

## 7 汚泥肥料施用土壌におけるカドミウムの溶出形態の推移

藤田 卓<sup>1</sup>, 井上智江<sup>1</sup>, 松崎 学<sup>1</sup>

キーワード 汚泥肥料, 土壌, カドミウム, インキュベーション, ICP/MS

### 1. はじめに

FAO/WHO 合同食品添加物専門家会議(JECFA)が 1972 年にカドミウムの毒性を初めて評価したことを受け、コーデックス委員会では 1988 年から JECFA のリスク評価の結果に基づき、食品中のカドミウムの国際基準を検討してきた。その結果、2006 年の第 29 回コーデックス委員会総会までに精米、小麦など 10 食品群について国際基準値が最終採択された。一方、日本の国内基準については、2003 年の厚生労働省からの依頼により、食品安全委員会が食品健康影響評価を実施しているところであり、この評価結果に基づいて厚生労働省が国内基準値を見直す予定である。また、この様な状況を踏まえて、農林水産省では 2003 年から食品のカドミウム対策検討チームを設置し、農産物のカドミウム吸収抑制技術の開発等の様々な対策を実施している。

土壌中のカドミウムは天然に存在するものの他、日本ではその多くが鉱山・製錬所の生産活動に伴って発生する排水、煤煙等より蓄積されてきた。現在、食品衛生法に基づく米のカドミウム基準値は、「玄米として 1.0 mg/kg 未満」であるが、これに適合しない米の流通は禁止されるとともに、農用地土壌汚染防止法に基づき客土等の対策が実施されている。また、0.4 mg/kg 以上 1.0 mg/kg 未満含有する米については、別途流通防止対策がとられるとともに、登熟期に水田の水を張り続けたり、石灰などにより土壌を中性にする等のカドミウム吸収抑制対策<sup>1)</sup>が進められている。

肥料中のカドミウムは肥料取締法に基づく公定規格により、複合肥料、汚泥肥料等で含有を許される最大量が定められているが、過度の施用や長年の連用により土壌に蓄積する可能性がある<sup>2~4)</sup>。

これまでに土壌由来のカドミウムの形態や作物の吸収低減に関する調査研究<sup>1, 5~11)</sup>は多く行われているが、肥料由来のカドミウムについて<sup>12)</sup>はあまり行われていない。肥料由来のカドミウムは、土壌中では植物必須要素であるマグネシウムやマンガンと同様に水溶性の形態で容易に作物に吸収され、く溶性や有機結合態の形態は、微生物作用や pH 変化等によって水溶化した後、作物に吸収されると考えられる。そこで、独立行政法人農林水産消費安全技術センター(FAMIC)では、作物に吸収される肥料由来のカドミウムの吸収低減のための基礎調査として、平成 18 年度には収集した肥料中に含有されるカドミウムを形態別に分析した。その結果、無機質肥料、汚泥肥料とも水溶性カドミウムはカドミウム全量に対して少量であったが、く溶性カドミウムや有機結合態カドミウムの割合は比較的高い傾向にあった。平成 19, 20 年度は土壌に施用された汚泥肥料由来のカドミウムの溶出形態の推移を約 1 年間のインキュベーション試験及び誘導結合プラズマ質量分析装置(以下、ICP/MS という)による定量により調査したので、その結果を報告する。

<sup>1</sup> (独) 農林水産消費安全技術センター神戸センター

## 2. 材料及び方法

### 1) 供試肥料及び土壌

#### (1) 供試肥料

し尿汚泥肥料 (カドミウム全量 3.98 mg/kg 現物)

焼成汚泥肥料 (カドミウム全量 2.94 mg/kg 現物)

試験には、試料を風乾し、目開き 0.5 mm のふるいを通したものをを用いた。

#### (2) 供試土壌

供試土壌の理化学性は表 1 のとおり。試験には、目開き 2 mm のふるいを通したものをを用いた。

表1 供試土壌の理化学性

土壌の種類(母岩)	黒ボク土(火山灰)
土性	L
水分 (%)	22.87
最大容水量 (mL)	106
pH(土:H <sub>2</sub> O=1:5) <sup>13)</sup>	5.7
電気伝導度 (mS/cm)	0.04
有機物(乾物当たり) (%)	22.87
カドミウム全量 (mg/kg乾土)	0.43

### 2) 使用した機器, 器具及び試薬等

#### (1) 機器

インキュベーター(三洋電機製 MIR-252), 超純水装置(ADVANTEC 製 CPW-100), 遠心分離機(日立工機製 himac SCT 5BA), ヒートブロック型加熱分解装置(ジーエルサイエンス製 Digi PREP Jr.), 恒温回転式振とう機(増田理化工業製 MK-41), ICP/MS(Hewlett-Packard 製 HP4500(0~84 日目試料), Varian,Inc.製 820MS (133~351 日目試料)), pH メータ(堀場製作所製 F-54)

#### (2) 器具

PP 製全量フラスコ 100 mL, PP 製ロート, デジチューブ及びデジチューブ用使い捨て時計皿(ジーエルサイエンス製), キャップ式 PP 製遠沈管 50 mL(アズワン製)(器具は 1 mol/L 程度の硝酸溶液に 2~3 日以上浸漬した後, 水道水, 超純水の順に洗浄して使用した.)

