

土壌の化学性，作物収量および周辺環境への影響から判断した 黒ボク土畑の有機物連用手法

高間由美¹⁾・廣澤美幸²⁾

摘要：県内の代表的な黒ボク土畑で，29年間各種有機物を連用した．本報では，21年目以降の結果に基づき，有機物連用による土壌化学性および作物収量への影響を明らかにした．土壌中の全窒素増加量は，それらの化学肥料および有機物を含めた窒素収支に大きく影響される．また，化学肥料と有機物を含めた窒素施用量は，作物の収量に最も影響するが，施用量が増加すると硝酸態窒素の溶脱量も増加し，同時に塩基類も溶脱し，pHを低下させる．土壌の化学性，作物収量および周辺環境への影響を考慮すると，本県黒ボク土畑では，稲わら堆肥1.7t/10a/年，牛ふん3.5t/10a/年，豚ふん堆肥0.9t/10a/年を施用するのが望ましい．

キーワード：黒ボク土，有機物，養分収支，溶脱，土壌化学性

The proper technique for continuous application of organic material judging from physicochemical properties of soil, crop yield, and the impact on surrounding areas

Yumi TAKAMA, Miyuki HIROSAWA

Summary: This study was conducted for 29 years in the Andisol upland that covers over half of the arable land in Tochigi Prefecture. This study elucidated the effects of organic materials on crop growth and physicochemical properties of soil based on results obtained after the 21st year. Total nitrogen accrued in soil is influenced by the nitrogen content of artificial manure and nutrient balance, including organic materials. The amount of nitrogen applied, including artificial manure and organic materials, influences crop growth the most; however, when amount of nitrogen applied increased, eluviation of nitrate nitrogen and exchangeable cations increased, thereby decreasing the pH of the soil. It is desirable to apply rice straw compost at 1.7 t/10a/year, cattle feces at 3.5 t/10a/year, or pig manure at 1.7 t/10a/year on Andisol upland fields in Tochigi Prefecture, when considering the physicochemical properties of soil, the growth of crops, and the influence to surrounding areas.

Key words : Andisol, organic materials, nutrient balance, eluviation, physicochemical properties of soil

I 緒言

堆肥を中心とした有機物の施用は、地力²⁶⁾の増進を図るため以前より行われてきた。近年は、環境保全型農業を志向する農業者から、安定した作物収量の確保や土壌環境に配慮した堆肥施用方法の確立が求められている。また、消費者も循環型農業を注目し、地域内の物質循環について関心が高まっている。

有機物は、その原料や製造方法がさまざま、肥効や作物への影響がさまざまであることから、これまでに多数の研究が報告されており^{7)~10)14)~15)18)~21)23)~25)}、有機物の連用により、物理性が改善され、化学性の改善とともに作物の生育に良好な環境条件が与えられること、大豆連作畑の地力低下の抑制に効果があること¹⁷⁾、土壌中の腐植含有量への影響等¹⁶⁾について報告されている。また、有機物の過剰施肥により、土壌中に塩基類が蓄積し、作物に障害が発生したという報告もある¹¹⁾。しかし、有機物連用は、作付け体系により土壌化学性や作物生育に及ぼす影響が異なると考えられることや、本県に広く分布している黒ボク土において作物を良好に生育させるには塩基類やりん酸を多量に施用することが必要であること、また、施用した有機物の分解速度が他の土壌に比べて遅く¹⁾、土壌への有機物蓄積パターンも特殊性があると考えられるからである。このことから、黒ボク土において29年間各種有機物の連用試験を行った。前報²⁾では、試験開始から20年間の結果に基づき、作物収量は、窒素施用量や土壌中の可給態窒素および可給態りん酸含有量に大きく影響され、可給態窒素含有量は有機態窒素施用量とほぼ正比例関係であることが明らかとなった。青刈りデントコーンの連用では、養分がほ場外に流亡している可能性が示唆され、収量性からも明らかに他の有機物よりも劣ることが示され、今後、有機物を用いた環境保全型農業を推進する上で、ほ場内の養分収支ならびに流亡について明らかにすることが重要であると考えられた。

これらのことから、本試験では、有機物連用の土壌や作物生育への影響を持続的に把握し、一部の処理区では、有機物の種類や作型を変更し、それがどう影響するかを把握するため、21年目以降も試験を継続し、29年間有機物連用を行った。その結果から、各種有機物連用における養分収支が土壌化学性や作物収量に及ぼす影響の変化を検討した。

II 試験方法

1. 供試ほ場および試験区の構成

試験は、宇都宮市の栃木県農業試験場内畑ほ場で行った。本ほ場は、標高170mの台地上にあり、非固結火成岩を母材とした風積土壌で、排水は良く浸食に弱い。土壌類型は、表層多腐植質黒ボク土(III f II dn)で、試験ほ場の断面形態を第1表および第1図に示した。I層は作土層で0~15cm、II層は耕盤層で30cmまで、III層は50cmまでで、IV層は腐朽細小浮石礫層(今市浮石層)であった。

試験開始時の1977年9月に採取したIII層までの土壌化学性を第2-1表に示した。本試験土壌は、りん酸吸収係数2200以上と高く、黒ボク土特有の値である。また、試験開始から20年目の1997年の作土中の土壌化学性を第2-2表に示した。

各試験区の処理内容を第3表に示した。有機物連用区は、堆肥区、牛ふん区、牛ふん増量区、豚ふん区、青刈りデント区、麦わら区を設置した。対照区として、三要素区、無窒素区を設置した。有機物連用区は、毎作、化学肥料区に上乘せして各種有機物を施用した。

