NARO 農研機構
国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

キャベツ栽培圃場における家畜ふん堆肥の多投入が土壌養分環境に及ぼす影響

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 村上, 弘治, 畔柳, 有希子 メールアドレス: 所属:
URL	https://repository.naro.go.jp/records/1698

キャベツ栽培圃場における家畜ふん堆肥の多投入が土壌養分環境に及ぼす影響

村上　弘治・畔柳　有希子

（平成20年12月4日受理）

Effects of Animal Manure Application on Soil Environment in Cabbage Field

Hiroharu Murakami and Yukiko Kuroyanagi

Ⅰ　緒　　言

露地野菜栽培においては，持続的な安定生産を念頭に，いわゆる「土づくり」のために家畜ふん堆肥等の有機質資材が圃場に多投入される傾向にあった．そして，これらの資材に含まれる養分については肥料成分として勘案されず，野菜を栽培するにあたって上乗せで化学肥料等の施用が行われてきた実態がある．そのため土壌診断に基づいた土壌・施肥管理を行ってこなかった圃場では，土壌中にリンやカリウム等の土壌養分が蓄積して塩基バランスが悪化したり，余剰養分が周辺環境を汚染したりする懸念が生じている（中井ら，2003；小原ら，2003，2004；瀧ら，2006；後藤ら，2008）．このような状況に対し，最近では適切で効率的な施肥の実施など，より一層の環境保全を重視した対応が求められている．また，一方では，家畜ふん堆肥をはじめとするバイオマスの農業面での有効利用の促進も期待されている．さらに，有機農業の推進も求められており，有機質資源の適切な利活用を含む，土壌養分環境や作物の養分吸収量に適合した総合的養分管理技術の確立が望まれている（村上，2004）．

以上のような状況を踏まえ，本研究では，露地キャベツ栽培における各種家畜ふん由来資材の多投入が土壌環境に及ぼす影響について，養分としての効果とともに，環境負荷物質としてのポテンシャルの面から評価した．

Ⅱ　材料および方法

1　供試資材

牛ふん堆肥は茨城県畜産研究センター（茨城県石岡市）で副資材としてオガクズを混合し，横型発酵槽で1次発酵させた後，堆積して2次発酵まで行われたものを，発酵豚ぷんは茨城県下妻市K養豚農家で，発酵鶏ふんは畜産草地研究所（茨城県つくば市）でそれぞれ縦型発酵槽で処理され，その後堆積されていたものを供試した．また，ナタネ油かすは市販品を使用した．これらの成分含量を測定するため，70℃で乾燥後，粉砕器（FOSS Tecator Cyclotec 1093 Sample Mill）で粉砕した．全窒素含量は粉砕試料を元素分析装置（elementar vario EL）により分析した．また，粉砕試料0.50gを硫酸－過酸化水素水法で分解後，リンは比色法（モリブデンブルー法，分光光度計BECKMAN DU530）で，その他の成分（カリウム，カルシウム，マグネシウム，ナトリウム，マンガン，銅，亜鉛，カドミウム）は高周波誘導結合プラズマ発光分析（ICP-AES，PerkinElmer Optima 3000）により分析した．さらに，培養法により窒素無機化量を測定した．すなわち，最大容水量の60%に調整した淡色黒ボク土（中央農業総合研究センターつくば内圃場の有機質資材無施用土壌，2mm篩別）20.0gに粉砕試料0.40gを添加・混合して，30℃・暗所で30〜90日間培養した．その後，2M塩化カリウムで抽出し，ブレムナー蒸留法にて無機態窒素含量を定量した（日本土壌協会，2000）．

〒305-8666　茨城県つくば市観音台3-1-1
野菜IPM研究チーム

表－１　試験区の設計概要

試験区	資材	施用量 (N kg/10a)				
		2003	2004	2005	2006	2007
化学肥料区	CDU	25	25	25	20	20
	S646[a]				5	5
	過リン酸石灰				(3.7)	(3.7)
牛ふん堆肥区	牛ふん堆肥	25	75	75	75	75
発酵鶏ふん区	発酵鶏ふん	25	50	50	50	50
発酵豚ぷん区	発酵豚ぷん	25	50	50[b]	50	50
混合区	牛ふん堆肥	12.5	37.5	10	5	5
	発酵鶏ふん	12.5	25	5		5
	ナタネ油かす			10	15	5
	過リン酸石灰				(2.2)	(3.8)

a：追肥.
b：牛ふん堆肥 N10kg/10a相当も施用.
( )：リン酸施用量 P_2O_5 kg/10a.

化学肥料としては緩効性肥料CDU（15-15-15），燐硝安加里S646（16-4-16），過リン酸石灰（P_2O_5：17.5%）を使用した．

２　供試圃場および試験区の設定

茨城県つくば市の中央農業総合研究センター本部地区内の圃場（淡色黒ボク土）でソルゴーを均一栽培した後，2003年より2007年まで５年間供試した．試験区（表－１）として，まず，牛ふん堆肥，発酵鶏ふん，発酵豚ぷんをそれぞれ単独に施用した区を設けた．2003年は全区ともキャベツの標準施肥量である全窒素25kg/10aに相当する施用量としたが，2004年からは含有全窒素の無機化率（原田，2001）を牛ふん堆肥は約30%，発酵鶏ふんおよび発酵豚ぷんは約50%として算出した量を施用した．これらの区では，前年に施用した分の残効は考慮せずに，当作分の必要養分を当年の施用により確保するように，翌年以降も引き続き多投入を継続した．次に，これらの家畜ふん由来資材やナタネ油かす等を推定される窒素の肥効発現パターンや前作の収量および土壌養分状態等を参考に組み合わせた混合区を設けた．すなわち，2003年は無機態窒素の発現パターンが比較的早いと考えられる発酵鶏ふんと逆に遅いと考えられる牛ふん堆肥を等量ずつ全窒素で25kg/10aになるように施用した．2004年はそれぞれの窒素無機化率を勘案し，牛ふん堆肥は前年の3倍量，発酵鶏ふんは２倍量とした．2005年は窒素，リン，カリが化学肥料区と同量になるように牛ふん堆肥と発酵鶏ふんの施用量を算出し，不足する窒素をナタネ油かすで補填した．2006年は前年までに施用した資材の残効も期待して全窒素量を20kg/10aに，リンとカリウムを30%減肥する設計とし，カリウムは牛ふん堆肥で賄い，不足する窒素はナタネ油かす，リンは過リン酸石灰で補った．2007年はリンは標準量としたが，窒素を15kg/10aに，カリウムを50%減肥することを検討するため，牛ふん堆肥，発酵鶏ふん，ナタネ油かす，過リン酸石灰を組み合わせた．さらに，対照区としては，化学肥料区（全窒素25kg/10a，CDU，燐硝安加里S646，過リン酸石灰）を設けた．化学肥料区は2005年までは全量基肥としていたが低収であったため，初期生育を改善するべく2006年以降は基肥20kgN/10aと追肥5kg/10a（定植約２週間後に施用）に変更した．各区の広さは2.5m×8.0mで１反復とした．

表－２　耕種概要　(作業年月日)

年度	2003	2004	2005	2006	2007
堆肥散布	8/29	7/27	7/28	7/27	7/31
施肥[a]	9/18	9/2	8/23	8/18	8/30
追肥[b]	ー	ー	ー	9/15	9/25
定植	9/18	9/3	8/29	8/24	9/10
収穫	1/13	12/6	11/22	11/6	11/26

a：化学肥料およびナタネ油かす.
b：化学肥料区のみ.

３　キャベツの栽培

表－２に示した耕種概要で年1作，128穴セルトレーで約４週間育苗した秋冬キャベツ‘秋徳’を株間30cm，条間60cm（4畝／区）で各区約100株ずつ定植・栽培した．害虫防除は2003年および2004年は無防除としたが，2005年以降は慣行に従い，化学合成農薬（殺虫剤）を適宜散布して実施した．収穫後，残さ（外葉）および地下部は土壌にすき込んだ．

４　土壌試料の採取および化学分析

経時的（資材施用前，定植時，収穫時）に深さ0-20cm(作土層）の土壌を円筒型採土器（大起理化工業，上径5.5cm・下径5.0cmおよび上径4.5cm・下径4.0cm，採土深各10cm）で，20-40cm（下層）の土壌をオーガ（直径2.5cm，採土深20cm）で３ヶ所から採取，混合し１試料とし，これを各区３反復採取した．

採取した土壌は湿潤土のまま石や根等を除去するため，土塊を崩して２mmに篩別した後，常法により各種化学分析を行った（土壌標準分析・測定法委員会編，1986)．

湿潤土については，風乾土10g相当量に水分が25mlになるように蒸留水を添加して１時間放置後にpHメータ（HORIBA pH/ION METER F-23）でpH(H_2O)を，

風乾土10g相当量に水分が50mlになるように蒸留水を添加して１時間振とう後に導電率計（HORIBA CONDUCTIVITY METER DS-14）でECを測定した．無機態窒素（アンモニア態窒素および硝酸態窒素）は試料10.0gに蒸留水100mlを添加して抽出し，イオンクロマトグラフ（アンモニア態窒素：TOA DKK IA-200，硝酸態窒素：東ソー CCP&8020）を用いて測定した．また，作土層の土壌については，土壌水分含量を最大容水量の60%に調整して，30℃・暗所にて30日間培養後，2M塩化カリウムで抽出した無機態窒素含量と培養前の数値から可給態窒素含量を算出した．

土壌を風乾後，可給態リン酸（トルオーグリン酸），1M酢酸アンモニウム液（pH7）で抽出した交換性カリウム，カルシウム，マグネシウム，ナトリウム，マンガンおよび0.1M塩酸で抽出した銅，亜鉛，カドミウムをICP-AES（前出）にて分析した．さらに，乳鉢で風乾土を磨砕して元素分析装置（前出）にて全炭素・全窒素含量を測定した．

５　pFセンサーおよびECセンサーによる経時計測

オーガを用いて地表下30cmに埋設したセンサーにより土壌水分（藤原製作所FV-406(pF8ch)）およびEC（藤原製作所FV-406EC）を１時間毎に自動計測した．

６　土壌浸透水の採取および化学分析

試験供試前に層別に土壌を掘り上げて，採水面が地下100cmになるようにキャピラリーライシメーター（大起理化工業COMH-9，30cm×60cm，高さ80cm）を１区あたり１台埋設し，降水量に応じて経時的に浸透水を採取した．得られた試料はそのままpHやECを測定するとともに，イオンクロマトグラフ（前出）によりアンモニア態窒素および硝酸態窒素濃度を測定した．また，ICP-AES（前出）により含有イオンの分析を行った．

７　キャベツ収量調査および成分分析

収穫時に各区内の全個体について結球の有無（結球率）を調査するとともに，各区10個体について地上部重および結球重（収穫重）を測定した．その後，植物体地上部を外葉部分と結球部分とに分けて80℃で乾燥し，乾物重を測定した．粉砕器（前出）で粉砕した後，全炭素および全窒素は元素分析装置（前出）で，無機成分（リン，カリウム，カルシウム，マグネシウム，ナトリウム，マンガン，銅，亜鉛，カドミウム）は0.20gを硝酸分解法にて分解し，ICP-AES（前出）にて測定した（植物栄養実験法編集委員会編，1987）．

