

コメ中のカドミウム及びヒ素低減のための実施指針（参考情報）

目次

1	カドミウム及びヒ素について	1
(1)	コメ中の無機ヒ素の割合	1
(2)	食品中のカドミウム及びヒ素について	1
(3)	国産コメ中のカドミウム及び無機ヒ素濃度実態	2
(4)	コメ中のカドミウム及び無機ヒ素濃度の品種間差	3
(5)	土壌からコメへの移行	4
(6)	土壌中及びコメ中のカドミウム及びヒ素濃度との関係性について	9
(参考)	ヒ素の水稻の生育への影響について	10
2	無機ヒ素の低減対策	11
(1)	落水管理	11
(2)	資材施用による低減対策	20
①	湛水管理と含鉄資材の多量施用の組み合わせ	20
②	落水管理と含鉄資材の多量施用の組み合わせ	24
③	湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用の組み合わせ	26
④	落水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用の組み合わせ	27
3	カドミウムの低減対策	29
(1)	カドミウム低吸収性品種	29
(2)	湛水管理	32
(3)	その他のカドミウム低減技術	33
①	植物浄化	33
②	土壌洗浄	34
4	加工等によるコメ中無機ヒ素の低減	38
(1)	とう精による低減効果	38
(2)	調理による低減効果	40
5	分析法	42
(1)	カドミウム	42
(2)	ヒ素	42
(参考)	土壌のサンプリング方法	46

1 カドミウム及びヒ素について

(1) コメ中の無機ヒ素の割合

コメ中の総ヒ素のうち、無機ヒ素が占める割合は、平均で9割程度であった。

表 1 コメ中の総ヒ素のうち無機ヒ素が占める割合

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。

【農林水産省調査結果¹（2012）】

(2) 食品中のカドミウム及びヒ素について

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ると、食品から摂取しているカドミウムの約4割を、無機ヒ素の約7割をコメ（加工品を含む）から摂取していると推定される。

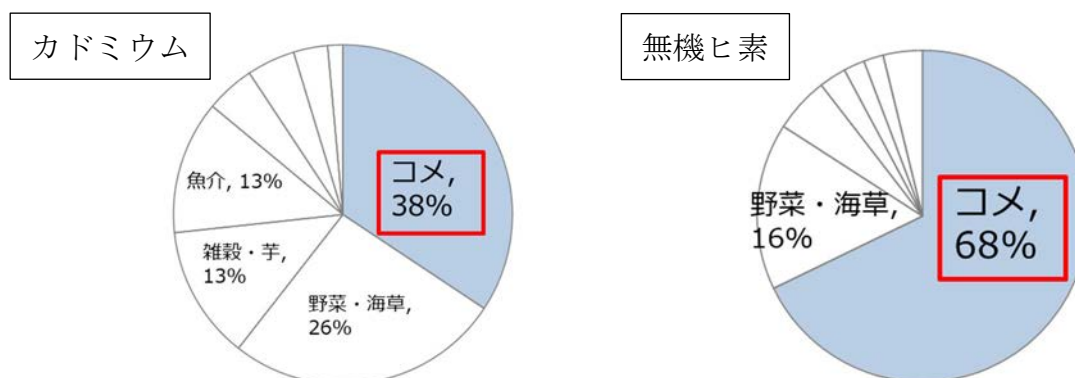


図 1 カドミウム・無機ヒ素の食品からの摂取割合

【厚生労働省研究事業の報告書²より農林水産省が計算（2016-2020 の5年間の平均値）】

¹ 平成 24 年度 国産玄米及び精米中のヒ素の含有実態調査

² 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」

(3) 国産コメ中のカドミウム及び無機ヒ素濃度実態

農林水産省では、日本全国の集出荷施設から採取したコメ中のカドミウムや無機ヒ素濃度の実態について定期的に調査を実施している。

表 2 国産コメ中のカドミウム含有実態調査結果

種類	調査年度	試料数	カドミウム濃度 [mg/kg]					
			平均※	最小	25%ile※	中央値	75%ile※	最大
玄米	1997-1998	37,250	0.06	< 0.01	0.02	0.04	0.08	1.2
	2009-2010	2,000	0.05	< 0.04	< 0.04	< 0.04	0.06	0.40

※%ile はいくつかの測定値を、小さいほうから順番に並べ、何パーセント目にあたるかを示す言い方。

※<0.01 などの表記は、それぞれの調査時の定量下限（LOQ、1997-1998 年度については 0.01 mg/kg、2009-2010 年度については 0.04 mg/kg）未満であることを示す。

※平均値は、LOQ 未満の試料中濃度を LOQ の 1/2 の濃度であると仮定して算出した。

※1997-1998 年度は、全国の水田を対象として、水稻の作付面積 50 ha 当たり 1 点の比率で試料が採取できるように採取地区を選定し、2 年で計 37,250 点の試料を採取。

※2009-2010 年度は、試料点数 1,000 点を米作付面積で比例配分し、市町村ごとの試料点数を決定。2 年で計 2,000 点の試料を採取。

【農林水産省調査結果³（2009-2010）】

表 3 国産コメ中の無機ヒ素含有実態調査結果

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

※都道府県もしくは市町村のコメの作付面積に応じて試料点数を比例配分し、分析した。

【農林水産省調査結果⁴】

³ 国産農産物中のカドミウムの実態調査

⁴ 農林水産省ウェブサイト「食品に含まれるヒ素の実態調査」

(4) コメ中のカドミウム及び無機ヒ素濃度の品種間差

◇コメ中のカドミウム濃度の品種間差

国内で主に栽培されている食用品種について、玄米中のカドミウム濃度に大きな品種間差は見られないが、海外品種などでは、カドミウムを吸収しやすい又はしにくい品種が存在する。

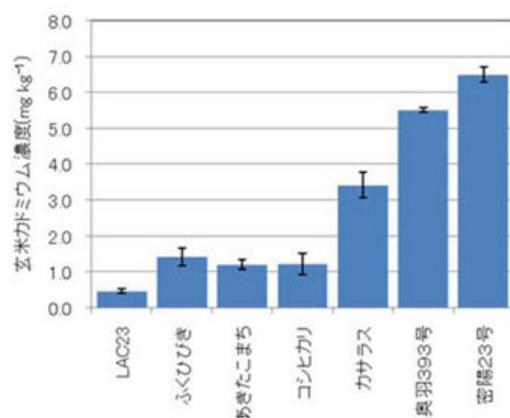


図 2 玄米中のカドミウム濃度の品種間差

【農林水産省研究委託事業（2003-2007）】

◇コメ中のヒ素濃度の品種間差

国内で主に栽培されている食用品種において、玄米中のヒ素濃度について二品種間では差がみられる場合もあるが、おおむね差がない品種が多くみられる。

表 4 日本の栽培品種の総ヒ素濃度と無機ヒ素濃度

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 ^e
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}

※国内の試験は場において湛水条件で栽培。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個体を個体ごと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。

※それぞれの列において、数値に付している記号が異なると Tukey の検定で5%水準で有意に異なることを示す。

【Kuramata et al., 2011⁵】

⁵ Arsenic accumulation and speciation in Japanese paddy rice cultivars (Kuramata et al. Soil Science and Plant Nutrition 57.2 (2011): 248-258.)

(5) 土壌からコメへの移行

◇自然環境中のカドミウム及びヒ素の存在状況

カドミウムは、全国の土壌に普遍的に存在する重金属である（表 5）。

表 5 自然環境中におけるカドミウムの存在状況

農地等平均濃度	0.228 mg/kg DW
水田	0.300 mg/kg DW
畑	0.211 mg/kg DW
樹園地	0.291 mg/kg DW
林地	0.155 mg/kg DW

※表層土：農用地では 0～15 cm、林地では A0 層を除いた 0～10 cm

※0.1 mol/L 塩酸抽出によるカドミウム濃度

【(財) 日本土壌協会, 1984 を一部改変】

ヒ素についても全国の土壌に普遍的に存在しており、農林水産省が実施した水田土壌の調査結果において、1 mol/L 塩酸で抽出したヒ素の濃度は、全試料の平均で 2.3 mg/kg DW、中央値で 1.7 mg/kg DW だった（図 3）。

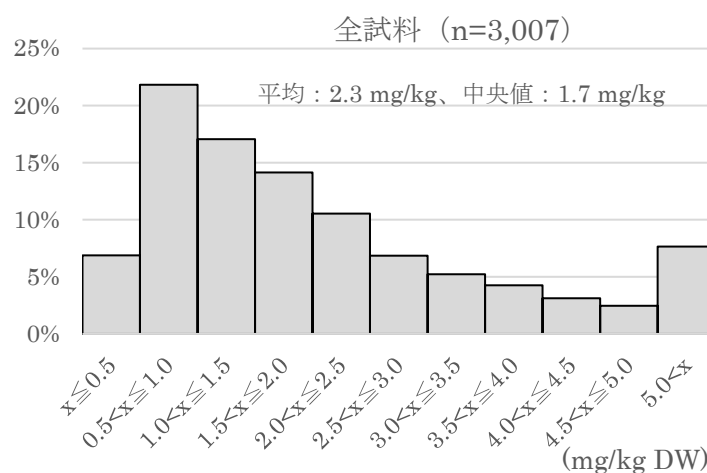


図 3 全国の水田土壌中のヒ素濃度の分布

※水稻作付面積に応じて市町村ごとに調査点数を割り当て。

※水田ほ場から 5 点对角線法（ほ場の角を結んだ対角線上から均等に 5 点採取する方法）により、ほ場の作土層から試料を採取（ $n = 3,007$ ）。

※土壌中ヒ素濃度は乾土あたりの濃度で算出。

【農林水産省調査結果⁶（2013-2016）】

⁶ 水田土壌中ヒ素等の含有実態調査

表 6 土壌群別土壌中ヒ素濃度

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%ile	中央値	75%ile	90%ile
全体	3,007	2.3	1.0	1.7	2.9	4.6
灰色低地土	1,041	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

※「農耕地土壌分類第2次案」による農耕地土壌の土壌群別の1 mol/L 塩酸抽出土壌中のヒ素濃度。

※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、土壌を採取したほ場ごとの土壌群を判定していないことに留意。

【農林水産省調査結果（2013-2016）】

◇土壌中のカドミウム及びヒ素の特性

水田土壌では、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的な状態になる。

その場合、水田土壌中に含まれるカドミウムは、共存する硫黄と結合し極めて水に溶けにくい硫化物（硫化カドミウム）を形成すると考えられ、イオンとして土壌溶液（土壌中の孔隙に含まれる溶液）に溶出しにくくなる。その結果、土壌溶液中のカドミウム濃度が低下するため、水稻による吸収量が減少する。

一方で、水田土壌中に含まれるヒ素は、鉄鋳物が還元され溶出しやすくなることで、鉄鋳物に吸着されていた5価のヒ酸も水溶性の3価の亜ヒ酸へ還元され、還元された鉄鋳物とともに土壌溶液に溶出しやすくなる。その結果、土壌溶液中のヒ素濃度が増加するため、水稻による吸収量が増加する。

湛水条件と異なり、田面水の落水により、水田の表面が乾くと、土壌中の孔隙に空気（酸素）が侵入することで水田土壌が酸化的な状態になる。

その場合、水田土壌中に含まれるカドミウムは、硫化物を形成することが困難となり、カドミウムイオンとして土壌溶液中に溶け出しやすくなる。その結果、土壌溶液中のカドミウム濃度が増加するため、水稻による吸収量が増加する。

一方で、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、土壌溶液中に溶け出しにくくなる。その結果、土壌溶液中のヒ素濃度は低下し、水稻による吸収量が減少する。

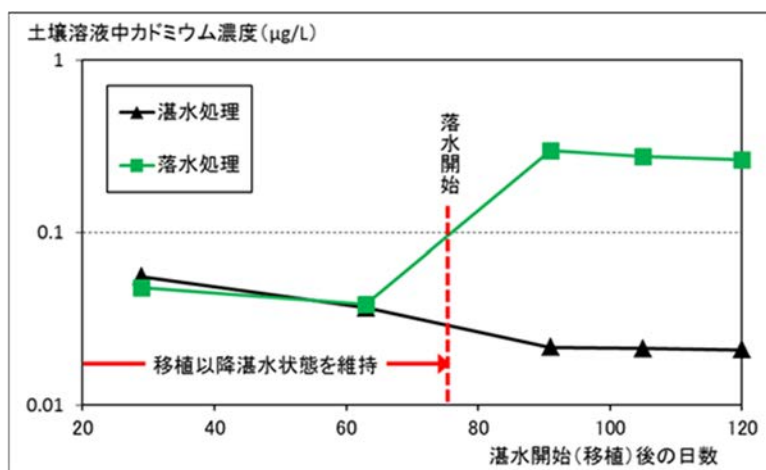


図 4 湛水状態の変化に伴う土壌溶液中カドミウム濃度の変化

※水稻をポットで栽培し、定期的に土壌溶液を採取してカドミウム濃度を測定。落水処理群は

移植後 75 日目に落水し、湛水処理群はそれ以降も湛水状態を維持

※使用土壌：細粒グライ土、カドミウム濃度 0.29 mg/kg

【農林水産省研究委託事業（2000-2002）】

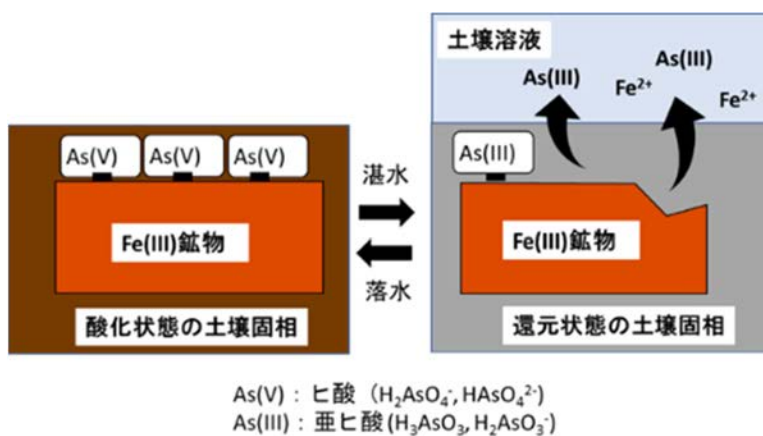


図 5 ヒ素の土壌での状態変化（イメージ）

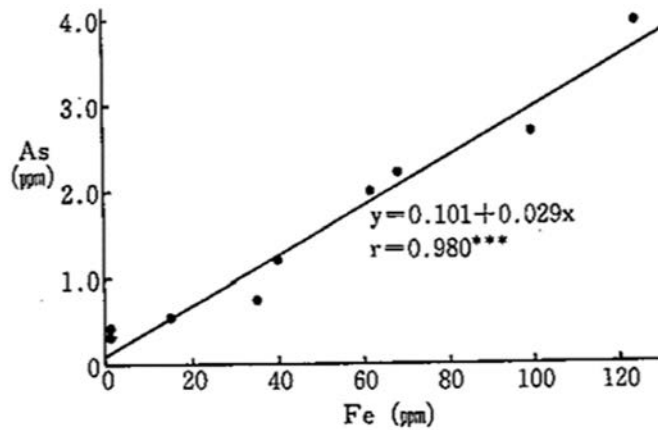


図 6 土壌溶液中へ溶出した鉄イオン濃度とヒ素濃度との関係

※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し、7日後に土壌溶液を採取して2価の鉄イオン (Fe^{2+}) とヒ素 (As) 濃度を測定

