

## 牛ふん堆肥連用キャベツ畑における土壌中形態別リン酸の経時変化

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

**摘要**：2010年から2015年までの5年間、黄色土壌の牛ふん堆肥連用畑(冬作：キャベツ、夏作：キャベツ)において、堆肥由来リン酸の動態を明らかにするため、牛ふん堆肥とリン酸肥料の施用の有無を組み合わせた栽培試験を実施した。牛ふん堆肥由来リン酸は緩効性の成分を含み、リン酸が少しずつ溶出するため、キャベツの吸収効率が高いことが示唆された。また、化学肥料由来リン酸は、牛ふん堆肥由来リン酸と比べ、難溶性リン酸であるA1型リン酸を土壌に蓄積させやすいことが明らかになった。牛ふん堆肥に加えリン酸肥料を施用した場合、多くの余剰リン酸が発生した。牛ふん堆肥に上乘せして施用された化学肥料由来リン酸は、土壌のA1に固定されて不可給態となり、利用されない可能性が高い。このため、牛ふん堆肥を施用した際は、化学肥料のリン酸を減肥することが望ましいと考えられた。

**キーワード**：キャベツ、牛ふん堆肥、形態別リン酸、余剰リン酸、リン酸減肥

## Changes of Phosphate Species in a Cabbage Field Using Cattle Manure Compost

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

**Abstract** : The dynamics of phosphate in cattle manure compost were surveyed in a yellow soil cabbage field that used cattle manure compost for a period of 5 years (2010-2015). During this period, cabbage was alternately cultivated from September to February and from January to June. The cattle manure compost used in the present study contained phosphate that dissolves slowly, cabbage absorbed this phosphate efficiently. Soil in which cabbage was cultivated with phosphate from fertilizer contained more Al-P (phosphate that binds to aluminum) than the soil in which cabbage was cultivated with phosphate from cattle manure compost. When cabbage was cultivated with phosphate from fertilizer in soil to which cattle manure compost was applied, the soil contained considerable surplus phosphate that cabbage could not absorb. In addition, surplus phosphate could bind to aluminum. Hence, phosphate application should be reduced when cattle manure compost is applied during cabbage cultivation.

**Key Words** : Cabbage, Cattle manure compost, Phosphate species, Surplus phosphate, Reduced phosphate fertilization

---

本研究の一部は、日本土壌肥料学会中部支部第94回例会(2014年11月)、第95回例会(2016年3月)において発表した。

<sup>1)</sup>東三河農業研究所 <sup>2)</sup>東三河農業研究所(現環境基盤研究部)

(2016. 10. 12受理)

## 緒言

世界的な肥料の需要増大の影響を受け、化学肥料の価格は近年上昇を続けている<sup>1)</sup>。こうした中、化学肥料の代替として家畜ふん堆肥を利用した化学肥料削減技術の開発が進められている。糟谷ら<sup>2)</sup>は、牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑(冬作:キャベツ、夏作:スイートコーン)における養分動態について調査を行い、堆肥連用畑における化学肥料の代替可能性を明らかにした。しかし、堆肥由来成分の作物による吸収への寄与度や土壌中での蓄積形態はまだ不明な点が多い。特にリン酸は、土壌中で結合する元素により様々な形態で蓄積していることが知られており、各形態によって水への溶解度が大きく異なる<sup>3)</sup>。Caと結合した形態(Ca型リン酸)であれば、比較的溶解度が高く作物にも利用されやすいが、AlやFeと結合した形態(Al型リン酸、Fe型リン酸)は難溶性のため、作物に利用されにくい。このため、堆肥由来リン酸の土壌中での蓄積形態を明らかにすることは、リン酸を有効に活用するためにも重要である。そこで、牛ふん堆肥連用キャベツ畑において、堆肥とリン酸肥料の施用の有無を組み合わせさせた栽培試験を実施し、土壌中での牛ふん堆肥由来リン酸の蓄積形態及び動態について検討した。

