

茨城県立医療大学大学院博士論文

知覚における確信度の計算メカニズム

新 國 彰 彦

茨城県立医療大学大学院博士後期課程保健医療科学研究科
理学療法学専攻

2015年3月

論文要旨

2015年3月19日

茨城県立医療大学大学院博士後期課程

専攻名	保健医療科学	学籍番号	45030067	氏名	新國 彰彦
研究テーマ	知覚における確信度の計算メカニズム				

【背景】 私たちの視覚経験は、状況によって変化する。たとえ、物理的に同一のものを見ていても、主観的に感じる確からしさは、毎回、様ではない。近年、そのような確からしさ（確信度）のゆらぎに着目することで、従来、本人にしか分からないとされてきた主観経験に対して実験的アプローチができる可能性がでてきた。しかし、その確信度の神経基盤・計算メカニズムの詳細は不明であった。

【目的】 本研究では、まず、動物実験において、視知覚における確信度を行動学的に推定し、その神経基盤を探る。次に、ヒトに同様の行動課題を課して、主観的報告から得られる確信度を定量評価する。そして、両者の結果を、数理モデルを用いて比較することで、霊長類に共通する確信度の計算メカニズムを検証する（実験1）。さらに、確信度を表出するまでの過程を、新たにメタ認知の観点から検討することで、ヒトの視知覚系が有する客観—主観機能の関係性を、明らかにする（実験2）。

【方法】 実験1では、サル（*Macaca mulatta*）の知覚判断に対する確信度を推定するために、判別回避課題を導入した。この課題では、刺激属性を問う二択の判別か、判別回避かという、三者択一の判断を課し、判別に正解した場合と、回避行動を選択した場合の報酬量に差をつけることで、個体の確信度を推定した。その上で、課題遂行中のサルの視床枕という領域から神経活動を記録した。また、ヒトの知覚心理実験を行い、観察者が下した6段階の確信度評定から、主観的確からしさを直接的に測定した。実験2では、同一の健常観察者に対し、二種の視覚課題、刺激の存在を問う検出課題と刺激の属性を問う弁別課題を行い、各課題で、判別成績に利用された情報ソースと確信度評定に利用された情報ソースの差（相対的メタ認知感受性）を定量することで、二つの課題から視知覚系のメタ認知過程を評価した。

【結果及び考察】 実験1の判別回避課題では、サルは刺激が曖昧になるにつれて回避行動を頻繁に選択した。この課題中の神経活動を解析したところ、視床枕応答が弱い場合にはサルは回避行動を選択し、応答が強い場合には判別行動を選択することわかった。刺激変数を横軸とする関数として捉えると、サルの視床枕の神経応答パターンと、ヒトの主観報告パターンに相同性がみられた。信号検出理論を用いると、双方の結果は、知覚判別における確信度の揺らぎを反映する単一のモデルで再現できた。このことは、サルとヒトで共通した確信度の計算過程を経ていることを示唆する。これら実験1で示した確信度は、メタ認知の結果であるが、その計算過程までは明らかではない。そこで、実験2では、確信度を表出する際に、自己が下した知覚判断の正誤についてどれだけ自覚的であったかを、相対的メタ認知感受性として算出した。その結果、検出課題では最適値を示す相対的メタ認知感受性が、弁別課題において、特異的に低下することが判明した。このことは、検出系においては、判別成績を正確に把握し確信度を表出しているのに対し、弁別系では、判別成績に利用した情報に比べて減衰した情報が確信度評定へ利用されていることを意味する。過去の研究において、知覚の意識・無意識の境界域で、検出・弁別成績が乖離する状況が度々指摘されてきたが、本知見は、そのメカニズムに、両課題におけるメタ認知過程の相違が関与していることを示唆する。

【今後の課題】 今後、視覚系検出—弁別間でメタ認知感受性が異なるという点も踏まえて、確信度を支える脳内機構の全貌を明らかにする必要がある。

【結語】 本研究では、知覚の確からしさを計算する神経基盤の一端を発見し、サル・ヒトの実験結果から、霊長類に共通する確信度の計算メカニズムを示した。また、ヒトの視覚検出・弁別系の行動成績と確信度の関係性を比較することで、メタ認知処理において、課題特異的な過程が存在することが明らかになった。これは、同様の視覚刺激でも、状況によって異なるメタ認知過程を経て、異なる主観知覚を形成する可能性を示唆する。確信度という観点から主観知覚の計算原理に踏み込んだ本成果は、外界の情報が“何であり、確かにそこにある”という知覚意識の成立メカニズムとその病態解明へ大いに資すると考える。

目次

第1章	序論	1
第2章	実験1 霊長類に共通する確信度の計算過程	2
第1節	実験1-1 方法 — サルの神経生理実験 —	4
2.1.1	対象	4
2.1.2	実験装置	4
2.1.3	視覚刺激および実験手続き — 実験1-1 判別回避課題 —	4
2.1.4	データ解析	5
第2節	実験1-2 方法 — ヒトの行動心理実験 —	7
2.2.1	対象	7
2.2.2	実験装置	7
2.2.3	視覚刺激および実験手続き — 実験1-2a 動き知覚の確信度評定—	7
2.2.4	視覚刺激および実験手続き — 実験1-2b 傾き知覚の確信度評定—	8
2.2.5	データ解析	8
第3節	実験1 結果	10
2.3.1	実験1-1 サルの視床枕応答と確信度	10
2.3.2	実験1-2 ヒトの視知覚における確信度	13
2.3.3	確信度モデルによる検証	17
第4節	実験1 考察	21
第3章	実験2 視覚系検出・弁別間におけるメタ認知過程	25
第1節	実験2 方法	26
3.1.1	対象	26
3.1.2	実験装置	26
3.1.3	視覚刺激および実験手続き —実験2-1 ランダムドット刺激の検出と弁別—	26
3.1.4	視覚刺激および実験手続き —実験2-2 ガボールパッチの検出と弁別—	27
3.1.5	データ解析	29

3.1.5.1	客観指標の算出 (Type1 SDT; d' , Type1 ROC)	29
3.1.5.2	主観指標の算出 (Type2 SDT; meta- d' , meta-Type1 ROC)	30
3.1.5.3	客観指標と主観指標の関係性評価 (相対的メタ認知感受性)	32
3.1.5.4	統計処理	32
第2節	実験2 結果	36
3.2.1	実験2-1 結果	36
3.2.2	実験2-2 結果	36
第3節	考察	39
第4章	結語	43
第5章	謝辞	44
	引用文献	45

図表目次

図1	確信度を測る行動手法	3
図2	サルにおける判別回避課題と視床枕応答	11
図3	ヒトで用いたランダムドット刺激の Coherence レベル	14
図4	ヒトにおける知覚判別と確信度評定	15
図5	信号検出理論における知覚判別と確信度	19
図6	確信度モデルによる再現	20
図7	視床枕における確信度ニューロンの分布	23
図8	確信度を支える神経ネットワーク	24
図9	実験2における検出・弁別課題	28
図10	Type1 および Type2 信号検出理論	33
図11	客観指標 (d') と主観指標 (meta- d') の算出方法の概要	34
図12	ROC による検出・弁別課題の相対的メタ認知感受性	37
図13	AUC による検出・弁別課題の相対的メタ認知感受性の定量化	38
図14	検出・弁別課題における客観-主観処理のスキーマ	41
補足1	同一刺激の検出と弁別	42

第1章 序論

臨床の現場で、我々は、脳に障害を負った患者のふるまいの逸脱に、しばしば驚かされる。その際に、患者に寄り添う臨床家として、真先に知りたくなることは、その患者が、身の回りの環境を、どのように捉え、どのように感じているかという主観的世界である。昨今、検査テストの発展に伴って、患者をとりまく客観的データは、容易に入手可能になっているが、主観的側面については、究極のところ、その患者のみぞ知るといふ扱いにとどまっていることが多い。そもそも、健常者の主観機能のメカニズムについてすら、理解が進んでいない[1]。その一因に、本来、その個人にしか分からない主観そのものに対する有効な評価法が定まっていなかったことが挙げられる。本研究では、これまで神経科学の中で、最も知見が集積してきた視知覚を対象に、確信度という指標を用いた、新しい切り口から、主観機能のメカニズムに迫ることにした。

我々の視覚経験は、単に、目の前にある物理世界のコピーではない。たとえ、物理的に同一のものを見ていても、視覚経験は一樣ではなく状況によって変化する。例えば、ある刺激が見えたか見えなかったかをテストした場合にも、“確かに見えた”、“おそらく見えた”、“見えたかどうか分からない”というように、ある事象をどのくらい確からしく感じるか程度の差が生まれる。近年、このような観察者の確からしさ（確信度）を利用することで、これまで、研究テーマとして扱いにくかった主観経験に定量的なアプローチができるようになってきた[2]。しかし、その確信度の神経基盤と計算メカニズムについての詳細は明らかではなかった。

そこで本研究では、まず、動物実験において、知覚判断に対する個体の自信の程度を行動学的に推定し、その神経基盤を生理学的手法から探った。しかし動物に、主観経験を、直接確認することはできないので、次に、ヒトを対象として同様の課題を行うことで、明示的に報告された知覚の確信度を測定した。そして、これら、動物実験で得られた神経活動パターンと、ヒトの心理実験で得られた主観報告パターンを、数理モデルを用いて比較することで、動物とヒトで共通する確信度のメカニズムを検証した。さらに、物理的な視覚情報が主観的な確信度として変換するまでの過程を、メタ認知の観点から検討することで、ヒトの視知覚系が有する客観—主観機能の関係性を実験心理学および計算科学的手法から推察した。

第2章 実験1 霊長類に共通する確信度の計算過程

外界の情報をどのくらい確かに理解しているかという知覚の確信度に対し、科学的にアプローチするためには、まず、視覚対象が何であったかという判別に加えて、どのくらい確からしく感じたかという主観を、実験フレームの中で定量化する必要がある。

ヒトを対象とした場合には、確信度評定が有用な手法として、用いられてきた(図1A) [3-5]。知覚判別課題を例にとると、観察者に、二通りの刺激(刺激A/刺激B)を呈示し、刺激はAであったか(判別A)、Bであったか(判別B)という判断を求める。その後、自己が下した判別に対する確信度を、“自信がある(Sure)”もしくは“当てずっぽう(Guess)”という言語報告や、“自信がある”を「2」、 “自信がない”を「1」とするような数値スケールを通して、明示的に報告させる。このように個人に委ねられた確信度を定量化するためには、課題の教示を理解できるヒトを対象とする他にないと考えられてきたが、ある行動テストを導入することで、ヒト以外の霊長類から、自己判断に対する自信の程度を測定可能にした。それは、“判別回避課題(Opt-out task)”という行動手法である(図1B) [6-8]。判別回避課題では、二者択一の判別A・Bに加えて、判別を回避することができる3つ目の選択肢Cを用意し、三者択一の判断を固体に課す。また、このとき、個体が判別A・Bを選び、かつ正解した場合には大きな報酬を与え、間違えれば何も与えない。しかし、3つ目の選択肢Cを個体が選択した場合には、少量ながら常に報酬を与えるという状況を作る。このような報酬量に差のついた状況で、固体の行動を予測すると、自分の判断に自信があれば大きな報酬がもらえるリスクな判別行動(A・B)を、自信がなければ少ない報酬を安全にもらえる回避行動(C)を選ぶことが予想される。

このような行動手法を、実際に、サルの行動課題へ導入することで、確信度の神経基盤にアプローチした。本研究では、視覚系視床のうち視床枕という領域に着目した。視床枕は、ほぼすべての皮質領野と解剖学的結合を有し、進化の過程でめざましく拡大してきた連合核である[9-12]。過去の知見から、視床—大脳皮質ループによって知覚意識が生成されるという仮説が提案されている[2, 13, 14]。視床枕がもつ構造特性から、知覚意識を支える上で重要な信号が潜んでいる可能性が考えられた。

本章では、まず、サルの神経生理実験において、視床枕の神経活動と確信度との関係性を示す(実験1-1)。次に、ヒトの行動心理実験において、直接的に報告された確信度を測定し、その表出特性を示す(実験1-2)。そして、双方の結果に、計算科学的手法から迫ることで、霊長類に共通する確信度の計算メカニズムを明らかにする。

第1節 実験 1-1 方法 — サルの神経生理実験 —

2.1.1 対象

2頭のニホンザル（体重5–9 kg, 3–8 歳）を対象とした。本研究は、産業技術総合研究所動物実験委員会（動2012-052）の承認を得たものであり、研究の遂行に際しては、同研究所の動物実験・実験動物取扱ガイドラインに従って行った。また、動物倫理の点から、使用する個体数は最小限にとどめた。頭部の固定および微小電極を刺入する目的で、ヘッドホルダーと神経活動記録用チャンバーを、麻酔下の外科手術によって、個体の頭部上に設置した。チャンバーの位置は、右の視覚系視床を標的としてMRIをもとに決定し、右頭頂葉の上、正中線から外側20°の角度で設置した。また、眼球運動を記録するために、麻酔下の外科手術によって、結膜にサーチコイルを留置した。

2.1.2 実験装置

行動実験：リアルタイムデータ取得システム REX (OS; QNX) を使用し、ViSaGe (Cambridge Research Systems) による刺激作成と呈示、および行動課題の進行を制御した。刺激呈示には CRT モニター (SONY, 21 inch, frame rate; 100 Hz, 視距離 57 cm) を用い、実験で用いた一連の刺激は色彩輝度計 (Minolta, ColorCAL) を用いて校正した。実験中、個体の眼球運動は、1 kHz の精度で記録した (Datel)。サルの頭部を固定し、課題を遂行するためのモンキーチェア内には、課題応答に使用する 4 つバーを設置した (図 2 A; 中央バー, 左・右バー, 下バー)。

神経活動記録：単一神経活動記録にはタングステン微小電極を用い、マニピュレーター (MO-97A, Narishige) によって脳内へ刺入した。スパイクデータは、Plexon (Neurotechnology Research Systems) を使用し取得した。

2.1.3 視覚刺激および実験手続き — 実験 1-1 判別回避課題 —

視覚刺激：標的には、ランダムドット刺激 (random-dots stimulus; RDS) を用い、黒の背景画面上に呈示した (dot size; 0.165°, aperture size; 4.7–8.8°, dots density; 16.8 dots / degree², speed; 15.8° / sec)。図 2 B に実験 1-1 で用いた RDS の例を示す。この RDS は、2 種類の色 (赤 (CIE 色度; $x = 0.623, y = 0.34$), 緑 (CIE 色度; $x = 0.288, y = 0.6$)) と 2 種類の動き (上, 下) から構成された。計 4 種類の刺激の混合比を変えることで、刺激の曖昧さを操作した。赤色でかつ下に動くドットの割合 (red-down pairing ratio) を X とおくと、 $X = 0$ では、赤のドットは全て上に動き、 $X = 100$ では赤のドットは全て下に動く。 $X = 50$ に近づくとつれて、動きの判別がつきにくくなる刺激構成とした。サルの行動課題では、 $X = 0$,

30, 45, 55, 70, 100 の計 6 種類の刺激を呈示した。

実験手続き：図 2 A に，実験 1-1 の一試行の時系列を示す。サルは，あらかじめ固視点 (0.33°) で指定された色のドットの集合体について，上下どちらに動いたかを判断することが求められる。図 2 A は，赤のドットが標的の場合である。まず，サルが中央のバーを触ると，色のついた固視点が呈示された。それを 600 ms 注視すると，固視点の色が白に変わり，300~600 ms 呈示された。その後，標的である RDS が 500 ms の呈示時間で左視野に呈示された。RDS が消えた後，400~900 ms の遅延をはさむと，固視点の色がグレイに変わり，サルが動きの判別をする合図とした。ドットの動きが上だと判断した場合には右のバーを，下だと判断した場合には左のバーを触ることで報告させ，正解した場合にのみ，報酬として水もしくはジュースを与え，エラーの場合にはブザー音を呈示した。また，この他に，サルには判別を回避することができる下のバーを用意した。サルが下のバーを選択した場合には，少量ながら常に少ない量の報酬を与えた。判断の制限時間は 1 秒以内とした。また，ターゲットとなるドットの色は，試行毎にランダム化した。

2.1.4 データ解析

解析にあたっては，測定データの類似性から 2 頭のデータを統合して行った。

行動データ：判別に正解した試行と，エラーした試行，回避行動を選んだ試行の 3 種類に分け，呈示された 6 種類の RDS 毎に，各行動の割合を算出した (図 2 C)。