※溶出した鉄イオンとヒ素との間に相関関係が見られることから、還元状態で鉄鉱物からヒ素が溶出することが明らかとなった。

※溶出したヒ素の大半（約9割）が3価の亜ヒ酸

【山根ら, 1989⁷】

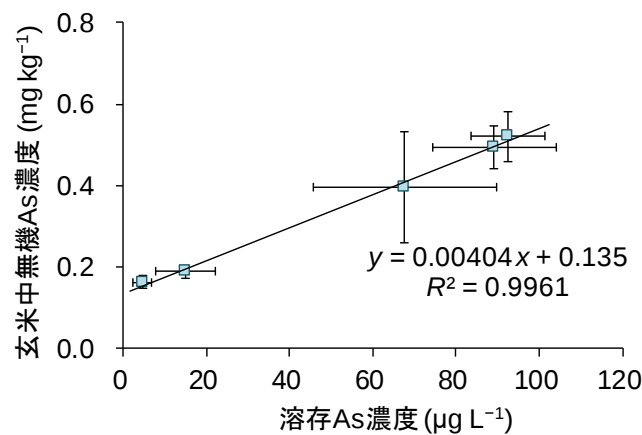


図 7 出穂後3週間の土壌中の平均溶存ヒ素濃度と玄米中の無機ヒ素濃度との関係

※土壌溶液は15 cm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。

【Honma et al., 2016⁸を一部改変】

⁷ 水稻におけるヒ素被害の発生機構と対策（山根ら. 島根農試研報 24 (1989): 1~95.）

⁸ Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains (Honma et al. Environmental Science and Technology 50.8 (2016): 4178-4185.)

◇水管理による水田土壌中のカドミウム及びヒ素の特性（トレードオフ）

水田土壌中のカドミウムとヒ素は、湛水状態もしくは落水を実施することで、それぞれの濃度が真逆の挙動を示す。土壌中の酸化状態を示す酸化還元電位が落水により上昇することで、カドミウムの溶解性は高まるがヒ素の溶解性が下がる。一方で、酸化還元電位が湛水により低下することで、カドミウムの溶解性は下がるがヒ素の溶解性は高まる。

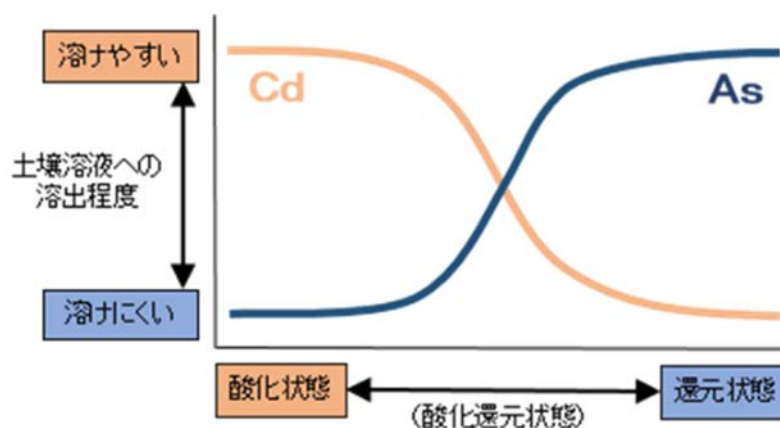


図 8 カドミウム、ヒ素の土壌での溶けやすさと土壌の酸化還元状態との関係のイメージ

◇ヒ素のイネ地上部への移行

イネ地上部のヒ素蓄積量は、中干し時期から徐々に上昇し、出穂前後にかけて急激に高まる様子が見られた（図 9）。

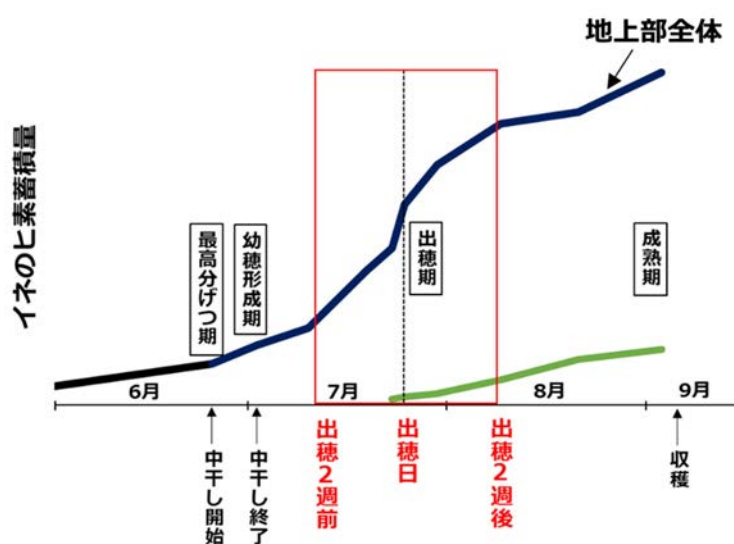


図 9 イネ地上部へのヒ素蓄積

※試験場内の1ほ場で得られた結果

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

(6) 土壌中及びコメ中のカドミウム及びヒ素濃度との関係性について

コメ中のカドミウム濃度は、土壌中のカドミウム濃度が高いほど高くなる傾向がみられる (図 10)。

一方で、コメ中の無機ヒ素濃度は、土壌中の無機ヒ素濃度との間に明確な相関はみられず (図 11、図 12)、無機ヒ素濃度が高くない土壌でも高くなる可能性がある。

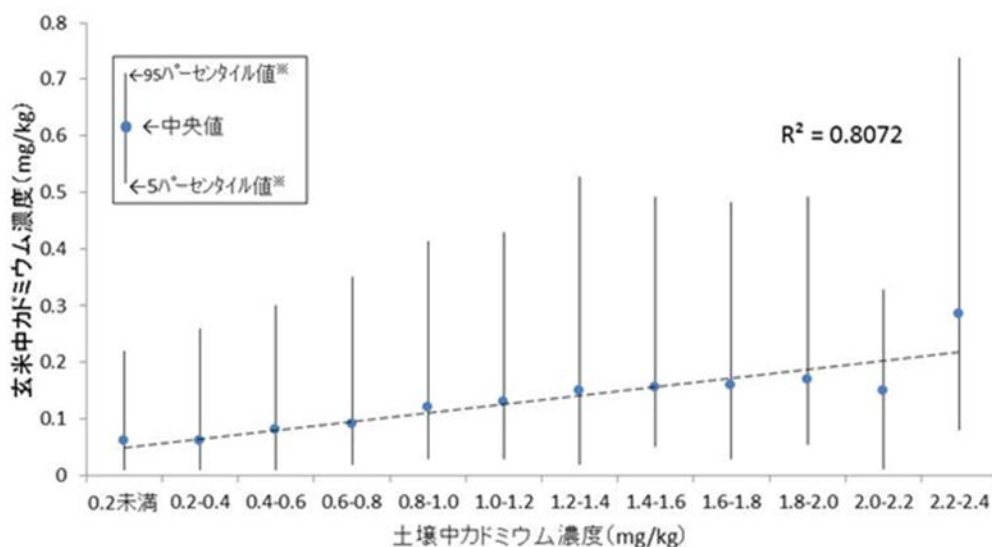


図 10 土壌中と玄米中のカドミウム濃度の関係

【農林水産省調査結果⁹ (1971-1976)】

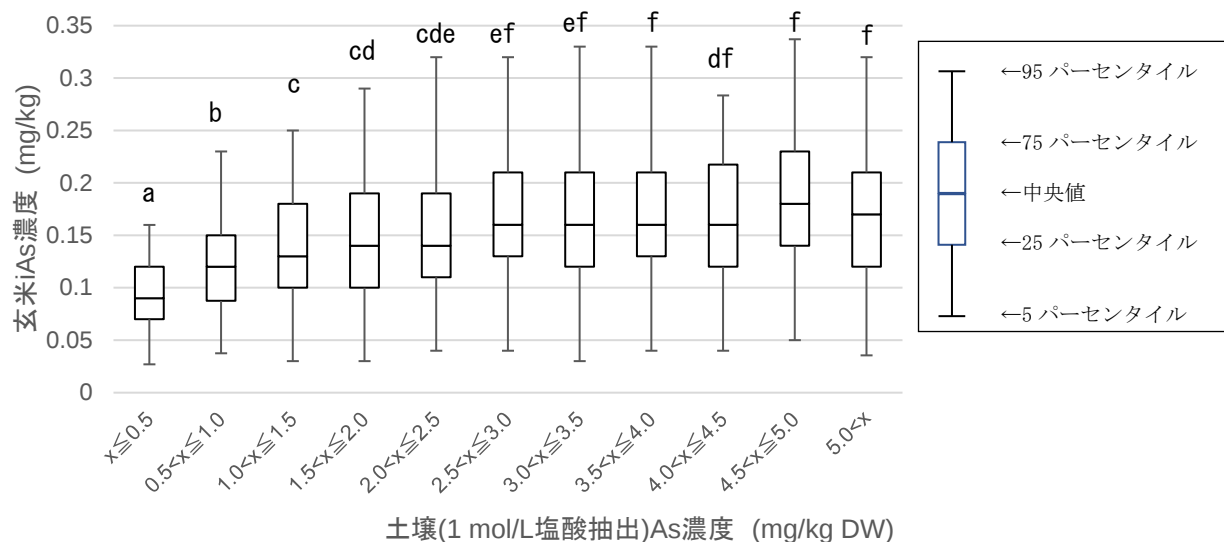


図 11 土壌中ヒ素濃度と玄米中無機ヒ素濃度の関係性

※異なる記号が付された階級間には Steel-Dwass 法による多重比較により 5%水準で有意差があることを示す。

【農林水産省調査結果 (2013-2016)】

⁹ 重金属概況調査 (昭和 46-51、農林水産省農蚕園芸局)

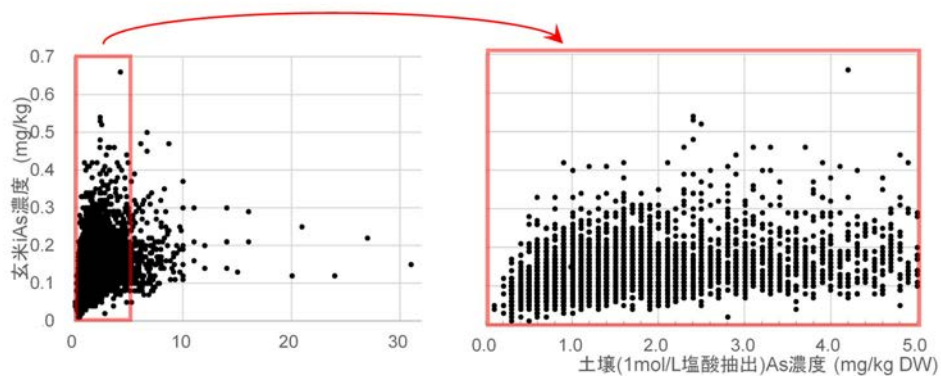


図 12 土壌中ヒ素濃度と玄米中無機ヒ素濃度の関係性

【農林水産省調査結果（2013-2016）】

（参考）ヒ素の水稻の生育への影響について

土壌中ヒ素濃度がかかなり高くなると農作物の生育が阻害される可能性がある。

ヒ素により汚染されたほ場において、土壌の 1 mol/L 塩酸抽出ヒ素濃度と水稻の収量の間には負の相関が認められており、15 mg/kg で約 10%の減収だったと報告されている（表 7）。

表 7 土壌の可溶性ヒ素濃度と水稻の減収割合

可溶性ヒ素 (mg/kg)	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
減収割合 (%)	6.9	10.3	13.7	34.3	34.3	55.1	82.4

【山根ら，1989】

2 無機ヒ素の低減対策

(1) 落水管理

◇土壌の酸化還元状態の指標

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だが、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る。このため、落水と湛水を繰り返す間断かんがい有効だが、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重要である。

その判断材料となり得る指標については以下のものが挙げられる。

① 酸化還元電位 (Eh)

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ある。

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。

② 気相率

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る。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する。

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。

表 8 水管理による酸化還元電位 (Eh) と気相率と溶存ヒ素濃度の変化

	(a)	(b)	(c)	(d)
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	↑	↓	↓	↑

(b) 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する。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。

(d) 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）。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~-200 mV 前後に低下する。

