

## 野菜畑土壌におけるカドミウムの施用資材による負荷量と可食部および作物残さによる持出し量

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	細淵, 幸雄 林, 哲央 中住, 晴彦
巻/号	82巻3号
掲載ページ	p. 207-213
発行年月	2011年6月

# 野菜畑土壌におけるカドミウムの施用資材による 負荷量と可食部および作物残さによる持出し量

細淵幸雄<sup>1</sup>・林 哲央<sup>1,2</sup>・中住晴彦<sup>1,3</sup>

キーワード カドミウム, トマト, キャベツ, ダイコン

## 1. はじめに

食品中のカドミウムに関する国際基準値が、FAO/WHO 合同食品規格委員会 (Codex 委員会) で決定された (小野・阿部, 2007)。これを受けて、国内においてもこれまでコメのみに設定されていたカドミウムの基準値が、国際基準値に準じて畑作物や野菜などにも拡大適用される可能性があり、今後は設定される基準値を上回る作物が栽培されることが予想される。

作物中のカドミウムは、主に土壌から吸収されるが、土壌中のカドミウムは母材に元々存在する他に、外部要因として大気降下物、かんがい水、および肥料等の施用資材に由来する (McLaughlin and Singh, 1999)。このため、カドミウム非汚染土壌とされている圃場では、肥料や堆肥などの施用資材が、カドミウムの主な負荷源になることも考えられる。日本では、Mishima *et al.* (2004) が化学肥料や家畜ふん尿による農地へのカドミウム負荷量を算出した。森ら (2004) は、草地飼料畑における堆肥に由来する銅、亜鉛、カドミウムおよび鉛の負荷量と牧草や飼料作物による持出し量を推定した。また、実際の草地 (チモシー) において、コンポストやリン酸肥料によるカドミウム負荷量がチモシーによる持出しを上回ることが明らかになった (古館・乙部, 2009)。しかし、日本国内を対象に食用作物を栽培する土壌におけるカドミウムの負荷や、収穫物などによる持出しを量的に把握し、比較した報告はこれまでに見られない。中でも、野菜栽培では水稲や畑作物に比べて施肥量や (金野, 1997)、各種資材施用量が多いことから (後藤・村上, 2004)、それに伴う土壌へのカドミウム負荷が他作物に比べて大きいと想定される。また、カドミウム負荷量と野菜の吸収量を比較することは、栽培土壌における

将来のカドミウム負荷や蓄積を低減させるための施用資材を選択する上で、重要な知見となりうる。

本報では、代表的な果菜、葉菜および根菜類であるトマト (*Solanum lycopersicum*)、キャベツ (*Brassica oleracea v. capitata*) およびダイコン (*Raphanus sativus* L.) を対象に、各栽培土壌におけるカドミウムの施用資材による負荷量と可食部および作物残さによる持出し量を調査した。

## 2. 試験方法

北海道立総合研究機構道南農業試験場内の周年利用型ハウス (年間を通して被覆を剥がさないハウス) でトマトを、露地でキャベツおよびダイコンを栽培した。供試土壌は、普通褐色低地土であり、 $0.1 \text{ mol L}^{-1}$  塩酸可溶性カドミウムは  $0.32 \sim 0.35 \text{ mg kg}^{-1}$  であった (表 1)。これは、北海道の耕地土壌の平均 ( $0.11 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (乙部, 2004) や、全国の低地土の平均 ( $0.25 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (浅見, 2002) より高い値であった。

トマト、キャベツおよびダイコンの栽培圃場に、それぞれ堆肥区および無堆肥区を設置した。各野菜の肥料および堆肥の施用量は、北海道施肥ガイド (北海道農政部編, 2002) に準じて設定した (表 2)。堆肥は牛ふん堆肥を用い、ハウス栽培であるトマトでは  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  (堆肥 40 区)、露地栽培であるキャベツとダイコンでは  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  (堆肥 20 区) 施用した。使用した肥料は、単肥で窒素、リン酸、カリウムをそれぞれ硝酸アンモニウム (硝安)、硫酸アンモニウム (硫安)、重過リン酸石灰 (重過石) および硫酸カリウム (硫加) を用いて施用した。堆肥区では、北海道施肥ガイド (北海道農政部編, 2002) に基づき、施用量に応じて窒素およびカリウムを減じ、リン酸は堆肥施用の有無にかかわらず同量を施用した。

トマトは「ハウス桃太郎」を供試品種とし、55 日間育苗した苗を 2003 年 4 月 22 日に定植し、果実の収穫を 6 月 27 日から 9 月 4 日まで行った。栽植様式はベツ幅 120 cm の 2 条植え、通路幅 80 cm、株間 30 cm で、栽植密度は  $33300 \text{ 株 ha}^{-1}$  である。整枝は主枝 1 本仕立てで、第 7 果房の上位 2 枚を残して摘心した。キャベツは「藍春ゴールド」を供試品種とし、25 日間育苗したセル成形苗を 2003 年 5 月 30 日に定植し、8 月 8 日に収穫した。栽植様式は株間 35 cm、畝間 60 cm、栽植密度は  $45710 \text{ 株 ha}^{-1}$

