

植物進化の解明と微細藻類の高度な産業利用の促進 ～温泉微細藻類ガルデリアの性の発見と高度な遺伝的改変技術～

■ 概要

植物には、花を咲かせて受精により種子を生じるという「有性生殖⁽¹⁾」を伴う生活環が存在します。しかしながら、これまでに、進化の初期に出現した単細胞紅藻などは、無性生殖⁽¹⁾するとされており、植物の有性生殖の起源や藻類・植物の進化の過程は不明でした。

情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所の廣岡俊亮特任助教、宮城島進也教授、理化学研究所の岩根敦子チームリーダーによる共同研究グループは、単細胞紅藻の一種で国内外の酸性温泉に生息するガルデリアが、有性生殖を行う生物の特徴である 2 倍体⁽²⁾として存在し、特殊な環境に晒すことで減数分裂を行い細胞壁が無い 1 倍体⁽²⁾を生じることを発見しました。ガルデリアには、植物において花を作るための鍵遺伝子群の祖先遺伝子群が存在し、これらの機能を調べた結果 1 倍体が 2 倍体化する時にはたらくことがわかりました。さらに、1 倍体を 1 倍体のまま安定的に増殖させることに加え、遺伝的改変技術の開発にも成功しました。

本研究は今後、植物の有性生殖の起源や藻類・植物の進化の過程の解明につながることを期待されます。一方で、ガルデリアは、タンパク質および各種ビタミンの含有量が高く、短期間で超高密度まで増殖するため、新たな産業用藻類として世界各国で活用法の開発が進められています。また本研究グループにより、ガルデリアは、強力な抗酸化作用を持ち、記憶力の向上などの脳機能の促進効果が認められているエルゴチオネイン⁽³⁾を高濃度に含むことも明らかとなっています。しかしながら、2 倍体のガルデリアの活用は、強固な細胞壁が原因で内容物の抽出が困難であり、遺伝的改変による品種改良も不可能という問題がありました。本研究によって発見された細胞壁の無い 1 倍体は、内容物抽出が容易であり遺伝的改変も可能なため、これらの問題を解決することが期待されます。さらに、これらの特性を活用することによって家畜用の「食べるワクチン」など、微細藻類の高度な利用形態の創出も期待されます。

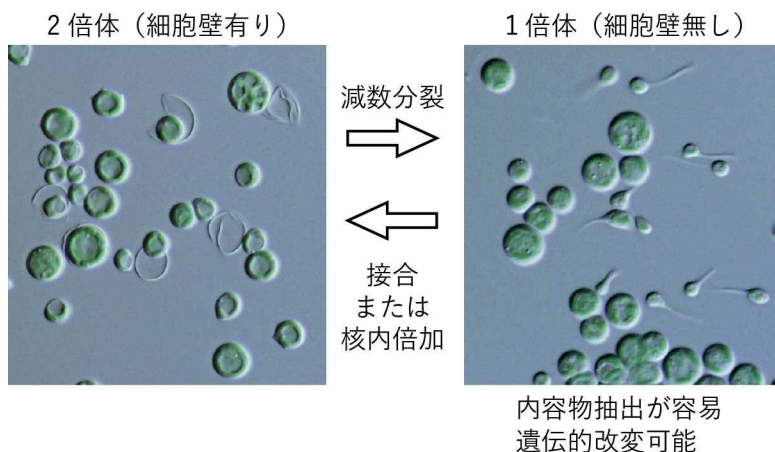


図 1: 本研究で発見されたガルデリアの有性生殖を伴う生活環

■ 成果掲載誌

本研究成果は、米国科学雑誌「Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)」に 2022 年 10 月 3 日の週(日本時間)に掲載されます。

論文タイトル: Life cycle and functional genomics of the unicellular red alga *Galdieria* for elucidating algal and plant evolution and industrial use

(単細胞紅藻ガルデリアにおける生活環の発見と機能ゲノムクスー藻類・植物の進化の解明と微細藻類の産業利用にむけて)