試験開始時から1997年までの有機物連用量は、堆肥区では、稲わら堆肥を現物で1500kg/10a施用した。牛ふん区および豚ふん区は、乾物に対して稲わら堆肥施用量相当量を施用した。牛ふんは、敷料なしで飼養した乳牛の糞尿を固液分離器により分離した固体を、豚ふんはもみがらを敷料としたものを使用した。また、青刈りデントコーンは、冬作終了後に処理区内で栽培し、夏作栽培時に収穫全量を施用した。麦わらは、処理区内で栽培したものを全量夏作栽培時に施用した。青刈りデント区および麦わら区では、冬期に資材の確保が困難なため、冬作栽培時には稲わら堆肥を1500kg/10a施用した。

1998年からは、牛ふん増区(以前は堆肥区)を設置し、豚ふん区は、豚ふんから豚ふん堆肥施用に変更した。堆肥区、牛ふん区および豚ふん区では、各種有機物中の全窒素で、7kg/10a相当量施用した。牛ふん増区は、牛ふん区の倍量施用し、全窒素で14kg/10aになるように施用した。また、青刈りデント区と麦わら区は、1997年までと同様に施用し、冬作時の稲わら堆肥は、全窒素で7kg/10a相当量施用した。1998年~2005年の各種有機物の成分含有率の平均値を第4表に、各種有機物からの成分投入量を第5表に示した。

各処理区における作付け内容および化学肥料の施用量を第6表に示した。冬作は、各処理区ともに、二条大麦を栽培した。供試品種は、スカイゴールデンである。ま

た、夏作は、1998年～2002年まではレタス、2003年～2005年まではほうれんそうを栽培した。レタスの供試品種は、1998年～1999年はエクシード、2000年～2002年ユーレイクス、ほうれんそうはソロモンである。化学肥料の施用量は、栃木県の施肥基準³⁾に基づき、硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸加里を施用した。

2. 収量および乾物収量の測定方法

レタスは、外葉と結球に分けて生重を測定し、結球部重を収量とした。ほうれんそうは、地上部の生重を測定し収量とした。レタスおよびほうれんそうは、通風乾燥器により80℃で48時間乾燥したものを乾物収量とした。二条大麦は、地上部刈り取り風乾し、脱穀、精麦後の精麦重を収量とした。風乾物の含水率を測定し、風乾物料をこれで除して乾物収量とした。

3. 分析方法

作物および土壌化学性の分析は、「土壌環境基礎調査における土壌、水質および作物分析法」⁴⁾に基づき、以下の方法で行った。

1) 作物体

作物体は、地上部を収穫後、乾燥し粉砕したものを供

試試料とした。窒素は、ケルダール法により分解し、水蒸気蒸留法により測定した。りんは、硝酸一過塩素酸分解後、バナドモリブデン酸比色法で測定した。カリウム、カルシウム、マグネシウムは、りんと同様の方法で分解後、原子吸光分光光度計により測定した。

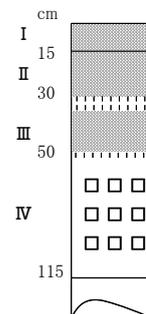
2) 土壌

土壌は、毎年冬作収穫後の6月に各処理区から採取し、風乾後2mmメッシュの篩で篩別し、供試土壌とした。pHは、蒸留水を用いガラス電極式pHメーターにより測定した。全窒素および全炭素は、乾式燃焼法（NC-Analyzer Sumigraph NC-A80）により分析した。

CECは、セミマイクロSchollenberger法—水蒸気蒸留法により測定した。交換性カリウム、カルシウム、マグネシウムは、セミマイクロSchollenberger法—原子吸光分光光度計により測定した。可給態窒素は、保温静置培養法—水蒸気蒸留法で測定した。可給態りん酸は、トルオーグ法により測定した。

第1表 試験開始時の土壌形態（前報²⁾の再掲）

層位	深さcm	土色	土性	構造	ち密度mm
I	0～15	7.5YR 1.7/1	L	細粒状	14
II	15～30	7.6YR 1/1	SiL	細粒状	17
III	30～50	7.7YR 1/1	SiCL	連結状	20
IV	50～115	7.8YR 3/6	腐朽細小浮石礫層		-
IV以下	115以下	7.9YR 4/5	SiL	連結状	-



第1図 試験開始時（1977年）の土壌断面（前報²⁾の再掲）

第2-1表 試験開始時の土壌化学性（前報²⁾の再掲）

層位	pH	全炭素 (10 ⁻² kgkg ⁻¹)	全窒素 (cmol _c kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	交換性塩基			塩基飽和度 (%)	りん酸吸収 係数	可給態 りん酸 (cgkg ⁻¹)
					CaO	MgO	K ₂ O			
I	6.0	9.32	0.52	29.3	304	84	19	53	2250	4.1
II	5.4	9.42	0.53	28.8	196	26	21	30	2360	4.8
III	5.9	6.67	0.35	28.7	286	25	13	41	2370	0.0

第2-2表 試験開始から20年目（1997年）の作土の土壌化学性（前報²⁾の再掲）

処理区	pH	全炭素 (10 ⁻² kgkg ⁻¹)	全窒素 (10 ⁻² kgkg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	交換性塩基			可給態窒素 (cgkg ⁻¹)	全りん酸 (cgkg ⁻¹)	可給態りん酸 (cgkg ⁻¹)
					CaO	MgO	K ₂ O			
					(cgkg ⁻¹)					
無窒素区	6.8	8.7	0.65	43.0	837	146	23	5.3	349	4.9
三要素区	6.4	8.8	0.65	42.8	528	65	16	7.1	341	5.2
堆肥区	6.7	10.4	0.77	54.5	1031	139	65	12.5	436	15.5
牛ふん区	6.2	10.5	0.74	51.3	613	66	25	12.5	375	6.7
牛ふん増区(旧堆肥区)	6.7	10.6	0.72	52.5	1013	133	59	9.4	430	15.2
豚ふん区	6.3	10.5	0.76	54.3	663	81	17	16.9	483	24.3
青刈りデント区	6.1	10.1	0.72	48.3	745	93	55	11.7	454	15.0
麦わら区	6.4	9.8	0.67	51.3	872	113	54	8.0	398	9.3

