配信先：文部科学記者会、科学記者会、共同通信 PR ワイヤー

２０２６年１１月１１日

東京都公立大学法人　東京都立大学

# ベイツ型擬態がみせる多様な状態の創出条件を理論的に解明

## ―正確な擬態・不完全な擬態・種内多型―

## 1. ポイント

- 毒を持たない無毒種が有毒種に姿を似せて身を守るベイツ型擬態には、有毒種にそっくりな「正確な擬態」、擬態が中途半端な「不完全な擬態」、同じ種の中に異なる姿が共存する「種内多型」など、多様な状態があります。
- 本研究は、有毒種がその環境にどれだけ棲めるか（環境収容力）の違いが、無毒種がみせる多様な状態を導くことを、数理モデルを用いて明らかにしました。
- 有毒種の環境収容力が大きくなるにつれ、無毒種の姿は擬態しない状態から、種内多型、正確な擬態、不完全な擬態へと移り変わることがわかりました。

## 2. 概要

ベイツ型擬態とは、毒を持たない生物（無毒種）が、毒や不快な味を持つ生物（有毒種）に姿や形を似せて捕食者から身を守る戦略です。ダーウィンの時代から 150 年以上研究されてきた、進化生物学の代表的なテーマの一つでもあります。無毒種は有毒種に似ているほど捕食者に襲われにくくなるため、一見すると、似れば似るほど生存に有利になり、擬態はつねに完璧へと近づいていくように思われます。しかし実際には、全ての無毒種が完璧な擬態をしているわけではありません。不完全なまま保たれている擬態もあれば、同じ集団の中に、擬態する個体としない個体が共存していることさえあります。無毒種の姿は、なぜこれほど多様なのでしょうか。




図 1 ベイツ型擬態において擬態種がみせる多様な状態のイメージ（イラスト：酒井理志、横田陽）。

東京都立大学大学院理学研究科の冨塚暖史大学院生と立木佑弥准教授は、無毒種の姿がどのように進化するかを調べる新たな数理モデルを構築しました。その結果、有毒種がその環境にどれだけ多く棲めるか、すなわち環境が支えられる有毒種の数の上限（環境収容力）が、無毒種の姿の進化を決定する鍵であることが明らかになりました。有毒種がわずかしか棲めない環境では、無毒種の擬態は進化しませんでした。しかし、有毒種の環境収容力が大きくなるにつれて、無毒種にとって最適な姿は変化していきました。まず、よく似た個体とあまり似ない個体が共存する「種内多型」が現れ、環境収容力がさらに大きくなると、有毒種にそっくりな「正確な擬態」へと進化しました。そして環境収容力が非常に大きくなると、今度は逆に、「不完全な擬態」となりました。

さらに本研究は、環境収容力に応じて生まれるこの多様な姿が長く保たれるかどうかを左右する、もう一つの条件も見い出しました。それは、有毒種そのものが、自力で数を増やす力（増殖力）をどれだけ持っているかです。無毒種が擬態を獲得すると、その姿をした無害な個体が増え、捕食者はその見た目を危険と見なさなくなります。すると、本物の有毒種までもが以前より多く捕食されるようになります。このとき、有毒種の増殖力が乏しい場合には、増えた捕食に耐えきれずに数を減らし、やがて絶滅してしまいます。有毒種が絶滅すれば、無毒種にとって擬態は意味を失い、いったん進化した擬態も失われてしまうのです。

本研究は、擬態する無毒種だけでなく、擬態される有毒種の集団としての性質に目を向けることで、擬態の多様な状態（正確な擬態・不完全な擬態・種内多型）が生まれ、保たれ、失われる条件を統一的に説明できることを示しました。

本研究成果は 2026 年 11 月 6 日（日本時間）に米国の学術誌 The American Naturalist 誌で電子出版されました。

## 3. 研究の背景

生物にとって、捕食者からの攻撃を避けることは生存に直結する重要な課題です。そのため生物は、様々な捕食回避戦略を進化させてきました。その一つに「ベイツ型擬態」があります。ベイツ型擬態は、毒を持たない、あるいは捕食者にとって食べやすい「無毒種」が、毒や不味さを持つ「有毒種」に姿・形を似せることで、捕食者からの攻撃を避ける戦略です。ベイツ型擬態は、適応進化の代表的な例として、昆虫、魚類、両生類、爬虫類など、多様な分類群で知られています。

