

原 著

## 汚泥肥料の利用における安全性確認に係る調査・研究

近藤笑加, 奥山幸俊, 坂口貴啓\*, 立野雄也\*\*,  
渡邊卓弥, 石田健太, 阪本晶子\*\*\*, 有富洋子\*\*\*\*

### The Study of Safety Confirmation in the Use of Sludge Fertilizer

Emika KONDO, Yukitoshi OKUYAMA, Takahiro SAKAGUCHI\*, Yuya TACHINO\*\*,  
Takuya WATANABE, Kenta ISHIDA, Akiko SAKAMOTO\*\*\* and Yoko ARITOMI\*\*\*\*

汚泥肥料の安全性について明らかにするために、土壌カラム試験における重金属類の挙動調査と下水汚泥および汚泥肥料の性状分析を実施した。三重県で定めている「汚泥肥料の農地への利用に係るガイドライン」<sup>1)</sup>に基づき汚泥肥料の安全性確認を実施した。

重金属類の土壌汚染について、砒素(As)、セレン(Se)は土壌溶出量基準に係る土壌汚染リスクが、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、水銀(Hg)は土壌含有量基準に係る土壌汚染リスクが高い。カラム内土壌に添加した重金属類の量に対する土壌の溶出量と含有量、カラム下部から流れ出る量の各々の割合を計算して、重金属類の土壌中の挙動を把握した。毎年10t相当量の重金属類を施肥しながら20年間分の雨量を通水した場合でも、土壌溶出量基準を超過しなかった。

下水汚泥、汚泥肥料の性状試験の結果、環境庁告示第46号の土壌溶出量試験(46号試験)ではAsが、環境省告示第19号の含有量試験(19号試験)ではPbが検出され、カラム試験ではAsが流出した。すべての下水汚泥と汚泥肥料は肥料の品質の確保等に関する法律における公定規格を満たしていた。汚泥肥料の46号試験結果を用いて、汚泥肥料中の重金属類の溶出と土壌への浸透を考慮した土壌汚染リスクの推定を試みた。

安全性確認を実施した結果、1000m<sup>2</sup>につき1tを毎年施肥して蓄積割合が概ね50%に達するには、下水汚泥では55年、汚泥発酵肥料は65年、し尿汚泥肥料は27年を要した。

キーワード：汚泥肥料, 下水汚泥, 肥料等試験法

### はじめに

下水汚泥のリサイクル方法として、燃料化、建設資材、緑農地利用などがあげられる。下水道法改正(平成27年5月)により、下水汚泥を肥料化・燃料化し再生利用するよう努力義務が追加され肥料利用が推進されていることから、今後汚泥肥料の生産量は増加していくことが予想される。下水汚泥はリン資源としての有機性廃棄物として注目されており、肥料の原料としてリサイクル

することは天然資源の使用抑制の観点から重要である。

肥料の品質は肥料の品質の確保等に関する法律において定められ、汚泥肥料には下水処理施設に流入する汚水などに由来する有害成分が含まれている可能性があるため、重金属類の含有量が規制されている。しかし、その規制は作物の生育に有害となる成分の許容含有最大量であり、土壌環境基準の観点とは異なるものである。したがっ

\* 三重県農林水産部みどり共生推進課

\*\* 三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課

\*\*\* 三重県鈴鹿地域防災総合事務所

\*\*\*\* 三重県環境生活部大気・水環境課

て肥料の品質の確保等に関する法律に適合する汚泥肥料であっても、土壌汚染を招く可能性がある。

そこで、汚泥肥料の施用も含めた土壌中の重金属類の挙動を実験室レベルで調査して、汚泥肥料と下水汚泥の肥料の品質の確保等に関する法律の公定規格への適合状況と重金属類の溶出量や含有量、カラム試験による流出量を明らかにした。土壌カラム試験における土壌の溶出量と含有量の結果と汚泥肥料のカラム試験による流出量の結果から、汚泥肥料中の重金属類の溶出から土壌への浸透、土壌中の挙動を把握して土壌汚染レベルを推定することを試みた。また、三重県で策定している「汚泥肥料の農地への利用に係るガイドライン」の考え方に基づいて汚泥肥料の安全性確認を実施した。

## 方法

### 1. 土壌カラム試験による重金属類の挙動調査

#### 1.1 対象とした重金属類

汚泥肥料中に含まれ、土壌環境基準が定められている項目で、特に有害性が高いと思われる、カドミウム (Cd)、鉛 (Pb)、砒素 (As)、セレン (Se)、クロム (Cr)、水銀 (Hg) の6項目を対象とした。ただし、クロムについては、土壌環境基準には六

価クロムとして定められているが、重金属混合溶液を調製する段階で、六価クロムと三価砒素が反応して三価クロムに還元され、六価クロムとして試験が行えなかったため、全クロムとして評価を行った。

#### 1.2 供試土壌

三重県内の代表的な農作物の栽培に使われている土壌として、図1に示す三重県農業研究所茶業研究室から細粒黄色土、三重県農業研究所から淡色黒ボク土、三重県農業研究所紀南果樹研究室から礫質黄色土および市販されている関東ローム層の黒ボク土の4種類を収集して用いた。

実験用土壌の物性試験、環境庁告示第46号の土壌溶出量試験(46号試験)を実施したところ、各土壌のpH、水分等の基本的物性は表1のとおりであり、46号試験の重金属類の結果はすべて報告下限値未満であることを確認した。

#### 1.3 カラム試験の条件および手順

##### 1.3.1 カラム装置

カラム試験の模式図を図2に示す。

実際の農用地1000m<sup>2</sup>(10a(アール))で行われている施肥の状況を実験室レベルに縮小し、20万分の1のスケール(内径25mm、面積4.9cm<sup>2</sup>)の

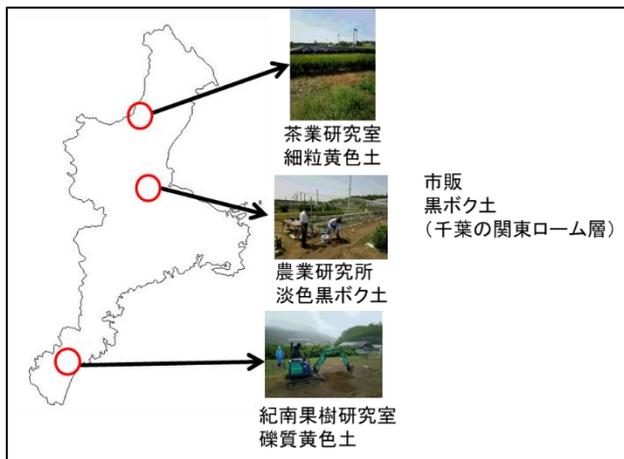


図1 各土壌の採取場所および土壌の種類

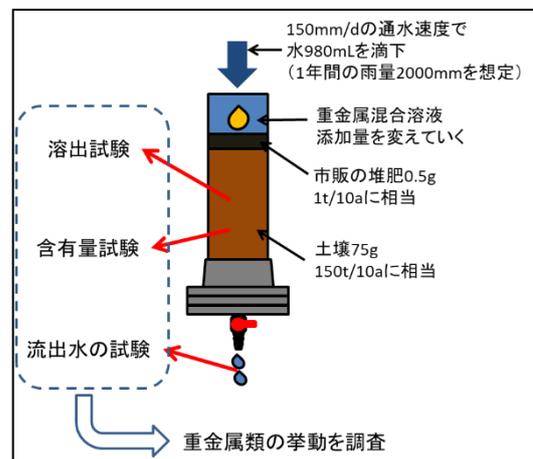


図2 カラム試験の模式図

表1 供試土壌の基本的物性

種類	採取場所	pH	水分 (%)	強熱減量 (%)	塩基置換容量 (me/100g-dry)	交換性陽イオン (me/100g-dry)	塩飽和度 (%)	
A	淡色黒ボク土	三重県松阪市	5.1	6.5	8.0	20.1	6.3	31.4
B	細粒黄色土	三重県亀山市	5.0	6.4	5.8	12.8	7.9	61.4
C	礫質黄色土	三重県御浜町	5.7	3.8	5.1	11.9	6.7	56.1
D	黒ボク土	市販品	5.2	13.7	11.8	24.1	7.7	32.1

