

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H03241

研究課題名（和文）葉緑体機能を支えるレドックス制御システムの包括的解析

研究課題名（英文）Comprehensive Study of the Redox Regulation System for Supporting Chloroplast Functions

研究代表者

吉田 啓亮（YOSHIDA, Keisuke）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：40632310

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、植物光合成の制御メカニズムの解明を目指し、酸化還元に応じたタンパク質の翻訳後修飾であるレドックス制御に注目した。分子生物学・生化学から植物生理学を貫徹する基礎研究を行い、レドックス制御系の分子基盤・生理意義に関する新たな知見を得ることができた。以下はその例である。タンパク質を酸化して不活性化する新規の還元力経路を同定し、さらに複数の酸化経路が協調して機能するしくみを明らかにした。レドックス制御の標的酵素を同定し、さらにその制御機構の詳細を生化学的に明らかにした。ゲノム編集を有効に活用し、レドックス制御系の生理的役割を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で得られた成果は、植物の光合成の重要な制御系として理解されながらもシステム全体像が掴めていなかったレドックス制御系に関して、確実にその理解を推進したものである。特に、研究代表者が2018年に初めて明らかにしたタンパク質酸化システムをさらに詳細かつ拡張的に解明できたことは、基礎学術的に大きな成果である。また、ゲノム編集技術を活用することで、レドックス制御系がバイオマス生産に果たす役割を実証した。この知見は、システム改変によって植物の高機能化を試みるための指針となるものである。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to clarify the redox regulation system for supporting chloroplast functions in plants. Comprehensive research in vitro and in vivo has led to the discovery of new aspects of the redox regulation system. 1) We identified new redox pathways for oxidizing and thereby deactivating chloroplast proteins. We further elucidated the mechanism in which some protein-oxidation pathways work in concert. 2) We identified new target enzymes of the redox regulation. Using biochemical procedures, we further elucidated their redox regulation mechanisms in detail. 3) Using the gene editing technology, we elucidated physiological role of the redox regulation system in planta.

研究分野：生化学・植物生理科学

キーワード：レドックス制御系 葉緑体 光合成 シロイヌナズナ チオレドキシン

### 1. 研究開始当初の背景

レドックス制御とは、酸化還元状態に応じて標的酵素のチオール基の状態（ジスルフィド結合の形成・開裂など）を制御することで、その機能を調節する分子機構である。植物葉緑体のレドックス制御は、光合成電子伝達系によって得られる還元力を用いることにより、光に応答した葉緑体の機能調節を可能にしている。その従来の反応経路

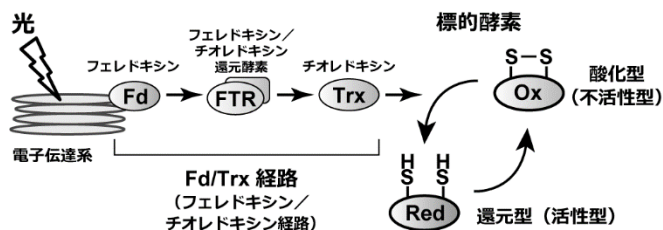


図1 葉緑体レドックス制御系の従来の反応経路

として、電子伝達系のフェレドキシン (Fd) からチオレドキシン (Trx) を介して一部の標的酵素へと至る単純な還元力カスケード (Fd/Trx 経路) が知られていた (図1)。Fd/Trx 経路は 1970 年代にブキャナンらによって発見され、それ以来、葉緑体レドックス制御の基盤として理解されてきた。ところが、今世紀の植物オミクス解析の進展によって、葉緑体のレドックス制御系は数多くの制御因子群および標的酵素群によって構成されていることが明らかになってきたのである (図2)。例えば、制御因子である Trx は、活性部位以外のアミノ酸配列によって5つものサブタイプに分類される。これらの知見は、還元力伝達経路をネットワーク状に複雑に張り巡らせ、多岐にわたる葉緑体機能を状況に応じて巧みに操っている可能性を想起させる。では、この制御システムは、実際にどのように構成され、環境変動に対してどのように応答し、そして植物の生存戦略においてどのような役割を果たすのだろうか。これらの疑問の解明は、新たな局面を迎えているレドックス研究の最重要課題と捉え、本研究を行った。