## 材料及び方法

### 1 試験区の設定

試験は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。試験開始前の土壌の化

学性は表1のとおりである。

2010年から2015年までの5年間、毎年8月下旬に牛ふん堆肥を施用し、その後、冬作キャベツと夏作キャベツを連続して栽培するキャベツの年二作体系で試験を行った。試験区は牛ふん堆肥を施用し、N、P、K(化学肥料)を施用する「堆肥区」、牛ふん堆肥を施用し、Pを無施用とする「堆肥-P区」、堆肥を施用せず、N、P、Kのみ施用する「化学肥料区」、堆肥、化学肥料ともに施用しない「無肥料区」を設けた。試験区の面積は14.4 m<sup>2</sup>(3.6 m×4.0 m)で、各区2反復とした。

牛ふん堆肥の施用量は、愛知県の有機質資材施用基準<sup>4)</sup>量の30 Mg-FW ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>(水分含量50%換算)とした。使用した牛ふん堆肥は乳牛から排泄されたふん尿を主原料としており、副資材としておがくずを混合したものである。供試した牛ふん堆肥の成分量を表2に示した。これらの牛ふん堆肥は県内産堆肥<sup>5)</sup>と比べて、リン酸含量がやや低いものの、他の成分はほぼ平均的な値であった。

冬作キャベツの化学肥料の施用量は愛知県の施肥基準<sup>4)</sup>どおりとした。夏作キャベツについては、前作の残肥を考慮して施肥基準から各成分を減肥した。化学肥料の施用量は表3に示した。また、窒素については、基肥で全体の40%から50%の量を施用し、残りを追肥(2回に分施)で施用した。リン酸、カリウムについては全量を基肥で施用した。使用した肥料は、窒素を硫酸、リン酸を過リン酸石灰、カリウムを硫酸カリとした。

### 2 栽培体系

冬作キャベツは9月上旬または中旬に定植し、12月下旬から2月下旬に収穫した。夏作キャベツは1月下旬から3月上旬に定植し、6月上旬または中旬に収穫した。キャベツは結球のみを収穫し、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33 cm

表1 試験開始前土壌の化学性

試験区	pH	T-C g-C kg <sup>-1</sup>	T-N g-N kg <sup>-1</sup>	可給態 窒素 mg-N kg <sup>-1</sup>	CEC cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	交換性イオン cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>			リン酸吸 収係数 g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg <sup>-1</sup>
						Ca	Mg	K	
堆肥区	6.0	12.2	1.4	33.2	14.5	3.0	1.7	0.9	4.4
堆肥-P区	6.3	11.6	1.3	28.0	14.4	3.7	1.5	0.9	4.5
化学肥料区	6.0	11.1	1.2	21.6	13.9	2.8	1.5	0.9	4.5
無肥料区	5.9	10.8	1.2	23.2	13.6	2.5	1.3	0.7	4.6

注) 土壌採取時期:2010年8月9日

表2 供試堆肥の成分

年	C <sup>1)</sup> g-C kg <sup>-1</sup>	N <sup>1)</sup> g-N kg <sup>-1</sup>	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>1)</sup> g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg <sup>-1</sup>	K <sub>2</sub> O <sup>1)</sup> g-K <sub>2</sub> O kg <sup>-1</sup>	CaO <sup>1)</sup> g-CaO kg <sup>-1</sup>
2010年	373.4	15.6	23.9	13.1	41.0	17.7
2011年	442.9	19.8	22.3	15.1	38.9	23.6
2012年	451.4	19.0	23.7	12.0	30.8	18.9
2013年	330.9	16.6	19.9	12.8	32.4	25.0
2014年	449.3	16.9	26.6	13.1	34.5	21.3

1) 値は乾物換算

表3 各試験区の堆肥及び化学肥料施用量

試験区	牛ふん堆肥 施用量 <sup>1)</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	化学肥料施用量(kg ha <sup>-1</sup> )					
		冬作キャベツ			夏作キャベツ		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
堆肥区	30	300	150	300	200	50	180
堆肥-P区	30	300	-	300	200	-	180
化学肥料区	-	300	150	300	200	50	180
無肥料区	-	-	-	-	-	-	-

1) 牛ふん堆肥施用量は水分率 50%で計算

とした。ただし、2011年、2012年に作付した夏作キャベツは畝間を 65 cm、株間を 30 cm で栽培した。栽培品種は、冬作を「そらと」(トヨタネ株式会社)、夏作を「SE」(一般社団法人長野県原種センター)とした。

