

他者の数知覚の観察による潜在的影響の神経相関 Neural correlates for implicit influence of observation of others' numerical perceptions

小川 昭利[†], 亀田 達也[‡], 中谷 裕教^{*}
Akitoshi Ogawa, Tatsuya Kameda, Hironori Nakatani

[†]順天堂大学, [‡]東京大学, ^{*}東海大学
Juntendo University, The University of Tokyo, Tokai University
a-ogawa@juntendo.ac.jp

概要

我々の知覚決定は、他者の観察によって暗黙のうちに影響を受け、低次な知覚さえも調整され得る。本研究では、他者の数認識の観察により、個人の数知覚がどのように暗黙的に調節されるか、その神経機構を調べた。実験の結果、他者の過大評価と過小評価を観察した後、数知覚が異なる調節がされ、上頭頂小葉の活動が異なることが示された。この結果は、他者の数認識の観察が数知覚の神経基盤に暗黙的に影響することを示唆する。

キーワード: 機能的磁気共鳴画像法 (fMRI), 計算モデル, 機能的結合, 内側前頭前皮質, 上頭頂小葉

1. はじめに

我々の知覚決定は、他者の決定や意見を観察することで洗練されていく[1-4]。このような社会的影響は、恐怖、痛み、評価などの幅広い認知において研究されてきた[5-14]。他者の知覚判断を観察することは、観察者の知覚を暗黙のうちに変化させる可能性があるが、このような他者の知覚観察の影響についての神経基盤は明らかではなかった。

他者の知覚を観察したことによる暗黙の影響は2つのプロセスから構成されると考えられる。第一は、他者の知覚を観察したときに、自己の知覚が他者の知覚と異なることを認識することである。二つ目は、自己と他者の知覚の不一致に基づく知覚の調整である。神経レベルでは、自他不一致を検出した領域が、その情報を知覚領域に送る。そして、知覚領域の活動が調整されると考えられる。

この仮説を検証するため、我々はヒトの基礎的知覚の一つである数知覚に着目した。多くの研究により、右上頭頂小葉 (superior parietal lobule, SPL) が数知覚に関与していることが明らかにされている[15-28]。また、数の情報 (例えば、呈示された物体数) は SPL から頭頂間溝の領域における活動パターンから解読することができる[29-31]。

本研究では、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) 実験の参加者は数知覚課題を行うとともに、他者の課題遂行

を観察した。課題は、呈示されたドットの数が参照数よりも大きいかどうかの判別とした。その結果として、他者の数知覚の観察が参加者の知覚に影響を与えると予想した。これまでのイメージング研究では、内側前頭前野皮質 (MPFC) が認知における自他不一致のフィードバックと関連していることが明らかにされている[10, 32-35]。このことから、他者の数知覚を観察する際に、MPFC が自己と他者の不一致の検出に関与していると予想した。また、SPL の数知覚関連領域は MPFC と機能的に結合し、他者の観察後に SPL の活動が調節され、SPL の活動の空間活動パターンが他者の数知覚の観察によって調整されることが予想された。

2. 方法

機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) 実験では、大学生 21 名 (男性 10 名と女性 11 名, 18~21 歳, 平均年齢 19.4 歳 (標準偏差 0.92)) が実験に参加した。参加者全員の視力は正常または正常値に補正されていた。参加者全員が実験前に書面によるインフォームドコンセントを受けた。順天堂大学医学部の倫理委員会が本研究を承認した。参加報酬は 5,000 円だった。

課題は、呈示されたドットの数 を推定し、推定した数が基準となる数 (参照数) よりも大きい小さいかを回答することであった (図 1A)。各参加者には、fMRI セッション (スキャニングセッション) が 5 回、ノースキャンセッションが 4 回あった (図 1B)。1 回目、5 回目、9 回目のセッション (セルフセッション) では、呈示されたドットの数 を自分で推定した。3 回目と 7 回目のセッションでは、他者の課題遂行を観察した (観察セッション)。観察セッションの事前事後 (2 回目、4 回目、6 回目、8 回目) では他者の反応を予測した (予測セッション, 図 1B)。予測セッションではスキャンを行わなかった。予測セッションの結果から、参加者が他者の課題遂行を見ていたことを確認した。

各試行では、視角 15 度の範囲内のランダムな位置に

白いドットを 500 ミリ秒呈示した (刺激フェーズ, 図 1A). 各ドットの大きさは視角 1 度であった. 固視フェーズ (2, 3, または 4 秒でジッター) の後, 呈示ドット数が参照数 (例えば, 「 $X > 35?$ 」または 「 $X < 35?$ 」) より大きい小さいかの質問が現れた. 「参照数よりも大きい」とする選択を Larger 選択と呼ぶこととする. 呈示ドット数と参照数の関係は表 1 にまとめた. 参加者は, 画面下部の左右に表示される 「Yes」 または 「No」 を 2 秒以内に選択した. セルフセッションの各試行では, Yes と No の選択肢は出現時に白色に着色され, 参加者がボタンを押した直後に赤色に変化した. 次の試行の前は固視期間とした (2, 3, または 4 秒でジッター). 不等号 ($>$ または $<$), "Yes" と "No" の左右の位置は, 参加者間でカウンターバランスされた.