#### (3) 試薬等

ICP 汎用混合液(SPEX XSTC-760A), 高純度硝酸(多摩化学工業 TAMAPURE-AA-100), インジウム, ロジウム及びカドミウム標準液(和光純薬工業 原子吸光分析用 1,000 mg/L), ピロリン酸カリウム及びくえん酸一水和物(関東化学 特級), 定性ろ紙(ADVANTEC No.131)

### 3) 試験方法

#### (1) インキュベーション試験

##### ① 試験区

- ア. し尿汚泥肥料添加区
- イ. 焼成汚泥肥料添加区
- ウ. 無添加区

② 培養日数

0日, 第1週(7日), 第2週(14日), 第4週(28日), 第8週(56日), 第12週(84日), 第19週(133日), 第23週(161日), 第28週(196日), 第50週(351日)

③ 試験方法

乾土として50gの土壌と供試肥料2.5gを良く混合した後ビーカー100mLに入れ, 土壌の最大容水量の60%になるよう水(本試験に使用した水は全て比抵抗値18.3 MΩ・cm以上の超純水)を加えた. 土壌の乾燥を防ぐためビーカーの上部をアルミ箔で覆い30℃のインキュベーターに入れた. 無添加区も同様に処理した. (図1)平行試験数は, 各試験区について, 培養日数毎に3連とした. また, 試験期間中に土壌が乾燥することがないように, 2週間毎にビーカーの重量を量り, 不足する水分を補充した.

設定した培養日数になったら, ビーカーをインキュベーターから取り出し, 土壌をビニール袋に移し袋内で良く混合した. この土壌をカドミウムの定量に供する試料とした. また, 乾物換算のため当該試料中の水分の測定も併せて実施した.

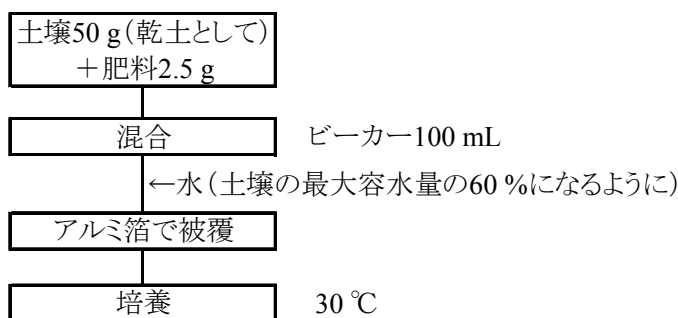


図1 インキュベーション試験の手順

(2) ICP/MSによるカドミウムの定量

3)の(1)で処理した土壌について, 以下の方法によりピロリン酸塩液溶性<sup>14)</sup>カドミウム, く溶性カドミウム及び水溶性カドミウムを定量した.

① 内標準液の調製

インジウム<sup>6, 15, 16)</sup>及びロジウムの標準液(1,000 mg/L)1 mLをPP製全量フラスコ100 mLにとり, 水約20 mL, 硝酸4 mLを加え, 水で定容した. その5 mLをPP製全量フラスコ100 mLにとり, 水約20 mL, 硝酸1 mLを加え, 水で定容し, 内標準液(0.5 mg/L)とした. (図2)

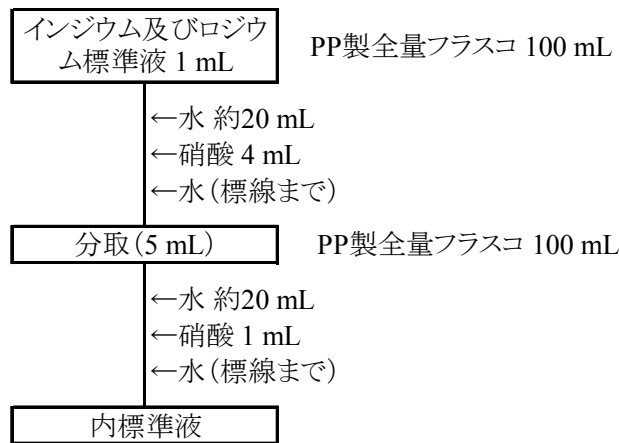


図2 内標準液の調製手順

## ② カドミウム標準液の調製

ICP 汎用混合液(カドミウム濃度 1 mg/L) 0, 10, 50, 200, 1000  $\mu\text{L}$  をそれぞれ PP 製全量フラスコ 100 mL にとり, 水約 20 mL, 硝酸及び内標準液 1 mL を加え, 水で定容し, カドミウム標準液(0, 0.1, 0.5, 2, 10  $\mu\text{g/L}$ )とした。(図 3)



