

コメ中ヒ素の低減対策の確立に向けた手引き

平成 31 年 3 月策定、令和 4 年 2 月改訂

農林水産省

～本手引きの読者の皆様へ～

コメは、その栽培方法により、土壤中に天然に残存する無機ヒ素（ヒ素化合物の一種）が吸収されやすいことが知られています。

無機ヒ素は、長期間にわたって継続的にかつ大量に摂取した場合には、がんの発生などの悪影響があると報告されています。コメは、日本人の主食であり、消費量が多いことから、食品からの無機ヒ素の摂取量を小さくするためには、コメに含まれる無機ヒ素の濃度を低くすることについても考える必要があります。

このため、農林水産省は、コメ中の無機ヒ素の含有実態を調査するとともに、無機ヒ素を低減することを目的として、低減技術の開発を進めてきました。これらの成果や国内外で得られた科学的な情報を踏まえ、「コメ中ヒ素の低減対策の確立に向けた手引き」としてまとめました。都道府県の行政担当者、研究者、普及指導員、農業経営者の皆様には、本手引きを、各地域の栽培環境や管理の実態に即した、現場で実行できる対策の確立や実証などに役立てていただきたいと考えています。

今後も、農林水産省は、都道府県や関係団体等の皆様とともに、研究開発や実証等を更に進め、コメ中のヒ素低減が進むよう有効かつ現場で実行しやすい技術の確立などに取り組んでまいります。

本手引きに掲載されている図表は、特に断りのない限り農林水産省委託研究プロジェクト「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）」（平成 25 年度～平成 29 年度）及び、戦略的プロジェクト研究推進事業（現：安全な農畜水産物安定供給のための包括的レギュラトリーサイエンス研究推進事業）「有害化学物質・微生物の動態解明によるリスク管理技術の開発（省力的かつ現場で使い易いコメの無機ヒ素低減技術の開発）」（平成 30 年度～令和 4 年度（予定））の成果です。また、「農研機構, 2021」と記載された図表は、同事業により作成した「コメのヒ素低減のための栽培管理技術導入マニュアル ～コメの収量・品質への影響を抑えつつ、ヒ素を低減するために～（第 2 版）」の内容を元に作成しました。これらの図表を使用する場合には、同マニュアルからの引用であることを明記してください。

コメ中ヒ素の低減対策の確立に向けた手引き (概要)

0 手引きの目的

- 農林水産省は、コメ中の無機ヒ素の含有実態を調査するとともに、無機ヒ素を低減することを目的として、低減技術の開発を進めてきました。これらの成果や国内外で得られた科学的な情報を提供し、産地におけるコメ中のヒ素低減対策の検討に役立てていただきたいと思います。

1 食品中のヒ素による健康リスク

- ヒ素は、天然や産業活動を由来として土壌やかんがい水等に含まれています。このため、作物の種類や生産された環境によって濃度は異なるものの、農作物にもヒ素が含有しています。
- ヒ素には無機ヒ素と有機ヒ素があり、無機ヒ素の毒性が強いことが知られています。無機ヒ素が長期間にわたって大量に摂取された場合には、がんの発生などの悪影響があると報告されています。
- 内閣府食品安全委員会によると、食品を通じて摂取した無機ヒ素については、我が国では明らかな健康影響は認められていません。しかし、一部の人では無機ヒ素の摂取量が多い可能性があり、「特定の食品に偏らず、バランスの良い食生活を心がけることが重要」との見解が示されています。

2 コメ中のヒ素の含有実態

- 水稻は、その栽培方法により、比較的ヒ素を吸収しやすい作物です。我が国では、コメは主食であり、消費量が多いことから、無機ヒ素の摂取への寄与が最も大きな食品です（図1）。

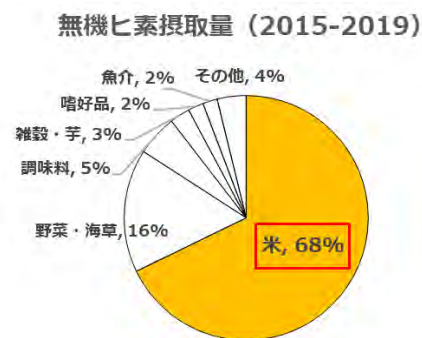


図1 食品からの無機ヒ素摂取量における
各食品群摂取量の推定寄与率

- ・ 食品安全に係る国際基準を策定するコーデックス委員会は、コメ中に含まれる無機ヒ素濃度について最大基準値（精米：0.2 mg/kg、玄米：0.35 mg/kg）を設定しました。我が国は基準値検討の作業部会の議長を務め世界各国から提出されたデータを解析し、基準値案を提案するなど議論を主導しました。
- ・ 国産のコメに含まれる無機ヒ素濃度を調査した結果、一部に比較的濃度の高いコメも存在することが分かっています（図2）。
- ・ コメ中の無機ヒ素を低くするためには、低減技術を導入することが重要です。

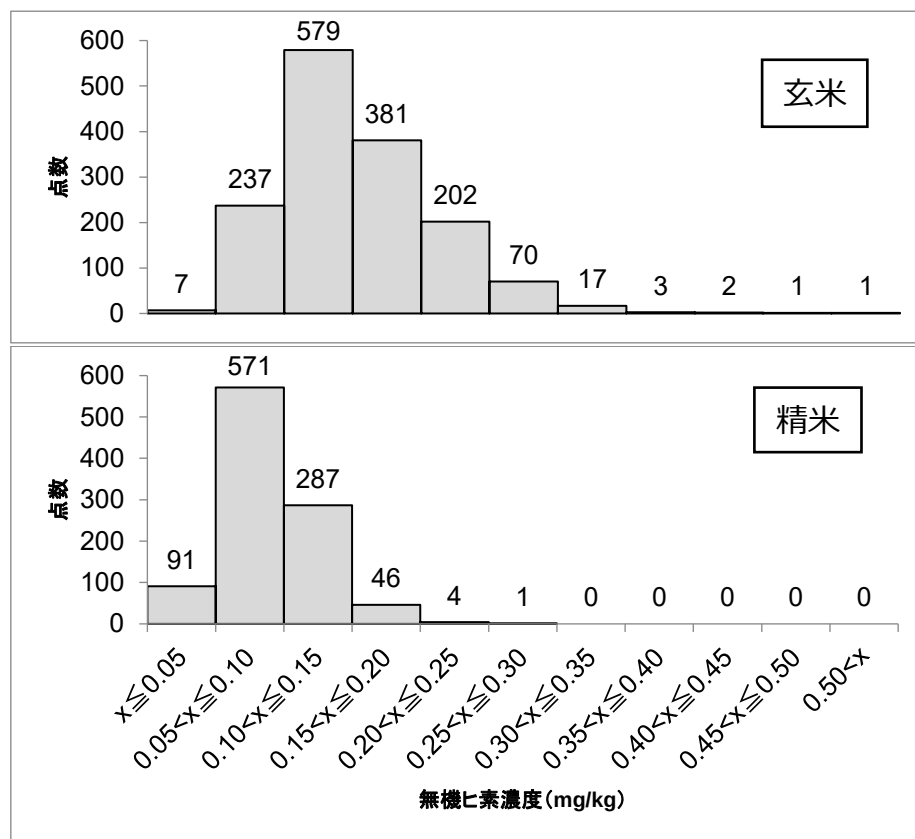


図2 精米及び玄米中の無機ヒ素濃度の度数分布（玄米：2017~2019年産、計1,500点（各年500点）、精米：2017~2018年産、計1,000点（各年500点））（農林水産省調査）

3 水田土壌中のヒ素の動態と水稻への吸収

- ・ 田面水の落水により水田の表面が乾くと、土壌が酸化的な状態になります。その場合、水田土壌中に含まれるヒ素は、主に 5 価のヒ酸として鉄鋳物等に吸着され、水稻に吸収されにくくなります。
- ・ 水田が一定期間湛水されると、土壌が還元的な状態になります。その場合、鉄鋳物が溶出しやすくなり、5 価のヒ酸が 3 価の亜ヒ酸になり、水稻に吸収されやすくなります（図 3）。

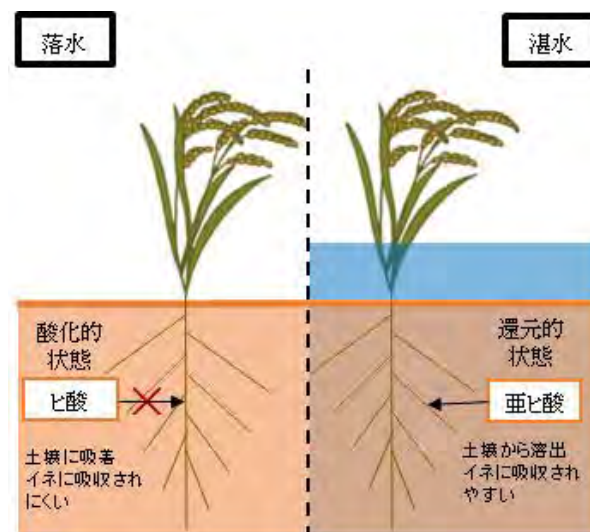


図 3 水田土壌の酸化的・還元的状態におけるヒ素の動き

4 コーデックス委員会の実施規範

- ・ 食品に含まれる汚染物質を生産段階から低減することが重要という国際的に共通の認識のもと、コーデックス委員会において「コメ中ヒ素の汚染の防止と低減に関する実施規範（CXC 77-2017）」が 2017 年に策定されています。我が国は、この実施規範の策定を行う作業部会の議長国として、策定作業を主導しました。
- ・ 本手引きに記載されている低減技術は、この実施規範の記述と整合しています。

5 好氣的な水管理によるコメ中ヒ素の低減

- ・ 水稻のヒ素の吸収を抑制するためには、しっかりと中干し※をした上で、出穂3週間前から出穂3週間後にかけて4日間の落水を3回行う水管理（落水3回）が効果的です（図4）。

※ 地域において一般的に中干しを実施している時期に、断続的な4日間の無降雨日の後、連続した4日間の無降雨日となった場合に十分な効果が確認されました。

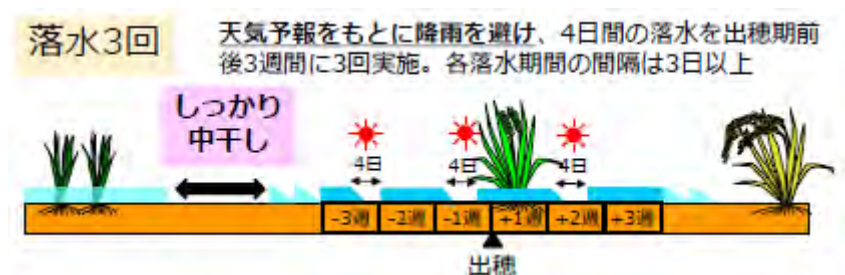


図4 湛水と落水を繰り返す間断かんがいのイメージ

- ・しっかりと中干しをした上で、出穂3週間前から出穂3週間後にかけて、落水3回を行うことで、常時湛水に比べ、玄米中無機ヒ素濃度を低く抑えることができました（図5）。

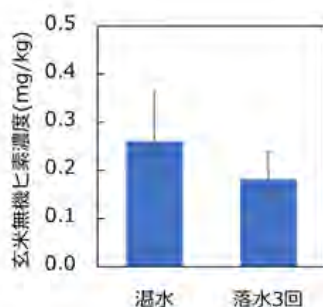


図5 湛水管理と落水3回を行った場合の玄米中無機ヒ素の比較（15試験区（2018年））（農林水産省研究委託事業）※誤差範囲は標準偏差

- ・ 出穂期間中の落水期間の設定によるコメの収量・品質への影響が懸念されるものの、その差は大きくありませんでした（図6）。

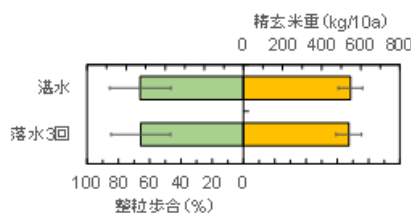


図6 湛水管理と落水3回を行った場合の精玄重量及び整粒歩合の比較（15試験区（2018年））（農林水産省研究委託事業）※誤差範囲は標準偏差

6 コメ中のヒ素とカドミウムの濃度の関係

- ・ カドミウムは、長期間にわたり継続的に摂取し続けると健康に悪影響を及ぼす可能性がある重金属です。我が国には、過去の鉱山開発等の結果として、カドミウム濃度の高いコメが生産される可能性の高い地域が存在します。

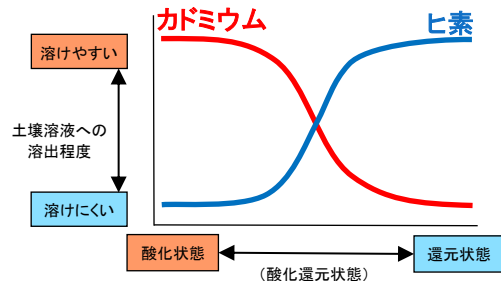


図7 カドミウム、ヒ素の土壌での溶けやすさと土壌の酸化還元状態の関係の模式図

- ・ 土壌中のカドミウムは、ヒ素とは逆に、土壌が酸化的になると溶出します（図7）。このため、ヒ素が溶け出さないように落水日数を長くするとカドミウムの溶出を引き起こすおそれがあります。

- ・ 現時点では、収量や品質に加え、コメ中のカドミウム濃度の上昇防止の観点からも間断かんがいの落水期間は4日間程度が適当と考えられます（図8）。ただし、コメ中のカドミウム濃度が高くなり易い場合は、4日間の落水でもカドミウム濃度が高くなる場合があります。

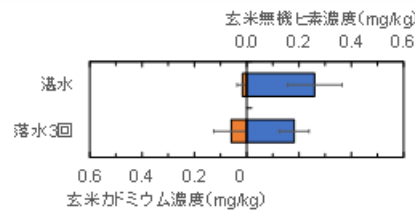


図8 湛水管理と落水3回を行った場合の玄米中無機ヒ素及びカドミウム濃度の比較（15試験区（2018年））（農林水産省研究委託事業）※誤差範囲は標準偏差

- ・ コメ中のカドミウム濃度が高くなりやすい地域でのヒ素低減には、カドミウム低吸収性イネを利用した上で、土壌が酸化的になるような水管理を組み合わせることが効果的です（図9）。

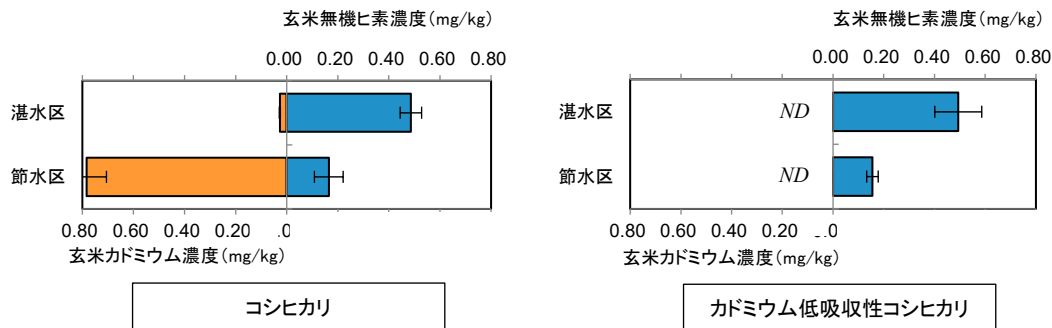


図9 玄米の無機ヒ素とカドミウム濃度の比較（2013年度）

左：コシヒカリ、右：カドミウム低吸収性コシヒカリ NDは検出下限（0.005 mg/kg）未満

7 その他のコメ中ヒ素濃度に影響がある要因

- ・ 土壌中のヒ素濃度が高くなると、コメ中の無機ヒ素濃度が高くなる傾向があります。(図 10)。一方、土壌中のヒ素濃度が比較的低い場合でも、コメ中の無機ヒ素濃度が高くなる可能性があります。

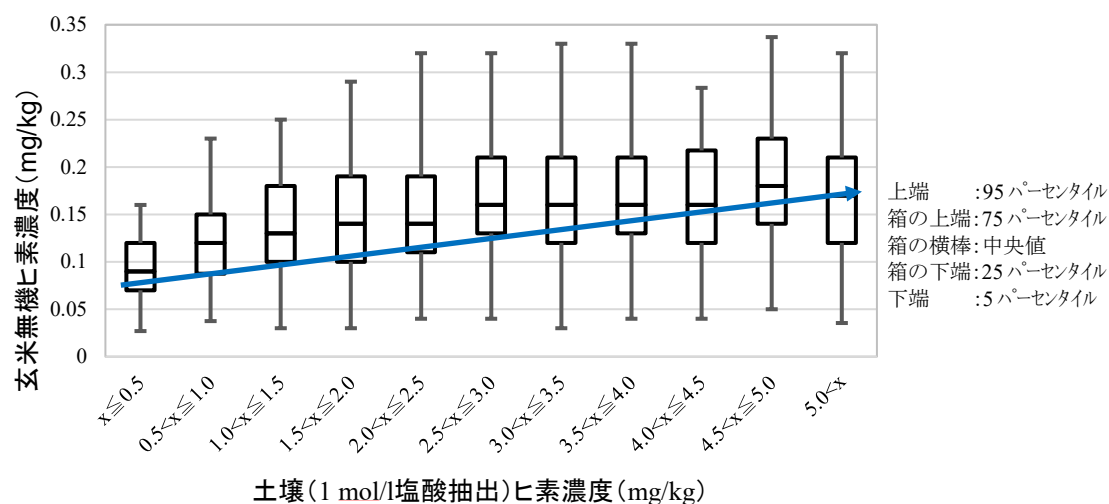


図 10 土壌中ヒ素濃度と玄米中無機ヒ素濃度との関係（箱ひげ図）

- ・ 土壌中のヒ素濃度以外にも、鉍物の存在や登熟期の気温等もコメ中ヒ素濃度に影響を与える可能性があります（表 1）。

表 1 土壌の理化学性がコメ中ヒ素濃度にあたえる作用（想定）

要因	関係(仮説含む)	コメ中ヒ素
土壌中ヒ素	水稻へのヒ素の供給	増加
土壌中鉄鉍物	土壌中でヒ素を吸着	減少
土壌中アルミニウム鉍物	土壌中でヒ素を吸着	減少
登熟期間気温	蒸散に伴いヒ素の子実体への転流の増加等	増加

8 コメ中のヒ素の低減に向けて今後対応すべき課題(まとめ)

- ・ 地域条件にあった、現実的に導入できる水管理法（最適な落水時期の把握、最小限の落水回数など）の確立と実証
- ・ 落水と湛水を繰り返す水管理により、新たに加わる作業による負担を軽減するための自動水管理システムの効果検証と普及
- ・ ヒ素の低減のための水管理をしても、コメ中のカドミウムの濃度が高くなるように、（地域に普及している品種へのカドミウム低吸収性の導入など）カドミウム低吸収性イネの育成と早期普及
- ・ 通常の営農で使用される種類と量で資材（含鉄資材やケイ酸など）を施用した場合の低減効果及び連用の効果の検証

コメ中ヒ素の低減対策の確立に向けた手引き

目次

1 はじめに.....	1
2 ヒ素について	2
2.1 化学的性質	2
2.2 ヒ素の毒性.....	2
2.3 食品中のヒ素による健康リスク	2
2.4 分析法	5
2.4.1 高速液体クロマトグラフ誘導結合プラズマ質量分析による無機ヒ素分析 ..	6
2.4.2 水素化物発生誘導結合プラズマ発光分析による無機ヒ素の分析	6
2.4.3 誘導結合プラズマ質量分析による総ヒ素分析	7
2.4.4 改良 Gutzeit(グッツアイト)法による分析法	7
2.4.5 蛍光 X 線分析法	8
3 コメ中のヒ素について	11
3.1 コメに含まれるヒ素の存在形態	11
3.2 コメ中のヒ素濃度の品種間差	12
3.3 国産のコメ中のヒ素含有実態	13
3.4 水田土壌中のヒ素のコメへの移行のメカニズム	15
4 コメ中ヒ素の低減技術	19
4.1 排出源対策	20
4.2 水管理による土壌中溶存ヒ素濃度上昇の防止	21
4.2.1 落水期間の設定による溶存ヒ素濃度上昇防止	21

4.2.2	好気的な水管理によるヒ素低減効果	28
4.2.3	好気的な水管理の導入に向けて、今後対応すべき問題	34
4.3	ヒ素とトレードオフの関係にあるカドミウムへの対応	37
4.3.1	ヒ素とカドミウムのトレードオフの関係	37
4.3.2	カドミウム低吸収性イネの利用	39
4.4	資材施用を中心とする吸収抑制技術	42
4.5	加工によるコメ中の無機ヒ素の低減効果	46
4.6	今後、対応すべき課題	48
5	その他のコメ中ヒ素濃度に影響がある要因	49
5.1	水田土壌中のヒ素含有実態	49
5.2	土壌中ヒ素濃度の影響	52
5.3	土壌中ヒ素濃度以外の環境要因の影響とモデル化	54
	参考文献	56

(別添)コメ中ヒ素の汚染防止、低減のための実施規範の日本語仮訳(未定稿)

1 はじめに

自然環境には様々な物質が存在しています。このような物質は、動植物が育つ過程で土や水などから取り込まれ、農畜水産物などの食品に含まれることがあります。ヒ素もそのような物質の1つであり、水や食品を通じてヒトに摂取されることで、ヒトの健康に悪影響を及ぼす可能性があります。

土壌には、天然由来のヒ素のほか、鉱業や精錬などの産業活動に伴って環境中に放出されるヒ素も含まれています。また、日本のように比較的新しい火山活動の影響を受けた地域の土壌に含まれるヒ素の濃度は、他の地域に比べて高いと言われています。一方で、日本では公共用水中のヒ素の濃度は監視されており、飲料水やかんがい用水中のヒ素濃度は低く管理されています。

水稻は、他の作物と比べて、土壌中のヒ素を吸収し、茎葉及び子実中に無機ヒ素を蓄積しやすいことが知られています。これは、水稻が湛水条件で栽培されることから、土壌への酸素供給が制限された状態（還元状態）になり、土壌中のヒ素が溶け出しやすいためです。コメは、無機ヒ素の濃度が高いことに加え、消費量も多いため、結果として、我が国では食品由来の無機ヒ素摂取量の約7割がコメに由来すると推定されています。

無機ヒ素を大量かつ長期的に摂取し続けることで、皮膚組織の変化やがんの発生などの悪影響があることが知られていますが（JECFA, 2010）、我が国においては、食品を通じて摂取した無機ヒ素による明らかな健康影響は認められていません。コメは、ほとんどの日本人が主食として消費する品目であり、食品からの無機ヒ素の主要な摂取源なので、より安全性の高い食品を供給する観点から、コメに含まれる無機ヒ素を低減し、消費者の無機ヒ素の摂取量を減らすことは重要です。

また、海外にコメを輸出する際には、輸出先国がコメに含まれる無機ヒ素濃度の基準を設定している場合には、これを超えないようにする必要があります。

2 ヒ素について

2.1 化学的性質

ヒ素は、ヒ素単体として存在する以外に、炭素や酸素など他の元素と結合したヒ素化合物となって環境中に存在しています。ヒ素化合物のうち、炭素を含む化合物は「有機ヒ素（化合物）」、炭素を含まない化合物は「無機ヒ素（化合物）」と呼ばれています。有機ヒ素と無機ヒ素の両者を合わせたものは「総ヒ素」と呼ばれます。ヒ素は、その化学形態によって、毒性や環境中の動態、分布等が異なります。

