

第三章 メタン発酵消化液脱水ケーキ炭化物のリン酸肥料的効果

第1節 はじめに

本章では、山田バイオマスプラントで発生したメタン発酵消化液の固体分である消化液脱水ケーキを炭化した資材(第1-2図)のリン酸肥料的効果について論じる。

メタン発酵技術は、微生物反応により家畜ふん尿等の生物由来資源からバイオガスを取り出すものであり、バイオマス利活用において重要な役割を果たしている(李, 2005)。一方で、バイオガスを取り出した残さであるメタン発酵消化液が大量に発生し、その処理が問題となっている(中村ら, 2007a)。消化液を浄化し、水系に放流すると多大なコストがかかることや(柚山ら, 2011)、窒素、リン酸および加里の肥料成分が含まれることから、農地施用が望ましい(柚山ら, 2007)。

しかし、消化液は多量の水分を含むため(中村ら, 2007a)、農業資材として流通利用するには輸送・散布の取り扱いに難点がある。そこで、濃縮等による消化液の減容化が試みられている(山岡ら, 2008)。減容化の一手法として、独立行政法人農業・食品技術総合研究機構農村工学研究所が、千葉県香取市に設置した乳牛ふん尿等を原材料とするメタン発酵プラント(農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」、2007)では、消化液を固体と液体に分離し、固体分である脱水ケーキを過熱水蒸気法で炭化して脱水ケーキ炭が試作されている(迫田ら, 2007)。

炭化は、汚泥状の物質を減容化する技術として広く用いられており、下水汚泥については、減容化・悪臭除去を目的として行われている。下水汚泥は貴重なリン酸資源として期待されているが(水谷, 1997)、その炭化物のリン酸肥効がほとんど認められないことが報告されている(久保山ら, 2007)。一方、牛ふん炭化物および除塩牛ふん炭化物については、リン酸肥効が認められている(真行寺ら, 2009)。

横田ら(2003)は、製造条件の異なる牛ふん堆肥中の無機態リン酸をFrossard et.al(1994)の方法で逐次抽出し、その形態別リン酸含有率を明らかにし、有効性を評価している。また、伊藤ら(2010)は、同法により豚ふんおよび鶏ふん堆肥に含まれる有効態リン酸を評価している。また、早川・渡辺(1990)は下水汚泥焼却灰の形態別リン酸含量を明らかにし、その肥料的効果について論じている。しかし、メタン発酵消化液脱水ケーキの炭化物に含まれる有効態リン酸含量を測定し、リン酸肥効を評価した事例は見られない。

そこで、脱水ケーキ炭に含まれる有効態リン酸含量を明らかにするために、逐次抽出法でリン酸含量を評価した。あわせて、リン酸固定力の異なる2種類の土壌(黒ボク土および褐色低地土)においてコマツナのポット栽培試験を行い、脱水ケーキ炭のリン酸肥効を明らかにしたので報告する。

第2節 材料および方法

1. 脱水ケーキ炭の概要

脱水ケーキ炭は、乳牛ふん尿と野菜残さを現物重で約7:1の割合で混合し、メタン発酵した消化液の脱水ケーキを(中村ら, 2007a)、飽和水蒸気を100℃以上に加熱した過熱水蒸気中で炭化して製造されたものである。炭化温度は230~330℃、処理時間は6~7分間である(迫田ら, 2007)。

脱水ケーキ炭およびメタン発酵原料である乳牛ふん尿と野菜残さの化学性を第3-1表に示した。脱水ケーキ炭の含水率は0.015 kg kg⁻¹、pHは8.8である。全窒素含量は33,200 mg kg⁻¹であるが、アンモニウム態窒素含量は約20 mg kg⁻¹、硝酸態窒素含量は約2 mg kg⁻¹であり、全窒素に占める無機態窒素の割合は極めて低い。ク溶性加里含量は9,460 mg kg⁻¹である。メタン発酵原料である乳牛ふん尿は、全窒素含量が26,000 mg kg⁻¹、全加里含量が22,887 mg kg⁻¹で

第3-1表 脱水ケーキ炭およびその原料の化学性

	Water content (kg kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	EC (mS m ⁻¹)	T-C (mg kg ⁻¹)	T-N (mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	Citric acid soluble K ₂ O (mg kg ⁻¹)
Biochar	0.015	8.8	390	337,000	33,200	19.9	2.2	9,460
	Water content (kg kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	EC (mS m ⁻¹)	T-C (mg kg ⁻¹)	T-N (mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	Total-K ₂ O (mg kg ⁻¹)
Cow manure ^a	0.85	no data	no data	419,000	26,000	no data	no data	22,887
	Water content (kg kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	EC (mS m ⁻¹)	T-C (mg L ⁻¹)	T-N (mg L ⁻¹)	NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	Total-K ₂ O (mg L ⁻¹)
Vegetable residue ^b	0.969	4.4	790	14,900	1,490	209	<0.6	2,963

a,b:quoted from "Nakamura et al.(2007)"

