

記号コミュニケーションにおける言外の意味の推論に基づく 先行的行動価値修正メカニズムの役割

The role of proactive modification of behavioral values based on the inference of connotations in symbolic communication

金野 武司[†], 橋本 敬[†], 李 冠宏[†], 奥田次郎[‡]

Takeshi Konno, Takashi Hashimoto, Guanhong Li, Jiro Okuda

[†] 北陸先端科学技術大学院大学, 知識科学研究科

[‡] 京都産業大学, コンピュータ理工学部 インテリジェントシステム学科

[†] School of Knowledge Science, JAIST

[‡] Faculty of Computer Science and Engineering, Kyoto Sangyo University

{t-konno, hash, adam.li}@jaist.ac.jp, jokuda@cc.kyoto-su.ac.jp

Abstract

Humans communicate with each other through symbols conveying dual meanings (i.e., denotation and connotation). Conveying the connotations can reduce behavior adjustment times through trial and error. In this paper, we construct a computational model that reproduces humans' behavioral performance in a cognitive experiment that co-creates a novel symbolic communication system. Using this model, we show that dual meanings can be conveyed not only by inferring the symbols' meaning but also through a behavioral simulation mechanism and an inference-based modification mechanism that can adjust proactively the behavioral values. These two mechanisms realize to believe connotations; however, if the intended connotation was misunderstood, the appropriate candidates will be eliminated in advance. Moreover, the dual meaning formation process involves a problem of mutual dependence in intra- and inter-individual relations.

Keywords — experimental semiotics, symbolic communication, denotation and connotation, computational model, proactive control

1. はじめに

人の記号的なコミュニケーションでは、記号によって字義通りの意味だけでなく、言外の意味が伝えられる。例えば、会って打ち合わせをする約束をしていた二人が電話口で次のようなやりとりをする場面を想像してみる。「A:いま一階」「B:じゃあ二階で」「A:いや三階で」。一階、二階、三階ということば(記号)は字義通りの意味としてそれぞれの場所を指し示すと共

に、やりとりではそれぞれの場所に「いる」のか、それとも「行く」のかという言外の意味が伝えられている。このような例において明らかな利点の1つは、記号の交換を通じて言外の意味をやりとりすることで、二人は試行錯誤的な行動コストを払わずに1つのフロアで会えることにある。こういったコミュニケーションを人は自然に行なうが¹、記号を通じた言外の意味(意図)のやりとりは、人間固有のやり方であることが知られている [1, 2]。しかし、これがどのようなメカニズムによって実現されているのかについてはまだ不明な点が多い。

字義通りの意味と言外の意味の違いは、大きくは意味論と語用論の違いとして捉えられている [3]。意味論や語用論の研究では、基本的には実際に行なわれる具体的な発話とそれが行なわれた状況や文脈が分析され、そこにある法則性や原則が導かれる [4, 5]。しかし、その法則性や原則の下で交わされる意味(字義通りの意味と言外の意味)がどのようなメカニズムによって成立しているのかを明らかにするのは容易なことではないように思われる。その原因の1つには、意味論や語用論が研究の対象にする日常的な対話が非常に複雑であることが挙げられる。メカニズムを理解するための方法の1つに、計算モデルの構築(認知科学が採る主要な方法の1つでもある)があるが、意味論や語用論が当たり前に扱う言語現象は、計算モデルで扱うには複雑すぎる。計算モデルの構築が十分に可能なほどに現象が単純でありながら、字義通りの意味や言外の意味が伝達・共有される過程を観察できる方法が求められている。

¹もちろん、取り上げた例でもしっかりと言葉を補って、「いる」「行く」を明示する場合も多いだろう。しかし基本的に人は言外の意味が伝わることを前提としたやりとりをする。

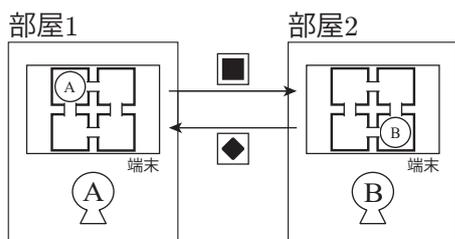


図1 実験環境

この問題を解決する方法として、我々は実験記号論 [6, 7] が行なう実験室実験の手法 [8, 9] を取り入れている [10, 11]. 実験記号論に基づく実験室実験では、参加者は普段使っているコミュニケーション手段（対面での発話や表情やジェスチャー、あるいは文字を使ったやりとり）の使用が制限され、別途デザインされた手段を用いる。実験者は、参加者がこの新しい手段を使いこなす過程を観察することで、記号的なコミュニケーションシステムが形成される過程を調査することができる。この方法を使って我々は、実験室実験を行なった結果と、その結果を再現する計算モデルの構築を通じて、字義通りの意味と言外の意味の成立に必要なとされるメカニズムを明らかにすることを目的としている。本稿では特に、言外の意味を推論するという方略そのものがどのようなメカニズムによって構成されているのかを、計算モデルの構築を通じて明らかにすることを目的とする。

そこで本稿ではまず実験室実験の課題・手続き・結果を示し、その後で、その実験結果を再現するための計算モデルの構築方法とその動作結果を示す。その上でそれぞれの結果を比較し、字義通りの意味と共に言外の意味を推論する方略を持った記号的なコミュニケーションシステムが、その成立の難しさを含め、どのようなメカニズムによって構成されているのかを議論する。

2. 実験室実験

我々が設計した実験環境を図1に示す。この実験では二人の参加者がペアとなって、離れた部屋に設置された端末を介して調整課題に取り組んだ。端末には2×2に配置された4つの部屋が表示され、その1つに自分のエージェントが配置されていた。相手のエージェントも同様に自分とは異なるどこかの部屋に配置されるが、その配置はわからないようになっていた。この状況で参加者たちは、互いのエージェントを同じ部屋に移動させることが求められた。

参加者は自分のエージェントを移動させる前に、予め意味のない記号として用意された4つの図形（, , , ）のうち一つをメッセージとして相手に送

るようになっていた²。この図形は手元のボタンを押すごとに形が変わり、何もしない状態が一定時間続くと自動的に相手に届けられるようになっていた。そのため、参加者はメッセージを送る順序によって先手・後手（ターンテイク）を調整することができた³。互いのメッセージが交換された後で、参加者は自分のエージェントを上下左右にのみ一度だけ移動させ、斜めには移動させることができないようになっていた（ただし留まることはできた）。互いの移動先が決まると、自分と相手の行動結果（どこからどこへ移動したか）が表示されるようになっていた。行動結果が表示された後で、二人のエージェントは再度ランダムに配置しなおされ、参加者はメッセージ交換からの手順を繰り返した。

