

砂質露地畑における夏季休閑期の豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培が 秋冬作キャベツ栽培と土壌中の養分動態に及ぼす影響

中村嘉孝¹⁾・糟谷真宏²⁾・安藤 薫¹⁾・大橋祥範¹⁾・瀧 勝俊¹⁾・大竹敏也¹⁾

摘要: 砂質露地畑において夏季休閑期に1 kg-DW m⁻²の豚ふん堆肥(堆肥)の施用とソルガム栽培の導入が秋冬作キャベツ栽培と土壌の養分動態に及ぼす影響を明らかにした。堆肥施用とソルガム栽培によって作土の可給態窒素含有率は高くなり、キャベツ栽培で化学肥料(化肥)の窒素量(30 g-N m⁻²)を1割削減しても目標収量(5.5 kg m⁻¹)を上回った。リンとカリウムについて、堆肥からの投入量は施肥基準量以上で、化肥を無施用としても化肥のみの栽培と同程度の吸収量であったことから、堆肥で化肥を代替できることが示された。堆肥施用は窒素とリンの溶脱量を増加させたが、ソルガム栽培により窒素は土壌蓄積を通じて溶脱量を化肥のみの栽培より削減できた。しかし、リンの溶脱量は堆肥のリン含有率が高いためソルガム栽培により減少するが、化肥のみの栽培よりも増加した。

キーワード: 砂質露地畑、豚ふん堆肥、ソルガム、キャベツ、溶脱

Effects of Swine Manure Application and Sorghum Cultivation on Cabbage and Dynamics of Nutrients in Sandy Upland Field

NAKAMURA Yoshitaka, KASUYA Masahiro, ANDO Kaori, OHASHI Yoshinori,
TAKI Katsutoshi and OTAKE Toshiya

Abstract: In a sandy upland field, we investigated the effects of the application of swine manure and sorghum cultivation during the summer fallow period on fall and winter cabbage cultivation, as well as the related nutrient dynamics. The swine manure (1 kg m⁻² dry matter weight) and sorghum cultivation increased the available nitrogen content of the soil. Furthermore, reducing the nitrogen fertilizer (30 g N m⁻²) in the cabbage cultivation by 10% caused the yield to remain high. The amount of phosphorus and potassium input from swine manure was higher than the levels with standard cabbage fertilization. The absorption amount was approximately the same as when applying swine manure without the chemical fertilizers of phosphorus and potassium as that with only the chemical fertilizers. These results indicate that swine manure can replace phosphorus and potassium chemical fertilizers. Furthermore, by cultivating sorghum, the amount of nitrogen and phosphorus leached could be reduced compared to that with only applying swine manure. However, it was suggested that the application of swine manure with a high phosphorus content increased the amount of phosphorus leached.

Key Words: Sandy soil upland field, Swine manure, Sorghum, Cabbage, Leaching

¹⁾ 環境基盤研究部 ²⁾ 環境基盤研究部(現愛知県経済農業協同組合連合会)

緒言

愛知県の露地野菜は秋冬野菜を中心に栽培されることが多く、夏季に休閑される場合が多い。この休閑期は高温多雨であるため、多量の降雨に伴って土壤中の養分の溶脱が進むおそれがある。砂質露地畑は保肥力や保水力が小さく、窒素の溶脱量が多いため¹⁾、環境負荷が他の畑土壌よりも大きいことが懸念される。一方で、土壌理化学性の劣る砂質露地畑では土壌改良を目的として家畜ふん堆肥等の有機物が施用されている。特に、砂質露地畑における豚ふん堆肥(乾物重で1 kg m⁻²)の連用は環境負荷物質である窒素やリンの溶脱量が多いため²⁾、これらの溶脱量を削減する技術の導入が必要である。

夏季の休閑期に緑肥作物であるソルガムを栽培することで浸透水の硝酸態窒素濃度が低下し、窒素の溶脱量を削減できることが報告されている^{3,4)}。砂質露地畑では窒素だけでなくリンも溶脱する²⁾ことから、ソルガムの導入はリンの溶脱量を削減することも期待される。砂質露地畑において、豚ふん堆肥を夏季休閑期に施用し、その後ソルガムを栽培することにより、窒素やリンの溶脱量を削減し、すき込んで緑肥作物として利用することで土壌の作物生産性を向上させることができると考えられる。一方、豚ふん堆肥を連用した砂質露地畑において、化学肥料のカリウムを無施用としても作物の収量は化学肥料のみを施用した場合と同程度であったが、豚ふん堆肥からのカリウムの投入量は化学肥料のみを施用した場合よりも少なかった。さらに、土壌中のカリウムも減少傾向であったため、カリウムの施肥管理についてはさらなる検討が必要であることが指摘されている²⁾。このため、夏季休閑期に施用した豚ふん堆肥からのカリウム供給で、秋冬作に必要なカリウムを賄えるかは明らかでない。

そこで本研究では、肥料成分が溶脱しやすい砂質露地畑において、夏季休閑期の豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培が秋冬作キャベツ栽培と各養分の収支及び溶脱量からみた土壤中の養分動態に及ぼす影響を明らかにし、その有効性について評価した。

材料及び方法

1 試験ほ場

試験は、愛知県長久手市(愛知県農業総合試験場)において既報²⁾のほ場に隣接し、堆肥施用及び作物栽培を20年以上継続する露地畑で行った。土壌は典型山地黄色土⁵⁾で

地表下1.0 mまでの土性は砂土～砂壤土であった。土壌下方への浸透水を採取するため、2016年4月にキャピラリーライシメーターを各試験区に1基ずつ埋設した(図1)。このキャピラリーライシメーターは、直径(内径)が0.298 mの塩化ビニル製の管を用いて、高さ0.2 mの集水部の上に高さ0.6 mのガイド部を接続し、集水部とガイド部の境界は複多数の小孔を開けた篩状の塩化ビニル製の板で仕切る構造とした。ガイド部底面に不織布を敷き小孔から集水部に紐状の不織布を垂れ下げた。集水部には採水用チューブと内圧調整用の大気開放チューブを接続し地上に取り出した。ガイド部には下層土を充填し、採水面(集水部上面)が地表から深さ1.1 mとなるように設置した。

試験開始前の長期間の土壌管理の影響をみるため、2015年にキャベツを均一栽培した後、2016年5月から本試験を開始した。試験を開始した5月から翌年の4月末までを1年として集計し、2021年4月末までの5年間を解析対象とした。

2 試験区及び耕種概要

試験区として、豚ふん堆肥の施用と同時にソルガムを播種し緑肥作物として利用する「堆肥+緑肥区」、豚ふん堆肥のみを施用する「堆肥区」、豚ふん堆肥の施用も緑肥の栽培もしない「化学肥料区」を設けた(表1)。豚ふん堆肥は副資材としてモミガラを用いたものを5月24日～6月2日に、試験開始時の2016年の施肥基準⁶⁾に準じて、乾物重で1 kg m⁻²施用した(表2)。ソルガム「ジャンボ」(雪印種苗株式会社、札幌)を豚ふん堆肥施用の同日に5 g m⁻²で散播し、7月20日～7月30日にすき込んだ(ソルガムの播種からすき込みまでの日数は55～65日間)。後作として、秋冬作にキャベツ「YRしぶき2号」(有限会社石井育種場、静岡)を8月21日～9月2日に定植した。各試験区は2反復とした。



