

カドミウム極低吸収品種「コシヒカリ環1号」の育成

誌名	育種学研究 = Breeding research
ISSN	13447629
著者名	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
発行元	日本育種学会
巻/号	19巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 109-115
発行年月	2017年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



ノート

カドミウム極低吸収品種「コシヒカリ環1号」の育成

安部 匡¹⁾・倉俣正人¹⁾・井倉将人¹⁾・荒尾知人²⁾・牧野知之¹⁾・春原嘉弘³⁾・黒木 慎⁴⁾・石川 寛¹⁾¹⁾ 農研機構 農業環境変動研究センター, 茨城県つくば市, 〒305-8604²⁾ 農研機構 中央農業研究センター, 茨城県つくば市, 〒305-8666³⁾ 農研機構 北海道農業研究センター, 北海道札幌市, 〒062-8555⁴⁾ 農研機構 次世代作物開発研究センター, 茨城県つくば市, 〒305-8518

“Koshihikari Kan No. 1”, a new rice variety with nearly cadmium-free in grains

Tadashi Abe¹⁾, Masato Kuramata¹⁾, Masato Igura¹⁾, Tomohito Arao²⁾, Tomoyuki Makino¹⁾, Yoshihiro Sunohara³⁾, Makoto Kuroki⁴⁾ and Satoru Ishikawa¹⁾¹⁾ *Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization (NARO), Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan*²⁾ *Central Region Agricultural Research Center, NARO, Tsukuba, Ibaraki 305-8666, Japan*³⁾ *Hokkaido Agricultural Research center, NARO, Sapporo, Hokkaido 062-8555, Japan*⁴⁾ *Institute of Crop Science, NARO, Tsukuba, Ibaraki 305-8518, Japan*

キーワード

Oryza sativa L., 品種育成, 低カドミウム, 突然変異育種, コシヒカリ

1. 育成の背景

カドミウム (Cd) は自然界に普遍的に存在する元素である。人が食品を通じて、一定量を超える Cd を長年にわたり摂取し続けると、腎機能障害等健康への悪影響の可能性がある。食品安全委員会は、疫学調査の結果から食品由来の Cd 耐容摂取量を 7 µg/kg 体重/週と評価した (食品安全委員会 2010)。2007 年、日本人が食品から摂取する平均的な Cd 量は、耐容摂取量の約 40% であるが、その 37.2% がコメ類由来であり、コメに含まれる Cd 濃度を低減することは、日本人の Cd 摂取量の低減に直接寄与する (食品安全委員会 2010)。

一方で我が国には、過去の産業活動の結果として比較的土壌 Cd 濃度の高い水田が存在する (浅見 2001, 農林水産省消費・安全局 2011)。コメ中の Cd 濃度の規格基準 (以下, Cd 基準値) が玄米および精米で 0.4 mg kg⁻¹ 以下と食品衛生法で定められていることから、各産地では生産された玄米の Cd 濃度に対応し、客土法による土壌浄化や出穂前後 3 週間の湛水管理等の Cd リスク低減対策が取り組まれてきた (農林水産省消費・安全局 2011)。しかしながら、それらの方法はコストや用水の確保、効

果の安定性など生産者や行政への負担も大きく、「Cd を吸収しない」もしくは「玄米 Cd 濃度が低い」品種の育成が望まれていた。

これまでイネの Cd 吸収性に関わる研究は、主に自然変異に着目し進められており、Arao and Ae (2003) は、玄米 Cd 濃度に品種間差異が存在し、日本型品種はインド型品種に比較して玄米 Cd 濃度が低いことを報告している。また、同報告において日本型品種よりも玄米 Cd 濃度が低かったアフリカ原産の日本型陸稲品種「LAC23」と「コシヒカリ」の染色体部分置換系統群を用いた遺伝解析の結果、「コシヒカリ」の玄米 Cd 濃度を半減する「LAC23」由来の染色体領域が検出されている (Abe *et al.* 2013)。しかしながら、我が国の多様な土壌種と栽培環境において安定して低 Cd 形質を呈する実用品種の育成には、Cd 吸収量がさらに低い育種素材の探索が必要であった。

このような状況に対応して著者らは、我が国の主力品種である「コシヒカリ」を原品種に突然変異育種法を用いて玄米 Cd 濃度が極めて低い実用品種の開発を進めてきた。本報では、その成果として育成した Cd 極低吸収品種「コシヒカリ環1号」について、育成経過と特性について報告する。