2.2 ヒ素の毒性

食品を食べたり水を飲んだりすることで、ヒトがヒ素を摂取した際に、どのような健康影響を及ぼすかは、摂取されたヒ素化合物の種類とその量によって異なります。

無機ヒ素が一度に、または短い期間に大量に摂取された場合は、発熱、下痢、嘔吐、興奮、脱毛などの症状があらわれると報告されています（JECFA, 1983; ATSDR, 2007）。また、無機ヒ素が長期間にわたって、継続的かつ大量に摂取された場合には、皮膚組織の変化やがんの発生などの悪影響があると報告されています（JECFA, 2011）。

一方、有機ヒ素については、ヒトに摂取されたときにどのような健康影響があるのか現在のところよく分かっていません。欧州食品安全機関（EFSA）や米国環境有害物質・特定疾病対策庁（ATSDR）の評価によると、一般的に有機ヒ素は、無機ヒ素に比べるとその健康への悪影響の程度は小さいとされています。

2.3 食品中のヒ素による健康リスク

国際的には、FAO/WHO 合同食品添加物専門家会議（JECFA）¹が食品中のヒ素による健康リスクを評価しています。JECFA は、暫定耐容週間摂取量（この量までであれば一生涯にわたり摂取しても健康に悪影響を与えないと考えられる1週間あたりの摂取量（PTWI））として体重1 kg あたり 15 μg （2.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 体重/日相当）を設定していましたが、第72回会合（2010年）において、疫学調査の結果から推定した用量反応評価により、ヒトの肺がんの発生率が0.5%増加する無機ヒ素の摂取量の統計科学的な下限値（BMDL_{0.5}）²を3.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 体重/日（幅：2.0～7.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 体重/日）と算出しました。これまで設定されていた PTWI

¹ FAO、WHO、それらの加盟国及びコーデックス委員会に対する科学的な助言機関。食品添加物、食品汚染物質、動物用医薬品のリスク評価を実施。

² ベンチマーク用量信頼下限値（BMDL）

はこの BMDL_{0.5} の範囲に含まれるため、取り下げられました。また、コメを主食とする地域において、コメが無機ヒ素の主要な摂取源となるとしました。

JECFA の評価を受け、食品安全に係る国際的な規格・基準を策定するコーデックス委員会³は、コメ中の無機ヒ素の最大基準値（Maximum Level）を検討しました。我が国は、電子作業部会の議長や共同議長を務め、日本を含めた世界各国から提出されたデータを解析して基準値の案を提示するなど議論を主導しました⁴。その結果、精米中の無機ヒ素濃度の最大基準値については 2014 年に 0.2 mg/kg が、玄米中の無機ヒ素濃度の最大基準値については 2016 年に 0.35 mg/kg が、それぞれ設定されました。

国内では、内閣府食品安全委員会が食品健康影響評価を実施しました（2013 年 12 月公表）。評価及び見解の概要は以下のとおりです。

- ✓ 無機ヒ素曝露による非発がん影響として、ヒ素で汚染された飲料水を長期間摂取した地域における疫学調査では、皮膚病変、発達神経影響及び生殖・発生影響が、飲料水中無機ヒ素濃度依存的に認められている
- ✓ 無機ヒ素曝露により、ヒトにおいて発がん（肺がん、膀胱がん等）が認められ、また染色体異常等の遺伝毒性がみられているが、現在得られている知見からは、ヒ素の直接的な DNA への影響の有無について判断することはできない。また、ヒ素による発がんメカニズムについて、現時点においては知見が不足しており、発がん曝露量における閾値の有無について判断できる状況にない
- ✓ 調査地域と日本では生活環境が大きく異なること（日本では水道が整備されているため、飲料水からのヒ素の摂取がほとんどない等）や有害性を評価するために必要な知見が不足していること等から、日本において、どのくらいの量の無機ヒ素が体の中に入った場合に、健康への悪影響が生じるかを評価することは困難
- ✓ 日本において、食品を通じて摂取したヒ素による明らかな健康影響は認められておらず、ヒ素について食品からの摂取の現状に問題があるとは考えていないが、一部の集団で無機ヒ素の摂取量が多い可能性があることから、特定の食品に偏らず、バランスの良い食生活を心がけることが重要

³ コーデックス委員会は、消費者の健康の保護、食品の公正な貿易の確保等を目的として、1963 年に FAO 及び WHO により設置された国際的な政府間機関であり、国際食品規格（コーデックス規格）の策定等を行っている。世界貿易機関（WTO）の策定した協定（SPS 協定）では、コーデックス規格が唯一、食品安全にかかる国際基準として明示されている。

⁴ 国際機関における検討状況については、以下のウェブサイトを参照。
http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_as/international.html#2

また、同委員会は農林水産省や厚生労働省に対して、調査や研究のさらなる充実を要請しています。

日本人の無機ヒ素とカドミウムの摂取量に占めるコメの寄与割合(推定)

コメは主食であり、消費量が多いことから、無機ヒ素とカドミウムの摂取への寄与が最も大きな食品です。国立医薬品食品衛生研究所等が実施している研究結果によれば、平均で食品から摂取している無機ヒ素の約7割を、カドミウムの約3分の1をコメ（加工品を含む）から摂取していると推定されています（図1）。

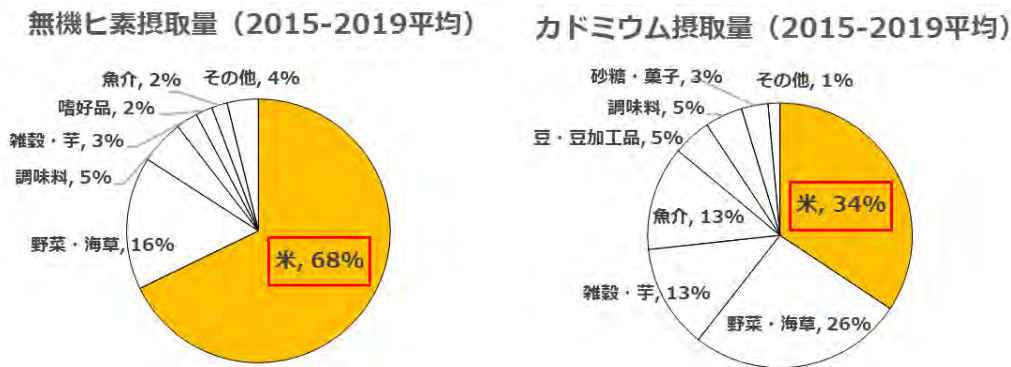


図1 食品からの無機ヒ素とカドミウムの摂取量における各食品群摂取量の寄与率

2015～2019年度の厚生労働行政推進調査事業費補助金食品の安全確保推進研究事業 分担研究報告「食品の有害元素、ハロゲン難燃剤等の摂取量推定及び汚染実態の把握に関する研究」の報告書より農林水産省が計算

なお、無機ヒ素とカドミウムについて、食品全体からの平均摂取量とコメからの寄与分、及び JECFA が算出した耐容摂取量や毒性指標値に対する割合は表1のとおりです。

表1 無機ヒ素及びカドミウムの推定摂取量と耐容摂取量や毒性指標値との比較

	平均無機ヒ素摂取量	肺がんの BMDL _{0.5} (3.0 µg/kg 体重/日) に対する割合
食品全体から	0.31 µg/kg 体重/日	10%
コメからの寄与分	0.21 µg/kg 体重/日	6.9%

	平均カドミウム摂取量	月間耐容摂取量 (25 µg/kg 体重) に対する割合
食品全体から	10.1 µg/kg 体重/月	40%
コメからの寄与分	3.5 µg/kg 体重/月	14%

日本人の平均体重を 55.1 kg として農林水産省が算出。出典は図1と同じ。

2.4 分析法

食品にどのような濃度で汚染物質が含まれているかを知るためにも、対策の効果을把握するためにも、分析により濃度データを取得する必要があります。また、行政機関が行う調査か、農業生産者や民間事業者が収集するデータかにかかわらず、その根拠となるデータが科学的に信頼できるものである必要があります。

そのためには、一定の技能をもった試験者が分析した場合には、いつでも、どこでも、許容できる範囲内の不確かさをもつ分析値が得られることが確認された適切な分析法、すなわち妥当性が確認された分析法を採用する必要があります。本項では、農林水産省が実施する実態調査で用いた分析法に加えて、より簡易な分析法についても示しています（表 2）。

表 2 コメ中のヒ素の主な分析原理と測定対象、特徴、留意点

分析原理	測定対象	特徴	留意点
2.4.1 高速液体クロマトグラフ誘導結合プラズマ質量分析 (HPLC-ICP/MS)	無機ヒ素 (分子種別)	・無機ヒ素の濃度を高い精度で推定できる ・ヒ酸と亜ヒ酸やその他のヒ素化合物を分離して定量 ・感度が高い ・国際的な室間共同試験による妥当性確認済み。	・機器が高価 ・分析できる機関に限られる ・分析単価が高い。
2.4.2 水素化物発生誘導結合プラズマ発光分析	無機ヒ素	・HPLC-ICP/MS に比べて装置が安価 ・分析時間は HPLC-ICP/MS より短時間 ・国際的な室間共同試験による妥当性確認済み。	・有機ヒ素であるジメチルアルシン酸(DMA)存在量の 4%程度が無機ヒ素として定量される ・水素化物発生に使用する還元剤は、用時調製する必要
2.4.3 誘導結合プラズマ質量分析	総ヒ素	・HPLC-ICP/MS と比較して簡易 ・カドミウムや鉛等の他の元素と同時に分析可能 ・感度が高い ・国際的な室間共同試験による妥当性確認済み。	・無機ヒ素の濃度を正確に知るためには無機ヒ素を再度分析する必要
2.4.4 改良 Gutzeit 法	無機ヒ素	・高価な分析機器が不要 ・1 検体あたりの分析費用は 100 円以下（人件費除く） ・ヒ素標準液を用いない	・DMA の存在量の 1 割程度が無機ヒ素の分析値として含まれる
2.4.5 蛍光 X 線分析法	総ヒ素	・コメ試料を粉碎したり抽出したりする調製がほぼ不要	・使用する蛍光 X 線分析装置の機種ごとに最適化することが必要 ・無機ヒ素の濃度を正確に知るためには無機ヒ素を再度分析する必要

今後、コメ中ヒ素のリスク管理に必要な各段階（例：産地レベルの詳細な実態把握、産地レベルの低減技術の検証、生産物のヒ素濃度のスクリーニング）で、用途に応じた分析法の利用が期待されます。

2.4.1 高速液体クロマトグラフ誘導結合プラズマ質量分析による無機ヒ素分析

コメ中の無機ヒ素濃度を低濃度まで高い信頼性をもって測定できる妥当性の確認された分析法としては、高速液体クロマトグラフ誘導結合プラズマ質量分析（HPLC-ICP/MS）を用いた分析法が広く用いられています。農林水産省が実施した、国際試験室間比較において妥当性が確認された分析法は以下の出典から入手可能です。

Ukena, T., et al. "Speciation and determination of inorganic arsenic in rice using liquid chromatography-inductively coupled plasma/mass spectrometry: Collaborative study." *Journal of AOAC International* 97.3 (2014): 946-955.

【利点】

- ✓ 無機ヒ素の濃度や摂取量を高い精度で推定できる。
- ✓ ヒ酸と亜ヒ酸やその他のヒ素化合物を分離して定量することが可能。
- ✓ 感度が高く、低濃度の無機ヒ素まで定量可能。

【留意点】

- ✓ 高価な機器を使用するため、分析できる機関が限定され、受託分析単価も高い。

2.4.2 水素化物発生誘導結合プラズマ発光分析による無機ヒ素分析

水素化物発生と誘導結合プラズマ発光分析（ICP/AES）を組み合わせた方法に関して、国際試験室間比較で分析法の妥当性が確認されています。

Chaney, R.L., et al. "Inter-laboratory validation of an inexpensive streamlined method to measure inorganic arsenic in rice grain." *Analytical Bioanalytical Chemistry* (2018) 410: 5703-5710.

【利点】

- ✓ HPLC-ICP/MS に比べて装置が安価。
- ✓ 分析時間は HPLC-ICP/MS より短時間。

【留意点】

- ✓ DMA 存在量の 4%程度が無機ヒ素として定量される。無機ヒ素が占める割合の高い国産のコメでは大きな問題はないが、海外産のコメでは総ヒ素に占める DMA の割合が高い場合があるため、結果の取扱には留意する必要がある。
- ✓ 水素化物発生に使用する還元剤は保存ができないので、用時調製する必要がある。

2.4.3 誘導結合プラズマ質量分析による総ヒ素分析

国産のコメに含まれるヒ素の大部分が無機ヒ素であることから、無機ヒ素の分析より比較的簡易である総ヒ素の分析も用いられています。近年は、コメを含めた様々な食品を対象として、試料を硝酸分解後に誘導結合プラズマ質量分析（ICP/MS）を用いた分析法が広く用いられています。例えば、

EN 15763:2009 Foodstuffs —Determination of trace elements —Determination of arsenic, cadmium, mercury and lead in foodstuffs by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS) after pressure digestion

などが妥当性確認された分析法として入手できます。

【利点】

- ✓ HPLC-ICP/MS と比較して簡易であり、対応できる分析機関が多い。
- ✓ カドミウムや鉛等の他の元素と同時に分析することが可能。
- ✓ 感度が高く、低濃度の総ヒ素まで定量可能。

【留意点】

- ✓ 総ヒ素の分析であり、無機ヒ素の濃度を正確に知るためには無機ヒ素の濃度を再度分析する必要がある。

2.4.4 改良 Gutzeit(グッツアイト)法による分析法

Gutzeit 法を利用した市販の水質用ヒ素分析キットを改良してコメの無機ヒ素分析に適用している例があります⁵。しかし、この方法では有毒な臭化水銀を使用しているため、臭化水銀を用いない等の改良を加えたコメ中の無機ヒ素分析法を開発しました。

玄米中の無機ヒ素の分析について、室間妥当性確認試験を実施し、0.20 mg/kg 以上の濃度範囲で、妥当性が確認されています。さらに、精米や土壌抽出液、稲わらについても適用可能であると考えられます。

今後、産地における詳細な実態把握を行うにあたって、利用が期待されます。当該分析法の情報は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構のウェブサイト⁶から入手できます。

⁵ Bralatei, E. et al.” Detection of Inorganic Arsenic in Rice Using a Field Test Kit: A Screening Method.” *Analytical Chemistry* (2016) 87(22): 11271-11276.

⁶ https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/121228.html

【利点】

- ✓ 高価な分析機器が不要。1 検体あたりの分析費用は 100 円以下（人件費除く）。
- ✓ 有毒なヒ素標準液を用いず、色見本を用いて検量線を作成

【留意点】

- ✓ 本法による分析値には、DMA の存在量の 1 割程度が含まれる。無機ヒ素に対する DMA の割合が低いことがわかっている国産のコメでは影響は極めて小さいが、海外のコメでは総ヒ素に占める DMA の割合が高い場合があるため、結果の取扱には留意する必要がある⁷。

2.4.5 蛍光 X 線分析法⁸

蛍光 X 線分析法は、非接触・非破壊の分析法で、試料の前処理をほとんどせずに総ヒ素濃度を測定することができます。しかし、コメに含まれる総ヒ素の濃度域は、通常、蛍光 X 線分析で測定する濃度域より低く分析法の改良が必要でした。

農林水産省では、委託研究により、コメ中総ヒ素濃度が測定できる分析法の開発に取り組み、ヒ素分析用に調整された蛍光 X 線分析装置を使用することで、茎葉と比べてヒ素濃度が低い精米においても 0.2 mg/kg を境界値とするスクリーニング分析が可能であることを示す結果が得られました（図 2）。さらに、イネの茎葉は子実（＝コメ）よりもヒ素濃度が高いため、コメよりも短い測定時間で分析が可能である⁹ことがわかりました（図 3）。

⁷ DMA の影響は無機ヒ素濃度の過大評価の方向であり、算出された濃度は安全側の見積もりになる。

⁸ 蛍光 X 線分析法は、波長分散型（WDX）とエネルギー分散型（EDX）に大別される。波長分散型はエネルギー分散型よりもスペクトル分解能や S/N が高く、より微量の元素の検出ができるが、装置が大掛かりになり、価格も高価になる。さらに装置の稼働には冷却用の液体窒素が不可欠になるなどランニングコストも高くなる。本稿では、スクリーニング分析としての実行可能性の観点から、小型で液体窒素不要のエネルギー分散型の装置を使用することを前提として記述している。

⁹ ただし、試料はあらかじめ乾燥微粉碎されていることが前提。

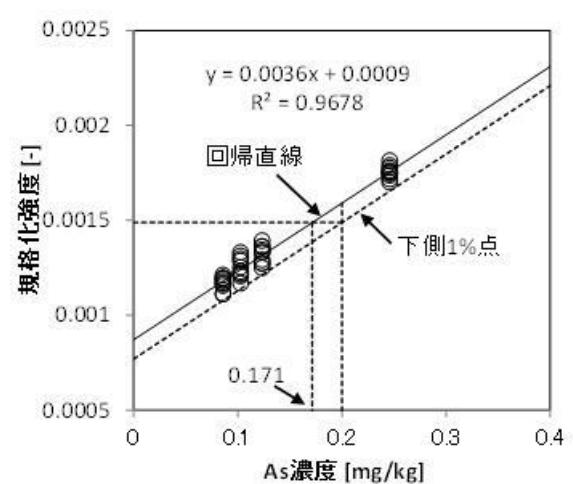


図2 総ヒ素濃度が既知の精米試料を繰り返し測定した場合のスペクトル強度（規格化強度）（農林水産省研究委託事業）

繰り返し測定の結果から、測定時間が1700秒の場合、測定値が0.171 mg/kg未満であれば、総ヒ素濃度が0.20 mg/kgを超過する可能性は低い（1%未満）と判断できる。

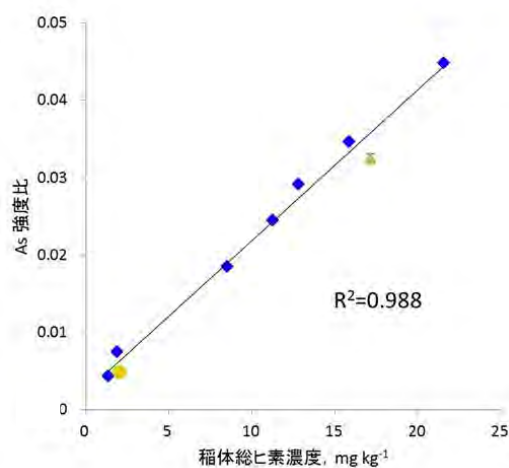


図3 蛍光X線分析によるイネ茎葉（穂、稲わら、止葉）のヒ素測定結果（農林水産省研究委託事業）

測定時間は100秒、3回繰り返し測定

【利点】

- ✓ コメ試料を粉碎したり抽出したりする調製が不要。

【留意点】

- ✓ 蛍光 X 線分析装置の機種によって、感度やばらつきが異なるため、使用する機種ごとに最適化することが必要（研究では、ヒ素測定用のフィルターを追加し、ヒ素に最適化した X 線光学系になるよう調整された装置を使用）。
- ✓ 総ヒ素の分析であり、無機ヒ素の濃度を正確に知るためには無機ヒ素の濃度を別に分析する必要がある。

3 コメ中のヒ素について

3.1 コメに含まれるヒ素の存在形態

- ・ コメに含まれるヒ素は無機ヒ素(亜ヒ酸、ヒ酸)と有機ヒ素(DMA、MMA)があるが、平均で9割程度が無機ヒ素である

【解説】

コメに含まれる可能性があるヒ素化合物として、無機ヒ素である亜ヒ酸 (As (III)) とヒ酸 (As (V)) のほか、有機ヒ素であるジメチルアルシン酸 (DMA) やモノメチルアルソン酸 (MMA) を分析しています¹⁰。コメに含まれるヒ素化合物の割合は栽培地域によって異なりますが、国産のコメではほとんどが無機ヒ素です(図4)。農林水産省が実施した実態調査の結果¹¹では、国産のコメは、無機ヒ素と有機ヒ素の合計である総ヒ素に占める無機ヒ素の割合が高く、玄米、精米ともに、平均で9割程度となっていました(表3)。

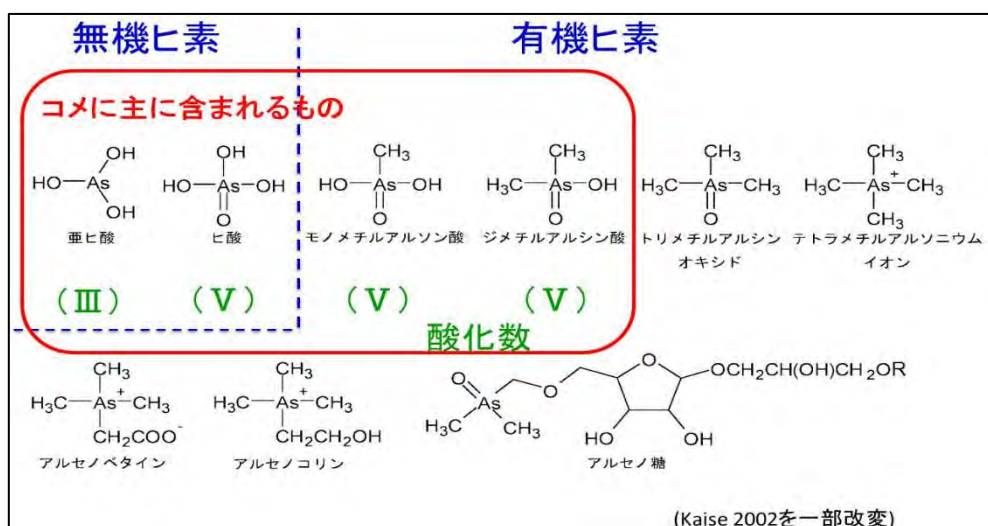


図4 環境(食品)中に存在する主なヒ素化合物

¹⁰ ヒ素化合物の不法投棄による汚染等の特殊な事例を除く。(例: 茨城県神栖市における有機ヒ素化合物汚染 http://www.env.go.jp/chemi/gas_inform/local/kamisu.html)

¹¹ 農林水産省「平成24年度 国産玄米及び精米中のヒ素の含有実態調査」の結果について (http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_as/attach/pdf/occurrence-1.pdf)

表3 2012年産米に含まれる総ヒ素のうち無機ヒ素が占める割合（農林水産省調査結果）

品目	調査点数	最小値 (%)	中央値 (%)	平均値※ (%)	最大値※ (%)
玄米	600	58	92	92	100
精米	600	41	90	89	100

※100%を超える試料は、100%として算出

総ヒ素は試料をケルダール法で分解後に水素化物発生法による原子吸光法で、無機ヒ素は、試料を希硝酸で抽出後に、液体クロマトグラフで分離後に誘導結合プラズマ分析法で分析。

3.2 コメ中のヒ素濃度の品種間差

- ・ 日本の栽培品種においては、玄米に含まれる総ヒ素濃度や無機ヒ素濃度の品種間差異は小さい

【解説】

日本の主要な食用品種を同一条件下で栽培した場合、玄米中総ヒ素濃度及び無機ヒ素濃度について、大きな品種間差異はありませんでした。現在の日本の栽培品種はコシヒカリが交配親となっている場合が多く、遺伝的多様性に乏しいため、ヒ素の集積については大きな品種間差異がないと考えられます（表4）。

