

下水汚泥焼却灰を原料とするスラグ肥料の肥効性の実証と評価

廃棄物・有害物管理工学研究室
指導教員；姫野修司 小松俊哉
06529682 露崎知広

1. 背景及び目的

下水汚泥焼却灰の有効利用とリンの循環利用の観点から、より付加価値の高いリンの有効利用方法として、下水汚泥焼却灰に熔融処理を施し肥料化する技術が注目されている。しかし、これまでこのリン肥料（スラグ肥料）はポットやプランターでの小規模で植害試験として検証されてきたが、実圃場での肥効性評価としての栽培試験の検証は不十分である。そこで、本研究では実規模の圃場でスラグ肥料の肥効性の検討・評価を目的とした。

2. 実験及び方法

2-1 作付け

圃場 475m²を選定し、畑を作成した。スラグ肥料の効果をより明確化するために土壌（施肥）条件を3条件、農作物として茶豆、スイートコーン、小松菜を選定した。また圃場の一部を掘削し、砂土壌を客土として土壌条件を一定にした栽培区を作成し、小松菜の栽培を3土壌条件で行った。圃場の作付けの概略を図1に示す。

加えて砂土壌を用いた室内ポット栽培試験も圃場と同じ土壌条件で行い、スラグ肥料施肥の影響評価を行った。

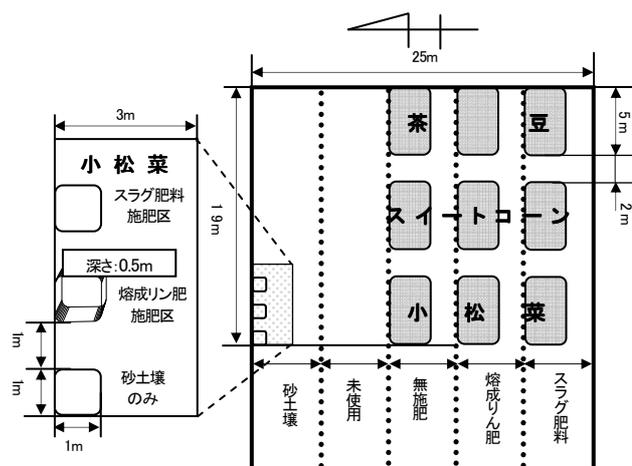


図1 圃場作付け図

2-2 土壌分析

施肥による土壌への影響を評価するために土壌重金属含有量ならびに土壌中のリン成分評価項目として扱われる有効態リン酸、リン酸吸収係数を栽培前・収穫後に分析した。

2-3 収穫物の分析

収穫した各農作物は1土壌12検体を可食部、茎、葉、根など部位ごとに風乾・粉碎後に硝酸一過塩素酸分解法により分解・濃縮後に検液を分析した。

3. 結果および考察

3-1 使用しているリン肥料の肥効性、安全性の確認

本研究で使用するスラグ肥料および市販リン肥料である熔成リン肥の主要素、重金属の含有量およびク溶性ならびにク溶性での溶出率（以下：ク溶率）を図2に示す。スラグ肥料は肥料取締法の熔成汚泥灰複合肥料の公定規格でク溶性 P₂O₅：12wt%以上、ク溶性 K₂O：1wt%以上、アルカリ分（CaO+MgO）：40wt%以上を保証されており、使用したスラグ肥料はク溶性 P₂O₅：16wt%、ク溶性 K₂O：1.4wt%、アルカリ分（CaO+MgO）：40wt%であり、十分に規格を満たしていた。熔成リン肥は肥料取締法の熔成リン肥の公定規格でク溶性 P₂O₅：17wt%以上、アルカリ分（CaO+MgO）：40wt%以上、ク溶性 MgO：12wt%以上を保証されており、今回使用した熔成リン肥はク溶性 P₂O₅：20wt%、アルカリ分（CaO+MgO）：43wt%、ク溶性 MgO：12wt%であり、十分に規格を満たしていた。

重金属の含有量（ク溶率）はスラグ肥料が Cd：1.4mg/kg（17%）、T-Cr：82mg/kg（63%）、Pb：4mg/kg（1%）、Ni：23mg/kg（6%）であったが、熔成リン肥は Cd：4mg/kg（47%）、T-Cr：674mg/kg（56%）、Pb：2mg/kg（41%）、Ni：679mg/kg（16%）であり、スラグ肥料のほうが重金属含有量は少なかった。これはスラグ肥料が熔融処理を行っているため、スラグ中の重金属が金属の形態で存在し、スラグ骨格構造が崩壊しても溶液中に溶出せずに残渣中に含有したものと推察される。一方、熔成リン肥はリン鉱石から作製しているため、肥料中の重金属の形態が不安定であり、CaやMgなどがH⁺とのイオン交換により

