

## ミトコンドリア・葉緑体に次ぐ第三の共生オルガネラか？ ～“光合成しない”光合成細菌のゲノム解読に成功～

### 成果のポイント

1. ある種の珪藻に細胞内共生<sup>1</sup>する細菌のゲノムを世界に先駆けて解読することに成功しました。
2. この共生体は、光合成性細菌であるシアノバクテリア起源を起源とし、窒素固定を行うが、珪藻細胞に共生する過程で光合成能力を失ったことがわかりました。本論文は、「光合成をしない」シアノバクテリアについての初めての報告となります。
3. 本共生体は、ミトコンドリアや葉緑体と同じ、真核生物<sup>3</sup>の細胞の一部をなすオルガネラ<sup>4</sup>(細胞小器官)に進化する過程にあると考えられます。

筑波大学生命環境系 稲垣祐司准教授と筑波大学計算科学研究センター 中山卓郎研究員のグループは、ロパロディア科珪藻の細胞内に見られる窒素固定共生体ゲノムの完全解読に成功しました。

ロパロディア科の珪藻にはスフェロイドボディ<sup>5</sup>と呼ばれる特殊な共生体が見られます(写真1)。スフェロイドボディは光合成を行うことで知られるバクテリア「シアノバクテリア」を起源としますが、その役割は窒素固定を行い、宿主である珪藻へ窒素源を供給することであると考えられています。スフェロイドボディは単独では生存できないことから、珪藻と高度な共生関係を築いていることが示唆されてきました。しかし、その共生関係そのものを対象とした研究はあまり進んでおらず、その詳細はよくわかっていませんでした。

本研究では、ロパロディア科珪藻の一種 *Epithemia turgida*(エピテミア・タルジダ)のスフェロイドボディから取り出したDNAを解析し、その全ゲノム配列を決定しました。スフェロイドボディゲノムに存在する遺伝子を詳しく解析した結果、スフェロイドボディが独立して生育するために必要な遺伝子はその多くが失われていることが明らかとなり、宿主珪藻に依存した生き方に特化していることがわかりました。失われた遺伝子の中には、光合成に関連する遺伝子も含まれていました。つまり、スフェロイドボディはシアノバクテリアに由来するにも関わらず、光合成能力まで失っていることが明らかとなりました。これらの特徴は、スフェロイドボディが珪藻細胞の一部として統合されつつあることを示しています。今後、さらに研究が進めば、同じようにバクテリアが共生したことに由来とするミトコンドリアや葉緑体といった真核生物の重要なオルガネラの進化に関する手がかりが得られるものと期待されます。

本研究成果は米国科学アカデミー紀要 (Proc. Natl. Acad. Sci. USA) に 2014 年 7 月 21 日付(太平洋標準時)でオンライン掲載されました。

※本研究は科学研究費補助金(日本学術振興会および文部科学省)、公益財団法人発酵研究所一般研究助成によって実施されました。

## 研究の背景

珪藻は光合成を行う微生物の一群ですが、そのうちロパロディア科に含まれる種は、葉緑体とミトコンドリアなどのオルガネラ(細胞内小器官)の他に、光合成細菌の一群であるシアノバクテリアに由来する細胞内共生体を持ちます。この共生体はスフェロイドボディと呼ばれ、ロパロディア科珪藻の細胞の中に常に確認できます(写真1)。スフェロイドボディは、空気中の窒素ガスを窒素化合物に変える「窒素固定」能力をもっています。本来ならば窒素固定できない珪藻は、スフェロイドボディで合成された窒素化合物を利用していると考えられています。珪藻とスフェロイドボディは互いに依存し合っていると考えられており、スフェロイドボディは珪藻細胞外では生育できず、珪藻が分裂する際には他のオルガネラ(細胞内小器官)と同様に娘細胞に受け継がれます。しかし、ロパロディア科珪藻とその共生体に関する分子生物学的な研究はこれまであまり進んでおらず、その宿主と共生体がどの程度依存し合っているかはよくわかっていませんでした。

