

NAIST-IS-MT1651119

修士論文

快情動プライミング影響下における時間選好に関わる神経基盤の解明

山本 諭

2018 年 3 月 13 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

山本 諭

審査委員：

池田 和司 教授	（主指導教員）
松本 健一 教授	（副指導教員）
川人 光男 教授	（副指導教員）
森本 淳 准教授	（副指導教官）

快情動プライミング影響下における時間選好に関わる神経基盤の解明*

山本 諭

内容梗概

意志決定の際、報酬を獲得できるまでの時間を考慮する必要がある。時間選好とは遅延報酬 (長期報酬) に対する即時報酬 (短期報酬) の好みの度合いである。この指標となる時間割引率は主に個人特性として扱われるが、個々人の状態により変動することも知られている。特に快情動を惹起された際の時間割引率が上昇するという知見が多く存在する。しかし、快情動による時間選好に関わる神経基盤への影響は明らかにされていない。そこで、快情動の時間選好への影響を脳情報から明らかにするために、快情動プライミング影響下での時間割引課題を実行中の脳活動を fMRI (磁気共鳴機能画像法) で計測し、脳活動データから機械学習を用いて刺激を読み取る手法であるデコーディング解析及び類似度解析を行った。報酬選択のデコーディング解析により短期・長期報酬選好を表現する脳活動パターンを同定し、類似度解析で時間選好に関わる脳領域への快情動の影響を確認した。その結果、短期・長期報酬選好を表現している脳活動パターンの存在及び、短期報酬選好を表現する脳活動を快情動が調節し、時間割引率を上昇させていることが示唆された。

キーワード

fMRI, 時間割引, 感情, 機械学習

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651119, 2018 年 3 月 13 日.

Elucidating neural mechanisms of time-preference under the effect of emotional primes*

Satoshi Yamamoto

Abstract

When we make decisions, it is necessary to consider the time to receive rewards. Time preference is the current relative valuation placed on acquiring immediate over delayed rewards. The temporal discounting rate is used as a personal trait-like indicator in this situation. It is also known to change depending on individual state. There are many previous studies that the temporal discounting rate rises when people have a positive emotion. The influence on neural representation related to time preference due to positive emotion, however, has not been elucidated. To understand this biological mechanism, We measured brain activity with fMRI undergoing temporal discounting task under positive priming and performed a brain decoding of choices for immediate and delayed reward. We also conducted representational similarity analysis between brain activity patterns representing a choice for immediate reward and those under positive priming. Our results revealed the existence of a brain region directly coding immediate and delayed reward. Moreover, we could confirm the effect of positive emotion on brain areas related to temporal discounting.

Keywords:

fMRI, delay discounting, emotion, machine learning

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651119, March 13, 2018.

目次

図目次	iv
第 1 章 序論	1
第 2 章 方法	3
2.1 被験者	3
2.2 実験	3
2.2.1 動画セットに対する感情価の評定の事前実験	3
2.2.2 時間割引課題の行動実験	3
2.2.3 時間割引課題実行中の fMRI による脳活動計測	5
2.3 解析	7
2.3.1 脳活動データからの特徴量抽出	7
2.3.2 報酬選択のデコーディング	7
2.3.3 条件間の脳活動類似度解析	8
第 3 章 結果	9
3.1 行動実験における時間割引率 k への快情動の効果	9
3.2 報酬選択の二値判別	9
3.3 fMRI 実験における報酬選択回数への快情動の効果	11
3.4 条件間での短期報酬選択時の脳活動の類似度	11
第 4 章 考察	15
第 5 章 結論	17
謝辞	18
参考文献	19
付録	22

図目次

2.1	実験課題の 1 試行のシーケンス	5
3.1	行動実験における条件別の推定された時間割引率	9
3.2	「短気報酬選択」対「長期報酬選択」の判別成績	11
3.3	fMRI 実験における条件別の短期報酬選択回数	12
3.4	条件間の trial ごとの短期報酬選択時の脳活動との類似度	14
4.1	快情動の時間割引率への効果と不快-快度の標準偏差の被験者間での関係	15
5.1	長期報酬選好を表現する脳活動との類似度	23

第 1 章 序論

私たちは日常生活において、手に入る報酬の期待値（価値）を元に行動選択を下す。その価値の計算においては、報酬が手に入るまでの時間を考慮する時間割引という概念が広く用いられている [1,2]。即時報酬に対して遅延報酬をどれだけ割引くかという度合いを表す時間割引率は、異時点間の報酬を選択する時間割引課題によって推定される [3]。この課題では、短い時間遅れののちに手に入る小さい報酬（短期報酬）を選択するか、長い時間遅れののちに手に入る大きい報酬（長期報酬）を選択するかを意思決定する。時間割引率が大きいほど将来の報酬に対する価値が大きく減衰するため衝動的な傾向を示し、小さいほど将来の報酬に対する価値の減衰が小さいことから将来に対して計画的な行動特性を有する。時間割引課題実行時の脳活動は fMRI(磁気共鳴機能画像法) を用いて数多く調べられてきており [4-8]、線条体、眼窩前頭皮質、帯状回などが時間割引に関連する領域として知られている。線条体の一般的な機能として運動機能、学習、報酬予測、価値評価、意思決定等が挙げられる。眼窩前頭皮質は価値評価、情動、意思決定等に関わるとされる。帯状回は感情の形成と処理、学習と記憶、報酬予測、意思決定、自律機能といった様々な機能を持つとされている。時間割引率は個人特性だけでなく、状態的特性を有しているとされる。先行研究の知見から、時間割引率の上昇に快情動が影響していることが示唆されている [9-14]。さまざまな表情の顔写真を提示することによって被験者の情動を操作させる表情刺激プライミングによる時間割引課題における脳活動を fMRI 実験により調査した結果 [14] からは、異時点間の報酬選択課題の意思決定時において前帯状皮質等が賦活していた領域であることが示唆されている。しかし、その際の脳活動が快情動により調整された異時点間の報酬選択を表現したものであるかどうかは明確ではない。そこで本研究では、快情動の時間選好への影響を神経基盤から明らかにすることを目的とする。仮説として、快情動により短期報酬選好を表現する脳活動が惹起され、その結果、時間割引率の上昇に繋がる行動が生じるということを提唱する。仮説検証のために、脳情報デコーディング解析を用いて短期報酬選好を表現する脳活動パターンを同定し、短期報酬選好を表現する脳活動パターンと中立時及び快情動時の脳活動パターンとの類似度を比較する。脳情報デコーディングとは、感覚刺激や行動出力などの情報が脳活動として符号化さ

れていると考え、これらの対応関係を機械学習等のアルゴリズムで学習し、その学習器を用いて脳活動から感覚刺激や行動出力を予測する技術である。fMRI による意思決定時の脳活動データを用いて、報酬関連行動選択を予測した先行研究は複数存在する。前帯状皮質・内側前頭前皮質・腹側線条体を組み合わせた特徴量を用いることで被験者の行動選択のデコーディングに成功した研究 [15] やリスク選好をコードしている領域を同定した研究 [16] などがある。実験および解析の流れは以下の通りとなる。1) 行動実験で個人特性としての時間割引率を推定する。2) 時間割引課題実施中の脳活動パターンを fMRI で測定し、脳情報デコーディング解析により長期・短期報酬選択を表現する脳活動パターンを同定する。3) 短期報酬選好を表す脳表現が快情動プライミングにより惹起されていることを検証するために、1) で求めた割引率から同じ価値の選択肢の組を持つ時間割引課題を生成し、その選択時の脳活動と 2) で同定した短期報酬選択の脳活動パターンとの類似度を、中立および快情動刺激をプライミングとして付与させた条件間で比較する。結果として、中立条件と比較して快情動プライミング条件では、2) で同定した短期報酬選択時の脳活動パターンとの類似度が高いことが期待される。3) では 2 つの選択肢の割引価値が等しいので、中立条件ではランダムな脳活動パターンを示すと想定される。その結果、長期・短期報酬選択数は同じ頻度となると想定される。それに対し、快情動条件ではプライミングにより短期報酬選好が上昇するように脳表現がバイアスされ、等価な割引価値の選択肢の組に対して、短期報酬選択回数が増加すると考えられる。以上の実験・解析により、異時点間の報酬選択における快情動の時間割引率への影響を脳活動レベルで解明することを目指す。

