

下水汚泥焼却灰のリン酸肥料代替効果

Effect of sewage sludge ash as phosphoric manure

城 秀信・白石由美子*

Hidenobu JYOU., Yumiko SHIRAISSI

要 約

下水汚泥焼却灰はク溶性リン酸を10%程度含んでおり、リン酸肥料代替資材としての利用が期待できるため、この資材の有効性をブロッコリーとコマツナで検討した。

下水汚泥焼却灰の単独施用は、重焼燐施用に比べブロッコリーとコマツナの収量、リン酸吸収量とも低く、リン酸肥料としての肥効が劣った。下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸と過燐酸石灰の速効性リン酸を1:1の割合で混用したものは、重焼燐施用よりブロッコリーおよびコマツナとも収量が多かった。また、リン酸吸収量は、ブロッコリーでは重焼燐施用より劣るものの、コマツナでは同程度であった。

キーワード：下水汚泥焼却灰，ク溶性リン酸，速効性リン酸，重焼燐，過燐酸石灰

I 緒言

リン酸肥料の原料となる燐鉱石の埋蔵量は、地域により大きな偏りがあり、アメリカ、中国、モロッコの上位3カ国で燐鉱石採掘量の約2/3を占めている。さらに需要の伸び率からみて高品質燐鉱石資源は、今後50年～130年の間に枯渇してしまうという試算がされており、肥料資源としての燐鉱石の重要性が高まっている。このため原産国のうちアメリカは1996年から全面的に輸出を禁止しており、中国も近年はリン鉱石に高い関税をかけ輸出を制限している。しかし、中国、インドでの食料生産の増加によりリン酸肥料の世界的な需要量は増大しており、リン酸肥料の需供逼迫による肥料の価格高騰や供給不足が懸念されている^{1, 2)}。

一方、一般廃棄物として大量に発生する下水汚泥のうち約40%程度が焼却処分されている。この下水汚泥焼却灰の中には比較的高い濃度のリン酸が含まれていることが分かっているが、現状では、埋め立て処分やセメント原料副資材として有償で引き取られており、下水汚泥焼却灰中の有用成分を活かした利用がなされていない³⁾。

そこで下水汚泥焼却灰に含まれるリン酸成分に着目し、下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸を施肥リン酸として有効な成分であると想定し、下水汚泥焼却灰のリン酸肥料としての有効性や利用方法について検討を行った。

なお、本研究は、独立行政法人土木研究所との共同研究協定「下水汚泥中の有用塩類の有効利用に関する研究」に基づき試験を実施した。

II 材料および方法

1 下水汚泥焼却灰中の特性と肥料成分

1) 供試資材

独立行政法人土木研究所から提供を受けた長万部終末処理場（北海道山越郡長万部町）で処理された4種類の下水汚泥焼却灰を用いた（第1表）。

2) 試験方法

下水汚泥焼却灰の農業資材としての特性を評価するため下水汚泥焼却灰に含まれる水分、pH、EC、全炭素、全窒素、全リン酸、全加里、全石灰、全苦土を測定し、リン酸肥料としての肥料効果に関係する成分として2%クエン酸可溶性リン酸（以下ク溶性リン酸と記す）と水溶性リン酸含量を測定した。

水分は110℃、12時間乾燥後の重量から求め、pHはガラス電極、ECは電気伝導度計を用いて測定した。全炭素および全窒素は全自動元素分析装置（Vario MACRO）で、全加里、全石灰、全苦土は過塩素酸-硝酸による湿式分解後、全加里については炎光光度法、全石灰および全苦土は原子吸光光度法で測定した。全リン酸は過塩素酸-硝酸による湿式分解後、バナドモリブデン法で、ク溶性リン酸、水溶性リン酸は肥料分析法に基づいた抽出を行った後バナドモリブデン法で測定した⁴⁾。

2 ブロッコリーに対する下水汚泥焼却灰の施用試験

1) 供試資材

*：農林水産部農業技術課

試験1の焼却灰Bを用いた(第1表)。

2) 供試品種および耕種概要

‘ハートランド’を2010年9月11日に播種し、10月5日に381株/aの栽植密度で定植した。収穫は生育にばらつきが見られたため、2011年1月26日と2月2日の2回実施した。

3) 試験圃場および土壌の種類

試験は熊本県農業研究センター内の露地畑で実施した。なお、圃場の土壌は厚層多腐植質黒ボク土で土性はCL(埴壤土)に分類される。

4) 試験方法

施肥量は熊本県の栽培基準である窒素:1.5kg/a、リン酸:3.5kg/a、加里:1.5kg/aとした。試験はリン酸に重焼燐を用いたリン酸肥料区、リン酸施用量を下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸で全量代替する区(以下、焼却灰B区)、下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸と過磷酸石灰中のリン酸を1:1で組み合わせて施用する区(以下、灰B+過石区)および無リン酸区の4区を設けた。基肥はいずれの区も窒素成分は硫安、加里成分は硫酸加里を用い、追肥は市販の追肥化成(16-0-16)を用いた。試験は1区15m²の2反復で実施した。

