

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

恒川 歩¹⁾・池田彰宏²⁾・辻 正樹³⁾・瀧 勝俊¹⁾

摘要：家畜排泄物由来の堆肥連用条件下の砂質露地畑における養分動態についての定量的知見は、長期圃場試験の実施が困難であるなどの理由により、これまでほとんど得られていない。本研究では、砂質露地畑において、家畜ふん堆肥連用開始時から8年間の養分動態に着目し、堆肥施用が養分の作物吸収、土壌蓄積及び下層への溶脱に及ぼす影響を調査した。

- 1 窒素の作物吸収量は豚ふん堆肥施用により増加したが、牛ふん堆肥施用ではその効果は小さかった。浸透水中全窒素濃度も、豚ふん堆肥施用により上昇したが、牛ふん堆肥施用ではその影響は小さかった。作土の全窒素含量は、両堆肥施用区とも増加した。
- 2 リンの作物吸収量は豚ふん堆肥施用により増加したが、牛ふん堆肥施用ではその効果は小さかった。浸透水中全リン濃度は、両堆肥施用区とも上昇した。作土の可給態リン酸含量は、全区とも減少傾向であったが、両堆肥施用区とも減少割合は小さかった。
- 3 カリウムの作物吸収量は両堆肥施用により増加した。浸透水中カリウム濃度も、両堆肥施用により上昇した。作土の交換性カリウム含量は、牛ふん堆肥施用により増加傾向が見られたが、豚ふん堆肥施用ではその影響は小さかった。

保肥力の小さい砂質畑で家畜ふん堆肥を連用する場合は、溶脱養分量を低減する栽培法を組み合わせる必要性が示された。

キーワード：牛ふん堆肥、豚ふん堆肥、窒素、リン、カリウム、溶脱

Nutrient Dynamics in Sandy Field Soil Amended using Composted Livestock Manure during an Eight-Year Period

TSUNEKAWA Ayumi, IKEDA Akihiro, TSUJI Masaki and TAKI Katsutoshi

Abstract: Little quantitative knowledge has been accumulated regarding the long-term nutrient dynamics in sandy field soils amended using composted livestock manure, mainly because of the difficulties in conducting long-term field experiments. In this study, the nutrient leaching, accumulation, and uptake by vegetable crops were monitored in sandy field soil amended using composted cattle or swine manure in addition to conventional chemical fertilization during an 8-year period.

- 1 The crops' nitrogen uptake and the total nitrogen concentration in leaching water largely increased with the amendment of composted swine manure. The total nitrogen content in the topsoil increased in both cattle- and swine-manure-amended plots.
- 2 The crops' phosphorus uptake increased with the amendment of composted swine manure. The total phosphorus concentration in leaching water increased in both manure-amended plots. The decrease in available phosphorus content in the topsoil was larger in the conventional chemical fertilizer plot compared to those in both manure-amended plots.
- 3 The crops' potassium uptake and the potassium concentration in leaching water increased with the amendment of both manures. The exchangeable potassium content in the topsoil increased with the amendment of composted cattle manure.

These results indicate that the application of some additional appropriate crop or fertilizer management methods is indispensable to mitigating nutrient leaching in sandy field soils with the long-term, continuous amendment of composted livestock manure because of the soil's low nutrient retention capacity.

Key Words: Composted cattle manure, Composted swine manure, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Leaching

緒言

愛知県は野菜栽培が盛んで、特に渥美半島には露地野菜地帯が広がり、キャベツの作付面積が全国1位となっている¹⁾。愛知県は畜産業も盛んであり、露地野菜産地で家畜ふん堆肥が容易に入手できることから、露地畑に家畜ふん堆肥が連年施用される事例が多い。露地畑に施用される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と言われている²⁾。一方、作物の生育過程で吸収されない硝酸塩やリン酸塩は作物根域から系外に流出し、地下水汚染の原因になり得ることから問題視されている^{3, 4)}。

愛知県では糟谷ら⁵⁾が強粘質の黄色土野菜畑において家畜ふん堆肥を連用し、養分動態を調査した結果、堆肥施用量に応じて化学肥料を減肥できると報告している。

本報告では、肥料成分の溶脱が起こりやすい砂質露地畑において、家畜ふん堆肥連用開始時から8年間の養分動態に着目し、堆肥施用が作物吸収や土壌蓄積、下層への溶脱に及ぼす影響を調査した。

材料及び方法

1 試験区の設定

試験は愛知県農業総合試験場内の露地ほ場で行った。土壌は典型山地黄色土に分類され、作土の砂含量が84%の粗砂壤土である。連用開始前の土壌の化学性は表1のとおりである。

試験ほ場の概略図を図1に示した。ほ場全体の大きさは南北長14 m、東西長26 mであり、東西に4区画(14 m×7 m 3区画、14 m×5 m 1区画)に分けた。14 m×7 mの区画をそれぞれ堆肥無施用区、牛ふん堆肥区、豚ふん

