

6 カドミウムの土壌蓄積及び作物吸収における汚泥肥料連用の影響(続報)

廣井利明¹, 五十嵐総一², 恵智正宏³, 橋本良美¹, 阿部文浩⁴

キーワード 汚泥肥料, 連用試験, カドミウム

1. はじめに

肥料の公定規格¹⁾では汚泥肥料中の含有を許されるカドミウムの最大量(以下、「含有許容値」という。)は 0.0005 %と定められており, 汚泥肥料はこの範囲内において流通, 施用されている. 一方, 汚泥肥料の施用により土壌に負荷された重金属が蓄積し, 更に長期に施用すると土壌の保持力を超えて農作物へ移行し, 人畜に有害な農作物が生産されることが懸念されている. このことから, 肥料の有効性及び安全の確保に必要な課題に関する調査研究として, 汚泥肥料の連用施用試験を実施している.

2009年夏作から2012年夏作にかけては, 汚泥肥料を施用した区及び施用していない区の2試験区を設け, ニンジン, ホウレンソウ, ホウレンソウ, チンゲンサイ, カブ, ホウレンソウ, ニンジンの順で栽培し, 土壌中のカドミウム濃度の変化及び作物体へのカドミウム吸収量を確認した. その結果は既に肥料研究報告第5号²⁾及び6号³⁾で報告した. 2012年冬作及び2013年夏作においてはそれぞれホウレンソウ, ニンジンを用いて試験を実施したのでその結果を報告する.

2. 材料及び方法

1) 2012年冬作の連用試験(2012年10月26日~2013年3月6日)

(1) 試験圃場及び供試土壌

本試験は当センター岩槻圃場(埼玉県さいたま市)で実施した. 試験は, 汚泥肥料の施用履歴がある土壌(汚泥肥料施用区)と施用履歴がない土壌(標準区)を供試土壌とし, 2試験区2反復とした. 施肥の前歴として汚泥肥料施用区は平成16年及び18年に汚泥肥料(し尿汚泥肥料及び下水汚泥肥料)を施用した. この時の汚泥肥料由来のカドミウム負荷量は, 試験区(4 m²)当たり約100 mgであった. 土壌の種類, 土性, 及び前作跡地のpH, EC, 有効態リン酸, 陽イオン交換容量, 全窒素, 全炭素及び0.1 mol/L 塩酸可溶カドミウム(以下, 0.1 mol/L HCl-Cd)をTable 1に示す.

(2) 供試肥料等

施用する汚泥肥料は高分子凝集剤を用いて脱水したし尿汚泥を乾燥し, 生産された市販のし尿汚泥肥料を使用した. し尿汚泥肥料は, カドミウム含有量(乾物値)が肥料公定規格の含有許容値付近(約5 mg/kg)のものを選定した. 補正肥料として特級試薬の硫酸アンモニウム, リン酸一アンモニウム及び塩化カリウムを使用した.

¹ 独立行政法人農林水産消費安全技術センター肥飼料安全検査部

² 独立行政法人農林水産消費安全技術センター肥飼料安全検査部(現)福岡センター

³ 独立行政法人農林水産消費安全技術センター肥飼料安全検査部(現)神戸センター

⁴ 独立行政法人農林水産消費安全技術センター肥飼料安全検査部(現)仙台センター

汚泥肥料及び補正肥料の各成分の分析は肥料等試験法⁴⁾によった。なお、汚泥肥料中の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度は、汚泥肥料 1 g を 0.1 mol/L 塩酸 50 mL で 1 時間振とうして抽出したカドミウムを原子吸光光度法により測定した。汚泥肥料中の 1 mol/L 酢酸アンモニウム溶液 (pH7.0) 可溶カドミウム (以下、1 mol/L 酢安 (pH7.0) - Cd) 濃度は、汚泥肥料 1 g を 1 mol /L 酢酸アンモニウム溶液 (pH7.0) 50 mL で 1 時間振とうして抽出したカドミウムを ICP 質量分析法により測定した。汚泥肥料の分析結果は Table 2 に、補正肥料の成分量は Table 3 に示した。

Table 1 Characteristics of soil used in this study

	Unit	year	AP ¹⁾ -1	AP ¹⁾ -2	SP ²⁾ -1	SP ²⁾ -2
pH (H ₂ O) ³⁾		2009 ⁷⁾	6.1	6.1	6.2	6.2
		2012 ⁸⁾	6.2	6.3	6.2	6.3
EC ⁴⁾	mS/m	2009	10.0	10.3	14.0	11.6
		2012	16.6	16.9	15.6	13.4
Total nitrogen ⁵⁾	% ⁶⁾	2012	0.42	0.43	0.38	0.38
Total carbon ⁵⁾	% ⁶⁾	2012	5.8	5.8	5.4	5.5
Phosphate absorption coefficient ⁵⁾	mg/100g dry soil	2012	2370	2380	2360	2420
Available phosphate ⁵⁾	mg/100g dry soil	2009	5.8	6.1	7.7	6.9
		2012	4.9	5.1	6.2	6.0
CEC ⁵⁾	c molc/kg	2012	35.8	36.3	36.9	37.3
0.1 mol /L HCl-Cd ⁵⁾	mg/kg	2009	0.18	0.19	0.18	0.21
		2012	0.18	0.19	0.14	0.15
Kind of soil			Andosol		Andosol	
Soil texture			Light clay		Light clay	

1) Sludge-fertilizer-application plot

2) Standard plot

3) Soil pH determined on 1 : 5 (soil : water) suspensions with a glass electrode, n= 1

4) Soil electrical conductivity determined on 1:5 (soil:water) suspensions with an electrical conductivity meter, n = 1

5) Content in the dry matter, average (n = 2)

6) Mass fraction

7) The year when the study was designed to evaluate the effects of sludge fertilizer applications on soil intended for long-term use

8) The year when this study was conducted.

Table 2 Properties of sludge fertilizer

Properties	Unit	Content	Property	Unit	Content
Total nitrogen	% ¹⁾	3.3	Total copper	mg /kg	546
Total phosphorus ²⁾	% ¹⁾	5.2	Total zinc	mg /kg	1,760
Total potassium ³⁾	% ¹⁾	0.4	Carbon to nitrogen ratio	-	7.1
Total calcium ⁴⁾	% ¹⁾	2.1	Total cadmium	mg /kg	3.6
Organic carbon	% ¹⁾	23.6	Acid-solubility-cadmium ⁵⁾	mg /kg	3.2
Moisture	% ¹⁾	26.1	Exchangeable-cadmium ⁶⁾	mg /kg	0.32

1) Mass fraction

2) Content as P₂O₅

3) Content as K₂O

4) Content as CaO

5) Content of cadmium dissolved with 0.1 mol/L hydrochloric acid

6) Content of cadmium dissolved with pH 7.0, 1 mol/L ammonium acetate solution

Table 3 Properties of the reagent

Property	Unit	Ammonium sulfate	Ammonium dihydrogenphosphate	Potassium chloride
Total nitrogen	% ¹⁾	21.1	12.0	-
Total phosphorus ²⁾	% ¹⁾	-	61.5	-
Total potassium ³⁾	% ¹⁾	-	-	63.1

1) Mass fraction

2) Content as P₂O₅

3) Content as K₂O

(3) 試験区の構成

汚泥肥料施用区及び標準区は、1 試験区の面積を 4 m²(縦 2 m×横 2 m)とし、各試験区 2 反復の計 4 試験区を Fig.1 のとおり配置した。施肥量は埼玉県の高レンソウ施肥基準⁵⁾を基に施肥設計した。

汚泥肥料の施肥量は、農林水産省のアンケート調査結果では 1 作当たり 2 t/10a 程度施用している農家も存在するが、最も一般的な施肥量は、500 kg/10a 程度であった⁶⁾。自治体によっては、汚泥肥料中の重金属の農地への蓄積を抑制するため施用上限量の目安を示しており、年間 500~1,000 kg/10a としている事例がある^{7~9)}。また、高分子凝集剤を使用した汚泥肥料を連用した場合、土壌 pH が低下する¹⁰⁾ことが知られており、連用施用による土壌理化学性への影響等を考慮し、1 作当たりの施肥量は 500 kg/10a(現物)とした。窒素肥効率は前作までの標準区との生育量の差から 30 %として計算し、不足分を補正肥料で施用した。りん酸及び加里についても不足分は補正肥料を用いて調整した。標準区については、補正肥料を用いて汚泥肥料施用区と同様の成分量になるよう施用した(Table 4 参照)。なお、前作の跡地土壌を分析したところ、各試験区の有効態りん酸は 4.9~6.2 mg/100g 乾土であり、地力増進基本指針¹¹⁾における有効態りん酸の改善目標(10 mg/100g 乾土)と比較して低い値であった。このため、熔成りん肥(く溶性りん酸 20 %含有)を 1 試験区当たり 200 g 施用した。

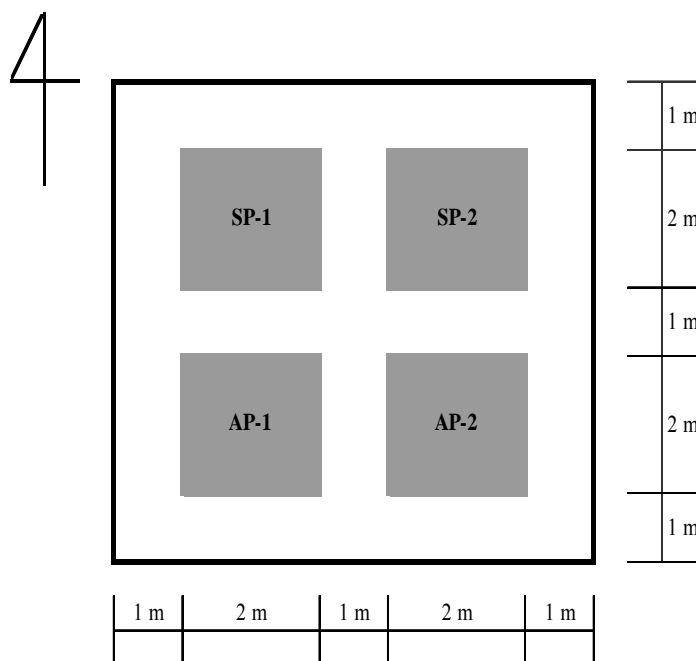


Fig.1 Plot plan of the test field

AP: Sludge-fertilizer-application plot

SP: Standard plot

Table 4 The design of the test plots

	Amount of application (g)	The applied components			
		N (g)	P ¹⁾ (g)	K ²⁾ (g)	Cd (mg)
<Sludge-fertilizer-application plot (AP)>					
Sludge fertilizer	2000	66	104	7	7.3
Ammonium sulfate	285	60	—	—	—
Ammonium dihydrogenphosphate	—	—	—	—	—
Potassium chloride	103	—	—	65	—
Fused magnesium phosphate	200	—	40	—	—
Total		126	144	72	7
<Standard plot (SP)>					
Sludge fertilizer	—	—	—	—	—
Ammonium sulfate	283	60	—	—	—
Ammonium dihydrogenphosphate	170	20	104	—	—
Potassium chloride	114	—	—	72	—
Fused magnesium phosphate	200	—	40	—	—
Total		80	144	72	0.0

