

コミュニケーションの創発

有田 隆也*

*名古屋大学 大学院情報科学研究科, 愛知県名古屋市千種区不老町
 * Graduate School of Information Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi
 * E-mail: arita@nagoya-u.jp

1. はじめに

言語の起源や進化は謎が多く、また多くの領域に関わる魅力的なテーマである。適応進化の産物としてヒトの心を理解する見地、及び、新しい計算科学やハードウェアに基づく構成論的手法の進展によって、構成論的手法に基づく言語進化の研究が盛んになっている[1]。構成論的手法とは、対象とする現象やシステムのエッセンスを捉えたモデル化をした上で、計算機やロボットなどを用いて実際に動かすことにより、対象の現象やシステムの理解を深める手法である¹。言語に限らず、生命や社会など、要素間の相互作用から創発するシステムとしての複雑系を解明するには従来の還元論的手法には限界があり、構成論的手法が重要である[2]。

本稿では、言語やコミュニケーションを多数の個体の間の相互作用から創発する動的システムと捉える立場から、言語、特にそのコミュニケーションの機能の創発性に対して構成論的手法によってアプローチする試みについて論じる。特に、すぐには答えが出そうにない、次の3つの難問に対する回答の模索を中心とする。

- 1) コミュニケーションはどのように成立するか？
- 2) 文法はどのように創発するか？
- 3) 言語能力はどのように適応進化するか？

2. 言語進化の基本的理解

2.1 言語進化プロセスの全体像

図1に動的な言語観に基づく言語進化プロセスのイメージを示す。ダイナミクスの基本は、脳²と言語の共進化である。言語は脳という環境が選択圧の一部となり、高効率、高表現力、学習容易なものへ進化する。世界中の言語に普遍的な特徴（言語普遍性）はこのダイナミクスに深く関係するであろう。一方、脳は言語という環境が選択圧の一部となり、言語の処理に適した方向に進化すると考えられる。ヒトの脳が備えているメンタル文法[3]の少なくとも一部はこのダイナミクスに基づいて、Chomskyの普遍文法のような

¹ 具体的なメカニズムよりは概念のレベルの理解を目指す場合のほうが多い。
² 発声器官等の言語処理に関わる器官も含むが本稿では略している。

キーワード：言語進化 (language evolution), 創発 (emergence), 構成論的手法 (constructive approach), 複雑系科学 (complex systems science)
 CN 0000/00/0000-0000 © 2002 SICE (016_コピーライト-タイトル系)

な生得的システムを有する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、言語も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ている。それらがお互いに選択圧に影響を与え合うので「共進化」が起こる。さらに、個体の生涯というもっと短い時間スケールでは学習(表現型可塑性)のプロセスも働いている。この3つのプロセス間の影響は複雑であり、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、問題を難しくする。
 脳と言語のそれぞれの進化に関して、次のような見解がありうる[4]。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。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。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。

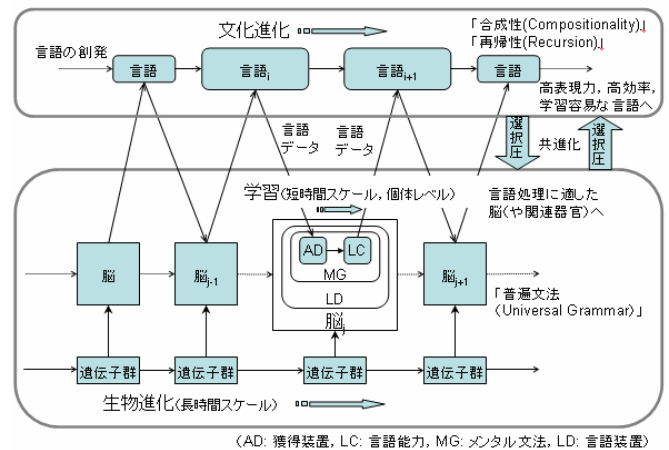


図1 言語進化プロセスの全体像

2.2 根本的な疑問

そもそも、我々の祖先はなぜ話すようになったのだろうか？ 聞き手には情報が伝わるが、話し手側にはコストがあるだけで、メリットがなさそうに思える。従来の有力説としては、共同で狩猟をする際に、コミュニケーションによる関係プレーが生き残り上、重要だったというものがある

る。この場合は、両者に恩恵があるので理解しやすい。

近年、この説に代わって有力なのはいわゆる社会知能仮説にリンクしたものである。この仮説は、ヒトの知能が、自然環境でうまく生きるため（従来説）ではなく、集団に属する個体間の相互作用、つまり社会環境でうまく生きるための適応の結果であるというものである。言語があれば、話し手は聞き手を自分のためにコントロールできるし、また、中身に大した意味がない無駄口でも、連帯意識を高めて非常時の助け合いにもつながる[5]。