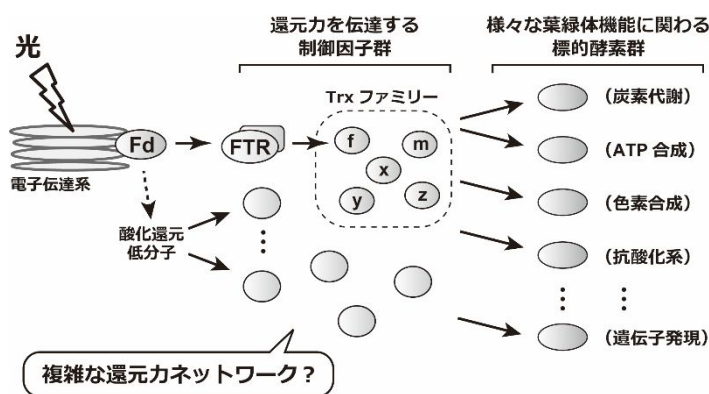


図2 近年示唆されているネットワーク状の葉緑体レドックス制御系。多くの制御因子と標的酵素により構成される。

### 2. 研究の目的

葉緑体レドックス制御系を構成する還元力伝達経路を網羅的かつ詳細に解析し、この制御システムが葉緑体機能を統御するための分子基盤を解明する。また、制御システム全体のレドックス応答を検出し、さらに各システム構成因子の欠損変異株・機能改変株の表現型を解析する。それらを統合することで、この制御システムが持つ生理意義を解明する。以上より、葉緑体レドックス制御系の理解を基礎科学の視点から総合的に深めることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本課題は、研究内容を以下の3つに大別して進めた。植物材料としては、以前の研究より発現プラスミド、精製タンパク質、抗体、変異株などを多数揃えていたシロイヌナズナを使用した。

研究1：未知の還元力伝達経路の同定

制御因子群がどのような標的酵素に対してどのような効率で還元力伝達を行っているのかを、インタラクトーム解析および精製タンパク質を用いた in vitro 構成的解析を軸として調べる。

研究2：生体内レドックスダイナミクスの網羅的検出

システム構成因子群の酸化還元状態は、光環境の変化に対してどのように応答するのかを網羅的に調べる。

研究3：変異株植物の解析による生理意義の解明

ゲノム編集を用いて複数の変異株を作成し、レドックス制御系の異常が植物の生育や光合成に与える影響を調べる。

### 4. 研究成果

一連の研究により、以下に代表される成果を挙げることができた。

タンパク質酸化機構の解明  
 研究代表者は2018年に長年の謎となっていたタンパク質酸化経路 (TrxL2/2CP 経路) を同定した (図3; Yoshida et al. *PNAS* 2018)。この発見を足掛かりとしてさらにタンパク質酸化機構の全体像に迫るための研究を行った。その結果、TrxL2/2CP 経路が酸化系的ペントースリン酸経路の鍵酵素 G6PDH の酸化・活性化因子として働くこと (Yoshida et al. *Biochem J.* 2019)、TrxL2 の他に ACHT という Trx 様タンパク質が酸化因子として働くこと (Yokochi et al. *J. Biol. Chem.* 2019)、TrxL2 と ACHT が異なる酸化標的の選択性を持っていること (Yokochi et al. *PNAS* 2021b)、ストロマの代謝系酵素だけでなく ATP 合成酵素も TrxL2 および ACHT に依存した酸化・不活性化制御を受けること (Sekiguchi et al. *J. Biol. Chem.* 2022)、ACHT 過剰発現株の解析から、標的酵素の還元・酸化のバランスが光合成や生育に重要であること (Fukushi et al. *J. Plant Res.* 2024) などを明らかにした。