最初のセッション(S1)では, 参加者は他者の影響を受けていないと前提した. 観察セッションでは, 過大評価者(OE)と過小評価者(UE)の課題遂行を観察した. OE の Larger 選択の確率は 69%, UE の Larger 選択の確率は 31% に設定した (図 S1). OE と UE の順番は, 参加者間でカウンターバランスした. 各試行で参加者は, 緑色で示された他者の選択に対応するボタンを押すように求められた. もう一方の選択肢は, セルフセッションと同様に白で示した. 参加者の選択は, 参加者がボタンを押した直後に赤色で示した. 5 回目と 9 回目のセッションでは, 参加者が自分で課題を遂行した (SO は OE の後のセルフセッション, SU は UE の後のセルフセッション). 各セルフセッションの最後に, 7 点のリッカート尺度(1: 絶対に自信がない, 4: 中立, 7: 絶対に自信がある)を用いて, 課題における自信の有無を回答した. 参加者は, 自己セッションで 48 試行, 観察セッションで 96 試行を行った.

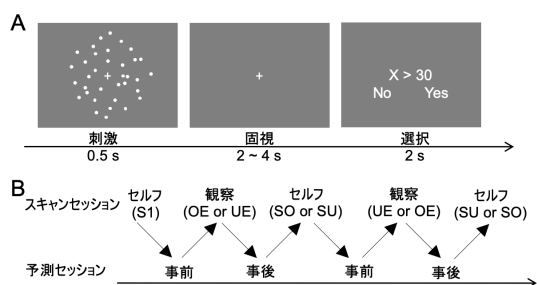


図 1 実験の概要. A. 実験課題. 行動実験と fMRI 実験ともに, ドット数を推定する課題である. ドットの刺激が 0.8 秒間呈示され, 呈示ドット数についての識別を行う. 参加者は質問に対して Yes または No のボタンを押す. B. セッションの順番.

表 1 呈示ドット数と参照数

セッション	ドット数	参照数
スキャン	22, 24, 26, 28, 32, 34, 36, or 38	30
	27, 29, 31, 33, 37, 39, 41, or 43	35
	32, 34, 36, 38, 42, 44, 46, or 48	40
予測	25 or 35	30
	30 or 40	35
	35 or 45	40

観察セッションで参加者は, 他者の課題遂行を観察する前後に, 時間制限なしで相手の選択を予測した (図 1B). 各予測セッションでは, 12 回の試行があり, 呈示ドット数はスキャンセッションとは異なっていた. 呈示ドット数と参照数の関係は表 1 の下段にまとめた.

fMRI 実験が始まる前に, セルフセッションと同じ 48 試行の練習を行った. また, 実験開始時の参加者間のばらつきを少なくするために, 選択に対するフィードバック (正解・不正解) を選択フェーズの後 1 秒間表示した. スキャンセッションと予測セッションでは, フィードバックはなかった. 刺激は MRI 装置の後部に設置した MRI 対応 32 インチ LCD (NordicNeuroLab) に表示された. 選択は MRI 対応のレスポンスパッド (Current Designs, USA) で記録した. 刺激の呈示と選択の記録には, Matlab ソフトウェア (Mathworks 社) 上で動作する Psychtoolbox[36]を使用した.

参加者の選択について, Larger 選択が SU セッションよりも SO セッションにおいて多いかどうかを調べ, 参加者の数知覚に観察の影響があることを確認した. また, 選択の自信と正確さの認識が脳の活性化に及ぼす影響を除外するために, 自信と正確さがセルフセッション間で安定していることを確認した. 選択内容は, ロジットモデルを用いた一般化線形混合モデルを用いて解析を行った. 過大評価と過小評価を観察した後, すなわち SO と SU セッションでの Larger 選択の割合への影響を比較した. また, OE セッションと UE セッションの事前セッションと事後セッションの予測値を比較し, 参加者が他者の回答を注意深く見ていることを確認した.

