

## 第IV章 牛ふん炭及び除塩牛ふん炭のリン酸資材代替性と濃度障害に対する影響

### 第1節 緒言

牛ふん炭を農地に多量に施用すると、含有される炭成分の影響が起こると考えられる。各種の炭資材では、化合物に対する吸着、土壌の物理性及び微生物相に及ぼす影響、作物生育の促進など幅広い効果が認められており（西尾, 1987；今野・西川, 1993；森, 2001；磯部ら, 2002）、牛ふん炭でも同様な効果が期待できる。しかし、牛ふん炭の炭資材としての効果は、炭素含量の高い木炭資材などに比べると、全炭素含量が30%前後と少ないため、比較的小さいものと考えられる。一方、牛ふん炭中の肥料成分に関しては、炭化物資材の中では含量が著しく多いことから、これらの成分の肥効が期待される。牛ふん炭中の窒素の肥効は極めて低いと考えられるが（牧ら, 2009）、主要成分であるリン酸とカリには、第II章の試験で示したように、速効性肥料と同等の肥効が認められている。両成分は、ともに水溶性と水不溶可溶性の画分から構成され、特にリン酸成分では後者の割合が90%程度と多くなっている。このため、牛ふん炭を農地に多量施用した場合には、可溶性のリン酸資材のような緩効性のリン酸肥効が発現することが予測される。しかし、第III章の牛ふん炭の多量施用試験では、副次成分の塩素がコマツナに濃度障害を発生させ、また、コマツナの栽培期間も短かったことから、牛ふん炭のリン酸資材的な緩効性の肥効を確認することができなかった。また、多量施用後の土壌に灌水除塩を行っても、牛ふん炭中の塩類の影響が完全には除けない問題点が認められた。さらに、根本的な問題として、牛ふん炭中のリン酸とカリのどちらが主体にコマツナに対して肥効を発現させたかに関しては、前章までの試験系ではリン酸及びカリが比較的多い一般的な野菜畑の土壌を用いたため、明らかとなっていない。

そこで、本章では、初めに、牛ふん炭のリン酸及びカリのコマツナに対する肥効寄与率を明らかにする目的か

第4-1表 供試土壌の化学性（試験1及び試験2）

土壌の種類	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	T-C T-N C/N			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	リン酸吸 収係数 (mg kg <sup>-1</sup> )	Truog- P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	水溶性P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
			(10 <sup>-2</sup> kg kg <sup>-1</sup> )							
黒ボク土	6.4	0.10	2.87	0.23	12.3	26	12	21,239	8	0.1
砂質土	6.7	0.04	0.01	0.00	-	1	4	435	49	0.4

土壌の種類	CEC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	交換性塩基 (mg kg <sup>-1</sup> )				水溶性塩基 (mg kg <sup>-1</sup> )				水溶性Cl <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
		CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	
黒ボク土	28.3	5,807	693	236	35	74	16	12	9	6
砂質土	2.4	320	110	35	34	6	7	6	13	10

ら、両成分の脊薄な土壌を用いてコマツナの要素欠乏試験を行った。次に、特定した肥効成分の持続性を把握する目的で、コマツナを指標作物とした4連作栽培を行い、初作に一回施用した牛ふん炭の肥効の経時的な変化を調査した。さらに、第III章で問題となった牛ふん炭の多量施用時における塩類集積を改善するため、牛ふん炭を予め水洗処理した除塩牛ふん炭（以下、除塩炭）を作成し、その肥効特性と濃度障害についても併せて検討した。

### 第2節 材料および方法

#### 1. コマツナの要素欠乏試験による牛ふん炭の肥効成分の特定（試験1）

供試土壌は2種類の土壌とした。表層腐植質黒ボク土（米神統、以下黒ボク土）は千葉市緑区の農業総合研究センター内で4年間耕作をしていない露地畑の作土。砂質土は茨城県鹿島市にある未耕地の海成砂質土を水洗したものを用いた。土壌の化学性は第4-1表に示したとおりである。黒ボク土では水溶性リン酸0.1mg kg<sup>-1</sup>、トルオーグリン酸8 mg kg<sup>-1</sup>、水溶性カリ12mg kg<sup>-1</sup>、交換性カリ236mg kg<sup>-1</sup>であった。砂質土では水溶性リン酸0.4mg kg<sup>-1</sup>、トルオーグリン酸49mg kg<sup>-1</sup>、水溶性カリ6mg kg<sup>-1</sup>、交換性カリ35mg kg<sup>-1</sup>であった。

試験1の要素欠乏試験区の構成は第4-2表に示したとおりである。リン酸を無施用とし、塩化カリウムでカリ成分を300kg ha<sup>-1</sup>と900kg ha<sup>-1</sup>相当を施用した2区、カリを無施用とし、過リン酸石灰でリン酸を150kg ha<sup>-1</sup>と450kg ha<sup>-1</sup>相当を施用した2区、及びリン酸とカリを450kg ha<sup>-1</sup>と900kg ha<sup>-1</sup>相当を施用した両成分多量区の合計5区とした。試験区は1区4ポットの反復とした。土壌のポット充填及び肥料などの混合は、前章までの方法と同様に行った。コマツナの栽培についても、第II章の炭化温度の異なる牛ふん炭の試験時と同様の方法で行った。播種は2006年1月26日、収穫は3月16日とした。

