

鉄が欠乏する不良土壌でも育つオオムギの変異を解明

東京農業大学応用生物科学部農芸化学科
樋口恭子教授、齋藤彰宏助教

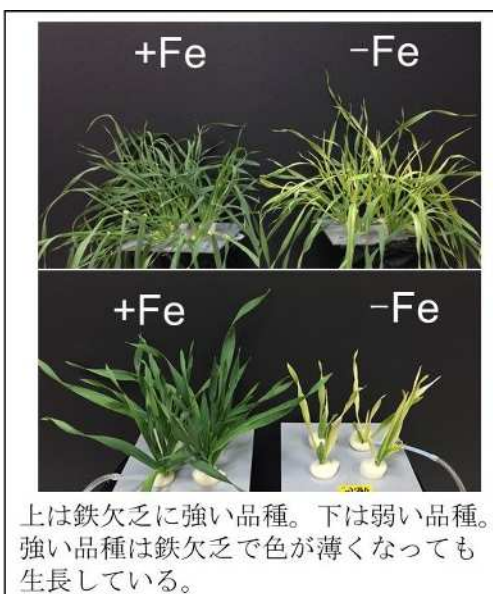
東京農業大学(所在地：東京都世田谷区、学長：高野 克己)では、樋口恭子教授らのグループがオオムギの品種の一部が鉄欠乏症に非常に強いことに着目し、世界中のオオムギ約20品種の鉄含量と光合成速度を解析、中央・西アジアなどのアルカリ土壌地帯(補足資料図3)で栽培されている品種では、少ない鉄を利用して効率よく光合成が行えるよう遺伝子に変異していることを突き止めました。(Plants 誌で1月25日公開)

鉄は植物の光合成(補足資料1ページ)に不可欠の元素ですが、アルカリ性の農地では水に溶けにくく、多くの植物が鉄欠乏症となり不作が問題となってきました。

鉄を吸収しにくい不良土壌での生育向上を目指す研究はこれまで、鉄を吸い上げる根の機能に注目して行われてきましたが、今回の成果は光合成能力を増強する遺伝子の選抜・改変研究にも大きな可能性があることを示すもので、オオムギのほかコムギ、トウモロコシなど多くの作物で作付面積拡大や増産につながることを期待されます(補足資料2ページ)。

今回、鉄欠乏症に強い品種が見つかったのは中央・西アジアや地中海沿岸、北米大陸中西部などのアルカリ土壌地帯です。こうした農地でも比較的収量が多い品種を、農家や農業試験場が長年育種してきた結果、光合成に必要な遺伝子に変異した品種が選抜され残ってきたと考えられます。

我々の解析で、光化学系の反応中心に光のエネルギーを渡すLhcb1の遺伝子がイネゲノムには3個しかないのにオオムギゲノムでは17個に増えており、この変異によって、鉄が足りずに壊れてしまう光化学系Iを守っていることが分かりました。また、特に鉄欠乏症に強い品種では光化学系Iに鉄節約機構があることが判明したことから、光合成の鉄欠乏耐性にはもっと多くの遺伝子が関与していると考えられます(補足資料図1・図4)。