図3 カドミウム標準液の調製手順

## ③ 抽出方法

## (i) ピロリン酸塩液溶性カドミウム

試料 1 g をキャップ式 PP 製遠沈管 50 mL にとり, 0.1 mol/L ピロリン酸カリウム溶液 50 mL を加えた. 30  $^{\circ}\text{C}$  で1昼夜回転振とうした後, 3,000 rpm で5分間遠心分離し, その上澄み液 25 mL を定容試験管(デジチューブ) 50 mL にとった. 硝酸 500  $\mu\text{L}$  を加え, 使い捨て時計皿で覆い, ヒートブロック型加熱分解装置で 100  $^{\circ}\text{C}$ , 1 時間加熱分解した. 放冷後, 内標準液 500  $\mu\text{L}$  を加え, 水で 50 mL に定容した後, PP 製ロートをを用いてろ過し, 試料溶液とした。(図 4)

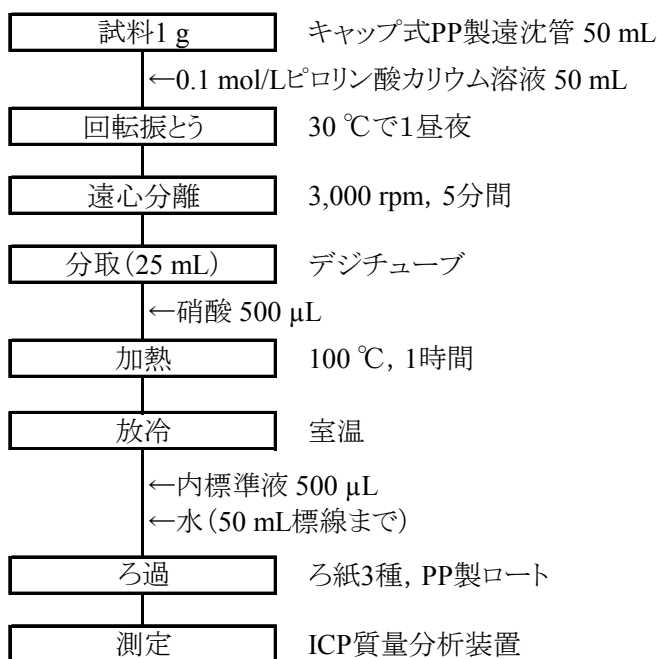


図4 ピロリン酸塩液溶性カドミウムの測定手順

## (ii) く溶性カドミウム

試料 1 g を全量フラスコ 250 mL にとり, 2 %くえん酸溶液 150 mL を加えた. 30 °Cで 1 時間回転振とうした後, PP 製ロートを用いてろ過した. 適量のろ液を定容試験管(デジチューブ) 50 mL にとり, 硝酸及び内標準液をそれぞれ 500 μL 加え, さらにろ液で 50 mL に定容し, 試料溶液とした. (図 5)

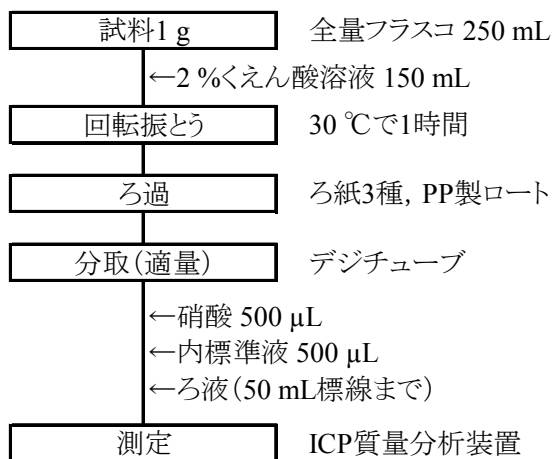


図5 く溶性カドミウムの測定手順

## (iii) 水溶性カドミウム

試料 5 g を全量フラスコ 500 mL にとり, 水 400 mL を加えた. 室温で 30 分間回転振とうした後, PP 製ロートを用いてろ過した. 適量のろ液を定容試験管(デジチューブ) 50 mL にとり, 硝酸及び内標準液をそれぞれ 500 μL 加え, さらにろ液で 50 mL に定容し, 試料溶液とした. (図 6)

