

愛媛県における玄米のカドミウム吸収抑制対策

大森誉紀

Reducing cadmium absorption in brown rice in Ehime Prefecture

OOMORI Takanori

要旨

愛媛県の玄米中カドミウム濃度を 0.4mg/kg 以下に抑えるためには、出穂前後各 3 週間の湛水率を 50%以上とすることが必要であり、高品質安定生産のための水管理はカドミウム吸収抑制にも有効である。四国地方の梅雨の期間とコシヒカリの出穂前後の各 3 週間が重なる期間が多いため、品種はコシヒカリが有利である。土壌 pH を上げるために投入する石灰質資材の量は、改良作土深を考慮し施用量を決定することで、3 年以上の効果の持続性が期待できる。

キーワード: 玄米中カドミウム, 吸収抑制, 湛水, コシヒカリ, 土壌 pH

1. 緒言

農林水産省では、1997 年から、カドミウムに係るリスク管理を的確に行うために玄米に含まれるカドミウム濃度の調査を行っている。2000 年からは、政府米の流通基準である 0.4 ppm を超えるカドミウムを含む玄米(以下、基準超過米とする)を産出した市町村名を農林水産省のホームページ上で公表している。

愛媛県には農用地土壌汚染防止法に基づく指定地域はなく、カドミウム基準超過米の産出に対する認識は低かった。ところが、2002 年および 2003 年の農林水産省の調査において、西条市でカドミウム基準超過米の産出が確認され、県内の農業関係機関に大きな動揺が起こった。地元 JA では、現在、全域でカドミウム吸収抑制対策に取り組み、カドミウム基準超過米を市場に流通させないように全ほ場の出荷前調査を実施し、安心安全な米の流通に万全を期している。

玄米のカドミウム吸収抑制のための対策は、出穂前後の各 3 週間で湛水管理することと、土壌 pH が中性に保つよう土壌改良資材を施用することが必要とされている((独)農業環境技術研究所, 2002)。農業試験場は、地元

JA や普及センターと協力して、2003 年から現地に定点調査ほ場を設置し、玄米中のカドミウム濃度の経年変化を調査するとともに、2004 年からカドミウム吸収抑制対策の現地実証試験に取り組んだので、その結果を報告する。

表1 調査地点の概要(2006 年)

品種	出穂期	成熟期	pH(H ₂ O)		可給態Cd(mg/kg)	
			作土	下層土	作土	下層土
コシヒカリ	7月14日	8月14日	6.1	6.3	0.36	0.30
コシヒカリ	7月14日	8月14日	6.5	6.4	0.33	0.24
コシヒカリ	7月14日	8月14日	6.2	5.5	0.28	0.24
コシヒカリ	7月14日	8月14日	5.4	5.2	0.38	0.27
コシヒカリ	8月16日	9月15日	6.3	6.4	0.29	0.26
ヒノヒカリ	8月21日	10月1日	5.9	6.5	0.30	0.26
ヒノヒカリ	8月25日	10月3日	5.9	6.1	0.48	0.32
ヒノヒカリ	8月25日	10月3日	6.5	6.7	0.39	0.38
ヒノヒカリ	8月25日	10月3日	5.7	5.7	0.28	0.26
ヒノヒカリ	8月25日	10月3日	6.3	6.7	0.22	0.21
ヒノヒカリ	8月25日	10月3日	5.9	6.4	0.31	0.29
ヒノヒカリ	8月25日	10月5日	6.3	6.9	0.16	0.16
ヒノヒカリ	8月26日	10月5日	6.6	6.6	0.23	0.21
ヒノヒカリ	8月28日	10月7日	6.2	6.4	0.29	0.27
ヒノヒカリ	8月28日	10月7日	5.7	6.0	0.29	0.26
愛のゆめ	8月28日	10月3日	5.6	6.2	0.25	0.21
愛のゆめ	8月28日	10月10日	5.8	6.1	0.31	0.30
松山三井	9月12日	10月25日	5.5	5.8	0.31	0.31
松山三井	9月1日	10月15日	5.8	6.1	0.31	0.27
松山三井	9月4日	10月20日	5.7	6.1	0.34	0.31
		平均	6.0	6.2	0.30	0.27
		最大	6.6	6.9	0.48	0.38
		最小	5.4	5.2	0.16	0.16



図1 調査地点位置図(2006年)

2. 試験方法

2. 1 定点ほ場における実態調査

2003年4月から2006年11月の間、西条市内に約20カ所の調査ほ場を設置した。2006年の調査地点を図1に、調査地点の概要を表1に示した。毎年、玄米中のカドミウム濃度と収穫終了後の作土および下層土のpH(H₂O)および可給態カドミウム濃度を調査した。2006年には出穂前後の各3週間の入水状況を毎週月曜日と金曜日に確認した。入水状況は、落水、足跡水、浅水、満水の4段階に分け、全調査回数に占める浅水および満水の日数の割合から期間中湛水率を求めた。

土壌及び玄米中のカドミウムの分析は、定法（(財)日本土壌協会 2001）によった。繰り返し分析は3回行い、その平均値を求めた。また、2. 2～2. 8の各試験においても同様に分析した。