1) Content as P₂O₅2) Content as K₂O

(4) 栽培方法

供試作物はホウレンソウ(品種名:オーライ)とし、埼玉県の施肥基準を基に栽培を実施した。各試験区の周辺部にはガードプランツとして供試作物を栽培した。

施肥は2012年10月22日に、各試験区の表層土約12 kgを袋に取り、肥料を入れ混合し、各試験区表層に均等に散布した。耕耘機で深さ約15 cmまで耕耘した。

試験区内は9条(条間約20 cm)とし、播種は10月26日にシーダーテープ種子により行った。

間引きは11月13日及び11月29日に行い、農薬散布はヨトウムシ等の害虫防除のため播種時に(2-イソプロピルー4-メチルピリミジルー6)-ジエチルチオホスフェート粒剤を散布した。雑草防除は手除草により適宜実施した。

収穫は2013年3月6日に行い、地際をハサミで切断して地上部のみを収穫した。

(5) 作物体のカドミウム分析

収穫したホウレンソウは直ちに試験区毎に全株重量を測定した。分析用試料として試験区中央の1 m²分全てを、水道水、イオン交換水の順に洗浄し、ガラス室で自然乾燥した後に通風乾燥機にて65 °Cで24時間乾燥した。重量を測定した後、目開き500 µmのふるいを通すまで粉砕機(ZM200:Retsch ロータ回転数6,000 rpm)で粉砕し分析用試料とした。

カドミウム含有量は、分析試料0.5 gに硝酸5 mL及び過酸化水素水2 mLを加えマイクロ波分解装置(Multiwave 3000:Perkin Elmar)¹²⁾で分解したものを50 mLに定容し試料溶液とした。測定はICP質量分析装置(ICPM-8500:島津製作所)により行った。

(6) 跡地土壌の分析

収穫後の跡地土壌は、対角線採土法¹³⁾により採取した。各試験区の作物体の分析用試料を収穫した場所と同じ試験区中央1 m²の四隅及び中央の計5か所より、採土器(内径50 mm×長さ250 mm)を用いて表層から約15 cmまで採取し、通風乾燥機により35 °Cで一晩乾燥後、目開き2 mmのふるいを通したものを分析用試料とした。

風乾した土壌の水分は、ハロゲン水分計(HG53:メトラー・トレド)により測定した。

土壌pH及びECは風乾土壌1に対して純水5を加え1時間振とう後、pHはガラス電極法(F-23:HORIBA)により、ECは電気伝導率計(F-54:HORIBA)により測定した。

土壌中カドミウムの形態(可溶性)別評価法については、土壌の種類による溶出傾向や作物体の吸収との相関などに対応するための様々な方法が検討されているものの、万能と呼べる方法がない状況にある。そこで統一的な尺度として、政令¹⁴⁾で定められた0.1 mol/L HCl-Cd及び交換性陽イオンの測定に用いられており¹⁵⁾、0.1 mol/L HCl-Cdと比較してより多くの各種作物体のカドミウム濃度と相関があると報告されている^{16~17)} 1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cdを選択した。また、参考として供試汚泥肥料中にカドミウムと比較して多量に含まれる銅及び亜鉛の土壌蓄積状況を確認するため、1 mol/L 酢酸アンモニウム溶液(pH 7.0)可溶銅及び亜鉛(以下、1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cu及びZn)についても測定した。

土壌中の0.1 mol/L HCl-Cdは、土壌10 gに対し0.1 mol/L 塩酸50 mLを加え約30 °Cに保ち1時間振とうして抽出したカドミウムをICP質量分析法により測定した。

土壌中の1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cd、Cu及びZnは、土壌2.5 gに対し1 mol/L 酢酸アンモニウム溶液(pH 7.0)50 mLを加え約20~30 °Cに保ち1時間振とうして抽出したカドミウム、銅及び亜鉛をICP質量分析法により測定した。

2) 2013年夏作の連用試験(2013年7月17日~2013年10月22日)

(1) 試験圃場及び供試土壌

試験圃場及び供試土壌として2.1)の試験の汚泥肥料施用区及び標準区の跡地を引き続き使用した。土壌の種類, 土性, 及び前作跡地のpH, EC, 有効態リン酸(トルオーグ法)¹³⁾, 全窒素, 全炭素及び0.1 mol/L HCl-Cd濃度をTable 5に示す。

Table 5 Characteristics of soil used in this study

	Unit	year	AP ¹⁾ -1	AP ¹⁾ -2	SP ²⁾ -1	SP ²⁾ -2
pH (H ₂ O) ³⁾		2009 ⁷⁾	6.1	6.1	6.2	6.2
		2013 ⁸⁾	6.8	6.7	6.5	6.5
EC ⁴⁾	mS/m	2009	10.0	10.3	14.0	11.6
		2013	19.4	19.6	17.5	18.7
Total nitrogen ⁵⁾	% ⁶⁾	2013	0.42	0.43	0.40	0.42
Total carbon ⁵⁾	% ⁶⁾	2013	5.6	5.6	5.4	5.5
Available phosphate ⁵⁾	mg/100g dry soil	2009	5.8	6.1	7.7	6.9
		2013	5.4	5.4	8.2	7.3
0.1 mol /L HCl-Cd ⁵⁾	mg/kg	2009	0.18	0.19	0.18	0.21
		2013	0.20	0.21	0.16	0.18
Kind of soil			Andosol		Andosol	
Soil texture			Light clay		Light clay	

1) Sludge-fertilizer-application plot

2) Standard plot

3) Soil pH determined on 1 : 5 (soil : water) suspensions with a glass electrode, n= 1

4) Soil electrical conductivity determined on 1:5 (soil:water) suspensions with an electrical conductivity meter, n= 1

5) Content in the dry matter, average (n= 2)

6) Mass fraction

7) The year when the study was designed to evaluate the effects of sludge fertilizer applications on soil intended for long-term use

8) The year when this study was conducted.

(2) 供試肥料等

供試肥料及び補正肥料は2.1) (2)と同様のものを用いた。

(3) 試験区の構成

試験区の構成は2.1) (3)と同様に配置した。施肥量は埼玉県のニンジン施肥基準⁵⁾を基に設計した。汚泥肥料の施用量は, 前作同様 500 kg/10 a(現物), 窒素肥効率を30%として計算し, 不足分を補正肥料で施用した。りん酸及び加里についても不足分は補正肥料を用いて調整した。標準区については, 補正肥料を用いて汚泥肥料施用区と同様の成分量になるよう調整し施用した(Table 6 参照)。

また、前作(2012年冬作)の跡地土壌を分析したところ、各試験区の有効態リン酸は5.4~8.2 mg/100 g 乾土であり、地力増進基本指針¹¹⁾における有効態リン酸の改善目標(10 mg/100g 乾土)に比べて低い値であった。このため、熔成りん肥(く溶性りん酸 20%含有)を1試験区当たり200 g 施用した。

Table 6 The design of the test plots

	Amount of application (g)	The applied components			
		N (g)	P ¹⁾ (g)	K ²⁾ (g)	Cd (mg)
<Sludge-fertilizer-application plot (AP)>					
Sludge fertilizer	2000	66	104	7	7.3
Ammonium sulfate	323	68	—	—	—
Ammonium dihydrogenphosphate	—	—	—	—	—
Potassium chloride	115	—	—	73	—
Fused magnesium phosphate	200	—	40	—	—
Total		134	144	80	7.3
<Standard plot (SP)>					
Sludge fertilizer	—	—	—	—	—
Ammonium sulfate	321	68	—	—	—
Ammonium dihydrogenphosphate	170	20	104	—	—
Potassium chloride	127	—	—	80	—
Fused magnesium phosphate	200	—	40	—	—
Total		88	144	80	0.0

1) Content as P₂O₅

2) Content as K₂O

(4) 栽培方法

供試作物はニンジン(品種名:ベーターリッチ)とした。各試験区の周辺部にはガードプランツとして供試作物を栽培した。

施肥は2013年6月24日に行った。各試験区の表層土約12 kgを袋に取り、肥料を入れ混合し、各試験区表層に均等に散布した。耕耘機で深さ約15 cmまで耕耘した。

試験区内は9条(条間約20 cm)とし、播種は7月17日にシーダーテープ種子を用いて行った。

間引きは8月1日及び8月16日に行い、収穫時の株間が約5 cmとなるようにした。

農薬散布はヨトウムシ等の害虫防除のため、施肥時に(2-イソプロピルー4-メチルピリミジルー6)-ジエチルチオホスフェート粒剤を散布した。雑草防除は手除草により適宜実施した。栽培期間中は例年に比べて高温少雨であったため、適宜水道水によるかん水を行った。

収穫は2013年10月22日に行い、葉部と根部を収穫した。

(5) 作物体のカドミウム分析

収穫したニンジンは水道水洗浄後、試験区毎に全株重量を測定した。分析用試料として試験区中央の1 m²分全てを根部と葉部に切り分け、部位別に重量を測定した。根部はイオン交換水ですすぎ、自然乾燥して薄く

切り分けた後、通風乾燥機により 65 °C で 24 時間乾燥を行い重量を測定した。葉部は葉が重ならないように広げ、自然乾燥し、その後、通風乾燥機により 65 °C で 24 時間乾燥を行い重量を測定した。乾燥した根部及び葉部は、それぞれ目開き 1 mm 及び 500 µm のふるいを通すまで超遠心粉砕機 (ZM200:Retsch ロータ回転数 6,000 rpm) で粉砕した。

カドミウム含有量の分析は、2.1).(5)と同様に行った。

(6) 跡地土壌の分析

収穫後の土壌の採取及び分析は、2.1).(6)と同様に行った。

3. 結 果

1) 2012 年連用試験(冬作ホウレンソウ:2012 年 10 月 26 日～2013 年 3 月 6 日)

(1) 作物体の収量及びカドミウム吸収量

播種から収穫までの栽培期間は約 4 ヶ月半であり、その間の生育に異常な症状等は観察されなかった。

ホウレンソウの収量、カドミウム濃度及び吸収量を Table 7 に示した。汚泥肥料施用区及び標準区の収量は、生体重平均値でそれぞれ 11.28 kg と 13.33 kg であり、有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。カドミウム濃度については、汚泥肥料施用区は平均値で 0.56 mg/kg、標準区は 0.47 mg/kg であり、汚泥肥料施用区が有意に高かった ($p < 0.05$)。カドミウム吸収量については、両試験区ともに平均値で 0.75 mg/試験区と同程度であった。

