

家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌における収支、溶脱量及び 土壌蓄積量からみた窒素、リン、カリウムの動態

中村嘉孝¹⁾・恒川 歩²⁾・糟谷真宏¹⁾

摘要：砂質畑土壌において牛ふん堆肥3 kg-FW m⁻²または豚ふん堆肥2 kg-FW m⁻²を施用し、リン及びカリウムの化学肥料を無施用とした区(牛ふん堆肥区、豚ふん堆肥区)と化学肥料のみ施用した区(堆肥無施用区)を設け、窒素、リン、カリウムの収支と溶脱量及び土壌蓄積量から養分動態を明らかにした。牛ふん堆肥区は堆肥の窒素量と同程度が土壌蓄積しており、キャベツ収量は堆肥無施用区と同程度か少なかった。豚ふん堆肥区は堆肥の窒素有効化率が高く堆肥無施用区より溶脱量は多かったが、同区より多収であり窒素肥料を削減できると判断された。堆肥からの投入リン量は、堆肥無施用区の化学肥料からの投入量よりも多かった。作物のリン吸収量は豚ふん堆肥区が最も多く、牛ふん堆肥区は堆肥無施用区と同程度であり、リン酸肥料低減の可能性が示唆された。牛ふん堆肥からの投入カリウム量は、堆肥無施用区の化学肥料からの投入量より多かった。豚ふん堆肥区における収量は堆肥無施用区より多収であるが、豚ふん堆肥からの投入カリウム量は堆肥無施用区の化学肥料の施用量より少なく、土壌中のカリウム含有量は減少傾向であった。

キーワード：砂質畑土壌、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥、収支、溶脱量、土壌蓄積量

Dynamics of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in relation to Nutrient Balance, Leaching and Soil Accumulation in a Sandy Soil Field with Manure Application

NAKAMURA Yoshitaka, TSUNEKAWA Ayumi and KASUYA Masahiro

Abstract : We investigated the dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium by nutrient balance, leaching amount and soil accumulation amount in a sandy soil field to which cattle manure (3 kg-FW m⁻²) or swine manure (2 kg-FW m⁻²) was applied. Nitrogen accumulated in the soil in amounts equivalent to the amounts of cattle manure applied. The yields of cabbage grown with cattle manure application were the same or lower than those grown with the chemical fertilizer alone. The available rate of nitrogen for crops, leaching amount of nitrogen and the yield were higher in the field to which swine manure was applied than in the field to which only the chemical fertilizer was applied. Therefore, application of swine manure could result in a reduction of the application of nitrogen fertilizer. Phosphorus inputs from cattle or swine manures were greater than those from the chemical fertilizer. The phosphorus absorption amount of crops to which swine manure was applied was higher than that of crops to which the chemical fertilizer was applied, which was similar to that of crops to which with cattle manure was applied. Therefore, application of cattle or swine manure could reduce the application of chemical fertilizers containing phosphorus. Potassium inputs from cattle manure were greater than those from the chemical fertilizer, whereas they were lower than those from swine manure. However, the yield was higher in the field to which swine manure was applied than in the field to which the chemical fertilizer was applied, and the potassium content in soil was reduced.

Key Words : Sandy soil, Cattle manure, Swine manure, Nutrient balance, Leaching, Soil accumulation

本研究の一部は日本土壌肥料学会中部支部第95回例会(2016年3月)において発表した。

¹⁾環境基盤研究部 ²⁾環境基盤研究部(現尾張農林水産事務所)

(2016. 10. 12受理)

緒言

砂質畑土壌は、保肥力や保水力が小さく、肥料成分の溶脱量が他の土壌よりも多いため¹⁾、施肥量が多くなりがちである。このため、溶脱養分による環境負荷が大きいことが懸念される。一方、家畜ふん堆肥などの有機物は、作物への養分供給、土壌の物理性や生物性の改善などの効果がある資材で²⁾、理化学性の劣る砂質畑土壌では、土壌改良を目的として施用されている。

家畜ふん堆肥による化学肥料代替の可能性が示唆されているが、砂質畑土壌における堆肥の連用効果や溶脱などの養分動態に関する知見は少ない。また、国内の畑土壌における肥料成分の溶脱についての研究は窒素を対象として実施されたものが多いが^{1, 3-5)}、恒川ら⁶⁾は、砂質畑土壌では、窒素だけでなく、リンやカリウムの溶脱が起きていることを報告している。

しかしながら、これら養分の収支と溶脱、土壌蓄積量の定量的な解明については、まだ不明な点も多い。砂質畑土壌における養分の溶脱量や土壌蓄積量を定量化することは、養分動態のさらなる解明につながり、砂質畑土壌における堆肥や化学肥料の施用法の改善に役立てることができ、生産性を維持しつつ、環境への負荷を軽減する点において重要である。

そこで、本報告では、肥料成分が溶脱しやすい砂質畑土壌において、家畜ふん堆肥を連用し、リン酸肥料とカリウム肥料を無施用とした場合の収支、溶脱量及び土壌蓄積量を明らかにした。

材料及び方法

1 試験圃場及び調査年次

調査は、愛知県長久手市(愛知県農業総合試験場)の堆肥施用及び作物栽培を2002年から継続する露地畑において行った。土壌は典型山地黄色土⁷⁾で、地表下1.0 mまでの土性は砂土～砂壤土である。本試験では、8月に堆肥を施用し、冬作と夏作を行い、翌年の堆肥施用前までを1年として集計し、リン酸肥料とカリウム肥料を無施用とした2007年から2012年までの6年間を解析対象とした。

2 試験区及び耕種概要

牛ふん堆肥を愛知県の有機質資材施用基準⁸⁾の施用基準量である3 kg-FW m²施用する試験区を牛ふん堆肥区とした。また、豚ふん堆肥を同基準の2 kg-FW m²施用する試験区を豚ふん堆肥区とした。ただし、両堆肥とも、2002年と2003年は3 kg-FW m²を施用し、2002～2010年は現物重量で施用した。2011年からは、両堆肥とも水分50%換算値で施用量を算出した。牛ふん堆肥は副資材としてオガクズを、豚ふん堆肥は副資材としてモミガラを用いたものを施用した。別に堆肥を施用しない試験区を堆肥無施用区として設けた。それぞれの試験区は南北長14 m、東西長7 m(面積98 m²)とした。反復は設けなかった。表2に堆肥の養分含量を示した。牛ふん堆肥及び豚ふん堆肥の養分含量は、愛知県の平均的な値⁹⁾であった。

表1 2007年の作土土壌の化学性

試験区	pH	全炭素 (g-C kg ⁻¹)	全窒素 (g-N kg ⁻¹)	Av-N ¹⁾ (mg-N kg ⁻¹)	Truog-P (mg-P kg ⁻¹)	CEC ²⁾ (cmol _c kg ⁻¹)	Ex-ion (cmol _c kg ⁻¹)		
							K	Ca	Mg
牛ふん堆肥区	5.6	12.9	1.3	62	594	8.9	0.5	4.8	1.2
豚ふん堆肥区	5.1	15.6	2.0	66	898	9.3	0.4	4.8	0.8
堆肥無施用区	5.1	8.2	0.8	41	549	7.5	0.6	5.1	1.3

