

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03502

研究課題名（和文）神経リズムの引き込み協調により実現する脳コミュニケーション

研究課題名（英文）Communication between brains by synchronization of neural oscillations

研究代表者

水原 啓暁（Mizuhara, Hiroaki）

京都大学・情報学研究科・講師

研究者番号：30392137

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：脳内の皮質部位間をまたがる情報伝達に、神経の振動的な電気信号の皮質間でのシンクロ現象が関与していることが指摘されている。この振動的信号のシンクロ現象は、単に脳内の皮質部位間での情報伝達のみでなく、脳をまたぐ情報伝達、つまりコミュニケーションにも共通する原理であるとの観点で、音声リズムと脳波のシンクロ現象を検証した。コミュニケーションの質的な変化をとらえることを目的として、最新のニューラルネットワークモデルによる自然言語処理技術を用いて、実験参加者の理解度を評価した。このことにより、振動的信号のシンクロ現象により脳間の情報伝達についても記述可能であることを支持する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動的信号のシンクロ現象により、脳内のみならず、脳をまたぐ情報伝達が実現されていることを示すことは、脳の異なるスケールにおける情報伝達のメカニズムを、統一的な原理で記述可能な枠組みを提出することとなる。このことは、脳の情報処理メカニズムに基づいた新たな情報伝達様式の提案につながる可能性を秘めている。また、ニューラルネットワークモデルによる自然言語処理技術により、コミュニケーションの理解度を定量測定する方法は、本研究と同様のコミュニケーションを対象とした心理学実験のみならず、一般のコミュニケーションの質を評価するツールとしても有用である。

研究成果の概要（英文）：Oscillatory synchronization of electrical signals between cortical regions has been proposed to play a role in the information transfer across cortical regions in the brain. In this study, we examined the synchronization of speech rhythms and EEGs from the viewpoint that the oscillatory synchronization is a common principle not only in the information transfer between cortical regions in the brain, but also in the information transfer across the brain, that is, in communication. To detect qualitative changes in communication, we evaluated the comprehension of the participants using natural language processing technology based on the latest neural network models. The results support the idea that oscillatory synchronization can describe the information transfer between brains.

研究分野：脳認知科学

キーワード：コミュニケーション 脳波 人工知能 シンクロ 音声理解 脳計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 脳内の神経ネットワークの動的なコミュニケーション

研究代表者は、脳内の複数の部位間の情報コミュニケーションが、神経リズムのシンクロにより動的に実現されているとの仮説のもと、脳波計測や fMRI と脳波の同時計測などにより研究を進めてきている。脳内では状況に応じて柔軟に神経ネットワークを切り替える必要があり、これを実現するメカニズムの有力候補として神経リズムのシンクロ現象が注目されている (von der Malsburg & Schneider, Biol Cybern 1986)。脳内における神経リズムのシンクロは、ニューロンレベル、局所場電位レベル、脳波レベルなどの複数のネットワークスケールにおいて共通して観察されることが報告されている (図 1) (Singer, Trends Cogn Sci 2013; Varela et al., Nat Rev Neurosci 2000)。申請者のこれまでの研究においては、ヒトの脳波と fMRI の同時計測により、認知課題遂行中のネットワークが神経リズムのシンクロにより動的に変化することを明らかにしてきている。

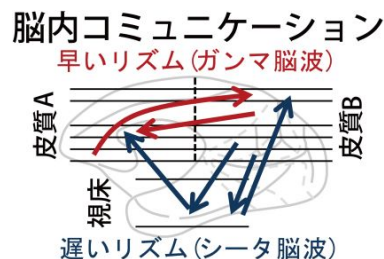


図1 脳内の動的コミュニケーション

(2) 脳間コミュニケーションへの拡張

脳内の動的なコミュニケーションを実現する神経リズムのシンクロが、脳内のみならず脳と脳、つまりヒトとヒトの間のコミュニケーションにも共通する原理であると考えている。ヒトの脳内の神経の情報伝達においては、近い距離においては早い周期の神経リズムが、より遠距離においては緩やかな周期の神経リズムが寄与していることが報告されている (Saalman et al., Science 2012)。研究代表者は脳内での動的な情報伝達メカニズムのアナロジーとして、脳間のコミュニケーションの神経メカニズムを記述可能であると考えている。脳間のコミュニケーションは、脳内のネットワークの情報伝達と比較して、系のスケールがより大きくなる。したがって、脳内で観察される神経リズムよりもさらに緩やかな神経リズムによるシンクロにより、脳間のコミュニケーションが実現していると考え、これまでに音声コミュニケーションを対象として脳波計測を実施してきた (図 2)。音声コミュニケーションにおいてはプロソディと呼ばれる 1~3Hz の緩やかな音声リズムが聴取者の神経リズムを引き込むことで、音声コミュニケーションを促進していることを明らかにしている (Onojima et al., PLoS One 2017)。この音声コミュニケーションにおけるリズムは、脳内の広範な部位の動的なコミュニケーションの際に観察される神経リズム (4~8Hz) よりも緩やかな活動であり、研究代表者の仮説を支持する結果を得ている。