手の存在意義が多数考えられるように、言語の存在するメリットも、これら以外にも、たとえば、おしゃべりのほうが魅力的で性選択上有利であるという説などいろいろ考えられている[6]。しかし、ヒトだけが文法を持つ言語を持つという点を忘れてはならない。したがって、ヒトの祖先の生活環境の独自性を考えることが必要であろう。

Bickerton は、その環境が捕食者に狙われやすく食料も不十分なため、仲間内で勢力争いをする余裕がなく、グループ内で協力関係を築くことが重要であったことを指摘した上で、そのことが、動物では、受信者に対する操作のように話し手にメリットがあり、ヒトでは、話し手にメリットがないコミュニケーションが典型的であることの要因である可能性を指摘している[7]。この説明は個体レベルとグループレベルの両者からより包括的に説明するマルチレベル選択（群選択の発展理論）の考え方[8, 9]につながるものである。さらに、評判を言語によって伝達することは、利己主義個体（フリーライダー）除去にとって大きな役割を果たすと考えられ、その意味からも言語と協力的行為は深く関連して進化した可能性がある。

3. 言語進化の基本的モデルの例

3.1 ゲーム論的言語モデル

Nowak らは、動物のコミュニケーションからの言語創発に関心を持ち、進化ダイナミクスとゲーム論に基づき、数学的モデルによって言語進化にアプローチしている。その一環として、以下のような単純な言語モデルを提示している[4, 10]。

集団を構成する個体は N 個の意味（概念）に対して M 個の任意の信号を使ってコミュニケーションする。各個体はそれぞれ $N \times M$ の結合行列 A を持つ。行列の要素 a_{ij} は、非負の実数（あるいは整数）であり、意味 i と信号 j の結びつきの強さを表す。話し手は行列 P で表される。その要素 P_{ij} は意味 i に対して信号 j を使う確率を表す。聞き手は行列 Q で表され、その要素 Q_{ij} は受け取った信号 j が意味 i を参照すると解釈する確率を表す。次のように、行列 P は行列 A を行に関して、行列 Q は結合行列 A を列に関して、それぞれ正規化することによって得ることができる。

$$p_{ij} = a_{ij} / \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad q_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

次に、結合行列 A_I と A_J をそれぞれ持つ 2 個体 I と J を想定し、 J とコミュニケーションする I の利得を次のように定義する。

$$F(A_I, A_J) = (1/2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (p_{ij}^{(I)} q_{ij}^{(J)} + p_{ij}^{(J)} q_{ij}^{(I)}) \quad (2)$$

なお、ここで、 $\sum_{j=1}^m p_{ij}^{(I)} q_{ij}^{(J)}$ は、個体 I がいずれかの信号を用い

て個体 J に意味を伝えることに成功する確率を表している。これをすべての意味に関して、また、話し手と聞き手の両者になるとして計算する。

2.2 で論じたように、話し手と受け手の両者が同様に利得を受けるとは限らない。その利得を意味ごとに設定できるように一般化すると、次のようになる。ここで、 α_i, β_i はそれぞれ、話し手と受け手の利得を表し、その正負が利得の正負に対応する。

$$F(A_I, A_J) = (1/2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\alpha_i p_{ij}^{(I)} q_{ij}^{(J)} + \beta_i p_{ij}^{(J)} q_{ij}^{(I)}) \quad (3)$$

言語進化は、基本的には文化進化である。同世代間で上記の計算を行い（水平伝達）、利得に比例して子を残し、親から子への垂直伝達によって行列の中身は伝わるが、その際、ノイズが入る³。

3.2 垂直伝達モデル

Kirby らの ILM (Iterated Learning Model) [11, 12] は、親から子への伝達による文化進化を扱う手続き的モデルであり、「親」個体が「子」個体へ意味—信号のペアを送ることを繰り返す。その間、子はあらかじめ設定した学習アルゴリズムに基づいて文法を獲得する。その後、子が親になり、同様の学習を行うことを繰り返して行くというものである。以下に基本的アルゴリズムを示す。

- 1) 親の学習エージェントと子の話し手エージェントを一つずつ（言語知識を持たない）を作成。
- 2) 意味を一つランダムに選択。
- 3) 話し手エージェントがその意味に対する信号を生成（知識がない場合、新たな信号を作り出す）。
- 4) 意味—信号ペアを学習エージェントが受信、学習。
- 5) 2)-4)を規定回数（例えば数百回）繰り返す。
- 6) 話し手エージェントを除去。
- 7) 学習エージェントを話し手エージェントとする。
- 8) 言語知識を持たない新しい学習エージェントを導入。
- 9) 2)-8)を規定回数（例えば数千から一万回）繰り返す。