注. 牛ふん増区は、1997年までは堆肥区として稲わら堆肥を施用した。表内の数値は稲わら堆肥区としての値。

第3表 試験区の構成および処理内容（1998年～2005年）

処理区	各有機物の現物施用量(kg/10a/作)				
	稲わら堆肥	牛ふん	豚ふん	青刈りデント	麦わら
無窒素区					
三要素区					
堆肥区	859	(382)			
牛ふん区		1763	(319)		
牛ふん増区		3527	(638)		
豚ふん区			460	(290)	
青刈りデント区	853	(380)		収穫全量 (384)	
麦わら区	853	(380)			収穫全量 (288)

注1. 稲わら堆肥および牛ふん、豚ふんは、各種有機物中の全窒素で7kg/10a相当量施用し、平均投入量を示した。

注2. 青刈りデント区および麦わら区は、冬作時に稲わら堆肥の全窒素で7kg/10a相当量施用し、夏作時に青刈りデントコーン（平均3366kg/10a）および麦わら（平均332kg/10a）を処理区全量施用した。

注3. () 内は、乾物施用量を示す。

第4表 各種有機物の成分（1998年～2005年）

有機物	水分率	乾物当たりの成分含有率(%)					
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	C
稲わら堆肥	55.5	1.98	1.54	3.80	3.83	0.99	23.8
牛ふん	81.9	2.17	1.31	3.10	2.22	0.97	35.4
豚ふん堆肥	36.9	2.48	7.63	3.45	6.29	2.13	34.0
デントコーン	88.6	3.00	0.53	4.22	0.59	0.31	43.5
麦わら	13.4	1.08	0.13	3.56	0.52	0.14	44.2

注1. 1998年～2005年の平均値を示す。

注2. 豚ふん区は、1998年から豚ふん施用からもみがら豚ふん堆肥施用に変更した。

第5表 各種有機物からの成分投入量（1998年～2005年）

有機物	養分投入量(kg/10a/作)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	C
堆肥区	7.0	4.8	14.3	14.4	3.7	91
牛ふん区	7.0	4.5	9.8	6.4	2.8	113
牛ふん増区	14.1	9.0	19.5	12.8	5.7	226
豚ふん区	7.0	24.9	9.1	16.5	5.9	99
デント区	8.7	3.3	13.5	8.6	2.5	167
麦わら区	5.0	2.5	12.0	7.9	2.1	127

第6表 化学肥料の施用量 (1998年～2005年)

作付け時期	栽培作物	化学肥料施用量(kg/10a)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
夏作	レタス	15.0	20.0	15.0
	ほうれんそう	14.0	16.0	14.0
	デントコーン	10.0	10.0	10.0
冬作	二条大麦	6.0	9.0	8.0

注. 夏作として,1998年～2002年まではレタス,2003年～2005年まではほうれんそうを栽培した.

Ⅲ 結果及び考察

1. 養分収支や養分溶脱が土壌化学性に及ぼす影響

(1) 作土中の土壌化学性の変化

作土中の全窒素含有率の推移を第2図に示した. 2002年～2005年の期間では, いずれの処理区においても大きな変化はなかった. 1997年以前の平均値と比較すると, 無窒素区及び三要素区では減少していたが, 有機物連用区では窒素含有率が0.02～0.07%増加しており, 堆肥区が最も高かった.

全炭素含有率の推移を第3図に示した. 全窒素含有率と同様に, 2002年～2005年の期間では大きな変化はなかった. 1997年以前の平均と比較すると, 無窒素区0.91%, 三要素区0.97%, 堆肥区0.73%, 牛ふん区0.46%, 牛ふん増区0.35%, 豚ふん区0.77%, 青刈りデント区0.71%, 麦わら区0.99%減少していたことから, 有機物乾物で毎作10a当たり, 稲わら堆肥382kg, 牛ふん638kg, 豚ふん290kg, 青刈りデント384kg, 麦わら288kg, 全炭素で91～226kgの連用では土壌炭素の維持出来ない可能性が示唆された. 古野²⁷⁾は, 40年間の堆肥, 厩肥の長期連用試験の結果, 年次経過により土壌中の炭素含量が減少する傾向を明らかにし, 水田では0.1%, 畑地では0.16%の減少になり, 水田に比べて畑の方が土壌中の炭素含量の消耗が大きく, また畑地では堆肥, 厩肥を夏冬作通して10aあたり毎年1t程度の施用では土壌有機物の現状維持は困難と推察している. 本試験においても, 各種有機物からの炭素投入量よりも消耗が大きかったことが, 土壌中の全炭素含有率の減少に影響したと考えられる.

pHの推移をを3年間の移動平均値により第4図に示した. いずれの処理区も同様の推移を示し, 1998年～2001年にかけて低下した. 各処理区の1998年～2005年の平均値は, 無窒素区6.3, 三要素区6.0, 堆肥区6.2, 牛ふん区5.8, 牛ふん増区6.0, 豚ふん区5.8, 青刈りデント区5.5, 麦わら区5.9であり, 堆肥区は三要素区を上回ったものの, 他の有機物連用区では三要素区よりも低く, 青刈りデント区は最も低く推移した.

