

## 人工言語の共創実験における二者間での移動情報量の分析

Transfer entropy across individuals in co-creation experiment of artificial language

金野 武司\*<sup>1</sup> 森田 純哉\*<sup>1</sup> 橋本 敬\*<sup>1</sup>  
 Takeshi Konno Junya Morita Takashi Hashimoto

\*<sup>1</sup>北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科  
 School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

In order to study the formation of symbol communication systems, we conducted an experiment of co-creation of artificial language to solve a coordination task. We focused especially on a process of establishment of role division utilizing turn-taking. In this paper, we analyzed the transfer entropy between the messages and the actions by individuals. Consequently, we confirmed that the transfer entropy reduced significantly across individuals in the successful pairs under the low uncertainty between the first sender's messages and the actions. In the process, we found that the second sender changed the formation of messages depending on the first sender's messages, and uncertainty of the second sender's actions was reduced after the first sender's reduction. These show a concrete process of the establishment of the role division. Further qualitative exploration based on the process suggests that entraining the same semantic and syntactic rules may contribute to the establishment of role division.

## 1. はじめに

人の言語的なコミュニケーションは、発することばが持つ字義どおりの意味だけではなく、そのことばを発する状況や文脈、あるいは意図に応じて、様々に言外の意味を込めるところに大きな特徴がある [Tomasello 03]. このような言語的なコミュニケーションシステムの成立過程を調べる方法に、人工言語の共創実験がある [Galantucci 09, Scott-Phillips 10]. これは、通常のコミュニケーションメディアを制約した状況で、用意された課題を解くための人工言語を二人で作成してもらうという実験である。

先行研究では、暗黙的な行動傾向や認知傾向の偏りが互いの共通基盤になり、それが記号的なコミュニケーションシステムの形成を成功に導く傾向にあることが報告されている [Galantucci 05, Scott-Phillips 09]. しかし金野ら [Konno 12] は、言外の意味の成立までを含めた記号コミュニケーションシステムの成立過程では、前述の傾向は、字義どおりの意味の成立には寄与しても、言外の意味の成立には寄与しないことを報告している。代わりにわかってきたのは、記号への意味付けに同義語や同音異義語を作らないような明示的な記号の使い方の傾向（記号使用に関する曖昧性を低くする傾向）があると、言外の意味が成立しやすくなることである [金野 13]. しかし、記号使用に関する曖昧性の低さは個人的な持つ特性であり、それがどのようなプロセスを経て二者間の関係である言外の意味の成立に至るのかは良く分かっていない。

そこで本論では、記号と行動の対応関係の曖昧性について、個人内と二者間の両方を同じ尺度で測ることのできる情報量の観点から分析し、個人の持つ特性が、どのようなプロセスで二者間の持つ特性へとつながっていくのかを明らかにする。

## 2. 実験課題と方法

## 2.1 課題

実験に参加する二人は、別々の居室から端末を操作して、相手と人工的な言語を作成する。端末の画面には 2×2 の部屋が

連絡先: 〒 923-1292 石川県能美市旭台 1-1,

{t-konno,hash}@jaist.ac.jp

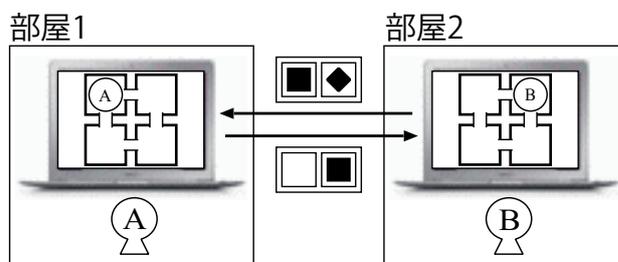


図 1: 実験環境

表示されており、その部屋の 1 つに自分のエージェントが配置されている。相手のエージェントは自分とは異なる部屋に配置され、その位置は分からないようになっている。二人は、それぞれのエージェントを同じ部屋に移動させる調整ゲームに取り組む (図 1)。ここで二人は 6 つの図形 (□, ■, ◻, ◼, ◾, ◿) を 2 つ組み合わせたメッセージを交換する。このメッセージ交換は非同時に行なわれるので、メッセージの先手・後手 (ターンテイク) を調整することができる。メッセージを交換したら、二人はそれぞれのエージェントを移動させる (留まることも可)。ただし、エージェントを斜めの部屋に移動させることはできない。この制約によって、二人は互いのメッセージを利用して、行き先を調整し合う必要が生じる。エージェントを移動させた後で、互いの移動結果が開示される。ここまですべてを 1 ラウンドとして、二人のエージェントは再び別々の部屋にランダムに配置され、同じ手順を繰り返す。参加者はこの繰り返しの中でメッセージの先手・後手を調整しながら、記号の意味を相手と取り決めていく。