表4 日本の栽培品種の総ヒ素濃度と無機ヒ素濃度（Kuramata et al.(2011)を一部改変）

品種名	総ヒ素濃度 (mg/kg)	無機ヒ素濃度 (mg/kg)
きらら 397	0.121 ^{ab}	0.104 ^{abcd}
ほしのゆめ	0.107 ^a	0.092 ^{abc}
あきたこまち	0.141 ^{abc}	0.102 ^{abc}
はえぬき	0.147 ^{bc}	0.129 ^c
ササニシキ	0.162 ^c	0.118 ^{de}
ひとめぼれ	0.140 ^{abc}	0.124 ^{de}
コシヒカリ	0.166 ^c	0.113 ^{cde}
日本晴	0.133 ^{abc}	0.085 ^{ab}
ヒノヒカリ	0.117 ^{ab}	0.079 ^a
ヒメノモチ	0.136 ^{abc}	0.106 ^{bcde}

国内の試験ほ場で湛水条件で栽培。品種ごとに1列に1本植えて12個体を移植し、各列の中央3個体を個体毎にヒ素濃度の分析に供試。3個体の分析値の平均を示した。

数値に付している符号が異なると Tukey の検定で 5%水準で有意に異なることを示す。

ヒ素低吸収性品種の開発について

これまでの研究の結果、コメのヒ素集積に関連する遺伝子が複数特定されています。それら遺伝情報を活用して、ヒ素濃度が一定程度低減する系統の作出が実験的に進められています。

3.3 国産のコメ中のヒ素含有実態

- ・ 近年の国産のコメ中の無機ヒ素の濃度は、玄米が中央値で 0.14～0.16 mg/kg、精米が中央値で 0.08～0.10 mg/kg となっており、一部に比較的濃度の高いコメも存在
- ・ 低減技術を導入し、国産米に含まれる無機ヒ素をできるだけ低減していくことが重要

【解説】

農林水産省が日本全国の集出荷施設から採取した玄米と精米について無機ヒ素濃度を分析した結果では、中央値で玄米が 0.14～0.16 mg/kg、精米が 0.08～0.10 mg/kg でした（表 5）。図 5 で示す分布からわかるように、一部に比較的無機ヒ素濃度が高いコメも存在することから、高濃度に無機ヒ素を含むコメの濃度を低くするために低減技術を導入することが重要です。

表 5 国産玄米、精米に含まれる無機ヒ素濃度の分析結果（農林水産省調査結果）

試料種類	試料採取年	試料数	無機ヒ素濃度 [mg/kg]					
			最小	25%ile	中央値	平均	75%ile	最大
玄米	2003-2005	600	0.04	0.12	0.15	0.15	0.18	0.37
	2012	600	0.03	0.15	0.20	0.21	0.24	0.59
	2017	500	0.04	0.11	0.14	0.15	0.18	0.38
	2018	500	0.04	0.11	0.14	0.15	0.18	0.37
	2019	500	0.03	0.13	0.16	0.17	0.21	0.60
精米	2012	600	0.02	0.09	0.12	0.12	0.14	0.26
	2017	500	0.02	0.07	0.08	0.092	0.11	0.26
	2018	500	0.02	0.07	0.10	0.098	0.12	0.25

水稲作付面積に比例するように全国の市町村に試料採取点数を割り付けた。

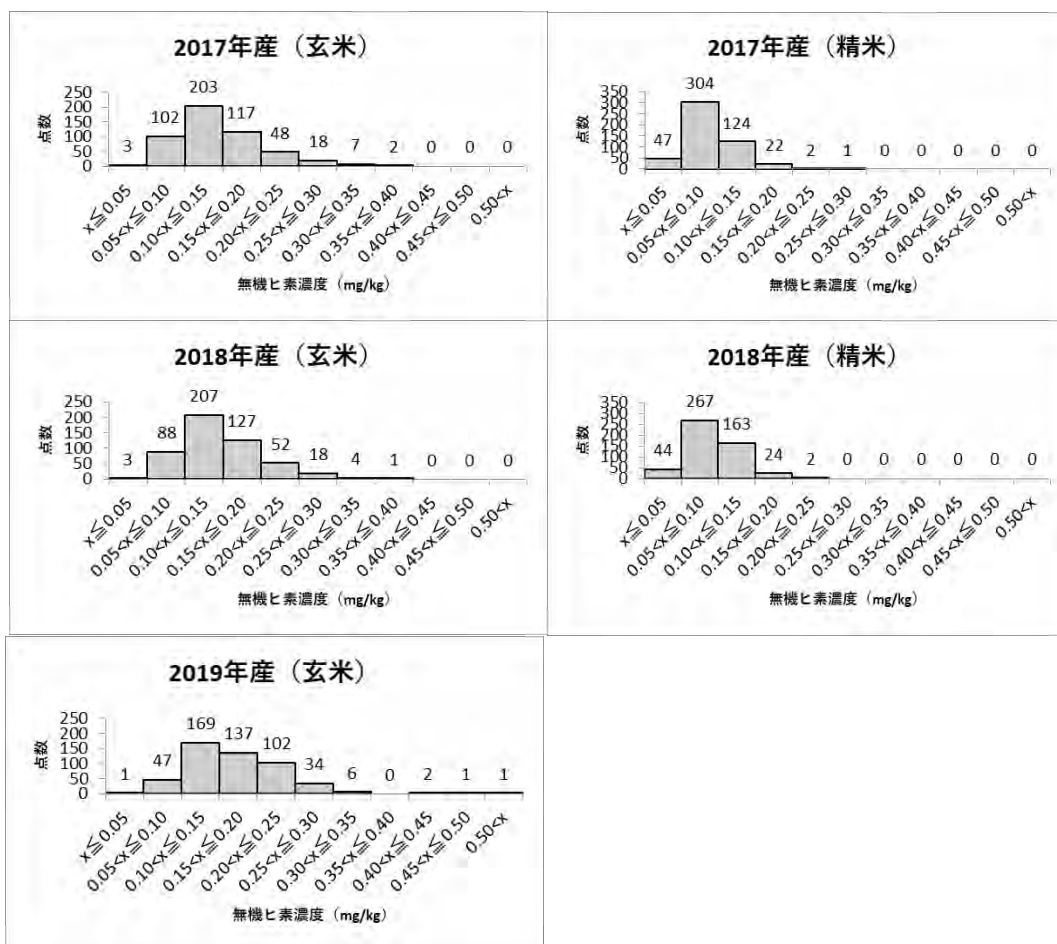


図5 コメ中の無機ヒ素濃度の度数分布（玄米：2017～2019年産、計1,500点（各年500点）、精米：2017～2018年産、計1,000点（各年500点））（農林水産省調査）

玄米に比べて精米中の無機ヒ素濃度が低くなっているのは、ぬか層（玄米の外側の9%に相当）に無機ヒ素が偏在しているためです。国産のコメの場合、精米中の無機ヒ素濃度は平均で玄米中の無機ヒ素濃度の約6割であることが、農林水産省の調査で明らかになっています（表6）。

表6 玄米中の無機ヒ素濃度に対する精米中の無機ヒ素濃度の比率※（農林水産省調査）

調査点数	最小値 (%)	中央値 (%)	平均値 (%)	最大値 (%)
1,000	38	64	63	86

※（玄米中の無機ヒ素濃度に対する精米中の無機ヒ素濃度の比率）（%）

=（精米中の無機ヒ素濃度）/（玄米中の無機ヒ素濃度）×100

3.4 水田土壌中のヒ素のコメへの移行のメカニズム

- ・ 水田土壌中のヒ素は、主にヒ酸と亜ヒ酸として存在
- ・ 水田土壌が酸化状態にあると、ヒ素は鉄鉱物等に吸着されているが、還元状態になると溶出
- ・ イネ地上部のヒ素蓄積量は、出穂前後にかけて急激に高まり、さらに一部が子実に移行する
- ・ 出穂後 3 週間に、水田土壌中に溶出したヒ素が多い場合、コメ中のヒ素濃度が高まる

【解説】

土壌中のヒ素の形態は、コメ中のヒ素と同様に無機態と有機態がありますが、我が国の水田土壌では、主に無機態である 5 価のヒ酸 (H_2AsO_4^- 、 HAsO_4^{2-}) と 3 価の亜ヒ酸 (H_3AsO_3 、 H_2AsO_3^-) で存在しています。

田面水の落水により、水田の表面が乾き、土壌中の間隙（孔隙）に空気（酸素）が侵入すると酸化状態になります。その場合、水田土壌中に含まれるヒ素は、主に 5 価のヒ酸として鉄鉱物等に強く吸着されるため、水稻には吸収されにくくなります。一方、水田が一定期間湛水条件下に置かれると、土壌中の酸素が微生物の呼吸等で消費され還元状態になります。その場合、鉄鉱物が還元され溶出しやすくなり、鉄鉱物に吸着されていた 5 価のヒ酸も 3 価の亜ヒ酸へ還元され、還元された鉄鉱物とともに土壌溶液（土壌中の孔隙に含まれる溶液）に溶出し、水稻に吸収されやすくなります（図 6）。このような還元状態における鉄鉱物からのヒ素の溶出は、鉄鉱物の還元によって生じた 2 価の鉄イオン濃度と土壌溶液中のヒ素濃度に正の相関があることから明らかです（図 7）。溶出したヒ素は落水により土壌が酸化条件になると再び鉄鉱物に吸着されます（図 6）。

なお、ヒ酸は土壌 pH の上昇に伴って溶出しやすくなる性質があります。しかし、土壌 pH が 7 程度以下であればヒ酸は鉄鉱物等に吸着されます。我が国のは場で pH7 を超えるような水田土壌はほぼ皆無であり、水田土壌中でのヒ酸の溶出に土壌 pH の影響を考慮する必要はないと考えられます。

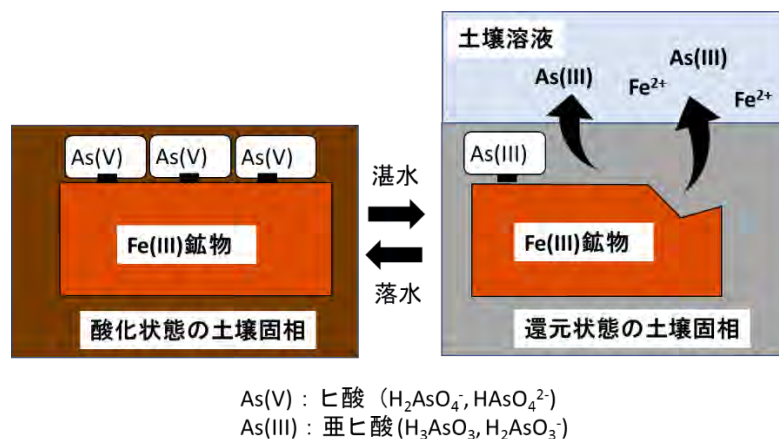


図6 ヒ素の還元的な溶解（模式図）

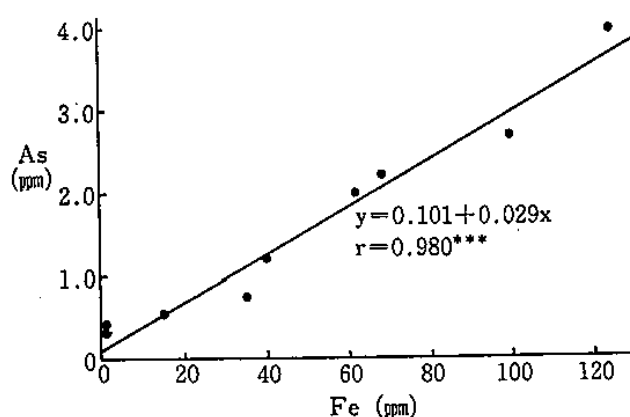


図7 土壌溶液中へ溶出した二価の鉄イオン (Fe^{2+}) 濃度と As 濃度との関係（山根, 1989）

ヒ素汚染土壌を、湛水条件で温度を変えてインキュベーション（培養）し、7日後に土壌溶液を採取して Fe^{2+} と As 濃度を測定した。溶出した As の大半（約9割）が3価の亜ヒ酸であった。

溶出した亜ヒ酸は、ケイ酸の輸送体を通して水稻に吸収されやすく、一部は子実（コメ）中にも蓄積します。コメ中のヒ素濃度は茎葉よりも著しく低い水準となっています（図8）¹²。

¹² 稲わらを飼料として用いる場合には、「飼料の安全性の確保及び品質の改善に関する法律（昭和28年法律第35号）」に基づくヒ素濃度の管理基準として7 mg/kg が定められており、飼料分析基準（平成20年4月1日付け19消安第14729号）により行うこととされている。

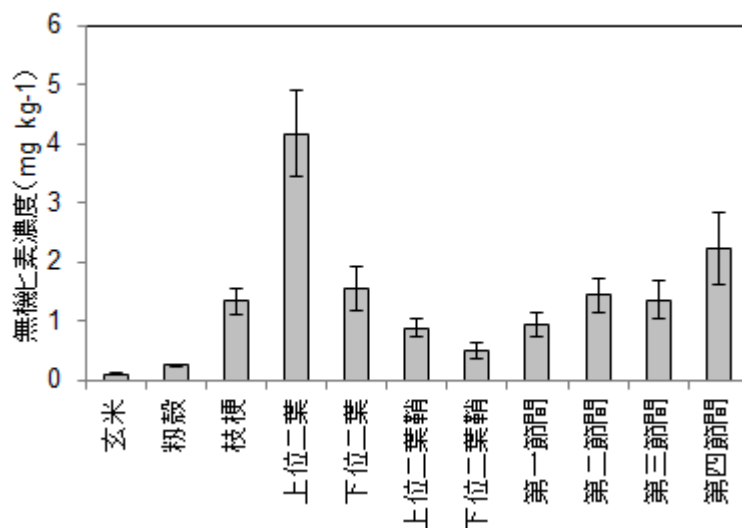
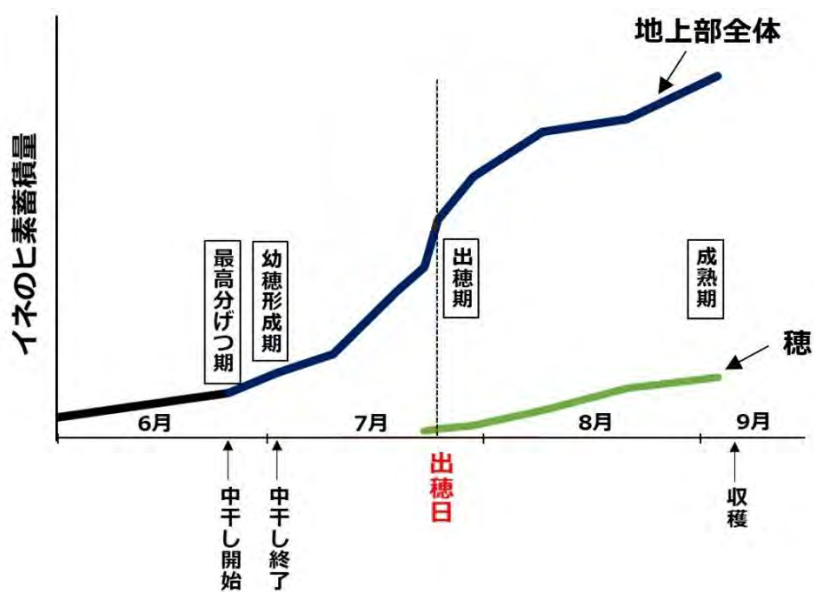


図8 イネの部位別の無機ヒ素濃度（棒グラフ）（Kuramata et al., 2011 を元に編集）

イネ地上部のヒ素蓄積量は、出穂前後にかけて急激に高まる結果が見られています（図9）。



（注）つくば市内のほ場でコシヒカリを、出穂期前3週間から出穂3週間後、常時湛水条件で栽培した結果です。

図9 イネ地上部へのヒ素蓄積（農林水産省研究委託事業）

出穂後の土壌溶液に含まれるヒ素濃度と、その土壌で生産された玄米中の無機ヒ素濃度との間には相関関係がみられています（図 10）。

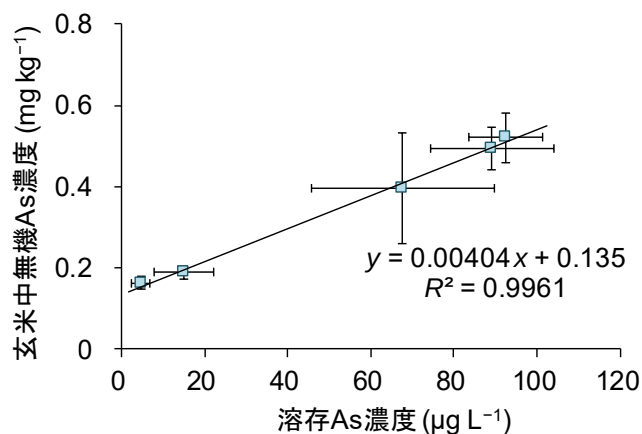


図 10 出穂後 3 週間の土壌中の平均溶存ヒ素濃度と玄米中の無機ヒ素濃度との関係（Honma et al., 2016 を一部改変）

土壌溶液は 15cm の深さで出穂後 3 週間の間に 4 回採取。各プロットは異なる水管理（計 5 種類）を示す。3 反復の平均。

玄米試料は、各水管理で生産されたほ場から収穫期に採取。

このため、栽培期間中のコメ中のヒ素を低減させるためには、以下の対策が効果的であると考えられます。

- ① 溶存ヒ素（土壌から溶け出すヒ素）がイネ地上部やコメに移行しやすい出穂前後にかけて、できる限り土壌を酸化的に保つための水管理を行い、土壌溶液へのヒ素の溶出を抑えること（4.2 節）。
- ② 土壌に資材を施用し、ヒ素の吸着源である鉄鋳物等を増やして吸着能を高める、あるいは、土壌溶液からの水稻によるヒ素の吸収を阻害すること（4.4 節）。

4 コメ中ヒ素の低減技術

ヒ素のように環境に由来する汚染物質を低減するためには、生産から消費の必要な段階で対策をとることが重要です（図 11）。

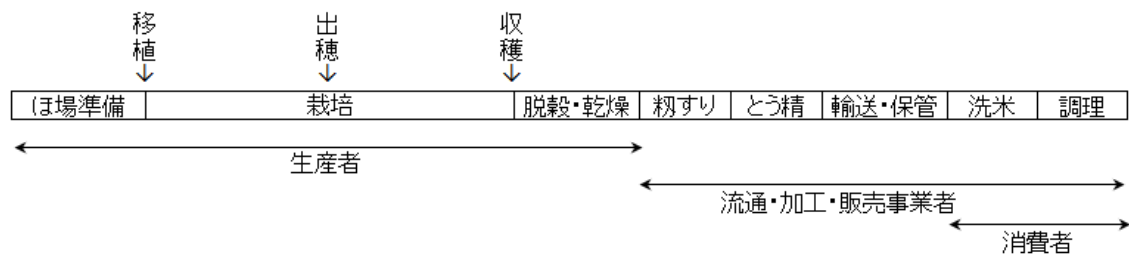


図 11 コメに関する生産から消費までの流れ

食品に含まれる汚染物質に関して生産段階から低減することが重要という国際的に共通の認識のもと、コーデックス委員会において「コメ中ヒ素の汚染の防止と低減に関する実施規範（CXC 77-2017）」が 2017 年に策定されています。我が国は、この実施規範の策定を行う作業部会の議長国として、策定作業を主導しました。

この実施規範においては、

- ・ 低減対策の有効性は地域の環境条件によって異なるため、ほ場試験が必要であること
- ・ 無機ヒ素の低減が重要であること
- ・ 排出源対策が農業技術対策に優先すること
- ・ 好氣的な条件（水田がよく排水されて土壌が酸化になるような条件）がヒ素低減に有効であるが、コメのカドミウム濃度を上昇させる可能性があること
- ・ とう精や洗米によってもヒ素が低減すること

等の基本的な情報が記載されています。

実施規範に記載すべき低減技術については、ほ場レベルでの有効性と実行性が確保された技術に限定していることから、その内容は基礎的な知見に限定されています。今後、各国で実施された低減技術等の開発結果を受けて、改訂が予定されています。

本手引きに記載されている低減技術は、この実施規範の記述と整合しています。

4.1 排出源対策

- ・ 生産ほ場を汚染するような排出源がある場合は、排出源への対策を優先して実施する

【解説】

ヒ素等の環境中に広く存在する汚染物質については、排出源への対策を実施することが重要です。コーデックス委員会の実施規範も、排出源対策を優先すべきとしています¹³。ヒ素の排出源は以下が想定されます。

- ・ 天然起源：火山活動、土壌や底質からの溶出、風化作用等
- ・ 人為起源：非鉄金属の採掘・精錬、化石燃料の燃焼、ヒ素含有農薬¹⁴の使用、CCA（クロム・銅・ヒ素化合物系木材防腐剤）処理された木材の廃棄

我が国では、人為的な排出については対策が進められてきており、また、河川や地下水などの公共用水についても、監視体制があるため、これらによる直接的な汚染の可能性は低いと言えます。もし、上記のような排出源の存在によりヒ素濃度が高くなったかんがい水があれば、排出源を特定するとともに、継続的に公共用水などに含まれるヒ素の濃度を把握することが重要です。また、一旦土壌が汚染されるとその浄化にはコストがかかり、栽培管理による低減にも手間がかかることから、公共用水に重篤な汚染が判明した場合には、対策が講じられるまでの間、排出源対策の原則に従い汚染されたかんがい水等をコメの生産に用いないことが重要です。

¹³ 実施規範の 4.2 項 “National or relevant food control authorities may consider implementing the measures in Section 4.3 as a priority.”

