

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—

東北大学大学院農学研究科

伊藤 豊彰

1. リン資源の枯渇問題

(1) 不可欠だが限りある資源

リン酸は作物の必須栄養素であり、持続的な作物生産に不可欠である一方、リン(リン鉱石)は有限の自然資源である。リン鉱石の約80%は化学肥料に使用されており、増大する食料需要を保証するためには、リン資源の確保が不可欠である。

人口増加と間接的な穀物消費が高まる肉類消費の増大、エネルギー作物の生産奨励によって、世界的に食料生産の機運が高まりリン酸肥料の需要が増加している。これに伴い、リン酸肥料は価格が上昇し、資源確保が困難になりつつある¹⁾。

リン鉱石の価格は、2008年の暴騰後も高い状態が維持され、2011年では2007年以前の2倍以上となっている。2009年にはリン資源の枯渇を懸念する論文^{2, 3)}が著名な科学雑誌に相次いで掲載され、世界的にリン危機が注目された。

(2) 経済的鉱量

1) アメリカ地質調査所 2010年

リン資源は早々に枯渇するのだろうか? アメリカの地質調査所(United States Geological Survey; USGS)は、世界の鉱物資源の埋蔵量を調査、公表しており、リン鉱石の経済的鉱量(Reserve、推計時点

の技術によって経済的に生産できるリン鉱石の量(選鉱後の P_2O_5 で30%以上のリン鉱石の重量))を予測している。USGSの2010年のリン鉱石推定値⁴⁾を年間生産量で割った単純耐用年数は約100年となり、またCordellら⁵⁾は50から100年で現在のリン資源は枯渇すると予測した。

2) 国際肥料開発センター(IFDC)

しかし、国際肥料開発センター(IFDC)が世界のリン鉱石の資源量を精査したところ、リン鉱石の経済的鉱量が大幅に修正された⁶⁾。表1に示したように、IFDCの推定量が反映され、リン鉱石の経済的鉱量(USGS)は2010年から2011年において4倍以上に増加した。その大きな原因は、モロッコと西サハラの資源量が約9倍に増えたことであり、新たなリン鉱石保有国としてアルジェリアが追加され、ロシアとシリアのリン鉱石埋蔵量が大幅に修正された。

3) アメリカ地質調査所 2015年

さらに2015年公表のリスト⁷⁾では、新たなリン鉱石資源国としてインド、イラク、カザフスタン、メキシコ、ペルー、サウジアラビア、ベトナムが追加され、オーストラリアの資源量が大幅に増加した。これは、IFDCが提案した資源量推定

表1 世界のリン鉱石の経済的鉱量(×100万トン)^{4,7)}

産出国	公表年		
	2010	2011	2015
アメリカ合衆国	1,100	1,400	1,100
アルジェリア	-*	2,200	2,200
オーストラリア	82	82	1,030
ブラジル	260	340	270
カナダ	15	5	76
中国	3,700	3,700	3,700
エジプト	100	100	715
インド	-	-	35
イラク	-	-	430
イスラエル	180	180	130
ヨルダン	1,500	1,500	1,300
カザフスタン	-	-	260
メキシコ	-	-	30
モロッコと西サハラ	5,700	50,000	50,000
ペルー	-	-	820
ロシア	200	1,300	1,300
サウジアラビア	-	-	211
セネガル	80	180	50
南アフリカ	1,500	1,500	1,500
シリア	100	1,800	1,800
トーゴ	60	60	30
チュニジア	100	100	100
ベトナム	-	-	30
他の諸国	950	620	300
(合計)	15,627	65,067	67,417

*:記載なし。2010年時点ではリン鉱石の主要産出国ではないと判断。

値⁸⁾を考慮した資源量推定が修正された結果である。これにより、リン鉱石の耐用年数は300~400年に大幅に増加した^{8,9, 10)}。

しかしながら、リン資源の有限性の問題が解決したわけではなく、少し余裕ができただけである。リン資源保全の重要性は、現在も変わらないと考えるべきである。

2. リン資源を節約する方法

(1) 輸入に依存する資源

リンは今後も増加する人口を支える持続的な食料生産に不可欠である一方、食料生産のために最も多くのリンが使用されている。わが国はリン鉱石をすべて輸

入に依存しており、リンのリサイクルや使用量の節減は非常に重要なテーマである。

大竹¹¹⁾によれば、わが国に持ち込まれるリンは約72万トン(Pとして)であるが、そのうち50%が肥料に仕向けられている(表2)。カロリーベースで食料の約70%を海外に依存しているために食料と飼料に含まれるリンの輸入量も多く、17万トンに達し、製鉄に必要な鉄鉱石と石炭に含まれるリンも15万トンになる。これらが国内で農業-食料消費と鉱工業生産を通じて排出され、リサイクル利用が可能なリンは23万トンあるとしている(表2)。

表2 日本に持ち込まれるリンとリサイクル可能なリンの量¹¹⁾

リンの持込み量(P万トン)		リサイクル可能なリンの量(P万トン)	
食料、飼料	17	下水汚泥として	5
鉄鉱石、石炭	15	製鋼スラグとして	10
化学工業原料	26	化学工業で使用	8
(うち、リン酸肥料に)	(22)		
化学肥料	14		
(合計)	72		23

(2) リサイクル資源

下水処理場で発生する下水汚泥と製鉄業で副産物として発生する製鋼スラグがリサイクルリン資源として重要であるとしているが¹¹⁾、飼料の輸入依存が高いため家畜生産過程で発生するふん尿由来リン酸量も非常に多く、化学肥料として利用されるリン酸の約60%にも相当する(図1)。わが国の農業分野では、家畜

