

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：94301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12771

研究課題名（和文）多様な感覚刺激に対する印象のブレイン・デコーディング

研究課題名（英文）Brain decoding of impressions induced by diverse sensory stimuli

研究代表者

堀川 友慈 (Horikawa, Tomoyasu)

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員

研究者番号：60721876

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）：本研究では、印象や感情のような感性的な情報がヒトの脳内でどのように表現されているかを明らかにするため、多様な感情を惹起させる2185本の動画を観察しているときのヒトの脳活動を機能的磁気共鳴画像法を用いて計測し、機械学習の方法を用いて計測脳活動から各動画にタグづけられた34の感情カテゴリと14の情動次元のスコアの予測を行った。その結果、数十におよぶ種類の感情や情動スコアを脳活動から予測可能であり、各感情・情動のスコアに関して、高い精度での予測に寄与する脳部位が全脳に分散的に分布していることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、感情に関わる多様な感性的情報を脳計測信号から精度良く解読可能であることが明らかになり、脳を介した感性評価技術の発展に寄与することができた。また、個々の感情が皮質上の複数の脳部位において分散的に表現されていることを明らかにしたことは、感情が局所的な脳部位で表現されているとする従来の知見を更新し、感情の意識体験に関わる神経基盤を明らかにすることに貢献するものである。さらに、感覚刺激の感性的情報が脳内で視覚的情報や意味的情報に対してより高次の部位において表現されているという知見は、今後映像などの入力情報に基づいて感情を認識する機械やロボットの開発にも活用されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：To investigate how information about impressions and emotions in the brain, we analyzed fMRI responses to a total of 2185 emotionally evocative videos, which are annotated with scores of 34 emotional categories and 14 affective dimensions, using data-driven analytical approaches. Our analyses demonstrated that (1) dozens of video-evoked emotions were accurately predicted from fMRI patterns in multiple brain regions with different regional configurations for individual emotions, (2) emotion categories better predicted cortical and subcortical responses than affective dimensions, outperforming visual and semantic covariates in transmodal regions, and (3) emotion-related fMRI responses had a cluster-like organization efficiently characterized by distinct categories. These results demonstrated the feasibility to decode diverse emotional states from the brain, illuminating its neural foundations distributed across transmodal regions.

研究分野：感性認知脳科学

キーワード：脳情報デコーディング 感情 fMRI

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging) の計測技術および解析技術の発展により、視覚・聴覚をはじめとする多様な感覚刺激の情報が、ヒトの脳内でどのように表現されているかに関する理解が大きく進められてきた。多くの研究により、視覚・聴覚など異なる感覚モダリティの情報をはじめとして、視覚の中でも人の顔や風景、物体の情報が、異なる脳部位で表現されていることが明らかにされている (Kanwisher et al., 1997; Epstein & Kanwisher, 1998)。

一方で、これら多様な感覚刺激に対してわれわれが抱く「印象」や「感情」が、刺激ごとに異なる脳部位で表現されているのか、共通の脳部位で表現されているのかについてはいまだ明らかにされていない。これまでに、基本感情 (e.g., 怒り, 悲しみ) と関連づいた複数のモダリティの感覚刺激に対する脳情報表現 (Peelen et al., 2010) や、画像や味覚刺激に対する快・不快の評価情報が脳の高次感覚皮質や前頭葉で表現されていること (Chikazoe et al., 2014) などが調べられているが、現状、少数の基本感情や快・不快といった情動次元など、おおまかな感性評価に関わる神経基盤しか調べられておらず、より詳細な情報の脳内表現については未解明の点が多い。また、fMRI 信号のパターン解析により、知覚・認知状態を脳から解読する「脳情報デコーディング」技術も用いられ、商品や宣伝広告に対する脳の感情的反応を応用利用する「ニューロ・マーケティング」も試みられつつあるが (Morris et al., 2009)、少数の評価項目に対する予測にとどまっており、いまだ基礎研究の域を出ていない。