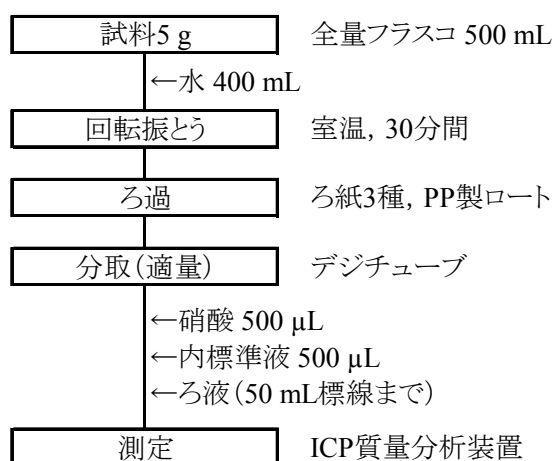


図6 水溶性カドミウムの測定手順

## ④ ICP/MS による定量

③で調製した試料溶液について、インジウム及びロジウムを内標準元素として、カドミウムを ICP/MS により測定した。

ICP/MS の測定条件は以下のとおりとした。

## (i) HP4500 の測定条件

RF パワー	: 1500W
RF マッチング	: 2V
サンプリング位置	: 7 mm
キャリアガス流量	: 1.1 L/min
ペリポンプ設定	: 0.1 rps
S/C 温度	: 2 degS
積分時間	: 0.1 sec

## (ii) 820S の測定条件

パワー	: 1.30 kW
プラズマ・フロー	: 15.50 L/min
補助流量	: 1.55 L/min
シースガスの流れ	: 0.20 L/min
ネブライザフロー	: 0.95 L/min
サンプリングデプス	: 6.00 mm
ポンプ回転数	: 5 rpm
スプレーチャンバー温度	: 3.00 °C
スキャン時間	: 161 msec

得られた測定値について土壌水分を補正して、乾土中のカドミウム量(mg/kg 乾土)に換算した。

### 3. 結果

#### 1) 添加回収試験

各形態別カドミウムを抽出した後の試料溶液に、0.5 mg/kg 乾土相当量のカドミウムを添加し、得られた回収試験結果を内標準元素の別に表 2 に示した。

インジウムによる補正では、く溶性カドミウム及び水溶性カドミウムの回収率は 92.3～97.1 %であったが、ピロリン酸塩液溶性カドミウムの回収率が 74.7 %と低かった。ロジウムによる補正では、いずれの抽出液におけるカドミウムの回収率は 89.4～98.5 %と、インジウムによる補正より回収率が高かった。また、それらの相対標準偏差は 0.3～0.9 %であり、ロジウムによる補正において良好な正確さと繰返し精度が得られた。

表2 添加回収試験の結果

内標準元素	カドミウムの抽出方法	添加濃度 (mg/kg乾土)	平均回収率 <sup>1)</sup> (%)	相対標準偏差 (%)
インジウム	ピロリン酸塩液溶性カドミウム	0.5	74.7	1.1
	く溶性カドミウム	0.5	92.3	1.0
	水溶性カドミウム	0.5	97.1	0.4
ロジウム	ピロリン酸塩液溶性カドミウム	0.5	89.4	0.4
	く溶性カドミウム	0.5	94.6	0.9
	水溶性カドミウム	0.5	98.5	0.3

1) 3点併行分析成績の平均回収率

#### 2) 汚泥肥料由来のカドミウムの溶出形態の推移

汚泥肥料由来のカドミウムと考えられるし尿または焼成汚泥肥料添加区と無添加区との差(以下、汚泥肥料由来のカドミウムという。)の推移を図 7, 8 に示した(内標準元素:ロジウム)。なお、カドミウム全量は培養期間中変化しないと考えられるため、今回測定しなかった。添加した汚泥肥料のカドミウム全量から算出した土壌中のし尿汚泥肥料由来のカドミウム全量は 0.19 mg/kg 乾土、焼成汚泥肥料由来は 0.14 mg/kg 乾土であった。

##### (1) ピロリン酸塩液溶性カドミウム

し尿汚泥肥料由来のピロリン酸塩液溶性カドミウムは 0 日目の 0.12 mg/kg 乾土から 14 日目に 0.19 mg/kg 乾土まで増加した。その後徐々に減少し、196 日目で 0.11 mg/kg 乾土になった後、ほぼ一定になった。焼成汚泥肥料由来でも 0 日目の 0.05 mg/kg 乾土から 14 日目に 0.13 mg/kg 乾土まで増加した。その後徐々に減少し、161 日目で 0.04 mg/kg 乾土になった後、ほぼ一定になった。

