

Title	記号および身体動作を用いた人間のコミュニケーションに関わる大域的な神経基盤の脳波解析
Author(s)	藤原, 正幸
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/18410
Rights	
Description	Supervisor: 橋本 敬, 先端科学技術研究科, 博士

記号および身体動作を用いた
人間のコミュニケーションに関わる
大域的な神経基盤の脳波解析

北陸先端科学技術大学院大学

藤原 正幸

博士論文

記号および身体動作を用いた
人間のコミュニケーションに関わる
大域的な神経基盤の脳波解析

藤原 正幸

主指導教員 橋本 敬

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科 [知識科学]

令和5年3月

Abstract

Human communication is one of the most widely discussed topics, including interactions using physical motions and symbolic language. In this study, I aim to elucidate the neural mechanisms underlying human communication through symbols and physical motions by investigating the global neural activity involved in these interactions in terms of EEG-based synchronization processes.

In this thesis, I have investigated the neural activities especially for two communication tasks. One is the "symbolic communication" task, which was performed as a laboratory experiment based on experimental semiotics, and focuses on the process of understanding each other's intentions and the establishment of communication through the exchange of symbols. On the other hand, the "Look This Way" task was designed to require intentional switching of physical motions and to generate different motor intentions. This task required coordination of the physical motion of "rock-paper-scissors" followed by Congruent or Incongruent motions.

In the former task, I first examined (1) how the amplitude of the receiving event differed from the fixation event by comparing the time-frequency and topographic amplitudes. The results showed that the amplitudes of the theta and alpha bands from 0 to 500 ms and the gamma band around 600 ms immediately after receiving a symbolic message were significantly higher in receiving events than in fixation events in the whole brain. In addition, I analyzed the phase synchronization between the success and failure groups to investigate (2) the presence or absence of functional connectivity between brain regions that are expected to be important for understanding symbolic messages. The results reveal that the success group showed frontal-parietal phase synchronization at 600 ms in the first 12 trials, while the failure group showed asynchronous phase synchronization. These suggest that the amplitude of the low-frequency band is related to the processing of short-term and semantic memory, and that the gamma-band amplitude and its phase synchronization in the whole brain may reflect the cognitive process of binding and understanding the association between figure and meaning.

In the latter task, I investigated the differences in neural activity among the three conditions (Scramble, Congruent, and Incongruent) by performing high-resolution power analysis of neural activity associated with movements and EEG signals through the the Hyperscanning EEG-Motion-Gaze recording systems. As a result, significant differences were observed between the three conditions, especially between the Congruent and Incongruent conditions, at the left central electrode in the alpha band and at the right parietal electrode in the gamma band. In addition, there was no significant difference in the alpha band compared to the gamma band in the time-frequency power expression. Thus, I propose that the left frontal center region is related to the mirror neuron system, while in the right central parietal region, the alpha band may be associated with perception of other's motion, and the gamma band with switching of social coordination.

At the end of this thesis, it is suggested that symbolic and embodied communication have in common a complex neural basis for communication involving multiple brain regions, including the frontal and parietal regions. In addition, gestural communication, which was not considered in this study, is positioned between symbolic and embodied communication. In order to clarify the neural mechanisms of symbolic and embodied communication, we proposed a working hypothesis of a unified neural mechanism that takes into account the involvement of multiple brain regions. To validate this hypothesis, we proposed a framework in which cognitive experiments are conducted using the constructed model as a virtual partner.

Keywords: synchronization, symbolic communication, motor intention, hyper-scanning EEG, Experimental Semiotics

目次

図目次	vi
第1章 序論	1
1.1 ヒトの記号および身体動作を通じたコミュニケーション	1
1.2 記号的コミュニケーションと意図理解	3
1.3 身体的コミュニケーションと意図理解	5
1.4 神経同期現象による神経基盤および認知活動の検討	6
1.4.1 神経同期	6
1.5 研究目的	10
1.6 研究方法	10
1.7 論文の構成	11
第2章 記号的・身体的コミュニケーションに関わる先行研究および本 研究の位置づけ	13
2.1 記号的コミュニケーション	14
2.1.1 実験記号論	14
2.1.2 記号的コミュニケーションにおける神経活動の検討 . . .	16
2.2 身体的コミュニケーション	17

2.2.1	身体的コミュニケーションにおける神経活動の検討 . . .	17
2.3	解くべき問題と状況	20
2.4	本研究の着眼点	21
第3章	記号コミュニケーション課題における脳波振幅および位相同期	
	解析	22
3.1	研究背景	22
3.2	研究目的	23
3.3	実験方法	24
	3.3.1 記号コミュニケーション課題	24
	3.3.2 実験手順	25
	3.3.3 実験参加者	26
3.4	脳波計測	26
3.5	解析方法	29
	3.5.1 前処理	29
	3.5.2 振幅解析	31
	3.5.3 位相同期解析	32
3.6	解析結果	33
	3.6.1 結果1：振幅解析	34
	3.6.2 結果2：位相同期解析	34
3.7	議論	37
	3.7.1 低周波数帯の振幅の変化	39
	3.7.2 ガンマ帯振幅と位相同期	42
	3.7.3 前頭頭頂間の同期の意味	42
3.8	まとめ	43

第 4 章	身体動作コミュニケーション (あっち向いてホイ) 課題における 三デバイス二者同時脳波計測と解析	44
4.1	研究背景	44
4.2	研究目的	45
4.3	実験方法	46
4.3.1	あっち向いてホイ課題	46
4.3.2	実験参加者	47
4.3.3	実験手順	47
4.4	二者同時三デバイス計測 (脳波・動作・視線)	49
4.4.1	二者同時三デバイス計測	49
4.4.2	二者同時脳波計測	50
4.4.3	二者同時動作計測	51
4.4.4	二者同時視線計測	52
4.5	解析方法	52
4.5.1	前処理	52
4.5.2	時間周波数変換: パワー解析	52
4.6	解析結果	54
4.6.1	結果: パワー解析	54
4.7	議論	55
4.7.1	議論: パワー解析	55
4.8	まとめ	58
第 5 章	神経質量・場モデルの検討	59
5.1	研究背景	60
5.1.1	神経活動の階層性とコミュニケーションの神経基盤	60

5.1.2	神経細胞モデル	61
5.1.3	従来の神経質量・場モデル	62
5.1.4	次世代型の神経質量・場モデル	64
5.2	研究目的	66
5.3	研究方法	66
5.3.1	Byrne モデル	66
5.3.2	Cauchy – Lorentz 分布と Lorentz 仮設	67
5.3.3	位相同期指標	67
5.3.4	数値実験	68
5.4	解析結果	68
5.5	議論	70
5.6	まとめ	73
第 6 章	総合議論	74
6.1	記号的コミュニケーションの神経基盤に関する仮説	74
6.2	身体的コミュニケーションの神経基盤に関する仮説	75
6.3	コミュニケーションに関わる統一的な神経基盤に関する仮説の 提案	76
6.4	今後の発展	77
6.4.1	コミュニケーションの神経基盤理解のためのフレーム ワークの提案	77
6.4.2	身体動作, ジェスチャー, そして記号を用いたコミュニ ケーションへの実験的拡張	81
6.4.3	カオスのセルラーニューラルネットワーク	82
6.4.4	光ポンピング磁力計を用いた二者同時計測の可能性	83

6.5	本研究の限界	83
6.6	まとめ	85
第7章	結論	86
7.1	本研究の成果	86
	参考文献	88
	謝辞	100
	本研究に関する発表論文および学会発表	104
	本研究に関する受賞	110

目次

1.1	本研究の対象とするコミュニケーション	2
1.2	語用論（伝達の理論）の系譜	3
1.3	神経活動のマルチスケール	9
1.4	本論文の構成	12
2.1	記号的・身体的コミュニケーション	21
3.1	記号コミュニケーション課題	27
3.2	記号コミュニケーション課題における前処理	30
3.3	(全電極) 成功群における記号受信イベントと固視点イベント間の全電極の総平均振幅の時間一周波数の違い	35
3.4	(頭頂部電極) 成功群における記号受信イベントと固視点イベント間の頭頂部電極の総平均振幅の時間一周波数の違い	36
3.5	(成功群) 記号受信イベントと固視点イベント (500 1000 ms) 間の総平均振幅のトポグラフィーの違い	37
3.6	(失敗群) 受信イベントと固視点イベント (500 1000 ms) 間の平均振幅のトポグラフィーの差異	38

3.7	Fp1-P4 平均位相同期 (wPLI) のグループ間およびイベント間の時間的な差異	38
3.8	F3-P4 記号受信イベントと固視点イベント間の成功群と頭頂部電極間の平均値位相同期 (wPLI) の時間-周波数の差異	39
3.9	初期 12 試行におけるイベント受信時のアルファ帯とガンマ帯の同期 (100ms 毎)	40
4.1	あっちむいてホイ課題の概要	48
4.2	TTL の図	49
4.3	計測環境	50
4.4	二者同時三デバイス計測システム	51
4.5	前処理の概要	53
4.6	(t-score) Congruent 条件と Incongruent 条件間の実験参加者・周波数における総平均パワーのトポグラフィーマップの違い.	56
4.7	Congruent 条件と Incongruent 条件間の実験参加者・電極における総平均パワーの時間-周波数表現の違い.	57
5.1	一次神経場モデルの図	63
5.2	二次神経場モデルの図	64
5.3	QIF ニューロンと蔵本秩序変数間のマッピング	65
5.4	興奮性と抑制性集団間相互作用の模式図	69
5.5	5000 個の QIF モデルからなる 1 神経細胞集団の活動	70
5.6	各 1000 個の QIF モデルからなる興奮性・抑制性神経細胞集団の活動	71
5.7	興奮性・抑制性神経細胞集団の解析結果	72

6.1	記号的・身体動作的コミュニケーションの神経基盤に関する仮説	77
6.2	コミュニケーションの神経基盤理解のためのフレームワーク . . .	78
6.3	マイクロ（・メゾ）・マクロ・ループとマイクロ（・メゾ）・マクロ・ ループ・チェーン	79
6.4	神経細胞モデルから二者間コミュニケーションまでを想定した 神経モデル	80
6.5	記号・ジェスチャー・身体動作コミュニケーション	82

第1章

序論

本論文は、記号および身体動作を通じた人間の二者間コミュニケーションの成立に関わる大域的な神経活動を、脳波による脳内神経同期現象として捉えることで、それらの神経基盤の解明を試みるものである。本章では、人間のコミュニケーションに関連する研究背景と目的、本論文の構成について述べる。また人間のコミュニケーションに関連する分野の先行研究と未解明な点を簡潔に紹介し、位相同期、脳の結合性、そしてネットワーク解析といった本研究の着眼点について示す。

1.1 ヒトの記号および身体動作を通じたコミュニケーション

人間は身体の内外の多種多様な情報を処理することで、他者とのコミュニケーションを可能にしている。人間のコミュニケーションは、形式と意味の対である「記号」をやり取りすることで、記号の「字義通りの意味」に加えて、意図を含む「言外の意味」を伝え合うことができる。その他、ある種抽象的な言語や記号

などの既存の慣習や規約などを用いずとも、行進などのように相手と同じタイミングで動作を合わせたり、それとは逆にわざと外したりなどといった、単なる身体的動作を通じたコミュニケーションも多くの場合で可能である。

記号を用いたコミュニケーション（以下、記号的コミュニケーションとする）や身体動作を用いたコミュニケーション（以下、身体的コミュニケーション）がいかにして成立し、特に、その神経基盤は何であるのか？

このような問い（図 1.1）に対し本論文は、実験記号論、三デバイス二者同時計測法、神経モデル化という研究分野のパラダイム、そして神経同期現象という視点からアプローチを試みるものである。そのため、既存のコミュニケーションに関わる理論や研究を紹介し（第2章）、記号的/身体的コミュニケーションの大域的な神経活動の分析を試みる（第3章と第4章）ことで、コミュニケーション成立過程の解明を目指す。

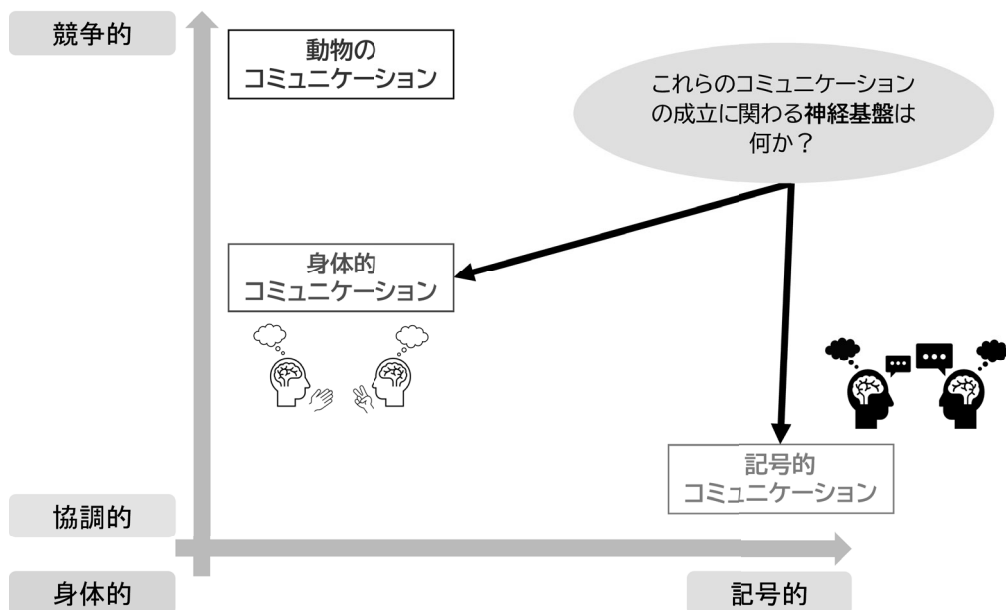


図 1.1: 本研究の対象とするコミュニケーション

1.2 記号的コミュニケーションと意図理解

コミュニケーションに関わる研究として、言語哲学の分野の J.L.Austin などに代表されるように、語用論の観点から研究がある。

後に H.P.Grice は、**協調の原理** (Cooperative Principle) を提示し4つの格率を措定した他、この Grice の流れを組む、Sperber and Wilson (1986); Wilson and Sperber (2008) は**関連性理論**を、Brown and Levinson (1987) は**ポライトネス理論**などへとそれぞれ発展を遂げるようになった (図 1.2)。

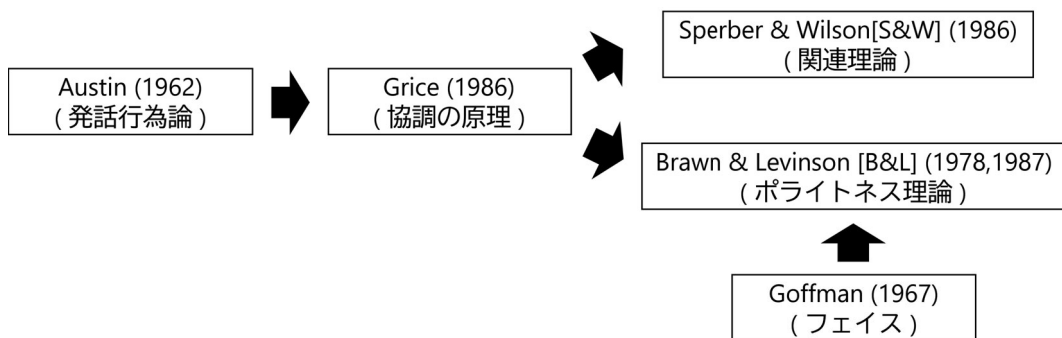


図 1.2: 語用論 (伝達の理論) の系譜

このうちの関連性理論の中で、Sperber and Wilson (1986); Wilson and Sperber (2008) は、特に伝達される意図には2種類あるとした。一方は**情報意図** (informative intention) であり、聞き手に何かを知らせること、他方は**伝達意図** (communicative intention) であり、聞き手に情報意図があることを知らせることである。そして、人間の認知は関連性が最大になるようにできていると仮定し、すべての認知機構をひとまとまりにして認知システムができあがっているとする。

このような語用論の分野では、会話分析などを用いることで理論的枠組みに基

づいた行動測度を用いる解析手法が中心である。しかし、Sperber and Wilson (1986); Wilson and Sperber (2008) が提案・指摘したような認知システムの存在を念頭におき、生理指標も同様に用いることで検証していくことは、コミュニケーションの成立過程の解明にとっても有効であると考えられる。

語用論でのコミュニケーションに関わる意図理解について触れてきたが、語用論はもともと言語哲学、そして記号論の流れを汲んだ分野である。記号論は C.S.Peirce によって開かれており、記号を**類似 (icon)**、**指標 (index)**、**象徴 (symbol)** の三種類に分類している。このうち類似 (icon)、指標 (index) については、いずれも外部から動機づけが得られるような形式と意味の対応付けがなされる。一方、本研究で扱う**記号**は象徴 (symbol) にあたり、使用者の間の規約によって恣意的に決まるような**形式 (form)** と**意味 (meaning)** の対応付けを指している。

このような記号 (symbol) には、**字義通りの意味 (literal meaning; denotation)** と**言外の意味 (implied meaning; connotation)** の2種類が含まれることがある。Grice は**明示された意味 (what is said)** と**(言外の) 推意 (implicature)** とも呼んでおり、いずれにせよ記号それ自体が指す意味とは別に、どのようなつもりで相手が送っているのかという意味を理解することが、記号的コミュニケーションを行う上で重要となる。

本論文では第3章に、字義通りの意味、そして言外の意味の両方を理解しなければ成立しえない、記号 (symbol) のみを用いたコミュニケーションの創発過程およびその神経活動を**実験記号論** (第2章で詳しく後述する) に基づいた**実験パラダイム**にて捉えることで、脳の大域的な神経活動について分析した結果を示す。

1.3 身体的コミュニケーションと意図理解

身体的コミュニケーションに関わる研究は、身体動作に関わる意図性が着目され、数多くの視点から理解が進められている。特に、特定の目標によって動機づけられる**目標志向行動** (goal-directed behavior), そして行動の根底にある真なる意図を指す**運動意図** (motor intention) に関する研究では、主体の運動のデコーディングという文脈で主に研究が進められている (Grafton and Tipper, 2012).

一方、観察者が運動する他者の運動意図を理解しようとする際には、観察された行動の根底にある意図について理解する必要がある。神経科学に関する研究では、**ミラーニューロン**と呼ばれる、サルが他者の行動を観察する際に腹側運動前野 (F5 野) におけるニューロンの活性化が示されており、上側頭溝・下頭頂葉・腹側運動前野が**ミラーニューロンシステム**を形成する可能性が指摘されている (Rizzolatti et al., 2001; Rizzolatti and Craighero, 2004; Fogassi et al., 2005). この神経システムは、他者の運動の理解は観察者自身の運動表現を重ね合わせて解釈される、とする**シミュレーション仮説**に基づく解釈へと繋がっている (Gallese and Goldman, 1998).

さらには、詳しくは第2章で取り上げるが、タッピングや指振りなどといった、二者で身体動作を協調しようとするコミュニケーションにおいて、脳内や二者の脳間において神経活動の同期が観察されており、右頭頂部の神経活動は社会的協調のマーカーとして観察できることが示唆されている。次いでは、**異なる運動意図**の種類 (例. 社会的か非社会的か)、個人の**意図の切り替え** (Intentional Switching) が生じる場合などの運動意図に関する先行研究についても後述する。

第4章ではこのような身体動作の観察に関する課題を取り上げ、意図の切り替えが生じうるような二者のコミュニケーションの神経同期現象について見て

いく。

1.4 神経同期現象による神経基盤および認知活動の 検討

1.4.1 神経同期

神経同期ということばは、さまざまな脳の階層で用いられている。はじめに思いつくのは、神経細胞間の発火同期現象であろう。歴史的には、1950年代後半、サイバネティクスの創始者である Norbert Wiener が、神経細胞集団が局所的に相互作用し振動同期している可能性 (Wiener, 1958), そして人間のアルファリズムは非線形振動子の結合の結果である可能性 (Wiener, 1965), を推測したことに始まる。

1980年代後半には、ネコの第一次視覚野(17野と18野)における方位選択性神経細胞間の同期発火現象 (Eckhorn et al., 1988; Gray et al., 1989) が実際に観察され、神経細胞の発火率ピークがガンマ帯(40 Hz 付近)を取ることが示された。そして Singer らは、同期発火が知覚の**バインディング問題** (binding problem) を解く可能性を主張するに至った (Singer and Gray, 1995)。これ以前より、バインディング問題に対応すべく、ニューロン発火のタイミングの相関によって入力情報の要素の特徴が動的にバインディングされるという**相関符号化仮説** (Von der Malsburg, 1981), そしてそれを発展させた**動的細胞集成体仮説** (Fujii et al., 1996) などが提唱されており、脳内の情報処理には発火頻度コーディング (rate coding) だけでなく、時間パターンコーディング (temporal coding) も重要であることなどが指摘されていた。

この指摘に従い、2000年代ではさまざまなレベルの神経活動の同期現象が研

究され (Varela et al., 2001; Kelso et al., 2013), 実際, 神経ネットワークの同期や振動がの選択にバイアスをかけたり, 神経細胞を集合体として時間的に結びつけたり, シナプス可塑性を促進したりすることなど明らかとなった (Buzsáki and Draguhn, 2004).

Fries (2005) によれば, 2010 年代中頃には, 神経細胞のコミュニケーションは神経細胞の同期によって支えられているとする, Communication through Coherence(CTC) 仮説に基づき, 以下のシナリオが提案されるまでに進展している.

1. まず大脳皮質の局所的な神経細胞群はアルファ帯でデフォルトに同期する.
2. アルファ帯で同期している間, ネットワークの興奮は 100 ミリ秒周期で変動するが, 3 ミリ秒以内にネットワークの抑制に追随する. これにより, ネットワーク内で実効的な情報のやりとりが妨げられた結果として, 局所的な神経細胞の表現を「ストック」として保持し, 柔軟にアクセスできるようになる.
3. 注意は前述の内部記憶からシータ帯のリズムでサンプリングされる. トップダウン型注意による影響は, アルファ-ベータ帯同期によって媒介される. トップダウンのアルファ帯は無関係な背景領域に対して局所的にアルファ帯を強化する一方, トップダウンのベータ帯の影響は局所的な回路を惹起させ, 刺激にもっとも敏感な神経細胞間でのガンマ帯同期を強化し, その頻度を高めることで変調させる可能性がある.
4. 視覚は, ボトムアップの刺激の重要性和刺激の履歴を反映し, 強さと頻度が異なる多くの局所的なガンマ帯のリズムを引き起こす. その結果, 例えば V1 のガンマ帯は刺激の特性, 経験, トップダウンの影響を反映したも

のとなる。ある時点で、これらの共存するガンマ帯のリズムのうちの1つがシナプス後細胞群を同期させる。このガンマ帯同期により、刺激表現を伝達し、競合する刺激表現を利己的に遮断することができる。この同期により、周期的な記憶が確立され、シータサイクルの終わりまで維持される。

5. シナプス前部のガンマリズムは、ネットワークの興奮が、常に追従するネットワークの抑制から逃れられるようにする。抑制は時間的に集中しているため、抑制の間に興奮が起こり、シナプス後細胞を最適に駆動するために興奮性出力を同期させることができる。

仮に、局所的な神経活動やその同期が上記のシナリオに基づくとするならば、各周波数帯域で機能的な役割が異なっていると考えられる。実際に、海馬などの記憶に関わる脳部位にはシータ帯、V1などの視覚野ではガンマ帯の同期現象が知られている。このため、各脳部位・脳領域だけでなく、各周波数帯についての検討も同様に重要である。

Singer (2018)によれば、同期や振動は正確な時間的構造を神経細胞の応答に与える理想的な手段であり、動的な機能的ネットワークの形成、意味的關係のエンコーディング、動的な伝達のゲート、学習メカニズムによる連合形成などの現象が持つ不安定な性質は、認知における同期や振動の機能的役割を考える上で機能的に有利であること、そして複雑かつ高次の非線形ダイナミクスが前掲した現象にとどまらない計算にも利用されている可能性が示唆されている。

ここまでに、大脳皮質のマイクロレベルの神経活動に焦点を当ててきたが、これだけでは説明できない高次の認知活動について検討するため、局所フィールド電位 (local field potential, LFP) などのメゾレベルや脳領域間などのマクロレベルの神経活動における神経同期も研究され、さらには、それにとどまらず、その

ネットワークレベルの同期現象およびヒト間の神経同期現象についても研究が進められている (Varela et al., 2001; Hasson et al., 2012; Kelso et al., 2013). 特に複雑ネットワーク科学の進展により, 脳内ネットワークのダイナミクスを考える向きがある (Avena-Koenigsberger et al., 2018). 神経同期現象を階層的な現象として捉える見方は, 神経細胞間からヒト間に至るまでの神経活動を各レベルごとの神経同期が情報処理の過程や認知的な機能を反映していることを示している (図 1.3).

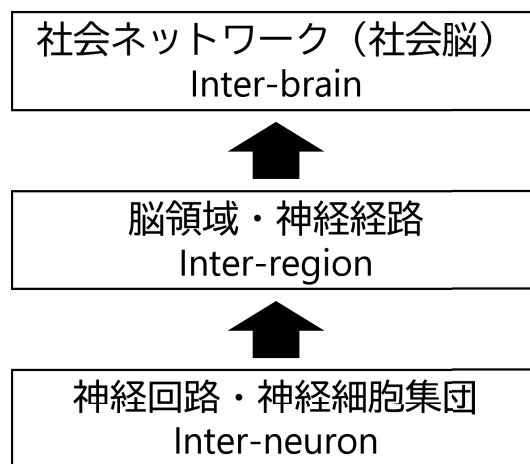


図 1.3: 神経活動のマルチスケール

しかし現在の神経同期に関わる研究は, 注意や視覚など知覚の神経活動の理解にしたがって, 研究が進められてきている印象が強い. 記号および身体動作を通じたコミュニケーションに関連する認知活動と神経同期の関係性については, 第2章で述べるように既存研究はあるものの, 未だ明らかになっていない部分が多く, これらコミュニケーションの大域的な神経基盤の解明が期待される.

