

# 記号コミュニケーションシステムの形成過程を 再現する解釈学的循環の計算モデル

齊藤 優弥<sup>†</sup>, 金野 武司<sup>‡</sup>

Yuya Saito, Takeshi Konno

<sup>†</sup> 金沢工業大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻, <sup>‡</sup> 金沢工業大学 工学部 電気電子工学科

Kanazawa Institute of Technology, College of Engineering,

<sup>†</sup> Electrical Engineering and Electronics,

<sup>‡</sup> Electrical and Electronic Engineering

b1512436@planet.kanazawa-it.ac.jp, konno-tks@neptune.kanazawa-it.ac.jp

## 概要

本研究では、人間が記号的なコミュニケーションにおいて字義通りの意味と言外の意味（二重の意味）を共有・学習するメカニズムを、メッセージ付きコーディネーションゲームを用いた計算機シミュレーションにより調査した。結果、我々が構築した計算モデルが、他者の言外の意味を同義語および同音異義語の数から推定する方法を持つ場合に、人間どうしの実験データをより良く再現することを確認した。本論ではこの結果に基づき、人間が持つ記号への意味づけとその共有のメカニズムを議論する。

キーワード：実験記号論，意味論，語用論，メッセージ付きコーディネーションゲーム

## 1. はじめに

人は記号に対して何らかの意味付けを行い、それらを使って他者とコミュニケーションを行なっている。その時使われる記号には、記号と直接的に結びついている字義通りの意味と、間接的に結びついている言外の意味がある。例えば、話相手から「郵便受けを見て来て」と発話された時、郵便受けを確認してその中に郵便物が有ったなら、聞き手は相手の発話とその郵便物を持って来てほしいという依頼であったと解釈するであろう [1]。しかし、話し手のその時の意図によっては、発話内容の字義通りに、郵便受けをただ目視して来てほしいという依頼である可能性も有り得る。このように、話し手の意図によって表現の意味が変化する状況に対しても、人は話し手の意図を推定し、その意図に応じて字義通りの意味と言外の意味をそれぞれ理解することができる。ところが、このような二重の意味を創り、他者と二者間で共有するメカニズムは未だ明らかにされていない。

この間に対して金野らは、二者間で字義通りの意味と言外の意味の両方をやりとりするゲーム課題（メッ

セージ付きコーディネーションゲーム）を作成し、人どうしでの実験室実験を実施した [2]。さらに構成論的アプローチに基づいて計算モデルを作成し、計算機シミュレーションを実施した [3]。しかしこの計算機シミュレーションでは、前述のゲーム課題を計算機どうしで行うため、そのシミュレーション結果が人どうしの実験に見られるものと機能的に同様のものであるかはわからない。そこで河上らは、人と計算モデル間でゲーム課題を実施し、計算モデルの機能的妥当性を検証した [4, 5]。これらの研究から、我々は計算モデルと人の中で解釈学的循環 [6, 7] と呼ばれる字義通りの意味と言外の意味の学習プロセスを循環させる構造が形成され、その循環が収束した結果として意味が共有されることに気づいた。しかし、その循環を収束させるメカニズムはまだ計算モデルとして構築できていない。

そこで我々は、解釈学的循環を収束させる2つのメカニズムとして、心的シミュレーションと呼ばれる自身が扱う言外の意味を決定する仕組みと、やりとりされる記号と行動の対応関係から言外の意味を推定する仕組みを考案し、これらによって言外の意味と字義通りの意味の学習が収束することを計算機シミュレーションによって確認した [8]。また、言外の意味の推定には相互情報量を用いる MI 推定と、同義語と同音異義語をそれぞれ数える SH 推定を検討し、SH 推定の方が推定精度が高く、ゲーム課題において相手との移動する部屋の一致率も高くなることを確認した。しかしこれらの推定方法が人どうしでゲーム課題を行った場合での課題成績の推移をどの程度再現するかについては分析していなかった。そこで本研究では、計算機シミュレーションでの結果に対して課題成績による成功群と失敗群への分離を行い、人どうしにおける成功群と失敗群との質的類似性を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験課題

