

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02502

研究課題名（和文）光合成生物のレドックス制御系はin situでどのように働くのか

研究課題名（英文）How do redox-regulated systems in photosynthetic organisms work in situ?

研究代表者

久堀 徹 (HISABORI, TORU)

東京工業大学・国際先駆研究機構・特任教授

研究者番号：40181094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：葉緑体レドックス制御系の電子伝達に関わるフェレドキシン-チオレドキシン還元酵素（FTR）を遺伝子破壊し制御システムの生理的な重要性を明らかにした。また、FTRのノックダウンによるレドックス制御標的酵素の還元レベルの低下が電子伝達系に影響することを見出した。葉緑体で機能する酸化因子に標的特異性があること、酸化因子ACHTが過剰な光エネルギーの熱散逸システムに関わることを明らかにした。レドックス制御系の標的である葉緑体ATP合成酵素の制御領域の変異株を作出し、レドックス応答とATP合成活性制御の対応を明らかにした。また、この酵素の酸化過程におけるプロトン駆動力の寄与を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光合成は地球上で唯一太陽光エネルギーを生物が利用可能な化学エネルギーに変換する、すべての生命を支える重要なエネルギー変換機構である。自然界では、光環境は時々刻々変化するが、光合成生物はこの環境変化に適応して最適な状態で光合成反応を営んでいる。この最適化の鍵を握る制御システムがレドックス制御システムであり、この制御機構を明らかにすることは、光合成の耐性強化、生産性の向上など、将来の光合成機能の改変による光合成生物の強化に重要な知見を提供するもので、エネルギー獲得や食糧増産など人類社会に貢献する研究である。

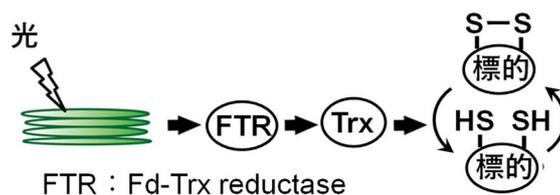
研究成果の概要（英文）：(1) Physiological Importance of the Thylakoid Redox Control System: The gene disruption of Ferredoxin-Thioredoxin Reductase (FTR), which is associated with electron transfer in the chloroplast redox control system, revealed its physiological significance. Insufficient reduction of redox-regulated target enzymes due to FTR knockdown affected in the photosynthetic electron transfer chain. (2) Oxidation Factors in Chloroplasts: It was demonstrated that oxidation factors functioning in chloroplasts exhibit targeted specificity. The oxidation factor ACHT is involved in the excess light energy dissipation system. (3) Redox regulation of Chloroplast ATP Synthase: Several strains containing mutations at the redox regulatory region of chloroplast ATP synthase were created, and the correspondence between redox responses and ATP synthesis activity regulation was elucidated. In addition, the contribution of proton motive force during the oxidation process of this enzyme was clarified.

研究分野：植物生化学

キーワード：レドックス制御 チオレドキシン システイン グルタチオン 光合成電子伝達 酸化因子 ATP合成

### 1. 研究開始当初の背景

チオレドキシン (Trx) が、葉緑体の主要な代謝酵素をレドックス調節していることが明らかになったのは 1970 年代である。その後、個別酵素の生化学的な解析を経て、光合成生物の細胞内で様々なタンパク質の機能にレドックス制御に関わることが明らかになったきっかけは、研究代表者らによる Trx 親和性クロマトグラフィーの研究成果である (Motohashi, K. et al. PNAS, 2001)。この研究を皮切りに、この制御システムに関わるタンパク質の研究が大きく進展し、光合成系のレドックス制御が、それまで考えられていた一本道の還元力伝達 (図 1) によるものではなく、複数の Trx 分子種と標的分子で構成される複雑なネットワーク (図 2: 明所部分) によって運用されていることが判明した。この制御ネットワークの解析では、新たなレドックス制御タンパク質が現在も発見されている。また、研究代表者らは、標的に対する還元力伝達側だけでなく、TrxL2 - 2-Cys Peroxiredoxin (2CP) を中核とする標的の酸化経路 (夜間にシステムをシャットダウンする経路) も明らかにした (図 2: 暗所部分, Yoshida K. et al. PNAS, 2018)。



FTR : Fd-Trx reductase

図 1 一本道のレドックス制御系

さらに、我々は、これまで長年にわたり光合成生物の各種タンパク質のレドックス応答を解析し、それぞれのレドックス動態が光のオンオフに対して多様であることを報告している (Konno H. et al. Plant Cell Physiol. 2012, Yoshida K. et al. Plant Cell Physiol. 2014)。

