

# 記号コミュニケーション課題における コミュニティ抽出法を用いた脳波位相同期ネットワーク構造の解析 Analysis of Phase Synchrony Network Structure of EEG using the Louvain Method for Community Detection on Symbolic Communication Task

藤原 正幸<sup>1)</sup>, 橋本 敬<sup>1)</sup>, 李 冠宏<sup>1)</sup>, 奥田 次郎<sup>2)</sup>, 金野 武司<sup>3)</sup>, 鮫島 和行<sup>4)</sup>, 森田 純哉<sup>5)</sup>  
FUJIWARA Masayuki<sup>1)</sup>, HASHIMOTO Takashi<sup>1)</sup>, LI Adam<sup>1)</sup>,  
OKUDA Jiro<sup>2)</sup>, KONNO Takeshi<sup>3)</sup>, SAMEJIMA Kazuyuki<sup>4)</sup>, MORITA Junya<sup>5)</sup>  
{m-fujiw, hash, adam.li}@jaist.ac.jp, jokuda@cc.kyoto-su.ac.jp,  
konno-tks@neptune.kanazawa-it.ac.jp, samejima@lab.tamagawa.ac.jp, j-morita@inf.shizuoka.ac.jp

- 1) 北陸先端科学技術大学院大学,  
2) 京都産業大学, 3) 金沢工業大学, 4) 玉川大学, 5) 静岡大学  
1) Japan Advanced Institute of Science and Technology,  
2) Kyoto Sangyo University, 3) Kanazawa Institute of Technology,  
4) Tamagawa University, 5) Shizuoka University

【要約】人間は、はじめは何の意味を持たない記号に新たな意味を接地することができる。さらには、その記号の言外の意味（意図）をお互いに理解するコミュニケーションを取ることも可能であるが、そのメカニズムは定かではない。本研究では、脳のダイナミクスやネットワークという視点から、記号コミュニケーション課題中の実験参加者らの脳波データから、相手へ伝えようとする意図の違いとその順序（先手・後手）で試行を抽出し、電極間位相同期度を解析した。そして、得られた脳波位相同期ネットワークに対してコミュニティ抽出法を用いて、大局的な神経活動を検討した。この結果、相手へ先にメッセージを送る場合は前頭または頭頂―側頭間、後に送る場合は前頭―頭頂間で機能的結合が密であるコミュニティが観察された。本研究は、二者が記号の意図をお互いに理解するに至るメカニズムの解明に示唆を与えるものである。

【キーワード】記号コミュニケーション、脳波位相同期ネットワーク、コミュニティ抽出

## 1. はじめに

### 1.1 記号コミュニケーション

人間は、記号のやり取りを重ねることで、他者に記号の意味あるいはお互いの意図を伝達する記号コミュニケーションを行う。そのような記号の意味のすり合わせによる調整・協調行動を行うことで、人間は社会を形成しているといえる。たとえば、著者が所属する北陸先端科学技術大学院大学（以下、JAIST）は、イノシシや猿、カモシカなどの野生動物が度々目撃されることで知られているが、特にカモシカを見ることは「鹿に似た野生動物の一種<sup>(1)</sup>を目撃する」という字義通りの意味として捉えられているだけでなく、在校生やOBらの間で「（カモシカを見ると）留年する」という言外の意味を持った記号として古くから捉えられており<sup>(2)</sup>、その言外の意味はJAISTというローカルな場におけるコミュニケーションに限り通用する。より一般的な例を取り上げると、「お塩取れる？」という言葉には、「お塩の容器を取れる能力があるか」という字義通りの意味と「お塩が欲しいから渡してほしい」という言外の意味があり、人間は後者の意図を推測して相手にお塩の容器を渡すというコミュニケーションを成立させることができる。これらの例以外にも、人間は日常的に記号コミュニケーションを行っているが、その成立メカニズムは定かではない。

人間同士のコミュニケーションにおいて、はじめは意味を持たなかった記号に新しい意味を二者以上で共創（接地）し、お互いに意味を共有し、さらにはその記号の背後に有る意図を理解する、という記号コミュニケーションの成立・不成立を観察することは、その過程が複雑であったため、従来の手法では困難であった。しかし近年ではこれを可能とする実験パラダイムとして実験記号論が提案されている（Galantucci, 2009; Galantucci, Garrod, & Roberts, 2012）。実験記号論では、実験室実験の形を取ることで、コミュニケーションの手段をあえて制限することにより、記号を用いたコミュニケーションの成立過程