<sup>1</sup> (地独) 北海道立総合研究機構道南農業試験場 (041-1201 北斗市本町 680)

<sup>2</sup> 現在, (地独) 北海道立総合研究機構花・野菜技術センター (073-0026 滝川市東滝川 735)

<sup>3</sup> 現在, (地独) 北海道立総合研究機構中央農業試験場 (069-1395 夕張郡長沼町東 6 線北 15 号)

Corresponding Author: 細淵幸雄

2010 年 9 月 30 日受付・2011 年 2 月 21 日受理

日本土壌肥科学雑誌 第 82 巻 第 3 号 p.207 ~ 213 (2011)

表1 供試土壌の化学的性質 (深さ 0~20 cm)

圃場	容積重 (Mg m <sup>-3</sup> )	pH (H <sub>2</sub> O)	全炭素 (g kg <sup>-1</sup> )	無機態窒素 (mg kg <sup>-1</sup> )	有効態 P <sup>*1</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	交換性 (mg kg <sup>-1</sup> )		0.1mol L <sup>-1</sup> HCl 可溶性 (mg kg <sup>-1</sup> )	全 Cd <sup>*2</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
						K	Ca		
トマト	ハウス	1.10	6.3	16.8	5.4	108			
キャベツ	露地	1.15	5.7	16.5	1.8	124			
ダイコン									
圃場									
トマト		552	2449	361	15.8	6.2	0.35	0.72	
キャベツ		362	2458	292	12.0	6.6	0.32	0.58	
ダイコン									

\*1 トルオーグ法. \*2 硝酸-過塩素酸分解法.

表2 トマト, キャベツおよびダイコン栽培に用いた施用資材および施用量

圃場	試験区	牛ふん堆肥 Mg ha <sup>-1</sup>	施肥 (kg ha <sup>-1</sup> ) N-P-K	施肥に使用した資材 <sup>*4</sup> および施用量 (kg ha <sup>-1</sup> )	
				硝安	硫安
トマト	堆肥 40 区	40	200 <sup>*1</sup> -65-0	硝安 581-重過石 375-硫加 0	
	無堆肥区		300 <sup>*2</sup> -65-83	硝安 872-重過石 375-硫加 200	
キャベツ	堆肥 20 区	20	200 <sup>*3</sup> -61-83 <sup>*3</sup>	硫安 952-重過石 350-硫加 200	
	無堆肥区		220 <sup>*3</sup> -61-149 <sup>*3</sup>	硫安 1047-重過石 350-硫加 360	
ダイコン	堆肥 20 区	20	20-35-0	硫安 95-重過石 200	
	無堆肥区		40-35-0	硫安 190-重過石 200	

\*1 150 kg ha<sup>-1</sup> を第1~第5果房肥大期にそれぞれ5回に分けて追肥. \*2 200 kg ha<sup>-1</sup> を第1~第5果房肥大期にそれぞれ5回に分けて追肥. \*3 N-K で 60-50kg ha<sup>-1</sup> を結球始めに施肥. \*4 硝安は硝酸アンモニウム, 硫安は硫酸アンモニウム, 重過石は重過リン酸石灰, 硫加は硫酸カリウム. 表3以降も同表記とする.

である. ダイコンは「春北海」を供試品種とし, 2003年5月28日に播種し, 7月23日に収穫した. 栽植様式は株間27cm, 畝間60cm, 栽植密度は59260株ha<sup>-1</sup>である.

トマトの栽培面積は6m<sup>2</sup>区<sup>-1</sup>, キャベツとダイコンでは7.5m<sup>2</sup>区<sup>-1</sup>であり, それぞれ2反復で行った. 各野菜の収量, 乾物生産量, カドミウム含有量および吸収量の処理間差は, t検定を用いて有意水準5%で判定した.

施用資材のうち, 牛ふん堆肥については60℃, 3日間の通風乾燥後に粉碎し, 硝酸アンモニウム, 硫酸アンモニウム, 重過リン酸石灰および硫酸カリウムについては現物のままカドミウム分析に供試した. 作物体については, トマトでは収穫期間中の果実および収穫終了時の茎葉を, キャベツでは収穫時に結球と外葉を, ダイコンでは収穫時に葉と根部を採取した. 採取した作物体は, それぞれ60℃, 3日間の通風乾燥後に粉碎し, 分析に供試した. 施用資材および作物体のカドミウム含有量は, 約2gの粉碎試料を硝酸30mLおよび過塩素酸10mLで湿式分解後, 分解液をDDTC-MIBKで抽出し, 原子吸光度計 (SHIMADZU AA660, 228.8nm) により測定した.

施用資材のカドミウム含有量に施用量を乗じて, 土壌へのカドミウム負荷量とした. また, 作物体のカドミウム含有量に乾物生産量に乗じてカドミウム吸収量とした. 施用資材によるカドミウム負荷量と, トマト, キャベツおよびダイコンによるカドミウム持出し量の差を計算した. すなわち, トマトによる持出し量は, 通常次作以降の病虫害を予防するため茎葉 (残さ) をハウスから持出すことから, 地上部全体の吸収量とした. キャベツとダイコンにおいては, 可食部の結球や根部のみ圃場から持出し, 外葉や葉を圃場にすき込むので, 結球と根部のカドミウム吸収量を持

出し量とした.

