

特集 ■ アンドロイドやエージェントに感じる人の存在感

ロボットによる認知発達研究 — アンドロイドはヒトなのかモノなのか —



開 一夫

東京大学

HIRAKI KAZUO



板倉昭二

京都大学

ITAKURA SHOJI

1. はじめに

近年の発達研究では、「意図の理解」、「目的の帰属」、「心の理論」など他者理解の認知機能に関する研究が盛んに行われている。「人間が人間をどう理解するのか」のメカニズムと発達の変遷について明らかにすることを目的とした研究である。こうした流れは発達研究に限定されない。脳機能イメージングを主な研究手法とする認知神経科学では、意図や目的理解・心の理論に関与する脳内部位を見つけ出すことに精力が注がれている。比較認知科学・進化心理学でも、「大脳新皮質の相対重量は社会集団サイズに相関する」という興味深い知見が提出され、ヒトと他の霊長類を分け隔てるものは、他者を理解し複雑な社会を構成する能力であるという「社会脳仮説」に発展している。他者理解の認知機能に関する研究は多くの研究領域を巻き込んで認知科学の大きな潮流を形成しつつある*。

一方、工学系研究領域（特にロボティクス）では、人間とコミュニケーション可能な知的人工物あるいは情報処理システムを実現することが大きな目標の一つとなっている。こうした目標を達成する上での人工物設計指針としては、以下の二つのシステムについて考慮する必要がある。

- ・相手（人間）の意図や目的を認知・理解するための他者認知システム
- ・人工物そのものがコミュニケーションの相手として適切であると人間に認知されるための自己表出システム

「他者認知システム」と「自己表出システム」という二つのシステムは、人工物、あるいは、情報処理システムにおける入力系と出力系に対応させて考えることができる。他者認知システム（あるいはヒト認知システム）に関しては、これまで、多くの研究者が様々な視点から実現を試みてきた。例えば、自然言語処理システムや談話理解システムにおいては、表層レベルに現れる言語情報から発話意図をどう理解するかが最も大きな課題とされてきた。また、コンピュータビジョンにおいては、人間の動作を認識するための研究が多数存在する。さらに、ヒューマン・マシンインタフェースの分野でも、ユーザの目的を先回りして推測し、その結果に応じたサービスを提供することが重要である。

一方、自己表出システムに関しては、他者認知システムと比較すると、それほど多くの研究が行われているとは言えない。しかしながら、近年のヒューマノイドロボットやアンドロイドロボットの出現 [2] は、人間と類似した形状や動作など出力系が重視され始めていることを物語っている。

さて、ここまで、認知科学と工学という2領域の研究背景について述べてきた。これらは一見すると立場も方法も全く異なるように見える。しかし、実は、それぞれが抱えている研究課題が多くの点で共通していることに気づく。認知科学における他者認知の問題は、工学者が夢見るコミュニケーション可能な人工物における入力処理系（他者認知システム）の設計基盤（building-blocks）に通じる。また、乳幼児や成人が人間とそうでない物とをどう区別・認知しているかは、人工物の出力系（自己表出システム）を設計する上で多くの示唆を与えてくれる。

* 認知科学におけるこうした動向の詳細については [1] を参照されたい。

以下では、認知科学と工学の両領域の研究背景を踏まえて、著者らが ATR 知能ロボティクス研究所と共同で行っている研究を紹介しながら、ロボットが認知科学的研究にどう貢献するのかについて俯瞰する。さらに、認知科学・工学の現状を踏まえて、今後、両領域が相互に発展していく上で解決すべき課題についても展望する。

2. 乳幼児はヒューマノイドロボットをどう捉えるか？

2.1 発達研究における論争：「見た目」か「動きか」

認知発達研究では、他者理解に関する認知機能に関連して、大きな論争が巻き起こっている。論争のポイントは、目的や意図など目に見えない心的機能を付与する対象の範囲・条件に関するものである。