2. 2 人工汚染土壌における主要品種の玄米カドミウム濃度の品種間差

2003年5月13日に、農試水田ほ場の土壌を作業舎へ持ち帰り、軽く乾燥させた後、金属カドミウムを硝酸に溶解した溶液を添加し、可給態カドミウムが均一に4mg/kgとなるよう約300L容ミキサーでよく攪拌し、人工汚染土壌を作製した。この土壌をコンテナ(55cm×25cm×深さ18cm)に深さ約15cmとなるよう充填し試験に供した。6月13日に、愛媛県の水稲奨励品種(うるち5種)をコンテナへ移植した。コンテナには、各品種とも3株(1株3本植)移植し、網室で栽培した。対照としてカドミウム溶液無添加土壌と同様に栽培した。

2004年は、前年に作製した4mgCd/kgの土壌を、前年と同じ方法で場内水田土壌とミキサーでよく攪拌し、0.5mgCd/kgと1.0mgCd/kgの土壌を作製した。これら土壌を用いて前年と同様に奨励品種を栽培した。

両年とも、施肥は窒素成分で基肥1.2gN/ポット、穂肥0.8gN/ポット施用した。中干しまでは常時湛水とし、それ以降はポットの排水孔を開いた状態で毎朝かん水する常時節水栽培とした。

2. 3 現地の土壌を用いたポット栽培における湛水管理と早期落水管理の比較

2004年4月27日に、2の1)の定点調査ほ場の作土を農業試験場へ持ち帰り、1/5000aワグネルポットへ充填し、同年6月12日にヒノヒカリを各ポット1株(3本植え)ずつ移植した。施肥は窒素成分で基肥0.16gN/ポット、穂肥0.1gN/ポットとした。水管理は落水まで常時湛水とし、出穂1週後に落水した早期落水区と、出穂3週後に落水した対照区を設置し網室で栽培した。

2. 4 現地ほ場における湛水管理の効果

2005年6月22日に、西条市内の湿田(砂質グライ土)において、1枚のほ場を畦畔シートで区切り、出穂の前

後各3週間の水管理を常時深水、常時浅水、間断かん水深水(間断深水と略)、間断かん水浅水(間断浅水と略)の4処理で栽培した。深水処理は水深5cm程度、浅水は1cm程度とした。間断かん水は10日おきとした。入水状況を関係機関の職員とともに定期的に確認した。

ヒノヒカリの移植は2005年6月6日で、出穂始めは8月20日であった。湛水処理は8月3日から9月20日まで行った。これ以外の時期の水管理や施肥、防除は農家慣行とした。試験規模は1区138～236m²(1連制)とした。

収穫調査は同年9月24日に行った。

2. 5 現地ほ場における早期落水の影響

2006年に、西条市内の湿田(砂質グライ土)および乾田(礫質灰色低地土)において、1枚のほ場を畦畔シートで区切り、出穂1週後から1週間ごとに落水時期を変えた区を設置した。

湿田では同年4月5日にコシヒカリを移植、6月21日に畦畔シートを設置し、7月14日に出穂した。乾田では同年6月10日にヒノヒカリを移植、7月11日に畦畔シートを設置し、8月25日に出穂した。落水以外の水管理や施肥、防除は農家慣行である。試験規模は湿田で1区36m²、乾田で1区75m²、いずれも1連制とした。

収穫調査はコシヒカリでは8月14日、ヒノヒカリでは10月3日に行った。また、収穫後土壌の円錐貫入抵抗(地耐力)を、貫入式土壌硬度計(SR-II型)で測定した。

2. 6 現地の土壌を用いたポット栽培における土壌pH改善の効果

2004年4月27日に、西条市内の湿田(砂質グライ土)の作土を農業試験場へ持ち帰り、コンテナ(55cm×25cm×深さ18cm)へ深さ約15cmに充填した。ケイ酸カルシウム(ケイカルと略)を100g施用し、pH矯正区とした。対照としてケイカルを添加しないポット(pH矯正なし区)を準備した。同年4月28日にコシヒカリを各ポットに1株(3本植え)ずつ移植した。施肥としていずれのポットも窒素成分で基肥1.2gN/ポット、穂肥0.8gN/ポットを施用した。出穂は7月10日であった。水管理は、各区とも田植後から1ヶ月は湛水とし、その後20日間中干しした。湛水開始を遅らせた区以外は、いずれも6月19日から再び湛水し、出穂3週後から落水した区を標準湛水区、出穂1週後から落水した区を早期落水(I)区、出穂2週後から落水した区を早期落水(II)区とし、また湛水始めを出穂期から行い出穂3週後から落水した区を湛水始遅区とし、いずれも網室で栽培した。

玄米中のカドミウムは2. 1と同様に分析した。ポット土壌を塊状で実験室に持ち帰り、土壌の酸化還元電位(Eh)は塊状の生土にガラス電極を挿入し、Ehメータ(UC-23, セントラル)を用いて2分後の指示値を測定値

とした。pHは土1:水2の懸濁液をpHメータ(HM-50S, 東亜電波)で測定した。

2. 7 現地ほ場における土壌改良資材等の効果の比較

2005年6月1日に、西条市内の湿田(砂質グライ土)において、1枚のほ場を細分し、必要に応じ畦畔シートで区切り、表2の試験区を設置した。土壌改良資材の効果を発現させやすくするため、出穂2週後に落水した。