神経活動：神経活動の解析にあたっては，左視野に受容野をもつ視覚応答性の視床枕ニューロンに限定した。各ニューロンの受容野の位置は，記録開始前に，サルが固視点を注視している間に視覚刺激を呈示し，確認した。発火頻度は，スパイクの時系列を，Gaussianカーネル ($\sigma = 10 \text{ ms}$) の畳み込みによって平滑化し算出した。視床枕の早期応答は，RDS呈示後，50~150 msの期間に観察された発火頻度とした。後期応答は，RDS呈示後，400~500 msの期間に観察された発火頻度とした。また，視覚応答性ニューロンは，RDSの呈示前100 msの発火頻度に比べ，早期応答もしくは後期応答の発火頻度が有意に高いニューロンとした (Wilcoxon signed-rank test, $p < 0.01$)。判別回避課題では，計133個の視床枕ニューロンを記録した。そのうち，RDSの関数として後期応答の発火頻度をプロットした場合に，正解事象でV字 (図2 E) の関数をとった72個のニューロンを解析した。

計算モデル：判別回避課題で得られたデータと確信度との関係を検証するために，信号検出理論 (Signal detection theory; SDT) [15] を用いた数理モデルを構築した。各試行で観測される内的な信号値 (s) を以下で定義する。red-down pairing

ratio を x , $x = 0,100$ の状態を表現する正規分布の平均を m , 正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従ったノイズを n とおくと, 信号値 (s) は, 以下で表すことができる。

$$s = m(x - 50)/50 + n, n \in N(0, \sigma^2),$$

ここで, RDS の動きについての判別 ($R_{\text{down}}, R_{\text{up}}$) は, 信号値 (s) が判断基準 (b) を超えるか否かによって, 以下で決定される。

$$\text{Decision} = \{R_{\text{down}} \mid s < b; R_{\text{up}} \mid s > b\}, \quad (\text{i})$$

また, このモデルにおいて, 確信度の値 (Confidence value(d)) は, 信号値 (s) と判断基準 (b) の距離で表現される[16, 17]。

$$\text{Confidence value}(d) = |s - b|, \quad (\text{ii})$$

この確信度の値 (d) が, 確信度の閾値 (τ) を超えるか否かによって, 判別行動 (Risky) か回避行動 (Escape) かの決定がなされると仮定すると, 以下になる。

$$\text{Opt-out behavior} = \{\text{Risky} \mid d > \tau; \text{Escape} \mid d < \tau\}.$$

神経応答データ (図 2 E) を再現するにあたっては, 以上の m , σ , τ を最小二乗法によって決定した。

統計処理 : 統計処理は, MATLAB (MathWorks) を用いて行った。単一神経活動の解析には, 一元配置分散分析 (Kruskal-Wallis test) を用いた。事後検定として Steel-Dwass test を行った (図 2 D) 。また, 複数のニューロンの応答パターンの解析には, permutation test を用いて検定した (図 2 E) 。

第2節 実験 1-2 方法 — ヒトの行動心理実験 —

2.2.1 対象

健常成人 13 名（男性 9 名，女性 4 名），平均年齢 27.0 ± 2.4 (mean \pm SD) 歳を対象とした。そのうち 6 名は実験 1-2a に，7 名は実験 1-2b に参加した。研究を行うにあたって，協力者全員に本研究の目的と方法を十分に説明し同意を得た。本研究は茨城県立医療大学倫理委員会（558）および産業技術総合研究所人間工学実験委員会（人 2010-135C）の承認を得たものである。

2.2.2 実験装置

視覚刺激の作成には，実験 1-2a では Psychophysics toolbox-3 [18] を，実験 1-2b では ViSaGe (Cambridge Research Systems) を使用し，MATLAB (MathWorks) 上で制御した。刺激呈示には CRT モニター (Mitsubishi, 22 inch, frame rate; 75 Hz (実験 1-1a), 100 Hz (実験 1-2b), 視距離 57 cm) を用いた。実験 1-2b において，用いた一連の刺激は色彩輝度計 (Minolta, ColorCAL) を用いて校正した。協力者にはアゴ台で頭部を固定した状態でモニターを注視させた。協力者の課題応答には，実験 1-2a では，通常のデスクトップ PC 用のキーボードを，実験 1-2b では 6 つの反応キーがあるレスポンスボックス (Cambridge Research Systems, CB6 Response Box) を使用した。

2.2.3 視覚刺激および実験手続き — 実験 1-2a 動き知覚の確信度評定 —

視覚刺激： 標的には，ヒトの心理物理実験で一般的に用いられるランダムドット刺激 (RDS) を用いた (dot size; 0.125° , aperture size; 6.0° , dots density; 16.7 dots / degree², dots speed; 5° / sec)。ドットの集合体のうち上または下に動くドットの割合 (Coherence; 図 3 参照) を変化させ刺激の曖昧さを操作した。呈示した Coherence レベルは，実験に先立ち協力者毎に測定した，RDS の上下の動きについての 70% 弁別閾 (X) から決定した (Staircase procedure, 1up-2down method [19])。70% 弁別閾を $X = 1$ とおき，その 2 倍，4 倍，8 倍の Coherence を呈示した。下に動く刺激をマイナス，上に動く刺激をプラスとおくと， $X = -8, -4, -2, -1, +1, +2, +4, +8$ の計 8 種類の RDS を呈示した。

実験手続き： 図 4 A に実験 1-2a の一試行の時系列を示す。まず，画面中央に固視点 (0.3°) が 320~520 ms の時間で呈示された。その後，標的が 520 ms の呈示時間で，固視点から左へ 5° の位置に呈示された。標的が消えた後，固視点が赤に変わると，RDS が上へ動いたか，下に動いたかという動きの判断を二択のキー押しで求めた。上だと判断した場合には，キーボードの “→” を，下だと判断した場合には，“←” を押すよう求めた。その後，固視点が青に変わると，確信度を

6段階のキー押しで報告させた。最も自信がある場合を“6”，最も自信がない場合を“1”として，テンキーパッドの1から6に対応して押すことで報告させた。また，評定に際しては，1から6まですべて使用するよう指示した。上もしくは下に動くRDSの出現頻度は50%とし，ランダムに呈示した。各協力者は，120試行を1ブロックとして，計5ブロック，600試行を行った。

2.2.4 視覚刺激および実験手続き — 実験 1-2b 傾き知覚の確信度評定—

視覚刺激：標的には，ガボールパッチ（size; 2.4° , spatial frequency; 2 cycle per degree (cpd), %contrast = 15%）を用いグレイ（15 cd / m²）の背景画面上に呈示した（図 4 C）。ガボールパッチは正弦格子刺激を二次元ガウス関数によって平滑化したものである。 45° を基準にガボールの縞の傾きを変えることで，刺激の曖昧さを操作した。実験 1-2a と同様に，呈示した刺激は，あらかじめ測定したガボールの傾きについての 70%弁別閾から決定した[19]。70%弁別閾となるガボールの傾き $45 \pm X^\circ$ のうち X を 1 とし，その 2 倍，4 倍，8 倍の傾きを呈示した。 45° に対して反時計回りの刺激（counter-clockwise; CCW）をマイナス， 45° に対して時計回りの刺激（Clockwise; CW）をプラスにとると， $X = -8, -4, -2, -1, +1, +2, +4, +8$ までの計 8 種類の傾きをもつガボールパッチを呈示した。

実験手続き：図 4 C に実験 1-2b の一試行の時系列を示す。まず，画面中央に固視点（ 0.3° ）が 300~500 ms の時間で呈示された。その後，標的が 100 ms の呈示時間で，固視点から左へ 5° の位置に呈示された。標的が消えた後，Q1において，呈示された刺激は CCW か CW かという判断を二択のキー押しで求めた。そして，実験 1-2a と同様に，確信度を 6 段階のキー押しで報告させた。CW もしくは CCW の刺激は，50%の出現頻度でランダムに呈示された。各協力者は，200 試行を 1 ブロックとして，計 5 ブロック，1000 試行を行った。

実験 1-2a, 1-2b とともに判別および確信度評定の制限時間は 5 秒以内とし，判別の正誤に関するフィードバックは与えなかった。ブロック間は十分に休憩をはさみデータを測定した。

2.2.5 データ解析

行動データ：実験 1-2a, 1-2b とともに，協力者毎に得られたデータを判別に正解した事象とエラーの事象に分類し，それぞれの事象における確信度の平均評定値を，呈示された 8 種類の刺激毎に算出した。そして，その値をすべての協力者平均としてプロットした（図 4 B, D）。

計算モデル：確信度評定の状況を SDT の観点から検証するために，評定モデルを構築した。各試行で観測される内的な信号値（ s ）を以下で定義する。呈示した刺激の X 値を x ， $x = \pm 8$ の状態を表現する正規分布の平均を m ，正規分布

$N(0, \sigma^2)$ に従ったノイズを n とおくと、信号値 (s) は、以下で表すことができる。

$$s = mx/8 + n, n \in N(0, \sigma^2),$$

また、実験 1-1 と同様に、視覚刺激の判別 (R1, R2) と、確信度の値 (Confidence value(d)) を以下に定義する[16, 17]。

$$\text{Decision} = \{R1 \mid s < b; R2 \mid s > b\}, \quad (\text{i})$$

$$\text{Confidence value}(d) = |s - b|. \quad (\text{ii})$$

6 段階の確信度の閾値 (τ) を判断基準 (b) に近い方から両側に $\tau_1 \sim \tau_5$ まで仮定すると、評定値 (Confidence score) は、式 (ii) をもとに、以下で決定される。

$$\begin{aligned} \text{Confidence score} &= \{i \mid |\tau_{i-1} - b| \leq d < |\tau_i - b|\}, & (\text{ii}') \\ \text{where } i &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \\ \tau_0 &= b, \tau_6 = \pm\text{Inf}. \end{aligned}$$

評定データを再現するにあたっては、実験 1-2a と 1-2b のデータを統合した計 13 名の平均評定値を対象とし、以上の $m, \sigma, \tau_1 \sim \tau_5$ を最小二乗法によって決定した。

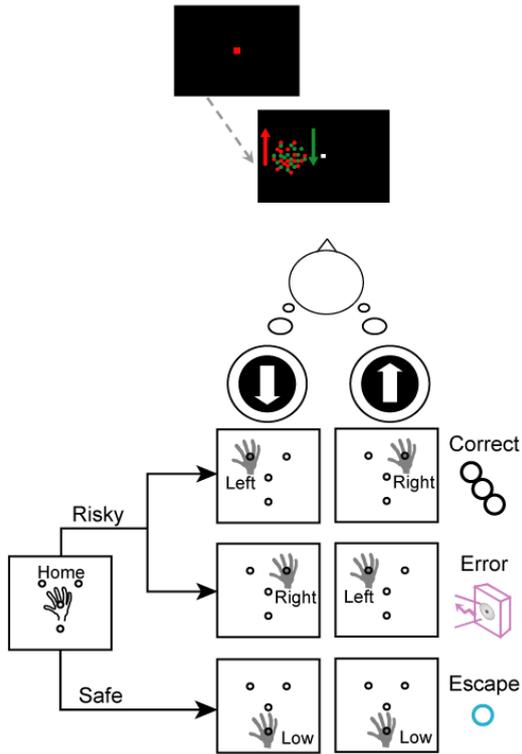
統計処理： IBM SPSS Statistics 20 を用いて反復測定による二要因分散分析を行った。

第3節 実験1 結果

2.3.1 実験1-1 サルの視床枕応答と確信度

図2 Aに、実験1-1で用いた判別回避課題を示す。この課題では、サルは、あらかじめ指定された色のドットの集合体が上下どちらに動いたかを、“上”もしくは“下”の判別行動か、回避行動かの三者択一で判断しなければならない。刺激の曖昧さをX軸にとり、サルが選択した各行動の割合を見てみると、予想通り、刺激が判別しやすい $X = 0$ および 100% から、刺激の判別がつきにくい $X = 50\%$ へ両側から近づくにつれて、回避行動を選ぶ割合が増えた(図2 B, C)。このことから、サルはやみくもに3つの行動を選択しているわけではないことがわかる。また、同一刺激に対する各行動の割合をみると、3つの判断が混在していた。したがって、サルは、単に物理的な刺激との対応で行動選択しているのではなく、内的な刺激の曖昧さをもとに行動選択していることが考えられる。次に、サルがこの課題を遂行中に、視床枕という領域から単一神経活動を記録した(図2 D, E)。図2 Dに、標的であるランダムドット刺激が呈示された期間に観察された、ひとつの視床枕ニューロンの応答例を示す。視床枕のニューロンは、二峰性の応答を示す。そのうち、視覚刺激を呈示した直後に一過性に応答する早期成分は、どの刺激が呈示されても応答に変化は見られなかった。しかし、同一の視覚刺激に対する後期成分を、サルが選んだ行動の種類毎にみてみると、正解、エラー、判別回避の順に、その大きさが減少した(Kruskal-Wallis test, $H = 890.4$, $p < 0.001$; post-hoc Steel-Dwass test, $p < 0.001$)。すなわち、視床枕の後期応答が弱い場合にはサルは回避行動を選択し、後期応答が強い場合には判別行動を選択する傾向が示された。図2 Eに、多数の視床枕ニューロンの発火頻度を平均し、視覚刺激の曖昧さの関数としてプロットしたものを示す。すると、判別に正解した場合にはV字、エラーの場合には逆V字、回避行動の場合にはほぼ一定という特徴的な応答パターンを示すことがわかった(permutation test; 正解 $p < 0.001$, エラー $p < 0.001$, 回避行動 $p > 0.28$)。このような視床枕の応答は、視覚刺激が呈示されている期間にのみ観察され、行動決定をする期間には観察されなかった。これらの結果を踏まえると、視床枕は、行動決定に対する確信度ではなく、外界をどのくらい確かに理解しているかという知覚の確信度を反映していることを示唆する。

A

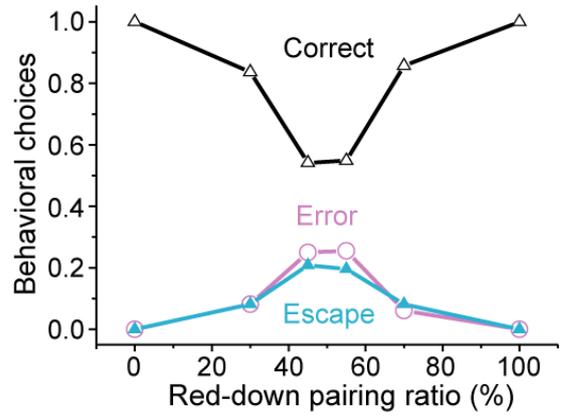


B

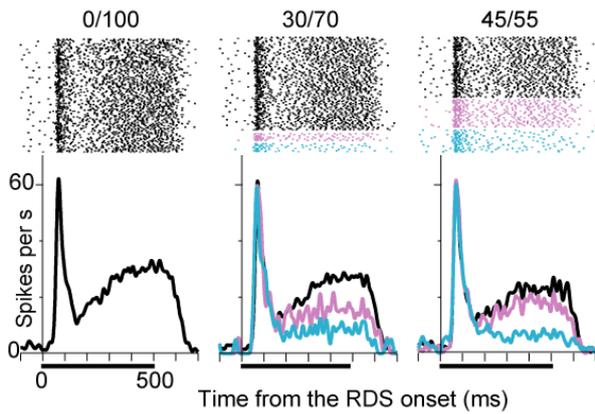
	Motion	
Color		
Red	X	100-X
Green	100-X	X

0	100	30	70	50	50	70	30	100	0
100	0	70	30	50	50	30	70	0	100

C



D



E

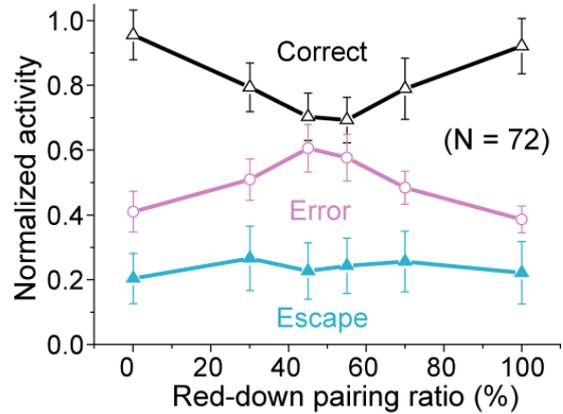


図 2 サルにおける判別回避課題と視床枕応答

(A) 実験 1-1 においてサルで行った判別回避課題。サルは、あらかじめ指定された色（図中では赤）のドットが、上下どちらに動いたかを判断しなければならない。上の場合には右のバーを、下の場合に左のバーを選択し、正解すれば大きな報酬が得られ、間違えればエラー音が鳴る。このほかに、サルには判別を回避することができる第三の選択肢、下のバーが用意されている。サルが下のバーを選択すると、少量ながら常に報酬がもらえる。