S1 セッションにおける参加者個人の回答を, 心理測定関数としてロジットリンク関数を用いた一般化線形モデルを用いてモデル化した. この関数の入力である x

は、ドット数の対数と参照番号の対数の差である。この関数は、Larger の解答の確率を出力する。S1 セッションの参加者 i の心理測定関数を個別に同定したところ、以下の式ようになった。

$$P_i(x) = \frac{1}{1 + \exp(-(a^i + \beta_1^i x))}$$

心理測定関数のパラメータである a^i と β_1^i は、Matlab ソフトウェア(Mathworks, Inc.)の Optimization Toolbox に搭載されている Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)法を用いて推定した。

観察セッションにおける画像解析では、各参加者の Larger 選択を推定するために、各参加者の心理測定関数を使用した。大きいと答えると推定した確率が 0.5 よりも大きければ、参加者は Larger 選択をしたと推定された。この推定結果から、他者の選択と推定された参加者の選択とが、一致する (congruent, Con)か不一致 (incongruent, Inc)かを各試行で推定した。

SO と SU セッションにおけるグループの心理測定関数を全参加者のデータから推定した。リンク関数を下記のロジスティック関数として、一般化線形混合モデルを用いた。

$$P(x) = \frac{1}{1 + \exp(-(a + \beta_1 x + \beta_{SO} x_{SO} + \beta_{SU} x_{SU}))}$$

ここで、 x は、ドット数の対数と参照番号の対数との差である。SO と SU のセッションをダミー変数 x_{SO} と x_{SU} としてモデル化した。SO セッションのデータの場合は $x_{SO}=1$, $x_{SU}=0$, SU セッションのデータの場合は $x_{SO}=0$, $x_{SU}=1$ とした。OE と UE の影響を反映した SO セッションと SU セッションのベータ推定値を求めて比較した。参加者はランダム効果として扱った。パラメータは、BFGS 法を用いて再度推定した。

シーメンスの Prisma 3T MR スキャナで、64ch の頭頸部コイルを使用して画像を取得した。参加者の頭部の動きはクッションにより最小限に抑えた。機能画像は、マルチバンドエコープラナーイメージング法[37, 38]を用いて、血中酸素濃度依存性画像 (66 スライス, 192mm × 192mm × 132mm, 面内分解能=96 × 96, 画素サイズ=2mm × 2mm, 厚さ=2mm, ギャップなし, TR=1.0 秒, TE=30 ミリ秒 ms) を用いて取得した (マルチバンドファクター=6)。各 fMRI セッションで 418 画像を取得した。課題を開始する前に MP-RAGE プロトコルを用いて T1 強調画像 (分解能=1mm 等方性) を取得した。

取得した画像を処理するため、Matlab 上で動作する

SPM12 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, University College London) を使用した。前処理では、スライスタイミング補正, スキャン間位置調整, 標準脳の MNI (モントリオール神経研究所) 空間への正規化, および空間平滑化 (等方性 FWHM=8mm) を行った。低周波ノイズを除去するためにハイパスフィルタ (カットオフ=128 秒) を使用した。機能画像の前処理を行った後、クラスター形成閾値を $P < 0.001$, クラスターサイズ閾値を $k > 100$ とし、以下に説明する 2 つの異なる一般線形モデル (GLM1 および GLM2) による解析を実行した。単変量解析と多ボクセルパターン解析と機能的結合解析における一貫性のために、共通の関心領域 (ROI) を定義して使用した。上頭頂小葉の数知覚に関連する ROI は、Santens らが報告している [$x = 21, y = -63, z = 57$]を中心とした半径 8mm の球体で定義した [21]。

GLM1 では、刺激フェーズのドット数に対する脳の活性化を全スキャンセッションにわたって調べた。刺激フェーズと選択フェーズを条件として設定し、呈示ドット数の対数を刺激フェーズにおけるパラメトリックモジュレーションとした。GLM2 では、選択フェーズにおいて、他者の選択と推定された参加者の選択の不一致に関連する脳領域を求めた。そのため、OE と UE セッションにおいて、刺激フェーズの条件と選択フェーズの Con と Inc の 2 つの条件の計 3 条件を設定した。相手の数知覚が参加者の知覚と異なることの認識に対応する脳活動を $\text{Inc} > \text{Con}$ のコントラストにより調べた。個人ごとの GLM では、fMRI 信号の時間的自己相関を補正するために SPM12 の FAST オプションを使用した [39]。両 GLM には、頭部の動きの標準的な 6 つの無関心回帰子に加えて、心拍と呼吸の無関心回帰子も計画行列に含めた [40, 41]。

