

平成 27 年 4 月 20 日

報道機関 各位

東北大学大学院農学研究科

イネの効率的な窒素利用機構を解明 —オートファジーがイネの成長と窒素転流の鍵を握る—

【概要】

東北大学農学研究科の和田 慎也 助教、石田 宏幸 准教授らの研究グループは、「オートファジー」と呼ばれる真核生物に共通する細胞内成分の分解機構が、イネの体内で起こる窒素転流に関与することを明らかにしました。本研究は、東北大学、東京理科大学、ならびに東京工科大学の共同研究によるもので、その成果は、米国植物生物学会誌 *Plant Physiology* (IF=7.394) への掲載が決定し、それに先立ち平成 27 年 3 月 18 日に暫定版がオンラインで発表されました。

窒素は、タンパク質をはじめ、DNA や葉緑素などの成分であることから、植物の成長を律速する重要な栄養素です。植物は、土壌から利用可能な限られた窒素栄養を使って成長を続けるために、老化葉から新しい葉に窒素を篩管を通して輸送（転流）させることにより、体内で再利用（リサイクル）していることが知られています。植物の窒素転流は、20 世紀初頭より報告のある現象ですが、その初発反応となる老化葉におけるタンパク質分解の機構はこれまで明らかにされていませんでした。和田助教、石田准教授らのグループは、オートファジーがイネ老化葉における主要な転流窒素源である光合成タンパク質の分解を担うことを明らかにしました。そして、オートファジーを行うことができない変異体イネは、通常のイネと同じ量の窒素を吸収しても成長が抑制されることを明らかにしました。

今回の成果では、環境負荷の少ない「持続可能な農業」の発展に向けて、「少ない肥料で効率よく成長するイネ」をつくるための重要な改良ターゲットを提示することができた、と言えます。

【研究の背景】

窒素は、植物が成長する上で必要なタンパク質、DNA、葉緑素（クロロフィル）などの構成元素として要求量が非常に高く、成長に最も強く影響を及ぼす栄養素です。現在の農業では、化石燃料を使い合成した化学窒素肥料を作物にたくさん与えることで、収量を増加させています。その一方で、肥料と収量とのコストバランスの問題、また大量の化学肥料を使用することで、土壌や地下水など環境に負荷がかかるという問題が生じています。

植物は本来、一度地面に根を下ろすと自ら移動することはできず、その場の栄養環境に適応しながら生き抜かなければならないため、土壌から吸収できる限られた栄養素を効率的に利用する能力を持っています。植物の葉に存在する多くの窒素は、光合成を行うための酵素やタンパク質として存在します。大量の窒素を投資し、植物は光合成を行うことで、糖やデンプンといったエネルギー源を獲得し成長することができます。そして成長に伴い、初期に作られた葉は、新しく上位に作られた葉によって光が遮られ、光合成をするのに不利な状況になります。その際植物は、下位の古い葉の光合成タンパク質を小さなアミノ酸分子へと分解させ、窒素が体内を移動できる形にして、より光合成を行うのに効率のよい上位の新しい葉へと窒素を篩管を通じて移動（転流）させ、再び光合成タンパク質をつくるために再利用します（図 1）。この老化葉での光合成タンパク質の分解機構については、1980 年代初頭より世界中で研究が盛んに行われてきましたが、分解に関わる機構や分子の正体については長い間未解明のままでした。

オートファジーとは、真核生物（動物・植物・酵母やカビなど）が持つ、主に栄養飢餓に陥った際に自分の体の一部を食べて飢えをしのぐための、細胞内タンパク質のリサイクル分解機構です。和田助教、石田准教授らの研究グループは、これまでモデル実験植物であるシロイヌナズナを材料に、光合成タンパク質の分解機構の一つとして、オートファジーによる分解経路があることを明らかにしてきました。しかしながら実際の作物に関して、オートファジーが光合成タンパク質の分解を行うのか、またそれが作物の成長にとってどのくらい大切なものなのかはわかっていませんでした。今回、研究グループは、世界の三大作物であり、アジアや日本、そして本学が位置する東北地方の最重要作物でもあるイネを材料に、作物の成長や窒素利用とオートファジーの関係について研究を行いました。

