

第三章 牛ふん炭の多量施用及び施用後の漏水除塩がコマツナの生育と養分吸収及び溶脱塩類に及ぼす影響

第1節 緒言

前章の砂質土及び黒ボク土において、牛ふん炭中のリン酸とカリは、過リン酸石灰と塩化カリの混合肥料と同等の成分量で同等の効果が得られた。この効果は炭化処理の温度の違いや栽培時期の違いに関わらず概ね安定しており、牛ふん炭が速効性の化学肥料の代替として使えることは明らかであった。しかし、篩別を行っていない原体の牛ふん炭は、化学肥料に比べると粒度が均一でなく、施用量が少ない場合には施肥むらが生じる可能性があり、この点では牛ふん炭を多量に施用する方法が適していると考えられる。また、本研究の最終的な目標は、農業系の環境負荷の主因である余剰の家畜排泄物を有効利用して可能な限り減らし、不適切な利用や投棄処理による環境負荷 (Murphy ら, 1972; 羽賀, 2001; Rodriguez ら, 2004) を未然に防止することにある。このため、本章では、一般の土壤改良資材と同様な牛ふん炭の農地への多量施用の可能性について、コマツナの生育を中心指標として検討した。

炭化物資材の土壤に対する施用混入率は重量比で5%程度が一般的に限界とされるが、5%以上の混入率で土壤の保水性が改善された事例 (凌, 2002) もある。炭化物の施用限界量に関しては、炭化物資材の種類や施用対象の土壤及び作物によって変わるものと考えられる。既にオカラ炭など数種の炭化物では多量施用の影響が検討されており (磯部ら, 1996; 牧ら, 2005)、また、木炭においては塩類の含有量が少ないことから、多量施用を行って濃度障害の軽減に使う方法が検討されている (北海道林業試験場, 1992)。一方、牛ふん炭では、他の炭化物に比べて塩類が顕著に多い (凌・東理, 2003a) ため、濃度障害が施用に際しての主たる制限要因となることが危惧される。そこで、本章では初めに、牛ふん炭

の施用限界量を検討する目的で、原料及び炭化条件が異なる2種類の牛ふん炭について、各々異なる設定範囲で3段階に施用量を変えた試験を実施し、コマツナの濃度障害の発生や土壤の塩類集積の状況を調査した。次に、多量施用した土壤において漏水除塩による濃度障害の軽減効果を把握するため、漏水除塩後の土壤塩類の集積状況と溶脱塩類の組成、及び作物の生育と養分吸収の変化について検討した。

第2節 材料および方法

1. 供試牛ふん炭の化学性

本試験では2種類の牛ふん炭を供試した。牛ふん炭Aは、千葉県畜産総合研究センターで発生した牛ふんを外熱式炭化装置 (トーム社製) を用いて400℃で炭化し、牛ふん炭Bは、第II章のロータリーキルン式炭化装置 (独) 農村工学研究所) を用いて500℃で炭化したものである。牛ふん炭Aの化学性は、第3-1表に示したとおりである。pH (H₂O) が10.7、ECが16.9dSm⁻¹、全窒素が1.5%、全炭素が42.9%、ク溶性リン酸が4.8%、ク溶性カリが9.3%であった。牛ふん炭Bの化学性は、前章の第2-1表に示したとおりである。牛ふん炭Aに比べると、ク溶性リン酸が1/2以下と少ない特徴が認められたものの、pH (H₂O)、EC及びその他の成分含量はほぼ同等であった。

2. 供試土壤の化学性

供試土壤は、前章と同様に表層腐植質黒ボク土 (米神統, 以下黒ボク土) 及び中粗粒褐色低地土 (長崎統, 以下砂質土) の2種類とした。土壤の化学性は、牛ふん炭Aでは第3-2表、牛ふん炭Bでは2章と同じで第2-2表に示したとおりである。

第3-1表 牛ふん炭Aの化学性

水分 (10 ⁻² kg kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	T-C		C/N	P ₂ O ₅ (10 ⁻² kg kg ⁻¹)		K ₂ O (10 ⁻² kg kg ⁻¹)	
			T-C (10 ⁻² kg kg ⁻¹)	T-N (10 ⁻² kg kg ⁻¹)		全量	ク溶性	全量	ク溶性
6.6	10.7	16.9	42.9	1.5	28.6	5.1	4.8	9.8	9.3

注1) pH及びECは、1:20で水抽出した値を示す。

第3-2表 牛ふん炭Aの施用試験に用いた土壤の化学性

土壤の 種類	pH (H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	T-C		C/N	Truog-P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	交換性塩基 (mg kg ⁻¹)			
			T-C (10 ⁻² kg kg ⁻¹)	T-N (10 ⁻² kg kg ⁻¹)				CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
黒ボク土	6.0	0.09	6.35	0.45	14.1	32	31.1	3,790	470	740	14
砂質土	6.7	0.07	0.40	0.03	13.3	310	3.7	1,070	80	200	23

第3-3表 牛ふん炭試料A及びBを用いた多量施用試験区の構成

試験区	施肥量 (kg ha ⁻¹)			備考
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
牛ふん炭A				
標準(A)	150	150	150	N, P ₂ O ₅ , K ₂ Oいずれも化学肥料を施用した。
無PK	150	0	0	P ₂ O ₅ , K ₂ Oを無施用とした。
炭2.5倍	150	370	630	P ₂ O ₅ を標準区の2.5倍量とした。
炭7.5倍	150	1,110	1,880	P ₂ O ₅ を標準区の7.5倍量とした。
炭12.5倍	150	1,850	3,130	P ₂ O ₅ を標準区の12.5倍量とした。
牛ふん炭B				
標準(B)	150	150	300	N, P ₂ O ₅ , K ₂ Oいずれも化学肥料を施用した。
無PK	150	0	0	P ₂ O ₅ , K ₂ Oを無施用とした。
炭1倍	150	150	550	P ₂ O ₅ を標準区の1倍量とした。
炭3倍	150	450	1,650	P ₂ O ₅ を標準区の3倍量とした。
炭6倍	150	900	3,300	P ₂ O ₅ を標準区の6倍量とした。