##### (2) く溶性カドミウム

培養期間中、し尿汚泥肥料由来のく溶性カドミウムは 0.15～0.19 mg/kg 乾土、焼成汚泥肥料由来は 0.11～0.14 mg/kg 乾土であった。

##### (3) 水溶性カドミウム

培養期間中、し尿汚泥肥料由来の水溶性カドミウムは 0.000～0.003 mg/kg 乾土、焼成汚泥肥料由来は 0.000 mg/kg 乾土であった。

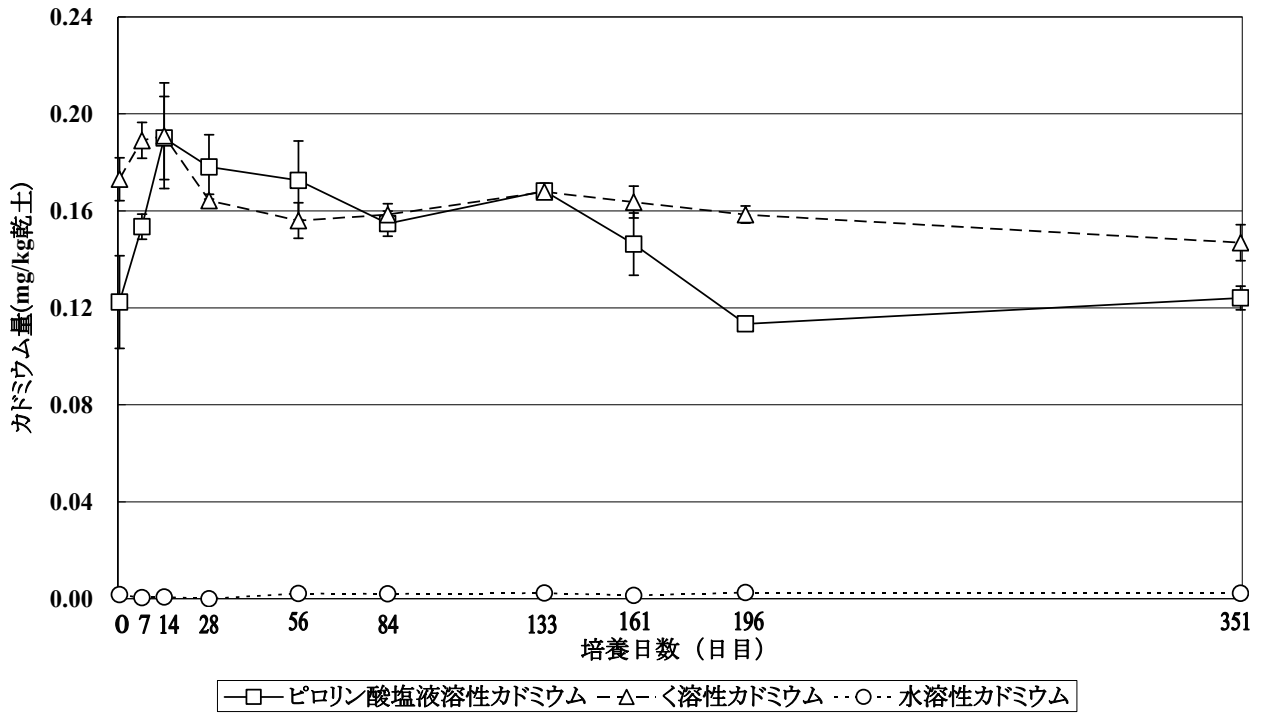


図7 し尿汚泥肥料由来のカドミウムの溶出形態の推移 (内標準元素:ロジウム)

