

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K07721

研究課題名（和文）相互作用する二者の神経ダイナミクスを統合的に理解するための新たな解析法の開発

研究課題名（英文）Development of new analytical methods for integrative understanding of the neural dynamics of interacting dyads

研究代表者

田邊 宏樹（Tanabe, Hiroki）

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：20414021

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究において、過去のハイパースキャン研究の実験デザインと解析法を詳細に検討し直し、相互作用する二者のハイパースキャンfMRI実験により得られたデータに対する新たなネットワークダイナミクスを扱える手法を構築、開発した。例として、健常者同士のペアと高機能自閉スペクトラム症（ASD）者と健常成人のペアがそれぞれ共同注意課題を行っている際の脳活動データを解析し、健常成人ペアでは以前の解析で見られた以外の部位でも二者の脳活動の同期の増強や、これまでの解析では全く脳活動の同期が見られなかったASDと健常成人ペアにおいて視覚野同士の同期が確認された。これにより本解析手法の有効性の一端を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義として、まずハイパースキャンにおける解析法を整理し、全ての装置で用いることが可能な実験を構築したことが挙げられる。さらにハイパースキャンfMRIデータに対するネットワークダイナミクスの新たな解析パッケージを作成し、解析例として高機能自閉症者のデータに適用し、新たな知見を得られたことも学術的に大きな意味を持つ。これにより、さまざまな関係性を持つ二者の社会的相互作用に関わる神経基盤をさらに詳細に探ることができるようになり、リアルタイムコミュニケーションのあり方について科学的見地からの発信力が増したことに社会的な意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I reexamined the experimental design and analysis methods of previous hyperscan studies in detail, and developed a new analytical approach for examining network dynamics using data obtained from hyperscan MRI experiment involving interacting dyads. To illustrate its application, I analyzed the brain activity data of pairs of typically-developed (TD) individuals and pairs of high-functioning autistic spectrum disorder (ASD) and TD individuals performing a joint attention task. The findings revealed that the TD pairs showed enhanced synchronization of brain activity in several regions other than the synchronization observed in the previous analysis. Moreover, in the ASD and TD pairs where no synchronization of brain activity had been detected in previous analyses, the present method detected synchronization specifically between the visual cortices. This indicates the efficacy of this analytical method.

研究分野：認知神経科学，社会神経科学，脳機能イメージング

キーワード：社会脳科学 社会的相互作用 リアルタイムコミュニケーション ハイパースキャンング 機能的MRI 脳活動の同期

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの社会認知や社会性に関わる脳機能マッピング研究は、そのような能力が個人の脳内でどのような神経基盤を持つかを調べる研究がほとんどであった。一方、社会性の一側面が現れるコミュニケーション場面でのやりとりはリアルタイム性を持ち、ダイナミックで相互作用的である。この点において、実験参加者は実際の他者と関わることなくその事象を観察する従来の実験パラダイムでは捉えきれないものが隠されている可能性が高く、特に目の前の「あなた」と「わたし」のリアルタイム相互作用を重視する、いわゆる二人称視点神経科学が広がり始めていた。しかしながら、リアルタイムで相互作用をする二者の脳活動を同時に計測する、いわゆるハイパースキャンシステムを構築することは一般的に非常に困難であり、特にお互いの顔を見ながら実験できるハイパースキャン MRI や脳磁計 (MEG) は現在世界的に見ても数える程しかなかった。一方で、脳波 (EEG) や近赤外線スペクトロスコピー (fNIRS) は装置が軽量で移動可能であり、ハイパースキャンシステムを構築することはそれほど難しくないので、研究は飛躍的に増加している状況であった。

