

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：13302

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21120011

研究課題名(和文)言語的推論と連続ダイナミクスの相互作用による意味創造メカニズムの解明

研究課題名(英文) Study on meaning creation mechanism through interaction between linguistic inference and continuous dynamics

研究代表者

橋本 敬 (Hashimoto, Takashi)

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・教授

研究者番号：90313709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円、(間接経費) 9,450,000円

研究成果の概要(和文)：メッセージの含意(発話の意図)を伝達できる記号コミュニケーションを支えるシステムが創発する過程を、調整ゲームを用いた言語進化実験により明らかにした。その形成過程には、共通基盤の構築、記号の字義通りの意味を表わす記号システムの共有、役割分担の形成という3つの段階があり、それぞれが次段階の足場となる。第3段階では、ターンテイクを適切に行うことで含意の伝達が実現されることがわかった。実験の詳細な分析と認知アーキテクチャACT-Rを用いたシミュレーション解析により、役割反転模倣、互いに類似した記号システム、多義性の少ない記号システムを初期段階から作ることが形成要因として重要であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this study, it was shown that shared communication systems can be formed from scratch through interactions by designing a language evolution experiment utilizing a coordination game with symbolic message exchange. We show that three scaffolding stages exist in the process of formation of symbolic communication systems in which connotations are communicated as well as denotations. The three stages are building common ground, sharing a symbol system, and forming a role division. At the third stage, communicating connotations is realized by arranging an appropriate turn-taking. Analysis using simulated experiment with ACT-R, a cognitive architecture for simulating and understanding human cognition, suggests that role-reversal imitation is important for achieving shared communication systems.

研究分野：複雑系，進代言語学，進化経済学，知識科学

科研費の分科・細目：情報学，感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：コミュニケーションシステム 言外の意味 記号コミュニケーション 実験記号論 言語進化実験 調整ゲーム 役割反転模倣 ACT-R

1. 研究開始当初の背景

記号コミュニケーションでは、記号による表現の生成とそれに対する意味づけが連鎖する。意味づけは環境や他者との相互作用を含む内的なプロセスであり、解釈の多義性や開放性により、コミュニケーションは単なる情報の伝達・共有ではなく、新しい表現や意味の創発が生じる。このような創造的コミュニケーションは談話研究、人類学、教育学などで質的な研究が行われているが、その生成的プロセスの理解はまだ進んでいない。言語進化の研究では、コミュニケーション創発の数理的・計算論的研究が進められているが、主に言語の構造化や語彙の共有が扱われ、構造や意味の生成発展を扱う研究は少ない。特に、記号が指し示す対象を意味としている場合が多く、人間のコミュニケーションのように指示対象だけでなく意図が共有できるような意味づけがほとんど扱われていない。

人は記号によるコミュニケーションを可能にするシステム(記号コミュニケーションシステム)自体を創発させることができる。共通言語がない社会状況で生じるピジン語、ホームサインや新しい手話言語の成立はその例である。また、実験室実験で簡単なコミュニケーションシステムが成立し発展することも示された。しかし、その創発プロセスとメカニズムについて詳細な知見は乏しい。

2. 研究の目的

人間のコミュニケーションでは、字義通りの意味だけではなく発話の意図のような言外の意味も伝えられる。本研究は、このような記号コミュニケーションシステムが相互作用を通じて生成されるプロセスとメカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

記号メッセージをやりとりして一種の調整課題を解く実験を元に、定量的分析が行えるように改変した実験をデザインした。調整課題とは、両者の行動を調整しないとお互い不利益となるような課題である。ここでは、4つの部屋があり両者が同じ部屋で会おうとするという調整課題を用いる。

また、この実験課題の認知モデリングを用いて、コミュニケーションシステムの生成に至る被験者の内部メカニズムの検討を行った。ここでは ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational) という統合認知アーキテクチャに基づいた計算モデルを用いる。統合認知アーキテクチャは、知覚、運動、記憶、思考などの基礎的な心理実験の結果に基づいて構成され、様々な人間の認知現象を統合的に説明することを試みるものである。

4. 研究成果

この実験では、二人の被験者が異なる場所において、その間では互い相手の姿や表情が見えず音も聞かえない状況におかれる(図1)。

したがって、日常的なコミュニケーション手段が制限される。唯一の通信手段はコンピュータ端末を用いたメッセージ交換である。メッセージには、■や▲といった6種類の図形(ブランクを含む)を用いるが、各図形がなにを意味するか、どのように使うかについては、事前になんら取り決められていない。