## 2. コマツナ4連作栽培による牛ふん炭及び除塩炭の肥効持続性評価 (試験2)

牛ふん炭は、第II章と同じ(独)農業工学研究所のロータリーキルン式の連続式パイロット炭化装置を用いて500℃で炭化したものを供試した。試験には5mm目の篩を通した牛ふん炭を使用した。また、除塩炭は、篩い別した牛ふん炭を底面に排水孔のある育苗箱に2cm程度の厚さに敷き詰め後、第III章と同じ組成の水道水を用いて炭1:水80の重量比でジョウロによる散水を行って作成した。牛ふん炭及び除塩炭の化学性は、第4-3表に示したとおりである。牛ふん炭のpH(H<sub>2</sub>O)は9.4、ECは17.0dS m<sup>-1</sup>、全窒素は1.4%、全炭素は25.9%であり、主要塩類は、リン酸がク溶性2.8%、水溶性0.29%、カリがク溶性7.4%、水溶性4.2%、水溶性塩素が6.4%であった。除塩炭では、pH(H<sub>2</sub>O)は8.7、ECは4.9dS m<sup>-1</sup>に低下し、リン酸0.15%、カリ2.0%、塩素4.5%が流出除去された。

供試土壌は試験1と同じものを用い、土壌のポット充填及び肥料などの混合についても試験1と同様に行った。試験2の試験区の構成は第4-4表に示したとおりである。試験1と同じ肥料でリン酸150kg ha<sup>-1</sup>とカリ300kg ha<sup>-1</sup>相当を毎作施用した標準区、及び1作目のみに標準区のリン酸成分の6倍相当量を溶性リン肥(以下、溶リン)で施用した溶リン6倍区、同様に牛ふん炭で6倍相当量を施用した牛ふん炭6倍区及び除塩炭で5倍相

当量のリン酸を施用した除塩炭5倍区を設けた。また、リン酸とカリを施用しない無PK区を設けた。なお、溶リン6倍区では標準区と同量の塩化カリウムを毎作施用した。また、牛ふん炭の窒素肥効はほとんどないので、各試験区共通に硝酸アンモニウムを用いて窒素150kg ha<sup>-1</sup>を毎作施用した。試験区は1区4ポットの反復とした。

供試資材の肥効持続性を評価するためのコマツナの4連作栽培は、試験1と同様の栽培管理で、1作(播種2005年6月4日、収穫6月29日)、2連作(播種2005年10月4日、収穫11月9日及び14日)、3連作(播種2005年11月18日、収穫2006年1月5日)、4連作(播種2006年1月26日、収穫3月16日)の作付け体系で実施した。なお、次作の栽培に際しては、前作の主要根を手で取り除いた土壌を、所定の肥料と均等に混合し、ポットに再充填して使用した。

## 3. 調査及び分析方法

試験1及び試験2のコマツナの生育調査は、前章までの方法に準じて行った。また、土壌分析の方法についても、前章までの方法に準じて行った。なお、試験2の4連作栽培では、1作目の栽培開始時にそれ以降の分析調査に伴う試験ポットの損失分を補足栽培し、各作毎に土壌分析及び根量調査を実施した。

第4-2表 コマツナ栽培における要素欠乏試験区の構成 (試験1)

試験区	施肥量 (kg ha <sup>-1</sup> )			備 考
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
POK1	150	0	300	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> を無施用、K <sub>2</sub> Oを1倍量とした。
POK3	150	0	900	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> を無施用、K <sub>2</sub> Oを3倍量とした。
P1K0	150	150	0	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> を1倍量、K <sub>2</sub> Oを無施用とした。
P3K0	150	450	0	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> を3倍量、K <sub>2</sub> Oを無施用とした。
P3K3	150	450	900	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> を3倍量、K <sub>2</sub> Oを3倍量とした。

注) 化学肥料は、N:硝安、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:過石、K<sub>2</sub>O:塩加を供試した。

第4-3表 牛ふん炭(上段)及び除塩炭(下段)の化学性 (試験2)

pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	T-C		C/N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (10 <sup>-3</sup> kg kg <sup>-1</sup> )			K <sub>2</sub> O(10 <sup>-3</sup> kg kg <sup>-1</sup> )			水溶性Cl <sup>-</sup> (10 <sup>-2</sup> kg kg <sup>-1</sup> )
		T-N			(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	全量	ク溶性	水溶性	全量	ク溶性	水溶性	
9.4	17.0	25.9	1.4	18.9	4	22	3.2	2.8	0.29	8.0	7.4	4.2	6.4

pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	水溶性P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (10 <sup>-3</sup> kg kg <sup>-1</sup> )	水溶性K <sub>2</sub> O (10 <sup>-3</sup> kg kg <sup>-1</sup> )	水溶性Cl <sup>-</sup> (10 <sup>-2</sup> kg kg <sup>-1</sup> )
8.7	4.9	3	6	0.14	2.2	1.9

注) 炭化物のpH及びUECIは、1:20で水抽出した値を示す。

### 第3節 結果

#### 1. リン酸・カリ要素欠乏試験におけるコマツナの生育 (試験1)

黒ボク土の要素欠乏試験におけるコマツナの生育は、第4-1図(左)に示したとおりである。リン酸を無施用にした場合、カリ施用の多寡に関わらず、地上部重が著しく低下した。一方、リン酸を施用してカリを無施用にした場合には、地上部重が顕著に増加した。リン酸の3倍量施用では1倍量施用に比べてさらに有意に増加した。この結果は、カリの3倍量施用を同時に行っても同じであり、リン酸の増肥に併せたカリの増肥効果は認められなかった。また、地下部の生育についても、地上部とほぼ同様であり、カリの施用効果は認められず、リン