まず、論争を巡る二つの立場について述べることにしよう*。第一の立場は、目的や意図など心的機能を付与する対象の条件として、「見た目」を重視する立場である。この主張点は、乳児は人間に特徴的な「外見」(agency-cue)を有した動作主(エージェント)に対してのみ目的や意図を付与するというものである。この立場に立つ研究者は、人間(養育者など)が行う行動の観察経験や乳児自身が行える行動レパートリーを重視している [4][5]。

もう一方の立場は、エージェントのある種の「動き方」(behavioral-cues)を重視するものである。乳児は、人間的な外見をしているかどうかとは無関係に、ある特徴的な「動き方」に駆動されて、エージェントに対して意図や目的を帰属するという立場である。「動き方」の特徴にはバリエーションがあり、個々の研究者間でどのキューが重要であるかは異なるものの「動作主の外見的特徴が乳児の目的・意図の理解とは独立している」と主張している点で意見が一致している [6-8]。また、この説を支持する研究者は、他者理解の原初的能力は生得的に保有されていると主張する点でも共通している。

さて「見た目説」と「動き説」の論争の接地点は存在するのであるか？ここでは、両者の主張点を整理しつつ、矛盾しているように見える個々の研究結果の再解釈を試みる。

まず、乳児が、目的・意図を付与するエージェントとして「人間しか認めない」とする極端な「見た目説」は、「動き説」を支持する数々の実験結果を考えると修正する必要があるであろう。この点は我々が日常的に目にするアニメーションの(人間的でない)キャラクターに「心」を見いだすことを考えれば自然な要求である。しかし、

人間的な外見を持たないエージェントが人間的な外見を持つエージェントと「全く」同等な対象と捉えられるのか、という疑問は残る。

次に、外見とは独立した幾つかの behavioral-cues が生得的に備わっており、それが乳児の目的・意図認知を駆動するという「動き説」について考察しよう。Premack や Gergely など、「動き説」を主張する研究者がこれまで行ってきた実験は、乳児の視覚的能力に依存した方法を用いており、新生児や低月齢の乳児を直接調査している訳ではない [6][9]。乳児を取り巻く環境を考えると、目的や意図を持って行動しているエージェントは人間であることがほとんどであり、経験によって人間行動が抽象化された形式で獲得されたと考えることもできる。自己推進性や合理的運動・随伴性といった behavioral-cues は、全ての養育者が日常的に示す行動に含まれている。たとえ数ヶ月の短い期間であっても、刺激としての人間行動から多くのことが学習可能なはずである。

ここで議論したように、「見た目説」と「動き説」は、それぞれの主張を少なからず修正すべきである。特に検討すべき重要な点としては：

- ・行為の観察経験がその後の意図理解にどのように影響するのか？
- ・agency-cue と behavioral-cues とがどのように相互作用して目的・意図認知を起動しているのか？

という点である。

これらの点にどうアプローチするのがよいだろうか？我々は、ヒューマノイドやアンドロイドロボットを用いた研究こそが活路を開いてくれると考える。その理由の一つとして、殆どの乳児にとってヒューマノイドロボットは新奇な人工物であり、かつ、人工物ではあるが、振る舞いや外見の点で人間と類似している点が挙げられる。これらの特徴は、これまで述べてきた、乳児における行為の意図・目的認知研究に大きく貢献する。まず、乳児にとって新奇なロボット(の行動)を刺激とすることで、経験の効果を統制することができる。前述した「行為の観察経験がその後の意図理解にどのように影響するのか」という点について新奇な対象を用いて検討することができる。

また、「見た目」の点で人間と類似している(が全く同じではない)ヒューマノイドロボットの行動を刺激とすることで、「見た目」の効果の範囲を検討できる。前述した、「人間的な外見を持たないエージェントが人間的な外見を持つエージェントと同等に捉えられるのか」という疑問や、「agency-cue と behavioral-cues とがどのよ

* より詳細な議論は、[3]を参照されたい。

うに相互作用して目的・意図認知を起動しているのか」といった点は、新奇な人工物であるヒューマノイドロボットを用いることでアプローチできる。

次節以降では、我々が ATR 知能ロボティクス研究所と共同で行っているロボビーと呼ばれるヒューマノイドロボットを用いた二つの認知発達研究について紹介する。

2.2 研究 1: ロボットはコミュニケーションの相手になり得るか?

