

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

糟谷真宏*・荻野和明**・廣戸誠一郎***・石川博司****・鈴木良地*

摘要：2005年から5年間10作、牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑（冬作：キャベツ、夏作：スイートコーン）における養分動態を調査した。最初の3年間6作は、堆肥施用区も化学肥料の減肥を行わずに養分動態を把握し、第7～10作は、堆肥施用量に応じて化学肥料を減肥した。

キャベツ、スイートコーンともに、堆肥施用によって堆肥無施用区より多収となり、化学肥料減肥を始めた第7作以降もその傾向が維持された。土壌のTN、可給態窒素含量は、堆肥無施用区では漸減したが、両堆肥区では当初の水準で維持された。堆肥施用区で窒素減肥を行わないと、夏季を中心に大量の硝酸態窒素が溶脱したが、堆肥由来窒素の利用率に基づく窒素減肥を行うことによって、窒素溶脱量は堆肥無施用区と同等程度に低減した。

牛ふん堆肥、豚ふん堆肥ともに、窒素肥料については、堆肥由来窒素の利用率に基づいて減肥量を決定すること、リン酸とカリウムについては、堆肥施用後の作では無施肥とすることが妥当と考えられた。さらに豚ふん堆肥標準量の施用では、リン酸の施肥はキャベツ、スイートコーンの両作ともに必要ないと判断された。

キーワード：家畜ふん堆肥連用、養分動態、化学肥料減肥、余剰窒素、窒素溶脱、リン、カリウム

Dynamics of Nutrients in a Yellow Soil Vegetable Field Using Cattle or Pig Feces Compost for five years

KASUYA Masahiro, OGINO Kazuaki, HIROTO Seichiro, ISHIKAWA Hiroshi and SUZUKI Ryoji

Abstract: The dynamics of nutrients, such as nitrogen, phosphorus, and potassium, were surveyed in a yellow soil vegetable field to which composted cattle or swine manure was applied every August for 5 years (2005-2010). During this period, cabbage and maize were alternately cultivated from September to February and from May to July, respectively. A chemical fertilizer was also applied, but its application was reduced in the 4th and 5th year based on the estimated rate of absorption from the compost.

The yields of cabbage and maize were higher in the plot with compost than in the plot without compost even after reducing chemical fertilizer application. Total and available nitrogen contents in the soil decreased in the plot without compost. In contrast, these contents were maintained at the initial level on applying compost. A large amount of nitrogen leached from the soil in the plot with compost, especially in summer. However, this amount successfully decreased to a similar extent as that leached from the soil in the plot without compost by nitrogen fertilizer reduction.

These results indicate that nitrogen fertilizer application should be reduced on the basis of the specific rate of nitrogen absorption from the composted cattle or swine manure. Furthermore, no phosphorous or potassium is necessary for cabbage cultivation following compost application, and sufficient phosphorus is available to both cabbage and maize only by the application of composted swine manure.

Key Words: Application of compost, Dynamics of nutrients, Reduction of chemical fertilizer application, Surplus nitrogen, Leached nitrogen, Phosphorus, Potassium

緒言

愛知県に広く分布する黄色土は重粘で窒素肥効に乏しいことから、野菜作において堆肥等有機物の施用が土壌物理性の改善や養分供給の観点から有効である。また、愛知県で盛んな畜産業からもたらされる家畜ふん堆肥の施用は、このような土壌改善効果に加えて地域の有用資源のリサイクルの観点からも推奨されるべき技術である。しかしながら、堆肥投入による窒素負荷増加量に見合うほどには野菜の窒素吸収量は増えないため、堆肥施用時に化学肥料を減らさない場合には余剰窒素による水域への窒素負荷の増大が懸念される。愛知県の有する三河湾は西を知多半島に、南を渥美半島に遮られるため閉鎖性が強く、富栄養化が著しい¹⁾。流域からの窒素負荷の増加はその富栄養化を加速するおそれがある。伊勢・三河湾の「化学的酸素要求量、窒素含有量及びリン含有量に係る総量削減計画」²⁾では、肥料、有機質資材の適正利用により汚濁負荷量の削減を図ることを農耕地における対策として位置づけており、堆肥施用による水域への栄養塩負荷を増大させない土壌管理技術の確立が急務となっている。このためには、まず第一に有機質資材に含まれる肥料成分を考慮して化学肥料減肥を行うことが望まれる。

牛ふん堆肥や豚ふん堆肥は、分解の遅い画分が多く、特に窒素肥効は施用年だけでなく長期にわたって現れる。このため、生産性の維持・向上を図りながら、水域への負荷を低減させる方法を確立するうえで、連用条件における養分、特に窒素の動態を把握することが不可欠である。

そこで、東三河農業研究所では、2005年から、牛ふん堆肥または豚ふん堆肥の施用量レベルを変えて連用するキャベツ-スイートコーン栽培において、野菜の収量、土壌養分含量、窒素溶脱量のモニタリングを継続し、養分収支を調査している。まず、当初3年間は、堆肥施用区においても化学肥料減肥を行わない条件で養分収支を把握し、4、5年目に化学肥料減肥を行って、その養分収支に及ぼす影響を評価した。本報告は、この家畜ふん堆肥連用ほ場における初期5年間の養分動態の概要をとりまとめたものである。

調査対象および方法

1 試験ほ場

試験に用いたほ場は、1979年から2002年までブドウ園として利用されたほ場で、土壌は細粒質台地黄色土であるが、ブドウ植栽前の1978年に浄水汚泥が作土に混和されている。2002年にブドウ園を廃止して2005年まで裸地として管理された。この間の除草は、トラクタによるすき込みによった。その後、このほ場を野菜畑に改め、本試験を開始した。

浄水汚泥が混和されているため、本試験開始時における作土のリン酸吸収係数は $11.9\text{g-P}_2\text{O}_5\text{ kg}^{-1}$ と、一般的な赤黄色土と比べて³⁾著しく大きく、可給態リン酸含量は $129\text{mg-P}_2\text{O}_5\text{ kg}^{-1}$ と小さかった。試験開始時における作土の主な化学性を表1に示す。

2 栽培体系

2005年から5年間、8月中旬～9月中旬に牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を施用し、9月中旬から翌年の1、2月までキャベツ(YR冬さかり、トヨハン種苗)を、5月中旬～7月下旬にスイートコーン(味来390、パイオニアエコサイエンス)を作付けする体系で試験を行った。キャベツは結球を、スイートコーンについては雌穂のみを収穫し、その他の茎、葉、根は残渣としてすき込んだ。なお、スイートコーンは1株につき1個の雌穂を除いて他は除穂した。

畝幅60cmとし、キャベツは株間33cm、スイートコーンは株間35cmで栽培を行った。

3 試験区

試験区は、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥について、愛知県の有機質資材施用基準⁴⁾に基づく標準量区(牛ふん堆肥 $15\text{Mg-DW ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ 、豚ふん堆肥 $10\text{Mg-DW ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$)に加えて、その半量区と1.5倍量区を設けた。別に、堆肥を施用しない区を堆肥無施用区とし、愛知県の施肥基準⁴⁾に準じて施肥を行った。用いた堆肥の主な成分含量を表2に示す。これらの堆肥成分は、県内産堆肥⁵⁾の平均値と比べて、牛ふん堆肥のリン含量がやや低いことを除けば、ほぼ標準的であった。試験は1区面積 $30\text{m}^2(4\times 7.5\text{m})$ の3反復または2反復で行った。

表1 試験開始時における作土の主な化学性

試験区	pH	TC g-C kg ⁻¹	TN g-N kg ⁻¹	可給態窒素 mg-N kg ⁻¹	CEC cmol _c kg ⁻¹	交換性陽イオン cmol _c kg ⁻¹			可給態リン酸 mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹	
						K	Ca	Mg		
牛ふん堆肥	半量区	6.4	23.2	1.96	66	14.0	0.99	5.5	1.5	124
	標準量区	6.4	22.7	2.00	67	14.5	0.89	5.1	1.6	126
	1.5倍量区	6.4	25.0	2.21	72	15.3	1.03	5.9	1.7	144
豚ふん堆肥	半量区	6.4	22.5	1.99	65	14.3	1.02	6.0	1.6	121
	標準量区	6.4	21.7	1.91	61	13.9	1.09	6.1	1.7	140
	1.5倍量区	6.4	22.2	1.95	61	14.7	0.94	5.3	1.6	129
堆肥無施用区	6.4	21.3	1.89	61	14.5	0.95	5.3	1.6	117	