著者: S. Hirooka, T. Itabashi, T. M. Ichinose, R. Onuma, T. Fujiwara, S. Yamashita, L. W. Jong, R. Tomita, A. H. Iwane, S. Miyagishima

(廣岡 俊亮、板橋 岳志、一ノ瀬 孝子、大沼 亮、藤原 崇之、山下 翔大、ジョン リンウェイ、富田 麗子、岩根 敦子、宮城島 進也)

■ 研究の詳細

● 研究の背景

植物には、花を咲かせて受精により種子を生じるという有性生殖を伴う生活環が存在し、これにより同一種の集団内に遺伝的多様性が生じます。有性生殖は植物の祖先である一部の単細胞藻類にも見られますが、進化の初期に出現した多くの単細胞藻類では、有性生殖過程は見つかっていませんでした。したがって、これらの単細胞藻類は細胞分裂によってのみ増殖(無性生殖)するとされ、植物の有性生殖の起源や藻類・植物の進化の過程は不明でした。

また、単細胞藻類は植物に比べて高い CO₂ 固定能力を有し、タンパク質、ビタミン類、色素などを高濃度に含まみ、その生産は農業と競合しないことなどから、一部の微細藻類はサプリメント、色素、化粧品などとして産業利用されています。特に国内外の硫酸酸性温泉(群馬県草津、大分県別府など)に生息する単細胞紅藻ガルデリアは、他の微細藻類に比べてタンパク質および各種ビタミンの含有量がさらに高く、短期間で超高密度(100 g 乾燥藻体/L)まで増殖するため、その産業利用に向けた開発が世界各国で進められています。しかしながら、ガルデリアは強固な細胞壁に囲まれているため、内容物抽出が困難で、なおかつ遺伝的改変による品種改良も不可能という問題がありました。

● 本研究の成果

自然環境に生息し、これまで世界中で培養されてきたガルデリアは、すべて強固な細胞壁に覆われており、その他の形態は知られていませんでした。本研究では、細胞壁を有するガルデリア細胞は 2 倍体であり、この 2 倍体を生息環境よりもさらに強い酸性環境に晒すと細胞壁が無い 1 倍体が生じることを発見しました。さらに、1 倍体を 1 倍体のまま安定的に増殖させること、1 倍体を 2 倍体に戻すことにも成功しました。これまで進化の初期に出現した藻類では見つかっていなかった有性生殖過程が世界で初めて発見されました。

また、細胞壁の無い 1 倍体を用いることでガルデリアの遺伝的改変技術の開発にも成功しました。本方法では他生物の遺伝子産物を作らせるような組換え体だけでなく、外来配列を一切導入しないセルフクロニング⁽⁴⁾も可能です。したがって、本手法で、天然には存在しない青い藻体(青は食品着色料として用いられるフィコシアニンの色)を作出することなども可能になりました。



図 2: 酸性温泉に生息する単細胞紅藻ガルデリアの有性生殖の発見と、細胞壁の無い 1 倍体を用いた遺伝的改変の例

(A) ガルデリアの属する単細胞紅藻イデユコゴメ(出湯小米)類の天然での様子。

(B) 今回の研究により、従来唯一の形態として知られていた細胞壁を有するガルデリア細胞が 2 倍体であることが明らかとなった。さらに今回、新たに細胞壁のない 1 倍体が発見された。細胞壁を持つ 2 倍体は母細胞壁内に 4~32 個の娘細胞を形成し、母細胞壁を破る(矢印)ことによって増殖する。1 倍体はオタマジャクシ様の細胞(矢じり)が成長し球形となり分裂することで増殖する。

(C) 2 倍体と 1 倍体を乾燥させた後に再膨潤し、遠心分離した結果。2 倍体は強固な細胞壁に囲まれているため、内容物が出てこないが、1 倍体は細胞壁が無いため、青色色素(フィコシアニン)などの内容物が容易に抽出できる。

(D) 遺伝的改変により作出したクロロフィル(緑色の光合成色素)合成遺伝子破壊株($\Delta CHLD$)、カロテノイド(黄色の光合成色素)合成遺伝子破壊株(ΔPSY)と両方の遺伝子の二重破壊株($\Delta CHLD \Delta PSY$)。

