鹿児島大学農場研報（Bull. Exp. Farm Fac. Agr. Kagoshima Univ.）39：1〜5（2018）

鹿児島大学農学部附属農場で栽培されたオクラ11品種の果実中カドミウム濃度

赤木　功*・原田竜海・樗木直也

鹿児島大学農学部植物栄養・肥料学研究室　〒890-0065 鹿児島市郡元

Cadmium Concentration in the Fruits of Eleven Okura Varieties Cultivated at the Experimental Farm, Faculty of Agriculture, Kagoshima University.

Isao Akagi*, Tatsu-umi Harada and Naoya Chishaki

Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima 890-0065

Summary

We cultivated eleven okura varieties at the experimental farm, faculty of agriculture, Kagoshima university, and analyzed cadmium concentration in the fruits of okura harvested there. The cadmium concentration ranged from 0.0218 to 0.0482 mg kg^{-1}FW. The concentration levels below the Codex guideline of 0.05 mg kg^{-1}. A significant difference in the cadmium concentrations among the okura varieties was recognized. There was 1.4 times difference between the concentration of highest variety, ‘Youkihi’, and the concentration of the lowest variety, ‘Green Star’. Additionally, the cadmium concentration fluctuated with harvest date. There was not a significant correlation between cadmium concentration and each essential micro-elements, manganese, copper, zinc and molybdenum, concentration in okura fruits.

Key Words: Cadmium concentration, Codex guideline, Okura (*Abelmoschus esculentus*)

キーワード：Codex基準，カドミウム濃度，オクラ（*Abelmoschus esculentus*）

緒　言

カドミウムは食品を介して経口的に摂取される重金属の一つである．日本人のカドミウム摂取量は非汚染地域の住民であっても諸外国と比較して多いことが指摘されており（浅見ら，1986；浅見，1998），例えば，ベルギー，フィンランド，スウェーデンおよびイギリスにおける食事由来のカドミウム一日摂取量は20 μg day^{-1}以下であるのに対し，日本では31〜59 μg day^{-1}（非汚染地域），136〜245 μg day^{-1}（汚染地域）に達することが示されている（IPCS/WHO，1992）．カドミウムはヒトに対して強い毒性を示し，標的器官である腎臓において尿細管機能障害を引き起こすことが広く知られている．特に，体内に吸収されたカドミウムの排出速度は遅いことから，低濃度であっても一定量以上を長期にわたって摂取することによって健康被害を生じる可能性が懸念されている．このような，食事由来のカドミウム摂取量を抑制させるためには，農産物に含まれるカドミウムに対して注意を払う必要がある．

食品に含まれるカドミウムについては，近年，WHO/FAO合同食品規格委員会（Codex Alimentarius Commission：以下，コーデックス委員会）において国際基準値の設定が検討され，2005年７月の第28回の総会において野菜類の国際基準値案が最終採択された．すなわち，カドミウムの基準（新鮮重当たり）として，葉菜類が0.2 mg kg^{-1}，塊根塊茎類，茎菜類およびマメ科野菜類が0.1 mg kg^{-1}，その他の野菜（アブラナ科野菜，鱗茎類，ウリ科果菜，トマトを除くその他果菜類）が0.05 mg kg^{-1}とそれぞれ定められた．しかしながら，農林水産省が平成９〜14年（1997〜2002年）に実施した実態調査によれば，ホウレンソウ，サトイモ，ゴボウ，ニンジン，ネギ，タマネギ，ナス，オクラなどの野菜は調査検体の１％以上がこの基準値を超過していることが示されている（農林水産省，2002）．特に，オクラは165検体のうち22.4%にあたる37検体がこの基準値（0.05 mg kg^{-1}）を超過していたことが報告されている．鹿児島県は国内第一位の出荷量を誇るオクラの産地であり，オクラの安全性を検証し，それを消費者に提示するためにも，当地域で収穫されるオクラのカドミウム濃度の実態把握が必要であるが，現時点では十分な調査は行われていない．本研究では，オクラ果実のカドミウム濃度に関するデータの集積を図るために，鹿児島大学農学部附属農場においてオクラ11品種を栽培し，2011年７月上旬から９月中旬にかけて収穫された果実のカドミウム濃度について調査を行った．

2017年10月23日　受付日
2017年12月７日　受理日
*Corresponding author. E-mail: akagi046@chem.agri.kagoshima-u.ac.jp

