



配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

報道の解禁日(日本時間)

(テレビ、ラジオ、インターネット) : 2026年5月30日(土) 午前3時

(新聞) : 2026年5月30日(土) 付朝刊

2026年5月25日

報道機関 各位

## 小脳が「危険」と「安全」を見分ける仕組みを解明 ～行動を柔軟に切り替える脳内部モデルの実体に迫る～

### 【本研究のポイント】

- ・ゼブラフィッシュの小脳<sup>注1)</sup>が「危険」と「安全」を区別して表現する神経回路を持つことを発見。
- ・小脳内に危険・安全それぞれに応答する神経細胞集団が形成されることを解明。
- ・環境の変化に応じて神経活動が柔軟に変化し、学習を支える仕組みを明らかに。
- ・小脳が運動制御に加えて、価値判断や意思決定に関わる重要な役割を担うことが示され、精神・神経疾患の理解や治療への応用が期待される。

### 【研究概要】

名古屋大学大学院理学研究科の小山 航 博士後期課程学生(研究当時)、清水 貴史 准教授、日比 正彦 教授らの研究グループは、理化学研究所脳神経科学研究センターの岡本 仁 客員主管研究員の研究グループ、ワイツマン科学研究所の川島 尚之 博士との共同研究で、小脳が「危険」と「安全」に関する価値情報<sup>注2)</sup>を区別して表現し、それに基づいて行動を制御する仕組みを明らかにしました。

動物は、環境中の手掛かりから「危険」や「安全」を学習し、それに応じて行動を選択します。このような能力は生存に不可欠ですが、その神経基盤は十分に解明されていませんでした。

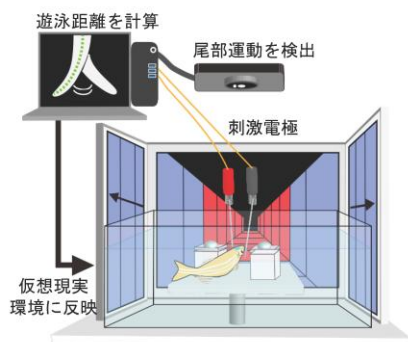
本研究では、ゼブラフィッシュを用いた仮想現実(VR)環境とカルシウムイメージング技術<sup>注3)</sup>を組み合わせ、行動中の小脳の神経活動を解析しました。その結果、小脳神経回路が「危険」と「安全」を表す内部モデル<sup>注4)</sup>を形成し、それをもとに回避行動を制御していることを明らかにしました。

さらに、環境のルール(色と危険・安全の対応)を変更すると、神経活動も柔軟に変化し、新しいルールに適応することが分かりました。

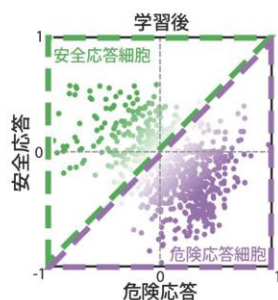
本研究により、小脳が運動制御に加えて、価値判断や意思決定に関わる重要な役割を担うことが示され、精神・神経疾患の理解や治療への応用が期待されます。

本研究成果は、2026年5月30日午前3時(日本時間)付で米国科学雑誌『Science Advances』に掲載されます。

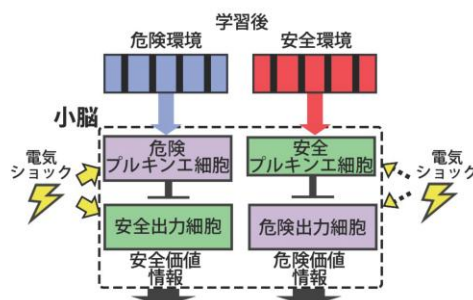
## 小脳が「危険」と「安全」を表す内部モデルを作る!



