

## 黒ボク土水田における節水管理が玄米中の無機ヒ素濃度に与える影響

Effect of Water-Saving Conditions in Andosol Paddy Field  
on Inorganic Arsenic Concentrations in Unpolished Rice Grain

白尾謙典\*・石川覚\*\*・牧野知之\*\* \*\*\*

Kensuke SHIRAO, Satoru ISHIKAWA and Tomoyuki MAKINO

## 要 約

コメでは、国際食品規格によって農作物に含まれる基準値がカドミウム(Cd)の精米中0.4mg/kgに続き玄米中無機ヒ素(As)濃度についても0.35mg/kgと設定された。現在、玄米中Cdの国内基準値は0.4mg/kgと設定され、今後無機Asの国内基準値設定も予想されるため、玄米中の無機As及びCd濃度を同時に低減する技術開発が求められている。そこで本研究では、熊本県農業研究センター内黒ボク水田において中干以降に3水準の水管理(節水区、間断灌漑区、湛水区)を設定し、‘コシヒカリ’及びカドミウム低吸収品種‘コシヒカリ環1号’を栽培した。それら試験区において、無機As・Cd吸収に影響が大きいと考えられる土壌の酸化還元電位(土壌Eh)および玄米中無機As及びCdの濃度を測定し玄米収量・品質に与える影響について検討した。その結果、節水区により土壌を酸化状態に保つことで、間断灌漑、湛水区に比べ玄米中の無機As濃度は低く、またCd濃度は検出限界以下であった。一方、精玄米重および整粒比は低下する傾向であった。以上のことから、本研究の黒ボク水田における節水管理が玄米中の無機As・Cd濃度低減に有効であることは示されたが、玄米の収量・品質低下を起さず、無機As・Cd濃度を低減し、また実際の圃場に適用する水管理法の開発が必要であると考えられた。

キーワード：カドミウム，ヒ素，酸化還元電位，コメ

## I 緒言

ヒ素(以下As)とカドミウム(以下Cd)は自然環境中に広く存在する元素であり、農耕地土壌で栽培された農作物には低濃度ながら含まれている。無機AsとCdは一定量以上を継続して摂取することで、健康被害を与えることが知られており、国際食品規格によって農作物に含まれる量に対して基準値が設けられている。

コメを主食とする日本人は、食品から摂取する無機AsおよびCdの多くをコメから摂取している<sup>1) 2)</sup>。国際食品規格で玄米に含まれる無機Asについては0.35mg/kg、精米中に含まれるCdについては0.4mg/kgという基準値が設定されている。国内ではCdに対して食品衛生法に基づく玄米および精米中濃度の国内基準値0.4mg/kgが2011年に設定されている。一方、Asに対しても今後、国内基準値の設定が予想されるため、玄米中のAsおよびCd濃度を同時に低減可能な技術が求められている。

これまで、玄米中のカドミウム濃度を低減するための技術開発が実施され、出穂期前後3週間の湛水管理が有効であることが明らかにされており<sup>3) 4)</sup>、対策として広く利用されている。また、農業環境変動研究センターが

作出したカドミウム低吸収品種‘コシヒカリ環1号’は、突然変異によりイネのカドミウム吸収機能を欠損させることで、玄米に吸収されるカドミウムを極低濃度にした品種であり、水稲におけるカドミウム汚染リスクをほぼ皆無にすることができる対策技術として普及が期待されている<sup>5)</sup>。

一方、玄米中の無機Asの低減技術についても研究が進められている<sup>6)</sup>。土壌中のAsは溶解性の低いヒ酸として存在することが多い。しかし、出穂前後の湛水等により土壌が還元状態になることで水溶性が高く土壌への吸着性が低い亜ヒ酸に還元され土壌溶液中に溶出し玄米中のAs濃度に大きく影響を与える。このため、水稲におけるAsの吸収を抑制し玄米中のAs濃度を低減するためには水田を乾田状態とし、土壌を酸化状態に維持することが重要である。

乾田状態ではAsの吸収は減少するがCdの吸収は増加する。一方、湛水状態ではCdの吸収は減少するがAsの吸収が増加することから、水管理によってAsとCdを同時に低減することは容易ではない。そのため、カドミウム低吸収品種‘コシヒカリ環1号’と水田土壌を酸化状

\*現 熊本県産業技術センター \*\*農研機構農業環境変動研究センター \*\*\*現 東北大学大学院農学研究科

態に維持するために落水期間を慣行の間断かん水より長く設定する水管理（以下節水管理）を組み合わせた As および Cd の同時吸収抑制技術が検討され、有効性が確認されている<sup>7)</sup>。しかし、熊本県では、節水管理を開始する時期が梅雨期と重なるため、節水管理による酸化状態は降雨による影響を強く受ける。そこで、本県の黒ボク土水田において Cd 低吸収品種‘コシヒカリ環1号’と節水管理を組み合わせ、その条件が玄米中の無機 As 濃度、Cd 濃度および玄米収量・品質に及ぼす影響について検討した。

## II 材料および方法

### 1 試験圃場と土壌の物理化学性

試験は熊本県農業研究センター内水田(熊本県合志市)で実施した。土壌は厚層多腐食質多湿黒ボク土で、減水深は中干前で 6.4 cm/日、中干後で 10.5 cm/日と透水性は高かった。試験開始前の土壌の理化学性を第1表に示したが、公定法による As 濃度は 1.8mg/kg (1M 塩酸抽出)、Cd 濃度は 0.1mg/kg (0.1M 塩酸抽出)であった。