¹⁴ 現在、ヒ素を有効成分とする農薬は我が国では登録されていない。

4.2 水管理による土壌中溶存ヒ素濃度上昇の防止

4.2.1 落水期間の設定による溶存ヒ素濃度上昇防止

- ・ コメ中のヒ素の低減には出穂前後に生育などへの支障の無い範囲でできるだけ土壌を酸化的に保つことが重要であり、落水期間を設定した間断かんがいが効果的
- ・ 土壌中の「気相率」と「酸化還元電位 (Eh)」が、湛水開始時期と落水期間を判断するための指標として利用できる
- ・ 「気相率」については、気相率が十分に上がった場合（約 $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ を超えた場合）には、再湛水後に還元状態となっても、ヒ素はただちに溶出せず、溶存ヒ素濃度は低く抑えられる
「Eh」では、0 mV 以上の状態が1～2日程度継続すると、溶存ヒ素濃度が低減する傾向がある
このような指標も活用して湛水期間と落水期間を設定することが必要である
- ・ 「気相率」は落水後の変化が比較的予測しやすく、土壌の変化の状況や降雨の影響も把握しやすいが、「Eh」は落水後の変化が気相率に比べて急激で予測しにくく、経時的に測定しなければ変化の様子を把握しにくいことに留意する必要がある

【解説】

3.4 節のとおり、コメ中ヒ素の低減には、出穂前後に、できる限り土壌を酸化的に保つための落水期間を設定することが効果的ですが、この時期は、水稻が最も水を要求する時期であり、コメへの収量や品質への影響が懸念されます。このため、落水と湛水を繰り返す間断かんがいが有効ですが、湛水は土壌の還元を通じたヒ素の溶出の原因となるため、湛水開始時期と落水期間をいかに判断していくかがヒ素濃度上昇防止の鍵となります。

気相率は、土壌の全体積に占める気相の体積の割合を示す数値であり、この値が高いほど酸素が土壌中に拡散しやすくなります。このため、気相率の上昇は、土壌が酸化状態へ移行する原因であり、ヒ素の吸着に直接関係します。また、酸化還元電位 (Eh) は土壌の酸化還元状態を示す指標であり、土壌中でヒ素の溶出が進むか吸着が進むかを判断する指標として有効です。

湛水を続けると、土壌孔隙が水でほぼ飽和し気相率はゼロ近くで維持され、Eh が-200 mV 前後で安定となって、ヒ素の溶出が進行し、土壌溶液中ヒ素濃度は増加を続けます（図 12 左図）。一方、間断かんがいをした場合は、湛水と落水のサイクルの中で、気相率と Eh は、

（湛水→落水）

- ① 湛水条件下ではゼロ近くであった気相率が、落水による土壌水分の減少に伴って上昇

- ② 気相率が上昇するにつれて、土壌は酸化的な状態に移行し、湛水条件下で -200 mV 前後であった Eh が急激に上昇し正の値を示す

(落水→湛水)

- ③ 再湛水により田面がかんがい水で覆われ、大気からの土壌への酸素拡散が阻害される（気相率はゼロに近くまで低下。）
- ④ 土壌中微生物による有機物の分解に伴う酸素消費により、土壌は還元的な状態に移行し、Eh も $-100\sim-200\text{ mV}$ 前後に低下

と変化し、土壌中ヒ素が溶出しやすい条件と吸着しやすい条件が繰り返されることとなります（表 7、図 12 右図）。

表 7 水管理に対応した気相率、Eh、土壌中ヒ素の変化

水管理のサイクル	湛水期間	湛水→落水	落水期間	落水→湛水
気相率	0（に近い）	0→（+）	（+）	（+）→0
Eh	（-）	（-）→（+）	（+）	（+）→（-）
土壌中ヒ素	溶出	溶出→吸着	吸着	吸着→溶出
土壌溶液中ヒ素濃度	↑	↓	↓	↑

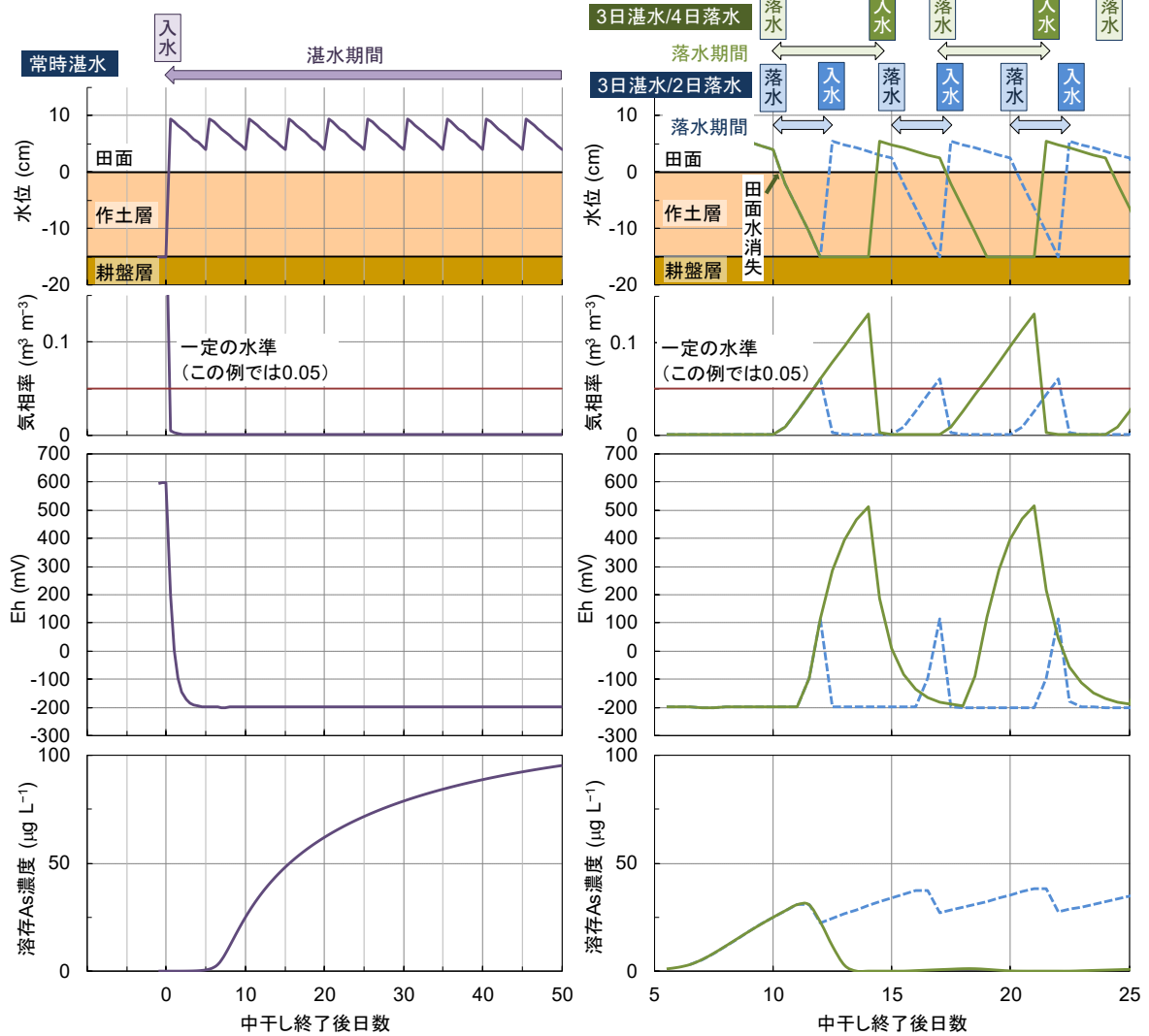


図 12 出穂前後常時湛水（左図）と湛水と落水のサイクル（間断かんがい）（右図）による気相率、Eh、溶存ヒ素濃度の変動イメージ

農林水産省が試験ほ場で様々な条件で試験したところ、落水期間に気相率が一定の水準（約 $0.04 \sim 0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ）を超えると、溶存していたヒ素の鉄鉱物への吸着が始まり溶存ヒ素濃度が下がりました。さらに気相率が十分に上がった（約 $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ を超える）場合には、再湛水後に還元状態となっても、ヒ素が溶出しにくく、結果的に溶存ヒ素濃度を低濃度に抑えられることがわかりました。さらに、Eh との関係でみた場合には、落水期間中に Eh が 0 mV 以上の状態が 1～2 日程度継続すると、溶存ヒ素濃度が低減する傾向がありました。

一方、落水日数が不足したり、ほ場の排水が不良であったりなどして、気相率が一定の水準を超えないか、超える期間が短い場合には、土壌が酸化的な状態に移行せず、Eh の上昇も不十分になります。結果として、溶存したヒ素の鉄鉱物等への吸着はほとんど進まず、溶存ヒ素濃度は低下しないか、低下しても不十分になるため、再湛水により還元状態になると、再びヒ素の溶出が進み、溶存ヒ素濃度がしだいに高くなると考えられます（図 12 の右図（破線参照））。

落水時（田面から水が無くなって以降）の土壌気相率の上昇は、主に水稻の吸水・蒸散によるものです。降雨がなければ土壌気相率は比較的一定の速度で上昇することが知られています。したがって、気相率を指標として用いた場合には、落水による土壌の変化の状況を推定しやすく、落水期間中に降雨があった場合でも、気相率の値が分かれば、さらに何日程度落水期間を継続すればいいか推定することができます。なお、気相率を測定するには、TDR 水分計を用いて体積含水率を測定し、飽和状態での体積含水率の値からの変化を求める必要があります¹⁵。

一方、土壌中 Eh を測定するには、あらかじめ測定用電極を土壌に挿入してなじませておく必要があります、多くのほ場を測定して回るには不都合です。また、Eh の上昇は気相率と比較して急激で予測が難しい問題があります。

¹⁵ 任意の時点における気相率（ m^3/m^3 ）は、気相率 = [直近の飽和状態（落水直後）での体積含水率（ m^3/m^3 ）] - [測定時の体積含水率] から求められます。

(例) 実際のは場から得られた気相率、Eh、溶存ヒ素濃度の関係 (図 13-1,2,3)

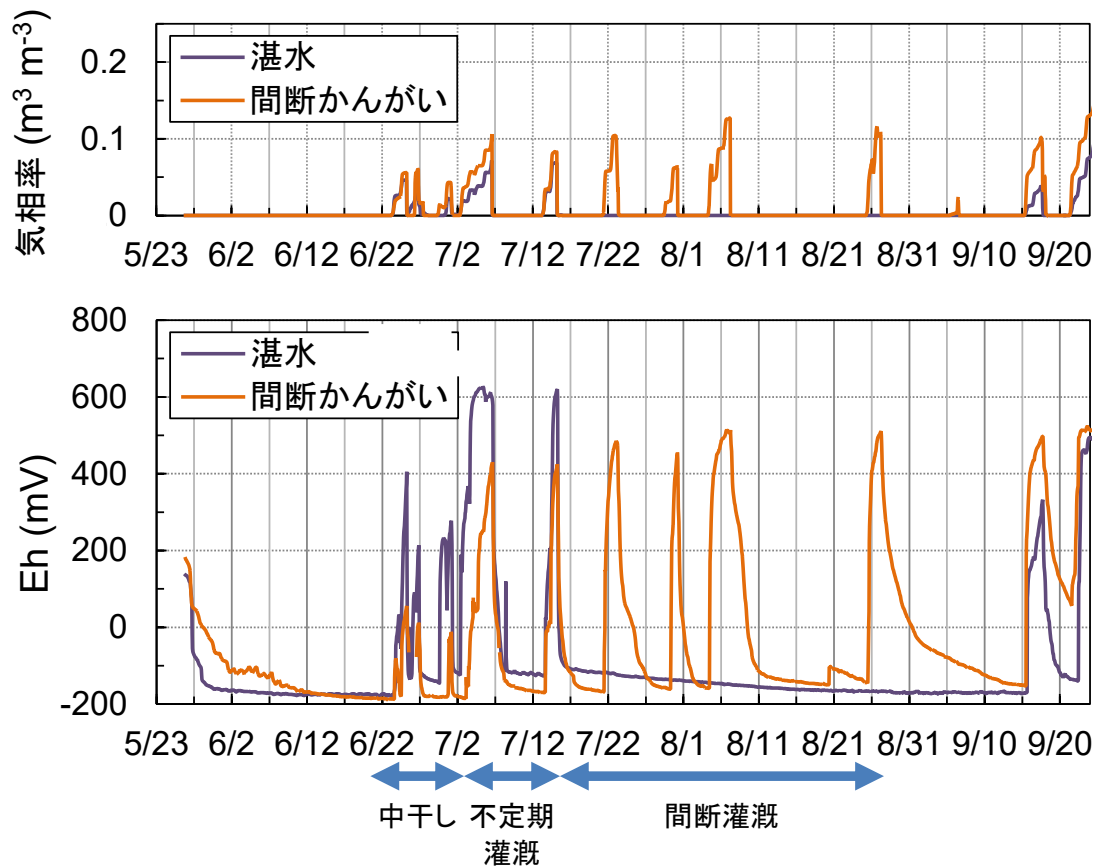


図 13-1 (例) は場における水管理と気相率、Eh の経時変化 (農林水産省研究委託事業)

気相率と Eh は、土壌深さ 5cm で測定

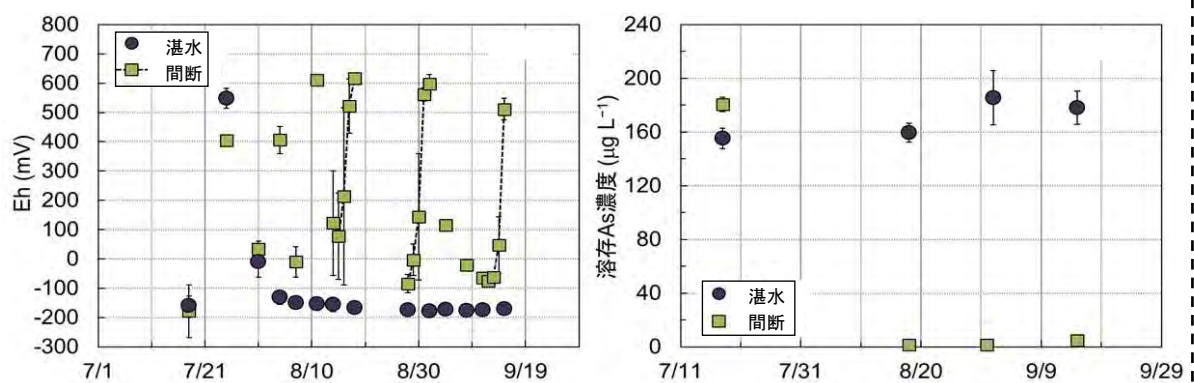


図 13-2 (例) 異なる水管理をおこなったは場における土壌中 Eh の変化 (左図) と対応する溶存ヒ素濃度 (右図) (農林水産省研究委託事業)

土壌中の Eh が落水期間に十分に上昇すれば、溶存ヒ素濃度は低い状態が維持される。湛水を継続すると溶存ヒ素濃度は高い状態が維持される。

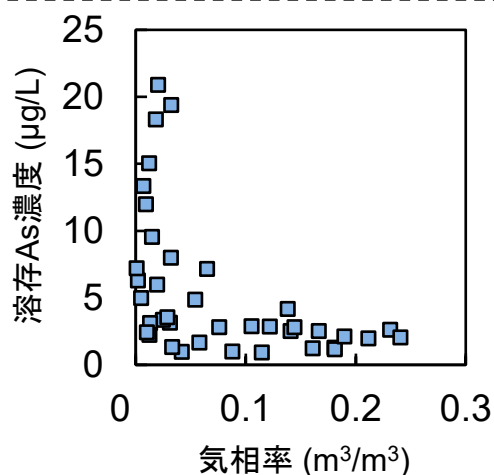


図 13-3 (例) 気相率と溶存ヒ素濃度の関係 (Nakamura et al., 2018 を一部改変)

気相率が一定の水準（ここでは $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ）を超えるとヒ素は土壌に吸着され溶存ヒ素濃度は低く抑えられる。溶存ヒ素濃度を抑えるための気相率（約 $0.04 \sim 0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ）は、ほ場や深さによって異なる。

○気相率や Eh 以外の指標の探索について

農林水産省では、Eh や気相率の測定に代替する簡易な指標として、「作土内水位」、「作土に挿入した鉄棒のサビの発生状況」、「土壌硬度」と気相率や Eh との相関関係を調べています。

【作土内水位】

ここで言う「作土内水位」は土壌を掘り出した穴あき塩ビ管の内部に観察される水位（落水後田面と同じ高さから次第に低下）のことです（図 14）。作土内水位は、一部の試験ほ場では気相率とよい対応関係がみられ、降雨にも鋭敏に反応しました。一方、気相率と良好な対応がみられない場合もありました。また、作土内水位の低下の速度はほ場によって異なり、落水後 2 日程度で作土層と耕盤の境界まで水位が下がり、その後の気相率の上昇や酸化還元状態の指標として機能しない場合などがみられました。

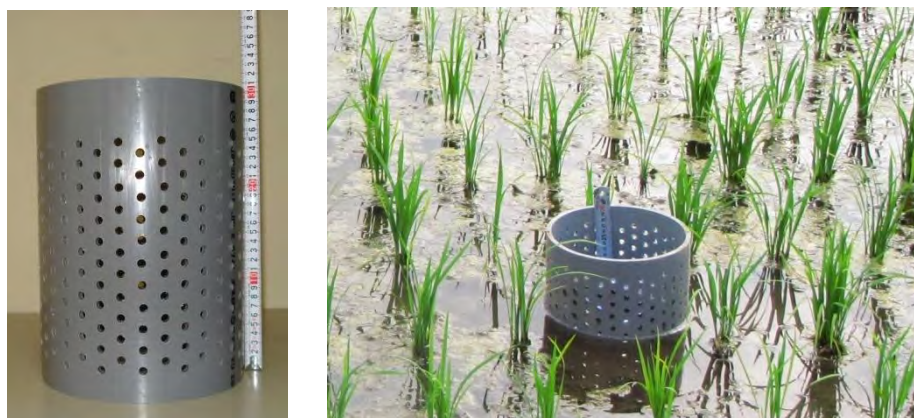
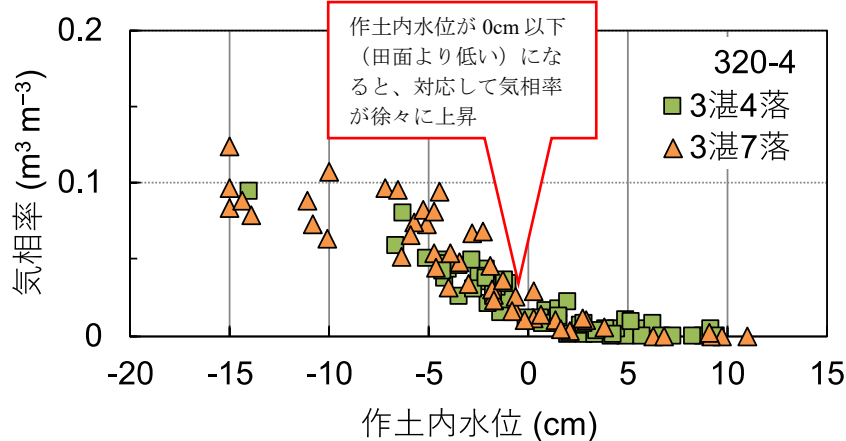


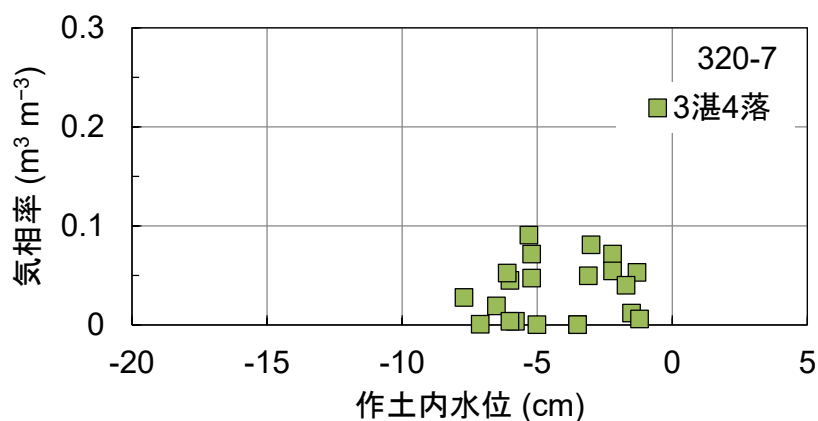
図 14 作土内水位の測定に用いた塩ビ管（左図）と設置状況（右図）

作土内水位は気相率や Eh よりも測定が容易で安定性もあるという利点があります。水管理の指標として利用するためには、ほ場の性質にあわせた作土内水位と気相率・酸化還元状態や溶存ヒ素濃度との対応関係を整理することが必要です（図 15）。

対応関係が良い例



対応関係が不明確な例



落水期間中に作土内水位が耕盤に達している例

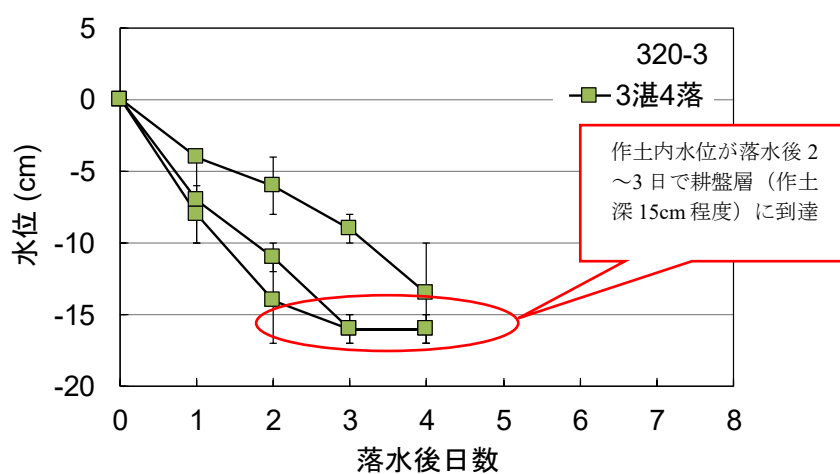


図 15 作土内水位と気相率の対応関係の例及び落水期間中に作土内水位が耕盤に達している例（農林水産省研究委託事業）

【作土に挿入した鉄棒のサビの発生状況】

作土中に鉄棒を挿入したときに、サビ（酸化鉄）が付着すれば、その部位の土壌は酸化的な状態にあったと考えられます。そこで、鉄棒のサビ（酸化鉄）の深さと土壌中の Eh（深さ 10cm）に関係性がみられるかどうかを検証したところ、相関はみられませんでした。

【土壌硬度との関係】

落水期間中に土壌の乾燥が進めば、土壌が硬くなるため、土壌硬度と気相率や Eh と関係性がみられることが想定されます。そこで、土壌硬度と土壌中の Eh（深さ 10 cm）に関係性がみられるか検証しました。土壌硬度と Eh の関係はほ場や栽培時期により異なりました。間断かんがいすると落水の繰り返しにより土壌が次第に密になる傾向がみられましたが、Eh の上昇がみられないまま土壌硬度のみが上昇する場合もありました。

4.2.2 好氣的な水管理によるヒ素低減効果

- ・ 出穂前から出穂後にかけて湛水期間と落水期間を交互にくりかえす間断かんがいなどの好氣的な水管理（水田がよく排水されて土壌が酸化になるような水管理）を行うことで、コメ中の無機ヒ素濃度を比較的強く抑えることができる
- ・ コメの品質・収量への影響を考慮すれば出穂 3 週間前から出穂 3 週間後にかけて落水 3 回（4 日間の落水を 3 回実施）や 3 湛 4 落（3 日間湛水・4 日間落水の繰り返し）が有効
- ・ 落水の効果を十分に得るためには、中干しをしっかりと行うことが重要

【解説】

【落水によるコメ中ヒ素の低減効果及び品質への影響】

同一ほ場において、出穂 3 週間前から出穂 3 週間後にかけて様々な落水期間の水管理によるコメ中ヒ素の低減効果を確認したところ、落水期間を長くとした場合においてコメ中ヒ素を顕著に低減することが明らかになりました。落水期間を 5 日間以上とした場合には、品質に悪影響が出る場合があります（表 8）。

表 8 異なる水管理を実施した場合の玄米中無機ヒ素濃度、収量、整粒比（農林水産省研究委託事業）

年度	試験区 (水管理)	無機ヒ素濃度 (mg/kg)	玄米収量 (kg/10a)	整粒比
2013	湛水区	0.319 ab	568 a	68.9 a
	3 湛 1 落および 4 湛 1 落区	0.337 a	570 a	70.0 a
	3 湛 3 落および 4 湛 3 落区	0.273 b	572 a	69.8 a
	3 湛 5 落および 4 湛 5 落区	0.208 c	560 a	68.1 a
2014	湛水区	0.226 a	490 a	78.0 a
	3 湛 3 落区	0.154 b	491 a	75.5 ab
	3 湛 5 落区	0.114 c	484 a	73.2 b
2015	湛水区	0.248 a	515 a	75.3 a
	3 湛 4 落-1 区	0.133 b	531 a	74.8 a
	3 湛 4 落-2 区	0.119 b	507 a	74.3 a