前述してきた神経同期現象から, 本研究で対象とする人間の記号および身体動作を通じたコミュニケーションに関わる神経基盤を同定することを目指し, より大域的な脳活動を捉えることは, その機能的な役割の解明へ貢献することにつな

がると考えた。

1.5 研究目的

本研究の目的は、脳内の神経同期現象という観点から、人間の記号および身体動作を通じたコミュニケーションの円滑な成立に関わる大域的な神経メカニズムを明らかにすることである。より具体的に言えば、二者がはじめは意味を持たない図形のみを用いてやりとりを行う中でコミュニケーションが成立するようになる創発過程を対象に、どのような脳領域間で位相同期による機能的な結合が強まるのか、を明らかにする。加えて、二者間で協調または競争的な状況といった意図を切り替えねばならない場合に、身体動作を通じたコミュニケーションの大域的な神経メカニズムが何であるのか、そして異なる状況下での違いは見られるのか、を明らかにする。特に、神経同期現象に着目した、これら2種類の異なるコミュニケーション体系間の神経メカニズムの共通点や相違点、そしてどの脳領域間の機能的結合に関わるのかを考察・議論し、統一的な作業仮説を提案する。

1.6 研究方法

本研究では、「記号コミュニケーション課題」(第3章)における脳波計測データを用いた。この課題は実験記号論に基づくもので、人工言語が創発する過程を扱う実験室実験を可能にするものである。具体的には、相手からのメッセージ(記号)を受信・解釈している際の脳波データに対して、振幅解析および位相同期指標を用いた機能的結合の解析を実施した。これにより、記号の意味・意図理解の際の大域的な神経活動を捉えることを目指した。

次に、二者間の身体動作によるコミュニケーションの神経メカニズムの検討のため、「あっち向いてホイ課題」(第4章)時の二者同時三デバイス(脳波・動作・

視線)計測による脳波パワー解析を実施した。より具体的に言えば、二者間で身体動作を協調することが必要である「じゃんけん」後に、スクランブル・協調・競争の異なる3つの条件を設けたオリジナルの「あっち向いてホイ課題」を実施した。特に、実際の身体動作のデータとの関連付けを行った課題中の脳波データを対象に、これら3つの条件間の神経活動の違いを検討した。

また、人間のコミュニケーションの神経メカニズムの検討のために、神経細胞モデルから脳波などを想定した神経質量・場モデルへと展開する「次世代型の神経質量・場モデル」(第5章)について検討を行い、1つおよび2つ(興奮性・抑制性)の神経細胞集団を想定し、予備的な数値実験を実施した。そしてこのような数理モデルが、人間のコミュニケーションの神経基盤の検討に対し、どのような貢献ができるかを考察した。

1.7 論文の構成

本論文は全7章で構成される(図1.4)。以下に各章の内容を概説する。

第1章(本章)は、序論であり、本論文の研究背景と研究目的、および論文の構成について述べた。

本章に続く第2章では、二者間コミュニケーションなどの関連研究について述べる。ここでは主に、本研究で取り扱う記号的および身体的コミュニケーション、そして脳波位相同期に関する先行研究で明らかになっている知見とそこから得られる課題について指摘し、本研究がどのような貢献を考えているかについて説明する。

第3章では、はじめに本研究で用いた記号コミュニケーション課題、そして得られた脳波データに対する解析方法について説明する。記号コミュニケーション課題で得られた脳波データに対し、脳波振幅・位相同期解析やその統計検定につ

いて詳細を述べた後に、実際に解析結果を示し考察する。

第4章では、身体動作コミュニケーション(あっち向いてホイ)課題における三デバイス二者同時脳波計測法とその解析結果について述べる。

第5章では、コミュニケーションの神経基盤の理解を念頭に、近年提案されている次世代型の神経質量・場モデルについて説明する。そしてこのモデルを用いた、予備的な2つの神経細胞集団間の同期解析の結果について述べ、将来的なコミュニケーションの神経基盤の理解への道筋について概観する。

第6章では、関連研究の知見を参照しながら各研究の結果および議論から、総合的な議論を行う。

第7章では、本論文の結論と今後の展望を示す。

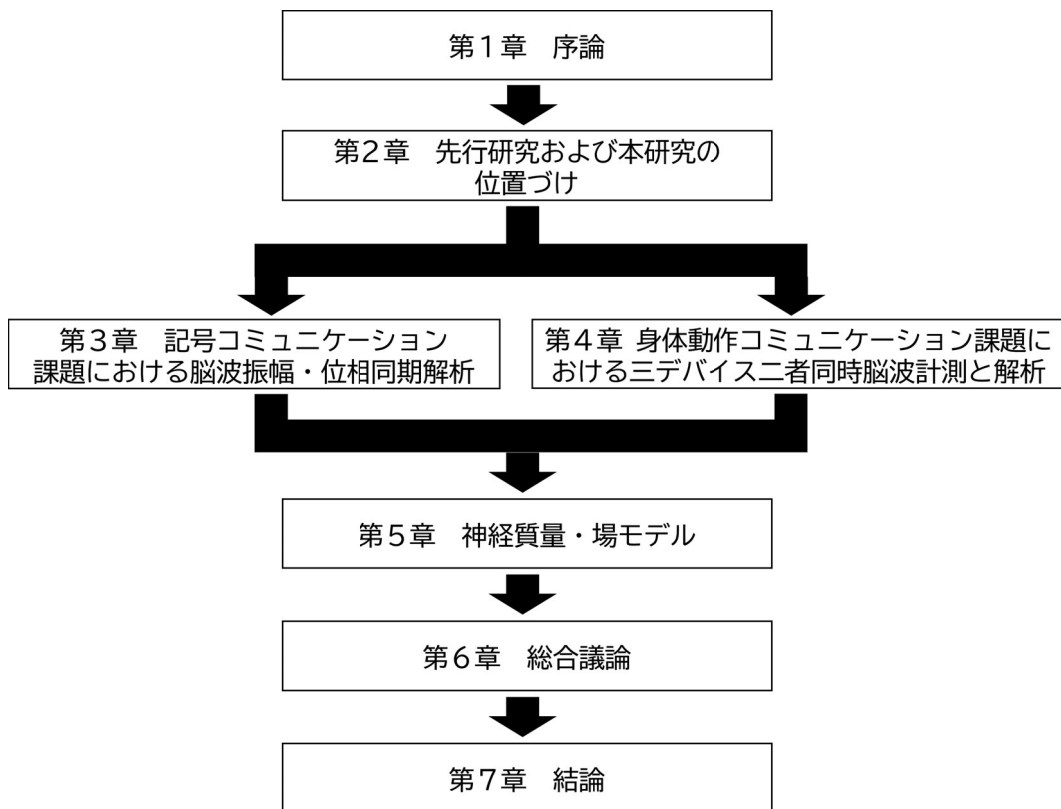


図 1.4: 本論文の構成

第2章

記号的・身体的コミュニケーションに関わる先行研究および 本研究の位置づけ

前章では、本論文の研究背景と研究目的、および論文の構成について述べた。本章では、本研究が対象とする課題を浮き彫りにするために、記号的および身体的コミュニケーションに関連する理論や先行研究のレビューを行う。これにより、検討する課題を整理し本研究の立ち位置を明瞭にする。そして、記号的コミュニケーションの成立メカニズムおよび神経基盤の解明のための方法や着眼点についてより詳細に提案する。

2.1 記号的コミュニケーション

2.1.1 実験記号論

実験記号論 (Experimental Semiotics, ES) (Galantucci, 2005) は、実験室実験で人間の新奇なコミュニケーションシステムの形成過程の調査を目的とした、新しい方法論・分野である。ES は、言語の創発・進化を実験室で調査するための人工言語や人間のコミュニケーションシステムの自発的な形成に関する新しい実験パラダイムを提案し、従来の発話やテキストを対象とする会話分析による研究などに対して科学的に補完するものである。

Galantucci and Garrod (2011) によれば、ES は、実験語用論、人間言語を使った自然実験、そしてコンピュータシミュレーションなどの3つの研究分野とそれぞれ接点をもつとしている。まず、ES と実験語用論との共通点として、1) 実験的操作・制御が可能なアプローチを取ることで、観察される現象の背後にある因果関係を明らかにする目的をもっていること、2) 人間の社会的相互作用および個人の認知処理の過程を調べなければならないという前提をもつこと、を挙げている。一方で、ES と実験語用論の違いとして、ES は人々が既存のコミュニケーションシステムを使えない場合に形成する新奇なコミュニケーションの創発を研究する点を強調する。そして、そのような新奇なコミュニケーションの創発を自然実験で扱う既存研究の一例として、ニカラグア手話に関する研究 (Kegl, 1994) を取り上げている。ニカラグア手話は、家庭内などで自然発生した「ホームサイン」と呼ばれるジェスチャーから不完全なピジン手話を経て、完全な手話言語体系へとクレオール化するに至った事例として広く知られている。これに対し、ES は実験室実験で操作的にコミュニケーションの創発を観察するため、コミュニケーションシステムの創発過程を全て記録することができ、人間が上手く

コミュニケーションを取れるようになる過程を理解することが可能である、と主張する。そして、実験室実験で操作的に扱うことと同様に、進化シミュレーションなどに代表される、コンピュータ内で人工エージェント間のコミュニケーションの創発過程を扱う研究 (Steels, 1997) から得られる知見に対し、ES は実際の人間の行動を対象として情報を補完する立ち位置にあることを述べている。

ES 研究の一例として、Scott-Phillips et al. (2009) は Embodied Communication Game (ECG) を考案している。ECG では各プレイヤーはエージェントとして画面上に表現され、各ラウンドの最初には、4つ (2×2) の象限 (四角形) のいずれかにそれぞれランダムに配置される。それぞれの象限には、赤、青、緑、黄色のいずれかが配色されているが、自身のいる象限の色しか確認できず、それ以外には他プレイヤーの動きだけが観察できる。両プレイヤーはエージェントの動きのみでやりとりを行い、同じ色の象限を当てることで、点数を上げることが課題として与えられる。プレイヤーは象限の間を一定の速度で自由に行き来できるが、その動きで文字やその他の記号をなぞることはできないため、エージェントの動きと部屋の色を、プレイヤー間で対応させ一致させる必要が生じる。この際に、エージェントの動きが相手に何かを伝えるためのもの (伝達意図といっても良いだろう) であることを示す (信号性と呼んでいる) 必要がある。仮に相手がこの伝達意図を理解することに成功したとしても、はじめの段階ではその信号の意味を理解できていない。しかし試行錯誤しながら複数の段階を経ることで、コミュニケーションシステムが成立し、信号の意味を共有することができるようになることが示されている。

このような信号を用いたコミュニケーションに関わる ES 研究は認知神経科学的アプローチでも模索されており、脳内や脳間の神経同期現象が確認されている。Stolk et al. (2014) による fMRI 研究は、二者の脳活動を同時に測定したコヒーレンス解析により、新しい信号を相互に理解することで、二者間で右側頭

葉の脳ダイナミクスが 0.05Hz 以下のかかなり遅い低周波数で同期することを示した。また現在コミュニケーションにおける信号の関連性には、以下の 2 つの異なる仮説があるとしている：

1. コミュニケーションの信号の生成とその意味理解を、連想メカニズムが自動的に調整するという仮説。
2. コミュニケーション中の特定の経験から抽象化された、信号の使用に関する概念の共有が必要だという仮説。

どちらの説も二者間での神経活動の同期が起こることが予測される。Stolk et al. (2014) は、記号の使用に関する共通の概念化から意味が生じるという後者の仮説を解析結果から支持している。しかしながら fMRI による計測は、空間解像度は高く賦活した脳部位を同定することに長けているものの、神経同期現象を扱う上では脳波やその他の手法のように時間解像度が高い訳ではないこと、そして両方の仮説が反映された結果である可能性も否定できないことから、さらなる知見の提供が必要である。

2.1.2 記号的コミュニケーションにおける神経活動の検討

本論文では、前述したような二者がコミュニケーションしている際の脳間の神経同期現象も視野に入れつつも、記号のみをやりとりをしていく中で、記号（信号）を受信した際の脳内の神経同期現象を重点的に分析し、その大域的な神経活動を捉えることで、さらなる知見の提供を目指した（第 3 章）。

記号のみをやりとりをしていく二者のコミュニケーションを対象にした研究は局所的な神経活動を捉えているが、大域的な神経活動の検討は進んでいない。Konno et al. (2013) は、実験記号論に基づいた従来の課題を定量的分

析が可能な形に洗練させることで、分析結果より3つの段階を経ることでコミュニケーションシステムの成立に至ることを示している。そして Li et al. (2019) は、Konno et al. (2013) らの課題を脳波計測実験向けにアレンジした Communicative Coordination Game において、ミラーニューロンシステムに関わるとされる脳領域で、アルファ帯の抑制を観察している。しかし、神経同期現象に着目した解析は行われておらず、どのような脳領域間の情報のやりとりが記号的コミュニケーションに関連するのかは明らかでない。このため、脳領域間の大域的な神経活動を明らかにすることは、二者のコミュニケーション研究にさらなる知見をもたらす可能性があり、本研究の3章ではこれを明らかにする。

2.2 身体的コミュニケーション

2.2.1 身体的コミュニケーションにおける神経活動の検討

前述した記号的コミュニケーションに対して、身体的コミュニケーションは、身体動作のみを用いて二者が相互作用するものである。運動の観察を通じた他者の意図理解、つまり運動意図の理解を対象とする神経科学研究は、神経基盤の解明と計算モデルの両面から進められている。

Blakemore and Decety (2001) によれば、人間には他者の行動からその意図を推測する傾向があるとしており、脳が他者の生物学的な動きを検出、意図のような心的状態を自動的に推測し、行動の未来を予測するように設計されている、という考えを示している、そして、意図を行動に帰属させるメカニズムは、観察された行動を観察者がシミュレーションして、自分の意図の表現に接地させることに依存している可能性を示唆している。

また Praamstra et al. (2005) は、行動の空間的注意と運動意図の関係を脳波を用いた解析から調べており、注意の方向付けと応答の選択によって活性化され

る共通の前頭一頭頂ネットワークを明らかにした。このネットワークの活性化は、頭頂葉と前頭葉が順に活性化され、その後、前部から後部へと活動が移動していき、後頭葉の外側に到達するという仮説に基づいており、通常の運動準備の活性化とは異なっていることを指摘している。加えて、Eskenazi et al. (2015) は、主に個人の行動を知覚することに焦点を当てるのではなく、2人以上の人間が意図を共有して行動する共同行動の知覚に関する神経活動の違いについて調べている。2人の個人が意図を共有して行動している状況を観察する場合と、個人がそれぞれの意図に依存して並行して行動している状況を観察する場合を比較した結果、意図の共有に基づく共同行動を観察する方が、個々人の意図に依存した相互作用を観察するよりも、側頭極、楔前部、腹側線条体を活性化することを示している。これに合わせて、前頭葉と側頭葉は意図の推論を手助けし、とくに後者は社会的文脈に関連した記憶を検索する役割を担っているとしている。

Schröder et al. (2014) は、意図と行動の関係に関する計算モデルを提案している。彼らの示す行動制御のモデルは、Daniel Kahneman のシステム1（自動型、無意識的）とシステム2（熟慮型、意識的）の間の相互作用的な競争から生じるものとする一時的な見解を計算論的に説明したものであり、運動意図の項目が含まれたいくつかのシミュレーションを念頭に、提案する計算論的神経モデルを論じている。このモデルは、行動は脳基底核 (basal ganglia, BG)、前頭前皮質 (prefrontal cortex, PFC)、前帯状皮質 (anterior cingulate cortex, ACC)、補足運動野 (supplementary motor area, SMA) などの脳領域における神経処理から生じることを提案しており、複数の脳部位間が活動する描像を描いている。

そして、行動の観察および伝達意図を念頭に置いた研究 (Ciaramidaro et al., 2007; Enrici et al., 2011) では、複数の領域からなる動的な心の理論 (Theory of Mind, ToM) に関するネットワークのモデルを提案しており、意図は個人が追求する目標の性質（私的か社会的か）と社会的相互作用の時間的次元（現在か

未来か)によって異なるという区分けを導入した結果、意図の性質に応じた内側前頭前皮質 (medial prefrontal cortex, mPFC) と右側頭頭頂接合部 (right temporo-parietal junction, rTPJ) の異なる働きが重要な役割を果たしていることを示唆した。rTPJ と楔前部が事前意図 (prior intention) を処理するのに対し、lTPJ と前側頭頂葉皮質は社会的意図の理解に特異的に関与していること、特に lTPJ は伝達意図が含まれる場合にのみ活性化されることを指摘している。Chambon et al. (2017) は、どのような神経メカニズムが意図の抽象度に合わせて、事前の期待と感覚の相互作用を調整するのかを明らかにしようとし、異なる種類の意図 (地位が上位か下位か、社会的か非社会的か、など) が描かれた行動場面を用いて、事前証拠と感覚証拠を操作した2つの異なる fMRI 実験を行っている。結果として、意図を推論する際に事前情報と感覚情報の相対的な重みを調整するために、前頭葉ネットワークが重要な役割を果たしていることを指摘している。

これらの研究が示唆するのは、他者の動作の観察が必要である二者の身体的コミュニケーションの場合は、前頭部と頭頂部の関与が予想される。異なる運動意図の種類 (特に社会的か非社会的か) に応じた活性化が示唆されているということである。特に頭頂部については、手指を用いた身体動作による二者のコミュニケーション中の二者同時脳波計測実験が実施されており、これらの結果から社会的な神経マーカーとして機能しうることが示されている (Tognoli et al., 2007; Dumas et al., 2020)。他にも、二者間のガンマ帯神経同期が協調的あるいは競争的な状況の違いを反映している可能性が示唆されている (Barraza et al., 2020)。

しかし、異なる運動意図の種類による神経活動の違いが見られているものの、二者が身体動作を同期させた状態から、この意図を変更し動作を切り替える場合に生じる動的な意図性に関する神経活動についてはまだ明らかではない。Scholz and Kelso (1990) らは、両手の協調パターンの自発的な変化を観察しており、実

験参加者が両手の人差し指を6つの動作周波数のうちのいずれかで律動的に動かしながら、同相または逆相の指の協調動作を行う課題を行っている。この解析結果からは、実験参加者が両手の協調パターンを変えようとすることで生じる意図は、動作パターンの力学的特性および全体的な安定性に依存することなどが示唆されている。

このような個人の意図の切り替え (Intentional Switching) が生じる場合の運動意図、そして前述した異なる運動意図の種類を考慮して、行動指標とともに生理指標である神経活動を捉えることは、他者の動作の観察が必要である二者の身体的コミュニケーションの理解に新しい知見をもたらさう。

このため本研究の第4章では、二者の身体的コミュニケーションの動的な意図の切り替え (Intentional Switching) を観察するため、協調的そして競争的な状況の神経活動の違いとして明らかにすることを試みた。

2.3 解くべき問題と状況

これまでの研究から、記号的コミュニケーションおよび身体的コミュニケーションの共通する点としては、記号ないし身体動作から相手の意図を理解すること、が挙げられる。記号的コミュニケーションについては、実験記号論のパラダイムを用いた行動実験については検討が進められているが、脳波計測実験は多くなく、局所部位の検討に留まっており、脳全体の大域的な神経活動は捉えられていなかった。一方、身体的コミュニケーションについては、運動意図の理解といった他者の動作観察を対象に神経活動が捉えられており、前頭部と頭頂部の脳領域が関与することが示唆されている。また社会的あるいは非社会的な運動意図の違いによっても違いが見られるとする。さらに二者が身体動作を同期させた状態から、この意図を変更し動作を切り替える場合に生じうる動的な意図性に関する

る神経活動を捉えることができれば、この社会的な運動意図の理解についてのさらなる知見をもたらすことが可能となる。これら2つのコミュニケーションにおける意図理解に関する大域的な神経活動、そして記号と身体動作というコミュニケーション様式の違いから生じる神経活動の共通点および相違点を明らかにすることは、意図に関するコミュニケーションはの神経基盤の解明につながる可能性がある。

2.4 本研究の着眼点

本研究の着眼点は、パワー解析や位相同期解析などを用いて、大域的な神経同期現象の観点からコミュニケーション時の脳波を捉えることで、記号的および身体的コミュニケーションの神経基盤に迫ろうとする点にある。そして、これら2つのモダリティの異なるコミュニケーションの統一的な神経基盤の作業仮説について考察し、提示する点を特筆したい。特に本研究では、記号的および身体的コミュニケーションの変化を一種のスペクトル（図 2.1）として見ていることから、これらのコミュニケーション形態の違いに起因する神経活動の特徴について次章以降で観察していくこととする。

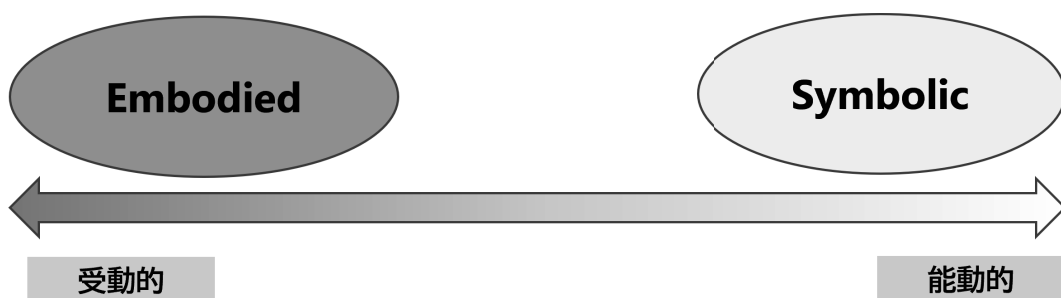


図 2.1: 記号的・身体的コミュニケーション

第3章

記号コミュニケーション課題における脳波振幅および位相同期解析

行動指標に対応する位相同期解析の方法およびその解析結果から、記号的コミュニケーションに関わる神経基盤についての洞察を得る。成功・失敗群間の神経位相同期性の違いなどについて、試行を詳細に分類した解析結果を示すことで、記号的コミュニケーションに関わる重要な神経活動について議論を行う。

3.1 研究背景

実験記号論 (Experimental Semiotics, ES) (Galantucci, 2005) は、前述したように、実験室実験で人間の新奇なコミュニケーションシステムの形成過程の調査を目的とした、新しい方法論・分野である。ES は、自然言語を用いることができないように操作され、コミュニケーション手段が限定された状況下において、

人工言語を用いたコミュニケーションシステムの創発を観察することが可能である。

金野らは実験記号論に基づいたコーディネーションゲームを洗練させ、記号的コミュニケーションにおける行動指標による分析を行っている (Konno et al., 2013). その改訂版 (Li et al., 2019) では、コミュニケーションに用いる幾何学図形を 4 種類のみ限定した上で脳波計測実験が実施されている。しかし局所的な神経活動のみが対象とされ、脳全体の大域的な神経活動の分析は行われていなかった。本研究ではこの Li et al. (2019) らの計測実験から得られた脳波および行動データを分析対象として用いることで、記号的コミュニケーションにおける大域的な神経活動を明らかにしようとした。

3.2 研究目的

本論文では、記号的コミュニケーションに関わる神経基盤を明らかにすることを目的とした。このために、本研究の目的として以下を明らかにする：

研究目的 1

位相同期の観点から記号理解時の大域的な神経活動を明らかにする。

研究目的 2

成功群と失敗群間での神経活動の違いを明らかにする。

3.3 実験方法

3.3.1 記号コミュニケーション課題

記号的コミュニケーション課題では、実験参加者が目的を達成するためのコミュニケーションの手段が4種類の異なる幾何学的な図形のみに制限される。具体的には、2人1組となった実験参加者が、図 3.1A に模式的に示したコンピューター画面上の4つの異なる部屋（縦横 2×2 の配置）のいずれかに無作為に配置された自分を模したエージェントを、各試行で上下左右の部屋に1度だけ移動させることで、同じ部屋に向かわせることを目的とした。

本課題の1試行は図 3.1B に示すように、固視点イベント後（図 3.1C）に4つの段階を経ることになる：

1. 実験参加者の自分を模したエージェントが4つの部屋のいずれかに試行毎に無作為に配置される。このとき、相手のエージェントの位置はお互いに分からない状態である。(Location Assigning)
2. プレイヤーは4つの選択肢から1つの幾何学的図形を選択し、非同期的にパートナーと図形（メッセージ）を送り合う。このとき二者が送り合う順番はあらかじめ決められたものでなく指定されていないため、どちらが先手あるいは後手になるかは両方で意思疎通しあう必要がある。そして、図形の交換時には（図 3.1D）に示すように、先手・後手でそれぞれ異なる手順を踏む。(Message Exchanging)
3. 相手から送られてきた図形（メッセージ）が表示される（記号受信イベント、図 3.1C）ため、その意図を考慮して、上下左右に移動するか留まることを選択する。(Moving)

4. 選択後、結果の表示画面でお互いのエージェントの位置が表示され、お互いのエージェントが同じ部屋で出会えた場合、点数が加算される。(Result Showing)

本課題では以上を 60 試行繰り返した。課題では対角の部屋への移動（つまり斜めの移動）は許されていないため、二者が記号のやり取りを通して相互に理解しあいコミュニケーションが成立していなければ、高い成績は得られないものとなっている。なぜなら、4つの部屋に4種類の図形を当てはめ相手と共有できればよい一方、現在居る部屋なのか今から移動する部屋なのかという意味は、別の方法で取り決める必要が生じるからである。本研究ではこれらを、字義通りの意味（図形と部屋の対応関係）と言外の意味（現在居る部屋なのか今から移動する部屋なのか）と区別しており、課題の高い成績のためには、これら2つの意味を相互に理解することが参加者に求められた。つまり高い成績を得やすい最良の方法は、実験参加者らが任意に決めた送る順序（先手なのか後手なのか）で言外の意味をパートナーと共有しあう、という戦略であった。

本研究で分析の対象とした、固視点イベント（図 3.1C）と記号受信イベント（図 3.1E）では、前者で固視点を 2 秒間、後者でパートナーが送ってきた図形を 3 秒間、それぞれ実験参加者に対して、ディスプレイ上で呈示された。

3.3.2 実験手順

実験参加者ペアは無作為に割り当てられ、2つの実験室にそれぞれ分けられた。視覚刺激の提示には、リフレッシュレート 120Hz の 22 インチのディスプレイ (ViewPixx, VPixx Technologies Inc., America) が用いられ、Psychtoolbox^{*1} によるカスタムスクリプトが使用された。このディスプレイは各実験参加者の約

^{*1} <http://psychtoolbox.org>

100cm 離れた箇所に設置され、参加者は右手人差し指を用いて、4つのキーボタ
ンを使用することとした。実験参加者には、自分を模したエージェントが配置さ
れた部屋から移動するか、あるいはは留まるかを選択し、相手を模したエージェ
ントと同じ部屋で出会い続けられるように図形を選び送り合うこと、が教示さ
れた。

3.3.3 実験参加者

実験参加者はお互いに知り合いではない形で、40人の参加者がコミュニケー
ション実験を行うために募集された。そして課題の成績に応じて、12組24人の
参加者を抽出し、前処理の過程で技術的な問題により、1人の参加者が除外され
た。これらの参加者は、実験行動データから推定された課題の成績に基づいてグ
ループ分けされた（成功：13人、失敗：10人）。23名の参加者（age Mean =
22.2, SD=2.36, range = 20~29）は、全員が右利きの健康な日本人成人男性で
あった。実験開始前に、実験参加者に対して、研究目的、方法、予想される危険
性と不利益および利益、個人情報取り扱いについて、書面と口頭で説明を行っ
た。本実験は、倫理委員会の機関ガイドラインに基づいてインフォームドコンセ
ントを行い、北陸先端科学技術大学院大学ライフサイエンス委員会と京都産業大
学研究倫理委員会の承認をそれぞれ得た。

3.4 脳波計測

脳波計測では、脳波計測用アンプである BrainAmp MRplus (Brain Products
GmbH, Germany) を2台用いた。BrainAmp MRplus により増幅された脳波
データを、BrainVision Recorder (Brain Products GmbH, Germany) を用い
て計測することで実施された。そして、グラウンド (GND) 電極とリファレンス

