

## 黒ボク土畑における下水汚泥肥料の施用によるサツマイモー露地野菜体系での持続的な生産に関する研究

勝田雅人・上菌一郎・肥後修一\*<sup>1</sup>・脇門英美\*<sup>2</sup>・森清文\*<sup>2</sup>

### 要 約

多腐植質厚層アロフェン質黒ボク土壌において、鹿児島県の下水汚泥肥料施用ガイドラインに基づき、1 作当たり 500gm<sup>2</sup> あるいは 1kgm<sup>2</sup> 程度の下水汚泥肥料を施用した連用試験を 10 年間実施し、春夏作：サツマイモー秋冬作：露地野菜の輪作体系での収量、植物体や土壌中の重金属量などに及ぼす影響を検討した。下水汚泥肥料の窒素肥効率を考慮し、不足する肥料成分を化学肥料で補給する施肥法により、収量は、化学肥料のみの栽培と同等であった。収穫物可食部中のカドミウム含量については、各作物ともコーデックス委員会が定める国際基準値を大きく下回った。当栽培体系における銅、亜鉛およびカドミウムの収支解析から、下水汚泥肥料による施肥は銅、亜鉛およびカドミウムの投入量に対して作物吸収量が少ないため、これら重金属は土壌に蓄積されたものの、下水汚泥肥料の連続的な施用による土壌に蓄積する含量は公的な基準値に比べて低かった。以上、サツマイモー露地野菜の栽培体系において、下水汚泥肥料を 1 作当たり 500gm<sup>2</sup> 程度の 10 年間連年施用は、窒素肥効率や不足する養分を補給する施肥によって、化学肥料のみの施肥と同等な収量が確保でき、可食部のカドミウム含量が国際基準値を超過することなく、土壌への重金属の蓄積程度も小さいと考えられる。

キーワード：カドミウム、下水汚泥肥料、サツマイモ栽培、連用試験、露地野菜栽培

### 緒 言

近年、化学肥料原料の国際価格が大幅に上昇し、肥料価格が高騰するなか、地域未利用資源の一つである下水汚泥が注目されている。下水汚泥には窒素とリン酸成分が含まれており、化学肥料に比べて安価なことから、化学肥料の代替としての利用が期待されている<sup>7), 16)</sup>。また、「みどりの食料システム法」において、輸入に依存している肥料原料について、窒素、リンを有する下水汚泥資源等の利用拡大により、グリーン化を推進しつつ、肥料の国産化・安定供給を図る必要がある<sup>14)</sup>、とされている。

下水汚泥の有効利用については、国土交通省の 2022 年度調査によると、全国の下水処理場の約半数が肥料利用に取り組んでいるが、年間の汚泥発生量約 230 万トンのうち、5 割が建設資材等に活用されており、実際に肥料化へ利用されているのは 1 割程度である<sup>7)</sup>。鹿児島県内では 18 市町村で公共下水道施設が整備され、排出される汚泥のほとんどが堆肥化され有機質肥料として利用

されている<sup>4)</sup>。そのなかで最も排出量が多い鹿児島市の下水汚泥は、全量が堆肥化され「サツマソイル」の製品名で販売されている。「サツマソイル」の年間取扱量は、約 10,000 トンで、下水汚泥肥料としては市町村別で全国一であり、その大半の約 9,800 トンを肥料業者などの大口需要者に販売し、残りの 200 トンは一般購入者への販売や、イベント会場での試供品の無償配布等に使用されている<sup>22)</sup>。これまで一般利用者に下水汚泥由来肥料の利用が進まなかった理由としては、多量の石灰やカドミウム等の重金属が含まれることから、長期に連用した場合土壌 pH の上昇や、土壌への重金属の蓄積等による作物の生育や収穫物、土壌への悪影響が懸念されていることにある。

そこで、鹿児島県が提示した下水汚泥肥料施用のガイドライン<sup>5)</sup>に基づいた 10 年間の連年施用が作物の収量、植物体や土壌中の重金属量などに及ぼす影響を解明し、下水汚泥肥料の施用法の確立に資する知見を報告する。

### 試験材料および方法

#### 1 耕種概要

試験は鹿児島県農業開発総合センターの大隅支場（鹿屋市串良町細山田）内圃場で行った。土壌は多腐植質厚

(連絡先) 生産環境部

\*1 大島支庁沖永良部事務所

\*2 元農業開発総合センター

層アロフェン質黒ボク土である。表1に耕種概要を示す。春夏作は2010年から2014年に原料用サツマイモ「コガネセンガン」、2015年から2019年までは青果用サツマイモ「べにはるか」を黒マルチで栽培した。秋冬作は2010年から2014年までブロッコリー「グランドーム」、2015年から2019年まではニンジン「向陽2号」を栽培した。

原料用サツマイモおよび青果用サツマイモの栽植密度は3.57株/m<sup>2</sup>（畝間0.8m, 株間0.35m）、ブロッコリーの栽植密度は5.00株/m<sup>2</sup>（畝間0.8m, 株間0.25m）、ニンジンの栽植密度は53.6株/m<sup>2</sup>（畝間1.6m, 6条, 条間0.25m, 株間0.07m）とした。

## 2 供試下水汚泥肥料

供試した下水汚泥肥料は、鹿児島市水道局で製造された「サツマソイル」で、色は淡褐色、形状は粒子が細かく、臭気は汚泥特有の臭いを有する。その化学性は表2のとおりである。10年間の成分含量の平均値は、全窒素が0.039kgkg<sup>-1</sup>、リン酸が0.045kgkg<sup>-1</sup>、加里が0.003kgkg<sup>-1</sup>、石灰が0.105kgkg<sup>-1</sup>、苦土が0.007kgkg<sup>-1</sup>であった。全銅および全亜鉛含量は有機質肥料等推奨基準値、全カドミウム含量は公的規格の含有許容値を下回った。

## 3 試験区の構成と施肥量

各作物ごとの試験区の施肥量を表3～4に示す。試験区は化学肥料区、下水汚泥肥料施用量を春夏作、秋冬作それぞれに500gm<sup>-2</sup>（以下、下水汚泥肥料50:50区とする）、下水汚泥肥料施用量を春夏作500gm<sup>-2</sup>、秋冬作1kgm<sup>-2</sup>（以下、下水汚泥肥料50:100区とする）、豚ふん堆肥区を設定し、1区当たりの面積は24m<sup>2</sup>、3反復で行った。窒素施肥量は、下水汚泥肥料および豚ふん堆肥からの窒素肥効率をそれぞれ60%、50%と勘案して、化学肥料区に対して不足する窒素、リン酸、加里をそれぞれ尿素、過リン酸石灰、塩化加里で補給した。ブロッコリーでは、当作5年目に下水汚泥肥料の窒素肥効率を30%、ニンジンでは、下水汚泥肥料の窒素肥効率を40%とした。青果用サツマイモでは、当作4年目から下水汚泥肥料の施用量を250gm<sup>-2</sup>とした。

