

博士論文

知覚に基づく意思決定に確率情報と過去の意思決定が
影響を及ぼす神経メカニズムの解明

金子 宜之

0. 要旨	5
1. 序文	6
1.1. 研究の背景	6
1.2. 信号検出理論	14
1.3. 機能的磁気共鳴画像法の原理と方法	18
1.4. 本研究の目的	21
2. 方法	24
2.1. 研究対象	24
2.2. 心理課題	24
2.3. 行動記録の解析	30
2.4. 信号検出理論を用いた解析	31
2.5. 機能的磁気共鳴画像データの取得	32
2.6. 機能的磁気共鳴画像データの前処理と解析	33
2.7. 意思決定のバイアス効果に関連する領域の同定	34
2.8. 脳賦活と意思決定の計算指標の相関	36
3. 結果	38
3.1. 確率情報と過去の試行の意思決定への影響	38

3.2.	確率情報と過去の試行の意思決定指標への影響	41
3.3.	確率情報と過去の試行の脳活動への影響	43
3.3.1.	probability cue と関連した賦活がみられる脳領域	43
3.3.2.	過去の意思決定と関連した賦活がみられる脳領域	44
3.3.3.	確率情報と過去の意思決定の交互作用がみられる脳領域	51
3.4.	脳活動と意思決定指標の相関性	51
4.	考察	53
4.1.	意思決定に影響を及ぼす過去の意思決定の要素	54
4.2.	意思決定とその計算処理に及ぼす影響の違い	55
4.3.	確率情報と過去の意思決定に関連した神経回路網の違い	57
4.3.1.	確率情報の影響がみられた脳領域	58
4.3.2.	過去の意思決定の影響がみられた脳領域	59
4.3.2.1.	三段階意思決定モデルとの関連	59
4.3.2.2.	作動記憶および注意機能との関連	61

4.4. 経験と事前情報の意思決定へのバイアスの概念的枠組み	63
5. 謝辞	68
6. 引用文献	69
7. 資料	83

0. 要旨

ヒトが不明瞭な感覚刺激に基づいて意思決定を行う場合、その決定は過去の経験や刺激出現に関する確率情報に影響されることがわかっている。しかし、経験に依存した意思決定と確率情報に依存した意思決定の関連性についてはわかっていない。本研究は、ターゲット検出課題で得られたデータに信号検出理論を適用することで、直前の意思決定および確率情報が異なる意思決定指標に影響を及ぼすことを示した。さらに、機能的磁気共鳴画像を用いて、直前の意思決定と確率情報が異なる脳領域の賦活に影響を及ぼすことを示した。これらの結果から、過去の意思決定および確率情報は異なる機序を介して知覚に基づく意思決定に影響を及ぼすことが示唆された。

1. 序文

1.1. 研究の背景

ヒトは環境を認知する能力を持ち、認知された情報に基づいて意思決定を行い、意思により行動する。生活の様々な場面においては、知覚した情報を利用して適切な意思決定が行われることが適応的行動の条件となる。これらについてはヒトや動物の神経科学的探索に加え、コンピューターを用いたシミュレーション研究が行われ、メカニズムや論理構造が明らかになりつつある。一方、対象の知覚が困難な場面や、知覚された情報が不明瞭である場面においても、感覚情報以外の知識を動員し、推測の元で意思決定を行いうることがヒトの特徴である^{1,2}が、その複雑性からシミュレーションが困難であり、メカニズムが十分理解されていない。こうした条件における意思決定の過程を明らかにすることは、ヒトに特有な高次の判断のメカニズムを解明するために重要である。

ヒトや動物の神経生理学的探索から、知覚に基づいた意思決定の処理過程は三つの段階から構成されると考えられている³⁻⁵（以下本論文においては三段階意思決定モデルと呼ぶ）（図 1）。第一段階は、感覚情報から意思決定に必要な情報が抽出され、それが感覚野における神経細胞の発火として表現される過

程である。第二段階では、第一段階で抽出された情報が下流にあたる前頭葉及び頭頂葉で読み出され、情報の加算（accumulation）が行われる過程である。第三段階では、加算された情報に対して、事前に設定された基準が適用される過程であり、この段階で最終的に意思決定がなされる。第一段階における意思決定に用いられる情報を *evidence* と呼び、第二段階において加算された *evidence* を *decision variable* と呼び、第三段階における基準を *decision criteria* と呼ぶ。

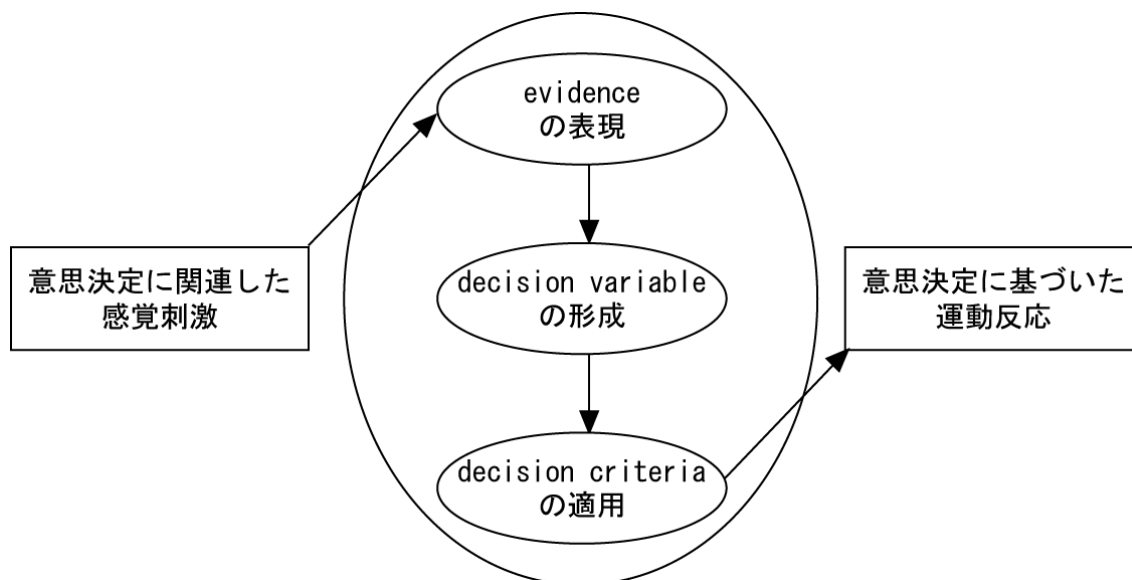


図 1 三段階意思決定モデルにおける意思決定の処理過程 楕円が脳内の処理過程、長方形が処理過程に対する入出力を示す。第一段階で意思決定に必要な感覚情報が抽出され、*evidence* として表現される。第二段階で *evidence* が加算され *decision variable* が形成される。第三段階で *decision variable* に事前に設定された *decision criteria* が適用され特定の選択肢が採択される。（5 より改変）

三段階意思決定モデルは、次に述べるマカクザルを対象に視覚モダリティにおける知覚識別課題や知覚検出課題を用いた電気生理学研究から形成されたものである。視覚刺激の運動方向に関する知覚識別課題を実行しているマカクザル

ルにおいては、視覚野にある特定の運動方向を反映する神経細胞の活動がサル
の意思決定と関連し、この細胞を電気刺激することで意思決定に変化が生じる
ことが明らかになった^{6,7}。これらの知見から、この視覚野の神経細胞の活動は
意思決定に用いられる感覚情報、すなわち **evidence** を表現するものとみなされ
ている。次の段階である **evidence** の加算が行われる領域を同定するために、マ
カクザルに対し知覚識別課題を用いて、視覚野から入力を受け運動野に出力を
送る領域である外側頭頂間野の神経活動が調べられた⁸⁻¹⁰。これら知覚識別課
題を用いた研究で、知覚に基づく意思決定を行っているマカクザルの外側頭頂
間野にある神経細胞の発火頻度は視覚刺激の強度と呈示時間の両方に依存して
上昇し、意思決定を反映すること、視覚刺激の強度を一時的に変えることや視
覚野の神経細胞を電気刺激することにより発火頻度に変化が生じ、その変化は
運動反応が生じるまで保持されること、外側頭頂間野の神経細胞への電気刺激
により意思決定にバイアスが生じることなどの知見が得られた。これらの知見
から外側頭頂間野は **evidence** が加算され **decision variable** を形成する過程に関与
していると考えられている。これと類似した神経発火パターンは知覚識別課題
において前頭前野背外側部などの前頭葉内の領域でも観察されており、
evidence の加算処理は外側頭頂間野だけでなく、前頭葉においても行われる可

能性が指摘されている¹¹。これら知覚識別課題を用いた実験だけでなく、マカクザルを用い、視覚刺激を用いて運動の有無を検出させる知覚検出課題においても、頭頂間野の神経活動が視覚刺激の持続時間に従って上昇し、その意思決定や反応時間を反映することが Cook と Maunsell により示されている¹²。これらの知見から、知覚に基づいた意思決定における evidence の加算過程には、頭頂葉および前頭葉が関与していることがわかる。

知覚刺激に基づく意思決定に関する三段階意思決定モデルの最終段階では、evidence が加算されることで形成された decision variable に、判断基準である decision criteria が適用されるが³⁻⁵、これは以下のような神経生理学的知見を背景に得られたものである。マカクザルが意思決定後出来るだけ早くに運動反応をするように要求された場合、evidence の加算を反映する外側頭頂間野の神経活動がある一定の発火頻度まで上昇した直後に最終的意思決定を反映する運動反応が生じた¹³。これは、evidence の加算によって得られた decision variable に decision criteria が適用され、decision variable が decision criteria に達したことが検出されることで意思決定が生じることと解釈できる。しかし、この decision criteria がどのように設定されているのか、decision variable に decision criteria がどのようなメカニズムで適用されているかは未だに明らかになっていない。数

理モデルを用いた研究から、**decision variable** を計算する神経回路網において行われている可能性¹⁴ や大脳皮質のみではなく皮質外の領域が関与しているという可能性¹⁵ が推測されているのみである。

ヒトにおいて、三段階意思決定モデルの **evidence** の加算過程までについては、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging; fMRI) などの脳機能画像を用いた研究から知見が得られており、これらは機能解剖学的観点から前述のマカクザルにおける研究結果にほぼ相当すると考えられる。視覚刺激の分類課題を用いた fMRI 研究において、視覚刺激の強度に依存した賦活が視覚野で観察され、この賦活が意思決定を反映することから、視覚野の賦活が **evidence** と関連すると考えられている¹⁶。また、複数の研究でサル外側頭頂間野の相同領域として知られる頭頂間溝¹⁷ や前頭前野背外側部、下前頭回などの領域の活性化が **evidence** の加算状態、すなわち **decision variable** と関連することが示唆されている^{16, 18-21}。ただし、**decision criteria** の設定や **decision criteria** の **decision variable** への適用に関与する脳領域については未だに明らかになっていない。

このように、動物やヒトを用いた神経科学的な探索により、基本的な条件下における知覚に基づく意思決定の枠組みが明らかになりつつある。近年はより

高度な、感覚情報が不明瞭な条件における意思決定についての研究も行われている。このような条件においては知覚に基づく意思決定が様々な要因の影響を受け、ある特定の判断に偏ることがあり、バイアス効果と呼ばれている²²⁻²³。

これには外部状況を知識に基づいて推測し判断するという高次なメカニズムが関与すると考えられている。これを実験的に確かめるには、実験課題における難易度、すなわち明瞭性の統制を行った上で、最終的な判断に与える要因を評価する必要がある。これまでは、実験パラダイムにおける感覚情報の不明瞭性を統制することが技術的に困難であることから、一定した結果が得られにくく、そのメカニズムに関しては不明な点が多かった。

感覚情報が不明瞭な条件において知覚に基づく意思決定にバイアス効果を及ぼす代表的な要因としては、判別すべき対象の出現確率についての情報が知られている²⁴⁻²⁶。対象の知覚が困難な条件では、ある対象の出現確率が高いことを直前に呈示した場合、その対象が出現したと報告する確率が高くなり、低いことを呈示した場合には報告する確率が低くなることが確認されている。このメカニズムについては、意思決定と脳活動の同時記録により、確率情報呈示が意思決定に及ぼす影響について研究され²⁷⁻²⁹、解剖学的に頭頂間溝が関与している可能性が示唆されている。

このような実験的に設定された場面と異なり、実生活で知覚に基づき判断する場合において、決定の直前に対象の出現する確率が明示されることは極めて稀である。情報が不明瞭な条件において知覚に基づく判断を行う場合には、必ずしも感覚情報のみに基づいて意思決定を行うのではなく、それまでの経験に依存して判断を下すことが考えられてきた³⁰。行動学的研究では、不明瞭な刺激を用いた知覚検出課題や知覚識別課題において前の試行と同じ選択を繰り返す傾向が指摘され、試行前の経験に基づくバイアス効果と考えられている³¹⁻³³。更に、ヒトにおける機能画像研究においては、過去の試行を経験したことで、引き続き試行における判断が影響を受け、この影響は脳波や fMRI における脳賦活の程度の変化として捉えうることを示されている^{34, 35}。これまで、過去の経験は対象の出現確率の推定に利用されると考えられてきた^{2, 35-36}。過去の試行における経験は、対象の出現確率についての知識を変化させることで判断に影響を及ぼす、すなわち経験と事前に呈示された確率が共通のメカニズムを介して意思決定に影響を及ぼすことを前提として数理モデルが構築されてきた^{37, 38}。一方で、意思決定の経験は、出現確率呈示による意思決定とは独立したメカニズムを介している可能性も考え得る。しかし、経験に依存した意思決定と呈示された確率情報に依存した意思決定について、その階層性や独立性につい

て検討した研究はこれまでにない。これまで、統合失調症患者においては結論への飛躍バイアス³⁹や原因帰属バイアス⁴⁰など複数の認知過程におけるバイアス効果が統合失調症の妄想形成に関与する可能性が提案されており、意思決定におけるバイアス効果のメカニズムの解明が統合失調症などの精神疾患の理解を深めることも期待出来る。

知覚に基づく意思決定において最も単純な課題は知覚検出課題である。この課題における知覚検出という意思決定過程は、数学的には信号検出に対応すると考えることができ、モデルとしての数量的な関数による記述が可能となる。その代表的なものとして信号検出理論がある⁴¹。この手法では知覚に基づいた意思決定の処理を意思決定の対象である感覚刺激の弁別能（discriminability）と検出過程の基準（criteria）である閾値の二要因から構成される関数として取り扱う。この理論によれば、感覚情報が不明瞭な条件での知覚検出課題における意思決定は、ノイズと一緒にあったターゲット信号とノイズの数学的弁別としてモデル化できるため、信号検出理論を被験者の意思決定に適用することで、意思決定に先行する意思決定の経験や確率情報が及ぼす影響を定量的に評価することが可能と考えられる。

このような数理モデルからのアプローチに加え、経験や確率情報が知覚に基

づく意思決定の処理過程に及ぼすメカニズムの神経基盤を明らかにするために、脳機能画像研究からのアプローチが重要である。認知機能に關与する神経回路網を非侵襲的に評価する代表的な方法として fMRI がある。この手法を用いることで、ヒトの脳活動を比較的高い時間解像度と空間分解能で観察することが可能になる。脳賦活に対し一般線形モデルを適用し統計学的アプローチによって現在の試行及び過去の試行の要素と關連する領域を推定することで脳賦活に対する現在の試行と過去の試行の影響を評価することが可能である^{42, 43}。

次節以降では本研究で用いた信号検出理論および fMRI について本研究の目的に沿って詳述する。

1.2. 信号検出理論

知覚に基づく意思決定を数理モデルとして記述するために、これまで様々な方法が開発されているが、代表的な方法として信号検出理論^{41, 44} (図 2) が知られている。

