

## 牛ふん堆肥を3年一括施用した露地畑における野菜の収量と養分動態

辻 正樹<sup>1)</sup>・山本 拓<sup>1)</sup>・糟谷真宏<sup>2)</sup>・鈴木良地<sup>2)</sup>・竹内将充<sup>1)</sup>

**摘要**：牛ふん堆肥を毎年15 Mg-DW ha<sup>-1</sup>施用して減肥した場合と、3年に1回3年分(45 Mg-DW ha<sup>-1</sup>)を一括施用して減肥した場合の冬作キャベツおよび夏作スイートコーンの収量と養分動態について比較検討した。3年一括区の野菜の収量は、堆肥無施用区に比べて同等以上であったが、堆肥連用区に比べると堆肥を施用しない年の夏作で収量がやや少なかった。3年一括区のT-C、T-N、可給態窒素、交換性カリウムは、3年のサイクルで増減を繰り返した。3年一括区では、堆肥施用年に大量の余剰窒素が生じたが、溶脱窒素量が大幅に増加することはなかった。そのため、堆肥を3年に一回施用する場合でも、減肥を行うことで、野菜の収量を維持しつつ、環境負荷を抑制できることが明らかになった。3年一括区の土壌中の可給態リン酸含量は、堆肥無施用区より多く、また、堆肥無施用区よりリン酸吸収量が多かったことから、作物に対するリンの供給に不足はなかったと考えられる。3年一括区の土壌中の交換性カリウム含量は、堆肥施用年に顕著に増加したが、施用2年目以降は含量が急速に減少した。作土から溶脱したカリウムは、継続的に下層土へ移行および流亡したと考えられた。

**キーワード**：牛ふん堆肥、3年一括施用、施肥量削減、露地野菜、養分動態

## Yield and Nutrient Dynamics of Vegetables in an Open Field Treated with a Three-year Dose of Cattle Manure Compost

TSUJI Masaki, YAMAMOTO Taku, KASUYA Masahiro,  
SUZUKI Ryoji and TAKEUCHI Masamitsu

**Abstract** : The yield and nutrient dynamics of vegetables were comparatively evaluated between vegetables cultivated in a field to which cattle manure compost was applied every year and vegetables cultivated in a field to which a three-year collective dose of compost was applied only once. The yield of vegetables in the field with this three-year collective application of compost was equal to or higher than that in fields to which compost was not applied, although it was slightly lower than that in fields to which compost was applied every year in the summer crop. Total carbon, total nitrogen, available nitrogen and exchangeable potassium in the field with the three-year collective application initially increased followed by a decrease; this cycle continued in over the 3 years. In the three-year collective application field, considerable surplus nitrogen was observed in the first year when compost was applied, although the amount of leaching nitrogen did not substantially increase. Therefore, if a three-year collective dose of compost is applied, with subsequent reduction in fertilizer application, it is possible to reduce environmental impact maintaining vegetable yield. The available phosphorus acid content in the soil and the phosphorus uptake by crops in the three-year collective application field were higher than that in the field with no compost application. Therefore, we determined that there was no shortage phosphorus supply. Exchangeable potassium content in the soil of the three-year collective application field was significantly higher in the compost application year, although it rapidly decreased after the second year. Potassium is thought to have leached from the surface soil and migrated to the underlying layers and the leaching continued.

**Key Words** : Cattle manure compost, Three-year collective application, Reducing fertilizer, Open field vegetable, Nutrient dynamics

## 緒言

愛知県の畑地帯の代表的土壌である黄色土は、一般に有機物含量が乏しく、重粘で窒素やリンの肥効に乏しい。愛知県は畜産業も盛んであるが、家畜ふんには肥料成分も多く含まれているため、これを堆肥化して利用することは、地域内の資源リサイクルの観点からも効果大きい。しかし、堆肥を投入したほ場に通常量の化学肥料が施用されると、投入量過多により窒素やリンの余剰量が増加するため、環境への負荷が増大し、水質悪化や温室効果ガス排出増など環境の悪化をもたらすおそれがある。そのため、愛知県では堆肥の連用効果を考慮して化学肥料の施肥量を削減できる技術の開発を進めてきた。

糟谷ら<sup>1)</sup>は、牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用した黄色土野菜畑において野菜の収量および養分動態を継続的に調査し、堆肥由来窒素利用率に基づいて窒素減肥を行うことで野菜の収量を維持しつつ、溶脱窒素量を堆肥無施用と同等程度に低減できることを明らかにした。

一方、本県の有機質資材施用基準<sup>2)</sup>では、標準的な資材の連年施用条件における資材毎の年間施用量の上限を定めると同時に、「牛ふん堆肥、パーク堆肥など肥効の緩やかな資材を2~3年に1回施用する場合は、3年分を限度として、1回に施用基準×施用間隔(年)まで施用可能」としている。現地の露地野菜畑においても、省力の観点から堆肥を毎年施用せず、2~3年に1回、一括して散布する場合は見られる。牛ふん堆肥は、他の畜種の堆肥に比べて有機物含量が多く、C/N比が比較的高いため、肥効が緩やかで、土壌への養分蓄積も進みやすいと考えられる。そのため、2~3年に1回、一括して施用する場合でも、残存する堆肥からの肥効発現が施用翌年以降も期待される。

家畜ふん堆肥の連用による土壌肥沃度や作物収量への効果については、多くの研究成果<sup>3-5)</sup>がある。数年分の堆肥を一括施用する体系については、Nakamaru et al.<sup>6)</sup>が、3年間に1回、30 Mg ha<sup>-1</sup>の牛ふん堆肥を施用する野菜畑では、リンとカリウムを無施肥としても、野菜の収量への影響はほとんど認められなかったと報告している。