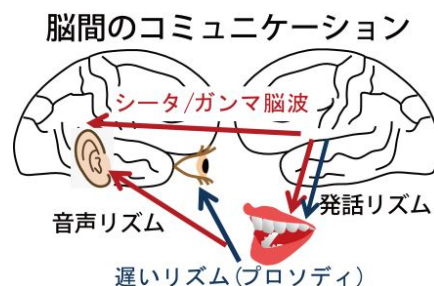


図2 脳内のアナロジーとしての脳間コミュニケーション

2. 研究の目的

本研究課題では、ヒトとヒトのコミュニケーションは、コミュニケーションを行う二者の脳の神経活動の振動 (神経リズム) がシンクロ (引き込み協調) することによって実現される、という仮説を検証する。従来研究では神経リズムのシンクロは、脳内における複数の脳部位間の情報伝達 (コミュニケーション) を実現する神経メカニズムとして着目されてきた。本研究では、これを脳間のコミュニケーション、つまりヒトとヒトのコミュニケーションを理解するために拡張可能な共通原理であると考え、そこで、コミュニケーション課題を遂行中の被験者からの脳波計測を実施することで、コミュニケーションの量的および質的变化が起こるかを検証する。

3. 研究の方法

音声聴取中の脳波計測により、音声リズムと神経リズムのシンクロが変化するかを検証する。音声は短い小説のナレーションを用いた。従来研究 (Lerner et al., J Neurosci 2011) と同様にして、文章の順番をシャッフルしたナレーションをコントロール課題として用いた。完全なナレーション (intact 条件) とシャッフルしたナレーション (shuffled 条件) を聴取中の脳波を比較することで、文章長の作業記憶を保持するための神経基盤を探索する。

このナレーションの理解度を定量評価するために、自然言語処理のニューラルネットワークモデルを用いた解析を実施した。この研究では、被験者に実験後にナレーションの内容をできるだ

け詳しく自由想起してもらおうよう要求した。この自由想起した文章の内容と、オリジナルのナレーションの内容について類似性を検証した。この類似性の検証に、自然言語処理のニューラルネットワークモデルを用いた。このニューラルネットワークモデルはビッグデータとして Wikipedia に掲載された全ての記事にもとづいて単語の意味をベクトルとして表現するように学習する。このニューラルネットワークを用いて、自由想起文章とオリジナルの小説を意味ベクトル表現する。このベクトルが、被験者による自由想起文章とオリジナル文章とで近ければ、正しく理解できたとして判断する。つまり、単に同じ単語が使われたかで作業記憶の成否を判断するのではなく、意味レベルでオリジナル文章と近い内容を想起できていれば、正しく作業記憶がおこなえたとして定量評価した。

4. 研究成果

(1) 自然言語処理のニューラルネットワークモデルのパラメータ探索

人工ニューラルネットワークには、日本語 Wikipedia の全ての記事(2020年3月29日時点)を用いて、形態素の単語分散表現を学習させた。ニューラルネットワークの学習をおこなう前処理として、形態素解析を実施した。日本語は、英語のような明示的な単語の区切りを示すスペースは存在せず、単語が連続して文章を構成している。そこで、まず文章を形態素に分割する必要がある。形態素解析には、Conditional Random Fields (CRF)に基づく日本語形態素解析エンジンである MeCab を用いた(Kudo, Yamamoto, & Matsumoto, Proc EMNLP 2004)。

前処理をおこなった Wikipedia の記事の形態素系列を対象として、ニューラル言語モデルの一つである word2vec を用いて、単語分散表現を学習した(Mikolov, Sutskever, Chen, Corrado, & Dean, NIPS 2013)。Word2vec モデルの学習アルゴリズムには skip-gram を用いた。word2vec の学習に用いる周辺語数は 10 単語、コーパス中に 3 回以上出現する形態素を対象、negative word sampling of 15 words とパラメータを設定して学習をおこなった。なお、意味ベクトルの次元数については 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 として実施し、最適な次元数を探索した。