このゲームは、先手が現在位置を伝え、後手がそれに応じて互いに行ける部屋を行き先として指定する役割分担を行なうと安定して移動する部屋を一致させることができるようになる。ここで重要なのは、同じ記号を送っていても、それが先手・後手に応じて現在位置なのか行き先なのかといった意味が変わることである。つまりこのゲームは、記号が指し示す字義どおりの意味と共に、同じ記号が異なる意味を伝える仕組み (言外の意味を取り決めること) が要求されるようになっている。

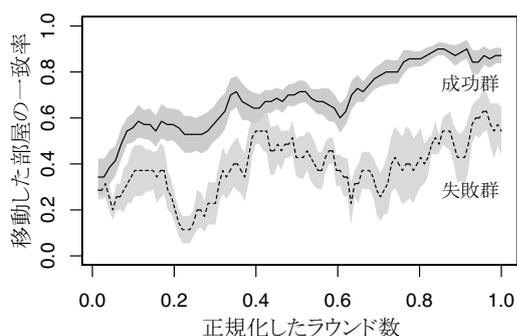


図 2: 移動した部屋の一致率の推移. 灰色の領域は標準誤差.

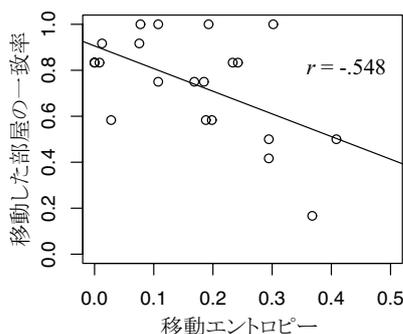


図 3: 先手のメッセージから先手の行き先を予測する場合の移動エントロピー (始め 12 ラウンド) と, 移動した部屋の一致率 (終り 12 ラウンド) の散布図.

## 2.2 参加者

実験には 21 ペアが参加した. 参加者の年齢は 22~37 歳 ( $M = 25.5, SD = 3.0$ ) で, いずれも北陸先端科学技術大学院大学の院生, 研究員および助教であった.

## 2.3 手続き

参加者は人工言語の作成に 1 時間取り組んだ. ゲーム中, 二人が同じ部屋に移動すると 2 点が加点され, そうでないときには 1 点が減点された. ただしこの得点はマイナスにはならない. この得点が 50 点を超えたら, その時点でゲームを終了させた.

## 3. 結果: 移動エントロピーの分析

21 ペア中 14 ペア (66.7%) が 1 時間以内に 50 点に到達した. 要したラウンド数は, 平均 54.8 ラウンド ( $SD = 25.1$ ) だった. 50 点に到達したペアを成功群, 達しなかったペアを失敗群とする. それぞれの群で, 移動した部屋の一致率の推移を図 2 に示す. 一致率は 5 ラウンドごとに計算した. また, 参加者全体の推移を確認するためにラウンド数は正規化している.

成功群の一致率は大きく 3 つの期間で段階的に上昇しているが, 失敗群にはそのような特徴は見られない. この一致率の変化の中で, メッセージと行動の対応関係がどのように推移したのかを, 移動エントロピー ( $T$ ) [Schreiber 00] を使って分析する (式 (1)).

$$T_{I \rightarrow J} = \sum p(j_{n+1}, i_n, j_n) \log \frac{p(j_{n+1} | i_n, j_n)}{p(j_{n+1} | j_n)}, \quad (1)$$

ここで,  $i, j$  は系列  $I, J$  に属する要素であり,  $p(j_{n+1}, i_n, j_n)$  は  $j_{n+1}, i_n, j_n$  の同時確率を,  $p(j_{n+1} | j_n)$  は  $j_n$  であるときに  $j_{n+1}$  になる条件付き確率を表す. この移動エントロピーは,

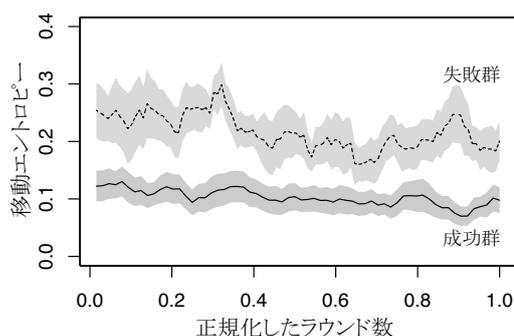


図 4: 先手のメッセージから先手の行き先を予測する場合の不確かさの推移. 灰色の領域は標準誤差.