酸の施用量の増加に伴う促進効果のみが認められた。

砂質土の要素欠乏試験におけるコマツナの生育は、第4-1図(右)に示したとおりである。リン酸を無施用にした場合、カリ施用の多寡に関わらず、地上部重は著しく低下した。一方、リン酸を施用してカリを無施用にした場合は、地上部重が顕著に増加した。リン酸の3倍量施用では、1倍量施用に比べてやや低下したが、カリの3倍量施用を併用すると地上部重が有意に増加した。地下部の生育についても、概ね地上部と同様な傾向であった。

以上のように、コマツナは、両土壌においてリン酸のみに反応してカリに対してほとんど反応しないことから、リン酸とカリを含む牛ふん炭のリン酸肥効を検定する作物として有効と判定された。

第4-4表 コマツナ4連作栽培における資材施用試験区の構成 (試験2)

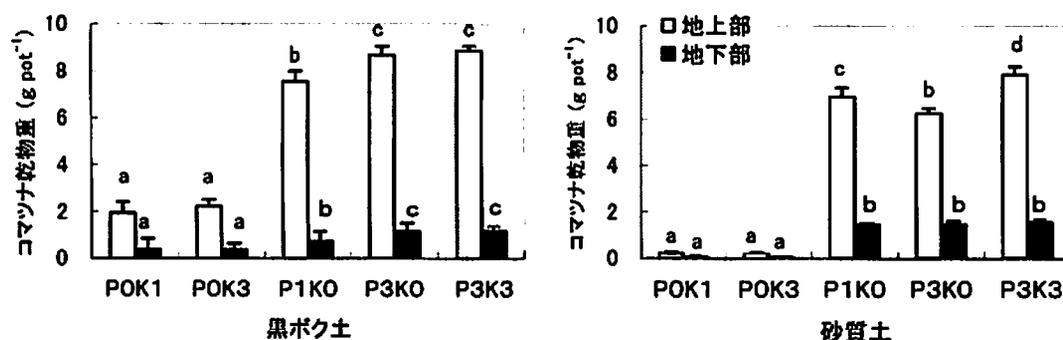
試験区	施肥量 (kg ha <sup>-1</sup> )			備 考
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
標準	150	150	300	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> Oを毎作施用した。
溶リン6倍	150	900	1,800	溶リンを1作目のみ施用, K <sub>2</sub> Oは毎作施用した。
牛ふん炭6倍	150	900	2,400	牛ふん炭を1作目のみ施用, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> Oは無施用とした。
除塩炭5倍	150	750	1,750	除塩炭を1作目のみ施用, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> Oは無施用とした。
無PK	150	0	0	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> Oを無施用とした。

注1)標準区は、試験1と同じ肥料を供試した。

2)ク溶性リン酸成分で、溶リン及び牛ふん炭は標準の6倍量、除塩炭は5倍量を施用した。

3)牛ふん炭6倍量は炭63g pot<sup>-1</sup> (31.8Mg ha<sup>-1</sup>)、除塩5倍量は炭52.5g pot<sup>-1</sup> (26.5Mg ha<sup>-1</sup>)に相当する。

4)窒素は、全区共通に硝安を作付け毎に施用した。



第4-1図 リン酸・カリ要素欠乏試験におけるコマツナの地上部及び地下部の生育 (試験1)

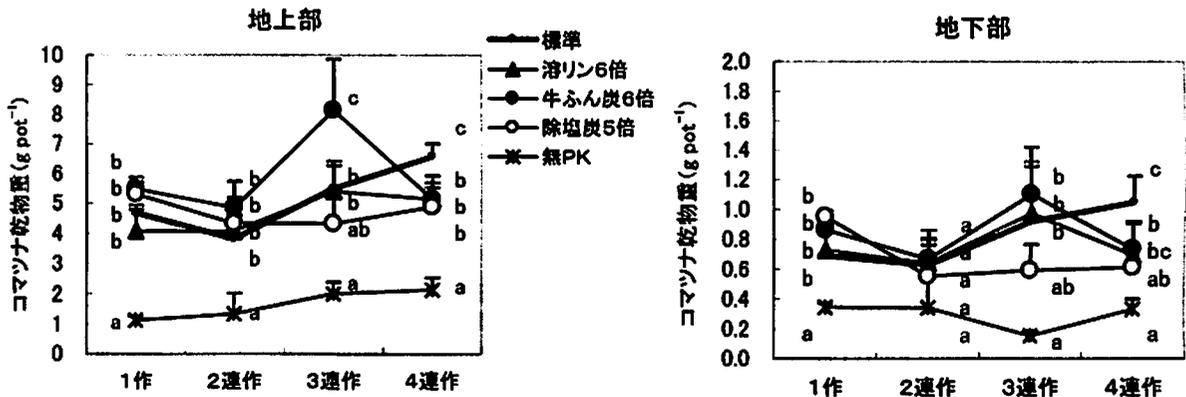
注1) 同項目で異なる英文字間には、5%水準で有意差有り (Tukeyの方法による)。

2) グラフ中のバーは、標準偏差 (正方向) を示す。

2. 黒ボク土及び砂質土におけるコマツナ4連作栽培による牛ふん炭及び除塩炭のリン酸肥効持続性評価 (試験2)