しかし、堆肥の連用に対する2~3年一括施用の土壌肥沃度および肥効に及ぼす影響について、十分には明らかにされてはおらず、本県に広く分布する黄色土での研究成果は見当たらない。

そこで、本報告では牛ふん堆肥を連用するほ場と3年に1回、一括して施用するほ場において施肥量削減を進めた畑での野菜の収量と養分動態および環境への影響について比較検討した。

## 材料及び方法

### 1 試験ほ場

試験は、糟谷ら<sup>1)</sup>と同じ愛知県豊橋市飯村町(東三河農業研究所)の細粒質台地黄色土のほ場で実施した。このほ場は、1979年から2002年までブドウを栽培した後、2005年までは裸地として管理されていた。裸地期間中はトラクタによる雑草すき込みのみを行い、2005年9月より野菜畑として試験を開始した。

### 2 栽培体系

2005年から、毎年8月下旬に牛ふん堆肥を施用し(2005年のみ9月中旬)、その後、冬作のキャベツ(「YR冬さかり」:トヨタネ株式会社)、夏作のスイートコーン(「味来390」:パイオニアエコサイエンス)の年2作体系で栽培した。キャベツは9月上旬から中旬に定植し、1月または2月に収穫した。スイートコーンは5月中旬に定植し、7月中旬または下旬に収穫した。キャベツは結球部のみを、スイートコーンは雌穂のみを収穫し、その他の部位は残渣としてすき込んだ。定植時の畝間は60 cmとし、株間はキャベツでは33 cm、スイートコーンは35 cmとした。

### 3 試験区

試験区は、牛ふん堆肥 15 Mg-DW ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>(愛知県の有機物資材施用基準量)を毎年施用する区(以下、堆肥連用区)と、牛ふん堆肥 45 Mg-DW ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>を3年に1回施用する区(以下、3年一括区)を設けた。対照として、堆肥を施用せず愛知県の施肥基準に準じた量の化学肥料のみ施用する堆肥無施用区を設けた。使用した牛ふん堆肥は副資材としてオガクズを混合しており、その成分を表1に示した。試験区の面積は30 m<sup>2</sup>(4 m×7.5 m)で、堆肥無施用区および3年一括区は3反復、堆肥連用区は試験開始4年目まで3反復で、5年目からは2反復とした。

化学肥料の施用量は、初めの3年間6作は、全ての区で同一とし、窒素量が愛知県施肥基準(キャベツ:300 kg-N ha<sup>-1</sup>、スイートコーン:250 kg-N ha<sup>-1</sup>)になるように被覆尿素入り複合肥料を施用した。

表1 供試堆肥の成分

	含水率	T-C (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	C/N	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )
平均値	0.599	406.0	18.7	21.8	5.9	31.3	14.9	6.4
最小値	0.450	330.9	15.6	17.9	4.9	25.5	12.6	4.8
最大値	0.703	451.4	22.5	23.9	7.0	35.7	17.9	7.6

注) 値は乾物換算値

表2 試験ほ場における窒素収支

単位: kg-N ha<sup>-1</sup>

試験区	年数	投入量				吸収量				余剰量		
		化学肥料		堆肥	年間計	3年計	収穫物 <sup>1)</sup>	残渣 <sup>1)</sup>	年間計	3年計	年間計	3年計
		冬作	夏作									
堆肥 連用区	1	300	250	273	823		202	197	398		621	
	2	300	250	312	862	2510	241	197	438	1302	621	1791
	3	300	250	275	825		276	190	466		549	
	4	280	230	338	848		275	181	457		572	
	5	270	150	261	681	2153	257	195	452	1258	424	1417
	6	240	150	234	624		204	146	350		420	
	7	240	130	297	667		89	91	180		579	
	8	240	130	286	656	1942	222	172	394	979	434	1420
	9	240	130	249	619		211	194	405		408	
合計	2410	1670	2524	6604		1976	1563	3538		4629		
3年 一括区	1	300	250	819	1369		191	199	390		1178	
	2	300	250	0	550	2469	229	207	436	1262	321	1791
	3	300	250	0	550		259	177	436		291	
	4	270	230	1013	1513		268	209	477		1244	
	5	270	150	0	420	2323	225	193	418	1192	195	1660
	6	240	150	0	390		169	127	297		221	
	7	240	130	892	1262		88	95	182		1175	
	8	240	130	0	370	2002	205	174	379	948	165	1501
	9	240	130	0	370		209	178	387		161	
合計	2400	1670	2724	6794		1842	1559	3401		4952		
堆肥無 施用区	1	300	250	0	550		184	197	380		366	
	2	300	250	0	550	1650	211	191	402	1194	339	1011
	3	300	250	0	550		244	168	412		306	
	4	300	250	0	550		254	177	431		296	
	5	300	250	0	550	1650	211	169	381	1140	339	989
	6	300	250	0	550		196	132	328		354	
	7	300	250	0	550		95	96	191		455	
	8	300	250	0	550	1650	184	178	362	906	366	1172
	9	300	250	0	550		199	155	354		351	
合計	2700	2250	0	4950		1778	1462	3240		3172		

1) 収穫物と残渣の吸収量は、冬作と夏作の和とした。

試験開始4年目の冬作以降の堆肥連用区の施肥量は、糟谷らの既報<sup>1)</sup>の方法に基づき、前年の収量、養分収支、土壌中養分含量に加えて、窒素については前年の見かけの堆肥由来窒素利用率を、リン酸とカリウムは堆肥中含量を考慮して減肥した(表2、表3、表4)。3年一括区の施肥量は、堆肥連用区と同量(4年目冬作の窒素を除く)とした。なお、使用肥料は被覆尿素入り複合肥料から単肥に変更し、窒素は硫酸を用いて基肥で全体の50%量を、追肥(2回に分施、ただし2012年のキャベツ作は3回)に50%量を施用した。リン酸は過リン酸石灰を、カリウムは硫酸加里をそれぞれ基肥として施用した。