材料および方法

国内で入手可能なオクラ11品種，アーリーファイブ（多角形，濃緑色），エメラルド（丸形，淡緑色），グリーンスター（多角形，濃緑色），グリーンソード（多角形，濃緑色），島の唄（丸形，淡緑色），ピークファイブ（多角形，濃緑色），まるみちゃん（丸形，淡緑色），みどり丸の助（丸形，淡緑色），レッドサン（多角形，紫色），レッドソード（多角形，紫色）および楊貴妃（多角形，白色）を試験に供した（括弧内は果実横断面形状および果実色を示す）．なお，鹿児島県内で広く栽培されている品種として，ブルースカイおよびブルースカイZがあるが，栽培開始時までにこれらの種子を入手することができなかったことから本研究では供試していない．栽培は2011年に鹿児島大学農学部附属農場の露地圃場で実施した．圃場の土壌は灰色低地土で，栽培前の土壌pH（ガラス電極法）は5.9，電気伝導率（1：5水抽出法）は0.140 dS m^{-1}であった．また，土壌中のカドミウム濃度（0.1 mol L^{-1}塩酸抽出法）は0.108 mg kg^{-1}であり，カドミウムの汚染レベルは低いと判断されるものであった．5月9日にポリポットで育苗した本葉3葉期の苗を畝間200 cm，株間50 cm，条間40 cm（2条），1株3本立ての栽植密度で定植した．各供試品種の栽植株数は12株（36本）とし，6株ずつをそれぞれランダムに圃場へ配置した．施肥はN-P_2O_5-K_2Oの成分を，基肥として8-10-6 g m^{-2}，追肥として8-4.8-6.4 g m^{-2}を施用した．その他病害虫防除等の栽培管理は慣行に従い適宜行った．オクラの生育はいずれの品種も栽培期間を通してほぼ順調に経過した．

分析に供する果実は2011年7月7日，7月15日，7月29日，8月11日，8月19日，8月26日および9月15日に収穫した．収穫された果実の中から無作為に5～10個を採取し分析試料とした．果実は流水ですばやく洗い，蒸留水ですすいだ後，通風乾燥させた．これを振動式粉砕機で粉砕し，微粉末としたものを分析に供した．

カドミウム，亜鉛，マンガン，銅およびモリブデンの測定は，湿式分解-誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS法）で行った．湿式分解は上記の微粉末試料0.5 gに硝酸（有害金属分析用，和光純薬工業製）5 mLを加え，マイクロ波加熱分解装置（ETHOS D，マイルストーンゼネラル社製）を用いて分解した．この分解液を，必要に応じて適宜希釈し，内部標準物質としてインジウムを最終濃度10 μg L^{-1}となるように添加した後，ICP-MS装置（ELAN DRC，パーキンエルマー社製）を用いて，質量数55（マンガン），63（銅），66（亜鉛），95（モリブデン），111（カドミウム）および115（インジウム）の強度を測定し，それぞれの元素の濃度を求めた．本法に従って，白米粉末の認証標準物質（NMIJ CRM7501-a）のカドミウム濃度を測定した結果，0.0509 mg kg^{-1}の値が得られた（認証値：0.0517 mg kg^{-1}）．なお，マンガン，銅，亜鉛およびモリブデンについては，2011年7月15日，8月19日および9月15日の3回分の試料のみを測定した．

結果および考察

供試したオクラの果実中カドミウム濃度は，新鮮重当たり0.0218～0.0482（中央値：0.0319）mg kg^{-1}（以下，mg kg^{-1} FW）の範囲にあった（第1表）．果実の重量および水分含有率と果実中カドミウム濃度との間には明らかな相関関係は認められなかった（データ省略）．

国内で生産されたオクラの果実中カドミウム濃度については農林水産省によって実態調査が実施されている．平成9～14年（1997～2002年）に行われた調査によれば，オクラ果実165点のカドミウム濃度は0.01 mg kg^{-1} FW未満（定量限界）～0.22 mg kg^{-1} FWの範囲にあり，最頻値は0.02～0.03 mg kg^{-1} FWの範囲にあったことが報告されている（農林水産省，2002）．また，平成21～22年（2009～2010年）に行われた調査によれば，オクラ果実239点のカドミウム濃度は0.01 mg kg^{-1} FW（定量限界）未満～0.11 mg kg^{-1} FWの範囲にあり，中央値は0.03 mg kg^{-1} FWであったことが報告されている（農林水産省，2016）．