### 3. 結果

#### 1) 土壌へのカドミウム負荷

表3に投入資材のカドミウム含有量を示した. 牛ふん堆肥, 硝安, 硫安および硫加のカドミウム含有量は0.20mg kg<sup>-1</sup>以下であったのに対し, リン酸肥料である重過石では6.66mg kg<sup>-1</sup>と他の資材に比べて高かった.

各栽培土壌のカドミウム負荷量は, 牛ふん堆肥と重過石によるものが主であり, 硝安, 硫安および硫加による負荷は極めて少なかった (表4). トマト栽培土壌へのカドミウム負荷量は, 堆肥40区および無堆肥区でそれぞれ6.8および2.6g ha<sup>-1</sup>であり, 堆肥40区では牛ふん堆肥による負荷が4.2g ha<sup>-1</sup> (全体の負荷量の約6割) と多くを占め, 無堆肥区では重過石による負荷が97%と大部分を占めた. キャベツ栽培土壌では, 堆肥20区および無堆肥区でそれぞれ4.5および2.4g ha<sup>-1</sup>であり, 堆肥20区では牛ふん堆肥による負荷が2.1g ha<sup>-1</sup>と全体の約5割を占め, 無堆肥区では重過石による負荷が97%と大部分を占めた. ダイコン栽培土壌では, 堆肥20区および無堆肥区でそれぞれ3.5および1.3g ha<sup>-1</sup>であり, 堆肥20区では牛ふん堆肥による負荷が2.1g ha<sup>-1</sup>と全体の約6割を占め, 無堆肥区で

表3 施用資材のカドミウム含有量 (現物あたり)

施用資材	Cd (mg kg <sup>-1</sup> )
牛ふん堆肥	0.11
硝安	0.04
硫安	0.01
重過石	6.66
硫加	0.20

は重過石による負荷がほとんどを占めた。

2) トマト、キャベツおよびダイコンのカドミウム吸収量

表5, 6および表7に、それぞれトマト、キャベツおよびダイコンの収量、乾物生産量、カドミウム含有量および吸収量を示した。これらの項目全てについて、堆肥施用の

有無による有意差は認められなかった。したがって、以下堆肥区における値について述べる。

トマトの果実収量は126 Mg ha<sup>-1</sup>であり、この作型における北海道の基準収量(90 Mg ha<sup>-1</sup>)より多かった(北海道農業協同組合中央会・ホクレン農業協同組合連合会編, 2006)(表5)。トマトの現物あたりのカドミウム含有量は、

表4 施用資材による土壌へのカドミウム負荷量

施用資材	トマト		キャベツ				ダイコン	
	堆肥40区	無堆肥区	堆肥20区	無堆肥区	堆肥20区	無堆肥区	堆肥20区	無堆肥区
	負荷量 (g ha <sup>-1</sup> )							
牛ふん堆肥	4.23 (62.7) <sup>*1</sup>		2.12 (47.1)		2.12 (61.3)			
硝安	0.02 (0.4)	0.04 (1.4)						
硫安			0.01 (0.2)	0.01 (0.4)	0.00 (0.1)	0.00 (0.1)		
重過石	2.50 (37.0)	2.50 (97.1)	2.33 (51.9)	2.33 (96.7)	1.33 (38.6)	1.33 (99.9)		
硫加		0.04 (1.5)	0.04 (0.9)	0.07 (2.9)				
合計	6.76 (100)	2.57 (100)	4.50 (100)	2.41 (100)	3.45 (100)	1.33 (100)		

<sup>\*1</sup> 括弧内数値は、各処理区における各資材による負荷割合(%)を示す。

表5 トマトの果実収量、乾物生産量、カドミウム含有量および吸収量

	果実収量 (Mg ha <sup>-1</sup> )		乾物生産量 (Mg ha <sup>-1</sup> )			Cd含有量 <sup>*3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	
	葉	茎	葉	茎	果実	葉	茎
堆肥40区	126 (3.57) <sup>*1</sup>	3.42 (0.02)	2.52 (0.36)	8.42 (0.02)	6.83 (1.25)	2.55 (0.45)	0.46 (0.07)
無堆肥区	112 (0.30)	3.77 (0.11)	2.58 (0.20)	7.20 (0.15)	6.90 (0.27)	2.70 (0.09)	0.48 (0.03)
	ns <sup>*2</sup>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Cd含有量 <sup>*4</sup> (mgkg <sup>-1</sup> )			Cd吸収量 (g ha <sup>-1</sup> )			計
	葉	茎	果実	葉	茎	果実	
堆肥40区	1.03 (0.18)	0.45 (0.08)	0.030 (0.003)	23.4 (4.37)	6.40 (0.22)	3.84 (0.54)	33.6 (5.13)
無堆肥区	1.01 (0.00)	0.45 (0.03)	0.031 (0.002)	26.0 (1.80)	6.96 (0.31)	3.45 (0.16)	36.4 (2.27)
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>\*1</sup> 括弧内数値は標準偏差を示す。 <sup>\*2</sup> 処理間で有意差なし (t検定, 5%水準, n=2)。 <sup>\*3</sup> 乾物あたり。 <sup>\*4</sup> 現物あたり。