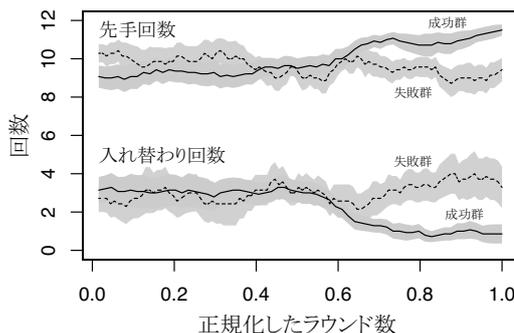


図 5: 先手が多かったプレイヤーの先手回数, および先手・後手の入れ替わり回数の推移 (12 ラウンドごと). 灰色の領域は標準誤差.

$I$  と  $J$  という 2 つの系列があったとき,  $J$  の過去の系列から  $J$  の次の状態を予測する不確かさに比べて,  $I$  の過去の系列を加えた場合に, 相対的に変化しない不確かさの程度を測ることができる.

この移動エントロピーを使って, まず個人内でのメッセージと行動の対応関係の不確かさとして, 先手のメッセージから先手の行き先を予測する場合を分析した. すると, 始め 12 ラウンドの移動エントロピーは, 終り 12 ラウンドの移動した部屋の一致率と有意な負の相関を示した ( $r = -.548, p = .01$ ). この散布図を図 3 に示す. この結果は, 記号使用に関する曖昧性の低さが言外の意味の成立と有意に相関するというこれまでの結果と対応する [金野 13]. さらに, この移動エントロピーの 12 ラウンドごと<sup>\*1</sup>の推移 (図 4) を見ると, そこでは成功群と失敗群に大きな開きがあり, それがゲーム中にはほとんど変化しなかったことが見てとれる. これは, 先手自身のメッセージと行動の対応関係の確実性が, 成功のための基礎的な要件になっていることを示唆している.

交換されるメッセージの先手・後手はゲーム中に調整されるため, プレイヤーが入れ替わる場合がある. そこで, 12 ラウンドごとに先手になることが多かったプレイヤーの先手回数 (図 5 上) と, 先手・後手の入れ替わり回数 (図 5 下) を確認した. これを見ると, ラウンドの始めから先手は一方のプレイヤーに偏ることが多いが, ゲームの中盤までは成功群, 失敗群ともに先手・後手の入れ替わりが起こっていたことが分かる. このため, 先ほどの先手自身のメッセージに対する行動の不確かさは, 一方のプレイヤーにのみ当てはまるのではなく, 先手になったプレイヤーの持つ要件として理解すべきものであると言える.

\*1 部屋とメッセージの対応関係を分析するため, 二人の初期配置の組み合わせの総数と同じラウンド数とした.