注1)標準(A)及び(B)の化学肥料は、N：硝安、P₂O₅：過石、K₂O：塩加とした。

2)牛ふん炭の各倍量施用は、ク溶性のP₂O₅及びK₂O分析値に基づいて算出した。

3)炭A2.5倍量は炭15.1g pot⁻¹ (7.6Mg ha⁻¹)、炭B1倍量は炭15.5g pot⁻¹ (7.8Mg ha⁻¹)に相当する。

4)無PK区及び各炭区の窒素肥料は標準と同じとした。

第3-4表 除塩に使用した井戸水の化学性

pH (H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N NH ₄ ⁺ -N			PO ₄ ³⁻ -P (mg L ⁻¹)	塩基 (mg L ⁻¹)				Cl ⁻ (mg L ⁻¹)
		NO ₃ ⁻ -N (mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N (mg L ⁻¹)	Ca ²⁺		Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺		
8.2	0.22	0.5	0	0.1	25.0	4.3	7.3	11.0	10.0	

3. 牛ふん炭の多量施用試験の構成

試験区の構成は、第3-3表に示したとおりである。牛ふん炭Aの試験では、化学肥料で窒素、リン酸、カリ各150kg ha⁻¹相当を施用した標準区、リン酸とカリを施用しない無PK区、及び牛ふん炭のク溶性リン酸成分で標準区の2.5倍、7.5倍及び12.5倍を施用した区を設定した。一方、牛ふん炭Bの試験では、標準区のカリを倍量の300kg ha⁻¹相当に変更し、牛ふん炭施用量は1倍、3倍及び6倍に変更した。供試した化学肥料は第II章と同じとした。試験は1/5,000 aワグネルポットを用い、1区4ポットの反復で実施した。

4. 牛ふん炭多量施用土壌の除塩と溶脱水の採水方法

本試験では牛ふん炭Bを供試材料とした。前述の標準区及び炭6倍区の2試験区に加えて、以下に示す方法で各々の除塩区を設定した。牛ふん炭施用土壌の除塩は、ポット下部より150～200mLの溶脱水を得る目的から、1回につき約1,300mL pot⁻¹ (65mm相当)の井戸水(第3-4表)を、播種7日後及び41日後の収穫時の2回に分けてポット上面から灌水する方法とした。なお、灌水時におけるポット内壁面からの浸透水量の増加を防ぐため、土壌を充填する前にポット内壁に予めグリースを塗布した。溶脱水の採水は、ポット下部にあるゴム栓穴に差し込んだチューブを採水ピンに誘導して捕集し

た。採水は各区の4ポット全てについて行った。

5. 供試作物と栽培方法

供試作物は第II章のコマツナと同じとし、栽培の方法についても第II章の炭化温度の異なる牛ふん炭の試験に準じた方法で行った。コマツナの播種は2003年11月14日、収穫は同年12月25日に実施した。なお、水管理に関しては、牛ふん炭の多量施用区を設定し、濃度障害による萎れが発生しやすくなったため、12月7日以降から2日に1回の割合でジョウロで井戸水を10mm程度灌水し、栽培株に萎れの兆候があった場合は、適宜灌水を追加した。

6. 調査及び分析方法

コマツナの生育及び収量調査は前章に準じて行った。植物体の分析は、収穫した地上部を80℃で24時間通風乾燥した後に4ポット分を合わせて粉碎し、乾式灰化後に無機成分を定法(作物分析法委員会, 1975)で測定した。地上部植物体の化学肥料由来及び牛ふん炭由来の各養分吸収量は、それぞれ、標準区及び牛ふん炭区の養分吸収量から無PK区の養分吸収量を差し引いて求めた。土壌及び牛ふん炭の分析は、第II章第2節4項に示す方法に準じて行い、除塩に用いた井戸水及び溶脱水の各無機成分の分析についても、前章と同じ方法とした。