5) 調査方法

収穫期に各区10株について葉数、最大葉の葉長および葉幅を測定し、さらに各区5株を採取して、全重、茎葉重、花蕾重、花蕾径を測定し、収量性を調査した。

収穫調査で採取した株から全重が平均値に近い3株について、花蕾、茎葉の生重および乾物重を測定するとともに乾燥後、粉碎して無機成分含量を測定し、養分吸収量を求めた。作物体の無機成分は窒素とリン酸については硫酸-過酸化水素水による湿式分解後、窒素は水蒸気蒸留-滴定法、リン酸はバナドモリブデン法で分析を行った。加里は乾式灰化後、炎光光度法で分析した⁵⁾。

栽培前後における土壌養分の変化を比較するために栽培前後の作土を採取し、乾燥・粉碎・篩別後、pH、EC、CEC、交換性陽イオン類(CaO、MgO、K₂O)、可給態リン酸を測定した。pHはガラス電極、ECは電気伝導度計を用いて測定した。CECはセミマイクロ Schollenberger法で陽イオン交換を行った後、水蒸気蒸留-滴定法で、交換性カルシウムおよび交換性マグネシウムは原子吸光度法、交換性カリウムは炎光光度法で分析を行った。可給態リン酸はTroug法で抽出後モリブデンブルー法で測定を行った⁵⁾。

3 コマツナに対する下水汚泥焼却灰の施用試験

1) 供試資材

2010年は、試験1の焼却灰Aを用い、2011年は焼却灰

CおよびDを用いた(第1表)。

2) 供試品種および耕種概要

‘楽天’を供試し、熊本県農業研究センターのガラスハウス内で1/5000aワグネルポットに3株/ポットの栽植密度で栽培を行った。2010年夏作は7月2日に播種し、8月5日に収穫した。2010年秋作は10月16日に播種し、12月3日に収穫した。2011年秋作は9月21日に播種し、11月7日に収穫した。

3) 土壌の種類

厚層多腐植質黒ボク土で土性がCL(埴壤土)の土壌を1/5000aワグネルポットに充填して試験を実施した。

4) 試験方法

施肥は熊本県の栽培基準である窒素:2.0kg/a、リン酸:2.0kg/a、加里:2.0kg/aとした。2010年の試験はリン酸肥料としてリン酸に重焼燐を用いたリン酸肥料区、さらにリン酸施用量を下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸で全量代替する区(以下、焼却灰A区)、下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸と過磷酸石灰のリン酸成分を1:1で組み合わせて施用する区(以下、灰A+過石区)および無リン酸区の4区を設けた。基肥はいずれの区も窒素成分は硫安、加里成分は硫酸加里を用いた。2011年の試験はリン酸として過磷酸石灰、重焼燐、熔成りん肥の3種の肥料を用いた過磷酸石灰区、重焼燐区、熔成りん肥区を設け、さらにリン酸肥料として下水汚泥焼却灰CおよびDについてリン酸施用量を下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸で全量代替する区(以下、焼却灰C区、焼却灰D区)、下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸と過磷酸石灰のリン酸成分を1:1で組み合わせて施用する区(以下、灰C+過石(1:1)区、灰C+過石(1:1)区)、下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸と過磷酸石灰のリン酸成分を4:1で組み合わせて施用する区(以下、灰C+過石(4:1)区、灰C+過石(4:1)区)および無リン酸区の10区を設けた。基肥はいずれの区も窒素成分は硫安、加里成分は硫酸加里を用いた。試験は、1/5000aワグネルポットで3反復で実施した。

5) 調査方法

収穫期に各試験区のコマツナ3株について草丈、葉数を計測後、第3展開葉の葉色をグリーンメータで測定した。また、各試験区のコマツナ3株を収穫し、新鮮重および乾物重を測定したのち、乾燥後、粉碎して無機成分含量を測定し養分吸収量を求めた。無機成分の分析はブロッコリー試験と同じ方法で実施した。さらに栽培前後における土壌養分の変化を比較するために栽培前後の作土を採取し、乾燥・粉碎・篩別後、pH、EC、CEC、交換性陽イオン類(CaO、MgO、K₂O)、可給態リン酸を測定した。測定はブロッコリー栽培試験と同じ方法で実施