この課題ではエージェントを斜めに移動させることができなかった。このため、二人が対角に配置された状態では、ある特定の部屋で落ち合うというやり方がうまく機能せず、参加者はメッセージをうまく使わなければ、安定して移動先を一致させることができないようになっていた。メッセージは主に部屋の位置へ対応付けられることを想定したが、参加者はどのような意味でもメッセージに込めることができた。

メッセージと部屋の対応付けによってこの課題を解く方法は少なくとも3つあった。1つ目は先手が現在位置を伝え、後手が落ち合う場所を指示する方法（方法1）。2つ目は先手・後手に関係なく現在位置を伝える方法（方法2）。そして3つ目は、同じく先手・後手に関係なく落ち合う場所を指示し合う方法（方法3）であった⁴。

いずれの方法も、部屋を指し示す字義通りの意味と共に、それが現在位置を意味するのか、それとも落ち合う場所を意味するのか（言外の意味）を取り決める必要があった。方法1は、この言外の意味を取り決めることで対角配置の状況を解決することができたが、方法2と3は、この言外の意味の取り決めとは別に、さらに暗黙的な行動を取り決める必要があった。方法2の場合には、互いの配置に応じて落ち合う暗黙的な

²先行研究 [11] では、用意された6つの図形から二つを組み合わせて相手へのメッセージを作成するようにしていたが、本研究では課題をより簡単にし、かつ、より単純な計算モデルを構築できるようにするためにこのような設定とした。

³図形の出現順序は参加者ごとにランダム化されていた。

⁴「落ち合う場所」を「行き先」としないのはその場に留まることがあるためである。これにより「落ち合う場所」には「現在位置」が含まれることになるが、重要なのは「現在位置」は行動を選択する前の状態への意味付けであり、「落ち合う場所」は行動を選択した後の状態（これから実現しようとする状態）への意味付けであるという点である。

3つの場所⁵を取り決める必要があり、方法3の場合には、先手が指定する場所に後手が移動できない1/3のケースで互いの推論が必要だった⁶。また、方法1には先手・後手のそれぞれでメッセージを簡易化する方法が2つあったが、この場合にも、追加の推論が必要ようになっていた⁷。

2.1 参加者

実験には20ペア（男性のみ40名）が参加した。参加者の年齢は20～29歳（ $M = 22.1, SD = 2.3$ ）で、主に近畿圏に住む大学生だった。実験は全て京都産業大学で行なわれた。

2.2 手続き

参加者は実験開始と共に別々の部屋に入り、実験についての説明を受け、簡単な練習を行なった後で先述の調整課題に取り組んだ。参加者は、初期配置、メッセージ交換、エージェントの移動、結果開示という一連の手順を1ラウンドとして、これが60ラウンドに到達した時点で課題終了となることが開始前に告げられた。エージェントの初期配置は、全ての組み合わせである12パターンを1セットとして、その1セット内でランダムに出現するようになっていた。このため、12ラウンドのうちに同じ配置は現れないようになっていた。参加者は課題終了後、自分が作成したルールおよび相手が作成したと思うルールについて、自由記述で質問紙へ回答した。

2.3 結果

終り12ラウンドの移動した部屋の一致率をペアごとに昇順に並べたグラフを図2に示す。参加者が取り

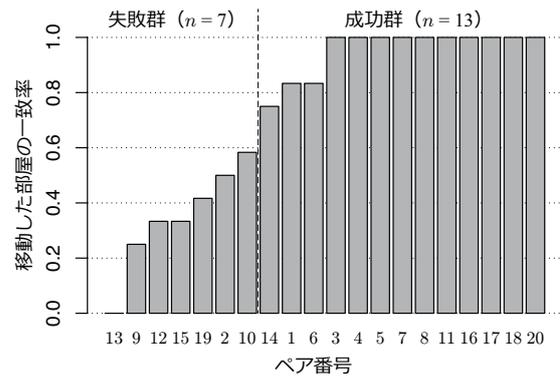


図2 終り12ラウンドのペアごとの一致率（昇順）

組んだ調整課題は、エージェントをランダムに移動させたときの期待値は0.22であり、メッセージ交換なしで特定の部屋に移動する方略をとった場合の期待値は0.50である。この期待値0.5を有意に超える一致率だったペアは、記号を何らかの形で有効に使うような記号コミュニケーションシステムを構築したと考えられる。そこでここでは一致率0.7を閾値として⁸、これを上回ったペアを成功群（ $n = 13$ ）、下回ったペアを失敗群（ $n = 7$ ）として分析を進める。

ゲーム終了後のアンケートを分析すると、成功群13ペアのうち、12ペアが方法1を採用していたようである（一致率0.833のペア6だけが方法3だった）。この結果は、方法1が最も成功させやすい方法であったことを示している。また、失敗群のうち字義通りの意味の形成に失敗したのが4ペア（ペア13, 9, 12, 15）、方法2を採用したのが1ペア（ペア19）⁹、方法3を採用したのが2ペアだった（ペア2, 10）。字義通りの意味の形成に失敗した4ペアは特に一致率が低く、いずれのペアも一方のプレイヤーが記号を部屋に対応付けなかったことで、他方のプレイヤーがその意味を理解できなかったようである¹⁰。字義通りの意味を取り決めることができた3つのペアはいずれも一致率が0.4から0.6の間にあるが、アンケートには方法2もしくは3をとっていることで生じる追加の調整に関する記述はなかった。これは、必要とされる暗黙的なルールを取り決めることができなかったことを示唆する。

上記の結果は、字義通りの意味と言外の意味の取り

⁵例えば、左上の部屋に優先的に移動することを決めた場合、続けて左上に一方が行けない配置になった場合の第二移動先を定め、さらに一方が左上に行けず、かつ他方が第二移動先に行けない場合の第三移動先を定める必要があった。