Wikipedia で単語分散表現を学習したニューラルモデルを用いて、ナレーションに用いた物語、および被験者による自由想起文章の意味ベクトルを抽出した。これらの文章についても、ニューラルネットワークの学習の際と同様に、MeCab による形態素解析を前処理として実施した。この前処理により、オリジナルの物語、および被験者による自由想起文章を、名詞、動詞、形容詞の形態素列に変換した。この形態素列を、学習した word2vec モデルにより意味ベクトルに変換する。その後、オリジナル物語と被験者の自由想起文章の意味ベクトルのコサイン類似度 $\cos(v_1, v_2) = \frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1| |v_2|}$ を計算することで、これらの文章間の意味的な類似性を定量的に示す。なお、コサイン類似度は -1 から 1 のレンジで表現され、1 に近いほど 2 つのベクトルは類似している。

文章全体の類似度を計算するため、形態素ごとに抽出した意味ベクトルを全形態素で加算平均したのちにコサイン類似度を計算した。このコサイン類似度が、自由想起文章に対応した物語の類似度が高く、関係のない物語との類似度が低いほど、ニューラルモデルによる行動データの分離性能が高く最適な次元といえる。そこで、自由想起文と対応する場合の物語の類似度を S_c 、対応しない物語の 3 話(4 話中の残り)との類似度の平均値 S_i を算出した(図 3a)。ここで $S_c = S_i$ がチャンスレベルである。このチャンスレベルとの距離 $|S_c - S_i| / 2$ の被験者間平均を最大とする次元が最適なベクトル次元となる。この分離性能は、次元数の増加に従って単調増加していた(図 3b)。つまり、今回の word2vec モデルに用いた次元数よりも大きい場合に、より高い分離性能を有する可能性があるが、計算コストを考えると、今回はベクトル次元数 5000 として解析を行った。

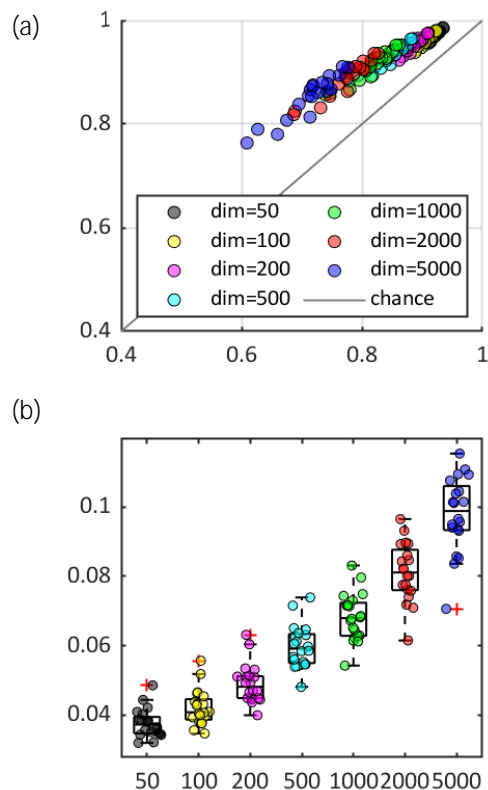


図 3 自然言語処理に用いるニューラル言語モデルのパラメータ(次元)探索。(a) 次元を変化させたときの対象文章とサロゲート文章に対するコサイン類似度。(b) 各次元における対象文章とサロゲート文章との分離性能。

(2) 記憶パフォーマンスの評価

被験者がどれだけ物語を覚えていられたかを、オリジナルの物語と被験者による自由想起文章の意味的な類似度、および自由想起できた文章の長さを用いて検証した。意味的な類似度の解析では、オリジナル文章と自由想起文章に含まれる形態素の意味ベクトルの全形態素平均のコサイン類似度を計算した。その結果、文章をシャッフルして提示したナレーション (shuffled 条件) では、シャッフルしていないナレーション (intact 条件) を聞かせた場合よりも、意味的な類似度が低い結果となった。また、自由想起文章で書きだした名詞、動詞、助動詞の形態素数も同様に、文章をシャッフルして提示したナレーションでは、より少ない形態素数しか自由想起できなかった。

(3) 音声リズムと神経リズムのシンクロ変化

文章長の記憶保持を実現する脳波を特定するために、音声と脳波のシンクロ指標を、文章をシャッフルして提示したナレーション (shuffled 条件) と、シャッフルしていないナレーション (intact 条件) を聞かせた場合を比較した (図 5)。

音声リズムと脳波のシンクロについては、前頭を中心とした帯域 (9-12Hz) においてシャッフル条件において intact 条件と比較して、音声リズムとのシンクロが増加した。この前頭のシンクロに加えて、左の頭頂領域で、帯域 (22-26Hz) の脳波が音声エンベロープのリズムと、シャッフル条件において、よりシンクロした。記憶パフォーマンスの結果と総合的に検討すると、このことは、音声リズムと神経リズムのシンクロ変化にともない、発話理解の精度が変化することを意味している。