ところが、ベイツ型擬態の「できばえ」は種によって様々です。例えば、刺すことのない無害なハナアブの仲間は、ハチによく似た姿で身を守っています。花に集まるハナアブをハチと見間違えることも少なくありませんが、その似せ方の精度には幅があり、ハチと見分けがつかないほどそっくりな「正確な擬態」を持つ種もいれば、一見すると似ているものの、よく見ると細部の異なる「不完全な擬態」にとどまる種も数多く知られています。さらに、同じ種の中で、擬態するタイプとしないタイプが共存する例もあります。日本に棲むシロオビアゲハでは、メスに有毒なベニモンアゲハによく似た「擬態型」と、有毒種に似ていない「非擬態型」の二つのタイプがいることが知られています（種内多型）。このように、ベイツ型擬態は、正確なものから不完全なもの、さらには一つの種の中に複数の姿が共存するものまで、多様な状態を見せます。

無毒種は、有毒種に似ているほど捕食者に襲われにくくなると考えられます。この理屈だけを考えれば、擬態はつねに完璧へと近づき、やがてどの無毒種も有毒種と見分けのつかない「正確な擬態」に行き着くように思われます。しかし現実には、必ずしもそうではありません。不完全なまま留まる擬態や、擬態しない

個体が共存する集団も見られます。では、こうした多様な状態は、いつ、どのような条件のもとで現れるのでしょうか。この問いは、これまで明確には答えられてきませんでした。

## 4. 研究の詳細

本研究では、有毒種と無毒種の個体数の増減と、無毒種の擬態形質の進化を同時に扱う数理モデルを新たに構築しました。このモデルでは、有毒種と無毒種が増殖・死亡・捕食によって増減する過程に加え、無毒種が擬態形質を持つことに伴うコストを組み込みました。こうした擬態形質のコストは実際に知られており、例えばシロオビアゲハでは、擬態型をつくる遺伝子を持つ個体ほど、成虫になるまで生き残りにくいことが報告されています。さらに、捕食者が、目の前の個体がどれだけ有毒種に似ているか（擬態の精度）に基づいて、攻撃するか避けるかを意思決定する過程も取り入れました。この意思決定の数理モデル化には、認知心理学などで用いられる「信号検出理論」を応用しました。信号検出理論は、受け取った信号に基づく判断を数理的に扱う理論で、擬態のように見た目で相手を見分ける状況の記述に適しています。

解析の結果、まず、有毒種がその環境にどれだけ多く棲めるか（環境収容力）が、無毒種の姿の進化を決める鍵であることがわかりました（図2）。具体的には、環境収容力が大きくなるにつれて、無毒種の姿は「擬態しない」→「種内多型（二型）」→「正確な擬態」→「不完全な擬態」の順に移り変わりました。以下、環境収容力の小さいほうから順に見ていきます。

