

# 下水汚泥焼却灰から作製したリン肥料の小松菜栽培による肥効性、安全性の実規模での検証

廃棄物・有害物管理工学研究室 酒巻 堯史  
指導教員 小松 俊哉、姫野 修司

## 1 本研究の目的

年々発生量が増加する下水汚泥は、現在最終処分場の逼迫問題を引き起こしている。従来、下水汚泥は焼却処分し減容化されてきたが、更にこの下水汚泥焼却灰を溶融処理し溶融スラグとすることで、容積を更に 1/3 にまで減らす事ができる。この下水汚泥焼却灰から作製した溶融スラグは埋め立て処分されるだけでなく建設資材等を中心に再利用が進められてきたが、都市ごみ焼却灰から作製される溶融スラグに比べ下水汚泥焼却灰中にはリン（以下、P）が豊富に含有しているため、建設資材製品としての溶融スラグの強度低下の原因となり問題となっていた。しかし現在、この P は世界規模の枯渇問題からリサイクルの促進が重要視されてきており、下水汚泥に豊富に含まれる P を有効利用することは循環型社会の形成において重要である。

そこで本研究は、下水汚泥焼却灰から作製した溶融スラグをリン肥料として有効利用することを想定し、利用者が安心して使用できるよう、肥料としての安全性および肥効性を明確にすることを目的とした。具体的には実際の畑でスラグ肥料を施肥して小松菜を栽培し、畑の土の土壤分析、収穫した小松菜の生育量測定や成分分析を行った。そして、スラグ肥料の施肥量と小松菜の生育の関係を明確にするとともに、安全性の評価として、重金属の土壤への蓄積性、スラグ肥料の長期利用の可能性について検討した。

## 2. 1 農作物の選定

実際に畑で農作物を栽培することでスラグ肥料の安全性、肥効性の評価を試みた。農作物は根が可食部となる大根、葉が可食部となる小松菜、実のなるとうもろこしを選定、栽培したが、今回は標準試験品種である小松菜に注目し考察を行った。

## 2. 2 土壌（施肥）条件

本研究ではスラグ肥料の効果を明確にするために、以下のように土壌（施肥）条件を設定した。

Ca + N + K + C + スラグ肥料・標準量（以下、スラグ肥料（1倍） + N + C + K）

市場に出せる農作物にすることと同時に、の一般市販リン肥料である熔成リン肥との比較をするため。

スラグ肥料のみ                      スラグ肥料の効果の確認。

Ca + N + K + C

ブランク土壌としてリン肥料を与えない土壌だけの生育を確認するため。

Ca + N + K + C + 熔成リン肥                      一般的に使用されている肥料を用いての生育を確認するため。

Ca + N + K + C + スラグ肥料（標準量 × 1.5 倍量）（以

下、スラグ肥料（1.5 倍） + N + C + K）

のスラグ肥料を標準量、1.5 倍量施肥したものとで生育具合を比較するため。

なお略記号は以下の肥料を表している。消石灰（以下、Ca）市販窒素肥料（以下、N）

市販加里肥料（以下、K）市販完熟堆肥（以下、C）

Fig.1 に作付け図を示す。

1 区画は 5m×3m とし、区画間に 2m の間隔をあけ、隣あう区画が互いに影響を与えないようにした。

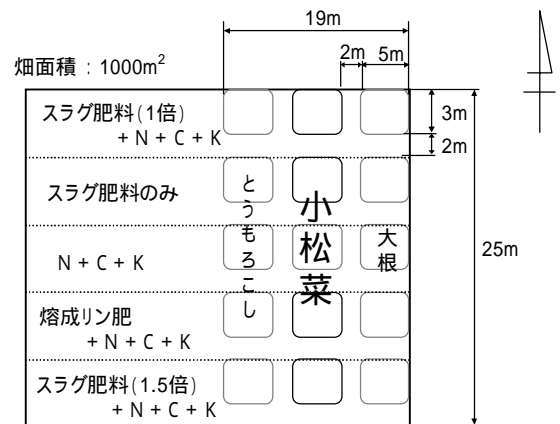


Fig.1 畑の作付け図

2.3 土壌、小松菜の重金属分析

スラグ肥料施肥後の各土壌の安全性を確認するために、土壌を採土した。そして重金属溶出量を環境庁告示 46 号法で、重金属含有量を環境庁告示 19 号法によって測定した。Table1 に施肥後各土壌の重金属溶出量および土壌環境基準値を、Fig.2 に施肥後各土壌の重金属含有量および土壌含有量基準値を示した。

