

令和6年7月4日

文部科学記者会、科学記者会、  
静岡県社会部記者室、岡山大学記者クラブ 御中

国立大学法人静岡大学  
国立大学法人岡山大学  
理化学研究所

## 低エネルギークロロフィル *d* を有する *Acaryochloris* の光化学系 I 複合体の特性解析

### 【研究のポイント】

- 低エネルギークロロフィル *d* を持つ *Acaryochloris* から光化学系 I 単量体と三量体の精製に成功しました。
- 光化学系 I 単量体と三量体で低エネルギークロロフィル *d* の組成や配向が異なることを示唆しました。
- 低エネルギークロロフィル *d* の多様性は *Acaryochloris* 種の進化を解明するうえで重要なものかもしれません。

### 【研究概要】

静岡大学農学部の長尾遼准教授の研究グループは、岡山大学の沈建仁教授、理化学研究所環境資源科学研究センターの堂前直ユニットリーダーらと共に、低エネルギークロロフィル *d* <sup>(注1)</sup> を有するシアノバクテリア <sup>(注2)</sup> *Acaryochloris* sp. NBRC 102871 (以下、NBRC102871) から光化学系 I (PSI) <sup>(注3)</sup> 単量体と三量体のそれぞれを精製し、分子特性を明らかにしました。紫外可視分光スペクトルおよび蛍光スペクトルにより、PSI 単量体と三量体のそれぞれで低エネルギークロロフィル *d* が観測されました。しかし、それらのスペクトル特性は大きく異なりました。PSI の単量体間相互作用の影響により、クロロフィル *d* 周辺で構造変化が生じた結果、PSI 三量体と単量体において、異なる低エネルギークロロフィル *d* の形成が示唆されました。これは、多様な低エネルギークロロフィル *d* を有する *Acaryochloris* 種の特徴です。

クロロフィル *d* は *Acaryochloris* 種のみが有しています。その他のシアノバクテリア、藻類、陸上植物といった酸素発生型光合成生物は、クロロフィル *d* を持ちません。我々は 2023 年に *Acaryochloris marina* MBIC 11017 (以下、MBIC11017) の PSI を分析しましたが、NBRC102871 ほどの低エネルギークロロフィル *d* は観測されませんでした。このように、特殊な生物群である *Acaryochloris* 種の PSI に結合する低エネルギークロロフィル *d* は多様であることを見出しました。本研究で得られた研究成果は、*Acaryochloris* 種の進化を理解するうえで重要な知見となります。

なお、本研究成果は、2024 年 6 月 27 日に、シュプリンガー・ネイチャーの発行する国際雑誌「Photosynthesis Research」に掲載されます。

### 研究者コメント

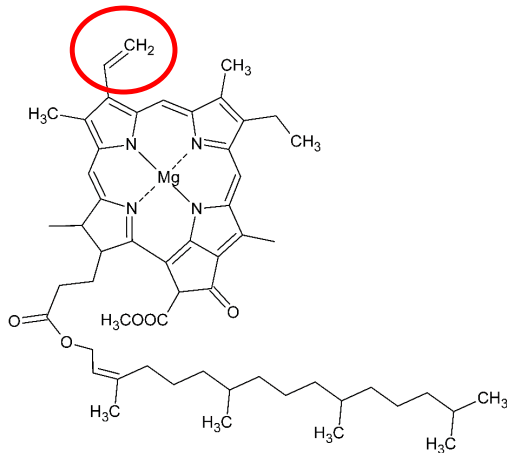
静岡大学農学部

准教授・長尾遼 (ながおりょう)

私の研究室では光合成生物の見た目の色の違いについて分子レベルで研究しています。クロロフィル *d* を有する *Acaryochloris* 種は本当に不思議な生物群です。なぜ他の光合成生物が利用しているクロロフィル *a* を利用しなかったのか？そんな素朴な疑問を解明するために本研究を行いました。今回の成果でその一端を明らかに出来たと思います。