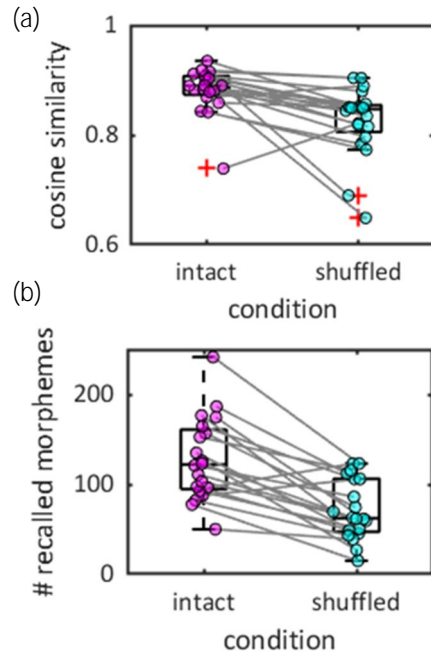


図 4 ニューラル言語モデルにより評価した記憶成績。(a) ナレーション文章と自由想起文章の類似度。(b) 自由想起できた形態素数。

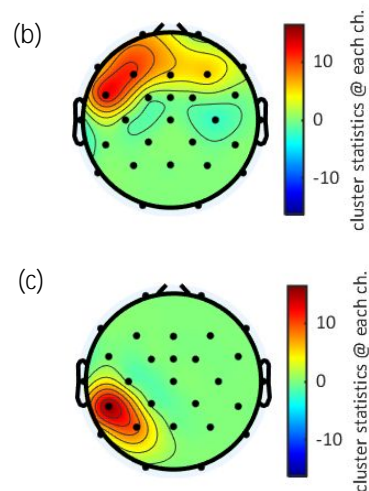
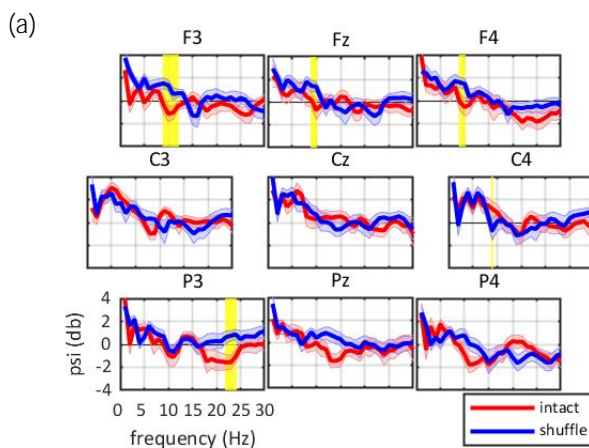


図 5 音声リズムと神経リズムのシンクロ。(a) 各電極位置における intact 条件と shuffled 条件のシンクロ指標。黄色領域が統計的に有意な差を示す。帯域(b)と帯域(c)で観察した統計的な差のトポグラフ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mizuhara Hiroaki, Uhlhaas Peter	4. 巻 12
2. 論文標題 The Role of Temporal Contingency and Integrity of Visual Inputs in the Sense of Agency: A Psychophysical Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2021.635202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Naoyuki, Matsumoto Riki, Shimotake Akihiro, Matsubashi Masao, Otani Mayumi, Kikuchi Takayuki, Kunieda Takeharu, Mizuhara Hiroaki, Miyamoto Susumu, Takahashi Ryosuke, Ikeda Akio	4. 巻 -
2. 論文標題 Frequency-dependent cortical interactions during semantic processing: an electrocorticogram cross-spectrum analysis using a semantic space model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sato Naoyuki, Mizuhara Hiroaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Successful Encoding during Natural Reading Is Associated with Fixation-Related Potentials and Large-Scale Network Deactivation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 eneuro	6. 最初と最後の頁 e0122-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1523/ENEURO.0122-18.2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiroaki Mizuhara, Peter Uhlhaas
2. 発表標題 The impact of predictions and sensory input on the sense of agency: Development of a new psychophysical paradigm
3. 学会等名 EuroCogSci2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoyuki Sato, Riki Matsumoto, Akihiro Shimotake, Masao Matsuhashi, Mayumi Otani, Takayuki Kikuchi, Takeharu Kunieda, Hiroaki Mizuhara, Ryosuke Takahashi, Akio Ikeda
2. 発表標題 Predictability of electrocorticogram coherence using distributed semantic representation
3. 学会等名 Annual meeting of Society for Neuroscience 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Mizuhara
2. 発表標題 Neural Oscillations Are a Common Mechanism to Explain Multiscale Communication within/Between the Brains
3. 学会等名 NOLTA2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	佐藤 直行 (Sato Naoyuki) (70312668)	公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授 (20103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Glasgow			
ドイツ	Charite Universitaetsmedizin			