(B) 標的となるランダムドット刺激 (RDS) の構成。この RDS は、2 種類の色（赤・緑）と 2 種類の動き（上・下）の組み合わせから成る。計 4 通りの組み合わせのうち赤のドットかつ下に動く割合 (Red-down pairing ratio) を X とすると、 $X = 0$ では、赤のドットはすべて上に動き、 $X = 100$ では、赤のドットはすべて下に動く。 $X = 50$ に近づくにつれて、動きの判別がつきにくくなる。

(C) 判別回避課題における行動結果。

(D) RDS が呈示された期間に観察されたひとつの視床枕ニューロンの応答例。黒は判別に正解した試行を、ピンクはエラー試行を、ブルーは回避行動の試行を示す。左側から順に、 $X = 0, 100, X = 30, 70, X = 45, 55$ の RDS が呈示された試行における神経活動を示している。

(E) 視床枕ニューロンの応答パターン。72 個の視床枕ニューロンの後期応答を標準化および平均したものを、サルが選択した 3 つの行動タイプ毎に、呈示された RDS の関数としてプロットした (Error bars = mean \pm s.d.)。

2.3.2 実験 1-2 ヒトの視知覚における確信度

サルで用いた判別回避課題は、確信度を明示的に報告させることなしに、報酬量（ジュース）に差をつけ、いわば、自己の判断に“賭け”をさせることで、自信の程度を推定する間接的な手段である。そのような状況のもとで得られたサルの結果が、ヒトの主観的評価として直接表出される確信度と相同なのか確かめる必要がある。そこで、心理物理実験で一般的に用いられる二つの視覚刺激を用いて、ヒトの確信度評定から検証した。

ひとつは、サルの課題と類似するランダムドット刺激を用いた、動きの弁別課題である（図 4 A）。もうひとつは、ガボールパッチを用いた傾きの弁別課題である（図 4 C）。図 4 B, D に、二つの課題における確信度の平均評定値を示す。ヒトの確信度評定では、サルの判別回避課題のような回避行動のカテゴリーを設ける必要がなくなり、すべてのデータは、判別に正解した事象とエラーした事象の二つに集約することができる。それぞれの事象における確信度の平均評定値を、刺激の曖昧さの関数としてプロットすると、二つの課題ともに、判別に正解した事象では V 字、エラー事象では逆 V 字という、サルの視床枕応答における正解・エラーのパターンとよく似た関数を描くことがわかった（図 4 B, D, 二要因分散分析（判別の正誤 × 視覚刺激）；判別の正誤の主効果 $F(1,12) = 363.75, p < 0.01$, 視覚刺激の主効果 $F(7,84) = 41.11, p < 0.01$, 判別の正誤と視覚刺激の交互作用 $F(7,84) = 76.19, p < 0.01$ ）。

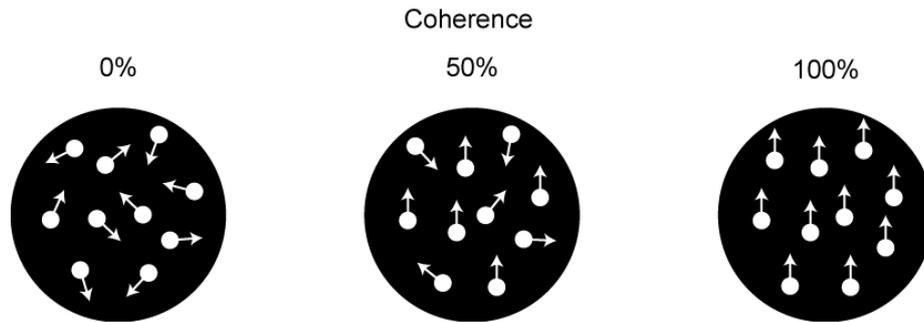


図 3 ヒトで用いたランダムドット刺激の **Coherence** レベル

ヒトの心理実験で用いた RDS の例。呈示されているドットのうち同じ方向へ動くドットの割合 (**Coherence**) を操作することで、動き知覚の難易度を操作した。左は、すべてのドットがランダムな方向へ動く **Coherence = 0%** の刺激。中央は、半数のドットは上へ動き、残りの半数はランダムな方向へ動く **Coherence = 50%** の刺激。右は、すべてのドットがすべて上へ動く **Coherence = 100%** の刺激を表す。このような RDS を、実験 1-2a および実験 2-1 で呈示した。

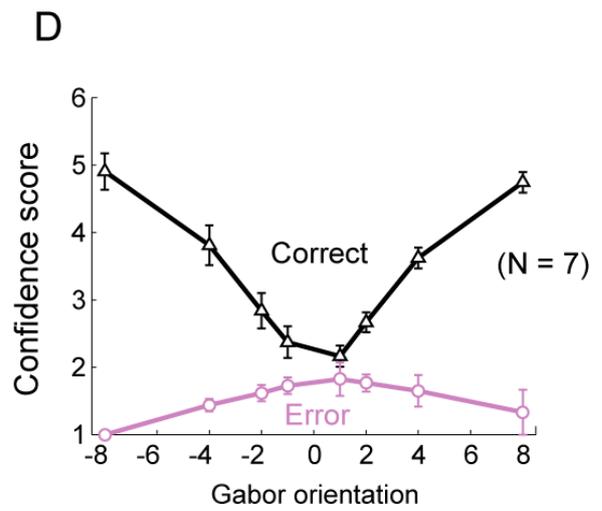
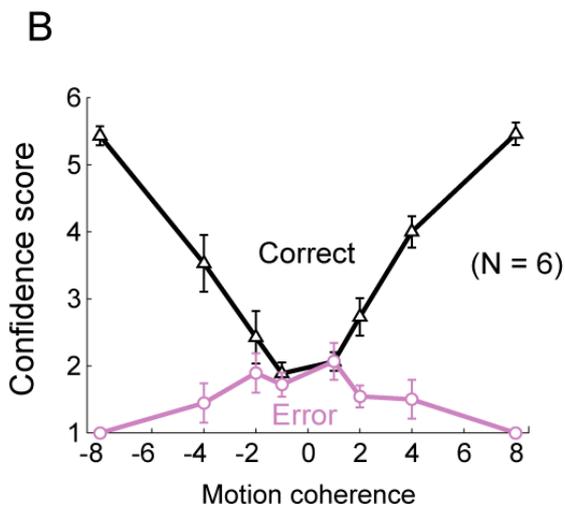
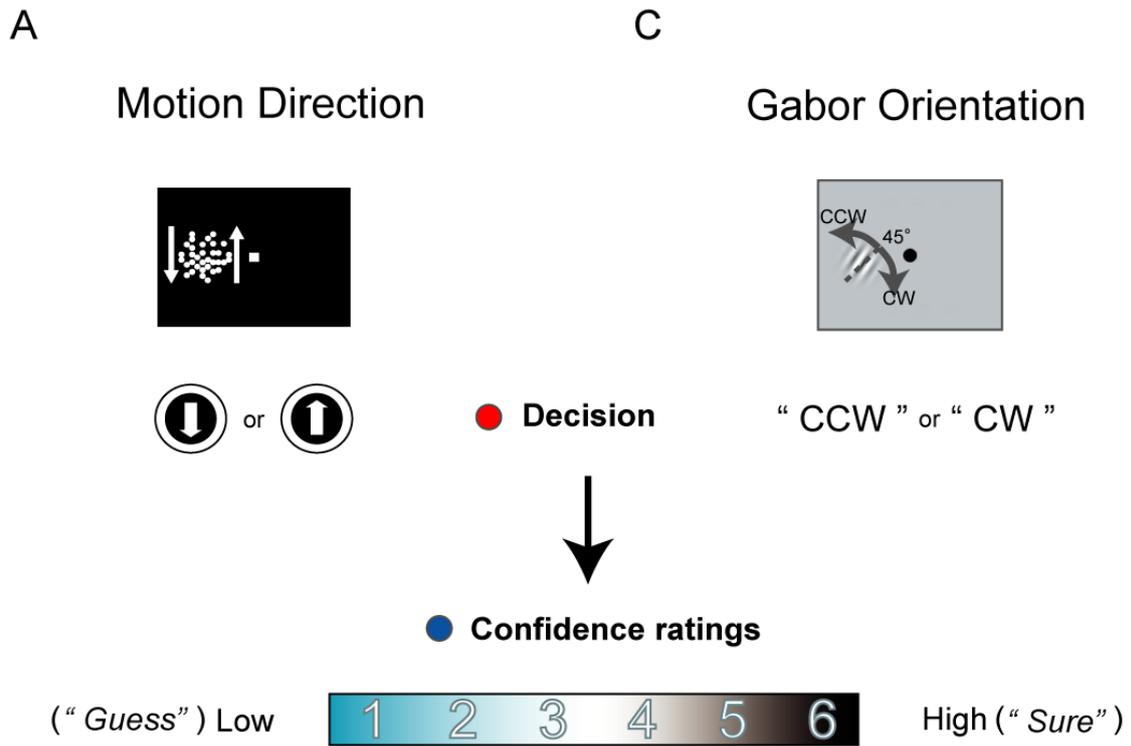


図 4 ヒトにおける知覚判別と確信度評定

(A, C) ヒトで行った、RDS の動き知覚についての確信度評定 (実験 1-2a) とガボールの傾き知覚についての確信度評定 (実験 1-2b)。A では、RDS の動きが上下どちらであったかを判断させた。その後、自己が下した判断に対する自信のほどを 6 段階で報告させた。C では、ガボールの縞模様の傾きが、45 度を基準に時計回りの刺激 (Clockwise; CW) であったか、反時計回りの刺激

(Counter-clock wise; CCW) であったかを判断させた。その後、A と同様に、確信度を 6 段階で評定させた。

(B, D) A, C それぞれの課題において、ヒトが表出した確信度の表出パターン。判別に正解した試行とエラーした試行における確信度の平均評定値を、呈示された刺激の関数としてプロットした (Errorbars = mean \pm s.e.)。X 軸の 1 単位は、各協力者の 70% 弁別閾を表す。下に動く RDS および CCW の刺激を X 軸のマイナスに、上に動く RDS と CW の刺激をプラスとして示している。

2.3.3 確信度モデルによる検証

以上の実験 1 から得られたサルとヒトの結果を、信号検出理論 (SDT) [15]の観点から検証した。SDT では、2 種類の刺激呈示条件 (S1, S2) と観察者が行う 2 通りの判断 (R1, R2) から、データを 4 通りに分類することができる (図 5 A)。また、横軸に内的な信号強度、縦軸に頻度をとると、S1, S2 それぞれの確率分布を想定することができる (図 5 B)。SDT において観察者の判別行動は、判断基準 (b) によって決定される。観測された信号値 (s) が基準を超えた場合には観察者は“R2”と報告し、基準に満たない場合には“R1”と報告すると仮定される (式 (i))。一方、報告に対する確信度は、内的な信号値 (s) が判断基準 (b) から両側に離れるほど高く、基準付近では低いと仮定される (図 5 C)。すなわち、確信度の強さは、判断基準 (b) と観測された信号値 (s) の距離の絶対値 ($|s - b|$) に対応する (式 (ii)) [16, 17]。

$$\text{Decision} = \{R1 | s < b; R2 | s > b\}, \quad (\text{i})$$

$$\text{Confidence value} = |s - b|. \quad (\text{ii})$$

このような非常にシンプルな計算フレームによって、判別回避課題を遂行中に観測されたサルの神経応答と行動上得られたヒトの確信度評定の特性、双方を説明できることがわかった。まず、サルで観察された視床枕の応答パターン (図 2 E) と確信度との関係を検証するために、判別回避課題を想定したモデルを構築した (図 6 A, B)。呈示された 6 個の視覚刺激を表す 6 つの正規分布と判断基準 (b)、およびその両側に 2 つの確信度の閾値 (図 6 A; 点線) を仮定すると、図 6 A のように表現することができる。上段は、 $X = 0, 100$ のペアのように判別が付きやすい視覚刺激を、下段は $X = 45, 55$ のペアのように、判別が付きにくい視覚刺激を表している。また、このモデルにおいて、確信度の値 ($|s - b|$) が確信度の閾値を越えればサルは判別行動を選択し、越えなければ回避行動を選択するとみなすことができる。このような想定のもと、判別行動のルール (i) と確信度の計算ルール (ii) から、確信度の強さを算出し、視覚刺激の関数としてプロットした。その結果、この確信度モデルの計算値から、視床枕の応答パターンを再現することができた (図 6 B)。

次に、同一の計算フレームで、ヒトが明示的に報告した確信度の評定パターン (図 4 B, D) を説明できるのか明らかにするために、評定モデルを構築した (図 6 C, D)。判別回避課題と異なる仮定は、判別行動か回避行動かを決定づけていた確信度の閾値が、6 段階評定になったことで、判断基準 (b) の両側に 5 本 (評定の数 - 1 本) 設定されていることのみである。ここで、確信度の閾値を τ とし、判断基準に近いほうから両側に向かって、 τ_1 から τ_5 までおくと、6 段階の評定値は、式 (ii) をもとに、以下によって決定される。

$$\begin{aligned} \text{Confidence score} &= \{ i \mid |\tau_{i-1} - b| \leq |s - b| < |\tau_i - b| \}, & (\text{ii}') \\ \text{where } i &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \\ \tau_0 &= b, \tau_6 = \pm\text{Inf}. \end{aligned}$$

視床枕の応答を再現した時と同様に，呈示された刺激数である **8** 個の正規分布を仮定し，判断基準 (b) と複数の確信度の閾値を設けると図 **6 C** のように表現できる。そのうち上段は， $X = \pm 8$ のペアのように判別が付きやすい視覚刺激を，下段は $X = \pm 1$ のペアのように，判別が付きにくい視覚刺激を表している。このような想定のもと，判別行動のルール (i) と評定値のルール (ii') を適用して，正解およびエラー事象における確信度の平均評定値を算出し，視覚刺激の関数としてプロットした (図 **6 D**)。その結果，サルとヒトの視床枕応答と同様に，この確信度モデルの計算値から，ヒトの確信度評定の結果も再現できることがわかった。

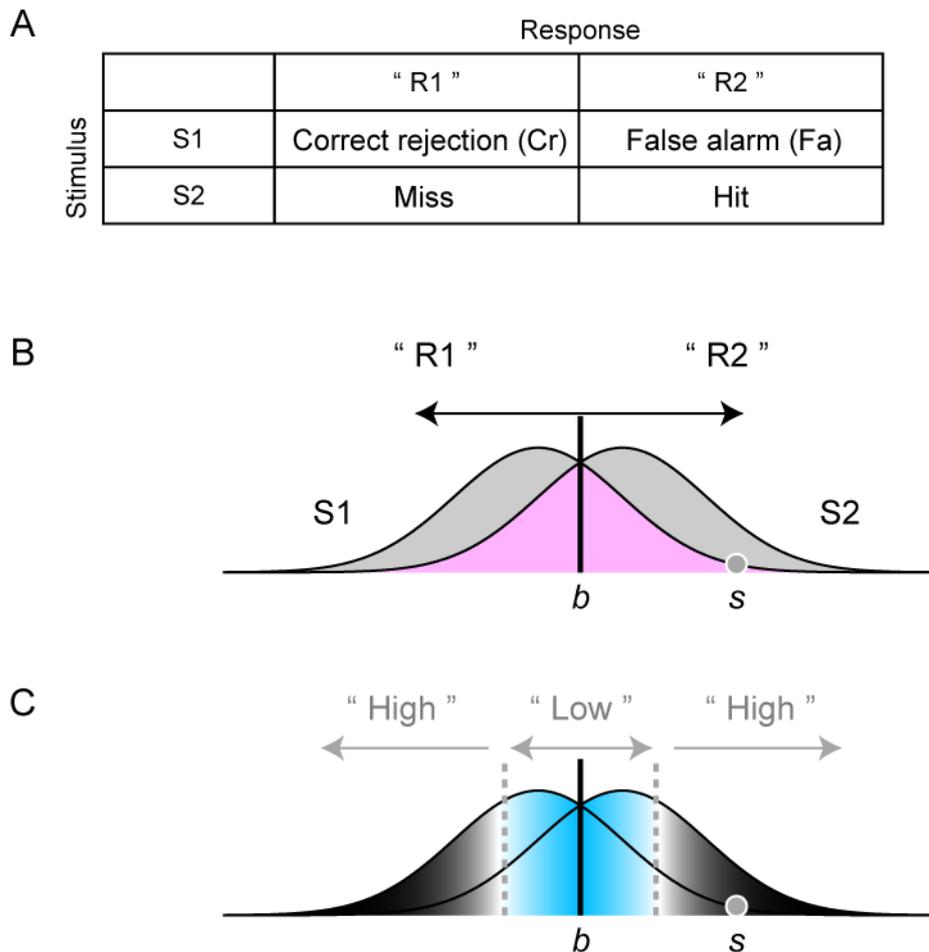


図 5 信号検出理論における知覚判別と確信度

(A) 信号検出理論 (SDT) [15] における刺激—反応マトリックス。呈示された 2 種類の刺激 (S1, S2) と観察者が報告した 2 種類の判断 (R1, R2) から、データを 4 通りに分類することができる。