⁶例えば、先手が落ち合う場所として左上の部屋を指定してきたが、後手が右下にいて左上には移動できない場合、後手は相手が右上にいるのか左下にいるのか特定できない状態になる。ここで後手は、相手が右上か左下にいるならば、自分がいる右下にはどちらにいても移動することができるだろうと推論して、相手に右下で落ち合うことを指示する。そうして先手が後手のメッセージを右下で落ち合うことだと正しく理解できれば、移動する部屋を一致させることができるようになっていた。ただしこの推論を成立させるには、先手が伝える「落ち合う場所」は必ず「行き先」でなければならなかった。

⁷1つは、先手が第一移動先に移動できるかどうかの2状態だけを伝える方法。この場合には、先手のメッセージで現在位置が特定できない場合があるので、その際の推論負荷が後手にかかるようになっていた。もう1つは、先手が現在位置を伝えてくるのに対して、後手がそこに行けるか行けないかの2状態だけを伝える方法。この方法も後手のメッセージの種類は二つで済むが、先手のいる部屋に移動できないケースに対処するための暗黙的な移動先を取り決める必要があった。

⁸平均0.5、分散0.1の正規分布を仮定したとき、一致率0.7の有意確率（ p 値）は0.023である。ペア14の一致率0.750は $p = 0.006$ 、ペア10の一致率0.583は $p = 0.203$ になる。

⁹厳密には、現在位置を伝え合うのではなく、移動できない場所を伝え合おうとした。

¹⁰記号に対応付けようとした字義通りの意味には、移動に関して上下左右や時計回り・反時計回りといった方向への対応付けが見られた。また、「移動しない」「変更の意思あり」といった意味付けも試みられていたが、これらはいずれも相手に伝わらなかったようである。

表 1 言外の意味に応じた状態番号の定義. 現在位置の意味を ps, 落ち合う場所の意味を pe で表記した.

		プレイヤー 2				
		先手 ps	後手 ps	先手 pe	後手 pe	
プレイヤー 1	先手 ps	0	1	2	3	方法 2
	後手 pe	4	5	6	7	方法 1
	先手 ps	8	9	10	11	方法 3
	後手 pe	12	13	14	15	

決め状態に応じて, 2 段階の一致率の変化があることを示している. つまり, 部屋と記号の対応関係として字義通りの意味を取り決めることで 0.5 程度の一致率が実現され, 現在位置あるいは落ち合う場所への対応づけとして言外の意味を取り決めることで 0.7 を超える一致率が実現されるのだと考えられる.

次節では, こうした字義通りの意味と言外の意味の取り決めがどのような仕組みによって実現されているのかを, 計算モデルの構築を通じて検討する. このために, それぞれのペアが字義通りの意味と言外の意味の取り決め状態に応じて, どの程度の一致率になっているのかを定量的に分析しておく. 分析では記号と部屋の対応関係における同義語と同音異義語の割合を調べ, これを記号システムの曖昧度として基本的な指標にする. この曖昧度が移動前の部屋の位置 (現在位置) と移動後の部屋の位置 (落ち合う場所) のどちらで低くなっているのかを評価し, 曖昧度の低い方をそのプレイヤーが対応付けた言外の意味と解釈する. また同時に, その曖昧度を字義通りの意味付けの程度として分析する (詳細な分析方法を付録 A に示す).

言外の意味の取り決めは, プレイヤごとに先手・後手のそれぞれで 2 つずつ (現在位置と落ち合う場所) の意味を持つことを想定する. その組み合わせは 16 状態になる (表 1). ここで, ペアが採る方法 1, 2, 3 は, それぞれ状態 5, 0, 15 に対応する. この状態番号はプレイヤーの入れ替わりに対して対称である.

ペアごとに終り 12 ラウンドでの状態番号を上記の曖昧度を用いた方法で推定し, 成功群と失敗群に分けてそれぞれの状態に該当するペアの番号および移動した部屋の一致率を平均した結果を図 3 に示す. 成功群に関しては方法 1 とそれを部分的に含む状態 1,4,5 が推定され, また, 失敗群で方法 3 を報告したペア 2 と 10 は状態 15 および 13 と推定されている. この結果はアンケートの分析結果と概ね整合的である¹¹. また,

¹¹曖昧度による定量的な分析は, 部屋と記号の対応付け, および現在位置と落ち合う場所への対応付けという観点で客観的にどのよ

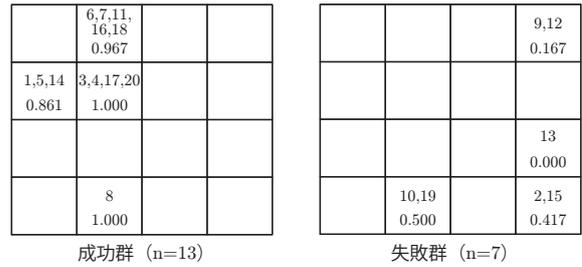


図 3 推定した言外の意味の組み合わせに応じた平均一致率. 左が成功群, 右が失敗群. 各ボックスは表 1 の各状態番号に対応する. それぞれの状態には上にペア番号を, 下に一致率の平均を示した.

部屋と記号の意味付け度合いとして曖昧度を計算すると¹², 成功群は平均 0.016 ($SD = 0.008$), 失敗群は平均 0.110 ($SD = 0.031$) であり, この二群の平均の差は有意だった ($F(12, 6) = 0.11, p = .001; t(6.73) = 2.97, p = .022$). この分析における同義語と同音異義語の最大値は 24 個¹³なので, 成功群は平均して約 0.4 個, 失敗群は約 2.6 個の同義語あるいは同音異義語があったことになる. さらにこの曖昧度は, 移動した部屋の一致率と有意な負の相関関係を持つ ($r = -0.859, F(1,18) = 50.45, p < .001$). この結果は, 記号と部屋の対応関係の曖昧度が低いほど, 移動する部屋の一致率が高かったことを示している.

3. 計算モデル

課題に取り組む参加者は, メッセージを交わしながら, その字義通りの意味と言外の意味を取り決めた. この過程を計算モデルで再現するには, メッセージの送受信と行動選択, そしてそこでの推論と学習の仕組みが必要になる. これらを一度に構成すると, どの仕組みが何にとって重要であるのかが分かりにくくなるので, 本稿では段階的に計算モデルを構築する.