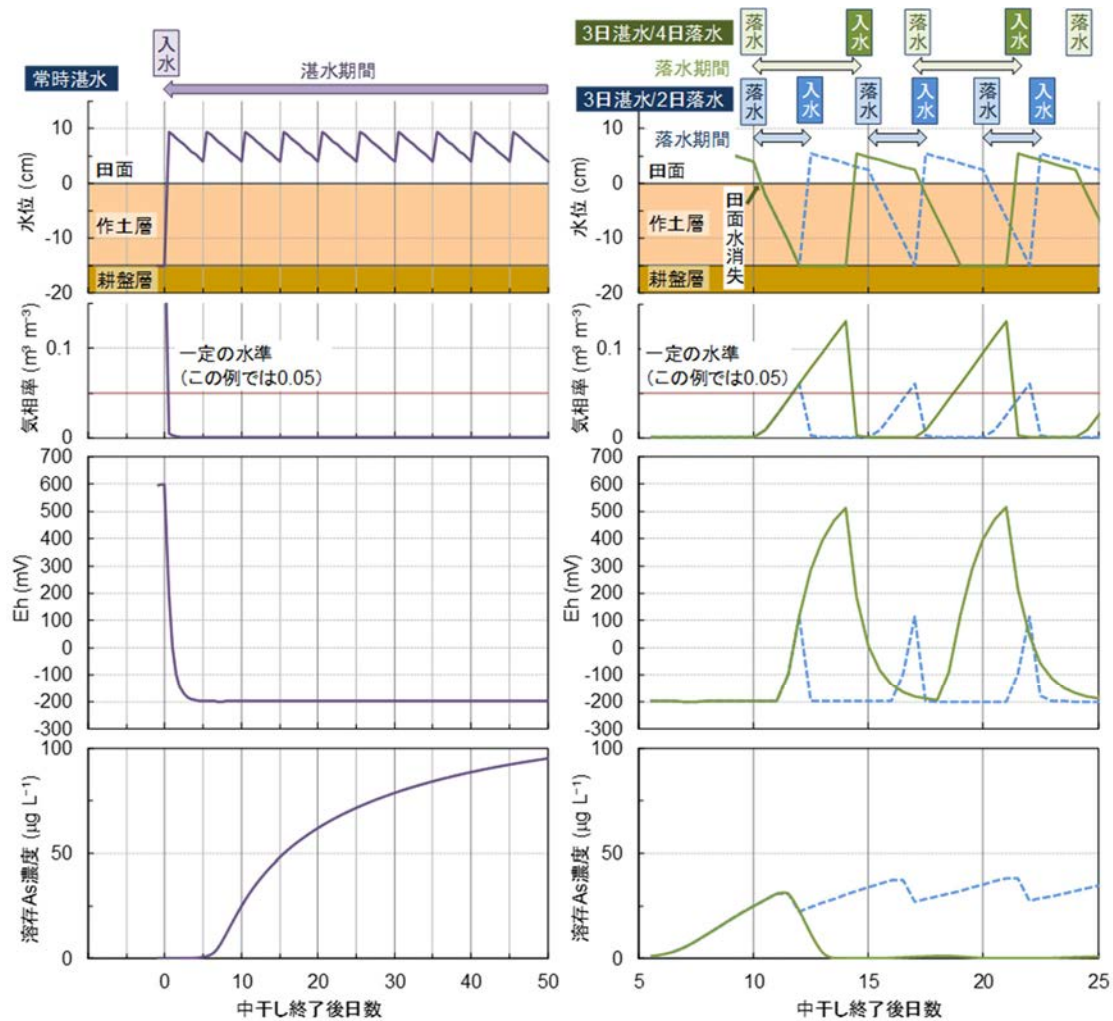


図 13 常時湛水と間断かんがいによる気相率、Eh、溶存ヒ素濃度の変動イメージ

※出穂前後常時湛水（左図）と湛水管理と落水管理を交互に実施（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

【農林水産省研究委託事業（2013-2017）】

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。

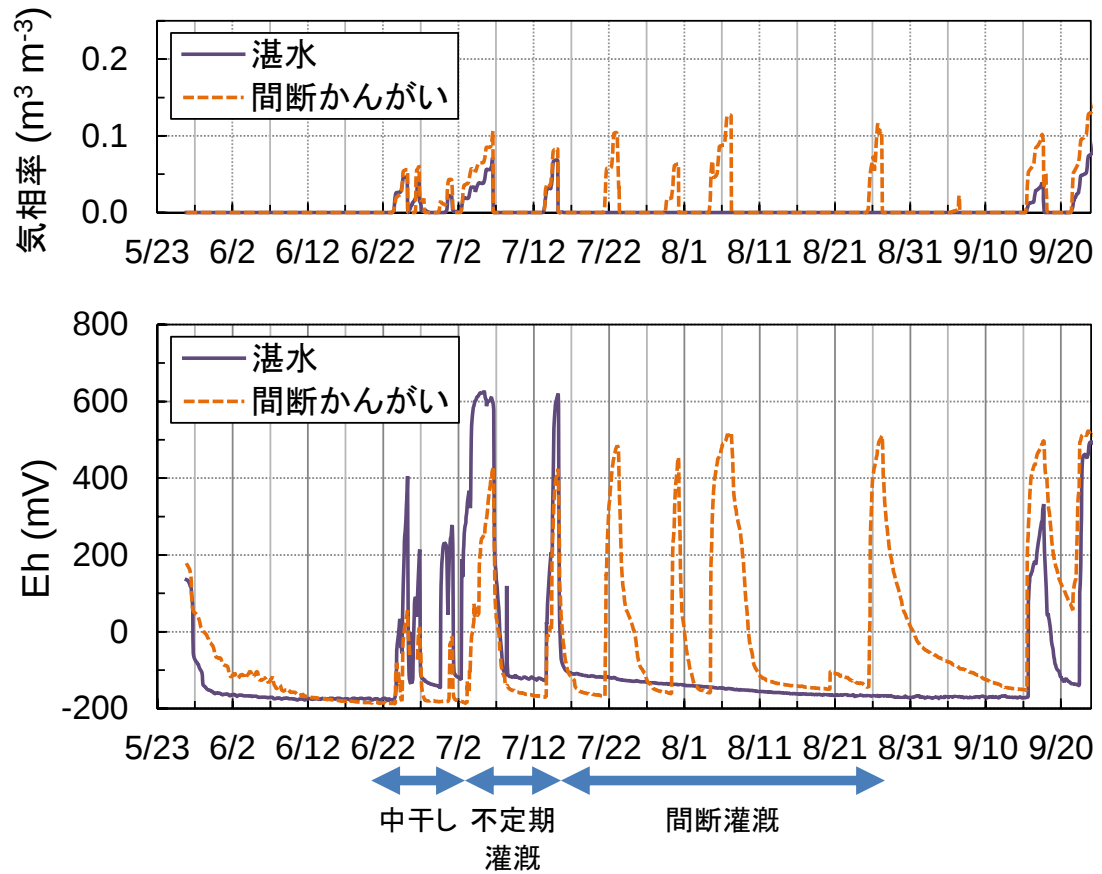


図 14 ほ場における水管理と気相率、Eh の経時変化の例

※気相率と Eh は、土壌深さ 5cm で測定

【農林水産省研究事業（2013-2017）】

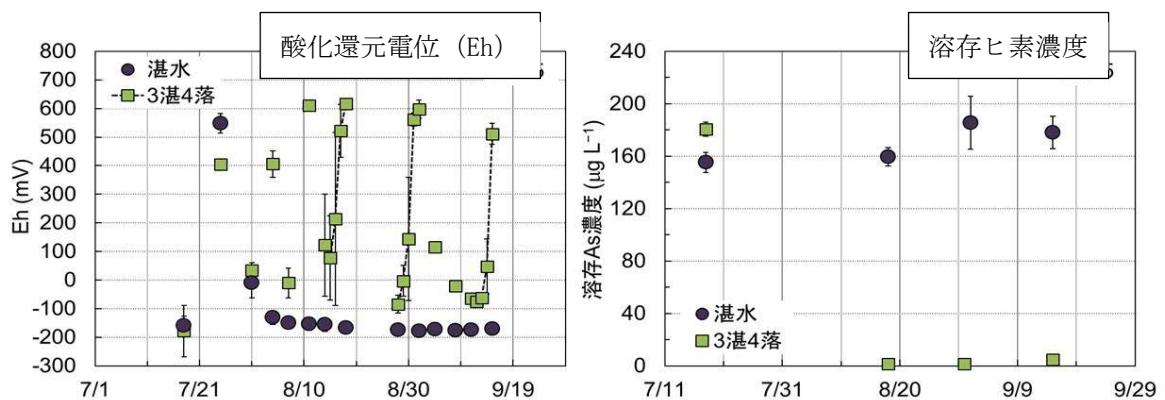


図 15 湛水管理と落水管理による土壌中 Eh と溶存ヒ素濃度の変化の例

【農林水産省研究事業（2013-2017）】

＜Eh 及び気相率を指標として用いる際の留意点＞

落水時（田面から水が無くなって以降）の気相率の上昇は、主に水稻の吸水・蒸散によるものである。降雨がなければ、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る。

そのため、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る。

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る。

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、多くのほ場を測定するには不都合となる。また、Eh の上昇は気相率と比較して急激で予測が難しい。

◇「しっかりとした中干し」の方法

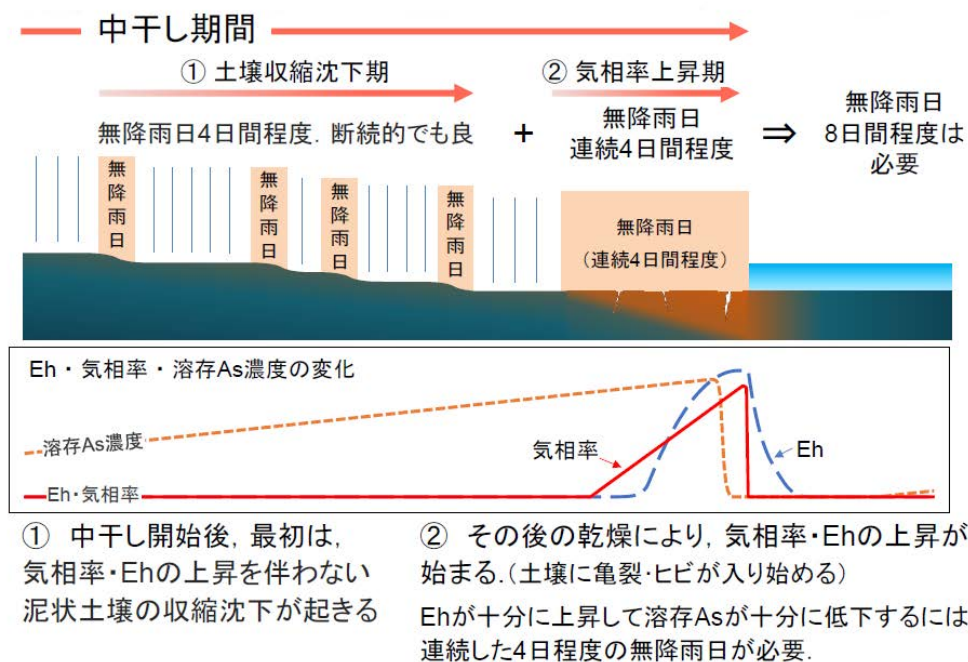


図 16 「しっかりとした中干し」の方法及び溶存ヒ素濃度等への影響

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

◇「しっかりとした中干し」による落水管理への影響

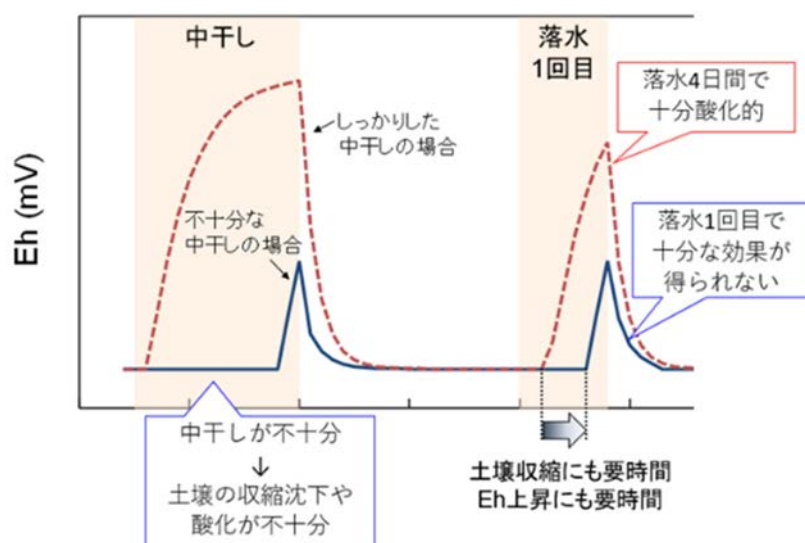


図 17 中干しの程度による土壌中 Eh の変化

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

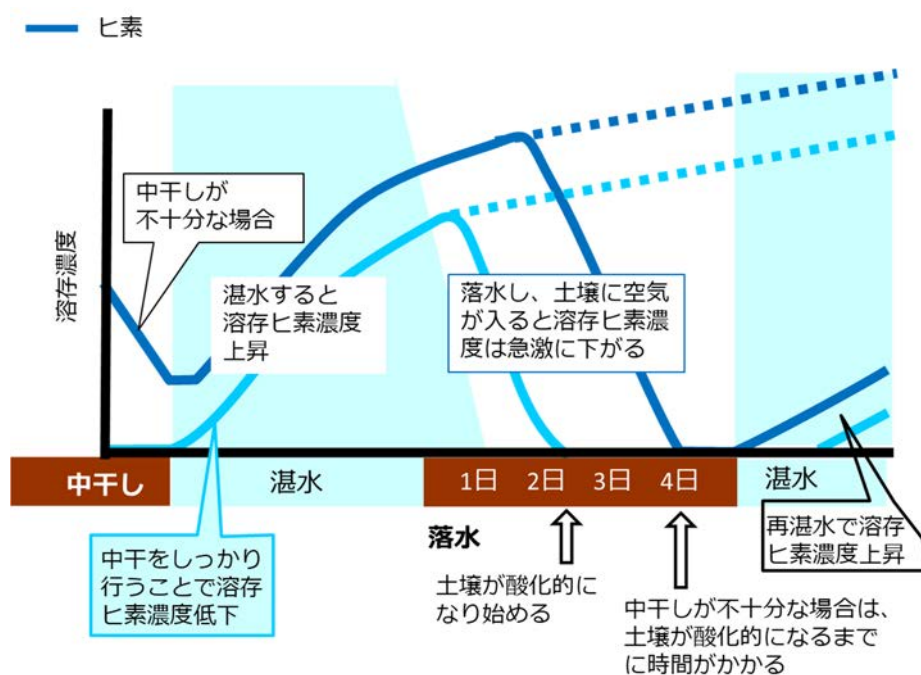


図 18 中干しの程度による溶存ヒ素濃度の変化

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

◇落水時の田面の渇き具合

落水4日目に図 19 のような乾き具合になっていれば十分乾いているといえる。

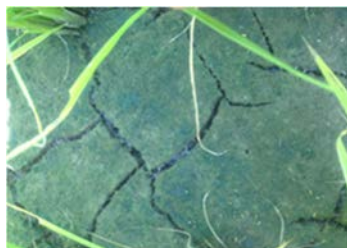


図 19 落水4日目の田面の様子

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

◇落水管理によるヒ素低減効果

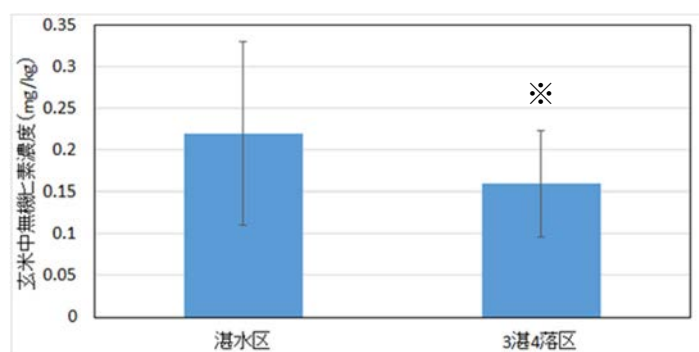


図 20 3湛4落による玄米中無機ヒ素濃度の低減割合

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

【農林水産省研究委託事業（2013-2017）】

表 9 3 湛 4 落による生育、収量、品質の統計量

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		
整粒歩合	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		