黒ボク土におけるコマツナ連作栽培中の地上部乾物重の推移は第4-2図(左)に示したとおりである。標準区、溶リン6倍区、牛ふん炭6倍区及び除塩炭5倍区の地上部は、4~8 g pot<sup>-1</sup>の範囲で概ね5 g pot<sup>-1</sup>前後を推移し、無PK区は1~2 g pot<sup>-1</sup>であった。標準区に対して、溶リン6倍区、牛ふん炭6倍区及び除塩炭5倍区は、3連作までは、3連作目に急増した牛ふん炭6倍区(対標準区148%)を除くと、標準区とほぼ同等であったが、4連作ではいずれも標準区の80%程度に地上部乾物重が有意に低下した。なお、4連作を通して連作による生育低下はいずれの試験区も認められなかった。地下部乾物重の推移は第4-2図(右)に示したとおりである。標準区、溶リン6倍区、牛ふん炭6倍区及び除塩炭5倍区の地下部は、0.6~1.1g pot<sup>-1</sup>の範囲で、無PK区は0.2~0.4g pot<sup>-1</sup>であった。これらの試験区における地下部重の変動傾向は、地上部の場合と同様であった。ただし、除塩炭5倍区では、溶リン6倍区及び牛ふん炭6倍区との有意差がないものの、3連作目に地下部重の減少傾向が認められた。

砂質土におけるコマツナ連作栽培中の地上部乾物重の推移は第4-3図(左)に示したとおりである。標準区、溶リン6倍区、牛ふん炭6倍区及び除塩炭5倍区では、2~7 g pot<sup>-1</sup>の範囲で推移し、無PK区では0.4g pot<sup>-1</sup>以下であった。標準区に対して、溶リン6倍区は全作を通して標準区と同等であったが、牛ふん炭6倍区では、2連作まで地上部重が有意に低下(対標準約40%)し、3連作以降は反対に有意に増加(対標準約190%, 140%)した。除塩炭5倍区では、2連作まで標準区と同等で、3連作以降は標準区に比べて有意に増加(対標準約240%, 150%)した。なお、標準区及び溶リン6倍区では連作に伴う生育低下の傾向が認められたが、牛ふん炭6倍区及び除塩炭5倍区では認められなかった。地下部乾物重の推移は第4-3図(右)に示したとおりである。無PK区では0.2g pot<sup>-1</sup>以下、他の試験区では0.2~1.4g pot<sup>-1</sup>の範囲で推移した。各試験区の地下部重の変動傾向は、地上部の場合と同様であった。ただし、連作の影響は地上部に比べてより顕著で、3連作目の標準区及び3連作以降の溶リン6倍区の地下部重は無PK区と有意差がない程度まで低下した。また、牛ふん炭6倍区の地下部重も3連作まで顕著に低下し、除塩炭5倍区に比べると4連作まで有意な地下部重の低下が認められた。



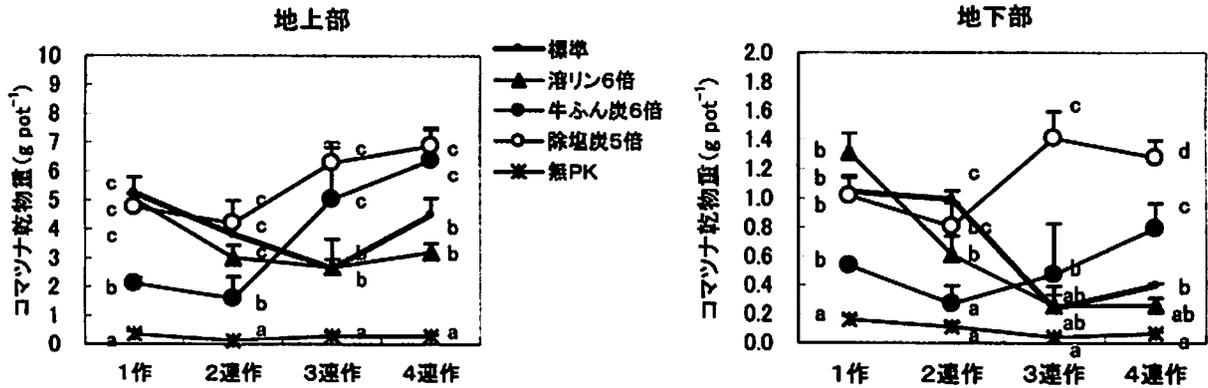
第4-2図 黒ボク土を用いたコマツナ4連作栽培による牛ふん炭及び除塩炭の肥効評価 (試験2)

注 1) 標準区は過石, 塩加, 硝安を毎作施用, 溶リン6倍区は塩加, 硝安を毎作施用した。

2) その他の区は硝安を毎作施用した。

3) 異なる英文字は, 各作の試験区間において5%水準で有意差有り (Tukeyの方法による)。

4) グラフ中のバーは, 標準偏差 (正方向) を示す。



第 4-3 図 砂質土を用いたコマツナ 4 連作栽培による牛ふん炭及び除塩炭の肥効評価 (試験 2)