#### 4 調査項目

##### (1) 作物収量と養分吸収量

キャベツ、スイートコーンともに、1区あたり3か所で隣接する株に欠損のない連続した5株を地際から刈り取り、合計15株を収穫物(キャベツ:結球、スイートコーン:雌穂)とその他の残渣に分けて新鮮重を測定した。収穫物および残渣について、乾燥・粉碎後、全炭素(T-C)と全窒素(T-N)を既報<sup>1)</sup>と同様に分析し、乾物収量と養分含量から養分吸収量を求めた。

##### (2) 養分収支

ほ場への養分投入量は、化学肥料および牛ふん堆肥に由来する養分量とし、持出し養分量は、収穫物中の養分

量とした。養分投入量から持出し養分量を差し引いた値を余剰養分量とした。また、地下1mへの下方浸透水をキャピラリーライシメータ(大起理化学工業株式会社、埼玉)で採取した(反復なし)。浸透水の硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)、リン酸とカリウムの濃度を測定し、浸透水量に乗じて溶脱量を算出した。分析方法は既報<sup>1)</sup>と同じである。

##### (3) 土壌の養分含量

作土の化学性を把握するために、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、T-C、T-N、可給態窒素、可給態リン酸、全リン(T-P)、交換性カリウムを測定した。T-Pは風乾試料1gを硝酸一過塩素酸法にて分解した後、モリブデン青法<sup>7)</sup>で測定し、他は既報<sup>1)</sup>と同じ方法で分析した。

## 試験結果

### 1 作物収量

試験開始時からのキャベツおよびスイートコーンの収量を表5に示した。7年目のキャベツとスイートコーンはともに台風の被害を受けたため、大きく減収した。キャベツの収量について、試験区間での有意差は見られなかったが、減肥をしない3年目までは堆肥連用区と3年一括区で堆肥無施用区より収量がやや多く、その後は3

表3 試験ほ場におけるリン収支

試験区	年数	投入量					吸収量				単位: kg-P ha <sup>-1</sup> 余剰量	
		化学肥料		堆肥	年間計	3年計	収穫物 <sup>1)</sup>	残渣 <sup>1)</sup>	年間計	3年計	年間計	3年計
		冬作	夏作									
堆肥 連用区	1	49	41	105	195		27	22	49		168	
	2	49	41	101	191	552	29	19	48	146	162	463
	3	49	41	75	165		33	17	49		133	
	4	0	22	96	118		35	21	56		82	
	5	0	44	74	117	364	27	15	42	138	90	278
	6	0	44	86	129		23	17	40		106	
	7	0	44	99	142		10	9	18		133	
	8	0	44	79	123	393	23	15	38	100	99	334
	9	0	44	84	128		26	17	43		102	
合計	147	363	798	1308		233	151	384		1075		
3年 一括区	1	49	41	315	405		30	29	59		375	
	2	49	41	0	90	585	27	18	45	149	63	498
	3	49	41	0	90		30	15	45		60	
	4	0	22	287	309		37	25	63		272	
	5	0	44	0	44	397	23	14	37	129	21	320
	6	0	44	0	44		17	12	29		27	
	7	0	44	296	340		12	12	23		328	
	8	0	44	0	44	428	23	12	35	98	21	369
	9	0	44	0	44		24	15	40		20	
合計	147	365	899	1411		224	152	376		1187		
堆肥無 施用区	1	49	41	0	90		22	18	41		68	
	2	49	41	0	90	270	22	15	37	114	68	202
	3	49	41	0	90		24	12	37		66	
	4	65	44	0	109		29	17	46		80	
	5	65	44	0	109	327	21	12	33	109	88	258
	6	65	44	0	109		19	12	31		90	
	7	65	44	0	109		9	7	16		100	
	8	65	44	0	109	327	20	10	30	81	89	276
	9	65	44	0	109		23	12	36		86	
合計	540	385	0	925		189	115	304		735		

1) 収穫物と残渣の吸収量は、冬作と夏作の和とした。

試験区ではほぼ同等の収量となる場合が多かった。スイートコーンの収量は、3年目までは有意差が見られなかったが、4年目は3年一括区が多く、5年目以降は、堆肥連用区>3年一括区>堆肥無施用区の順で収量が多い傾向であった。

## 2 養分収支

各試験区における9年間および3年毎の窒素、リン、カリウムの収支を表2、3、4に示した。

堆肥連用区および3年一括区の野菜の窒素、リン、カリウム吸収量について、減肥開始後の4~6年目、7~9年目の合計値は、1~3年目に比べてやや低下する傾向であったが、堆肥無施用区より多かった。3年一括区では、これらの養分吸収量が、堆肥施用年は堆肥連用区より多く、堆肥施用後3年目は堆肥連用区より少なくなる傾向であった。また、3年ごとの養分吸収量は堆肥連用区よりやや少なくなった。

堆肥無施用区の年間の余剰窒素量は300~350 kg-N ha<sup>-1</sup>程度であった。堆肥連用区の余剰窒素量は、試験開始当初は年間600 kg-N ha<sup>-1</sup>以上となり、1~3年目の合計は1791 kg-N ha<sup>-1</sup>であったが、減肥開始後は4~6年目、7~9年目ともに1400 kg-N ha<sup>-1</sup>程度に減少した。3年一括区は、堆肥施用年に1000 kg-N ha<sup>-1</sup>を超える余剰窒素

