

開発の社会的背景

人口急増にともなう食料危機や化石燃料の枯渇のおそれから、食料の増産とバイオマスエネルギーの利用拡大の必要性が高まっています。食料とバイオマスの生産を支えるのが、光合成を始めとする「一次代謝」と呼ばれる植物のしくみであり、無機物から私たちが利用可能な糖、タンパク質、脂質等の有機物を生産します。植物のこの能力を向上させること、すなわち、生産性を高めることは、農業上の重要課題のひとつです。また、植物の代謝機能を利用して生産性を向上させることは、二酸化炭素削減にも結びつくものであり、大きな期待が寄せられています。

植物は光合成で大気中の二酸化炭素を固定し、土壌から吸収した窒素を利用して、様々な有機物をつくりだします。一次代謝はほぼすべての植物に共通と考えられており、様々なモデル植物を用いて生産性の向上につなげるための基礎的研究が行われています。

一方で、ゲノム研究の進展にともなって、植物間の違いも徐々にわかってきました。シソの赤い色素やタバコのニコチン等、植物に固有の物質をつくる二次代謝経路では、植物種に特有の遺伝子が働いていることがわかっています。しかし、一次代謝に関しては、これまで特定の植物のみに存在する遺伝子は知られていませんでした。

研究の経緯

生物のもつすべての遺伝情報はゲノムと呼ばれ、現在様々な生物のゲノムの解読が進められています。イネのゲノムは2004年に解読が完了し、遺伝情報の概要が明らかにされました。今回の研究では、イネの遺伝情報から一次代謝に関連する酵素遺伝子を網羅的に調べ、葉緑体で働くホスホエノールピルビン酸カルボキシラーゼ (PEPC) という、イネ特有の酵素をコードする遺伝子を見出しました。PEPCは、細菌、原生動物、光合成細菌から高等植物にいたるすべての光合成生物がもつ普遍的な酵素ですが、これまでに知られていたPEPCはすべて、細胞質で働く細胞質型でした。一方、今回見つけられた遺伝子は、光合成の場である葉緑体で働く新規の葉緑体型PEPCをコードする遺伝子であることがわかりました。そこで、葉緑体型PEPCがどんな機能をもっているのか調べました。

研究の内容・意義

葉緑体型PEPC遺伝子は、主に葉で働くことがわかりました。葉緑体型PEPC遺伝子の働きを人為的に抑制し、酵素の生産量を減少させると、イネの生育が阻害されました。生育阻害の程度は主要栄養素である窒素源によって異なり、窒素源が硝酸の場合はあまり生育は阻害されませんでした。アンモニアを窒素源として育てると生育が大きく阻害されました(図1)。アンモニアで育てたイネの葉に含まれる物質を網羅的に調べたところ(メタボローム解析)、遺伝子の働きを抑制したイネではリンゴ酸、クエン酸などの有機酸類(炭素化合物)が大きく減少し、その結果、有機酸を使って窒素を有機物に取り込む反応が抑えられ、イネの生育が阻害されることがわかりました。

有機酸は、光合成でつくられた炭水化物から、解糖系とトリカルボン酸(TCA)回路を経てつくられると考えられていましたが、今回の研究で、イネは葉緑体型PEPCが関与する、有機酸をつくるための独自の経路をもつことがわかりました(図2)。

肥料として土壌に投入された窒素は、畑作条件では硝酸に、水田のような湛水条件ではアンモニアになります。イネを含むイネ属は湛水条件での生育に適応しており、栽培イネ以外にも、野生イネが葉緑体型PEPCをもつことがわかりました。一方、畑作物であるトウモロコシやオオムギ、モデル植物であるシロイヌナズナは、葉緑体型PEPC遺伝子を持っていません。このことから、葉緑体型PEPCは、主要窒素源がアンモニアである湛水条件での生育に適応するための酵素であることが示されました。