交換性カルシウムの推移を3年間の移動平均値により第5図に示した. いずれの処理区も減少し, 1998年～2005年の間の減少量は, 無窒素区311mg/100g, 三要素区176mg/100g, 堆肥区545mg/100g, 牛ふん区283mg/100g, 牛ふん増区607mg/100g, 豚ふん区291mg/100g, 青刈りデント区421mg/100g, 麦わら区544mg/100gであった.

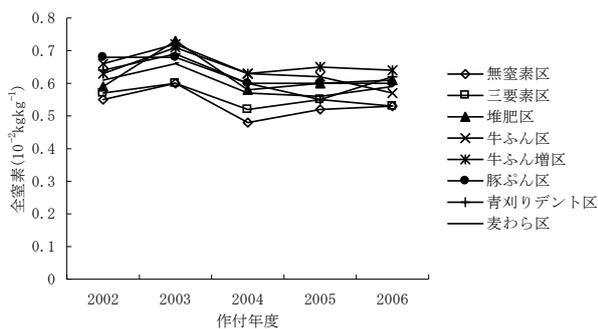
交換性カリウムの推移を3年間の移動平均値により第6図に示した. 1998年～2001年の間は, いずれの処理区においても一様に減少し, 減少量は, 無窒素区61mg/100g, 三要素区29mg/100g, 堆肥区62mg/100g, 牛ふん区36mg/100g, 牛ふん増区58mg/100g, 豚ふん区35mg/100g, 青刈りデント区65mg/100g, 麦わら区71mg/100gであった.

交換性マグネシウムの推移を3年間の移動平均値により第7図に示した. 交換性カルシウムやカリウムと比較すると緩やかであるが減少する傾向であった. 交換性陽イオン類とpHはおおむね連動しており, pHは交換性陽イオン類の推移に大きく影響を受けていると考えられる.

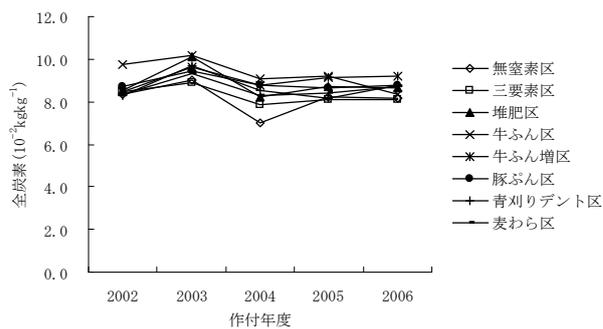
可給態りん酸の推移を3年間の移動平均値のにより第8図に示した. 有機物連用区では, 三要素区を上回って推移しており, またいずれの処理区においても増加する傾向であった. 1998年以降の増加量は, 無窒素区7.4mg/100g, 三要素区5.4mg/100g, 堆肥区1.0mg/100g, 牛ふん区8.3mg/100g, 牛ふん増区10.3mg/100g, 豚ふん区11.6mg/100g, 青刈りデント区8.4mg/100g, 麦わら区4.6mg/100gであり, 豚ふん区と牛ふん増区において増加程度が大きかった. また, 堆肥区の変化は小さかった.

可給態窒素の推移を第9図に示した. 各処理区の平均値は, 無窒素区4.2mg/100g, 三要素区4.7mg/100g, 堆肥区7.5mg/100g, 牛ふん区8.0mg/100g, 牛ふん増区10.0mg/100g, 豚ふん区7.2mg/100g, 青刈りデント区6.6mg/100g, 麦わら区7.1mg/100gであった. 最も高く推移していたのは牛ふん増区であった.

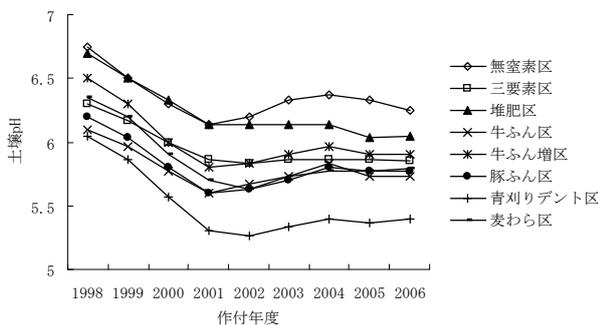
試験終了時の作土中の土壌化学性を第7表に示した.



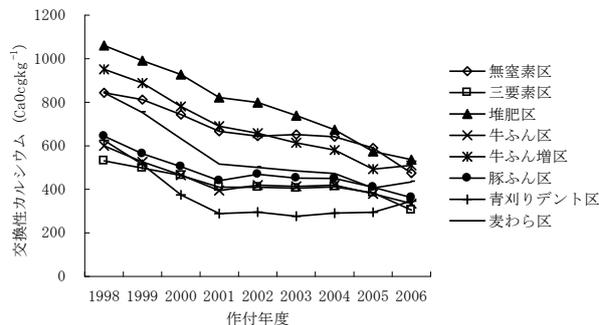
第2図 作土中の全窒素含有率の推移



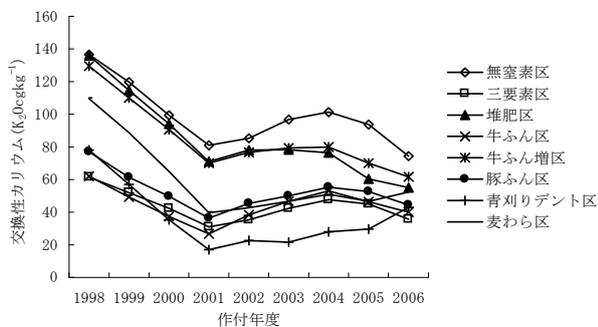
第3図 作土中の全炭素含有率の推移



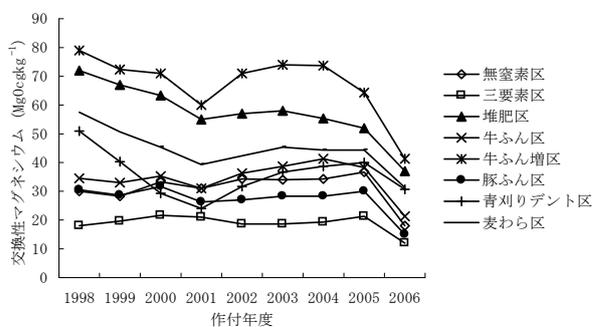
第4図 作土中のpHの推移 (3年間の移動平均)