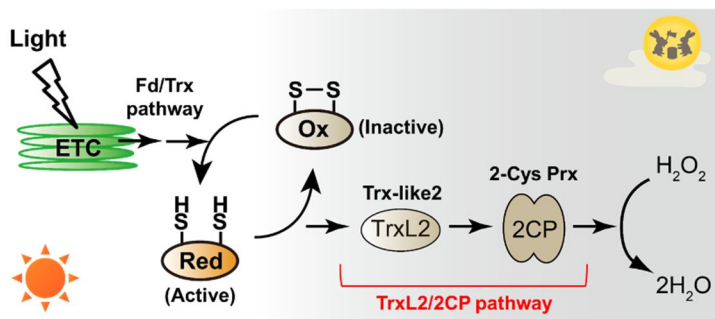


図3 光合成機能を夜に抑制するためのタンパク質酸化経路

レドックス制御の新規標的酵素の同定および分子基盤解明

過去の研究からレドックス制御を受けることが示唆されていた葉緑体酵素に主に着目し、精製タンパク質を用いた詳細な生化学解析を行ってその可否を検証した。その結果、葉緑体のセリン合成経路で働くホスホグリセリン酸デヒドロゲナーゼ (PGDH; Yoshida et al. *J. Biol. Chem.* 2020) および葉緑体の解糖系で働くホスホフルクトキナーゼ (PFK; Yoshida and Hisabori *Plant Cell Physiol.* 2021) を新規のレドックス制御の標的酵素として同定した。これらの酵素については、制御を受けるシステイン残基の特定などレドックス制御の分子基盤も合わせて明らかにした。PFK のレドックス制御機構の解明は、2023年に植物生理学会から PCP Best Paper Award を受賞した。

また、以前よりレドックス制御の標的酵素として知られていたものに関しても、詳細な in vitro 解析を通して新規の制御機構を明らかにした (Fukui et al. *Plant Cell Physiol.* 2022; Akiyama et al. *PNAS* 2023)。

レドックス制御の生理意義の解明

ゲノム編集 CRISPR/Cas9 を有効に活用し、レドックス制御系が果たす生理的役割を明らかにした。具体的には、葉緑体からの還元力排出に働くリンゴ酸バルブの鍵酵素であるリンゴ酸デヒドロゲナーゼ (MDH) のレドックス制御スイッチをピンポイントで破壊し、その表現型を解析することで、この酵素のレドックス制御が変動光環境で果たす役割を明らかにした (Yokochi et al. *PNAS* 2021a)。また、古典的なレドックス制御経路でありながらもそれがいかに重要なかが不明であった Fd/Trx 経路に関して、過去に報告がない完全破壊株を作出した (図4)。一連の生理解析を通して、Fd/Trx 経路が植物の光合成や生育に果たす必須機能を実証した (Yoshida et al. *J. Biol. Chem.* 2022)。興味深いことに、Fd/Trx 経路以外にも光依存的に働く還元力伝達経路が存在することを示唆する結果も得られた。

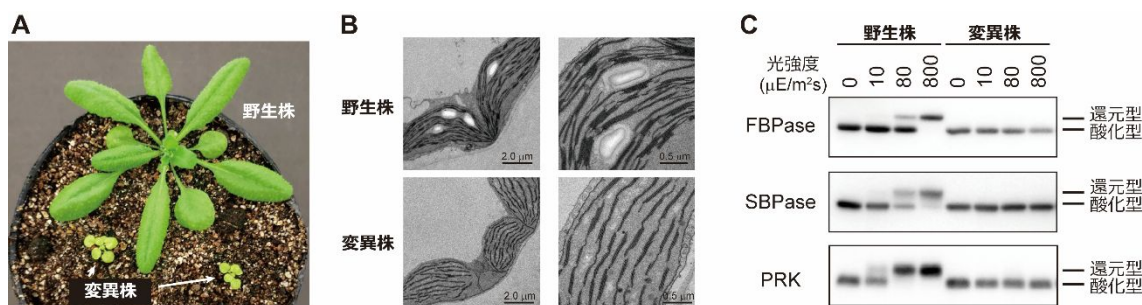


図4 Fd/Trx 経路の機能抑制が植物に与える影響。Yoshida et al. (2022) より改変。

- (A) 野生株と Fd/Trx 経路の変異株の生育の表現型
- (B) 電子顕微鏡により観察した葉緑体の微細構造
- (C) ストロマ酵素 (FBPase, SBPase, PRK) の光に依存した酸化還元変化。

