

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

高野 雅典[†], 加藤 正浩[‡], 有田 隆也[†]

An individual having a Theory of Mind (ToM) can read the minds of others. If we assume further that the individual considers each of them also to have a ToM, then there should be recursive structure here. We believe that emergence and evolution of this structure are deeply linked to the evolution of intelligence. We construct two computational models: an abstract model describing fitness landscapes interacting with each other and a concrete model describing physically-situated agents moving around avoiding collisions. We conduct evolutionary simulations using the concrete model in order to investigate the dynamics inherent in the mechanism of recursion. Several unexpected properties of recursion were found, including a significant difference in fitness between odd levels and even levels of recursion. This is due to the asymmetry between level 0 and 1 (without and with ToM). We also discuss an evolution scenario in which human beings have evolved the ToM.

1. はじめに

我々は他者と相互作用し合う環境の中で他者の行動を予測し自分の行動を決めている。さらに、自分の行動が他者に与える影響がどのようなものであるかということも考えることができる。例えば、対戦競技では、味方や敵の心を推測したり欺いたりすることが重要な要素であることは明らかである。また、人混みの中を移動するとき、意図する方向に一直線に向かうのではなく、向かってくる他者を避けることや他者が自分を避けることなどを考えて行動している場合もある。このような例にとどまらず、他者の心の状態を推測することは、社会に適応した生活を送るための条件であると考えられる。

一般に、他者の心の状態を推測できる個体は、「心の理論」を持っていると言われる。心の理論とは、ある個体が自己または他者の心の状態、目的、意図、

知識、信念、思考、疑念、推測などを推測する心の機能のことである(Premack & Woodruff, 1978)。そして、心の理論により他者が心の理論を持つと推測するとき、他者も他個体に対して、心の推測を行っているという推測ができる。このとき、心の推測の入れ子構造が発生し、他者がどのような状態なのか、自分が他者にどのような影響を与えるのか、を推測することができる。

近年、イヌ(Miklósi, Polgádi, Topál, & Csányi, 1998)、イルカ(Tschudin, Call, Dunbar, Harris, & Vander Elst, 2001)、ヤギ(Kaminski, Riedel, Call, & Tomasello, 2001)、カラス(Bugnyar, Stöwe, & Heinrich, 2004)などの動物に他個体の視線を追う能力があることが示された。視線を追う能力は基本的な社会的認知能力のひとつであり、集団内での社会的な相互作用にも大きく関わっている(Kaminski et al., 2001)。また、他個体の行動に合わせて自分の行動を変えることや、他個体を操作することは霊長類を含む多くの動物で見られる(Hauser & Nelson, 1991)。特にサル類や類人猿は、ヒトに比べ部分的ではあるが心の理論を持つという主張もある(Premack, 1988)。しかし、定かな証拠は今のところ

A Constructive Approach to the Evolution of the Recursion Level in the Theory of Mind, by Masanori Takano[†], Masahiro Kato[‡] and Takaya Arita[†] (Graduate School of Information Science, Nagoya University[†], Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, Tokyo University[‡]).

るない(Zimmer, 2003)．ただし、心の理論が動物における他個体の行動予測を起源とし、サル類、類人猿を経てヒトの持つような心の理論へと進化してきたというシナリオを検討することは有益であろう．例えば、最近のFlombaum and Santos (2005)の実験において、アカゲザルに対して目を隠した人間と口を隠した人間の両方が餌を見せたところ、そのアカゲザルは目を隠した人間が持つ餌を取ろうとするという行動を示した．この実験から、アカゲザルが人間の視界（とそれに伴う行動）を考えているのではないかということが考えられる．

ヒトの心の進化的基盤を検討する進化心理学では人間の心理メカニズムには文化を越えた普遍性があり、それは自然淘汰の産物である(長谷川, 1997)とする．このような考えからも、心の理論が進化によって得られたとすると、それは適応的な形質であったと仮定するのは自然である．

実際、心の理論は社会的な環境における様々な場面で、その機能を持つ個体の適応度を上げるために有用である．互いに心を読みあうことによって、協調行動(McCabe, Houser, Ryan, Smith, & Trouard, 2001)、他者への教示(Zimmer, 2003)、高度なコミュニケーション(Makino & Aihara, 2003)が可能になるのではとされている．また、集団で生活する生物の場合、同種の個体は同じ空間を利用し、同じ種類のものを食べ、同種の異性と交尾して子孫を残していく．そのため、自分と同種の個体は協力者であると同時に、競合相手でもある(小川, 1997)．このような複雑な社会的環境で生ずる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った．このような社会環境で発揮される知能のことを社会的知能と言う(Byrne & Whiten, 1988; Byrne, 1995)．とすると、社会的知能の一つとして、心の理論の起源は動物の社会において、他個体の行動を予測することに始まり、進化してきたのではないかと考えられる(Zimmer, 2003)．そしてさらに他者の行動を操作する能力と、自分の都合の悪くなるよう操作されないように他者の心を推測する能力が互いに強化しあって進化してきたことが一つのシナリオとして考えられる(Krebs & Dawkins, 1984)．つまり、社会的相互作用の中で他者の行動を予測する能力、さらに他者の予測を予測する能力などが適応進化によって創発してきたというものである．

一方、脳科学の研究において、近年、小脳内に内部モデルが存在することが明らかになった．ここで言う内部モデルとは自分自身の運動装置の入出力特性をシミュレーション、またはその逆ができる脳のメカニズムである(Kawato, 1999)．さらに、小脳が自分自身の運動の内部モデルだけでなく、道具の入出力特性をシミュレーションする内部モデルが獲得されることが明らかになった(Imamizu, Kuroda, Miyauchi, Yoshioka, & Kawato, 2003)．外界の対象物を脳内に内部モデル化していることを示すこの知見は、道具と同様に他者の脳の内外部モデル化の機能が存在する可能性を示唆している．脳科学の研究の進展によって、道具の内部モデル化と同様に他者の脳の内外部モデル化のメカニズムも徐々に解明されていくことが予測される．

心の理論による他者の心の推測には、他者の心の推測の推測といった再帰性が存在する．Dennett (1987)は、他者の行動を解釈するための方法論として「志向姿勢」に基づく他者の内的状態の再帰的表現を提案している．計算論的には、他者の心を推測することは、自分の頭の中でモデル化した他者をシミュレーションすることであり(泰地・池上, 1999; 伊藤, 1999; Makino & Aihara, 2003)、再帰性を扱うことは比較的容易である．ところが、従来の心の理論に関する様々なアプローチでは、我々が経験的に3次以上の他者の心の推測も可能であると感じているにもかかわらず、ほとんどが2次までを対象としていた(Dunbar, 2000)．

