

# 水稻のヒ素輸送機構とヒ素低減対策

Mechanisms of arsenic transport and countermeasures for reducing arsenic level in rice

石川 覚\*

Satoru ISHIKAWA \*

国立研究開発法人 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，  
有害化学物質研究領域 作物リスク低減ユニット

Crop Safety Unit, Division of Hazardous Chemicals,

Institute for Agro-Environmental Science, National Agriculture and Food Research Organization (NARO)

## 摘 要

コメは毒性の高い無機ヒ素の主要な摂取源である。他の作物に比べて水稻の高いヒ素集積は、1)水田土壌における亜ヒ酸の可溶化、および2)ケイ酸輸送体(トランスポーター)を介した亜ヒ酸の高い吸収能力、に起因する。水稻のヒ素輸送に関する分子メカニズムは、いくつかの重要な遺伝子が特定されたことで、次第に明らかになりつつある。それと並行して、コメのヒ素濃度低減に向けた技術開発は進行中である。灌漑水を制限し土壌を乾燥させる管理(節水栽培)は、水稻のヒ素吸収抑制に有効である一方、カドミウム濃度を上昇させる。その対応策として、カドミウムを吸収しない水稻品種「コシヒカリ環1号」の節水栽培が有効である。さらに現在開発中の低ヒ素品種と「コシヒカリ環1号」を交配すれば、従来の栽培方法を変えずに、品種の力でヒ素とカドミウムの同時低減が可能となり、コメからの摂取量は大幅に低下するものと期待される。

**キーワード：** イネ変異体， 吸収抑制資材， コシヒカリ環1号， トランスポーター， 水管理

**Key words：** rice mutant, soil amendments, Koshihikari Kan No. 1, transporter, water management.

## はじめに

ヒ素は、環境中に広く分布する元素である。農耕地土壌にも天然由来のヒ素が含まれており、そこで生産された作物は微量なヒ素を含んでいる。ヒ素は、無機ヒ素と有機ヒ素に分類される。日本人が普段の食事から摂取する無機ヒ素の62%が穀類由来であり、その中の97%を「コメ」から摂取している<sup>1)</sup>。コメは、日本を含め多くのアジア諸国において主食であるとともに、すし等の日本食ブームもあり、欧米諸国においても高い需要がある。

食品を通じて摂取する無機ヒ素を低減するために、食品の国際的な規格を設定するコーデックス委員会(Codex Alimentarius Commission(CAC))は、無機ヒ素濃度の基準値を精米については0.2 mg/kg(2014年7月)<sup>2)</sup>、玄米については0.35 mg/kg(2016年6月)と設定した。あわせて、現在、コーデックス委員会で検討しているコメ中のヒ素低減のための実施規範が各国で実施されれば、コメ中ヒ素濃度の低下が期待されるため、実施3年後に、国際的な実

態調査データを収集し、基準値を引き下げるかどうかの検討を行うこととなっている。

農林水産省は、国産玄米および精米中に含まれるヒ素濃度の実態調査を実施しており、平成24年度産米(n=600)における無機ヒ素濃度の平均値は玄米は0.21 mg/kg、精米は0.12 mg/kgであった<sup>3)</sup>。いずれの平均値もコーデックス基準値はクリアしているものの、一部のサンプルにおいては基準値超えが見られ、自然賦存の土壌ヒ素レベルであっても、コメのヒ素濃度が基準値を超過する恐れがある。一方、ダイズやムギ、野菜類における可食部のヒ素濃度は、0.1 mg/kgを大きく下回っており、作物の中でコメのヒ素濃度が明らかに高い<sup>3)</sup>。では、なぜコメのヒ素濃度が高いのであろうか？主な理由は二つある。一つは、水田土壌におけるヒ素の存在形態が大きく関与する。水田土壌のように嫌気的な状態では、土壌固層に吸着したヒ酸[As(V)]が亜ヒ酸[As(III)]に還元されて土壌溶液中に溶出し、水稻に吸収されやすくなる。二つ目は後で詳しく述べるが、水稻はケイ酸と化学的性質が類似するAs(III)を吸

受付：2016年11月29日， 受理：2017年2月15日

\* 〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3, e-mail: isatoru@affrc.go.jp