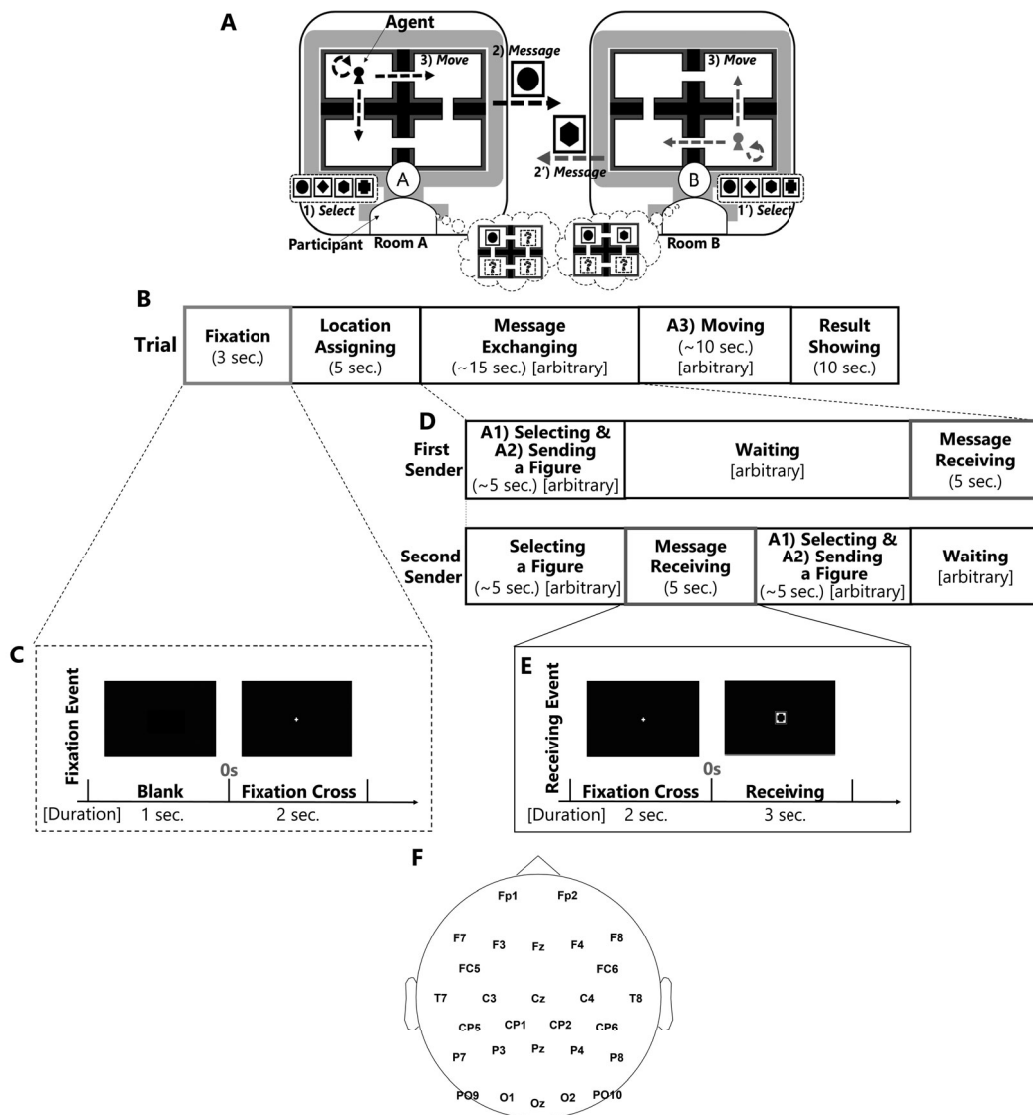


図 3.1: 記号コミュニケーション課題. (A) 記号コミュニケーション課題の概要図. (B) 1 回の試行の手順. 本課題では全部で 60 試行が行われた. 各試行において, 参加者のエージェントは, 4 つの部屋のうちの 1 つにランダムに配置された. (C) 固視点イベント. 各試行の開始直前に提示される. (D) メッセージ交換の手順. 2 人の参加者は課題を通じてメッセージを送る順番を任意に決める. 最初にメッセージを送る参加者を第一送信者, そのパートナーを第二送信者としていくつか異なる手順をとる. (E) 2 番目の送信者による記号受信イベントはメッセージを受信した直後のイベントのタイミングを 0 秒として赤で示している. (F) 脳波電極配置図. 脳波の記録には, 国際 10-20 法に基づく 28 個の頭皮電極を用いた.

(REF) 電極を含んだ 28 個の電極に加え、眼球電図 (electrooculogram, EOG) に用いる 4 個の電極を含んだ計 32 個の電極について、実験参加者 1 ペア 2 名分である総計 64 個の電極が二者同時計測に用いられた。拡張された国際 10-20 法に従って、アクティブ Ag/AgCl 電極 (actiCAP 32-Ch Standard-2; 図 3.1F) を配置、頭皮上の脳波信号を記録した。また、AFz をリファレンス (REF) 電極とし、FCz をグラウンド (GND) 電極とした。加えて、4 個の電極 (FC1, FC2, TP9, TP10) は、眼球電図 (electrooculogram, EOG) の記録に使用し、左目の上下および左右の目の外角横にテープで固定することで、上下左右の眼球運動による眼球アーチファクトを検出した。残りの 28 個の電極 (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC5, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, CP5, CP1, CP2, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, PO9, O1, Oz, O2, PO10) は脳波計測に用いられ、すべての電極に導電ジェルを塗布し記録した (図 3.1F)。

EEG と EOG の信号はすべて BrainVision Recorder を用いて記録され、A/D 変換のサンプリング周波数を 1000 Hz とし、Low Cutoff は 10s, High Cutoff は 250 Hz に設定された。EEG と EOG 記録時にはノッチフィルターは適用せず、各電極のインピーダンスはおおよそ 10 k Ω 以下に抑えるように努め、計測中でも最高で 37 k Ω 以下であった。

2 台の ViewPixx モニターからのトリガー信号は、トリガー出力端子から USB 中継ボックスまで BNC ケーブルで接続し、8bit の TTL 信号 (5 V) として伝送され、脳波データと同時に記録された。

3.5 解析方法

MATLAB® R2019a (MathWorks, Inc, Natick, MA) ^{*2} のカスタムスクリプト, EEGLAB (Delorme and Makeig, 2004) ^{*3}, Fieldtrip Toolbox (Oostenveld et al., 2011) ^{*4}を用いて, オフラインでの EEG データの前処理と解析を行った.

3.5.1 前処理

はじめに, 実験課題で計測した 1 ペア分の脳波データである 64 電極 (実験参加者 1 人あたり 32 電極分の EEG・EOG データ) を各実験参加者のデータに分割した. さらに EEGLAB で取り込んだ脳波データは 1~70 Hz の範囲でフィルタリングし, スペクトル補間で 60 Hz のラインノイズを除去した (Leske and Dalal, 2019). 次に, Artifact Subspace Reconstruction (ASR) (Mullen et al., 2015) を適用し, 高振幅のアーチファクトによるデータ汚染を低減し, 不良な電極を除去した後, 除去したすべての電極を補間した. そして, 共通平均で再参照し, Adaptive Mixture Independent Component Analysis (AMICA) (Hsu et al., 2018) を実行した後, IClab (Pion-Tonachini et al., 2019) に加えて, Semi-Automatic Selection of Independent Components for Artifact correction (SASICA) (Chaumon et al., 2015) (EOG チャンネルを用いた眼球とサッカーボールの成分の除去のみに用いた) で実行される独立成分法によるアーチファクト除去を行った. 最後に, 前処理が済んだ脳波データを固視点および記号受信イベント周辺の -1500 ms から 2000 ms までの試行に分割し, Fieldtrip のデータ構造

^{*2} <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>

^{*3} <https://sccn.ucsd.edu/eeglab/index.php>

^{*4} <https://www.fieldtriptoolbox.org/>

への変換処理を施した (図 3.2).

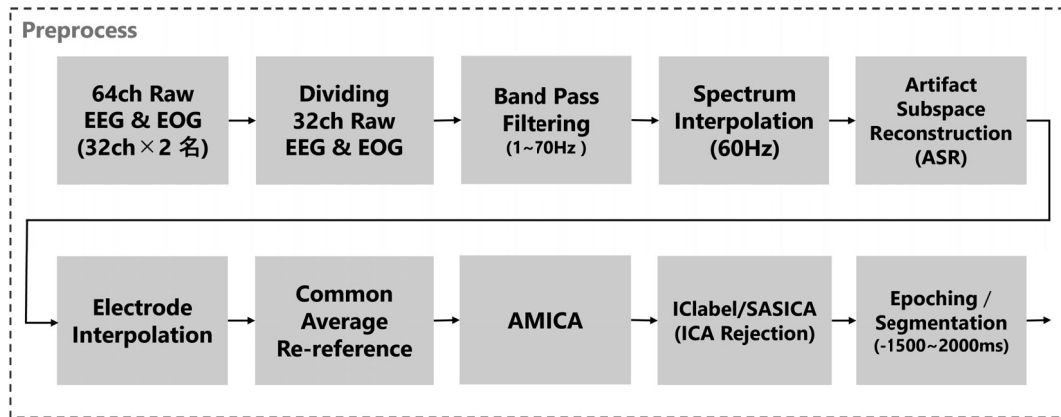


図 3.2: 記号コミュニケーション課題における前処理.

また本研究では成功群と失敗群について調べるために、モデルベース行動アプローチによるベイズ推論モデルと同様のアプローチを採用した (Corrado and Doya, 2007; Samejima and Doya, 2008). このモデルベース行動アプローチは、外部変数の履歴から推定される学習モデルの内部変数を参照しながら、神経記録データや脳画像データを特徴づける方法をとる. そのためこの方法は、実験参加者の行動履歴などから、記号コミュニケーションの創発過程を調べると同時に脳活動の過程を探ることを可能とする. 本研究では Samejima et al. (2016) と同じアプローチで構築した記号生成確率モデルを用いて、各実験参加者の課題遂行状況に応じて成功群と失敗群の推定を判定することとした. このモデルでは、実験参加者はそれぞれ図形と部屋の間に対応表を持ち、その図形を参照として使っていると仮定する. この対応表が実験参加者ペアでどのように共有されているかを評価するために、Matching Degree を導入した. 各試行におけるペアにおいて、Matching Degree は以下のように定義される:

$$Match = \frac{1}{N_f} \sum (P(c_1|m) * P(c_2|m)), \quad (3.1)$$

ここで、 c_1, c_2 はそれぞれ実験参加者の部屋の現在位置、 m は確率的メッセージマップ (24 通り)、 P は m が与えられたときの条件付き確率、 N_f は図形の種類数 (本実験では $N_f = 4$) である。実験参加者は各 12 試行の Matching Degree の平均値によって順序付けされ、2 種類 (字義通りおよび言外) の図形の意味を共有していると見なせるかどうかで、4 種類のグループに大別された：

1. 2 種類の図形の意味を共有し、第一送信者と第二送信者の役割を適応的に変えるペア
2. 2 種類の図形の意味を共有し、役割を固定するペア
3. 字義通りの意味は共有するが、言外の意味を共有しないペア
4. 2 種類の意味を共有しないペア

本研究では、最終的には最上位と最下位のグループをそれぞれ成功群、失敗群として分析した。

3.5.2 振幅解析

複素 Morlet ウェーブレット (complex Morlet wavelet) 変換を適用して、各 EEG 信号の瞬時振幅と位相を、周波数 f は 1 Hz から 70 Hz まで 1 Hz ステップで、固視点および記号受信イベントでは -1500 ms から 1500 ms で計算した。複素 Morlet ウェーブレット $w(t, f)$ は次のように定義される：

$$w(t, f) = (\sigma\sqrt{\pi})^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_f^2}\right) \exp(j2\pi ft), \quad (3.2)$$

ここで $\sigma_f = \frac{1}{2\sigma\omega_t}$ であり、ウェーブレットは一定の比率 $\frac{f}{\sigma_f}$ で特徴づけられる。本研究では、 $\frac{f}{\sigma_f} = 7$ として解析を行った。

位相情報の影響を分離するために、得られたフーリエスペクトル $X(t, f)$ から

瞬時振幅 $|X(t, f)|$ を計算した.

$$X(t, f) = X_R(t, f) + jX_I(t, f) = |X(t, f)|e^{j\omega t + \theta}, \quad (3.3)$$

$$|X(t, f)| = \sqrt{X_R(t, f)^2 + X_I(t, f)^2}, \quad (3.4)$$

ここで, $\omega = 2\pi f$, θ は, それぞれある電極上の EEG 信号の角周波数 f と瞬時位相を表す.

3.5.3 位相同期解析

2つの脳波電極間の位相同期度を算出するため, Weighted Phase Lag Index (wPLI) (Vinck et al., 2011) を用いた. この指標は容積伝導やサンプルサイズバイアスの効果を低減することにより, アーチファクトの影響を考慮した信号間の同期度を推定することができる. その定義式は,

$$\text{wPLI}_{xy}(t, f) = \frac{|E[\Im\{S_{xy}(t, f)\}]|}{E[|\Im\{S_{xy}(t, f)\}|]}, \quad (3.5)$$

であり, ここで $\Im\{S_{xy}\}$ と $E[\bullet]$ は電極 x と y の脳波信号間のクロススペクトル S_{xy} の虚部および期待値をそれぞれ示す. wPLI は 0 から 1 の範囲の値を取り, 0 に近ければ位相同期しておらず (no phase locking), 1 に近ければ位相同期している (complete phase locking) と見なすことができる.

得られた wPLI は, 0 から 1 の閉じた値を取ることで分布の歪みが生じる. これを考慮するため, 以下の定義式による逆正接関数を用いた Fisher Z-transformation (Fisher, 1915) を実施した:

$$Z(r) = \arctan(r) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right), \quad (3.6)$$

ここで、 $r = \text{wPLI}$ であり、0 から 1 の取りうる範囲を 0 から ∞ と無限次元化した (Kay and Freeman, 1998). また得られた値が無限大をとる場合は、線形補完を行った.

次に得られた指標を

$$zscore = \frac{\text{wPLI}_{xy}^Z(t, f) - \mu_{xy}(t_{baseline}, f)}{\omega_{xy}(t_{baseline}, f)} \quad (3.7)$$

で正規化した. ここで、 μ_{xy} と ω_{xy} は、ベースライン (イベント前の継続時間として: -300~-100ms) における Fisher Z-transformation 後の wPLI_{xy}^Z の平均値と標準偏差をそれぞれ表している.

正規化された wPLI_{xy}^Z を各群の参加者で総平均化した後、成功群と失敗群のそれぞれで、ベースラインから統計的に有意な同期の変化を、並べ替え t 検定を用いて検証した. 並べ替え t 検定では、1 群あたりの参加者数が一定になるようにランダムに並べ替え、 $N = 500$ 回分の代理群データを生成し、観察された wPLI の差が、 $P_N < 0.05$ の有意差を持つかどうかを検証した.

3.6 解析結果

我々は (1) 記号受信イベントにおける脳波の振幅が固視点イベントとどのように異なるのかを時間周波数振幅の比較を通して調べ、(2) 課題の成功群と失敗群の位相同期を分析することを通して、記号メッセージを理解する上で重要と予想される脳領域間の同期が生じるかどうかを調べた. 具体的には、記号受信イベントと固視点イベントの間の振幅の有意差を、クラスタベースの並べ替え t 検定

で検定した。さらに記号コミュニケーション課題の成功群と失敗群の Weighted Phase Lag Index の差異を算出した。

3.6.1 結果 1：振幅解析

記号の意味を理解する際の神経活動の活性化を評価したところ、成功群において記号受信イベントと固視点イベントの時間-周波数振幅に有意な差が見られた (two-sided permutation t-tests, 8,000 surrogates, $P < 0.05$, cluster-corrected; Fig.3.3,3.4. これらの違いは、初期と終期の 12 試行における全電極、そして頭頂部電極において効果が認められた。また記号の意味を理解する際の効果を、クラスターベースの両側並べ替え t 検定を用いた 0ms~1,000ms の潜時で検証したところ、初期と終期の 12 試行において、記号受信イベントと固視点イベント間で振幅に有意な差があることが示された (two-sided permutation t-tests, 8,000 surrogate, $P < 0.05$; 図 3.5). 初期 12 試行で、シータ・アルファ (4~13 Hz) 帯では約 100~700 ms (Fig.5A), ガンマ帯では約 600~700 ms (Fig.3.5B) の潜時にクラスターの効果が見られた。さらに終期の 12 試行では、ガンマ (30~55 Hz) 帯で約 700~800 ms の潜時にのみクラスターによる効果が認められた (Fig.3.5C). この効果は成功群の前頭部と頭頂部の電極で観察された。一方、失敗群では、ガンマ (30~55 Hz) 帯の振幅には有意な差は見られなかったが、シータ・アルファ (4~13 Hz) 帯では、中心部、後頭部の電極で有意な差が見られた (Fig.3.6A, B).

3.6.2 結果 2：位相同期解析

成功群と失敗群では、ベースラインで正規化後の位相同期度が 100ms ごとに異なることを示した (図 3.7, 図 3.8).

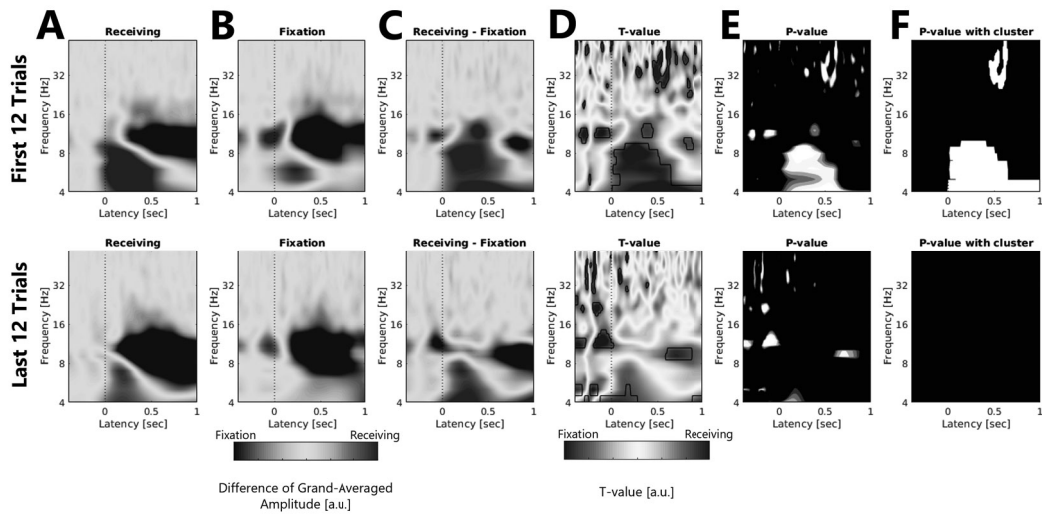


図 3.3: (全電極) 成功群における記号受信イベントと固視点イベント間の全電極の総平均振幅の時間一周波数の違い. (A) 受信イベント. (B) 固視点イベント (C) 受信イベントと固視点イベント間の差. (D) t 統計量. 輪郭線は受信イベントと固視点イベント間で有意であった領域を示す $P < 0.05$. (E) P 値 (two-sided permutation t-tests, 8,000 surrogates, $P < 0.05$, cluster-corrected). (F) クラスタ補正後の結果. カラーバーは (A), (B), (C), (D) とともに-3 から 3 まで.

実際には、初期 12 試行でシータ・アルファ (4~13 Hz)、ガンマ (30~55 Hz) の各帯域で、位相同期の Fp1-P4 の時間-周波数スペクトルの有意な差が示された (図 3.7C) 一方、失敗群では、200ms 以降の多くの電極で全体的な非同期化の傾向が見られた. 終期 12 試行では、成功群では 0~500 ms の側頭頭頂部、500 ms 以降の左前頭部の電極と同期する傾向が見られたが、失敗群は前頭部で非同期的であった.

同様に、図 3.8 では、P4 電極からのアルファ帯の位相同期が 100 ms ごとに 0 ms から 1000 ms までベースラインから増減することが観察された. 初期 12 試行では、成功群は記号メッセージを受け取った直後の 100 ms から数百 ms にかけて、右前頭部電極との結合が強くなった. 一方、失敗群では、400 ms 以降に頭頂部や後頭部の電極間で非同期化する傾向が見られた. 終期 12 試行では、成功

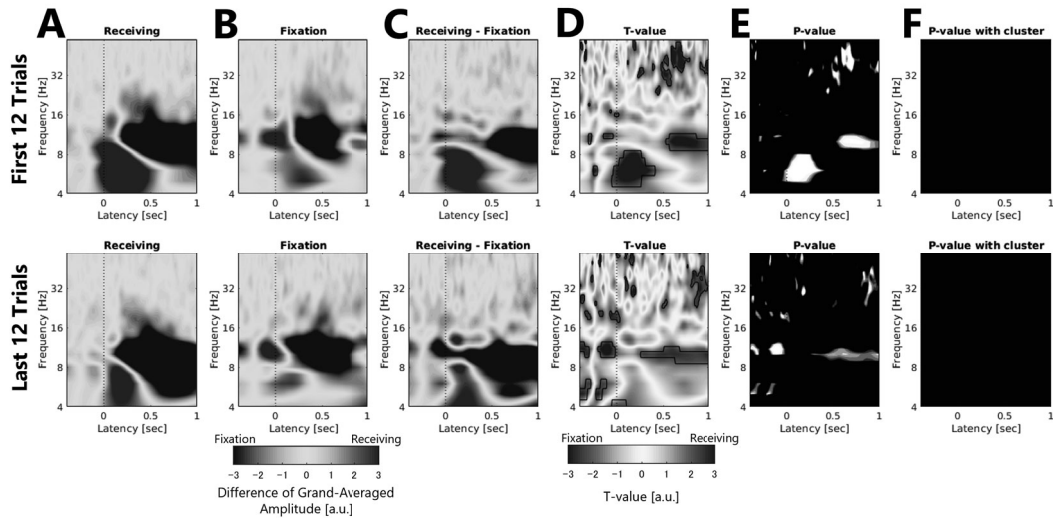


図 3.4: (頭頂部電極) 成功群における記号受信イベントと固視点イベント間の頭頂部電極の総平均振幅の時間一周波数の違い. (A) 記号受信イベント. (B) 固視点イベント. (C) 記号受信イベントと固視点イベント間の差. (D) t 統計量. 輪郭線は受信イベントと固視点イベント間で有意であった領域を示す $P < 0.05$. (E) P 値 (two-sided permutation t -tests, 8,000 surrogates, $P < 0.05$, cluster-corrected). (F) クラスター補正後の結果. カラーバーは, (A), (B), (C), (D) とともに-3 から 3 まで.

群は 0~500 ms の潜時で, 左前頭部の電極と結合する傾向があったが, 失敗群は頭頂部の電極で脱同期していた.

また成功群と失敗群では, アルファ帯とガンマ帯の位相同期がベースラインから変化していることを確認した (図 3.9). アルファ帯については, 成功群の初期 12 試行の 700 ms で, 頭頂部と頭頂部の位相同期が有意に増加していることが明らかになった (図 3.9A). 一方, 失敗群の 12 試行では, 右半球領域の位相同期は主に 200~900 ms で有意に減少した (図 3.9B). またガンマ帯ではそのような差は見られなかったが, 成功群と失敗群では, いくつかの潜時で有意な長距離の位相同期が見られた (図 3.9C,D).

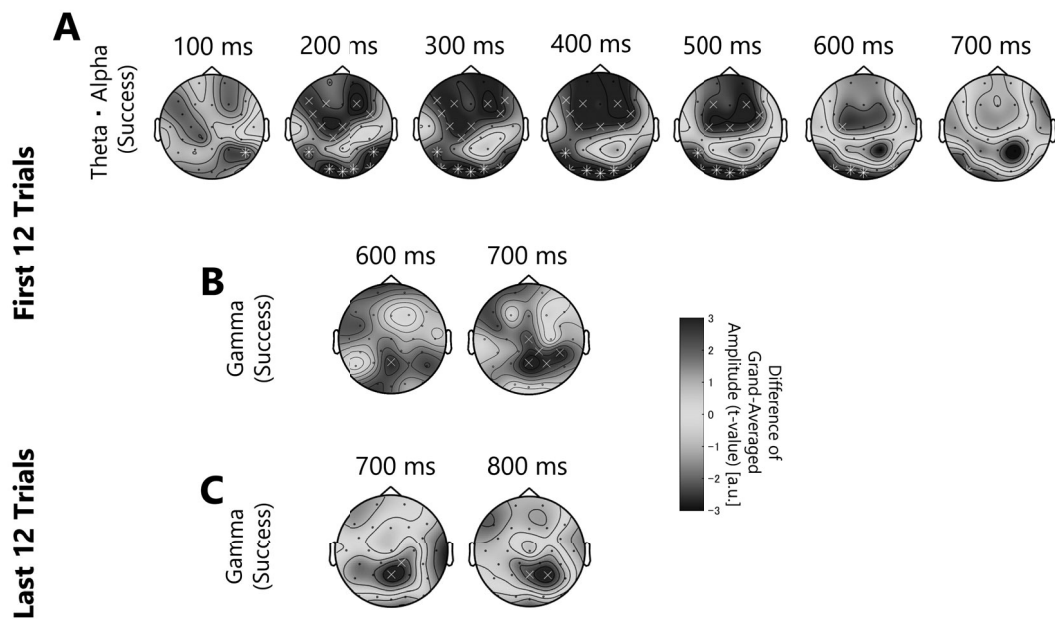


図 3.5: (成功群) 記号受信イベントと固視点イベント (500 1000 ms) 間の成功群間の平均振幅のトポグラフィの差異. チャンネルには, 記号受信イベントと固視点イベント間の有意差を示すアスタリスク (*) とクロス (x) が付けられている (two-sided permutation t-tests, 8,000 surrogates, * $P < 0.01$, $\times P < 0.05$, cluster-corrected). カラーバーは t 統計量を示す. (A) 初期 12 試行試行におけるシータ・アルファ (4~13 Hz) 帯域と (B) ガンマ (30~55 Hz) 帯域の振幅の違い. (C) 終期 12 試行におけるガンマ (30~55 Hz) 帯の振幅の違い.