第 2 章 方法

2.1 被験者

株式会社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) において、行動実験 13 名 (平均年齢:23.15 歳 $\pm$ 1.34 SD、男性:10 名、全員右利き) 及び、その中から 3 名 (平均年齢:22.67 歳 $\pm$ 0.47SD、男性:3 名) fMRI 実験に参加をしていただいた。本実験は、ATR の倫理安全委員会の承認及び、被験者への説明と同意を得た上で実施されている。

2.2 実験

2.2.1 動画セットに対する感情価の評定の事前実験

後述の実験に用いる各被験者個別の情動喚起刺激の選定のために、情動喚起動画セット [17] に対して、質問紙を用いて 不快-快度 (valence) の評定を実施した [18]。ただし、今回は快と中立のプライミングを行うため、動画セットのうち positive と neutral のラベルのついたもののみを用いた。100 個の約 20~30 秒の情動喚起動画 (日常生活を撮影したもの) の不快-快度 (valence) を質問紙形式で 5 段階で回答してもらった。それぞれの被験者に対し、後述の一連の課題において、不快-快度 (valence) が 3 の動画を中立動画、不快-快度 (valence) が 4 と 5 の動画を快情動動画として採用した。

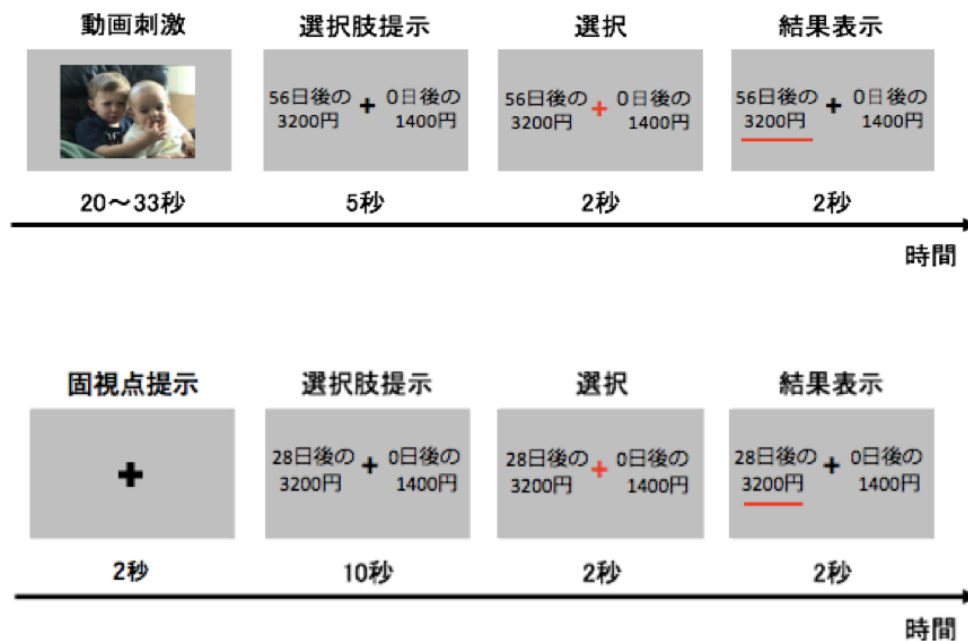
2.2.2 時間割引課題の行動実験

時間割引率を推定するために adaptive delay discounting task[19] を基にして中立及び快情動刺激をプライミングとして付与させた時間割引課題 (図 2.1) を PC で実施した。感情価が中立の動画刺激をプライミングとして提示する中立条件と、感情価が快であった動画刺激をプライミングとして提示する快情動条件の 2 条件を用意した。中立条件で個人特性としての時間割引率を推定し、快情動条件で快情動の時間割引率への影響を確認した。それぞれの条件を 50 試行行ってもらった。

adaptive delay discounting task では、被験者の行動選択に応じて選択肢が動的に生成される。選択肢は金銭報酬とそれが手に入るまでの時間を表す時間遅れからなっており、双曲関数型の時間割引モデル [3]

$$DV = \frac{R}{1 + kD}$$

を基に試行ごと時間割引パラメータ k を計算及び更新し、規定の時間遅れの組を用いて報酬を導出し提示する。 DV は割引価値、 R は報酬、 D は時間遅れを表す。被験者の報酬選択に応じて k が更新されていく推定手法を採用した。時間割引率 k の初期値が 0.02、 k の step size を 0.01 に設定した。短期・長期それぞれの報酬選択に対し、step size 分の加算・減算を行う。試行ごとに step size には step size change rate として設定した 0.95 が乗算される。中立条件で被験者の個人特性としての時間割引率を導出し、快情動条件で出力された時間割引率と対比することで快情動の時間割引率への影響を確認する。課題の 1 試行の構成を図 2.1 上段に示す。



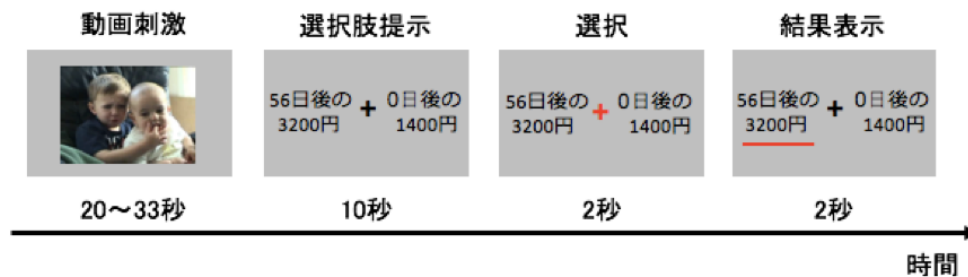


図 2.1 実験課題の 1 試行のシーケンス。(上段) 行動実験。動画刺激が選択肢の前にプライミングとして提示される。中立条件では事前の評定実験において感情価が 3 であった動画を、快情動条件では 4 か 5 であった動画を刺激として表示する。その後、短期報酬・長期報酬選択肢の組が画面に表示される。被験者は 5 秒以内に得たい方の選択肢を決定する。キーボードのボタン押しで反応を測定する。選ばれた選択肢の下にバーが表示される。これで 1 試行となる。(中段)fMRI 実験トレーニング条件。画面中央の固視点提示後、短期報酬・長期報酬選択肢の組が画面に表示される。被験者は 10 秒以内に得たい方の選択肢を決定する。選択肢提示時の脳活動の信号値と選択結果を解析に用いる。(下段)fMRI 中立&快情動条件。動画刺激が選択肢の前にプライミングとして提示される。中立条件では事前の評定実験において感情価が中立であった動画を、快情動条件では快であった動画を刺激として表示する。