これら研究により、葉緑体レドックス制御系の総合的理解を確実に推し進めることができた (Yoshida and Hisabori *Plant Cell Physiol.* 2023)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 26件）

1. 著者名 Yoshida Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 65
2. 論文標題 Divergent Protein Redox Dynamics and Their Relationship with Electron Transport Efficiency during Photosynthesis Induction	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plant And Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 737 ~ 747
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcae013	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 Fukushi Yuka, Yokochi Yuichi, Hisabori Toru, Yoshida Keisuke	4. 巻 137
2. 論文標題 Overexpression of thioredoxin-like protein ACHT2 leads to negative feedback control of photosynthesis in Arabidopsis thaliana	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Plant Research	6. 最初と最後の頁 445 ~ 453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10265-024-01519-2	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 Wang Mengyao, Tabeta Hiromitsu, Ohtaka Kinuka, Kuwahara Ayuko, Nishihama Ryuichi, Ishikawa Toshiki, Toyooka Kiminori, Sato Mayuko, Wakazaki Mayumi, Akashi Hiromichi, Tsugawa Hiroshi, Shoji Tsubasa, Okazaki Yozo, Yoshida Keisuke, Sato Ryoichi, Ferjani Ali, Kohchi Takayuki, Hirai Masami, Yokota	4. 巻 7
2. 論文標題 The phosphorylated pathway of serine biosynthesis affects sperm, embryo, and sporophyte development, and metabolism in Marchantia polymorpha	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-023-05746-6	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 Yoshida Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 64
2. 論文標題 Current Insights into the Redox Regulation Network in Plant Chloroplasts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plant And Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 704 ~ 715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcad049	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 Tran Chau M., Mihara Shoko, Yoshida Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 653
2. 論文標題 Cystathionine- <i>γ</i> -synthase X proteins negatively regulate NADPH-thioredoxin reductase C activity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biochemical and Biophysical Research Communications	6. 最初と最後の頁 47 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbrc.2023.02.055	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 Torii Machi, Horie Momoka, Kumaki Yuka, Yoneyama Taku, Kore-eda Shin, Mitsuyama Susumu, Yoshida Keisuke, Hisabori Toru, Nishiyama Yoshitaka	4. 巻 480
2. 論文標題 Chloroplast translation factor EF-Tu of <i>Arabidopsis thaliana</i> can be inactivated via oxidation of a specific cysteine residue	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biochemical Journal	6. 最初と最後の頁 307 ~ 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1042/BCJ20220609	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 Akiyama Kentaro, Ozawa Shin-ichiro, Takahashi Yuichiro, Yoshida Keisuke, Suzuki Toshiharu, Kondo Kumiko, Wakabayashi Ken-ichi, Hisabori Toru	4. 巻 120
2. 論文標題 Two specific domains of the $\gamma$ subunit of chloroplast FoF1 provide redox regulation of the ATP synthesis through conformational changes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2218187120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2218187120	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 Yoshida Keisuke, Yokochi Yuichi, Tanaka Kan, Hisabori Toru	4. 巻 298
2. 論文標題 The ferredoxin/thioredoxin pathway constitutes an indispensable redox-signaling cascade for light-dependent reduction of chloroplast stromal proteins	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biological Chemistry	6. 最初と最後の頁 102650 ~ 102650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbc.2022.102650	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 Sekiguchi Takatoshi、Yoshida Keisuke、Wakabayashi Ken-Ichi、Hisabori Toru	4. 巻 298