まず, メッセージの交換がない状態で, お互いの現在位置が見える課題の計算モデルを構築する. 互いの現在位置が見えれば, メッセージ交換の必要はない. この計算モデルを最初に作ることで, 行動選択の仕組みとして何が必要とされるのかを確認する. 続いて, 参加者が取り組んだ課題と同じように, 互いの現在位

うに見えるのかを明らかにする. このため, 当然のことながらアンケートの分析と一致しない箇所があることに留意すべきである. 成功群では方法 1 を報告したペア 8 と方法 3 を報告したペア 6, 失敗群では方法 2 を報告したペア 19 が一致しない. また, 字義通りの意味において部屋と記号を対応づけなかったプレイヤーがいたペア 9, 12, 13, 15 は, そもそもこの分析の枠組みに対応していない.

¹²プレイヤーごとに先手・後手でそれぞれ現在位置と落ち合う場所について 4 つの曖昧度が計算できるが, ここではラウンド数が多かった方の手のうち, 数値が低かった方の曖昧度を用いた.

¹³詳しくは付録 A を参照.

置が見えない状態でメッセージ交換を行なう計算モデルを作成する。ただし、この時点ではまだ相手の記号の意味を推論する仕組みは導入しない。この計算モデルにおいて、字義通りの意味と言外の意味を取り決める仕組みがどのように実装できるのかを確認する。最後に、相手のメッセージの意味を推論する仕組みを導入し、前節の実験データを再現するための仕組みを検討する。

3.1 互いの現在位置が見える課題の計算モデル

互いの現在位置が見えるので、計算モデルで行動決定を行なうプレイヤー A, B は、自分と相手の部屋の現在位置 (s_{A-ps}, s_{B-ps}) を入力にして、移動する部屋 ($s_{A/B-pe}$) を出力する関数 (Q_{i-s}) を持てば良い。

$$s_{i-pe} = Q_{i-s}(s_{i-ps}, s_{j-ps}) \quad (1)$$

ここで、 i, j はプレイヤーを表わす添え字である。 Q_{i-s} は初期状態ではランダムに落ち合う場所を決定し（ただし斜めには移動できない）、移動した部屋が一致した場合にその選択行動を保存（学習）する。この仕組みは一度の成功事例を 100%再現し続ける¹⁴。このため、一度成功した事例が何らかの理由で成功できなくなったときには行動選択の変更ができなくなるが、ここではそのような状況は発生しないことを前提にする。

行動のシミュレーション：

この課題は、それぞれの配置パターンに応じて明らかに一致できない部屋が生じる。例えば、図 1 に示したような対角配置のパターンではその場に留まるといった選択がそれである。人は当然、そのような選択をすることがないため、計算モデルにおいても移動の結果として一致することがないだろう部屋への移動を選択しない仕組みを実装する。この仕組みがある場合には、学習前に部屋を一致させることのできる確率は 0.50 になるが、ない場合には 0.22 に低下する。この仕組みは、自分と相手の位置を脳内で事前に操作し、結果をシミュレーションする能力を仮定するものだと考えられる。

¹⁴このような行動選択の仕組みに関しては、より簡単な調整課題において、人が同じような行動傾向を示すことが確認されている [12]。この先行研究では、直近の成功例のみを再現する傾向がマルコフ性バイアスとして、また 1 度の成功でその行動の選択確率を 1 にする傾向が決定論バイアスとしてそれぞれ論じられている。

3.2 メッセージを交換する計算モデル（事例ベースモデル）

前節のモデルにメッセージ交換の仕組みを追加するため、先手・後手を決める仕組みと、メッセージへの意味付けとそれに応じた行動決定の仕組みを構築する。それぞれを以下に説明する。

先手・後手の決定方法：

プレイヤーは自分の初期位置 (s_{i-ps}) に応じたメッセージの送信時刻 (t_i) を関数 Q_{i-t} で決定する。

$$t_i = Q_{i-t}(s_{i-ps}) \quad (2)$$

ここで、選択される時刻は 1 から 100 までの自然数で、プレイヤー A が奇数、プレイヤー B が偶数を選択する。これにより、時刻の選択によって必ず先手・後手が決まるようにした¹⁵。また、 Q_{i-t} の学習も Q_{i-s} と同様に、初期状態ではランダムに時刻を選択し、移動した部屋が一致した場合にその時刻を保存する方法で行なわれる。

メッセージと行動の決定方法：

メッセージの作成には、メッセージを現在位置と落ち合う場所のどちらに¹⁶対応付けるかを決定する仕組み（言外の意味を決める仕組み）と、その対応付けに応じてメッセージを作成する仕組み（字義通りの意味を決める仕組み）が必要となる。これらの仕組みを実装したシステム図を図 4 に示す。ここでは、先手がプレイヤー A 、後手がプレイヤー B に決まった後のシステム図を示した。 $Q_{A/B-ic}$ は現在位置か落ち合う場所のどちらか一方を出力する（言外の意味を決定する）関数であり、 $Q_{A/B-m}$ は字義通りの意味を決定する関数である。さらに、移動する部屋を決定する関数 $Q_{A/B-s}$ ((1) 式) は、その入力の一方が相手の現在位置 (s_{j-ps}) から相手のメッセージ (m_j) に変わる。これによって、前節で仮定したシミュレーションの能力はこのモデルでは使われないことになる。

メッセージおよび落ち合う場所を決める 2 つの関数 ($Q_{A/B-m}$, $Q_{A/B-s}$) の学習は、前節のモデルと同様に初期状態ではランダムに決定し、移動する部屋が一致した際にその選択行動を保存することで行なう。これを行なうと、メッセージと部屋の対応関係において

¹⁵このような仕組みにしたのは、先手・後手の確率的なゆらぎによる成功事例の不確実性を生じさせないためである。この仕組みでは奇数を選択するプレイヤー A が先手になる確率が、プレイヤー B よりも 1/50 だけ高くなる。

¹⁶人の場合には最初からこの 2 つの選択肢が提示されているわけではないが、簡単化のためにこれを設定する。また同様に、字義通りの意味の決定においても、メッセージは部屋に対応付けるものとする。