施肥量は、はじめの3年間6作は、すべての区で同一とし、被覆尿素入複合肥料（ロジワン、愛知経済連、窒素16%うち硫安4.8%、リン酸6%-P₂O₅、カリウム16%-K₂O）を用いて窒素量を愛知県施肥基準（キャベツ：300kg-N ha⁻¹、スイートコーン：250kg-N ha⁻¹）に合わせて行った。

第7作目以降の施肥量は、前年の収量、養分収支、土壤中養分含量の変化に加えて、窒素については、前年の見かけの堆肥由来窒素利用率を、リン酸、カリウムについては、堆肥中含量を参考に減肥した（表3-5）。なお、窒素は被覆尿素入複合肥料から硫安の分施（基肥50%、追肥50%（2回））に変更し、リン酸とカリウムは、それぞれ、第6作までの複合肥料に含まれるものと同様の過リン酸石灰と硫酸加里を基肥として施用した。

4 調査項目と方法

(1) キャベツとスイートコーンの収量と養分吸収量

収穫時には、キャベツ、スイートコーンともに、1区につき3カ所で周囲に欠株のない5株を一部の根を含めて地上部をすべて刈り取った。1区合計15株について、収穫物と残渣、すなわち、キャベツでは結球部とそれ以外の部分に、スイートコーンでは雌穂とそれ以外の部分に分けて新鮮重および乾物重を測定した。さらに1区につき5株の収穫物および残渣について乾燥・粉碎後、全炭素（TC）、全窒素（TN）、リン、カリウム含量を測定した。

(2) 養分収支

インプットとして、堆肥および化学肥料に由来する養分量、アウトプットとして乾物重と成分含有率から収穫による持ち出し量を把握するとともに（表3-5）、牛ふん堆肥および豚ふん堆肥標準量区、ならびに堆肥無施用区において地下1mへの雨水の浸透に伴う硝酸態窒素（NO₃-N）とカリウムの溶脱量をキャピラリーライシメータ（大起理化学工業製）を用いて調査した（反復なし）。

(3) 作土の土壤養分含量

家畜ふん堆肥連用による作土の化学性の変化を把握するため、試験開始時および各作の栽培終了後に作土（深さ20cm）を採取し、pH、全炭素（TC）、全窒素（TN）、

可給態窒素、可給態リン酸、陽イオン交換容量（CEC）、交換性カリウム、カルシウム、マグネシウムを測定した。

(4) 分析法

土壌および作物体のTC、TN含量は、住化分析センター製、スミグラフNC-700によって分析した。土壌の可給態窒素は保温静置法⁶⁾によった。土壌の可給態リン酸はトルオーグ法で、作物体のリンは過塩素酸分解後モリブデン青法で分析した⁶⁾。CECはショーレンベルガー法で、交換性陽イオンはpH7酢酸アンモニウム抽出後原子吸光光度計（日立製作所製、Z-6100）で測定した⁶⁾。作物体のカリウムは過塩素酸分解後、また溶脱水のカリウムは過塩素酸でpHを1とした後に原子吸光光度計（日立製作所製、Z-6100）で測定した。溶脱水のNO₃-Nの測定にはイオンクロマトグラフ（横河電機製、IC-7000）を用いた。

結果

1 キャベツとスイートコーンの収量

表6にキャベツとスイートコーンの収量を、堆肥無施用区を100とする収量指数で示した。収量は、キャベツ、スイートコーンともに一斉収穫を行って栽培期間を一定に揃えたことにより、愛知県施肥基準⁴⁾の目標収量よりやや低めの場合が多かった。しかしながら、キャベツ、スイートコーンともに、両家畜ふん堆肥の標準量以上の施用により、堆肥無施用区と比べて多収となる傾向が認められ、特に豚ふん堆肥でその効果は高かった。一方、牛ふん堆肥の半量区では、その効果は判然としなかった。

堆肥施用により増収する現象は、化学肥料減肥を始めた7作目以降も継続した。

2 キャベツとスイートコーンの養分収支

(1) 窒素収支

年間の窒素収支について、堆肥による投入量、化学肥料施肥量および野菜の収穫物および残渣への吸収量を表3に示した。

第7作以降の窒素施肥量については、前年の堆肥由来窒素吸収量の試算結果を基に、収量、可給態窒素量、

表2 供試堆肥の化学組成

堆肥種類	年次	TC	TN	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	C/N	P	K	Ca	Mg
		g-C kg ⁻¹	g-N kg ⁻¹	mg-N kg ⁻¹	mg-N kg ⁻¹		g-P kg ⁻¹	g-K kg ⁻¹	g-Ca kg ⁻¹	g-Mg kg ⁻¹
牛ふん堆肥	2005	411	18.2	5	12	22.6	5.70	35.2	13.4	7.3
	2006	413	20.8	166	10	19.8	5.42	35.7	17.3	7.6
	2007	436	18.3	9	7	23.9	4.02	29.4	12.6	5.8
	2008	403	22.5	61	17	17.9	5.57	33.2	16.3	7.3
	2009	392	17.4	4	5	22.5	3.98	29.8	13.4	6.3
豚ふん堆肥	2005	368	30.2	209	282	12.2	28.4	33.4	56.9	11.4
	2006	365	35.0	264	625	10.4	29.7	24.4	39.7	13.1
	2007	375	39.8	318	886	9.4	30.7	24.4	42.6	13.1
	2008	367	40.8	361	782	9.0	33.2	25.4	44.4	13.8
	2009	346	34.5	126	805	10.0	29.7	23.9	39.9	12.9