**仮想現実 (VR) 能動的回避学習**  
危険と安全のルールを学習



**小脳に危険・安全細胞が形成**  
学習によって危険・安全細胞が形成される



**能動的回避を支える小脳の内部モデル**  
環境変化に応じて内部モデルを更新

### 【研究背景と内容】

#### ◆研究背景

小脳は、運動の正確さやタイミングを調整する脳領域として知られていますが、近年では、恐怖や報酬に基づく学習など、情動や意思決定に関わる機能にも重要な役割を果たすことが示唆されています。実際、小脳の異常は、自閉スペクトラム症や不安障害などの精神疾患とも関連することが報告されています。

小脳は脊椎動物に共通して保存された神経回路構造を持ち(図1)、顆粒細胞、プルキンエ細胞<sup>注5)</sup>、出力神経細胞<sup>注6)</sup>などから構成されます。これらの神経細胞は、感覚情報や運動情報、さらには誤差信号(予測と結果のずれ)を統合し、「内部モデル」と呼ばれる脳内表現を形成することで、行動を適切に制御すると考えられています。

しかし、小脳が「危険」や「安全」といった価値情報をどのように表現し、それに基づいて行動を制御しているのかについては、これまでほとんど分かっていませんでした。

#### ◆研究内容

本研究では、ゼブラフィッシュを用い、仮想現実(VR)環境下での回避学習課題とカルシウムイメージングを組み合わせることで、小脳神経回路の活動を解析しました。

この課題では、魚は色(青または赤)によって示される環境の中で行動し、「危険」を示す色環境から「安全」を示す色環境へ移動することで電気刺激を回避することを学習します(図2)。このVR能動的回避学習が、小脳に依存していることが分かりました。

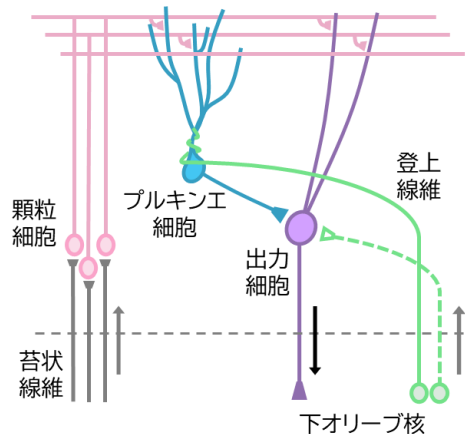


図1 小脳神経回路の模式図

詳細な解析の結果、以下のことが明らかになりました:

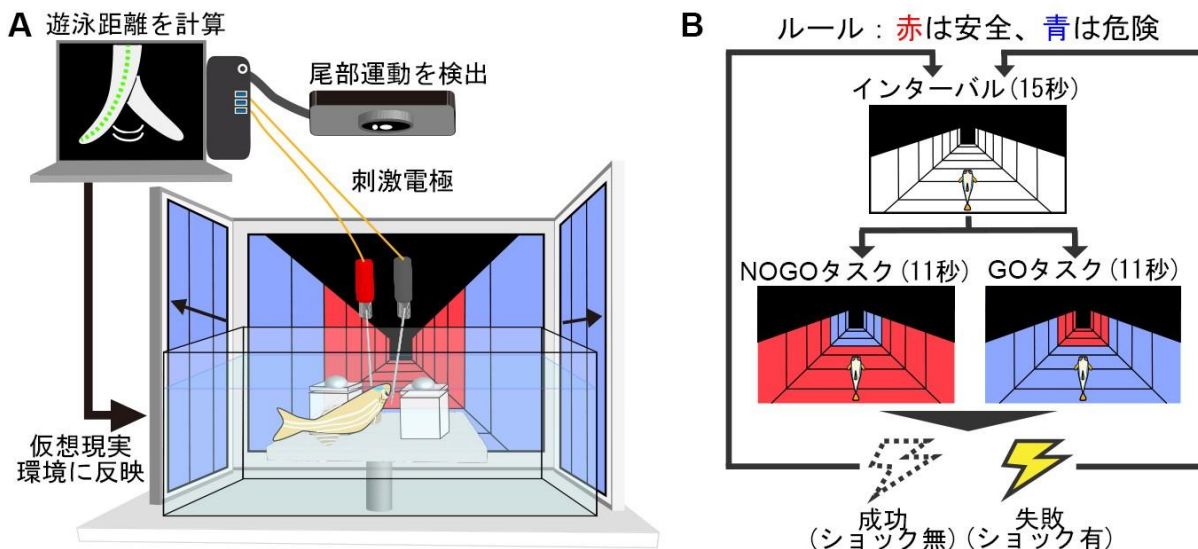


図2 仮想現実(VR)を用いた能動的回避学習課題  
(A) 頭部固定したゼブラフィッシュを用いた仮想現実(VR)実験系の模式図。(B) GO/NOGO 課題の模式図。NOGO 課題では安全(赤)領域から 10 秒以内に出た場合、GO 課題では危険(青)領域から 10 秒以内に安全(赤)領域へ移動できなかった場合、1 秒間の電気刺激を与えた。電気刺激ありを失敗、なしを成功とした。