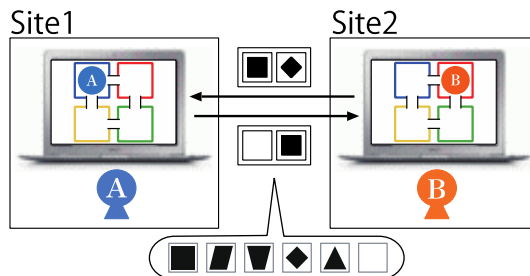


図1: 記号コミュニケーションシステム共創実験の環境

実験課題の手順は以下の通りである。1) 各実験参加者のエージェントが端末上の4つの部屋の異なる位置にランダムに配置される。相手の姿は表示されない。それぞれ縦か横への1回の移動(斜めには移動できない)、あるいは、そのまま留まるという行動により、相手と同じ部屋に行くことが課題の目的である。2) 参加者はこの移動の前に図形を2つ組み合わせて作成したメッセージを送信する。一方が送信したメッセージは他方の送信を待たずに直ちに相手側に表示される。3) 両者はメッセージを交換した後で部屋の移動を決定する。4) 両者が移動すると、自分と相手の移動前後の部屋および両者の送ったメッセージが表示される。両者の移動後の部屋があつていれば、得点を2点加算、違っていれば1点減点する。ただし得点は0以下にはならない。この、初期配置、メッセージ作成と移動先決定、移動、結果表示の4ステップを1ラウンドとして、得点が0点から始めて50点に達するか、1時間が経過するまで繰り返す。これをトライアルセッションとする。

生成されたコミュニケーションシステムの性質を調べるために、トライアルセッションの後に、メッセージなし(T_{NM})、メッセージ同期交換(T_{SM})、メッセージ非同期交換(T_{AM})で調整課題を行う3種類のテストを実施する。 T_{SM} では、メッセージは両者が作成し終わってから相手側に表示される。 T_{AM} はトライアルセッションと同じ条件である。 T_{NM} では記号メッセージは使われないので、これと T_{SM} の間で課題目的の達成に差があれば、それは記号をうまく使ったコミュニケーションシステムを生成していることを意味する。また、 T_{SM} と T_{AM} に差があれば、それはメッセージ送受信タイミングを利用する効果だと考えられる。

この実験課題にはいくつかの特徴がある。どの記号にどんな意味がつけられるかは相互作用を通じて決まってくるだけでなく、なにが意味になるかということもあらかじめ

決まっていない。メッセージが部屋や移動方向を指し示すこともあれば、「あなたにまかせる」や「意味なし」といったことも表わし得る。メッセージは即座に相手に送られるので、送信タイミングを調整することができる。そして、移動結果やメッセージが各ラウンド後に表示されるため、ラウンドを経て行動や記号が学習され調整されていくだろう。また、メッセージをあらかじめ決められた図形から選び、行動を1回だけの移動に制限している。このような特徴から、この実験課題は、共有されたコミュニケーションシステムがない状態から、記号の意味や使い方が相互作用を通じて決まり共有されることで調整課題が解かれていく過程を観察し、さらに定量的に分析できるものになっている。

大学院生 21 ペアを参加者として実験を実施した。トライアルセッションにおいて1時間以内に50点に達した14ペアを成功群、それ以外を失敗群とする。課題のパフォーマンスとして5ラウンド中の成功率の変化を観察した(図2)。総ラウンド数はペアごとに異なるため、図3では全体を0~1に正規化したものを横軸としている。また、各ペアの初期、真ん中、最終の各12ラウンドでのパフォーマンスの平均を図3に同時に示した。成功群では、パフォーマンスの変化は3段階で上昇しているようである。前中後期のパフォーマンス間には有意差があった。そして、この3期間のパフォーマンスの間には統計的に有意な相関が認められた。このことから、各段階は次の段階の足場となっていると考えられる。失敗群ではそのような明らかな傾向は見られなかった。

