

二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と
生産物活用のための基盤技術の創出

平成 23 年度採択研究代表者

H25 年度
実績報告

鹿内 利治

京都大学 大学院理学研究科
教授

構造と進化の理解に基づく光合成の環境適応能力の強化

§ 1. 研究実施体制

(1)「鹿内」グループ

① 研究代表者: 鹿内 利治 (京都大学理学研究科、教授)

② 研究項目

・サイクリック電子伝達の最適化

(2)「池内」グループ

① 研究代表者: 池内 昌彦 (東京大学総合文化研究科、教授)

② 研究項目

・光化学系Ⅱ水分解系の強化

・光化学系Ⅰの強化

(3)「高橋」グループ

① 主たる共同研究者: 高橋 裕一郎 (岡山大学大学院自然科学研究科、教授)

② 研究項目

・光化学系Ⅱ水分解系の強化

・光化学系Ⅰの強化

(4)「牧野」グループ

① 主たる共同研究者: 牧野 周 (東北大学大学院農学研究科、教授)

② 研究項目

・サイクリック電子伝達系の最適化

・炭酸固定の強化と光合成系全体の最適化

・革新的光合成測定技術の開発

§ 2. 研究実施の概要

光合成は、太陽の光エネルギーを使って大気中の CO₂ を固定する地球規模のエネルギー変換反応である。したがって、その強化は作物としての食糧生産以外にも、エネルギーや地球環境問題の解決にも直結する。光合成は植物バイオマス生産の鍵を握るが、長い育種の過程においても光合成能力は強化されていない。そのことは、植物にとっても極めて重要な形質である光合成がすでに現在の環境に適応していることに一部起因する。また、強い光を利用する光合成が活性酸素を生成する可能性のあるリスクの高い反応であることにも関係する。したがって作物の光合成機能の改変は難しい課題であるが、人類の存続にさえ関わるため挑戦を継続しなければならない。

近年の光合成の基礎科学の進展は著しく、少数の遺伝子導入による光合成強化の試みを過去のものにしつつある。例えば、光合成装置の構造の解明により、光合成反応は原子レベルで理解され、基本反応の革新的改変への道が拓かれた。また光合成を過酷な光環境に適応させた進化の分子機構の理解は、効率の良い光合成と活性酸素生成の間のトレードオフを最適化する戦略を可能にしている。

シアノバクテリアは、葉緑体の起源となった原核光合成生物であり、葉緑体研究のモデルとして使われる。特に光合成の基本装置は、高等植物のものと同じであり、光合成装置の革新的な改変を試みるには絶好の材料である。池内グループは光合成に光を集める集光装置の改変を行いその効果を調べた。また光合成の基本的反応に関わる色素の改変、あるいは反応装置(光化学系 II)の革新的な改変に向けた生物材料の整備を行った。

クラミドモナスは単細胞の真核生物であり、高等植物により近い光合成装置を用いて、様々な改変の試みが可能である。光合成装置の多くは、核と葉緑体の両ゲノムにコードされる多くのタンパク質からなる巨大複合体であり、その量的、質的改変には、複合体蓄積の調節メカニズムを理解し操作することが必要である。高橋グループは、クラミドモナスを用いてこの問題に挑戦し、光化学系 I のアセンブリ因子の過剰発現により興味深い表現型を発見した。また、光化学系 II での水の分解(光合成の本質の一つ)に行う部位に多数の変異を導入し、重要な知見を得た。

シロイヌナズナは高等植物であるが、特に遺伝学において優れたモデル生物であり、シアノバクテリアやクラミドモナスで得られた知見を高等植物で調べ、イネでの評価に橋渡しする為の欠かすことのできない材料である。鹿内グループは、巨大な複合体を形成する NDH について、シロイヌナズナを用いて、アセンブリ過程の強化と電子分配の効率化の戦略から、人為的改変を目指して基盤的情報を蓄積した。また、NDH の関わる、電子伝達の制御と光合成の効率化を結ぶ制御の実体について重要な知見を得ており、イネでの光合成評価に向けて、研究を進展させた。

イネは重要作物であると同時に、モデル植物としての使いやすさも備えている。プロジェクトの出口として、作物における光合成改変を評価する重要な材料である。牧野グループは、いくつかの光合成装置を量的、質的に微調整することで、光合成に与える影響を詳細に調べており、その影響を代謝研究の基盤知識に立脚して評価する技術を確立した。この評価技術がなければ、光合成の改良は方向性を見失ってしまう。他のグループから得られる光合成装置の革新的な改変の影響を正しく評価できる系を確立している。

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報

1-1 Sugimoto K, Okegawa Y, Tohri A, Long TA, Sarah FS, Hisabori T and Shikanai T, “A single amino acid alteration in PGR5 confers resistance to antimycin A in cyclic electron transport around PSI.” *Plant Cell Physiol* 54(9):1525-1534, 2013 (DOI: 10.1093/pcp/pct098).