図1 埋設したキャピラリーライシメーターの外観

表1 試験開始時の土壌の化学性(2016年5月20日採取)

試験区	pH	全炭素 全窒素		AvN	全リン	AvP	CEC	交換性陽イオン(mg kg ⁻¹)		
		(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)					K	Ca	Mg
堆肥+緑肥区	6.8	8.5	0.85	38	1.3	0.68	5.2	75	861	105
堆肥区	6.8	7.9	0.79	37	1.1	0.68	5.2	71	920	104
化学肥料区	6.8	8.3	0.82	34	1.2	0.71	5.4	82	908	107

AvN: 可給態窒素(30℃4週間培養無機化窒素量)、AvP: 可給態リン酸(Truog法)、CEC: 陽イオン交換容量

キャベツは株間0.3 m、畝幅0.6 m、栽植密度は5.6 株 m²とした。ソルガムの作物体全体及びキャベツの残さはほ場にすき込んだ。ソルガム栽培では化学肥料を無施用とした。キャベツの施肥管理について、窒素は2016年～2018年は全試験区とも硫酸による分施で30 g-N m²施用し、2019年～2020年の堆肥+緑肥区は土壌の可給態窒素含有率から施肥窒素指針⁷⁾に準じて減肥し、27 g-N m²施用した。同期間の堆肥区及び化学肥料区は30 g-N m²施用した。堆肥+緑肥区及び堆肥区では、リン及びカリウムの肥料は無施用とした。化学肥料区では、リンは過リン酸石灰で5 g-P m²、カリウムは硫酸加里で25 g-K m²施用した。全試験区ともキャベツの定植前にpH矯正のために炭酸苦土石灰を現物重で100 g m²施用した。

試験開始前にキャベツを均一栽培した2015年は、全試験区とも夏季は休閑し、秋冬作にキャベツ「そらと」(トヨタ株式会社、豊橋)を9月に定植した。施肥管理は、窒素をLP40(ジェイカムアグリ株式会社、東京)による全量基肥施肥で30 g-N m²施用し、リンは過リン酸石灰で5 g-P m²、カリウムは硫酸加里で25 g-K m²施用した。

3 調査項目

(1) 作物体の収量、養分吸収量及び収支

ソルガムは1 m²のコードラート内の地上部を採取し、草丈を測定した。キャベツは収穫適期に連続した地上部10株を刈り取り、収穫部位と残さに分けて採取した。採取した作物体は新鮮重を測定後、通風乾燥機(FV630、アドバンテック東洋株式会社、東京)で60°C3日間乾燥させてから乾物重を測定した。乾燥試料は微粉碎後、分析に供した。作物体の全炭素濃度及び全窒素濃度は全炭素・全窒素分析装置(SUMIGRAPH NC-800、住化分析センター株式会社、大阪)による乾式燃焼法、全リン及び全カリウム濃度は乾式灰化後1 mol L⁻¹塩酸に溶解し、リンはバナドモリブデン酸法、カリウムは原子吸光光度計(ZA3300、株式会社日立ハイテクサイエンス、東京)による原子吸光光度法で定量した。作物体の養分濃度と乾物重から養分吸収量を求めた。

窒素、リン及びカリウムの収支(余剰量)は、化学肥料及び豚ふん堆肥からの投入量から、ほ場から持ち出される作物体の収穫部位の吸収量を差し引いた値として算出した。

(2) 溶脱量

浸透水として、20 mm以上の降雨が観測された日の翌日以降にライシメーター内の水を吸引して採取した。採水した浸透水は孔径0.45 μmのメンブレンフィルターでろ過し、分

析に供した。全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)または全有機体炭素窒素分析装置(multi N/C3100、Analytik Jena GmbH、JENA、独)、全リン濃度はペルオキシ二硫酸カリウム液で分解後モリブデン青法、全カリウム濃度は原子吸光光度法で定量した。

浸透水量は、浸透水量=(降水量+かんがい水量)-蒸発散量、により算出した。降水量は主に愛知県農業総合試験場の気象観測データを用い、一部の欠損した気象データは近隣の気象庁の名古屋観測点の観測データ⁸⁾を用いた。蒸発散量はFAO Penman-Monteith法⁹⁾に気象データと生育データを入力して求めた。浸透水の各養分濃度に浸透水量を乗じて溶脱量を求めた。

(3) 作土の化学性

地表下0.2 mまでの土壌を作土として、堆肥施用前、秋冬作定植前及び秋冬作栽培後に採取した。土壌試料は風乾してから目開き2 mmで篩別後、分析に供した。可給態窒素含有率は30°C4週間の保温静置法、全窒素含有率は乾式燃焼法で定量した。全リン含有率は小宮山¹⁰⁾に準じて乾式灰化後、2 mol L⁻¹硫酸で抽出してバナドモリブデン酸法で定量した。陽イオン交換容量(CEC)及び交換性カリウム含有率は、セミマイクロSchollenberger法で抽出後、アンモニア態窒素をホルモール法、カリウムを原子吸光光度法で定量した。

1年間当たりの土壌の各養分の変化量として、余剰量から溶脱量を差し引いた値を推定値、有意な経年変化が見られた作土の全窒素及び全リンの養分含有率の回帰式の傾きに作土の乾燥密度1.2 g cm⁻³、作土深20 cmを乗じた値を実測値として求めた。

試験結果

1 ソルガムの生育及びキャベツの収量

ソルガムの新鮮重は5783～9533 g m⁻²(表3)、炭素吸収量は379～665 g-C m⁻²、窒素の吸収量は7～16 g-N m⁻²(表4)、C/N比は35～54であった。

試験開始前年の2015年の化学肥料区を100とするキャベツの収量指数は、堆肥+緑肥区及び堆肥区においてそれぞれ100、103で化学肥料区と同程度であった(図2)。2016年～2018年の堆肥+緑肥区の収量指数は102～117で同年の化学肥料区よりも高かった。2019年及び2020年の堆肥+緑肥区は窒素の化学肥料を減肥したが、その収量指数はそれぞれ124、129で同年の化学肥料区よりも高かった。堆肥区の収

表2 供試した豚ふん堆肥の化学性

年	全炭素 全窒素 C/N比			P K Ca Mg			
	(g kg ⁻¹)			(g kg ⁻¹)			
2016	378	47	8.1	29	24	36	19
2017	388	46	8.5	27	26	33	6
2018	326	41	8.0	25	30	52	16
2019	304	43	7.1	30	27	52	17
2020	349	38	9.2	26	26	38	15

乾物重当たり

表3 ソルガムの生育、炭素吸収量及びC/N比

年	草丈 (cm)	新鮮重 (g m ⁻²)	炭素吸収量 (g m ⁻²)	C/N比
2017	228	9533	509	35
2018	203	5783	379	54
2019	235	8751	491	44
2020	197	7213	409	45