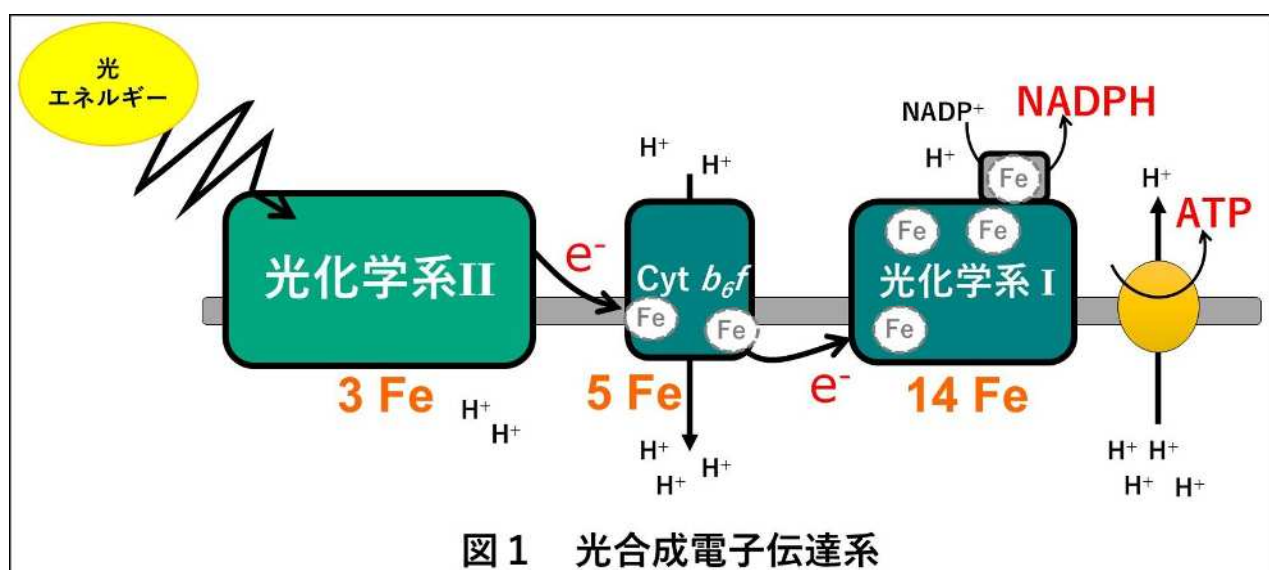


今後さらに変異遺伝子を探し出し、オオムギが厳しい環境でも育つ適応機構の全容を解明していく必要があります。そのためには今回の研究で有効性が確認された「光合成鉄利用効率 (PIUE)」という新指標を活用します(補足資料1~2ページ)。これは鉄1モル当たり何モルの二酸化炭素を有機物にできるか、という指標です。光化学系における鉄利用効率を数値化できたことで、QTL解析という分子遺伝学的手法を用いて未知の有用遺伝子を発見することも可能になります。

【本件に関する問い合わせ先】

【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)。

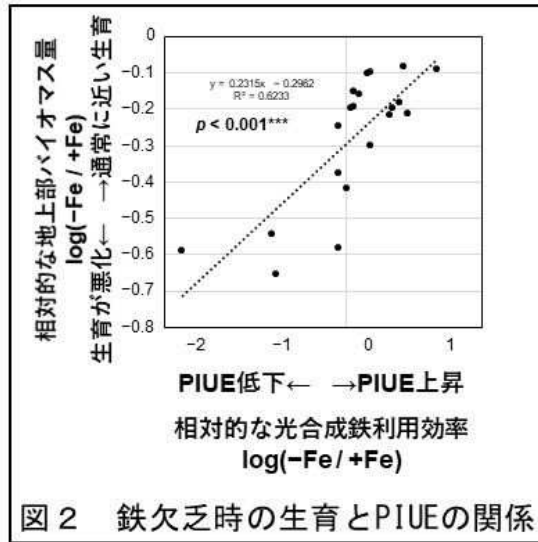


オオムギは経験的に鉄欠乏に強い作物として知られ、イネやトウモロコシの仲間であるソルガム (用語説明) は弱い作物として知られています。これは、オオムギは鉄を吸収する能力が高く、イネやソルガムは低いからだ、と考えられています。しかし我々は、鉄欠乏のオオムギの葉は必ずしも多くの鉄を持っているわけではなく、一方鉄欠乏のイネやソルガムの葉はオオムギと同じくらい鉄を持っていても光合成能力が低いことを見出していました (当研究室の関連論文参照)。これがどの品種にも当てはまるのかを今回調べたところ、オオムギでも品種によって鉄欠乏耐性が大きく異なることが分かり、鉄欠乏に強い品種の光化学系は鉄が足りない時にどう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