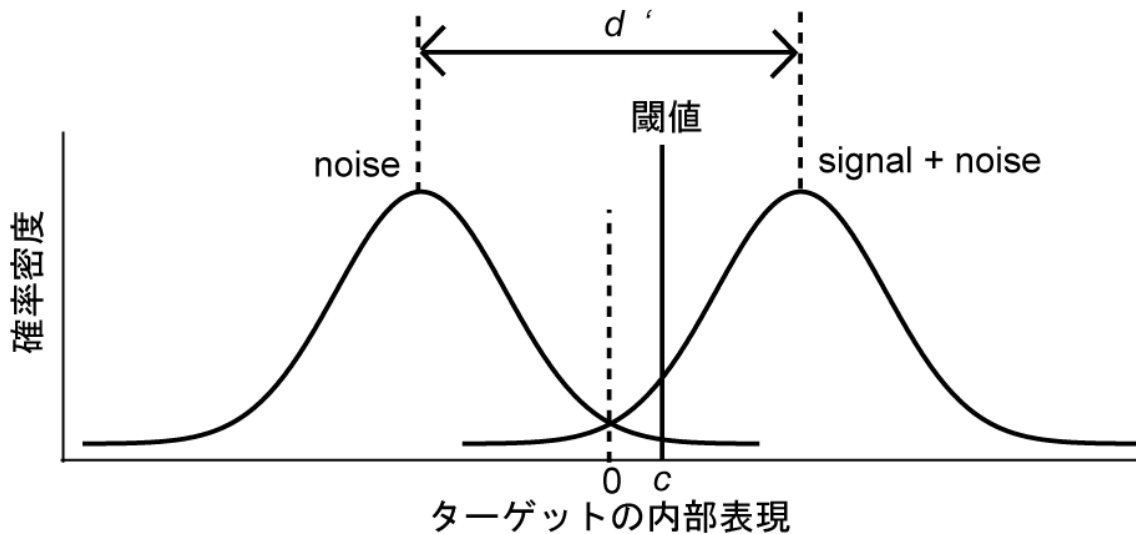


図2 信号検出理論 ターゲットが存在する条件における内部表現の出力 (signal+noise) とターゲットが存在しない条件における内部表現の出力 (noise) に関する確率密度分布関数を示す。垂直の線 c は意思決定の閾値であり、 c より出力が大きい場合はsignalが存在すると判断され、出力が小さい場合はsignalが存在しないと判断される。ここでは確率密度分布はsignalの有無に依存しない標準正規分布を示すと仮定されている。signalが存在する条件とsignalが存在しない条件における内部表現の平均値の差を d' と呼ぶ (44より、一部改変)。

信号検出理論では、刺激検出の処理は検出対象である物理的ターゲットを強度に対応した一次元の心理量、すなわち内部表現に変換する過程と、内部表現を閾値と比較し刺激があるか無いかを判断する過程の二段階によって行われるとされている。最初の過程で出力された内部表現は外界から感覚器を経て脳に至るまでの全ての過程で生じた noise の存在により連続値をとり、ターゲットに由来する成分、すなわち signal が存在しない条件では noise が出力され、一方、signal が存在する条件では signal と noise の総和 (signal+noise) が出力される。出力は閾値と比較され、出力が閾値以上の値であれば signal が存在すると

判断され、閾値未満であれば **signal** が存在しないと判断される。ここで、刺激が実際に呈示されたときに被験者が刺激の存在を報告する条件付き確率を的中率と呼び、刺激が呈示されなかったにもかかわらず被験者が刺激の存在を報告する条件付き確率を誤警報率と呼ぶと、的中率は **signal+noise** の確率密度分布における閾値から無限大までの範囲での積分値に、誤警報率は **noise** の確率密度関数における閾値から無限大までの範囲での積分値に一致する。このとき、付加される **noise** の確率密度分布は **signal** の有無に依存しない標準正規分布を示すと仮定すると、**signal+noise** と **noise** の弁別しやすさ、すなわちターゲットについての弁別能 d' は以下の式で表される。

$$d' = z(\text{HR}) - z(\text{FAR})$$

ここで z は正規分布の累積関数の逆関数を表し、HR と FAR はそれぞれ的中率と誤警報率を表す。 d' が大きい、すなわち **signal+noise** の確率密度分布と **noise** の確率密度分布の中央値の距離が大きいと、**signal+noise** と **noise** の弁別の正確性が増し、 d' が小さい、すなわち **signal+noise** の確率密度分布と **noise** の確率密度分布の中央値の距離が小さいと、**signal+noise** と **noise** の弁別の正確性が減じる。

また、確率密度分布に対する閾値の相対的水準 c は以下の式で表される。

$$c = -(z(\text{HR}) + z(\text{FAR}))/2$$

ここで、 $c = 0$ の場合、すなわち signal+noise の確率密度分布と noise の確率密度分布の中央に閾値が存在する場合には意思決定の偏りはみられない。一方、 $c \neq 0$ の場合、すなわち signal+noise の確率密度分布と noise の確率密度分布の中央に閾値が存在しない場合には意思決定の偏りが生じることとなる。

このように、信号検出理論を用いると知覚検出のパフォーマンスを刺激弁別能と知覚検出の閾値という二つの独立した数学的指標で簡潔に記述することが可能になる。また、不明瞭な感覚情報に基づき知覚検出を行う条件について検討する場合には、実験上のターゲット、つまり課題に関連した感覚情報に由来する内部表現を数学的 signal とし、実験上のノイズ及び脳内に至るまでの処理過程で生じた全てのノイズに由来する内部表現を数学的 noise とした数学モデルを設定することで定量解析が可能となる。さらに不明瞭な感覚情報から判断する条件において判断に影響を与えうる要因の影響を定量化することも可能である。このため、この信号検出理論は知覚や意思決定についての多くの研究で利用されるようになった^{45, 46}。さらに、信号検出理論を用いて刺激検出課題を

数学的に定量化することで、定量的脳機能画像と合わせて評価することが可能となり、機能解剖学的知見と組み合わせることさまざまな要因が意思決定の処理過程のどの段階に影響を及ぼすかを明らかにすることが可能となる^{47,48}。

前節で述べた知覚に基づく意思決定に関する三段階意思決定モデルと信号検出理論の関連については、Gold と Shadlen⁴により以下の様な解釈が成され、この分野の研究結果を解釈するために多く用いられている。信号検出理論における内部表現は三段階意思決定モデルにおける **decision variable** に対応する。そして、信号検出理論における感覚刺激を内部表現に変換する過程は、三段階意思決定モデルにおける第一段階及び第二段階、つまり **evidence** を表現し加算して **decision variable** を形成する過程に対応する。また、信号検出理論において内部表現を閾値と比較する過程は、三段階意思決定モデルにおける第三段階、つまり **decision variable** に **decision criteria** が適用されることで最終的な意思決定が行われる段階に対応する。

1.3. 機能的磁気共鳴画像法の原理と方法

ヒトの知覚的意思決定を含めた認知機能の神経基盤を探る研究において、fMRI が広く用いられている。fMRI は磁気共鳴画像を用いた脳機能測定法であ

り、数秒単位の比較的高い時間解像度と数 mm 単位の比較的高い空間分解能で観察できる非侵襲的手法である。ここでは、fMRI の原理と統計手法について概説し、本研究における有用性について述べる。

脳内のある部位で賦活が生じた場合、その部位の局所血流量が増加し、酸素消費量を上回る血流量が供給される。その結果、近傍の毛細血管及び細静脈領域では還元型ヘモグロビンが減少し、酸化型ヘモグロビンが増加する。還元型ヘモグロビンは常磁性体であり、その減少で磁場が均一になり BOLD (bold oxygenation level dependent) 信号と呼ばれる MR 信号強度が増加する⁴⁹。賦活による BOLD 信号の変化を統計的手法により検出し画像化するのが fMRI の基本原理となる。fMRI においては、BOLD 信号を鋭敏に捉えるために、連続高速撮像法である EPI (echo planar imaging) 法⁵⁰が用いられる。賦活を与える実験デザインとしては複数の種類があるが、本研究では事象関連デザインを用いた⁵¹。このデザインは短時間の課題をランダムに間隔をおいて実施し、課題に伴う信号変化を経時的に測定する方法であり、脳賦活の検出力が小さいという欠点があるものの、柔軟な課題設計が可能である。

fMRI データの処理には Statistical Parametric Mapping (SPM)が用いられることが多い⁵¹。SPM においては、MRI 装置により取得した BOLD 信号のデータに

対して、前処理を行った上で統計的推論が行われる。前処理には時間補正（スライス毎に異なる撮像タイミングを補正する）、動き補正（撮像中に生じた頭部の動きを補正する）、標準化（標準脳のテンプレート画像に被験者個人の脳画像を合致させる）、空間的平滑化（検定の妥当性を改善するために近傍のデータを平均化する）などの過程がある。前処理後の統計解析として、被験者個人のデータに対し一般線形モデル（General Linear Model; GLM）を適用して課題と関連した領域を推定する。fMRI で用いられる一般線形モデルは重回帰分析であり、条件や要因、あるいは低周波ノイズ、体動などの説明変数が回帰子としてモデルの計画行列に挿入される。一方、イベントと BOLD 信号の関連を示した Hemodynamic Response Function (HRF) と呼ばれる関数を脳から出力されるインパルス応答と仮定する。計画行列と HRF を畳み込むことで fMRI データを説明するモデルを構築する。そして、このモデルを実際に観察された fMRI データに当てはめ、一般線形モデルの回帰係数を推定する。次に、関心をもった回帰係数の組み合わせ（コントラスト）に対してボクセルごとに統計的検定を行い、課題と関連した脳賦活が生じた領域を推定することができる⁵²。

このような手法を、認知課題実行中の fMRI により得られたデータに適用すると、以下に述べるように複数の要素が別々の神経基盤によって処理されてい

るか、共通の神経基盤によって処理されるかを推測することができる⁵³。まず、意思決定における要素 1 が認知処理 a に影響を及ぼすが認知処理 b に影響を及ぼさず、要素 2 が認知処理 b に影響を及ぼすが認知処理 a に影響を及ぼさない場合を考える⁵⁴。このとき、認知処理 a に関与する脳領域 A は要素 1 に関連した賦活を示すが、要素 2 とは関連した賦活を示さないと予想できる。一方、認知処理 b に関与する脳領域 B は要素 2 に関連した賦活を示すが、要素 1 とは関連した賦活を示さないと考えられる。このことから、ある脳領域が二つの要素のうち的一方のみに関連した賦活を示し、別の脳領域が二つの要素のうちのもう一方のみに関連した賦活を示すとき、二つの要素が異なる神経基盤によって処理されると推測することができる。これとは別に、ある脳領域の賦活が二つの要素に共に関連しており、さらに要素間の交互作用がみられた場合、二つの要素が共通の神経基盤によって処理されることが推測される⁵⁵。このように fMRI を用いることで認知処理と脳領域の関連性を推測し、意思決定処理の神経基盤について理解を深めることが可能である。

1.4. 本研究の目的

これまで述べてきたように、不明瞭な状況での知覚に基づく意思決定におい

て、直前に与えられた確率情報や先行する試行における経験自体が、引き続く意思決定を変化させることが知られている。しかし、これらが共通のメカニズムを介して知覚に基づく意思決定に影響を及ぼすのか、それとも異なったメカニズムを介して知覚に基づく意思決定に影響を及ぼすのかについては明らかにされていない。さらに、先行する試行における刺激や意思決定など、経験のいかなる要素が意思決定に影響を及ぼすのかについても十分にわかっていない。

これらの点を明らかにし、知覚に基づく意思決定にバイアス効果をもたらす神経回路網を同定することが本研究の目的である。本研究では、知覚や注意に関する実験で多く用いられてきた視覚刺激であるガボール刺激に白色ノイズを付加することにより、被験者間でほぼ一定の正答率になるように知覚対象の不明瞭さを統制した。各試行において、ガボール刺激が呈示される直前には、ターゲット刺激が呈示される確率を呈示した。この課題における意思決定に関する行動学的データを用いて、知覚検出に影響を及ぼす過去の試行の要素を同定し、直前に呈示された確率情報と先行する試行における経験が知覚検出に及ぼす影響を比較した。次に、行動学的データに信号検出理論を適用し、確率情報と先行する試行における経験が意思決定の処理過程に及ぼす影響を意思決定指標として定量的に評価し比較した。最後に、fMRI を用いて確率情報と先行する試

行における経験が脳活動に及ぼす影響を評価し比較した。

2. 方法

2.1. 研究対象

19人の右利きの健常被験者（男性9名、女性10名、年齢：21-44歳）が今回の実験に参加した。全ての被験者について、神経・精神疾患の既往、体内金属がないことが確かめられ（資料1）、実験の趣旨、内容、MRI実験に伴いうる危険について十分な説明を行い、この研究に参加するために書面にて同意を得た（資料2）。この研究は東京大学医学部の研究倫理審査委員会〔受付番号2968：機能的MRIを用いたヒト前頭葉制御に関する研究〕及び玉川学園心理実験・脳活動計測実験倫理・安全委員会〔受付番号C23-8：機能的MRIを用いた前頭葉制御に関する研究〕にて承認された。3名の被験者のデータは機能的磁気共鳴画像（fMRI）実験中に頭部の過剰な動きがみられたために以降の解析には用いなかった。

2.2. 心理課題

被験者はfMRIスキャナの中で視覚刺激の運動検出課題を行った（図3）。それぞれの試行の最初に、画面中央に確率情報を示す手がかり刺激（probability cue）が呈示された。この刺激は下部が緑色、上部がマジェンタの長方形（0.6

x 3.0°) であり、全体に占める緑色の割合がその試行においてターゲット刺激である運動刺激が出現する確率を示した。Probability cue として、ターゲット刺激の出現確率が 67%であることを示す Cue-High とターゲット刺激の出現確率が 33%であることを示す Cue-Low の二種類の手がかり刺激を用いた。半分の試行では Cue-High が、残り半分の試行では Cue-Low が呈示された。被験者には probability cue とターゲット刺激が出現する確率の関係が事前に伝えられており、probability cue を用いて意思決定を行うよう教示された上で課題に臨んだ。

Probability cue は 1 秒間呈示され、その 2 秒後に白色ノイズが付加された水平方向のガボール刺激（輝度変調正弦格子、空間周波数：1.33cpd、正弦波包絡波の半値全幅：2.3°）が呈示された（図 4）。このガボール刺激は半分の試行では 5.0°/秒の速度で下向きに運動しており（Target (+)条件）、残り半分の試行では静止していた（Target (-)条件）。ターゲット刺激の実際の出現確率は先行する手がかり刺激が示す確率と一致しており、ターゲット刺激は Cue-High 刺激呈示後の 67%の試行と Cue-Low 刺激後の 33%の試行で呈示された。被験者は意思決定が終了すると人差し指と中指で二つのボタンを同時に押すことで意思決定の終了を報告した。この報告はガボール刺激呈示後 1.5 秒間以内に行うように要求された。ガボール刺激出現からこの報告までに要した時間を反応時間と

定義した。ガボール刺激はボタン押しの時点まで、最大 1.5 秒間呈示された。

ガボール刺激呈示開始 1.5 秒後に意思決定と運動反応の関係を示す手がかり刺激 (decision-response mapping cue) が呈示され、被験者は decision-response mapping cue に基づいて二つのボタンのうちの一つを押し、ガボール刺激の下向き運動があったか否かを報告した。Decision-response mapping cue は画面中心の十字の左右にある「Y」という緑色の文字と「N」というマゼンタ色の文字 (それぞれ「Yes」「No」を意味する) で構成されていた。Decision-response mapping cue は 1 秒間呈示され、その間に被験者はターゲット刺激が呈示された、すなわちガボール刺激が下向きに動いていると判断した場合 (Decision (+) 試行) は「Y」の文字がある側のボタンを、ターゲット刺激が呈示されなかったと判断した場合 (Decision (-) 試行) は「N」の文字がある側のボタンを押すことを要求された。右側のボタンを押すためには右手の中指を、左側のボタンを押すためには右手の人差し指を用いた。「Y」と「N」の文字がある位置は試行ごとに疑似ランダムに変化し、半分の試行で「Y」の文字は十字の左に、残り半分の試行では「Y」の文字は十字の右に呈示された。そのため、被験者は同じ判断を報告するために右手の人差し指と中指をほぼ 50% ずつの確率で用いた。この方法を用いて意思決定の種類と運動効果器の種類を区別することで、意思

