは両者が異なった戦略を選択したとき ((A, B) または (B, A)) のみ利得が得られる (これらはナッシュ均衡解である)。なお、このゲームは動物の資源争いの状況を表していると考えられる。両者が譲らなければ闘争コストによりともに利得は0であり、一方が譲れば闘争コストはなく、譲らなかった側は利得1で譲った側は利得 $\alpha$ である。

このゲームでは、両プレイヤーが協力してどちらかの均衡を選択すれば利得を得ることができる (ゲームの成功と呼ぶ)。ただし、ゲームが成功した場合でも、戦略Bを選択したプレイヤーは戦略Aのプレイヤーより  $1 - \alpha$  だけ利得が小さいという意味で、個体間には  $\alpha$  に応じた対立が存在する。この対立は  $\alpha$  が大きいほど小さくなり、1になるとなくなるので、 $\alpha$  はゲームの公平度を表すと考えられる。

ゲーム前に両者が交渉する場合、交渉はゲームの成功を促すが、 $\alpha$  が小さいほどその効果は小さくなると考えられる<sup>2)</sup>。このゲームにおける交渉なしの場合の進化的に安定な戦略 (ESS)<sup>14)</sup> は戦略Aを選択する確率が  $1/(1 + \alpha)$ 、Bを選択する確率が  $\alpha/(1 + \alpha)$  の混合戦略であり<sup>11)</sup>、ESS だけから構成される集団 (ESS 集団) のゲームの成功率は  $2\alpha/(1 + \alpha)^2$

表1 本研究で考える個体間の関係  
Table 1 The relationship between individuals in this study.

	A	B
A	0, 0	1, $\alpha$
B	$\alpha, 1$	0, 0

\*1 この利得行列は「男女の争い」ゲームの利得を対称にしたものであり、チキンゲームとよく似た性質を持つ<sup>17)</sup>。

である。したがって、交渉する集団におけるシグナルの有効性はこの成功率を上回るかどうかで判断できる。また、このゲームは基本的には両者が戦略の棲み分けを行ったとき利得を得られる調整ゲームに近い形であり、相手をだます利益はないため、正直なシグナルが進化すると考えられる<sup>12)</sup>。

## 3. モデル

集団を構成する各エージェントは、状態として、交渉期間後に戦略を表す  $a$ 、(戦略とは直接関係ないが) 相手に観測されるシグナル  $\phi$ 、内部状態  $I$  の3つを持ち、それらはエージェントが持つ3層の階層型ニューラルネットワーク (NN) によって更新される。各状態は連続値で表される。そして、総当たりで対戦を行い、その際の平均利得を適応度として、NNの重みを進化させる。

1回の対戦は、連続値の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) によって構成されており、2個体間で行われる (図1)。文献9)、19)も同時双方向の動的コミュニケーションの獲得について検討している。しかし、それら是对立がない場面での離散的なシグナル送受信によるコミュニケーションを扱っており、本モデルとは基本的に異なる。本モデルにおけるこの相互作用は、人がすれ違うときの衝突回避行動と解釈することが可能である。人は離れている間 (交渉期間) は互いに相手の視線や仕草 (連続的なシグナル) を観察しあい、近づくと (交渉期間後に) 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、外から観察される2つのパラメータに関して、たとえば、 $a$  が交渉後の体の方向、 $\phi$  が視線方向に相当するといえる。

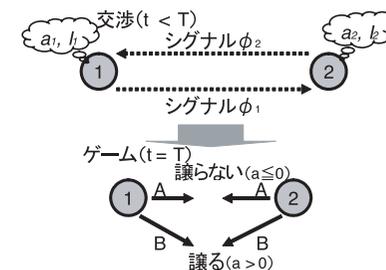


図1 エージェント間の2段階の相互作用  
Fig. 1 Two-stage interaction between agents.

交渉期間（時刻  $t = 0$  から  $T - 1$  まで）では，エージェントは，自分のシグナル  $\phi$  の送信と相手のシグナル  $\phi$  の受信（両者は並列実行），および，受信した  $\phi$  と自分の内部状態  $I$  を用いた自分の状態  $a, \phi, I$  の更新，の両者を繰り返す．このような動的交渉における文脈保持のためにエージェントには内部状態  $I$  を持たせている．そして，交渉期間後（ $t = T$ ）の  $a$  の値が  $a \leq 0$  の場合は戦略 A， $a > 0$  の場合には戦略 B を選択するものとする．

交渉期間中のエージェント 1 の状態  $a_1, \phi_1, I_1$  とエージェント 2 の状態  $a_2, \phi_2, I_2$  の更新は以下にあげる「連続更新」と「不連続更新」の 2 方法で行った．NN の入力 自分の内部状態  $I$  と相手のシグナル  $\phi$  とし，出力は自分の状態  $a, \phi, I$  を更新するために用いる．以下では，入力が  $I, \phi$  のときの状態 \* に関するエージェント 1 の NN の出力を表す関数を  $f_*(I, \phi)$ ，同様にエージェント 2 の状態 \* に関する関数を  $g_*(I, \phi)$  と書く．なお， $f_*, g_*$  の値の範囲はすべて  $(-0.5, 0.5)$  とする．