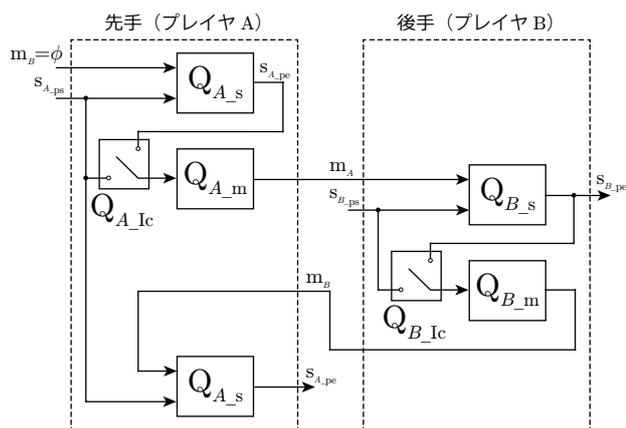


図4 メッセージ交換を持つシステム図 (事例ベースモデル)

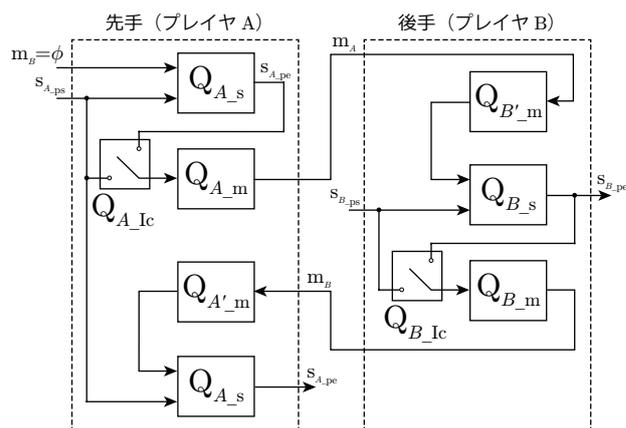


図5 相手メッセージの字義通りの意味を推論する計算モデルのシステム図 (意味推論モデル)

同義語 (1つの部屋を参照する2つ以上の記号) は発生しなくなるが、同音異義語 (1つの記号での2つ以上の部屋の参照) は発生する。実験の分析では曖昧度 (同義語と同音異義語の割合) の低いペアが成功する傾向にあったので、計算モデルにはあらかじめ同音異義語が発生しないように、メッセージを作成する際に既に成功したケースで使用された記号は使わない仕組みを実装する。言外の意味を決定する関数 ($Q_{A/B_{Ic}}$) は、静的な特性を確認するために学習の仕組みを入れずに、その関数自体を現在位置もしくは落ち合う場所の二値を持つパラメータとして扱う。

この計算モデルは、人が取り組んだ課題をこなすことができるため、言外の意味の状態に応じた一致率を計算して人のデータと比較することができる。この計算モデルは、成功事例を経験として蓄積するので、事例ベースモデルと呼ぶことにする。

3.3 メッセージの意味を推論する計算モデル (意味推論モデル)

事例ベースモデルには、相手メッセージの意味を推論する仕組みがないため、これを加える。相手メッセージの意味の推論には、そのメッセージがどの部屋に対応付けられているかという字義通りの意味と、それが現在位置と落ち合う場所のどちらに対応付けられているかという言外の意味の2つがあるが、いずれの意味も、相手のメッセージと行動の対応関係から学習する必要がある。

そこで、相手の字義通りの意味を学習する関数 (Q_{A'/B'_m}) と相手の言外の意味を決定する関数 ($Q_{A/B_{Yc}}$) を用意し、移動する部屋的一致/不一致に関係なく一回のラウンドが終わるたびに相手の記号の

使い方を学習する。学習方法は次式に従う。

$$m_j = \begin{cases} Q_{i'm}(s_{j-ps}) & \text{if } Q_{i_{Yc}} = s_{j-ps} , \\ Q_{i'm}(s_{j-pe}) & \text{otherwise ,} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $Q_{i_{Yc}}$ は $Q_{i_{Ic}}$ (自分の言外の意味を決定する関数) と同様に二値を持つパラメータとして扱う。このため、この計算モデルでは相手メッセージによる言外の意味の推論は行なわれない。

字義通りの意味を学習する関数を使って課題に取り組む計算モデルのシステム図を図5に示す。このシステム図における $Q_{i'm}$ は、従来のメッセージ作成関数とは逆に、相手のメッセージから相手の現在位置もしくは落ち合う場所を推定することになるため、入出力の方向が逆になる。また同じ理由で、 $Q_{i'm}$ には3.1節で仮定したシミュレーションの能力を適用することができる。ただし、互いの現在位置がわかる場合と異なり、落ち合う場所に関するシミュレーションについては能力の拡張を仮定する必要がある。なぜなら、落ち合う場所についての相手の指示を推定した場合のシミュレーションには、相手はその行動をとることを信じる行為が含まれるからである。冒頭の例を思い出して欲しい。後手が「二階で」と言ってきたときに、先手はそこに相手が移動することを前提にした (信じた) 上で、そこに行けるか行けないかを判断し、「三階で」という返答をしている。翻って図1のような対角の状況を考えてとき、もし後手からのメッセージを先手が「右上の部屋で落ち合う」ことだと推定したとき、先手は左下の部屋に行くという行動を選択したりはしないだろう。

このような行動選択の仕組みは次のように実装できる。相手のメッセージの言外の意味を落ち合う場所だと推定する場合には、そこへの移動確率を1として

自分の移動を行なった場合の一致確率を計算する。また、自分が落ち合う場所の意味でメッセージを作る場合には、それぞれの部屋への移動確率を1にしてみたときの相手との一致確率を計算する。ただし、落ち合う場所を推定したシミュレーションでは、相手のメッセージに従うとどこにも一致できる部屋がないケース（行動選択肢の一致確率が全て0のケース）が生じる。この場合にはもとの方法に戻って、ランダムに落ち合う場所を選択するようにする。この仕組みは、相手が実際にそのとおりに移動する結果を見る前に、相手のメッセージに応じて**先行的に自身の行動選択肢の価値を修正する**。

3.4 結果

事例ベースモデルと意味推論モデルにおいて、言外の意味を変更した場合の移動する部屋の一致率を確認する。ただし意味推論モデルにおいては、課題を解くことのできる理想的な状態にするために、一方の言外の意味が他方に直ちに理解されることを仮定する。つまり、パラメータとして設定された現在位置か落ち合う場所かの二値が、次式の関係を持つようにする。

$$Q_{i,1c} = Q_{j,Yc} \quad (4)$$

この設定の下で、互いの言外の意味の組み合わせを表1と同様に用意したときの、移動した部屋の一致率を図6に示す。図6では、それぞれの状態で1000ペアを用意し、1ペアごとに60ラウンドを行なって、その終り12ラウンドの一致率の平均を算出した。また、意味推論モデルに関しては、先行的な行動価値の修正を行なわない場合（左）と、行なった場合（右）の結果を示した。