3.7 議論

本研究ではまず, (1) 記号受信イベントが固視点イベントとどのように異なるのかを時間周波数とトポグラフィの振幅を比較して調べた. その結果, 記号メッセージを受信した直後の 0~500 ms のシータ帯とアルファ帯, および 600 ms 付近のガンマ帯の振幅が, 記号受信イベントでは脳全体で固視点イベントよりも有意に増加していることがわかった. この結果は, 参加者が記号と部屋の現在/過去の対応付けに関するワーキングメモリのような意味的短期記憶 (short-term

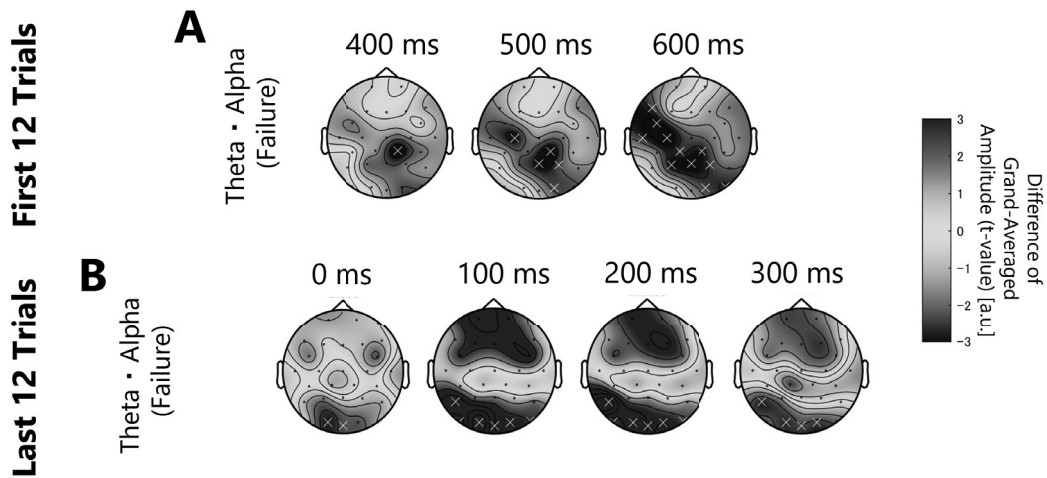


図 3.6: (失敗群) 受信イベントと固視点イベント (500 1000 ms) 間の平均振幅のトポグラフィの違い. チャンネルにアスタリスク (*) とクロス (x) を付けたものは, 記号受信イベントと固視点イベントの間の有意差を示す (two-sided permutation t-tests, 8,000 surrogates, * $P < 0.01$, x $P < 0.05$, cluster-corrected). カラーバーは t 統計量を示す. (A) 初期 12 試行における振幅の違い. (B) 終期 12 試行におけるシータおよびアルファ (4~13 Hz) 帯の振幅の違い.

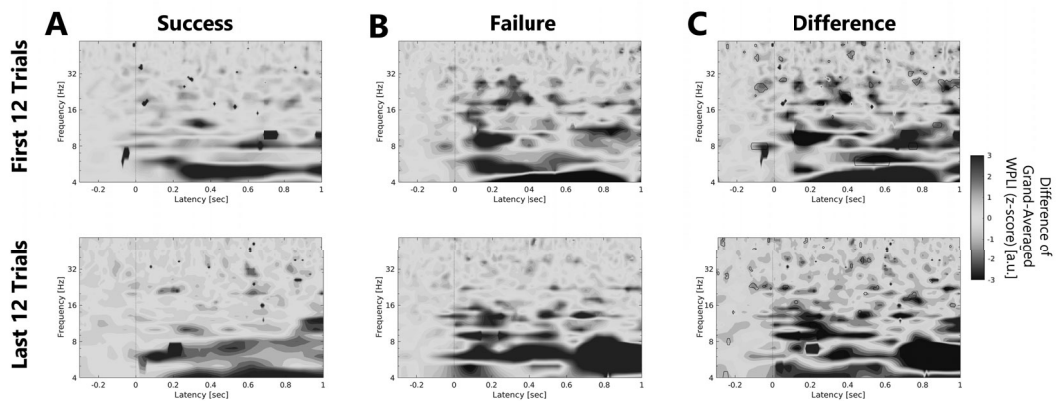


図 3.7: Fp1-P4 平均位相同期 (wPLI) のグループ間およびイベント間の時間的な差異. (A) 成功グループと (B) 失敗グループ. (C) 成功グループと失敗グループの間の差. 等高線は, 記号受信イベントと固視点イベントの間の統計的有意差を示す (two-sided permutation t-tests, 500 surrogates, $q < 0.05$, FDR-corrected). カラーバーは-3 から 3 までのすべての図で同じである.

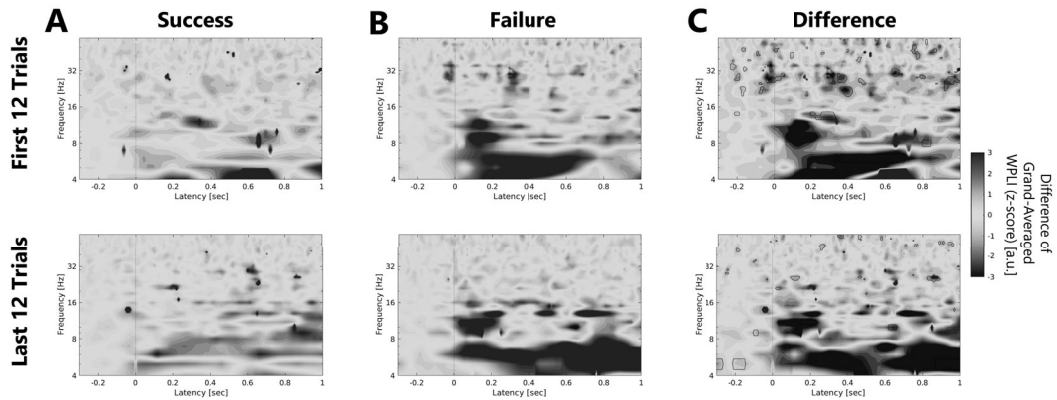


図 3.8: F3-P4 記号受信イベントと固視点イベント間の成功群と頭頂部電極間の平均値位相同期 (wPLI) の時間-周波数差. (A) 成功群. (B) 失敗群. (C) 成功群と失敗群の間の差. 輪郭線は、記号受信イベントと固視点イベント時の統計的有意差を示す (two-sided permutation t-tests, 500 surrogates, $q < 0.05$, FDR-corrected). カラーバーは-3 から 3 までのすべての図で同じである.

memory, STM) を駆動した可能性があることを示している. さらに、頭頂部のガンマ周波数に局所的なクラスターの増加が見られた. この発見は、注意と刺激の知覚の特徴と一致している (Ahmed and Cash, 2013; João Castelhamo and Eugenio Rodriguez, 2015). つまり、600 ms 付近のガンマ周波数領域の振幅は、記号の意味を理解するために頭頂部が関与していることが示唆される.

また、成功群と失敗群の位相同期を分析することで、(2) 記号メッセージの理解に重要であると予想される脳領域間の機能的結合の有無を調べた. その結果、成功群では初期 12 試行の 600ms で前頭-頭頂部の位相同期が見られたのに対し、失敗群では非同期的であったことが観察された.

3.7.1 低周波数帯の振幅の変化

今回の結果から、前頭葉のシータ・アルファ帯は、相手から記号を受け取った時 (記号受信イベント) と比較して、固視点イベントの最初の数百 ms の間に有

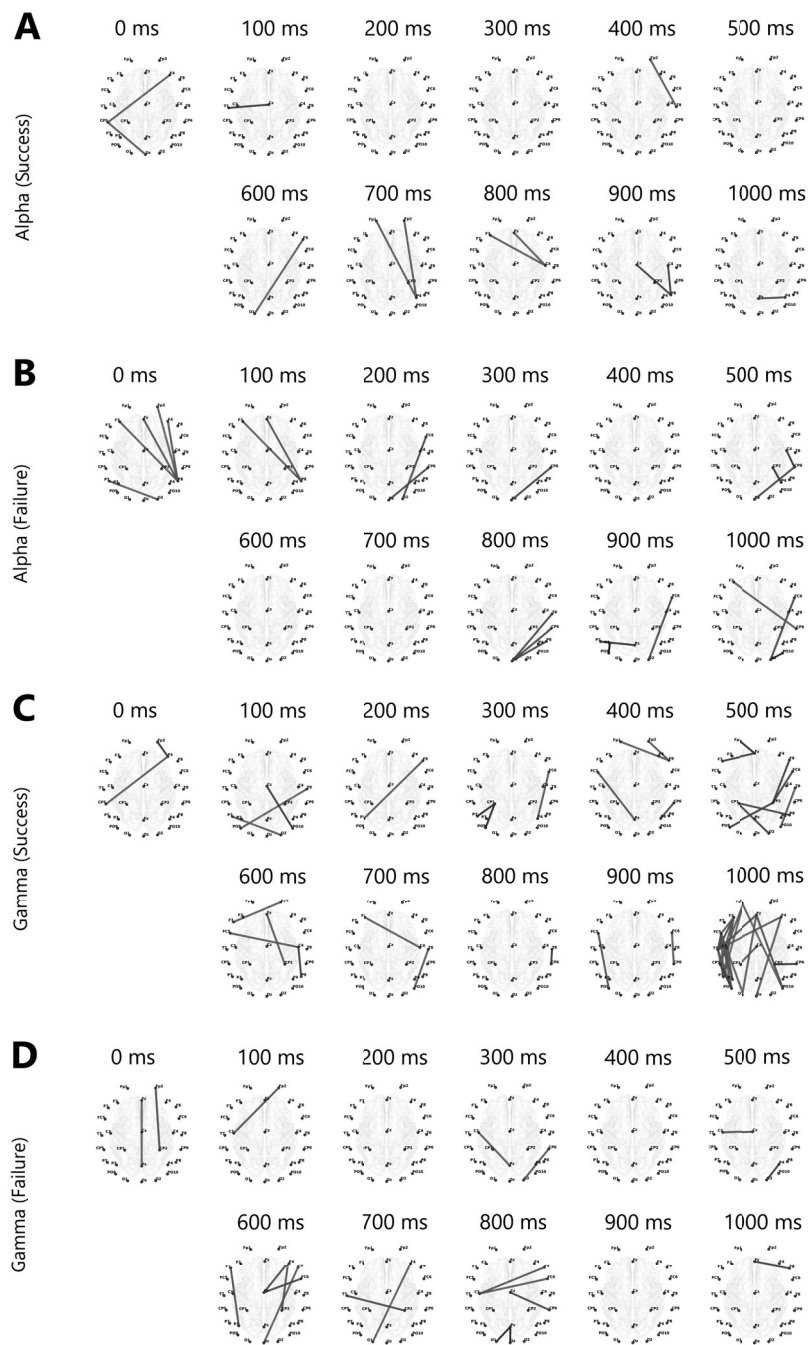


図 3.9: 初期 12 試行におけるイベント受信時のアルファ帯とガンマ帯の同期 (100ms 毎)

意な差があることがわかった。記号コミュニケーション課題では、相手から送られてきた記号の2つの意味（字義通りの意味と言外の意味）を理解する必要があるが、これは試行錯誤によって達成され、成功群は比較的早い段階での理解ができていたことが示されている。これはシータ帯では現在受け取った出来事の短期記憶またはエピソード記憶を維持しながら、アルファ帯で記号の意味を求める長期記憶（long-term memory, LTM）の要求を処理している可能性がある。実際には、シータ帯域は人間の記憶処理（リハーサル、短期記憶、新しいエピソード情報のエンコードや認識など）との関連が示唆されており、特に短期記憶の保持に前頭部が関与している可能性が指摘されている。また、アルファ帯域は意味論的なLTMの必要性と関連しており、保持された情報への注意やアクセス制御に用いられる、とされる。加えて、シータ・アルファ帯は、情報共有時の意図と関連することが報告されているが、本研究では受信イベントでの結果であるため、これには当てはまらない可能性が残る。

しかし今回の結果では、アルファ帯の位相同期の群間の違いは、記号の伝達に関わる活動（意味理解と意図共有の両方）を反映している可能性が示唆された。シータ帯とアルファ帯の位相同期は記憶 (Klimesch et al., 2008; Palva and Palva, 2011; Lobier et al., 2018) との関連が指摘されている。特にシータ帯の位相同期は、中枢実行制御、短期記憶、ワーキングメモリなどの記憶保持 (Fell and Axmacher, 2011) のために増強される、と考えられている。アルファ帯の位相同期は、意味に関するLTM (Freunberger et al., 2008) や、前頭頭頂間の認知制御ネットワークに対応している (Sadaghiani et al., 2012; Sadaghiani and Kleinschmidt, 2016), と考えられる。このように、前頭領域のシータ・アルファ帯域とその位相同期は、記号コミュニケーション課題における記号の意味理解のための記憶保持とその解釈などの認知制御活動を反映している可能性が示唆される。

3.7.2 ガンマ帯振幅と位相同期

ガンマ帯の振動は、ある脳領域からボトムアップ（低レベルの感覚野から高レベルの連想野や制御野へ）とトップダウン（逆）の処理の間を伝わりやすくする機能 (Fell et al., 2003; Fell and Axmacher, 2011) があることが指摘されている。また、Gestalt-feature に特徴づけられる物体のエンコーディングは、大規模なガンマ同期と明確に関連していることが主張されている。さらに、協調時に脳間のガンマ帯の同期が増加するという報告があり、これは意図の共有のマーカーである可能性がある (Barraza et al., 2020)。本研究では、身体的・物理的な同期が直接行われていないため、脳間の相互作用の分析は行っていないが、今後の分析対象として注目される現象であるだろう。したがって、脳全体のガンマ帯とその位相同期は、記号コミュニケーション課題において、図形と意味の関連性を結びつけて理解する認知プロセスを反映している可能性があると考えられる。

3.7.3 前頭頭頂間の同期の意味

これらの結果から、頭頂部は他者との協調に関与し、前頭部は運動意図だけでなく、記号の意味を理解し他者の意図を理解することにも関与している可能性が示唆された。特に、前頭-頭頂領域間の機能的結合は、記号的コミュニケーション時の記号の2種類の意味に関連する神経活動を反映している可能性がある。記号コミュニケーション課題において、実験参加者の二者が成功するためには、受け取った図形の字義通りの意味（図形と部屋の対応関係）と、言外の意味（目的地または現在地）を理解する必要がある。我々は、この2つの意味が mPFC が属する前頭領域で想起されるのではないかと考え、記号を受け取ると、その記号の字義通りの意味と言外の意味の両方を自分の意味に置き換えて、前頭領域で想起

されている可能性を提示する。実際に, Tylén et al. (2016) は前頭領域の mPFC や頭頂葉領域の TPJ などの活性化部位が記号の社会的意味の理解に関与していることを示している。本研究では, TPJ が属する頭頂部において, いつ, どのように図形を送るかという, 参加者間の社会的調整を反映している可能性を提案する。特に右頭頂領域は, 二者間コミュニケーションの社会的調整マーカーとして関連性があることが示唆されている (Tognoli et al., 2007)。前頭葉-頭頂間の結合性は, 認知制御としてのワーキングメモリ (Schack et al., 2005; Salazar et al., 2012), 空間的注意, 運動意図 (Chambon et al., 2017) を含む実行機能への寄与が示唆されているが, 運動による社会的調整のマーカー (Dumas et al., 2020) の効果は除外されており, 同様の寄与が示唆される。

3.8 まとめ

以上の結果から, 記号コミュニケーション課題において, 記号メッセージを理解する過程では, 0~500 ms のシータ帯およびアルファ帯の振幅および 600 ms 以降のガンマ帯の振幅が関与していることが示唆された。さらに, 600 ms 以降の前頭葉-頭頂葉の低周波数帯の位相同期も記号的コミュニケーションを行う際に関与し, 高周波帯のガンマ振動は私たちが記号の意味を抽出・理解するために, 脳が意味情報を伝達・統合するメカニズムを反映している可能性を示唆している。

第4章

身体動作コミュニケーション (あっち向いてホイ) 課題における 三デバイス二者同時脳波計測 と解析

本章では，第三章で対象とした記号的コミュニケーションに対して，身体的コミュニケーション時の協調・競争状態時の脳波解析について述べる．

4.1 研究背景

本研究が対象とする身体的コミュニケーションについては，観察者が運動する他者の運動意図を理解しようとする際に，観察された行動の根底にある意図について理解する必要がある．

第二章にて，先行研究ではタッピングや指振りなどといった，二者の身体的コ

コミュニケーションにおいて、脳内や二者の脳間における神経活動の同期、右頭頂部の神経活動が社会的協調のマーカーとして観察しうること、そして、異なる運動意図の種類についても神経活動に違いが見られていることについて述べた。

しかし、二者が身体動作を同期させた状態から、この意図を変更し動作を切り替える場合に生じうる動的な意図性に関する神経活動についてはまだ明らかではない。

個人の**意図の切り替え (Intentional Switching)**が生じる場合の運動意図、そして前述した異なる運動意図の種類を考慮し、行動指標とともに生理指標である神経活動を捉えることは、他者の動作の観察が必要である二者の身体的コミュニケーションの理解に新しい知見をもたらさう。

このため本研究では後述する、従来の「あっちむいてホイ」を改変した課題を構築し、異なる運動意図に切り替える際の神経活動を捉えることで、二者の身体的コミュニケーションの神経基盤を明らかにしようとした。

4.2 研究目的

人間のコミュニケーションには、環境を含めたマルチモーダルな情報処理が必要である。本実験は、協力的な状況や競争的な状況において、参加者はコミュニケーションを円滑にするために行動のタイミングや切り替えを調整し、相手の意図を推定しているという仮説を立て、その行動の背後にある神経メカニズムを明らかにすることを目的とした。このために、本実験の目的として以下を明らかにする。

研究目的

二者同時三デバイス計測システムを用いた、動作と脳波を関連付けた神経活動の解析により、協調時と競争時の神経活動の違いを明らかにする。

4.3 実験方法

4.3.1 あっち向いてホイ課題

本課題は、日本の伝統的なゲームである「あっち向いてホイ」ゲームを改変することで構築した。本課題の「あっち向いてホイ」ゲーム (図 4.1) では、参加者は2人1組のペアを作り、身体動作コミュニケーションを行う (図 4.1A)。

まずはじめに「じゃんけん」フェーズでは、従来の「じゃんけん」を行う。「じゃんけん」フェーズの結果があいこの場合は、再び「じゃんけん」をやり直す。

「あっち向いてホイ」フェーズでは、「じゃんけん」の勝者は、従来の「あっち向いてホイ」ゲームと同様に右手の人差し指で、敗者であるパートナーに方向を指し示す。一方で、「じゃんけん」の敗者は、従来の「あっち向いてホイ」ゲームと異なり、「じゃんけん」の勝者が指し示した方向とはランダムか、同じまたは異なる方向を指す、という後述する3つの条件に従うように教示した (図 4.1B)。また従来の「あっち向いてホイ」ゲームでは、敗者であるパートナーは通常、顔や首を動かすことで方向を示すことになるが、本課題の「あっち向いてホイ」フェーズでは右手の人差し指だけで向いた方向を示すことを、実験参加者に教示した。

このように、本課題の1試行は「じゃんけん」と「あっち向いてホイ」の2つのフェーズから構成されている (図 4.1C)。

本課題では、協調・競争動作を行う際の神経活性化の違いを見るために、以下の3種類の異なる条件を設け、これらの条件の違いを分析対象とした。

- **Scramble 条件.** 実験参加者はじゃんけんをした後、勝者敗者ともにランダムな方向に指先を向けるように指示された (ベースライン条件)。

- **Congruent** 条件. 実験参加者はじゃんけんの後、右手の人差し指をお互いに同じ方向に向けるように指示された (**協調条件**).
- **Incongruent** 条件. じゃんけんの勝者は右手の人差し指を相手と同じ方向に向け、敗者は右手の人差し指を勝者が向けた方向とは別の方向に向けるように指示された (**競争条件**).

4.3.2 実験参加者

本研究で対象とした実験参加者は、北陸先端科学技術大学院大学の学生である健康成人男性 8 名 (age Mean=28.1, SD=3.82, range=22-36 years) であった。全員右利きであり、レンズで矯正された視力を持つ日本人と中国人の成人男性であった。施験者は実験参加者らに対するインフォームド・コンセントを行い、実験内容を口頭と書面で説明後、実験参加者らの同意を書面で得た。本研究は倫理委員会の機関指針に基づき、北陸先端科学技術大学院大学ライフサイエンス委員会および九州工業大学倫理委員会の承認を得た上で実験を実施した。

4.3.3 実験手順

実験参加者ペア 2 名はランダムに割り当てられ、それぞれ机に向かい合って座った状態で実験が実施された。まずはじめに、安静時の脳波を 2 分間記録した後、前述の 3 つの条件でそれぞれ課題を実施し、各条件で 8 分以上継続して課題が行われた。このとき、実験参加者には、机の上に肘を固定したまま、右腕だけで「じゃんけん」ゲームを行い、じゃんけんの勝敗に応じて Scramble, Congruent, Incongruent の各条件に従い、右手の人差し指のみを用いて「あっち向いてホイ」ゲームを繰り返すこと、が教示された。全体の実験の所要時間は約 80 分であった。

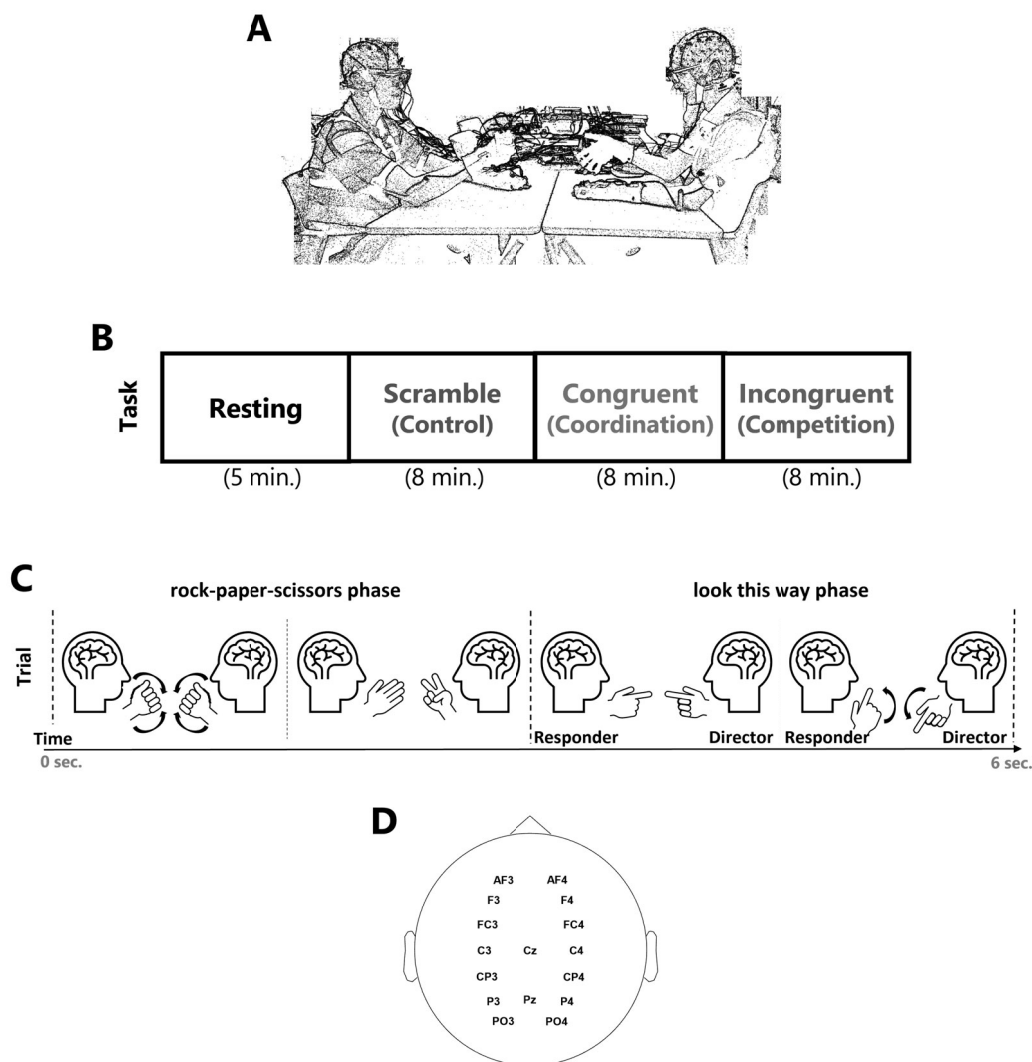


図 4.1: あっちむいてホイ課題の概要. (A) 二者三デバイス同時計測を用いた本課題の様子. (B) 本課題の手順. 最初に 5 分間の休息を設けた後, Scramble 条件, Congruent 条件, Incongruent 条件が各 8 分間実施された (C) 1 試行の手順. 1 つの試行は「rock-paper-scissors phase」と「look this way phase」の 2 つのフェーズから構成される. 「rock-paper-scissors phase」における結果を踏まえて, 「look this way phase」における Responder と Director が決定され, 各条件に応じた振る舞いが求められた. (D) 脳波電極配置図. 脳波の記録には, 国際 10-20 法に基づく 16 個の頭皮用電極を用いた.