このような研究状況での問題は、使用する装置によって実験パラダイム・データ解析手法・得られる結果がかなり異なり、それらが全く整理できていない状態にあったことである。言葉としては同じ「相互作用する二者の脳活動の同期」であっても、そのことが持つ意味が全く異なっており、これが二者相互作用の神経基盤解釈の混迷を生む原因ともなっていた。このような状況を打破するため、それぞれの装置の特性・得られるデータの違いを整理し、包括的な視点でハイパースキャン研究における実験計画と解析法の整備・開発を進める必要があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)各装置の実験で主に使われている実験デザインと解析法の妥当性を検証し、(2)装置の制限を超えたハイパースキャン研究の広範囲に適用できる実験デザインを作成し、(3)ネットワークダイナミクスを取り扱える解析法を開発することであった。なお、(3)は(1)と(2)の結果とは独立に遂行できるため、並行して研究をおこなった。

### 3. 研究の方法

(1)については、過去にそれぞれの装置で行われた研究の論文を精査し、解析法の纏めを作成する。

(2)については、各装置の特性、脳活動の何をどのように測っているのか、得られるデータの特性、(1)の論文で行われていた実験等について纏め、どのような実験デザインであれば装置間の比較が可能となるかについて検討する。さらに、その実験デザインを用いて、複数の装置で実際に実験をおこない、得られた結果を比較検討する。

(3)については、今まで装置毎に得られたデータに対しネットワークダイナミクスを検討するための解析パッケージがなかったことから、まずそのような解析法を開発し、手持ちのハイパースキャン fMRI データを用いてその妥当性を検討する。そしてそれを全ての装置で得られたデータに対応できるように改変する。

### 4. 研究成果

#### (1) 各装置のハイパースキャンデータの解析法の纏め

最初に脳磁図 (MEG)、脳波 (EEG)、機能的磁気共鳴画像 (fMRI)、近赤外線スペクトロスコピー (fNIRS) を用いたハイパースキャン実験の二個体同時取得データの解析の概要を記し、詳しい解析法については、装置毎のところで述べることにする。

全ての装置においてみられるのが、相関解析である。ただし、相関解析と言っても、各装置によりその中身は異なる。また、fMRI 以外では、位相カップリング解析による脳活動の同期を検討するものがあるが、これについても MEG、EEG と fNIRS では対象とする時間幅などがかなり異なり、異なる現象を見ていると考えられる。次にそれぞれの装置を用いた解析法の詳細を記す。

MEG・・・ハイパースキャン実験の数自体が少ないが、主に位相カップリング解析と周波数帯での相関解析が主流である。位相カップリング解析では、Phase Locking Value (PLV) を用いたものと Phase Lag Index (PLI) を用いたものがある。

EEG・・・実験数が多く、また用いられている解析法も4つの装置の中では最も多い。EEG においても位相カップリング解析と周波数帯の相関解析が多い。MEG で紹介した解析法の他に、位相カップリング解析では Phase coherence を、周波数相関解析においては Wavelet coherence を同期指標として用いた研究がある。また、MEG ではなかったグラフ理論による解析とグレンジャー因果解析も行われている。

fMRI・・・MEG と同様にハイパースキャン研究自体がとてもなく、解析の主流は時系列相関解析である。fMRI の特徴として、課題関連脳活動を含むそのままの時系列データでの相関解析の他、一試行毎に課題関連脳活動を推定し、それをスタックして時系列データとしたものの相関を解析したり、逆に課題関連脳活動をモデル化し時系列データから差し引

いた残差時系列データを用いて相関を解析したりする方法等、同じ相関解析でも異なるアプローチをしているものがある。また、ごく少数ではあるが、グレンジャー因果解析や Dynamic Causal Model を用いた因果性解析を行っている研究もある。fNIRS・EEG の次に実験数は多いが、多くの研究が Wavelet coherence を同期の指標としている。その他、Phase coherence による位相カップリング解析、fMRI と同様の時系列データによる相関解析、グレンジャー因果解析を行っている研究もある。

以上のように、同じ脳活動の同期と言っても、各装置による解析法はバラバラであり、さらに言えば、同じ装置を用いても解析法の違いにより二者の脳活動の同期の意味合いは異なる。また、例えば位相カップリングの解析ではごく短時間や一瞬のイベントに対する位相を調べているものがほとんどであり、他の解析による同期とは全く意味合いが全く異なることには注意が必要である。

