

## 3-2 ニューロフィードバック法に基づく視覚的意識を作り出す脳活動の解明

### 3-2 *Neural Mechanisms Underlying Visual Awareness Studied with fMRI Decoded Neurofeedback*

天野 薫 小泉 愛

Kaoru AMANO and Ai KOIZUMI

本稿では、デコーデッドニューロフィードバック (Decoded Neurofeedback: DecNef) 法 [1] を用いて視覚的意識の脳内メカニズムに迫った2つの研究成果を紹介する。初めに、ニューロフィードバック法を用いて低次視覚皮質において方位特異的な色知覚を作り出した研究を紹介し (研究1)、さらに、類似したニューロフィードバック法を用いてメタ認知を変容することに成功した研究を紹介する (研究2)。

In the current paper, we introduce two recent studies utilizing neurofeedback techniques to understand neural mechanisms underlying visual awareness. First, we introduce an experiment where we created orientation-specific color perception in the early visual cortices. Second, we introduce an experiment where we succeed in changing metacognition to introspect visual perception by neurofeedback.

#### 1 まえがき

ヒトの脳活動を非侵襲的に変化させる方法として、経頭蓋磁気刺激法 (Transcranial magnetic stimulation: TMS)、経頭蓋電気刺激法 (transcranial direct/alternate current stimulation: tDCS/tACS) などが提案されている。TMS や tDCS/tACS により、特定の領域において全体的な活動を興奮させたり抑制したりすることは可能であり、これまでも多くの研究で用いられてきた。一方で、より細かい空間スケールで表現されている情報も数多く存在すると考えられる。実際、機能的磁気共鳴画像装置 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) で計測された脳の特定の領域の活動パターンを調べることで、被験者が見ている画像、さらには見ている夢の内容までも予測できることが報告されており [2]-[4]、この手法はデコーディングと呼ばれる。この原理を応用したデコーデッドニューロフィードバック (Decoded Neurofeedback: DecNef) 法 [1] は、TMS、tDCS/tACS では困難な、特定の情報表現に対応した脳活動のパターンを作り出すことができるという大きな利点を持っている。従来 DecNef 法は、特定の脳活動パターン (例えば縞の向き、色) を誘起するために用いられていたが、今回この方法を発展させ、研究1では被験者に実際に与え

られる感覚入力によって生じる脳活動と DecNef によって誘起される脳活動を対応付けることを試みた。さらに研究2では類似の方法を用いて視知覚における高次機能であるメタ認知を変容させることを試みた。

#### 2 DecNef 法を用いた低次視覚皮質における方位と色の連合学習 (研究1) [5]

連合学習とは、複数の感覚入力や感覚属性のペアの関係性を学習し、一方だけで他方が想起されるようになる現象で、日常生活においても非常に重要な学習の一種である。例えば、犬に餌を与える前にベルの音を鳴らすことで、次第にベルの音を聞くだけで唾液を分泌するようになったというパブロフの条件反射などが有名である。従来連合学習は、頭頂葉、前頭葉、海馬など比較的高次の脳領域で起こると考えられてきた [6]-[9]。本研究では、DecNef 法 [1] を発展させた連合デコーデッドニューロフィードバック (Associative decoded neurofeedback: A-DecNef) 法と呼ばれる非侵襲的な脳活動操作技術を開発し、視覚野の入り口にあたる低次視覚野において方位と色の連合学習が生じることを実証した。

2.1 研究1の方法と結果

本実験では18名の被験者の視覚野を同定した後[10]、被験者が赤色及び緑色の画像を見ている際の脳活動をfMRIによって記録し、第一次、第二次視覚野(V1、V2)における脳活動から、見ている縞刺激の色(赤か緑)を推定するデコーダー[11]を作成した(色デコーダー作成)。続いて、白黒の縦縞刺激を用いたニューロフィードバック訓練を3日連続して行った(A-DecNef訓練)。ここでは白黒の縦縞を見ている際の低次視覚野における脳活動をfMRIによって記録しながら、その脳活動が赤色を見ているときの脳活動に近いほど丸が大きくなるようなフィードバックを被験者に与えた(図1)。被験者は丸のサイズだけを手がかりに、白黒の縦縞を見ているときの脳活動を操作し、できるだけ丸のサイズを大きくするよう教示された。3日目の訓練終了後に、縞刺激の色の見えを調べる心理実験を行った(色知覚テスト)。その結果、A-DecNef訓練を通して、赤色と連合させた白黒の縦縞刺激に対し、赤色の知覚回答が有意に増えた(図2)。すなわち、白黒の縦縞を見ているときの脳活動と赤色