3.3 統合モデル

渡辺らのモデル[13]は、2.1 で示した、生物進化、文化進化、学習の 3 プロセスを扱う。各個体の生涯は、前世代個体から聞く垂直伝達、同世代同士で会話する水平伝達、次世代個体に話す垂直伝達の 3 つの期間で構成される（図 2）。

³ 学習の正確さはエージェントの言語獲得装置に依存しており、このパラメータを進化させれば、生物進化モデルとなりうる。

各個体は3階層のエルマン型ニューラルネットワーク(NN)で構成され、各結合重みの初期値と可塑性の有無を遺伝情報として持つ。会話[14]では、入力層の各ユニットに対応する文字が逐次的に話し手から聞き手に送られる。伝達内容(意味)はビット列(主部と述部に相当する部分の結合)で表現される。会話において、聞き手側では、一文字ずつNNに入力し、出力パターンを量子化する。同時に、伝達内容を教師信号として誤差逆伝播法によって学習する。送信終了時にNNの出力を量子化したものが伝達内容に一致していれば会話の成功で、得点を得る。話し手側では、NNで伝達内容に最も近い出力を得る文字を一つずつ選び出して送る。よく表現できる文字列を産出できれば発話成功で、得点を得る。水平伝達期間の終了時の得点を適応度として、遺伝的アルゴリズムによって次世代の集団を作った後、次世代への垂直伝搬の期間に移行する。

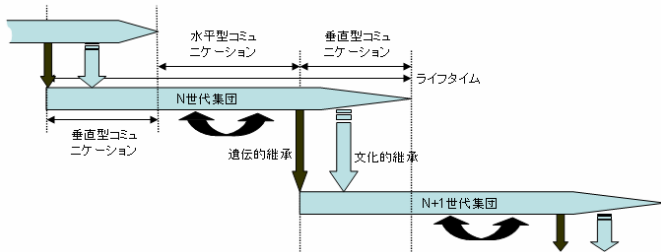


図2 統合モデルでのコミュニケーション

4. どのようにコミュニケーションは成立するか

4.1 原初的コミュニケーションからの言語基盤の創発

近年盛んに行われている言語の起源や進化に関する構成論的研究で扱うモデルの多くは、1) 離散的表現のシグナルを通信し、2) 話し手と聞き手の役割は明確に分かれ、3) 両者の適応度は意味伝達の成功によって同等に増加することを前提としている。実際、3.1で紹介した3つのモデルでも、この3点に明確に当てはまらないのは、Nowakらのモデルにおいて、(3)式で α_i , β_i によって話し手と聞き手の適応度への寄与を変化させる点のみである。

もちろん、創発性を問題にする場合、どこまでをモデルの前提にすべきかという問題は、どのレベルからの創発現象に焦点をあてるかということに依存する。もし、これら3モデルでこの3前提をはずしたのならば、得られた様々な成果(5.1で一部紹介)は結実しなかったであろう。

しかし、コミュニケーションという豊かなプロセスにおいて、これらの前提はかなり強いことも事実である。特に、非言語的コミュニケーションからの言語的コミュニケーションの創発を問題とするならば、これらの前提は致命的である。むしろ、そのような問題意識からは、これらの成立

自体こそを検討すべきであろう。つまり、1) (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、2) 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。そして、3) その2者間には対等な関係を含む様々な対立度がありうる、という状況である。実際、鳴き声や仕草のようなシグナルによる動物の典型的コミュニケーションはこのような特徴を持つ。

このような問題意識に関連する計算論的、構成論的な研究は存在する[15-17]が、これら3点をコミュニケーション創発の主問題と考えて、その進化的基盤を検討する研究を次に紹介する。

4.2 言語基盤の創発に関する構成論的モデル

高野らは、コミュニケーションする2個体間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、先の3特徴を満たしうる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のモデルを考え[18]。各エージェントは、(交渉期間後にその正負で)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 ϕ 、内部状態 I を持つ。対戦は2エージェント間で行われ、連続値のシグナルの送受信を同時双方向に繰り返す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。各エージェントは、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、このNNに基づいて、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。

個体間の関係は表1の利得行列を用いて表す($0 \leq \alpha \leq 1$)。この利得行列を用いたゲームでは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)。この状況は動物の資源争いに相当する。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、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 α である。両者が協力してどちらかの均衡を選択すれば利得を得られる(ゲーム「成功」)。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 $1-\alpha$ だけ利得が小さいので、両者間には α の大きさに応じた対立が存在する。このような対戦(図3)を総当たりで行い、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。

表1 コミュニケーション成立モデルでの個体間関係

	A	B
A	0, 0	1, α
B	α , 1	0, 0

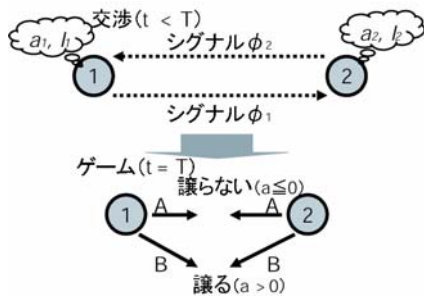


図3 エージェント間の2段階の相互作用

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）を観察しあった後、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。