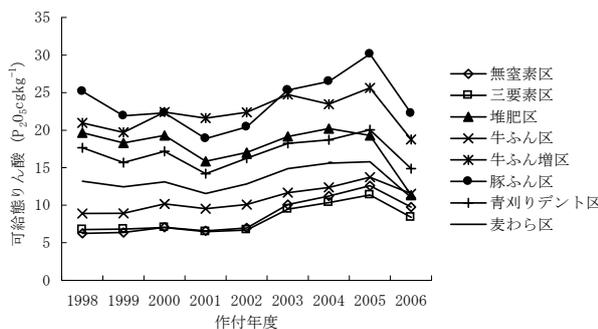
第5図 作土中の交換性カルシウムの推移 (3年間の移動平均値)



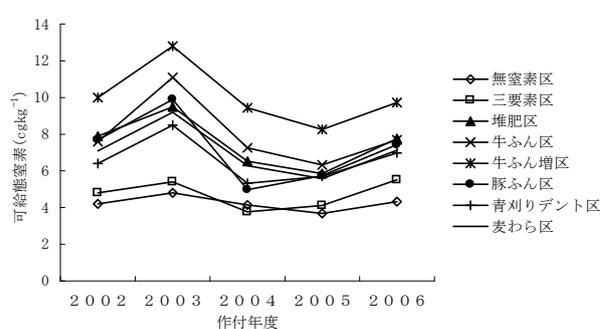
第6図 作土中の交換性カルシウムの推移 (3年間の移動平均値)



第7図 作土中の交換性マグネシウムの推移 (3年間の移動平均値)



第8図 作土中の可給態りん産の推移 (3年間の移動平均値)



第9図 作土中の可給態窒素の推移

第7表 試験終了時の作土中の土壌化学性(2006年6月採取)

処理区	pH (H ₂ O)	EC (dS/m)	T-N (10 ⁻² kgkg ⁻¹)	T-C	C/N	可給態窒素	硝酸態窒素 (cgkg ⁻¹)	可給態リン酸	CEC (cmol _e kg ⁻¹)	交換性陽イオン(cgkg ⁻¹)		
										CaO	MgO	K ₂ O
無窒素区	6.1	0.1	0.53	8.2	15.3	4.3	0.6	11.8	37.9	526	76	42
三要素区	5.8	0.1	0.53	8.1	15.3	5.5	0.3	10.7	35.2	352	38	22
堆肥区	5.8	0.1	0.61	8.7	14.3	7.8	0.3	16.4	39.7	485	45	53
牛ふん区	5.6	0.2	0.57	8.4	14.6	7.7	0.3	14.8	36.8	330	39	37
牛ふん増区	5.8	0.1	0.64	9.2	14.4	9.8	0.4	26.0	41.6	406	61	64
豚ふん区	5.7	0.1	0.60	8.7	14.6	7.4	0.4	31.0	37.8	372	49	32
青刈りデント区	5.3	0.2	0.62	8.8	14.2	7.0	0.3	21.9	36.4	324	37	46
麦わら区	5.7	0.1	0.59	8.7	14.7	7.1	0.3	15.4	36.1	328	43	46

(2) 養分収支

窒素収支（「窒素施用量－作物による窒素吸収量」の積算量）と作土中の全窒素量増加量との関係を第10図に示した。窒素収支は、試験開始時の1977年～1997年および1998年～2005年の期間における積算量を1年間の平均値で示した。また、窒素施用量は、化学肥料および有機物由来の成分量を含めて算出した。1977年～1997年の収支には、大豆による窒素固定量を吸収量の0.67倍⁹⁾として窒素施用量に加えた。作土中の全窒素量増加量は、試験開始時の1977年～1997年または1998年～2005年における増加量を示し、各期間の作土中の全窒素含有率ならびに1997年の各処理区の作土深と仮比重²⁾により計算し、1年間の平均値として示した。

窒素収支が高いほど全窒素量の増加量も大きいことから、作土中の全窒素含有量は、窒素収支に影響されることが示された。またその傾向は、三要素区と有機物連用区で同じであった。作物に吸収されなかった余剰の窒素の一部は有機態として作土に残存するが、三要素区と有機物連用区は有機物の有無に関わらず同一の傾向であったことから、その程度は有機態窒素でも無機態窒素でも違いがないものと考えられる。土壌中の微生物は、無機態窒素を取り込み、バイオマスを生成し、その一部が有機態窒素として蓄積すると考えられる¹²⁾。土壌微生物による有機化の影響により、土壌への窒素の蓄積は、施用される窒素の形態に関わらず窒素の量に比例したものと考えられる。

有機物連用区において、窒素収支10kg/10a/年に対する全窒素含有量の増加率は、1977年～1997年までは2～12kg/10a/年、1998年～2005年は2～4kg/10a/年であり、1998年～2005年の窒素収支がプラスであったが、窒素増加量は減少した。

