

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K07722

研究課題名（和文）一次感覚皮質と後頭頂皮質の各層における視触覚クロスモーダルな情報処理機構の解明

研究課題名（英文）Layer-specific processing in the human brain for visuo-haptic cross-modal object perception

研究代表者

楊 家家（Yang, Jiajia）

岡山大学・ヘルスシステム統合科学学域・研究准教授

研究者番号：30601588

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトの対象認知過程は、多感覚情報の知覚、学習、記憶など脳の高次機能が総合されるもので、感覚種をまたがるクロスモーダルな性質を持つ。本研究は、7テスラ超高磁場fMRIを用いてヒトの視触覚クロスモーダルな脳内情報処理を大脳皮質レイヤーレベルで検討した。その結果、一次体性感覚皮質の表層と深層ともに多感覚刺激に活動する脳領域と機能的に結合していることがわかった。さらに、対象刺激を知覚する際に一次体性感覚皮質の表層と深層は異なる機能的役割を果たしている可能性があることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトはある物体を見たときに、過去の経験や学習による記憶に基づき、手触りなどの関連性質を想起して、それが何であるかを理解する。この一連の作業は、一次感覚皮質と多感覚刺激に応答する領域間の各層間神経回路の役割が重要であると考えられる。本研究は、最新のレイヤーfMRI技術を用いて皮質レイヤーレベルでクロスモーダルな情報処理機構の検討を実現した。本研究の成果は、ヒトの多感覚情報処理の神経基盤解明に有用な知見が得られ、ヒト大脳皮質層の機能解明を推進する点にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：Humans can effortlessly recognize objects using different sensory modalities. This suggests that information about an object produced by different sensory modalities converges in the human brain to form representations invariant to the input sensory modality. In the present project, we used ultra-high field laminar fMRI to reveal how crossmodal memory retrieval modulates human brain activity. We found that the primary somatosensory cortex's upper and deep layers (S1) functionally connected with higher-level brain areas for cross-modal object recognition. We also found that the upper and deep layers of S1 play different functional roles during cross-modal memory retrieval processing.

研究分野：認知脳科学

キーワード：レイヤーfMRI 層別脳機能

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトはある物体を見たときに、過去の学習や経験による記憶に基づき、手触りはどうかなど多くの関連性質を想起して、それが何であるかを理解する。このようにヒトの対象認知過程は、多感覚情報の知覚、学習、記憶など脳の高次機能が総合されるもので、感覚種をまたがるクロスモーダルな性質を持つ (Driver & Noesselt, *Neuron*, 2008)。これまでヒト対象の機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を中心とする脳イメージング技術の進歩により、視覚や触覚などの単一感覚の対象認知過程を解明されつつある。申請者らは、これまで触覚対象の fMRI 研究を進め、触覚による素材表面を撫でるときの皮膚変形及び振動などの情報は、一次体性感覚皮質 (S1) で対象表面の時空間的特徴 (凹凸の空間分布とその継時的変化) として抽出され、二次体性感覚皮質 (S2) においてこれらの情報を統合されることが明らかにされた (Yang et al, *Sci Rep*, 2017)。他方では、視覚研究において、一次視覚皮質 (V1) の脳活動から単純な視覚刺激を再構築できる段階に至っており、紡錘状回は光沢感の認識 (Namima et al, *J Neurosci*, 2014) に重要な役割を果たしていることが解明された。一方、視覚と触覚情報は初期段階で感覚間の統合が始まり、さらに他の感覚皮質からトップダウン信号も受けると考えられ、多感覚統合の脳機能について更なる検討は不可欠である。

近年、分子生物学や遺伝子操作技術などの進歩により、動物対象の脳神経科学研究成果は数多く発表されている。その中で多感覚刺激に応答する後頭頂各領域 (PPC) が注目された研究により、PPC の皮質各層 (レイヤー) に多感覚情報の投射を受ける神経細胞の分布密度の違いが明らかにされたなど、ミクロ観点からクロスモーダルな情報処理機構の理解を深めた (Foxworthy et al., *J Comp Neurol*, 2013)。しかし、ミクロな機能素子となる神経細胞や皮質レイヤーがどのように相互に結びつき、それぞれがどのように情報処理を行うことによって、ヒトのクロスモーダルな情報処理機能を実現しているかは未だ明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

