

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K07399

研究課題名（和文）藻類の重炭酸イオン輸送におけるCa<sup>2+</sup>とCO<sub>2</sub>のクロストーク制御研究課題名（英文）Crosstalk regulation of Ca<sup>2+</sup> and CO<sub>2</sub> signals for bicarbonate transport in algae

研究代表者

山野 隆志（Yamano, Takashi）

京都大学・生命科学研究科・講師

研究者番号：70570167

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、光合成の維持に必須なCO<sub>2</sub>濃縮機構の制御機構を明らかにすることである。緑藻クラミドモナスをモデルとして用い、次のことを明らかにした。（1）カルシウム結合タンパク質CASは、重炭酸イオン輸送体を含むCO<sub>2</sub>欠乏誘導性遺伝子の転写を、葉緑体から核へのレトログレードシグナルによって制御する。（2）CASは環境中のCO<sub>2</sub>濃度に応答して葉緑体内での局在を変化させ、CO<sub>2</sub>欠乏条件下では葉緑体内のピレノイドと呼ばれる構造内に局在する。（3）ピレノイドの周囲に形成されるデンプン鞘は、光合成活性の維持とCO<sub>2</sub>濃縮機構に必須なタンパク質LCIBのピレノイド周囲への局在に必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の地球環境は、持続可能な開発目標（SDGs）に関わる温暖化・食糧不足・エネルギー枯渇などの様々な問題を抱えている。これに対して、水圏に生息する藻類が持つCO<sub>2</sub>濃縮機構を利用・改変して、光合成の能力を最大限に高めた陸上植物を創出し、解決しようとする試みが広がっている。例えば、主要作物にCO<sub>2</sub>濃縮機構を導入し、CO<sub>2</sub>の吸収量と生産量を高めるといった研究である。本研究課題で明らかになった、藻類のCO<sub>2</sub>濃縮機構の制御機構に関する新しい知見は、これらの喫緊の課題を解決するためのブレークスルーにつながることで期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, by forward genetic analysis using the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*, we revealed the following points: (1) The calcium-binding protein CAS regulates CCM-related gene expression, including bicarbonate transporters, by retrograde signaling from chloroplast to the nucleus, (2) CAS changes its localization in the chloroplast in response to environmental CO<sub>2</sub> concentrations and localizes within a structure called pyrenoid under CO<sub>2</sub> deficiency conditions, and (3) Starch sheath formed around pyrenoid is essential for maintaining photosynthetic activity and proper localization of LCIB, an essential factor of the CCM, around the pyrenoid.

研究分野：植物分子細胞生物学

キーワード：CO<sub>2</sub>濃縮機構 クラミドモナス ピレノイド 重炭酸イオン輸送 光合成 デンプン鞘

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

植物にとって光合成に必要な CO<sub>2</sub> を効率よく細胞内に取り込むことはその生存に必須である。陸上植物は、主に気孔を介して CO<sub>2</sub> を拡散によって取り込む。一方、藻類が生息する水中では CO<sub>2</sub> の拡散速度は大気中の 10,000 分の 1 にまで低下し、さらに CO<sub>2</sub> は水と反応して重炭酸イオン (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) の形で多く存在する。藻類はこのような CO<sub>2</sub> 欠乏条件下に順化するために、能動的な HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送を伴う CO<sub>2</sub> 濃縮機構 (CO<sub>2</sub>-concentrating mechanism: CCM) を持つ。真核藻類における HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送体の実態は長らく不明であったが、申請者は緑藻クラミドモナスをモデルとして、細胞膜に局在する HLA3 と葉緑体包膜に局在する LCIA が協調して HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送に働き、光合成の維持に関わることを明らかにした (Yamano et al. *PNAS* 2015)。

CO<sub>2</sub> 欠乏条件下で生育できない表現型を指標にクラミドモナス変異株のスクリーニングを行ったところ、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送体遺伝子 *HLA3* と *LCIA* の発現量が低下した H82 株の単離に成功した (Wang et al. *Photosynth. Res* 2014)。H82 株の原因遺伝子はカルシウムイオン (Ca<sup>2+</sup>) 結合タンパク質 CAS のオルソログ遺伝子であることが相補実験により示された。

