

# 記号の意味推定に応じた行動修正のメカニズムが 集団での共通語彙の形成に果たす役割の解明

## The role of behavioral modification mechanisms in formation of common vocabulary in population according to the interpretation of symbols

金野 武司<sup>†</sup>, 村上 萌美<sup>‡</sup>

Takeshi Konno, Moemi Murakami

<sup>†</sup> 金沢工業大学 工学部 電気電子工学科, <sup>‡</sup> NEC ソリューションイノベータ

<sup>†</sup> Kanazawa Institute of Technology, College of Engineering, Electrical and Electronic Engineering,

<sup>‡</sup> NEC Solution Innovators, Ltd.

konno-tks@neptune.kanazawa-it.ac.jp, b1515576@planet.kanazawa-it.ac.jp

### 概要

人間の言語には非常に多くの語彙があり、かつその語彙の意味は集団で共有されている。中央集権的な仕組みがないにも関わらず、人間は局所的なコミュニケーションを繰り返して、共通の語彙を持った言語を創り出す能力を持っている。本研究では、記号のやり取りを通じて協調的な調整課題に取り組むゲーム枠組みを用いてその計算モデルを構築し、計算機シミュレーションによって集団で共通の記号システム（人工言語）が形成されるメカニズムを調べた。結果、記号の意味推定に応じた行動修正の仕組みか、あるいは他者の記号の使い方と行動の仕方を模倣する仕組みがあれば、集団で同一化した記号システムが形成されることを確認した。

キーワード：実験記号論，メッセージ付きコーディネーションゲーム，語用論，役割反転模倣，計算モデル

### 1. はじめに

人間の言語コミュニケーションには非常に多くの語彙が存在する。この語彙の多様性が、人間の創造的な文化を支えているのは言うまでもない。しかしこれらの語彙が、特に中央集権的な仕組みを持たない状態で、いかにして生成・共有されるようになったのかについては、未だ未解明な部分が多い。Baronchelliら[1]は、Naming Gameというゲーム的枠組みを使った計算機シミュレーションによって、そのメカニズムの解明に迫っている。このゲームでは、1つのオブジェクトに対して多人数が名前（ことば）をつける状況を考える。結果として、集団全体がそのオブジェクトを同じ名前と呼ぶようになるには、二者間で話し手と聞き手が固定され、話し手が作り出した呼び名を聞き手は一方的に受け入れる仕組みが必要とされる<sup>1</sup>。

この Naming Game は語彙形成の重要な側面を捉えてはいるが、これに加えて我々は、ことばと行動の結びつきに着目する。なぜなら、ことばの持つ主要な機能は、ことばによって相手の行動に影響を与えることにあるからである [2]。本研究の目的は、ことばと行動が結びつくゲーム的状况において、集団での共通語彙の形成に必要とされるメカニズムを明らかにすることである。

### 2. 方法

ことばと行動を結びつけるゲーム的状况として、我々はメッセージ付きコーディネーションゲーム（図1）を用いた。これは二人のプレイヤーが2×2の4つの部屋に配置された自身の駒を、相手と同じ部屋に移動させるゲームである。1回のラウンドで、駒はお互いの配置がわからない状態でランダムに配置され、プレイヤーは上下左右にのみ1度だけ駒を移動させる。移動の結果はラウンドごとに開示され、次のラウンドでは互いの駒がランダムに再配置される。この条件だけではラウンドを繰り返しても駒が一致する確率は1/2にしかないが、プレイヤーは駒を移動させる前に、4つの簡単な図形（記号）を相手と任意のタイミングで交換することができる。このため、プレイヤーは先手・後手を調整し、先手が自身の現在位置を記号で伝え、後手がそれに応じて二人が落ち合うことのできる部屋（行き先）を伝えれば、安定して駒を同じ部屋に移動させることができるようになる。あらかじめ意味が定

<sup>1</sup>文献においては計算モデルの仕組みが提示されているのみであるが、我々の追試において、この仕組みがなければ集団の命名が1つに収束しないことが確認されている。