Table 7 Cadmium uptake and yield of spinach in the test

	Part	Unit	Test plot-1		Test plot-2		Average	t-test
<Sludge-fertilizer-application plot (AP)>								
Fresh weight	edible portion	kg	10.95		11.60		11.28	n.s. ³⁾
Dry weight	edible portion	kg	1.30		1.41		1.36	n.s.
Cadmium concentration ¹⁾	edible portion	mg/kg	0.57	0.58	0.53	0.54	0.56	significance ⁴⁾
Quantity of cadmium uptake ²⁾	edible portion	mg/plot	0.74	0.75	0.75	0.77	0.75	n.s.
<Standard plot (SP)>								
Fresh weight	edible portion	kg	13.75		12.90		13.33	
Dry weight	edible portion	kg	1.67		1.53		1.60	
Cadmium concentration ¹⁾	edible portion	mg/kg	0.49	0.49	0.46	0.43	0.47	
Quantity of cadmium uptake ²⁾	edible portion	mg/plot	0.83	0.81	0.70	0.66	0.75	

1) Content in the drying soil

2) Quantity of cadmium uptake = Harvest (dry weight) × Cadmium concentration (dry matter)

3) It is no significantly different for standard plot (t-test, 5 % of both sides levels of significance, the harvest is $n = 2$, the cadmium quantity of cadmium uptake is $n = 4$ (2×2) (repetition × number of samples))

4) It is significantly different for Standard plot (t-test, 5 % of both sides levels of significance, the cadmium concentration is $n = 4$ (2×2) (repetition × number of samples))

(2) 跡地土壌のカドミウム濃度

跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度, 1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cd 濃度, pH 及び EC を Table 8 に示した. 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度は, 平均値で汚泥肥料施用区は 0.21 mg/kg, 標準区は 0.17mg/kg であり, 汚泥肥料施用区が有意に高かった($p < 0.05$). 1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cd 濃度は, 平均値で汚泥肥料施用区は 0.038 mg/kg, 標準区は 0.032 mg/kg であり, 汚泥肥料施用区が有意に高かった($p < 0.05$).

Table 8 Characteristics of soil used in this study

	Unit	Test plot-1		Test plot-2		Average	t-test
< Sludge-fertilizer-application plot (AP) >							
0.1 mol /L HCl-Cd ¹⁾	mg/kg	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	significance ⁵⁾
Exchangeable-Cd ²⁾		0.037	0.038	0.039	0.037	0.038	significance
pH (H ₂ O) ³⁾		6.8		6.7			
EC ⁴⁾	mS/m	19.4		19.6			
< Standard plot (SP) >							
0.1 mol /L HCl-Cd ¹⁾	mg/kg	0.16	0.16	0.18	0.18	0.17	
Exchangeable-Cd ²⁾		0.030	0.031	0.036	0.032	0.032	
pH (H ₂ O) ³⁾		6.5		6.5			
EC ⁴⁾	mS/m	17.5		18.7			

1) Content of cadmium dissolved with 0.1 mol/L hydrochloric acid in the drying soil

2) Content of cadmium dissolved with pH 7.0, 1 mol/L ammonium acetate solution in the drying soil

3) Soil pH determined on 1 : 5 (soil : water) suspensions with a glass electrode, n= 2

4) Soil electrical conductivity determined on 1 : 5 (soil : water) suspensions with an electrical conductivity meter, n= 2

5) It is significantly different for standard plot (t-test, 5 % of both sides levels of significance, n = 4 (2×2) (repetition × number of samples))

2) 2013 年連用試験(夏作ニンジン:2013 年 7 月 17 日~2013 年 10 月 22 日)

(1) 作物体の収量及びカドミウム吸収量

播種から収穫までの栽培期間は約 3 ヶ月であり, その間は, 例年に比べて高温少雨傾向で特に発芽後に枯死する個体が多く認められた. また, 収穫直前には, 一部の葉にうどん粉病と思われる病徴や虫による葉の食害が認められたが, それ以外は異常な症状等は観察されなかった.

ニンジンの収量, カドミウム濃度及び吸収量を Table 9 に示した. 汚泥肥料施用区及び標準区の収量は, 生体重平均値で根部がそれぞれ 12.15 kg と 10.33 kg, 葉部がそれぞれ 5.43 kg と 4.58 kg であり, 有意差は認められなかった($p > 0.05$).

汚泥肥料施用区及び標準区のカドミウム濃度については, 平均値で根部がそれぞれ 0.18 mg/kg と 0.15 mg/kg, 葉部がそれぞれ 0.33 mg/kg と 0.28 mg/kg であり, 葉部については汚泥肥料施用区が有意に高かった($p < 0.05$). 汚泥肥料施用区及び標準区の試験区当たりのカドミウム吸収量については, 平均値で根部がそれぞれ 0.22 mg と 0.17 mg, 葉部がそれぞれ 0.24 mg と 0.18 mg であり, 根部及び葉部ともに汚泥肥料施用区が有意

に高かった($p < 0.05$). 作物体全体の試験区当たりのカドミウム吸収量の平均値は汚泥肥料施用区で 0.46 mg, 標準区で 0.34 mg であり, 汚泥肥料施用区が有意に高かった($p < 0.05$).

Table 9 Cadmium uptake and yield of carrot in the test

	Part	Unit	Test plot-1		Test plot-2		average	t-test
< Sludge-fertilizer-application plot (AP) >								
Fresh weight	Root	kg	11.50		12.80		12.15	n.s. ³⁾
	Leaf	kg	5.20		5.65		5.43	n.s.
	Total	kg	16.70		18.45		17.58	n.s.
Dry weight	Root	kg	1.23		1.26		1.25	n.s.
	Leaf	kg	0.71		0.72		0.71	n.s.
	Total	kg	1.94		1.98		1.96	n.s.
Cadmium concentration ¹⁾	Root	mg/kg	0.17	0.20	0.16	0.19	0.18	n.s.
	Leaf	mg/kg	0.34	0.35	0.32	0.32	0.33	significance ⁴⁾
Quantity of cadmium uptake ²⁾	Root	mg/plot	0.21	0.25	0.20	0.23	0.22	significance
	Leaf	mg/plot	0.24	0.25	0.23	0.23	0.24	significance
	Total	mg/plot	0.46	0.50	0.43	0.46	0.46	significance
< Standard plot (SP) >								
Fresh weight	Root	kg	9.35		11.30		10.33	
	Leaf	kg	4.15		5.00		4.58	
	Total	kg	13.50		16.30		14.90	
Dry weight	Root	kg	1.00		1.21		1.10	
	Leaf	kg	0.56		0.71		0.63	
	Total	kg	1.56		1.91		1.74	
Cadmium concentration ²⁾	Root	mg/kg	0.16	0.17	0.14	0.14	0.15	
	Leaf	mg/kg	0.31	0.30	0.26	0.26	0.28	
Quantity of cadmium uptake ²⁾	Root	mg/plot	0.16	0.17	0.17	0.16	0.17	
	Leaf	mg/plot	0.17	0.17	0.19	0.18	0.18	
	Total	mg/plot	0.34	0.34	0.36	0.34	0.34	

1) Content in the drying soil

2) Quantity of cadmium uptake = Harvest (dry weight) × Cadmium concentration (dry matter)

3) It is no significantly different for standard plot (t-test, 5% of both sides levels of significance, the harvest is $n = 2$, cadmium concentration is $n = 4$ (2×2) (repetition × number of samples))

4) It is significantly different for Standard plot (t-test, 5 % of both sides levels of significance, the cadmium concentration and cadmium quantity of cadmium uptake are $n = 4$ (2×2) (repetition × number of samples))

(2) 跡地土壌のカドミウム濃度

跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度, 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度, pH 及び EC を Table 10 に示した. 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度は, 汚泥肥料施用区は 0.20 mg/kg, 標準区は 0.16 mg/kg で, 汚泥肥料施用区が有意に高かった($p < 0.05$). 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度は, 汚泥肥料施用区は 0.038 mg/kg, 標準区は 0.031 mg/kg で, 汚泥肥料施用区が有意に高かった($p < 0.05$).

Table 10 Characteristics of soil used in this study

	Unit	Test plot-1		Test plot-2		Average	t-test
< Sludge-fertilizer-application plot (AP) >							
0.1 mol/L HCl-Cd ¹⁾	mg/kg	0.20	0.19	0.20	0.20	0.20	significance ⁵⁾
Exchangeable-Cd ²⁾		0.038	0.036	0.039	0.038	0.038	significance
pH (H ₂ O) ³⁾		6.1		6.2			
EC ⁴⁾	mS/m	15.1		16.8			
< Standard plot (SP) >							
0.1 mol/L HCl-Cd ¹⁾	mg/kg	0.15	0.16	0.17	0.17	0.16	
Exchangeable-Cd ²⁾		0.030	0.029	0.032	0.031	0.031	
pH (H ₂ O) ³⁾		6.0		6.1			
EC ⁴⁾	mS/m	16.3		16.7			

1) Content of cadmium dissolved with 0.1 mol/L hydrochloric acid in the drying soil

2) Content of cadmium dissolved with pH 7.0, 1 mol/L ammonium acetate solution in the drying soil

3) Soil pH determined on 1 : 5 (soil : water) suspensions with a glass electrode, n= 2

4) Soil electrical conductivity determined on 1 : 5 (soil : water) suspensions with an electrical conductivity meter, n= 2

5) It is significantly different for standard plot (t-test, 5 % of both sides levels of significance, n = 4 (2×2) (repetition × number of samples))

4. 考 察

1) 2009 年連用試験開始時からの推移について

2009 年の試験開始時から、これまで 5 年間、年 2 作、計 9 作(2013 年冬作は実施中)の試験を行った。各測定結果の推移については下記のとおりであった。

(1) 作物体の収量

作物体の収量(生体重)の推移は Table 11 のとおりである。これまでの試験の収量は、参考にした自治体施肥基準に記載されている目標収量と同等以上であり、一定の収量を確保できていると考えられる。標準区に対する汚泥肥料施用区の生体重指数を見ると、主に葉菜類において、汚泥肥料施用区の収量が 8 割程度となっていた。これは、汚泥肥料施用区の施肥設計において、汚泥肥料の連用による残効¹⁸⁾を考慮して、窒素肥効率を 100 %として計算していたが、連用 6 作目の 2011 年冬作ホウレンソウにおいても収量が標準区に対して 8 割程度であった。この原因として、窒素要求量の比較的少ないニンジン(2009 年夏作)では両試験区間での収量が同程度であったことから、汚泥肥料の窒素肥効率が標準区の試薬よりも低いことが考えられる。そこで、2012 年は、汚泥肥料の窒素肥効率を夏作 50 %、冬作 30 %として施肥した。その結果、2012 年冬作ホウレンソウでは、標準区を 100 とした汚泥肥料施用区の生体重指数は 85 となり、汚泥肥料の窒素肥効率 30 %とした施肥量では同等の収量とはならなかった。

改めて供試肥料であるし尿汚泥肥料の窒素無機化率を確認するため、無機化試験(恒温槽 30 °Cで240日間培養)を実施したところ、培養期間 90 日以降は無機化率 30 %で推移した。この結果から、2013 年夏作ニンジンは汚泥肥料の窒素肥効率を 30 %として施肥したところ、汚泥肥料施用区の生体重指数は 118 となった。これは、

前作である冬作の残効があることが考えられる. このことから, 供試肥料としているし尿汚泥肥料については, 窒素肥効率を夏作ニンジンでは 50 %, 冬作ホウレンソウでは 10 %として施肥設計を計算することが適当と考えられる. このため, 2013 年冬作ホウレンソウ試験においては, 供試汚泥肥料の窒素肥効率を 10 %として施肥している.