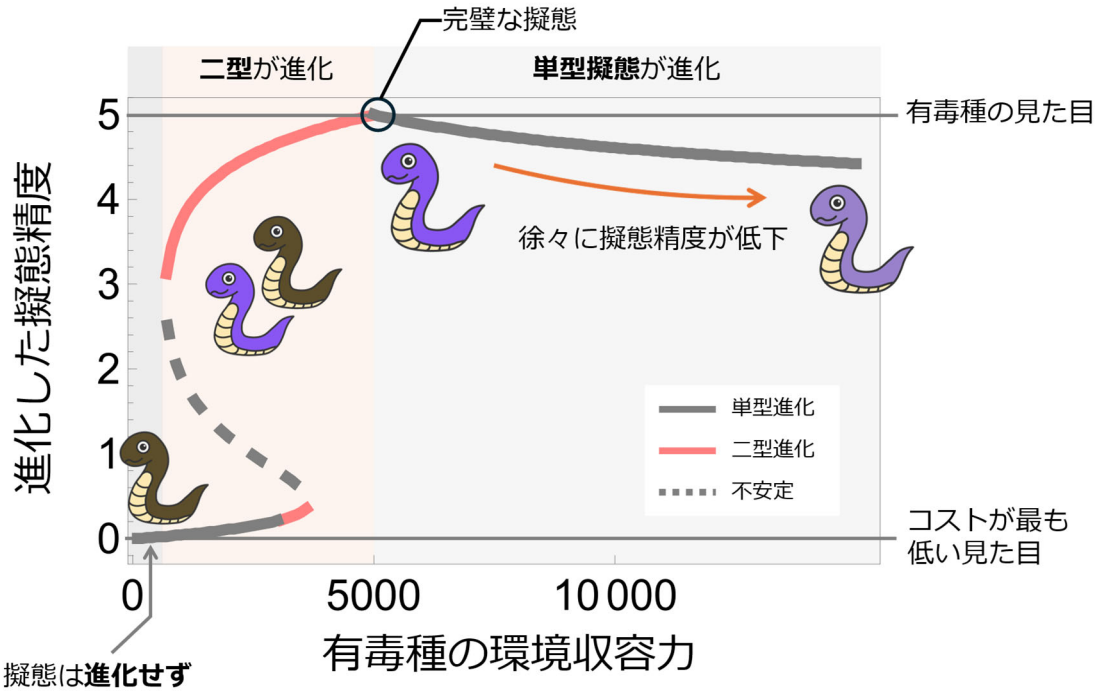



図 2 横軸は有毒種の環境収容力、縦軸は無毒種が進化させた擬態の精度（0 は似せるコストが最も小さい状態、5 は有毒種そっくりの姿）。環境収容力が非常に小さいうちは、擬態は進化しない。中間の範囲（ピンクの背景）では、無毒種の姿は一つにまとまらず二つの型に分かれ（種内多型）、大きい範囲（灰色の背景）では一つの型の擬態（単型擬態）が進化する。単型擬態の領域では、環境収容力が大きくなるほど擬態の精度がゆるやかに低下する。ピンクの実線は集団が二つの型へと分かれる進化的分岐点、灰色の実線は進化が最終的に落ち着く姿を表す。灰色の点線は不安定な擬態精度。

1. 擬態しない

有毒種がごくわずかしか棲めない環境では、そもそも捕食者が有毒種の姿を「危険だ」と学習する機会が少なく、姿を似せても捕食を免れる利益が小さいため、無毒種は有毒種への擬態を進化させませんでした。

2. 種内多型（二型）

環境収容力がある程度大きくなると、無毒種の集団は一つの姿にまとまらず、二つのタイプに分かれます。では、なぜ二つに分かれるのでしょうか。擬態が有利になって多くの無毒種が有毒種に似ていくと、その姿をした無害な個体が増え、本物の有毒種が占める割合が下がります。すると捕食者は、その姿の個体を食べても害がないという経験を重ね、「この姿は食べても平気なことが多い」と学習して、しだいにその姿を避けなくなります。こうして、擬態で得られる利益（捕食を免れる効果）はだんだん小さくなっていくのです。そうなると、もっとも損をするのは、中途半端に似せた個体です。この状況で有利になるのは両極端、すなわち、似せる精度をさらに高めて捕食をより確実に避ける方向と、逆に似せるのをやめて擬態にかかるコストを減らす方向です。その結果、集団は「よく似せるタイプ（擬態型）」と「あまり似せないタイプ（非擬態型）」の二つに分かれます。これが「進化的分岐」と呼ばれる現象です。図2では二つに分かれ始める位置がピンク色の線で示され、擬態精度の時間変化を追った図3では、一つの系統が二つのタイプへ分かれていくようすが見てとれます。最終的には有毒種の見た目にぴったり一致する擬態型とコストが最も小さい非擬態型の二型が共存しました。