著者らは人間ではない新奇なエージェント(ヒューマノイドロボット)が行う行為の観察経験が、その後の乳児の行為理解にどのように影響するのかを明らかにすることを目的とした実験を行った。実験は、乳児が「人工物に話しかける不自然さ」を理解していることを示した Legerstee ら [10] の実験パラダイムを改変して行われた。Legerstee らの実験では、6 ヶ月児に、行為者(人間)が遮断物(カーテン)に隠された何かに話しかける行動を呈示し、その後遮断物が取り除かれ、人間が現れる場合と人工物(ほうき)が現れる場合の注視時間を比較した。乳児は人工物が現れた場合を人間が現れた場合より長く注視した。別のグループの乳児(6 ヶ月児)には、話しかけるといふ行為ではなく、手を伸ばして掃く動作が呈示され、その後、同じく人間かほうきが現れる場面が呈示された。このグループの乳児は、人間が現れた方を長く注視した。この結果は、6 ヶ月児が、人間と人工物を区別しており、行為の違いによってその行為が向けられるべき対象を適切に理解していることを示唆している。

我々の実験では、乳児がヒューマノイドロボットをコミュニケーションの対象として認識するかどうか調べられた [11]。実験刺激としては、ATR で開発されたロボビーと人間との相互作用場面の実写映像が用いられた(図 1)。ロボビーは乳児にとって新奇な人工物である。

この実験のポイントは、「エージェントの行為の観察経験」の影響をコントロールしたことにある。観察経



図 1 [11] で用いられたロボビーと人間の映像

験の影響を調べるため、実験群の乳児にはロボットと人間の相互作用の仕方を変化させた約 1 分のビデオクリップが呈示された(familiarization フェーズ)。その後、Legerstee らの実験 [10] と同様に、乳児が人工物(ロボット)を「話し相手」として捉えているかどうかを、注視時間を測定することで確かめた(テストフェーズ)。実験群の被験児は二つのグループに分けられ、一つのグループには familiarization フェーズでインタラクティブなロボット(ヒトと相互作用するロボット)の映像が呈示され(interactive 群)、もう一つのグループにはインタラクティブでないロボットの映像が呈示された(non-interactive 群)。control 群には、familiarization なしで直接テストフェーズの刺激が呈示された。

テストフェーズでは、実験群と control 群全ての乳児に:

1. 人間がロボットに話しかけている場面
2. 人間が人間に話しかけている場面

の 2 種類の映像刺激が交互に呈示され、それぞれに対する注視時間が計測された。

図 2 は、実験結果の一部をグラフで示したものである。このグラフは interactive 群、non-interactive 群、control 群の乳児それぞれの、テストフェーズにおける平均注視時間を示している。図で濃い色のバーはロボットに話しかけている場面、薄い色のバーは人間に話しかけている場面への平均注視時間である。

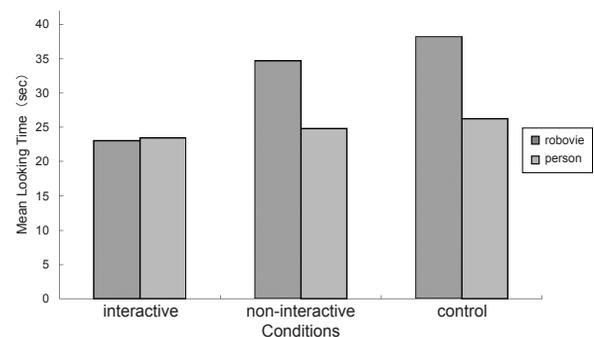


図 2 [11] の実験結果(抜粋)