Ca<sup>2+</sup> は生物のシグナル伝達における主要なセカンドメッセンジャーとして働くが、植物の光合成の維持・制御にも深く関わることは古くから知られていた。例えば、光依存的に葉緑体内に Ca<sup>2+</sup> が流入することは 30 年以上も前に報告された (Muto et al. *FEBS Lett* 1982)。さらに Ca<sup>2+</sup> は光化学系 II の水分解・酸素発生を触媒する Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> クラスターの構成因子であるとともに、カルビン回路の酵素活性、葉緑体へのタンパク質輸送、循環的電子伝達経路など、光合成の多岐にわたる調節に関わる。Ca<sup>2+</sup> シグナルの伝達において、動植物に共通するカルモジュリンや Ca<sup>2+</sup> 依存性タンパク質リン酸化酵素の働きが詳細に調べられているが、植物に特有な制御因子 Ca<sup>2+</sup> 結合タンパク質 CAS (Han et al. *Nature* 2003) が同定され注目を集めた。CAS は葉緑体チラコイド膜に局在し、CO<sub>2</sub> ガス交換を行う気孔の閉鎖や、葉緑体から核へのレトログレードシグナルにより植物免疫応答に関わる遺伝子発現を制御することが報告されている (Nomura et al. *Plant J* 2007; Nomura et al. *Nat Commun* 2012)。

以上のように、藻類の HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送と陸上植物の CO<sub>2</sub> ガス交換といった、光合成維持のための CO<sub>2</sub> の獲得が、Ca<sup>2+</sup> 結合タンパク質 CAS という共通の因子で制御され、植物進化の過程で保存されていることが分かってきた。さて、これらを制御するもうひとつの共通因子が CO<sub>2</sub> である。シロイヌナズナでは CO<sub>2</sub> に応答した気孔閉鎖にリン酸化酵素や炭酸脱水酵素に関わるものが報告され (Hashimoto et al. *Nat Cell Biol* 2006; Hu et al. *Nat Cell Biol* 2010)、Ca<sup>2+</sup> と CO<sub>2</sub> のシグナル伝達のクロストークが明らかになりつつある。一方、緑藻では CCM のマスター調節因子 CCM1 が HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送体遺伝子を含むほぼ全ての CO<sub>2</sub> 欠乏誘導性遺伝子の発現を調節することから (Miura et al. *Plant Phys* 2004; Yamano et al. *Plant Phys* 2008)、CCM1 が CO<sub>2</sub> センサーであると考えられている。そこで本研究課題では、陸上植物とは異なる Ca<sup>2+</sup> と CO<sub>2</sub> シグナルのクロストーク制御を、緑藻の CCM 制御をモデルとして提唱できるのではないかと考えるに至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、HLA3 と LCIA による協調的な HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 輸送を中心とする CCM の駆動が、Ca<sup>2+</sup> と CO<sub>2</sub> シグナル伝達のクロストークによってどのように制御されるのかを明らかにすることである。具体的には、緑藻クラミドモナスの CCM の制御に重要な CAS の機能解析を中心に進めた。また、CAS が環境中の CO<sub>2</sub> 濃度に応答して葉緑体内でダイナミックに局在を変化させることが分かってきたことから、研究テーマをさらに発展させ、CO<sub>2</sub> に応答して局在を変化させる CCM 必須因子 LCIB タンパク質の局在変化がどのように制御されているのかについても明らかにす

ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

CAS の機能を明らかにするための方法として、(1) CAS タンパク質の  $\text{Ca}^{2+}$  結合性、(2) CAS の  $\text{CO}_2$  濃度に応答した細胞内局在の高解像度イメージング、(3)  $\text{Ca}^{2+}$  特異的阻害剤 BAPTA の添加実験による CAS が制御する遺伝子群の発現への影響、(4) RNA-seq 解析による CAS が制御する遺伝子群の網羅的同定を行った。また LCIB のタンパク質局在変化については、(5) LCIB 局在異常変異株のスクリーニング、(6) LCIB 局在異常変異株の原因遺伝子の同定と機能解析を行った。