(B) SDT における知覚判別過程。内的な刺激状態を表す 2 つの確率分布と、判断基準 (b) をおくと、ある試行で観測された信号値 (s) が、 b より右側であれば観察者は “R2” と報告し、左側であれば “R1” と報告すると仮定される。

(C) SDT における確信度の表現。判断基準付近では確信度は低く、両側に離れれば離れるほど確信度は高いとみなすことができる。すなわち、確信度の強さは、信号値 (s) と判断基準 (b) の距離 ($|s - b|$) で表現できる。

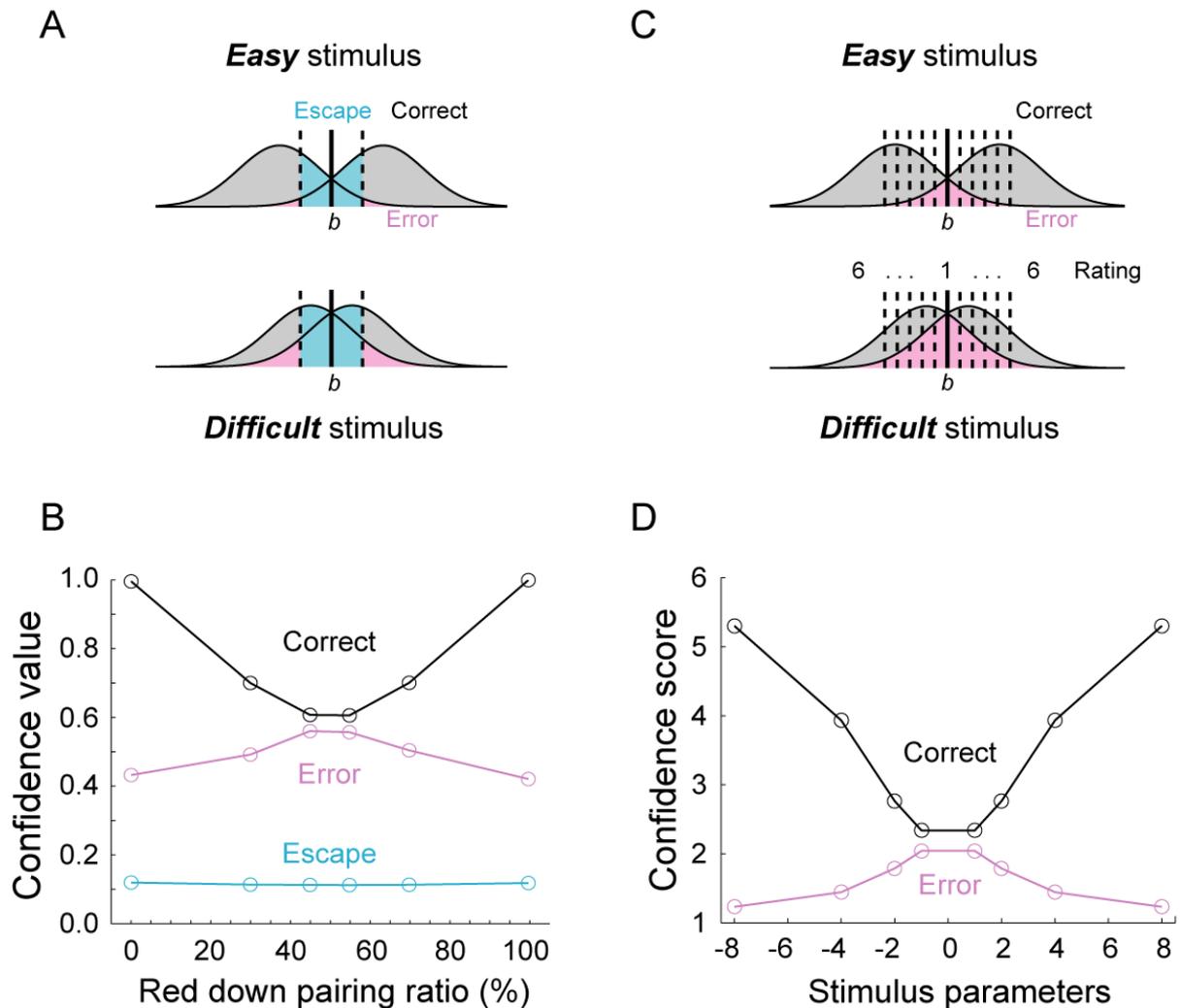


図 6 確信度モデルによる再現

(A, B) サルの判別回避課題 (実験 1-1) を想定した SDT モデル。判断基準 (b) と確信度の閾値 (点線) を仮定すると、観測した信号値が確信度の閾値を越えれば、サルは判別行動 (Correct, Error) を選択し、閾値に満たなければ回避行動 (Escape) を選択すると仮定される。A の上段は、Red-down pairing ratio (X) = 0, 100 の刺激ペアのように刺激の判別が付きやすい状況を、下段は $X = 45, 55$ のように判別が付きにくい状況を表す。A の確率分布間の距離を刺激の曖昧さとし、呈示された刺激数である 6 個の分布ごとに、三種類の行動における確信度の値 (図 5C; $|s - b|$) を計算すると、視床枕の応答パターン (図 2E) を再現できる (B)。

(C, D) ヒトの確信度評定 (実験 1-2) を想定した SDT モデル。6 段階評定の状況では、確信度の閾値を判断基準の両側に 5 本ずつ仮定する (点線)。確信度の値がどの基準の間に入るかによって、1 から 6 の評定値が決定される。C の上段は、 $X = \pm 8$ の刺激ペアのように刺激の判別が付きやすい状況を、下段は $X = \pm 1$ の刺激ペアのように判別が付きにくい状況を表す。A, B と同様に、呈示された刺激数である 8 個の分布ごとに、正解とエラー事象の平均評定値を計算すると、ヒトの評定パターン (図 4B, D) を再現できる (D)。

第4節 実験1 考察

実験1では、判別回避課題と確信度評定を用いることで、サルとヒトの双方から、確信度を行動学的に定量化することに成功した。そして、サルの神経生理データを記録することで、視床枕という領域から確信度の神経表現を発見した(図2D, E)。また、ヒトの主観データを測定した結果、サルの視床枕における確信度の表現パターンと、ヒトが行動上報告した確信度の表出パターンが類似することがわかった(図2E, 図4B, D)。計算論的視点を踏まえると、両者の結果は、試行毎に揺らぐ確信度の値 ($|s - b|$) を反映していることが判明した(図6)。このことから、知覚の確からしさを成立させる上で同じ計算過程を、サルとヒトの双方で、経ていることが示唆される。

今後、霊長類に共通する確信度の神経メカニズムを明らかにするために、本知見を踏まえて、確信度を支える神経ネットワークについて概観したい。図7に、サルの視床枕で観測した確信度に相関をもつニューロン群の解剖学的位置を示した。視床枕は、上丘腕 (brachium of superior colliculus; BSC) を境に、背側視床枕 (dPUL) と腹側視床枕 (vPUL) の二つに大別される[20-22]。dPULは、前頭葉や頭頂葉、側頭葉など複数の高次領野との結合をもつものに対し[10, 23, 24]、vPULは、上丘や有線皮質など初期視覚系との連絡をもつという違いがある[25-27]。図2Eに示したように、サルの判別内容によらない左右対称な神経応答を示した視床枕ニューロンの位置をプロットすると、dPULに偏在していることがわかった。このことから、確信度を反映していた視床枕応答は、連合野を含む多数の大脳皮質との相互作用によって生成されている可能性が高いと考えられる。その解剖学的事実と整合的に、これまで確信度の神経基盤は、筆者らの知見も含めると、前頭眼窩野 (Orbito-frontal cortex; OFC) [16]、補足眼野

(Supplementary eye field; SEF) [28]、外側頭頂間溝 (Lateral intra-parietal; LIP) [29]、視床枕 (Pulvinar) [30]の4つの領域で発見されている(図8)。一方で、機能的側面からみると、これらの神経相関は、それぞれ異なる時間動態と応答パターンを示している。視床枕は、視覚刺激が呈示されている期間にのみ応答するが、LIPは視覚刺激の呈示期間から行動決定をするまで単調な応答を示す[29]。対して、SEFとOFCは、行動決定期間もしくはそのあと報酬を待つ期間に相関をもつ[16, 28]。また、OFCについては、視床枕と逆の応答パターン、すなわち、不確かさを表現している点でも異なる[16]。これら異なる時間相で確信度に相関をもつ複数の領域が、系列的な情報処理を経ているのか、もしくは、それぞれの期間で異なる側面を担っているのかという点については、今後、同一の実験系における同時記録等の知見が待たれる。

一方、ヒトの確信度の神経基盤については、理解が遅れている。臨床知見では、前頭前野を損傷した患者において、視覚対象を見えたという程度 (visibility) が低下することが報告されている[31]。また、同部位は、ヒトの脳機能イメージングでも、確信度と相関することが報告されているが[32]、他の領域との関連は不明である。霊長類に共通する確信度の計算原理を示した本知見を踏まえると、今後、

動物で発見されている 4 つの領域（図 8）について，臨床知見や脳活動計測を集積していくことが求められる。

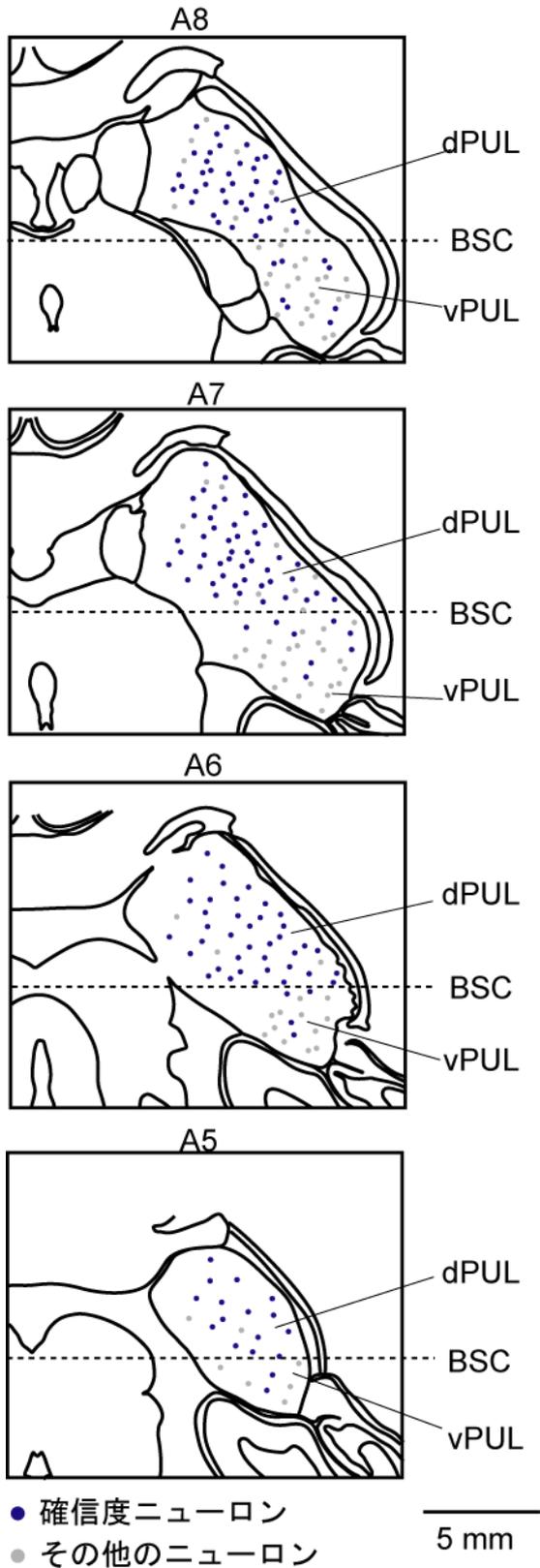


図 7 視床枕における確信度ニューロンの分布
文献[30] 図 8 を一部改変。

実験 1-1 で記録した視床枕ニューロンの解剖学的位置を示す。外耳孔より前方 5~8 mm (A5~8) の 4 枚の冠状断アトラスを示す。青丸は、図 2 E のように、左右対称な確信度表現を示したニューロンを、灰丸はその他の応答を示したニューロンを示す。

視床枕は、上丘腕 (BSC) を境に、背側視床枕 (dPUL) と腹側視床枕 (vPUL) の二つに大別される。図のように確信度を表現するニューロンは、dPUL に偏在していた。

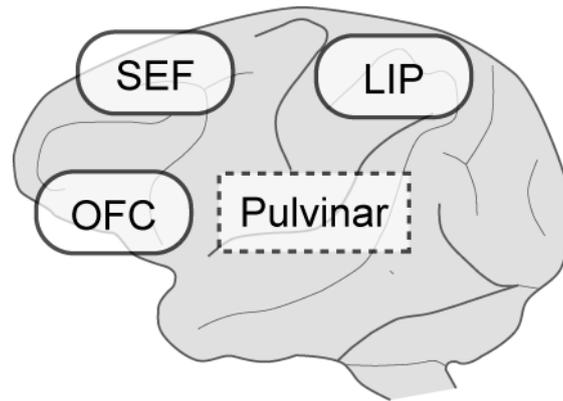


図 8 確信度を支える神経ネットワーク

確信度との相関が報告されている動物の脳領域。

前頭眼窩野 (OFC) [16], 補足眼野 (SEF) [28], 外側頭頂間溝 (LIP) [29], 視床枕 (Pulvinar) [30]

第3章 実験2 視覚系検出・弁別間におけるメタ認知過程

実験1で示した確信度は、メタ認知の計算結果である。メタ認知とは、**cognition about cognition**とも呼ばれ、自分の認知状況を、より上位の視点から把握する能力のことである[33]。したがって、メタ認知とは、自身が下した判断の正誤に対して、どのくらい自覚的であるかということの意味する[34]。これは、確信度評定の文脈に当てはめると、判別成績に利用された情報を、どのくらい把握し、確信度評定へ反映することができたかを示すことに等しい。そこで、実験2では、確信度を表出するまでに経たメタ認知処理を、行動成績に利用された情報ソースと確信度評定に利用された情報ソースの差として定量することで、評価した。さらに、本研究では、意識と無意識の差も、主観的自覚を伴っているか否かということに着目して、知覚意識の主観的特性を、メタ認知の処理過程の観点から、検証することにした。

過去の知覚意識の研究において、一次視覚野に障害をおった患者の中には、視覚対象の存在は検出できないにもかかわらず、色や動きなどその内容を弁別する課題では偶然以上の成績を残す“盲視”という現象を示す症例が報告されている[35-37]。また、健常者においても、同一の視覚情報を呈示した場合に、検出成績に比べて、形態的特徴や意味性の判断の方が、優れた成績を示すことが報告されている[38]。これまで、このような状況は、検出・弁別間で生じた判別精度の乖離をもとに、意識—無意識の様相の差が議論されてきたが、両者の状況において、メタ認知が、どのように働いているかは不明だった。

この点を明らかにするために、実験2では、同一の健常観察者に対し、視覚刺激の存在の有無を問う検出課題と、刺激属性を判別する弁別課題を別個に行い、それぞれのメタ認知感受性（**metacognitive sensitivity**）[39]を評価した。実験1では、弁別課題における確信度の結果のみを示した。本章では、検出・弁別課題における、確信度を表出するまでの過程を、メタ認知の観点をふまえた新しい計算モデルを用いて比較した。

