



状況に応じて物の価値判断を変化させる脳の仕組みを解明 ～脳深部の線条体尾部で情報の統合が行われる～

ヒトを含む動物の生存にとって、価値ある物を手に入れることは最も重要な行動の一つです。そして、同じ物であっても、動物にとっての価値は物が置かれた環境や状況によって変化します。動物はその価値を、経験や学習に基づいて適切に判断しているのです。では、どのようなメカニズムで私たちは物の価値を学習しているのでしょうか。これまでは、特定の刺激を受けた時の反応によって得られた報酬から、脳は物の価値を学習すると考えられてきました。しかし、この学習メカニズムでは、物が置かれた環境の情報は考慮されておらず、どのようにして動物が環境に応じて物の価値判断を変化させているかを説明することはできませんでした。

本研究では、物が置かれた環境を判断する際の重要な手掛かりとなる「背景」に着目し、サルを使った実験で、その学習メカニズムを探りました。その結果、脳の深部にある「線条体尾部」と呼ばれる領域で、背景情報と物体の価値情報が統合されることによって、環境ごとにどの物体の価値が高いかを学習していることを発見しました。

具体的には、サルに対し、背景画像の中に提示される二つの物体（フラクタル図形）から一つを選択する行動課題を訓練しました。そして、その課題を行っているときに、線条体尾部にある2種類の神経細胞（投射ニューロンと介在ニューロン）の活動を調べました。この課題では、同じ物体でも背景によって得られる報酬（リンゴジュース）の量が変わるため、サルは背景に応じて選択する物体を変化させます。実験の結果、投射ニューロンは背景によって変化する物体の価値情報を、介在ニューロンは背景の情報を保持していることが明らかになりました。また、薬を用いて、線条体尾部の介在ニューロンの働きを一時的に抑制すると、新たな背景と物体価値の学習が阻害されました。介在ニューロンは投射ニューロンを抑制していることから、以上の結果は、介在ニューロンの持つ信号が背景ごとに投射ニューロンの持つ物体価値の信号を変化させることで、背景によって異なった物体の価値情報が作り出されていることを示しています。

本研究は、介在ニューロンが環境に応じた物の価値の学習をコントロールするという、これまで知られていなかった神経メカニズムの存在を示唆しています。また、ハンチントン病やトゥレット障害といった病気では、線条体の介在ニューロンが減少していることがわかっており、本研究の結果はこれらの病態の解明を促進することが期待されます。

研究代表者

筑波大学医学医療系（トランスポーター医学研究センター）

國松 淳 助教

米国国立衛生研究所

彦坂 興秀 Distinguished investigator

研究の背景

物体の価値は環境や状況によって変化しますが、私たちは経験や学習に基づいてそれを適切に判断して選択することができます。従来の考えでは、私たちの脳は特定の刺激に対する反応で得た報酬によって、物体価値を学習するとされています。しかし、このメカニズムだけでは環境の情報が考慮されていないため、一つの状況での物体の価値しか学習することができず、環境に依存して価値判断を変化させることができません。それでは、環境の情報は脳内でどのように表現され、いかに選択を変化させているのでしょうか。本研究チームは環境を判断する際の重要な手がかりとなる「背景」に着目し、その神経表現と物体価値との関係を調べました。

研究内容と成果

本研究では、背景によって物体の価値が変化する行動課題（背景依存的物体選択課題）を考案し、アカゲザル^{注1}の訓練を行いました（参考図 A）。この課題では価値（報酬量）が異なる二つの物体（フラクタル図形）が大きな背景画像の上に提示されます。同じ物体でもその価値は背景によって変化するため、サルは多くの報酬（リンゴジュース）を得るために背景によって価値の高い物体をきちんと学習しなければいけません。たくさんの背景を用いるために、画像は Google Earth^{注2}の衛星写真から作りました。