年度別に Tukey 検定、同一年度・同一処理内で異符号は有意差有。4 地点で実施。

3 湛 4 落-1 区は、湛水期間を通じて十分な田面水深が維持されるようにかんがい；

3 湛 4 落-2 区は、強制落水時の落水量を減らすためにほ場の日減水深を考慮してかんがい水量を加減

2014 年度の 3 湛 5 落区で整粒比が湛水区より劣った。

【ヒ素低減に有効な間断かんがい期間の検証】

様々な土壌や気候条件における検証として、全国のべ 30 ほ場において出穂 3 週間前から出穂 3 週間後、常時湛水と 3 日間湛水・4 日間落水を繰り返す間断かんがい（以下「3 湛 4 落」という。）の水管理を行った場合の玄米中無機ヒ素濃度を比較したところ、3 湛 4 落は湛水と比較して玄米中の無機ヒ素濃度が有意に低くなる結果が得られました（図 16）。このことから、3 湛 4 落は様々な環境で有効なヒ素低減技術と考えられます。

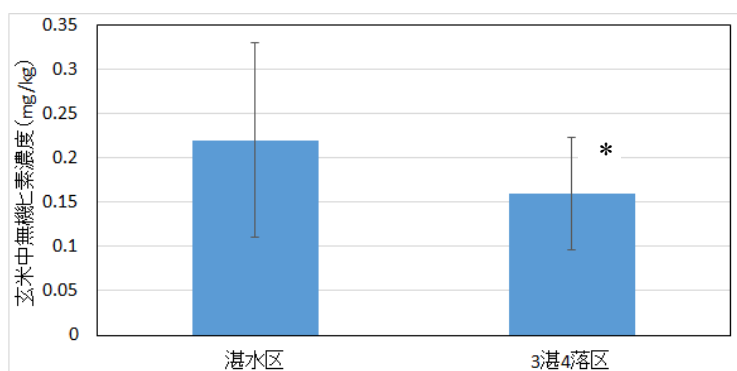


図 16 全国のべ 30 ほ場で湛水管理と 3 湛 4 落を行った場合の玄米中無機ヒ素濃度（農林水産省研究委託事業）

* ウィルコクソンの符号付き順位和検定（ $p < 0.05$ ）で有意差あり。バーは標準偏差。

収量及び一部の品質項目については、常時湛水と3湛4落で、統計学的に有意な差がみられたものの、いずれの項目もその差は大きくありませんでした（表9）¹⁶。

表9 水管理別の生育、収量、品質の統計量（一部データ欠損あり）（農林水産省研究委託事業）

項目	試験区 (水管理)	データ数	平均値	中央値	標準偏差	有意差 ^{**}	効果量 ^{***}
出穂日の遅れ（日数） (湛水区を基準にした3湛4落区)		64	0.09	0	0.4	—	
精玄米重（kg/10 a）	湛水区	64	552	541	77	あり	0.16
	3湛4落区	64	539	535	83		
穂数（本/m ² ）	湛水区	63	398	380	83	なし	
	3湛4落区	63	394	376	83		
稈長（cm）	湛水区	63	84.5	85.2	8.3	なし	
	3湛4落区	63	83.9	84.2	8.0		
粒長（mm）	湛水区	61	5.10	5.11	0.10	なし	
	3湛4落区	61	5.10	5.12	0.10		
粒幅（mm）	湛水区	61	2.86	2.87	0.06	あり	0.00
	3湛4落区	61	2.86	2.85	0.07		
粒厚（mm）	湛水区	57	2.02	2.02	0.08	なし	
	3湛4落区	57	2.01	2.02	0.07		
玄米千粒重（g）	湛水区	64	22.5	22.5	1.0	あり	0.10
	3湛4落区	64	22.4	22.4	1.1		
整粒粒比	湛水区	63	71.6	75.0	14.4	なし	
	3湛4落区	63	71.2	74.3	15.2		
食味（食味計スコア）	湛水区	59	77.9	78.5	7.5	あり	0.12
	3湛4落区	59	78.8	78.7	7.1		

*ウィルコクソンの符号付き順位和検定（ $p < 0.05$ ）

**Cohen's *d*

【より簡易な間断かんがい方法の検討】

3湛4落より簡易な水管理方法として、出穂3週間前から出穂3週間後にかけて4日間の落水を3回行う水管理（落水3回）を検討したところ、落水3回は3湛4落と同程度の玄米中無機ヒ素低減効果が見られました（図17）。

また、収量・品質への影響は、常時湛水区と比較してほとんど認められませんでした（図18）。

このことから、落水3回についても有効なヒ素低減技術と考えられます（図19）。

¹⁶ 解析に用いた試料の数（サンプルサイズ）によらず、2群間の差が実質的に意味があるかどうかを判断するために、Cohen's *d* という効果量を求めた。*d* が0.2未満であれば実質的な差は小さい、と評価される。

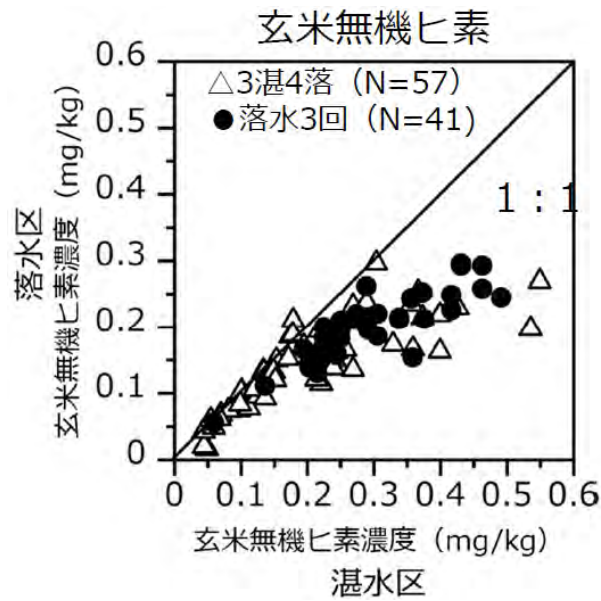


図 17 3 湛 4 落と落水 3 回を行った場合の玄米中無機ヒ素低減効果（農林水産省研究委託事業）

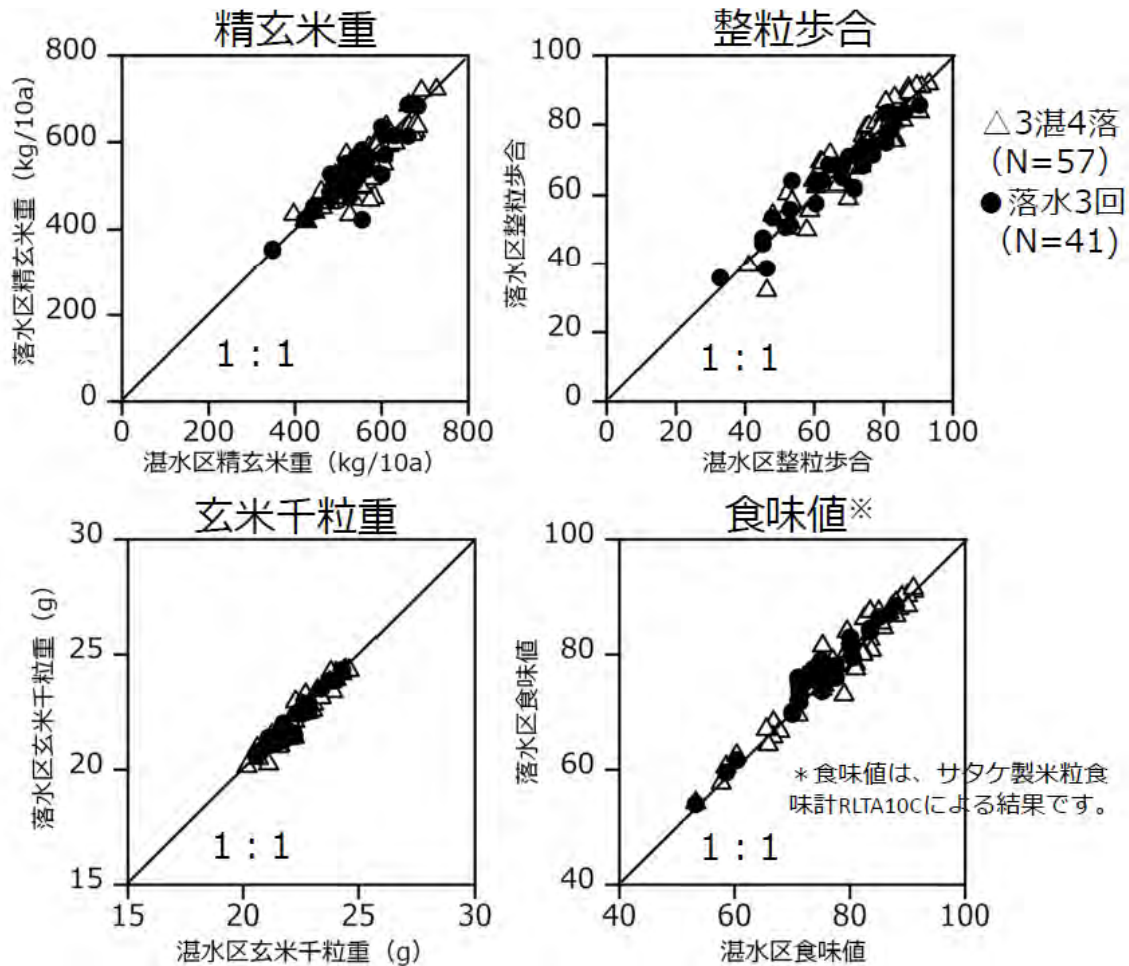


図 18 3 湛 4 落と落水 3 回を行った場合の収量・品質への影響（農林水産省研究委託事業）
※同一ほ場内に「湛水区」と「3 湛 4 落区」、「落水 3 回区」を設けて比較

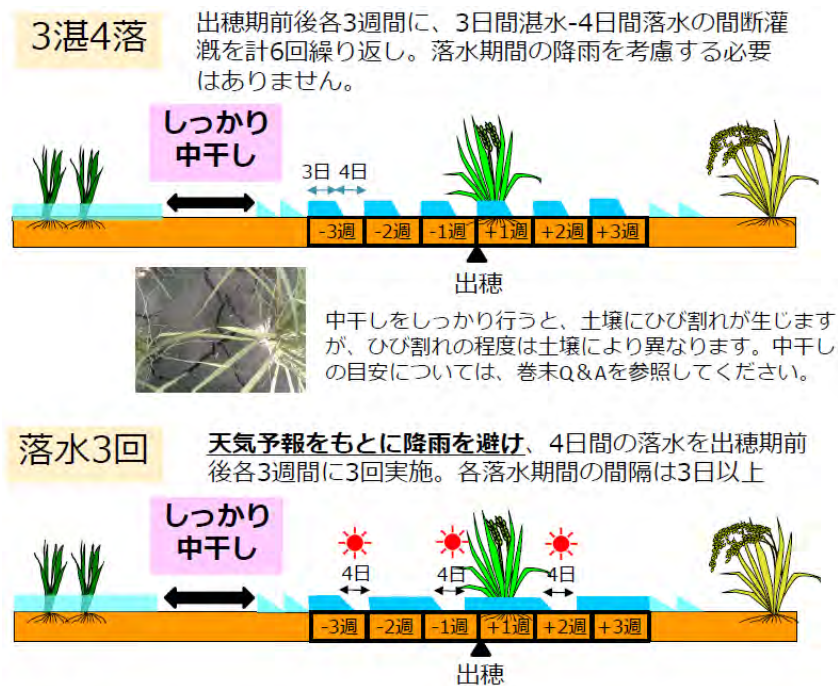


図 19 出穂 3 週間前から出穂 3 週間後にかけて湛水と落水を繰り返す間断かんがいのイメージ

【落水時の留意点】

落水期間の設定によるコメ中ヒ素低減の効果を確実に得るには、以下の点に留意する必要があります。

- ・ 落水時に確実に排水されるように、ほ場の溝切りを確実に行う（作土層と鋤床層の境界の深さまで）。溝の末端は必ず水尻の排水溝につなげる。
- ・ 落水時に隣接ほ場からの水の浸透がないように畔を管理する。
- ・ 落水時に土壌の乾燥と酸化の進行がほ場内でムラが生じないように、ほ場の均平をとる。
- ・ 土壌の性質によるが、落水期間中に降雨がなければ、4 日間落水すると田面はヒビが入る程度乾く（図 20）。
- ・ 湛水によるヒ素の溶出を低く抑えるために、中干しをしっかりと行う※（図 21、図 22）。

※ 地域において一般的に中干しを実施している時期に、断続的な 4 日間の無降雨日の後、連続した 4 日間の無降雨日となった場合に十分な効果が確認されました。

- ・ 落水 3 回については、天気予報をもとに降雨を避けて実施する。4 日間の落水期間中に降雨があれば、降雨や湛水の程度に応じて、落水期間を延長する（表 10）。
- ・ 過度の落水はコメの収量・品質の低下を引き起こすおそれがあるため、排水過良水田では、収量・品質に悪影響が出ないように落水回数を調節しながら玄米中無機ヒ素の低下を目指す必要がある。

- ・高温障害や冷害が懸念される状況下においては収量・品質に悪影響が出る可能性がある。

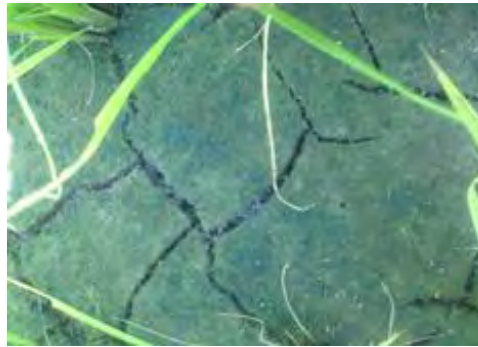


図 20 落水 4 日目の田面の様子（例）
（土壌が乾く過程でひび割れが生じますが、その程度は土壌によって異なります。）

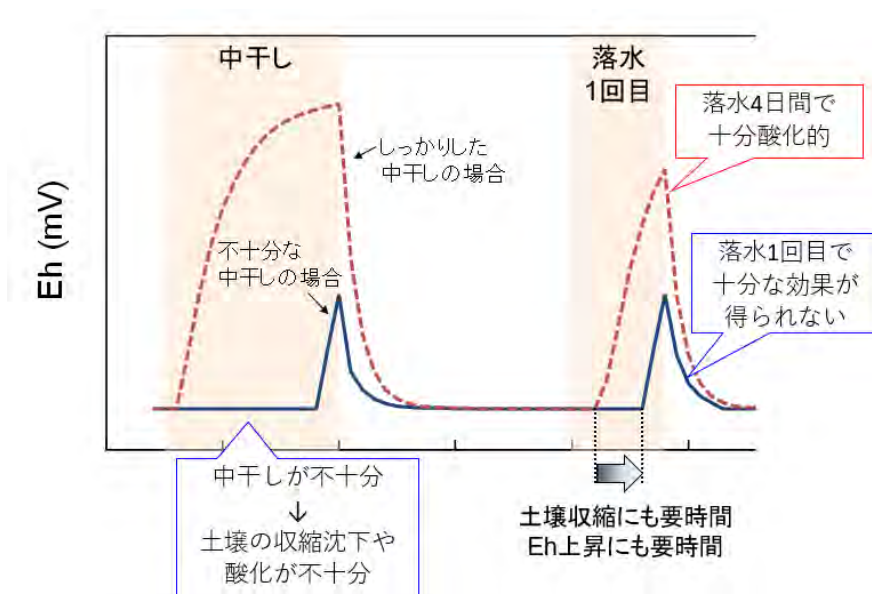


図 21 中干しの程度による土壌中 Eh の変化（農林水産省研究委託事業）

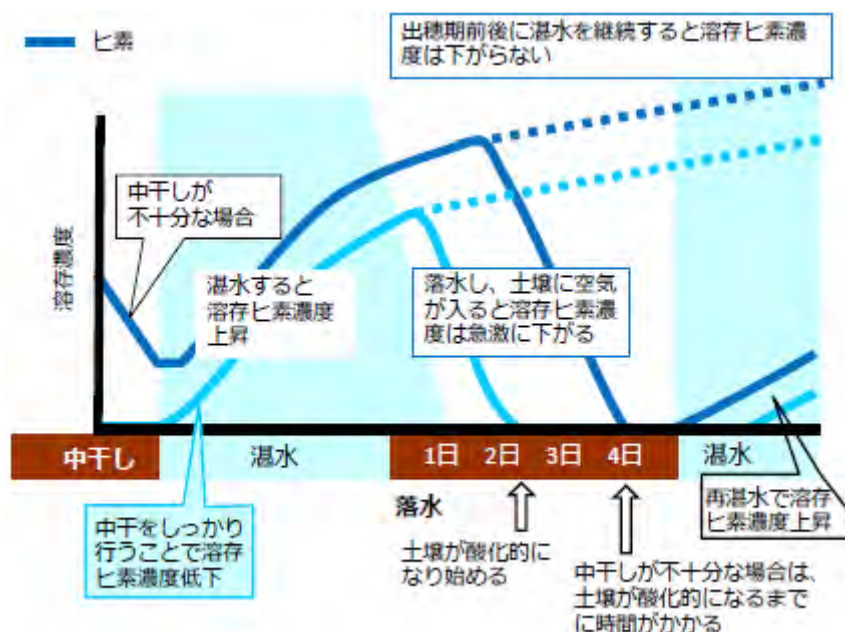


図 22 中干しの程度による溶存ヒ素濃度の変化（農林水産省研究委託事業）

表 10 落水期間中に降雨があった場合の期間延長の目安（想定例）

延長落水期間	目安
4 日延長	落水 3 日経過後、それ以前の降雨により、土壌が再湛水した場合
3 日延長	落水 3 日経過後、それ以降の降雨により、土壌が再湛水した場合
降雨 1 日につき、1 日延長	土壌が再湛水しなかった場合

4.2.3 好気的な水管理の導入に向けて、今後対応すべき問題

- ・ 生産現場での好気的な水管理の効果の検証と普及
- ・ ヒ素低減効果及び現場導入の観点からの実効性の向上

【解説】

【生産現場での好気的な水管理の効果の検証と普及】

水田は場の排水性が良すぎる場合（排水過良田）には、3 湛 4 落の間断間隔では土壌が乾きすぎることがあるので、湛水期間を長くしたり、間断の頻度を高くしたりする必要があります。また、逆に排水性が悪く（排水不良田、湿田）土壌が十分乾かない場合には、落水の期間を長くする必要があります。

このため、土壌中の気相率や Eh を指標としつつ、最終的には栽培されるコメ中ヒ素濃度の低減効果をもとに、生産現場の土壌条件に応じた湛水と落水間隔を検証・設定していく必要があります。

【ヒ素低減効果及び現場導入の観点からの実効性の向上】

湛水と落水を繰り返すことは、農業者の労力負担、用水量の確保、用排水施設等の条件から普及が難しい地域も想定されます。特に、入排水のための水尻の開閉作業は、農道からほ場を挟んで反対側にある排水路側まで畦畔を歩いて往復する作業となるため労力負担が相当程度増える場合があることが想定されます。

今後、生産現場で好氣的な水管理が利用できるようにするためには、求められるヒ素低減効果が得られる落水時期と落水回数を探索し、必要最小限の回数としたり、入水作業のみで落水作業が不要な水管理作業など現場で適用しやすい技術を構築したりしていくことが必要です。さらに、水管理の自動化による対応など、現場においてより簡易に実施できる対策技術の検証が求められます。

また、1ヘクタールを超えるような大規模ほ場では、入排水のタイミングとほ場の酸化還元状態の変化が過去の検証結果と異なる可能性があることから、間断かんがいの効果の検証が必要です。

さらに、地域によっては、高温時の品質・収量の低下回避技術や、逆に低温対策としての出穂期前の深水かんがいとの両立を検討する必要があります。

【産地におけるヒ素低減技術の実証】

各産地における効果の検証や実行性の向上のための実証に取り組む際に採すべきデータについてまとめました（表 11）。試験の目的に応じて、分析項目を追加することが望ましいです。

表 11 ヒ素低減の効果を検証する際に取得すべきデータ

採取するデータの種類	データ取得のタイミング、方法	留意点
玄米中の無機ヒ素濃度	1 区画内から 5 箇所ですべて採取し、試料を合わせて分析する。	無機ヒ素の分析が困難であれば、総ヒ素を分析
土壌溶液中のヒ素濃度	間断かんがい期間中に、定期的又は落水期間終了時に採取する。ファイバー式溶液採取器を用いて真空集液管に採取するのが簡易である。	落水期間終了時（入水直前）が最も土壌が酸化していると考えられる。
土壌中 1 mol/L 塩酸抽出ヒ素濃度	土壌は栽培開始前に採取する。（51 ページコラム参照）	実証するほ場で無機ヒ素濃度が高くなりやすいか判断の材料となる。
土壌中の気相率	TDR 計による体積含水率測定値から求める。	落水直後（土壌が水で飽和）の体積含水率との差から計算。
土壌の酸化還元電位（Eh）	あらかじめ白金電極を土壌に挿入しておき、栽培期間中の任意の時期に測定。	水管理によって土壌の酸化還元状態がどのように変化しているかの指標となる。
湛水時の減水深	中干しの前後に測定する。	

その他、生育・収量、気象項目（特に気温と降水量）、水管理履歴などを試験の目的にあわせて記録する。

4.4 で記載するとおり、カドミウムのリスクが懸念される地域では、あわせて玄米及び土壌中のカドミウムも測定する。

4.3 ヒ素とトレードオフの関係にあるカドミウムへの対応

4.3.1 ヒ素とカドミウムのトレードオフの関係

- ・ 土壤中のヒ素の溶出を抑えるため土壌を酸化的な条件にすると、土壤中のカドミウムが溶出しやすくなる(トレードオフの関係)
- ・ 現時点では、コメ中カドミウム濃度の上昇防止の観点から間断かんがいの落水期間は4日間程度が適当
- ・ ただし、コメ中カドミウム濃度が高くなりやすい地域では、4日間の落水でもカドミウム濃度が高くなるほ場があるため、注意が必要

【解説】

土壤中のカドミウムは、土壤中のヒ素が溶出しやすい還元的な条件では難溶性の硫化カドミウムとして存在しますが、土壤中のヒ素の溶出が抑えられる酸化的な条件ではカドミウムイオン (Cd^{2+}) として溶出します(図23)。

