

収穫前段階における玄米カドミウムの汚染リスク予測技術

今井 清之*・柴原 藤善**・堀田 悟・小野 信一***

Risk Management for Cadmium Pollution of Brown Rice in Paddy Fields before Harvest

Kiyoyuki IMAI, Fujiyoshi SHIBAHARA, Satoru HOTTA
and Shin-ichi ONO

キーワード：カドミウム，吸収抑制，玄米，リスク予測

カドミウム (Cd) の汚染リスク管理体制を確立するため、リスクの高い現地圃場において、生産対策としてアルカリ資材施用と湛水管理によるカドミウム吸収抑制技術を圃場レベルで実証するとともに、カドミウムの吸収・玄米蓄積経過や圃場内の変動分布を解析することにより、収穫前段階で玄米Cd濃度をモニタリングし、汚染リスクを予測する方法について検討した。

- 1) カドミウム低汚染圃場において、カドミウム吸収抑制対策としてアルカリ資材の施用に加え、出穂前後各3週間の継続的な湛水管理が有効なことを実証した。
- 2) 収穫1, 2週間前の玄米Cd濃度だけでなく、茎・葉鞘部(基部を除く部分)の濃度と玄米Cd濃度との間に相関が認められたことから、これらの部位のCd濃度が玄米Cd濃度を予測するための有効な指標となる可能性が示唆された。
- 3) 玄米Cd濃度が0.1~0.2mg/kg程度の圃場(30a)においては、圃場の長辺方向(100m)に1往復あたり50穂(最長稈穂)を採取して2~4往復(100~200穂)する方法により、圃場を代表する試料が簡便かつ効率的に得られると考えられた。

1. 緒 言

滋賀県では、これまで土壤汚染防止法で指定されたカドミウム (Cd) の汚染対策地域 (玄米Cd濃度1mg/kg以上) は存在しないものの、2003年に一部の地域で政府米の流通上の基準値 (0.4mg/kg) を超える玄米が生産されたことから、玄米Cd濃度が0.2mg/kg以上の地域では、Cd吸収抑制の生産対策を実施するとともに、集荷団体における立毛調査、ロット調査など玄米Cd濃度の分析によって安全性を確認する流通対策を行

い、近江米のカドミウムリスク管理に取り組んでいる。

一方、2006年7月には、FAO/WHO合同食品規格委員会 (Codex) において、精米中Cd濃度の国際基準値が0.4mg/kgに設定されたことを受け、食品衛生法で玄米中Cd濃度1.0mg/kg未満とされている国内基準値の見直しが検討されており、今後、さらに玄米カドミウムの汚染リスクの管理が重要性を増してくる。

カドミウムのリスク管理を行うためには、生産現場において、収穫後から出荷までの間に迅速に玄米

* 現, 商工観光労働部商業観光振興課, ** 執筆・連絡先, *** 独立行政法人 農業環境技術研究所。
本報告の一部は、日本土壌肥料学会2007年度大会 (東京) で発表した。

中Cd濃度を分析し、リスクを予測しなければならない。そのためには、立毛段階で玄米Cd濃度の予測が可能な部位を明らかにするとともに、その部位をほ場から効率良く採取し、分析に供する必要がある。

そこで、本報告では、基準超過リスクの高い地域で圃場を選定し、湛水管理を中心としたCd吸収抑制技術を圃場レベルで実証した上で、玄米Cd濃度を収穫前にモニタリングする手法を確立するため、立毛中の稲体Cd濃度と玄米Cd濃度との関係および圃場を代表する稲試料の採取方法について検討を行った。

2. 材料および方法

2.1 供試圃場の概要

滋賀県内の水田カドミウム賦存量調査(土壤保全対策事業定点点調査, 3巡目)¹⁵⁾の土壤中Cd濃度(0.1M 塩酸浸出法)の平均値0.18mg/kgに比べてリスクの高い地域にある圃場を選定した(表1)。2005年は圃場1~5の5筆, 2006年は圃場2, 3, 6~10の7筆をそれぞれ供試した。

アルカリ資材については、稲原ら⁸⁾が、ケイ酸分を保証した7種のアルカリ資材について、水稻のCd吸収抑制効果を比較し、熔成けい酸りん肥の効果が高いことを報告しており、また筆者ら⁵⁾も一定の効果を認めていることから、現地で普及しているケイカル+熔リン混合肥料に加え、熔成けい酸りん肥の施用も検討した。すなわち、選定圃場のうち、圃場3では、資材A(熔成ケイ酸リン肥, アルカリ分45%)を60kg/10a, 圃場6では資材B(ケイカル・熔リン混合, 商系,

アルカリ47%)を200kg/10a, その他の圃場では資材C(ケイカル70%・熔リン30%混合, 系統, アルカリ分45%)を200kg/10aとし、それぞれ前年秋に施用した上で、稲作期間中に出穂前後各3週間(計6週間)の湛水管理を実施した。

2.2 土壤酸化還元電位の測定

土壤の酸化還元電位(以下, Eh)は、各圃場において調査ポイントを水口側と水尻側に1点ずつ(計2点)設定し、その周辺に3本の白金電極を設置し(深さ5cm), 出穂前後各3週間に経時的にEhメーター(株藤原製作所製PRN-41)を用いて測定した。

2.3 稲体カドミウム濃度の分析方法

立毛中の稲体Cd濃度は、調査ポイント(圃場の水口側と水尻側に1点ずつの計2点設定)の周辺から平均的な生育量の水稲株を採取した。2005年は幼穂形成期から収穫期に3株ずつ, 2006年は出穂期から収穫期の期間中に5株ずつ経時的に採取し、稲体を穂(2005年, 2006年の収穫期および2006年の収穫1週間前は玄米), 葉身, 茎・葉鞘の各部位に分け、さらに葉鞘・茎については、基部(地際から3cm), 下半分および上半分に細分した。

稲体試料を各部位ごとにまとめ(ただし, 2006年の収穫期は株毎), 乾燥・粉碎して分析に供した。各部位のCd濃度は、1M 塩酸で抽出(固液比1:20)した試料をICP発光分析装置により測定した(1M 塩酸浸出法)¹²⁾。なお, 2006年は低濃度域を測定するためICP質量分析装置を使用した。分析は2連で行い、平均した。