※湛水区と 3 湛 4 落区との有意差はウィルコクソンの符号付き順位和検定（ $p < 0.05$ ）により算出。

※効果量は Cohen の d を算出。2 群間の平均値の差の程度を示す指標で、 $d < 0.2$ であれば、一般に実質的な差は小さいと評価される。

※データ数が少ないものはデータ欠損しているもの。

【農林水産省研究委託事業（2013-2017）】

◇落水2回によるヒ素低減効果及びカドミウムへの影響

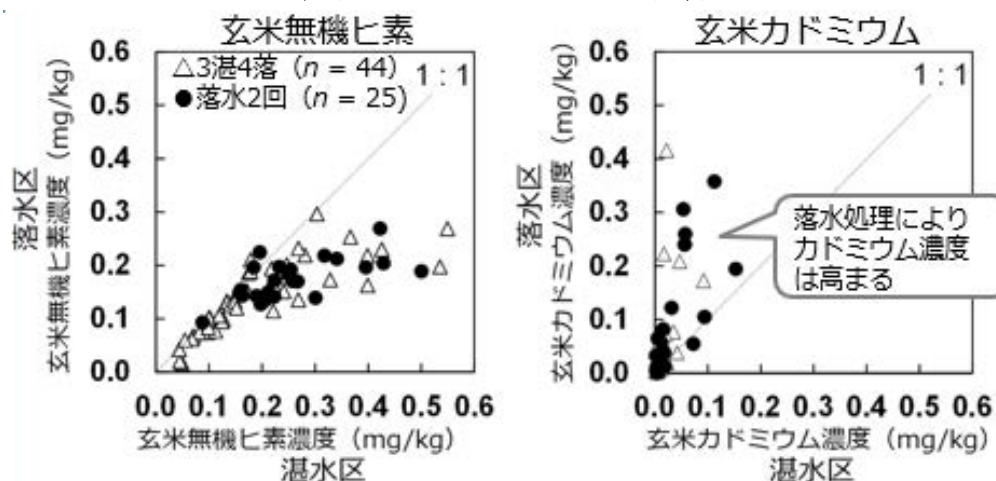


図 21 3 湛 4 落 及 び 落 水 2 回 に よ る 玄 米 中 無 機 ヒ 素 濃 度 の 低 下 及 び 玄 米 中 カ ド ミ ウ ム 濃 度 の 変 化

※縦軸は各落水区、横軸は湛水区の玄米中の無機ヒ素及びカドミウム濃度 (mg/kg)。

【農研機構, 2024】

◇落水管理によるコメの収量・品質への影響

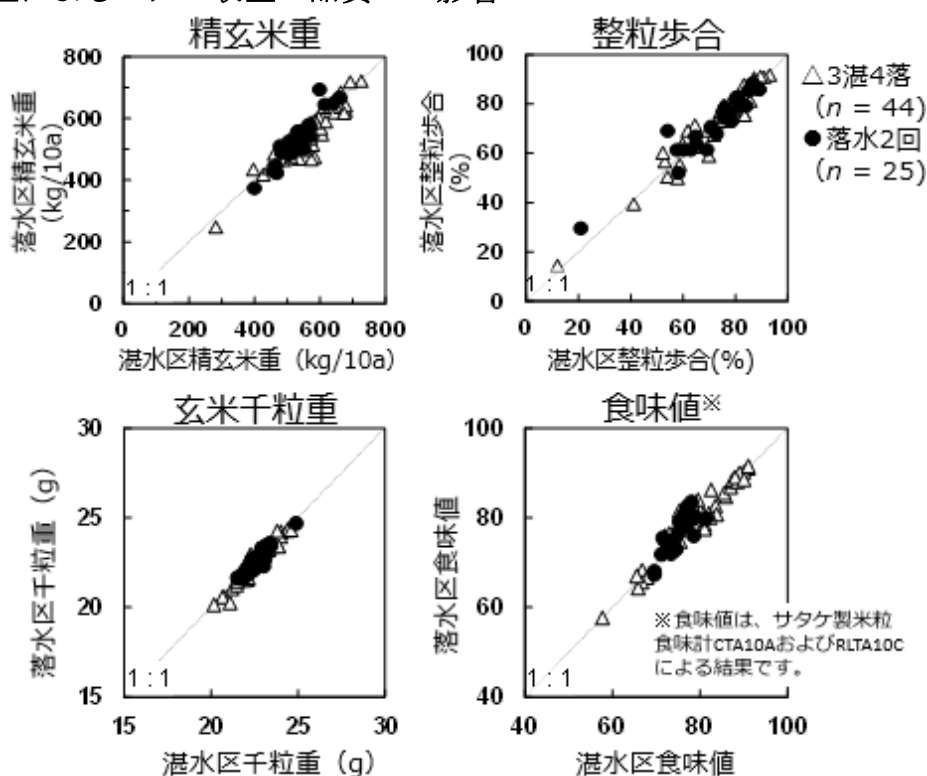


図 22 落水管理によるコメの収量・品質への影響

※縦軸は各落水区、横軸は湛水区の精玄米重、整粒歩合、玄米千粒重、食味値。

【農研機構, 2024】

◇土壌の粘土含量と水管理による収量の変化

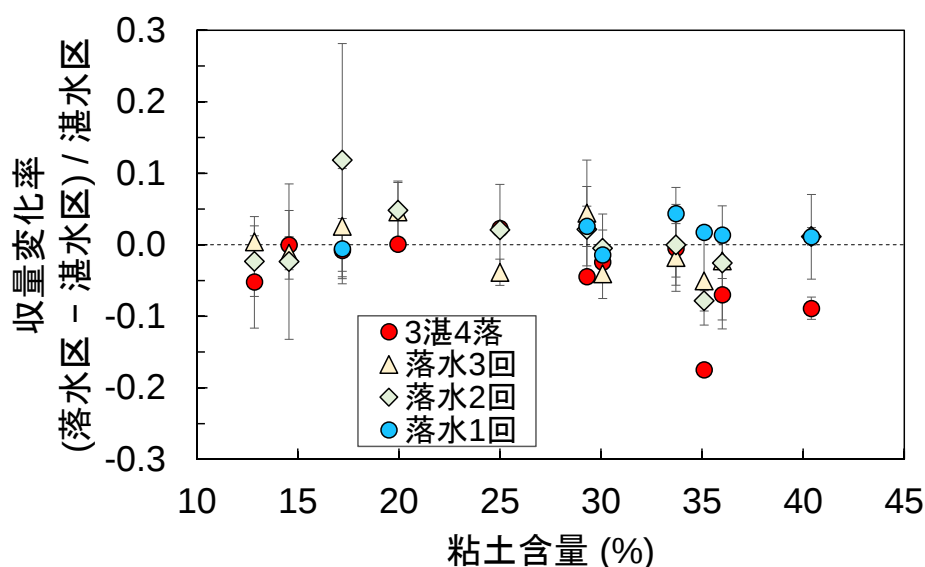


図 23 粘土含量の違いによる水管理による収量の変化

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

（参考）自動水管理装置を利用した落水管理によるコメ中無機ヒ素低減

落水管理による低減対策は、4 日間の落水を繰り返し実施するという負担の軽減が課題だが、水管理を自動水管理装置で実施することにより、コメ中無機ヒ素の低減対策の負担を軽減することが可能である。

表 10 自動水管理装置を使った 3 湛 4 落による玄米中無機ヒ素の低減効果及びカドミウム濃度の変化、収量・品質への影響

	玄米中 無機ヒ素濃度 mg/kg	玄米中 カドミウム濃度 mg/kg	精玄米重 kg/10a	整粒歩合 %
湛水	0.19	<LOQ	560	49
間断灌漑3湛4落	0.16	<LOQ	530	45
分散分析				
水管理	***	-	*	n.s.
年	***	-	n.s.	***

※試験は場の水口と水尻に自動水管理装置を設置し、中干し後の出穂 3 週間前から 3 湛 4 落をプログラムして実施。

※数値は 2 年間の調査結果の平均値。

※水管理及び年をそれぞれ要因として二元配置分散分析を行った。表中の*、**、および***は、それぞれ 5 %、1 % 及び 0.1 % 水準で有意であること、n. s. は 5 % 水準で有意でないことを示す。

【農研機構，2024】

(2) 資材施用による低減対策

① 湛水管理と含鉄資材の多量施用の組み合わせ

◇含鉄資材の多量施用によるコメ中の無機ヒ素濃度の低減効果

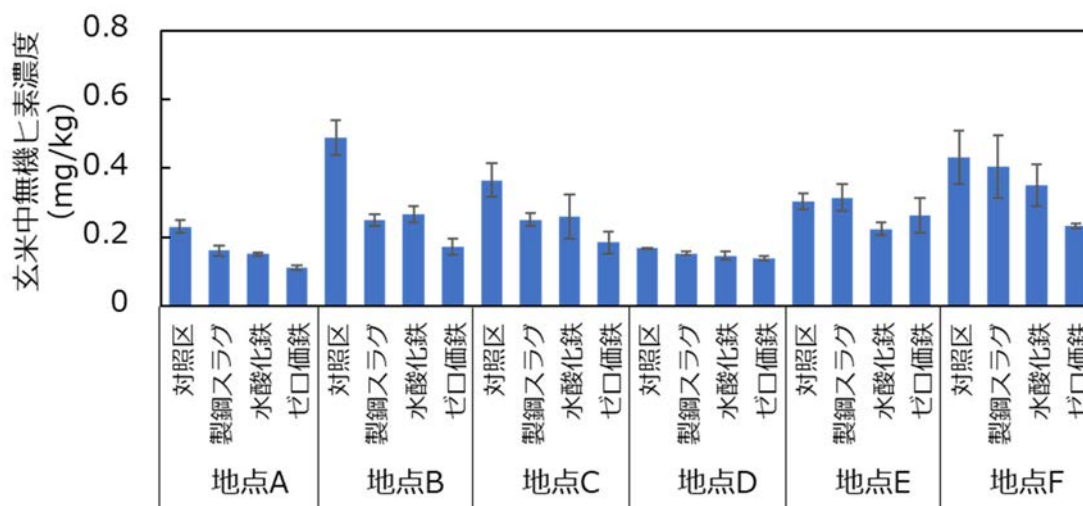


図 24 含鉄資材多量施用による玄米中無機ヒ素の低減効果（初年度の結果）

※土壌特性と気象条件の異なる6ほ場で、初年度の耕うん直前に製鋼スラグ（2トン/10アール）、水酸化鉄（1トン/10アール）、ゼロ価鉄（1トン/10アール）をほ場に直接施用した。

※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（3反復）。

【農林水産省研究委託事業（2013-2017）】

◇含鉄資材の多量施用によるコメ中の無機ヒ素濃度の低減効果とカドミウムの変化

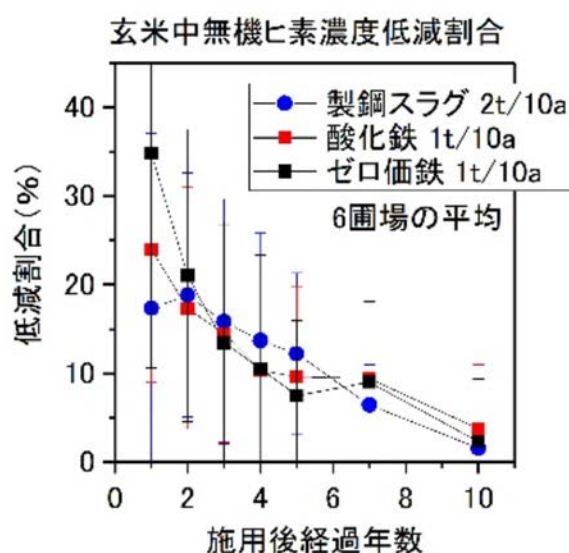


図 25 含鉄資材の多量施用後の玄米中無機ヒ素濃度の低減効果の継続性

※鉄資材を2013年に投入後、追加投入無しで2022年まで継続栽培した（ $n = 6$ ）。

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

表 11 湛水管理と含鉄資材の多量施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果と継続性

	コメ中無機ヒ素濃度（最小値～最大値、mg/kg）			
	無施用区	製鋼スラグ 資材区	酸化鉄 資材区	ゼロ価鉄 資材区
1 年目	0.17～0.49	0.15～0.41	0.15～0.35	0.11～0.26
2 年目	0.11～0.34	0.10～0.32	0.10～0.32	0.10～0.28
3 年目	0.08～0.36	0.08～0.27	0.08～0.28	0.04～0.26
4 年目	0.13～0.54	0.13～0.46	0.14～0.47	0.14～0.45
5 年目	0.11～0.40	0.11～0.33	0.11～0.35	0.12～0.35

※湛水管理のみ実施した無施用区と、湛水管理に加えて各含鉄資材を施用した資材区とを比較。コメ中無機ヒ素濃度の範囲を記載（mg/kg）。

※初年度のみ各含鉄資材を 1～2 トン施用。全ての年で出穂期前後 3 週間は湛水管理を実施（ $n = 6$ ）。

【農林水産省研究委託事業（2013-2017，2018-2022）】

表 12 湛水管理と含鉄資材の多量施用とを組み合わせた場合のコメ中カドミウムの変化

	コメ中カドミウム濃度（最小値～最大値、mg/kg）			
	無施用区	製鋼スラグ 資材区	酸化鉄 資材区	ゼロ価鉄 資材区
1 年目	<0.05 ～0.02	<0.05 ～0.02	<0.05 ～0.01	<0.05 ～0.01
2 年目	<0.002～0.22	<0.002～0.07	<0.002～0.20	0.002～0.26
3 年目	<0.01 ～0.12	<0.01 ～0.07	<0.01 ～0.11	<0.01 ～0.11
4 年目	<0.01 ～0.04	<0.01 ～0.02	<0.01 ～0.03	<0.01 ～0.04
5 年目	<0.01 ～0.06	<0.01 ～0.06	<0.01 ～0.05	<0.01 ～0.06