を見ているときの脳活動が連合され、白黒の縦縞が赤く知覚されるようになることが心理実験によって示された。この結果は、方位と色という2つの視覚特徴の連合学習が低次視覚野で生じる可能性を示唆している。

2.2 研究1の考察

複数の感覚入力や感覚属性などの対応関係の学習、すなわち連合学習は、大脳皮質前頭葉や高次視覚野、海馬など比較的高次の脳領域で生じるものと考えられていた。本研究において我々は、方位と色という基本的な視覚属性の対応関係の学習が、視覚情報処理の入り口にあたる低次視覚野で生じることを実証した。

方位特異的な色順応としてマッカロー効果\*が広く知られている[12]。例えば赤の縦縞、緑の横縞に数分

\* マッカロー効果

縞模様の方向に随伴した色残効効果。例えば赤色の縦縞および緑色の横縞を数分程度観察した後に白黒の縦縞、横縞を観察すると、縦縞は緑色に、横縞は赤色に知覚される。残効は数ヶ月以上持続することもある。

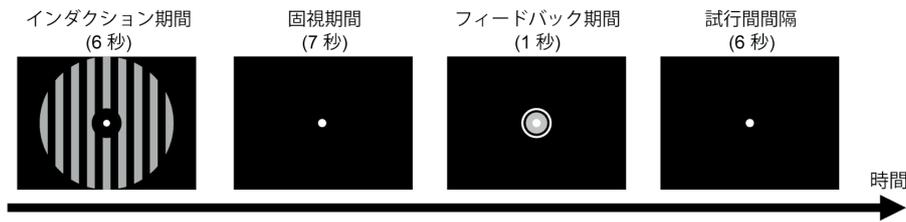


図1 A-DecNef訓練における一試行のタイムコース

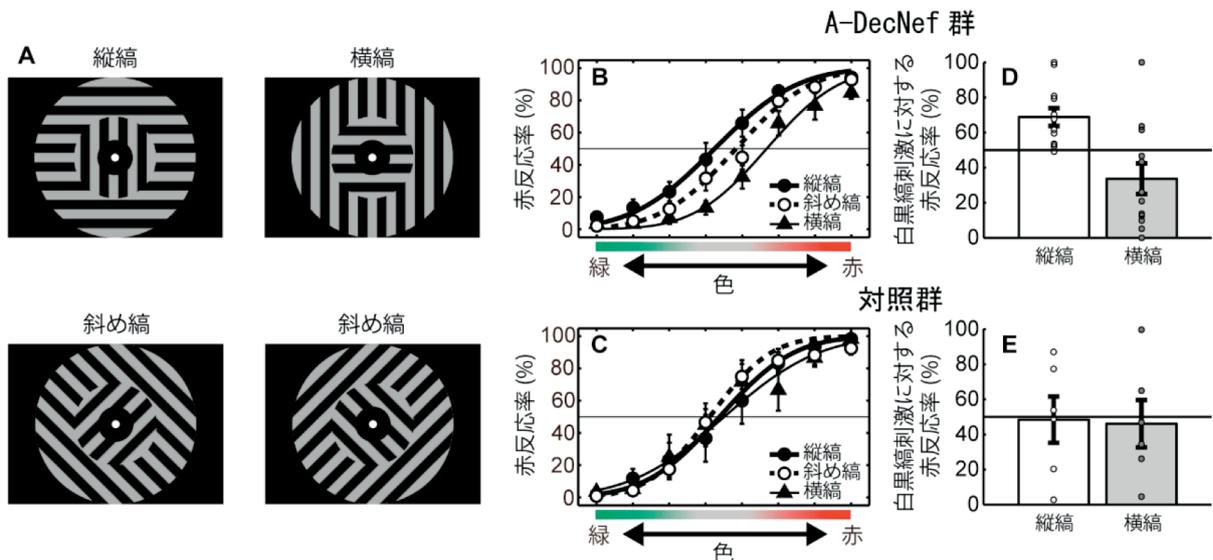


図2 色知覚実験の刺激と結果 (A) : 色知覚実験で用いた縞刺激 (B) A-DecNef 訓練に参加した被験者 (A-DecNef 群) の心理測定関数 (C) A-DecNef 訓練に参加していない被験者 (対照群) の心理測定関数 (D) グレー (斜め縞に対する赤反応率が 50 % となる刺激) の縦縞、横縞に対する A-DecNef 訓練に参加した被験者の赤反応率 (E) グレー (斜め縞に対する赤反応率が 50 % となる刺激) の縦縞、横縞に対する対照群の赤反応率

～10分程度順応すると、白黒の縦縞は緑っぽく、白黒の横縞は赤っぽく見え、その効果は数か月にわたって持続する。本研究における連合学習は、長期間持続する方位特異的な色知覚という意味でマッカロー効果と共通しているが、少なくとも2つの面で背景となるメカニズムは異なると考えられる。まず初めに、マッカロー効果が脳内のどのレベルで生じているかについては、V1起源であることを示唆する結果と、高次視覚野が関与していることを示唆する結果の両方があり決着がつかない[13]-[16]。