ある。同じくメタン発酵原料である野菜残さは、含水率が 0.969 kg kg^{-1} と高く、pHが4.4と低い。

2. 脱水ケーキ炭および各種リン酸資材のリン酸含有率

脱水ケーキ炭および比較対象としたリン酸肥料(過リン酸石灰, 重焼リン, 溶性リン肥)の全リン酸含量, ク溶性リン酸含量および水溶性リン酸含量を測定した。

全リン酸含量は、粉碎した現物100 mg に60 %硝酸を8 mL 添加し、マイクロウェーブサンプルプロセッサ(ETHOS 900, マイルストーン社製)で分解したサンプルを、脱イオン水で希釈後にモリブデン青法(土壤環境分析法編集委員会, 1997)で測定した。

ク溶性リン酸含量は、農林水産省農業環境技術研究所(1992)による肥料分析法に準じ、粉碎した現物1 g に2 %クエン酸液150 mL を添加し、30分振とう後に、ろ過した溶液をモリブデン青法で測定した。

水溶性リン酸含量は、粉碎した現物1 gに脱イオン水150 mL を添加し、30分振とう後に、ろ過した溶液をク溶性リン酸含量と同様に測定した。

有効態リン酸含量を評価するために、Frossard et al. (1994)による逐次抽出法に従って、脱イオン水, 0.5 mol L^{-1} 重炭酸ナトリウム溶液 (pH8.5), 0.1 mol L^{-1} 水酸化ナトリウム溶液, 1.0 mol L^{-1} 塩酸で順次抽出し、各リン酸含量をモリブデン青法で測定した。

3. コマツナのポット栽培によるリン酸肥効評価

1/5,000aワグネルポット(底部排水栓開放)に湿重量で黒ボク土(触感土性L) 2.5 kgもしくは褐色低地土(触感土性LS) 5.0 kgを入れ、千葉県農林総合研究センター内のハウス圃場においてコマツナ(品種:夏楽天)を無加温で栽培した。供試土壌の化学性は第3-2表に示した。

試験区は脱水ケーキ炭をポット当たり全リン酸で $300 \text{ mg-P}_2\text{O}_5$ 相当施用した脱水ケーキ炭区(以下, BC区), 過リン酸石灰, 重焼リンおよび溶性リン肥をそれぞれク溶性リン酸で $300 \text{ mg-P}_2\text{O}_5$ 相当施用した過石区, 重焼リン区および溶リン区, リン酸肥料を施用しない無リン酸区とした。BC区のカ溶性リン酸施用量は、ポット当たり $192 \text{ mg-P}_2\text{O}_5$ であった。窒素および加里はすべての試験区にポット当たり 300 mg をそれぞれ硫酸および塩化加里で施用した。

試験規模は1区3ポットで3反復とした。2010年12月21日にポット当たり13粒を播種し、2011年1月12日にポット当たり5株に間引いた。かん水は土壌の表面が乾かない程度に適宜行った。

2011年3月10日にコマツナを収穫し、地上部の新鮮重, 乾物重およびリン酸吸収量を調査した。リン酸吸収量は乾燥粉碎サンプルをマイクロウェーブサンプルプロセッサで硝酸分解し、モリブデン青法で測定した。

コマツナ収穫後に栽培跡土壌のpHおよび可給態リン酸含量を測定した。可給態リン酸は、トルオーグ法(土壤環境分析法編集委員会, 1997)で抽出し、モリブデン青法で測定した。

第3-2表 ポット栽培試験に供した土壌の化学性

Soil	pH (H ₂ O)	EC (mS m ⁻¹)	T-C (mg kg ⁻¹)	T-N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)
Andosol (soil texture:L)	6.4	7.4	43,800	3,160	26.6	16.0
Lowland soil (soil texture:LS)	6.7	1.6	2,100	170	1.6	13.8

Soil	Phosphate absorption coefficient (gP ₂ O ₅ kg ⁻¹)	Truog P ₂ O (mg kg ⁻¹)	CEC (cmolc kg ⁻¹)	Exchangeable cation (mg kg ⁻¹)		
				CaO	MgO	K ₂ O
Andosol (soil texture:L)	22.70	32.5	44.5	3,274	191	289
Lowland soil (soil texture:LS)	1.85	289.6	6.5	553	66	48

第3節 結果

1. 脱水ケーキ炭のリン酸含量

脱水ケーキ炭の全リン酸含量は74.1 g-P₂O₅ kg⁻¹, ク溶性リン酸含量は40.9 g-P₂O₅ kg⁻¹, 水溶性リン酸含量は2.0 g-P₂O₅ kg⁻¹であった(第3-3表). ク溶率(全リン酸に占めるク溶性リン酸の割合)は55.2%であった. ク溶性リン酸に占める水溶性リン酸の割合は4.9%で, 過リン酸石灰の61.2%の約1/12, 溶性リン肥の約8倍であった.