事例ベースモデル（図6上段右）では、一致率が1になるような状態がないかわりに、どの状態であってもほぼ同じ一致率になっている（全体の平均は0.706、それぞれの状態の標準誤差の平均は0.005と十分に小さい）。このモデルでは、言外の意味の選択状態に一致率はほとんど影響されないようである。また、事例ベースモデルは実施するラウンド数を300まで伸ばすと、そのまま全体の一致率が上がり、その平均は0.937（標準誤差の平均は0.003）になる。

他方、意味推論モデル（図6下段）は興味深い結果を示している。先行的な行動価値の修正が行なわれない場合には、相手の字義通りの意味および言外の意味を正しく推定しているにも関わらず、一致率が事例ベースモデルよりも低くなっている（全体

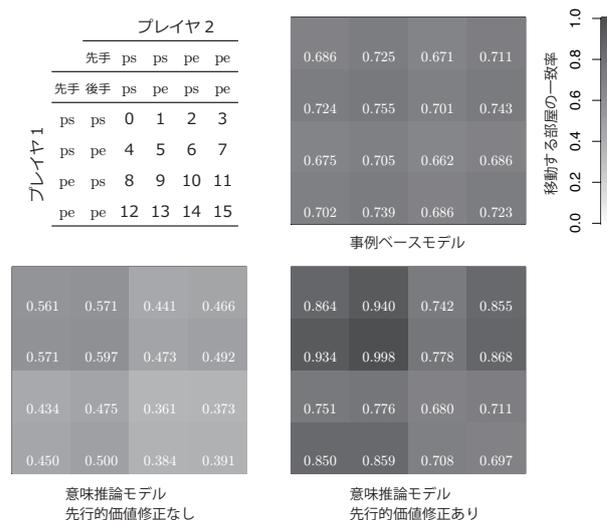


図6 言外の意味の組み合わせに応じた平均一致率。上段左は表1の再掲。上段右に事例ベースモデルの一致率を示した。下段が意味推論モデルの一致率。左が相手メッセージに応じた行動のシミュレーションによる先行的な行動価値の修正がない場合、右がある場合。

の平均は0.471、それぞれの状態の標準誤差の平均は0.006）。この結果は、メッセージに応じた先行的な行動価値修正の仕組みがなければ、メッセージの推論は効果がないばかりか、逆にパフォーマンスを低下させてしまうことを示している。

また、この意味推論の成立には、当然のことながら同義語と同音異義語の発生を抑制する仕組みが重要な役割を果たす。なぜなら、記号と部屋の対応関係に同義語や同音異義語があると、相手のメッセージからその字義通りの意味を一意に推定することができなくなるからである。これまでに示した結果はすでに同義語および同音異義語を発生させない仕組み¹⁷が入っているが、これらの仕組みを取り外せば、移動する部屋の一致率は低下することが予想される。その確認として、ここでは同音異義語を発生させないようにする仕組みを取り外し、図6と同様に言外の意味の組み合わせに応じた平均一致率を算出した。結果、全体は図6と同様のプロポーシオンを保ちながら、その平均は事例ベースモデルでは0.706から0.641へ、意味推論モデルでは0.813から0.575へとそれぞれ低下した（いずれもそれぞれの状態の標準誤差の平均は0.007を下回った）。

¹⁷同義語と同音異義語を発生させない仕組みはそれぞれ異なる。同義語の発生は、移動する部屋が一致した際に使われた記号の選択確率を1にする仕組み（(1)式に相当）によって抑制される。同音異義語の発生は、相手に送る記号を選択する際に、すでに他の部屋に対応付けられている記号を選択肢から除外する仕組みによって抑制される。

4. 議論

メッセージの交換を通じて調整課題を解く際に、事例ベースモデルのようにそのメッセージの意味を推論しない方法でも、時間をかければ問題を（ほぼ）解くことができるようになる。これは、メッセージが現在位置もしくは落ち合う場所に関連付けられていれば、2. 節で説明した方法 1 から 3 を混合した方略によって課題を解くことができるようになってきているからである。しかし事例ベースモデルの問題は、メッセージと現在位置に応じた行動の調整を試行錯誤的に行なわなければならないことにある。

メッセージ（記号）を使ったコミュニケーションにおいて、人は事例ベースモデルほどの試行錯誤の手間をとらない¹⁸。図 3 の結果が示すように、人は 60 ラウンドあれば十分に一致率を高めることができるからである。この手間を取らないことの本質的なメカニズムは、計算モデルの構築から、落ち合う場所の指示に対してそこへの移動を前提に行動をシミュレーションし、その結果に応じて先行的に行動価値を変更する仕組みにあると我々は考える。この仕組みがなければ、メッセージから部屋を推定する仕組みは、単に 4 つの記号を 4 つの部屋に変換するだけになる。このため、プレイヤーにとっては部屋を一致させることのできるサイコロの目が出にくくなるだけの効果しかない。これによって、メッセージの意味の推定は効果がないばかりか、さらなる一致率の低下を招くことになる（図 6 下段左）。

先行的に行動価値を修正する仕組みは、メッセージの意味推定を行なうときに限って必要とされるものではない。この仕組みは、互いの現在位置が見える状況（3.1 節）で想定したように、メッセージを交換しない場合においてもその原型として考えることができる。このため、この仕組みについては人と人以外の動物の行動に関して、同じ条件での比較が可能だと考えられる。記号の交換を有効に機能させるための上述の仕組みに関して、人以外の動物がどの程度の能力を持つのかを明らかにすることで、記号によるコミュニケーションシステムの形成に必要なとされる人固有の能力の解明に迫ることができるのではないかと考えられる。

また我々が構築した計算モデルにおいては、記号の意味推論の仕組みに関して検討できる興味深い問題が 3 つある。1 つは、本論で構築した意味推論モデル

¹⁸計算モデルにおいては、記号は部屋に結び付けられる（字義通りの意味）ようになっており、かつ、現在位置か落ち合う場所の意味（言外の意味）しか持たないように設定されている。また、言外の意味は、相手に直ちに正確に伝わることも設定されている。それにも関わらず、事例ベースモデルでは一致率を 1 に近づけるのに 300 ラウンドほどもかかるようになっていく。