第1表 試験圃場の土壌理化学性

pH	炭素含量 (%)	窒素含量 (%)	CEC mg/100g乾土	交換性塩基			土性		
				Ca	K mg/100g乾土	Mg	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)
6.6	8.7	0.6	46.0	748.1	55.5	115.7	39.8	39.3	20.9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Fe				As		Cd	
Trout法	Bray-2準法 (mg/100g乾土)	リン酸吸収係数	遊離酸化Fe (g/kg)	非晶質Fe (g/kg)	非晶質Al (g/kg)	可給態Si (mg/kg)	交換性Mn (mg/kg)	1M HCl (mg/kg)	0.1M HCl (mg/kg)
2.4	26.9	2119.0	37.8	19.9	49.8	39.0	3.8	1.8	0.1

第2表 試験区の構成および水管理概要

ただし、3試験区とも出穂から1週間は湛水状態とした。

年度	試験区	移植日	中干し開始日	中干し終了日	中干し以降出穂期まで	出穂期	出穂期以降落水日まで	落水日	収穫日
H27	節水区 (4湛3落)	5/16	6/29	7/9	4日間湛水3日間落水の繰り返し	コシヒカリ (7/20) コシヒカリ環1号 (7/22)	4日間湛水3日間落水の繰り返し	8/17	8/25
	間断灌漑区	5/16	6/29	7/9	3日間湛水1日間落水 2日間湛水1日間落水の繰り返し	コシヒカリ (7/21) コシヒカリ環1号 (7/24)	3日間湛水1日間落水 2日間湛水1日間落水の繰り返し	8/17	8/25
	湛水区	5/16	6/29	7/9	常時湛水	コシヒカリ (7/21) コシヒカリ環1号 (7/24)	常時湛水	8/17	8/25
H28	節水区 (3湛4落)	5/23	6/27	7/6	3日湛水4日落水	コシヒカリ (7/24) コシヒカリ環1号 (7/26)	3日湛水4日落水	8/20	8/24
	間断灌漑区	5/23	6/27	7/6	3日間湛水1日間落水 2日間湛水1日間落水の繰り返し	コシヒカリ (7/25) コシヒカリ環1号 (7/27)	3日間湛水1日間落水 2日間湛水1日間落水の繰り返し	8/20	8/24
	湛水区	5/23	6/27	7/6	常時湛水	コシヒカリ (7/25) コシヒカリ環1号 (7/27)	常時湛水	8/20	8/24
H29	節水区 (3湛4落)	5/23	6/28	7/12	3日湛水4日落水	コシヒカリ (7/18) コシヒカリ環1号 (7/18)	3日湛水4日落水	8/16	8/22
	間断灌漑区	5/23	6/28	7/12	3日間湛水1日間落水 2日間湛水1日間落水の繰り返し	コシヒカリ (7/18) コシヒカリ環1号 (7/18)	3日間湛水1日間落水 2日間湛水1日間落水の繰り返し	8/16	8/22
	湛水区	5/23	6/28	7/12	常時湛水	コシヒカリ (7/18) コシヒカリ環1号 (7/18)	常時湛水	8/16	8/22

※ 全ての試験区で田植えから1週間後に除草剤を散布し、その後中干し開始までは湛水管理を行った。

※ 全ての試験区で出穂期から約1週間は湛水管理を行った。

平成 27 年は 1 区 90 m<sup>2</sup> 2 反復とし、同一の水管理を並べて配置した。平成 28 年および平成 29 年は 1 区 72 m<sup>2</sup> の 3 反復とした。3 年間を通じて隣接区の水管理の影響を受けないために中心に設置した波板に盛り土した土畦畔で分割した。

#### 4 酸化還元電位の測定

土壌の酸化還元電位は 1 区あたり 2 本ずつ白金電極を常時設置し飽和塩化ナトリウムが内部液の塩化銀電極 (4400 型,株式会社藤原製作所) および ORP メーター (HM31,東亜ディーケーケー株式会社) を使用し、中干し前から収穫前まで 1 日～3 日間隔で平成 27 年は 28 回、平成 28 年は 36 回、平成 29 年は 32 回測定した。

#### 5 玄米中の無機ヒ素およびカドミウム濃度

成熟期に採取した玄米サンプルは、農業環境変動研究センターにおいて硝酸と過塩素酸で湿式分解し ICP-MS (NexION 300XX, Perkin Elmer 製) で Cd 濃度、0.15M 硝酸で抽出し HPLC (Flexar Perkin Elmer 製) および ICPMS (同上) で無機 As 濃度を測定した。

#### 6 水稻の生育および収量

生育調査は、出穂期、稈長、穂長および穂数について 1 区あたり 20 株を抽出して行った。収量調査は、籾黄化率 60% の頃に 1 区あたり 50 株を抽出して採取し、精粒重、精玄米重、玄米千粒重およびわら重を測定した。また、穀粒判別器 (RGQI 10B, サタケ) により外観品質を測定した。なお、収量および品質調査に供する玄米試料は、1.8mm で選別した。