表1 耕種概要

年度	春夏作			秋冬作		
	作物名 (品種名)	移植期	収穫期	作物名 (品種名)	播種期 定植期	収穫期
2010 ～2014年度	原料用サツマイモ (コガネセンガン)	4月	9月	ブロッコリー (グランドーム)	10月	2月
	黒マルチ栽培					
2015 ～2019年度	青果用サツマイモ (べにはるか)	4月	9月	ニンジン (向陽2号)	10月	3月
	黒マルチ栽培					

## 4 連用開始前土壌の化学性

試験開始前土壌の化学性を表5に示す。試験ほ場は2005年～2009年度に下水汚泥肥料施用試験を行ったほ場と同一である。各区試験ほ場の土壌塩基含量が均一となるよう、原料用サツマイモ作付け前に石灰、苦土、加里資材を散布し、各塩基の飽和度を調整した。

## 5 収量調査および収穫後の処理

春夏作の原料用および青果用サツマイモは各区20株を収穫し、茎葉およびいもに分けて重量を測定した。いもは原料用では50g以上をいも、50g未満をくずいも、青果用では40g以上をいも、40g未満をくずいもとした。これら一部を通風乾燥機で70℃、48時間以上乾燥して乾物重を得た。また、収穫後の茎葉およびいもは全量圃場外に持ち出した。

秋冬作のブロッコリーは、花蕾および茎葉に分けて重量を測定し、原料用サツマイモと同様に乾燥したものを乾物重とした。収穫後、地上部は全て圃場外に持ち出した。ニンジンも、茎葉部と根身部に分けて重量を測定した。原料用サツマイモと同様に乾燥したものを乾物重とした。収穫後、地上部は全て圃場外に持ち出した。

## 6 分析方法

作物および土壌の化学性の分析は「土壌機能モニタリング調査のための土壌、水質及び作物体分析法」<sup>23)</sup>に基づき以下の方法で分析した。

### (1) 作物体

作物体は、部位ごとに乾燥、粉碎したものを供試し、硫酸一過酸化水素水で分解した。窒素は水蒸気蒸留法で測定し、カルシウムおよびマグネシウムは原子吸光法、カリウムは炎光法によって原子吸光光度計（島津製作所AA-6300）で測定した。リン酸はバナドモリブデン酸比色法によって分光光度計（日立製作所U-2900）で測定した。

重金属類の分析は、硝酸一過塩素酸による湿式分解した分解液により、銅、亜鉛、カドミウムをICP質量分析装置（PerkinElmer社製ELAN DRC-e）で測定した。

これらから得られた乾物当たりの養分含有率に、乾物重を乗じて養分吸収量を求めた。

表2 供試下水汚泥肥料の化学性 (乾物当たり)

	含水率 %	pH (H <sub>2</sub> O)	EC dSm <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Cu	Zn	Cd
				mgkg <sup>-1</sup>		%		mgkg <sup>-1</sup>		μgkg <sup>-1</sup>			
最高	23.6	9.3	5.2	10,451	125	4.7	6.3	0.6	17.9	1.1	123	708	965
最小	12.9	7.7	3.4	3,049	3.7	2.9	2.6	0.2	2.6	0.2	46	56	446
平均	18.3	8.0	3.9	7,613	57	3.9	4.5	0.3	10.5	0.7	81	280	632
CV (%)	14%	4%	13%	20%	63%	11%	28%	36%	37%	36%	36%	70%	27%

注1) 全銅および全亜鉛含量の有機質肥料等推奨基準値 (有機質肥料等品質保全研究会) は全銅が600mgkg<sup>-1</sup>, 全亜鉛が1,800mgkg<sup>-1</sup>, カドミウムの公的規格の含有許容値は5mgkg<sup>-1</sup>

表3 原料用サツマイモおよびブロッコリーの施肥設計

区名	現物施用量 (gm <sup>-2</sup> )				窒素施用量 (gm <sup>-2</sup> )				年間施用量	
	原料用サツマイモ		ブロッコリー		原料用サツマイモ		ブロッコリー			
	汚泥	豚ふん	汚泥	豚ふん	汚泥・豚ふん	化学肥料	汚泥・豚ふん	化学肥料		
化学肥料	—	—	—	—	—	8.0	—	20.0	28.0	—
下水汚泥肥料50:50	500	—	500	—	15.7(9.4)	—	15.7(9.4)	10.6	31.4	(18.8)
下水汚泥肥料50:100	500	—	1,000	—	15.7(9.4)	—	31.3(24.4)	—	47.0	(33.8)
豚ふん堆肥	—	469	—	1,173	16.0(8.0)	—	40.0(20.0)	—	56.0	(28.0)

注1) 下水汚泥肥料および豚ふん堆肥の窒素肥効率はそれぞれ60%, 50%とし, ( ) に化学肥料換算量として記した。ただし, ブロッコリーの5作目の下水汚泥肥料施用区は30%とした

- 下水汚泥肥料および豚ふん堆肥の成分値は10年間の平均値を用いた
- 施肥基準量を原料用サツマイモでは8-12-24(gm<sup>-2</sup>), ブロッコリーでは20-20-20(gm<sup>-2</sup>)に設定し, 不足する窒素は尿素, カリは塩化加里で補給した
- 化学肥料区は原料用サツマイモでは尿素, 過リン酸石灰, 塩化加里を, ブロッコリーではBB48, 過リン酸石灰, 塩化加里を用いて施肥基準量になるよう施用した

表4 青果用サツマイモおよびニンジンの施肥設計

区名	現物施用量 (gm <sup>-2</sup> )				窒素施用量 (gm <sup>-2</sup> )				年間施用量	
	青果用サツマイモ		ニンジン		青果用サツマイモ		ニンジン			
	汚泥	豚ふん	汚泥	豚ふん	汚泥・豚ふん	化学肥料	汚泥・豚ふん	化学肥料		
化学肥料	—	—	—	—	—	5.0	—	20.0	25.0	—
下水汚泥肥料50:50	500	—	500	—	15.7(9.4)	—	15.7(6.3)	13.7	31.4	(13.7)
下水汚泥肥料50:100	500	—	1,000	—	15.7(9.4)	—	31.3(12.5)	7.5	54.5	(21.9)
豚ふん堆肥	—	243	—	1,173	8.3(5.0)	—	40.0(20.0)	—	48.3	(25.0)

注1) 下水汚泥肥料および豚ふん堆肥の窒素肥効率は春夏作ではそれぞれ60%, 50%, 秋冬作ではそれぞれ40%, 50%とし ( ) に化学肥料換算量として記した。青果用サツマイモの4作目から, 下水汚泥肥料区は250kgm<sup>-2</sup>の施用量とした。当施用量による全窒素の平均投入量は7.8gm<sup>-2</sup>, 化学肥料換算量は4.7gm<sup>-2</sup>であった。