を捉えることを可能としている。すなわち、二者間のコミュニケーションを通じて一種の人工言語が創発する現象を捉えようとする。

金野ら(Konno, Morita, & Hashimoto, 2013)は、この実験記号論に基づいた記号コミュニケーション課題(2.2 節で後述する)から得られた行動データを用いた分析を行っており、記号に対する理解は、複数の段階を経ることで、二者でコミュニケーションが取れるようになる傾向があることを報告している。そして、記号の言外の意味の理解には、相手へメッセージを送るタイミングの調整を行う二者の役割分担が重要であることを指摘している。これらの二者の調整や詳細な変遷については、鮫島らがベイズ推定を用いた記号生成確率モデルを提案・分析しており、成功・失敗ペアにおける同様の傾向を詳細に可視化することに成功している(鮫島, 金野, 李, 奥田, 森田, 橋本, 2016)。また李らは、記号コミュニケーション課題中の二者同時脳波計測を用いた神経活動の検討を行っており、相手の記号を受け取る際にアルファ帯の局所的なパワー抑制が見られることを指摘している(Li, Konno, Okuda, & Hashimoto, 2015)。

これらの研究は、記号を用いたコミュニケーションの成立過程の解明に行動指標と生理指標の両面から示唆を与えるものであるが、相手へメッセージを送る際に何を意図しているのか、すなわち記号の言外の意味を伝えようとする認知活動を反映した、脳全体の大域的な神経活動はまだ扱えていなかった。近年では認知活動や神経基盤を検討するために、脳全体をネットワークとして捉え、その複雑なネットワーク構造の特徴を検討する試みが進められている。特に神経ネットワークに対するコミュニティ抽出法(後述する)の適用などによる計測部位のクラスタリング結果は、何らかの機能を担っている脳の機能モジュールに対応していると解釈でき、言語ネットワークの動的な構造の解析(Chai, Mattar, Blank, Fedorenko, & Bassett, 2016)などにも用いられている。大域的な神経指標によるネットワーク解析と行動指標を用いた推定モデルとの対応をもって認知活動を検討することで、記号の言外の意味の認知活動に関する記号コミュニケーションの成立の理解に新たな知見が得られると考えられる。

したがって本稿では、記号の言外の意味を伝えようとする際の認知活動を検討するため、記号コミュニケーション課題における脳波計測データに対して、行動データによる推定結果を用いて、次節で述べる位相同期現象とネットワークの視点を援用し、大域的な神経活動を検討した。

## 1.2 脳波位相同期現象とネットワーク構造の解析による認知活動の理解

大域的な神経活動を検討する一つの方法として、神経活動間の位相同期が知られている。たとえば、あるムーニーフェイスと呼ばれる図形を人間の顔だと認識する際に、ガンマ帯の長距離の脳波電極間で位相同期が起こることが示されている(Rodriguez et al., 1999; Varela, Lachaux, Rodriguez, & Martinerie, 2001)。さらに、シータ・アルファ帯の低周波数帯における位相同期は、作業記憶(Klimesch, Freunberger, Sauseng, & Gruber, 2008)や認知制御(Palva & Palva, 2011; Sadaghiani et al., 2012)、語彙情報の処理(Brunetti, Maldonado, & Aboitiz, 2013)に関連することが示唆されている。

二者の協調過程を明らかにするために同期やダイナミクスの観点から研究が進められている。指振り(Tognoli, Lagarde, DeGuzman, & Kelso, 2007)などの動きの同期を伴う二者間の協調では、二者の局所部位間での位相同期が生じることが示されている。その一方で、二者で数字を交互に数えあげるという、動きを伴わない言語を用いたコミュニケーションでは、二者の脳部位間の位相同期は見られていないが、脳部位間の位相同期が報告されている(Ahn et al., 2018)。これらの知見は、各認知活動に応じた神経活動の特徴および二者間の協調を検討する上で、位相同期を捉えることが有益であることを示唆している。

また近年では、脳内の神経活動を一種のネットワークとして捉えた脳結合性を解析することで、多くの認知活動の神経基盤が明らかにされつつあり、脳全体の領域間の相互作用などを考慮した脳内ネットワークに対して、その複雑な構造を解析する試みが進められている(Avena-Koenigsberger, Misić, & Sporns, 2017; Mišić & Sporns, 2016)。この視点は、局所的活動を検討する以上に新しい知見をもたらす可能性(Bassett & Sporns, 2017)があり、複雑な認知活動を捉えることに有益だと考えられる。

神経メカニズムやその動的な描像を同定するため、脳のネットワーク構造の特徴を検討する一手法としてコミュニティ抽出法が用いられつつある(Bullmore & Sporns, 2009; Rubinov & Sporns, 2010)。コミュニティ抽出法は、対象とするネットワーク構造のリンクが密である部分集合を抽出することができ、そのネットワーク構造の特徴を検討する上で用いられる手法の一つである。発展的な例として、脳内の言語ネットワークを調べた研究では、動的なコミュニティ抽出を行い、右半球のハブを中心としたロバストな神経活動と周辺ネットワークの動的な変化を捉えている(Chai et al., 2016)。実際のコミュニティ抽出では、モジュラリティを最適化する手法が広く用いられている。モジュラリティはネットワーク科学に