注) 値は乾物換算値。

表3 家畜ふん堆肥連用畑における窒素収支に基づく推定化学肥料代替可能量

試験区	作期	投入量 kg-N ha ⁻¹		吸収量 kg-N ha ⁻¹			余剰窒素 ¹ kg-N ha ⁻¹ y ⁻¹	見かけの堆肥由来 窒素吸収量 ² kg-N ha ⁻¹	見かけの堆肥由来 窒素利用率 ³	推定化学肥料 代替可能量 ⁴ kg-N ha ⁻¹	設定 減肥量 kg-N ha ⁻¹
		化肥	堆肥	収穫物	残渣	合計					
牛ふん堆肥半量区	第1作	300	137	146	143	289		12	0.086	13	0
	第2作	250	0	45	58	103	496	0	0.003	1	0
	第3作	300	156	199	146	345		3	0.017	2	0
	第4作	250	0	32	40	71	476	12	0.075	49	0
	第5作	300	137	201	121	322		14	0.100	13	0
	第6作	250	0	57	55	112	430	8	0.059	20	0
	第7作	290	169	169	218	104		17	0.103	17	10
	第8作	250	0	51	69	120	439	3	0.020	7	0
	第9作	290	130	130	173	296		-1	-0.010	-1	10
	第10作	200	0	35	39	74	412	15	0.115	51	50
牛ふん堆肥標準量区	第1作	300	273	150	136	285		8	0.029	8	0
	第2作	250	0	52	61	113	621	10	0.037	25	0
	第3作	300	312	208	149	357		15	0.049	13	0
	第4作	250	0	33	48	80	621	21	0.066	86	0
	第5作	300	275	218	133	351		43	0.157	42	0
	第6作	250	0	57	57	114	549	11	0.038	25	0
	第7作	280	338	211	105	316		23	0.067	22	20
	第8作	230	0	64	76	140	572	33	0.098	71	20
	第9作	270	261	213	147	360		84	0.320	82	30
	第10作	150	0	43	48	91	424	47	0.181	160	100
牛ふん堆肥1.5倍量区	第1作	300	410	141	139	280		2	0.006	3	0
	第2作	250	0	52	64	116	767	13	0.032	32	0
	第3作	300	468	187	150	337		-5	-0.010	-4	0
	第4作	250	0	33	57	90	798	30	0.064	126	0
	第5作	300	412	200	111	312		4	0.009	4	0
	第6作	250	0	59	56	115	702	11	0.027	26	0
	第7作	270	506	197	116	313		30	0.060	29	30
	第8作	230	0	62	82	144	747	37	0.073	79	20
	第9作	250	391	197	161	358		102	0.262	100	50
	第10作	130	0	48	61	109	525	71	0.181	240	120
豚ふん堆肥半量区	第1作	300	151	144	155	299		22	0.143	23	0
	第2作	250	0	56	74	130	501	27	0.179	66	0
	第3作	300	175	200	156	357		15	0.083	13	0
	第4作	250	0	35	58	94	489	34	0.194	142	0
	第5作	300	199	228	145	373		65	0.326	63	0
	第6作	250	0	57	61	118	464	14	0.072	34	0
	第7作	290	204	236	136	372		68	0.335	65	10
	第8作	230	0	67	76	143	421	36	0.177	77	20
	第9作	280	262	175	146	322		35	0.133	34	20
	第10作	190	0	42	41	83	515	27	0.103	92	60
豚ふん堆肥標準量区	第1作	300	302	157	169	326		49	0.161	52	0
	第2作	250	0	56	72	127	639	25	0.081	60	0
	第3作	300	350	195	166	361		19	0.054	17	0
	第4作	250	0	43	64	106	663	47	0.133	195	0
	第5作	300	398	209	133	343		35	0.087	34	0
	第6作	250	0	67	79	146	671	42	0.106	102	0
	第7作	270	408	207	138	345		62	0.153	60	30
	第8作	200	0	65	97	163	606	69	0.170	149	50
	第9作	250	345	218	161	383		127	0.367	124	50
	第10作	140	0	45	57	102	472	60	0.175	205	110
豚ふん堆肥1.5倍量区	第1作	300	453	154	187	342		64	0.141	69	0
	第2作	250	0	55	69	124	794	22	0.048	53	0
	第3作	300	525	204	160	364		22	0.042	19	0
	第4作	250	0	46	70	117	824	57	0.108	238	0
	第5作	300	597	236	153	389		81	0.135	79	0
	第6作	250	0	79	106	185	832	81	0.136	195	0
	第7作	250	612	228	143	371		109	0.178	104	50
	第8作	180	0	66	99	165	748	81	0.132	174	70
	第9作	225	524	203	161	364		133	0.254	130	75
	第10作	100	0	59	65	125	587	95	0.181	323	150
堆肥無施用区	第1作	300	0	137	141	278		-	0.925*	-	0
	第2作	250	0	47	56	103	366	-	0.411	-	0
	第3作	300	0	186	156	342		-	1.140	-	0
	第4作	250	0	25	35	60	339	-	0.239	-	0
	第5作	300	0	193	115	308		-	1.026	-	0
	第6作	250	0	51	53	104	306	-	0.416	-	0
	第7作	300	0	198	116	315		-	1.048	-	0
	第8作	250	0	55	61	117	296	-	0.467	-	0
	第9作	300	0	175	132	307		-	1.024	-	0
	第10作	250	0	36	38	74	339	-	0.294	-	0

1 余剰窒素量は冬作と夏作、1年間の合計。

2 見かけの堆肥由来窒素吸収量 = 窒素吸収量 - 化学肥料施用量 × 堆肥無施用区の窒素利用率

3 見かけの堆肥由来窒素利用率 = 見かけの堆肥由来窒素吸収量 ÷ 当該年に施用した堆肥中窒素量

* 堆肥無施用区の値は化学肥料由来窒素利用率を示す。

4 推定化学肥料代替可能量 = 当該年に施用した堆肥中窒素量 × 見かけの堆肥由来窒素利用率 ÷ 堆肥無施用区の窒素利用率

表 4 家畜ふん堆肥連用畑におけるリン収支

試験区	作期	作物	投入量 $\text{kg-P ha}^{-1} \text{y}^{-1}$			吸収量 $\text{kg-P ha}^{-1} \text{y}^{-1}$		余剰量 $\text{kg-P ha}^{-1} \text{y}^{-1}$
			化学肥料	堆肥	合計	収穫物	残渣	
牛ふん堆肥半量区	第1-6作	キャベツ	49	38	128	19	12	101
		スイートコーン	41			8	5	
	第7-8作	キャベツ	33	42	96	22	9	66
		スイートコーン	22			9	8	
牛ふん堆肥標準量区	第1-6作	キャベツ	33	30	107	15	10	84
		スイートコーン	44			8	4	
	第7-8作	キャベツ	49	76	166	22	13	136
		スイートコーン	41			8	6	
牛ふん堆肥1.5倍量区	第1-6作	キャベツ	0	84	105	24	11	70
		スイートコーン	22			12	9	
	第9-10作	キャベツ	0	60	103	19	10	76
		スイートコーン	44			9	5	
牛ふん堆肥1.5倍量区	第1-6作	キャベツ	49	114	204	21	14	175
		スイートコーン	41			8	6	
	第7-8作	キャベツ	0	125	147	22	12	114
		スイートコーン	22			11	11	
豚ふん堆肥半量区	第1-6作	キャベツ	0	90	133	17	12	107
		スイートコーン	44			9	6	
	第7-8作	キャベツ	49	148	238	22	15	207
		スイートコーン	41			8	7	
豚ふん堆肥標準量区	第1-6作	キャベツ	33	166	199	28	15	160
		スイートコーン	0			11	9	
	第9-10作	キャベツ	0	149	171	18	12	145
		スイートコーン	22			8	4	
豚ふん堆肥1.5倍量区	第1-6作	キャベツ	49	297	387	23	16	354
		スイートコーン	41			9	8	
	第7-8作	キャベツ	0	332	332	25	16	294
		スイートコーン	0			13	13	
豚ふん堆肥1.5倍量区	第1-6作	キャベツ	0	298	298	24	14	265
		スイートコーン	0			9	6	
	第7-8作	キャベツ	49	444	534	24	18	500
		スイートコーン	41			10	9	
堆肥無施用区	第1-6作	キャベツ	0	498	498	30	18	455
		スイートコーン	0			13	14	
	第9-10作	キャベツ	0	446	446	21	15	412
		スイートコーン	0			12	9	
堆肥無施用区	第1-6作	キャベツ	49	0	90	16	11	67
		スイートコーン	41			7	5	
	第7-8作	キャベツ	65	0	109	20	10	80
		スイートコーン	44			9	6	
堆肥無施用区	第9-10作	キャベツ	65	0	109	14	8	88
		スイートコーン	44			7	5	

注) 第1-6作の値は、3年間の平均値。

堆肥施用量レベルを勘案して減肥量を決定した。堆肥由来窒素吸収量については、以下により堆肥無施用区との差し引きによって見かけの堆肥由来窒素吸収量を推定した。これを堆肥無施用区の窒素利用率で除して、堆肥による化学肥料代替可能量とした。

堆肥由来窒素吸収量 = 堆肥区の窒素吸収量 - 堆肥区の化学肥料施肥量 × 堆肥無施用区の窒素利用率

なお、この値は、正確には堆肥由来窒素吸収量を示していないが、当該年に施用された堆肥だけでなく、それ以前に施用されて土壌に残存、あるいは土壌窒素として再有機化されたものを含む堆肥施用土壌全体としての概略値と理解され、施肥窒素量を設定する目的であれば利用可能と判断した。

野菜の窒素吸収量は、堆肥施用により概ね増加した。第7作以降、窒素減肥を行った場合も、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥ともに標準量区と1.5倍量区では窒素吸収量