Ⅲ　結果および考察

１　供試資材の性質および圃場投入養分量

供試資材の分析値（供試5年分の平均値）を表－３に示した．牛ふん堆肥は他の資材に比べて全窒素，リン含量が低く，窒素に比べてカリウムが多く，銅も多い傾向であった．発酵鶏ふんはECが高く，銅以外のリン，カリウム，カルシウム，ナトリウム等が牛ふん堆肥に比べて多く，発酵豚ぷんは発酵鶏ふんほどではないが銅以外は全般に高く，特にリンやマグネシウム，亜鉛が多い傾向であった．ナタネ油かすは全窒素含量が高く，リンやカリウム等他の成分は低い傾向であった．これらはいずれも文献値（西尾，2007）と大きくは異なっておらず，一般的な品質のものであると判断された．

表－１に示した全窒素施用量に伴う他の成分の圃場投入量を各資材の成分含有量を基に算出して表－４に示した．牛ふん堆肥区，発酵鶏ふん区および発酵豚ぷん区（以下，まとめて「家畜ふん堆肥単独施用区」と称する）

表－３　供試資材の分析値

資材		pH	EC	T-C	T-N	C/N	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	Zn	Cd
			dS/m	乾物%	乾物%		g/kg[b]								mg/kg[b]
牛ふん堆肥	平均[a]	8.8	4.7	31.8	1.3	24.7	3.9	17.0	11.5	3.3	3.8	0.2	0.3	0.1	0.0
	SE	0.1	0.1	0.8	0.1	1.9	0.5	1.1	1.4	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
発酵鶏ふん	平均[a]	7.9	8.9	27.3	2.6	10.5	28.7	32.7	173.9	9.9	6.1	0.5	0.1	0.4	0.1
	SE	0.6	0.4	0.5	0.0	0.1	1.1	2.2	13.6	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.1
発酵豚ぷん	平均[a]	8.1	5.5	37.5	3.2	11.7	28.6	23.7	41.9	12.8	4.0	0.3	0.2	0.6	0.3
	SE	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.8	1.2	1.3	0.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1
ナタネ油かす	平均[a]	5.7	3.2	43.9	6.7	6.6	15.0	13.1	10.0	7.6	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0
	SE	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.3	0.8	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

a：供試5年分の平均値．
b：乾物重あたり．

表－４　資材施用に伴う投入成分量

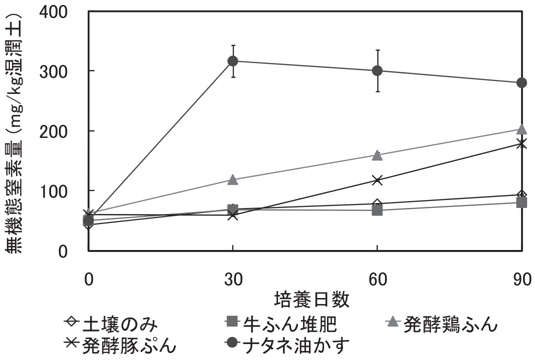
年	処理区	N	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	Zn	Cd
		kg/10a									mg/10a
2003	化学肥料区	24.8	10.8	20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	牛ふん堆肥区	24.8	11.5	45.5	37.3	7.1	8.8	0.4	1.0	0.2	0.3
	発酵鶏ふん区	25.0	31.0	40.1	165.8	13.2	7.4	0.5	0.1	0.5	0.2
	発酵豚ぷん区	25.2	21.2	20.8	33.3	11.4	5.0	0.3	0.2	0.6	0.4
	混合区	24.9	21.3	42.9	101.6	10.1	8.1	0.5	0.6	0.3	0.3
2004	化学肥料区	24.8	10.8	20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	牛ふん堆肥区	74.9	18.3	59.3	36.6	12.5	10.9	0.6	1.7	0.3	0.0
	発酵鶏ふん区	49.8	55.1	55.0	274.5	17.0	10.6	0.8	0.2	0.7	0.5
	発酵豚ぷん区	49.2	43.4	32.9	61.1	17.5	5.1	0.4	0.2	0.8	0.6
	混合区	63.2	37.3	57.9	158.5	15.0	10.9	0.7	0.9	0.5	0.3
2005	化学肥料区	24.8	10.8	20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	牛ふん堆肥区	75.0	21.1	104.9	70.7	22.4	29.0	1.4	1.4	0.6	0.0
	発酵鶏ふん区	50.3	56.5	64.1	455.4	20.5	12.9	1.0	0.2	0.7	0.0
	発酵豚ぷん区	60.2	53.3	51.3	81.0	23.7	9.7	0.7	0.4	1.0	0.0
	混合区	25.0	10.6	22.5	56.4	6.3	5.2	0.3	0.2	0.2	0.0
2006	化学肥料区	25.0	10.9	20.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	牛ふん堆肥区	75.0	23.8	155.1	89.6	30.0	31.8	2.0	1.1	1.1	0.0
	発酵鶏ふん区	50.0	57.7	69.2	330.1	17.4	10.8	1.0	0.2	0.7	0.0
	発酵豚ぷん区	50.0	47.0	43.3	73.1	20.6	5.3	0.5	0.3	1.0	0.0
	混合区	20.0	7.1	13.5	8.2	3.8	2.1	0.1	0.1	0.1	0.0
2007	化学肥料区	25.0	10.9	20.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	牛ふん堆肥区	75.0	20.6	89.5	58.6	20.3	24.5	1.3	1.0	0.7	0.0
	発酵鶏ふん区	50.0	46.7	49.6	296.8	14.7	10.2	0.8	0.1	0.6	0.0
	発酵豚ぷん区	50.0	37.9	29.0	52.9	16.9	4.5	0.4	0.2	0.8	0.0
	混合区	15.0	11.0	11.7	34.3	3.3	2.7	0.2	0.1	0.1	0.0

では，キャベツの標準施肥量の化学肥料区に比べて，いずれもリン，カリウムの投入量が多かった．他には牛ふん堆肥でナトリウム，マンガン，銅，発酵鶏ふんでカルシウムの投入量が他区に比べて多かった．一方，混合区は2005年以降は成分量を勘案して施用したため，家畜ふん堆肥単独施用区に比べると特定成分が過度に投入されることはなかった．

また，各資材の窒素の無機化パターンを図－１に示した．ナタネ油かすは比較的短期間に窒素の無機化がみられたものの，他の家畜ふん由来資材では無機化が緩慢であった．発酵鶏ふんは培養期間中ほぼ一定の割合で無機化が進行したが，発酵豚ぷんは30日目以降とやや遅く無機化が始まり，その後は一定の割合で進行した．これら資材の含有全窒素に対する培養90日後の無機化率は，ナタネ油かすで約18%，発酵鶏ふんで約23%，発酵豚ぷんで約14%であった．一方，牛ふん堆肥は90日後でも土壌単独培養の場合よりも値が小さく，無機化よりも，むしろ有機化が進行していたと考えられた．

２　キャベツ収量

2004年までは無防除に伴う虫害や地力不足等による生育不良で，化学肥料区を含めて収量はほとんど得られ



図－１　供試資材の窒素無機化パターン

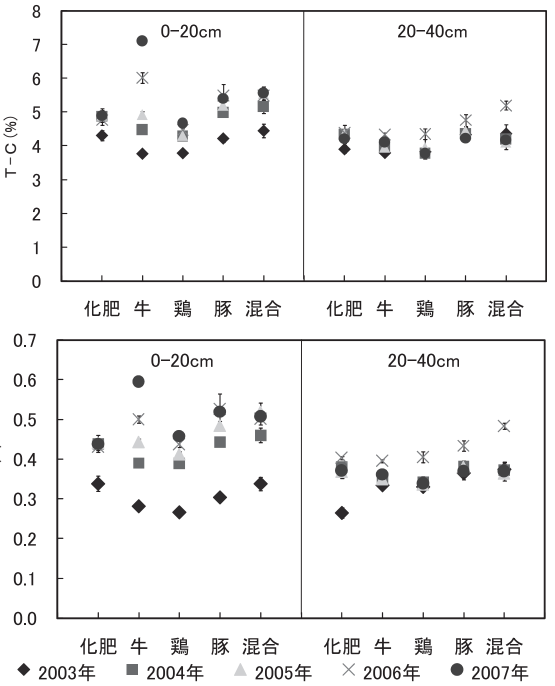
土壌由来分も含めた培養法（30℃）による値．
縦棒は標準誤差を示す（n=3）．

表－５　キャベツ収量および収量指数

試験区	2005 収量 t/10a	2005 指数[a]	2006 収量 t/10a	2006 指数[a]	2007 収量 t/10a	2007 指数[a]	平均指数[b]
化学肥料区	1.7	100	8.0	100	4.7	100	100
牛ふん堆肥区	2.1	128	6.0	75	2.4	51	85
発酵鶏ふん区	2.2	133	9.3	116	4.1	88	112
発酵豚ぷん区	3.9	233	9.6	120	4.2	90	148
混合区	2.8	165	7.6	95	2.0	43	101

a：化学肥料区を100とした指数．
b：3年間の平均．

なかった．2005年はキャベツの標準的な収量の目安である5t/10aに比べると少ないものの，家畜ふん堆肥単独施用区（2.1-3.9t/10a）の方が化学肥料区（1.7t/10a）よりも多かった（表－５）．2006年は全体に収量が多かったが，化学肥料区（8.0t/10a）に比べると，牛ふん堆肥区（6.0t/10a）では少なく，発酵鶏ふん区（9.3t/10a）および発酵豚ぷん区（9.6t/10a）では多かった．2007年も家畜ふん堆肥単独施用区各区の傾向は前年とほぼ同様であったが，化学肥料区（4.7t/10a）に比べると収量は少なかった（2.4-4.2t/10a）．一方，混合区は2005年は牛ふん堆肥と発酵鶏ふん，ナタネ油かすを施用したが，牛ふん堆肥や発酵鶏ふんの単独施用よりも収量は多かった（2.8t/10a）．これは窒素無機化の遅い牛ふん堆肥に比較的無機化の早い発酵鶏ふんやさらに無機化が迅速なナタネ油かすを組み合わせた結果，窒素の肥効発現が牛ふん堆肥や発酵鶏ふん単独の場合よりも進み，収量の確保につながったためと考えられた．牛ふん堆肥とナタネ油かす等を全窒素量20kg/10aに減肥して施用した2006年は，牛ふん堆肥区よりも収量は多く，化学肥料区とほぼ同等であった（7.6t/10a）．この時は，前年までに施用された資材の残効も期待されたが明確ではなかったため，むしろ窒素施用量におけるナタネ油かすの比率が高かったことが，減肥しても肥効の維持と収量の確保に結びついたと考えられた．全窒素量で15kg/10aまで減肥して牛ふん堆肥，発酵鶏ふん，ナタネ油かす等を施用した2007年は，牛ふん堆肥区よりも収量（2.0t/10a）は少なかった．この原因は施用資材におけるナタネ油かすの比率が低く，残効も十分得られなかったためと推測された．



図－2　土壌中の全炭素および全窒素含量

横軸の試験区は，化肥：化学肥料区，牛：牛ふん堆肥区，
鶏：発酵鶏ふん区，豚：発酵豚ぷん区，混合：混合区を表す．
0-20cmおよび20-40cmは採土した深さ．
毎年資材を施用する前の分析値．縦棒は標準誤差を示す．