ではメッセージを作成する関数 ($Q_{i,m}$) と相手のメッセージを推論する関数 ($Q_{i',m}$) が独立しているため、プレイヤー間で個別の語彙表（記号と部屋の対応関係）が作られるようになる問題である。この状況は大げさに言えば一方が日本語を話し、他方が英語を話すことに相当する。集団での記号的なコミュニケーションを考えれば、相手が変わるたびに別々の語彙表を作り・使うのは現実的な方法ではない。実際に課題の成功群が最終的に作った語彙表をアンケートから調べると、全てのペアが同じ対応関係を形成し共有していた。このことから、人には作成する語彙表を相手と同じにする仕組みが備わっていると考えられる。

語彙表を同じにしていく方法として我々は役割反転模倣 [1] に着目している。我々の実験課題において役割反転模倣は、先手・後手（役割）を入れ替えて相手の行動を学習することに対応する。つまり、移動する部屋が一致した際に、自分の行動選択だけを学習するのではなく、相手の行動選択を同時に学習するのが役割反転模倣である。これまでの研究 [13, 14] で我々は、役割反転模倣を行なう計算モデルにおいて、類似した語彙表が形成され、かつその類似度の変遷が人の特性に近くなることを確認している [15, 16]。ただし、相手と語彙表を同じにしていく過程では、相手との間で生じる同音異義語をどのように解消するかが問題になる。相手の使った記号と部屋の対応関係が、すでに自分の語彙表においては別の記号に割り当てられている場合、どちらの対応関係を採用するかを決めなければならない。これを適切に行なわなければならない。これを適切に行なわなければならない。相手のメッセージからその字義通りの意味を一意に推定することができなくなるだろう。この調整において、人はルール決定についてのリーダー・フォロワーの認識に基づいた調整を行なうのではないかと考えられる。しかし、その決め方に論理的な解法がないことで、この調整は難しいものになっているのではないだろうか。本研究で扱うような調整課題が相性の問題としても認識される 1 つの要因は、このような問題構造（ルールが衝突した際に、どちらを採用しても効果に違いはないが、どちらか一方は採用しなければならない）にあるのではないかと考えられる。

2 つ目の問題は、事例ベースモデルが 1 つの関数で済むのに対して、意味推論モデルが 2 つの関数を必要とすることである。これに対しては、役割反転模倣のような仕組みによって最終的に同じ語彙表が作られることを考えれば、作成される関数も初めから 1 つだと考えることができるかもしれない。作成される関数が初めから 1 つである場合には、自分のメッセージ作成

関数を使って相手のメッセージの意味を推論する仕組みを持つことになる。この仕組みは、幼児の語彙獲得において必要性が指摘されている対称性バイアス [17] に関連している。記憶容量と認知負荷を軽減する観点から、まずは意味推論モデルにおいて、2つの関数を初めから1つにすることが可能かどうかを確認する必要があると考えられる。しかし、人は自他のルールを分けて考えることができるし、先行研究で行なった実験 [11] では、プレイヤー間で異なる語彙表を作成したペアも少数ながら観察されている。このため、実際に人が持つ仕組みとしては、2つの関数が徐々に1つに融合されていくような仕組みがあるのかもしれない。

3つ目の問題は、言外の意味を推論する仕組みの影響である。本論で構築したモデルでは言外の意味を二値のパラメータとして扱っており、課題中にそれらの意味は変化しないようになっていた。しかし、人のコミュニケーションにおいてはこの言外の意味の調整が非常に難しいのではないかと考えられる。なぜなら、その調整では字義通りの意味と言外の意味の取り決めに相互依存性があるからである [5]。本論で構築した意味推論モデルにおいて、それぞれの関数の内容がどのように影響し合うのかを図7にまとめる。この図において、プレイヤーは相手の言外の意味 ($Q_{i,Yc}$) を相手の字義通りの意味 ($Q_{i',m}$) から推定すると考えられるにもかかわらず、相手の字義通りの意味はその相手の言外の意味の推定に基づいて学習されるようになっている。また、プレイヤー間においては、自分の字義通りの意味 ($Q_{i,m}$) が自分の言外の意味 ($Q_{i,c}$) によって決定されるにもかかわらず、その言外の意味は、相手の言外の意味 ($Q_{i,Yc}$) を正しく推定した上で適切に設定しなければ課題をうまく解くことができない。さらにこの相手の言外の意味 ($Q_{i,Yc}$) の推定は、互いの字義通りの意味 ($Q_{i,m}$) の成立を必要としている。このような相互依存性の解決は、津田 [18] の解釈学的循環の議論を参考にすれば、言外の意味は仮説の状態で運用され、字義通りの意味が取り決められるに従って確定あるいは棄却されるようになっているのではないかと考えられる。

5. 結論

本稿では、人が記号的なコミュニケーションにおいて言外の意味を伝え合うことに着目し、そのシステムがどのような仕組みによって構成されているのかを検討した。記号をやりとりしながら調整課題を解く実験室実験において、我々は記号コミュニケーションシステムの形成過程を観察し、それを計算モデルによって

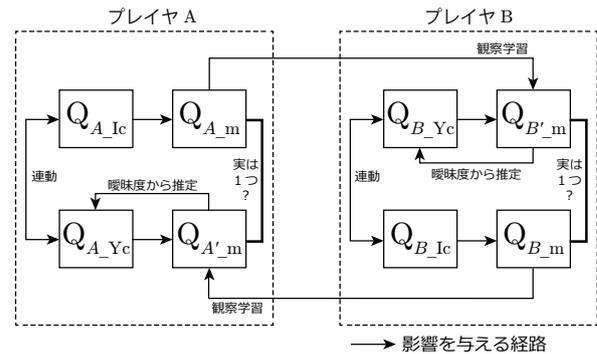


図7 字義通りの意味と言外の意味の取り決め過程に見られる相互依存性

再現することを通じて、言外の意味をやりとりするシステムの形成が3つの仕組みによって構成できることを示した。1つ目は記号からその意味（字義通りの意味と言外の意味）を推定する仕組み、2つ目はその推定した意味に基づいて、自他の行動をシミュレーションする仕組み、そして3つ目はその結果に基づいて、先行的に行動価値を修正する仕組みである。相手の記号から意味を推定する仕組みがあっても、残り2つの仕組みがなければ人と同程度の試行回数で調整課題を解くことはできない。また、3つ目の仕組みで特に重要なのは、相手のメッセージの意味する行動がまだ実現されていない状況（ある特定の場所に行くという宣言のみ）で、自分の行動選択肢を修正する点にある。これはまさに、相手のことばを信じるという状態を成立させる仕組みだと考えられる。この仕組みは試行錯誤的な行動調整を大幅に減らすことに貢献する一方で、ひとたび相手のメッセージの意味を誤解してしまうと、成功できるはずの行動選択肢を先行的に除外してしまうことにもつながっている。