【研究成果】

研究グループは、イネにおけるオートファジーと窒素リサイクルの関係を明らかにするために、オートファジーに必須の遺伝子 *ATG7* が破壊されオートファジーを行うことができない変異体 (*Osatg7-1*) の成長を、通常の日本晴（野生型）と比較解析しました(図 2)。その結果、オートファジー不能変異体 (*Osatg7-1*) は、日本晴に対して根から吸収する窒素量は変わらないのに体の大きさが約 30%小さい、つまり窒素の利用効率が悪いイネであることがわかりました。そこで、老化葉の窒素リサイクルについて解析すると、*Osatg7-1* の葉は、見た目にはふつうの日本晴と同時に葉が黄色く枯れていくものの、老化に伴った窒素の流出（転流）が起らず、老化葉に窒素が残っていくことがわかりました（図 3）。さらによく調べると、*Osatg7-1* の老化葉には、光合成タンパク質や葉緑体が分解されずに大量に残存することから、オートファジーがイネ葉の老化過程において光合成タンパク質や葉緑体を分解する主要なメカニズムであることがわかりました。

【今後の展望】

イネは、水田に密植された群落として栽培されるため、自己や他の個体の上位葉からの被陰効果が大きく、下位葉から上位葉への効率的な窒素転流が特に求められます。本研究成果ではオートファジーがイネの窒素転流を担う主要な機構であることが明らかになりました。今後、オートファジー機能の制御が、環境負荷の少ない「持続可能な農業」を発展させるために、「少ない肥料で効率よく成長するイネ」をつくるための重要な改良ターゲットとなることが考えられます。また、老化葉におけるオートファジー機能の適切な強化は、イネだけではなく、例えば窒素の利用効率が低い作物において、利用効率を改善し成長促進につなげることができるかもしれません。オートファジーは、これまでヒトの長寿、健康や疾患との関わりから注目され、最近では毎年ノーベル賞候補に名前があげられるまでに発展している研究分野です。そのオートファジーが、食糧やバイオマス生産といった別の観点からも、人類の福祉と密接に関係していることが明らかになりつつあります。今後、植物においてもさらなるオートファジー研究の展開が望まれます。

本研究は文部科学省科学研究費補助金、並びに GRENE 植物科学分野(NC-CARP)の支援を受けて行われました。

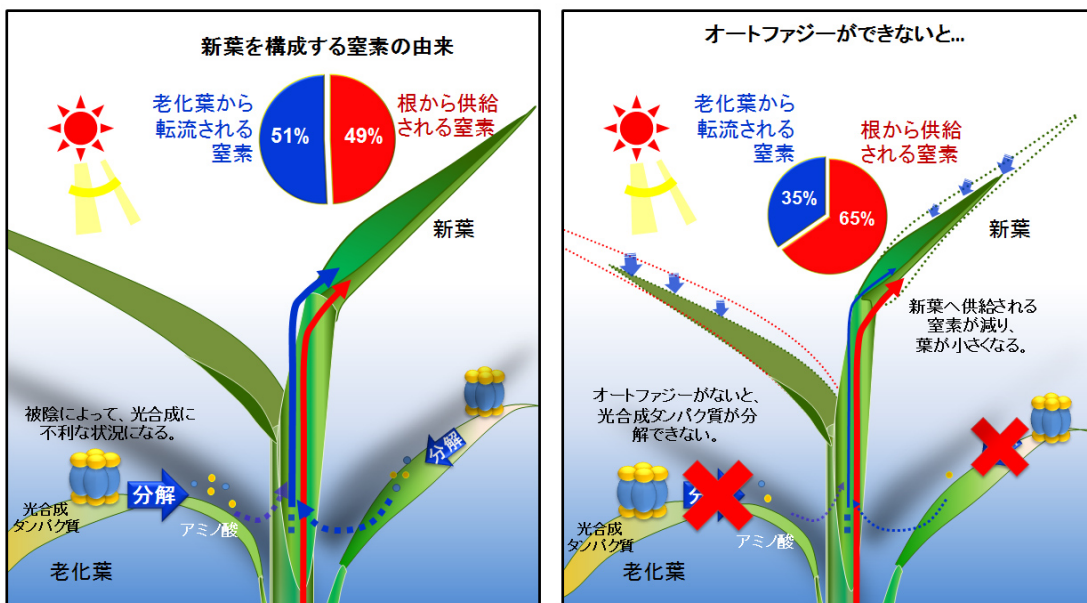


図 1; イネの窒素転流におけるオートファジーの役割(イメージ図)