## (2) 実験デザインの検討

各脳活動計測装置の対象とする生理現象やその特性により、得られるデータの質がかなり異なる。また混入するノイズについても同様である。特に脳波計測では、目の動きや瞬目、筋電の影響が大きいため、できるだけそれを抑える必要がある。そのため、これらのことを全て加味して、全ての装置で実験可能なデザインを作成するのはかなり難しい。

我々はこれまで共同注意に着目し実験を行ってきた。共同注意はミニマムな社会的相互作用の例として実験に適しているが、視線を使うものは特に脳波・脳磁図への影響が大きく、これをそのまま使用するのは難しい。他のさまざまな課題を検討した結果、我々が以前開発した言葉によるキューを用いた特徴への共同注意課題を改変することにした。ただし、言葉を喋ることも大きなノイズ源となるため、発話は最小限に留め、fMRI 実験で行っていた互いの確認はボタン押しによるものに変更した。以下にその試行例を示す(図1)。

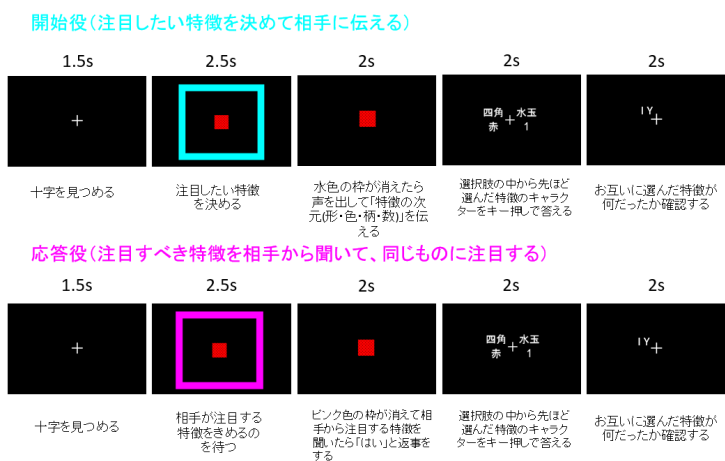


図1 新たに開発した特徴への共同注意課題の1試行例

これを用いて、ハイパースキャン脳波実験を開始したが、コロナ禍により実験の進捗が大幅に遅れ、さらに脳波計測装置の故障などもあり、実験を最後までやりきることができなかった。これについては、現在も実験を継続し、続いてデータ解析を行う予定である。

## (3) ネットワークダイナミクスを検討するための新たな解析パッケージの開発

上記(1)に挙げたこれまでの解析では、主に二者の関係およびやりとりが定常状態であることを仮定し、二者の脳活動の同期を解析するものがほとんどであった。また、ハイパースキャン fMRI のデータにおいては、相同部位の脳活動の同期を解析するものが多く、または特定の関心領域間の同期や因果関係を見ていた。本研究課題では、上記のことに対処するため、従来 fMRI の安静時脳活動で行われていた脳全体を対象としたネットワーク解析を二者に拡張し、さらに時間変化を追うことができる解析パッケージの開発を目指した。さらに、これを他の装置で取得したデータにも対応できるように改変することを目標とした。

まず、ネットワーク解析を行うにあたり、領域分割のテンプレートとしてどの脳地図を用いるのがよいか、各領域内の各ボクセルの時系列データをどのように纏めるのが適切かについて検討した。なお、検討するデータとして、過去に我々が行った視線を用いたハイパースキャン fMRI データを用いた。脳地図については、他の研究でも多く使用されている以下の3つについて検討した。AAL (Tzourio-Mazover et al., 2002), AAL3 (Rolls et al., 2020), Shen368 (Shen et al., 2013) は全脳をそれぞれ 116 領域, 166 領域, 368 領域に分割した脳地図である。一方、領域内の時系列データの要約には、これも多くの研究で使用される領域内の全ボクセルの時系列の平均をとる平均時系列データと、領域内の全てのボクセルの時系列データに対し主成分分析 (PCA) をかけた第一成分 (first eigenvariate) の時系列データ、の2つについて検討した。以下の方法の概略を図2に示した。