① 小脳に「危険」と「安全」に応答する神経細胞群が存在

小脳の出力神経細胞およびプルキンエ細胞において、危険を示す色環境で活動が上昇する「危険応答細胞」と、安全を示す色環境で活動が上昇する「安全応答細胞」が形成されることが分かりました。これは、小脳が価値情報を区別して表現していることを直接示す結果です(図3)。

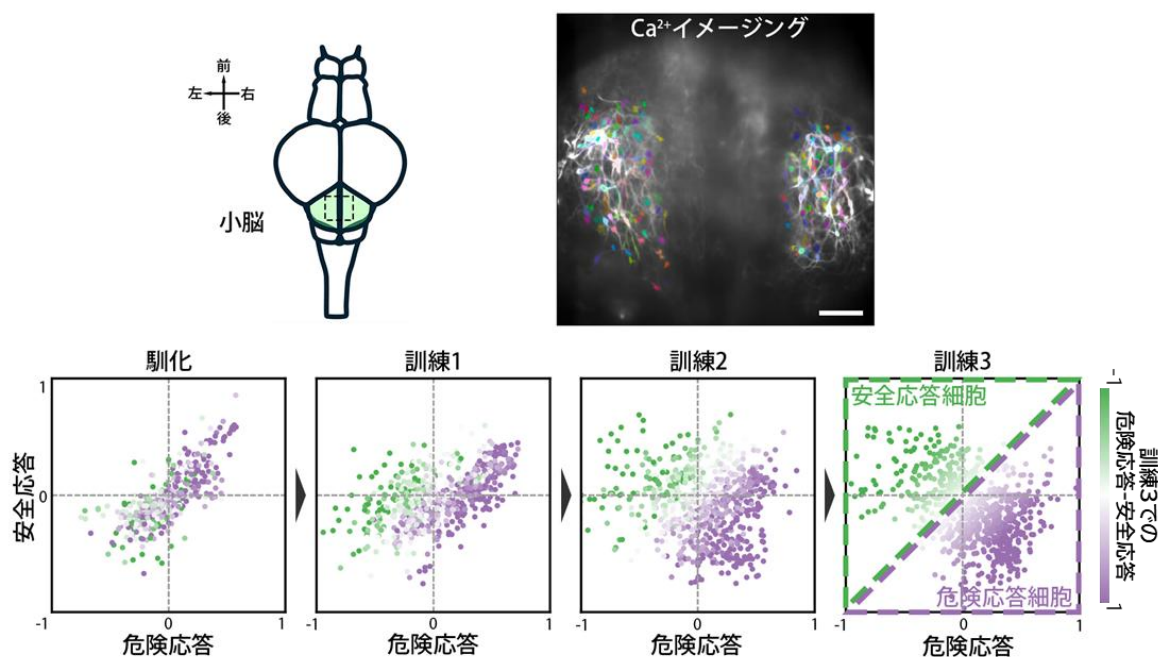


図3 学習により安全・危険に応答する出力神経細胞が出現する  
各点は1つの出力神経細胞を示す。神経活動を解析し、それぞれの細胞が危険または安全を示す色のどちらに強く応答するかを評価した。学習が進むと、危険に応答する細胞と安全に応答する細胞が分かれて出現した。同様の応答特性は、プルキンエ細胞においても認められた。

## ② 学習により神経活動が特異化する

学習前には特定の応答を示さなかった神経細胞が、学習の進行に伴い、危険または安全に特異的に応答するように変化しました。この結果は、小脳が経験に応じて価値情報を表現することを示しています。

