



有機物を通じた植物へのリン供給経路・動態

3. 堆肥中リンの肥効についての一考察

阿江教治¹・森泉美穂子²・保原 達³

¹(株)ヤンマーアグリジャパン, ²龍谷大学農学部資源生物科学科,
³酪農学園大学農食環境学群

キーワード 家畜ふん堆肥, 稲わら堆肥, リン, 肥料, 肥効率

「食品リサイクル法」が制定されて、有機物の循環利用に焦点が当たっている。有機物の肥料効果への考察や実験についての報告は多くある。重要なのは、過去のデータをどう読みとくかである。私見であるが、分析技術の進歩により、最新分析データが尊重されている一方、古人が打ち立てた土壌に関する研究データや考察への理解がおろそかになっているように感じられる。我が国には、膨大かつ正確な研究データが残されており、これらのデータを紐解くのも研究者としての責任であることを忘れてはならない。そこで、今一度、過去の研究データを読み込み、その研究結果に現れている「矛盾」をどう克服するかを考えてみたいと思う。分析技術の発展とデータの理解力との両輪が動かなければ、研究は発展しない。本論では、堆肥中のリンに肥効について、気付いたことをここに披露し、効率的なリン肥料のあるべき形態について議論が深まる事を期待している。

化学肥料としてのリン酸の肥効は低く、20%前後と言われている。尾和(1996)は環境保全的な農業を確立するための基礎となる作物養分の収支を把握する事を目的に、全国の試験研究機関からのデータを取りまとめた。そのデータから、代表的な作物の養分吸収量(可食部とそれ以外の地上部を含む)と施肥量を抜粋したものを紹介する(表1)。5つの畑作物(小麦, ダイズ, キャベツ, ニンジン, タマネギ)の化学肥料リンの肥効率は20-35%と、これまで言

われてきたように低い事が確認できる。水稻の場合、化学肥料リンの施肥効率は60%と、明らかに高いが、これは投入量が少ない(水稻のリン酸施用量は9.1kg-P₂O₅/10aであるが、小麦は16.6kg-P₂O₅/10a)ことが大きな理由だが、溶解しにくい鉄型リンの一部が湛水還元条件下で利用されていることにも起因するだろう。これは、両作物の間では、窒素、カリの吸収量はほぼ同じであるが、小麦へのリン施用量が水稻よりも多いにもかかわらず小麦のリン吸収量は水稻よりも少ないことから考察できる。

「堆肥の肥効率」に関してのネット検索を行い、農林水産省、全農、山口県、岡山県から発表されている手引き書を元に、代表的な肥料成分(窒素、リン、カリ)の含有率と、三要素の成分の肥効率をまとめた(表2)。現物換算で約0.7~1.0%の窒素を含む牛ふん堆肥中の窒素の肥効率(施用初年)は20-30%である。これは牛ふん堆肥のC/Nが16-20と高く、牛ふん堆肥中に含まれる窒素の全量が無機化するまでに4~5年もかかることから理解できる。すなわち、堆肥の連用では、残効の窒素が後々作へと供給されるため、堆肥の連用4~5年になると、堆肥中の全窒素が一作で、見かけ上供給されることになる。一方、堆肥中のリンの肥効率については、山口県畜産振興協会からは100%、岡山県では90%、家畜糞尿処理利用研究会の報告では60%等、さまざまな数字が提出されているが、これらは堆肥中の窒素の肥効率(20-30%)に比べて明らかに高い。堆肥中の窒素の肥効が遅れるのは、堆肥中の窒素が無機化しアンモニアになったとしても、糖やセルロースなどの微生物のエネルギー源である有機炭素が存在すれば、再び微生物菌体へ取り込まれてC/N比が低下するまでに様々な微生物相への取り込みと分解が繰り返されるためと考えられる。しかし、リンの60~100%という高い肥効率から想起されるのは、循環型の複雑な微生物相が関与している窒素とは対照的に、堆肥中のリンは、比喩的に言うなら根圏で吸収される過程は極めて単純な微生物相を経て作物根へと吸収されるのではないかということである。

Noriharu AE, Mihoko MORIIZUMI and Satoru HOBARA:
Pathways and dynamics of phosphorus supply to plants
through organic substances. 3. A consideration on the fertilizing effect of phosphorus in manures