2. 論文標題 Dissipation of the proton electrochemical gradient in chloroplasts promotes the oxidation of ATP synthase by thioredoxin-like proteins	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biological Chemistry	6. 最初と最後の頁 102541 ~ 102541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbc.2022.102541	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 Fukui K, Yoshida K, Yokochi Y, Sekiguchi T, Wakabayashi KI, Hisabori T, Mihara S.	4. 巻 63
2. 論文標題 The Importance of the C-terminal Cys pair of Phosphoribulokinase in Phototrophs in Thioredoxin-Dependent Regulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plant Cell Physiol.	6. 最初と最後の頁 855-868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcac050.	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 Fukushi Y, Yokochi Y, Wakabayashi KI, Yoshida K, Hisabori T.	4. 巻 11
2. 論文標題 Verification of the Relationship between Redox Regulation of Thioredoxin Target Proteins and Their Proximity to Thylakoid Membranes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Antioxidants	6. 最初と最後の頁 773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/antiox11040773	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 Yokochi Y, Fukushi Y, Wakabayashi KI, Yoshida K, Hisabori T.	4. 巻 118
2. 論文標題 Oxidative regulation of chloroplast enzymes by thioredoxin and thioredoxin-like proteins in Arabidopsis thaliana.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc Natl Acad Sci U S A.	6. 最初と最後の頁 e2114952118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2114952118	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 Kondo K, Izumi M, Inabe K, Yoshida K, Imashimizu M, Suzuki T, Hisabori T.	4. 巻 297
2. 論文標題 The phototroph-specific $\sigma$ -hairpin structure of the $\sigma$ subunit of FoF1-ATP synthase is important for efficient ATP synthesis of cyanobacteria.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Biol Chem.	6. 最初と最後の頁 101027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbc.2021.101027.	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 Yoshida K, Hisabori T.	4. 巻 62
2. 論文標題 Biochemical Basis for Redox Regulation of Chloroplast-Localized Phosphofructokinase from <i>Arabidopsis thaliana</i> .	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Cell Physiol.	6. 最初と最後の頁 401-410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcaa174.	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 Juniar L, Tanaka H, Yoshida K, Hisabori T, Kurisu G.	4. 巻 29
2. 論文標題 Structural basis for thioredoxin isoform-based fine-tuning of ferredoxin-thioredoxin reductase activity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Protein Sci.	6. 最初と最後の頁 2538-2545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pro.3964	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 Yokochi Y, Yoshida K, Hahn F, Miyagi A, Wakabayashi KI, Kawai-Yamada M, Weber APM, Hisabori T.	4. 巻 118
2. 論文標題 Redox regulation of NADP-malate dehydrogenase is vital for land plants under fluctuating light environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc Natl Acad Sci U S A.	6. 最初と最後の頁 e2016903118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2016903118	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 Yoshida K, Ohtaka K, Hirai MY, Hisabori T.	4. 巻 295
2. 論文標題 Biochemical insight into redox regulation of plastidial 3-phosphoglycerate dehydrogenase from <i>Arabidopsis thaliana</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J Biol Chem.	6. 最初と最後の頁 14906-14915
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1074/jbc.RA120.014263	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 Hoshino T, Yamabe E, Hawari MA, Tamura M, Kanamaru S, Yoshida K, Koesoema AA, Matsuda T	4. 巻 76