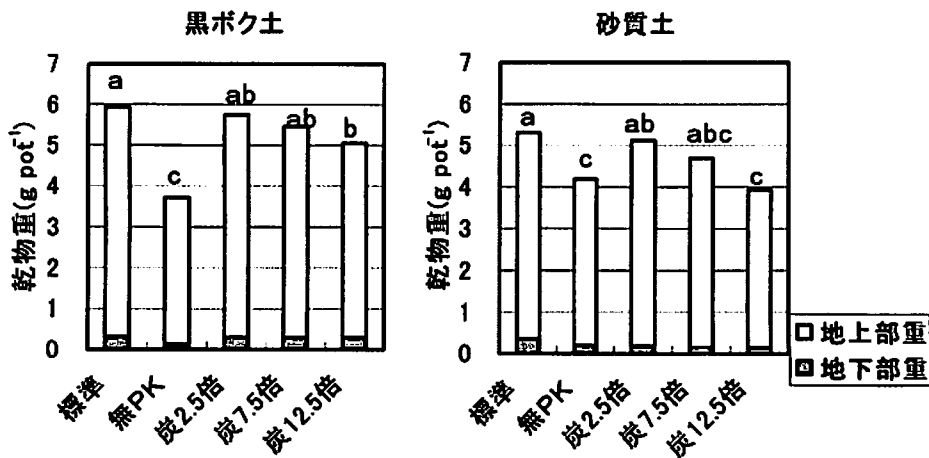
第3節 結果

1. 牛ふん炭の多量施用がコマツナの乾物収量に及ぼす影響

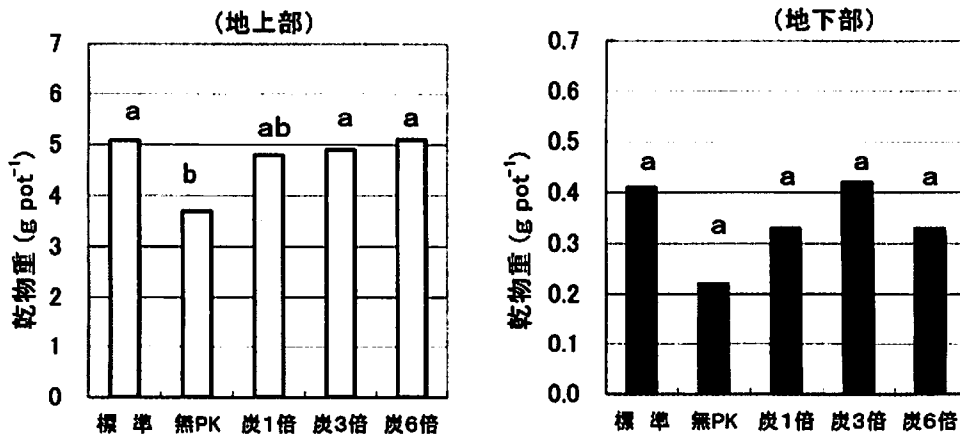
リン酸含量の高い牛ふん炭Aを多量施用した場合のコマツナの乾物収量は、地上部と地下部を合計して、第3-1図に示した。黒ボク土及び砂質土のいずれにおいても、標準区に対して、炭2.5倍及び炭7.5倍は統計的に差がなく、炭12.5倍区及び無PK区は有意に減少した。

一方、リン酸含量が低い牛ふん炭Bを多量施用した場

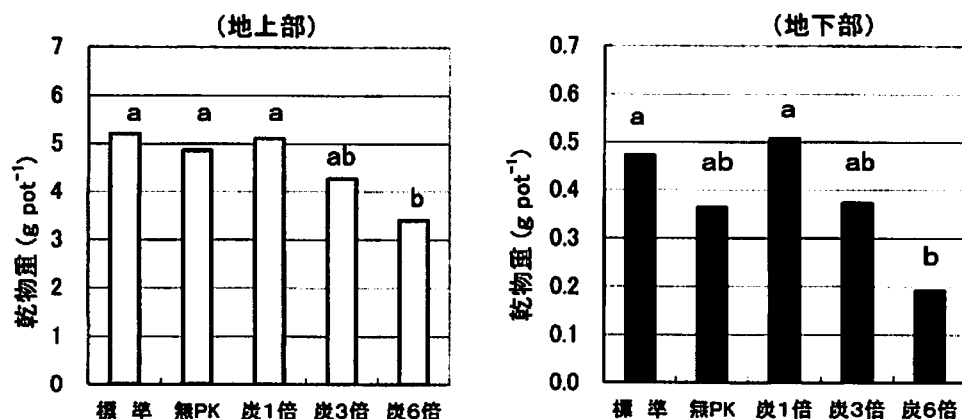
合のコマツナの乾物収量は、地上部と地下部に分けて、第3-2図及び第3-3図に示した。黒ボク土では、標準区に対して、炭1倍、炭3倍及び炭6倍区のいずれも地上部及び地下部で有意差がなく、無PK区は地上部で有意に減少した。また、砂質土でも、標準区に対して、炭1倍及び炭3倍区は地上部及び地下部の乾物収量に有意差はなかった。しかし、牛ふん炭の施用量の増加に伴った生育抑制傾向が認められ、炭6倍区では地上部及び地下部が、炭3倍区とは有意差がないものの、標準区及び炭1倍区に比べて有意に乾物収量が減少した。



第3-1図 牛ふん炭A (炭化400℃)の多量施用がコマツナの地上部及び地下部の生育に及ぼす影響
注)異なる英文字間には、5%水準で有意差有り (Tukeyの方法による)。



第3-2図 黒ボク土における牛ふん炭B (炭化500℃)の多量施用がコマツナの地上部及び地下部生育に及ぼす影響
注)異なる英文字間には、5%水準で有意差有り (Tukeyの方法による)。



第 3-3 図 砂質土における牛ふん炭 B (炭化 500 °C) の多量施用がコマツナの地上部及び地下部生育に及ぼす影響 (注) 異なる英文字間には、5%水準で有意差有り (Tukey の方法による)。

第 3-5 表 牛ふん炭多量施用土壌における除塩の有無がコマツナの生育に及ぼす影響 (n = 4)