相手の記号の意味を推論する仕組みは記憶容量と相応の認知負荷を必要とする。この問題に対して、人は自分と相手の記号システム（字義通りの意味の集まり）を同化させることで1つの対処としているのではないかと考えられる。この対処方法を実現する仕組みには、自分の行動と共に相手の行動を学習する役割反転模倣の仕組みを考慮することができる。ただしその場合には、相手との間で発生する同音異義語を適切に解消しなければならない。人は、この解消プロセスにおいてリーダー・フォロワー的な解消方法を選択しているかもしれない。また、字義通りの意味と言外の意味の取り決めには相互依存性の問題がある。この相互依存関係において、言外の意味は仮説的に運用され、字義通りの意味の決定に伴って適宜変更されていくので

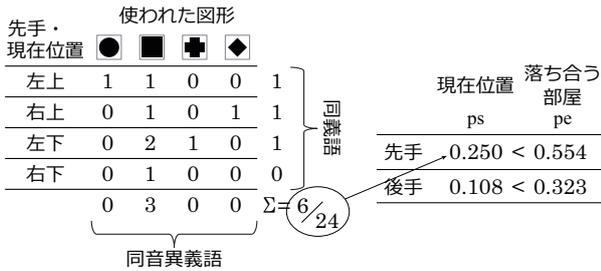


図8 現在位置に対して使われた記号の頻度分布(左)と曖昧度による言外の意味の推定(右)。12ラウンドを対象に分析し、そのうちの8ラウンドが先手だったケース。

はないかと考えられる。この具体的な仕組みの解明に向けて、本稿では扱えなかった、言外の意味を推定・学習する仕組みを検討することが今後の課題である。

付録

A 記号システムの曖昧度に基づく言外の意味の推定方法

部屋と記号の対応関係から以下の手順で言外の意味を推定した。まず、分析対象にするラウンド期間をプレイヤーごとに先手・後手に分ける。ここで、それぞれのラウンド数が2ラウンド以上あれば、部屋と記号の対応関係についての曖昧度を計算する。先手・後手に分けたデータを使って、使用した記号と現在位置(移動前の部屋)および落ち合う場所(移動後の部屋)との頻度分布を作成する。図8左には、一例として12ラウンドを対象にして、あるプレイヤーが先手で現在位置に対して使った記号の頻度分布を示した。この頻度分布において、同義語と同音異義語の数を足し合わせ(図では6)、これを最大値である24で割った値を曖昧度とする。ここで最大値が24になるのは、例えば同義語であれば1つの部屋に対して全ての記号が使われた場合に、その数を3とカウントするためである。先手・後手の場合でそれぞれ現在位置と落ち合う部屋に対する曖昧度を計算し、その大小関係を比較する(図8右)。曖昧度が低い方をそのプレイヤーが割り当てている言外の意味と推定する。図8の場合には、先手・後手ともに現在位置へ意味付けていることが推定される。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(A)「意図共有と意味創造を伴うコミュニケーション創発の進化的構成論による研究」/課題番号 26240037 の助成を受けた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- [1] Tomasello, M.: *Constructing a Language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition*, Harvard University Press (2003)
- [2] Frith, U.: *AUTISM: Explaining the Enigma*, Blackwell (1989).
- [3] Tomasello, M.: *The new psychology of language: Cognitive and functional approaches to language structure*, Vol. 1, Psychology Press (2014).
- [4] Grice, P.: *Studies in the Way of Words*, Harvard University Press (1989).
- [5] Carston, R.: *Thoughts and Utterances: The Pragmatics of Explicit Communication*, Blackwell (2002).
- [6] Galantucci, B.: Experimental semiotics: A new approach for studying communication as a form of joint action, *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 393-410 (2009).
- [7] Scott-Phillips, T. and Kirby, S.: Language evolution in the laboratory, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 14, No. 9, pp. 411-417 (2010)
- [8] Galantucci, B.: An experimental study of the emergence of human communication systems, *Cognitive science*, Vol. 29, No. 5, pp. 737-767 (2005).
- [9] Scott-Phillips, T., Kirby, S., and Ritchie, G.: Signalling signalhood and the emergence of communication, *Cognition*, Vol. 113, No. 2, pp. 226-233 (2009).
- [10] Konno, T., Morita, J., and Hashimoto, T.: Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks, in Yamaguchi, Y. (Ed.), *Advances in Cognitive Neurodynamics III*, Springer, pp. 453-460 (2013).
- [11] 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬: 言語的コミュニケーションシステムの創発に関する実験的アプローチ, 計測と制御, Vol. 53, No. 9, pp. 801-807 (2014).
- [12] 寺田 和憲, 山田 誠二: 適応アルゴリズム理解のための認知モデル, 日本認知科学会第30回大会予稿集, pp.84-91 (2013).
- [13] Morita, J., Konno, T., and Hashimoto, T.: The role of imitation in generating a shared communication system, *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012)*, pp. 779-784 (2012).
- [14] 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回大会予稿集, pp. 18-24, (2013).
- [15] Hashimoto, T., Konno, T., and Morita, J.: Dividing Roles and Ordering Information Flow in the Formation of Communication Systems: The Influence of Role Reversal Imitation, in Liljenstrom, H. (Ed.), *Advances in Cognitive Neurodynamics IV*, 4 pages, Springer (in printing).
- [16] 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬: 記号コミュニケーションシステムにおいて言外の意味を成立させるメカニズムの計算モデルによる検討, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014 (SSI2014), pp. 401-406, (2014).
- [17] Sidman, M.: Symmetry and equivalence relations in behavior, *認知科学*, Vol. 15, No. 3, pp. 322-332 (2008).
- [18] 津田 一郎: *ダイナミックな脳 —カオスの解釈*, 岩波書店 (2002).