1-2 Fujii S, Sato N and Shikanai T, “Modulation of the RNA-binding activity of individual PPR motifs reveals the functional partitioning of PROTON GRADIENT REGULATION 3.” *Plant Cell* 25(8):3079-3088, 2013 (DOI: 10.1105/tpc.113.112193).

1-3 Taira Y, Okegawa Y, Sugimoto K, Abe M, Miyoshi H and Shikanai T, “Antimycin A-like molecules inhibit cyclic electron transport around photosystem I in ruptured chloroplasts.” *FEBS Open Bio* 3:406-410, 2013 (DOI: 10.1016/j.fob.2013.09.007).

1-4 Yamamoto H and Shikanai T, “*In planta* mutagenesis of Src homology 3 domain-like fold of NdhS, a ferredoxin-binding subunit of the chloroplast NADH dehydrogenase-like complex in *Arabidopsis*. A conserved Arg-193 plays a critical role in ferredoxin binding.” *J Biol Chem* 288(51):36328-36337, 2013 (DOI: 10.1074/jbc.M113.511584).

2-1 Watanabe M, Semchonok DA, Webber-Birungi M, Ehira S, Kondo K, Narikawa R, Ohmori M, Boekema EJ and Ikeuchi M, “Attachment of phycobilisomes in an antenna-photosystem I supercomplex of cyanobacteria.” *Proc Natl Acad Sci USA* 111:2512-2517, 2014 (DOI: 10.1073/pnas.1320599111).

光化学系 I とアンテナ複合体フィコビリソームの超複合体を初めて単離し、その構造を明らかにした。超複合体の形成にかかわる因子を同定できたので、この因子の遺伝子を操作することで、超複合体の形成を自在に操作できると期待される。本論文のプレスリリースを行った。

2-2 Nagao R, Tomo T, Narikawa R, Enami I and Ikeuchi M, “Light-independent biosynthesis and assembly of the photosystem II complex in the diatom *Chaetoceros gracilis*.” *FEBS Lett* 587:1340-1345, 2013 (DOI: 10.1016/j.febslet.2013.02.050).

4-1 Suzuki Y and Makino A, “Translational down-regulation of RBCL is operative in the coordinated expression of Rubisco genes in senescent leaves in rice.” *J Exp Bot* 64(4): 1145-1152, 2013 (DOI: 10.1093/jxb/ers398).

RBCS 過剰生産体イネの老化葉では、*RBCS* の発現が老化初期に速やかに止まってしまい、それに合わせて葉緑体側の RBCL の翻訳がおさえられ、Rubisco タンパク質量の生合成が止まってしまうことを明らかにした。Rubisco 量を高く、しかも寿命長く維持させるための貴重な情報となる。

4-2 Ono Y, Wada S, Izumi M, Makino A and Ishida H, “Evidence for contribution of autophagy to Rubisco degradation during leaf senescence in *Arabidopsis thaliana*.” *Plant Cell Environ* 36(5):1147-1159. 2013 (DOI: 10.1111/pce.12049)

4-3 Izumi M, Hidema J, Makino A and Ishida H, “Autophagy contributes to nighttime energy availability for growth in Arabidopsis.” *Plant Physiol* 161(4):1682-1693, 2013 (DOI: 10.1104/pp.113.215632).

4-4 Ishida H, Izumi M, Wada S and Makino A, “Roles of autophagy in chloroplast recycling.” *Biochim Biophys Acta* 1837(4):512–521, 2014 (DOI: 10.1016/j.bbabi.2013.11.009).

for growth in Arabidopsis.” *Plant Physiol* 161(4):1682-1693, 2013 (DOI: 10.1104/pp.113.215632).

10 Ishida H, Izumi M, Wada S and Makino A, “Roles of autophagy in chloroplast recycling.” *Biochim Biophys Acta* 1837(4):512–521, 2014 (DOI: 10.1016/j.bbabi.2013.11.009).

(3-2) 知財出願

①平成 25 年度特許出願件数(国内 0 件)

②CREST 研究期間累積件数(国内 0 件)