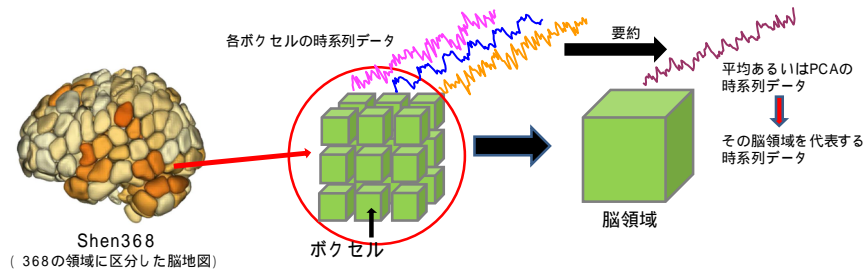


図2 データ要約の概略図

この方法により、各領域の二者および個人の脳領域間の時系列データの相関を計算し、相関マトリックスを作成した(図3)。これを実際にペアで行った二者(リアルペア)と統制条件として実際のパアでない組合せの二者(擬似ペア)の全てで計算し $r$ 値を求め、フィッシャーの $r$ - $Z$ 変換式を用いて $Z$ 値に変換した。この $Z$ 値マトリックスを用いて、全てのセルの $Z$ 値毎にリアルペアと擬似ペアでウェルチの二群 $t$ 検定を行い、リアルペアで相関の高い領域を同定した。

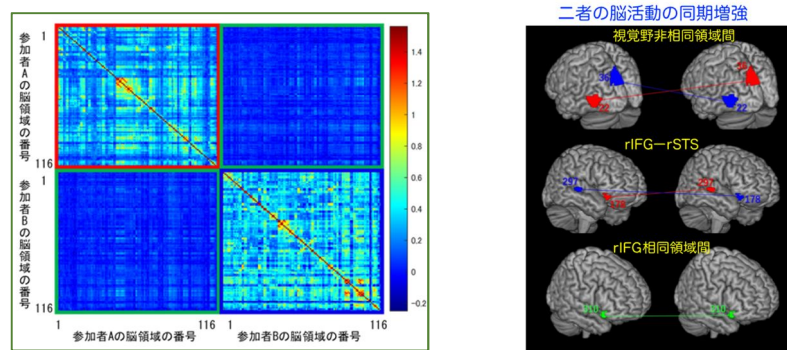


図3 相関マトリックスと結果の例

上記のことを、AAL, AAL3, Shen368の脳地図を用い、さらに各領域のデータの要約を平均とPCAの二種類で検討した。解析の結果、1つずつの領域体積が最も大きいAALではデータの要約の仕方により結果が大幅に異なり、リアルペアの脳活動の相関が高い領域が両者で一致しなかった。次に1つの領域の大きいAAL3では一部一致し、逆に1つずつの領域が細かいShen368ではほぼ一致した結果が得られた。さらに、過去に二者の脳の相同領域の相関が高いことが分かっている右下前頭回の領域間について検討したところ、PCAの方が結果の一致率が高かった。このことから、二者の脳活動の非相同領域を含めたネットワークの解析には、脳領域をある程度細かく分割したShen368を用い、各領域のデータ要約にはPCAを用いることがよいことが示された。

次に、ネットワークの時間的変化を検討するため、時系列データをセッション毎あるいは移動平均のように時間毎に分割するプログラムの追加を行い、実際のデータを用いてその挙動を確認した。このプログラムを用いて、上記データについて時間的変化の解析を試みたが、本実験が二者の関係性が変わるものではなかったため、残念ながら統計的に有意な変化を捉えることができなかった。また、この開発に予定よりも時間がかかってしまい、他の装置で取得したデータへの適用するためのプログラムの改変も行うことができなかった。