カラムを作成した。カラム下部は土壌の流出がない構造とし、カラム上部は開放系で低流量のペリスタルティックポンプとシリコンチューブを用いて水を滴下できるようにした。

### 1.3.2 施肥量

汚泥肥料には公定規格である「含有を許される有害成分の最大量」の10分の1程度の重金属類が平均的に含まれていることがわかっている<sup>2)</sup>。公定規格の10分の1の重金属類を含む汚泥肥料を10aの農地に施肥すると仮定して、Cd:2.5, Pb:50, Cr:2.5, Hg:1, As:25, Se:2.5 (mg/L)となるよう重金属混合溶液を調製した。この溶液を0.1mL添加することは、肥料取締法で含有を許される最大量の10分の1の重金属が含まれている汚泥肥料を10aにつき1t施肥することに相当する。添加量は表2のとおりとなる。

1t/10a から500t/10a までの施肥量に相当する量の重金属混合溶液をカラムに充填した土壌上部の市販堆肥0.5g (施肥量1t/10aに相当する量)に添加して、約20分静置した。なお、農用地での通常の施肥量は多くても1t/10aほどであるが、県内では汚泥肥料を100t/10a/年程度を施肥している事例があり、安全性確認の観点から500t/10aまで設定した。

### 1.3.3 通水条件

津市の年間降水量約2000mm<sup>3)</sup>を参考に、1年間の雨量・雨水を想定して980mLの水を滴下した。滴下速度は、廃棄物関連試料の分析マニュアルの「上向流カラム通水試験」<sup>4)</sup>を参考にして150mm/dayとした。水質は、保環研年報第19号「2016年度酸性雨調査結果」<sup>5)</sup>において、Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>の合計の年平均は0.06mEq/L, pHの加重平均値は4.68であったことから、炭酸水素ナトリウム0.005gを蒸留水1Lに溶かし、硝酸と硫酸を用いてpH4.7とした。

表2 施肥量1t/10aあたりの重金属類添加量

項目	添加量 (mg)
カドミウム	500
鉛	10000
ひ素	5000
セレン	500
クロム	500
水銀	200

### 1.3.4 土壌充填量

「汚泥肥料の農地への利用に係るガイドライン」では、重金属の土壌蓄積計算を行う際、土壌重量を150t/10aとしている。また、「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」<sup>6)</sup>では、「地表からおおむね15cmまでの土壌を採取すること」となっている。土壌重量150t/10aは土壌の比重を1とすると厚さ15cmとなる。農用地土壌汚染の評価は表土15cmに対して行うのが妥当であると考えられることから、カラムに充填する土壌量は、150t/10aの土壌に相当する75gとした。

## 1.4 分析方法

### 1.4.1 分析対象

カラムから流れ出た水(流出水)と通水後のカラム内の堆肥と土壌の混合物を分析対象とした。

### 1.4.2 試験方法

流出水は環境庁告示第64号に準じて重金属類濃度を測定した。また、通水後のカラム内の堆肥と土壌をよく混合し、風乾後、46号試験および環境省告示第19号の含有量試験(19号試験)を行い、重金属類濃度を測定した。なお、詳細な試験方法を表3に示す。

## 1.5 評価方法

通水後のカラム内の堆肥と土壌の混合物で行った46号試験結果を土壌溶出量基準と比較することにより、汚泥肥料の安全性を評価した。

また、流出水の分析結果、通水後のカラム内の堆肥と土壌の混合物の46号試験結果および19号試験結果から、重金属類の添加量の収支を計算し、金属種による違いやカラムに充填した土壌による違い等を把握することにより、汚泥肥料に含有する有害成分の挙動に関する評価を行った。

表3 重金属類の試験方法

項目	試験方法
カドミウム	JIS K0102 55.4
鉛	JIS K0102 54.4
ひ素	JIS K0102 61.4
セレン	JIS K0102 67.4
クロム	JIS K0102 65.1.5
水銀	環境庁告示第59号付表2

## 2. 連続施肥を想定したカラム試験による重金属類の挙動調査

農用地においては毎年施肥をすることが通例である。そこで連続的に汚泥肥料を施肥したときの重金属類の挙動を把握し、土壤汚染リスクを確認するため、20年間の連続施肥の条件下におけるカラム試験を行った。2.2に記した条件以外は、1.と同様に操作した。

### 2.1 供試土壌

黒ボク土は国内および県内の農用地においてその多くを占めること、県内で農用地として実際に利用されていることから、準備した4種類の土壌のうち、淡色黒ボク土を選定して試験を行った。

### 2.2 カラム試験の条件および手順

#### 2.2.1 施肥量

1年間あたりの施肥量10tに相当する量の重金属混合溶液をカラムに充填した土壌上部の市販堆肥に添加した。1年間分の水980mLを滴下した後、同量の重金属混合溶液の添加と水の滴下を19回繰り返すことで20年間分の連続施肥とし、累計200t/10aを施肥した。

1年の施肥量を10t/10aとしているのは、試験条件として土壤汚染のリスクを評価するため、通常の施肥量1t/10aより多い施肥量が良いと判断したためである。

なお、施肥の影響を把握するために重金属混合溶液の添加をせずに対照試験を実施した。

#### 2.2.2 通水条件

1.3.3と同様に調整した水490mLを半年間の雨量と想定し、滴下した。これを40回繰り返して20年間分の雨量とし、流出水は490mL滴下後に回収した。

### 2.3 分析方法

#### 2.3.1 分析対象

流出水と20年間分の滴下を終えたカラム内の堆肥と土壌の混合物を分析対象とした。

#### 2.3.2 試験方法

流出水回収時に液量を記録し、環境庁告示第64号に準じて、流出水のpH、電気伝導率(EC)、重金属類濃度を測定した。

滴下後カラム内の堆肥と土壌をよく混合して風乾させ、46号試験および19号試験を行い、重金属類濃度を測定した。

### 2.4 評価方法

流出水中の重金属類の含有量(流出量)から1.で得られた重金属類の収支の割合を用いて計算で溶出量試験濃度を算出した。これを土壤溶出量基準と比較することで評価した。

また20年間分の雨量を想定した水を滴下した後、カラム内の堆肥と土壌の混合物の46号試験および19号試験結果から、連続施肥における汚泥肥料の土壤汚染リスクを評価した。

## 3. 下水汚泥と汚泥肥料の安全性の確認

### 3.1 試験用試料

下水汚泥は、県内6か所の下水処理場からスポットで1回ずつ採取した。下水汚泥の他に、汚泥発酵肥料1種類、し尿汚泥肥料1種類の汚泥肥料を調達した。汚泥発酵肥料は工業汚泥・下水汚泥・植物類原料から製造されたもので、し尿汚泥肥料はし尿汚泥のみから製造されたものである。

### 3.2 46号試験, 19号試験

下水汚泥を風乾または梅雨時期は40℃で加温して予備乾燥させてから検液を作成し、表3の試験方法により重金属類濃度(Cd, Pb, As, Se, Cr, Hg)を測定した。

汚泥肥料は風乾を行わず有姿のまま検液を作成して同様に測定した。

1回の検液作成に用いる試料量は、46号試験は60g、19号試験は18gまたは15gとした。

### 3.3 肥料等試験法

下水汚泥とし尿汚泥肥料は2019年度版および2020年度版肥料等試験法(独立行政法人農林水産消費安全技術センター)<sup>7)</sup>に従って試験した。下水汚泥は水分が多いため予備乾燥を行った。水分、窒素全量、りん酸全量、重金属類(Cd, Pb, As, Se, Cr, Hg)、ニッケルを測定した。詳細な試験方法は表4に示す。なお、セレンは本試験法に規定がないため、鉛の測定方法に準じて測定した。

