

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25240019

研究課題名(和文) 神経振動子の位相リセットによる音声コミュニケーション原理

研究課題名(英文) Underlying mechanism of verbal communication by phase-resetting 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) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：脳内の皮質間の情報伝達と、ヒトとヒトとの情報伝達の神経メカニズムを、神経振動子理論にもとづき統一的に記述することを目的として、脳波実験、および脳波と機能的MRIの同時計測実験を行った。その結果、脳内の動的なネットワークはシータ波の特定の位相においてガンマ波が発生することで実現されていること、ヒトとヒトとのコミュニケーションについては、さらに緩やかなデルタ波で脳間の神経振動子協調を実現することで、シータ波で表象している情報の伝達を効率的に行っていることを示した。このことは、脳内から脳間までの情報伝達の神経メカニズムを、神経振動子を用いた統一的な理論により記述可能であることを意味している。

研究成果の概要(英文)：We measured human scalp EEG, and simultaneous fMRI-EEG to investigate the neural mechanisms of communication. In this project, we assumed that the communication, ranging from cortical networks in the brain to social networks between humans, can be explained by a common theoretical framework on the neural oscillations. The results indicated that the dynamic cortical networks in the brain were achieved by a hierarchical synchrony of neural oscillations between the theta and gamma EEGs. The hierarchical synchrony of neural oscillations also enhanced the communication between humans, where the slower oscillation in delta EEG conveyed information represented by the theta EEG in the brain to others. We demonstrated that the underlying mechanism of communication can be described by a common theoretical framework on the neural oscillations ranging from cortical networks in the brain to real human-human interaction.

研究分野：認知神経科学

キーワード：認知神経科学 コミュニケーション 音声知覚 神経振動子 神経回路 脳機能イメージング 身体性
引き込み

1. 研究開始当初の背景

(1) 脳内での神経振動子協調

柔軟な情報処理を実現する脳内メカニズムの有力候補として、神経振動子協調が世界的に注目されている(例えば Donner & Siegel, Trends Cogn Sci. 2011)。脳には機能局在があるが、状況に応じて皮質間を跨がる神経回路をつなぎかえる必要がある。比較的長時間での神経ネットワークの創発はシナプス結合強度の可塑性として知られている。一方、状況に応じた短時間での神経ネットワークの組み換えは物理的な結線のみでは説明できない。この短時間の動的な神経ネットワークの構築が、神経活動のタイミング制御により実現されると考えられており、これを担う脳内メカニズムが神経振動子協調である。

神経振動子協調に関する研究は、当初、主に実験動物を対象として実施され、複数のニューロン活動の同期発火や、離れた領域における局所場電位の位相同期現象などが報告されている。さらに、研究代表者らの行った研究において、ヒトにおいても頭皮上で観察される脳波活動の位相同期により遠距離の皮質ネットワークが動的に切り替えられることが示されている (Mizuhara & Yamaguchi, NeuroImage 2007)。また、異なる周波数(例えばシータ波とガンマ波)の協調による情報処理メカニズムが注目され始めており、緩やかな脳波の位相と、早い脳波の振幅の位相-振幅カップリングによりエピソード記憶保持が実現されていることも示している (Mizuhara & Yamaguchi, Eur J Neurosci. 2011)。この研究では、複数の周波数の神経振動子協調が、脳内で分散表現している情報をひとかたまりの情報として認識するための動的な皮質ネットワーク形成の神経基盤であることを示唆している。

(2) 個体間での神経振動子協調への拡張

脳内で観察されるこのような神経振動子協調が、脳内の皮質ネットワークを動的に構築するのみならず、ヒトとヒトとのコミュニケーションをも説明し得る共通原理であることが指摘されている。他者の話を聞いているときには、話者の表情などを観察することで会話内容の理解が促進されることが知られている。この神経基盤が神経振動子協調であることが提唱されている (Schroeder et al., Trends Cogn Sci. 2008)。ヒトの音声は主にシラブル(音節)とフォニーム(音素)と呼ばれる単位に細分化できる。シラブルの発声周波数は 4~8Hz、フォニームの発声周波数は 30Hz 付近であり、それぞれ脳波のシータ波およびガンマ波と周波数が一致する。また、シータ波は右半球、ガンマ波は左半球の聴覚皮質の活動と相関することが示されており (Giraud et al., Neuron 2007)、それぞれのシラブルとフォニームが左右半球聴覚皮質において分散してコードされていることを意味している。