### 3 調査項目と方法

#### (1) 作物収量とリン酸吸収量

1区あたり3か所で、隣接する株に欠損のない連続した4株を地際から刈り取り、合計12株の新鮮重を収穫物(結球)とその他の残渣に分けて測定した。それぞれについて、乾燥、粉碎後、硝酸-過塩素酸分解<sup>6)</sup>により分解し、モリブデン青法<sup>7)</sup>でリン酸含量を測定した。

#### (2) 供試堆肥の形態別リン酸含量

供試堆肥について、乾燥、粉碎後、形態別リン酸含量を Frossard ら<sup>8)</sup>及び横田ら<sup>9)</sup>の方法に従い分析した。試料と抽出液の割合を 1:200 とし、水、0.5 mol L<sup>-1</sup>炭酸水素ナトリウム溶液(pH8.5)、0.1 mol L<sup>-1</sup>水酸化ナトリウム溶液、1.0 mol L<sup>-1</sup>塩酸の順に逐次抽出を行い、それぞれの抽出液をモリブデン青法<sup>7)</sup>によって定量した。この方法により抽出されるリン酸は水に溶けやすい性質のものから順に分離される。横田ら<sup>9)</sup>は、水溶性の水抽出リン酸と可給性の高いと考えられる炭酸水素ナトリウム抽出リン酸を易溶性リン酸としており、本試験でも、これに従った。塩酸までの抽出によってすべての無機態リン酸が抽出されるため、全リン酸から易溶性リン酸、水酸化ナトリウム抽出リン酸(AI、Fe型リン酸)及び塩酸抽出リン酸(難溶性のアパタイト型リン酸)を引いた値を有機態リン酸とした。

#### (3) 土壌の形態別リン酸含量

試験開始時及び夏作の栽培終了後に作土(深さ 20 cm)を採取し、全リン酸、可給態リン酸、形態別リン酸及び有機態リン酸の含量を測定した。

全リン酸は風乾細土を硝酸-過塩素酸分解<sup>10)</sup>後、モリブデン青法<sup>7)</sup>でリン酸含量を測定した。

可給態リン酸は、トルオーグ法<sup>11)</sup>により分析した。

形態別リン酸は、土壤養分分析法<sup>10)</sup>に記載の方法及び谷ら<sup>12)</sup>の方法に従い分析した。風乾細土に抽出液を順番に加え、Ca型リン酸、Al型リン酸、Fe型リン酸の3画分を逐次抽出し、それぞれの抽出液をモリブデン青法<sup>7)</sup>によって定量した。2.5%酢酸液及び1N塩化アンモニウム液で抽出した画分をCa型リン酸、次に1Nフッ化アンモニウム液で抽出した画分をAl型リン酸、最後に飽和塩

化ナトリウム液で洗浄後、0.1 N 水酸化ナトリウムで抽出した画分をFe型リン酸とした。

有機態リン酸は江川<sup>13)</sup>の方法に従って測定した。風乾細土を 350℃の電気マッフル中で1時間燃焼後、1N硫酸で4時間振とうして得られた抽出液をモリブデン青法<sup>7)</sup>で定量した。さらに、燃焼しない風乾細土についても同様に1N硫酸で4時間振とうし、得られた抽出液をモリブデン青法<sup>7)</sup>で定量した。燃焼後に抽出したリン酸から燃焼せずに抽出したリン酸を引いた値を有機態リン酸とした。

なお、全リン酸、可給態リン酸、形態別リン酸及び有機態リン酸の土壌への蓄積傾向を明らかにするため、試験開始後年数を説明変数、土壌中リン酸含量を目的変数とする回帰分析を行った。また、目的変数である土壌中リン酸含量は、反復間のばらつきを考慮し、2つの反復を平均しない値を用いた。

## 試験結果

### 1 収量指数の推移

堆肥区の収量を 100 として計算した収量指数を図 1 に示した。2010年冬作と2011年夏作は生育不良によりばらつきが大きかったため、収量指数が大きく変動した。収量指数については、年次間の変動が大きく、一定の傾向は見られなかった。