まず，エージェント 1 と 2 の内部状態  $I_1, I_2$  ( $\in (-0.5, 0.5)$ ) は，2 方法で共通であり，次のように不連続に更新される．

$$I_1(t+1) = f_I(I_1(t), \phi_2(t)) \quad (1)$$

$$I_2(t+1) = g_I(I_2(t), \phi_1(t)) \quad (2)$$

連続更新モデルでは，状態  $a, \phi$  に関する更新は増分を与えることによって連続的に行う ( $\delta \ll 1, a \in \mathcal{R}, \phi \in \mathcal{R}$ )．

$$a_1(t+1) = a_1(t) + f_a(I_1(t), \phi_2(t))\delta \quad (3)$$

$$\phi_1(t+1) = \phi_1(t) + f_\phi(I_1(t), \phi_2(t))\delta \quad (4)$$

$$a_2(t+1) = a_2(t) + g_a(I_2(t), \phi_1(t))\delta \quad (5)$$

$$\phi_2(t+1) = \phi_2(t) + g_\phi(I_2(t), \phi_1(t))\delta \quad (6)$$

一方，不連続更新モデルでは，状態  $a, \phi$  に関する更新も不連続的に行うので，1 度に大きく変更することができる ( $a, \phi \in (-0.5, 0.5)$ )<sup>\*1</sup>．

$$a_1(t+1) = f_a(I_1(t), \phi_2(t)) \quad (7)$$

$$\phi_1(t+1) = f_\phi(I_1(t), \phi_2(t)) \quad (8)$$

$$a_2(t+1) = g_a(I_2(t), \phi_1(t)) \quad (9)$$

$$\phi_2(t+1) = g_\phi(I_2(t), \phi_1(t)) \quad (10)$$

\*1 したがって，伝達媒体  $\phi$  の変化に関する制約の大小を考えると，連続更新モデルでは視線方向，不連続更新モデルでは音声に相当すると考えられるかもしれない．

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 設定

3 章で示したモデルに基づいて，NN の重みを実数値遺伝的アルゴリズムによって進化させた．NN のニューロンの出力関数にはシグモイド関数 ( $f(x) = 1/(1 + e^{-x}) - 0.5$ ) を用いた．NN の各層のニューロン数は，入力層 2，中間層 4，出力層 3 で，さらに，入力層と中間層にはバイアスニューロンが 1 個ずつあるので重みの数は 27 である．これが遺伝子長に相当する．遺伝的操作として，突然変異は平均 0，標準偏差 0.5 の正規分布に従って変異率 0.05 で与え，交叉は交叉率 0.8 の二点交叉，選択はルーレット選択を用いた．

エージェントの個体数は 100，初期状態  $a(0), \phi(0), I(0)$  は 0 とし，交渉期間  $T$  は 200，連続更新モデルのパラメータ  $\delta$  は 0.05 とした．そして，利得行列（表 1）の  $\alpha$  を 0 から 1 まで 0.1 刻みで変えて，それぞれ 8,000 世代進化させる．各  $\alpha$  について連続更新，不連続更新モデルの進化を 50 試行ずつ行った．

連続更新モデルの結果 4.2 節はこの 50 試行に関する平均である．不連続更新モデルの結果 4.3 節は後述する収束型，振動型に分けて平均値を示している．また，ゲームの成功率を除き，すべて最終世代のエージェントを用いて計算している．各図中の誤差棒はそれら平均値を計算した試行に関する標準偏差である．

### 4.2 連続更新モデル

#### 4.2.1 基本的傾向

進化結果の基本的傾向を知るために，図 2 に 7,000 から 8,000 世代におけるゲーム成功

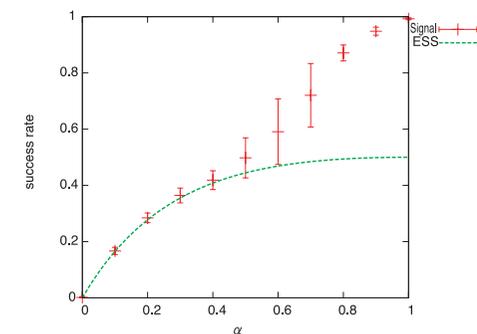


図 2 ゲームの成功率 (ESS 集団との比較)

Fig. 2 Success rate at the games compared with the ESS population.

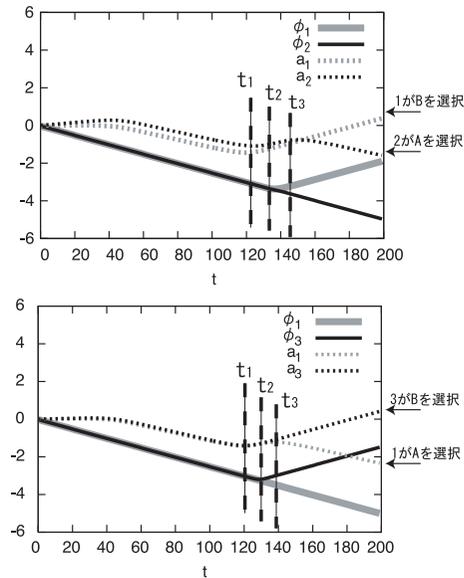


図 3 交渉期間におけるシグナリングの典型例  
Fig. 3 Typical signaling during the negotiation stage.