本研究は、心の理論における再帰のレベルの進化に焦点を絞り、再帰的な推測という機能を仮定した上で、計算論的モデルを構築する．そして、シミュレーション実験により、そのメカニズムに内在するダイナミクスに関する知見を得ることを目的とする．本論文では、再帰の深さに関する基本的な表現方法について述べた後、抽象モデル、実体モデルの2つのモデルを用いた実験について論ずる．まず、基礎的な検討を行うために、2個体が互いに他者の行動を読みあう抽象的なモデルについて述べる．次に、冒頭に挙げた人混みの中での移動という具体的な場面を想定し、物理的に接地させた群集の衝突回避行動モデルにおける再帰のレベルの適応進化に焦点を絞ったシミュレーション実験について論ずる．これは、社会的な相互作用を象徴的に表す最小モデルを狙ったものであり、群集の群れ行動をリアルに

再現することが目的ではない。最後に、行った実験の意味することや示唆することに関して議論する。

2. モデルの基本設計

Dennett (1987)の「志向姿勢」とは、振る舞いを予測しようとするシステムを信念や欲求などの心的状態を持つ合理的な行為者として扱う、他者の行動を解釈するための方法論である。信念や欲求を持つとみなす個体（非生物も含む）を「志向システム」と言う。他者に対し志向姿勢を適用し、志向システムとして扱うことで他者の欲求や意図が推測できる。志向システムは再帰的な表現が可能であり、その再帰の深さを志向性のレベルと言う。レベル0のシステムは信念や欲求を持たず、単に外界の物理的世界について理解しているのみである。レベル1は信念や欲求を持ち、レベル0に対し信念や欲求を持つことができるが、信念や欲求に関する信念や欲求を持たない。レベル2は他者および自分自身の信念や欲求についての信念や欲求を持つ。つまり、レベル1に対し信念や欲求を持つことができる。このような、再帰的表現により、理論的には無限のレベルを考えることができる。

本研究では、Dennett (1987)の志向姿勢の議論に準じて、内部状態だけでなく行動も含むように再帰的表現を拡張し、他者の行動予測に基づく自分の行動の決定を表現する。行動を組み入れることにより、適応度を設定した上で、適応進化を検討することが可能となるためである。なお、Dennett (1987)による表現では、“know”, “believe”, “expect”等の「心理主義的」用語の使用が可能であるが、以下の2つのモデルでは“know”だけに限定している。さらに、簡単のため全ての個体は同じ知識を持つ場合に同様の行動を取ることを仮定している。 X , Y , Z の3者が存在し(X_n , Y_n , Z_n はレベル n の志向システム)、得た情報 E に応じて行動 B を取る例を次に示す。ここで、 E_{in} はレベル n の個体 i が得る環境情報、 B_{in} はレベル n の個体 i が行う行動を表すとする。この他者の行動予測は、予測する他者の行動予測を内部で呼び出すことで再帰的に無限の深さまで記述可能である。

- レベル0

X_0 knows E_{x0} and takes action B_{x0}
based on it.

- レベル1

X_1 knows

{

Y_0 knows E_{y0} and takes action B_{y0}
based on it.

Z_0 knows E_{z0} and takes action B_{z0}
based on it.

E_{x1}

} and takes action B_{x1} based on it.

- レベル2

X_2 knows

{

Y_1 knows

{

X_0 knows E_{x0} and takes action B_{x0}
based on it.

Z_0 knows E_{z0} and takes action B_{z0}
based on it.

E_{y1}

} and takes action B_{y1} based on it.

Z_1 knows

{

X_0 knows E_{x0} and takes action B_{x0}
based on it.

Y_0 knows E_{y0} and takes action B_{y0}
based on it.

E_{z1}

} and takes action B_{z1} based on it.

E_{x2}

} and takes action B_{x2} based on it.

この再帰的表現に基づき、「抽象モデル」と「実体モデル」を構築する。これらのモデルは各個体の適応度が他個体の取る行動(の分布)に依存するような頻度依存の適応度を前提としている。そのような環境下で、基本設計に基づき構築された抽象モデル・実体モデルは共に再帰的に他者の心と行動を推測し、その上で自分の行動を決定する。よって、両モデルは共に、自分の適応度を上げるために他者の行動を正確に読むことが重要になる。抽象モデルは物理的接地を求めない、実体モデルは物理的接地を求める場合の、それぞれ最小モデルを目指している。心の推測の深さの本質的な性質について知るために、これら2種類のモデルを用いる。

3. 抽象モデル

もっとも基本的な振舞いを調べるために、ある個体の行動のよし悪しが他個体の行動に影響される状況として、2個体による仮想的な山登りを考える。それぞれは別の山を登っているが、一方の山を登っている個体の位置に依存して、自分の山の形状が変化する。両者は相手がどこにいれば、自分のいる場所の高さ（適応度）がどうなるかを知っているものとする。この設定により、相手が次にどちらに一步を踏み出すと考えるかという心の読み合いの状況が生まれる(加藤・有田, 2005)。山のモデルは NKC 適応度地形(Kauffman, 1993)を用いて表現する。 NKC 適応度地形とは、適応度地形が互いにリンクした競合的な生物2種間の共進化のモデルであり、 N は個体の総遺伝子数、 K は自身の各遺伝子が自身の遺伝子に関連する数、 C は自身の各遺伝子が他個体の遺伝子に関連する数を表す。基本的に、山の凹凸の程度をパラメータで調整できる意味付けのない人工的、抽象的な山（関数）である。

抽象モデルでは、各個体の一世代における行動は自分の N 個ある遺伝子を1つ反転すること（適応歩行）である。反転させる遺伝子は、 N 個の各遺伝子を独立に反転させた場合の適応度の増加を計算し、この量のもっとも大きいものとする。適応度が増加する遺伝子がない場合は何も行わない。この操作を両個体で独立に一回ずつ行うことにより次世代をつくり、各個体に対して適応度を計算して、それを次世代の適応度とする。予測の深さに関しては、レベル0は相手の行動を予測せずに自分の反転する遺伝子を決め、レベル1は相手がレベル0の行動をすると仮定して自分の反転する遺伝子を決め、レベル2は相手がレベル1の行動をすると仮定して自分の反転する遺伝子を決める。レベル3以上においても同様に相手を1つ下のレベルと仮定して自分の反転する遺伝子を決めるものとする。

