

PRESS RELEASE (2026/03/27)

育ちが生まれが変わるとき メダカから見た可塑性を介する進化の道すじ

～気候変動下における生物の適応メカニズムの理解に新たな知見～

ポイント

- ① 環境に応じて変化する形質が、進化の過程で新たな形質として遺伝的に固定される現象は知られていたが、その分子メカニズムは未解明だった。
- ② メダカの腸の長さの季節変化と地域差を用いて、エピジェネティックな仕組みが失われ、もともとあった遺伝的変異から有利なものが選ばれる、という過程を初めて分子レベルで示した。
- ③ 気候変動下で生物がどのように新たな環境に適応するのかを理解する上で、エピジェネティクスと進化生物学を結びつける新たな枠組みを提供する。

概要

キリンの首はなぜ長いのか？高い木の葉を食べようと首を伸ばし続けた結果、その形質が子に受け継がれたからだ、と、19世紀の博物学者ラマルクは唱えました。この「獲得形質の遺伝」による環境適応は今でも根強い魅力がありますが、現在では否定されています。しかし生物には、育った環境によって姿や形を変化させる能力があります（表現型可塑性（※1））。最近では、この育ちで獲得した変化が、生まれつき備わっている集団が見つかっており、ラマルクが唱えた「獲得形質の遺伝」を匂わす事例が報告されています。そして、この過程がどのような分子メカニズムで起こるのかは、長年の謎でした。

本研究では、メダカの腸の長さをモデルに、この謎に初めて分子レベルで答えを出しました。

九州大学大学院芸術工学研究院の勝村啓史准教授と、東京大学大学院理学系研究科の太田博樹教授、北里大学医学部解剖学の小川元之教授らの研究グループは、香川県の野生メダカと、日本各地に由来するメダカ野生系統を用いて、腸の長さの季節変化と地理的変異を解析しました。その結果、メダカにおいて、祖先的な集団（※2）では育った環境に応じて腸の長さが変わるのに対し、派生的な集団（※3）ではその変化の幅を超えた“極端に長い腸”が、生まれつき備わっていることが示されました。

この「育ち」が「生まれ」に変わる過程を分子レベルで調べたところ、二つの段階が明らかになりました。まず、腸の長さの季節的な変化（可塑性）は、*Plxnb3*（※4）の上流領域におけるDNAメチル化（※5）の季節変動と相関しており、この領域を欠失させると、腸の可塑性が失われました。次に、この可塑性が自然に失われた北日本メダカのNJPN1では、*Ppp3r1*（※6）近傍にもともと存在していた遺伝的変異が選択され、極端に長い腸が固定されていました。分子進化解析から、*Plxnb3*上流領域のCpG部位（※7）が減少して可塑性が失われた後に、*Ppp3r1*の変異が広がったことが示唆されました。

本研究で示された重要な点は、一見すると環境によって長くなった腸が、そのまま子孫に受け継がれたかのように見える、このラマルク的な現象も、ダーウィンの自然選択と木村資生の中立進化（※8）の枠組みで説明できる点です。環境に応じた柔軟な変化を可能にしていたエピジェネティックな仕組みが失われ、その後、集団にもともとあった遺伝的変異から有利なものが選ばれた。これが、本研究が示す「可塑性主導進化（以下PLE、※9）」のメカニズムです。この発見は、エピジェネティクスと進化生物学を橋渡しし、気候変動下における生物の適応進化を理解するための新たな視点をも提供します。

本研究成果は、米国科学アカデミー紀要（PNAS）に2026年3月26日（午前3時）（日本時間）に掲載されました。

研究者からひとこと：

「獲得形質は遺伝するか」という問いは、現代の進化学において否定されているものの、議論が絶えない問題です。本研究では、日本の多様な環境に生息するメダカとゲノム解析を組み合わせることで、この問いに分子レベルで一つの答えを出すことができました。可塑性が失われ、可塑的に変化するレンジから逸脱した形質（本研究の“極端に長い腸”）が遺伝的に固定されるという過程は、一見、獲得形質の遺伝のように見えます。この発見が、進化の理解をさらに深めるきっかけとなれば幸いです。（勝村啓史）

