

「好き」の進化を生み出す脳のしくみ ～求愛歌のリズムに対する好みの種差を支える神経基盤を発見～

【本研究のポイント】

- ・ショウジョウバエのリズムに対する好みが種間で分化していることを発見した。
- ・好みの種間差の神経機構を探るために AMMC-B1 神経細胞群^{注1)}に着目した。
- ・AMMC-B1 のリズムに対する応答の強さが種間で異なることを発見した。
- ・今回確立した手法により、さまざまな神経細胞を種間比較することが可能になった。

【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科の上川内 あづさ教授、石川 由希 講師、大橋 拓朗 大学院生らの研究グループは、ショウジョウバエの求愛歌のリズムに対する好みの進化が、どのような脳内メカニズムによって起こるのかを新たに解明しました。

求愛歌は、さまざまな動物で同種のパートナーを識別するために利用され、同種と正しく交配するためには、歌の好み^{注2)}が種間で分化していることが重要です。

本研究では、ハエのリズムへの好み^{注2)}が種間で異なることを見出しました。また、脳内の特定の神経細胞^{注2)}のリズムに対する応答の強さも種間で異なっていました。さらに、数理モデリングを組み合わせることで、神経応答の種間差を説明する情報処理機構を新たに提案しました。

また、このツールを近縁種^{注3)}に導入することで、聴覚神経回路の詳細な種間比較を世界で初めて行いました。今回確立した手法により、動物の聴覚の脳内メカニズムがどのように進化してきたのか、全貌の解明に大きく貢献することが期待されます。

本研究成果は、2023年1月8日付国際科学雑誌「Scientific Reports」に掲載されました。

【研究背景と内容】

夏になると聞こえてくるセミの声は「ミンミン」や「オーシーツクツク」など、種ごとに異なります。このように動物はそれぞれ種に固有な音を用い、また同種と異種の音を識別することでコミュニケーションを成立させています。音を識別するための情報処理は脳内で行われています。近縁種が異なる音を用いるということは、その音を識別するための脳内の情報処理もまた、種間で分化しているはずですが、ではこの情報処理の進化はいったいどのように起こるのでしょうか？私たちは、特にさまざまな種の音の聞き分けに重要である音のリズムに着目して研究を行いました。

私たちは、キイロショウジョウバエと近縁種のオナジショウジョウバエ(以下「近縁種」と表記)に着目しました。2種のオスは、メスに求愛する際に羽を振動させて「求愛歌」と呼ばれる音を発します。一方メスは、オスの求愛歌によって交尾を受け入れます。この求愛歌の“リズム”(パルス音のパルス間隔)は種ごとに異なり、近縁種はキイロショウジョウバエよりも遅いリズムの音を発します(図1)。交尾受け入れに対する求愛歌の効果が、異種よりも同種で高いことから、メスは同種と異種の求愛歌を識別する能力を持っていると考えられます。これまで、キイロショウジョウバエにおいて「同種の求愛歌を認識する神経回路」が調べられてきましたが、これが近縁種とどのように異なるのか、調べられていませんでした。

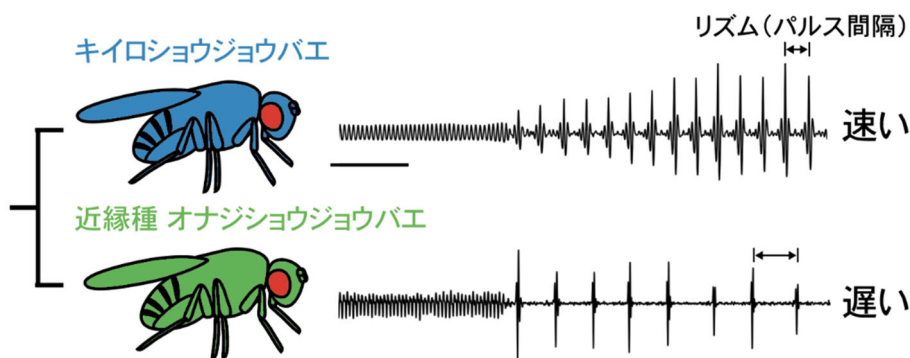


図1 ショウジョウバエの求愛歌のリズムは種間で異なる。

はじめに、メスのリズムに対する好みは種間で異なるのかを調べるため、2種のメスに様々なリズムの音を聞かせて、どの音でメスが求愛を受け入れるのかを調べました。すると2種のメスは、それぞれ同種のリズムをきいたときに、最もよく求愛を受け入れました。つまり近縁種の「同種の求愛歌を認識する神経回路」では、キイロショウジョウバエよりも遅いリズムが認識されると期待されます。

