

平成 29 年度

修士学位論文

両眼視野闘争における 知覚交代の脳メカニズム

Investigation of brain mechanisms
underlying binocular rivalry

1205084 松本 剛

指導教員 中原 潔

2017 年 2 月 28 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報システム工学コース

要 旨

両眼視野闘争における知覚交代の脳メカニズム

松本 剛

意識的知覚における脳メカニズムは、現代の神経科学の中心的な問題の一つである。そして、両眼視野闘争は意識的な視覚認知を調べるための有効な手法である。両眼視野闘争とは、左右の目に異なる刺激を呈示した時、知覚される刺激が交代する現象である。本研究では fMRI 実験を行い、両眼視野闘争中の脳活動の変化と活動パターンに注目し、意識的な視覚認知における神経メカニズムを明らかにする。FFA を同定するためのローカライズスキャンと、両眼視野闘争時の脳活動を計測するためのライバリスキャンを行った。次に、デコーディング、LFF の抽出と統計的仮説検定、心理生理学的相互作用 (PPI) 解析の 3 つの解析を行った。デコーディングでは初期視覚野において高いデコーディング成績が見られた。次に、LFF の抽出と統計的仮説検定からは、顔選択の意思決定に LFF の活動が影響しているとは言えないことがわかった。最後に、PPI 解析によって FFA 領域と相関するいくつかの領域を同定することができた。

キーワード fMRI, 両眼視野闘争, 脳デコーディング, 自発的脳活動 (LFF), 心理生理学的相互作用 (PPI)

Abstract

Investigation of brain mechanisms underlying binocular rivalry

Gou MATSUMOTO

A study on neuronal mechanisms associated to conscious visual perception during binocular rivalry. The brain mechanism underlying conscious perception is one of central questions of modern neuroscience. Binocular rivalry has been used as powerful behavioral paradigm for investigating conscious visual perception. Binocular rivalry is a perceptual phenomenon in which perception alternates between different images presented to each eye. Although there have been a lot of neuroimaging studies using binocular rivalry, brain mechanisms underlying this phenomenon are still largely unknown. In this study, I am conducting fMRI experiments using binocular rivalry, and investigating neuronal mechanisms associated to conscious visual perception by focusing on intrinsic fluctuations of brain activity and brain activation patterns that represent perceptual alteration during binocular rivalry. Subjects were scanned in two experiments. First experiment, it measured brain activity when viewing pictures of face, house or object. Second experiment, it measured brain activity when viewing an image of a face in one eye and an image of a house in the other eye with polarization glasses. In brain decoding analysis, it found primary visual cortex is better grade than other brain areas. And it was found that , LFF of FFA does not affect the decision making the subject respond as "face" under the rivalry condition by the paired-ttest for low frequency fluctuation At the last, several regions correlated with the FFA region were

found by PPI analysis.

key words fMRI, binocular rivalry, brain decoding, low frequency fluctuation (LFF), psychophysiological interaction (PPI) analysis

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
第 2 章	実験の手続き	3
2.1	被験者と実験に用いた装置と環境	3
2.2	ローカライズスキャン	4
2.2.1	ローカライズスキャンに用いた刺激	4
2.2.2	ローカライズスキャンの手順	5
2.3	ライバリスキャン	6
2.3.1	ライバリスキャンに用いた刺激	6
2.3.2	ライバリスキャンの手順	6
2.4	撮像パラメータ	7
2.4.1	SMP12 を用いた脳画像解析	8
第 3 章	脳デコーディング解析	10
3.1	脳デコーディングとは	10
3.2	脳デコーディング解析の流れ	10
3.3	チューニングパラメータ	11
第 4 章	自発的脳活動の抽出と統計的仮説検定	14
4.1	自発的脳活動 (LFF: low frequency fluctuation) について	14
4.2	同定された FFA から LFF の抽出と統計的仮説検定	14
第 5 章	PPI 解析	16
5.1	PPI 解析	16

目次

5.2	PPI 解析の流れ	16
第 6 章	脳デコーディングの解析結果	18
6.1	脳デコーディングの結果	18
第 7 章	自発的脳活動の抽出と統計的仮説検定の結果	25
7.1	FFA の同定結果	25
7.2	LFF の t 検定結果	26
第 8 章	PPI 解析の結果	27
8.1	PPI 解析の結果	27
第 9 章	考察	29
9.1	ローカライズスキャンとライバリスキャンの実験結果について	29
9.2	デコーディング解析について	29
9.3	自発的脳活動の検定結果について	30
9.4	PPI 解析について	30
第 10 章	まとめ	32
	参考文献	34

目次

2.1	実験に用いた MRI 装置	4
2.2	評価に用いるボタンコントローラー	4
2.3	偏光フィルタのついたメガネ	4
2.4	ローカライズスキャンに用いた画像の一覧	5
2.5	ローカライズスキャンの実験手順	6
2.6	注視点	7
2.7	顔画像	7
2.8	家画像	7
2.9	ライバリスキャンの実験手順	8
3.1	fMRI 実験とデコーディング手順	12
3.2	探索する ROI の形状	13
6.1	学習器 RR のデコーディング結果	20
6.2	学習器 NN のデコーディング結果	21
6.3	学習器 NR のデコーディング結果	22
6.4	学習器 RN のデコーディング結果	24
7.1	FFA の LFF	26
7.2	刺激呈示 3 秒間の LFF の平均値	26
8.1	PPI 解析の結果	28

表目次

3.1	学習に用いた試行の条件と, その学習器名	11
6.1	学習器 RR のデコーディング結果	19
6.2	学習器 NN のデコーディング結果	19
6.3	学習器 NR のデコーディング結果	19
6.4	学習器 RN のデコーディング結果	23
7.1	FFA の座標と統計量 T	25
8.1	PPI 解析の結果	27

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景と目的

意識的知覚における脳メカニズムは、現代の神経科学の中心的な問題の一つである。我々がモノを知覚する際、左右の目からの入力を主としている。さらに、左右の目による 2 つの見えを 1 つの見えに融合させることで、3 次元空間の奥行き知覚に利用している。しかし、左右の目に融合できないほどの全く異なる見えがあるとき、時間変化により左右の目からの見えは交互に知覚される。この現象を両眼視野闘争という。しかし、両眼視野闘争の神経メカニズムは未だ明らかになってない。これまでの先行研究の蓄積によりから、低次レベル説 (V1 など) と高次レベル説 (下側頭皮質など) が挙げられているが、どちらかに決着できない問題であるとされている [1]。

両眼視野闘争について機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を使った先行研究がある。Frank Tong[2] らの先行研究では、顔認識に関わる脳領域 FFA (fusiform face area) [4] と風景などの場所の認知に関係する脳領域 PPA (parahippocampal place area) [5] に注目した。画像呈示直前のいずれかの ROI の BOLD 信号の変化によって、ROI に関係する画像がより強く見えるという仮説の元、顔と家の画像を用いた実験を行なった。つまり、両眼視野闘争時に顔が応答された場合 FFA にて BOLD 信号の変化、家が応答された場合 PPA にて BOLD 信号の変化があると仮説を立てていた。解析ではそれぞれの ROI の BOLD 信号の脳活動の変化率と、半径 6mm 内のマルチボクセルパターンの相関係数について解析していた。結果は非両眼視野闘争条件、両眼視野闘争時共にこの仮説を支持した。

今回の研究では、FFA や PPA, FC に特定せず全脳に対して脳デコーディング解析と自発

1.1 研究の背景と目的

的脳活動を用いた解析, 心理生理学的相互作用法を用いた解析 (PPI 解析) を行う. 脳デコーディングを用いた解析では, 両眼視野闘争時に顔もしくは家が応答された時の脳活動パターンに対して機械学習を用いることで両眼視野闘争に関連するとされる領域を同定する. 自発的脳活動を用いた解析では, 画像呈示直後の FFA の自発的脳活動を抽出し, 自発的脳活動の変化が両眼視野闘争時の見えに影響しているかを調査する. さらに, PPI 解析を用いて, FFA の BOLD 信号と相関を示す領域を全脳から探索する. デコーディングについては第 3 章, 自発的脳活動については第 4 章, 心理生理学的相互作用法については第 5 章に詳細を記述している. これらの解析を用いることで, 両眼視野闘争の神経メカニズムについて明らかにしていく.

第 2 章

実験の手続き

2.1 被験者と実験に用いた装置と環境

大学生 7 名 (男性 5 名, 女性 2 名, 年齢幅 19~21) に対して実験を行った. 実験を行う前にそれぞれの被験者に対して, 同等な実験の手順と内容の説明を行った.