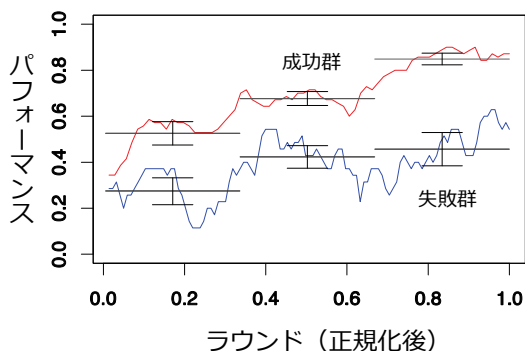


図2：成功群と失敗群のパフォーマンスの変化。エラーバーは標準誤差。

トライアルセッションにおける成功群の3段階のパフォーマンス上昇の2,3段階目は、それぞれメッセージ同期交換 (T_{SM})、メッセージ非同期交換 (T_{AM}) のテストのパフォーマンスと同程度であった。このことから、コ

ミュニケーションシステムが形成される過程に見られる各段階は、テストで測られているものが反映されたものと考えられる。

この調整ゲームでは、いつも同じ部屋へ移動するという行動の傾向(規則性)が共有されているとある程度の確率で移動先を一致させられる。しかし、斜め移動が禁じられているため、たとえ相手がどこに移動しようとしているかが分かったとしても、自分がそこには移動できない状況が生じる。よって、行動傾向を共通の基盤とするだけでは完全には解けない。

T_{NM} に比べ T_{SM} でのパフォーマンスは有意に高かった。したがって成功群はメッセージを有効に使っていることがわかる。実際のメッセージや行動を分析すると、成功群は、記号メッセージがどの部屋を指し示すかを表す記号システムを作り、多くの場合共有している。これには、ある図形がどの部屋を指すかというセマンティクスや、記号の組み合わせ方というシンタックスが含まれる。

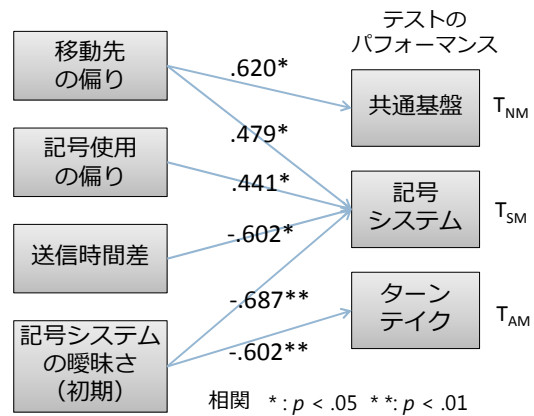
T_{AM} のパフォーマンスは T_{SM} よりも有意に高かった。このことから、メッセージ送受信タイミングが有効に使われているようである。斜め移動禁止の条件は、記号システムの共有でもこの課題を完全には解けないものになっている。成功群の多くは、メッセージを先に送るか後に送るか(先手か後手か)というターンテイクを利用して役割分担するという方法によりこの状況を解決するようになる。役割分担とは、先手は自身の現在位置を送信し、後手は相手と自分の位置を勘案して両者が行ける移動先を指示するというものである。この方法は、部屋を指し示すメッセージを送受信しつつ、それぞれのメッセージは現在地と行き先という異なることを伝えている。すなわち、記号メッセージが、部屋という記号システムで取り決められた枠内の字義通りの意味(denotation)と、現在地の宣言か行き先の指示かというメッセージの意図を表す言外の意味(connotation)の二重の意味を持つようになる。

以上から、記号メッセージが字義通りの意味だけでなく課題や状況に応じた言外の意味・意図を伝えられるコミュニケーションシステムができる過程には、まず行動の共通基盤という、記号を使うよりも前の慣習、いわば前記号的プラグマティクスの形成があり、続いて、記号システムというセマンティクスとシンタックスの共有、そして、ターンテイクを利用した役割分担によるプラグマティクスの構築という3つの段階があることが示唆される。