他者の過大評価と過小評価を観察した後、数知覚に関連する上頭頂小葉 (SPL) の活動に違いがあるかを調べた。SPL の関心領域 (ROI) における脳活動は、MarsBaR[42]を用いて、3 つの連続したドット数の範囲 ($n < 30, 40 > n > 30, n > 40$) について別々に抽出した。反復測定 ANOVA により、数字の範囲 ($n < 30 / 40 > n > 30 / n > 40$) と他者観察後の自己セッション (SO/SU) についての SPL の活動の解析を行った。この解析のために、刺激フェーズでの数の範囲についての 3 つの条件と選択フェーズの条件を含む、別の GLM を実行した。

観察セッションの選択フェーズにおける SPL の機能的結合について、MPFC の活動で前後 2 つのピークが確認されたことから、MPFC の前部と後部のどちらに SPL が機能的結合しているかを調べた。観察セッションの選択フェーズにおける機能的結合解析では、SPL をシードとして MPFC の前部と後部をターゲットとして機能的結合の強さを比較した（前部, $[x=6, y=30, z=42]$, 後部, $[x=0, y=20, z=50]$, 下記のイメージング結果を参照）。この解析では、MPFC の前部と後部の ROI (aMPFC と pMPFC) は、両ピークを中心とした 8mm の球体として定義した。機能的結合解析には gPPI ツールボックス[43]を用いた。機能的結合の強さ（すなわち、PPI のベータ推定値）は、SPL-aMPFC と SPL-pMPFC のそれぞれについて、MarsBaR を用いて抽出し（Brett et al., 2002）、ROI (aMPFC / pMPFC) と一致性(Inc / Con)についての二元配置反復測定 ANOVA を行った。

3. 結果

S1 のセッションでは Larger 選択が 40%だった。他者の選択を観察後は、SO セッションの方が SU セッションよりも Larger 選択が多くなった (SO, 42%; SU, 37%; paired t test, $t(20) = 2.34, P = 0.030$, 図 2A)。正答率はすべてのセルフセッションで同様だった (S1, $70 \pm 8\%$ (平均 \pm 標準偏差), SO, $67 \pm 8\%$, SU, $66 \pm 8\%$)。

図 2B は、OE 事後セッションでは、他者が Larger 選択を多くすることを参加者が予測していたことを示した (OE 事前, 37%; OE 事後, 58%, paired t test, $t(20) = 3.58, P = 0.0019$)。対照的に、過小評価者の回答を観察した前後で、参加者の予測は変化しなかった (UE 事前, 42%; UE 事後, 37%; paired t test, $t(20) = 1.01, P = .32$)。参加者は平均的に過小評価者であったため、過小評価者の選択の予測は、観察の前後で似たものとなった可能性がある。参加者は、OE 事後の方が UE 事後よりも多く Larger 選択を予測していた ($t(20) = 3.41, P = 0.0028$)。

一般化線形モデルのロジットモデルを用いて、S1 セッションでの個人の心理測定関数を同定した。この心理測定関数は、参加者の選択を推定し、推定された選択と他者の選択との不一致に関連する脳領域を調べるために、機能画像の解析において使用した。

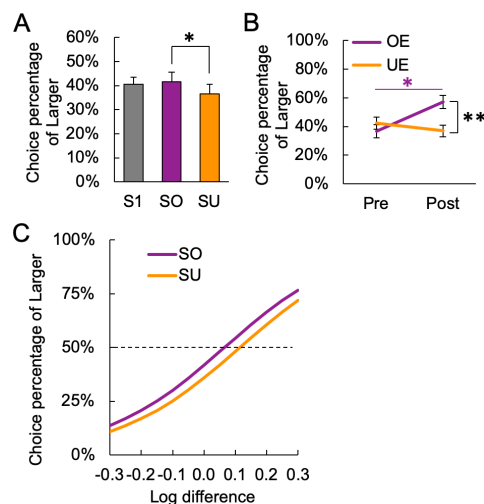


図 2 行動結果. A. S1, SU, SO の各セッションにおける Larger の選択率. B. 予測セッションの結果. C. SO セッションと SU セッションにおけるグループの心理測定関数. 一般化線形モデル回帰の結果, SO セッションと SU セッションの効果が有意に異なることが示された.

