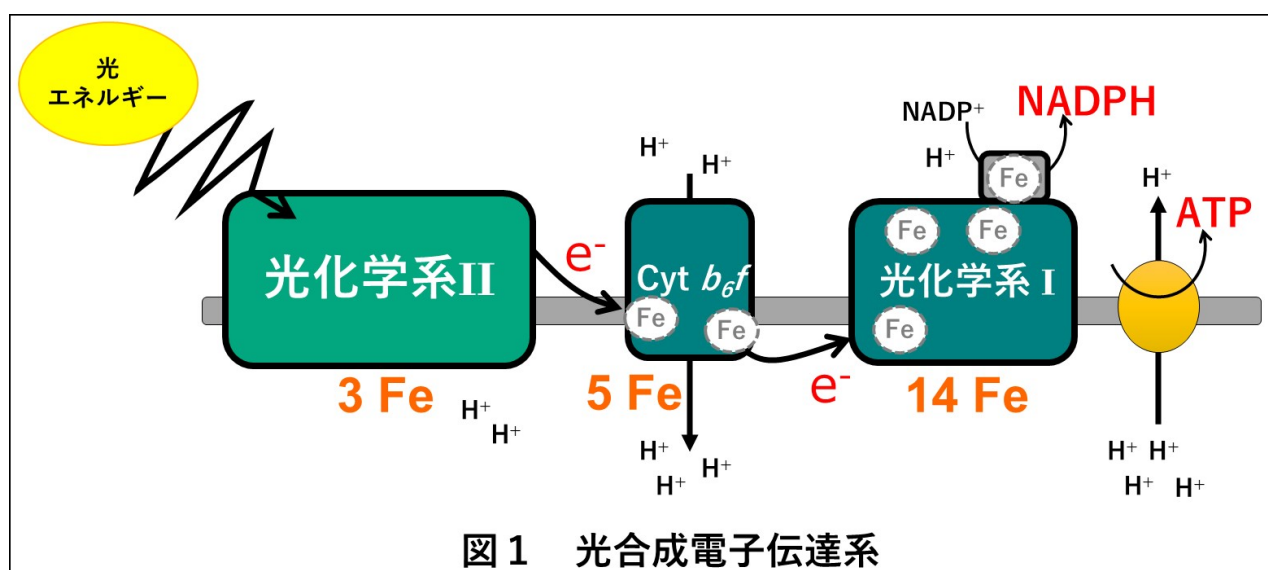


【光合成における鉄の働き】

葉に光があたると、はじき出された電子が次々に受け渡されていき、最終的に ATP (エネルギー通貨に例えられる) と NADPH (相手に電子を与える還元剤) が作られます (図 1)。この電子の受け渡しを行うのが鉄です (図 1)。ここで鉄の代わりに他の金属を使うことはできないため、鉄が不足すると植物は光化学系の特に光化学系 I を作れません。またクロロフィルの生合成経路には鉄を必要とする酵素があるため、葉は黄色くなり、光合成能力は大きく低下します。しかし意外なことに、鉄欠乏に強い植物が光化学系をどのように維持しているのか、という研究は我々以外にはほとんどなされてきませんでした (当研究室の関連論文参照)。



オオムギは経験的に鉄欠乏に強い作物として知られ、イネやトウモロコシの仲間であるソルガム (用語説明) は弱い作物として知られています。これは、オオムギは鉄を吸収する能力が高く、イネやソルガムは低いからだ、と考えられています。しかし我々は、鉄欠乏のオオムギの葉は必ずしも多くの鉄を持っているわけではなく、一方鉄欠乏のイネやソルガムの葉はオオムギと同じくらい鉄を持っても光合成能力が低いことを見出していました (当研究室の関連論文参照)。これがどの品種にも当てはまるのかを今回調べたところ、オオムギでも品種によって鉄欠乏耐性が大きく異なることが分かり、鉄欠乏に強い品種の光化学系は鉄が足りない時にどうやって光合成を行うのか、その機構の研究を始めました。

【研究の内容と成果】

オオムギ 23 品種とソルガム 7 品種について、鉄十分の葉と鉄欠乏の葉の二酸化炭素固定速度 (二酸化炭素+水+光エネルギー → 有機物+酸素+水 の反応を二酸化炭素固定と呼びます) とクロロフィル蛍光 (用語説明) を測定したうえで、その葉の鉄濃度を測定し、光合成鉄利用効率 (PIUE、Photosynthetic Iron Use Efficiency、鉄 1 モルあたり何モルの二酸化炭素を固定できるか) を品種ごとに計算しました。葉の鉄濃度が高いからと言って PIUE が高いわけではなく、鉄欠乏の時に PIUE が上昇するほど、鉄欠乏の時にもよく生育できるということが分かりました (図 2)。さらに、鉄欠乏時に PIUE を上昇させることができる、すなわち鉄欠乏に強いオオムギ品種には、鉄欠乏が発症しやすいアルカリ土壌

