

オブティックフロー選択性脳領域を結ぶ白質繊維束

上崎 麻衣子****・竹村 浩昌****・蘆田 宏*

*京都大学 大学院文学研究科

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

** Department of Psychology, Stanford University

450 Serra Mall, Stanford CA 94305, U. S. A.

*** 日本学術振興会

〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1

uesaki.maiko.82m@st.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

オブティックフローとは私たちが空間内を移動することによって網膜上に生じる運動パターンのことを指し^{1,2)}, 自己運動の推定において重要な視覚の手がかりである³⁾. オブティックフローを正確に知覚することで, 自己と外部環境の時空間的な関係の変化の知覚が可能となる.

先行fMRI研究の結果からオブティックフロー刺激により視覚野, 感覚連合野, 前庭野における複数の感覚領域(hMT+, V6, VIP, CSv, PcM, p2v, PIVC)が同時に賦活することが明らかになっている^{4,5)}. また, オブティックフローが自己運動の視覚手がかりとして処理される過程において, 以上の領域のうちhMT+・V6・VIP・PIVCの活動が増加するという報告もある⁶⁾. これらの知見から, 視覚野, 感覚連合野, 前庭野の間の相互作用がオブティックフロー, さらに自己運動の知覚に必要なことが示唆される.

一方で, 視覚野, 感覚連合野, 前庭野における領域は大脳白質において離れた位置に存在し, これらの領域間で視覚情報や前庭感覚情報が伝達される過程を理解するためには白質を介した長距離線維連絡を解明することが重要である. 近年, 拡散強調画像法(diffusion-weighted

imaging; DWI)およびトラクトグラフィ法の進展により, 機能的に同定された領域と白質線維束の関係を生体脳において同定することが可能となった⁷⁻⁹⁾.

本研究では, 同一被験者を対象に核磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging; fMRI)を用いて前述のオブティックフロー選択性領域を同定した上で, DWIおよびトラクトグラフィ法を用いて, これらの脳領域を連絡する白質線維束を同定することを目的とした.

2. 手法

2.1 被験者

被験者は正常視力または正常矯正視力を有する健常成人6名であった. ヘルシンキ宣言に基づき全被験者に対して, 事前に研究の目的・方法・危険性等に関して十分に説明を行ったうえで, インフォームド・コンセントを得た. 実験計画については, 京都大学心の先端研究ユニット倫理・安全審査委員会の承認を得た.

2.2 視覚刺激

オブティックフロー刺激は, 注視点と暗い背景にランダムに配置された200点のドットにより構成される直径30°(視角)の円状のパッチを用いた¹⁰⁾. ドットはそのパッチの中心から周辺へ(拡張), もしくは周辺から中心へ(収縮)向かう螺旋状の軌道に沿って移動した. 統制刺激では, 実験刺激と同様のドットがランダムな方向に動いた.

実験にはブロックデザインを用いた。被験者はそれぞれ4分16秒の実験を2回行った。各実験は、8ブロック(各条件4ブロック)から成り、各ブロックは8秒の刺激呈示と8秒の刺激間隔(注視点のみ呈示)から成った。被験者には実験中常に注視点を固視するよう教示した。

オプティックフロー刺激はLCDプロジェクタでスクリーン上に呈示した。被験者は、刺激される視野範囲をできるだけ広くするため拡大眼鏡(MaxTV; Eschenbach Optik GmbH, Nuremberg, Germany)をかけ、全反射鏡を介してスクリーン上の視覚刺激を観察した。

2.3 脳イメージング

画像データの取得には、京都大学こころの未来研究センターの所有する3テスラMagnetom Verio スキャナ(Siemens, Erlangen, Germany)を使用した。ヘッドコイルは、32チャンネルのフルコイルとハーフコイルの2種類を用いた。

fMRIデータ(空間解像度:3×3×3mm)はGE-EPI法により撮像し、後頭葉と頭頂を撮像範囲とした。また、MP-RAGE法を用いT1強調画像を取得した(空間解像度:1×1×1mm)。最後にDWIデータ(空間解像度:2×2×2mm; 角解像度:64方向)の撮像を2回繰り返した。

2.4 データ解析

2.4.1 fMRIデータ

画像データの前処理と解析には、BrainVoyager QX (version 2.6; Brain Innovation, Maastricht, the Netherlands)を用いた。

前処理として動き補正、スライスタイミング補正、時間的高パスフィルタを施した後、基準となるT1強調画像への位置合わせを行った。

解析はfMRI時系列信号に一般線形モデルを適用することで行った。モデル関数は、各ブロックの前半8秒間(刺激呈示)に1、ブロック後半8秒間(ブランク)に0をとる矩形波関数にヒモダイナミック応答関数を畳み込んだものである。