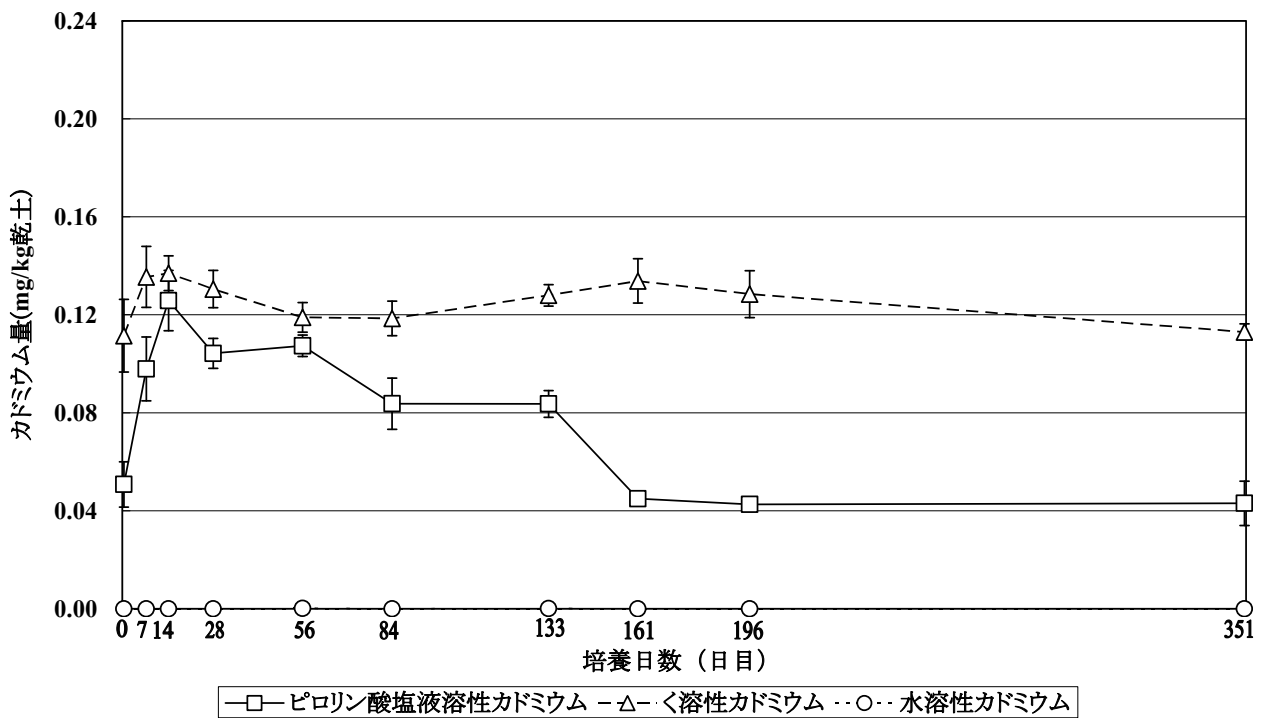


図8 焼成汚泥肥料由来のカドミウムの溶出形態の推移 (内標準元素:ロジウム)



### 3) 土壌 pH の変化

汚泥を施用した土壌からの重金属の溶出は土壌 pH の影響を強く受けることが知られている<sup>17)</sup>。土壌 pH の変化に伴うカドミウムの溶出形態の変化を検討するため、各試験区の土壌 pH(土:H<sub>2</sub>O=1:5)を測定した。(図 9)

無添加区の土壌 pH は培養期間中 5.5~5.7 であり、ほとんど変化しなかった。し尿汚泥肥料添加区の土壌 pH は 0 日目が 5.9 で、その後徐々に低下する傾向にあり、56 日目で 5.2 まで低下し、以後はほぼ一定になった。焼成汚泥肥料添加区の土壌 pH は培養期間中 5.4~5.9 であり、ほとんど変化しなかった。