各土壌改良資材は施用するアルカリの量が等しくなるように、表2のとおり施用量を設定した。

ヒノヒカリを同年6月19日に移植、出穂日は8月30日であった。施肥、防除は農家慣行とした。試験規模は

慣行区で1処理区あたり45㎡、出穂2週後落水区で1処理区あたり25㎡であり、いずれも2連制で実施した。収穫調査は10月12日に行った。

2. 8 現地ほ場における土壌改良資材の多量施用による効果の持続性

2004年4月5日および5月21日に、西条市内の湿田(中粗粒質グライ土)2か所において、表3の試験区を設置した。ケイカルおよびエンリッチの施用量は、土壌のpH緩衝曲線と改良作土深から中和石灰量をもとめ決定した(表3)。Bほ場は作土が深く、耕盤が未発達であったことから、作土深を2段階で設定した。翌年からは、両ほ場ともに毎年100kg/10aの土壌改良資材(エンリッチ)を施用し、これらの玄米中のカドミウム濃度の変遷を調査した。

Aほ場では3年間ともコシヒカリを4月下旬に移植した。Bほ場ではヒノヒカリを2004年6月10日に移植し、2005年、2006年はいずれもコシヒカリを4月下旬に移植した。水管理は、2004年はコシヒカリで6月20日から7月31日を、ヒノヒカリでは8月4日から9月15日をそれぞれ湛水とし、2005年および2006年は農家慣行とした。施肥、防除は3年間とも農家慣行とした。試験規模はAほ場で1区5a、Bほ場で1区3a、いずれも1連制とした。

収穫調査はコシヒカリで8月中旬、ヒノヒカリで10月上旬に行った。

3. 結果および考察

3. 1 定点ほ場における実態調査

定点調査ほ場における玄米中カドミウム濃度の分布割合を図2に示した。2003年は0.2mg/kg以上が約3分の1以上を占めていたが、2004年以降は10~15%程度と大きく減少した。また、0.1mg/kg未満も、2003年は30%であったが2004年は63%、2006年は75%と、増加傾向にある。このことは、玄米カドミウムの低減に対する農家の意識が浸透しつつあることを示している。

表2 土壌改良資材等の施用試験で使用した資材とその区名

区名	土壌改良剤および肥料***
石灰窒素	石灰窒素を、基肥に4kgN/10a、追肥に4kgN/10a
硝化抑制	硝化(成抑制剤)入り肥料を、基肥に4kgN/10a、追肥に4kgN/10a
石灰追肥	DL石灰 ^{*)} を、出穂の3週間前から1週間おきに22kg/10a施用。
貝化石追肥	貝化石肥料 ^{**)} を、出穂の3週間前から1週間おきに33kg/10a施用。
エンリッチ追肥(エンリッチ)	エンリッチ ^{**)を、出穂の3週間前から1週間おきに40kg/10a施用。}
石灰基肥(少)	DL石灰を基肥に111kg/10a施用。
石灰基肥(多)	DL石灰を基肥に278kg/10a施用。
美土里(少)	美土里 ^{**)を基肥に200kg/10a施用。}
美土里(多)	美土里 ^{**)を基肥に500kg/10a施用。}
ケイカル(少)	ケイカル ^{**)を基肥に200kg/10a施用。}
ケイカル(多)	ケイカル ^{**)を基肥に500kg/10a施用。}
エンリッチ(少)	エンリッチを基肥に200kg/10a施用。
エンリッチ(多)	エンリッチを基肥に500kg/10a施用。
ゼオライト(少)	ゼオライトを基肥に200kg/10a施用。
ゼオライト(中)	ゼオライトを基肥に1000kg/10a施用。
ゼオライト(多)	ゼオライトを基肥に2000kg/10a施用。
対照	土壌改良資材はなし。

*) 2-sulfanilamidethiazole 0.45%含有

**) アルカリ度はDL石灰、貝化石肥料がそれぞれ72%、48%。エンリッチ、美土里、ケイカルはすべて40%

***) 石灰窒素区および硝化抑制区を除く全てに区に、基肥としてセラコートR1を7kgN/10a

表3 施用した土壌改良資材と玄米中カドミウム濃度 (mg/kg)

ほ場名	区名	目標改良作土深	土壌改良剤	玄米中カドミウム濃度		
				2004年	2005年	2006年
Aほ場	ケイカル	15cm	ケイカルを513kg/10a	0.07	0.05	0.05
	無処理	-	なし	0.10	0.14	0.08
	エンリッチ	24cm	エンリッチを756kg/10a	0.05	0.05	0.11
Bほ場	エンリッチ	12cm	エンリッチを378kg/10a	0.10	0.23	0.24
	無処理	-	なし	0.16	0.31	0.25
	無処理	-	なし	0.16	0.31	0.25