前述のように、動物とヒト対象の研究はそれぞれの利点を生かして、多感覚統合に関する脳内神経基盤の解明に関する研究を進めてきた。一方で、根本的な種間差や脳計測モダリティの違いがあり、動物研究で得られた知見はヒトへの展開が阻害されている。ヒト用 7 テスラ超高磁場 MRI システム (7T-MRI) の誕生により、従来困難の百マイクロン単位での大脳皮質レイヤーレベルの脳活動を計測できるようになり、動物研究で提案されたレイヤー脳内情報処理モデルをヒトの生体脳において検証できる可能性を示した (Norris & Polimeni, *NeuroImage*, 2019)。申請者らは、これまでの研究を通じてヒトの S1 の中間層に触覚信号を入力されるに対して、高次領野からのフィードバック信号が S1 の表層と深層へ投射されることを明らかにした (Yu et al, *Sci Adv*, 2019)。本研究は、この最新の 7 テスラ超高磁場 fMRI 技術を駆使して、大脳皮質レイヤーから全脳レベルに渡る多階層な視触覚クロスモーダルな情報処理機構を理解することを目的とする。

## 3. 研究の方法

まず、7T-MRI を用いた全脳撮像とレイヤー撮像シーケンスの選定・改善を行った。7T-MRI を用いることにより、高精細かつコントラストの高い脳画像を撮像できるようになり、従来困難であった百マイクロン単位での大脳皮質の微細機能に迫ることを可能にした。しかし、ヒトのレイヤー脳活動を計測するレイヤー fMRI 技術は未熟であり、標準的なレイヤー fMRI 研究アプローチが確立されていないのが現状である。そのために、申請者らは、これまでの研究で独自開発のレ

レイヤーfMRI シーケンスを元に撮像領域の拡大と画質の向上を図り、本研究課題に特化したシーケンスを改良した。次に、ヒトの視覚と触覚を研究対象として、まず全脳における一次感覚皮質と視触覚刺激ともに応答する脳領域の同定 fMRI 実験を設計・実施した。被験者それぞれの S1 と V1 を同定するため、全脳撮像シーケンスを用いて、手指の Somatotopic と中心視野の Retinotopic マッピング実験を行った。次に、同撮像シーケンスを用いて、申請者らが考案した様々な材質と形状の物を「触ってから見る」と「見てから触る」の視触覚クロスモーダルな対象マッチング実験を行った。この実験により、視覚と触覚刺激に共通に活動する脳領域（PPC を含む高次領域）と、視覚と触覚のそれぞれ選択性を示す領域も同定した。また、前述の全脳 fMRI 実験の結果に基づいて低次感覚野と多感覚領域のそれぞれに対象としたレイヤーfMRI 実験を実施した。さらに、従来の動物研究の知見により、レイヤー脳内情報処理の仮設モデルの構築・検証・更新を行った。最後に、視触覚クロスモーダルな情報処理の全脳ネットワークと各領域のレイヤー情報処理モデルを照合し、一次感覚皮質と高次領域の皮質レイヤー間の相互作用を検討した。

#### 4. 研究成果

全脳 fMRI 実験の結果より、視触覚クロスモーダル（触ってから見ると見てから触る）条件と単一感覚条件とともに一次感覚皮質を含む広い領域の脳活動が確認できた（図 1）。さらに、後頭頂葉などの多感覚領域において単一感覚条件に比べてクロスモーダル条件の活動は強かったことがわかった。さらに、レイヤーfMRI 実験の結果により、一次体性感覚皮質の表層と深層ともに多感覚刺激に活動する脳領域と機能的に結合していることがわかり、対象刺激を知覚する際に一次体性感覚皮質の表層と深層は異なる機能的役割を果たしている可能性があることを示唆した。現在、レイヤーfMRI 研究で得られた成果を中心に学術論文誌への投稿を進めている。

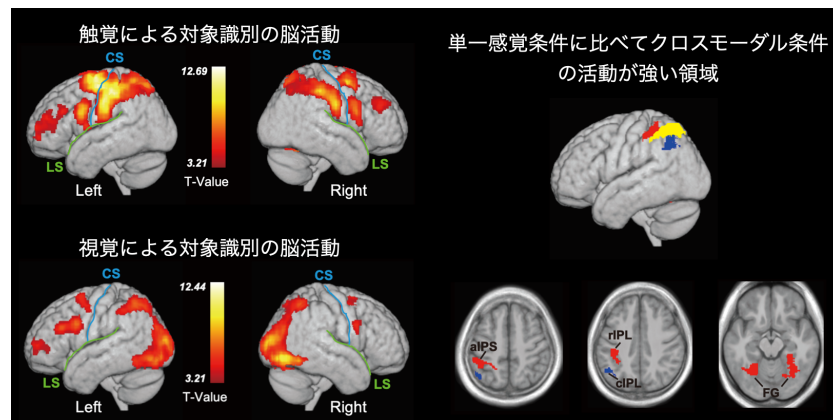


図 1 全脳 fMRI 実験の結果概要 (Yang et al., *Brian Behav*, 2020)