試験区	除塩の有無	葉数 (枚)	地上部長 (cm)	最大葉		地上部		
				葉身長 (cm)	葉幅 (cm)	生体重 (g)	乾物重 (g pot ⁻¹)	
黒ボク土	標準	無	9.0	22.7	11.1	8.7	20.5 ± 2.1	5.1 ± 0.51
		有	9.8 ns	22.7 ns	11.1 ns	8.5 ns	19.9 ± 2.6 ns	5.5 ± 0.68 ns
	炭6倍	無	9.3	22.7	11.8	9.8	22.6 ± 0.7	5.3 ± 0.14
		有	9.7 ns	20.7 *	10.5 *	8.3 *	18.9 ± 0.7 *	5.5 ± 0.23 ns
砂質土	標準	無	9.2	21.3	10.7	8.7	18.9 ± 2.8	5.2 ± 0.92
		有	9.2 ns	22.4 ns	10.7 ns	8.5 ns	17.5 ± 0.7 ns	5.2 ± 0.36 ns
	炭6倍	無	8.2	19.9	9.7	8.3	12.7 ± 1.2	3.4 ± 0.40
		有	8.7 ns	20.1 ns	9.8 ns	8.2 ns	14.4 ± 1.2 ns	4.5 ± 0.33 *

(注) *は5%水準で除塩の有無による有意差有り(t検定による)。

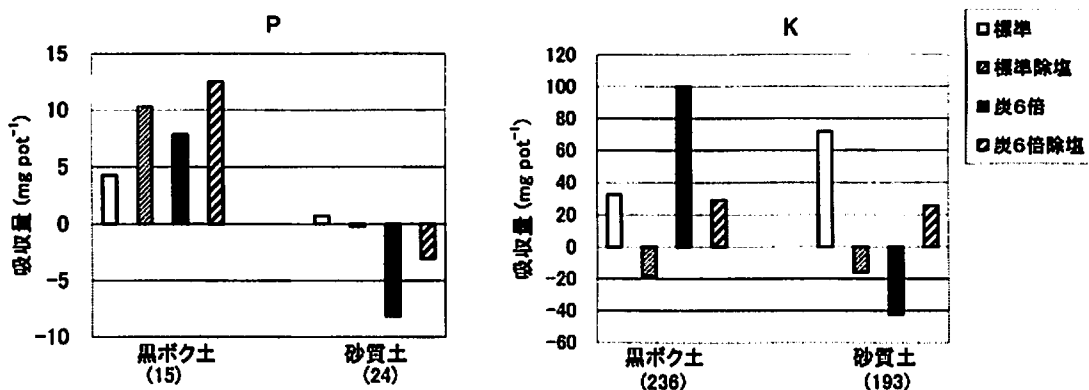
2. 牛ふん炭多量施用土壌の除塩がコマツナの生育に及ぼす影響

播種 7 日後の海水除塩が標準区及び炭 6 倍区のコマツナに及ぼす影響を第 3-5 表に示した。黒ボク土においては、標準区ではコマツナの葉数、地上部長、葉身長、葉幅、地上部生重及び乾物重について除塩の有無による有意差は認められなかった。炭 6 倍区では有意差が一部認められ、除塩によって地上部長、葉身長、葉幅、地上部生重が減少した。一方、砂質土においても、標準区では除塩の有無による各生育項目の差は認められず、炭 6 倍区でも葉数、地上部長、葉身長、葉幅、地上部生重について除塩による有意差は認められなかった。しかし、地上部乾物重は除塩によって有意に増加し、標準区の生育量と有意差のない(統計データ省略)状態にまで牛ふん炭による生育抑制が軽減された。

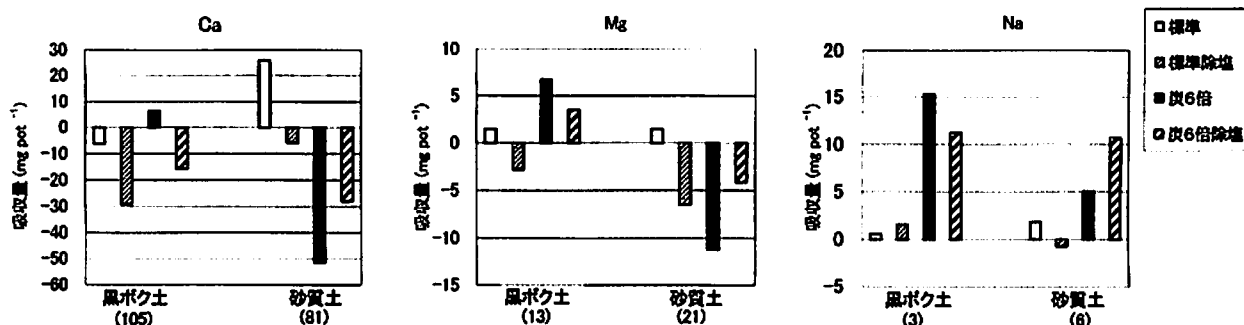
3. 牛ふん炭多量施用及び施用後の除塩に伴うコマツナの養分吸収の変化

植物体の化学肥料由来及び牛ふん炭由来のポットあたりの無機成分吸収量を第 3-4 図及び第 3-5 図に示した。リン (P) は、黒ボク土では、標準区は約 4 mgpot⁻¹、炭 6 倍区は約 7 mgpot⁻¹ の吸収を示し、除塩後に両区の P 吸収は増加し、それぞれ約 10mgpot⁻¹、約 12mgpot⁻¹ となった。砂質土では、標準区の約 1 mgpot⁻¹ の吸収に対して、炭 6 倍区は約 8 mgpot⁻¹ の著しい負の吸収を示した。除塩後に炭 6 倍区の吸収抑制は軽減されたものの、依然、約 3 mgpot⁻¹ の負の吸収であった。

カリウム (K) は、黒ボク土では標準区は約 30mgpot⁻¹ の吸収、炭 6 倍区は約 100mgpot⁻¹ の過剰吸収を示した。除塩後に炭 6 倍区は標準区と同程度まで吸収量が大幅に減少した。砂質土では、標準区の約 70mgpot⁻¹ の吸収に対して、炭 6 倍区では約 50mgpot⁻¹ の負の吸収が認め