ヒトの感性的評価を詳細に定量化する様々な試みは、これまで心理学分野において盛んに進められてきた。古典的な感性評価手法の代表例であるセマンティック・ディファレンシャル法 (SD 法) では、明るい-暗い、美しい-醜い、男性的な-女性的な、などの複数の形容詞ペアに対する 5-7 段階評価を用いて、対象に対する詳細かつ多様な印象を捉えることが可能である。また、近年、感情の心理学研究では、クラウドソーシングを利用した大規模ヒト行動実験を行い、ヒトの感情体験を、数十種類の感情カテゴリの違いによって説明する研究アプローチが注目を集めており (Cowen & Keltner, 2017)、多様な感情を惹起するシーンを映した動画など、さまざまな感覚刺激データおよび刺激に対するヒトの感情反応データ (評定スコア) を収集・解析することで、多数の感情カテゴリを用いたモデル (高次元感情モデル) が、従来の少数の基本感情や情動次元に基づくモデルよりも、ヒトの感情反応を精度よく説明できることを示している。

このように、心理学分野において、詳細な感性評価を行うための研究アプローチが発展している一方で、神経科学分野では、従来の基本感情や情動次元に基づいた少数の感情が扁桃体や大脳辺縁系と強い関係性を持つ、という旧来の知見からの知識の更新がなされず、多彩な感情の意識的体験に本質的な役割を持つと考えられている大脳皮質において、どのように多様な感性情報が構築・表現されているかの理解が遅れているのが現状である。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、多様な感覚刺激に対する詳細な感性評価に関わる情報が、ヒトの脳でどのように表現されているか理解することを目指し、多様な印象や感情の情報を、脳情報デコーディング手法を用いて脳から解読する技術の開発を目指す。これにより、多様な印象情報に関する脳内情報表現の理解を進めるとともに、マーケティング分野や社会・臨床分野で利用可能な脳活動ベースの感性評価手段の提供を目指す。

### 3. 研究の方法

多様な感覚刺激に対する感性的評価に関わる脳情報表現を調べるため、本研究では、近年の心理学研究 (Cowen & Keltner, 2017) で収集された実験データリソースである、(1) 多様な感情を惹起する 2185 本の動画刺激と、(2) 各動画刺激に対してクラウドソーシングサービスを利用して複数ワーカーが評価した 34 の感情カテゴリスコア (e.g., joy, amusement, horror) および 14 の情動次元スコア (e.g., valence, arousal) を活用し、動画刺激に対するヒトの脳活動を対象としたデータ駆動的な実験・解析を行なった。具体的には、2185 本の動画を観察しているときの 5 人の被験者の全脳の活動を fMRI を用いて計測し、各被験者から得られた脳計測信号と、各刺激に付与された合計 48 種類の感情スコアとの間で統計的モデルを用いた感情デコーディング解析と脳活動予測解析を行なった (図 1)。

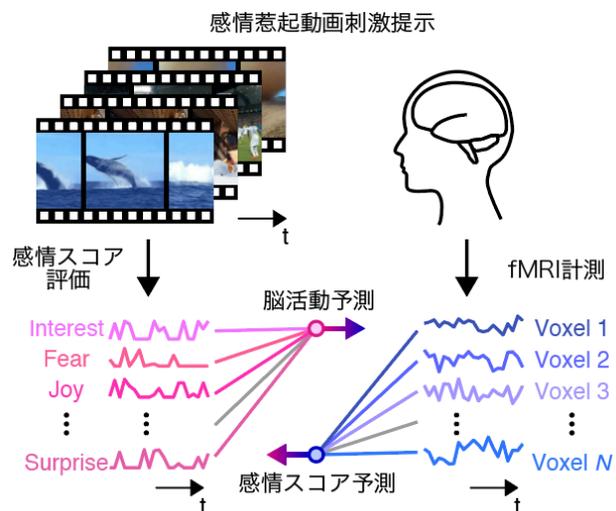


図 1. 研究アプローチの概要図。

#### 4. 研究成果

脳活動からの感情スコアの予測解析では、各感情の情報に脳のどの部位で表現されているかを調べるため、全脳を、Grasser et al. (2016)の方法に従って360の小皮質領域と10の皮質下領域に分割し(図2)、動画観察中に計測された各脳部位内のfMRI信号パターンから、制約付き線形回帰モデルを用いて各動画に付与された感情スコアの予測を行なった。解析の結果、34の感情カテゴリスコア、14の情動次元スコアのうち、envy, contempt, guiltの3つの感情カテゴリを除き、多くの感情スコアに関して、いずれかの脳部位から、5被験者間で安定して高い精度での予測が可能であることが分かった(図3)。