また、マッカロー効果では順応刺激の補色が知覚されるのに対して、本研究ではニューロフィードバックによって誘起した脳活動に対応する色そのものが知覚されており、方位特異的な色知覚の方向が逆向きであることが挙げられる。これらの結果からマッカロー効果は単純な方位と色の連合ではなく、複雑な神経メカニズムによって生じていることが示唆され、V1、V2起源である本研究における連合学習とはメカニズムが異なる可能性が高いと考えられる。

本研究では、感覚入力によって生じる脳活動とDecNefによって誘起される脳活動を対応付けるA-DecNef法を新たに開発し、低次視覚野の操作によって長期間にわたり方位特異的な色知覚が生じることを報告した。本研究の結果は、低次視覚野において方位と色の連合学習が生じることを示唆している。本研究における連合学習において、V1、V2以外が寄与している可能性も完全には排除できない。将来的に、連合学習の両眼間転移、視野間転移等を調べることで、高次視覚野の役割を明らかにすることができると考えられる。

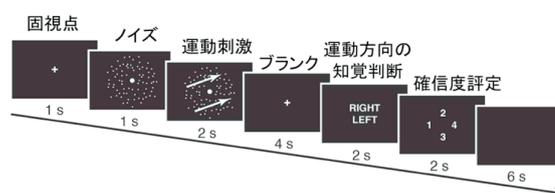
### 3 DecNef法を用いたメタ認知の変容 (研究2) [17]

上述の研究1では、ニューロフィードバック法を用いて物の見え(図形に連合された色の知覚)そのものを変容した。一方、私達は日常的に、「今見えた図形は間違いなく赤色だった」あるいは「ポケットの中で携帯が鳴ったかもしれない」、という具合に、何かを見たり聞いたりした際に、そうした知覚の「確からしさ」を日頃から推測している。このように、自らの知覚の確からしさを振り返ることは、自身の認知の働きを俯瞰する「メタ認知」の重要な役割のひとつと考えられている[18]。では、知覚に対する確信度が脳内で推定されるメカニズムについて、現在どこまで理解が進んでいるのだろうか？そうしたメタ認知の神経メカニズムについての見解は、大きく分けて2つに分かれており、まだ議論が収束していないのが現状と言える。

ひとつの見解は、私達の知覚そのものを支える神経基盤が、その知覚を俯瞰するメタ認知も支えているというものである[19]。もうひとつの見解は、知覚を支えている神経基盤とは異なる神経基盤がメタ認知を支えているというものである[20]-[22]。これまで、そうした2つの見解をめぐる議論がなかなか収束してこなかったが、その原因のひとつとして、従来の脳科学的手法では、「知覚」と「メタ認知」を支える2つの神経基盤の乖離を十分に示せなかったという限界が挙げられる。