¹530-0014 大阪市北区鶴野町1-9 梅田ゲートタワー

²520-2194 大津市瀬田大江町横谷1番5

³069-8501 江別市文京台緑町582番地

Corresponding Author: 阿江教治 noriharu.ae@gmail.com

2020年12月14日受付・2021年1月28日受理

日本土壌肥科学雑誌 第92巻 第3号 p. 267~272 (2021)

表1 代表的な作物の施肥量とリンの施肥効率(尾和(1996)から作成)

	現物収量 (kg/10a)	地上部の養分吸収量 (kg/10a)			施肥量 (kg/10a)			リンの施肥効率 (%)
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
水稲	596	11.1	5.5	15.7	8.0	9.1	8.7	60
小麦	477	12.0	4.5	14.8	11.1	16.6	9.6	27
大豆	296	20.5	4.8	9.5	2.0	16.0	10.0	30
キャベツ	429	27.2	7.0	29.1	23.2	20.0	23.0	35
ニンジン	603	12.7	4.0	31.4	15.0	20.0	20.0	20
タマネギ	736	14.7	7.2	18.8	19.9	30.2	19.6	24

表2 代表的な堆肥の三要素成分とその肥効率(農林水産省草地試験場(1983), 岡山県(2014), 山口県畜産振興協会(2009), 全国農業協同組合連合会肥料農業部(2008)を基に作成)

	C/N	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
稲わら堆肥	~20	0.42	0.2	0.45
牛ふん堆肥	16~20	0.71	0.7	0.74
豚ふん堆肥	~10	1.35	0.94	1.05
肥効率*		20~30	60~100	65~100

表3 東和科学株式会社より提供をうけた人工リン鉱石の成分分析結果(単位: %)(辻本ら(2007)から作成)

	水分	強熱減量	全リン	水溶性リン	Ca	K	Mg	Fe
乾燥品	3.48	36.4	7.85	0.01	20.3	1.26	2.03	1.17
焼成品	0.00	0.2	13.7	0.01	32.7	1.84	3.24	1.18

堆肥中のリンの肥効が高い理由として、過リン酸石灰のように水溶性でないこと、土壌は多少に関わらずリン酸吸収係数を持ち施用リンはいずれ難溶解性となるが、堆肥中のリンはそこに含まれる有機物残渣によって無機リンや有機リンの反応基が保護されていることによって肥効率が良くなると考えられる。堆肥中のリンは、その形態が有機態であるか無機態であるかにかかわらず大量の有機物(セルロースや糖, 微生物菌体の死骸や生菌体)によって覆われているのが化学肥料とは異なる特徴である。

1. リン肥料は水溶性で無くてもよいこと
~人工リン鉱石をめぐる~

黒田ら(2005)は下水汚泥から効率よくリンを回収する技術(Heatphos法)を開発した。汚泥中の微生物の体内で生産されたポリリン酸に対して、熱を加えて溶出させ、そこに石灰を添加しリンを沈殿物として回収する方法である。有機物汚泥を含むリンを乾燥させた物を彼らは「人工リン鉱石(乾燥品)」と呼んでいる(以下「乾燥品」と言う)。この乾燥品からリンを精製し、肥料だけでなく、工業製品の材料とする研究プロジェクトが2005年に生研機構で採択された(「リン資源の再利用技術とリサイクルシステムの開発」)。われわれは、精製するまでもなく「乾燥品」そのものが従来のリン酸肥料よりも効率よく作物に利用されることを期待して以下の実験を行った。また、人工リン鉱石を焼却し有機物を除いた「焼却品」についても、リンの