- 下水汚泥肥料および豚ふん堆肥の成分値は10年間の平均値を用いた
- 施肥基準量を青果用サツマイモでは5-7.5-15(gm<sup>-2</sup>), ニンジンでは20-20-20(gm<sup>-2</sup>)に設定し, 不足する窒素は尿素, カリは塩化加里
- 化学肥料区は青果用サツマイモでは尿素, 過リン酸石灰, 塩化加里を, ニンジンではBB48, 過リン酸石灰, 塩化加里を用いて施肥基準量になるよう施用した
- 化学肥料区のニンジンでは全窒素20gm<sup>-2</sup>の内, 基肥は16gm<sup>-2</sup>, 追肥4gm<sup>-2</sup>施用した

表5 連用試験開始前の土壌の化学性 (乾土当たり)

区名	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dms <sup>-1</sup> )	無機態 窒素 (mgkg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	CaO MgO K <sub>2</sub> O			塩基飽和度			CaO /MgO	MgO /K <sub>2</sub> O	可給態 リン酸 (mgkg <sup>-1</sup> )
					(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )			Ca Mg K					
								(%)					
化学肥料	5.0	0.05	9.1	36.1	5.7	0.27	0.25	15.7	0.7	0.7	21.0	1.1	41.0
下水汚泥肥料50:50	5.7	0.05	0.8	37.8	13.8	0.80	0.40	36.5	2.1	1.1	17.3	2.0	28.1
下水汚泥肥料50:100	5.9	0.03	8.8	37.7	14.7	1.86	0.24	39.0	4.9	0.6	7.9	7.8	64.1
豚ふん堆肥	5.9	0.04	12.7	39.3	15.7	2.53	0.29	39.9	6.4	0.7	6.2	8.7	110.0

## (2) 土壌

土壌は各作収穫後、各処理区から採取し、未風乾状態で2mmの篩を通したものを供試した。

土壌 pH (H<sub>2</sub>O)、EC、無機態窒素は未風乾土壌、陽イオン交換容量 (以下 CEC と記す)、交換性塩基類、可給態リン酸は風乾土を用いた。土壌 pH は、土壌 1 に対し、蒸留水 2.5 を加え、十分に振とう後、ガラス電極法により測定した。EC は土壌 1 に対し、蒸留水 5 を加え、十分に振とう後、電気伝導度計により測定した。可給態リン酸はトルオグ法で抽出し、分光光度計で測定した。

CEC および交換性カルシウム、マグネシウム、カリウムは、Schollenberger 法で抽出し、CEC は蒸留法で、交換性カルシウムおよびマグネシウムは原子吸光法、交換性カリウムは炎光法で定量した。重金属類の分析は、硝酸一過塩素酸による湿式分解した分解液で、全銅、全亜鉛、全カドミウムを ICP 質量分析装置により測定した。

また、0.1M 塩酸抽出法により抽出した可溶性の銅、亜鉛およびカドミウムを ICP 質量分析装置により測定した。

## (3) 下水汚泥肥料

pH (H<sub>2</sub>O) は、新鮮物 1 に対し蒸留水 10 を加え振とう後、ガラス電極法により測定した。EC は新鮮物 1 に対し蒸留水 10 を加え、十分に振とう後、電気伝導度計により測定した。全窒素は、ケルダール法により硫酸一過酸化水素水で分解し、水蒸気蒸留法により定量した。硫酸分解した分解液を用いてカルシウム、マグネシウムは原子吸光度計により測定し、カリウムは炎光法により測定した。リン酸はバナドモリブデン酸比色法で測定した。重金属類の分析は、硝酸一過塩素酸による湿式分解した分解液で、銅、亜鉛、カドミウムを ICP 質量分析装置により測定した。

## 結果および考察

### 1 収量

下水汚泥肥料区のサツマイモ上いも重、ブロッコリー花蕾重およびニンジン根身重の指数は化学肥料区を 100 とした指数で示した。

#### (1) 原料用サツマイモ

図 1 に原料用サツマイモ上いも重指数の推移を示す。下水汚泥肥料区の上いも重は化学肥料区と同等以上で推移した。下水汚泥肥料を 500g<sup>m</sup> 施用し不足するカリ成分を補給する施肥法では、化学肥料区と同等の収量を得ることが可能であった。

#### (2) ブロッコリー

図 2 にブロッコリー花蕾重指数の推移を示す。下水汚

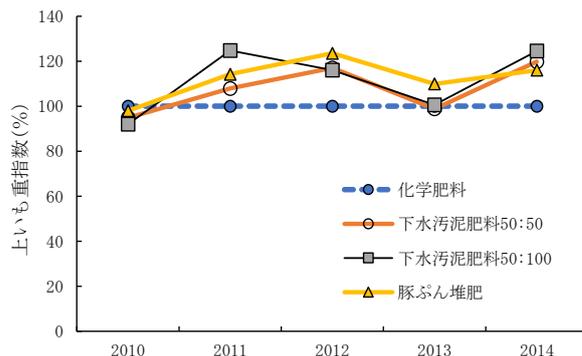


図 1 原料用サツマイモの上いも重指数

泥肥料 50:50 区の花蕾重は化学肥料と同程度であった。

一方、下水汚泥肥料 50:100 区の花蕾重は、試験 3 年目および 4 年目において、化学肥料区に比べて有意に少なかった。これは、下水汚泥肥料の窒素肥効を過大評価したことによる窒素供給量不足と考え、試験 5 年目に、下水汚泥肥料の窒素肥効を 50% から 30% に変更して検討したところ、化学肥料区に対する減収程度は 1 割程度に抑えられ、有意な収量差はなくなった。

以上、ブロッコリーにおいても下水汚泥肥料を 500g<sup>m</sup> 施用し、化学肥料区と比べて不足する成分量を尿素および過リン酸石灰、塩化加里等の化学肥料で補給する施肥法は、化学肥料区と同程度の収量確保が可能と考えられる。

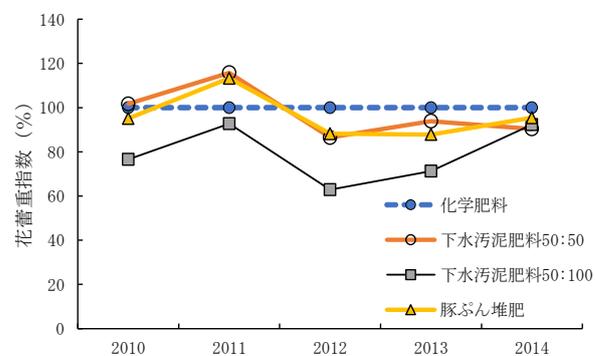


図 2 ブロッコリーの花蕾重指数

### (3) 青果用サツマイモ

図 3 に青果用サツマイモ上いも重指数の推移を示す。下水汚泥肥料区は、化学肥料区に比べて茎葉が繁茂し上いも収量が少ない、いわゆる“つるぼけ”傾向がみられ、特に 3 年目で化学肥料区より減収した。このときの茎葉重では、下水汚泥肥料 50:50 区は化学肥料区の 1.05 倍、下水汚泥肥料 50:100 区は 1.2 倍であり、いもへの養分の転流量が少なく、減収したものと考えられた。そこで、試験 4 年目から下水汚泥肥料を半量の 250g<sup>m</sup> 施用に変更した結果、化学肥料区と同等の収量に回復した。このことから、青果用サツマイモのように、窒素必要量が少ない品種では、下水汚泥肥料の 500g<sup>m</sup> 施用では窒素供