一般化線形混合モデルの結果, SO セッションのロジットモデルのベータ値 (0.08 ; 95%CI, $-0.12 \sim 0.29$) は SU セッションのベータ値 (-0.27 ; 95%CI, $-0.43 \sim -0.02$) よりも有意に大きいことが示された。つまり, SO セッションと SU セッションに分割した心理測定関数は, 主観的平等点が有意に異なっていたといえる (図 2C)。

GLM1 の結果, 一次視覚野 (V1) の活動が呈示ドット数の対数に関連していることが示された。左 V1 の活動が有意だった (ピーク $[x = -12, y = -92, z = -12]$, ピーク Z 値 = 3.99, クラスタサイズ = 226, クラスタレベル P-FWE = 0.047)。一方, 右 V1 の活動は有意傾向だった (ピーク $[x = 16, y = -90, z = -8]$, ピーク Z 値 = 4.70, クラスタサイズ = 197, クラスタレベル P-FWE = 0.073)。SPL の活動は, クラスタ形成閾値には達しなかったが, ROI 解析では有意だった。

GLM2 では, 推定された参加者の選択と他者の選択との不一致に関連する脳領域を調べた。参加者の選択を心理測定関数より求めて, 他者の選択との一致・不一致を推定した。不一致の脳活動を示す Inc > Con のコントラストは, MPFC の活動が有意であることを示した (クラスタサイズ = 365, クラスタレベル P-FWE = 0.013, 図 3)。また, この活動には局所ピークが前後に 2 つ観測された。

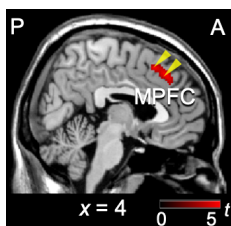


図3 自他不一致に関わる脳活動。観察セッションの選択フェーズにおいて、推定された参加者の選択と他者の選択の不一致において、内側前頭前皮質(MPFC)の活動が見られた。矢印は2つの局所ピークのy-z位置を示す。

ドット数の3つの連続した範囲($n < 30 / 30 < n < 40 / n > 40$)に対するSPLの活動が、SOセッションとSUセッションの間で異なるかどうかを調べた。セッション(SO/SU)と範囲($n < 30 / 30 < n < 40 / n > 40$)の二元配置反復測定ANOVAは、有意な交互作用を示し($F(2,40) = 3.97, P = 0.027$, 図4A)、セッション($F(1,20) = 0.02, P = 0.88$)と範囲($F(2,40) = 2.39, P = 0.104$)の有意な主効果は認められなかった。このことは、SPLの活動がSOセッションとSUセッションではドット数範囲に対して異なることを示す。

上記のSPLのROIの解析結果を補強するため、右V1のROIを、提示されたドット数 $[x = 16, y = -90, z = -8]$ のパラメトリック変調のピークを中心とした半径8mmの球体として定義した。SPL ROIが右半球に位置していたので、右V1をROIとした。V1の活性化のためのセッション(SO/SU)とドット数の範囲($n < 30 / 30 < n < 40 / n > 40$)の二元配置反復測定ANOVAは、有意な効果を示さなかった(セッションの主効果, $F(1,20) = 0.46, P = 0.50$; ドット数範囲の主効果, $F(2,40) = 1.25, P = 0.30$; 交互作用($F(2,40) = 1.84, P = 0.17$)(図4B)。

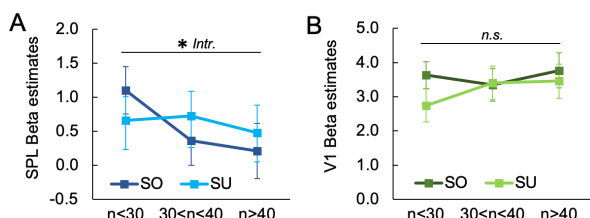


図4 脳活動のROI解析結果。A. 上頭頂小葉(SPL)の活動。セッションとドット数範囲の交互作用が有意である。B. 一次視覚野の活動。SPLとは対照的に、SOセッションとSUセッションの両方において、同様なレベルの活動が観測された。

SPL ROIをシード領域とし、観察セッションの選択フェーズにおいて、SPL-pMPFCの前・後MPFC ROIとの機能的結合を検討した。ROI(aMPFC/pMPFC)と一致性(Inc/Con)についての二元配置反復測定ANOVAの結果、SPL-aMPFCよりもSPL-pMPFCの方が、機能的結合が有意に強いことが示された($F(1,20) = 20.7, P < 0.001$, 図5)。一致性(Inc/Con)の有意差は認められなかった($F(1,20) = 1.6, P = 0.22$)。交互作用も同様に有意ではなかった($F(1,20) = 1.3, P = 0.27$)。