1) 30℃4週間培養無機化窒素量 2) 陽イオン交換容量

表2 供試堆肥の養分含量

堆肥の種類	年	T-C	T-N	C/N	P	K	Ca	Mg
		(g kg ⁻¹)			(g kg ⁻¹)			
牛ふん堆肥	2007	354	24	15	12	32	22	7
	2008	301	20	15	25	36	23	8
	2009	336	23	15	12	50	26	11
	2010	297	22	14	16	51	29	12
	2011	321	24	14	14	47	27	11
	2012	372	26	14	22	34	22	9
豚ふん堆肥	2007	327	43	8	23	20	33	9
	2008	317	44	7	32	24	50	14
	2009	350	52	7	29	20	45	13
	2010	305	44	7	23	24	48	11
	2011	336	48	7	28	23	34	11
	2012	375	46	8	27	20	44	11

注) 乾物あたり

冬作はキャベツ、夏作はスイートコーンを栽培した。堆肥施用後1か月以内にキャベツを定植し、11月末から翌年1月の間に収穫した。スイートコーンは4月下旬から5月上旬の間に定植し、7月上旬に収穫した。収穫後の残渣は2006年冬作までは圃場外へ持ち出したが、2006年夏作からは圃場にすき込んだ。キャベツ品種は「YRしぶき2号」を用いた。スイートコーン品種は2007年から2011年までは「サニーショコラ」、2012年は「恵味ゴールド」を用いた。冬作及び夏作ともに株間0.3 m、畝幅1.4 mに2条千鳥植えとし、栽植密度は4.8 株 m⁻²とした。化学肥

料及び堆肥からの投入量を表3～5に示した。

家畜ふん堆肥は毎年1回、8月に施用した。調査期間の窒素肥料は、いずれの試験区においても冬作及び夏作ともに肥効調節型肥料(ロングショウカルまたはLPコート40、ともにジェイカムアグリ株式会社、東京)を用いた全量基肥栽培とした。リン酸肥料は過リン酸石灰を、カリウム肥料は硫酸加里を施用した。牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区では、冬作及び夏作ともにリン酸肥料及びカリウム肥料を施用しなかった。

表3 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌における窒素収支

試験区	年	品目	投入量(g-N m ⁻²)			吸収量(g-N m ⁻²)			年間余剰量 (g-N m ⁻² y ⁻¹)
			化肥	堆肥	年間合計	収穫物	残渣	年間合計	
牛ふん堆肥区	2007	キャベツ	30	43	103	17	15	38	83
		スイートコーン	30	0		3	3		
	2008	キャベツ	30	33	93	7	7	26	79
		スイートコーン	30	0		7	5		
	2009	キャベツ	30	42	97	8	9	27	86
		スイートコーン	25	0		3	7		
	2010	キャベツ	30	42	97	8	7	23	86
		スイートコーン	25	0		3	5		
	2011	キャベツ	30	35	90	7	7	23	80
		スイートコーン	25	0		3	7		
	2012	キャベツ	30	40	95	11	7	33	78
		スイートコーン	25	0		5	10		
豚ふん堆肥区	2007	キャベツ	30	66	126	13	15	37	108
		スイートコーン	30	0		4	5		
	2008	キャベツ	30	65	125	12	9	35	108
		スイートコーン	30	0		5	8		
	2009	キャベツ	30	79	134	16	14	45	112
		スイートコーン	25	0		6	8		
	2010	キャベツ	30	72	127	13	12	39	109
		スイートコーン	25	0		4	10		
	2011	キャベツ	30	48	103	11	12	39	87
		スイートコーン	25	0		5	11		
	2012	キャベツ	30	46	101	11	11	43	83
		スイートコーン	25	0		7	13		
堆肥無施用区	2007	キャベツ	30	0	60	16	13	36	41
		スイートコーン	30	0		3	3		
	2008	キャベツ	30	0	60	8	7	27	46
		スイートコーン	30	0		7	6		
	2009	キャベツ	30	0	55	8	10	27	44
		スイートコーン	25	0		3	6		
	2010	キャベツ	30	0	55	9	7	21	44
		スイートコーン	25	0		2	3		
	2011	キャベツ	30	0	55	9	7	25	43
		スイートコーン	25	0		3	6		
	2012	キャベツ	30	0	55	12	8	37	37
		スイートコーン	25	0		6	11		

3 調査項目

(1) 作物体の収量及び養分吸収量

収穫適期に各試験区から連続した地上部10株を刈り取り、収穫部位と残渣に分け、新鮮重を測定した。それぞれを通風乾燥機で60℃3日間乾燥後、乾物率を測定した。乾燥試料は微粉碎後、作物体の全窒素、全リン及び全カリウム濃度の分析に供試した。乾物収量と作物体の養分濃度から養分吸収量を求めた。

(2) 溶脱量

圃場の浸透水量を次式により算出した。

$$\text{浸透水量} = (\text{降水量} + \text{灌漑水量}) - \text{蒸発散量}^{10)}$$

降水量は愛知県農業総合試験場の農業気象観測データを用いた。蒸発散量はFAO Penman-Monteith法¹¹⁾に気象データや生育データを入力して求めた。期間は、堆肥施用から次作の堆肥施用までを1年間として求めた。

土壌下方への浸透水を採取するため、2003年に各試験区に、採水面を地表面から深さ0.86 mとするライシメーターを2基ずつ埋設した。20 mm以上の降雨が観測された日の翌日以降に集水用コンテナ内の水を吸引して採取した。採取した水は孔径0.45 μmのメンブレンフィルターでろ過し、窒素、リン及びカリウム濃度を分析した。それぞれの濃度と浸透水量を乗じて溶脱量とした。

