

報道関係者各位

【発表日】2026年7月7日

【発表機関名】徳島文理大学

神経を持たない単細胞生物の行動を支える「なめらかな電気信号」 を数式で再現

— 19世紀から研究されてきたゾウリムシの膜応答を定量モデルで説明 —

徳島文理大学神経科学研究所の富永貴志教授、富永洋子研究員らの研究グループは、単細胞生物ゾウリムシ (*Paramecium multimicronucleatum*) の行動の基盤となる電気信号を、実験と数理モデルを組み合わせて定量的に再現しました。

私たち人間や動物では、行動を支える電気信号は神経細胞で生じます。そのしくみを数式で表す研究は、イカの神経活動の研究でノーベル賞につながった Hodgkin-Huxley 型の理論として知られています。一方、ゾウリムシのような単細胞生物は、進化的に大きく異なる道をたどり、神経系を持たないにもかかわらず、細胞膜の電位変化を使って繊毛の動きを変え、泳ぐ向きや動き方を調節しており、「泳ぐ神経細胞」とも呼ばれます。本研究は、こうした進化的に大きく異なる生物でも、行動を支える電気信号を定量的に記述できることを示しました。

特に本研究では、刺激の強さに応じてなめらかに変化する膜電位応答（論文では **graded membrane responses** と表現）に注目しました。これは、スイッチのオン・オフのように決まった大きさで起こる応答ではなく、入力の高さに応じて応答の大きさや波形が連続的に変わるものです。ゾウリムシのように、1つの細胞がそのまま感覚と運動の両方を担う生物では、このような連続的な電気応答が、行動を細かく調節するうえで重要と考えられます。

本研究の背景には、富永貴志教授が、ゾウリムシの電氣的信号の研究で重要な足跡を残した故・内藤豊教授、故・リチャード・アレン教授とともに、主としてハワイ大学で長年積み重ねてきた研究があります。本研究は、その流れを受けて、ゾウリムシの膜応答を定量的に再構成したものです。

本研究成果は、国際的な生理学専門誌 **Journal of General Physiology (JGP)** に掲載（2026年7月7日）されました。

【本研究のポイント】

1. 神経系を持たない単細胞生物であるゾウリムシの行動を支える連続的でなめらかな電気応答を、数理モデルで再構成しました。
2. 19世紀末から20世紀初頭の古典的な観察 (Mendelssohn, Jennings) に遡り、1960年代からの電気生理学的な研究で脚光を浴びたゾウリムシの膜応答について、長年重要とされてきた定量的再構成の課題に取り組みました。
3. 静止時リーク成分、脱分極で活性化される成分、過分極で活性化される成分、一過性の Ca^{2+} 電流を統合することで、実験で観察された膜電位応答の主要な特徴を再現しました。

4. Ca^{2+} 電流の不活性化過程の定式化にあたり、特有のカルシウムによる不活性化を反映する数理モデルを作成しました。

【研究の背景】

ゾウリムシは、19世紀の顕微鏡観察の時代から、生物がどのように環境に応じて動くのかを考えるうえで注目されてきた単細胞生物です。さらに1960年代以降には、細胞膜の電位変化と行動の関係を調べる電気生理学的研究が進み、ゾウリムシは細胞の興奮性を研究する古典的なモデル生物となりました。

ゾウリムシでは、細胞膜の電位変化が繊毛の動きに直結し、そのまま遊泳行動の変化につながります。しかし、その膜電位応答は1種類の電流だけで決まるわけではなく、複数のイオン電流成分が時間的にも電位的にも重なり合って全体の波形を作っています。このため、「どの成分が、どのように重なって、実際の連続的な膜応答を作っているのか」を定量的に説明することは、長い間重要な課題でありながら容易ではありませんでした。

【研究内容】

このような解析では、特定の電流を阻害する薬理的な手法を用いることが一般的ですが、ゾウリムシは進化的に他の生物とは異なるため、同じ薬が同じように作用するか不明です。そこで、研究班は独自の電圧固定プロトコルを駆使してこれらの電流の分離に成功しました。

その結果、静止時に流れるリーク成分と、脱分極で活性化される成分、過分極で活性化される成分という主要な遅い電流成分を定量化しました。さらに、その枠組みを使って、一過性の内向き Ca^{2+} 電流を切り分け、活性化、不活性化、回復の性質を調べました。

さらに、 Ca^{2+} 電流の特別な不活性化（一旦生じた電流が減衰する仕組み）を、 Ca^{2+} 濃度に応じた不活性化として定式化し、それらを1つの膜方程式に統合しました。すると、電流注入実験で実際に観察された連続的な膜電位応答の特徴を、コンピュータ上で再現することができました。

【この研究の意味】

この研究の意義は、単細胞生物の電気応答を「測った」だけでなく、その応答がどのような成分の組み合わせでできているのかを、予測できる形で表したことにあります。つまり、神経系を持たない生物でも、行動の基盤となる電気信号を数理的に記述できることを示した点に意味があります。

また本研究は、ヒトのようなオン・オフの活動電位で情報をやり取りする神経系を持つ生物と進化的に大きく異なる単細胞生物での行動を制御する電気信号の数理的な再構築を行った点で重要です。これは、神経回路を持たない生物が、どのように環境に応じた行動を作り出しているのかを理解するうえで、新しい定量的な手がかりを与えるものです。

今後は、この枠組みをさらに発展させて、長い進化の過程を経て、一つの細胞だけで環境に適合した行動をとれる生物の行動決定の仕組みをより深く理解するとともに、マイクロロボットやAIとは異なる情報処理装置として模倣する研究につなげていくことも期待されます。

【論文情報】

- ・ 雑誌名 : Journal of General Physiology
- ・ 論文名 : Kinetic reconstruction of graded membrane excitability in Paramecium
- ・ 著者 : Takashi Tominaga, Yoko Tominaga
- ・ DOI : 10.1085/jgp.202613977

【図の説明文】

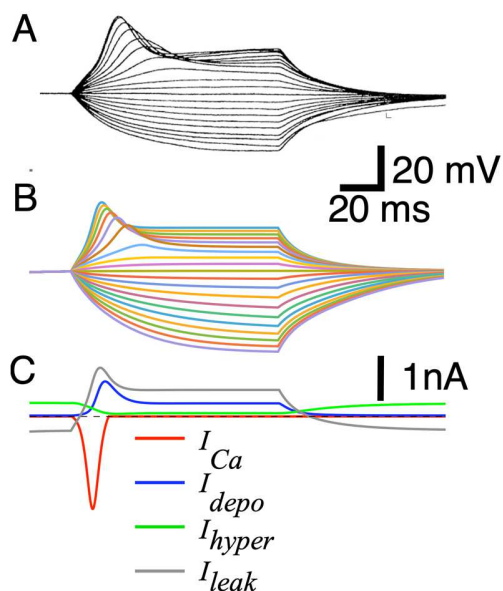


図 ゾウリムシの膜電位応答の再構成

Aは実験で記録した膜電位応答、Bは本研究のモデルで再現した応答。Cの複数の膜電流成分を統合することで、連続的な膜応答の主要な特徴を説明できることを示した。

【お問い合わせ先】

(研究内容に関するお問い合わせ)

徳島文理大学 神経科学研究所・香川薬学部

教授 富永 貴志

Email: tominagat@kph.bunri-u.ac.jp

TEL: 087-899-7469