2.2.3 時間割引課題実行中の fMRI による脳活動計測

行動実験で導出した個人特性としての時間割引率を元に被験者ごとにカスタマイズした時間割引課題を実施中の脳活動を、fMRI で計測した。短期報酬選択・長期報酬選択それぞれの情報が表現されている脳活動を判別するための脳活動データ取得を行うプライミング刺激の無いトレーニング条件 (図 2.1 中段)、中立の感情価の刺激をプライミングとして提示する中立条件、快情動刺激をプライミングとして提示する快情動条件の 3 つの条件を用意した (図 2.1 下段)。トレーニング条件においては、短期報酬選択・長期報酬選択それぞれを表現する脳活動を取得する。そのために、短期の割引価値が長期の割引価値より大きい選択肢、そして長期の割引価値が短期の割引価値より大きい選択肢を導出し提示した。ここでは、長期選択と短期選択の数が揃うように、行動実験で導出した時間割引率を中心に選択肢が分布するように設定した (詳しくは後述)。中立条件と快情動条件においては、行動実験で推定

した個人特性としての時間割引率から、それぞれの割引価値が等しい選択肢の組を導出し提示した（詳しくは後述）。また、個人特性としての時間割引率から算出した等価な選択肢に対して中立条件では全試行の半数程度に選択回数が制御できているか、快情動条件では短期報酬選択回数が増加しているか確認した。選択肢の導出方法を以下に示す。短期報酬の時間遅れの組を 0 日と 14 日、長期報酬の時間遅れの組を 28 日と 42 日と 56 日とした。1000 円から 4000 円の間の一様分布から無作為に抽出された金額を短期報酬とし、短期報酬の時間遅れの組から無作為に選ばれた時間遅れと行動実験で推定した個人特性としての時間割引率を用いて、双曲関数型の時間割引モデルから割引価値を算出した。この割引価値と長期報酬の時間遅れの組から無作為に選ばれた時間遅れを同じモデルに適用し、長期報酬を算出した。これを中立条件及び快情動条件の 1 試行の選択肢とし、1 実験分を同じプロトコルで繰り返し導出する。トレーニング条件の選択肢としては、3 つの条件間の割引価値のスケールを合わせるために、短期・長期報酬割引価値の平面において、上記で導出された 1 実験分の割引価値の最小値と最大値からなる正方グリッド内に一様に分布する点を短期・長期それぞれの割引価値の組として算出した。この割引価値の組と上述の時間遅れの組及び個人特性としての時間割引率を用いて、双曲型の時間割引モデルに適用し、短期報酬及び長期報酬を導出し、選択肢として用いた。トレーニング条件、中立条件、快情動条件の順で課題を行ってもらうのを 1 実験とし、計 2 日間実施した。1 日目の実験ののち 1 週間程度のインターバルを設け同じプロトコルで 2 日目の実験を行った。バイアス効果を防ぐため、被験者に対する説明においては中立条件と快情動条件の区別について明示的に説明しない。脳機能画像データの撮像は、3T fMRI 装置 (Siemens 社 MAGNETOM Prisma) を用いて行った。撮像パラメータは、TR: 2000ms、TE:30ms、Flip angle:80deg、FOV:200mm、ボクセルサイズ: 2.5 x 2.5 x 2.5mm、スライス数:56 スライスとした。また、実験初日の課題終了後に脳構造画像を T1 強調画像法によって撮像した。ボクセルサイズは、1.0 x 1.0 x 1.0mm とした。

2.3 解析

2.3.1 脳活動データからの特徴量抽出

fMRI 計測により得られた脳機能画像データに対して SPM8 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/>) を用いて前処理を施した。スキャン開始から 10 秒以内に撮像された画像は信号が不安定なため除去した。その後、機能画像時系列に対する位置合わせである Realignment、機能画像と構造画像への位置合わせである Coregister を行った。Region Of Interest (ROI : 関心領域) としては、Automated Anatomical Labeling Atlas[20] の 116 領域のうち、時間割引に関わるとされる [4-8] 眼窩前頭皮質、帯状回、線条体に含まれる 16 領域を使用した。各被験者の個人脳空間で解析をするために、標準脳空間の関心領域を個人脳空間に変換した。SPM では、脳活動が実験課題の効果の線形和で表されるとする下記の一般線形モデルが用いられる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\beta + \epsilon \quad (2.3.1)$$

$\mathbf{Y}$ は fMRI 信号の時系列データである。 $\mathbf{X}$ は実験課題を反映した計画行列であり、 ϵ は残差である。 β はデータから推定されるパラメータであり、刺激が信号に与える効果の大きさを表す。今回は、選択肢提示中の脳活動を抽出した β 値を特徴量として使用した。

2.3.2 報酬選択のデコーディング

上記で求めたトレーニング条件の選択肢提示時における β マップを特徴量として用いて、短期報酬選択・長期報酬選択の Multi Voxel Pattern デコーディングを行った。fMRI で計測された脳活動データは非常に高次元かつサンプル数が少ないため、過学習が生じてしまう恐れがある。そこで、未知のデータに対する汎化性能を向上させるため、スパース制約を課すアルゴリズムである Sparse Logistic Regression (SLR)[21] を判別モデルとして用いた。SLR はロジスティック回帰のベイズ拡張で、多数の特徴量の中から判別に寄与しない特徴量を自動的に削除し、判別に有効な特徴量のみを抽出して学習する推定手法である。判別に用いるロジス

ティック関数は、

$$p_i = \frac{1}{1 + \exp[-(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + w_0)]} \quad (2.3.2)$$

で表される。 $\mathbf{x}$ はボクセルの信号値で、 $\mathbf{w}$ は重みである。尤度関数は、

$$P(\mathbf{t}|\mathbf{X}; \mathbf{W}) = \prod_{i=1}^N p_i^{t_i} (1 - p_i)^{1-t_i} \quad (2.3.3)$$

で表される。 t はクラスラベルで、 N はサンプル数である。SLR では、重み w に対してスパース制約を課す。判別に関連する脳部位は限定的という仮説のもと、Automatic Relevance Determination により関連する脳部位が自動探索される。事前分布として、

$$P(w_k|\alpha_k) = \mathcal{N}(0|\alpha_k^{-1}) \quad (2.3.4)$$

で表される正規分布を用いる。 k はボクセル番号で、 α はボクセル毎に存在するハイパーパラメータであり、この事前確率は下記のように示される。

$$P(\alpha_k) = \alpha_k^{-1} \quad (2.3.5)$$

推定の過程で関連のないボクセルの α が大きくなることにより、関連するボクセルのみが抽出される。また、関心領域ごとに短期・長期報酬選択の脳活動データ間で両側 t 検定により t 値を計算し、有意差のあるボクセルを降順に 2000 個に次元削減し、特徴量として用いた。Leave-one-trial-out cross validation により判別精度の検証を行った。

2.3.3 条件間の脳活動類似度解析

トレーニング条件における短期報酬選択時の脳活動パターンを試行平均したものと、中立条件、快情動条件それぞれの短期報酬選択時の各試行における脳活動との類似度を計算した。類似度としては相関係数 (Pearson's correlation) を採用した。中立条件と快情動条件の類似度を比較することにより、快情動による時間割引に関わる脳活動への影響を調査する。被験者内で関心領域ごとに各条件の全試行の類似度に 2 標本 t 検定を行い、被験者ごとに条件間で有意差が生じている関心領域を同定する。