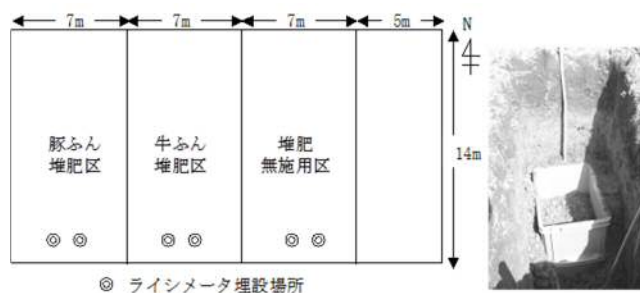


図1 試験ほ場の概略図と埋設したライシメータ

表1 堆肥連用開始前及び8年連用後の作土の化学性

土壌採取時期	試験区	pH(H ₂ O)	EC(1:5)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	交換性塩基類			可給態 P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	C/N
					CaO (g kg ⁻¹)	MgO (g kg ⁻¹)	K ₂ O (g kg ⁻¹)				
連用開始前		6.8	0.07	6.5	1.33	0.33	0.14	2.4	14.3	1.2	11.7
8年連用後	堆肥無施用区	5.8	0.12	6.3	0.95	0.05	0.10	1.1	8.5	0.8	10.2
	牛ふん堆肥区	6.4	0.15	9.1	1.61	0.19	0.21	1.9	18.6	1.9	10.0
	豚ふん堆肥区	5.7	0.14	9.8	1.16	0.12	0.12	2.0	13.8	1.8	7.9

表2 供試堆肥の成分

堆肥施用	年度	水分含量 (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	C/N	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)
	2003	4.45	3.07	0.22	13.89	0.11	0.37	0.20	0.08
	2004	4.12	3.43	0.23	15.15	0.12	0.39	0.25	0.08
	2005	4.32	3.39	0.19	17.63	0.12	0.39	0.21	0.09
	2006	3.71	3.64	0.25	14.69	0.14	0.38	0.26	0.09
	2007	4.12	3.54	0.24	14.53	0.12	0.32	0.22	0.07
	2008	4.53	3.01	0.20	14.94	0.25	0.36	0.23	0.08
	2009	3.98	3.36	0.23	14.61	0.12	0.50	0.26	0.11
豚ふん堆肥	2002	2.54	3.08	0.42	7.39	0.34	0.32	0.46	0.13
	2003	2.63	3.20	0.47	6.77	0.33	0.34	0.40	0.16
	2004	4.68	3.68	0.49	7.59	0.21	0.26	0.31	0.08
	2005	2.50	3.68	0.44	8.35	0.22	0.14	0.16	0.05
	2006	2.49	3.74	0.53	7.12	0.28	0.26	0.37	0.11
	2007	2.40	3.27	0.43	7.55	0.23	0.20	0.33	0.09
	2008	2.56	3.17	0.44	7.21	0.32	0.24	0.50	0.14
	2009	2.37	3.50	0.52	6.73	0.29	0.20	0.45	0.13

堆肥区とした。堆肥は2002年から毎年1回、8月に施用した。堆肥の成分を表2に示した。牛ふん堆肥は副資材としてオガクズが用いられたものを、現物として 3 kg m^{-2} 施用した。豚ふん堆肥は副資材としてモミガラが用いられたものを、2003年までは現物 3 kg m^{-2} 、2004年以降は現物 2 kg m^{-2} 施用した。堆肥は区画内全面に散布後、トラクターで深さ15~20 cmまで混和した。化学肥料施用量を表3、4、5に示した。化学肥料の施用方法は、堆肥と同様、全面全層施肥とした。基肥は定植日の5日前までに施用した。2002年のキャベツ作のみ追肥を2回行う分施栽培を行い、スイートコーン作以降は全て全量基肥栽培を行った。

2 耕種概要

供試作物は、冬作キャベツ、夏作スイートコーンの年2作の体系とした。毎年、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、6月下旬から7月中旬の間に収穫した。収穫後の残渣は、2006年冬作まではほ場外へ持ち出したが、2007年スイートコーン作以降、ほ場内へすき込んだ。キャベツの品種は2003年までは「YR錦秋強力152」、2004年以降は「YRしぶき2号」を用いた。スイートコーンの品種は2006年までは「ピーター235」、2007年以降は「サニーショコラ」を用いた。キャベツ、スイートコーンとも株間0.30~0.33

m、畝幅1.2~1.5 mに2条千鳥植えとし、栽植密度は4.4~5.6 株 m^{-2} である。

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5株を2連で刈り取り、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°C 7日間乾燥後、乾物率を測定した。乾燥試料は微粉碎後、窒素、リン及びカリウム含量の分析に供した。乾物収量と養分含量から養分吸収量を求めた。なお、根部については、窒素吸収量が株全体の3.0~5.2%と少ない⁶⁾ことから、調査を行わなかった。