【研究の背景と経緯】

生物は、環境の変化に応じて形質を変化させる能力（表現型可塑性）を持っています。例えば、食物環境の変化に応じて腸の長さが変わることは、魚類をはじめ多くの動物で知られています。こうした可塑的な形質が、進化の過程で環境に依存しなくなり遺伝的に固定される現象は「遺伝的同化」（※10）と呼ばれ、さらに新たな遺伝的形質をもたらす現象が自然集団で明らかになってきています。これを説明する進化モデルは PLE と呼ばれ、ラマルクの進化にみえる現象を現代の枠組みで説明できる経路として注目されてきました。しかし、可塑的な形質がどのようにして遺伝的に固定され、新規な形質として広がるのか、その分子メカニズムはこれまで明らかにされていませんでした。

PLE の過程を調べるためには、遺伝的に多様で、それらの系統関係が明らかになっており、表現型可塑性を示す形質をもつ生物が必要です。ニホンメダカ（*Oryzias latipes*；以下、メダカ）は東アジアに広く分布する小型淡水魚で、地域集団ごとに遺伝的背景や生息環境が異なります。また、集団間の進化的関係がゲノムレベルで詳しく解明されています。メダカは近年、欧米の研究者からも注目されている実験動物で、ゲノム編集など最新の分子生物学的手法も適用可能です。そこで本研究グループでは、メダカに着目し、その腸（消化管：食道から肛門まで）の長さの多様性を調べることで、PLE の分子メカニズムの解明に挑みました。

【研究の内容と成果】

最初に、香川県の河川で採集した南日本グループ（※11）の野生メダカの腸の長さを2年間にわたり季節ごとに測定しました。その結果、腸が冬に短く夏に長くなる顕著な季節変動が確認されました。遺伝的多様性の解析から、この変動は集団の入れ替わりではなく、同一個体内での可塑的な変化であることが示されました。一方、バイオリソースとして維持されている野生実験系統メダカ40系統を同一環境下で比較したところ、北日本グループ（※12）の NJPN1 サブグループ（※13）のメダカは、遺伝的に固定された極端に長い腸を持つことがわかりました。これにより、祖先的な系統ではその長さが季節や環境に応じて変化し、派生的な系統では極端に長くなっていることが明らかになり、メダカの消化管に PLE が起こっていることがわかりました。

そこで次に、PLE で重要な可塑性の喪失と遺伝的固定について、それぞれ調べました。まず、可塑性の分子基盤を探るため、ゲノム規模の DNA メチル化解析を行いました。その結果、神経突起伸長の抑制に関わる *Plxnb3* 遺伝子上流領域に季節的にメチル化される CpG アイランドが存在し、それに応じるように *Plxnb3* 発現が季節変化していることがわかりました。ゲノム編集でこの領域を欠失させたメダカでは腸長の可塑性が失われ、腸絨毛先端の神経線維タンパク質の発現も消失しました。この結果から、*Plxnb3* 上流域の季節的メチル化が腸長の可塑性を制御していることを示唆しました。続いて、腸を長くする遺伝的変異を調べるために、メダカ集団で見られる一塩基多型を用いたゲノムワイド解析を行いました。それにより、神経軸索伸長や腸の発達に関わる *Ppp3r1* 遺伝子近傍の既存の変異が、北日本グループのメダカ集団が示す極端に長い腸の遺伝的固定に寄与していることを発見しまし

た。

最後に、分子進化解析の結果、*Plxnb3* 上流域の CpG 部位の減少によって可塑性が失われた後に、*Ppp3r1* の変異が北日本グループの集団に広がったことが示唆されました (図 1A)。これまで、エピジェネティックな修飾部位の喪失と形質の遺伝的固定を結びつける実証的データは存在しませんでした (図 1B)。本研究は、この過程を自然集団で初めて分子レベルで示したものです。