※湛水管理のみ実施した無施用区と、湛水管理に加えて各含鉄資材を施用した資材区とを比較。コメ中カドミウム濃度の範囲を記載（mg/kg）。

※初年度のみ各含鉄資材を 1～2 トン施用。全ての年で出穂期前後 3 週間は湛水管理を実施（ $n = 6$ ）。

※<0.01 などは当該年度の定量下限（LOQ）の値未満であることを示す。

【農林水産省研究委託事業（2013-2017，2018-2022）】

含鉄資材の多量施用によるコメ中の無機ヒ素の低減効果は、経年的に減少するが、5年程度は一定の効果が持続する。

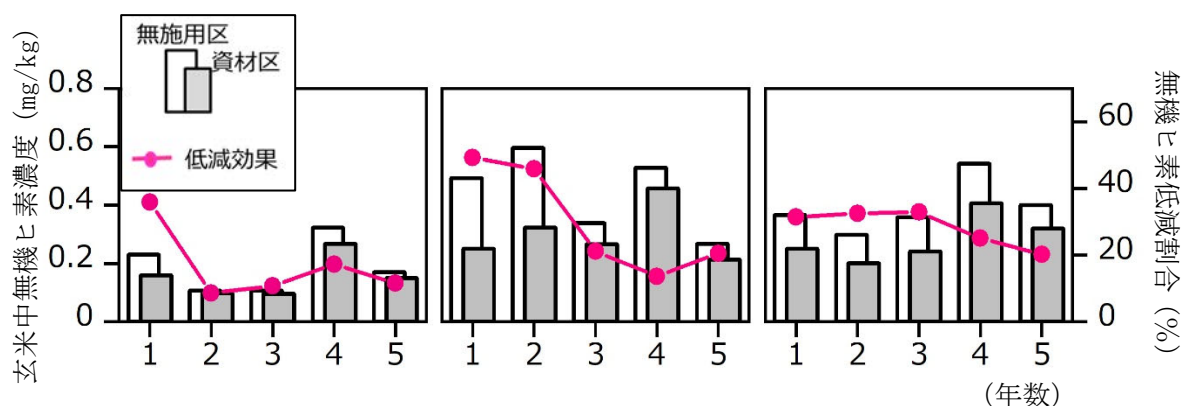


図 26 湛水管理と含鉄資材の多量施用との組み合わせの低減効果の継続性

※試験ほ場のうち、湛水管理の実施と含鉄資材の多量施用との組合せによる無機ヒ素の低減割合の推移の代表的な3例。

※無施用区は湛水管理のみ、資材区は初年度に含鉄資材を2t/10a施用し湛水管理を実施。

【農林水産省研究委託事業（2013-2017，2018-2022）】

コメ中の無機ヒ素の低減効果は、玄米中無機ヒ素濃度が0.2 mg/kg以上の条件で大きくなる。

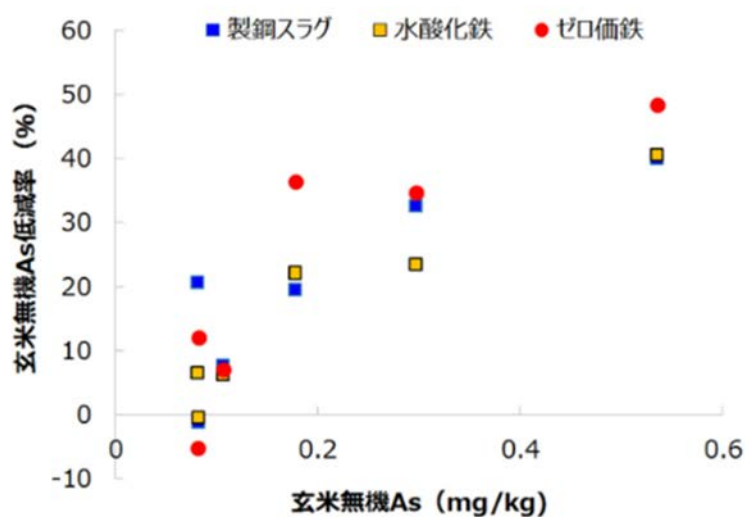


図 27 資材無施用区と含鉄資材の多量施用区との玄米中無機ヒ素の低減割合の関係性

※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

【農林水産省研究委託事業（2013-2017）】

◇含鉄資材の多量施用によるコメの品質への影響

含鉄資材の多量施用をしてもコメの品質（精玄米重、整粒歩合）に影響は見られない。

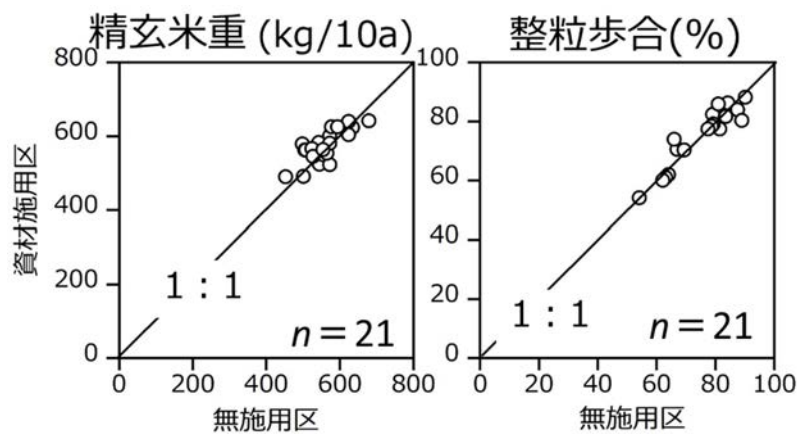


図 28 含鉄資材の多量施用による品質への影響

※縦軸は資材施用区、横軸は資材無施用区の精玄米重、整粒歩合（ $n = 21$ ）。

【農研機構，2024】

② 落水管理と含鉄資材の多量施用の組み合わせ

落水管理と含鉄資材の多量施用とを組み合わせると、対照区と比較して玄米中無機ヒ素濃度が低くなる傾向がある。一方で、玄米中カドミウム濃度が高くなる場合がある。

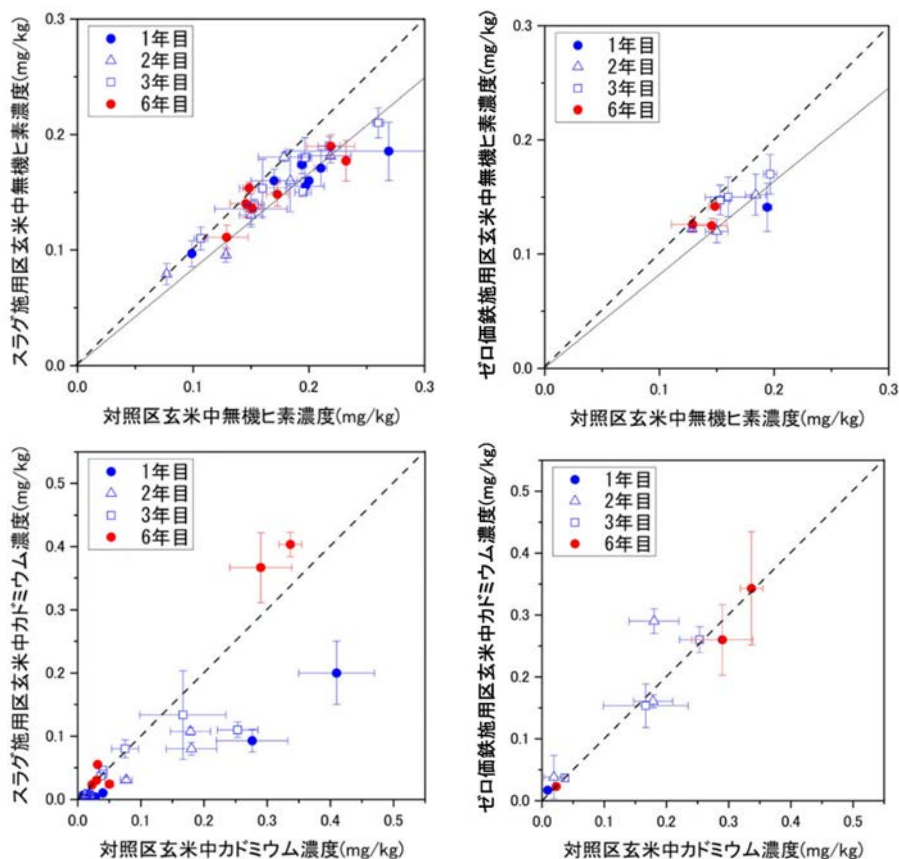


図 29 落水管理と含鉄資材の多量施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果及びカドミウムの変化

【農林水産省研究委託事業（2013-2017，2018-2022）】

表 13 落水管理と含鉄資材の多量施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果と継続性

	コメ中無機ヒ素濃度（最小値～最大値、mg/kg）		
	無施用区	製鋼スラグ 資材区	ゼロ価鉄 資材区
1 年目	0.10～0.27	0.10～0.19	0.14
2 年目	0.08～0.22	0.08～0.18	0.12～0.15
3 年目	0.11～0.26	0.04～0.21	0.15～0.17
6 年目	0.13～0.23	0.02～0.19	0.12～0.14

※「しっかりとした中干し」を実施し出穂期前後3週間に落水2回を実施したのみの無施用区と、各含鉄資材を施用した資材区（製鋼スラグ： $n = 7$ 、ゼロ価鉄： $n = 3$ ）とを比較。コメ中無機ヒ素濃度の範囲を記載（mg/kg）。

【農林水産省研究事業（2013-2017, 2018-2022）】

表 14 落水管理と含鉄資材の多量施用とを組み合わせた場合のコメ中カドミウムの変化

	コメ中カドミウム濃度（最小値～最大値、mg/kg）		
	無施用区	製鋼スラグ 資材区	ゼロ価鉄 資材区
1 年目	0.01～0.41	<0.01～0.20	0.02
2 年目	0.01～0.18	<0.01～0.11	0.04～0.29
3 年目	<0.04～0.25	<0.04～0.13	<0.04～0.26
6 年目	<0.03～0.34	<0.03～0.40	<0.03～0.34

※「しっかりとした中干し」を実施し出穂期前後3週間に落水2回を実施したのみの無施用区と、各含鉄資材を施用した資材区（製鋼スラグ： $n = 7$ 、ゼロ価鉄： $n = 3$ ）とを比較。コメ中カドミウム濃度の範囲を記載（mg/kg）。

※<0.01 などは当該年度の定量下限（LOQ）の値である 0.01 mg/kg 未満であることを示す。

【農林水産省研究事業（2013-2017, 2018-2022）】

③ 湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用の組み合わせ

◇含鉄資材の慣行的な量の施用による低減効果

湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用を組み合わせると、対照区と比較して玄米中無機ヒ素濃度が低くなる傾向があり、玄米中無機ヒ素濃度が高いほど低減割合が高い傾向がある。一方で、玄米中カドミウム濃度が高くなる場合がある。

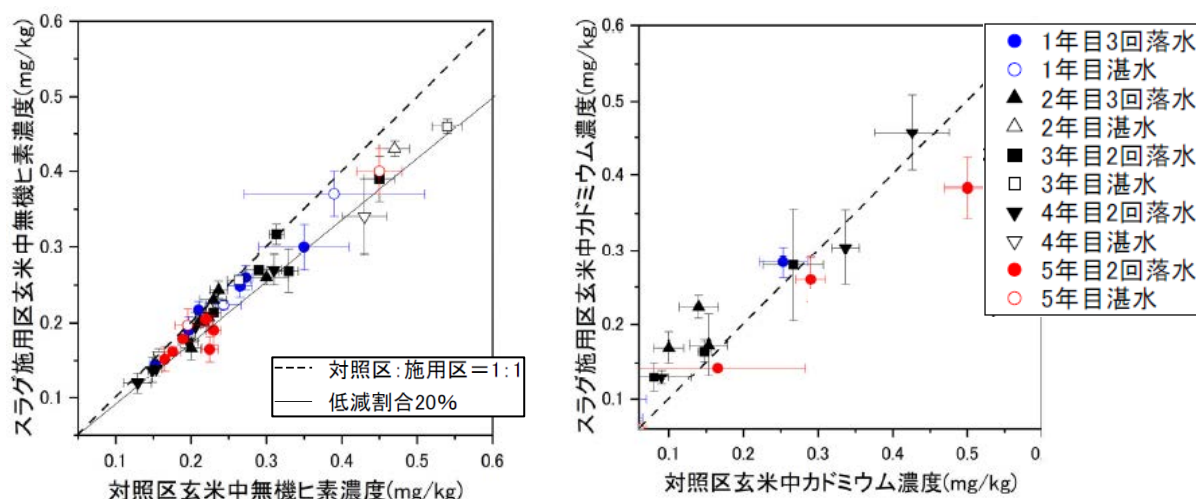


図 30 湛水管理または落水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果及びカドミウムの変化

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

表 15 湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果と継続性及びカドミウムの変化

	コメ中無機ヒ素濃度 (最小値～最大値、mg/kg)		コメ中カドミウム濃度 (最小値～最大値、mg/kg)	
	無施用区	資材区	無施用区	資材区
1 年目	0.24～0.39	0.22～0.37	<0.04～0.04	<0.04～0.04
2 年目	0.23～0.47	0.22～0.43	<0.04～0.04	<0.04～0.04
3 年目	0.26～0.54	0.26～0.46	<0.02～0.03	<0.02～0.02
4 年目	0.16～0.43	0.16～0.34	<0.03	<0.03
5 年目	0.20～0.45	0.20～0.40	0.02～0.06	0.02～0.06

※湛水管理のみ実施した無施用区と湛水管理で各含鉄資材を施用した資材区とを比較したコメ中無機ヒ素濃度の低減割合とコメ中カドミウム濃度の増加割合（％）。

※毎年慣行の施肥時期に製鋼スラグ資材を 200 kg 施用し、出穂期前後 3 週間は湛水管理を実施（ $n = 2$ ）。

※<0.01 などは当該年度の定量下限（LOQ）の値である 0.01 mg/kg 未満であることを示す。

【農林水産省研究事業（2018-2022）】

◇湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用の組み合わせによる低減効果の継続

湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用とを組み合わせると、玄米中の無機ヒ素濃度が比較的高い条件では一定の低減効果がある一方で、玄米中の無機ヒ素濃度が比較的低い条件では低減効果が見られない場合がある。