このグラフから分かるように、インタラクティブなロボットがあらかじめ呈示された乳児に関しては、話し相手が人間の場合もロボットの場合も注視時間に差がないことが示された。また、インタラクティブでないロボットの行動を観察した乳児に関しては、話し相手がロボットの場への注視時間が人間の場合と比較して長いことが示された。

この実験で用いられた期待背反法のロジックに従う

と、この実験結果は、10ヶ月児が、インタラクティブで「ない」ロボットに対して話しかけることは「不自然」であると捉え、インタラクティブなロボットに対して話しかけることは「自然」であると捉えていることを示唆している。つまり、familiarizationで呈示された人間とロボットとの相互作用の仕方が、乳児のロボットに対する捉え方に影響を与えたことになる。

乳児にとってヒューマノイドロボットは、「外見」に関しても「動作」に関しても新奇な対象のはずである。少なくともコミュニケーションの「相手」としての判断には、人間の動作や呼びかけに伴って反応する行動が重要であり、その効果は僅か(約1分)な観察経験で十分であることが示唆されたわけである。

2.3 研究2: ロボットの行動から意図をくみ取れるか?

冒頭に述べた通り、人間との柔軟な相互作用を指向した人工物の設計においては、自己表出システムについて十分に考慮する必要がある。ロボットに局限するならば、ロボットがとる行動の「意図」を人間に理解してもらうことが非常に重要である。ここで、Meltzoff [12]が行った興味深い実験を紹介することにしよう。Meltzoffは、行為再現課題(Reenactment of goal paradigm)という巧妙な方法を用いて、18ヶ月児が、モデルの意図を読み取って模倣を行うこと、また、人のモデルでなければ、そのような模倣は見られないことを報告した。図3の上段を参照してほしい。

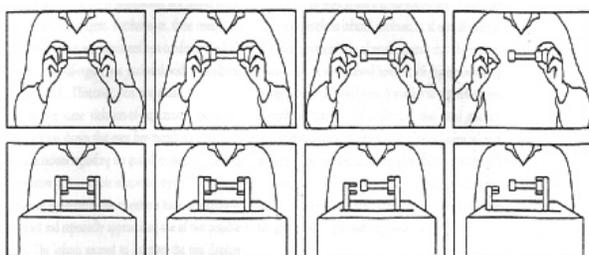


図3 Meltzoff [12] の実験刺激の例

大人のモデルがダンベルのようなおもちゃを二つに分解しようとしているが、失敗してしまう(時間経過は左から右)。18ヶ月児は、最終的なダンベルの状態、この場合は、ダンベルが二つに分かれることであるが、その状態を見なくても、モデルがダンベルをはずそうとする意図を読み取って、最後まで「ふたつに分ける」という行為を遂行する。しかしながら、下段に示されているように、メカニカルピンサーと呼ばれる機械が

同じ動作をしても、18ヶ月児はその行為を完遂しない。この結果をもってMeltzoffは、18ヶ月児は、人にしか意図の付与はしないのだと結論づけた*。しかし、この実験で用いられたメカニカルピンサーは、機械の腕のようなもので、当然ながら「機械的に」動くだけである。ヒューマノイドロボットのように顔や目や腕や胴体があり、自律的に動くものに対して子どもはどのような反応を示すのだろうか。