表6 キャベツの結球収量、乾物生産量、カドミウム含有量および吸収量

	結球収量 (Mg ha <sup>-1</sup> )	乾物生産量 (Mg ha <sup>-1</sup> )		Cd含有量 <sup>*3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )		Cd含有量 <sup>*4</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )		Cd吸収量 (g ha <sup>-1</sup> )		
		外葉	結球	外葉	結球	外葉	結球	外葉	結球	計
堆肥20区	94.2 (0.51) <sup>*1</sup>	3.30 (0.10)	5.49 (0.03)	0.51 (0.22)	0.12 (0.15)	0.039 (0.017)	0.007 (0.008)	1.67 (0.77)	0.63 (0.81)	2.31 (1.57)
無堆肥区	88.8 (7.54)	3.68 (0.03)	5.36 (0.56)	0.43 (0.20)	0.088 (0.05)	0.037 (0.017)	0.005 (0.003)	1.59 (0.75)	0.47 (0.20)	2.06 (0.95)
	ns <sup>*2</sup>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>\*1</sup> 括弧内数値は標準偏差を示す。 <sup>\*2</sup> 処理間で有意差なし (t検定, 5%水準, n=2)。 <sup>\*3</sup> 乾物あたり。 <sup>\*4</sup> 現物あたり。

表7 ダイコンの根部収量、乾物生産量、カドミウム含有量および吸収量

	根部収量 (Mg ha <sup>-1</sup> )	乾物生産量 (Mg ha <sup>-1</sup> )		Cd含有量 <sup>*3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )		Cd含有量 <sup>*4</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )		Cd吸収量 (g ha <sup>-1</sup> )		
		葉	根部	葉	根部	葉	根部	葉	根部	計
堆肥20区	66.1 (5.15) <sup>*1</sup>	2.71 (0.07)	3.76 (0.08)	0.65 (0.03)	0.25 (0.09)	0.063 (0.004)	0.015 (0.006)	1.76 (0.12)	0.95 (0.35)	2.71 (0.26)
無堆肥区	69.4 (4.48)	2.54 (0.04)	4.19 (0.05)	0.74 (0.02)	0.22 (0.08)	0.077 (0.000)	0.013 (0.007)	1.87 (0.02)	0.92 (0.35)	2.79 (0.33)
	ns <sup>*2</sup>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>\*1</sup> 括弧内数値は標準偏差を示す。 <sup>\*2</sup> 処理間で有意差なし (t検定, 5%水準, n=2)。 <sup>\*3</sup> 乾物あたり。 <sup>\*4</sup> 現物あたり。

果実が  $0.03 \text{ mg kg}^{-1}$  であったのに対し、葉および茎ではそれぞれ  $1.03$  および  $0.45 \text{ mg kg}^{-1}$  であり、部位別では葉が最も高かった。また、トマトについては国際基準値が設定されていないが、本処理における果実のカドミウム含有量は、トマト以外の果菜類の基準値 ( $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ ) を下回った。トマトのカドミウム吸収量は  $34 \text{ g ha}^{-1}$  であり、葉が多く ( $23 \text{ g ha}^{-1}$ )、それに比べて可食部である果実は少なかった ( $3.8 \text{ g ha}^{-1}$ )。

キャベツの結球収量は  $94 \text{ Mg ha}^{-1}$  であり、この作型における北海道の基準収量 ( $65 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) を上回った (北海道農業協同組合中央会・ホクレン農業協同組合連合会編, 2006) (表6)。キャベツの現物あたりのカドミウム含有量は、外葉が  $0.039 \text{ mg kg}^{-1}$ 、結球が  $0.007 \text{ mg kg}^{-1}$  であり、外葉の方が高かった。また、可食部である結球のカドミウム含有量は国際基準値 ( $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ ) を下回った。キャベツのカドミウム吸収量は  $2.3 \text{ g ha}^{-1}$  であり、結球 ( $0.63 \text{ g ha}^{-1}$ ) より外葉 ( $1.7 \text{ g ha}^{-1}$ ) で多かった。

ダイコンの根部収量は  $66 \text{ Mg ha}^{-1}$  であり、この作型における北海道の基準収量 ( $45 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) を上回った (北海道農業協同組合中央会・ホクレン農業協同組合連合会編, 2006) (表7)。ダイコンの現物あたりのカドミウム含有量は、葉が  $0.063 \text{ mg kg}^{-1}$ 、根部が  $0.015 \text{ mg kg}^{-1}$  であり、葉の方が高かった。また、可食部である根部のカドミウム含有量は国際基準値 ( $0.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) を下回った。ダイコンのカドミウム吸収量は  $2.7 \text{ g ha}^{-1}$  であり、根部 ( $1.0 \text{ g ha}^{-1}$ ) より葉 ( $1.8 \text{ g ha}^{-1}$ ) で多かった。