酸可給態Cdは、Aほ場で0.3mg/kg、Bほ場で0.4mg/kg

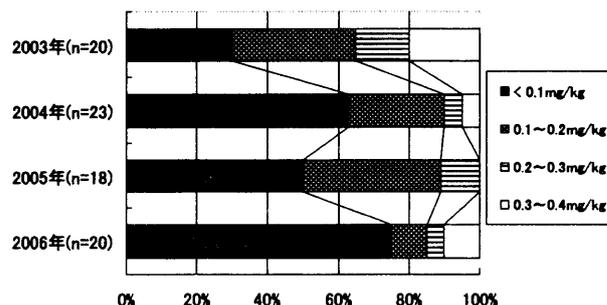


図2 定点調査ほ場の玄米中のカドミウム濃度の分布割合

(注) 0.4mgCd/kg以上の玄米はなかった。

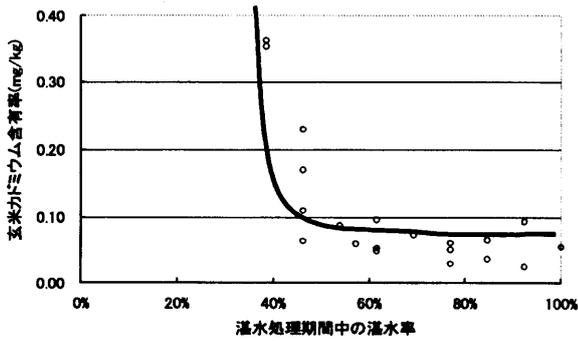


図3 定点調査ほ場における湛水状況と玄米カドミウム含有率の関係

一方で、政府米流通基準(カドミウムで 0.4 ppm)に近い玄米もあることから、土壌特性や慣行水管理等地域の状況に応じた細やかなカドミウム低減対策を明らかにする必要がある。

そこで、2006年の調査定点について、水管理の状況と玄米カドミウム含有率との関係を図3に示した。湛水率50%以上では玄米のカドミウム濃度は0.1mg/kg以下であるが、湛水率50%未満では急激にカドミウム濃度が上昇した。

一般に、玄米のカドミウム吸収抑制のための対策は、出穂前後の各3週間湛水管理すること((独)農業環境技術研究所,前出)とされている。今回調査した地域では、湛水率50%以上では玄米のカドミウム濃度は0.1mg/kg以下であり、2日に一回以上湛水にしておけば玄米中カドミウムは低濃度に抑えられるものと考えられた。一般的な乾田の減水深は20~30mm/日(愛媛県農林水産部技術指導課,1995)とされており、これらほ場では一回の入水で3cm程度の湛水とし、翌日自然落水したあと、翌々日に再び入水する必要があることを示している。また、減水深が10mm/日程度の湿田では、一回の入水は1cm程度の走水かんがいを行った時は乾田の場合と同様、翌日自然落水し、翌々日に入水となる。

現地では、登熟期の根の活力維持として走水かんがいが多く、湿田であれば1cm程度の走水かんがいでも2日に一回の入水で湛水率は50%となることから、湿田では走水かんがいでもカドミウム吸収抑制に有効であると思われる。しかし、乾田で走水かんがいを行うと、湛水状態が一日もたないため、湛水率を50%以上とするためには毎日入水しなければ土壌の乾燥がすすみ、カドミウムの吸収促進ともなりうる。このことから、カドミウムの吸収抑制のためには、土壌条件に応じた水管理が必要であると思われる。

3. 2人工汚染土壌における主要品種の玄米カドミウム濃度の品種間差

異なるカドミウム濃度の人工汚染土壌でポット栽培し

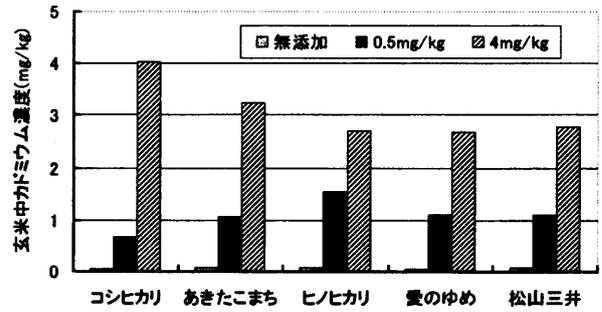


図4 異なるCd濃度の土壌で栽培した時の品種別玄米中Cd濃度

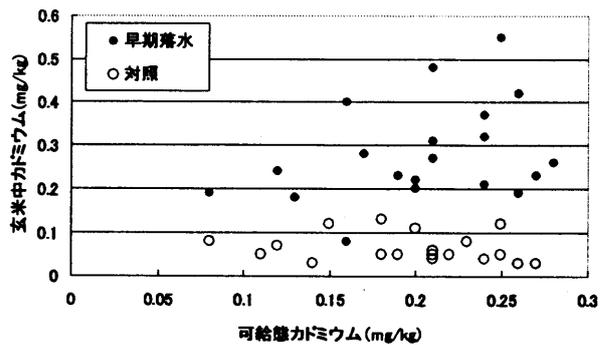


図5 落水を早めた場合の玄米中カドミウム濃度(ポット試験)

た時の愛媛県水稻(うるち奨励品種)の玄米カドミウム濃度を図4に示した。いずれの品種も土壌中カドミウム濃度が高いと玄米中カドミウム濃度も高いが、品種間では一定の傾向は見られなかった。森下ら(1986)は、非汚染土壌でインド型、ジャワ型、日本型の品種66種について調査し、「コシヒカリ」や「あきたこまち」など従来の日本型イネ品種は玄米カドミウム濃度が低いグループに入ることを報告している。また、本試験はポット栽培であり、それぞれのポットの土壌水分含量は同じでないことから、土壌の酸化還元電位もそれぞれ異なり、土壌溶液中へのカドミウムの溶出もポット毎に異なると考えられる。このため元来低吸収である奨励品種間では明確な品種間差が見出せなかったものと思われる。