量指数は、2017年は97で同年の化学肥料区より低かったものの、2016年及び2018年～2020年は102～109で同年の化学肥料区よりも高かった。

2 養分収支

豚ふん堆肥からの窒素の投入量は38～47 g-N m² y⁻¹で、秋冬作の化学肥料からの30 g-N m² y⁻¹よりも多かったことから、化学肥料に加えて豚ふん堆肥を施用した堆肥区の窒素の投入量の年間合計は68～77 g-N m² y⁻¹で、豚ふん堆肥を無施用とした化学肥料区よりも多かった(表4)。2019年～2020年の堆肥+緑肥区における窒素の投入量は化学肥料を減肥したため、堆肥区よりも少なかったが化学肥料区よりも多かった。堆肥+緑肥区のキャベツの収穫物の窒素の吸収量は10～16 g-N m² y⁻¹で、堆肥区の10～14 g-N m² y⁻¹や化学肥料区の9～13 g-N m² y⁻¹と同程度かやや多かった。堆肥+緑肥区の窒素の余剰量は、2016年～2018年は堆肥区と同等で、化学肥料を削減した2019年と2020年は堆肥区よりも少なかったものの、化学肥料区よりも多かった。

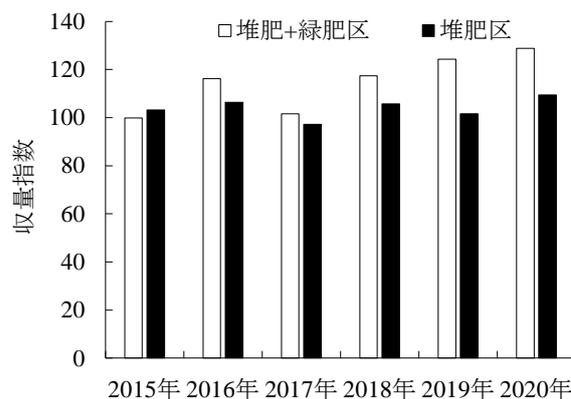


図2 キャベツの収量指数
化学肥料区の収量を100とした指数
化学肥料区の収量(kg m⁻²):2015年は7.3、2016年は5.7、2017年は6.8、2018年は6.1、2019年は6.1、2020年は6.7

表4 窒素の投入量と吸収量

試験区	年	品目	投入量(g m ⁻²)			吸収量(g m ⁻²)			余剰量(g m ⁻² y ⁻¹)
			化肥	堆肥	年間合計	収穫物	残さ	年間合計	
堆肥+緑肥区	2016	ソルガム	0	47	77	0	16	32	67
		キャベツ	30	0		10	6		
	2017	ソルガム	0	46	76	0	15	38	63
		キャベツ	30	0		13	10		
	2018	ソルガム	0	41	71	0	7	24	59
		キャベツ	30	0		11	6		
	2019	ソルガム	0	43	70	0	11	34	58
		キャベツ	27	0		12	11		
2020	ソルガム	0	38	65	0	9	36	49	
	キャベツ	27	0		16	11			
堆肥区	2016	(夏季休作)	0	47	77	0	0	16	67
		キャベツ	30	0		10	6		
	2017	(夏季休作)	0	46	76	0	0	20	65
		キャベツ	30	0		11	9		
	2018	(夏季休作)	0	41	71	0	0	18	58
		キャベツ	30	0		12	6		
	2019	(夏季休作)	0	43	73	0	0	18	61
		キャベツ	30	0		11	7		
2020	(夏季休作)	0	38	68	0	0	22	54	
	キャベツ	30	0		14	8			
化学肥料区	2016	(夏季休作)	0	0	30	0	0	16	21
		キャベツ	30	0		9	7		
	2017	(夏季休作)	0	0	30	0	0	23	18
		キャベツ	30	0		12	11		
	2018	(夏季休作)	0	0	30	0	0	14	21
		キャベツ	30	0		9	5		
	2019	(夏季休作)	0	0	30	0	0	20	19
		キャベツ	30	0		11	8		
	2020	(夏季休作)	0	0	30	0	0	24	17
		キャベツ	30	0		13	10		

豚ふん堆肥からのリンの投入量は25～30 g-P m² y⁻¹で、秋冬作の化学肥料からの5 g-P m² y⁻¹よりも多かったことから、堆肥＋緑肥区及び堆肥区のリンの投入量の年間合計は秋冬作でリン酸肥料を施用しなかったにもかかわらず、化学肥料区よりも多かった(表5)。キャベツの収穫物のリンの吸収量は全試験区で2 g-P m² y⁻¹前後であった。このため、堆肥＋緑肥区及び堆肥区のリン余剰量は23～28 g-P m² y⁻¹で、化学肥料区の3 g-P m² y⁻¹より多かった。

豚ふん堆肥からのカリウムの投入量は24～30 g-K m² y⁻¹で秋冬作の化学肥料からの25 g-K m² y⁻¹と同程度であったことから、秋冬作でカリウムの化学肥料を施用しなかった堆肥＋緑肥区及び堆肥区におけるカリウムの投入量の年間合計は化学肥料区と同程度であった(表6)。堆肥＋緑肥区のキャベツの収穫物のカリウムの吸収量は12～17 g-K m² y⁻¹で、堆肥区の12～14 g-K m² y⁻¹や化学肥料区の11～15 g-K m² y⁻¹と同程度であった。このため、堆肥＋緑肥区のカリウムの余剰量は10～16 g-K m² y⁻¹で、堆肥区の12～18

g-K m² y⁻¹や化学肥料区の10～14 g-K m² y⁻¹と同程度であった。

3 溶脱量

浸透水量は、ソルガムによる吸水、蒸散を反映して堆肥＋緑肥区が631～976 mm y⁻¹で、堆肥区の747～1019 mm y⁻¹及び化学肥料区の747～1017 mm y⁻¹よりも少なかった(表7)。2016年～2018年の堆肥＋緑肥区における窒素の溶脱量は20～44 g-N m² y⁻¹で、同期間の堆肥区の42～80 g-N m² y⁻¹及び化学肥料区の47～66 g-N m² y⁻¹よりも少なかった。窒素の化学肥料を削減した2019年～2020年の堆肥＋緑肥区における窒素溶脱量はそれぞれ41、34 g-N m² y⁻¹で、同期間の堆肥区における44、37 g-N m² y⁻¹及び化学肥料区の55、33 g-N m² y⁻¹と同程度かやや少なかった。

試験を開始した2016年の堆肥＋緑肥区のリンの溶脱量は0.1 g-P m² y⁻¹で堆肥区及び化学肥料区と同程度で少なかった。2017年以降の堆肥＋緑肥区の年間のリンの溶脱量は1.3～5.3 g-P m² y⁻¹で、堆肥区の1.4～8.0 g-P m² y⁻¹よりも少