おけるコミュニティの分割の良し悪しを定量化した指標であり、位相同期度などを含む脳領域間、すなわち脳の結合性の特徴をコミュニティという形で検討することは、脳ネットワーク構造が持つ特徴やその機能モジュールの検討を可能にし、新しい知見が得られると期待できる。

本稿では、記号の言外の意味を意図する際の認知活動を検討するために、脳波電極間の位相同期を用いた脳の機能的結合性を一種のネットワークとして捉え、そのネットワーク構造に対しコミュニティ抽出を行うことで、機能モジュールの検討を行った。

### 1.3 研究目的

本研究は、記号コミュニケーションに関わる神経メカニズムを解明するために、脳波位相同期ネットワーク構造の特徴を明らかにすることを目的としている。本稿では、相手へメッセージを送る際の順序（先手・後手）と相手に記号の言外の意味を伝えようとする際の認知活動を検討するために、記号コミュニケーション課題時の脳波計測データから得られた位相同期ネットワークに対して、コミュニティ抽出法を適用することで、そのネットワーク構造の特徴を検討した。

## 2 脳波計測実験と解析方法

### 2.1 実験参加者

本研究では、健常成人 20 ペア 40 名（いずれも 20 代右利き男性）から得られた、次節で述べる記号コミュニケーション課題時の二者同時脳波計測データ（サンプリング周波数 1000Hz, 28ch 脳波）を用いた。

### 2.2 記号コミュニケーション課題

本研究で扱う記号コミュニケーション課題（図 1）は、実験記号論に基づき考案されたものである（Konno et al., 2013）。実験参加者のペア 2 名はそれぞれ別の部屋にいる状態で、コーディネーションゲームとよばれる協調課題を行う。本課題は、試行ごと（全 60 試行）にディスプレイ上に 4 つの部屋といずれかの部屋にランダムに配置された自分のエージェントが表示され、相手のエージェントがいる位置が隠された状態で、図形のやりとりのみを通じて、相手と同じ部屋に向かい出会うことを目指し高得点を狙うゲームである。自分のエージェントを動かす前には、1) 相手へのメッセージとして 4 種の図形から 1 つを選択・送信することができる。ただし、二者のうちどちらが先に送るかは任意である。すなわち、メッセージを送る順序（先手・後手）を実験参加者らは自分たちで取り決め合う必要がある。二者がメッセージを送り合った後には、2) 画面上のエージェントを上下左右に移動させる、または留まるかを選択し、同じ部屋に向かうことを試みるが、対角の部屋への移動はできない設定になっている。このため、高得点を得るためには、二者が各試行の最後に提示される移動結果を踏まえ、全 60 試行を繰り返し行うことを通して試行錯誤する中で、二者間で図形と部屋の対応関係（字義通りの意味）を一致させることが求められる。加えて、現在エージェントがいる部屋なのか移動先の部屋なのか、すなわち現在位置の部屋が行き先の部屋のどちらの意味なのか（言外の意味）という相手の意図を理解するに至らなければ高い得点を得ることは難しい課題になっている。