決定から運動準備や実行に関わる過程を除外することが可能になった。また、過去の意思決定によるバイアス効果から過去の運動反応によるバイアス効果を除外することも可能になった。この課題では試行ごとに正解か不正解かのフィードバックは呈示しなかったが、それぞれのセッションの最後に正答率が呈示された。

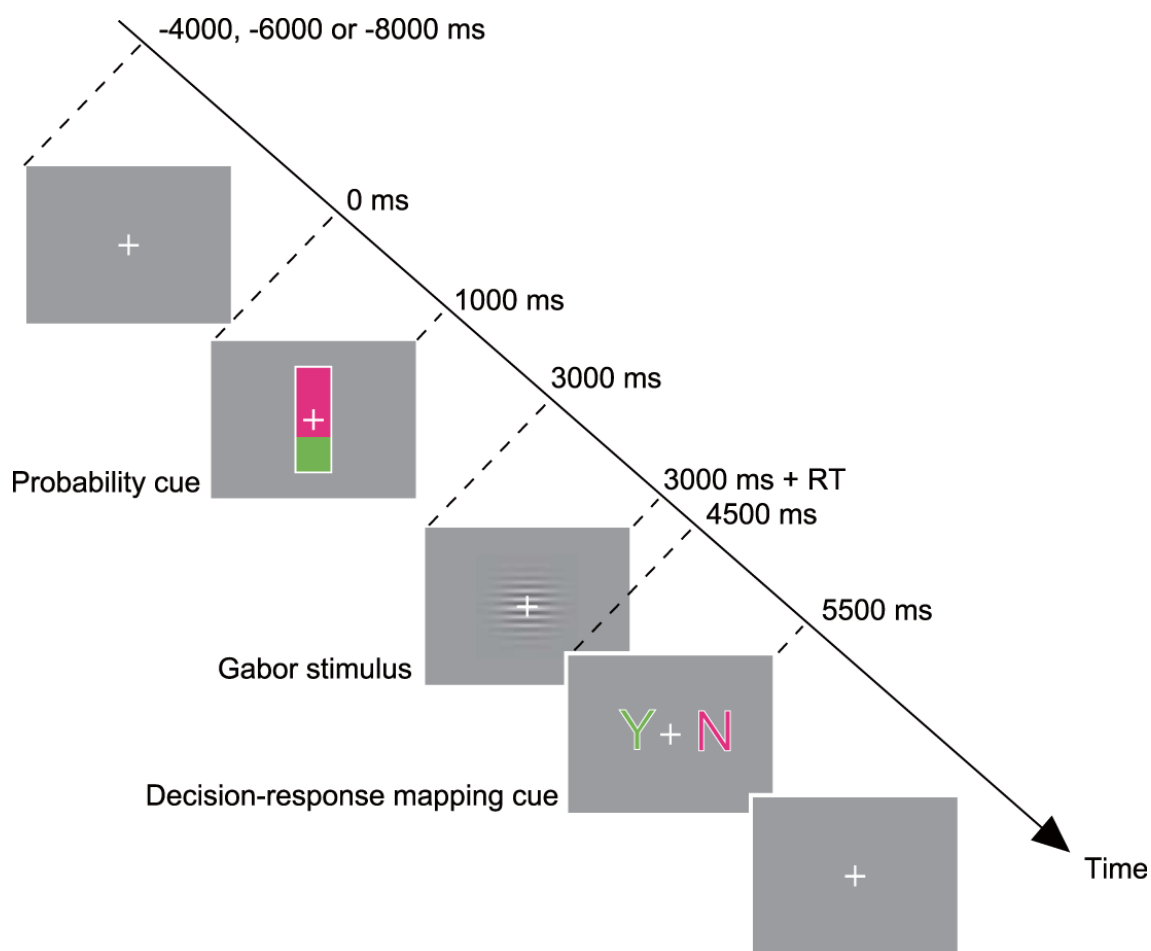


図 3 本研究で用いた運動検出課題 被験者はノイズ下に呈示されたガボール刺激の下向き運動をターゲットとした知覚検出の意思決定を行った。ガボール刺激が呈示される前にターゲット刺激の出現確率が probability cue の緑色の部分の大きさによって被験者に呈示された。被験者はガボール刺激に基づき意思決定を行い、意思決定の終了を二つのボタンを同時に押すことで報告した。次

に decision-response mapping cue が呈示され、被験者は二つのボタンのうちの一つを押すことで被験者の意思決定を報告した。RT：反応時間。

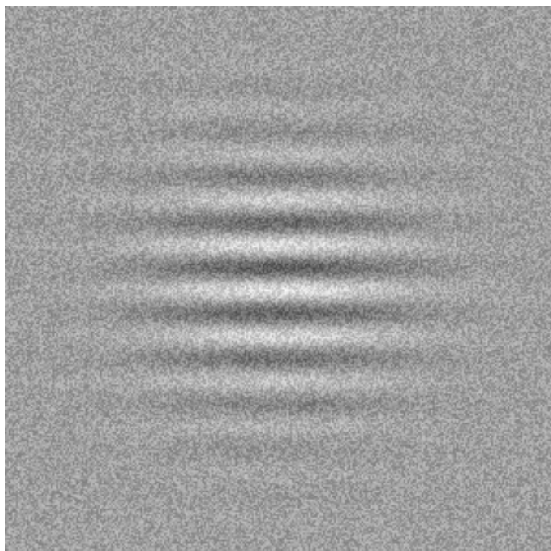


図 4 白色ノイズが付加されたガボール刺激。本図ではガボール刺激がみやすいように白色ノイズの強度を下げています。

それぞれのセッションは 49 回の試行で構成された。試行間の時間間隔、つまり decision-response mapping cue が消えてから次の試行での確率手がかり刺激が出現するまでの時間は 4、6、8 秒のいずれかであり、試行間ごとに疑似ランダムに選ばれた。一つのセッションはおよそ 8 分間で、セッションの間、被験者は画面中央にある十字を注視するように指示された。被験者は全部で 8 セッションに参加し、fMRI 実験には約 65 分間を必要とした。

それぞれのセッションにおいて、Cue-High 条件と Cue-Low 条件、そして、Target (+)条件と Target (-)条件が、それぞれの条件が同じ頻度となるように、また、それぞれの試行の先行する試行についても Cue-High 条件と Cue-Low 条件、

そして、Target (+)条件と Target (-)条件が同じ頻度になるように疑似ランダムな順番で試行が配列された。

fMRI 実験の前に、被験者は練習セッションを 3-4 回行った。練習セッションを行う直前に、本実験で用いられる運動刺激検出課題について口頭で説明された。最初のセッションでは probability cue は呈示されず、コントラストが高いガボール刺激を用いた約 5 分の練習を行った。最初のセッションの後に、ガボール刺激の前に probability cue が呈示されること、Cue-High 出現後約 2/3 の確率で下向きに運動するガボール刺激が出現し、Cue-Low 出現後約 1/3 の確率で下向きに運動するガボール刺激が出現することが口頭で説明された。

Probability cue を用いた約 5 分のセッションを 1-2 回行い、課題の理解を確認した。最後の練習セッションを除き、被験者には正解についてのフィードバックが呈示された。最後の練習セッションにおいては再び probability cue が呈示されず、コントラストが低いガボール刺激系列とコントラストが高いガボール刺激系列のいずれかが試行毎に呈示された。それぞれの系列に対して、下向き運動が二つの試行で連続して検出されたら刺激コントラストが低下し、下向き運動が検出されなかったら刺激強度が上昇し、セッション終了時における両方の刺激コントラストの平均値が実験で用いられる変形ステアケース法⁵⁶を用い、

それぞれの被験者の正解率がおよそ 70%になるようにガボール刺激のコントラストを決定した。最後の練習セッションは約 7-8 分行われた。

2.3. 行動記録の解析

行動解析の最初に、現在の試行と先行する試行におけるターゲット検出に影響を及ぼす要素を同定した。そのために、意思決定の種類 (Decision (+) 及び(-)) を被説明変数としたマルチレベルロジスティック回帰分析を行った。レベル 1 の予測因子として、現在の試行における probability cue の種類 (Cue-High 及び-Low) とターゲット刺激の有無 (Target (+)及び(-)) に加え、先行する試行における probability cue の種類 (prev-Cue-High 及び-Low) 、ターゲット刺激の有無 (prev-Target (+) 及び(-)) 、意思決定の種類 (prev-Decision (+)及び(-)) が投入された。被験者の要素はレベル 2 の予測因子として投入された。意思決定に有意に影響を及ぼす要素を、赤池情報量基準⁵⁷に基づいた変数減少法にて同定し、Wald 統計量の確率を用いて除去検定を行った (閾値水準 $p < 0.05$)⁵⁸。この解析により、現在の試行におけるターゲット刺激の有無 (Target) 、現在の試行における probability cue の種類 (Cue) 、及び先行する試行の意思決定の種類 (prev-Decision) が有意に意思決定に影響を及ぼすことが明らかになった。

次に、マルチレベルロジスティック回帰分析にて意思決定に有意な影響を及ぼすと同定された要因の効果が他の要因の影響を受けるのか否かを評価するために、被験者ごとのターゲットを検出したと報告した (Decision(+)) 確率に対して Target、Cue 及び prev-Decision を被験者内要因として繰り返しのある三元配置分散分析を行った (閾値水準 $p < 0.05$)。また、反応時間に対しても同様に繰り返しのある三元配置分散分析 (閾値水準 $p < 0.05$) を行った。

2.4. 信号検出理論を用いた解析

次に、信号検出理論を用いて、確率の手がかり刺激と過去の意思決定がどのようにターゲット検出の処理に影響を及ぼしているかを調べた。現在の試行における probability cue の種類 (Cue-High 及び-Low) と先行する試行における意思決定の種類 (prev-Decision(+)及び(-)) のそれぞれの組み合わせに対して、被験者ごとの弁別能の指標 d' と閾値の指標 c を以下の式に従って計算した⁴¹。

$$d' = z(\text{HR}) - z(\text{FAR})$$

$$c = -(z(\text{HR}) + z(\text{FAR}))/2$$

ここで、 z は正規分布の累積関数の逆関数を表し、HRとFARはそれぞれの中率と誤警報率を表す。次に d' と c のそれぞれに対してCue及びprev-Decisionを被験者内要因として二元配置分散分析（閾値水準 $p < 0.05$ ）を行った。

さらに、被験者ごとの確率情報の利用の程度と過去の経験の利用の程度に関連性があるかを調べた。そのために、Cue-Low 試行と Cue-High 試行における c の差 (Diff c) と、prev-Decision(+)試行と prev-Decision(-)試行における d' の差 (Diff d') を被験者ごとに計算し、Diff c と Diff d' の線形相関の有意性を Pearson の積率相関分析を用いて評価した（閾値水準 $p < 0.05$ ）。

2.5. 機能的磁気共鳴画像データの取得

fMRI の撮像は玉川大学にて Siemens 社製の 3 テスラ MR 機器 (MAGNETOM Trio A Tim; Siemens, Germany) を用いて行われた。それぞれのセッションで 310 ボリュームの echo planar imaging (EPI) 画像を取得した。撮像条件は繰り返し時間 2100 msec、エコー時間 25 msec、マトリックスサイズ 64 x 64、ボクセルサイズ 3 x 3 x 3 mm、スライス数 35 枚、スライス間ギャップ 1 mm とした。画像取得のタイミングと試行の開始時間の間隔は試行ごとに 500 msec 刻みで変

化させた。また、全ての被験者の高分解能 T1 構造画像が取得された。撮像条件は繰り返し時間 2000 msec、エコー時間 1.97 msec、反転時間 900 msec、ボクセルサイズ 1 x 1 x 1.5 mm、スライス数 192 枚とした。

2.6. 機能的磁気共鳴画像データの前処理と解析

画像の前処理と統計解析には SPM8 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>) を用いた。撮像開始直後は BOLD 信号が不安定であるため、それぞれのセッションで得られた EPI 画像データの最初の 5 ボリュームは統計解析において除外された。残りの画像ボリュームは最初のボリュームを基準に頭部の位置とスライスタイミングの補正を行い、SPM に添付された EPI 画像テンプレートを用いて Montreal Neurological Institute (MNI)空間への標準化を行い、一辺 2mm のボクセルへのリサンプリングを行った後にガウスフィルタを用いた半値幅 8mm の平滑化を行った。

次に、一般線形モデルを用いて前処理をおこなった画像データを解析した。現在の試行における意思決定の種類 (Decision(+)及び(-))、ターゲット刺激の有無 (Target(+)及び(-))、probability cue の種類 (Cue-High 及び-Low)、先行する試行における意思決定の種類 (prev-Decision(+)及び(-)) の全ての組み合わせ

せに対して、ガボール刺激呈示中の一時的な活動がガボール刺激の呈示開始と同時に始まりガボール刺激の呈示時間と同じ時間持続するイベントとして別々にモデル化された。また、probability cue 呈示中の一時的な活動も probability cue の呈示開始と同時に始まり probability cue の呈示時間と同じ時間持続するイベントとして別々にモデル化された。この一般線形モデルには全ての試行における decision-response mapping cue の呈示に対する一時的な反応に関する説明変数も追加された。ガボール刺激と decision-response mapping cue のいずれかに要求された時間の範囲内に反応を示さなかった試行は別個に関心のない共変量としてモデル化された。頭部の動きに伴う信号変化を是正するために頭部の動きに関する 6 方向 (x 軸、y 軸、z 軸方向の移動、および各軸を中心とした回転) のパラメータがモデルに追加された。全てのイベントは標準的な血流動態反応関数を用いて畳み込みされた。データはハイパスフィルタ (カットオフ周波数 0.01Hz) によりフィルタリングされた。

2.7. 意思決定のバイアス効果に関連する領域の同定

最初に probability cue が呈示されている時の活動が probability cue の種類 (Cue-High 及び-Low) の影響を有意に受ける領域を探したが、このような領域

を見つけることは出来なかった。そのため、ガボール刺激呈示中の活動を対象に、特に Cue 及び prev-Decision の主効果、prev-Decision と Target との交互作用、そして Cue と prev-Decision との交互作用に関心を持って解析を行った。まず、一般線形モデルにおける条件特異的な効果を調べるために、ボクセルごとに回帰係数の推定を行い、関心を持った効果を説明するコントラストの画像を被験者ごとに作成した。次に、16 人の被験者のコントラスト画像に対して一標本 t 検定を行いパラメトリックマップを作成した。この t 検定において、まず全脳内のボクセルごとに閾値水準 $p < 0.001$ （多重比較補正なし）で検定を行い、更にクラスターサイズの検定を閾値水準 $p < 0.05$ （familywise error rate を用いた多重比較補正あり）で行った⁵⁹。有意なクラスターサイズを決定するためにモンテカルロシミュレーション⁶⁰を行い、連続する 11 ボクセル以上を有意な領域と定義した。

上記で同定された領域の活動に対し、Target、Cue 及び prev-Decision を独立変数とした分散分析を行った。この目的で、上記で同定された被験者集団での活動のピークを中心とした半径 8mm の領域において、それぞれの被験者での活動のピークを探した。それぞれのピークにおいて Target、Cue 及び prev-Decision の各条件の組み合わせごとに試行間の間隔と比較した信号変化