編集委員: 西尾 剛

2017 年 4 月 3 日受理 2017 年 6 月 20 日受理

Correspondence: isatoru@affrc.go.jp

安部 匡と倉俣正人は共同第一著者

2. 育成経過

1) 低 Cd コシヒカリ変異体の作出

著者らは、「コシヒカリ」の突然変異集団を作出するため、2008 年独立行政法人原子力研究機構高崎量子応用研究所（現国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所）のイオン照射研究施設（TIARA）において AVF サイクロトロンで加速した炭素イオンを「コシヒカリ」の種子に照射し変異源処理をした（Ishikawa *et al.* 2012）。同年、農業環境技術研究所（農環研、現農業環境変動研究センター）の温室において M_1 世代約 4000 個体から M_2 種子を獲得した（表 1）。 M_2 世代 2592 個体を 2010 年 5 月下旬に高 Cd 土壌を充填したポットに移植し、成熟期まで栽培した。また、移植から穂ばらみ期まで湛水栽培を行い、その後はイネによる Cd 吸収を促進する落水栽培を行った（Ishikawa *et al.* 2012）。収穫した玄米は硝酸を用いた加熱分解後、誘導結合プラズマ質量分析装置（ELAN DRC-e, Perkin-Elmer Sciex）を用いて Cd 濃度を測定した。その結果、対照の「コシヒカリ」と比較して、極めて玄米 Cd 濃度の低い個体を 3 個体見出した。それらの Cd 極低変異体を lcd-kmt (*low cadmium-koshihikari mutant*) 1~3 と命名した（Ishikawa *et al.* 2012）。

2) 「コシヒカリ環 1 号」の育成

lcd-kmt1~3 は 2010 年冬季に農環研ガラス温室において玄米 Cd 濃度の後代検定（ M_3 世代）を行い、低 Cd 形質が遺伝形質であることを確認した。翌 2011 年に M_4 世代を用いて低 Cd 形質や農業形質の固定度調査、生産力検定予備試験および系統選抜を実施した。その結果、lcd-kmt3 は、極早生および弱勢形質を示したため選外とし

た。2012 年には残る 2 系統を用いて農研機構作物研究所（作物研、現次世代作物開発研究センター）と共同で M_5 世代における特性検定、生産力検定試験、固定度調査を実施した。また、同年東北から九州の 9 県 10 試験地において系統適応性試験も実施した（データ不掲載）。その結果、「コシヒカリ」に対し最も高い相同性を示す系統として lcd-kmt2 を選抜し、「コシヒカリ環 1 号」と命名して品種登録出願をした（石川ら 2014）。その後、「コシヒカリ環 1 号」は同品種名にて品種登録された（登録番号：第 24338 号、平成 27 年 5 月 20 日）。「コシヒカリ環 1 号」の「コシヒカリ」との識別性は、本登録出願時に新設された「カドミウム吸収性」のみであった。また、「コシヒカリ環 1 号」は出穂期、稈長、穂長、穂数が実用レベルで固定していることを、2012 年の固定度調査の結果によって確認した（表 2）。品種登録出願時の種子世代は M_5 世代であった。

3) 原因遺伝子の同定

「コシヒカリ環 1 号」の Cd 極低吸収性に関わる原因遺伝子の解析は、Ishikawa *et al.* (2012) によって報告されているため、本報では概要を記す。同品種の Cd 極低吸収性形質は、根においてマンガン（Mn）吸収に関わるトランスポーター遺伝子 *OsNRAMP5* に生じた一塩基欠損に起因するものであり（Ishimaru *et al.* 2012, Sasaki *et al.* 2012）、この変異により *OsNRAMP5* タンパク質は機能を失い、根からの Cd 吸収量が著しく低くなった。また、lcd-kmt1 および lcd-kmt3 も *OsNRAMP5* 遺伝子内にそれぞれ異なる変異が創出されており、*OsNRAMP5* タンパク質を機能欠損型で有していた（Ishikawa *et al.* 2012）。

表 1. 「コシヒカリ環 1 号」の育成経過

年次	2008 夏	2008 冬	2010 夏	2010 冬	2011 夏	2012 夏	2013 夏
世代		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
育成経過	イオンビーム照射	世代促進	個体選抜	ガラス温室 後代検定 種子増殖	圃場 固定度調査 特性検定 生産力検定	圃場 固定度調査 特性検定 生産力検定	圃場 育種家種子 原原種 採種
栽植系統群数				1	10	4	
栽植系統数		4000 ¹⁾	2592 ¹⁾	24 ¹⁾	10	20	
選抜系統数			3 ¹⁾	10 ¹⁾	4	0	
選抜系統名				lcd-kmt1			
栽植系統群数				1	5	2	1
栽植系統数				12 ¹⁾	5	10	8
選抜系統数				5 ¹⁾	2	1	8
選抜系統名				lcd-kmt2		コシヒカリ環 1 号	
栽植系統群数				1	5		
栽植系統数				11 ¹⁾	5		
選抜系統数				5 ¹⁾	0		
選抜系統名				lcd-kmt3			