脳機能イメージングに使用した MRI 装置と視覚刺激呈示用のプロジェクターは本学 MRI 室にある装置を用いた. 両眼視野闘争を起こす刺激呈示のために, 2 台のプロジェクターから異なる角度の偏光フィルタを通過させてスクリーンに投射した. 被験者が 2 つのプロジェクターからの刺激を左右の目で独立して知覚できるように, 偏光フィルタがかかった MRI 室用の眼鏡 (図 2.3) を用いた. 刺激提示及び課題の制御にはソフトウェア Presentation[15] を用いた. 被験者は, ボタンコントローラー (図 2.2) を用いて選択する. 解析には MTLAB (2017a)[16], The Decoding Toolbox (TDT, ver3.98)[18], SPM12[17] を用いた. MNI 空間座標から 3 次元モデルへの描画には MNI2FS[20] を用いた.

- MAGNETOM Verio3T (SIEMENS 製)
 - 70cm ワイドボアマグネットシステム
 - 重量: 6.3 トン (液体ヘリウムを含む)
 - 傾斜磁場システム: 1 軸 45mT/m
 - 最大スリューレート (1 軸 200mT/m/ms)
 - 最大撮像領域 (FoV) : 50cm
 - 画像処理: 2xAMDOpteron,64bit (2.6GHz)

2.2 ローカライズスキャン

- 視覚提示プロジェクター
 - DLA-X70R × 2 台 (Victor 製)



図 2.1: 実験に用いた MRI 装置



図 2.2: 評価に用いるボタンコントローラー



図 2.3: 偏光フィルタのついたメガネ

2.2 ローカライズスキャン

2.2.1 ローカライズスキャンに用いた刺激

顔画像 19 枚, 家画像 19 枚, モノの画像 19 枚を用いた. 画像のリストは図 2.4 の通りである. 実験中はそれぞれ 19 枚のうちいずれか一つが 2 度連続して表示される. 2 つのプロジェクターからは同一の刺激を映し出しており, 被験者の両眼にも同一の刺激が呈示されている.

2.2 ローカライズスキャン

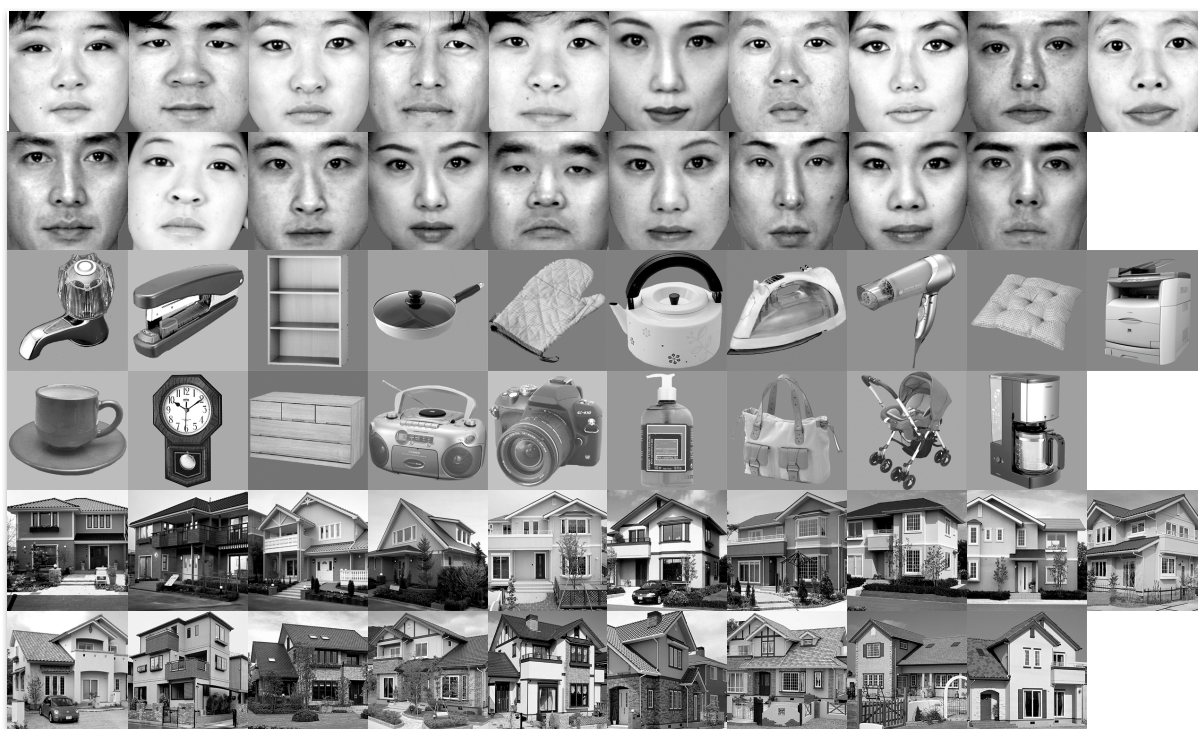


図 2.4: ローカライズスキャンに用いた画像の一覧

2.2.2 ローカライズスキャンの手順

MRI 装置による RF パルスをトリガーとして、20 秒の注視点画面が開始される。次に、1 秒の画像呈示、その後 0.2 秒のブランク画面を挟んで次の画像を呈示する。これらを 20 回繰り返す。順番に顔画像 20 枚、家画像 20 枚、モノの画像 20 枚を呈示し、これを 3 周する。画像の種類が変わるごとに 10 秒の注視点画面が呈示される。画像はランダムな順番で呈示された。3 種類を 3 周すると、最後に 20 秒の注視点画面が呈示される。ローカライズスキャンは 2 ラン行った。

2.3 ライバリスキャン

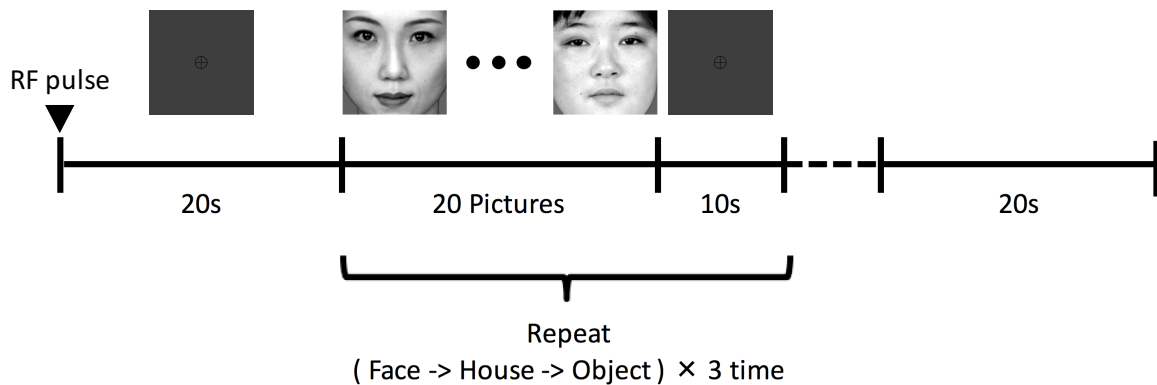


図 2.5: ローカライズスキャンの実験手順

2.3 ライバリスキャン

2.3.1 ライバリスキャンに用いた刺激

中心点 (図 2.6) と顔画像 (図 2.7), 家画像 (図 2.8) の 3 枚の画像と, 顔から家もしくは家から顔にフェードする動画を作成した. 刺激呈示時に画像が呈示された条件をライバリ条件, 動画が表示された条件をノンライバリ条件とする. 呈示させた刺激の大きさは $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ とした. 刺激の大きさの計算にはウェブアプリケーション Visual Angle Calculator[12] を用い, ピクセル単位の大きさを計算した. 2つのプロジェクターからそれぞれ顔もしくは家の画像刺激を呈示した場合, 被験者の両眼には独立した刺激が呈示される. 動画刺激を呈示した場合, 両眼には同一の刺激が提示される. 被験者には本実験に入る前に, 左右の目に独立した見えがあることを確認した.