汚泥発酵肥料は肥料分析法(農林水産省農業環境技術研究所)に従って、窒素全量、りん酸全量、重金属類(Cd, Pb, As, Se, Cr, Hg)を測定した。この試験方法は、肥料の品質又は表示方法を規定している農林水産省告示(「肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格等を定める等の件」等)に採用されていたが、2020年2月に農林水産省告示の改正により、肥料等試験法が採用されているため

表4 肥料等試験の方法

項目	試験の方法
水分	3.1.a 乾燥器による乾燥減量法
窒素全量	4.1.1.b 燃焼法
りん酸全量	4.2.1.a バナドモリブデン酸アンモニウム吸光光度法
カドミウム	5.3.b ICP発光分光分析法
鉛	5.6.b ICP発光分光分析法
砒素	5.2.a 水素化物発生原子吸光法
セレン	本法に規定のない項目のため5.6.bに準じる
クロム	5.5.b ICP発光分光分析法
総水銀	5.1.a 還元気化原子吸光法
ニッケル	5.4.b ICP発光分光分析法

肥料分析法で試験した結果は肥料等試験法により得られた結果と同等に扱った。

### 3.4 カラム試験

下水汚泥を風乾または梅雨時期は 40°Cで加温して乾燥させた後、試料 10~15 g とテフロン製で長さ 2~3 mm の中空糸状ビーズを 1:1 で十分に混合した。これを 1.3.1 カラム装置と同じカラムに充填し、1.3.3 通水条件と同様にして通水させた。カラムから流れ出した流出水を環境庁告示第 64 号に準じて、pH, EC, 重金属類 (Cd, Pb, As, Se, Cr, Hg) を測定した。

汚泥肥料は試料 60g を 1.3.1 カラム装置と同様のカラムに充填した後、下水汚泥と同じ操作をした。

### 3.5 評価方法

下水汚泥および汚泥肥料のカラム試験の結果と土壌カラム試験における土壌の溶出量と含有量の結果を用いて、汚泥肥料中の重金属類の溶出から土壌への浸透、土壌中の挙動を調査した。

「汚泥肥料の農地への利用に係るガイドライン」の考え方にに基づき、下水汚泥と汚泥肥料の安全性を確認した。ガイドラインの概要を図3に示す。このガイドラインの考え方は、平均的な重金属の含有量の土壌が自然に存在し得る量の概ね上限になる「著しい蓄積」を避けるため、施用する肥料の重金属の含有量から施用に伴う蓄積の程度を予測して、必要に応じて施用量、施用回数を調整し、重金属の蓄積を管理するものである。「蓄積割合」が 100%に達すると自然に存在し得

「蓄積割合」は肥料の施用に伴う重金属類土壌中含含有量の増加量を指標化したもので、平均的な土壌の含有量が自然賦存量の概ね上限の含有量に増加する幅を100とし、それに対する割合を計算した数値

「蓄積度」は肥料を1t/10a（一定量）施用した場合の蓄積割合

「蓄積係数」は重金属毎に一定で、平均的な含有量と自然賦存量の概ね上限量から計算した数値

#### 蓄積係数

カドミウム	鉛	ひ素	セレン	クロム	水銀	ニッケル
1.3	0.03	0.05	-	0.01	1.9	0.01

式：「蓄積度」 = [重金属毎の蓄積係数] × 「肥料の重金属含有量」

「施用後の蓄積割合」 = 「重金属毎の蓄積係数」 × 「肥料の重金属含有量」 × 「施用量」

つまり、「施用後の蓄積割合」 = 「蓄積度」 × 「施用量」

図3 汚泥肥料の農地への利用に係るガイドラインの概要

る量の概ね上限となり、「著しい蓄積」が生じたことになる。つまり、「蓄積割合」が100%に達しないよう施用量を決定することで「著しい蓄積」を防止する。

下水汚泥と汚泥肥料の施肥を想定し、肥料等試験法の結果をガイドラインの「肥料の重金属含有量」として扱い、蓄積割合100%時の施用量を計算した。セレンの蓄積係数は設定されていないため、ひ素に準じて計算した。

## 結果および考察

### 1. 土壌カラム試験による重金属類の挙動調査

#### 1.1 通水後のカラム内の堆肥と土壌の混合物の46号試験・19号試験結果

46号試験の結果を図4に示した。

ひ素については、施肥を行う土壌の種類によらず施肥量の増加に比例して46号試験結果も増加傾向であった。淡色黒ボク土で施肥量100t/10a, 200t/10a, 500t/10a時に、細粒黄色土で施肥量100t/10a, 500t/10a時に、礫質黄色土で施肥量200t/10a, 500t/10a時に土壌溶出量基準を超過した。

セレンについてもひ素と同様、施肥を行う土壌の種類によらず施肥量の増加に比例して46号試験結果も増加傾向であったが、土壌溶出量基準の超過はなかった。施肥量が100t/10a時に淡色黒ボ

ク土、細粒黄色土で基準の1/10程度、礫質黄色土と黒ボク土で基準の1/10より低い結果であった。

カドミウム、鉛、クロムについては、施肥量、土壌の種類によらず、すべて土壌溶出量基準の1/10よりも低い結果であった。

水銀については、淡色黒ボク土に施肥した場合に、施肥量1t/10aから100t/10aまでは施肥量の増加に比例して46号試験結果が増加しているようにも見られるが、200t/10aおよび500t/10a時には検出されなかったことから低濃度の範囲でばらばらしていると考えられた。また、淡色黒ボク土以外の土壌では検出されなかった。

次に、19号試験の結果を図5に示した。鉛は土壌の種類に関係なく施肥量が多くなると含有量も増加したが、土壌含有量基準値の1/5程度であった。他の重金属類は不検出、もしくはわずかに検出した。

以上より、ひ素は多量に施肥することで土壌溶出量基準を超過するリスクが高い。セレンも土壌溶出量基準を超過しないものの土壌溶出量基準に係る土壌汚染のリスクは高い。カドミウム、鉛、水銀は土壌含有量に係る土壌汚染のリスクが高く、クロムは他の重金属類と比べて土壌汚染リスクは低い。