骨格が崩壊するときにイオン化状態の重金属が同時に溶出してしまうと推察される¹⁾。加えて植物に対する元素の有害性を比較すると、害作用の大きいものから $Cr > Ni > As \approx Cd > Pb > Zn$ という報告もなされており²⁾、スラグ肥料は熔成リン肥に比べ、有害性が高い重金属である Cr, Ni 含有量が低い肥料であることが確認された。

3-2 圃場への施肥による土壤中リン成分の変化

図3に圃場での小松菜栽培による土壤中リン成分の変化について示す。

また図4に砂圃場での小松菜栽培による土壤中リン成分の変化について示す。どちらの栽培試験でも無施肥土壌と比較して熔成リン肥施肥土壌、スラグ肥料施肥土壌では土壤中リン成分の増加を確認した。リン酸吸収係数に比べ有効態リン酸の変化が顕著であり、畑土壌に比べ砂土壌の方が施肥による影響が大きく現れた。これは砂土壌中の肥効成分が低く、施肥による影響を受けやすい土壌だからだと推察される。

また溶出するリン酸量が等しくなるように熔成リン肥とスラグ肥料を施肥したが、リン酸吸収係数・有効態リン酸ともに熔成リン肥の方が若干優れた結果を示した。これはそれぞれの肥料の粒形の違いによるものと推察される。肥料取締法により熔成リン肥、スラグ肥料ともに粒形は2mm以下のふるいを全通するものとされているが熔成リン肥の粒形はスラグ肥料に比べて非常に小さく、土壌中の水分と接触する表面積が熔成リン肥の方が大きく^{3,4)}、結果として施肥した総リン酸量が等しくとも土壌中のリン酸成分の増加に差異が見られたと推察される。

3-2 スラグ肥料施肥による土壌への影響

図5に砂土壌ポット栽培試験による土壌重金属含有量の変化を示す。施肥により栽培前の Cr, Ni が増加したが、これは砂土壌の pH が低いために含有量を測定するための振とう試験の際に肥料中から若干溶出したためだと推測される。Pb、Cdに関しては施肥による増加はみられなかった。収穫後の重金属含有量をみると、 Cr, Ni はどの土壌条件でも減少傾向にあり、植物にとっての微量元素であることを考慮すると、生育に用いられたために減少したと推察される。