排泄物は再利用可能な最も重要なリン資源であり、適切に活用すべきである。

3. 家畜排泄物リン酸の再利用における課題

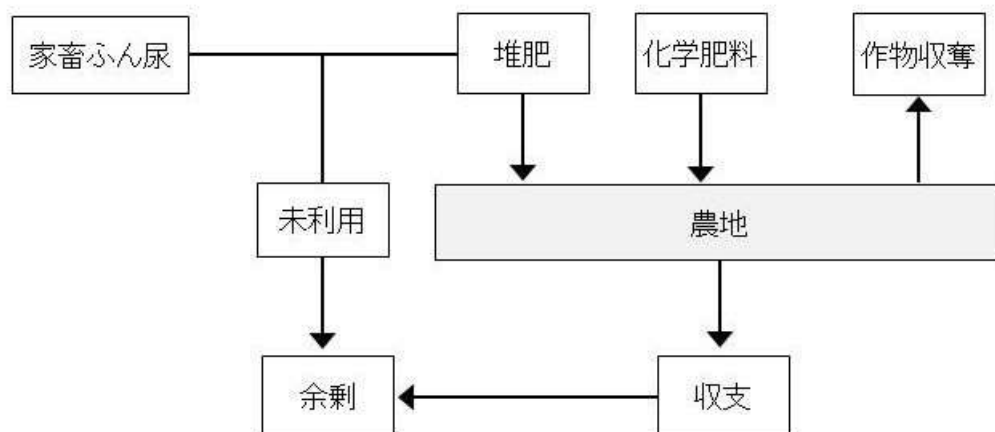
(1) 過剰なリン酸

わが国では家畜排泄物の多くは堆肥として農業利用されているが、未利用の排泄物由来リン酸が多だけでなく、過剰

なリン酸（余剰分）がわが国の農地に投入されている（図1）。家畜排泄物のリン酸は農業利用されなければ、リン酸流出による水質汚染の原因となる。家畜ふん尿や家畜ふん堆肥の過剰施用は土壤リン酸蓄積を助長し^{12)、13)}、土壤病害が発生しやすくなる場合がある。

例えば、黒ボク土の畑ではアブラナ科根こぶ病の休眠孢子（負に帯電）が土壤に正荷電部位に吸着するために、発病が抑制されている。しかし、多量のリン酸が蓄積すると、土壤の正荷電量が低下し、休眠孢子の吸着率が減少するために根こぶ病が発病しやすくなる¹⁴⁾。

化学肥料	家畜ふん堆肥	作物収奪	未利用ふん尿	余剰
227	75.1	60.7	54.3	295



水田では化学肥料が、畑地・野菜・果樹・茶・飼料作物では化学肥料と家畜ふん堆肥が投入され、作物の主産物(収穫部分)と副産物(収穫物以外の部分)が生産される。主産物は農地から持ち出され、作物収奪となる。副産物は農地に還元される。農地に投入されるリン酸(化学肥料、家畜ふん堆肥)から作物収奪を差し引いたものがリン酸収支となる。これに未利用の家畜ふん尿リン酸を加えたものが余剰と計算される。

図1 2005年におけるわが国の農地におけるリン酸のフローと余剰量 (kgP₂O₅/ha)¹¹⁾

(2) 家畜ふん堆肥のリン酸

このような土壤リン酸の過剰な蓄積は、水系へのリン酸流出リスクを高め、富栄養化による藻類の異常発生、水質悪化の原因ともなる。家畜ふん堆肥によって土壤リン酸蓄積が助長される理由は、堆肥が含有する窒素とリン酸のバランス

が作物が必要とするものと大きく異なるためである。わが国の家畜ふん堆肥の成分組成(表3、畜産環境整備機構)によれば、そのリン酸含量は乾物重あたりで約2%(乳用牛ふん堆肥)から6%(採卵鶏ふん堆肥)にもなり、牛ふん堆肥は全窒素の約1.3倍のリン酸を、豚ふん堆肥

と鶏ふん堆肥は全窒素の約2倍のリン酸を含んでいる。

作物は一般的に必要なとする窒素量の約1/5~1/2のリン酸を必要とするだけなので、農地に窒素とリン酸を等量施肥したとしてもリン酸は土壤に蓄積していく。通常、窒素供給が作物の生育に最も強く影響するために、堆肥の窒素供給量を最も重視して施肥設計をたてることが多い。このような作物への窒素供給量をベースにした堆肥施用体系では、過剰なリン酸が農地に投入されることになる。特に、窒素に対しておよそ2倍のリン酸を含む豚ふん堆肥、鶏ふん堆肥を用いた場合は、土壤リン酸の蓄積は急速に進行することになる。

わが国の土壤リン酸蓄積は進行中であること¹⁵⁾、輸入飼料を通じた家畜ふん由来のリン酸持込み量が多いこと(図1)を考えると、家畜ふんを堆肥化して、そのリン酸を適切に利用するとともに化学肥料リン酸使用を削減するのは必然であり、このことは環境汚染防止とリン資源節約を同時に解決するという意味で社会的な意義も非常に大きい。

表3 わが国の家畜ふん堆肥の養分含量
(畜種別堆肥の平均値)¹⁶⁾

畜種	試料数	水分		全N			全P ₂ O ₅			全K ₂ O			全CaO			
		(現物%)			(乾物%)			(乾物%)			(乾物%)			(乾物%)		
乳用牛	318	52	2.2	1.8	2.8	4.4	14	0.7	1.1	1.2	2.2	52	2.2	2.6	2.8	3.0
		14	0.7	1.1	1.2	2.2	13	0.6	1.2	1.0	2.8					
肉用牛	304	52	2.2	2.6	2.8	3.0	13	0.6	1.2	1.0	2.8					
		37	3.5	5.6	2.7	8.3	13	1.1	2.8	1.1	6.4					
豚	144	22	2.9	6.2	3.6	26	9.7	0.9	2.5	1.1	10					
		33	3.8	4.2	2.9	8.9	13	1.1	1.8	1.1	6.3					
採卵鶏	127	22	2.9	6.2	3.6	26	9.7	0.9	2.5	1.1	10					
		33	3.8	4.2	2.9	8.9	13	1.1	1.8	1.1	6.3					
ブロイラー	27	33	3.8	4.2	2.9	8.9	13	1.1	1.8	1.1	6.3					
		13	1.1	1.8	1.1	6.3										

上段の数値は平均値、下段の数値は標準偏差値を表す。

(3) 適切な利用

家畜ふん堆肥リン酸を適切に利用するには、作物のリン酸必要量または作物別の標準施肥量を堆肥リン酸で施用し、不足する窒素施肥量を化学肥料によって補う方法、すなわちリン酸ベースによる堆肥施用技術を確立することが必要である。リン酸ベースでの家畜ふん堆肥施用体系では、窒素ベースに比較して堆肥施用量が少なくなるので、堆肥からの有効態窒素供給では作物の必要量を満たすのは困難であり、化学肥料窒素が必要になる。