NKC 適応度地形のパラメータとして、 N は20, 50, 100, K は0, C は1, 予測レベルは0から9で2個体で同一とし、2個体の初期遺伝子列をランダムに設定して実験を行った。その結果、予測レベルが偶数の場合の個体の方が奇数の場合よりも適応度が高くなるという予想しなかった結果が得られた。レベル0は他者を全く考慮しないので相手から影響を全く受けない。レベル1は相手をそのようなレベル

0と考えるので相手に大きく影響される。さらにレベル2は相手をそのようなレベル1と考えるのであまり影響を受けない。このように、レベル0と1の差が偶数、奇数の差となって影響が出ている可能性がある。この点については、実体モデルでより詳細に検討することにする。また、両者の予測レベルの全組み合わせに関して総当りで実験を行った。その結果、すべての組み合わせの中で、予測レベルが相手より一段深い個体の適応度が高くなる傾向が示された。これは、予測がレベル L の個体はレベル $L - 1$ の個体の行動を正しく予測できるので、予想通りの結果である。

4. 実体モデル

実体モデルは、集団の中で、他者の移動を再帰的な心の処理により推測し、その上で自分の移動を決定する行動を対象とした、物理的に状況付けられたモデルである。環境内の複数のエージェントは、個々に設定されたスタート地点からゴール地点まで移動する。エージェント同士が衝突すると、移動速度が大きく低下する。逆に、他者を避けすぎても、必要以上の距離を移動しなければならなくなる。そのため、他者の行動予測に基づいた効率よい他者との衝突回避が必要である。

4.1 フィールド

エージェントのスタート地点とゴール地点は指定した2次元平面のフィールド内にランダムに割り当てられる。ただし、エージェント同士の相互作用によりフィールドの外へ移動することもありうる。本論文ではフィールドの大きさを 256.0×256.0 とし、エージェントの数は24体、エージェントは円形とし直径を8.0とした。

4.2 エージェント

4.2.1 行動

エージェントは、1) 他者の行動を予測し、2) その予測に基づき、移動する方向、速度を計算し移動する。エージェントは1ステップにこの2つの行動をし、それを1歩とする。

4.2.2 視界

エージェントは視界として扇形状の R_1, R_2 の2つの範囲を持つ(図1)。 R_1 は相手の行動予測をすると

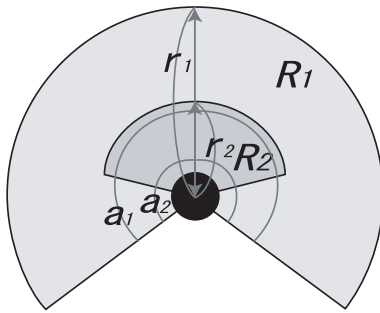


図1 エージェントの視界

きに, R_2 は移動方向・速度を決めるときに使用する. R_1 は半径 r_1 と角度 a_1 , R_2 は半径 r_2 と角度 a_2 によって決まる. 本実験では $a_1 = 240.0^\circ$, $a_2 = 170.0^\circ$ に固定した. r_1, r_2 は $r = r_1 = 2r_2$ を満たすとする. 実験中でこの半径 r を変え, 視界 R_1, R_2 を変化させる. 環境内に存在する全てのエージェントの R_1, R_2 の大きさは共通とする.

4.2.3 予測

エージェントは他者の内部モデル化によって他者の行動予測を行う. R_1 内に存在する全ての他者を内部モデル化し, その内部モデルを行動させることで他者の行動予測とする. このとき, 予測するエージェントの予測のレベルを n とすると, 内部モデルはレベル $n-1$ の予測をし, 行動する. レベル $n-1$ の内部モデルも同じく予測をするため, 同様に $n=0$ になるまで内部モデルを再帰的に生成し, その内部モデルの行動予測を行う. このとき, レベル $n-1$ の内部モデルはレベル n の視界 R_1 に存在する他者についてのみ予測を行う. また, 本モデルではレベル0の行動は相手の行動予測をしない, つまり相手を避けずゴールへ直進するものとする. なお, 本実験では, 全ての予測において他者の2歩分先を読むものと設定している.

4.2.4 移動

エージェントは図2に示すように他者の行動を予測し, その予測に基づき行動を決める. 以下の3つのベクトルを加算し, 移動に用いるベクトルを生成する.

- ゴールへ向かうベクトル: エージェントの現在地からゴール方向へのベクトル. 大きさは常に1.0とする.

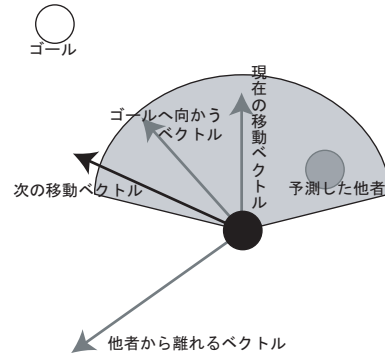


図2 移動ベクトルの決定方法

- 現在の移動ベクトル: 前回移動したときに使用したベクトル. 初期状態の大きさは0.0とし, 大きさの最大値は1.0とする.
- 衝突回避ベクトル: 他エージェントから離れるベクトル. 離れる対象は現在の他者の位置ではなく, 自分が予測した他者の位置とする. この予測した他者の位置の逆方向へ衝突回避ベクトルの方向を設定する. また, このベクトルの大きさ $|\vec{a}|$ は R_2 内の相手との距離 d に応じて与える(式1). 他エージェント1体に対する衝突回避ベクトルの大きさの最大値は c によって与えられ, 本実験では $c = 5.0$ を使用した.

$$|\vec{a}| = -cd/r_2 + c \quad (1)$$

ここで, d は R_2 の半径 r_2 に対し, $0 \leq d < r_2$ を満たすとする. なお, R_2 内に予測した他者が複数存在するとき, それぞれから離れるベクトルをまず計算し, それらのベクトルを加算することにより, 衝突回避ベクトルを生成する. 加算により求めた移動ベクトルの大きさが1.0より大きいとき, ベクトルの大きさを1.0に再設定する. さらに, このベクトルをそのときのエージェントの状態における最高速度(通常時は4.0, 衝突時は0.01)でスカラー倍し, 進行方向と速度を決める.