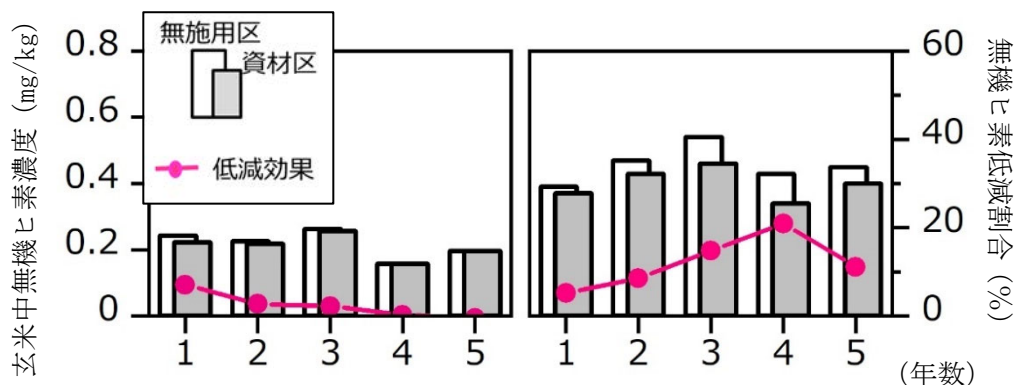


図 31 湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用との組み合わせの低減効果の継続性

※試験は場のうち、湛水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用との組合せによる無機ヒ素の低減割合の推移の代表的な2例。

※無施用区は湛水管理のみ、資材区は慣行の施肥時期に含鉄資材を 200 kg 施用し湛水管理を実施。

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

④ 落水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用の組み合わせ

落水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用とを組み合わせると、対照区と比較して玄米中無機ヒ素濃度が低くなる傾向があり、玄米中無機ヒ素濃度が高いほど低減割合が高い傾向がある。一方で、玄米中カドミウム濃度が高くなる場合がある。

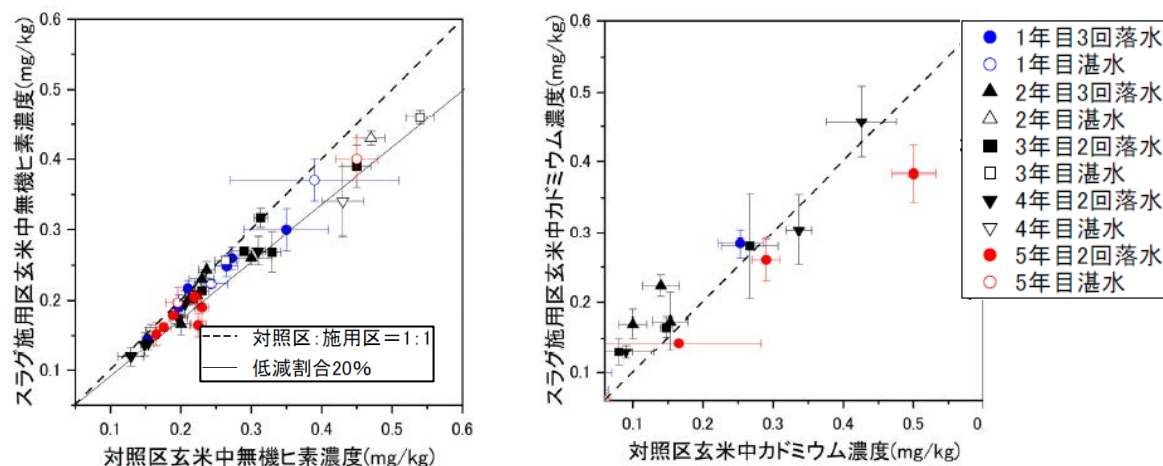


図 32 湛水管理または落水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果及びカドミウムの変化（再掲）

【農林水産省研究委託事業（2018-2022）】

表 16 落水管理と含鉄資材の慣行的な量の連年施用とを組み合わせた場合のコメ中無機ヒ素の低減効果と継続性及びカドミウムの変化

	コメ中無機ヒ素濃度 (最小値～最大値、mg/kg)		コメ中カドミウム濃度 (最小値～最大値、mg/kg)	
	対照区	資材区	対照区	資材区
1 年目	0.15～0.35	0.14～0.30	<0.04～0.25	<0.04～0.28
2 年目	0.20～0.30	0.17～0.26	0.04～0.15	0.04～0.22
3 年目	0.22～0.45	0.20～0.39	0.02～0.27	<0.02～0.28
4 年目	0.13～0.31	0.12～0.27	<0.03～0.43	<0.03～0.46
5 年目	0.17～0.23	0.15～0.20	0.02～0.50	0.01～0.38

※「しっかりとした中干し」を実施し出穂期前後 3 週間に落水 2 回を実施したのみの対照区と、各含鉄資材を施用した試験区とを比較したコメ中無機ヒ素濃度の低減割合とコメ中カドミウム濃度の増加割合 (%)。

※毎年慣行の施肥時期に製鋼スラグ資材を 200 kg 施用し、出穂期前後 3 週間に落水 2 ～ 3 回実施 ($n = 6$)。

※<0.01 などは当該年度の定量下限 (LOQ) の値である 0.01 mg/kg 未満であることを示す。

【農林水産省研究委託事業 (2018-2022)】

3 カドミウムの低減対策

(1) カドミウム低吸収性品種

◇カドミウム低吸収性品種における玄米中のカドミウム濃度

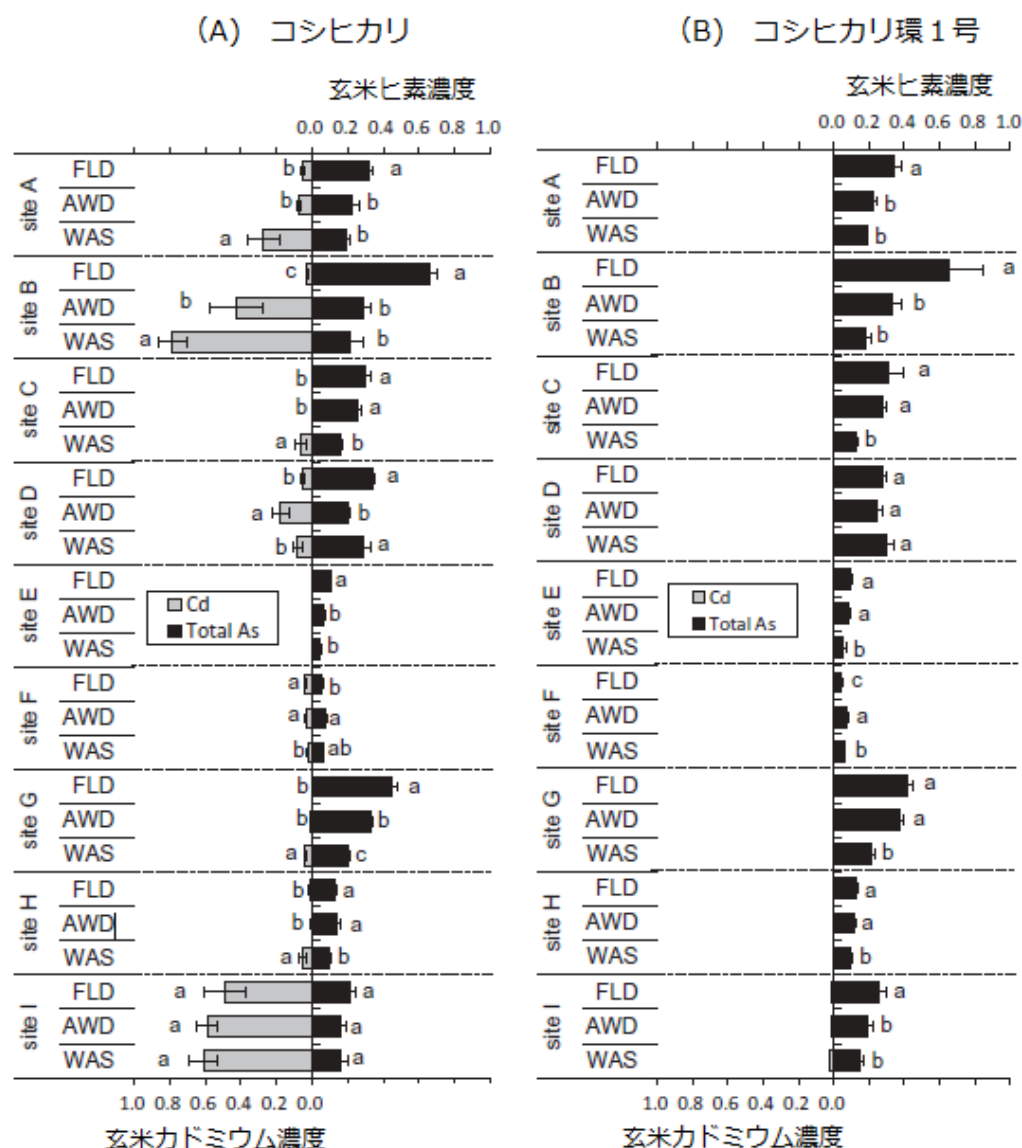


図 33 コシヒカリ及びコシヒカリ環 1 号における水管理方法の違いによる玄米中カドミウム及び総ヒ素濃度の比較

※A～I の 9 ほ場にて試験を実施。異符号間には有意差あり（有意水準 5%、Turkey 法）。

※FLD（湛水区）：常時、湛水状態を維持。

※AWD：湛水状態から、土壌表面まで水が引いたら入水。

※WAS（節水区）：土壌表面に乾燥が見え始めたら入水。

【Ishikawa et al., 2016¹⁰から一部抜粋】

¹⁰ Low-cadmium rice (*Oryza sativa* L.) cultivar can simultaneously reduce arsenic and cadmium concentrations in rice grains. (Ishikawa et.al. Soil Science and Plant Nutrition 62.4 (2016): 327-339.)

◇コシヒカリ環 1 号の品質

コシヒカリ環 1 号は、栽培特性、収量、食味、外観形質等がコシヒカリとほぼ同等である。

表 17 栽培特性等におけるコシヒカリ環 1 号とコシヒカリの比較

品種	栽培年	出穂期 (月/日)	成熟期 (月/日)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本 m ⁻²)	倒伏程度 (0～5) ¹⁾	精籾重 (kg a ⁻¹)	精玄米重 (kg a ⁻¹)	屑米重歩合 (%)	千粒重 (g)
コシヒカリ環 1 号	2012	8/5	9/5	88.9	17.8	355	—	68.1	53.0	3.7	21.0
	2013	8/7	9/4	96.9	17.8	390	1.5	70.9	54.5	4.2	21.6
	2014	8/3	9/6	86.1	19.3	317	0.0	66.0	50.0	6.7	22.9
	2015	8/4	9/13	84.2	19.6	306	0.0	60.9	45.4	6.8	22.1
	2016	8/8	9/9	93.3	19.5	320	0.0	68.6	53.6	4.4	22.0
	平均	8/5	9/7	89.9	18.8	338	0.4	66.9	51.3	5.2	21.9
コシヒカリ	2012	8/4	9/5	89.3	17.7	372	—	67.5	52.7	3.6	21.1
	2013	8/6	9/4	100.2	17.8	364	2.0	73.2	56.4	4.5	21.5
	2014	8/2	9/6	85.2	20.2	296	0.0	70.3	54.9	3.6	23.2
	2015	8/3	9/13	83.8	19.1	299	0.0	60.7	46.2	4.6	22.4
	2016	8/6	9/8	90.9	19.5	283	0.0	65.2	52.2	2.6	22.3
	平均	8/4	9/7	89.9	18.9	323	0.5	67.4	52.5	3.8	22.1
対照比率 ²⁾	—	—	—	100.0%	99.5%	104.7%	—	99.3%	97.8%	135.9%	99.0%

栽植密度は、22.2 株 m⁻² (30 cm×15 cm)。播種は 4 月 25 日前後、移植は 5 月 20 日前後。手植え移植栽培 (3 個体/株)。施肥量は窒素、リン酸およびカリウムともに同量で、2012 年～2015 年は 0.5 kg a⁻¹、2016 年は 0.7 kg a⁻¹ 施用。玄米調整篩目は 1.8 mm。栽培地は茨城県つくば市 (育成地)。分散分析の結果、全項目において両品種間に有意差 (5%水準) なし。

¹⁾ 0 (無)～5 (全面倒伏) の 6 段階評価。

²⁾ 各項目平均値における (コシヒカリ環 1 号) / (コシヒカリ) を示す。

【安部ら、2017¹¹⁾】

¹¹⁾ カドミウム極低吸収品種「コシヒカリ環 1 号」の育成 (安部ら、育種学研究 19 (2017): 109-115.)