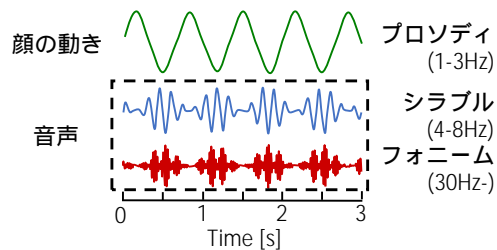


図 1 顔の動きにみられるリズム(プロソディ)に同期する音声のリズム(シラブル、フォニーム)

これらの分散表現された情報を、ひとかたまりの情報として統合する神経基盤として、話者の表情を観察することによる聴覚皮質の神経活動の位相リセットが考えられる。話者の表情は、音声のイントネーションなどにみられるプロソディと周波数が一致することが知られており、この周波数は脳波のデルタ波と同一の周波数帯域(~ 3Hz)である。このプロソディ表現により、シラブルおよびフォニームをコードした神経活動タイミングをリセットして、プロソディ表現をコードしている脳波の特定位相で励起することができれば、脳内で分散表現されているシラブルとフォニームをひとかたまりの音声情報として脳内で統合・認識することが可能となる(図1)。つまり、ヒトとヒトとのコミュニケーションにおいても、プロソディについての振動子が視覚情報として他者に伝達することで、発話のシラブル、フォニームといった振動子の励起タイミングを制御することが可能となる。この神経振動子協調により、他者の発話情報の理解が促進されると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、脳内でのダイナミックな皮質ネットワークと同様に、神経振動子協調により脳(個体)間のコミュニケーションを実現していることを、脳波および脳波と機能的 MRI の同時計測実験により明らかにすることを目的とした。この目的のために、

(1) 脳内の動的なネットワーク

(2) 脳間のコミュニケーション

について、それぞれ脳波で観察される神経振動子により実現しているかを検証した。

「(1) 脳内の動的なネットワーク」については、記憶の保持に関連して必要な皮質ネットワークが、複数の周波数の神経振動子協調により実現しているかを、脳波と機能的 MRI の同時計測により検証した。「(2) 脳間のコミュニケーション」については、音声聴取課題を実施中の脳波計測、および脳波と機能的 MRI の同時計測を実施することで、音声や顔の表情に含まれるリズムと聴取者の神経振動子が協調することでコミュニケーションが促進するかを検証した。また、これらの脳内と脳間の神経振動子協調によるダイナミックなコミュニケーションを統一的に記述可能な計算原理の解明を目指して、音刺激に

より聴取者の脳内の神経振動子が変調することを検証した。特にこの課題では、腹話術効果およびマガー効果に着目することで、音刺激レベルから音声刺激レベルでの聴取者の神経振動子変調を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

「(1) 脳内の動的なネットワーク」においては、代表者の従来研究において実施した記憶課題 (Mizuhara & Yamaguchi, Eur J Neurosci, 2011) に関連する脳ネットワークを解明することを目的として、脳波と機能的MRIの同時計測を実施した。記憶課題としては、風景写真と数字の作業記憶の二重課題を用いて、風景写真の記憶保持中に発生する脳波成分を同定するとともに、この脳波成分に関連した皮質ネットワークを、脳波と同時計測する機能的MRIにより同定した。

「(2) 脳間のコミュニケーション」においては、音声聴取課題実施中の脳波計測を実施するとともに、このときの脳内のネットワークを検証するために、脳波と機能的MRIの同時計測を実施した。音声聴取課題として、4文字の日本語単語の読み上げ音声とピンクノイズを重畳したものをを用いた。実験参加者は、提示された日本語音声の再認実験を実施中の脳波計測を実施した。これにより、音声リズムに含まれる周波数の脳波活動が音声リズムに引き込まれることを示すとともに、その脳波成分の位相により音声聴取成績が変化することを示した。また、脳波と機能的MRIの同時計測においても、同様の音声聴取課題を用いることで、脳波成分に関連した皮質ネットワークを同定した。