収するタンパク質(トランスポーター)を持つため、他の作物よりも根からヒ素を取り込みやすい。

本稿では、これまで明らかになっている水稻におけるヒ素の輸送機構を紹介するとともに、コメのヒ素低減に有効と思われる対策技術について述べる。

## 2. 水稻のヒ素輸送機構

### 2.1 酸化鉄被膜

水稻は通気組織が発達しているため、大気中の酸素を茎葉から根に送り込むことで、根の周辺域(根圏)が還元状態でも生育できる。還元状態の土壌から溶出した二価鉄イオン( $\text{Fe}^{2+}$ )は根圏で酸化され、根の周辺に酸化鉄被膜が形成される。酸化鉄被膜はフェリハイドライトやゲータイト等の水酸化鉄を主成分とし、As(V)が強く吸着するため<sup>4)</sup>、根のヒ素吸収抑制に優位に働くことが示唆されている<sup>5)</sup>。しかし、湛水状態で栽培した水稻根の酸化鉄被膜はAs(III)が主要な形態であること、ヒ素吸収の主要な部位と思われる若い根や根の先端部位に酸化鉄被膜は形成されないことなどから、酸化鉄被膜がヒ素吸収のバリアとして作用しない可能性が高い。むしろ、酸化鉄被膜にあるAs(III)は土壌溶液へのAs(III)の供給源となり、ヒ素吸収の促進に関わることが示唆されている<sup>6)</sup>。水稻のヒ素吸収における酸化鉄被膜の役割は、今後解明される必要がある。

### 2.2 トランスポーター

生体膜を通る物質の輸送は、分子の極性や大きさ、電荷等によって支配される。pH9.0以下の水溶液において、As(V)は主に $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ や $\text{HAsO}_4^{2-}$ のアニオンとして存在し、As(III)は電荷を持たない中性種( $\text{H}_3\text{AsO}_3^0$ )として存在する。一般的な土壌(pH4.0–7.0)においても、ヒ素は上記のような形態で存在すると考えられる。分子の形態が異なるAs(V)とAs(III)は、その吸収に関連する膜輸送トランスポーターも異なる。As(V)はリン酸と構造上類似するため、リン酸トランスポーターを經由して植物根に吸収される<sup>7)</sup>。一方、水田土壌ではAs(III)が主要な形態であるため、水稻の高いヒ素吸収能はリン酸トランスポーターに依存するとは考えにくい。As(III)は、酸解離定数(pKa=9.2)や分子サイズがケイ酸と類似している。水稻のケイ酸は、アクアポリン(aquaporin)の一つであるOsNIP2;1(OsLsi1)によって吸収される<sup>8)</sup>。OsLsi1の機能欠損株では、ケイ酸だけでなくAs(III)の吸収も抑制される<sup>9)</sup>。加えて、吸収されたケイ酸を導管に輸送するトランスポーター(OsLsi2)も特定され<sup>10)</sup>、この破壊株では、茎葉部と玄米のヒ素濃度が著しく低下した<sup>9)</sup>。このように、As(III)はケイ酸と同じトランスポーターを經由して根から吸収され、茎葉部に運搬されることがわかった。一方、玄米へのヒ素移行はケイ酸輸送とは異なる分子メカニズムによって制御されている。ATPカセット結合

輸送体(ATP-binding cassette transporters)の一つであるOsABCC1は、液胞にAs(III)を隔離するトランスポーターである<sup>11)</sup>。このトランスポーターはAs(III)とファイトケラチンの複合体[As(III)-PC]を液胞に輸送して隔離する。OsABCC1の機能欠損株は、野生型株に比べて上位節のヒ素濃度が低くなり、玄米ヒ素濃度が著しく高くなる。イネの上位節におけるヒ素の局在性を高分解能二次イオン質量分析法(Nano-SIMS)でイメージング解析した結果、分散維管束の篩部伴細胞の液胞に多く集積していた<sup>12)</sup>。OsABCC1遺伝子の発現はこの部位で高いため、液胞にAs(III)-PCを隔離し、玄米へのヒ素移行を制御していることがわかった<sup>11)</sup>。最近、二つのイノシトールトランスポーター(AtINT2とAtINT4)がシロイヌナズナの篩部伴細胞にAs(III)を輸送することがわかった<sup>13)</sup>。また、シロイヌナズナのイノシトールトランスポーター遺伝子が欠損した株は、野生型に比べて子実ヒ素濃度が半減した。このように、植物のヒ素輸送に関わる分子メカニズムは徐々に解明されつつある。