2.3.2 ライバリスキャンの手順

MRI 装置による RF パルスをトリガーとして, 20 秒の注視点画面が開始される. 次に, 3 秒間の刺激呈示, その後 6~8 秒のランダムな時間の注視点画面が呈示される. その後, 被験

2.4 撮像パラメータ

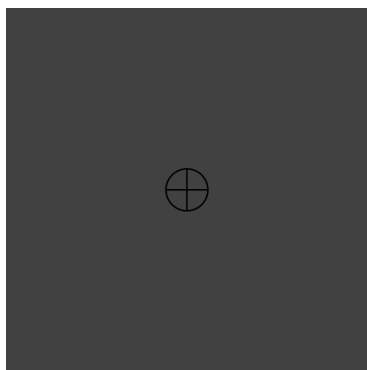


図 2.6: 注視点

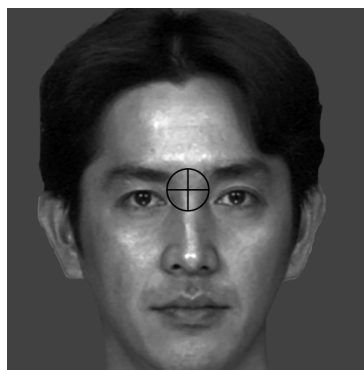


図 2.7: 顔画像



図 2.8: 家画像

者に画像呈示の間に最後により強く残った方を選択させる．これに時間制限は設けなかった．次に, 18 秒から 22 秒の時間の注視点画面が呈示される．画像呈示から 18 秒から 22 秒の時間の注視点画面までを 1 試行として 8 試行繰り返した．ライバリスキャンは 3 ラン行った．

ライバリスキャンでは被験者の応答によって 6 つの条件に分けられる．条件は以下の通りである．

- 条件: ライバリ, 応答: 顔
- 条件: ライバリ, 応答: どちらとも言えない
- 条件: ライバリ, 応答: 家
- 条件: ノンライバリ, 応答: 顔
- 条件: ノンライバリ, 応答: どちらとも言えない
- 条件: ノンライバリ, 応答: 家

2.4 撮像パラメータ

脳機能撮影画像として, GE-EPI (gradient-echo echoplanar imaging) 法を用い, EPI の撮像を行った．スライス枚数は 80 枚, 繰り返し時間 (TR) は 800 [ms], エコー時間 (TE) は 30 [ms], フリップ角は 78 [deg], 有効視野 (FOV) は 192 [mm], スライス厚は 2 [mm], ボクセルサイズは 3 [mm] × 3 [mm] × 2 [mm] である．

2.4 撮像パラメータ

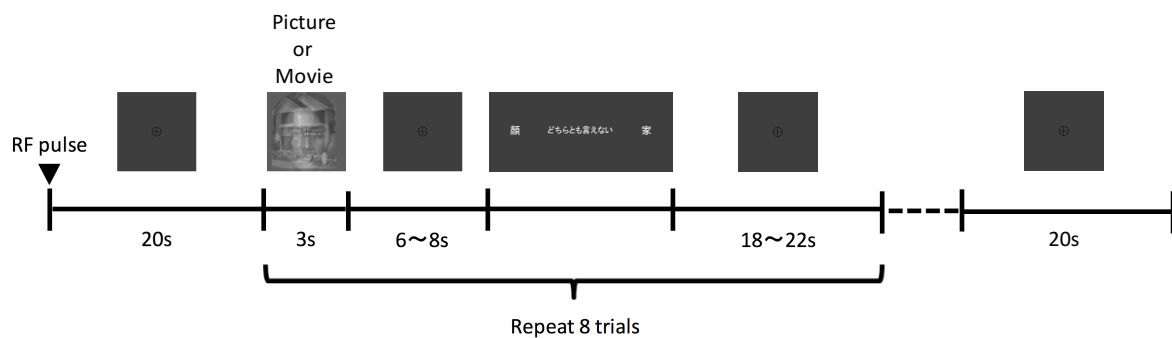


図 2.9: ライバリスキンの実験手順

2.4.1 SMP12 を用いた脳画像解析

SPM12 を用いて解析する前に、撮影された画像ファイルを変換する。MRI 装置によって撮影された DICOM 形式 (.dcm) の画像を SPM12 で利用可能な Analyze 形式 (.nii) に変換した。撮影した脳画像は以下の手順で前処理を行った。試行の基準となる時刻として、Slice timing に刺激が呈示された時刻を設定した。

1. Realignment: fMRI データ測定中の頭部の動きを補正し、fMRI データの脳画像をスライスし直す
2. Slice timing: 脳スライス間の時間のずれを補正する
3. Normalization: 1 の処理がなされた fMRI データを MNI 標準脳に合うように変形・調整する
4. Smoothing: 脳賦活画像を得るためのフィルター処理をおこなう

前処理後、個人解析 (1st level analysis) を行った。ローカライズスキャンとライバリスキンは、共に事象関連デザイン (event related design) として解析を行った。個人解析は以下の手順で行った。

1. 1st-level 解析: デザインマトリクスを作成し、前処理が完了した fMRI データを GLM に組み込む

2.4 撮像パラメータ

2. Estimate: GLM の説明変数の偏回帰係数を計算する
3. Result: 比較したい条件間のコントラストを作成し、その検定結果を表示する

ローカライズスキンの個人解析では頭の動きを補正する変数をリグレッサとした。ライバリスキンの個人解析については、頭の動きを補正する変数に加えて CSF によるノイズを除去するリグレッサを追加した。CSF とは脳脊髄液 (cerebrospinal field) 領域のことで、ライバリスキンではこれをノイズとして除去した。Result では、2 条件間のコントラストを作成し、t 検定を用いることで統計的に活発なボクセルを特定する。ローカライズスキンの場合、顔画像が呈示された試行の重みを 2 とした時、家画像とモノ画像が呈示された試行の重みを-1 としてコントラストを作成した。ライバリスキンの場合、コントラスト作成にあたって、各ランごとにライバリ条件で顔もしくは家が選択されたかどうかによって、適切なコントラストを設定した。ライバリスキンの時、Rivalry 条件の顔が選択された試行と Rivalry 条件の家が選択された試行のコントラストを作成した。個人解析以降の手続きについては第 3 章と第 4 章、第 5 章にて解説する。

第 3 章

脳デコーディング解析

3.1 脳デコーディングとは

まず, fMRI を使った脳活動の計測では, タスクに関連した脳活動を計測する. これをエンコーディング (符号化) とした時, 脳活動から刺激を解読することをデコーディングという. デコーディングを実装するにあたって, ニューラルネットワークや機械学習を用いる方法がある. 今回は SVM が使われている MATLAB ライブラリ The Decoding Toolbox (TDT)[18] を用いた.

3.2 脳デコーディング解析の流れ

脳デコーディングの流れを図 3.1 に沿って説明する. まず fMRI を使った実験であるとき, 計測結果からタスクの条件ごとにタスク中の脳活動パターンを取り出す (図 3.1a). 次に, 機械学習には脳全体のパターンではなく, ある半径を持つ ROI 内の脳活動パターンを用いるため, ROI を抽出する (図 3.1b). 学習器作成にあたって, 全試行数から学習する試行数 m を選択し, 残りをテストする試行とする. 学習について, 学習器には教師あり学習として ROI のパターンとその ROI がどちらのラベルに属しているかの情報を与える (図 3.1c). テストについて, 学習器は入力された ROI のパターンがラベル A と B どちらに属するかを判定し, 判定結果と入力パターンのラベルを答え合わせする (図 3.1d). デコーディングは, searchlight analysis で全脳の探索に加え, 試行回数だけ計算を繰り返す. その結果 ROI ごとに正答率が計算でき, デコーディング成績の良い ROI を見つけることができる.

3.3 チューニングパラメータ

今回の解析の場合、全 6 条件から 4 つの条件を用い、2 条件ずつ機械学習を行った。そのため、学習器のチャンスレベルは 50% である。すべての被験者に対して表 3.1 の条件ごと

表 3.1: 学習に用いた試行の条件と、その学習器名

応答: 顔	応答: 家	学習器
ライバリ	ライバリ	RR
ライバリ	ノンライバリ	RN
ノンライバリ	ノンライバリ	NN
ノンライバリ	ライバリ	NR

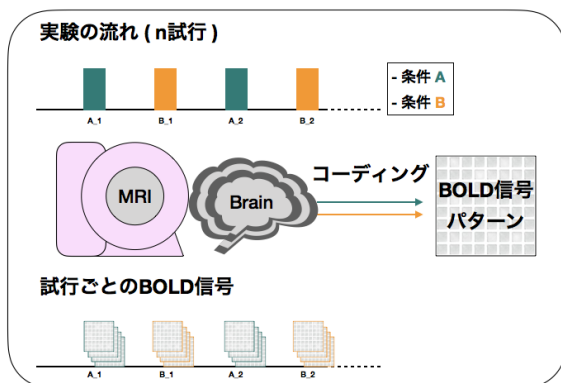
に解析を行い、それぞれのデコーディング成績を求めた。最後に、SPM を用いて 2nd-level 解析を行うことで被験者間で共通したデコーディング成績の高い ROI を同定した。脳領域名の特定には MNI 座標からブロードマンエリアを計算するウェブアプリケーション”MNI< - >Talairach with Brodmann Areas”[14] を用いた。2nd-level 解析の結果のプロットには、MATLAB ライブラリ mini2fs[20] を用いた。MNI 空間座標から 3 次元モデルへの描画には、MNI2FS を用いた。閾値として MNI 座標系に計算された値のうち累積密度分布上で上位 20 % の値をプロットしている。