表5 家畜ふん堆肥連用畑におけるリン収支

試験区	作期	作物	投入量 $\text{kg-K ha}^{-1} \text{y}^{-1}$			吸収量 $\text{kg-K ha}^{-1} \text{y}^{-1}$		余剰量 $\text{kg-K ha}^{-1} \text{y}^{-1}$
			化学肥料	堆肥	合計	収穫物	残渣	
牛ふん堆肥半量区	第1-6作	キャベツ	249	235	691	160	169	496
		スイートコーン	208			35	73	
	第7-8作	キャベツ	125	261	489	192	192	257
		スイートコーン	104			39	100	
	第9-10作	キャベツ	125	219	551	122	143	399
		スイートコーン	208			31	66	
牛ふん堆肥標準量区	第1-6作	キャベツ	249	469	926	159	171	730
		スイートコーン	208			37	83	
	第7-8作	キャベツ	0	521	521	184	176	290
		スイートコーン	0			47	125	
	第9-10作	キャベツ	0	437	541	125	145	379
		スイートコーン	104			37	81	
牛ふん堆肥1.5倍量区	第1-6作	キャベツ	249	704	1161	153	180	970
		スイートコーン	208			37	91	
	第7-8作	キャベツ	0	782	782	168	189	568
		スイートコーン	0			46	132	
	第9-10作	キャベツ	0	656	760	138	159	580
		スイートコーン	104			42	120	
豚ふん堆肥半量区	第1-6作	キャベツ	249	125	581	158	167	385
		スイートコーン	208			38	91	
	第7-8作	キャベツ	125	127	459	199	193	213
		スイートコーン	208			47	129	
	第9-10作	キャベツ	125	115	447	127	144	287
		スイートコーン	208			34	79	
豚ふん堆肥標準量区	第1-6作	キャベツ	249	250	706	152	176	511
		スイートコーン	208			43	103	
	第7-8作	キャベツ	0	253	461	169	193	242
		スイートコーン	208			50	155	
	第9-10作	キャベツ	0	230	438	162	140	239
		スイートコーン	208			37	98	
豚ふん堆肥1.5倍量区	第1-6作	キャベツ	249	375	831	162	185	625
		スイートコーン	208			45	120	
	第7-8作	キャベツ	0	380	483	195	194	240
		スイートコーン	104			48	166	
	第9-10作	キャベツ	0	345	553	149	159	355
		スイートコーン	208			49	112	
堆肥無施用区	第1-6作	キャベツ	249	0	457	135	158	290
		スイートコーン	208			32	65	
	第7-8作	キャベツ	249	0	457	177	192	239
		スイートコーン	208			40	90	
	第9-10作	キャベツ	249	0	457	140	140	302
		スイートコーン	208			53	53	

注) 第1-6作の値は、3年間の平均値。

表6 家畜ふん堆肥連用畑におけるキャベツとスイートコーンの収量指数の推移

試験区	第1作	第2作	第3作	第4作	第5作	第6作	第7作	第8作	第9作	第10作	
	キャベツ	スイートコーン	キャベツ	スイートコーン	キャベツ	スイートコーン	キャベツ	スイートコーン	キャベツ	スイートコーン	
牛ふん堆肥	半量区	113	99	109	111	109	98	105	101	101	108
	標準量区	112	104	114	114	119	101	105	115	113	121
	1.5倍量区	108	105	110	118	112	104	105	109	115	134
豚ふん堆肥	半量区	111	112	114	122	123	104	121	116	104	113
	標準量区	122	109	109	131	123	114	112	121	130	132
	1.5倍量区	118	111	114	136	128	126	119	124	119	153
堆肥無施用区	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	(37.3)	(14.2)	(52.5)	(9.2)	(44.5)	(14.5)	(57.1)	(15.2)	(48.2)	(10.5)	

注) 堆肥無施用区の括弧内の数値は収量 (Mg ha^{-1})。

は堆肥無施用区より多くなった。

余剰窒素量は、堆肥無施用区では平均で329kg-N ha⁻¹ y⁻¹であったのに対して、窒素減肥を行わない場合、牛ふん堆肥では、半量区、標準量区、1.5倍量区で、それぞれ、467、597、756kg-N ha⁻¹ y⁻¹、豚ふん堆肥では、同じく、525、658、817kg-N ha⁻¹ y⁻¹と多かったが、減肥開始2年目（第9、10作）には、同じく、牛ふん堆肥で412、424、525kg-N ha⁻¹ y⁻¹、豚ふん堆肥で425、477、587kg-N ha⁻¹ y⁻¹と大きく減少した。

(2) リン収支

表4に、リンについての年間の堆肥による投入量、化学肥料施肥量および野菜の収穫物および残渣への吸収量をまとめた。

堆肥の標準量施用で、牛ふん堆肥：80kg-P ha⁻¹、豚ふん堆肥：300kg-P ha⁻¹程度が土壤に投入された。家畜ふん堆肥中のリンの多くは可給態であり⁷⁾、化学肥料と同等の肥効を示すと見なせる。愛知県の施肥基準におけるリン施肥量は、キャベツで65kg-P ha⁻¹、スイートコーンで44kg-P ha⁻¹であるので、牛ふん堆肥ではキャベツ作に対しては十分であるが年2作分には不足する。豚ふん堆肥では、標準量区では2作分に対しても明らかに過剰である。このため、第7作目以降のリンの施肥については、牛ふん堆肥の場合、堆肥施用後のキャベツ作では、標準量区、1.5倍量区では無施肥とし、半量区では50%減肥とした。スイートコーン作では、標準量区、1.5倍量区、半量区ともに、第8作で堆肥無施用区の50%減肥とし、第10作では減肥を行わなかった。豚ふん堆肥では、標準量区、1.5倍量区では、キャベツ、スイートコーンともにリンの施肥は行わず、半量区では7作目のキャベツと第10作のスイートコーンで50%減肥とした。

その結果、リン吸収量は、いずれの堆肥施用区も、減肥を行った第7作以降も、窒素吸収量と同様に堆肥無施用区より多くなる傾向が認められ、特に豚ふん堆肥区でその傾向は顕著であった。

余剰リン量は、堆肥無施用区では平均で74kg-P ha⁻¹ y⁻¹であったのに対して、リン酸肥料の減肥を行わない場合、牛ふん堆肥では、半量区、標準量区、1.5倍量区で、それぞれ、101、136、175kg-P ha⁻¹ y⁻¹、豚ふん堆肥では、同じく、207、354、500kg-P ha⁻¹ y⁻¹であったが、減肥開始2年目（第9、10作）には、同様に、牛ふん堆肥84、76、107kg-P ha⁻¹ y⁻¹、豚ふん堆肥で145、265、412kg-P ha⁻¹ y⁻¹まで減少した。

(3) カリウム収支

表5に、カリウムについての年間の堆肥による投入量、化学肥料施肥量および野菜の収穫物および残渣への吸収量をまとめた。

牛ふん堆肥、豚ふん堆肥の標準量施用で、それぞれ500kg-K ha⁻¹、250kg-K ha⁻¹程度が土壤に投入される。家畜ふん堆肥中のカリウムの大部分がク溶性（そのうちの多くは水溶性）であり⁸⁾、肥効は化学肥料と同等と見なせる。愛知県の施肥基準におけるカリウム施肥量は、キャベツで249kg-K ha⁻¹、スイートコーンで208

kg-K ha⁻¹であるので、牛ふん堆肥標準量区では年2作分に相当する量を一度に供給することになり、豚ふん堆肥標準量区ではキャベツ1作分に見合う量がもたらされる。

このため、第7作目以降については、カリウムは、牛ふん堆肥の標準量区、1.5倍量区では、堆肥施用後のキャベツ作で無施肥とし、半量区では、50%減肥とした。スイートコーン作の標準量区、1.5倍量区については、第8作では無施肥とし、第10作では50%減肥とした。半量区では、第8作のみ50%減肥とした。豚ふん堆肥の標準量区、1.5倍量区では、キャベツ作で無施肥とし、さらに1.5倍量区では第8作のスイートコーンでも50%減肥とした。半量区では、7作目以降のキャベツ作で50%減肥とした。

カリウムの吸収量は、カリウム減肥を行わない場合、すべての堆肥施用区で堆肥無施用区より顕著に多くなったが、カリウム減肥を行った2年目には、牛ふん堆肥区の標準量区と半量区、および豚ふん堆肥半量区では、堆肥無施用区とほぼ同等量となった。

