

表情処理の神経時空間ダイナミクスの探究

Exploration of spatiotemporal neural dynamics for emotional expression processing

佐藤 弥

理化学研究所ロボティクスプロジェクト心理プロセス研究チーム

Wataru Sato

Psychological Process Team, BZP, Robotics Project, RIKEN

英語抄録

Emotional facial expressions are primary media for human emotional communication. Although functional neuroimaging studies have revealed brain activity associated with emotional expression processing, its temporal profile remains unclear. I review our two studies combining functional magnetic resonance imaging (fMRI) and magnetoencephalography (MEG) in an effort to resolve this issue. In Study 1, MEG was recorded while participants observed dynamic facial expressions and source-reconstruction analyses utilizing previous fMRI data were conducted. In Study 2, fMRI and MEG data while participants viewed dynamic facial expressions were analyzed using dynamic causal modeling. The results revealed neural activity and connectivity in response to dynamic facial expressions at high spatial and temporal resolutions. These findings suggest the effectiveness of combination of neuroimaging and electrophysiological measures to identify the neural mechanisms underlying emotional expression processing.

キーワード

dynamic causal modeling; dynamic emotional expression; functional magnetic resonance imaging (fMRI); magnetoencephalography (MEG)

日本語抄録

表情はヒト情動コミュニケーションの主要メディアである。機能的脳画像研究は表情処理に関連した脳活動を明らかにしてきたが、その時間情報は不明であった。本稿では、この問題を検討するため機能的磁気共鳴画像(functional magnetic resonance imaging: fMRI)と脳磁図(magnetoencephalography: MEG)を統合的に使用した我々の2研究を紹介する。研究1では、動的表情を観察中のMEGが計測され、fMRIの情報を活用して電流源推定がなされた。

研究2では、動的表情を観察中のfMRIとMEGデータが動的因果モデリングで解析された。その結果、表情処理における脳の活動と機能結合が、高い時空間分解能で明らかとなった。こうした知見から、表情処理の神経メカニズムを同定する上で、機能的脳画像と電気生理学指標を統合することが有効であることが示唆される。

はじめに

表情はコミュニケーションの主要メディアであり、社会関係の形成・維持に大きな役割を果たす。心理学研究は、表情がすばやく自動的に処理され、様々な行動反応を引き出すことを示してきた。例えば、表情は主観情動を喚起する(Sato & Yoshikawa, 2007a)、視覚的注意をひきつけ(Sato & Yoshikawa, 2010)、自動的な表情模倣をもたらす(Sato & Yoshikawa, 2007b)。

機能的磁気共鳴画像(functional magnetic resonance imaging: fMRI)などを用いた機能的脳画像研究は、表情処理する心のはたらきの基盤にある神経メカニズムの解明に貢献してきた。fMRIにより、どこの脳領域が活動するかという空間情報を、ミリレベルの高い分解能で描き出すことができる。研究例として、表情を観察すると、情動処理に重要な扁桃体が活動することが明らかにされた(Breiter et al., 1996)。また動的表情に対して、顔の視覚分析に関わるとされる紡錘状回や上側頭溝、ミラーニューロン（他者の運動観察と自分の運動実行のどちらでも活動する）が存在するとされる下前頭回が活動することが示された(Sato, Kochiyama, Yoshikawa, Naito, & Matsumura, 2004)。こうした知見は、表情という視覚入力に対し行動出力を生み出す内部の情報処理過程について、脳の客観的・定量的データに基づいた理解を提供してくれる。

しかし、表情処理の神経メカニズムの時間情報—いつ活動するか—は、不明な点が多く残されている。これは、fMRIが血流に関係した反応を測るため時間解像度が秒レベルであるという限界に由来する。表情処理が、知覚や運動の行動出力を生む数百ミリ秒のうちに実現されることを考えると、その過程を描き出すためには高い時間分解能で脳活動を計測することが必要となる。さらに、高時間分解能で計測された脳活動データについて脳領域間の機能結合を解析することで初めて、心的処理に対応する神経活動ダイナミクスを明らかにすることが可能となる。こうした目的を達成する1つの手段は、ミリ秒レベルの高い時間分解能を持つ脳波(electroencephalography: EEG)や脳磁図(magnetoencephalography: MEG)といった電気生理学指標を、fMRIと組み合わせて解析することであろう。