### III 結果

#### 1 玄米中の無機 As 濃度および Cd 濃度

平成 27 年から平成 29 年における玄米中の無機 As および Cd 濃度を第 3 表に示した。コシヒカリにおける玄米中の無機 As 濃度は、平成 27 年には水管理による差は認められなかったものの、平成 28 年および 29 年では湛水区と間断灌漑区に差は認められなかったが節水区で湛水区の 34.7%、44.4% に低下した。一方、コシヒカリ環 1 号では、湛水区に比べて平成 27 年の間断灌漑区で差が認められなかったものの、平成 28 年および 29 年の間断灌漑区、節水区では 3 か年ともに玄米中の As 濃度が低下した。なお、湛水区に比べ間断灌漑区の As 濃度は、平成 28 年が 45.9%、平成 29 年が 43.1%、同じく平成 27～29 年の節水区の As 濃度はそれぞれ 69.0%、44.3%、54.9% であった。1 週間に 4 日以上 of 落水を行った水管

理 (節水区) について、湛水区と比較して有意に玄米中の濃度は低減した。

一方、玄米中の Cd は、0.008mg/kg であった平成 27 年のコシヒカリを除き、検出限界以下であった。

第 3 表 玄米中の無機 As および Cd 濃度

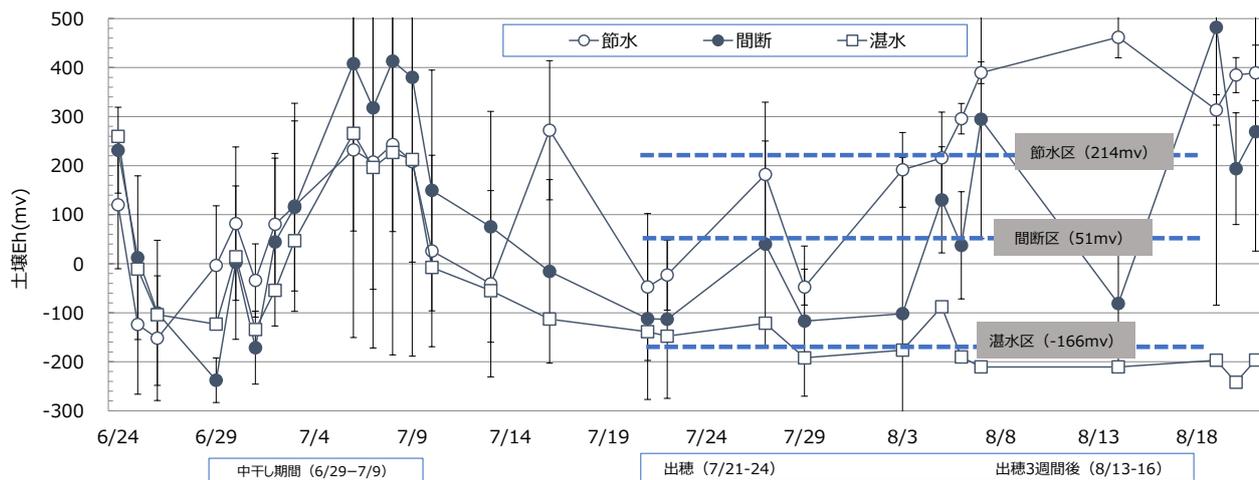
品種	年度	水管理	無機As (mg/kg)		Cd (mg/kg)
			AV	SD	AV
コシヒカリ環 1号	H27	節水区 (4湛3落)	0.029	± 0.006	N.D.
		間断灌漑区	0.039	± 0.010	N.D.
		湛水区	0.042	± 0.008	N.D.
コシヒカリ環 1号	H28	節水区 (3湛4落)	0.027	a ± 0.011	N.D.
		間断灌漑区	0.028	a ± 0.005	N.D.
		湛水区	0.061	b ± 0.003	N.D.
コシヒカリ環 1号	H29	節水区 (3湛4落)	0.028	a ± 0.003	N.D.
		間断灌漑区	0.022	a ± 0.001	N.D.
		湛水区	0.051	b ± 0.007	N.D.
コシヒカリ環 1号	H27	節水区 (4湛3落)	0.028	± 0.003	N.D.
		間断灌漑区	0.031	± 0.010	0.008
		湛水区	0.024	± 0.004	0.008
コシヒカリ環 1号	H28	節水区 (3湛4落)	0.017	a ± 0.005	N.D.
		間断灌漑区	0.045	b ± 0.007	N.D.
		湛水区	0.049	b ± 0.012	N.D.
コシヒカリ環 1号	H29	節水区 (3湛4落)	0.020	a ± 0.004	N.D.
		間断灌漑区	0.039	b ± 0.002	N.D.
		湛水区	0.045	b ± 0.007	N.D.

※異なるアルファベット間ではTukey検定で有意差あり(p<0.01)

※Cdの検出限界(H27:0.002mg/kg、H28:0.002mg/kg、H29:0.005mg/kg)