さらに、これらの実験に加えて、腹話術効果課題およびマガー効果課題を実施中の脳波計測を実施した。腹話術効果課題を用いた脳波計測においては、視覚刺激として左右視野のいずれかに光の点滅、聴覚刺激としては左右空間のどちらかから発生するピープ音を用いた。このとき、ピープ音の提示に先駆けて光刺激を表示することで、音の発生空間にかかわらず、光刺激が提示された空間から音が発生したと感ずる錯覚を誘発できる。さらにこの刺激提示方法に加えて、光の点滅刺激の代わりに画面中心に左右のいずれかを指し示す矢印刺激を提示する実験についても行った。これらの条件は、前者はボトムアップ注意を、後者はトップダウン注意を視覚刺激によって左右空間に向けさせたときの腹話術効果を検証するために行った。このときの脳波計測を実施することで、音声よりもより基本的な音刺激の場合における神経振動子の役割について検証した。

またマガー効果課題においては、発話中の口元の映像と音声を提示した。このとき、口元は/ka/の発話を行っているときの映像を、音声としては/pa/の音声を提示した。このように異なる音の映像と音声を組み合わ

せることにより、どちらの音でもない/ta/の音声が発覚される現象をマガー効果と呼んでおり、このときの脳波計測にもとづき音声により聴取者の脳内の神経振動子が引き込まれる機能的な意義について検証した。

これらの脳内の神経振動子協調による動的なネットワーク形成から、脳個体間のコミュニケーションにおける神経振動子協調の機能的役割までの複数のスケールを統一的に検証することで、神経振動子協調により脳内から脳間のコミュニケーションまでを統一的に記述可能な基礎理論を提出した。

4. 研究成果

脳内の複数の部位間の情報伝達においては、神経の振動的な電気活動(神経振動子)が複数部位間で位相協調することで実現されていることが注目されている。代表者は従来研究に基づいて、この神経振動子の位相協調が脳内の情報伝達のみならず、脳間の情報伝達、つまり人と人とのコミュニケーションにおいても共通して重要な役割を果たしているものと考え、人の音声コミュニケーションを対象として、その実験による検証を実施した。

まず、脳内の複数部位の動的なネットワーク形成が神経振動子協調により実現されていることを検証するために、記憶課題を遂行中の脳波と機能的MRIの同時計測を実施した。この研究においては、代表者の従来研究で用いた風景写真の作業記憶課題を用いて、その記憶保持中に発生する脳波に関連した脳活動部位を同定した。風景写真を記憶できる条件においては、早い周波数(ガンマ波, 30Hz以上)での脳波活動が遅い周波数(シータ波, 4Hz 付近)の特定の位相において発生していることを従来研究において示している (Mizuhara & Yamaguchi, Eur J Neurosci 2011)。そこで、この課題中に発生したガンマ波およびシータ波の振幅の時間変調に関連して変化する脳活動を機能的MRIにより同定した。その結果、ガンマ波に関連しては風景写真の情報を表現している脳部位が活動していることが明らかになった。さらに、シータ波に関連して、記憶の保持に関する皮質ネットワークが検出された。これらの結果から、シータ波のような緩やかな周波数の神経振動子により脳内の全体をまたがるグローバルな皮質ネットワークを形成するとともに、その神経振動子の特定の位相において早い周波数が発生するような複数周波数間の神経振動子協調により、脳内の複数部位間での情報伝達、つまり脳内でのコミュニケーションを行っているとする我々の仮説を支持する結果を得た。

さらに神経振動子協調によるコミュニケーションに関する理論を、脳と脳の間でのコミュニケーションに拡張するために、音声コミュニケーションを実施している際の脳と音声との協調を想定して音声聴取課題を遂

行中の脳波計測，および脳波と機能的 MRI の同時計測を実施した．従来研究により，音声コミュニケーションにおいては，音声に含まれる複数のリズムが重要な役割を担っていると考えられてきた．その中でも，プロソディおよびシラブルと呼ばれる発話ボリュームの抑揚および音節の発生頻度が，それぞれ 1-3Hz 程度，4-8Hz 程度と脳波の周波数帯域と一致することから，音声コミュニケーションにおいて重要であると考えられている．これらの周波数帯域の音声リズムと脳波リズムが，音声聴取中に位相同期することが従来研究において報告されていたことから，その機能的意義を検証するために，音声聴取課題実施中の脳波計測実験を実施した．