### 3) カドミウム負荷量と持出し量の比較

図1に、トマト、キャベツおよびダイコン栽培土壌における施用資材によるカドミウム負荷量および可食部と残さによる持出し量を示した。トマト栽培土壌では、カドミウム負荷量より持出し量の方が多く、その差 (負荷量-持出し量) は堆肥40区および無堆肥区でそれぞれ約-27および-34  $\text{g ha}^{-1}$  であった。キャベツおよびダイコン栽培土壌では、負荷量が持出し量より多く、その差はキャベツ栽培土壌の堆肥20区および無堆肥区でそれぞれ+3.9および+1.9  $\text{g ha}^{-1}$ 、ダイコン栽培土壌ではそれぞれ+2.5および+0.41  $\text{g ha}^{-1}$  であった。

## 4. 考 察

### 1) 土壌へのカドミウム負荷量

トマト、キャベツおよびダイコン栽培土壌へのカドミウム負荷は、施用量の多い牛ふん堆肥やカドミウム含有量の高いリン酸肥料 (重過石) に由来するものがほとんどであり、窒素 (硝安と硫安) やカリウム肥料 (硫加) による寄与は少なかった (表4)。このためリン酸肥料や牛ふん堆肥の施用量が多い順にカドミウム負荷量は多くなった。一般に、施用資材による農地へのカドミウム負荷源は、リン酸肥料や下水汚泥とされるが (Grant *et al.*, 1999)、堆肥はカドミウム含有量が少なくても施用量が多いことから、土壌へのカドミウム負荷の原因として無視できない資材であ

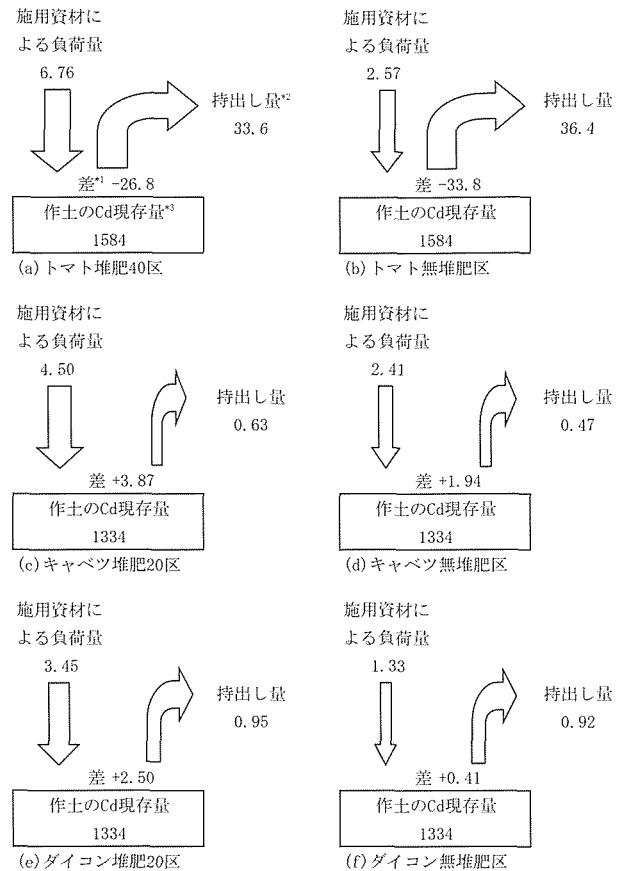


図1 トマト、キャベツおよびダイコン栽培土壌におけるカドミウム負荷量および持出し量 (単位  $\text{g ha}^{-1}$ )

(a) (b) はトマト、(c) (d) はキャベツおよび (e) (f) はダイコン栽培圃場。\*1 資材施用によるカドミウム負荷量-可食部および残さによる持出し量。\*2 トマトは果実と茎葉(残さ)、キャベツおよびダイコンはそれぞれ結球および根部のカドミウム吸収量。\*3 作土を20 cmまでとして、硝酸-過塩素酸分解によるカドミウム含有量に容積重を乗じた値。

ると考えられた。特に、トマトのようなハウス栽培では、堆肥の施用量が多く (北海道農政部, 2002)、堆肥40区では、牛ふん堆肥を  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  と露地野菜であるキャベツやダイコン ( $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) より多く施用し、それに伴うカドミウム負荷は負荷量全体の約6割を占めた (表4)。

なお、北海道における牛ふん堆肥のカドミウム含有量の平均値 (北海道立中央農業試験場編, 1980) は現物あたり  $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$  であり、神奈川県内で生産された牛ふん堆肥のカドミウム含有量の平均値は  $0.21 \text{ mg kg}^{-1}$  であった (折原ら, 2002)。本試験で使用した牛ふん堆肥のカドミウム含有量は、既往の文献値の範囲内であった (表3)。