## 【研究背景】

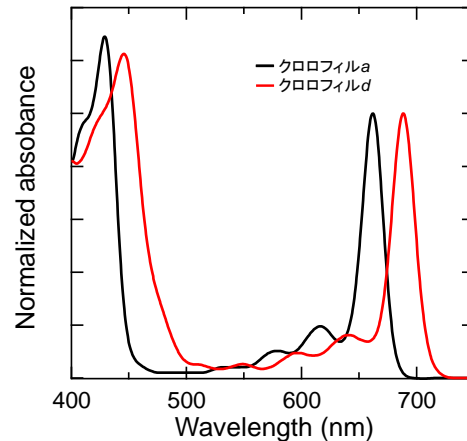
酸素発生型光合成は、太陽の光エネルギーを利用して水と二酸化炭素から有機物と酸素を合成します。シアノバクテリア、藻類、陸上植物が酸素発生型光合成を行うことにより、我々ヒトを含む酸素呼吸する生物は地球上で生活できています。酸素発生型光合成を行う上で光捕集システムは欠かせない要素です。光合成生物は光エネルギーを捕集するために、色素分子を進化の過程で多様化させてきました。色素分子は主にクロロフィルとカロテノイドに大別され、光エネルギーを化学エネルギーに変換する PSI および光化学系 II (PSII) に結合します。ほぼ全ての光合成生物の PSI と PSII には、クロロフィル *a* が結合します。しかし、特殊なバクテリアである *Acaryochloris* は、クロロフィル *a* ではなくクロロフィル *d* を主要色素として持ちます。クロロフィル *d* の分子構造はクロロフィル *a* のビニル基がホルミル基に変換されており、また、クロロフィル *d* の吸収ピークはクロロフィル *a* と比べ長波長シフトしています (図 1)。



クロロフィルaの分子構造

赤丸が

- ビニル基ならクロロフィルa
- ホルミル基ならクロロフィルd



クロロフィルの吸収スペクトル

- クロロフィルdの吸収ピークは、クロロフィルaよりも長波長シフト

図1. クロロフィルdとクロロフィルa

シアノバクテリアの PSI は、単量体、二量体、三量体、四量体をそれぞれ形成することが知られています。特に多くのシアノバクテリアは、単量体と三量体の PSI を持ちます。PSI には 95 個ものクロロフィルが結合しますが、そのうち数個は低エネルギークロロフィルになります。この低エネルギークロロフィルは、PSI の単量体と三量体とでは分光特性が異なります。我々は 2023 年に MBIC11017 の PSI 単量体と三量体の低エネルギークロロフィル *d* を分析しました。紫外可視吸収スペクトルにより低エネルギークロロフィル *d* が観測されませんでした。PSI 三量体でのみ蛍光スペクトルによりわずかなピークが得られました。一方、先行研究 (Ulrich et al., 2024) により、さまざまな *Acaryochloris* 種が低エネルギークロロフィル *d* を有する種とそうでない種に分かれることが報告されました。しかし、この研究では細胞レベルの分析であり、低エネルギークロロフィル *d* が PSI に結合しているか不明です。

## 【研究の成果】

静岡大学農学部の長尾遼准教授の研究グループは、岡山大学の沈建仁教授、理化学研究所の堂前直ユニットリーダーらと共に、低エネルギークロロフィル *d* を有する NBRC102871 から PSI 単量体と三量体のそれぞれを精製し、分子特性を明らかにしました。精製された PSI 単量体と三量体は、ほぼ同じタンパク質組成であり、色素成分も同じでした。紫外可視分光スペクトルを測定したところ、低エネルギークロロフィルに相当する吸収バンドが観測されました (図 2 ; 青矢印)。さらに、蛍光スペクトルを測定したところ、PSI 単量体では 767 nm、PSI 三量体では 754 nm の蛍光ピークが観測されました (図 2)。興味深いことに、蛍光スペクトルの形が両者で大きく異なりました (図 2)。これらの結果は、PSI の単量体間相互作用の影響により、クロロフィル *d* 周辺で構造変化が生じたことを示唆します。