### 2.3 品種間差

コメ中には主に四つのヒ素形態、As(III)、As(V)、モノメチルアルソン酸(monomethylarsonic acid:MMA)、ジメチルアルシン酸(dimethylarsinic acid:DMA)が検出される<sup>14)</sup>。世界のイネコアコレクション(69品種)を用いて玄米のヒ素濃度の品種間差を調査したところ、最大で3倍の品種間差があった<sup>15)</sup>。ほとんどの品種では、総ヒ素濃度の70%以上が無機ヒ素[As(III)とAs(V)]の形態として玄米に存在していたが、'Padi Perak'という熱帯ジャポニカ品種は無機ヒ素とDMA濃度比がほぼ1:1であった。「コシヒカリ」と'Padi Perak'の交雑集団を利用して、玄米のDMA濃度に関連する三つの遺伝子座が特定された<sup>15)</sup>。玄米ヒ素濃度の品種間差は多数報告されているが<sup>16), 17)</sup>、品種間差の要因を説明できる遺伝子の特定には未だ至っていない。無機ヒ素はコメ中の主要な形態だが、0.4 mg/kg付近で頭打ちとなり、土壌のヒ素濃度に関係なく、それ以上は上昇しにくい<sup>18), 19)</sup>。これは、OsABCC1による節の液胞へのAs(III)の隔離によって、玄米の無機ヒ素濃度が一定レベルを超えないように制御されているためかもしれない。DMAはAs(III)と同じLsi1によって吸収されるが<sup>20)</sup>、根における吸収量は少なく、更に吸収速度は遅い<sup>21)</sup>。しかし、DMAがいったん体内に取り込まれると、As(III)に比べて玄米に蓄積しやすくなるため<sup>22)</sup>、玄米へのDMA移行はAs(III)と異なるメカニズムによって制御されていると考えられる。動物や微生物による無機ヒ素のメチル化機構はよく理解されているが、植物体内でのヒ素のメチル化に関してはこれまで全く知見がなく、玄米に含まれるDMAの由来が全く不明であった。

## 2.4 ヒ素のメチル化

無機ヒ素はヒトの体内に入るとヒ素メチル基転移酵素(AS3MT)によりメチル化され、尿中に排泄される<sup>23)</sup>。微生物の場合、ヒ素耐性を示すため、機能の異なる複数の遺伝子から構成されるヒ素耐性オペロンを保有する<sup>24)</sup>。微生物のヒ素メチル基転移酵素(arsM)は、S-アデノシル-L-メチオニン(S-adenosyl-L-methionine: SAM)のメチル基をAs(III)に転位する触媒として機能し、As(III)はモノ、ジ、トリヒ素化合物(MMA, DMA, trimethylarsine: TMA)に代謝される。メチル基転移酵素は、主にアミノ酸やタンパク質をメチル化することで生体内の遺伝子発現の制御に利用されるが、植物ではヒ素のメチル化に関する酵素遺伝子はまだ見つかっていない。イネを無菌培養条件下でAs(III)もしくはAs(V)処理しても、イネ体内にはDMAが検出されないため<sup>25)</sup>、イネ体内で無機ヒ素がDMAに代謝されるのではなく、水稻根圏に生息する微生物によって作られたDMAを水稻根が吸収している可能性が高い。筆者らの研究グループは、鉾山周辺の高ヒ素土壌で栽培されたイネの根圏から、DMA合成に関わる新規の放線菌(*Streptomyces* 属, GSRB54 株)を単離した<sup>26)</sup>。この株は新規の*arsM* 遺伝子を保有し、その遺伝子をヒ素感受性大腸菌で過剰発現させたところ、As(III)をDMAやメチル基を三つ持つトリメチルアルシンオキシド(trimethylarsine oxide: TMAO)に変換することで、As(III)の高い毒性を軽減した。また、無菌栽培したイネにGSRB54株を接種したところ、As(III)によるイネの生育阻害は回避され、イネ体内にDMAが検出された。一方、接種しないイネではDMAが検出されなかった。この結果は、GSRB54株が培地中のAs(III)をDMAに変換し、それをイネが吸収した直接的な証拠と言える。さらに、我々は、水稻根圏に生息する微生物が、これまで全く報告例のないアミノ酸誘導体の新規ヒ素化合物を合成することを発見し、アルシノスリシン[2-amino-4-(hydroxymethylarsinoyl)butanoic acid: AST]と命名した<sup>27)</sup>。このように、水稻根圏でのヒ素代謝は多様であり、イネのヒ素吸収に土壌微生物が大きく関与することがわかった。