本研究では、実験記号論 [9] に基づいて実験室実験を設計・実施した。実験では、参加者 2 人が情報端末を介して相手と簡単なゲーム課題に取り組む (図 1)。両者は意味が定まっていない単純な 4 つの記号 (■, □, ●, ○) の中から 1 つを選択し、互いにメッセージとして送り合う。その際、画面下に表示される「メッセージ送信」のボタンをタップすることで、選択した記号は即座に相手に届けられ、相手が持つ端末の画面上に表示される。そのため、参加者はメッセージを送る順番によって先手と後手を調整することができた。メッセージ交換後、参加者は端末画面に表示された 4 つの部屋の内のひと部屋にランダムに配置された自分の駒を、その場に留まらせるかもしくは隣接する部屋へ移動させる操作を行い、移動後の部屋を相手と同じ部屋にすることが要求された。この時、参加者は互いに相手の駒がどの部屋に配置されているのかはわからないようになっていた。参加者両者が駒の移動先を決定すると、移動後の結果が両者の端末画面に表示された。そして相手と部屋を一致させることができたら得点として 2 点が加算され、不一致であれば 1 点が減点されるようになっていた。この課題において、メッセージの交換から部屋の移動、結果の確認までを 1 ラウンドとして、次のラウンドでは両者の駒は再びランダムに部屋に配置された。人どうしの実験の場合、1 度の実験で参加者はこれを 60 ラウンド繰り返した。

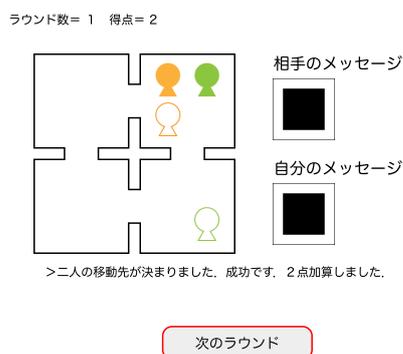


図 1 ゲーム課題中の端末画面の表示一例

このゲーム課題ではメッセージを交換する際に、先手は現在地、後手は両者が共通して選択できる移動先を伝えることができれば、安定して得点を得ることができる。この時、メッセージとして交換する記号の意味には、ただ記号と各部屋を直接的に結びつけた字義通りの意味を取り決めるだけではなく、先手・後手の文脈に応じて、その部屋が「現在地」なのか「移動

先」なのかという言外の意味を取り決めなければならない。

## 3. 計算モデル

前述のゲーム課題に取り組む計算モデルの学習メカニズムは、失敗学習モデル [5] をベースに作成されている。このゲーム課題の中で記号コミュニケーションシステムを形成していくためには、計算モデル内でメッセージの送信タイミング、メッセージ、部屋の位置のそれぞれが決定される必要がある。そのため、我々が構築する計算モデルには、メッセージの送信タイミングを決めるテーブル ( $4 \times 100$ : 現在地  $\times$  送信時刻)、部屋の位置とメッセージの対応関係を学習するメッセージテーブル ( $4 \times 4$ : 部屋の位置  $\times$  記号)、そして移動前の部屋の位置と相手のメッセージに対する移動先の関係を学習する行動テーブル ( $4 \times 4 \times 4$ : 現在地  $\times$  記号  $\times$  行き先) の 3 つが備わる。各テーブルの初期値には 0 から 1 の実数乱数を設定し、確率分布を構成することによってメッセージの送信タイミング、送信するメッセージ、移動先の部屋の位置がそれぞれ決定される。