4.2.5 適応度

ゴールにたどり着いたときに(式2)によってエージェントの適応度 f を評価する. エージェントは早くゴールに到達すれば, 高い適応度を得ることができる. また, 2000ステップ経過してもゴールにできなかった場合, 与える適応度は0.0とする.

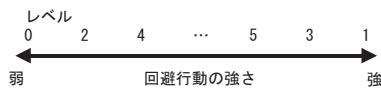


図3 予測のレベルと回避行動の強さの基本的関係。

$$f = \begin{cases} l/t & (t < 2000) \\ 0 & (t \geq 2000) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 t をゴールにたどり着くまでの時間、 l をスタート・ゴール間の距離とする。試行の終了は全エージェントがゴールにたどり着いたとき、または、 $t = 2000$ になったときとする。

4.3 シミュレーション実験による基本的な発見

4.4節と4.5節に示す基礎実験と進化実験の結果、予測レベルと回避行動の間に興味深い関係があることが示された。各実験の結果の記述はこの関係が前提となる場合が多いので、まずここでそれに関して論ずることとする。

基本的に予測レベルと回避行動の強さの間に図3に示すような関係が存在することが示された。その関係とは奇数レベルの予測をする個体は回避行動が強く、偶数レベルの予測をする個体は回避行動が弱い傾向があり、さらにその傾向はレベルが低いときのほうがより強く出るといものである。それらの傾向を、簡単のために2者間での衝突回避行動における各レベルの予測と行動を用いて説明する。レベル0は他者を全く考慮しないので予測を行わずに直進する。レベル1は相手が全く避けない(レベル0行動)と予測するので、極端に相手を避ける。レベル2は相手が自分を避ける(レベル1行動)と予測するので、レベル1よりは小さい回避行動を取って前進する。図4にレベル1と2の2個体での衝突回避行動の例を示す。同図より、レベル1がレベル2よりも強く回避行動を取り、レベル2に道を譲るような行動をとっていることがわかる。このように考えていくと、奇数レベルは回避行動を取りやすい、偶数レベルは前進行動をとりやすいことがわかる。しかも、この傾向はレベルが低いときの方がより強く出るため、図3のような傾向が各実験で示された。また、レベルが高くなるにつれ行動の傾向が徐々に弱まるため、高レベル同士の衝突回避では予測と実際の行動の誤差が小さくなる。

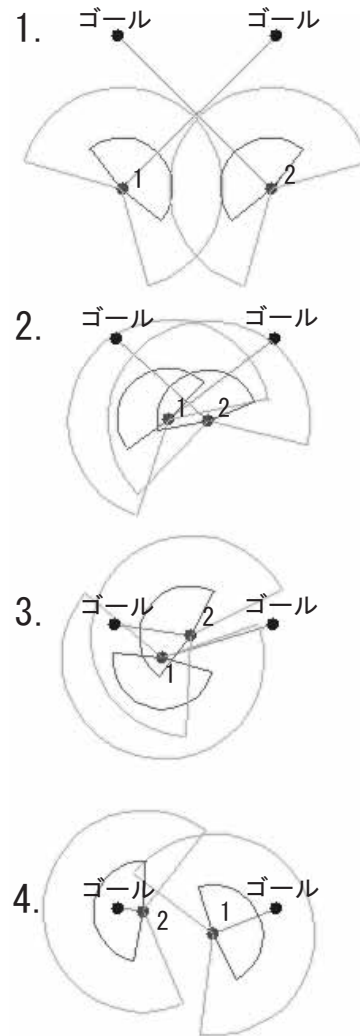


図4 レベル1と2の衝突回避の様子。両個体は直線でつながれた自分のゴールへ向かう。

以上のように、予測が2者間で行われる場合には、他者から受ける影響と回避行動の大きさを直接対応させることができる。しかし、予測対象が増えれば増えるほど、他者から受ける影響の大きさと回避行動の強さが、直接対応しないという可能性が大きくなることが予想される。ただし、このような場合においても、他者の影響を受けやすい(奇数レベル)、影響を受けづらい(偶数レベル)という、奇数、偶数の違いは存在すると考えられる。

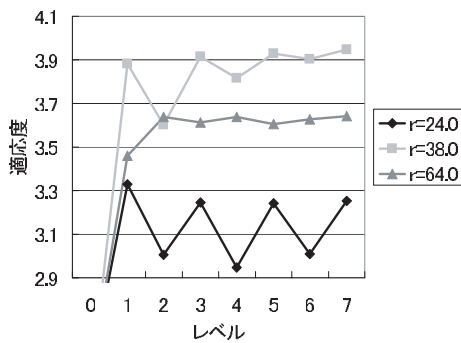


図5 同一レベル集団の典型的な r におけるレベル別適応度。

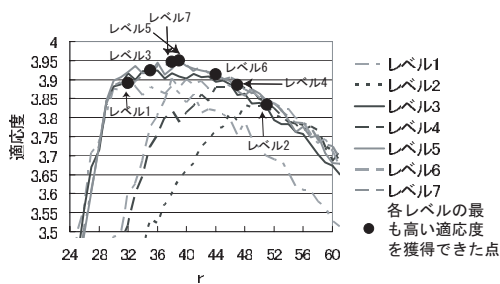


図6 同一レベル集団のレベル別適応度と r の関係。及び各レベルの集団の適応度が最も高くなった点。

4.4 基礎実験

予測のレベルと行動の関係を明らかにするために、レベルが同一のエージェントの集団と2種類のレベルが混在する集団で基礎的な実験をまず行った。

4.4.1 同一レベル集団

4.4.1.1 設定

エージェントの予測レベルが同一であるときの集団の適応度（全個体の適応度の平均）を調べる。全エージェント共通のパラメータ r を $24.0 \leq r \leq 64.0$ の範囲で r を1.0ずつ変化させて行った。実験は各設定ごとに200試行を行い、平均を取った。

4.4.1.2 結果

r の変化により、高い適応度を獲得できるレベルが徐々に変化した。図5は変化させた r のうち3つの典型的なものについて各レベルの集団の適応度を、図6は各レベルの集団の適応度の変化を r に対して示したものである。図6の黒丸は各レベルの集団に