2. 論文標題 Oxidation of aromatic and aliphatic aldehydes to carboxylic acids by <i>Geotrichum candidum</i> aldehyde dehydrogenase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tetrahedron	6. 最初と最後の頁 131387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tet.2020.131387	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 Sekiguchi T, Yoshida K, Okegawa Y, Motohashi K, Wakabayashi KI, Hisabori T.	4. 巻 1861
2. 論文標題 Chloroplast ATP synthase is reduced by both f-type and m-type thioredoxins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biochim Biophys Acta Bioenerg	6. 最初と最後の頁 148261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbabi.2020.148261	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 Mihara S., Sugiura K., Yoshida K., Hisabori T.	4. 巻 71
2. 論文標題 Thioredoxin targets are regulated in heterocysts of cyanobacterium <i>Anabaena</i> sp. PCC7120 in a light-independent manner	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Exp. Bot.	6. 最初と最後の頁 2018-2027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jxb/erz561	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 Yokochi Y., Sugiura K., Takemura K., Yoshida K., Hara S., Wakabayashi K-I., Kitao A., Hisabori T.	4. 巻 294
2. 論文標題 Impact of key residues within chloroplast thioredoxin-f on recognition for reduction and oxidation of target proteins	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Biol. Chem.	6. 最初と最後の頁 17437-17450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1074/jbc.RA119.010401	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 Sugiura K., Yokochi Y., Fu N., Fukaya Y., Yoshida K., Mihara S., Hisabori T.	4. 巻 294
2. 論文標題 The thioredoxin (Trx) redox-state sensor protein can visualize Trx activities in the light-dark response in chloroplasts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Biol. Chem.	6. 最初と最後の頁 12091-12098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1074/jbc.RA119.007616	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 Yoshida K., Uchikoshi E., Hara S., Hisabori T.	4. 巻 476
2. 論文標題 Thioredoxin-like2/2-Cys peroxiredoxin redox cascade acts as oxidative activator of glucose-6-phosphate dehydrogenase in chloroplasts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biochem. J.	6. 最初と最後の頁 1781-1790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1042/BCJ20190336	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 Inabe K., Kondo K., Yoshida K., Wakabayashi K-I., Hisabori T.	4. 巻 294
2. 論文標題 The N-terminal region of the e subunit from cyanobacterial ATP synthase alone can inhibit ATPase activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Biol. Chem.	6. 最初と最後の頁 10094-10103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1074/jbc.RA118.007131	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 Yoshida Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 9
2. 論文標題 Simple Method to Determine Protein Redox State in Arabidopsis thaliana	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 BIO-PROTOCOL	6. 最初と最後の頁 e3250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21769/BioProtoc.3250	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 Yoshida K., Yokochi Y., Hisabori T.	4. 巻 10
2. 論文標題 New light on chloroplast redox regulation: Molecular mechanisms of protein thiol oxidation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Front. Plant Sci.	6. 最初と最後の頁 1534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2019.01534	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 福土 結香, 横地 佑一, 若林 憲一, 吉田 啓亮, 久堀 徹	4. 巻 33
2. 論文標題 チオレドキシソ様タンパク質による葉緑体内の酸化制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 光合成研究	6. 最初と最後の頁 13-20
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 関口 敬俊, 吉田 啓亮, 若林 憲一, 久堀 徹	4. 巻 32
2. 論文標題 チオレドキシソ様タンパク質による葉緑体ATP合成酵素の酸化制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光合成研究	6. 最初と最後の頁 131-137
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 -