量が生じたが、堆肥を施用しない年は、堆肥無施用区より余剰窒素量が少なかった。3年一括区における1~3年目の余剰窒素量は堆肥連用区と同量となり、減肥開始後は投入年の堆肥の窒素成分が高かったため、堆肥連用区よりやや余剰窒素量が多くなったが、7~9年目には1501 kg-N ha<sup>-1</sup>に減少した。

堆肥無施用区の年間の余剰リン量は60~100 kg-P ha<sup>-1</sup>程度であった。堆肥連用区では、試験開始当初は160 kg-P ha<sup>-1</sup>を超える余剰リン量が生じ、1~3年目の合計値が463 kg-P ha<sup>-1</sup>であったのに対し、減肥開始後は4~6年目、7~9年目ともに300 kg-P ha<sup>-1</sup>程度に減少した。3年一括区では、減肥開始後も堆肥施用年には300 kg-P ha<sup>-1</sup>程度の余剰量が生じたが、堆肥を施用しない年は20~30 kg-P ha<sup>-1</sup>まで余剰量が減少した。3年一括区における1~3年目の余剰リン量は498 kg-P ha<sup>-1</sup>であったが、減肥開始後は4~6年目が320 kg-P ha<sup>-1</sup>、7~9年目が369 kg-P ha<sup>-1</sup>に減少した。

堆肥無施用区の年間の余剰カリウム量は250~300 kg-K ha<sup>-1</sup>程度であった。堆肥連用区では、試験開始当初は700 kg-K ha<sup>-1</sup>以上の余剰カリウム量が生じ、1~3年目の合計値が2287 kg-K ha<sup>-1</sup>であったのに対し、減肥開始後は1100 kg-K ha<sup>-1</sup>程度になった。3年一括区は堆肥施用年に1300 kg-K ha<sup>-1</sup>を超える大量の余剰量が生じた

表4 試験ほ場におけるカリウム収支

単位: kg-K ha<sup>-1</sup>

試験区	年数	投入量					吸収量				余剰量	
		化学肥料		堆肥	年間計	3年計	収穫物 <sup>1)</sup>	残渣 <sup>1)</sup>	年間計	3年計	年間計	3年計
		冬作	夏作									
堆肥 連用区	1	249	208	528	985		180	283	463		805	
	2	249	208	535	992	2876	212	269	480	1350	781	2287
	3	249	208	441	898		197	209	406		701	
	4	0	0	498	498		231	301	532		267	
	5	0	104	447	551	1663	162	227	388	1327	389	1088
	6	0	104	510	614		183	224	407		432	
	7	0	104	485	589		81	116	197		508	
	8	0	104	383	487	1583	217	196	413	1050	270	1093
	9	0	104	403	507		192	247	440		314	
合計	747	1144	4231	6122		1654	2073	3727		4468		
3年 一括区	1	249	208	1584	2041		180	328	508		1608	
	2	249	208	0	457	2955	210	270	480	1382	247	2122
	3	249	208	0	457		190	204	394		267	
	4	0	0	1494	1494		233	333	566		1330	
	5	0	104	0	104	1702	163	229	393	1295	-59	1224
	6	0	104	0	104		150	186	336		-46	
	7	0	104	1455	1559		86	140	226		1473	
	8	0	104	0	104	1767	190	196	386	1029	-86	1318
	9	0	104	0	104		174	244	418		-70	
合計	747	1144	4533	6424		1576	2130	3706		4664		
堆肥無 施用区	1	249	208	0	457		156	250	406		301	
	2	249	208	0	457	1371	176	239	416	1169	281	871
	3	249	208	0	457		168	180	348		289	
	4	249	208	0	457		218	282	499		239	
	5	249	208	0	457	1371	155	193	348	1232	302	822
	6	249	208	0	457		176	208	385		281	
	7	249	208	0	457		85	124	210		372	
	8	249	208	0	457	1371	202	204	406	1007	255	910
	9	249	208	0	457		174	217	391		283	
合計	2241	1872	0	4113		1509	1898	3408		2604		

1) 収穫物と残渣の吸収量は、冬作と夏作の和とした。

表5 キャベツとスイートコーンの収量の推移

(単位: t ha<sup>-1</sup>)

作目	試験区	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目
キャベツ	堆肥連用区	41.9 a	59.9 a	53.1 a	60.1 a	54.4 a	48.5 a	21.0 a	72.2 a	50.2 a
	3年一括区	38.5 a	59.6 a	50.3 a	61.6 a	50.9 a	38.5 a	22.2 a	67.8 a	49.9 a
	堆肥無施用区	37.3 a	52.5 a	44.5 a	57.1 a	48.2 a	49.3 a	25.9 a	67.0 a	51.4 a
スイートコーン	堆肥連用区	14.8 a	10.6 a	14.7 a	17.5 ab	12.7 a	12.3 a	4.8 a	13.2 a	16.2 a
	3年一括区	15.9 a	10.0 a	14.4 a	18.3 a	11.9 ab	10.5 a	5.0 a	12.6 a	14.5 ab
	堆肥無施用区	14.2 a	9.2 a	14.5 a	15.2 b	10.5 b	10.0 a	2.8 a	10.7 b	13.4 b

各年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法による)

たが、減肥開始後の堆肥を施用しない年は、余剰量が負の値となった。3年一括区における1~3年目の余剰カリウム量は2122 kg-K ha<sup>-1</sup>であったが、減肥開始後は4~6年目が1224 kg-K ha<sup>-1</sup>、7~9年目が1318 kg-K ha<sup>-1</sup>に減少した。