余剰カリウム量は、堆肥無施用区では平均で282kg-K ha⁻¹ y⁻¹であったのに対して、カリウム肥料減肥を行わない場合、牛ふん堆肥では、半量区、標準量区、1.5倍量区で、それぞれ、496、730、970kg-K ha⁻¹ y⁻¹、豚ふん堆肥では、同じく、385、511、625kg-K ha⁻¹ y⁻¹と多かったが、減肥開始2年目（第9、10作）には、同様に、牛ふん堆肥399、379、580kg-N ha⁻¹ y⁻¹、豚ふん堆肥で287、239、355kg-K ha⁻¹ y⁻¹まで減少した。

3 土壤の化学性

(1) pH

pHは試験開始時にすべての反復で6.2～6.5の範囲にあり、各区の平均値はすべて6.4であった。10作経過時点のpHは、堆肥無施用区の5.9に対して、牛ふん堆肥区では、半量区、標準量区、1.5倍量区で、それぞれ、6.0、6.3、6.4、豚ふん堆肥区では同じく、6.1、6.4、6.6であり、堆肥施用量に応じて堆肥無施用区より高めで推移した（データ省略）。

(2) CEC

CECは、試験開始時には14～15cmol_c kg⁻¹であったが、1作終了時にいったん各区とも2～4cmol_c kg⁻¹低下した後、堆肥無施用区では10作終了時点で13.8cmol_c kg⁻¹と当初の水準に戻った。堆肥施用によってCECは高まった。10作経過時点のCECは、牛ふん堆肥区では、半量区、標準量区、1.5倍量区で、それぞれ、14.2、16.4、17.7cmol_c kg⁻¹であり、豚ふん堆肥区では同じく、14.3、14.9、15.9cmol_c kg⁻¹であった（データ省略）。

(3) 窒素肥沃度

作土のTC、TN、可給態窒素含量の推移を図1に示した。堆肥無施用区では、炭素、窒素含量ともに減少する傾向が明らかであったが、堆肥施用によってその減少傾向は抑制された。試験開始時にTC含量は22～25g-C kg⁻¹、TN含量は1.9～2.2g-N kg⁻¹であったが、堆肥連用に伴い、牛ふん堆肥標準量区、1.5倍量区で増加傾向

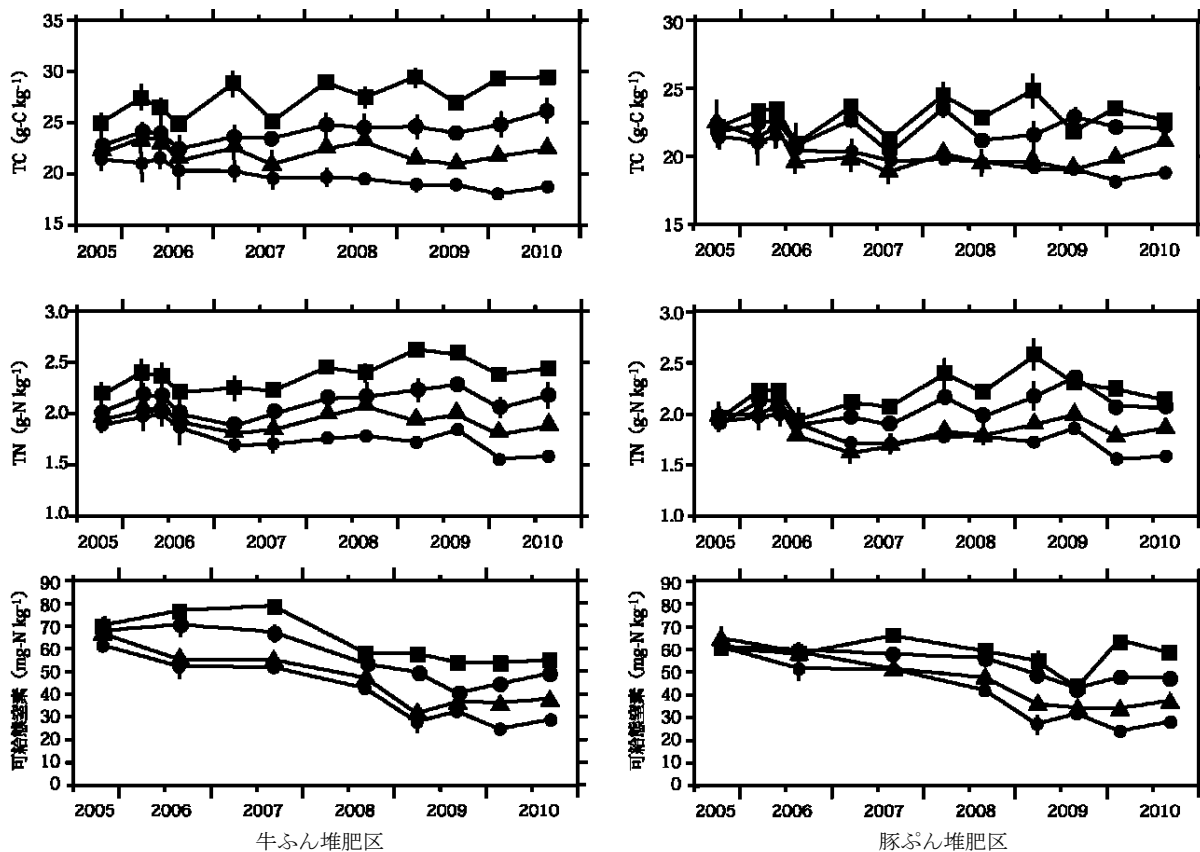


図1 家畜ふん堆肥連用畑における作土のTC、TN、可給態窒素含量の推移
 凡例 ○：標準量区、△：半量区、□：1.5倍量区、●：堆肥無施用区。エラーバーは標準偏差。

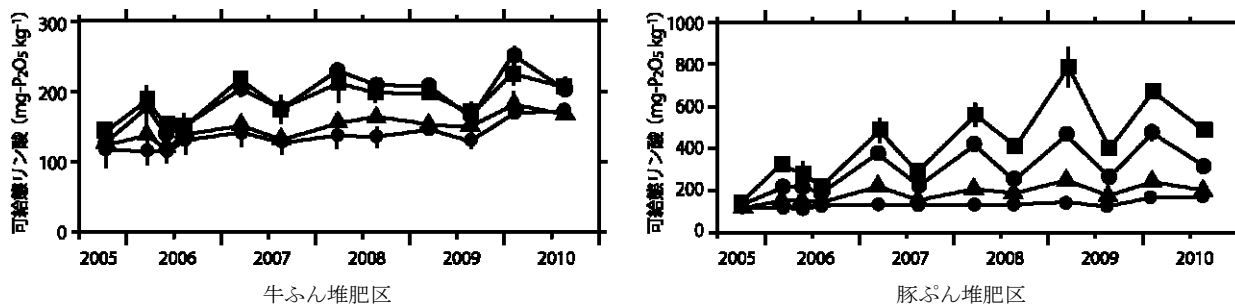


図2 家畜ふん堆肥連用畑における作土の可給態リン酸含量の推移
 凡例 ○：標準量区、△：半量区、□：1.5倍量区、●：堆肥無施用区。エラーバーは標準偏差。

が認められ、牛ふん堆肥半量区、豚ふん堆肥標準量区、1.5倍量区で当初の水準が維持されたが、豚ふん堆肥半量区では、その効果は小さかった。可給態窒素は、堆肥無施用区では試験開始時の61mg-N kg⁻¹から、10作を経過した時点で28mg-N kg⁻¹に低下したが、堆肥施用によりその低下傾向は抑制された。10作経過時点の可給態窒素含量は、牛ふん堆肥の半量区、標準量区、1.5倍量区で、それぞれ、38、49、55mg-N kg⁻¹、豚ふん堆肥では同じく、37、48、59mg-N kg⁻¹であった。