(2) 溶脱濃度

地下水への肥料成分の溶脱量を調査するため、2003年4月に、各試験区に採水面が地表面からの深さ86 cmに下方浸透水を採取するための埋設型ライシメータ⁷⁾を2基ずつ埋設した(図1)。このライシメータは、縦33 cm、横48 cm、高さ17 cmの集水用コンテナの上に、ほ場の下層土を充填した、縦横同サイズ、高さ26 cmのガイド用コンテナを重ねたものである。ガイド用コンテナの底面には直径0.5~1 cmの穴を約2 cm間隔に開け、不織布を敷き、その一部を穴から下方へ垂れ下げることにより、浸透水を集水用コンテナに流下させた。集水用コンテナには浸透水採取用チューブと大気開放チューブを取り付

表3 試験ほ場における窒素収支($\text{g-N m}^{-2} \text{y}^{-1}$)

試験区	堆肥施用 年度	投入量			作物体吸収量			余剰量
		化学肥料	堆肥	合計	収穫物	残渣	合計	
堆肥無施用区	2002	50	0	50	16	19	35	15
	2003	60	0	60	16	15	31	29
	2004	60	0	60	13	15	28	32
	2005	60	0	60	19	26	45	15
	2006	60	0	60	21	20	41	29
	2007	60	0	60	19	16	36	41
	2008	60	0	60	14	12	27	46
	2009	55	0	55	11	16	27	44
牛ふん堆肥区	2002	38	32	70	17	16	33	36
	2003	60	37	97	18	17	35	62
	2004	60	41	101	13	17	30	71
	2005	60	33	93	20	26	46	47
	2006	60	47	107	21	22	43	78
	2007	60	43	103	20	18	38	83
	2008	60	33	93	14	12	26	79
	2009	55	41	96	11	16	27	86
豚ふん堆肥区	2002	35	93	129	20	19	39	90
	2003	60	69	129	19	18	37	93
	2004	60	52	112	19	20	39	73
	2005	60	66	126	20	28	47	79
	2006	60	79	139	22	21	42	108
	2007	60	66	126	18	19	37	108
	2008	60	65	125	18	17	35	108
	2009	55	80	135	25	22	48	109

残渣は2005年キャベツ作まではほ場外へ持ち出し、2005年スイートコーン作以降ほ場内へすき込んだ。

表4 試験ほ場におけるリン収支($\text{g-P m}^{-2} \text{y}^{-1}$)

試験区	堆肥施用 年度	投入量			作物体吸収量			余剰量
		化学肥料	堆肥	合計	収穫物	残渣	合計	
堆肥無施用区	2002	9	0	9	3	4	7	3
	2003	10	0	10	3	4	7	3
	2004	10	0	10	3	3	6	4
	2005	10	0	10	3	4	7	2
	2006	10	0	10	4	5	8	5
	2007	10	0	10	3	4	7	7
	2008	10	0	10	2	3	6	7
	2009	9	0	9	2	3	5	8
牛ふん堆肥区	2002	9	14	23	3	4	7	16
	2003	10	8	18	3	4	7	11
	2004	10	22	31	3	4	6	25
	2005	10	21	30	3	4	8	23
	2006	5	26	31	3	5	8	28
	2007	0	21	21	5	4	9	16
	2008	0	41	41	3	4	7	38
	2009	0	22	22	2	3	5	20
豚ふん堆肥区	2002	9	76	85	3	4	7	78
	2003	10	32	42	3	4	7	34
	2004	10	23	33	4	4	8	25
	2005	10	33	43	3	5	8	35
	2006	5	42	47	4	5	8	42
	2007	0	35	35	3	5	8	32
	2008	0	48	48	3	4	8	45
	2009	0	44	44	4	3	7	41

残渣は2005年キャベツ作まではほ場外へ持ち出し、2005年スイートコーン作以降ほ場内へすき込んだ。

表5 試験ほ場におけるカリウム収支($\text{g-K m}^{-2} \text{y}^{-1}$)