¹⁾ 個体数

表2. 固定度調査結果

系統名 品種名	系統番号		個体数	出穂日			稈長 (cm)			穂長 (cm)			穂数 (本/株)		
				平均値	標準 偏差	変動係数	平均値	標準 偏差	変動係数	平均値	標準 偏差	変動係数	平均値	標準 偏差	変動係数
lcd-km2	3203	7-3-6(4)-4	21	7/31	0.7	0.78	84.3	3.3	3.93	17.2	1.0	5.97	13.9	1.6	11.25
	3204	7-3-6(4)-5	21	7/31	0.3	0.31	84.6	3.5	4.11	17.5	0.8	4.80	12.2	2.0	16.73
	3205	7-3-6(4)-6	21	8/1	0.8	0.86	86.1	3.3	3.84	17.8	0.8	4.29	11.9	1.6	13.41
	3206	7-3-6(4)-7	21	7/31	0.5	0.56	85.1	3.6	4.20	18.0	1.0	5.53	12.7	2.1	16.90
	3207	7-3-6(4)-8	21	7/31	0.7	0.71	84.3	4.5	5.35	17.2	0.8	4.84	13.1	1.5	11.36
	3209	7-3-6(C2)-4	21	7/31	0.6	0.65	84.8	5.2	6.13	17.4	0.9	5.28	13.0	1.8	13.97
	3210	7-3-6(C2)-5	21	7/31	0.5	0.50	86.9	3.1	3.54	17.5	0.6	3.58	13.4	1.6	11.91
	3211	7-3-6(C2)-6	21	7/31	0.8	0.88	86.0	4.3	5.03	17.0	0.8	4.51	12.8	2.8	22.01
	3212	7-3-6(C2)-7	21	7/31	0.5	0.48	86.1	4.4	5.15	16.5	0.9	5.50	12.9	2.0	15.86
	3213	7-3-6(C2)-8	21	8/1	0.6	0.67	86.9	2.7	3.10	16.3	0.6	3.49	12.9	1.7	13.08
コシヒカリ	3208		21	7/30	0.8	0.86	83.6	3.8	4.60	17.3	1.4	7.83	13.0	2.1	16.28

表内の黒枠は選抜系統を表す。2012年農環研にて実施。

表3. 栽培特性および収量性における「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⁾	精粒重 (kg a ⁻¹)	精玄米重 (kg a ⁻¹)	屑米歩合 (%)	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。玄米調整節目は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。

3. 栽培特性

1) 生育および収量性

2012年から2016年の5年間、育成地 (茨城県つくば市) において早植期移植栽培 (標準量施肥) の生産力検定試験を実施し、出穂期、成熟期、稈長など草姿および生態的特性について、「コシヒカリ環1号」と「コシヒカリ」を比較した (表3, 図1)。「コシヒカリ環1号」の出穂期は、「コシヒカリ」より1日程度遅かった。しかし、分散分析の結果、すべての調査項目において5%水準で有意差は認められなかった。次に収量性について両品種の平均値を比較すると精玄米重は「コシヒカリ環1号」の方が2.2ポイント低収であった (表3)。屑米歩合では、「コシヒカリ環1号」の方が1.3ポイント大きかった。また、玄米千粒重においては、「コシヒカリ環1号」の方が0.2 g小さかった。しかしながら、分散分析の結果、すべての調査項目において5%水準で有意差は認められなかった。以上の傾向、外観および統計解析結果を踏まえ、「コ

シヒカリ環1号」の草姿、生態的特性および収量性は、実用上「コシヒカリ」と同等と判断された。

2) 玄米形質

5年間の生産力検定試験で得られた精玄米を用いて、両品種の玄米の形態および外観品質について調査をした。調査項目は粒長、粒幅、粒厚、整粒歩合、胴割粒歩合、乳白粒歩合、基部未熟粒歩合、腹白未熟粒歩合、青未熟粒歩合およびその他未熟粒歩合であった (表4, 図2)。各測定値をもとに分散分析をした結果、「コシヒカリ環1号」の玄米形質は、すべての調査項目において「コシヒカリ」と5%水準で有意差は認められず、「コシヒカリ」と同等と判断された。