本稿では、この問題について検討するため MEG と fMRI を統合的に解析した我々のグループの 2 研究を紹介する。我々の知見から、表情を観察するとき数百ミリ秒のうちに脳の各領域が独自の時間パターンで活動し機能結合する様子が明らかとなった。

研究 1 : MEG 研究

研究 1(Sato, Kochiyama, & Uono, 2015)では、動的表情に対する脳活動の時間特性を解明するため、動的表情・動的モザイクを観察中の MEG を計測した。脳活動の解析では、fMRI の知見をベイズ推定における事前情報として活用して電流源推定した。機能結合を解析するため、動的因果モデリング (Friston, Harrison, & Penny, 2003)を遂行した。

被験者は、健常者 15 名であった。刺激として、恐怖と幸福の動的表情および動的モザイクを呈示した (図 1)。表情刺激の材料は標準写真セット(Ekman & Friesen, 1976)から選択した。モーフィングにより中性表情と情動表情の中間画像を作成し、動的表情刺激とした。動的モザイクは動的表情の各コマを分解再構成して作成された。ダミー課題として、低頻度で呈示されるターゲット刺激 (赤いプラスマーク) の検出を求め、動的表情・動的モザイク刺激を受動的に注視中の脳活動を計測した。脳磁図の計測には、210 チャンネルの全脳型システムを用いた。解析には、SPM8 を用いた。

まず脳活動について、全脳で動的表情>動的モザイクの対比を 50 ミリ秒ごとの時間窓で調べたところ、150~200 ミリ秒 (および以後のいくつかの時間帯) で紡錘状回や上側頭溝を含む視覚関連領野の活動が示された (図 1)。続いて 300~350 ミリ秒の段階で、下前頭回の活動が示された。

次に動的因果モデリングによって、新皮質活動の機能ネットワークを検討した。視覚経路として背側と腹側の二重経路があること(Oram & Perrett, 1996)、上側頭溝と下前頭回を結ぶミラーニューロンシステムがあること(Hamilton, 2008)を前提として、こうした結合が動的表情処理に関与するか、また順・逆どちらの方向で関わるかについて、7 つのモデルを比較して調べた。モデル選択の結果、全ての結合において順・逆の両方向が動的表情処理に関与するというモデルが支持された (図 1)。時間特性をより詳細に調べるため 50 ミリ秒ずつ時間窓をシフトさせて順方向のみと順逆両方向のモデルを比較したところ、初期は順方向のみのモデルが支持されたが、150~200 ミリ秒の段階から順・逆の両方向が動的表情の処理に関わるモデルが支持された。

こうした結果から、動的表情に対する脳活動のすばやく段階的な時間情報が明らかにな

ったと言える。動的表情の視覚処理に関与する紡錘状回や上側頭溝などは約 150 ミリ秒の段階で活動し、運動処理に関与する下前頭回は約 300 ミリ秒で活動する。さらに、こうした脳領域はすばやく機能ネットワークを形成しており、形態・動きをそれぞれ視覚処理する腹側・背側経路と、視覚と運動を結びつけるミラーニューロンシステムが、全て動的表情の処理に関わることが示される。このネットワークでは、まず順方向に視覚処理の結果が運動処理に送られ、続いて逆方向に運動情報が視覚処理を調整するという双方向の処理が実現されるようだ。

研究 2 : fMRI・MEG 研究

研究 2(Sato, Kochiyama, Uono, Yoshikawa, & Toichi, 2017)では、動的表情処理における扁桃体と新皮質の機能結合の方向を高い時空間分解能で明らかにするため、動的表情を観察中の既存の fMRI データ(Sato et al., 2004; Sato, Toichi, Uono, & Kochiyama, 2012)と MEG データ(Sato et al., 2015)を再解析して検討した。先行の fMRI 研究は、動的表情を観察するときの扁桃体と新皮質の活動の間に相関が生じることを報告していた(Foley, Rippon, Thai, Longe, & Senior, 2012)。しかしその方向は不明で、時間情報も不明であった。我々は、心理学研究の知見に基づいて、扁桃体がすばやく活動して新皮質の活動を調整するという仮説を立て、動的因果モデリングでこれを検証した。