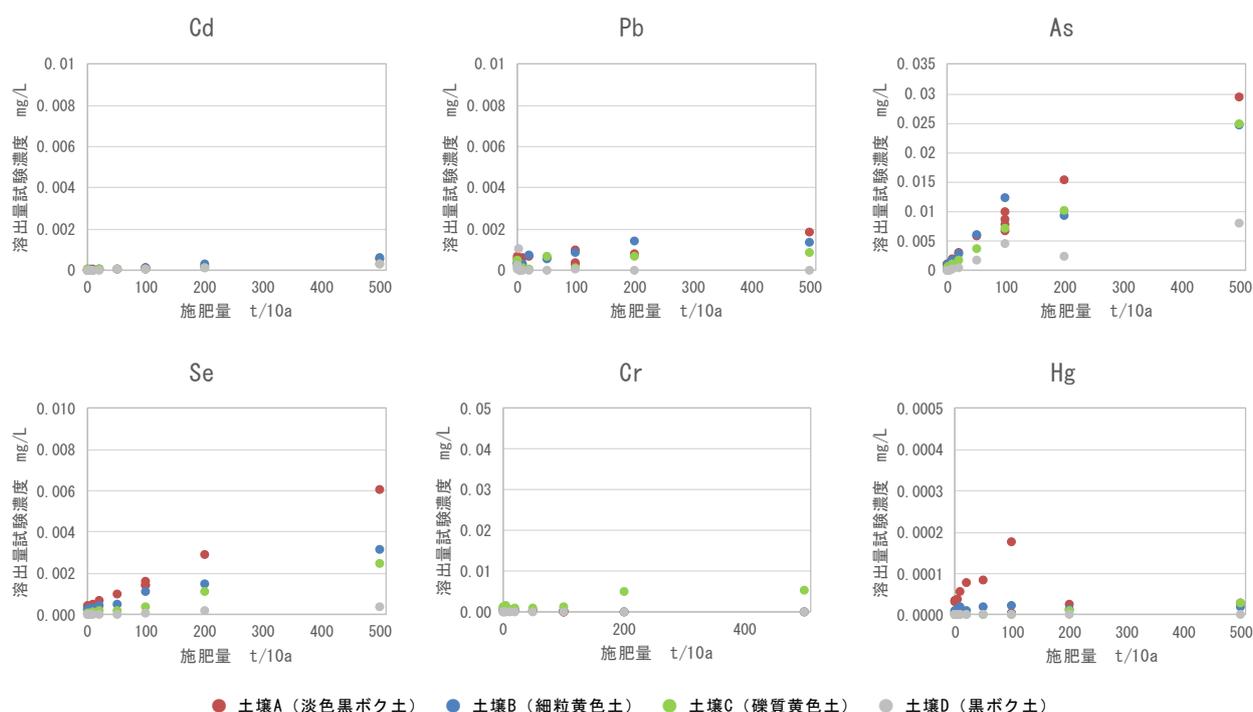


図4 通水後カラム内の堆肥と土壌の混合物の46号試験結果

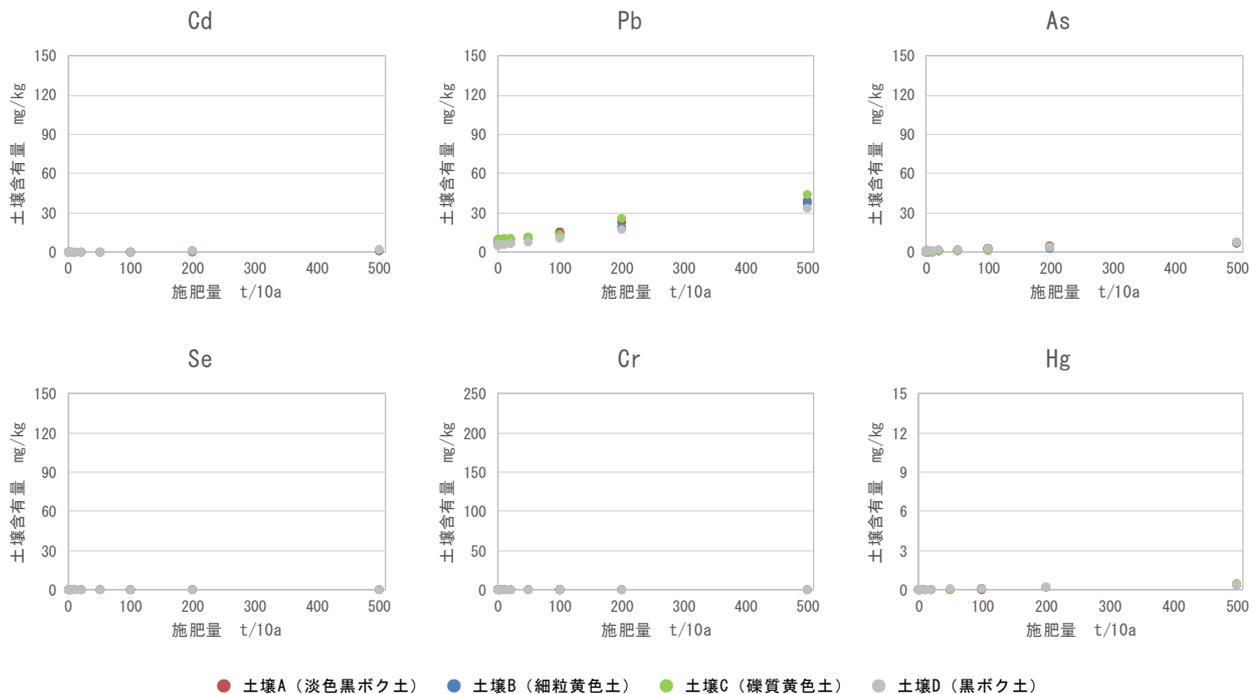


図5 通水後カラム内の堆肥と土壌の混合物の19号試験結果

## 1.2 施肥量に対する収支割合

カラム試験で流出水から検出されるものを「流出量」、46号試験で検出されるものを「溶出量試験検出量」、19号試験で検出されるものから溶出量試験検出量を差し引いたものを「含有量試験でのみ検出される量」、また、添加量から溶出量試験検出量、含有量試験でのみ検出される量および流出量を差し引いたものを「完全吸着量」として、土壌での重金属類の挙動を把握するために施肥量100t/10a、200t/10a、500t/10aの収支を図6に示した。

カドミウムと鉛は、含有量試験でのみ検出される量の割合が70%以上と高く、次いで完全吸着量の割合が高いが、流出量、溶出量試験検出量の割合は1%以下であった。

ひ素は、含有量試験でのみ検出される量の割合で30~50%、完全吸着量の割合で30~70%の割合となり、溶出量試験検出量の割合は1~3%程度、流出量割合は淡色黒ボク土と細粒黄色土が最大30%、礫質黄色土と黒ボク土が1%未満の割合となった。

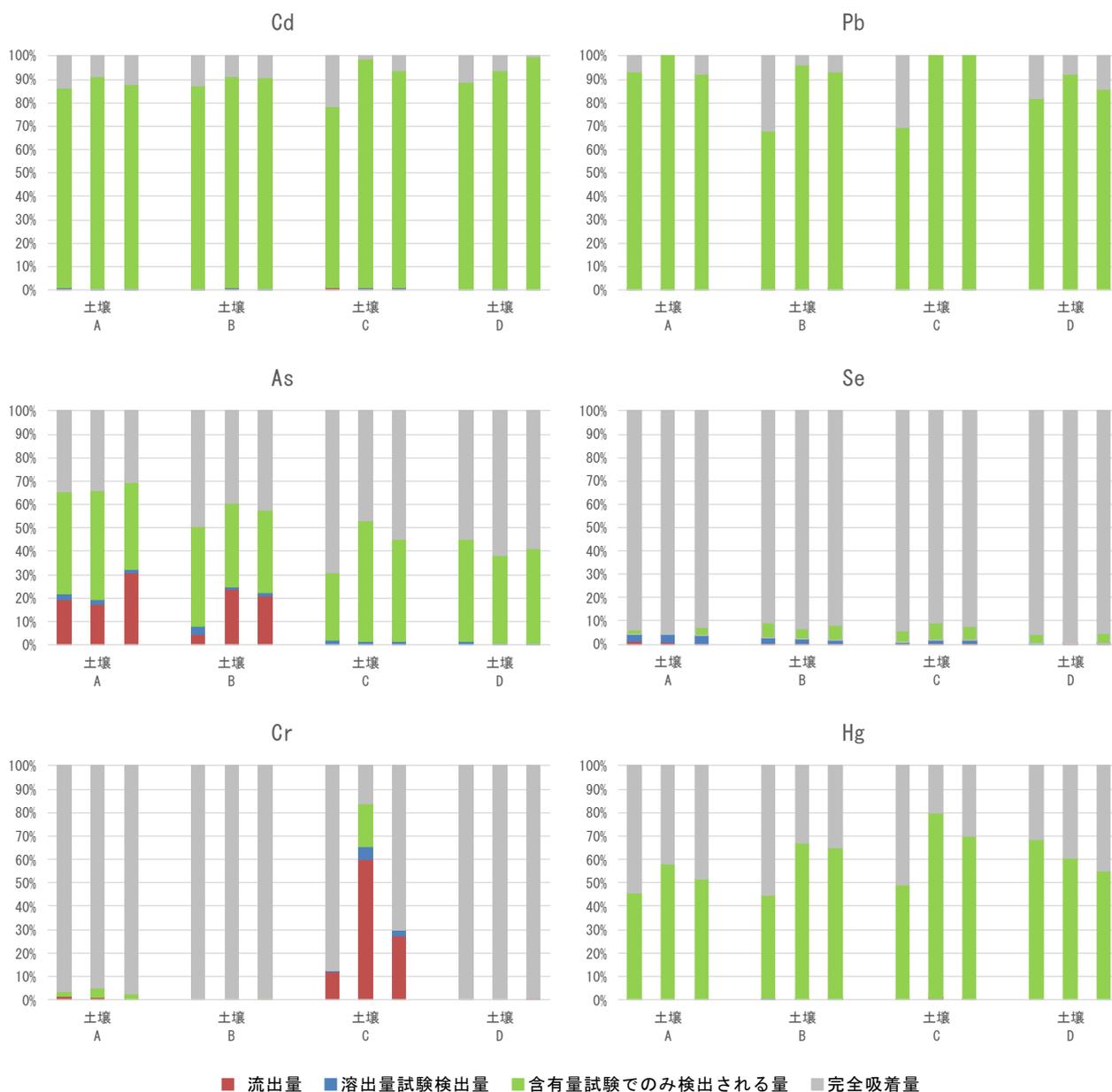
セレンは、完全吸着量の割合が90%以上を占め、含有量試験でのみ検出される量の割合は1~7%程度であった。溶出量試験検出量の割合は1~3%程度であるが、淡色黒ボク土ではやや多かった。