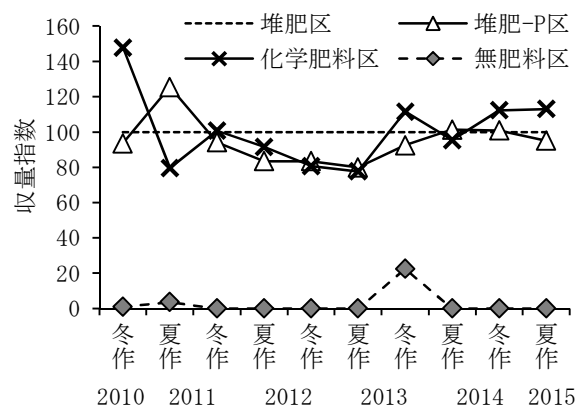


図1 収量指数の推移(堆肥区=100)

表4 供試堆肥の形態別リン酸の割合

年	全リン酸に占める形態別リン酸の割合(%)					
	H <sub>2</sub> O抽出 <sup>1)</sup>	NaHCO <sub>3</sub> 抽出 <sup>1)</sup>	NaOH抽出 <sup>1)</sup>	HCl抽出 <sup>1)</sup>	易溶性 <sup>2)</sup>	有機態 <sup>3)</sup>
2010年	39.8	29.8	2.8	6.8	69.6	20.9
2011年	27.9	20.7	1.7	19.7	48.6	30.1
2012年	33.6	24.5	2.7	13.4	58.1	25.8
2013年	30.4	24.1	4.5	22.3	54.5	18.6
2014年	34.8	30.4	3.2	14.3	65.1	17.4

1) H<sub>2</sub>O：水、NaHCO<sub>3</sub>：炭酸水素ナトリウム、NaOH：水酸化ナトリウム、HCl：塩酸

2) 易溶性＝H<sub>2</sub>O抽出＋NaHCO<sub>3</sub>抽出

3) 有機態＝100－(H<sub>2</sub>O抽出＋NaHCO<sub>3</sub>抽出＋NaOH抽出＋HCl抽出)

表5 5年間のリン酸収支

(kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>)

試験区	作期	リン酸投入量				リン酸吸収量		リン酸 余剰量 <sup>2)</sup>	土壌の 全リン酸 蓄積量 <sup>3)</sup>
		化学肥料	牛ふん堆肥			収穫物	残渣		
			全リン酸	易溶性 <sup>1)</sup>	有機態 <sup>1)</sup>				
堆肥区	冬作	750	992	584	226	184	195	1624	1486
	夏作	250	0	0	0	184	193		
	合計	1000	992	584	226	368	388		
堆肥-P区	冬作	0	992	584	226	167	170	666	681
	夏作	0	0	0	0	159	173		
	合計	0	992	584	226	326	344		
化学肥料区	冬作	750	0	0	0	182	171	643	718
	夏作	250	0	0	0	176	184		
	合計	1000	0	0	0	357	355		
無肥料区	冬作	0	0	0	0	14	66	-14	-182
	夏作	0	0	0	0	0	78		
	合計	0	0	0	0	14	145		

1) 牛ふん堆肥の形態別リン酸の割合から計算した、全リン酸に含まれる易溶性リン酸、有機態リン酸の量

2) 残渣をすき込みしたため、リン酸余剰量は投入量－収穫物で計算した

3) 土壌の全リン酸蓄積量は作土層の厚さを20 cm、礫を除いた仮比重0.98を用いて計算した

## 2 供試堆肥の形態別リン酸

供試堆肥の形態別リン酸の割合を表4に示した。水抽出リン酸の割合は27.9～39.8%、炭酸水素ナトリウム抽出リン酸の割合は20.7～30.4%であった。水抽出リン酸と炭酸水素ナトリウム抽出リン酸を合計した易溶性リン酸の割合は48.6～69.6%であり、全リン酸のうち多くを易溶性リン酸が占めた。水酸化ナトリウム抽出リン酸の割合は他の画分よりも少なく1.7～4.5%であり、塩酸抽出リン酸の割合は6.8～22.3%であった。また、全リン酸から逐次抽出4画分のリン酸を差し引いた有機態リン酸の割合は17.4～30.1%であった。

供試堆肥の形態別リン酸の割合は、横田ら<sup>9)</sup>が調査したパーク・おがくずを副資材とした乳牛ふん堆肥と比べ、易溶性リン酸、塩酸抽出リン酸の割合は同程度で、水酸化ナトリウム抽出リン酸の割合は少なく、有機態リン酸の割合は多かった。