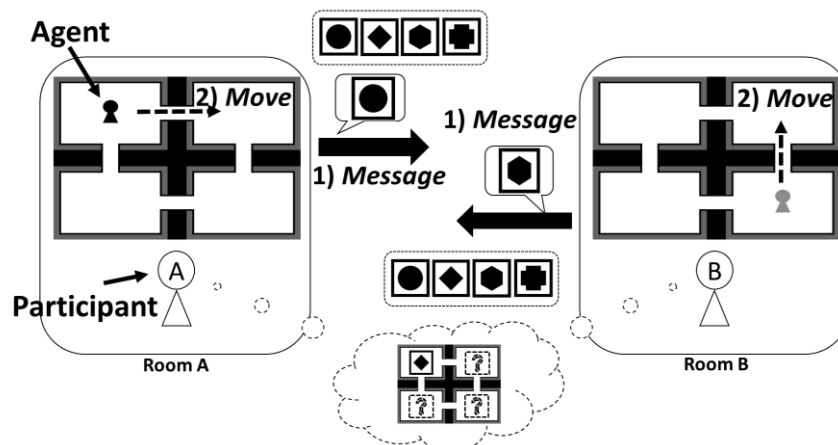


図 1：記号コミュニケーション課題の概要図

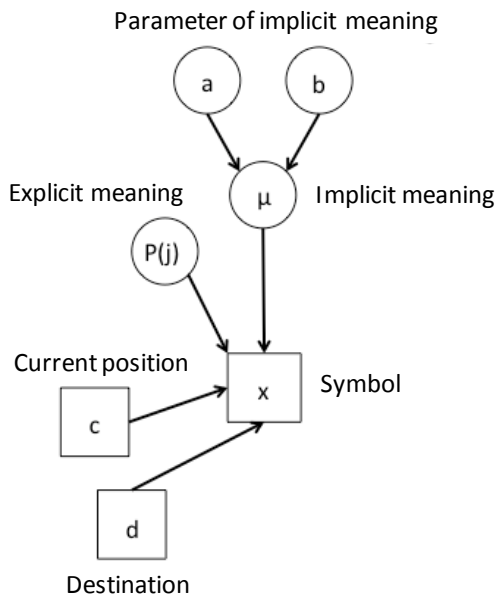


図 2：記号生成確率モデル(鮫島他, 2016)のベイジアンネットワーク図。四角は実際に観測された記号，丸は推定するパラメータをそれぞれ表す。

## 2.3 行動データによる記号の言外の意味の推定

本研究では、記号コミュニケーションにおける言外の意味に関連する神経活動の特徴を捉えるため、鮫島ら（文献）の記号生成確率モデルに従い、言外の意味として現在位置または行き先を意図してメッセージを送っていると推定される各試行を、先手・後手に分けて抽出・分離した。鮫島ら(鮫島他, 2016)の記号生成確率モデルは、記号コミュニケーション課題において、各試行で実験参加者が選択した記号やどの部屋に移動したか、送信順序などといった実験参加者の行動データを用いる(図 2)。図形と部屋の対応関係(字義どおりの意味)と現在位置/行き先(言外の意味)に関する事前分布をそれぞれ一様分布、ベータ分布として、実験参加者の行動データから事後分布を逐次求めることで、各試行における被験者の記号の字義通りの意味の共有や言外の意味の推定を可視化している。

本稿では、言外の意味に関連する認知活動を検討するため、全 60 試行の中で、記号のやり取りの際の先手・後手、さらに言外の意味として現在位置か行き先のどちらを意図しているかを推定し、被験者毎に各試行を分離・集約した上で次節の 2 つの位相同期度を求めた。

## 2.4 脳波位相同期指標とコミュニティ抽出

本研究では、記号コミュニケーション課題時の脳波電極間の位相同期度を解析した。以下の具体的な解析手順を図 3 に示す。本稿では、まず全 28ch 脳波電極間の位相同期度を、Phase Locking Value (PLV) (Lachaux, Rodriguez, Martinerie, & Varela, 1999)と debiased weighted Phase Lag Index (dwPLI) (Vinck, Oostenveld, Van Wingerden, Battaglia, & Pennartz, 2011) の 2 つの指標を用いて計算した。前者の PLV は従来から広く用いられている位相同期指標であり、ウェーブレット(あるいはヒルベルト)変換によって、脳波の位相情報のみ取り出し、複数試行にわたる電極間の脳波の位相差の平均を計算する。後者の dwPLI は、脳波計測の際のノイズ特性やサンプルサイズのバイアスを考慮し改善された位相同期指標である。次に、記号の言外の意味を意図する際の認知活動を反映していると考えられる、相手にメッセージを送る 3000ms~1500ms 前の脳波データに対し、初めの 500ms をベースラインとして標準化した。そして、これらの標準化された指標(PLVz, dwPLIz)に基づき、全被験者での平均を求めた。最後に、得られた脳