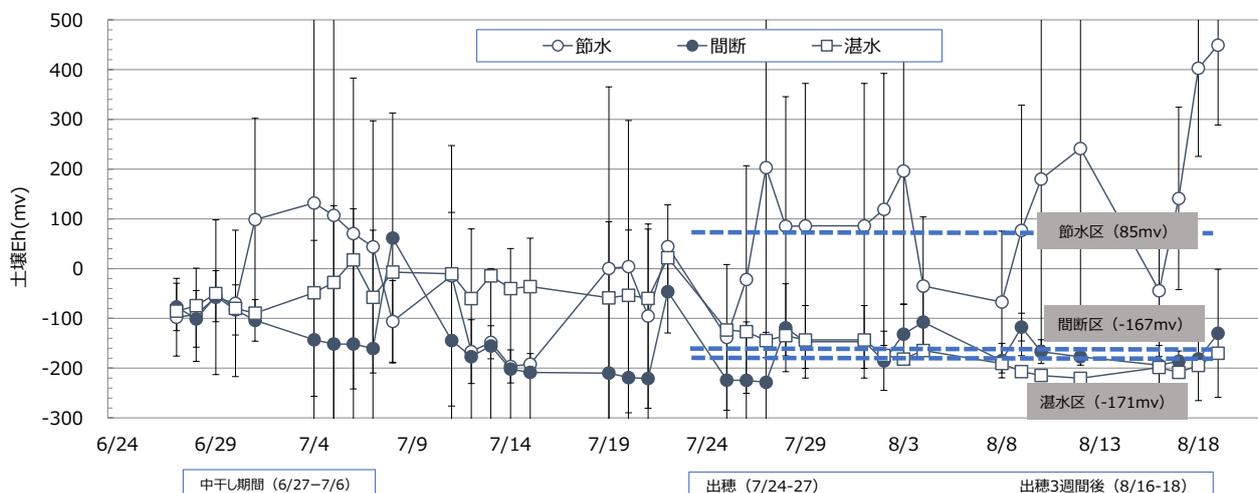
#### 2 栽培期間中の酸化還元電位と玄米中無機 As 濃度の関係

平成 27 年の酸化還元電位 (以下土壌 Eh) の推移を第 1 図に示した。中干開始後も降雨のため全ての水管理区で -200～0mV で推移したが、中干開始後 5 日後から 10 日後は晴天による土壌の乾燥によって全ての水管理区で 200mV を超え、間断区では 400mV に達した。その後の水管理で出穂後 3 週間目までの間、湛水区は -100～-200 mV の還元状態、間断区では 0 mV 前後、そして節水区では 0～400 mV の酸化的状態で推移した。平成 28 年の土壌 Eh の推移を第 2 図に示した。中干開始後も降雨のため全ての水管理区 -100 mV 前後で推移したが、その後の晴天により土壌が乾燥し 0～100mV に上昇した。その後の水管理で節水区は、収穫まで 100～200mV の酸化状態を維持する期間が長く、間断区および節水区では、0～100mV の還元状態で推移した。平成 29 年の土壌 Eh の推移を第 3 図に示した。中干しの前半は降雨により土壌が乾ききれず 0 mV 以下の還元状態で推移したが、その後の晴天により土壌が乾燥し 100mV 前後まで上昇した。その後の水管理で、節水区は、出穂後 1 週間から 2 週間の間は 100～300 mV 程度の酸化状態を維持する期間が長く、間断区および節水区では出穂後 1 週間から 2 週間の間は 0mV 程度、その後は -200 mV の還元状態で推移した。なお 3 か年を通じて土壌 Eh の値は同一区においてもバラつきが大きかった。



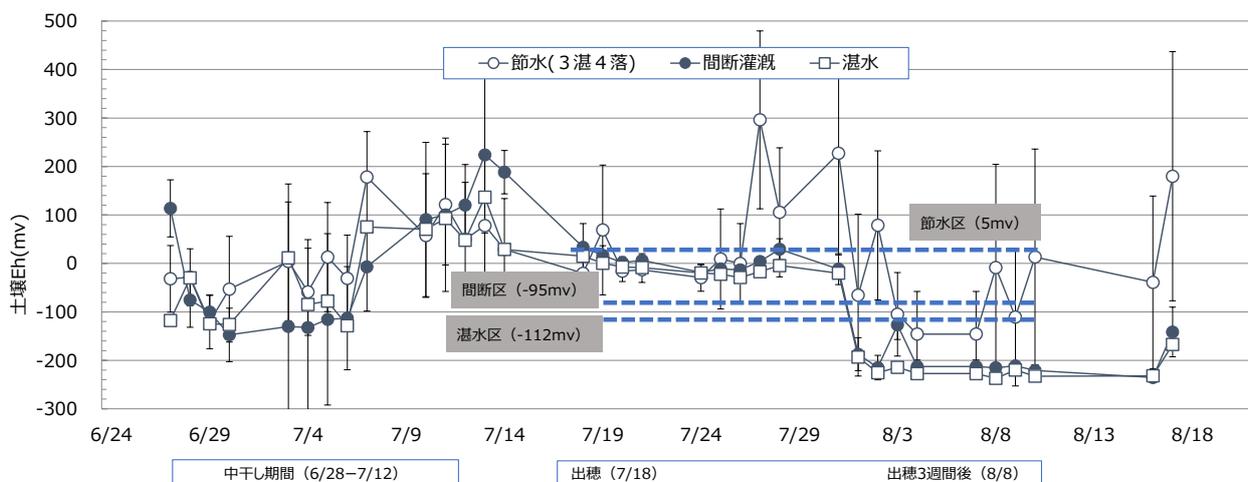
第1図 酸化還元電位の推移 (平成27年度)

※エラーバーは標準偏差を示す  
 ※図中の破線および数値は出穂後3週間の平均土壌 Eh を示す



第2図 酸化還元電位の推移 (平成28年度)

※エラーバーは標準偏差を示す  
 ※図中の破線および数値は出穂後3週間の平均土壌 Eh を示す



第3図 酸化還元電位の推移 (平成29年度)