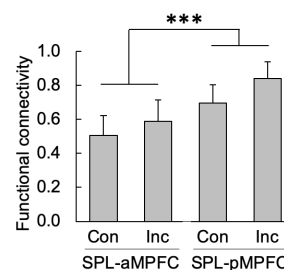


図5 機能的結合のROI解析結果。観察セッションにおいて、SPLとaMPFC/pMPFCの機能的結合を比較したところ、SPL-pMPFCの機能的結合は、SPL-aMPFCの機能的結合よりも有意に強かった。SPL-pMPFCの機能的結合は、SPL-aMPFCの機能的接続性よりも有意に強かった。

4. 議論

本研究では、他者の数知覚を観察することが暗黙のうち自己の数知覚に与える影響とその神経相関を調べた。行動結果から、参加者の数知覚は、他者の過大評価を観察した後の方が過小評価を観察した後よりも過大評価にシフトしていた。モデルに基づいたイメージング解析の結果、推定された参加者の選択と他者の選択との不一致に対してMPFCが活動することが示された。活動したMPFCの後部は、前部に比べて、数知覚に関連するSPLと機能的に結合していた。SPLはSO条件とSU条件で異なる活性化のパターンを示した。

本研究で提示されたドット数の範囲(22から48まで)では、ドットの密度が数値評価に影響を与える可能性がある[44-47]。本研究では、密度は提示ドット数の手がかりの一つとなり得る。密度情報はおそらくV1の活動に反映されるだろう。

観察セッションでは、参加者は自らの選択を求められなかった。これは、他者の数知覚と参加者の数知覚を明示的にフィードバックする先行研究とは異なる点で

ある[32-35, 48]. 参加者は呈示されたドット数を内発的に推定し、頭の中で自分の推定値と示された他者の推定値との間の不一致を認識していたのだろう[49]. 我々の予測通り、自他の数知覚の不一致の認識には MPFC の活動が見られた。

機能的結合解析の結果、MPFC と SPL は、他者の推定の観測において、他者の選択と推定された参加者の選択が一致していなくても、コミュニケーションをとっていることが示された。また、MPFC の活動の局所ピークで機能的結合を比較したところ、MPFC と SPL の間では、MPFC の後部の方が、機能的結合が高いことがわかった。先行研究[50, 51]と同様に、この結果は、MPFC の後部が主に自他不一致の検出に関与し、その後には知覚の調整が起こることを示唆する。

本研究では、他者の数知覚を観察することが、観察者の数知覚に与える影響について、行動と神経相関を調べた。その結果、他者の過大評価と過小評価を観察した後では、参加者の数知覚が異なることが明らかになった。イメージングの結果、一次視覚野の活動がドット数と関連していたのに対し、他者の選択と推定された参加者の選択の不一致に対して MPFC が活動していた。他者の過大評価と過小評価を観察した後では、数知覚に関連する SPL の活動が異なっていた。この SPL の領域は、後部の MPFC と機能的に結合していた。これらの結果は、他者の数知覚を観察することで、MPFC で自他不一致が検出され、それに続いて、SPL の活動が調節されていることを示唆している。