音声聴取課題中に計測した脳波の位相の機能的な役割を検証するために，脳波位相により変化する聴取成績を抽出可能な新たな指標の提案を行った．この提案した指標を用いて音声聴取中の脳波解析を実施したところ，音声聴取中のデルタ脳波（1-3Hz）および聴取直前のシータ脳波（4-8Hz）が，音声聴取成績に関係していることが明らかになった．さらに脳波と機能的 MRI の同時計測を実施することで，これらの脳波活動が運動皮質の活動と関係していることを明らかにした．運動皮質の活動は，音声コミュニケーション中において話者の発話運動の予測を行っていると考えられてきており，これらの脳波位相により聴取成績が変化した結果は，この神経振動子の位相が話者の運動情報の予測に寄与していることを意味している．

これらの解析に加えて，非線形物理分野で用いられる数理モデルを導入した新たな解析手法を開発することで，音声リズムが脳波の位相を変調させているか検証した．その結果，デルタ脳波およびシータ脳波の位相は音声リズムにより変調されていることが明らかになった．つまり，これらの結果は，音声コミュニケーションにおいては音声リズムが聴取者の神経振動子の位相を変調して最適な状態にすることで，円滑なコミュニケーションを実現していることを示唆している．

さらに，聴取者の神経振動子が音声により引き込まれる神経基盤を検証するために，腹話術効果課題を用いたときの脳波計測実験を行った．この実験では，左右いずれかの空間から発せられる音源の定位課題を実施した．このとき，音刺激の提示直前に，左右のどちらの空間から音が発せられるかの手がかりとなる視覚刺激が提示される．ただし，実際に音が発せられる空間と同じ空間を示唆する視覚刺激だけではなく，逆方向の空間を示唆する視覚刺激も提示される．逆方向を示唆する視覚刺激が提示された場合に，その視覚刺激の提示に誘導されて，あたかも音源が視覚刺激のほうに存在するとの錯覚が誘発される．このことを腹話術効果と呼ぶ．本研究では，視覚刺激としてボトムアップ注意を誘発する刺激，およびトップダウン注意を

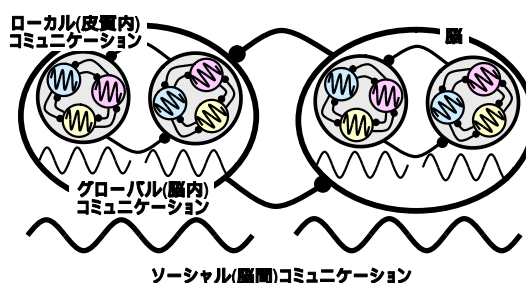


図 2 複数のコミュニケーションを統一的に記述する神経振動子協調理論

誘発する刺激を用いて，それぞれの注意により変調する神経振動子を明らかにすることで，神経振動子による音刺激の処理メカニズムについて検討した．その結果，ボトムアップ注意では緩やかな脳波（4-8Hz，シータ波）の位相がシフトすることで聴覚刺激に対する感度を増大させている一方，トップダウン注意ではやや早い脳波（10Hz 付近，アルファ波）の振幅が減少することで聴覚刺激に対する感度を増大させていることが明らかになった．このことは，聴取者の神経振動子と音声との引き込み協調を実現するメカニズムとして，ボトムアップ注意のような機能が関与していることを示唆している．

さらに，聴取者の神経振動子と音声との引き込み協調においては，二種類の緩やかな脳波（デルタ波：1-3Hz，シータ波：4-8Hz）が関係していることを示している．そこでこれらの異なる周波数が，音声コミュニケーションにおいてどのような役割を果たしているかを検証するために，マガーク効果課題を用いたときの脳波計測実験を行った．マガーク効果とは，実際の音声とは異なる発話をしている口元映像を見たときに，音声知覚の錯覚が起こる現象である．従来研究などにより，デルタ波での神経振動子は顔の動きなどの視覚情報に，シータ波での神経振動子は音声により位相変調が発生することで，聴取者の神経振動子と音声との引き込み協調が実現しているものと考えている．そこでマガーク効果課題を用いた際の脳波計測を実施したところ，視覚情報に対してはデルタ波の位相が，聴覚情報に対してはシータ波の位相が変調していることが明らかになった．音声コミュニケーションにおいては，視覚情報は聴覚情報よりも先に発せられることが知られており，視覚情報によるデルタ波の引き込み協調により聴覚情報への感度を増大させることで，聴覚情報とシータ波との引き込み協調を誘発していることを示唆する結果である．