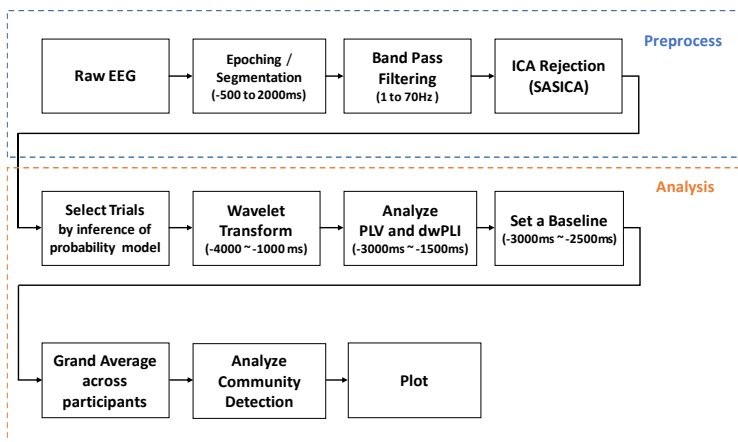


図 3：前処理と解析の手順。青色、赤色の点線で囲まれた箇所は前処理，解析部分をそれぞれ表す。

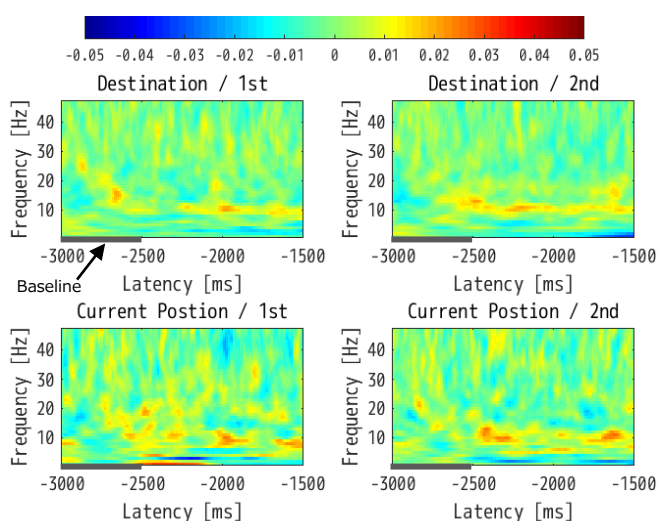
波位相同期ネットワークに対して、Louvain 法を用いることでコミュニティ抽出を行った。本稿で用いた Louvain 法は、複雑ネットワークの一指標であるモジュラリティが高くなるようにノードを分割する。ここでは電極間の位相同期が強い(増加している)部分集合をコミュニティとした。すなわち、本研究での解析におけるコミュニティは、位相同期による脳部位間の何らかの機能的結合を表現しているだろうとされる各脳波電極(ノード)が属する機能モジュールに対応している、と解釈できる。前述の解析を行う前処理の段階で、フィルタ処理や独立成分分析(ICA)を用いたアーチファクト除去などを行った。



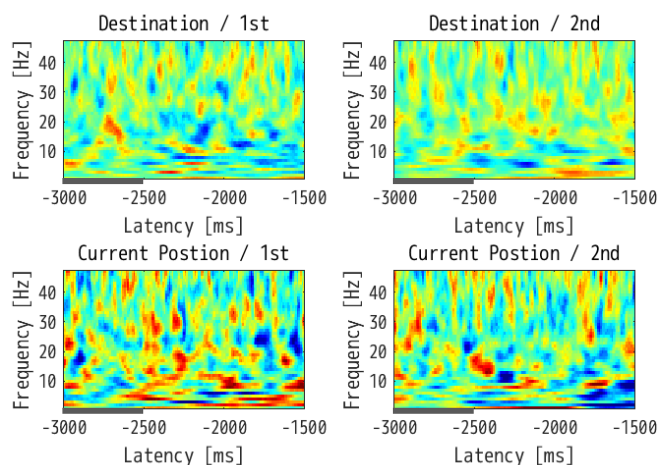
### 3. 解析結果

言外の意味に関する全体の位相同期の傾向を見るために、全実験参加者と電極で平均した位相同期スペクトルを計算した(図4(A), (B))。図4(A)はPLVzを用いて計算した場合を示す。上段・下段は行き先と現在位置をそれぞれ意図している場合、左右は先手か後手かを表している。図4(A)の結果からは、アルファ(8-13Hz) やシータ(4-8Hz) などの低周波数帯に同期の増加が見られた以外には、明瞭な同期や違いは見られなかった。これは解析時に集約した試行数(サンプル)が少ないことや容積伝導、ノイズなどの影響によって、本指標では上手く現象を捉えられていなかったと考えられる。

図4(B)はdwPLIzを用いて計算した場合を示す。上段・下段は、図4(A)と同様に、図形の言外の意味としてそれぞれ行き先または現在位置を意図していると推測される場合の平均位相同期スペクトルであり、先手・後手を区別した解析を図4(A)と同様に行った。それらの結果として、行き先を意図する



(A)



(B)

図4: メッセージ送信前の全被験者・電極間平均位相同期スペクトル。(A) PLVz, (B) dwPLIz。(A), (B)の上段, 下段は言外の意味としてそれぞれ行き先と現在位置を意図している場合を図示した。図の左右はメッセージをそれぞれ先手と後手で送った場合を表す。各図の縦軸, 横軸はそれぞれ周波数と相手にメッセージを送るまでの潜時を示している。(A) PLVz, よりも(B) dwPLIzを用いた場合の方が全体の同期の変化を明瞭に捉えられていることが分かる。

場合には低周波数帯に同期・脱同期の増加または減少が見られ, 現在地を意図する場合には低周波帯だけに限らず, ベータ(13-30Hz) 帯やガンマ帯(30-45Hz) などにも同期・脱同期が見られた。低周波数帯の同期は記憶や認知制御, またガンマ帯における同期は知覚や情報統合の際に起こるに関わるとされており, 本稿でもその存在が示唆された。