### 4. 研究成果

(1) 大腸菌で発現させたクラミドモナス CAS の全長、N 末端、C 末端配列について、放射性同位体  $\text{Ca}^{45}$  を用いた *in vitro* 結合実験を行い、CAS の N 末端に  $\text{Ca}^{2+}$  が実際に結合することを明らかにした (Wang et al. *PNAS* 2016)。

(2) 改変型 GFP である Clover を CAS の C 末端に融合させたタンパク質を CAS 変異株に発現させたところ、その表現型を相補した。これを用いて *in vivo* における CAS の局在を調べたところ、CAS は CCM が誘導される  $\text{CO}_2$  欠乏条件では  $\text{CO}_2$  固定酵素 Rubisco が集積するピレノイドに局在することが強く示唆された。この結果は、CAS 抗体を用いた免疫蛍光染色でも再現した (Wang et al. *PNAS* 2016)。一方で、CAS の C 末端にタグを付与すると、CAS タンパク質が不安定化し分解される問題があり、*in vivo* で CAS の細胞内局在観察を継続することに問題が生じていた。そこで、CAS と Clover の間へのフレキシブルリンカー配列の挿入、発現株の繰り返しの作出と凍結保存などの試行錯誤を通して、CAS の高解像度における葉緑体内局在観察に初めて成功した (Yamano et al. *Protoplasma* 2018)。CAS は、CCM が誘導されない高  $\text{CO}_2$  条件では葉緑体のチラコイド膜に沿って分散しているが、低  $\text{CO}_2$  条件に移して 2 時間後にはピレノイドチューブ (ピレノイドに貫入しているチラコイド膜) に沿って車輪状に局在し、12 時間後にはピレノイド内部に凝縮して局在することが分かった。

(3) BAPTA 処理により、 $\text{CO}_2$  欠乏条件における  $\text{HCO}_3^-$  輸送体 HLA3 と LCIA の蓄積が減少し、それに伴って無機炭素への親和性が低下することを明らかにした。またカルモジュリンアンタゴニスト W7 の添加によっても同様の表現型が見られたことから、 $\text{HCO}_3^-$  輸送体の制御に  $\text{CO}_2$  だけではなく  $\text{Ca}^{2+}$  シグナル伝達に関わることが明確になった (Wang et al. *PNAS* 2016)。

(4) 野生株、CAS 変異株、相補株の RNA-seq データを解析し、CAS が *HLA3* と *LCIA* を含む多くの核コード遺伝子を制御することを明らかにした。(1) ~ (4) の研究成果より、 $\text{CO}_2$  濃縮の制御における葉緑体から核へのレトログレードシグナルを提唱した (Wang et al. *PNAS* 2016; 図 1)。

