

下水汚泥焼却灰を原料として製造された焼成ケイ酸リン肥の 水稲に対する肥効

糟谷真宏¹⁾・福田充洋¹⁾・久野智香子¹⁾・大竹敏也¹⁾・今井敏夫²⁾

摘要：下水汚泥焼却灰とケイ酸カルシウム、炭酸カルシウムの混合物を焼成して試作された2種類の焼成ケイ酸リン肥の水稲に対する肥効をポット試験により評価した。焼成ケイ酸リン肥を施用した水稲のリン吸収量は、登録肥料の熔成ケイ酸リン肥や過リン酸石灰を施用した場合と同等であった。焼成ケイ酸リン肥のうち、リン含有率が低く水溶性ケイ酸含有率の高い試作肥料は、熔成ケイ酸リン肥と同様に、水稲のケイ酸吸収量を増大させ、収量を増加させた。差し引き法による見かけのケイ酸利用率は、リン含有率が低く水溶性ケイ酸含有率の高い試作肥料が1.08と最も高く、熔成ケイ酸リン肥の0.8を上回った。

以上の結果から、下水汚泥焼却灰の焼成によって製造されるケイ酸リン肥は、リン含有率を抑えケイ酸含有率を高めることで、リン酸質肥料として利用した場合にもケイ酸肥効が期待でき、水稲の生育、収量にも正の効果をもたらす可能性が示唆された。

キーワード：焼成ケイ酸リン肥、下水汚泥焼却灰、ケイ酸、リン酸、水稲

緒 言

下水にはリン(P)が大量に含まれるため、これを回収、資源化することは有意義である。下水汚泥中の利用しにくいリンを分離する方法として、リン酸マグネシウムアンモニウム(MAP)として回収する技術¹⁾が確立され、各地の下水処理場等で回収されたMAPは化成肥料として利用されている。また、下水汚泥焼却灰に酸化カルシウムと酸化マグネシウムを添加して熔融する方法などが確立され、熔成汚泥灰複合肥料として肥料取締法で公定規格が定められている^{2,3)}。

下水汚泥焼却灰にはケイ酸(SiO₂)も多く含まれており、リン酸肥効だけでなくケイ酸肥効も併せ持った肥料化が期待できる。焼成法によって、下水汚泥焼却灰からリン酸可溶性、ケイ酸可溶性に優れた肥料を製造可能であり、添加する資材の種類と量により、PとSiO₂の含有率を任意に変えられることが明らかとなっている⁴⁾。

愛知県の水田では、PよりSiO₂が土壌診断基準値を下回る場合が多く、愛知用水、明治用水、豊川用水のSiO₂濃度は10 mg-SiO₂ L⁻¹程度でかんがい水からのSiO₂供給量も少ない。SiO₂は水稲に大量に吸収され、生育、収量、品質の向上に有効であることが知られている。近年では、気候変動への対応の観点から、SiO₂の施用が、SiO₂吸収量の増大、気孔コンダクタンスの増加による葉温低下を通じて高温障害対策としても有効であることが

明らかにされている⁵⁾。以上のように、本県は、土壌、かんがい水からのSiO₂供給の少ない水田が多いため、水稲の生育に有効なSiO₂を含む資材の施用は重要である。したがって、下水汚泥焼却灰の肥料化にあたっては、リン酸肥効とともにケイ酸肥効を併せ持つことが望ましい。そこで、本研究では下水汚泥焼却灰にケイ酸カルシウムと炭酸カルシウムを加えて焼成法により製造したP、SiO₂含有率の異なる2種類の焼成ケイ酸リン肥(仮称)の水稲に対する肥効をポット試験により評価した。