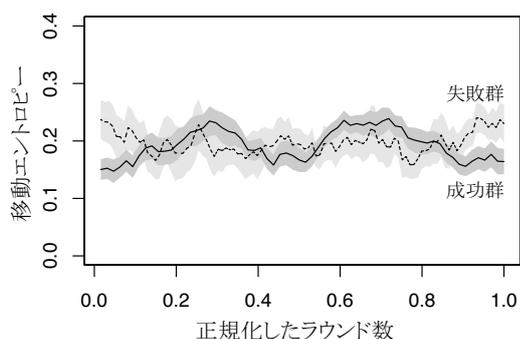


図 6: 後手の初期位置と先手のメッセージから後手のメッセージを予測する場合の不確かさの推移。灰色の領域は標準誤差。

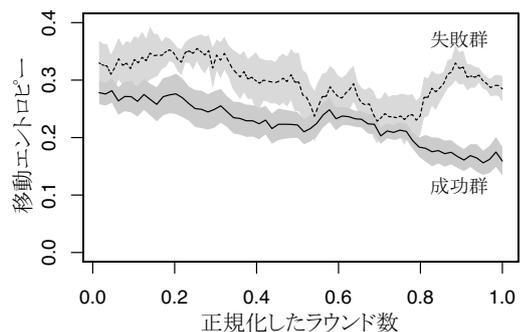


図 7: 先手の初期位置と後手のメッセージから先手の行き先を予測する場合の不確かさの推移。灰色の領域は標準誤差。

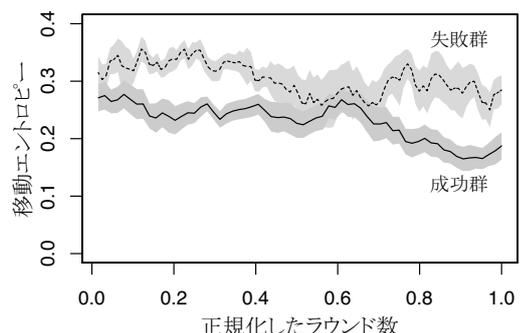


図 8: 後手の初期位置と先手のメッセージから後手の行き先を予測する場合の不確かさの推移。灰色の領域は標準誤差。

続いて、二者間で先手と後手の行き先の不確かさがどのように推移するのかを分析した。先手の現在位置に対するメッセージの確実さが、後手のメッセージ作成にどのような影響を与えるのかを検討するため、後手の初期位置と先手のメッセージから後手のメッセージを予測する場合の移動エントロピーの推移を調べた(図6)。これを見ると、後手は先手のメッセージに対して、成功群だけが自らの不確か性を上げる過程を二度(正規化したラウンド数で0.3のあたりと0.6を過ぎたあたりで)起こしている。これらのタイミングは一致率の段階的な上昇と対応しているように見える。このことから、成功群では後手がメッセージの作り方を変えたことで、システムの形成が進展したのではないかと考えられる。

メッセージの不確か性の推移に対して、先手・後手の行き先の不確か性はどのように推移したのだろうか。図7は先手の初期位置と後手のメッセージから先手の行き先を予測する場合の移動エントロピーの推移であり、図8は、後手の初期位置と先手のメッセージから後手の行き先を予測する場合の移動エント

ロピーの推移である。それぞれの成功群の推移を比較すると、先手の行き先についての不確か性は全期間を通じてなだらかに減少しているが、後手の行き先については、中盤までは変わらずに終盤になってから減少しているように見える。この結果は、先手の行き先の不確か性が低くなってから後手の行き先が決まってくることを示唆しているのではないかと考えられる。

以上をまとめると、記号コミュニケーションシステムの成立過程は以下のように構成されていたと考えられる。

1. 基礎的な特徴として、先手自身のメッセージに対する行動の不確か性が低い
2. 先手のメッセージに応じて後手がメッセージの作り方を修正する
3. その修正に伴い、後手のメッセージに対する先手の行動の不確か性が低減される
4. 先手のメッセージに対する後手の行動の不確か性が低減される

#### 4. 議論

このゲームでは、先手が現在位置を伝え、そして、両者が行ける場所を後手が伝える役割分担の方法を使うと、安定して移動する部屋を一致させることができる。ゲームでは、成功群においてのみ、先手のメッセージに応じた後手のメッセージ作成の修正が行なわれ、さらにゲーム終盤で一方のプレイヤーだけが先手を担うようになっていた。また、メッセージに対する行動の不確か性は同時に低下するのではなく、先手・後手の順で低下していた。これらは、成功群がまさに役割分担をゲーム中に取り決めていたことを示していると考えられる。先行研究[Galantucci 05, Scott-Phillips 09]では、こういったプロセスを定性的に記述するのみであったが、本論のような課題において移動エントロピーによる分析を用いれば、メッセージと記号の関係性が、個人内と二者間でどのように推移するのかを定量的に確認することができる\*2。

役割分担までの成立プロセスにおいて興味深いのは、個人内での情報量である先手のメッセージに対する行き先の確実さが、どのようなメカニズムで二者間の関係である言外の意味の成立を導くのかということである。定量的な分析によって明らかになる役割分担までの成立プロセスは、そのメカニズムに対してどのような示唆を与えるだろうか。実験の分析結果を基にすると、前記のプロセスは次のような4つのステップで構成されていると考えることができる。まず、先手のメッセージに対する行動の確実さが、後手に対する先手のメッセージの意味を明確にする(Step1)。この意味の明確化が後手のメッセージ作成の修正を促し、先手に対する後手の意味を明確にする(Step2)。結果として、後手のメッセージに対する先手の行動の不確か性が下がることになり、二者間での役割分担が明確化する(Step3)。その明確化に伴って、先手のメッセージに対する後手の行動の不確か性が低下する(Step4)。