表4 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌におけるリン収支

試験区	年	品目	投入量(g-P m ⁻²)			吸収量(g-P m ⁻²)			年間余剰量 (g-P m ⁻² y ⁻¹)
			化肥	堆肥	年間合計	収穫物	残渣	年間合計	
牛ふん堆肥区	2007	キャベツ	0	20	20	2	2	7	17
		スイートコーン	0	0		1	2		
	2008	キャベツ	0	41	41	2	1	7	38
		スイートコーン	0	0		2	2		
	2009	キャベツ	0	22	22	1	1	5	20
		スイートコーン	0	0		1	2		
	2010	キャベツ	0	30	30	1	1	5	28
		スイートコーン	0	0		1	2		
	2011	キャベツ	0	21	21	1	1	4	20
		スイートコーン	0	0		1	1		
	2012	キャベツ	0	33	33	2	1	7	30
		スイートコーン	0	0		1	3		
豚ふん堆肥区	2007	キャベツ	0	36	36	2	2	8	33
		スイートコーン	0	0		1	3		
	2008	キャベツ	0	48	48	2	2	8	44
		スイートコーン	0	0		1	3		
	2009	キャベツ	0	44	44	2	1	7	41
		スイートコーン	0	0		1	2		
	2010	キャベツ	0	37	37	2	2	7	34
		スイートコーン	0	0		1	2		
	2011	キャベツ	0	28	28	2	2	7	26
		スイートコーン	0	0		1	3		
	2012	キャベツ	0	27	27	2	2	8	23
		スイートコーン	0	0		1	3		
堆肥無施用区	2007	キャベツ	5	0	10	2	1	7	6
		スイートコーン	5	0		1	2		
	2008	キャベツ	5	0	10	1	1	6	7
		スイートコーン	5	0		1	2		
	2009	キャベツ	5	0	9	1	1	5	7
		スイートコーン	4	0		1	1		
	2010	キャベツ	5	0	9	2	1	4	7
		スイートコーン	4	0		0	1		
	2011	キャベツ	5	0	9	1	1	5	7
		スイートコーン	4	0		1	1		
	2012	キャベツ	5	0	9	2	1	7	6
		スイートコーン	4	0		1	3		

(3) 土壌蓄積量

土壌蓄積量の変化を明らかにするため、2007年7月及び2013年7月に、深さ30 cmまでの土壌試料を採取した。土壌試料は風乾してから目開き2 mmの篩で篩別後、全窒素、全リン及び全カリウム濃度の分析に供試した。ただし、2007年7月は深さ10~30 cmまでの土壌試料が欠損しているため、1年3か月前の2006年4月に採取した土壌試料で代用した。2006年4月に採取した土壌試料は、採取後の夏作2作及び冬作1作においてリン酸とカリウムが施用され、夏作1作及び冬作1作の残渣は持ち出さ

れている。

また、深さ別の乾燥密度と礫含量については、2002~2012年の試験期間を通じて各試験区の深さ10 cmまでの乾燥密度がほぼ一定であったため、2015年7月における深さ30 cmまでの乾燥密度で代用した。礫含量は、採土円筒内の試料を乾燥後、目開き2 mmの篩で篩別し、篩上の残渣から植物遺体を取り除いたものを礫として求めた。乾燥密度、礫含量及び土壌養分濃度から各養分の土壌蓄積量を求めた。

表5 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌におけるカリウム収支

試験区	年	品目	投入量(g-K m ⁻²)			吸収量(g-K m ⁻²)			年間余剰量 (g-K m ⁻² y ⁻¹)
			化肥	堆肥	年間合計	収穫物	残渣	年間合計	
牛ふん堆肥区	2007	キャベツ	0	57	57	16	12	39	38
		スイートコーン	0	0		3	9		
	2008	キャベツ	0	59	59	10	6	33	46
		スイートコーン	0	0		4	13		
	2009	キャベツ	0	90	90	11	11	38	76
		スイートコーン	0	0		3	13		
	2010	キャベツ	0	98	98	9	10	30	87
		スイートコーン	0	0		2	9		
	2011	キャベツ	0	71	71	7	8	28	62
		スイートコーン	0	0		2	10		
	2012	キャベツ	0	52	52	11	7	38	38
		スイートコーン	0	0		3	18		
豚ふん堆肥区	2007	キャベツ	0	30	30	12	11	38	14
		スイートコーン	0	0		3	12		
	2008	キャベツ	0	36	36	11	7	38	21
		スイートコーン	0	0		3	16		
	2009	キャベツ	0	31	31	16	8	39	10
		スイートコーン	0	0		4	11		
	2010	キャベツ	0	38	38	12	10	37	24
		スイートコーン	0	0		2	12		
	2011	キャベツ	0	23	23	10	10	31	11
		スイートコーン	0	0		3	10		
	2012	キャベツ	0	20	20	10	9	37	7
		スイートコーン	0	0		4	15		
堆肥無施用区	2007	キャベツ	25	0	50	15	12	41	31
		スイートコーン	25	0		3	11		
	2008	キャベツ	25	0	50	9	7	34	37
		スイートコーン	25	0		4	14		
	2009	キャベツ	25	0	46	9	11	33	35
		スイートコーン	21	0		2	12		
	2010	キャベツ	25	0	46	10	9	26	34
		スイートコーン	21	0		1	5		
	2011	キャベツ	25	0	46	10	10	30	34
		スイートコーン	21	0		2	8		
	2012	キャベツ	25	0	46	10	10	43	33
		スイートコーン	21	0		3	20		

(4) 分析方法

作物体と土壌の全窒素濃度はN.C-ANALYZER SUMIGRAPHNC-800(住化分析センター株式会社、大阪)またはMACRO CORDER JM1000CN(ジェイ・サイエンス・ラボ株式会社、京都)で、浸透水の窒素濃度は微量窒素分析装置TN-05(三菱化成株式会社、東京)で定量した。

作物体の全リン及び全カリウム濃度は、粉碎した乾燥試料を乾式灰化後、1 mol L⁻¹塩酸に溶解し、リンはバナドモリブデン酸法で、カリウムは原子吸光光度計Z-5310(日立計測器サービス株式会社、東京)で定量した。

浸透水のリン濃度はペルオキソ二硫酸カリウム分解後、モリブデン青法で定量した。浸透水のカリウム濃度は原子吸光光度計Z-5310(日立計測器サービス株式会社、東京)で定量した。

土壌の全リン及び全カリウム濃度は、硝酸-過塩素酸分解後¹²⁾、1 mol L⁻¹塩酸に溶解し、リンはバナドモリブデン酸法で、カリウムは原子吸光光度計Z-5310(日立計測器サービス株式会社、東京)で定量した。

(5) 堆肥のみかけの窒素有効化率及び土壌蓄積量の算出

各養分の圃場への投入量は、化学肥料由来と堆肥由来を分けて算出した。収奪量は、圃場から持ち出した作物体の収穫部位の吸収量とした。投入量から収奪量を差し引いた値を余剰量とした。

溶脱窒素量及び収奪窒素量の合計量を窒素の有効化量として、堆肥無施用区との差から、家畜ふん堆肥のみかけの窒素有効化率を次式により算出した。

$$\text{家畜ふん堆肥のみかけの窒素有効化率(\%)} = \frac{\{ \text{牛ふん堆肥区(または豚ふん堆肥区)の(溶脱窒素量+収奪窒素量)} \} - \{ \text{堆肥無施用区の溶脱窒素量+収奪窒素量} \}}{\{ \text{牛ふん堆肥区(または豚ふん堆肥区)の投入窒素量} \} - \{ \text{堆肥無施用区の投入窒素量} \}} \times 100$$

窒素、リン及びカリウムの年間投入量、溶脱量及び収奪量から推定年間土壌蓄積量を次式により算出した。

$$\text{推定年間土壌蓄積量(g m}^{-2} \text{ y}^{-1}) = \text{年間投入量} - (\text{年間溶脱量} + \text{年間収奪量})$$