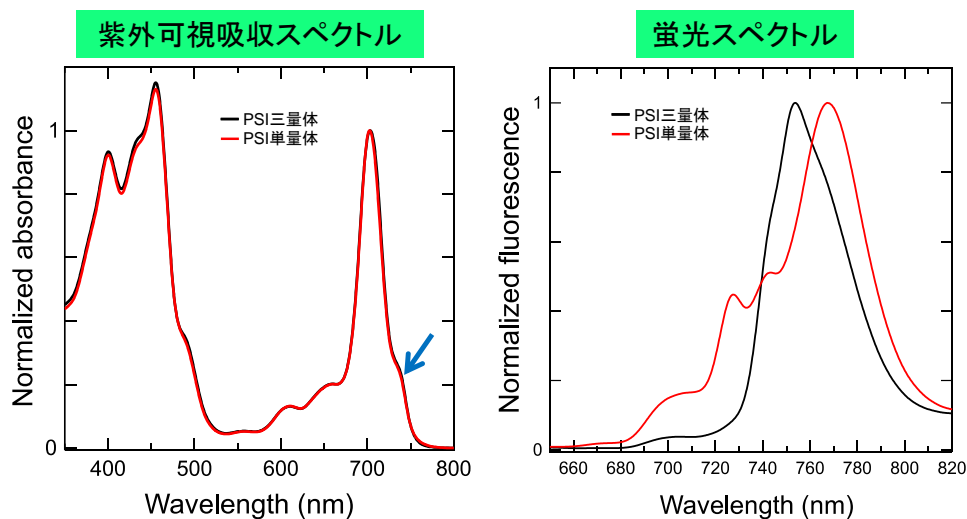


図2. PSIの吸収と蛍光スペクトル

NBRC102871 で観測された吸収スペクトルの長波長成分 (矢印) は、MBIC11017 の PSI では観測されませんでした。このことは、NBRC102871 と MBIC11017 の間で、PSI の光捕集戦略が異なることを示唆します。これは、多様な低エネルギークロロフィル *d* を有する *Acaryochloris* 種の特徴となります。

#### 【論文情報】

掲載誌名: Photosynthesis Research

論文タイトル: Presence of low-energy chlorophylls *d* in photosystem I trimer and monomer cores isolated from *Acaryochloris* sp. NBRC 102871

著者: Ryo Nagao, Haruki Yamamoto, Haruya Ogawa, Hibiki Ito, Yuma Yamamoto, Takehiro Suzuki, Koji Kato, Yoshiki Nakajima, Naoshi Dohmae, Jian-Ren Shen

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11120-024-01108-3>

#### 【用語説明】

注1：低エネルギークロロフィル *d*

クロロフィル *d* が周辺との相互作用により低エネルギー化したものをいいます。クロロフィル *d* はアカリオクロリス種でのみ見つかっています。

注2：シアノバクテリア

酸素発生の能力をはじめて獲得した、核をもたない光合成微生物で、植物の葉緑体の起源になったと考えられています。シアノバクテリアは約 30 億年の進化の歴史をもつため、光合成色素や代謝能力など種毎に変化に富んだ形質をもちます。

注3：光化学系 I (PSI)

光エネルギーを化学エネルギーへ変換する膜タンパク質複合体です。PSI は 10 種類以上のサブユニットから構成され、補欠因子として、金属錯体、色素分子 (クロロフィルやカロテノイド) がタンパク質に結合しています。クロロフィルとカロテノイドはそれぞれ特有の光エネルギー吸収帯を持ち、光捕集に重要な役割を担います。

**【問い合わせ先】**

(研究に関すること)

静岡大学農学部

准教授・長尾遼（ながおりょう）

TEL : 054-238-4251

E-mail : [nagao.ryo@shizuoka.ac.jp](mailto:nagao.ryo@shizuoka.ac.jp)

WEB サイトや SNS のリンクのまとめ (QR コード) : <https://linktr.ee/ryonag>



(報道に関すること)

静岡大学 広報・基金課

TEL : 054-238-5179      E-mail : [koho\\_all@adb.shizuoka.ac.jp](mailto:koho_all@adb.shizuoka.ac.jp)

岡山大学 総務・企画部 広報課

TEL : 086-251-7292      E-mail : [www-adm@adm.okayama-u.ac.jp](mailto:www-adm@adm.okayama-u.ac.jp)

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 050-3495-0247      E-mail : [ex-press@ml.riken.jp](mailto:ex-press@ml.riken.jp)