表5 リンの投入量と吸収量

試験区	年	品目	投入量(g m ⁻²)			吸収量(g m ⁻²)			余剰量 (g m ² y ⁻¹)	
			化肥	堆肥	年間合計	収穫物	残さ	年間合計		
堆肥＋緑肥区	2016	ソルガム	0	29	29	0.0	6.8	10.1	27	
		キャベツ	0	0		1.9	1.4			
	2017	ソルガム	0	27	27	0.0	5.8	9.3	25	
		キャベツ	0	0		1.9	1.6			
	2018	ソルガム	0	25	25	0.0	3.9	7.4	23	
		キャベツ	0	0		2.1	1.3			
	2019	ソルガム	0	30	30	0.0	9.3	13.1	28	
		キャベツ	0	0		2.1	1.7			
	2020	ソルガム	0	26	26	0.0	3.9	7.8	23	
		キャベツ	0	0		2.2	1.6			
	堆肥区	2016	(夏季休作)	0	29	29	0.0	0.0	3.4	27
			キャベツ	0	0		1.9	1.5		
2017		(夏季休作)	0	27	27	0.0	0.0	3.4	25	
		キャベツ	0	0		1.8	1.6			
2018		(夏季休作)	0	25	25	0.0	0.0	3.5	23	
		キャベツ	0	0		2.1	1.4			
2019		(夏季休作)	0	30	30	0.0	0.0	3.5	28	
		キャベツ	0	0		2.0	1.4			
2020		(夏季休作)	0	26	26	0.0	0.0	3.8	23	
		キャベツ	0	0		2.1	1.7			
化学肥料区		2016	(夏季休作)	0	0	5	0.0	0.0	2.9	3.3
			キャベツ	5	0		1.7	1.2		
	2017	(夏季休作)	0	0	5	0.0	0.0	3.4	3.2	
		キャベツ	5	0		1.8	1.6			
	2018	(夏季休作)	0	0	5	0.0	0.0	2.9	3.3	
		キャベツ	5	0		1.7	1.2			
	2019	(夏季休作)	0	0	5	0.0	0.0	3.3	3.1	
		キャベツ	5	0		1.9	1.4			
	2020	(夏季休作)	0	0	5	0.0	0.0	3.5	3.1	
		キャベツ	5	0		1.9	1.6			

なかったが、化学肥料区の0.2~1.5 g-P m² y⁻¹よりも多かった。

2016年~2018年の堆肥+緑肥区におけるカリウムの溶脱量は8~17 g-K m² y⁻¹で、同期間の堆肥区の15~20 g-K m² y⁻¹、化学肥料区の16~19 g-K m² y⁻¹と同程度であった。2019年~2020年の堆肥+緑肥区におけるカリウムの溶脱量はそれぞれ20、20 g-K m² y⁻¹で堆肥区と同程度であったが、化学肥料区の28、39 g-K m² y⁻¹よりも少なかった。

窒素、リン及びカリウムの1年間の余剰量と溶脱量を積算して比較したところ、いずれの養分も余剰量の増加に比例して溶脱量が増加した(図3~図5)。

4 作土の養分含量の経年変化

各試験区の試験開始時(2016年5月)の可給態窒素含有率は34~38 mg-N kg⁻¹前後で同程度であった(表1)。試験開始後の堆肥+緑肥区の可給態窒素含有率は35 mg-N kg⁻¹前後で推移し、堆肥区は30 mg-N kg⁻¹前後で推移した(図6)。一方、化学肥料区の可給態窒素含有率は試験開始後

に急減し、20 mg-N kg⁻¹前後で推移した。堆肥+緑肥区的全窒素含有率は、ばらつきが大きく有意な増減傾向は見られなかったが、堆肥区と同程度か高く推移した(図7)。堆肥区的全窒素含有率は有意な増加傾向を示したのに対し、化学肥料区的全窒素含有率は有意な減少傾向を示した。堆肥+緑肥区及び堆肥区的全リン含有率に有意な経年変化は見られなかったのに対し、化学肥料区的全リン含有率は有意な減少傾向を示した(図8)。堆肥+緑肥区及び堆肥区のCECは、2019年以降に高くなったのに対し、化学肥料区のCECは試験開始時と同程度のままで推移した(図9)。全試験区とも作土の交換性カリウムはばらつきが大きく、増減傾向は明らかでなかった(図10)。

有意な経年変化を示した全窒素含有率または全リン含有率について、図7及び図8の回帰式の傾きから1年間の土壌の変化量の実測値を算出すると、堆肥区的全窒素は8 g-N m⁻² y⁻¹で増加し、化学肥料区的全窒素と全リンはそれぞれ-13 g-N m⁻² y⁻¹、-7 g-P m⁻² y⁻¹で減少を示した(表8)。

表6 カリウムの投入量と吸収量

試験区	年	品目	投入量(g m ²)			吸収量(g m ²)			余剰量(g m ² y ⁻¹)
			化肥	堆肥	年間合計	収穫物	残さ	年間合計	
堆肥+緑肥区	2016	ソルガム	0	24	24	0	60	80	11
		キャベツ	0	0		13	8		
	2017	ソルガム	0	26	26	0	55	78	13
		キャベツ	0	0		12	10		
	2018	ソルガム	0	30	30	0	55	78	16
		キャベツ	0	0		14	9		
	2019	ソルガム	0	27	27	0	46	75	12
		キャベツ	0	0		15	13		
2020	ソルガム	0	26	26	0	39	70	10	
	キャベツ	0	0		17	14			
堆肥区	2016	(夏季休作)	0	24	24	0	0	19	12
		キャベツ	0	0		12	7		
	2017	(夏季休作)	0	26	26	0	0	21	14
		キャベツ	0	0		12	9		
	2018	(夏季休作)	0	30	30	0	0	20	18
		キャベツ	0	0		13	7		
	2019	(夏季休作)	0	27	27	0	0	22	13
		キャベツ	0	0		14	8		
2020	(夏季休作)	0	26	26	0	0	25	12	
	キャベツ	0	0		14	11			
化学肥料区	2016	(夏季休作)	0	0	25	0	0	19	13
		キャベツ	25	0		12	7		
	2017	(夏季休作)	0	0	25	0	0	24	13
		キャベツ	25	0		12	12		
	2018	(夏季休作)	0	0	25	0	0	18	14
		キャベツ	25	0		11	7		
	2019	(夏季休作)	0	0	25	0	0	27	10
		キャベツ	25	0		15	12		
2020	(夏季休作)	0	0	25	0	0	32	10	
	キャベツ	25	0		15	17			

考察

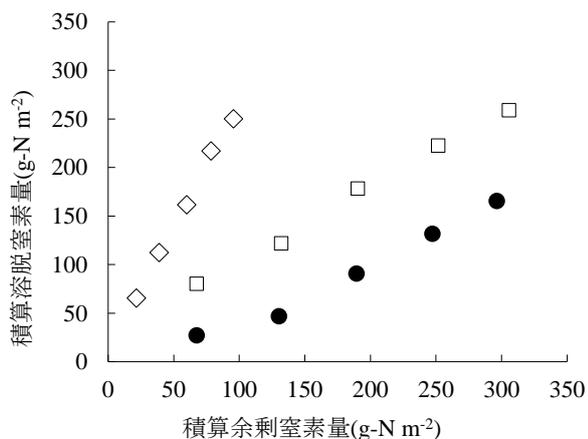
1 夏季休閑期における豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培がキャベツの収量と養分吸収に及ぼす影響

糟谷ら⁴⁾は、夏季休閑期に堆肥は施用せずにソルガム栽培のみ導入した初年の秋冬キャベツの収量は、ソルガム栽培を導入しない場合に比べて低かったことを報告し、その要因はソルガムの土壌中での分解に伴う窒素飢餓であると推察した。しかし、本試験において各試験区の処理を開始した2016年の堆肥+緑肥区のキャベツの収量は堆肥区や化学肥料区よりも多かった(図2)。堆肥+緑肥区におけるソルガムのすき込み時の窒素の吸収量及びC/N比(表3、表4)は既報⁴⁾