この3つの段階が生じる要因を調べるため、トライアルセッション中の行動および作られている記号システムの性質を定量化し、各テストのパフォーマンスとの相関を分析した。移動がランダムに行われるのではなくできるだけ左上の部屋に移動するといったようにある部屋に行きやすい傾向を持つならば、相手もそこを目指すことで同じ部屋に行ける可能性は高まる。すなわち、記号を使用する前に慣習的行動としての共有基盤が形成可能である。移動行動の規則性に加えて、使用する記号にも何らかの傾向が見られるならば、その移動とよく使う記号を結びつけた記号関係を作りやすいだろう。また、ターンテイクを利用した役割分担を行っていることから、メッセージを送る時間は役割分担になんらかの関係を持つと考えられる。字義通りの意味に加えて言外の意味をひとつのメッセージで伝える場合、異なる状況で同じメッセージが使われることがある。その際に、記号システムが変動しているとか曖昧であると判断するのではなく、字義通りの意味とは別のレベルに相手が共有したい意味があることに気づくには、そもそも記号システムが一貫した曖昧さの低いものになっているべきである。以上の予想より、移動先の偏り、記号使用の偏り、メッセージ送信時間差、記号の曖昧さを分析対象とし、それぞれ指標を作って分析した。

図3にこれらの指標とテストのパフォーマンスとの相関を示す。記号の曖昧さはトライアルセッション初期の12ラウンドの結果のみを出している。移動先および記号使用の偏りについては予想通りの結果となっている。成功群では初期から高いパフォーマンスを出しているということは、ある部屋へ移動しやすいという慣習的行動が共有基盤を形成し、その移動時によく使われる記号が結びつけられて、早くから記号関係ができるのだろう。そして、初期段階から曖昧さの低い記号システムを作っていること、すなわち、記号と行動の対応が初めから一貫していることが、記号システムによりゲームのパフォーマンスを上げられるという T_{SM} と相関することもリーズナブルである。一方、メッセージ送信タイミングはターンテイクによるパフォーマンス向上には寄与しない。むしろ、記号システムが作られていると、初期位置からどういったメッセージを送るべきかについて考える時間が短くなることから、 T_{SM} と逆相関するようになったと考えられる。曖昧さが T_{AM} と逆相関することも予想通りである。さらに、行動や記号使用の規則性といった行動の傾向はターンテイクによるパフォーマンス向上には寄与しないことから、言外の意味を伝えられるようになるには慣習的な行動とは異なるレベルのサブシステムがあることが示唆される。

図3：行動傾向とテストのパフォーマンスの相関



ACT-R は、人間の認知を複数の独立したモジュールにより構成されるものととらえる。中心的なモジュールは If-Then ルール（手続き知識）を格納するプロダクションモジュールであり、他の周辺的なモジュールを統合する。周辺的なモジュールは、一時的な情報の貯蔵場所（バッファ）をもち、入出力や宣言的知識の保持などの情報処理を行う。プロダクションモジュールは、各バッファの状態を条件とし、前件部が適合するルールを選択し発火させる。ルールの発火によりバッファは書き換えられ、新たな状態と合致するルールが探索される。

ACT-R は、シンボリックな学習とサブシンボリックな学習を統合するアーキテクチャでもある。2種類の学習を統合するという特徴は、前記号的なプラグマティクスの形成と記号システムの形成を含むコミュニケーションシステム生成過程のシミュレーションに適している。ルールに付された効用値を変化させる強化学習（サブシンボリックな学習）、過去のゴールバッファの状態を宣言的モジュールに蓄積する事例ベース学習、新たなルールを生成するコンパイル学習（それぞれシンボリックな学習）を組み入れたモデルを構築することで、強化学習により習慣的行動が形成され、事例ベース学習により状況と記号を対応付ける記号システムが形成され、コンパイル学習により役割分担の円滑化が導かれると考えられる。

ACT-R アーキテクチャ上で2体のエージェントが課題画面を介して相互作用する状況をモデル化する（図4）。エージェントの意思決定の方略として、事例利用と模倣という2種類の事例利用戦略の振る舞いを比較する。事例利用戦略では、現在のゴールバッファの状態に適合する過去の事例を用いる。模倣戦略では自身と相手を入れ換えた事例を用いる（役割反転模倣）。