3. 3現地の土壌を用いたポット栽培における湛水管理と早期落水管理の比較

ポット栽培で落水を早めた場合における土壌中可給態カドミウム濃度と玄米中カドミウム濃度との関係を図5に示した。対照では土壌中のカドミウム濃度にかかわらず、玄米中カドミウム濃度は全て0.13mg/kg以下であった。しかし、早期落水では1試料を除いた19試料が0.18mg/kg以上であり、また土壌中カドミウム濃度が高いと玄米中カドミウム濃度も高くなる傾向が見られ、0.4mg/kg以上の玄米が20試料中4点あった。これらの

ことから、同じ土壌でも、出穂3週後から落水した玄米に比べ、出穂1週後から落水した玄米では、カドミウム濃度は高くなると考えられた。

3. 4 現地ほ場における湛水管理の効果

間断浅水では8月14日を含めて10日おきに4回落水し、8月24日を除く3回は完全に落水した。常時深水および常時浅水ではほぼ設定した水管理ができた。

表4に現地試験における水稻の生育、収量、品質、玄米および土壌中のカドミウム濃度を示した。試験ほ場の土壌の可給態カドミウムは試験区で差がなく0.35~0.37mg/kgであったが、玄米中カドミウム濃度は常時深水、常時浅水および間断深水で0.04~0.06mg/kgと低く、間断浅水でのみ0.11mg/kgとやや高かった。このことから、減水深の小さな湿田では、玄米のカドミウム吸収抑制のためにはほ場が乾かない程度に水管理したので良く、深水管理は必ずしも必要ではないものと考えられた。

収量および外観品質は深水管理の方が浅水管理より良かった。特に間断浅水管理では、収量が常時深水の75%であり、玄米等級も3等以下であった。登熟期間の高温時に土壌乾燥が重なると品質が低下する(愛媛県, 2001)といわれており、間断浅水区では高温時の土壌乾燥により品質低下となったものと思われた。

3. 5 現地ほ場における早期落水の影響

湿田および乾田ともに、玄米中カドミウム濃度は出穂1週後が最も高く、落水時期が遅れるほど低くなった(表5)。湿田では土壌の可給態カドミウムが0.36mg/kgあるものの、出穂1週後から落水しても0.12mg/kgであった。このことから、出穂までの湛水は玄米のカドミウム吸収抑制に効果があることが示唆された。

両ほ場とも落水時期が遅いほど収量は多くなる傾向で

あった。しかし、湿田(作土)の地耐力は、出穂1週後および2週後の落水では2kg/cm²以上あったが、出穂3週後以降の落水では1.5kg/cm²以下であり、落水が遅いと地耐力は低下した。収穫機械の良好な走行のためには、2~3kg/cm²以上の地耐力を要する(久馬ら, 1993)とされている。当地域の湿田では、落水が遅いとコンバイン作業に支障がでることから一般に落水が早い傾向があり、今回の調査結果はこれを裏付けるものとなった。当地域の土壌はシルト質であるため、中干しを徹底してもその後の入水で再び土壌が軟弱となることから、落水まで湛水管理を徹底した後に溝切り等により表面水を速やかに排出するとともに、地耐力が不足するほ場では湿田対応型コンバインの導入も検討する必要があると思われた。

3. 6 現地の土壌を用いたポット栽培における土壌 pH 改善の効果

ケイカルを添加し土壌 pH を矯正した試験区の玄米中カドミウム濃度を異なる水管理方法ごとに比較したところ、いずれの水管理でも pH 矯正によって明らかに玄米中カドミウム濃度が低下した(図6)。早期落水(II)区では、

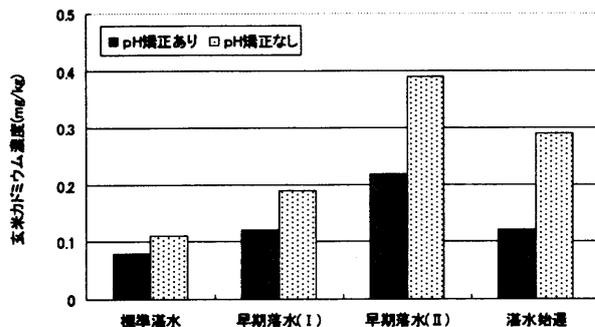


図6 ケイカルによる酸性矯正の効果

表4 水稻の生育、収量、品質とカドミウム濃度

区名	かん長 (cm)	わら重 (kg/a)	精玄米重* (kg/a)	玄米等級	格付け理由	玄米 Cd (mg/kg)	可給態 Cd (mg/kg)
常時深水	86	87.1	63.7a	2,2,2	充実不足	0.04	0.35
常時浅水	88	76.0	54.9b	2,2,2	充実不足、他未熟	0.06	0.36
間断深水	88	86.9	61.3a	2,2,2	他未熟	0.05	0.37
間断浅水	89	81.4	48.2c	3,3,格外	他未熟	0.11	0.36