3) 食味および関連形質

育成地における生産力検定試験で得られた精玄米を用いて、「コシヒカリ環1号」の食味官能試験を一般財団法人穀物検定協会による依頼分析により実施した (表5)。

表 4. 玄米特性における「コシヒカリ環 1 号」と「コシヒカリ」の比較

品種	試験年次	粒長 (mm)	粒幅 (mm)	粒厚 (mm)	長/幅	長*幅	整粒 歩合 (%)	胴割粒 歩合 (%)	乳白粒 歩合 (%)	基部 未熟粒 歩合 (%)	腹白 未熟粒 歩合 (%)	青未熟粒 歩合 (%)	その他 未熟粒 歩合 (%)
コシヒカリ環 1 号	2012～2016	5.06	2.82	1.96	1.80	14.3	57.9	1.0	6.6	12.8	1.7	0.6	16.3
コシヒカリ		5.07	2.83	1.97	1.79	14.3	59.0	1.1	5.9	13.9	1.9	0.7	15.8

2012 年から 2016 年までの 5 ヶ年の平均値を記す。調査は穀粒判別器 (RGQI 10B, サタケ社製) を用いた。調査は各系統 1000 粒 4 反復、合計 4000 粒を調査 (2012 年のみ 3000 粒)。玄米調整節目は 1.8 mm。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。

a.



b.



図 1. 育成地における「コシヒカリ環 1 号」の草姿。
「コシヒカリ」(左 4 列), 「コシヒカリ環 1 号」(右 4 列)。
茨城県つくば市。
a, 穂揃い期 (2014 年 8 月 8 日撮影)。b, 成熟期 (2014 年 9 月 8 日撮影)。

試験年は 2012 年と 2016 年であり、基準品種は同一圃場で栽培した「コシヒカリ」を用いた。その結果、2012 年の総合評価において両品種間に有意差は認められなかったが、2016 年の総合評価において「コシヒカリ環 1 号」が「コシヒカリ」の食味に対して有意に優る結果が得られ、2 か年の食味官能試験結果から「コシヒカリ環 1 号」の食味は、「コシヒカリ」と同等もしくはそれ以上であると判断された (表 5)。また玄米のアミロースとタンパク質含有率について両品種を比較した (表 6)。その結果、「コシヒカリ」と「コシヒカリ環 1 号」は実用上同等と判断された。

4) 病害抵抗性、耐冷性および穂発芽抵抗性

「コシヒカリ環 1 号」のいもち病菌の幼苗噴霧接種による抵抗性の推定遺伝子型は、「+型」であった (表 7)。「コシヒカリ環 1 号」の畑晩法による葉いもち病菌圃場抵抗性検定の結果は、「弱」と判定された。穂いもち病菌圃場抵抗



図 2. 「コシヒカリ環 1 号」の籾と玄米の外観。
「コシヒカリ」(左), 「コシヒカリ環 1 号」(右)。

性検定の結果は、「弱」と判定された (表 7)。また、2 群菌の剪葉接種法による白葉枯病抵抗性検定では抵抗性「中」と判定された。縞葉枯病については、*Stvb-i* 遺伝子の DNA マーカー検定の結果から「罹病性」とであると推定された。本報で実施した病害検定において「コシヒカリ環 1 号」の特性は、「コシヒカリ」の特性と比較して同等と評価された (表 7)。

障害型耐冷性においては、恒温水槽 (水温 19.1°C, 水深 20 cm) を用いた検定の結果、「コシヒカリ」と同等の「極強」と判定された (表 7)。穂発芽性検定においても「コシヒカリ」と同等の「難」と判定された。以上の特性においても「コシヒカリ環 1 号」は「コシヒカリ」と同等の性質を有していた (表 7)。

5) Cd およびその他の元素吸収

① Cd 吸収性

「コシヒカリ環 1 号」の Cd 吸収性を土壌 Cd 濃度の異なる 3 つの圃場で評価した。それぞれの土壌 Cd 濃度は、「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」(1970) に基づく 0.1 M 塩酸抽出法において、1.35 mg kg⁻¹ (圃場 A), 1.21 mg kg⁻¹ (圃場 B) および 0.35 mg kg⁻¹ (圃場 C) であり、日本の水田土壌の平均 Cd 濃度 0.3 mg kg⁻¹ と比較して同等もしくは高い濃度であった。栽培時の水管理方法は、中干し以降成熟期まで落水状態を維持する早期落水栽培を行った。この栽培方法は土壌中の可給態 Cd 濃度を高め、イネによる Cd 吸収を促進する栽培方法である

表 5. 食味官能試験における「コシヒカリ環1号」と「コシヒカリ」の比較

品種	栽培年	総合評価			外観	香	味	粘り	硬さ
		評価値	信頼区間	有意差 ¹⁾					
コシヒカリ環1号	2012	0.200	±0.368	ns	0.050	-0.050	0.150	0.350	-0.250
	2016	0.400	±0.278	*	0.100	-0.100	0.450	0.300	0.000