Frossard et al. (1994)の方法による脱水ケーキ炭の水抽出リン酸含量(以下, H₂O-P)は1.7 g-P₂O₅ kg⁻¹, 0.5 mol L⁻¹重炭酸ナトリウム溶液抽出リン酸含量(以下, NaHCO₃-P)は13.7 g-P₂O₅ kg⁻¹, 0.1 mol L⁻¹水酸化ナトリウム溶液抽出リン酸含量(以下, NaOH-P)は17.1 g-P₂O₅ kg⁻¹, 1.0 mol L⁻¹塩酸抽出リン酸含量(以下, HCl-P)は42.2 g-P₂O₅ kg⁻¹であった. 抽出されたリン酸の合計量は74.7 g-P₂O₅ kg⁻¹で, 全リン酸含量とほぼ等しかった. 合計量に占める割合はH₂O-Pが2%, NaHCO₃-Pが18%, NaOH-Pが23%, HCl-Pが56%であった.

過リン酸石灰は, H₂O-Pが170.6 g-P₂O₅ kg⁻¹で, 抽出されたリン酸の合計量203.1 g-P₂O₅ kg⁻¹の84%を占めた. 重焼リンは, H₂O-Pが408.4 g-P₂O₅ kg⁻¹で, 抽出されたリン酸の合計量525.4 g-P₂O₅ kg⁻¹の78%であった. 溶性リン肥は, H₂O-Pが0.1 g-P₂O₅ kg⁻¹とわずかであったが, HCl-Pが167.6 g-P₂O₅ kg⁻¹で, 抽出されたリン酸の合計量188.4 g-P₂O₅ kg⁻¹の89%であった.

2. 脱水ケーキ炭の施用がコマツナの生育とリン酸吸収量に及ぼす影響

黒ボク土で栽培したコマツナの地上部新鮮重は, 無リン酸区が8.9 g pot⁻¹, BC区が76.1 g pot⁻¹, 過石区が79.1 g pot⁻¹, 重焼リン区が76.4 g pot⁻¹, 熔リン区が57.7 g pot⁻¹であった(第3-4表). 地上部乾物重は, 無リン酸区が2.47 g pot⁻¹, BC区が6.58 g pot⁻¹, 過石区が6.25 g pot⁻¹, 重焼リン区が6.51 g pot⁻¹, 熔リン区が5.28 g pot⁻¹であった. 地上部リン酸吸収量は, 無リン酸区が4.0 mg-P₂O₅ pot⁻¹, BC区が46.9 mg-P₂O₅ pot⁻¹, 過石区が49.0 mg-P₂O₅ pot⁻¹, 重焼リン区が51.6 mg-P₂O₅ pot⁻¹, 熔リン区が38.3 mg-P₂O₅ pot⁻¹であった. BC区の地上部新鮮重, 地上部乾物重および地上部リン酸吸収量は, 無リン酸区と比べて有意に多かった.

褐色低地土で栽培したコマツナの地上部新鮮重は, 無リン酸区が39.9 g pot⁻¹, BC区が92.6 g pot⁻¹, 過石区が94.4 g pot⁻¹, 重焼リン区が85.9 g pot⁻¹, 熔リン区が68.8 g pot⁻¹であった. 地上部乾物重は, 無リン酸区が3.62 g pot⁻¹, BC区が9.28 g pot⁻¹, 過石区が8.76 g pot⁻¹, 重焼リン区が8.26 g pot⁻¹, 熔リン区が6.48 g pot⁻¹であった. 地上部リン酸吸収量は, 無リン酸区が34.0 mg-P₂O₅ pot⁻¹, BC区が84.0 mg-P₂O₅ pot⁻¹, 過石区が86.0 mg-P₂O₅ pot⁻¹, 重焼リン区が78.0 mg-P₂O₅ pot⁻¹, 熔リン区が66.8 mg-P₂O₅ pot⁻¹であった. BC区の地上部新鮮重, 地上部乾物重および地上部リン酸吸収量は, 無リン酸区と比べて有意に多かった.

第3-3表 脱水ケーキ炭および比較対象としたリン酸肥料のリン酸含有量(下段は逐次抽出法による)

Experiment material	Total-P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	Citric-acid soluble P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	Water soluble P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	Water soluble/ Citric-acid soluble(%)	Citric-acid soluble/ Total (%)
Biochar	74.1	40.9	2.0	4.9	55.2
Super phosphate	191.4	174.9	107.0	61.2	91.4
Multi phosphate	481.3	463.8	354.0	76.3	96.4
Fused magnesium phosphate	190.3	176.8	1.0	0.6	92.9
Experiment material	Water extracted P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	NaHCO ₃ extracted P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	NaOH extracted P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	HCl extracted P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	Total extracted P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)
Biochar	1.7(2%)	13.7(18%)	17.1(23%)	42.2(56%)	74.7
Super phosphate	170.6(84%)	6.1(3%)	4.5(2%)	22.0(11%)	203.1
Multi phosphate	408.4(78%)	17.9(3%)	8.6(2%)	90.5(17%)	525.4
Fused magnesium phosphate	0.1(0.1%)	18.4(10%)	2.3(1%)	167.6(89%)	188.4