青刈りデント区は、窒素収支に対する全窒素量の増加量が他の処理区よりも少なく、この傾向は連用期間に関わらず同じ傾向であった。

(3) 養分溶脱量

窒素収支の合計から作土に残存した窒素量（土壌中の全窒素含有量）の増加量を差し引き、その値を硝酸態窒素溶脱量の推定量として第8表に示した。値は、試験開始時の1977年～1997年と1998年～2005年の各期間における平均値である。麦わら区以外では、1997年以降に硝酸態窒素溶脱量が増加しており、中でも牛ふん増区では2.11mol/10a/年と最も多く、次いで青刈りデント区が1.70mol/10a/年であった。牛ふん増区と青刈りデント区は、窒素施用量が多いにもかかわらず、窒素利用率が低いことが硝酸態窒素溶脱量に影響したと考える。このことから、土壌中の窒素増加量が、1977年～1997年と比較して1998年～2005年が減少したのは、硝酸態窒素溶脱量増加の影響だと示唆される。また、畑地では脱窒が生じ、脱窒酵素活性は有機物の施用によって高まる¹³⁾ことから、脱窒や硝酸態窒素の溶脱により、窒素増加量が減少した可能性が考えられる。

硝酸態窒素溶脱量および浸透水量から土壌浸透水中の硝酸態窒素濃度を推定し、第9表に示した。浸透水は、年間降水量を1400mm（宇都宮市の平年値）、浸透水としての浸透率を50%（未発表 平成12～18年 栃木県環境技術部成績書を参照）として計算した。両時期ともに有機物連用区では、公共用水域の環境基準である10mg/Lを上回っており、牛ふん増区では、40mg/Lを超えていた。このことから、有機物施用量の増量は、地下水の硝酸態窒素濃度を高める可能性が示唆される。

硝酸態窒素溶脱量と塩基類の溶脱量との関係を第11図に示した。塩基類の溶脱量は、カルシウム、カリウムおよびマグネシウムの収支の合計値から作土中の増加量を差し引いて求めた。塩基類の溶脱量は、硝酸態窒素溶脱量が多いほど多いことから、作土中の交換性塩基類が減少したのは、硝酸態窒素の溶脱が大きく寄与していたことが示された。また、有機物の種類間で比較すると、硝酸態窒素溶脱量に対する塩基類の溶脱量は、堆肥区が最も多く、牛ふん区が最も少ない。これらの違いは、硝酸以外の陰イオン、つまり硫酸イオン、塩化物イオンま

たは有機物の分解過程で発生する酢酸等の有機酸の影響と考えられる。

第12図に作土の塩基飽和度と土壌pHの関係を示した。値は、作土中の交換性塩基類が減少し始めた1998年と試験終了時の2005年のものである。年次の違いにかかわらず土壌pHは塩基飽和度に規定されることが示され、1997年～2005年における土壌pHの経年的な低下は、塩基飽和度の減少によることが示唆された。

2. 養分施用量や土壌化学性が作物収量に及ぼす影響

夏作と冬作で作付け作物が異なるため、以下の手順により収量の標準化を行った。標準化は、作ごとに式(1)により行った。さらに、各作物の標準化収量を一定期間で平均した数値を期間標準化収量とした。

$$\text{標準化収量} = (\text{標本値} - \text{平均値}) / \text{標準偏差} \quad \text{式(1)}$$

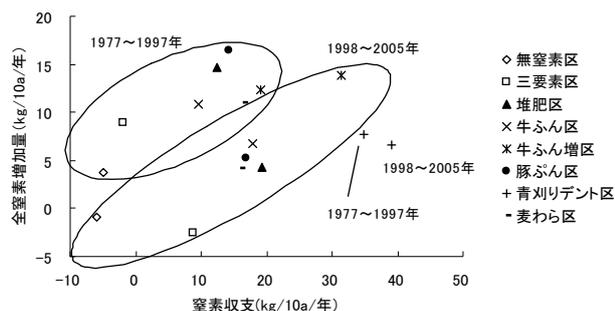
標準化収量を第10表に示す。標準化収量は、無窒素区と三要素区と青刈りデント区において負の値を示した。また、最も標準化収量が大きかったのは牛ふん増量区の1.01で、次いで豚ふん区0.66、堆肥区・牛ふん区0.60であった。

さらに、各養分施用量が収量に及ぼす影響を検討するため、窒素、りん酸、カリウム施用量を独立変数とし、標準化収量を従属変数として重回帰分析を行った。重回帰分析の結果を第11表に示す。標準回帰係数²²⁾は、試験開始時の1977年～1997年は、窒素施用量が正の、りん酸施用量とカリウム施用量が負の値を示した。窒素施用

量は、絶対値1.45と最も大きく、p値は0.02と小さく、三成分の中では最も収量に大きく影響していることが示された。1998年～2005年の窒素の標準回帰係数は0.35と正で絶対値も相対的には最も大きかったが、p値は0.20と大きかった。以上のようにいずれの年代でも窒素施用量の影響が大きかったが、試験開始～1997年までの20年間の連用によって、土壌中の養分含有率に処理区間差が生じ、1998年からの処理内容の違いによる影響が出にくくなったものと考えられる。

重回帰分析で、収量に対して特に影響が大きかった窒素施用量と標準化収量との関係を第13図に示した。窒素施用量に対する標準化収量は、青刈りデント区を除いて、有機物連用の種類や期間の違いにかかわらず直線的な関係であった。青刈りデント区では、全試験期間を通して窒素施用量は多いにも関わらず相対的に標準化収量が低く、窒素施用量が収量に反映されないことが示された。