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 福土結香, 横地佑一, 久堀徹, 吉田啓亮
2. 発表標題 シロイヌナズナにおける色素体局在型Trx 様タンパク質の胚形成への関与
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Minh Chau Tran, Keisuke Yoshida
2. 発表標題 Functional analysis of Trx-like protein CDSP32 in chloroplast redox regulation
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田啓亮, 久堀徹
2. 発表標題 光合成誘導期におけるレドックス制御と電子伝達効率の関連性
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 村井美波, 木村文香, 今泉滉, 吉田啓亮, 車玉芬, 石川規子, 久堀徹, 上妻馨梨, 伊福健太郎
2. 発表標題 シロイヌナズナpifi 変異体における光化学系II 最大量子収率の低下と葉緑体NDH 複合体活性の関わり
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平井優美, 王梦瑶, 多部田弘光, 大高きぬ香, 桑原亜由子, 西浜竜一, 石川寿樹, 豊岡公德, 佐藤繭子, 若崎真由美, 明石寛道, 津川裕司, 庄司翼, 岡咲洋三, 吉田啓亮, 佐藤諒一, Ali Ferjani, 河内孝之
2. 発表標題 ゼニゴケの発生におけるセリン生合成リン酸化経路の機能
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋拓子, 井須敦子, 吉田啓亮, 若林憲一, 久堀徹, 西山佳孝
2. 発表標題 クラミドモナスPGR1 タンパク質におけるシステイン残基の機能解析
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田啓亮, 久堀徹
2. 発表標題 Biochemical Basis for Redox Regulation of Chloroplast-Localized Phosphofructokinase from Arabidopsis thaliana
3. 学会等名 第64回日本植物生理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福土結香, 横地佑一, 若林憲一, 吉田啓亮, 久堀徹
2. 発表標題 シロイヌナズナにおける葉緑体内局在型Trx様タンパク質の非光化学的消光制御への関与
3. 学会等名 第64回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tran C.M., Mihara S., Yoshida K., Hisabori T.
2. 発表標題 Cystathionine-beta-synthase X proteins negatively regulate NADPH-thioredoxin reductase C activity
3. 学会等名 Taiwan-Japan Plant Biology 2023 (TJPB2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fukushi Y., Hisabori T., Yoshida K.
2. 発表標題 Physiological impacts of Trx-like protein overexpression in Arabidopsis chloroplasts
3. 学会等名 Taiwan-Japan Plant Biology 2023 (TJPB2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahashi H., Takayama K., Isu A., Wakabayashi KI., Yoshida K. Hisabori T., Nishiyama Y.
2. 発表標題 The role of PGRL1 in the photoprotection of photosystem I in the green alga Chlamydomonas reinhardtii
3. 学会等名 Taiwan-Japan Plant Biology 2023 (TJPB2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshida K.
2. 発表標題 Uncovering redox regulation network in plant chloroplasts
3. 学会等名 Taiwan-Japan Plant Biology 2023 (TJPB2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toru Hisabori, Yuichi Yokochi, Takatoshi Sekiguchi, Yuka Fukushi, Ken-Ichi Wakabayashi, Keisuke Yoshida
2. 発表標題 Redox regulation system in chloroplasts; what we know about reduction and oxidation of target enzymes
3. 学会等名 International Symposium on Photosynthesis and Chloroplast Regulation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sekiguchi Takatoshi, Keisuke Yoshida, Ken-Ichi Wakabayashi, Toru Hisabori
2. 発表標題 Oxidative regulation of chloroplast ATP synthase by thioredoxin-like proteins
3. 学会等名 International Symposium on Photosynthesis and Chloroplast Regulation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村井美波, 吉田啓亮, 車玉芬, 石川規子, 久堀徹, 伊福健太郎
2. 発表標題 光合成のレドックス制御に関わるPIFIタンパク質の分子機能解析
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田啓亮, 横地佑一, 田中寛, 久堀徹
2. 発表標題 フェレドキシン/チオレドキシン系の完全破壊株シロイヌナズナの解析
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上村柚紀子, 吉田啓亮, Chris White-Gloria, Greg B. Moorhead, 若林憲一, 久堀徹
2. 発表標題 色素体セリン合成系酵素3- ホスホグリセリン酸デヒドロゲナーゼのリン酸化
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福土結香, 横地佑一, 若林憲一, 吉田啓亮, 久堀徹
2. 発表標題 Trx およびTrx 様タンパク質による葉緑体タンパク質の酸化制御
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口敬俊, 吉田啓亮, 若林憲一, 久堀徹
2. 発表標題 Trx 様タンパク質による葉緑体ATP 合成酵素の不活性化制御