試験区	堆肥施用 年度	投入量			作物体吸収量			余剰量
		化学肥料	堆肥	合計	収穫物	残渣	合計	
堆肥無施用区	2002	49	0	49	16	26	41	7
	2003	50	0	50	16	24	40	9
	2004	50	0	50	11	21	32	18
	2005	50	0	50	19	27	45	4
	2006	50	0	50	19	25	44	22
	2007	50	0	50	19	23	42	31
	2008	50	0	50	13	14	27	37
	2009	46	0	46	11	22	33	35
牛ふん堆肥区	2002	47	39	85	15	26	42	44
	2003	50	51	101	19	28	47	54
	2004	50	69	119	12	28	40	79
	2005	50	67	117	24	34	57	59
	2006	25	72	97	18	28	46	68
	2007	0	56	56	18	21	39	38
	2008	0	59	59	14	19	33	45
	2009	0	90	90	14	23	37	76
豚ふん堆肥区	2002	45	72	117	18	26	44	74
	2003	50	62	112	19	27	46	67
	2004	50	27	77	17	29	46	31
	2005	50	20	70	21	34	55	15
	2006	25	41	65	18	23	42	38
	2007	0	30	30	15	23	38	15
	2008	0	36	36	14	23	38	21
	2009	0	31	31	20	19	39	10

残渣は2005年キャベツ作まではほ場外へ持ち出し、2005年スイートコーン作以降ほ場内へすき込んだ。

け、末端を地上部に出した。20 mm以上の降雨が観測された日の翌日以降に、ポンプで吸引し、集水用コンテナ内の浸透水を採取した。浸透水を孔径0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過し、形態別窒素濃度、全リン濃度及びカリウム濃度の分析に供した。なお、2005～2006年度は採水しなかった。

(3) 浸透水量

浸透水量は、降水量に見合った量が回収されず、ばらつきも大きかったため、次式により算出することとした。

1年以上の期間を対象としたほ場の水収支は、以下の式⁸⁾が成り立つ。

$$\text{降水量} + \text{灌漑水量} = \text{蒸発散量} + \text{浸透水量}$$

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、欠測値は名古屋地方気象台の観測データで補完した。灌漑水量は、2002、2005、2006、2007及び2009年については記録が残されているため、計算に用いた。蒸発散量はFAO Penman-Monteith法⁹⁾に気象データや生育データを入力し、求めた。

(4) 作土の化学性

スイートコーン収穫直後に作土0-10 cmを各区3か所からサンプリングし、風乾、篩別後、pH、EC、全窒素含量(T-N)、陽イオン交換容量(CEC)、交換性塩基類及び可給態リン酸含量の分析に供した。なお、2007年はサンプリングしたが全窒素含量のみ分析し、2008年度はサンプリングしなかった。

(5) 分析方法

作物体と土壌の全窒素含量はN. C-ANALYZER SUMIGRAPH NC-800(住化分析センター株式会社、大阪)またはMACRO CORDER JM1000 CN(ジェイ・サイエンス・ラボ株式会社、京都)で、溶脱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)で分析した。溶脱硝酸態及びアンモニア態窒素濃度は土壌用オートアナライザーモジュール(ビーエルテック株式会社、東京)で分析した。有機態窒素濃度は全窒素濃度から硝酸態窒素濃度とアンモニア態窒素濃度の合計を差し引いた。

作物体を、乾式灰化後、1 mol L⁻¹塩酸に溶解し、リン含量をバナドモリブデン酸法により、カリウム含量を原子吸光光度計Z-5310(日立計測器サービス株式会社、東京)で分析した。

溶脱リン濃度は、ペルオキシ二硫酸カリウム溶液を添加して分解後、モリブデン青法により分析した。溶脱カリウム濃度は、原子吸光光度計Z-5310(日立計測器サービス株式会社、東京)で分析した。

土壌のpH、EC、CEC、交換性塩基類及び可給態リン酸含量を常法¹⁰⁾に従い分析した。

(6) 養分収支の計算

ほ場への養分投入量は、化学肥料由来養分量と堆肥由来養分量の合計とした。持ち出し養分量は、作物体残渣をほ場外へ持ち出した2005年キャベツ作までは収穫物中養分量と残渣中養分量の合計値を、ほ場内へすき込んだ2005年スイートコーン作以降は収穫物中養分量のみとし

た。養分投入量から持ち出し養分量を差し引いた値を余剰量とした。

試験結果

1 作物体収量

連用開始時からの試験ほ場における作物体の収量を表6に示した。気象条件の影響により、作物体収量の年度によるばらつきが大きかった。特に2009年のスイートコーン作では、降雨が続き、過湿状態のほ場に定植したことにより、初期生育が劣り、低収量となった。2004年と2008年のキャベツ及び2007年のスイートコーンの収量は、豚ふん堆肥区が堆肥無施用区と牛ふん堆肥区に対し有意に多かった。収量に有意差のなかった年度においても、牛ふん堆肥区では堆肥無施用区と同程度の収量であったのに対し、豚ふん堆肥区で堆肥無施用区より高収量となる場合が多く見られた。

2 養分収支

連用開始時から8年間のほ場における窒素、リン、カリウムの収支を表3、4、5に示した。

作物体の窒素とリンの吸収量は、豚ふん堆肥区が堆肥無施用区より多い傾向が見られたが、牛ふん堆肥区では堆肥無施用区とほぼ同等であった。窒素及びリンの余剰量は投入量を反映し、豚ふん堆肥区>牛ふん堆肥区>堆肥無施用区であった。