クロムは、淡色黒ボク土で完全吸着量の割合が90%以上、含有量試験でのみ検出される量の割合は3%程度、流出量割合は1%程度となった。細粒黄色土、黒ボク土は完全吸着量の割合がほぼ100%であった。一方、礫質黄色土は他の3種の土壌と異なり、完全吸着量の割合が低くなり、流出量割合が10~60%、溶出量試験検出量の割合は5%程度となった。

水銀は、含有量試験でのみ検出される量の割合が40~80%、完全吸着量の割合が20~80%となった。

ひ素は礫質黄色土と黒ボク土、クロムは礫質黄色土で他の土壌と挙動が異なり、少なからず土壌の種類による影響があると考えられた。礫質黄色土は比較的大きな土壌粒子が大部分を占めていること、市販の黒ボク土は有機質を多く含むと表記されていることから、他の土壌とは異なる挙動となったと考えられる。

以上より、重金属類の土壌への吸着特性は元素毎に特徴があり、土壌の種類によらず似たような挙動となる元素もあるが、ひ素やクロムは土壌の種類により異なる挙動をとることがわかった。



左から施肥量100t/10a, 200t/10a, 500t/10a

図6 汚泥肥料 100t/10a, 200t/10a, 500t/10a を施肥した時の収支

## 2. 連続施肥を想定したカラム試験による重金属類の挙動調査

### 2.1 重金属類の挙動

この試験はカラム内の土壌をかくはん、入替をすることなく連続して施肥と水の滴下を行ったものであり、土壌の性質の変化を確認するため、分画毎の流出水の pH と EC の推移を図 7 に示した。

pH は、施肥開始時には 5.0~5.5 を示していたが、開始して 4 年間分を過ぎると 5.5~6.0 と高くなった。このころに土壌自体が有する pH 緩衝能

が失われたと考えられる。また EC は施肥開始時のみ 12mS/m 以上の高値で次分画からは 4mS/m 以下であった。施肥を行った試験区（施肥有）は、重金属類を添加した分画時に高くなり、次分画は対照試験区（施肥無）と同値になっていることから、重金属混合溶液に含有される酸の影響によるものと考えられる。

流出水を分析して得られた重金属類の濃度に流出水量を乗じて、流出水中に含有される重金属類の絶対量（流出量）を図 8 に示した。これは対照試験の結果で補正しており、数値が負の値にな

る場合と検出下限値未満は0として計算した。

次に、連続施肥の溶出量試験濃度を流出量と収支から算出し、図9に示した。なお、計算には表5に示した淡色黒ボク土における汚泥肥料の施肥量100t/10a/年の収支を採用した。これは、施肥量10t/10aの収支では重金属類の検出量が微量となり、計算精度が悪くなるためである。

まず、図8でひ素に着目すると、流出量は年経過に従い増減があるものの他の重金属類より多い。表5の収支では流出量に対する溶出量試験検出量の割合が低いため、流出量を溶出量試験濃度に換算すると、0.00002~0.00012mg/L程度であり、最大値で土壤環境基準0.01mg/Lの100分の1程度であった。

クロムの流出量はひ素に次いで多いが、ひ素と同じで流出量に対する溶出量試験検出量の割合

が低いため、流出量を溶出量試験濃度に換算すると六価クロムの土壤環境基準として0.05mg/Lの500分の1よりも低値であった。

鉛の流出量はほとんどなかった。クロムやひ素と同様に流出量に対する溶出量試験検出量の割合が低いため、流出量を溶出量試験濃度に換算すると土壤環境基準0.01mg/Lの1000分の1程度であった。

セレンに着目すると、流出量はひ素と比較すると少ないが、表5の収支では流出量に対する溶出量試験検出量の割合がひ素よりも高いため、流出量から溶出量試験濃度を計算するとひ素と同程度となったが、最大濃度は土壤環境基準0.01mg/Lの100分の1を下回った。

カドミウムと水銀の流出量は全期間で0であった。

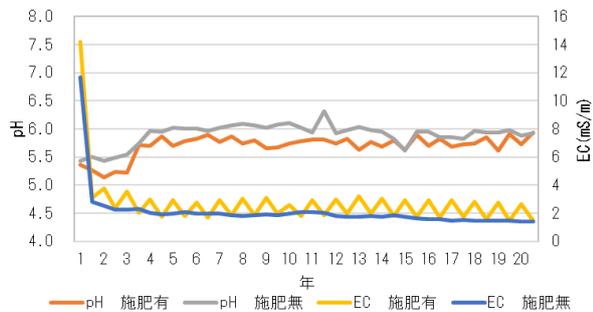


図7 流出水の pH と EC の推移

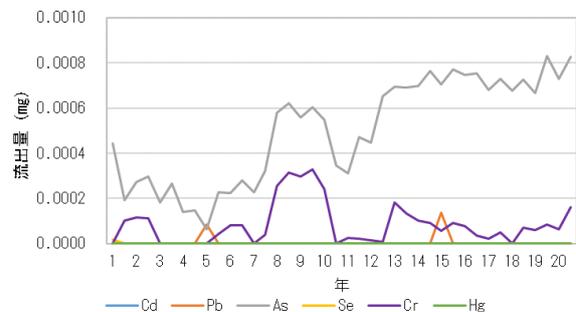


図8 連続施肥による流出量の推移

表5 連続施肥における溶出量試験濃度の計算に用いた収支

	流出量 (%)	溶出量試験検出量 (%)	含有量試験でのみ検出される量 (%)	完全吸着量 (%)
カドミウム	0.69	0.24	85.42	13.63
鉛	0.07	0.02	93.20	6.70
ひ素	19.47	2.19	43.97	34.35
セレン	1.12	3.20	1.97	93.70
クロム	1.65	0.13	1.78	96.43
水銀	0.18	0.00	45.66	54.15

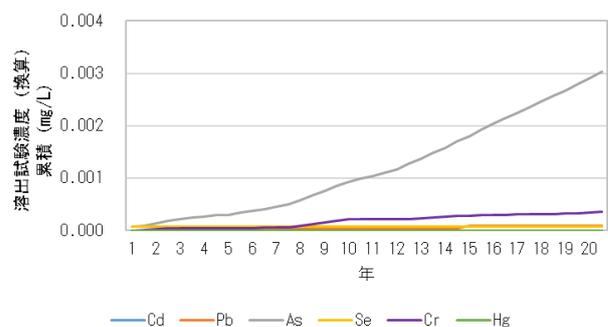
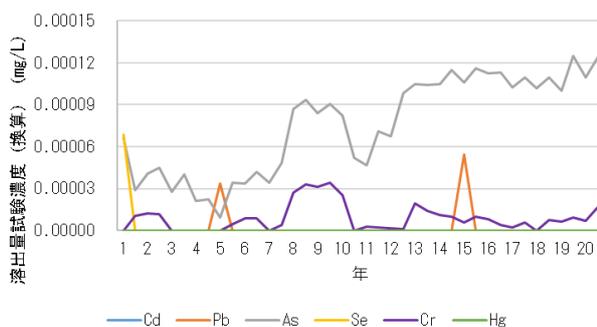