プログラムの完成に伴い、もう1つの例として、過去に我々が行った健常者同士のペアと高機能自閉スペクトラム症(ASD)者と健常成人のペアがそれぞれ共同注意課題をおこなった際の脳活動データを用いて解析を行った。このプログラムを用いた解析の結果、健常成人ペアでは以前の解析で見られた二者の右下前頭回の脳活動の同期以外に、背内側前頭前野同士の脳活動の同期や、複数の視覚野の非相同領域での脳活動の同期の高まりを見つけることができた。一方これまでの解析では全く脳活動の同期が見られなかったASDと健常成人ペアにおいても、非相同領域間の視覚野同士の二者の脳活動同期が確認され、本解析手法の有効性の一端を示すことができた。

以上、当初予定していたところまでは達成できなかった部分はあったが、各装置の実験で使用されている解析法を整理し、装置を跨いで使用できるハイパースキャン用の実験を構築し、ネットワークダイナミクスを検討するための新たな解析パッケージを完成させることができた。さらに、この解析法により、従来の解析では見つけられなかった新たな知見を得ることができたことも、成果として挙げられる。残念ながら、この解析法を各装置のデータに適用できるように改変するまでには至らなかったが、それは引き続き進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshioka Ayumi, Tanabe Hiroki C., Nakagawa Eri, Sumiya Motofumi, Koike Takahiko, Sadato Norihiro	4. 巻 13
2. 論文標題 The Role of the Left Inferior Frontal Gyrus in Introspection during Verbal Communication	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Brain Sciences	6. 最初と最後の頁 111 ~ 111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/brainsci13010111	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 Yoshioka Ayumi, Tanabe Hiroki C, Sumiya Motofumi, Nakagawa Eri, Okazaki Shuntaro, Koike Takahiko, Sadato Norihiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Neural substrates of shared visual experiences: a hyperscanning fMRI study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Social Cognitive and Affective Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1264 ~ 1275
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/scan/nsab082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田邊宏樹
2. 発表標題 ハイパースキャンを用いた複数人相互作用神経メカニズムの現状とこれから
3. 学会等名 第24回日本光脳機能イメージング学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田邊宏樹
2. 発表標題 Neural substrates and inter- and intra-brain functional connectivity during joint attention scheme: hyperscan fMRI studies
3. 学会等名 生理研シンポジウム「コミュニケーション研究の展望：双方向コミュニケーションを駆動する神経・行動因子」
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 田邊宏樹
2. 発表標題 ハイパースキャンによるライブでの二者相互作用神経メカニズムの新展開
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊宏樹
2. 発表標題 ハイパースキャンによる二者相互作用神経メカニズムの最前線
3. 学会等名 第59回日本生体医工学会大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沈鈺蕾, 小池耕彦, 吉岡歩, 土元翔平, 小笠原香苗, 定藤規弘, 田邊宏樹
2. 発表標題 クロスモーダルな情報伝達によるイメージ過程の神経基盤：ハイパースキャンfMRI研究
3. 学会等名 第25回日本ヒト脳機能マッピング学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沈鈺蕾, 田邊宏樹
2. 発表標題 相対的な社会不一致に対する認知処理の神経基盤：脳波による検討
3. 学会等名 Neuro2021
4. 発表年 2021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
研究協力者	吉岡 歩  (Yoshioka Ayumi)	生理学研究所・心理生理学研究部門・研究員  (63905)	
研究協力者	小池 耕彦  (Koike Takahiko)	生理学研究所・心理生理学研究部門・助教  (63905)	
研究協力者	定藤 規弘  (Sadato Norihiro)	生理学研究所・心理生理学研究部門・教授  (63905)	
研究協力者	中川 恵理  (Nakagawa Eri)	生理学研究所・心理生理学研究部門・研究員  (63905)	
研究協力者	角谷 基文  (Sumiya Motofumi)	生理学研究所・心理生理学研究部門・大学院生  (63905)	
研究協力者	沈 鈺蕾  (Shen Yulei)	名古屋大学・情報学研究科・大学院生  (13901)	
研究協力者	櫻井 悠介  (Sakurai Yusuke)	名古屋大学・情報学研究科・大学院生  (13901)	

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
---------	---------