このように、黒ボク土および褐色低地土のいずれにおいても、脱水ケーキ炭を施用した区は、リン酸を施用しない区と比較して、コマツナの地上部重および地上部リン酸吸収量が有意に増加した。

各区の地上部リン酸吸収量から無リン酸区の地上部リン酸吸収量を引き、リン酸施用量で除して施肥リン酸利用率を求めた。施肥リン酸利用率は、全リン酸、ク溶性リン酸および無機態リン酸（逐次抽出法による $H_2O\text{-P}$ 、 $NaHCO_3\text{-P}$ 、 $NaOH\text{-P}$ および $HCl\text{-P}$ の和）を施用量とした場合についてそれぞれ求めた。なお、BC区のリン酸施用量は全リン酸でポット当たり $300\text{ mg-P}_2\text{O}_5$ を意図していたが、ポット試験実施後に脱水ケーキ炭を再分析して得られた全リン酸含有率を反映させた結果、ポット当たり $347.9\text{ mg-P}_2\text{O}_5$ となった（第3-5表）。このため、脱水ケーキ炭の施肥リン酸利用率の算出に当たっては、ポット当たりの全リン酸施用量を $347.9\text{ mg-P}_2\text{O}_5$ とした。

黒ボク土における施肥リン酸利用率は、全リン酸を施用量とした場合、BC区が 12.3% 、過石区が 13.7% 、重焼リン区が 15.3% 、熔リン区が 10.6% であった。ク溶性リン酸を施用量とした場合、BC区が 22.3% 、過石区が 15.0% 、重

焼リン区が 15.9% 、熔リン区が 11.5% であった。BC区の施肥リン酸利用率は、過石区および熔リン区より有意に高かった。無機態リン酸を施用量とした場合、BC区が 12.2% 、過石区が 12.9% 、重焼リン区が 13.9% 、熔リン区が 10.3% であった。

褐色低地土における施肥リン酸利用率は、全リン酸を施用量とした場合、BC区が 14.4% 、過石区が 15.8% 、重焼リン区が 14.1% 、熔リン区が 10.1% であった。ク溶性リン酸を施用量とした場合、BC区が 26.0% 、過石区が 17.3% 、重焼リン区が 14.7% 、熔リン区が 10.9% であった。BC区の施肥リン酸利用率は、熔リン区より有意に高かった。無機態リン酸を施用量とした場合、BC区が 14.2% 、過石区が 14.9% 、重焼リン区が 12.8% 、熔リン区が 9.9% であった。

BC区の施肥リン酸利用率を過石区の施肥リン酸利用率で除して、脱水ケーキ炭のリン酸肥効率を求めた。全リン酸を施用量とした場合、黒ボク土では 90.1% 、褐色低地土では 92.6% であった（第3-1図）。ク溶性リン酸を施用量とした場合、黒ボク土では 149.1% 、褐色低地土では 153.2% であった。無機態リン酸を施用量とした場合、黒ボク土では 94.8% 、褐色低地土では 97.4% であった。

第3-4表 脱水ケーキ炭および各種リン酸肥料を施用して栽培したコマツナの生育とリン酸吸収量

Experimental plot	Fresh weight of aerial part (g pot ⁻¹)		Dry weight of aerial part (g pot ⁻¹)		P ₂ O ₅ uptake rate of aerial part (mg P ₂ O ₅ pot ⁻¹)	
	Andosol	Lowland soil	Andosol	Lowland soil	Andosol	Lowland soil
P-free	8.9 a	39.9 a	2.47 a	3.62 a	4.0 a	34.0 a
Biochar	76.1 b	92.6 b	6.58 b	9.28 b	46.9 b	84.0 b
Super phosphate	79.1 b	94.4 b	6.25 b	8.76 b	49.0 b	86.0 b
Multi phosphate	76.4 b	85.9 b	6.51 b	8.26 b	51.6 b	78.0 b
Fused magnesium phosphate	57.7 b	68.8 ab	5.28 b	6.48 ab	38.3 ab	66.8 b

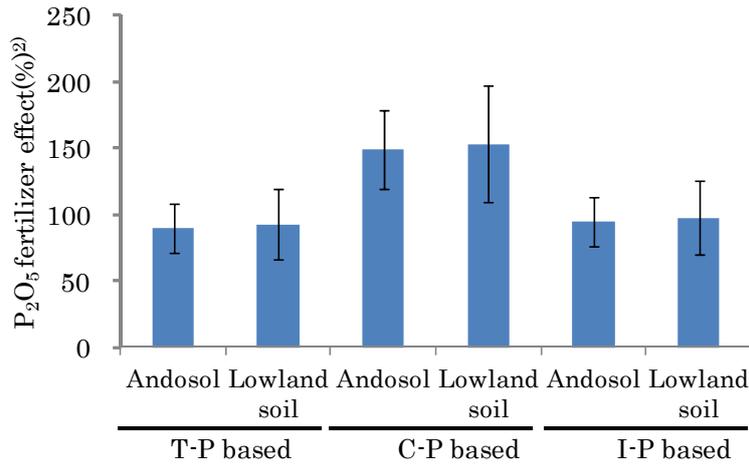
Mean value (n=3), Different letters in each row denote significant differences (P<0.05) among the treatments according to a Tukey's HSD test