以上の研究に基づき，脳内の動的な皮質ネットワーク形成から，脳と脳の間でのコミュニケーションにまでの複数の階層における情報伝達を，神経振動子協調を用いて統一的に記述する基礎理論を提出した（図 2）．脳内における局所部位での情報表現は，局所での早い神経振動子（ガンマ波：30Hz 以上）の協調に

よる実現している。この局所での情報を脳内の皮質間で情報伝達するために、より緩やかな神経振動子(シータ波: 4-8Hz)での協調を用いる必要がある。このときガンマ波はシータ波の特定の位相において出現することで、複数の皮質部位での発生タイミングの同期を実現することができる。このようにシータ波とガンマ波の階層的な神経振動子協調により、脳内の動的な皮質ネットワーク形成を実現している。

脳と脳の間でのコミュニケーションにおいても同様の神経振動子協調により情報伝達を実現している。脳内のシータ波での表現された情報を、脳と脳の間で伝達するために、より緩やかな神経振動子(デルタ波: 1-3Hz)を用いて脳と脳の間での引き込み協調を実現している。このときプロソディと呼ばれる音声の抑揚などのリズムと、顔表現やジェスチャーなどの視覚情報としてのコミュニケーション手段が同期することが知られている。そこで音声コミュニケーションにおいては、この視覚情報を用いてデルタ波での神経振動子協調を脳と脳の間で実現し、その特定の位相においてシータ波が発生することで効率的な脳間の情報伝達を実現しているものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 19 件)

Sasaoka T, Mizuhara H, Inui T, "Dynamic parieto-premotor network for mental image transformation revealed by simultaneous EEG and fMRI measurement." *Journal of Cognitive Neuroscience* **26**, 232-246, 2014.

Mizuhara H, Sato N, Yamaguchi Y, "Cortical networks dynamically emerge with the interplay of slow and fast oscillations for memory of a natural scene." *NeuroImage* **111**, 76-84, 2015.

Kumagai T, Mizuhara H, "Top-down and bottom-up attention cause the ventriloquism effect with distinct electroencephalography modulations." *NeuroReport* **27**, 647-651, 2016.

Kuga H, Onitsuka T, Hirano Y, Nakamura I, Oribe N, Mizuhara H, Kanai R, Kanba S, Ueno T, "Increased BOLD Signals Elicited by High Gamma Auditory Stimulation of the Left Auditory Cortex in Acute State Schizophrenia." *EBioMedicine* **12**, 143-149 2016.

Onojima T, Kitajo K, Mizuhara H, "Ongoing slow oscillatory phase modulates speech intelligibility in

cooperation with motor cortical activity." *PLoS One* **12**, e0183146, 2017.

Onojima T, Goto T, Mizuhara H, Aoyagi T, "A dynamical systems approach for estimating phase interactions between rhythms of different frequencies from experimental data." *PLoS Computational Biology* **14**, e1005928, 2018.

[学会発表](計 39 件)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

山口大学第64回姫山祭・特別講演「コミュニケーションする脳!? リズムは脳をつなぐ」, 2013年11月3日

京都大学アカデミックデイ2015「リズムでつながる脳」, 2015年10月4日

<http://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/2015/66/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

水原 啓暁(MIZUHARA, Hiroaki)

京都大学・大学院情報学研究科・講師

研究者番号: 30392137

(2)研究分担者

北城 圭一(KITAJO, Keiichi)

国立研究開発法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・副チームリーダー

研究者番号: 70302601

上野 雄文(UENO, Takefumi)

九州大学・医学研究科・共同研究員

研究者番号: 00441668

(3)連携研究者

鬼塚 俊明(ONITSUKA, Toshiaki)

九州大学・医学研究院・准教授

研究者番号: 00398059

平野 昭吾(HIRANO, Shogo)

九州大学・大学病院・助教

研究者番号: 10568984

(4)研究協力者

小野島隆之(ONOJIMA, Takayuki)

熊谷俊宏(KUMAGAI, Toshihiro)

大園敦士(OOZONO, Atsushi)