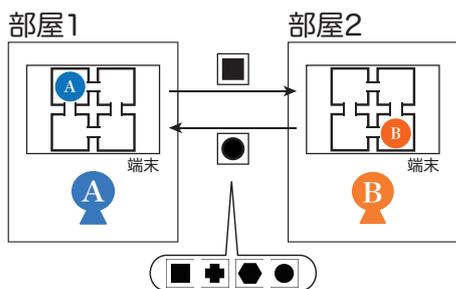


図1 メッセージ付きコーディネーションゲーム

められていない記号が、開示される結果の確認を通じて駒の移動（行動）と対応づけられていく。

## 2.1 計算モデル

我々はこのメッセージ付きコーディネーションゲームを使った人どうしの認知実験の結果を基に、二者間で共通語彙を形成することのできる計算モデルを構築した [3]。この計算モデルは、記号と部屋の位置の対応関係（語彙表）と共に、自身の駒の移動前の部屋の位置と相手から受け取った記号の組み合わせに対する自身の駒の移動先の対応関係（行動表）の2つを学習する。また、語彙表を使って相手から受け取った記号に対応する部屋の位置を推定し、それによって行動表の修正を実際の行動（駒の移動）前に行なう仕組み（これを行動前修正の仕組みと呼ぶ）を持つ。これによって、冒頭で指摘した、他者のことば（記号）が自身の行動選択に影響する仕組みが実現される。

この仕組みが機能する具体的事例を挙げる。例えば図1に示すような対角の駒の配置で先手（A）から■が送られたとする。後手（B）がこの記号を正しく「左上にいる」という意味に解釈した時、元々の行動選択としてはその場に留まることが可能性としてあったとしても、その行動をとれば相手と同じ部屋に移動する確率は0であることがわかる。この推定に基づいて、行動選択の際に行動表を書き換えるのが行動前修正である。人間は当たり前前にこの修正を行なっているが、これ（記号の意味を信頼して行動選択の確率を修正すること）こそが、ことばに実行力を備えさせる実体であろう<sup>2</sup>。

語彙表は4つの記号と4つの部屋の間の対応関係（ $4 \times 4$ の表）を、そして行動表は移動前の部屋（4つ）

<sup>2</sup>この仕組みは記号に限ったことではない。ジェスチャや表情がシグナルとして機能し、それが行動の選択確率に影響を与えるのは普通に起こることだからである。本論で記号を介したコミュニケーションを扱うのは、複数の記号と行動の対応関係がシステムとして成立する中で、それが集団で同一化するためのメカニズムを明らかにするためである。

と空を含めた5つの記号、そして移動後の部屋（4つ）の対応関係（ $4 \times 5 \times 4$ の表）を持つ。それぞれの要素は0もしくは1の二値とし、その初期値は全て1とした。これによって、初期状態では記号や行動は等確率で選択された。行動の結果として互いの移動した部屋が一致すると、語彙表および行動表の対応する箇所のみを1とし、それ以外の場所を0にした。これにより、一度成功した事例は同じ状況で必ず再現されるようになっていた<sup>3</sup>。

また、計算モデルには役割反転模倣 [5] に相当する、他者の記号と行動の対応関係を模倣する仕組みがある。これは、先手であれば後手の、後手であれば先手の記号の使い方と移動の仕方を、自身の語彙表と行動表にそれぞれ書き込む。語彙表は移動する部屋的一致／不一致に関係なく模倣し、行動表は成功時のみ模倣する。語彙表を失敗時にも模倣するのは、記号の使い方はたとえ部屋の移動が失敗であっても、その意味づけを継続することがほとんどだからである。実際に、この失敗時の記号の模倣が、ゲーム初期段階での素早い語彙表の形成に貢献し、それが人どうしの実験で観察されるゲームの成功速度をよく再現することが確認されている [4]。この役割反転模倣の仕組みによって、二者の語彙表は同じものになると共に、自身の語彙表を使った相手の記号の意味推定ができるようになる。つまり、前述の行動前修正の仕組みは、この役割反転模倣の仕組みがなければうまく機能しないことになる。