今後の予定・期待

今回の研究で、湛水環境に適応したイネは独自の一次代謝経路をもっていることがわかりました。植物の生産性は、光合成能だけではなく、窒素を有機物に取り込む能力にも大きく依存することが知られています。窒素肥料の投入量が作物の栄養状態ひいては生産性を決定するという考えがありますが、今回の成果から、少なくともイネでは、炭素化合物である有機酸の合成量の低下が窒素の取り込みを制限することが明らかにされました。光合成による炭素の固定と窒素の取り込みとは車の両輪のようなもので、どちらが抑えられても生産性は低下します。今回発見した葉緑体型 PEPC は、これら生産性に密接に関わるふたつの過程をつなぐ重要な酵素であり、本酵素を利用することでイネの生産性の向上に新たな道が拓かれると期待されます。

用語の解説

<酵素>

生体内で起こる化学反応を触媒する機能分子で、多くの場合タンパク質をもとに構成されています。酵素の作用を受けて反応を起こす物質を基質と呼びます。

<一次代謝と二次代謝>

一次代謝は、多くの生物に共通してみられる生命の維持に必須な生化学的反応で、エネルギー産生、アミノ酸、タンパク質、核酸の合成などが含まれます。植物では、光合成による二酸化炭素の固定と有機物への窒素の取り込みも一次代謝に含まれます。それに対して、二次代謝は限られた範囲の生物だけにみられる代謝で、植物では、色素、細胞壁成分、アルカロイド、テルペノイド、フェノール類の合成が含まれます。

<細胞、細胞質、葉緑体>

細胞は、膜に囲まれた、原則的に内部に1個の核をもつ生体の構造的かつ機能的な単位で、核以外の液相を細胞質と呼びます。細胞質には、葉緑体、ミトコンドリア、液胞等の細胞内小器官と呼ばれる様々な構造体や顆粒が存在し、それぞれが特有の機能を営んでいます。葉緑体は光合成を行う細胞内小器官で、クロロフィル(葉緑素)を多く含むため、緑色に見えます。

<解糖系とトリカルボン酸(TCA)回路>

解糖系は糖を分解する代謝経路で、細胞質で働いています。TCA回路はミトコンドリア内部に存在し、解糖系で生じた物質からエネルギーを産生する役割と、様々な生体内物質の合成に原料(有機酸)を供給する役割を担っています。

<ホスホエノールピルビン酸カルボキシラーゼ(PEPC)>

ホスホエノールピルビン酸と重炭酸イオンからオキサロ酢酸と無機リン酸を生成する反応を触媒する酵素です。一部の植物では光合成の初期炭酸固定酵素として働いていますが、他の植物の葉や非光合成組織では、ミトコンドリア内のTCA回路に基質を供給する機能(基質補充機能)をもっています。これまでに知られているPEPCはすべて、細胞質に存在する細胞質型酵素でした。

<メタボローム>

生体内の代謝活動によってつくられるすべての物質の総称です。メタボローム解析は、代謝物質の種類と量を網羅的に調べることで、代謝変動の様相を明らかにすることができます。

協力研究者

弘前大学 農学生命科学部 生物機能科学科

大河 浩

(独) 農業・食料産業技術総合研究機構 作物研究所 稲遺伝子技術研究チーム

谷口洋二郎

(独) 農業・食料産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 低温耐性研究チーム 村山 誠治

論文発表

2010年3月16日に、米国科学アカデミー紀要で公開されました。

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107: 5226-5231 (2010)