第3-4図 除塩の有無がコマツナにおける化学肥料または牛ふん炭由来のリン (P) とカリウム (K) の吸収量に及ぼす影響
注) 括弧内の数値は、無PK区の養分吸収量(mg pot⁻¹)を示す。



第3-5図 除塩の有無がコマツナにおける化学肥料または牛ふん炭由来のカルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg) 及びナトリウム (Na) の吸収量に及ぼす影響
注) 括弧内の数値は、無PK区の養分吸収量(mg pot⁻¹)を示す。

られたが、除塩後に吸収抑制が軽減されて約 20mgpot⁻¹ の正の吸収となった。

カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg) 及びナトリウム (Na) は、黒ボク土では、標準区がわずかな負あるいは正の吸収を示したのに対して、炭6倍区ではこれらの吸収量が多くなり、特に Na は約 15mgpot⁻¹ と顕著に増加した。しかし、除塩後はこれら全ての成分吸収量が減少した。砂質土では、標準区が全ての成分で正の吸収を示したのに対して、炭6倍区では Ca 及び Mg がそれぞれ約 -50mgpot⁻¹、-11mgpot⁻¹ の著しい負の吸収を示し、Na は反対に約 5 mgpot⁻¹ の正の吸収を示した。炭6倍区では、除塩後に Ca 及び Mg の吸収抑制が軽減されたものの、依然、顕著な負の吸収を示した。一方、Na は除塩によってさらに吸収量が増加した。

4. 牛ふん炭多量施用土壌の除塩に伴う溶脱水の化学組成の変化

2回の除塩に伴う溶脱水の化学組成の変化を第3-6

表に示した。溶脱水の EC は、播種7日後の除塩1回目に、標準区の黒ボク土 2.3dSm⁻¹、砂質土 4.5dSm⁻¹ に対して、炭6倍区ではそれぞれ 8.4dSm⁻¹、14.5dSm⁻¹ と高かった。除塩2回目では、標準区の両土壌の EC は 1dSm⁻¹ 前後の低い値を示したが、炭6倍区では黒ボク土 3.8dSm⁻¹、砂質土 9.3dSm⁻¹ であった。

溶脱水中の塩類は、いずれの土壌においても炭6倍区では標準区に比べて、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺ が数倍から数十倍の濃度であり、中でも、Cl⁻ と K⁺ が高濃度に検出された。炭6倍区における Cl⁻ 濃度は、砂質土に比べて黒ボク土で著しく低く、除塩1回目に黒ボク土で 2,025mgL⁻¹、砂質土で 3,774mgL⁻¹、除塩2回目にそれぞれ 687mgL⁻¹、2,622mgL⁻¹ であった。一方、溶脱水中の K⁺ 濃度は、有意差はないものの黒ボク土で若干高く、除塩1回目に黒ボク土で 2,517mgL⁻¹、砂質土で 2,069mgL⁻¹ であった。除塩2回目はそれぞれ 1,321mgL⁻¹、1,272mgL⁻¹ であった。炭6倍区における Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ は、前述の Cl⁻ や K⁺ に比べて概ね

1桁低い濃度であり、Ca²⁺はK⁺と、Mg²⁺及びNa⁺はCl⁻と類似した土壌間差のある溶脱特性を示した。

Pは、2回の除塩を通して黒ボク土の溶脱水中には検出されなかった。砂質土では10mgL⁻¹程度が検出された。NO₃⁻-N及びNH₄⁺-Nは、両土壌とも除塩1回目に検出され、黒ボク土に比べて砂質土で高濃度であった。除塩2回目にはほぼ消失した。NO₃⁻-Nは標準区と炭6倍区の間で差がなかったが、NH₄⁺-Nは炭6倍区の方が高かった。

5. 牛ふん炭の施用量及び多量施用土壌の除塩に伴う収獲跡地土壌のpH (H₂O)、EC及び水溶性塩類の差異

コマツナ収獲跡地土壌の化学性を第3-7表に示した。牛ふん炭の施用量の影響について、いずれの土壌においても、pH (H₂O)は、施用量に伴う変化はわずかで標準区との差がほとんどなかった。ECは、標準区に対して炭1倍区ではほぼ等しく、炭3倍は約2倍、炭6倍区は5倍～6倍に上昇した。なお、黒ボク土では砂質土に比べてECが全般に高かった。各水溶性塩類は、いずれの土壌でも牛ふん炭の施用量に伴って標準区の1倍から20倍程度まで増加した。中でもCl⁻及びK₂Oの増加

が顕著であり、両塩類は標準区に比べて炭1倍区では2倍、炭3倍区では5倍～8倍、炭6倍区では17倍～23倍に増加した。その他の塩類は標準区との差が比較的小さかった。

除塩の影響については、黒ボク土では、pH (H₂O)は標準区と炭6倍区のいずれも除塩の有無による差は小さかった。ECに関しても両区共に除塩の有無による差は小さく、炭6倍区の0.81dSm⁻¹に対して除塩区では0.71dSm⁻¹であった。水溶性塩類は、標準区では低含量であり、除塩の有無による差はほとんどなかった。炭6倍区でも除塩の有無による差は小さく、Cl⁻及びK₂Oは、それぞれ1,064mgkg⁻¹、676mgkg⁻¹に対して、除塩後でも905mgkg⁻¹、609mgkg⁻¹であった。一方、砂質土でも、pH (H₂O)は、除塩の有無による差は両区共に小さかった。しかし、ECは、炭6倍区では除塩によって0.49dSm⁻¹が0.27dSm⁻¹に低下した。水溶性塩類に関しても、炭6倍区における集積塩類全てが除塩によって顕著に減少した。主要塩類のCl⁻及びK₂Oは、それぞれ515mgkg⁻¹、478mgkg⁻¹であったものが、204mgkg⁻¹、280mgkg⁻¹に減少した。