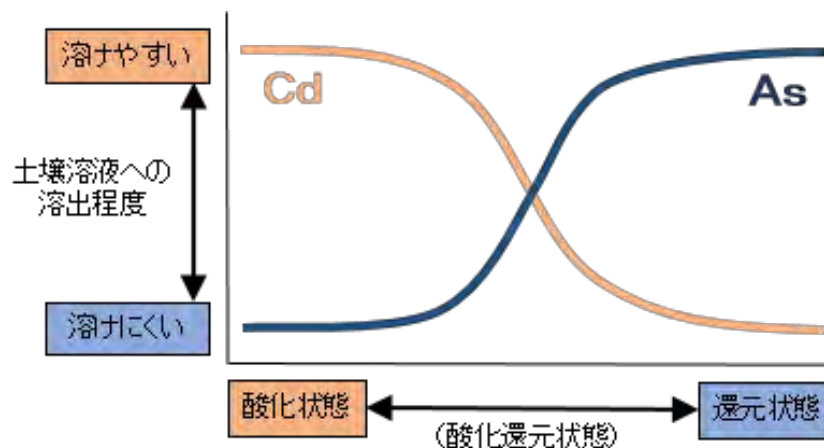


図23 カドミウム、ヒ素の土壌での溶けやすさと土壌の酸化還元状態との関係の模式図

このため、ヒ素対策として落水期間を設定した好氣的な水管理を導入した場合、カドミウムの溶出を引き起こすおそれがあります。実際に同一のほ場で水管理を変えて栽培してみると、ヒ素の低減効果の向上のために落水期間を長めに設定すると玄米中のカドミウム濃度が高くなる場合がみられました(図24)。このように、一方の危害要因を抑制するための対策により、他方の危害要因が増加する関係にある場合をリスクトレードオフの関係と呼ぶことがあります。現時点では、収量や品質に加え、コメ中カドミウム濃度の上昇防止の観点からも間断かんがいの落水期間は4日間程度が適当と考えられます(図24)。

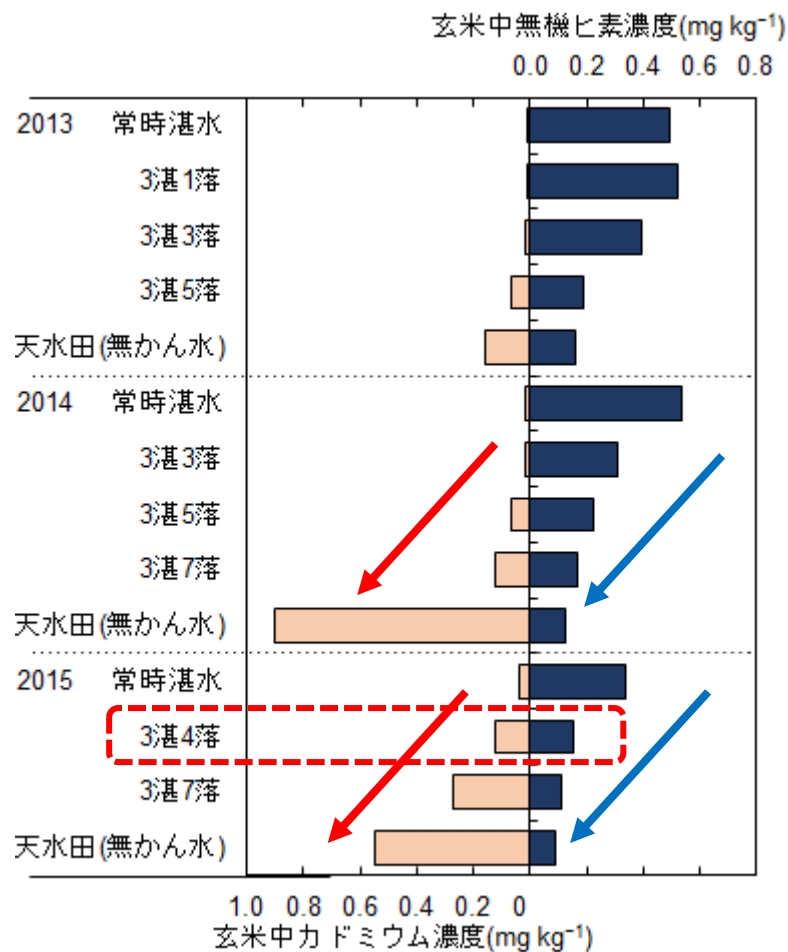


図 24 同一試験ほ場で水管理を変えた場合の玄米中カドミウム濃度（左向き）と無機ヒ素濃度（右向き）（農林水産省研究委託事業）

ただし、一部のほ場では、玄米中のカドミウム濃度が上昇する場合があります。ほ場の特性や排水性の違いを考慮し、土壌が酸化的になりすぎてコメ中カドミウムの濃度が上昇しないよう注意が必要です。農林水産省の実証試験では、常時湛水では玄米中のカドミウム濃度が低いものの、ヒ素低減のための間断かんがい（3 湛 4 落）を行うと玄米中のカドミウム濃度が顕著に高くなるほ場が一部にありました（図 25）。

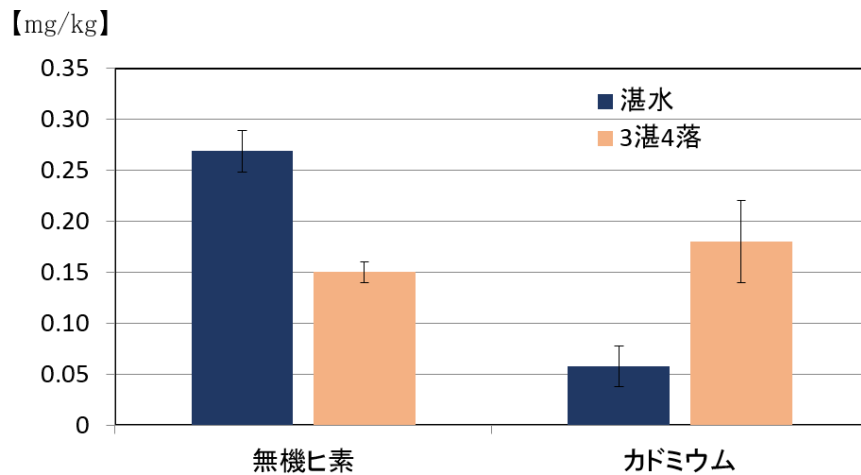


図 25 間断かんがいにより玄米中のカドミウム濃度が高まったほ場の例（農林水産省研究委託事業）

4.3.2 カドミウム低吸収性イネの利用

・カドミウム低吸収性イネの利用により、コメ中のカドミウム濃度を高めることなくコメ中の無機ヒ素を低減できる

【解説】

栽培管理や水管理によらず、土壌中のカドミウムをほとんど吸収しない、カドミウム低吸収性イネの品種育成が進んでいます。農林水産省では「コメ中のカドミウム低減のための実施指針（平成 30 年 1 月改訂）」において、カドミウム低吸収性イネの育成・実証と早期普及を図ることとしています。

農林水産省が複数のほ場で、カドミウム低吸収性イネであるコシヒカリ環一号を用いて水管理を変えて行った試験では、コメ中のカドミウム濃度を低く抑えたまま、コメ中の無機ヒ素濃度を低減できました（図 26）。

このため、コメ中カドミウム濃度が高くなりやすい地域でヒ素を低減するには、好氣的な水管理に加え、カドミウム低吸収性イネの利用を組み合わせることが効果的です。

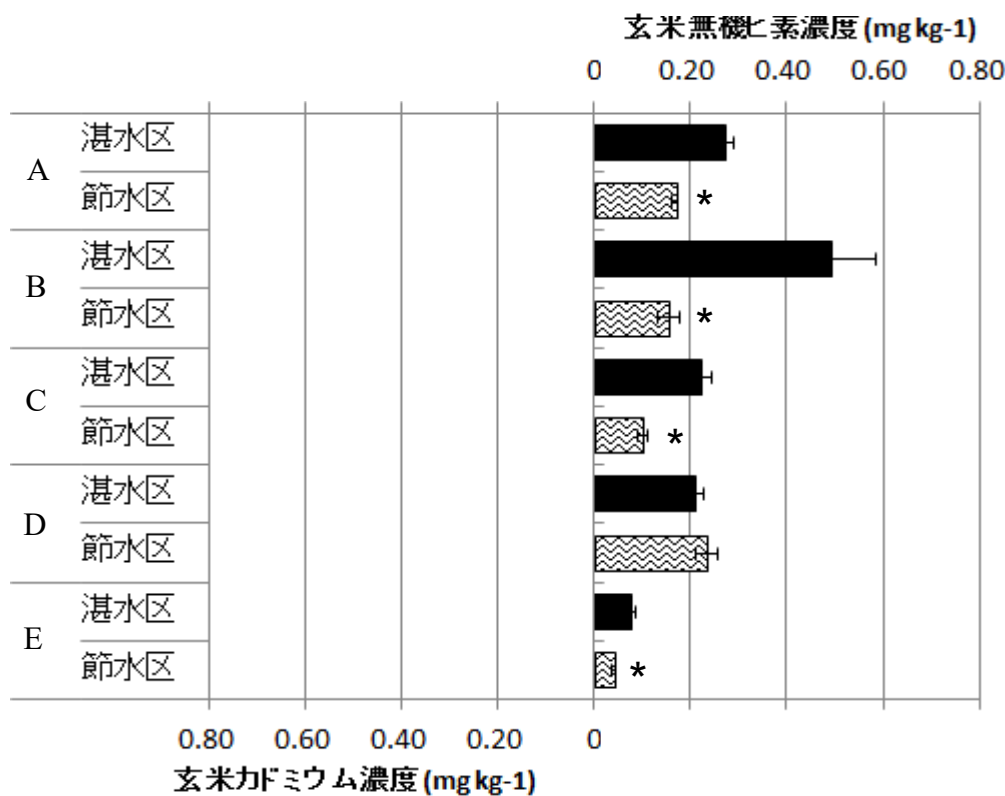
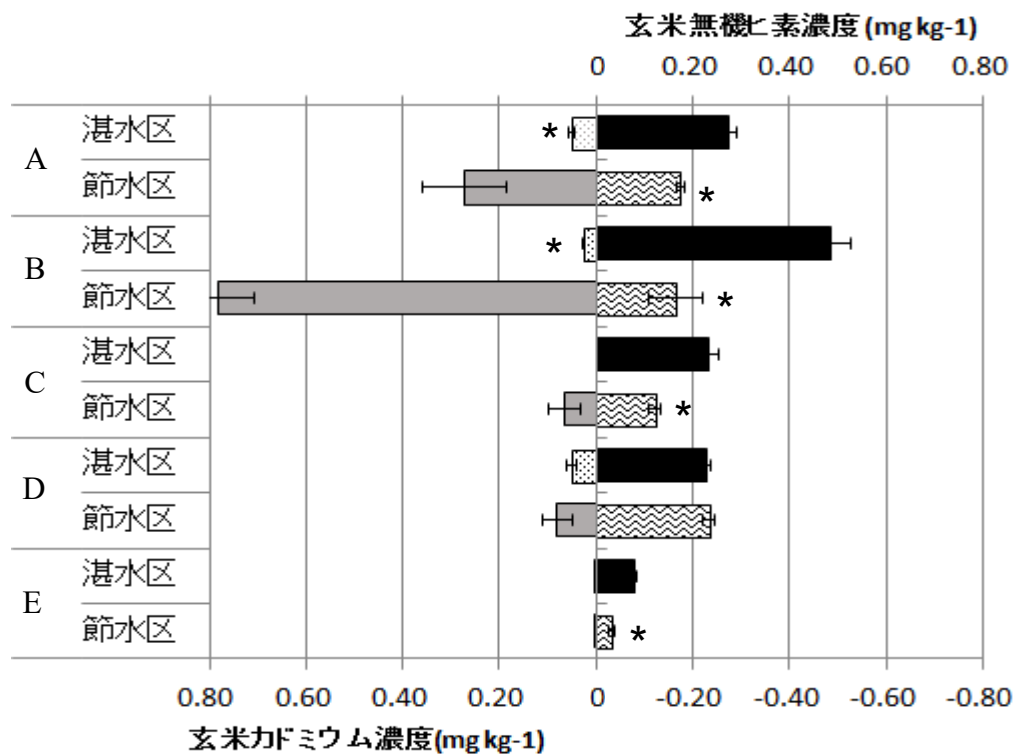


図 26 複数のほ場(A～E)でコシヒカリ(上図)及びコシヒカリ環1号※(下図)を用いて水管理を変えて栽培した場合の、玄米中無機ヒ素及びカドミウム濃度(Ishikawa et al., 2016 を一部改変)

* : 統計学的に有意に低い (有意水準 5%)

※ 生育特性、収量、外観、食味等がコシヒカリとほぼ同等で、土壌中のカドミウムをほとんど吸わない品種 (カドミウム低吸収性イネ)

湛水区 : 常時湛水处理区、節水区 : 土壌表面に乾燥が見え始めたら、入水する節水管理

カドミウム低吸収性イネ品種について

カドミウム低吸収性イネ品種については、(独)農業環境技術研究所(当時。現農研機構)により、コシヒカリを基にして突然変異により作出された「コシヒカリ環1号」(登録番号第24338号、品種登録日 平成27年5月20日)が育成されました。

また、コシヒカリ環1号を育種素材として用い、地域に適したイネ品種にカドミウム低吸収性遺伝子を導入することで、カドミウム低吸収性イネの新品種の育成が進んでいます。カドミウム低吸収性遺伝子を他の品種に効率よく導入できるよう、DNA マーカーが開発され、これを利用した選抜方法のマニュアル※ が作成・公表されています。既に農研機構や各地方自治体において、100 種類以上のカドミウム低吸収性イネ品種・有望系統の育成・開発が進んでおり、農林水産省もイノベーション創出強化研究推進事業により既存品種へのカドミウム低吸収性を導入した品種の開発等を支援しています。これまで、開発されたカドミウム低吸収性イネ品種は、既に 10 品種以上が品種登録出願されています。

※ 「「コシヒカリ環1号」の判別マーカーによるハイスループットな DNA マーカー選抜実験プロトコル ver1.0 -DNA 抽出から電気泳動まで-」(平成27年3月 農業環境技術研究所土壌環境研究領域)

農林水産省は、カドミウム低吸収性イネの普及拡大を図るため、各都道府県にカドミウム低吸収性を付与したイネの育成・普及を促すとともに、今後、農研機構において自ら育成する主要な食用品種にカドミウム低吸収性の付与を進めていくこととしております。

4.4 資材施用を中心とする吸収抑制技術

- ・ ゼロ価鉄、水酸化鉄資材、製鋼スラグの多量施用により玄米中の無機ヒ素濃度の低減傾向がみられるが、導入に当たってはコスト面を考慮することが必要

【解説】

土壌中のヒ素は主に土壌中の鉄鉱物に吸着されることから、含鉄資材の投入によるヒ素の溶出阻害効果が期待されています。また、水稻はケイ酸の輸送体を介して亜ヒ酸を吸収することから、ケイ酸資材の施用が、ケイ酸と亜ヒ酸の拮抗作用をとおして、イネの根からのヒ素の吸収を抑制すると期待されています¹⁷。

試験ほ場で、ゼロ価鉄資材（10アールあたり1トン）、水酸化鉄資材（同1トン）、製鋼スラグ（同2トン）の投入による無機ヒ素の吸収抑制効果を常時湛水の条件で検証したところ、玄米中の無機ヒ素濃度の低減効果が大きな順に、ゼロ価鉄資材＞水酸化鉄資材＞製鋼スラグでした（投入初年度）（図27）。ただし、検証した資材の投入量は10アールあたり1トンから2トンと多量であること、最も低減効果が高かったゼロ価鉄資材は資材価格が高い（1トンあたり約10万円）ことに留意が必要です。

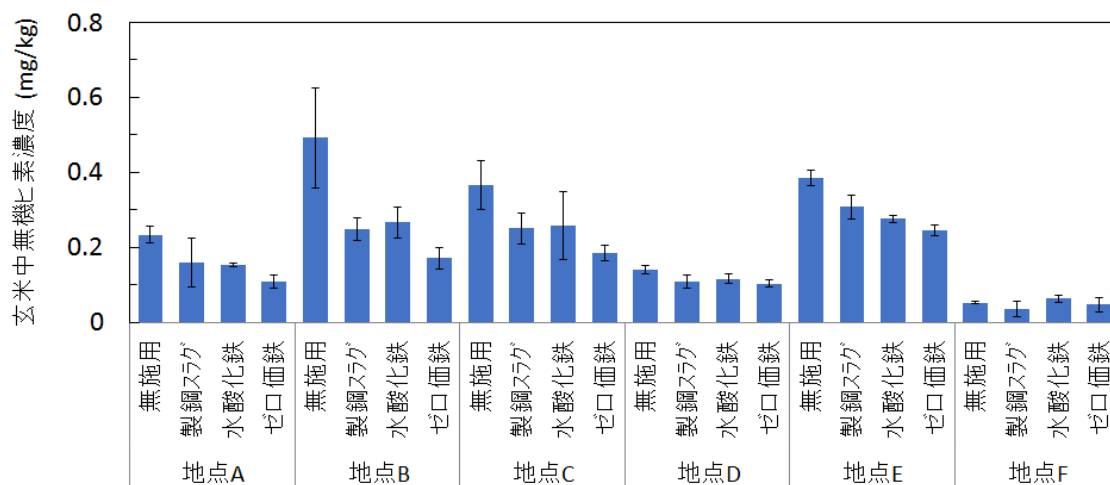


図27 含鉄資材多量投入による玄米中無機ヒ素及びカドミウムの低減効果（施用初年）（農林水産省研究委託事業）

土壌特性と気象条件の異なる6ほ場で、耕うん直前に製鋼スラグ（2トン/10a）、水酸化鉄（1トン/10a）、ゼロ価鉄（2トン/10a）をほ場に直接施用した（各3反復）。出穂3週間前から出穂3週間後にかけて常時湛水で栽培した。

¹⁷ 例えば Meharg & Zhao (2012)の pp. 147-148 に解説がある。

玄米中無機ヒ素の濃度レベルと含鉄資材施用による玄米中無機ヒ素濃度の低減率には正の相関があり、玄米中無機ヒ素濃度が 0.1 mg/kg 以下では、低減効果は小さくなりました（図 28）。

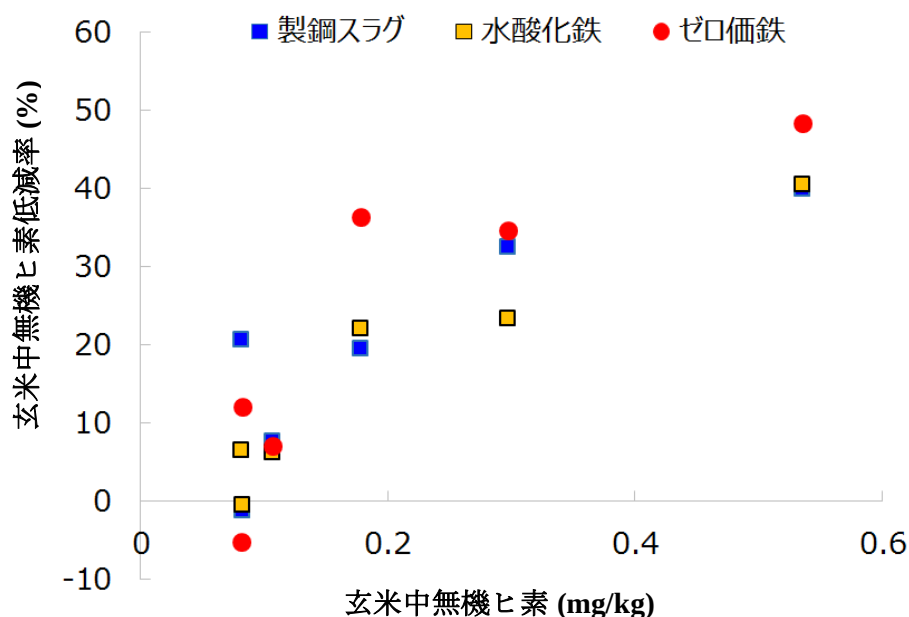


図 28 資材無施用区の玄米中無機ヒ素濃度と鉄資材多量投入による玄米中無機ヒ素低減率との関係（農林水産省研究委託事業）

含鉄資材を投入して 2 年目の結果。玄米無機ヒ素低減率（%）＝（1－各鉄資材施用区の玄米無機ヒ素濃度 / 資材無施用区の玄米無機ヒ素濃度）×100

【含鉄資材施用によるヒ素低減効果の持続】

含鉄資材の投入後、玄米中の無機ヒ素濃度の低減効果は徐々に低下しましたが、7 年目まで 10%程度低減させる効果が持続されました（表 12）。

表 12 鉄資材多量投入による玄米中無機ヒ素低減効果の持続性（玄米無機ヒ素低減率（%）の経年変化）（農林水産省研究委託事業）

資材の種類		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
製鋼スラグ (2 トン/10a)	平均	22.6	24.1	20.6	20.0	16.4	—	7.1
	最大	49.3	39.9	32.8	28.1	20.5	—	14.0
	最小	-3.6	7.6	10.8	13.7	11.6	—	0
水酸化鉄 (1 トン/10a)	平均	30.5	24.7	17.2	16.4	14.1	—	11.8
	最大	45.9	40.5	26.6	21.1	22.3	—	27.0
	最小	18.9	6.2	8.3	10.5	2.3	—	7.0
ゼロ価鉄 (1 トン/10a)	平均	44.1	29.2	18.1	16.3	11.6	—	10.5
	最大	65.2	48.3	28.5	29.7	17.0	—	23.0
	最小	13.8	5.2	5.2	4.8	6.3	—	0

鉄資材を 2013 年に投入後、追加投入無しで 2019 年まで継続栽培した（2013～2017 年：n=8、2019 年：n=6）。

【含鉄資材施用の収量・品質への影響】

含鉄資材を施用したほ場における精玄米の収量や品質については、無施用の時と比較しても影響はありませんでした（図 29）。

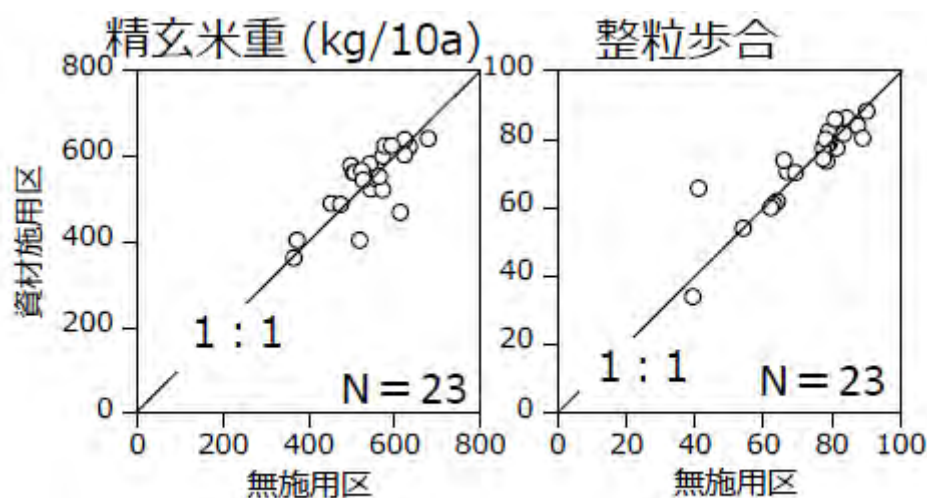


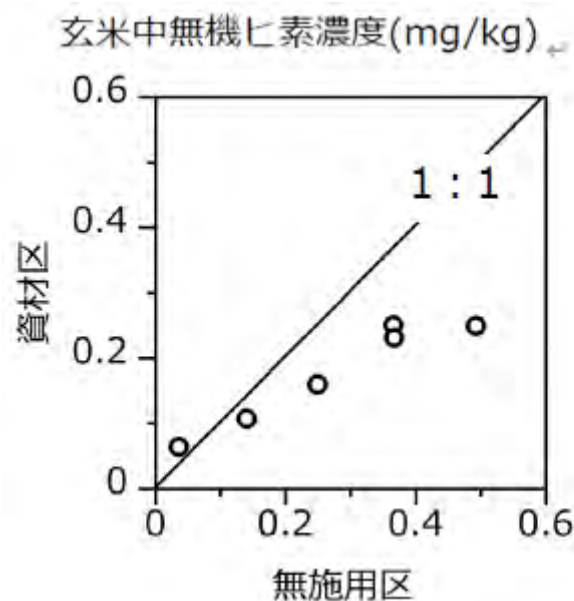
図 29 含鉄資材施用による精玄米重量及び整粒歩合への影響（農林水産省研究委託事業）