4.4 二者同時三デバイス計測 (脳波・動作・視線)

4.4.1 二者同時三デバイス計測

二者同時三デバイス計測を実現するためのシステムとして、各デバイスの Transistor-transistor logic(TTL) 信号を用いることで、後述する各デバイス間で計測開始タイミングの同期を取ることを可能にした (図 4.2)。本手法では、TTL による各信号がどのデバイスから発せられているのかを区別するために、電圧による弁別を採用している。EEG 計測デバイス、モーションキャプチャデバイス (自作の TTL デバイスを用いる)、視線計測デバイスから発する TTL はそれぞれ、8V, 4V, 2V の電圧を取るが、異なるデバイスにより発生した TTL 信号を TTL 信号の電圧の合計値から分離する機能を共同研究にて実現した (Sanchez et al., 2020)。これにより、イベントの発生が記録されたトリガー信号の時刻合わせが可能となり、特定の時間にどのデバイスがトリガー信号を送信していたかという判断が可能となった (図 4.3, 図 4.4)。

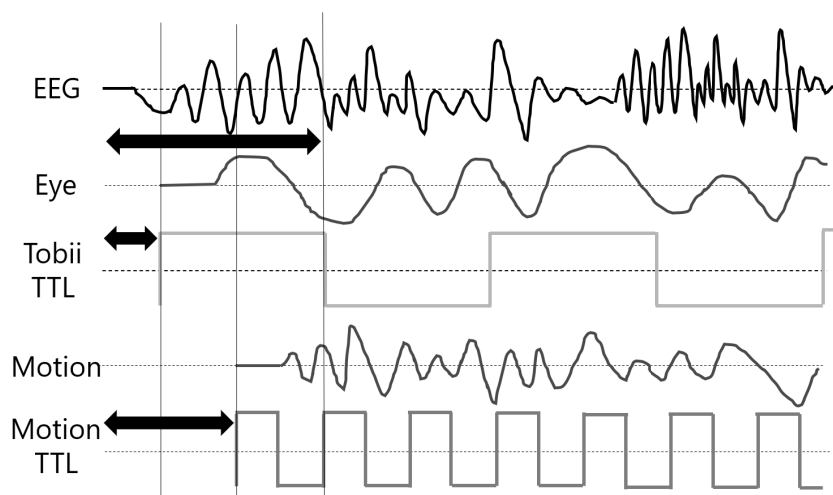


図 4.2: TTL の図

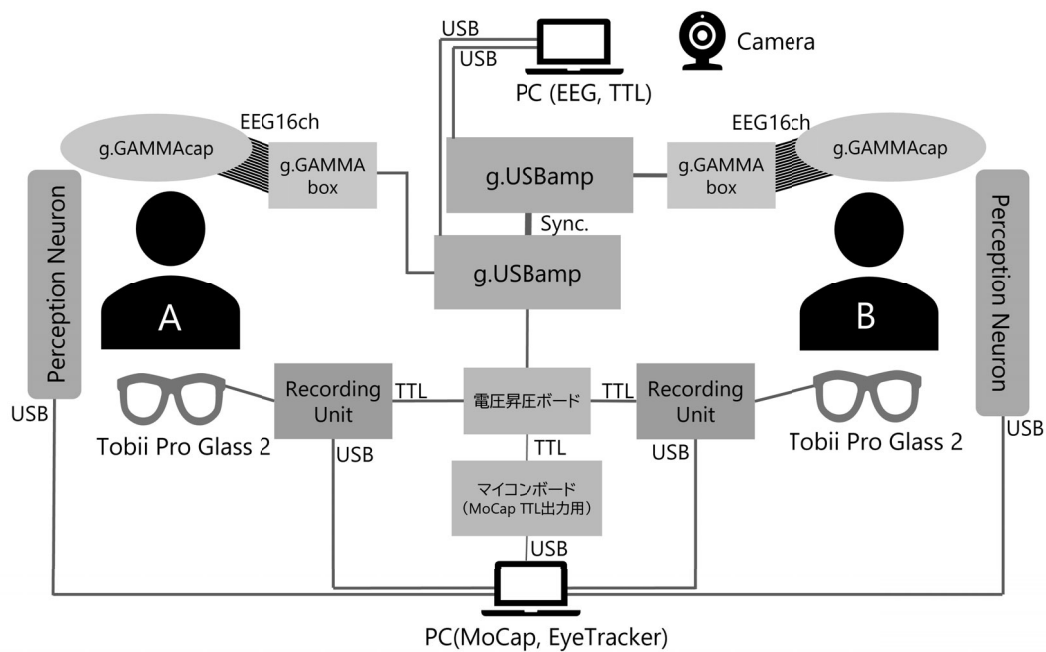


図 4.3: 計測環境

4.4.2 二者同時脳波計測

二者同時脳波計測は、**g.USBamp**[®] (Guger Technologies OG, Graz, Austria) の 24 bit 生体信号アンプ 2 台を同期ケーブルで接続することで実施された。拡張された国際 10-20 システムを採用し、アクティブ Ag/AgCl 電極を用いた 16 個の電極 (AF3, AF4, F3, F4, FC3, FC4, C3, Cz, C4, CP3, CP4, P3, Pz, P4, PO3, PO4) が配置された (図 4.1D)。そしてリファレンス (REF) 電極は右耳朶 (A2) に、グラウンド (GND) 電極は前頭部 (AFz) に配置し、すべての電極に導電ジェルを塗布した。二者の EEG 信号はすべて g.tec 社の記録用の MATLAB コードを用いて記録され、A/D 変換のサンプリング周波数は 512 Hz であり、60 Hz のノッチフィルターをオンラインで適用した。



図 4.4: 二者同時三デバイス計測システム

4.4.3 二者同時動作計測

二者同時動作計測では, **Perception Neuron**[®] (Perception Neuron, Noitom, Miami, FL, USA) を 2 台用いた. Perception Neuron[®] は, 実験参加者が使用するウェアラブルモーションキャプチャーデバイスであり, 慣性計測ユニット (IMU : Inertial Measurement Unit) であるニューロンと呼ばれる 9 軸のセンサーユニットが使用される. 動作データは, AXIS Neuron ソフトウェア (Noitom, Miami, FL, USA) を用いて二者同時に記録された.

4.4.4 二者同時視線計測

二者同時視線計測では, **Tobii Pro Glasses 2** (Tobii Technology, Danderyd, Sweden) を 2 台採用した. 本製品は, 目の動きを記録する際のサンプリングレートが 100 Hz のウェアラブルアイトラッキングデバイスであった.

4.5 解析方法

前章と同様に, 解析ソフトとして **MATLAB® R2020a** (MathWorks, Inc, Natick, MA) に加え, Open Source Software である, EEGLAB を主に前処理, 主な解析には Fieldtrip をそれぞれ用いた.

4.5.1 前処理

はじめに, 脳波データの前処理として, EEGLAB に取り込んだ上で, 0.5Hz のハイパスフィルターを適用した. 次に, 不良チャンネルを同定・除去し, **Artifact Subspace Reconstruction (ASR)** を軽度のしきい値で適用した後, 全ての除去されたチャンネルに対して補完を行った. **共通平均基準参照 (CAR: Common Average Reference)** を行い, 各試行の「rock-paper-scissors phase」の開始時刻をイベントとして抽出・定義し, -2 s から 6 s のエポッキングを実施した (図 4.5).

4.5.2 時間周波数変換: パワー解析

パワー解析では, 超解像度の時間-周波数変換を行うため, 近年新たに考案されたスーパーレット (Moca et al., 2021) を用いた. 従来の短時間フーリエ変換

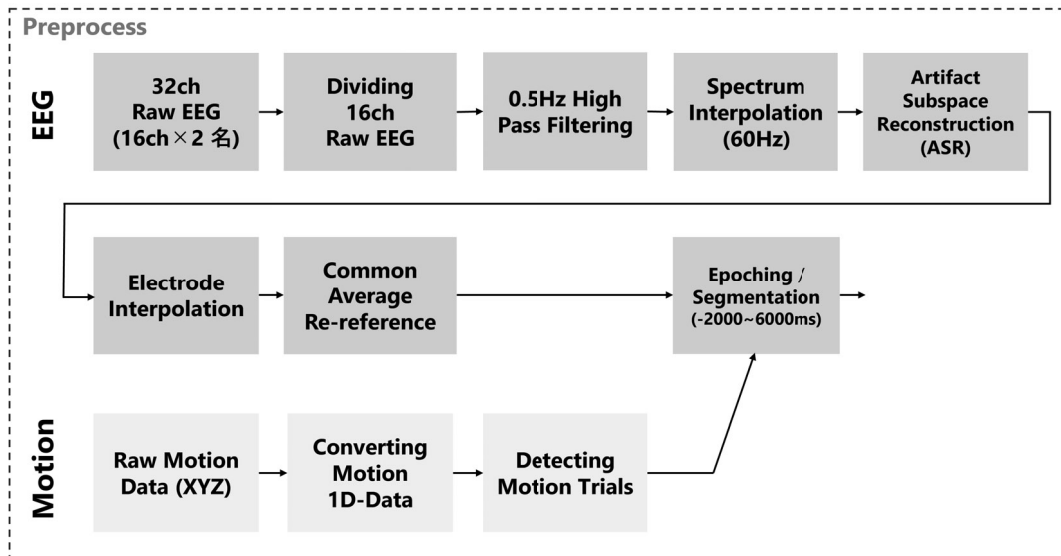


図 4.5: 前処理の概要

や連続ウェーブレット変換では、時間分解能と周波数分解能のどちらかを最適化するためにトレードオフが生じてしまい、**ハイゼンベルグ・ガボールの不確定性原理** (Heisenberg - Gabor uncertainty principle) により、有限振動の過渡現象は正確な時間と周波数の両方を同時に局在化することが困難であった。

これに対応すべく提案されたスーパーレットは、時間-周波数の超解像を可能にするスペクトル推定法であり、周波数分解能を向上させるために、帯域幅に制約のあるウェーブレットの集合を用い、これらを幾何学的に組み合わせることで、単一のウェーブレットの優れた時間分解能を維持しつつも超解像度の解析を実現している。

本論文でもスーパーレットを採用することで、超解像度のパワー解析を行うこととした。

スーパーレット (Moca et al., 2021) とは、一定の中心周波数を持ち、さまざまな周期を持つウェーブレットの集合であり、以下に定義される：

$$SL_{f,o} = \{\psi_{f,c} | c = c_1, c_2, \dots, c_o\} \quad (4.1)$$

ここでは、スーパーレットの次数 o を 7 とし、集合の各ウェーブレットのサイクル数 c_1, c_2, \dots, c_o を 5~20 の範囲で設定した。本論文では、加算スーパーレット (additive superlet) を用いて、中心周波数に対する次数を調整することで、周波数の増加に対するウェーブレット帯域幅の増加を補正した。

4.6 解析結果

4.6.1 結果：パワー解析

比較 1 では、Congruent 条件と Scramble 条件の間に有意な差が見られた。左側の頭頂部電極では、潜時 3.27 s から 4.33 s でアルファ帯域に正のクラスターが見られた。また後頭部の電極では、 -0.35 s から -0.06 s の潜時でガンマ帯に正のクラスターが見られた。

比較 2 では、Incongruent 条件と Scramble 条件の間に有意な差が見られた。アルファ帯では有意な差はなかったが、ガンマ帯では右中央電極上で 2.19 s から 2.80 s 秒の範囲で負のクラスターが見られた。

比較 3 では、Congruent 条件と Incongruent 条件の間で、各周波数帯において有意な差がそれぞれ見られた。このうちの 1 つはアルファ帯での正の効果によるものであり、その効果は 2.43 s から 3.98 s の潜時において、左中心部 (C3 電極周辺) で最も顕著であった。(Fig.4.6a)。一方、ガンマ帯では右の頭頂部 (CP4 電極周辺) で正の効果が最も顕著であった (4.6b)。この効果には、2.30 s から 5.00 s までの潜時の有意差が関与していた。またアルファ帯 (Fig.4.7a) は、ガンマ帯 (Fig.4.7b) と比較して、条件間で時間周波数パワーに有意な差は見られな

かった。この違いは 2.00 s 後の右中脳頭頂部電極におけるベータ帯とガンマ帯で観察された。

4.7 議論

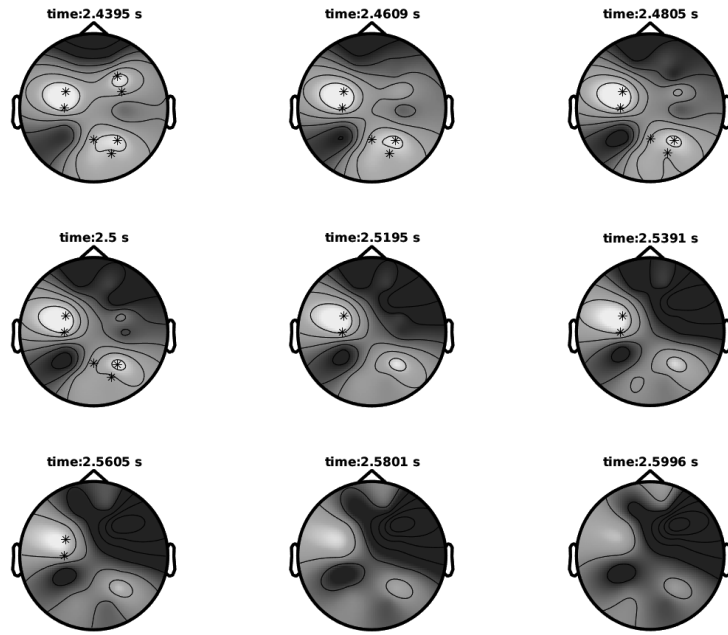
4.7.1 議論：パワー解析

本実験では、協調的行動と競争的行動を行う被験者の神経活動について調べた。特に、Scramble 条件に加え、Congruent 条件と Incongruent 条件の違いがあるかどうか注目した。その結果、Congruent 条件と Incongruent 条件では、アルファ帯とガンマ帯に有意な差があり、それぞれ左前頭中心部、右中央頭頂部に効果が認められた。

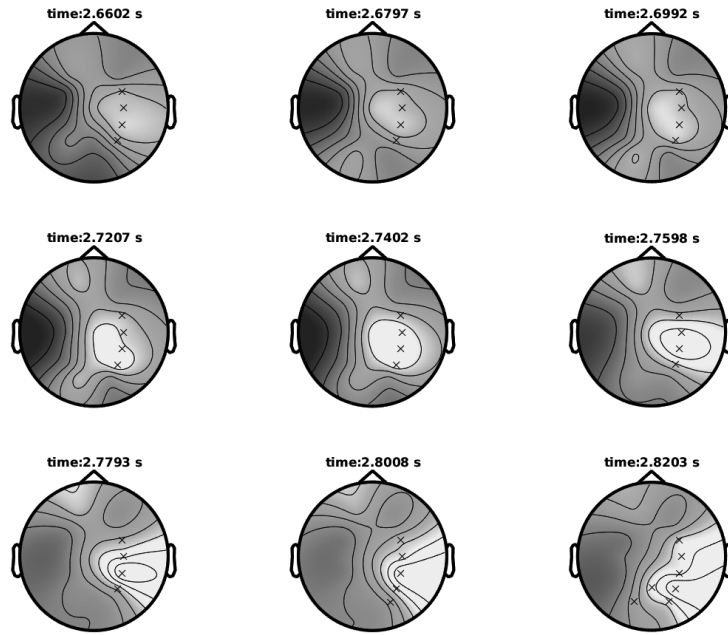
今回のあっちむいてホイゲームでは、実験参加者はじゃんけんの最中に協調行動を行い、その後行動を変える必要があった。それは、動作の効果だけでなく、動作を介した相手の意図を推論する過程を含んでいる。これまでの研究では、ミュー波を含むアルファ帯域とガンマ帯域の右頭頂部の神経活動が、人間の協調を反映していることが示唆されていた (Tognoli et al., 2007; Dumas et al., 2020)。本実験の結果は、左前頭中心部は相手の指の動きの存在の認識、運動意図の理解を反映している可能性があり（特にミラー効果があることが知られている C3 電極）、右中心頭頂部は協調・競争による効果を反映している可能性を示唆する。

この実験計画や解析方法にはいくつかの技術的な問題があるが、その一つは、条件による順序効果 (order effect) を排除できなかったことである。また本論文では使わなかった生理指標である視線データを脳波データと合わせて解析していくことで、協調行動や競争行動に役立つ情報を得ることが期待できる。

さらに、脳間脳波の位相同期は、協調動作時にのみガンマ帯に現れることが示

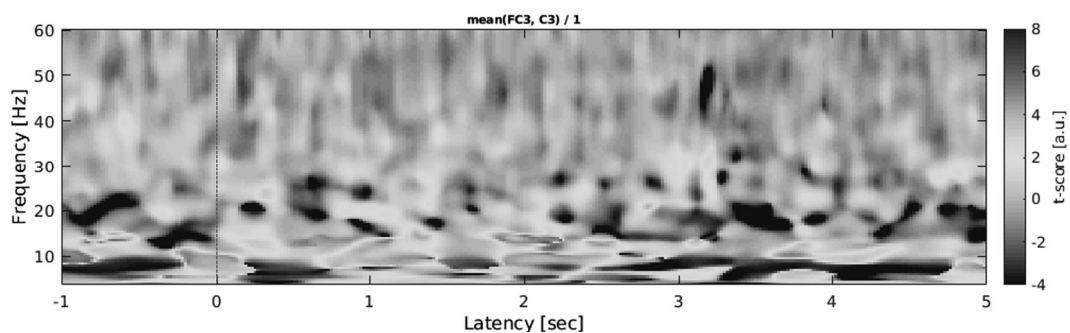


(a) Alpha (8~13 Hz)

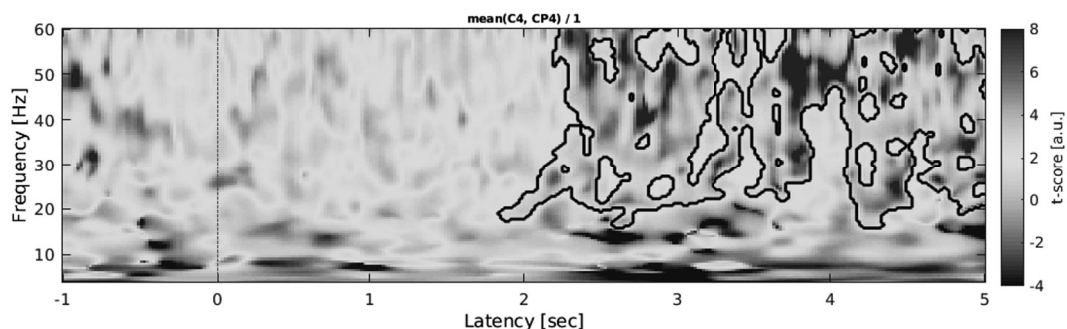


(b) Gamma (30~50 Hz)

図 4.6: (t-score) Congruent 条件と Incongruent 条件間の実験参加者・周波数における総平均パワーのトポグラフィーマップの違い. (a) アルファ帯と (b) ガンマ帯の総平均パワー差 (two-sided permutation t-tests, 256 surrogates, $\times p < 0.05$, $*p < 0.01$, cluster-corrected;). カラーバーは-2~4 の範囲.



(a) FC3 and C3 electrodes



(b) C4 and CP4 electrodes

図 4.7: (t-score) Congruent 条件と Incongruent 条件間の実験参加者・電極における総平均パワーの時間-周波数表現の違い (two-sided permutation t-tests, 256 surrogates, $\times p < 0.05$, $*p < 0.01$, cluster-corrected;). (a) 前頭中心部の電極. (b) 頭頂中心部の電極. 黒の実線は, 有意に異なるピクセルが連続している領域の輪郭を示す. カラーバーは-4 から 8 までの範囲である.

されている (Barraza et al., 2020). 本論文では脳間位相同期の解析については触れなかったが, このような人間の行動と神経活動の同期を観察することは, 社会神経科学のみならず, 人間の言語進化や語用論の分野においても, さらなる知見を得ることができるだろう.

4.8 まとめ

本章では、コミュニケーションを円滑にするために行動のタイミングや切り替えを調整し、相手の意図を推定しているという仮説を立て、「じゃんけん」で二者が動きを協調した状態から、「あっち向いてホイ」を3つの異なる状況下（Scramble 条件、Congruent 条件、Incongruent 条件）で実施した際の神経活動の違いについて調べた。その結果、特に Congruent 条件と Incongruent 条件で、アルファ帯とガンマ帯に有意な差が見られた。そしてその有意差はそれぞれ左前頭中心部、右中心頭頂部に認められ、それぞれ運動意図、そして社会的調整に関与する可能性を示した。

第5章

神経質量・場モデルの検討

前章までに、記号的および身体的コミュニケーションに関わる神経活動について、脳波計測実験を通して神経活動の検討を行い、前頭部および頭頂部が関与している可能性を指摘した。しかし、2つのコミュニケーションの計測実験はあくまで脳波などの現象論的側面を扱ったに過ぎず、これらの実験だけではその神経同期現象の機能的側面に迫ることは難しい。そこで本章では、近年提案されている次世代型の神経質量・場モデルを用い、コミュニケーションに関連する神経活動の検討を念頭に、階層的な神経同期現象のメカニズムについて調べることを意図し、十分ではないが予備的な数値実験を実施した。加えて、得られた予備的な結果について考察し、次の第6章で述べる、コミュニケーションの神経モデルへの道筋や今後の発展などの、本研究の展望に昇華させることを目指した。

5.1 研究背景

5.1.1 神経活動の階層性とコミュニケーションの神経基盤

神経活動と一口に言っても、その階層レベルは多岐にわたる。1970年には既に、(Freeman, 1975)による **K-set** ^{*1}が提案されている。K-set は、マルチスケールかつメゾスコピックなモデルである。このモデルは、ミクロな神経細胞とマクロな脳構造の中間的なレベルにおける構造と固有ダイナミクスに関連付けがなされている。言い換えると、神経細胞集団における結合の階層性をトポロジカルに規定したものとなっている。そしてこの階層性を整理した **K-set hierarchy** (Kozma, 2008; Kozma and Noack, 2017) は、神経細胞から皮質レベルの大域的な神経活動までを、K0, KI, KII, KIII, KIV, KV の5つのスケールとして扱い、K0 から順に再帰的な構造が想定されている。

また Varela et al. (2001) は、神経活動を脳の階層的な同期現象とした視座を与えており、単一神経細胞、局所フィールド電位、皮質脳波、脳波電極の順に得られた神経活動を局所的スケールとし、脳部位間の神経活動を大域的スケールと置いている。Kelso et al. (2013) は、前掲した Varela の階層を基に、二者間の神経同期の階層を加えたマルチスケールな神経活動の描像として整理している。

以上に紹介した研究は、前者は再帰的な構造を想定したモデルであり、後者は実際の神経活動・神経同期現象を整理した描像を描いている。このような見方は、神経細胞からコミュニケーションまでの神経活動を捉え検討することに有益である。

^{*1} K-set の名称の由来は、パレスチナ解放人民戦線やアラブ赤軍（後の日本赤軍派含む）などによるテルアビブ国際空港の乱射事件で殺害された、神経ダイナミクスのパイオニアであるイスラエル人研究者 Aharon Katzir-Katchalsky から名付けられている。

5.1.2 神経細胞モデル

一方、前述した2つの研究では最下位のレベルにあたる神経細胞の活動・神経同期現象について、特に数理的なモデルは、伝統的かつ基礎的な神経細胞モデルがこれまでに数多く提案されてきた。まずはじめに言及すべきである、**ホジキン・ハックスレー (Hodgkin-Huxley, HH) モデル**は、ヤリイカの巨大軸索の活動電位を対象とした電位固定法 (voltage-clamp) によって、Na⁺ チャンネル、K⁺ チャンネルの開閉に起因するコンダクタンスの変化を実験的に測定し、それを微分方程式を含む数理モデルで表現したことで、1963年のノーベル生理学・医学賞に至っている。

そして、**積分発火 (Integrate-and-Fire, IF) モデル**では、HHモデルで考慮していた神経細胞の活動電位の生成過程 (生理学的なイオンチャンネルの挙動) の記述を省略し、膜電位が閾値に達するまでの入力電流を時間的に積分するモデルとして記述された:

$$\dot{v}_i = v_i + I_i. \quad (5.1)$$

本研究では、後述する神経細胞集団間ネットワーク間の同期を調べるために、次の**二次積分発火モデル**を用いる。**二次積分発火 (Quadratic Integrate-and-Fire, QIF) モデル**は、IFモデルの一種であり、2次関数の項を含む数理モデルに拡張されている:

$$\dot{v}_i = v_i^2 + I_i. \quad (5.2)$$

スパイクレスポンスモデル (Spike Response Model, SRM) は、IFモデルの特殊例として微分方程式でない表現で定式化されている。他にも、イオンの拡散

などによる膜電位の漏れを考慮した漏れ積分発火 (Leaky integrate-and-fire, LIF) モデルや, QIF モデルを念頭に置いた多くの神経細胞の活動を再現できる Izhichevich モデルがある. またフィッツフュー-南雲 (FitzHugh-Nagumo, FHN) モデルやその特殊な場合であるファンデルポール (Bonhoeffer-van der Pol, BVP) モデルなどもある (これらのモデルの詳細は割愛する).

5.1.3 従来の神経質量・場モデル

神経細胞集団レベルを考えた古典的な神経質量モデルとして, はじめに **Wilson-Cowan モデル** (Wilson and Cowan, 1972) が挙げられる. この Wilson-Cowan モデルは, 興奮性と抑制性の神経細胞集団間の相互作用を記述した単純な神経質量モデルとして知られている.

そして, **Jansen-Rit モデル** (Jansen and Rit, 1995) は, 興奮性と抑制性介在ニューロン集団によるフィードバックを持つ錐体細胞の集団を導入し, 3つの集団間相互作用のダイナミクスを記述しており, Wilson-Cowan モデルを拡張した形のモデルとして提案されている. しかし, この Jansen-Rit モデルなどは, ガンマ帯のような速い波を表現することが難しかった. **Wendling モデル** (Wendling et al., 2000) は, Fast-spike と slow-spike な2つの抑制性集団を考慮することで, ガンマ帯のような早い波を表現できるモデルとして提案された. その後の進展で, 興奮性と抑制性の細胞集団を2つずつの計4集団を導入した, より複雑な **Liley モデル** (Liley et al., 2002; Liley and Walsh, 2013) や, 脳領域間の同期を想定した EEG や MEG を模倣するモデル (David and Friston, 2003) などへと拡張がなされている.

以上に述べてきた複数の神経質量モデルは**一次型の神経場モデル**と呼び, そして以下に述べていくモデルを**二次型の神経場モデル**と区別する場合がある (Cook

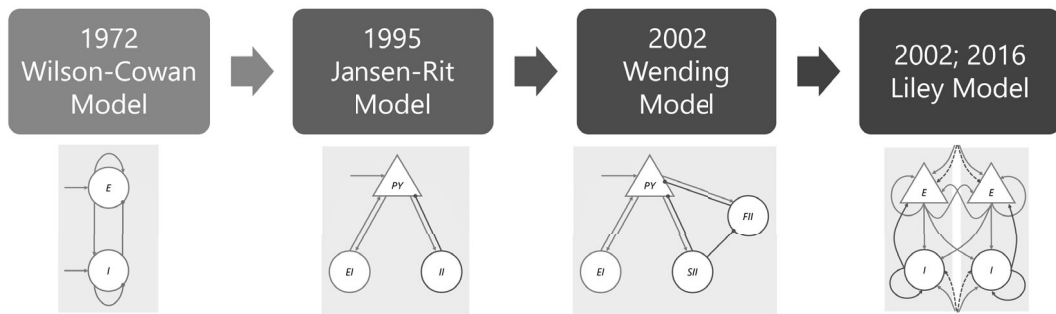


図 5.1: 一次神経場モデルの図

et al., 2022).

まずはじめに、**Robinson** らによる**神経場モデル** (Robinson et al., 1997) は単純なモデルである。次に、**Peterson** らのモデルは、非線形なコンダクタンスベースのシナプスやその複雑なダイナミクスを表現する神経場モデルを提案している。2010年代には次世代型と呼ばれる、シナプスのコンダクタンスが基になったモデルや平均場モデルなどが考案され、機能的ネットワークを視野に入れたモデル構築と分析が進められている (Byrne et al., 2020)。そして、**Coombes** らの**モデル** (Coombes et al., 2003; Coombes, 2005) は、結合偏微分方程式による記述を行い、グリーン関数やフーリエ変換などで神経場モデルを表現している。このモデルは、次節で紹介する次世代型の神経場モデルの一部にも研究の流れとしてつながっている。

しかし、これら従来型の神経質量・場モデルは、あくまで個々の発火ニューロンの活動に基づくものではなく、あくまで神経細胞集団レベルにおける集団作用を記述するものであった。つまり、単一な神経細胞モデル、例えば既存の発火ニューロンモデルを基に神経細胞集団を考えるアプローチについては、これまで困難なままであった。

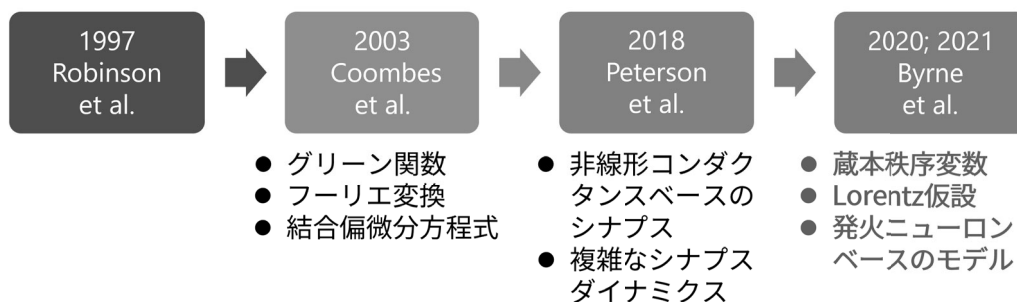


図 5.2: 二次神経場モデルの図

一方、非線形力学の分野では、2008年に蔵本モデルを念頭に、**Ott-Antonsen ansatz**による次元縮約が検討されてきた。Ott-Antonsen ansatzは、OttとAntonsenらが提案した数学上のansatz(仮設)に当たるもので、提案されて以来、蔵本モデルなどの結合された位相振動子間の同期を調べるための強力な道具として用いられる。

5.1.4 次世代型の神経質量・場モデル

近年、Montbrio (Montbrió et al., 2015)らは、このOtt-Antonsen ansatzを、神経場モデルに援用するLorentz ansatzを提案した。Lorentz ansatzは、背景入力 η_i の確率密度関数(PDF)は、中央値 η_0 、半値幅 γ を用いて、

$$\mathcal{L}(\eta) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\eta - \eta_0)^2 + \gamma^2} \quad (5.3)$$

という、一般にLorentz(Cauchy)型分布の関数に収束し、その低次元空間の中ですべてのダイナミクスが起こると仮定する、という仮設である。

この仮設を導入することで、QIFニューロン集団と蔵本秩序変数間のマッピング

ングが可能となる.