熔成リン肥施肥土壌とスラグ肥料施肥土壌を比較すると、熔成リン肥施肥土壌の Cr, Ni 含有量が高い

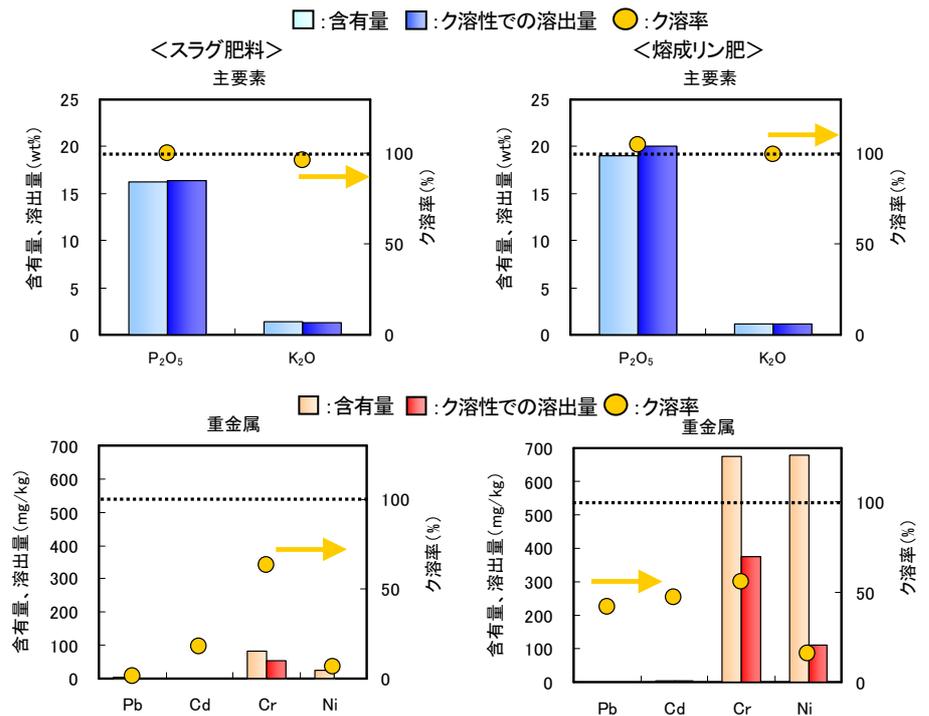


図2 スラグ肥料および熔成リン肥の重金属、主要素成分

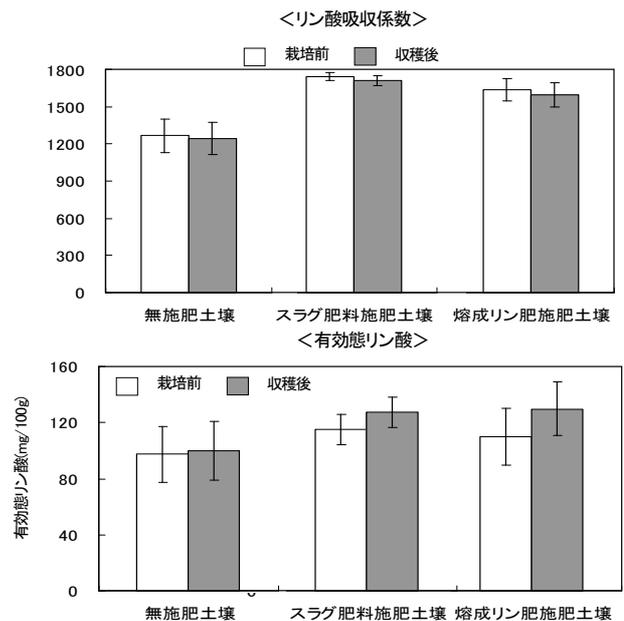


図3 圃場での小松菜栽培による土壤中リン成分の変化

数値を示した。これは熔成リン肥に含有するCr、Ni含有量がCrは6倍ほど、Niは30倍ほど大きいために差異が生じたのだと推察された。しかし土壌含有量基準(Pb:150mg/kg, Cd:150mg/kg, Cr⁶⁺:250mg/kg)をどの土壌もPbは1/80、Crは1/15~1/50、Cdは1/4700以下を示し、重金属類からみた土壌への危険性は非常に低く、施肥による問題はないと推測された。

3-3 スラグ肥料施肥による植物体への影響

表1に砂土壌ポット栽培試験による生育結果を、図6に砂土壌ポット栽培試験による小松菜の重金属含有量をそれぞれ示す。無施肥土壌と比較し、リン肥料を施肥した土壌では生育量の増加を確認した。もっとも生育量が優れていたのは熔成リン肥施肥土壌であった。これは先に述べた土壌中リン成分の増加量と合致する結果であった。

小松菜の重金属含有量のPb、Cdについて無施肥土壌、リン肥料施肥土壌ともに大きな差はみられず、施肥の影響はないものだと考えられた。Cr、Ni含有量は熔成リン肥施肥土壌において他の土壌条件と比較して高い値を示した。これは先に述べた熔成リン肥施肥土壌の土壌分析結果と合致しており、施肥の影響により含有量が増加したと推察される。

また食品衛生法許容上限量(Pb:2.0mg/100g, Cd:1.0mg/100g, T-Cr:10~20mg/100g)と比較した場合、どの土壌条件も1/50~1/100以下を示した。

3-4 粒形によるリン酸溶出量への影響

これまでの栽培試験から熔成リン肥とスラグ肥料を施肥した場合における土壌中リン酸量増加の違いは粒形の差によるものと推察された。粒形が小さい熔成リン肥は比表面積が大きく、その分だけリン酸の溶出が行われ易いと考えられる。そこで熔成リン肥とスラグ肥料を1kg採取し、2mm~1.70mmから75μm以下の範囲でふるいわけを行い、粒形分布をそれぞれ比較した。図7に粒形分布を示す。このように粒形は熔成リン肥の方が小さく、リン酸の溶出に対して影響を与えている可能性が示唆された。

リン酸の溶出試験としてク溶性試験を用いたが、実験条件として粒形212μm以下のものを実験試料として用いている。そのため粒系の影響を捉えることは出来ない。そこで粒形条件を設けず、振とう時間を10分刻みで割り振ったク溶性試験の結果を行った。その結果を図8に示す。熔成リン肥は10分の時