作物体のカリウムの吸収量は、両堆肥施用区が堆肥無施用区より多い傾向であった。カリウムの余剰量は、牛ふん堆肥区では堆肥無施用区より多かったが、豚ふん堆肥区では2006年までは堆肥無施用区より多く、2007年以降は堆肥無施用区より少なくなった。

3 浸透水量

ほ場における水収支を表7に示した。浸透水量は657～1140 mm y⁻¹であり、降水量と灌漑水量の和の1/2量程度であった。

4 溶脱濃度

2002年から2009年までの浸透水の全窒素、全リン及びカリウム濃度の推移を図2に示した。

全窒素濃度は8月の堆肥施用後と9月及び4月の化学肥料施用後に高くなり、生育期後半に低くなる推移を繰り返した。平均濃度を比較すると、豚ふん堆肥区で最も高く、牛ふん堆肥区は堆肥無施用区とほぼ同等であった。

全リン濃度も、2004年までは堆肥及び化学肥料施用に伴い高くなる傾向であったが、徐々にその傾向は見られなくなり、2009年には区ごとに年間を通してほぼ同じ濃度であった。平均濃度を比較すると、豚ふん堆肥区で最も高く、堆肥無施用区で最も低かった。

カリウム濃度の平均濃度を比較すると、2003年までは豚ふん堆肥区で、2007年以降は牛ふん堆肥区で最も高く、堆肥無施用区で最も低かった。

表6 作物体の部位別収量(kg m⁻²)

作目	部位	試験区	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
キャベツ	結球	堆肥無施用区	4.27	4.70	2.74 _a	5.31	7.55	6.73	3.60 _a	4.90
		牛ふん堆肥区	4.21	5.07	2.78 _a	5.90	6.30	6.92	3.60 _a	5.30
		豚ふん堆肥区	4.75	5.43	4.85 _b	5.47	7.19	5.04	6.00 _b	6.40
	外葉	堆肥無施用区	3.57	3.06	2.32	4.14	3.46	3.76	2.50	3.10
		牛ふん堆肥区	3.61	3.23	2.37	4.52	3.05	4.24	2.60	3.20
		豚ふん堆肥区	3.88	3.21	3.72	4.04	3.40	3.71	3.10	3.30
スイートコーン	子実	堆肥無施用区	1.43	1.92	1.98	2.05	2.81	1.82 _a	2.02	1.28
		牛ふん堆肥区	1.33	1.98	2.14	1.74	2.96	1.84 _a	2.56	1.52
		豚ふん堆肥区	1.24	1.95	2.30	2.07	2.78	2.37 _b	2.96	2.31
	茎葉	堆肥無施用区	2.56	2.68	3.21	2.52	2.80	1.72	2.28	1.62
		牛ふん堆肥区	2.13	2.66	3.67	2.49	3.09	1.53	2.10	2.04
		豚ふん堆肥区	2.04	2.68	3.60	2.97	2.89	1.85	2.50	2.88

各年度の同一作物の試験区間において、異符号間に5%水準で有意差あり (Tukey-KramerのHSD検定)。

表7 試験ほ場における水収支

堆肥施用 年度	降水量 (mm y ⁻¹)	灌漑水量 (mm y ⁻¹)	蒸発散量 (mm y ⁻¹)	浸透水量 (mm y ⁻¹)	浸透割合
2002	1,565	-	721	844	0.54
2003	1,489	27	805	711	0.47
2004	1,847	-	783	1,064	0.58
2005	1,509	12	752	769	0.51
2006	1,420	7	748	679	0.48
2007	1,406	-	750	657	0.47
2008	1,547	-	877	669	0.43
2009	1,837	25	722	1,140	0.61