こうした背景を受け、本研究では、近年の脳科学的知見及び独自のデコード解析結果を踏まえたうえで、前頭前野と頭頂葉を含む高次脳ネットワークの活動パターンを操作し、上記の見解の切り分けを試みた。脳活動の操作には、前述の研究1と同様に、特定の脳領域の活動パターンを変容できるDecNef法[1]を応用した。その結果、画像の動きの方向に関する回答の正答率そのものは変わらないにもかかわらず、自身の知覚に対して感じる確信度は変化することが明らかになった。つまり、よく見えるようになったり、見えにくくなったり、というような知覚成績の変化は生じなかったにもかかわらず、自らの知覚に対して感じる確信の強さのみが選択的に変化することが分かったのである。こうした結果は、「知覚」と「メタ認知」を支える2つの神経基盤の乖離を支持するものであり、メタ認知のメカニズムを巡る2つの見解のうち、知覚を生み出す神経メカニズムとは異なる神経メカニズムが私達のメタ認知の働きを支えているという見解を直接的に支持するものと言える。以下では、本研究のより具

知覚に対する確信度にかかわる脳活動パターンを切り出すための課題



知覚に対する確信度にかかわる脳活動パターンを前頭前野と頭頂葉を含むネットワークから解読

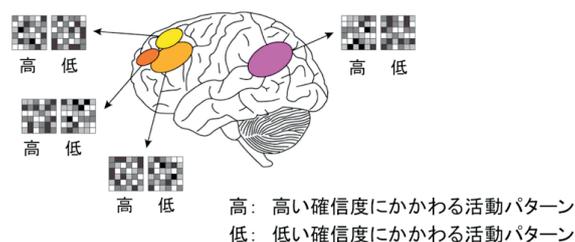


図3 知覚に対する確信度にかかわる脳活動パターンをデコードするために用いた知覚課題(上)と、実験の概念図(下)

体的な方法や結果を説明するとともに、臨床応用可能性について紹介する。

### 3.1 研究2の方法と結果

本実験には10名の成人被験者が参加した。被験者は、高い確信度に関わる脳活動パターンを誘導するDecNef訓練と、低い確信度に関わる脳活動パターン(図3)を誘導するDecNef訓練の双方に参加した。被験者は、それらの2種類のDecNef訓練の前後に、知覚課題にも参加した。この知覚課題のパフォーマンスをDecNef訓練の前後で比較することにより、果たしてDecNef訓練後に知覚に対する確信度が変容したのかどうかを検討した。より具体的には、高い確信度に関わる脳活動パターンを誘導するDecNef訓練の後には、自らの知覚に対して高い確信を持つようになり、一方で低い確信度に関わる脳活動パターンを誘導する訓練の後には、低い確信を持つようになるかどうかを検討した。

本研究では、前頭前野と頭頂葉を含む高次脳ネットワークの活動パターンを操作するDecNef訓練により、自らの知覚に対する確信度を変容できることを示した。具体的には、高い確信度に関わる脳活動パターンを誘導するDecNef訓練後には知覚に対する確信度が高まり、その一方で、低い確信度に関わる脳活動パターンを誘導するDecNef訓練後には知覚に対する確信度が低くなることを示した(図4)。このように、脳活動パターンを操作した結果、知覚に対する確信度は上下に変動したものの、知覚成績そのものは変化が見られなかった。つまり、知覚課題で用いられていたドット刺激の運動方向が見えやすくなったり、見えにくくなったりしたわけではないにもかかわらず、運動方向の知覚に対して感じる確信度が選択的に変化することが分かった。