(4) 可給態リン酸

図2に作土の可給態リン酸含量の推移を示した。試験開始時の作土の可給態リン酸含量は、平均で129mg-P₂O₅ kg⁻¹と低かったが、堆肥無施用区では、5年間で

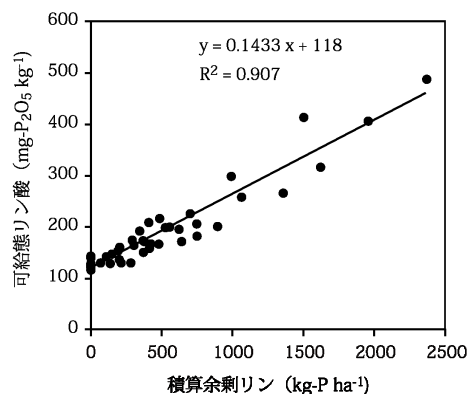


図3 積算余剰リン量と可給態リン酸含量の関係

174mg-P₂O₅ kg⁻¹まで上昇した。堆肥施用区の可給態リン酸含量は、投入リン量に応じて高まった。リン含量の高い豚ふん堆肥の標準量区では化学肥料減肥を行わなかった3年間で250mg-P₂O₅ kg⁻¹、1.5倍量区では400 mg-P₂O₅ kg⁻¹まで増加し、その後、化学肥料の施肥を中止しても漸増する傾向が維持された。豚ふん堆肥半量区の可給態リン酸は、3年間は増加傾向が見られたが、リン酸減肥を開始した第6作以降は増加が止まった。牛ふん堆肥区の可給態リン酸は、試験開始3年後までは増加傾向であったが、リン酸減肥を行った4年目の第8作スイートコーン作後にはやや減少し、減肥量を少なくした5年目には、再び増加に転じた。

図3に余剰リン量と可給態リン酸含量の関係を示す。

堆肥の種類、年間施用量にかかわらず、余剰リン量に対して一定の割合で可給態リン酸も増加した。

(5) 交換性カリウム

図4に作土の交換性カリウム含量の推移を示した。試験開始時の作土の交換性カリウム含量は、平均で1 cmol_c kg⁻¹程度であった。堆肥無施用区では、5年間で大きな変化はなく、堆肥施用区では投入カリウム量に応じた変化がみられた。すなわち、カリウム減肥を行わなかった3年間は、いずれの堆肥施用区でも交換性カリウム含量は増加した。特にカリウム含量の高い牛ふん堆肥では、標準量区では化学肥料減肥を行わなかった3年間で1.5 cmol_c kg⁻¹、1.5倍量区では2 cmol_c kg⁻¹と顕著に増加した。4年目からカリウム肥料の減

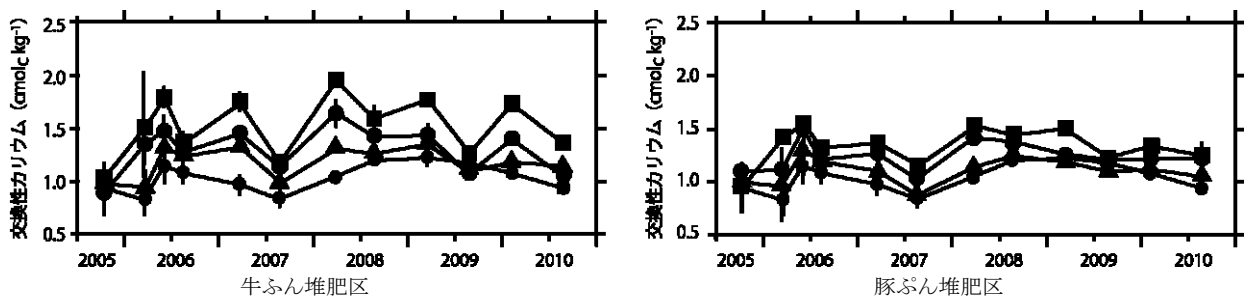


図4 家畜ふん堆肥連用畑における作土の交換性カリウム含量の推移

凡例 ○：標準量区、△：半量区、□：1.5倍量区、●：堆肥無施用区。エラーバーは標準偏差。

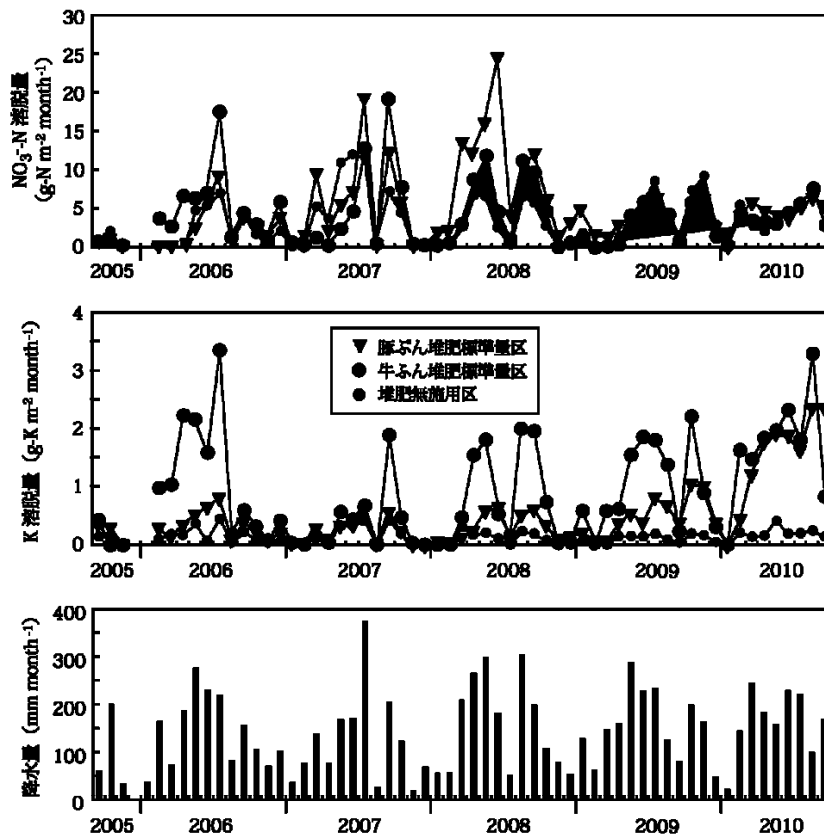


図5 家畜ふん堆肥連用畑における地下1mへのNO₃⁻-Nとカリウムの溶脱

注) 採水に用いたキャピラリーライシメータは、面積0.18m²(30×60cm)、壁高60cmで、採水面を深さ1mに設置した。原則として積算降水量100mm以内で回収した。降水量は試験は場横で雨量計により調査した。

肥を開始すると、全区とも交換性カリウム含量の増加傾向は止まった。

4 窒素溶脱量

牛ふん堆肥、豚ふん堆肥の両標準量区および堆肥無施用区の月別窒素溶脱量の推移を図5に示す。窒素減肥を行わなかった試験開始後3年間は、両堆肥区では、夏季に大量のNO₃-Nが地下1mへ溶脱したが、窒素減肥を開始した2008年9月以降（4年目以降）は、両堆肥区とも、夏季に堆肥無施用区と比べて溶脱量が多くなる現象が認められなくなった。その結果、減肥を行わなかった3年目には、年間のNO₃-N溶脱量は、堆肥無施用区で39.1g-N m⁻² y⁻¹、牛ふん堆肥区で69.2g-N m⁻² y⁻¹、豚ふん堆肥区で103.8g-N m⁻² y⁻¹であったが、減肥を行った4-5年目には、同じく、44.5g-N m⁻² y⁻¹、40.5g-N m⁻² y⁻¹、47.6g-N m⁻² y⁻¹と、堆肥施用区で大幅に減少した。

余剰窒素量と窒素溶脱量の関係は、図6のとおりで、いずれの区も、余剰窒素量の増加に強く比例して窒素溶脱量が増加する傾向が認められた。

5 カリウム溶脱量

月別に集計したカリウム溶脱量の推移を図5に示す。牛ふん堆肥標準量区では、キャピラリーライシメータ設置時の攪乱の影響と思われる初期の溶脱があるものの、カリウムの溶脱は、牛ふん堆肥標準量区で3年目から、豚ふん堆肥標準量区で4年目から増加しはじめた。余剰カリウム量と地下1mへの溶脱カリウム量の関係は、図7のとおりで、両堆肥区では、積算余剰カリウム量が約1500kg-K ha⁻¹以上になると溶脱カリウム量は急激に増加した。

