PRESS RELEASE

岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

岡山大学記者クラブ
文部科学記者会
科学記者会　　御中

令和 6 年 12 月 24 日
岡　山　大　学

イネのケイ素吸収を制御する長距離シグナルタンパク質を発見！
ケイ素蓄積を増やし、ストレスに強い作物に期待

◆発表のポイント

・イネはシグナルタンパク質 SSS を篩管を通して茎葉から根に運ぶことで、ケイ素の吸収と蓄積をフィードバック制御していることを明らかにしました。
・DIY インセクトレーザー法を開発し、篩管液中のタンパク質の検出が可能になりました。
・SSS は花成ホルモン(フロリゲン)から機能分化しました。この仕組みを獲得することでイネ科植物はより高度にケイ素を利用できるようになったと考えられます。

岡山大学資源植物科学研究所/J-PEAKS 研究特区主任研究者の山地直樹准教授、同研究所の三谷奈見季准教授らの研究グループは、イネの地上部で発現し、根に運ばれて根のケイ素吸収を促進するシグナルタンパク質 SSS(Shoot-Silicon-Signal)を発見し、ケイ素の吸収と蓄積をフィードバック制御する仕組みを解明しました。また、DIY インセクトレーザー法を開発することで、イネの篩管液の採取を可能にし、篩管液中の SSS タンパク質の検出に成功しました。これらの研究成果は 12 月 27 日午後 7 時（日本時間）、英国の総合学術誌「*Nature Communications*」に掲載されます。

ケイ素は土壌中に普遍的に存在し、陸上植物にとって必須元素ではありませんが、さまざまなストレス耐性を向上させる有益効果があります。イネ科植物、特にイネは多量のケイ素を積極的に吸収して利用しますが、これまでその制御メカニズムは解明されていませんでした。本研究成果によって、イネおよびイネ科植物が多量のケイ素を吸収するだけでなく、緻密に蓄積を制御する仕組みを備えていることが確認されました。この仕組みを応用し、ケイ素施肥の最適化や、より多くのケイ素を蓄積する作物品種の開発を通じて、よりストレスに強く、持続可能な農業生産に貢献することが期待されます。

◆研究者からのひとこと

この論文の最終稿を投稿したのは岡山マラソンの翌日でした。マラソンの朝は大盛りのカレーライスを食べて走りました。ケイ素はイネの籾殻にはとてもたくさん蓄積しますが、白米にはほとんど含まれません。走った後はビールをおいしく頂きましたが、こちらは籾殻付きの大麦麦芽を原料にしているのでケイ素をたくさん含んでいます。

山地准教授

■発表内容

＜現状＞

ケイ素（Si）は土壌中に酸素（O）に次いで二番目に多く、普遍的に存在する元素です。土壌の水分にはわずかずつですが常に土壌のケイ素がケイ酸（$Si(OH)_4$）として溶け出します。ケイ素は陸上植物にとって必須元素[1)]ではありませんが、土壌に根を下ろす植物は多かれ少なかれケイ素を吸収して利用します。植物が吸収したケイ素は葉の表面などにシリカ(SiO_2)として蓄積し、植物を病気や害虫、乾燥、高温、栄養素の過不足などのさまざまなストレスに対して強くする働きがあります。ケイ素の吸収／蓄積量は植物の種類によって大きく異なります。イネ科植物、なかでもイネは特に多くのケイ素を積極的に吸収・蓄積し、その濃度は 5～10%（藁の乾燥重量あたり）にも達します。しかしこれまで、イネの積極的なケイ素吸収がどのように制御されているのか、ほとんどわかっていませんでした。

＜研究成果の内容＞

私たちは、イネの地上部で発現し、根に運ばれて根のケイ素吸収を促進するシグナルタンパク質[2)] SSS(Shoot-Silicon-Signal)を発見しました。SSS の遺伝子は葉や節[3)]のみに発現し、根には遺伝子発現が検出されません。しかし SSS タンパク質は地上部だけでなく、根や篩管液中にも検出されました。植物の篩管[4)]は光合成によって作り出した糖を葉から全身に送り届ける役割がありますが、それだけでなく植物ホルモンやさまざまなシグナルタンパク質などを運び、植物体内の情報ネットワークとしても機能していると考えられています。しかし技術的な制約により篩管液を採取してそこに含まれるシグナル分子を調べる研究はほとんど進んでいません。今回私たちは、イネの害虫のトビイロウンカ[5)]と安価なレーザー彫刻機を使って、篩管液を吸汁中のトビイロウンカの口針をレーザーで狙って切断し、その切り口から浸み出す篩管液を回収する「DIY-インセクトレーザー法」の開発に成功し、SSS タンパク質を検出しました。すなわち SSS タンパク質はイネの地上部で発現し、篩管を通って根に運ばれることがわかりました（図 1 ）。

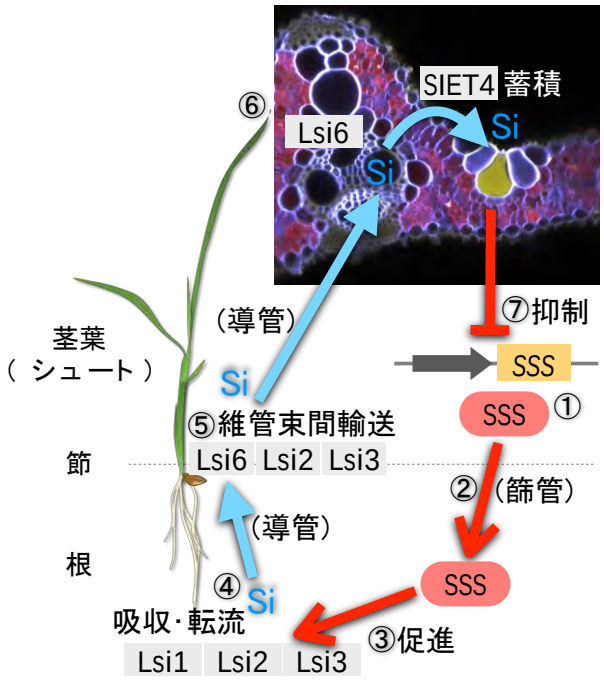

図1 SSSを介したケイ素吸収・集積のフィードバック制御

① *SSS*遺伝子はケイ素蓄積が少ない時に葉や節で発現しSSSタンパク質が作られる

② SSSタンパク質が篩管を通って根に運ばれる

③ SSSタンパク質が輸送体の遺伝子*Lsi1*，*Lsi2*，*Lsi3*の発現を促進する

④ Lsi1，Lsi2，Lsi3によってケイ酸が吸収され、導管に積み込まれて地上部に運ばれる

⑤ 節では輸送体Lsi6，Lsi2，Lsi3によってケイ酸が維管束間輸送され、新しい葉や籾殻に優先的に分配される

⑥ 葉に到達したケイ酸はLsi6によって導管から積み下ろされ、輸送体SIET4によって葉の表面や特定のケイ化細胞に輸送されてシリカとして蓄積する

⑦ ケイ素が蓄積するとSSS遺伝子の発現が抑制される

（ 写真はケイ素蓄積を蛍光染色[黄色]した葉の横断面）

イネは、根で働くケイ酸輸送体[6]Lsi1、Lsi2、Lsi3 によってケイ酸を吸収します(図 1)。ケイ素が少ない時にはこれらの遺伝子の発現が高く、より積極的にケイ素を吸収しようとしますが、ケイ素を十分に蓄積するとその発現が低下し、根のケイ酸吸収能力も低下します。この時、葉や節の SSS 遺伝子の発現を調べたところ、ケイ素を与えないイネで高発現しており、根からケイ素を与えるとわずか数時間で発現が減少し始め、1 日ほどで発現が消失しました。また SSS タンパク質もケイ素を与えて数日程度で地上部、根ともにほとんど消失しました。一方、ゲノム編集技術によって作出した SSS 遺伝子破壊イネでは、ケイ素を与えない条件でも SSS タンパク質が発現しないだけでなく、根の Lsi1、Lsi2、Lsi3 の発現とケイ酸吸収能力も低下し、そのレベルは十分なケイ素を蓄積したイネと同じでした。すなわち、イネは SSS を介してケイ素の吸収と蓄積の負のフィードバック制御[7]を行っています(図 1)。SSS タンパク質は地上部のケイ素の蓄積が少ない時に根に運ばれて、根のケイ酸輸送体の発現とケイ酸吸収を促進するシグナルとして機能し、地上部のケイ素蓄積が十分になるとシグナルが消失して根のケイ酸吸収を基底レベルまで抑制することがわかりました(図 1)。この SSS 遺伝子破壊イネを通常の水田土壌条件で栽培すると、茎葉や籾殻のケイ素蓄積が大幅に減少し、さまざまなストレスに弱くなった結果としてコメの収量が約 1/3 に低下しました。植物はケイ素を多く蓄積するほどストレスに強くなると考えられますが、その吸収と蓄積にはさまざまなコストがかかります。SSS はケイ素蓄積の有益効果とコストのバランスを調節するためのシグナルであると考えられます(図 1)。