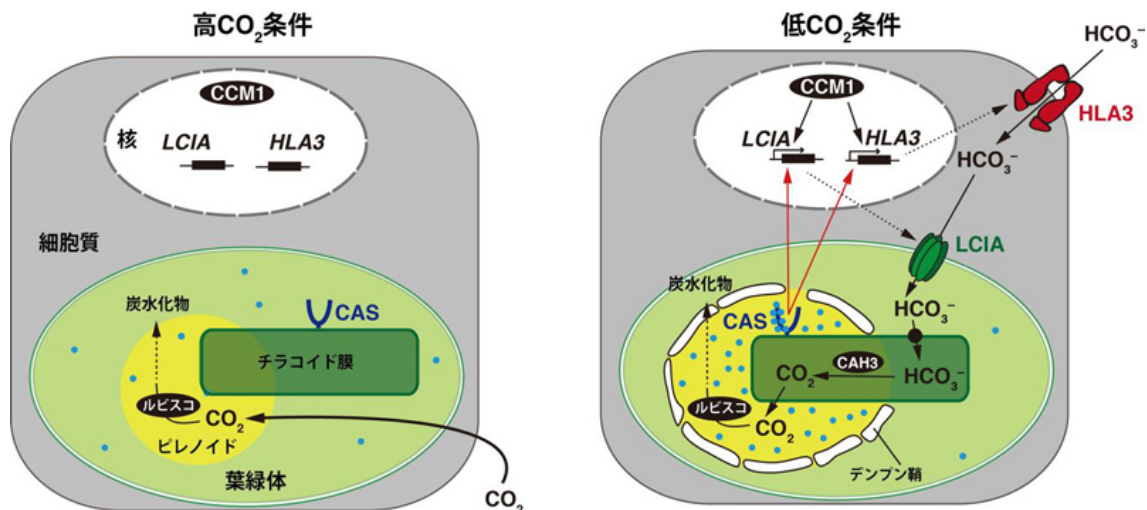


図 1. 葉緑体から核へのレトログレードシグナルによるクラミドモナスの CO<sub>2</sub> 濃縮機構の制御モデル

高 CO<sub>2</sub> 条件では CO<sub>2</sub> 濃縮機構を誘導する必要がないため、核内における *HLA3* と *LCIA* 遺伝子の転写誘導は起こらない。CO<sub>2</sub> 濃縮機構が誘導される明所かつ低 CO<sub>2</sub> 条件にさらされると、まず CCM1 によって *HLA3* と *LCIA* の速やかな転写が誘導される (20 分以内)。さらに葉緑体全体に局在していた CAS はチラコイド膜を介して速やかにピレノイド内部へと局在を変化させ、さらにピレノイド内部のカルシウムイオン (Ca<sup>2+</sup>) 濃度が上昇する。CAS が Ca<sup>2+</sup> と結合し活性化することで、葉緑体から核へとシグナルを伝達する (レトログレードシグナル)。これにより低 CO<sub>2</sub> 条件にさらして 20 分後以降の *HLA3* と *LCIA* の転写量が維持され、合成された *HLA3* タンパク質は細胞膜へ、*LCIA* タンパク質は葉緑体包膜へ局在し、細胞外から葉緑体内へと重炭酸イオンを輸送し、CO<sub>2</sub> 濃縮機構を駆動する。葉緑体の中の青丸は Ca<sup>2+</sup> を、チラコイド膜の黒丸はまだ同定されていない重炭酸イオン輸送体を示す。CAH3 は重炭酸イオンを CO<sub>2</sub> へと交換する反応を触媒する炭酸脱水酵素である。

(5) 共同研究により、高速蛍光顕微鏡、リアルタイム情報処理、1 細胞分取が統合されたインテリジェント画像活性型細胞選抜法の実証評価を行い、LCIB の細胞内空間情報に基づいた高速かつリアルタイムな 1 細胞分取ができることを実証した (Nitta et al. *Cell* 2018)。

(6) LCIB の局在変化が異常になった変異株 4-D1 を単離した。4-D1 株は LCIB のピレノイドへの移動が遅延し、葉緑体の基底側に LCIB が異常凝集する表現型を示した。4-D1 株では、デンプン枝切り合成酵素 isoamylase 1 (ISA1) の遺伝子が破壊されており、ピレノイド周囲のデンプン鞘が形成されなかった。また、4-D1 株では光合成における無機炭素に対する親和性が低下し、野生株に比べて生育が遅延した。以上の結果から、デンプン鞘はピレノイドから漏れ出る CO<sub>2</sub> の物理的な障壁となること、そして、それでも漏れ出た CO<sub>2</sub> をリサイクルする LCIB をデンプン鞘の周りに正しく配置するのに必要であることを明らかにした。デンプン鞘が形成できない変異株では、デンプン鞘による CO<sub>2</sub> の拡散障壁としての機能が失われただけでなく、LCIB が葉緑体の基底側で凝集するため、CO<sub>2</sub> をリサイクルする機能の一部も失われ、無機炭素に対する親和性が低下し、生育が遅延したと考えられた (Toyokawa et al. *Plant Phys* 2020)。