第1表　オクラ果実中のカドミウム濃度（新鮮重当たり）

品　種	Cd（mg kg^{-1}）							各品種の中央値
	7/7	7/15	7/29	8/11	8/19	8/26	9/15	
アーリーファイブ	0.0313	0.0350	0.0394	0.0305	0.0300	0.0442	0.0423	0.0350
エメラルド	0.0305	0.0319	0.0318	0.0297	0.0291	0.0472	0.0482	0.0318
グリーンスター	0.0357	0.0396	0.0310	0.0269	0.0218	0.0273	0.0229	0.0273
グリーンソード	0.0332	0.0290	0.0347	0.0270	0.0319	0.0470	0.0412	0.0332
島の唄	0.0283	0.0308	0.0315	0.0309	0.0249	0.0339	0.0309	0.0309
ピークファイブ	0.0310	0.0360	0.0376	0.0244	0.0251	0.0347	0.0281	0.0310
まるみちゃん	0.0305	0.0348	0.0396	0.0363	0.0364	0.0435	0.0365	0.0364
みどり丸の助	0.0285	0.0370	0.0452	0.0325	0.0298	0.0440	0.0318	0.0325
レッドサン	0.0307	0.0382	0.0310	0.0236	0.0232	0.0372	0.0311	0.0310
レッドソード	0.0286	0.0319	0.0384	0.0228	0.0224	0.0327	0.0296	0.0296
楊貴妃	0.0363	0.0472	0.0407	0.0369	0.0404	0.0424	0.0335	0.0404
各収穫日の中央値	0.0307	0.0350	0.0376	0.0297	0.0291	0.0424	0.0318	

今回，私たちが実施した調査で得られた濃度は，これら全国実態調査の結果の範囲内にあった．

コーデックス委員会は，オクラを含む「その他野菜（鱗茎類，アブラナ科野菜，ウリ科果菜，トマトを除くその他果菜）」について0.05 mg kg^{-1} FWとする食品（農産物）中カドミウムの国際基準を設定し，農産物に由来するカドミウムの摂取量低減を勧告している．今回の調査結果によれば，７月上旬から９月中旬にかけてのすべての収穫日において，いずれの品種も0.05 mg kg^{-1} FWを下回っており，このコーデックス基準をクリアするものであった．このことは，本学附属農場の実験圃場で生産されるオクラはカドミウム汚染に関して概ね安全性が保たれていることを示している．ただし，基準値を上回らなかったもののこれに近い値を示した試料，例えば0.045 mg kg^{-1} FWを上回る試料も５点ほど確認された．このことは，本学附属農場よりもカドミウム汚染レベルの高い圃場では，コーデックス基準値を上回るオクラが生産される可能性を予想させるものであり，この点については詳細な調査が必要であると考える．

各オクラ品種のカドミウム濃度は，中央値の低いものから順に，グリーンスター（0.0273 mg kg^{-1} FW），レッドソード（0.0296 mg kg^{-1} FW），島の唄（0.0309 mg kg^{-1} FW），ピークファイブ（0.0310 mg kg^{-1} FW），レッドサン（0.0310 mg kg^{-1} FW），エメラルド（0.0318 mg kg^{-1} FW），みどり丸の助（0.0325 mg kg^{-1} FW），グリーンソード（0.0332 mg kg^{-1} FW），アーリーファイブ（0.0350 mg kg^{-1} FW），まるみちゃん（0.0364 mg kg^{-1} FW），楊貴妃（0.0404 mg kg^{-1} FW）であった．これら品種間のカドミウム濃度には，Friedman検定により５％水準で有意差があることが認められた．

作物の可食部におけるカドミウム濃度について，例えば，イネでは品種間で玄米中濃度に大きな差異があることが報告されている（Morishitaら，1987；Arao・Ae, 2003）．Morishitaら（1987）によれば，国内28品種では2.1～27 μg kg^{-1}，インディカ23品種では4.1～55.5 μg kg^{-1}の範囲にわたり，最も低い品種と高い品種の間では10倍以上も濃度に差があるとされている．一方，今回私たちが調査したオクラ果実では，カドミウム濃度に統計的な有意差は認められたものの，最も濃度が高かった品種（楊貴妃）と低かった品種（グリーンスター）の中央値間の濃度差は1.4倍程度であり，少なくとも供試したオクラ11品種においてはイネのそれと比較して小さかった．