● 今後の期待

単細胞紅藻ガルデリアは有性生殖が可能で、植物において花を作るための鍵遺伝子群の祖先遺伝子群が存在し、これらが 1 倍体の 2 倍体化に必要なこともわかったため、本研究が藻類・植物の進化過程や有性生殖の起源の解明につながることを期待されます。また、本成果で発見された 1 倍体は 2 倍体と同様の増殖能を有し、内容物抽出も容易であり、遺伝的改変も可能であることから、産業利用が容易になっただけでなく、ウイルスの表面タンパク質を発現させた藻体を、家畜用の「食べるワクチン」として利用するなど、微細藻類の高度な利用形態の創出も期待されます。

なお、本研究に関連して以下の特許を保有または出願中です。

- ・WO/2019/107385 特許第 6852190 号 新規微細藻類、及びその使用
- ・WO/2020/071444 淡水産微細藻類の培養方法
- ・WO/2020/203816 薬物送達組成物
- ・公開前出願中 ガルデリア属に属する藻類のゲノム改変方法
- ・公開前出願中 エルゴチオネインの製造方法

■ 用語解説

(1) 有性生殖、無性生殖

2 つの性の異なる細胞間で、ゲノムの交換をランダムに行うことにより、両親とは異なる様々なゲノム組成を持つ個体群を生産すること。これにより同種内に多様な性質を持つ個体群を生産することができる。これに対して、ゲノムの交換をすることなく、同一のゲノム組成の個体群が増殖することを無性生殖と呼ぶ。

(2) 1 倍体、2 倍体

2 倍体は母親と父親にそれぞれ由来する 2 セットの遺伝子(染色体)を有する細胞。2 倍体が減数分裂し、1 セットの遺伝子(染色体)のみを有する 1 倍体細胞が生じる(動物の場合、精子と卵子)。

(3) エルゴチオネイン

キノコなどの担子菌類と一部の細菌のみが産生する希少なアミノ酸で、強力な抗酸化作用がある。記憶力の向上、認知症、アルツハイマー病、うつ病の改善など、脳神経や中枢神経に対する効果が示されている。

(4) セルフクローニング

同一種由来の DNA を移植し、その種が持つ任意の遺伝子の機能を強化したり抑制したりする遺伝的改変技術。外来 DNA を導入しない遺伝的改変であるため、カルタヘナ法上、遺伝子組換え生物扱いとはならない。

■ 研究体制と支援

本研究は、情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所・共生細胞進化研究室と理化学研究所生命機能科学研究センター・細胞場構造研究チームの共同研究で行われました。

本研究は、科学技術振興機構(JST)未来社会創造事業 探索加速型 本格研究「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域における研究開発課題「酸性水を用いた微細藻類の培養および利用形態の革新」(研究代表者:宮城島進也)の支援を受けて行われました。

■ 問い合わせ先

<研究に関すること>

- 国立遺伝学研究所 共生細胞進化研究室
教授 宮城島 進也 (みやぎしま しんや)
TEL:055-981-9411 メール:smiyagis[at]nig.ac.jp

<知財に関すること>

- 国立遺伝学研究所 産学連携・知的財産室
室長 鈴木 睦昭（すずき むつあき）
TEL:055-981-5835 メール:chizai[at]nig.ac.jp

<JST 事業に関すること>

- 科学技術振興機構 未来創造研究開発推進部
加藤 真一（かとう しんいち）
TEL:03-3512-3543 メール:alca[at]jst.go.jp

<報道担当>

- 国立遺伝学研究所 リサーチ・アドミニストレーター室 広報チーム
TEL:055-981-5873 メール:prkoho[at]nig.ac.jp
- 理化学研究所 広報室 報道担当
TEL:050-3495-0247 メール:ex-press[at]ml.riken.jp
- 科学技術振興機構 広報課
TEL:03-5214-8404 メール:jstkoho[at]jst.go.jp