シミュレーションの結果、 α が比較的小さい（対立度が大きい）場合でも有効なコミュニケーションが創発し、ゲーム成功率がコミュニケーションなしの進化的安定な戦略集団より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、次の2種のコミュニケーションのいずれかが進化することが示された。1つは、衝突直前のタイミングでシグナルの増減方向を変えることにより譲歩を知らせる（収束型、図4）。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、両者ともぎりぎりまで譲らないとゲーム失敗のリスクがある。このトレードオフで集団が多様化する。もう一つは、状態の振動を利用するものである（振動型）。相手と反対の位相を取る状態を維持して調停する興味深いものであり、Marocco らが創発させたロボット協調行動における振動型信号[19]と同様、鳥の一部に見られる鳴き声のデュエット[20]を思わせる。

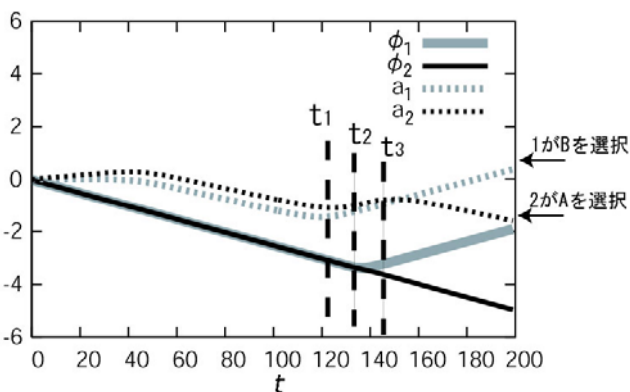


図4 収束型コミュニケーションの典型例

縦軸はエージェント1, 2の状態 ϕ_1, a_1 と ϕ_2, a_2 をそれぞれ表す。交渉期間終了時 $t=200$ での a の正負が戦略 B, A のどちらを取るかを決定する。正負に分かれるとゲーム成功である。最初、両者は高

利得の A を選択する方向へと a を減少させる。しかし、両者が A を選択すると失敗するため、譲る（B）選択も可能なぎりぎりのタイミング t_1 で両者は a を B 方向へと増加させ始める。 t_2 で、エージェント2が ϕ を逆方向へと増加させることで譲歩を相手に示す。 t_3 で、相手がそれに反応して t_1 で変えた a を再び A 方向へと減少させ始める。

収束型コミュニケーションの創発は、連続値をとるシグナルから意味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するという話し手と聞き手の役割分担化の萌芽と解釈しうる。この意味で、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言えよう。

5. どのように文法は創発するか

5.1 言語構造の普遍性

2.1 で述べた通り、ヒトによる言語処理はその脳を始めとする様々な普遍的な制約に基づいているはずであり、それが言語の構造、文法における普遍的な特徴を生み出していると考えられる。言語の構造の普遍的特徴として、たとえば、（信号全体が意味全体を表す「全体論的」ではなく）言語表現の意味が部分の意味と部分の組み合わせ方の関数になっているという「合成性」や構文規則を繰り返し適用して無限の文を生み出す「再帰性」などがあげられる。

Nowak らはゲーム論的手法に基づく様々な研究をしている。たとえば、3.2 で述べたモデルで合成性の優位性を次のように示した[10]。言葉の送信の際のエラーがある閾値以上では、言語の適応度（両者がその言語の文法を持っているときに言語一致に応じて得られる利得の期待値）が増加しなくなる性質があり、単語を複数に分割して送ることによってこの限界を超えられることを示している。また、別のいくつかの研究では、文法の集合を想定し、相手の文を理解できれば利得を得られる（文法間の類似度に基づく）として、各文法を使う個体の頻度に関するレプリケータ・ミューテータ方程式により進化ダイナミクスを表し、平衡状態を検討している[21]。

Kirby らは3.2 で述べた ILM を用いて合成性創発に関する研究を行っている[11, 12]。たとえば、 $\text{fears}(\text{john}, \text{tiger})$ や $\text{knows}(\text{john}, \text{eats}(\text{tiger}, \text{john}))$ のような形式で意味を与えると、話し手は自分の文法規則に基づいて言葉（文字列）を導出する（初期状態や適用できる規則がない場合は文字列を新しく作り出す）。受け手は自分の文法規則で受理できるか調べ、できなければ受理できるように文法を拡張する。ここでいう文法とは、確定節文法（DCG）に準じたものであり、たとえば、 $\text{eats}(\text{tiger}, \text{john})$ を tigereatsjohn という文字列で表す文法として、たとえば、以下の2つがある。