給量が多いため、窒素肥効率を考慮して、化学肥料区とほぼ同等量になる下水汚泥肥料の施用量を  $250\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  削減し、不足するカリ成分を塩化加里で補給する施肥法が適すると考える。また、秋冬作での  $1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  の連用は  $500\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  施用に比べて、春夏作青果用サツマイモの茎葉が過繁茂気味となることから、秋冬作での下水汚泥肥料の施用量は  $500\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  が適当と考えられた。

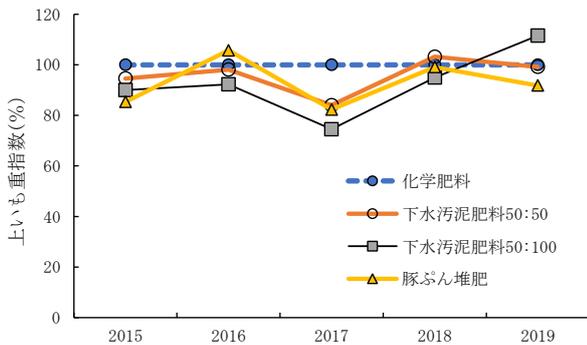


図3 青果用サツマイモの上いも重指数

(4) ニンジン

図4にニンジン根身重指数の推移を示す。化学肥料区の収量水準が低かったため、下水汚泥肥料区の収量は、化学肥料区を上回った。特に、2015年度の化学肥料区が  $2.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  程度と低収量であった要因としては、化学肥料区は基肥一発施肥としたこと、2年目以降も基肥一発から追肥体系に変更したものの十分な追肥効果が得られず、減収したものと考えられた。ニンジンにおいて、下水汚泥肥料は連用6年目から10年目の施用であるが化学肥料に対する収量指数の上昇傾向が認められず、当肥料の長期的な連用が収量に及ぼす効果は期待できないと考えられた。

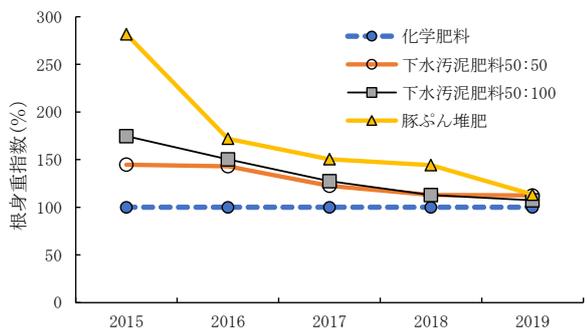


図4 ニンジンの根身重指数

2 土壌化学性の推移

(1) 土壌 pH (H<sub>2</sub>O) の推移

図5に土壌 pH (H<sub>2</sub>O) の推移を示す。春夏作後は低下し、秋冬作後は上昇する傾向を繰り返しながら推移し、連用10年20作後の土壌 pH (H<sub>2</sub>O) は化学肥料区が 6.1、下水汚泥肥料区が 6.3 ~ 6.4 であった。本試験で供試し

た下水汚泥肥料は、石灰系凝集剤を使用した汚泥と高分子系凝集剤を使用した汚泥の混合品であることから、石灰系単独の下水汚泥のような、下水汚泥肥料区の大幅な土壌 pH (H<sub>2</sub>O) の上昇<sup>3)</sup> はみられなかった。また、石灰系汚泥を連用した場合、その施用量を問わず、一定の施用回数を経過すると、それ以上の pH には上昇しにくくなる傾向がある<sup>19)</sup> とされているが、今回の試験では化学肥料区も同様な傾向がみられた。

下水汚泥肥料区 50:100 区の pH は、秋冬作後において 6.5 を超えることが複数回認められた。次作サツマイモの本県土壌診断基準値は 5.5 ~ 6.0 であり、 $1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  の連年施用では、診断基準値を上回った。サツマイモ栽培では、高 pH による立枯病の発生も懸念されることから、秋冬作での  $1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  の連年施用は、適当ではないと考えられた。

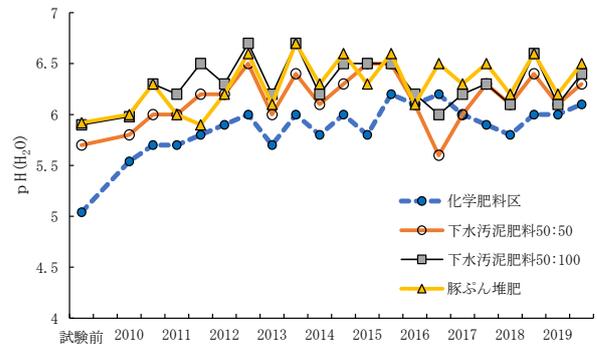


図5 土壌 pH (H<sub>2</sub>O) の推移

(2) 可給態リン酸含量の推移

図6に可給態リン酸含量の推移を示す。下水汚泥肥料区の可給態リン酸含量は、横ばいかやや増加傾向で推移したが、化学肥料区との差は小さかった。化学肥料区は概ね横ばいで推移した。下水汚泥肥料区は連用によるリン酸の蓄積は認められたが、その程度は豚ふん堆肥区より少なく、土壌診断基準値の範囲内であった。なお、豚ふん堆肥区は施用量の多い秋冬作後の値が特に大きく増加し、他の区に比べて増加程度が著しかった。

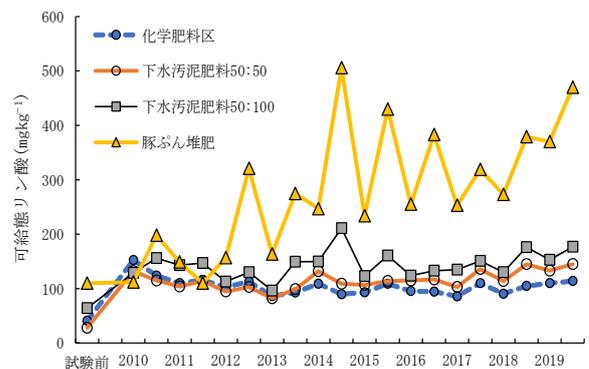


図6 可給態リン酸含量の推移

(3)陽イオン交換容量 (CEC) の推移

図7にCECの推移を示す。試験開始後4年目までは値が大きく変化したが、5年目以降は変動幅は小さくなった。下水汚泥肥料区のCECは化学肥料区に比べ高く推移したが、その差は小さかった。連用10年20作後のCECは試験開始前と大差なかった。有機物連用に関する試験での多くは、連用の効果としてCECの増大が報告されている<sup>2), 8), 11)</sup>。しかし、本試験ではCECの増大を認めなかった。下水汚泥肥料の連用では家畜ふん堆肥に比べ、保肥力を高める効果は期待できないと考えられる。

