リン酸イオンを吸着した硫酸第一鉄混合・加熱火山灰土壌のリン再生 及び使用済リン吸着材の再利用

江 耀 宗* 柳 田 友 隆* 三 谷 知 世** 野々山 弥**

Regeneration of Phosphorus in Volcanic Ash Soil Heated with Ferrous Sulfate Adsorbing Phosphate Ion and Reuse of Used Phosphorus Adsorbent

Yaozong JIANG*, Tomotaka YANAGITA*, Tomoyo MITANI ** and Yaya NONOYAMA**

* Createrra Incorporation, 6-39-18 Mastubara, Setagaya-ku, Tokyo 156-0043, Japan

** Department of Chemical Science and Engineering, Tokyo National College of Technology, 1220-2 Kunugida-cho, Hachioji, Tokyo 193-0997, Japan

Abstract

Using heated volcanic ash soil with ferrous sulfate that adsorbed phosphoric acid ions, phosphorus regeneration is experimentally examined, and the reuse of used phosphorus adsorbent is investigated. The phosphate adsorption quantity of the used phosphorus adsorbent is high, similar to that of phosphate rock. The phosphorus adsorbent pattern is aluminum-type phosphorus > iron-type phosphorus > calcium-type phosphorus. The ideal desorption liquid for used phosphorus adsorbent is sulfuric acid solution. It completely (100%) desorbs phosphate, but needs a sixfold increase in the amount of what to regenerate phosphate. Additionally, the effect of volcanic ash soil on the growth of *Brassica campestris* cv. komatsuna is investigated using used phosphorus adsorbent, and the reuse of the adsorbent in agriculture is also discussed. The application of used phosphorus adsorbent to the subsoil of andosol facilitates the growth of komatsuna; this effect is higher than that of superphosphate application. Therefore, used phosphorus adsorbent offers promising advantages for reuse in agriculture.

Key words: fertilizer, phosphorus, regeneration, reuse, used phosphate adsorbent

1. はじめに

河川や湖沼などの富栄養化を抑制するためには、窒素・リンを同時に除去することが望ましい。水中には窒素固定を行なう藻類が存在し、一方のリンは窒素に比べ藻類の生育に対し制限的で、リン除去は重要な役割を担う¹⁾。

富栄養化を引き起こすリン元素は資源として人間の生活に欠かせないものであり、農業、医薬の分野に広く用いられている。日本はリンの原料であるリン鉱石をほとんど全量海外から輸入し、その8割を肥料として利用している²⁾。リン鉱石の埋蔵量と生産量の関係からみると、約40-50年で世界的に枯渇と言われている³⁾。

現在のリン除去技術としては、一般に凝集沈殿法、晶析脱リン法、また生物学的脱リン法が用いられているが、これらの方法は、設置面積が広い、制御が複雑で維持管理が

難しい、余剰汚泥が多量に発生し、除去能力に限界があるなどの問題がある⁴⁾。また、リンの回収及び再利用が困難である。これらの観点から、経済的で効果的なリン除去と使用済リン吸着材の回収と再利用技術を融合した循環型リン吸着材の開発が強く望まれている。

筆者らは土壌に還元できる循環型リン吸着材を開発するために、土壌に着目し、種々の検討を行ってきた。その結果、土壌を加熱処理することによってリン吸着能力を高めることができた⁵⁾。また、土壌に硫酸第一鉄を混合し、加熱処理することによってリン吸着能力がさらに増加した。それらの処理によるリン吸着能力の増加は土壌の種類により異なるが、火山灰土壌が最も高かった⁶⁾。また、硫酸第一鉄混合・加熱火山灰土壌は水中でも粒子が崩壊する

* 株式会社クレアテラ 〒156-0043 東京都世田谷区松原6-39-18

** 国立東京工業高等専門学校 〒193-0997 東京都八王子市檜田町1220-2

ことがなく、環境水中のリンを効率よく吸着除去することをバッチ法、カラム法及び実排水により明らかにした^{7,8)}。また、バッチ法により使用済リン吸着材の再生が硫酸で最も優れていることがわかった⁹⁾。使用済リン吸着材を土壌に混入し、小松菜生育に促進効果があることがわかった^{9,10)}。しかし、まだ不明点が残っている。