第3-6表 牛ふん炭多量施用土壌における除塩に伴う溶脱塩類の構成

土壌	試験区	溶脱水量 (mL pot ⁻¹)	pH	EC (dS m ⁻¹)	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻ -P	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
					(mg L ⁻¹)							
除塩1回目												
黒ボク土	標準	164 ab	5.5 a	2.3 bc	122 ab	0 a	214 b	2 a	226 bc	46 a	78 a	23 a
	炭6倍	151 ab	5.8 ab	8.4 e	2025 c	0 a	245 b	8 a	766 d	144 b	2517 c	167 c
砂質土	標準	186 abc	5.3 a	4.5 d	312 ab	10 b	346 c	19 b	248 bc	147 b	136 a	30 a
	炭6倍	145 a	6.8 bc	14.5 f	3774 d	11 b	335 c	50 c	661 d	328 d	2069 bc	355 e
除塩2回目												
黒ボク土	標準	224 c	7.1 cd	0.3 a	36 a	0 a	2 a	0 a	22 a	4 a	6 a	7 a
	炭6倍	210 bc	7.1 cd	3.8 cd	687 b	0 a	2 a	0 a	201 abc	55 a	1321 b	99 b
砂質土	標準	189 abc	7.8 cd	1.2 ab	68 ab	11 b	1 a	0 a	64 ab	54 a	9 a	13 a
	炭6倍	186 abc	8.3 d	9.3 e	2622 c	7 b	7 a	0 a	383 c	223 c	1272 b	270 d

注1) 表中の数値は4potの平均値である。

2) 異なる英文字間には、5%水準で有意差有り(Tukeyの方法による)。

第3-7表 収獲跡地土壌のpH (H₂O)、EC及び水溶性塩類

試験区	pH (H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	Cl ⁻	P ₂ O ₅	NO ₃ ⁻ -N	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
			(mg kg ⁻¹)						
黒ボク土									
標準	6.0	0.13	60	0	11	55	18	40	36
炭1倍	6.0	0.17	149	0	28	65	17	77	42
炭3倍	6.1	0.29	337	0	10	65	21	215	67
炭6倍	6.2	0.81	1064	0	14	145	62	676	153
標準除塩	6.3	0.12	49	1	11	45	15	24	38
炭6倍除塩	6.5	0.71	905	0	7	108	46	609	148
砂質土									
標準	6.4	0.11	28	35	5	39	22	21	24
炭1倍	6.8	0.09	63	41	5	22	13	37	29
炭3倍	6.9	0.22	221	45	7	30	22	174	53
炭6倍	7.0	0.49	515	53	19	49	44	478	97
標準除塩	6.9	0.08	13	35	3	34	15	15	22
炭6倍除塩	7.2	0.27	204	85	3	15	13	280	64

第4節 考察

1. 牛ふん炭の施用限界

前章では牛ふん炭の速効的な肥料効果を明らかにしたが、本章では、資材的な利用法を探る目的から牛ふん炭の施用限界量を検討した。牛ふん原料では種々の要因で肥料成分が変動する (Lekasi ら, 2003) ため、牛ふん炭の製造来歴が異なると、施用限界量も変わる可能性が考えられた。そこで、異なる来歴の牛ふん炭を試料A及びBとして、個別に施用量を変えた試験を実施した。牛ふん炭の施用限界量は、植物や土壌に対する影響を総合的に捉えて判断することが本来望ましいが、ここでは、濃度障害の検定によく使われるコマツナの生育を指標として施用限界の概容を推定した。

牛ふん炭Aをリン酸成分で標準の2.5倍、7.5倍、12.5倍量を施用した結果、黒ボク土及び砂質土において炭12.5倍で濃度障害が顕在化した。従って、牛ふん炭Aの施用限界量は、両土壌において7.5倍～12.5倍の間にあると推定された。一方、牛ふん炭Bをリン酸成分で標準の1倍、3倍、6倍量を施用した結果、その施用限界量は、黒ボク土では濃度障害が起こらないため6倍量以上、砂質土では生育抑制が生じ始めた3倍量の近傍と推定された。また、これらの結果から、牛ふん炭の施用限界量に関しては、施用土壌及び牛ふん炭自体に大きく依存することが明らかとなった。

施用限界が最も低い事例の牛ふん炭Bの3倍量施用は、重量に換算すると約23Mg ha^{-1} に相当する。一般的に牛ふん炭は最大で原料牛ふんの1/10程度に重量が縮減されるため、3倍の施用量でも、原料牛ふんの230Mg ha^{-1} 程度に相当する多量施用の範疇に入る。牧・渡辺 (2004) 及び牧ら (2005) による数種の作物残渣由来の炭化物をマサ土に施用した試験では、コマツナに対して50Mg ha^{-1} の多量施用を行っても生育に問題が認められないが、牛ふん炭では、含有塩類の濃度が著しく高いため、施用量の限界点は通常の炭化物に比べて低くなると考えられる。しかしながら、前述の牛ふん炭Aでは、牛ふん炭Bに比べると概ね2倍以上の施用が可能であった。このように、牛ふん炭の試料間で施用限界量に差が生じた理由は、次のように考えられる。牛ふん炭Aでは、牛ふん炭Bに比べてECがやや低かったにも関わらず、リン酸含量は反対に約2.5倍と高かった。従って、炭12.5倍区で投入された塩類の総量は、EC値の比較から、牛ふん炭Bの炭6倍区に比べてむしろ低かったためと推定される。牛ふん炭に含まれるリン酸と塩類総量の相対比率は、前述のように排出牛ふんの来歴や炭化条