### 3 土壌の化学性

作土のT-C、T-N、可給態窒素含量について、試験開始以降の推移を図1に示した。堆肥無施用区のT-CとT-N含量は漸減したが、堆肥連用区では徐々に増加する傾向であった。3年一括区では、堆肥施用後に増加し、その後減少する傾向であった。可給態窒素について、堆肥無施用区では試験開始後から徐々に減少し、5~6年経過後から含量が維持された。堆肥連用区も同様の傾向を示し

たが、堆肥無施用区に比べて可給態窒素の減少が抑制された。3年一括区の可給態窒素含量は、堆肥無施用区に比べると高く維持されたが、堆肥連用区に比べると堆肥施用直後に高く、その後は低くなる傾向であった。

作土の可給態リン酸、T-Pと交換性カリウム含量の推移を図2に示した。可給態リン酸とT-Pは全ての区で含量が増加する傾向であった。堆肥無施用区に比べて、堆肥連用区と3年一括区は可給態リン酸とT-Pの含量が多かった。堆肥無施用区の交換性カリウム含量は、試験開始後ほぼ同程度で推移した。堆肥連用区と3年一括区のカリウム含量は、堆肥無施用区より概ね多く推移した。特に、3年一括区は堆肥施用直後にカリウム含量が顕著に増加し、その後急速に減少して、堆肥施用前には堆肥無施用区とほぼ同程度になった。

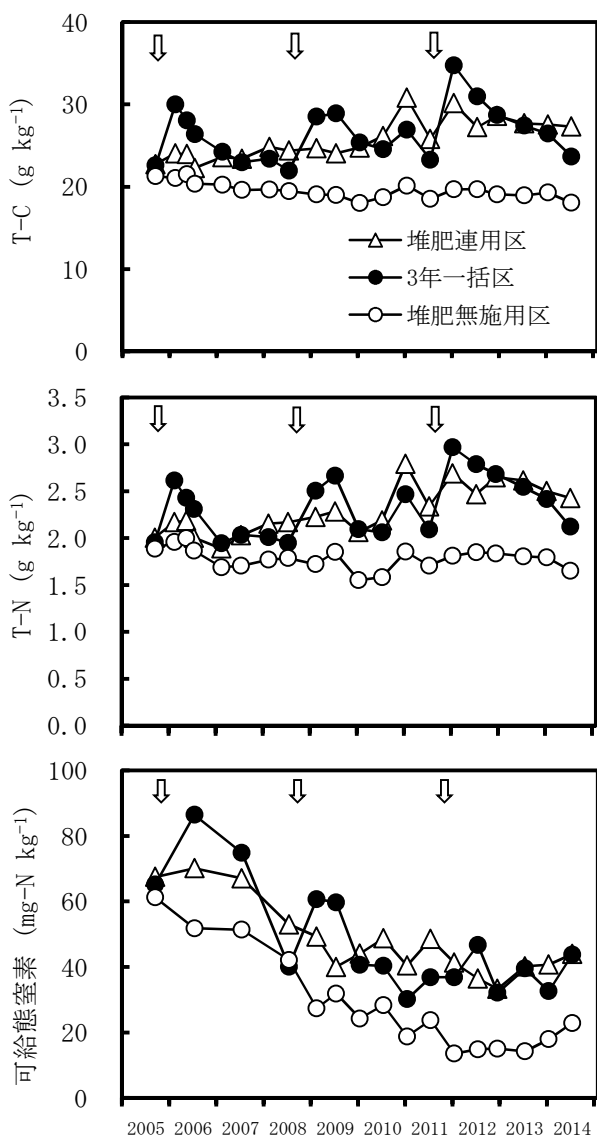


図1 作土におけるT-C、T-N、可給態窒素含量の推移 ( ↓ : 3年一括区の堆肥施用時期)

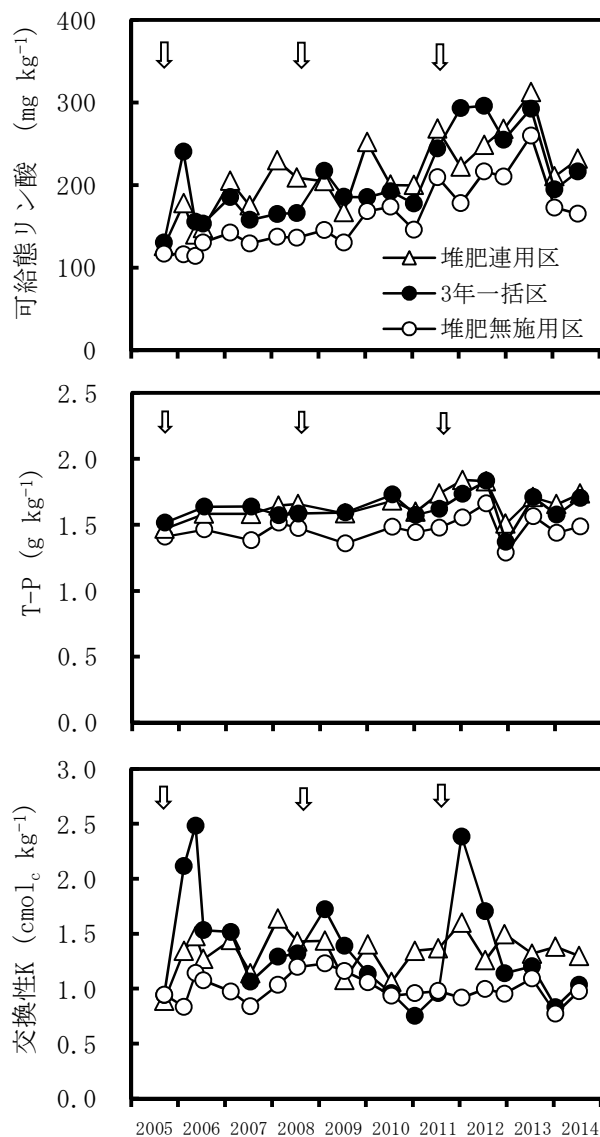


図2 作土における可給態リン酸、T-P、交換性カリウム含量の推移 ( ↓ : 3年一括区の堆肥施用時期)