率を各  $\alpha$  ついて示す．同図には ESS 集団の場合についても示している． $\alpha \geq 0.5$  では成功率は ESS 集団より高くなり，シグナルはゲームの成功に関して有効に働くように進化していることが分かる．また， $\alpha$  が大きいほど成功率は高い．これは， $\alpha$  が大きいほどゲーム成功時の利得差が小さいため，交渉によりどちらかが譲る（B を選択）ように進化したためであろう．逆に， $\alpha$  が小さいとゲーム成功時の利得差が大きくなり，B を選択したときの適応度が小さくなるため，譲らない個体が増加し，シグナルが有効に働かなくなり，特に， $\alpha < 0.5$  では ESS 集団とほぼ同じ成功率になったと考えられる．シグナルが有効に働く状態と働かない状態が  $\alpha$  が 0.4 と 0.5 の間のある点で明確に分かれているように見えるところは興味深い．

次に，エージェントがシグナル  $\phi$  と戦略を決める  $a$  をどのように変化させて戦略の選択を調整しているか具体例を用いて考える．図 3 に  $\alpha = 0.9$  におけるゲーム成功時の両エージェントの  $\phi(t)$  と  $a(t)$  の軌道の典型例を 2 つ示す．同図で用いているエージェントは 1 つの最終世代の集団から抜き出したもので，それぞれエージェント 1，エージェント 2，エー

ジェント 3 と呼ぶ．同図において，縦軸は各状態の値， $\phi_1$  と  $a_1$  はエージェント 1， $\phi_2$  と  $a_2$  はエージェント 2， $\phi_3$  と  $a_3$  はエージェント 3 の状態をそれぞれ表す．交渉期間終了時の  $t = T$  において， $a_1$  と  $a_2$ ，あるいは， $a_1$  と  $a_3$  の符号が異なることがゲームの成功を表す．

この例では，まず，初期状態  $\phi(0) = 0, a(0) = 0$ ，つまり原点から軌道は始まる．エージェントは  $a(t)$  を利得の高い A を選択する方向へ動かす（減少させる）．しかし，両者が A を選択するとゲームが失敗するため，相手に応じて譲る（B を選択する）選択もできるように， $t_1$  において  $a(t)$  を B 方向へ動かす始める（増加させる）． $t_2$  で，一方のエージェントがその変更を  $\phi(t)$  を逆方向へ動かす（増加させる）ことで相手に示し始める． $t_3$  では，もう一方のエージェントがそれに反応し， $t_1$  で変えた  $a(t)$  を再び A 方向へ動かす（減少させる）．

このコミュニケーションにおいては，エージェントが  $t_2$  において  $\phi(t)$  の動きを大きく変えることが，「自分は B を選択する」という合図となっているという仮説が考えられる．合図を送るタイミングがエージェントによって異なるので，A を選択するか，B を選択するかは相手に依存するはずである．この例でも， $t_2$  において  $\phi(t)$  の動かす方向を変えたのは，上図ではエージェント 1 であるが，下図ではエージェント 1 ではなくエージェント 3 である．

#### 4.2.2 情報量を用いた分析

4.2.1 項で示した仮説を検証するために，情報量を用いて分析する．各エージェントは，集団における選択される戦略の確率分布  $P(X)$  と時刻  $t$  にシグナル  $u(t)$  を送信したエージェントによって選択される戦略の確率分布  $P(X|Y(t) = u(t))$  を知っているとして仮定する．それらの情報エントロピーを  $H(X), H(X|u(t))$  とする．ただし， $u(t)$  は実数値のシグナル  $\phi(t)$  を離散化した値とする（ここでは  $-6.0$  から  $6.0$  の範囲で 100 等分している）．このようにすると，時刻  $t$  にエージェント  $j$  がエージェント  $i$  の送信したシグナル  $u_{ij}(t)$  を受信したときに得る情報量（bit）は，シグナル  $u_{ij}(t)$  の受信前と受信後の送信者の戦略に関する情報エントロピーの差

$$k_{ij}(t) = H(X) - H(X|u_{ij}(t)) \tag{11}$$

で表すことができる．時刻  $t$  におけるエージェント  $i$  のシグナルの平均的な情報量を， $i$  が他の 99 個体のエージェントに対して送信したシグナルの平均値  $k_i(t) = (1/99) \sum_{j \neq i} k_{ij}(t)$  として計算する．

図 4 に各  $\alpha$  の  $k_i(t)$  の平均  $\bar{k}(t) ((1/100) \sum_{i=1}^{100} k_i(t))$  の時間変化を示す（ $\alpha = 0$  では全エージェントが A を選択し， $k_{ij}(t)$  を計算できないので示していない）． $\bar{k}(t)$  が細かく振動しているのは実数値である  $\phi(t)$  を離散化したためであると考えられる．まず，シグナルが

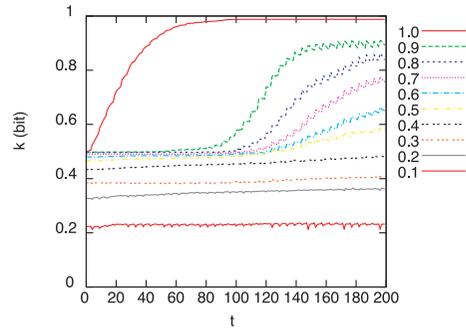


図 4  $\bar{k}(t)$  の時間変化  
Fig. 4 Transition of  $\bar{k}(t)$ .