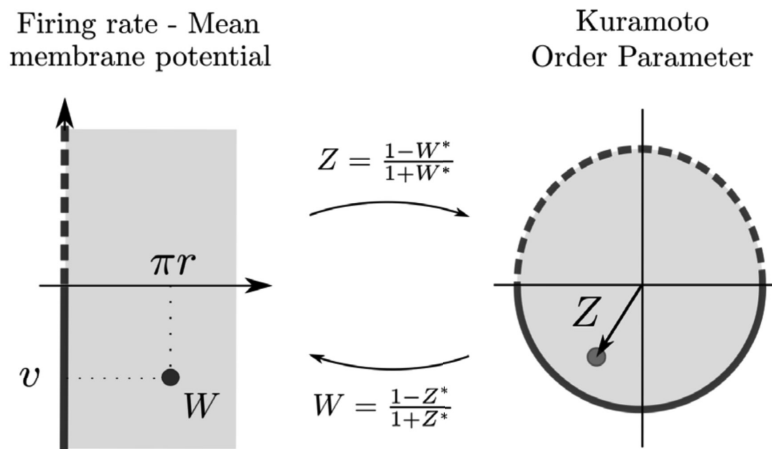


図 5.3: QIF ニューロンと蔵本秩序変数間のマッピング (Montbrió et al., 2015)

ただし，仮設の確率密度関数として採用した，**Cauchy - Lorentz 分布**（または **Breit - Wigner 分布**）は，分散や期待値は定義されないことから，大数の法則や中心極限定理が成立しない．そして2次モーメントが無限大となるなど，ある意味で特殊な確率分布である．ガウス分布がとるグラフの形と類似しているように見えるものの，その性質は異なるものであり，このことは次世代型の神経質量・場モデルに導入する上で懸念のひとつである．

しかし，本研究では，コミュニケーション時の脳波の同期現象に関わる神経メカニズムを探るため，神経細胞モデルから脳波を模した神経場モデルを繋ぐようなアプローチが必要となる．また逆に，脳波などの神経データから神経細胞の状態を推定することも，将来的には可能になるかもしれない．したがって，この仮設を導入することは，コミュニケーション時の脳波の同期現象に関わる神経メカニズムを神経細胞の活動から探る上で有益といえるだろう．残念ながら，本研究ではまだ脳波レベルまでのモデルとして昇華できていないが，この仮設に基づいた神経細胞集団間の神経同期現象について，まずは予備的な検討を行う．

5.2 研究目的

異なる種類の発火ニューロンモデルの複数の集団と平均発火率などのダイナミクスを関連付けた、神経回路網や脳波を対象とする計算論的な神経モデルを構築し、人間のコミュニケーションに関わる神経メカニズムを明らかにする道筋を概観する。

5.3 研究方法

5.3.1 Byrne モデル

二次積分発火 (Quadratic Integrate and Fire, QIF) モデルは、従来の積分発火モデルの発火特性の項を 2 次関数に拡張した発火ニューロンモデルである。Byrne らは、これを基にシナプスおよびギャップ結合を考慮に入れた、 N 個のニューロンをネットワークとする QIF モデル (Byrne et al., 2020) を提案しており、このモデルを本稿でも採用する。Byrne モデルにおける i 番目のニューロンの膜電位 v_i の変化は、

$$\tau \dot{v}_i = \eta_i + v_i^2 + \frac{\kappa_v}{N} \sum_{j=1}^N (v_j - v_i) + \frac{\kappa_s}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{m \in \mathbb{Z}} s(t - T_j^m) \quad (5.4)$$

である。ここで、 η_i は背景入力、 κ_v はギャップ結合強度、 κ_s はシナプス結合強度、 T_j^m は発火時刻、 τ は時定数、 $s(t) = \alpha^2 t \exp(-\alpha t) H(t)$ (H はヘビサイド関数、 $1/\alpha$ はシナプスのピークまでの時間) である。

5.3.2 Cauchy – Lorentz 分布と Lorentz 仮設

ここで神経細胞の背景入力確率分布に Cauchy – Lorentz 分布（再掲）

$$\mathcal{L}(\eta) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\eta - \eta_0)^2 + \gamma^2} \quad (5.5)$$

を採用する Lorentz 仮設 (Montbrió et al., 2015) を置くと (η_0, γ はそれぞれ中央値と半値幅), 集団同期性を記述する複素蔵本秩序変数 Z が, 平均発火率 R と平均膜電位 V からなる複素数 $W = \pi\tau R + iV$ を用いて,

$$Z = \frac{1 - W^*}{1 + W^*} \quad (5.6)$$

と書ける (W^* は W の複素共役).

これらの仮設や写像の導入により, 発火ニューロンモデルの大規模ネットワークのダイナミクス Z と平均発火率・平均膜電位を含んだ W のダイナミクスを関連付けられる. このモデルをもちいて, 興奮性, 抑制性それぞれの集団間の全細胞がシナプス結合している結合系を考える.

5.3.3 位相同期指標

集団間の同期解析には, 2 信号間の位相同同期度を複数試行における位相差の平均により定量化する Phase Locking Value(PLV) (Lachaux et al., 1999)

$$\text{PLV}_t = \frac{1}{M} \left| \sum_{m=1}^M \exp(j\theta(t, m)) \right| \left(= E \left[\frac{S_{xy}}{|S_{xy}|} \right] \right) \quad (0 \leq \text{PLV}_t \leq 1) \quad (5.7)$$

を用いた. ここで, M は試行回数, j は虚数単位, ϕ_x^m, ϕ_y^m は試行 m における

各信号 x, y の位相を表し, $\theta(t, m) = \phi_x(t, m) - \phi_y(t, m)$ である. PLV は各信号 x, y のクロススペクトル S_{xy} を用いた期待値 $E[\cdot]$ で表すこともできる. 値が 0 だと非同期であり, 1 だと同期していると見なす.

5.3.4 数値実験

前節で述べたモデルを基に興奮性・抑制性集団間の相互作用 (図 5.4) を考慮すると, 以下の数式で表すことができる (Byrne et al., 2020):

$$\begin{aligned} \tau_a \dot{R}_a & \left(= -\kappa_v^a R_a + 2R_a V_a + \frac{\gamma_a}{\pi \tau_a} \right) \\ & = -R_a \sum_{b \in \{E, I\}} \kappa_v^b + 2R_a V_a + \frac{\gamma_a}{\pi \tau_a} \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \tau_a \dot{V}_a & \left(= -\eta_0^a + V_a^2 - \pi^2 \tau_a^2 R_a^2 + \kappa_s^{ab} U_{ab} \right) \\ & = -\eta_0^a + V_a^2 - \pi^2 \tau_a^2 R_a^2 + \sum_{b \in \{E, I\}} \kappa_s^{ab} U_{ab} + \sum_{b \in \{E, I\}} \kappa_v^{ab} [V_b - V_a] \end{aligned} \quad (5.9)$$

ここで, U はシナプスの集団的活動, $a, b \in \{E, I\}$ であり, E は興奮性, I は抑制性細胞を表す.

本研究では, それぞれの神経細胞数を $N_E, N_I = 1000$ とした 2 集団の結合系における同期についても解析した.

5.4 解析結果

1 集団のシミュレーション結果を図 5.5 に表す. 5.5 は, 上段からそれぞれ, 各神経細胞の発火パターンを表すラスタプロット, 平均膜電位 V , 平均発火率 R , 集団内同期性 $|Z|$ の時間変化を表す. 黒線は発火ニューロンのネットワーク

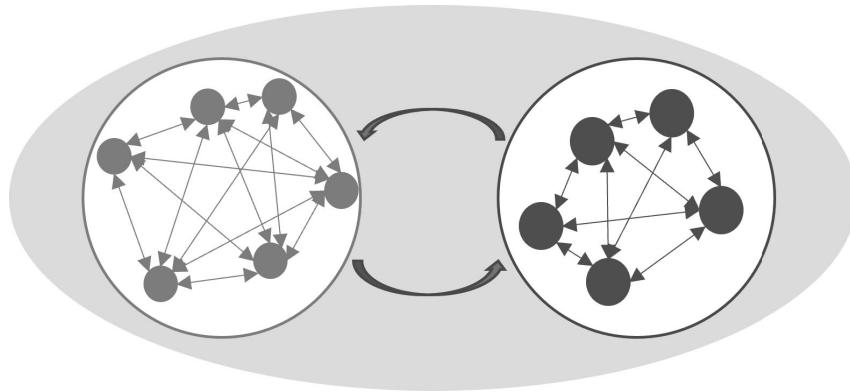


図 5.4: 興奮性と抑制性集団相互作用の模式図

の変化，赤・青線は神経質量モデルの変化を表している．結果として，Lorentz 仮説を用いた先行研究と同様に，集団全体の近似が出来ていることが分かった．

そして，図 5.6 は 2 集団のシミュレーション結果を表している．上段からそれぞれ，各神経細胞の発火パターンを表すラスタプロット，平均膜電位 V ，平均発火率 R ，集団内同期性 $|Z|$ の時間変化を表す．黒線は発火ニューロンのネットワークの変化，赤・青線は神経質量モデルの変化を表す．結果として，2 集団間のシナプス結合，特に抑制性から興奮性への結合が非常に強いとき，興奮性細胞の同期発火が抑制されることが観察された．すなわち，同期が生じている抑制性細胞の集団（図 1 右）ではラスタプロットに明瞭な疎密が見られるのに対し，興奮性細胞集団（図 1 左）はそのパターンは明瞭ではなかった．それに伴い，興奮性集団は抑制性集団に比べ，平均膜電位 V のピーク幅は狭く，平均発火率 R のピークは低く，集団内同期性 $|Z|$ は低い値で振動していた．

加えて，図 5.7 は上段から 100 試行のパワー平均，位相平均，PLV の結果を表している．特に，PLV の解析結果は，値がベータ帯域 (20-30Hz) で他の領域よりも比較的高い領域が観察された．

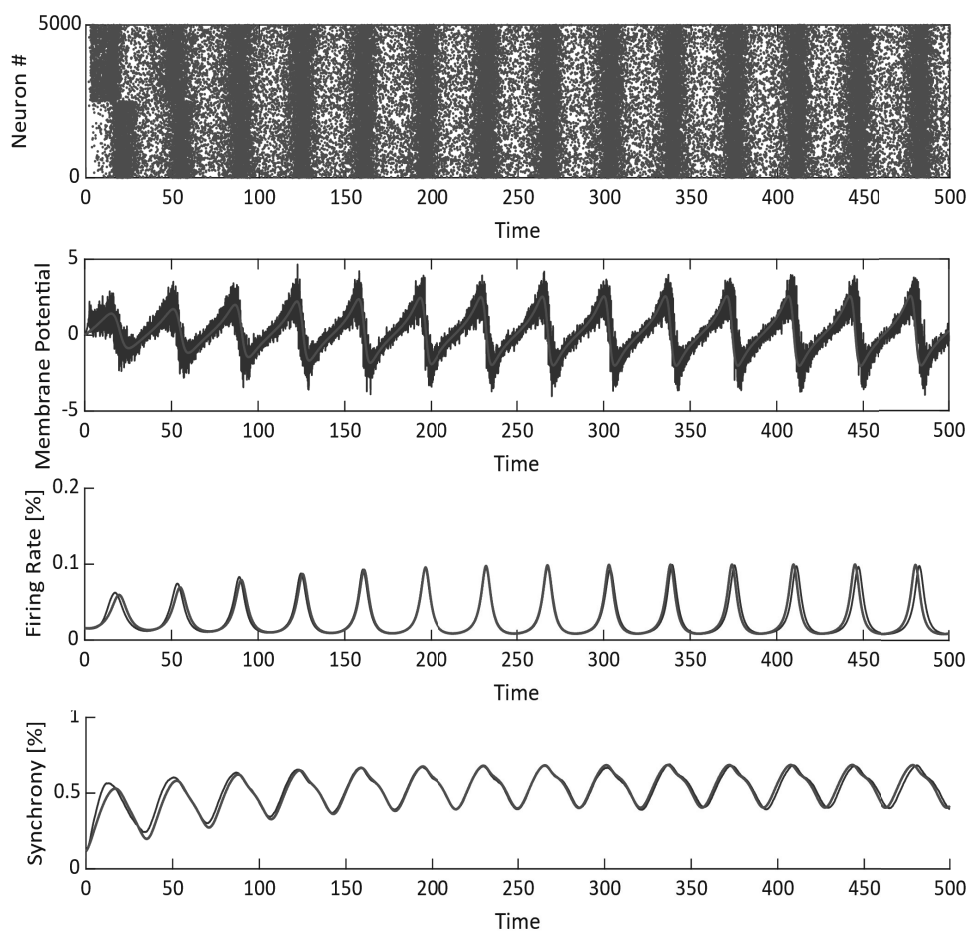


図 5.5: 5000 個の神経細胞モデルからなる 1 神経細胞集団の活動. 上段からそれぞれ, 各神経細胞の発火パターンを表すラスタプロット, 平均膜電位 V , 平均発火率 R , 集団内同期性 $|Z|$ の時間変化を表す. 灰線は発火ニューロンのネットワークの平均的な変化, 赤線は神経質量モデルの変化を表す. $\gamma = 0.5, \alpha = 1.0, \kappa_V = 1.0, \kappa_S = 0.01, \eta_0 = 2.0, \tau = 16, V_{th} = 30, V_{reset} = -70$.

5.5 議論

本研究では, Lorentz 仮説に基づく神経細胞集団の平均場への還元について予備的なシミュレーションを行った. そして同期現象を検討するために, パワー解析および位相同期解析を実施した. その結果, 神経細胞集団内の活動が先行研究

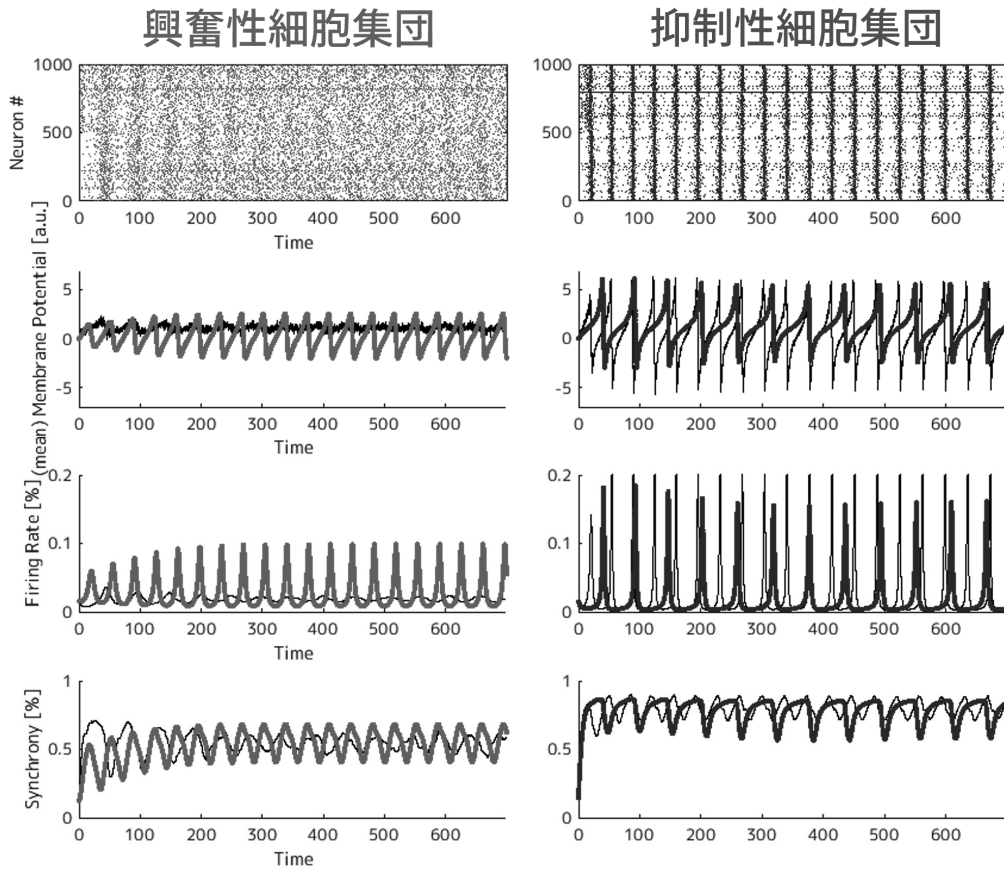


図 5.6: 各 1000 個の QIF モデルからなる興奮性・抑制性神経細胞集団の活動. 上段からそれぞれ, 各神経細胞の発火パターンを表すラスタプロット, 平均膜電位 V , 平均発火率 R , 集団内同期性 $|Z|$ の時間変化を表す. 黒線は発火ニューロンのネットワークの平均的な変化, 赤・青線は神経質量モデルの変化を表す.

と同様に集団全体として近似出来ていることや, 興奮性・抑制性神経細胞集団間の位相同期性の検討に有効である可能性を示した.

今回の結果では, 興奮性細胞集団よりも抑制性細胞集団において, 特に周期的な発火が集団として現れ, 位相同期は高周波に一定の値を得た. さらに外部周期的な力などによる引きこみなどによる現象を捉えるには, 発火間隔のばらつきや振動のある外部入力などが必要であると考えられる.

先行研究では, 蔵本モデルを基に二者の脳間 (Inter-brain coupling; IBC)

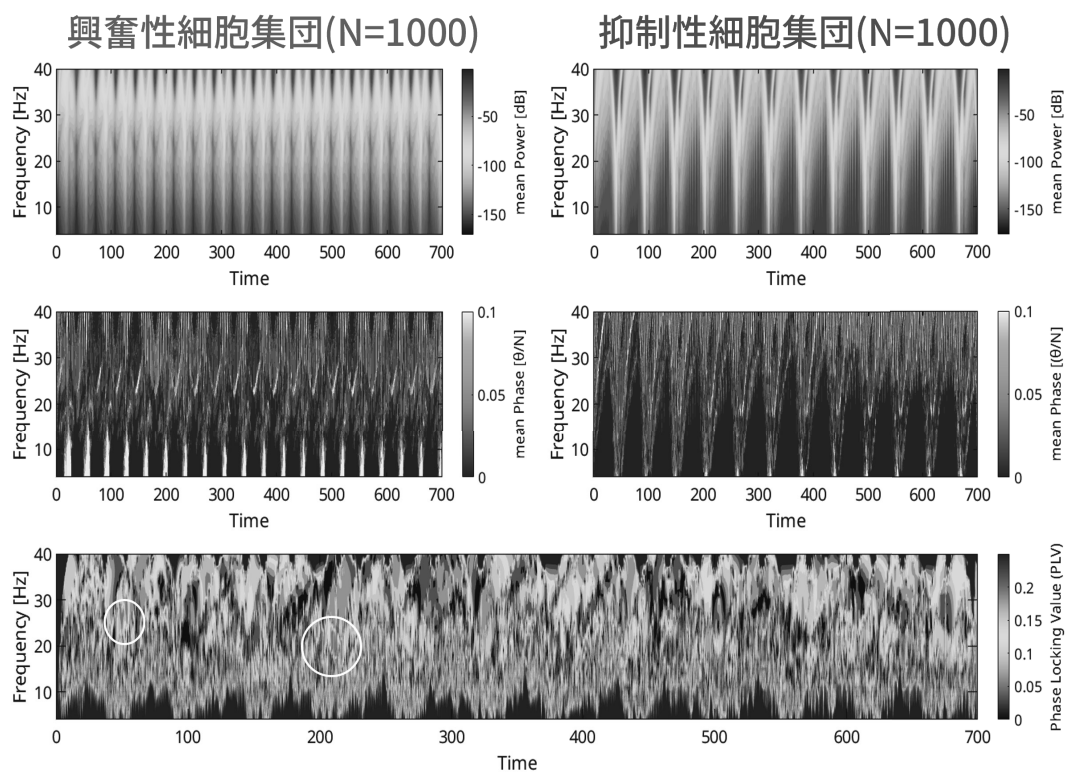


図 5.7: [興奮性・抑制性神経細胞集団の解析結果]

の周波数同期 (Cross-frequency coupling; CFC) の数理モデルが提案されている (Moreau and Dumas, 2022). このモデルは, 4つの振動子 (A1,A2,B1,B2) を想定し, シータ帯振動に加えて, 二者間コミュニケーションで見られるガンマ帯振動などを含む IBC および CFC の両方の主な特性を再現できることを示している. そして, ガンマ帯の IBC は, シータ・ガンマ帯の周波数同期, そしてシータ帯の IBC に起因するという仮説が提示されており, 注目に値する. 本研究における数理モデルは, このような周波数同期や脳間同期までは想定できおらず, よりミクロな現象を扱うにとどまっている. しかし, 先に挙げた先行研究のように一般的な自励振動子を想定した蔵本モデルをそのまま脳のモデルに採用するのではなく, 本研究ではより生物学的なモデルに近い発火ニューロンモデル

から神経同期現象を検討していた。このアプローチの違いは、階層的な神経同期現象の各階層のメカニズムの検討を可能にするという点で優位性があるものであり、複雑系である脳、そしてコミュニケーションの数理的理解に貢献するものである。

今後は、集団間のシナプス結合強度および各集団内の結合強度（ギャップ結合強度 K_V 、シナプス結合強度 K_S ）に対し、集団内・集団間の同期と平均発火率の振る舞いや分岐を解析することで、領野内の神経同期が発生するメカニズムを探求する。さらに、カオス的な神経振動/同期が生まれるメカニズムや、今回の結合系を複数結合させることで領野間の同期のメカニズムを調べる。これをある程度大きな規模にすることで、脳全体のモデル、そして脳間のモデルを見据えた検討が可能になると考えられる。

5.6 まとめ

本章では、人間のコミュニケーションにおける神経基盤を考えるために、階層的な神経同期現象の候補となりうる予備的な神経質量・場モデルについて検討した。はじめに、神経活動の階層性について指摘している2つの既存研究、そして、神経細胞モデル、神経質量・場モデルについて説明を行った。そして、Lorentz 仮説に基づく発火ニューロン集団の次元削減や写像変換は、領野内外の階層的な神経同期が発生するメカニズムを検討できるとの考えに至り、本研究では前述の仮説にもとづき、興奮性・抑制性神経細胞集団内・集団間の同期解析を行った。その結果、興奮性と抑制性細胞集団間の同期の変化を観察できた。今後は2集団/多集団の力学的解析や上位階層の（カオス）同期の検討を行うことで、人間のコミュニケーションにおける神経基盤を考えることが課題である。

第6章

総合議論

前章までに、記号的・身体的コミュニケーションについて脳波計測実験を通して神経活動の検討を行い、前頭部および頭頂部の関与について知見を得た。本章では、これまでに得られた観点と各分野における既存の知見を結びつけながら、記号的および身体的コミュニケーションに関わる神経基盤及び新しい仮説の提案を行うことで、総合議論を行う。そしてコミュニケーションの神経モデルや今回の検証方法、本研究の課題について考察する。

6.1 記号的コミュニケーションの神経基盤に関する 仮説

本論文の記号的コミュニケーションでは、記号を受け取る際に、相手から送られてきたときに自分が最初に送ることを想定して、自動的に embodied simulation (Gallese, 2005; Gallese and Sinigaglia, 2011) を行うことで、記号メッセージを相手から送られてきたものとして模倣すると同時に、社会的な調整を行うのが右頭頂領域である、という作業仮説を提案する。実施に、認知アーキ

テクチャ研究 (森田純哉 et al., 2018) により, 単なる模倣ではなく, 役割反転模倣 (=エミュレーション) が暗黙的な意味の共有に有効であることが示されている他, 運動皮質のミュー波帯抑制がタスクのパフォーマンスや暗黙的な意味の理解の度合いと相関することが示されている (Li et al., 2019). これらの基礎研究は本作業仮説を補強しうるものであり, 脳全体を用いた複合的な認知活動であると考えられる. 特に成功群の課題終了時には, つまり, 字義通りの意味 (図形と部屋の対応関係) が前頭部で処理され, 参加者間で共有する際の社会的調整は, 身体性を用いる頭頂領域で行われたのではないかと推察する.

6.2 身体的コミュニケーションの神経基盤に関する 仮説

一方, 身体的コミュニケーションでは, 協調的状況と競争的状況の違いとして, アルファ帯では左中心部, ガンマ帯では右頭頂部でのパワーに有意な差がそれぞれ見られた. また, この違いはじゃんけん開始後, 2秒以降に顕著であったことから, 相手と動きを合わせる状況から, あっち向いてホイゲームに移った際の認知的活動を反映している可能性がある.