Mishima *et al.* (2004) によると、過リン酸石灰 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  として18%含む) のカドミウム含有量は  $4.01 \text{ mg kg}^{-1}$  であった。これからリン酸 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) あたりのカドミウム含有量を算出すると  $22.3 \text{ mg Cd kg P}_2\text{O}_5^{-1}$  になる。同様に、本試験で使用した重過石 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  として40%含む) には  $16.7 \text{ mg Cd kg P}_2\text{O}_5^{-1}$  含まれており、リン酸あたりのカドミウム含有量は過リン酸石灰より小さかった。リン酸肥料は、過剰に施用しても作物に過剰症状が現れにくく、特に

野菜畑では多用されやすい(後藤・村上, 2004)。したがって、他の肥料よりカドミウム含有量の多いリン酸肥料の多用は、土壌への負荷量を増加させると考えることができる。したがって土壌へのカドミウム負荷を低く維持するために、リン酸肥料の適正施肥が重要と考えられた。

## 2) トマト、キャベツおよびダイコンのカドミウム吸収特性

トマトのカドミウム含有量を部位別にみると、葉が最も高く、果実が最も低かった(表5)。キャベツでは、結球よりも外葉の方が、ダイコンでは根部より葉の方が高かった(表6, 7)。伊藤・湯村(1979)も、トマトの葉のカドミウム含有量が他の地上部位より高く、レタスでは結球よりも外葉の方が高いことを報告した。また、ダイコンと同じ根菜類であるニンジンも根部より葉の方が高かった(Guttormsen *et al.*, 1995)。このことから、作物が吸収したカドミウムは葉部に蓄積しやすく、さらに出荷後の生育期間の長い外葉に蓄積しやすいと考えられた。

トマト、キャベツおよびダイコンのカドミウム吸収量は、それぞれ34, 2.3および2.7 g ha<sup>-1</sup>であり、トマトが多かった(表5~7)。これは、トマトの各部位のカドミウム含有量が、キャベツやダイコンに比べて高く、特にトマトの葉のカドミウム含有量が大きく寄与したと考えられた。文献値より、他の作物のカドミウム吸収量をみると、0.1 mol L<sup>-1</sup> 塩酸可溶性カドミウムとして2.1 mg kg<sup>-1</sup>の土壌で栽培されたケナフ、オクラおよびヒマワリがそれぞれ191~347, 181~304, 170~284 g ha<sup>-1</sup>であった(栗原ら, 2005)。同様に、0.48 mg kg<sup>-1</sup>の土壌でのイネの吸収量は、例えば「IR8」で32~67 g ha<sup>-1</sup>であった(本間ら, 2009)。また、ハクサイやニンジンでそれぞれ0.7および1.3 g ha<sup>-1</sup>であった(Guttormsen *et al.*, 1995)。土壌や栽培環境が違うが、本報で栽培したトマトはイネの吸収量に近く、キャベツやダイコンはハクサイやニンジンに近い値であった(表5~7)。また、この中でトマトのカドミウム吸収量は、一般的な露地野菜であるキャベツやダイコンなどよりも明らかに多かった。

なお、今回牛ふん堆肥を施用した区を設けたが、無堆肥区に比べてトマト、キャベツおよびダイコンのカドミウム含有量の低下は認められなかった。堆肥などの有機物施用により、作物のカドミウム含有量が低下する場合と(Eriksson, 1988)、しない場合があり(Narwal and Singh, 1998)、この有機物施用によるカドミウム吸収抑制については、施用有機物の種類や土壌環境など、どのような条件で効果があるのか今後の検討が必要である。また、本研究では牛ふん堆肥施用により土壌へのカドミウム負荷量が増加したが、それによるトマト、キャベツおよびダイコンのカドミウム含有量の増加は認められなかった。

## 3) カドミウム負荷量および持出し量が栽培土壌のカドミウムにおよぼす影響

各野菜の栽培土壌における、カドミウム負荷量と持出し量との差(負荷量-持出し量)は、トマトとキャベツやダ

イコンで違いが生じ、この違いは持出し量の多少によるところが大きかった(図1)。カドミウム吸収量が多く、可食部とともに茎葉を持出すトマト栽培土壌では、カドミウム負荷量と持出し量との差は負の値を示した。また、堆肥40区では堆肥によるカドミウム負荷量が多かったが、トマトによる持出し量が負荷量より著しく多かった。本研究では、大気降水物による土壌へのカドミウム負荷について検討しなかったが、国内における降雨水由来のカドミウム負荷量は、0.51(齋藤, 2004)、0.65(齋藤, 2005)および1.1 g ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>(村山, 2005)であった。また、欧米における大気降水物によるカドミウム負荷量は、<1.1~12.5 g ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であった(Alloway and Steinnes, 1999)。これらの数値と比較してもトマトによるカドミウム持出し量が多い。さらに、トマトはハウスで栽培されたことから、露地に比べて大気降水物によるカドミウム負荷は少ないと考えられる。したがって、トマトを栽培することにより、土壌のカドミウムは減少すると推定された。なお、トマトは既に述べたように、可食部の果実には、残さである茎葉よりカドミウムが蓄積しにくい。このため、トマトの栽培とその可食部と残さの圃場からの持出しを繰り返すことにより、果実の収穫・出荷を行いながら土壌のカドミウムを経年的に減少させられる可能性がある。