## 3. ヒ素低減技術

### 3.1 水管理

土壌からのAs(III)の可溶化は、湛水に伴う土壌の酸化還元電位(Eh)の低下とともに進行する。一方、灌漑水を制限し土壌を乾燥させることで、土壌Ehは上昇し、As(III)の可溶化は抑えられる。例えば、土壌の水保持容量の70%でイネを節水栽培すると、常時湛水栽培に比べて、玄米中の総ヒ素濃度は10分の1以下になった<sup>28)</sup>。また、出穂前後3週間湛水管理すると、玄米のヒ素濃度は増加するが、

その時期に落水して土壌を酸化的にすると、玄米のヒ素濃度は著しく低下する<sup>29)</sup>。このことから、玄米のヒ素濃度は出穂前後の水管理によって大きく影響を受ける。しかし、出穂期は水稻の生育において最も水を必要とする時期であるため、ヒ素吸収抑制のために落水することは容易ではない。湛水と落水を数日ごとに繰り返す間断灌漑法は、ヒ素の低減のみならず、用水量の節約や温室効果ガスの発生を防ぐ上でも有効な水管理法である<sup>30)</sup>。しかしながら、そのような管理は逆にコメのカドミウム濃度を上昇させてしまう可能性がある<sup>29)</sup>。水稻におけるヒ素とカドミウムの「トレードオフ」関係を最小限にする方策として、出穂後3週間を土壌pH6.2で土壌Ehを-73mVに保つ水管理が提案された<sup>31)</sup>。今後、さまざまな土壌で適応可能かどうか検証する必要がある。

### 3.2 ヒ素吸収抑制資材

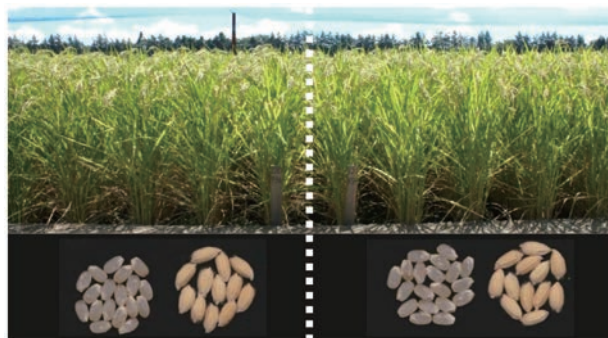
水稻はケイ酸の輸送体を介してAs(III)を吸収するため、ケイ酸資材の添加は拮抗作用によって根のヒ素吸収を抑制すると考えられる。土壌にシリカゲルを添加すると、稲わらや玄米の総ヒ素濃度が有意に低下したが<sup>32)</sup>、ケイ酸カルシウムの添加は有意にヒ素濃度を減少しなかった<sup>33)</sup>。また、土壌へのケイ酸資材の添加は無機ヒ素濃度を低下させる一方、逆にDMA濃度を上昇させるかもしれない<sup>32)</sup>。これらの報告から推測すると、ケイ酸資材の種類や量、施用のタイミング等によってヒ素吸収抑制効果が異なるかもしれない。また、根圏微生物によって作られたDMAをイネは吸収するので、ケイ酸資材が微生物活性に何らかの影響を与える可能性もある。ケイ酸資材は、水稻根の吸収部位におけるAs(III)との拮抗作用をねらったものであるが、鉄資材の添加は土壌固層から還元に伴い溶出してきたAs(III)をトラップすることにより、水稻のヒ素吸収を抑制する。3種類の鉄資材(ゼロ価鉄、転炉さい、フェリハイドライト様資材)の添加は、土壌溶液中のヒ素濃度を低下させるとともに、玄米ヒ素濃度も無施用区に比べ、有意に低下させた<sup>34)</sup>。特に、ゼロ価鉄が最も高い低減効果を示し、ヒ素硫化物の生成が土壌からのヒ素溶出の抑制に貢献していた可能性が高い<sup>34)</sup>。資材はコスト面や持続性を考慮しつつ、ヒ素吸収抑制の有効性を検証していく必要がある。