左前頭中心部はミラーニューロンシステムに関連する領域, 右頭頂部は先行研究で見られるように社会的調整のマーカーとして関連する領域として議論されている. ただし後者の右中心頭頂部は, 本研究で見られたガンマ帯ではなく, 先行研究ではアルファ帯に焦点が当てられている. 加えて, 本研究では相手と動きを協調した状態から, 協調的状況と競争的状況に変化する際の違いを調べているのに対し, 先行研究では相手の動きが見える状況あるいは見えない状況下での協調を調べている, という違いがある. このことから右中心頭頂部については, アルファ帯は他者の動きの存在に関する反応, そしてガンマ帯は社会的調整のスイッ

チングに関する反応が生じている可能性がある。そして、左前頭中心部で運動意図の処理を行っているという作業仮説を提案する。

6.3 コミュニケーションに関わる統一的な神経基盤に関する仮説の提案

本論文で扱った記号的・身体的コミュニケーションの両者に関して、前者の脳波計測実験より前頭部および右中央頭頂部領域の活性化を、後者の脳波計測実験より左側前頭中心部と右中央頭頂部領域の活性化、がそれぞれ観察された。そして、3つの脳領域が記号の解釈、運動意図、社会的調整の過程に関与していることを考察した。

これらの結果と考察に基づき、我々は図 6.1 に示した記号的・身体的コミュニケーションの統一的な神経基盤に関する作業仮説を提案する。2つのモダリティのコミュニケーションの神経基盤の類似点として右中央頭頂部のガンマ帯の活動が、そして前頭部と左前頭中心部の低周波（シータ/アルファ）帯の神経活動が2つのモダリティの相違点をそれぞれ反映している可能性を提示する。また、前後方向の長距離アルファ帯の位相同期については脳内調整に関する役割を担っている可能性を提示する。2つのモダリティの類似点と相違点は、記号的・身体的な人間のコミュニケーションの神経基盤を組織化し、制約する候補となる可能性がある。また、この作業仮説を検証するために、次節に述べた提案するフレームワークのステージ 3, 4 を実施する予定である。

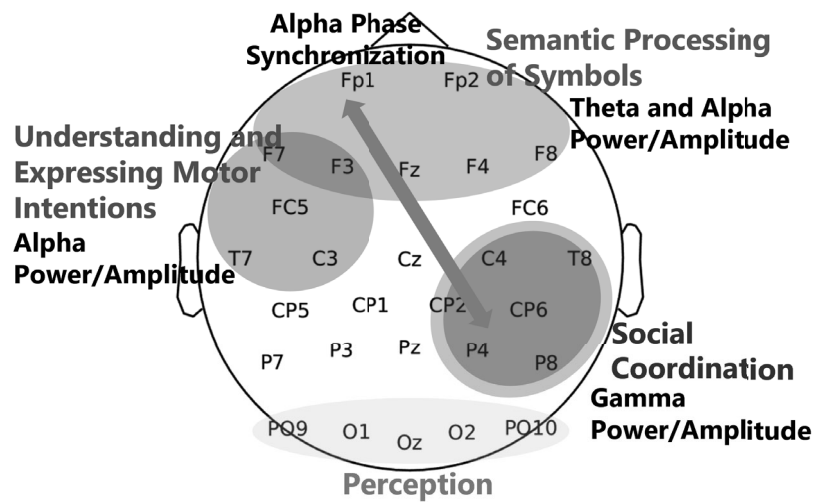


図 6.1: 記号的・身体動作的コミュニケーションの神経基盤に関する仮説 (Fujiwara and Hashimoto, 2022)

6.4 今後の発展

6.4.1 コミュニケーションの神経基盤理解のためのフレームワークの提案

本研究の成果の一部として、記号的・身体的コミュニケーションの神経基盤の理解のためのフレームワークを図 6.2 に提案する。

本フレームワークは、異なるコミュニケーション様式を統一的に扱うことを目的としている。同期現象は、細胞間、脳内、脳間、集団・社会行動などの異なるスケールや階層レベルで普遍的に観察されている。したがって、このような同期現象に着目することで、ヒトや非ヒトのコミュニケーションを統一的に扱うことができる可能性がある。本フレームワークは、以下の4つの段階からなる：

1. 記号的／身体的（非記号的）、自発的／非自発的の2軸で定義される空間

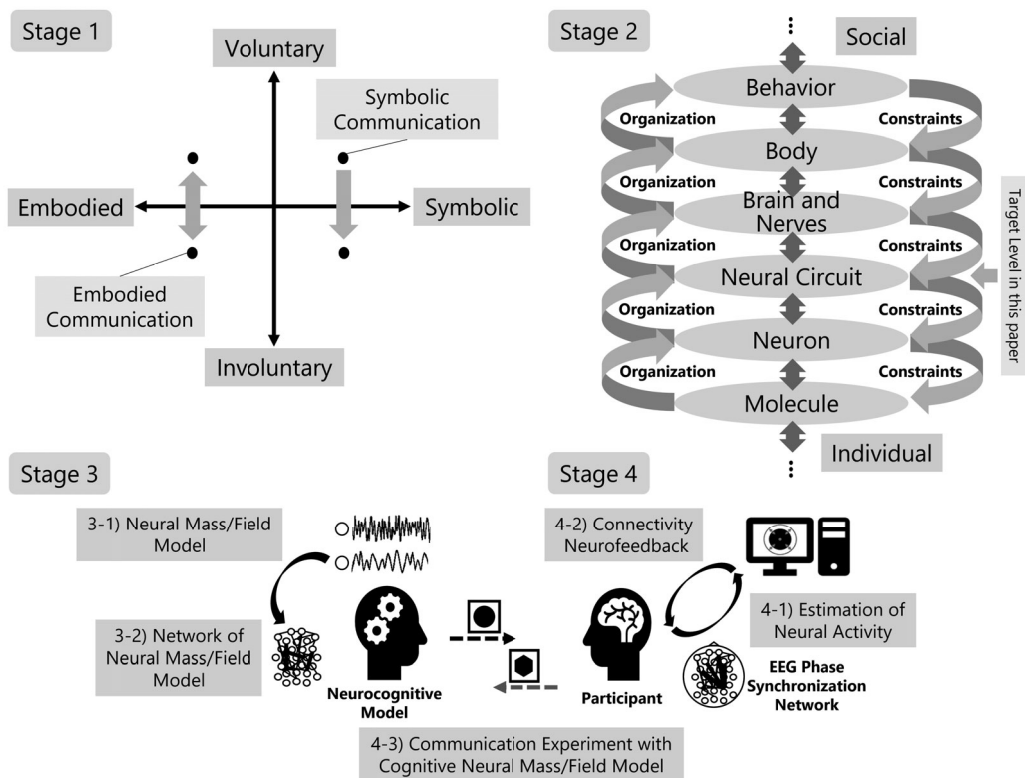


図 6.2: コミュニケーションの神経基盤理解のためのフレームワーク (Fujiwara and Hashimoto, 2022)

における対象のコミュニケーションの特徴づけ

2. コミュニケーション時の実証的計測を行うために、同期分析のレベルを個人の神経活動から社会的行動までの「マイクロ・マクロ・ループ・チェーン」（上位階層を組織化し下位階層を制約する）という存在論的階層に焦点を当てること。
3. 神経メカニズムを説明するニューロダイナミクスモデルの構築
4. 認知神経質量・場モデルに基づいた脳波結合性ニューロフィードバック法を用いた実証的仮説の検証

これらの段階を経ることで、異なる様式のコミュニケーションの統一的な神経

基盤を検証し解明することが出来る可能性がある。

神経科学におけるマイクロ（・メゾ）・マクロ・ループ・チェーン

神経同期現象 (Kelso et al., 2013; Varela et al., 2001) については、多様なスケールでの検討が進められており、本研究で対象とした二者のコミュニケーションが関連する社会的スケールにまで拡張されつつある。このような神経活動の階層性を考える見方は、藤井ら (Fujii et al., 1996) の動的細胞集集体仮説のほか、Freeman らによる K-set hierarchy が従来から提案されている (Kozma, 2008; Kozma and Noack, 2017)。このため、各階層をヒトや動物を対象に探ることで、個体の行動や社会へと接続することが重要である。

著者はこうした考えから、元は組織論、社会科学や複雑系の捉え方・方法論であるマイクロ（・メゾ）・マクロ・ループ (図 6.3(a)) を援用し、神経科学に当てはめたマイクロ（・メゾ）・マクロ・ループ・チェーン (図 6.3(b)) を提案した (詳細は藤原 (2020) を参照)。

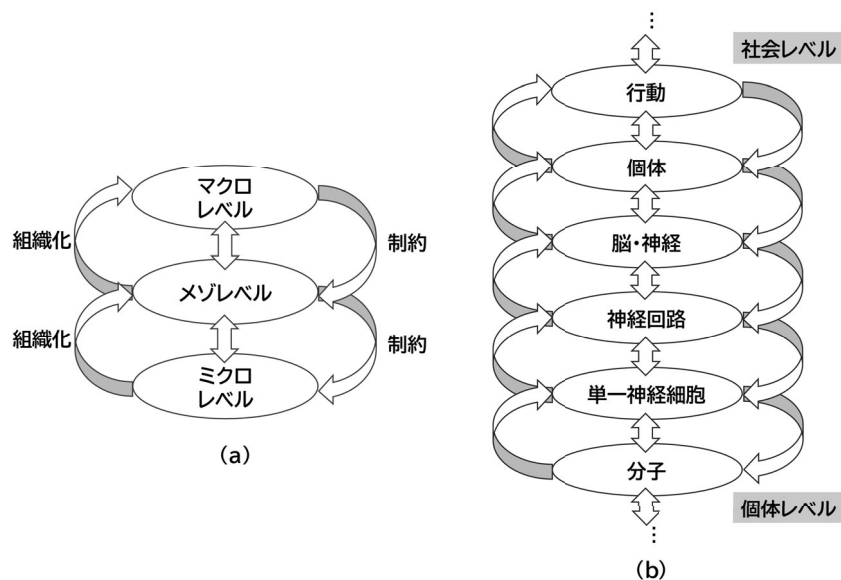


図 6.3: ミクロ（・メゾ）・マクロ・ループとマイクロ（・メゾ）・マクロ・ループ・チェーン

マイクロ（・メゾ）・マクロ・ループ・チェーンは、想定しうる階層が入れ子状に組織化（同期・同調）と制約の鎖のように繋がっている描像を描いており、同期・同調が鎖を保つ創発現象・組織化を支援していると捉えることで、個体レベルから社会レベルへと繋がることを展望している。

このような神経活動の階層性を考え、その複雑なダイナミクスを検討するには、生理学的分析と計算論的分析の両面が必要と考える。

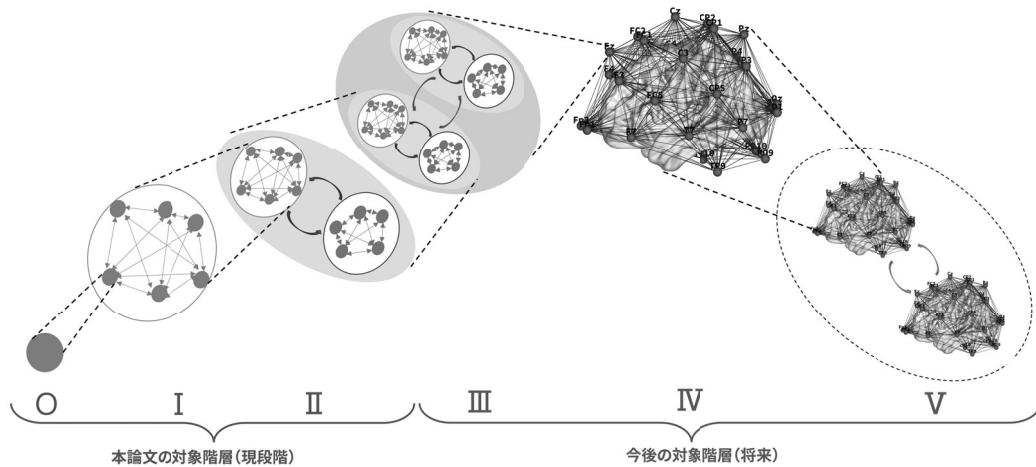


図 6.4: 神経細胞モデルから二者間コミュニケーションまでを想定した神経モデル

脳波計測による人間と認知神経モデルによる機械とのコミュニケーション

前節に述べたような神経細胞から脳領域間のモデルを考慮し、二者間のコミュニケーションを考えることで構成論的なアプローチを取ることが可能となる。実際には、運動協調性のモデルを用いた仮想パートナーの内部ダイナミクスとして導入し、手指の運動協調時の相手として用いることで、操作的な実験を可能にした研究 (Dumas et al., 2014; Kostrubiec et al., 2015; Dumas et al., 2020) があり、身体的コミュニケーションに拡張できる可能性がある。一方で、記号的コミュニケーションの仮想パートナーの内部ダイナミクスの導入を仮に実現でき

たとするならば、それを相手にコミュニケーションを行うことで、神経生理と行動の両面を操作的にアプローチすることが可能となるだろう。本研究で扱った、発火ニューロンモデルを基にした次世代型の神経質量・場モデルを足がかりとする、より高次のモデルを構築し、意思決定プロセスを含む認知神経モデルを今後構築することで、現状では相関関係に留まっている分析を因果関係に近い形へと昇華できる可能性がある。

モデルベースの結合ニューロフィードバックへの展開

近年では従来のニューロフィードバックだけでなく、機能的結合性などを用いた結合ニューロフィードバックが注目を集めている。ここでの機能的結合を位相同期の度合いとしてフィードバックすることで、時間解像度が高い EEG の特徴を生かした展開が期待できる。加えて、2者間のコミュニケーションの相手を認知神経モデルや機械学習などのモデルに置き換えた「仮想相手」とする。これにより、人間の脳波の位相同期の度合いをリアルタイムに読み取りモデルで学習・弁別し、認知神経モデルの状態や機械学習の結果を基にフィードバックすることで人間側を訓練・操作する。このような「モデルベースの結合ニューロフィードバック」の実現はコミュニケーションの神経基盤の解明に貢献できると考えられる。

6.4.2 身体動作、ジェスチャー、そして記号を用いたコミュニケーションへの実験的拡張

本研究では、記号的コミュニケーションおよび身体的コミュニケーションの大域的な神経活動を明らかにした。しかしこれらのコミュニケーション間にあるのがジェスチャーを用いたコミュニケーションであろう。実際に、Gillespie-Lynch

et al. (2013) によれば、チンパンジー、ボノボ、そしてヒトの子供の間で、多くのジェスチャーが機能的・形式的に類似しており、ジェスチャーから記号（シンボル）への変化は共通して見られるが、類人猿よりもヒトの子供の方がより顕著だとしている。このような身体動作から、ジェスチャー、そして記号へと変化していく過程を捉える（図 6.5）ことができれば、それに応じた神経活動の変遷の検討が可能となり、記号的および身体的コミュニケーションの解明にも寄与すると思われる。

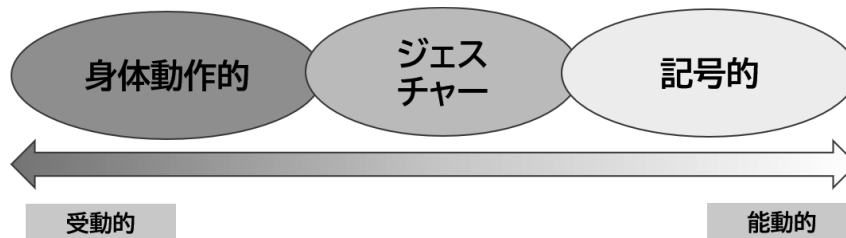


図 6.5: 記号・ジェスチャー・身体動作コミュニケーション

6.4.3 カオス的セルラーニューラルネットワーク

本論文では詳しくは取り上げなかったが、Fujiwara et al. (2015) は、背景振動のような揺らぎにより、神経細胞の発火タイミングがカオス的に変化し、かつ同期するような神経細胞集団を考えることで、視覚野における異なる情報のコーディング（結びつけ）を調べている（詳細は Fujiwara et al. (2015) を参照されたい）。このシミュレーション研究は、神経細胞レベルのカオス的同期の現象を扱うものであった。しかし、より高次の脳領域間などにおける同様の情報コーディングを考え、構築した神経モデルの力学的構造を検討することも重要である。本研究で行った脳領域間、そして将来的に脳間の脳波同期現象という実デー

タと神経モデルの構築を組み合わせることで、操作的な実験が可能となり、因果的關係に迫ることが期待できる。

6.4.4 光ポンピング磁力計を用いた二者同時計測の可能性

以上に将来研究の可能性を思い描いてきたが、近年、次世代の脳計測技術として、**超伝導量子干渉計** (superconducting quantum interference device, SQUID) に加えて、**光ポンピング磁力計** (optically pumped atomic magnetometer, OPM) が小型化かつ高感度で神経活動を捉えることができることから注目を集めており、従来の MEG 計測では難しかった身体動作時の計測が可能となってきた (Boto et al., 2018; Hill et al., 2020)。

将来研究として、記号・ジェスチャー・身体動作コミュニケーションをスペクトルとしてその変遷に焦点を当てる実験を考えたときに、神経活動を捉える上で、時間解像度だけではなく空間解像度についても現状よりも高精度な計測が可能となるだろう。この著しい進展は、コミュニケーションに関する大域的な神経基盤の解明にさらなる貢献をもたらさうる可能性を秘めている。

6.5 本研究の限界

本研究の限界として、4つの課題が挙げられる。1つ目は EEG という計測手法に関する限界である。EEG 計測の特徴として時間解像度が高い反面、空間解像度は他の手法 (fMRI や MEG など) に比べて劣ることが挙げられる。本研究ではこの点を考慮して、局所的というよりは大域的な活動を捉えることを目指し、分析面においても容積伝導などを十分に考慮した。しかしながら、EEG データを用いて神経活動が生じている脳深部の活動や賦活部位を推定することは逆問題となることから、その結果は本研究では前掲しなかった。現在の手法に

は、dipole（電流双極子）を考慮した分析に加えて、Lead Field などのいくつかの方法が取られるが、脳深部の活動や賦活部位を推定する限界は依然として存在する。

2つ目は、2つのコミュニケーション課題設計に起因する限界である。記号コミュニケーション課題では、課題の設計上、成功群や失敗群は課題終了後のパフォーマンス結果に基づいたモデルベースの推定によって決定される。このことは成功群と失敗群間の認知あるいは神経活動の差異を捉えることを困難にしている可能性がある。これに対応する方法としては、コミュニケーション能力を事前に測定することや、2段階の課題設計を行うなどの考慮を行うことで解消される可能性がある。また現在用いているパフォーマンス結果に基づいたモデルベースの推定から、成功群および失敗群の2群に分けるよりも、より詳細な区分ができる可能性がある。このため、より大規模な実験参加者による実験課題の実施を行い詳細に区分することは、成功群と失敗群間の認知あるいは神経活動の差異をつぶさに捉えることを可能とするだろう。あっちむいてホイ課題では3つの条件 (Congruent, Incongruent, Scramble) を設けたが、順序効果の排除が十分でなかったことが挙げられる。このことは、実施する条件の順番についてカウンターバランスをとるなどの対応により改善できると考えられる。

3つ目は、2つのコミュニケーション課題における分析上の限界である。記号コミュニケーション課題では送信時のイベントも設けていたが、記号メッセージの送信時のイベントはボタン押しで生じる運動の効果と意思決定の効果が複合的に生じていると考えられたため、本研究では受信イベントのみに対象を絞っている。この問題は、Deleyed Task などの実験パラダイムなどを参考にすることで、運動の効果と意思決定の効果をそれぞれ考慮することができるだろう。またあっちむいてホイ課題では、今回は記述できなかった、視線 (Gaze) と脳波 (EEG) を組み合わせた分析や二者間の神経同期解析も実施することで、

Intentional Switching について詳細な理解を得られる可能性がある。

最後は、以上に挙げた2つのコミュニケーション研究は、本研究の最後に提案したコミュニケーションの神経基盤理解のためのフレームワークの Stage 1 および 2 を考慮して実施したに過ぎない、という点である。総合議論で掲げた作業仮説を検証するためには、次節に述べた提案するフレームワークのステージ 3, 4 を実施する必要がある。本研究では次世代型の神経場モデルの有用性について予備的な評価を行ったが、このような認知神経モデルの構築を段階的に行うことで、フレームワークの有効性を検証することで、コミュニケーションの神経基盤の理解にさらに迫ることができると考えられる。

6.6 まとめ

本章では、本研究で扱った記号的・身体的を用いたコミュニケーションで迫れなかった側面がジェスチャー的コミュニケーションであることを指摘した。そして、身体動作から、ジェスチャー、そして記号へと変化していく過程を捉える実験的拡張について述べた。今後の課題として、マイクロ（・メゾ）・マクロ・ループとマイクロ（・メゾ）・マクロ・ループ・チェーンという視点を提案することで、マルチスケールな神経活動の描像を捉えること、構築した神経モデルの力学的構造の検討が重要であること、そして実データと神経モデルの構築を組み合わせることで操作的な実験を可能とし、人間と神経—認知モデルによる検証により因果的關係に迫ることを展望した。

第7章

結論

本章では最後に、本研究の成果と貢献についてまとめる。

7.1 本研究の成果

本研究の目的は、脳内の神経同期現象という観点から、人間の記号および身体動作を用いたコミュニケーションの円滑な成立に関わる大域的な神経メカニズムを明らかにすることであった。この目的に対し、具体的には「記号コミュニケーション課題」および「あっちむいてホイ課題」の2つの異なる脳波計測実験より得られた生体データをそれぞれ対象に、パワー（あるいは振幅）や位相同期解析を行った。その結果、それぞれの課題で、人間の記号および身体動作を用いたコミュニケーションに関わる特徴的な神経活動を前頭部および頭頂部において捉えた可能性が示唆された。

本研究の目的に関する成果として、低周波数（シータ・アルファ）帯と高周波数（ガンマ）帯のそれぞれで共通あるいは相違する神経活動が2つのコミュニケーションにおいて観察されたことは、その機能的な意味を議論する上で重要な

知見である。そして、前掲した前頭部および頭頂部の2つの脳領域を含んだ大域的な神経活動が基盤となって、コミュニケーションの円滑な成立に関連している可能性について言及し、コミュニケーションに関わる統一的な神経基盤に関する仮説について提示する考えに至った。本研究では、このコミュニケーションに関わる統一的な神経基盤に関する仮説の検証を念頭に、人間のコミュニケーションに関わる神経基盤理解のためのフレームワークを新たに提案した。このフレームワークは4つの段階からなり、本研究ではこのうちの前半2つの段階を満たしているが、残る後半の2つの段階の検証の余地が残っている。これらの段階を経ることで人間のコミュニケーションに関わる神経基盤理解につながる可能性について展望した。

本研究の限界に、1) EEG という計測手法、2) 課題設計および3) 分析の対象となるイベントに起因する問題、4) 新たに提案したフレームワークの有効性の検証、などが不十分な点として挙げられる。これらの点の改善については、実験パラダイムの改善や大規模な実験参加者による実験課題の実施、そして次世代型の神経場モデルを基にした認知神経モデルの構築を段階的に行う、などの継続的な研究および発展を施すことで対応できると考えられる。

参考文献

- Ahmed, O. J. and Cash, S. S. (2013). Finding synchrony in the desynchronized EEG: The history and interpretation of gamma rhythms. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(JUL).
- Avena-Koenigsberger, A., Misic, B., and Sporns, O. (2018). Communication dynamics in complex brain networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 19(1):17–33.
- Barraza, P., Pérez, A., and Rodríguez, E. (2020). Brain-to-Brain Coupling in the Gamma-Band as a Marker of Shared Intentionality. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14:295.
- Blakemore, S. J. and Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(8):561–567.
- Boto, E. ., Holmes, N. ., Leggett, J. ., Roberts, G. ., Shah, V. ., Meyer, S. S. ., Muñoz, L. D., Mullinger, K. J. ., Tierney, T. M. ., Bestmann, S. ., Barnes, G. R. ., Bowtell, R. ., Brookes, M. J., Duque, ., Mullinger, K. J. ., Tierney, T. M. ., Bestmann, S. ., Barnes, G. R. ., Bowtell, R. ., and Brookes, M. J. (2018). Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. *Nature*, 555(7698):657–661.

- Brown, P. and Levinson, S. C. (1987). *Politeness: Some Universals in Language Usage*. Cambridge University Press.
- Buzsáki, G. and Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, 304(5679):1926–1929.
- Byrne, A., O’Dea, R. D., Forrester, M., Ross, J., and Coombes, S. (2020). Next-generation neural mass and field modeling. *Journal of Neurophysiology*, 123(2):726–742.
- Chambon, V., Domenech, P., Jacquet, P. O., Barbalat, G., Bouton, S., Pacherie, E., Koechlin, E., and Farrer, C. (2017). Neural coding of prior expectations in hierarchical intention inference. *Scientific Reports*, 7(1):1278.
- Chaumon, M., Bishop, D. V., and Busch, N. A. (2015). A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *Journal of Neuroscience Methods*, 250:47–63.
- Ciaramidaro, A., Adenzato, M., Enrici, I., Erk, S., Pia, L., Bara, B. G., and Walter, H. (2007). The intentional network: How the brain reads varieties of intentions. *Neuropsychologia*, 45(13):3105–3113.
- Cook, B. J., Peterson, A. D. H., Woldman, W., and Terry, J. R. (2022). Neural Field Models: A mathematical overview and unifying framework. *Mathematical Neuroscience and Applications*, 2.
- Coombes, S. (2005). Waves, bumps, and patterns in neural field theories. *Biological Cybernetics*, 93(2):91–108.
- Coombes, S., Lord, G. J., and Owen, M. R. (2003). Waves and bumps in neuronal networks with axo-dendritic synaptic interactions. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 178(3):219–241.
- Corrado, G. and Doya, K. (2007). Understanding Neural Coding through the

- Model-Based Analysis of Decision Making. *The Journal of Neuroscience*, 27(31):8178–8180.
- David, O. and Friston, K. J. (2003). A neural mass model for MEG/EEG: Coupling and neuronal dynamics. *NeuroImage*, 20(3):1743–1755.
- Delorme, A. and Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1):9–21.
- Dumas, G., de Guzman, G. C., Tognoli, E., and Kelso, J. A. S. (2014). The human dynamic clamp as a paradigm for social interaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(35):E3726–E3734.
- Dumas, G., Moreau, Q., Tognoli, E., and Kelso, J. A. S. (2020). The Human Dynamic Clamp Reveals the Fronto-Parietal Network Linking Real-Time Social Coordination and Cognition. *Cerebral Cortex*, 30(5):3271–3285.
- Eckhorn, R., Bauer, R., Jordan, W., Brosch, M., Kruse, W., Munk, M., and Reitboeck, H. J. (1988). Coherent oscillations: A mechanism of feature linking in the visual cortex? - Multiple electrode and correlation analyses in the cat. *Biological Cybernetics*, 60(2):121–130.
- Enrici, I., Adenzato, M., Cappa, S., Bara, B. G., and Tettamanti, M. (2011). Intention processing in communication: A common brain network for language and gestures. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9):2415–2431.
- Eskenazi, T., Rueschemeyer, S.-A., de Lange, F. P., Knoblich, G., and Sebanz, N. (2015). Neural correlates of observing joint actions with shared intentions. *Cortex*, 70:90–100.
- Fell, J. and Axmacher, N. (2011). The role of phase synchronization in memory processes. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(2):105–118.