一般社団法人日本穀物検定協会による依頼分析結果。専門パネル20名による、炊飯した供試米と基準米を比較評価する相対法。値は基準米を0とした時の官能評価の平均値。総合評価では、+が基準より優れる、-が基準より劣ることを示す。その他は、+が外観・香り・味が良い、粘りが強い、硬いを、-が外観・香り・味が不良、粘りが弱い、柔らかいことを示す。供試米は「コシヒカリ環1号」、基準米は同一圃場で栽培した「コシヒカリ」。育成地（茨城県つくば市）の生産力検定試験区の精玄米（篩目1.8mm）を供試。

¹⁾*はt検定（5%水準）において有意差あり、nsは有意差なしを示す。

表 6. 「コシヒカリ環1号」の玄米のアミロース含有率とタンパク質含有率

品種	アミロース 含有率 (%)	タンパク質 含有率 (%)	
	2012	2011	2012
コシヒカリ環1号	17.4	7.5	7.1
コシヒカリ	17.2	7.4	6.9
分析方法	比色法 ¹⁾	食味計 ²⁾	ケルダール法 ³⁾

¹⁾ ブランルーベ社オートアナライザにより測定。

²⁾ サタケ社米粒食味計にて測定。

³⁾ (一財)食品分析開発センターにて依頼分析。

(Ibaraki *et al.* 2009)。また収穫物は、わらと玄米に分離し、硝酸を用いた加熱分解後、ICP-MSを用いてCd濃度を測定した (Ishikawa *et al.* 2012)。その結果、「コシヒカリ」の玄米Cd濃度が圃場A、BおよびCにおいて0.48 mg kg⁻¹、0.76 mg kg⁻¹および0.44 mg kg⁻¹であり、すべての圃場においてCd基準値を超過した (表8)。一方「コシヒカリ環1号」の玄米Cd濃度は圃場Aおよび圃場Bでは定量限界以下 (定量限界は0.01 mg kg⁻¹)、圃場Cにおいても0.01 mg kg⁻¹であり、「コシヒカリ」と比較して著しく低濃度であった。また、わらのCd濃度は圃場A、BおよびCにおいて、「コシヒカリ」が3.19 mg kg⁻¹、3.78 mg kg⁻¹および4.12 mg kg⁻¹であったのに対し、「コシヒカリ環1号」は0.04 mg kg⁻¹、0.04 mg kg⁻¹および0.08 mg kg⁻¹であった (表8)。これらの結果から「コシヒカリ環1号」のCd極低吸収性は、異なる環境においても安定して発現し、玄米およびわらのCd濃度は最大でも「コシヒカリ」の2%程度であった。

② その他の元素の吸収性

「コシヒカリ環1号」のCd以外の元素の吸収性を確認するため、農環研の場内圃場において「コシヒカリ環1号」と「コシヒカリ」の早期落水栽培を行った。収穫物はわらと玄米に分離し、硝酸を用いた加熱分解後、誘導結合プラズマ発光分析装置 (Vista-Pro, Agilent Technologies Japan) を用いてそれぞれのMn、Cu (銅)、Fe (鉄) およびZn (亜鉛) の濃度を測定した (Ishikawa *et al.* 2012)。その結果、「コシヒカリ環1号」のMn濃度が玄米、わらともに「コシヒカリ」と比較して有意に低下していた (表9) (Ishikawa *et al.* 2012)。また、「コシヒ

カリ環1号」はわらのZn濃度が低下する傾向にあるが、その他の元素においては分散分析の結果、両品種間に5%水準で有意差はなかった (表9) (Ishikawa *et al.* 2012)。

4. Cd 低吸収性判別マーカー

「コシヒカリ環1号」由来のCd極低吸収形質をDNAマーカーによる効率的な育種に利用するため、原因遺伝子 *OsNRAMP5* の一塩基欠損配列直上に存在する制限酵素 *FspI* の認識部位を利用したCAPSマーカーを作成した。品種判別実験に必要なプライマーは、F3189 (Forward primer: 5'-ATGGAAAGAAACCGAACAAAGATCCAGG-3') と R3612 (Reverse primer: 5'-CGGAGAAATCGTG TAGACTAATTCGGT-3') である。本DNAマーカーの使用法の詳細は、以下の技術マニュアルに記した (URL http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/techdoc/kk1_marker_v1.pdf?0527)。