### 3.3 低ヒ素品種の育成

「コシヒカリ」等の主要な栽培品種を低ヒ素タイプに品種改良するためには、育種の素材となる低ヒ素品種を見つけ出し、有用な低ヒ素関連遺伝子を特定する必要がある。ケイ酸トランスポーターの破壊株は、ヒ素の低下と同時にケイ酸不足による生育阻害が起こる<sup>9)</sup>。遺伝子組換え技術になるが、*OsABCC1*を過剰発現させ、節にAs(III)を過剰にトラップさせることでコメ中のヒ素濃度を抑えることはできるかもしれない。また、酵母由来のAs(III)を排出する輸送体(ScACR3)を導入したイネは、玄米ヒ素濃

度が20%減少した<sup>35)</sup>。しかし、遺伝子組換え植物の社会的受容は十分でないため、現時点では他の選択肢に頼らざるを得ない。

著者らのグループが開発したカドミウムを吸収しない水稲品種「コシヒカリ環1号」と水管理を組み合わせれば、ヒ素もカドミウムも同時に低減することが可能である。「コシヒカリ環1号」は、「コシヒカリ」へのイオンビーム照射によって作出した変異体である。この変異体は *OsNramp5* というマンガントランスポーター遺伝子に変異が挿入されており、カドミウム以外にマンガンを吸収も抑制される



コシヒカリ環1号                      コシヒカリ

図1 カドミウムを吸収しない水稲品種「コシヒカリ環1号」と原品種「コシヒカリ」の草姿とコメの形状。

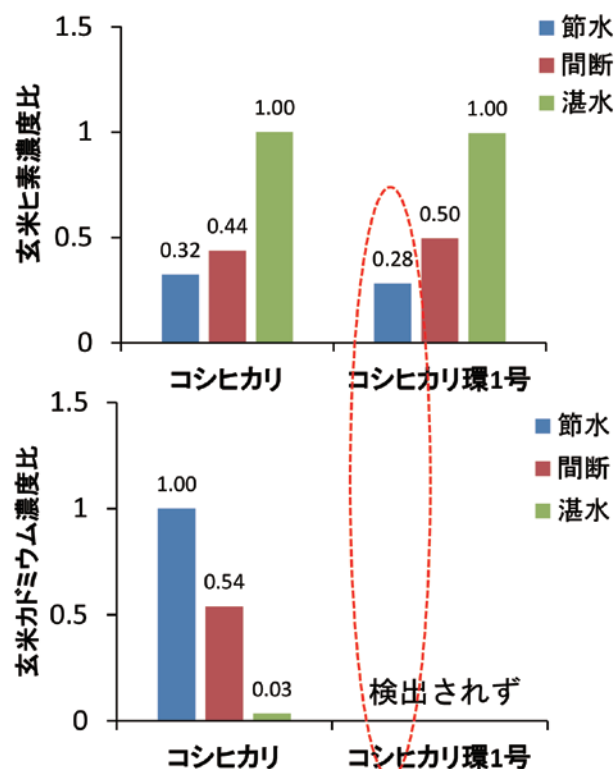


図2 異なる水管理で栽培した「コシヒカリ」と「コシヒカリ環1号」の玄米ヒ素及びカドミウム濃度の比較。「コシヒカリ」のヒ素(湛水区)及びカドミウム(節水区)の濃度を1としたときの相対比で示した。点線で囲った部分はヒ素とカドミウムの両元素が最も低いときの処理を示す。(Ishikawa *et al.* (2016)<sup>37)</sup>の論文から引用, Figure 2の結果を改変)。