気象条件等に起因すると考えられる収量の年次による変動が大きかったため，化学肥料区の収量を100とした場合の指数を表－５に示した．３年間の平均でみると，発酵鶏ふん区と発酵豚ぷん区では多投入により収量は化学肥料区よりも高かったが，牛ふん堆肥区ではやや低い傾向であった．また，牛ふん堆肥区は年々化学肥料区に対する指数が低下しており，連用効果が認められなかった．一方，混合区では2006年のようにある程度（25%程度）の減肥をしても施用資材の組み合わせによっては，収量の確保は可能であったが，それ以上の減肥あるいは施用資材の組み合わせ方法によっては収量の確保は難しい場合があると判断された．

３　土壌養分含量の動態

ａ　土壌中の全炭素および全窒素含量

土壌中の全炭素含量および全窒素含量を図－２に示した．深さ0-20cmの作土層では，いずれの区においても全炭素含量や全窒素含量が2003年の供試前に比べて増大する傾向がみられた．この増大は2003年の定植時には既に認められ（データ略），計算上は化学肥料や家畜ふん由来資材の施用に伴う投入量よりも多かったが，これらを全く施用していない場合には増大が認められなかったことから（データ略），詳細は不明な点はあるものの，やはりこれらの資材を施用した結果と考えられた．家畜ふん由来資材を施用した区では２年目以降もその連用により年々増大する傾向がみられた．特に，牛ふん堆肥区において顕著で，全炭素含量が2007年の資材施用前には約7.1%に，全窒素含量が約0.6%となった．牛ふん堆肥には副資材としてオガクズが入っていてC/N比が高く，施用量も多いことが一因と考えられた．また，資材連用とともに収穫残さのすき込みの影響もあると考えられた．一方，20-40cmの下層ではいずれの試験区でもほとんど変化はみられず，残さすき込み等の影響は作土層に限られ，耕うんが及ばない下層には影響しなかったと考えられた．

b　土壌pH

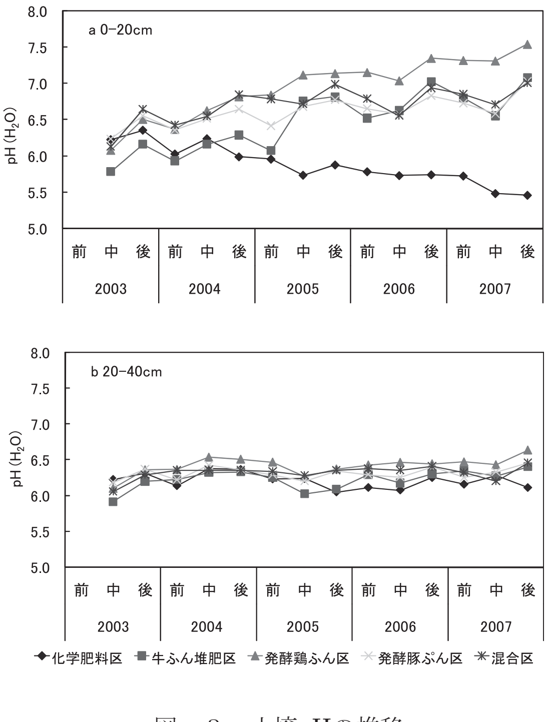
作土層の土壌pH（湿潤土）は６前後から化学肥料区では5.5程度まで経年的にやや低下する傾向であったが，家畜ふん堆肥単独施用区や混合区ではいずれも７前後まで上昇し，特に，発酵鶏ふん区で7.5と高くなった（図－３ａ）．一方，下層では発酵鶏ふん区で全般にやや高い傾向がみられたが，全体としては大きな変化はみられず6.0～6.5で推移した（図－３ｂ）．このようにpHの変動も作土層に限られていた．また，施用資材のpH自体は発酵鶏ふんよりも牛ふん堆肥の方が高かったが，土壌pHは発酵鶏ふん区の方が高かった．これは発酵鶏ふんの施用に伴うカルシウムの投入量が顕著に多いためと考えられた．

c　土壌EC

作土層の土壌ECは資材施用後の定植時に上昇し，収穫時には資材施用前とほぼ同じ程度まで低下する周期的変動を示し，また，経年的には混合区以外では若干高くなっていく傾向を示した（図－４ａ）．資材を施用した後の定植時において，資材別にみると，発酵鶏ふん区が最も高くなり，次いで，牛ふん堆肥区，発酵豚ぷん区，化学肥料区の順であった．混合区は施用資材の種類と量の影響により変動し，2006年までは化学肥料区より高く推移していたが，施用量を削減して２年目の2007年には化学肥料区よりも低くなった．一方，下層では2004年までは大きな変化はみられなかったが，2005年以降は家畜ふん由来資材施用による影響が現れ，いずれも化学肥料区よりも高い値を示した（図－４ｂ）．全体には変動幅は作土層よりも小さいものの，作土層と同様の時期による周期的な変動もみられた．ただし，牛ふん堆肥区の方が発酵鶏ふん区よりも高く推移し，化学肥料区と混合区では明確な周期はみられなかった．これらの下層における変動が当初認められず2005年以降になってみられたのは，ECに影響を及ぼすイオンが水移動に伴って下層へ達するのに時間を要するためと思われた．また，牛ふん堆肥の場合には施用量が多く，投入される成分が多いことが，発酵鶏ふんの場合にはさらに資材のEC自体が高いことが，他の区よりもECの変動が顕著であった一因であると推察された．

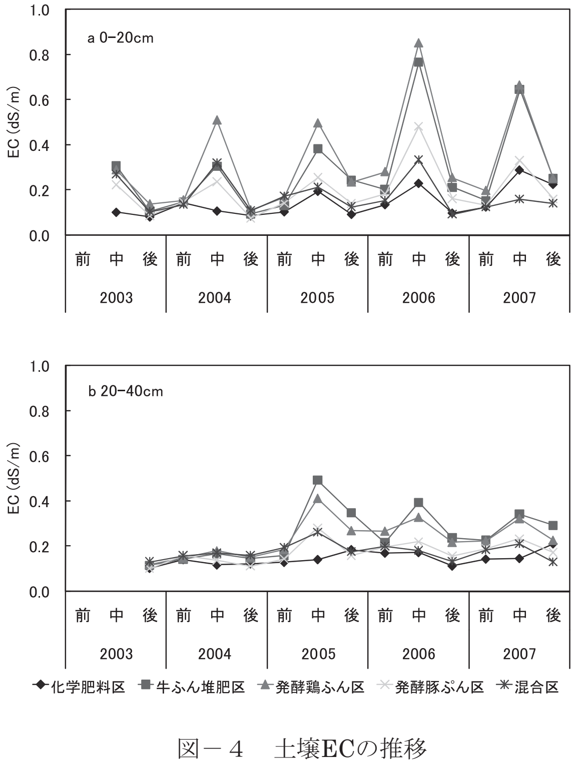
d　土壌無機態窒素含量

土壌中の無機態窒素含量（アンモニア態窒素および硝酸態窒素含量）は，概観すると発酵鶏ふん区＞化学肥料区，発酵豚ぷん区＞混合区＞牛ふん堆肥区という傾向であった（図－５）．牛ふん堆肥区では，作土層は当初３年間は資材施用後の定植時の方が施用前よりも無機態窒



図－３　土壌pHの推移

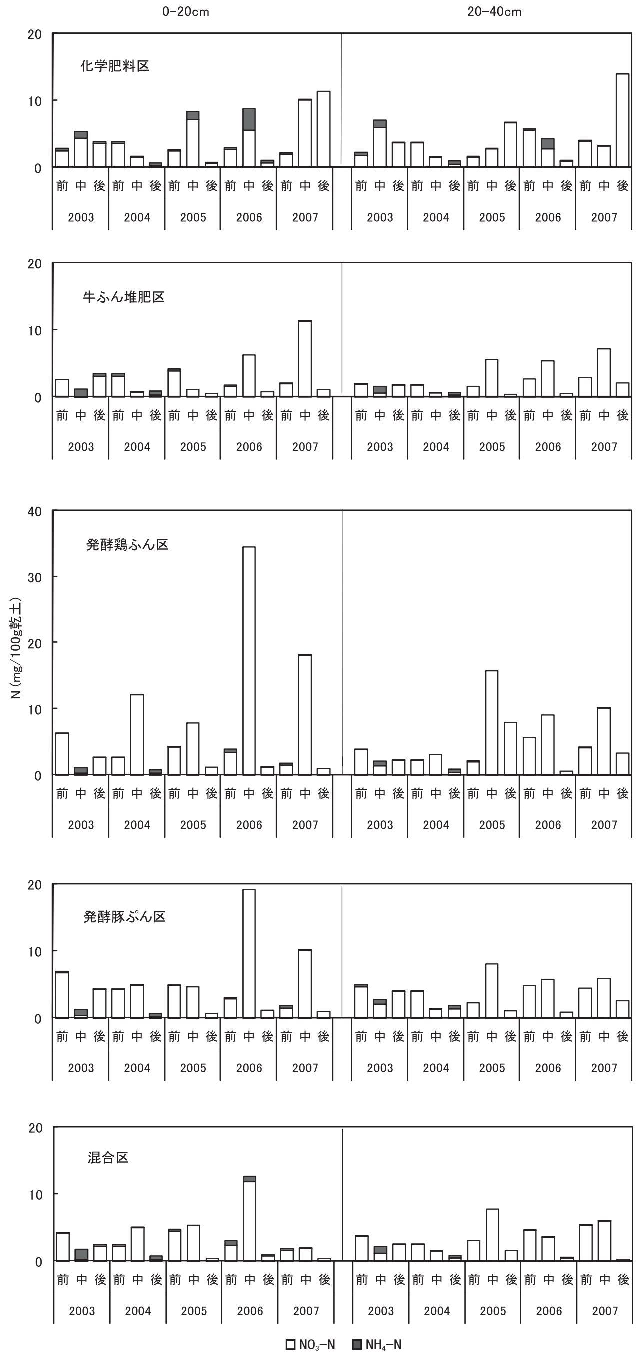
横軸の採土時期で，前：資材施用前，中：定植時，後：収穫後を示す．



図－４　土壌ECの推移

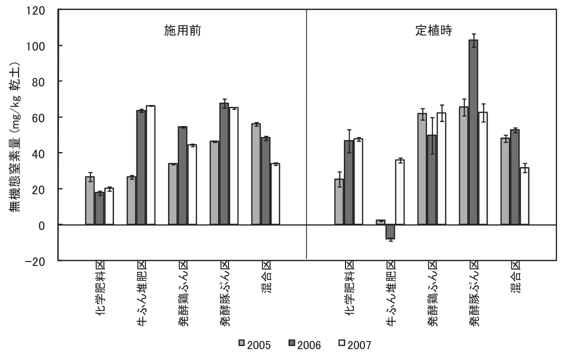
横軸の採土時期で，前：資材施用前，中：定植時，後：収穫後を示す．

素含量が少なかったが，４年目以降は定植時の方が多くなり，下層では３年目から定植時に多くなる傾向がみられた．発酵鶏ふん区では，作土層，下層ともに初年目は定植時に資材施用前よりも減少していたが，２年目以降は施用前よりも増加していた．発酵豚ぷん区では，作土層においては初年目は定植時に資材施用前よりも減少していたが，２，３年目はほぼ同程度，４年目以降は増加する傾向であった．下層では牛ふん堆肥区と同様に３年目以降に増加する傾向であった．化学肥料区では，２年目以外は，作土層では資材施用前よりも定植時に増加する傾向にあったが，下層では明確な傾向はなかった．混合区では，作土層では２年目以降に施用前よりも定植時に増加していたが，下層ではほぼ同程度であった．この無機態窒素含量（主に硝酸態窒素含量）の多少とEC値の大小とは一致していない場合もあるものの，2004年および2005年の牛ふん堆肥区以外の作土層ならびに下