材料及び方法

1 供試肥料

供試した肥料は、太平洋セメント株式会社で製造された焼成ケイ酸リン肥A、Bの2種類である。対照としてリン鉱石を原料とする熔成ケイ酸リン肥(とれ太郎、デンカ株式会社、東京)を用いた。それぞれのP、SiO₂含有率を表1に示した。焼成ケイ酸リン肥A(以下、焼成肥料A)は水溶性リン酸(C-P₂O₅)が10%と高く、焼成ケイ酸リン肥B(以下、焼成肥料B)は、C-P₂O₅含量を4.7%と抑え、水溶性ケイ酸(W-SiO₂)の割合を高めたものである。焼成肥料A、Bともに、重金属含量は対照とした熔成ケイ酸リン肥の公定規格の許容最大値より低く問題のないレベルであった。特に、Cd、Hg、Pbは焼成の過程でほぼ完全に除かれている。

本研究は資金供与型共同研究「焼成汚泥ケイ酸リン肥の水田における利用技術の開発」により実施した。

¹⁾環境基盤研究部 ²⁾太平洋セメント株式会社

(2017. 9. 13 受理)

表1 供試肥料の成分組成

肥料	T-P ₂ O ₅ %	C-P ₂ O ₅ %	T-SiO ₂ %	S-SiO ₂ %	W-SiO ₂ %	アルカリ分 %	Cd mg kg ⁻¹	Hg mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	As mg kg ⁻¹	Ni mg kg ⁻¹	Cr mg kg ⁻¹
焼成肥料A	10.2	10.0	25.2	22.4	3.8	50.0	0.6 (15)	ND (10)	49 (1000)	15 (400)	168 (10000)	194 (600)
焼成肥料B	4.7	4.7	23.3	21.2	19.7	50.0	ND (7)	ND (5)	45 (470)	5 (188)	119 (4700)	131 (282)
熔成肥料	—	7.1	48.8	30.6	15.0	40.0	—	—	—	—	—	—

注) T-P₂O₅:全リン酸、C-P₂O₅: 可溶性リン酸、T-SiO₂: 全ケイ酸、S-SiO₂: 可溶性ケイ酸、W-SiO₂: 水溶性ケイ酸。
重金属類の括弧内の値は熔成ケイ酸リン肥の場合の許容最大値。ND: 検出せず。

表2 施肥量

試験区	N g pot ⁻¹	P ₂ O ₅ g pot ⁻¹	K ₂ O g pot ⁻¹	SiO ₂ g pot ⁻¹
焼成肥料A 50 g m ⁻²	0.88	0.25	0.665	0.63
焼成肥料B 106 g m ⁻²	0.88	0.25	0.665	1.23
熔成肥料 70 g m ⁻²	0.88	0.25	0.665	1.71
無SiO ₂	0.88	0.25	0.665	0
無P・SiO ₂	0.88	0	0.665	0

注) N: 硫安、無SiO₂区のP₂O₅; 過リン酸石灰、K₂O: 塩化加里。
N、K₂Oは基肥: 2016年5月27日 追肥:7月29日; 8月7日

表3 最高分けつ期と出穂期の水稲の生育

試験区	160712		160819		乾物重 g pot ⁻¹
	草丈 cm	茎数 本 pot ⁻¹	草丈 cm	茎数 本 pot ⁻¹	
焼成肥料A	49.3	85.4 ^{ab}	87.0	45.0	62.4
焼成肥料B	50.1	97.8 ^a	89.7	43.8	71.5
熔成肥料	49.9	98.2 ^a	87.5	46.2	66.2
無SiO ₂	50.7	89.8 ^{ab}	87.5	45.0	66.8
無P・SiO ₂	50.1	80.8 ^b	90.9	41.6	68.4

注) 数値右肩の異なるアルファベット間に有意差あり(Tukey法、P<0.05)

2 ポット試験の概要

試験は1/2000 aワグネルポットで行った。供試土壌は灰色低地土(土性: 砂壤土)で、可給態リン酸(トルオーグ法)は91 mg-P₂O₅ kg⁻¹、可給態ケイ酸(pH6.5、0.02Mリン酸緩衝液抽出法)は36 mg-SiO₂ kg⁻¹であった。ポット下部に5.7 kgの土壌を詰めて厚さ10 cmに鎮圧し、その上に作土として8.3 kgを充填した。ポット最下部の排水口は解放し、浸透水が採取できるようにした。