被験者は、2つの fMRI 研究と MEG 研究の健常者 22・13・15 名であった。刺激は、標準写真セット(Ekman & Friesen, 1976)から構成された恐怖と幸福の動的表情・静的表情・動的モザイクであった。課題としてダミー課題などを課し、受動的注視中の脳活動を計測した。解析には、SPM12 を用いた。

動的因果モデリングでは、研究 1 で支持された視覚二重経路とミラーニューロンシステムを持つ新皮質のネットワークが形成されること、および皮質下経路により扁桃体に視覚入力があることを前提とした。その上で、扁桃体と新皮質の影響の方向について、扁桃体から新皮質、新皮質から扁桃体、双方向など 5 つのモデルを構築して比較した。その結果、2 セットの fMRI データと MEG データについての動的因果モデリングの結果は一貫して、扁桃体から新皮質への動的表情による影響を含むモデルが、他のモデルよりもデータに適合することが示された(図 2)。こうした機能結合の時間特性を調べるため 50ms ずつ時間窓をシフトさせて扁桃体→新皮質と新皮質→扁桃体のモデルを比較した結果、扁桃体→新皮質へのモデルは 150~200 ミリ秒の段階から支持された。

こうした結果から、動的表情を観察する際の機能ネットワークとして、扁桃体がまず活動して、約 200 ミリ秒というすばやい段階から新皮質ネットワークの活動を調整することが明らかになった。扁桃体は情動処理に重要であることから、表情処理においては、情動処理が新皮質の関与する知覚・認知・運動といった様々な処理に影響を与えていることが示唆される。

おわりに

MEG と fMRI を統合的に解析することで、動的表情を見た瞬間に起こる複数脳領域の活動を高い時空間分解能で描き出し、またその因果的ネットワークを解明することができた。こうした知見は、表情処理という心のはたらきの内部過程について、行動データを補完する洞察を提供する。

しかし、現状では多くの課題が残されている。例えば第一に、各脳領域の各時間帯の活動について、その心理機能を実証的に調べる必要がある。本研究では表情を受動的注視する間の脳活動を計測して脳活動を同定し、その機能については他研究の知見に基づいて推測したのみである。今後、表情についての脳活動を、心理課題の成績や計算論モデリングで得られるパラメータと対応つけていく必要があるだろう。第二に、fMRI と電気生理学指標を統合する最適な計測・解析パラダイムを探索していく必要がある。今回は、同様の課題を fMRI と MEG で独立に計測し、fMRI データの空間情報を MEG 解析における事前情報として活用するなどしたが、fMRI と EEG を同時計測したり、fMRI データの時間情報を利用して EEG/MEG と対応づけたりすることで、より効果的な統合が実現できるかもしれない。

今後さらに機能的脳画像と電気生理学を統合する研究が進展し、表情処理する心のはたらきの基盤にある神経時空間ダイナミクスの理解が深まることが期待される。

文献

- Breiter, H. C., Etcoff, N. L., Whalen, P. J., Kennedy, W. A., Rauch, S. L., Buckner, R. L. et al. (1996) Response and habituation of the human amygdala during visual processing of facial expression. *Neuron*, 17, 875–887.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1976) *Pictures of Facial Affect*. Consulting Psychologist. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.