3.3 チューニングパラメータ

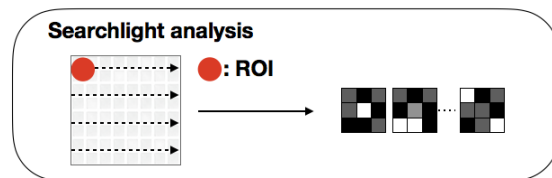
TDT を用いた機械学習を行うにあたって、いくつかのパラメータを調整した。まず、今回の実験の撮像パラメータにおいて、voxel サイズが $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 2\text{mm}$ だった。一度に探索する ROI の大きさは半径 7.5mm (107 voxels) とした。ROI の形状は図 3.2 のようになった。スケールは 0 から 1 になるように設定した。

また、被験者の応答によって機械学習に用いることができる試行数が異なるため、学習とテストに用いるデータ数は同じではない。不均衡なデータを許容し、学習する際にそれぞれのラベルに適度な重みを加えた。さらに、TDT の仕様上教師データが 1 つ以下の場合

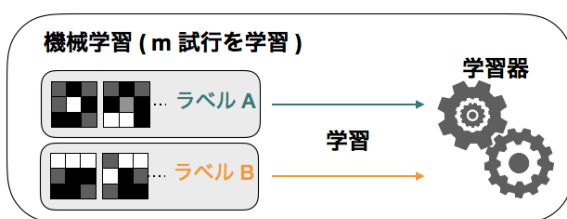
3.3 チューニングパラメータ



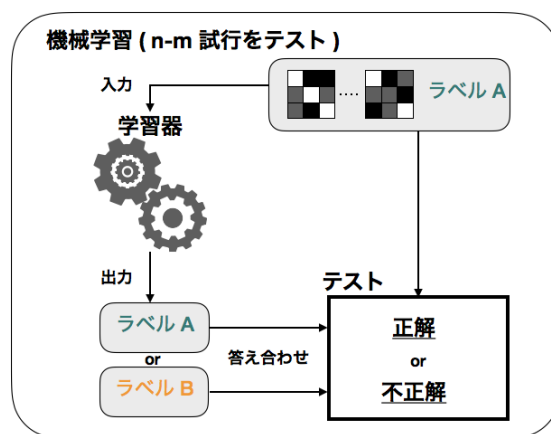
(a) エンコーディング



(b) ROI の選択



(c) 機械学習 (学習)



(d) 機械学習 (テスト)

図 3.1: fMRI 実験とデコーディング手順

はエラーになるため、2 つ以上の教師データを持つ条件の組み合わせで機械学習を行なった。学習とテストに用いたデータの組み合わせとしては、TDT のデフォルトの仕様である leave-one-run-out 法を用いた。leave-one-run-out 法とは、1-2-3 ラン目を学習に用いた場合 4 ラン目をテストに、1-2-4 ラン目を学習に用いた場合 3 ラン目をテストにと言ったような組み合わせである。その他のパラメータは、TDT のデフォルトの仕様に沿っている。

3.3 チューニングパラメータ

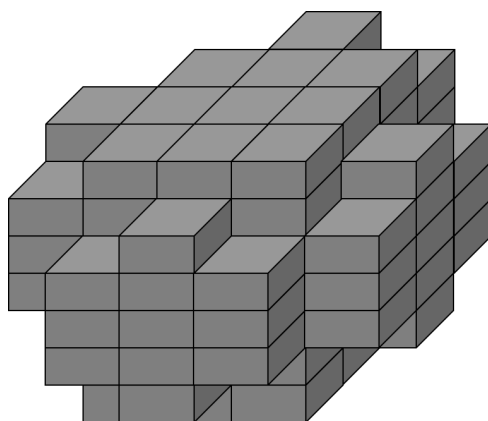


図 3.2: 探索する ROI の形状

第 4 章

自発的脳活動の抽出と統計的仮説 検定

4.1 自発的脳活動 (LFF: low frequency fluctuation) について

自発的脳活動とは、課題遂行時、休憩時など関わらず常に流れている脳活動である。今回の解析では、FFA の自発的脳活動においてより強い変化があった時、顔が強く知覚されると仮説を立てた。その時々々の脳活動は、タスクによる信号に加えて、自発的脳活動を含むその他の信号で構成されていると考える。モデルとして、タスクの条件数を n 、タスクによる BOLD 信号への影響を x 、タスクごとの重みを β 、計測時の頭の動きによるノイズを r_1 、脳の白質における脳髄液による影響を r_2 、自発的脳活動を含むその他の信号を ϵ とした時、計算モデルは以下の式のようになる。自発的脳活動は ϵ に対して 0.01 ~ 0.1Hz のバンドパスフィルタを通すことで抽出できる。

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + r_1 + r_2 + \epsilon$$

4.2 同定された FFA から LFF の抽出と統計的仮説検定

今回、ローカライズスキンの 1st-level 解析の結果から、被験者ごとの FFA の座標を特定し、ライバリスキャン中の BOLD 信号の値を抽出した。特定できなかった FFA 座標については解析に用いなかった。次に、BOLD 信号から 0.01 ~ 0.1Hz のバンドパスフィルタを

4.2 同定された FFA から LFF の抽出と統計的仮説検定

通過させ、ライバリスキャン中の自発的脳活動を抽出した。さらに、実験中の全時刻の信号から、試行ごと、条件ごとに切り出した。範囲は、各条件ごとに試行中の画像呈示時刻から -3.2s~6.4s までの区間とした。最後に、被験者ごとに各条件ごとに対応する試行の画像呈示から -3.2s 時と +6.4s 時の自発的脳活動の平均値に対して、対応ありの t 検定を行なった。

第 5 章

PPI 解析

5.1 PPI 解析

PPI 解析とは、心理生理学的相互作用による脳活動への影響から、ある領域と協調する領域を検出する手法である。心理生理学的相互作用とは、ある領域から別の領域への寄与が実験または心理的な状況によって大きく変化することである [7]。FFA に対する PPI 解析によって、FFA の脳活動と他の領域の脳活動の相関を計算し、相関の高い領域を探索することができる。また、FFA と探索した領域の間に脳活動が相関している場合、その領域間には Functional Connectivity があることを示す。今回はライバリスキャン中に被験者が顔と応答した試行にて、FFA と相関を示す脳領域を調べることで、FFA と Functional Connectivity を示す脳領域を調べる。

5.2 PPI 解析の流れ

SPM マニュアル [13] に沿って実装した。被験者 1 の左半球の場合、解析手順は以下の通りである。被験者 1 のライバリスキャンの個人解析結果から PPI 変数を計算する。計算に用いるラベルとして、ライバリ条件のうち顔が選択された試行とライバリ条件のうち家が選択された試行の 2 つを用いた。それぞれの重みはコントラストの差が 0 になるように設定した。

次に、PPI 変数をリグレッサとして 1st-level 解析を行った。FFA が特定できた全ての被験者の座標 (LR) について 1st-level 解析を行なった。

最後に 1st-level 解析で求めた結果を使って 2nd-level 解析を行うことで、被験者に共通し

5.2 PPI 解析の流れ

た FFA と相関の高い領域を調べた．脳領域名の特定には MNI 座標からブロードマンエリアを計算するウェブアプリケーション”MNI< – >Talairach with Brodmann Areas”[14] と MATLAB アプリケーションの xjview[19] を用いた．2nd-level 解析の結果のプロットには，MATLAB ライブラリ MNI2FS[20] を用いた．閾値として MNI 座標系に計算された値のうち累積密度分布上で上位 20 % の値をプロットしている．

第 6 章

脳デコーディングの解析結果

6.1 脳デコーディングの結果

ライバリスキャン時の fMRI の計測結果に対してデコーディングを行なった。ライバリスキャンの実験結果から被験者 5 において、ライバリ条件時に家と応答した試行が 1 度しかなかった。そのため、学習器 RR と学習器 NR の作成では被験者 5 の脳活動パターンを用いなかった。2nd-level 解析の結果、各条件ごとに高いデコーディング成績を示す領域が同定された。学習器 RR のデコーディング結果から、左右の V1, 右縁上回, 右背側後帯状皮質, 左体性感覚連合野, 左の V2, 左右腹側後帯状皮質, 右下前頭前野に高いデコーディング成績が見られた。学習器 NN のデコーディング結果から、右紡錘状回, 左右縁上回, 右上側頭回, 左下前頭回三角部, 背側後帯状皮質, 右下側頭回に高いデコーディング成績が見られた。学習器 NR のデコーディング結果から、左紡錘状回, 左右前運動野・補足運動野, 右下前頭前野, 左 V2, 左縁上回に高いデコーディング成績が見られた。学習器 RN のデコーディング結果から、右 V3, 左前頭極, 右 V2, 左中側頭回, 右 V1, 右角回, 左体性感覚連合野に高いデコーディング成績が見られた。座標と領域名をまとめると表 6.1~6.4 のようになった。MNI 座標系に変換し、脳の 3D モデルにプロットした結果は図 6.1~6.4 である。