## 3 5年間のリン酸収支

5年間のリン酸収支を表5に示した。堆肥区、化学肥料区において、5年間に投入された化学肥料由来リン酸は1000 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であった。作期別の化学肥料由来リン酸投入量は、冬作で750 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>、夏作で250 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であり、減肥を行った夏作で少なくなった。一方、堆肥区、堆肥-P区において、5年間に投入された牛ふん堆肥由来リン酸は、992 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であった。また、化学肥料と同程度の効果が期待される牛ふん堆肥中の易溶性リン酸の投入量は、584 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であり、化学肥料由来リン酸に比べ少なかった。牛ふん堆肥中の有機態リン酸の投入量は226 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であった。

収穫物のリン酸吸収量は堆肥区で368 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>、堆肥-P区で326 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>、化学肥料区で357 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であり、3区ともほぼ同程度であった。また、冬作と夏作のリン酸吸収量は、どの区も同程度であった。

リン酸投入量から収穫物のリン酸吸収量を差し引いたリン酸余剰量は、堆肥-P区で666 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>、化学肥料区で643 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>であり、ほぼ同程度であった。

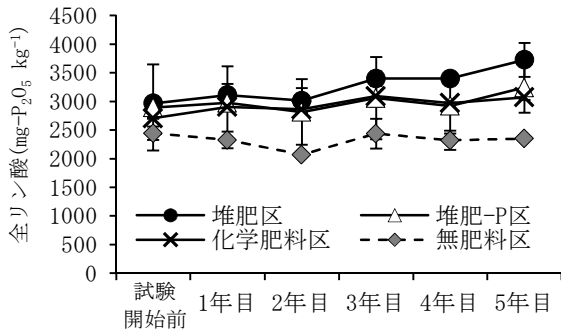


図2 土壤中の全リン酸含量の推移  
注) エラーバーは標準偏差を示す(n=2)