文献

- [1] Kelman, H.C. (1958) "Compliance, identification, and internalization three processes of attitude change", *Journal of Conflict Resolution*, Vol. 2, pp. 51-60.
- [2] Cialdini, R.B., Goldstein, N.J. (2004) "Social Influence: Compliance and Conformity", *Annual Review of Psychology*, Vol. 55, pp. 591-621.
- [3] Koban, L., Jepma, M., Geuter, S., Wager, T.D. (2017) "What's in a word? How instructions, suggestions, and social information change pain and emotion", *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol. 81, pp. 29-42.
- [4] Sowden, S., Koletsis, S., Lymberopoulos, E., Militaru, E., Catmur, C., Bird, G. (2018) "Quantifying compliance and acceptance through public and private social conformity. *Consciousness and Cognition*, Vol. 65, pp. 359-367.
- [5] Olsson, A., Nearing, K.I., Phelps, E.A. (2007) Learning fears by observing others: The neural systems of social fear transmission. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, Vol. 2, pp. 3-11.
- [6] Olsson, A., Phelps, E.A. (2007) Social learning of fear. *Nature Neuroscience*, Vol. 10, pp. 1095-1102.
- [7] Campbell-Meiklejohn, D.K., Bach, D.R., Roepstorff, A., Dolan, R.J., Frith, C.D. (2010) How the opinion of others affects our valuation of objects. *Current Biology*, Vol. 20, pp. 1165-1170.
- [8] Goubert, L., Vlaeyen, J.W., Crombez, G., Craig, K.D. (2011) Learning about pain from others: an observational learning account. *Journal of Pain*, Vol. 12, pp. 167-174.
- [9] Huang, Y., Kendrick, K.M., Yu, R. (2014) Conformity to the Opinions of Other People Lasts for No More Than 3 Days. *Psychological Science*, Vol. 25, pp. 1388-1393.
- [10] Chung, D., Christopoulos, G.I., King-Casas, B., Ball, S.B., Chiu, P.H. (2015) Social signals of safety and risk confer utility and have asymmetric effects on observers' choices. *Nature Neuroscience*, Vol. 18, pp. 912-916.
- [11] Nook, E.C., Zaki, J. (2015) Social norms shift behavioral and neural responses to foods. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 27, pp. 1412-1426.
- [12] Suzuki, S., Jensen, E.L.S., Bossaerts, P., O'Doherty, J.P. (2016) Behavioral contagion during learning about another agent's risk-preferences acts on the neural representation of decision-risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, pp. 3755-3760.
- [13] Lindström, B., Golkar, A., Jangard, S., Tobler, P.N., Olsson, A. (2019) Social threat learning transfers to decision making in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 116, pp. 4732-4737.
- [14] Murata, A., Nishida, H., Watanabe, K., Kameda, T. (2020) Convergence of physiological responses to pain during face-to-face interaction. *Scientific Reports*, Vol. 10, 450.
- [15] Fink, G.R., Marshall, J.C., Gurd, J., Weiss, P.H., Zafiris, O., Shah, N.J., Zilles, K. (2001) Deriving numerosity and shape from identical visual displays. *Neuroimage*, Vol. 13, pp. 46-55.
- [16] Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., Dehaene, S. (2004) Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, Vol. 44, pp. 547-555.
- [17] Shuman, M., Kanwisher, N. (2004) Numerical Magnitude in the Human Parietal Lobe: Tests of Representational Generality and Domain Specificity. *Neuron*, Vol. 44, pp. 557-569.
- [18] Nieder, A. (2005) Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nature reviews. Neuroscience*, Vol. 6, pp. 177-190.
- [19] Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., Dehaene, S. (2007) A Magnitude Code Common to Numerosities and Number Symbols in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, Vol. 53, pp. 293-305.
- [20] Roitman, J.D., Brannon, E.M., Platt, M.L. (2007) Monotonic coding of numerosity in macaque lateral intraparietal area. *PLoS Biology*, Vol. 5, pp. 1672-1682.
- [21] Santens, S., Roggeman, C., Fias, W., Verguts, T. (2010) Number processing pathways in human parietal cortex. *Cerebral Cortex*, Vol. 20, pp. 77-88.
- [22] Harvey, B.M., Klein, B.P., Petridou, N., Dumoulin, S.O., 2013. Topographic representation of numerosity in the human parietal cortex. *Science*, Vol. 341, pp. 1123-1126.
- [23] Hayashi, M.J., Kanai, R., Tanabe, H.C., Yoshida, Y., Carlson, S., Walsh, V., Sadato, N. (2013) Interaction of Numerosity and Time in Prefrontal and Parietal Cortex. *Journal of Neuroscience*, Vol. 33, pp. 883-893.
- [24] Holloway, I.D., Battista, C., Vogel, S.E., Ansari, D. (2013). Semantic and perceptual processing of number symbols: evidence from a cross-linguistic fMRI adaptation study. *Journal of cognitive neuroscience*, Vol. 25, pp. 388-400.
- [25] Park, J., Park, D.C., Polk, T.A. (2013) Parietal Functional Connectivity in Numerical Cognition. *Cerebral Cortex*, Vol. 23, pp. 2127-2135.
- [26] Javadi, A.H., Brunec, I.K., Walsh, V., Penny, W.D., Spiers, H.J. (2014) Transcranial electrical brain stimulation modulates neuronal tuning curves in perception of numerosity and duration. *NeuroImage*, Vol. 102, pp. 451-457.
- [27] Wei, W., Chen, C., Yang, T., Zhang, H., Zhou, X. (2014) Dissociated neural correlates of quantity processing of quantifiers, numbers, and numerosities. *Human brain mapping*,