- Foley, E., Rippon, G., Thai, N. J., Longe, O., & Senior, C. (2012) Dynamic facial expressions evoke distinct activation in the face perception network: A connectivity analysis study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24, 507–520.
- Friston, K. J., Harrison, L. & Penny, W. (2003) Dynamic causal modelling. *Neuroimage*, 19, 1273–1302.
- Hamilton, A. F. D. C. (2008) Emulation and mimicry for social interaction: A theoretical approach to imitation in autism. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 101–115.
- Oram, M. W., & Perrett, D. I. (1996) Integration of form and motion in the anterior superior temporal polysensory area (STPa) of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 76, 109–126.
- Sato, W., Kochiyama, T., & Uono, S. (2015) Spatiotemporal neural network dynamics for the processing of dynamic facial expressions. *Scientific Reports*, 5, 12432.
- Sato, W., Kochiyama, T., Uono, S., Yoshikawa, S., & Toichi, M. (2017) Direction of amygdala–neocortex interaction during dynamic facial expression processing. *Cerebral Cortex*, 27, 1878–1890.
- Sato, W., Kochiyama, T., Yoshikawa, S., Naito, E., & Matsumura, M. (2004) Enhanced neural activity in response to dynamic facial expressions of emotion: an fMRI study. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 20, 81–91.
- Sato, W., Toichi, M., Uono, S., & Kochiyama, T. (2012) Impaired social brain network for processing dynamic facial expressions in autism spectrum disorders. *BMC Neuroscience*, 13, 99.
- Sato, W., & Yoshikawa, S. (2007a) Enhanced experience of emotional arousal in response to dynamic facial expressions. *Journal of Nonverbal Behavior*, 31, 119–135.
- Sato, W., & Yoshikawa, S. (2007b) Spontaneous facial mimicry in response to dynamic facial expressions. *Cognition*, 104, 1–18.
- Sato, W., & Yoshikawa, S. (2010) Detection of emotional facial expressions and anti-expressions. *Visual Cognition*, 18, 369–388.