の地域で育種されたものが多いことも分かりました（図3）。

PIUE とクロロフィル蛍光（用語説明）の測定結果について、主成分分析（用語説明）を用いて解析したところ、鉄欠乏時にPIUEを上昇させる品種は、光化学系IIから光化学系Iへの電子の受け渡しを最適化する能力に優れていることが示されました。一方、光化学系IIの鉄欠乏順応はどのオオムギ品種でも行われていることが分かりました（図4）。

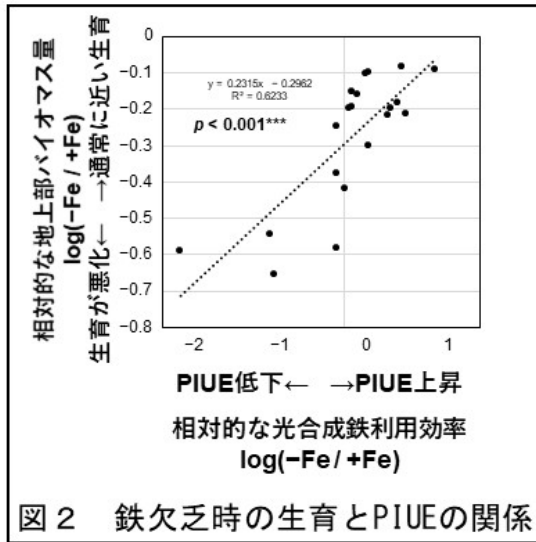


図2 鉄欠乏時の生育とPIUEの関係

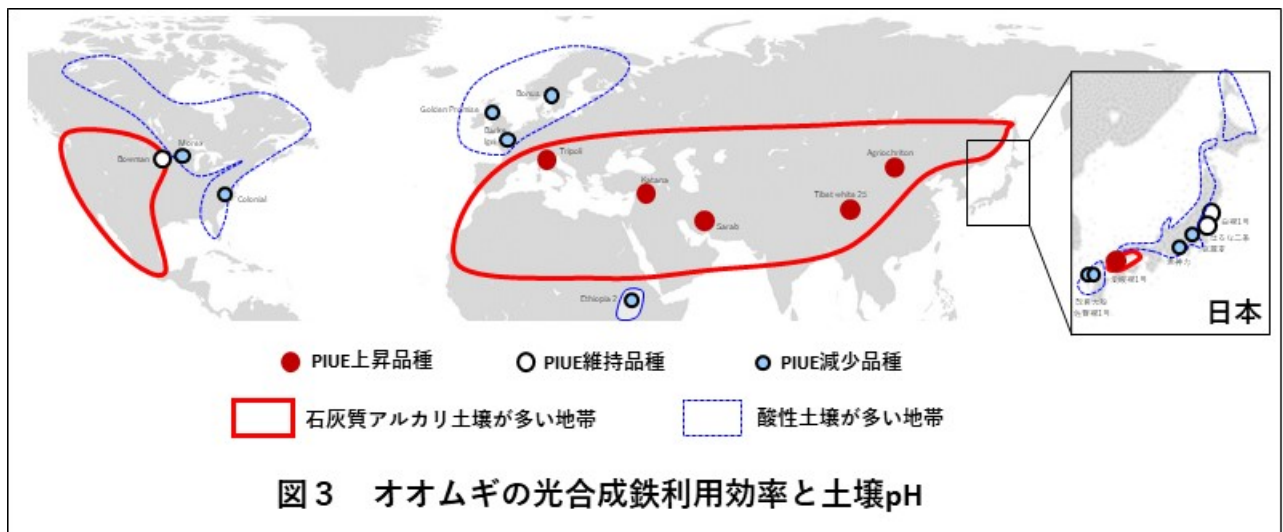


図3 オオムギの光合成鉄利用効率と土壌pH

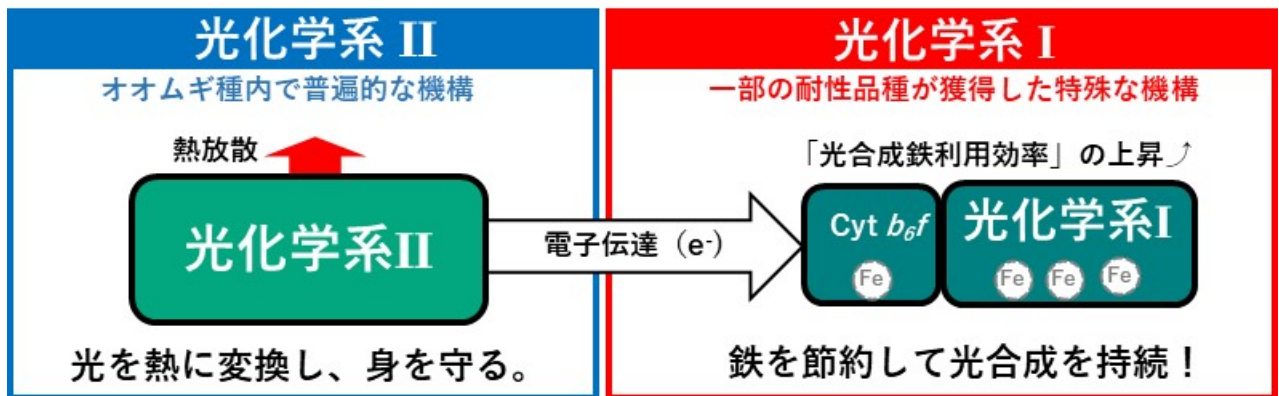


図4 今回分かったオオムギ葉緑体の鉄欠乏への適応機構

【今後の期待】

今回調べたオオムギにはオオムギ属の野生種も含まれていますが、これらは鉄欠乏時にPIUEを大きく上昇させることはありませんでした。すなわち、人間がオオムギを作物として品種改良する過程で、光化学系の鉄欠乏耐性を強くする変異を気が付かないうちに選んできた、と言えます。人間による光合成の改善はこれまで、効率の悪い酵素として有名なルビスコ（二酸化炭素を炭水化物に変える酵素）の改良や、光呼吸（ルビスコが炭水化物を二酸化炭素に戻してしまう反応）を行わないようにする、といった代謝経路の改良に焦

点が当てられてきました。しかし、光化学系に悪影響がおよぶ不良土壌においては、光化学系の改良も必要です。今回の成果を契機に、モデル植物の研究だけでは分からない多様な光化学系とその利用の研究が進むことが期待されます。

さらに、一部のオオムギ品種については、教科書的な光化学系のタンパク質複合体とは異なる構造の複合体を形成している可能性を示すデータも得られています。人工光合成においても、絶えず変動する光の量に柔軟に対応することが必要になりますが、植物から見つかった新たな調節の仕組みが人工光合成の改良のヒントになるかもしれません。

なお、この研究の一部は、科学研究費補助金(20H02891)の助成、および、アースノート社との共同研究契約に基づく研究費により行われました。

【研究に用いた植物材料】

オオムギの各品種は、岡山大学 資源植物科学研究所 大麦・野生植物資源研究センター、および The Nordic Genetic Resource Center から分譲していただきました。

ソルガムの各品種はアースノート社のコアコレクションから分譲していただきました。