6.1 脳デコーディングの結果

表 6.1: 学習器 RR のデコーディング結果

[x, y, z]	領域名	ブロードマンエリア
[-21,-70,12], [12,-82,6]	V1	17
[54,-37,26]	縁上回	40
[45,-46,22]	背側後帯状皮質	31
[-9,-46,50]	体性感覚連合野	7
[-24,-64,4]	V2	18
[-18,-58,6], [18,-61,8]	腹側後帯状皮質	23
[21,17,-22]	下前頭前野	47

表 6.2: 学習器 NN のデコーディング結果

[x, y, z]	領域名	ブロードマンエリア
[33,-40,-12]	紡錘状回	37
[-57,-40,36], [54,-40,22]	縁上回	40
[54,-1,-8]	上側頭回	22
[-36,23,14]	下前頭回 三角部	45
[0,-40,46]	背側後帯状皮質	31
[36,2,-40]	下側頭回	20

表 6.3: 学習器 NR のデコーディング結果

[x, y, z]	領域名	ブロードマンエリア
[-51,-52,-12]	紡錘状回	37
[-39,8,46], [24,-10,60]	前運動野・補足運動野	6
[30,29,-22]	下前頭前野	47
[-3,-85,-2]	V2	18
[-54,-28,38]	縁上回	37