第1節 実験2 方法

3.1.1 対象

健常男性 12 名，平均年齢 26.7 ± 4.0 (mean \pm SD) 歳を対象とした。そのうち 2 名は，実験 2-1，2-2 すべてに参加し，各実験 7 名の協力者からデータを測定した。研究を行うにあたって，協力者全員に本研究の目的と方法を十分に説明し同意を得た。本研究は茨城県立医療大学倫理委員会 (558) および産業技術総合研究所人間工学実験委員会の承認 (人 2010-135C) を得たものである。

3.1.2 実験装置

視覚刺激の作成には，実験 2-1 では Psychophysics toolbox-3 [18] を，実験 2-2 では ViSaGe (Cambridge Research Systems) を使用し，MATLAB (MathWorks) 上で制御した。刺激呈示には CRT モニター (Mitsubishi, 22 inch, frame rate; 75 Hz (実験 2-1), 100 Hz (実験 2-2), 視距離 57 cm) を用いた。輝度を操作した実験 2-2 で用いた一連の刺激は，色彩輝度計 (Minolta, ColorCAL) を用いて校正した。協力者にはアゴ台で頭部を固定した状態でモニターを注視させた。協力者の課題応答には，実験 2-1 では通常のデスクトップ PC 用のキーボードを，実験 2-2 では 6 つの反応キーがあるレスポンスボックス (Cambridge Research Systems, CB6 Response Box) を用いた。

3.1.3 視覚刺激および実験手続き

— 実験 2-1 ランダムドット刺激の検出と弁別 —

視覚刺激：標的には，白のランダムドット刺激 (random-dots stimulus; RDS) を用い，黒の背景画面上中央に呈示した (dot size; 0.125° , aperture size; 6.0° , dots density; $16.7 \text{ dots} / \text{degree}^2$, dots speed; $5^\circ / \text{sec}$)。検出課題では 70%検出閾の Coherence レベルで，上もしくは下方向へ動く RDS (シグナル刺激) と，すべてのドットがランダムな方向へ動く Coherence 0%の RDS (ノイズ刺激)，計 3 種類の刺激を呈示した (図 3 参照)。弁別課題では，70%弁別閾の Coherence レベルで，上もしくは下方向へ動く 2 種類の RDS を呈示した。70%検出閾および 70%弁別閾は，実験 1-2 と同様に，Staircase procedure 1up-2down method を用いて，データ測定前に協力者毎の値を決定した[19]。

実験手続き：図 9 A, B に実験 2-1 の一試行の時系列を示す。まず，画面中央に固視点 (0.3°) が 320~520 ms の時間で呈示された。その後，標的が 520 ms の呈示時間で，画面中央に呈示された。検出課題 (図 9 A) では，RDS の動く方向にかかわらず，動く方向のそろったドットを含むシグナル刺激であったか，ノイズ刺激であったかを Q1 で求めた。シグナルだと判断した場合には，キーボード

の“→”を，ノイズだと判断した場合には，“←”を押しよう求めた。その後，確信度を6段階のキー押しで評価させた。最も自信がある場合を“6”，最も自信がない場合を“1”として，テンキーパッドの1から6に対応して押すことで報告させた。弁別課題（図9B）では，RDSの動く方向が，上であったか，下であったか，というRDSの動く方向の判断をQ1で求めた。上だと判断した場合には，キーボードの“→”を，下だと判断した場合には，“←”を押しよう求めた。その後，検出課題と同様に，確信度を6段階で評定させた。弁別課題において，上もしくは下に動くシグナル刺激（以下， S_{up} , S_{down} ）の出現頻度は50%とし，ランダムに呈示した（ $S_{up} : S_{down} = 50 : 50$ ）。検出課題では，シグナル刺激（ S_{up} , S_{down} ）とノイズ刺激（ S_N ）の呈示頻度を50%とし，ランダムに呈示した（ $S_{up} : S_{down} : S_N = 25 : 25 : 50$ ）。各協力者は，検出課題と弁別課題を異なる日に行った。各課題は120試行を1ブロックとして，計5ブロック，600試行から構成された。

3.1.4 視覚刺激および実験手続き

— 実験 2-2 ガボールパッチの検出と弁別 —

視覚刺激：標的にはガボールパッチを用いグレイ（ 15 cd/m^2 ）の背景画面上に呈示した。標的刺激の各パラメータは，検出課題では，サイズ 1.8° ，空間周波数 1.5 cpd ，縞の傾きは垂直（ 90° ）の固定値とし，標的のコントラストを検出閾が70%となる値に，データ測定に先立ち協力者毎に設定した[19]。弁別課題では，刺激の存在は必ず検知できる，サイズ 2.4° ，空間周波数 2 cpd ，コントラスト15%の固定値とし，縞の傾きが $45 \pm X^\circ$ の2種類の標的刺激を呈示した。角度 X° を傾きの弁別閾が70%となる値に検出課題と同様の方法を用いて設定した[19]。

実験手続き：図9C, Dに実験2の一試行の時系列を示す。まず，画面中央に固視点（ 0.3° ）が300~500msの時間で呈示された。その後，標的が100msの呈示時間で，固視点から左へ 5° の位置に呈示された。検出課題（図9C）では，標的が存在したか否かをQ1において2択のキー押しで求めた。その後，確信度を6段階のキー押しで評価させた。弁別課題（図9D）では，標的の縞模様の角度が， $45 - X^\circ$ （ 45° に対して時計回り；clockwise（CW））か， $45 + X^\circ$ （ 45° に対して反時計回り；counter-clockwise（CCW））か，という傾き判断をQ1において2択のキー押しで求めた。その後，検出課題と同様に，確信度を6段階で評定させた。また，両者の課題において標的の出現頻度は50%とした。検出課題と弁別課題は異なる日に行った。各課題は200試行を1ブロックとして，計5ブロック，1000試行から構成された。

すべての実験において，Q1および確信度評定の制限時間は5秒以内とし，判別の正誤に関するフィードバックは与えなかった。また，行う課題の順番は協力者ごとにランダム化した。ブロック間は十分に休憩をはさみデータを測定した。

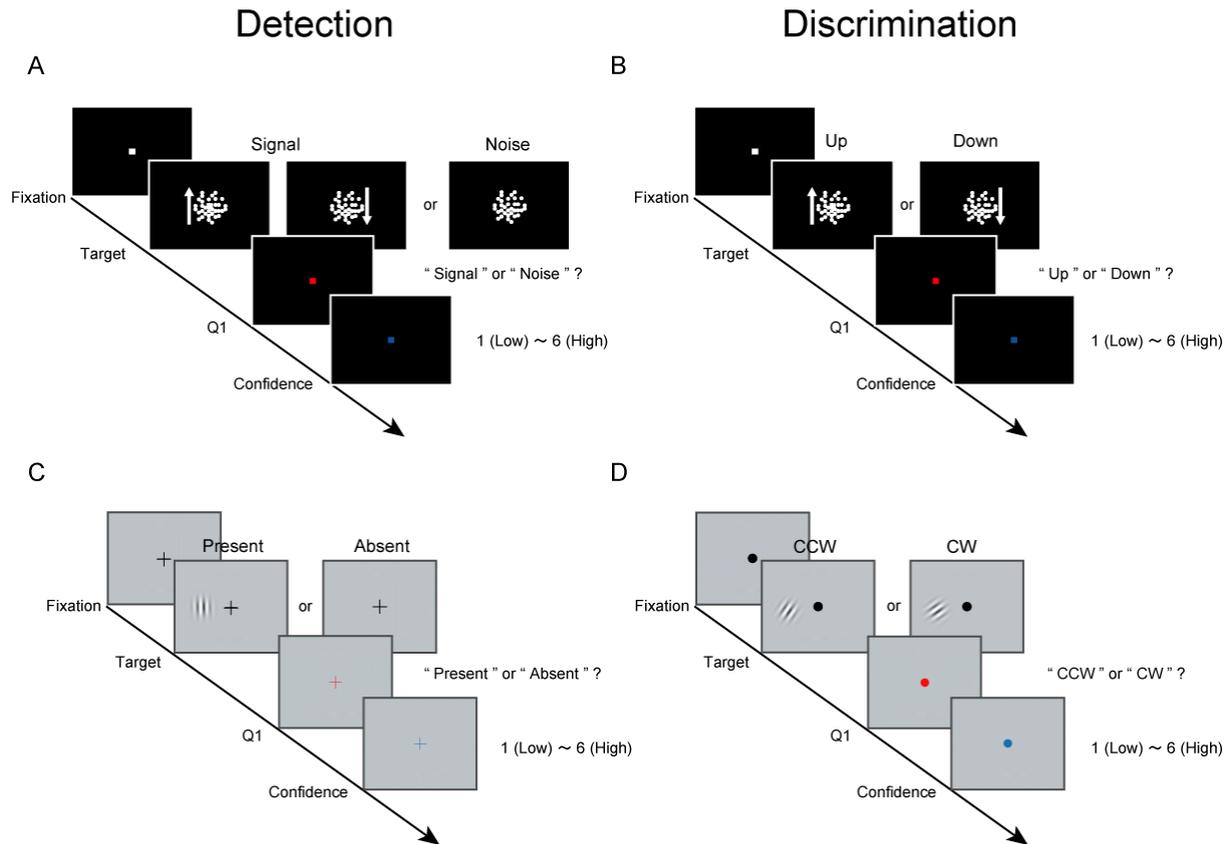


図 9 実験 2 における検出・弁別課題

(A, B) 実験 2-1 で用いた検出課題 (A) と弁別課題 (B) の一試行の時系列。標的にはランダムドット刺激 (RDS) を用いた。検出課題 (A) では、動く方向のそろったドットを含むシグナル刺激であったか、ノイズ刺激であったかを Q1 で求めた。その後、確信度を 6 段階で評定させた。弁別課題 (B) では、RDS の動く方向が、上であったか、下であったかを Q1 で求め、検出課題と同様に、確信度を報告させた。

(C, D) 実験 2-2 で用いた検出課題 (C) と弁別課題 (D) の一試行の時系列。標的にはガボールパッチを用いた。検出課題 (C) では、標的が呈示されたか否かを Q1 において判断させた。その後、上述と同様に 6 段階の確信度を報告させた。弁別課題 (D) では、標的の傾きが、 45° に対して時計回りか (CW; $45 - X^\circ$) , 反時計回りか (CCW; $45 + X^\circ$) という判断を求めた。その後、確信度を 6 段階で評定させた。すべての課題において、確信度は、最も自信がない場合を 1、最も自信がある場合を 6 として評定させた。

3.1.5 データ解析

3.1.5.1 客観指標の算出 (Type1 SDT; d' , Type1 ROC)

得られたデータは、信号検出理論 (Signal detection theory; SDT) [15] を用いて解析した。第 2 章で先述したように、検出課題を例にとると、標的呈示の有無と観察者の“ある”・“なし” 2 通りの判断から、データを 4 通りに分類することができる (図 10 A)。SDT では横軸に内的な信号強度、縦軸に頻度をとると、標的が呈示された場合 (Present) と呈示されなかった場合 (Absent) の確率分布を想定することができる (図 10 B)。また、観察者の報告に対する判断基準 (θ) を設定でき、観測された信号値が基準を超えた場合には観察者は標的が“ある”と報告し、超えない場合には“なし”と報告すると仮定される。図 10 A の 4 通りの確率のうち、Hit と False alarm (Fa) の確率を代表値とすることで、観察者が刺激の状態をどれだけ明確に判別できるかという能力の指標 (d') を算出することができる。このような刺激の判別能を評価する信号検出理論を Type1 SDT と呼ぶ。以下に、刺激の判別能 (d') および判断基準 (θ, C) の算出法を示した (式(1)~(4))。Absent の確率分布を標準正規分布 $N(0, 1)$ 、Present の確率分布を $N(d', \sigma^2)$ と仮定した場合、 d' は二つの分布の平均間の距離を意味する (図 10 B)。

$$d' = \sigma * z(P(\text{Hit})) - z(P(\text{Fa})). \quad (1)$$

判断基準 (θ) は、Absent の分布 ($N(0, 1)$) における x 軸上での位置を示す (図 10 B)。また、後の主観指標を算出の際に使用する C は、判断基準 (θ) の d' に対する相対位置を示す。

$$\theta = -z(P(\text{Fa})), \quad (2)$$

$$C = \frac{\theta}{d'}. \quad (3)$$

標準偏差 (σ) の推定にあたっては複数の判断基準についてのデータを得る必要がある。ひとつの方法は、確信度評定の数 (j) \times 2 通りの判断のデータを使用して、 $(2j-1)$ 個の判断基準を仮定し、確率密度の変化から σ を推定する手法である。本研究では、最尤推定法 [40] を用い、式 (4) の対数尤度を最大化するパラメータの組における σ を採用した。

$$\log(L_\sigma) = \sum_{r=1}^{j*2} \sum_{s=1}^2 N_{\text{data}}(R_r | S_s) * \log(P_{\mu', \sigma, \theta_i}(R_r | S_s)). \quad (4)$$

R は確信度評定の数 (j) \times “ある”・“なし” 2 通りの判断を、 S は刺激呈示の

有無を示す。 $N_{\text{data}}(R_r | S_s)$ は、刺激 S が呈示された試行において観察者が判断 R と報告した実際の試行数を示す。 $P_{\mu', \sigma, \theta_i}(R_r | S_s)$ は、二つの正規分布 ($N(0, 1)$, $N(\mu', \sigma^2)$) と $(2j-1)$ 個の判断基準 (θ_j ; $\theta_{-(j-1)} \leq \theta_0 \leq \theta_{+(j-1)}$) を仮定した場合に、そのモデルから得られる、刺激 S において判断 R と報告する確率を示す。求められた **Type1** の確率分布 ($N(0, 1)$, $N(d', \sigma^2)$) を **ROC** 曲線として変換したものが、図 11 A の **Type1 ROC** 曲線であり、観察者の判別成績を表す客観指標とした。また、推定に使用した確信度評定と判断のデータは、 $(2j-1)$ 個の点として、その **Type1 ROC** 曲線上に、プロットすることができる (図 12)。

3.1.5.2 主観指標の算出 (Type2 SDT; meta- d' , meta-Type1 ROC)

第 2 章で示したように、**SDT** の観点では、自身が下した判断に対する確信度は判断基準付近では低く、両側に離れるほど確信度は高いとみなすことができる (図 10 B)。すなわち、確信度の強弱は、判断基準と観測された信号値との距離の絶対値に対応する [16, 17]。図 10 B の τ_+ , τ_- は確信度の閾値を表す。一方で、メタ認知能力の的確さは、判断の正解・不正解に対する確信度の表出パターンに表れる。この点を詳細に分析するために **Type2** の信号検出理論が用いられている [5, 39, 41, 42]。**Type1** の刺激—反応マトリックス (図 10 A) に確信度の高低を組み合わせて、データを 8 通りに分類することができる。これを、判断に正解した試行と誤った試行に対する、確信度の表出確率として再構成したものが **Type2 SDT** である (図 10 C)。刺激の判別能を評価する **Type1 SDT** に対し、**Type2 SDT** は、観察者が自身の下した判断の正誤について、主観の上でどれだけ分別がつけられるかという能力の指標である。これは観察者の“ある”・“なし” 2 通りの判断それぞれに対し構成することができる。一見、**Type1 SDT** における刺激の確率分布 (図 10 B) のように、**Type2 SDT** においても正解・不正解の正規分布を仮定すれば、刺激の判別能 (d') と同様の算出式を適応することで、正誤の分別能 (**Type2 d'**) を求められるが、現時点で、内的な正誤の分布に正規性を保証する知見はない。また、正規性を仮定した **Type2 d'** を算出した場合、**Type1** の判断基準の位置 (θ) や確信度のバイアス (τ_+ , τ_- の位置) に依存し、正誤の分別能を正確に評価できないことが問題視されている [39, 42]。そこで、本研究では、**Type2** の分布に仮定を必要とせず、種々の反応バイアスとも独立であり、かつ、客観指標 (d') と同じ次元で直接比較することができるメタ認知感受性 (**meta- d'**) [39] を用いた。以下にその概要 (図 11 B~D) および算出法 (式(5)~(11)) を示した。