考 察

1 家畜ふん堆肥による土壌窒素肥沃度の維持

本研究では、堆肥無施用区を比較対象として、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥の標準量と半量、1.5倍量施用の区を設けて両家畜ふん堆肥連用条件における養分動態を評価した。

畑土壌では有機物の分解が速く、適度な有機物施用を行わないと、土壌のTC、TN、可給態窒素が減少する⁹⁾。このことは、生産性に関わる土壌窒素肥沃度の低下をもたらすと同時に、土壌炭素貯留量の減少による地球温暖化への寄与の増大を意味する。家畜ふん堆肥施用の効果は、これら両方の観点から検討が必要である。

作土の土壌窒素肥沃度に関連するTC含量、TN含量、可給態窒素含量の推移をみると、堆肥無施用区では漸減傾向があるが、すべての堆肥施用区でそれらの減少を抑える効果が認められる（図1）。特に、牛ふん堆肥の標準量区、1.5倍量区では、連用5年間で、TC、TN含量は高まった。可給態窒素に関しては、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥ともに、標準量施用では、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥ともに堆肥無施用区より20mg-N kg⁻¹程度、1.5倍量区では30mg-N kg⁻¹程度大きくなる効果が認められたが、半量区では、いずれの堆肥も可給態窒素の堆肥無施用区に対する増加量は10mg-N kg⁻¹以下とわずかであった。

今川ら¹⁰⁾によれば、稲わら堆肥20~80Mg-DW ha⁻¹ y⁻¹を施用した場合、作土のTC含量は、施用量に応じて増加し、一方、堆肥無施用区では試験当初と同等の水準で推移した。本研究では、この結果と異なり、堆肥無施用区のTC含量には明らかな減少傾向が認められる。

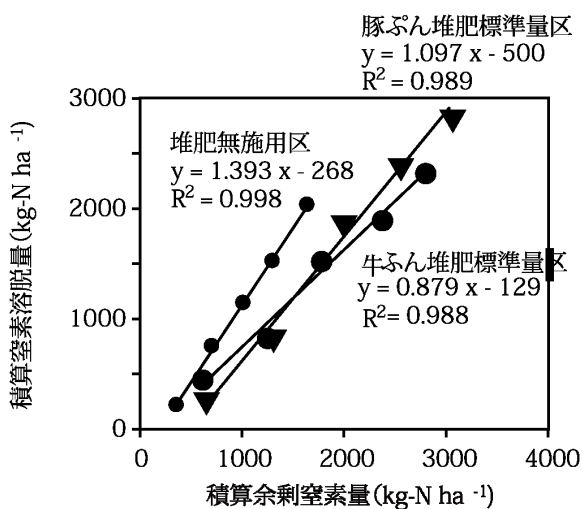


図6 積算余剰窒素量と積算溶脱窒素量の関係

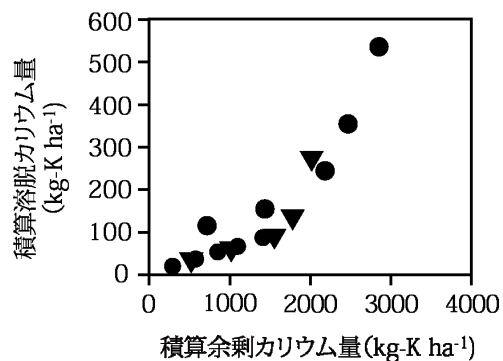


図7 積算余剰カリウム量と積算溶脱カリウム量の関係

凡例 ○：牛ふん堆肥標準量区、▽：豚ふん堆肥標準量区、●：堆肥無施用区

このことは、試験開始時のTC含量が今川らの 10g-C kg^{-1} と比べて、本研究では $22\sim 25\text{g-C kg}^{-1}$ と高かったことによると考えられる。すなわち、果樹園として23年間利用され、その後3年間の裸地期間中に数回のトラクタによる雑草のすき込みが行われた本試験ほ場では、試験開始時において、すでに今川らの試験ほ場より炭素蓄積が進んだ状態にあり、試験開始後、TC含量と同時にTN、可給態窒素含量も減少していることから、分解性に富む有機物がより多かったためと考えられる。すなわち、このような分解性に富む有機物は、可給態窒素を多く含有し、土壌窒素肥沃度の維持に重要な役割を果たしていると考えられる（それゆえ、愛知県の土壌診断基準⁴⁾でもTC含量に関して $17\sim 29\text{g-C kg}^{-1}$ を改良目標としている）。本研究において、堆肥無施用区のTC含量は減少を続け、5年後には 20g-C kg^{-1} を下回った。土壌炭素貯留量を維持、あるいは増大させ、土壌窒素肥沃度を適正水準で維持する観点からは、愛知県の施肥基準で示される牛ふん堆肥 $15\text{Mg-DW ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ 、豚ふん堆肥 $10\text{Mg-DW ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ が適当であると考えられた。特に牛ふん堆肥の標準量以上の施用は、土壌炭素貯留量増大に効果的であると考えられる。

2 窒素収支

1年間の窒素供給量（余剰窒素量と投入窒素量の合計）とキャベツ、スイートコーンの窒素吸収量の関係を図8に示した。この図のように、窒素供給を増加させると、野菜の窒素吸収量も増加するが、その増加割合はわずか8%に過ぎない。窒素吸収量のうち4割程度が残渣として土壌にすき込まれることを考慮すると、窒素供給増加分の大部分が余剰窒素分に回ることになる。したがって、余剰窒素量を減らし、窒素溶脱を抑えるためには、生産性を維持出来る範囲で供給量を可能な限り減らすことが重要である。本研究では、そうした観点から、堆肥施用区で化学肥料減肥を行った結果、余剰窒素量を大幅に減らし、窒素溶脱量も堆肥無施用区なみに低減できた。堆肥区の余剰窒素量は、依然として堆肥無施用区より多いが、図2のように、土壌への蓄積が生ずるために溶脱する窒素量はその分減少すると考えられる。したがって、余剰窒素量と溶脱量の関係をみた図7では、堆肥区における回帰式の傾きは、堆肥無施用区より小さくなっている。なお、堆肥無施用区で回帰式の傾きが1以上、すなわち、余剰窒素量以上に溶脱が起きているのは、図1のとおり、TN含量が減少、すなわち土壌由来窒素が無機化して溶脱したことによる。その年間の量は、図1の回帰式の傾き $(-0.64\text{g-N kg}^{-1}\text{ y}^{-1})$ 、 $p < 0.01$ から、作土深 20cm 、仮比重 1.2 として計算すると $15\text{g-N m}^{-2}\text{ y}^{-1}$ と推定され、この値は、平均溶脱窒素量 $(46\text{g-N m}^{-2}\text{ y}^{-1})$ と余剰窒素量 $(32\text{g-N m}^{-2}\text{ y}^{-1})$ の差にほぼ一致する。

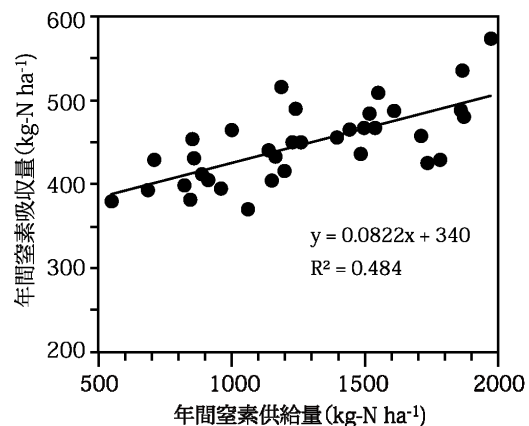


図8 窒素供給量と窒素吸収量の関係

注) 年間窒素供給量は窒素施用量と前作の余剰窒素量の合計、窒素吸収量はキャベツとスイートコーンの吸収量の合計とした。

3 家畜ふん堆肥施用条件での化学肥料減肥

(1) 窒素

収量性に関しては、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥ともいずれの施用量区も、連用に伴って増収効果が高くなり、第7作以降減肥を行っても、特に夏作のスイートコーンでその効果は顕著であった。