2007年の土壌中の窒素、リン及びカリウムの含量と、2013年の土壌含量との差から、実測年間土壌蓄積量を次式により算出した。

$$\text{実測年間土壌蓄積量(g m}^{-2} \text{ y}^{-1}) = (\text{2013年の土壌含量} - \text{2007年の土壌含量}) / 6$$

試験結果

1 キャベツとスイートコーンの収量

図1にキャベツの、図2にスイートコーンの収量を、堆肥無施用区を100とした収量指数で示した。キャベツの収量指数は、牛ふん堆肥区が72~108で堆肥無施用区よりも低いか同程度であった。豚ふん堆肥区は2007年が72、2012年が83と低かったものの、2008~2011年は107~167で、牛ふん堆肥区及び堆肥無施用区よりも高い場合が多かった。スイートコーンの収量指数は、牛ふん堆肥区が90~135で、堆肥無施用区と同程度かやや高い場合が多かった。豚ふん堆肥区は120~180で、牛ふん堆肥区及び堆肥無施用区よりも高かった。

2 養分収支

表3~5に、各試験区の窒素、リン及びカリウムの収支を示した。投入窒素量の年間合計は、堆肥無施用区と同量の窒素肥料の施用に加えて、堆肥による投入を反映して豚ふん堆肥区が101~134 g-N m⁻² y⁻¹で最も多く、牛ふん堆肥区も90~103 g-N m⁻² y⁻¹で、堆肥無施用区の55~60 g-N m⁻² y⁻¹よりも多かった。作物による窒素吸収量の年間合計は、豚ふん堆肥区が35~45 g-N m⁻² y⁻¹で最も多く、牛ふん堆肥区が23~38 g-N m⁻² y⁻¹で堆肥無施用区の21~37 g-N m⁻² y⁻¹と同程度であった。年間余剰窒素量は、豚ふん堆肥区が83~112 g-N m⁻² y⁻¹で最も多く、次いで牛ふん堆肥区が78~86 g-N m⁻² y⁻¹で、堆肥無施用区が37~46 g-N m⁻² y⁻¹で最も少なかった。

投入リン量の年間合計は、調査期間において、両堆肥区ともにリン酸肥料を施用しなかったにもかかわらず、豚ふん堆肥区が27~48 g-P m⁻² y⁻¹で最も多く、次いで

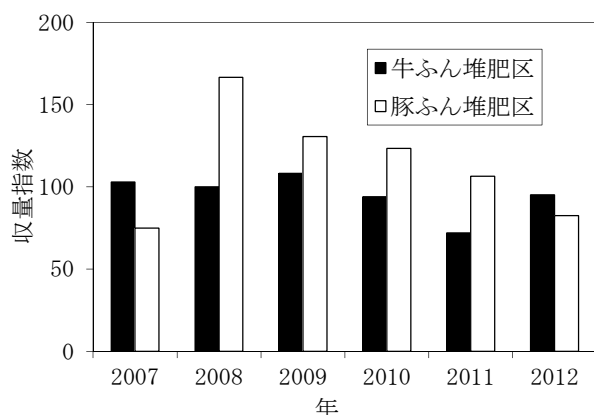


図1 キャベツの収量指数
注)堆肥無施用区を100とした指数

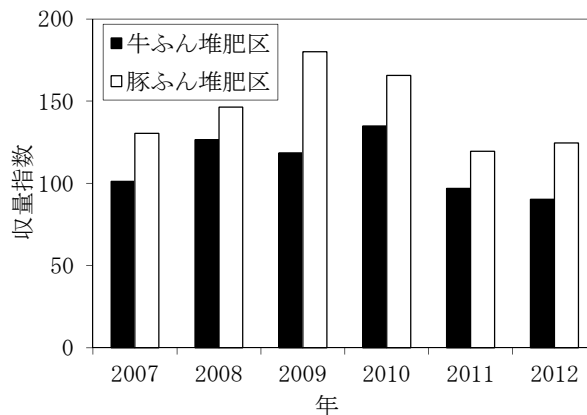


図2 スイートコーンの収量指数
注)堆肥無施用区を100とした指数

牛ふん堆肥区が20~41 g-P m² y⁻¹で、堆肥無施用区が9~10 g-P m² y⁻¹で最も少なかった。作物によるリン吸収量の年間合計は、豚ふん堆肥区が7~8 g-P m² y⁻¹で最も多く、牛ふん堆肥区が4~7 g-P m² y⁻¹で堆肥無施用区の4~7 g-P m² y⁻¹と同程度であった。年間余剰リン量は、豚ふん堆肥区が23~44 g-P m² y⁻¹で最も多く、次いで牛ふん堆肥区が17~38 g-P m² y⁻¹で、堆肥無施用区が6~7 g-P m² y⁻¹で最も少なかった。

カリウムもリンと同様に調査期間において、両堆肥区ともに化学肥料を施用しなかった。投入カリウム量の年間合計は、牛ふん堆肥区が52~98 g-K m² y⁻¹で最も多く、次いで堆肥無施用区が46~50 g-K m² y⁻¹で、豚ふん堆肥区が20~38 g-K m² y⁻¹で最も少なかった。作物によるカリウム吸収量の年間合計は、牛ふん堆肥区が28~39 g-K m² y⁻¹で、豚ふん堆肥区が31~39 g-K m² y⁻¹で、堆肥無施用区が26~43 g-K m² y⁻¹で、同程度であった。年間余剰カリウム量は、牛ふん堆肥区が38~87 g-K m² y⁻¹で最も多く、次いで堆肥無施用区が31~37 g-K m² y⁻¹で、豚ふん堆肥区が7~24 g-K m² y⁻¹で最も少なかった。

3 溶脱量

表6に浸透水量及び溶脱量を示した。浸透水量は牛ふん堆肥区が665~1085 mm y⁻¹で、豚ふん堆肥区が690~1107 mm y⁻¹で、堆肥無施用区が679~1097 mm y⁻¹で試験区間の差は小さかったが、同区内における年次変動は大きかった。

溶脱窒素量は、豚ふん堆肥区が70~142 g-N m² y⁻¹で最も多く、牛ふん堆肥区は21~73 g-N m² y⁻¹で堆肥無施用区の25~72 g-N m² y⁻¹と同程度であった。

溶脱リン量も豚ふん堆肥区が18~60 g-P m² y⁻¹で最も多く、次いで牛ふん堆肥区が8~21 g-P m² y⁻¹で、堆肥無施用区が6~13 g-P m² y⁻¹で最も少なかった。

溶脱カリウム量は、牛ふん堆肥区が45~123 g-K m² y⁻¹で最も多く、次いで豚ふん堆肥区が22~54 g-K m² y⁻¹で、堆肥無施用区が14~44 g-K m² y⁻¹で最も少なかった。

2007年から窒素、リン及びカリウムの養分収支を1年ごとに積算し、図3~5にその積算余剰量と積算溶脱量の関係を示した。いずれの養分も、余剰量の増加に強く比例して、溶脱量が増加した。