第3-5表 脱水ケーキ炭および各種リン酸肥料を施用して栽培したコマツナの施肥リン酸利用率

Experimental plot	Phosphate application rate (mg P ₂ O ₅ pot ⁻¹)			Recovery rate of applied P ₂ O ₅ (%) ^a					
	Total P ₂ O ₅	Citric acid soluble P ₂ O ₅	Inorganic P ₂ O ₅	Total-P ₂ O ₅		Citric acid soluble P ₂ O ₅		Inorganic-P ₂ O ₅	
				Andosol	Lowland soil	Andosol	Lowland soil	Andosol	Lowland soil
P-free	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-
Biochar	347.9	192.0	350.7	12.3	14.4	22.3 b	26.0 b	12.2	14.2
Super phosphate	328.3	300.0	348.4	13.7	15.8	15.0 a	17.3 ab	12.9	14.9
Multi phosphate	311.3	300.0	342.1	15.3	14.1	15.9 ab	14.7 ab	13.9	12.8
Fused magnesium phosphate	322.9	300.0	332.5	10.6	10.1	11.5 a	10.9 a	10.3	9.9
ANOVA	-	-	-	n.s.	n.s.	*p<0.05	*p<0.05	n.s.	n.s.

a: Recovery rate of applied P₂O₅=(P₂O₅ uptake rate of each plot · P₂O₅ uptake rate of P-free plot)/Phosphate application rate×100

Mean value(n=3), Different letters in each column denote significant differences (p<0.05) among the treatments according to a Tukey's HSD test



第3-1図 コマツナ栽培における脱水ケーキ炭のリン酸肥効率

1) Error bars denote S.D.(n=3)

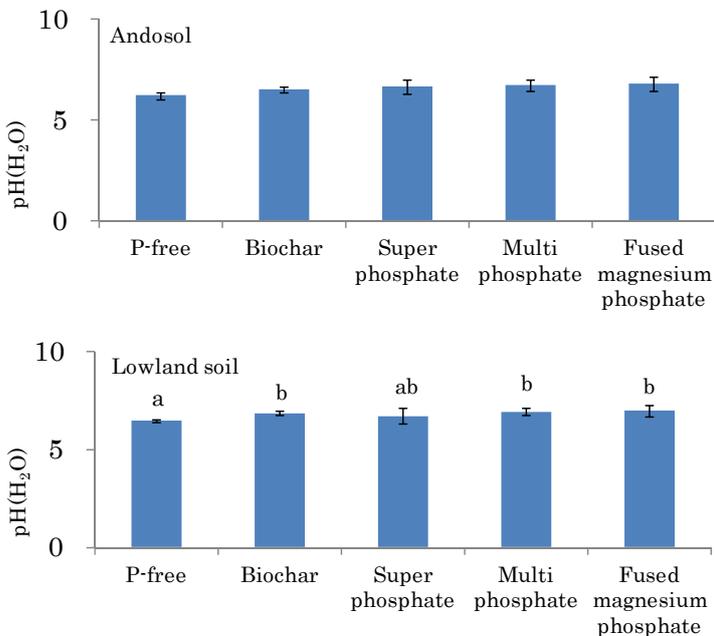
2) P_2O_5 fertilizer effect = Recovery rate of applied P_2O_5 of BC plot ÷ Recovery rate of applied P_2O_5 of Super phosphate plot × 100