考 察

1) 育成の意義と普及の利点

水稻のCd汚染リスクを低減させる従来の技術は、コストや安定性など問題が散見されていた。本研究において育成した「コシヒカリ環1号」は、突然変異によりイネのCd吸収機能を欠損させることで玄米に含まれるCdを極低濃度にした画期的な実用品種であり、本品種を普及させることは、品種の変更のみで水稻生産におけるCd汚染リスクをほぼ皆無にすることが可能な安価かつ確実な低減対策技術である。

本報で示した「コシヒカリ環1号」のCd吸収性の評価結果は3例のみである。しかしながら、本報で実施しているCd吸収性の評価方法は、通常的水稻栽培と異なり中干し以降の落水により土壌Cdの可給化が促進される条件で実施しているため、イネによるCd低吸収性を評価する方法としては極めて厳格な方法である。この方法で評価した「コシヒカリ環1号」のCd極低吸収形質は、Cd吸収試験に供試した土壌Cd濃度および結果として得られた同品種の玄米Cd濃度、またCd極低吸収メカニズムを勘案すると、現在我が国で水稻栽培が営まれて

表 7. 「コシヒカリ環 1 号」と「コシヒカリ」の病害抵抗性および生態的特性の比較

品種	いもち病 真性抵抗性 ¹⁾	葉いもち病 圃場抵抗性 ²⁾	穂いもち病 圃場抵抗性 ³⁾	白葉枯病 圃場抵抗性 ⁴⁾	縞葉枯病 抵抗性 ⁵⁾	障害型 耐冷性 ⁶⁾	穂発芽 耐性 ⁷⁾	
	推定遺伝子型	発病程度 判定	発病程度 判定	判定	判定	不稔率(%) 判定	発芽程度 判定	
コシヒカリ環 1 号	+	7.2 弱	6.2 弱	中	罹病性	30.0 極強	3.0 難	
コシヒカリ	+	7.2 弱	6.3 弱	中	罹病性	34.9 極強	3.0 難	

¹⁾ 4 種類のレース (007.0, 033.1, 035.1, 037.1) を接種。作物研にて 2012 年実施。

²⁾ 畑晩による検定。発病程度は 2 反復の平均値。作物研にて 2012 年実施。0 (無病斑) ~ 10 (全葉枯死) の達観評価。

³⁾ 作物研現地圃場にて 2012 年実施。0 (無病斑) ~ 10 (全葉枯死) の達観評価。

⁴⁾ 2 群菌の剪葉接種による検定。作物研にて 2012 年実施。登熟期における 2 回の調査の平均値を用いて判定。

⁵⁾ PCR にて推定遺伝子型を調査し、抵抗性を推定した。

⁶⁾ 恒温水槽による検定。水温 19.1℃、水深約 20 cm。5 個体 (5 穂) を採取し不稔率を調査。2 反復。作物研にて 2012 年実施。

⁷⁾ 成熟期に収穫した切り穂を 28℃、湿度 100%、7 日間処理。2 (極難) ~ 8 (極易) の 7 段階で達観評価。作物研にて 2012 年実施。

表 8. 玄米とわらにおける Cd 濃度の品種間比較

部位	品種	Cd 濃度 (mg kg ⁻¹)					
		圃場 A		圃場 B		圃場 C	
		平均値±標準偏差	有意差	平均値±標準偏差	有意差	平均値±標準偏差	有意差
玄米	コシヒカリ環 1 号	ND		ND		0.01±0.002	*
	コシヒカリ	0.48±0.06		0.76±0.079		0.44±0.048	
わら	コシヒカリ環 1 号	0.04±0.012	*	0.04±0.007	*	0.08±0.021	*
	コシヒカリ	3.19±0.275		3.78±0.972		4.12±0.301	

0.1 M 塩酸抽出法による土壌 Cd 濃度 (圃場 A : 1.35 mg kg⁻¹, 圃場 B : 1.21 mg kg⁻¹, 圃場 C : 0.35 mg kg⁻¹)。中干し以降、早期落水栽培を実施。n=5。ND は定量限界値以下 (定量限界値 : 0.01 mg kg⁻¹)。* は 5% 水準で「コシヒカリ」と有意差あり。試験年次は 2012 年。

表 9. 玄米とわらにおける重金属濃度の品種間比較

部位	品種	Mn	Cu	Fe	Zn
		(mg kg ⁻¹)			
玄米	コシヒカリ環 1 号	9.06*	4.22	15.8	31.4
	コシヒカリ	30.9	4.72	14.2	34.4
わら	コシヒカリ環 1 号	24.5*	4.35	50.6	32.4*
	コシヒカリ	714	3.57	71.7	43.3