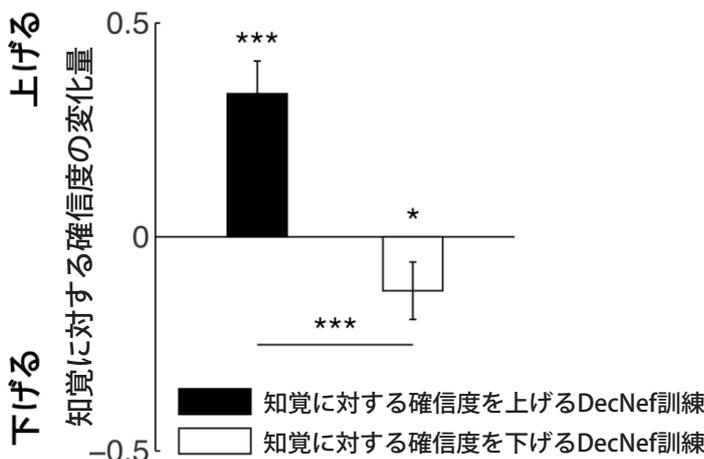
### 3.2 研究2の考察

上記の結果は、前頭前野と頭頂葉を含む高次脳ネットワークの活動パターンが、知覚に対する確信度に選択的に関わるものであり、「知覚」そのものと「メタ認知」を支える神経基盤の乖離を示すものと言える。先述のように、これまでは、知覚とメタ認知を支える神経基盤が同じか否か、という議論がなかなか収束してこなかったが、その背景には、従来の脳科学的手法ではそれらの神経基盤を乖離できない、という研究手法上の限界という問題があった。それに対し、本研究では、特定の脳領域の活動パターンを狙った方向に誘導するという最新のニューロフィードバック技術[1]を応用することで、知覚とメタ認知を支える神経基盤を乖離することに成功し、それにより、両者の神経基盤が異なる可能性を直接的に支持する結果を示すことができた。

## 4 まとめと展望

このように、ニューロフィードバック法を用いることで、知覚そのもの(図形の色の見えかた)や、知覚を振り返るメタ認知を変容できることが明らかになった。こうしたニューロフィードバック法は、本稿で紹介したように、人の知覚や認知機能を支える神経メカニズムの解明に役立てられるだけでなく、今後は、人の知覚や認知機能を向上させるために役立てる臨床応用も期待できると言える。