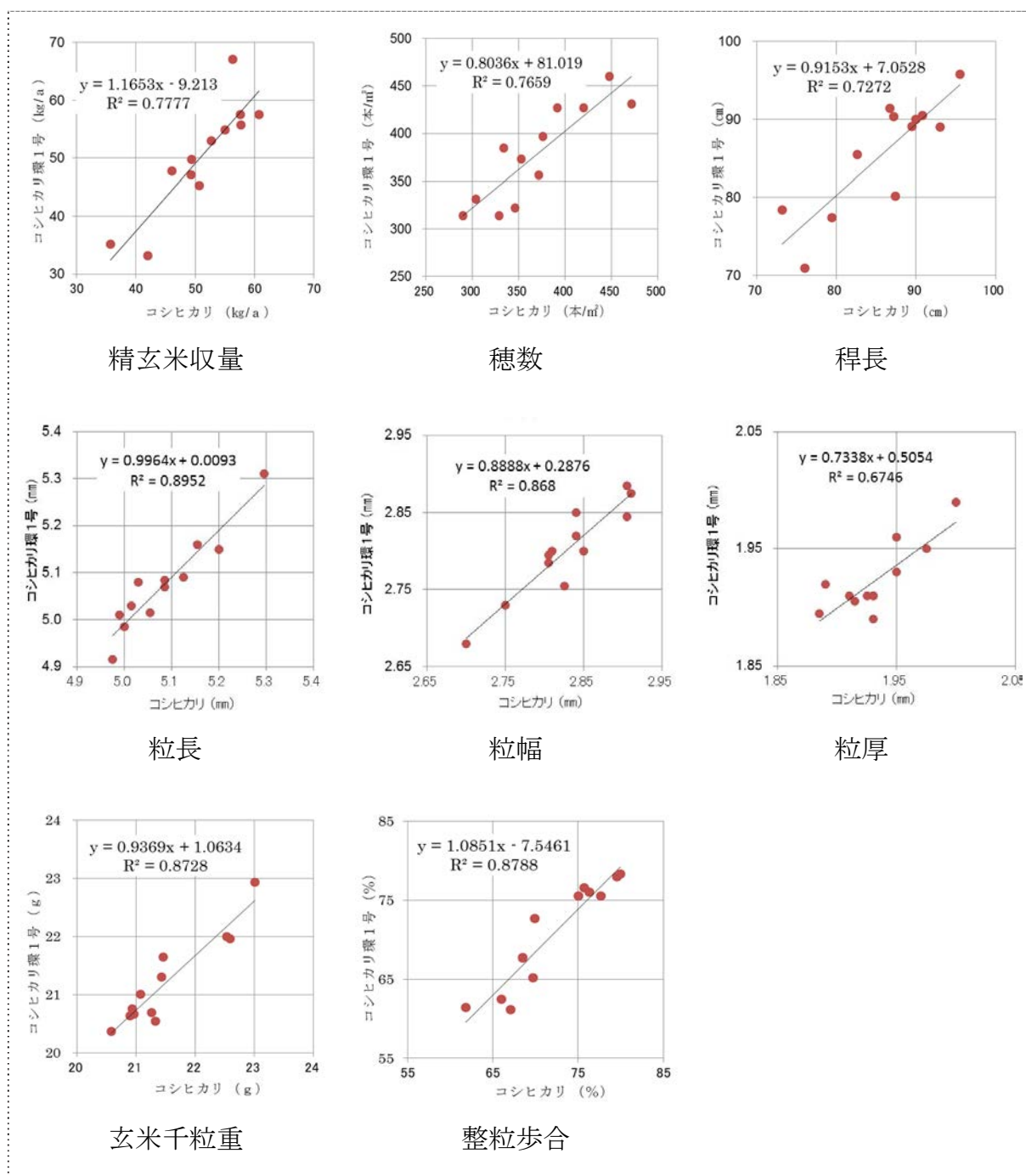


図 34 コシヒカリ環 1 号とコシヒカリとの比較（収量等）

【独立行政法人 農業環境技術研究所 土壌環境研究領域ほか、品種登録出願に関する参考成績書 水稻「lcd-kmt2」（権利保護），p17-19，2013】

表 18 コシヒカリとコシヒカリ環 1 号を比較した食味官能試験結果

総合評価			外観	香り	味	粘り	硬さ
評価値	信頼区間	有意差					
0.200	±0.368	なし	0.050	-0.050	0.150	0.150	-0.250

※専門パネル 20 名による。

※各項目の評価値は、コシヒカリを基準米として、基準米を 0 としたときの官能評価 (-3~+3) の平均値。正の値が基準より優れること、負の値が基準より劣ることを示す。

【独立行政法人 農業環境技術研究所 土壌環境研究領域ほか、品種登録出願に関する参考成績書 水稻「lcd-kmt2」(権利保護)，p9，2013】



図 35 コシヒカリ環 1 号のもみと玄米の外観

※左：コシヒカリ、右：コシヒカリ環 1 号

【安部、倉俣ら，2017】

(2) 湛水管理

◇湛水管理によるカドミウム低減効果

表 19 出穂後の落水時期と玄米中カドミウム濃度の関係

落水時期	玄米中カドミウム濃度 (mg/kg)	割合
出穂当日	1.4 ^a	—
出穂後 7 日目	1.3 ^a	93%
出穂後 14 日目	0.87 ^b	62%
出穂後 21 日目	0.49 ^c	35%

※カドミウム濃度 0.78 mg/kg (0.1 mol/L 塩酸抽出) の細粒グライ土を用いてポット栽培。

※出穂までは湛水状態で水稻を栽培。

※出穂当日からの低減割合。異符号間には有意差あり (5%有意水準、Tukey 法)。

【農林水産省研究委託事業 (2000-2002)】

表 20 湛水管理による吸収抑制対策の効果

水管理方法	玄米中カドミウム濃度 (mg/kg)	割合
湛水なし	0.66	—
湛水管理	0.18	27%

※カドミウム濃度 2.4 mg/kg (0.1 mol/L 塩酸抽出) の灰色低地土を用いてポット栽培試験を実施。

※3ヶ年の試験での平均値であり、湛水管理によって玄米中カドミウム濃度が有意に低減（5%有意水準、t検定）。

※湛水無し：出穂 21 日前から出穂後 21 日目までの間は間断かん水。

※湛水管理：出穂 21 日前から出穂後 21 日目までにわたって湛水管理を実施。

【京都府農業総合研究所による研究結果】

（３） その他のカドミウム低減技術

① 植物浄化

<概要>

植物浄化技術は、土壌中のカドミウムを特異的に吸収する植物を栽培し、生育期間を通じてカドミウムを植物体に吸収させ、ほ場土壌中の汚染物質を除去・浄化するものである。コストの大きい客土を代替するカドミウム除去技術として開発が進められ、いくつかの品種で効果があることが確認された。

◇実施方法

用いる浄化植物はイネとする。その品種については、カドミウム吸収能が高く一定の成果が見込めるファイレメ CD 1 号、ファイレメ CD 2 号、ファイレメ CD 3 号から選定することを基本とする。農業試験場等による予備試験の結果を勘案し、地域の土壌や気候条件に適した品種と栽培方法を選定する。

表 21 浄化植物の品種概要

品種	Cd 収奪量	脱粒 性	耐倒伏 性	食用品種との識別性
ファイレメ CD 1 号	○	なし	中	赤米、長粒、長稈、草姿
ファイレメ CD 2 号	○	なし	極強	赤米、大粒、長稈、草姿、強稈性
ファイレメ CD 3 号	◎	なし	強	赤米、大粒、長稈、草姿、芒あり
長香穀（対照品種）	△	甚	極弱	細粒、草姿、籾色（穂色）

<効果>

1 回の作付けで土壌中のカドミウム濃度（0.1 mol/L 塩酸抽出）を低下させる効果

があり、ファイレメ CD3 号では最大 44%低下させることが可能である。

また、地上部のカドミウム収奪量は、カドミウムの吸収量が多く植物浄化にこれまで用いられてきたイネ品種「長香穀」に比べて最大 2.1 倍であった。

表 22 植物浄化による土壌中カドミウム濃度の単年変化

品種	土壌カドミウム低減割合 (%)	イネ地上部カドミウム収 奪量の比較（長香穀比）
ファイレメ CD1 号	7.8 ～ 15.7	1.0 ～ 1.7
ファイレメ CD2 号	11.3 ～ 28.8	0.8 ～ 1.8
ファイレメ CD3 号	21.6 ～ 44.1	1.5 ～ 2.1

※2007 年度から 2009 年度に全国 3 ヶ所の現地ほ場で実施した結果である。

※土壌中のカドミウム濃度は、作土層（深度 0 cm から 15 cm）の土壌で評価したもの。

※低減割合は、計算式「(作付前の土壌中カドミウム濃度－作付後の土壌中カドミウム濃度)／作付前の土壌中カドミウム濃度」で算出した。

【農林水産省委託研究委託事業（2014-2016）】

<留意事項>

- ・浄化植物の生長が悪かった、農地の水分含量が低い状態を維持できなかった等により浄化植物のカドミウム収奪量が低下した場合、土壌中のカドミウム濃度が十分に低下しない可能性がある。
- ・収穫後の浄化植物は、含まれているカドミウムを適切に回収することが可能な施設で焼却処理する必要がある。

（参考資料）

植物による土壌のカドミウム浄化技術確立実証事業実施の手引（第 2 版）（平成 30 年 1 月、農林水産省、農研機構）

② 土壌洗浄

<概要>

土壌洗浄は、土壌に塩化第二鉄を加えて、カドミウムを水中に溶出させた後、溶出したカドミウムを回収した後に排水することによって、土壌中カドミウムを除去する技術である。

対策に要する期間は、必要な機材の設置、撤去を含め 2 ha 規模で 90 日間程度である。

土壌と水を混合する際の水深を 45 cm 以上とすることで、土壌中のカドミウム濃度を 60% から 80% 程度低くすることが可能である。事前に室内での予備洗浄試験を行うことで土壌からのカドミウムの低減率を精度良く予測できる。

(作業工程)

- a 水田に農業用水と塩化第二鉄を入れ、作業深度を可変かつ一定に維持可能なロータリーを装着したトラクターを用いて塩化第二鉄を含む水と土壌を混合する。
- b 水に溶出したカドミウムを処理装置で回収した上で排水する。
- c 農業用水のみを水田に入れて、工程 a と同様に水と土壌を混合し、水に溶出したカドミウムを回収した後に排水する（本工程を2回から3回繰り返す）。

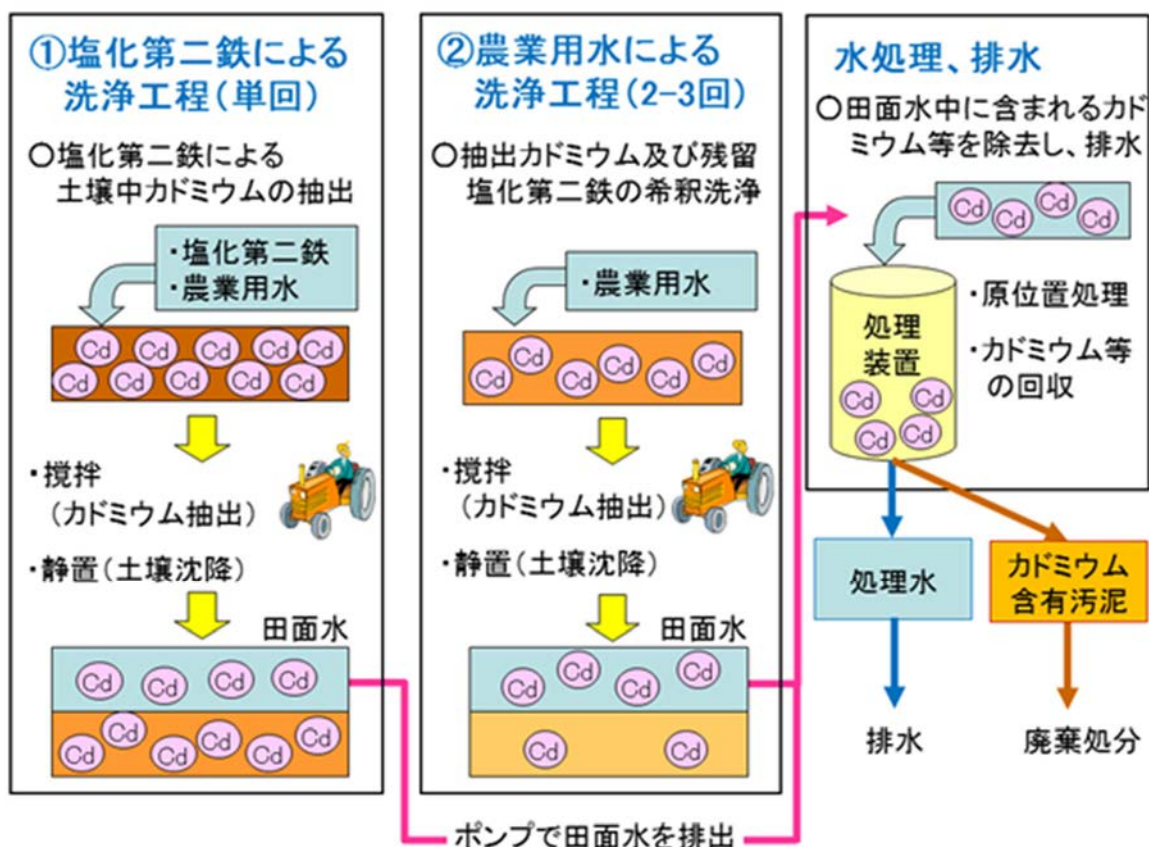


図 36 土壌洗浄技術の概要

<効果>

土壌洗浄技術の実証結果から、作物の収量を損なうことなく、コメ中のカドミウム濃度が低下し、その効果は複数年に渡って継続した。

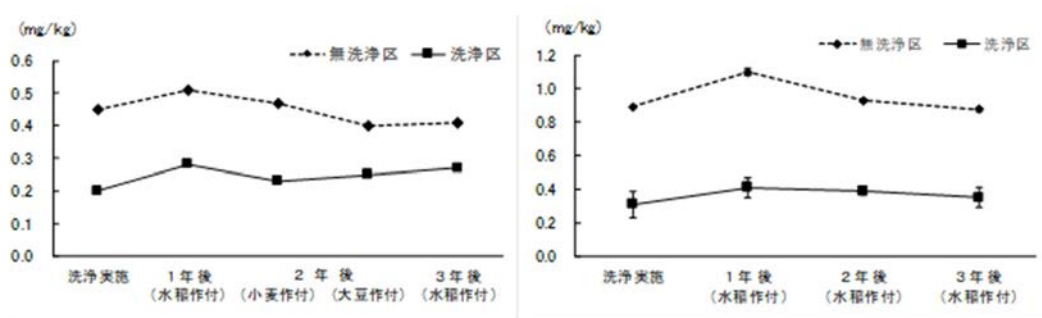


図 37 洗浄区及び無洗浄区での土壌中のカドミウム濃度の推移

【農林水産省研究委託事業：消費・安全対策交付金による実証成果】

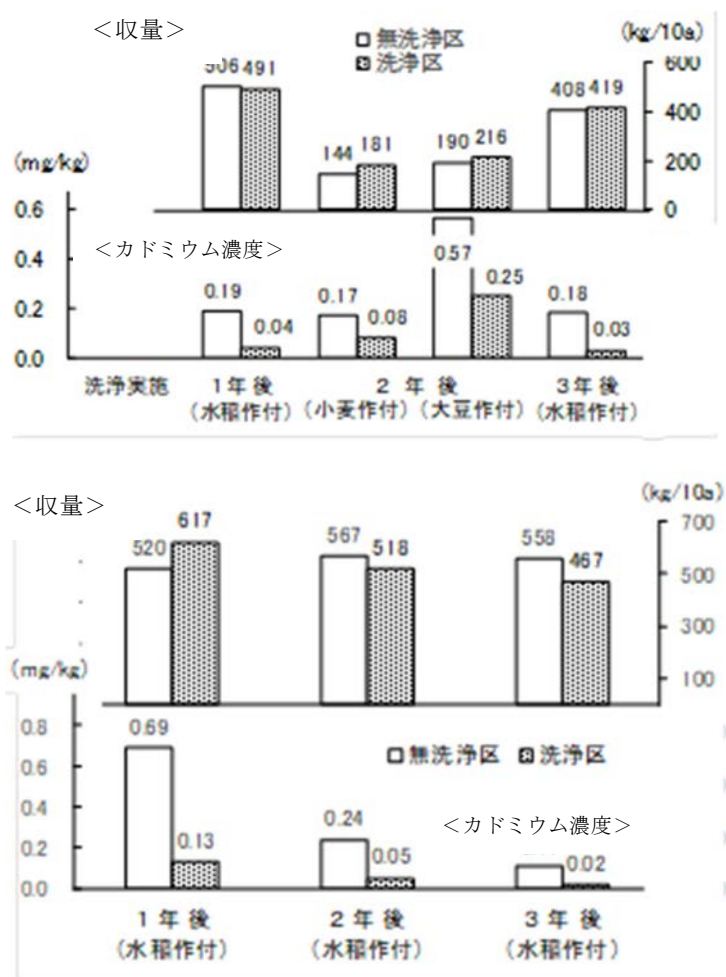


図 38 洗浄区及び無洗浄区での穀物の収量とコメ中のカドミウム濃度

【農林水産省研究委託事業：消費・安全対策交付金による実証成果】

<留意事項>

- ・水に溶出したカドミウムを回収するための処理装置を、対策を実施するほ場周辺に設置する必要がある。
- ・対策に必要な農業用水を確保する必要がある。
- ・対策により土壌の物理性が変化するため、対策終了後最初に生産した農作物、特に畑作物の生育や収量に影響を及ぼすことがある。
- ・対策により土壌中の無機態窒素が著しく増加することがあるため、対策終了後最初に生産した水稻に倒伏が生じることがある。
- ・土壌の種類によってはカドミウム抽出に高濃度の塩化第二鉄が必要となり、費用対効果について検討する必要がある。