表1 供試圃場の概要(2005, 2006)

地域の概要			供試圃場の概要					
地域名	土壤中Cd濃度 (mg/kg)	土壌pH	圃場名	面積 (a)	土壌タイプ	土壤中Cd濃度 (mg/kg)	土壌pH	品種
A地域	0.58 ± 0.11(n=14)	5.42 ± 0.44(n=12)	圃場1	30	細粒グライ土	0.52	6.2	コシヒカリ
			圃場2	10	細粒グライ土	0.54, 0.43	6.0, 5.9	コシヒカリ
			圃場3	30	細粒グライ土	0.65, 0.57	6.1, 6.0	コシヒカリ
B地域	0.43 ± 0.09 (n=15)	5.98 ± 0.25 (n=11)	圃場4	38	細粒グライ土	0.35	5.7	コシヒカリ
C地域	0.72 ± 0.13 (n=24)	5.32 ± 0.49 (n=24)	圃場5	30	グライ土, 下層有機質	0.66	5.9	秋の詩
			圃場6	30	グライ土, 下層有機質	0.50	5.7	秋の詩
D地域	0.34 ± 0.12 (n= 8)	6.28 ± 0.19 (n= 7)	圃場7	17	細粒強グライ土	0.31	6.2	コシヒカリ
E地域	0.37 ± 0.16 (n= 7)	5.88 ± 0.38 (n= 5)	圃場8	43	細粒強グライ土	0.30	5.8	コシヒカリ
F地域	0.47 ± 0.05(n= 7)	5.84 ± 0.44(n= 5)	圃場9	22	細粒強グライ土	0.31	5.5	キヌヒカリ
			圃場10	18	細粒強グライ土	0.39	5.1	日本晴

注) 2005年は圃場1~5, 2006年は圃場2, 3, 6~10で実証を行った。
圃場2, 3の土壤中Cd濃度および土壌pHの左の値は2005年, 右の値は2006年を示す。

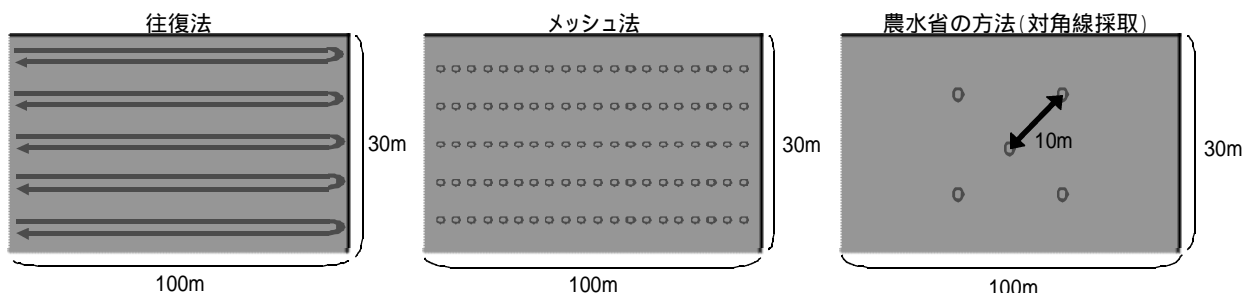


図1 圃場からの採取方法

2.4 圃場からの玄米試料の採取方法

2006年に圃場6において圃場からの玄米試料の採取方法を検討した(図1)。玄米試料の採取方法として、収穫1週間前および収穫期に、圃場の長辺方向(100m)に1往復あたり50穂(最長稈穂)を採取し、4~5往復(200~250穂)する方法(以下、往復法)と一定のメッシュ(0.3~1aメッシュ)に区分した区画から1株ずつ採取する方法(以下、メッシュ法)とを比較した。また、ロット調査として、圃場6から収穫・乾燥調製された玄米ロット(30kg/袋, 57袋)を分析に供した。

2007年には、早生品種であるコシヒカリにおける採取方法を検討するため、圃場3において、収穫1週間前および収穫期に、往復法、メッシュ法ならびに農水省の方法¹³⁾により玄米試料を採取し、ロット調査と比較した。

また、圃場内の土壌Cdの変動を調査するため、メッシュ法により水稻を採取した地点から作土(15cm深)を採取し、風乾後砕土し、2mmのふるいで篩別して分析に供した。

土壌のCd分析は、0.1M 塩酸を固液比1:5の割合で加え、恒温水平振とう機により30分で1時間振とう後ろ過し、原子吸光分光光度計により定量した。

3. 結果

3.1 水稻のカドミウム吸収経過と栽培管理との関係

3.1.1 2005年度の結果

気象条件については、登熟期間にあたる8月の平均気温が27.2(平年差+0.5)、降水量が142mm(平年比120%)となり、やや高温・多雨であった。

土壌Ehの推移をみると、圃場1~3では出穂後1週間

以内に一時酸化状態となったが、湛水期間中はおおむね-100mV以下であった。また、出穂後10~14日から落水状態となり、落水7日後にEhは急激に上昇した。圃場4では出穂後3週間の湛水管理が実践され、湛水期間終了後3日程度でEhは上昇した。これに対し、出穂直前から湛水管理できなかった圃場5では、出穂前から酸化状態で推移した(図2)。

Cd吸収量はいずれの圃場でも出穂期以降に増加し、特に圃場5では茎・葉鞘部および玄米部分の吸収量が著しく増加した。また、圃場2,3では収穫1週間前から収穫期にかけて玄米部分のCd吸収量の増加がみられた。いずれの圃場においても葉身のCd吸収量は少なかった。

供試圃場の玄米Cd濃度は、0.08~0.23 mg/kgの範囲にあり、比較的低いレベルとなったが、出穂以降、酸化状態が継続した圃場5では、湛水管理された圃場1~4に比べ高くなった。また、出穂後に一時湛水が中断された圃場1~3では、出穂3週間後まで湛水管理が徹底された圃場4に比べ玄米Cd濃度が高くなった。