このプロセスにおいて考えるべき重要な点の1つは、ゲームの中盤までは先手・後手が入れ替わっていたということである。そのため、プレイヤーは自分が先手になる場合と後手になる場合のそれぞれで、視点の切り替えが要求されていたのではないかと考えられる。このとき、自分本位に意味を作成するのではなく、相手から自分のルールがどう理解されるかという視点でメッセージを作成・修正できたペアが、システムの形成に成

\*2 ただし、先行研究は記号そのものの創発過程に注目していることから、本論のようにメッセージを離散的な確率分布として表現することが難しいという問題がある。

功したのではないだろうか。この観点では、例えば自分が作成したルールが後手に理解されていないにも関わらず、まったくルールを変更しなかったペア (Step1 での失敗事例) や、先手のルールを理解しながらも、自らのルールを修正しなかったペア (Step2 での失敗事例) などが、視点取得の失敗事例に該当するのではないかと考えられる。

Step1 での失敗事例には、例えば先手のルールとして、左側のカラムに 4 つの部屋に対応する記号を割り当て、右側のカラムに自分がいる部屋の対角にあたる部屋の位置に対応する記号を配置した事例があった。このような事例では、メッセージに対する行動の不確実性は低かったにも関わらず、作成されたルールが複雑だったために、後手にはまったく理解されなかった。また、Step2 での失敗事例には、後手が先手のメッセージのルールを理解したにも関わらず<sup>\*3</sup>、後手が先手とは異なるルール体系を維持したケースがあった。先手は自分のルールを持つ枠組みで相手のルールを理解しようとする傾向があると考えられるので、相手が自分とはまったく違うルール体系でメッセージを返してくると、それを理解することが難しくなっていたようである。

他者と記号の意味を取り決めることで解くことのできる調整課題では、記号の意味を自分本位に取り決めることはできない。このため、他者視点に立ったメッセージの意味の作成、すなわち間主観的な意味の作成が必要とされることは言うまでもない。このとき、我々が重要視するのは、間主観的な意味の作成がどのような特徴としてメッセージに表われるかという点である。実験での失敗事例から我々は、相手と同じルール体系を作る傾向が重要な役割を果たしているのではないかと考えている。記号的なコミュニケーションでは、記号には字義どおりの意味だけではなく言外の意味が込められる。このとき、共有された字義どおりの意味が同じセマンティクス・シンタックスによって構成されていることで、人はその記号に込められた言外の意味を推論しやすくなると考えられるからである。

## 5. 結論

人の記号的なコミュニケーションシステムの形成過程を人工言語の共創実験によって観察すると、そこには、一方が持つメッセージに対する行動の確実さを足掛かりにしながら、他方がメッセージの作り方を修正することで字義どおりの意味を成立させ、それによって互いのメッセージに対する行動の不確実さを低減させて役割分担を成立させるというプロセスがあった。

本論のような情報論的な分析によるプロセスの解明は、メカニズムそのものを説明するものではないが、そこで働くメカニズムの推定に大きな力を発揮する。今後は、明らかになった具体的なプロセスを基にして、そのメカニズムを解明していくことが課題である。

## 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」(領域番号 4103) / 課題番号 21120011 を受けて行われた。

## 参考文献

- [Galantucci 05] Galantucci, B.: An experimental study of the emergence of human communication systems, *Cognitive science*, Vol. 29, No. 5, pp. 737–767 (2005)
- [Galantucci 09] 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)
- [Konno 12] 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 (2012)
- [金野 13] 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬: 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, III 8-1 (2013)
- [Schreiber 00] Schreiber, T.: Measuring information transfer, *Physical Review Letters*, Vol. 85, No. 2, pp. 461–464 (2000)
- [Scott-Phillips 09] Scott-Phillips, T., Kirby, S., and Ritchie, G.: Signalling signalhood and the emergence of communication, *Cognition*, Vol. 113, No. 2, pp. 226–233 (2009)
- [Scott-Phillips 10] Scott-Phillips, T. and Kirby, S.: Language evolution in the laboratory, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 14, No. 9, pp. 411–417 (2010)
- [Tomasello 03] Tomasello, M.: *Constructing a Language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition*, Harvard University Press, Cambridge (2003)

\*3 事後アンケートの回答から確認した。