6.1 脳デコーディングの結果

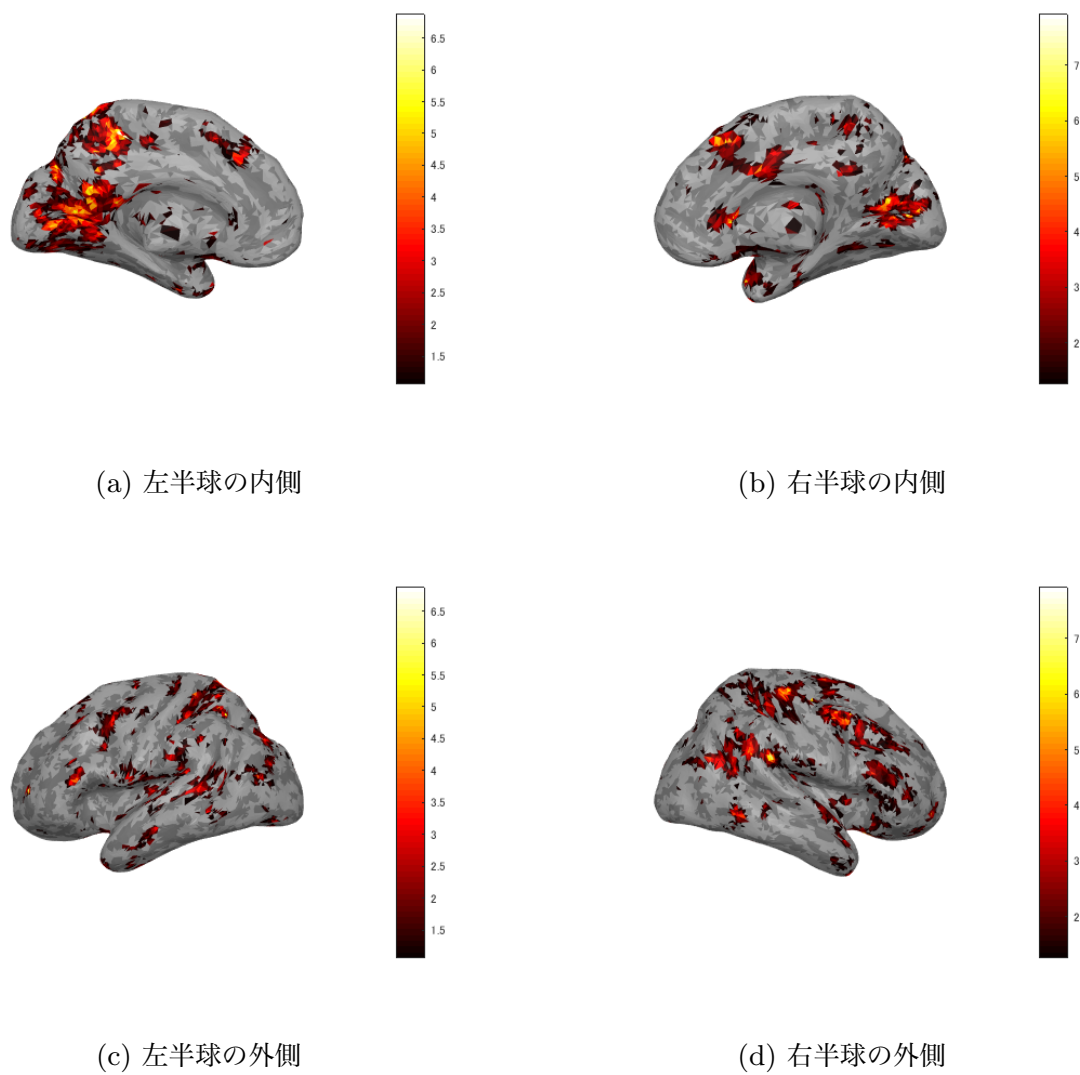


図 6.1: 学習器 RR のデコーディング結果

6.1 脳デコーディングの結果

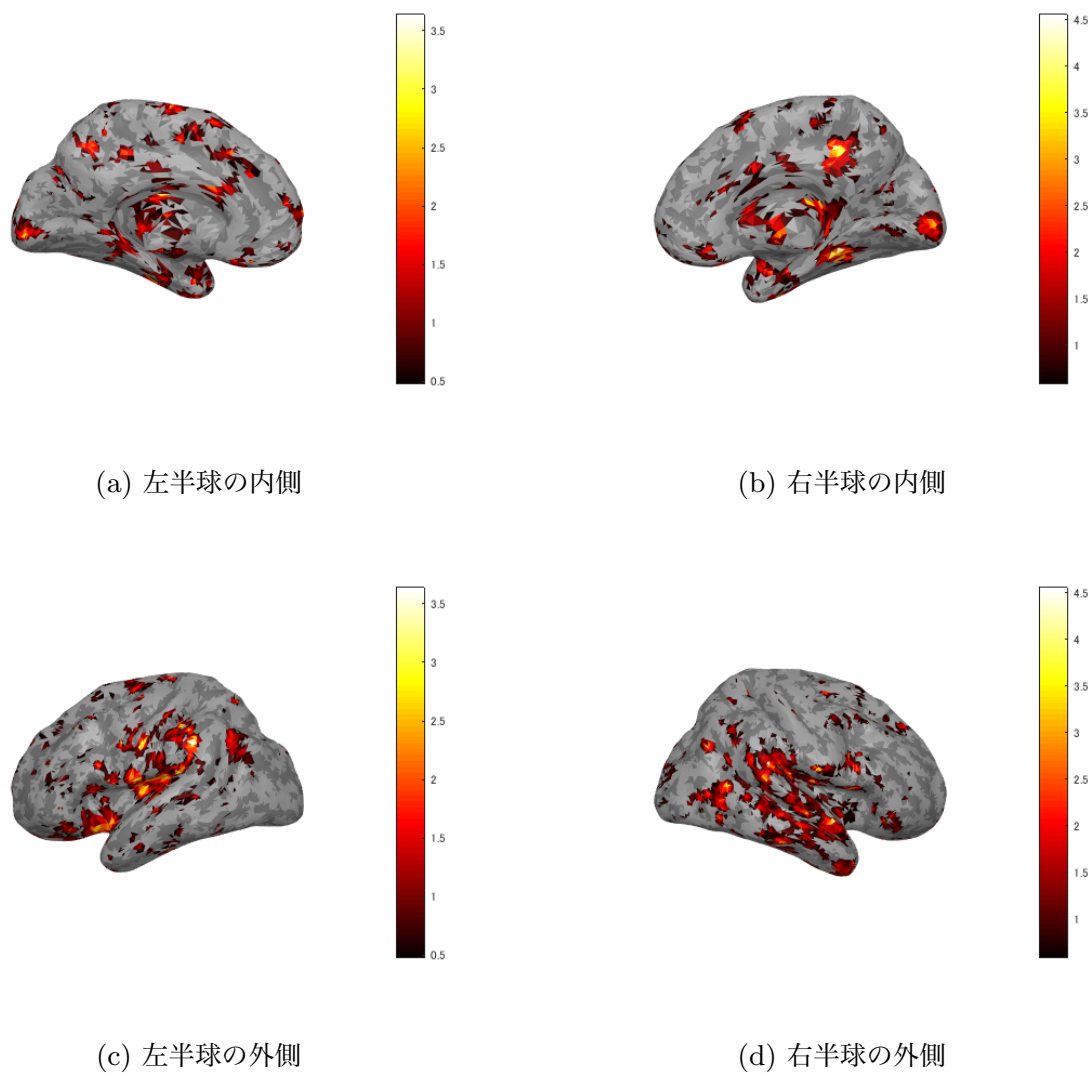


図 6.2: 学習器 NN のデコーディング結果

6.1 脳デコーディングの結果

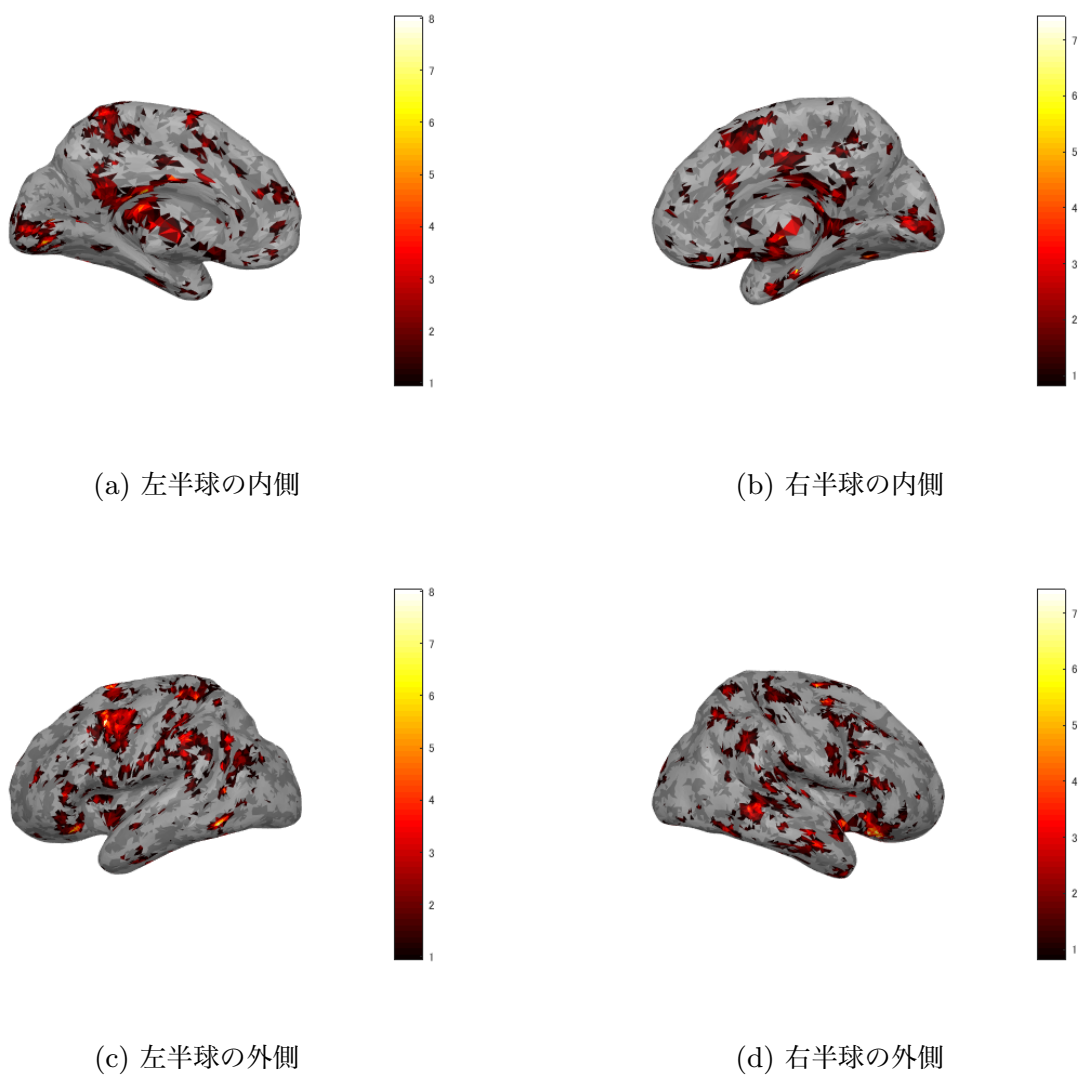


図 6.3: 学習器 NR のデコーディング結果

6.1 脳デコーディングの結果

表 6.4: 学習器 RN のデコーディング結果

[x, y, z]	領域名	ブロードマンエリア
[15,-70,30]	V3	19
[-30,56,2]	前頭極	10
[15,-49,4]	V2	18
[-69,-28,-8]	中側頭回	21
[6,-73,14]	V1	17
[48,-58,16]	角回	39
[-21,-76,46]	体性感覚連合野	7

6.1 脳デコーディングの結果

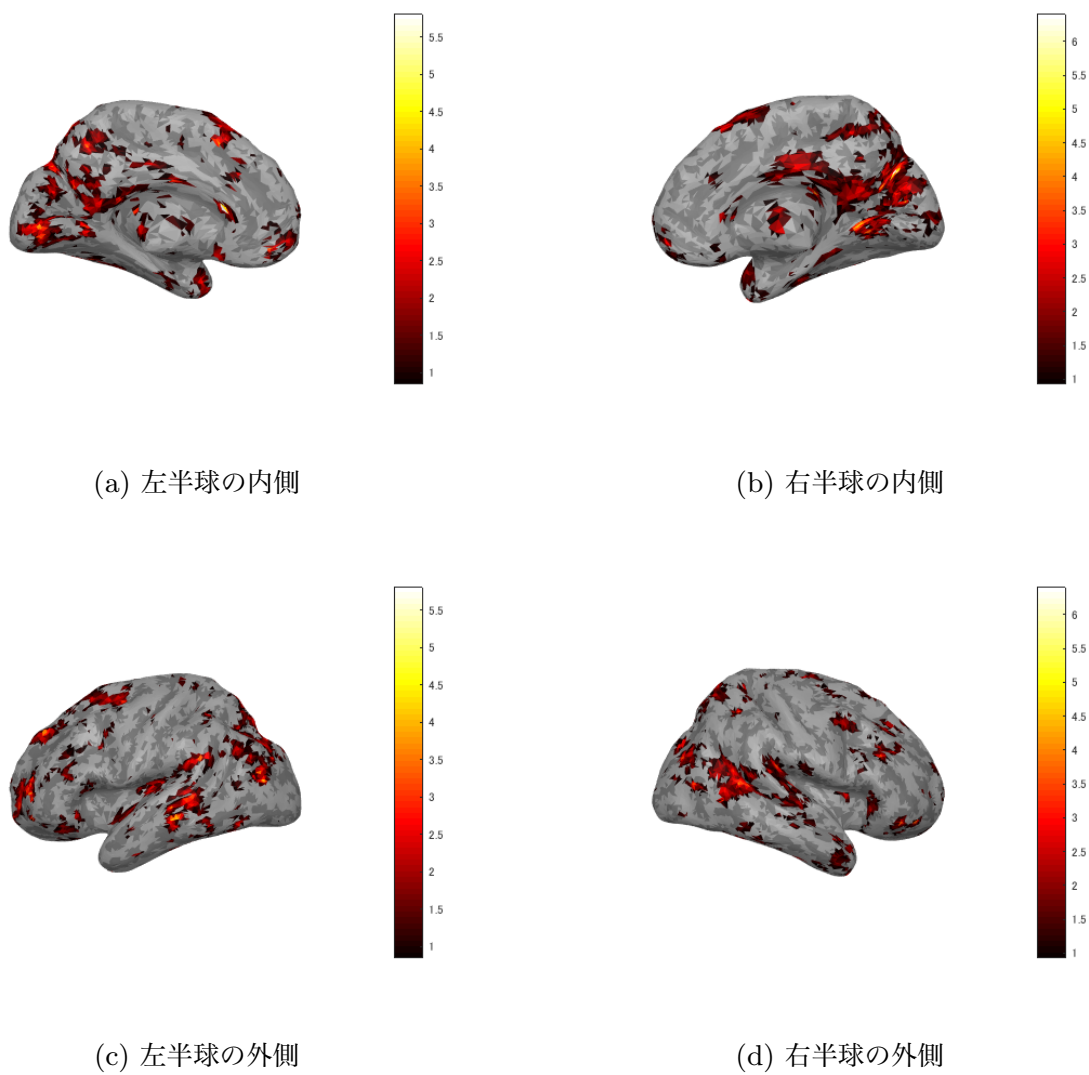


図 6.4: 学習器 RN のデコーディング結果

第 7 章

自発的脳活動の抽出と統計的仮説検定の結果

7.1 FFA の同定結果

まず、ローカライズスキャンにて得られた被験者ごとの FFA の座標は表 7.1 のようになった。被験者 2 の両半球と被験者 5 と 7 の右半球から FFA は同定できなかった。

