

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21268

研究課題名（和文）植物が眠るしくみ：タンパク質酸化システムによる光合成抑制機構の解明

研究課題名（英文）Elucidating mechanisms of photosynthesis repression based on protein-oxidation system

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、酸化還元を基盤としたタンパク質制御であり、植物光合成の制御の鍵であるレドックス制御系に注目した。特に、研究代表者が最近成し遂げたタンパク質酸化因子の同定を足がかりとして、長年謎に包まれていたレドックス制御系の酸化側の実体解明に挑んだ。一連の生化学・生理学研究によって、酸化によって活性化される新規の葉緑体機能、レドックス制御系の酸化側を支える分子装置、および酸化制御が植物の生存戦略に果たすインパクトなどについて重要な知見を得ることができた。これらの成果は、植物が夜間に光合成を抑制するしくみを多角的に明らかにしたものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、「植物は変動する光環境の中で光合成をどのように制御して、持続的なバイオマス生産を成し遂げているのか」ということへの理解を、基礎科学の観点から確実に推し進めたものである。この知見は、光合成機能の強化による農作物の収量増加といった応用研究への展開のためにも、重要な情報を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the redox regulation system, which is the key to the control of plant photosynthesis. Based on the recent identification of protein-oxidation factor, I tried to uncover the oxidation side of redox regulation system, which has been a long-standing gap in the field. Through a series of biochemical and physiological studies, I have gained important insights into novel chloroplast functions activated by oxidation, the molecular machinery supporting the oxidation side of the redox regulation system, and the impact of oxidative regulation on plant growth. These results provide an important clue regarding how photosynthesis is suppressed during the night.

研究分野：植物生理科学

キーワード：光合成 レドックス制御 タンパク質酸化 チオレドキシシン チオレドキシシン様タンパク質

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

植物は光合成によって物質生産を行っている。光合成は、太陽の光エネルギーを利用して大気中の二酸化炭素を固定し、炭水化物を生産する一連の過程の総称であり、地球上のすべての生命活動を根底から支える壮大な反応である。植物が絶えず変化している光環境で光合成を行うためには、光合成の場である葉緑体の生理機能を柔軟かつ精密に調節しなければならない。植物はどのようにそれを成し遂げているのだろうか。その解明は、今日の光合成研究が抱える中心的課題である。研究代表者は、酸化還元を基盤とし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、この課題の解明に取り組んでいる。その研究過程において、機能未知とされていた葉緑体チオレドキシ様タンパク質“チオレドキシライク2 (thioredoxin-like2; TrxL2)”が、標的となる酵素を可逆的に酸化して不活性化する能力を持っているという思いがけない発見を成し遂げた (Yoshida et al, *PNAS*, vol. 115, E8296-E8304, 2018)。光合成の諸反応を支える複数の酵素は、夜明け・日没時にそれぞれ還元型・酸化型へシフトし、それによって光合成のオン・オフの切り替えを行っていることが分かっている。還元側(オン側)の制御を支える還元力カスケード(フェレドキシ/チオレドキシ経路)は、40年以上も前に解明され、現在の植物科学関連の教科書に必ず記述されている。その一方で、酸化側(オフ側)の制御を行うための分子装置については報告がなく、完全なブラックボックスとなっていた。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、タンパク質酸化因子 TrxL2 の同定を突破口と捉え、当該レドックス制御系の研究分野の最大の謎であるタンパク質酸化システムの全容解明に挑戦する。分子生物学・生化学から植物生理学までを貫徹する基礎研究を行い、分子基盤と生理意義を包括的に明らかにする。そして、光合成機能を積極的に抑制するという新しい光合成制御機構を明らかにし、“植物は夜どのように眠るのか”という問いに対して光合成制御の視点から回答することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、以下2つの項目に大別し、複数の大学院生と協力して並行して進めた。