有効に働いている  $\alpha \geq 0.5$  では、ある時刻で増加し始めることが分かった。  $\alpha$  が大きいほど立ち上がりは鋭く、またその時刻は早くなる。各エージェントの  $k_i(t)$  がある時刻で急増加する時刻とは、シグナルを用いて自分の  $a(t)$  に関する合図を相手に示し始める時刻と考えられ、そのエージェントの  $t_2$  (図 3) に近い値であると考えられる。シグナルが有効に働いていない  $\alpha < 0.5$  では、 $\bar{k}(t)$  は変化しない。  $\alpha$  によって  $\bar{k}(t)$  の値が異なるのは、  $\alpha$  が大きいと B を選択するエージェントが A に比べて増加し、戦略の選択のエントロピー  $H(X)$  が大きくなるためであると考えられる。

次に、シグナルが機能している場合には  $k_i(t)$  がある時刻で急に増加すると考えられることから、エージェント  $i$  が相手に合図するタイミングを表す指標として  $K_i = \sum_{t=0}^{T-1} k_i(t)$  を考える。  $K_i$  が大きいということは  $k_i(t)$  が早い段階で増加する (合図を早く示す) 傾向にあることを意味する。これを用いて、相手に合図を送るタイミングが異なることで調整が行われるという先述の仮説を検討する。

ゲーム成功時に、A を選択したエージェントの  $K$  を  $K_A$ 、B を選択したエージェントの  $K$  を  $K_B$  とする。  $K_A < K_B$  ならば、合図を相手に示すタイミングが遅いエージェントが A、そうでない方が B を選択してゲームが成功したということであり、  $K_A > K_B$  ならばその逆である。  $K_A = K_B$  の場合は、合図のタイミングが同時か、ともに合図をしなかったか (合図を示さないエージェントの  $K$  は集団中で最小であり両者の  $K$  は等しいと考えられる) のいずれかで成功した場合である。しかし、前者は、非常にまれであると考えられるので、このケースではシグナルは有効ではないと考えられる。

ゲームが成功した場合の、  $K_A < K_B$  であった割合  $Q_l$ 、  $K_A = K_B$  であった割合  $Q_e$ 、

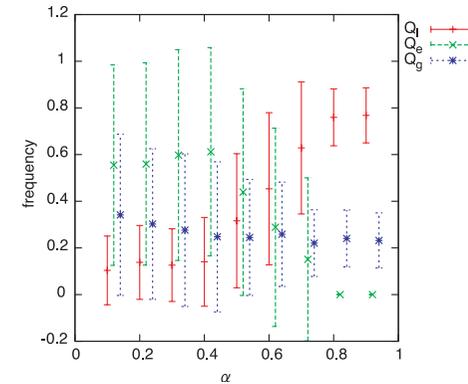


図 5 各  $\alpha$  における  $Q_l$ 、  $Q_e$ 、  $Q_g$   
Fig. 5  $Q_l$ 、  $Q_e$  and  $Q_g$ .

$K_A > K_B$  であった割合  $Q_g$  を総当たり対戦において求めた結果を図 5 に  $\alpha$  ごとに示す。なお、  $\alpha = 1$  では戦略 A、B の利得は対称で、  $Q_l$  と  $Q_g$  の区別がないため、また、  $\alpha = 0$  ではゲームはまったく成功せず  $Q_g$  が計算できないため、同図には示していない。また、図を見やすくするために、  $Q_e$  と  $Q_g$  の表示位置を少し右に移動している。同図より、シグナルが有効な場合 ( $\alpha \geq 0.5$ )、  $\alpha$  が大きいほど  $Q_l$  が大きく  $Q_e$  は小さくなり、先に合図を示した方が B を選択した頻度が大きくなった。シグナルが有効でない場合 ( $\alpha < 0.5$ ) は、  $Q_l$  は非常に小さい。

以上から、合図は「自分が B を選択する」ことを伝える役割を持っており、それを示すタイミングの違いによって戦略選択の調整を行っていることが分かった。このタイミングが遅いエージェントは相手より大きい利得を得られる場合が多いが、相手によっては、合図を出したり、相手の合図を受けての戦略変更が間に合わなくなったりする (ゲーム失敗) 可能性が大きい。このトレードオフにより多様性が生じたと思われる。

また、図 4 から分かるように、  $\alpha$  が小さいほど合図を示すタイミングは遅くなった。これは、  $\alpha$  が小さいほど B を選択する不利益が拡大するためであると考えられる。そして、タイミングが遅いほど、合図や戦略変更が間に合わなくなり、ゲーム失敗の頻度が大きくなる。したがって、  $\alpha$  が 0.5 未満のある値以下になると、シグナルが有効に働かなくなったと考えられる。

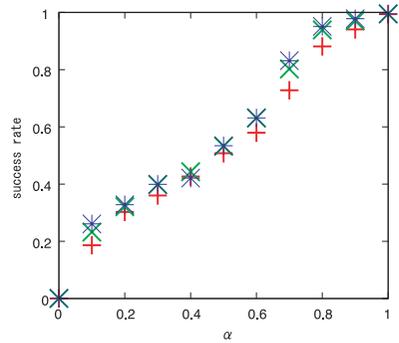


図 6 ゲームの成功率に関する  $T$  の影響  
Fig. 6 The effect of  $T$  on success rate at the games.