- Vol. 35, pp. 444-454.
- [28] Harvey, B.M., Fracasso, A., Petridou, N., Dumoulin, S.O., (2015) Topographic representations of object size and relationships with numerosity reveal generalized quantity processing in human parietal cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 112, pp. 13525-13530.
- [29] Eger, E., Michel, V., Thirion, B., Amadon, A., Dehaene, S., Kleinschmidt, A. (2009) Deciphering Cortical Number Coding from Human Brain Activity Patterns. *Current Biology*, Vol. 19, pp. 1608-1615.
- [30] Damarla, S.R., Just, M.A. (2013) Decoding the representation of numerical values from brain activation patterns. *Human brain mapping*, Vol. 34, pp. 2624-2634.
- [31] Castaldi, E., Aagten-Murphy, D., Tosetti, M., Burr, D., Morrone, M.C. (2016) Effects of adaptation on numerosity decoding in the human brain. *Neuroimage*, Vol. 143, pp. 364-377.
- [32] Klucharev, V., Hytönen, K., Rijpkema, M., Smidts, A., Fernández, G. (2009) Reinforcement Learning Signal Predicts Social Conformity. *Neuron*, Vol. 61, pp. 140-151.
- [33] Klucharev, V., Munneke, M.A.M., Smidts, A., Fernández, G. (2011) Downregulation of the posterior medial frontal cortex prevents social conformity. *Journal of Neuroscience*, Vol. 31, pp. 11934-11940.
- [34] Izuma, K. (2013). The neural basis of social influence and attitude change. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 23, pp. 456-462.
- [35] Toelch, U., Dolan, R.J. (2015) Informational and Normative Influences in Conformity from a Neurocomputational Perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 19, pp. 579-589.
- [36] Brainard, D.H., (1997) The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, Vol. 10, pp. 433-436.
- [37] Feinberg, D.A., Moeller, S., Smith, S.M., Auerbach, E., Ramanna, S., Gunther, M., Glasser, M.F., Miller, K.L., Ugurbil, K., Yacoub, E. (2010) Multiplexed echo planar imaging for sub-second whole brain fMRI and fast diffusion imaging. *PLoS One*, Vol. 5, e15710.
- [38] Xu, J., Moeller, S., Auerbach, E.J., Strupp, J., Smith, S.M., Feinberg, D.A., Yacoub, E., Ugurbil, K. (2013) Evaluation of slice accelerations using multiband echo planar imaging at 3T. *NeuroImage*, Vol. 83, pp. 991-1001.
- [39] Corbin, N., Todd, N., Friston, K.J., Callaghan, M.F. (2018) Accurate modeling of temporal correlations in rapidly sampled fMRI time series. *Human Brain Mapping*, Vol. 39, pp. 3884-3897.
- [40] Bim, R.M., Diamond, J.B., Smith, M.A., Bandettini, P.A. (2006) Separating respiratory-variation-related fluctuations from neuronal-activity-related fluctuations in fMRI. *NeuroImage*, Vol. 31, pp. 1536-1548.
- [41] Chang, C., Cunningham, J.P., Glover, G.H. (2009) Influence of heart rate on the BOLD signal: The cardiac response function. *Neuroimage*, Vol. 44, pp. 857-869.
- [42] Brett, M., Anton, J.-L., Valabregue, R., Poline, J.-B. (2002) Region of interest analysis using an SPM toolbox. Organization for Human Brain Mapping annual meeting, Sendai, Japan.
- [43] McLaren, D.G., Ries, M.L., Xu, G., Johnson, S.C. (2012) A generalized form of context-dependent psychophysiological interactions (gPPI): A comparison to standard approaches. *NeuroImage*, Vol. 61, pp. 1277-1286.
- [44] Gebuis, T., Reynvoet, B. (2012) Continuous visual properties explain neural responses to nonsymbolic number. *Psychophysiology*, Vol. 49, pp. 1649-1659.
- [45] Tibber, M.S., Greenwood, J.A., Dakin, S.C. (2012) Number and density discrimination rely on a common metric: Similar psychophysical effects of size, contrast, and divided attention. *Journal of Vision*, Vol. 12, 8.
- [46] Anobile, G., Cicchini, G.M., Burr, D.C. (2014) Separate Mechanisms for Perception of Numerosity and Density. *Psychological Science*, Vol. 25, pp. 265-70.
- [47] Zimmermann, E., Fink, G.R. (2016) Numerosity perception after size adaptation. *Scientific Reports*, Vol. 6, 32810.
- [48] Wake, S.J., Aoki, R., Nakahara, K., Izuma, K. (2019) Elucidating the role of the posterior medial frontal cortex in social conflict processing. *Neuropsychologia*, Vol. 132, 107124.
- [49] Tamir, D.I., Mitchell, J.P. (2010) Neural correlates of anchoring-and-adjustment during mentalizing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 107, pp. 10827-10832.
- [50] Izuma, K., Adolphs, R. (2013) Social manipulation of preference in the human brain. *Neuron*, Vol. 78, pp. 563-573.
- [51] Wu, H., Luo, Y., Feng, C. (2016) Neural signatures of social conformity: A coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis of functional brain imaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol. 71, pp. 101-111.