メッセージ送信の先手・後手は、それぞれのプレイヤーが移動前の部屋（4つ）に対応して1から10までの整数を確率的に選択するための表を持ち、数字の小さい方が先手となるようにした（数字が同じだった場合には、便宜上決められたプレイヤー1を先手とした）。表の数値は語彙表や行動表と同様に0もしくは1で構成し、初期値は全て1とした。部屋の移動に成功した時、その数字が選択される確率を1とした（他の数字が選択される確率を0にした）。

## 3. 計算機シミュレーションと実験結果

我々はこの計算モデルを使って多人数環境を構築し、マルチエージェントシミュレーションを実施した。集団（ $N=10$ ）から二体をランダムに選択し、ゲームを60ラウンドを上限にして行なわせ、ゲーム終了後に二体を集団に戻した。これを300回繰り返して、

<sup>3</sup>一般的な強化学習では、行動選択のための価値テーブルは行動頻度の蓄積によって構成され、行動の選択確率の修正は漸近的に行なわれる。しかし、この方法では移動する部屋の一貫率の上昇が、人どうしの実験結果に比べて非常に遅くなることが判明している [3]。

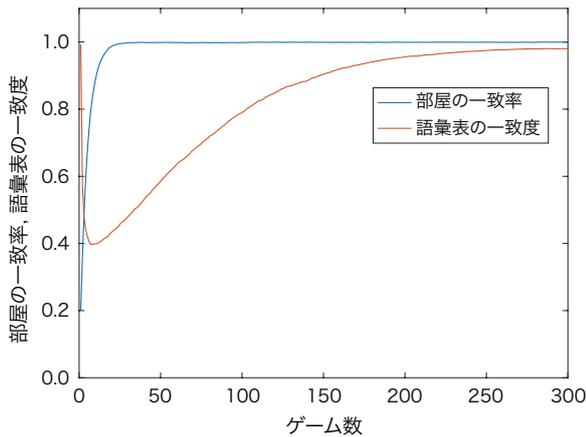


図2 移動した部屋の一貫率と集団全体での語彙表の一貫度の推移

結果的に各エージェントの語彙表が一致するようになるかどうかを調べた。

図2には、300回のゲームを1試行としてこれを1000試行繰り返した時の、ゲーム毎の終わり12ラウンド<sup>4</sup>の移動した部屋の一貫率と集団全体での語彙表の一貫度の平均値の推移を示した。ここで、語彙表の一貫度合い ( $Q_d$ ) は、10体 ( $N$ ) のエージェントそれぞれが持つ語彙表 ( $Q_m$ ) の内積をとり、それを平均化することによって求めた ((1) 式)。

$$Q_d = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j=1,i < j}^N \frac{Q_{mi}}{|Q_{mi}|} \cdot \frac{Q_{mj}}{|Q_{mj}|} \quad (1)$$

図2を見ると、多人数環境においても移動する部屋を一致させることができるようになり、集団での語彙表も同じものになっていくことがわかる。我々が構築した語彙表および行動表の学習は役割反転模倣によって双方向で行なわれるようになっており、ここではNaming Gameで確認されたような一方向的な記号学習は行なわれていない(この計算モデルをモデル0とする)。では、一方向的な学習は不要なのだろうか。

集団での語彙表の同一化過程を調べるため、その影響要素と考えられる行動表を修正する2つの仕組み(行動前修正と役割反転模倣)を取り除き、語彙表のみを互いに模倣し合う計算モデルを作成した(これをモデル1とする)。すると、集団での語彙表の一貫度は図2とほぼ同様の特性でありつつ、移動する部屋の一貫率は0.9程度までしか上昇しない結果となった。これは行動表を修正する仕組みを取り除いたためと考えられる。