一方、トマトよりカドミウム吸収量が少なく、かつ可食部のみ持出すキャベツやダイコンの栽培土壌では、正の値を示した。したがって、これらの作物を栽培することにより、カドミウムは土壌に蓄積すると推定され、さらに堆肥を施用することにより増加すると考えられた。ただし、いずれの区も土壌のカドミウム現存量(1334 g ha<sup>-1</sup>)と比較すると、単年度の蓄積はわずかであった(図1)。しかし、長年同じ施用資材を用いて、これらの作物を栽培している圃場では、経年的に土壌のカドミウムレベルが高まることが示唆される。例えば、北海道における耕地土壌と未耕地土壌の0.1 mol L<sup>-1</sup> 塩酸可溶性カドミウムの平均は、それぞれ0.11および0.07 mg kg<sup>-1</sup>であるが(乙部, 2004)、この差は、前述した長期的な持出し量以上のカドミウム負荷によると考えられた。

以上より、一般的な化学肥料や堆肥を施用して野菜を栽培した場合、野菜の種類によりカドミウムの吸収量や持出し量に大きな差があり、土壌のカドミウム負荷量と持出し量との差は、各野菜の持出し量により違いが生じることが明らかになった。

## 5. 要 約

トマト、キャベツおよびダイコンを栽培し、カドミウムの施用資材による負荷量と可食部および作物残さによる持出し量を調査した。

各栽培土壌のカドミウム負荷量は、堆肥やリン酸肥料に由来するものが多く、堆肥施用によりトマト(6.8 g ha<sup>-1</sup>) > キャベツ(4.5 g ha<sup>-1</sup>) > ダイコン(3.5 g ha<sup>-1</sup>)であり、堆肥無施用ではトマト(2.6 g ha<sup>-1</sup>) > キャベツ(2.4 g ha<sup>-1</sup>)

ダイコン ( $1.3 \text{ g ha}^{-1}$ ) であった。

トマト、キャベツおよびダイコンのカドミウム吸収量は、堆肥施用の有無による有意差は認められず、それぞれ堆肥を施用した場合に  $34, 2.3$  および  $2.7 \text{ g ha}^{-1}$  であり、トマトの吸収量はキャベツやダイコンに比べて多かった。このうち、可食部による吸収量は全体に比べて少なく、トマト、キャベツおよびダイコンでそれぞれ  $3.8, 0.63$  および  $0.95 \text{ g ha}^{-1}$  であった。

カドミウム負荷量と持出し量の差 (負荷量 - 持出し量) は、持出し量によって結果が大きく異なった。吸収量が多く地上部を全て持出すトマト圃場において、堆肥施用の有無にかかわらず負の値を示した (堆肥施用で  $-27$ , 無施用で  $-34 \text{ g ha}^{-1}$ )。一方、吸収量が少なく、かつ可食部のみ持出すキャベツ (堆肥施用で  $+3.9$ , 無施用で  $+1.9 \text{ g ha}^{-1}$ ) やダイコン (堆肥施用で  $+2.5$ , 無施用で  $+0.41 \text{ g ha}^{-1}$ ) 圃場では、正の値を示した。したがって、トマトを栽培することにより土壌のカドミウムは減少し、キャベツやダイコンの場合は蓄積すると推定された。

謝辞：本稿の作成にあたって、北海道立総合研究機構道南農業試験場研究部長奥村正敏博士、並びに中央農業試験場農業環境部長志賀弘行博士にご校閲いただいた。記して謝意を表する。