本研究では、牛ふん堆肥、豚ふん堆肥、いずれも標準量施用でそれぞれ 300kg-N ha^{-1} 、 350kg-N ha^{-1} 程度が堆肥により土壌に投入されたが、そのすべてが施用年に有効化されるわけではない。土壌中の窒素含量は、堆肥施用によって減少が抑えられ、堆肥無施用区と比べて蓄積している傾向が認められる。これら土壌蓄積分も含めた堆肥由来窒素の有効化率は、化学肥料の窒素の有効化率を100%と仮定して、以下のように概算した。

堆肥由来窒素有効化率 = 堆肥区の堆肥由来窒素有効化量/堆肥による窒素投入量

ただし、

堆肥区の堆肥由来窒素有効化量 = 収穫物による持ち出し窒素量 + 溶脱窒素量 - 化学肥料施用量 - 堆肥無施用区の土壌由来窒素有効化量

堆肥無施用区の土壌由来窒素有効化量 = 収穫物による持ち出し窒素量 + 溶脱窒素量 - 化学肥料施用量

5年間合計の堆肥由来窒素の有効化率は、牛ふん堆肥標準量区で43%、豚ふん堆肥標準量区で58%と概算されることから、5年間の連用では、堆肥中窒素の半分程度が肥効として期待できる。また、牛ふん堆肥より豚ふん堆肥の方がやや肥効を高く見積もれる。これら家畜ふん堆肥の窒素肥効が、主として土壌窒素肥沃度の維持、向上を通じたものであるとすれば（図1）、地

温の上昇する夏季にその効果がより大きく現れると考えられる。実際に、本研究では、堆肥連用5年目には、牛ふん堆肥標準量区で、キャベツ 30kg-N ha^{-1} （施肥基準の10%）、スイートコーン 100kg-N ha^{-1} （同40%）、豚ふん堆肥標準量区でキャベツ 50kg-N ha^{-1} （同17%）、スイートコーン 110kg-N ha^{-1} （同44%）の減肥が可能となり、堆肥施用直後の冬作より翌年の夏作での効果が高かった。

第7作目以降、堆肥施用に合わせて窒素減肥を行った結果、溶脱窒素量が堆肥無施用区と同等まで低減したとは言え、余剰窒素量は、牛ふん堆肥標準量区では堆肥無施用区と比べて $100\text{kg-N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 以上、豚ふん堆肥標準量区では同じく $150\text{kg-N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 以上多く発生しているため、さらに窒素施肥量を削減することが望ましい。1.5倍量区ではそれぞれ、標準量区よりさらに $100\text{kg-N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 以上多く余剰窒素が発生しており、本研究における減肥程度では窒素の溶脱による地下水、河川等水質の窒素高濃度化が懸念される。一方で、堆肥連用5年経過時点で、堆肥区では、堆肥由来窒素利用率がまだ上昇傾向にあり（表2）、堆肥無施用区以上の収量も維持されていることから（表6）、一層の窒素収支改善の可能性はあると考えられる。家畜ふん堆肥連用ほ場における窒素減肥の程度は、今後、さらに連用を継続した条件における堆肥由来窒素の動態の調査解析により決定されるべきである。

(2) リン

リンについては、試験ほ場の可給態リン酸含量が低く、このことが、キャベツ、スイートコーンの収量性に関与した可能性も否定できないが、植物体のリン含量は、必ずしも堆肥無施用区で低くはない。また、窒素、カリウムと同様に乾物生産が大きくなるに連れて、吸収量も増加していることから、堆肥全体の効果として乾物生産の増大に伴ってリンも多く吸収された可能性もある。したがって、堆肥施用の効果のうち、リン供給の効果がどの程度であるかは判然としない。この点に関しては、今後の詳細な検討が必要である。

土壤に蓄積したリンは、降雨時に懸濁態リンとして表面流出することにより河川・海域へのリン供給源となる点でも¹¹⁾、過剰な蓄積を避けることが望ましい。堆肥無施用区の施肥リンの利用効率は、キャベツで48%、スイートコーンで28%程度と低く、堆肥を施用しなくても、土壤へのリンの蓄積が進む（図2、3）。堆肥施用条件では、さらに、堆肥から十分量のリンが供給される。その大部分は可給態である⁷⁾ことから、化学肥料代替率を100%とみなせる。本研究において豚ふん堆肥標準量ではリン酸が 300kg-P 含まれるので、キャベツ、スイートコーンともにリン酸肥料無施肥、牛ふん堆肥標準量（同じく 80kg-P を含む）では、施用直後のキャベツのみ無施肥とする方法で減肥したところ、土壤の可給態リン酸を減少させることなく、堆肥無施

用区と比べて十分な供給が可能で収量も確保できたと考えられた。したがって、堆肥に含まれるリンが十分にある場合には、リン酸肥料は無施肥とすることが妥当である。

(3) カリウム

カリウムは、標準量の施用では牛ふん堆肥で 500kg-K ha^{-1} 、豚ふん堆肥で 250kg-K ha^{-1} 程度が土壤に投入される。したがって、両堆肥とも、施用後の作でカリウム無施肥が可能である。牛ふん堆肥標準量にはほぼ2作分に必要なカリウムが含まれるが、カリウム肥料を無施肥とした第7、8作において、土壤中の交換性カリウム含量の低下がみられる（図4）。また、牛ふん堆肥標準量区、豚ふん堆肥標準量区で、それぞれ、3、4年目からカリウム溶脱量が増し（図5）、積算余剰カリウム量が約 1500kg-K ha^{-1} に達すると溶脱量が急激に増加した（図7）。以上のことから考えて、堆肥施用によってCECが高まりいったんは土壤に吸着保持される量も増えるものの、それを上回る量のカリウムがイオン交換の過程を経て徐々に下方に溶脱していることを示唆している。実際、牛ふん堆肥標準量区における交換性カリウムの垂直分布は、試験開始時には深さ0-20、20-40、40-60cmで、それぞれ、0.82、0.53、0.45 $\text{cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ であったのが、4作終了時点では、同じく1.2、1.4、1.1 $\text{cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ と、深さ60cmまで濃度が高まっており、カリウムが作土に留まらずに深さ60cmまで移行している状況が認められた。したがって、堆肥施用後2作目をカリウム無施肥とすると作土からのカリウム供給が不足する可能性がある。カリウムを多く含む牛ふん堆肥においても、施用後2作目にはカリウムの減肥は50%程度に抑えることが妥当と考えられる。

以上のように、本研究では、堆肥施用畑ではリン酸肥料とカリウム肥料の大幅な削減が可能であり、窒素に関しても、夏作を中心として、堆肥中窒素の有効化、作物の利用率を考慮した化学肥料減肥が、生産性を維持しつつ、余剰窒素量、溶脱窒素量の減少に有効であることが明らかになった。

引用文献

1. 三河湾研究会. 三河湾. 八千代出版. 東京. p.1-312 (1997)
2. 愛知県. 化学的酸素要求量、窒素含有量及びリン含有量に係る総量削減計画(2007). http://www.pref.aichi.jp/kankyo/mizu-ka/mizu/soryo/6_keikaku.pdf
3. 愛知県農業総合試験場経営環境部環境化学研究室. 土壤環境基礎調査(定点調査)成績書(東三河地域-IV). p.120(1999)
4. 愛知県農林水産部農業経営課. 農作物の施肥基準. p.1-117(2011)
5. 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)
6. 土壤標準分析・測定法委員会編. 土壤標準分析・測定法. 博友社. 東京. p. 1-354(1986)
 7. 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. 新潟畜産研報. 15, 6-9(2005)
 8. 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. 土肥誌. 75, 91-93(2004)
 9. 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. 愛知農総試研報. 42, 141-146(2010)
 10. 今川正弘, 河合伸二, 木下忠孝, 真弓洋一, 大嶋秀雄. 鉬質畑土壌における炭素の蓄積とその効果. 愛知農総試研報. 21, 281-288(1989)
 11. 糟谷真宏, 坂西研二, 板橋直, 荻野和明, 廣戸誠一郎. 畜産を伴う赤黄色土野菜畑地帯の河川における窒素、リンの流出. 土肥誌. 81, 481-488(2010)