した。

Ⅲ 結果

1 下水汚泥焼却灰中の特性と肥料成分

下水汚泥焼却灰中の肥料成分を第1表に示した。いずれの下水汚泥焼却灰とも水分は極めて低く、リン酸含量は全リン酸が20%程度で、そのうち肥料の緩効性リン酸として利用可能なク溶性リン酸は8~15%程度含まれて

いたが、速効性リン酸として期待できる水溶性リン酸は殆ど含まれていなかった。pHは、ほぼ中性、ECは1.3~2.7mS/cm程度であり、リン酸肥料代替資材として用いる場合、特に問題となる数値ではなかった。リン酸の他に肥料として有用な加里(K₂O)、石灰(CaO)、苦土(MgO)も含まれていたが、肥料成分として実用化できるほどの含有量ではなかった。

区分	材 料	水分	現物当たり%		
			全リン酸	ク溶性	水溶性
A	下水汚泥	2.2	24.9	9.9	0.02
B	下水汚泥	0.1	22.6	11.7	0.02
C	下水汚泥	0.04	19.5	8.6	0.03
D	下水汚泥, 雑草 乾物比(1.8 : 1.0)	0.04	17.7	8.5	0.02

区分	pH (1:10)	EC(1:10) (mS/cm)	全炭素	全窒素	全加里	全石灰	全苦土
A	7.1	1.3	0.10	0.02	1.8	5.7	3.3
B	6.3	1.7	0.06	0.01	2.2	7.2	3.0
C	6.1	1.4	-	-	1.7	6.7	2.8
D	7.0	1.1	-	-	2.0	6.2	2.6

2 ブロッコリーに対する下水汚泥焼却灰の施用結果

1) 収穫時におけるブロッコリーの生育量

収穫時におけるブロッコリーの生育量を第2表に示した。ブロッコリーの生育は、葉数、葉長、葉幅ともにリン酸肥料区が最も大きく、次いで灰B+過石区、焼却灰区となり、無リン酸区が最も少なかった。

2) ブロッコリーの収量

ブロッコリーの収量を第3表に示した。花蕾収量は、灰

B+過石区が最も大きく、次いでリン酸肥料区、焼却灰B区の順となり、無リン酸区が最も少なかった。焼却灰B区は、リン酸肥料区と比較して大きく減収した。全重および外葉重は、リン酸肥料区と灰B+過石区が最も重く、次いで焼却灰B区となり、無リン酸区が最も軽かった。花蕾径は、リン酸肥料区が最も大きく、次いで灰+過石区、焼却灰区の順で、無リン酸区が最も小さかった。

第2表 収穫時におけるブロッコリーの生育

処 理	葉数 (枚)	葉長 (cm)	葉幅(cm)
リン酸肥料	5.9	11.2	8.8
焼却灰B	5.6	10.3	8.1
灰B+過石	5.5	11.1	8.4
無リン酸	5.4	10.1	7.8

第3表 ブロッコリーの収量

処 理	外葉重		花蕾重		全 重		花蕾径 cm
	kg/a	%	kg/a	%	kg/a	%	
リン酸肥料	407	100	81	100	488	100	9.8
焼却灰B	320	79	68	84	388	80	9.0
灰B+過石	394	97	85	106	479	98	9.4
無リン酸	286	70	61	76	347	71	8.4

注1) 2011年1月26日の2回調査の平均値

2) 比率はリン酸肥料区を100とした時の比率

3) ブロッコリーの養分吸収量

ブロッコリーの養分吸収量を第4表、時期別のリン酸吸収量の推移を第1図に示した。ブロッコリーの窒素吸

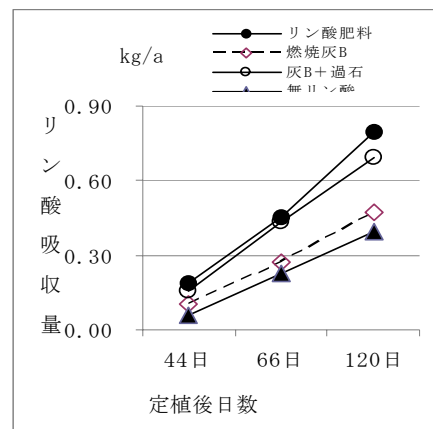
収量は、灰B+過石区が最も大きく、次いでリン酸肥料区、焼却灰B区の順で、無リン酸区が最も少なかった。灰B+過石区とリン酸肥料区との吸収量の差は小さく、

ほぼ同程度であった。焼却灰 B 区は、リン酸肥料区に比べて20%程度少ない吸収量となった。リン酸吸収量は、窒素に比べて1/3程度の吸収量であったが、リン酸肥料区が最も多く、次いで灰 B+過石区、焼却灰 B 区、無リン酸区の順であった。リン酸肥料区のリン酸吸収量に比べ