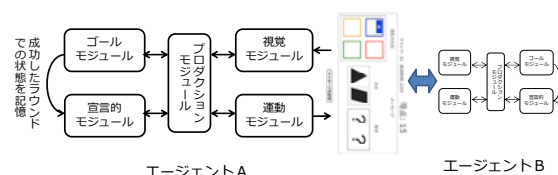


図4：ACT-Rによるモデルの概略

トライアルセッションのパフォーマンスについて、これら2つの意思決定方略、および、実験の成功群・失敗群の結果を比較した(図5)。役割反転模倣モデルが事例利用モデルよりも成功群の結果をよく再現する。特に中期・後期ではこの二者はほぼ一致する。興味深いことに、模倣方略の初期のパフォーマンスは失敗群と同じ程度である。成功群は初期段階から移動先・使用記号を偏らせることで共有基盤を形成でき、初期から課題に成功しやすい。対して、シミュレーションモデルは初期には行動ルールを持たないためランダムに行動する。たまたま成功した事例を蓄積し強化学習が進むことで、行動・記号の偏りが生じ、中期には成功群と変わらない程度に成功する。これは、行動・記号使用の偏りという共有基盤は、事前に組み込まれたものとして不可欠なわけではなく、成功事例を利用し強化学習により作ることができ、記号システムの形成にまで至れることを示唆する。

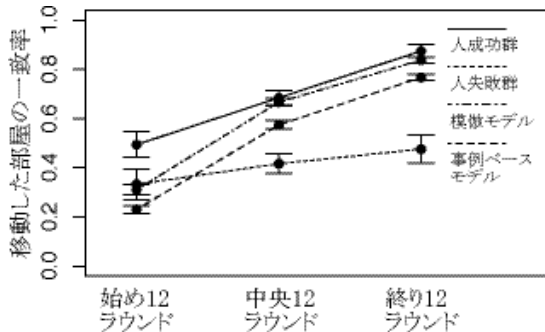


図5：課題のパフォーマンスの推移。モデルの2つの戦略、および、実験の成功群・失敗群について、初期・中期・後期12ラウンドにおける平均・標準誤差

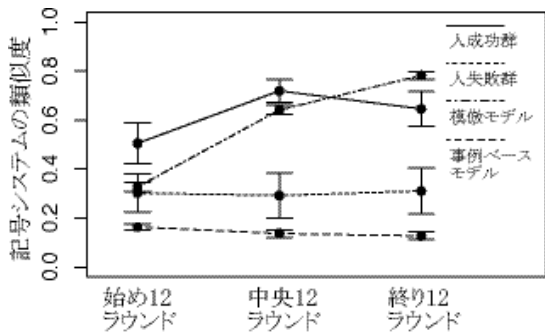


図6：記号使用の類似度の推移。モデルの2つの戦略、および、実験の成功群・失敗群について、初期・中期・後期12ラウンドにおける平均を示す

さらに、記号システムの特徴を調べるため、ペア内での記号システムの類似度を指標化した(図6)。失敗群、事例利用方略では類似度はまったく上昇しないのに対し、成功群と模倣方略ではラウンドを経て上昇する。成功群では初期から十分類似しており、中期でさらに類似度が高まるが、後期ではそれ以上

上昇しない。これに対し、模倣方略では、初期は失敗群と同程度だが、中期で成功群に迫り、そのまま上昇を続けて後期では成功群以上となっている。すなわち、記号システムを作る段階までは模倣方略が使われていると見ることができるが、役割分担を形成する段階では、人間は異なる方略をとっている可能性が示唆される。

本研究の実験課題では、意味のない図形に意味をつけそれをを用いて調整課題という共通目的を達成するシステムを作る過程が見られる。この過程には、共通基盤の形成、記号システムの共有、役割分担の構築という3つの段階があり、各段階が次の段階を形成する礎となるようなブートストラップ的生成過程があった。

第1段階では、用いる図形と移動先という行動をある程度規則的にすることで、その両者が記号関係にあるという解釈を可能にする。これを礎にして、他の部分の記号関係を調整し、第2段階の記号システムができる。そして第3段階では、各メッセージが指し示す場所という字義通りの意味だけではなく、それを指し示すことによる話者の意図という言外の意味が伝えられるようになる。そして、この段階が役割分担によって担われる得ることが示された。

シミュレーション解析より、これらの過程において役割反転模倣、すなわち、「もし自分が相手だったらどうするか」を過去の相手の行動に基づいて予測して自身の行動を決めるという意思決定戦略が有効であることが分かった。曖昧さが低い記号システムを作り共有することが有効なのは、それによって字義通りの意味とは異なるレベルに相手が伝えようとしていることがあることに気づくことができ、相手と共有したものを礎にして、相手の役割を勘案して自分なりの役割を担えるからであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