(4) リン酸ベース(Pベース)での利用

この分野の研究はアメリカ合衆国で活発に行われきた。例えば、EghballとPower¹⁷⁾は、リン酸ベース(Pベース)での家畜ふん堆肥施用によって、窒素供給量を基準とした窒素ベース(Nベース)の堆肥施用体系や化学肥料を用いた慣行体系と同等のコーン収量を確保でき、土壤の可給態リン酸の蓄積を抑制できることを明らかにしている。

わが国では、リン酸施肥の適正化の観点から家畜ふん堆肥の適正投入量を検討した研究は十分ではない。リン酸ベースの家畜ふん堆肥施用体系を構築するためには、作物に対する堆肥リン酸の可給性を評価し、化学肥料リン酸に相当する堆肥中の有効態リン酸量を知ることが必要となる。

4. 家畜ふん堆肥の有効態リン酸供給量の評価

(1) 家畜ふん堆肥の肥効

家畜ふん堆肥リン酸の肥効は、過リン酸石灰と同等¹⁸⁾、または同等以上¹⁹⁾、で

あることが報告されている。しかし、原料ふんの畜種や製造方法が異なる家畜ふん堆肥のリン酸の形態や溶解性は大きく変動すると考えられる。家畜ふん堆肥は、有機態と無機態のリン酸を含んでおり、その無機態リン酸は過リン酸石灰のように容易に水に溶けるものから、アパタイトのように非常に溶けにくいものまであり、化学肥料のように溶解性を予測できない点が堆肥リン酸を施肥設計に組みにくい原因である。家畜ふん堆肥の有効態リン酸を評価することによって、堆肥リン酸の有効活用が可能となる。

(2) 家畜ふん堆肥の評価

そこで、家畜ふん堆肥の有効態リン酸量を推定するために、最初に横田ら²⁰⁾と伊藤ら²¹⁾の報告をもとにして、多様な家畜ふん堆肥のリン酸組成(有機態リン酸の割合や無機態リン酸の形態)の特徴について解説した。次に、家畜ふん堆肥のリン酸組成と溶解性(=作物に対する可給性)との関係²²⁾を明らかにして、リン酸組成に基づく有効態リン酸評価法が適切である根拠を明らかにした。

なお、堆肥に含まれる有機態リン酸は微生物によって無機化され、実際には有効態リン酸として機能していると考えられるが、本稿では、家畜ふん堆肥の主要なリン酸形態である無機態リン酸の性質と可給性に焦点を当てることとした。

5. 家畜ふん堆肥のリン酸組成

(1) 抽出法による分画

全国で生産された家畜ふん堆肥を用いて、土壌リン酸の分画法を有機質資材に適用した逐次抽出法²³⁾によって無機態リ

ン酸を分画して、リン酸組成を特徴づけた。逐次抽出法は脱イオン水、0.5M 重炭酸ナトリウム溶液(pH=8.5)、0.1M 水酸化ナトリウム溶液、1.0M 塩酸溶液を用いて、試料：溶液比=1：200、16時間の振とう抽出によって堆肥を順次、抽出する方法^{20, 21)}である。

この方法では、水に溶けやすいリン酸から先に抽出され、脱塩水および0.5M 重炭酸ナトリウムで抽出されるリン酸の合計は、後半の0.1M 水酸化ナトリウム抽出リン酸(鉄、アルミニウム型リン酸)と1M 塩酸抽出リン酸(難溶性のアパタイト型リン酸)と比較して水に対する溶解性が高い。相対的に溶解性が高い前2画分の合計を「易溶性リン酸」と呼ぶことにした。最後の1M 塩酸抽出によって無機態リン酸のほぼ全量が溶解するはずなので、抽出されなかった“残さ”のリン酸は有機態であるとした。

(2) 有機態リン酸

乳用牛ふん、肉用牛ふん、豚ふん、採卵鶏ふん、ブロイラーふんを主原料とした、それぞれの堆肥の有機態リン酸の割合(平均)は、それぞれ13%、12%、7%、22%、34%であった(表4)。家畜ふん堆肥のリン酸の主体は無機態であり、これは堆肥化過程でふん中の有機態リン酸の大部分が無機化したためと考えられる。鶏ふん堆肥で有機態リン酸の割合が高いが、その主成分はリン酸モノエステル(フィチンが主成分)であった²⁴⁾。これは、鶏ふん堆肥の製造では、急速加熱による短期間での製造(有機物分解は抑制される)や乾燥処理によって有機態リン酸が分解されずに残存しやすく、また

ブロイラーふん堆肥は乾燥処理で製造される場合が多く、相対的に堆肥化が不十分(未熟堆肥)であるために有機態リン酸の割合が高いと考えられた²¹⁾。

(3) 無機態リン酸

家畜ふん堆肥の逐次抽出法で分画された無機態リン酸の組成は畜種によって異なり(表4)、溶解性の最も高い水抽出リン酸の割合は、鶏ふん堆肥で最も低かった。易溶性リン酸(水抽出リン酸+重炭酸ナトリウム抽出リン酸)の割合は、牛

ふん堆肥(肉牛ふん堆肥≒乳牛ふん堆肥)では約70%、豚ふん堆肥では約50%、鶏ふん堆肥(採卵鶏ふん堆肥=ブロイラーふん堆肥)では約30%であり、変動係数は15~32%と比較的小さく、畜種によって特徴のある傾向を示した。難溶性の塩酸抽出リン酸は、採卵鶏ふん堆肥で最も高い割合(全リン酸の47%)を示し、ブロイラーふん堆肥は有機態リン酸(残さ画分)の割合が最も高かった(34%)。

表4 原料ふんの畜種が異なる家畜ふん堆肥のリン酸組成^{20,21)}

種類	試料数		全リン酸含量 gP ₂ O ₅ /kg	易溶性リン酸 割合 ^{*2} (%)	全リン酸に占める各画分の無機態リン酸の割合(%)				
					水抽出	重炭酸Na抽出	水酸化Na抽出	塩酸抽出	残さ ^{*3}
乳牛ふん堆肥	42	平均	21.6	65	34	31	10	13	13
		SD ^{*1}	7.7	14	15	11	10.0	8.6	6.8
肉牛ふん堆肥	31	平均	21.6	72	49	23	5.1	11	12
		SD	9.7	11	11	10	2.2	13	8.2
豚ふん堆肥	61	平均	58.9	49	33	16	5.1	39	7.0
		SD	28	10	9.9	7.6	6.2	46.8	4.8
採卵鶏ふん堆肥	32	平均	61.4	30	21	9.4	1.6	47	22
		SD	15	5.8	5.3	2.8	0.89	12	13
ブロイラーふん堆肥	16	平均	46.1	31	26	5.0	1.7	34	34
		SD	12	10	9.9	4.1	0.70	11	17