て灰 B+過石区は14%、焼却灰 B 区は41%、無リン酸区は50%減少となった。リン酸吸収量は、生育の初期ではあまり差が見られなかったが、生育中期以降にはその差が大きくなった。加里吸収量は、窒素吸収量とほぼ同じような傾向を示した。

第4表 ブロッコリーの養分吸収量

処 理	kg/a								
	窒素(N)			リン酸(P ₂ O ₅)			加里(K ₂ O)		
	花 蕾	茎 葉	合 計	花 蕾	茎 葉	合 計	花 蕾	茎 葉	合 計
リン酸肥料	0.62	1.79	2.41	0.19	0.61	0.80	0.45	2.14	2.59
焼却灰 B	0.53	1.41	1.94	0.15	0.33	0.47	0.40	1.94	2.34
灰 B+過石	0.67	1.76	2.43	0.20	0.49	0.69	0.49	2.24	2.74
無リン酸	0.47	1.26	1.73	0.13	0.27	0.40	0.34	1.69	2.04



第1図 時期別リン酸吸収量の推移

4) 栽培前後における土壌の化学性

ブロッコリーの栽培前後における土壌の化学性を第5表に示した。栽培前と栽培後における土壌の pH には大きな変化はみられず、EC は栽培後が高かった。栽培後

の EC は、リン酸肥料区がやや高い傾向にあったものの他の区では差がなかった。可給態リン酸は、リン酸肥料区および焼却灰 B 区、灰 B+過石区は増加したが、無リン酸区はほとんど差がなかった。

第5表 ブロッコリー栽培前後における土壌の化学性

時期	処 理	pH(1:2.5)	EC(1:5)	可給態リン酸	ex-K ₂ O	ex-CaO	ex-MgO
			mS/cm		mg/100g 乾土	mg/100g 乾土	
栽培前	リン酸肥料	6.0	0.08	5.9	36.9	338.0	50.3
	焼却灰 B	6.3	0.09	7.2	43.6	384.1	60.4
	灰 B+過石	6.1	0.09	6.7	40.2	355.3	59.4
	無リン酸	6.3	0.09	5.9	38.1	391.8	59.7
収穫後	リン酸肥料	5.7	0.30	11.2	43.3	316.4	42.2
	焼却灰 B	6.0	0.24	10.2	48.7	366.3	52.2
	灰 B+過石	6.0	0.22	9.7	41.7	322.8	49.0
	無リン酸	6.1	0.23	6.3	51.2	397.6	57.1

3 コマツナに対する下水汚泥焼却灰の施用試験

1) 2010年試験結果

(1) 夏作コマツナ

夏作コマツナの生育を第6表に示した。草丈および葉数は、焼却灰 A 区が最も大きく、次いで灰 A+過石区、リン酸肥料区で、無リン酸区が最も少なかった。葉色は、焼却灰 A 区、灰 A+過石区、無リン酸区の順に濃かったが、これらの中ではほとんど差は認められず、リン酸肥

料区が最も薄かった。

夏作コマツナの収量を第7表に示した。新鮮重は、灰 A+過石区が最も重く、次いでリン酸肥料区、焼却灰 A 区で、無リン酸区が最も軽かった。灰 A+過石区はリン酸肥料区と比較して13%増収し、焼却灰 A 区はリン酸肥料区と同程度の収量であった。なお、乾物重も新鮮重と同じ傾向であった。

第6表 夏作コマツナの生育(2010年)

処 理	草丈 (cm)	葉数 (枚)	葉色
リン酸肥料	24.0	9.0	31.7
焼却灰 A	28.0	10.0	35.8
灰 A+過石	26.0	9.0	34.8
無リン酸	23.0	8.5	34.2

注) 葉色は第3展開葉をグリーンメータで測定

第7表 夏作コマツナの収量(2010年)

処 理	新鮮重		乾物重	
	g/株	%	g/株	%
リン酸肥料	87.8	100	8.2	100
焼却灰 A	86.9	99	8.1	98
灰 A+過石	99.1	113	9.2	111
無リン酸	87.3	99	6.9	84

注) 比率(%)はリン酸肥料区を100とした場合の値

夏作コマツナの養分吸収量を第8表に示した。窒素の吸収量は、灰 A+過石区が最も多く、次いで無リン酸区、焼却灰 A 区の順で、リン酸肥料区が最も少なかった。リン酸の吸収量は、リン酸肥料区に比べて焼却灰 A 区はかなり差がみられたが、灰 A+過石区では差が小さかった。加里の吸収量は、灰 A+過石区が最も多く、次いで焼却灰区 A および無リン酸区で、リン酸肥料区が最も少なかった。