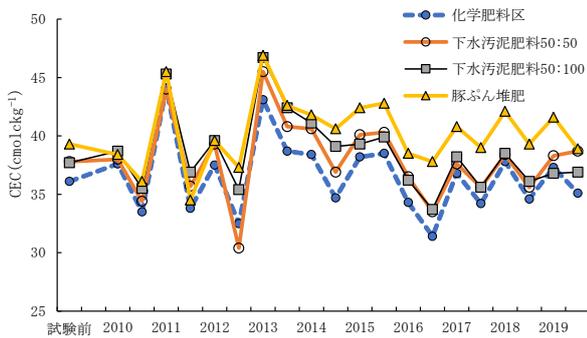


図7 CECの推移

(4)交換性カルシウム含量の推移

図8に交換性カルシウム含量の推移を示す。下水汚泥肥料区および豚ふん堆肥区の交換性カルシウム含量は、化学肥料区に比べて多い傾向で推移した。同様に化学肥料区も増加傾向で推移しており、下水汚泥肥料施用によるカルシウム含量の顕著な増加はみられなかった。今回供試した下水汚泥肥料は、石灰系凝集剤を使用した汚泥と高分子系凝集剤を使用した汚泥の混合品であり、供試下水汚泥肥料のカルシウム含量は2.6~17.9% (乾物当たり)で、両凝集剤の配合割合は製造の都度異なっていると考えられる。過去の下水汚泥肥料のカルシウム含量(19~26%)<sup>3), 5)</sup>と比べると低含量であることから、今回の試験ではカルシウム含量の顕著な増加はみられなかった。



図8 交換性カルシウムの推移

下水汚泥肥料の施用量を制限する要因としては、カドミウム等の重金属の他に、凝集助剤由来の石灰による土壌pH上昇とカルシウムの過剰蓄積とされてきた<sup>5)</sup>。近年、石灰系下水汚泥肥料から高分子系下水汚泥肥料に移行しつつあることから<sup>21)</sup>、カルシウム施用量の影響は小さくなると考えられる<sup>9)</sup>。

3 可食部中のカドミウム含量

食品の汚染物質に対する基準値は、消費者の健康が保護されることを前提として、合理的な範囲でできるだけ低く設定するとの考え方が、国際的に主流である。この考え方のもと、コーデックス委員会は、食品中のカドミウムの国際基準値を設定している。コーデックス委員会が定めている根菜類およびアブラナ科野菜類における食品中のカドミウムの国際基準値は、根菜類で0.1mgkg<sup>-1</sup>、アブラナ科野菜類(ブロッコリー:花蕾)で0.05mgkg<sup>-1</sup>である<sup>17)</sup>(「食品及び飼料中の汚染物質及び毒素に関する一般規格」(General Standard for Contaminants and Toxins in Foods and Feed, CXS 193-1995)の要約)。

図9~12に各作物の可食部中カドミウム含有量の平均値を示す。各作物の可食部中のカドミウム含有量(新鮮物当たり)はコーデックス委員会が策定した国際基準値に比べて大幅に低かった。このことからカドミウム含有量から判断すると、下水汚泥肥料を年間1.0kgm<sup>2</sup>あるいは1.5kgm<sup>2</sup>連用した栽培は、安全な可食部の生産が可能であると考えられた。