(percent signal change) を計算し、関心領域解析を行った。

2.8. 脳賦活と意思決定の計算指標の相関

次に Cue と prev-Decision に関連する脳賦活の個人差が意思決定指標における個人差と相関するか否かが調べられた。行動記録の解析から、Cue-Low が呈示された試行の方が Cue-High が呈示された試行よりも c が高いことが示された。この結果から、Cue-Low が呈示された試行の方が Cue-High が呈示された試行よりも大きな賦活を示す領域が c の変化に関与するのではないかと考え、Cue の種類が上記のパターンを示す脳賦活に及ぼす影響が大きい被験者では Cue の種類が c に及ぼす影響も大きくなるのではないかという仮説をたてた。この仮説を検証するために、それぞれの被験者において Cue-Low が呈示された試行と Cue-High が呈示された試行における賦活の違い (Diff act) を計算した。その上で、Diff act と行動解析において計算した Diff c の相関性を Pearson の積率相関分析を用いて評価した (閾値水準 $p < 0.05$) 。

また、行動記録から、prev-Decision(+)試行の方が prev-Decision(-)試行よりも d' が高いことが示された。この結果から、prev-Decision(+)試行の方が prev-Decision(-)試行よりも大きな賦活を示す領域が d' の変化に関与するのではない

かと考え、prev-Decision の種類が上記のパターンを示す脳賦活に及ぼす影響が大きい被験者では prev-Decision の種類が d' に及ぼす影響も大きくなるのではないかという仮説をたてた。この仮説を検証するために、それぞれの被験者において prev-Decision(+)試行と prev-Decision(-)試行における賦活の違い (Diff act) を計算した。その上で、Diff act と行動解析において計算した Diff d' の相関性を Pearson の積率相関分析を用いて評価した (閾値水準 $p < 0.05$)。

3. 結果

3.1. 確率情報と過去の試行の意思決定への影響

知覚検出課題のパフォーマンスに影響を及ぼす現在の試行及び過去の試行の要素を同定するためにマルチレベルロジスティック回帰分析を行った。最初に、prev-Cue、prev-Target、prev-Decision、Cue 及び Target の全ての要素を説明変数、Decision を被説明変数とした完全モデルを構築し、赤池情報量基準が最小となるように説明変数の除去を行った。その結果、prev-Decision、Cue 及び Target が含まれたモデルの赤池情報量基準が最小であった。また、除去検定においてこのモデルにおける prev-Decision、Cue 及び Target それぞれの説明変数の有意な効果がみられた (prev-Decision: Wald $\chi^2 = 36.3$, $p = 0.003$; Cue: Wald $\chi^2 = 236.4$, $p < 0.001$; Target: Wald $\chi^2 = 452.2$, $p < 0.001$)。また、現在の試行の二つ前の試行における Target、Cue 及び Decision を説明変数として追加したモデルも作成し同様に検討したが、これらの要素の追加では赤池情報量基準の低下はみられなかった。

次に、Target、Cue 及び prev-Decision の各要素の、被験者ごとのターゲットが呈示されたと判断した (Decision (+)) 確率への影響を調べた。予想される通り、Target の有意な主効果 ($F(1, 15) = 97.4$, $p < 0.001$) がみられ、Decision (+)確

率は Target(+)試行の方が Target(-)試行と比較して大きかった (図 5)。また、Cue の有意な主効果 ($F(1, 15) = 35.4, p < 0.001$) がみられ、Decision (+)確率は Cue-High 試行の方が Cue-Low 試行と比較して大きかった。しかし、Cue と Target の有意な交互作用はみられなかった ($F(1, 15) = 1.73, p = 0.208$)。

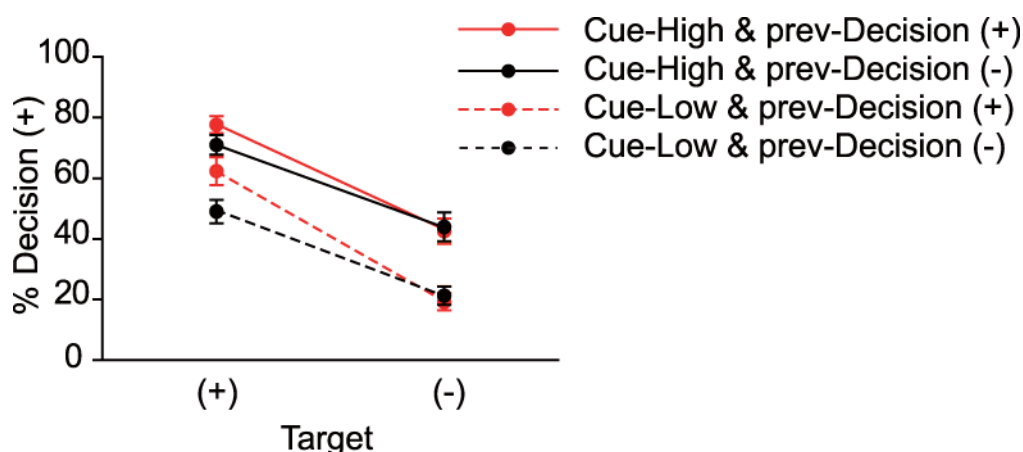


図 5 ターゲットが呈示されたと報告した確率 (% Decision (+))。被験者間の平均と標準誤差が Target, Cue, prev-Decision の条件の組み合わせごとに示されている (n = 16)。

Decision(+)_{確率}に対する prev-Decision の有意な主効果はみられなかった (図 5) ($F(1, 15) = 3.39, p = 0.086$)。しかし、Cue と異なり、Prev-Decision と Target 間では有意な交互作用が認められた ($F(1, 15) = 13.7, p = 0.002$)。Target(+)試行においては Decision(+)_{確率}は Prev-Decision(+)_{試行}の方が Prev-Decision(-)_{試行}よりも大きかった (単純主効果, $F(1, 15) = 12.78, p = 0.003$)。一方 Target(-)試行においては prev-Decision は Decision(+)_{確率}に有意な影響を及ぼさなかった (単純主効果, $F(1, 15) = 0.43, p = 0.521$)。Cue と prev-Decision の有

意な交互作用はみられなかった ($F(1, 15) = 0.523, p = 0.481$)。また、Target、Cue 及び prev-Decision 間の有意な二次交互作用はみられなかった ($F(1, 15) = 0.777, p = 0.392$)。

次に、Target、Cue 及び prev-Decision が反応時間に及ぼす影響が調べられた (図 6)。Target と Cue それぞれの有意な主効果はみられなかった ($F(1, 15) = 3.30, p = 0.089$; $F(1, 15) = 1.05, p = 0.322$) が、Target と Cue の間には有意な交互作用が認められた ($F(1, 15) = 9.36, p = 0.008$)。過去の試行の意思決定については、有意な主効果も Target との有意な交互作用もみられなかった ($F(1, 15) = .0504, p = 0.489$; $F(1, 15) = 1.90, p = 0.188$)。

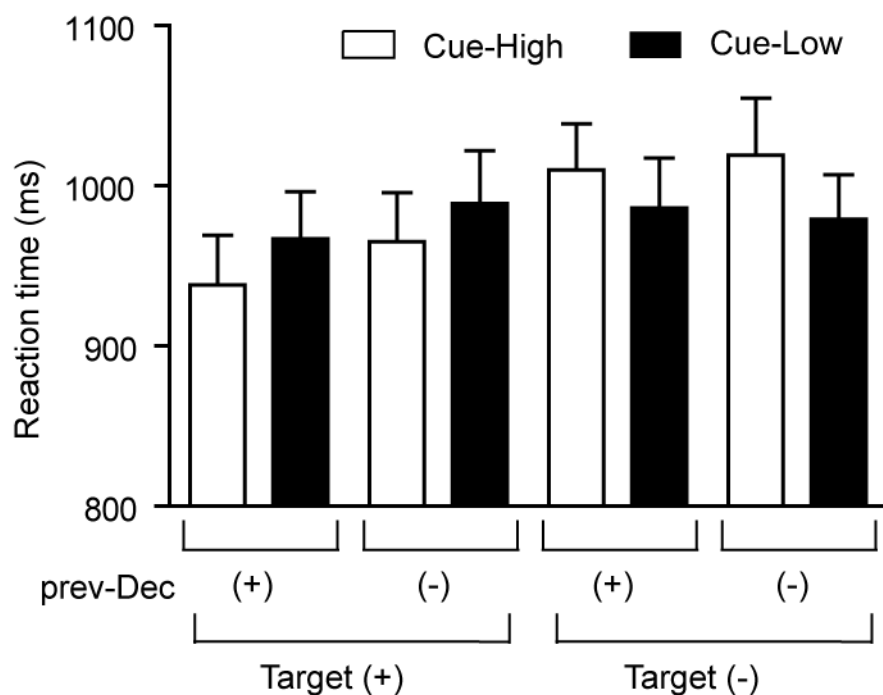


図 6 被験者の反応時間。被験者間の平均と標準誤差が Target, Cue, prev-Decision の条件の組み合わせごとに示されている (n = 16)。

3.2. 確率情報と過去の試行の意思決定指標への影響

信号検出理論を用いて probability cue と過去の意思決定の被験者の意思決定への影響を定量化した^{41, 44}。それぞれの被験者において、ターゲット刺激の弁別能を示す意思決定指標として d' が、閾値によるバイアスを示す意思決定指標として c が計算された。 d' に対して prev-Decision の有意な主効果が認められ、prev-Decision (+)試行の方が、prev-Decision (-)よりも大きかった ($F(1, 15) = 15.7, p = 0.001$) (図 7)。一方で、Cue の有意な主効果 ($F(1, 15) = 2.75, p = 0.118$) と、Cue と prev-Decision の有意な交互作用 ($F(1, 15) = 0.611, p = 0.446$) は認めなかった。 c については Cue の主効果が有意に認められ、Cue-Low 試行の方が、Cue-High 試行よりも大きかった ($F(1, 15) = 35.4, p < 0.001$) (図 7)。一方、prev-Decision の有意な主効果 ($F(1, 15) = 2.62, p = 0.126$) と、Cue と prev-Decision の有意な交互作用 ($F(1, 15) = 0.211, p = 0.653$) は認めなかった。

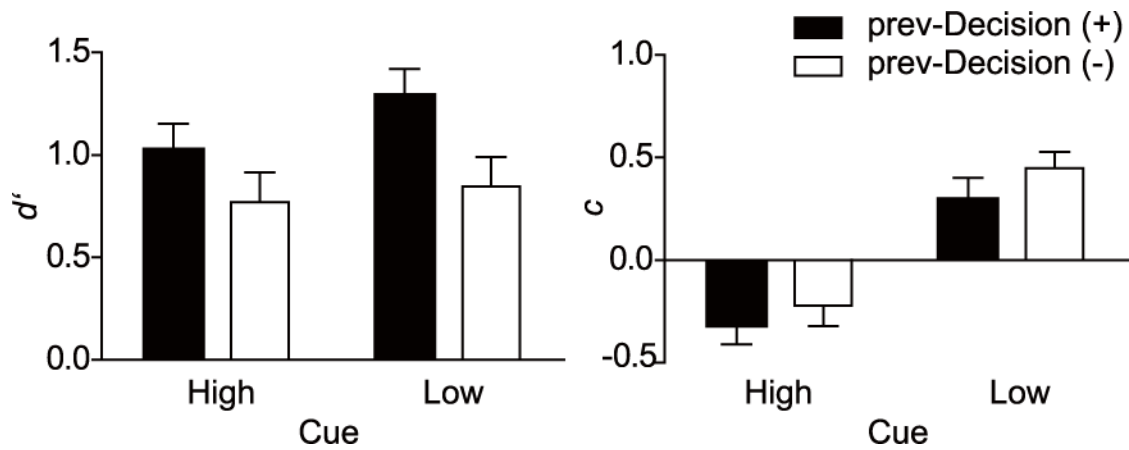


図7 信号検出理論における行動指標。被験者間の平均と標準誤差が Cue, prev-Decision の条件の組み合わせごとに示されている (n = 16)。

次に、被験者ごとの過去の経験の利用の程度と確率情報の利用の程度に関連性があるかを調べた。そのために被験者ごとの prev-Decision 条件間の d' の差 (Diff d') と Cue 条件間の c の差 (Diff c) の線形相関の有意性を検定したが、有意な相関はみられなかった (Pearson's correlation coefficient: -0.302, $p = 0.255$, $N = 16$; 図8)。

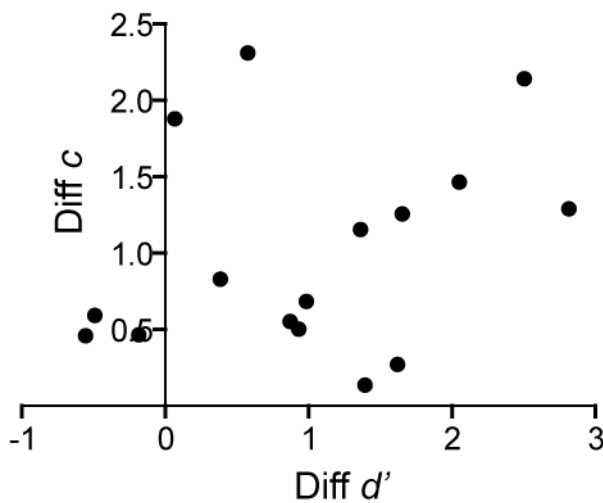


図 8 行動指標間の関連性 prev-Decision 条件間の d' の差 (Diff d') と Cue 条件間の c の差 (Diff c) とが被験者ごとに示されている。

3.3. 確率情報と過去の試行の脳活動への影響

3.3.1. probability cue と関連した賦活がみられる脳領域

ターゲット刺激の出現確率を示す probability cue の種類が意思決定に有意な影響を及ぼすという行動解析の結果から、まず Cue-Low と Cue-High が呈示された試行で異なる活動を示す領域が同定された。その結果、左頭頂間溝 (left intraparietal sulcus: left IPS) 内に Cue-Low 試行において Cue-High 試行よりも大きな活動を示す領域を発見した (表 1、図 9)。この領域の活動において、Target 及び prev-Decision の有意な主効果はみられなかった ($F(1, 15) = 0.116, p = 0.739$; $F(1, 15) = 0.076, p = 0.786$)。また、Cue と Target や prev-Decision の有意な交互作用もみられなかった ($F(1, 15) = 3.519, p = 0.080$; $F(1, 15) = 0.517, p = 0.483$)。

表 1 Cue の主効果を示す脳領域

Area	Side	Coordinates	T-value	Cluster size (voxels)
IPS	left	-33, -61, 58	4.40	12

IPS: intraparietal sulcus, 頭頂間溝

left IPS

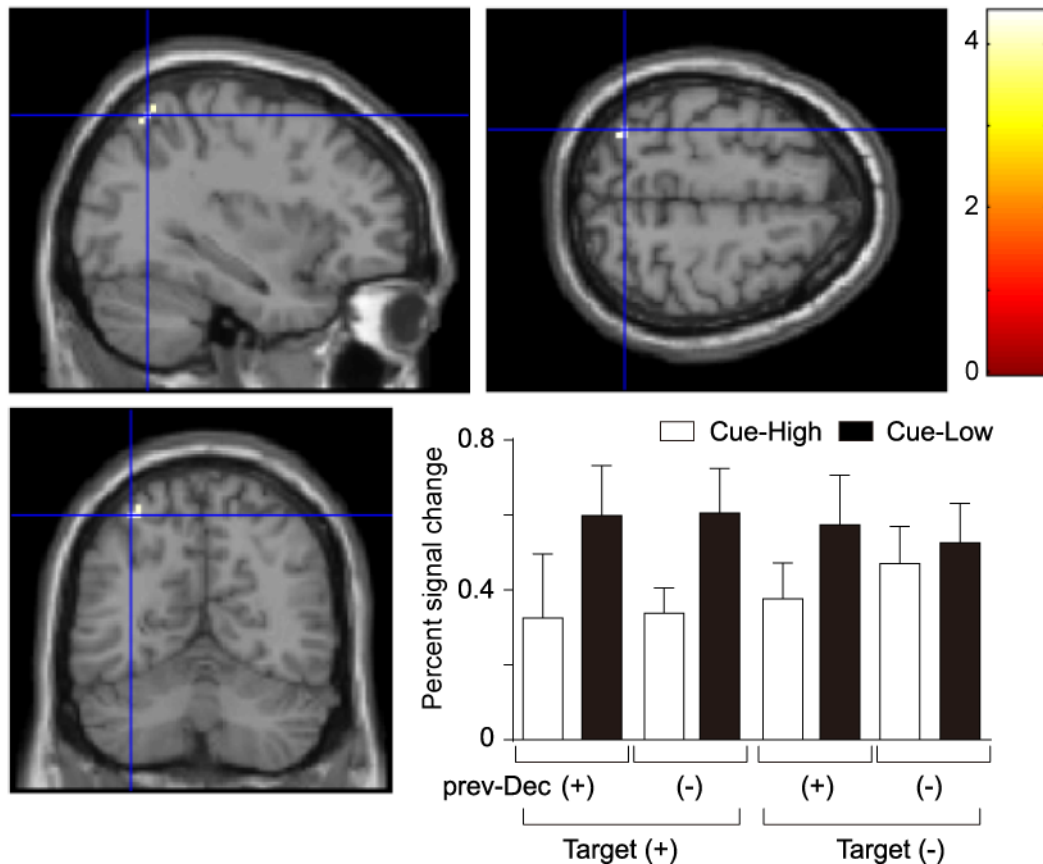


図9 Cueの主効果がみられた左頭頂間溝 (left IPS) における脳賦活。Target, Cue, prev-Decision の条件の組み合わせごとの信号変化 (percent signal change) の被験者間の平均と標準誤差が示されている (N = 16)。