Table1 から施肥後土壌の重金属溶出量が土壌環境基準以下であることから、スラグ肥料を施肥した土壌が重金属の溶出という観点から安全であることが分かった。また、Fig.2 から、今回小松菜を栽培した全ての土壌の重金属含有量が土壌含有量基準以下であること、また文献による一般土壌の重金属含有量の範囲<sup>1)</sup>内であるということが分かったため、重金属含有量から見てもスラグ肥料は安全であるといえる。次に小松菜の可食部・根および土壌の重金属含有量を Fig.3 に示す。Fig.3 から、Cd 含有量が最大のもので食品衛生法許容上限値の 1 / 20 以下 ( < 0.05 mg / 100g ) Pb についても最大のもので許容上限値の 1 / 20 以下 ( < 0.02 mg / 100g ) T-Cr は最大のもので許容上限値の 1 / 15 以下 ( < 0.7 mg / 100g ) であった。Pb、T-Cr は土壌の 1/10 ~ 1/100 のレベルであった。以上のことから、スラグ肥料を施肥して小松菜を栽培した場合、小松菜に対しても土壌に対しても安全であることが分かった。

Table1 施肥後土壌の重金属溶出量

		単位 : mg /		
		Cd	Pb	T-Cr
土壌環境基準		0.01	0.01	0.05
土壌条件	スラグ肥料(1倍)+N+C+K	0.0008	0.005	0.004
	スラグ肥料のみ	0.0008	0.004	0.005
	N+C+K	0.0009	0.003	0.006
	熔成リン肥+N+C+K	0.001	0.007	0.004
	スラグ肥料(1.5倍)+N+C+K	0.0004	0.005	0.004