そこで、本研究はリン酸イオンを吸着した硫酸第一鉄混合・加熱火山灰土壌（以下使用済リン吸着材）を用い、実験室でリンの再生方法を詳細に調べ、リン吸着材の再使用を検討した。また使用済リン吸着材を用い、小松菜の生育に対する影響を調べ、農業への再利用について検討した。

2. 実験方法

2.1 使用済リン吸着材の作成とリン形態

既報の方法¹¹⁾で作成した粒径1.0-2.5mmの硫酸第一鉄混合・加熱火山灰土壌（以下リン吸着材）5kgに3000mgP・l⁻¹のリン酸二水素ナトリウム溶液20lを添加し、時々攪拌しながら、24時間放置してリンを吸着させた。その後、リンを吸着させた吸着材を水道水で十分に洗浄し、これを使用済リン吸着材とした。

使用済リン吸着材の全リン含量及び無機態リンの形態（鉄結合型リン、アルミニウム結合型リン、カルシウム結合型リン）を調べた。

2.2 使用済リン吸着材の再生実験

2.2.1 バッチ法による再生

(1) 硫酸および水酸化ナトリウムによるリン脱着

2.1の方法で作成した使用済リン吸着材1gに濃度の異なる(0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5mol・l⁻¹) 硫酸あるいは水酸化ナトリウム溶液20mlを添加し、10分間振盪した。その上澄液をろ過し、ろ液中のリンを定量し、使用済リン吸着材のリン脱着量を求めた。リン脱着量が使用済リン吸着材の全リンに占める割合をリンの脱着率とした。

(2) 硫酸の添加量と抽出時間によるリン脱着への影響

使用済リン吸着材の単位重量に対し、容積で1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10倍量の0.5mol・l⁻¹硫酸溶液を添加し、5, 10, 15分間脱着振盪した後、脱着液中のリンを定量した。

(3) 再生回数

使用済リン吸着材5gに0.5mol・l⁻¹硫酸溶液50mlを添加し、15分間振盪してからろ過し、リン脱着液とした。その後水道水でリンを脱着した使用済リン吸着材を十分に洗浄し、リン吸着実験を行った。リンを脱着した使用済リン吸着材に、25g・kg⁻¹リン酸アンモニウム溶液20mlを添加し、1時間振盪後、24時間放置し、リンを吸着した。ろ紙(TOYO No. 5C)でろ過後、ろ液中のリン濃度を定量した。吸着前後のリン濃度差からリン吸着量を算出した。リンを吸着させた使用済リン吸着材を水道水で十分に洗浄し、脱着実験の試料とした。以上の脱着・吸着操作を繰り返して、吸着材の再生率（毎回の脱着後リン吸着量が最初のリン吸着量に対する割合）を求めた。

2.2.2 カラム法による再生

2.1の方法で作成した使用済リン吸着材を用いカラム（直径24.9mm、高さ100mm）に充填した。再生液は2.2.1のバッチ法の結果に基づいて硫酸溶液濃度が0.4, 0.5mol・l⁻¹、水酸化ナトリウム溶液濃度が1.0mol・l⁻¹であった。空間通水速度SV1, 2.5(l・h⁻¹)で上部から下部へ通水し、各通水時間帯での溶液中のリン濃度を定量し、リン脱着率を求めた。

ここで空間通水速度SVは単位時間当たりの通水量とろ過材の容積の比である。

2.3 黒ボク土における使用済リン吸着材の施用が小松菜の生育に及ぼす影響

使用済リン吸着材のリン酸肥料効果を明らかにするため、リン酸欠乏の黒ボク土の下層土を選定した。2.1の方法で作成した使用済リン吸着材を黒ボク土に3水準の施用率で混入し、対照として過リン酸石灰区と無リン区を設けた。各施用率の黒ボク土を1/5000aポットに充填し、ガラス室で小松菜 (*Brassica campestris* cv. komatsuna 品種うぐいす菜) の栽培試験を行った。2001年10月18日に小松菜をポット当たり3株に、1株当たり5粒を播種し、播種後9日目(10月27日)に1株当たり1個体に間引き、12月18日に収穫した。全栽培期間の水分管理を同様にし、実験はいずれも3連で行った。栽培終了後小松菜のクロロフィル含量を測定し、小松菜を採取、水洗、60℃で通風乾燥後、地上部と地下部の乾物重と葉の養分含量を測定し、使用済リン吸着材のリン酸肥料効果とリン利用率を検討した。