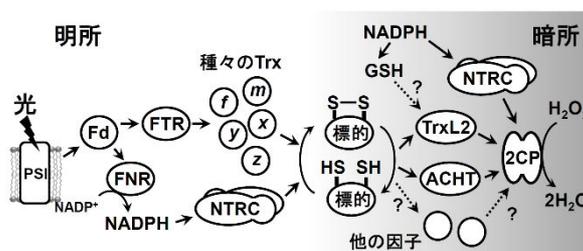


図 2 レドックス制御系ネットワーク

レドックス制御を受けるタンパク質は、分子内にジスルフィド結合を形成可能な一組以上の Cys ペアを持っているが、興味深いことに、そのレドックス応答 (還元プロセスと酸化プロセス) が *in vivo* で一意的に決まり *in vitro* の結果と合致するもの (ATP 合成酵素は光オンで還元される酵素の代表例) と、合致しないものがある。また、レドックス制御を受けるタンパク質のほとんどは、強光照射によっても完全に還元されることはないの、生体内ではレドックス状態について何らかの緩衝を受けている可能性が高い。

近年、動物細胞のレドックス制御の研究で Cys チオール基のポリスルフィド化が判明したことを契機に、生体内の Cys チオール基が単に酸化還元状態を変化させるだけでなく、他の修飾を受けることに注目が集まっている。上記の光合成生物細胞内でレドックス制御を受けるタンパク質の動態を考え合わせると、レドックス制御の全体像の解明には、生体内のレドックス環境、チオール基の修飾やそれに基づく酵素の制御を考慮に入れる必要がある。生化学研究において、pH やイオン強度については生体内環境の再現が重視されてきたが、細胞内に多量に存在するグルタチオンとレドックス制御系の関係には、我々の研究も含めてこれまで注意が払われていなかった。このような背景から、我々がこれまで描いてきた光合成生物のレドックス制御システムは、生体内での働きとして再検討する必要があると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究では、レドックス制御システムの全容解明を目指して、これまで *in vitro* の生化学分野において見落とされていた重要な生理的なパラメータを勘案して、レドックス制御システムの機能を再検討することにした。このために、生体内に多量に存在する酸化還元物質であるグルタチオンの酸化還元状態がレドックス制御システムに関わるタンパク質に及ぼす影響の解析や、研究代表者らが以前に開発した生体内の酸化還元状態をモニターする蛍光センサータンパク質を植物体内に導入する研究にも取り組むこととした。合わせて、酸化還元タンパク質の生体内での挙動や、ゲノム編集技術を用いたレドックス制御システムの完全破壊が生理的に及ぼす影響についても解析を進めた。

### 3. 研究の方法

- ・グルタチオン存在下でのレドックス制御システムの生化学研究  
これまで我々が行ってきたチオレドキシン及びその標的タンパク質の生化学研究をグルタチオン存在下で再検討し、グルタチオンの影響を調べた。
- ・細胞内レドックス状態モニタータンパク質 FROG/B (Sugiura K. et al. PNAS 2020) のシロイヌナズナへの導入と発現  
単波長励起で細胞内の酸化還元状態変化を緑色と青色の蛍光変化によってモニター可能な蛍

光センサータンパク質 FROG/B をシロイヌナズナに導入し、外環境変化による細胞内のレドックス状態変化のモニターを試みた。

- ゲノム編集技術による FTR 完全破壊・ノックダウンによる植物体への影響評価  
光合成電子伝達系からレドックス制御系への還元力授受のカギを握る FTR 量の制御が葉緑体内の被制御系タンパク質に与える影響を調べた。
- 葉緑体内酸化因子の生理的役割の解析  
葉緑体内の酸化因子 ACHT が葉緑体内の被制御系タンパク質に与える影響を調べた。
- 被制御系タンパク質の生理生化学的解析  
葉緑体内のレドックス制御を受けるタンパク質の分子機構を解析した。

#### 4. 研究成果

本研究では、個別の生化学研究で明らかになってきたレドックス制御機構が実際の植物細胞内でどのように機能しているのかを明らかにすることを目指して、細胞内の酸化還元物質であるグルタチオンの影響に注目すること、および、細胞内の酸化還元状態の変化を蛍光センサータンパク質で直接モニターしながら他の生化学的解析と組み合わせることを目指した。しかし、グルタチオンについては、当初予想したような顕著な影響を見出すことができなかったこと、蛍光センサータンパク質については植物細胞内の変化を十分にモニターする量のタンパク質を発現させることができなかったことから、研究手法を主として植物個体そのものを利用した実験系に移行して以下の成果を得た。