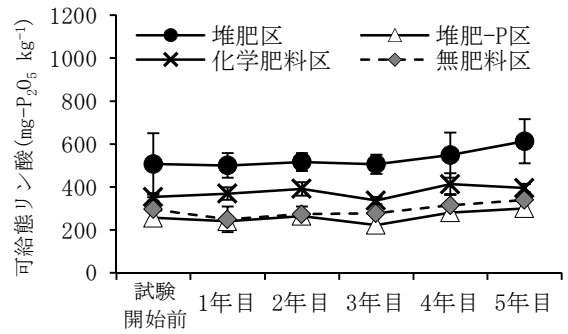


図3 土壤中の可給態リン酸含量の推移  
注) エラーバーは標準偏差を示す(n=2)  
堆肥-P 区は反復なしの値

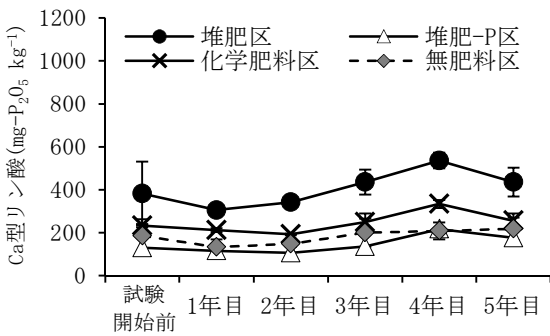


図4 土壤中のCa型リン酸含量の推移  
注) エラーバーは標準偏差を示す(n=2)  
堆肥-P 区は反復なしの値

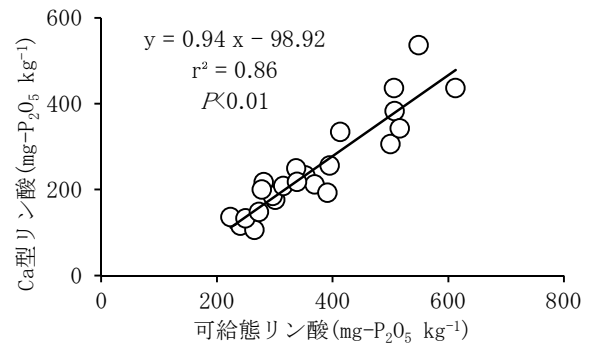


図5 可給態リン酸とCa型リン酸の関係

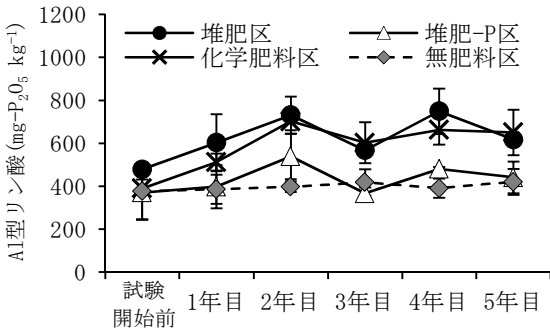


図6 土壤中のAl型リン酸含量の推移  
注) エラーバーは標準偏差を示す(n=2)

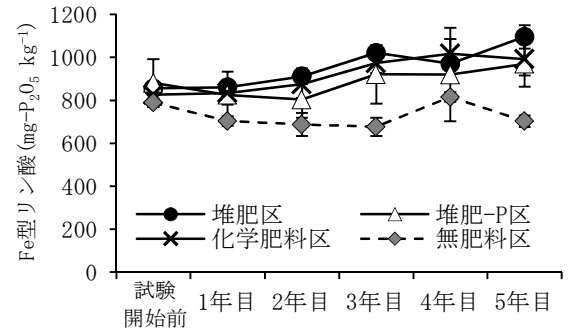


図7 土壤中のFe型リン酸含量の推移  
注) エラーバーは標準偏差を示す(n=2)

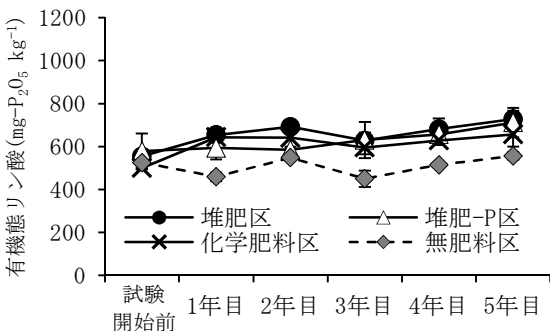


図8 土壤中の有機態リン酸含量の推移  
注) エラーバーは標準偏差を示す(n=2)

一方、堆肥区のリン酸余剰量は  $1624 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  であり、堆肥-P 区、化学肥料区に比べ、多くの余剰リン酸が発生した。

土壤の全リン酸蓄積量はリン酸余剰量と同様の傾向を示した。堆肥-P 区、化学肥料区の土壤の全リン酸蓄積量はそれぞれ  $681 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 、 $718 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  であり、ほぼ同程度であった。また、堆肥区の全リン酸蓄積量は  $1486 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  であり、堆肥-P 区、化学肥料区に比べ多くのリン酸が蓄積した。

無肥料区では、リン酸余剰量が  $-14 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  であり、リン酸の持ち出しがほぼ見られなかったが、土壤の全リ

ン酸蓄積量は $-182 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ と減少した。

#### 4 土壤の形態別リン酸含量の経時変化

##### (1) 全リン酸

土壤中の全リン酸含量の推移を図2に示した。全リン酸含量は堆肥区、化学肥料区において1%水準で有意に増加した。回帰式の傾きは、堆肥区で $144.0 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.693$ )、化学肥料区で $64.5 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.594$ )であり、堆肥区は化学肥料区よりも全リン酸含量の増加程度が大きかった。一方、堆肥-P区においても、全リン酸含量が増加する傾向が見られた。

##### (2) 可給態リン酸

土壤中の可給態リン酸含量の推移を図3に示した。試験開始前の可給態リン酸含量は各試験区でばらつきが見られた。特に堆肥区は他の試験区よりも可給態リン酸含量が多かった。可給態リン酸含量の推移については、各試験区で大きな変化はなく、一定の傾向は見られなかった。

##### (3) Ca型リン酸

土壤中のCa型リン酸含量の推移を図4に示した。試験開始前のCa型リン酸含量は各試験区でばらつきが見られた。特に堆肥区は他の試験区よりもCa型リン酸含量が多かった。Ca型リン酸含量の推移については、各試験区で大きな変化はなく、一定の傾向は見られなかった。