3.1.2 2006年度の結果

気象条件については、登熟期間にあたる8月の平均気温が28.2(平年差+1.5)と高く、降水量は11mm(平年比9%)となり、高温・寡雨であった。

土壌Ehは、圃場2では出穂後10日間程度酸化状態となったが、その後湛水管理により収穫直前までEhは-200mV程度で推移した。圃場3,7,9は出穂から収穫直前までEhは-100mV以下となった。これに対し、水利条件等により出穂以降に湛水管理できなかった圃場6,8では、Ehが急激に上昇した(図3)。

Cd吸収量は、出穂以降にEhが上昇した圃場2,6,8において、茎・葉鞘および玄米部分で顕著に増加した。

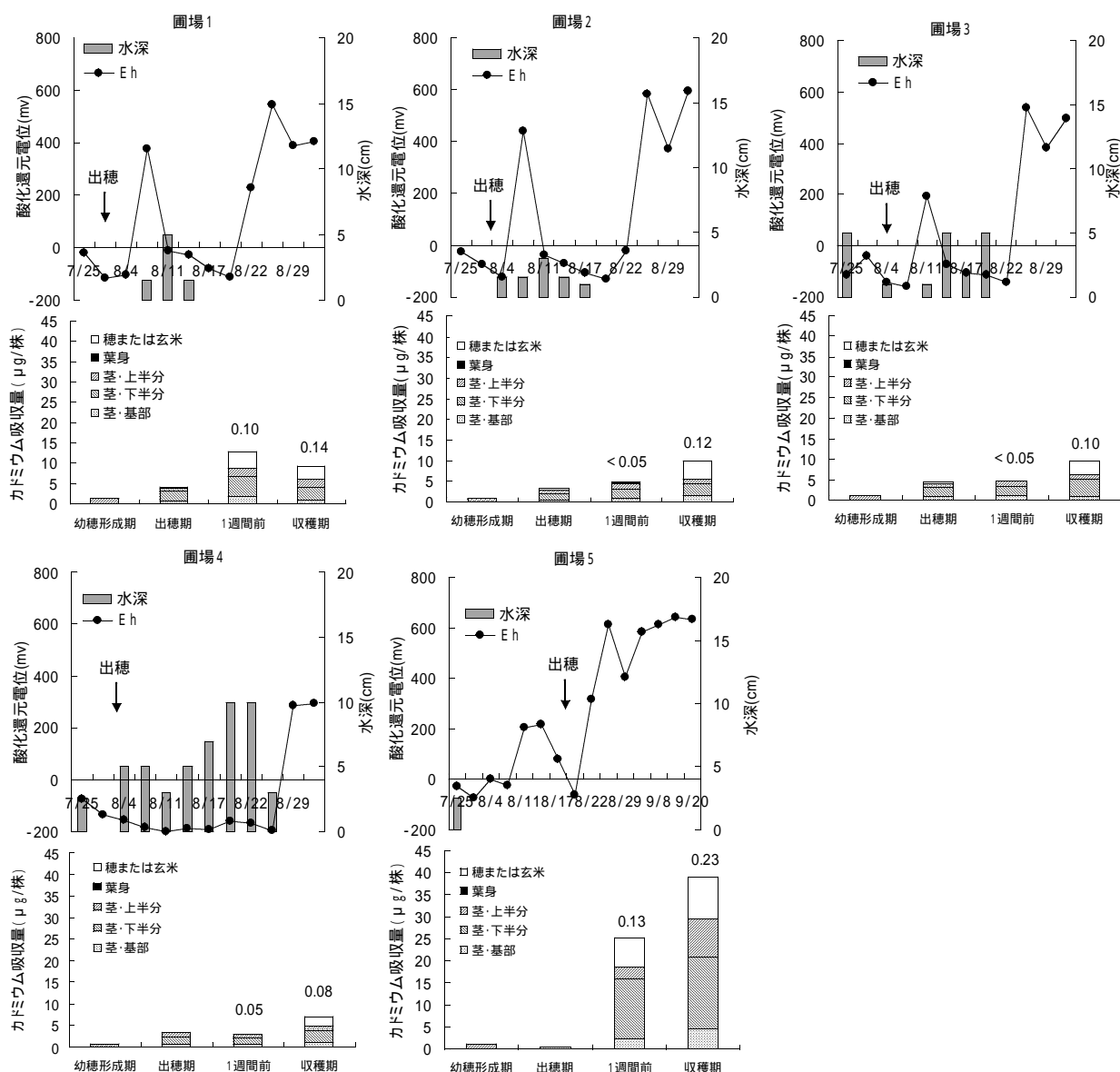


図2 現地圃場における酸化還元電位およびカドミウム吸収量の推移(2005)

注) 調査ポイント2か所のうち、圃場の水管理状態をよく反映した方の値を採用。Cd吸収量は、3株をまとめて分析。収穫1週間前および収穫期の数字は玄米Cd濃度を示す。「穂または玄米」の収穫期は玄米，その他の時期は穂。

これに対し、出穂以降も湛水管理された圃場3,7,9では、玄米部分のCd吸収量があまり増加しなかった。

各圃場の玄米Cd濃度は、0.02~0.18mg/kgと比較的低いレベルにあったが、Cd吸収量と同様、圃場2,6,8では高い傾向(0.15mg/kg以上)にあった。また、2006年には出穂20日後頃から土壌Ehが上昇した圃場がなかったことから、2005年のような収穫1週間から収穫期にかけてのCd吸収量および玄米Cd濃度の増加はみられなかった。

3.2 リスク予測技術の開発

3.2.1 玄米中カドミウム濃度と稲体カドミウム濃度との関係

玄米Cd濃度と稲体Cd濃度との関係を生育時期別・部位別にみると、2005年は幼穂形成期および出穂期には、いずれの部位も両者の間に有意な相関関係は認められなかった。また、収穫1週間前では茎・葉鞘の下半分との相関が高かった(表2)。