#### 4.2.3 ゲーム成功状態の安定性

交渉期間における戦略が調整されている（ゲームが成功する）状態の安定性を調べるため、 $T$  を長くした場合のゲームの成功率の変化を調べた。図 6 にその結果を示す。 $\alpha \geq 0.5$  では  $T$  が大きいほど成功率は高くなった。これは、合図や戦略の変更が間に合わずゲームが失敗していた場合が、成功になったためと考えられる。

$\alpha \geq 0.5$  では、ゲームの成功率が  $T$  に関して単調に増加していることから、シグナリングにより形成されたゲーム成功状態は安定であるといえる。これは、この状態がゲームのナッシュ均衡点であり、エージェントに戦略変更の利益がないためと考えられる。

#### 4.3 不連続更新モデル

##### 4.3.1 基本的傾向

進化の結果、交渉期間での振舞いが 2 つに分かれることが分かった。図 7、図 8 に  $\alpha = 0.7$  におけるゲームが成功したエージェントの組（それぞれの構成エージェントをエージェント 1, 2 と呼ぶ）のシグナル  $\phi(t)$ 、戦略を決める  $a(t)$  に関して、両者の典型的な軌道を示す。 $\phi_1, a_1$  はエージェント 1,  $\phi_2, a_2$  はエージェント 2 の状態を、縦軸は各状態の値をそれぞれ表す。図 7 では各状態は収束しており、このようなシグナリングを収束型と呼ぶ（A を選択したのはエージェント 1 である）。これは連続更新モデルで現れたシグナリングと同様であるので説明を省く。

図 8 では収束型とまったく異なった振舞いを見せており、各状態は ( $t \geq 50$  においても) 振動し続ける。このようなシグナリングを振動型と呼ぶ。 $0 \leq t < t_1$  では、両者の状態  $\phi$ ,

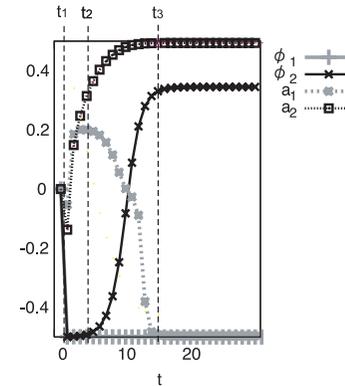


図 7 シグナリングの典型例（収束型）  
Fig. 7 Typical signaling (Convergence).

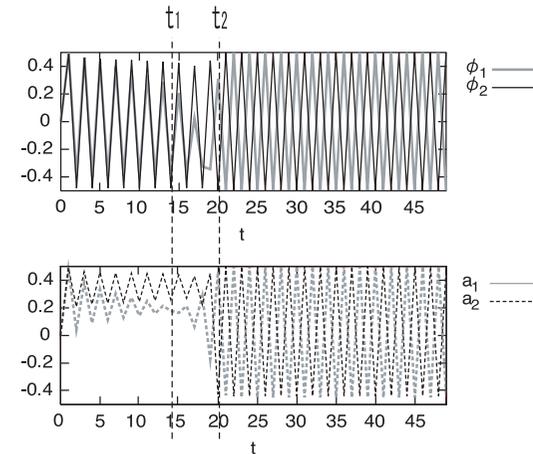


図 8 シグナリングの典型例（振動型）  
Fig. 8 Typical signaling (Oscillation).

$a$  は同位相で振動した。ここは不安定な過渡状態であり、各状態の振動の振幅は少しずつ変化した。 $t_1 \leq t < t_2$  ではエージェント 1 の振舞いが大きく変わって、振動の位相がずれていき、 $t_2 \leq t$  において位相が 1 ずれた周期 2 の安定した振動になった。 $a_1$  と  $a_2$  の符号が異なって振動するので、ゲームは成功する。A を選択したのはエージェント 2 である。こ

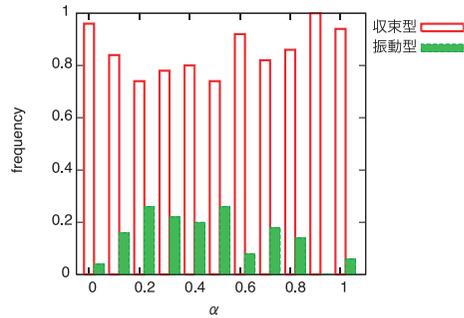


図 9 収束型と振動型の出現頻度

Fig. 9 Frequency of each type (Convergence or Oscillation).