では「同種の求愛歌を認識する神経回路」は種間で異なるのでしょうか？本研究では、この神経回路のうち、求愛歌を最初に受容する聴感覚神経細胞であるJO神経細胞群^{注4)}と、JO神経細胞群から情報を受け取るAMMC-B1神経細胞群に着目しました。

まず、JO神経細胞群とAMMC-B1神経細胞群の形態や神経伝達物質^{注5)}を比較すると、これらの特徴は種間でよく似ていました。このことから、これらの神経細胞群で構成される神経回路の基本的な構造は、種間で保存されていることが分かりました。

次に、様々なリズムの音に対するAMMC-B1神経細胞群の神経応答を「カルシウムイ

メーキング^{注6)}」で観察し、種間で比較しました。キイロショウジョウバエの AMMC-B1 神経細胞群は、25 ミリ秒間隔までは、リズムが速ければ速いほどよく応答する一方、25 ミリ秒以下の速すぎるリズムでは、応答が抑制される性質を持っていました。近縁種の AMMC-B1 神経細胞群もよく似た性質を示しましたが、その抑制される度合いは、キイロショウジョウバエよりも強いことがわかりました。このことは、AMMC-B1 神経細胞群までのリズムの情報処理が種間で異なることを示しています。

AMMC-B1 神経細胞群の神経応答の種間差が、どのような情報処理の違いによるものなのか推測するため、「階層ベイズモデル^{注7)}」を用いてモデリングを行いました。AMMC-B1 神経細胞群には、それぞれ神経応答を促進／抑制させる入力が入っています。この回路構造を考慮したモデリングを行った結果、速すぎるリズムの音を聞いたときに AMMC-B1 神経細胞群の応答を抑制する入力、近縁種でキイロショウジョウバエよりも強く働いている可能性が示されました(図2)。求愛歌を識別する情報処理の進化は、その情報処理を担う神経回路における、促進と抑制のバランスを変化させることによって実現したのかもしれない。

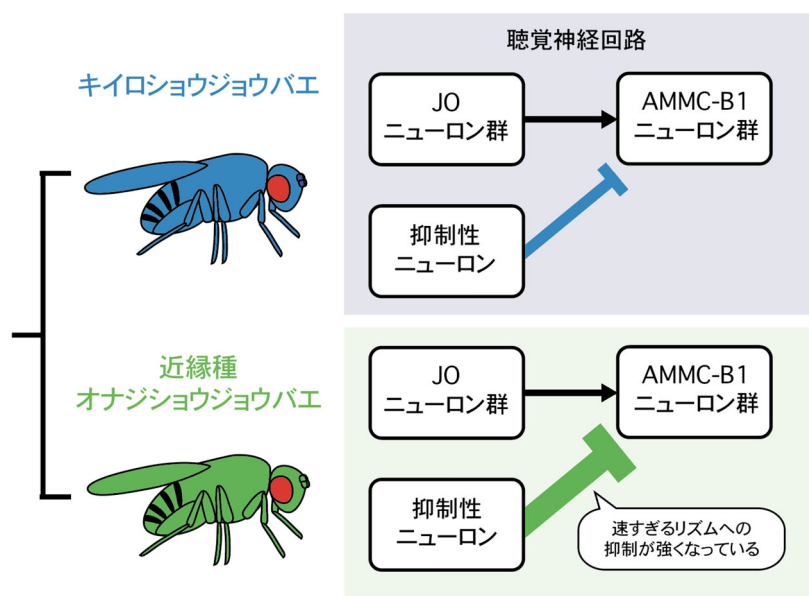


図2 ショウジョウバエの同種の求愛歌を認識する神経回路。
近縁種では抑制性ニューロンからの速すぎるリズムへの抑制が強くなっている。

【成果の意義】

本研究は、世界で初めて、同種の音のリズムを聞き分ける仕組みの進化がどのように起こっているのかを明らかにしました。これまで、音の周波数(音の高さや低さ)を認識する仕組みについては研究が進んでおり、哺乳類や鳥類、昆虫の聴覚器(耳)が同種の周波数に最適化していることがわかっていました。一方、リズムのような複雑な特徴を識別するには、聴覚器だけでなく神経回路を使った情報処理が必要です。しかし、リズムを聞き分ける仕組みの種間比較には、聴覚器よりも精密なアプローチが必要なため、これまで研究が進んできませんでした。本研究では、遺伝子操作技術や神経回路の知見が豊富なキイロショウジョウバエに着目し、これらの技術や知見を近縁種に導入することで、神経回路