*1: 標準偏差

*2: 全リン酸に対する水抽出リン酸と重炭酸Na抽出リン酸の合計の割合。

*3: 逐次抽出で溶解しなかったリン酸で、主に有機態リン酸と考えられる。

(4) リン酸カルシウム

家畜ふん堆肥は通常、アルカリ性であるが、アルカリ条件でリン酸に対してカルシウムが多い場合(Ca/P モル比が2以上)は、難溶性のリン酸カルシウム(ヒドロキシアパタイトなど)が形成されやすいとされている²⁵⁾。採卵鶏ふん堆肥は他の畜種の堆肥に比べてカルシウム含量が非常に高く(表3)、表4のすべての試料でCa/P モル比が2以上であった。これは、採卵鶏の飼料には卵殻形成を助け、リン酸栄養を補強するためのリン酸カル

シウムが添加されるため、難溶性リン酸カルシウムが生成しやすいことが易溶性リン酸割合が低い原因と考えられた。また、肉牛ふん堆肥に比べて乳牛ふん堆肥の易溶性リン酸割合がわずかに低い理由にも、後方でカルシウム含量が高いことが関係していると考えられた²⁰⁾。

6. 家畜ふん堆肥の無機態リン酸の溶解性と有効態リン酸

(1) 連続抽出法

上記の逐次抽出法では、4つの抽出液の

性質が大きく異なるため、それぞれの抽出液で溶解するリン酸の形態を特定することは困難である。さらに、上記の易溶性リン酸が家畜ふん堆肥の有効態リン酸量を示す根拠は明確ではない。それは、重炭酸ナトリウムに溶解するリン酸が水に溶解するのかが不明なためである。

そこで、Dahlgrenと Walker²⁶⁾の連続水抽出法によって家畜ふん堆肥のリン酸を連続的に抽出し、水に対するリン酸溶解曲線を測定した。このリン酸溶解曲線をPierreら²⁷⁾の方法に従って最大値を持つ非線形モデル式で回帰し、最大溶解量(P_{max})を推定した。この P_{max} と易溶性リン酸量との関係を検討した。

(2) 家畜ふん堆肥からの連続水抽出

家畜ふん堆肥(牛ふん4点, 豚ふん5

点, 採卵鶏ふん5点, ブロイラー鶏ふん2点)の連続水抽出によるリン酸溶解曲線の代表例を図2に示した。家畜ふん堆肥1gに対する添加水量0.5L付近までは無機態リン酸が急激に溶解し、その急激な溶解が終了した以降ではリン酸溶解は非常に緩やかになり、一定の値に収斂するパターンを示した。

この方法によって求めた最大溶解リン酸量(P_{max})は逐次抽出法の易溶性リン酸とほぼ1:1の関係を示した(図3)。また、水添加量が0.5L/堆肥1gあたりまでに急激に溶解したリン酸量と、その後の緩やかに溶解したリン酸量は、それぞれ逐次抽出法の水抽出リン酸量と、重炭酸ナトリウム抽出リン酸量と近い値を示した。

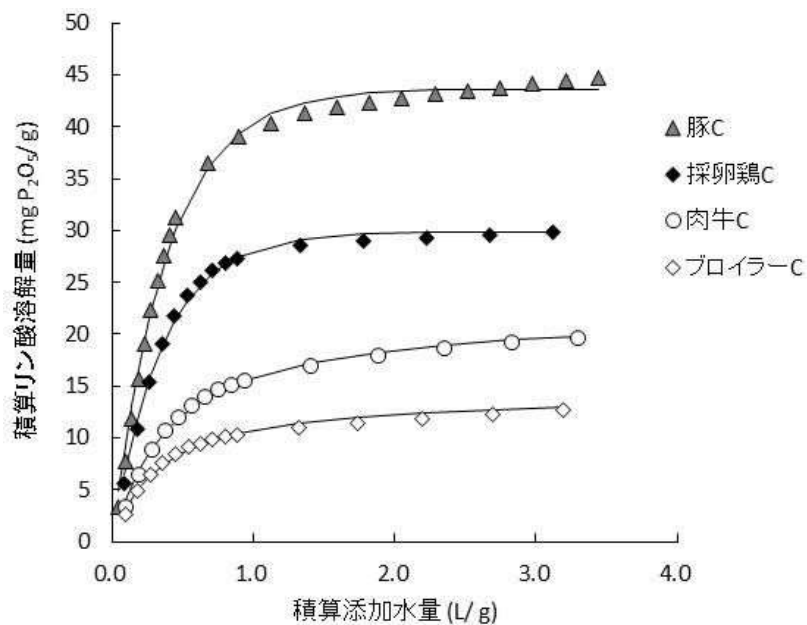


図2 連続水抽出法による家畜ふん堆肥の無機態リン酸溶解曲線²²⁾

(上記の豚ふん堆肥と採卵鶏ふん堆肥は、 $P(v)=P_{max} * [1-\exp(-k_1*v)]$ に、肉牛ふん堆肥とブロイラーふん堆肥は $P(v)=P_{max} * (P_{max} * k_2*v)/(P_{max} * k_2*v + 1)$ の曲線で回帰した。P(v): 積算リン酸溶解量、 P_{max} : 最大溶解リン酸量、 k_1 , k_2 : 定数、v: 添加水量)