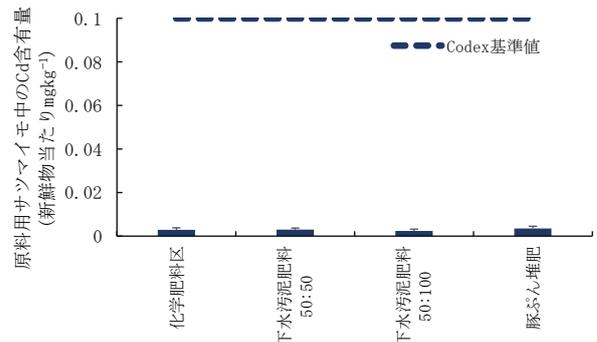


図9 原料用サツマイモ中のカドミウム含量

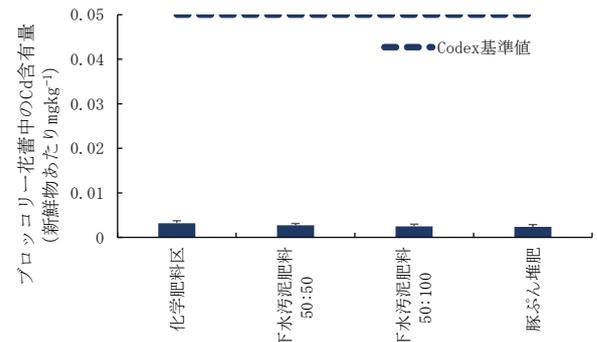


図10 ブロッコリー花蕾中のカドミウム含量

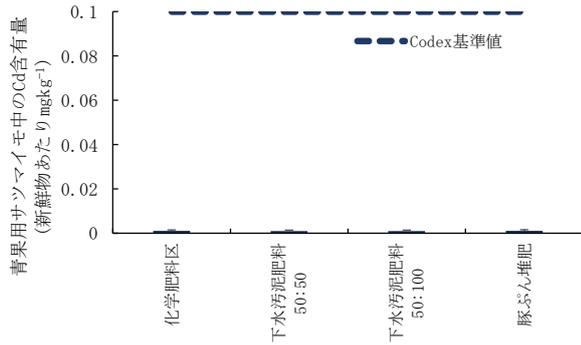


図 11 青果用サツマイモ中のカドミウム含量

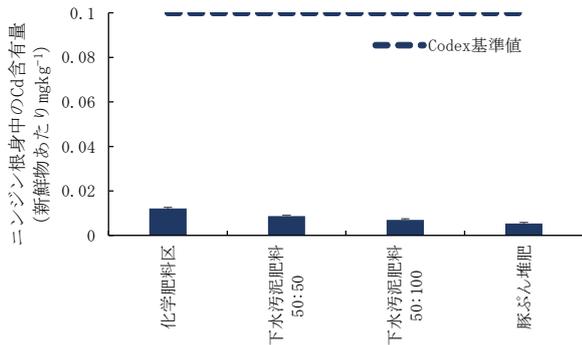


図 12 ニンジン根身中のカドミウム含量

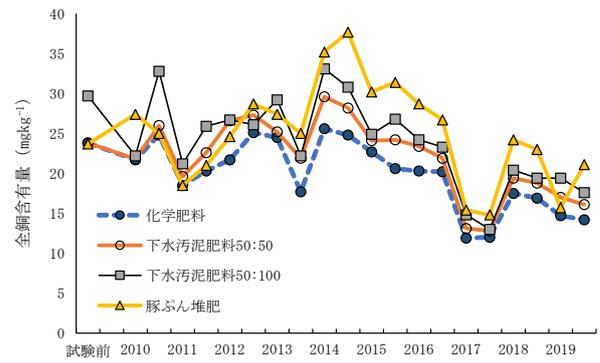


図 13 土壤中全銅含有量の推移

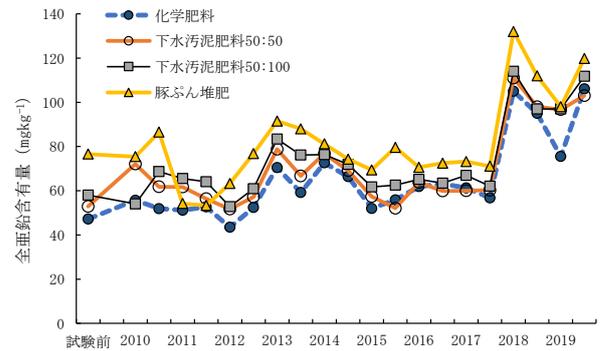


図 14 土壤中全亜鉛含有量の推移

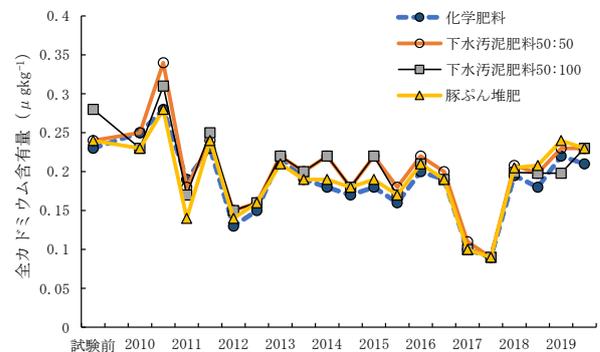


図 15 土壤中全カドミウム含有量の推移

#### 4 土壤中の重金属量の推移

図 13～15 に跡地土壌における全銅，全亜鉛および全カドミウム含量の推移を示す．全銅含量は，各区とも試験開始 5 年目を最大としてその後減少した．10 年 20 作後では，試験開始時より低くなる結果となった．全亜鉛含量は，試験開始 4 年目を最大としてその後一定のレベルで推移した．試験 9 年目において，土壌管理基準値の  $120\text{mgkg}^{-1}$  程度まで急上昇した．しかし，化学肥料区も同様に急上昇しており，この理由は不明である．全カドミウム含量は試験開始後に上昇したが，その後は増減を繰り返しながら一定のレベルで推移した．10 年 20 作後では，試験開始時と同等であった．

これまでの汚泥連用試験において，土壌に蓄積する重金属類は，連用を開始した当初の濃度上昇に比べて，数年目以降の上昇傾向が頭打ちになり，やがて一定レベルに収れんする，いわゆる「プラトー現象」がみられることが報告されている<sup>18)</sup>．しかし，今回の試験では化学肥料区と比べて連用に伴う変化の方向は判然としなかった．

図 16～18 に 0.1M 塩酸可溶性重金属含量の推移を示す．銅，亜鉛およびカドミウムとも全含量の推移とは異なる推移を示し，全含量と可溶性含量との関係や各元素ごとの推移の関係は判然としなかった．黒ボク土壌など腐植含量の高い土壌や有機物施用等により腐植含量が高

まった土壌では，重金属類が土壌から溶出されにくくなるとの報告<sup>13)</sup>や，0.1M 塩酸抽出時において，汚泥施用区では連用に伴って石灰が増加し，これが塩酸と反応して抽出液の pH を上昇させ，各重金属の抽出性を低下させるとの報告<sup>20)</sup>がある．しかし，今回の試験では，全含量と可溶性含量との関係がみられないことや，可溶性含量の年次間での変動が大きい理由は判然としなかった．

#### 5 重金属類の収支と土壌中の重金属含量の将来予測

サツマイモ，露地野菜栽培体系における銅，亜鉛およびカドミウムの収支を表 6～8 に示す．銅の収支については，投入量増加に伴い吸収量も増加する傾向であった．

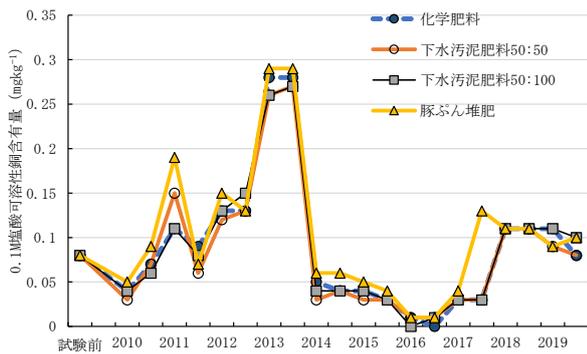


図16 0.1M 塩酸可溶性銅含有量の推移

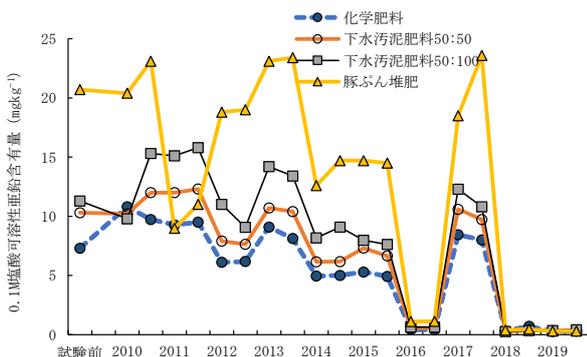


図17 0.1M 塩酸可溶性亜鉛含有量の推移

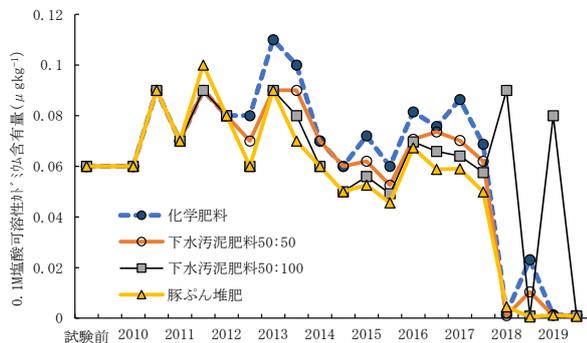


図18 0.1M 塩酸可溶性カドミウム含有量の推移

豚ふん堆肥区では下水汚泥肥料 50:100 区の 2.5 倍を超える投入量であるが、吸収量に大差なかった。亜鉛の収支については、亜鉛の投入量は下水汚泥肥料中の濃度の影響により銅の 2 倍以上で、吸収量も銅の 2 倍程度であった。亜鉛の吸収量では、投入量の影響は小さく各区とも同等の吸収量であった。カドミウムの収支では、下水汚泥肥料 50:100 区の投入量が最も多かったが、吸収量は最も少なく、化学肥料区が他の区より吸収量が多かった。下水汚泥肥料の施用と作物の重金属吸収との関係では、土壌中の重金属濃度よりもむしろ土壌 pH の影響が大きいとされ<sup>1)</sup>、土壌 pH と作物によるカドミウム、銅の吸収とは密接に関連するとして報告がある<sup>10)</sup>。今回の試験では銅の吸収量と同様の傾向はみられなかったが、化学肥料区のカドミウムの吸収量が多い理由として