1. Torii, T. and Hashimoto, T. (2014, in press) Rethinking context and its calculation mechanism: Correlation-based leaning is effective to calculate chained context, *Springer Transactions on Computational Science*. 査読有
2. Konno, T., Morita, J. and Hashimoto, T. (2013) Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks. *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Y. Yamaguchi (Ed.), Springer:Berlin, pp.453-460. 査読有
3. 金野武司, 森田純哉, 橋本敬 (2013) 人工言語の共創実験：使用する記号の類似性が導く言外の意味の成立, 第 30 回日

- 本認知科学会予稿集, pp.18-24. 査読有
4. 金野武司, 森田純哉, 橋本敬 (2013) コミュニケーションシステムの形成過程に見る知識共創の基盤, 第3回知識共創フォーラム予稿集, vol.3, pp. III 8-1. 査読有
 5. 森田純哉, 金野武司, 橋本敬 (2012) コミュニケーション成立の観察実験に基づく認知モデルの設計, 日本認知科学会第28回大会論文集, pp.45-52. 査読有
 6. Konno, T., Morita, J. and Hashimoto, T. (2012) How is pragmatic grounding formed in the symbolic communication systems?, *Proceedings of the 9th International Conference (EVOLANG9)*, T. C. Scott-Phillips et al. (Eds.), World Scientific, pp.482-483. 査読有
 7. Morita, J., Konno, T. and Hashimoto, T. (2012) The role of imitation in generating a shared communication system, *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012)*, N. Miyake, et al. (Eds.), pp.779-784. 査読有
 8. Hashimoto, T. and Konno, T. (2011) Language origin from simulation of language evolution, Comment on "Modeling the Cultural evolution of language " by Luc Steels, *Physics of Life Reviews*, Vol.8, No.4. 365-366. 査読有
 9. Torii, T. and Hashimoto, T. (2011), Modelling generation and sharing of novel expressions and meanings in symbolic communication, *International Journal Bio-Inspired Computation*, Vol. 3, No. 3, 168-178. 査読有

[学会発表] (計 59 件)

1. Hashimoto, T., An integrative study on the process and mechanism of the co-creation of symbolic communication systems, 第307回言語学セミナー, Institute of Linguistics, Chinese Academy of Social Science(Abstract), 2014/3/6, 北京中国社会科学院, 中国
2. 金野武司, 森田純哉, 橋本敬, 人工言語の共創実験: 使用する記号の類似性が導く言外の意味の成立, 日本認知科学会第30回大会, 2013/9/12-14, 玉川大学視聴覚センター, 東京
3. Hashimoto, T., Konno, T., and Morita, J., Dividing roles and ordering information flow by role reversal imitation in the formation of communication systems, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics(ICCN2013), 2013/6/23-27, Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden
4. Hashimoto, T., Study of communication from viewpoint of complex systems, International Advanced School on Knowledge and Systems Science,

2012/11/16, 北陸先端科学技術大学院大学, 石川

5. Hashimoto, T., Konno, T., and Morita, J., Co-creation process of symbolic communication systems: Cognitive experiments and constructive studies, Dynamic Brain Forum 2012, 2012/9/4-6, Carmona, Spain
6. Konno, T., Morita, J., and Hashimoto, T., How is pragmatic grounding formed in the symbolic communication systems?, The 9th International Conference on the Evolution of Language, 2012/3/13-16, Campus Plaza Kyoto, Kyoto
7. Hashimoto, T., Integrative approach to dynamic feature of symbolic communication system, EvolangIX Workshop: "Constructive Approaches to Language Evolution", 2012/3/13, Campus Plaza Kyoto, Japan
8. Konno, T., Morita, J., and Hashimoto, T., Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks, 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics 2011, 2011/6/12, Hilton Niseko Village, Hokkaido
9. Hashimoto, T., Evolution of symbolic communication and language: Constructive and experimental approaches, Global COE International Symposium "Future Trends in the Biology of Language", 2011/3/9, Keio University, Japan

[図書] (計 1 件)

1. 橋本敬 (2014, 印刷中), 岩波書店, 『コミュニケーションの認知科学 1 言語と身体性』(第9章, 「記号コミュニケーションはどのように成立するか」)

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本 敬 (HASHIMOTO TAKASHI)

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・教授

研究者番号: 90313709

(2)研究分担者

森田 純哉 (MORITA JUNYA)

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・助教

研究者番号: 40397443

(3) 研究分担者

金野 武司 (KONNO TAKESHI)

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・特任助教

研究者番号: 50537058

(平成 25 年 4 月 1 日より)