第 3 章 結果

3.1 行動実験における時間割引率 k への快情動の効果

13 名中 8 名に快情動が時間割引率を上昇させる効果が見られた (図 3.1)。効果があつた被験者のうち 3 名を fMRI 実験に採用した。

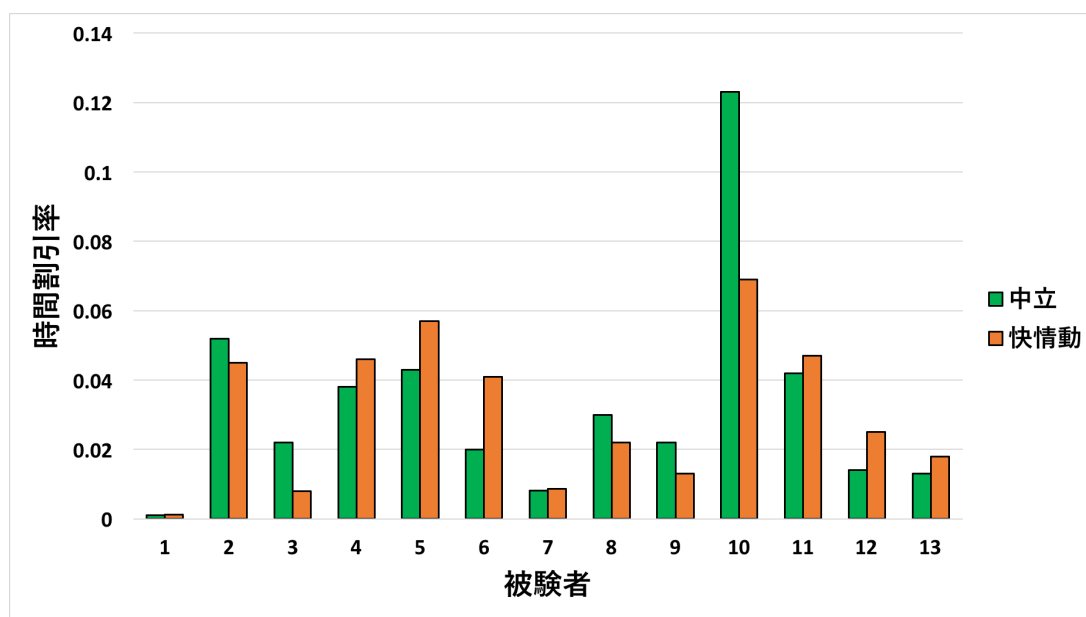
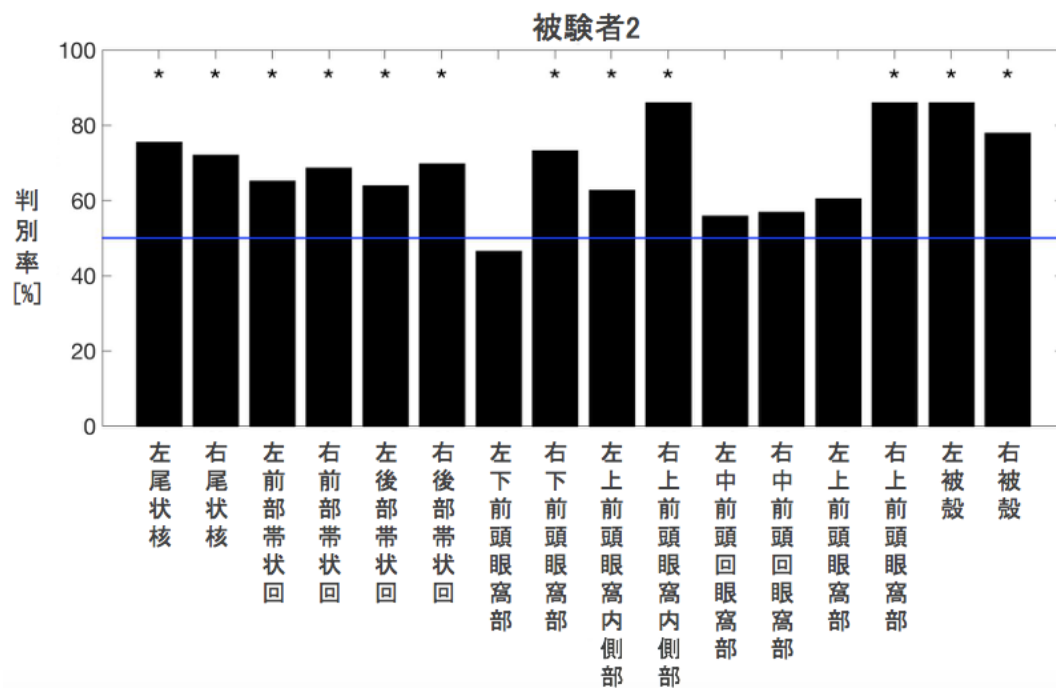
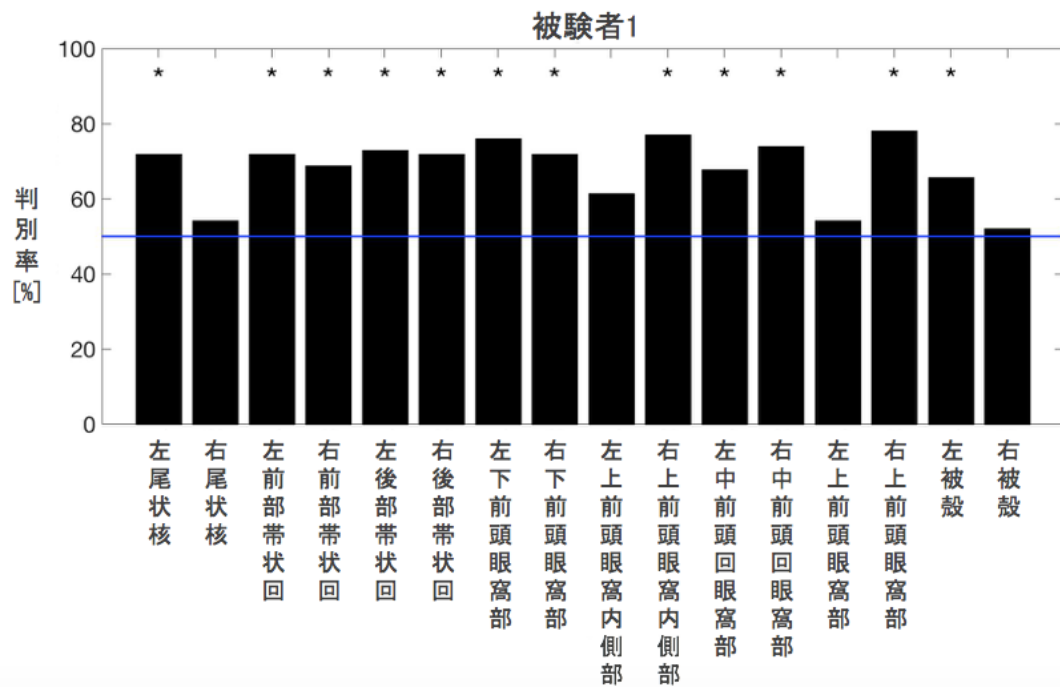


図 3.1 行動実験における条件別の推定された時間割引率

3.2 報酬選択の二値判別

行動実験で快情動の時間割引率への効果が確認された被験者のうち、被験者 1,4,5 をそれぞれ fMRI 実験における被験者 1,2,3 として採用した。トレーニング条件における選択肢提示時の脳活動を用いて、短期・長期報酬選択を判別した結果を図に示す (図 3.2)。この結果、全被験者に共通して多くの領域において判別成績が両側二項検定で p 値が 0.05 を下回る高い成績が得られた。