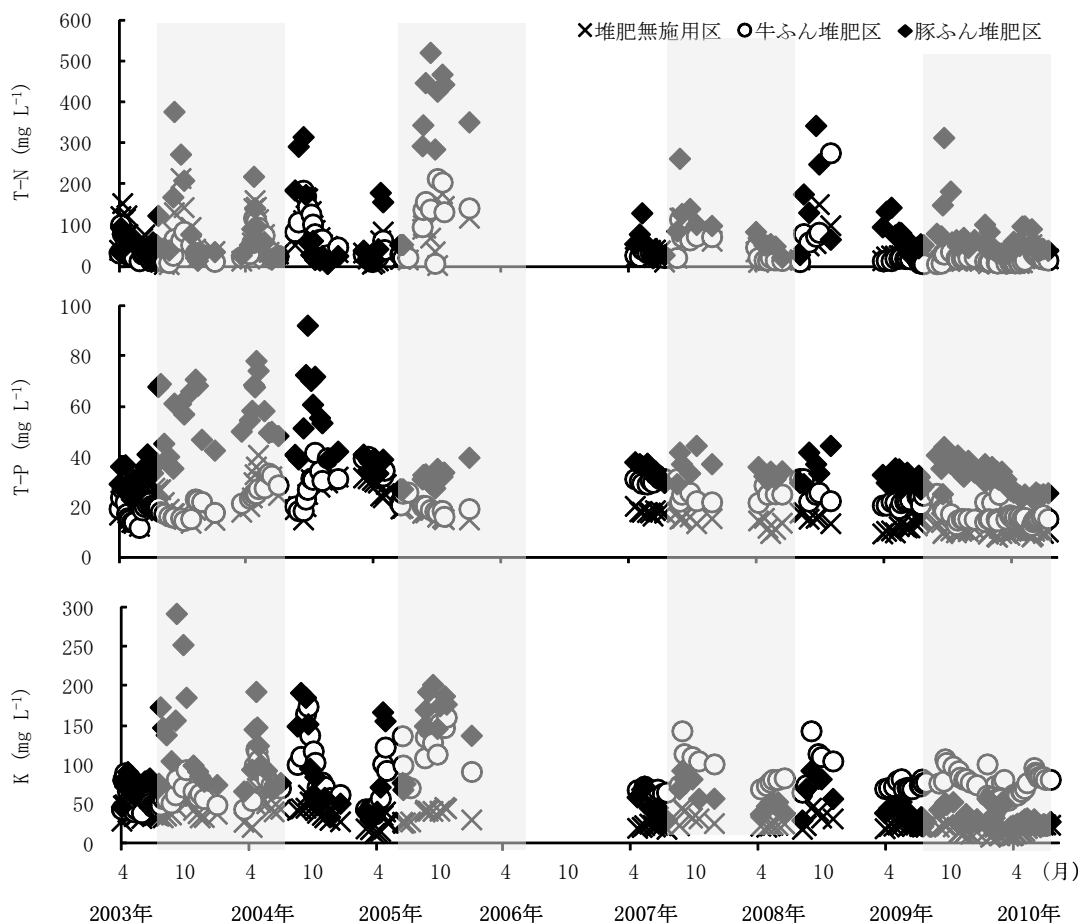


図2 キャピラリーライシメータから回収された浸透水中の全窒素、全リン及びカリウム濃度推移

5 作土の全窒素、可給態リン酸及び交換性カリウム含量の推移

作土0-10 cmの全窒素、可給態リン酸及び交換性カリウム含量の推移を図3に示した。

全窒素含量は、堆肥無施用区では連用開始前より低く推移した。牛ふん堆肥区では、2002年に低下したが、残渣をすき込み始めた2005年以降は連用開始前より高く推移した。豚ふん堆肥区でも、連用開始から3年間は連用前より低かったが、2005年以降上昇し、他区より高く推移した。

可給態リン酸含量は、連用開始時に高かったことから、全区において低下傾向にあり、その低下割合は堆肥無施用区で最も大きかった。

交換性カリウム含量は、堆肥無施用区では連用開始前と同程度で推移したが、牛ふん堆肥区では連用開始前より高く推移した。豚ふん堆肥区では、堆肥施用量が多かったため、2002年に上昇したが、その後低下傾向にあり、2009年には連用開始前と同程度となった。

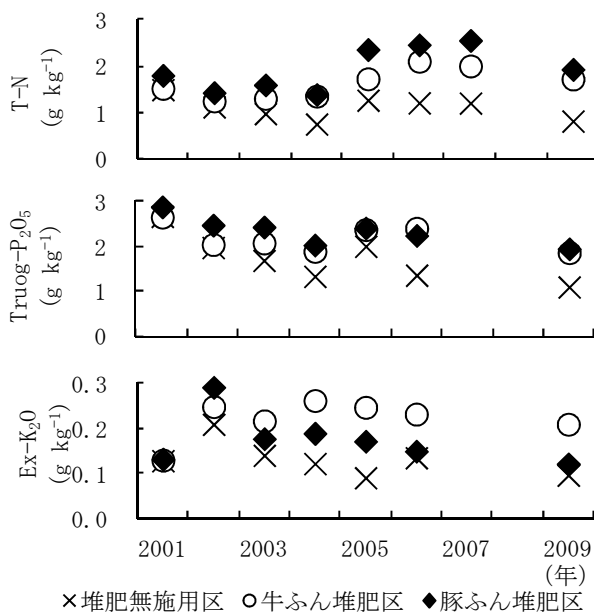


図3 作土中の全窒素、可給態リン酸及び交換性カリウム含量の推移

考 察

砂質露地畑で8年間家畜ふん堆肥を連用して毎年キャベツ及びスイートコーンを栽培したところ、豚ふん堆肥区では堆肥無施用区より収量性が優れる傾向にあったが、牛ふん堆肥区ではその傾向が見られなかった。この畜種による違いには、各試験区における養分動態の違いが影響していると考えられることから、以下に窒素、リン及びカリウムの動態について考察する。