本研究チームの先行研究から、長期の学習に基づいた物体の価値判断に線条体^{注3}尾部（参考図 B）が重要な役割を果たしていることがわかっており、同部位が環境に依存した物体選択にも関与している可能性が考えられました。本研究では、解剖学的な検証によって線条体尾部では他の線条体領域と比べて抑制性介在ニューロン^{注4}が多いことを発見したことから、同部の抑制性介在ニューロンが特別な情報処理を担っていると考えました。

そこで、サルが上記の背景依存的物体選択課題を行なっているときに、線条体尾部の抑制性介在ニューロンと、これまで物体価値に関わる活動を示すことが報告されている投射ニューロン^{注5}の役割を調べました。抑制性介在ニューロンは投射ニューロンに信号を伝えて線条体内で局所回路を形成しています。それぞれのニューロンの活動を記録した結果、投射ニューロンは特定の背景のときに物体の価値に従って活動を変化させました。一方で、抑制性介在ニューロンは物体の種類や価値に対しては活動を変化させず、背景によって異なった神経活動を示しました。このことから、投射ニューロンは背景ごとの物体の価値情報を、介在ニューロンは背景の情報を保持していることが判明しました。もし、介在ニューロンが持つ情報が背景依存的な価値判断に重要であれば、神経活動を人工的に操作することで何らかの変化が引き起こされる可能性があります。そこで、線条体尾部に微量の薬物を注入して抑制性介在ニューロンの活動を阻害したところ、物体の価値のみを学習することに影響はありませんが、背景と物体の価値を組み合わせることができなくなることが明らかになりました。これらの結果は、抑制性介在ニューロンの信号が背景ごとに変化することで投射ニューロンを操作し、背景依存的に物体価値の学習をコントロールしていることを示唆しています（参考図 C）。

今後の展開

本研究チームは、本論文で投射ニューロンと抑制性介在ニューロンの活動変化をドーパミン^{注6}による神経修飾とヘップ則^{注7}をもとに数理モデルで説明することにも成功し、新しい学習メカニズムの存在を提案しています。環境情報がどのように脳内で処理されているのかをさらに明らかにしてその動作原理がわかれば、汎用性のある新しい AI 技術の開発に応用できると期待されます。また、線条体の抑制性介在ニューロンの減少がハンチントン病やトゥレット障害といった病気で報告されており、本研究の結果はこれらの病態の解明を促進すると考えられます。