また、複数の脳領域で表現される情報を統合するため、各感情スコアに関して、高い予測成績を示した脳領域から得られた予測値を平均することで「アンサンブル・デコーダ」を構築し、その予測成績を評価した。その結果、多くの感情スコアに対して、アンサンブル・デコーダの予測成績が個々の脳領域からの予測成績を上回る結果が得られた(84.1%, 感情カテゴリ; 74.3%, 情動次元)。この結果は、個々の感情が特定の局所的な脳領域において表現されているのではなく、複数の脳領域に分散的に表現されていることを示唆する結果である。

さらに、個々の感情スコアで表現される単純な感情状態だけでなく、複数の感情が重なり合った複雑な感情状態(e.g., 怒りと悲しみ)を脳活動から同定可能かどうか検証するため、各動画に対応する34の感情カテゴリのスコアベクトルや、14の情動次元のスコアベクトルを用いて、アンサンブルデコーダによる予測値と真値との類似度を元に、見ている動画を脳活動から同定可能かどうか検証した。真の動画と偽の動画の二択で真の動画を正しく同定する解析を行った結果、感情カテゴリのスコアを使用した場合には81.9%、情動次元のスコアを使用した場合には68.7%の成績で予測可能であることがわかった(5被験者平均)。この結果は、個々の動画によって引き起こされる微妙な感情体験の違いを、感情カテゴリの方が情動次元よりもより高い精度で記述可能であることを示唆している。

以上の解析から、脳活動から予測した感情カテゴリのスコアを介して、被験者の感情状態を精度よく同定可能であることが示されたため、次に、脳から予測した被験者の感情状態を可視化するため、デコーディング解析と次元圧縮の解析手法を組み合わせることで、各動画観察中の被験者の感情状態を2次元の感情状態マップ上で可視化する解析を試みた。解析では、まずUniform Manifold Approximation and Projection (UMAP)を用いて動画にタグづけられた34次元の感情スコアを2次元上に投影する関数を学習し(図4左)、得られた関数を用いて脳活動から予測した感情スコアを2次元上に投影した(図4右)。その結果、いずれの被験者からも、脳から再構成した2次元の感情マップが、真の感情スコアから推定した感情マップと、類似した分布を示していた。この結果から、脳からの感情スコアのデコーディングと次元圧縮の手法を組み合わせることで、被験者の感情状態を2次元上の点の位置によって可視化することが可能であることが示された。この解析手法は、ニューロマーケティング分野における商品や宣伝広告に対する脳からの感性評価や、臨床の現場において不安状態や恐怖反応などを客観的に評価するための新たなツールとして利用されることが期待される。