## ③ 価値情報は小脳内で構造的に配置される

危険応答細胞と安全応答細胞は、小脳内で内側と外側に偏った分布を示しました。これは、価値情報が無秩序ではなく、構造的に配置されていることを示唆します(図4)。

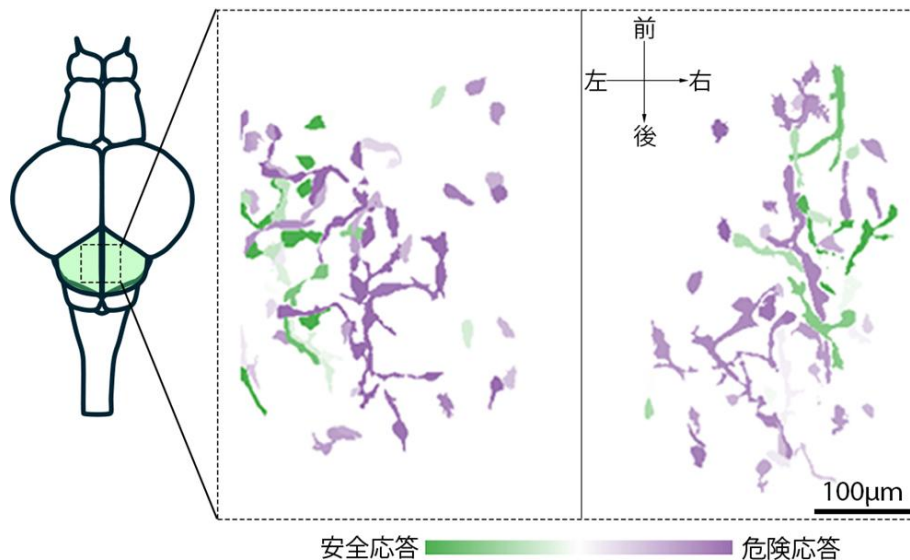


図4 小脳内における安全・危険応答神経細胞の空間配置

危険応答細胞と安全応答細胞は、小脳内で異なる空間分布を示した。危険応答細胞は内側、安全応答細胞は外側に偏る傾向が認められ、小脳内で価値情報が構造的に配置されている可能性が示された。

## ④ ルール変更に応じて神経回路が再編成される

危険と安全の対応関係を逆転させると、これまで危険に反応していた神経細胞が新たな危険を示す色環境に反応するようになり、安全応答細胞も同様に再編成されました。これは、小脳が固定的な反応ではなく、環境に応じて価値情報の対応関係を更新する能力を持つことを示しています(図5)。

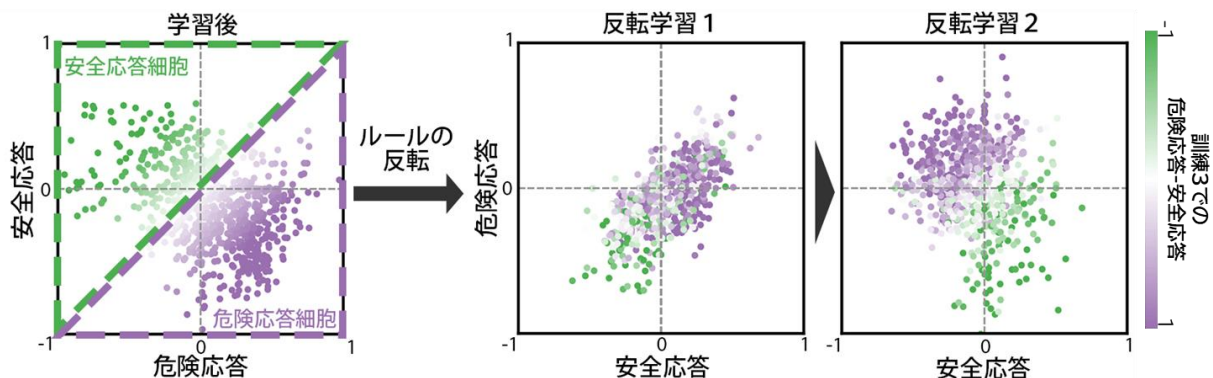


図5 ルール変更に伴う神経応答の再編成

各点は1つの神経細胞を示す。危険と安全を示す色の対応関係を逆転させると、危険応答細胞は新たな危険を示す色に、安全応答細胞は新たな安全を示す色に反応するよう変化した。これは、小脳神経回路が環境変化に応じて柔軟に更新されることを示している。

