

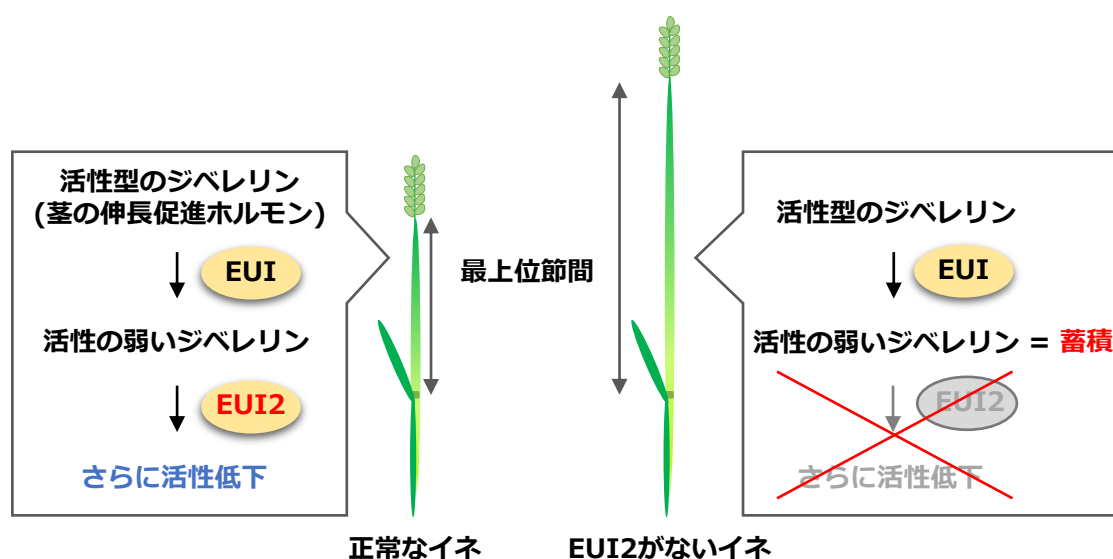
イネの成長調節ホルモンの新しい不活性化機構を解明

—イネはジベレリンを段階的に不活性化する—

概要

日本では米の不足や価格高騰が続いており、米の生産性を高めることは農産業における重要な課題の一つです。植物は成長の調節や生育環境への適応のために、植物ホルモンと呼ばれる様々な分子を作ります。その一つであるジベレリンは、葉や茎の伸長や種子の発芽を促進するといった働きを持ち、「緑の革命」と呼ばれる農業革命に利用されるなど、農業においても非常に重要なホルモンです。京都大学化学研究所 石田俊晃 博士課程学生（研究当時）、増口潔 同助教、山口信次郎 同教授、中国科学院 Zuhua He 教授、福建農林大学 Shubiao Zhang 教授らの国際共同研究グループは、イネから発見した「EUI2」という酵素タンパク質がジベレリンの働きを低下させ、イネの先端の節の間（最上位節間）の長さを巧妙に調節していることを明らかにしました。イネは最上位節間が十分に伸長することで穂を出し、種子を作ることができます。また、EUI2 が存在しない変異体（*eui2*変異体）は、「ハイブリッド米」と呼ばれる優れた性質を持つ雑種米を開発するために利用されています。今回の発見は、ジベレリンの働きを低下させる新たなメカニズムの発見に加えて、私たちの重要な主食であるイネの収量増加への貢献が大いに期待される知見です。

本研究成果は、現地時間 2025 年 6 月 4 日に、米国の国際学術誌「*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*」に掲載されました。