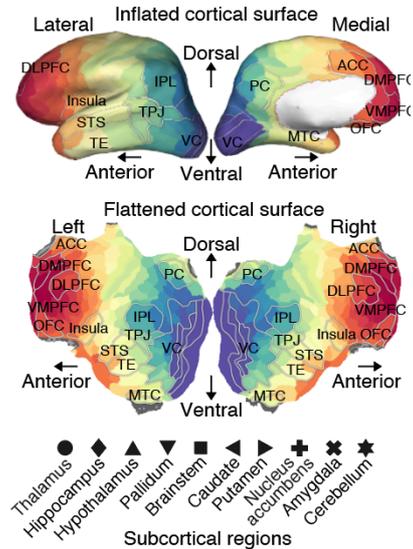


図2. 全脳の小領域への細分化。分割した個々の領域を異なる色および形で示す。

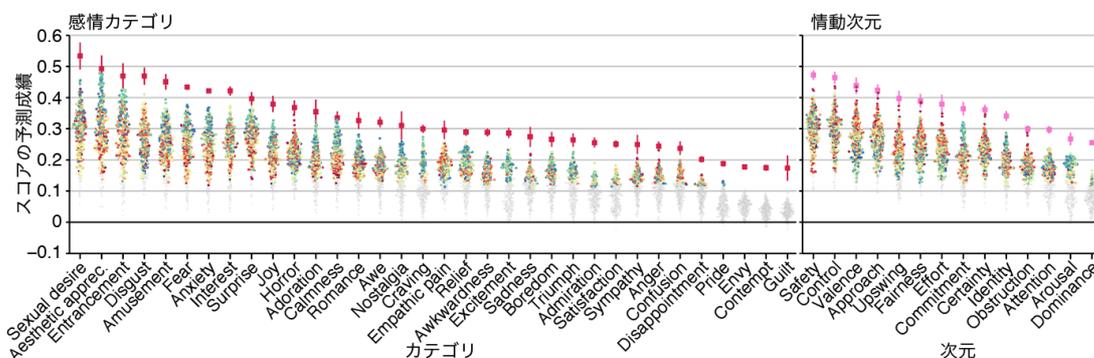


図3. 脳からの感情スコア予測成績。各点は、細分化された小脳領域からの予測成績(真値と予測値の相関係数)を表す。各点の色や形は図2に示す各脳領域と対応している。5被験者全員に対して有意に高い精度で予測できた脳領域についてのみ色付きで示している。赤およびピンクの四角は、複数脳領域からの予測を統合したアンサンブル・デコーダによる予測成績を表す。エラーバーは95%信頼区間を表す。

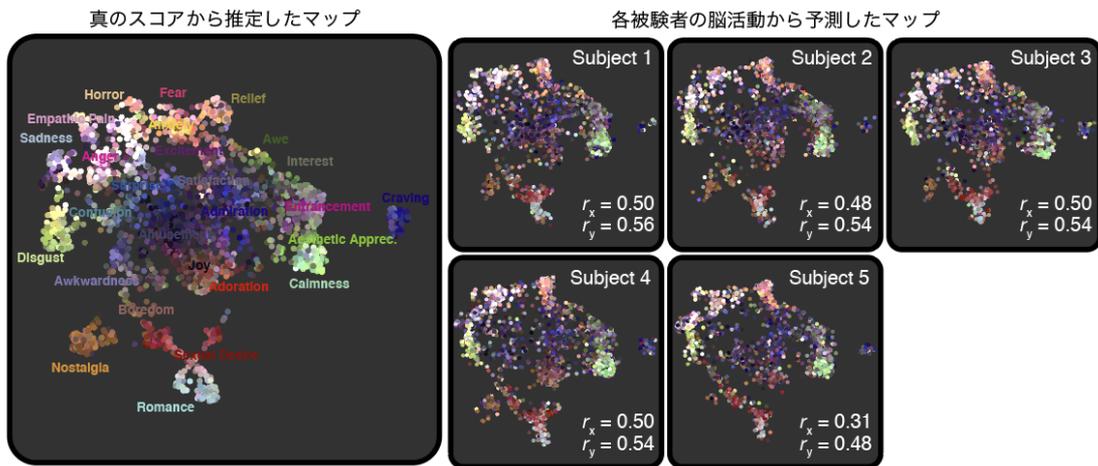


図4. 2次元感情マップ。各点は個々の動画刺激と対応しており、点の色は感情の違いを表している。各被験者の結果には、2次元空間上の横軸(x)と縦軸(y)の予測成績の精度を、2次元上の位置の真値と予測値の相関係数で評価した結果を示している。