Cr<sup>6+</sup>の基準

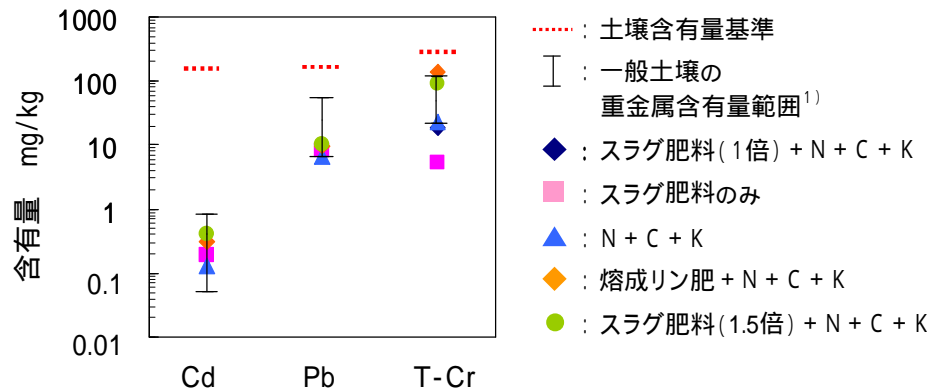


Fig.2 施肥後各土壌の重金属含有量

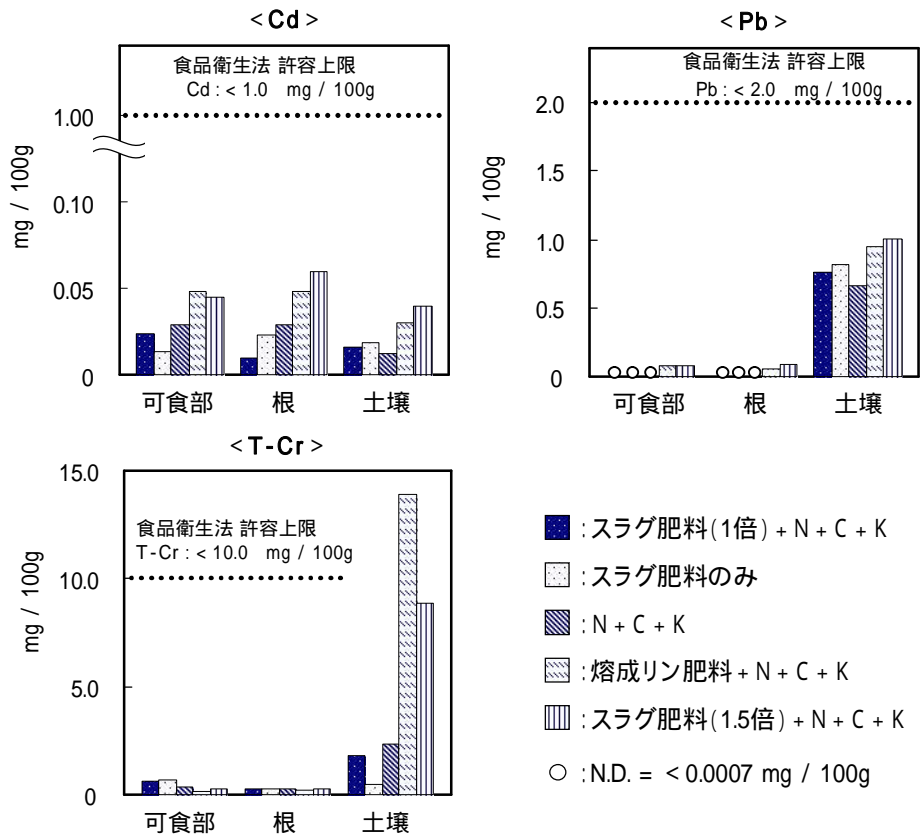


Fig.3 収穫した小松菜および土壌の重金属含有量

3 スラグ肥料中重金属の土壌への蓄積性  
スラグ肥料施肥による重金属の土壌への蓄積性について考察する。

Table2

一般土壌（文献値）とスラグ肥料の重金属含有量の比較

Table2 に一般土壌（文献値）<sup>1)</sup> および今回使用したスラグ肥料の重金属含有量を示した。スラグ肥料は Cd、Pb 含有量がきわめて少ないものの、T-Cr 含有量が一般土壌より約 6 倍も多いことが分かる。これは Cd、Pb は溶融処理の過程で大半が揮発するのに対し、T-Cr は沸点が高くスラグ中に残存しやすいといためと考えられる。

	単位：mg / kg	
	一般土壌	スラグ肥料
Cd	0.39	<0.001
Pb	24	<0.006
T-Cr	48	360

以下に、一般土壌の重金属含有量が土壌含有量基準を超えるまで何年施肥し続ける事ができるか計算した結果を Table3 に示す。また計算をする際に以下のように条件を設定した。

スラグ肥料施肥量は資料<sup>2)</sup> をもとに計算した、小松菜栽培時と同じ施肥量(0.44kg)とする  
土壌 1 畝の寸法、重量等は小松菜を栽培した時の畝と同じとする

スラグ肥料中の重金属含有量は栽培前にすでに測定した値を、一般土壌の重金属含有量は文献値<sup>1)</sup> の平均を用いることとする

土壌の重金属含有量の増加は肥料によるもののみとする（降雨等を考えない）

植物体への移行、降雨による流出などによる減少はないと仮定する

これらについて Fig.4 に図表、値を示した。また Table3 に施用限界数を示した。(1)式に表したように土壌含有量基準と一般土壌中重金属含有量の差をスラグ肥料中重金属含有量で除したものを施用限界年数とした。

$$\text{施用限界数} = (\text{土壌含有量基準} - \text{一般土壌重金属含有量}) / \text{スラグ肥料重金属含有量} \quad (1)$$

Table3 に示したように、Cd、Pb はスラグ肥料中の含有量が極めて低いため、(1) の計算によると 3~4 百万年施肥可能という結果になった。施肥限界年数が最短の T-Cr が基準を超えるまでに 126 年という結果だけを見ても、スラグ肥料を長期にわたって施肥することができるといえる。このことからスラグ肥料の長期有効利用の可能性が示唆された。

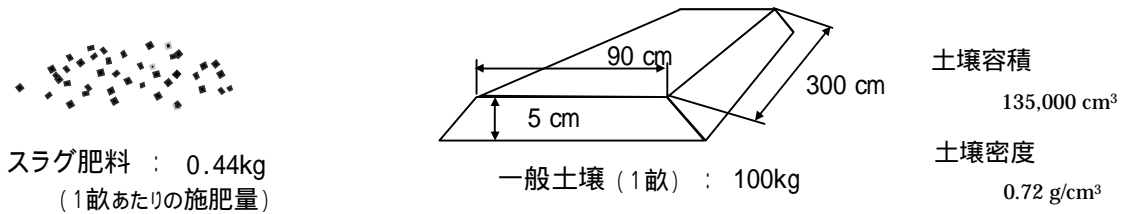


Fig.4 一般土壌 1 畝と施肥するスラグ肥料

Table3 一般土壌へのスラグ肥料の施用限界年数

	重金属含有量 mg		施肥限界年数 年
	土壌含有量基準	一般土壌	
	100kg(1畝)あたり	スラグ肥料 0.44kgあたり	
Cd	15000	39	3,400,000
Pb	15000	2400	4,100,000
T-Cr	25000	4800	126