さらに、土壌化学性を独立変数とし、標準化収量を従属変数として重回帰分析を行なった。その結果を第12表に示す。可給態窒素は、試験開始～1997年まで、1998年～2005年までともに標準回帰係数の絶対値が最も大きく、収量に対する影響が最も大きかった。その値は、試験開始～1997年よりも1998年～2005年が大きく、前項での解析と併せて、有機物連用初期は窒素施用量が、後期は土壌の可給態窒素が収量に影響を与えることが示された。



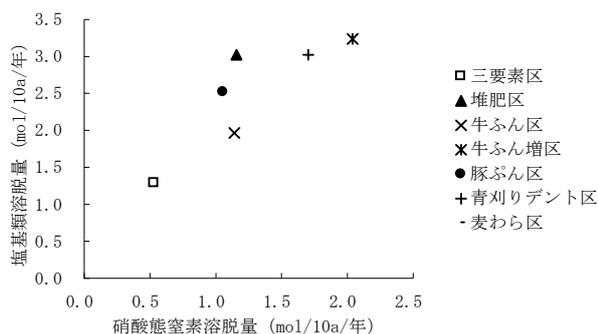
第10図 窒素収支と作土中の全窒素量増加量

第8表 硝酸態窒素溶脱量の推定量の変化 (mol/10a/年)

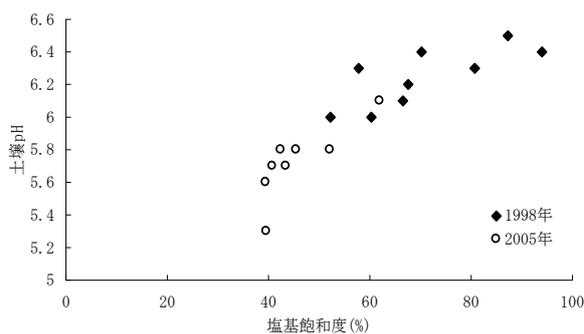
	試験開始～1997年	1998年～2005年
無窒素区	-0.38	-0.18
三要素区	-0.10	0.72
堆肥区	0.97	1.53
牛ふん区	0.74	1.52
牛ふん増区	1.44	2.11
豚ふん区	1.07	1.44
青刈りデント区	1.61	1.80
麦わら区	1.25	1.03

第9表 硝酸態窒素溶脱量および浸透水量から推定した浸透水中の硝酸態窒素濃度 (mgL⁻¹)

	試験開始～1997年	1998年～2005年
無窒素区		
三要素区		14.3
堆肥区	19.3	30.3
牛ふん区	14.6	30.2
牛ふん増区	28.7	41.9
豚ふん区	21.3	28.5
青刈りデント区	31.9	35.7
麦わら区	24.8	20.4



第11図 硝酸態窒素溶脱量と塩基類の溶脱量



第12図 塩基飽和度と土壌pH

第10表 各処理区の標準化収量

	試験開始～1997年	1998年～2005年
無窒素区	-1.69	-1.79
三要素区	-0.35	-0.43
堆肥区	0.38	0.60
牛ふん区	0.49	0.60
牛ふん増区	0.76	1.01
豚ふん区	0.67	0.66
青刈リデント区	-0.08	-0.32
麦わら区	0.04	0.27

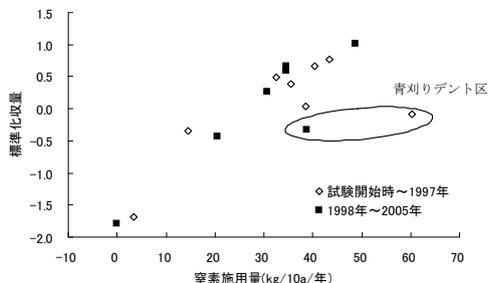
第11表 標準化収量を従属変数、窒素、りん酸及びカリウム施用量を独立変数とする重回帰結果

	試験開始～1997年		1998年～2005年	
	標準回帰係数	p値	標準回帰係数	p値
定数項	0.48		0.26	
窒素施用量	1.45 ※	0.02	0.35	0.20
りん酸施用量	-0.77	0.22	0.24	0.53
カリウム施用量	-0.71	0.08	-0.01	0.99

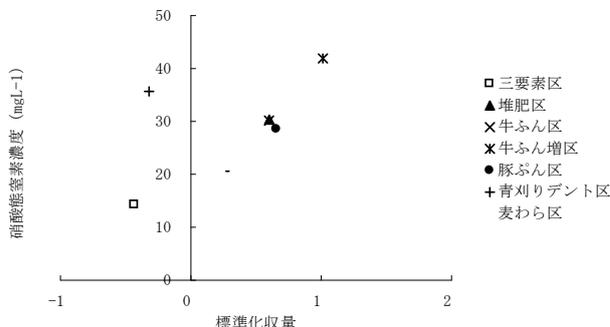
注. ※危険率5%水準で有意

第12表 標準化収量と土壌化学性における重回帰分析

	試験開始～1997年		1998年～2005年	
	標準回帰係数	p値	標準回帰係数	p値
定数項	0.03		0.07	
可給態窒素	0.58	0.28	0.89	0.10
可給態りん酸	-0.37	0.78	0.12	0.70
交換性カリウム	0.47	0.60	-0.41	0.35
pH	-0.41	0.66	0.13	0.72



第13図 標準化収量と窒素施用量



第14図 標準化収量と浸透水中の硝酸態窒素濃度 (1998～2005年の平均値)