#### 4 窒素、カリウムの溶脱量

地下1 m への窒素の溶脱量について、年間溶脱量の積算値と年間余剰窒素量の積算値との関係を図3に示した。堆肥無施用区と堆肥連用区は余剰窒素量の増加に比例して溶脱量が増加する傾向が認められた。3年一括区は堆肥施用年における溶脱窒素量の増加量が、余剰窒素量の増加量に比べて少なく、堆肥を施用しない年は逆に余剰窒素量に比べて溶脱窒素量の増加量が多くなる傾向があった。3年毎の溶脱窒素量の合計値は、堆肥無施用区で、1~3、4~6、7~9年目の順に1149、1232、1215 kg-N ha<sup>-1</sup>に対して、堆肥連用区で1507、1164、1013 kg-N ha<sup>-1</sup>、3年一括区で1116、1196、1316 kg-N ha<sup>-1</sup>であった。9年間の溶脱窒素量の積算値は、堆肥無施用区の3495 kg-N ha<sup>-1</sup>に対して、堆肥連用区で3684 kg-N ha<sup>-1</sup>、3年一括区

で3628 kg-N ha<sup>-1</sup>となり、全ての区でほぼ同等となった。

地下1 m へのカリウムの溶脱量について、年間溶脱量の積算値と年間余剰カリウム量の積算値との関係を図4に示した。堆肥無施用区と堆肥連用区では、積算余剰カリウム量が2000 kg-K ha<sup>-1</sup>を超えると急速に溶脱カリウム量が増加した。3年一括区では堆肥施用して積算余剰カリウム量が急増した4、7年目と同様に、堆肥施用せずに積算余剰量が減少した5~6年目と8~9年目も積算溶脱量が増加する傾向になった。9年間の溶脱カリウム量の積算値は、堆肥無施用区の438 kg-K ha<sup>-1</sup>に対して、堆肥連用区で1674 kg-K ha<sup>-1</sup>、3年一括区で2974 kg-K ha<sup>-1</sup>となり、堆肥施用によりカリウムの溶脱量が多くなる傾向であった。

なお、地下1 m へのリンの溶脱は認められなかった。

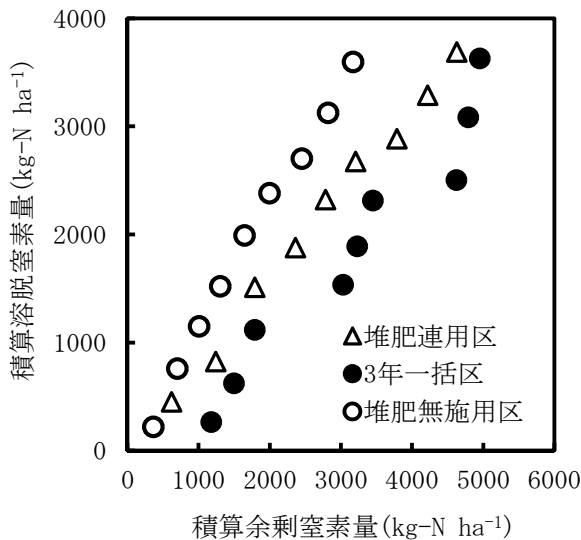
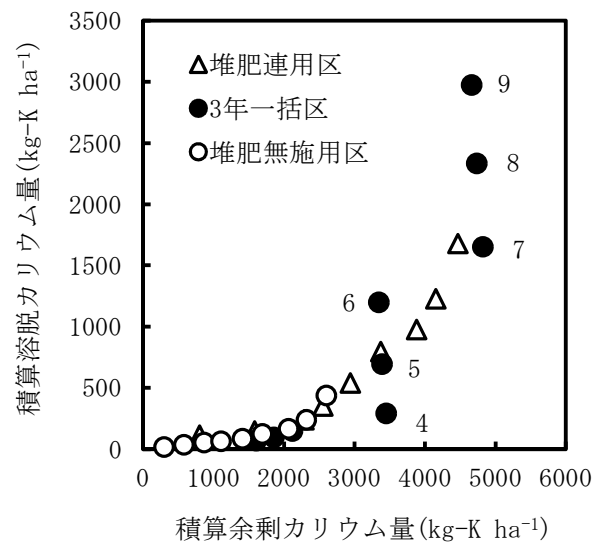


図3 積算余剰窒素量と積算溶脱窒素量の関係

図4 積算余剰カリウム量と積算溶脱カリウム量の関係  
注) 図中の数字は3年一括区の積算年数

## 考 察

### 1 牛ふん堆肥の施用法の違いが野菜の収量へ及ぼす影響

堆肥連用区と3年一括区のキャベツとスイートコーンの収量は、堆肥無施用区に比べて概ね同等以上であった(表5)ため、今回の試験で削減した施肥量で野菜の収量は確保できると考えられた。しかし、6年目のキャベツ作で、有意性は認められなかったものの、3年一括区で他の区より収量が少なくなり、また、スイートコーンの収量が、5~6年目と8~9年目に、堆肥連用区>3年一括区の傾向を示したことから、3年一括区では減肥を開始した4年目以降、堆肥を施用しない年に堆肥連用区より養分供給量が低下した可能性がある。

