

2025年12月16日

眼は脳に何を伝えるか — 網膜からの暗号情報を脳が解読する仕組みを解明

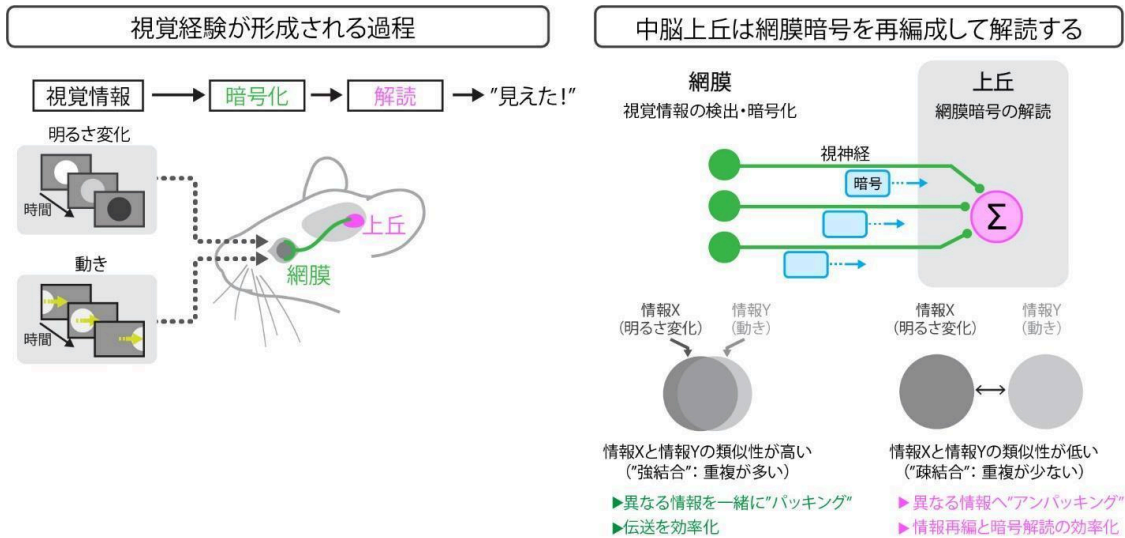
■ 概要

わたしたちが「ものが“見えた”」と感じるとき、中枢神経系は明るさや、色、動きなど膨大な視覚情報を処理しています。その起点となる網膜(1)は、光を受容して情報を神経発火として暗号化し、脳へ送ります。しかし、脳がこの網膜暗号をどのようにして解読するのか不明でした。

本研究ではネズミを用い、生存に重要な「明るさの変化」と「動き」という2種類の視覚情報に着目しました。網膜と視覚中枢である中脳上丘(2)の神経活動を、相互情報量解析(3)を応用し、比較分析しました。その結果、網膜では、それらの情報が互いに予測可能な形で結びついていました。これは、異なる情報を一緒に“パッキング”することで脳への伝送が効率化されることを示しています。一方、中脳上丘では、その重複性が解消され、視覚特徴が再編成されていました。これは、中脳上丘がただの暗号の中継局ではなく、暗号解読の精度を高め、視覚応答の多様性を劇的に増やす役割を担うことを示します。

こうした処理は、注意、危険検知、素早い眼球運動など、中脳上丘が担う高度でしなやかな認知や行動に不可欠だと考えられます。本研究は、注意欠如や統合失調症など神経暗号の解読異常が関わりと予想される疾患の理解にも寄与すると期待されます。

本成果は、オーストリア大学生物医学部DANDRITE研究所のOle Schwartz大学院生、国立遺伝学研究所の松本彰弘助教、山本悠研究員、米原圭祐教授によるものです。



図の説明

(左) 視覚経験が形成される視覚情報処理経路。視覚情報は網膜において検出、暗号化され、様々な脳部位へと伝送される。視覚中枢の一つである上丘では、網膜暗号が解読され、その後さらに脳の視覚関連部位での処理を経て、「見えた！」という視覚経験が形成される。

(右) 本研究成果の概要。網膜暗号は、視神経を介して中脳上丘へ伝送される。網膜では、「明るさ変化(情報X)」と「動き(情報Y)」の2種類の視覚情報を表現する神経活動に高い類似性があった(相互情報量が高い)。これは異なる2種類の情報が一緒にパッキングされることを示し、脳への暗号伝送の効率化に寄与すると考えられる。一方、中脳上丘では、こうした重複性の高い網膜暗号を脱結合する再編成が行われ、暗号解読の精度を高め、視覚情報表現に多様性が加えられる。

■ 成果掲載誌

本研究成果は、国際科学雑誌「Current Biology」に2025年12月17日（日本時間）に掲載されます。

論文タイトル:

Decoupling of visual feature selectivity in the retinocollicular pathway

著者:

Ole S. Schwartz, Akihiro Matsumoto, Haruka Yamamoto, and Keisuke Yonehara

DOI: 10.1016/j.cub.2025.11.050

■ 研究の詳細

● 研究の背景

感覚器である網膜や、視覚中枢である中脳上丘、視床、大脳視覚野などにまたがる動物の視覚系には、光の明るさや動き、輪郭、色などの様々な視覚情報に選択的に応答する多様な神経細胞が存在します。このような視覚情報への選択性のおかげで、動物の認知や行動が機能的に制御できるようになることはわかっていました。しかし、これら視覚中枢の神経細胞が、網膜から送られてくる神経信号（網膜暗号）をどのように解釈し、そして自分自身の神経活動を構築するのか、これまで不明でした。とりわけ、網膜において符号化された「明るさ変化」や「視覚的な動き」などの異なる視覚情報が、網膜の出力細胞である神経節細胞から主要な投射先である中脳上丘へどのように伝送され、さらに中脳上丘の神経細胞がどのように脱符号化するのかという「網膜－上丘経路での網膜信号変換」についてはわかっていませんでした。

● 本研究の成果

オーストリア生物医学部DANDRITE研究所のOle Schwartz大学院生、国立遺伝学研究所の松本彰弘助教、米原圭祐教授らは、神経活動イメージングと相互情報量解析という数理手法を駆使することで、視覚系の感覚器官である網膜において視覚情報がどのように暗号化され、そして脳がその網膜暗号をどのように解釈するのか、わたしたちの視覚経験形成の基本原則を明らかにしました。

神経細胞群間の情報伝達は、活動電位という電気信号の有無(0 OR 1)によって表現されます。こうした離散的(デジタル)な情報である神経信号を、相互情報量解析という情報理論に基づく数理手法を用いることで、個々の細胞が視覚情報をどのように表現しているのか分析することが可能になりました。

2光子顕微鏡イメージングによって記録した網膜と、脳の視覚中枢である中脳上丘の神経細胞の活動について、相互情報量解析を用いて分析したところ、網膜の細胞活動では「明るさ変化」と「動き」という異なる視覚情報間の類似性が高い(相互情報量が高い)ものの、中脳上丘では情報間の類似性が低くなっており(相互情報量が低い)、脱結合されていることがわかりました。つまり、網膜では異なる視覚情報を一緒に符号化することで脳への伝送を効率化させる一方で、情報に重複が多くなっています。中脳上丘では、その重複を解消させ、それぞれの視覚情報にアクセスしやすい状態になるように解釈、再編成を行っていました。中脳上丘は、さらに脳の様々な部位へ解釈した視覚情報を伝送することで、視覚経験や高度な認知、しなやかな行動などの形成基盤になると考えられます。

● 今後の期待

本研究の成果は、中枢神経系が、時々刻々と変化する膨大な視覚情報をどのように処理し、スムーズな視覚経験や行動の形成に寄与するのかという視覚神経科学における根本的な動作原理について、理論的理解を深めるものです。将来的には、注意欠如や統合失調症など神経暗号の解釈異常が関わりと予想される疾患の理解にもつながると期待されます。

■ 用語解説

1) 網膜

視覚系の感覚器官。眼底にはりつくシート状の神経組織で、光を感受する視細胞や視覚情報を暗号化する神経節細胞など様々な種類の神経細胞が存在する。神経節細胞で符号化された情報(網膜暗号)は視神経を介して50以上もの異なる脳部位に伝送される。

2) 中脳上丘

感覚情報の処理中枢。げっ歯類ではおよそ80%以上もの視神経が中脳上丘に投射する。視覚情報処理だけでなく、聴覚や体性感覚などとの多感覚統合、眼球運動、注意制御、認知など様々な情報処理に貢献する重要な脳部位。

3) 相互情報量解析

情報理論に基づく数理解析。二つの変数が情報を共有する程度を定量する。一方の変数の情報量(エントロピー)の変化を知ること、他方の情報量の変化をどれだけ予測することができるか、という確率変化における共分散の指標。本研究では、「明るさ変化」と「動き」という異なる二つの視覚刺激に対する神経応答について、一方への応答から他方への応答の予測可能性をモデル化するために応用した。

■ 研究体制と支援

本研究は、情報・システム研究機構国立遺伝学研究所多階層感覚構造研究室、およびデンマーク王国オーフス大学生物医学部DANDRITE研究所(いずれも米原圭祐教授が主宰)において、Ole Schwartz大学院生と松本彰弘助教が中心となり、国を跨いだ2つのラボの協同体制によって行われました。

Lundbeck Foundation(DANDRITE-R248-2016-2518; R344-2020-300; R218-2016-368)、Novo Nordisk Foundation(NNF15OC0017252)、European Research Council(638730)、JST戦略創造研究推進事業さきがけ(JPMJPR2489)、科研費(22K21353、23H04687、24K02134、24H02311; 23K19412; 25K09816)、上原記念財団の支援を受けて行われました。

■ 問い合わせ先

<研究に関すること>

- 情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所 多階層感覚構造研究室
教授 米原 圭祐 (よねはら けいすけ)

メール: keisuke.yonehara@nig.ac.jp

<報道担当>

- 情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所 広報室

メール: prkoho@nig.ac.jp

ZOOMでの取材にも対応しますので、ご希望の方はお知らせください。

配付先

文部科学記者会、科学記者会、三島記者クラブ