3. 脱水ケーキ炭の施用が土壌のpHおよびリン酸肥度に及ぼす影響

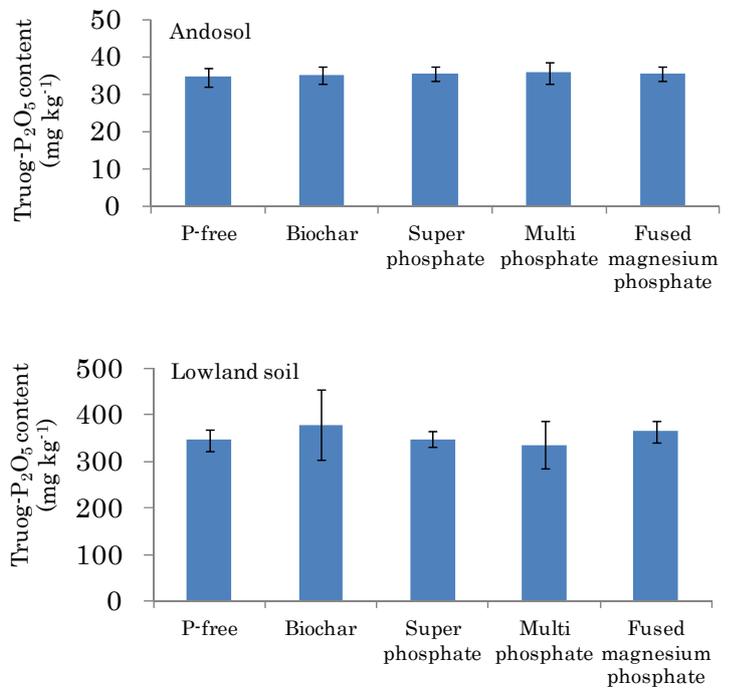
コマツナ栽培跡の黒ボク土のpHは、無リン酸区が6.2, BC区が6.5, 過石区が6.7, 重焼リン区が6.7, 熔リン区が6.8であった(第3-2図)。無リン酸区とBC区および他のリン酸肥料を施用した区との間には、有意な差が認められなかった。褐色低地土のpHは、無リン酸区が6.5, BC区が6.9, 過石区が6.8, 重焼リン区が7.0, 熔リン区が7.0であった。BC区のpHは、無リン酸区と比較して有意に上昇した。BC区と他のリン酸肥料を施用した区との間には、有意な差が認められな

かった。

BC区の栽培跡土壌の可給態リン酸含量は、黒ボク土では $35.1 \text{ mg} \cdot P_2O_5 \text{ kg}^{-1}$, 褐色低地土では $379.1 \text{ mg} \cdot P_2O_5 \text{ kg}^{-1}$ であった(第3-3図)。無リン酸区の栽培跡土壌の可給態リン酸含量は、黒ボク土では $34.7 \text{ mg} \cdot P_2O_5 \text{ kg}^{-1}$, 褐色低地土では $346.1 \text{ mg} \cdot P_2O_5 \text{ kg}^{-1}$ であった。黒ボク土および褐色低地土のいずれにおいても無リン酸区とBC区や他のリン酸肥料を施用した区の栽培跡土壌の可給態リン酸含量には、有意な差が認められなかった。



第3-2図 脱水ケーキ炭および各種リン酸肥料を施用したコマツナ栽培跡土壌のpH



第3-3図 脱水ケーキ炭および各種リン酸資材を施用したコマツナ栽培跡土壌の可給態リン酸含量

1) Error bars denote S.D.(n=3)

2) Different letters denote significant differences (P<0.05) among the plots according to a Tukey'sHSD test

Error bars denote S.D.(n=3)

第4節 考察

1. 脱水ケーキ炭に含まれるリン酸の有効性

一般的に、有機物の炭化処理による全リンの減少はほとんど認められない。Bridle and Pritchard (2004) は、450 °C で生ゴミを炭化した場合における全窒素の減少は55 %であったが、全リンの減少はほとんど認められなかったと報告している。

しかし、炭化原料の違いにより、炭化物に含まれるリンの可給性は大きく異なる。本稿で示したク溶性リン酸とは2%のクエン酸溶液に溶出するリン酸のことであり(農林水産省農業環境技術研究所, 1992)、肥料や資材に含まれるリン酸のうち、作物の根から分泌される有機酸の影響で溶解・吸収されるリン酸とされている。したがって、肥料や資材に含まれるリン酸のうち、作物の生育に有効な画分がク溶性リン酸であると考えて良い。歌野ら(2007)は、250~800 °Cでの牛ふんの炭化において、炭化物に含まれるリン酸のほぼ全量がク溶性であると報告している。一方、大津ら(2011)は、300 °Cで炭化した廃棄パレイショに含まれるリン酸のク溶率が20 %程度であるとの結果を得ている。230~330 °Cで乳牛ふん尿と野菜残さのメタン発酵消化液脱水ケーキを炭化した脱水ケーキ炭のク溶率は55.2 %であり、中間的な値を示した。水不溶性でク溶性を示すリン酸について、小柳ら(2005)は、第2リン酸カルシウムか第3リン酸カルシウムではないかと推定している。Uchimiya and Hiradate (2014)は、畜ふん炭化物中のリン酸が非晶質のリン酸カルシウム主体であるのに対し、植物質炭化物中のリンは、縮合リン酸が主体であると報告しており、このような理由で、畜ふんと野菜残さの炭化物に含まれるリン酸の可給性が大きく異なると考えられる。