堆肥連用区と3年一括区では、作土における養分含量の推移が大きく異なり、3年一括区のT-C、T-N、可給態窒素、交換性カリウムは、堆肥施用後に堆肥連用区より高くなり、その後減少して堆肥連用区より低くなる傾向を示した(図1、図2)。牛ふん堆肥は窒素の分解が緩やかで、土壌への残存量も多い<sup>8)</sup>ことから、3年一括区では堆肥施用後、いったん土壌に蓄積された有機物が徐々に無機化され、3年のサイクルでT-C、T-N、可給態窒素が増減を繰り返すと考えられる。また、交換性カリウムについては、堆肥中に含まれるカリウムがほとんど水溶性である<sup>9)</sup>ことから、堆肥施用後に作土に吸着されたカリウムが、作物の吸収に加えて降雨に伴う溶脱により減少すると考えられる。

このように、3年一括区の堆肥施用年は、土壌肥沃度の重要な指標の一つである可給態窒素や交換性カリウムの含量が大幅に増えるため、増収が見込める。しかし、堆肥施用後の2、3年目はこれら養分が堆肥連用区に比べて減少するため、堆肥連用区と同量の減肥下では、土壌

から供給される養分が不足し、収量が低下したと考えられる。特に、気温が高く有機物の分解が進みやすい夏作では、牛ふん堆肥を毎年施用した方が土壌有機物からの窒素の無機化量が安定的に得られ、野菜の増収傾向が維持されると推察された。そのため、牛ふん堆肥を3年一括で施用する栽培体系において、堆肥投入1年目の夏作では、堆肥を連年施用する体系より減肥ができる可能性があるが、2、3年の夏作では、堆肥連用より施肥量を増やす必要があると考えられた。

### 2 養分動態および環境への影響

#### (1) 窒素

堆肥連用区と3年一括区では、1~3年目に対して4年目以降に減肥を行うことで、野菜の窒素吸収量を堆肥無施用区より多く維持しながら、余剰窒素量を低減できた。3年一括区では、堆肥連用区に比べて、4~6年目、7~9年目ともに、余剰窒素量が多い反面、窒素吸収量はやや少なくなった。このことは、堆肥施用後2~3年目の窒素肥効低下に伴う吸収量減少が要因と考えられる。

3年一括区では、堆肥施用年に1100 kg-N ha<sup>-1</sup>を超える大量の余剰窒素が生じたが、当年中の溶脱窒素量の増加は認められず、むしろ堆肥を施用しない年の方が溶脱量は増える傾向であった(図3)。家畜ふん堆肥等の有機物資材の無機化は、資材のC/N比に大きく依存するとされており、広瀬<sup>10)</sup>は、C/N比の高い有機物ほど有機態窒素の無機化開始時期が遅くなり、C/N比20以上の有機物では、施用70日以降から有機態窒素の無機化が進むと報告している。また、井原<sup>11,12)</sup>は重窒素標識した牛ふん堆肥を冬作前に施用したところ、堆肥由来窒素は、施用直後よりも地温の上昇した翌春から多く溶脱し始めたと報告している。本試験に供した牛ふん堆肥のC/N比の平均値が21.8であったことから、既往の成果と同様に、堆

肥施用後すぐには窒素の無機化が進行せず、翌年春以降の地温の上昇に伴い、無機化量が徐々に増加したと推察される。

堆肥連用区と3年一括区の9年間の積算余剰窒素量はそれぞれ  $4629 \text{ kg-N ha}^{-1}$ 、 $4952 \text{ kg-N ha}^{-1}$  で、堆肥無施用区に比べて1.5倍程度多くなった(表2)が、積算溶脱窒素量は、各試験区で概ね同程度であった(図3)。糟谷ら<sup>1)</sup>は、余剰窒素量、溶脱窒素量と土壤炭素・窒素含量との関係から、堆肥連用区では土壤への窒素の蓄積が進むため溶脱窒素量は余剰窒素量より少ないのに対して、堆肥無施用区では、土壤有機物の分解に伴い窒素が無機化し、余剰窒素量以上の窒素溶脱が起きたと述べている。本研究においても、3年一括区では土壤中のT-N含量が堆肥連用区と同様に増加しており、有機態窒素の分解が緩やかな牛ふん堆肥の施用により土壤への窒素蓄積が進むとともに、残存する窒素が多いため、溶脱窒素量が増加しなかったと考えられる。

このように、堆肥を施用するほ場では、化学肥料の窒素減肥を行うことで、余剰窒素量の減少、地下への溶脱量低減が可能であり、3年一括区でも野菜の収量を減らすことなく、堆肥無施用区と同程度に溶脱窒素量を抑制できることが明らかになった。

ただし、前述のとおり、3年一括区では、堆肥施用2、3年目に堆肥連用区より増肥する必要があると考えられる。3年毎の余剰窒素量でみると、1~3年目に比べて4年目以降は減肥を進めた結果、余剰量は低減しているものの、7~9年目の余剰窒素量は、堆肥無施用区に対してなお  $300 \text{ kg-N ha}^{-1}$  以上多い(表2)。堆肥施用年の夏作では減肥可能と考えられるため、溶脱窒素量の抑制を図るためには、堆肥施用2、3年目の増肥と併せて施用1年目の減肥が重要になる。

### (2) リン

堆肥に含まれるリンは、作物に吸収されやすい形態で存在していること<sup>13)</sup>が知られており、牛ふん堆肥の基準施用量では、 $80 \text{ kg-P}$  程度のリンが含まれていることから、堆肥連用区では試験開始4年目から、堆肥施用後の冬作のリンを無施肥とした。3年一括区においても、堆肥連用区と同様の施肥量としたため、減肥開始後は堆肥施用年に  $300 \text{ kg-P ha}^{-1}$  程度の余剰量がある反面、堆肥を施用しない年は  $20 \text{ kg-P ha}^{-1}$  程度まで余剰量は減少した(表3)。このように、3年一括区では年次により余剰リン量に大きな差異が生じたが、土壤中の可給態リン酸含量は、堆肥無施用区を下回ることなく、堆肥連用区と同様に増加傾向を示した(図2)。また、堆肥無施用区よりリン酸吸収量が多かった(表3)ことから、作物に対するリンの供給に不足はなかったと考えられる。