ゲーム課題に取り組む中で計算モデルは、互いの駒が移動した部屋を一致させることができたとき、該当するテーブル要素に 1 をセットし、それ以外の要素すべてを 0 にするという学習を行う。この方法により、計算モデルは以降のラウンドにおいて成功事例を 100% の確率で再現する。もし移動後の部屋が一致しなかったとしても、メッセージテーブルに関する学習は行われる。メッセージテーブルからは、計算モデルは、字義通りの意味と自身が持つ言外の意味の解釈から、相手が扱う言外の意味がその部屋に「いる」なのか「行く」なのかを推定することができる。そして推定した意味に応じて事前に行動シミュレーションを実行する。その結果から、移動先に対する一致確率の予想に基づいて、行動テーブルの数値を修正する。この、予想に基づいて自身の行動を評価・修正するメカニズムは先行研究 [3] において「先行的行動価値修正」と呼ばれる仕組みである。上記のメカニズムは初期段階における二者間での語彙形成を早める効果があることが確認されている [5]。

### 3.1 解釈学的循環

前述の仕組みを備えた計算モデルを作成し、人と計算モデル間でゲーム課題を実施したところ、参加者は移動先の部屋の一致率をうまく上げていくことができ

なかった [5]. この計算モデルでは、字義通りの意味を学習するために必要な言外の意味が、課題に成功する組み合わせに初期状態から固定されていた. 本来であれば、ゲーム課題に取り組む中で、使われる記号に「この部屋にいる」と「その部屋に行く」のどちらの言外の意味が対応づけられているのかを定めていかなければならない. しかし、この計算モデルでは初期状態から、先手は「この部屋にいる」、後手は「その部屋に行く」をそれぞれ記号に対応づけるように固定されていた. すると、ゲーム課題の初期段階で相手の扱う言外の意味が最適解（ゲーム課題に成功する組み合わせ）と異なっていた場合、計算モデルが学習した字義通りの意味は間違っただけになってしまい、意味を正しく取り決めることができない. つまり、字義通りの意味と言外の意味それぞれの決定は相互依存関係にあり、相手と言外の意味を共有した状態で字義通りの意味を取り決めつつ、課題に対して最適な言外の意味に修正・変更していくプロセスが必要だということである (図 2). ここで述べている相互依存関係こそ解釈学的循環 [6, 7] であると我々は考えている.

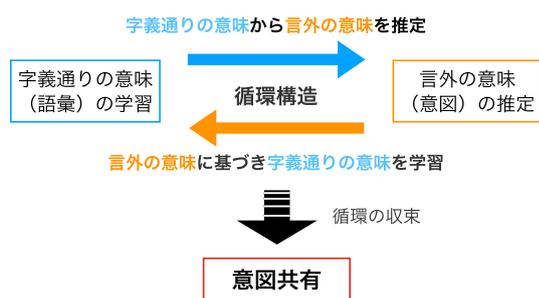


図 2 解釈学的循環と意図共有

### 3.2 解釈学的循環を収束させるメカニズム

解釈学的循環を形成・収束させるためには、主に 2 つの問題を解決しなければならない. 1 つは、自分が送る記号にどのような言外の意味を付与するのか、つまり自分の意図の選択・決定に関する問題、そしてもう一つは、相手がどのような言外の意味を記号に付与しているのかを正しく知らなければならないという問題である. まず、我々が用意したゲーム課題では、たとえ参加者が扱う言外の意味が同じであっても、互いに行き先あるいは現在地を伝え合ってしまうようなことをすれば課題を成功させることはできない. そして相手が扱う言外の意味を正しく知ることができなければ字義通りの意味を決めることもできず、これもまた課題を成功させることができない. 以上 2 つの問題を解決するメカニズムとして、我々は心的シミュレーション [10] と、相手の言外の意味を推定する仕組みを

計算モデルに導入することを提案した [8]. そして 2 つのメカニズムを実装した計算モデルを以降、循環収束モデルと呼ぶ.

#### 3.2.1 心的シミュレーション

心的シミュレーションは、仮想的な意図を形成し、他者の行動を予測する仕組みのことである [10]. 例えるならば、将棋やチェスのようなボードゲームにおいて、相手がどのように駒を動かしてくるのかを予測することである. このような予測は、仮想的に構成された心的なシミュレーションによって実現されていると考えられる. そこで本研究では、計算モデル内で仮想的にメッセージ付きコーディネーションゲームを実施することによって心的シミュレーションを実現する (図 3). また、人が心的シミュレーションを行う際には、それまでに学習した情報を用いてシミュレートしていると考えられるため、計算モデルの場合においても各種テーブルは最新の学習状態を用いることにした. この仕組みによって、計算モデルはゲームを成功に導く言外の意味（先手が現在位置、後手が移動先をそれぞれ伝える）を探し出すことができるようになる」と期待される.