*欄のアルファベットは、チューキーの検定(5%)結果

表5 ほ場で落水時期を変えた時の水稻の生育とカドミウム濃度および地耐力

ほ場	品種	落水時期	わら重 (kg/a)	精玄米重 (kg/a)	玄米 Cd (mg/kg)	地耐力(作土) (kg/cm ²)	地耐力(下層土) (kg/cm ²)	作土可給態 Cd (mg/kg)
湿田	コシヒカリ	出穂1週後	50.8	40.6	0.12	2.7	7.7	0.36
		出穂2週後	54.8	41.5	0.11	2.0	7.7	0.36
		出穂3週後	50.6	40.9	0.08	1.5	8.3	0.36
		出穂4週後	55.3	42.5	0.07	1.3	8.3	0.36
乾田	ヒノヒカリ	出穂1週後	58.4	37.1	0.15	2.3	8.3	0.20
		出穂2週後	64.5	42.1	0.14	2.5	8.2	0.20
		出穂3週後	62.7	39.5	0.13	2.6	8.3	0.20
		出穂4週後	64.6	44.0	0.12	2.0	8.3	0.20

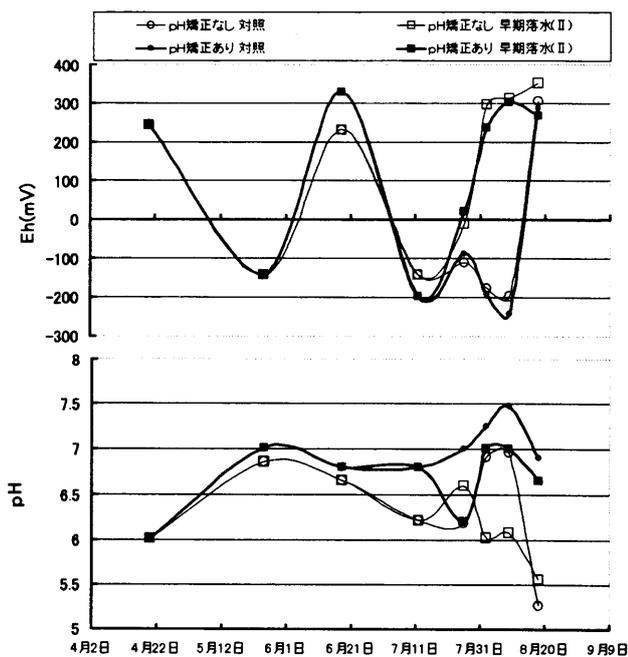


図7 ポット栽培土壌の酸化還元電位 (Eh) と pH の推移

表6 土壌改良資材の施用効果

区名	収量(kg/a)	玄米 Cd(mg/kg)	後地土壌 pH
石灰窒素	39.2	0.18	abc
硝化抑制	41.4	0.15	abc
石灰追肥	44.6	0.14	abc
貝化石追肥	46.9	0.19	abc
エンリッチ追肥	45.5	0.19	abc
石灰基肥(少)	44.5	0.14	abc
石灰基肥(多)	44.7	0.11	ab
美土里(少)	46.2	0.13	abc
美土里(多)	44.4	0.12	abc
ケイカル(少)	48.4	0.22	c
ケイカル(多)	46.1	0.16	abc
エンリッチ(少)	45.3	0.22	c
エンリッチ(多)	47.7	0.15	abc
ゼオライト(少)	44.3	0.20	abc
ゼオライト(中)	45.0	0.15	abc
ゼオライト(多)	42.7	0.10	a
対照	47.4	0.20	bc

玄米 Cd 値のアルファベットは、チューキーの検定(5%)結果

pH矯正なしで 0.39mg/kg であったものが、pH矯正により 0.22mg/kg に低下した。この時、土壌 Eh は田植え直後や中干しまたは落水等土壌が酸化的条件になることで約 300mV と高く、湛水条件では -200mV 程度まで低下した(図 7) が、土壌の pH 矯正の影響は小さかった。

本試験では、コンテナあたり 100g のケイカルを添加した。これは 10a あたり約 500kg に相当し、供試土壌の pH を 7 程度に改善するのに要する量である。土壌 pH の推移を見ると、6 月 20 日までは pH 矯正の有無にかかわらずほぼ同等で、出穂前後の湛水処理期間においては pH 矯正土壌でほぼ pH 7 程度、pH 矯正なし土壌で pH 6~

6.5 であった(図 7)。しかし、収穫終了時では矯正土壌で pH 6.7~6.9 であり、矯正なし土壌で pH 5.3~5.6 と、落水後の土壌 pH は低かった。このことから、土壌の pH 緩衝曲線から pH 7 程度に改善するのに要する土壌改良資材の量を求め、これを施用することで生育期間中の土壌 pH がほぼ中性に維持でき、玄米中カドミウムを低減できることが明らかとなった。

3. 7 現地ほ場における土壌改良資材の効果の比較

土壌改良資材等 8 種 17 処理(対照区含む)について、収量、玄米中カドミウム濃度および跡地土壌 pH を表 6 に示した。玄米カドミウム濃度は対照区と比べゼオライト(多)で明らかに低く、他の資材や施用方法では、明らかな差を生じなかった。ゼオライト(多)では Ca 型ゼオライト(M 建設工業製) 2 t/10a を施用した土壌の pH が 7.5 であった。このことから、ゼオライトの働きはカドミウム等重金属の不溶化ではなく、土壌のアルカリ化による吸収抑制と考えられる。他のほ場でも同様の試験を行ったところ、ゼオライト(多)でのみ玄米中カドミウム濃度が低く、他の処理にはチューキーの多重検定で差が認められなかった(データ省略)ことから、ほ場レベルで土壌改良資材の施用効果を得るには、土壌の中和石灰量に応じた施用量と、耕起深や仮比重等を考慮し、施用量を決定することが必要である。土壌改良資材を散布する場合、地域一円で均一な施用量にすると、散布効果にばらつきがでることが懸念された。