3.3.2. 過去の意思決定と関連した賦活がみられる脳領域

次に、prev-Decision(+)試行と prev-Decision(-)試行で異なる活動を示す領域を同定した。その結果、右下前頭回 (right inferior frontal gyrus: right IFG) 内で prev-Decision(+)試行において prev-Decision(-)試行よりも大きな活動を示す領域が発見された(表 2、図 10)。関心領域解析によってこの領域は Target の有意な主効果があることが示された ($F(1, 15) = 12.16, p = 0.003$)。更に、Target と

prev-Decision の交互作用は有意であった ($F(1, 15) = 15.54, p = 0.001$)。行動解析の結果と同様に、Target(+)条件においては prev-Decision(+)試行の方が prev-Decision (-)条件よりも大きな活動がみられ (単純主効果, $F(1, 15) = 40.01, p = 0.001$)、Target(-)条件においては prev-Decision (+)条件と prev-Decision (-)条件で有意差はみられなかった (単純主効果, $F(1, 15) = 0.10, p = 0.760$)。一方この領域の活動において、Cue の主効果は有意ではなかった ($F(1, 15) = 0.188, p = 0.671$)。他に、右頭頂間溝 (right intraparietal sulcus: right IPS) と右腹側後頭葉 (right ventral occipital cortex: right VOC) の賦活においても prev-Decision の有意な主効果がみられた (表 2、図 11、図 12)。関心領域解析では、これらの領域の活動における Target (right IPS, $F(1, 15) = 0.472, p = 0.503$; right VOC, $F(1, 15) = 0.077, p = 0.786$) や Cue (right IPS, $F(1, 15) = 0.585, p = 0.456$; right VOC, $F(1, 15) = 2.149, p = 0.163$) の有意な影響はみられなかった。

表 2 prev-Decision の主効果を示す脳領域

Area	Side	Coordinates	T-value	Cluster size (voxels)
IFG	right	48, 2, 28	6.79	42
IPS	right	27, -58, 40	6.11	24
VOC	right	36, -76, -8	4.98	13

IFG: inferior frontal gyrus, 下前頭回, IPS: intraparietal sulcus, 頭頂間溝, VOC: ventral occipital cortex, 腹側後頭葉

right IFG

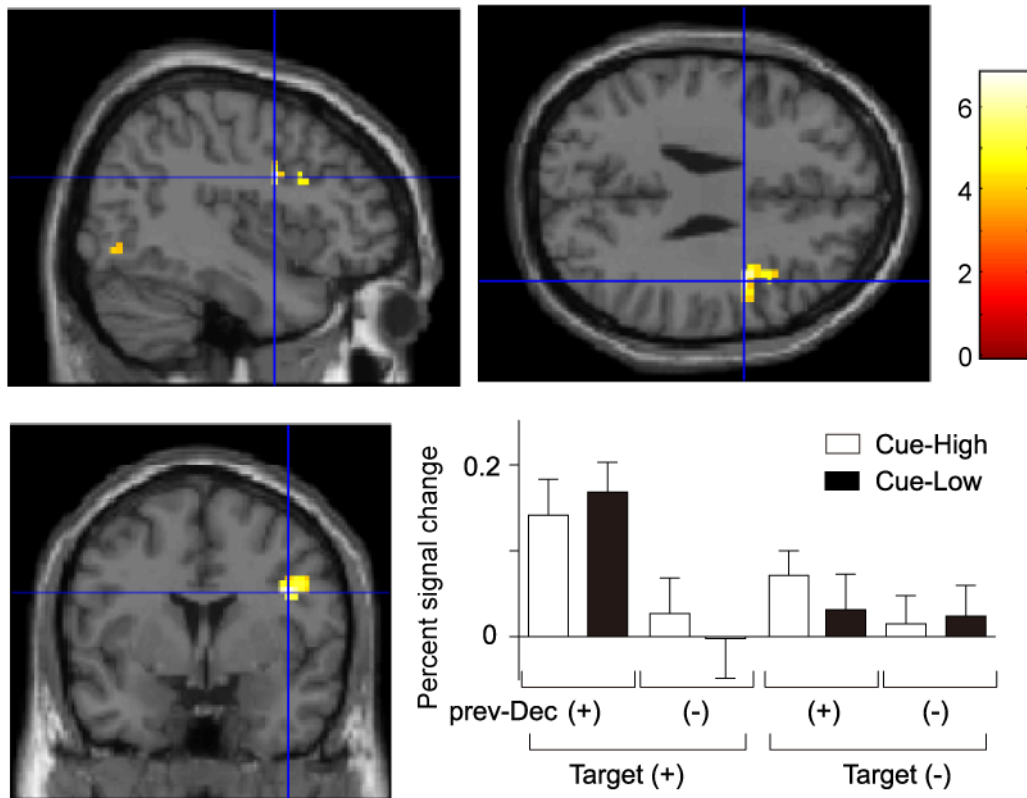


図 10 prev-Decision の主効果がみられた右下前頭回 (right IFG) における脳賦活。記述方法は図 9 と同じである。

right IPS

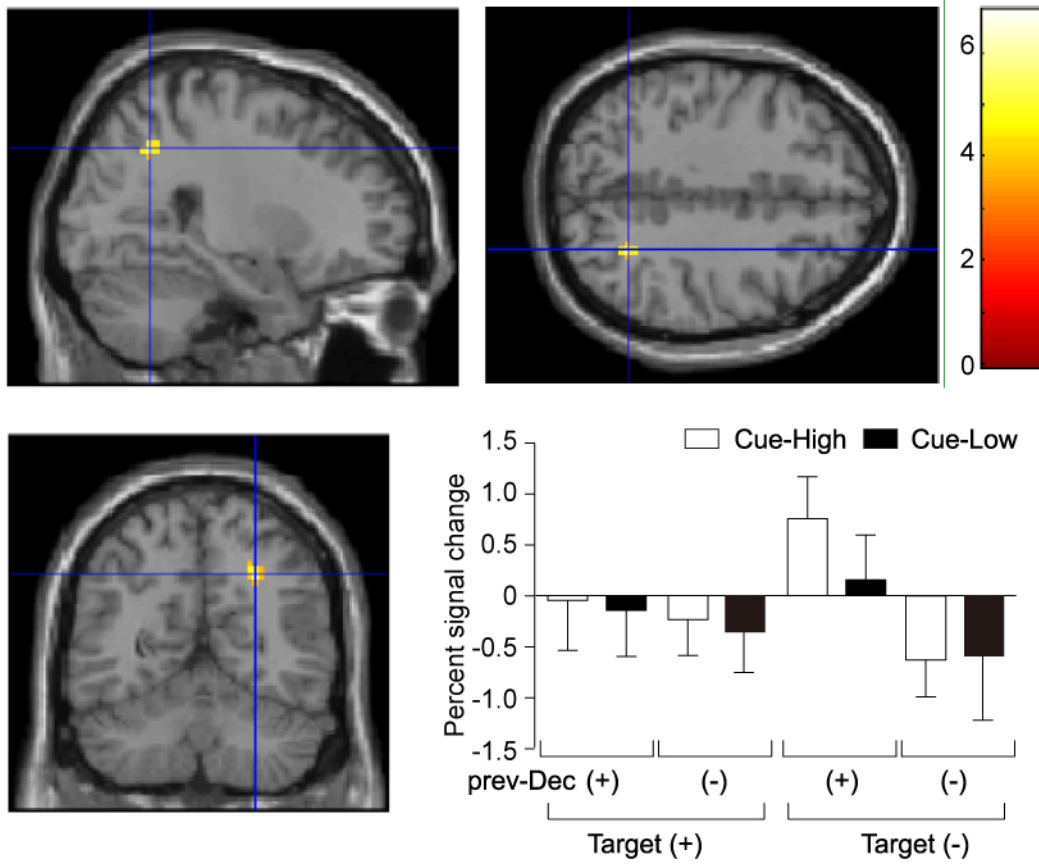


図 11 prev-Decision の主効果がみられた右頭頂間溝 (right IPS) における脳賦活。記述方法は図 9 と同じである。

right VOC

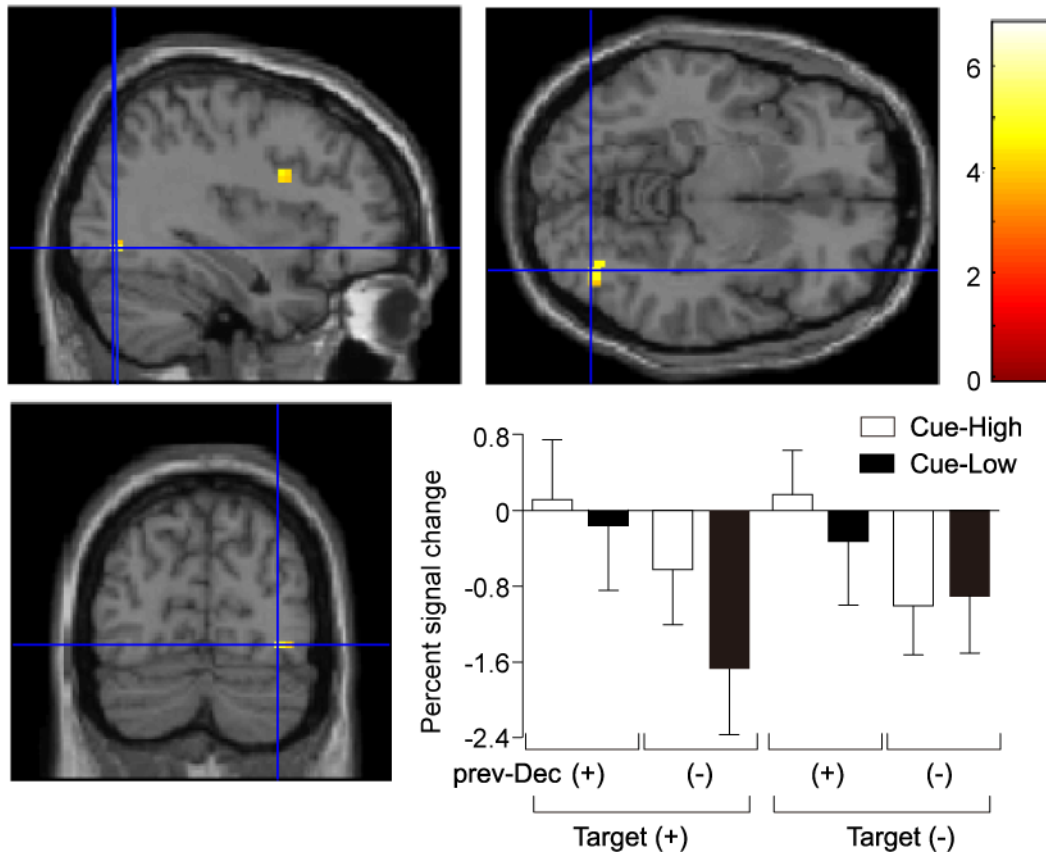


図 12 prev-Decision の主効果がみられた右腹側後頭葉 (right VOC) における脳賦活。記述方法は図 9 と同じである。

更に、prev-Decision と Target の交互作用は右中前頭回 (right middle frontal gyrus: right MFG) 及び右頭頂弁蓋 (right parietal operculum: right POP) 内の領域においても認められた(表 3、図 13、図 14)。関心領域解析において、これらの領域の賦活では、Cue の有意な主効果 (right MFG, $F(1, 15) = 1.098$, $p = 0.311$; right POP, $F(1, 15) = 0.371$, $p = 0.552$) は認められなかった。

表 3 prev-Decision と Target の交互作用を示す脳領域

Area	Side	Coordinates	T-value	Cluster size (voxels)
MFG	right	39, 50, 25	5.09	22
POp	right	60, -13, 13	4.25	13