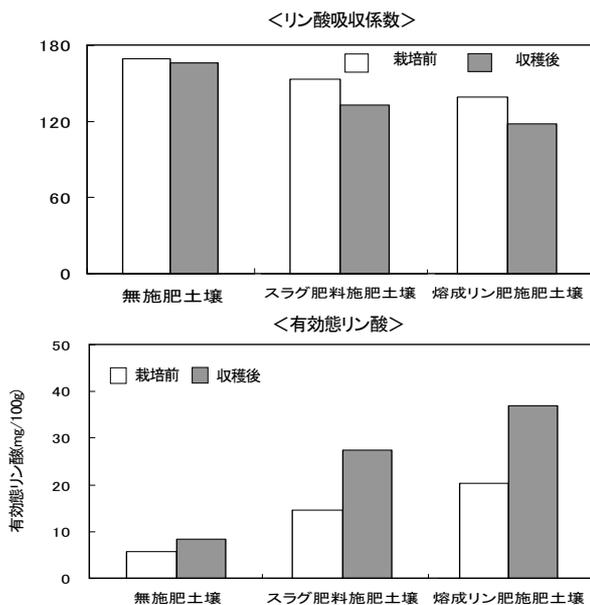


図4 砂圃場での小松菜栽培による土壌中リン成分の変化

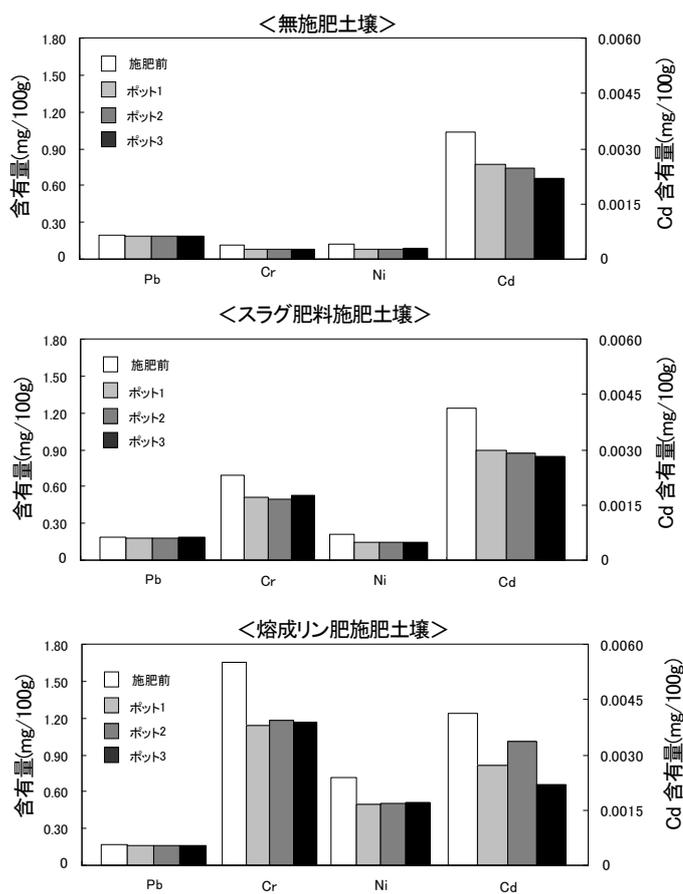


図5 砂土壌ポット栽培試験による土壌重金属含有量の変化

点で 15wt%リン酸が溶出しており、40 分の時点で溶出量は飽和したが、スラグ肥料は 10 分の時点で 7wt%ほどしかリン酸は溶出しておらず、50 分の時点で溶出するリン酸量が飽和した。10 分の段階でリン酸含有量に対して熔成リン肥は 75%程度が溶出しているが、スラグ肥料は 45%程度しか溶出していない。今回の試験結果より粒形は溶出量ならびに溶出時間に大きく影響を与えるという事が示唆された。そのためスラグ肥料の肥効成分溶出量をより向上させるには粒形をより細かく設定する必要があると推察された。

4. 結論

- スラグ肥料施肥により土壌中のリン成分の増加を確認した。
- リン成分の増加量は熔成リン肥に比較してやや少なかったが、粒形による影響だと推察された。
- スラグ肥料施肥による土壌、植物体への重金属含有量に影響は小さく、実用問題がないことが実証された。

以上のことからスラグ肥料は植物の生育を促す肥効性を有しており、熔成リン肥と比較しても重金属が少ない肥料であることより、下水汚泥の有効利用の観点からも有効な技術であると結論付けられる。