## ⑤ 誤差信号が学習の更新に必須である

光遺伝学的手法<sup>注7)</sup>により、プルキンエ細胞へ伝達される誤差信号入力を遮断すると、ルール変更への適応が著しく低下しました。この結果は、小脳が誤差信号を利用して学習内容を更新する中枢であることを示しています。

### 【成果の意義】

本研究は、小脳が「危険」と「安全」といった価値情報を神経回路として表現し、それに基づいて行動を制御する仕組みを明らかにしたものです。これまで小脳は主に運動制御や運動学習に関与する脳領域と考えられてきましたが、本研究により、小脳が情動や意思決定に関わる情報処理にも重要な役割を担うことが明確に示されました。

特に、本研究では、小脳内に危険と安全に応答する神経細胞群が形成され、それらが空間的に配置されること、さらに環境の変化に応じてその活動が柔軟に再編成されることを示しました。これは、小脳が外界の状況に応じた「内部モデル」を形成し、それを柔軟に更新しながら行動制御に関与していることを示す重要な成果です(図6)。

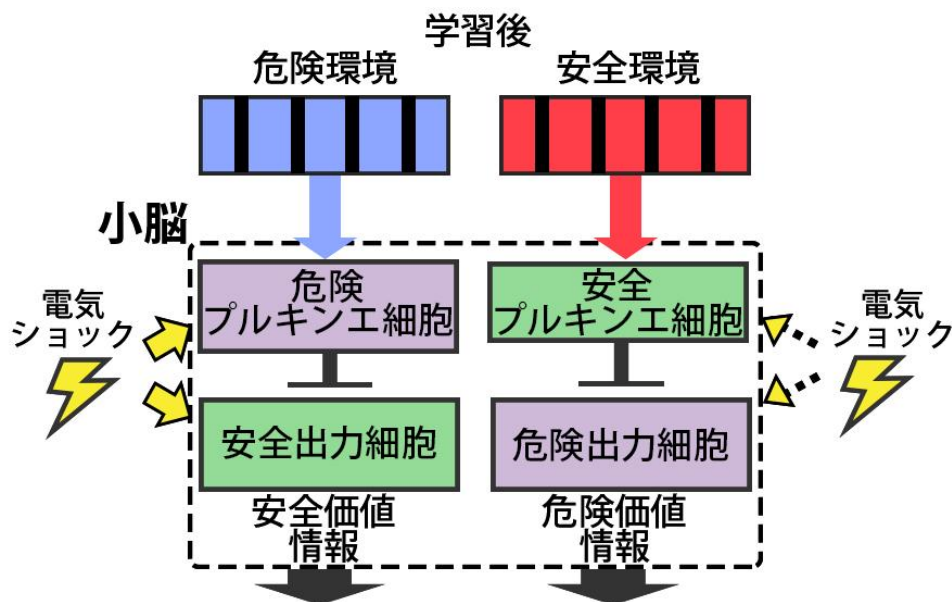


図6 能動的回避学習を支える小脳の内部モデル

小脳は、「危険」と「安全」に関する内部モデルを形成し、それをもとに行動を制御していると考えられる。さらに、誤差信号を利用して内部モデルを更新することで、環境変化への適応を支えている。

また、脳がどのように「価値(valence)」を表現し、それに基づいて行動を選択するのは、神経科学における重要な課題の一つです。これまでこのような機能は主に大脳皮質や扁桃体などで担われると考えられてきましたが、本研究は小脳もまたこのような価値情報処理に深く関与していることを示しており、脳全体における機能分担の理解を大きく進展させるものです。

さらに、小脳の機能異常は、自閉スペクトラム症や不安障害、PTSDなどの精神・神経疾患との関連が指摘されています。本研究で明らかになった、小脳における価値情報の表現や学習更新の仕組みは、これらの疾患における症状の理解や、新たな治療標的の探索にもつながる可能性があります。