(窒素の吸収量は6~12 g m⁻²、C/N比は31~59)と同程度であったが、豚ふん堆肥を施用したことで土壌中の窒素濃度が高まり、C/N比の高いソルガムの分解に伴う窒素の有機化が早く進み、キャベツ栽培期間中の窒素飢餓が回避されたと考えられた。このことは、堆肥+緑肥区における作土の可給態窒素含有率の上昇にも現れている。堆肥区の可給態窒素含有率は化学肥料区より高くなったが、堆肥+緑肥区の可給態窒素含有率はさらに高くなった(図6)。また、堆肥を無施用としてソルガム栽培だけを導入した露地畑において、可給態窒素含有率が高まることも報告されている⁴⁾。したがって、豚ふん堆肥によりもたらされた窒素は、ソルガムをすき込むことで再有機化し、堆肥やソルガムを単独で用いる以上に可給態窒素含有率を高めたと考えられる。この堆肥+緑肥区

表7 浸透水量及び溶脱量

試験区	年	浸透水量 (mm y ⁻¹)	溶脱量(g m ⁻² y ⁻¹)		
			窒素	リン	カリウム
堆肥+緑肥区	2016	762	27	0.1	8
	2017	890	20	1.3	17
	2018	631	44	2.3	15
	2019	772	41	3.9	20
	2020	976	34	5.3	20
堆肥区	2016	848	80	0.2	15
	2017	977	42	1.4	20
	2018	747	56	3.5	17
	2019	807	44	5.8	17
	2020	1019	37	8.0	21
化学肥料区	2016	848	66	0.2	16
	2017	981	47	0.2	18
	2018	747	49	0.3	19
	2019	805	55	1.5	28
	2020	1017	33	1.5	39



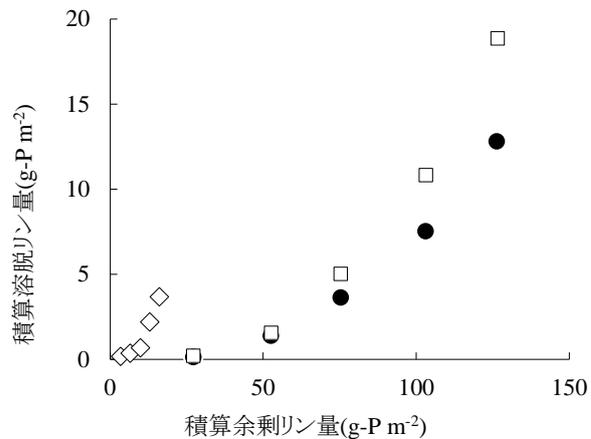
堆肥+緑肥区(●): $y=0.63x-23.8$ ($r=0.991^{**}$)

堆肥区(□): $y=0.77x+27.1$ ($r=0.998^{**}$)

化学肥料区(◇): $y=2.52x+12.8$ ($r=0.999^{**}$)

** 1%水準で有意性あり

図3 窒素の積算余剰量と積算溶脱量の関係



堆肥+緑肥区(●): $y=0.13x-4.6$ ($r=0.968^{**}$)

堆肥区(□): $y=0.19x-7.1$ ($r=0.963^{**}$)

化学肥料区(◇): $y=0.28x-1.3$ ($r=0.934^{*}$)

** 1%水準で有意性あり * 5%水準で有意性あり

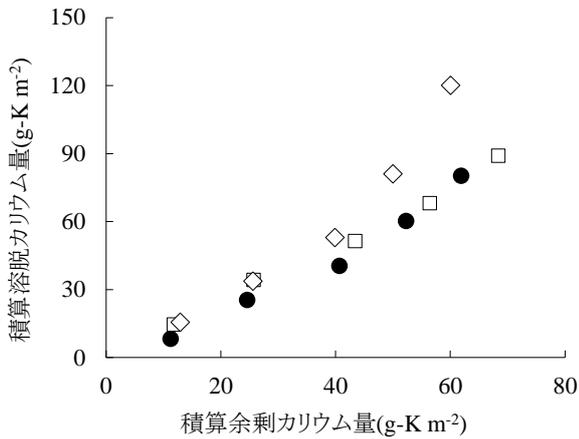
図4 リンの積算余剰量と積算溶脱量の関係

における可給態窒素含有率は、施肥窒素指針⁷⁾における標準施肥量(30 g m⁻²)とする場合の可給態窒素含有率の基準(20~30 mg-N kg⁻¹)よりも高く維持された。そこで、2019年及び2020年の堆肥+緑肥区のキャベツ栽培における窒素の化学肥料を減肥したが、その収量は堆肥区及び化学肥料区よりも多かったことから、さらなる減肥の可能性が示唆された。

作土の可給態リン含有率はキャベツ栽培における適正基準(0.13~0.21 g-P kg⁻¹)⁶⁾よりも高く、リンの化学肥料を無施用として栽培できる減肥基準(0.87 g-P kg⁻¹)⁶⁾よりもやや少ない程度であった(表1)。このため、試験土壌ではリンの化学肥料を無施用としても、試験開始時に作土に蓄積していたリンでキャベツの必要量が賄えた可能性が考えられる。しかし、施肥基準⁶⁾に準じて乾物重で1 kg m⁻²施用した豚ふん堆肥によるリンの投入量はキャベツのリンの吸収量の合計を大きく上回ったこと(表5)、豚ふん堆肥を施用した堆肥+緑肥区のリンの吸収量は化学肥料区と同程度であったこと、作土の全リン含有率が試験開始時の値を維持する傾向であったことから

(図8)、豚ふん堆肥の施用により十分なリンの供給がなされたと考えられる。このため、豚ふん堆肥の施用により、キャベツ栽培におけるリンの化学肥料を無施用とすることができると考えられる。

堆肥+緑肥区及び堆肥区ではキャベツの定植約3か月前に豚ふん堆肥を施用したが、キャベツのカリウムの吸収量の合計値は化学肥料区と同程度であった(表6)。土壌中で移動性のあるカリウムの形態で土壌管理の影響を反映しやすい作土の交換性カリウムの含有率にも減少傾向は見られなかった(図10)。このため、豚ふん堆肥の施用をキャベツ定植3か月前の夏季休閑期に早めても後作となるキャベツ栽培におけるカリウムの化学肥料を無施用とすることができると考えられる。



堆肥+緑肥区(●): $y=1.37x-9.1$ ($r=0.989^{**}$)
 堆肥区(□): $y=1.26x-0.4$ ($r=0.995^{**}$)
 化学肥料区(◇): $y=2.12x-19.2$ ($r=0.971^{**}$)
 ** 1%水準で有意性あり

図5 カリウムの積算余剰量と積算溶脱量の関係

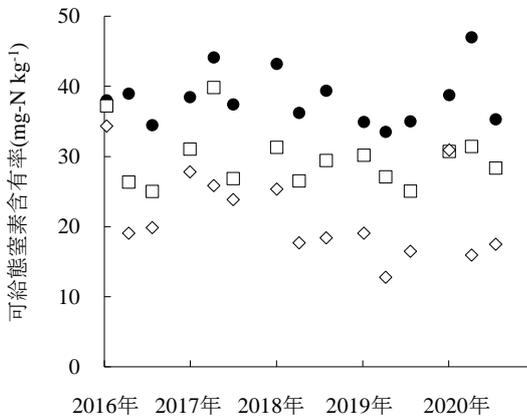
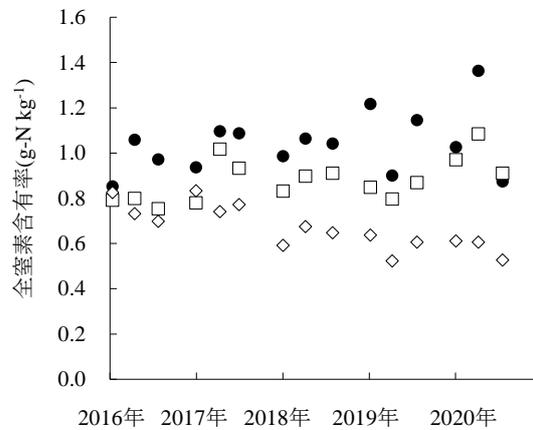