参考文献

- 1) 農林水産省告示第 218 号: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(2006)
- 2) 伊藤純雄他：重金属による野菜の汚染に関する研究 II トマトとレタスによるひ素・カドミウム・銅・亜鉛・クロム・ニッケル・鉛の過剰吸収と汚染の指標, 野菜試験場報告 A.6, pp.123-145 (1979)
- 3) 高橋邦夫他：高炉水砕スラグの固結に及ぼす要因について (その 1:各種要因の影響), 土木学会第 57 回年次学術講演会, III-031, pp.61-62 (2002)
- 4) 高橋邦夫他：高炉水砕スラグの固結に及ぼす要因について (その 1:粒度の影響), 土木学会第 57 回年次学術講演会, III-032, pp.63-64 (2002)

表 1 砂土壌ポット栽培による小松菜の栽培結果

播種数	収穫数	草丈 (cm)	総重量 (g)
無施肥1	24	3.9 (0.2)	0.29 (0.04)
無施肥2	23	4.1 (0.3)	0.31 (0.02)
無施肥3	25	3.7 (0.2)	0.28 (0.04)
スラグ肥料1	25	6.6 (0.4)	0.41 (0.04)
スラグ肥料2	23	6.9 (0.3)	0.45 (0.02)
スラグ肥料3	24	6.8 (0.3)	0.44 (0.03)
熔成リン肥1	25	6.8 (0.1)	0.42 (0.03)
熔成リン肥2	24	6.7 (0.3)	0.44 (0.02)
熔成リン肥3	25	7.0 (0.2)	0.43 (0.02)

()内は標準偏差

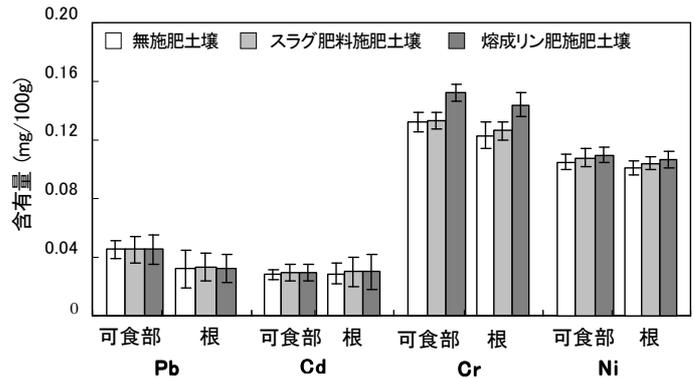


図 6 砂土壌ポット栽培試験による小松菜の重金属含有量

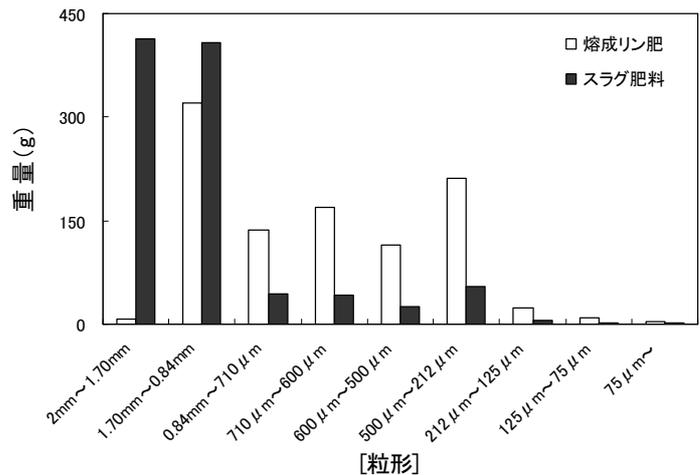


図 7 熔成リン肥ならびにスラグ肥料の粒形分布

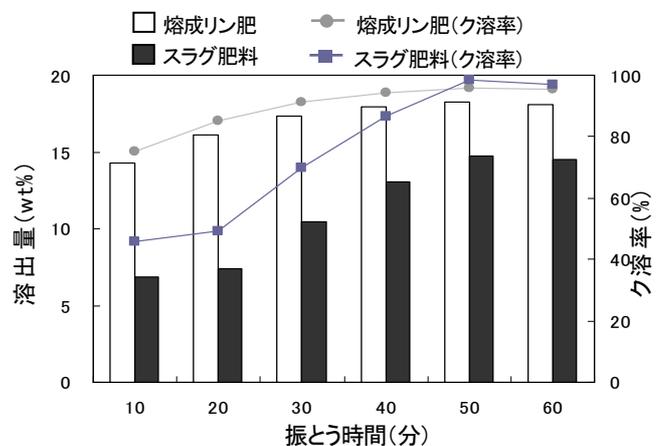


図 8 ク溶性試験によるリン酸溶出量の経時変化