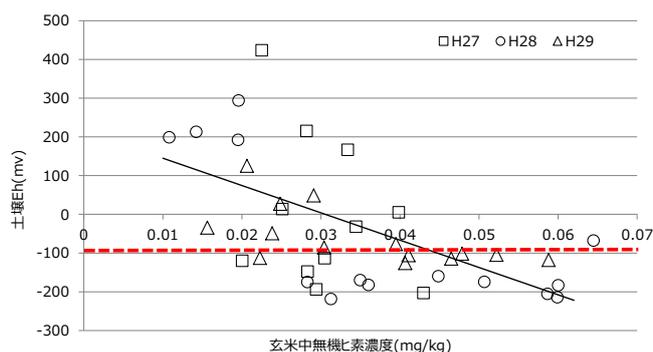
※エラーバーは標準偏差を示す  
 ※図中の破線および数値は出穂後3週間の平均土壌 Eh を示す

中干し開始から収穫前の落水までの間で出穂日を基準とした一定期間の土壌 Eh の平均値と玄米中無機 As 濃度の相関を第 4 表に示した。3 年間 3 試験区における出穂前 3 週間から出穂後 3 週間、出穂前 1 週間から出穂前 3 週間および出穂後 3 週間の土壌 Eh の平均値と玄米中無機 As 濃度の比較した結果、いずれも有意な負の相関が認められた。相関係数は出穂後 3 週間の平均土壌 Eh が -0.562 と最も高く、平均する期間が長くなるほど低下した。

出穂後 3 週間の平均土壌 Eh と玄米中無機 As 濃度の関係を第 4 図に示した。出穂後 3 週間の平均土壌 Eh が概ね -100mV より酸化状態になると玄米中の As 濃度は低く抑えられる傾向がみられた。

第 4 表 栽培期間中の土壌 Eh 期間平均値と玄米中無機 As 濃度の相関

土壌 Eh を平均した期間	p 値	相関係数
出穂後 3 週間	0.00016	-0.562
出穂前 1 週間から出穂後 3 週間	0.00131	-0.491
出穂前 3 週間から出穂後 3 週間	0.01827	-0.371



第 4 図 出穂後 3 週間の土壌 Eh の平均値と玄米中無機 As 濃度の関係

### 3 生育および収量

3 か年のコシヒカリ環 1 号およびコシヒカリの生育と収量を第 5 表に示した。コシヒカリ環 1 号の出穂期は、平成 27 年および平成 28 年の節水区と間断灌漑区で湛水区に比べ 1 日早まったが、平成 29 年では処理区間の差がみられなかった。一方、コシヒカリの出穂期は平成 28 年に節水区が湛水区および間断灌漑区に比べ 1 日早く、平成 27 年および平成 29 年は差がみられなかった。稈長は、コシヒカリ環 1 号で、湛水区と比較して間断灌漑区および節水区は平成 27 年で 3.4~3.8 cm、平成 28 年は 2.4~7.1 cm、平成 29 年は 5.2~7.2 cm 短くなった。コシヒカリでは、湛水区と比較して間断灌漑区および節水区は、平成 27 年では差がみられず、平成 28 年で 4.0~7.5 cm、平成 29 年で 4.1~6.1 cm 短くなった。穂長については、両品種とも水管理による差がみられなかった。穂数は、節水区と間断灌漑区では湛水区と比較すると 3 年を通してコシヒカリ環 1 号は 5.5~16.0%、コシヒカリは 5.5~18.5% 減少した。

精玄米重は、両品種の湛水区を 100 とした指数で比較した。コシヒカリ環 1 号の平成 27 年、28 年および 29 年における節水区の精玄米重は、104、86、87、間断湛水区が 101、87、75 であった。一方、コシヒカリでは、節水区が 97、81、88、間断灌漑区が 100、96、84 であった。平成 28 年および 29 年の精玄米重は、湛水区に比べ節水区、間断灌漑区ともに低下する傾向が認められたが、有意差は認められなかった。

第 5 表 生育および収量 (平成 27-29 年度)

品種	年度	水管理	出穂期	稈長	穂長	穂数	精籾重	精玄米重	玄米千粒重 (g)	わら重 (kg/10a)
			(月日)	(cm)	(cm)	(本/m <sup>2</sup> )	(kg/10a)	(kg/10a)		
コシヒカリ環 1 号	H27	節水区 (4 湛 3 落)	7/25	91.1	18.4	290	583	422 (104)	20.8	621
		間断灌漑区	7/25	90.7	19.6	282	572	410 (101)	21.0	612
		湛水区	7/26	94.5	19.5	302	575	405 (100)	20.7	589
	H28	節水区 (3 湛 4 落)	7/26	92.9	18.9	310	662	464 (86) ns	20.7	669
		間断灌漑区	7/26	97.6	19.1	311	669	470 (87) ns	21.3	731
		湛水区	7/27	100.0	19.2	329	780	541 (100) ns	21.0	740
	H29	節水区 (3 湛 4 落)	7/19	83.8	18.5	295	351	253 (77) ns	19.9	506
		間断灌漑区	7/19	81.8	18.7	272	306	248 (75) ns	20.3	550
		湛水区	7/19	89.0	18.4	337	462	329 (100) ns	20.0	613
コシヒカリ	H27	節水区 (4 湛 3 落)	7/24	93.6	18.5	293	604	443 (97)	21.1	647
		間断灌漑区	7/24	94.5	19.5	302	606	457 (100)	21.2	656
		湛水区	7/24	93.4	19.0	364	616	459 (100)	21.2	614
	H28	節水区 (3 湛 4 落)	7/24	93.5	16.4	299	623	474 (81) ns	21.2	715
		間断灌漑区	7/25	97.0	19.0	302	736	560 (96) ns	21.4	733
		湛水区	7/25	101.0	19.0	324	782	583 (100) ns	21.5	738
	H29	節水区 (3 湛 4 落)	7/18	83.8	17.7	316	332	248 (88) ns	20.1	577
		間断灌漑区	7/18	81.8	16.3	279	319	236 (84) ns	20.1	511
		湛水区	7/18	87.9	18.0	315	377	282 (100) ns	20.2	559