表 7.1: FFA の座標と統計量 T

	L [x, y, z]	T (p<0.01)	R [x, y, z]	T (p<0.01)
Sub1	[-42, -55, -20]	7.53	[51, -55, -26]	7.83
Sub2	-	-	-	-
Sub3	[-42, -55, -20]	9.16	[46, -49, -18]	6.20
Sub4	[-42, -49, -24]	8.94	[42, -46, -22]	7.29
Sub5	[-36, -49, -20]	4.41	-	-
Sub6	[-45, -70, -26]	3.76	[45, -67, -22]	3.76
Sub7	[-39, -49, -24]	3.21	-	-

7.2 LFF の t 検定結果

ライバリスキャンにおいて、これらの座標にある VOI の BOLD 信号の活動を抽出し、バンドパスフィルタにかけた。画像呈示から 3 秒間の LFF の値を被験者ごとに平均した結果について対応なしの t 検定を行った結果、顔が選ばれた試行と家が選ばれた試行に有意な差は見られなかった ($p = 0.2480$)。

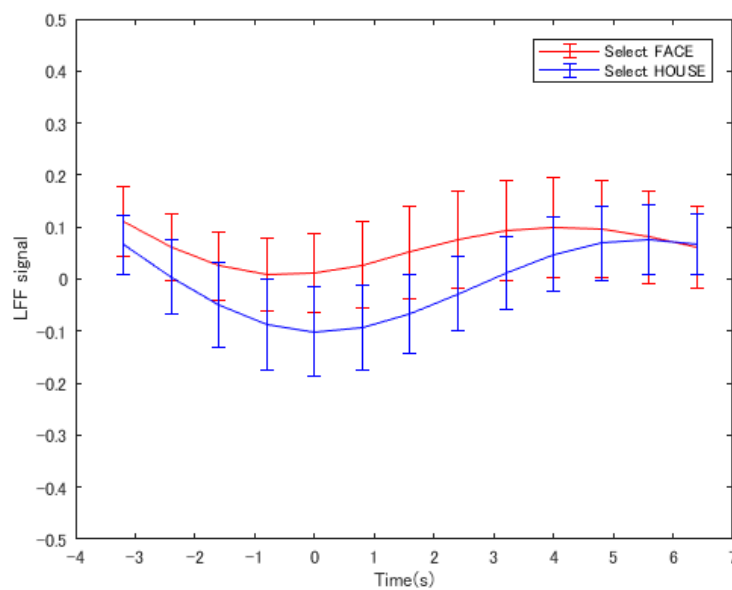


図 7.1: FFA の LFF

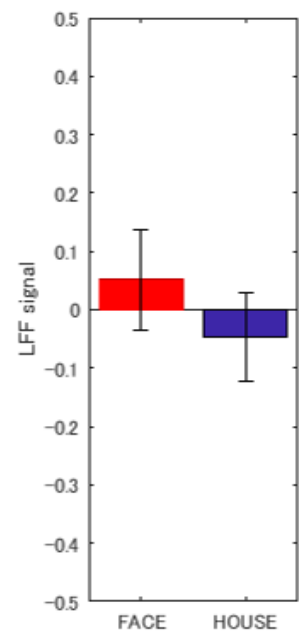


図 7.2: 刺激呈示 3 秒間の LFF の平均値

第 8 章

PPI 解析の結果

8.1 PPI 解析の結果

ライバリスキャン時の計測結果に対して PPI 解析を行なった．2nd-level 解析の結果，左前頭極，左紡錘状回，左海馬房回，左縁上回，右 V3 に賦活が見られた ($p < 0.01$)．座標と領域名をまとめると表 8.1 のようになった．MNI 座標系に変換し，脳の 3D モデルにプロットした結果は図 8.1 である．

表 8.1: PPI 解析の結果

[x, y, z]	T ($p < 0.01$)	領域名	ブロードマンエリア
[-27,53,-2]	5.11	前頭極	10
[-66,-49,-2]	5.03	紡錘状回	37
[-18,-25,-20]	4.95	海馬傍回皮質	36
[-57,-34,40]	4.72	縁上回	40
[51,-61,14]	4.52	V3	19

8.1 PPI 解析の結果

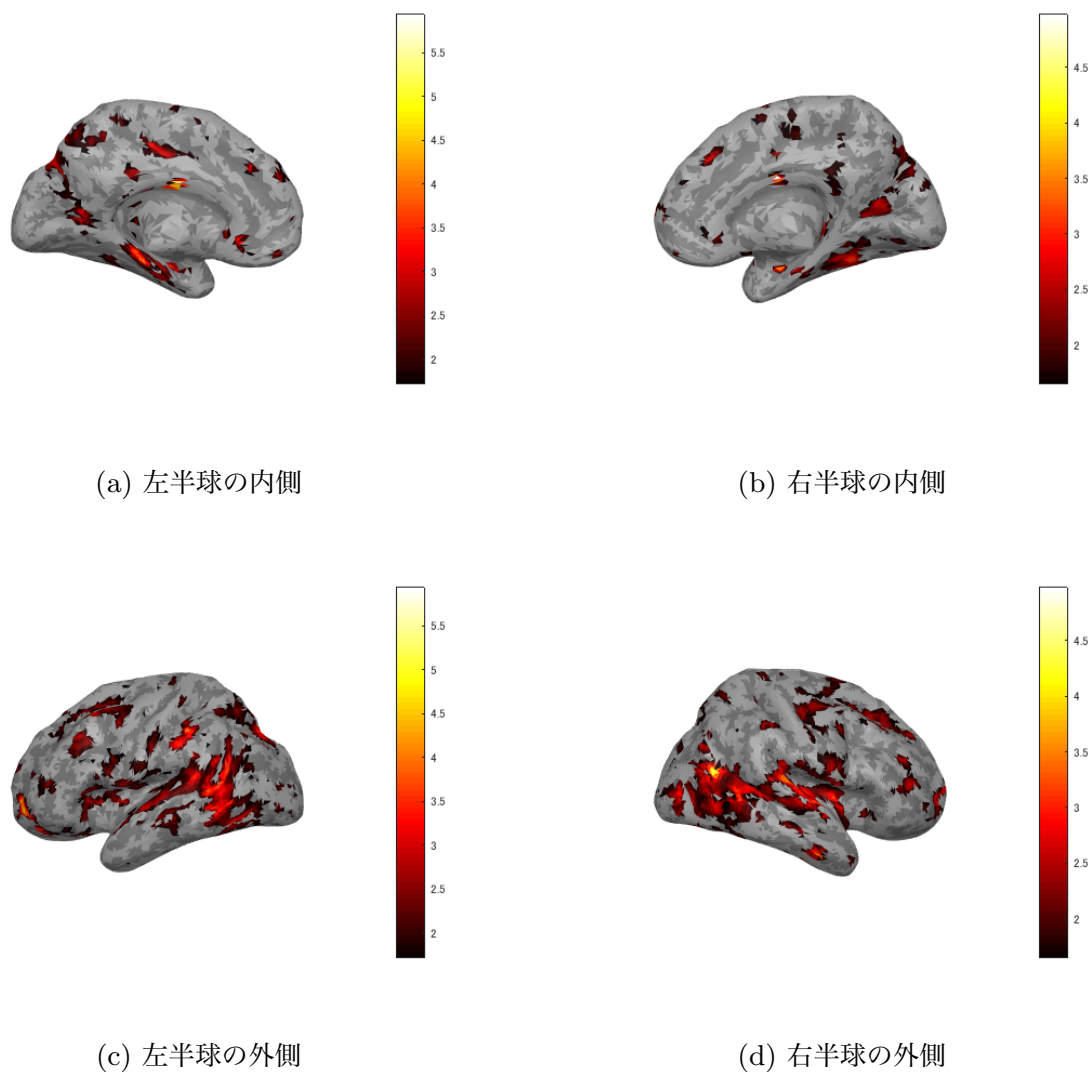


図 8.1: PPI 解析の結果

第 9 章

考察

9.1 ローカライズスキャンとライバリスキャンの実験結果について

ローカライズスキャンについて、被験者 1, 3, 4, 6 では両半球にて FFA とされる領域を同定できたものの、被験者 2 の両半球と被験者 5 と 7 の右半球において同定できなかった。ライバリスキャンについて、先行研究 [2] で用いられていたような色の異なる刺激より、偏光フィルタを用いることでさらに両眼視野闘争が起こりやすい環境を整えることができた。しかし、顔もしくは家と応答するにあたって、効き目側に見えた画像を選択する割合の方が多かった。被験者やランごとに区別せずに割合を計算したとき、効き目側の刺激が応答された確率は 63%、非効き目側の刺激が応答された確率は 20%であった。左右の目に同程度の刺激を与えたとしても、ほとんどの被験者の最終的な見えは効き目によることが大きいことが確認できた。ただし、FFA が特定できなかった被験者 2 について効き目側の刺激が応答された確率は 19% (他の被験者は 50%以上) の確率であった。課題として、効き目に影響されない実験モデルを考えることが挙げられる。