- 1) $S/\text{eats}(\text{tiger}, \text{John}) \rightarrow \text{tigereatsjohn}$
- 2) $S/p(x, y) \rightarrow N/x V/p N/y$

V/eats → eats

N/tiger → tiger

V/john → john

ここで、S は開始記号で、V と N は通常非終端記号である。1)は右辺の文字列全体で左辺の意味を表し(全体論的)、2)のような合成性は一切ない。聞き手は、文法を学習するための手続きとして、まず規則の追加と重複の除去を行い、次に一般化の操作を行う。この一般化は、規則のペアを取り出しては、より一般的な形式を抽出できないか試みる操作である。

実験の結果、初期においては、文全体に対して文字列を割り当てるといような 1)のタイプの文法が使われるが、ある時点で急に 2)のように意味の構造が文法に反映されるようになった。そして、数百世代後には再帰的な合成性が創発したという。この過程において、表現可能な意味の量は増加し続けるのに対して、個体の中の規則数+単語数は、構造的な文法に推移することによって減少した。

渡辺らは、3.3のモデルを用い、意味としては主部(4ビット)5種類と述部(6ビット)5種類、伝達に使う文字を a-d の4文字として実験を行ったところ、初期の全体論的構造から、次第に合成性を有する構造に徐々に推移することを示した(表2)[13]。これは、聞き手の手続き的記述による学習に基づいた結果ではなく、意味構造をニューラルネットワークが自律的に反映した結果である。

表2 頻出する言葉の変化例

進化序盤(上)では、例えば意味 1000011100 に言葉 bb を発しており、規則性は見られないが、進化後期(下)では、前半に述部の一つに対応する文字(下線)、後半に主部の一つに対応する文字(斜体)を発する傾向が見られる。

主部 \ 述部	1000	1011	0101
011100	bb	aa	ba
101001	dbc	dbd	cb
100011	dc	dd	cd

主部 \ 述部	1000	1011	0101
011100	<u>bb</u> d	<u>b</u> b <u>c</u>	<u>b</u> d
101001	<u>a</u> a	<u>a</u> c	<u>a</u> d
100011	<u>c</u> a	<u>c</u> c	<u>c</u> d

ところで、現在の言語に至る前の原型(原言語)がいかなる経緯で合成性を有するようになったか、論争が盛んになっている[22]。複雑な文法を持たない言葉で構成されており、それらが規則に従って組み合わせられるようになって現在の言語に至ったという見解と、文に相当する複雑な意味を持つ言葉から構成される言語において言葉が分解されて、現在の言語に至ったという見解が対立している。

5.2 心の理論における再帰レベルの進化モデル

5.1の冒頭で述べた通り、ヒトによる言語処理、そして言語の構造は様々な普遍的制約に基づいていると考えられるが、認知機能一般の制約にも関連している可能性がある。ここでは、特に「心の理論」[23]との関連について考える。心の理論とは、他者の心の状態(意図、知識、信念など)を推測する心の機能である。心の理論を持つことが社会的生物にとって適応的であることは言うまでもないだろう。資源の限られた複雑な社会的環境では、他者との駆け引きの中で他者よりも優位に立つことが重要であるからである。社会環境で発揮されるこのような知能を社会的知能と言う。

ある個体が心の理論により他者も心の理論を持つと推測すると、心の推測の入れ子構造が発生する(この構造の深さを再帰レベルと呼ぶ)。高度な社会的知能を持つチンパンジーの可能な他者の再帰的な推測はレベル2程度と言われる[24]一方で、ヒトはレベル5前後まで可能と言われており[25]、他種に比べて際立って高い。この再帰レベルは何を意味するのであろうか?

まず、心のこの機能と、有限の数の言葉から無限の文を作り出しうるという言語の本質的特徴との関連を考えよう。たとえば、「私は本を買った」という文を生み出すルールを再帰的に適用することによって、「私は彼女が薦めてくれた本を買った」のように、何段でも入れ子構造を深めることができる。特に、信じる、知っている、というような自分の内的状態を表す動詞が再帰的に使われる場合、心の理論における再帰とその言語表現は直接的に対応する。また、子供の成長過程においては、言語の文法構造の方を先に獲得しているという報告もある[26]が、聞き手として、言語表現の限られた情報量の下で意味を理解するため、あるいは、話し手として、言語を用いて相手进行操作するためには、相手の心を推測する機能が必要だという議論も有力である。