注 1) 標準区は過石，塩加，硝安を毎作施用，溶リン 6 倍区は塩加，硝安を毎作施用した。

2) その他の区は硝安を毎作施用した。

3) 異なる英文字は，各作の試験区間において 5%水準で有意差有り (Tukey の方法による)。

4) グラフ中のバーは，標準偏差 (正方向) を示す。

### 3. 4 連作栽培中の牛ふん炭及び除塩炭施用跡地土壌のリン酸含量 (試験 2)

連作跡地土壌のリン酸含量は第 4-5 表に示したとおりである。水溶性リン酸含量は，黒ボク土では全ての試験区において各連作跡地で微量であった。一方，砂質土では，標準区は 1 作から 4 連作跡地で 5~17mg kg<sup>-1</sup> 乾土まで段階的に増加し，溶リン 6 倍区では連作中に 4 mg kg<sup>-1</sup> 乾土前後と少なく一定していた。牛ふん炭 6 倍区は 1 作から 4 連作まで 37~12mg kg<sup>-1</sup> 乾土，除塩炭 5 倍区では 21~7 mg kg<sup>-1</sup> 乾土の範囲で，連作に伴って段階的に減少した。無 PK 区では微量であった。トルオーグリン酸含量は，黒ボク土では，無 PK 区は 4 連作の平均で約 7 mg kg<sup>-1</sup> 乾土の低含量であった。他の試験区でも，平均でいずれも 12mg kg<sup>-1</sup> 乾土前後 (7~19mg kg<sup>-1</sup> 乾土) と少なく，区間差及び連作に伴う増減傾向は認められなかった。一方，砂質土では，低含量の無 PK 区を除き，連作に伴うトルオーグリン酸含量の増減傾向が認められた。標準区では 38~171mg kg<sup>-1</sup> 乾土まで段階的に増加し，溶リン 6 倍区及び除塩炭 5 倍区では，それぞれ 129~53mg kg<sup>-1</sup> 乾土，149~71mg kg<sup>-1</sup> 乾土の範囲で段階的に減少した。牛ふん炭 6 倍区においては 121~148mg kg<sup>-1</sup> 乾土の範囲で連作に伴う明瞭な変化は認められなかった。

### 4. 4 連作栽培中の牛ふん炭及び除塩炭施用跡地土壌の塩類集積 (試験 2)

連作跡地土壌の塩類集積の状況は第 4-5 表に示したと

おりである。土壌 pH (H<sub>2</sub>O) の連作に伴う変動はわずかであった。4 連作の平均値で比較すると，黒ボク土では，標準区の 6.7 に対して，溶リン 6 倍区は 6.9，牛ふん炭 6 倍区は 6.8，除塩炭 5 倍区は 7.0 で試験区間の差はほとんどなかった。一方，砂質土では，標準区の 5.9 に対して，溶リン 6 倍区は 6.2，牛ふん炭 6 倍区は 6.7，除塩炭 5 倍区は 7.0 で，炭化物施用区の土壌 pH (H<sub>2</sub>O) が 1 程度上昇した。土壌 EC は，両土壌の標準区と溶リン 6 倍区において連作に伴う上昇傾向がみられたが，牛ふん炭 6 倍区及び除塩炭 5 倍区では連作に伴う一定の傾向が認められなかった。4 連作の平均値で比較すると，黒ボク土では，標準区の 0.20dSm<sup>-1</sup> に対して，牛ふん炭 6 倍区は 0.32dSm<sup>-1</sup> と高かったが，除塩炭 5 倍区ではその他の区と同等の 0.15dSm<sup>-1</sup> に低下した。一方，砂質土では，標準区の 0.19dSm<sup>-1</sup> に対して，牛ふん炭 6 倍区が同等の 0.20dSm<sup>-1</sup>，溶リン 6 倍区及び無 PK 区は 0.10dSm<sup>-1</sup> と低かった。除塩炭 5 倍区ではさらに低い 0.05dSm<sup>-1</sup> であった。

主要塩類の内訳を 4 連作の平均値で見ると，黒ボク土における水溶性 Cl<sup>-</sup> 含量は，標準区の 103mg kg<sup>-1</sup> 乾土に対して，溶リン 6 倍区はほぼ同等，牛ふん炭 6 倍区は約 3 倍に増加，除塩炭 5 倍区では約 1/2 に減少し，牛ふん炭 6 倍区の 17% となった。一方，砂質土における水溶性 Cl<sup>-</sup> 含量は，標準区の 76mg kg<sup>-1</sup> 乾土に対して，溶リン 6 倍区は同等，牛ふん炭 6 倍区は約 2 倍に増加，除塩炭 5 倍区では無 PK 区と同等の約 1/4 に減少し，牛ふん炭 6 倍区の 12% となった。

第4-5表 コマツナ連作栽培における牛ふん炭及び除塩炭施用跡地土壌の pH (H<sub>2</sub>O), EC 並びに主要塩類の変化 (試験2)

試験区	pH (H <sub>2</sub> O)					EC (dS m <sup>-1</sup> )					水溶性Cl <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )				
	1作	2連作	3連作	4連作	平均	1作	2連作	3連作	4連作	平均	1作	2連作	3連作	4連作	平均
黒 標準	6.6	6.6	6.4	7.1	6.7	0.14	0.21	0.21	0.24	0.20	57	105	123	126	103
ボ 溶リン6倍	7.0	6.8	6.6	7.2	6.9	0.12	0.15	0.15	0.19	0.15	60	106	136	208	127
ク 牛ふん炭6倍	6.7	6.8	6.6	7.3	6.8	0.25	0.49	0.30	0.25	0.32	228	542	341	243	339
土 除塩炭5倍	6.9	7.0	6.7	7.2	7.0	0.10	0.17	0.18	0.16	0.15	36	57	56	85	58
無PK	7.0	6.8	6.3	7.0	6.8	0.17	0.17	0.14	0.12	0.15	13	10	17	50	23
砂 標準	6.9	5.5	5.4	5.9	5.9	0.04	0.15	0.20	0.37	0.19	11	50	76	166	76
質 溶リン6倍	5.7	6.4	6.4	6.4	6.2	0.03	0.06	0.14	0.18	0.10	11	39	106	158	78
土 牛ふん炭6倍	5.9	6.9	6.9	7.1	6.7	0.09	0.25	0.27	0.18	0.20	56	182	237	176	163
除塩炭5倍	7.0	6.9	7.0	6.9	7.0	0.04	0.05	0.03	0.06	0.05	13	15	4	48	20
無PK	6.4	5.1	5.6	5.5	5.7	0.02	0.09	0.14	0.16	0.10	7	8	9	54	20