#### 3 - 1. In vitro 解析に基づいたタンパク質酸化システムの分子基盤の解明

#### 3 - 2. In vivo 解析に基づいたタンパク質酸化システムの生理意義の解明

#### 3 - 1. In vitro 解析に基づいたタンパク質酸化システムの分子基盤の解明

TrxL2 を中心とするタンパク質酸化システムの分子基盤 (TrxL2 がどのような酵素を標的として酸化しているのか等) を、精製タンパク質を用いた試験管内解析をベースに明らかにする。

- ・ TrxL2 と相互作用する葉緑体酵素を捕捉・同定する。TrxL2 をベイトとしたアフィティークロマトグラフィー~LC-MS/MS 解析などを行う。
- ・ 構成的アプローチによって TrxL2 が標的酵素を酸化するための還元力伝達を明らかにする。マレイミド試薬を用いてチオール基を修飾することで、タンパク質の酸化還元状態を識別する。
- ・ 新規のレドックス制御の標的酵素に対して、酸化還元に伴う酵素活性の変化や制御を受けるシステイン残基の位置を明らかにする。

#### 3 - 2. In vivo 解析に基づいたタンパク質酸化システムの生理意義の解明

TrxL2 によるタンパク質の酸化 (= 光合成機能の抑制) が植物体レベルでどのような役割を果たすのかを、シロイヌナズナ変異株を用いた生理学解析をベースに明らかにする。

- ・ CRISPR/Cas9 法によって、TrxL2 の欠損株植物を作出する。また、タンパク質酸化因子として働く可能性がある他のチオレドキシ様タンパク質の欠損株植物も作出する。
- ・ CRISPR/Cas9 法によって、レドックス制御の標的酵素の制御スイッチ部位を欠失させた変異株植物を作出する。
- ・ 作出した変異株植物の表現型を様々な条件下で解析し、タンパク質酸化機能が植物の光合成効率、生長速度、メタボロームなどに与える影響を明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究の遂行により、主に以下の成果を挙げることができた。

#### 4 - 1. 葉緑体型ホスホフルクトキナーゼのレドックス制御の生化学的基盤の解明

#### 4 - 2. リンゴ酸脱水素酵素の酸化・不活性化制御の生理的意義の解明

#### 4 - 3. タンパク質酸化因子欠損株の網羅的解析による酸化ネットワークの実体の解明

#### 4 - 1 . 葉緑体型ホスホフルクトキナーゼのレドックス制御の生化学的基盤の解明

解糖系の律速酵素として働くホスホフルクトキナーゼの葉緑体型アイソフォームを、新規のレドックス制御の標的酵素として同定した。この酵素は、還元により不活性化され、酸化によって活性化されるという希少なタイプのレドックス制御を受けることを明らかにした。酸化・活性化の制御には、TrxL2 が関与していることを明らかにした。さらに、葉緑体型ホスホフルクトキナーゼは細胞質ゾル型にはないアミノ酸挿入配列を持っており、その挿入配列内に保存されているシステイン残基が酸化に伴って分子内ジスルフィド結合を形成することを、質量分析を用いたペプチドマッピング解析および部位特異的変異体タンパク質の解析から明らかにした。以上より、葉緑体の夜間の代謝を支えるためのタンパク質酸化制御の新規の分子基盤を明らかにすることができた。

#### 4 - 2 . リンゴ酸脱水素酵素の酸化・不活性化制御の生理的意義の解明

葉緑体からの還元力排出に関与するリンゴ酸脱水素酵素は、古くから良く知られたレドックス制御の標的酵素である。この酵素のカルボキシル末端に保存されているシステイン残基は、レドックス制御のためのスイッチとして働いている。そこで、CRISPR/Cas9 法を用いて、このシステイン残基を含む領域を部分的に欠失させたシロイヌナズナ変異株を作出した。レドックス制御スイッチを欠失した変異体リンゴ酸脱水素酵素は、分子内ジスルフィド結合を形成することができないために常時活性型となった。様々な生育条件下での生長解析、光合成解析、メタボローム解析など一連の表現型解析を行い、リンゴ酸脱水素酵素のレドックス制御（特に酸化制御）が変動光環境で果たす重要性を明らかにすることができた。