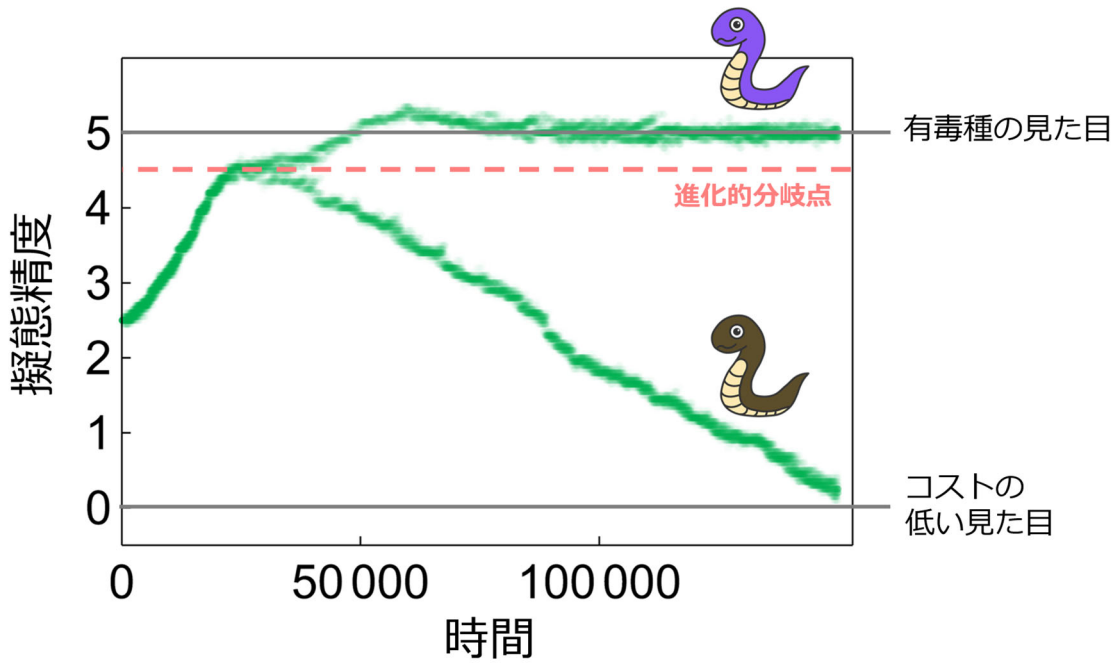



**図 3 無毒種の姿（擬態の精度）の時間変化。はじめは一つだった姿が、ピンクの破線で示した時点（進化的分岐点）で二つの型に分かれ、その後は負の頻度依存選択のもとで、二つの型が長期にわたって共存する。図 2 のピンクの線で何が起きるかを、時間を追って示したものに当たる。**

3. 正確な擬態

さらに環境収容力が大きくなると、事情が変わります。有毒種が十分に多いため、無毒種がこぞって擬態しても、その姿をした個体に占める本物の有毒種の割合は大きくは下がりません。そのため捕食者は、その姿を「危険だ」と学習し続け、避け続けます。二型のときのように擬態の利益が小さくなることがないので、似せるほど

有利という関係が保たれ、集団は二つに分かれる必要がありません。こうして無毒種はそろって有毒種にそっくりな「正確な擬態」へと進化しました。

4.　不完全な擬態

有毒種の環境収容力が非常に大きくなると、今度は逆に、無毒種の姿は有毒種から少し離れた「不完全な擬態」となりました。有毒種が非常に多いと、捕食者の警戒心は高く、多少似ていなくても捕食者はその姿を危険とみなして避けます。そのため、コストをかけて完璧に似せる必要が薄れ、無毒種は似せ方を少しだけゆるめることが最適となりました。

ここまでは、環境収容力によって「無毒種にどのような姿が進化するか」を見てきました。次に、種内多型が生じる場合、その後も二型が長く維持されるのかを調べました。すると、二型が長く保たれるかどうかは、有毒種が自力で数を増やす力（増殖力）によって大きく変わることがわかりました。

増殖力の大きい有毒種では、図3でみたように、分かれた二つのタイプである擬態型と非擬態型は長期にわたって安定に共存します。この共存には、「多いほど損、少ないほど得」というはたらきである負の頻度依存淘汰が関係しています。無毒種の中で擬態型が増えすぎると、捕食者はその姿をした無害な個体に多く出会うようになり、擬態の効果が下がることで、擬態型は生存に不利になります。これによって擬態型が減り、非擬態型が増えると、今度は捕食者が有毒種の姿をした無害な個体に出合いにくくなるため、擬態の効果が高まることで、擬態型は生存に有利になります。このような負の頻度依存淘汰を通して、二つのタイプは共存し続けました。