試験区	水溶性K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )					交換性K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )					水溶性P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )					Trough-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				
	1作	2連作	3連作	4連作	平均	1作	2連作	3連作	4連作	平均	1作	2連作	3連作	4連作	平均	1作	2連作	3連作	4連作	平均
黒 標準	10	14	15	11	12	182	231	227	168	202	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	8	11	12	19	12
ボ 溶リン6倍	9	11	13	13	11	195	231	235	212	218	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	11	9	11	16	12
ク 牛ふん炭6倍	223	268	212	168	218	1764	1823	1560	1462	1652	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	7	9	11	16	11
土 除塩炭5倍	58	57	58	37	53	846	786	717	555	726	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	11	11	14	13	12
無PK	11	11	9	9	10	186	212	204	215	204	0.0	0.3	0.3	0.0	0.2	7	6	6	9	7
砂 標準	7	7	18	17	12	43	24	67	62	49	4.6	4.7	9.4	16.6	8.8	38	61	99	171	92
質 溶リン6倍	7	11	18	23	15	60	55	92	110	79	4.1	5.1	3.8	4.4	4.4	129	75	53	54	78
土 牛ふん炭6倍	90	176	232	119	154	809	789	797	626	755	36.8	19.4	13.3	12.3	20.4	145	148	121	133	137
除塩炭5倍	32	37	26	14	27	291	295	203	140	232	21.4	12.0	10.2	7.2	12.7	149	100	76	71	99
無PK	5	7	9	9	8	34	49	51	52	46	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	28	18	23	20	22

土壌中の水溶性 K<sub>2</sub>O 含量は、黒ボク土では、標準区の 12mg kg<sup>-1</sup> 乾土に対して、溶リン6倍区は同等、牛ふん炭6倍区は約 18 倍、除塩炭5倍区では約 4 倍で牛ふん炭6倍区の 24 %まで減少した。一方、砂質土では、標準区の 12mg kg<sup>-1</sup> 乾土に対して、溶リン6倍区は同等、牛ふん炭6倍区は約 13 倍、除塩炭5倍区では約 2 倍で牛ふん炭6倍区の 18 %まで減少した。土壌中の交換性 K<sub>2</sub>O 含量は、4 連作の平均で、水溶性の場合と類似した傾向を示したが、除塩炭5倍区の牛ふん炭6倍区に対する比率は、黒ボク土で 44 %、砂質土で 31 %に留まった。

#### 第4節 考 察

##### 1. コマツナの要素欠乏試験による牛ふん炭及び除塩炭の肥効成分の特定

野菜の種類によってリン酸に対する生育反応は異なる (西尾, 1987)。コマツナのリン酸に対する生育反応に関する論文知見はないが、農業技術体系では同作物は、土壌中の難溶性のカルシウム型リン酸を吸収利用してリン酸肥料が少量で足りることから、リン酸施用効果の低い野菜種とされている (増井, 1985a)。一方、カリに

対するコマツナの生育反応については、石英砂を培地に用いた溶成ケイ酸カリの施用で促進効果が認められている (八尾・日高, 2001)。また、前Ⅲ章の牛ふん炭を施用した黒ボク土のコマツナでは、リン酸吸収量に比べてカリウム吸収量の顕著な増加を認めた。このようなことから、当初、牛ふん炭のコマツナに対する肥効は多量に含まれるカリによる影響が大きいと考えられた。しかし、要素欠乏試験をリン酸及びカリ成分が少ない黒ボク土及び砂質土で実施したところ、コマツナの生育はリン酸によってのみ影響されることが明らかになった。従って、前章までに示した牛ふん炭のコマツナに対する顕著な肥効は、牛ふん炭中のリン酸による単独効果と考えられた。同様なリン酸に対する作物の生育反応は、最近、キャベツにおいても認められている (町田ら, 2007)。また、類似した現象がソルガムのリン酸及びカリの要素欠乏試験でも報告されている (Reneau ら, 1983)。ソルガムでは、カリ増施に伴うマグネシウムの吸収抑制による生育低下、及びリン酸増施に伴うマグネシウムの吸収促進による生育増加が認められている。なお、本章のコマツナを用いた試験系では牛ふん炭のカリ肥効が評価されなかったが、牛ふん炭は、ク溶性のカリ成分を多く含むため、他の作物では緩効性のカリ肥料として使える可能性がある。木炭の多量施用試験では、含有成分のカリがサ

ツマイモの生育を増加させたと報告されている(磯部ら, 1996)。今後、牛ふん炭においても、カリに反応性が高い作物(高橋ら, 1997; 杉山・阿江, 2000)を指標とするなどの方法で、この点を評価する必要がある。