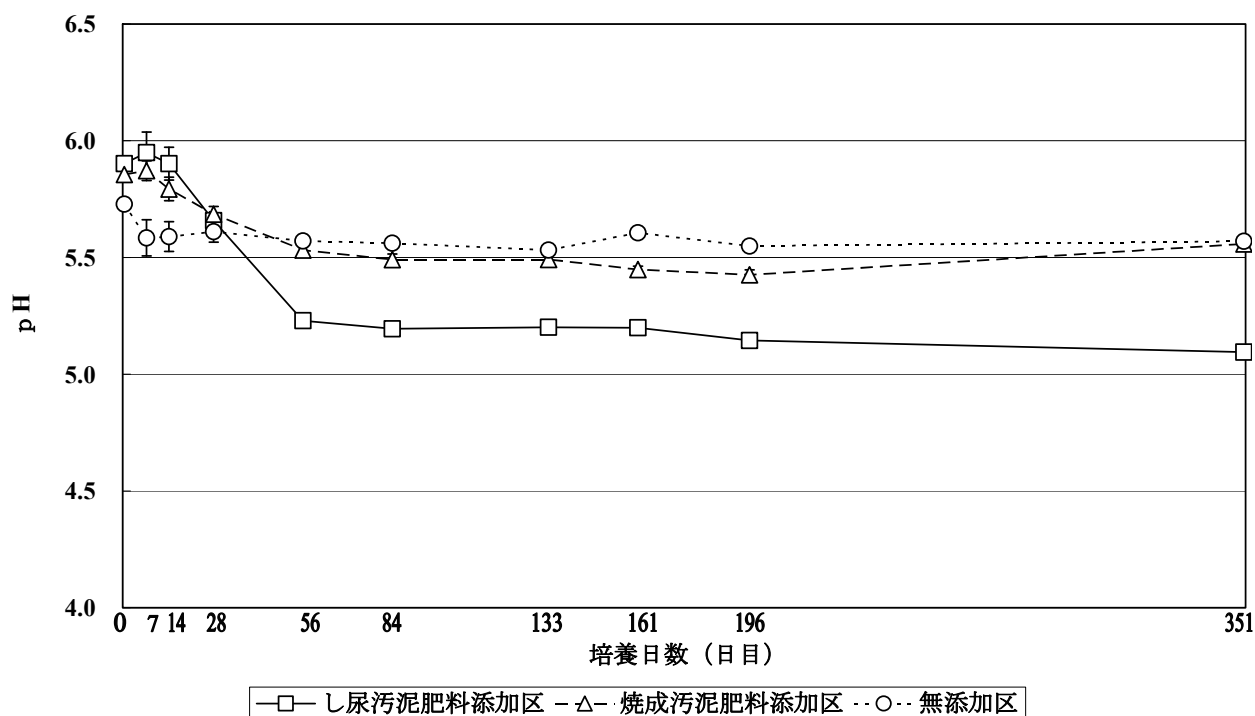


図 9 土壌 pH の変化

## 4. 考 察

### 1) 内標準元素の検討

ICP/MS による内標準法では、一般に内標準元素は測定元素の質量数に近いものか、イオン化エネルギーに近いものを選択する<sup>18)</sup>。インジウム、ロジウムとも質量数はカドミウムに近いが、1 次イオン化エネルギーはカドミウムの 8.993 eV に対して、インジウムが 5.786 eV、ロジウムが 7.460 eV であり、ロジウムの方がカドミウムに近い。また、マトリクス濃度が高い試料をプラズマに導入した場合、マトリクスを分解するためにプラズマのエネルギーが消費され、測定元素が十分にイオン化されないことがあり、特に亜鉛、カドミウム、水銀といった元素はイオン化されにくい<sup>19)</sup>。添加回収試験での各試料溶液のカドミウム濃度はピロリン酸塩液溶性カドミウムが 3~5 µg/L、く溶性カドミウムが 1~3 µg/L、水溶性カドミウムが 0~4 µg/L 程度であり、ピロリン酸塩液溶性カドミウムの試料溶液ではマトリクス濃度が高いと推察された。すなわち、ピロリン酸塩液溶性カドミウムの測定では、高マトリクス濃度中で、インジウムよりロジウムの方がカドミウムのイオン化率に近かったため、回収率が高かったと考えられた。

以上のことから、本試験ではインジウムよりロジウムの方が内標準元素として適当と考えられたので、以後はロジウム補正による測定値で考察を行った。

## 2) 汚泥肥料由来のカドミウムの溶出形態の推移

し尿汚泥肥料、焼成汚泥肥料とも肥料由来のピロリン酸塩液溶性カドミウムは培養期間の初期で一度増加してから徐々に減少し、やがて肥料添加直後の状態に戻って一定になる傾向があった。ピロリン酸塩液溶性カドミウムは有機結合態カドミウムを反映していると考えられる<sup>14)</sup>。従って、肥料中のカドミウムが腐植との錯化合物として一度取り込まれた後、徐々に放出されて初めの状態に戻ったと考えられた。

汚泥中のカドミウムは焼成することによって難溶化し、作物への吸収が低減されると考えられる<sup>12)</sup>。焼成汚泥肥料由来のカドミウムは大部分が難溶化したく溶性と考えられ、培養期間中もこの形態が維持され、水溶化しなかったと考えられた。

し尿汚泥肥料由来のく溶性カドミウムも培養期間中ほとんど変化しなかった。しかし、し尿汚泥肥料添加区において、有機態窒素が硝化して硝酸イオンが生成し、土壌 pH が低下した<sup>20, 21)</sup>と考えられる 56 日目以降、水溶性カドミウムの ICP/MS 測定値(イオン強度値)が他の2区に較べて高くなり、計算値であるカドミウム量も僅かであるが増加した。このことは、し尿汚泥肥料添加区でみられる程度の pH 低下では、カドミウムの水溶化は僅かしか起こらないが、汚泥肥料の過度施用や酸性雨により土壌が強酸性化した場合、カドミウムが水溶化することを示唆していると考えられた。また、実際に作物を栽培した場合、pH 低下により水溶化した微量のカドミウムが作物に吸収され、これに伴い土壌の平衡状態維持<sup>22)</sup>のためカドミウムが水溶化され、持続的に作物に吸収されて生体濃縮する可能性が考えられた。

以上、本試験ではピロリン酸塩液溶性カドミウムに多少の変化があったものの、く溶性カドミウムはほとんど変化せず、水溶性カドミウムはほとんど検出されなかった。従って、作物にカドミウムが吸収される状態への土壌変化はなかったと考えられた。今後の検討課題としては、作物を栽培した場合の土壌におけるカドミウムの形態の推移、可給態カドミウムの形態として多くの研究で用いられている 0.1 mol/L 塩酸溶性カドミウム<sup>10, 23~25)</sup>の測定等が考えられた。

## 5. まとめ

土壌に施用された汚泥肥料由来のカドミウムの溶出形態の推移をインキュベーション試験及び ICP/MS による定量により調査したところ、以下のことが考察された。

- (1) 添加回収試験の結果より、今回の試験では ICP/MS でカドミウムを測定する際の内標準元素にはロジウムが適当であった。
- (2) 汚泥肥料由来のピロリン酸塩液溶性カドミウムは培養期間の初期で一度増加してから、徐々に減少する傾向があった。
- (3) 汚泥肥料由来のく溶性カドミウムは、培養期間中ほとんど変化しなかった。
- (4) 汚泥肥料由来の水溶性カドミウムは培養期間中ほとんど検出されなかった。
- (5) し尿汚泥肥料添加区では、土壌 pH が低下する傾向がみられた。