栽培前後における土壌の化学性を第9表に示した。土壌の pH および EC は、いずれの試験区とも栽培前よりわずかに上昇した。可給態リン酸は、リン酸肥料区および灰 A+過石区はわずかに上昇したが、焼却灰 A 区はやや

第8表 夏作コマツナの養分吸収量(mg/ポット)

処 理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
リン酸肥料	167	94	445
焼却灰 A	169	87	458
灰 A+過石	185	92	508
無リン酸	177	77	457

減少し、無リン酸区は1.0mg/100g(乾土)程度と大きく減少した。交換性陽イオン類には栽培前後で大きな変化が見られなかった。

第9表 夏作コマツナの栽培前後における土壌の化学性

採取時期	処 理	pH (1:2.5)	EC(1:5) mS/cm	可給態リン酸 mg/100g 乾土	exK ₂ O	exCaO	exMgO
					mg/100g 乾土		
収 穫 後	栽 培 前	6.50	0.15	8.6	48	558	96
	リン酸肥料	6.69	0.20	9.1	46	568	104
	焼却灰 A	6.60	0.22	8.2	42	556	97
	灰 A+過石	6.63	0.19	8.9	42	575	100
	無リン酸	6.69	0.18	7.7	46	568	104

(2) 秋作コマツナ

秋作コマツナの生育を第10表に示した。草丈は、無リン酸区が高く、次いで焼却灰 A 区、リン酸肥料区の順で、灰 A+過石区が最も低かった。葉数は、灰 A+過石区が10葉、他の区はいずれも9葉で処理間にほとんど差はなかった。葉色は、無リン酸区が最も濃く、次いでリン酸肥料区、焼却灰 A 区、灰 A+過石区であったがその差は小さかった。全体的にコマツナに対するリン酸施肥の有無やリン酸資材の影響は判然としなかった。

第10表 秋作コマツナの生育

処 理	草丈 cm	葉数 枚	葉色
リン酸肥料	21.0	9.0	38.1
焼却灰 A	22.5	9.0	37.0
灰 A+過石	18.5	10.0	32.4
無リン酸	26.0	9.0	38.4

注) 調査日: 2010年12月3日

葉色は第3展開葉をグリーンメータで測定した。

秋作コマツナの収量を第11表に示した。秋作コマツナの収量は、夏作と同様に新鮮重、乾物重ともに灰 A+過石区が最も重く、次いでリン酸肥料区、焼却灰 A 区の順で、無リン酸区が最も軽かった。収量は、新鮮重、乾物重ともにリン酸肥料区に比べ、灰 A+過石区が多かった。焼却灰 A 区はリン酸肥料区より少なかった。

第11表 秋作コマツナの収量

処 理	新鮮重		乾物重	
	g/ポット	%	g/ポット	%
リン酸肥料	63.1	100	6.2	100
焼却灰 A	60.7	96	5.7	92
灰 A+過石	67.9	107	9.6	156
無リン酸	53.4	85	4.3	70

注1) 調査日：2010年12月3日

秋作コマツナの養分吸収量を第12表に示した。窒素の吸収量は、灰 A+過石区が最も多く、次いで無リン酸区で、焼却灰 A 区とリン酸肥料区は少なく、夏作と同様の傾向を示した。リン酸の吸収量は、灰 A+過石区が最も多く、次いでリン酸肥料区、焼却灰 A 区の順で、無リン酸区が最も少なかった。加里の吸収量は、灰 A+過石区が最も多く、次いで焼却灰 A 区、無リン酸区の順で、リン酸肥料区は最も少なかった。

第12表 秋作コマツナの養分吸収量(2010年)(mg/ポット)

処 理	N	P205	K20
リン酸肥料	138	27	260
焼却灰 A	138	15	289
灰 A+過石	163	30	300
無リン酸	150	11	277

栽培前後における土壌の化学性の変化を第13表に示した。土壌の pH は、無リン酸区を除き、いずれの試験区とも栽培前よりわずかに上昇した。EC はわずかに変動があるものの栽培前と同水準であった。栽培後の可給態

リン酸は、いずれの試験区ともわずかに減少したが、リン酸肥料区の減少率が最も小さかった。交換性陽イオン類は、栽培前後で大きな変化がなかった。

第13表 秋作コマツナ栽培前後における土壌の化学性(2010年)

採取時期	処 理	pH (1:2.5)	EC(1:5) mS/cm	可給態リン酸 mg/100g 乾土	可給態		
					exK20	exCa0	exMg0
					mg/100g 乾土		
収穫後	栽培前	6.21	0.11	4.6	36	375	51
	リン酸肥料	6.47	0.10	4.2	40	367	50
	焼却灰 A	6.53	0.09	3.7	40	370	52
	灰 A+過石	6.52	0.08	3.6	38	360	49
	無リン酸	6.21	0.11	3.2	38	377	51