まず、客観指標で **Type1** の確率分布 ($N(0, 1)$, $N(d', \sigma^2)$) および判断基準 (θ , C) が算出されると、その分布に対し二つの確信度の閾値 (図 10 B; τ_+ , τ_-) を両側へ連続的にスライドさせることで、観察者の“ある”・“なし”，二つの判断について $\text{Hit}_{\text{Type2}}$ および Fa_{Type2} の確率 (式(5)~(8)) を連続値として計算できる。

$$P(\text{Hit}_{\text{Type2}} | \text{" Present " response}) = P(\text{High confidence} | \text{Hit}), \quad (5)$$

$$P(\text{Fa}_{\text{Type2}} | \text{" Present " response}) = P(\text{High confidence} | \text{Fa}), \quad (6)$$

$$P(\text{Hit}_{\text{Type2}} | \text{" Absent " response}) = P(\text{High confidence} | \text{Cr}), \quad (7)$$

$$P(\text{Fa}_{\text{Type2}} | \text{" Absent " response}) = P(\text{High confidence} | \text{Miss}). \quad (8)$$

この連続値を **Type2 ROC** としてプロットしたものが判別成績から予測された **Type2 ROC** 曲線である (図 11 B, C; 黒線)。この予測曲線は、客観指標で算出されたある判別成績 (d') の水準において、観察者は自身が下した判断の正誤を、この程度見分けられるであろうというメタ認知感受性の予測値を意味する。一方で、実際にデータから得られた $\text{Hit}_{\text{Type2}}$ および Fa_{Type2} の確率 (式(5)~(8)) を **Type2 ROC** 上にプロットすると、予測曲線からのずれを評価することができる (図 11 B, C; 青丸および赤丸)。“ある”・“なし”二つの判断の **Type2 ROC** 上には、確信度評定の数 (j) - 1 個のデータ点がプロットされる。図 11 B, C は 2 段階評定の例である。

反対に、この **Type2** の観測値 (式(5)~(8)) に最も適合する、**Type1** の確率分布パラメータ ($N(0, 1)$, $N(\mu_{\text{meta}}, \sigma^2)$) を逆推定したものがメタ認知感受性 ($\text{meta-}d'$) である。 $\text{meta-}d'$ は、式 (10) の対数尤度を最大化する μ_{meta} の値である。

$$\theta' = \mu_{\text{meta}} * C, \quad (9)$$

$$\log(L_{\text{meta}}) = \sum_{c=1}^j \sum_{r=1}^2 \sum_{s=1}^2 N_{\text{data}}(\text{Conf}_c | R_r, S_s) * \log(P_{\mu_{\text{meta}}, \sigma, \theta', \tau}(\text{Conf}_c | R_r, S_s)), \quad (10)$$

$$\text{meta-}d' = \mu_{\text{meta}}. \quad (11)$$

Conf は確信度を、 j は確信度評定の数を、**R** は観察者が報告した“ある”・“なし” 2 通りの判断を、**S** は刺激呈示の有無を示す。 $N_{\text{data}}(\text{Conf}_c | R_r, S_s)$ は、刺激 **S** が呈示され観察者が判断 **R** と報告した試行において、確信度 **Conf** を報告した実際の試行数を示す。 $P_{\mu_{\text{meta}}, \sigma, \theta', \tau}(\text{Conf}_c | R_r, S_s)$ は、二つの正規分布 ($N(0, 1)$, $N(\mu_{\text{meta}}, \sigma^2)$) および、判断基準 (θ') と確信度の閾値 (τ ; $\tau_{-(j-1)} \leq \tau_{-1}, \tau_{+1} \leq \tau_{+(j-1)}$) を仮定した場合に、そのモデルから得られる、刺激 **S** かつ判断 **R** において確信度 **Conf** を報告する確率を示す。求められた確率分布 ($N(0, 1)$, $N(\text{meta-}d', \sigma^2)$) は、**Type2 ROC** (図 11 B, C; ピンク線) として表示すると、**Type2** のデータ点に最も適合する曲線としてプロットされる (図 11 B, C; ピンク線および観測された **Type2 data points**)。また、その分布を、**Type1 ROC** (図 11 D; ピンク線) へ変換することで、客観指標 (図 11 A; 黒線) と同じ次元で直接

比較することができる。図 11 D にピンク線で示した Type1 ROC 曲線を、本研究では meta-Type1 ROC とし、観察者のメタ認知感受性を表す主観指標として用いた。

3.1.5.3 客観指標と主観指標の関係性評価（相対的メタ認知感受性）

上記から算出される客観指標 (d') と主観指標 ($\text{meta-}d'$) の関係性は、(i) $d' = \text{meta-}d'$ 、(ii) $d' > \text{meta-}d'$ 、(iii) $d' < \text{meta-}d'$ となりうる。このような d' と $\text{meta-}d'$ の差が相対的メタ認知感受性である [39]。二つの指標の関係を解釈すると、(i) は、観察者は刺激があるかないかという検出判断に利用した Type1 の確率分布 (図 10 B) を正確にモニターし、確信度を表出していることを意味する。(ii) は、判別成績に比して、主観の上では刺激の判別がし難い分布を、(iii) は、判別し易い分布を、確信度を表出する際の情報ソースとして利用しているというように、判別成績から求められた予測値 (図 11 B, C; 黒線) に対する相対的なモニタリング能の程度としてみなすことができる。この方法は、弁別課題においても、2つの刺激呈示条件と2通りの判断を任意に割り当てることで、同様に算出することができる。

客観指標 (d') と主観指標 ($\text{meta-}d'$) の解析に際して、本研究では、ROC 曲線の下面積 (Area under the curve; AUC) を用いた。同一の正答率であったとしても、刺激の分散比 ($\sigma^2 / 1$) が異なると d' も異なる値をとる。一般的に、検出課題では、刺激が呈示された場合の分散の方が大きくなることが多い [15, 43]。各課題における刺激の分散比の違いも加味するために、 d' と $\text{meta-}d'$ を Type1 ROC へ変換し、AUC として評価した。

3.1.5.4 統計処理

統計処理は、IBM SPSS Statistics 19 を用いて t 検定を行った。有意水準は両側検定にて危険率 5%未満として判定した。

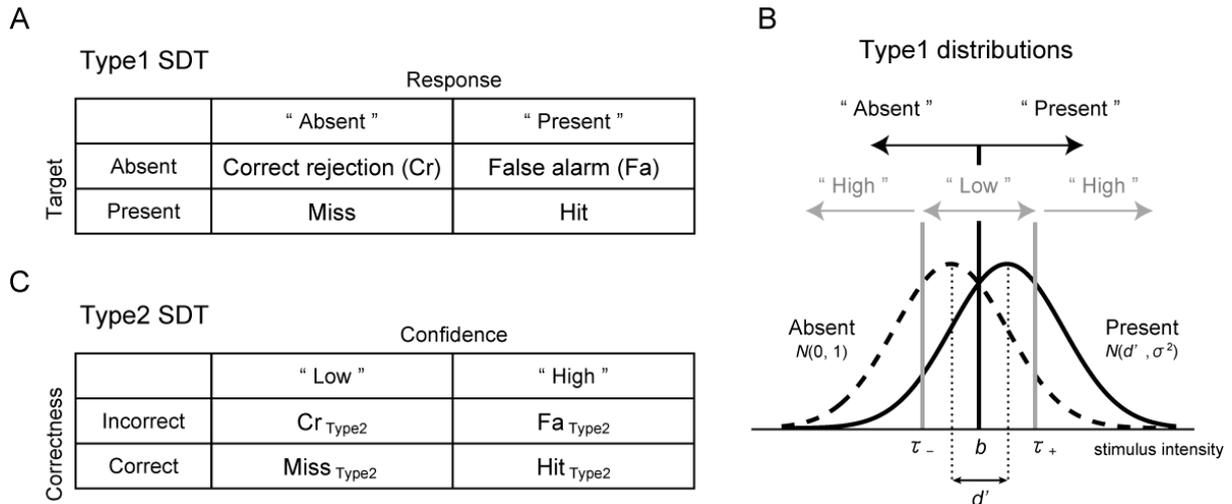


図 10 Type1 および Type2 信号検出理論

(A) Type1 信号検出理論 (Type1 SDT) における刺激—反応マトリックス。検出課題を例にとると、標的が呈示されたか否かという刺激呈示の 2 条件と、観察者が報告した“ある (Present)”・“なし (Absent)” 2 通りの判断から、得られたデータを 4 通りに分類することができる。そのうち、Hit と Correct rejection (Cr) は正しい判断の確率を、False alarm (Fa) と Miss はエラーの確率を意味する。

(B) Type1 SDT において仮定される確率分布と判断基準。SDT では、横軸に内的な刺激強度、縦軸に頻度をとると、刺激が呈示された場合 (Present, $N(d', \sigma^2)$) と呈示されなかった場合 (Absent, $N(0, 1)$) の確率分布を仮定することができる。客観指標として算出した観察者の刺激の判別能は、二つの分布の平均間の距離 (d') で表される。また、観測された信号値が判断基準 (θ) を超えれば、観察者は刺激が“ある (Present)”と報告し、超えなければ“なし (Absent)”と報告すると仮定される。このモデルにおいて、確信度は判断基準付近では低く (Low)、両側へ離れるほど高い (High) とみなされる。 τ_+ , τ_- は確信度の閾値を表す。

(C) Type2 信号検出理論 (Type2 SDT) における自己判断の正誤—確信度マトリックス。Type1 の刺激—反応マトリックス (A) に、確信度の高低を組み合わせると、データを 8 通りに分類することができる。それを判断に正解した事象 (Correct; Hit, Cr) と誤った事象 (Incorrect; Fa, Miss) における確信度の表出確率 (High, Low) として再構成したものが Type2 SDT である。これは観察者の“ある” (Hit, Fa), “なし” (Cr, Miss) 2 通りの判断に対し、それぞれ構成することができる。

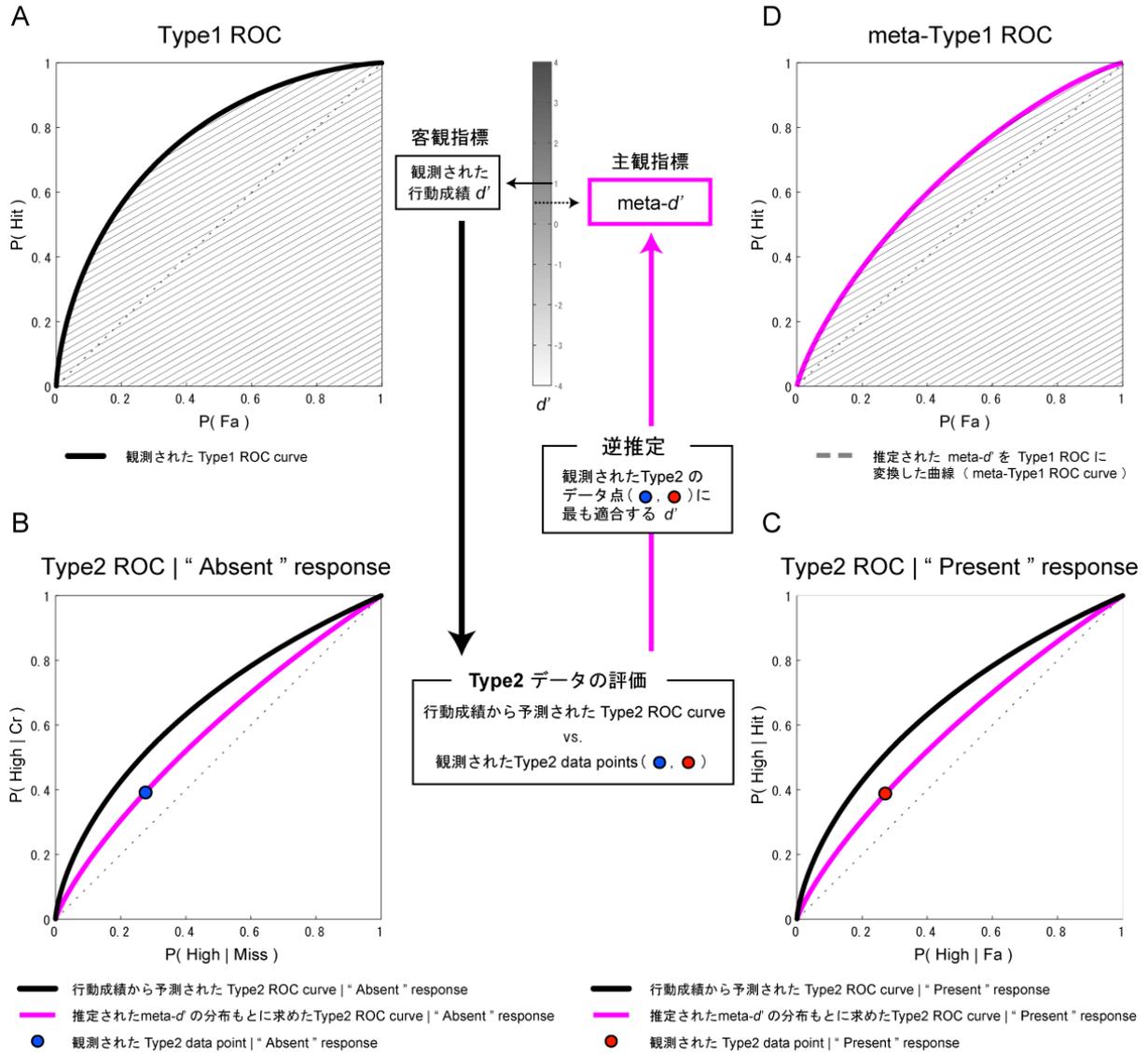


図 11 客観指標 (d') と主観指標 (meta- d') の算出方法の概要

(A) 行動成績を表す客観指標 (d' , Type1 ROC)。観察者の Type1 データ (図 10 A) をもとに Type1 の確率分布 (図 10 B; $N(0, 1), N(d', \sigma^2)$) が算出されると、その分布は Type1 ROC 曲線 (黒線) としてプロットすることができる。ここでは、 $d' = 1, \sigma = 1$ の例を示した。ROC は、刺激の判別能 d' (図 10 B) の値が大きくなるにつれて左上へ膨らみ、二つの分布が重なる全く判別がつかない状態 ($d' = 0$) では、対角線 (点線) としてプロットされる。Type1 ROC 曲線の下での面積 (Area under the curve; AUC, 斜線部) を定量することで、観察者の行動成績を評価することができる。AUC は 0.0 ~ 1.0 までの範囲をとり得、0.5 はチャンスレベルを表す。

(B, C) 行動成績から予測された Type2 ROC 曲線。Type1 の確率分布 (図 10 B, $N(0, 1), N(d', \sigma^2)$) に対し、二つの確信度の閾値 (図 10 B, τ_+, τ_-) を両側へ連続的にスライドさせると、観察者の“ある”・“なし”、2通りの判断について、 $\text{Hit}_{\text{Type2}}$ ($P(\text{High confidence} | \text{Hit}), P(\text{High confidence} | \text{Cr})$) および Fa_{Type2} の確率 ($P(\text{High confidence} | \text{Fa}), P(\text{High confidence} | \text{Miss})$) を連続値として計算することができる。この値を Type2 ROC としてプロットしたものが、行動成績から予測された二つの Type2 ROC 曲線である (B, C; 黒線)。この予測曲線は、ある行動成績 (d') の水準において、観察者が自己判断の正解・不正解を、この位、見分けられるであろうというメタ認知感受性の予測値を意味する。一方で、実際に得られた二つの判断についての Type2 データ (図 10 C; $\text{Hit}_{\text{Type2}}$ および Fa_{Type2} の確率) をプロットすると、予測曲線からのずれを評価することができる (B, C; 青丸および赤丸)。それぞれの Type2 ROC 上には、確信度評定の数-1 個のデータ点がプロットされる。B, C は、2段階の確信度評定の例である。

(D) メタ認知感受性を表す主観指標 ($\text{meta-}d'$, meta-Type1 ROC)。実際に得られた Type2 データに最も合う、Type1 の確率分布 ($N(0, 1), N(\text{meta-}d', \sigma^2)$) を推定したものがメタ認知感受性 ($\text{meta-}d'$) である。B, C において、Type2 のデータに最も適合するパラメータは、 $\text{meta-}d' = 0.5, \sigma = 1$ であり、Type2 ROC (B, C; ピンク線) として表示すると、データ点を通る曲線としてプロットされる。また、確率分布 ($N(0, 1), N(\text{meta-}d', \sigma^2)$) を Type1 ROC (D; ピンク線) へ変換することで、客観指標 (A; 黒線) と同じ次元で直接比較することができる。D の Type1 ROC 曲線を、本研究では meta-Type1 ROC とし、斜線で示した面積を観察者のメタ認知感受性を表す主観指標として用いた。