そこで筆者らは、ロボビーを用いて同様の実験を企てた[13]。対象は2歳~3歳児であった。

ロボビーを用いて行われた実験は、基本的には先述の

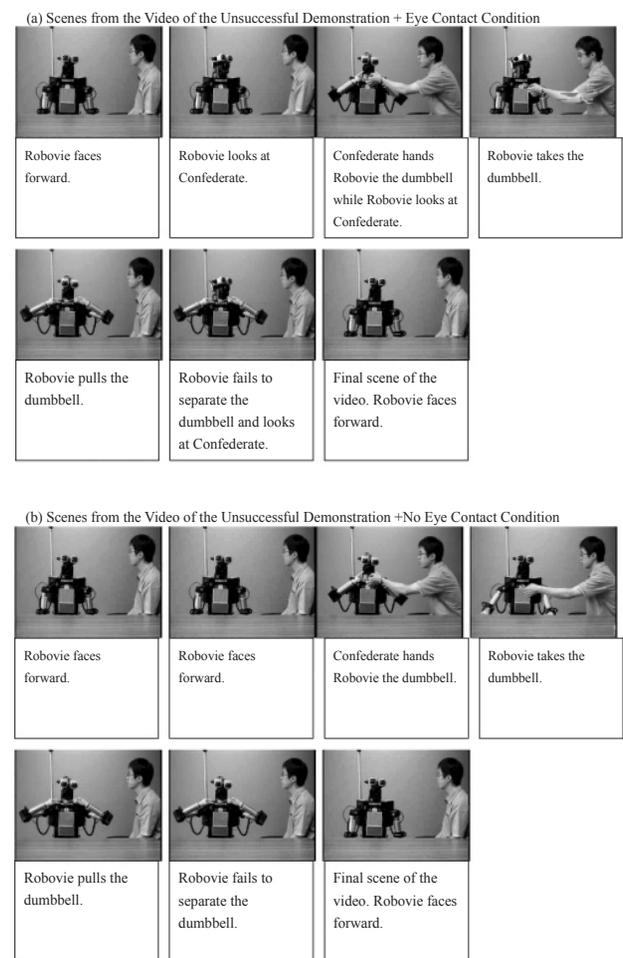


図4 ロボビーの実験刺激の例

Meltzoffのパラダイムと同じであった(図4参照)。ダンベルなどに対するロボットの行為をすべてビデオに記録し、それを実験刺激として用いた。このビデオ刺激を呈

* この点でMeltzoffは「見た目」重視の立場をとっていると考えられる。

示し、被験児がモデルであるロボット行為を、ビデオを見た後に完遂するかどうかを調べたわけである。

被験児に呈示したビデオは、それぞれ次のような行動の連鎖からなる4種類であった。1)成功デモンストレーション+視線あり条件：ロボットがとりにいるパートナー(ヒト)の顔を見る→物体を受け取る→行為を完遂する→再びパートナーの顔を見る、2)成功デモンストレーション+視線なし条件：ロボットはまっすぐ前を向いたまま物体を受け取り、行為を完遂する、3)失敗デモンストレーション+視線あり条件：ロボットがとりにいるパートナー(ヒト)の顔を見る→物体を受け取る→行為を完遂しようとするが失敗する→再びパートナーの顔を見る、4)失敗デモンストレーション+視線なし条件：ロボットはまっすぐ前を向いたまま物体を受け取り、行為を完遂しようとするが失敗する。ロボビーがやろうとしている行為には、ダンベルのようなおもちゃを二つに分けるもの、ビーズのネックレスをマグカップに入れるもの、髪留めの輪を棒にかけるもの、という3種類があった(図5参照)。上記のようにロボビーが、ターゲットとなる行為に成功する、あるいは失敗するビデオを見せる条件のほかに、ビデオを見せない統制条件も、設定しておいた。統制条件では、ビデオ刺激を呈示することなしに、単に物を被験児に渡し、ターゲットとなる行為が自発的に出現する頻度を記録した。