## 2. 牛ふん炭及び除塩炭のリン酸肥効の持続性

牛ふん炭中のリン酸は、水溶性が少なくク溶性が多いことから、除塩炭の形態でも水不溶のク溶性リン酸が多く残り、コマツナに対して緩効性の肥効を示すものと考えられる。このことを確認するため、本試験では牛ふん炭及び除塩炭の肥効持続性を、毎作施用した速効性のリン酸肥料の過リン酸石灰及び1作目のみ施用した緩効性のリン酸肥料である溶リンと比較した。黒ボク土では、牛ふん炭は2連作まで前述の肥料と同等以上の肥効を示し、3連作では有意にリン酸肥効が高まったが、4連作において溶リンと同様に肥効が標準区の約80%に低下した。リン酸施肥量が若干少なかった除塩炭では、3連作目ですでに肥効低下の兆候が見えた。このようなことから、牛ふん炭に含まれるリン酸は、水不溶のク溶性が主体の化合物ではあるが、比較的早い時期に溶出量が多くなって肥効を発現し、その後に溶出量が減少して肥効が低下したと考えられた。すなわち、黒ボク土に施用した牛ふん炭が3連作目に示したコマツナの顕著な生育促進は、要素欠乏試験における速効性のリン酸肥料の3倍量施用による促進現象と同様であり、牛ふん炭のリン酸溶出量が3連作目に増大した可能性を示している。また、4連作目の肥効低下は、リン酸吸収係数の高い黒ボク土では3連作までに増加した溶出リン酸が土壤に固定されて難溶化するとともに、4連作目において牛ふん炭からのリン酸溶出量が標準区のリン酸施肥に伴うリン酸溶出量を下回った可能性を示している。除塩炭ではリン酸施肥量が牛ふん炭の約80%と少なかったため、3連作目にリン酸の溶出量がすでに不足したものと考えられる。一方、砂質土ではこのような肥効低下は認められず、4連作目においても牛ふん炭及び除塩炭の顕著なリン酸肥効が示された。リン酸吸収係数の低い砂質土では、溶出リン酸が土壤に固定されずに残存して4連作まで高いリン酸肥効が維持されたと考えられる。牛ふん炭及び除塩炭を施用した砂質土では、水溶性リン酸含量が溶リンを施用した場合と比較して1作目から顕著に高く、この点からも牛ふん炭中のリン酸は施用後の比較的早い段階から溶出していたものと考えられる。

比較した溶リンは、ク溶性であり、緩効性リン酸資材に分類される(藤原・岸本, 1988)が、酸性土壤では過リン酸石灰に近い肥効を示した報告があり(Yostら, 1982)、本試験のように、酸性肥料の塩化カリと併用す

ると溶解性が増大し(藤原・岸本, 1988)、通常より肥効発現が速まると推察される。牛ふん炭は、このような施用条件の溶リンに比べてもリン酸肥効の発現が早い特徴があった。牛ふん炭中のリン酸化合物の形態は明らかではないが、牛ふん堆肥には、溶解性が最も高い水抽出態のリン酸に次いで、可給性が高い重炭酸ナトリウム抽出態のリン酸が多く存在している(横田ら, 2003)。一方、畜産廃液から回収したリン酸石灰化合物は、ク溶性でありながら重過リン酸石灰に匹敵する肥効を示し、その粒径が大きくなると肥効が遅くなるとの報告がある(Bauerら, 2007)。また、最近では上山ら(2008)が豚ふん尿から結晶化法で回収したリン酸肥効成分がMAP(リン酸マグネシウムアンモニウム)であり、ク溶性形態であるにも関わらず、溶リンに比べてリン酸の溶出が早く、重焼リンに匹敵することを明らかにしている。牛ふん炭中のリン酸化合物についても、これらに類似した成分で、速効性と緩効性を併せ持つ重焼リン(藤原・岸本, 1988)のような資材特性を有すると考えられる。

## 3. 牛ふん炭及び除塩炭による黒ボク土のリン酸肥沃度の向上

我が国の露地野菜における化学肥料相当リン酸の利用効率は平均10%と低く(西尾, 2003)、リン酸吸収係数の高い黒ボク土では利用効率がさらに低下すると予測される。このため、黒ボク土では、リン酸資材によるリン酸肥沃度の向上による生産力の増強が図られており、牛ふん炭のリン酸資材としての活用場面も期待される。本試験では、牛ふん炭及び除塩炭の施用によって、コマツナの生育が4連作まで促進されたが、リン酸肥沃度の一般指標であるトルオーグリン酸含量は、黒ボク土では連作期間を通して大きく変化せず、無PK区を除くと、いずれの試験区も $12\text{mg kg}^{-1}$ 乾土前後と少なかった(第4-5表)。地力増進法に基づく黒ボク土普通畑におけるトルオーグリン酸の改善目標値の $100\text{mg kg}^{-1}$ 乾土以上(農林水産省農産園芸局農産課, 1996)にも遙かに及ばず、両炭化物の多量施用によるリン酸肥沃度の向上はトルオーグリン酸含量を見る限り認められなかった。溶リン区でも同様であったことから、リン酸6倍施用( $\text{P}_2\text{O}_5$   $900\text{kg ha}^{-1}$ )の設定量では、リン酸施肥が4年間なかった来歴の供試黒ボク土のトルオーグリン酸含量を上げるには不十分であったと考えられる。

両炭化物施用後の黒ボク土において、トルオーグリン酸含量の顕著な増加がなかったにも関わらず、リン酸肥効の持続性が明瞭に認められた理由としては、コマツナの生育がトルオーグリン酸含量のわずかな増加で促進さ

れた可能性がある。三好 (1984) によると、過リン酸石灰でトルオーグリン酸を 15mg, 22mg, 76mg, 154mg  $\text{kg}^{-1}$  乾土に設定した黒ボク土では、ホウレンソウはリン酸含量に正比例して生育が増大するが、コマツナでは 22mg  $\text{kg}^{-1}$  乾土まで明瞭な増加反応を示し、それ以降の生育増加は緩慢になる。両炭化物施用後の連作中のトルオーグリン酸含量は 22mg  $\text{kg}^{-1}$  乾土以内で無 PK 区よりは高かったことから、炭化物施用後のトルオーグリン酸含量のわずかな上昇によってコマツナの生育が促進されたものと考えられる。