※精玄米重について Tukey 検定の結果有意差なし (H28, H29)

※精玄米重について、各品種の各年における湛水区を 100 とした場合の百分率を示した

4 玄米の外観品質と粒形

平成 27 年から平成 29 年における玄米の外観品質と粒形を第 6 表に示した。平成 27 年の整粒粒比は、コシヒカリの湛水区で 46.9%，間断灌漑区で 47.2%，節水区で 45.7%，コシヒカリ環 1 号の湛水区で 40.4%，間断灌漑区で 42.5%，節水区で 39.1% であり，両品種とも水管理による差はなかった。平成 28 年は，コシヒカリの湛水区で 54.0%，間断灌漑区で 44.4%，節水区で 50.4%，コシヒカリ環 1 号の湛水区で 44.5%，間断灌漑区で 39.8%，節水区で 38.4% であり，コシヒカリ環 1 号は水管理による差はみられず，コシヒカリでは湛水区と間断灌漑区で有意差が認められた。平成 29 年は，コシヒカリの湛水区で 11.9%，間断灌漑区で 10.0%，節水区で 14.4%，コシヒカリ環 1 号の湛水区で 16.8%，間断灌漑区で 18.1%，節水区で 17.4% であり，両品種とも水管理による差はなかった。また，3 か年を通じて水管理ならびに品種による粒形の差はみられなかった。

IV 考察

As および Cd の吸収には土壌 Eh の影響が大きく，As では-100mV 以下，Cd では-100mV 以上で土壌中への溶出量が増加し，植物体へ吸収されやすくなることが報告されている<sup>8) 9)</sup>。今回，節水区，間断灌漑区，湛水区と水管理が異なる試験区を設定し土壌 Eh を測定したが，3 カ年ともに落水期間が長いほど土壌 Eh の値が高い酸化状態を維持していた。また，玄米中の As 濃度は，土壌 Eh の値が高いほど低くなる傾向が認められており，土壌 Eh によって As の吸収抑制効果の評価することが可能と考えられた。ただし，土壌の乾燥状態は同一水田内でも地点によって

異なっており，同一処理でも反復による土壌 Eh の差が大きかった。今後，現地圃場の効果を評価する手法として活用するためには，設置方法や測定点数などの検討が必要である。

Ishikawa et al.<sup>7)</sup>は，間断灌漑または節水管理により，コシヒカリ環 1 号およびコシヒカリ玄米中の As 濃度を低減できること，その効果は間断灌漑に比べて節水管理で高いことを報告している。今回，熊本県内に広く分布する黒ボク土壌水田において，コシヒカリ環 1 号およびコシヒカリを供試し，間断灌漑および節水管理による As 濃度低減効果を検討した。その結果，節水管理区は平成 27 年のコシヒカリを除き湛水区に比べて玄米中の As 濃度が 30~65% に低下した。一方，間断灌漑区における玄米中の As 濃度は，コシヒカリで湛水区に比べて-13~29% と明確な効果は認められなかった。また，コシヒカリ環 1 号では平成 28 年，29 年は 54.1%，56.9% 低下したが，平成 27 年の低下は 7% と小さく効果は年によって大きく異なった。したがって，出穂期以降に落水期間を設ける節水管理および間断灌漑は玄米中の As 濃度の低減に有効であるが，年によって変化する気象条件に対しても安定した効果を示すには，1 週間のうち 4 日以上落水する節水管理が必要と考えられる。

Cd については，土壌 Eh は-100mV より高いと可溶化され植物体へ吸収されやすくなることが報告されている<sup>8)</sup>。3 年間を通じて，出穂後 3 週間に酸化状態で推移した節水区の Cd 濃度は平成 27 年におけるコシヒカリの 0.008mg/kg を除き検出限界以下であり，コシヒカリ環 1 号の玄米中 Cd 吸収抑制効果は評価できなかった。しかし，熊本県内に広く分布する黒ボ

第 6 表 玄米の外観品質と粒形 (平成 27-29 年度)