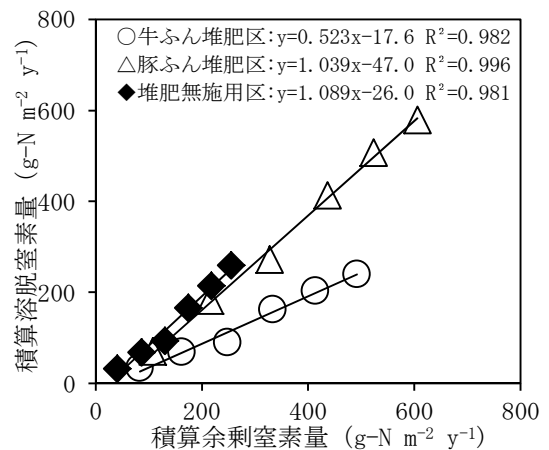


図3 積算余剰窒素と積算溶脱窒素量の関係

表6 浸透水量及び溶脱量

試験区	年	降水量 (mm y ⁻¹)	浸透水量 (mm y ⁻¹)	溶脱量(g m ⁻² y ⁻¹)		
				窒素(N)	リン(P)	カリウム(K)
牛ふん堆肥区	2007	1381	762	34	12	45
	2008	1599	850	36	21	70
	2009	1640	1085	21	17	84
	2010	1615	982	73	13	120
	2011	1682	1084	40	15	123
	2012	1177	665	37	8	70
豚ふん堆肥区	2007	1381	787	70	18	29
	2008	1599	869	111	28	46
	2009	1640	1105	90	34	31
	2010	1615	1004	142	60	54
	2011	1682	1107	94	36	34
	2012	1177	690	72	21	22
堆肥無施用区	2007	1381	778	32	7	14
	2008	1599	876	36	13	22
	2009	1640	1089	25	11	19
	2010	1615	995	72	9	35
	2011	1682	1097	49	11	44
	2012	1177	679	45	6	28

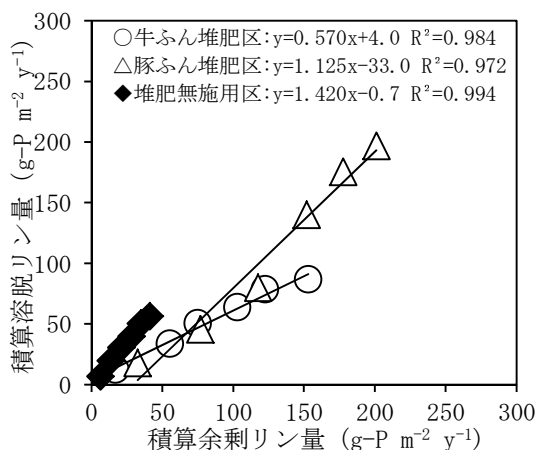


図4 積算余剰リン量と積算溶脱リン量の関係

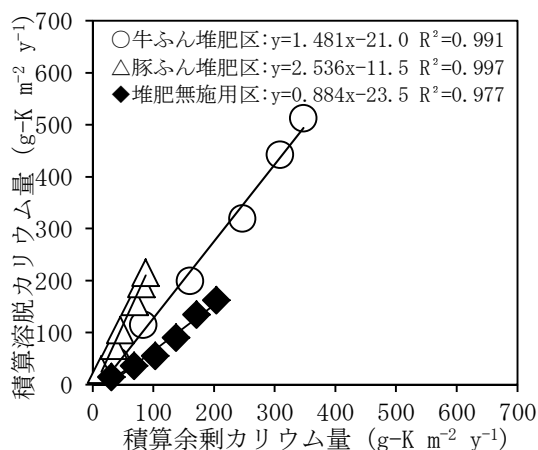


図5 積算余剰カリウムと積算溶脱カリウムの関係

表7 窒素、リン及びカリウムの土壌含量

試験区	土壌含量 ¹⁾					
	窒素(g-N m ⁻²)		リン(g-P m ⁻²)		カリウム(g-K m ⁻²)	
	2007年 ²⁾	2013年 ³⁾	2007年	2013年	2007年	2013年
牛ふん堆肥区	485	683	526	527	1550	1498
豚ふん堆肥区	537	595	580	553	1573	1473
堆肥無施用区	344	301	453	410	1436	1465

1) 深さ 30 cm までの含量 2) 深さ 10 cm まで 2007 年 7 月採取、深さ 10~30 cm は 2006 年 4 月採取

3) 2013 年 7 月採取

4 土壌含量

表7に窒素、リン及びカリウムの土壌含量を示した。窒素の土壌含量は、牛ふん堆肥区の2007年が485 g-N m⁻²で、2013年が683 g-N m⁻²で増加していた。豚ふん堆肥区も2007年が537 g-N m⁻²で、2013年が595 g-N m⁻²で増加していた。しかし、堆肥無施用区は2007年が344 g-N m⁻²で、2013年が301 g-N m⁻²で減少していた。リンの土壌含量は、牛ふん堆肥区の2007年が526 g-P m⁻²で、2013年が527 g-P m⁻²で変化はみられなかった。しかし、豚ふん堆肥区は2007年が580 g-P m⁻²で、2013年が553 g-P m⁻²でやや減少していた。堆肥無施用区も2007年が453 g-P m⁻²で、2013年が410 g-P m⁻²でやや減少していた。カリウムの土壌含量は、牛ふん堆肥区の2007年が1550 g-K m⁻²で、2013年が1498 g-K m⁻²で減少していた。豚ふん堆肥区も2007年が1573 g-K m⁻²で、2013年が1473 g-K m⁻²で減少していた。しかし、堆肥無施用区は2007年が1436 g-K m⁻²で、2013年が1465 g-K m⁻²でやや増加していた。

5 家畜ふん堆肥のみかけの窒素有効化率及び年間土壌蓄積量

表8に家畜ふん堆肥のみかけの窒素有効化率及び年間土壌窒素蓄積量を示した。牛ふん堆肥のみかけの窒素有効化率は-9%でわずかに負の値を示した。一方、豚ふん堆肥のみかけの窒素有効化率は92%と高かった。みかけの窒素有効化率は、堆肥の種類の違いにより大きく異なる。

った。牛ふん堆肥区における投入量と、溶脱量及び収奪量から求めた窒素の推定年間土壌蓄積量は42 g-N m⁻² y⁻¹で、実測年間土壌蓄積量は33 g-N m⁻² y⁻¹であった。豚ふん堆肥区では同じく5 g-N m⁻² y⁻¹、10 g-N m⁻² y⁻¹であり、堆肥無施用区では同じく-1 g-N m⁻² y⁻¹、-7 g-N m⁻² y⁻¹であった。窒素収支から算出した年間土壌蓄積量の推定値は実測値と近く、牛ふん堆肥区が最も多く、次いで豚ふん堆肥区、堆肥無施用区が最も少ない大小関係が認められた。