現在の地球環境は、温暖化・食糧不足・エネルギー枯渇などの様々な問題を抱えている。これに対して、藻類が持つ CCM を利用・改変し、光合成の能力を極限まで高めた植物を創出することで解決しようとする試みが世界的な競争のなか進められている。例えば、イネやコムギなどの主要作物に CCM を導入し、CO<sub>2</sub> の吸収量と生産量を高めるといった応用研究が進められている。本研究課題で明らかになった藻類の CCM の制御機構に関する新しい知見は、SDGs に関わる喫緊の課題を解決するためのブレイクスルーにつながることを期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Toyokawa C, Yamano T, Fukuzawa H	4. 巻 182
2. 論文標題 Pyrenoid Starch Sheath Is Required for LC1B Localization and the CO <sub>2</sub> -Concentrating Mechanism in Green Algae	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 1883-1893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1104/pp.19.01587">https://doi.org/10.1104/pp.19.01587</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamano T, Fukuzawa H	4. 巻 2050
2. 論文標題 Transformation of the Model Microalga <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> Without Cell-Wall Removal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Methods in Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 155-161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9740-4_16">https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9740-4_16</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山野 隆志、福澤 秀哉	4. 巻 29
2. 論文標題 緑藻クラミドモナスにおける光合成ターボエンジンの駆動と制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光合成研究	6. 最初と最後の頁 14-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamaoka Y, Shin S, Choi BY, Kim H, Jang S, Kajikawa M, Yamano T, Kong F, Legeret B, Fukuzawa H, Li-Beisson Y, Lee Y	4. 巻 31
2. 論文標題 The bZIP1 Transcription Factor Regulates Lipid Remodeling and Contributes to ER Stress Management in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Plant Cell	6. 最初と最後の頁 1127-1140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1105/tpc.18.00723">https://doi.org/10.1105/tpc.18.00723</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nitta N, Sugimura T, (他40名), Yamano T et al.	4. 巻 175
2. 論文標題 Intelligent Image-Activated Cell Sorting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cell	6. 最初と最後の頁 266 ~ 276.e13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.08.028">https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.08.028</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shinkawa H, Kajikawa M, Nomura Y, Ogura M, Sawaragi Y, Yamano T, Nakagami H, Sugiyama N, Ishihama Y, Kanasaki Y, Yoshikawa H, Fukuzawa H	4. 巻 60
2. 論文標題 Algal Protein Kinase, Triacylglycerol Accumulation Regulator 1, Modulates Cell Viability and Gametogenesis in Carbon/Nitrogen-Imbalanced Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant and Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 916 ~ 930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/pcp/pcz010">https://doi.org/10.1093/pcp/pcz010</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Owa M, Uchihashi T, Yanagisawa H, Yamano T, Iguchi H, Fukuzawa H, Wakabayashi K, Ando T, Kikkawa M	4. 巻 10
2. 論文標題 Inner lumen proteins stabilize doublet microtubules in cilia and flagella	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-019-09051-x">https://doi.org/10.1038/s41467-019-09051-x</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamano T, Toyokawa C, Fukuzawa H	4. 巻 255
2. 論文標題 High-resolution suborganellar localization of Ca <sup>2+</sup> -binding protein CAS, a novel regulator of CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Protoplasma	6. 最初と最後の頁 1015-1022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00709-018-1208-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamano T, Fukuzawa H	4. 巻 6
2. 論文標題 Indirect Immunofluorescence Assay in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> .	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Bio-protocol	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21769/BioProtoc.1864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang L, Yamano T, Takane T, Niiawa Y, Toyokawa C, Ozawa S, Tokutsu R, Takahashi Y, Minagawa J, Kanesaki Y, Yoshikawa H, Fukuzawa H	4. 巻 113