1 窒素の動態

本試験では、堆肥施用区でも化学肥料の減量を行わなかったため、堆肥施用区への窒素投入量は堆肥無施用区より多く、牛ふん堆肥区では1.4~1.8倍、豚ふん堆肥区では1.9~2.6倍量であった。余剰量は投入量を反映し、豚ふん堆肥区>牛ふん堆肥区>堆肥無施用区であった(表3)。余剰窒素が全量溶脱されると仮定し、余剰量を表7の浸透水量で除した値を推定溶脱濃度とし、年間

表8 余剰量から推定した溶脱窒素濃度と実測値の比較

試験区	堆肥施用年度	T-N (mg L ⁻¹)	
		推定濃度	実測濃度
堆肥無施用区	2003	41	67
	2004	30	60
	2007	62	45
	2008	68	35
	2009	39	21
牛ふん堆肥区	2003	87	48
	2004	67	65
	2007	127	42
	2008	118	36
	2009	75	18
豚ふん堆肥区	2003	130	94
	2004	69	84
	2007	164	88
	2008	161	90
	2009	96	70

表9 2003年度堆肥施用後1年間の形態別溶脱窒素濃度の平均

	全窒素(a)	アンモニア態窒素 (mg L ⁻¹)	硝酸態窒素 (mg L ⁻¹)	有機態窒素(b) (mg L ⁻¹)	b/a×100 (%)
堆肥無施用区	67.2	0.4	63.5	3.3	5.0
牛ふん堆肥区	48.3	0.1	37.3	11.0	22.7
豚ふん堆肥区	94.0	0.7	82.8	10.5	11.1

の浸透水の実測濃度がそろっている2003、2004、2007、2008及び2009年について、実測値の平均濃度を表8に示した。堆肥無施用区では、推定濃度が、2004年までは実測濃度より低かったが、2007年以降は高かった。2004年までは作土の全窒素含量が低下している（図3）ことから、土壌からの窒素溶脱が考えられる。一方堆肥施用区では、2004年の豚ふん堆肥区を除き、推定濃度より実測濃度が低かった。作土の全窒素含量が上昇している（図3）ことから、土壌への窒素蓄積が考えられる。家畜ふん堆肥と化学肥料の併用条件下における窒素の動態に関して、重窒素標識堆肥あるいは重窒素標識硫酸を用いて多くの研究成果^{1)~15)}があり、牛ふん堆肥と硫酸を併用すると、作物体吸収量や溶脱量が低下すると報告されている。今回の試験においても、牛ふん堆肥区では堆肥無施用区に対し、吸収量の増加割合は少なく、溶脱濃度の低下が確認されており、既往の成果を支持する結果となった。すなわち、牛ふん堆肥区では、堆肥中有機物の分解のために併用した化学肥料中窒素が有機化され、無機態窒素量が堆肥無施用区より少なくなったために、作物体への吸収量と溶脱濃度が低く推移したと考えられた。一方、豚ふん堆肥区では、堆肥施用初年目から堆肥由来窒素の肥効が現れていた。豚ふん堆肥には牛ふん堆肥より易分解性有機物が多く含まれる¹⁶⁾ことから、堆肥由来窒素の無機化量が多く、作物体への吸収と同時に溶脱窒素量も増加したものと考えられる。

2005年のスイートコーン作から残渣のすき込みを開始したところ、年間の余剰窒素量が増大し（表3）、作土の全窒素含量は増加傾向となり（図3）、溶脱窒素濃度は減少傾向にある（図2）。残渣を土壌微生物が分解する際に、土壌中の無機態窒素を取り込んで菌体を合成し、微生物は増殖する。その後微生物の死滅に伴い徐々に窒素が放出されるようになることから、残渣を持ち出していた期間に比べ、窒素の滞留時間が長くなったものと推察される。

本試験で観測された溶脱窒素濃度は非常に高く、特に豚ふん堆肥区では、年間を通して 10 mg L^{-1} 以上であった。松丸⁶⁾が行った砂質土のライシメータ試験においても、降水量に対する浸透水量は59%、肥料窒素の溶脱率は58~66%との結果が得られ、野中と加村¹⁷⁾及び望月ら¹⁸⁾も砂質土では窒素の溶脱が起りやすいことを報告している。また、これらの報告では、溶脱窒素の99%以上が硝酸態とされているが、本研究では有機態窒素も多く溶脱している点が特徴的であった（表9）。三浦と阿江¹⁹⁾は、黒ボク土の茶園土壌を充填したカラム試験において、有機物を多量に施用すると、タンパク様窒素が増加して土壌中に吸着するが、その容量を超えると、水溶性になり溶脱する可能性があるとして指摘している。有機態窒素の溶脱に関しては、土壌の化学性や物理性が影響を及ぼすことから、実態解明については今後の検討課題としたい。