図9 連続施肥による溶出量試験濃度(計算値)の推移

## 2.2 連続施肥後の土壌

通水後のカラム内の土壌および堆肥の混合物を風乾して、46号試験と19号試験を実施した結果を表6に示した。

土壌および堆肥の混合物の46号試験結果では、ひ素のみ検出されたが土壌環境基準の0.01mg/Lは超過していなかった。試験前の土壌では検出されなかったことから、汚泥肥料の連続的な施用によってカラム内土壌がひ素に汚染されたと考えられた。

また、1年間分の施肥後土壌の46号試験結果(図4)における施肥量200t時のひ素の溶出量試験濃度と、連続施肥後土壌の46号試験結果(表7)を比較すると、1年間分の施肥後土壌が高い。セレンも同様に、1年間分の施肥後の土壌の46号試験結果が高い。トータルの施肥量は同じだが、累積雨量が一因と考えられる。このことから、同量を施肥する場合は、複数年かけて少量ずつ施肥する方法よりも、1年で全量を施用する方法が土壌を汚染しやすいことがわかった。

19号試験結果では、鉛とひ素が検出された。鉛は含有量基準150mg/kgを超過していないが、含有量試験における検出量が重金属類の中で最も多い。これは表5で示した収支において含有量試

表6 通水後土壌の46号試験と19号試験結果

測定項目	46号試験 (mg/L)	19号試験 (mg/kg)
カドミウム	<0.001	<1
鉛	<0.005	8
ひ素	0.007	2
セレン	<0.002	<1
クロム	<0.04	<1
水銀	<0.0005	<1

験でのみ検出される量の割合が多いこと、連続施肥として添加した量が一番多いことによるものと推察される。ひ素は46号試験でも検出されており、収支割合として含有量試験でのみ検出される量の割合が半分程度であることからも妥当な結果だと考えられる。

連続施肥終了後における累計施肥量に対する収支割合を計算し、表5の単年度施肥の収支と比較した結果を表7に示した。

表5の単年度収支の施肥量は100t/10aで、連続施肥終了後の累計施肥量は200t/10aであるが、セレン以外の重金属類で完全吸着量が単年度施肥の収支から増加している。これは長期間の施肥と通水によってカラム内土壌の大部分と重金属類が接触・吸着でき、不溶性の結晶等が十分に生成したことで、水で溶出しにくくなったと考えられた。

さらに、単年度と連続施肥後のカラム内土壌の46号試験・19号試験結果を比較すると、全体的に単年度の結果が高く、短期間で多量に施肥をすることの方が土壌汚染リスクは高くなることがわかった。

本試験における汚泥肥料は、公定規格の10分の1の重金属類が含まれると設定している。例えば公定規格を超える重金属類が含まれる汚泥肥料ならば、さらに土壌汚染のリスクが高くなる。カラム試験は実際の農用地で行われている施肥の状況を実験室レベルに縮小したものであり、試験期間中は土壌のかくはん・入替をしていないことから全てが実態に即したものではないものの、検討した重金属類の中ではひ素と鉛の土壌汚染リスクは高い。

表7 連続施肥終了後の施肥全量に対する収支

	流出量 (%)	溶出量試験検出量 (%)	含有量試験でのみ検出される量 (%)	完全吸着量 (%)
カドミウム	0.02 (-0.67)	0.09 (-0.15)	84.11 (-1.31)	15.77 (+2.14)
鉛	0.01 (-0.06)	0.02 (0)	64.87 (-28.33)	35.08 (+28.38)
ひ素	3.45 (-16.02)	1.11 (-1.08)	34.27 (-9.7)	61.15 (+26.8)
セレン	1.89 (+0.77)	2.34 (-0.86)	8.20 (+6.23)	87.56 (-6.14)
クロム	1.21 (-0.44)	0.07 (-0.06)	0 (-1.78)	98.70 (+2.27)
水銀	0.34 (-0.16)	0.01 (+0.01)	4.44 (-41.22)	95.18 (+41.03)

※小数第3位を切り捨て

※施肥量10t/10a/20年の淡色黒ボク土の収支

※( )内の数値は、施肥量10t/10a/年との増減を表す

### 3. 下水汚泥と汚泥肥料の安全性の確認

#### 3.1 下水汚泥と汚泥肥料の性状

下水汚泥と汚泥肥料では用いた試料 60g の水分量が異なるため、乾燥重量 60g あたりに換算した 46 号試験結果を表 8 に示した。下水汚泥の A～F は県内 6 箇所の下水処理場で採取した 6 種類の下水汚泥を意味している。E の下水汚泥は初沈汚泥を含まない余剰汚泥であり、他の下水汚泥は初沈汚泥と余剰汚泥が混合したものである。これらすべての下水汚泥でひ素とセレンが検出され、カドミウムは B, 鉛は B と E, クロムは A のみで検出された。汚泥発酵肥料ではカドミウム, 鉛, ひ素, セレンが検出された。し尿汚泥肥料ではカドミウム, ひ素, セレンが検出された。

下水汚泥および汚泥肥料の 19 号試験結果を表 9 に示した。汚泥発酵肥料の測定結果はない。すべての下水汚泥とし尿汚泥肥料で鉛とひ素が検出された。特に鉛はし尿汚泥肥料と下水汚泥 E で 10mg/dry-kg 以上が検出された。

下水汚泥および汚泥肥料の肥料等試験法による結果を表 10 に示した。上段の表は乾物単位重量中の含有量 (mg/dry-kg) を、下段の表は成分量 (%) を表したもので、同一の結果である。下段の表の下限値は、肥料の品質の確保等に関する法律の含有を許される有害成分の許容量 (公定規格)

の 10 分の 1 である。

下水汚泥の窒素全量・りん酸全量について、下水汚泥 E は大半が余剰汚泥で泥分が多く、夾雑物が少量のため、りん酸全量が多いと考えられた。下水汚泥はスポットで採取しているため、得られた結果は各処理場の代表値ではないが、窒素全量が多いとりん酸全量も多い傾向にある。また、試料採取は冬から夏にかけて実施したが、水温・気温の変動はあるものの窒素全量・りん酸全量はある程度一定していると推察された。

下水汚泥中の重金属類の平均含有量はクロム, ニッケル, 鉛の順に多いが、公定規格における重金属類の平均成分量 (%) は許容値の 10 分の 1 を下回っており、下水汚泥のみで公定規格に適合していることがわかった。

カラム試験結果を表 11, 12 に示した。表 11 は、カラム下部から流れ出た水の pH, EC, 塩分の結果と乾燥重量 60g に換算した重金属類の濃度を記載した。表 12 は、重金属類の乾燥重量 60g 換算に流出水量を乗じて、乾燥単位重量あたりの流出量 (mg/dry-kg) を記載した。

下水汚泥の pH, EC, 塩分について、E が異なる結果であった。これは E のみ初沈汚泥を含まないためと考えられた。EC および塩分については汚泥発酵肥料が測定試料の中で一番高く、し尿汚泥

表 8 下水汚泥と汚泥肥料の 46 号試験結果

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
カドミウム	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.001
鉛	<0.005	0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.007	<0.005	<0.005	0.011	<0.005
ひ素	0.076	0.10	0.15	0.16	0.084	0.074	0.16	0.074	0.10	0.035	0.008
セレン	0.009	0.014	0.023	0.036	0.002	0.011	0.036	0.002	0.016	0.003	0.003
クロム	<0.04	<0.04	0.05	<0.04	<0.04	<0.04	0.05	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
水銀	<0.0005	0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

(単位: mg/L)

※水分量により試料中の固形分量が異なるため、乾燥重量60gに換算

表 9 下水汚泥と汚泥肥料の 19 号試験結果

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
カドミウム	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	<1
鉛	3	5	3	5	13	5	13	3	6	-	14
ひ素	1	1	1	2	2	1	2	1	1	-	6
セレン	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	<1
クロム	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	<1
水銀	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	<1

(単位: mg/dry-kg)