2.4 分析方法

土壌分析は土壌標準分析・測定法¹²⁾に準じて行った。リン濃度の分析はモリブデンブルー（アスコルビン酸）吸光度法¹²⁾により定量した。なお、発色にpHの影響がでないように、溶液中のpHを中性付近に調整してから分析を行った。土壌のリン形態分析は関谷法¹³⁾によって行った。

小松菜の葉の養分分析は栽培植物分析測定法¹⁴⁾に準じて行った。小松菜のクロロフィル含量は葉緑素計(MINOLTA SPAD-502)¹⁵⁾で行った。

3. 結果および考察

3.1 使用済リン吸着材のリン含量とその無機態リンの形態

使用済リン吸着材のリン含量とその無機態リンの形態を明らかにすることによって、植物に対する有効性の複雑さの一端が解かれるとともに、使用済リン吸着材の利用上有益な知見が得られると考えた。Table 1に示すようにリン酸二水素ナトリウム溶液を吸着させたリン吸着材のリン吸着量は全リンとして8.65g・kg⁻¹であり、リン鉱石と同等レベルであった。無機態リンの三形態のうち、アルミニウム結合型リン(Al-P)が58.5%と最も多く、鉄結合型リン(Fe-P)、カルシウム結合型リン(Ca-P)がそれぞれ23.5%、17.8%であった。これは、本リン吸着材は火山灰土壌に硫酸第一鉄を混合し、加熱処理することにより、大量の非晶質アルミニウム・鉄（活性、遊離）が生じたため、リン酸溶液を添加することによってリン酸アルミニウム・鉄が生成したと考えられる。この結果は、火山灰土壌に施用した過リン酸石灰、熔成リン肥、重焼リン、リン酸二アンモニウムは、無機三形態のうち78-81%がアルミニウム結合型、

Table 1 Amount of inorganic phosphate in used phosphorus adsorbent.

	Amount(g・kg ⁻¹)	Percentage (%)
T-P	8.65	
Ca-P	1.54	17.8
Al-P	5.06	58.5
Fe-P	2.03	23.5

15-17%が鉄結合型リンに変換されるという東海林ら¹⁶⁾の結果と一致している。

また、南條¹⁷⁾は、過リン酸石灰または重焼リンを施用したアロフェン質黒ボク土の粘土画分に含まれている主生成物が非晶質リン酸アルミニウム類似物質であり、また非晶質水酸化鉄・アルミニウムに収着したリン酸イオンの赤外線吸収スペクトル及びX線回折により非晶質リン酸鉄・アルミニウムの混合物ができていることを明らかにしている。この結果は、本研究の使用済リン吸着材のリン酸アルミニウム・鉄は非晶質であり、植物が利用できる可能性があることを示唆している。

3.2 使用済リン吸着材の再生

3.2.1 バッチ法による使用済リン吸着材の再生

(1) 硫酸溶液と水酸化ナトリウム溶液によるリンの脱着

Fig.1に示すように、硫酸溶液、水酸化ナトリウム溶液ともに、 $0.3\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度までリン脱着率は急激に大きくなり、体積濃度で表すと、硫酸溶液で約74.8%、水酸化ナトリウム溶液で30.3%であった。 $0.3\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 以降リン脱着率は徐々に高くなり、 $0.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ の脱着率は硫酸溶液で83.2%、水酸化ナトリウム溶液で37.4%であり、 $1.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ の脱着率は硫酸溶液で100%、水酸化ナトリウム溶液で58.7%であった。また、いずれの濃度においてもリン脱着率は硫酸溶液の方が水酸化ナトリウム溶液よりもはるかに高かった。

船引¹⁸⁾は、土壌に固定されたリン酸の解放は、リン酸の固定に関与している活性Al及び活性Feと加えられた陰イオンの結合によって行われ、固定されたリン酸を解放する

能力は水酸基が最も大きく、次いで硫酸イオン、塩酸イオンの順序となっていることを指摘している。しかし、本研究では硫酸でのリン酸脱着率が水酸化ナトリウムよりも高かった。これは、リン酸イオンがAl-OH、Fe-OHの-OH基と置換するほかに、 AlPO_4 と FePO_4 が硫酸酸性により溶出したためと考えられる。