【用語説明】

ソルガム

トウモロコシの仲間、近年バイオマス作物として中南米やオーストラリアで広く栽培されています。ソルガムは非常に鉄要求量が多く、鉄欠乏時にPIUEを上昇させる品種はまだ見つかっていません。

クロロフィル蛍光

クロロフィルに光があたると、光のエネルギーの一部は光化学反応に使われ、残りは熱や蛍光に変化します。短時間強い光をあてるとそれ以上光をあて続けても光化学反応を行うことができず、光のエネルギーは熱と蛍光に変化します。そこで、短時間強い光をあてた場合とあてない場合のクロロフィル蛍光を比較すると、光のエネルギーをどのくらい光化学反応に使うことができているのかが分かります。

主成分分析

多数の試料について多数の項目を調査し、それらを分類したいときに用いられる統計手法です。多数の変数のうち、相関の高いものを統合して2, 3の合成変数とすることにより、多数の試料の特徴を2次元のグラフ上に表現することができるようになります。

[当研究室の関連論文]

Maruyama et al. Soil Science and Plant Nutrition (2005) v51 p1035-1042 doi: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00142.x

Hirai et al. Soil Science and Plant Nutrition (2007) v53 p612-620 doi: 10.1111/j.1747-0765.2007.00190.x

Saito et al. Plant and Cell physiology (2010) v51 p2013-2030 doi:10.1093/pcp/pcq160

Higuchi et al. Soil Science and Plant Nutrition (2011) v57 p233-247 doi: 10.1080/00380768.2011.564574

Mikami et al. Plant Physiology and Biochemistry (2011) v49 p513-519 doi:10.1016/j.plaphy.2011.01.009

Higuchi et al. Physiologia Plantarum (2014) v151 p313-322 doi:10.1111/pp1.12175

Saito et al. FEBS Letters (2014) v588 p2042-2048 doi: 10.1016/j.febslet.2014.04.031