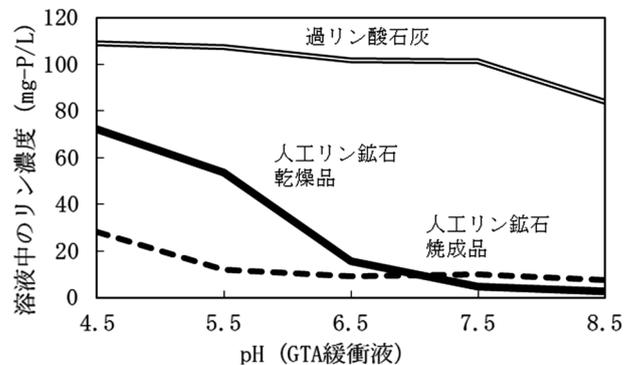


図1 pHが人工リン鉱石の溶解に及ぼす影響

肥効実験の材料に加えた(辻本ら, 2007)。これから先は、代表的な化学肥料リンとして過リン酸石灰(過石)を議論の対照として取り扱う。

表3には、人工リン鉱石乾燥品と焼成品の成分を示す。乾燥品、焼成品は共に水溶性リンを含まず、ほとんどがクエン酸可溶のオルトリン酸であった。乾燥品には、重量の36%もの有機物が混入しており、低分子多糖類、脂肪族化合物、および多糖類からなるが、多糖類が最も多かった。「焼成品」は、焼成によって0.2%まで有機物は減少している。

有機物で覆われた乾燥品とその焼成品のpHに対する溶解性について、図1に示した。0.15 M-GTA緩衝液によれば、過リン酸石灰はpH 7.5より高くなると10%程度その

溶解性は少し落ちるだけである。一方、乾燥品は pH 4.5 で70%の溶解性があり、さらに pH が高くなると急速に溶解性は低下した。焼成品は高温で有機物を焼却しており、カルシウム型リン酸が結晶型となっており、その溶解性は乾燥品よりも遙かに劣った。

この3種類のリンをリン酸吸収係数が少ないと思われるパーミキュライト培地に施用し、トウモロコシを栽培した結果を表4に示す。投入リン資材の溶解性が低下するに従い過石>乾燥品>焼成品の順番でトウモロコシの生育(乾物重)は低下し、図1に示したリンの pH-溶解特性によく対応していた。培地であるパーミキュライトのリン酸吸収係数が非常に小さいだけでなく、リンとの吸着強度も低いため、リン資材の溶解性とその肥効が一致したと思われる。では、リン酸吸収係数の高い土壌での肥効はどうか。過リン酸石灰から放出される水溶性のリンは土壌に吸着し肥効が低下すると想定し、次の実験を行った。

淡色黒ボク土 (pH: 5.9, トルオーグリン酸: 2.1 mg-P₂O₅/100g, リン酸吸収係数: 1940 mg-P₂O₅/100g; 茨城県・つくば市) と赤色土の国頭マージ (pH: 4.7, トルオーグリン酸: 1.7 mg-P₂O₅/100g, リン酸吸収係数: 272 mg-P₂O₅/100g, 沖縄県・東村山) をポットに充填し、トウモロコシ、ダイズ、落花生を栽培した。栽培にあたり、リン資材を施用した土壌をポットに充填し、すぐに栽培する区(「培養なし」と呼ぶ)と、あらかじめリン資材を土壌に混

和した後、最大容水量の60%の水を加え6ヶ月間培養した後に栽培する区(「培養あり」と呼ぶ)を設けた。これまでの実験結果 (Otani and Ae, 2001) から、3種類の検定作物を選抜した。すなわち、トウモロコシは難溶性のリン酸を吸収する能力が低く、次いでダイズ、そして落下生が最も難溶性リン酸を吸収する能力に優れている。

表5には作物のリン吸収量を示した。黒ボク土では「乾燥品」は過リン酸石灰と比較して同等あるいは同等以上の肥効が観察され、この結果は3種類の作物に当てはまった。また、トウモロコシでは、溶けにくい乾燥品の方が過石よりも若干であるがリン吸収が優れていた。「培養あり」区のリン吸収量は「培養なし」区よりもリン供給には劣るが、乾燥品が最も良かった。赤色土では、3種類の作物で乾燥品の肥効が顕著に高かった。また、面白いことに、リン吸収能力に劣るトウモロコシが赤色土では焼成品からのリン吸収が良かった。つまり、リンの吸着力が強い赤色土でも焼成品は土壌と反応すること無く、トウモロコシ根がリンを溶解吸収している。表5からは、水溶性リンよりも溶解性が低いリンの方が土壌への吸着が妨げられることによってリンとしての効果が高いことが読み取れる。乾燥品は重量比で36%の有機物が包み込むことによって土壌の吸着部位にリンが触れないために(土壌吸着が起こらず)、作物根がリンを効果的に吸収したと考えられる。さらに、落花生のリン吸収能の高い事も確認できた。リン肥料は必ずしも水溶性である必要はないと思われる。