ここでは、両者の関係を明らかにする構成論的アプローチの第一歩として、心の理論の再帰レベルの適応性と進化に関する研究[27, 28]を紹介する。具体的状況設定としては、人混みの中で各個体がスタートとゴール地点をランダムに与えられて移動するが、その際、各個体が持っている再帰レベルに基づいて、他個体の動きを予測し、衝突回避しながら動く。衝突すると時間的ペナルティが課される。逆に、他個体を気にしすぎて、大きく迂回することは時間のロスにつながる。再帰レベル0の個体は、相手をまったく気にせず自分のゴールに向かって直進し、レベル1は、視界内の個体が皆レベル0だとみなして動きを予測して移動する。レベル2以降も同様に自分より一つレベルが低いと考えて移動する⁴。適応度は、要した時間をスタート・ゴール

⁴ 周りが自分より小さいレベルのどれかという設定でも基本的に

間距離で割ったものである。

シミュレーションの結果、予想しなかった結果が得られた。それは、再帰レベルの奇数偶数による行動や適応度への大きな影響である。レベル1はレベル0が全く避けないと予測するので、極端に他者を避ける。レベル2はレベル1が自分を大きく避けてくれると予測するので、極めて小さな回避行動しかしない。レベルが高くなるにつれて、両者の差は小さくなる(図5)。

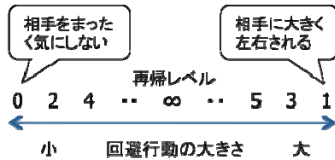


図5 再帰レベルと回避行動の大きさの関係

適応度は、この直線上のある点をピークにしてそこから離れると小さくなる。その場所はあるパラメータによって決まる。それは、視界の広さである。間近に迫ってから回避行動を始めると、大きな回避行動をとらないと間に合わない。逆に、遠くの個体も気にすると、無駄な迂回を招いてしまう。さらに、再帰レベルと視界の広さを同時に進化させる実験を行ったところ、再帰レベルが深ければ深いほど適応的である領域に視野の広さが進化し、再帰レベルも深くなる一方であった。

視野の広さを表すパラメータは、個体の密集度を表すパラメータに置き換えても同様な結果が得られた。視野が狭い(密集度が大きい)と、この直線上で左よりの奇数レベルの推測が他者との衝突をうまく避け適応的であり、逆の場合は右よりの偶数レベルが適応的である。特に、相互作用の強さが中央にあるとき、奇数偶数に関係なくより高いレベルが高い適応度を得る。ヒトの歴史において、個体間の相互作用の強さは徐々に強くなり、それが知能の進化を駆動してきたと考え、適応度がピークとなるレベルは、図5において、右から左へと移行したのかもしれない。つまり、ヒトと他種との差は、レベルが深くなればなるほど適応的であるような、この特定の領域に達したかどうかの差であり、同時に言語の文法も進化した可能性がある。

6. どのように新しい言語能力は進化するか

6.1 表現型可塑性(学習)の役割

コミュニケーションは相手次第であり、個体の言語能力の適応性は他個体に依存する。他個体の使っている言語の文法が自分のものと同一である保証はない。あてにならないからこそ、会話することは意味を伝えると同時に、自分

の使っている文法に関する断片的情報を相手に伝える意味がある。こうして、お互いが自分の文法を少しずつ変えていく。これが言語の動的特性をもたらす源であろう。このような動的言語観は、各個体の有するメンタル文法の柔軟性、つまり表現型可塑性(広い意味の学習)の重要性を浮き彫りにする。

さらに、言語の適応進化のシナリオを考えると、この表現型可塑性が大きな役割を演じている可能性がある。ある時点で標準的になっている言語より高い適応度を潜在的にもつ言語(あるいはコミュニケーションの新しいチャンネル)があり、さらに、ある個体(突然変異体)がその言語を処理できる能力を持つようになったと仮定する。しかし、周りの個体がその言語を理解できない限り、その個体の適応度は増加しないため、この言語やその言語処理能力は適応進化しない。言語の適応進化を主張するならば、この問題の解決が必要である[29]。

学習が進化に与える影響に関しては、100年以上の議論があり、近年は計算論的アプローチが盛んである。その初期においては、学習が進化を加速する面が強調されていたが、最近では、逆に遅らせる状況も指摘されている[30]。学習によって獲得された形質と先天的な形質が適応度に対して同等ならば、選択圧が消えて進化の停滞を招くからである。学習のメリットとコストのトレードオフが進化の局面に応じて異なる影響をもたらす点は重要である[31]。

以下では、コミュニケーションに関する抽象的なレベルを設定し、レベルが増加した突然変異体が相手の学習によって初めてコミュニケーションが可能となると仮定した場合、コミュニケーションレベルの段階的な増加が学習によっていかに実現しうるかを検討するための、鈴木らによるシンプルなモデル[32]を示す。