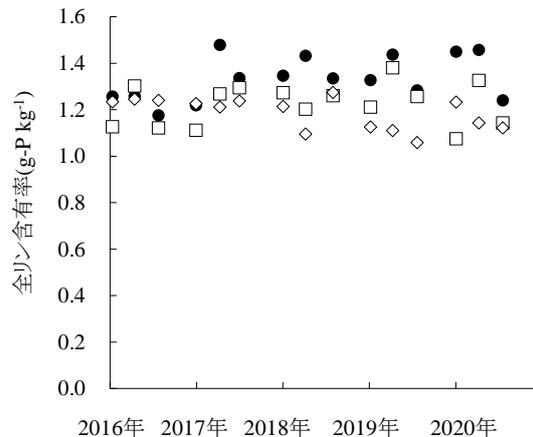
図6 可給態窒素含有率の推移

図中の●は堆肥+緑肥区、□は堆肥区、◇は化学肥料区を示す



堆肥+緑肥区(●): $y=0.030x+1.0$ ($r=0.332$)
 堆肥区(□): $y=0.035x+0.8$ ($r=0.543^*$)
 化学肥料区(◇): $y=-0.055x+0.8$ ($r=-0.830^{**}$)
 ** 1%水準で有意性あり * 5%水準で有意性あり
 変数 x は試験開始後年数

図7 全窒素含有率の推移



堆肥+緑肥区(●): $y=0.028x+1.3$ ($r=0.427$)
 堆肥区(□): $y=0.008x+1.2$ ($r=0.125$)
 化学肥料区(◇): $y=-0.028x+1.2$ ($r=-0.605^*$)
 * 5%水準で有意性あり
 変数 x は試験開始後年数

図8 全リン含有率の推移

堆肥+緑肥区と堆肥区でキャベツのリン及びカリウムの吸収量に大きな差は見られなかった。豚ふん堆肥の施用と併用した場合のソルガム栽培がキャベツ栽培のリンやカリウムの施肥管理に及ぼす影響は明らかでなかった。

2 夏季休閑期における豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培が窒素の動態に及ぼす影響

窒素の積算余剰量と積算溶脱量の回帰式の傾きは、堆肥区+緑肥区は0.63、堆肥区は0.77でともに1よりも小さかったのに対し、化学肥料区は2.52で1より大きく(図3)、化学肥料区の窒素の動態は他の2試験区と大きく異なることが示唆された。

堆肥区において、作土の全窒素含有率、乾燥密度及び作土深から求めた土壌の全窒素の変化量の実測値は8 g-N m⁻² y⁻¹で、余剰量と溶脱量から推定した推定値の9 g-N m⁻² y⁻¹と同程度の増加を示した(表8)。さらに、積算溶脱量は積算余剰量よりも少なかったことから、溶脱しなかった余剰の窒素は土壌に蓄積していたと考えられる。堆肥+緑肥区の全窒素含有率は、ばらつきが大きく有意な増減傾向は見られなかったが、堆肥区と同程度が高く推移したこと(図7)、積算余剰量に対する積算溶脱量は堆肥区よりも少なかったことから、堆肥区よりも多くの余剰の窒素が土壌に蓄積していたことが示唆された。

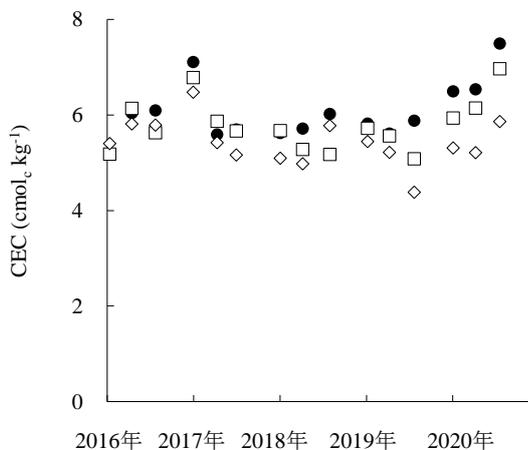


図9 CECの推移

図中の●は堆肥+緑肥区、□は堆肥区、◇は化学肥料区を示す

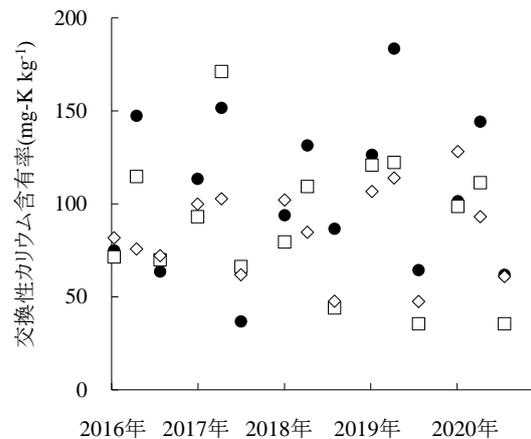


図10 交換性カリウム含有率の推移

図中の●は堆肥+緑肥区、□は堆肥区、◇は化学肥料区を示す

表8 1年間の平均収支と土壌蓄積量

養分	試験区	投入量	収奪量 ¹⁾	余剰量 ²⁾	溶脱量	土壌の変化量	
						推定値 ³⁾	実測値 ⁴⁾
(g m ⁻² y ⁻¹)							
窒素	堆肥+緑肥区	72	12	59	33	26	-
	堆肥区	73	12	61	52	9	8
	化学肥料区	30	11	19	50	-31	-13
リン	堆肥+緑肥区	27	2	25	3	23	-
	堆肥区	27	2	25	4	22	-
	化学肥料区	5	2	3	1	2	-7
カリウム	堆肥+緑肥区	27	14	12	16	-4	-
	堆肥区	27	13	14	18	-4	-
	化学肥料区	25	13	12	24	-12	-

1) 冬作(キャベツ)の収穫物の吸収量

2) 余剰量=投入量-収奪量

3) 推定値=余剰量-溶脱量

4) 実測値=有意な経年変化が見られた土壌養分含有率の回帰式の傾き×1.2×200

一方、化学肥料区において、土壌の全窒素の変化量の実測値は $-13 \text{ g-N m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であり、余剰量と溶脱量から推定した推定値 $-31 \text{ g-N m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ とは異なるものの減少傾向を示し、積算溶脱量は積算余剰量よりも多かったことから、余剰の窒素に加えて作土の窒素が無機化し溶脱していたと考えられる。また、化学肥料区の作土の可給態窒素含有率が低下したことは、同試験区における作土の窒素そのものが減少したこと起因していたと考えられる。以上のことから、豚ふん堆肥の施用及びソルガムのすき込みは砂質露地畑の土壌窒素肥沃度の向上に有効と評価できる。