本実験では、 $0.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ の脱着率が回帰曲線の変曲点であることから、使用済リン吸着材の脱着には $0.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 硫酸溶液を用いるのが適当であると考えられる。

(2) リン脱着率に及ぼす硫酸溶液の液量と脱着時間の影響

Fig.2に示すように、リン脱着率は、 $0.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 硫酸溶液の添加量の増加に伴って急速に高くなり、3倍添加量までのリン脱着率は異なる脱着時間の間に差がほとんどなかった。硫酸溶液の添加量が3倍以上になると、リン脱着率の増加は緩やかになり、脱着時間が長いほうがリン脱着率は高かった。これは、高倍率の場合硫酸溶液は十分に使用済リン吸着材の内部へ浸透し、長時間の脱着により使用済リン吸着材の内部に吸着されたリンが溶出したためと考えられる。10倍添加硫酸溶液量では、リン脱着率は、5分間で約83.1%、10分間で約89.3%、15分間で103.9%に達した。本実験の添加硫酸溶液量とリン脱着率から総合的に考察すると、使用済リン吸着材に $0.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 硫酸溶液を10倍量加えて、15分間脱着することが適当であると考えられる。

(3) 使用済リン吸着材の再生回数と再生率

Fig.3に示したように、再生回数が6回までのリン再生率は100%であり、7回以上になると、低下した。再生回数6回までは、硫酸溶液の処理によって吸着されたリンが除去されただけでなく、使用済リン吸着材自身の表面に元来露出していたFeやAlの一部も酸で溶かされ、リンの吸着サイトを形成する活性Alや活性Feが表面に新たに露出したため、高いリン吸着能力を回復したものと考えられる。しかしながら、再生回数6回以降は使用済リン吸着材中FeやAlが硫酸処理を重ねるにつれて溶出減少し、リンを吸着できるサイトが少なくなったため、リン吸着能力が低下したものと考えられる。このことから、使用済リン吸着材の再生回数には限度があることがわかった。

以上の結果から、使用済リン吸着材は硫酸溶液でリンをほぼ完全に脱着することができ、再生回数は6回程度が適当であると認められた。

Fig.1 Desorption percentage of phosphate in used phosphorus adsorbent by H_2SO_4 , NaOH solutions.

Fig.2 Effect on desorption percentage by the amount of H_2SO_4 solution and desorption time.

Fig.3 Relations between the regeneration times and the regeneration rate of used phosphorus adsorbent in batch experiment.

Fig.4 Cumulative desorption rate of phosphate in used phosphorus adsorbent by H₂SO₄, NaOH solutions in column experiment.

3. 2. 2 カラム法による使用済リン吸着材の再生

バッチ法による使用済リン吸着材の脱着には0.5mol・l⁻¹硫酸溶液、10倍量添加、15分間振盪という条件が最適で、これによって脱着率が100%に達したことが明らかになった。しかし、バッチ法の場合強い振盪で吸着材の破砕が起こるため、ろ過材として使用する場合には適していない。ここで、破砕しにくいカラム法による使用済リン吸着材の脱着を行い、その効果をバッチ法と比較検討した。

Fig.4に示すように、空間通水速度SV2.5、通水6時間目のリン脱着率は、1mol・l⁻¹水酸化ナトリウム溶液で38.6%、0.5mol・l⁻¹硫酸溶液で84.5%であった。バッチ法と同様に硫酸溶液のリン脱着効果が水酸化ナトリウム溶液よりも高いことがわかった。

また、同様の濃度の硫酸溶液のリン脱着率は、空間通水速度SV2.5のほうがSV1よりも高く、1.7倍となった。同様の空間通水速度SV2.5場合のリン脱着率は、硫酸溶液濃度が高いほうが高く、5%増加した。

以上の結果から、0.5mol・l⁻¹硫酸溶液、空間通水速度SV2.5、通水時間6時間で使用済リン吸着材から84.5%のリンを脱着できることがわかった。カラム法の硫酸溶液添加量はバッチ法の約15倍量に相当し、バッチ法よりも多くなった。しかしながら、カラム法でも使用済リン吸着材のリンを約85%脱着できることから、本吸着材をろ過材として使用する場合には、リン脱着装置を設置することにより使用済リン吸着材からリンを脱着し、繰り返し使用できることが可能となった。また、硫酸溶液で脱着したリンが石灰の添加やpHの調整によって回収できることから、今後リン回収方法についても検討する。