おいて最も高い適応度を獲得できたときの r を表している。また、レベル0の集団は予測、回避行動をしないので、 r に関係なく適応度は約2.41となった。図5より、 r が小さいときは回避行動の強い個体（奇数レベル）の集団が高い適応度を得ていることがわかる。さらに、 r が大きくなるにしたがって高い適応度を得ることのできる集団は、回避行動の弱いレベル（偶数レベル）の集団へと変化する。 r が小さいと、エージェント同士がかなり近寄るまで衝突回避行動を取らないため、回避行動の強いレベルでないと衝突回避が行えない。逆に r の値が大きいと、エージェント同士が離れていても回避行動を始めるため、回避行動の弱いレベルの方が必要以上に相手を避けず、効率のよい衝突回避を行える。そのため r により各レベルの適応度が変化すると考えられる。

また、 r によって集団全体の適応度が変化するが、適応度が最も高くなるときの r はレベルによって異なった。図6の黒丸を見ると、回避行動が強いレベルの集団ほど、適応度がもっとも高くなる r （以降、この値を理想値と呼ぶ）は小さい値になり、回避行動の弱いレベルの集団ほど、理想値は大きくなるということがわかる。また、図6より、 r が理想値であるときの適応度は、同程度の高さのレベルを比較すると、奇数レベル集団の方が偶数レベル集団より高い適応度を得ることがわかる。このことから、個々のエージェントがゴール地点へ向かおうとするよりも、互いに避け合う方が集団全体としては適応的であるということが考えられる。

さらに、高いレベルの集団ほどより高い適応度を得ることができている。これは、4.3節で述べたように、高いレベル同士になるほど予測の誤差が小さくなるためと思われる。また、高いレベルの予測をするほど行動の傾向が似てくるため、各レベルの理想値は高いレベルになるほど、図3における行動の傾向と同様に、互いに近づく。よって、レベル n が十分に高いとき、理想値はある値に収束することが考えられる。そして、レベルが十分に高いとき、その収束した r で得られる適応度は、全てのレベルと r の組み合わせの中で最も高くなると思われる。

4.4.2 2種レベル混在集団

4.4.2.1 設定

レベル n とレベル m の2種類のエージェント（合計24）をフィールド内に配置し、有利なレベルを調

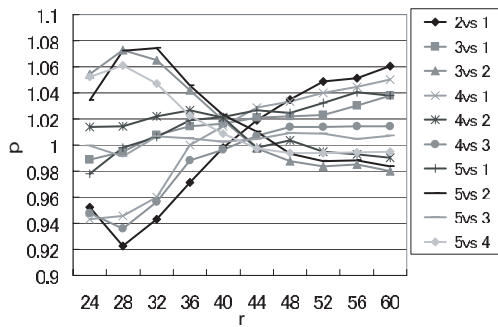


図7 r による高いレベルの有利さの変化。

べる．この実験では2種類のレベル n , m は $0 \leq n, m \leq 5, n \neq m$ を満たす全ての組み合わせで実験を行った．2種類のエージェント数比を1:23, 3:19, 5:17, ..., 23:1まで12段階で変化させ、それらの適応度をレベルごとに平均する．全エージェント共通のパラメータ r は $24.0 \leq r \leq 60.0$ の範囲で変化させる．実験は各設定ごとに100試行を行った．

4.4.2.2 結果

実験結果を図7に示す．同図は、高いレベルの適応度 f_h を低いレベルの適応度 f_l で割った値 $p = f_h/f_l$ を、各レベルの組み合わせにおける高いレベルの有利さを表す値として示している．したがって、この値が1の場合は両レベルの適応度が等しいことを表す．なお、レベル0の含まれる組み合わせの場合、値がやや大きくなるので、結果は以下の文中で述べることに留めており、レベル1から5の組み合わせについてのみ同図に示している．

同図より、 r が小さいと回避行動の強いレベル（奇数レベル）の方が有利であり、 r が大きくなるに従って回避行動の弱いレベル（偶数レベル）が有利になることがわかる．また、レベル0との組み合わせでは、他のレベルの方が常に有利であった（ r の増加につれて約1.25から約1.15まで p は減少）．

このような傾向は以下のような理由に基づくと考えられる．回避行動の弱い方のレベルと強い方のレベルの衝突回避では回避行動の強いレベルの方が相手より大きく避けるため、回避行動の弱いレベルの方が効率よくゴールに向かうことができる．ただし、 r が小さい場合、回避行動の弱い方のレベル同士では衝突回避をうまく行うことができず、全体として回避行動が強いレベルの方が有利となる．一方、 r

が大きいとき、例えば、弱い方のレベルに関する同一レベル集団実験において高い適応度を得ることができた r の値を用いる場合、弱い方のレベルは同レベル同士の衝突回避を効率よく行うことができ衝突も少なくなる．また、回避行動の強い方のレベルとの衝突回避も、相手の方が回避行動を強く取る傾向にあるため、結局、より有利に行うことができると考えられる．

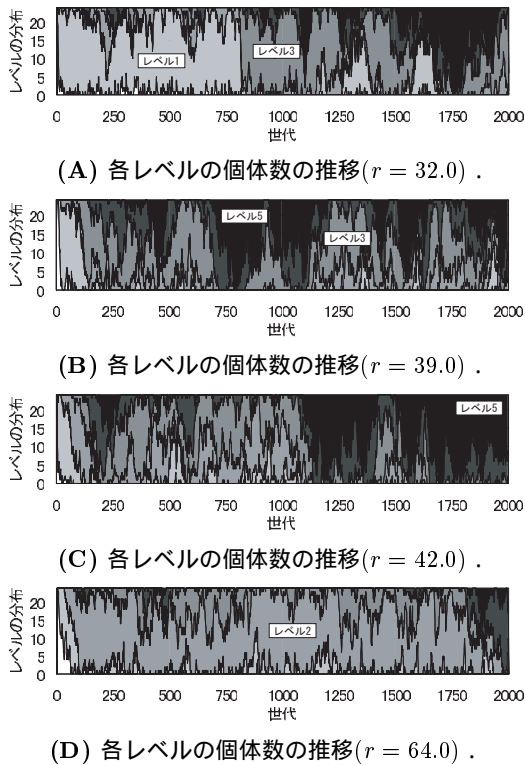
r が中間的な値（ $41.0 \leq r \leq 43.0$ ）では、回避行動の強弱によらず、全ての組み合わせで高いレベルの方が有利となった．これは、回避行動の傾向がより中間的であるレベルが有利な状態、つまり、図3における中間の領域をこの領域が表しているためであると考えられる．