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mengyao Wang, Hiromitsu Tabeta, Kinuka Ohtaka, Ayuko Kuwahara, Kiminori Toyooka, Mayuko Sato, Mayumi Wakazaki, Hiromichi Akashi, Takayuki Kohchi, Ryuichi Nishihama, Keisuke Yoshida, Ali Ferjani, Masami Yokota Hirai
2. 発表標題 Important roles of PGDH-mediated serine synthesis in thallus growth, male gametogenesis and metabolism in Marchantia polymorpha
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minh Chau Tran, Shouko Mihara, Ken-ichi Wakabayashi, Keisuke Yoshida, Toru Hisabori
2. 発表標題 Functional interaction between Cystathionine- $\gamma$ -synthase X proteins and NADPH-thioredoxin reductase C in Arabidopsis thaliana
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口敬俊、吉田啓亮、桶川友季、本橋健、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 チオレドキシシンによる葉緑体ATP合成酵素の還元分子機構
3. 学会等名 日本植物学会第84回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田啓亮
2. 発表標題 レドックスを基盤とした光合成機能のオン・オフ制御
3. 学会等名 第36回植物科学シンポジウム及び第12回植物ストレス科学研究シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田啓亮、横地佑一、久堀徹
2. 発表標題 チオレドキシシン系を介した葉緑体の機能統御ネットワーク
3. 学会等名 日本植物生理学会第62回年会（招待講演）
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 見原翔子、福井一葉、吉田啓亮、久堀徹
2. 発表標題 シロイヌナズナのホスホリプロキナーゼのレドックス制御の生理的意義
3. 学会等名 日本植物生理学会第62回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福土結香、横地佑一、吉田啓亮、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 葉緑体内で働く迅速応答型レドックス制御機構の解明に向けて
3. 学会等名 日本植物生理学会第62回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関口敬俊、吉田啓亮、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 チオレドキシン様タンパク質による葉緑体ATP合成酵素の酸化制御
3. 学会等名 第11回日本光合成学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田啓亮
2. 発表標題 光合成のチオレドキシン制御系に関するタンパク質生化学研究
3. 学会等名 第一回光合成タンパク質勉強会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久堀徹、吉田啓亮、横地佑一、福土結香、傳奈恵、杉浦一徳
2. 発表標題 光合成の恒常性を維持する葉緑体のレドックス制御機構
3. 学会等名 第94回日本生化学大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshida K.
2. 発表標題 Thioredoxin-based redox regulatory network in chloroplasts
3. 学会等名 IRN France-Japan Frontiers in Plant Biology: Webinar（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関口敬俊、吉田啓亮、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 Trx様タンパク質による葉緑体ATP合成酵素の不活性化制御
3. 学会等名 日本生体エネルギー研究会第47回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大高きぬ香、多部田弘光、明石寛道、桑原亜由子、西浜竜一、松田順子、吉田啓亮、Ali Fergani、河内孝之、平井優美
2. 発表標題 ゼニゴケにおけるセリン合成酵素ホスホグリセリン酸デヒドロゲナーゼの生理的役割
3. 学会等名 日本植物生理学会第61回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田啓亮、大高きぬ香、平井優美、久堀徹
2. 発表標題 色素体セリン合成系のレドックス制御系の可能性
3. 学会等名 日本植物生理学会第61回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshida K., Yokochi Y., Hisabori T.
2. 発表標題 Uncovering dark side of chloroplast redox regulation
3. 学会等名 Japan-US Binational Seminar on Photosynthesis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横地佑一、吉田啓亮、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 葉緑体におけるTrx様タンパク質による標的酸化と標的選択性
3. 学会等名 日本植物学会第83回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田啓亮、久堀徹
2. 発表標題 チラコイド膜タンパク質のレドックス制御
3. 学会等名 日本植物学会第83回大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高橋裕一郎・園池公毅・古本強 編	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 224
3. 書名 光合成	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東工大化生研 田中・吉田研究室 <a href="http://www.res.titech.ac.jp/~biores/">http://www.res.titech.ac.jp/~biores/</a>
--

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
研究分担者	増田 建  (Masuda Tatsuru)  (00242305)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授   (12601)	
研究分担者	川合 真紀  (Kawai Maki)  (10332595)	埼玉大学・理工学研究科・教授   (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------