Table 11 The yield of each crop body of 2009 to 2013 (fresh weight)

Year	Season	Test crops	Part	AP ¹⁾		SP ²⁾		Aim yield ³⁾ (kg/plot)	Fresh weight index of AP ⁴⁾
				Fresh weight (kg/plot)	(0.1) ⁵⁾	Fresh weight (kg/plot)	(1.0)		
2009	Summer	Carrot	Root	18.0	(0.1) ⁵⁾	17.9	(1.0)	-	101
			Leaf	10.5	(0.4)	9.6	(0.9)	-	109
			Total	28.5	(0.4)	27.6	(1.8)	16	104
2009	Winter	Spinach	Edible portion	13.7	(0.8)	18.6	(1.0)	8	74
2010	Summer	Spinach	Edible portion	4.5	(0.1)	5.8	(0.6)	4	77
2010	Winter	Qing geng cai	Edible portion	22.4	(0.7)	26.9	(0.8)	12	83
2011	Summer	Turnip	Root	8.9	(0.6)	9.4	(0.9)	-	95
			Leaf	8.7	(1.0)	10.0	(1.3)	-	88
			Total	17.6	(1.5)	19.3	(2.2)	16	91
2011	Winter	Spinach	Edible portion	8.1	(0.0)	10.3	(0.5)	8	79
2012	Summer	Carrot	Root	12.3	(0.5)	12.1	(0.2)	-	101
			Leaf	10.0	(0.6)	9.7	(0.8)	-	103
			Total	22.3	(0.1)	21.8	(0.5)	14	102
2012	Winter	Spinach	Edible portion	11.3	(0.5)	13.3	(0.6)	8	85
2013	Summer	Carrot	Root	12.2	(0.9)	10.3	(1.4)	-	118
			Leaf	5.4	(0.3)	4.6	(0.6)	-	119
			Total	17.6	(1.2)	14.9	(2.0)	14	118

1) Sludge-fertilizer-application plot

2) Standard plot

3) This value is shown in the recommending rate of fertilizer application (local government) exchanging aim yield (kg/10 a) to 4 m².

4) Fresh weight index of sludge-fertilizer-application plot when standard plot assume 100.

5) Standard deviation ($n = 2$ (2 repetition))

(2) 跡地土壌の pH

跡地土壌 pH の推移は Fig.2 のとおりである. pH 6.0~6.7 の範囲内で処理間差も小さく推移している. 石灰含量の低い高分子凝集汚泥を連用施用した場合に土壌 pH が低下することが知られている¹⁰⁾が, 本試験では pH 6.0を下回らないよう, 適宜, 石灰資材による pH の補正を行っており, 供試土壌が黒ボク土であることや, 高分子凝集剤を使用したし尿汚泥肥料の施用量が極端に多くないため, 連用施用による pH の変動は比較的少ないものとなっていると考えられる. 土壌 pH の変動は, 土壌中カドミウムの作物体への可給性に影響を及ぼすことが知られている^{19, 20)}. 本試験では, 汚泥肥料施用区と標準区の跡地土壌 pH は, ほぼ同程度で推移していることから, 各試験でのカドミウム動態の処理間差に土壌 pH はほとんど影響していないものと考えられる.

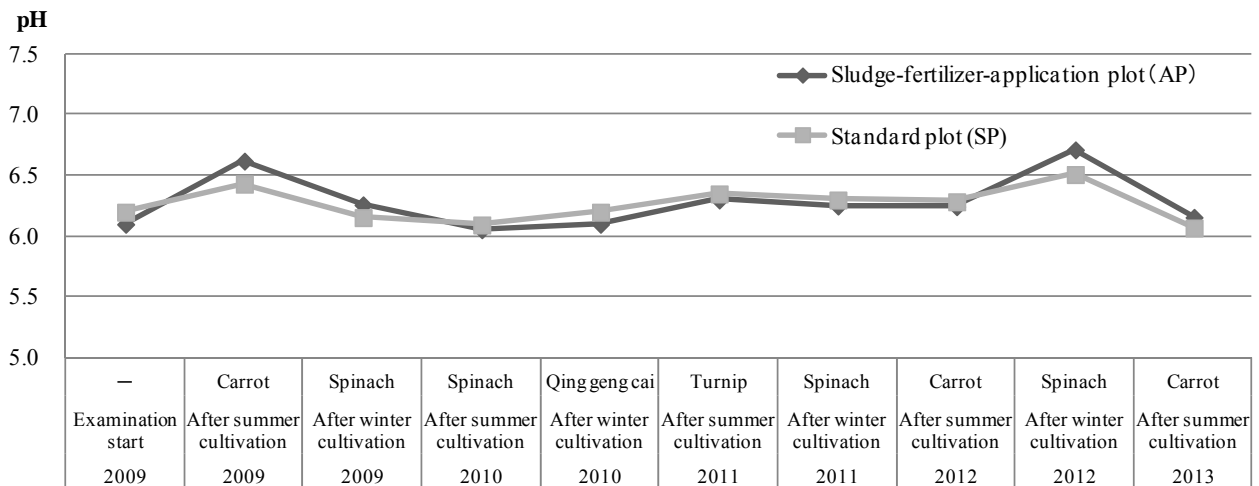


Fig. 2 Changes of the pH of cultivated soil

(3) 跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度

跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の推移は Table 12 及び Fig.3 のとおりである。

汚泥肥料施用区及び標準区の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の推移について傾向を把握するため、それぞれの処理区における、試験開始時からの経過月(各試験の間隔は 6 ヶ月とした)に対する 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の線形単回帰分析を行った(単回帰式の分散分析表の p 値により評価, 両側有意水準 5%) (Table 12). 2013 年夏作跡地までの汚泥肥料施用区の回帰は有意でなく($p=0.89$)一定で推移している傾向であった. 一方, 標準区では, 2011 年冬作跡地以降, 回帰が有意となり下降傾向が認められ($p<0.05$), 両試験区間の差は大きくなる傾向であった. また, 2011 年冬作以降, 汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高くなり, 同様の結果が続いている. これは, 標準区は肥料由来のカドミウム負荷がないため, 各試験において作物体の収穫により土壌中カドミウムの圃場外への持ち出しが継続されること等により, 跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度についても減少する傾向となっていると考えられる.

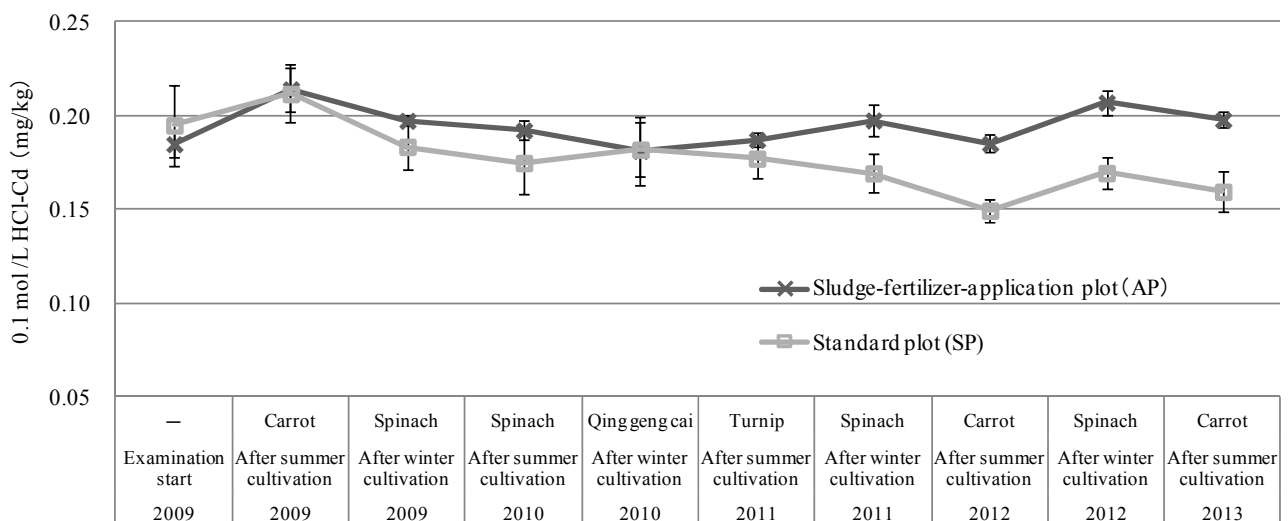


Fig. 3 Changes of the 0.1 mol/L HCl-Cd density of cultivated soil
(The error bar indicating the standard deviation)

Table 12 Change of the 0.1 mol/L HCl-Cd density¹⁾ of ruins soil

Year	Season	Test crops	AP ²⁾		SP ³⁾		t-test (difference between the processing)	p-value of single regression analysis ⁴⁾	
			(mg/kg)	(0.01) ⁵⁾	(mg/kg)	(0.02)		AP ²⁾	SP ³⁾
2009	Start	—	0.19	(0.01) ⁵⁾	0.20	(0.02)	n.s. ⁶⁾	—	—
2009	Summer	Carrot	0.21	(0.01)	0.21	(0.02)	n.s.	—	—
2009	Winter	Spinach	0.20	(0.003)	0.18	(0.01)	n.s.	—	—
2010	Summer	Spinach	0.19	(0.01)	0.17	(0.02)	n.s.	—	—
2010	Winter	Qing geng cai	0.18	(0.02)	0.18	(0.01)	n.s.	0.55	0.20
2011	Summer	Turnip	0.19	(0.004)	0.18	(0.01)	n.s.	0.41	0.11
2011	Winter	Spinach	0.20	(0.01)	0.17	(0.01)	significance ⁷⁾	0.63	0.03 ⁸⁾
2012	Summer	Carrot	0.19	(0.005)	0.15	(0.01)	significance	0.41	0.01 ⁸⁾
2012	Winter	Spinach	0.21	(0.01)	0.17	(0.01)	significance	0.98	0.01 ⁸⁾
2013	Summer	Carrot	0.20	(0.004)	0.16	(0.01)	significance	0.89	0.002 ⁸⁾

1) Content in the drying soil

2) Sludge-fertilizer-application plot

3) Standard plot

4) The p-value which calculated from dispersion analysis for linear regression by examination start of each examination plot.