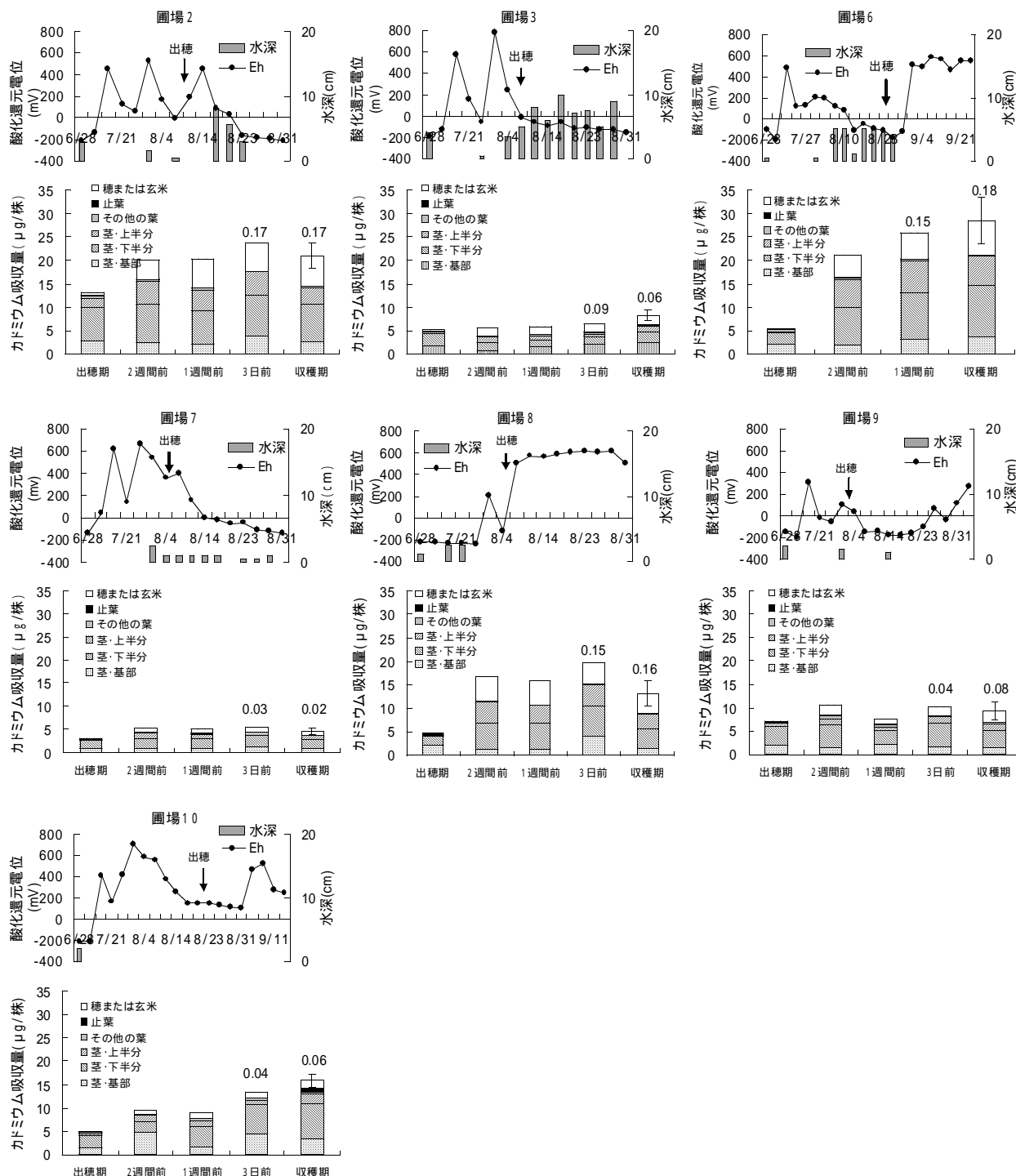


図3 現地圃場における酸化還元電位およびカドミウム吸収量の推移 (2006)

注) 調査ポイント2か所のうち、圃場の水管理状態をよく反映した方の値を採用。収穫期は5株について株毎に、その他の時期は5株をまとめて分析。収穫期の縦棒はCd吸収量の標準偏差、数字は玄米Cd濃度。「穂または玄米」の収穫期および収穫1週間前は玄米、その他の時期は穂。

これに対し、2006年は、収穫1週間前の茎・葉鞘の基部と葉身を除く部位のCd濃度と玄米Cd濃度との間に高い正の相関関係が認められた(表3)。茎・葉鞘上半分 > 茎・葉鞘下半分 > 玄米の順に相関が高くな

った。また、収穫2週間前の茎・葉鞘の基部と止葉の葉身を除く部位のCd濃度と玄米Cd濃度との間に高い正の相関関係が認められ、茎・葉鞘上半分 > 穂 > 茎・葉鞘下半分の順に相関は高くなった。

表2 生育時期別・部位別の稲体カドミウム濃度と玄米カドミウム濃度との関係(2005)

圃場	収穫期		収穫1週間前				出穂期				幼穂形成期		
	玄米	穂	茎・葉鞘部			葉身	幼穂	茎・葉鞘部			茎・葉鞘	葉身	
			上半分	下半分	基部			上半分	下半分	基部			
圃場1	0.14	0.10	0.28	0.34	0.76	<0.05	0.06	0.10	0.15	0.30	<0.05	0.12	<0.05
圃場2	0.12	<0.05	0.15	0.18	0.53	0.06	0.06	0.09	0.12	0.21	<0.05	0.09	<0.05
圃場3	0.10	<0.05	0.14	0.17	0.50	<0.05	0.07	0.08	0.13	0.28	<0.05	0.09	<0.05
圃場4	0.08	0.05	0.09	0.12	0.35	<0.05	<0.05	0.11	0.14	0.29	<0.05	0.06	<0.05
圃場5	0.23	0.13	0.26	0.51	0.65	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.10	<0.05	0.12	<0.05
平均	0.13	0.09	0.18	0.26	0.56	-	0.06	0.10	0.14	0.24	-	0.10	-
玄米との相関係数	0.97	0.78	0.97**	0.65	-	-0.87	-0.20	0.20	-0.86	-	0.80*	-	-

注) 単位: mg/kg. *は5%, **は1%水準で有意であることを示す.
 茎・葉鞘部の上半分, 下半分は, 基部を除いた部分を半分に分割した部分. 基部は, 地際から3cmまでの部分.
 収穫1週間前および出穂期の葉身は, Cd濃度が検出限界以下 (ICP発光分析法).