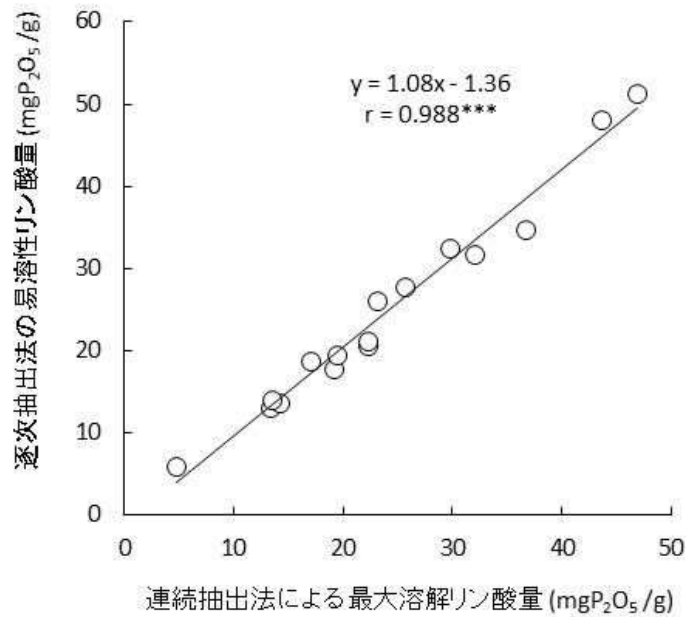


図3 易溶性リン酸量（逐次抽出法）と最大溶解リン酸量（連続水抽出法）との関係²²⁾

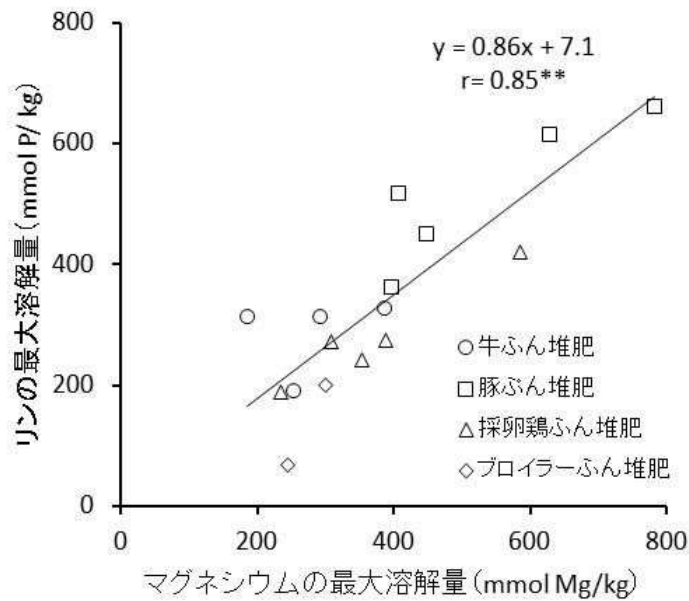


図4 連続水抽出法によるマグネシウムとリンの最大溶解量の関係²²⁾

この結果から、逐次抽出法における水抽出リン酸は過リン酸石灰のような速効性リン酸に相当すること、重炭酸ナトリウム抽出リン酸は徐々に水に溶解するリン酸であることがわかる。水抽出リン酸

と重炭酸ナトリウム抽出リン酸の合計（易溶性リン酸）は、全量が水に溶解し、作物に吸収されうる有効態リン酸と考えることができる。また、連続水抽出において同時に溶解したカルシウム、マグネ

シム、カリウムとリン酸の溶解曲線を比較すると、マグネシウムとリン酸の溶解曲線が類似しており、 P_{max} はマグネシウムの最大溶解量と1:1に近い正の相関を示した(図4)。このことから、易溶性リン酸(= P_{max})はマグネシウムと結合したリン酸が主体であると推定された。

(3) ストラバイト(MAP)

Komiyamaら²⁸⁾によれば、豚ふん堆肥の10試料中9試料に、結晶性リン酸塩としてストラバイト($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, MAP)が含まれ、このMAPは多量の水に完全溶解すること、水溶性リン酸の66%(9試料の平均)を占めることを明らかにした。この結果も含めて考えると、家畜ふん堆肥中の無機態リン酸には多量の水で溶解する「水溶性リン酸」が存在し、その主な形態はマグネシウムを含む化合物であると言える。さらに、この水溶性リン酸(=易溶性リン酸)は作物が吸収することができる形態なので、家畜ふん堆肥の「有効態リン酸」とすることができる。

(4) リン酸の肥効率

家畜ふん堆肥リン酸の作物に対する有効性を表す指標として、肥効率がある。これは、栽培試験における水溶性の化学肥料リン酸の利用率に対する堆肥リン酸の利用率の割合で表される。家畜ふん堆肥リン酸の肥効率は100%、またはそれ以上であることが報告されてきた^{18, 19, 29)}。

このことは、家畜ふん堆肥に含まれる多様な形態のリン酸は全体として、水溶性の化学肥料リン酸と同程度以上に作物に吸収されることを意味している。その理由として、堆肥に含まれるリン酸は、その一部は溶解速度が遅いこと(緩効的)

や有機物に覆われていることによって土壌の固定を受けにくいことが推測されている²⁹⁾が、その詳細は明らかにはなっていない。

家畜ふん堆肥施用後の土壌の可給態リン酸値が、褐色低地土とリン酸固定力の高い黒ボク土で大きく異なる²⁹⁾ことからわかるように、この“肥効率”は、土壌のリン酸固定力の違いによって変動する。土壌別に肥効率を求めなくてはならない面から、多様な土壌、作物、堆肥を活用する農業現場では肥効率は使用しにくいと思われる。

(5) 家畜ふん堆肥の有効態リン酸

本稿の「有効態リン酸」は、水溶解性を根拠にして設定しているため、単純な指標となっている。易溶性リン酸の値を用いて、家畜ふん堆肥の有効態リン酸の割合を「牛ふん堆肥で70%、豚ふん堆肥で50%、鶏ふん堆肥で30%と設定すること」は可能であり、これによって、家畜ふん堆肥のリン酸を比較的容易に施肥設計に取り込むことができる。

堆肥は本法による有効態リン酸以外に、難溶性ゆえに土壌固定を受けにくく、“有効態”とされなかった他の画分のリン酸も作物に利用される可能性がある。このことから堆肥の有効態リン酸は水溶性の化学肥料リン酸よりも見かけの利用率は高いと推定され、上記の“有効態リン酸”の推定値は、余裕をもった値(=等量の化学肥料リン酸に比べて作物の利用可能量は多い)であり、安心して使用できる家畜ふん堆肥の有効態リン酸推定法とも言える。

7. 家畜ふん堆肥のリン酸を有効に利用し、環境汚染を抑制する

(1) リン酸ベース (Pベース)

施用体系

上記の有効態リン酸をもとに設計した家畜ふん堆肥施用体系 (Pベース施用) で作物の収量は十分に確保されるのだろうか? わが国では、堆肥のリン酸ベース施用体系による栽培試験結果はなく、著者らが実施した飼料用トウモロコシの例^{30, 31)} について紹介する。