5) Standard deviation ($n = 4 (2 \times 2)$ (repetition \times number of samples))

6) It is no significantly different for Processing examination section (t-test, 5 % of both sides levels of significance, $n = 4 (2 \times 2)$ (repetition \times number of samples))

7) It is significantly different for Processing examination section (t-test, 5% of both sides levels of significance, $n = 4 (2 \times 2)$ (repetition \times number of samples))

8) It show that regression is significant in $p < 0.05$ (5 % of both sides levels of significance).

(4) 跡地土壌の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度

跡地土壌の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度の推移(2009 年冬作～2013 年夏作まで)は Table 13 及び Fig.4 のとおりである。

汚泥肥料施用区及び標準区の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度の推移について傾向を把握するため、それぞれの処理区における、2010 年冬作からの経過月(各試験の間隔は 6 ヶ月とした)に対する 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度の線形単回帰分析を行った(単回帰式の分散分析表の p 値により評価, 両側有意水準 5 %) (Table 13). 2013 年夏作跡地までの汚泥肥料施用区の回帰は有意でなく($p > 0.05$), 一定で推移している傾向であった. 一方, 標準区では, 2012 年夏作跡地以降, 回帰が有意となり($p < 0.05$) 下降傾向が認められ, 両試験区間の差は大きくなる傾向であった. この傾向は 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度と同様であった (Table 12 及び Fig.3).

Table 13 Change of the exchangeable-Cd density¹⁾ of cultivated soil

Year	Season	Test crops	AP ²⁾		SP ³⁾		t-test (difference between the processing)	p-value of single regression analysis ⁴⁾	
			(mg/kg)		(mg/kg)			AP ²⁾	SP ³⁾
2009	Winter	Spinach	0.036	(0.002) ⁵⁾	0.037	(0.002)	n.s. ⁶⁾	—	—
2010	Summer	Spinach	0.038	(0.002)	0.036	(0.003)	n.s.	—	—
2010	Winter	Qing geng cai	0.041	(0.001)	0.037	(0.001)	significance ⁷⁾	—	—
2011	Summer	Turnip	0.036	(0.0004)	0.035	(0.003)	n.s.	—	—
2011	Winter	Spinach	0.039	(0.001)	0.035	(0.002)	significance	0.58	0.13
2012	Summer	Carrot	0.037	(0.001)	0.032	(0.001)	significance	0.93	0.03 ⁸⁾
2012	Winter	Spinach	0.038	(0.001)	0.032	(0.003)	significance	0.93	0.004 ⁸⁾
2013	Summer	Carrot	0.038	(0.001)	0.031	(0.001)	significance	0.91	0.0005 ⁸⁾

1) Content of cadmium dissolved with pH 7.0, 1 mol/L ammonium acetate solution in the drying soil

2) Sludge-fertilizer-application plot

3) Standard plot

4) The p-value which calculated from dispersion analysis for linear regression by examination start of each examination plot.

5) Standard deviation ($n = 4$ (2×2) (repetition \times number of samples))

6) It is no significantly different for Processing examination section (t-test, 5 % of both sides levels of significance, $n = 4$ (2×2) (repetition \times number of samples))

7) It is significantly different for Processing examination section (t-test, 5% of both sides levels of significance, $n = 4$ (2×2) (repetition \times number of samples))

8) It show that regression is significant in $p < 0.05$ (5 % of both sides levels of significance).

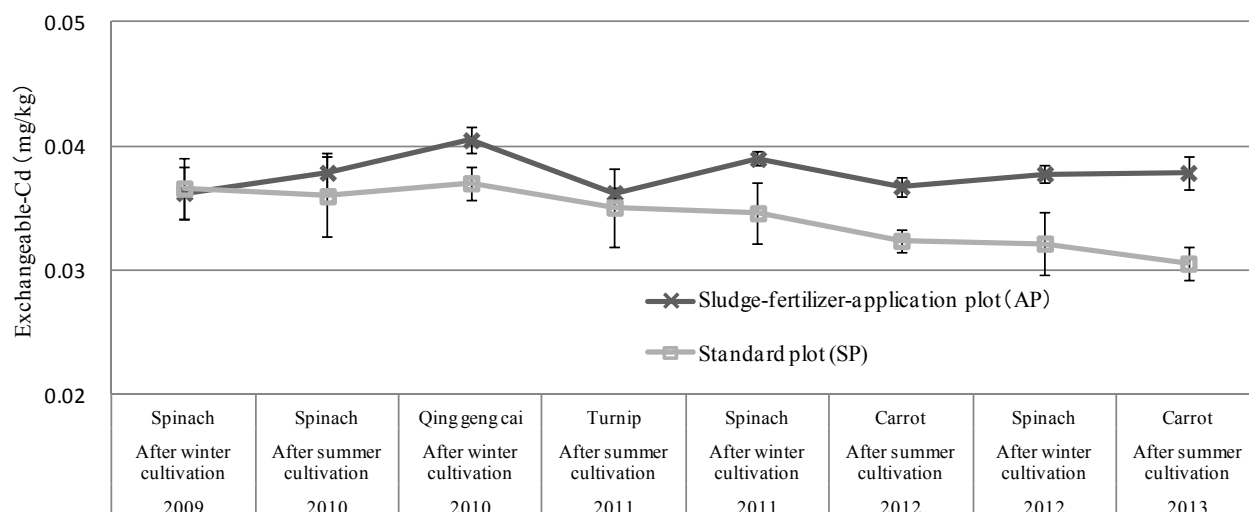


Fig. 4 Changes of the exchangeable-Cd density of cultivated soil (The error bar indicating the standard deviation)

(5) 跡地土壌の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cu 及び Zn 濃度

跡地土壌の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cu 及び Zn 濃度の推移(2009 年冬作～2013 年夏作まで)は Table 14 及び Fig.5 のとおりである. 汚泥肥料中にカドミウムと比較して多量に含まれる銅及び亜鉛について, カドミウムの土壌蓄積の参考とするため推移を確認した.

汚泥肥料施用区及び標準区の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cu 及び Zn 濃度の推移について傾向を把握するため、それぞれの処理区における、2009 年冬作からの経過月 (各試験の間隔は 6 ヶ月とした) に対する 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cu 及び Zn 濃度の線形単回帰分析を行った (単回帰式の分散分析表の p 値により評価、両側有意水準 5%)。1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cu については、2013 年夏作跡地までの汚泥肥料施用区及び標準区の回帰は有意でなく ($p > 0.05$)、一定で推移している傾向であった。1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Zn については、汚泥肥料施用区では、2011 年冬作跡地以降、回帰が有意となり ($p < 0.05$) 上昇傾向が認められた。一方、標準区は一定で推移しており ($p > 0.05$)、両試験区間の差は大きくなる傾向であった。

黒ボク土を用いた高分子凝集剤を使用した汚泥の連用ポット試験において、汚泥の連用によって土壤中の可溶性のカドミウム、銅及び亜鉛の増加が認められ、施肥量が多いほど蓄積量は多く、銅及びカドミウム濃度の増加傾向は亜鉛ほど顕著ではなかったことが報告されており²¹⁾、この報告と今回の結果は矛盾しないものであった。

土壌では粘土や有機物に重金属は吸着され蓄積する。その吸着の強さは腐植質火山灰土壌の腐植酸を用いた測定では pH 5 の場合「銅 > 亜鉛 > カドミウム」となっている²²⁾。1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cu が一定で推移している理由として、土壌有機物等への吸着が比較的強いため、現状の負荷量では可溶化する銅が増加していないことが考えられる。一方、1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Zn が上昇傾向である理由は、供試汚泥肥料中の亜鉛濃度が 1,760 mg/kg (Table 2) と銅やカドミウムと比較して非常に高く、銅よりも土壌中で動きやすいために汚泥肥料の連用施用により上昇傾向となっていると考えられる。カドミウムについては、亜鉛及び銅と比較して連用による負荷量は少ないものの、亜鉛よりも土壌中で動きやすいことから、汚泥肥料を長期連用した場合や大量施用により負荷量が増大した場合は、亜鉛と同様に作物に吸収可能なカドミウム濃度が上昇傾向となる可能性が考えられる。

また、亜鉛濃度の高い汚泥肥料を連用した試験において、負荷量が多い試験区 (1 作当たり 2 t/10a 及び 6 t/10a) の 7 作目 (コマツナ) 及び 9 作目 (コカブ) において土壌の pH 6.0 未満という条件で亜鉛の過剰症状 (クロロシス及び生育抑制) が認められたという報告がある²³⁾。本試験では土壌 pH を 6.0 以上に保っているため条件が異なるが、汚泥肥料を多量に長期連用する場合には、土壌 pH の変動とともに亜鉛の過剰症状についても注意する必要があると考えられた。

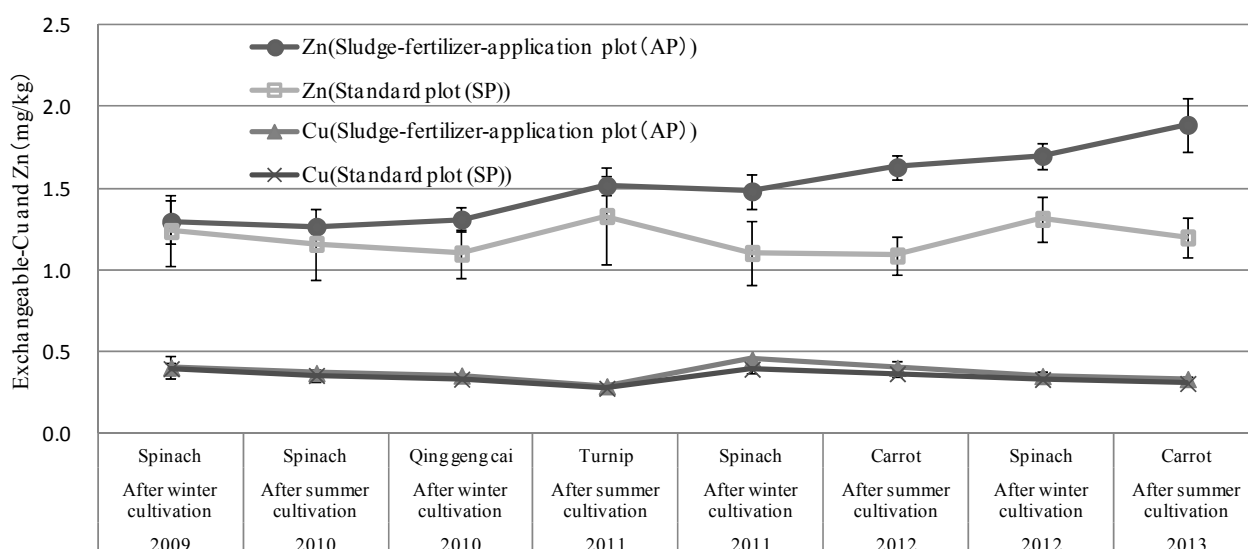


Fig. 5 Changes of the exchangeable-Cu and Zn density of cultivated soil
(The error bar indicating the standard deviation)