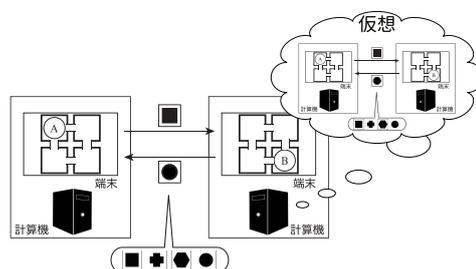


図 3 心的シミュレーション

#### 3.2.2 相手の言外の意味の推定

相手が扱う言外の意味は、心的シミュレーションとは異なり、相手から送られてくる情報を元に推定する必要がある. 相手から送られてくる情報とは、メッセージの記号と送信タイミング、移動前の部屋の位置と移動後の部屋の位置、以上の 4 つである. これらの情報を用いた言外の意味の推定方法として、先行研究 [8] では相互情報量による推定 (以降、MI 推定と呼ぶ) と、同義語と同音異義語の数による推定 (以降、SH 推定と呼ぶ) の 2 つが検討された.

MI 推定は、(1) 式を用いて、メッセージの記号を移動前の部屋  $p_s$  と対応づけた場合と、移動後の部屋  $p_e$  と対応づけた場合それぞれの相互情報量を計算し、情

報量が高い方を相手の言外の意味であると判断する。

$$MI(m|p_x) = \sum_{p_x} \sum_m^n p(m, p_x) \log_2 \frac{p(m, p_x)}{p(m)p(p_x)} \quad (1)$$

where

$$p_x \in \{p_s, p_e\}$$

この推定方法は、ある程度の頻度が蓄積されることで正しく対応関係を推定することができる。そのため、ゲーム初期段階における推定精度は低くなってしまふことが予想される。

SH 推定は、記号と部屋の対応関係について、同義語（複数の記号が同時に1つの部屋を表すケース）と同音異義語（1つの記号が同時に複数の部屋を表すケース）の数を計算する。そしてこの計算を移動前の部屋と移動後の部屋それぞれに対して行い、同義語と同音異義語の数が少ない方を曖昧性が少ない対応関係とみなし、それを相手が扱う言外の意味であると判断する。この推定方法はMI推定と異なり、多くの頻度を蓄積する必要が無いいため、ゲーム初期段階での推定精度がMI推定よりも高くなることが予想される。

#### 4. 推定方法の検証と結果

MI推定とSH推定のそれぞれを循環収束モデルに実装し、MI推定どうしとSH推定どうしでそれぞれ500ペアずつの計算機シミュレーションを行うことによってその効果の違いを調査した。

まず、それぞれの計算モデルのゲームにおける12ラウンドごと<sup>1</sup>の移動する部屋の一致率について、結果を成功群と失敗群に分けたものの推移を図4に示す。これと同時に、図には人どうし（20ペア）でのゲーム結果を成功群13ペア、失敗群7ペアに分けた場合の推移をそれぞれ記載した。ここで、成功群と失敗群は、メッセージを使わずに実現できる一致率の最大値（1/2）よりも有意に高い一致率となったペアを成功群とし、他方を失敗群とした。また、計算モデルの群分けについても人どうしと同様に49-60ラウンドの結果を用いて行なった。

この結果を見ると、SH推定の成功群と人どうしの成功群それぞれの一致率の推移は数値的によく一致する結果となった。これに対してMI推定の成功群は、1-48ラウンドの期間で一致率が他の成功群より低く、その上昇パターンも異なる傾向を示した。失敗群については、人どうしで32ラウンドまで上昇傾向にあっ