東北大学大学院農学研究科複合生態フィールド教育研究センターの非アロフェ

ン質黒ボク土圃場で栽培試験を3年間行った。土壌のリン酸固定力は非常に大きく、リン酸吸収係数は19.6 g P₂O₅/kgであり、トルオーグリン酸は0.14 g P₂O₅/kgで適正範囲であった。

堆肥としては、デントコーン栽培でピュラーな牛ふん堆肥と、有効態リン酸割合が大きく異なる鶏ふん堆肥を用いた(表5)。両者で有効態窒素割合の推定値はほぼ等しいが、全リン酸濃度は鶏ふん堆肥が高く、有効態リン酸割合は牛ふん堆肥が高い(表5)。

表5 栽培試験に用いた堆肥の成分含量(3年間分の平均)³⁰⁾

コンポスト	窒素(gN/kg)		リン酸(gP ₂ O ₅ /kg)			カリウム(gK ₂ O/kg)	副産材等
	全窒素	有効態*1	全リン酸	有効態*2	全カリウム		
牛ふん堆肥	28	8.3 (30%)	25.4	19.8 (78%)	58.3	敷料の稲わら、副産材オガクズを含む	
鶏ふん堆肥	26	7.5 (28%)	59.1	20.0 (34%)	44.8	採卵鶏ふん、副産材なし	

*1:有効態窒素の推定は、牛ふん堆肥は草地試験場²²⁾、鶏ふん堆肥は榎橋・矢野²³⁾に従った。()内の数値は全窒素に対する割合。
*2:逐次抽出法における水可溶および重炭酸ナトリウム可溶性リン酸の含量(易溶性リン酸)を有効態リン酸とした。()内の数値は全リン酸に対する割合。

(2) 実験処理区の構成

実験処理区は、牛ふん堆肥と鶏ふん堆肥の窒素(N)ベース施用とリン酸(P)ベース施用、化学肥料慣行施肥、無施肥、である(表6)。堆肥施用量は、Nベース施用とPベース施用では堆肥の有効態窒素または有効態リン酸の施用量がデントコーンの標準施肥量(150 kgN/ha、150 kgP₂O₅/ha = 化学肥料慣行施肥区の施肥量)となるように設計した。

有効態リン酸については、水抽出リン

酸と重炭酸ナトリウム抽出リン酸の合計値(易溶性リン酸)とした。Pベース区では堆肥で供給される有効態窒素量が150 kgN/haに満たないため、不足分を化学肥料窒素で補った。化学肥料は、肥効調節型肥料のLPコート(70日タイプと40日タイプを2:1で混合)、重過リン酸石灰、塩化カリウムを用いた。

Nベース区の年間の堆肥施用量は、牛ふん堆肥では乾物18.1 Mg/ha (Mg/ha = t/ha)(水分含量50%とすると現物で36.2

Mg/ha)、鶏ふん堆肥では乾物 21.4 Mg/ha (水分含量 25%とすると現物で 28.5 Mg/ha)となり、P ベース区の堆肥施用量はN ベース区の約 40%に低下した。

これによって P ベース施用体系の 1 作あたりの有効態リン酸投入量は、N ベー

ス区よりもかなり削減された。P ベース施用による全リン酸投入量(1作あたり)の削減量はさらに大きく、N ベース区に比べて 266 kgP₂O₅/ha (牛ふん堆肥)と 801 kgP₂O₅/ha (鶏ふん堆肥)が削減された。

表6 1年あたりの有効態養分投入量と堆肥施用量(3年間の平均)³⁰⁾

	養分投入量						堆肥の施用量 (乾物でMg ha ⁻¹)	
	有効態N(kg ha ⁻¹)			有効態P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)				全P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) 計
	堆肥	化学肥料	計	堆肥	化学肥料	計		
牛ふん堆肥/Nベース	150	0	150	359	0	359	461	18
牛ふん堆肥/Pベース	64	86	150	152	0	152	195	7.7
鶏ふん堆肥/Nベース	150	0	150	419	0	419	1279	21
鶏ふん堆肥/Pベース	60	90	150	150	0	150	478	8.1
化学肥料 慣行	0	150	150	0	150	150	150	0
無施肥	0	0	0	0	0	0	0	0

(3) 乾物収量と養分吸収

家畜ふん堆肥の N ベース区、P ベース区のデントコーンの乾物収量は、3年間とも化学肥料慣行体系より高かった(図5)。デントコーンの窒素とリン酸の吸収量は乾物収量と比例関係を示し、P ベース区の養分吸収量は N ベース区や化肥慣行区とほぼ同等だった。

牛ふん堆肥と鶏ふん堆肥の P ベース区のリン酸吸収量は化肥慣行区(速効性の化学肥料リン酸)よりも多かった。このことは、逐次抽出法による堆肥の有効態リン酸(易溶性リン酸)は、リン酸固定力の高い黒ボク土においても堆肥が供給できる有効態リン酸を評価するうえで適

切であることを示唆する。これらのことから、P ベース施用体系においても慣行体系と同等以上の窒素とリン酸が作物に供給されたと考えられた。

(4) 可給態リン酸

3年間の栽培試験によって土壌の可給態リン酸(トルオーグリン酸)は増加した。3年間の栽培試験後のトルオーグリン酸含量は、N ベース区が 0.25、0.49 gP₂O₅/kg (それぞれ、牛ふん堆肥および鶏ふん堆肥施用区)であったのに対して、P ベース区では 0.19、0.30 gP₂O₅/kg となり、可給態リン酸の増加はかなり抑制された。