ケイ酸リン肥を2016年5月24日に施用した後、5月27日にその他の施肥と代かきを行い、水稲(あいちのかおりSBL)を1ポットあたり3株(1株あたり3本植え)移植した。中干しを7月13日~7月18日に行い、9月29日に収穫した。ポット側面を不織布で覆い散水して過度の温度上昇を防いだ。試験期間中の月平均気温は、6月: 22.6°C、7月: 27.0°C、8月: 27.9°C、9月: 25.1°Cであった。地温は、同じく、23.1°C、26.1°C、27.1°C、25.0°Cであった。試験は5連で開始し、8月19日に各試験区とも2ポットを用いて成分吸収量を調査した。各試験区とも収穫時の調査は残りの3ポットについて行った。

3 施肥

施肥量を表2に示した。窒素(N)は硫安で、加里(K₂O)は塩化加里を用いて各試験区同量を施用し、Pは、C-P₂O₅を0.25 g-P₂O₅ pot⁻¹の同一量となるよう供試肥料の施用量を設定した。無SiO₂区のPは過リン酸石灰で与えた。P施肥量を各区で同一としたため、焼成肥料A、焼成肥料B、熔成肥料のSiO₂施用量は、それぞれ、0.63 g-SiO₂ pot⁻¹、1.23 g-SiO₂ pot⁻¹、1.71 g-SiO₂ pot⁻¹と異

なった。また、無SiO₂区および無P・SiO₂区には、アルカリ分の供給量を他と合わせるため炭酸苦土石灰2.5 g pot⁻¹を施用した。なお、栽培途中、水稲に鉄欠乏の症状がみられたため、キレート鉄10 mg L⁻¹を7月19日~7月26日のかんがい水に添加した。

4 生育と収量

7月12日(最高分けつ期)と8月19日(出穂期)に草丈と茎数を測定し、収穫時(9月29日)に、穂数、穂長、稈長を測定するとともに、風乾後、わら重、籾重、精玄米重、千粒重を調査した。

5 PとSiO₂の収支

供試肥料の動態を明らかにし、肥効を評価するため、PとSiO₂の収支を求めた。施肥以外のインプットとしてかんがい水と土壌、アウトプットとしてポットからの排水と作物吸収量を調査した。

かんがい水は週1回の頻度で、排水は、試験開始後2週間は週2回、その後は週1回の頻度で全量採取して分析した。土壌は、作土と下層土について栽培前後に採取し、可給態リン酸と可給態ケイ酸を測定した。水稲のPとSiO₂の吸収量は、わらと籾に分けて分析した。

かんがい水と排水のPはアスコルビン酸還元モリブデン青法、SiO₂はモリブデン青法で分析した。土壌の可給態リン酸はトルオーグ法で、可給態ケイ酸はpH6.5、0.02 Mリン酸緩衝液抽出法(40°C5時間)により抽出し、モリブデン青法によって定量した。作物体のPは湿式灰化後モリブデン青法で、SiO₂は重量法で測定した。

表4 収穫時の水稻の生育と収量

試験区	穂数	稈長	穂長	わら重	籾重	精玄米重	玄米千粒重
	本 pot ⁻¹	cm	cm	g pot ⁻¹	g pot ⁻¹	g pot ⁻¹	g
焼成肥料A	34.0 ± 2.6	61.9 ± 3.0	19.6 ± 1.4	98.5 ± 8.3	54.1 ± 4.7	34.0 ± 1.8	24.7 ± 0.2
焼成肥料B	36.7 ± 3.5	63.3 ± 2.8	20.0 ± 1.9	104.9 ± 4.7	57.4 ± 5.9	36.9 ± 2.9	24.6 ± 0.2
熔成肥料	33.3 ± 1.5	61.9 ± 3.2	19.9 ± 1.4	99.9 ± 7.6	56.8 ± 5.1	36.5 ± 2.3	24.6 ± 0.1
無SiO ₂	34.0 ± 1.0	61.5 ± 3.8	19.6 ± 1.5	96.0 ± 1.6	52.0 ± 4.6	32.7 ± 2.4	24.8 ± 0.1
無P・SiO ₂	31.0 ± 1.7	62.3 ± 2.9	20.1 ± 1.1	96.0 ± 6.7	52.6 ± 1.1	33.3 ± 1.0	24.5 ± 0.1