<sup>1</sup>このメッセージ付きコーディネーションゲームでは、部屋の初期位置の組み合わせが全12パターンになる。初期位置の偏りが出ないよう、シミュレーションでは12ラウンドですべてのパターンが出現するようにした。そのため、分析では12ラウンドごとの部屋の一致率を見ることにした。

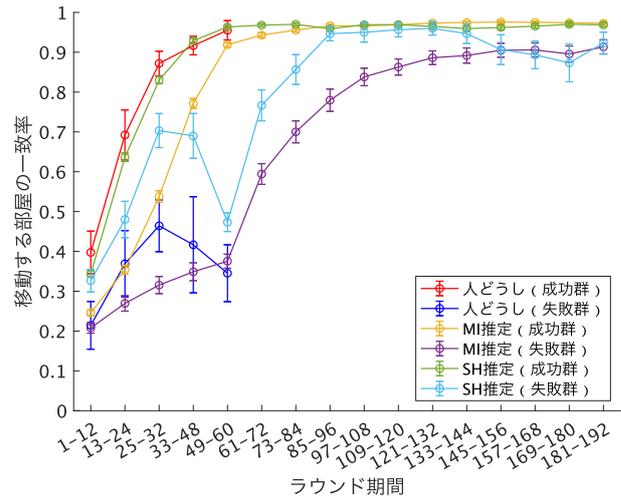


図4 人どうしと循環収束モデル2種の一致率の推移

た部屋の一致率が、33-60ラウンドにかけて低下するという特徴的なパターンが見られ、SH推定の場合においても同様のラウンド期間で部屋の一致率が低下し、SH推定の失敗群と人どうしの失敗群とで同様のパターンが出現した。

次に、それぞれの推定方法がどの程度相手の言外の意味を推定できていたのかを確認する。計算機シミュレーションの結果から、計算モデルが用いていた言外の意味と推定結果を比較し、一致していない場合を0、一致していた場合を1として、12ラウンドごとの推定精度を0から1の範囲で算出した。MI推定ならびにSH推定の12ラウンドごとの精度の推移は図5のようになった。

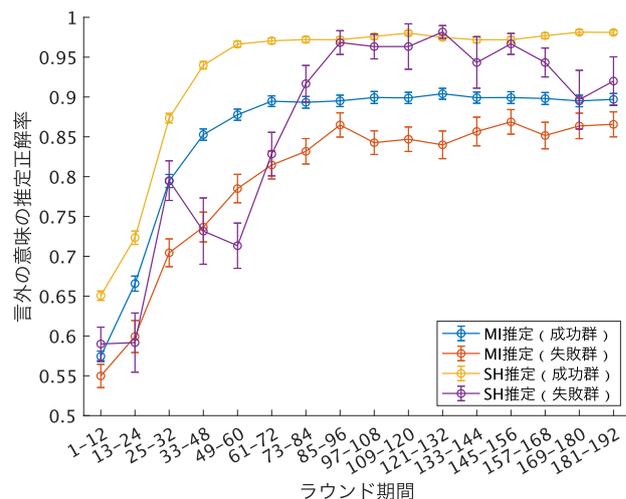


図5 12ラウンドごとの言外の意味の推定精度の推移

MI推定とSH推定それぞれの成功群に注目すると、SH推定の推定精度はMI推定のものよりも高い精度を終始維持し続けていることがわかる。次にSH推定

の失敗群に注目すると、25-32 ラウンドでは推定精度が急激に上昇しているが、その後の 33-60 ラウンドでは推定精度が低下してしまっている。また、61-120 ラウンドは上昇した推定精度が 121-192 ラウンドでは不安定になり低下してしまっている。この SH 推定失敗群について、部屋の一致率の推移と推定精度の推移のパターンを見比べた時、部屋の一致率と言外の意味の推定精度それぞれにおける低下タイミングが一致していることがわかる。