2.4.2 DWIデータ

DWIデータの前処理と解析にはStanford大学で開発されたvistasoftツール(<https://github.com/vistalab/vistasoft>)を用いた。前処理としてmrDiffusionを用いて動き補正および渦電流補正を施した後、基準となるT1強調画像への位置合わせを行った。トラクトグラフィ解析にはmrTrax¹¹⁾とLinear Fascicle Evaluation (LiFE¹²⁾)を用いた。まず、mrTraxを用いて全脳トラクトグラフィ解析を行い、LiFEを用いて拡散強調データの予測に寄与しないstreamlineを除外した。Freesurfer¹³⁾を用いて頭頂葉および側頭葉の関心領域を含むウェイポイントを定義し、両ウェイポイントを通る白質繊維束を同定した。

3. 結果

3.1 fMRI

各半球において、オプティックフローに対してランダムドット・モーションよりも有意に強い応答を示す7つの領域を同定した。これらの領域群は、CardinとSmith⁴⁾により定義された7つのオプティックフロー選択性領域(hMT+, V6, VIP, CSv, PcM, p2v, PIVC)と、解剖学的位置およびTalairach座標に一貫性が見られ、先行研究で提案されたオプティックフロー選択性領域の同定に成功した。

3.2 DWI

オプティックフロー選択性を持つ、頭頂葉領域群(VIP, PcM, p2v)と前庭野PIVCを結ぶ白質繊維束を同定した。この白質繊維束は6名の被験者の両半球において一貫して同定され、それぞれの被験者における半球間の対称性がみられた。また、同定された白質繊維束と関心7領域との関係性は被験者間で一致していた。この白質繊維束はSachs¹⁴⁾、Verganiら¹⁵⁾による死後脳研究で同定されたStratum Proprium of Interparietal Sulcus (SPIS)と一致した。

4. 考察

本研究では、まずfMRIによりオプティック

フロー選択性脳領域を同定し、同一被験者から計測したDWIデータを、トラクトグラフィ法を用いて解析することで脳領域間を結ぶ白質線維束を同定した。その結果、感覚連合野VIPを含む頭頂の領域群と側頭の前庭野(PIVC)がSPISを介して連絡していることが明らかになった。この結果から、SPISがオプティックフロー、さらに自己運動の知覚に必要な視覚と前庭感覚の相互作用を支えている可能性が示唆された。

謝辞 本研究は、京都大学こころの未来研究センターのMRIスキャナ及び関連実験設備を用いて行った。科学研究費補助金(#26285165 代表：蘆田 宏)の補助を受けた。また、研究に関する貴重なコメントをくださったBrian A. Wandell教授をはじめとするスタンフォード大学の研究者の皆様へ感謝します。

文 献

- 1) J. J. Gibson: *The perception of the visual world*. Houghton Mifflin, Boston, 1950.
- 2) J. J. Gibson: The visual perception of objective motion and subjective movement. *Psychological Review*, **61**, 304–314, 1954.
- 3) W. H. Warren and D. J. Hannon: Direction of self-motion is perceived from optical flow. *Nature*, **336**, 162–163, 1988.
- 4) V. Cardin and A. T. Smith: Sensitivity to human visual and vestibular cortical regions to egomotion-compatible visual stimulation. *Cerebral Cortex*, **20**, 1964–1973, 2010.
- 5) V. Cardin and A. T. Smith: Sensitivity of human visual cortical area V6 to stereoscopic depth gradients associated with self-motion. *Journal of Neurophysiology*, **106**, 1240–1249, 2011.
- 6) M. Uesaki and H. Ashida: Vection: Sensory integration during exposure to optic flow as a cue to self-motion, in prep.
- 7) 竹村浩昌, 小川俊平: 拡散強調MRIを用いた視覚研究. *VISION*, **27**, 61–72, 2015.
- 8) J. D. Yeatman, A. M. Rauschecker and B. A. Wandell: Anatomy of the visual word form area: adjacent cortical circuits and long-range white matter connections. *Brain and Language*, **125**, 146–155, 2013.
- 9) J. Gomez, F. Pestilli, N. Witthoft, G. Golarai, A. Liberman, S. Poltoratski, J. Yoon and K. Grill-Spector: Functionally defined white matter reveals segregated pathways in human ventral temporal cortex associated with category-specific processing. *Neuron*, **85**, 216–227, 2015.
- 10) S. Pitzalis, M. I. Sereno, G. Committeri, P. Fattori, G. Galati, F. Patria and C. Galletti: Human V6: The medial motion area. *Cerebral Cortex*, **20**, 411–424, 2010.
- 11) J.-D. Tournier, F. Calamante and A. Connolly: MrTrix: Diffusion tractography in crossing fiber regions. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, **22**, 53–56, 2012.
- 12) F. Pestilli, J. D. Yeatman, A. Rokem, K. N. Kay and B. A. Wandell: Evaluation and statistical inference for human connectomes. *Nature Methods*, **11**, 1058–1063, 2014.
- 13) B. Fischl: Freesurfer. *NeuroImage*, **62**, 774–781, 2012.
- 14) H. Sach: Das hemisphärenmark des menschlichen crosshirns. I. Der Hinterhauptlappen. G. Thieme, Leipzig, 1892.
- 15) F. Vergani, S. Mahmood, C. M. Morris, P. Mitchell and S. J. Forkel: Intralobar fibres of the occipital lobe: A post mortem dissection study. *Cortex*, **56**, 145–156, 2014.