注) 平均値±標準誤差

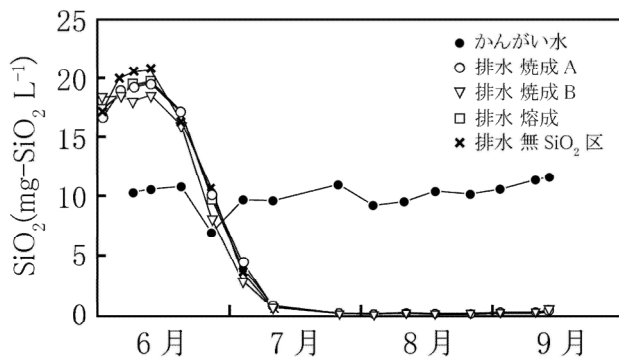
図1 かんがい水とポット排水のSiO₂濃度の推移

表5 土壌の可給態リン酸含量の推移

試験区	160530 mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹	160819 mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹	160929	
			作土 mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹	下層土 mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹
焼成肥料A	212 ± 29.7	98 ± 2.7	157 ± 4.9	209 ± 17.8
焼成肥料B	199 ± 5.6	93 ± 5.7	180 ± 23.6	229 ± 1.8
熔成肥料	172 ± 5.8	95 ± 4.0	145 ± 5.1	230 ± 15.0
無SiO ₂	192 ± 8.3	103 ± 2.7	161 ± 7.9	220 ± 20.1
無P・SiO ₂	175 ± 10.9	86 ± 7.7	159 ± 7.9	253 ± 13.4

注) 平均値±標準誤差

表6 土壌の可給態ケイ酸含量の推移

試験区	160530 mg-SiO ₂ kg ⁻¹	160819 mg-SiO ₂ kg ⁻¹	160929	
			作土 mg-SiO ₂ kg ⁻¹	下層土 mg-SiO ₂ kg ⁻¹
焼成肥料A	43.3 ± 2.9	23.3 ± 4.2	45.8 ± 3.7	52.4 ± 1.0
焼成肥料B	76.5 ± 6.0	19.7 ± 0.4	45.5 ± 1.6	52.4 ± 0.7
熔成肥料	48.3 ± 5.9	22.1 ± 1.5	44.0 ± 1.1	56.8 ± 1.6
無SiO ₂	47.3 ± 6.0	19.6 ± 1.9	43.0 ± 0.6	51.4 ± 2.1
無P・SiO ₂	41.4 ± 6.1	20.5 ± 2.9	44.2 ± 1.7	54.9 ± 0.5

注) 平均値±標準誤差

結果及び考察

1 水稻の生育と収量

表3に最高分けつ期と出穂期の生育調査結果を示した。最高分けつ期(7月12日)には、無P・SiO₂区と比べて他のP施肥区で茎数がやや多い傾向が認められた。特に、焼成肥料Bと熔成肥料は茎数が多かった。出穂期(8月19日)には草丈、茎数、乾物重ともに試験区の差は認められなかった。

表4に収穫時(9月29日)の生育と収量の調査結果を示した。いずれの項目も、統計的に有意な差は認められないものの、穂数は、焼成肥料Bでやや多く、籾重、精玄米重は焼成肥料B、熔成肥料が無SiO₂区の1割増となり、他の3区を上回った。