3. 3 使用済リン吸着材の農業への再利用

供試黒ボク土の下層土の物理性と化学性をTable 3に示

Table 3 Physical and chemical properties of subsoil of andosol (Yachimata, Chiba) used in the experiment

pH(H ₂ O)	6.17
Electric conductivity(dS・m ⁻¹)	0.12
Cation exchange capacity (cmol(+)・kg ⁻¹)	16.7
Total carbon(g・kg ⁻¹)	25.3
Total nitrogen(g・kg ⁻¹)	2.09
Total phosphate(g・kg ⁻¹)	0.78
Phosphate absorption coefficient (g P ₂ O ₅ ・kg ⁻¹)	43.4
Coarse sand(%)	3.5
Fine sand(%)	49.3
Silt(%)	33.4
Clay(%)	13.8
Texture	L

Fig.5 Effect on growth of komatsuna by the application of used phosphorus adsorbent (60days).

す。供試土壌の土性はローム質で、リン酸吸収係数は高く、リン欠乏土壌であることがわかった。また、Table 4に試験処理区と肥料使用量を示す。使用済リン吸着材のリン酸効果を評価するために、各処理区とも同量の窒素とカリを施用した。使用済リン吸着材の施用処理区のほかに、過リン酸石灰区と無リン区も設けた。

(1) 使用済リン吸着材の施用による小松菜の生育への影響

Table 4の条件で小松菜を栽培した時の生育状況をFigs.5,6に示す。Fig.6(A)から分かるように小松菜の葉は、無リン区ではほとんど生長しなかった。これは、本供試土壌の有効態リン酸が著しく欠乏しているため、植物の核酸やタンパク質の合成が低下し、細胞分裂も衰えて、植物生育が極めて貧弱になったためである。

Table 4 Test treatment

	Treatments	Soil (kg)	Used phosphorus adsorbent (kg 10a ⁻¹)	NH ₄ NO ₃ (kg 10a ⁻¹)	Superphosphate (kg 10a ⁻¹)	K ₂ SO ₄ (kg 10a ⁻¹)
NK	Nonphosphate	2.0	-	35	-	25
NK+PC10%	Used phosphorus adsorbent 10%	1.8	10,000	35	-	25
NK+PC20%	Used phosphorus adsorbent 20%	1.6	20,000	35	-	25
NK+P	Superphosphate	2.0	-	35	35	25

Fig.6 Effect on growth (plant length, chlorophyll, root length and harvest yield) of *Brassica campestris* cv. komatsuna by the application of used phosphorus adsorbent. Bars denote means S.D.(n=3), different letters are significantly different at $p<0.05$.

一方、使用済みリン吸着材の施用区と過リン酸石灰区とも栽培時間の経過に伴い、葉身長は顕著に高くなった。小松菜の葉身長は使用済みリン吸着材20%区 $\geq$ 使用済みリン吸着材10%区 $>$ 過リン酸石灰区 $>$ 無リン区の順で低下した。

また、収穫時点での小松菜の葉のクロロフィル含量 (Fig.6(B))及び根長 (Fig.6(C))は葉身長と同様な傾向を示し、使用済みリン吸着材の施用によって増加し、過リン酸石灰区と無リン区よりも多かった。小松菜の地上部、地下部重量 (Fig.6(D))は、使用済みリン吸着材の施用によって顕著に増加し、過リン酸石灰区よりもそれぞれ176%、180%増加した。これは、使用済みリン吸着材中の非晶質リン酸アルミニウム・鉄が小松菜の根から分泌された無機酸や有機酸により可溶化され、吸収しやすくなったため、根系の発達を促進したものと考えられる。それとともに窒素、カリウムの吸収もよくなった。結果として小松菜の収量が高くなった。このことから、使用済みリン吸着材のリン酸効果は高いことが認められた。

異なる使用済みリン吸着材施用区の間には大きな差はなかった。これは、使用済みリン吸着材の施用量を多くしすぎると、リン以外の無機養分が制限因子となり、植物の生育が抑制されるためと考えられる。