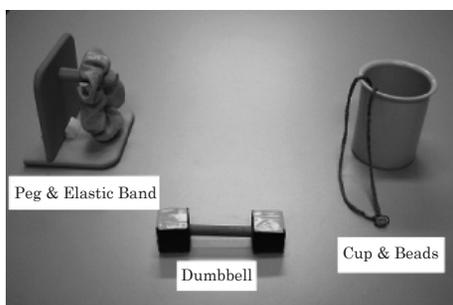


図5 ターゲット刺激として使用した物

実験の結果は、以下の通りである。まず、統制条件では、ターゲットとなる行為はほとんど見られなかった。ただ対象物を渡すだけでは、子どもたちは、ダンベルを二つに分けたり、ビーズをカップに入れたりしなかったということである。では、モデルの行為を見た後で物を渡された、テスト条件ではどうだろうか。成功デモンストレーション条件では、ロボットがパートナーや物体に視線を向けているのが、まっすぐに前を向いたままであろうが、被験児はいずれの条件でもロボットの見せた行

為を完遂した。ところが、失敗デモンストレーションでは、興味深い違いが現れた。被験児は、ロボットの視線がパートナーや物体に向かっているときは、ロボットが試みて失敗した行為を完遂したが、ロボットがまっすぐに前を見たままのときには、完遂しなかったのである。つまり、被験児は、ロボビーの視線からロボビーがコミュニケーション可能であることを顕著に認めたとき、Meltzoffの解釈でいう、意図を読み取ったのである。正確に言うと、意図を付与したのであろう。そして、モデルであるロボットが失敗したが意図していた(と思われる)行為を、自分で完遂した。ここで大事なことは、ロボットの動きのなかに、意図が読み取られるような分かりやすい要素が含まれていた、ということである。この要素が含まれていれば、2～3歳児は、ヒト以外のエージェントにも意図を見出し得るのだ。もちろん、モデルがヒトであったときとの違いは無視できない。ヒトがモデルとなったMeltzoffの実験では、モデルがまっすぐ前を見たまま、ターゲットとなる行為の失敗を示した場合も、被験児はちゃんとその行為を完遂していた。しかしながら、ロボットがモデルになると、モデルがパートナーに視線を送らない場合は、行為の完遂はあまり見られなかった。実際に、ロボットがターゲットの行為に取り組む様子を見ていると、視線を交わさないロボットだけが無表情であるかのように見えた。

3. まとめと今後の展望

本稿では、認知発達研究にヒューマノイドロボットを用いた研究を紹介し、ロボット研究が認知科学の発展に貢献できることを示した。ここで紹介した研究以外にも、我々は「心の理論」に関する実験[14]や目的理解に関する研究[15]を行っており既に興味深い結果が得られている。

さて、冒頭で述べた人間と円滑に相互作用できる人工物を設計するにあたって我々の研究はどのような貢献ができるのであろうか？これまでの、発達研究を総括すると、

- 必ずしも人間とそっくりな「見た目」がなくても、基本的には意図・目的を有したエージェントであると捉えられること
- しかし、「ある程度」の人間の外見は、意図・目的を表出する上で「動き」との相乗効果が期待できること

などが明らかになっている。知的人工物における自己表出システムは、これらの点を考慮した設計をする必要が

ある。特に、「動き」と「見た目」のバランスをどう保つかが重要である。

また、他者認知システムに関しては、

- ・「動き説」が提案しているような複数の behavioral-cues の検出機構
- ・ behavioral-cues を用いた意図・目的の学習機構

に関する研究を行っていく必要がある。

最後に、近年登場したアンドロイドに関しては、更なる認知科学的研究が必要であろう [2]。外見的には人間とほとんど見分けがつかない「人工物」に対して系統だった研究はこれまでほとんど行われていない。agency-cue だけが突出した場合、乳児・成人の他者認知システムに対してどのような影響が生じるのかは非常に興味深い。いわゆる「不気味の谷」と呼ばれる現象は、agency-cue と behavioral-cues がアンバランスな状況で生じるものと考えられる。以上、まとめると工学系研究者・認知科学者が単独で研究を行っていくには根深い課題が多数存在する。今後、ロボティクスと認知科学は手を取り合って研究を進めていく必要がある。