- Fell, J., Fernández, G., Klaver, P., Elger, C. E., and Fries, P. (2003). Is synchronized neuronal gamma activity relevant for selective attention? *Brain Research Reviews*, 42(3):265–272.
- Fisher, R. A. (1915). Frequency distribution of the values of the correlation coefficient in samples from indefinitely large population. *Biometrika*, 10(4):507–521.
- Fisher, R. A. (1921). On the 'probable error' of a coefficient of correlation deduced from a small sample. *Metron*, 1:3–32.
- Fogassi, L., Ferrari, P. F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., and Rizzolatti, G. (2005). Neuroscience: Parietal lobe: From action organization to intention understanding. *Science*, 308(5722):662–667.
- Freeman, W. J. (1975). *Mass action in the nervous system*. Academic Press.
- Freunberger, R., Klimesch, W., Griesmayr, B., Sauseng, P., and Gruber, W. (2008). Alpha phase coupling reflects object recognition. *NeuroImage*, 42(2):928–935.
- Fries, P. (2005). A mechanism for cognitive dynamics: Neuronal communication through neuronal coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(10):474–480.
- Fries, P. (2015). Rhythms for Cognition: Communication through Coherence. *Neuron*, 88(1):220–235.
- Fujii, H., Ito, H., Aihara, K., Ichinose, N., and Tsukada, M. (1996). Dynamical cell assembly hypothesis - Theoretical possibility of spatio-temporal coding in the cortex. *Neural Networks*, 9(8):1303–1350.
- Fujiwara, M. and Hashimoto, T. (2022). Proposing Discussion Framework and Hypothesis for Neural Underpinnings of Human Symbolic and Embod-

- ied Communication from Synchronization Viewpoint. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 9(3):221–228.
- Fujiwara, M., Yamaguchi, A., and Kubo, M. (2015). Synchronized Response to Grayscale Image Inputs in Chaotic Cellular Neural Network. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 2(1):26.
- Galantucci, B. (2005). An experimental study of the emergence of human communication systems. *Cognitive Science*, 29(5):737–767.
- 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.
- Galantucci, B. and Garrod, S. (2011). Experimental semiotics: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5(FEBRUARY):1–15.
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: From neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4(1):23–48.
- Gallese, V. (2009). Mirror neurons, embodied simulation, and the neural basis of social identification. *Psychoanalytic Dialogues*, 19(5):519–536.
- Gallese, V. and Goldman, A. (1998). Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(12):493–501.
- Gallese, V. and Sinigaglia, C. (2011). What is so special about embodied simulation? *Trends in Cognitive Sciences*, 15(11):512–519.
- Gillespie-Lynch, K., Greenfield, P. M., Feng, Y., Savage-Rumbaugh, S., and Lyn, H. (2013). A cross-species study of gesture and its role in symbolic development: Implications for the gestural theory of language evolution. *Frontiers in Psychology*, 4(MAR):160.
- Grafton, S. T. and Tipper, C. M. (2012). Decoding intention: A neuroer-

- gonomic perspective. *NeuroImage*, 59(1):14–24.
- Gray, C. M., König, P., Engel, A. K., and Singer, W. (1989). Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, 338(6213):334–337.
- Hasson, U., Ghazanfar, A. A., Galantucci, B., Garrod, S., and Keysers, C. (2012). Brain-to-brain coupling: A mechanism for creating and sharing a social world. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2):114–121.
- Hill, R. M., Boto, E., Rea, M., Holmes, N., Leggett, J., Coles, L. A., Papastavrou, M., Everton, S. K., Hunt, B. A. E., Sims, D., Osborne, J., Shah, V., Bowtell, R., Brookes, M. J., Ryan, M., Hill, M., and Mansfield, P. (2020). Multi-channel whole-head OPM-MEG: Helmet design and a comparison with a conventional system. *NeuroImage*, 219:116995.
- Hsu, S.-H., Pion-Tonachini, L., Palmer, J., Miyakoshi, M., Makeig, S., and Jung, T.-P. (2018). Modeling brain dynamic state changes with adaptive mixture independent component analysis. *NeuroImage*, 183:47–61.
- Jansen, B. H. and Rit, V. G. (1995). Electroencephalogram and visual evoked potential generation in a mathematical model of coupled cortical columns. *Biological Cybernetics*, 73(4):357–366.
- João Castelhana, Inês Bernardino, J. R. and Eugenio Rodriguez, M. C.-B. (2015). Oscillations or Synchrony? Disruption of Neural Synchrony despite Enhanced Gamma Oscillations in a Model of Disrupted Perceptual Coherenc. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(12):2416–2426.
- Kay, L. M. and Freeman, W. J. (1998). Bidirectional processing in the olfactory-limbic axis during olfactory behavior. *Behavioral Neuroscience*, 112(3):541–553.

- Kegl, J. (1994). The Nicaraguan sign language project: An overview. *Signpost*, 7:24–31.
- Kelso, J. S., Dumas, G., and Tognoli, E. (2013). Outline of a general theory of behavior and brain coordination. *Neural Networks*, 37:120–131.
- Klimesch, W., Freunberger, R., Sauseng, P., and 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.
- Konno, T., Morita, J., and Hashimoto, T. (2013). Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks. *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, (Figure 1):453–459.
- Kostrubiec, V., Dumas, G., Zanone, P. G., and Scott Kelso, J. A. (2015). The virtual teacher (VT) paradigm: Learning new patterns of interpersonal coordination using the human dynamic clamp. *PLoS ONE*, 10(11):e0142029.
- Kozma, R. (2008). Intentional systems: Review of neurodynamics, modeling, and robotics implementation. *Physics of Life Reviews*, 5(1):1–21.
- Kozma, R. and Noack, R. (2017). Freeman’s Intentional Neurodynamics. *Chaos and Complexity Letters*, 11(1).
- Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J., and Varela, F. J. (1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping*, 8(4):194–208.
- Leske, S. and Dalal, S. S. (2019). Reducing power line noise in EEG and MEG data via spectrum interpolation. *Neuroimage*, 189:763–776.
- Li, G., Hashimoto, T., Konno, T., Okuda, J., Samejima, K., Fujiwara, M., and Morita, J. (2019). The Mirroring of Symbols: An EEG Study on the Role of Mirroring in the Formation of Symbolic Communication Systems.

- Letters on Evolutionary Behavioral Science*, 10(2):7–10.
- Liley, D., Cadusch, P., and Dafilis, M. (2002). A spatially continuous mean field theory of electrocortical activity. *Network: Computation in Neural Systems*, 13(1):67–113.
- Liley, D. and Walsh, M. (2013). The Mesoscopic Modeling of Burst Suppression during Anesthesia. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7.
- Lobier, M., Palva, J. M., and Palva, S. (2018). High-alpha band synchronization across frontal, parietal and visual cortex mediates behavioral and neuronal effects of visuospatial attention. *NeuroImage*, 165:222–237.
- Moca, V. V., Bârzan, H., Nagy-Dăbâcan, A., and Mureșan, R. C. (2021). Time-frequency super-resolution with superlets. *Nature Communications*, 12(1):1–18.
- Montbrió, E., Pazó, D., and Roxin, A. (2015). Macroscopic description for networks of spiking neurons. *Physical Review X*, 5(2):021028.
- Moreau, Q., Adel, L., Douglas, C., Ranjbaran, G. and Dumas, G. (2022). A neurodynamic model of inter-brain coupling in the gamma band. *Journal of Neurophysiology*, 128(5):1085–1090.
- Mullen, T. R., Kothe, C. A., Chi, Y. M., Ojeda, A., Kerth, T., Makeig, S., Jung, T. P., and Cauwenberghs, G. (2015). Real-time neuroimaging and cognitive monitoring using wearable dry EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(11):2553–2567.
- Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., and Schoffelen, J. M. (2011). FieldTrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011:1–9.

- Palva, S. and Palva, J. M. (2011). Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks. *Frontiers in Psychology*, 2(SEP):204.
- Pion-Tonachini, L., Kreutz-Delgado, K., and Makeig, S. (2019). ICLabel: An automated electroencephalographic independent component classifier, dataset, and website. *NeuroImage*, 198:181–197.
- Praamstra, P., Boutsen, L., and Humphreys, G. W. (2005). Frontoparietal control of spatial attention and motor intention in human EEG. *Journal of Neurophysiology*, 94(1):764–774.
- Rizzolatti, G. and Craighero, L. (2004). the Mirror-Neuron System. *Annual Review of Neuroscience*, 27(1):169–192.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., and Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9):661–670.
- Robinson, P. A., Rennie, C. J., and Wright, J. J. (1997). Propagation and stability of waves of electrical activity in the cerebral cortex. *PHYSICAL REVIEW E*, 56(1):826–840.
- Sadaghiani, S. and Kleinschmidt, A. (2016). Brain Networks and α -Oscillations: Structural and Functional Foundations of Cognitive Control. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(11):805–817.
- Sadaghiani, S., Scheeringa, R., Lehongre, K., Morillon, B., Giraud, A. L., D’Esposito, M., and 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.
- Salazar, R. F., Dotson, N. M., Bressler, S. L., and Gray, C. M. (2012).

- Content-specific fronto-parietal synchronization during visual working memory. *Science*, 338(6110):1097–1100.
- Samejima, K. and Doya, K. (2008). Estimating internal variables of a decision maker’s brain: A model-based approach for neuroscience. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4984 LNCS:596–603.
- Samejima, K., Konno, T., Li, A., Okuda, J., Morita, J., and 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.
- Sanchez, M. R. V., Mishima, S., Fujiwara, M., Ai, G., Jouaiti, M., Kobryn, Y., Rimbert, S., Bougrain, L., Hénaff, P., and Wagatsuma, H. (2020). Methodological design for integration of human eeg data with behavioral analyses into human-human/robot interactions in a real-world context. *ICIC Express Letters*, 14(7):693–701.
- Schack, B., Klimesch, W., and Sauseng, P. (2005). Phase synchronization between theta and upper alpha oscillations in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology*, 57(2):105–114.
- Scholz, J. P. and Kelso, J. A. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22(1):98–124.
- Schröder, T., Stewart, T. C., and Thagard, P. (2014). Intention, Emotion, and Action: A neural theory based on semantic pointers. *Cognitive Science*, 38(5):851–880.
- Scott-Phillips, T. C., Kirby, S., and Ritchie, G. R. (2009). Signalling signal-

- hood and the emergence of communication. *Cognition*, 113(2):226–233.
- Singer, W. (2018). Neuronal oscillations: unavoidable and useful? *European Journal of Neuroscience*, 48(7):2389–2398.
- Singer, W. and Gray, C. M. (1995). Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*, 18:555–586.
- Sperber, D. and Wilson, D. (1986). *Relevance: Communication and cognition*. Harvard University Press.
- Stolk, A., Noordzij, M. L., Verhagen, L., Volman, I., Schoffelen, J. M., Oostenveld, R., Hagoort, P., and Toni, I. (2014). Cerebral coherence between communicators marks the emergence of meaning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(51):18183–18188.
- Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., and 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.
- Tylén, K., Philipsen, J. S., Roepstorff, A., and Fusaroli, R. (2016). Trails of meaning construction: Symbolic artifacts engage the social brain. *NeuroImage*, 134:105–112.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., and Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(4):229–239.
- Vinck, M., Oostenveld, R., Van Wingerden, M., Battaglia, F., and Pennartz, C. M. (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.

- Von der Malsburg, C. (1981). The Correlation Theory of Brain Function. *Physics of Neural Networks*, (July 1981):95–119.
- Wendling, F., Bartolomei, F., Bellanger, J. J., and Chauvel, P. (2002). Epileptic fast activity can be explained by a model of impaired GABAergic dendritic inhibition. *European Journal of Neuroscience*, 15(9):1499–1508.
- Wendling, F., Bellanger, J. J., Bartolomei, F., and Chauvel, P. (2000). Relevance of nonlinear lumped-parameter models in the analysis of depth-EEG epileptic signals. *Biological Cybernetics*, 83(4):367–378.
- Wiener, N. (1958). *Nonlinear problems in random theory*. The MIT Press, Cambridge.
- Wiener, N. (1965). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press, Cambridge.
- Wilson, D. and Sperber, D. (2008). Relevance Theory. *The Handbook of Pragmatics*.
- Wilson, H. R. and Cowan, J. D. (1972). Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons. *Biophysical Journal*, 12(1):1–24.
- 森田純哉, 金野武司, 奥田次郎, 鮫島和行, 李冠宏, 藤原正幸 橋本敬 (2018). 協調的コミュニケーションを成立させる認知的要因. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 20(4):435–446.

謝辞

本研究は、著者が北陸先端科学技術大学院大学博士課程在学中に、先端科学技術研究科知識科学系 橋本敬 教授の指導のもとに行われました。本研究を遂行するにあたり、橋本敬 教授には終始丁寧かつ熱心に御指導・御鞭撻を頂きました。橋本さんには、修士課程では右も左も分からない私に、工学と科学の違いを粘り強く教えて頂き、研究の進め方についても熱心に指導していただきました。また私が後期課程に進学する前後、橋本さんが50歳になった時に「この50代は自分の研究を進めるんだ」と仰っていた姿を見聞きして、研究者とは斯くあるべきだな、と思ったことを強く覚えています。そのような御姿を思い出しつつ、コロナ禍が明けつつある今、そして研究者として今後ともこれまで以上に精力的に研究に邁進していく所存です。ここに心から深甚なる感謝を申し上げます。

そして本研究および論文をまとめるにあたりご教授頂きました、京都産業大学の奥田次郎教授をはじめ、金沢工業大学の金野武司准教授、玉川大学の鮫島和行教授、静岡大学の森田純哉准教授、のそれぞれの先生方に深く感謝申し上げます。先生方には、著者の修士時代から現在に至るまで継続して本研究に関する熱い議論をして頂きました。その他、研究者としての振る舞いを御教示頂き、大変お世話になりました。次いで研究や脳波データに関して、相談に乗って頂いた橋本研究室 OB で京都外国語大学の李冠宏講師に厚く感謝いたします。さらに今後も、

主テーマ研究として扱った記号コミュニケーションを研究対象として、意図理解に焦点を当てることで研究を進める所存です。

また、副テーマ研究としての研究指導をご快諾頂き御指導・御鞭撻を頂きました。九州工業大学の我妻広明准教授には大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。新型コロナウイルス感染症などの影響により、なかなか思うように人を対象とする実験を進めることが難しい事情がありましたが、そんな中でもご指導いただきましたことは有り難く思っています。二者三デバイス同時計測システムの開発、そしてそれを利用した身体動作コミュニケーションの研究は、継続した研究テーマとして今後とも邁進していく所存です。

以上の主テーマおよび副テーマ研究は、JSPS 特別研究員奨励費 JP17J06623, JSPS 科研費 JP26240037 の助成を受けたものであります。

学部時代には、福岡工業大学の山口明宏教授に御指導・御鞭撻頂きました。カオスという興味深い現象を、そして研究を通してジャーナル論文を執筆する経験を、人生で初めて教えてくれたのが山口明宏先生でした。卒業した私を度々気にかけてくれる厳しくも心優しい先生で、頭が上がりません。防衛大学の久保正男准教授にも大変お世話になりました。御二人に深く感謝申し上げます。

そして、中部大学の津田一郎教授には外部審査委員として、また本学の藤波努教授、日高昇平准教授、DAM, Hieu Chi 教授には審査委員として、本論文作成および審査に当たり大変お世話になりました。ここに深く感謝いたします。

下戸健准教授、丸山勲准教授をはじめとする福岡工業大学情報工学部情報システム工学科の先生方に感謝申し上げます。短期留学の際にはマルタ大学の Noellie Brockdorff 教授や Marthese Borg 博士、マルタ大学語学学校の Karen Borg 先生、そして副テーマ研究の際にはブルガリア科学アカデミー・ロボット工学研究所の Maya Dimitrova 教授にそれぞれお世話になりました。

加えて、新学術領域「共創的コミュニケーションのための言語進化学（共創言

語進化)」に参画されている先生方にもお世話になりました。そして、浪人時代、高校・中学・小学校時代の先生方にもお世話になりました。

前掲した御指導頂いた先生方にあらためて深く感謝申し上げます。有難うございました。

また、同志社大学の阪口幸駿特任助教，東京大学の近藤聡太郎さんの御二人には、『言語進化学の未来を共創する』（岡ノ谷一夫・藤田耕司 編，ひつじ書房）第 10 章の共同執筆にあたり，かなり長い時間をかけて議論していただきました。阪口幸駿さんは神経回路学会の ASCONE2017 で，近藤聡太郎さんとは新学術領域「共創的コミュニケーションのための言語進化学（共創言語進化）」にて初めてお会いし，同世代の研究者としてお互いに意欲的な議論ができたことは僥倖であったと思っています。無事出版に至ったことに加えて，3 度に渡るコミュニケーションセミナー，そしてマイクロ・マクロ・ループ・チェーンのアイデアをさらに推し進めることが出来たのは，まさに御二人のおかげであります。深く感謝いたします。今後ともどうぞよろしく願います。

「共創言語進化学 若手の会」代表の中条太聖さんをはじめとする世話人の方々，その他メンバーにも本会の運営や議論を通して大変お世話になりました。ここに上記の皆様へ感謝申し上げます。

また，橋本研究室の OB・元講師であり札幌市立大学 小林重人准教授，OB の外谷弦太さんや赤池敬さんをはじめとする研究室の OB/OG，成太俊君をはじめとする現役の皆様のサポートがあり，本研究が成ったことに対して，心より感謝申し上げます。

次いで，度々連絡を入れてくれる，勝村勇太郎君，鷹羽淳君，前田聡君らをはじめとする JAIST 修士課程修了生の同期，福岡工業大学山口研究室の同期，佐藤拓広君や FIT Pocket Lab メンバーをはじめとする学部時代，乙木翔太君，高原真里さん，松永（西村）革君，山口晋君らをはじめとする高校時代，そして武

井光君、樋之口華那さん、前田瑞輝君、松葉涼介君、南亨賢君、杠拓実君らをはじめとする中学時代の友人たち、ロボコンメンバー、ここに挙げきれなかった友人たちに、あわせて感謝申し上げます。木霊のように跳ね返ってくるみなさまの頑張りや存在が私の力になっています。

最後に、遠方の福岡から全力で応援してくださり、いままで育ててくれた両親に心から深く感謝いたします。

私自身腎臓があまり良くはないのですが、それ以上に祖父や母は腎不全で血液透析患者であり、毎晩あるいは1日置きに透析をする難しい中、一度、父の運転で福岡から石川までの長距離の運転 (!) で、博士課程に進んだ私の様子を見に来てくれたことは、驚きと嬉しさで忘れられません。

また本年、父が長らく勤めていた会社を早期希望退職をするとの一報を秋頃に受けた時は驚きを隠せませんでした。12月には既に次の新たな場で仕事をしているなど、エネルギッシュな姿に私自身励まされました。

そして昨年、妹が籍を入れると聞いたときには驚きよりも嬉しさで胸がいっぱいになりました。旦那さんと幸せな家庭を築き上げ、みんなで幸せになってください。弟は高校卒業後から兄より早くも社会人経験を積み上げており、実家のことをはじめとして、いつまでたっても学生の兄を陰ながら見守り応援してくれていたことに有り難く思っています。

愛犬のラブとカンは、家族に、帰省した私に、癒やしを与えて続けてくれました。コロナ禍で、昨年対面では二匹とも看取ることが叶いませんでしたが、いまでも私の心のオアシスです。

以上の父母、祖父、妹弟、愛犬を含む家族に改めて深く感謝して謝辞といたします。

本研究に関する発表論文および 学会発表

学術雑誌

1. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Proposing Discussion Framework and Hypothesis for Neural Underpinnings of Human Symbolic and Embodied Communication from Synchronization Viewpoint, *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 査読有, 9(3), pp.221 – 228, 2022. https://doi.org/10.57417/jrnal.9.3_221
2. Maria Rodalyn, V. Sanchez, Satoru Mishima, Masayuki Fujiwara, Guangyi Ai, Mélanie Jouaiti, Yuliia Kobryn, Sébastien Rimbart, Laurent Bougrain, Patrick Hénaff, Hiroaki Wagatsuma, Methodological Design for Integration of Human EEG Data with Behavioral Analyses into Human-Human/Robot Interactions in a Real-World Context, *ICIC Express Letters*, 査読有, 14(7), pp.693 – 701, 2020. <https://doi.org/10.24507/icicel.14.07.693>
3. Guanhong Li, Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Jiro Okuda, Kazuyuki Samejima, Masayuki Fujiwara, Junya Morita, The Mir-

roring of Symbols: An EEG Study on the Role of Mirroring in the Formation of Symbolic Communication Systems, *Letters on Evolutionary Behavioral Science*, 査読有, 10(2), pp.7 – 10, 2019. <https://doi.org/10.5178/lebs.2019.70>

4. 森田 純哉, 金野 武司, 奥田 次郎, 鮫島 和行, 李 冠宏, 藤原 正幸, 橋本 敬, 協調的コミュニケーションを成立させる認知的要因:-認知アーキテクチャによるシミュレーション-, 『ヒューマンインタフェース学会論文誌』, 査読有, 20(4), pp.435 – 446, 2018. https://doi.org/10.11184/his.20.4_435

図書の章

1. 藤原 正幸, 近藤聡太郎, 阪口幸駿, 「ヒトおよび動物の同期・同調から見る意図共有」, 第 10 章, 『言語進化学の未来を共創する』, 査読有, ひつじ書房, 26 pages. ISBN: 978-4-8234-1161-8

会議論文

国際会議における予稿集

1. Masayuki Fujiwara, Maria Rodalyn, V. Sanchez, Satoru Mishima, Takashi Hashimoto, Hiroaki Wagatsuma, An EEG Power Analysis with Hyperscanning EEG-Motion-Gaze data in Embodied Synchronization: A Pilot Study for Intentional Switching with "Look This Way!" Game, *The 8th of International Congress on Cognitive Neuro-*

- dynamics*, 査読有, in press, Hongkong, China.
2. Jiro Okuda, Hiroki Kataoka, Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Neurofeedback Training As A Method for Evaluation of Brain Systems for Language, *Proceedings of Joint Conference on Language Evolution*, 査読有, pp.566-568, 2022, Kanzawa, Ishikawa, Japan. <https://doi.org/10.17617/2.3398549>
 3. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, A Framework for Understanding the Neural Underpinnings of Symbolic and Non-Symbolic Communication Based on Global Synchronization in Human Brain Activity, *Proceedings of the 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics*, 査読有, pp.260-265 2022.
 4. Hiroki Kataoka, Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Jiro Okuda, Connotation embedded in hierarchical structures of symbol strings -Extension of experimental semiotics approach-, *Proceedings of the 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 査読有, pp.964-969 2020, B-Con PLAZA, Beppu, Oita, Japan.
 5. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Guanhong Li, Jiro Okuda, Takeshi Konno, Kazuyuki Samejima, Junya Morita, Changes in Phase Synchronization of EEG During Development of Symbolic Communication Systems, *Advances in Cognitive Neurodynamics (VI)*, 査読有, pp.327 – 333, 2018, Carmona, Seville, Spain. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8854-4_41
 6. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Guanhong Li, Jiro Okuda, Takeshi Konno, Kazuyuki Samejima, Junya Morita, Phase synchrony in symbolic communication: Effect of order of messaging bearing in-

- tention, *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society*, 査読有, pp.40 – 41, 24 – 27 Oct. 2018, OIST, Okinawa, Japan.
7. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Guanhong Li, Jiro Okuda, Takeshi Konno, Kazuyuki Samejima, Junya Morita, Existence of phase synchronization, detected by electroencephalography, in the formation of symbolic communication systems, *The Booklet of Analysis and Modeling of Complex Oscillatory Systems*, 査読有, p.48, 19 – 23 Mar. 2018, PRBB, Barcelona, Spain.
 8. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Guanhong Li, Jiro Okuda, Takeshi Konno, Kazuyuki Samejima, Junya Morita, Neural Phase Synchrony on Understanding Meanings of Symbols, *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 査読有, p.3711, 26-29 Jul. 2017, London, UK.
 9. Junya Morita, Takeshi Konno, Jiro Okuda, Kazuyuki Samejima, Guanhong Li, Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Implicit memory processing in the formation of a shared communication system, *Proceedings of the 15th International Conference on Cognitive Modeling*, 査読有, 6pages, 2017, Coventry, UK.

国内学会・研究会における発表と予稿

1. 藤原 正幸, 橋本敬, 次世代型神経質量モデルの二集団間における同期解析, 『日本応用数理学会 2022 年度年会講演予稿集』, 査読無, C3-4-2, 北海道大学, 札幌市, 北海道.

2. 藤原 正幸, 橋本敬, 李冠宏, 奥田次郎, 金野武司, 鮫島和行, 森田純哉, 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, 『知識共創』, 査読有, 8, pp.IV3-1 – IV3-8,
2018年3月6 – 7日, 石川県政記念しいのき迎賓館, 金沢市, 石川県.
3. 藤原 正幸, 橋本敬, 李冠宏, 奥田次郎, 金野武司, 鮫島和行, 森田純哉, 記号
コミュニケーション課題における成功群と失敗群の同期の特徴と結合性,
『日本神経回路学会全国大会講演論文集 27th』, 査読有, pp.53 – 54, 2017
年9月21 – 22日, 北九州国際会議場, 北九州市, 福岡県.
4. 藤原 正幸, 橋本敬, 李冠宏, 奥田次郎, 金野武司, 鮫島和行, 森田純哉, 記号
コミュニケーション課題における成功・失敗ペア間の脳波位同期構造の
比較, 査読有, 『知識共創』, 7, p.V15-1, 2017年3月21 – 22日, 大阪府立
大学「I-site (アイサイト) なんば」, 大阪市, 大阪府.
5. 藤原 正幸, 橋本敬, 李冠宏, 奥田次郎, 金野武司, 鮫島和行, 森田純哉, 記号
コミュニケーション課題における脳波位同期構造の変化, 『計測自動制
御学会システム・情報部門学術講演会講演論文集 2016』, 査読有, GS13 –
13, 2016年6 – 8日, 滋賀県立体育館, 大津市, 滋賀県.
6. 藤原 正幸, 橋本敬, 記号コミュニケーション理解のための脳波位相同
期ネットワークによる二者間相関解析の提案, 『知識共創』, 査読有, 6,
pp.VII-1 – VII-1-6, 2016年3月12 – 13日, 石川県政記念しいのき迎賓
館, 金沢市, 石川県.
7. 藤原 正幸, 山口明宏, 久保正男, カオスのセルラーニューラルネットワー
クにおける画像入力に対する同期応答の解析, 『第11回日本応用数理学会
研究部会連合発表会』, 明治大学中野キャンパス, 2015年3月6 – 7日,
中野区, 東京都.

投稿準備中

1. Masayuki Fujiwara, Takashi Hashimoto, Guanhong Li, Jiro Okuda, Takeshi Konno, Kazuyuki Samejima, Junya Morita, Neural Dynamics of EEG for the Understanding of Meaning and Intention of Symbols on the Emergence of Symbolic Communication (tentative), 投稿準備中, 18 pages.

本研究に関する受賞

1. 藤原 正幸, 2020 年 4 月新学術領域研究「共創的コミュニケーションのための言語進化学」第四回領域全体会議 優秀賞
2. 藤原 正幸, 橋本 敬, 2019 年 3 月新学術領域研究「共創的コミュニケーションのための言語進化学」第三回領域全体会議 奨励賞
3. 藤原 正幸, 橋本敬, 李冠宏, 奥田次郎, 金野武司, 鮫島和行, 森田純哉, 2018 年 3 月第 8 回知識共創フォーラム 奨励賞
4. 藤原 正幸, 2017 年 3 月計測自動制御学会北陸支部 優秀学生賞