次に, アルファ帯に見られた脳波電極間で位相同期・脱同期が強かった潜時(-2500 ~ -1500ms)における位相同期ネットワークに対して, コミュニティ抽出を行った解析結果を図5に示す。各ノードは脳波電極を示しており, 属するコミュニティに応じて色分けがなされている。灰色の線は全28ch脳波電極間でベースラインから位相同期が強くなっている場合のリンクを表す。解析結果より, 先手の場合には左右の前頭または頭頂一側頭間のコミュニティ(上段青色: P3, P7—T8; 下段橙色: Fp1, P4, P8—T7)が見られた。後手の場合には, 行き先と現在位置のいずれの場合も前頭—頭頂の長距離電極間でコミュニティが見られた(上下段赤色: Fp1, Fp2, F7—P7; F4, F7—P8)。この前頭—頭頂間の結合性の存在は, 筆者らが先行研究の中で示した, メッセージの受取の際の前頭—頭頂間の結合性を示唆する結果(Fujiwara et al., in press)とも一致しており, 記号の意味解釈時だけでなく, 相手へメッセージを送る際にも同様の現象が示唆された。

しかし, 行き先か現在位置かのどちらかを意図する言外の意味について, 今回のアルファ帯のコミュニティ解析では明瞭な違いは見られなかった。

### 4. 考察

本稿では, 記号コミュニケーション時の脳波位相同期ネットワークに対して, コミュニティ抽出を行い, 先手の場合は前頭または頭頂一側頭間, 後手の場合は前頭—頭頂間でコミュニティが観察された。後者の前頭—頭頂間の位相同