2 リンの動態

本試験で観測された溶脱リン濃度も、全窒素濃度と同様に非常に高く、特に豚ふん堆肥区では、年間を通して

20 mg L^{-1} 以上と高かった（図2）。また、溶脱リンのほぼ100%が無機態のリン酸態リンであった。全試験区において作土の可給態リン酸含量が低下傾向にある（図3）ことから、施肥として投入したリンに加え、連用開始前から土壌中に多く蓄積されていた可給態リン酸（表1）が徐々に溶出したと考えられる。

河野⁴⁾は、系外を汚染しないで通常の農業生産を行うリンの最大保持量を土壌中リンの環境容量と定義し、有機物の施用等により微生物バイオマスリン量を増加させることがリンの環境容量の増加につながるとしている。2007年以降、堆肥連用区へのリンの施肥を中止したが、作物体への吸収量は堆肥無施用区と同等あるいは多かった。本試験ほ場の堆肥連用区においてもリンの環境容量が増加し、バイオマスリンの分解及び作物吸収が促進されていると推察され、堆肥連用時にリンの施肥は必要ないと考えられる。

3 カリウムの動態

堆肥連用区では、2007年以降リンと同時にカリウム施肥も中止した。牛ふん堆肥にはカリウムが多く含まれることから、牛ふん堆肥区では作物体への吸収量や土壌中の交換性カリウム含量の低下も見られず、カリウム無施肥の影響はないと判断した。一方、豚ふん堆肥のカリウム含量は牛ふん堆肥より少なく、2007年以降余剰量が堆肥無施用区より少なくなり、吸収量や作土中の交換性カリウム含量は低下傾向にある（表5、図3）。豚ふん堆肥区については、今後カリウム無施肥の影響が現れる可能性があるため、カリウム施肥量に関して慎重に検討する必要がある。

以上の結果、牛ふん堆肥と豚ふん堆肥では、連用による養分動態が異なることが明らかとなった。本試験ほ場のように保肥力の小さい砂質畑へ家畜ふん堆肥を施用する際には化学肥料を減量したり、裸地期間に緑肥を作付けたり、家畜ふん堆肥とC/N比の高い有機質資材を同時に施用する等の技術を組み合わせることにより、溶脱養分量を低減する必要性が示された。

謝辞：本研究をとりまとめるに当たり、農業環境技術研究所江口定夫氏にご指導頂いたので、ここに感謝の意を表する。

引用文献

1. 平成23年産野菜生産出荷統計。農林水産省
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. 熊澤喜久雄。地下水の硝酸態窒素汚染の現況。土肥誌。70，207-213(1999)
4. 河野憲治。環境負荷を予測する。IX 生物圏におけるリンの動態。博友社。東京。p.143-154(2002)
5. 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. 愛知農総試研報. 43, 137-149(2011)
6. 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. 土肥誌. 68, 423-429(1997)
 7. 尾崎保夫, 前田守弘, 亀和田國彦, 本島俊明, 関口浩昭. 畑地における硝酸態窒素等の溶脱量モニタリング技術の開発. 農業および園芸. 76, 490-496(2001)
 8. 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)
 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. 土壌標準分析・測定法委員会. 土壌標準分析・測定法. 博友社. 東京(1986)
 11. 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. 土肥誌. 75, 445-451(2004)
 12. 上之園茂, 長友誠, 高橋茂, 西田瑞彦. 重窒素標識牛ふん堆肥製造と牛ふん堆肥施用畑地における2作間の窒素動態. 土肥誌. 79, 37-44(2008)
 13. 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. 土肥誌. 80, 494-501(2009)
 14. 加藤雅彦, 林康人, 森國博全. 重窒素ラベル硫安と各種牛ふん堆肥の併用下におけるハウレンソウへの窒素供給特性の解析. 土肥誌. 79, 283-289(2008)
 15. 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. 土肥誌. 81, 549-556(2010)
 16. 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. 愛知農総試研報. 33, 237-244(2001)
 17. 野中昌法, 加村崇雄. ライシメータによる砂丘畑地の施肥窒素の溶脱と窒素収支. 土肥誌. 66, 372-380(1995)
 18. 望月康秀, 戸田任重, 川島博之. 暗きょ排水組織を敷設した海岸砂地畑における窒素溶脱量の推定. 土肥誌. 71, 512-519(2000)
 19. 三浦伸之, 阿江教治. 有機物の多量施用時における有機態窒素溶脱の可能性. 土肥誌. 76, 843-848(2005)