3. 8 現地ほ場における土壌改良資材の多量施用による効果の持続性

A ほ場の玄米カドミウム濃度は、ケイカル施用 3 年後に 0.05mg/kg であったが、無処理区でも 0.08mg/kg であり、ケイカル多量施用の効果は明確ではなかった(表 3)。しかし、2. 4 のポット試験の土壌は A ほ場から採土したものであり、施用量も 500kg/10a と同量であること、またポット栽培試験後の土壌 pH がおおむね 7 であることから、2 年以上は効果が持続するものと考えられた。また、B ほ場の玄米カドミウム濃度は、施用 2 年後および 3 年後ではエンリッチ(少)で 0.23~0.24mg/kg と高く、エンリッチ(多)では 0.05~0.11mg/kg であったことから、中和石灰量と改良作土深を考慮し施用量を決定することで、3 年以上の効果の持続性が期待できるものと考えられた。

4. 総合考察

4. 1 品種について

人工汚染土壌を用いた試験結果等から、日本型イネである奨励品種間では、顕著な品種間差は見られなかった。しかし、以下に示す栽培環境を考慮すると、ヒノヒカリの栽培に比べ、コシヒカリを栽培する方が玄米中カドミウム濃度の低減化に効果があると思われる。

早期コシヒカリの出穂期は7月10日頃であり、6月20日から7月30日までが湛水管理が必要である。四国地方の梅雨は6月4日頃から7月17日頃までであり、コシヒカリの湛水期間と重なる時期があること(図8)から、コシヒカリの栽培は湛水管理をしやすいと言える。また、収穫期は8月中旬の盛夏期であることから、登熟後期まで湛水してもほ場が乾きやすいのでコンバイン収穫に有利である。一方、ヒノヒカリは出穂期が8月25日頃であり、8月5日から9月15日頃まで湛水管理が必要である。この期間の前半は晴天が多く土壌が乾燥しやすいため、細やかな水管理が必要とされる。同期間の後半は9月に入り、秋雨前線の活動が盛んになる頃であり、比較的雨が多く湛水しやすい。しかし、収穫までにはほ場を乾燥させてコンバイン収穫に良好な地耐力を得るには、早い時期から落水させなければならない。このため、湿田においては早期落水の傾向となり、玄米カドミウムの低減化に取り組みにくい環境にある。このことから、生理的、遺伝的なカドミウム吸収にかかる品種間差は明らかでなくとも、栽培環境的にコシヒカリを栽培する方が、玄米カドミウムを抑制するには有利であると考えられた。

西条市F地区では、カドミウム基準超過米の問題が明らかになって以降、地域をあげて品種転換に取り組み、それまでヒノヒカリが中心であったが、地域のほとんどでコシヒカリに転換し、省力的な水管理に取り組みながらカドミウム基準超過米の産出を回避している。

4. 2 土壌改良による吸収抑制

玄米中カドミウムは、出穂の前後各3週間(穂孕み期から登熟前期)土壌を湛水することで低下し、節水時には高くなる。このため、水の便が悪い地域や湿田でやむを得ず落水を早めねばならない地域は、カドミウム濃度の高い玄米を産出しやすい条件にある。これら地域では土壌の中和石灰量に応じてカルシウム資材を施用し、基準超過米の発生を防ぐことが必要である。

表3にあるとおり、当地域の湿田の作土10cmあたり中和石灰量は、ケイカル等で300~340kg/10aであり、改良作土深を15cmとすると約500kg/10a必要となる。現地で

の一般的な土壌改良材の施用量は100kg/10a程度であるので、500kg/10aは非常に多い施用量ではあるが、これによりやむを得ず落水した場合でも、土壌は中性に保たれ、玄米中カドミウム濃度を低く抑えることができるものと思われた。

また、JAや普及センターが市内の水田(161か所)の土壌pHを調査した結果(2004年データ未発表)では、pH5.0~5.4が全体の33%、pH4.9以下が12%あり、pH5.5未満が45%を占めている。これら圃場の土壌pHは、今回現地試験に供試した圃場の土壌pHに比べ低いことから、土壌改良に必要な石灰量は本試験で供試した量より多く必要であると考えられた。

これらのことから、基準超過米の発生予防のための土壌改良材の散布としては、慣行の施用量では不足しており、土壌の中和石灰量に応じた施用が望まれるところである。

4. 3 本県の土壌条件に適した水管理について

上述のように、土壌pH改善により基準超過米の発生を予防するには、多量の土壌改良材を散布する必要がある。経済的に大きな負担であることから、水管理による基準超過米発生抑制が現実的であると思われた。

一般的には、土壌中カドミウム濃度が高い場合に基準超過米が産出することがあると思われている。しかし、土壌中カドミウム濃度が低くても、土壌が乾燥した環境で栽培すると玄米中カドミウムが比較的高い濃度となり、出穂前後の各3週間の湛水率で50%程度を下回ると急激に高くなった(図3)。このことから、カドミウム吸収抑制のための水管理は湛水率で50%以下、すなわち入水し1日以上湛水した後、自然落水し、さらに1日完全落水した後、再び入水すればよいと考えられた。なお、湛水が必要となる時期は幼穂形成後であり、中干しは通常どおり実施することが必要である。特に、湿田では中干しが不十分だと根腐れを起こしやすい。現地で湛水管理に取り組み始めた頃は湛水を意識するあまり、生育初期から湛水栽培し中干しが省略される事例が見られ、ゴマ葉枯れ病が増えたともいわれている。中干しやかん排水を効率的に行うため、溝切り等の基本技術を従来以上に徹底することも必要である。