2. 論文標題 Chloroplast-mediated regulation of CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism by Ca <sup>2+</sup> -binding protein CAS in the green alga <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc Natl Acad Sci USA	6. 最初と最後の頁 12586-12591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1606519113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 山野 隆志、豊川 知華、福澤 秀哉
2. 発表標題 緑藻クラミドモナスのデンブン鞘はCO <sub>2</sub> 濃縮機構に寄与する
3. 学会等名 日本農芸化学会2020年度大会 (九州大学 伊都キャンパス)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 豊川 知華、山野 隆志、福澤 秀哉
2. 発表標題 Starch sheath is required for the CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 第61回日本植物生理学会年会 (大阪大学 吹田キャンパス)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嶋村 大亮、新川 友貴、山野 隆志、福澤 秀哉
2. 発表標題 SAGA1 Mutants of Chlamydomonas Exhibit the High-CO2 Requiring Phenotype due to the Repression of Bicarbonate Uptake System as well as the Abnormal Morphology of Pyrenoid
3. 学会等名 第61回日本植物生理学会年会（大阪大学 吹田キャンパス）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 豊川 知華、山野 隆志、福澤 秀哉
2. 発表標題 緑藻クラミドモナスのデンブリン鞘はLCIBの局在と無機炭素濃縮機構に必要である
3. 学会等名 ユーグレナ研究会 第35回研究集会（大阪府立大学 I-siteなんば）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋村 大亮、新川 友貴、山野 隆志、福澤 秀哉
2. 発表標題 CO2濃縮に関わるデンブリン結合性因子の同定とCRISPR/Cas9による遺伝子破壊
3. 学会等名 第37日本植物細胞分子生物学会大会（京都府立大学 稲盛記念会館）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山野 隆志、豊川 知華、新田 尚、杉村 武昭、磯崎 瑛宏、飯野 敬矩、伊藤 卓朗、合田 圭介、福澤 秀哉
2. 発表標題 インテリジェント画像活性細胞選抜法によるタンパク質局在変化を指標にした藻類細胞の高速変異株スクリーニング
3. 学会等名 第13回クラミドモナス研究会（東京工業大学 すすかけ台キャンパス 大学会館）
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 豊川 知華、山野 隆志、松岡 俊樹、福澤 秀哉
2. 発表標題 ピレノイド周囲のデンブリン鞘はLCIBの局在と無機炭素濃縮機構に必要である
3. 学会等名 第13回クラミドモナス研究会 (東京工業大学 すすかけ台キャンパス 大学会館)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山野 隆志
2. 発表標題 Running and regulation of photosynthetic turbocharger engine in green alga
3. 学会等名 ERATOセミナー (理化学研究所和光キャンパス) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山野 隆志、豊川 知華、松岡 俊樹、新田 尚、杉村 武昭、磯崎 瑛宏、飯野 敬矩、伊藤 卓朗、合田 圭介、福澤 秀哉
2. 発表標題 High-throughput screening of algal mutant cells based on CO <sub>2</sub> -dependent protein relocation by intelligent image-activated cell sorting
3. 学会等名 第60回日本植物生理学会年会 (名古屋大学 東山キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊川 知華、松岡 俊樹、山野 隆志、福澤 秀哉
2. 発表標題 Localization of low-CO <sub>2</sub> inducible protein B (LCIB) in the chloroplast is determined by net CO <sub>2</sub> concentration and CCM1 in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 第60回日本植物生理学会年会 (名古屋大学 東山キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山野 隆志、豊川 知華、新田 尚、杉村 武昭、磯崎 瑛宏、飯野 敬矩、伊藤 卓朗、合田 圭介、福澤 秀哉
2. 発表標題 細胞検索エンジンによるタンパク質局在異常を指標とした藻類細胞の高速ミュータントスクリーニング
3. 学会等名 2019年生体運動合同班会議 (福岡大学 七隈キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Yamano, Chihana Toyokawa, Toshiki Matsuoka, Nao Nitta, Takeaki Sugimura, Akihiro Isozaki, Takanori Iino, Takuro Ito, Keisuke Goda, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 High-throughput screening of algal mutants by intelligent image-activated cell sorting
3. 学会等名 International Symposium on Photosynthesis and Chloroplast Biogenesis 2018 (Kurashiki Civic Hall, Okayama, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Yamano, Chihana Toyokawa, Toshiki Matsuoka, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> -dependent relocation of calcium-binding protein CAS and LCIB essential for carbon-concentrating mechanism in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 18th International Conference on the Cell and Molecular Biology of <i>Chlamydomonas</i> (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Shimamura, Yuki Niikawa, Donghui Hu, Asuka Miyamoto, Tomoya Honjo, Noriko Kozai, Chihana Toyokawa, Takashi Yamano, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Isolation and characterization of novel high-CO <sub>2</sub> -requiring mutants of <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 The 17th International Joint Mini-Symposium on Molecular and Cell Biology among Kyoto University, National Taiwan University, the University of Tsukuba (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 豊川 知華, 松岡 俊樹, 西村 明洋, 山野 隆志, 福澤 秀哉