第 2 節 実験 2 結果

3.2.1 実験 2-1 結果

実験 2 では、検出と弁別課題間の正答率をすべての協力者で統制することで、メタ認知感受性の相違のみを抽出することがねらいであった（実験 2-1 検出 $74 \pm 0.001\%$ 、弁別 $74 \pm 0.001\%$ 、(mean \pm s.d.) ; t-test, $p = 0.94$)。まず、実験 2-1 において、両者の 70% 閾値の Coherence を比較すると、動きの検出課題の方が、弁別課題に比べて高い Coherence レベルであった（検出 = $23 \pm 3.0\%$ 、弁別 = $15 \pm 3.1\%$ 、(mean \pm s.e.) ; t-test, $p < 0.0001$)。そのような状況で、両者の相対的メタ認知感受性を測定したところ、動きの検出課題では、Type1 AUC と meta-Type1 AUC は同等レベルなのに対し（図 12 A, 図 13 A; t-test, $p = 0.12$ ）、動きの弁別課題において、Type1 AUC に比して meta-Type1 AUC が有意に低下した（図 12 B, 図 13 A; t-test, $p < 0.001$ ）。

3.2.2 実験 2-2 結果

実験 2-1 から、動きを処理する系において、弁別課題の相対的メタ認知感受性が低下していることがわかった。しかし、外界の情報は、脳内では、傾き、色、動きなどのモダリティーに分散し処理されている[44]。先述の結果が、ほかの構成要素においても再現されるのか明らかではない。そこで、実験 2-2 では、視覚刺激をランダムドット刺激からガボールパッチへ変更した。また、実験 2-1 では、動きの検出閾値が、弁別閾値よりも高かった。したがって、RDS が上下どちらに動いていたかを判別すべき弁別課題において、上下の動き自体を検知できていない状況があり得る。そのために、動きの弁別課題の相対的メタ認知感受性が低下した可能性が考えられる。このような可能性を排除するため、検出と弁別で異なる刺激変数を操作し、弁別における検出不可能性をなくした。その上で、両者の正答率を統制し（実験 2-2 検出 $72 \pm 0.05\%$ 、弁別 $71 \pm 0.04\%$ 、(mean \pm s.d.) ; t-test, $p = 0.79$ ）、再度、検出および弁別課題の相対的メタ認知感受性を測定した（図 12 C, D, 図 13 B）。そのような条件下でも、各課題内で、Type1 AUC と meta-Type1 AUC を比較すると、検出課題において差は認められなかった（図 12 C, 図 12 B; t-test, $p = 0.34$ ）。対して、弁別課題では、Type1 AUC に比して meta-Type1 AUC が有意に低下した（図 12 D, 図 13 B; t-test, $p < 0.01$ ）。このことから、動きを処理する系と同様に、単純な明暗模様を処理する系においても、メタ認知感受性の観点から視覚系検出—弁別間の乖離が観察されることが判明した。

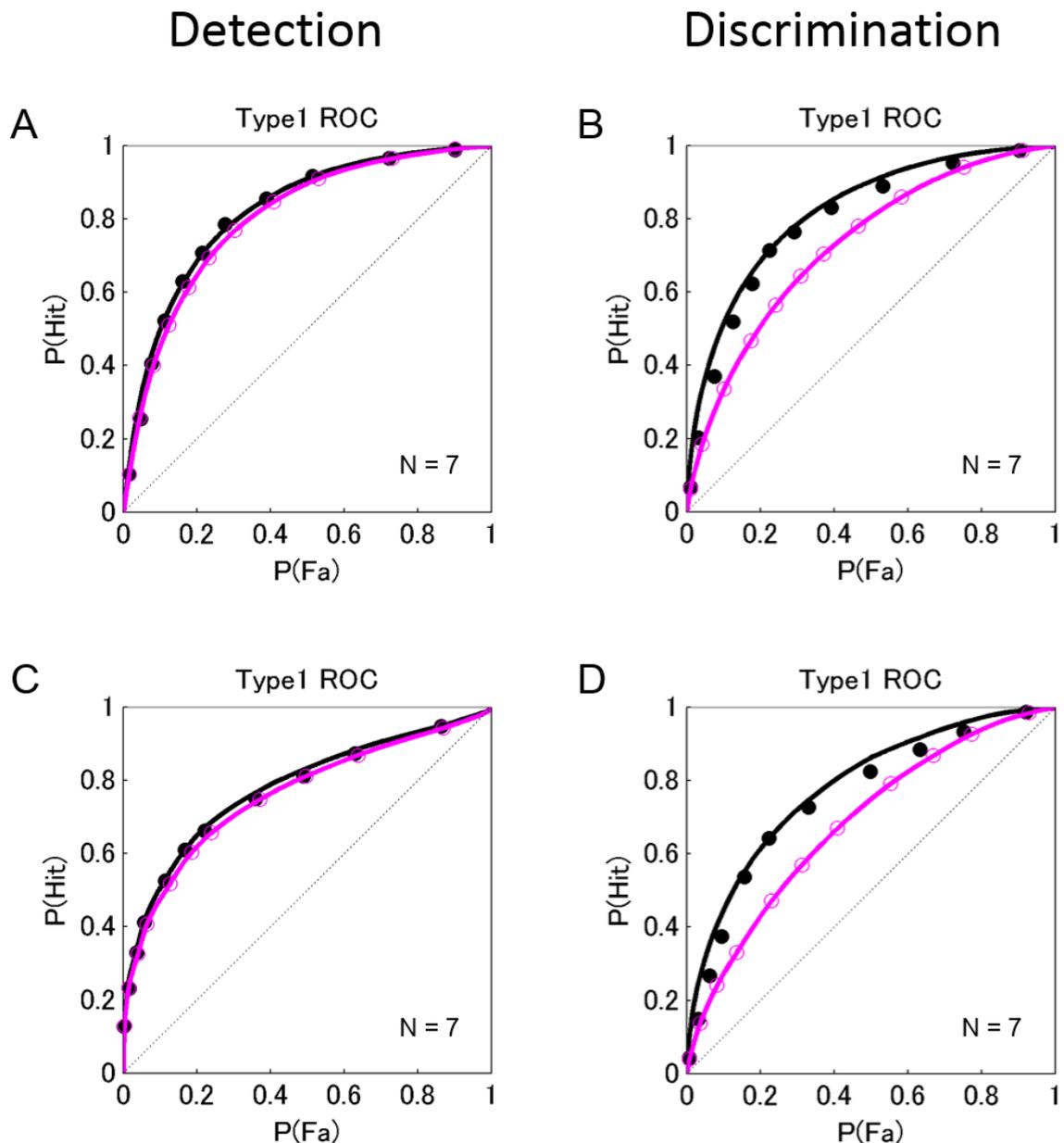


図 12 ROC による検出・弁別課題の相対的メタ認知感受性

(A, B) 実験 2-1 における検出・弁別課題の相対的メタ認知感受性。RDS の動きの検出課題 (A) では、Type1 ROC (黒線) と meta-Type1 ROC (ピンク線) は同等のカーブを示すが、動きの弁別課題 (B) では、meta-Type1 ROC が浅いカーブを描く。

(C, D) 実験 2-2 における検出・弁別課題の相対的メタ認知感受性。ガボールパッチの存在を判断させた検出課題 (C) においても、二つのカーブは同等だが、傾きの弁別課題 (D) において、meta-Type1 ROC が浅いカーブを描く。二つの曲線と点は、平均の ROC 曲線と観測された Type1 のデータ点を示す。

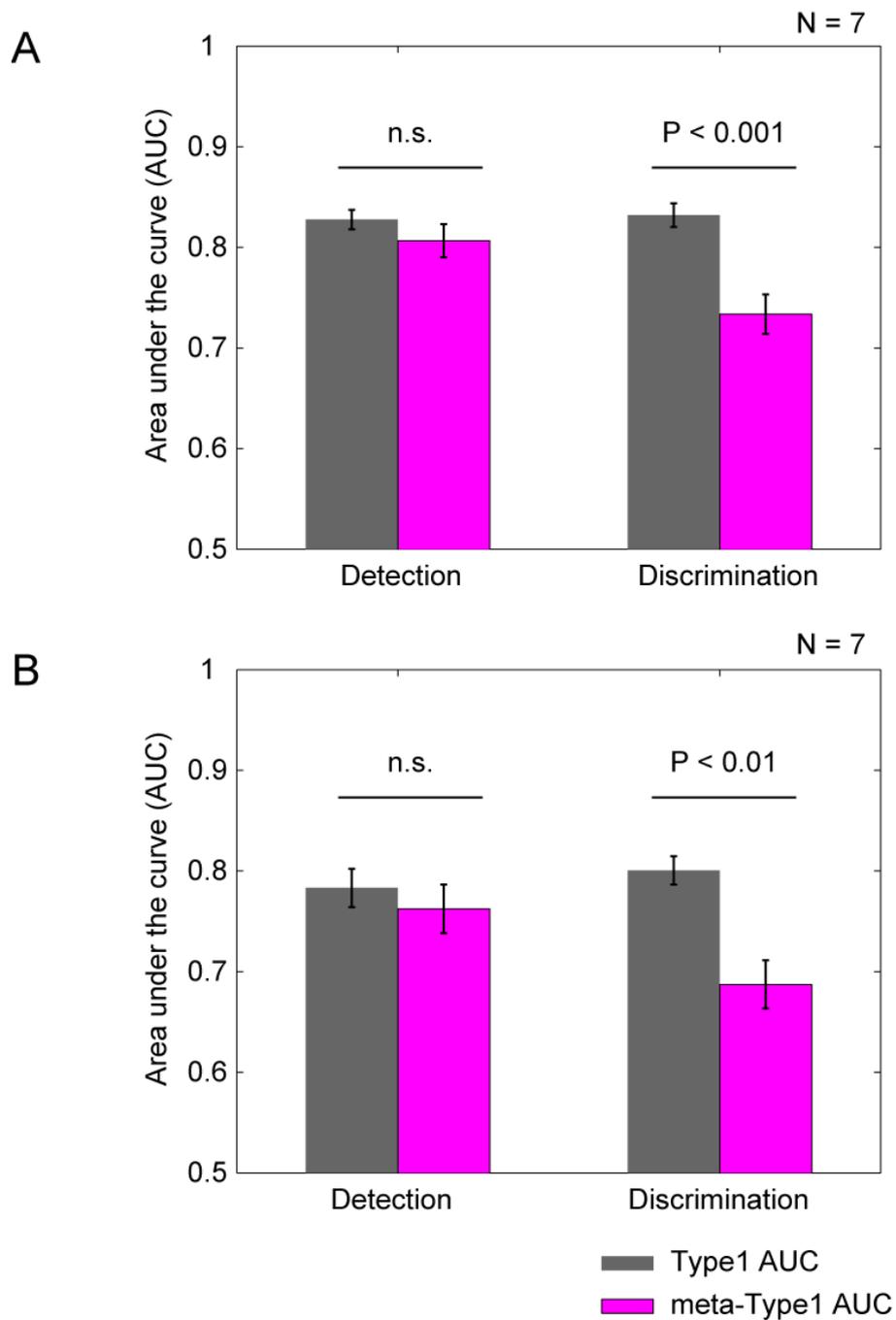


図 13 AUC による検出・弁別課題の相対的メタ認知感受性の定量化

図 12 に示した Type1 ROC (黒線) と meta-Type1 ROC (ピンク線), 二つの曲線の下面積値 (AUC) をとり, 比較した (t-test)。Error bars = mean ± s.e.

(A) 実験 2-1 (図 12 A, B) の AUC

(B) 実験 2-2 (図 12 C, D) の AUC

第3節 考察

以上、実験2では、物理的な視覚情報が、検出と弁別という二つの異なる状況において、どのようなメタ認知処理過程を経て、確信度を表出するに至っているのか、実験心理学および計算科学手法から検討した。これまで、検出と弁別という対比構造は、知覚意識の分野において、しばしば検討されてきたにもかかわらず [38, 45, 46], 両者の状況における判別成績と確信度の関係性（相対的メタ認知感受性 [39]）は不明であった。本研究では、検出と弁別課題間の正答率を統制することで、主観評定の相違のみ抽出した。その結果、ヒトの視知覚におけるメタ認知の特性が明らかになってきた。

実験2-1では、ランダムドット刺激を用い、動きの検出および弁別系における相対的メタ認知感受性を定量評価した。その結果、検出課題では客観指標（Type1 AUC）と主観指標（meta-Type1 AUC）が同等の値を示したのに対し、弁別課題では客観指標に比して主観指標が低下していることが判明した（図12 A, B, 図13 A）。また、ガボールパッチを用いた実験2-2から、単純な明暗模様を処理する系においても、同様の結果が再現された（図12 C, D, 図13 B）。したがって、このような検出—弁別課題間で観察されたメタ認知能力の乖離は、視覚のモダリティーに依存しない一般的特性であることが示唆される。このことは、検出系においては、判別成績に利用した情報がほぼ正確に確信度評定へ反映されているのに対し、弁別系では、より減衰した情報が確信度を表出する際のソースとして利用されていることを意味する。また、このような差異を生じる背景には、弁別系において、判別成績に利用した情報をモニタリングシステムへ送る段階で漏洩があるか、モニタリングシステム自体が劣っているために、減衰した情報が確信度を表出する系へ送られているかのどちらかが示唆される（図14）。

本知見を踏まえて、盲視のメカニズムを再考してみたい。実験2の結果から、類似の現象は、健常者においても認められることがわかった。盲視には、二つの特徴がある。一つは、視覚対象を検出できない（“見えない”）が、内容の弁別はできることである[4, 35, 45]。もう一つは、弁別課題において、正解しているという自覚を伴わず、良好な成績を残すことである[47]。前者は、検出閾値と弁別閾値の違いによって説明できる。本研究の実験2-1においても、同一の正答率を得るための閾値は、検出の方が弁別よりも高かった。これは、同一の視覚刺激を対象にした場合、検出の方が弁別よりも、正答率が低くなり得ることを意味する。実際に、同一の視覚刺激に対し両者の課題を行うと、弁別成績は高いまま、検出成績がチャンスレベルまで低下する状況がある（補足1 C）。このように、検出閾値は超えないが、弁別閾値を超えるような条件の時に、“見えない”が弁別できるという状況が生じることが考えられる。一方、後者の現象は、図12 B, Dで示す、弁別課題におけるType1とmeta-Type1のROC曲線のギャップに相当しているものと考えられる。すなわち、弁別課題を行っているときには、観察者は、自身がパフォーマンスを把握できる以上の成績を残すことが可能

なのである（図 14）。

これまで、記憶と視知覚系でメタ認知能力が異なることは報告されていたが [48, 49]，本知見は，それぞれの機能モジュール内でも，同一ではないことを示唆する。実験 2 の結果を総合すると，我々が経験する視知覚は，必ずしも客観的な判別精度に比例するわけではなく，求められる状況によって，主観的な確からしさが付与される過程が異なっていることがわかった。