表9に年間リン収支と年間土壌リン蓄積量を示した。牛ふん堆肥区における投入量と、溶脱量及び収奪量から求めたリンの推定年間土壌蓄積量は11 g-P m⁻² y⁻¹で、実測年間土壌蓄積量は0 g-P m⁻² y⁻¹であった。豚ふん堆肥区では同じく1 g-P m⁻² y⁻¹、-4 g-P m⁻² y⁻¹であり、堆肥無施用区では同じく-2 g-P m⁻² y⁻¹で、-7 g-P m⁻² y⁻¹であった。

表10に年間カリウム収支と年間土壌カリウム蓄積量を示した。牛ふん堆肥区における投入量と、溶脱量及び収奪量から求めたカリウムの推定年間土壌蓄積量は-27 g-K m⁻² y⁻¹で、実測年間土壌蓄積量は-9 g-K m⁻² y⁻¹であった。豚ふん堆肥区では同じく-21 g-K m⁻² y⁻¹、-17 g-K m⁻² y⁻¹であり、堆肥無施用区では同じく7 g-K m⁻² y⁻¹、5 g-K m⁻² y⁻¹であった。カリウム収支から算出した年間土壌蓄積量の推定値と実測値は、堆肥無施用区ではほぼ一致し、牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区ではどちらも減少傾向で一一致した。

考 察

1 収量と養分収支

牛ふん堆肥区の投入窒素量は、窒素肥料と牛ふん堆肥を併用したため堆肥無施用区よりも多く、余剰窒素量も同様に多かった(表3)。しかし、溶脱窒素量は堆肥無施用区とほぼ同等で、牛ふん堆肥中の窒素量に相当する量が、土壌に蓄積されていることが示唆された。したがって、作物に供給される窒素量は堆肥無施用区とほぼ同等となり、収量は堆肥無施用区と同程度か少なくなったと考えられた。一方、豚ふん堆肥区も窒素肥料と豚ふん堆肥を併用したため、投入窒素量は堆肥無施用区よりも多かった。豚ふん堆肥区の作物による窒素吸収量は多く、増収効果が認められた。このことから、投入窒素量を削減しても、収量性を確保したまま、余剰窒素量及び溶脱窒素量も削減できると考えられる。

牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区のリンの投入量は、リン酸肥料を無施用としても、堆肥無施用区よりも多かった(表4)。さらに、作物によるリン吸収量は、収量を反映し、豚ふん堆肥区で多く、牛ふん堆肥区と堆肥無施用区

は同程度であった。家畜ふん堆肥に含まれるリンの多くは可給態であり¹³⁾、化学肥料と同等の肥効を示すと見なせるため、今回の試験では家畜ふん堆肥の施用のみで作物生産に必要なリンが供給されたと考えられる。

年間カリウム投入量の多い牛ふん堆肥区と年間カリウム投入量の少ない豚ふん堆肥区の年間カリウム吸収量は、同程度であった(表5)。一般に、カリウムは作物体の吸収量が増加しても収量が増えない。このため、牛ふん堆肥区及び堆肥無施用区の収量は豚ふん堆肥区よりも低かったが、カリウム吸収量は豚ふん堆肥区と同程度であったと考えられる。さらに、牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区の溶脱カリウム量は堆肥無施用区よりも多かった。家畜ふん堆肥中のカリウムの大部分はく溶性(そのうち多くは水溶性)であり¹⁴⁾、肥効は化学肥料と同等と見なせる。施用前に牛ふん堆肥のカリウム含量を確認する必要があるものの、牛ふん堆肥による投入量が多い場合、カリウム肥料は削減できる可能性が示唆された。一方、豚ふん堆肥区の収量は高いものの、投入量は堆肥無施用区より少なかった。さらに、溶脱量も多いことからカリウムの施肥量削減についてはさらなる検討を必要とする。

表8 家畜ふん堆肥のみかけの窒素有効化率及び年間土壌窒素蓄積量

試験区	年間	年間	年間	堆肥のみかけの 窒素有効化率 ²⁾	推定年間	実測年間
	投入量 ¹⁾	溶脱量	収奪量		土壌蓄積量 ³⁾	土壌蓄積量 ⁴⁾
	(g-N m ⁻² y ⁻¹)			(%)	(g-N m ⁻² y ⁻¹)	
牛ふん堆肥区	96	40	14	-9	42	33
豚ふん堆肥区	119	96	18	92	5	10
堆肥無施用区	57	43	14	-	-1	-7

1) 1年間の平均値

2) 堆肥のみかけの窒素有効化率(%) = [{牛ふん堆肥区(または豚ふん堆肥区)の(溶脱量+収奪量)} - (堆肥無施用区の溶脱量+収奪量)] / {牛ふん堆肥区(または豚ふん堆肥区)の年間投入量 - 堆肥無施用区の年間投入量} × 100

3) 推定年間土壌蓄積量 = 年間投入量 - (年間溶脱量 + 年間収奪量)

4) 実測年間土壌蓄積量 = (2013年の土壌窒素含量 - 2007年の土壌窒素含量) / 6

表9 年間リン収支と年間土壌リン蓄積量

試験区	年間	年間	年間	推定年間	実測年間
	投入量 ¹⁾	溶脱量	収奪量	土壌蓄積量 ²⁾	土壌蓄積量 ³⁾
	(g-P m ⁻² y ⁻¹)				
牛ふん堆肥区	28	14	3	11	0
豚ふん堆肥区	37	33	3	1	-4
堆肥無施用区	9	9	2	-2	-7

1) 1年間の平均値 2) 推定年間土壌蓄積量 = 年間投入量 - (年間溶脱量 + 年間収奪量)

3) 実測年間土壌蓄積量 = (2013年の土壌リン含量 - 2007年の土壌リン含量) / 6

表10 年間カリウム収支と年間土壌カリウム蓄積量

試験区	年間	年間	年間	推定年間	実測年間
	投入量 ¹⁾	溶脱量	収奪量	土壌蓄積量 ²⁾	土壌蓄積量 ³⁾
	(g-K m ⁻² y ⁻¹)				
牛ふん堆肥区	71	85	13	-27	-9
豚ふん堆肥区	30	36	15	-21	-17
堆肥無施用区	47	27	13	7	5

1) 1年間の平均値 2) 推定年間土壌蓄積量 = 年間投入量 - (年間溶脱量 + 年間収奪量)

3) 実測年間土壌蓄積量 = (2013年の土壌カリウム含量 - 2007年の土壌カリウム含量) / 6

2 窒素の動態

余剰量と溶脱量の関係において、単年度の余剰窒素量は必ずしも溶脱量とは関係せず、4年あるいは5年を通じた積算量と非常に高い正の相関を有しているとされる¹⁵⁾。本試験においても、積算余剰量と積算溶脱量は高い正の相関を示した。この積算余剰窒素量と積算溶脱量の回帰式における傾きは、牛ふん堆肥区が0.5で、堆肥無施用区及び豚ふん堆肥区と比較して小さく(図3)、牛ふん堆肥区では、余剰量に対して溶脱量は少なく、余剰窒素の一部が土壌に蓄積していると考えられた。