表3 生育時期別・部位別の稲体カドミウム濃度と玄米カドミウム濃度との関係(2006)

圃場	収穫期		収穫1週間前					収穫2週間前					
	玄米	玄米	茎・葉鞘部			葉身	穂	茎・葉鞘部			葉身		
			上半分	下半分	基部			10~20cm	止葉	上半分		下半分	基部
圃場2	0.17	0.17	0.65	0.52	1.02	0.48	0.05	0.14	0.69	0.60	1.08	0.58	0.08
圃場3	0.06	0.09	0.13	0.12	0.89	0.10	0.02	0.00	0.09	0.13	0.31	0.12	0.03
圃場6	0.18	0.15	0.72	0.57	1.23	0.53	0.05	0.13	0.73	0.54	0.89	0.49	0.07
圃場7	0.02	0.03	0.12	0.16	0.38	0.16	0.01	0.03	0.15	0.18	0.41	0.16	0.03
圃場8	0.16	0.15	0.57	0.37	0.57	0.30	0.02	0.14	0.70	0.40	0.54	0.30	0.06
圃場9	0.08	0.04	0.13	0.22	1.19	0.21	0.03	0.07	0.23	0.38	0.88	0.37	0.06
圃場10	0.06	0.04	0.22	0.22	0.44	0.21	0.04	0.02	0.18	0.15	1.91	0.15	0.03
平均	0.10	0.10	0.36	0.31	0.82	0.28	0.03	0.08	0.40	0.34	0.86	0.31	0.05
玄米との相関係数	0.93**	0.96***	0.93**	0.53	0.89**	0.65	0.93**	0.97***	0.90**	0.07	0.83*	0.89**	-

注) 単位: mg/kg. *は5%, **は1%, ***は0.1%水準で有意であることを示す.
 茎・葉鞘部の上半分, 下半分は, 基部を除いた部分を半分に分割した部分. 基部は, 地際から3cmまでの部分.
 10~20cmは, 地際から10~20cmの部分で, 試料採取の作業効率を高めるために, 別の稲株で検討した.
 2005年の収穫1週間前および出穂期の葉身Cd濃度が検出限界以下 (ICP発光分析法) となり, 2006年はICP-MSで分析.

なお, 2006年は, 2005年の結果をもとに, 玄米Cd濃度と相関の高かった茎・葉鞘部下半分の採取作業の効率を高めるため, 地際から10~20cmの部分(地際から握り拳で2つ目の部分に相当)を採取する簡便な方法を別の稲株で検討したが, 玄米Cd濃度との間に相関関係が認められたものの, 下半分の部分に比較して相関係数は低くなった(表3).

3.2.2 圃場を代表する稲試料の採取方法の検討

今回選定した地域の中でもリスクが高い地域A(圃場2,3)およびC(圃場6)において, 1筆圃場内の土壌Cd濃度と玄米Cd濃度の変動を2006年に調査した結果, 両者は異なる分布を示し, 土壌Cd濃度(変動係数5~12%)に比べ, 玄米Cd濃度(変動係数31~56%)の変動が大きくなり, 相関関係も低いことを認めた(図4).

また, 往復法とメッシュ法とを比較した結果, 収穫

1週間前および収穫期において圃場からそれぞれの方法を用いて採取した玄米Cd濃度に有意な差は認められなかった(表4. 圃場2,3のデータ略). しかし, Cd濃度の変動係数は, 往復法の方が小さくなった.

さらに, 土壌Cd濃度が最も高く, リスクの最も高いと考えられる地域C(圃場6)について, ロット調査を併せて実施した結果, 玄米Cd濃度は0.13mg/kgとなり, いずれの採取方法もロット調査との間に差は認められなかった(表4). 玄米Cd濃度の変動係数から, 許容誤差率10%で信頼水準を90%とした場合の必要標本数を求めたところ, 往復法では2~3往復(100~150穂), メッシュ法では22~29株となった.

2007年に, 早生品種のコシヒカリを作付けしている圃場(圃場3)からの採取方法を検討した結果を表5に示す. 玄米ロット調査における玄米Cd濃度(0.09mg/kg)と, 収穫1週間前と収穫期の往復法, メッシュ法および収穫期の農水省の方法で採取した玄米Cd濃度との間に有意な差は認められなかった. 2006年の

ほ場に比べて玄米Cd濃度の変動係数が大きくなったが、濃度レベルが低かったことから、許容誤差率20%で信頼水準を90%として必要標本数を求めると、

往復法で3～4往復(150～200穂)となった。また、本結果から、農水省の方法の有効性も確認された。

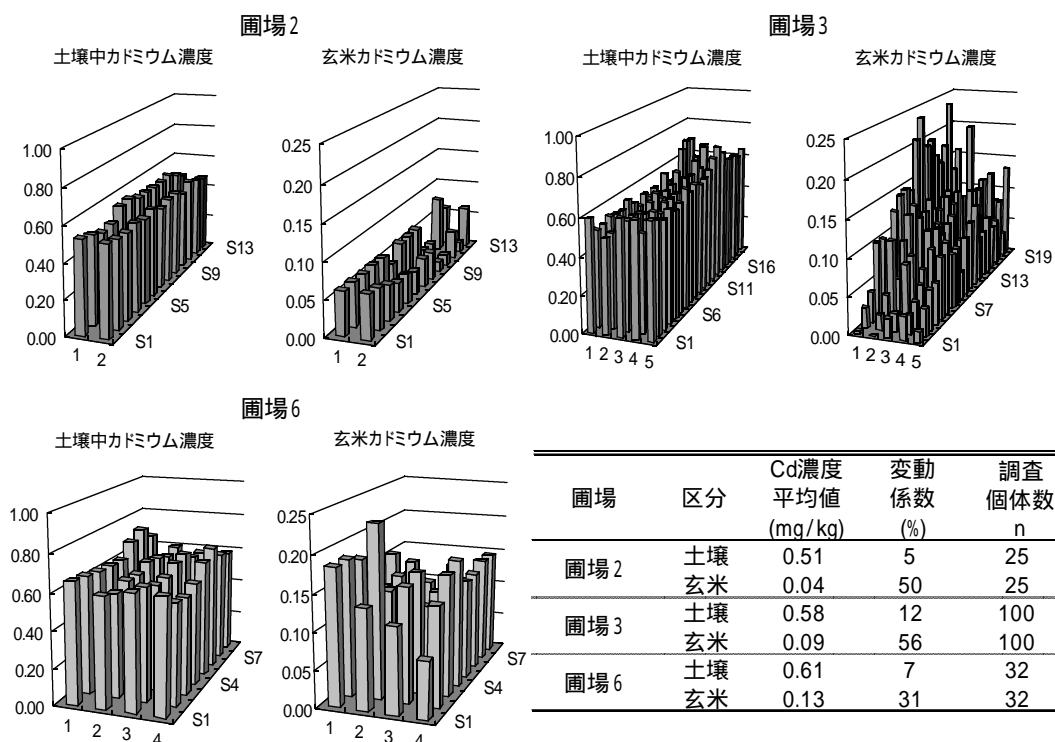


図4 ほ場内の土壌中カドミウム濃度と収穫期における玄米カドミウム濃度の分布(2006)