次に、集団中のエージェント数比による有利さの変化について述べる． r が小さい場合や大きい場合においてはエージェント数比を変えることによる影響は少なく、前述したことと同様のことが言える． r が中間的な値の場合では、エージェント数比が結果に少なからぬ影響を及ぼした．特に、高いレベルが有利であった $41.0 \leq r \leq 43.0$ では、以下のようになった．2種類のレベルの差が2以上のときは、全体的に中間的な性質を持つレベル（高いレベル）が有利であった．レベル差が1であるときは、少数派のレベルの方が有利になるという傾向にあった．ここで、個々の衝突回避行動について考えると、衝突回避を行うエージェントのレベル差が1の衝突回避では、高いレベルが低いレベルを正確に予測することができるため、衝突は起こりにくい．レベル差が0、つまり同じレベルのエージェント同士での衝突回避では互いに行動予測がはずれるので衝突が起こりやすい．そのため、衝突を起こしにくい相手が多い（少数派である）方が有利であったと考えられる．ただし、レベル差1の場合でも高いレベルの方がやや中間的な性質を持つことになるため、平均すると高いレベルがやや有利という結果になった．

4.5 進化実験

4.5.1 設定

エージェントの適応度に応じて、レベルをエージェントごとに進化させる実験を行う．進化は選択と突然変異により行い、各個体の適応度は各世代20試行の平均を与える．選択は全個体の合計適応度に対する個々の適応度の割合を求め、その割合を元に



□レベル0 ■レベル1 ■レベル2 ■レベル3 ■レベル4 ■レベル5

図8 進化シミュレーションによる各 r 別の個体数の推移

次世代の個体を生成する。このとき、生じた端数分はルーレット選択によって選択する。突然変異は一定の確率で個体のレベルの値を ± 1 する。

本実験では個体数を24、世代数は2000世代、突然変異率を0.02とし、レベル l は $0 \leq l \leq 5$ を満たす(初期集団は0)ものとする。 r の値については、同一レベル環境において、レベル5集団の適応度が最も高くなった $r = 39.0$ と、2種レベル混在環境において、全てのレベルの組み合わせで高いレベルの方が有利であった $r = 42.0$ 、加えて、大小各々代表的な値として $r = 32.0, 64.0$ を使用した。

4.5.2 結果

図8に各 r について世代ごとのレベルの分布の推移を示す。同図は複数回行った実験のうちの典型的な試行であり、全試行において以下と同様な結果が得られた。

同図より $r = 32.0$ のとき、回避行動の強いレベル

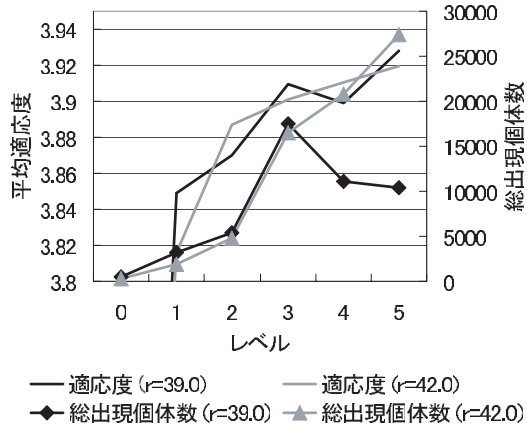


図9 $r = 39.0, 42.0$ の全世代通しての各レベルの平均適応度と総出現個体数。

1, 3の個体が多く出現した(図8(A))。 $r = 39.0$ ではレベル3, 5が多く出現した(図8(B))。 $r = 42.0$ では高いレベルへ進化していった(図8(C))。 $r = 64.0$ のとき、回避行動が弱いレベル2の個体が集団中の多くを占めた(図8(D))。また、 r が極端に大きい場合、レベル0が有利になり、多く出現した。基礎実験においては、 r が小さいと回避行動が強い個体(レベル1, 3)が、大きいと回避行動が弱い個体(レベル2, 4)が、両者の境界では高いレベルの個体が有利であったが、進化実験においても、各々それら有利なレベルへ進化していつている。このとき、回避行動が強い個体が有利な値 r と弱い個体の有利な値 r の境界は、高いレベルへ進化していった $r = 42.0$ であると考えられる。

図9に $r = 39.0, 42.0$ の全世代通しての各レベルの適応度と総出現個体数を示す。ここでの両状態のレベル0の適応度は約2.45となった。同図より、レベル5は他のレベルと比較して、どちらの r でも最も高い適応度を獲得していることがわかる。レベル5にとって $r = 39.0$ は同一レベル集団において適応度が最も高くなった理想的な値であった。しかし、 $r = 39.0$ では高いレベルへ進化していかず、 $r = 42.0$ のときに高いレベルへ進化していった。

そこでまず、同一レベル集団において最も高い適応度を得ることができる r がどのようにして求めたかについて考える。同一レベル集団では個体の行動は一切多様性がない集団である。レベルが同一で行動の多様性がない場合、そのレベルの行動の傾向において衝突回避のできる r をできる限り小さくし

たとき、他者をぎりぎりで避けることができ、最も効率の良い衝突回避ができる。しかし、複数のレベルが混在する集団では、個体の行動に多様性があるため、同一レベル集団で得られた r 値では、避け切れなかったり、必要以上に避けてしまうということがある。そのため、レベルが混在する集団において各レベルの最も高い適応度を得ることができる r は、同一レベル集団で得られた各レベルの理想値から変化することになる。他者が自分よりも回避行動が弱いレベルの場合は、他者は同一レベル環境の他者と比べて、回避行動を取らない傾向にある。そのため、同一レベル集団で得られた理想値では衝突回避に余裕が無いため、衝突してしまう。よって、自分よりも回避行動が弱い他者避けるためには、同一レベル集団での理想値よりも r が大きい必要があると言える。逆に、他者が自分よりも回避行動が強いレベル場合は、他者は同一レベル集団の他者と比べて、回避行動を大きく取る傾向がある。そのため、自分は同一レベル集団ほど回避行動を取らなくてもよい。よって、自分よりも回避行動が強い他者との衝突回避をより効率よく行うためには、同一レベル集団での理想値より小さいほうがよいと考えられる。

図3において、レベルが混在する場合、回避行動がやや強いレベル5は他者が自分より回避行動が弱いことの方が多い。そのため、自分より回避行動が弱い他者を避けることができ、高い適応度を獲得する r は同一レベル集団における理想値よりも大きい値になる。ゆえに、レベル5の高い適応度を獲得する r は同一レベル集団では $r = 39.0$ であり、混在環境において $r = 42.0$ になったと考えられる。同様に、回避行動の強いレベル3も、高い適応度を獲得する r は、同一レベル集団における理想値 $r = 34.0$ が、混在集団において自分より回避行動が弱い他者を避けることができる $r = 39.0$ 付近の値になったと思われる。また、 $r = 39.0$ においても、レベル5の全世代通しての平均適応度が最も高いのは、レベル5が一時的に支配的になったときに、レベル5の集団が高い適応度を得ることができたためと思われる。