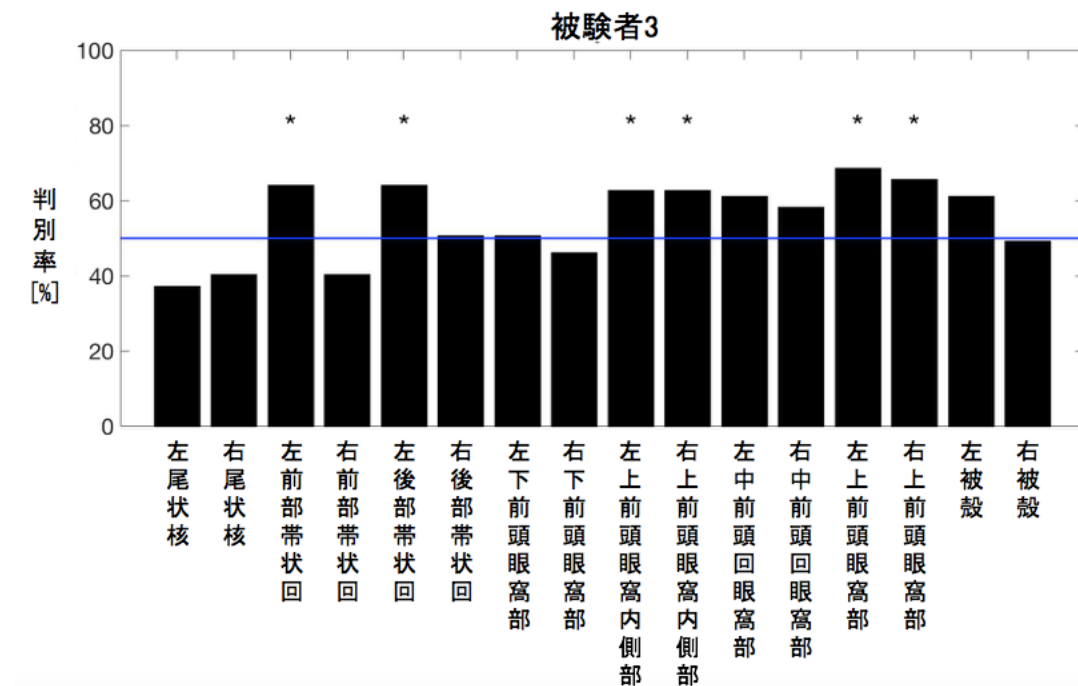


図 3.2 「短気報酬選択」対「長期報酬選択」の判別成績 (上段から順に被験者 1, 2, 3)。LOOCV による判別成績を時間割引に関わるとされる 16 の関心領域ごと示した。青線はチャンスレベルを表し、アスタリスクは両側二項検定で p 値が 0.05 を下回る成績であることを表す。

3.3 fMRI 実験における報酬選択回数への快情動の効果

fMRI 実験における報酬選択回数を確認した。採用した被験者 3 名共、等価な選択肢を提示する中立条件で短期・長期報酬それぞれの選択回数が全試行数の半数近辺であった。快情動条件では短期報酬選択数が増加していた (図 3.3)。このことから、この 3 名に関しては、fMRI 実験においても快情動プライミングの効果が見られたと言える。

3.4 条件間での短期報酬選択時の脳活動の類似度

報酬選択のデコーディング解析結果から存在が示唆された短期報酬選好を表現する脳活動との類似度解析を行った。トレーニング条件における短期報酬選択時の脳

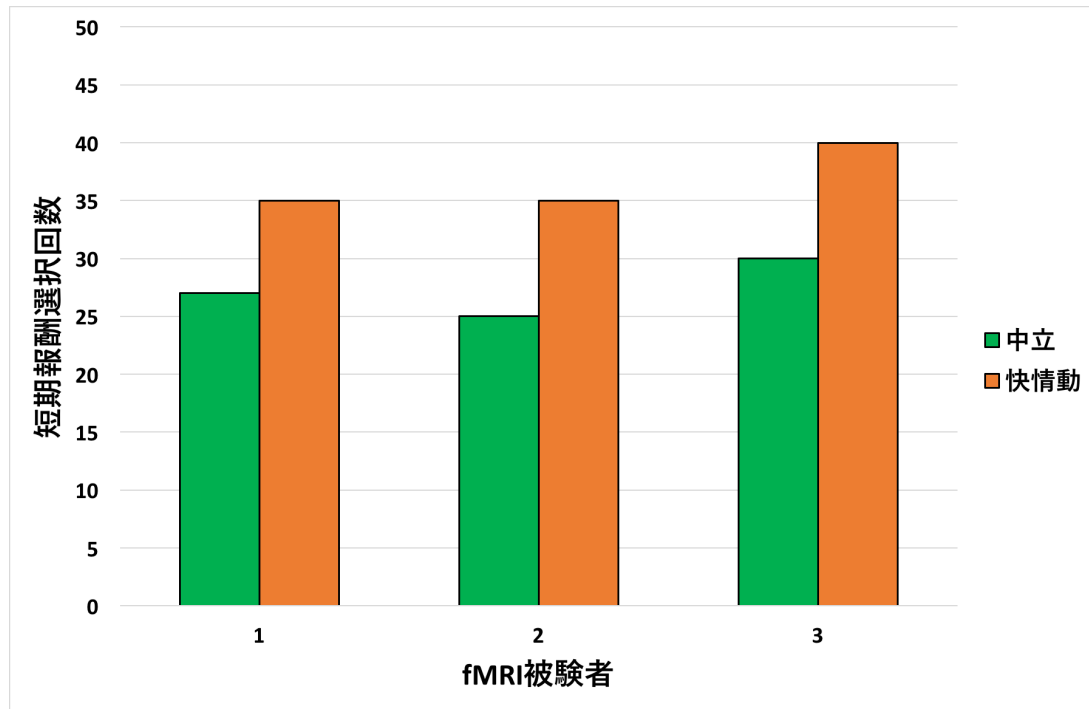
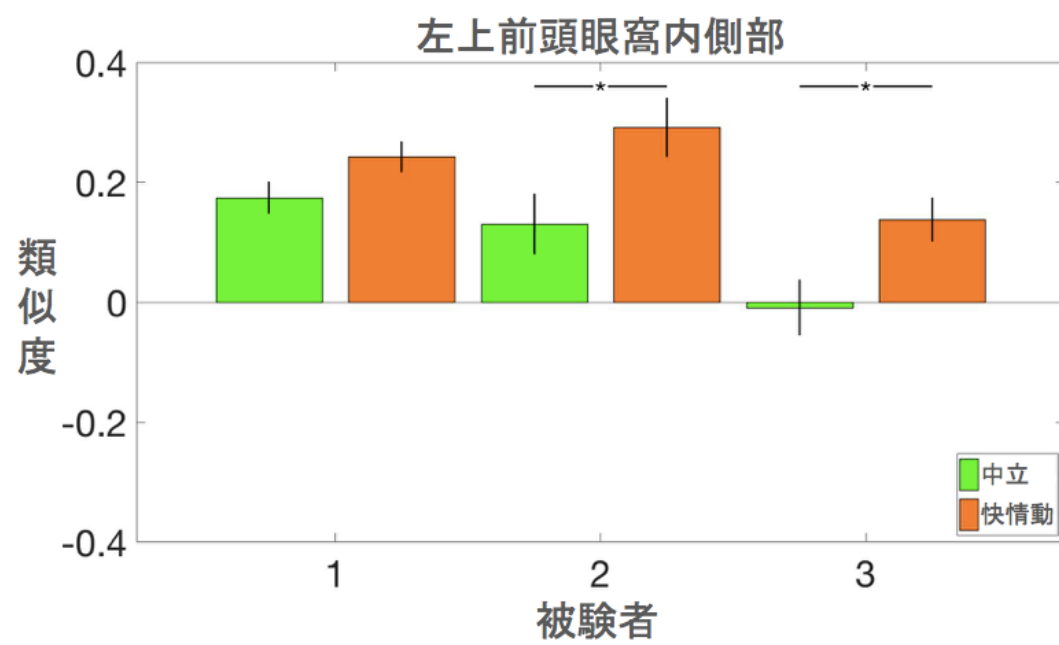
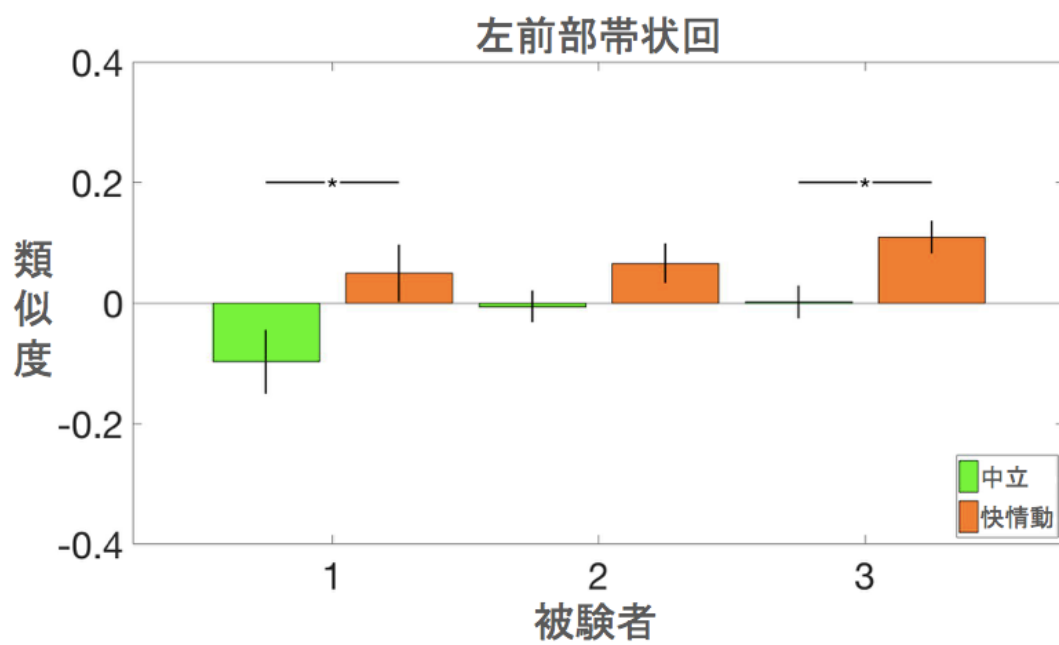