2016年～2018年の堆肥＋緑肥区の窒素の溶脱量は堆肥区に比べて少なかったことから、ソルガム栽培は窒素の溶脱量を削減させる効果が示唆された。そこで、ソルガムによる1年間当たりの窒素の平均溶脱量の削減効果として、堆肥＋緑肥区と堆肥区における窒素の溶脱量の差を求めると 19 g-N m^{-2} であった。ソルガム栽培による硝酸態窒素の溶脱量の削減効果について、細粒黄色土の造成土⁹⁾で1年間当たり $9.1 \text{ g-N m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、腐植質普通黒ボク土¹¹⁾でソルガム栽培期間中に最大で 17 g-N m^{-2} であったと報告された。本試験の結果から、窒素の溶脱量が多い砂質露地畑におけるソルガム栽培による窒素の溶脱量の削減効果は既報⁴⁾¹¹⁾と同等以上であることが示唆された。しかし、2019年～2020年の堆肥＋緑肥区では化学肥料を削減したにも関わらず、堆肥＋緑肥区と堆肥区の窒素の溶脱量の差は経年的に小さくなった(表7)。堆肥を長期間にわたって連用すると、土壌に残存する堆肥からの窒素の無機化量が累積し、最終的には見かけ上で堆肥中の窒素量と同じ量の窒素が無機化される平衡状態に達する。実際、本試験と同様に、砂質の黄色土において豚ふん堆肥を5年間連用した後の窒素の余剰量($101 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$)に対する溶脱量($96 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$)の割合は高いことが報告されている²⁾。ソルガムをすき込んだことにより、その残さからの窒素の無機化量が累積した結果、試験の後半期における窒素の溶脱量が増加している可能性が考えられる。このため、今後は連用を継続する過程で下層土への蓄積等も含めてソルガムによる長期的な窒素の溶脱抑制効果についてのさらなる検討が必要である。

砂質露地畑における窒素の溶脱量の削減について、窒素の積算余剰量と積算溶脱量には正の相関関係が見られたことから、溶脱量を減らすためにはソルガム栽培だけでなく、余剰量そのものを減らすことが有効と考えられる。細粒質の黄色土において前年の堆肥の窒素利用率に基づいて徐々に減肥量を増加させた報告¹²⁾では、豚ふん堆肥連用7年目には減肥量を最大で 10 g-N m^{-2} まで増加させても堆肥を無施用とした試験区に対して2割程度の多収の維持が可能となっている。砂質露地畑で実施した本試験において、堆肥＋緑肥区では窒素の施肥量を削減しても収量は化学肥料区よりも2割程度高く、窒素の減肥の可能性が示唆された。したがって、環境負荷となる窒素の溶脱量を削減するためには、土壌の窒素肥沃度に応じて化学肥料を減らすことや、窒素含有率の高い堆肥の連用を行う場合は堆肥そのものの施肥量を削減することで、窒素の余剰量を削減することも重要であると考えられる。

3 夏季休閑期における豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培がリンの動態に及ぼす影響

堆肥＋緑肥区及び堆肥区のリンの1年間当たりの平均投入量は $27 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ で、化学肥料区における1年間当たりの平均投入量 $5 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ を大きく上回った(表8)。一方で、キャベツの収穫に伴う収奪量は全試験区で $2 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 程度で、堆肥＋緑肥区及び堆肥区で投入されたリンのほとんどは余剰であった(表5)。また、堆肥＋緑肥区及び堆肥区の1年間当たりのリンの溶脱量の平均値は $3\sim 4 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であったことから、余剰のリンの多くは土壌に蓄積していることが示唆された。5年間の土壌の全リン含量の変化量を見ると、化学肥料区の実測値は $-7 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と減少傾向であったが、堆肥＋緑肥区及び堆肥区の作土の全リン含量には有意な増減傾向は認められなかった(図8)。したがって、豚ふん堆肥を施用した2試験区では、化学肥料区のような作土の全リンの減少が余剰のリンによって抑制されていたと解釈できる。しかしながら、堆肥＋緑肥区及び堆肥区において余剰量は $25 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 程度であることから、土壌のリンの消耗を補う以上に余剰が発生しており、その行方は作土内の動態だけでは説明できない。

本試験土壌は、試験開始時において可給態リン含有率が 0.7 g-P kg^{-1} 程度と高かったことから、試験開始以前の土壌管理によりリンの蓄積が進んでいたと考えられる。堆肥＋緑肥区及び堆肥区では多くの余剰リンが発生するにも関わらず作土の全リン含有率に有意な増加傾向が見られなかったことから、作土のリンの蓄積量には限界があることが示唆された。このため、リン含有率の高い豚ふん堆肥の施用を継続すると、既報²⁾と同様に、余剰のリンは溶脱すると考えられる。実際、各年のリンの溶脱量の推移を見ると、堆肥＋緑肥区と堆肥区のリンの溶脱量は、2017年目から経年的に増加し、リンの余剰量の少なかった化学肥料区は2019年目から溶脱量が経年的に増加した(表7、図4)。これらのことから、余剰のリンが下層へ移動し、徐々に溶脱量が増加していたことが示唆された。すなわち、余剰リンのうち行方の不明であったリンは、作土から下層土へ移動している段階にあると考えられる。

リンの溶脱量が多くなった2019年以降の堆肥＋緑肥区のリンの溶脱量は同期間の堆肥区よりも少なかったことから、ソルガム栽培によるリンの溶脱抑制効果が示唆された。しかし、前述のとおり、本試験期間における余剰のリンは作土から下層土へ移動している段階にあると考えられるため、ソルガムによるリンの溶脱抑制効果の定量的な評価についてはさらなる長期的な検討が必要である。また、ソルガムによるリンの溶脱抑制効果の目安としてソルガムのリン平均吸収量を見ると $6 \text{ g-P m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ で、豚ふん堆肥による投入量に比べて少なかった。このことは、ソルガムによる吸収だけでは豚ふん堆肥からもたらされるリンを回収することができないことを示している。

リンの積算余剰量と積算溶脱量には正の相関関係が見られたことから、窒素と同様にリンの溶脱量を減らすためには余剰量を減らすことが有効と考えられる。よって、リン含有率の高い豚ふん堆肥を施用する場合、長期的なリンの溶脱量を減らすためにはソルガム栽培だけではなく、リンの投入量

すなわち豚ふん堆肥の施用量そのものを削減すべきであると考えられる。

4 夏季休閑期における豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培がカリウムの動態に及ぼす影響

豚ふん堆肥からのカリウムの投入量は秋冬作の化学肥料からの投入量と同程度で、各試験区におけるキャベツの収穫に伴う収奪量も同程度であったことから、各試験区の余剰量も同程度であった(表6)。化学肥料区のカリウム肥料は水溶性の硫酸加里を施用したが、豚ふん堆肥に含まれるカリウムも多くは水溶性であることが報告されている¹³⁾。2018年までの溶脱量は全試験区で同程度であったことは(図5、表7)、各試験区の余剰のカリウムは同程度の水溶性カリウムであったためと考えられる。