加えて、本研究で用いたゼブラフィッシュの仮想現実系と神経活動解析手法は、行動と脳活動の関係を高精度に解析できる強力な実験系であり、今後、意思決定や学習の神経基盤の解明に広く応用されることが期待されます。

本研究は、2022 および 2025 年度から始まった日本学術振興会 基盤研究(B) JP23K23894、JP25K02283、2023 年度から始まった基盤研究(C) JP23K05845、2023 年度から始まった学術変革領域研究(A) JP23H04976、2023 年度から始まった特別研究員奨励費 JP22KJ1601、2017 年度から始まった国立研究開発法人 科学技術振興機構 CREST [オプトバイオ]光の特性を活用した生命機能の時空間制御技術の開発と応用、の支援のもとで行われたものです。

## 【用語説明】

### 注 1)小脳とその神経回路:

小脳は脳の後方に位置する構造で、運動の正確さやタイミングの調整に重要な役割を果たす。近年では、学習や意思決定、感情に関わる情報処理にも関与することが明らかになってきている。小脳は主に、顆粒細胞、プルキンエ細胞、出力神経細胞などから構成される。顆粒細胞は外部からの感覚・運動情報を受け取り、プルキンエ細胞へ伝える。プルキンエ細胞はこれらの情報と誤差信号を統合し、小脳の出力を制御する中心的な神経細胞である。出力神経細胞は、小脳で処理された情報を他の脳領域へ伝え、行動の制御に関与する。本研究では、この小脳神経回路が「危険」や「安全」といった価値情報を表現し、それに基づいて行動を制御することを示した。

### 注2)価値(バレンス, valence):

刺激や状況が「好ましい(安全)」か「好ましくない(危険)」かといった意味的な価値のこと。脳はこの価値情報をもとに行動を選択する。本研究では、小脳内に危険と安全をそれぞれ表現する神経細胞群が存在することが明らかになった。

### 注3)カルシウムイメージング:

神経細胞の活動に伴って細胞内のカルシウム濃度が変化することを利用し、神経活動を光で可視化する技術。本研究では、行動中のゼブラフィッシュの小脳神経細胞の活動をリアルタイムで観察するために用いた。

### 注4)内部モデル:

脳内に形成される、外界の状態や行動に関連する情報を脳内で表現する仕組み。運動制御では、感覚情報や運動情報を統合して適切な行動を導くために用いられると考えられている。本研究では、小脳が「危険」や「安全」を表現する内部モデルを形成し、それに基づいて回避行動を制御していることを示した。

### 注5)プルキンエ細胞:

小脳に特有の大型の神経細胞で、小脳皮質の唯一の出力を担う重要な細胞。多くの入力を統合し、その結果を出力神経細胞に伝えることで、小脳の情報処理を制御する。本研究では、プルキンエ細胞が「危険」と「安全」に関する情報を学習によって表現し、行動の更新に重要な役割を果たすことが示された。

### 注6)小脳出力神経細胞(広樹状突起細胞/eurydendroid cells):

小脳で処理された情報を脳の他の領域へ伝える神経細胞。哺乳類では深部小脳核に相当し、ゼブラフィッシュでは広樹状突起細胞と呼ばれる。本研究では、これらの細胞が「危険」と「安全」の情報を表現し、その情報が行動制御に利用されることが明らかになった。

### 注 7)光遺伝学(オプトジェネティクス):

光に応答するタンパク質を神経細胞に発現させ、光を照射することで神経活動を制

御する技術。本研究では、小脳への入力を一時的に抑制することで、学習の更新における役割を検証した。

## 【論文情報】

雑誌名: Science Advances

論文タイトル: The cerebellum implements structured representation of valence to support adaptive behavior control

著者: Wataru Koyama (名古屋大学、現カリフォルニア大学サンディエゴ校), Yuki Tanimoto (理化学研究所), Tanvir Islam (理化学研究所), Makio Torigoe (理化学研究所), Takashi Shimizu (名古屋大学), Takashi Kawashima (ワイツマン科学研究所), Hitoshi Okamoto (理化学研究所), Masahiko Hibi (名古屋大学)

DOI: 10.1126/sciadv.aeb5860

URL: <http://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aeb5860>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。  
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