表 10 下水汚泥と汚泥肥料の肥料等試験法結果

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
窒素全量	58200	52000	58800	62800	68000	55500	68000	52000	59200	-	55200
りん酸全量	42000	38700	40000	47700	58200	43700	58200	38700	45100	-	47300
カドミウム	0.25	0.20	0.29	0.30	0.68	0.14	0.68	0.14	0.31	0.56	1.4
鉛	6.2	7.0	5.0	5.5	15	6.2	15	5.0	7.5	13	30
ひ素	2.4	1.7	3.0	4.5	6.8	3.4	6.8	1.7	3.6	2.3	9.9
セレン	1.4	1.7	0.5	1.0	1.9	0.12	1.9	0.12	1.1	0.57	2.2
クロム	9.4	10	11	25	18	9.7	25	9.4	14	23	35
水銀	0.18	0.17	0.12	0.17	0.25	0.14	0.25	0.12	0.17	0.11	0.34
ニッケル	8.8	8.5	10	13	15	10	15	8.5	11	-	27

(単位：mg/dry-kg)

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
窒素全量	5.8	5.2	5.8	6.2	6.8	5.5	6.8	5.2	5.9	3.4	5.5
りん酸全量	4.2	3.8	4.0	4.7	5.8	4.3	5.8	3.8	4.5	3.7	4.7
カドミウム	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	0.00006	<0.00005	0.00006	<0.00005	<0.00005	0.00005	0.00014
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.003
ひ素	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0006	<0.0005	0.0006	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0009
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
クロム	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
水銀	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	0.00002	<0.00002	0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	0.00003
ニッケル	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	-	<0.003

(単位：%)

下限値は肥料取締法において含有を許される有害成分の最大量 (%) の1/10値

表 11 下水汚泥と汚泥肥料のカラム試験結果

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
pH	8.0	7.7	8.0	7.5	5.4	7.3	8.0	5.4	7.3	8.1	7.1
EC(mS/m)	150	120	130	130	27	130	150	27	110	770	270
塩分(%)	0.7	0.6	0.6	0.6	0.1	0.6	0.7	0.1	0.5	4.2	1.4
カドミウム	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.002
鉛	<0.005	0.013	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.013	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
ひ素	0.079	0.14	0.11	0.16	0.11	0.084	0.16	0.079	0.11	0.047	0.019
セレン	0.011	0.032	0.022	0.042	0.005	0.013	0.042	0.005	0.021	0.003	0.006
クロム	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
水銀	<0.0005	0.0017	<0.0005	0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0017	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

(単位：mg/L)

重金属類は乾燥重量60gに換算

表 12 下水汚泥と汚泥肥料の乾燥単位重量あたりの流出量

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
カドミウム	0.008	0.025	0	0	0.005	0	0.025	0	0.006	0.027	0.035
鉛	0.016	0.21	0.058	0.048	0.048	0	0.21	0	0.064	0.057	0.013
ひ素	1.3	2.3	1.9	2.6	1.9	1.3	2.6	1.3	1.9	0.77	0.31
セレン	0.18	0.52	0.37	0.69	0.085	0.22	0.69	0.085	0.34	0.053	0.11
クロム	0.05	0.15	0	0	0	0.03	0.15	0	0.04	0.55	0.02
水銀	0.0028	0.028	0.0026	0.0090	0	0.0044	0.028	0	0.0079	0.0074	0.0007

(単位：mg/dry-kg)

重金属類は乾燥単位重量に換算

肥料，下水汚泥の順となった。汚泥発酵肥料で数値が高い原因は，工業汚泥由来もしくは植物類原料に付着した塩分由来と考えられた。

すべての下水汚泥でひ素とセレンが検出され，Bのみさらにカドミウム，鉛，水銀が検出された。汚泥発酵肥料とし尿汚泥肥料ではカドミウム，ひ素，セレンが検出された。

46号試験とカラム試験の結果を比較すると，ひ素とセレンの検出濃度が同程度であり，下水汚泥Bではカドミウム，鉛，水銀が両試験ともに検出されている。今回実施した条件下におけるカラム試験結果と46号試験の結果は検出される重金属類の傾向が類似していた。

クロムは19号試験において全ての試料で検出していないが，肥料等試験では鉛よりも多く検出されている。これは表5の収支の傾向とも一致しており，クロムの蓄積量は19号試験では把握できないことがわかった。

### 3.2 汚泥肥料中の重金属類の溶出と土壌における挙動

「1. 土壌カラム試験による重金属類の挙動調査」では重金属混合溶液を添加して土壌における重金属類の挙動を把握したが，汚泥肥料中の重金属類が降雨によって水に溶出する過程を考慮していない。下水汚泥と汚泥肥料のカラム試験における流出水濃度の結果は，1年間の雨量を想定して重金属類の溶出の程度を調査したものである。

から，汚泥肥料の重金属類含有量に対する土壌カラム試験の流出水中の含有量の割合を計算することにより，汚泥肥料中の重金属類の溶出を含めた土壌汚染のリスクを確認することが可能と考えた。そこで，汚泥肥料1t当たりの重金属類含有量に対する溶出量の割合を流出比として，式Aを作成した。重金属類含有量は，土壌カラム試験における汚泥肥料1tに相当する重金属類混合溶液0.1mL中の含有量，つまり表2に示す施肥量1t/10aあたりの重金属類添加量である。溶出量は，下水汚泥と汚泥肥料のカラム試験結果の流出水濃度を汚泥肥料1tに相当する乾燥重量0.5gから溶出する濃度に換算し，流出水量を乗じて算出した。重金属類の元素ごとに，式Aで流出比を計算した結果を表13に示した。

流出比が1より大きいと，土壌カラム試験において汚泥肥料から溶出して土壌へ浸透する量が多くなり，重金属類の挙動調査結果(図4, 5)では土壌汚染のリスク(土壌溶出量濃度と土壌含有量濃度)は高くなる。反対に，1より小さいと土壌への浸透する量が少なく，土壌汚染のリスクは低くなる。

表13で下水汚泥のセレンを例にすると，汚泥肥料1t/10a(Se 500mg含有)を施肥した場合，流出比は最大で1.3，最小は0.17であり，それぞれ1.3t/10a(Se 650mg含有)，0.17t/10a(Se 85mg含有)に相当するセレンが汚泥肥料から流出し土壌に浸透することになる。

$$\text{流出比} = \frac{\text{カラム試験流出水濃度}[\text{mg/L}] \times (0.5[\text{g}] \div \text{試料量}[\text{g}]) \times \text{流出水量}[\text{L}] \times 2000000}{\text{重金属類添加量}[\text{mg}]} \quad \dots A$$

$$\text{流出比} = \frac{\text{土壌溶出量濃度}[\text{mg/L}] \times (0.5[\text{g}] \div 100[\text{g}]) \times 0.98[\text{L}] \times 2000000}{\text{重金属類添加量}[\text{mg}]} \quad \dots B$$

表13 流出比

	下水汚泥			汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	最大	最小	平均		
カドミウム	0.050	0	0.012	0.054	0.071
鉛	0.021	0	0.006	0.005	0.001
ひ素	0.53	0.26	0.30	0.15	0.063
セレン	1.3	0.17	0.69	0.10	0.22
クロム	0.30	0	0.080	1.1	0.059
水銀	0.14	0	0.039	0.037	0.004

(単位：t/10a)

表 1 4 下水汚泥と汚泥肥料の蓄積割合 100%時の施用量

測定項目	下水汚泥						最大	最小	平均	汚泥発酵肥料	し尿汚泥肥料
	A	B	C	D	E	F					
カドミウム	290	370	<u>250</u>	<u>250</u>	<u>110</u>	530	110	530	240	<u>130</u>	<u>54</u>
鉛	530	470	650	600	210	530	210	650	440	230	100
ひ素	820	1100	640	430	290	570	290	1100	540	840	200
セレン	1400	1100	3900	1900	1000	16000	1000	16000	1700	3500	890
クロム	1000	920	900	380	530	1000	380	1000	700	420	270
水銀	<u>280</u>	<u>300</u>	420	300	200	<u>350</u>	200	420	290	440	150
ニッケル	1100	1100	950	720	660	990	660	1100	900	-	370

(単位：t/10a)