MFG: middle frontal gyrus, 中前頭回, POp: parietal operculum, 頭頂弁蓋部

right MFG

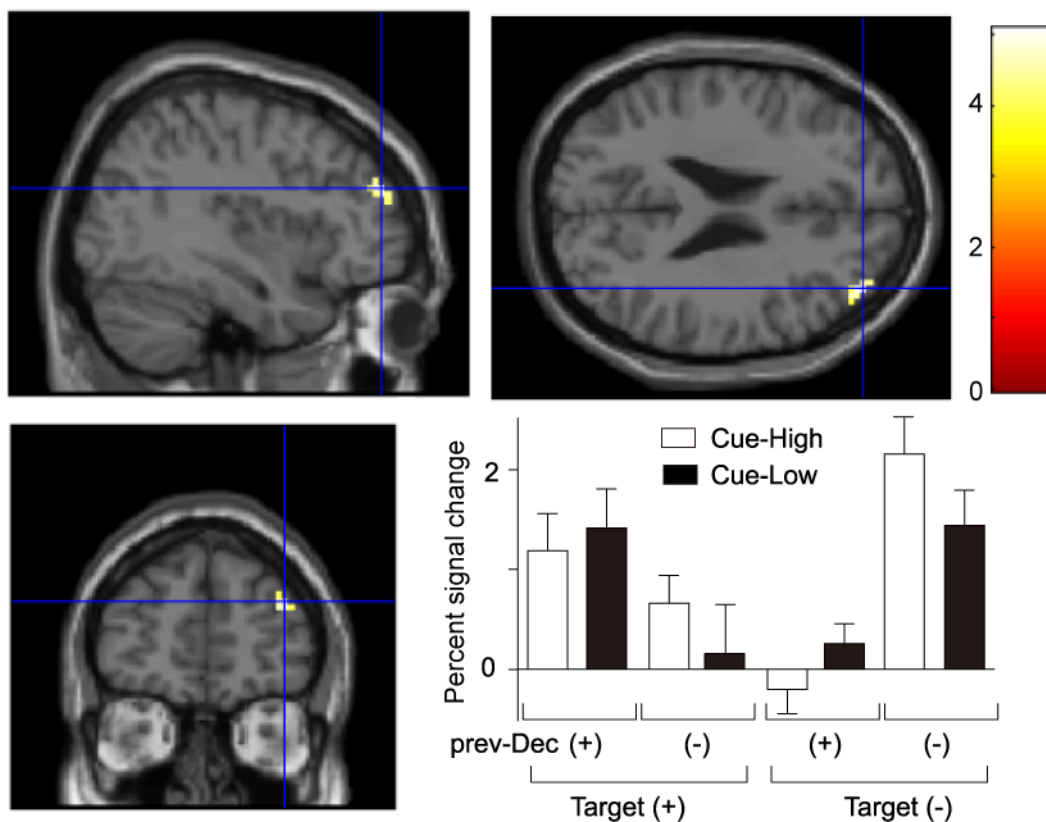


図 13 prev-Decision と Target の交互作用がみられた右中前頭回 (right MFG) における脳賦活。記述方法は図 9 と同じである。

right POp

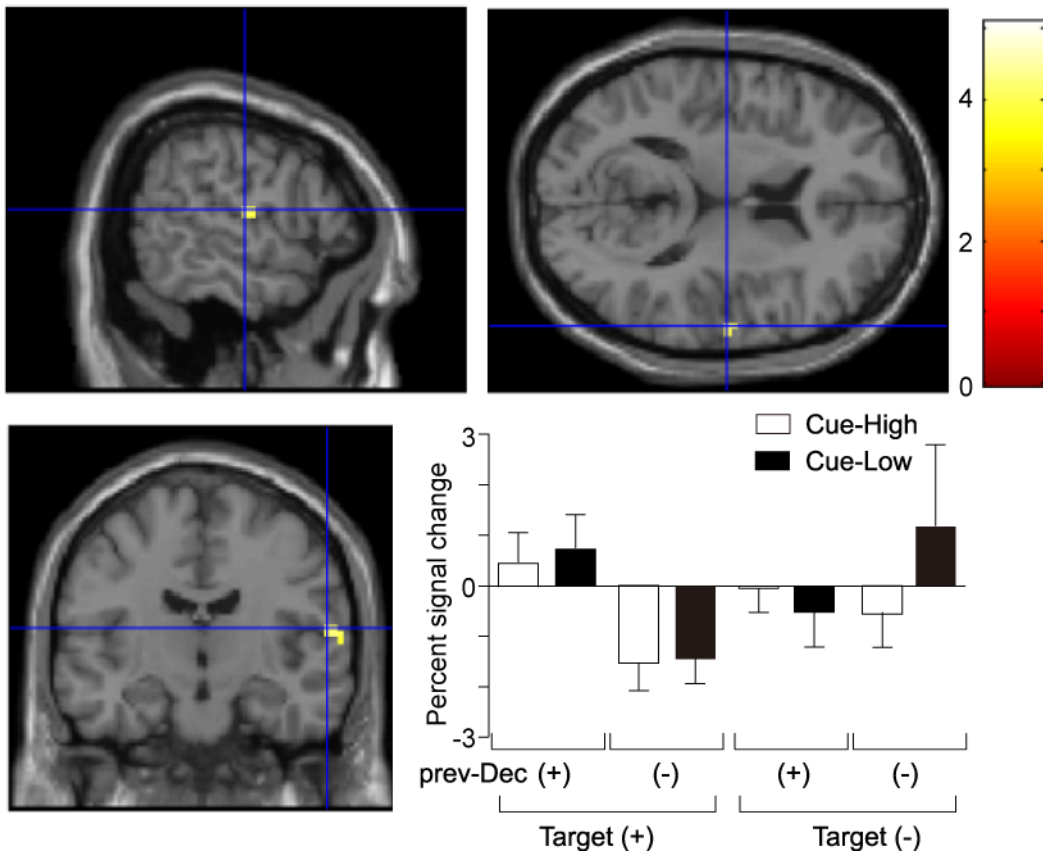


図 14 prev-Decision と Target の交互作用がみられた右頭頂弁蓋 (right POp) における脳賦活。記述方法は図 9 と同じである。

過去の意思決定が Target(+)試行においてのみ意思決定に影響を及ぼしたという行動解析の結果に基づき、次に、ターゲットの有無を反映する視覚領域の賦活が過去の意思決定の影響を受けるかを検討した。ターゲットの処理に関与する領域を探すために Target(+)試行と Target(-)試行で異なる活動を示す領域を探索したが、この二条件で有意な活動差を示す領域は認められなかった。そのため、側頭後頭葉において Target(+)試行と Target(-)試行で異なる賦活を示す領域を閾値水準 $p < 0.05$ (多重比較補正なし) で同定し、その領域内において prev-

Decision の影響を受ける領域を探した。しかし、この手法においても、この領域内において prev-Decision の主効果や prev-Decision と Target の交互作用を示す領域はみつからなかった。

3.3.3. 確率情報と過去の意思決定の交互作用がみられる脳領域

最後に Cue と prev-Decision の交互作用がみられる領域を探したが、有意な交互作用を示す領域はみつからなかった。

3.4. 脳活動と意思決定指標の相関性

解析の最後に、これまでに同定した領域の活動の確率情報や過去の意思決定による変化が意思決定の指標の変化と関連しているかを調べた。この目的で、Cue の主効果が見られた左頭頂間溝 (left IPS) 内の領域における Cue 条件間の活動の差 (Diff act) を被験者ごとに計算し、被験者ごとの Cue 条件間の c の差 (Diff c) との線形相関の有意性を検定した。その結果、この領域における Diff act と Diff c の間に有意な相関があることが示された (Pearson's correlation coefficient: 0.601, $p = 0.014$, $N = 16$; 図 15A)。次に、prev-Decision 及び Target の主効果、そして prev-Decision と Target の交互作用が認められた右下前頭回

(right IFG) 内の領域における prev-Decision 条件間の活動の差 (Diff act) を被験者ごとに計算し、被験者ごとの prev-Decision 条件間の d' の差 (Diff d') との線形相関の有意性を検定した。その結果、この領域における Diff act と Diff d' に有意な相関があることが示された (Pearson's correlation coefficient: 0.590, $p = 0.016$, $N = 16$; 図 15B)。

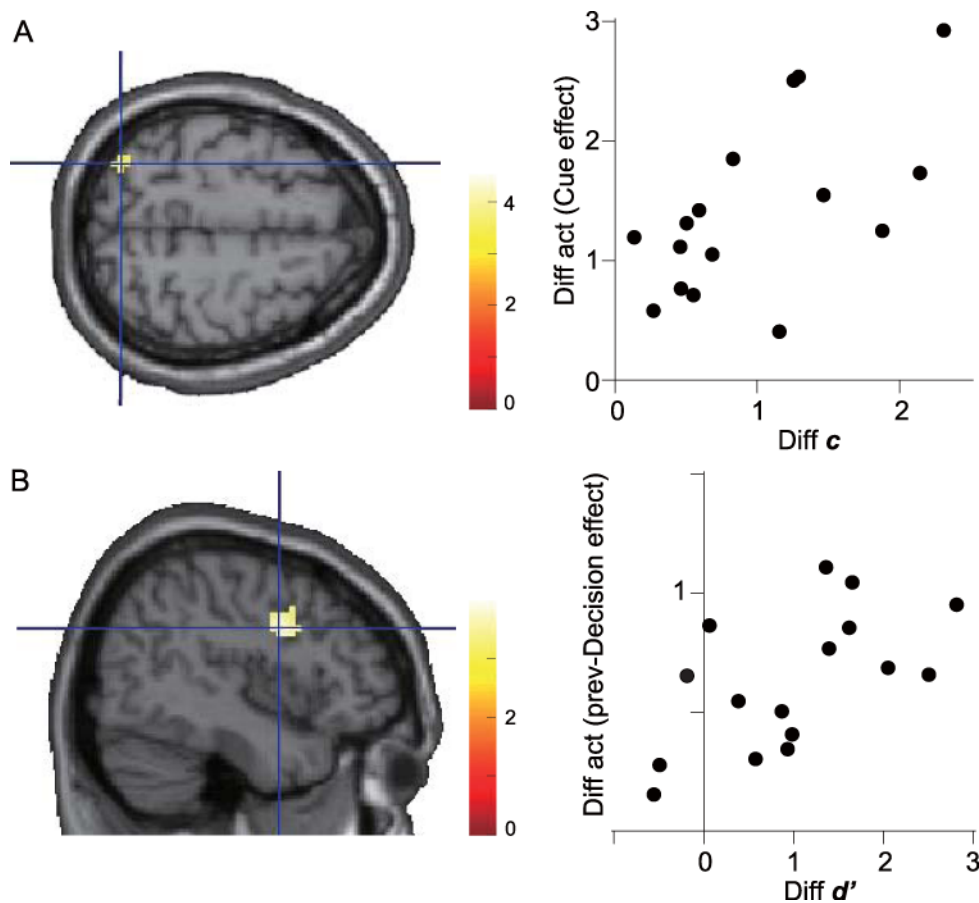


図 15 脳賦活と行動指標の関連性 A : 左頭頂間溝 (left IPS) の Cue-Low 試行と Cue-High 試行の賦活の差 (Diff act) と c の差 (Diff c) が被験者ごとに示されている。B : 右下前頭回 (right IFG) の prev-Decision(+)試行と prev-Decision(-)試行の賦活の差 (Diff act) と d' の差 (Diff d') が被験者ごとに示されている。

4. 考察

本研究では、知覚に基づく意思決定への確率情報と過去の経験の影響を明らかにするために、ガボール刺激にホワイトノイズを加えた不明瞭な条件においてターゲット刺激の出現確率情報を示すprobability cueと直前の試行が知覚検出に及ぼす影響を比較した。その際、意思決定に基づくボタン押しにおける運動反応の影響を除外するために、刺激呈示後に意思決定と運動効果器の種類の関係を示す手がかり刺激を導入して実験を行った。その上で、マルチレベルロジスティック回帰モデルに、現在及び直前の試行におけるprobability cue、ターゲット刺激の有無、直前の試行における意思決定を別個の要素として組み込むことで、それぞれの要素の知覚検出への影響を調べた。その結果、直前の意思決定が次の意思決定に有意な影響を及ぼすことが明らかにされた。また、確率についての事前情報がターゲットの有無にかかわらず意思決定に影響を及ぼす一方、直前の意思決定はターゲットが呈示された試行においてのみ意思決定に影響を及ぼすことが示された。次に、確率情報と直前の意思決定は、それぞれ信号検出理論に基づいて計算された異なる意思決定の諸指標に影響することが示

された。最後に、fMRIを用い、確率情報と過去の意思決定が異なる領域の脳賦活に別々に影響を及ぼすことが示された。

4.1. 意思決定に影響を及ぼす過去の意思決定の要素

行動学的解析において、直前の試行における様々な要素の中で、特に直前の意思決定が次の試行の意思決定にバイアス効果を及ぼすことが示された。この結果は、今回と同様に不明瞭な刺激に基づいて意思決定を行う過去の研究における行動学的知見と一致する^{34, 35}。近年の研究において、刺激の明瞭性を試行ごとに変化させて意思決定を課した場合に、明瞭な刺激と比較して不明瞭な刺激に基づいて意思決定を行ったときに過去の意思決定によるバイアス効果が大きくなったという知見が得られており³⁴、過去の意思決定によるバイアス効果は不明瞭な条件でより強くみられると考えられる。

4.2. 意思決定とその計算処理に及ぼす影響の違い

行動学的解析においては、ターゲット呈示についての確率情報を示す手がかり刺激の知覚検出への影響はターゲットの有無にかかわらず認められたのに対し、過去の意思決定の知覚検出への影響はターゲットの有無に依存しており、ターゲット呈示試行においてのみ先行する試行と同じ意思決定をしていた。過去の研究においても本研究と同様に、ターゲットの出現確率情報が知覚に基づく意思決定に及ぼす影響はターゲットが呈示された試行においても呈示されなかった試行においても認められている^{26, 61}。一方、過去の意思決定が知覚に基づく意思決定に及ぼす影響がターゲットの呈示の有無に依存するかを調べた研究はこれまでない。本研究では両者の知覚に基づく意思決定に及ぼす影響の違いが明確に認められた。

行動学的データに信号検出理論^{41, 44}を適用し、知覚に基づいた意思決定における計算処理をターゲットの弁別能 (d') と閾値 (c) という二つの意思決定指標で記述し、刺激出現についての確率情報と過去の刺激検出に関する意思決定がそれぞれの意思決定指標に及ぼす影響を調べた。その結果、過去の研究²⁴と同様に、刺激出現に関する確率情報は d' ではなく c を変化させることが示された。信号検出理論において、 c は内部表現に対する閾値の相対的水準を

数学的に示したものである^{41, 44}。そのため、確率情報が c に影響を及ぼしたという結果からは、確率情報によるバイアス効果はターゲットが呈示された試行と呈示されなかった試行において同程度認められたことと合わせ、過去の研究から推測されてきたように^{26, 29}、確率情報により内部表現に対する閾値の水準がシフトしたと考えられた。一方、過去の意思決定は d' を変化させることが示された。 d' はsignal、つまり課題に関連した感覚刺激に由来する内部表現とnoise、つまり実験上のノイズ及び脳内に至るまでの処理過程で生じた全てのノイズに由来する内部表現の弁別性を数学的に示したものである^{41, 44}。そのため、過去の意思決定が d' に影響を及ぼしたという今回の結果からは、過去の意思決定がターゲット出現試行においてのみ意思決定にバイアス効果を及ぼしたことと合わせ、過去の意思決定がノイズの処理過程ではなく課題に関連した感覚刺激の内部表現への変換過程に特異的に影響を及ぼしたと考えられた。このように確率情報と過去の意思決定が二つの意思決定指標に異なる影響を及ぼすという結果から、確率情報と過去の意思決定は別々の処理過程を介して知覚検出に関する意思決定にバイアス効果を及ぼすと考えられた。

4.3. 確率情報と過去の意思決定に関連した神経回路網の違い

ターゲット出現についての確率情報と過去の意思決定が共通の神経回路網において処理されるのか、それとも異なった神経回路網において処理されるのかを調べるためにfMRIを用いた全脳解析を行った。その結果、ターゲット出現についての確率情報の主効果がみられた領域である左頭頂間溝では、過去の意思決定の影響はみられなかった。過去の意思決定の主効果がみられた領域である右下前頭回、右頭頂間溝及び腹側後頭葉では確率情報の影響はみられなかった。過去の意思決定とターゲットの交互作用がみられた領域である右中前頭回及び頭頂弁蓋においても確率情報の影響はみられなかった。さらに、確率情報と過去の意思決定の交互作用を示す領域はみつからなかった。これらの全脳解析で得られた機能画像所見と行動学的指標として信号検出理論を適用して得られた意思決定指標の関連を調べると、確率情報の左頭頂間溝の賦活への影響は、確率情報の c への影響と相関しており、過去の意思決定の右下前頭回の賦活への影響は、過去の意思決定の d' への影響と相関していた。これらの結果は、以下に考察するように確率情報と過去の意思決定が異なる神経回路網で処理され意思決定に影響を及ぼすことを示唆している。

4.3.1. 確率情報の影響がみられた脳領域

今回の研究でターゲット出現についての確率情報の主効果が認められた左頭頂間溝は、過去のヒトを用いたfMRI研究において確率情報の影響が示唆されている領域である^{29, 62, 63}。序文で示したように、知覚に基づく意思決定において、ヒト頭頂間溝の相同領域とされるサル外側頭頂間野¹⁷の神経細胞がevidenceの加算に関与することを示唆する知見が得られている⁸⁻¹⁰。知覚識別課題を負荷した際には、サル外側頭頂間野におけるevidenceの加算を反映する神経細胞の発火頻度が確率情報に影響されることが示されており、確率情報はevidenceの加算過程に影響を及ぼすと考えられてきた^{27, 28}。一方本研究では、左頭頂間溝内の領域の賦活においてターゲットが呈示された条件とこれが呈示されなかった条件における差がみられなかった。この結果は、知覚識別課題で得られたこれまでの知見と異なり、知覚検出課題においてはこの領域が感覚刺激に由来しない意思決定過程に関与する可能性を示唆する。先に述べた三段階意思決定モデル³⁻⁵における、decision variableの形成までの段階は課題に関連した感覚刺激に由来した内部表現を処理する過程である^{3, 5}。一方、decision variableに適用するた