図－５　土壌中の無機態窒素含量の推移

横軸の採土時期で，前：資材施用前，中：定植時，後：収穫後を示す．



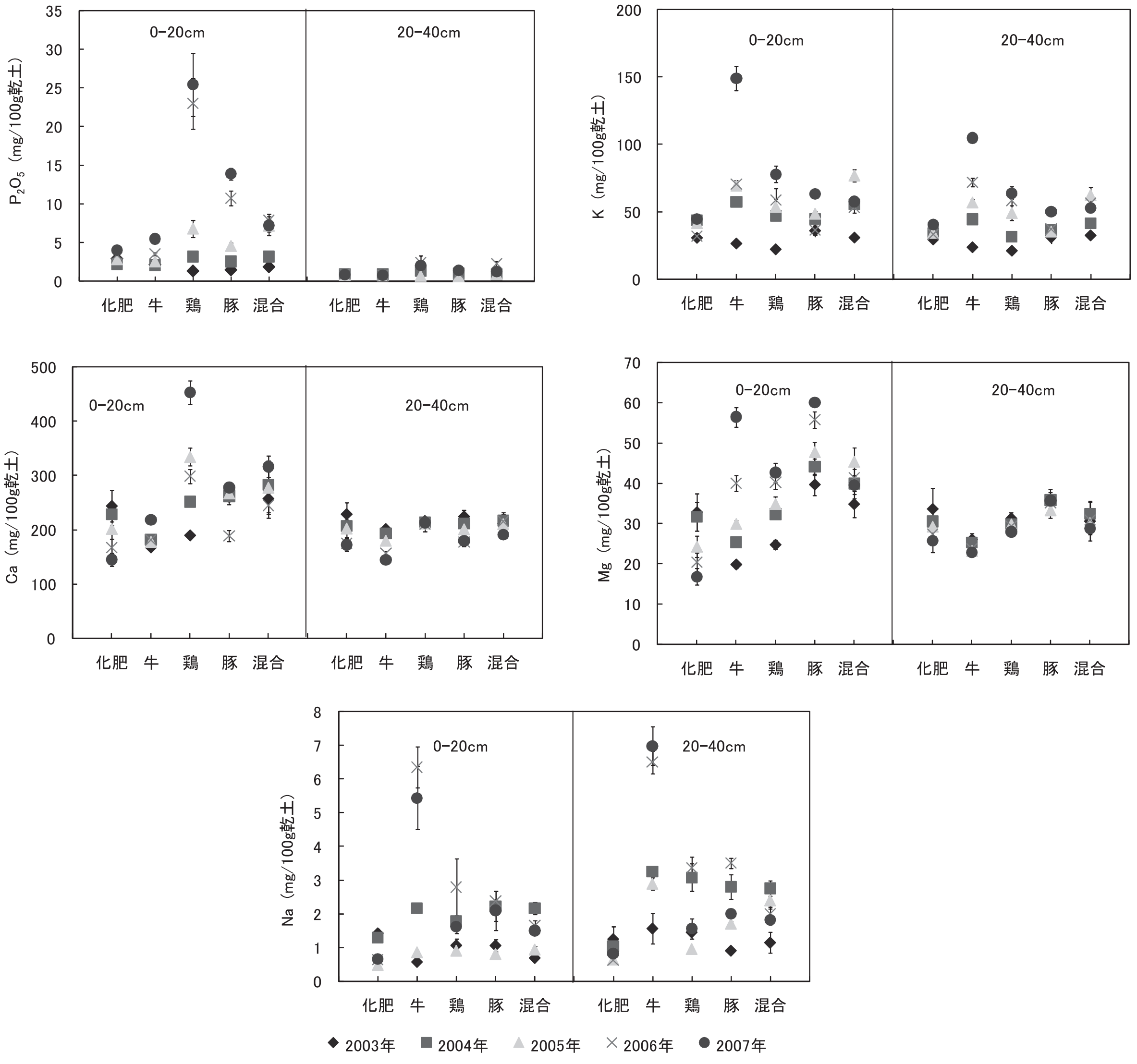
図－６　土壌中の可給態窒素含量

培養法（30℃・30日間）による値．
縦棒は標準誤差を示す．

層でのECの変動にほぼ一致しており，硝酸態窒素含量がECに影響を及ぼしていることが推測された．

e　土壌中の可給態窒素含量

2005年から2007年に測定した可給態窒素含量は，当年の資材施用前には，家畜ふん由来資材を施用した区の方がほとんどの場合で化学肥料区よりも多かったが，資材施用後の定植時には，発酵鶏ふん区と発酵豚ぷん区では化学肥料区よりもやや多かったものの，牛ふん堆肥区では少なかった（図－６）．この牛ふん堆肥区の定植時における減少は，資材連用による効果（前年までの施用分に由来する窒素の無機化）が発現せず，資材の無機化パターンの結果で示したように，むしろ牛ふん堆肥の投入に伴い，土壌中の窒素の有機化が進行していたためと



図－７　土壌中の養分含量の経年変化（１）多量要素

横軸の試験区は，化肥：化学肥料区，牛：牛ふん堆肥区，鶏：発酵鶏ふん区，豚：発酵豚ぷん区，混合：混合区を示す．
資材施用前の分析値．縦棒は標準誤差を示す．

考えられた．一方，発酵鶏ふん区では連用効果もあると思われるが，30日程度でも窒素の無機化が進行しうるため，増大したと考えられた．発酵豚ぷん区では30日程度では牛ふん堆肥と同様に窒素の無機化が期待できないと考えられたが，実際には増大していた．これは牛ふん堆肥に比べて面積あたりの施用量（土壌量に対する施用資材量の比率）が少ないことや連用に伴う前年までの施用分からの無機化が促進されたことなどが要因として推測された．また，混合区は家畜ふん堆肥単独施用区よりも施用量が少ないこともあり，定植時には化学肥料区と同程度であった．

f　土壌中の塩基含量

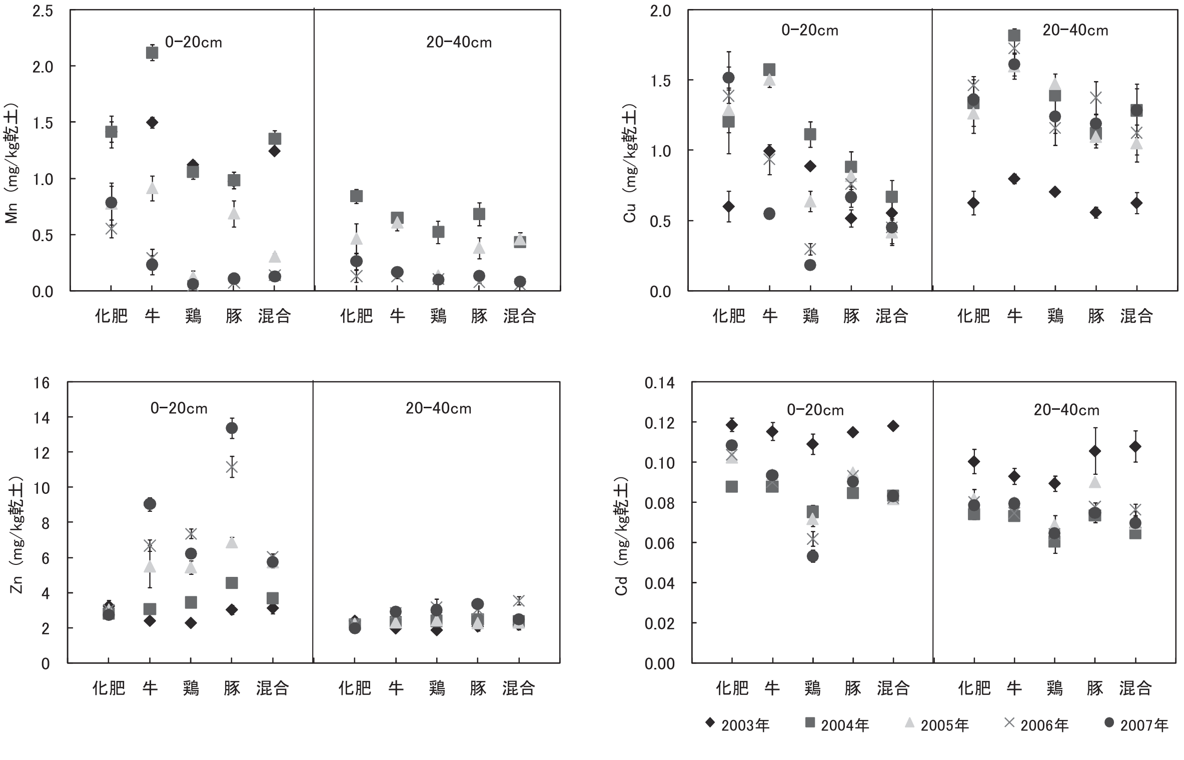
資材施用前に毎年採取した土壌の養分含量の経年的な変化を図－7，8に示すとともに，その傾向を表－6にまとめた．その結果，化学肥料区では作土層でカリウム，銅は増加，リン，亜鉛，カドミウムは大きな変化はなく，カルシウム，マグネシウム，ナトリウム，マンガンは減少傾向にあったが，下層では銅が増加し，マンガン，カドミウムが減少した以外，大きな変化はなかった．一方，牛ふん堆肥区では作土層でリン，カリウム，マグネシウム，ナトリウム，亜鉛は増加，カルシウムは変化なし，

表－6　土壌中の養分含量の経年的変化傾向[a]

	試験区	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	Zn	Cd
作土層	化学肥料区	→	↑	↓	↓	↓	↓	↑	→	→
	牛ふん堆肥区	↑	↑↑	→	↑	↑↑	↓↓	↓	↑↑	↓
	発酵鶏ふん区	↑↑↑	↑↑	↑	↑	↑	↓↓↓	↓↓	↑	↓↓
	発酵豚ぷん区	↑↑	↑	→	→	↑	↓↓↓	→	↑↑	↓
	混合区	↑↑	↑	→	→	↑	↓↓↓	→	↑	↓
下層	化学肥料区	→	→	→	→	→	↓↓	↑	→	↓
	牛ふん堆肥区	→	↑↑	↓	→	↑↑	↓↓	↑	↑	→
	発酵鶏ふん区	→	↑↑	→	→	→	↓↓	↑	↑	↓
	発酵豚ぷん区	→	↑	→	→	↑	↓↓	↑	↑	↓
	混合区	→	↑	→	→	↑	↓↓	↑	→	↓

a：2003年試験供試前の土壌養分含量に対する2007年資材施用前の土壌養分含量の増減傾向を示す．
↑↑↑：供試前に比べ10倍以上，↑↑：同3～10倍，↑：同2～3倍程度，
→：同程度，↓：0.5倍程度，↓↓：半分以下，↓↓↓：1/10以下．