図 3.3 fMRI 実験における条件別の短期報酬選択回数 (各条件共に全試行回数 50 回中)

活動パターンを試行平均したものと、中立条件・快情動条件それぞれの短期報酬選択時の各試行における脳活動パターンとの類似度に対し、後者が前者に対して有意に上昇しているかどうか検定した。類似度として相関係数を採用している。被験者内で関心領域ごとに全試行の類似度に対し条件間の 2 標本 t 検定を行った結果、全被験者で条件間に有意差があった領域は確認されなかった。被験者 2 名以上に危険率 5% で有意差があった関心領域として、左前部帯状回、左上前頭眼窩内側部、左被殻が確認された (図 3.4)。長期報酬選好を表現する脳活動との類似度に関しては条件間で有意差が生じなかった (付録, 図 5.1)。



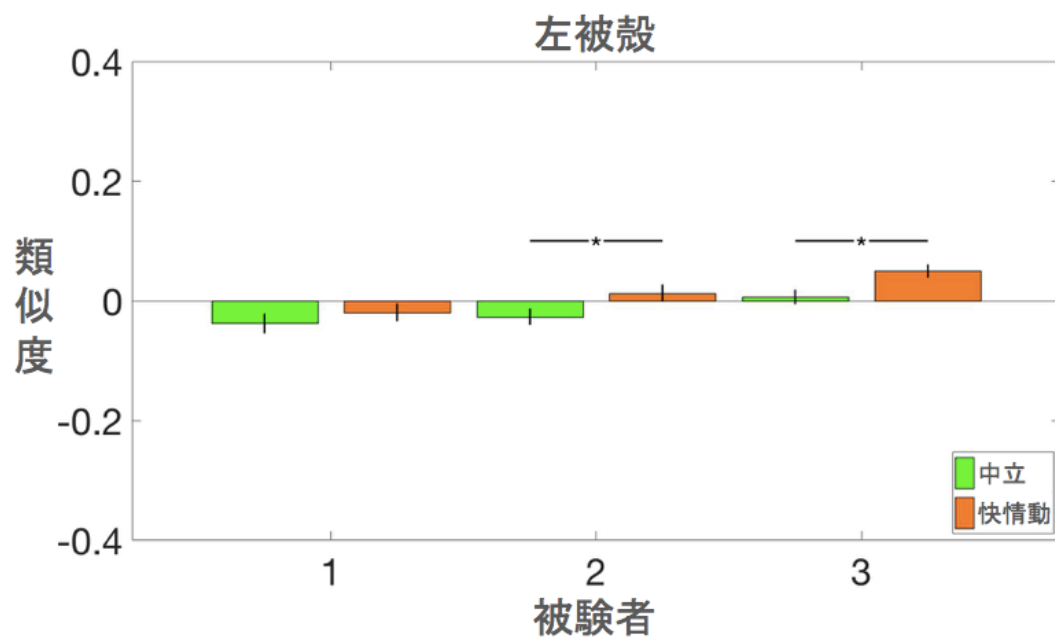


図 3.4 条件間の trial ごとの左前部帯状回 (上段) 及び左上前頭眼窩内側部 (中段) 及び左被殻 (下段) における短期報酬選択時の脳活動との類似度。アスタリスクは条件間の 2 標本 t 検定により p 値が 0.05 を下回った被験者を表す。

第4章 考察

時間割引率の推定のための行動課題において、先行研究と整合的な快情動の時間割引率への影響が見られた被験者とそうでなかった被験者が生じた。この理由を考察するために、全被験者 ($n = 13$) 間で、快情動の時間割引率への効果 (快情動条件における時間割引率から中立条件における時間割引率を減算したもの) と不快-快度の標準偏差でスピアマンの順位相関を検証したところ (図 4.1)、中程度の有意な相関が見られた (Spearman's $\rho = 0.577$, $p = 0.0386$)。不快-快度の標準偏差は惹起されやすさを表していると考えられ、この値が低い被験者は、本実験で使用した動画セットでは快情動を惹起しにくかったと考えられる。このような被験者に対しては、この実験のパラダイムにおいては、行動課題での快情動条件での動画数が少なくなるため、同じ動画の提示が増加し、情動が惹起されづらく、時間選好へのプライミングの影響が期待と逆方向に動いた可能性が示唆される。また、今回快情動