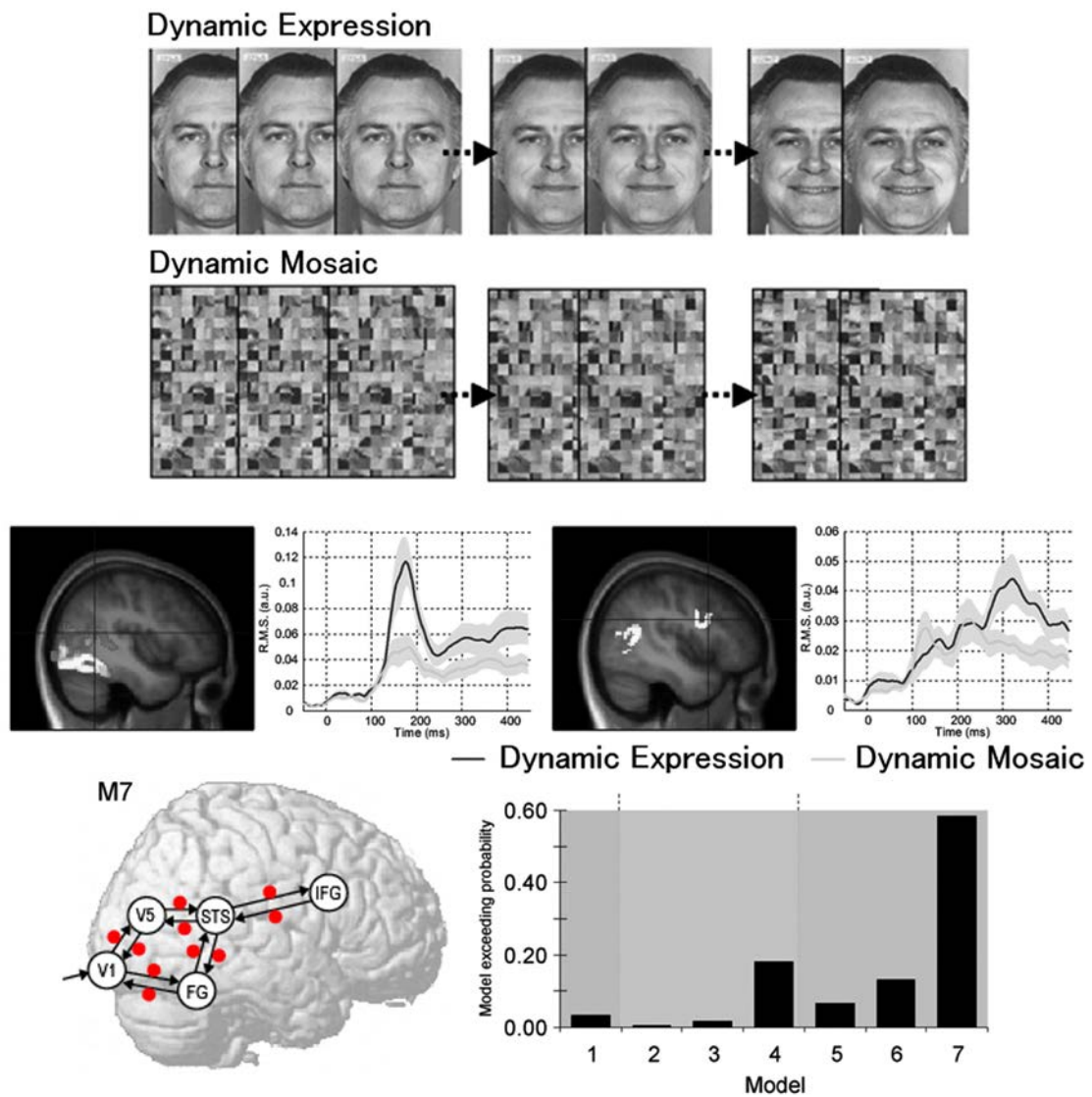


Figure 1. Study by Sato et al. (2015).

Upper) Illustrations of dynamic facial expressions and dynamic mosaics.

Middle) Statistical parametric maps showing activity in the superior temporal sulcus (left) and inferior frontal gyrus (right) in response to dynamic facial expressions versus dynamic mosaics and the waveforms of peak activity.

Lower) The selected model (M7) and results of model selection in dynamic causal modeling. The arrows and circles indicate intrinsic connections between brain regions and the modulatory effects of dynamic expression, respectively. The model with modulatory effects on all feedforward and feedback connections were supported. V1 = primary visual cortex; V5 = middle temporal area; FG = fusiform gyrus; STS = superior temporal sulcus; IFG = inferior frontal gyrus.

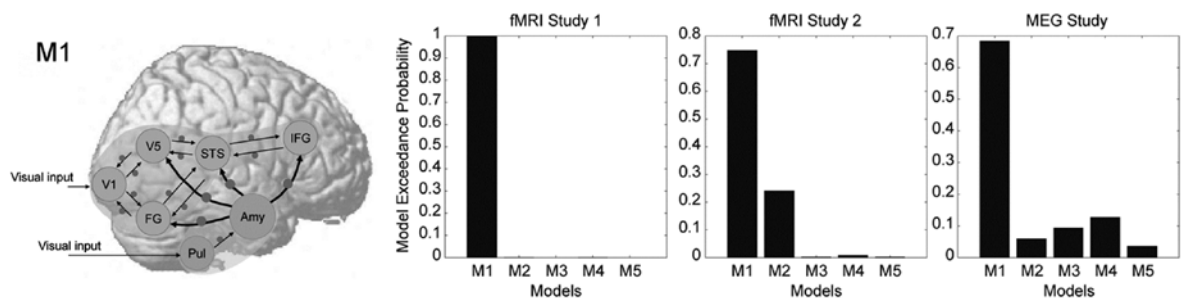


Figure 2 Study by Sato et al. (2017).

Left) The hypothesized model (M1) in dynamic causal modeling. The arrows and circles indicate intrinsic connections between brain regions and the modulatory effects of dynamic expression, respectively. The modulatory effects from the amygdala to neocortical regions were expected. Pul = pulvinar; Amy = amygdala; V1 = primary visual cortex; V5 = middle temporal area; FG = fusiform gyrus; STS = superior temporal sulcus; IFG = inferior frontal gyrus.

Right) The results of model selection of functional magnetic resonance imaging (fMRI) studies 1 and 2 and magnetoencephalography (MEG) study. The amygdala → neocortex model was consistently supported.