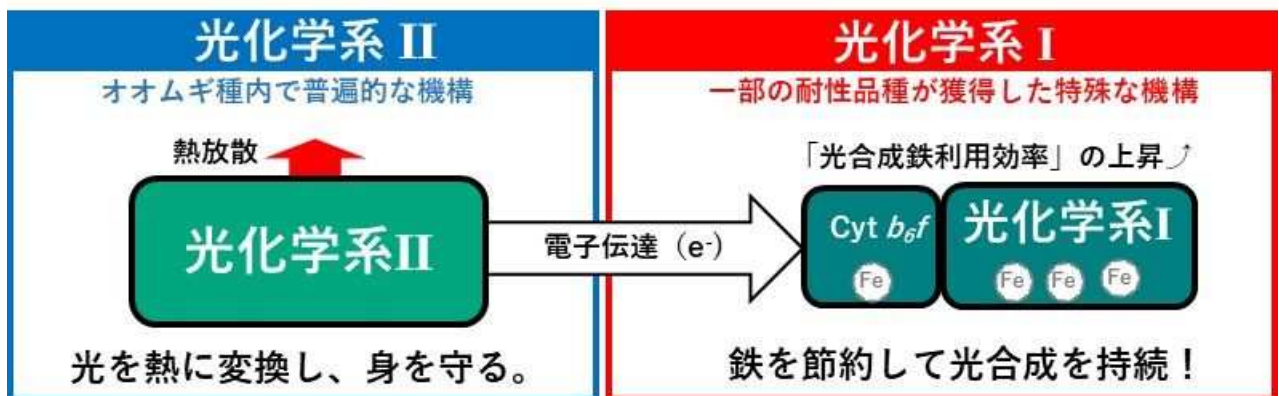
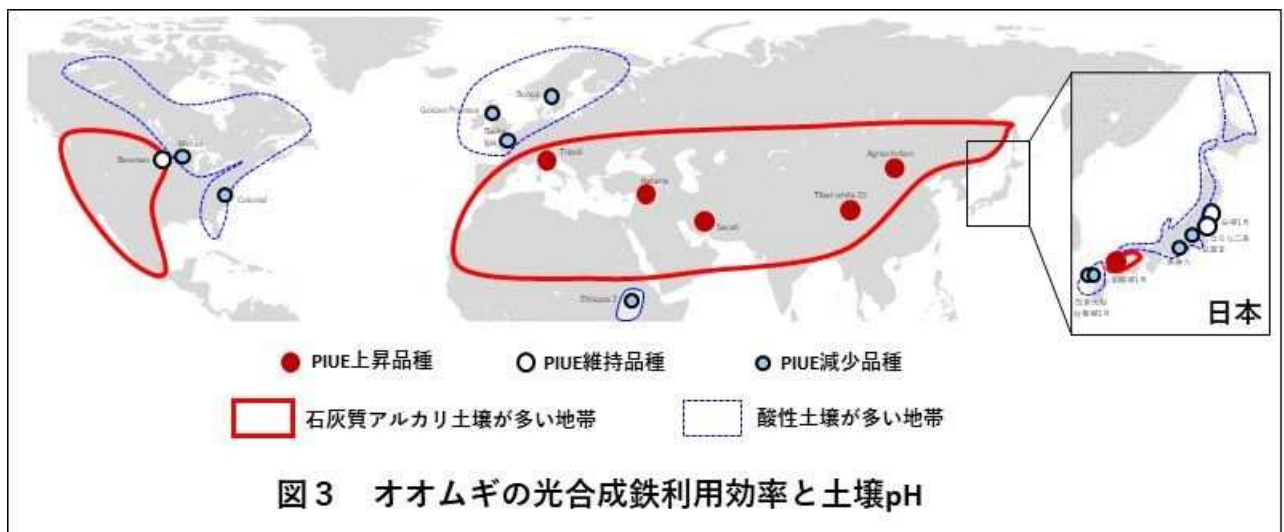
【研究の内容と成果】

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)。



【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