## 研究内容と成果

本研究では、ロパロディア科珪藻の一種 *Epithemia turgida*(エピテミア・タルジダ)のスフェロイドボディから抽出したDNAを次世代シーケンサーにて解析を行い、スフェロイドボディゲノムの全塩基配列を決定しました。スフェロイドボディのゲノムの総塩基数は2.79 Mbp(メガベースペア、279万塩基対)であり、共生生活を送らないシアノバクテリアに比べるとゲノムは縮小していることが明らかとなりました。ゲノム上に存在する遺伝子を詳しく解析した結果、珪藻細胞外で生育するために必要と考えられる遺伝子の多くがゲノムから消失しており、宿主である珪藻の細胞外ではもはや生育できないことが裏付けられました。さらに興味深いことに、スフェロイドボディは光合成に必須の遺伝子を失っていることが確認されました。これは、「光合成をしないシアノバクテリア」の世界初の発見になります。一方、予想通り、窒素固定に必要な遺伝子一式がスフェロイドボディのゲノム中に見つかりました。以上の結果から、スフェロイドボディは窒素固定能力をキープしつつ、シアノバクテリアのアイデンティティともいべき光合成能力を捨てるという前例のない進化を遂げていることがわかりました。

## 今後の展開

真核生物のもつミトコンドリアや葉緑体は、細胞内に共生したバクテリアが退化したオルガネラです。ミトコンドリアや葉緑体と同様に、スフェロイドボディはロパロディア科珪藻と不可分であり、窒素固定という特有の役割を担う共生体であると考えられます。スフェロイドボディとロパロディア科珪藻のように高度な依存関係を築いている共生体と宿主の例は極めて稀であり、ミトコンドリアや葉緑体に次ぐ「第三の共生オルガネラ」である可能性があります。今後、この共生関係について更に研究が進めば、細胞内共生を通じた真核生物の進化を解明する手がかりが得られるものと期待されます。

## 参考図



写真 1 ロパロディア科珪藻の顕微鏡写真

細胞(左)はガラス質の殻に覆われており、細胞全体に茶色の葉緑体が見える(細胞長は約  $80\mu\text{m}$ )。細胞中央部に見える球体がスフェロイドボディ。右は人工的に珪藻細胞の中から取り出したスフェロイドボディ(直径約  $5\mu\text{m}$ )。

## 用語解説

- 1 細胞内共生：自由生活をする生物が他の細胞内に取り込まれ、維持される状態をいう。
- 2 窒素固定：空気中の窒素を生物がアンモニアに還元すること。それによって生産されたアンモニアは、グルタミン酸などに同化される。
- 3 真核生物：地球上の生物は細菌、古細菌、真核生物に大別される。ヒトを含む動物や植物はこのグループに属する。
- 4 オルガネラ：細胞小器官ともいう。ミトコンドリア、葉緑体など、真核生物の細胞内で一定の機能をもつ構造体。
- 5 スフェロイドボディ：楕円球形をした小体という意味。珪藻細胞中のスフェロイドボディは、本研究が示すように、かつては光合成をして自由生活をしていたシアノバクテリアが細胞内に取り込まれて共生するようになったものと考えられる。

## 掲載論文

【題名】 Complete genome of a nonphotosynthetic cyanobacterium in a diatom reveals recent adaptations to an intracellular lifestyle

(和訳：珪藻細胞内非光合成性シアノバクテリアの完全ゲノムが明らかにする細胞内共生体としての適応進化)

【著者名】 中山卓郎、神川龍馬、谷藤吾朗、柏山祐一郎、大河内直彦、John M Archibald、稲垣祐司

【掲載誌】 Proceedings of the National Academy of Sciences USA (米国科学アカデミー紀要)

## 問い合わせ先

稲垣 祐司(いながき ゆうじ)

筑波大学 生命環境系 准教授