#### 4. 牛ふん炭及び除塩炭の多量施用がコマツナの濃度障害と塩類集積に及ぼす影響

第Ⅲ章で明らかにしたように、牛ふん炭の農地施用においては、牛ふん炭に多量に含まれる塩素及びカリの処置が問題となる。本塩類による濃度障害は、イオンの特異的な作用ではなく、浸透圧による一般的な作用である (嶋田, 1969)。塩類濃度が一定以下に低下すれば、濃度障害は解消されると考えられる。前章までにおいて、牛ふん炭を化学肥料と同等のリン酸成分量でコマツナに施用した場合は本塩類による濃度障害は起こらないが、多量施用した場合には塩素及びカリによる濃度障害が問題になった。しかし、単作栽培で試験を終了したため、多量施用による濃度障害の後作への影響は確認していない。本章では、牛ふん炭及び除塩炭の多量施用による濃度障害の影響をコマツナの4連作栽培で評価した。牛ふん炭区では、黒ボク土におけるコマツナの濃度障害は連作中に発生しなかったが、砂質土においては2連作まで顕著な濃度障害が発生した。3連作以降も、濃度障害は発生しなかったものの、地下部の生育は除塩炭区に比べると有意に劣った。一方、除塩炭区では、濃度障害が生じやすい砂質土に関しても濃度障害が全く発生せず、牛ふん炭の施用前の除塩が濃度障害の解決策として有効であることが示された。

両炭化物の施用跡地土壌において、多くの作物で濃度障害を起こす  $\text{Cl}^-$  (松丸, 1993) の土壌集積状況を見てみると、前章同様、牛ふん炭6倍区では、黒ボク土と砂質土の両方に顕著な  $\text{Cl}^-$  の集積が起こり、4連作目まで高含量が続いた。しかし、除塩炭5倍区では、いずれの土壌も連作期間を通して  $\text{Cl}^-$  の集積は標準区より顕著に少なく、無 PK 区とほぼ同程度であった。従って、除塩炭にして施用すれば、副次成分の酸根を含まない肥料と同様な塩類ストレスの軽減効果 (中野ら, 2001) が得られると考えられる。また、除塩炭には、 $\text{Cl}^-$  に加えてカリの土壌集積の軽減効果も期待される。

国内の野菜地帯では、堆肥の連用によるカリの土壌集積が顕在化し、堆肥の適正施用量を算出する際にカリが制限要因になる場合もある。牛ふん炭では、炭化に伴って成分濃縮が起こるため、施用に際して同様の制約が生じる可能性がある。本試験では牛ふん炭6倍量の施用によって、黒ボク土では交換性  $\text{K}_2\text{O}$  含量が4連作の平均で標準区の約8倍、砂質土では約15倍に達し、カリが過剰となった。一方、除塩炭にして施用すると、牛ふん炭で施用した場合に比べて、交換性  $\text{K}_2\text{O}$  は黒ボク土で44%、砂質土で31%、水溶性  $\text{K}_2\text{O}$  ではそれぞれ24%と18%に土壌集積が軽減された。交換性  $\text{K}_2\text{O}$  の低減効果が水溶性  $\text{K}_2\text{O}$  に対して劣った理由は、施用前の除塩が牛ふん炭中の可溶性カリの57%を占める水溶性カリの除去のみであるため、灌水除塩によるカリ低減効果の限界を示している。しかしながら、現段階では家畜排泄物を除塩炭化物にして利用する手法は、家畜排泄物由来の  $\text{Cl}^-$  やカリの土壌集積を軽減するための最も有力な手段であろう。

#### 第5節 要約

牛ふん炭及び水洗した除塩炭 (炭1:水80の重量比) のリン酸資材的な特性及び土壌の塩類集積に及ぼす影響を明らかにする目的から、以下の2つの試験を実施した。試験1では、リン酸及びカリが低含量の4年間未耕作の黒ボク土及び水洗した砂質土を用いて、コマツナの1/5,000aのワグネルポット栽培によるリン酸・カリの要素欠乏試験を行った。その結果、コマツナは、両土壌においてカリ肥料に反応せず、リン酸肥料のみに反応したことから、リン酸肥効の指標作物として有効であった。試験2では、前述の土壌を充填したポットでコマツナを1年間に4連作栽培して、地上部の乾物重の推移から各資材のリン酸肥効の持続性を評価した。試験区は、過リン酸石灰を毎作施用 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  150 $\text{kg}\text{ha}^{-1}$ ) した標準区、1作目のみに標準区の6倍量のリン酸 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  900 $\text{kg}\text{ha}^{-1}$ ) を施用した溶リン6倍区と牛ふん炭6倍区、及び5倍量を施用した除塩炭5倍区とした。その結果、黒ボク土においては、2連作まで溶リン6倍区及び両炭化物区のリン酸肥効は標準区と同等であった。3連作では標準区に対して、溶リン6倍区は同等、牛ふん炭6倍区は約150%、除塩炭5倍区は約80%であった。4連作ではいずれの資材施用区も標準区の約80%にリン酸肥効が低下した。一方、砂質土においては、2連作まで濃度障害が発生した牛ふん炭6倍区を除き、溶リン6倍区及び除塩炭5倍区は標準区と同等のリン酸肥効を示した。3連作

以降は両炭化物区ともに、連作で生育が低下した標準区及び溶リン6倍区に対して、140～240%に増加した。両炭化物施用土壌のリン酸含量は、黒ボク土では溶リン6倍区と同様に水溶性及びトルオーグ態がほとんど増加しなかったが、砂質土では両炭化物区ともに水溶性リン酸が1作目に溶リン6倍区の5～9倍と顕著に増加し

た。濃度障害の主因である水溶性塩素及びカリウムは、両土壌でそれぞれ、牛ふん炭6倍区では標準の2～3倍、13～18倍と多かったが、除塩炭5倍区では1/4～1/2倍、2～4倍と少なかった。以上から、除塩した牛ふん炭は、塩類集積の危険性が小さい多量施用に適したリン酸資材として有望であると考えられた。