各収穫日のカドミウム濃度の平均値は，中央値の低いものから順に，８月19日（0.0291 mg kg^{-1} FW），８月11日（0.0297 mg kg^{-1} FW），７月７日（0.0307 mg kg^{-1} FW），９月15日（0.0318 mg kg^{-1} FW），７月15日（0.0350 mg kg^{-1} FW），７月29日（0.0376 mg kg^{-1} FW），８月26日（0.0424 mg kg^{-1} FW）であった．なお，これら収穫日間のカドミウム濃度には，Friedman検定により５％水準で有意差があることが認められた．このように収穫日によって果実中のカドミウム濃度に変動が見られる原因については，オクラの草勢と着果果実数のバランス，気象条件，土壌水分状態等の様々な要因が関与しているものと予想されるが，少なくとも本研究の結果から確かなことを判断することはできなかった．例えば，鹿児島市（鹿児島気象台）の気象データを基に気象条件との関連性を調べた結果によれば，果実中のカドミウム濃度と果実生育期間（収穫４日前から前日）の平均気温および降水量の積算値との間には明瞭な相関関係（それぞれ，$r_s = -0.270$, $r_s = -0.321$：スピアマンの順位相関係数）は認められなかった．なお，ナスを対象に実施した調査・研究事例によれば，果実中カドミウム濃度は着果節位が高くなるほど，すなわち収穫日が遅くなるほど低下することが示されているが（竹田ら，2007），今回調査を行ったオクラ果実においてはそのような傾向は認められなかった．

カドミウムの吸収および地上部への転流は，亜鉛，マンガン，銅などの他の重金属のそれと相加的あるいは拮抗的な関係にあることが，いくつかの植物種について報告されている．例えば，Liuら（2003）はカドミウムで汚染された土壌で栽培されたイネ20品種において，葉ではカドミウム濃度と鉄，亜鉛および銅濃度，根ではカドミウム濃度と鉄，亜鉛，銅およびマンガン濃度との間に有意な正の相関が認められたことを報告している．Ishikawaら（2017）も同様に，イネ地上部におけるカドミウム濃度と亜鉛濃度およびマンガン濃度との間には有意な正の相関が認められたことを報告している．そこで，オクラの果実中におけるカドミウム濃度と他の重金属濃度との関連性を検証することを目的として，７月15日，８月19日および９月15日に収穫された果実のマンガン，銅，亜鉛およびモリブデン濃度を測定した（第２表）．果実中のマンガン濃度は2.36～5.39 mg kg^{-1} FW，銅濃度は0.748～1.51 mg kg^{-1} FW，亜鉛濃度は3.73～6.21 mg kg^{-1} FW，モリブデン濃度は33.5～144 μg kg^{-1} FWの範囲にあった．これらの値は，日本食品標準成分表2015年（七訂）（文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会，2015）に示されている「オクラ（果実，生）」の値（マンガン：4.8 mg kg^{-1} FW，銅：1.3 mg kg^{-1} FW，亜鉛：6.0 mg kg^{-1} FW，モリブデン：0.04 mg kg^{-1} FW）とほぼ一致するものであった．果実中のカドミウム濃度とこれら重金属濃度相互間の相関分析（スピアマンの順位相関）の結果を第３表に示した．銅と亜鉛の果実中濃度の間にはやや高い正の相関（$r_s = 0.751$，$p < 0.01$）が認められたものの，カドミウムはいずれの重金属元素とも明瞭な相関関係は認められなかった．このことは，少なくともオクラにおけるカドミウムの吸収移行あるいはその分配の機構は，マンガン，銅，亜鉛およびモリブデンのそれとは異なっていることを予想させるものである．

以上のように，鹿児島大学農学部附属農場の露地圃場で栽培したオクラ11品種の果実中カドミウム濃度は，コーデックス委員会が設定した国際基準（0.05 mg kg^{-1} FW）を下回っていることが示された．ただし，本調査は，土壌中のカドミウム濃度が0.1 mol L^{-1}塩酸抽出法で0.108 mg kg^{-1}のカドミウム汚染レベルが比較的低いとみなされる圃場で行った結果であることに留意する必要がある．野

第２表　オクラ果実中のマンガン，銅，亜鉛およびモリブデン濃度（新鮮重当たり）

品　種	Mn（mg kg^{-1}）			Cu（mg kg^{-1}）			Zn（mg kg^{-1}）			Mo（μg kg^{-1}）		
	7/15	8/19	8/26	7/15	8/19	8/26	7/15	8/19	9/15	8/11	8/19	8/26
アーリーファイブ	3.52	3.75	3.32	1.00	1.21	1.14	4.48	4.35	4.75	63.6	118	43.0
エメラルド	3.00	4.40	2.98	1.13	1.29	1.23	4.55	5.30	5.64	71.1	88.7	54.0
グリーンスター	3.42	3.11	2.47	1.07	1.24	0.920	4.04	5.10	3.92	93.6	144	91.1
グリーンソード	2.61	3.36	2.53	0.935	1.22	1.09	4.01	4.98	5.69	60.9	96.5	75.4
島の唄	2.63	3.91	2.92	0.922	1.17	1.19	3.73	4.96	5.04	48.2	59.2	54.6
ピークファイブ	3.54	3.70	2.54	1.04	1.24	1.15	4.33	5.09	5.06	92.7	144	52.5
まるみちゃん	5.39	5.21	2.96	1.41	1.33	1.22	5.27	4.58	5.26	119	98.0	51.9
みどり丸の助	3.58	3.15	2.36	1.51	1.30	1.12	6.21	5.45	5.34	85.9	68.1	44.2
レッドサン	2.83	2.72	2.53	1.12	1.07	0.992	5.09	4.87	4.91	125	66.7	50.8
レッドソード	3.16	2.99	2.90	0.985	0.964	1.01	4.49	4.33	5.12	74.3	72.7	47.6
楊貴妃	4.08	4.39	2.50	0.830	0.877	0.748	3.81	3.92	3.95	63.0	51.4	33.5