ここでの結果では、小松菜の生育に対して黒ボク土への使用済みリン吸着材の施用量は10%、20%でほぼ同程度で、10%の施用で十分な効果があることがわかった。

(2) 使用済みリン吸着材の施用による小松菜の養分含量への影響

Fig.7に使用済みリン吸着材の施用による小松菜の養分含量への影響を示す。使用済みリン吸着材施用区の小松菜の窒素、カリウム、カルシウム、マグネシウム含量は過リン酸

石灰区に比べて少なくなった。また、使用済みリン吸着材の施用量の増加に伴いそれらの含量は少なくなった。しかしながら、リン、ナトリウム含量については過リン酸石灰区に比べて使用済みリン吸着材施用区の方が多くなり、使用済みリン吸着材の施用量の増加に伴いそれらの含量は多くなった。これは、使用済みリン吸着材はリン酸二水素ナトリウムを吸着させたもので、大量のリン酸とナトリウムイオンが含まれており、そのため、小松菜が多くのリン酸とナトリウムイオンを吸収したためである。谷田沢¹⁹⁾は、作物のリン酸吸収が硝酸態窒素の吸収と競合し、カルシウムイオンがアンモニア態窒素の吸収に好影響を与えることを指摘している。本実験で使用済みリン吸着材の施用によって小松菜のカルシウムが顕著に少なく、リンが多くなったことから、小松菜は窒素肥料として施用した硝酸アンモニウムに

Fig.7 Effect on nutrient of komatsuna by the application of used phosphorus adsorbent.

Table 5 Effect on absorption rate of N,P,K of the growth of komatsuna by the application of used phosphorus adsorbent.

Treatments	N Absorption rate (%)	P Absorption rate (%)	K Absorption rate (%)
NK+PC10%	41.9	2.8	40.5
NK+PC20%	38.6	1.7	33.9
NK+P	37.1	17.6	26.6

対する吸収が阻害され、窒素の吸収も少なくなったと考えられる。

(3) 使用済リン吸着材のリン利用率

肥料の利用率は作物の種類、栄養状態、塩類濃度、養分の存在様式などの環境因子に影響されている。一般的に火山灰土壌における畑作の窒素、リン酸、カリウム肥料の利用率はそれぞれ40-60%、5-20%、40-70%である²⁰⁾。本研究の小松菜の窒素、リン、カリウム肥料の利用率をTable 5に示す。過リン酸石灰区の小松菜の窒素、リン、カリウムの利用率は火山灰土壌における畑作とほぼ同程度であった。使用済リン吸着材施用区の小松菜の窒素、カリウムの利用率は過リン酸石灰区に比べて高く、リンの利用率は低かった。これは、3.1に示したように施用した使用済リン吸着材が主にリン酸アルミニウム・鉄であり、植物が利用しにくいと考えられた。今後使用済リン吸着材のリン利用率の向上を検討する予定である。

以上の結果から、使用済リン吸着材のリン利用率は過リン酸石灰よりも劣ってはいるが、一定のリン効果が認められた。吸収されていないリンは土壌に保存され、来季も利用できると考えられることから、使用済リン吸着材を土壌の改良資材として使用することが可能で、農業生産への再利用が有望であることが示唆された。今後、実都市下水二次処理水からのリンを回収した硫酸第一鉄混合・加熱火山灰土壌を用い、使用済リン吸着材の回収方法を検討し、さらに使用済リン吸着材の農業への再利用を検討する。

4. ま と め

リン酸イオンを吸着した硫酸第一鉄混合・加熱処理火山灰土壌を用い、実験室レベルでリンの再生方法を調べ、リン吸着材の再使用を検討した。また使用済リン吸着材を用い、小松菜の生育に対する影響を調べ、農業への再利用について検討した。得られた結果は次の通りである。

1) 使用済リン吸着材のリン吸着量は高く、リン鉱石と同等レベルであった。そのリン形態はアルミニウム結合型リン>鉄結合型リン>カルシウム結合型リンであった。

2) 使用済リン吸着材の最適脱着液は硫酸溶液であり、 $0.5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 硫酸溶液を10倍量加えて、15分間脱着することによってリンを100%脱着した。カラム法でもリンを85%脱着できた。再生回数は6回程度が適当であった。