横田ら(2003)は、堆肥に含まれる無機態リン酸のうち、水抽出画分と0.5 mol L⁻¹ 重炭酸ナトリウム溶液抽出画分を非常に可給性の高いリン酸、0.1 mol L⁻¹ 水酸化ナトリウム溶液抽出画分をアルミニウムもしくは鉄と結合した形態のリン酸、1.0 mol L⁻¹ 塩酸抽出画分をアパタイトリン酸としている。また、伊藤ら(2005)は、堆肥に含まれる無機態リン酸のうち、水抽出画分と0.5 mol L⁻¹ 重炭酸ナトリウム溶液抽出画分の和を有効態リン酸としている。これらの評価に基づく、脱水ケーキ炭に含まれる有効態リン酸は15.4 g-P₂O₅ kg⁻¹ となり、連続抽出により抽出されたすべてのリン酸の合計量74.7 g-P₂O₅ kg⁻¹ の21 %となる(第3-3表)。同様に供試したリン酸肥料中の有効態リン酸の割合は、過リン酸石灰が87 %、重焼リンが81 %、熔性リン肥が10 %となる。

また、横田ら(2003)は、水抽出画分は可給性が高いが、土壌に固定されやすいため、植物への肥料的効果を考える

上では0.5 mol L⁻¹ 重炭酸ナトリウムで抽出されるリン酸が重要であると述べている。脱水ケーキ炭に含まれるNaHCO₃-Pは13.7 g-P₂O₅ kg⁻¹ であり、抽出されたリン酸合計量の18 %である。同様に、NaHCO₃-Pが抽出されたリン酸合計量に占める割合は、過リン酸石灰および重焼リンが3 %、熔性リン肥が10 %となる。これらの結果から、脱水ケーキ炭は、リン酸固定力の高い圃場においても有効なリン酸資材であると推測される。

2. リン酸固定力の異なる土壌における脱水ケーキ炭のリン酸肥効

本試験に供した土壌のリン酸吸収係数は、黒ボク土が22.70 g-P₂O₅ kg⁻¹、褐色低地土が1.85 g-P₂O₅ kg⁻¹であった(第3-2表)。リン酸吸収係数の大きく異なるいずれの土壌においても、無リン酸区と比較してBC区のコマツナの地上部新鮮重および地上部リン酸吸収量が有意に増加したことから(第3-4表)、土壌のリン酸固定力にかかわらず、脱水ケーキ炭にはリン酸肥料としての効果が認められた。

一般的にリン酸肥料の肥料的効果は、ク溶性リン酸等の保証成分に基づいて評価される。しかし、堆肥等の資材のリン酸肥効については、小柳ら(2005)が各種畜ふん堆肥を対象に行ったコマツナのポット試験のように、全リン酸に基づいた評価の事例も見られる。これは小柳ら(2005)が述べているとおり、家畜ふん堆肥等では、クエン酸不溶性の有機態リン酸も土壌微生物により無機化され、肥料的効果を持つ可能性があるためと考えられる。脱水ケーキ炭に含まれる有機態リン酸も、クエン酸不溶性である可能性は高いと推測される。その点も含め、本試験では脱水ケーキ炭中の有機態リン酸を含めた肥効を評価することをねらいとして、脱水ケーキ炭施用量を全リン酸でポット当たり300 mg、その他のリン酸肥料の施用量をク溶性リン酸でポット当たり300 mgとした。

ク溶性リン酸に基づいた脱水ケーキ炭の施肥リン酸利用率は、黒ボク土および褐色低地土において、熔性リン肥と比べて有意に高かった(第3-5表)。ただし、BC区のク溶性リン酸施用量が他の区と大きく異なることから、この結果のみから脱水ケーキ炭のリン酸肥効が熔性リン肥と比較して高いと判断することは難しいと考えられる。

全リン酸および無機態リン酸に基づいた脱水ケーキ炭の施肥リン酸利用率には、比較対象としたリン酸肥料と比べて、黒ボク土および褐色低地土において有意な差が認められなかった(第3-5表)。逐次抽出法により得られた結果では、脱水ケーキ炭の無機態リン酸に占めるNaHCO₃-Pの比率が高いことから、過リン酸石灰や重焼リンと比較して、黒ボク土での施肥リン酸利用率が高まることが期待された。しかし、ポット栽培されたコマツナの無機態リン酸に基づいた施肥リン酸利用率には、BC区と過石区および重焼リン区の間で

の有意差は認められなかった。この理由に関しては不明であるが、松丸・真行寺 (2005) は本試験と同様に牛ふん炭化物のリン酸肥効を黒ボク土におけるコマツナのポット栽培試験で評価し、1月中旬播種、栽培日数40日程度で、乾物重で株当たり2 g 程度のコマツナを収穫している。一方、本試験では、12月下旬播種で栽培日数が80日に達したにもかかわらず、収穫されたコマツナの乾物重は、リン酸資材を施用した区においても株当たり1.0~1.3 g 程度と少なかった。この理由は、松丸・真行寺 (2005) が夜温を14 °Cに設定し、加温を実施したのに対し、本試験では昼夜にわたって無加温としたため、低温条件が生育を制限したからであると想定される。このために、気温が著しく低下する期間においては、植物体の生長が制限されるとともに、リン酸の吸収が抑えられた可能性がある。低温期には水溶性リン酸の施用が効果的とされており (加藤, 2008), 水溶性リン酸主体の過リン酸石灰と脱水ケーキ炭の間での施肥リン酸利用率に差が見られなかったと考えられる。