参考図

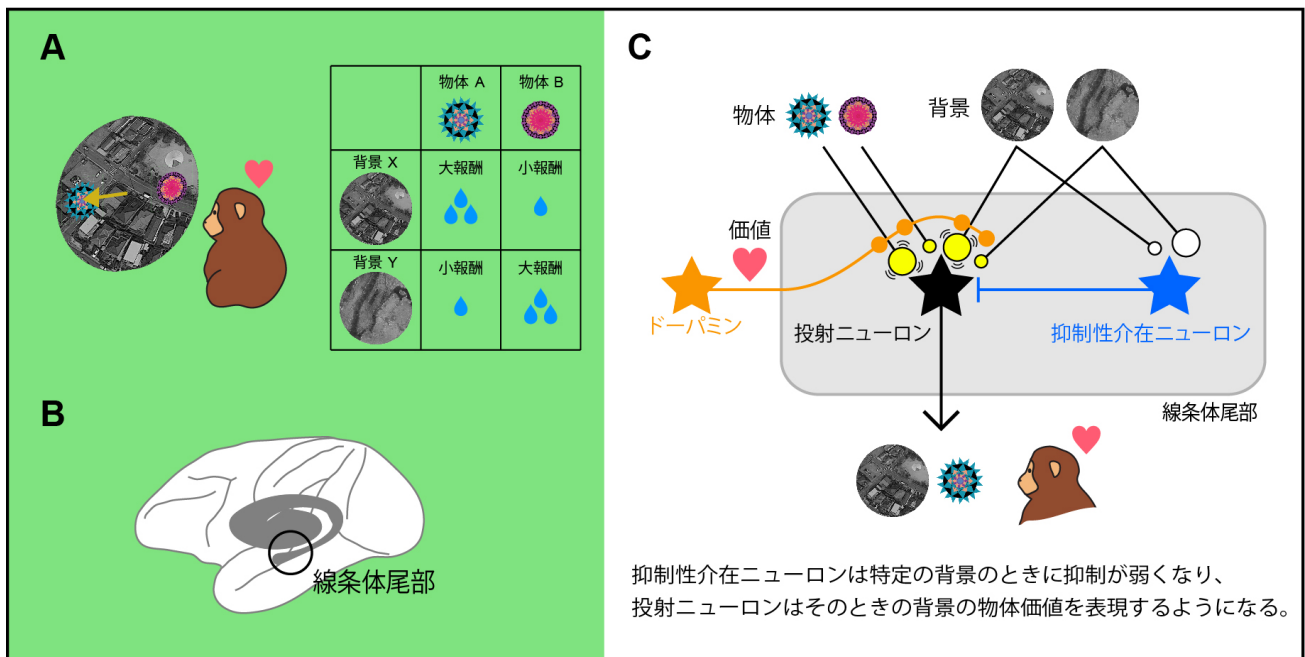


図 本研究に用いた方法と結果

A. 背景依存的物体選択課題の概要。サルの眼前に置かれたモニターに行動課題が提示されます。サルは背景の上に提示された二つの物体のうちの一つに目を向けると、報酬としてリンゴジュースがもらえます。同じ物体でもその背景によって報酬量が異なるため、サルは背景によって選択する物体を変化させます。B. 線条体尾部の位置。C. 本研究の結果を示す概略図。先行研究から、ドーパミンからの価値情報によって投射ニューロンへ伝わる物体と背景の信号が強化されると考えられます。抑制性介在ニューロンは、背景に応じて投射ニューロンへ送る信号を変化させる事で、背景依存的な物体価値の学習を可能にしています。

用語解説

- 注1) アカゲザル ニホンザルと同じマカク属の一種で、ヒトと類似した脳構造を持つ。
- 注2) Google Earth 世界中の衛星写真を閲覧することができるバーチャル地球儀 (<https://www.google.com/earth/>)。
- 注3) 線条体 脳深部にある領域で、意思決定や運動制御などに関与することが知られている。
- 注4) 介在ニューロン 近傍にあるニューロンとだけ情報伝達を行う神経細胞。線条体では主に抑制性 (GABA) とコリン作動性のものがあるが、本研究では抑制性介在ニューロンに着目した。
- 注5) 投射ニューロン 異なる領域間の情報伝達を担う神経細胞。線条体では中型有棘細胞が投射ニューロンである。
- 注6) ドーパミン 報酬系に関与し、受容体の活性化によってニューロン間の情報伝達の強さを調節する。線条体の多くのニューロンがドーパミンの受容体を持つ。
- 注7) ヘップ則 ニューロンの繰り返しの発火によって、結合するシナプスの伝達効率が增强されるといふ説。

研究資金

本研究は、米国国立衛生研究所の研究プロジェクトとして実施されました。

掲載論文

【題名】 Environment-based object values learned by local network in the striatum tail
(環境に依存した物体価値の学習は線条体尾部の局所回路で行われる)

【著者名】 Jun Kunimatsu^{1,2,3}, Shinya Yamamoto⁴, Kazutaka Maeda¹ and Okihide Hikosaka¹

【掲載誌】 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

【掲載日】 2021年1月18日(現地時間)

【DOI】 10.1073/pnas.2013623118

1. 米国国立衛生研究所
2. 筑波大学医学医療系
3. 筑波大学トランスポーター医学研究センター
4. 産業技術総合研究所人間情報インタラクション研究部門

問合わせ先

【研究に関すること】

國松 淳 (くにまつ じゅん)

筑波大学医学医療系 (トランスポーター医学研究センター) 助教

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000004204>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp