

イオンビーム照射で放射性セシウムを吸収しにくい 水稲を開発



石川 覚

Ishikawa Satoru

((国研) 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター)

1 はじめに

2011年3月の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により、環境中に多量の放射性セシウム(Cs)が放出され、広範囲にわたって農地土壤が汚染された。放出された放射性核種のうち、 ^{134}Cs は物理的半減期が約2年であるが、 ^{137}Cs は約30年であり比較的長い。放射性Csは農作物を介して容易に人体に取り込まれるため、コメ等の農作物中に含まれる放射性Cs濃度は今後も長期にわたって監視を続けていく必要がある。被災地では土壤の復元工事のほか、農地土壤から農作物への放射性Csの移行を低減させるために、カリ(K_2O)肥料の施与量を増やした吸収抑制対策を実施している。K⁺はCs⁺と同じ一価のアルカリ金属イオンであり、根の吸収部位において競合が起こるため、Cs⁺吸収を抑制する効果が高いと考えられている¹⁾。カリ増肥による吸収対策が功を奏し、福島県内で実施されている全量全袋調査において、平成27年度以降は基準値(玄米で100 Bq/kg)を超過するコメは産出されなくなった。一方で、カリ増肥の対策費用は年間十数億円にも上り、農家側の労力的な負担も大きいことから、省力的でかつ低コストで行える新たな低減対策が望まれている。放射性Csを吸収しにくい水稲品種の開発は、水田へのカリ肥料の投入量を抑えつつ、放射性Cs濃度の低いコメの生産が可能になるため、農家の負担軽減や対策コストの

大幅な削減に繋がるだけでなく、作物に由来する放射性Csの摂取量を大幅に減少することが期待できる。

筆者らのグループは、コシヒカリの種子にイオンビームを照射し、変異を与えた種子から「イタイタイ病」の原因物質であり、有害元素の1つであるカドミウム(Cd)をほとんど吸収しないイネ(稲)を作り出し、2013年5月号(No.709)の本雑誌にて紹介した。その後、このイネは「コシヒカリ環1号」という品種名で2015年に種苗登録された。今回、同様の手法を用いて、放射性Cs吸収を抑制したイネを作ることに成功したので、紹介する。

2 イオンビーム照射したコシヒカリ変異体からの選抜

イオンビームとは、水素イオンや炭素イオン等を加速器(サイクロトロン)を使って作り出した放射線であり、医学、工学、農学等多岐にわたる分野で広く利用されている。特に農学分野では種子等にイオンビームを照射し、DNAに変異を与えることでこれまでとは異なる形質を持つ品種を作ることに利用されている。「コシヒカリ環1号」はOsNramp5という重金属(主にマンガン)輸送体をコードする遺伝子に1塩基の欠損が生じることで、Cd吸収が抑制された品種である。イオンビーム照射によって新たに作り出された品種は遺伝子組換え植物ではないため、生産現場にすぐに導入できることが最大の

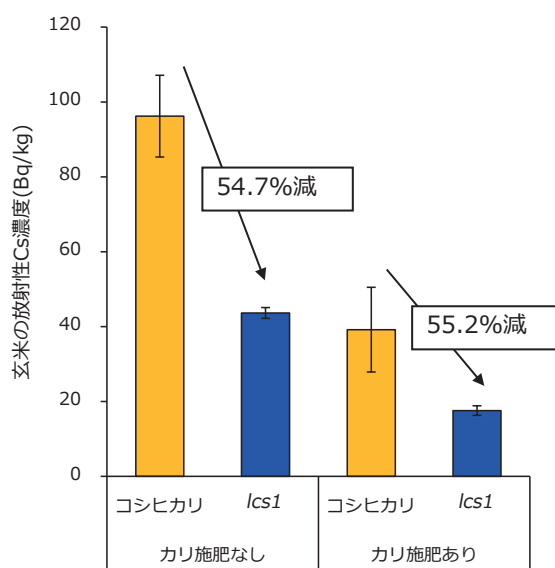


図1 現地圃場における玄米の放射性Cs濃度の比較

放射性Csは¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計。土壌の交換性カリ(K₂O)含量はカリ施肥なしで7.0 mg/100 g、カリ施肥ありで12 mg/100 gに増加した。現地圃場は東京電力福島第一原発から北西約60 kmに位置する。

メリットである。

イオンビームをコシヒカリの種子に照射し、第2世代の種子(M2)を当研究センターでは保存している。その中から無作為に種子を抽出し、生育が揃った約3,000個体の苗を1個体ずつポットに移植して栽培した。各個体から玄米を収穫し、安定同位元素である¹³³Csの玄米中濃度を誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)で測定した。その結果、通常のコシヒカリに比べ、玄米中の¹³³Cs濃度が半減した変異体(low cesium 1: *lcs1*)を選抜することに成功した。

3 現地圃場での栽培試験

安定同位体(¹³³Cs)の濃度で選抜した*lcs1*変異体が放射性Cs濃度(¹³⁴Csと¹³⁷Cs)においても同様に低くなるのか確かめるため、福島第一原発から北西に約60 km離れた水田圃場において、コシヒカリと*lcs1*変異体を栽培し、玄米中の放射性Cs濃度を比較した(図1)。この水田の土壌は、放射性¹³⁷Cs濃度が約4,000 Bq/kgと高く、また交換性カリ含量は約7.0 mg/100 gと低いため、水稻の放射性Cs吸収が高まりやすい圃場である。カリ施肥との併用による吸収抑制も調査するために、土壌の交換性カリ含量を12 mg/100 gまで高めたカリ施肥区も設定し



図2 現地圃場における草姿

た。カリ施肥をしない場合、コシヒカリの玄米中放射性Cs濃度は96 Bq/kgであり、基準値である100 Bq/kgに接近した。一方、*lcs1*変異体は44 Bq/kgとなり、コシヒカリに比べて半分の濃度であった。稲わらの放射性Cs濃度も同様に*lcs1*変異体で低下した。カリ施肥した場合、コシヒカリの玄米中放射性Cs濃度は約40 Bq/kgまで低下した一方、*lcs1*変異体は20 Bq/kgを下回った。よって、カリ施肥と併用することで効果的に放射性Cs吸収を抑制できることが分かった。

現地圃場で栽培した時の*lcs1*変異体の草姿は、コシヒカリと見分けが付かないくらい、よく似ていた(図2)。カリ施肥をしていない区ではやや草丈と玄米収量が*lcs1*変異体で低くなる傾向だったが、カリ施肥区ではほとんど違いが無かった。外部機関による食味官能検査試験では、コシヒカリと*lcs1*変異体で有意な違いは見られなかった。以上の結果から、*lcs1*変異体は放射性Cs吸収が低く、更にコシヒカリ並の栽培特性を持つことが、現地圃場の試験で確認された。

4 *lcs1*変異体のCs吸収抑制に関わる分子メカニズム

*lcs1*変異体のCs低吸収に関わる原因遺伝子を一塩基多型(SNP)による連鎖解析と次世代シーケンサによる全ゲノム解析を組み合わせた方法で特定した。方法の詳細は論文²⁾を参照していただきたいが、簡単に言うとSNPによる連鎖解析で候補領域を絞り込み、更に次世代シーケンサによるゲノム解析で候補領域内にある変異箇所を特定した。その結果、*lcs1*変異体は第6染色体上にある*OsSOS2*(Salt Overly Sensitive 2)遺伝子の3'末端側に1.5 kbpの大

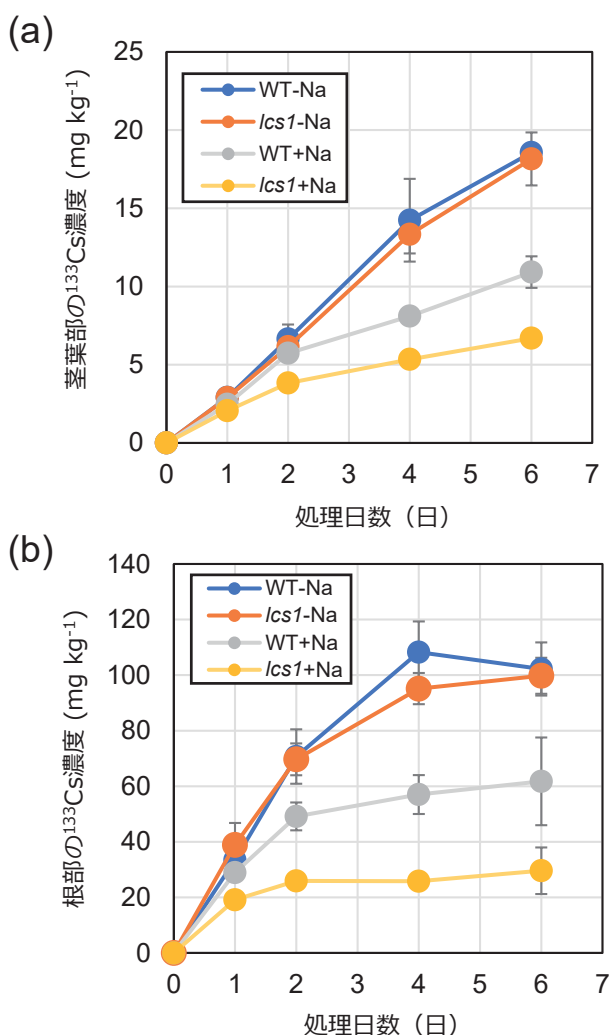


図3 *lcs1* 変異体の Cs 吸収に及ぼす Na の影響

0.1 μM の ¹³³Cs を含む低 K (0.05 mM K⁺) の水耕培地に 10 mM Na⁺ を添加 (+Na) 又は添加しない (-Na) 条件で、コシヒカリ (WT) と *lcs1* 変異体の幼植物を 6 日間栽培。 (a) 茎葉部の ¹³³Cs 濃度、 (b) 根部の ¹³³Cs 濃度

きな欠失が生じていた。OsSOS2 はイネの耐塩性を司る SOS シグナル経路に関わっているタンパク質リン酸化酵素であり、この酵素が働かなくなるとナトリウム (Na) ストレスに対して感受性を示すことが予想される。事実、*lcs1* 変異体はコシヒカリに比べて、高濃度の Na 処理に対して生育障害を引き起こした。OsSOS2 の機能欠損により、なぜ Cs 吸収抑制が起こるのか、その原因を探るため、Cs 吸収が高まりやすい低 K 条件の水耕培地に、生育障害を起こさない程度の Na を添加し、*lcs1* 変異体の根の Cs 吸収と茎葉部への Cs 移行を経時的に観察した (図 3)。なお、この時の Cs は安定同位体の ¹³³Cs を用いた。Na を添加しない条件において、コ

シヒカリと *lcs1* 変異体はほぼ同等の Cs 濃度を根部及び茎葉部で示した。一方、Na を添加すると、*lcs1* 変異体の根の Cs 濃度は低下し、コシヒカリの約半分の濃度になった。茎葉部の Cs 濃度においても *lcs1* 変異体で低い値を示した。これらの結果、*lcs1* 変異体は K 濃度が低い条件下で Na が存在するとき、根の Cs 吸収が抑制されることが分かった。

カリ施肥はイネの Cs 吸収を効果的に抑制すること、また同じ 1 価のカチオンであり、化学的な性質が類似していることから類推すると、Cs⁺ は K⁺ の輸送体を経由して取り込まれる。K⁺ はシステム I とシステム II と呼ばれる二元的なパターンによって植物に吸収される。前者は K⁺ 濃度の低い条件のときに働く高親和性の輸送システムで、アデノシン三リン酸 (ATP) をエネルギー源に濃度勾配に逆らって物質を能動的に運搬する。そのシステムに関与する輸送体はトランスポーターと呼ばれる。後者は K⁺ 濃度の高い条件で働く低親和性の輸送システムで、細胞膜を貫通する親水性の孔の開閉によってイオンを受動的に運搬する。そのシステムに関与する輸送体はチャンネルと呼ばれる。K⁺ のトランスポーターやチャンネル等のタンパク質をコードする遺伝子群は植物においてかなりの部分が明らかになっている。Cs⁺ は K⁺ 濃度の低い条件で吸収が高まるため、主に高親和性の K⁺ トランスポーターを経由して根に吸収される可能性が高い。

OsSOS2 は直接物質を取り込むタンパク質ではないため、OsSOS2 遺伝子の変異は K⁺ 輸送に関わる遺伝子に影響を及ぼしていると考えられた。そこで根における K⁺ 輸送関連の遺伝子発現を網羅的に調べた。培地の K⁺ レベルが低い条件下では、コシヒカリと *lcs1* 変異体共に *OsHAK1* と呼ばれる高親和性のトランスポーター遺伝子の発現が著しく高まった。それと同時に主に Na⁺ 輸送に関わる *HKT2;1* 遺伝子の発現も高まっていた。Na⁺ を添加することで、*OsHAK1* 発現は両イネ共に低下したが、その発現はコシヒカリを 1 とした場合、*lcs1* 変異体は約 0.3 となり、顕著に低下した。最近、*OsHAK1* の機能が欠損したイネの試験により、放射性 Cs⁺ の吸収は著しく低下することが報告された^{3,4)}。よって、*lcs1* 変異体の Cs⁺ 吸収抑制は *OsSOS2* 遺伝子の変異に伴う *OsHAK1* の発現低下が原因と思われた。

以上の結果、*lcs1* 変異体において玄米の放射性

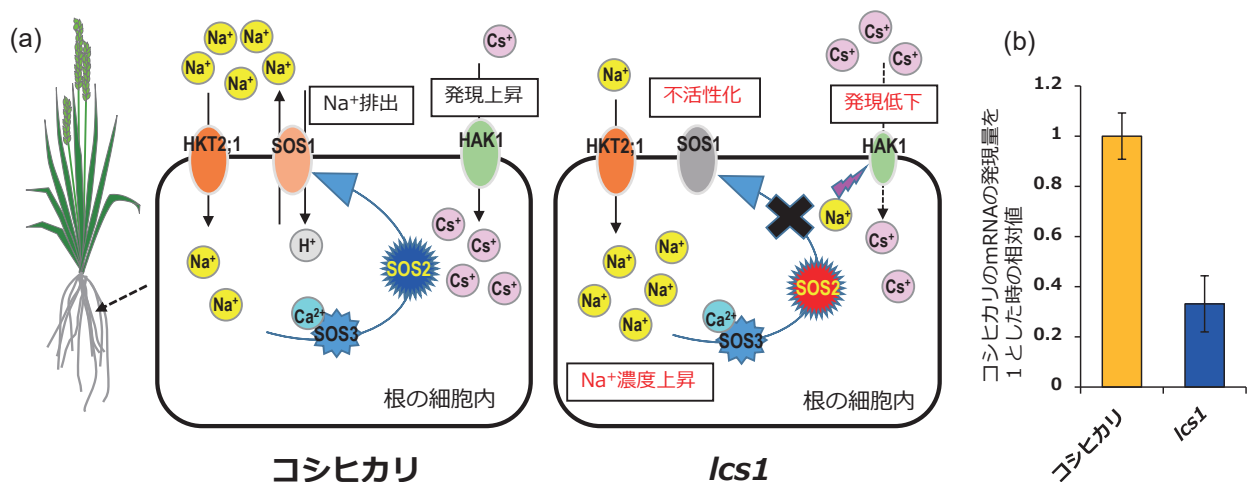


図4 *lcs1* 変異体の Cs 吸収抑制モデル (a) と *OsHAK1* の遺伝子発現 (b)

SOS1: Na⁺/H⁺ アンチポーター, SOS2: タンパク質リン酸化酵素, SOS3: カルシウム結合タンパク質
HKT2;1: Na⁺ トランスポーター, HAK1: K⁺ トランスポーター
低カリウム (0.02 mM K⁺) 培地に 10 mM Na⁺ を添加して 24 時間後の根の *HAK1* 遺伝子の発現

Cs 濃度が低下する作用機序を図4にまとめた。土壌の交換性カリ含量が低い水田土壌において、水稻の根は *HKT2;1* 遺伝子の発現が高まり、根細胞内に多量の Na⁺ を取り込む。コシヒカリの場合、根の Na⁺ の高まりがシグナルとなり、カルシウムセンサータンパク質である *OsSOS3* の作用によって *OsSOS2* が活性化する。プロトン (H⁺) と Na⁺ の対向輸送体である *OsSOS1* は *SOS2* によるリン酸化で活性型に変化し、Na⁺ を細胞外に排出する。一方、*lcs1* 変異体は *SOS2* の機能が欠失しているため、根の中に Na⁺ が蓄積される。また、土壌中の K⁺ 濃度が低い場合、*OsHAK1* 遺伝子の発現はコシヒカリで高まり、*OsHAK1* トランスポーターを經由して、K⁺ と共に放射性 Cs⁺ は吸収される。一方、*lcs1* 変異体は、多量の Na⁺ による影響で *OsHAK1* 遺伝子の発現が低下し、*OsHAK1* を經由する Cs⁺ 吸収は少なくなる。Na⁺ は植物にとって必須元素ではないが、K⁺ が欠乏した植物は Na⁺ を積極的に吸収し、一部 K⁺ の代わりとして生育に有益な影響を及ぼす⁵⁾。憶測になるが、*lcs1* 変異体は Na⁺ が存在することで K⁺ 不足を感じず、*OsHAK1* 遺伝子の発現が高まらなかったかもしれない。なお、Cs⁺ 吸収の抑制と共に K⁺ 吸収も抑制されるが、取り込まれた K⁺ は速やかに地上部に移行し、成長に必要な組織に優先的に運ばれるため、玄米の K 濃度は有意に減少しないことを確認している。

5 展望

カリ増肥を中心とした Cs 吸収抑制対策によって、基準値超過するコメは生産されなくなった。しかし、長期的な視野に立ってより安全性を高めるためには、カリ増肥のみの対策だけではなく、低吸収イネを併用した対策メニューを考えていくことが必要である。*lcs1* はコシヒカリから作られた変異体であり、栽培特性や食味はコシヒカリの性質を受け継いでいる。そのため、変異体に対する抵抗がなければ、現地にも受け入れられやすい水稻と考えられる。今後、*lcs1* 変異体の品種化を目指すと共に、被災地での農業復興の一助にこの品種を利用してもらえれば、開発者としては本望である。

謝辞

本研究の共同研究者の方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Shaw, G. and Bell, J.N.B., *J. Environ. Radioactiv.*, **13**, 283–296 (1991)
- 2) Ishikawa, S., *et al.*, *Sci. Rep.*, **7**, 2432 (2017)
- 3) Nieves-Cordones, M., *et al.*, *Plant J.*, **92**, 43–56 (2017)
- 4) Rai, H., *et al.*, *Plant Cell Physiol.*, **58**, 1486–1493 (2017)
- 5) Miyamoto, T., *et al.*, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **58**, 728–736 (2012)