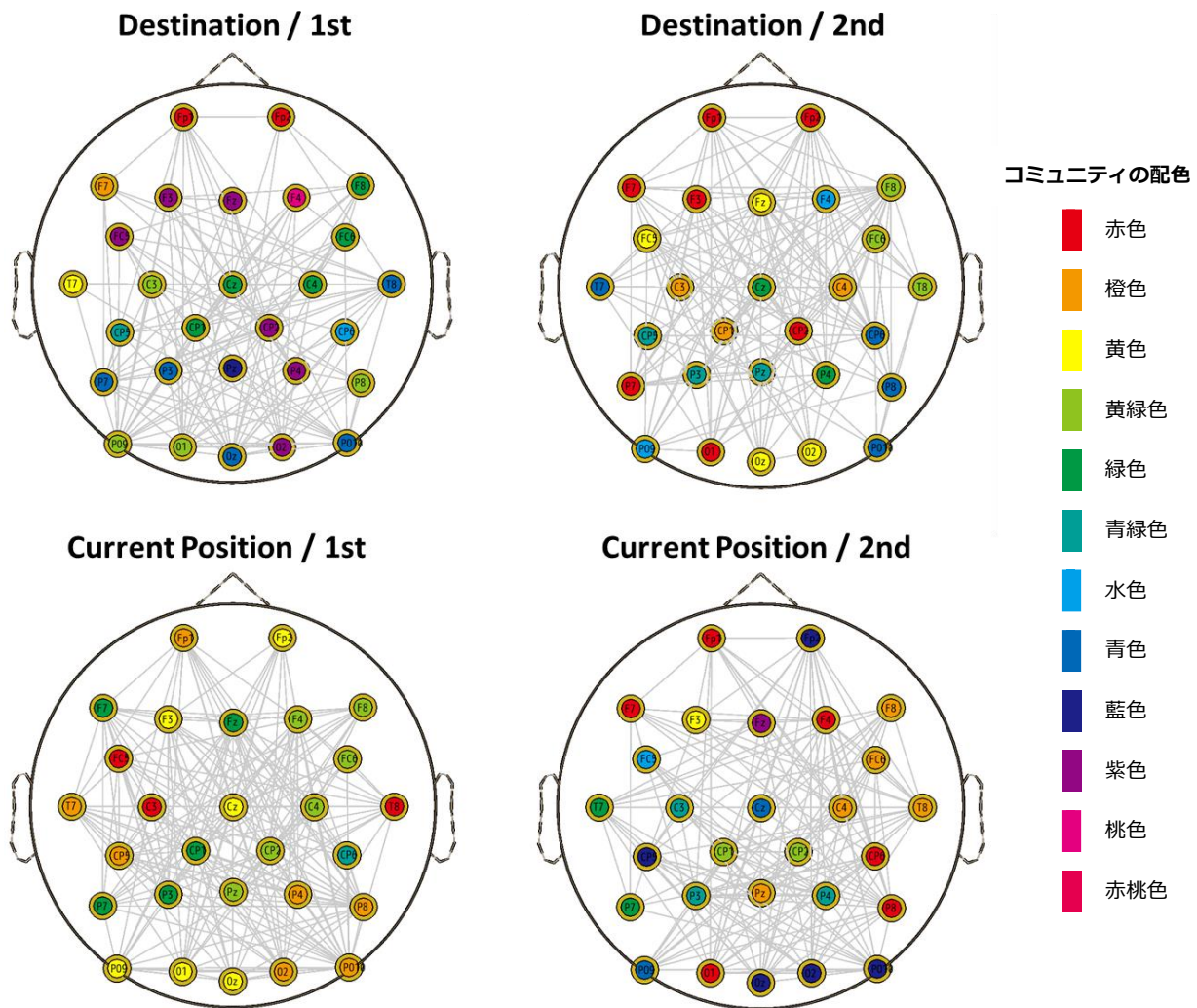


図 5：全被験者平均位相同期ネットワーク(dwPLIz)のコミュニティ抽出結果（アルファ帯）。図の上段，下段は言外の意味としてそれぞれ行き先と現在位置を意図している場合を図示した。図の左右はメッセージをそれぞれ先手と後手で送った場合を表す。各図のノードの位置は，脳波電極の配置(10-20 法)を表しており，ノードの色は属するコミュニティを表す。ノード（電極）間の灰色の線は，ベースラインから位相同期が高まった全リンク（結合性）を表している。先手の場合には左右の前頭または頭頂一側頭間（上段：青色，下段：橙色），後手の場合には前頭一頭頂（上下段：赤色）の長距離電極間でコミュニティがそれぞれ見られた。

期による機能的結合については，作業記憶(Schack, Klimesch, & Sauseng, 2005)や認知制御(Phillips, Vinck, Everling, & Womelsdorf, 2014)といったものに関連すると示唆されているが，前者の前頭または頭頂一側頭間はさらなる検討が必要である。後者で示された異なる部位間にまたがったコミュニティは，記号コミュニケーション課題において，相手へ図形をメッセージとして送る際に，過去の二者の部屋への移動結果の想起や記号の意味の解釈に関する認知活動を反映している可能性を示唆する。しかしながら，今回のアルファ帯のみの解析では，言外の意味の違いによる特徴的なコミュニティの検討にはまだ不十分だった。この改善方法としては，実験参加者のパフォーマンスや行動モデルとの対応をもって成功・失敗群を分離することやスペクトルで違いが見られた高周波数帯での同様の解析を行うことが挙げられる。さらには，統計的に有意な位相同期のみを扱うことで，その位相同期ネットワークや条件間での差異を検討するなど，実際の神経活動を反映した現象であるのか，を十分に検討する必要がある。

本研究でコミュニティ抽出を用いる限界は，ノードとして用いた脳波電極は 28ch のみであることか

ら、コミュニティ分割の際の詳細な検討が難しい点にある、と考えている。しかし、これはもともとの64chを眼球運動計測と二者同時脳波計測に用いたことによるものであるため、さらにチャンネル数の多い脳波計などを計測時に用いることでより詳細な検討が可能となると思われる。

本稿では、二者間の協調の検討に加えて、本課題における成功・失敗群間の違いや統計的分析などは扱っていない。本稿で行った全実験参加者の傾向を解析するだけでなく、ノード数は少ないながらも、二者同時計測を活かすことを考慮した二者間や成功・失敗群間の詳細な解析へフォーカスし、実験参加者ペアごとに行動データによる推定結果と神経データの対応を検討することで、統計的に有意かつ実際の現象を示しているのかを注意して進めていく必要があるだろう。

## 5. まとめ

本稿では、記号の言外の意味を意図する際の認知活動を検討するために、記号コミュニケーション時の脳波位相同期ネットワークに対して、コミュニティ抽出を行なった。結果として、先手の場合は前頭または頭頂一側頭間、後手の場合は前頭一頭頂間でコミュニティが観察された。この結果は、相手へメッセージを送る際に、そのやり取りの順序に応じた、言外の意味（＝意図）に関連する、過去の二者の部屋への移動結果の想起や記号の意味の解釈に関する認知活動を反映している可能性を示唆する。しかし、言外の意味の違いによる特徴的なコミュニティの検討には本稿の手法だけではまだ不十分であることがわかった。この点について、実験参加者の分類やペア毎などを詳細に検討することで、より明瞭な現象を捉えることができると考えられる。