が、通常の水田土壌で栽培する限り、農業形質は「コシヒカリ」と同等である<sup>36)</sup>(図1)。図2は「コシヒカリ」と「コシヒカリ環1号」を異なる水管理(湛水, 間断灌漑, 節水)で圃場栽培した時の玄米ヒ素濃度とカドミウム濃度に対する影響を比較したものである<sup>37)</sup>。両品種の玄米ヒ素濃度は、節水<間断灌漑<湛水の順に上昇するが、節水条件では「コシヒカリ」のカドミウム濃度のみ著しく上昇する。よって、「コシヒカリ環1号」の節水栽培は、ヒ素とカドミウムの同時低減に有効な手法である。しかし、節水栽培は玄米収量や玄米品質に負の影響を与える可能性があるため、水管理の工夫がより一層必要であろう。「コシヒカリ環1号」の成功例をもとに、著者らの研究グループは、突然変異による低ヒ素変異体の選抜を試みている。仮に選抜されれば、「コシヒカリ環1号」と交配することで、ヒ素もカドミウム濃度も低い新たな「コシヒカリ」が完成し、コメからのヒ素・カドミウムの摂取量は大幅に低下するものと期待される。

## 謝 辞

本研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト「ゲノム情報を活用した農産物の次世代生産基盤技術の開発プロジェクト(イネの低コスト化・省力化・環境負荷低減に資する有用遺伝子の同定とDNAマーカーの開発)」及び「食品の安全性と動物衛生の向上のためのプロジェクト(水稲におけるヒ素のリスクを低減する栽培管理技術の開発)」の支援を受けて行われた。

## 引用文献

- Oguri, T., J. Yoshinaga, H. Tao and T. Nakazato (2014) Inorganic arsenic in the Japanese diet: daily intake and source. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 66, 100–112.
- Codex Alimentarius (2015) CODEX STAN 193-1995, Codex general standard for contaminants and toxins in foods and feed. <[https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiyiIT42cDQAhWCgrwKHRAdCnEQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.fao.org%2Finput%2Fdownload%2Fstandards%2F17%2FCXS\\_193e\\_2015.pdf&usg=AFQjCNGVlR0jal0UX5Vg5KPPvKs7q6KJNA&sig2=55qaOEBagRndpG\\_R1O-lqg&bvm=bv.139782543,d.dGc&cad=rja](https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiyiIT42cDQAhWCgrwKHRAdCnEQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.fao.org%2Finput%2Fdownload%2Fstandards%2F17%2FCXS_193e_2015.pdf&usg=AFQjCNGVlR0jal0UX5Vg5KPPvKs7q6KJNA&sig2=55qaOEBagRndpG_R1O-lqg&bvm=bv.139782543,d.dGc&cad=rja)> (2017年2月15日最終確認)
- 農林水産省(2014) 食品に含まれるヒ素の実態調査. <<http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/>>