表1 移動した部屋の一貫率および集団での語彙表の一貫度が95%に達するまでのゲーム数のモデルごとの違い

モデル	語彙表の反転模倣	行動前修正	成功時の行動表反転模倣	失敗時の行動表リセット	移動する部屋の一貫率	集団での語彙表の一貫度
0 (図2)	双方向	○	○	×	14	191
1	一方向	×	×	×	達しない	176
2	一方向	×	×	×	達しない	75
3	一方向	○	×	×	14	127
4	一方向	×	○	×	15	106
5	一方向	×	×	○	40	75
6 (図3)	一方向	○	○	○	14	120

これを基準にして、語彙表の模倣を一方向的に行なう仕組みに変更してみる(これをモデル2とする)。ここで、一方向的な語彙表の学習は、相手の直前のゲームの成績(前のゲームでの終了間際12ラウンドの移動する部屋の一貫率)を参照して、成績が悪かった方が良かった方の記号の使い方を模倣するようにした。これは、過去のやりとりを観察して、うまくいっている側の記号の使い方をうまくいっていない側が学ぶことを想定した仕組みである。すると、集団での語彙表の一貫度の上昇が早まることが確認された。これを定量化するために、移動する部屋の一貫率と集団での語彙表の一貫度がそれぞれ95%に達するまでのゲーム数を調べた(表1のモデル1と2)。この結果から、一方向の情報の定着は、双方向である場合に比べて95%の一致までにかかるゲーム数を100ゲームほど短くすることがわかる。そこまでかかる75ゲームをエージェント数( $N=10$ )で割れば、個々のエージェントが平均して7回程度のゲームを他者と繰り返すと、集団全体での記号システムが同一化したことがわかる。

続いて、行動表を修正する仕組みの効果について調べた。記号の使い方のみを模倣するモデル2に対して、我々は行動表を修正する仕組みが少なくとも3つあることに気づいた。1つは行動前修正であり、2つ目は役割反転模倣における行動の模倣である。そして3つ目は、部屋の移動に失敗したケースで相手の記号の使い方を模倣する際に、その記号と対応づけられた行動表での行動との対応関係をリセットする仕組み(行動表でその記号に対応づけることのできる行動の数値を全て1にする仕組み)である。この仕組みは、部屋の移動に失敗した際に、記号の使い方を学び直す側がその記号と行動の対応関係を改めて試行錯誤できるようにする。それぞれの仕組みをモデル2に導入して、移動する部屋の一貫率と集団での語彙表の一貫度が95%に達するまでにかかるゲーム数を調べた(表1

<sup>4</sup>駒の配置が4×3=12パターンであることから、これをゲームの成功度を評価する際のラウンド数とした。

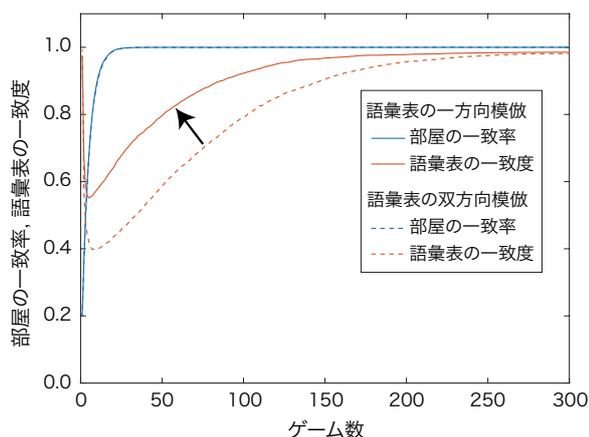


図3 一方向的な記号模倣にした場合の、移動した部屋の一致率と集団全体での語彙表の一致度の推移。図2のグラフを点線で再掲した。

のモデル3から5)。すると、行動前修正と役割反転模倣は語彙表の一致度に関してはほとんど同じになることがわかった(表1のモデル3と4)。失敗時に行動表をリセットするモデル(モデル5)は、語彙表の一致度の上昇を早くする効果があるが、逆に移動する部屋の一致率の上昇が遅くなることがわかった。最後に、語彙表の模倣は一方向にしなから、行動表を修正する3つの仕組み全てを導入した場合(これをモデル6とする)のグラフを図3に示す。