また、表4にあるように必ずしも深水管理の必要はなく、浅水管理であっても常に土壌が水を含んでいればカドミウムの吸収を抑制できるものと考えられる。玄米カドミウム濃度の上昇は、湛水方法よりも落水時期の早期化が影響しているものと思われた(表5)。

愛媛県の稲作栽培指導指針は、高品質安定生産を目標に、県内に一般的な栽培方法を明示したものである(愛媛県、前出)。同指針は玄米中のカドミウムの低減について配慮をしていないものの、幼穂形成期から穂はらみ期

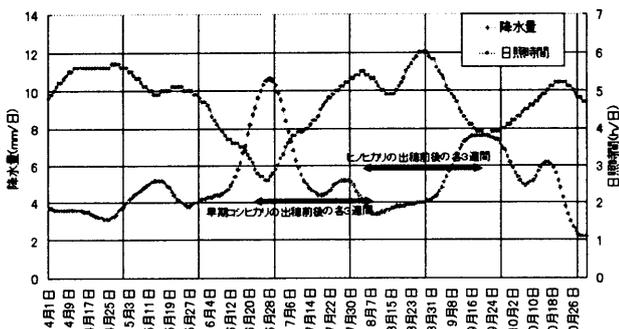


図8 日降水量と日照時間の平年値(丹原アメダス地点)

愛媛県における玄米のカドミウム吸収抑制対策

表7 土壌タイプ別のカドミ吸収抑制栽培留意点

土壌タイプ	日減水深	満水した時の水もち日数	出穂前後各3週間の水管理法	その他
漏水田	40mm/日以上	水深5cm程度入水しても、1日程度しか水が持たない。	週に1~2回落水しても良いが、基本的には毎日水を入れ、2日続いて乾かすことは避ける(走水管理は避ける)。	ベントナイト等の漏水抑制土壌改良材を2t/10a散布する。また、代かきは丁寧にする。
乾田	20mm/日	水深5cm程度入水すると、2~3日、水持ちする。	入水する場合は満水とし、自然減水した後、1日程度落水する。これを繰り返す。浅水入水の場合は、漏水田の管理に同じ。	2日連続して落水するなど圃場を乾かさなければ通常の間断かん水でよい。
湿田	10mm/日以下	水深5cm程度入水すると、約一週間水持ちする。	入水後3日以上水が保たれる場合は浅水入水で良い。入水後自然減水させ、週に1~2日落水する間断かん水とする。	強い中干しは亀裂が大きくなるので控える。早い落水は避ける。

の間は3~4日おきに間断かん水し、出穂開花期は湛水し決して乾燥させないとしている。また、出穂期以降は水を溜めっぱなしにしてはいけないが、逆に乾燥させてもいけない。さらに、登熟期は2~3日間飽水状態を保ち、1日程度あけ、土壌が乾かないうちに間断かん水すると記述されている。落水期については、早期では収穫5日前まで、普通期では7日前まで間断かん水としている。これらのことは、すべて玄米中のカドミウム低減化のための方策とまったく一致している。愛媛県の水田のようにカドミウム濃度がそれほど高くないにもかかわらず、まれに基準超過米を産出する地域では、高品質安定生産のための基本管理を徹底することで、カドミウム基準超過米の産出を防ぐことができるものと考えられた。

しかしながら、湿田と乾田では減水深が大きく異なり、水管理も異なってくる。そこで、土壌タイプ別にカドミウム吸収抑制栽培留意点をまとめた(表7)。本研究結果を踏まえて、消費者の求める食の安全安心に応え、カドミウム基準超過米の産出がなくなることを期待している。

謝辞

西条中央地域農業改良普及センター(当時)の元専門

技術課長山岡和徳氏ほか担当者の方々、および地元JAの前営農振興課長高橋収一氏ほか関係役職員の方々、ならびに現地試験実施農家の皆様方には現地試験の実施にあたり大変お世話になった。また、課題の設定や試験の遂行にあたり農業経営課(当時)の関係各位には多くの支援をいただいた。ここに記して感謝申し上げる。

引用文献

- 愛媛県(2001):愛媛県稲作栽培指導指針,平成13年3月
- 愛媛県農林水産部技術指導課(1995):土壌・作物体診断マニュアル 調査・評価編,48-52
- 久馬一剛,佐久間敏雄,庄子貞雄,鈴木 皓,服部 勉,三土正則,和田光史(1993):土壌の事典,朝倉書店,東京,357
- 独立行政法人農業環境技術研究所(2002):水稻のカドミウム吸収抑制のための対策技術,2002年10月,
<http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/mgz030.html#03005>
- 森下豊昭・西 知己・香川邦夫雄・大田安定(1986):同一ほ場からのジャポニカ,インディカ,ジャワ,及び交雑型水稻66品種産米中のカドミウム自然賦存濃度,土肥誌57,293-296