中干し以降、早期落水栽培を実施。5 個体の平均値を示す。* は 5% 水準で「コシヒカリ」と有意差あり。農環研にて 2011 年実施。本表は Ishikawa *et al.* (2012) からの引用。

いるすべての圃場において、Cd 基準値超過米を生産する可能性が極めて低いことが推察された。

今後、Cd 基準値の超過が危惧される地域に「コシヒカリ環 1 号」を導入した際には、「コシヒカリ」と同じ栽培方法で Cd 汚染リスクをほぼゼロにすることが可能である。また、Cd 基準値を超過する可能性の低い地域においても「コシヒカリ環 1 号」を導入することにより、食品由来の Cd 摂取量の約 4 割を占めるコメからの Cd 摂取を大幅に低減することが可能となる。これらの点において、「コシヒカリ環 1 号」の育成および普及は生産者および消費者の両者にとって大きな利点があると考えられる。

2) Mn 低吸収性

「コシヒカリ環 1 号」の Cd 極低吸収性は、OsNRAMP5 遺伝子に生じた変異により OsNRAMP5 タンパク質が機能を欠損したことが原因であった (Ishikawa *et al.* 2012)。OsNRAMP5 タンパク質は Mn の主要なトランスポーター

であるため、Mn 吸収も低下し、玄米わら共に「コシヒカリ」と比較して「コシヒカリ環 1 号」の Mn 濃度が有意に低下した (表 9) (Ishikawa *et al.* 2012, Ishimaru *et al.* 2012, Sasaki *et al.* 2012)。

3) 栽培上の留意点

「コシヒカリ環 1 号」の栽培特性は、Cd 極低吸収性および Mn 低吸収性を除いて「コシヒカリ」と同等であることから、本報で評価した「コシヒカリ環 1 号」の栽培上の留意点も「コシヒカリ」と同様である。また普及が期待される地域も「コシヒカリ」の栽培地域である。

最近、本間ら (2017) は、秋落ち水田などごま葉枯病多発圃場において、「コシヒカリ環 1 号」のごま葉枯病の病斑数が「コシヒカリ」に対して有意に多く、玄米収量が低下したことを報告している。その原因として「コシヒカリ環 1 号」は「コシヒカリ」と比較して Mn 含有率が低く Fe 含有率が高い。その結果、茎葉の Mn/Fe 比が低くなりごま葉枯病斑数の増加した可能性を示唆している (本間ら 2017)。その対応策として、Mn 資材施用が病斑数を減少させ、収量もコシヒカリ同等まで改善する傾向があることを報告している (本間ら 2017)。ごま葉枯病は、いもち病の防除薬で同時防除が可能であることから (小笠原ら 1999)、秋落ち水田など土壌中の低 Mn 濃度が危惧される水田においては、Mn 資材施用もしくは薬剤散布による防除を検討する必要がある。

また、「コシヒカリ環 1 号」と「コシヒカリ」との目視による識別は、すべての形質において困難である。した

がって、原原種等の重要種子を生産管理する際には、種子コンタミネーション防止のため上述の DNA マーカーを用いた品種判定の導入を推奨する。

4) 今後の展望と課題

「コシヒカリ環1号」は「コシヒカリ」の普及地域に導入可能であるが、「コシヒカリ」の栽培に適さない地域や「コシヒカリ」以外の品種が主力品種として栽培されている地域においては、「コシヒカリ環1号」に由来する Cd 低吸収形質を導入した新品種を育成する必要がある。また、そのことが国内に流通するコメ全体の Cd 汚染リスクの回避に大きく貢献する。これまでに、「コシヒカリ環1号」由来の機能欠損型 *OsNRAMP5* 遺伝子を判別する DNA マーカーが作出されていることから、現在、日本国内において 100 を超える品種・系統と「コシヒカリ環1号」の交配が行われており、新品種への同遺伝子の導入が効率的に行われている。今後は「コシヒカリ環1号」および同品種を親に持つ低 Cd 品種が普及し、日本人のコメからの Cd 摂取量が大幅に減少することを期待するとともに、日本産のコメの低 Cd 性が世界のコメ市場において認知され、極良食味や高品質に加えて食の安全においても世界をリードしていくことを期待している。

また、それと同時に「コシヒカリ環1号」を実用品種として普及させる上で消費者の Cd に対するマイナスイメージや生産者の風評被害を危惧する心情は無視できない。したがって、今後、我が国の食の安全を積極的に守る「コシヒカリ環1号」や「新規 Cd 低吸収品種」を導入する際には、消費者および生産者が正しい理解を得るための戦略や啓蒙活動も大きな課題として挙げられる。