は、化学肥料の原料であるリン鉱石やカリ鉱石にもカドミウムが含まれており、他の区に比べて化学肥料区の土壌 pH が低く推移していたことの影響も考えられた。

当栽培体系の下水汚泥肥料施用による銅の 1 年間に上昇する含量は、下水汚泥肥料 50:50 区が 0.53 (mgkg<sup>-1</sup> 乾土)、下水汚泥肥料 50:100 区が 0.59 (mgkg<sup>-1</sup> 乾土) と試算された。下水汚泥肥料を連続施用した場合、0.1M 塩酸抽出法による可溶性銅含量が「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」<sup>6)</sup> で定められた環境基準値の 125mgkg<sup>-1</sup> (乾土、ただし水田土壌対策) を超過する施用年は、最も施用量が多い下水汚泥肥料 50:100 区が 170 年と試算された。

当栽培体系の下水汚泥肥料施用による亜鉛の 1 年間に上昇する含量は、下水汚泥肥料 50:50 区が 1.33 (mgkg<sup>-1</sup> 乾土)、下水汚泥肥料 50:100 区が 2.24 (mgkg<sup>-1</sup> 乾土) と試算された。下水汚泥肥料を連続施用した場合、土壌管理基準値である 120mg kg<sup>-1</sup> を超過する施用年は、下水汚泥肥料 50:50 区が 55 年、下水汚泥肥料 50:100 区が 33 年と試算された。当栽培体系の下水汚泥肥料施用によるカドミウムの 1 年間に上昇する含量は、下水汚泥肥料 50:50 区が 3.04 (µgkg<sup>-1</sup> 乾土)、下水汚泥肥料 50:100 区が 5.01 (µgkg<sup>-1</sup> 乾土) と試算された。

表6 銅の収支

区名	投入量 (mgm <sup>-2</sup> )	吸収量 (mgm <sup>-2</sup> )	土壌蓄積量 <sup>1)</sup> (mgm <sup>-2</sup> )	年間上昇 含量 <sup>2)</sup> (mgkg <sup>-1</sup> )	土壌環境 基準値 <sup>3)</sup> (mgkg <sup>-1</sup> )	基準値を超過 する施用年数 <sup>4)</sup> (年)
化学肥料	—	100	—	—	125	—
下水汚泥肥料50:50	618	124	494	0.35	125	287
下水汚泥肥料50:100	964	134	830	0.59	125	171
豚ふん堆肥	2,615	135	2,480	1.77	125	57

注1) 土壌蓄積量=投入量-吸収量  
 2) 年間上昇含量: 土壌蓄積量/140kgm<sup>-2</sup> (作土20cm, 仮比重0.7で試算)/10  
 3) 土壌基準値: 0.1規定塩酸抽出による  
 4) 基準値を超過する施用年数: (土壌環境基準値-試験開始前の化学肥料区の含量 (23.8mgkg<sup>-1</sup>))/年間上昇含量

表7 亜鉛の収支

区名	投入量 (mgm <sup>-2</sup> )	吸収量 (mgm <sup>-2</sup> )	土壌蓄積量 <sup>1)</sup> (mgm <sup>-2</sup> )	年間上昇 含量 <sup>2)</sup> (mgkg <sup>-1</sup> )	土壌管理 基準値 <sup>3)</sup> (mgkg <sup>-1</sup> )	基準値を超過 する施用年数 <sup>4)</sup> (年)
化学肥料	—	264	—	—	120	—
下水汚泥肥料50:50	2,127	265	1,863	1.33	120	55
下水汚泥肥料50:100	3,388	256	3,132	2.24	120	33
豚ふん堆肥	5,233	294	4,939	3.53	120	21

注1) 土壌蓄積量=投入量-吸収量  
 2) 年間上昇含量: 土壌蓄積量/140kgm<sup>-2</sup> (作土20cm, 仮比重0.7で試算)/10  
 3) 土壌管理基準値: 強酸分解法による  
 4) 基準値を超過する施用年数: (土壌管理基準値-試験開始前の化学肥料区の含量 (47.2mgkg<sup>-1</sup>))/年間上昇含量

表8 カドミウムの収支

区名	投入量 (mgm <sup>-2</sup> )	吸収量 (mgm <sup>-2</sup> )	土壌蓄積量 <sup>1)</sup> (mgm <sup>-2</sup> )	年間上昇 含量 <sup>2)</sup> (mgkg <sup>-1</sup> )
化学肥料	—	0.88	—	—
下水汚泥肥料50:50	4.95	0.69	4.26	0.03
下水汚泥肥料50:100	7.58	0.57	7.02	0.05
豚ふん堆肥	5.33	0.58	4.75	0.03

注1) 土壌蓄積量=投入量-吸収量  
 2) 年間上昇含量: 土壌蓄積量/140kgm<sup>-2</sup> (作土20cm, 仮比重0.7で試算)/10

以上、当栽培体系における銅、亜鉛およびカドミウムの収支解析から、下水汚泥肥料による施肥は、銅、亜鉛およびカドミウムの投入量に対して作物吸収量が少ないため、これら重金属は土壌に蓄積されると考えられるが、その量は土壌環境基準値等と比較しても非常に小さいことが明らかになった。

## 6 下水汚泥資源の肥料利用の拡大に向けて

最近の国際情勢に伴う輸入肥料原料の価格高騰を受け、2022年に策定された「食料安全保障強化政策大綱」では、「2030年までに堆肥・下水道汚泥資源の使用量を倍増し、肥料の使用量（りんベース）に占める国内資源の利用割合を40%へ」とする方針<sup>12)</sup>が示された。

また、国としての大きな動きの一つが2023年10月にできた新しい肥料規格の「菌体りん酸肥料」の設定<sup>15)</sup>である。これにより下水汚泥由来の肥料であっても、肥料成分が保証されるとともに、重金属の含有量も一定の基準値未満であることが担保されることになり、肥料製造会社等が肥料の原料として利用することや、農業者も安心して下水汚泥由来の肥料を使用できると思われる。

## ま と め

サツマイモ露地野菜の輪作体系で下水汚泥肥料の当県ガイドラインに基づく施用試験を10年間実施し、作物の収量、植物体や土壌中の重金属量などに及ぼす影響を検討した。その結果は下記のとおりである。

- 1 下水汚泥肥料の窒素肥効を考慮し、不足する肥料成分を化学肥料で補給する施肥法により、化学肥料のみの栽培と同等の収量が得られた。
- 2 収穫物可食部中のカドミウム含量は、各作物ともコーデックス委員会が定める国際基準値を大きく下回った。カドミウム含有量から判断すると、下水汚泥肥料を主体とした連用栽培は、安全な農産物生産が可能であると考えられた。
- 3 当栽培体系における銅、亜鉛およびカドミウムの収支解析から、下水汚泥肥料による施肥は銅、亜鉛およびカドミウムの投入量に対して作物吸収量が少ないため、これら重金属は土壌に蓄積されるが、その量は非常に小さいことが明らかになった。
- 4 下水汚泥肥料を主体とした施肥体系での連用栽培は、1作当たりの施用量の上限を500g<sup>m</sup><sup>2</sup>程度とすることで、10年程度の連用では作物の収量、植物体や土壌中の重金属量等に問題がないと考えられた。