##### 還元力伝達経路の解析

葉緑体レドックス制御系にはフェレドキシシン-チオレドキシシン還元酵素 (FTR) を経由する還元力伝達系と NADPH-チオレドキシシン還元酵素 C (NTRC) を経由する伝達系の二つが機能していることが知られている。これらの機能を明らかにするため、前者の鍵酵素である FTR を遺伝子破壊し、この経路が供給する還元力を用いる制御システムの生理的な重要性を明らかにした (Yoshida K. et al. JBC 2022)。また、FTR のノックダウンや過剰発現による Calvin-Benson 回路の酵素の酸化還元レベルの変化が電子伝達系に影響することを見出した (Yoshida K. et al. PCP 2024)。一方、NTRC と相互作用することが知られている Cystathionine-β-synthase X (CBSX) については、AMP 存在下で NTRC 機能を抑制することを見出した (Tran CM. et al. BBRC 2023)。

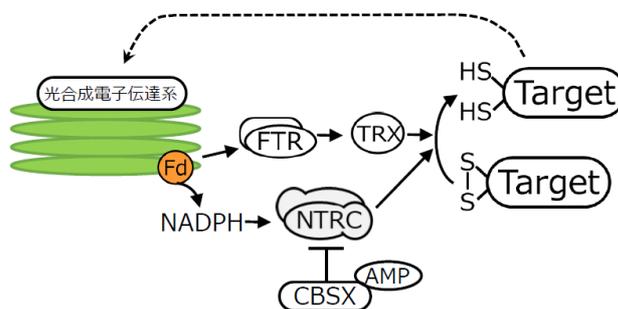


図3 還元力伝達経路の解析の成果

##### 代謝系酵素のレドックス制御

葉緑体内でレドックス制御を受ける酵素には、光照射後、ただちに還元されるもの、遅れて還元されるものなど、応答がまちまちである。この原因が還元力供給系が存在するチラコイド膜に対する局在の違いによるものかを調べるため、ストロマに存在する代謝系酵素に膜貫通ヘリックスを付加してチラコイド膜にアンカーして還元応答を調べた。その結果、還元応答の違いは局在よりも標的タンパク質自身とチオレドキシシンの相互作用の違いによるものである可能性が高いことが判明した (Fukushi Y. et al. Antioxidants (Basel) 2022)。レドックス制御を受けることが知られているホスホリプロキナーゼは、分子の N 末と C 末の両方に Cys ペアを持つ。そこで、それぞれ Cys ペアの役割を生化学的に調べ、C 末側がレドックス制御の標的となり酵素機能を制御していることを明らかにした (Fukui K. et al. PCP 2022)。

##### 酸化経路の解析

葉緑体のレドックス制御において酸化側で働く酸化因子である Trx 様タンパク質 (TrxL2, ACHT) および酸化機能が報告されている f 型チオレドキシシンについて、それぞれの標的特異性を調べたところ、還元側で働く Trx 同様に標的特異性があることを明らかにした。また、酸化因子 ACHT が過剰な光エネルギーの熱散逸システムに関わることを明らかにした (Yokochi Y. et al. PNAS 2021)。さらに、この ACHT 過剰発現により、光合成電子伝達系が負に制御されることを見出した (Fukushi Y. et al. JPR 2024)。

### 葉緑体 ATP 合成酵素の制御

緑藻クラミドモナスを用いてレドックス制御系の標的である葉緑体 ATP 合成酵素の制御領域に存在する重要な構造である  $\beta$  ヘアピン構造とレドックスループ構造のそれぞれあるいは両方を欠損した変異株を作成し、レドックス応答と ATP 合成活性制御の対応を調べた。その結果、両構造が協調的に働くことで制御を行っていることが明らかにした(Akiyama K. et al. PNAS 2023)。また、葉緑体内の酸化因子である Trx 様タンパク質と ACHT が ATP 合成酵素の酸化過程に果たす役割を生化学的に解析した。さらに、この過程におけるプロトン駆動力の関与を明らかにした(Sekiguchi T. et al. JBC 2022)。