めのdecision criteriaを設定する過程は感覚刺激の有無の影響を直接的には受けないと考えられる^{3,5}。そのため、左頭頂間溝内の領域の賦活が c 、すなわち内部表現に対する知覚検出の閾値の水準と相関したという結果と合わせると、この領域の賦活がdecision criteriaである知覚検出の閾値の設定を反映していた可能性が示唆される。但し、本研究ではターゲットとして不明瞭で弱い感覚刺激の運動を用いたため、この領域の賦活においてターゲットの有意な影響を認めるには刺激の強度が不十分であった可能性も否定できない。確率情報が知覚に基づく意思決定のどの段階に影響を及ぼすかについては、今後のさらなる検討が必要と考える。

4.3.2. 過去の意思決定の影響がみられた脳領域

4.3.2.1. 三段階意思決定モデルとの関連

行動データと同様に、ターゲット刺激が呈示された条件でのみ右下前頭回において過去の意思決定を反映する賦活が観察された。ターゲット刺激、すなわち課題に関連した感覚刺激に由来した内部表現を処理する過程は三段階意思決

定モデルにおける第一段階及び第二段階、すなわちevidenceが表現・加算され decision variableが形成されるまでの段階に対応すること^{3, 5}、右下前頭回が数理モデルを用いたfMRI研究においてevidenceの加算速度を反映することが示唆されている領域であること^{20, 21}から、右下前頭回においてみられた過去の意思決定によるバイアス効果に関連した賦活が、過去の意思決定によるevidence加算処理への影響を反映していた可能性が示唆される。但し、実際にこの領域が過去の意思決定によるevidence加算処理への影響に関与することを示すためには、数理モデルと経頭蓋磁気刺激法などの手法を組み合わせ⁶⁴、右下前頭回の刺激あるいは不活化が過去の意思決定のevidence加算処理への影響を変化させることを示す必要がある。

さらに、過去の意思決定によるバイアス効果に視覚野においてevidenceとして表現する第一段階の情報処理過程が関与していたかを調べるために、これまでの研究^{65, 66}において視覚運動の表現に関与するとされているMT+野を含む側頭後頭葉の賦活を調べた。しかし、側頭後頭葉におけるターゲットの有無に依存した賦活を示す領域では過去の意思決定の影響は見られなかった。したがって、過去の意思決定が第一段階において影響した可能性は考えにくい。但し、ここ

でもターゲット刺激として用いた感覚刺激が不明瞭で弱いものであったために側頭後頭葉の賦活においてターゲット刺激の有意な影響を認めるには刺激の強度が不十分であった可能性が否定できない。過去の意思決定がevidenceの表現に影響を及ぼすか否かを更に調べるためには、ターゲットの影響が視覚領野の賦活に十分に反映される強度の視覚刺激を用いた上で過去の意思決定の影響を評価すること、さらにこの領域の賦活が被験者の意思決定と関連することを示す必要がある。

4.3.2.2. 作動記憶および注意機能との関連

過去の意思決定の主効果は下前頭回他に、右頭頂間溝と腹側後頭葉においても認められた。これらの領域はいずれも作動記憶との関連が指摘されている領域である⁶⁷⁻⁶⁹。したがって、これらの三部位が賦活していたという結果からは、過去の意思決定の知覚に基づく意思決定への影響には作動記憶に関する神経基盤が関与している可能性が示唆される。但し、今回の研究では試行間の情報の保持に焦点を当てた実験デザインではなく、これらの領域が過去の意思決定の保持に関与しているかは明らかではない。過去の意思決定が知覚に基づく

意思決定に影響を及ぼす過程におけるこれらの領域の役割を明らかにするためには、試行間隔を長くし試行間の持続活動を計測する⁷⁰、あるいは経頭蓋磁気刺激法を用いてこの領域を各試行間に不活性化する⁷¹などの手法を用いる必要がある。

過去の意思決定とターゲット刺激の交互作用は、関心領域解析における過去の意思決定の影響がみられた右下前頭回の賦活のピークに加え、全脳解析における右中前頭回や頭頂弁蓋の賦活において認められた。これらの領域は、注意課題を用いた機能画像研究において、周囲と比較して顕著に目立つ刺激によって自動的に引き起こされるボトムアップ注意に関与する腹側注意ネットワークを構成していると考えられている⁷²⁻⁷⁴。このため、過去の意思決定とターゲット刺激に関して得られた機能解剖学的な所見は、この過程が注意と関連していることを示すと考えられた。これは、注意を引き起こす刺激の顕著性（saliency）によって知覚に基づく意思決定にバイアス効果が生じるという報告によっても支持される^{75,76}。

以前より、作動記憶に関するネットワークと注意に関するネットワークは一部重なり合っていると考えられている⁷⁷。fMRIを用いたヒトの注意機能に関す

る研究^{78, 79}からは、下前頭回は、作動記憶によって注意が駆動されるときに賦活される領域であることが考えられている。すなわち、下前頭回が作動記憶に関連したネットワークと腹側注意ネットワークを媒介する役割を担うとも考えられる。但し、本研究においては作動記憶やボトムアップ注意との直接の関連が評価されていないため、下前頭回が作動記憶ネットワークと腹側注意ネットワークを媒介することで過去の意思決定によるバイアス効果に関与するか否かは明らかではなく、下前頭回の役割を解明するためには今後の研究が必要である。

4.4. 経験と事前情報の意思決定へのバイアスの概念的枠組み

信号検出理論を用いた行動データの解析とfMRIで得られた脳賦活データの解析から、知覚に基づく意思決定、特に視覚刺激の検出に関する意思決定において、視覚刺激の出現確率についての情報と過去の意思決定が異なる処理過程及び神経回路網を介して意思決定に影響を及ぼすことを示唆する結果が示された。今回得られた結果及びそれに関する考察をもとに、確率情報と過去の意思決定がそれぞれ知覚検出についての意思決定にバイアス効果を及ぼすメカニズムに

ついでに、図16にまとめた。以下、これにしたがって説明する。知覚検出についての意思決定において、先行して付与される対象についての確率情報はdecision criteriaである知覚検出の閾値の水準をシフトすることで意思決定へのバイアス効果を生じさせると考えられる。このバイアス効果には左頭頂間溝の関与が示唆される。一方、過去の意思決定はevidenceの加算によるdecision variableの形成過程に影響を及ぼすことで意思決定へのバイアス効果を生じさせると考えられる。このバイアス効果には右下前頭回の関与が示唆され、腹側注意ネットワークや作動記憶ネットワークが関与している可能性がある。このように、本研究からは大脳皮質には知覚に基づいた意思決定においてバイアス効果を担う複数の神経回路網が解剖学的には独立して存在し、意思決定における異なる処理過程を修飾することが考えられた。実際の意思決定において、この二つの神経機構のうちどちらが主に働いているかは、知識を確率情報として獲得したか、それとも知識を自身の経験として獲得したか、すなわち知識の獲得方法に依存するものと考えられる^{80, 81}。これまでの知覚に基づいた意思決定の計算モデルでは、知識の獲得方法については強い関心をもたれていなかった^{4, 5, 36}が、高次の意思決定メカニズムを理解するためには、今後知識の獲得方法を考慮に入れた意思決定モデルを構築していく必要がある。

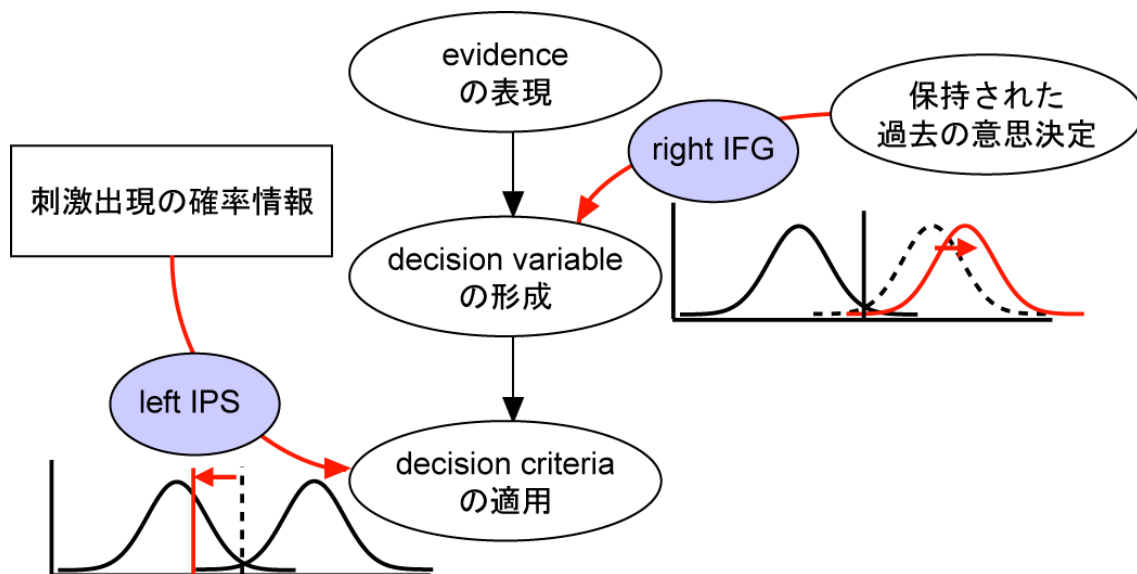


図16 意思決定の履歴と確率情報が知覚検出についての意思決定にバイアス効果を及ぼす処理過程の概念図。紫色の楕円はバイアス効果と関連する脳領域を、赤矢印はバイアス効果を生み出す処理過程の変化を示す。他の記述方法は図1と同じである。

本研究においてこれまで述べたように新たな知見が得られた一方、本研究にはいくつかの限界がある。第一に、本研究においては視覚刺激を用いた知覚検出課題を用い、呈示された確率情報と直前に行われた意思決定の影響を比較したが、聴覚や触覚など他の感覚モダリティ、知覚識別課題や知覚分類課題など他の意思決定課題、過去の意思決定の長期的な影響などに一般化できるかについては言及できない点である。この点については、今後の研究において確かめられるべきである。第二に、本研究のfMRI解析にて同定された脳領域と知覚に基づく意思決定におけるバイアス効果との因果関係は不明であるという点がある。これらの脳領域がバイアス効果においてどのような役割を果たすかを調べ

るためには経頭蓋磁気刺激法などの手法を用いてこの領域を刺激、あるいは不活性化した上で行動面への評価を行う必要がある。第三に、本研究のfMRIデータ解析における偽陽性の可能性である。本研究では過去の意思決定の脳賦活に及ぼす影響が小さいため、ボクセルごとの検定に通常用いられる閾値水準 $p < 0.05$ (familywise error rateを用いた多重比較補正あり) では過去の意思決定に関連した賦活を観察することができなかった。そのためにボクセルごとに閾値水準 $p < 0.001$ (多重比較補正なし) で検定を行い、更にクラスターサイズの検定を閾値水準 $p < 0.05$ (familywise error rateを用いた多重比較補正あり) で行うというよりリベラルな方法を採用した⁵⁹。そのため、統計的検出力が高い一方、偽陽性の可能性については否定出来ない。第四に、本研究は確率情報を用いて不明瞭な条件における単純な刺激の検出課題を繰り返すという特殊な状況において行われたという点である。現実場面においては、刻々と変化する状況において最適な判断が要求される。そのような場面では、状況に応じて最適な判断に必要な事前知識を柔軟に組み合わせて利用することが必要となる^{82, 83}。このような状況においては意思決定のバイアスに関わる複数のメカニズムが状況に応じて相互作用することで状況変化に対して適切な行動が可能になる可能性があるが、状況が変化する場面において事前知識がどのように利用されるか、ま

た、複数のメカニズムがどのように働き知覚に基づく意思決定に影響を及ぼすのかについては現時点では不明であり、今後明らかにする必要があると考える。

今回研究対象にしたバイアス効果は、統合失調症などの精神疾患との関連が指摘されている。これまで、認知過程におけるバイアス効果が統合失調症の妄想形成に関与する可能性が提案されている^{39, 40}が、それらのバイアス効果の背景となるメカニズムやそれぞれのバイアス効果の関連性については明らかになっていない。今後統合失調症などの精神疾患における病的体験と今回調べたようなバイアス効果のメカニズムとの関連を明らかにすることで、精神疾患における病的体験の形成メカニズムの解明が期待出来る。

5. 謝辞

本論文を作成するにあたり、本研究にご協力・ご支持くださった全ての方に感謝致します。特に、本研究のみならず、研究面における幅広いご指導を頂いた玉川大学脳科学研究所の坂井克之先生、東京大学大学院教育学研究科の森田賢治先生、須磨学園高等学校の梅田和昌先生、fMRIデータ取得に多大なるご協力を頂いた（株）ATR-Promotions の土師知己先生に心より感謝申し上げます。

また、論文作成についての多大なるご尽力・ご助言を頂いた日本大学医学部精神医学系精神医学分野の内山真先生、貴重なご助言を頂いた同分野の大久保起延先生、金森正先生に深謝致します。

6. 引用文献

1. Summerfield, C., Egner, T., Greene, M., Koechlin, E., Mangels, J., & Hirsch, J. Predictive codes for forthcoming perception in the frontal cortex. *Science*, 314(5803), 1311-1314, 2006.
2. Pouget, A., Beck, J. M., Ma, W. J., & Latham, P. E. Probabilistic brains: knowns and unknowns. *Nature Neuroscience*, 16(9), 1170-1178, 2013.
3. Mazurek, M. E., Roitman, J. D., Ditterich, J., & Shadlen, M. N. A role for neural integrators in perceptual decision making. *Cerebral Cortex*, 13(11), 1257-1269, 2003.
4. Gold, J. I., & Shadlen, M. N. The neural basis of decision making. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 535-574, 2007.
5. Gold, J. I., & Ding, L. How mechanisms of perceptual decision-making affect the psychometric function. *Progress in Neurobiology*, 103, 98-114, 2013.
6. Britten, K. H., Shadlen, M. N., Newsome, W. T., & Movshon, J. A. The analysis of visual motion: a comparison of neuronal and psychophysical performance. *The Journal of Neuroscience*, 12(12), 4745-4765, 1992.

7. Ditterich, J., Mazurek, M. E., & Shadlen, M. N. Microstimulation of visual cortex affects the speed of perceptual decisions. *Nature Neuroscience*, 6(8), 891-898, 2003.
8. Shadlen, M. N., & Newsome, W. T. Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area LIP) of the rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, 86(4), 1916-1936, 2001.
9. Huk, A. C., & Shadlen, M. N. Neural activity in macaque parietal cortex reflects temporal integration of visual motion signals during perceptual decision making. *The Journal of Neuroscience*, 25(45), 10420-10436, 2005.
10. Hanks, T. D., Ditterich, J., & Shadlen, M. N. Microstimulation of macaque area LIP affects decision-making in a motion discrimination task. *Nature Neuroscience*, 9(5), 682-689, 2006.
11. Kim, J. N., & Shadlen, M. N. Neural correlates of a decision in the dorsolateral prefrontal cortex of the macaque. *Nature Neuroscience*, 2(2), 176-185, 1999.
12. Cook, E. P., & Maunsell, J. H. Dynamics of neuronal responses in macaque MT and VIP during motion detection. *Nature Neuroscience*, 5(10), 985-994, 2002.

13. Roitman, J. D., & Shadlen, M. N. Response of neurons in the lateral intraparietal area during a combined visual discrimination reaction time task. *The Journal of Neuroscience*, 22(21), 9475-9489, 2002.
14. Deco, G., Pérez-Sanagustín, M., de Lafuente, V., & Romo, R. Perceptual detection as a dynamical bistability phenomenon: a neurocomputational correlate of sensation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 20073-20077, 2007.
15. Lo, C. C., & Wang, X. J. Cortico–basal ganglia circuit mechanism for a decision threshold in reaction time tasks. *Nature Neuroscience*, 9(7), 956-963, 2006.
16. Heekeren, H. R., Marrett, S., Bandettini, P. A., & Ungerleider, L. G. A general mechanism for perceptual decision-making in the human brain. *Nature*, 431(7010), 859-862, 2004.
17. Grefkes, C., & Fink, G. R. REVIEW: The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *Journal of Anatomy*, 207(1), 3-17, 2005.