## 謝 辞

本研究の試験は、鹿児島市水道局の依頼を受けて、鹿児島県農業開発総合センター大隅支場において実施したもので、本研究の実施に際して、下水汚泥肥料の提供等、ご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。また、栽培管理等においてご協力いただいた農業開発総合センター大隅支場環境研究室の技術補佐員および会計年度任用職員の方々に深く感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 安倍世紀・林勝實・清末哲男・宮崎芳郎・吉浦昭二 1986. 汚泥類の連用が畑土壌及び作物に及ぼす影響, 第1報作物の生育と土壌の理化学性の変化, 大分県農業技術センター研究報告 16:27-42
- 2) 葉上恒寿・高橋良学・佐藤喬・中野亜弓・佐藤千秋・小田島ルミ子・新毛晴夫・小野剛志・多田勝郎 2009. 非アロフェン質黒ボク土における有機物連用効果, 岩手県農業研究センター研究報告 9:1-19
- 3) 市来征勝・野々山芳夫・伊藤秀文 1989. 下水汚泥コンポストの畑作物に対する施用効果と土壌への影響, 鹿児島県農試研報 17:71-92
- 4) 鹿児島県土木部都市計画課生活排水対策室 2019. かがしま生活排水処理構想 2019 1-26, 資料編 1-19
- 5) 鹿児島県農政部 1994. 下水汚泥堆肥の施用のガイドライン 1-48
- 6) 環境省 1984. 農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について(昭和59年11月8日公布 環水土149号)
- 7) 国土交通省 下水汚泥資源の肥料利用 [https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000555.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000555.html) (確認日 2024年12月12日)
- 8) 香西清弘・平木孝典 1997. 牛ふん堆肥の連用が土壌の理化学性に及ぼす影響, 香川県農業試験場研究報告 49:61-67
- 9) 松本英一・平山 力 1989. 下水汚泥の農業利用に関する研究, 第3報下水汚泥の畑施用が土壌の化学性に及ぼす影響, 茨城県農業試験場研究報告 29:139-147
- 10) 三好 洋 1974. 第3編土壌汚染, 坂井弘ら編, 農業公害ハンドブック, 地人書館, 東京.126-134
- 11) 森清文・西裕之・古江広治・脇門英美・松元順・渋川洋・相本涼子・小玉泰生・井上健一・永田茂徳・山下純一・森田重則・後藤忍 2012. 家畜ふん堆肥の連用が普通畑作物収量と養分収支並びに土壌化学

- 性に及ぼす影響, 鹿児島県農総セ研報 6:39-48
- 12) 内閣官房 政策会議 2022. 食料安定供給・農林水産業基盤強化本部, 食料安全保障強化政策大綱  
[https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/pdf/20221227anpokyoka\\_honbun.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/pdf/20221227anpokyoka_honbun.pdf) (確認日 2024年12月16日)
- 13) 内藤健二・佐藤賢一 2008. 家畜ふんたい肥施用によるカドミウム, 亜鉛の作物への影響とその要因, 埼玉県農林総合研究センター研究報告 7:6-13
- 14) 農林水産省 2022. みどりの食料システム法  
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/houritsu.html> (確認日 2024年12月16日)
- 15) 農林水産省 2023. 肥料成分を保証可能な新たな公定規格(菌体りん酸肥料)の創設について  
[https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k\\_hiryokintairinsan.html](https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_hiryokintairinsan.html) (確認日 2024年12月17日)
- 16) 農林水産省 2024<sup>a</sup>. 肥料をめぐる情勢  
[https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s\\_hiryo/attach/pdf/index-133.pdf](https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/attach/pdf/index-133.pdf) (確認日 2024年12月12日)
- 17) 農林水産省 2024<sup>b</sup>. 食品中のカドミウムに関する国際基準値  
[https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k\\_cd/04\\_kijyun/01\\_int.html](https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/04_kijyun/01_int.html) (確認日 2024年12月11日)
- 18) 岡本保 2000. 石灰系下水汚泥の長期連用により土壌に蓄積する重金属の存在形態と挙動, 土肥誌 71:231-242
- 19) 岡本保 2004. 石灰系下水汚泥の農業利用に関する研究 汚泥連用ほ場における土壌 pH と重金属類の存在形態および挙動, 神奈川県農業総合研究所研究報告 14:1-74
- 20) 真行寺孝・日暮規夫・安藤光一・松本直治 1986. 下水汚泥の多量施用が土壌および作物に及ぼす影響, 千葉県農業試験場研究報告 27:61-70
- 21) 山添文雄 1979. 3. 下水汚泥の肥料化, 日本土壌肥料学会編, 下水汚泥ーリサイクルのためにー, 博友社, 東京.45-66
- 22) 吉鶴麗璽 2020. 鹿児島市の汚泥発酵肥料への取り組み, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集.713-714
- 23) 財団法人 日本土壌協会 2001. 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法, 東京

## Application of Sewage Sludge Fertilizer in Andosol Soil Field for Sustainable Production of Sweet Potatoes - an Open Field Vegetable System

Masato Katsuda, Ichiro Uezono, Syuuichi Higo, Hidemi Wakikado and Kiyofumi Mori

### Summary

A 10-year continuous application test was conducted on a thick-layered humic allophyllous andosol soil with the application of about 500 gm<sup>-2</sup> or 1 kg m<sup>-2</sup> of sewage sludge fertilizer per crop, based on Kagoshima Prefecture's guidelines for the application of sewage sludge fertilizer. The effects of sewage sludge fertilizer on yield and heavy metals content in plants and soil were investigated. The yield was equivalent to that of a chemical fertilizer-only crop, when the nitrogen fertilizer efficiency of sewage sludge was taken into account and the insufficient fertilizer components were supplemented with chemical fertilizers. The cadmium content in edible parts of the harvest was well below the international standard set by the Codex Alimentarius Commission for each crop. The balance analysis of copper, zinc, and cadmium in this cropping system showed that these heavy metals accumulated in the soil due to low crop uptake of copper, zinc, and cadmium relative to the input of sewage sludge fertilizer, but the content accumulated in the soil due to continuous application of sewage sludge fertilizer was lower than the official standard. However, the content of these heavy metals accumulated in the soil was lower than the official standard. In the sweet potato-vegetable cultivation system, the continuous application of sewage sludge fertilizer at a rate of 500 gm<sup>-2</sup> per crop for 10 years can ensure a yield equivalent to that of chemical fertilizer alone through nitrogen fertilizer efficiency and fertilizer application that replenishes deficient nutrients, and the cadmium content of edible parts does not exceed the international standard, and the soil is not affected by the application of chemical fertilizers. The cadmium content in edible parts does not exceed the international standard, and the accumulation of heavy metals in the soil is considered to be small.

Keywords : cadmium, continuous use test, open field vegetable cultivation  
sewage sludge fertilizer, sweet potato cultivation