可給態リン酸とCa型リン酸の関係を図5に示した。可給態リン酸とCa型リン酸は1%水準で正の相関が見られた。

##### (4) Al型リン酸

土壤中のAl型リン酸含量の推移を図6に示した。Al型リン酸は化学肥料区において5%水準で有意に増加した。回帰式の傾きは、 $47.3 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.472$ )であった。また、堆肥区のAl型リン酸含量も増加する傾向であった。一方、無肥料区、堆肥-P区のAl型リン酸含量は若干の増減があるものの、5年間ほとんど変化しなかった。

##### (5) Fe型リン酸

土壤中のFe型リン酸含量の推移を図7に示した。堆肥区、化学肥料区のFe型リン酸含量はそれぞれ1%水準で有意に増加した。回帰式の傾きは堆肥区で $46.7 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.799$ )、化学肥料区で $42.3 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.668$ )であり、堆肥区と化学肥料区のFe型リン酸含量の増加程度は同じであった。一方、堆肥-P区のFe型リン酸含量も増加する傾向が見られた。

##### (6) 有機態リン酸

土壤中の有機態リン酸含量の推移を図8に示した。有機態リン酸含量は、堆肥区において1%水準、堆肥-P区及び化学肥料区において5%水準で有意に増加した。回帰式の傾きは、堆肥区で $25.2 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.516$ )、堆肥-P区で $25.8 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.458$ )、化学肥料区で $19.8 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ( $r^2=0.335$ )であり、有機態リン酸含量の増加程度は各区で同じであった。

## 考 察

### 1 リン酸収支からみた牛ふん堆肥由来リン酸の特徴

試験区ごとの5年間のリン酸余剰量と土壤の全リン酸蓄積量は多少のばらつきはあるものの、ほぼ同程度であった。このことから、余剰リン酸のほとんどが溶脱することなく、深さ20 cmまでの土壤に蓄積していると考えられた。

堆肥-P区において、キャベツによる5年間のリン酸吸収量は $670 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ であった。これに対し、牛ふん堆肥由来の易溶性リン酸投入量は $584 \text{ kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ であり、易溶性リン酸投入量が吸収量に対して不足している。このため、不足分は土壤由来のリン酸が使われたか、牛ふん堆肥由来の有機態リン酸が無機化することにより補われたと考えられた。

また、堆肥-P区では、冬作と夏作でほぼ同程度のリン酸の吸収が見られた。8月下旬に投入された牛ふん堆肥由来リン酸が、翌年の1月から6月に栽培した夏作キャベツによって吸収されていることから、牛ふん堆肥由来リン酸が長期間にわたって有効態のかたちを維持していることが示唆された。伊藤<sup>14)</sup>は易溶性リン酸の溶解性に関する試験から、牛ふん堆肥中の炭酸水素ナトリウム抽出リン酸が、徐々に水に溶解するリン酸であることを示している。本試験でも、牛ふん堆肥に含まれる炭酸水素ナトリウム抽出リン酸が徐々に水に溶け出すことで、堆肥由来リン酸の肥効が長期間続いたと考えられた。また、牛ふん堆肥に含まれる有機態リン酸も微生物の作用によって無機化され、有効態のリン酸へと変化したと考えられた。

### 2 土壤中の形態別リン酸の経時変化からみた牛ふん堆肥由来リン酸の特徴

試験開始前土壤において、可給態リン酸含量の試験区によるばらつきが大きかった。一方、可給態リン酸はCa型リン酸と正の相関があり、ほぼ1:1の関係を示している。このため、可給態リン酸含量の試験区によるばらつきの多くはCa型リン酸に影響を与えており、その他の形態のリン酸への影響は少ないと考えられた。

堆肥-P区のAl型リン酸含量は無肥料区と同程度で推移し、蓄積もほとんど見られなかった。一方、化学肥料区ではAl型リン酸含量が増加した。これにより、化学肥料由来リン酸は堆肥由来リン酸と比べ、Al型リン酸を土壤に蓄積しやすいことが明らかになった。また、堆肥-P区でAl型リン酸の蓄積が少なかった要因として、牛ふん堆肥由来リン酸の可給化がゆるやかであるため、土壤に固定される形態にリン酸が変化するまで時間がかかったこと、ゆるやかに溶出したリン酸をキャベツが効率良く吸収できたことが考えられた。