赤矢印; 直接根から吸収され、新葉へ輸送される窒素の流れ。

青矢印; 老化葉から転流されるリサイクル窒素の流れ。

地面に垂直に成長するイネのような植物では、より上位に新しい葉が展開すると、光が届きにくくなり光合成に不利になる下位の葉では、葉の老化が促進される。その際、葉緑体タンパク質が積極的に分解され、それにより生じるアミノ酸が師管を通して上位の葉へと転流され、リサイクルされる。通常のイネでは、新しい葉を作る時、その葉を構成する約半分の窒素は、老化葉からのリサイクル窒素に依存している(左図)。オートファジー不能イネでは、老化葉の光合成タンパク質分解ができないため、新葉へのリサイクル窒素が減少し、新葉が小さくなる(右図)。



図 2; オートファジーができなくなったイネの外観

(左:地上部、右:地下部)

植物は両写真ともに左が日本晴、右がオートファジー不能変異体イネ(*Osatg7-1*)。 *Osatg7-1* は、生育が全体的に低下している。

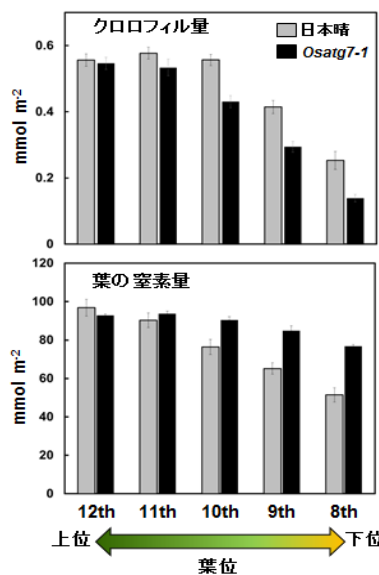
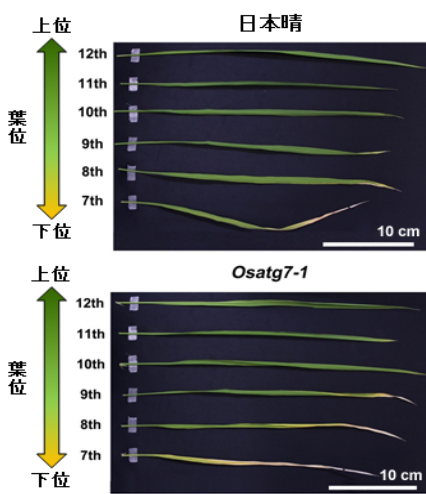


図 3; 日本晴と *Osatg7-1* の葉の老化

(左写真)イネの若い上位の葉から下位の老化葉までを並べた様子。

(上; 日本晴、下; *Osatg7-1*)

(右グラフ)上位葉から下位葉までのそれぞれの葉に含まれる、緑色色素量(上)と、窒素量(下)の推移。(グレー; 日本晴、黒; *Osatg7-1*)

Osatg7-1 の下位の葉は、日本晴と同様に緑色色素量が低下し、見た目にも枯れてくるにも関わらず、窒素量が高く維持されている。

【論文情報】

表題: Autophagy supports biomass production and nitrogen use efficiency at the vegetative stage in rice

「オートファジーはイネの栄養成長期におけるバイオマス生産と窒素利用効率に寄与する」

著者: Shinya Wada¹, Yasukazu Hayashida¹, Masanori Izumi, Takamitsu Kurusu, Shigeru Hanamata, Keiichi Kanno, Soichi Kojima, Tomoyuki Yamaya, Kazuyuki Kuchitsu, Amane Makino, Hiroyuki Ishida* (¹equal contribution; *corresponding author)

(和田慎也、林田泰和、泉正範、来須孝光、花俣繁、菅野圭一、小島創一、山谷知行、朽津和幸、牧野周、石田宏幸)

雑誌: Plant Physiology

巻頁: Published online before print (March 18, 2015), pp.00242.2015.

DOI: 10.1104/pp.15.00242

【問い合わせ先】

東北大学 大学院農学研究科 応用生命科学専攻 植物栄養生理学分野

助教 和田慎也

E-mail: s-wada@biochem.tohoku.ac.jp Tel: 022-717-8767 Fax: 022-717-8765

准教授 石田宏幸

E-mail: hiroyuki@biochem.tohoku.ac.jp Tel: 022-717-8767 Fax: 022-717-8765

〒981-8555 宮城県仙台市青葉区堤通雨宮町 1-1

東京理科大学 理工学部 応用生物科学科

教授 朽津和幸

〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

E-mail: kuchitsu@rs.tus.ac.jp Tel: 04-7122-9404

東京工科大学 応用生物学部 応用生物学科

助教 来須孝光

〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

E-mail: kurusutkmt@stf.teu.ac.jp Tel: 042-637-5346