## 文 献

- Alloway, B. J., and Steinnes, E., 1999. Anthropogenic additions of cadmium to soils. *In* M. J., McLaughlin, and B. R., Singh (ed.) *Cadmium in soils and plants*, p. 100. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 浅見輝男 2002. 日本土壌特に火山灰土のカドミウム濃度. 人間と環境, 28, 10-20.
- Eriksson, J., E. 1988. The effect of clay, organic matter and time on adsorption and plant uptake of cadmium added to the soil. *Water, Air, and Soil pollution*, 40, 359-373.
- 古館明洋・乙部裕一 2009. 牛ふん・水産系廃棄物混合堆肥および汚泥コンポストの施用がチモシー (*Phleum pretense* L.) のカドミウム含有量に及ぼす影響. 土肥誌, 80, 506-510.
- 後藤逸男・村上圭一 2004. リン酸過剰が土壌病害を助長する. 日本土壌肥科学会編 施肥管理と病害発生, p. 75-112, 博友社, 東京.
- Grant, C. A., Bailey, L. D., McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. 1999. Management factors which influence cadmium concentrations in crops. *In* M. J., McLaughlin, and B. R., Singh (ed.) *Cadmium in soils and plants*, p. 154, 161. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Guttormsen, G., Singh, B. R., and Jeng, A. S. 1995. Cadmium concentration in vegetable crops grown in sandy soil as affected by Cd levels in fertilizer and soil pH. *Fertilizer Res.*, 41, 27-32.
- 北海道農業協同組合中央会・ホクレン農業協同組合連合会編 2006. 北海道野菜地図 (その29), p. 18, 62, 84.
- 北海道農政部 2002. 北海道施肥ガイド, p. 78, 113, 139.
- 北海道立中央農業試験場編 1980. 北海道の有機性廃棄物の性状と化学成分. 北海道立農業試験場資料, 11, 25.
- 本間利光・大峽広智・金子綾子・星野 卓・村上政治・大山卓爾 2009. 低カドミウム汚染圃場におけるイネを用いた土壌浄化. 土肥誌, 80, 116-122.
- 伊藤純雄・湯村義男 1979. 重金属による野菜の汚染に関する研究 II トマトとレタスによるヒ素・カドミウム・銅・亜鉛・クロム・ニッケル・鉛の過剰吸収と汚染の指標. 野菜試報, A6, 123-145.
- 金野隆光 1997. 畑土壌. 久馬一剛編 最新土壌学, p. 144-146, 朝倉書店, 東京.
- 栗原宏幸・渡辺美生・早川孝彦 2005. カドミウム含有水田転換畑におけるケナフ (*Hibiscus cannabinus*) を用いたファイトレメディエーションの試み. 土肥誌, 76, 27-34.
- McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. 1999. Cadmium in soils and plants. *In* M. J., McLaughlin, and B. R., Singh (ed.) *Cadmium in soils and plants*, p. 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Mishima, S., Kimura, R., and Inoue, T. 2004. Estimation of cadmium load on Japanese farmland associated with the application of chemical fertilizers and livestock. *Soil Sci Plant Nutr.*, 50, 263-267.
- 森 昭憲・寶示戸雅之・近藤 熙・松波寿弥 2004. 我が国の草地飼料畑における微量金属の堆肥による投入量と牧草および飼料作物による収奪量. 土肥誌, 75, 651-658.
- 村山重俊 2005. 水を媒体とする農耕地へのカドミウム, 銅, 鉛, 亜鉛のバックグラウンド負荷量 灌漑水, 降雨水, 降雪水からの負荷量の推定. 土肥講演要旨集, 51, 176.
- Narwal, R. P., and Singh, B. R., 1998. Effect of organic materials on partitioning extractability and plant uptake of metals in alum shale soil. *Water, Air, and Soil pollution*, 103, 405-421.
- 小野信一・阿部 薫 2007. 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線 1. 農耕地土壌の重金属汚染の現状と対策. 土肥誌, 78, 323-328.
- 乙部裕一 2004. 北海道農耕地土壌のカドミウム含量. 土肥講演要旨集, 50, 170.
- 折原健太郎・上山紀代美・藤原俊六郎 2002. 家畜ふん堆肥の重金属含有量の特徴. 土肥誌, 73, 403-409.
- 齋藤貴之 2004. カドミウムの農耕地への降雨水からの負荷つくば市の事例. 土肥講演要旨集, 50, 169.
- 齋藤貴之 2005. カドミウムの農耕地への降雨水からの負荷 (第2報). 土肥講演要旨集, 51, 186.

### Estimation of cadmium balance in soils: load applied in fertilizer and compost and removal in edible and uneaten parts of vegetables

Yukio HOSOBUCHI, Tetsuo HAYASHI and Haruhiko NAKAZUMI  
*Dohman Agric. Exp. Stn., Hokkaido*

We grew tomato (*Solanum lycopersicum*), cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*), and daikon (Japanese radish; *Raphanus sativus* L.) in soils treated with fertilizer or compost and analyzed the contents of cadmium (Cd) in the soil and removed in the edible and uneaten parts of the vegetables. Cattle manure compost plus phosphate fertilizer increased the Cd load of each soil the most: the Cd loads were  $6.8 \text{ g ha}^{-1}$  in tomato soil,  $4.5 \text{ g ha}^{-1}$  in cabbage soil, and  $3.5 \text{ g ha}^{-1}$  in daikon soil. Without compost, the loads were 2.6, 2.4, and  $1.3 \text{ g ha}^{-1}$ , respectively. Yet the addition of compost did not significantly affect the

Cd uptake. The total uptakes with (without) compost were 34 (36) g ha<sup>-1</sup> by tomato, 2.3 (2.1) g ha<sup>-1</sup> by cabbage, and 2.7 (2.8) g ha<sup>-1</sup> by daikon; the uptake by tomato was much greater than that by cabbage and daikon. In contrast, the uptakes by the edible parts were 3.8, 0.63, and 0.95 g ha<sup>-1</sup>, respectively, much smaller than those by the uneaten parts. The difference between the Cd load and removal was determined more by removal than by load in the presence of fertilizer plus manure compost. Tomato removed more than was applied: the difference (load – removal) was –27 g ha<sup>-1</sup> with compost and –34 g ha<sup>-1</sup> without (both edible and residual parts were removed from the field). However, cabbage and daikon removed less than was applied: +3.9 and +1.9 g ha<sup>-1</sup>, respectively, by cabbage and +2.5 and +0.41 g ha<sup>-1</sup> by daikon (only edible parts were removed). Therefore, soil Cd decreased with tomato cultivation and increased with cabbage and daikon cultivation.

*Key words:* cabbage, cadmium, Japanese radish, tomato

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 82, 207–213, 2011)