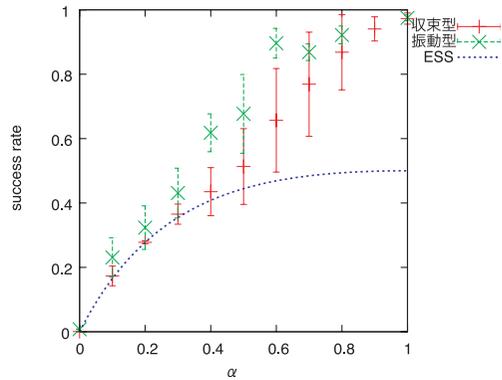


図 10 収束型と振動型のゲームの成功率

Fig. 10 Success rate at the games by Convergence or Oscillation.

の場合、 $t_1 \leq t < t_2$  において振動の位相を 1 ずらしたことが B の選択を相手に示す合図になったと考えられる。

図 9 に収束型、振動型の出現頻度を示す。つねに収束型に進化する頻度が高いが、 $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$  のとき、約 2 割が振動型へ進化的に進むことが分かる。また、収束型と振動型のゲームの成功率を図 10 に示す。同図には ESS 集団の場合も示している。収束型は連続更新モデルの場合とほぼ等しい。同図より、収束型の成功率は  $\alpha < 0.5$  において ESS 集団とほぼ変わらないが、振動型は  $0 < \alpha < 1$  において収束型より成功率が高いことが分かる。

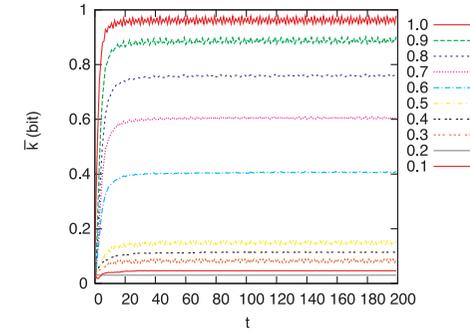


図 11  $\bar{k}(t)$  の時間変化 (収束型)

Fig. 11 Transition of  $\bar{k}(t)$  (Convergence).

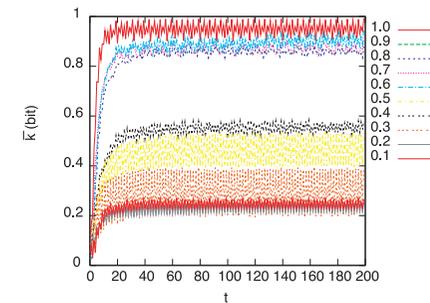


図 12  $\bar{k}(t)$  の時間変化 (振動型)

Fig. 12 Transition of  $\bar{k}(t)$  (Oscillation).

#### 4.3.2 情報量を用いた分析

4.2.2 項と同様な分析を行った (ここでは  $-0.5$  から  $0.5$  の範囲で 100 等分して  $\phi$  を離散化している)。収束型と振動型の各  $\alpha$  の  $\bar{k}(t)$  の時間変化を図 11, 図 12 に示す。どちらの場合でも、有効なシグナルが進化したとき (収束型では  $\alpha \geq 0.5$ , 振動型では  $\alpha > 0$ )、 $\bar{k}(t)$  は振動しながらも基本的には  $t$  に関して増加し、また、連続更新モデルの場合より早い段階で戦略選択に関する合図を送るように進化した。本モデルは、連続更新モデルに比べて  $\phi$ ,  $a$  を一気に大きく変更することができ、また、 $\phi, a$  の範囲が  $(-0.5, 0.5)$  に限定されているので、短時間で両者の戦略が決定した安定状態に至ったのであろう。

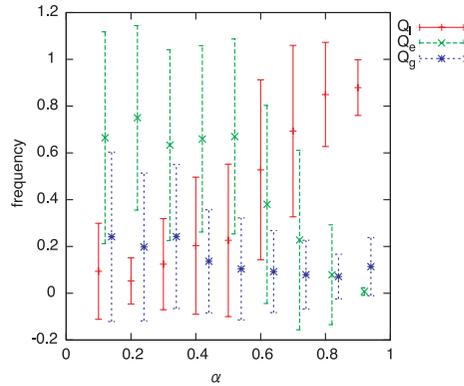


図 13 各  $\alpha$  における  $Q_l, Q_e, Q_g$  (収束型)  
Fig. 13  $Q_l, Q_e$  and  $Q_g$  (Convergence).

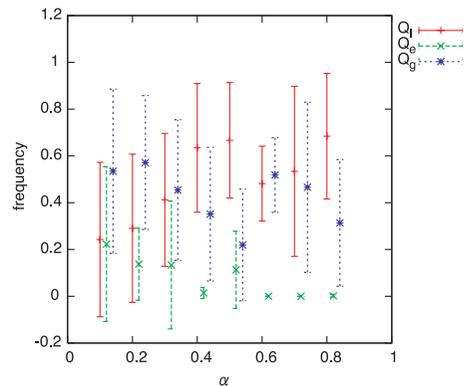


図 14 各  $\alpha$  における  $Q_l, Q_e, Q_g$  (振動型)  
Fig. 14  $Q_l, Q_e$  and  $Q_g$  (Oscillation).