イネの最上位節間におけるジベレリンの段階的な活性調節と EUI2 の働き

1. 背景

植物の成長を調節する物質である植物ホルモンの一つである「ジベレリン」は、葉や茎の伸長や種子発芽の促進、開花の誘導などの機能を持っています。ホルモンとして直接働くジベレリン（活性型ジベレリン）の量が増加した植物は草丈が大きくなり、反対にその量が少ない植物は草丈が小さくなります。植物は活性型ジベレリンの含量を調節するための仕組みを持っており、その一つが、ジベレリンの働きを低下させる「不活性化」です。私たちが過去に発見したイネの EUI タンパク質は、ジベレリンを不活性化する酵素の一つで、最上位節間 [注 1] の長さを調節するのに重要であることが知られていました。EUI 遺伝子が欠損した *eui* 変異体は、最上位節間における活性型ジベレリンが増加するため、この部分が劇的に長く伸長します。また、*eui* 変異体ほどではないものの、同様に最上位節間が長く伸長する *eui2* 変異体も知られていました (図 1)。

eui 変異体と *eui2* 変異体は、ハイブリッド米 [注 2] の開発に利用されています。病害に強く収量が高いなどの特徴を持つハイブリッド米は、中国を中心に栽培が進められています。その作出には雄性不稔株 [注 3] と呼ばれるイネが必要ですが、最上位節間が伸長しにくく穂を出しにく

い難点を持ちます。そこで、最上位節間が長く伸びる *eui* 変異体や *eui2* 変異体がハイブリッド米の作出に使用されています。しかし、農業において非常に重要な変異体であるにも関わらず、*eui2* 変異体の原因遺伝子やその役割は明らかにされておらず、この変異体がなぜわずかに大きくなるのかも不明でした。



図 1. *eui* 変異体と *eui2* 変異体の表現型。

野生型と比較して、*eui* 変異体は最上位節間が長く伸長して草丈が大きくなる。*eui2* 変異体も最上位節間が長く伸びるが、*eui* 変異体ほど顕著ではない。

2. 研究手法・成果

まず、3 万個以上あるイネの遺伝子のうち、*eui2* 変異体の中でどの遺伝子に異常が生じているかを調べたところ、これまで機能が未知であった酵素タンパク質 (EUI2 タンパク質と命名) をコードする遺伝子に変異が生じていることが明らかとなりました。次に、EUI2 タンパク質の機能を調べました。その結果 EUI2 タンパク質は、EUI タンパク質によって活性型ジベレリンから作られる「エポキシ型ジベレリン」を加水分解して、「ジヒドロキシ型ジベレリン」へと変換することが示されました。

そこで、イネの最上位節間に含まれるエポキシ型ジベレリンの量を測定したところ、野生型よりも *eui2* 変異体で増加していることが明らかとなりました。一方、通常よりも EUI2 タンパク質が過剰に働くように作出した *EUI2* 過剰発現体では、野生型よりもジヒドロキシ型ジベレリンが増加することが示されました。これらの結果から、EUI2 タンパク質がイネの体内でもエポキシ型ジベレリンの加水分解を行うことが明らかとなりました。一方、活性型ジベレリンの含量は野生型と *eui2* 変異体の間で同程度だったことから、*eui2* 変異体の最上位節間がわずかに長く伸長するのは、エポキシ型ジベレリンの蓄積が原因であることが示唆されました。つまり、これまで不活性だと思われていたエポキシ型ジベレリンには、まだ活性が残っているのではないかと予想されました。

そこで、まずエポキシ型ジベレリンを穂が出る時期のイネに投与してみると、活性型ジベレリンよりも活性が弱いものの、最上位節間を伸ばすことが明らかとなりました。次に、イネが活性型のジベレリンを認識して、その情報を流すのに重要な受容体タンパク質に、実際にエポキシ型ジベレリンが結合するかを調べました。その結果、結合のしやすさは活性型ジベレリンよりも弱いものの、エポキシ型ジベレリンは受容体と結合可能で

あることが明らかとなりました。また、EUI2 タンパク質によってエポキシ型ジベレリンから作られるジヒドロキシ型ジベレリンは、エポキシ型ジベレリンよりもさらに結合しにくいという結果が得られました。

以上の結果から、*eui2* 変異体の最上位節間がわずかに長く伸長するのは、ジベレリンとしての活性が弱いエポキシ型ジベレリンの蓄積が原因であることが明らかとなりました。また、イネでは EUI タンパク質と EUI2 タンパク質が連続的に働くことで、ジベレリンの活性を段階的に低下させていることが明らかとなりました（図 2）。