### (3) カリウム

牛ふん堆肥にはカリウムが多く含まれているため、3年一括区では、堆肥施用年に  $1300 \text{ kg-K ha}^{-1}$  を超える大量の余剰カリウムが生じた(表4)。これは、堆肥無施用区における施肥量の3年分に近い量であり、1~3年目の余剰カリウム量の合計値は  $2000 \text{ kg-K ha}^{-1}$  以上になった。堆肥施用年の土壤中の交換性カリウム含量は他区に比べ

て顕著に増加したが、堆肥施用2年目以降は含量が急速に減少し、3年目の含量は堆肥無施用区と同程度まで低下した(図2)ことから、余剰のカリウムは降雨に伴い下層へ溶脱したと考えられる。

堆肥連用区と堆肥無施用区では、積算余剰カリウム量が  $1500 \sim 2000 \text{ kg-K ha}^{-1}$  を超えるとカリウム溶脱量が急速に増加する傾向が認められた(図4)。これは、余剰となったカリウムが、降雨に伴い作土から溶脱し、下層土へ移行して吸着保持されるものの、1 m までの土壤の吸着能を超え、保持できなくなったカリウムが多量に溶脱されたと推察される。

3年一括区では、4年目以降、減肥により3年間の余剰カリウム量を、1~3年目に比べて40%程度低減した(表4)が、溶脱カリウム量は急速に増加した(図4)。特に、堆肥施用しない5~6、8~9年目には、積算余剰量が減少するにも関わらず多量のカリウム溶脱が生じた(図4)。この現象についても、堆肥施用時に作土に吸着した多量のカリウムが、その後の降雨に伴うイオン交換により上層から下層へ徐々に移行し、1 m までの土壤に保持できなくなることで急速な流亡が生じたと考えられる。

このため、3年分を一括施用した多量の堆肥中カリウムが、作土に多く留まる期間は短く、堆肥施用後2~3年目は、土壤からのカリウム供給量が堆肥連用区に比べて低下すると考えられ、窒素と同様に施肥量の増減を検討する必要がある。

以上のように、牛ふん堆肥を3年に一回、一括で施用する体系は、堆肥を施用せずに化学肥料のみで栽培する体系に比べて、土壤肥沃度を高く保つことができ、施肥量を削減しても野菜の収量を維持できると考えられた。また、堆肥連用区と同程度の減肥を行えば、溶脱窒素量の増加を抑え、環境への負荷も低減できると考えられた。3年に1回の堆肥施用は、作業効率の面でも省力的で有利であるが、土壤養分含量の変動が大きいこと、堆肥施用後の年数に応じた施肥量の調節を行うことで、収量安定と環境負荷抑制が両立できると考えられる。

## 引用文献

1. 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)
2. 愛知県農林水産部農業経営課. 農作物の施肥基準. (2016). <http://www.pref.aichi.jp/soshiki/nogyo-keiei/0000085287.html> (2016. 5. 9 参照)
3. 中津智史, 田村元. 30年間の有機物(牛ふんパーク堆肥および収穫残さ)連用が北海道の淡色黒ボク土の全炭素, 全窒素および物理性に及ぼす影響. 日本土壤肥料学雑誌. 79 (2), 139-145(2008)
4. 今川正弘, 河合伸二, 木下忠孝, 真弓洋一, 大嶋秀雄. 鈣質畑土壌における炭素の蓄積とその効果. 愛知県農業総合試験場研究報告. 21, 281-288(1989)



5. 若澤秀幸, 河合徹, 神谷径明, 堀田柏, 青島洋一, 鈴木則夫, 中神敏, 山田金一, 堀兼明, 堀内正美, 高橋和彦, 水本順敏, 松本昌直. 堆きゅう肥の連用が黄色土及び黒ボク土畑土壤に及ぼす影響(第1報)土壤の理化学性の変化とキャベツ, カンショの収量. 静岡県農業試験場研究報告. 38, 85-98(1994)
6. Nakamaru, M. Y., Kokido, Y., Sasada, M., Takada, C., Altansuvd, J., Kasajima, S., Ito, H. and Yoshida, H. Effects of three years of continuous no P and no K fertilization under manure application on crop yields and soil chemical properties in northern Japan, Hokkaido. 東京農業大学農学集報. 60 (1), 44-49(2015)
7. 並木博. 詳解工業排水試験方法. 改訂 4 版. 東京. P328-346(2008)
8. 上乃藺茂, 長友誠, 高橋茂, 西田瑞彦. 重窒素標識牛堆肥作製と牛ふん堆肥施用畑地における2作間の窒素動態. 日本土壤肥科学雑誌. 79(1) , 37-44(2008)
9. 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. 日本土壤肥科学雑誌. 75(1), 91-93(2004)
10. 広瀬春朗. 各種植物遺体の有機態窒素の畑状態土壤における無機化について. 日本土壤肥科学雑誌. 44(5), 157-163(1973)
11. 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. 日本土壤肥科学雑誌. 80(5), 494-501(2009)
12. 井原啓貴, 前田守弘, 駒田充生, 太田健. 重窒素標識牛ふん堆肥を施用した黒ボク土モノリスライシメーターにおける2年半の窒素動態. 日本土壤肥科学雑誌. 81(5), 489-498(2010)
13. 小柳渉. 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)