## 注

- (1) カモシカはウシやヤギと同じウシ科に属するため、厳密にはシカとは異なる。
- (2) この言外の意味は、少なくとも10年以上前（2006年頃）のJAISTには既に存在していたようではあるが、成立時期は定かではない。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP26240037, 特別研究員奨励費 JP17J06623 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- Ahn, S., Cho, H., Kwon, M., Kim, K., Kwon, H., Kim, B. S., Chang, W. S., Chang, J. W. & Jun, S. C. (2018). Interbrain phase synchronization during turn-taking verbal interaction—a hyperscanning study using simultaneous EEG/MEG. *Human Brain Mapping*, 39(1), 171–188. <https://doi.org/10.1002/hbm.23834>
- Avena-Koenigsberger, A., Misić, B., & Sporns, O. (2017). Communication dynamics in complex brain networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 19(1), 17–33. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.149>
- Bassett, D. S., & Sporns, O. (2017). Network neuroscience. *Nature Neuroscience*, 20(3), 353–364. <https://doi.org/10.1038/nn.4502>
- Brunetti, E., Maldonado, P. E., & Aboitiz, F. (2013). Phase synchronization of delta and theta oscillations increase during the detection of relevant lexical information. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00308>
- Bullmore, E., & Sporns, O. (2009). Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(3), 186–198. <https://doi.org/10.1038/nrn2575>
- Chai, L. R., Mattar, M. G., Blank, I. A., Fedorenko, E., & Bassett, D. S. (2016). Functional Network Dynamics of the Language System. *Cerebral Cortex*, 26(11), 4148–4159. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw238>
- Fujiwara, M., Hashimoto, T., Li, G., Okuda, J., Konno, T., Samejima, K., & Morita, J. (in press). Changes in Phase Synchronization of EEG during Development of Symbolic Communication Systems. *Advances in Cognitive Neurodynamics* (VI).
- Galantucci, B. (2009). Experimental Semiotics: A New Approach for Studying Communication as a Form of Joint Action. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 393–410. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01027.x>
- Galantucci, B., Garrod, S., & Roberts, G. (2012). Experimental Semiotics. *Linguistics and Language Compass*, 6(8), 477–493. <https://doi.org/10.1002/lnc3.351>
- Klimesch, W., Freunberger, R., Sauseng, P., & Gruber, W. (2008). A short review of slow phase synchronization and memory: Evidence for control processes in different memory systems? *Brain Research*, 1235, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.06.049>
- Konno, T., Morita, J., & Hashimoto, T. (2013). Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks. *Advances in Cognitive Neurodynamics* (III), (Figure 1), 453–459. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4792-0\\_61](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4792-0_61)
- Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J., & Varela, F. J. (1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping*, 8(4), 194–208. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1999\)8:4<194::AID-HBM4>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1999)8:4<194::AID-HBM4>3.0.CO;2-C)
- Li, G., Konno, T., Okuda, J., & Hashimoto, T. (2015). An EEG Study of Human Mirror Neuron System Activities During Abstract Symbolic Communication. *The Proceedings of the 5th International Conference on Cognitive Neurodynamics*, 1–6. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0207-6>
- Miśić, B., & Sporns, O. (2016). From regions to connections and networks: New bridges between brain and behavior. *Current*

- Opinion in Neurobiology, 40(October), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2016.05.003>
- Palva, S., & Palva, J. M. (2011). Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks. *Frontiers in Psychology*, 2(SEP), 204. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00204>
- Phillips, J. M., Vinck, M., Everling, S., & Womelsdorf, T. (2014). A long-range fronto-parietal 5- to 10-Hz network predicts “top-down” controlled guidance in a task-switch paradigm. *Cerebral Cortex*, 24(8), 1996–2008. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht050>
- Rodriguez, E., George, N., Lachaux, J. P., Martinerie, J., Renault, B., & Varela, F. J. (1999). Perception’s shadow: Long-distance synchronization of human brain activity. *Nature*, 397(6718), 430–433. <https://doi.org/10.1038/17120>
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations. *NeuroImage*, 52(3), 1059–1069. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.003>
- Sadaghiani, S., Scheeringa, R., Lehongre, K., Morillon, B., Giraud, A.-L., D’Esposito, M., & Kleinschmidt, A. (2012). Alpha-Band Phase Synchrony Is Related to Activity in the Fronto-Parietal Adaptive Control Network. *Journal of Neuroscience*, 32(41), 14305–14310. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1358-12.2012>
- Samejima, K., Konno, T., Li, A., Okuda, J., Morita, J., & Hashimoto, T. (2016). Statistical inference of meaning by a generative model of signal communication in the “coordination game.” IPSJ SIG Technical Report, 2016(5), 1–6.
- Schack, B., Klimesch, W., & Sauseng, P. (2005). Phase synchronization between theta and upper alpha oscillations in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology*, 57(2), 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.03.016>
- Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., & Kelso, J. A. S. (2007). The phi complex as a neuromarker of human social coordination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(19), 8190–8195. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611453104>
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(4), 229–239. <https://doi.org/10.1038/35067550>
- Vinck, M., Oostenveld, R., Van Wingerden, M., Battaglia, F., & Pennartz, C. M. A. (2011). An improved index of phase-synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias. *NeuroImage*, 55(4), 1548–1565. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.055>

---

連絡先

住所：〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1 北陸先端科学技術大学院大学 橋本研究室

名前：藤原 正幸

E-mail：m-fujiw@jaist.ac.jp