の詳細な種間比較を世界で初めて実現しました。その結果、神経回路におけるリズムの情報処理が、種間で異なることを示しました。さらに、数理モデリングを用いて、この種差の背景に、神経回路における促進と抑制のバランスの変化がある可能性を示しました。

キイロショウジョウバエは、脳が小さく調べやすい上に、発達した分子遺伝学的手法^{注 8)}により、特定の神経細胞の神経活動の観察や操作が可能です。そのため、様々な行動の神経機構に関する知見が蓄積されています。近年、これらの手法や知見を近縁種に転用することで、動物の脳内の情報処理がどのように進化してきたのか研究され始めています。本研究では、近縁種の神経細胞で、遺伝子発現を制御するツールを新たに確立することで、神経回路の種間比較を実現しました。さらに、近年注目を集めている統計モデリング手法「階層ベイズモデル」を用いることで、神経応答の種間差が、どのような情報処理の違いによってもたらされたのかを推定する手法を、世界で初めて確立しました。今後、キイロショウジョウバエと近縁種において、分子遺伝学的手法と統計モデリングを駆使することにより、動物が複雑な音の特徴の情報処理をどのように進化させてきたのか、その全体像が解明されると期待されます。

本研究は、2018-2020 年度まで行われた基盤研究(B)(JP18H02488)、2020 年度から始まった基盤研究(B) (JP20H03355)、ならびに 2022 年度から始まった科学技術振興機構『創発的研究支援事業』(JPMJFR2147)の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1)AMMC-B1 神経細胞群:

ショウジョウバエの脳内にある音の情報処理に関わる神経細胞。

注 2)神経細胞:

動物の脳や神経系を構成する特殊な細胞。ニューロンとも言う。

注 3)近縁種:

進化の過程で、最近分岐した種。

注 4)JO 神経細胞群:

昆虫の触角内部にある、音、重力変化、風向きなどの検知を担う感覚神経細胞。

注 5)神経伝達物質:

神経細胞から神経細胞へ情報を伝達する物質。細胞間で形成される接合部位(シナプス)で放出される。受容した細胞の活動を抑制する神経伝達物質を抑制性神経伝達物質という。

注 6)カルシウムイメージング:

神経細胞の神経活動を観察する方法。神経細胞が活動する時には細胞内部カルシウム

イオンの急激な濃度上昇が起こる。この濃度上昇を、カルシウムイオンに結合すると蛍光を発するカルシウムセンサータンパク質を用いて、蛍光強度の増加として観察する。

注 7)階層ベイズモデル:

ベイズ統計モデリング手法の一種。ベイズ統計モデリングでは、あらかじめ設定した事前分布とデータをもとに求めたいパラメータの確率分布(事後分布)を推定する。マルコフ連鎖モンテカルロ法の発達により、事後分布の推定が容易になり、強力なモデリング手法のひとつとなった。階層ベイズモデルは、このベイズ統計モデルを複数の階層で記述する。本研究では、個体内・個体間の 2 つの階層で記述することで、個体間のばらつきも加味したモデリングを行った。

注 8)分子遺伝学的手法:

分子遺伝学を利用して遺伝子発現を操作する手法。ショウジョウバエでは、特定の細胞群における遺伝子発現や神経活動を人為的に操作することができる。

【論文情報】

雑誌名:Scientific Reports

論文タイトル:Evolutionary conservation and diversification of auditory neural circuits that process courtship songs in *Drosophila*

著者:Takuro S. Ohashi, Yuki Ishikawa, Takeshi Awasaki, Matthew P. Su, Yusuke Yoneyama, Nao Morimoto and Azusa Kamikouchi

(本学関係者は下線)

DOI: 10.1038/s41598-022-27349-7

URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-27349-7>