9.2 デコーディング解析について

学習器 RR のテスト結果から、デコーディング成績の高い領域として初期視覚野が同定された。両眼視野闘争の実験環境として、被験者は顔と家のどちらを応答していてもライバリ条件では同一刺激を入力として受け取っている。これまでの先行研究 [2] では FFA や PPA

9.3 自発的脳活動の検定結果について

など高次視覚領域の活動が見えの意識に影響していると考えられていたが、初期視覚野が両眼視野闘争において重要な働きを持つと報告した A Polonsky[8] らと F Tong[9] らの研究を支持する結果となった。学習器 RR を作成するにあたって、ライバリ条件にて顔と応答された試行と家と応答された試行の脳活動パターンを学習際、初期視覚野における 2 種の脳活動パターンには何らかの差があることが考えられる。また、高次視覚野からのトップダウン的な処理が働いているとも考えられる

また、チューニングパラメータによって精度が変化することに注意する必要がある。今回、注目したパラメータとして ROI の範囲を 7.5mm (107 voxels) とした。実際に半径 5mm (27 voxels) でデコーディング解析を行った結果よりも、半径 7mm の結果の方が同程度の座標に敏感な応答を示した。さらに、searchlight analysis において、future selection として基準となる座標を与えなかった。future selection に FFA の座標を中心に置くことで、より精度の良い結果が得られる可能性がある。その他のパラメータにおいても適切な設定によって、より精度のよい結果が得られるかもしれない。

9.3 自発的脳活動の検定結果について

先行研究 [2] において試行中の FFA の BOLD 信号について有意差があったと報告された。しかし、本実験では刺激呈示から 0~3.2s の FFA の LFF の信号について、ライバリ条件の顔と応答された試行と家と応答された試行には有意差は見られなかった。つまり、FFA の LFF はライバリ条件時に顔と応答する意思決定に影響するとは言えないことがわかった。課題として、本実験の被験者は少ないことが挙げられる。

9.4 PPI 解析について

2nd-level 解析の結果から、同定された領域である紡錘状回、海馬房回、V3 は、座標で見たとき FFA と近い位置でため関連性があると考えられる。縁上回についても知覚情報の認知経路として関連性があると考えられる。前頭極の機能的役割については記憶や意思決定にか

9.4 PPI 解析について

かわることが報告されている [10][11]. ただし, 単に偶然同一のパターンを示しただけで, 両眼視野闘争と関連のない領域が結果に表れた可能性も考慮する必要がある.

第 10 章

まとめ

意識的知覚における脳メカニズムは、現代の神経科学の中心的な問題の一つである。意識的な視覚認知を調べるにあたって、両眼視野闘争という現象に注目した。本研究は両眼視野闘争中の脳活動の変化と活動パターンに注目し、意識的な視覚認知における神経メカニズムについて調べた研究である。

両眼視野闘争についての知覚交代メカニズムを調べるにあたって、顔認知を処理する部位 (FFA) を同定するためのローカライズスキャンと、両眼視野闘争中の脳活動を計測するライバリスキャンを行った。プロジェクタと被験者が装着するメガネに偏光フィルタを装着することによって、実験中左右の目に異なる刺激が呈示される環境を整えた。ライバリスキャンの呈示刺激について、顔と家画像を左右の目に独立して呈示するライバリ条件、顔と家画像をフェードさせた動画を左右の目に呈示するノンライバリ条件を用意した。被験者には画像もしくは動画を呈示後、最後にどちら (顔もしくは家) がより強く見えたかを応答させた。

解析手法として、デコーディング解析、自発的脳活動についての解析、PPI 解析を行った。デコーディング解析の結果として、デコーディング解析からライバリ条件にて顔と応答された試行と家と応答された試行に対してデコーディングと 2st-level 解析を行ったところ、デコーディング成績が高い領域として初期視覚野が同定された。これまでの先行研究 [2] では高次視覚領域の活動が見えの意識に影響していると考えられていたが、初期視覚野も重要な働きを持つと報告した A Polonsky[8] らと F Tong[9] らの研究を支持する結果となった。

自発的脳活動についての解析では、ライバリスキャン中のライバリ条件にて顔と応答された試行と家と応答された試行について、刺激提示後約 3 秒間の FFA の LFF を抽出し被験者ごとに平均を計算した。この被験者ごとの平均値に対して対応のある t 検定を行ったところ、

2 条件に有意な差は見られなかった ($p = 0.2480$). このことから, FFA の LFF はライバリ条件時に顔と応答する意思決定に影響するとは言えないことがわかった.

PPI 解析では, FFA の BOLD 信号と協調するような領域を探索した. PPI 解析の結果から, 両側の紡錘状回, 前頭極, 海馬傍回, 縁上回, V3 に賦活が見られた ($p < 0.01$). FFA 領域と相関を示す領域であり, Functional Connectivity を示す領域であると示唆された.

参考文献

- [1] 村田勉. 2004. "両眼視と意識にのぼる「見え」 -視覚的意識を創り出す脳のメカニズム-". 日本視能訓練士協会誌, 33, 7-14.
- [2] Frank Tong, Ken Nakayama, J. 1998. Thomas Vaughan, Nancy Kanwisher. "Binocular Rivalry and Visual Awareness in Human Extrastriate Cortex". Neuron, 21, 753759.
- [3] Hsieh, P., Colas, J., Kanwisher, N. 2012. "Pre-stimulus pattern of activity in the fusiform face area predicts face percepts during binocular rivalry". Neuropsychologia, 50, 522529.
- [4] Kanwisher N, McDermott J, Chun MM. 1997. "The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception". J. Neurosci, 17, 430211. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9151747>
- [5] Russell Epstein, Nancy Kanwisher. 1998. "A cortical representation of the local visual environment". Nature 392, 598601. <https://www.nature.com/articles/33402>
- [6] 神谷之康. "脳の暗号を解読する". 認知神経科学, 2013, 15 巻,1 号,61-65
- [7] Friston KJ, Buechel C, Fink GR, Morris J, Rolls E, Dolan RJ. 1997. "Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging". <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9344826>
- [8] Polonsky A, Blake R, Braun J, Heeger DJ. "Neuronal activity in human primary visual cortex correlates with perception during binocular rivalry". Nat Neurosci 3, 1153-1159. 2000.
- [9] Tong F, Engel SA. "Interocular rivalry revealed in the human cortical blind-spot representation". Nature 411, 195-199. 2001.

参考文献

- [10] Burgess PW, Dumontheil I, Gilbert SJ. "The gateway hypothesis of rostral prefrontal cortex (area 10) function". Trends Cogn Sci, 11, 290-298. 2007. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17548231>
- [11] Gilbert SJ, Spengler S, Simons JS, Steele JD, Lawrie SM, Frith CD, Burgess PW. "Functional specialization within rostral prefrontal cortex (area 10): a meta-analysis". J Cogn Neurosci, 18, 932-948. 2006. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16839301>
- [12] Visual Angle Calculator. 2017 年 12 月 閱覽. <http://elvers.us/perception/visualAngle/>
- [13] SPM12 Manual. 2017 年 12 月 閱覽. http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/spm12_manual.pdf
- [14] MNI-Talairach with Brodmann Areas (1.09). Xenios Papademetris, Yale University. 2017 年 12 月 閱覽. <http://sprout022.sprout.yale.edu/mni2tal/mni2tal.html>
- [15] Neurobehavioral Systems. Presentation. <https://www.neurobs.com/>
- [16] MathWorks. MATLAB. <https://jp.mathworks.com/>
- [17] SPM12. 2014. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>
- [18] Grgen, K., Hebart, M.N. The Decoding Toolbox. 2012. <https://sites.google.com/site/tdtdecodingtoolbox/>
- [19] Cui X, Li J. xjView — a viewing program for SPM. 2007. <http://people.hnl.bcm.tmc.edu/cuixu/xjView>
- [20] D. Price. Software, MNI2FS. 2017. <http://www.darrenprice.org/software/>

謝辞

卒業論文のテーマ決めから実験指導, 論文添削にあたり, ご指導いただいた高知工科大学中原潔教授に, 心より感謝申し上げます. さらに, また本研究の副査と担当していただいた, 篠森敬三教授, 繁耕博昭准教授ならびに, 本研究を進めるにあたってご助言をいただいた脳コミュニケーション研究センター青木隆太助教にも深く感謝いたします.