1 Cr<sup>6+</sup>の基準

#### 4. まとめ

スラグ肥料を施肥して小松菜を栽培した結果以下のことが分かった。

畑の土壌、収穫した小松菜の重金属含有量をそれぞれ分析したが、いずれも基準値以下であったため安全であるということが分かった。

スラグ肥料中重金属の土壌への蓄積性について条件を設定して計算したところ、T-Cr が土壌含有量基準を超えるまで 120 年以上かかるという結果を得た。このことから、スラグ肥料が実土壌において長期間施肥可能であるということが示唆された。

#### 5. 本研究の今後について

下水汚泥焼却灰を原料とする溶融スラグを肥料として有効利用するために、どのようなことが課題となるか。Fig.5 に下水汚泥焼却灰からスラグ肥料が作られさらに畑に還元されるまでの図を示す。スラグ肥料が安全であるというために農作物栽培の過程では、スラグ肥料施肥後の土壌含有量基準および蓄積、土壌から農作物への重金属の移行等を今よりさらに精度よく把握する必要がある。スラグ肥料の製造工程においては、溶融処理の際に下水汚泥焼却灰中の重金属がどの程度揮発して何割ほどがスラグに移行するのか、また下水汚泥焼却灰の重金属含有量にはどの程度の振れ幅があるのかについても把握する必要がある。これらを統合することで、さらなるスラグ肥料の有効利用促進を図ることができると考えられる。

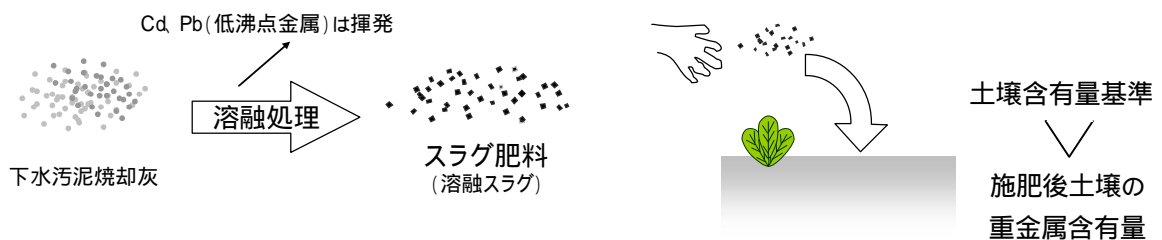


Fig.5 下水汚泥焼却灰から畑までの流れ

一般的に、下水汚泥の含有成分、特に重金属については地域によって異なる。重工業地帯の下水から回収される下水汚泥は当然重金属含有量が多いことが予想される。このような下水汚泥を原料として溶融スラグを作製した場合、低沸点金属は大半が揮発するが溶融スラグに高沸点金属が多く移行するものと考えられる。これではいかに下水汚泥が原料の溶融スラグがPを高含有していても、高沸点金属(Cr、Cu等)も高含有してしまうため、安全性の面から見て実用化は難しい。このことから下水汚泥由来の溶融スラグをリン肥料として実用化するためには、下水汚泥の性状、下水汚泥が発生する地域と産業形態、季節変動等についても考慮しなければならない。

これらを踏まえて現在、農作物への重金属移行率を把握するために、小松菜のポット栽培を行っている。重金属含有量の違う土壌で小松菜を栽培し、小松菜への重金属の移行について明確にできると考えられる。また新たに、スラグ肥料中重金属の溶出率、異なる時期に作製されたスラグの重金属含有量などを測定していくことで、スラグ肥料の有効利用促進につなげていくことができると考えられる。また、どのような地域からどのような重金属を含有する下水汚泥が発生するのか調査する必要がある。

#### 参考文献

1) 土壌汚染環境基準設定調査、環境庁(昭和58年)

2) 全農肥料農薬部、土壌診断とその結果の活用