2. 発表標題 緑藻クラミドモナスのCO2濃縮機構に必須な因子LCIBの局在制御機構
3. 学会等名 日本植物学会第82回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 CO2濃縮に必要な因子LCIBがピレノイド周囲に局在する培養条件の再検討
2. 発表標題 松岡 俊樹, 豊川 知華, 山野 隆志, 福澤 秀哉
3. 学会等名 日本植物学会第82回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嶋村 大亮, 新川 友貴, 胡 東輝, 本庄 智也, 香西 紀子, 山野 隆志, 福澤 秀哉
2. 発表標題 緑藻CO2要求性変異株の単離とCO2濃縮機構の制御因子の大規模探索
3. 学会等名 日本植物学会第82回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新川 友貴, 胡 東輝, 王 連勇, 山野 隆志, 吉川 博文, 兼崎 友, 福澤 秀哉
2. 発表標題 葉緑体Ca <sup>2+</sup> 結合タンパク質CASおよびCa <sup>2+</sup> シグナルを介してCO <sub>2</sub> 応答性遺伝子を制御し光合成無機炭素親和性を維持する
3. 学会等名 第8回日本光合成学会年会およびシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山野 隆志
2. 発表標題 藻類のCO <sub>2</sub> 濃縮とその制御 - 光合成のターボエンジンはいかにして駆動するか-
3. 学会等名 第13回植物縦横無尽の会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Yamano
2. 発表標題 Chloroplast-mediated regulation of CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism by Ca <sup>2+</sup> -binding protein CAS
3. 学会等名 第19回京都大学生命科学研究科シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山野 隆志、新川 友貴、豊川 知華、王 連勇、兼崎 友、吉川 博文、福澤 秀哉
2. 発表標題 葉緑体Ca <sup>2+</sup> 結合タンパク質CASによる核のCO <sub>2</sub> 応答性遺伝子発現とCO <sub>2</sub> 濃縮の制御
3. 学会等名 日本植物学会第81回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新川 友貴、胡 東輝、嶋村 大亮、本庄 智也、香西 紀子、宮本 明日香、豊川 知華、山野 隆志、福澤 秀哉
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 要求性変異株の単離とCO <sub>2</sub> 濃縮機構の制御因子の大規模探索
3. 学会等名 第59回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山野 隆志、王 連勇、高根 俊輔、新川 友貴、豊川 知華、小澤 真一郎、得津 隆太郎、高橋 裕一郎、皆川 純、兼崎 友、吉川 博文、福澤 秀哉
2. 発表標題 Ca <sup>2+</sup> 結合タンパク質CASによる葉緑体を介した重炭酸イオン輸送の制御機構
3. 学会等名 第7回日本光合成学会年会およびシンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Lianyong Wang, Takashi Yamano, Shunsuke Takane, Yuki Niikawa, Chihana Toyokawa, Ryutaro Tokutsu, Jun Minagawa, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Thylakoid calcium-binding protein CAS and calcium regulate the expression of ABC-type plasma membrane bicarbonate transporter in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 17th International Conference on the Cell and Molecular Biology of <i>Chlamydomonas</i> (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Chihana Toyokawa, Takashi Yamano, Lianyong Wang, Jun Minagawa, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Suborganellar localization of chloroplast Ca <sup>2+</sup> -binding protein CAS, a novel regulator of CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 17th International Conference on the Cell and Molecular Biology of <i>Chlamydomonas</i> (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuki Niikawa, Lianyong Wang, Takashi Yamano, and Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Identification of nuclear genes regulated by chloroplast calcium-sensing receptor homologue, CAS, under CO <sub>2</sub> -limiting conditions by transcriptome analyses in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 17th International Conference on the Cell and Molecular Biology of <i>Chlamydomonas</i> (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takashi Yamano, Emi Sato, Hiro Iguchi, Yuri Fukuda, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Cooperative bicarbonate uptake into chloroplast stroma by HLA3 and LCIA in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 17th International Conference on the Cell and