1) 2011年試験

秋作コマツナの生育および収量を第14表に示した。2010年の試験と同様に秋作コマツナの生育に対するリン酸施肥の有無、リン酸資材の影響は判然としなかった。

コマツナの新鮮重および乾物重は、燃焼灰 C と D 両方の灰+過石(1:1)区が大きかった。新鮮重は焼却灰 C および D とともに灰+過石(4:1)区が過磷酸石灰区、重焼燐区

より重かったが、乾物重はいずれも軽かった。無リン酸区は、新鮮重および乾物重とも過磷酸石灰区を大きく下回った。全体的に下水汚泥燃焼灰を施用した場合、コマツナの収量は、焼却灰単独施用ではいずれも過磷酸石灰区、重焼燐区、熔成りん肥区を下回ったが、過磷酸石灰と併用することにより向上した。特に過磷酸石灰の混入割合が多いほど収量が多くなった。

第14表 秋作コマツナの生育及び収量(2011年)

処 理	草丈 cm	葉数 枚	葉色	新鮮重		乾物重	
				g/ポット	%	g/ポット	%
過磷酸石灰	29.5	10.2	49.7	79.9	100	7.3	100
重焼燐	28.0	9.3	50.4	72.7	91	7.0	96
熔成りん肥	28.6	8.0	35.3	49.1	61	3.3	46
焼却灰C	28.9	8.3	31.9	44.0	55	2.6	36
灰C+過石(4:1)	32.2	9.7	46.6	90.5	113	6.7	92
灰C+過石(1:1)	31.0	10.2	48.9	92.4	116	7.9	109
焼却灰D	26.9	7.8	35.4	34.8	44	2.4	33
灰D+過石(4:1)	32.6	9.3	46.9	86.8	109	6.6	91
灰D+過石(1:1)	30.4	9.8	48.4	90.9	114	8.6	118
無リン酸	14.7	5.0	36.7	5.6	7	0.6	8

注1) 調査日：2011年11月7日，葉色は第3展開葉をグリーンメータで測定した。

2) 比率(%)は過磷酸石灰を100とした場合の値。

コマツナの養分吸収量を第15表に示した。窒素吸収量は、灰C+過石(1:1)区と灰D+過石(1:1)区が多く、次いで過磷酸石灰区、灰C+過石(4:1)区、重焼燐区、灰D+過石(4:1)区で、熔成りん肥区、焼却灰C区、焼却灰D区は少なく、無リン酸区が最も少なかった。リン酸吸収量は、過磷酸石灰区が最も多く、次いで灰D+過石(1:1)区、重焼燐区と灰C+過石(1:1)区で、熔成りん肥区、焼却灰C区、焼却灰D区は少なく、無リン酸区が最も少なかった。加里の吸収量は、灰C+過石(4:1)区が最も多く、次いで灰C+過石(1:1)区、灰D+過石(1:1)区、過磷酸石灰区、灰D+過石(4:1)区、重焼燐区、焼却灰C区、熔成りん肥区、焼却灰D区の順となり、無リン酸区が最も少なかった。

秋作コマツナ栽培後における土壌の化学性を第16表に示した。土壌のpHおよびECは、試験区による差がほとんどなかった。可給態リン酸は、熔成りん肥区が他の区より多かったが、他の区間には差が認められなかった。交換性陽イオン類も明確な傾向は認められなかった。

第15表 コマツナの養分吸収量(2011年) (mg/ポット)

処 理	N	P205	K20
過磷酸石灰	313	76	452
重焼燐	302	65	393
熔成りん肥	164	22	214
焼却灰C	129	15	227
灰C+過石(4:1)	311	42	496
灰C+過石(1:1)	339	65	485
焼却灰D	105	10	180
灰D+過石(1:1)	337	66	470
灰D+過石(4:1)	284	40	433
無リン酸	83	4	91

第16表 秋作コマツナ栽培後の土壌の化学性(2011年)

処 理	pH (1:2.5)	EC(1:5) mS/cm	可給態 リン酸	exK20	exCa0	exMg0
				mg/100g 乾土		
過磷酸石灰	6.3	0.09	1.4	29	354	60
重焼燐	6.2	0.10	1.5	30	348	58
熔成りん肥	6.0	0.19	5.6	40	356	62
焼却灰C	6.0	0.19	2.0	39	352	61
灰C+過石(4:1)	6.2	0.09	1.7	27	352	60
灰C+過石(1:1)	6.3	0.09	1.6	28	350	60
焼却燃焼灰D	6.0	0.21	1.9	42	346	60
灰D+過石(4:1)	6.3	0.09	1.9	30	363	62
灰D+過石(1:1)	6.2	0.09	1.8	29	355	61
無リン酸	5.8	0.29	1.0	45	356	60