続いて、脳の感性情報表現をさらに詳細に調べるため、提示刺激と関連する様々な特徴量から脳活動を予測するエンコーディング解析（脳活動の予測解析）を行なうことで、提示した動画刺激のどのような特徴がfMRIによって計測した各ボクセルの活動を説明するかを調査した。この解析では、動画にタグづけられた感情カテゴリースコアや情動次元スコア、また、動画のフレームから抽出した視覚特徴や、動画に現れる物体や風景などの意味特徴から、全脳の各ボクセルに対する脳活動予測モデルを構築し、それぞれの特徴量に基づくモデルが、どの程度精度よく脳活動を予測可能か評価した。

まず、動画に対する感性的評価に関連する感情カテゴリースコアと情動次元スコアのそれぞれから脳活動予測を行なったところ、脳の広範な領域において、感情カテゴリースコアに基づくモデルが情動次元スコアに基づくモデルよりも高い精度で脳活動を予測可能であることがわかった（図5上）。同様の結果は、脳の皮質下領域である、海馬や扁桃体、小脳などにおいても観察さ

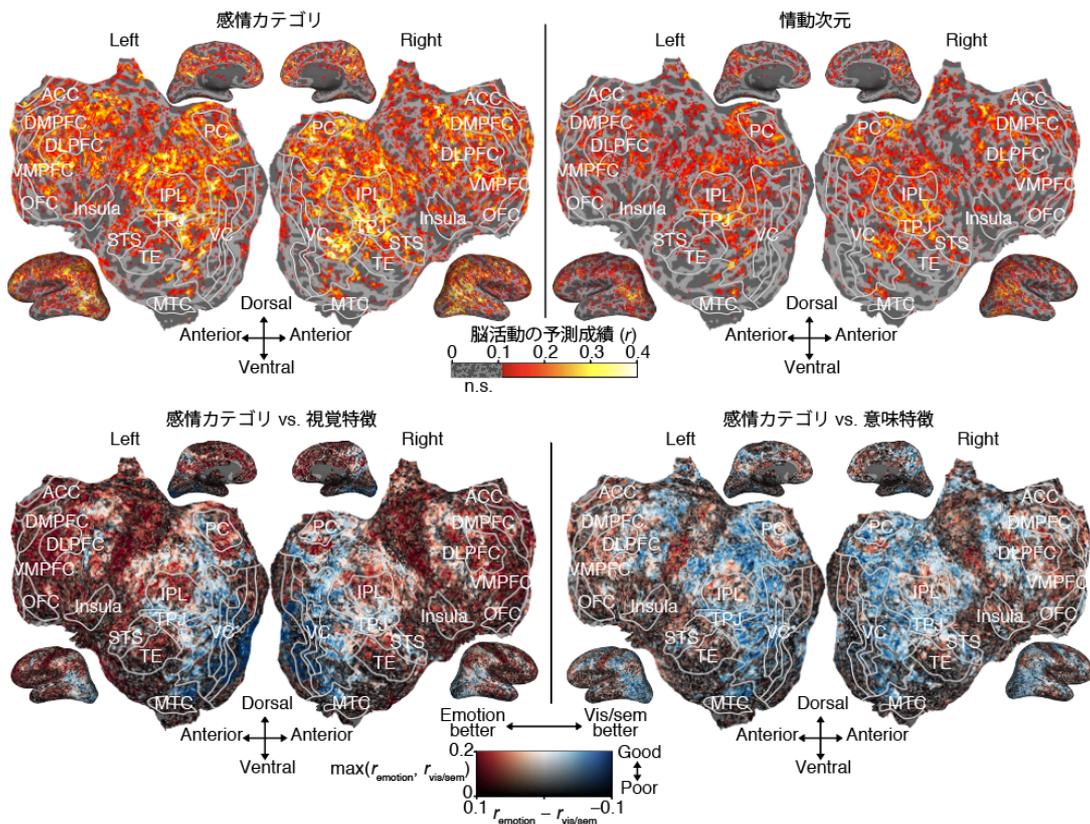


図5. さまざまな特徴からの脳活動予測結果。感情カテゴリースコア（左上）、情動次元スコア（右上）それぞれからの脳活動予測成績と、感情カテゴリーによる予測成績と視覚特徴（左下）および意味特徴からの予測成績の比較（右下）を示している。