以上の理由から、高いレベルへ進化していった r の値は、同一レベル集団でレベル5が最も高い適応度を得た理想値 $r = 39.0$ ではなく、レベルが混在している場合において高いレベルが高い適応度を得ることができる $r = 42.0$ になったと考えられる。

また、突然変異をレベル n が $0 \leq n \leq 5$ の範囲の

値に等確率で突然変異するという設定を用いた場合について実験を行ったところ、進化の過程は若干異なるものになるが、全世代通しての総出現個体数、平均適応度についてみると、上記で行った実験と同様の傾向を示したため、急激な予測レベルの突然変異が起こる場合においても以上のことが概して言えると考えられる。

5. 議論

ここでは、本モデルが群集行動のモデル化によって表している社会的相互作用がいかなるものか、パラメータの意味付けを通して明らかにした後、心の理論における再帰レベルの基本的性質やヒトの有する心の理論の進化過程に関して、本実験の結果が意味することや示唆することを議論する。

5.1 「視界の広さ」の意味付け

実体モデルにおける「視界の広さ」は、他者の行動が自分に影響を及ぼすような環境において、自分の行動を決定する際に、どの程度、相手の行動を想定するかという、予測における相互作用の影響の大きさを決めるパラメータである。

このように、実体モデルではそれをエージェントの属性としているが、想定する関係性自体によっても、このパラメータは左右される。例えば、資源の取り合いの状況において、個体の密度が小さいならば、他個体の行動が自分の適応度にあまり影響しないという意味で、実体モデルにおける視界が狭いことと等価と考える。

実体モデルにおける実験では r が小さい場合、レベル0は他者と衝突しがちなので適応度が低くなるが、 r を極端に大きくすると、0より大きい全てのレベルがレベル0に対して十分な回避行動を取ることになるため、2種レベル混在集団実験と進化実験でレベル0の適応度が最も高くなった。このような、基本的に自分の行動だけを考える(本モデルで言えば直進するような)他個体の存在が、自分の適応度を下げるような状況を想定しており、 N 人版のジレンマゲームに本質的に近い性質が内在していると言える。

また、実体モデルでは視界が狭いと、至近距離で他者との衝突回避行動を始めるため、衝突の可能性が高く、強い回避行動を取ることが適応的になる。そして、視界が広くなると、強い回避行動は他者を

必要以上に避けすぎるため、移動の効率が悪く、適応的でなくなる。このことを集団サイズ・密度と対応させると以下のようなことを意味する。密度が大きくなると、考慮する対象の他者が多くなり、それに従い、自分にとって相対的にあまり影響が無いような他者まで考慮対象となるが多くなる。そのような状態では、他者に対して配慮をするような行動をすると自らの欲求に沿った行動ができず、適応的でなくなる。

5.2 再帰レベルの非連続性

抽象モデル、実体モデルの両実験に共通して、奇数レベルと偶数レベルの適応性に明確な差が存在することが示された。このような奇数、偶数レベルの差はレベル0とレベル1の質的なギャップに起因するといえることができる。他者の心の状態の推測が起点となっている奇数レベルと、自分の心の状態を他者が推測することが起点である偶数レベルではその結果に本質的な違いが生ずるのであろう。特に、奇数レベルの予測は、「他者が『他者を意識しない自身の欲求だけを考慮して行動をする』」という予測に基づいている。そのため、相手の欲求に沿った行動に自分自身の行動を合わせがちである。それは、自分自身の欲求に沿った行動を取りづらくなることを意味する。

前述のように、実体モデルにおける視界の広さを他者との相互作用の強さとして考えると、視界が狭いとき、つまり、利害関係がぶつかりやすいとき、あるいは、他個体のことに対する配慮の小さい集団における社会的関係においては、奇数の志向性のレベルの推測が他者との衝突をうまく避けることができ、適応的であると考えられる。逆に、社会的相互作用が強いとき、偶数の志向性のレベルの推測をすると自分自身の目的に近い行動を取りやすくなり、適応的であると言える。

このように、レベルの適応性が連続的でなく、奇数、偶数によって非連続的に変化するのならば、レベルが徐々に高くなるという漸進的進化は現れにくいと推測される。なお、実際の生物においては、チンパンジーがレベル2程度と考えられる(松沢, 1991)一方で、ヒトにおける他者の心の再帰的な推測は、レベル5前後まで可能と言われており(Dennett, 1987; Dunbar, 2000)、ヒトのみが際立って高いレベルへ進化している。また、そのヒトにおいても他者の心

の推測を行う実験において、レベル4とレベル5の推測において難易度に大きな差が存在することが示されている(Kinderman, Dunbar, & Bentall, 1998)。これらのことは、漸進的進化の難しさを示唆しているとも考えられ、奇数、偶数のレベルのギャップに一部起因している可能性がある。

5.3 再帰レベルの進化

以上より、再帰のレベルの進化について、次のようなことを考えることができる。

- 小さな集団を作っている段階では、相互作用が弱く、レベル1が適応的となり高いレベルへは進化しない。
- 大きな集団を作り、相互作用が強い場合でも、適応的なレベルは0, 2であり、高いレベルへは進化していかない。
- ヒトのみが際立って高いレベルへ進化した要因として、集団のサイズが大きすぎず、小さすぎない中間の特定の領域に達したときに、1) レベルの奇数、偶数の差が最も小さくなる、さらには、2) 高いレベルへの選択圧が生じることが考えられる。高いレベルへの進化は、このような特定の中間領域にあるときに、レベルの奇数、偶数の適応度差が小さくなり、同時に高いレベルへの選択圧が生じるときに可能となる。
- 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(Dunbar, 2000)と考えると、有利なレベルは、図3において、右から左へと変わってきたと考えられる。ヒトと他種との差は、この特定の領域に達したかどうかの差である可能性がある。
- 高いレベルへ進化していくと考えられるその特定の中間領域とは、集団の適応度が最も高くなる「理想的」な状態である。

6. まとめ

構成論的手法に基づいて、動物から人間への心の進化における再帰の構造の進化に関する計算論的モデルを構築し、シミュレーション実験を行った。他者の内部モデルを持つことと持たないことのギャップが再帰レベルの奇数と偶数の適応度差をもたらすこと、他者との関係性の大きさが再帰レベルの適応性の支配要因となっている可能性があること、