件によって変動する可能性がある。また、豚ふんの例では飼料に塩類を多く与えると排泄物中の塩類も比例して濃度が高まることが報告されている (Sutton, 1976)。このようなことから、牛ふん炭資材の一般的な施用限界量を求めるには、リン酸成分量と共に塩類の総量も考慮する必要があると考えられる。なお、第II章の800℃で炭化した牛ふん炭の各塩類成分の含量は、全窒素は激減したものの、500℃で炭化した場合と類似し、炭の段階的施用に対するコマツナの生育反応もほぼ同様な傾向であった (データ省略)。このことから、牛ふん炭の施用限界は、含有塩類の濃度に依存するものと考えられる。

2. 牛ふん炭多量施用土壌における灌水除塩の効果

牛ふん炭では、ク溶性のリン酸及びカリ成分が多いことから、緩効性の肥料資材としての活用法が考えられる。この際の問題点は、施用上の律則段階になる牛ふん炭中の高濃度の塩類に対する処置である。本章では、その対策の一つとして灌水除塩を実施した。黒ボク土では、炭6倍区の収穫跡地土壌の塩類濃度が極めて高かったにもかかわらず、コマツナの生育は標準区とほぼ同等で正常であった。灌水除塩を行っても、集積した土壌塩類の低減効果はほとんど認められず、生育に関してはむしろ低下する傾向があった。従って、黒ボク土においては、本試験で行った牛ふん炭の多量施用後の灌水除塩は有効ではないと考えられた。一方、砂質土では炭6倍施用によってコマツナの生育に著しい抑制が起こったものの、灌水除塩によって生育が明らかに回復した。さらに、灌水除塩による土壌塩類の低減も黒ボク土の場合に比べると顕著であった。このことから、砂質土においては、牛ふん炭多量施用後の灌水除塩は比較的有效であると考えられた。

3. 灌水除塩に伴う主要溶脱成分のCl⁻及びK⁺の挙動

牛ふん炭は、炭化物としては炭素含量が約30%と極めて少なく、代わりに水溶性塩類を多量に含んでいる点で木炭資材 (北海道林業試験場, 1992; 磯部ら, 1996) と比べて異質である。供試した牛ふん炭中の水溶性塩類は、Cl⁻が8.8%、K⁺が2.9%と著しく多いため、除塩時の溶脱水は両成分が主体であった。

Cl⁻は、除塩1回目の砂質土の溶脱水において3,774mgL⁻¹の高濃度で検出されたのに対して、黒ボク土では2,025mgL⁻¹と比較的低濃度であり、黒ボク土特有の微細孔隙によるCl⁻の物理的捕捉や、土壌溶液中の塩類濃度の上昇に伴う陰イオン交換容量増大による

Cl⁻吸着の増加 (Katou, 2004) の影響が考えられた。このことは、潜在的な塩類集積の進展を意味しており、黒ボク土においては、牛ふん炭の多量施用あるいは連用に伴う塩類集積が懸念される。

K⁺についても、黒ボク土において陽イオン交換容量が大きいことから、Cl⁻と同様に K⁺の土壤吸着に伴う溶脱水中の濃度低下が予測されたが、溶脱水中の K⁺濃度は、むしろ黒ボク土の方が砂質土に比べてやや高かった。この理由は明らかではないが、いずれにしても、溶脱水中の K⁺は Cl⁻に次いで高濃度で検出されるため、牛ふん炭施用によって、根圏の土壤溶液の K⁺濃度は、極めて高濃度の状態になっているものと考えられる。同一浸透圧に設定した培養液を用いたキュウリの栽培試験では、K⁺は、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺イオンに比べて、最も生育抑制作用が小さなイオン種とされている (高橋, 1991)。しかし、本試験の牛ふん炭施用後のコマツナには、多量の K⁺の存在による K⁺の過剰吸収だけでなく、養分拮抗阻害 (山内, 1991) が起きた可能性が考えられる。以上のような牛ふん炭施用後の K⁺及び Cl⁻の濃度上昇は、化学肥料の塩化カリを多量に施用した場合とほぼ同様な状況と考えられた。

4. 牛ふん炭多量施用及び除塩がコマツナの濃度障害と養分吸収に及ぼす影響

牛ふん炭多量施用土壌からの溶脱水の EC は、砂質土では海水の約半分に相当する 14.5dSm⁻¹ に達した。海水の EC 値の半分に設定した NaCl 濃度の培養液を用いたイタリアンライグラスの栽培試験では、著しい生育抑制が認められている (高橋, 1991)。近縁種のペレニアルライグラスは耐塩性が強く、葉菜類のホウレンソウは耐塩性が弱くと分類されている (高橋, 1991)。コマツナの耐塩性の程度は不明であるが、炭 6 倍区の栽培中の土壌溶液 EC は、溶脱水 EC に比べてさらに高まった状態と予測されるため、牛ふん炭の多量施用によって濃度障害が発生し、除塩を行うことにより障害が軽減されたものと考えられた。