これに対して、有毒種の増殖力が乏しいときには、二つのタイプが生じても長続きしませんでした（図4）。無毒種が擬態を獲得すると、その姿をした無害な個体が増え、捕食者はその見た目を危険と見なさなくなります。すると、本物の有毒種までもが以前より多く捕食されるようになり、増殖力の乏しい有毒種は、増えた捕食に耐えきれずに数を減らし、やがて絶滅してしまいます。有毒種が絶滅すれば、無毒種にとって擬態は意味を失い、いったん進化した擬態形質も失われてしまいました。図3と図4を比べると、同じように二型が生じても、有毒種の増殖力しだいで、それが保たれるか失われるかが分かれることがわかります。

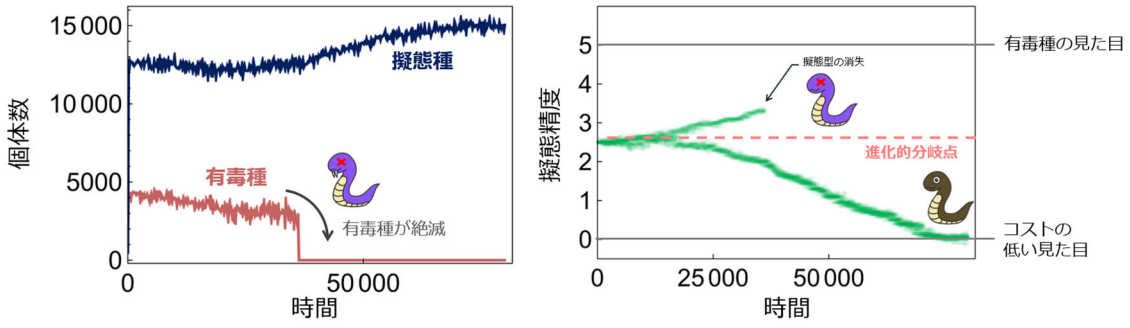



**図 4 有毒種の増殖力が乏しい場合の、個体数の時間変化（左）と無毒種の姿の時間変化（右）。左のパネルでは、赤い線が有毒種、青い線が無毒種の個体数を表す。二つの型はいったん生じるが、擬態する無毒種が増えるにつれて有毒種（赤）は捕食に耐えきれず減少し、やがて絶滅する。手本を失った無毒種では擬態が意味を失い、右のパネルのように姿の多様さも失われる。**

## 5.　研究の意義と波及効果

本研究は、擬態する無毒種だけでなく、擬態される有毒種の集団としての性質に目を向け、数理モデルに

よって理論的に探究しました。その成果として、これまで別々に報告され、その進化的意義が議論されてきたベイツ型擬態の多様な状態（正確な擬態・不完全な擬態・種内多型）について、それらの創出条件や喪失条件を統一的に説明できることを示しました。

本研究成果は、捕食者の意思決定という個体レベルの行動が、個体群動態を介して形質の進化に影響し、多様な形質をもたらしうることを示しました。これは、生物が示す形質の多様性がどのような条件で生まれ、維持され、失われるのかを理解する新たな視点を提供するものであり、行動・生態・進化を横断して、生物の多様化を生み出す仕組みの理解を深めることに貢献すると期待されます。

## 6. 論文情報

掲載誌：The American Naturalist

タイトル：Maintenance and breakdown: how population dynamics determine the evolutionary fate of Batesian mimicry.

著者：Haruto Tomizuka, Yuuya Tachiki

ＤＯＩ：10.1086/743066

ＵＲＬ：https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/743066

## 7. 問合せ先

（研究に関すること）

東京都立大学大学院 理学研究科 准教授 立木佑弥

TEL：042-677-2571　E-mail：tachiki@tmu.ac.jp

（大学に関すること）

東京都公立大学法人

東京都立大学管理部 企画広報課 広報係

TEL：042-677-1806　E-mail: info@jmj.tmu.ac.jp