【参考説明図】

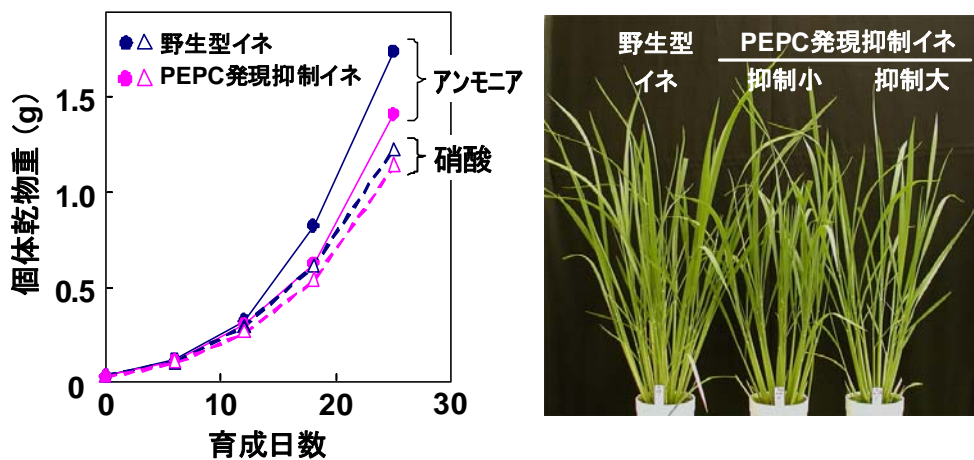


図1. 葉緑体型 PEPC 遺伝子の働きを抑制したイネの生育
 (左) アンモニアあるいは硝酸を窒素源として水耕栽培したイネの乾燥重量。
 (右) 水田同様に湛水させて土耕栽培したイネの生育。
 野生型イネに比べ、葉緑体型 PEPC 遺伝子の働きを抑制した形質転換イネ (PEPC 発現抑制イネ) では生育が阻害されることがわかりました。

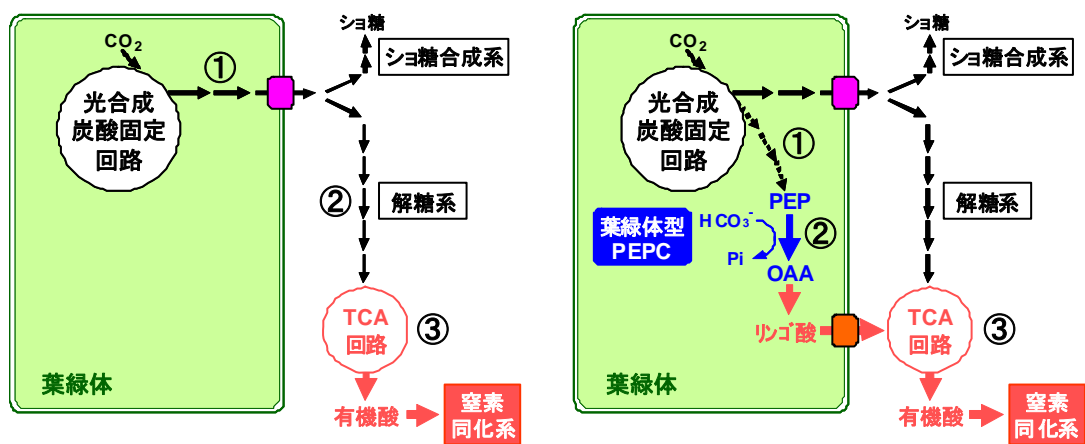


図2. 葉の有機酸合成経路の比較

一般の植物では、様々な生体内物質の原料となる有機酸は、光合成炭酸固定産物から、解糖系、TCA 回路を経由してつくられます (左図の経路①、②、③)。今回の研究で、イネは葉緑体型 PEPC を経由する独自の有機酸合成系をもつこと (右図の経路①、②、③)、また、この経路が窒素を有機物に取り込む際の主要な有機酸供給系として働いていることがわかりました。

PEP: ホスホエノールピルビン酸 (PEPC の基質)、OAA: オキサロ酢酸 (PEPC の反応産物)、窒素同化系: 窒素を有機物に取り込むための酵素群、ショ糖合成系: 砂糖 (ショ糖) をつくるための酵素群。