【湛水管理下での資材施用の効果】

コメ中のカドミウム濃度が高い地域においては、出穂 3 週間前から出穂 3 週間後にかけての湛水管理が推奨されています¹⁸。その場合、コメ中の無機ヒ素濃度が高くなるため、カドミウム低吸収性品種を導入した上で好氣的な水管理を行うなどの対策を導入することが推奨されますが、生産地域に適した対策が無い可能性があります。そのような場合において、含鉄資材を施用することにより、コメ中の無機ヒ素濃度を 20%から 40%程度低減できる可能性があります。

また、含鉄資材による効果は、コメ中の無機ヒ素濃度が高くなるようなほ場ほど高くなる傾向にありました（図 30）。

¹⁸ コメ中のカドミウム低減のための実施指針（平成 23 年 8 月（平成 30 年 1 月改訂）、農林水産省）



※含鉄資材を 2t/10a を投入し、6 ほ場にて試験

図 30 含鉄資材によるコメ中無機ヒ素濃度の低減効果（農林水産省研究委託事業）

上記のように、資材の多量施用によるコメ中ヒ素濃度の低減効果があり、また施用後 7 年目まで効果が持続することが認められました。地域によって入手可能な含鉄資材は異なることから、低減効果の大きさや費用との兼ね合いから、生産現場で実施できるか判断する必要があります。

また、通常の営農で施用される資材の種類と量でコメ中の無機ヒ素低減に効果があれば、生産現場において実行性のある低減技術として期待できます。特に製鋼スラグは、鉄と同様にコメ中の無機ヒ素濃度を低減させる可給態のケイ酸を多く含み、資材価格も比較的安価であり、既に広く水稻作に利用されています。そのため、通常の施用量（200kg/10a）によるコメ中無機ヒ素濃度の低減効果を検証しているところです。

4.5 加工によるコメ中の無機ヒ素の低減効果

- ・ 玄米をとう精すると無機ヒ素濃度が低くなる
- ・ とう精した白米を洗米(米とぎ)すると無機ヒ素濃度はさらに低くなり、無洗米処理でも洗米と同等の効果が得られる

【解説】

コメ中の無機ヒ素はぬか層に偏在していることから、玄米を精米にとう精することにより、無機ヒ素の低減が期待されます¹⁹。

農林水産省が調査した結果によれば、精米歩合が 90%以下になると減少傾向が小さくなり、精米の価値等を考えると通常の精米歩合以下までとう精することは現実的な低減方法とはいえないことがわかりました（表 13）。逆に、とう精を緩くした場合（五分搗き、精米歩合 95%）には、通常の精米と比べて無機ヒ素濃度の減少効果も半分程度（濃度減少率が 12～25%）でした（表 14）。

表 13 玄米をとう精したときのとう精後のコメ中の無機ヒ素濃度の減少率（農林水産省調査結果）

精米歩合	試料数	無機ヒ素濃度減少率※（%）	
		平均	範囲
91%	10	51	38-61
89%	10	53	39-61
80%	10	60	49-69

※玄米の無機ヒ素濃度を 100%とした場合の減少率

表 14 通常のとう精（精米歩合 90%）と五分搗き（精米歩合：95%）の場合の無機ヒ素濃度（玄米を 100 とする）の減少率（Naito et al., 2015 から作成）

精米歩合	試料 A（玄米無機ヒ素濃度：0.43 mg/kg）	試料 B（玄米無機ヒ素濃度：0.21 mg/kg）	試料 C（玄米無機ヒ素濃度：0.04 mg/kg）
95%	25	25	12
90%	49	37	29

とう精した白米を洗米（いわゆる「米とぎ」）すると、無機ヒ素が低減することが知られています。農林水産省が実施した研究では、白米をイオン交換水で 3 回洗米した後の洗米中の無機ヒ素の濃度は、洗米前に比べて 20%程度低くなりました。玄米では、洗米してもほとんど無機ヒ素濃度は低くなりませんでした（図 31）。

¹⁹ 玄米は白米と比べてビタミン B₁ やビタミン E などが豊富に含まれた優れた食品である。

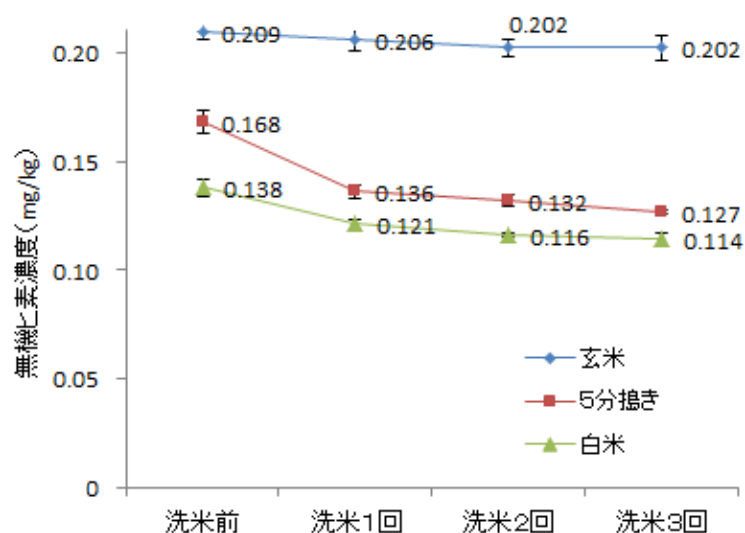


図 31 コメの洗米回数とヒ素低減効果 (Naito et al., 2015 から作成)
バーは 2 併行分析 3 反復の標準偏差 (n=6)

洗米のかわりに無洗米処理をしても、米とぎと同様に無機ヒ素濃度が低くなります。白米を無洗米処理すると、無機ヒ素濃度は、10%程度低くなりました (表 15)。

表 15 無洗米加工によるコメ中無機ヒ素の濃度変化 (Naito et al., 2015 を一部改変)

加工の種類	(単位:mg/kg)	
	平均値 ^{注 3)}	標準偏差
玄米	0.208	0.004
90%精米 ^{注 1)}	0.131	0.003
無洗米 ^{注 2)}	0.119	0.001

注 1) 精米歩合 90 %は目安 (実測値なし)

注 2) 無洗米加工はヌカ式 (BG 精米製法)

注 3) 5 反復試験結果、n=2 点併行×5 回加工

4.6 今後、対応すべき課題

これまで4章で言及した低減技術に関して今後対応すべき課題を以下に整理しました。農林水産省では、研究機関や都道府県等の協力を得て、さらに現場で使いやすいコメ中の無機ヒ素低減技術の研究を進めています。都道府県等においても、これらの課題解決も含めた各地域の実態に応じたコメ中無機ヒ素の低減対策の確立や実証等を進めることが期待されます。

好気的な水管理によるヒ素吸収抑制技術

○現場レベルでの様々な条件下でのヒ素低減効果の実効性の向上

- ・ 落水時の湿田でのヒ素低減効果の発現や排水過良田での落水期間中の過乾燥による水稻の生育への影響回避に向けた落水期間・適期の検討
- ・ 大規模ほ場でのヒ素低減効果の確認
- ・ 高温時の落水による品質・収量への影響の回避に向けた落水条件の設定
- ・ 低温対策としての深水かんがいとの両立

○落水期間の設定に伴う労力負担の軽減

- ・ 落水回数の削減に向けたヒ素低減に効果的な時期の把握と落水回数の探索
- ・ 排水作業せずに入水作業のみで落水期間の設定と同じ効果が得られる水管理方法の探索
- ・ 省力化に向けた自動水管理システムの効果検証と普及

○コメ中カドミウム濃度が高くなりやすい地域への対応

- ・ 好気的な水管理との組合せに必要なカドミウム低吸収性イネの育成と早期普及

資材施用を中心とする吸収抑制技術

○ヒ素吸収抑制技術としての資材の施用とコストの両立

- ・ ケイ酸質肥料や含鉄資材を通常施用した際のヒ素低減効果の検証

5 その他のコメ中ヒ素濃度に影響がある要因

コメ中のヒ素は、土壌から溶出したヒ素が水稻に吸収されたものですが、その溶出や吸収は、土壌の酸化還元の状態に加え、そもそもの由来である土壌中ヒ素の量やその他の環境要因に大きく左右されます。これらの関係が明らかになれば、ヒ素低減の対策を講じる際の参考になると考えられます。

5.1 水田土壌中のヒ素含有実態

農林水産省が実施した水田土壌の調査結果によれば、1 mol/L 塩酸で抽出したヒ素の濃度（1 mol/L 塩酸抽出土壌ヒ素濃度）²⁰は、全試料の平均で 2.3 mg/kg DW、中央値で 1.7 mg/kg DW でした（図 32）。

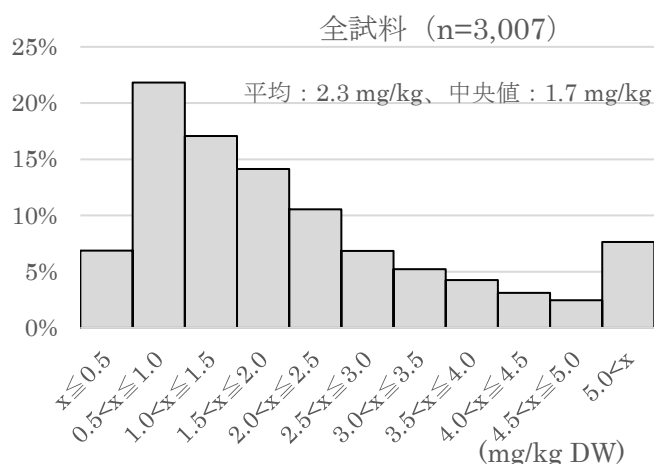


図 32 全国の水田土壌中のヒ素濃度の分布（2013～2016 年）（農林水産省調査結果）

水田ほ場の作土層を採取し、1 mol/L 塩酸で抽出。試料は 1 ほ場から 5 点对角線法で採取。土壌中ヒ素濃度は乾土あたりの濃度（以下同じ）。

また、農耕地土壌の土壌群別²¹に整理した 1 mol/L 塩酸抽出土壌ヒ素濃度は表 16 のとおりでした。

²⁰ 1 mol/L 塩酸抽出土壌ヒ素濃度は、当該土壌で生育した水稻の減収程度との関係性が高く、「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律（昭和 45 年 12 月 25 日法律 139 号）」における対策地域の指定要件に係る（土壌中の）ヒ素の量の検定にも用いられている。このほかに、土壌中のヒ素濃度（含有量）の評価方法には、濃硫酸や濃硝酸などの強酸による分解で得られる全ヒ素を測定する方法や、各種の抽出溶液で抽出して得られたヒ素を測定する方法がある。

²¹ 「農耕地土壌分類第 2 次案」による。

表 16 土壌群別土壌中ヒ素濃度（農林水産省調査結果）

土壌群	試料点数	1 mol/L 塩酸抽出土壌ヒ素濃度（mg/kg DW）				
		平均	25 パーセンタイル	中央値	75 パーセンタイル	90 パーセンタイル
全体	3007	2.3	1.0	1.7	2.9	4.6
灰色低地土	1041	2.0	0.9	1.5	2.5	3.8
グライ土	953	2.8	1.1	2.1	3.7	5.8
多湿黒ボク土	250	1.9	1.0	1.5	2.3	3.4
褐色低地土	197	2.5	1.1	1.9	3.3	4.6
黄色土	118	1.5	0.6	1.0	1.7	2.8
泥炭土	100	2.7	1.7	2.3	3.4	4.4
灰色台地土	76	1.8	0.9	1.6	2.4	3.7
黒泥土	63	2.9	1.1	2.1	3.8	5.4
黒ボク土	60	1.5	0.9	1.2	1.9	3.0
グライ台地土	46	2.3	1.1	2.0	3.1	4.2
黒ボクグライ土	45	1.7	1.0	1.4	2.4	3.3
褐色森林土	28	1.3	0.7	1.1	1.8	2.4

注：土壌群は地域の試験場等に確認するなどして可能な範囲で特定したが、実際に土壌を採取したほ場ごとに判定したわけではない。

ほ場からの土壌の採取方法

コメ中の無機ヒ素は土壌に由来していることから、適切にリスク管理を行うためには、ほ場土壌中のヒ素含有実態を把握することが重要です。一方で、ほ場内の土壌は均一ではないことから、そのほ場を代表するデータを取得するための適切な土壌の採取方法を選択する必要があります。データを取りたい測定対象によって、ほ場内のばらつきの程度は異なることが知られています。そこで、土壌中のヒ素濃度についてほ場内でどの程度のばらつきがあるか把握する調査を実施しました。

複数の一般ほ場で4mメッシュで土壌試料を採取及び測定し、その結果から3点法²²や5点法²³で試料採取した場合の、1 mol/L 塩酸抽出土壌ヒ素濃度の95%信頼区間の幅を推定しました。その結果、推定された信頼区間幅は、ほ場内の全体平均に対して5点法で30～40%程度、3点法で60～80%程度になりました（表17）。これは、矢内ら（2008）が報告した全炭素や全窒素、交換性Ca、Mg、K、可給態リン酸などでの変動と同程度でした。

試料採取にかかる手間と得られるデータの信頼性のバランスを考慮すると、ほ場内の土壌ヒ素含有実態を調査する場合は、5点法による試料の採取が適当だと考えられます。また、その場合は得られた測定値には95%信頼区間の幅として30～40%（±15～20%）程度を伴うと認識しておく必要があります。

表17 現地ほ場から土壌を採取して1 mol/L 塩酸で抽出したヒ素濃度（農林水産省研究委託事業）

	〇〇圃場	N5圃場	N6圃場	H1圃場
サンプル数	90	96	64	75
平均(mg kg ⁻¹)	7.71	8.36	6.06	0.77
標準偏差(mg kg ⁻¹)	1.30	1.22	0.92	0.09
5点サンプリング時の 95%信頼区間 (mg kg ⁻¹)	9.32 ～ 6.09	9.87 ～ 6.85	7.20 ～ 4.92	0.89 ～ 0.66
区間幅の平均に対する 割合(%)	42%	36%	38%	30%
3点サンプリング時の 95%信頼区間 (mg kg ⁻¹)	10.94 ～ 4.47	11.38 ～ 5.34	8.34 ～ 3.78	1.00 ～ 0.54
区間幅の平均に対する 割合(%)	84%	72%	75%	59%

ほ場を4mメッシュで分割し、土壌試料を採取。1 mol/L 塩酸で抽出しヒ素濃度を測定。

²² 農用地土壌汚染防止法に基づく対策地域の指定要件にかかる銅やヒ素の量の検定の際にも試料採取方法として用いられる。

²³ 農用地土壌汚染防止法に基づく対策地域の指定要件にかかるカドミウムの量の検定の際にも試料採取方法として用いられる。

5.2 土壌中ヒ素濃度の影響

- ・ コメ中無機ヒ素濃度は、土壌中ヒ素濃度とは単純な相関はないが、土壌の塩酸抽出ヒ素濃度が高いほど、無機ヒ素濃度の高いコメが生産される可能性が高い

【解説】

コメ中のヒ素は土壌中のヒ素に由来することは明らかですが、日本全国のは場から採取した土壌とそのは場で生育したコメについて調査したところ（調査点数：約 3,000 点）、コメ中無機ヒ素濃度と土壌中のヒ素濃度との間に明確な相関はみられませんでした（図 33）。これは、コメ中無機ヒ素濃度には、土壌中のヒ素濃度に加え、土壌の酸化還元状態、土壌中の鉍物等の含有量、栽培条件（気象、水管理、施肥、病虫害等）、生育する水稻のヒ素吸収能力等の様々な要因が影響しているためと考えられます。

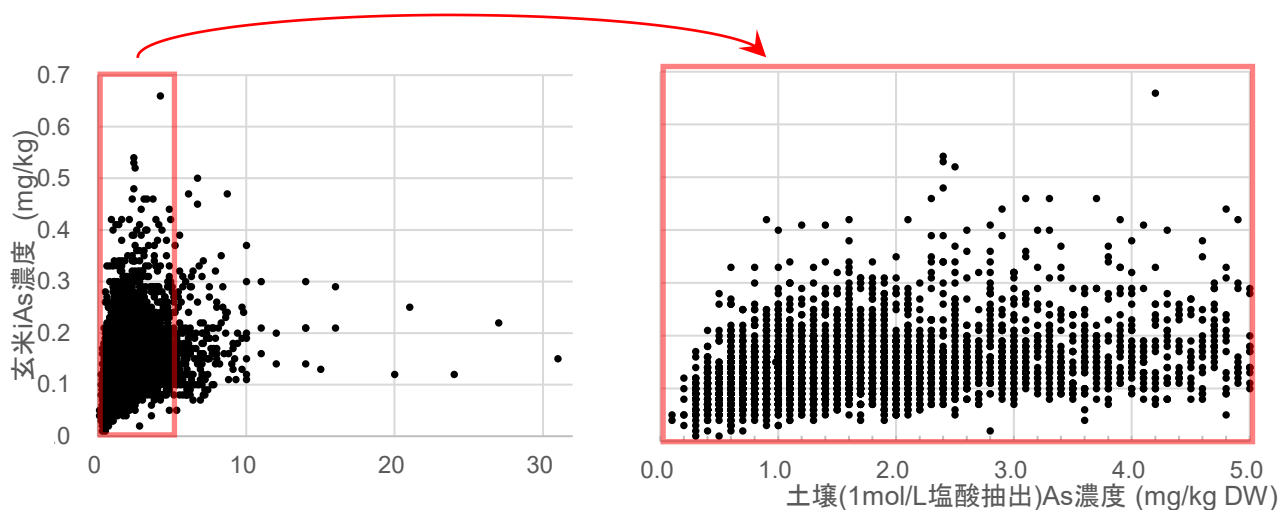
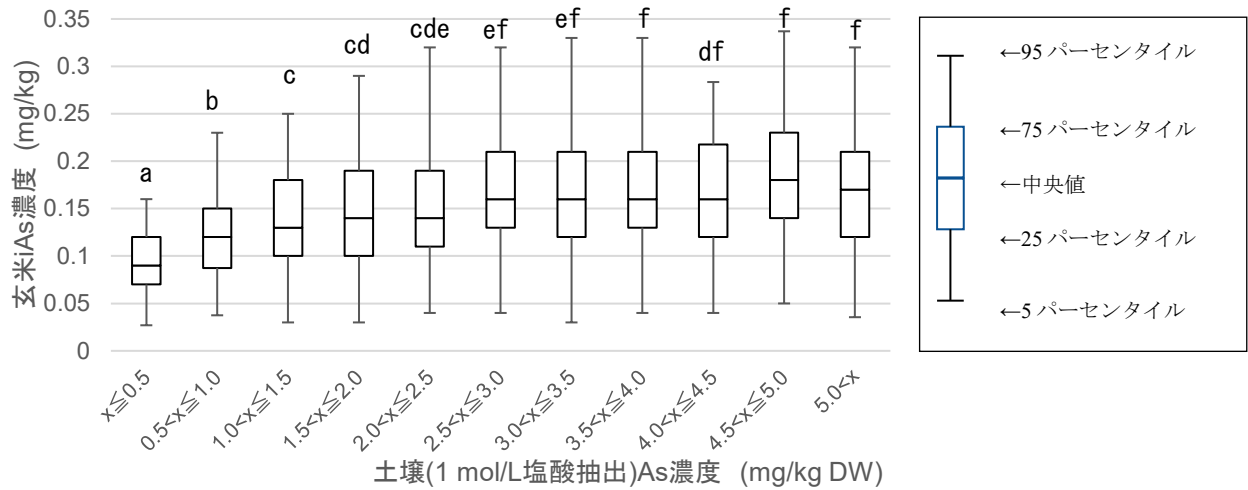


図 33 土壌中 1 mol/L 塩酸抽出ヒ素濃度と玄米中無機ヒ素濃度の関係性（農林水産省調査結果）

一方で、土壌中のヒ素濃度区分ごとに、生産された玄米中の無機ヒ素濃度の分布をみると、土壌中ヒ素濃度が高くなると、玄米中の無機ヒ素濃度分布が高濃度側に移動し、95 パーセンタイルや 75 パーセンタイルの濃度も高くなることとなりました（図 34）。



Steel-Dwass 法による多重比較を行い、有意に異なる階級間には異なる記号を付した。（有意水準 5%）

図 34 土壌中 1 mol/L 塩酸抽出ヒ素濃度 0.5 mg/kg 毎に区切った際の各階級の玄米中無機ヒ素濃度分布（農林水産省調査結果）

ヒ素の水稲の生育への影響について

土壌中ヒ素濃度が高くなると農作物の生育が阻害される可能性があります。土壌中ヒ素は湛水により土壌が還元状態になると溶出しやすいため、水田で悪影響が顕著であることが知られています。具体的には、山根（1989）は、ヒ素汚染現地ほ場において、土壌の 1 mol/L 塩酸抽出ヒ素濃度と水稲の収量の間には負の相関が認められており、15 mg/kg（ppm）で約 10%の減収だったと報告しています（表 18）。15 mg/kg は、農作物の生育阻害を防止する観点で設定された、農用地の土壌の汚染防止等に関する法律に基づく対策地域の指定要件と一致しています。

表 18 土壌の可溶性ヒ素（1 mol/L 塩酸抽出ヒ素）濃度と水稲の減収率（山根（1989））

可溶性ヒ素 (ppm)	10	15	20	30	50	80	120
収量(kg/a)	42.3	40.7	39.2	36.0	29.8	20.4	8.0
減収率(%)	6.9	10.3	13.7	34.3	34.3	55.1	82.4

5.3 土壌中ヒ素濃度以外の環境要因の影響とモデル化

- ・ 土壌中ヒ素濃度のほかに、登熟期間中の気温や土壌の可溶性鉄／アルミニウム、リン酸吸収係数もコメ中ヒ素濃度に影響
- ・ 得られたモデル式は、コメ中無機ヒ素濃度が高くなる可能性が高い地域を予測する参考として活用できる

【解説】

コメ中無機ヒ素濃度を規定する要素を特定するため、コメ中の無機ヒ素濃度とそのコメが生育した土壌理化学性データを解析しました。さらに、登熟期間の日平均気温とコメ中無機ヒ素濃度に正の相関があることが報告されていることから (Arao et al., 2018)、平均気温もデータ解析の対象に追加しました。

その結果、玄米中無機ヒ素濃度を推定する2つのモデルが求められました。モデル1は、「土壌中塩酸抽出ヒ素濃度」、「0.2 mol/L 酸性シュウ酸塩抽出非晶質鉄濃度」、「0.2 mol/L 酸性シュウ酸塩・0.1 mol/L アスコルビン酸抽出アルミニウム濃度」「出穂後2～4週間の日平均気温の平均」が有意な要因として特定されました。モデル2は、「土壌中塩酸抽出ヒ素濃度」、「リン酸吸収係数」、「出穂後2～4週間の日平均気温の平均」が有意な要因として特定されました。