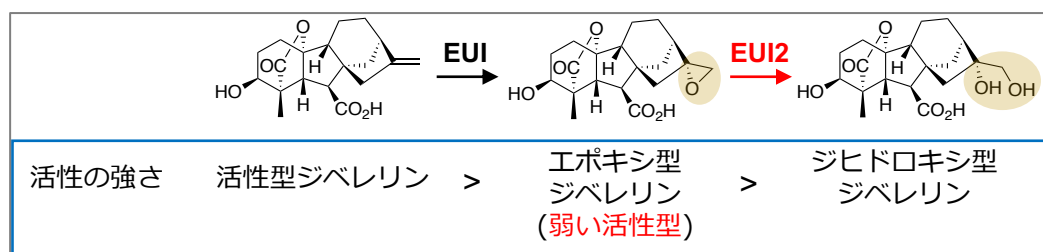


図 2. 本研究により明らかとなったイネのジベレリン不活性化経路。
活性型ジベレリンは EUI によってエポキシ型ジベレリンへと酸化され、さらに EUI2 によってジヒドロキシ型ジベレリンへ加水分解されることで段階的に活性が低下する。

3. 波及効果・今後の予定

本研究により、イネの特に最上位節間におけるジベレリン量の調節に EUI2 タンパク質が重要であることが明らかとなりました。最上位節間の長さは、イネが種子を作る上で重要な形質です。加えて、*eui2* 変異体はハイブリッド米の開発に利用されていることから、本研究の成果はイネの増収への応用が期待される重要な知見です。また、イネではジベレリンを段階的に不活性化されることが明らかとなりました。弱い活性を持つエポキシ型ジベレリンは、イネがより精巧な成長調節を行う上で重要な役割を果たしていると推測されます。今後はその詳細に加え、本不活性化機構が他の植物にも存在するのかといったことを明らかにしていくことが重要だと考えられます。

4. 研究プロジェクト

本研究は、科学研究費助成事業[課題番号：17H06474]、京都大学化学研究所国際共同利用・共同研究[課題番号：2024-101、2023-106、2022-90、2021-84、2020-61]の支援の下で実施されました。

<用語解説>

[注 1] 最上位節間：植物の葉が茎につく部分を「節」といい、節と節の間が「節間」と呼ばれる。その中でも最上位節間は、穂に一番近い節間のことを指す。

[注 2] ハイブリッド米：病気に強い、環境ストレスに強い、味が良いなど、異なる有用形質を持つ親株同士を掛け合わせることで、両親の優れた性質を併せ持つ次世代（雑種第一代や F1 品種とよばれる）を作り出すという方法で開発されたイネのこと。また、「雑種強勢」と呼ばれるメカニズムにより、雑種第一代は親株よりも生育が旺盛となり、収量が良くなることが知られている。現在、雑種第一代は、多くの野菜の生産に広く利用されている。

[注 3] 雄性不稔株：健全な花粉を作ることができない株のこと。自身の花粉では受粉できないため、遠縁の品種間での交雑が必要なハイブリッド米の開発において重要な役割を果たす。

<研究者のコメント>

「既に農業利用されている一方、その詳細が不明だった *eui2* 変異体の解析により、イネにおける重要なジベレリンの不活性化機構を明らかにすることができました。イネがなぜ、またはどのようにしてこのシステムを備えたのかを明らかにしていくことは、他の植物にも似た機構が存在するのかを含めて興味深いことだと考えます。」（石田俊晃）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Stepwise deactivation of gibberellins during rice internode elongation（イネの節間伸長におけるジベレリンの段階的な不活性化）

著者：Toshiaki Ishida*, Yingying Zhang* †, Hongbo Zhu*, Shoko Fudano, Yu Peng, Yoshiya Seto, Kiyoshi Mashiguchi, Jiyun Liu, Zuhua He, Shubiao Zhang †, Shinjiro Yamaguchi †（*共筆頭著者、†責任者）

掲載誌：*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*

DOI：10.1073/pnas.2415835122