#### 4. 議論

結果的に、Naming Gameにおいて必要とされた話し手から聞き手へ一方向的に情報を定着させる仕組みは、記号と行動の対応関係を学習する本論のモデルでは、集団での語彙表の一致に必須ではないことがわかった。その効果は、同一の語彙表の形成速度を速めることにあった。人間の記号的なコミュニケーションでは、例えば年齢による上下関係のような外部要因を使って、ことばの意味づけや解釈に一方向性を持たせることがあるように思われるが、本論のシミュレーション結果は、そういった一方向性は、集団で同一の記号システムを形成するという観点からは必ずしも必要とされるものではないことが示唆される。ただし残念ながら、その仕組みについてはまだよくわかっていない。

また、この語彙表の同一化過程を調べる中でわかったのは、記号と行動の対応関係を学習する状況において、記号の意味を変更する場合(語彙表を修正する場合)には、それに付随する行動(行動表)も適切に修正する必要があるということである。この修正方法と

して、修正の対象となっている記号に関連した行動との対応関係をリセットし、再び試行錯誤できるようにする仕組み(モデル5)は非常にわかりやすい。これに対して我々が当初想定していなかったのは、行動前修正や役割反転模倣の仕組み(モデル3, 4)が、それと同様の効果を持っていたことである。それぞれは、記号と行動の対応関係のリセットを行いつつ、その行動の成功速度(移動する部屋の一致率の上昇速度)を高める効果を持っているようである。

#### 5. 結論

本論では、他者との協調的な行動調整が必要なゲーム枠組みにおいて、複数の記号と行動との対応関係を形成する実験枠組みを用い、集団でその記号と行動の対応関係を定める記号システムが同一化するためのメカニズムを計算機シミュレーションによって調べた。1つの対象に共通の名前を付けるような先行研究の枠組みでは、記号の学習には一方向的に情報が定着する仕組みが必要とされたが、本論のゲーム枠組みのように行動調整を含む場合には、双方向の模倣であっても集団全体での記号システムは同一化することが確認された。ただし、この原因がどのような仕組みによるのかについてはまだ明らかになっていない。また、一方向的に情報を定着させる仕組みは、集団での同一語彙の形成を早める効果があった。この仕組みは例えば、対人関係における主従や上下などの外的要因を頼りにして実現されていることに相当するかもしれない。

記号の意味を変更する際には、それに付随して行動の対応関係を修正する必要があるが、相手の記号の意味推論に基づいて自身の行動の選択確率を変更する仕組みや、相手の記号の使い方と行動の仕方を模倣する仕組みは、その修正を適切に実施してくれるようである。

#### 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, JSPS 科研費基盤研究(C)「人工言語の共創課題を用いたことばへの気づきの獲得と言語学習効果の検証」/課題番号 16K00205, 及び MEXT/JSPS 科研費「共創言語進化」 #4903, JP17H06383 の助成を受けた。ここに記し謝意を表します。

#### 文献

- [1] Baronchelli, A., M. Felici, V. Loreto, E. Caglioti, and L. Steels (2006): Sharp transition towards shared vo-

- cabularies in multi-agent systems, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P06014.
- [2] Seyfarth, R.M., and D. L. Cheney (2003): Meaning and emotion in animal vocalizations, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1000:32–55.
- [3] 金野 武司, 橋本 敬, 李冠宏, 奥田次郎 (2015): 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, *日本認知科学会第32回大会予稿集*, 477–486.
- [4] 河上 章太郎, 金野 武司 (2017): 失敗事例を含む語彙表形成の仕組みが二者間での記号システムの成立に与える効果, *HAI シンポジウム 2017 予稿集*, P-39.
- [5] Tomasello, M. (2003): *Constructing a Language, A Usage-Based Theory of Language Acquisition*, Harvard University Press.