家畜ふん堆肥を連用した細粒質の黄色土における5年間のカリウムの溶脱量は、積算余剰量が約150 g-K m⁻²に達すると溶脱量が急激に増加するものの、余剰量よりも少なかったことが報告されている¹⁴⁾。これは土壤の保持量を上回るカリウムの投入により溶脱量は増加するものの、堆肥の施用によってCECが高まり、下層土も含めた土壤全体に吸着保持される量が増えたためと考えられている。一方、本試験におけるカリウムの溶脱量は試験開始年から全試験区で余剰量よりも多かった。本試験と同様に、砂質の黄色土において豚ふん堆肥を5年間連用した後のカリウムの溶脱量は、余剰量よりも多かったことが報告されている²⁾。細粒質の黄色土とは異なり、砂質の黄色土のCECは低く、カリウムの吸着保持量が少ないため、余剰のカリウムは1年間のうちにキャピラリーライシメーターの採水面(地表面からの深さ1.1 m)まで移動したと考えられる。

堆肥+緑肥区におけるソルガムのカリウムの吸収量は豚ふん堆肥によるカリウムの投入量よりも多かったことから(表6)、ソルガムは下層土を含む土壤中のカリウムも吸収していたと考えられる。しかし、堆肥+緑肥区のカリウムの溶脱量はソルガムを栽培しなかった堆肥区と同程度であった。ソルガムは栽培後に全量をすき込んだことから、ソルガムに吸収されたカリウムは土壤へ放出され、キャベツに利用されなかった余剰のカリウムは、前述のとおり、溶脱したと考えられる。

このように、砂質土壤の特性を反映して、各試験区の余剰量は同程度であったことから溶脱量も同程度となったと考えられる。しかし、2019年以降の堆肥+緑肥区及び堆肥区におけるカリウムの溶脱量は化学肥料区よりもやや少なかった。堆肥+緑肥区及び堆肥区では2019年以降のCECが化学肥料区よりも高く推移したことから、カリウムの保持量が増したためと考えられるが、その要因は明らかではなかった。また、全試験区で余剰量よりも溶脱量が多かったにもかかわらず、作土の交換性カリウムに有意な減少傾向は見られなかった。土壤中のカリウムで植物に利用されやすい形態は水溶性や交換性と考えられているが、農耕地土壤におけるカリウムの全量に対するこれらの割合はわずかで、植物による吸収に伴って水溶性や交換性カリウムが減少した後は鉱物の層間や結晶格子内に存在する非交換態カリウムも植物に供給される¹⁵⁾。砂質露地畑におけるカリウムの動態につい

て、下層土の交換性カリウム含有量、吸着保持能及び非交換態カリウム含量についてのさらなる解析が必要である。

5 まとめ

砂質露地畑において、夏季休閑期における乾物重で1 kg m⁻²の豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培の導入は、土壤の窒素肥沃度を向上させて秋冬作キャベツ栽培における窒素の化学肥料を減肥できること、豚ふん堆肥由来のリン及びカリウムで秋冬作キャベツ栽培における化学肥料を無施用で栽培できることが明らかとなった。さらに、本試験期間では、豚ふん堆肥の施用と合わせてソルガムを栽培することで豚ふん堆肥のみを施用する場合よりも窒素及びリンの溶脱量を削減できることが明らかとなった。

しかし、本試験で供した豚ふん堆肥はリンの含有率が高く、リンの投入量が多かったため、余剰のリンが多く発生した。一方で、土壤に蓄積する傾向は見られなかったことから、今後、リンの溶脱量がさらに増加すると考えられる。リン含有率の高い家畜ふん堆肥の施用では、堆肥からのリンの施用量に基づいた施用体系が有効であることが指摘されている¹⁶⁾。リンの溶脱が見られる砂質露地畑において、豚ふん堆肥を施用する場合にはソルガム栽培の導入によって豚ふん堆肥のみを施用するよりも溶脱量の低減効果が見られるものの不十分であり、将来危惧されるリンの溶脱量の削減に向けて、豚ふん堆肥の施肥基準量(乾物重で1 kg m⁻²)⁶⁾を減らすべきであると考えられる。

リンの投入量を考慮して豚ふん堆肥の施用量を減らした場合、堆肥の施用に伴う土壤の窒素肥沃度の向上効果が小さくなると予想される。しかし、本試験の結果から、夏季休閑期に豚ふん堆肥の施用と合わせてソルガム栽培を導入することで、土壤の窒素肥沃度の向上効果を補うことが期待できる。カリウムに関しては、豚ふん堆肥の施用量を減らすことで堆肥由来のカリウムの投入量も減少するため、後作のカリウムの化学肥料を無施用とできるかについて検討が必要である。特にCECの小さい砂質土における施肥量の決定のためには、カリウム収支の把握と土壤中のカリウム動態の詳細な検討が必要である。

以上のことから、砂質露地畑におけるリン含有率から見た豚ふん堆肥の施用量は検討が必要であるものの、夏季休閑期に豚ふん堆肥を施用し、あわせてソルガムを栽培することで土壤の作物生産性の向上と環境負荷の軽減に寄与すると考えられる。

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. 日本土壤肥料学雑誌. 68, 423-429(1997)
2. 中村嘉孝, 恒川歩, 糟谷真宏. 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壤における収支、溶脱量及び土壤蓄積量からみた窒素、リン、カリウムの動態. 愛知県農業総合試験場研究報告. 48, 17-28(2016)

3. 高津あさ美, 石橋英二. 緑肥の導入および緑肥すき込み時の堆肥施用が窒素溶脱に及ぼす影響. 農業および園芸. 8110, 1064-1067(2006)
4. 糟谷真宏, 廣戸誠一郎. 秋冬キャベツ栽培の夏季休閑期への緑肥作物導入による窒素収支の改善. 愛知県農業総合試験場研究報告. 42, 141-146(2010)
5. 農耕地土壌分類委員会. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業環境技術研究所資料. 17, 1-79(1995)
6. 愛知県農林水産部農業経営課. 農作物の施肥基準. 愛知県. p.1-281(2016)
7. 日置雅之, 中村嘉孝, 山本拓, 大橋祥範, 糟谷真宏, 瀧勝俊. 土壌、堆肥、化学肥料由来別窒素利用率と可給態窒素に基づいた秋冬キャベツおよびスイートコーンの施肥指針. 愛知県農業総合試験場研究報告. 52, 17-22(2020)
8. 気象庁. 過去の気象データ検索.
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>(2021.5.10参照)
9. 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)
10. 小宮山鉄兵, 新妻成一, 藤澤英司, 森國博全. 土壌全リン酸含量簡易測定法. 日本土壌肥科学雑誌. 80, 616-620(2009)
11. 原田浩司, 八槇敦, 山本幸洋. 緑肥作物の窒素吸収特性と硝酸態窒素溶脱抑制効果. 千葉県農林総合研究センター研究報告. 6, 41-49(2014)
12. 辻正樹, 山本拓, 糟谷真宏, 鈴木良地. 黄色露地野菜畑のキャベツ-スイートコーン体系にける堆肥連用による施肥量削減. 日本土壌肥科学雑誌. 89, 232-236(2018)
13. 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, 91-93(2004)
14. 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)
15. 森塚直樹. 日本の農耕地土壌のカリウムの形態: 地域・圃場・根域スケールでの評価. 日本土壌肥科学雑誌. 80, 80-88(2009)
16. 伊藤豊彰. 家畜排泄物堆肥のリン資源としての有効活用作物収量確保、土壌リン酸蓄積の抑制及びリン資源節約をめざして. 畜産環境情報. 57, 1-16(2015)