注)手前は水口部、奥は水尻部を示す。

表4 時期別および試料採取方法別の玄米カドミウム濃度と変動係数から推定した必要標本数(2006)

圃場 (品種)	試料 採取 方法	時期	月日	Cd濃度 ^x				標準 偏差	変動 係数 (%)	調査 個体数 n	必要標本数n					
				平均値	最大値	最小値	必要標本数n									
							信頼水準(%)				68		90		95	
圃場6 (秋の詩)	往復	収穫1週間前	10月5日	0.12	0.13	0.11	0.01	8	5	0.7	0.2	1.9	0.5	2.7	0.7	
		収穫期	10月10日	0.14	0.15	0.12	0.02	12	5	1.3	0.3	3.6	0.9	5.1	1.3	
	メッシュ	収穫1週間前	10月5日	0.15	0.26	0.07	0.05	33	32	10.6	2.7	28.8	7.2	40.8	10.2	
		収穫期	10月10日	0.13	0.23	0.06	0.04	28	32	8.0	2.0	21.7	5.4	30.8	7.7	
	ロット	乾燥調製後	-	0.13	0.15	0.12	0.00	4	50							

注)^xSteel法によるロットとの比較を行った結果、各採取方法およびサンプリング時期に5%水準で有意差は見られなかった。Cd濃度は水分含量15%換算値。

表5 時期別および試料採取方法別の玄米カドミウム濃度と変動係数から推定した必要標本数(2007)

圃場 (品種)	試料 採取 方法	時期	月日	Cd濃度 ^x				標準 偏差	変動 係数 (%)	調査 個体数 n	必要標本数n					
				平均値	最大値	最小値	必要標本数n									
							信頼水準(%)				68		90		95	
圃場3 (コシヒカリ)	往復	収穫1週間前	8月30日	0.08	0.10	0.05	0.02	23	5	5.3	1.3	14.3	3.6	20.3	5.1	
		収穫時期	9月5日	0.09	0.11	0.06	0.02	21	5	4.4	1.1	12.0	3.0	17.1	4.3	
	メッシュ	収穫1週間前	8月30日	0.10	0.27	0.02	0.05	50	100	25.0	6.2	67.6	16.9	95.9	24.0	
		収穫時期	9月5日	0.12	0.28	0.02	0.05	46	100	21.3	5.3	57.7	14.4	81.9	20.5	
	対角線	収穫時期	9月5日	0.12	0.17	0.08	0.04	31	5	9.4	2.4	25.5	6.4	36.2	9.0	
	ロット	乾燥調製後	-	0.09	0.12	0.06	0.01	15	50							

注)^xSteel法によるロットとの比較を行った結果、各採取方法およびサンプリング時期に5%水準で有意差は見られなかった。Cd濃度は水分含量15%換算値。

4. 考 察

4.1 水稻のカドミウム吸収経過と栽培管理との関係

水稻のCd吸収は、湛水により土壌Ehが-100mV以下になると著しく抑制されることが知られている¹¹⁾。本試験でも、出穂以降の土壌Ehが-100mV以下となる期間が長いほど、Cdの吸収が抑制された。

一方、2005年の圃場1~3では、出穂後の一時的な酸化状態により玄米Cd濃度が増加したが、このことは、稲村ら⁷⁾が、出穂前後40日の湛水管理期間中に、8日間程度の湛水の中絶があると玄米Cd濃度が高まるリスクがあると報告した結果と一致している。

また、2005年の圃場2,3のように、早生品種が作付けされ、出穂後20日以降に土壌Ehが急激に上昇した圃場で、玄米のCd吸収量および濃度が収穫1週間前から収穫期にかけて増加した。玄米Cd濃度は、出穂20~23日頃のCdの吸収によっても高まる²⁾ことから、出穂後20日以降の土壌Eh上昇により可溶化したCdが玄米に蓄積されたとともに、登熟後半に相当する8月20日以降の日照不足(52.2hr: 平年比81%)等により同化産物の玄米への転流が少なく、玄米中Cdが希釈されにくかったためと推察される。

2005, 2006年の2か年の試験結果から出穂期以降の土壌の平均Eh, 土壌中Cd濃度および土壌pHを説明変数として玄米Cd濃度に対する重回帰分析を行ったところ、5%水準で有意となり(重相関係数 $r = 0.70$, $n=20$)、出穂期以降の平均酸化還元電位が玄米Cd濃度に影響を及ぼす重要な因子(1%水準で有意)であることを明らかにした(表6)。

以上の結果、現地圃場レベルにおいても、Cdの吸収抑制対策として出穂以降の湛水管理による継続的な土壌Ehの低下が有効であることを実証した。しかし、湛水管理期間が長くなると、収穫時の地耐力の

低下が問題となることから、それぞれの圃場の特性(土性、地下水位、落水からEh上昇までの期間等)を考慮した湛水管理を実施する必要があると考えられた。

これに対し、土壌pHについては、本試験ではアルカリ資材の施用によりpH6前後となっており、玄米Cd濃度に大きく影響を及ぼす要因とはならなかった。しかし、圃場レベルでは天候や水利等の条件により湛水状態に保つことが難しい場合があること、また、石黒ら⁹⁾と同様、筆者ら⁵⁾も玄米粒重が小さいとCd含有率が高くなる傾向を認めていることから、登熟の向上により玄米粒重を大きくすることも玄米Cd濃度の低減対策の一つとして期待され、ケイ酸質を含むアルカリ資材の施用と湛水管理とを組み合わせることが効果的であると考えられた。