6.2 学習に基づくコミュニケーションレベルの進化モデル

各個体はそれぞれ $2M$ 個の形質(半分は送信, 残りは受信のレベル決定用)を持ち、各形質は M まで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それぞれ可塑的であるかどうかを表す属性である。 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6)。

$$level_{send/receive} = \arg \max f(n) \quad (4)$$

$$f(n) = \begin{cases} n & \text{if } s(n) \geq n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

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。

以降の話は同様であることが示されている。

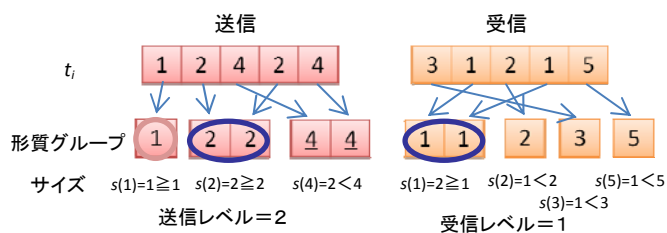


図6 送受信レベルの決定例

送受信のレベルが異なっていることと、高いレベルほど達成されにくいことがこのモデルの基本的特徴であり、前者は、発話や聴覚などの脳の処理の分離に対応し、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に対応する。

2 個体間のコミュニケーションは極めて抽象的であり、送信個体の送信レベルと受信個体の受信レベルが一致したときを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、広い意味でコミュニケーションをモデル化したものである。

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的かどうかを表す属性を進化させる実験を行った。インタラクションは全個体が総当たりで行う。まず、一回目は遺伝的に決められた形質値を使い、その後の C 回、それぞれの可塑的な形質値としては、 $\{-1, 0, +1\}$ からランダムに選んだ値を遺伝的に決まる初期値に足した値を用いる⁵。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最大値とし、各個体の適応度は全ステップに関する平均得点とする。その結果、以下のことが示された。

まず、 $C=0$ 、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であり、2になることは不利であるからである。一方、学習ありとした場合には、適応度は徐々に増加していく、つまり、学習がコミュニケーションレベルの適応進化を促進した。その際に、適応度が増加した後に生得適応度が追いつくという過程が次のように繰り返されていることが示された。

- 1) すべての個体がコミュニケーションレベル L を共有しているが、そのうち学習によりレベル $L+1$ のコミュニケーションを成功させるペアが出現してくる。つまり、生得適応度は一定のまま生涯適応度が増加する。
- 2) 大多数のペアが学習によってレベル $L+1$ を達成できるので、学習に頼らず最初からレベル $L+1$ にある個体のほうが、最初から高い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、学習で獲得したレベル $L+1$ を先天的に持つ個体が増加する。生涯適応度は増加する一方

⁵ 広い意味の学習としてランダム探索を採用している。

で、生得レベルが多様化するため生得適応度は減少する。

3) 両レベルとも $L+1$ を持つ個体の方が学習しなくてよいので、そのような個体が集団を占めるようになる。学習は働かなくなり、生得適応度が生涯適応度に一致していく。

静的な適応度地形において、谷を超える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、相手次第、つまり自分と同じような個体が近所にいればいほど適応度が高い（正の頻度依存）ような、谷が動的に深くなる場合においても、「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（ラマルク進化なしに）学習で獲得していた形質が遺伝子に獲得される」というシナリオが初めて示された。

7. おわりに

本稿では、言語やコミュニケーションを個体間相互作用から創発する動的システムとみなし、言語のコミュニケーション機能に内在する創発性に対して主に構成論的手法によってアプローチする試みについて論じた。言語学、認知科学、進化学、計算機科学、複雑系科学などの広領域に関わるチャレンジングで魅力的なテーマであるが、強い前提の下で厳密な定式化を行っても、あるいは手続的な記述に依存しすぎても、言語のダイナミックな本質や創発性が抜け落ちがちである。狭い意味のコミュニケーションに留まらない広い見地に立った、コミュニケーションの創発性に焦点を合わせた構成論的手法の重要性を強調したい。

Bickerton は、言語進化の領域は魅力的ではあるが、爆薬（あやふやな事実）の詰まった地雷がゴロゴロしており、その地雷はすぐにも洒落た理論を吹っ飛ばすと警告している。同時に、ここに踏み込むことは視野を広げてくれるし、自分のような年配にはアルツハイマー予防になると論文 [33] を終えている。ユーモアたっぷりだが、納得させられる。

(2008年10月1日受付)

参考文献

- [1] 橋本敬: AI レクチャ: 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).
- [2] 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).
- [3] R. Jackendoff: *Patterns in the Mind: Language and Human Nature*, Basic Books (1994).
- [4] M. A. Nowak, N. L. Komarova and P. Niyogi: Computational and Evolutionary Aspects of Language, *Nature*, 417, 611/617 (2002).
- [5] R. Dunbar: *Grooming, Gossip, and the Evolution of Language*, Faber & Faber (1996).
- [6] T. C. Scott-Phillips: The Social Evolution of Language and the Language of Social Evolution, *Evolutionary Psychology*, 5(4), 740/753 (2007).
- [7] D. Bickerton: Two Neglected Factors in Language Evolution, *The Evolution of Language: Proceedings of the 7th International Conference*, 26/33 (2008).
- [8] E. Sober and D. S. Wilson: *Unto Others: The Evolution and*

Psychology of Unselfish Behavior, Harvard University Press (1998).