黒ボク土では、濃度障害は認められなかったが、炭 6 倍施用によって P, K, Ca, Mg, Na の吸収量が標準区に比べて明らかに増加し、特に K の過剰吸収が顕著になった。しかし、除塩後に P を除いたこれらの成分吸収量が減少し、過剰吸収が認められた K においても除塩後は概ね 1/3 の吸収量まで低下した。このようなことから、牛ふん炭多量施用後の黒ボク土では、灌水除塩によって、塩類集積の進行は防げないものの、作物の養分吸収面の改善効果は得られるものと判断された。

砂質土では、炭 6 倍施用によって P, K, Ca, Mg の吸収量が著しく減少して負の値を示し、濃度障害による養分吸収阻害が認められた。除塩後においても吸収阻害は K を除くと十分に回復しておらず、本試験の 1 回の除塩では不十分であった。一般的な必須養分でない Na は、前述成分と異なって濃度障害発生時にも正の吸収があり、除塩後にさらに吸収が増加したことから、牛ふん炭の多量施用や連用に際しては問題成分になる可能性がある。

5. 牛ふん炭多量施用後の灌水除塩対策の限界

家畜ふん及び家畜ふん堆肥では、高濃度の含有塩類が施用上の制限要因となる (小柳ら, 2004; Xian ら, 2007) が、牛ふん炭の施用に際しては、それ以上に濃縮された含有塩類が大きな問題点として挙げられる。特に、本章までの試験で明らかとなった牛ふん炭に含まれる高濃度の水溶性 Cl⁻及び K₂O の存在である。両塩類の除去が可能になれば、土壌改良資材的な利用も容易になると考えられる。牛ふん炭施用後の灌水除塩はこの目的で行った対策試験である。しかし、本試験の結果では、除塩が効果的だった砂質土においても、除塩 1 回目の溶脱水で洗い流された Cl⁻は、溶脱水量と濃度からポット当たり 547mg と算出され、この Cl⁻除去量は炭 6 倍区の牛ふん炭施用に伴う Cl⁻投入量の約 7% に満たなかった。収穫した植物体の Cl⁻吸収量は約 2% (データ省略) であったので、土壌中には約 91% の牛ふん炭由来の Cl⁻が残存すると見積もられた。また、2 回目の収穫後の除塩による Cl⁻除去量も 1 回目とほぼ同等の約 6% であり、合計約 130mm の灌水除塩を行っても、Cl⁻除去量は 13% 程度の少量であることが判明した。供試した牛ふん炭は、篩を通した粒径 5 mm 未満の小さなもので、比較的除塩されやすかったと考えられたが、実際圃場で篩前の粒径の大きな牛ふん炭を施用した場合には、除塩効率がさらに低下することも懸念される。このようなことから、牛ふん炭の除塩に関しては、土壌施用後に対策を行うより、施用前の牛ふん炭に予め除塩処理を施すなど、より効果的な除塩の方法を開発する必要があると考えられた。効果的な除塩対策が実施できない場合の牛ふん炭の施用量は、前章及び本章の試験結果を総合すると土壌塩類の集積が少ない炭 1 倍区の施用量 (塩類成分 Cl⁻ 695kg/ha⁻¹, K₂O 545kg/ha⁻¹ 相当) 程度に留める必要があると考えられた。

第 5 節 要 約

牛ふん炭の資材的な利用法を探る目的から、牛ふん炭を多量施用した場合の施用限界量と多量施用後の灌水除塩による濃度障害の低減効果を黒ボク土及び砂質土で検討した。施用限界量に関する試験では、製造来歴の異なる2種類の牛ふん炭（炭A：ク溶性 P_2O_5 含量 4.8%，炭B：同 1.9%）試料を用いて、標準のリン酸施用量（ P_2O_5 150kg/ha）を基準に段階的な倍量施用（炭A：2.5倍, 7.5倍, 12.5倍，炭B：1倍, 3倍, 6倍）を行い、ポット栽培したコマツナの生育を調査した。その結果、牛ふん炭の施用量の増加に伴う濃度障害は、炭Aでは両土壌において 12.5 倍量で認められた。一方、炭Bでは砂質土の 6 倍量において濃度障害が認められたものの、黒ボク土では認められなかった。灌水除塩に関する試験では、炭B試料を 6 倍量施用した土壌に 2 回の灌水（播種後 7 日、49 日）を行い、灌水除塩がコマツナの生育と養分吸収及び溶脱塩類の組成に及ぼす影響を調査した。砂質土における炭 6 倍量施用による本濃度障害は、除塩 1 回

目の 65mm 灌水によって低減したが、除塩後においても植物体中の P、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ の吸収抑制は依然認められ、反対に Na⁺ 吸収は高まった。除塩 1 回目の溶脱成分は Cl⁻ 及び K⁺ が主体で、それぞれ砂質土では 3,774mg/L⁻¹、2,069mg/L⁻¹、黒ボク土では 2,025mg/L⁻¹、2,517mg/L⁻¹ の高濃度となった。その他の溶脱塩類は概ね 1 桁低い濃度であり、牛ふん炭施用時の濃度障害の主因は、牛ふん炭に含まれる多量の Cl⁻ 及び K⁺ によると考えられた。黒ボク土では牛ふん炭施用に伴う土壌の塩類集積が顕著であり、除塩による改善効果は低かった。砂質土においては除塩の効果が比較的高かったものの、除塩 2 回の合計 130mm の灌水による Cl⁻ の除去量は、牛ふん炭施用に伴う Cl⁻ 投入量の約 13% に満たなかった。従って、牛ふん炭の施用に際しては、炭 1 倍区の施用程度に留めるか、牛ふん炭に含まれる高濃度の塩類を事前に除去する必要があると推察された。