年度	水管理	品種	外観品質 (%)						粒形 (mm)			
			整粒粒比	胴割粒粒比	乳白粒粒比	基部未熟粒粒比	腹白未熟粒粒比	青未熟粒粒比	その他未熟粒粒比	長さ平均	幅平均	厚み平均
コシヒカリ環1号	H27	節水区 (4湛3落)	39.1 (-1.3)	0.5	6.5	21.2	2.7	1.1	25.7	5.0	2.8	2.0
		間断灌漑区	42.5 (2.1)	0.4	6.9	14.0	3.2	1.8	28.3	5.0	2.8	2.0
		湛水区	40.4 (0.0)	0.3	7.5	11.8	2.6	2.7	31.8	5.0	2.8	2.0
	H28	節水区 (3湛4落)	38.4 (-6.1) ns	0.7	13.8	20.1	2.3	1.3	20.2	5.1	2.8	2.0
		間断灌漑区	39.8 (-4.7) ns	1.7	12.9	20.9	3.3	1.0	16.6	5.1	2.8	2.0
		湛水区	44.5 (0.0) ns	1.6	10.8	18.0	1.5	1.8	17.7	5.1	2.8	2.0
H29	節水区 (3湛4落)	17.4 (0.6) ns	0.5	16.6	34.8	6.4	0.2	16.8	5.1	2.7	2.0	
	間断灌漑区	18.1 (1.3) ns	0.6	15.2	36.8	6.8	0.1	14.8	5.1	2.8	2.0	
	湛水区	16.8 (0.0) ns	0.6	15.0	38.3	5.7	0.3	15.2	5.1	2.7	2.0	
コシヒカリ	H27	節水区 (4湛3落)	45.7 (-1.2)	0.2	6.1	15.1	2.8	0.8	26.2	5.0	2.8	2.0
		間断灌漑区	47.2 (0.2)	0.5	5.5	17.0	2.3	0.6	24.6	5.0	2.8	2.0
		湛水区	46.9 (0.0)	0.3	6.1	12.3	3.0	1.5	27.5	5.0	2.9	2.0
	H28	節水区 (3湛4落)	50.4 (-3.6) ab	0.9	7.5	21.5	1.9	0.5	15.1	5.1	2.8	2.0
		間断灌漑区	44.4 (-9.6) b	1.5	9.6	25.4	1.7	0.6	14.4	5.1	2.8	2.0
		湛水区	54.0 (0.0) a	1.3	6.8	17.4	1.5	1.1	14.6	5.1	2.8	2.0
	H29	節水区 (3湛4落)	14.4 (2.5) a	0.4	15.5	34.4	9.5	0.0	13.5	5.1	2.8	2.0
		間断灌漑区	10.0 (-1.9) a	0.5	19.3	34.0	8.9	0.0	13.3	5.1	2.8	2.0
		湛水区	11.9 (0.0) a	1.0	16.4	38.6	7.7	0.1	14.0	5.1	2.8	2.0

※精玄米重についてTukey検定の結果有意差なし(H28,H29)  
 ※精玄米重について、各品種の各年における湛水区を100とした場合の百分率を示した

ク土は腐植が多く含有されており，Cd等の重金属を吸着するため，土壤中への溶出が制限されている<sup>10)</sup>．さらにコシヒカリ環1号は，Cd吸収に関与する機能が欠損した品種であり，これまでの試験で水管理に関係なく玄米中のCd濃度がほぼ0に抑制されることが明らかにされている．3年間，熊本県内で試験を実施した結果，節水管理によって玄米中のAsを低減することが可能であることが示されたが，コシヒカリ環1号を節水管理で栽培することで，AsおよびCdを同時に低減することが可能と考えられる．

ただし，ヒ酸については土壤中でリン酸と同じ動態を示すことが知られているが，リン酸吸収係数の高い黒ボク土壌であっても無機Asである亜ヒ酸の吸着は低く，土壌の酸化還元電位100mVを下回ると溶出をはじめ，さらに-100mVを下回る強還元状態になれば二価鉄の生成と可溶化された亜ヒ酸は急激に増加する<sup>9)</sup>．本試験においても中干し以降は落水期間を設けない湛水区では無機Asの急激な溶出の目安となる-100mVを下回る強還元状態で推移する期間が見られたが，出穂後3週間の土壌Ehの平均値が概ね-100mVを超え酸化状態へと遷移することで玄米中のAs濃度は低く抑えられる傾向がみられた．今回検討した節水管理は，玄米中のAs濃度を湛水区の2/3～1/3に低減する技術である．本試験では土壌中のAs濃度が1.8mg/kgで玄米中のAs濃度も国際食品規格0.35mg/kgを常に下回ったが，土壌中As濃度が高い場合国際食品規格を上回る可能性がある．食品規格を常に維持するためには，土壌中のAs濃度と節水管理時における玄米中のAs濃度の関係を今後明らかにしていく必要がある．

玄米中の無機ヒ素が低減した間断灌漑および節水管理においては，稈長が短縮し，穂数が減少するという傾向がみられ，精玄米重はコシヒカリ環1号の間断灌漑で最大25%，節水区で最大23%，コシヒカリの間断灌漑区で最大16%，節水区で最大19%減少した．間断灌漑は，一般的には，稲の根の分枝根の発生と伸長を促し，根からの窒素吸収を継続させ，稲体の活力を維持させることで登熟歩合，収量，品質の向上を目指す栽培技術となっているが，出穂期間中も4日の落水を継続する栽培管理で常時湛水と比較して18%減収したという報告もある<sup>11)</sup>．本試験においても出穂後5日間の湛水以外は予定通り落水期間を設けており，受精や稔実に対する障害があったと考えられる．また，平成29年度については精玄米重が大幅に減少し過去2か年の60%に留まった．降雨の影響で土壌が十分に乾かず中干しを延長した

こと，そして出穂期が過去2年間と比べて数日早くなったことにより中干し期間と幼穂形成期とが重なり十分な水を供給できなかったため粒数が減少したためだと考えられる．また，品質についても有意に低下する場合があります．幼穂形成期から登熟期にかけての水不足が影響しているものと考えられる．