[9] G. Ichinose and T. Arita: The Role of Migration and Founder Effect for the Evolution of Cooperation in a Multilevel Selection Context, *Ecological Modelling*, 210 (3), 221/230 (2008).

[10] M. Nowak: The Evolutionary Biology of Language, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 355: 1615/1622 (2000).

[11] S. Kirby and J. R. Hurford: The Emergence of Linguistic Structure: An Overview of the Iterated Learning Model, In A. Cangelosi and D. Parisi (eds.): *Simulating the Evolution of Language*, Springer (2002).

[12] S. Kirby: Learning, Bottlenecks and the Evolution of Recursive Syntax, In Briscoe, E., (eds.): *Linguistic Evolution through Language Acquisition: Formal and Computational Models*, pp.173/203, Cambridge University Press (2002).

[13] Y. Watanabe, R. Suzuki and T. Arita: Language Evolution and the Baldwin Effect, *Artificial Life and Robotics*, 12 (1), 65/69 (2008).

[14] J. Batali: Computational Simulations of the Emergence of Grammar, In C. Knight, J. R. Hurford and M. Studdert-Kennedy (eds.): *Approach to the Evolution of Language*, Cambridge University Press, 405/426 (1998).

[15] J. Farrell and M. Rabin: Cheap Talk, *The Journal of Economic Perspectives*, 10 (3), 103/118 (1996).

[16] 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ワーク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, 35 (11), 1346/1354 (1999).

[17] J. Tanimoto: Emergence of Cooperation Supported by Communication in a One-Shot 2x2 Game, *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1374/1381 (2007).

[18] 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, 49 (8), 2890/2899 (2008).

[19] D. Marocco and S. Nolfi: Emergence of Communication in Teams of Embodied and Situated Agents, In: A. Cangelosi, A. D. M. Smith and K. Smith (eds.): *The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference on the Evolution of Language*, 198/205 (2006).

[20] S. M. Farabaugh: The Ecological and Social Significance of Duetting, In D. E. Kroodsmas and E. H. Miller (eds.): *Acoustic Communication in Birds (Vol. 2)*, 85/124, Academic Press (1982).

[21] M. A. Nowak: *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*, Harvard University Press (2006).

[22] M. A. Arbib and D. Bickerton (eds.): Holophrasis vs Compositionality in the Emergence of Protolanguage, *Special issue of Interaction Studies*, 9(1) (2008).

[23] D. Premack and G. Woodruff: Does the Chimpanzee Have a Theory of Mind?, *The Behavioral and Brain Sciences*, 4, 515/526 (1978).

[24] 松沢哲郎: チンパンジー・マインド 心と認識の世界, 岩波書店 (1991).

[25] P. Kinderman, R. Dunbar and R. P. Bentall: Theory of Mind Deficits and Causal Attributions, *British Journal of Psychology*, 89, 191/204 (1998).

[26] J., de Villiers, and P. de Villiers: Linguistic Determinism and the understanding of false beliefs, In P. Mitchell and K. Riggs (eds.): *Children's Reasoning and the Mind*, Psychology Press, 189/226 (1999).

[27] 高野雅典, 加藤正浩, 有田隆也, "心の理論における再帰のレベルの進化に関する構成論的手法に基づく検討", 認知科学, 12 (3), 221/233 (2005).

[28] M. Takano and T. Arita: Asymmetry between Even and Odd Levels of Recursion in a Theory of Mind, *Proc. of ALIFE X*, 405/411 (2006).

[29] S. Pinker: *The Language Instinct*, Morrow (1994).

[30] I. Paenke, B. Sendhoff and T. J. Kawecki: Influence of Plasticity and Learning on Evolution under Directional Selection, *American Naturalist*, 170 (2), E47/E58 (2007).

[31] R. Suzuki and T. Arita: Dynamic Changes in Roles of Learning through the Baldwin Effect, *Artificial Life*, 13 (1), 31/43 (2007).

[32] R. Suzuki and T. Arita: How Learning Can Guide Evolution of Communication, *Proceedings of Artificial Life XI*, 608/615 (2008).

[33] D. Bickerton: Language Evolution: A Brief Guide for Linguists, *Lingua*, 117(3), 510/526 (2007).

[著者紹介]

あり た たか や
有 田 隆 也 君



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), 『心はプログラムできるか』(ソフトバンククリエイティブ)等。