モデル1

玄米

$$\log(iAs_BR) = -3.850145 + 0.306520 \log(As_HCl) - 0.124597 \log(Fe) - 0.186943 \log(Al) + 0.099383 (Ta_14-27)$$

精米

$$\log(iAs_PR) = -4.673170 + 0.249734 \log(As_HCl) - 0.096775 \log(Fe) - 0.165134 \log(Al) + 0.113775 (Ta_14-27)$$

モデル2

玄米

$$\log(iAs_BR) = -3.747270 + 0.305654 \log(As_HCl) - 0.339723 \log(Pabs) + 0.097282 (Ta_14-27)$$

精米

$$\log(iAs_PR) = -4.615421 + 0.250553 \log(As_HCl) - 0.275585 \log(Pabs) + 0.112210 (Ta_14-27)$$

$\log(x)$ はxの自然対数

iAs_BR：玄米中無機ヒ素濃度 (mg/kg)

iAs_PR：精米中無機ヒ素濃度 (mg/kg)

As_HCl：土壌中ヒ素濃度 (1 mol/L 塩酸抽出) (mg/kg)

Fe：土壌中铁濃度 (0.2 mol/L 酸性シュウ酸塩抽出) (g/kg)

Al：土壌中アルミニウム濃度 (0.2 mol/L 酸性シュウ酸塩・0.1 mol/L アスコルビン酸抽出) (g/kg)

Ta_14-27：出穂後14～27日の日平均気温の平均値 (°C)

Pabs：リン酸吸収係数：(g P₂O₅/kg)

予測力は十分高いとはいえないものの、これらのデータをモデルに入れることで、コメ中無機ヒ素濃度を予測できることから、コメ中無機ヒ素濃度が高くなる可能性が高い地域やほ場を予測する参考になると考えられます。ただし、実際に無機ヒ素濃度が高いコメが生産されるか否かの最終的な判断は、現物（生産されたコメ）を分析しておこなう必要があります。

環境要因と水稻のヒ素吸収との関係

回帰分析により、各要因が結果に与える影響を解釈するためには、解析により得られたモデルが示す影響の方向性が既存の理論と整合していることが重要です。今回解析に用いた環境要因とイネによるヒ素の吸収に与える影響の関係を既存の研究をもとに整理すると表 19 のとおり整理できます。

表 19 土壌の理化学性がコメ中ヒ素濃度にあたえる作用（想定）

環境要因	作用(仮説含む)	環境要因に関係するパラメータ	パラメータの増加に対するコメ中ヒ素濃度の反応
土壌中ヒ素	水稻へのヒ素の供給	土壌中のヒ素濃度(塩酸抽出)	増加
土壌中铁鋳物	土壌中でヒ素を吸着	土壌中の鉄濃度(非晶質鉄)(シュウ酸抽出)	減少
土壌中アルミニウム鋳物	土壌中でヒ素を吸着	土壌中のアルミニウム濃度(シュウ酸塩・アスコルビン酸抽出)	減少
リン酸吸収力	土壌中で(リン酸と同様に)ヒ素を吸着(鉄鋳物やアルミニウム鋳物を仲介して)	リン酸吸収係数	減少
登熟期間気温	蒸散による導管を通じたヒ素の転流の増加、(地温上昇を通じた)土壌還元促進	出穂後 2-4 週の平均気温	増加

参考文献

- Arao, Tomohito, et al. "Effect of air temperature after heading of rice on the arsenic concentration of grain." *Soil Science and Plant Nutrition* 64.3 (2018): 433-437.
- ATSDR. 2007. Toxicological profiles for Arsenic
- Bralatei, Edi, et al. "Detection of inorganic arsenic in rice using a field test kit: a screening method." *Analytical chemistry* 87.22 (2015): 11271-11276.
- Chaney, Rufus L., Carrie E. Green, and Steven J. Lehotay. "Inter-laboratory validation of an inexpensive streamlined method to measure inorganic arsenic in rice grain." *Analytical and bioanalytical chemistry* (2018): 1-8.
- EFSA. 2009. Scientific Opinion - Arsenic in Food of the EFSA Panel on Contaminants in Food Chain.
- Honma, Toshimitsu, et al. "Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains." *Environmental science & technology* 50.8 (2016): 4178-4185.
- Ishikawa, Satoru, et al. "Low-cadmium rice (*Oryza sativa* L.) cultivar can simultaneously reduce arsenic and cadmium concentrations in rice grains." *Soil science and plant nutrition* 62.4 (2016): 327-339.
- JECFA (1983) Evaluation of certain food additives; twenty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.
- JECFA (2010) Evaluation of certain food additives; seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.
- JECFA (2011) Evaluation of certain food additives; seventy-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.
- Kuramata, Masato, et al. "Arsenic accumulation and speciation in Japanese paddy rice cultivars." *Soil science and plant nutrition* 57.2 (2011): 248-258.
- Meharg, A. A., & Zhao, F. J. (2012). *Arsenic & rice*. Springer Science & Business Media.
- Naito, Shigehiro, et al. "Effects of polishing, cooking, and storing on total arsenic and arsenic species concentrations in rice cultivated in Japan." *Food chemistry* 168 (2015): 294-301.
- Nakamura, Ken, et al. "Air-Filled Porosity as a Key to Reducing Dissolved Arsenic and Cadmium Concentrations in Paddy Soils." *Journal of environmental quality* 47.3 (2018): 496-503.
- Ukena, Takanori, et al. "Speciation and determination of inorganic arsenic in rice using liquid chromatography-inductively coupled plasma/mass spectrometry: Collaborative study." *Journal of AOAC International* 97.3 (2014): 946-955.
- 内閣府食品安全委員会. "化学物質・汚染物質評価書 食品中のヒ素" (2013)
- 内閣府食品安全委員会. "食品中のヒ素に関する Q&A"
<http://www.fsc.go.jp/fsciis/evaluationDocument/show/kya2009031900k>
- 矢内純太ら. "土壌診断のための水田土壌の合理的サンプリング法の検討: 土壌のサンプリング頻度とデータの信頼性との関係." *日本土壌肥科学雑誌*

誌 79.1 (2008): 61-67.

- ・ 山根忠昭. "水稻におけるヒ素被害の発生機構と対策." 島根県農業試験場研究報告 24 (1989): p1-95.

(別添) コメ中ヒ素の汚染防止、低減のための実施規範の日本語仮訳(未定稿)

CODE OF PRACTICE FOR THE PREVENTION AND REDUCTION OF ARSENIC CONTAMINATION IN RICE	コメ中ヒ素の汚染防止、低減のための実施規範
1. INTRODUCTION	1. はじめに
1.1 Arsenic is a toxic metalloid that may be found in various foods, including rice. Soil in rice paddy fields can contain naturally occurring arsenic and also can be polluted by irrigation water, rain and air that are contaminated with arsenic from anthropogenic sources such as mining and smelting and materials for agricultural and livestock production. Rice plants absorb arsenic from soil, especially when soil is in reducing conditions, and accumulate it in grain and straw. Rice may contain inorganic arsenic (arsenite and arsenate) and organic arsenic (monomethylarsonic acid and dimethylarsinic acid).	1.1 ヒ素は、米を含む様々な食品中に見出される毒性のある半金属である。水田土壌には、天然に存在するヒ素が含まれている可能性があり、鉱業や製錬などの人為起源のヒ素や農業生産や家畜生産の資材で汚染されたかんがい用水、雨、空気によって汚染される可能性もある。イネは、特に土壌が還元条件下にある時に土壌からヒ素を吸収し、子実や茎葉に蓄積する。コメは無機ヒ素（亜ヒ酸とヒ酸）と有機ヒ素（モノメチルアルソン酸とジメチルアルシン酸）を含む場合がある。
1.2 The effectiveness of measures in the Code of Practice can vary depending on local environmental conditions (e.g. soil properties, management regimes and, temperature). Field studies should be conducted to identify measures that are feasible and effective for local or regional conditions. If possible, the field studies should be conducted across crop years because arsenic uptake in rice crops is highly variable from year to year. Implementation of measures that unnecessarily restrict supply of rice to the market should be avoided.	1.2 実施規範における措置の有効性は、各地域の環境条件（例：土壌特性、管理体制、温度）によって異なる可能性がある。地域や広域の状況に適した実行性の高い有効な手段を特定するために、ほ場試験を実施すべきである。イネによるヒ素の取り込みは年により大きく変動するため、可能であれば、ほ場試験は複数年にわたって行われるべきである。米の市場への供給を不必要に制限する措置の実施は避けるべきである。
2. SCOPE	2. 適用範囲
2.1 The Code intends to provide national or relevant food control authorities, producers, manufacturers and other relevant bodies with guidance to prevent and reduce arsenic contamination in rice as follows: (i) Source directed measures; and (ii) Agricultural measures	2.1 本実施規範は、米のヒ素汚染を防止及び低減するための指針を、国または適切な食品監視当局、生産者、製造業者及びその他関連機関に以下のガイダンスを提供することを意図している。 (i) 排出源対策

	(ii) 農業技術対策
2.2 The Code also includes guidance on monitoring and risk communication.	2.2 この規範には、モニタリングとリスクコミュニケーションに関する指針も含む。
3. DEFINITIONS	3. 定義
3.1 Paddy rice(rice grain) is rice (species <i>Oryza sativa</i> L.) which has retained its husk after threshing (GC 0649 ¹). ¹ Classification of Foods and Animal Feeds (CXM 4-1989)	3.1 水稻コメ（コメ穀粒）とは、脱穀後にもみ殻を残したコメ（学名 <i>Oryza sativa</i> L.）とする。
3.2 Husked rice (brown rice or cargo rice) is paddy rice from which the husk only has been removed. The process of husking and handling may result in some loss of bran (CM 0649 ¹).	3.2 玄米は、もみ殻のみが除かれた水稻コメとする。もみすり調製の過程で、ぬかがいくらか損失する可能性がある。
3.3 Polished rice (milled rice or white rice) is husked rice from which all or part of the bran and germ have been removed by milling (CM 1205 ¹).	3.3 精米（白米）は、ぬか及び胚芽のすべてまたは一部が除去された米である。
3.4 Arsenic is a metalloid and is found in the environment both from natural occurrence and from anthropogenic activity. Note: In this paper, the term “arsenic” refers to inorganic and organic arsenic.	3.4 ヒ素は半金属であり、天然起源と人為的活動の両方から環境中に見出される。 注：この文書では、「ヒ素」という用語は無機及び有機ヒ素を示す。
3.5 Organic arsenic is an arsenic compound that contains carbon, including monomethylarsonic acid and dimethylarsinic acid.	3.5 有機ヒ素は、炭素をもつヒ素化合物で、モノメチルアルソン酸及びジメチルアルシン酸を含む。
3.6 Inorganic arsenic is an arsenic compound that does not contain carbon. Arsenite (As(III)) and Arsenate (As(V)) are the inorganic arsenic compounds typically found in rice. Inorganic arsenic is considered the significant toxic form of arsenic in rice.	3.6 無機ヒ素は炭素を含まないヒ素化合物である。亜ヒ酸（As（III））及びヒ酸（As（V））は、米に見出される典型的な無機ヒ素化合物である。無機ヒ素は、イネのヒ素の主要な毒性形態と考えられている。
3.7 Flooded condition is a condition in which a paddy field is filled or covered with water during growth.	3.7 湛水条件とは、水田が栽培期間中に用水で満たされたり覆われたりする状態である。
3.8 Aerobic condition of soil is a condition in which a paddy field, where rice is grown, is well drained, non-flooded or unsaturated.	3.8 好氣的な条件は、イネが栽培されている水田がよく排水されて

	いる、湛水されていない、又は水分で飽和していない条件である。
3.9 Intermittent ponding means a variety of possible water management practices in which a paddy field is alternately in flooded and aerobic/non-flooded condition.	3.9 間断かんがいとは、水田が湛水条件と好氣的/非湛水状態に交互におかれる様々な水管理の方法を意味する。
4. MEASURES TO PREVENT AND REDUCE ARSENIC CONTAMINATION	4. ヒ素汚染を防止し、低減するための措置
4.1 Inorganic arsenic is the most toxic form of arsenic in rice. Measures to reduce arsenic levels (e.g. aerobic growth) may affect inorganic and organic arsenic differently. The most important goal is to reduce inorganic arsenic levels in rice.	4.1 無機ヒ素は、コメ中で最も毒性の強い形態のヒ素である。ヒ素濃度を減少させるための手段（例：好気条件での栽培）は、無機ヒ素及び有機ヒ素に異なる影響を及ぼす可能性がある。最も重要な目標は、コメの無機ヒ素濃度を下げることである。
4.2 Measures to prevent and reduce arsenic contamination in rice are recommended particularly on highly contaminated areas. National or relevant food control authorities may consider implementing the measures in Section 4.3 as a priority. The measures in Section 4.4 may be implemented if necessary.	4.2 コメのヒ素汚染を防止し低減するための措置は、特に高濃度に汚染されている地域で推奨される。国や関連する食品管理当局は、4.3 項の措置を優先して実施することを検討すること。必要であれば、4.4 の措置を実施すること。
4.3 Source Directed Measures	4.3 排出源対策
4.3.1 Sources of arsenic in the environment are: 1) natural sources, including volcanic action, elution from soil or sediment such as Holocene sediments, geogenic weathering and low temperature volatilization; and 2) anthropogenic sources, including emission from industries, especially from mining and smelting of non-ferrous metals; burning of fossil fuels; use of arsenic pesticides; and disposal of timber treated with copper chrome arsenate (CCA). In the paddy environment, use of soil amendments and fertilizers contaminated with significant concentration of arsenic are also sources of arsenic ² .	4.3.1 環境中のヒ素排出源は、1) 自然由来—火山活動、土壌または完新世などの堆積物からの溶出、地質の風化及び低温揮発; 2) 産業由来—特に鉱業及び非鉄金属の製錬からの排出;化石燃料の燃焼;ヒ素を含む農薬の使用;クロム銅ヒ素化合物系木材防腐剤 (CCA) で処理した木材の廃棄。水田環境では、高濃度のヒ素で汚染された土壌改良材及び肥料の使用もヒ素の排出源となる ² 。
² Many fertilizers contain trace levels of arsenic. “Contaminated” should not be interpreted as equivalent to trace levels of arsenic.	² 多くの肥料は微量のヒ素を含む。「汚染された」というのは、微量のヒ素と同義と理解されるべきではない。

4.3.2 National or relevant food control authorities should consider implementation of source directed measures in the Code of Practice concerning Source Directed Measures to Reduce Contamination of Foods with Chemicals (CXC 49-2001). In particular, authorities can consider whether measures in the following areas are appropriate for their countries: - <u>Irrigation water:</u> • Identification of irrigation water with high arsenic concentration. • Reduction of arsenic from irrigation water with high arsenic concentration. • Avoidance of use of irrigation water with high arsenic concentration for rice production. - <u>Paddy field:</u> • Identification of paddy fields in which arsenic concentration in soil is high and/or where rice with a high concentration of inorganic arsenic is produced. - <u>Identification and control of potential sources of arsenic:</u> • Atmospheric emissions and waste water from industries. • Materials used in agricultural and livestock production such as pesticides, veterinary medicines, feed, soil amendments and fertilizers. • Waste (such as timber treated with copper chrome arsenate).	4.3.2 国家または関連する食品管理当局は、「化学物質による食品汚染を低減するための排出源対策に関する実施規範」(CXC 49-2001) の実施を検討すべきである。特に、当局は、以下の分野における措置が自国にとって適切かどうかを検討することができる。 <u>かんがい用水：</u> • ヒ素濃度の高いかんがい用水の識別。 • ヒ素濃度の高いかんがい用水からのヒ素の削減。 • ヒ素濃度の高いかんがい用水を米生産に使用しないこと。 <u>水田：</u> • 土壌中のヒ素濃度が高く、かつ/または無機ヒ素濃度が高い米が生産されている水田の特定。 <u>潜在的なヒ素源の特定と管理：</u> • 産業からの大気排出と廃水。 • 農薬、動物用医薬品、飼料、土壌改良材、肥料などの農業及び畜産で使用される材料。 • 廃棄物 (CCA 処理木材など)。
4.4Agricultural Measures	4.4 農業技術対策
4.4.1 National or relevant food control authorities should educate rice producers about practices to prevent and reduce arsenic concentration in rice. Education programmes may include: - Publishing and disseminating technical guidance on rice cultivation techniques to reduce arsenic in rice. - Establishing farmer field schools.	4.4.1 国または関連する食品管理当局は、米のヒ素汚染を防止し、低減するための実践について、生産者を教育すべきである。教育プログラムには、次を含んでもよい： －米のヒ素を減らすための稲作技術についての技術ガイダンスを出版し普及すること。 －農家のフィールドスクールを設立すること。

4.4.2 Aerobic conditions or intermittent ponding during rice production, instead of flooded conditions, may reduce arsenic concentration while there is a possibility to increase cadmium concentration in rice. Studies have shown aerobic soils reduce arsenic uptake as compared to flooded soils even when there are high amounts of arsenic in the soil. Intermittent ponding can also reduce availability of arsenic for plant uptake compared to flooded soils.	4.4.2 湛水条件ではなく、米生産時の好氣的条件や間断かんがいはヒ素濃度を低下させうるが、一方でコメのカドミウム濃度を上昇させる可能性がある。多量のヒ素が含まれていたとしても、好氣的な条件の土壌は、湛水条件の土壌と比較して、ヒ素吸収を減少させることが研究によって示されている。間断かんがいも、湛水条件の土壌と比較して、植物による吸収に利用されるヒ素を減少させることができる。
4.4.3 However, if cadmium concentrations in rice are of concern in a geographic region, risk managers should ensure that implementation of arsenic control measures would not increase cadmium concentrations in rice to unsafe levels³. If appropriate, risk managers may consider implementation of source directed measures for cadmium reduction in soil, water or fertilisers that are used for rice production⁴. ³ Use of some rice cultivars that absorb little amount of cadmium, if available, may be a solution. ⁴ See the <i>Code of Practice concerning Source Directed Measures to Reduce Contamination of Foods with Chemicals</i> (CXC 49-2001).	4.4.3 ただし、米のカドミウム濃度が懸念される地域の場合、リスク管理者はヒ素対策の実施が米のカドミウム濃度を安全でないレベル³にまで上昇させないことを確実にすべきである。適切であれば、リスク管理者は、米生産に使用される土壌、水、肥料中のカドミウム削減のための排出源対策の実施を検討することができる。⁴ ³ カドミウムをほとんど吸収しない品種が利用可能であれば、その利用は解決策の一つとなりうる。 ⁴ 「化学物質による食品汚染を低減するための排出源対策に関する実施規範」(CXC 49-2001)を参照
4.4.4 It is also noted that implementation of aerobic or intermittent ponding conditions may result in a decrease in rice production in some areas and may not be an available practice in all areas. Aerobic growth may also have to be balanced with the use of flooding for weed control or temperature control in cooler areas.	4.4.4 好氣的水管理また間断かんがいの実施は、一部の地域での米生産量の減少をもたらす可能性があり、すべての地域において利用可能な方法ではないかもしれないことにも注意が必要である。好氣的条件での栽培は、雑草防除または冷涼地域における温度管理のた

	めの湛水の使用とバランスを取らなければならない。
4.4.5 National or relevant food control authorities may identify rice cultivars with low arsenic uptake and/or low arsenic concentration and encourage public research institutes or private firms to develop such rice cultivars. Producers could select such rice cultivars, if available and suitable.	4.4.5 国または関連する食品規制当局は、ヒ素吸収量が少なく、かつ/またはヒ素濃度が低い栽培品種を特定し、公的研究機関または民間企業にそのような栽培品種の開発を促してもよい。生産者は、そのようなイネ品種が入手可能で適切であれば、選択することができる
5 MONITORING	5. モニタリング
5.1 The effectiveness of measures to reduce levels of arsenic should be monitored by determining the concentrations of inorganic arsenic in rice.	5.1 ヒ素濃度を低下させる措置の有効性は、コメ中の無機ヒ素濃度を測定することによって監視されるべきである。
5.2 If agricultural land or ground waters used for growing rice are widely contaminated by natural sources, non-point source or past activities, monitoring of arsenic concentrations in soil and/or irrigation water may also be necessary.	5.2 イネの栽培に使用される農地や地下水が、天然汚染源、非点源または過去の活動によって広く汚染されている場合、土壌及び/またはかんがい用水中のヒ素濃度のモニタリングも必要である。
6 RISK COMMUNICATION	6. リスクコミュニケーション
6.1 National or relevant food control authorities should consider sharing information on risks and benefits of consuming polished and/or husked rice among stakeholders in the light of arsenic concentrations and nutrient components, considering both concerns regarding arsenic concentrations and the nutritional benefits of rice consumption.	6.1 国内または関連する食品管理当局は、精米及び/または玄米を消費することによるヒ素摂取によるリスクと栄養上のベネフィットの両方を考慮して、消費者のリスクとベネフィットに関する情報を関係者間で共有することを検討すべきである。
6.2 National or relevant food control authorities should consider sharing the following information with distributors and consumers and should consider encouraging them to implement practices that would reduce arsenic concentration during processing and cooking.	6.2 国または関連する食品管理当局は、以下の情報を流通業者及び消費者と共有することを検討すべきであり、加工及び調理中のヒ素濃度を低下させるような慣行を実施するよう促すべきである。
6.3 Polished rice contains less inorganic arsenic than husked rice, because polishing removes the bran layer which contains most of the inorganic arsenic. Husked rice polished at the higher polishing rate results in polished	6.3 精米は、玄米よりも無機ヒ素含有濃度が小さい。なぜなら、無機ヒ素の大部分を含むぬか層をとる精により除去するからである。

rice with lower arsenic concentrations. However, there are also benefits associated with consumption of husked rice.	玄米をより多く削った場合、精米中のヒ素濃度はより低くなる。しかし、玄米を摂取することの利益もある。
6.4 Arsenic concentration in rice can be reduced by washing rice, applying “rinse-free”⁵ treatment or cooking rice with large amounts of water followed by discarding excess water. ⁵ “Rinse-free” rice, also known as “Museummai”, is rice in which bran that remains on the surface after polishing is completely removed and thus it is not necessary to wash before cooking.	6.4 米のヒ素濃度は、米を洗う、「無洗米」⁵処理を施す、大量の水で米を調理した後余分な水を捨てることによって減らすことができる。 ⁵ 無洗米としても知られている、Rinse-free rice とは、表面に残ったぬかを磨くことで完全に取除いたもので、そのため調理する前に洗う必要が無い。
6.5 When water used for cooking is highly contaminated with arsenic, national or relevant food control authorities should inform consumers that they should avoid use of such water for washing and cooking rice, as rice absorbs arsenic in water. Consumers should be encouraged to use water for washing and cooking rice that contains lower concentration of arsenic.	6.5 調理に使用する水がヒ素で非常に汚染されている場合、国または関連する食品管理当局は、米が水に含まれるヒ素を吸収するので、米を洗浄して炊飯するためにそのような水の使用を避けるべきであることを消費者に知らせるべきである。消費者は、より低濃度のヒ素を含む水を、洗米や調理に使用するよう推奨されるべきである。