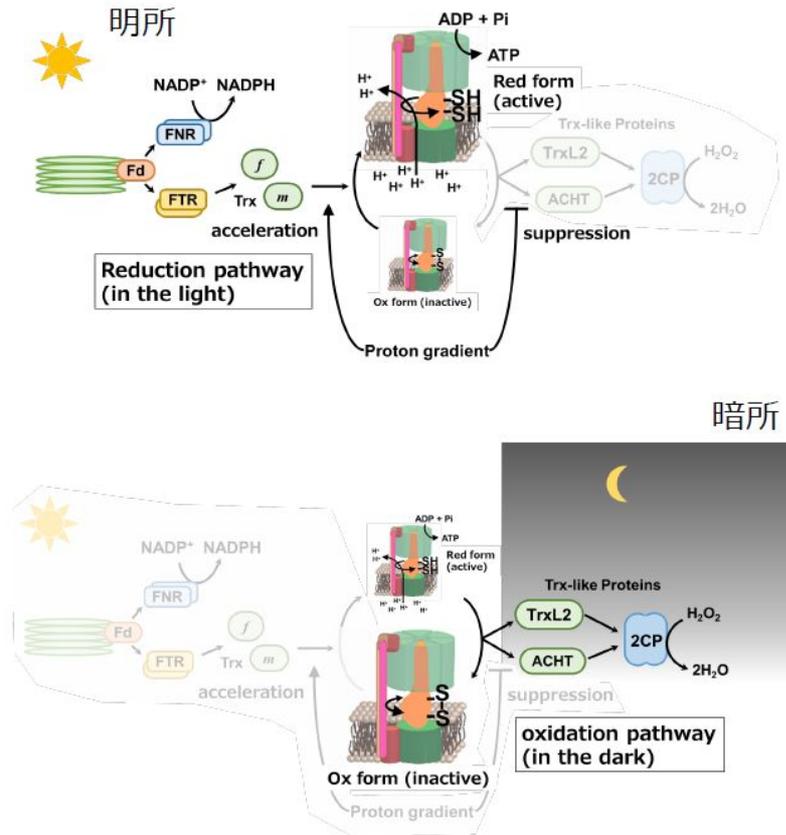


図4 ATP合成酵素の酸化還元とプロトン駆動力による制御

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 8件）

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 <i>Arabidopsis thaliana</i>	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 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 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 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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toriu 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 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, 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 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 Yoshida Keisuke, Hisabori Toru	4. 巻 -
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 -
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 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 Machida Akito, Kondo Kumiko, Wakabayashi Ken-ichi, Tanaka Kan, Hisabori Toru	4. 巻 64
2. 論文標題 Molecular Bulkiness of a Single Amino Acid in the F1 -Subunit Determines the Robustness of Cyanobacterial ATP Synthase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plant And Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 1590 ~ 1600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcad109	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28件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

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 日本光合成学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤久益子、和泉諒之、鈴木俊治、久堀徹
2. 発表標題 シアノバクテリアATP合成酵素 サブユニットによるATP加水分解・合成活性の制御機構
3. 学会等名 日本光合成学会2021年年会
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 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 町田亮人、近藤久益子、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 シアノバクテリアATP合成酵素 サブユニットのY252C変異
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 秋山健太郎、若林憲一、久堀徹
2. 発表標題 葉緑体ATP合成酵素研究：クラミドモナスでできること
3. 学会等名 第15回クラミドモナス研究会
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 Minh Chau Tran, Shoko Mihara, Ken-ichi Wakabayashi, Keisuke Yoshida, Toru Hisabori
2. 発表標題 Functional interaction between Cystathionine-beta-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 福土結香、横地佑一、若林憲一、吉田啓亮、久堀徹
2. 発表標題 シロイヌナズナ葉緑体内におけるTrxおよびTrx様タンパク質による酸化制御
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 久堀徹
2. 発表標題 光合成制御の分子スイッチを理解する
3. 学会等名 第24回植物オルガネラワークショップ
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 (オンライン)
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 <i>Arabidopsis thaliana</i>
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 (オンライン)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 町田亮人, 近藤久益子, 若林憲一, 久堀徹
2. 発表標題 シアノバクテリアATP合成酵素 サブユニットのY252C変異
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 (オンライン)
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 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PGRL1 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64回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2023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 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 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久堀徹
2. 発表標題 葉緑体ATP合成酵素の活性制御の分子機構 - 40年でどこまで理解できたか -
3. 学会等名 日本生体エネルギー研究会第49回討論会 (招待講演)
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 Takahashi H., Takayama K., Isu A., Wakabayashi K.I., 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 <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
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 <i>Arabidopsis</i> 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 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 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PGRL1 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 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 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 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 久堀徹
2. 発表標題 光合成エネルギー変換系酵素の機能制御の解明
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	吉田 啓亮  (YOSHIDA KEISUKE)  (40632310)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授    (12608)	

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