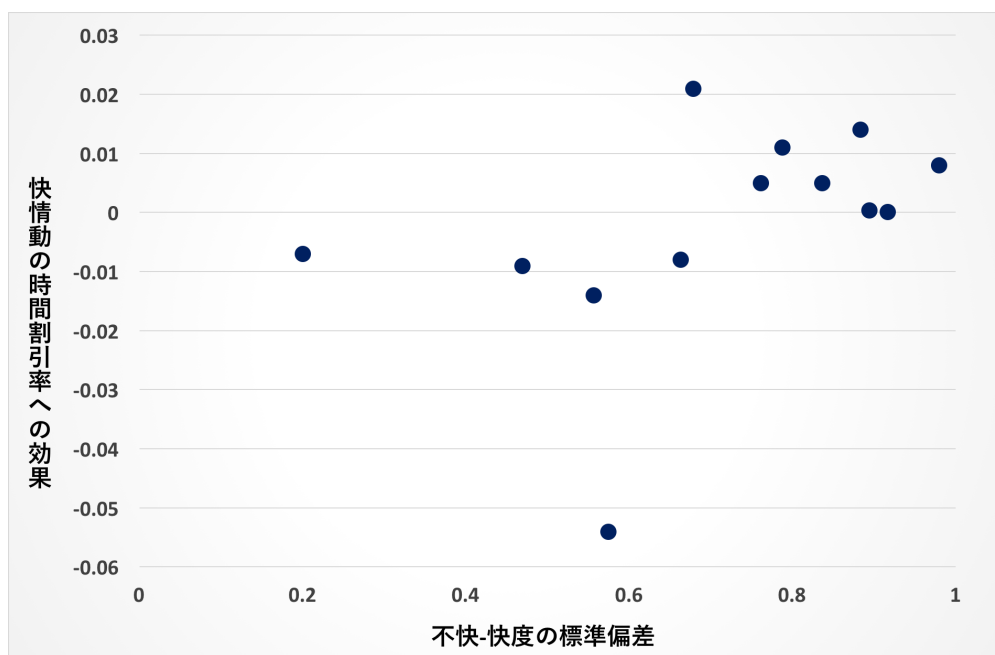


図 4.1 快情動の時間割引率への効果と不快-快度の標準偏差の被験者間での関係。Spearman's $\rho = 0.577$, $p = 0.0386$, $N = 13$.

プライミングによって短期報酬選択の脳活動パターンが誘発されることを示唆され

る結果を得られたものの、その原因は不明のままである。先行研究としては、快情動とドーパミンの投射が関連しており、それにより認知制御が必要とされる行動の調節が行われているという知見 [22] や、ドーパミンの前駆体である L-dopa を投与した被験者がプラシーボ群よりも時間割引率が上昇していたという知見 [5] 等が存在し、ドーパミンの関与が示唆されている。今後は快情動と時間割引率上昇の媒介物としての神経伝達物質の作用機序も含めたメカニズムの解明が待たれる。

第 5 章 結論

fMRI で計測した時間割引課題実行中の脳活動データから短期報酬と長期報酬の選択肢をデコーディングした。その結果、時間割引に関わるとされる脳領域の大部分において高い判別成績が得られた。この結果から時間選好を表現している神経活動パターンの存在が示唆される。また、快情動プライミングを与えた際、個人特性としての時間割引率から算出した等価な選択肢に対して短期報酬の選択回数が増加し、その時の脳活動パターンは中立時の脳活動パターンに比して短期報酬選択を表現する脳活動パターンとの類似度が有意に高いという結果を得た。その際に、時間割引率に関わるとされる脳領域の中でも、左前部帯状回、左上前頭眼窩内側部、左被殻が快情動の影響を受けやすい領域であると示唆される結果を得た。本研究の結果から、短期報酬選択に関わる脳活動を快情動が調節し、時間割引率を上昇させているということが示唆される。

謝辞

はじめに、本研究を行うにあたり、終始、全面的なご指導をしていただき大変お世話になった ATR 脳情報通信総合研究所数理知能研究室田中沙織室長に深く感謝申し上げます。また、ATR という素晴らしい研究環境で計算論的神経科学という素晴らしい研究分野に従事させて頂く機会を与えてくださった川人光男所長に深く感謝申し上げます。また、数理情報学研究室に受け入れて下さり、セミナー等での多くのご指導や、本論文の審査をしてくださった池田和司教授に深く感謝申し上げます。松本健一教授、森本淳准教授には、本論文の審査を引き受けてくださったこと深く感謝申し上げます。吉本潤一郎准教授、久保孝富准教授、佐々木博昭助教にはセミナーで貴重なご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。吉田和子研究員、山田貴志研究員、酒井雄希研究員、守谷大樹研究員、山下歩研究員には様々なご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。先輩の高木優さん、千代原真哉さんは様々な場面で助けて下さりました。深く感謝申し上げます。また、研究活動を支えてくださった数理知能研究室秘書の内田抄代子さんに深く感謝申し上げます。そして、共に研究生活を送った計算神経科学研究室・数理情報学研究室の学生の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] Ainslie G. Specious reward: a behavioral theory of impulsiveness and impulse control. *Psychological Bulletin*, 82(4). 1975
- [2] S Frederick, G Loewenstein, T O'donoghue. Time discounting and time preference: A critical review. *Journal of economic literature*, 40(2). 2002
- [3] Mazur, J. E. An adjusting procedure for studying delayed reinforcement. In M. L. Commons, J. E. Mazur, J. A. Nevin, and H. Rachlin (Eds.), *Quantitative analyses of behavior*, Vol. 5. The effect of delay and of intervening events on reinforcement value (pp. 55-73). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum. 1987
- [4] Peters J, Büchel C. The neural mechanisms of inter-temporal decision-making: understanding variability. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(5). 2011
- [5] Alex Pine, Tamara Shiner, Ben Seymour, and Raymond J. Dolan. Dopamine, Time, and Impulsivity in Humans. *The Journal of Neuroscience*, 30(26). 2010
- [6] Hariri AR, Brown SM, Williamson DE, Flory JD, de Wit H, Manuck SB. Preference for immediate over delayed rewards is associated with magnitude of ventral striatal activity. *The Journal of Neuroscience*, 26(51). 2006
- [7] Kable JW, Glimcher PW. The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nature Neuroscience*, 10(12). 2007
- [8] Tanaka SC, Doya K, Okada G, Ueda K, Okamoto Y, Yamawaki S. Prediction of immediate and future rewards differentially recruits cortico-basal ganglia loops. *Nature Neuroscience*, 7(8). 2004
- [9] Hirsh JB, Guindon A, Morisano D, Peterson JB. Positive mood effects on delay discounting. *Emotion*, 10(5). 2010
- [10] Wilson M, Daly M. Do pretty women inspire men to discount the future?. *Proceedings Biological Sciences*, 271(Suppl 4). 2004
- [11] Bram Van den Bergh, Siegfried Dewitte and Luk Warlop. Bikinis Instigate

- Generalized Impatience in Intertemporal Choice. *Journal of Consumer Research*, 35, 2008
- [12] Li X. The effects of appetitive stimuli on out-of-domain consumption impatience. *Journal of Consumer Research*, 34(5). 2008
 - [13] Drichoutis, Andreas, Nayga, Rodolfo, Eliciting risk and time preferences under induced mood states, MPRA Paper, 25731. 2010
 - [14] Shan Luo, George Ainslie and John Monterosso. The behavioral and neural effect of emotional primes on intertemporal decisions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(3). 2014
 - [15] Alan N. Hampton and John P. O'Doherty. Decoding the neural substrates of reward-related decision making with functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(4). 2007
 - [16] Yu-Feng Huang, Chun Siong Soon, O'Dhaniel A. Mullette-Gillman, Po-Jang Hsieh. Pre-existing brain states predict risky choices. *Neuroimage*, 101. 2014
 - [17] Samson AC, Kreibig SD, Soderstrom B, Wade AA, Gross JJ. Eliciting positive, negative and mixed emotional states: A film library for affective scientists. *Cognition and Emotion*, 30(5). 2016
 - [18] Russell JA, Barrett LF. Core affect, prototypical emotional episodes, and other things called emotion: dissecting the elephant. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76(5). 1999
 - [19] Wouter van den Bos, Christian A. Rodriguez, Julie B. Schweitzer and Samuel M. McClure. Connectivity Strength of Dissociable Striatal Tracts Predict Individual Differences in Temporal Discounting. *The Journal of Neuroscience*, 34(31). 2014
 - [20] Tzourio-Mazoyer N, Landeau B, Papathanassiou D, Crivello F, Etard O, Delcroix N, Mazoyer B, Joliot M. Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, 15(1). 2002
 - [21] Yamashita O, Sato MA, Yoshioka T, Tong F, Kamitani Y. Sparse estima-