マンガン，銅，カドミウムは減少し，下層でもカリウムやナトリウムなどが増加した．発酵鶏ふん区では作土層でリン，カリウム，カルシウム，マグネシウム，ナトリウム，亜鉛は増加，マンガン，銅，カドミウムは減少し，下層では特にカリウムが増加した．また，発酵豚ぷん区では作土層でリン，カリウム，ナトリウム，亜鉛は増加，マグネシウムはやや増加，カルシウム，銅は大きな変化はなく，マンガン，カドミウムは減少した．混合区では作土層でリン，カリウム，ナトリウム，亜鉛が増加したが，牛ふん堆肥区あるいは発酵鶏ふん区に比べると施用量が少ないため，増加程度は小さかった．カルシウム，マグネシウム，銅は大きな変化はなく，マンガン，カド



図－8　土壌中の養分含量の経年変化（2）微量要素

横軸の試験区は，化肥：化学肥料区，牛：牛ふん堆肥区，鶏：発酵鶏ふん区，豚：発酵豚ぷん区，混合：混合区を示す．
資材施用前の分析値．縦棒は標準誤差を示す．

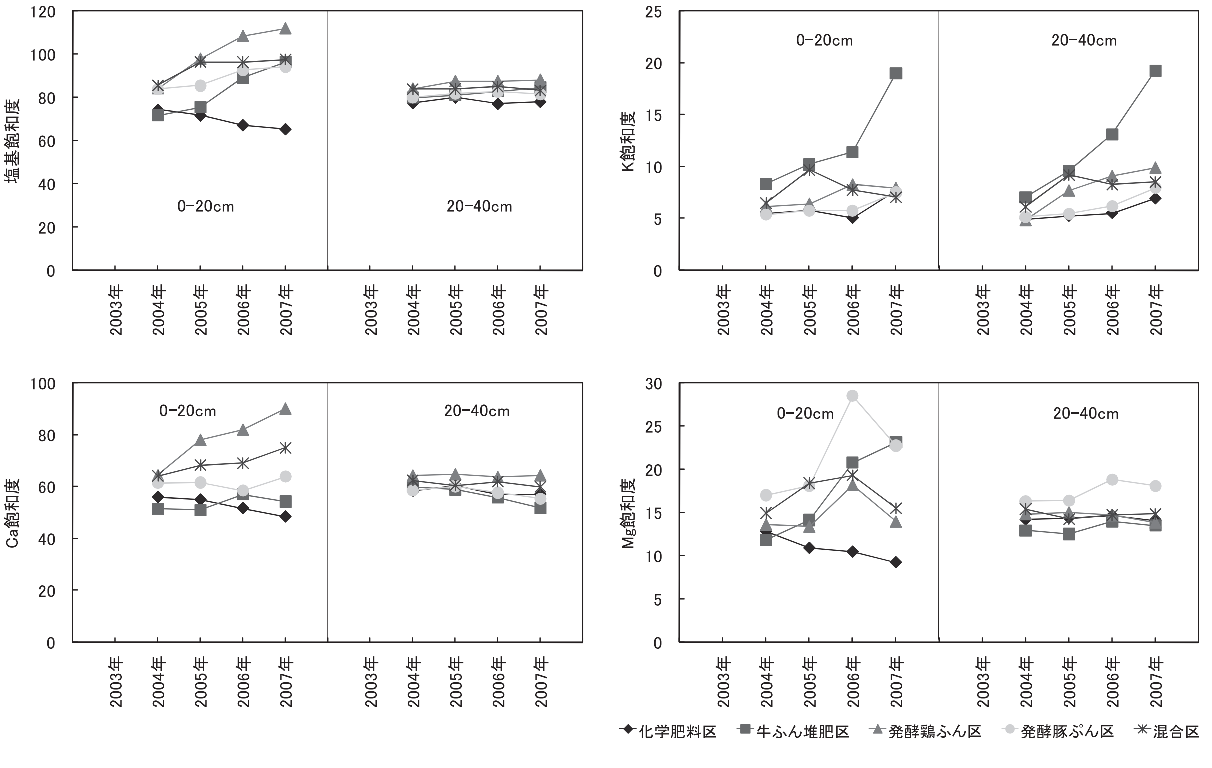
ミウムは減少した．また，発酵豚ぷん区や混合区の下層では大きな変動はみられなかった．2005年以降資材施用量を減らした混合区では，３年目以降の養分含量の変動が概して少なくなり，養分富化傾向に歯止めがかかる傾向がみられた．

これらの養分の動態において，多量要素の増加程度は資材施用に伴う投入量によく一致していたが，微量要素については必ずしも一致していなかった．投入養分量は全量分析の結果であるが，ここでの数値は抽出法による交換性のものの数値である．特に，微量要素に関しては有機態をはじめ，塩においても溶解性の異なる様々な形態をとりうる．このため，投入量と養分動態とが合致しない場合がみられたと推測された．

また，上述のように，下層では牛ふん堆肥区のカリウムとナトリウム，発酵鶏ふん区のカリウムでは顕著な増加が認められたが，他の成分や他の区ではほとんど変動がみられなかった．これらの成分は，資材施用前に比べて施用後の定植時には顕著に増大し，収穫時にはやや減少するECの変動と同様の周期的変動を示していた（データ略）．このことから牛ふん堆肥区と発酵鶏ふん区の下層におけるECの上昇にはこれらの成分が影響を及ぼしていたことが推測された．

カルシウム飽和度は作土層において発酵鶏ふん区と混合区で上昇傾向にあり，カリウム飽和度は牛ふん堆肥区で作土層，下層とも顕著な上昇傾向で，下層では混合区以外の区でもやや上昇傾向を示し，マグネシウム飽和度は牛ふん堆肥区と発酵豚ぷん区の作土層で上昇傾向であった（図－９）．これら以外では，いずれも大きくは変化していなかった．このため2007年には作土層の牛ふん堆肥区のカリウム飽和度および発酵鶏ふん区のカルシウム飽和度は基準値に比べて高い傾向が認められた．また，この結果，塩基飽和度は家畜ふん由来資材を施用した区のいずれの作土層でも上昇傾向で，逆に，化学肥料区ではやや下降傾向であった．一方，下層では牛ふん堆肥区を含めてほぼ一定であった．このように全体としては量的にカルシウムの影響が大きいため，それに合致した傾向であったが，牛ふん堆肥区においてはカリウムの影響も認められた．

作土層のCaO／MgOは化学肥料区では当初の6.3からやや増加し7.3程度に，発酵鶏ふん区では6.5から9.0程度まで上昇し，いずれも高い値であったが，混合区では6.2が6.7に，牛ふん堆肥区および発酵豚ぷん区ではそれぞれ7.1，5.5から３～４程度に低下した．一方，下層では６前後で大きな変化はみられなかった．このため，混



図－９　土壌塩基バランスの経年変化

毎年の資材施用前の分析値の平均より算出．

合区の作土層と各区の下層では適正範囲内であったが，それ以外では高いあるいは低い値であった．作土層の変化は，上述の塩基飽和度などからも発酵鶏ふんの場合はカルシウム投入量が多かったためと考えられ，牛ふん堆肥や発酵豚ぷんはマグネシウムに比べるとカルシウム投入量が相対的に少なかったためと考えられた．

作土層のMgO/K_2Oは発酵豚ぷん区ではばらつきはみられたが，ほぼ一定の1.4程度で，他の区ではいずれも約1.5からやや減少し，0.5～1と適正範囲よりもやや低い値であった．一方，下層ではいずれも1.5前後から0.3～1.0程度に低下する傾向であった．これはいずれもマグネシウムの投入量に比べて，カリウムの投入量が多かったためと判断された．

g　土壌水分および土壌ECの動態

地表下30cmに設置したpFセンサーにより測定した土壌水分の動態には試験区間で大きな差はみられなかったが，家畜ふん由来資材を施用した区の方が化学肥料区よりも全般に水分含量が高い傾向であった（データ略）．すなわち，土壌の保水性が向上していることが推察され，このことが浸透水量が化学肥料区よりも家畜ふん堆肥単独施用区において多かった原因であると考えられた（データ略）．ECセンサーによる土壌ECは概して家畜ふん由来資材施用区の方が化学肥料区よりも高く推移しており（データ略），下層におけるECと同じ傾向であった．

4　土壌浸透水の動態

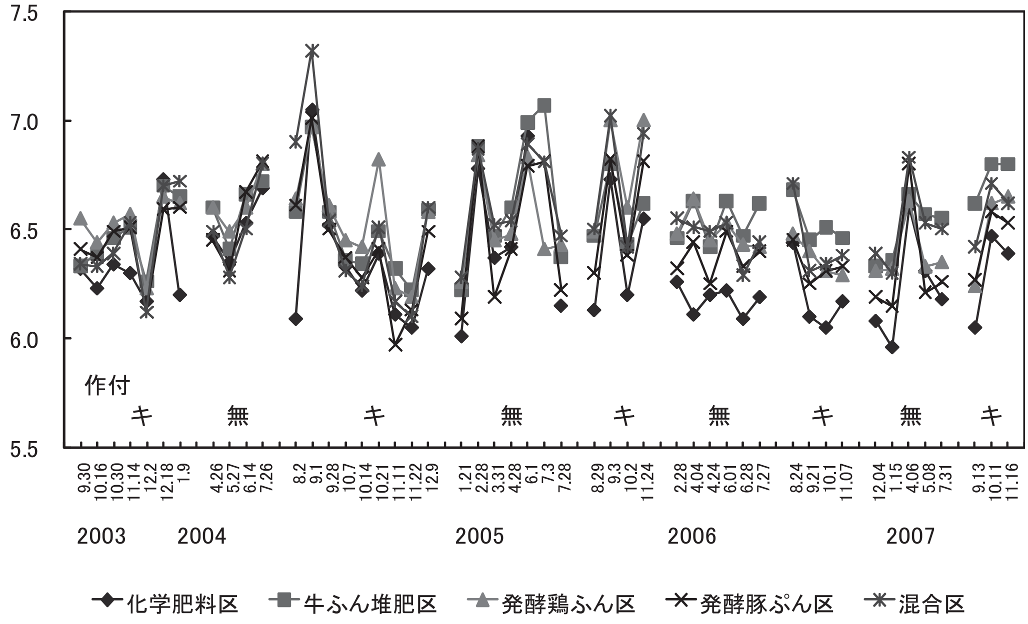
a　浸透水のpHおよびEC

浸透水のpHは2005年の春までは試験区間で大きな差はみられなかったものの，2005年の夏頃から化学肥料区は6.1前後とやや低く，2006年の春頃から牛ふん堆肥区は6.5前後とやや高く，他の区はその中間値を示すようになった（図－10）．ただし，作付けの有無や資材施用の有無，施用後の期間，地温等が異なるキャベツ作付け期と非作付け期とで相違はみられなかった．