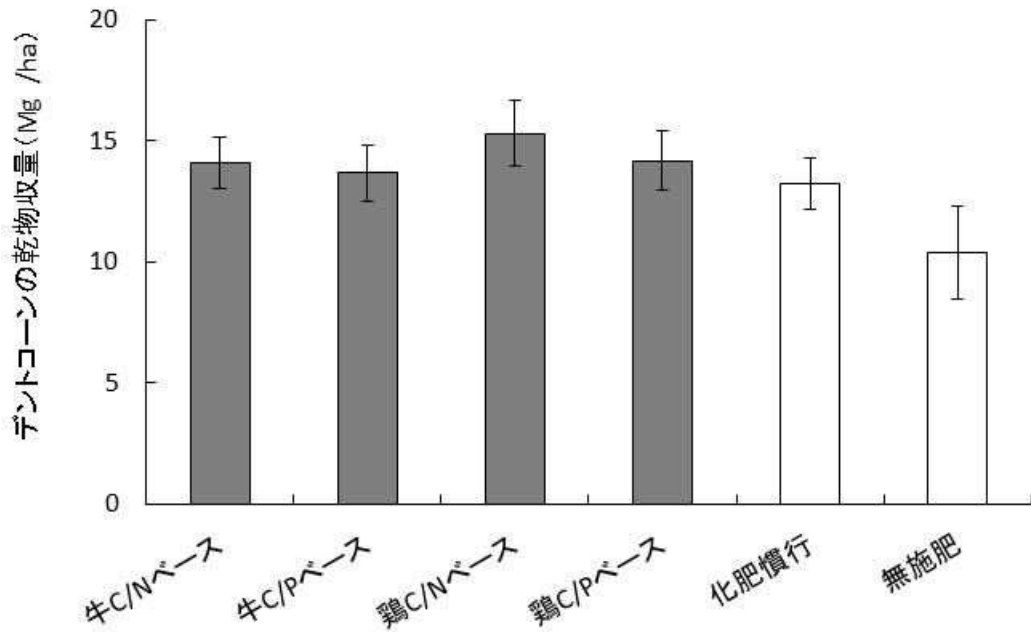


図5 デントコーンの乾物収量³⁰⁾
(3年間の栽培試験結果の平均、縦棒線は標準誤差。)

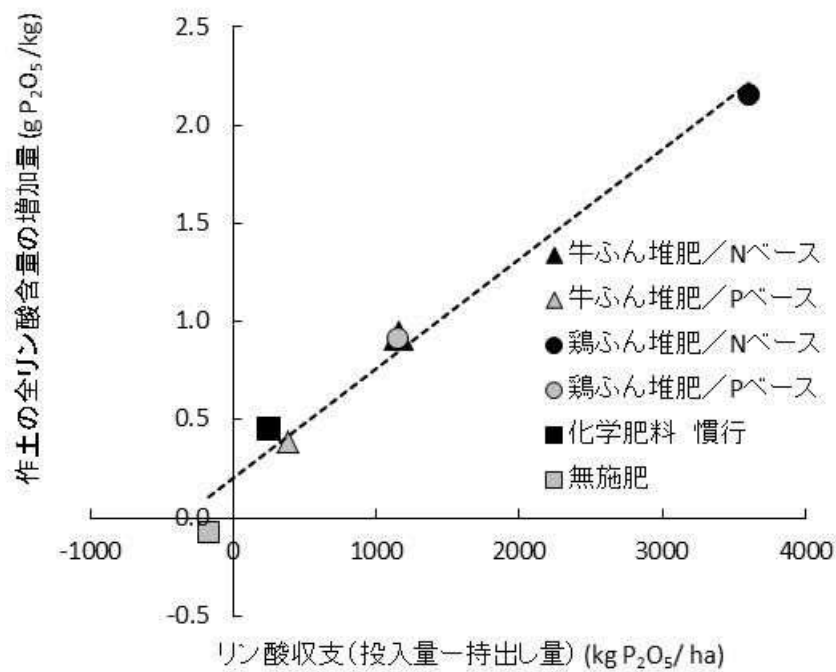


図6 デントコーン栽培に伴う土壌(作土)の全リン酸含量とリン酸収支³⁰⁾
(試験開始時から3年後の土壌の全リン酸含量の増加量と
3年間におけるリン酸収支の関係)

(5) リン酸収支

3年間の栽培後の土壌(作土、表層15cm)の全リン酸含量の増加量は、リン酸収支(堆肥と化学肥料で投入された全リン酸量からデントコーンが吸収したリン酸量を差し引いた余剰リン酸)と密接な直線関係を示した(図6)。特に鶏ふん堆肥のNベース施用区では、リン酸収支超過(投入量過剰)が大きく、土壌のリン酸蓄積量が顕著に増加した。Nベース区と比較してPベース区の土壌全リン酸含量の増加量は牛ふん堆肥区で41%、鶏ふん堆肥区で42%に抑制された。

(6) リン酸の無駄ない活用

家畜ふん堆肥の有効態リン酸量を基準にして堆肥施用量を決定し、不足する窒素成分は化学肥料で補う体系(リン酸ベース施用体系)では、化学肥料リン酸は全く施肥されないばかりか、堆肥由来のリン酸投入量も削減される。この体系で家畜ふん堆肥を施用した場合、リン酸固定能の高い黒ボク土においても十分なリン酸と窒素を供給し、飼料用トウモロコシの収量を確保することができた。有効態リン酸を簡易に評価し、それに基づいて家畜ふん堆肥施用量を決定することによって、家畜ふん堆肥のリン酸をむだなく活用することができ、環境保全効果(土壌リン酸蓄積の抑制)とリン資源の節約が可能となる。

(7) 家畜ふん堆肥のク溶性リン酸

畜産環境整備機構の事業によって、家畜ふん堆肥のリン酸肥効率が肥料分析に用いられる、2%クエン酸可溶性リン酸によって精度よく推定できる成果が得られた³⁴⁾。このク溶性リン酸は、上記の易溶性

リン酸よりも抽出量が多いので、ク溶性リン酸をもとにした堆肥施用量設計では、さらなる家畜ふん堆肥リン酸の効率的な利用がはかられる。多くの生産現場での活用に期待したい。

引用文献

- 1) 大竹久夫(2011)リン資源枯渇危機とはなにか。大阪大学出版会。
- 2) Gilbert N. (2009) The disappearing nutrient(養分消失). *Nature*, 461:716-718.
- 3) Vaccari D. A. (2009) Phosphorus: A looming crisis(リン:迫る危機). *Scientific American*, 300: 54-59.
- 4) U.S. Geological Survey (2011) Mineral Commodity Summaries(鉱物商品概要). (http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/index.html)
- 5) Cordell D., J.-O. Drangert, S. White (2009) The story of phosphorus: global food security and food for thought(世界の食糧安全保障と判断材料としてのリン). *Global Environmental Change*, 19: 292-305.
- 6) 西尾道徳(2013)西尾道徳の環境保全型農業レポート, No.234 リン鉱石埋蔵量の推定値が大幅に増加 (<http://lib.ruralnet.or.jp/nisio/?p=2835>)
- 7) U.S. Geological Survey (2015) Mineral Commodity Summaries(鉱物商品概要). (http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/index.html)
- 8) IFDC (2010) World Phosphate Rock Reserves and Resources(世界のリン鉱石の備蓄と資源量). International Fertilizer Development Center, Muscle