#### <引用文献>

- Driver & Noesselt, Multisensory interplay reveals crossmodal influences on 'sensory-specific' brain regions, neural responses, and judgments. *Neuron*. 2008, 57(1):11-23.
- Foxworthy et al., Laminar and connective organization of a multisensory cortex. *J Comp Neurol*. 2013, 521:1867-1890
- Norris & Polimeni, Laminar (f)MRI: A short history and future prospects. *Neuroimage*. 2019, 197:643-649.
- Namima et al., Effects of Luminance Contrast on the Color Selectivity of Neurons in the Macaque Area V4 and Inferior Temporal Cortex. *J Neurosci*. 2014, 34(45):14934-14947
- Yang et al., Neural correlates underlying tactile speed classification with periodic and non-periodic surfaces: an fMRI study. *Sci Rep*. 2017, 7:40931
- Yang et al., Functional heterogeneity in the left lateral posterior parietal cortex during visual and haptic crossmodal dot-surface matching. *Brain Behav*. 2020, e02033
- Yu et al., Layer-specific Activation of Sensory Input and Predictive Feedback in the Human Primary Somatosensory Cortex. *Sci Adv*. 2019, 5:eaav9053

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Yang Weiping, Guo Ao, Yao Hanyun, Yang Xiangfu, Li Zimo, Li Shengnan, Chen Jianxin, Ren Yanna, Yang Jiajia, Wu Jinglong, Zhang Zhilin	4. 巻 14
2. 論文標題 Effect of aging on audiovisual integration: Comparison of high- and low-intensity conditions in a speech discrimination task	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Aging Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1010060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnagi.2022.1010060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yu Yinghua, Huber Laurentius, Yang Jiajia, Fukunaga Masaki, Chai Yuhui, Jangraw David C., Chen Gang, Handwerker Daniel A., Molfese Peter J., Ejima Yoshimichi, Sadato Norihiro, Wu Jinglong, Bandettini Peter A.	4. 巻 248
2. 論文標題 Layer-specific activation in human primary somatosensory cortex during tactile temporal prediction error processing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 118867 ~ 118867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2021.118867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Wu Jinglong, Wang Chenyu, Wang Luyao, Wang Yutong, Yang Jiajia, Yan Tianyi, Suo Dingjie, Wang Li, Liu Xin, Zhang Jian	4. 巻 0
2. 論文標題 Development of a Piezoelectric Actuated Tactile Stimulation Device for Population Receptive Field Mapping in Human Somatosensory Cortex With fMRI	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetic Resonance Imaging	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jmri.28173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Liu Yulong, Yang Jiajia, Yu Yinghua, Yu Yiyang, Wang Wu, Li Huazhi, Takahashi Satoshi, Ejima Yoshimichi, Wu Qiong, Wu Jinglong	4. 巻 11
2. 論文標題 A New Method for Haptic Shape Discriminability Detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 7049 ~ 7049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11157049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Jiajia, Molfese Peter J., Yu Yinghua, Handwerker Daniel A., Chen Gang, Taylor Paul A., Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong, Bandettini Peter A.	4. 巻 231
2. 論文標題 Different activation signatures in the primary sensorimotor and higher-level regions for haptic three-dimensional curved surface exploration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 117754 ~ 117754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2021.117754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Jiajia, Yu Yinghua, Shigemasu Hiroaki, Kadota Hiroshi, Nakahara Kiyoshi, Kochiyama Takanori, Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong	4. 巻 11
2. 論文標題 Functional heterogeneity in the left lateral posterior parietal cortex during visual and haptic crossmodal dot surface matching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Brain and Behavior	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/brb3.2033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang Wu, Yang Jiajia, Yu Yinghua, Wu Qiong, Takahashi Satoshi, Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong	4. 巻 161
2. 論文標題 Tactile Semiautomatic Passive-Finger Angle Stimulator (TSPAS)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Visualized Experiments	6. 最初と最後の頁 e61218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3791/61218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福永 雅喜  (Fukunaga Masaki)  (40330047)	生理学研究所・システム脳科学研究領域・准教授    (63905)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 洋紀  (Yamamoto Hiroki)  (10332727)	京都大学・人間・環境学研究科・助教    (14301)	
研究分担者	呉 景龍  (Wu Jinglong)  (30294648)	岡山大学・ヘルスシステム統合科学学域・教授    (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関