ECは2003年は試験区間で差はみられず，0.2前後とほぼ一定であったが，2004年の夏以降は全区とも徐々に高くなった（図－11）．化学肥料区はその後0.4前後でほぼ一定の値を示し，牛ふん堆肥区は2006年の夏以降は0.6以上と特に高かった．発酵鶏ふん区は2004年秋から2005年夏まで顕著に高かったが，その後は0.2～0.4前後で推移した．発酵豚ぷん区は2006年は0.2程度とやや低かったものの，その前後では0.4程度で推移した．混合区は2006年は化学肥料区と同等であったが，2007年は0.2程度と低くなった．以上の結果は，下層の土壌ECの結果とは異なる傾向であり，深さ40cm以下では20-40cmの下層土とは別の要因が関与していることも推察された．

b　浸透水中の硝酸態窒素含量

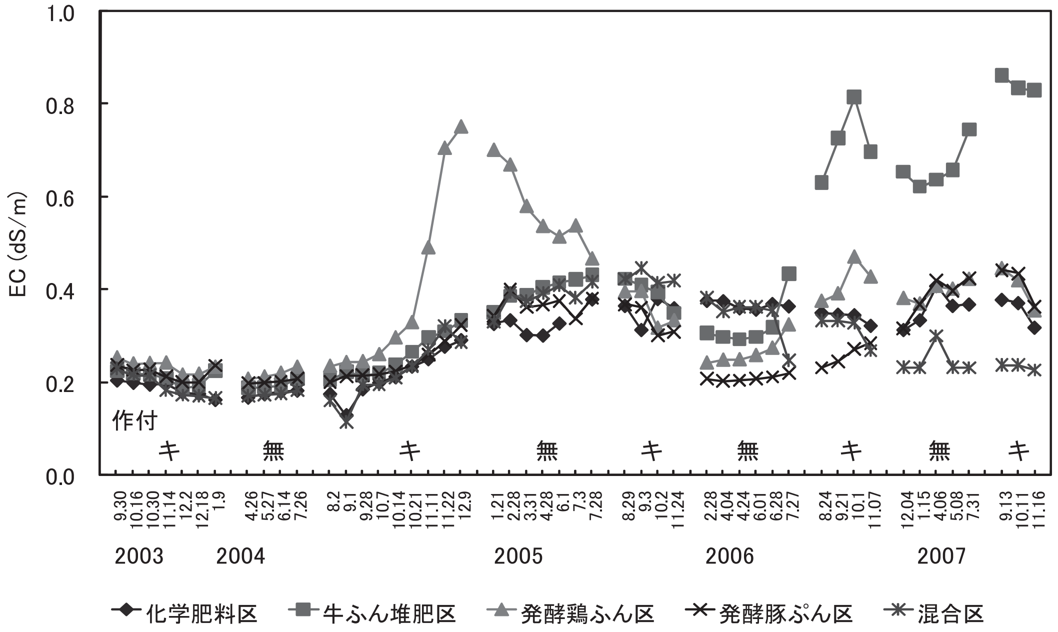
いずれの試験区でも浸透水にアンモニア態窒素はほと



図－10　浸透水におけるpHの推移

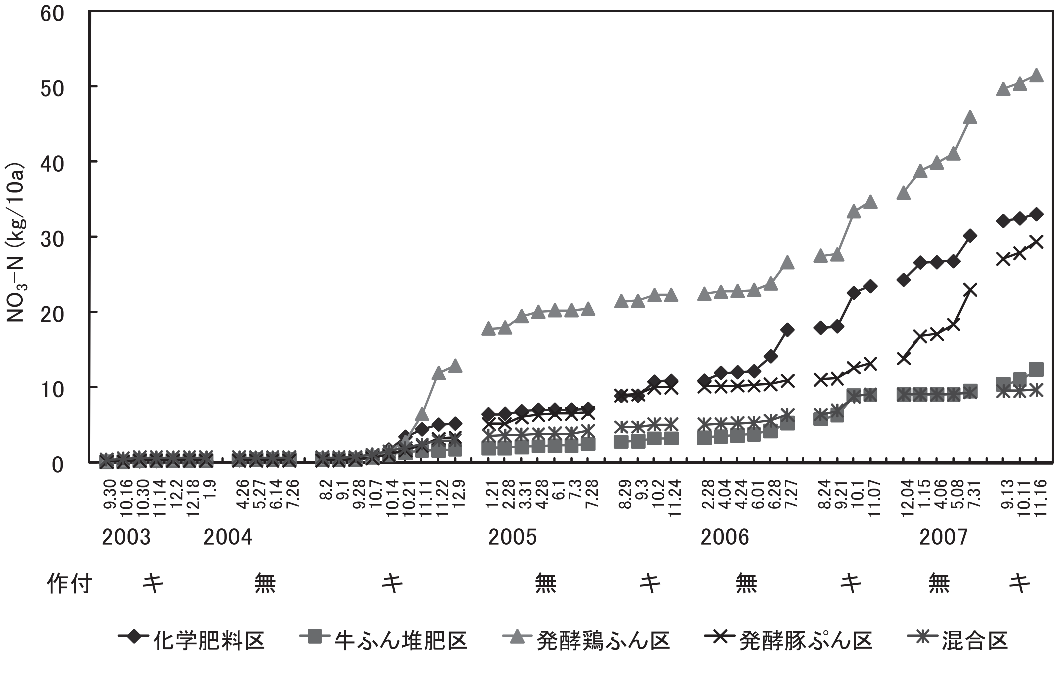
横軸の作付で，キ：キャベツ作付け，無：無作付けを示す．

んど検出されなかった．一方，浸透水中の硝酸態窒素は2003年から2004年夏まではほとんど検出されなかったが，その後は全区で検出された（図－12）．発酵鶏ふん区では2004年のキャベツ栽培後期に溶脱量が多く顕著であった．次いで，化学肥料区，発酵豚ぷん区で多く，化学肥料区は2006年以降，発酵豚ぷん区は2007年以降の増加が顕著であった．牛ふん堆肥区と混合区では少なく，増加傾向は小さかった．全般にキャベツ作付け後期の頃や無作付け期で地温等が高くなってきた後の梅雨時期に増大する傾向がみられた．この結果は，窒素が無機化（硝化）作用を受けて硝酸態窒素となって地下へと移動してきたものを採取していることから，資材含有窒素



図－11 浸透水におけるECの推移

横軸の作付で，キ：キャベツ作付け，無：無作付けを示す．



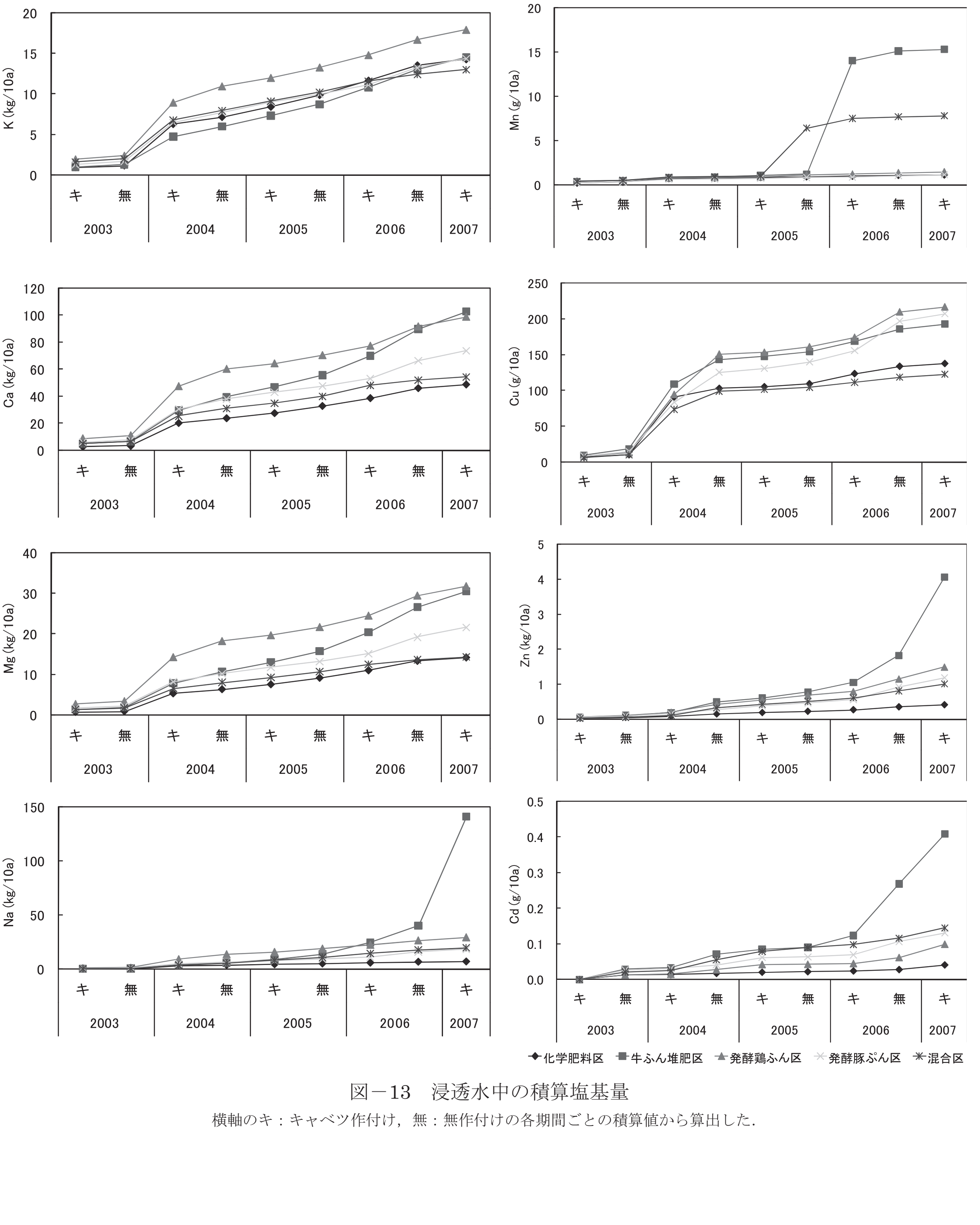
図－12 浸透水中の積算硝酸態窒素量

横軸の作付で，キ：キャベツ作付け，無：無作付けを示す．

の無機化しやすさや施用量の多少などの影響を受けた結果であると考えられた．この硝酸態窒素含量の動態は，浸透水のECの傾向とは一致しない場合があるものの，影響を及ぼしていることが推測された．

c　浸透水中の塩基含量

浸透水中の濃度から算出した各塩基の10アールあたりの積算浸透量を図－13に示した．カリウムは発酵鶏ふん区で他区よりも多かった．カルシウムとマグネシウムは牛ふん堆肥区，発酵鶏ふん区＞発酵豚ぷん区＞化学肥料区，混合区という傾向に，ナトリウムと亜鉛，カドミウムは牛ふん堆肥区＞発酵鶏ふん区，発酵豚ぷん区，混合区＞化学肥料区，マンガンは牛ふん堆肥区＞混合区＞その他の区，銅は牛ふん堆肥区，発酵鶏ふん区，発酵豚ぷん区の方が化学肥料区や混合区よりも多かった．また，全区ともリンは検出されなかった．いずれの成分も牛ふん堆肥区における浸透量が比較的多く，次いで，発酵鶏ふん区，発酵豚ぷん区となり，化学肥料区は概して