- Shoals, AL 35662, USA. ISBN 978-0-88090-167-3.
- 9) Dawson C. J. and J. Hilton (2011) Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. (限られた資源の肥料としての利用:窒素とリンの生産とリサイクル) *Food Policy*, 36:S14-S22.
- 10) Van Kauwenbergh S. J., M. Stewart and R. Mikkelsen (2013) World Reserves of Phosphate Rock... a Dynamic and Unfolding Story (リン鉱石の世界備蓄、その展開). *Better Crops*, 97:
- 11) 三島慎一郎・神山和則(2010)近年の日本・都道府県における窒素・リン酸フローと余剰窒素・リン酸の傾向に関する算出方法とデータベースおよび運用例, 農業環境技術研究所報告, 27: 117-139.
- 12) 伊藤豊彰・橋本三尚・井上博道・三枝正彦(2001)デントコーン栽培における附属農場産牛ふんコンポストの肥料代替効果および適正投入量, 川渡農場報告, 17: 1-8.
- 13) 瀧 典明・熊谷千冬・畑中 篤(2006)灰色抵地土焼土壌への家畜ふん堆組連用に伴うリン蓄積, 宮城県古川農業試験場報告, 6: 35-41.
- 14) 村上圭一・中村文子・後藤逸男(2004)土壌のリン酸過剰とアブラナ科野菜根こぶ病発病の因果関係, 土肥誌, 75: 453-457.
- 15) 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.
- 16) (財)畜産環境整備機構(2007)家畜ふん堆肥の肥効を取り入れた堆肥成分表と利用法, 畜産環境整備機構.
- 17) Eghball B and Power JF (1999) Phosphorus-and Nitrogen-based manure and compost applications (リンおよび窒素ベースによるふん尿と堆肥の施用). *Soil Sci. Soc. Am., J.*, 63: 895-901.
- 18) Sikora LJ, Enkiri NK (2003) Availability of poultry litter compost P to fescue as compared to triple super phosphate (重過リン酸石灰と比較した鶏ふん堆肥の利用性). *Soil Sci.*, 168: 192-199.
- 19) 小柳 渉・和田富広・安藤義昭(2005)家畜ふん堆肥中リン酸の性質と肥効. 新潟畜産研報, 15: 6-9.
- 20) 横田 剛・伊藤豊彰・三枝正彦(2003)製造条件の異なる牛ふん堆肥の無機態リン酸組成. 土肥誌, 74: 133-140.
- 21) 伊藤豊彰・小宮山鉄兵・三枝正彦・森岡幹夫(2010)豚ふんおよび鶏ふん堆肥のリン酸組成. 土肥誌, 81, 215-223.
- 22) Komiyama T., T. Ito and M. Saigusa (2014) Measurement of the maximum amount of water-extractable phosphorus in animal manure compost by continuous and sequential water extraction (連続・逐次抽出法による家畜ふん堆肥の水溶性リン酸の測定). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60:196-207.
- 23) Frossard, E., Tekely, P. and Grimal, J.Y. (1994) Characterization of phosphate species in urban sewage sludges by high-resolution solid-state ^{31}P NMR (固相リン-31 NMR による下水汚泥のリン

- の形態分析) . *European Journal of Soil Science*, 45 : 403-408.
- 24) Yokota, T., Ito, T. and Saigusa, M. (2003) Measurement of total phosphorus and organic phosphorus contents of animal manure composts by the dry combustion method (乾式燃焼法による家畜ふん堆肥の全リンおよび有機態リンの測定) . *Soil Sci. Plant Nutr.*, 49 : 267-272.
- 25) Toor, G.S., Hunger, S., Peak, J.D., Sims, J.T. and Sparks, D.L. (2006) Advances in the characterization of phosphorus in organic wastes: environmental and agronomic applications (有機性廃棄物中のリンの形態: 環境保全的な作物への施用) . *Advances in Agronomy*, 89 : 1-72.
- 26) Dahlgren, R.A. and Walker, W.J. (1993) Aluminum release rates from selected Spodosol Bs horizons: Effect of pH and solid-phase aluminum pools (スポドソルにおけるアルミニウム放出速度: pHと固相アルミニウムの影響) . *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 57 : 57-66.
- 27) Pierre, G-M., Walter, M.T. and Steenhuis, T.S. (2005) Simple models for phosphorus loss from manure during rainfall (降雨時のふん尿からのリン流出モデル) *J. Environ. Qual.*, 34:872-876.
- 28) Komiyama, T., S. Niizuma, E. Fujisawa and H. Motikuni (2013) Phosphorus compounds and their solubility in swine manure compost (豚ふん堆肥のリン酸化合物の水溶性) . *Soil Sci. Plant Nutr.*, 59:419-426.
- 29) 加藤雅彦・小宮山鉄兵・藤澤英司・森國博全 (2010) 畑条件での牛糞・鶏糞堆肥と重過リン酸石灰の併用による肥料由来の可給態リン酸の不可給化の抑制. *土肥誌*, 81 : 367-371.
- 30) Komiyama T., T. Ito and M. Saigusa (2014) Effects of phosphorus-based application of animal manure compost on the yield of silage corn and on soil phosphorus accumulation in an upland Andosol in Japan (Pベースによる家畜ふん堆肥施用によるサイレージ用トウモロコシの収量と黒ボク土へのリン蓄積への影響) . *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60:863-873.
- 31) 伊藤豊彰,小宮山鉄兵,三枝正彦(2005) 黒ボク畑におけるリン酸ベースでの家畜ふん堆肥施用がデントコーンの収量および土壌無機態リン酸蓄積に与える影響—施用1年目での評価, 複合生態フィールド教育研究センター報告, 21: 27-31.
- 32) 草地試験場 (1983) 草地試験場資料, No.58-2, 46-49.
- 33) 棚橋寿彦,矢野秀治 (2004) 鶏ふん堆肥の窒素含量に基づく肥効推定法, *土肥誌*, 75: 257-260.
- 34) (財)畜産環境整備機構 (2013) 高肥料成分たい肥調製・利用技術開発普及事業報告書 (平成22~24年度) .