## 5. 議論

本研究では循環収束モデルを用いて、MI 推定と SH 推定のそれぞれで 500 ペアずつの計算機シミュレーションを実施し、移動する部屋の一致率の推移を人どうしでの実験と同様に成功群と失敗群に分けて分析を行なった(図 4)。すると成功群については、SH 推定の部屋の一致率の推移は人どうしのもとの数値的に近い結果となったが、MI 推定は 1-60 ラウンドにおける一致率の上昇が他よりも低い状態が続く傾向を示した。これは、言外の意味の推定精度について SH 推定と MI 推定を比較した時、SH 推定の方が高い推定精度であったからだと考えられる。また、MI 推定の特徴として、記号と行動の対応関係についてある程度の頻度が積もらなければ正しい推定を行うことができないため、頻度の積もっていないゲーム初期段階では SH 推定よりも低い推定精度となってしまう、その後も推定精度は SH 推定より低い状態になったのではないかと考えられる。

失敗群については、SH 推定の場合のみ、人どうしの結果と同様に 33-60 ラウンド間で部屋の一致率が低下するというパターンを示した。SH 推定は MI 推定と異なり、記号と行動の対応関係について部分的な整合性を基に他の記号と行動の対応関係をも推定するため、一部の推定が間違っていた場合にそれが他の推定結果にも影響を及ぼし、全体的に間違った推定結果となる性質を持っている。これによって SH 推定は素早く部屋の一致率を上昇させることができる反面、部分的な推定の間違いによる特徴的なパターンが出現したのではないかと我々は考えている。

MI 推定と SH 推定それぞれについて、人どうしの実験結果から見られる移動する部屋の一致率のパターンとの類似性に注目すると、MI 推定よりも SH 推定の方が人どうしのパターンに近いことがわかる。このことから、人は字義通りの意味と言外の意味を学習する過程で形成される循環構造を取束させるメカニズムとして、部分的な整合性から曖昧性の少ない対応関係

を選択することによって相手が扱う言外の意味を推定する、SH 推定に近いメカニズムで推定を行なっていると考えられる。

## 6. むすび

本研究では、メッセージ付きコーディネーションゲームを用いて、人が字義通りの意味と言外の意味を他者と共有・学習するメカニズムを調査した。特に我々は、字義通りの意味と言外の意味を学習する過程で形成される循環構造(解釈学的循環)を持つ計算モデルについて、心的シミュレーションのメカニズムと相手が扱う言外の意味を推定するメカニズムがその循環を取束させることを計算機シミュレーションによって確認した。さらに、計算モデルは言外の意味の推定に同義語・同音異義語の数をを用いる方法をとることで高い推定精度を実現し、課題に成功した群と失敗した群共に、人どうしでメッセージ付きコーディネーションゲームを行なった場合の課題成績の推移パターンに類似したパターンが示されることを明らかにした。

## 謝辞

本研究は、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] Frith, U.: AUTISM: Explaining the Enigma, *Blackwell Publishing*, pp. 219-220(邦訳) (1989).
- [2] 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).
- [3] 金野 武司, 橋本 敬, 李 冠宏, 奥田次郎: 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, pp. 477-486 (2015).
- [4] 河上 章太郎, 金野 武司: 記号コミュニケーションにおいて言外の意味を推定する計算モデルの人への効果, 日本認知科学会第 34 回大会予稿集, pp. 1209-1213 (2017).
- [5] 河上 章太郎, 金野 武司: 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 プロシーディングス* (2017).
- [6] 津田 一郎: ダイナミックな脳-カオスの解釈, 岩波書店 (2002).
- [7] Carston, R.: Thoughts and Utterances: The Pragmatics of Explicit Communication, *Blackwell*(2002).
- [8] 河上 章太郎, 金野 武司: ことばの言外の意味の修正過程における字義通りの意味の解釈破棄の効果 実験室実験と計算機シミュレーションによる検証 *HAI シンポジウム 2020 オンライン予稿集*, pp. P-35 (2020).
- [9] Galantucci, B.: An experimental study of the emergence of human communication systems, *Cognitive science*, 29(5), pp. 737-767 (2005).
- [10] Gordon, R.: Folk Psychology as Simulation, *Mind and language* 1, pp. 71-158(1986).