#### 4 - 3 . タンパク質酸化因子欠損株の網羅的解析による酸化ネットワークの実体の解明

研究代表者が初めて同定したタンパク質酸化因子である TrxL2 に加え、その後の解析でもう一つの酸化因子として示唆されたチオレドキシシン様タンパク質 ACHT などにも着目し、CRISPR/Cas9 法を用いてそれぞれの因子をノックアウトしたシロイヌナズナ変異株を複数作出した。これらの変異株を用いて、明暗移行時の様々なレドックス応答性酵素の酸化キネティクスを詳細に分析・比較した。その結果、各酸化因子が酸化の標的とする酵素の選択性を *in vivo* レベルで見出し、レドックス制御の酸化側にある複雑な還元力ネットワークの一端を明らかにすることができた。

以上の成果は、光合成を夜間に抑制するためのタンパク質酸化システムの実体を多角的に明らかにしたものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Tran Chau M., Mihara Shoko, Yoshida Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 653
2. 論文標題 Cystathionine- $\gamma$ -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 Arabidopsis thaliana 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 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 $\beta$ 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 -
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 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 Kazuha、Yoshida Keisuke、Yokochi Yuichi、Sekiguchi Takatoshi、Wakabayashi Ken-ichi、Hisabori Toru、Mihara Shoko	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 and Cell Physiology	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 Yuka、Yokochi Yuichi、Wakabayashi Ken-ichi、Yoshida Keisuke、Hisabori Toru	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 ~ 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 Yuichi、Fukushi Yuka、Wakabayashi Ken-ichi、Yoshida Keisuke、Hisabori Toru	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 Proceedings of the National Academy of Sciences	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) 10.1073/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 Kumiko, Izumi Masayuki, Inabe Kosuke, Yoshida Keisuke, Imashimizu Mari, Suzuki Toshiharu, Hisabori Toru	4. 巻 297
2. 論文標題 The phototroph-specific -hairpin structure of the subunit of FoF1-ATP synthase is important for efficient ATP synthesis of cyanobacteria	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Biological Chemistry	6. 最初と最後の頁 101027 ~ 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 Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 62
2. 論文標題 Biochemical Basis for Redox Regulation of Chloroplast-Localized Phosphofructokinase from Arabidopsis thaliana	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant and Cell Physiology	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 Yokochi Yuichi, Yoshida Keisuke, Hahn Florian, Miyagi Atsuko, Wakabayashi Ken-ichi, Kawai-Yamada Maki, Weber Andreas P. M., Hisabori Toru	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 Proceedings of the National Academy of Sciences	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) 10.1073/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 Juniar Linda, Tanaka Hideaki, Yoshida Keisuke, Hisabori Toru, Kurisu Genji	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 Science	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 Yoshida Keisuke, Ohtaka Kinuka, Hirai Masami Yokota, Hisabori Toru	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 Journal of Biological Chemistry	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 Tomoyasu, Yamabe Emi, Hawari Muhammad Arisyi, Tamura Mayumi, Kanamaru Shuji, Yoshida Keisuke, Koesoema Afifa Ayu, Matsuda Tomoko	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 ~ 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 Sekiguchi Takatoshi, Yoshida Keisuke, Okegawa Yuki, Motohashi Ken, Wakabayashi Ken-ichi, Hisabori Toru	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 Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics	6. 最初と最後の頁 148261 ~ 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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 3件)

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Post-Illumination Chlorophyll Fluorescence Increase (PIFI)タンパク質の分子機能解析
3. 学会等名 第12回日本光合成学会年会およびシンポジウム
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12回日本光合成学会年会およびシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minh Chau Tran, Shoko 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12回日本光合成学会年会およびシンポジウム
4. 発表年 2022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 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 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 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 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 上村袖紀子, 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 <i>Marchantia polymorpha</i>
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 <i>Arabidopsis thaliana</i>
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, 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	第62回日本植物生理学会年会 (招待講演)
4. 発表年	2021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

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------