【今後の展開】

本研究は、DNA メチル化部位の喪失がエピジェネティックな制御を失わせ、その後に既存の遺伝的変異が形質を固定するという、PLE の分子メカニズムを初めて示しました。そして、ラマルク的に見える現象がダーウィンの自然選択と木村資生の中立進化で説明できることを示唆しています。今後は、腸長の可塑性を駆動する環境シグナルの特定や、*Ppp3r1* の因果的な制御変異の同定、そして *Plxnb3* と *Ppp3r1* が同一経路で機能するのか独立した経路なのかの検証が課題となります。

本研究で明らかにしたメカニズムから、進化の一つの過程として、安定した環境下で可塑性が失われ、その後の厳しい環境への進出時に有利な変異が固定されるという経路の存在を示唆しています。この知見は、気候変動により生息環境が急速に変化する現代において、生物がどのように新たな環境に適応しうるかを理解する上で重要な基盤となります。

【参考図】

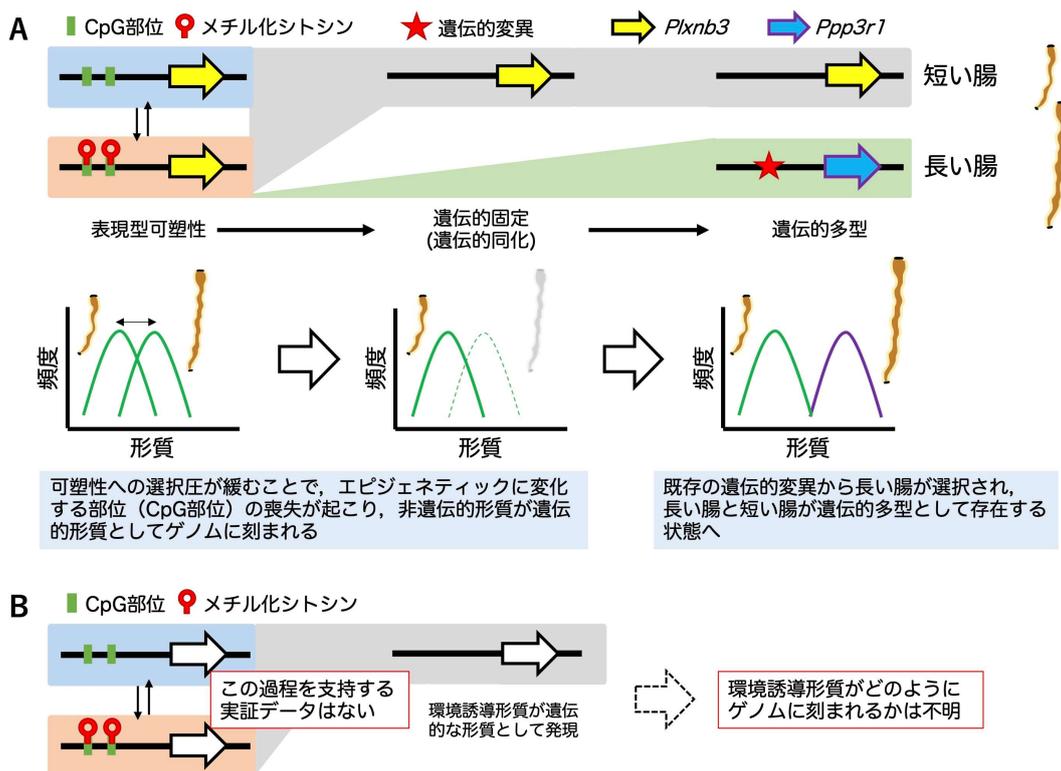


図 1 本研究で明らかになった PLE のメカニズム

(A) 本研究の成果：CpG 部位の減少により DNA メチル化を介した可塑性が失われ、既存の遺伝的変異から、より長い腸が固定される過程を示す。

(B) これまでわかっていたこと：エピジェネティックな修飾部位の喪失と新規形質の遺伝的固定を結びつける実証的データはなかった。

【用語解説】

- ※1 **表現型可塑性 (Phenotypic plasticity)** : 同一の遺伝子型を持つ生物が、環境の変化に応じて異なる表現型を示す現象。
- ※2 **祖先的な集団** : 進化的に古い特徴を保持している集団。本研究では、腸の長さに季節変動 (可塑性) を示す南日本グループのメダカ集団を指す。
- ※3 **派生的な集団** : 祖先的な集団から分岐し、新たな特徴を獲得した集団。本研究では、腸の可塑性を失い、極端に長い腸が遺伝的に固定された北日本グループの NJPN1 サブグループを指す。
- ※4 ***Plxnb3*** : 神経突起の伸長を抑制するタンパク質をコードする遺伝子。本研究では、その上流領域の季節的な DNA メチル化が腸長の可塑性と関連していた。
- ※5 **DNA メチル化** : DNA 上の CpG 配列のシトシンにメチル基が付加されるエピジェネティック修飾。遺伝子の発現制御に重要な役割を果たす。
- ※6 ***Ppp3r1*** : 神経軸索の伸長や小腸の発達に関わるタンパク質をコードする遺伝子。本研究では、この遺伝子近傍の既存の変異が、北日本グループのメダカにおける極端に長い腸の遺伝的固定に寄与していた。
- ※7 **CpG 部位 (CpG site)** : DNA 配列中でシトシン (C) の次にグアニン (G) が続く部位のこと。このシトシンが DNA メチル化の標的となる。これらが密集した領域は CpG アイランドと呼ばれる。
- ※8 **木村資生の中立進化** : 生物の進化の多くは自然選択ではなく、有利でも不利でもない遺伝的変異が偶然によって集団内に広がることで起こるとする理論。本研究では、*Ppp3r1* の変異が可塑性の存在下では中立的に維持され、可塑性が失われた後に自然選択の対象となったと考えられる。
- ※9 **可塑性主導進化 (Plasticity-led evolution, PLE)** : 表現型可塑性が進化の出発点となり、後に新規な形質が遺伝的に固定されるという適応進化の代替経路。