IV 考察

下水汚泥焼却灰には有用資源として再利用が可能なリン酸成分が含まれている^{6, 7)}が、今回、4種類の下水汚泥焼却灰中のリン酸成分を測定した結果、既報と同様に全リン酸は18~20%と比較的高濃度のリン酸を含有していた。また、速効性のリン酸肥料成分である水溶性リン酸は殆ど含まれていないものの、緩効性のリン酸肥料成分であるク溶性リン酸が8~11%含まれていた(第1表)。現在、リン酸肥料として利用されている熔成りん肥は、ク溶性リン酸を20%、腐植りんは15%のク溶性リン酸を含有している。これらの資材と比較すると、下水汚泥焼却灰のリン酸含量はやや低いものの、リン酸質資材として利用の可能性は高いものと考えられた。

下水汚泥焼却灰のリン酸肥料代替資材としての有効性をブロッコリーとコマツナで栽培試験を実施した結果、リン酸肥沃度の低い土壌ではリン酸肥料の施用により生育が明らかに良好となったことから、両作物はリン酸肥効の検証に適していることが確認できた。

施肥リン酸の全量を下水汚泥焼却灰で置き換えた場合、ブロッコリー、コマツナの夏作および秋作ともに収量、リン酸吸収量はリン酸肥料を施用した場合と比較して低かった。早川らはエンバクにリン酸肥料代替物として下水汚泥焼却灰を施用した場合、下水汚泥焼却灰のリン酸吸収量は過燐酸石灰の50%程度と報告している⁸⁾。本試験の下水汚泥焼却灰では、ブロッコリーで重焼燐を施用した場合の89%、コマツナでは重焼燐を施用した場合は15~92%、過燐酸石灰を施用した場合は13~20%となった。作物、作型、供試資材、土壌の可給態リン酸含量の違いにより大きな変動が見られるものの、いずれも重焼燐、過燐酸石灰には及ばず、下水汚泥焼却灰単独のみのリン酸肥料代替では、肥料効果が十分ではなかった。過燐酸石灰のリン酸成分は、可溶性リン酸が17.5%でそのうち速効的な効果を示す水溶性リン酸が14.5%と8割程度を速効性リン酸が占めている。重焼燐はク溶性リン酸が35%であるが、そのうちの約半分である16%は水溶性リン酸となっている。熔成りん肥はク溶性リン酸が20%で水溶性リン酸は含まれていない⁹⁾。このことから下水汚泥焼却灰が過燐酸石灰や重焼燐よりも効果が劣ったのは速効性の水溶性リン酸が下水汚泥焼却灰に殆ど含まれておらず、ク溶性リン酸成分だけではリン酸の肥効が不足したためであると考えられる。熔成りん肥と同じくク溶性が主体で水溶性リン酸を含まない下水汚泥焼却灰が熔成りん肥より効果が劣ったのは判然としなが、熔成りん肥はリン酸成分の他に苦土やアルカリ分を含むことや同じク溶性リン酸であっても作物への吸収されやすさに差があるのではないかと考えられる。

下水汚泥焼却灰単独では、リン酸の肥効が不足するのでそれを補うために過燐酸石灰と組み合わせた下水汚泥焼却灰のク溶性リン酸成分と過燐酸石灰のリン酸成分を1:1の割合で施用した結果、ブロッコリー、コマツナのいずれの作物とも下水汚泥焼却灰単独施用に比べ収量、リン酸吸収量が高まり、特に収量は重焼燐を施用した場合と同等以上となった。また、リン酸吸収量は、ブロッコリーで重焼燐を施用した場合よりやや少ないものの、コマツナでは同等以上となり、下水汚泥焼却中のク溶性リン酸成分と過燐酸石灰のリン酸成分を1:1の割合で施用したものは、重焼燐を施用した場合とほぼ同程度の肥料効果が得られた。さらに下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸と過燐酸石灰中のリン酸を4:1の割合で施用したコマツナでは、収穫物の新鮮重は過燐酸石灰と重焼燐を上回ったものの乾物重はやや劣り、リン酸吸収量が明らかに少なかった。

コマツナのリン酸吸収量を指標として下水汚泥焼却灰のリン酸肥料効果を過燐酸石灰、重焼燐、熔成りん肥と比較した場合、下水汚泥焼却灰単独のリン酸吸収量は熔成りん肥をやや下回り、下水汚泥中のク溶性リン酸量と過燐酸石灰をリン酸成分換算で1:1の割合で施用したものは重焼燐と同等であった。すなわち、下水汚泥焼却灰と過燐酸石灰を1:1で組み合わせた場合、ク溶性リン酸と水溶性リン酸の比率は、重焼燐中の比率とほぼ等しくなることから、この組み合わせはリン酸成分の組成からも妥当であると考えられた。