れた。これらの結果は、感情カテゴリが情動次元よりも、より詳細な脳の活動変化を説明可能であることを示唆しており、従来研究で考えられてきた、valence や arousal などのコア・アフェクトに基づいて感情体験を記述するモデル (Russel, 2003) に対して、高次元の感情カテゴリによって感情体験を記述するモデル (Cowen & Keltner, 2017) の優位性を神経科学的にサポートする結果である。

次に、感情カテゴリスコアに基づくモデルの予測成績と、動画の視覚特徴や意味特徴に基づくモデルの予測成績を比較したところ、下頭頂小葉 (inferior parietal lobule, IPL) や前頭皮質 (frontal cortex, FC) など、デフォルトモードネットワーク (default mode network, DMN) と関連のある脳領域において、感情カテゴリスコアに基づくモデルが高い成績を示すことが分かった。これらの結果は、感情のような抽象度の高い情報が、視覚特徴や意味特徴の情報とは異なり、モダリティによらない情報が表現されると考えられている DMN 関連領域において、分散的に表現されていることを示唆しており、同一の刺激に由来する段階的に異なる抽象度を持つ情報が、ヒトの脳内で視覚、意味、感性、という階層関係をもって表現されていることを明らかにした。

最後に、感情を惹起する動画を観察している時の脳活動がどのような構造を有しているかを調べるために、fMRI による脳計測活動パターンに直接、次元圧縮手法である UMAP を適用し、2次元空間上でのデータの分布を調べた。その結果、sexual desire や disgust など、特定の感情カテゴリと関連づいた動画に対する脳反応データサンプルがクラスタとなって分布しており、動画刺激に対する脳の反応が、情動次元よりも感情カテゴリの違いによってより精度よく特徴づけられることが明らかになった (図6)。

以上、本研究課題では、多様な感情に関わる感性的な情報を fMRI で計測した脳活動のパターンから高い精度で解読可能であることを実証するとともに、そのような抽象度の高い感性的情報が、具体性の高い視覚・意味特徴より高次の脳領域で、分散的に表現されているかことを明らかにした。これらの結果は、脳情報デコーディング技術のさらなる応用可能性を示すとともに、脳の感情情報表現に関する旧来の知見を更新することに貢献した。上記の研究において収集されたデータおよび解析コードは、研究代表者の所属する研究室のウェブページやデータリポジトリから公開している。