参考文献

- [1] 開一夫, 長谷川寿一 (編): ソーシャルブレインズ, 東京大学出版 (2009)
- [2] 石黒浩: アンドロイドサイエンス, システム/制御/情報 49(2), pp.47-52 (2005)
- [3] 開一夫, 旦直子, 有田垂希子: 「乳児の人工物認知と人認知」ベビーサイエンス, Vol.6, pp.32-4 (2007)
- [4] Woodward, A. L.: Infants selectively encode the goal object of an actor's reach. *Cognition* 69, pp.1-34 (1998)
- [5] Guajardo, J. J. & Woodward, A. L.: Is agency skin deep?: Surface attributes influence infants' sensitivity to goal-directed action. *Infancy* 6(3), pp.361-384 (2004)
- [6] Gergely, G. & Csibra, G.: Teleological reasoning in infancy: The naive theory of rational action. *Trends in Cognitive Science* 7, p.287 (2003)
- [7] Csibra, G., Gergely, G., Bíró, S., Koós, O. & Brockbank, M.: Goal attribution without agency cues: The perception of 'pure reason' in infancy. *Cognition* 72, pp.237-267 (1999)
- [8] Johnson, S., Slaughter, V. & Carey, S.: Whose gaze will infants follow?: The elicitation of gaze-following in 12-month-olds. *Developmental Science* 1(2), pp.233-238 (1998)
- [9] Premack, D. & Premack, A. J.: Original Intelligence: Unlocking the mystery of who we are (McGraw-Hill, New

York, 2002)

- [10] Legerstee, M., Barna, J. & DiAdamo, C.: Precursors to the development of intention at 6 months: Understanding people and their actions. *Developmental Psychology* 36(5), pp.627-634 (2000)
- [11] Arita, A., Hiraki, K., Kanda, T. & Ishiguro, H.: Can we talk to robots?, Ten-month-old infants expected interactive humanoid robots to be talked to by persons. *Cognition* 95(3), pp.B49-B57 (2005)
- [12] Meltzoff, A. N.: Understanding the intentions of others: Re-enactment of intended acts by 18-month-old children. *Developmental Psychology* 31, pp.838-850 (1995)
- [13] Itakura, S., Ishida, H., Kanda, T., Shimada, Y., Ishiguro, H., & Lee, K. (2008). How to build an intentional android: Infants' imitation of a robot's goal-directed actions. *Infancy*, 13, pp.519-532
- [14] Itakura, S. Okanda, M., & Moriguchi, Y. (2008). Discovering mind: Development of mentalizing in human children. In S. Itakura & K. Fujita (Eds.), *Origins of social mind: Evolutionary and developmental views*. Springer.
- [15] Kamewari, K., Kato, M., Kanda, T., Ishiguro, H. & Hiraki, K: Six-and-a-half-month-old children positively attribute goals to human action and to humanoid-robot motion. *Cognitive Development* 20, pp.303-320 (2005)

【略歴】

開 一夫 (HIRAKI Kazuo)

1993年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻修了。博士(工学)。同年,(旧)通産省電子技術総合研究所入所。2000年, 東京大学大学院総合文化研究科助教授, 2006年より, 東京大学大学院情報学環准教授(流動)。現在に至る。主な著書に『ソーシャルブレインズ』(共編, 東大出版), 『日曜ピアジェ赤ちゃん学のすすめ』(岩波書店), 『イメージと認知』(共著, 岩波書店), 『情報の表現と論理』(共著, 岩波書店)。

板倉昭二 (ITAKURA Shoji)

京都大学大学院文学研究科准教授。専門は, 比較認知発達科学, ディヴェロプメンタル・サイバネティクス。著書に, 「自己の起源」(金子書房, 1999年), 「私はいつ生まれるか」(ちくま新書, 2006年), 「心を発見する心の発達」(京都大学学術出版会, 2007年), *Diversity of cognition* (Kyoto University Press, 2007), *Origins of the social mind* (Springer, 2008) 他。