以上のことから、下水汚泥焼却灰のリン酸肥料効果は、下水汚泥焼却灰のみでもあってもある程度の効果は得られるが、熔成りん肥より劣り、重焼燐、過燐酸石灰の肥料効果には及ばないため、単独で利用するのは難しいと考えられた。一方、下水汚泥焼却灰中のク溶性リン酸量と過燐酸石灰をリン酸成分換算で1:1の割合で組み合わせれば重焼燐とほぼ同等の肥料効果が得られた。このことは下水汚泥焼却灰と速効性のリン酸肥料を組み合わせることで作物栽培に利用できると考えられる。

下水汚泥焼却灰に先行し肥料として利用されている廃棄物由来の資材として鶏糞焼却灰がある。鶏糞焼却灰中のリン酸は、下水汚泥焼却灰と同様にク溶性リン酸が主体で水溶性リン酸をほとんど含まない資材である¹⁰⁾。この鶏糞焼却灰は、リン酸および加里を主体とした肥料として既に市販されている¹¹⁾。本試験の結果から下水汚泥焼却灰も鶏糞燃焼灰と同様に肥料としての有効利用が可能な資材であると考えられる。ただ、下水汚泥焼却灰単独ではリン酸の肥効がやや低いことから、配合肥料の原料としてリン酸肥料を節減できる資材としての利用が現

実的であろう。鶏糞焼却灰では pH が12~13と高いため窒素肥料と混合すると窒素成分が気散してしまうため、窒素と配合するには中和処理が必要とされている¹¹⁾。下水汚泥焼却灰の pH は6~7とほぼ中性であるため、配合肥料の原料としても適しているといえる。

V 謝辞

本研究の実施にあたり共同研究協定を締結した独立行政法人土木研究所から供試した下水汚泥燃焼灰の提供を受けるとともに、岡本誠一郎氏、宮本豊尚氏よりご指導・ご助言を戴き、感謝いたします。また、本稿の取りまとめに際し、ご校閲を賜った当センター果樹研究所高原利雄氏に厚く謝意を表します。

VI 引用文献

- 1) 黒田章夫, 滝口昇, 加藤純一, 大竹久夫(2005):リン資源枯渇の予測とそれに対応したリン有効利用技術開発, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol. 4, No2, 87-94
- 2) 俵谷圭太郎, 和崎淳(2012):リン酸資源の枯渇に対応したリン栄養研究 1. 講座のねらい, 土壤肥料学会雑誌, 第83巻第2号, 173
- 3) 古畑 哲(2009):下水汚泥由来のリン酸肥料とその施用効果, 再生と利用, Vol, 33, No123, 98-103
- 4) 農林水産省農業環境技術研究所(1992):肥料分析法(1992年版) 34-37
- 5) 財団法人日本土壤協会(2001):土壤機能モニタリング調査のための土壤, 水質及び植物体分析法
- 6) 野晃弘, 小澤正治, 岩井良博, 高木禎史, 小松貴司(2001):下水汚泥焼却灰のリン肥料化, 衛生工学シンポジウム論文集, 9,
- 7) 菅原龍江, 佐々木昭仁, 佐藤佳之(2010):下水汚泥焼却灰等のリン肥料化技術調査, 岩手県工業技術センター8研究報告第17号, 38-42
- 8) 早川 修, 渡辺紀元(1989):下水汚泥焼却灰の多量施用が作物の生育と重金属吸収に及ぼす影響, 日本土壤肥料学会雑誌, 第61巻第6号, 557-564
- 9) 熊本県経済農業共同組合連合会(2007):くみあい肥料ハンドブック改訂15版, 5
- 10) 千葉行雄, 宍戸貢, 菅原隆志, 斎藤博之(1986):鶏糞焼却灰の利用, 東北農業研究, 39, 139-140
- 11) 南国興産:南国興産の灰物語, 1-9

Summary

Effect of sewage sludge ash as phosphoric fertilizer

Hidenobu JYO, Yumiko SHIRAI

Sewage sludge ash is possible to use as phosphoric fertilizer, because it is by include 2% citric acid-soluble phosphate of about 10%. Use the sewage sludge ash alone, the effect as the phosphoric fertilizer is inferior to the commercial phosphoric fertilizer using it with the leafy vegetables or using a low available phosphate soil. The sewage sludge ash fertilizer is used together with the super-phosphate at a rate of 1:1, the effect of the fertilizer rises, and almost the same effect as the multi-phosphate is achieved.