SSS タンパク質は、花成ホルモン(フロリゲン)[8]として知られるシグナルタンパク質と類似性があります。また SSS のオーソログ遺伝子[9]はイネだけでなくイネ科植物に広く存在していることがわかりました。本研究ではコムギ、トウモロコシ、モウソウチクの SSS オーソログ遺伝子について、イネの SSS と同様にケイ素に素早く応答して発現が減少することを確かめました。イネ科植物は、植物の生存戦略の根幹であるフロリゲンによって開花を調節する仕組みを転用し、ケイ素の蓄積を高度に調節する仕組みを新たに獲得したと考えられます。この仕組みによって、より積極的にケイ素を利用できるようになり、ケイ素が普遍的に存在する地球上の環境に適応する新たな戦略を身につけたことが、イネ科植物が卓越する草原を形成し、またイネやムギなどのイネ科穀物による集約的な農業生産を可能にした要因の 1 つかもしれません。

＜社会的な意義＞

積極的なケイ素の吸収と利用がイネをはじめとするイネ科植物の特徴です。イネ科作物の農地では、作物の吸収によってしばしば土壌中に溶存するケイ酸が枯渇します。SSS やそのオーソログ遺伝子の発現を指標に作物のケイ素要求を把握して適切なケイ素施肥を行うこと、また SSS の働きをより強くすることによって、作物をさまざまなストレスに強くし、作物の生産性や農業の持続可能性の向上に寄与することが期待されます。

■論文情報

論 文 名：Shoot-Silicon-Signal Protein to Regulate Root Silicon Uptake in Rice.

邦題名 「イネの根のケイ素吸収を調節する茎葉由来のシグナルタンパク質」

掲 載 紙：*Nature Communications*

著　　者：Naoki Yamaji, Namiki Mitani-Ueno, Toshiki Fujii, Tomonori Shinya, Ji Feng Shao, Shota Watanuki, Yasunori Saitoh, Jian Feng Ma

D　O　I：10.1038/s41467-024-55322-7
U　R　L：https://www.nature.com/articles/s41467-024-55322-7

■研究資金

本研究は、独立行政法人日本学術振興会（JSPS）「科学研究費助成事業」（基盤 B・19H03250, 基盤 A・24H00571 研究代表：山地直樹, 基盤 S・21H05034 研究代表：馬建鋒, 基盤 C・24K08648 研究代表：三谷奈見季）、武田科学振興財団「生命科学研究助成」(研究代表：山地直樹)、 大原奨農会「共同研究助成」（研究代表：山地直樹）の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

1) 必須元素
生きていくために必ず必要とする元素。陸上植物の場合は 17 元素（水素、ホウ素、炭素、窒素、酸素、マグネシウム、リン、硫黄、塩素、カリウム、カルシウム、マンガン、鉄、ニッケル、銅、亜鉛、モリブデン）が知られている。

2) シグナルタンパク質
比較的小さな水溶性タンパク質で、発現した細胞から別の組織・器官へと移動して情報を伝達するもの。

3) 節
葉と茎が接する部分。イネ科植物の節は非常に維管束が発達しており、さまざまな輸送体タンパク質を介した維管束間輸送によって栄養素の分配先を集約的にコントロールしている。

4）篩管
導管とともに植物の維管束を構成する通導組織。葉などの光合成器官から、茎頂や根端の発達中の組織や種子などの貯蔵器官へ光合成産物（イネの場合は蔗糖）を運ぶ。さらにさまざまな栄養素やアミノ酸、植物ホルモン、シグナルタンパク質などの輸送経路としても重要な役割を担うと考えられている。

5) トビイロウンカ
カメムシ目ウンカ科、全長~5mm で鳶色の昆虫。日本では越冬できないため、東南アジアや中国南部から風に乗って飛来したものが盛んにイネを吸汁して増殖する。秋までに増えすぎるとイネの坪枯れを起こすことがある。

6) 輸送体
生体膜を横切って基質を輸送するタンパク質。イネのケイ酸輸送体については次の 5 種類が知られており、Lsi1 と Lsi6 は細胞膜上でケイ酸を透過し、Lsi2、Lsi3、SIET4 は細胞の中から外へケイ酸を排出する。

7) フィードバック制御

システムの出力に基づいて次の時点の入力を制御する仕組み。SSS の例では、ケイ素の蓄積が多いと吸収を減らし、蓄積が少ないと吸収を増やす、逆向き（負）のフィードバックによって蓄積を一定の目標に近づけるように制御される。

8) フロリゲン

開花時期を調節するタンパク質性のホルモン。日長など開花に適した環境条件になると主に葉で発現し、茎頂の分裂組織に篩管輸送されて花芽の形成を誘導する。

9) オーソログ遺伝子

異種間で共通祖先の同じ遺伝子に由来する遺伝子。同じ役割があると推測される。

＜お問い合わせ＞
岡山大学資源植物科学研究所
准教授　山地　直樹
（電話番号）086-434-1212

Japan. Committed to the SDGs
岡山大学 OKAYAMA UNIVERSITY
SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS
岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。