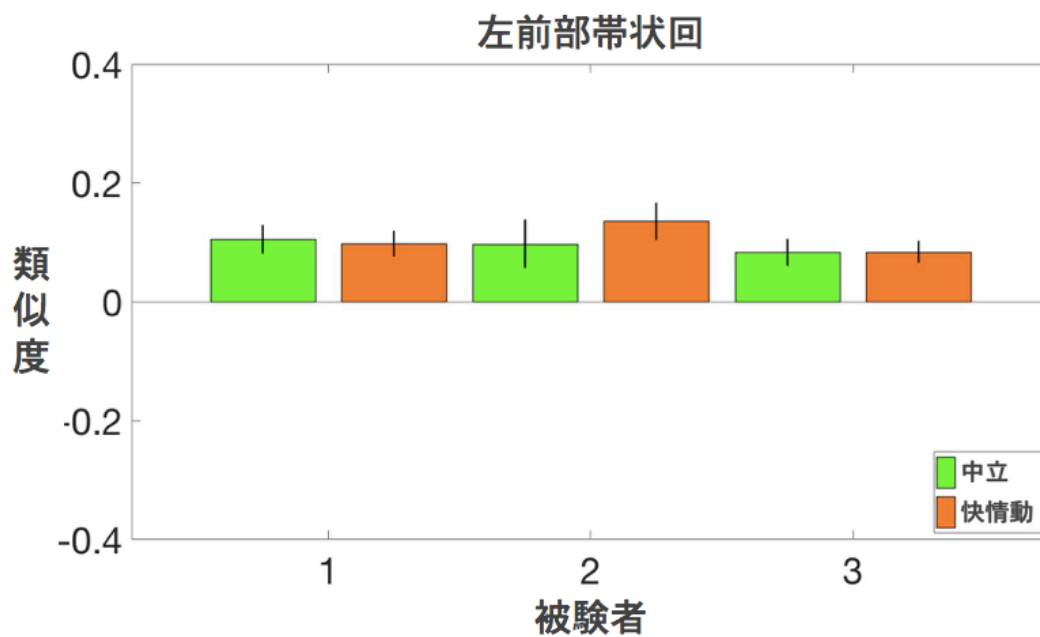
tion automatically selects voxels relevant for the decoding of fMRI activity patterns. *Neuroimage*, 42(4). 2008

- [22] Ashby FG, Isen AM, Turken AU. A neuropsychological theory of positive affect and its influence on cognition. *Psychological Review*, 106(3). 1999

付録

長期報酬選好を表現する脳活動との類似度

短期報酬選択時の脳活動と長期報酬選好を表現する脳活動との trial ごとの類似度に対して有意水準 5 % で条件間の 2 標本 t 検定を行ったところ、全被験者において 3 領域とも有意差は生じなかった。



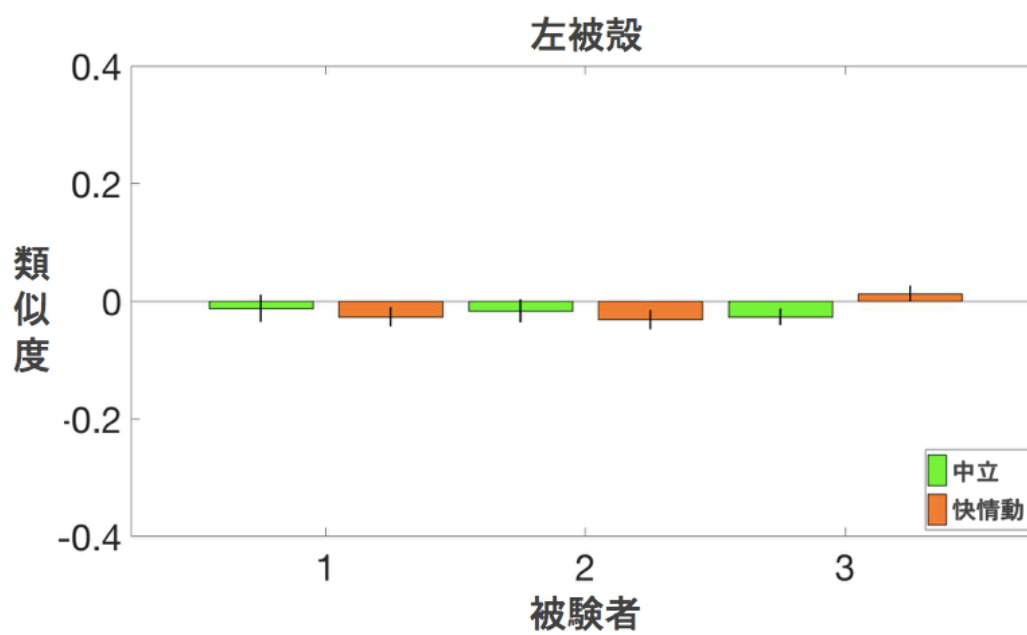
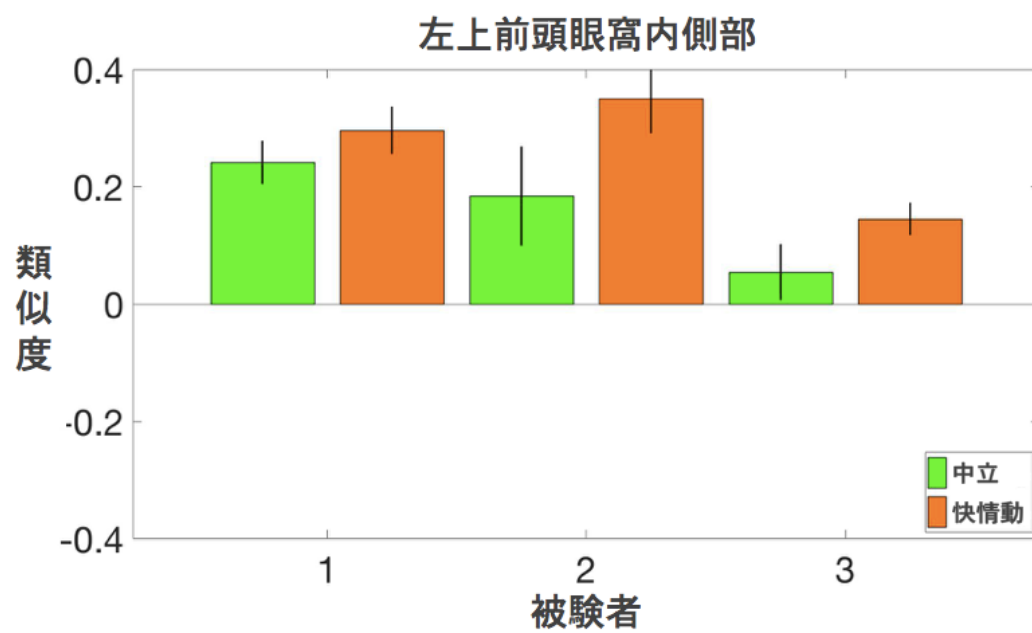


図 5.1 条件間の trial ごとの左前部帯状回 (上段) 及び左上前頭眼窩内側部 (中段) 及び左被殻 (下段) における長期報酬選好を表現する脳活動との類似度。