図 5 と同様に、収束型、振動型の各  $\alpha$  についてゲームが成功した場合の  $K_A < K_B$  であった割合  $Q_l$ ,  $K_A = K_B$  であった割合  $Q_e$ ,  $K_A > K_B$  であった割合  $Q_g$  を図 13, 図 14 に示す。収束型は、連続更新モデルと同様に、合図を示すのが遅い方が A, 早い方が B を選択するように進化している傾向が見られる。振動型の場合はそのような傾向は見られない。微妙な振動の位相のずれが、どちらが譲るかを決定していると考えられる。

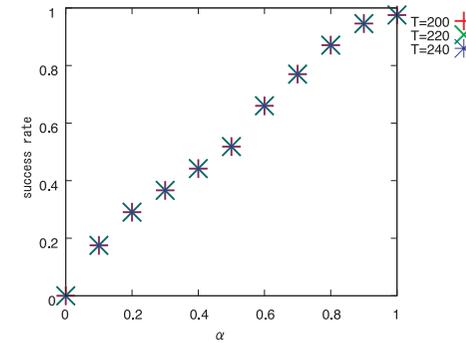


図 15 ゲームの成功率に関する  $T$  の影響 (収束型)  
Fig. 15 The effect of  $T$  on success rate at the games (Convergence).

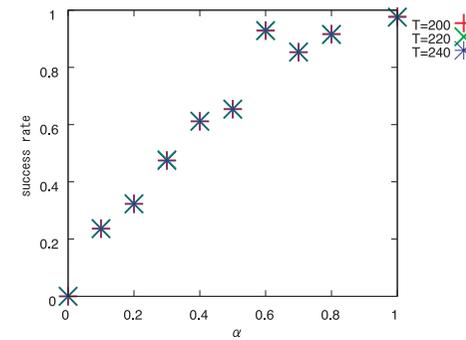


図 16 ゲームの成功率に関する  $T$  の影響 (振動型)  
Fig. 16 The effect of  $T$  on success rate at the games (Oscillation).

#### 4.3.3 ゲーム成功状態の安定性

4.2.3 項と同様な分析を行った。図 15, 図 16 に  $T$  を長くした場合のゲームの成功率を示す。収束型・振動型ともに変化せず、ゲーム成功状態は安定であるといえる。

収束型は連続更新モデルの場合と同様に戦略の組合せがナッシュ均衡へ収束しているためであると考えられる。

振動型は次の理由から安定していると考えられる。エージェント 1 が A, エージェント 2 が B を選択してゲーム成功状態になっているとき、エージェント 2 が戦略を A に変更す

ると、ゲーム成功のためにはエージェント 1 が戦略を B に変更しなければならない。次に、同様にエージェント 1 が自分の戦略を A に変更するならば、エージェント 2 は戦略を B に変更しなければならない。ゲーム成功状態において、このように戦略が B のエージェントがつねに戦略を A に変えるとすると、ゲーム成功のためには戦略の振動が繰り返される必要がある、そのため振動状態は安定していると思われる。そして、交渉期間初期の振動は不安定であるため、この安定した振動状態へ収束していくと思われる。この方式は、一方の振舞いではなく、両者のダイナミックな相互作用によりゲーム結果が決まるため、前節の分析では明確な傾向が見られなかったと考えられる。

## 5. おわりに

本論文では、言語・コミュニケーションの進化の成立基盤を検討することを目的として、2 者の衝突回避行動を題材としたエージェントベースモデルを設計し、進化シミュレーションを行った。その結果、次のような 2 種類の動的なシグナリングが進化することが示された。

1 つは、シグナルを途中で変更することにより自分の譲歩を知らせると解釈できるものである。このタイミングは遅いほど高利得が期待できるが、両者ともぎりぎりまで譲らないとゲームが失敗するリスクがある。このトレードオフのために集団が多様化し、このコミュニケーションが成立する。ただし、両者の対立度が大きいとこのコミュニケーションは進化しない。このシグナリングの出現は、連続的な値をとるシグナルから意味のある合図への記号化、あるいは、同時双方向の相互作用から一方が合図を示すという話し手と聞き手の役割分担化と解釈することも可能である。この意味では、従来の計算論的言語進化モデルが前提としている言語・コミュニケーションの進化的基盤の一部を創発したといえるであろう。また、このようなコミュニケーションと繰返しゲームにおいて交互に A と B を出しあつてともに高得点を得る互惠関係 (CAD 型の ST 互惠<sup>1)</sup>) の関連が指摘されており<sup>16)</sup>、興味深く、これに関する考察は今後の検討課題としたい。

このシグナリングでは、進化する場合としない場合の間に、対立度に関して明確な境界が存在することが示唆された。この境界について検証するために、進化したシグナリングシステムを単純化した戦略とシグナリングをしない戦略との混在集団を構成し、そのレプリケータダイナミクス<sup>5)</sup> の数理解析を行った。その結果、対立度がある値より大きくなると、シグナリング戦略どうしの利得が低下し、シグナリング戦略が非シグナリング戦略に支配されてしまうということが示された。この事実は、この境界の存在を間接的に説明するものである。これに関しては別の機会に報告する予定である。