DecNef訓練後に知覚に対する確信度が変化



DecNef訓練後に知覚成績の変化はない

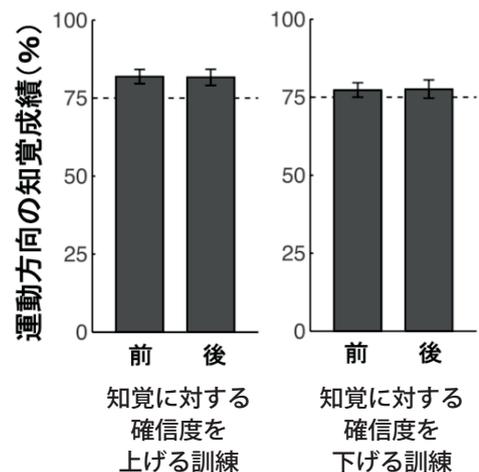


図4 DecNef訓練後の知覚に対する確信度(左)と知覚成績(右)の変化

## 【参考文献】

- 1 K. Shibata, T. Watanabe, Y. Sasaki, and M. Kawato, "Perceptual learning incepted by decoded fMRI neurofeedback without stimulus presentation," *Science*, vol.334, pp.1413–1415, 2011, DOI:10.1126/science.1212003.
- 2 T. Horikawa, M. Tamaki, Y. Miyawaki, and Y. Kamitani, "Neural decoding of visual imagery during sleep," *Science*, vol.340, pp.639–642, 2013, DOI:10.1126/science.1234330.
- 3 Y. Kamitani and F. Tong, "Decoding the visual and subjective contents of the human brain," *Nature Neuroscience*, vol.8, pp.679–685, 2005, DOI:10.1038/nn1444.
- 4 Y. Miyawaki et al. "Visual Image Reconstruction from Human Brain Activity using a Combination of Multiscale Local Image Decoders," *Neuron*, vol.60, pp.915–929, 2008, DOI:10.1016/j.neuron.2008.11.004.
- 5 K. Amano, K. Shibata, M. Kawato, Y. Sasaki, and T. Watanabe, "Learning to associate orientation with color in early visual areas by associative Decoded fMRI neurofeedback," *Current Biology*, vol.26, pp.1861–1866, 2016, DOI:10.1016/j.cub.2016.05.014.
- 6 W. F. Asaad, G. Rainer, and E. K. Miller, "Neural activity in the primate prefrontal cortex during associative learning," *Neuron*, vol.21, pp.1399–1407, 1998.
- 7 M. Petrides, "Deficits on conditional associative-learning tasks after frontal- and temporal-lobe lesions in man," *Neuropsychologia*, vol.23, pp.601–614, 1985.
- 8 D. A. McCormick and R. F. Thompson, "Cerebellum: essential involvement in the classically conditioned eyelid response," *Science*, vol.223, pp.296–299, 1984.
- 9 K. Henke, A. Buck, B. Weber, and H. G. Wieser, "Human hippocampus establishes associations in memory," *Hippocampus*, vol.7, pp.249–256, 1997, DOI:10.1002/(SICI)1098-1063(1997)7:3<249::AID-HIPO1>3.0.CO;2-G.
- 10 B. A. Wandell and J. Winawer, "Imaging retinotopic maps in the human brain," *Vision Research*, vol.51, 2011, DOI:10.1016/j.visres.2010.08.004.
- 11 O. Yamashita, M. A. Sato, T. Yoshioka, F. Tong, and Y. Kamitani, "Sparse estimation automatically selects voxels relevant for the decoding of fMRI activity patterns," *NeuroImage*, vol. 42, pp. 1414–1429, 2008, DOI:10.1016/j.neuroimage.2008.05.050.
- 12 C. McCollough, "Color Adaptation of Edge-Detectors in the Human Visual System," *Science*, vol.149, pp.1115–1116, 1965, DOI:10.1126/science.149.3688.1115.
- 13 G. K. Humphrey, T.W. James, J.S. Gati, R.S. Menon, and M.A. Goodale, "Perception of the Mccollough Effect Correlates with Activity in Extrastriate Cortex: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study," *Psychological Science*, vol.10, pp.444–448, 1999.
- 14 J. Uhlarik, R. Pringle, and M. Brigell, "Color aftereffects contingent on perceptual organization," *Perception & Psychophysics*, vol.22, pp.506–510, 1997.
- 15 T. R. Vidyasagar, "Orientation specific colour adaptation at a binocular site," *Nature*, vol.261, pp.39–40, 1976.
- 16 S. Grossberg, S. Hwang, and E. Mingolla, "Thalamocortical dynamics of the McCollough effect: boundary-surface alignment through perceptual learning," *Vision research* vol.42, pp.1259–1286, 2002.
- 17 A. Cortese, K. Amano, A. Koizumi, M. Kawato, and H. Lau, "Multivoxel neurofeedback selectively modulates confidence without changing perceptual performance," *Nature Communications*, vol.7, No.13669, 2016, DOI:10.1038/ncomms13669.
- 18 H. Lau and D. Rosenthal, "Empirical support for higher-order theories of conscious awareness," *Trends Cogn. Sci.*, vol.15, pp.365–373, 2011.
- 19 M. N. Hebart, Y. Schriever, T. H. Donner, and J.-D. Haynes, "The Relationship between Perceptual Decision Variables and Confidence in the Human Brain," *Cereb. Cortex*, vol.26, pp.118–130, 2016.
- 20 E. Rounis, B. Maniscalco, J. C. Rothwell, R. E. Passingham, and H. Lau, "Theta-burst transcranial magnetic stimulation to the prefrontal cortex impairs metacognitive visual awareness," *Cogn. Neurosci.*, vol.1, pp.165–175, 2010.
- 21 A. Koizumi, B. Maniscalco, and H. Lau, "Does perceptual confidence facilitate cognitive control?," *Atten. Percept. Psychophys.*, vol.77, pp.1295–1306, 2015.
- 22 C. Wilimzig, N. Tsuchiya, M. Fahle, W. Einhäuser, and C. Koch, "Spatial attention increases performance but not subjective confidence in a discrimination task," *J. Vis.*, vol.8, p.7, 2008.



天野 薫 (あまの かおる)

脳情報通信融合研究センター  
脳情報通信融合研究室  
主任研究員  
博士 (科学)  
視知覚、非侵襲脳機能計測

小泉 愛 (こいずみ あい)

脳情報通信融合研究センター  
脳情報通信融合研究室  
研究員  
博士 (心理学)  
視知覚、情動、恐怖記憶、精神疾患