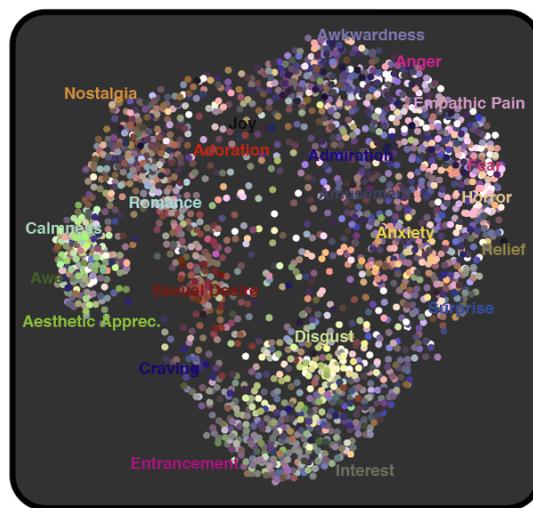


図6. 脳活動パターンの2次元空間表現。

#### <引用文献>

- Chikazoe, J., Lee, D.H., Kriegeskorte, N., and Anderson, A.K. (2014). Population coding of affect across stimuli, modalities and individuals. *Nat. Neurosci.* 17, 1114–1122.
- Cowen, A.S., and Keltner, D. (2017). Self-report captures 27 distinct categories of emotion bridged by continuous gradients. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, E7900–E7909.
- Epstein, R. and Kanwisher, N. (1998). A cortical representation of the local visual environment. *Nature* 392, 598–601.
- Glasser, M.F., Coalson, T.S., Robinson, E.C., Hacker, C.D., Harwell, J., Yacoub, E., Ugurbil K., Andersson, J., Beckmann, C.F., Jenkinson, et al. (2016). A multi-modal parcellation of human cerebral cortex. *Nature* 536, 171–178.
- Kanwisher, N., McDermott, J. and Chun, M.M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *J. Neurosci.* 17, 4302–4311.
- Russell J.A. (2003). Core affect and the psychological construction of emotion. *Psychol. Rev.* 110, 145–172.
- Peelen, M.V., Atkinson, A.P., and Vuilleumier, P. (2010). Supramodal Representations of Perceived Emotions in the Human Brain. *J. Neurosci.* 30, 10127–10134.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shen Guohua, Horikawa Tomoyasu, Majima Kei, Kamitani Yukiyasu	4. 巻 15
2. 論文標題 Deep image reconstruction from human brain activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1006633
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pcbi.1006633	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 Horikawa Tomoyasu, Aoki Shuntaro C., Tsukamoto Mitsuaki, Kamitani Yukiyasu	4. 巻 6
2. 論文標題 Characterization of deep neural network features by decodability from human brain activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Data	6. 最初と最後の頁 190012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/sdata.2019.12	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 Shen Guohua, Dwivedi Kshitij, Majima Kei, Horikawa Tomoyasu, Kamitani Yukiyasu	4. 巻 13
2. 論文標題 End-to-End Deep Image Reconstruction From Human Brain Activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	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） 10.3389/fncom.2019.00021	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 Horikawa Tomoyasu, Cowen Alan S., Keltner Dacher, Kamitani Yukiyasu	4. 巻 23
2. 論文標題 The neural representation of visually evoked emotion is high-dimensional, categorical, and distributed across transmodal brain regions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 101060
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101060">https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101060</a>	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

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Park Jong Yun, Horikawa Tomoyasu, Majima Kei, Kamitani Yukiyasu
2. 発表標題 Brain decoding of sound-induced cortical activity with deep neural network features
3. 学会等名 2018 Annual Meeting of Korean Society for Cognitive Science
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Horikawa Tomoyasu
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークを介した心的イメージの解読
3. 学会等名 第29回生理科学実験技術トレーニングコース（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Horikawa Tomoyasu
2. 発表標題 Decoding of seen and imagined contents from the human brain via deep neural network representation
3. 学会等名 第28回日本神経回路学会全国大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shen Guohua, Horikawa Tomoyasu, Majima Kei, Kamitani Yukiyasu
2. 発表標題 Deep image reconstruction from human brain activity
3. 学会等名 Cognitive Computational Neuroscience（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Horikawa Tomoyasu、Kanitani Yukiyasu
2. 発表標題 Attention biases neural representations of hierarchical visual features
3. 学会等名 Cognitive Computational Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Horikawa Tomoyasu、Kanitani Yukiyasu
2. 発表標題 Inter-individual deep image reconstruction
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Horikawa Tomoyasu
2. 発表標題 Neural Decoding of What 's Not There from Human Brain Activity
3. 学会等名 A Workshop of Hallucinations, Dreams, Imaginations, and Virtual Reality. Experiencing What's Not There. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀川友慈
2. 発表標題 心的イメージの脳情報デコーディング
3. 学会等名 日本生理人類学会「感性・脳科学研究部会&睡眠研究部会」合同会合 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・神経情報学研究室のウェブサイトにてコードを公開。https://github.com/KamitaniLab/EmotionVideoNeuralRepresentation  
データリポジトリfigshareで研究に使用したデータを公開。https://figshare.com/articles/The\_neural\_representation\_of\_visually\_evoked\_emotion\_is\_high-dimensional\_categorical\_and\_distributed\_across\_transmodal\_brain\_regions/11988351

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
研究協力者	神谷 之康  (Kamitani Yukiyasu)		
研究協力者	コーウェン アラン  (Cowen Alan)		
研究協力者	ケルトナー ダッカー  (Keltner Dacher)		