- kome/k\_as/occurrence.html)  
(2017年2月15日最終確認)
- 4) Seyfferth, A. L., S. M. Webb, J. C. Andrews and S. Fendorf (2011) Defining the distribution of arsenic species and plant nutrients in rice (*Oryza sativa* L.) from the root to the grain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 6655–6671.
  - 5) Wu, C., Z. H. Ye, H. Li, S. C. Wu, D. Deng, Y. G. Zhu and M. H. Wong (2012) Do radial oxygen loss and external aeration affect iron plaque formation and arsenic accumulation and speciation in rice? *Journal of Experimental Botany*, 63, 2961–2970.
  - 6) Yamaguchi, N., T. Ohkura, Y. Takahashi, Y. Maejima and T. Arao (2014) Arsenic distribution and speciation near rice roots influenced by iron plaques and redox conditions of the soil matrix. *Environmental Science & Technology*, 48, 1549–1556.
  - 7) Zhao, F. J., J. F. Ma, A. A. Meharg and S. P. McGrath (2009) Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytologist*, 181, 777–794.
  - 8) Ma, J. F., K. Tamai, N. Yamaji, N. Mitani, S. Konishi, M. Katsuhara, M. Ishiguro, Y. Murata and M. Yano (2006) A silicon transporter in rice. *Nature*, 440, 688–691.
  - 9) Ma, J. F., N. Yamaji, N. Mitani, X. Y. Xu, Y. H. Su, S. P. McGrath and F. J. Zhao (2008) Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 9931–9935.
  - 10) Ma, J. F., N. Yamaji, N. Mitani, K. Tamai, S. Konishi, T. Fujiwara, M. Katsuhara and M. Yano (2007) An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*, 448, 209–212.
  - 11) Song, W. Y., T. Yamaki, N. Yamaji, D. Ko, K. H. Jung, M. Fujii-Kashino, G. An, E. Martinoia, Y. Lee and J. F. Ma (2014) A rice ABC transporter, OsABCC1, reduces arsenic accumulation in the grain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 15699–15704.
  - 12) Moore, K. L., Y. Chen, A. M. L. van de Meene, L. Hughes, W. J. Liu, T. Geraki, F. Mosselmans, S. P. McGrath, C. Grovenor and F. J. Zhao (2014) Combined NanoSIMS and synchrotron X-ray fluorescence reveal distinct cellular and subcellular distribution patterns of trace elements in rice tissues. *New Phytologist*, 201, 104–115.
  - 13) Duan, G. L., Y. Hu, S. Schneider, J. McDermott, J. Chen, N. Sauer, B. P. Rosen, B. Daus, Z. Liu and Y. G. Zhu (2016) Inositol transporters AtINT2 and AtINT4 regulate arsenic accumulation in Arabidopsis seeds. *Nat Plants*, 2, 15202.
  - 14) Schoof, R. A., L. J. Yost, J. Eickhoff, E. A. Crecelius, D. W. Cragin, D. M. Meacher and D. B. Menzel (1999) A market basket survey of inorganic arsenic in food. *Food and Chemical Toxicology*, 37, 839–846.
  - 15) Kuramata, M., T. Abe, A. Kawasaki, K. Ebana, T. Shibaya, M. Yano and S. Ishikawa (2013) Genetic diversity of arsenic accumulation in rice and QTL analysis of methylated arsenic in rice grains. *Rice*, 6.
  - 16) Norton, G. J., S. R. M. Pinson, J. Alexander, S. McKay, H. Hansen, G. L. Duan, M. R. Islam, S. Islam, J. L. Stroud, F. J. Zhao, S. P. McGrath, Y. G. Zhu, B. Lahner, E. Yakubova, M. L. Guerinet, L. Tarpley, G. C. Eizenga, D. E. Salt, A. A. Meharg and A. H. Price (2012) Variation in grain arsenic assessed in a diverse panel of rice (*Oryza sativa*) grown in multiple sites. *New Phytologist*, 193, 650–664.
  - 17) Pillai, T. R., W. G. Yan, H. A. Agrama, W. D. James, A. M. H. Ibrahim, A. M. McClung, T. J. Gentry and R. H. Loeppert (2010) Total Grain-Arsenic and Arsenic-Species Concentrations in Diverse Rice Cultivars under Flooded Conditions. *Crop Science*, 50, 2065–2075.
  - 18) Kuramata, M., T. Abe, S. Matsumoto and S. Ishikawa (2011) Arsenic accumulation and speciation in Japanese paddy rice cultivars. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57, 248–258.
  - 19) Zavala, Y. J., R. Gerads, H. Gurleyuk and J. M. Duxbury (2008) Arsenic in rice: II. Arsenic speciation in USA grain and implications for human health. *Environmental Science & Technology*, 42, 3861–3866.
  - 20) Li, R. Y., Y. Ago, W. J. Liu, N. Mitani, J. Feldmann, S. P. McGrath, J. F. Ma and F. J. Zhao (2009) The rice aquaporin *lsi1* mediates uptake of methylated arsenic species. *Plant Physiology*, 150, 2071–2080.
  - 21) Abedin, M. J., J. Feldmann and A. A. Meharg (2002) Uptake kinetics of arsenic species in rice plants. *Plant Physiology*, 128, 1120–1128.
  - 22) Carey, A. M., K. G. Scheckel, E. Lombi, M. Newville, Y. Choi, G. J. Norton, J. M. Charnock, J. Feldmann, A. H. Price and A. A. Meharg (2010) Grain unloading of arsenic species in rice. *Plant Physiology*, 152, 309–319.