図－13　浸透水中の積算塩基量

横軸のキ：キャベツ作付け，無：無作付けの各期間ごとの積算値から算出した．

少なかった．一方，混合区は一部成分では多いものの，家畜ふん堆肥単独施用区よりも少ない傾向であった．しかし，各養分の投入量との相関はあまり高くはなかった．

2006年から牛ふん堆肥区におけるナトリウムの浸透量が他の成分に比較して飛躍的に多くなっており，このことが浸透水のECの上昇につながったと推測された．

表－７　キャベツの部位別養分含有率および吸収量

年	試験区	部位	C/N	含有率											吸収量									
				C	N	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	Zn	Cd	N	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	Zn	Cd
				%							ppm				kg/10a						g/10a			
2005	化学肥料区	外葉	12.8	39.5	3.1	0.2	2.8	3.7	0.5	0.0	5.0	0.4	1.9	0.0	11.9	0.8	10.9	14.3	1.9	0.1	19.4	1.6	7.6	0.0
		結球	13.5	42.7	3.2	0.3	2.7	0.7	0.2	0.0	1.7	0.2	1.9	0.0	2.3	0.2	2.0	0.5	0.2	0.0	1.3	0.2	1.4	0.0
	牛ふん堆肥区	外葉	12.1	39.5	3.3	0.3	3.2	3.5	0.5	0.3	3.2	0.4	2.1	0.0	12.6	1.1	12.3	13.5	2.0	1.2	12.3	1.6	8.2	0.0
		結球	13.5	42.8	3.2	0.3	3.0	0.6	0.2	0.1	1.4	0.1	1.7	0.0	3.7	0.4	3.5	0.8	0.3	0.2	1.6	0.2	2.0	0.0
	発酵鶏ふん区	外葉	11.4	38.6	3.4	0.3	2.8	4.0	0.5	0.2	4.2	0.4	2.0	0.0	16.5	1.6	13.6	19.1	2.5	0.7	20.2	1.8	9.6	0.0
		結球	12.5	42.8	3.4	0.4	2.8	0.8	0.2	0.1	1.3	0.1	1.7	0.0	4.1	0.5	3.3	0.9	0.3	0.1	1.6	0.1	2.0	0.0
	発酵豚ぷん区	外葉	10.8	38.1	3.5	0.4	3.1	4.1	0.7	0.2	4.2	0.4	2.2	0.0	16.2	1.6	14.2	18.7	3.3	0.8	19.3	1.9	10.2	0.0
		結球	13.3	42.6	3.2	0.4	2.7	0.8	0.3	0.1	1.5	0.1	1.8	0.0	6.5	0.8	5.5	1.6	0.5	0.2	3.0	0.1	3.7	0.0
	混合区	外葉	12.5	39.3	3.1	0.3	2.7	3.7	0.5	0.1	4.0	0.4	2.0	0.0	12.3	1.0	10.6	14.6	1.9	0.4	15.6	1.7	7.9	0.0
		結球	13.8	42.7	3.1	0.3	2.8	0.8	0.2	0.1	1.6	0.1	1.9	0.0	3.1	0.3	2.8	0.8	0.2	0.1	1.6	0.1	1.9	0.0
2006	化学肥料区	外葉	9.9	36.0	3.6	0.2	3.1	4.8	0.6	0.0	4.6	0.2	1.7	0.0	13.1	0.8	11.1	17.2	2.0	0.1	16.6	0.5	6.3	0.0
		結球	14.1	42.6	3.0	0.3	2.6	0.9	0.2	0.0	2.2	0.2	1.7	0.0	13.4	1.3	11.4	4.1	1.0	0.1	10.0	0.9	7.5	0.0
	牛ふん堆肥区	外葉	11.0	36.2	3.3	0.3	3.0	4.1	0.6	0.6	2.1	0.1	2.0	0.0	11.2	1.0	10.3	13.9	2.0	2.0	7.3	0.3	6.9	0.0
		結球	14.4	42.6	3.0	0.4	2.7	0.8	0.2	0.2	1.4	0.1	1.9	0.0	10.3	1.2	9.4	2.9	0.8	0.8	4.9	0.2	6.7	0.0
	発酵鶏ふん区	外葉	9.0	35.2	3.9	0.4	3.3	5.1	0.6	0.2	1.8	0.0	2.1	0.0	15.5	1.5	12.9	20.3	2.4	1.0	7.2	0.0	8.3	0.0
		結球	12.6	41.7	3.3	0.5	2.9	1.2	0.3	0.1	1.6	0.1	2.2	0.0	15.1	2.2	13.3	5.4	1.3	0.6	7.5	0.5	9.9	0.0
	発酵豚ぷん区	外葉	9.5	35.5	3.8	0.4	3.0	4.9	0.8	0.2	2.5	0.1	2.1	0.0	14.7	1.5	11.8	19.1	3.2	0.9	9.6	0.3	8.1	0.0
		結球	12.6	41.8	3.3	0.5	3.2	1.2	0.3	0.2	1.9	0.2	2.6	0.0	14.7	2.2	14.0	5.5	1.5	0.7	8.4	0.8	11.6	0.0
	混合区	外葉	11.1	36.1	3.3	0.2	2.9	5.0	0.6	0.1	2.5	0.1	2.3	0.0	13.5	0.8	12.1	20.6	2.6	0.6	10.4	0.6	9.5	0.0
		結球	13.8	42.5	3.1	0.3	2.8	1.1	0.3	0.1	1.8	0.2	2.2	0.0	12.3	1.3	11.3	4.3	1.1	0.4	7.1	0.7	8.9	0.0
2007	化学肥料区	外葉	11.0	38.2	3.5	0.2	3.0	4.6	0.5	0.0	5.1	0.3	1.7	0.0	15.7	1.1	13.4	20.8	2.2	0.2	22.9	1.4	7.8	0.1
		結球	14.3	43.6	3.0	0.3	2.2	0.7	0.2	0.0	1.9	0.1	1.3	0.0	10.2	0.9	7.3	2.4	0.6	0.1	6.5	0.4	4.5	0.0
	牛ふん堆肥区	外葉	11.7	39.5	3.4	0.3	3.1	3.1	0.5	0.7	1.7	0.3	1.2	0.0	12.4	1.0	11.3	11.4	2.0	2.5	6.3	1.3	4.5	0.0
		結球	13.7	43.3	3.2	0.3	2.5	0.6	0.2	0.2	1.1	0.0	1.4	0.0	6.1	0.6	4.8	1.2	0.4	0.4	2.0	0.1	2.7	0.0
	発酵鶏ふん区	外葉	10.2	37.8	3.7	0.4	3.0	4.5	0.6	0.2	1.9	0.6	1.8	0.0	13.9	1.5	11.3	16.6	2.1	0.9	7.0	2.1	6.6	0.0
		結球	13.7	43.1	3.1	0.4	2.6	0.9	0.2	0.1	1.3	0.1	1.3	0.0	8.7	1.1	7.1	2.4	0.6	0.3	3.5	0.3	3.7	0.0
	発酵豚ぷん区	外葉	10.7	38.6	3.6	0.3	2.8	3.8	0.7	0.2	2.1	0.6	2.1	0.0	14.2	1.3	11.1	15.2	2.8	0.7	8.4	2.3	8.3	0.0
		結球	14.0	43.5	3.1	0.4	2.3	0.8	0.2	0.1	1.2	0.0	1.1	0.0	9.4	1.1	7.1	2.4	0.7	0.3	3.6	0.0	3.4	0.0
	混合区	外葉	12.8	39.9	3.1	0.2	2.4	3.8	0.6	0.1	2.0	0.5	1.4	0.0	11.0	0.8	8.6	13.5	2.0	0.4	7.1	1.9	4.8	0.0
		結球	14.5	43.7	3.0	0.3	2.2	0.7	0.2	0.1	1.2	0.1	1.4	0.0	5.3	0.5	3.8	1.2	0.3	0.1	2.1	0.1	2.5	0.0

５　キャベツによる養分吸収量

2005年以降のキャベツの結球，外葉別の養分含有率と吸収量を表－７に示した．その結果，化学肥料区と比較した場合の含有率の傾向としては，窒素とカルシウムは発酵鶏ふん区と発酵豚ぷん区でやや高く，リンは牛ふん堆肥区，発酵鶏ふん区，発酵豚ぷん区で若干高かった．カリウムは特に結球部分でいずれの試験区も高い傾向を示した．マグネシウムは発酵豚ぷん区でやや高く，ナトリウムはいずれの試験区でも高い傾向であった．他の微量成分には明確な傾向はみられなかった．

10アールあたりの養分吸収量は収量の影響も受けるため，家畜ふん堆肥単独施用区の収量が化学肥料区と同等以上であった2005年は概して化学肥料区よりも養分吸収量が多かったが，2006年では収量が少なかった牛ふん堆肥区では養分吸収量も少なかった．2007年は全体に収量は化学肥料区を下回ったため，いずれの試験区でもほとんどの成分で養分吸収量も少なかった．

６　総合考察

発酵鶏ふんや発酵豚ぷんといった比較的含有養分を放出しやすい資材については，単独の施用でも窒素無機化率を考慮して施用量を増やすことにより化学肥料区と同等以上に収量は確保できた．しかし，土壌への養分の富化やアンバランス化，硝酸態窒素等の溶脱量の増大といった環境への負荷が大きかった．一方，牛ふん堆肥のように窒素の無機化が遅い資材については単独施用では養分富化やアンバランス化，環境負荷が大きい上に，５年の連用でも収量を確保することが難しかった．この両者を組み合わせ，キャベツの標準施肥量に見合うように不足養分をナタネ油かすなどで補うことで，養分富化や環境負荷を抑えつつ，収量も確保することができた．

当年の養分施用量に対する地上部（外葉＋結球）の養分吸収量の割合であるみかけの養分利用率を試算してみると（表－８），化学肥料区に比べると低いものの，発酵鶏ふん区や発酵豚ぷん区の方が窒素やカリウムなどの利用率は牛ふん堆肥区に比べて概して高かった．ただし，家畜ふん堆肥単独施用区では，土壌中の交換性塩基等が年々増加する傾向にあったことからもわかるように，連用により土壌中に養分が年々蓄積していた．このため，実際には，前年までに施用された蓄積養分からの吸収もあると推定され，当年分の利用率は表－８の値よりも低いと判断された．一方，各種資材を混合施用した混合区では，土壌中の養分含量等を踏まえた施用を実施したため，家畜ふん堆肥単独施用区よりも利用率は大きく向上した．また，養分投入量を減じたこともあり，2005年よりも2006年の方が利用率は上がったが，2007年は収量低下を招いたため，前年よりも低下した．それでも化学肥料区並みの利用率は得られた．しかし，連用に伴う正確な養分利用率の算出，あるいは養分利用率の向上や土壌養分環境の適正化の試験に際しては，土壌の全量分析を行って，養分収支を明らかにする必要がある．

本研究では，牛ふん堆肥と発酵鶏ふんを主体にした組み合わせについて検討したが，同様に，窒素の肥効発現が遅く，カリウム蓄積をもたらす牛ふん堆肥と窒素含有量は高いものの，銅や亜鉛の蓄積をもたらす発酵豚ぷんを適切に併用施用することで，露地野菜（レタス，ダイコン，キャベツ等の輪作）の収量を維持しつつ，土壌環境への負荷を低減できるとの報告もある（甲木，2003）．