下線の数値は試料毎の最小値を示す

今回試験を行った下水汚泥と汚泥肥料に限れば、大半の重金属類の流出比は1より小さいため、土壤汚染のリスクは低いと推察される。

なお、下水汚泥のセレンと汚泥発酵肥料のクロムは1を超えているが、図4にあるとおり500t/10aの施肥であっても土壤溶出量基準を超過することはないと考えられる。

汚泥肥料中の重金属類の溶出を想定する場合には、1年間の雨量を想定したカラム試験の結果が実態に即している。しかし、カラム試験は規格化されていないことに加えて試験時間を多く要する。そこで、カラム試験結果と46号試験結果は重金属類の検出傾向が類似していることから、46号試験結果を用いて簡略化できると考えた。式Aのカラム試験流出水濃度を46号試験結果である土壤溶出量濃度に置き換えると式Bとなる。46号試験は試料と溶媒(水)を重量体積比10%の割合で混合させて試料液を作成することから、検液1Lあたりの試料量は100g、流出水量は滴下した液量と同じ0.98Lとした。今回試験した汚泥肥料以外であっても、式Bで流出比を求め、施肥量を乗じた値(t/10a)を計算することで、土壤カラム試験による重金属類の挙動調査結果(図4, 5)から汚泥肥料中の重金属類の溶出を考慮した46号試験結果と19号試験結果の推定ができることとする。

県内では汚泥肥料を100t/10a/年程度を施肥している事例が存在する。下水汚泥に多く含有するひ素について着目すると、仮に今回試験した下水汚泥そのものを100t/10a施肥した場合、表13の下水汚泥の最大値の流出比は0.53であり、土壤カラム試験による重金属類の挙動調査結果(図4, 5)では施肥量53t/10aに相当することになる。よって、下水汚泥中のひ素の土壤汚染レベルは実際には低くなると推察される。

### 3.3 汚泥肥料の農地への利用に係るガイドラインに基づく安全性の確認

「汚泥肥料の農地への利用に係るガイドライン」に基づき、下水汚泥と汚泥肥料の蓄積割合100%時の施用量を計算した結果を表14に示した。

重金属含有量が少量のものは施用量が多く、含有量が多量のもの施用量が少なくなる。ガイドラインでは「蓄積度が最も大きい重金属で蓄積割合を把握する」と記載され、当該肥料の最小施用量が施用できる最大量となる。したがって、下水汚泥そのものを施肥した場合の施用可能量は110t/10a、汚泥発酵肥料は130t/10a、し尿汚泥肥料は54t/10aとなった。このガイドラインには、施用者の遵守事項として長期間連用する場合は、施用前および5年経過後または累積の蓄積割合がおおむね50%に達したときに、土壤中の重金属の含有量を測定して土壤への蓄積状況を把握すること、との記載がある。通常の施用量1t/10aを毎年同量施肥すると仮定すると、蓄積割合が概ね50%に達するには下水汚泥では55年、汚泥発酵肥料は65年、し尿汚泥肥料は27年を要することがわかった。

### 結 語

土壤カラム試験による重金属類の挙動調査で、ひ素、セレンは土壤溶出量基準に係る土壤汚染リスクが、カドミウム、鉛、水銀は土壤含有量基準に係る土壤汚染リスクが高いことがわかった。

重金属類の土壤における挙動はカラム内土壤に添加した重金属類の量に対する土壤の溶出量と含有量、カラム下部から流れ出る量の各々の割合を計算した。カドミウム、鉛、水銀の収支は主に含有量試験でのみ検出される量、完全吸着量で、セレンの収支は完全吸着量、含有量試験でのみ検

出される量，溶出量試験の順で，ひ素の収支は含有量試験でのみ検出される量，完全吸着量，溶出量試験，流出量で，クロムの収支は完全吸着量で主に検出された。

カラム内の土壌に毎年 10t 相当量の重金属類を添加し，20 年間分の雨量を通水した場合，土壌溶出量基準を超過しない結果となった。一方，土壌含有量基準を超過しないが，ひ素と鉛が検出されていることから，土壌には蓄積される。同量の汚泥肥料を施肥する場合，一度に全量施肥する方法は，複数年をかけて少量ずつ施肥する方法よりも土壌汚染のリスクが高いことがわかった。

下水汚泥と汚泥肥料の性状試験を実施した結果，すべての下水汚泥と汚泥肥料は肥料の品質の確保等に関する法律に定める公定規格を満たしていた。下水汚泥と汚泥肥料ともに，46 号試験ではひ素が，19 号試験では鉛が検出され，カラム試験ではひ素が多く流出した。

汚泥肥料中の重金属類の溶出と土壌への浸透を含めた重金属類の挙動を確認するため，下水汚泥と汚泥肥料のカラム試験結果を用いて，汚泥肥料 1t 当たりの重金属類含有量に対する割合を流出比とし，計算した。試験試料の流出比は最大 1.3 であり，土壌カラム試験の結果から土壌溶出量基準を超過することはないと考えられた。また，下水汚泥と汚泥肥料のカラム試験の結果の代わりに 46 号試験結果を用いて流出比を計算し，土壌汚染レベルの推定を試みた。

汚泥肥料の農地への利用に係るガイドラインにより安全性確認を実施したところ，通常施用量の 1t/10a を毎年同量施肥して蓄積割合が概ね 50%

に達するには，下水汚泥では 55 年，汚泥発酵肥料は 65 年，し尿汚泥肥料は 27 年となった。

## 謝 辞

下水汚泥を提供頂いた下水道事業者の皆様，本調査研究に御協力頂いた関係各所の皆様に感謝します。

## 文 献

- 1) 三重県農林水産部農産物安全・流通課，汚泥肥料の農地への利用に係るガイドライン，<http://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000117869.pdf> (2020 年 11 月 30 日アクセス)。
- 2) 水野和俊，吉羽雅昭：汚泥肥料の種類と成分含有量の実態－FAMIC の肥料検査成績から－。日本土壌肥料学雑誌，84(4)，311-320 (2015)。
- 3) 気象庁，過去の気象データ検索，<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (2020 年 11 月 30 日アクセス)。
- 4) 一般社団法人廃棄物資源循環学会：廃棄物関連試料の分析マニュアル，378-384，2015
- 5) 2016 年度酸性雨調査結果，三重保環研年報，19，97-102 (2017)。
- 6) 農林水産省，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 年農林省令第 47 号。
- 7) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター，肥料等試験法，<http://www.famic.go.jp/ffis/fert/sub9.html> (2020 年 11 月 30 日アクセス)。

## The Study of Safety Confirmation in the Use of Sludge Fertilizer

Emika KONDO, Yukitoshi OKUYAMA, Takahiro SAKAGUCHI, Yuya TACHINO,  
Takuya WATANABE, Kenta ISHIDA, Akiko SAKAMOTO and Yoko ARITOMI

**Keywords** : sludge fertilizer, sewage sludge, testing methods for fertilizer

In order to clarify the safety of sludge fertilizer, we conducted a behavioral survey of heavy metals in a soil column test and analyzed the properties of sewage sludge and sludge fertilizer. We tested the safety of sludge fertilizer with the guideline for the use of sludge fertilizer for agricultural land in Mie prefecture.

Arsenic (As) and selenium (Se) have a high risk of soil elution exceeding the standard. Cadmium (Cd), lead (Pb) and mercury (Hg) have a high risk of soil content exceeding standards. The behavior of heavy metals in the soil was grasped by calculating the ratios of the amount of heavy metals added to the soil in the column to the amount of soil elution, the soil content, and the amount flowing out from the bottom of the column. In a test in which 10 tons of fertilizer was applied every year and water was dropped assuming rainfall for 20 years, the soil elution standard was not exceeded.

As a result of the property test of sewage sludge and sludge fertilizer, As was detected in the Ministry of the Environment Notification No. 46 test and Pb was detected in the Ministry of the Environment Notification No. 19 test. In the column test, a large amount of As was leaked. All sewage sludges and sludge fertilizers met the official standards of the Act on Ensuring the Quality of Fertilizers.

The number of years when 1 ton per 1000 m<sup>2</sup> was fertilized every year, the accumulation ratio reached about 50% was 55 years for sewage sludge, 65 years for fermented sludge fertilizer, and 27 years for human waste sludge fertilizer, respectively.