Table 14 Change of the exchangeable-Cu and Zn density¹⁾ of cultivated soil

Year	Season	Test crops	Cu		Zn	
			AP ²⁾ (mg/kg)	SP ³⁾ (mg/kg)	AP ²⁾ (mg/kg)	SP ³⁾ (mg/kg)
2009	Winter	Spinach	0.40 (0.07) ⁴⁾	0.40 (0.03)	1.3 (0.1)	1.2 (0.2)
2010	Summer	Spinach	0.37 (0.02)	0.36 (0.04)	1.3 (0.04)	1.2 (0.2)
2010	Winter	Qing geng cai	0.35 (0.004)	0.33 (0.004)	1.3 (0.1)	1.1 (0.1)
2011	Summer	Turnip	0.29 (0.002)	0.28 (0.01)	1.5 (0.1)	1.3 (0.3)
2011	Winter	Spinach	0.46 (0.01)	0.39 (0.02)	1.6 (0.2)	1.3 (0.3)
2012	Summer	Carrot	0.40 (0.04)	0.37 (0.02)	1.6 (0.1)	1.1 (0.1)
2012	Winter	Spinach	0.35 (0.02)	0.33 (0.03)	1.7 (0.1)	1.3 (0.1)
2013	Summer	Carrot	0.33 (0.02)	0.31 (0.01)	1.9 (0.2)	1.2 (0.1)

1) Content of copper and zinc dissolved with pH 7.0, 1 mol/L ammonium acetate solution in the drying soil

2) Sludge-fertilizer-application plot

3) Standard plot

4) Standard deviation ($n = 4$ (2×2) (repetition \times number of samples))

(6) 作物体のカドミウム濃度及び吸収量

各試験での作物体のカドミウム濃度及び吸収量の推移は Table 15 及び Fig.6 のとおりである。ニンジンについては、過去3回、ホウレンソウについては、過去4回試験を実施しているが、汚泥肥料の施用量や連用回数に関わらず、試験を行った年や季節によって作物体のカドミウム濃度は変動していた。これは、栽培期間中の降水量や気温等の気象条件が影響していると考えられる²⁴⁾。

試験開始時(2009年夏作)から2013年夏作までの作物体のカドミウム濃度は、概ね Codex 基準値²⁵⁾の1/4以下程度で推移している。しかし、2010年夏作ホウレンソウのカドミウム濃度は、汚泥肥料施用区及び標準区ともに Codex 基準値(葉菜 現物濃度 0.2 mg/kg)の8割程度と顕著に高い濃度であった。跡地土壌の pH 及び 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度には大きな変動は認められていないことから、気象条件等によっては作物体中のカドミウム濃度が大幅に高まる場合があることが考えられる。

2009年冬作及び2010年夏作ホウレンソウのカドミウム吸収量は、標準区が汚泥肥料施用区に比べて有意に多かった($p < 0.05$)。これは、汚泥肥料施用区に比べて標準区の収量が2割程度多かった(Table 11)ためと考えられる。一方で、作物体中のカドミウム濃度では両試験区で有意差は認められず($p > 0.05$)、これはホウレンソウの生育量とカドミウム濃度に関係は認められないという報告²⁶⁾と一致する結果であった。

2010年冬作チンゲンサイのカドミウム濃度は、汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった($p < 0.05$)が、カドミウム吸収量は両試験区間で同程度であった($p > 0.05$)。これは、汚泥肥料施用区に比べて標準区の収量が2割程度多かった(Table 11)ためと考えられる。

2011年冬作ホウレンソウにおいて、試験開始から初めて汚泥肥料施用区が標準区に比べてカドミウム濃度及び吸収量の両方で有意に高かった($p < 0.05$)。この差は、跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度においても認められており(Table 12)、ホウレンソウは土壌中の交換態のカドミウムを主体に吸収するが、無機結合態カドミウムなど他形態のカドミウムも吸収し、作物体のカドミウム吸収と土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度に相関があるという報告²⁷⁾と一致する結果であった。

その後実施した2012年夏作ニンジンでも、跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度は引き続き汚泥肥料施用区

が有意に高かった ($p < 0.05$) が、作物体のカドミウム濃度及び吸収量に試験区間で有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。これは、ニンジンのカドミウム吸収と土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度との相関は認められないという報告²⁸⁾と一致する結果であった。汚泥肥料施用区と標準区では、ホウレンソウが吸収可能な形態のカドミウムとニンジンが吸収可能な形態のカドミウムの濃度が異なるため、ホウレンソウとニンジンで異なる結果となった可能性が考えられる。

2012 年冬作ホウレンソウのカドミウム濃度は、汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった ($p < 0.05$)。これは、2011 年冬作ホウレンソウと同様な結果であり、汚泥肥料施用区ではホウレンソウが吸収可能な形態のカドミウム濃度が標準区と比較して高い状態が 2011 年冬作以降続いていることが原因と考えられる。

2009 年及び 2012 年夏作ニンジンでは根部及び葉部ともにカドミウム濃度の有意差はなかった ($p > 0.05$) が、2013 年夏作ニンジン葉部において、汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった ($p < 0.05$)。2013 年夏作の汚泥肥料施用区の作付け前及び跡地土壌の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度についても標準区と比較して有意に高かった ($p < 0.05$) (Table 8 及び 10)。これはニンジンのカドミウム吸収には、土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度との相関は認められない²⁷⁾が、土壌中の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度との相関がある¹⁶⁾という報告と一致する結果であった。跡地土壌の 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度において汚泥肥料施用区と標準区の差が大きくなる傾向で推移していることから (Fig.4), 作物体のカドミウム濃度も同様の傾向となっていると考えられる。

作物体のカドミウム濃度及び吸収量については、2011 年冬作以降は汚泥肥料施用区の方が常に高い傾向となっている ($p < 0.05$)。この傾向は跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 及び 1 mol/L 酢安 (pH 7.0)-Cd 濃度とも一致した (Table 12 及び 13)。跡地土壌の pH 等の理化学性に顕著な差が認められないことから (Table 1 及び 5), 標準区においては有機物の施用がない状態で連作していることが影響し作物体が吸収可能な形態のカドミウム量が減少していると考えられる。一方で、汚泥肥料施用区では汚泥肥料の連用施用によって作物体に吸収されるカドミウムのうち、土壌や大気等由来のカドミウムと比較して汚泥肥料由来のカドミウムの割合が増加する傾向となっていることが考えられる。

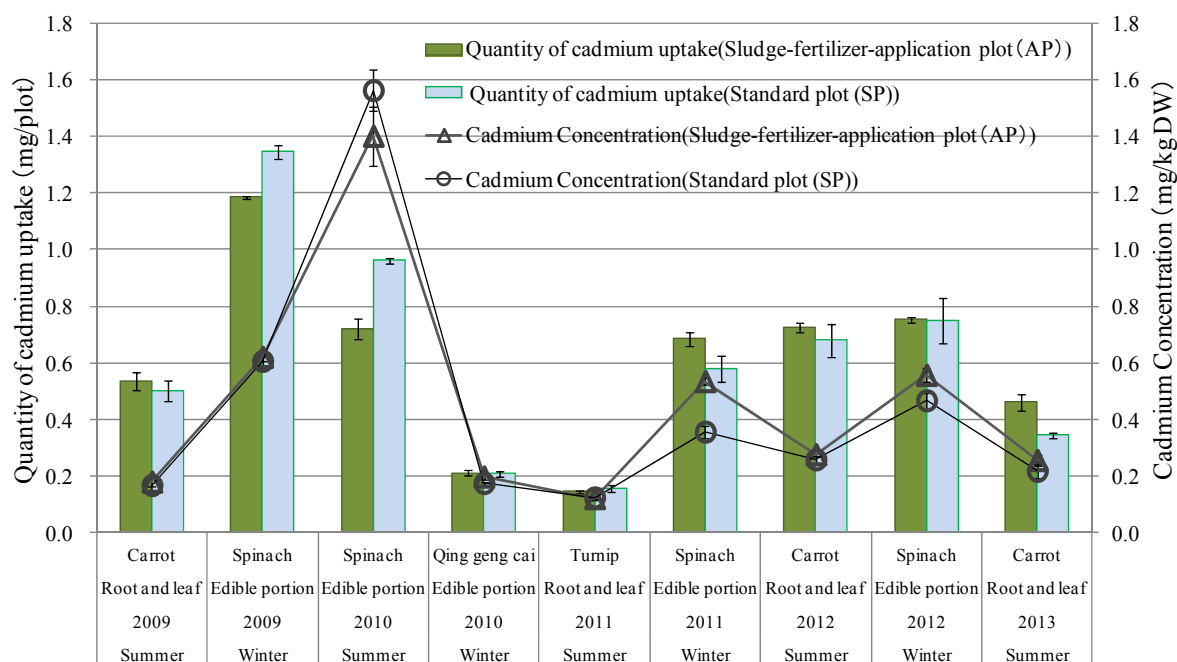


Fig. 6 Absorption and the amount of cadmium concentration of each crops in 2009~2013
(The error bar indicating the standard deviation)

Table 15 Absorption and the amount of cadmium concentration of each crops in 2009~2013

Year	Season	Test crops	Part	Cadmium Concentration ¹⁾			Quantity of cadmium uptake		
				AP ²⁾ (mg/kg)	SP ³⁾ (mg/kg)	t-test	AP ²⁾ (mg/plot)	SP ³⁾ (mg/plot)	t-test
2009	Summer	Carrot	Root	0.12 (0.01) ⁴⁾	0.11 (0.02)	n.s. ⁵⁾	0.21 (0.02)	0.20 (0.03)	n.s.
			Leaf	0.24 (0.02)	0.22 (0.02)	n.s.	0.32 (0.02)	0.31 (0.01)	n.s.
			Total	-	-	-	0.54 (0.03)	0.50 (0.04)	n.s.
2009	Winter	Spinach	Edible portion	0.62 (0.01)	0.61 (0.02)	n.s.	1.18 (0.004)	1.34 (0.02)	signifi- cance
2010	Summer	Spinach	Edible portion	1.40 (0.10)	1.56 (0.07)	n.s.	0.72 (0.04)	0.96 (0.01)	signifi- cance
2010	Winter	Qing geng cai	Edible portion	0.20 (0.01)	0.17 (0.01)	signifi- cance ⁶⁾	0.21 (0.01)	0.21 (0.01)	n.s.
2011	Summer	Turnip	Root	0.08 (0.01)	0.08 (0.002)	n.s.	0.04 (0.003)	0.04 (0.00)	n.s.
			Leaf	0.16 (0.01)	0.17 (0.01)	n.s.	0.10 (0.01)	0.11 (0.01)	n.s.
			Total	-	-	-	0.15 (0.01)	0.16 (0.01)	n.s.
2011	Winter	Spinach	Edible portion	0.53 (0.01)	0.36 (0.02)	signifi- cance	0.68 (0.02)	0.58 (0.05)	signifi- cance
2012	Summer	Carrot	Root	0.24 (0.01)	0.23 (0.01)	n.s.	0.32 (0.01)	0.30 (0.02)	n.s.
			Leaf	0.31 (0.01)	0.29 (0.02)	n.s.	0.41 (0.005)	0.38 (0.04)	n.s.
			Total	-	-	-	0.73 (0.02)	0.68 (0.06)	n.s.
2012	Winter	Spinach	Edible portion	0.56 (0.02)	0.47 (0.03)	signifi- cance	0.75 (0.01)	0.75 (0.08)	n.s.
2013	Summer	Carrot	Root	0.18 (0.02)	0.15 (0.02)	n.s.	0.22 (0.02)	0.17 (0.004)	signifi- cance
			Leaf	0.33 (0.02)	0.28 (0.03)	signifi- cance	0.24 (0.01)	0.18 (0.01)	signifi- cance
			Total	-	-	-	0.46 (0.03)	0.34 (0.01)	signifi- cance
The sum total				-	-	-	5.42 (0.07)	5.53 (0.13)	n.s.