- ※10 **遺伝的同化 (Genetic assimilation)** : 環境によって誘導された可塑的な形質が、進化の過程で遺伝的に固定され、環境刺激なしでも発現するようになる過程。
- ※11 **南日本グループ** : 沖縄から岩手の太平洋側にかけて広く分布するニホンメダカの遺伝的グループ。九州北部や山陰の日本海側にも分布している。
- ※12 **北日本グループ** : 兵庫北部から青森にかけて分布するニホンメダカの遺伝的グループ。南日本グループのメダカとは、少し異なる形態的特徴を持ち、別種とされる場合もあるが、自然交雑も知られており、本研究ではニホンメダカ (*Oryzias latipes*) の遺伝的グループの一つとして扱っている。
- ※13 **NJPN1 サブグループ** : 北日本グループのサブグループで、青森まで広がった遺伝的グループ。兵庫北部周辺に主に生息している NJPN2 サブグループから NJPN1 が分岐したとされる。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (JP16K21352、JP19K16201、JP19H05737、JP24K02078、JP17H01453、JP17H03738、JP16J07227) の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌 : Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)

タイトル : DNA methylation site loss for plasticity-led novel trait genetic fixation

著者名 : Takafumi Katsumura, Suguru Sato, Kana Yamashita, Shoji Oda, Takashi Gakuhari, Shodai Tanaka, Kazuko Fujitani, Toshiyuki Nishimaki, Tadashi Imai, Yasutoshi Yoshiura, Hirohiko Takeshima, Yasuyuki Hashiguchi, Yoichi Sekita, Hiroshi Mitani, Motoyuki Ogawa, Hideaki Takeuchi, Hiroki Oota

D O I : 10.1073/pnas.2534817123

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院芸術工学研究院 准教授 勝村啓史

TEL : 092-553-4634

Mail : tk@design.kyushu-u.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科 教授 太田博樹

TEL : 03-5841-7580

Mail : hiroki_oota@bs.s.u-tokyo.ac.jp

北里大学医学部解剖学 教授 小川元之

TEL : 042-778-9024

Mail : motomedu@kitasato-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報室

TEL : 03-5841-8856

Mail : media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

学校法人北里研究所 広報室

TEL : 03-5791-6422 FAX : 03-3444-2530

Mail : kohoh@kitasato-u.ac.jp