しかし、BC区の無機態リン酸に基づいた施肥リン酸利用率は、過石区や重焼リン区と比較して有意に高くはなく、黒ボク土および褐色低地土のいずれにおいても過石区や重焼リン区と同程度であった (第3-5表)。この結果から、脱水ケーキ炭は、土壤のリン酸固定力にかかわらず、慣行のリン酸肥料と同等の肥料的効果を持つと判断してよいと考えられる。

なお、脱水ケーキ炭の窒素および加里の肥料的効果を評価するための栽培試験は実施していない。しかし、脱水ケーキ炭を黒ボク土に施用し、圃場容水量60 %の水分条件で30 °Cの恒温培養を4週間おこなったところ、窒素の無機化が認められた。また、歌野ら (2007) は250 °Cの比較的低温で炭化した牛ふんを施用したコマツナのポット栽培試験において、ある程度の窒素肥効を認めている。これらのことから、230~330 °Cの比較的低温で炭化された脱水ケーキ炭は、若干の窒素肥効を持つことが推測される。また、9,460 mg- K₂O kg⁻¹ のク溶性加里を含むことから (第3-1表), わずかながら加里肥効も期待できると判断される。

3. 脱水ケーキ炭の施用が土壤のpHおよびリン酸肥沃度に及ぼす影響

脱水ケーキ炭はpHが8.8と高く (第3-1表), 本試験での施用量は2.3 Mg ha⁻¹ に相当する。しかし、黒ボク土においては、脱水ケーキ炭の施用による土壤pHの有意な上昇は認められなかった (第3-2図)。一方、褐色低地土においては、脱水ケーキ炭の施用により土壤pHが上昇したが、その度合いは慣行のリン酸肥料と同程度であった (第3-2図)。この結果から、リン酸肥料の代替資材とする程度の量の脱水ケーキ炭を施用する場合には、土壤pHの上昇に留意する必要は

ないと考えられる。

栽培跡土壤の可給態リン酸含量について、BC区と無リン酸区の間で、有意な差が認められなかったことから (第3-3図), 脱水ケーキ炭の施用により、コマツナ栽培跡土壤のリン酸肥沃度が向上したとはいえない。

真行寺ら (2009) は、牛ふん炭化物を黒ボク土に33 Mg ha⁻¹ 相当施用してコマツナを4作栽培した試験において、栽培跡土壤の可給態リン酸含量が増加しなかったと報告し、その原因をリン酸施用量が不足しているためとしている。本試験における脱水ケーキ炭の施用量は、2.3 Mg ha⁻¹ にとどまることから、栽培跡土壤の可給態リン酸含量に影響を及ぼすには不十分な量であったと推測される。

第5節 まとめ

乳牛ふん尿と野菜残さのメタン発酵消化液を固液分離し、固液分を過熱水蒸気式炭化装置により230~330 °Cで炭化した脱水ケーキ炭のリン酸肥効を評価した。

脱水ケーキ炭の全リン酸含量は74.1 g-P₂O₅ kg⁻¹, ク溶性リン酸含量は40.9 g-P₂O₅ kg⁻¹, 水溶性リン酸含量は2.0 g-P₂O₅ kg⁻¹ であった。全リン酸に占めるク溶性リン酸の割合は55.2 %であった。ク溶性リン酸に占める水溶性リン酸の割合は4.9 %で、過リン酸石灰の約1/12, 溶性リン肥の約8倍であった。

水、0.5 mol L⁻¹ 重炭酸ナトリウム溶液、0.1 mol L⁻¹ 水酸化ナトリウム溶液および1.0 mol L⁻¹ 塩酸溶液で脱水ケーキ炭を逐次抽出したところ、それぞれの溶液で抽出されたリン酸量は、1.7 g-P₂O₅ kg⁻¹, 13.7 g-P₂O₅ kg⁻¹, 17.1 g-P₂O₅ kg⁻¹ および42.2 g-P₂O₅ kg⁻¹ であった。抽出されたリン酸の合計量に占める有効態リン酸量 (水および0.5 mol L⁻¹ 重炭酸ナトリウム溶液で抽出されたリン酸量の和) の比率は21 %であった。

コマツナのポット栽培試験により、脱水ケーキ炭のリン酸肥効を評価したところ、黒ボク土および褐色低地土のいずれにおいてもリン酸肥料としての効果を示した。そのリン酸肥効は、慣行のリン酸肥料 (過リン酸石灰, 重焼リンおよび溶性リン肥) と同等であった。

なお、脱水ケーキ炭はリン酸を含むが、作物栽培において最も重要な養分である窒素の肥料的効果はほとんど無いと想定される。脱水ケーキ炭の肥料としての価値を高めるためには、無機態窒素を含む濃縮液肥を添加することが有用であると考えられる。そこで、次章においては、濃縮液肥を脱水ケーキ炭に添加した資材を試作し、その窒素保持・放出特性について論じる。