Molecular Biology of <i>Chlamydomonas</i> (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takashi Yamano, Lianyong Wang, Shunsuke Takane, Yuki Niikawa, Chihana Toyokawa, Ryutaro Tokutsu, Jun Minagawa, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Chloroplast-mediated regulation of CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism by Ca <sup>2+</sup> -binding protein CAS in the green alga <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 Satellite Meeting on Photosynthesis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuki Niikawa, Lianyong Wang, Takashi Yamano, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Identification of nuclear genes regulated by chloroplast calcium-sensing receptor homologue, CAS, under CO <sub>2</sub> -limiting conditions by transcriptome analyses in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 The IXth International Symposium on Inorganic Carbon Utilization by Aquatic Photosynthetic Organisms (CCM9) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Chihana Toyokawa, Takashi Yamano, Lianyong Wang, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Suborganellar localization of chloroplast Ca <sup>2+</sup> -binding protein CAS, a novel regulator of CO <sub>2</sub> -concentrating mechanism, in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 The IXth International Symposium on Inorganic Carbon Utilization by Aquatic Photosynthetic Organisms (CCM9) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takashi Yamano, Emi Sato, Hiro Iguchi, Yuri Fukuda, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Characterization of cooperative bicarbonate transport uptake into chloroplast stroma in the green alga <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 The IXth International Symposium on Inorganic Carbon Utilization by Aquatic Photosynthetic Organisms (CCM9) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Lianyong Wang, Takashi Yamano, Shunsuke Takane, Yuki Niikawa, Chihana Toyokawa, Ryutaro Tokutsu, Jun Minagawa, Hideya Fukuzawa
2. 発表標題 Thylakoid calcium-binding protein CAS and calcium regulate the inorganic carbon uptake in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
3. 学会等名 The IXth International Symposium on Inorganic Carbon Utilization by Aquatic Photosynthetic Organisms (CCM9) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 王 連勇、山野隆志、新川 友貴、豊川 知華、福澤 秀哉
2. 発表標題 緑藻クラミドモナスにおいて光とCO <sub>2</sub> により制御されるカルシウム結合タンパク質CASの細胞内局在
3. 学会等名 第58回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 山野隆志	4. 発行年 2018年
2. 出版社 講談社サイエンティフィック	5. 総ページ数 11
3. 書名 京大発！フロンティア生命科学「18章：体の設計図を読む ゲノム情報と進化」	

1. 著者名 山野隆志、福澤秀哉	4. 発行年 2016年
2. 出版社 日本農芸化学会	5. 総ページ数 2
3. 書名 微細藻の光合成を支える重炭酸イオン輸送 -細胞膜と葉緑体包膜に局在する重炭酸イオン輸送体の発見-	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 Method of transferring gene into algal cell involving utilizing multiple square-wave pulses in three steps	発明者 福澤 秀哉、山野 隆志、伊福 健太郎、早川 靖彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、9255276	取得年 2016年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

<p>京都大学プレスリリース「光合成により生じたデンプンの新たな機能を発見」 <a href="http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200406_2.html">http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200406_2.html</a></p> <p>京都大学プレスリリース「世界初のIntelligent Image-Activated Cell Sorterを開発 - 細胞画像の深層学習により高速細胞選抜を実現 - 」 <a href="http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180828_1.html">http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180828_1.html</a></p> <p>京都大学プレスリリース「光合成のターボエンジンCO2濃縮機構が葉緑体を介して制御される仕組みを新たに発見」 <a href="http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/161017_1.html">http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/161017_1.html</a></p>
---

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----