- 23) Sumi, D. and S. Himeno (2012) Role of arsenic (+3 Oxidation State) methyltransferase in arsenic metabolism and toxicity. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 35, 1870–1875.
- 24) Carlin, A., W. P. Shi, S. Dey and B. P. Rosen (1995) The ars operon of escherichia-coli confers arsenical and antimonial resistance. *Journal of Bacteriology*, 177, 981–986.
- 25) Lomax, C., W. J. Liu, L. Y. Wu, K. Xue, J. B. Xiong, J. Z. Zhou, S. P. McGrath, A. A. Meharg, A. J. Miller and F. J. Zhao (2012) Methylated arsenic species in plants originate from soil microorganisms. *New Phytologist*, 193, 665–672.
- 26) Kuramata, M., F. Sakakibara, R. Kataoka, T. Abe, M. Asano, K. Baba, K. Takagi and S. Ishikawa (2015) Arsenic biotransformation by *Streptomyces* sp. isolated from rice rhizosphere. *Environmental Microbiology*, 17, 1897–1909.
- 27) Kuramata, M., F. Sakakibara, R. Kataoka, K. Yamazaki, K. Baba, M. Ishizaka, S. Hiradate, T. Kamo and S. Ishikawa (2016) Arsinothricin, a novel organoarsenic species produced by a rice rhizosphere bacterium. *Environmental Chemistry*, 13, 723–731.
- 28) Xu, X. Y., S. P. McGrath, A. A. Meharg and F. J. Zhao (2008) Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. *Environmental Science & Technology*, 42, 5574–5579.
- 29) Arao, T., A. Kawasaki, K. Baba, S. Mori and S. Matsumoto (2009) Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice. *Environmental Science & Technology*, 43, 9361–9367.
- 30) Linquist, B. A., M. M. Anders, M. A. A. Adviento-Borbe, R. L. Chaney, L. L. Nalley, E. F. F. Da Rosa and C. Van Kessel (2015) Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biology*, 21, 407–417.
- 31) Honma, T., H. Ohba, A. Kaneko-Kadokura, T. Makino, K. Nakamura and H. Katou (2016) Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Environmental Science & Technology*, 50, 4178–4185.
- 32) Li, R. Y., J. L. Stroud, J. F. Ma, S. P. McGrath and F. J. Zhao (2009) Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization. *Environmental Science & Technology*, 43, 3778–3783.
- 33) Matsumoto, S., J. Kasuga, N. Taiki, T. Makino and T. Arao (2015) Reduction of the risk of arsenic accumulation in rice by the water management and material application in relation to phosphate status. *Journal of Plant Interactions*, 10, 65–74.
- 34) Makino, T., K. Nakamura, H. Katou, S. Ishikawa, M. Ito, T. Honma, N. Miyazaki, K. Takehisa, S. Sano, S. Matsumoto, A. Suda, K. Baba, A. Kawasaki, N. Yamaguchi, I. Akahane, M. Tomizawa and T. Arao (2016) Simultaneous decrease of arsenic and cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) plants cultivated under submerged field conditions by the application of iron-bearing materials. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62, 340–348.
- 35) Duan, G. L., T. Kamiya, S. Ishikawa, T. Arao and T. Fujiwara (2012) Expressing ScACR3 in rice enhanced arsenite efflux and reduced arsenic accumulation in rice grains. *Plant and Cell Physiology*, 53, 154–163.
- 36) Ishikawa, S., Y. Ishimaru, M. Igura, M. Kuramata, T. Abe, T. Senoura, Y. Hase, T. Arao, N. K. Nishizawa and H. Nakanishi (2012) Ion-beam irradiation, gene identification, and marker-assisted breeding in the development of low-cadmium rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 19166–19171.
- 37) Ishikawa, S., T. Makino, M. Ito, K. Harada, H. Nakada, I. Nishida, M. Nishimura, T. Tokunaga, K. Shirao, C. Yoshizawa, M. Matsuyama, T. Abe and T. Arao (2016) Low-cadmium rice (*Oryza sativa* L.) cultivar can simultaneously reduce arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62, 327–339.



石川 覚 / Satoru ISHIKAWA

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 有害化学物質研究領域 作物リスク低減ユニット長。岩手大学大学院連合農学研究科修了。博士(農学)。専門は植物栄養学。カドミウムやヒ素、放射性セシウム等の有害化学物質の作物吸収メカニズムに関する研究、及びそれら物質を吸収しにくい水稲品種の育成に従事している。これまでカドミウムを吸収しない水稲品種「コシヒカリ環1号」(登録番号第24338号)を育成した。