1) Content in the drying soil

2) Sludge-fertilizer-application plot

3) Standard plot

4) Standard deviation ($n = 4 (2 \times 2)$ (repetition \times number of samples))

5) It is no significantly different for processing examination section (t-test, 5 % of both sides levels of significance, $n = 4 (2 \times 2)$ (repetition \times number of samples))

6) It is significantly different for processing examination section (t-test, 5 % of both sides levels of significance, $n = 4 (2 \times 2)$ (repetition \times number of samples))

(7) カドミウム負荷量, 持出し量及び蓄積量

各試験での肥料由来のカドミウム負荷量, 作物体によるカドミウム持出し量, 土壤へのカドミウム蓄積量及び蓄積濃度の推移は Table 16 のとおりである. 施用肥料のカドミウム含有量に施用量を乗じて, 土壤へのカドミウム負荷量とした. カドミウム持出し量は, 収穫した作物体のカドミウム吸収量とした. 施用肥料によるカドミウム負荷量と作物体によるカドミウム持出し量の差をカドミウム蓄積量とした. カドミウム蓄積量を試験区当たりの土壤量(作土の深さ 15 cm, 土壤の仮比重 0.67 とし, 試験区 4 m²当たりの土壤量を 400 kg とした)で除して, 土壤へのカドミウム蓄積濃度とした.

カドミウム持出し量については, これまで実施した 9 作の試験の合計は, 汚泥肥料施用区で 5.42 mg/試験区, 標準区で 5.53 mg/試験区と同程度であり, 有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (有意差検定結果は, Table 15 カドミウム吸収量の総計を参照).

汚泥肥料施用区では, 各試験において, カドミウム負荷量と比較して持出し量が少ないことから土壤のカドミウム収支がプラスとなるため, 汚泥肥料の連用によるカドミウム負荷量の増加に伴って土壤蓄積するカドミウムが高まる傾向であることが考えられる. 過去 9 作の試験における汚泥肥料施用区のカドミウム負荷量は 47 mg/試験区 (118 g/ha), カドミウム蓄積濃度(カドミウム蓄積量と試験区土壤量から算出した理論上の土壤中カドミウムの上昇濃度)は 0.105 mg/kg となった (Table 16).

汚泥肥料施用区のカドミウム負荷量及び蓄積量と土壤中 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の推移は Fig.7 のとおりである. 土壤中 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度は試験開始時の 2009 年夏作から 2013 年夏作まで, ほぼ一定で推移しており, 汚泥肥料の連用施用による有意な上昇又は下降傾向は認められなかった ($p > 0.05$). しかし, カドミウム負荷量が 1 作当たり 5 mg/試験区 (12 g/ha) 以下であった 2009 年夏作から 2011 年夏作まで (Table 16) の推移を線形回帰分析したところ, 回帰が有意となり ($p < 0.05$), 下降傾向が認められた (Fig.7). 2011 年冬作以降にカドミウム負荷量を 1 作当たり 7 mg/試験区 (18 g/ha) 以上とした場合は, 線形回帰分析(両側有意水準 5%)では有意ではなく, 下降傾向は認められなくなり ($p > 0.05$) 一定で推移していた. 今後, データ数を増やして推移を確認する必要があると考えられる.

他の試験で高分子凝集剤を使用した汚泥肥料を用い 5 年 (5 作) 以上の黒ボク土圃場での連用試験を実施し, 土壤の pH を 6.0~6.7 に維持した状態で土壤中 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の推移を確認した報告は見当たらない. 類似の試験として黒ボク土に比べて腐植の少ない褐色森林土の圃場において水産系廃棄物由来堆肥を用い 5 年間 5 作の連用試験を実施した結果(カドミウム総負荷量は 91.1 g/ha, 跡地土壤の pH は 6.0~6.7 の間で推移しており, 本試験に近い条件となっている), 跡地土壤の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度は 0.15 mg/kg から 0.17 mg/kg にわずかに増加したことが報告されている²⁹⁾.

以上のことから, 本試験で用いた土壤, し尿汚泥肥料及び作物等における連用施用においては, 1 作当たり 7 mg/試験区 (年間 14 mg/試験区 (36 g/ha)) よりカドミウム負荷量を多くした場合は, 今後, 跡地土壤の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度が増加傾向となる可能性もあるため推移を確認する必要があると考えられる. 一方, 肥料由来のカドミウム負荷がない標準区及び汚泥肥料由来のカドミウム負荷量が 1 作当たり 5 mg/試験区以下の場合に, 土壤中 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度が減少傾向 ($p < 0.05$) となる理由としては, 作物収穫による持出しの他, 土壤中に負荷されたカドミウムは水平や下方移動により作土に留まらないものがあること^{30~31)}や, 土壤や汚泥肥料中の有機物等と結合すること³²⁾等により 0.1 mol/L 塩酸には不溶な形態として作土中に蓄積していることが考えられる.

Table 16 Change of the 2009~2013 year of the quantity of cadmium load by fertilizer¹⁾, quantity of peculating due to the crops body¹⁾, and quantity of cadmium accumulation to the soil¹⁾

Year	Season	Test crops	Sludge-fertilizer-application plot (AP)				Standard plot (SP)			
			Quantity of cadmium			Concentration of cadmium accumulation	Quantity of cadmium			Concentration of cadmium accumulation
			load	removal	accumulation		load	removal	accumulation	
(mg/plot)	(mg/plot)	(mg/plot)	(mg/kg)	(mg/plot)	(mg/plot)	(mg/plot)	(mg/kg)			
2009	Summer	Carrot	4.84	0.54	4.30	0.011	0	0.50	-0.50	-0.001
2009	Winter	Spinach	4.40	1.18	3.22	0.008	0	1.34	-1.34	-0.003
2010	Summer	Spinach	3.30	0.72	2.58	0.006	0	0.96	-0.96	-0.002
2010	Winter	Qing geng cai	2.64	0.21	2.43	0.006	0	0.21	-0.21	-0.001
2011	Summer	Turnip	3.30	0.15	3.15	0.008	0	0.16	-0.16	0.000
2011	Winter	Spinach	7.04	0.68	6.35	0.016	0	0.58	-0.58	-0.001
2012	Summer	Carrot	7.28	0.73	6.55	0.016	0	0.68	-0.68	-0.002
2012	Winter	Spinach	7.28	0.75	6.53	0.016	0	0.75	-0.75	-0.002
2013	Summer	Carrot	7.28	0.46	6.82	0.017	0	0.34	-0.34	-0.001
Total			47.36	5.42	41.93	0.105	0.00	5.53	-5.53	-0.014

1) It show every test plot.

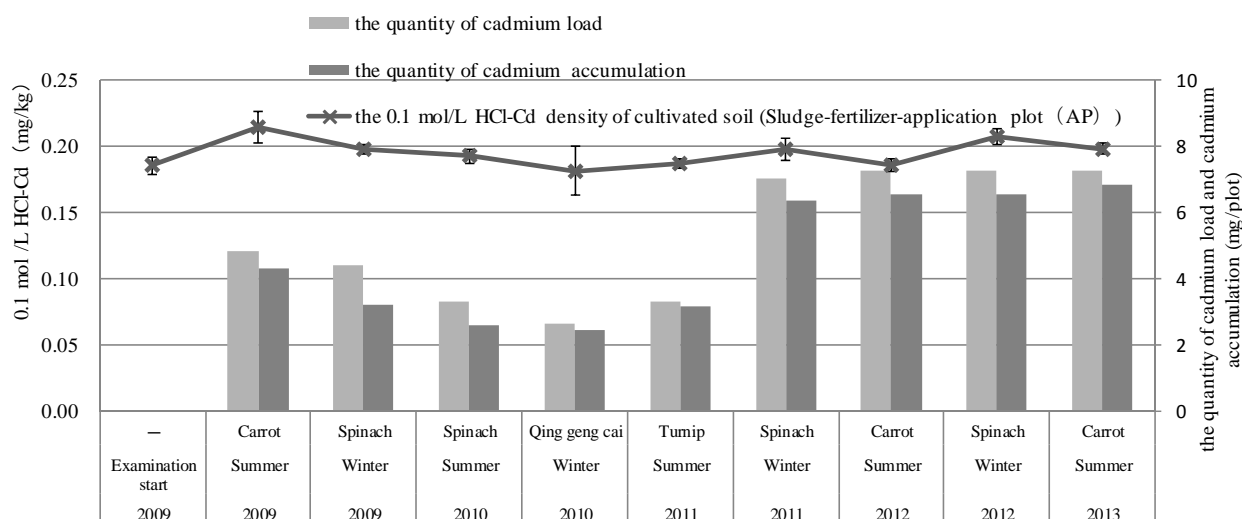


Fig. 7 Changes of the 2009~2013 year of the quantity of cadmium load by fertilizer, quantity of cadmium accumulation to the soil, and the 0.1 mol/L HCl-Cd density

5. まとめ

肥料の有効性及び安全の確保に必要な課題に関する調査研究として、汚泥肥料の連用施用試験を2009年より引き続き行っており、汚泥肥料施用区及び汚泥肥料無施用の標準区の2試験区に、2012年冬作としてハウレンソウを、2013年夏作としてニンジン栽培し、土壌中のカドミウム濃度の変化及び作物体へのカドミウム吸収量を確認した。その結果、跡地土壌の0.1 mol/L HCl-Cd濃度及び1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cd濃度は汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった($p < 0.05$)。作物体のカドミウム濃度は2012年冬作ハウレンソウ及び2013年夏作ニンジン葉部においては、汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった($p < 0.05$)が、

2013 年夏作ニンジン根部では、両試験区に有意差は認められなかった($p > 0.05$)。作物体のカドミウム吸収量は 2012 年冬作ホウレンソウでは両試験区に有意差は認められなかった($p > 0.05$)が、2013 年夏作ニンジンにおいては葉部及び根部ともに汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった($p < 0.05$)。