18. Kayser, A. S., Buchsbaum, B. R., Erickson, D. T., & D'Esposito, M. The functional anatomy of a perceptual decision in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, *103*(3), 1179-1194, 2010.
19. Liu, T., & Pleskac, T. J. Neural correlates of evidence accumulation in a perceptual decision task. *Journal of Neurophysiology*, *106*(5), 2383-2398, 2011.
20. Ploran, E. J., Tremel, J. J., Nelson, S. M., & Wheeler, M. E. High quality but limited quantity perceptual evidence produces neural accumulation in frontal and parietal cortex. *Cerebral Cortex*, *21*(11), 2650-2662, 2011.
21. Pedersen, M. L., Endestad, T., & Biele, G. Evidence Accumulation and Choice Maintenance Are Dissociated in Human Perceptual Decision Making. *PloS One*, *10*(10), e0140361, 2015.
22. Klink, P. C., van Wezel, R. J. A., & van Ee, R. United we sense, divided we fail: context-driven perception of ambiguous visual stimuli. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *367*(1591), 932-941, 2012.

23. Carnevale, F., de Lafuente, V., Romo, R., & Parga, N. Internal signal correlates neural populations and biases perceptual decision reports. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(46), 18938-18943, 2012.
24. Swets, J. A., Tanner Jr, W. P., & Birdsall, T. G. Decision processes in perception. *Psychological Review*, *68*(5), 301, 1961.
25. Terman, M., & Terman, J. S. Concurrent variation of response bias and sensitivity in an operant-psycho-physical test. *Perception & Psychophysics*, *11*(6), 428-432, 1972.
26. Wyart, V., Nobre, A. C., & Summerfield, C. Dissociable prior influences of signal probability and relevance on visual contrast sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(9), 3593-3598, 2012.
27. Hanks, T. D., Mazurek, M. E., Kiani, R., Hopp, E., & Shadlen, M. N. Elapsed decision time affects the weighting of prior probability in a perceptual decision task. *The Journal of Neuroscience*, *31*(17), 6339-6352, 2011.
28. Rao, V., DeAngelis, G. C., & Snyder, L. H. Neural correlates of prior expectations of motion in the lateral intraparietal and middle temporal areas. *The Journal of Neuroscience*, *32*(29), 10063-10074, 2012.

29. Mulder, M. J., Wagenmakers, E. J., Ratcliff, R., Boekel, W., & Forstmann, B. U. Bias in the brain: a diffusion model analysis of prior probability and potential payoff. *The Journal of Neuroscience*, 32(7), 2335-2343, 2012.
30. von Helmholtz, H. The Perceptions of Vision, Treatise on Physiological Optics. New York: Optical Society of America, 1910.
31. Verplanck, W. S., Collier, G. H., & Cotton, J. W. Nonindependence of successive responses in measurements of the visual threshold. *Journal of Experimental Psychology*, 44(4), 273, 1952.
32. Bertelson, P. Serial choice reaction-time as a function of response versus signal-and-response repetition. *Nature* 206, 217-218, 1965.
33. Treisman, M., & Williams, T. C. A theory of criterion setting with an application to sequential dependencies. *Psychological Review*, 91(1), 68, 1984.
34. Bode, S., Sewell, D. K., Lilburn, S., Forte, J. D., Smith, P. L., & Stahl, J. Predicting perceptual decision biases from early brain activity. *The Journal of Neuroscience*, 32(36), 12488-12498, 2012.
35. Akaishi, R., Umeda, K., Nagase, A., & Sakai, K. Autonomous mechanism of internal choice estimate underlies decision inertia. *Neuron*, 81(1), 195-206, 2014.

36. Körding, K. Decision theory: what "should" the nervous system do?.
Science, 318(5850), 606-610, 2007.
37. Yu, J. A., & Dayan, P. Uncertainty, neuromodulation, and attention.
Neuron, 46(4), 681-692, 2005.
38. Gold, J. I., Law, C. T., Connolly, P., & Bennur, S. The relative influences of priors and sensory evidence on an oculomotor decision variable during perceptual learning. *Journal of Neurophysiology*, 100(5), 2653-2668, 2008.
39. Huq, S. F., Garety, P. A., & Hemsley, D. R. Probabilistic judgments in deluded and non-deluded subjects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 40A, 801-812, 1988.
40. Kaney, S., & Bentall, R. P. Persecutory delusions and the self-serving bias. Evidence from a contingency judgment task. *The Journal of Nervous and Mental Disease*, 180(12), 773-80, 1992.
41. Green, D. M., & Swets, J. A. Signal detection theory and psychophysics. New York: Wiley, 1996.
42. Manoach, D. S., Thakkar, K. N., Cain, M. S., Polli, F. E., Edelman, J. A., Fischl, B., & Barton, J. J. Neural activity is modulated by trial history: a functional

magnetic resonance imaging study of the effects of a previous antisaccade. *The Journal of Neuroscience*, 27(7), 1791-1798, 2007.

43. Harlé, K. M., Shenoy, P., Stewart, J. L., Tapert, S. F., Angela, J. Y., & Paulus, M. P. Altered neural processing of the need to stop in young adults at risk for stimulant dependence. *The Journal of Neuroscience*, 34(13), 4567-4580, 2014.
44. Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. Detection theory: A user's guide. Psychology Press, 2004.
45. Celebrini, S., & Newsome, W. T. Neuronal and psychophysical sensitivity to motion signals in extrastriate area MST of the macaque monkey. *The Journal of Neuroscience*, 14(7), 4109-4124, 1994.
46. McDonald, J. J., Teder-Sälejärvi, W. A., & Hillyard, S. A. Involuntary orienting to sound improves visual perception. *Nature*, 407(6806), 906-908, 2000.
47. Ivanoff, J., Branning, P., & Marois, R. fMRI evidence for a dual process account of the speed-accuracy tradeoff in decision-making. *PLoS One*, 3(7), e2635, 2008.
48. Ress, D., Backus, B. T., & Heeger, D. J. Activity in primary visual cortex predicts performance in a visual detection task. *Nature Neuroscience*, 3(9), 940-945, 2000.

49. Ogawa, S., Lee, T. M., Nayak, A. S., & Glynn, P. Oxygenation - sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic Resonance in Medicine*, 14(1), 68-78, 1990.
50. Pavone, P., & Rossi, P. (Eds.). *Functional MRI*. Springer Milan, 1996.
51. Penny, W. D., Friston, K. J., Ashburner, J. T., Kiebel, S. J., & Nichols, T. E. (Eds.). *Statistical parametric mapping: the analysis of functional brain images: the analysis of functional brain images*. Academic press, 2011.
52. Poldrack, R. A., Mumford, J. A., & Nichols, T. E. *Handbook of functional MRI data analysis*. Cambridge University Press, 2011.
53. Henson, R. Forward inference using functional neuroimaging: Dissociations versus associations. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 64-69, 2006.
54. Hernandez, L., Wager, T., & Jonides, J. Introduction to functional neuroimaging. *Ann Arbor*, 1001, 48109-1109, 2001.
55. Silk, T. J., Bellgrove, M. A., Wrafter, P., Mattingley, J. B., & Cunnington, R. Spatial working memory and spatial attention rely on common neural processes in the intraparietal sulcus. *Neuroimage*, 53, 718-724, 2010.

56. Levitt, H. Transformed up - down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical society of America*, 49(2B), 467-477, 1971.
57. Akaike, H. Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models. *Biometrika*, 60(2), 255-265, 1973.
58. Bursac, Z., Gauss, C. H., Williams, D. K., and Hosmer, D. W. Purposeful selection of variables in logistic regression. *Source Code Biol. Med.*, 3:17, 2008.
59. Slotnick, S. D., Moo, L. R., Segal, J. B., & Hart, J. Distinct prefrontal cortex activity associated with item memory and source memory for visual shapes. *Cognitive Brain Research*, 17(1), 75-82, 2003.
60. Forman, S. D., Cohen, J. D., Fitzgerald, M., Eddy, W. F., Mintun, M. A., & Noll, D. C. Improved assessment of significant activation in functional magnetic resonance imaging (fMRI): use of a cluster - size threshold. *Magnetic Resonance in Medicine*, 33(5), 636-647, 1995.
61. Carterette, E. C., Friedman, M. P., & Cosmides, R. Reaction - Time Distributions in the Detection of Weak Signals in Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 38(4), 531-542, 1965.

62. Domenech, P., & Dreher, J. C. Decision threshold modulation in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, 30(43), 14305-14317, 2010.
63. Rahnev, D., Lau, H., & de Lange, F. P. Prior expectation modulates the interaction between sensory and prefrontal regions in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, 31(29), 10741-10748, 2011.
64. Philiastides, M. G., Auksztulewicz, R., Heekeren, H. R., & Blankenburg, F. Causal role of dorsolateral prefrontal cortex in human perceptual decision making. *Current Biology*, 21(11), 980-983, 2011.
65. Dumoulin, S. O., Bittar, R. G., Kabani, N. J., Baker, C. L., Le Goualher, G., Pike, G. B., & Evans, A. C. A new anatomical landmark for reliable identification of human area V5/MT: a quantitative analysis of sulcal patterning. *Cerebral Cortex*, 10(5), 454-463, 2000.
66. Amano, K., Wandell, B. A., & Dumoulin, S. O. Visual field maps, population receptive field sizes, and visual field coverage in the human MT+ complex. *Journal of Neurophysiology*, 102(5), 2704-2718, 2009.

67. Courtney, S. M., Ungerleider, L. G., Keil, K., & Haxby, J. V. Transient and sustained activity in a distributed neural system for human working memory. *Nature*, 386(6625), 608-611, 1997.
68. Zanto, T. P., Rubens, M. T., Thangavel, A., & Gazzaley, A. Causal role of the prefrontal cortex in top-down modulation of visual processing and working memory. *Nature Neuroscience*, 14(5), 656-661, 2011.
69. Riggall, A. C., & Postle, B. R. The relationship between working memory storage and elevated activity as measured with functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, 32(38), 12990-12998, 2012.
70. Sakai, K., Rowe, J. B., & Passingham, R. E. Active maintenance in prefrontal area 46 creates distractor-resistant memory. *Nature Neuroscience*, 5(5), 479-484, 2002.
71. Sharika, K. M., Neggers, S. F., Gutteling, T. P., Van der Stigchel, S., Dijkerman, H. C., & Murthy, A. Proactive control of sequential saccades in the human supplementary eye field. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(14), E1311-E1320, 2013.
72. Corbetta, M., & Shulman, G. L. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 201-215, 2002.

73. Wen, X., Yao, L., Liu, Y., & Ding, M. Causal interactions in attention networks predict behavioral performance. *The Journal of Neuroscience*, 32(4), 1284-1292, 2012.
74. Corradi-Dell'Acqua, C., Fink, G. R., & Weidner, R. Selecting category specific visual information: Top-down and bottom-up control of object based attention. *Consciousness and Cognition*, 35, 330-341, 2015.
75. Zehetleitner, M., Hegenloh, M., & Müller, H. J. Visually guided pointing movements are driven by the salience map. *Journal of Vision*, 11(1), 24, 2011.
76. Pooresmaeili, A., Bach, D. R., & Dolan, R. J. The effect of visual salience on memory-based choices. *Journal of Neurophysiology*, 111(3), 481-487, 2014.
77. LaBar, K. S., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. Neuroanatomic overlap of working memory and spatial attention networks: a functional MRI comparison within subjects. *Neuroimage*, 10(6), 695-704, 1999.
78. de Fockert, J. W., Rees, G., Frith, C. D., & Lavie, N. The role of working memory in visual selective attention. *Science*, 291(5509), 1803-1806, 2001.

79. Greccucci, A., Soto, D., Rumiati, R. I., Humphreys, G. W., & Rotshtein, P. The interrelations between verbal working memory and visual selection of emotional faces. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(6), 1189-1200, 2010.
80. Hau, R., Pleskac, T. J., Kiefer, J., & Hertwig, R. The description–experience gap in risky choice: The role of sample size and experienced probabilities. *Journal of Behavioral Decision Making*, 21(5), 493-518, 2008.
81. Hertwig, R., & Erev, I. The description–experience gap in risky choice. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(12), 517-523, 2009.
82. Efron, B. Bayesians, frequentists, and scientists. *Journal of the American Statistical Association*, 100, 1-5, 2005.
83. Epstein, L. G., Schneider, M. Learning under ambiguity. *The Review of Economic Studies*, 74, 1275-1303, 2007.

7. 資料

資料 1

MR I 実験事前質問表

(以下の項目に「有」がある場合には被験者になることはできません。)

・心臓ペースメーカーの使用	有	無
・脳血管のクリップの使用	有	無
・神経の電気刺激装置の使用	有	無
・埋め込み式ポンプの使用	有	無
・金属片の体内残存	有	無
・貼薬（ニコチネール TTS、ニトロダーム TTS 等）の使用	有	無
・現在の妊娠の有無	有	無
・入れ墨（入れ墨式のアイライン等を含む）の有無	有	無

(以下の項目に「有」が場合には被験者としては注意が必要です。実験担当者によく打ち合せた上で実験を行ないます。)

・グリセリンパッチの使用（パッチが外せない場合過熱の危険性あり）	有	無
・耳内人工物（人工鼓膜などは問題ないが人工内耳の使用者は被験者になれない）		
	有	無
・骨折などの補綴のための金属板やネジが体内にある	有	無
・金属による目の外傷（X線による金属片残存の有無を確認する必要）	有	無
・外傷あるいはそれに伴う外科的な手術の経験	有	無
・IUDの使用（ほとんど問題はないが、例外がある）	有	無
・（着脱式を含む）義歯の使用		
有		
無		
・義眼の使用	有	無
・メニエール病等の内耳疾患経験の有無	有	無
・人工心臓弁の使用（現在ほとんどプラスチック製で問題は少ない）	有	無
・現在母乳授乳している（ガドリニウムによる造影をする場合に除外）	有	無
・歯列矯正用ブリッジ装着（EPI が artifact をもたらす可能性）	有	無
・閉所恐怖症	有	無
・運動障害（動きによる artifact をもたらす可能性）	有	無

- | | | |
|---|---|---|
| ・強度の視覚障害や聴覚障害 | 有 | 無 |
| ・狭心症など心臓発作の経験 | 有 | 無 |
| ・てんかん発作の経験 | 有 | 無 |
| ・偏頭痛の有無 | 有 | 無 |
| ・ピカピカした光を見て気持ちが悪くなった経験 | 有 | 無 |
| ・金属研磨の職業歴 | 有 | 無 |
| (以下の物は実験前に取り除いていただきます。普段使用しているものを確認願います。) | | |
| ・金属の装飾品（イヤリング、ピアス等） | 有 | 無 |
| ・腕時計 | 有 | 無 |
| ・ヘアピン、髪止め等 | 有 | 無 |
| ・眼鏡 | 有 | 無 |
| ・衣服についた金属（金属ボタン、下着の金属等） | 有 | 無 |
| ・金属を含有する化粧品（アイシャドーなどに含まれる場合がある） | 有 | 無 |
| ・カラーコンタクトレンズ（収納用のケースをご用意ください） | 有 | 無 |
| ・かつら | 有 | 無 |
| ・補聴器 | 有 | 無 |

以上の通り相違ありません。

説明者 東京大学医学系研究科・認知言語神経科学分野

氏名 金子 宜之

平成 年 月 日

被験者 氏名 _____

年齢 _____ 歳

同意書

東京大学医学部長殿

私は下記の研究に被験者として参加するにあたり、研究担当者（認知言語神経科学分野 金子宜之）から別紙説明書記載の事項について説明を受け、これらの内容を十分に理解しましたので、私自身の自由な意志で本実験に参加することに同意します。

研究課題： 機能的 MRI を用いたヒトにおける確率情報を元にした知覚的意思決定に関する研究

平成 年 月 日

被 験 者 氏 名

印

住 所