土壤中の有機態リン酸含量の推移は、無肥料区で変化がなかったのに対し、堆肥区、堆肥-P区、化学肥料区では同程度に蓄積が進んだ。堆肥区、堆肥-P区では化学肥料区よりも堆肥由来の有機態リン酸が上乘せされて投入されていることから、堆肥由来の有機態リン酸は比較的無機化が速いことが示唆された。

形態別リン酸の蓄積傾向に関して、試験開始から5年目の結果では、傾向がはっきりしている形態もあれば、

まだ不明確な形態も見られた。特に、Ca 型リン酸は余剰リン酸の発生により、今後堆肥区で蓄積傾向が明らかになる可能性もある。これらの点については、試験を継続し明らかにしていく。

### 3 牛ふん堆肥を施用する場合のリン酸の減肥

堆肥区では、堆肥-P 区に比べて多くの余剰リン酸が発生した。これは、リン酸投入量が増えてもキャベツによる吸収量がほとんど変化しないためと考えられた。余剰となったリン酸は土壌による固定を受け、難溶性成分として蓄積してしまう可能性が高い。特に、今回の試験では、化学肥料由来リン酸が堆肥由来リン酸よりも Al によって土壌に固定されやすいことが明らかになった。一方、牛ふん堆肥由来リン酸は緩効性の成分を含み、リン酸が少しずつ溶出するため、キャベツの吸収効率が低いと考えられる。これらのことから、牛ふん堆肥を施用した際は、一定量のリン酸を減肥して栽培することが望ましいと考えられた。

以上により、化学肥料由来リン酸及び牛ふん堆肥由来リン酸の土壌への蓄積傾向を明らかにすることができた。牛ふん堆肥由来リン酸は緩効性のリン酸を含み、長期間の肥効が期待できる。作物に利用されやすい牛ふん堆肥由来のリン酸を効果的に利用していくことは、生産コストの削減や環境保全の面からも有効であると考えられた。

## 引用文献

1. 農林水産省. 肥料をめぐる事情. (2015). [http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/sehi/pdf/hiryo\\_meguji.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/sehi/pdf/hiryo_meguji.pdf). (2016. 6. 6 参照)
2. 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)
3. 松中照男. 土壌学の基礎-生成・機能・肥沃度・環境-. 農山漁村文化協会. 東京. 208-218(2003)
4. 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. 6. 6 参照)
5. 日置雅之, 北村秀教, 久野智香子, 加藤保. 愛知県で生産される家畜ふん堆肥の化学組成. 愛知県農業総合試験場研究報告. 33, 237-244(2001)
6. 植物栄養実験法編集委員会編. 植物栄養実験法. 博友社. 東京. 125-126(1990)
7. 並木博編. 詳解工場排水試験方法 改定 4 版. 日本規格協会. 東京. 328-346(2008)
8. Frossard, E., Tekely, P. and Grimal, J. Y. Characterization of phosphate species in urban sewage sludge by high-resolution solid-state <sup>31</sup>P NMR. European Journal of Soil Science. 45, 403-408(1994)
9. 横田剛, 伊藤豊彰, 小野剛志, 高橋正樹, 三枝正彦. 製造条件の異なる牛ふん堆肥の無機態リン酸組成. 日本土壌肥科学雑誌. 74(2), 133-140(2003)
10. 土壌養分測定法委員会編. 土壌養分分析法. 養賢堂. 東京. 225-257(1975)
11. 土壌環境分析法編集委員会編. 土壌環境分析法. 博友社. 東京. 267-272(1997)
12. 谷昌幸, 溝田千尋, 八木哲生, 加藤拓, 小池正徳. 十勝地域の未耕地土壌および農耕地土壌におけるリン酸の垂直分布と蓄積量. 日本土壌肥科学雑誌. 81(4), 350-359(2010)
13. 江川友治. 噴出年代を異にする火山灰土壌各層位におけるリンの形態別分布. 明治大学農学部研究報告. 70, 23-32(1985)
14. 伊藤豊彰. 家畜排泄物堆肥のリン資源としての有効活用-作物収量確保、土壌リン酸蓄積の抑制及びリン資源節約をめざして-. 畜産環境情報. 57, 1-16(2015)