カドミウムのリスク管理体制をより確実なものとするためには、本試験で認められたCd濃度の収穫直前での上昇が、どのような条件下で発生するのか、例えば気象条件、水管理方法、作期および品種の早晚性などとの関係を明らかにすることが必要である。また、作業性を高めるには、収穫時の地耐力を確保するための湛水管理方法について検討する必要がある。

4.2 リスク予測技術の開発

4.2.1 稲体カドミウム濃度からの玄米中カドミウム濃度の予測

収穫以降の流通段階でCd汚染米を排除するためには、収穫前段階で玄米Cd濃度を予測する必要がある。本試験において、稲体各部位のCd濃度と玄米Cd濃度との関係について調査したところ、幼穂形成期および出穂期では相関関係は認められなかった。これは、出穂期~乳熟期の落水処理によって水稻のCd吸収が最も高まること^{14), 16)}、すなわち、出穂期から収穫期

表6 玄米カドミウム濃度に対する重回帰分析結果

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数
出穂以降の平均Eh(mv)	0.00019**	0.612
土壌中カドミウム濃度(mg/kg)	0.141	0.247
土壌pH	0.072	0.309
重回帰係数(R)	0.70*	

注)2005~2006年の現地圃場データ(n=20)による。
*は5%、**は1%水準で有意であることを示す。

までの水管理により稲体各部位のCd濃度が大きく変化することから、この時期における相関関係は認められなかったものと考えられた。

収穫1, 2週間前では、茎・葉鞘部（基部を除く部分）および玄米（穂）で玄米Cd濃度と高い正の相関関係がみられたが、一部の圃場では玄米Cd濃度が収穫1週間前から収穫期に上昇したことから、茎・葉鞘部（基部を除く部分）の方が相関係数はやや高くなったものと考えられる。したがって、収穫1, 2週間前の玄米だけでなく、茎・葉鞘部（基部を除く部分）の濃度についても有効な指標となる可能性が示唆された。

そこで、現地での流通防止措置の目安とするため、2005～2006年の2か年における玄米中Cd濃度と高い相関関係が認められた部位との関係について回帰式を求め、玄米Cd濃度が0.35mg/kg以上（1M 塩酸浸出法の信頼性を考慮したロット調査基準値）と推定される場合の各部位のCd濃度の指標値（信頼区間95%の予測下限値）を求めた（表7）。なお、ここでのロット調査基準値0.35mg/kgは、簡易分析法である1M 塩酸浸出法の利用や民間検査機関への委託を想定しており、市川ら⁴⁾が公定法である加熱酸分解・溶媒抽出・原子吸光法と比較検討して、公定法値0.40mg/kg に対する99.5%信頼区間下限値が0.36mg/kgになったとする結果を考慮して設定した値である。

その結果、例えば、収穫1週間前の玄米Cd濃度が0.27mg/kg未満であれば、収穫後から出荷までの段階で排除せずに済ますことができる可能性が示唆された。しかし、ここでの指標値については、玄米Cd濃度が比較的低いデータ（0.18mg/kg以下）から推定したため、予測値の幅が大きい傾向にある。このため、収穫前段階（収穫1～2週間前）において玄米Cd濃度を精度良く推定するためには、今後ロット調査基準値

レベルのデータも集積して指標値を求める必要があると考えられた。

4.2.2 圃場を代表する稲試料の採取方法の検討

水田内におけるCd濃度の分布については、Cdの供給が用水由来の場合は、Cd濃度は水口が高く、水尻が低い傾向にあることが報告されている^{3), 16)}。本研究で供試した水田では、Cd濃度一筆内の変動が小さく、Cdの供給源は用水以外であると考えられる。

土壌Cd濃度の変動に比べ、玄米Cd濃度の変動が大きいことから、玄米へのCdの移行は、土壌Cd濃度以外の要因（例えば、土壌の酸化還元電位および水稻の生育状況など）が影響していると考えられるが、今回のように、比較的変動が大きい玄米Cd濃度をモニタリングするためには、ほ場を代表する試料を効率良く採取する必要がある。

農林水産省で実施されている農水産物中カドミウム実態調査では、圃場の中心点とその中心点から4方向に5～10mの等距離に離れた4点の計5点から約500本の穂を採取することとなっている¹³⁾が、より簡便に試料を採取するための方法について検討した。

2006年に、供試圃場の中から比較的土壌中カドミウム濃度の高い圃場6において、試料の採取方法を検討したところ、収穫1週間前および収穫期に往復法、メッシュ法により採取した試料の玄米Cd濃度は、ロット調査における玄米Cd濃度との間に差は認められなかった⁶⁾。

ただ、圃場6では、中生品種（秋の詩）が作付けされており、玄米Cd濃度の圃場内変動も小さかったことから、2007年は早生品種（コシヒカリ）が作付けされており、玄米Cd濃度の変動が大きい圃場3において、2006年と同様に試料の採取方法を検討した。

表7 玄米カドミウム濃度が0.35mg/kg以上と推定される場合の各部位カドミウム濃度の指標値

玄米	収穫1週間前			穂	収穫2週間前			葉身 止葉
	茎・葉鞘部				茎・葉鞘部			
	上半分	下半分	10～20cm		上半分	下半分	10～20cm	
0.27	1.18	0.83	0.73	0.25	1.29	0.86	0.78	0.09

注) 信頼区間95%の予測下限値。単位：mg/kg。

その結果、コシヒカリについても、収穫1週間前および収穫期に往復法、メッシュ法により採取した試料の玄米Cd濃度は、ロット調査における玄米Cd濃度との間に有意な差は認められなかった。しかし、玄米Cd濃度が低く、変動係数が高くなったことから、信頼水準90%で許容誤差率20%とした場合の必要標本数は、往復法で3~4往復、メッシュ法では14~17株となった。

採取に要する作業時間について、メッシュ法では、1aに1株を目安として圃場から均一に採取するため、圃場の長さを計測した上で採取位置の決定する必要があり、採取に時間と手間を要するが、往復法では、圃場の計測を必要とせず、1圃場あたり15~20分程度で採取が可能である。