試験開始時の 2009 年夏作からの跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の推移について整理したところ、汚泥肥料施用区と標準区で差がない状態が続いていたが、2011 年冬作ホウレンソウ以降は今回の試験においても、汚泥肥料施用区が標準区に比べて有意に高かった($p < 0.05$)。跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 及び 1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Cd 濃度の推移は、標準区では有意な下降傾向が認められた($p < 0.05$)が汚泥肥料施用区はほぼ一定で推移しており($p > 0.05$)、汚泥肥料の連用施用による有意な上昇又は下降傾向は認められなかった。しかし、汚泥肥料施用区のカドミウム負荷量が 1 作当たり 5 mg/試験区以下(12 g/ha)であった 2011 年夏作までは跡地土壌の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度の有意な下降傾向が認められていた($p < 0.05$)が、カドミウム負荷量を 1 作当たり 7 mg/試験区(18 g/ha)程度とした 2011 年冬作以降は、下降傾向が認められなくなっていることから、データ数を増やし今後の推移を確認する必要があると考えられる。また、汚泥肥料中の濃度が比較的高く、カドミウムの同族元素である亜鉛については、汚泥肥料施用区において 2011 年冬作以降、跡地土壌の 1 mol/L 酢安(pH 7.0)-Zn の上昇傾向が認められた($p < 0.05$)。

汚泥肥料のカドミウム含有許容値付近(約 5 mg/kg)のし尿汚泥肥料を、一般的な 1 作当たりの施用量 500 kg/10 a(現物)以下を施用し、年 2 作(年間施用量 1 t/10 a)の試験を 9 作行った。これまでのところ、汚泥肥料を施用していない標準区の結果との比較から、汚泥肥料由来のカドミウムは作土中に残留し、作物に吸収されている可能性が考えられるが、土壌中の 0.1 mol/L HCl-Cd 濃度はほぼ一定で推移しており、作物中のカドミウム濃度についても Codex 基準値に比べて低い濃度で推移している。本試験条件においてカドミウム負荷量年間約 14 mg/試験区(36 g/ha)での 5 年間程度の汚泥肥料連用施用であれば、カドミウムの土壌蓄積量や作物体への吸収量が増大する可能性は低いと考えられる。しかし、更に長期に連用を継続した場合や、汚泥肥料施用量を増加させた場合又は黒ボク土以外の種類の土壌の場合における汚泥肥料由来のカドミウムの土壌中への蓄積及び作物体への吸収については知見を集積する必要があると考えられる。

文 献

- 1) 農林水産省告示:肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件, 昭和 61 年 2 月 22 日, 農林水産省告示第 284 号, 最終改正平成 26 年 9 月 1 日, 農林水産省告示第 1146 号 (2014)
- 2) 舟津正人, 山西正将, 阿部文浩:カドミウムの土壌蓄積及び作物吸収における汚泥肥料連用の影響(続報), 肥料研究報告, **5**, 60~68 (2012)
- 3) 廣井利明, 恵智正宏, 山西正将, 阿部文浩:カドミウムの土壌蓄積及び作物吸収における汚泥肥料連用の影響(続報), 肥料研究報告, **6**, 43~60, (2013)
- 4) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター(FAMIC):肥料等試験法
<<http://www.famic.go.jp/ffis/fert/sub9.html>>
- 5) 農林水産省ホームページ:都道府県施肥基準等 主要農作物施肥基準, 埼玉県
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyhozen_type/h_sehi_kizyun/sai05.html>
- 6) 農林水産省 消費・安全局 農産安全管理課 肥料企画班:汚泥肥料の施用に係る指導実態等に関するアンケート結果(抜粋) (2008)
<http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_hiryo/odei_hiryo/pdf/03_data1.pdf>
- 7) 千葉県 農林水産技術推進会議農林部会:肥料価格高騰に伴う土壌管理・施肥適正化指導指針 平成 20

年 9 月, p.20 (2008)

<<http://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/network/h21-fukyuu/documents/kakakukoutou.pdf>>

- 8) 栃木県 農作物施肥基準—環境と調和のとれた土づくり・施肥設計の手引き 平成 18 年 1 月, p.110 (2006) <<http://www.pref.tochigi.lg.jp/g04/work/nougyou/keiei-gijyutsu/sehikijun.html>>
- 9) 群馬県 作物別施肥基準及び土壌診断基準 おでい肥料と土壌の重金属
<<http://www.aic.pref.gunma.jp/agricultural/management/technology/soil/01/index.html>>
- 10) 有機性汚泥の緑農地利用委員会:有機性汚泥の緑農地利用, 183, 博友社, 東京(1991)
- 11) 農林水産省:地力増進基本指針, 平成 20 年 10 月 16 日
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf>
- 12) Perkin Elmer 社:マイクロ波分解装置取扱説明書, 分解メソッド集, ホウレンソウ
- 13) 財団法人日本土壌協会:土壌, 水質及び植物体分析法, 東京(2001)
- 14) 農林省省令:農用地土壌汚染対策地域の指定要件に係るカドミウムの量の検定の方法を定める省令, 昭和 46 年 6 月 24 日農林省令第 47 号, 最終改正平成 24 年 8 月 6 日環境省令第 22 号(2012)
- 15) 日本土壌肥料学会監修:土壌環境分析法, p.215~219, 博友社, 東京(1997)
- 16) 戸上和樹, 吉住佳与, 工藤一晃, 青木和彦, 三浦憲蔵:Bland-Altman 分析による土壌 pH を考慮した野菜可食部カドミウム濃度予測のための土壌抽出法の検証, 日本土壌肥料学雑誌, **83**(5), 564~573 (2012)
- 17) 農林水産技術会議事務局:農林水産省委託プロジェクト生産・流通・加工工程における体系的な危害要因の特性解明とリスク低減技術の開発, 技術情報集, p.47 (2013)
- 18) 有機性汚泥の緑農地利用委員会:有機性汚泥の緑農地利用, p.106, 博友社, 東京(1991)
- 19) 農林水産省, 独立行政法人 農業環境技術研究所:ダイズのカドミウム吸収抑制のための技術確立マニュアル, 平成 19 年 4 月, p.4 (1991)
- 20) 有機性汚泥の緑農地利用委員会:有機性汚泥の緑農地利用, p.119, 博友社, 東京 (1991)
- 21) 海老原武久, 山田要, 松村尉:汚泥の農用地への利用に関する研究 第Ⅱ報 汚泥連用が土壌・作物に及ぼす影響, 群馬県農業試験場報告, **22**, 49~58 (1982)
- 22) 農林水産技術会議事務局:有機性汚泥の環境保全的評価及び農林業への利用に関する研究, 研究成果, p.231 (1989)
- 23) 伊藤淳次, 田村明長, 山根忠昭:し尿処理汚泥の連用が作物および土壌に及ぼす影響, 島根農試報告, **25**, 83~100 (1991)
- 24) 佐野健人・松本栄一・中村憲治:ホウレンソウのカドミウム吸収能に関する品種間差異のほ場における検証(2), 農用地土壌のカドミウムによる農作物汚染リスク予測技術の開発に関する研究成果集(H17.12), 84~87 (2005)
- 25) 農林水産省ホームページ:コーデックス委員会が策定した国際基準値
<http://www.maff.go.jp/j/syuan/nouan/kome/k_cd/kizyunti/>
- 26) 伊藤純雄, 菊地 直, 加藤直人:ホウレンソウ類のカドミウム吸収に関わる品種間差の生育条件による変動とそれに基づく吸収程度の相対的序列の推定, 中央農研研究報告, **14**, 1~15 (2010)
- 27) 砂川 匡, 袖垣一也, 安田雅晴, 沢野定憲:ホウレンソウのカドミウム吸収特性の解明と含量予測技術の開発, 岐阜県農業技術センター研究報告, **8**, 26~33 (2008)
- 28) 八槇 敦:各種抽出法による土壌のカドミウム含量と野菜のカドミウム吸収との関係, 日本土壌肥料学会講演要旨集, **55**, 283 (2009)
- 29) 農林水産技術会議事務局:農林水産生態系における有害化学物質の総合管理技術の開発, 研究成果,

471, 210~2162009)

- 30) 有機性汚泥の緑農地利用委員会:有機性汚泥の緑農地利用, 124~127, 博友社, 東京 (1991)
- 31) 岡本 保:下水汚泥の農業利用上の留意点, 再生と利用, **34**(127), 74~81 (2010)
- 32) 独立行政法人 農業環境技術研究所:農作物中のカドミウム低減対策技術集, 49 (2011)
< http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/cadmium_control.pdf>

Effect of Continuous Application of Sludge Fertilizer on Cadmium Absorption of the Crop and Accumulation of Cadmium in the Soil (Continued Report)

Toshiaki HIROI¹, Souichi IGARASHI², Masahiro ECHI³, Yoshimi HASHIMOTO¹ and Fumihiko ABE⁴

¹ Food and Agricultural Materials Inspection Center, Fertilizer and Feed Inspection Department

² Food and Agricultural Materials Inspection Center, Fertilizer and Feed Inspection Department
(Now) Fukuoka Regional Center

³ Food and Agricultural Materials Inspection Center, Fertilizer and Feed Inspection Department
(Now) Kobe Regional Center

⁴ Food and Agricultural Materials Inspection Center, Fertilizer and Feed Inspection Department
(Now) Sendai Regional Center

This research is monitoring the change of the cadmium which was dissolved with 0.1 mol/L hydrochloric acid (acid-solubility-Cd) and pH 7.0, 1 mol/L ammonium acetate solution (exchangeable-Cd) from the soil. We have investigated the cadmium absorption by the crop since 2009. Test field is the upland fields derived from Andosol, and the used fertilizer is sludge fertilizer and chemical fertilizer. We cultivated the carrot in summer (2013), and the spinach in winter (2012). Those crops were cultivated in the standard plot (SP) and the sludge-fertilizer-application plot (AP). The SP was used reagents and fused magnesium phosphate. The AP was used the sludge fertilizer of 500 kg/10a (fresh weight). Other ingredients were used reagents and fused magnesium phosphate. The amount of nitrogen, phosphorus and potassium applied to each plot was designed on the basis of fertilization standard showed by Saitama prefecture Web-site. Total cadmium amount in the crop, acid-solubility-Cd and exchangeable-Cd in cultivated soil were measured by an inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). As a result, acid-solubility-Cd and exchangeable-Cd in the AP were indicated significantly highly content for the SP. This result has been obtained from the 2011 winter-crop spinach. Although acid-solubility-Cd and exchangeable-Cd content in the SP soil from 2009 summer to 2013 summer showed significantly decreasing trend in the SP, the Cd content in the AP soil did not show significantly increasing or decreasing trend in the AP by the continuous application of sludge fertilizer.

Key words sludge fertilizer, continuous application, cadmium

(Research Report of Fertilizer, 7, 43~67, 2014)