もう 1 つのシグナリングは、シグナルや戦略の変更に関する制約が小さい設定において進化するもので、両者の共振という動的な振舞いを巧妙に利用したものである。これは、記号と意味の対応付けというような静的な言語観とは大きく異なるものであり、また、このシグナリングが進化した集団のゲーム成功率が大きい点も注目すべきであろう。

動物のシグナルの研究においては、対立度が非常に低い場合でしかシグナルは進化しないとされてきた<sup>12),13)</sup>。ただし、それらは威嚇のような単純なシグナルを研究対象としていた。本研究では、前提をなるべく取り除いた計算論的モデルを構成した結果、振動型のような巧妙なシグナリングが観察可能となり、それらは、対立度が比較的大きい場合でも進化しうることが分かった。本論文で示された収束型と振動型以外にもシグナリングのタイプが存在するかどうかは興味深いテーマだと思われる。また、交渉期間、シグナルの表現法などに関して検討し、より一般的で最小のモデルによる検討をすることや、得られた知見を実際の生物のシグナルの進化に関する知見と比較検討することも今後の課題である。

## 参 考 文 献

- 1) Crowley, P.H.: Dangerous Games and the Emergence of Social Structure: Evolving Memory-based Strategies for the Generalized Hawk-Dove Game, *Behavioral Ecology*, Vol.12, No.6, pp.753-760 (2001).
- 2) Farrell, J.: Cheap Talk, Coordination, and Entry, *The RAND Journal of Economics*, Vol.18, No.1, pp.34-39 (1987).
- 3) Farrell, J. and Rabin, M.: Cheap Talk, *The Journal of Economic Perspectives*, Vol.10, No.3, pp.103-118 (1996).
- 4) Flack, J.C. and de Waal, F.: Context modulates signal meaning in primate communication, *Proc. National Academy of Sciences*, Vol.104, No.5, pp.1581-1586 (2007).
- 5) Hofbauer, J. and Sigmund, K.: *Evolutionary Games and Population Dynamics*, Cambridge University Press (1998).
- 6) Iizuka, H. and Ikegami, T.: Adaptive Coupling and Intersubjectivity in Simulated Turn-Taking Behaviour, *Proc. 7th European Conference on Artificial Life*, pp.336-345 (2003).
- 7) Kirby, S.: Natural Language From Artificial Life, *Artificial Life*, Vol.8, No.2 (2002).
- 8) Marocco, D. and Nolfi, S.: Self-Organization of Communication in Evolving Robots, *Proc. Artificial Life X* (Rocha, L.M. (Ed.)), pp.178-184, MIT Press (2006).
- 9) Miller, J.H. and Moser, S.: Communication and Coordination, *Complexity*, Vol.9, No.5, pp.31-40 (2004).
- 10) Ryan, M.J., Phelps, S.M. and Rand, S.A.: How Evolutionary History Shapes Recognition Mechanisms, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.5, No.4, pp.143-148

- (2001).
- 11) Smith, M.J.: *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press (1982).
  - 12) Smith, M.J. and Harper, D.: *Animal Signals*, Oxford University Press (2003).
  - 13) Smith, M.J.: Must Reliable Signals Always be Costly?, *Animal Behaviour*, Vol.47, No.5, pp.1115–1120 (1994).
  - 14) Smith, M.J. and Price, G.R.: The Logic of Animal Conflict, *Nature*, Vol.246, No.5427, pp.15–18 (1973).
  - 15) Steels, L.: Evolving Grounded Communication for Robots, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.7, No.7, pp.308–312 (2003).
  - 16) Tanimoto, J.: Emergence of Cooperation Supported by Communication in a One-Shot 2 x 2 Game, *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation 2007*, pp.1374–1381 (2007).
  - 17) 石原秀樹, 金井雅之: 進化的意思決定, 朝倉書店 (2002).
  - 18) 橋本 敬: 言語進化とはどのような問題か?—構成論的な立場から, 第 18 回人工知能学会全国大会論文集, 1CS-2 (2004).
  - 19) 柴田克成, 伊藤宏司: 利害の衝突回避のための交渉コミュニケーションの学習と個性の発現—リカレントニューラルネットを用いたダイナミックコミュニケーションの学習, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.11, pp.1346–1354 (1999).

(平成 19 年 12 月 10 日受付)

(平成 20 年 5 月 8 日採録)



高野 雅典

1981 年生まれ。2004 年会津大学コンピュータ理工学部コンピュータソフトウェア学科卒業。2006 年名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程（前期課程）修了。現在，同大学院博士課程（後期課程）在学中。2006 年から日本学術振興会特別研究員（DC1）。



有田 隆也（正会員）

1960 年生まれ。1983 年東京大学工学部計数工学科卒業。1988 年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。名古屋工業大学講師，カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て，現在，名古屋大学大学院情報科学研究科教授（情報文化学部兼務）。人工生命や情報科学の研究に従事。複雑適応系，進化ダイナミクス，言語の進化等に興味を持つ。著書に『人工生命』（医学出版，2002 年），『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 年）等。