以上の結果、現場での作業労力を考慮すると、玄米Cd濃度が0.1~0.2mg/kg程度の圃場(30a)においては、収穫1週間前に、最長稈穂を往復法により100~200穂採取することにより、圃場を代表する試料を得ることができ、この試料を簡易分析することにより、収穫後の玄米カドミウムのリスク予測が可能であると考えられた。

現在、国・大学・都道府県等によるプロジェクト研究が実施され、汚染レベルに応じた水稻のCd吸収抑制技術の開発が進められており¹⁰⁾、本共同研究でも流通防止策としてイムノクロマトキットによる簡易・迅速判定法の有効性が認められている¹⁾。

したがって、前述のように、今後は玄米Cd濃度が基準値レベルの圃場のデータも蓄積しながら、リスク予測精度を向上させる必要があるが、生産現場では玄米Cd濃度0.2mg/kg以下を目標に営農技術を実践し、収穫1週間前等に立毛中の穂・玄米を採取してリスク予測する方法が安全かつ確実であると考えられ、今回の玄米Cd濃度レベル0.1~0.2mg/kgの結果は低汚染土壌におけるリスク管理を進める上で広く活用でき、意味のある成果であったと考える。

また、麦・大豆・野菜等との田畑輪作体系における総合的なカドミウム吸収抑制技術を確立することも重要になっており、全国レベルの産学官共同研究などを通じて、引き続き研究を行っていく必要があると考える。

謝 辞

本研究は、先端技術を活用した農林水産研究高度化事業「農産物中Cdの収穫前段階の効率的モニタリング手法の確立」(課題番号 1718, 2005~2006年, 研究総括者 小野信一)による共同研究として実施した。

現地の関係機関、JAおよび農家の方々には、圃場の選定と栽培管理に格別のご協力を賜った。また、秋田県農業試験場 前主席研究員(元生産環境部長)佐藤福男氏には、有益なご助言を賜った。当センター環境研究部環境保全担当職員各位には多大なるご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 阿部 薫・石川 覚・櫻井泰弘・奥山 亮・佐々木和裕・依田 啓, 2006: Cd検出用イムノクロマトキットによる玄米中カドミウム濃度簡易測定を試み。土肥誌。77: 679-682
- 2) 茅野充男, 1973. 重金属の吸収時期および吸収経路と水稻玄米中への重金属とりこみ量との関係。土肥誌。44(6): 204-210
- 3) 廣崎昭太, 1983. 土壌環境の計測と評価に関する統計学的研究 特に重金属について。国立公害研究所研究報告。41: 1-149
- 4) 市川泰之・広瀬 灰・横山幹郎・谷 秀男・中島秀治, 2008. 1M-HCl抽出 - ICP分析法を用いた出荷前玄米中カドミウムのリスク管理法。第17回環境化学討論会講演要旨集。110-111
- 5) 今井清之・堀田 悟・武久邦彦・柴原藤善, 2007. 水稻に対する湛水処理期間とアルカリ資材施用がカドミウム吸収抑制に及ぼす効果。土肥要旨集。53(): 284
- 6) 今井清之・堀田 悟・柴原藤善, 2007. 玄米中カドミウム濃度の収穫前段階のモニタリング手法とリスク予測技術。土肥要旨集。53: 181
- 7) 稲原 誠・雄川洋子・東 英男, 2006. 水稻玄米のカドミウム濃度に対する生育後期の湛水中断処理の影響。富山県農技セ研報。23: 11-18
- 8) 稲原 誠・雄川洋子・東 英男, 2006. 可溶性けい酸を含む各種アルカリ資材による水稻のカドミ

- ウム吸収抑制効果．富山県農技セ研報．23：19-27
- 9) 石黒哲也・山田信明,1997．水稻 1 穂内における着粒位置別の玄米のカドミウム集積．土肥誌．68(6)：629-633
- 10) 石川 覚,2008．農用地における重金属汚染土壤の対策技術の最前線．7．水稻のカドミウム吸収抑制技術．土肥誌．79：408-416
- 11) 伊藤秀文・飯村康二,1975．土壤の酸化還元状態の変化と水稻のカドミウム吸収応答．土肥誌．46(3)：82-88
- 12) 中島秀治,2004．水稻出穂直前茎中濃度からの玄米中カドミウム濃度対策．農及園．79(7)：804-809
- 13) 農林水産省．農水産物中のカドミウム実態調査について（試料の採取及び分析方法）．<http://www.maff.go.jp/cd/PDF/an2.pdf>
- 14) 大竹俊博,1992．カドミウム汚染土壤における水稻のカドミウム吸収およびその抑制に関する研究．山形県農試特別研報．20：1-77
- 15) 滋賀県農業試験場環境部,1995．定点調査からみた本県農耕地の重金属含量の実態．滋賀県農林水産主要試験研究成果．2：49-50
- 16) 柳澤宗男・新村善男・山田信明・瀬川篤忠・喜田健治,1984．神通川流域における重金属汚染の実態調査と土壤復元工法に関する研究．富山県農試研報．15：1-11

Summary

Field experiments were performed to establish a risk management system for cadmium (Cd) pollution of brown rice in high-risk paddy fields. Cd absorption control measures focusing on alkali application and flooding management were verified in the fields. A method of monitoring Cd concentrations in brown rice before harvest was examined to predict pollution risks by analyzing the processes of Cd absorption and accumulation in brown rice and the variation depending on the location in the field.

- 1) In slightly Cd-polluted paddy fields, cadmium absorption was effectively reduced by alkali application and continuous flooding for 6 weeks around the heading stage.
- 2) A remarkable correlation was found between Cd concentrations in heads and straw (except the basal part of the rice plant) at 1-2 weeks before harvest and Cd concentrations in brown rice after harvest; it was suggested that Cd concentrations in these portions may serve as a good index for predicting Cd concentrations in brown rice.
- 3) In the paddy fields where the Cd concentration in brown rice ranged from 0.1 to 0.2 mg/kg (0.3ha), it seemed possible to easily and efficiently obtain representative samples by collecting 50 heads (from the main stem) per round trip along the longitudinal side of the field (100m) in 2 to 4 cycles (100 to 200 heads in total).