3) 使用済リン吸着材を黒ボク土の下層土に施用すると小松菜の生育に高い促進効果があり、過リン酸石灰の施用よりも高いことが認められた。このことから、使用済リン吸着材の農業生産への再利用が有望であることが示された。

謝 辞

本研究の一部は平成12、13年度中小企業総合事業団の課題対応新技術研究開発事業の委託業務による成果であることを付記し、関係各位に深謝いたします。

(原稿受付 2004年10月06日)

(原稿受理 2005年 7月11日)

参 考 文 献

- 1) 稲森悠平, 須藤隆一 (1992) 水環境の現状と将来, 精密工学会誌, 58(1), 30-37.
- 2) 村山勝男 (1992) 排水中のリン除去とリサイクリング, 資源環境対策, 28(12), 1099-1106.
- 3) 小田部廣男 (1987) リン資源の現在と未来, *Gypsum & Lime*, 210, 307-316.
- 4) 稲森悠平, 松本一夫, 須藤隆一 (1988) 特集/小規模合併処理浄化槽 嫌気性条件を組み込んだ小規模合併処理浄化槽における脱窒・脱リン, 用水と廃水, 30(4), 358-364.
- 5) 江耀宗, 柳田友隆, 和田秀徳, 三谷知世 (2004) 加熱土壌のリン除去特性, 水環境学会誌, 27(2), 103-108.
- 6) 江耀宗, 柳田友隆, 和田秀徳, 三谷知世 (2004) 硫酸第一鉄混合・加熱処理土壌のリン除去特性, 水環境学会誌, 27(9), 605-609.
- 7) 三谷知世, 市村綾香, 下村耕平, 小池奈緒子, 大城英俊, 柳田友隆, 江耀宗 (2000) 焼成火山灰土壌によるリン酸イオンの除去, 化学工学論文集, 26(6), 877-881.
- 8) 三谷知世, 白石協子, 野々山弥, 黒江誠子, 柳田友隆, 江耀宗 (2003) 焼成火山灰土壌を用いた下水二次処理水からのリン酸の除去に関する長期的実証研究, 水環境学会誌, 26(6), 393-396.
- 9) 三谷知世, 古山将樹, 柳田友隆, 江耀宗 (2003) リン酸イオンを吸着した焼成火山灰土壌の酸及びアルカリによる再生, 化学工学論文集, 29(1), 147-149.
- 10) 柳田友隆, 江耀宗 (2002) 建設汚泥を用いた水質浄化用高性能吸着材の合成技術と浄化能力, 資源環境対策, 38(13), 1249-1252.
- 11) 江耀宗, 柳田友隆, 三谷知世 (2005) カラム実験を用いた硫酸第一鉄混合・加熱火山灰土壌による水中のリン除去, 水環境学会誌, 28(5), 327-332.
- 12) 土壌標準分析・測定法委員会編 (1986) 土壌標準分析・測定法, 博友社, pp. 10-13, pp. 54-58, pp. 127-129.
- 13) 土壌養分測定法委員会編 (1986) 土壌養分分析法, 養賢堂, pp. 235-239.
- 14) 作物分析法委員会編 (1976) 栽培植物分析測定法, 養賢堂, pp. 63-86.
- 15) 植物栄養実験法編集委員会編 (1990) 植物栄養実験法, 博友社, pp. 366-367.
- 16) 東海林覚, 樋口福男 (1970) 土壌およびリン酸質肥料の差が水田土壌へのリン酸の蓄積形態に及ぼす影響について, リン酸多肥によって水田土壌に蓄積されたリン酸形態と有効性について, 日本土壌肥科学雑誌, 41, 353-357.
- 17) 南條正巳 (1989) 土壌とリン酸イオンの化学的反応に関する研究, 農業環境技術研究所報告, 6, 18-73.
- 18) 船引真吾 (1974) 土壌学講義, 養賢堂, p. 131.
- 19) 高橋英一, 谷田沢道彦, 大平幸次, 原田登五郎, 山田芳雄, 田中明 (1969) 作物栄養学, 朝倉書店, p. 42.
- 20) 安藤奨, 小田部廣男 (1976) 肥料の必要量, 植物栄養・土壌肥料・大事典, 養賢堂, pp. 535-539, pp. 1122-1127.