5) 「コシヒカリ環1号」を用いた As と Cd の同時低減技術

ヒ素 (As) は環境中に広く分布する元素であるが、Cd 同様に栽培土壌由来の As がコメにも含まれている。コーデックス委員会 (CAC) ではコメに含まれる無機 As に関する国際基準値 (精米: 0.2 mg kg^{-1} , 玄米: 0.35 mg kg^{-1}) を策定した (CAC 2014, 2016)。今後、我が国において As の低減対策は必須である。イネにおける両元素の吸収には、早期落水栽培の様な好気的な条件で Cd の可給化が進み、湛水栽培の様な嫌気的な条件において As の可給化が進むトレードオフの関係が成り立ち、水管理などの耕種的方法で両元素の吸収抑制を行うことは容易ではない (Arao *et al.* 2009)。Ishikawa *et al.* (2016) は、収量や玄米品質の低下を考慮しつつ、中干し以降の間断灌漑の入水の回数を減らし水田土壌を比較的好気的な条件で維持した条件で「コシヒカリ環1号」を栽培することにより、As と Cd の同時低減技術を見出した。「コシヒカリ環1号」を用いたこの方法が有効な As 低減技術として考えられる。

謝 辞

「コシヒカリ環1号」の育成にあたり、東北から九州までの9県の担当者に地域適応性の評価をして頂いた。また、農研機構つくば技術支援センター観音台業務第2科 (旧農環研研究技術支援室) 各位には、育種試験や原種生産業務においてご尽力いただいた。ここに記して謝意を表す。本成果の一部は、生物系特定産業技術研究支援センタープロジェクト研究「イノベーション創出基礎的研究推進事業」「食の安全を目指した作物のカドミウム低減の分子機構解明」(2007-2011) によるものである。

引用文献

- Abe, T., Y. Nonoue, N. Ono, M. Omoteno, M. Kuramata, S. Fukuoka, T. Yamamoto, M. Yano and S. Ishikawa (2013) *Breed. Sci.* 63: 284-291.
- 浅見輝夫 (2001) “日本土壌の有害金属汚染”, アグネ技術センター, 東京. 32-103.
- Arao, T. and N. Ae (2003) *Soil Sci. Plant Nutr.* 49: 473-479.
- Arao, T., A. Kawasaki, K. Baba, S. Mori and S. Matsumoto (2009) *Environ. Sci. Technol.* 43: 9361-9367.
- CAC (2014) Report of the eight session of the Codex Committee on contaminations in food, Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Alimentarius Commission, 37th Session Report. Codex Alimentarius commission.
- CAC (2016) Report of the 10th session of the Codex Committee on contaminations in food, Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Alimentarius Commission, 39th Session Report. Codex Alimentarius commission.
- 本間利光・白鳥 豊・大峽広智・土田 徹・牧野知之・安部 匡・石川 覚 (2017) *土肥誌* 88: 213-220.
- Ibaraki, T., N. Kuroyanagi and M. Murakami (2009) *Soil Sci. Plant Nutr.* 55: 421-427.
- 石川 覚・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 (2014) コシヒカリ環1号. 登録番号 24338. [http://www.hinsyu.maff.go.jp/vips/CMM/apCMM112.aspx?TOUROKU_NO=24338&LANGUAGE=Japanese]. 2015年5月20日登録.
- Ishikawa, S., Y. Ishimaru, M. Igura, M. Kuramata, T. Abe, T. Senoura, Y. Hase, T. Arao, N.K. Nishizawa and H. Nakanishi (2012) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109: 19166-19171.
- Ishikawa, S., T. Makino, M. Ito, K. Harada, H. Nakada, I. Nishida, M. Nishimura, T. Tokunaga, K. Shirao, C. Yoshizawa *et al.* (2016) *Soil Sci. Plant Nutr.* 62: 327-339.
- Ishimaru, Y., R. Takahashi, K. Bashir, H. Shimo, T. Senoura, K. Sugimoto, K. Ono, M. Yano, S. Ishikawa, T. Arao *et al.* (2012) *Sci. Rep.* 2: 286.
- 農林水産省消費・安全局 (2011) コメ中のカドミウム濃度低減他のための実施指針. [<http://www.maff.go.jp/j/press/syoutan/nouan/pdf/110804-02.pdf>].
- 小笠原紘一・吉野嶺一・杉山 稔・榎吉寿夫 (1999) 北日本病虫研報 50: 28-31.
- Sasaki, A., N. Yamaji, K. Yokosho and J.F. Ma (2012) *Plant Cell* 24: 2155-2167.
- 食品安全委員会 (2010) 汚染物質評価書 カドミウム (第2版). [https://www.fsc.go.jp/hyouka/hy/hy-tuuchi-cadmium_k.pdf].