個体レベルに働く進化圧が集団全体としての進化方向にバイアスをかけうることなどが示された。人間の独自性を際立たせているもののひとつである心の理論における再帰の深さの進化は、記憶や処理コストに関わる制約だけでなく、処理内容そのものに関わる制約を少なからず受けていることが示唆される。

社会のサイズ、密度、物理的条件などの環境に関する条件と、視野や他個体のことをどの程度配慮するかなどの個体の属性が、再帰レベルの進化にどのように関わってきたか詳細に議論を行うために、視界の広さと集団サイズの関係について、現在、詳細な解析を行っている。得られた知見をヒトや生物の脳、生態、進化に関する見解や知見、例えば、集団サイズの増大が他者との複雑な社会的相互作用の増加を招き、結局、ヒトの脳を大きくさせたという説(Dunbar, 2000)と比較検討することが今後の課題である。本論文で示したような再帰のメカニズムの進化は言語の起源、特に文法構造の起源と関連があるのではないかと考えている。

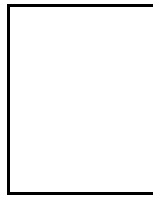
文 献

- Bugnyar, T., Stöwe, M., & Heinrich, B. (2004). Ravens, *Corvus corax*, follow gaze direction of humans around obstacles. *The Royal Society*, **271**, 1331-1336.
- Byrne, R. (1995). *Thinking Ape*. Oxford: Oxford University Press. (小山高正, 伊藤紀子 訳 (1998). 『考えるサル』. 大月書店.)
- Byrne, R. & Whiten, A. (Eds.) (1988). *Machiavelian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*. Oxford: Oxford University Press. (藤田和生, 山下博志, 友永雅巳 監訳 (2004). 『マキャベリの知性と心の理論の進化論』. ナカニシヤ出版.)
- Dennett, D. (1987). *The Intentional Stance*. Cambridge: MIT Press. (若島正, 川田学 訳 (1996). 『志向姿勢の哲学』. 白揚社.)
- Dunbar, R. (2000). On the origin of the human mind. In P. Carruthers & A. Chamberlain (Eds.), *The Evolution of Mind*, 238-253. Cambridge University Press.
- Flombaum, J. I. & Santos, L. R. (2005). Rhesus Monkeys Attribute Perceptions to Others. *Current Biology*, **15** (5), 447-452.
- 長谷川寿一 (1997). 心の進化: 人間性のダーウィンの理解. 『科学』, **67** (4), 248-256.
- Hauser, M. D. & Nelson, D. (1991). Intentional Signaling in Animal Communication. *Trends of Ecology & Evolution*, **6**, 186-189.
- Imamizu, H., Kuroda, T., Miyauchi, S., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2003). Modular Organization of Internal Models of Tools in the Human Cerebellum. *PNAS*, **100** (9), 5461-5466.
- 伊藤昭 (1999). 心を読む能力 マルチプレイヤー囚人のジレンマゲーム. 『認知科学』, **6** (1), 77-86.
- Kaminski, J., Riedel, J., Call, J., & Tomasello, M. (2001). Domestic goats (*Capra hircus*) follow gaze direction and use social cues in an object choice task. *Animal behaviour*, **69**, 11-18.
- 加藤正浩・有田隆也 (2005). 心の理論の進化に関するNKC適応度地形に基づく検討. 『情報処理学会第67回全国大会』, 2号, 347-348.
- Kauffman, S. A. (1993). *The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, **9**, 718-727.
- Kinderman, P., Dunbar, R., & Bentall, R. P. (1998). Theory-of-mind deficits and causal attributions. *British Journal of Psychology*, **89**, 191-204.
- Krebs, J. R. & Dawkins, R. (1984). Animal signals: Mindreading and manipulation. *Behavioural ecology: An evolutionary approach*, 380-402. Oxford: Blackwell.
- Makino, T. & Aihara, K. (2003). *Self-observation principle for estimating the other's internal state - a new computational theory of communication*. Mathematical engineering technical reports METR 2003-36, Department of Mathematical Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo.
- 松沢哲郎 (1991). 『チンパンジー・マインド-心と認識の世界-』. 岩波書店.
- McCabe, K., Houser, D., Ryan, L., Smith, V., & Trouard, T. (2001). A functional imaging study of cooperation in two-person reciprocal exchange. *PNAS*, **98** (20), 11832-11835.
- Miklósi, A., Polgádi, R., Topál, J., & Csányi, V. (1998). Use of Experimenter-given cues in dogs. *Animal Cognition*, **1**, 113-121.

- 小川 秀司 (1997). 霊長類における同種間での他者理解の進化. 『心理学評論』, 40 (1), 22-38.
- Premack, D. (1988). "Does the chimpanzee have a theory of mind" revisited. *Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*, 160-179. Oxford: Oxford University Press. (藤田 和生, 山下 博志, 友永 雅巳 監訳 (2004). 『マキャベリの知性と心の理論の進化論』. ナカニシヤ出版.)
- Premack, D. & Woodruff, G. (1978). Does the Chimpanzee Have a Theory of Mind?. *The Behavioral and Brain Sciences*, 1, 515-523.
- 泰地 真弘人・池上 高志 (1999). ゲームにおける学習プレイヤーのダイナミクス. 『認知科学』, 6 (1), 21-30.
- Tschudin, A., Call, J., Dunbar, R. I., Harris, G., & Van der Elst, C. (2001). Comprehension of signs by dolphins (*Tursiops truncatus*). *Journal of Comparative Psychology*, 115, 100-105.
- Zimmer, C. (2003). How the Mind Reads Other Minds. *Science*, 300 (16), 1079-1080.

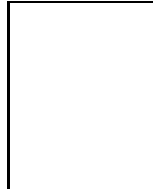
(Received 2005 May 6)

(Accepted 2005 July 15)



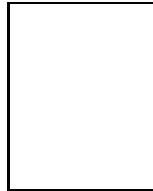
高野 雅典

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. 現在, 名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程 (前期) 在学中.



加藤 正浩

1983年生まれ. 2005年名古屋大学情報文化学部自然情報学科卒業. 現在, 東京大学大学院学際情報学府博士課程 (前期) 在学中.



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. 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, 言語の進化などに興味を持つ. 著書に“人工生命” (医学出版, 2002年) など.