(参考資料)

薬剤による土壌のカドミウム浄化技術確立実証調査計画指針（平成 19 年 7 月、農林水産省、(独) 農業環境技術研究所）

4 加工等によるコメ中無機ヒ素の低減

(1) とう精による低減効果

◇玄米と精米との比較

ヒ素については、ぬか層（玄米の外側の約9%に相当）に無機ヒ素が偏在していることが知られており、農林水産省の調査においても、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割であった（表23）。

表23 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

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を100%として、精米中の無機ヒ素濃度の比率を算出（精米中の無機ヒ素濃度）／（玄米中の無機ヒ素濃度）×100（%）。

【農林水産省調査結果¹²（2017-2019）】

◇とう精によるヒ素の低減

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る。

精米歩合を低くするほどコメ中の無機ヒ素濃度は減少したものの、通常の精米歩合である90%以下になると減少傾向が小さくなることが分かった。また、とう精を緩くした場合（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となることが分かった（表24、表25）。

表24 玄米をとう精後の無機ヒ素濃度の減少割合

精米歩合	試料数	無機ヒ素濃度減少割合※ (%)	
		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%とした場合の減少割合

【農林水産省調査結果（2016）】

¹² 国産米の無機ヒ素の含有実態調査（平成29年～令和元年産）

表 25 一般的なとう精（精米歩合 90%）と五分づき（精米歩合：95%）の場合の無機ヒ素濃度の減少割合

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

※玄米の無機ヒ素濃度を 100%とした場合の減少割合（%）

【Naito et al., 2015 を改変¹³⁾】

◇とう精のカドミウムへの影響

玄米に含まれるカドミウムは、とう精過程を経ても、含有濃度はほとんど減少しないことが分かっている。ただし、米ぬか中のカドミウム濃度は、玄米及び精米と比較して高い傾向がみられた（表 26）。

表 26 原料玄米、精米及び米ぬかのカドミウム濃度

試料	玄米 (mg/kg)	精米 (mg/kg)	米ぬか (mg/kg)	精米歩合 (%)
試料 1	0.0453 (100%)	0.0436 (96.2%)	0.0639 (141.1%)	90.1
試料 2	0.0635 (100%)	0.0626 (98.6%)	0.0904 (142.4%)	88.7
試料 3	0.1164 (100%)	0.1109 (95.3%)	0.1701 (146.1%)	83.6
試料 4	0.1205 (100%)	0.1169 (97.0%)	0.1640 (136.1%)	89.7
試料 5	0.1176 (100%)	0.1124 (95.6%)	0.1470 (125.0%)	92.0
試料 6	0.0156 (100%)	0.0153 (98.1%)	0.0224 (143.6%)	88.4

※括弧内は玄米の無機ヒ素濃度を 100%とした場合の割合（%）。

※供試品種：ヒノヒカリ、きらら 397、ひとめぼれ、コシヒカリ、あきたこまち

【守山ら，2003¹⁴⁾】

¹³⁾ Effects of polishing, cooking, and storing on total arsenic and arsenic species concentrations in rice cultivated in Japan. (Naito et.al., Food Chemistry 168 (2015): 294-301.)

¹⁴⁾ 中規模搗精工程におけるコメ中カドミウム含有量の変化（守山ら，食品衛生学雑誌 Vol. 44, 3 (2003): 145-149.）

（２） 調理による低減効果

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る。

白米を３回洗米した後のコメ中の無機ヒ素の濃度は、洗米前に比べて 20%程度低くなった。しかし、玄米では、洗米してもほとんど無機ヒ素濃度は低くならなかった（図 39）。

また、洗米のかわりに無洗米処理（とう精で除去しきれない精米表面のぬかを取り除く処理）をしても、洗米と同様に無機ヒ素濃度が低くなり、白米を無洗米処理すると、無機ヒ素濃度は、10%程度低くなる（表 27）。

一方で、カドミウムについては、精米後の洗米や炊飯などによる低減効果はみられない。

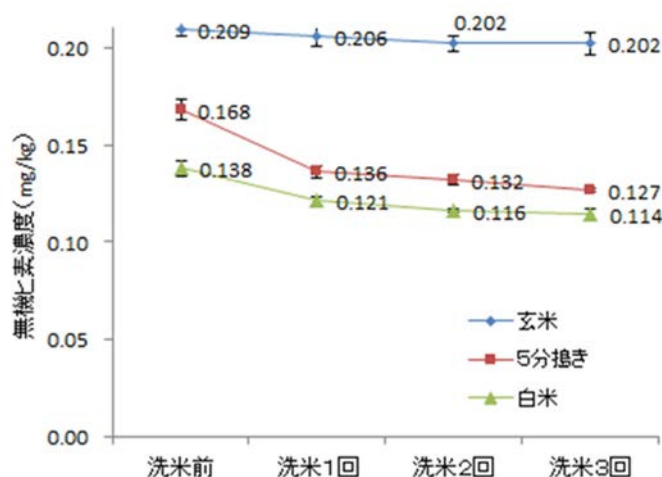


図 39 コメの洗米回数とヒ素低減効果

【農林水産省研究委託事業（2012-2013）】

表 27 無洗米加工によるコメ中無機ヒ素の濃度変化

加工の種類	平均値 (mg/kg)	標準偏差
玄米	0.208	0.004
90%精米	0.131	0.003
無洗米	0.119	0.001

※精米歩合 90 %は目安（実測値なし）で、無洗米加工はヌカ式（BG 精米製法）。

※5 反復試験結果、n=2 点併行×5 回加工。

【Naito et al., 2015 を改変】

表 28 調理に伴う精米中のカドミウム濃度の変化

カドミウム濃度(mg/kg)		
精米時	水洗後	炊飯後
0.064±0.003 (100%)	0.060±0.001 (93.8%)	0.063±0.003 (98.4%)

※括弧内は精米のカドミウム濃度を 100%とした場合の割合（%）。

※炊飯は、水洗後の精米に重量比 1.4 倍のイオン交換水を加え 1 時間浸水させた後、電気炊飯器で炊飯した。

【Shindoh & Yasui, 2003¹⁵】

¹⁵ Changes in Cadmium Concentration in Rice during Cooking. (Shindoh, K. and Yasui, A., Food Sci. Technol. Res., 9 (2) (2003): 193-196.)

5 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、対策の効果を把握するためにも、分析により濃度データを取得する必要がある。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どうかにかかわらず、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る。

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る。

ここでは、農林水産省が実施する実態調査で活用している分析法などを紹介する。

(1) カドミウム

食品衛生法に基づく「食品、添加物等の規格基準」(昭和 34 年厚生省告示第 370 号)において、原子吸光法による分析法が規定されている。また、「食品、添加物等の規格基準の一部を改正する件について」(平成 22 年 4 月 8 日厚生労働省医薬食品局食品安全部長通知)において、原子吸光法と同等以上の性能を有する分析法として以下のものが規定されている。詳細については、厚生労働省のウェブサイト等を参照。

- ・誘導結合プラズマ発光分光分析法
- ・誘導結合プラズマ質量分析法

(2) ヒ素

◇高速液体クロマトグラフ誘導結合プラズマ質量分析法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る。

なお、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、以下の文献から入手可能。

- ・測定対象
無機ヒ素 (分子種別)
- ・利点
 - ✓ 無機ヒ素の濃度や摂取量を高い精度で推定可能。
 - ✓ 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。

- ・ 文献情報

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.

◇水素化物発生誘導結合プラズマ発光分析法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る。

- ・ 測定対象

無機ヒ素

- ・ 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。

- ・ 文献情報

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.

◇改良 Gutzeit（グッツアイト）法による無機ヒ素分析

水溶液試料に含まれる無機ヒ素を簡易に検出する方法である Gutzeit 法を基に、コメからの抽出液に適用できるように手順を変更し、抽出方法についても最適化した分析法が開発されている。また、当該分析法では、Gutzeit 法で使用する毒性の高い水銀化合物を用いることなく、国内で入手可能な器具、試薬のみを用いて分析が可能である。

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る。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る。

当該分析法に係る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から入手可能。

- ・測定対象
無機ヒ素
- ・利点
 - ✓ 高価な分析機器が不要。1 検体あたりの消耗品の費用は 100 円前後（2016 年時に試算）。
 - ✓ 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
 - ✓ 当該分析法においては呈色から無機ヒ素の濃度を求めるが、無機ヒ素の 10 分の 1 程度の感度で有機ヒ素も呈色に影響するため、無機ヒ素の濃度が本来よりもやや高く評価される。国産のコメ中の有機ヒ素の割合は 1 割に満たない程度であり、呈色への影響はその 10 分の 1 である 1 %程度となるが、海外のコメの中には有機ヒ素が高いものもあると報告されているため、結果の取り扱いには注意が必要となる。
 - ✓ 分析濃度の範囲は 0.1 mg/kg～0.5 mg/kg である。
- ・文献情報
コメ中無機ヒ素の簡易分析標準作業手順書（サンプル版）

◇誘導結合プラズマ質量分析法による総ヒ素分析

国産のコメに含まれるヒ素（総ヒ素）の大部分が無機ヒ素であることから、コメ中の総ヒ素の濃度を測定することでおよそそのコメ中の無機ヒ素濃度を把握することができるため、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る。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る。

- ・測定対象
総ヒ素
- ・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。
- ・文献情報
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可能。

◇蛍光 X 線分析法による総ヒ素分析

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る。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あった。

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た（図 40）。

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ことが確認された（図 41）。

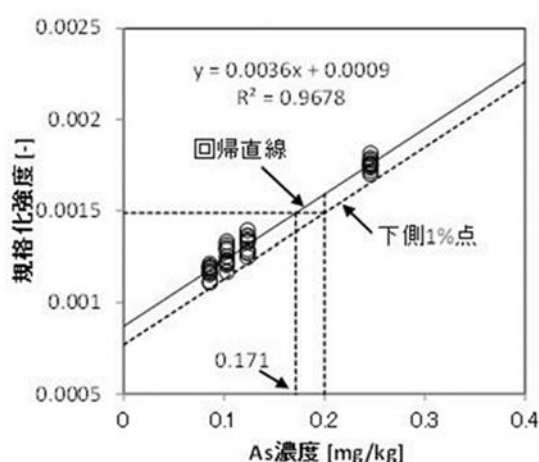


図 40 総ヒ素濃度が既知の精米試料を繰り返し測定した場合のスペクトル強度（規格化強度）

※繰り返し測定の結果から、測定時間が 1,700 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。

【農林水産省研究委託事業（2013-2019）】

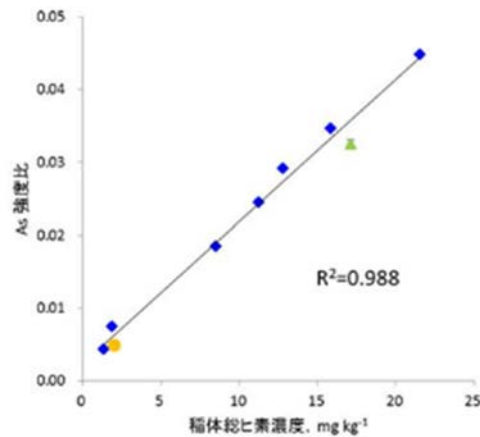


図 41 蛍光 X 線分析によるイネ茎葉（穂、稲わら、止葉）のヒ素測定結果

※測定時間は 100 秒、3 回繰り返し測定

【農林水産省研究委託事業（2013-2019）】

- ・測定対象

総ヒ素

- ・利点

- ✓ コメ試料を粉砕したり抽出したりする調製が不要である。

- ・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である（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。

（参考）土壌のサンプリング方法

コメ中のカドミウムや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、ほ場土壌中のカドミウム及びヒ素の含有実態を把握することが重要である。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る。また、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る。

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を把握するために実施した調査の結果は以下のとおり。

<土壌中のヒ素濃度を把握するための採取法の検討>

複数の一般ほ場において、縦横 4 m ごとの区画（メッシュ）から土壌試料を採取し、土壌中の 1 mol/L 塩酸抽出土壌ヒ素濃度を分析した結果を用いて、農用地の土壌の汚染防止等に関する法律に基づき土壌中の銅やヒ素の含有量の検定の方法として規定されている 1 ほ場から 3 点採取する方法（3 点法）や土壌中のカドミウムの含有量の検定の方法として規定されている 5 点採取する方法（5 点法）について、95%信頼区間の幅を推定した。

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% 程度になった（表 29）。

この結果は、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あった。

そのため、試料採取にかかる労力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る。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る。

表 29 採取方法による信頼区間幅の比較

	00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 4 m 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。

【農林水産省研究委託事業（2013-2017）】

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（水稻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）の成果です。また、「農研機構，2024」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 3 版）（予定）」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。