実測年間土壌蓄積量をみると、牛ふん堆肥区は他の試験区と比較して土壌蓄積された窒素量が多く(表8)、牛ふん堆肥は土壌に蓄積されやすく、化学肥料よりも溶脱窒素量は少ないと考えられた。また、実測年間土壌蓄積量は牛ふん堆肥区が最も多く、ついで豚ふん堆肥区で、堆肥無施用区が最も少なく、推定年間土壌蓄積量も同様な傾向であった。

今回の試験では、みかけ上、牛ふん堆肥中の窒素はほとんど有効化せず、牛ふん堆肥由来の窒素量と同程度の窒素が土壌に蓄積していた。

牛ふん堆肥については、単年度施用の結果ではあるが、淡色黒ボク土、灰色低地土、台地黄色土の3種の土壌においても、牛ふん堆肥と硫酸を併用した場合、作物の窒素吸収量に対する堆肥中の窒素の寄与は少なく、堆肥に含まれる窒素量の多くが土壌に残存すると推察されている¹⁶⁾。また、いずれの土壌でも牛ふん堆肥と窒素肥料の併用は、表層における窒素肥料由来の窒素の有機化を促進し¹⁷⁾、有機化された窒素は表層付近に安定して集積し、容易には後作に利用されないことが報告されている¹⁸⁾。本土壌においても、牛ふん堆肥と窒素肥料の併用により、土壌中に無機化した窒素は有機化され、みかけ上は牛ふん堆肥の窒素は分解されず、作物への窒素寄与が小さかったと考えられる。

しかし、糟谷ら¹⁹⁾は、強粘質の黄色土野菜畑において家畜ふん堆肥を5年間連用し、養分動態を調査した結果、牛ふん堆肥由来の窒素有効化率を43%と概算し、堆肥中の窒素含量に応じて化学肥料を減肥できることを報告している。本試験における牛ふん堆肥のみかけの窒素有効化率は-9%で、糟谷ら¹⁹⁾の報告とは大きく異なった。

堆肥の製造方法、窒素肥料の違いや土性の違いによって同じ畜種の堆肥でも窒素肥効が異なることが示唆された。

堆肥無施用区と豚ふん堆肥区の積算余剰窒素量と積算溶脱窒素量の回帰式の傾きはほとんど変わらず、今回の試験に用いた豚ふん堆肥は化学肥料と同程度の窒素が溶脱していた。豚や牛の家畜ふん堆肥において、C/N比が8よりも低くなると、窒素無機化率や窒素発現量が多くなることが報告されている²⁰⁾。今回の試験に用いた豚ふん堆肥はC/N比が7~8であったことから、窒素の有効化率が高く、化学肥料と同様に窒素が溶脱したと考えられた。

豚ふん堆肥の実測年間土壌蓄積量は10 g-N m⁻² y⁻¹で、豚ふん堆肥区の年間投入窒素量(119 g-N m⁻² y⁻¹)の8%程度は土壌に蓄積されたが、大部分の窒素は溶脱した。今回の試験に用いた豚ふん堆肥のように窒素の有効化率が高い堆肥を使う場合、作物の生育に必要な量よりも多くの窒素が供給されるため、吸収されなかった窒素が溶脱すると考えられる。溶脱した窒素は、地下水汚染や三河湾等の閉鎖性水域の富栄養化の原因になり得ることから問題視されている²¹⁾。窒素の有効化率が高い堆肥を施用する場合、窒素肥料の投入量を減らす必要がある。

そこで、糟谷ら¹⁹⁾が用いた手法により、家畜ふん堆肥のみかけの窒素利用率を求め、化学肥料の代替量を推定した。すなわち、家畜ふん堆肥を施用した試験区における年間吸収量と堆肥無施用区における年間吸収量の差を堆肥由来の吸収量とし、年間堆肥由来投入量で除してみかけの堆肥の窒素利用率とした。あわせて、化学肥料由来の投入量と年間吸収量からみかけの化学肥料の窒素利用率を求め、年間堆肥由来投入量に堆肥のみかけの窒素利用率を乗じ、みかけの化学肥料由来投入量で除して、推定化学肥料代替可能量とした。

表11に窒素収支に基づく推定化学肥料代替可能量を示した。推定化学肥料代替可能量は、牛ふん堆肥が-1 g-N m⁻² y⁻¹と、化学肥料代替の可能性が小さいのに対し、豚ふん堆肥は22 g-N m⁻² y⁻¹で年間化学肥料由来投入量の39%に相当した。本試験で用いたように、窒素有効化率の高い豚ふん堆肥を施用した場合、化学肥料を削減できることが示唆された。

表11 窒素収支に基づく推定化学肥料代替可能量

試験区	年間化学肥料由来	年間堆肥由来	年間	みかけの	推定化学肥料
	投入量 ¹⁾	投入量			
		(g-N m ⁻² y ⁻¹)			(g-N m ⁻² y ⁻¹)
牛ふん堆肥区	57	39	28	-0.01	-1
豚ふん堆肥区	57	63	40	0.17	22
堆肥無施用区	57	-	29	0.51	-

1) 1年間の平均値

2) みかけの窒素利用率=(年間吸収量-堆肥無施用区の年間吸収量)/年間堆肥由来投入量

*堆肥無施用区におけるみかけの窒素利用率=年間窒素吸収量/年間化学肥料由来投入量

3) 推定化学肥料代替可能量=年間堆肥由来投入量×みかけの窒素利用率/堆肥無施用区のみかけの窒素利用率

3 リンの動態

積算余剰リン量と積算溶脱リン量の回帰式の傾きは、堆肥無施用区が 1.4、豚ふん堆肥区が 1.1、牛ふん堆肥区が 0.6 で(図4)、牛ふん堆肥区は余剰量に対してリンの溶脱量が少なく、土壌蓄積していると考えられた。しかし、牛ふん堆肥区の実測年間土壌蓄積量に増減傾向は見られなかった(表9)。堆肥無施用区及び豚ふん堆肥区の積算余剰リン量と積算溶脱リン量の回帰式の傾きは 1 よりも大きく、余剰量よりも多くのリンが溶脱していると考えられた。これら 2 試験区における実測年間土壌蓄積量も減少傾向であった。実測年間土壌蓄積量は、牛ふん堆肥区で増減傾向は見られなかったが、豚ふん堆肥区よりも堆肥無施用区の減少量は多く、推定年間土壌蓄積量と同様な傾向であった。