## 文 献

- 1) 農林水産省・独立行政法農業環境技術研究所: 水稻のカドミウム吸収抑制のための対策技術マニュアル

- ル, (2005)
- 2) 岡本 保: 日本土壤肥料学雑誌, **71**(2), 231~242 (2000)
  - 3) 後藤茂子・林 浩昭・山岸順子・米山忠克・茅野充男: 日本土壤肥料学雑誌, **73**(4), 391~396 (2002)
  - 4) 後藤茂子・林 浩昭・米山忠克・茅野充男: 日本土壤肥料学雑誌, **75**(5), 605~608 (2004)
  - 5) 飯村康二: 土壤の物理性, **67**, 19~27 (1993)
  - 6) 伊藤優子・相澤洲平・釣田竜也・吉永秀一郎: 第 117 回日本森林学会大会講演要旨集, p.734 (2006)
  - 7) 林 雄・紫 英雄: 埼玉県農業試験場研究報告, **38**, 55~94 (1982)
  - 8) 大竹俊博: 山形県農業試験場特別研究報告, **20**, 1~77 (1992)
  - 9) 尾川文明: 秋田県農業試験場研究報告, **35**, 1~64 (1994)
  - 10) 栗原宏幸・渡辺美生・早川孝彦: 日本土壤肥料学雑誌, **76**(1), 27~34 (2005)
  - 11) 農林水産省・独立行政法農業環境技術研究所: ダイズの cadmium 吸収抑制のための技術確立マニュアル, (2007)
  - 12) 早川 修・渡辺紀元: 日本土壤肥料学雑誌, **61**(2), 134~141 (1990)
  - 13) 西 貞夫監修: 新編 野菜園芸ハンドブック, p.193~194, 養賢堂, 東京(2001)
  - 14) 定本裕明・飯村康二・本名俊正・山本定博: 日本土壤肥料学雑誌, **65**(6), 645~653 (1994)
  - 15) 木村和彦・吉田光二・杉戸智子・山崎慎一: 日本土壤肥料学雑誌, **74**(4), 493~497 (2003)
  - 16) 山崎慎一・手嶋博美・南條正巳・木村和彦: 日本土壤肥料学会講演要旨集, **47**, p.18 (2001)
  - 17) 服部浩之: 日本土壤肥料学雑誌, **69**(2), 135~143 (1998)
  - 18) 横川アナリティカルシステムズ: ICP 質量分析装置 HP4500 アプリケーションハンドブック, 4-4
  - 19) 横川アナリティカルシステムズ: 4500/Chemstation オペレーション基礎 トレーニングテキスト, 付録-6
  - 20) 土壤養分測定法委員会編: 土壤養分分析法, p.30~31, 養賢堂, 東京(1970)
  - 21) 早津雅仁: 土の環境圏, p.287~292, フジ・テクノシステム, 東京(1997)
  - 22) 飯村康二: 土壤の物理性, **67**, 19~27 (1993)
  - 23) 農用地土壤汚染対策地域の指定用件に係る cadmium 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 12 年 6 月 1 日総理府令第 58 号
  - 24) 茨城県農業総合センター農業研究所: ホウレンソウの cadmium 濃度の品種間差異と制御・推定法の実用性, (2004)
  - 25) 独立行政法農業環境技術研究所: cadmium 高吸収イネ品種による cadmium 汚染水田の浄化技術(ファイトレメディエーション)を開発—新たな低コスト土壤浄化対策技術として期待—, (2009)

## Transition of Soluble Forms of Cadmium Derived from Sludge Fertilizer Applied Soil

Taku FUJITA<sup>1</sup>, Tomoe INOUE<sup>1</sup> and Manabu MATUZAKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Food and Agricultural Materials Inspection Center, Osaka Office of Kobe Regional Center

In order to obtain the basic data for absorption reduction of the cadmium derived from fertilizer absorbed by crops, transition of three soluble (pyrophosphate-soluble, citric acid-soluble and water-soluble) forms of cadmium derived from sludge fertilizer applied soil was investigated. The cadmium content was measured by an inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP/MS) throughout the incubation period of one year. Three plots were set up: a plot of 50 g soil added with 2.5 g human wastes sludge fertilizer as dry matter; a plot of 50 g soil added with 2.5 g calcined sludge fertilizer as dry matter; and a plot of 50 g soil added with no fertilizer. Each plot was incubated at 30 °C in triplicate and subjected to measurement of cadmium on days 0, 7, 14, 28, 56, 84, 133, 161, 196 and 351. The measurement comprised of extraction of the three soluble forms of cadmium, followed by measurement of their contents by ICP/MS, using indium or rhodium as an inner standard element. First, the accuracy and the precision of measurement were assessed using extraction solution spiked with cadmium of 0.5 mg/kg-dry. Judging from the average recoveries and relative standard deviations, rhodium was suitable as inner standard element. Transition of the cadmium contents for each soluble form originating in sludge fertilizers showed a similar tendency. The pyrophosphate-soluble cadmium contents increased at an early stage of the incubation period, but decreased gradually and stabilized at a later stage. Throughout the incubation period, the citric acid-soluble cadmium contents changed little, and the water-soluble cadmium were hardly detected.

*Key words* sludge fertilizer, soil, cadmium, incubation, ICP/MS

(Research Report of Fertilizer, **2**, 58~69, 2009)