最後に，黒ボク土壌水田では，土壌特性によりカドミウムが吸収されやすいとされる酸化状態であっても玄米中カドミウム濃度の基準値超過の可能性は低いと見られる．出穂期から出穂後3週間の土壌酸化還元電位が酸化状態となる水管理を行うことにより玄米中の無機ヒ素濃度がより低減され，カドミウムと無機ヒ素の同時低減が可能となる．ただし，過度の節水，幼穂形成期の落水は収穫量および品質の低下を招くため細心の注意が必要であり，必要最小限の節水を行い玄米中の無機ヒ素濃度を低減させる水管理を土壌の酸化還元電位をもとに見つけ出すことは今後の課題である．また，カドミウムリスクの高い圃場や土壌ではコシヒカリ環1号のようなカドミウム低吸収品種の導入が必要不可欠である．さらに本試験とは異なり，実際の圃場では細やかな水管理が困難であることも予想されるため，いかなる水管理を実施するかは重要な課題である．現在，水稻におけるヒ素とカドミウムの「トレードオフ」関係を最小限にする方策として，出穂後3週間の土壌pH6.2で土壌Eh-73mvに保つ水管理条件も提案されており<sup>12)</sup>，今後検討していく必要がある．

## V 謝辞

本研究は，食品の安全性と動物衛生の向上のためのプロジェクト「フードチェーンのリスク低減に向けた基盤技術の開発」および「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」に参画し実施した．As分析等に係る情報を提供いただきました農研機構農業環境変動研究センターに深く御礼申し上げます．

## VI 引用文献

- 1) 我が国における食品からのカドミウムの摂取量．農林水産省消費・安全局農産安全管理課，東京，  
[http://www.maff.go.jp/j/syuan/nouan/kome/k\\_cd/jitai\\_sesyuu/02\\_int.html](http://www.maff.go.jp/j/syuan/nouan/kome/k_cd/jitai_sesyuu/02_int.html) (2018年12月1日閲覧)
- 2) 食品に含まれるヒ素の実態調査．農林水産省消費・安全局農産安全管理課，東京，  
[http://www.maff.go.jp/j/syuan/nouan/kome/k\\_as/occurrence.html](http://www.maff.go.jp/j/syuan/nouan/kome/k_as/occurrence.html) (2018年12月1日閲覧)

- 3) コメ中のカドミウム低減のための実施指針. 農林水産省消費安全局 (平成 23 年度 8 月策定,平成 30 年度 1 月改定)
- 4) 稲原誠・雄川洋子・東英男(2007): 生育後期の湛水管理による水稲のカドミウム吸収抑制. 日本土壤肥料科学雑誌, 78, 149-155
- 5) 安部匡・倉俣正人・井倉将人・荒尾知人・牧野知之・春原嘉弘・黒木慎・石川覚 (2017): カドミウム極低吸収品種「コシヒカリ環 1 号」の育成, 育種学研究, 19, 109-115
- 6) 農林水産省農林水産技術会議事務局 (2014): 「生産・流通・加工工程における体系的な危害要因の特性解明とリスク低減技術の開発」, 521, 1-238
- 7) S. Ishikawa, T. Makino, M. Ito, K. Harada, H. Nakada, I. Nishida, M. Nishimura, T. Tokunaga, K. Shirao, C. Yoshizawa, M. Matsuyama, T. Abe and T. Arao (2016): Low-cadmium rice (*Oryza sativa* L.) cultivar can simultaneously reduce arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Soil Science And Plant Nutrition*, 62-4, 327-339
- 8) 伊東秀文・飯村康二 (1975): 土壌の酸化還元状態の変化と水稲のカドミウム吸収応答. 日本土壤肥料科学雑誌, 46-3, 82-88
- 9) 山根忠明 (1989): 水稲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, 1-95
- 10) 小野寺嘉郎 (1980): 水田土壌の重金属イオン吸着 - 重金属による土壌汚染に関する研究 (第 1 報) - .東北工業技術試験所報告, 11, 40-48
- 11) 工藤祐亮・登尾浩助・加藤孝・下大園直人(2012): 間断灌漑における間断日数の違いが水田からの温室効果ガス放出と水稲収量に及ぼす影響. 農業農村工学会論文集, 282, 43-50
- 12) T. Honma, H. Ohba, A. Kaneko-Kadokura, T. Makino, K. Nakamura and H. Katou (2016): Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Environmental Science & Technology*, 50, 4178-4185

### Summary

#### Effect of Water-Saving Conditions in Andosol Paddy Field on Inorganic Arsenic Concentrations in Unpolished Rice Grain

Kensuke SHIRAO, Satoru ISHIKAWA and Tomoyuki MAKINO

Based on the Codex level of cadmium (Cd) in rice, the Japanese domestic standard for Cd for unpolished rice was changed to 0.4 mg kg<sup>-1</sup>. In addition, because the Codex level of inorganic arsenic (As) for unpolished rice was set at 0.35 mg kg<sup>-1</sup>, cultivation methods that reduce the As and Cd concentrations in rice grains simultaneously are needed, and it is expected that a new Japanese domestic standard will be set for As and Cd.

Toward the goal of establishing such new cultivation methods, we cultivated the rice cultivars 'Koshihikari' and 'Koshihikari Kan No.1' in andosol paddy fields under three water conditions: flooded conditions (FLD), alternate wetting and drying conditions (AWD), and water-saving conditions (WAS). At 3 months cultivation, the WAS conditions reduced the grain As concentrations relative to the FLD conditions, for both cultivars. Nearly undetectable levels of grain Cd were identified in all conditions. In addition, compared to the flooded conditions, the water saving conditions decreased the grain yield and quality.