表－８　みかけの養分利用率（%）

年	試験区	N	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu	Zn	Cd
2005	化学肥料区	57.7	9.1	63.0							
	牛ふん堆肥区	21.9	7.1	15.1	20.2	10.0	4.8	1.0	0.1	1.7	0.0
	発酵鶏ふん区	40.8	3.6	26.3	4.4	13.5	6.5	2.3	0.9	1.6	0.0
	発酵豚ぷん区	37.8	4.5	38.4	25.0	16.1	10.4	3.4	0.5	1.4	0.0
	混合区	61.6	12.2	59.8	27.4	34.2	9.6	5.7	0.9	6.0	0.0
2006	化学肥料区	106.0	19.1	108.4							
	牛ふん堆肥区	28.7	9.2	12.7	18.8	9.5	8.6	0.6	0.0	1.3	0.0
	発酵鶏ふん区	61.1	6.4	37.8	7.8	21.0	14.6	1.5	0.3	2.4	0.0
	発酵豚ぷん区	58.7	7.9	59.5	33.6	23.0	31.1	3.5	0.4	2.0	0.0
	混合区	128.8	29.6	172.6	304.6	95.6	46.3	11.8	1.7	21.3	0.0
2007	化学肥料区	103.3	18.4	99.8							
	牛ふん堆肥区	24.7	7.9	18.0	21.5	11.6	11.8	0.7	0.1	1.0	0.0
	発酵鶏ふん区	45.2	5.5	37.0	6.4	18.6	11.4	1.3	2.0	1.7	0.0
	発酵豚ぷん区	47.3	6.4	62.4	33.2	21.1	20.1	2.9	1.2	1.5	0.0
	混合区	109.0	11.8	105.6	42.9	70.7	18.1	5.4	2.6	6.7	0.0

しかし，窒素を基準とした牛ふん堆肥の施用では，必ずしも作物の養分吸収量に見合った養分バランスに調整できず，カリウム等の蓄積を招いてしまうことがあるため，カリウムを基準とした施用量算出法も提案されている（小野寺ら，2007）．その場合，不足する窒素やリンは他の有機質資材や化学肥料（単肥）等を施用し，解決することができる．例えば，リンやカリウムが蓄積した圃場での促成インゲンマメ栽培において，家畜ふん堆肥に化学肥料で窒素のみを補填し，リンとカリウムは無施用とした場合でも，収量を維持しつつ，土壌中の養分環境を改善できたことが報告されている（前原ら，2003）．

本報告でも混合区での牛ふん堆肥の施用量はカリウム含量が制限要因であった．さらに，併用する資材中の含有量も考慮せざるを得ないため，設計に際しては，養分バランスの維持が重要であった．本試験では，これらに加え，土壌中の養分含量も踏まえた設計により減肥も組み入れた結果，土壌養分環境の更なる悪化は防止でき，みかけの養分利用率も向上したが，土壌中に蓄積した養分を減らすことはできなかった．この点については，特に，堆肥等を連用した圃場において，さらなる継続的な検討が必要であると考えられた．

家畜ふんを原料としない植物系の堆肥においては，連用により炭素や窒素，リン等の増加はみられるものの，カリウムや重金属等の蓄積は認められなかったと報告されている（家壽多ら，2003）．以上のことから，原料の異なる堆肥等の有機質資材や化学肥料（単肥）を土壌養分状態や作物の養分吸収量に見合うように適切に組み合わせて利用することで，収量を維持しつつ，環境への負荷を低減し，さらには悪化した土壌養分環境を適正化できる可能性も考えられた．

しかし，家畜ふん堆肥に含まれる養分は有機態のものが多いため，施用当作に利用される量は限られており，次作以降にも徐々に供給される（上薗ら，2004）．実際に，牛ふん堆肥については，施用2作後でも土壌（0-25 cm）中に施用窒素量の52～74%が残存しているとの報告もある（上之薗ら，2008）．この堆肥連用により土壌中に蓄積された養分の経年的な動態については必ずしも十分明らかになっているとはいえないため，土壌養分環境の適正化方法を確立するためには，今後，上述のように全量分析を行うとともに，養分の有機化・無機化といった動態についても明らかにする必要がある．

また，本研究では，脱窒については測定していないが，易分解性有機物の多い乾燥豚ぷんでは施用後に脱窒量が多いとの報告（西尾，2005）や牛ふん堆肥施用野菜畑での９作（３年９ヶ月）にわたる試験では，合計で施用窒素の18%が脱窒・揮散したとの推定も報告されている（大橋ら，2003）．資材の性質や環境条件により異なる可能性はあるものの，環境への負荷低減あるいは養分利用率向上の面からも脱窒あるいはアンモニア揮散による窒素成分の損失も考慮する必要があると思われる．

さらに，家畜ふん堆肥利用の際に問題となっているハンドリング性や上記のような含有成分のアンバランスを改善した成分調整成型堆肥の開発，実証も進展しており（山本，2005；井手ら，2005），未利用資源としての家畜ふんをより一層有効に利用していく上で，今後，実用的な技術としての確立が期待される．

Ⅳ 摘 要

露地野菜畑において肥料とともに，多投入されてきた家畜ふん堆肥等の有機質資材について，これまで含まれている養分量を十分考慮していない場合が多かった．近年，有機農業に対する意識の高まり，農業面における環境に対する配慮，未利用バイオマス資源の有効利用，肥料価格の高騰等の情勢により，有機質資材の適正な有効利用がより一層求められている．そこで，有機質資材に含まれている各養分の露地キャベツ栽培における土壌中での動態について検討した．

１）牛ふん堆肥，発酵鶏ふん，発酵豚ぷんといった各有機質資材を単独で施用しても，含有全窒素の無機化率（牛ふん堆肥：約30%，発酵鶏ふんおよび発酵豚ぷん：約50%）を基に施用量を調整して多投入することにより，化学肥料の80%以上の収量が得られた．

２）土壌pHは化学肥料の連用により作土層（深さ0-20cm）で低下する傾向が，家畜ふん由来資材の多投入では上昇する傾向がみられたが，下層（深さ20-40cm）ではいずれも影響はみられなかった．また，採水面地下100cmの浸透水のpHは４年目以降に牛ふん堆肥区でやや高く，化学肥料区でやや低い傾向がみられたが，大きな差異は認められなかった．

３）土壌ECは作土層で資材の施用後に上昇し，収穫時には資材施用前とほぼ同程度に低下する周期的変動がみられた．下層では供試３年目以降に同様の傾向がみられたが，変動幅は作土層よりも小さかった．浸透水のECは供試２年目以降にやや高くなり，特に牛ふん堆肥区で顕著であった．

４）家畜ふん由来資材の多投入により，窒素やリン，カリウム，ナトリウム，亜鉛などが作土層に蓄積され，

塩基バランスが悪化した．下層においても牛ふん堆肥ではカリウムやナトリウムが，発酵鶏ふんではカリウムの蓄積が認められた．また，浸透水においてもカリウムやカルシウム，ナトリウム，銅などが検出された．

５）土壌中の無機態窒素（硝酸態窒素）の消長は土壌ECの変動にほぼ一致したパターンを示し，土壌ECに影響を及ぼしていることが考えられたが，下層ではさらにカリウムやナトリウムの寄与も推察された．また，発酵鶏ふんなどの比較的窒素の無機化が起こりやすい資材においては，浸透水に硝酸態窒素が認められ，これが浸透水のECにも影響を及ぼしていることが想定された．一方，牛ふん堆肥ではナトリウムの影響が推察された．

６）土壌養分状態や作物の吸収量を勘案し，各種家畜ふん由来資材や有機質資材（ナタネ油かす），化学肥料（過リン酸石灰）を適切に組み合わせて施用することにより，収量を維持しつつ，土壌への養分富化や窒素溶脱などの環境への負荷を低減することができた．

引用文献

１）後藤逸男・吉田綾子・稲垣開生（2008）：集約的園芸地域における土壌養分富化の実態と有機質資源リサイクルの適正化．交付金プロジェクト研究「有機農業の土壌環境への影響評価と環境保全効果の検証」成果集，74-77.

２）原田靖生（2001）：家畜排泄物の環境保全的利用．安田環・越野正義共編，環境保全と新しい施肥技術，78-115，養賢堂，東京.

３）井手治・山本富三・森山友幸・石坂晃（2005）：キャベツ栽培における成分調整成型堆肥の作型別施用方法．福岡農総試研報，24，53-58.

４）甲木哲哉（2003）：露地野菜栽培における土壌残存硝酸態窒素削減のための家畜ふん堆肥施用法．土肥誌，74，357-361.

５）前原隆史・長友誠・清本なぎさ・別府誠二（2003）：家畜ふん堆肥を用いた促成インゲンマメのリン，カリ無化学肥料栽培．土肥誌，74，515-518.

６）村上弘治（2004）：露地野菜畑における土壌診断と資材の施用．圃場と土壌，36，18-23.

７）中井信・小原洋（2003）：土壌環境基礎調査（定点調査）の概要．土肥誌，74，557-565.

８）西尾道徳（2007）：堆肥・有機質肥料の基礎知識，農文協，東京.

９）西尾隆（2005）：畑土壌における有機質資材施用後の脱窒の推移と二酸化炭素発生の関係．土肥誌，77，401-406.

10）小原洋・中井信(2003)：農耕地土壌の交換性塩基類の全国的変動・農耕地土壌の特性変動(I)．土肥誌，74，615-622.

11）小原洋・中井信(2004)：農耕地土壌の可給態リン酸の全国的変動・農耕地土壌の特性変動(II)．土肥誌，75，59-67.

12）大橋哲郎・俣野修身（2003）：黒ボク土野菜畑における牛ふんおがくず堆肥および被覆肥料由来窒素の溶脱．土肥誌，74，631-635.

13）小野寺政行・中本洋（2007）：北海道における堆肥と各種有機質肥料を用いた露地野菜の無化学肥料栽培．土肥誌，78，611-616.

14）瀧典明・熊谷千冬・畑中篤（2006）：灰色低地土畑土壌への家畜ふん堆肥連用に伴うリン蓄積．宮城古川農試報，6，34-41.

15）上之薗茂・長友誠・高橋茂・西田瑞彦（2008）：重窒素標識牛ふん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．土肥誌，79，37-44.

16）上薗一郎・長友誠・上之薗茂・中園充紀・上村幸廣（2004）：^{15}Nトレーサー法による家畜ふん堆肥由来窒素の動態解析．鹿児島農試研報，32，55-69.

17）山本克巳（2005）：成分調整堆肥の製造と利用．第3回環境保全型農業技術研究会「環境保全型農業を構築するための土壌肥料新技術」，28-37.

18）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壌に及ぼす影響．土肥誌，74，673-677.

19）土壌標準分析・測定法委員会編（1986）：土壌標準分析・測定法，博友社，東京.

20）日本土壌協会（2000）：堆肥等有機物分析法，日本土壌協会，東京.

21）植物栄養実験法編集委員会編（1987）：植物栄養実験法，125-127．博友社，東京.

Effects of Animal Manure Application on Soil Environment in Cabbage Field

Hiroharu Murakami and Yukiko Kuroyanagi

Summary

The continuous application of animal manure, e.g. cattle manure, dried poultry feces or dried swine feces, brought yields enough to some extent in cabbage fields, when the application rate of the materials was based on the mineralization rate of nitrogen in the manure. On the other hand, some nutrients, e.g. nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, zinc, accumulated in the soil because of the continuous and abundant application. Moreover, the imbalance of exchangeable cations in the soil and the leaching of various elements, e.g. nitrogen as nitrate ions, potassium and sodium were detected. These elements brought the high EC value of the soil and the leaching water. When the appropriate combination of several kinds of animal manure and the organic materials were recommended, the appropriate application rate should be calculated according to the nutrient content in the soil and the absorption rate of cabbage. Then an adequate yield of cabbage could be maintained and the soil environment could be preserved.

Accepted ; December 4,2008
Vegetable Pest Management Research Team
3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666 Japan