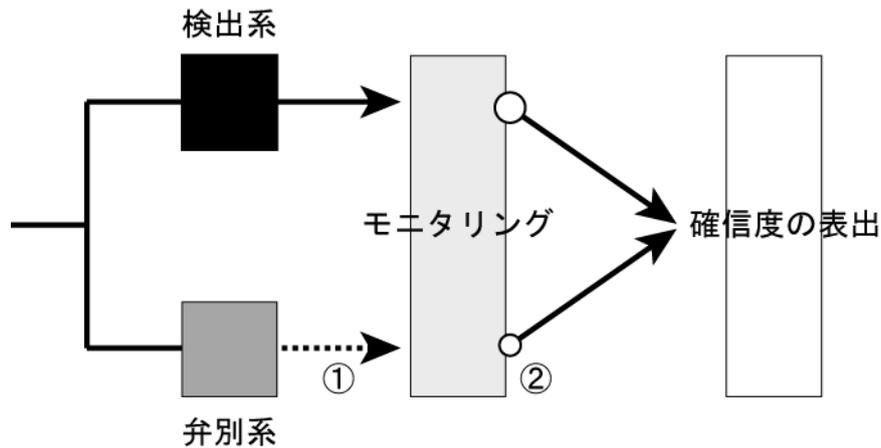
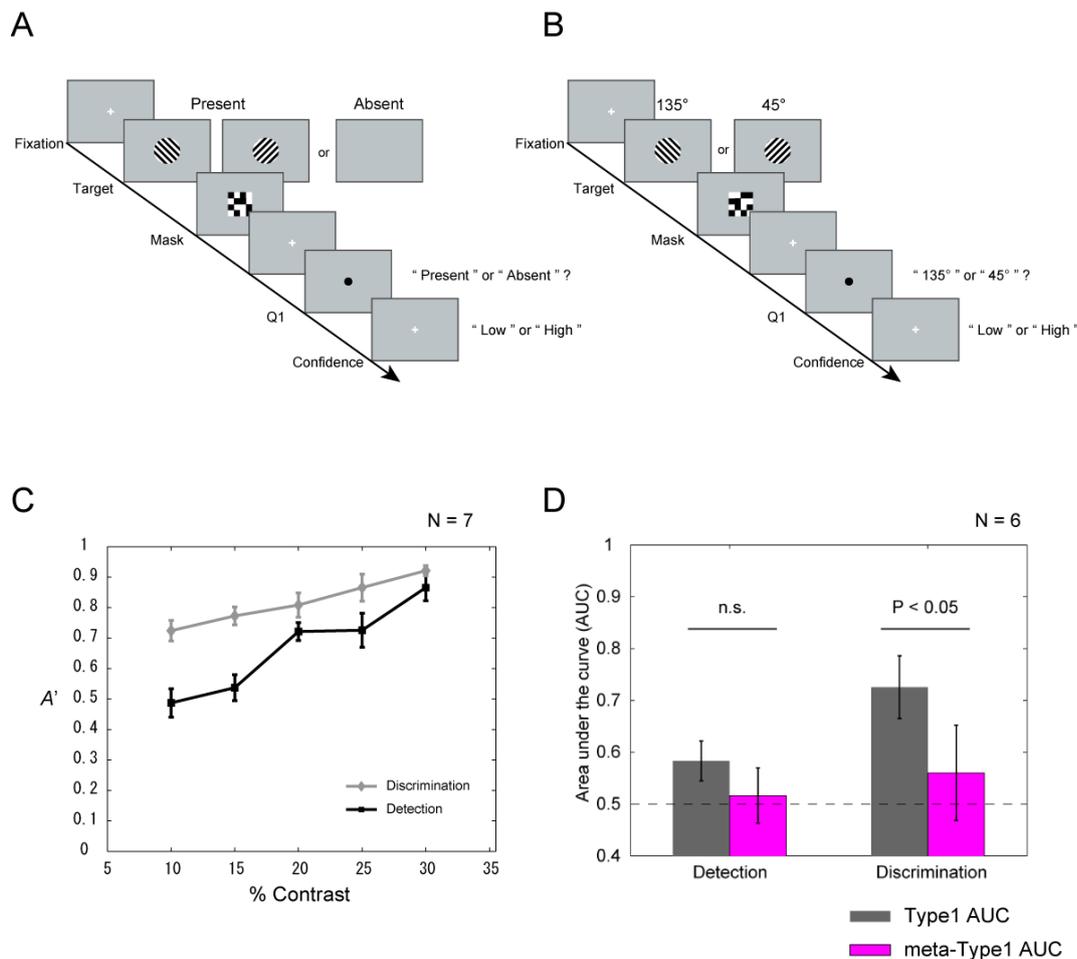


図 14 検出・弁別課題における客観－主観処理のスキーマ

視覚検出・弁別系の情報処理とモニタリングおよび確信度の表出系との関係性。相対的メタ認知感受性の結果（図 12, 13）から、それぞれの課題で標的となる視覚情報を処理してから、その情報をモニタリングするまでの過程において、両者の課題に差異が生じている可能性がある。検出系では、標的の情報がより正確にモニターされ、確信度評定に反映されていると考えられる。対して、弁別系では、①標的の情報をモニタリングの系へ送る段階で漏洩があるか、②モニタリングの系自体が劣っているために、知覚判別の時点よりも減衰した情報が、確信度を表出する系へ送られているかのどちらかが考えられる。



補足 1 同一刺激の検出と弁別

(A, B) 同一の正弦格子を標的とした検出課題 (A) と弁別課題 (B)。標的のコントラストを操作し、さらに標的の後に格子パターン刺激 (Mask) を呈示することで、刺激の曖昧さを調節した。検出課題 (A) では、標的の縞の傾きに関わらず、正弦格子が存在したか否か判断させた。その後、自身の検出に対する確信度の高低 (High・Low) を報告させた。弁別課題 (B) では、標的の傾きが 135° であったか 45° であったかを判断させた。その後、検出と同様に、二値化された確信度を報告させた。

(C) 両者の課題における行動成績。判別精度 (A' [43]) を標的コントラストの関数としてプロットした。コントラストが 15%以下では、検出成績は 50%まで低下しているが、弁別課題では高い成績を残す。

(D) 同一刺激に対する相対的メタ認知感受性の相違。相対的に検出成績の方が低い状況だが、検出課題の Type1 AUC と meta-Type1 AUC に差は認められない。しかし、判別精度が高いはずの弁別課題において、有意にメタ認知感受性が低下した (t-test)。 (D) の解析には、標的コントラストが 10~20%の範囲から、二つの課題ともにメタ認知感受性を算出できたコントラスト値をひとつ選択した。データ条件から解析不可能な 1 名は、除外した。[50]

第4章 結語

本研究では、知覚の確からしさを計算する神経基盤の一端を発見し、霊長類に共通する確信度の計算メカニズムを数理モデルから具現化した。また、ヒトの視覚検出・弁別系の行動成績と確信度の関係性を比較することで、確信度を表出するまでに経るメタ認知処理に、課題特異的な過程が存在することが明らかになった。これは、同様の視覚刺激でも、状況によって異なるメタ認知過程を経て、異なる主観知覚を形成する可能性を示唆する。対象の存在を問う検出と、刺激属性を判断する弁別は、認知心理学における二大主要課題である。今後、それぞれのメタ認知感受性が異なることを踏まえ、知覚の確からしさを支える神経メカニズムの全貌を明らかにする必要がある。その成果は、眼前の情報が“何であり、確かにそこにある”という知覚意識の成立メカニズムとその病態解明へ大いに寄与するものと考えられる。

また、これまでの臨床研究を振り返ってみると、知覚判別にどの位、誤りが生じるかといった客観的側面の評価に重きが置かれてきたが、対象をどの程度、確からしく感じるかという主観的側面は、観察者の内省報告例としての扱いにとどまり、定量的理解は得られていなかった。実験2のような解析法は、知覚障害や病態失認などの脳損傷後の徴候に対して、新たな評価フレームを提供できる可能性がある。今後、本研究のパラダイムを臨床例へ適用し、二つの課題から正常との差異を抽出することで、同じ視知覚の障害に対しても、課題要求、判断の精度、モニタリングという少なくとも3つの観点から、病態を捉えていきたい。臨床患者の主観経験を映し込む行動学的尺度と言語的な内省報告、および行動変容に関する知見を集約することで、知覚の確からしさを支える機能が失われた場合に、日常生活へどのような影響がもたらされるのか、明らかにしていくことが基礎と臨床、双方のこれからの課題であろう。

第5章 謝辞

本研究は、指導教員沼田憲治教授と産業技術総合研究所システム脳科学研究グループの小村豊博士の指導のもと行われました。本稿を終えるにあたり、臨床の患者さん一人ひとりが抱える真実に、科学から向かうきっかけと発想を常にもたせてくれた、二人の恩師に心より御礼申し上げます。

産業技術総合研究所システム脳科学研究グループには、修士課程より技術研修生として受け入れて頂き、多くの方々からご指導を賜りました。動物の飼育管理や行動心理・神経生理実験の手技、およびプログラミング技術の習得にあたって、温かく支えて下さった、同グループの宮本暁様、植竹哲平様、平島範子様、村松朱愛様、女鹿俊晴様、高島一郎博士をはじめ、システム脳科学グループの皆様に深く御礼申し上げます。また、本研究の遂行に際して、ご協力頂いた研究協力者の皆様に感謝いたします。

最後に、在学中、家庭を支え、遺憾なく研究へ臨ませてくれた妻と、新たな幸せを運んでくれた息子に、心より感謝の意を表します。

引用文献

1. Koch, C. *The Quest for Consciousness; A Neurobiological Approach*. Roberts, Englewood, Colorado, (2004).
2. Dehaene, S. and Changeux, J.P. Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, **70**: p. 200-27. (2011).
3. Seth, A.K., et al. Measuring consciousness: relating behavioural and neurophysiological approaches. *Trends Cogn Sci*, **12**: p. 314-21. (2008).
4. Sahraie, A., Weiskrantz, L. and Barbur, J.L. Awareness and confidence ratings in motion perception without geniculo-striate projection. *Behav Brain Res*, **96**: p. 71-7. (1998).
5. Kunimoto, C., Miller, J. and Pashler, H. Confidence and accuracy of near-threshold discrimination responses. *Conscious Cogn*, **10**: p. 294-340. (2001).
6. Shields, W.E., et al. Confidence judgments by humans and rhesus monkeys. *J Gen Psychol*, **132**: p. 165-86. (2005).
7. Kornell, N., Son, L.K. and Terrace, H.S. Transfer of metacognitive skills and hint seeking in monkeys. *Psychol Sci*, **18**: p. 64-71. (2007).
8. Persaud, N., McLeod, P. and Cowey, A. Post-decision wagering objectively measures awareness. *Nat Neurosci*, **10**: p. 257-61. (2007).
9. Berman, R.A. and Wurtz, R.H. Exploring the pulvinar path to visual cortex. *Prog Brain Res.*, **171**: p. 467-473. (2008).
10. Kaas, J.H. and Lyon D.C., Pulvinar contributions to the dorsal and ventral streams of visual processing in primates. *Brain Res Rev*, **55**: p. 285-96. (2007).
11. Casanova, C. The visual functions of pulvinar. in *The Visual Neurosciences* (eds. Chalupa, L.M. & Werner, J.S.). *MIT Press*, p. 592-608. (2003)
12. Guillery, R.W.S., Sherman, S.M. Thalamic relay functions and their role in corticocortical communication: generalizations from the visual system. *Neuron*, **33**: p. 163-175. (2002).
13. Tononi, G. An information integration theory of consciousness. *BMC Neurosci*, **5**: p. 42. (2004)
14. Crick, F.K., Koch, C. Constraints on cortical and thalamic projections: the no-strong loops hypothesis. *Nature*, **391**: p. 245-250. (1998)
15. Green, D.M. and Swets, J.A. *Signal detection theory and psychophysics*. Wiley, New York, (1966).
16. Kepecs, A., et al. Neural correlates, computation and behavioural impact of decision confidence. *Nature*, **455**: p. 227-31. (2008)
17. Kepecs, A. and Mainen, Z.F. A computational framework for the study of confidence in humans and animals. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, **367**: p. 1322-37. (2012).
18. Brainard, D.H. The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**: p. 433-436.

- (1997).
19. Levitt, H. Transformed up - down methods in psychoacoustics. *J Acoust Soc Am*, **49**: p. 467-477. (1971).
 20. Olszewski, J. The Thalamus of the Macaca Mulatta, An Atlas for Use with the Stereotaxic Instrument. *Karger Press, Basel*, (1952).
 21. Gutierrez, C., et al., Neurochemical and connectional organization of the dorsal pulvinar complex in monkeys. *J Comp Neurol*, **419**: p. 61-86. (2000)
 22. Wilke, M., Mueller, K.M. and Leopold, D.A. Neural activity in the visual thalamus reflects perceptual suppression. *Proc Natl Acad Sci USA*, **106**: p. 9465-70. (2009).
 23. Imura, K.R., and Lockland K.S., Long-range interneurons within the medial pulvinar nucleus of macaque monkeys. *J. Comp. Neurol.* **498**: p. 649-666. (2006)
 24. Romanski, L.M., Giguere, M., Bates, J.F. and Goldman-Rakic, P.S., Topographic organization of medial pulvinar connections with the prefrontal cortex in the rhesus monkey. *J. Comp. Neurol.*, **379**: p. 313-332. (1997).
 25. Purushothaman, G., Marion, R., Li, K. and Casagrande, V.A, Gating and control of primary visual cortex by pulvinar. *Nat. Neurosci*, **15**: p. 905-912. (2012).
 26. Lyon, D.C., Nassi, J.J. and Callaway, E.M. A disynaptic relay from superior colliculus to dorsal stream visual cortex in macaque monkey. *Neuron*, **65**: p. 270-9. (2010).
 27. Berman, R.A. and Wurtz, R.H. Functional identification of a pulvinar path from superior colliculus to cortical area MT. *J Neurosci*, **30**: p. 6342-54. (2010).
 28. Middlebrooks, P.G. and Sommer, M.A. Neuronal correlates of metacognition in primate frontal cortex. *Neuron*, **75**: p. 517-30. (2012).
 29. Kiani, R. and Shadlen, M.N. Representation of confidence associated with a decision by neurons in the parietal cortex. *Science*, **324**: p. 759-64. (2009).
 30. Komura, Y., Nikkuni, A., Hirashima, N., Uetake, T, Miyamoto, A. et al., Responses of pulvinar neurons reflect a subject's confidence in visual categorization. *Nat Neurosci*, **16**: p. 749-55. (2013).
 31. Del Cul, A., et al. Causal role of prefrontal cortex in the threshold for access to consciousness. *Brain*, **132**: p. 2531-40. (2009).
 32. Fleming, S.M., Huijgen, J. and Dolan, R.J. Prefrontal contributions to metacognition in perceptual decision making. *J Neurosci*, **32**: p. 6117-25. (2012).
 33. Metcalfe, J.S., Shimamura, A.P. Metacognition: knowing about knowing. *MIT Press*, (1994).
 34. Fleming, S.M. and Lau, H.C. How to measure metacognition. *Front Hum Neurosci*, **8**: p. 443. (2014).
 35. Weiskrantz, L., et al. Visual capacity in the hemianopic field following a restricted occipital ablation. *Brain*, **97**: p. 709-28. (1974).

36. Poppel, E. Held, R. and Frost, D. Residual visual function after brain wounds involving the central visual pathways in man. *Nature*, **243**: p. 295-6. (1973).
37. Sanders, M.D., et al. "Blindsight": Vision in a field defect. *Lancet*, **1**: p. 707-8. (1974).
38. Marcel, A.J. Conscious and unconscious perception: experiments on visual masking and word recognition. *Cogn Psychol*, **15**: p. 197-237. (1983).
39. Maniscalco, B. and Lau, H.C. A signal detection theoretic approach for estimating metacognitive sensitivity from confidence ratings. *Conscious Cogn*, **21**: p. 422-30. (2012).
40. Dorfman, D.D. and Alf, E. Jr. Maximum likelihood estimation of parameters of signal detection theory--a direct solution. *Psychometrika*, **33**: p. 117-24. (1968).
41. Galvin, S.J., et al. Type 2 tasks in the theory of signal detectability: discrimination between correct and incorrect decisions. *Psychon Bull Rev*, **10**: p. 843-76. (2003).
42. Barrett, A.B., Dienes, Z. and Seth, A.K. Measures of metacognition on signal-detection theoretic models. *Psychol Methods*, **18**: p. 535-52. (2013).
43. Wickens, T.D., Elementary signal detection theory. New York: *Oxford University Press*, (2002).
44. Kandel, E.R., Schwartz, J.H., and Jessell, T.M. *Principles of neural science*. 4th ed. New York, *McGraw-Hill*, 2000.
45. Azzopardi, P.C., Cowey, A. Blindsight and visual awareness. *Conscious Cogn*, **7**: p. 292-311. (1998).
46. King, J.R. and Dehaene, S. A model of subjective report and objective discrimination as categorical decisions in a vast representation space. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, **369**: p. 20130204. (2014).
47. Persaud, N. and H. Lau, Direct assessment of qualia in a blindsight participant. *Conscious Cogn*, **17**: p. 1046-9. (2008).
48. McCurdy, L.Y., et al., Anatomical coupling between distinct metacognitive systems for memory and visual perception. *J Neurosci*, **33**: p. 1897-906. (2013).
49. Fleming, S.M., et al., Domain-specific impairment in metacognitive accuracy following anterior prefrontal lesions. *Brain*, **137**: p. 2811-22. (2014).
50. Nikkuni, A., Komura, Y. and Numata, K. Different processes of subjective certainty between visual detection and discrimination tasks. *J Rehab Neurosci*, **15**: (2015). (Accepted).