2 かんがい水とポット排水のP、SiO₂濃度

かんがい水の平均P濃度は0.013 mg-P L⁻¹で、ポット排水の平均P濃度は全区で0.11~0.13 mg-P L⁻¹であった。一方、かんがい水のSiO₂濃度は平均で10.1 mg-SiO₂ L⁻¹であり、排水の平均SiO₂濃度は6.4~6.9 mg-SiO₂ L⁻¹であった。排水中濃度はP、SiO₂ともに初期に高く、後半は極めて低濃度で推移した。SiO₂の排水中濃度の推移を図1に示す。移植1か月後には排水中濃度が低下し始め、中干し以降はほとんど流出しなかった。かんがい水

中のSiO₂は、少なくとも根の伸長した生育後半においては、多くが水稻に吸収されていると考えられる。

3 土壌の可給態リン酸、可給態ケイ酸

表5に可給態リン酸の、表6に可給態ケイ酸の推移を示した。施肥・代かき後(5月30日)の作土の可給態リン酸は全区で200 mg-P₂O₅ kg⁻¹程度であり、8月19日には100 mg-P₂O₅ kg⁻¹前後まで低下した後、9月29日には150 mg-P₂O₅ kg⁻¹となった。下層土の可給態リン酸は、200~250 mg-P₂O₅ kg⁻¹であった。

可給態ケイ酸は5月30日には、W-SiO₂含有率の高い焼成肥料Bで76.5 mg-SiO₂ kg⁻¹と他の区より高かった。それ以外の区は、無SiO₂区を含めて45 mg-SiO₂ kg⁻¹程度と大差なかった。8月19日には全区で20 mg-SiO₂ kg⁻¹程度まで低下し、9月29日には再び45 mg-SiO₂ kg⁻¹前後となった。下層土は50~57 mg-SiO₂ kg⁻¹と全試験区で同等であった。これらの可給態リン酸と可給態ケイ酸含量の変動は、土壌中でのPとSiO₂の動態の詳細は不明であるも

表7 出穂期の稲体及び籾とわらのSiO₂含有率

試験区	170819		籾		わら	
	g-SiO ₂ kg ⁻¹		g-SiO ₂ kg ⁻¹		g-SiO ₂ kg ⁻¹	
焼成肥料A	45.8 ± 1.49	21.8 ± 0.92	68.4 ^{ab} ± 6.82			
焼成肥料B	49.7 ± 3.65	21.7 ± 0.92	77.9 ^b ± 3.13			
熔成肥料	48.0 ± 1.36	22.0 ± 0.45	79.4 ^b ± 6.84			
無SiO ₂	45.7 ± 1.01	21.3 ± 0.81	63.3 ^a ± 1.09			

注) 平均値±標準誤差
数値右肩の異なるアルファベット間に有意差あり(Tukey法、P<0.05)

表8 SiO₂の収支

試験区	INPUT		OUTPUT	
	施肥 g-SiO ₂ pot ⁻¹	かんがい g-SiO ₂ pot ⁻¹	排水 g-SiO ₂ pot ⁻¹	水稲吸収 g-SiO ₂ pot ⁻¹
焼成肥料A	0.63	0.510	0.192	8.27
焼成肥料B	1.23	0.520	0.177	8.91
熔成肥料	1.71	0.530	0.166	8.62
無SiO ₂	0.00	0.485	0.119	6.75

の、8月19日までの期間における水稲による吸収が盛んであったことを示唆する。

4 リン酸肥効

無P・SiO₂区のP吸収量0.18 g-P₂O₅ pot⁻¹に対して、Pを施用した他の試験区のP吸収量は0.18~0.21 g-P₂O₅ pot⁻¹と差は認められなかった。可給態リン酸が栽培期間中に大きく低下したこと(表5)、ポットから排水されるPもわずかであることから、全区において土壤中の可給態画分がよく水稲に吸収されたことが明らかである。本研究では、P施用区で初期の茎数の増加傾向は認めるものの、可給態リン酸が100~200 mg-P₂O₅ kg⁻¹程度あれば、土壌からのP供給によりP無施用でも水稲は十分に生育可能であったことが明らかである。このため、本研究で供試した肥料のリン酸肥効は明確には評価できなかった。