国内の畑地の約5割は、火山灰を母材とする黒ボク土で占められている⁷⁾。黒ボク土はリン酸吸着能が高いため、リンは施肥位置にとどまり、アンモニア態窒素やカリウムイオンのように溶脱せずに、不可給態化することが報告されている²²⁾。しかし、本試験では、リンの溶脱が観察された。これは、粘土含量が少ない砂質土はリンの吸着力が弱いため、土壌が保持できない過剰なリンが溶脱したためと考えられた。このため、家畜ふん堆肥を施用する場合、堆肥から供給されるリン量を把握し、リン酸肥料の施用量を減らす必要がある。本試験土壌では、余剰リンの土壌蓄積が少なく、溶脱量が多いことが明らかとなった。今後、土壌条件、堆肥の施用時期や種類等の違いによるリンの土壌蓄積量や溶脱のしやすさ等を検討する必要がある。

4 カリウムの動態

積算余剰カリウム量と溶脱カリウム量の回帰式の傾きは、堆肥無施用区が 0.9、牛ふん堆肥区が 1.5、豚ふん堆肥区が 2.5 で、堆肥を施用した 2 試験区は余剰量よりも多くのカリウムが溶脱していた(図 5)。このため、カリウム収支から推定された牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区の推定年間土壌蓄積量は、減少を示した。牛ふん堆肥及び豚ふん堆肥区の実測年間土壌蓄積量も減少を示した(表 10)。実測年間土壌蓄積量は、推定年間土壌蓄積量より高い値を示したものの、牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区が減少傾向を示し、堆肥無施用区が蓄積傾向で、推定年間土壌蓄積量と同様な傾向を示した。

今回の試験期間内で、カリウムを無施用としたことにより、牛ふん堆肥区及び豚ふん堆肥区の収量が低下することはなかった。しかし、これら堆肥を施用した 2 試験区では土壌中のカリウムが減少する傾向にあり、カリウムの無施用を継続した場合、影響が生ずるかは不明である。カリウムの施肥量や施用時期については、今後も検討が必要である。

以上の結果から、砂質畑土壌で牛ふん堆肥を施用した場合、リンとカリウムの投入量は多く、リン酸やカリウム肥料を無施用としても収量を維持しながら、余剰量及び溶脱量を削減できると考えられる。窒素について、牛ふん堆肥では投入窒素量は多いものの、投入量に相当す

る窒素量が土壌に蓄積し、有効化率は低く、収量は堆肥無施用の場合と同程度であった。

今回の試験に用いたような C/N 比の低い豚ふん堆肥を施用した場合、窒素の投入量は多く、窒素有効化率が高いことから、窒素は減肥ができると考えられた。また、投入リン量は堆肥無施用区よりも多いため、リン酸肥料を無施用とし、生産性を維持しつつ溶脱を削減できると考えられた。カリウムについて、豚ふん堆肥区における収量は堆肥無施用区と同程度であるが、豚ふん堆肥からの投入カリウム量は堆肥無施用区の化学肥料の施用量よりも少なく、土壌中のカリウムが減少傾向であるため、さらなる検討が必要である。

引用文献

1. 松丸恒夫. 黒ボク土と砂質土における肥料窒素溶脱のライシメーター法による解析. 日本土壌肥科学雑誌. 68(4), 423-429(1997)
2. 西尾道徳, 藤原俊六郎, 菅家文左衛門. 有機物をどう使いこなすか. 農山漁村文化協会. 東京. p.12-15 (1988)
3. 野中昌法, 加村崇雄. ライシメーターによる砂丘畑地の施肥窒素の溶脱と窒素収支. 日本土壌肥科学雑誌. 66(5), 372-380(1995)
4. 松丸恒夫. 被覆肥料利用による畑地からの肥料窒素溶脱抑制. 日本土壌肥科学雑誌, 68(4), 430-434(1997)
5. 井原啓貴, 前田守弘, 高橋茂, 駒田充生, 太田健. 重窒素標識牛ふん堆肥を施用した砂丘未熟土モノリスライシメーターにおける 2 年半の窒素動態. 日本土壌肥科学雑誌. 80(5), 494-501(2009)
6. 恒川歩, 池田彰宏, 辻正樹, 瀧勝俊. 家畜ふん堆肥連用砂質露地畑における 8 年間の養分動態. 愛知県農業総合試験場研究報告. 45, 1-9(2013)
7. 農耕地土壌分類委員会. 農耕地土壌分類第 3 次改訂版第 2 刷. 農業環境技術研究所資料. 17, 1-79(1995)
8. 愛知県農林水産部農業経営課. 農作物の施肥基準Ⅲ 有機質資材施用基準. 愛知県. p. 11-23(2016). <http://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/210027.pdf> (2016. 9. 26参照)
9. 日置雅之, 北村秀教, 久野智香子, 加藤保. 愛知県で生産される家畜ふん堆肥の化学組成. 愛知県農業総合試験場研究報告. 33, 237-243(2001)
10. ダニエル・ヒレル. 環境土壌物理学. Ⅲ 環境問題への土壌物理学の応用土壌物理. 農林統計協会. 東京. p. 1-35(2004)
11. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome. (1998)
12. 関谷宏三. 無機態リン酸の分別定量法. 土壌養分分析法 土壌養分測定法委員会. 養賢堂. 東京. p. 235-238 (1970)

13. 小柳渉, 和田富広, 安藤義昭. 家畜ふん堆肥中リン酸の性質と肥効. 新潟県農業総合研究所畜産研究センター研究報告. 15, 6-9(2005)
14. 小柳渉, 安藤義昭, 水沢誠一, 森山則男. 家畜ふん堆肥中の塩類組成の特徴. 日本土壌肥科学雑誌. 75(1), 91-93(2004)
15. 木村園子ドロテア, 岡崎正規, 波多野隆介. 広域における窒素循環-評価の現状と今後の展望-. 日本土壌肥科学雑誌. 77(3), 351-359(2006)
16. 西尾隆, 三浦憲蔵. 有機質資材と化学肥料の併用下における畑土壌中の窒素動態の特徴と窒素収支. 日本土壌肥科学雑誌. 75(4), 445-451(2004)
17. 松波寿弥, 三浦吉則. 露地野菜畑における牛ふん堆肥併用時の硫安由来窒素の動態. 日本土壌肥科学雑誌. 81(6), 549-556(2010)
18. 松波寿弥, 實示戸雅之, 森昭憲. 多量窒素連用条件下のオーチャードグラス単播草地における重窒素標識硫安の動態. 日本土壌肥科学雑誌. 76(5), 609-617(2005)
19. 糟谷真宏, 荻野和明, 廣戸誠一郎, 石川博司, 鈴木良地. 牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑における5年間の養分動態. 愛知県農業総合試験場研究報告. 43, 137-149(2011)
20. 日置雅之, 久野智香子, 北村秀教, 加藤保. 愛知県で生産される家畜ふん堆肥の窒素肥効特性. 愛知県農業総合試験場研究報告. 33, 245-250(2001)
21. 熊澤喜久雄. 地下水の硝酸態窒素汚染の現況. 日本土壌肥科学雑誌. 70(2), 207-213(1999)
22. 野中純隆. 南九州の腐植質火山灰畑土壌における施肥養分の動態に関する定量的研究. 鹿児島県農業試験場研究報告. 5, 1-202(1977)