第３表　オクラ果実中のマンガン，銅，亜鉛，モリブデンおよびカドミウム濃度間の相関係数

	Mn	Cu	Zn	Mo	Cd
Mn	−	0.421*	−0.019	0.455**	−0.069
Cu		−	0.751**	0.446**	−0.068
Zn			−	0.122	0.166
Mo				−	−0.389*
Cd					−

Spearmanの順位相関係数（n=33）.
*および**はそれぞれ危険率１％，５％で有意な関係であることを示す.

菜類の摂取量は米をはじめとする他の食品と比較すると少なく，カドミウム摂取源としての野菜類の寄与は小さいとみなされるが，カドミウムの摂取量が高い傾向にある我が国においては，農産物のカドミウム濃度は可能な限り低減させることが求められている．食品に由来するカドミウムの摂取量低減のための方策を考える上でも，野菜類の可食部に含まれるカドミウム濃度に関するデータの蓄積が必要であると考える．

要　約

鹿児島大学農学部附属農場でオクラ11品種を栽培し，収穫された果実のカドミウム濃度を測定した．供試したオクラ果実のカドミウム濃度は新鮮重当たり0.0218～0.0482（中央値：0.0319）mg kg^{-1} FWの範囲にあった．これらの値は，コーデックスの国際基準をクリアするものであった．果実中のカドミウム濃度は品種間で差が認められたが，最も高かった品種（楊貴妃）と低かった品種（グリーンスター）との差は1.4倍程度であった．また，カドミウム濃度は収穫日によって変動が認められた．果実中のカドミウム濃度はマンガン，銅，亜鉛およびモリブデンのいずれの微量必須元素濃度とも有意な相関関係は認められなかった．

引用文献

Arao, T. and N. Ae. 2003. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain. Soil Sci. Plant Nutr. 49: 473-479.

浅見輝男・平田　熙・能川浩二. 1986. 土壌・植物・人体におけるカドミウムの挙動. 土肥誌. 57: 521-531.

浅見輝男. 1998. 土壌の有害金属汚染に関する今後の問題点. p.113-135. 日本土壌肥料学会編. 土壌の有害金属汚染 －現状・対策と展望－. 博友社. 東京.

IPCS/WHO. 1992. Environmental Health Criteria 134. Cadmium. WHO, Geneva.

Ishikawa, S., N. Ae, M. Sugiyama, M. Murakami and T. Arao. 2005. Genotypic variation in shoot cadmium concentration in rice and soybean in soils with different levels of cadmium concentration. Soil Sci. Plant Nutr. 51: 101-108.

Liu, J., K. Li, J. Xu, J. Liang, x. Lu, J. Yang and Q. Zhu. 2003. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes. Field Crops Research. 83: 271-281.

農林水産省. 2002. 平成14年12月２日プレスリリース「農作物等に含まれるカドミウムの実態調査結果」の提出について.
[Online] http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/jitai_sesyu/attach/pdf/01_inv-2.pdf(2017年10月閲覧)

農林水産省. 2016. 平成28年２月23日プレスリリース

「国産農産物中のカドミウムの実態調査」の結果について.
[Online] http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/pdf/160223-01.pdf（2017年10月閲覧）
文部科学省 科学技術・学術審議会資源調査分科会. 2015. 日本食品標準成分分析表2015年度版（七訂）. [Online] http://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365297.htm（2017年10月閲覧）
Morishita, T., N. Fumoto, T. Yoshizawa and K. Kagawa. 1987. Varietal differences in cadmium levels of Rice grains of Japonica, Indica, Javanica, and hybrid varieties produced in the same plot of field. Soil Sci. Plant Nutr. 33, 629-637.
竹田宏行・佐藤 淳・西原英治・荒尾知人. 2007. スズメノナスビ（*Solanum torvum*）を台木とした接ぎ木栽培によるナス果実中カドミウムの低減技術. 土肥誌. 78; 581-586.