5 ケイ酸肥効

表7に出穂期(8月19日)と収穫時の籾とわらのSiO₂含有率を示した。出穂期、収穫時においてもSiO₂施用区でSiO₂含有率が高い傾向があり、特にわらのSiO₂含有率は焼成肥料B、熔成肥料で高かった。表8にSiO₂収支をまとめた。各試験区のSiO₂吸収量は、無SiO₂区の6.75 g-SiO₂ kg⁻¹に対して、焼成肥料A:8.27 g-SiO₂ kg⁻¹、焼成肥料B:8.91 g-SiO₂ kg⁻¹、熔成肥料:8.62 g-SiO₂ kg⁻¹とSiO₂を施用した区、特に焼成肥料Bと熔成肥料で明らかに多かった(P<0.05)。これは、これら2種類の肥料では、わらのSiO₂含有率が高まったためである(表7)。施肥量とかんがい水からの供給量の合計はわずかであり、水稲に吸収されたSiO₂の多くは土壌起源と考えられる。

各肥料の見かけのSiO₂利用率を、無SiO₂区を対照として差し引き法により求めると、焼成肥料Bが1.08と最も高く、次いで熔成肥料が0.8、リン酸含量が高くケイ酸施用量の少ない焼成肥料Aが0.52であった。収量も焼成肥料Bと熔成肥料で無SiO₂区の1割増と優れることから(表4)、P含量を5%程度に抑え、SiO₂含量を高めた肥料

が水稲のSiO₂吸収、収量の増大に有効と考えられる。

松森と郡司掛は、土壌の可給態ケイ酸が150 mg-SiO₂ kg⁻¹未満でかんがい水のSiO₂濃度が15 mg-SiO₂ L⁻¹以下の場合には、ケイ酸資材施用の効果で水稲は増収している⁶⁾。本研究でも、可給態ケイ酸36 mg-SiO₂ kg⁻¹、かんがい水のSiO₂濃度10.1 mg-SiO₂ L⁻¹といずれも低いレベルであったことから、SiO₂肥料の施用により水稲のSiO₂吸収量、収量の増加効果が現れたと考えられる。

以上の結果から、下水汚泥焼却灰を原料とし、P含量を抑えSiO₂含量を高めて製造した焼成ケイ酸リン肥は、リン酸質肥料としてだけでなく、SiO₂吸収量の増大を通じた水稲の増収が示唆されたことから、ケイ酸質肥料としても有効と考えられた。

引用文献

1. 白毛宏和. MAP法によるリン回収資源化システム. 環境バイオテクノロジー学会誌. 4, 109-115(2005)
2. 小松貴司, 岩井良博, 定塚徹治, 久保山周子, 後藤逸夫. 下水処理におけるリン資源リサイクルシステムの開発. Phosphorous Letter, 49, 19-30(2004)
3. 後藤逸夫. 溶成汚泥灰複合肥料の肥料効果. EICA, 14, 23-26(2009)
4. 今井敏夫, 三浦啓一. 焼成法による下水汚泥焼却灰のりん酸肥料化技術. 太平洋セメント研究報告. 169, 51-61(2015)
5. 金田吉弘, 高橋大悟, 坂口春菜, 金和裕, 高階史章, 佐藤孝. ケイ酸質肥料が登熟期の高温処理水稲の葉温・気孔コンダクタンスおよびケイ酸吸収に及ぼす影響. 土肥誌. 81, 504-507(2010)
6. 松森信, 郡司掛則昭. 水田のケイ酸供給能に基づく水稲に対するケイ酸質資材施用の適否判定. 熊本県農業研究センター研究報告. 17, 9-17(2009)