3. 収量と浸透水中の硝酸態窒素濃度

標準化収量と浸透水中の硝酸態窒素濃度を第14図に示した。最も標準化収量大きい牛ふん増区は、硝酸態

窒素濃度も大きい。また、堆肥区、牛ふん区、豚ふん区では同程度の影響を受けていた。このことから、作物収量性および浸透水中の硝酸態窒素濃度への影響を考慮す

ると、稲わら堆肥、牛ふん、豚ふん堆肥の施用が望ましいと考えられる。1998年～2005年の各種有機物施用量は、稲わら堆肥1.7t/10a/年、牛ふん3.5t/10a/年、豚ふん堆肥0.9t/10a/年であるが、今後有機物を用いた環境保全型農業を推進していく上には、養分溶脱量を削減するための有機物施用量などの手法についての検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の実施に当たり、栃木県農業試験場 大貫悟技術員には圃場管理について、同高崎恭子技術員には試料の分析について補助いただいた。また、本研究をまとめるにあたり、栃木県農業試験場 亀和田國彦環境保全研究室長には、ご助言いただき、ここに記して心から感謝の意を表する。

引用文献

1. 藤原俊六郎(1999)農業技術体系 土壤施肥編 3 : 13-16 社団法人 農山漁村文化協会
2. 片峯美幸・亀和田國彦・鈴木康夫・伊藤良治・中山喜一・内田文雄(2000)黒ボク土畑における各種有機物の20年間連用が作物生育ならびに土壤理化学性に及ぼす影響. 栃木農試研報 50 : 25-32
3. 栃木県農作物施肥基準(1992)
4. 農林水産省農産園芸局農産課(1979)土壤環境基礎における土壤、水質及び作物体分析法
5. 浅沼修一(1999)農業技術体系 土壤施肥編 1 : 87-89 社団法人 農山漁村文化協会
6. 後藤忍・江口洋(1997)圃場条件における緑肥および有機質肥料からの塩基類の溶出. 土肥誌 68 : 640-644
7. 青山喜典・大塩哲視・松浦克彦・津高寿和(2002)有機質資材の11年間連用による水田土壌の変化と水稻の収量. 兵庫県農技研報(農業) 50 : 33-36
8. 大塩哲視・三好昭宏・青山喜典・松浦克彦・齋藤教子・津高寿和(2002)有機質資材の連用による転換畑の土壤変化とタマネギの収量. 兵庫県農技研報(農業) 48 : 22-27
9. 中津智史・田村元(2008)30年間の有機物(牛ふん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. 土肥誌 79 : 139-145
10. 家壽多正樹・八槇敦・戸辺学・安西徹郎(2003)黒ボク土における有機物および土壌改良資材の連用が作物収量および土壤に及ぼす影響. 土肥誌 74 :

673-677

11. 鎌田淳・武田正人・佐藤一弘(2006)カリ過剰処理が秋冬ブロッコリーの生育に及ぼす影響. 日本土壤肥料学会講演要旨集 52 : 148
12. 樋口太重(1983)土壤中における施用窒素の有機化と再無機化. 農技研報B 34 : 1-81
13. Kunihiko KAMEWADA (2007) Vertical distribution of denitrification activity in an Andisol upland field and its relationship with dissolved organic carbon:Effect of long-term organic matter application, Soil Science Plant Nutrition 53 : 401-412
14. 北村明久・久保田増栄(1985)鉍質畑に地力に対する有機物連用の影響 第1報 土壤中における各種有機物の分解と集積ならびに土壤理化学性の変化と作物生育. 高知県農林技術研究所研究報告 17 : 63-77
15. 香西清弘・平木孝典(1997)牛ふん堆肥の連用が土壤の理化学性に及ぼす影響. 香川県農業試験場研究報告 49 : 61-67
16. 進藤晴夫・島田みさと(2001)二毛作田水田の腐植組成に及ぼす堆肥連用効果. 土肥誌 72 : 92-95
17. 佐藤雄幸・井上一博・鈴木光喜・宮川栄雄(2001)褐色低地土における長期連作大豆に対する有機物連用効果. 日作東北支部報 44 : 61-64
18. 六本木和夫(1985)沖積畑土壌における稲わら堆肥連用に関する研究. 埼玉園試特研報 4号
19. 若澤秀幸・河合徹・神谷径明・堀田柏・青島洋一・鈴木則夫・松本昌直(1994)堆きゅう肥の連用が黄色土及び黒ボク土畑に及ぼす影響 第1報, 土壤の理化学性の変化とキャベツ, かんしょの収量. 静岡農試研報 38 : 85-98
20. 山田良三・沖野英男(1991)土壤の水分環境と作物収量 第2報, 堆肥連用畑土壌における水分特性と窒素吸収. 愛知農総研報告 23 : 281-288
21. 二見敬三・吉倉淳一郎・桑名健夫・青山喜典・入江和己・足立年一・相野公孝・宗林正・北川芳雄・堀本圭一・平田滋・吉本均・栗山雅夫(1995)有機物の多面的な特性と総合的施用技術. 土肥誌 66 : 65-73
22. 池田三雄(1983)農学における統計学概論 財団法人農林統計協会
23. 上山紀代美・藤原俊六郎・船橋秀登(1995)牛ふん堆肥の連用が作物収量と土壤の化学性に及ぼす影響. 神奈川農総研報 136 : 31-42

24. 久野智香子(1997)牛ふん堆肥連用における下層土への肥料成分・有機物の移動. 愛知研農総試研報 29 : 135-140
25. 斉藤研二・榎本優(1987)野菜畑における土壌管理と施肥改善に関する研究 第3報, 稲わら堆肥多施用と基肥窒素施用量が夏秋作キュウリの生育, 収量及び土壌性質に及ぼす影響. 福島農試研報 26 : 42-54
26. 上沢正志(1998)有機物施用の許容限界と地力維持. 農及園 73 : 211-215
27. 古野昭一郎(1997)火山灰土における堆肥およびきゅう肥の長期連用効果に関する研究. 農林水産技術会議事務局研究成果 95, 1-142