表4 パーミキュライト培地において過リン酸石灰および2種類の人工リン鉱石を施用した時のトウモロコシの生育(辻本ら(2007)から作成)

リン資材	乾物重 (g/個体)	(±標準偏差)
なし	1.01	0.01
過リン酸石灰	5.23	0.12
人工リン鉱石(乾燥品)	4.09	0.27
人工リン鉱石(焼成品)	2.95	0.27

2. 有機物に包まれたリン資材「堆肥」の効果

小柳ら(2005)が行った家畜ふん堆肥のリンの肥効に関する精力的な研究の一部を紹介しよう。リン欠乏土壌を用いて行った試験で、家畜ふん堆肥が過リン酸石灰よりも効果が高いことを示している(図2)。同量のリン施用条件下で、家畜ふん堆肥(牛、豚、鶏)は、過リン酸石灰よりもコマツナの生育(乾物重)に寄与した。最も顕著な生育増を示した畜種は牛ふん堆肥で、過リン酸石灰区のコマツナの生育が9.3g/potであったのに対し、牛ふん堆肥で

表5 過リン酸石灰および2種類の人工リン鉱石を施用した時のトウモロコシ、ダイズ、ラッカセイのリン吸収量

土壌(場所)	リン資材	トウモロコシ (mg-P/個体)		ダイズ (mg-P/個体)		ラッカセイ (mg-P/個体)	
		培養なし	培養あり	培養なし	培養あり	培養なし	培養あり
黒ボク土 *1 (つくば市)	無リン	2.55d		4.69c		4.99b	
	過リン酸石灰	6.34a	3.85c	8.63a	6.39b	8.50a	8.26a
	乾燥品	7.07a	4.93b	8.62a	7.08b	8.99a	9.11a
	焼成品	3.28d	3.28d	4.71c	4.14c	4.36b	4.37b
赤色土 *2 (沖縄県東村山)	無リン	0.45c		1.17e		1.98d	
	過リン酸石灰	2.69b	2.86b	4.27b	3.64b	5.28bc	3.86c
	乾燥品	4.05a	2.66b	5.28a	2.84c	6.42ab	4.49c
	焼成品	4.42a	2.13b	3.76b	2.14d	5.71bc	3.80c

*1 普通畑, pH: 5.9, トルオーグリン酸: 2.2 mg-P₂O₅/100g *2 未耕地, pH: 4.7, トルオーグリン酸: 1.7 mg-P₂O₅/100g

「培養あり」とは、リン資材を施用した後、最大容水量の60%の水を加え6ヶ月間培養したもの。培養後ポットに充填し栽培に供した。異なるアルファベット間には、多重検定により5%水準で有意差があることを示す(辻本ら(2007)から作成)。

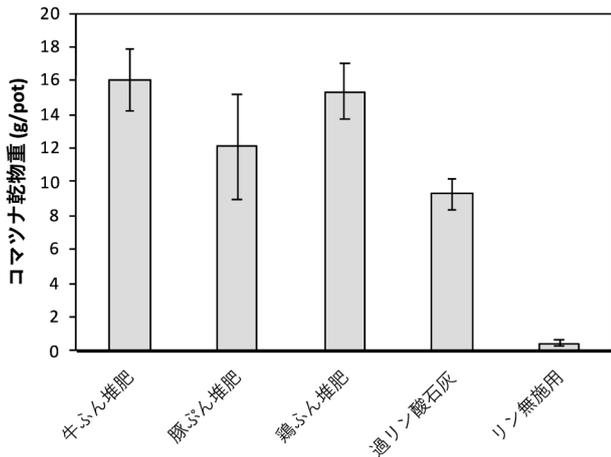


図2 ポット栽培における家畜ふん堆肥中のリンの肥効
リン欠乏土壌での栽培 (小柳ら (2005) から)

は16g/potであった。牛ふん堆肥からのリン肥効率の高さが伺える。さらに、小柳ら (2005) が指摘するように、家畜ふん堆肥の処理方法によっても肥効が異なると述べているが、処理方法の説明がないのが残念である。「はじめに」で述べたように、堆肥中の窒素の無機化の行動とリン吸収への行動は全く異なる事がここでも証明されている。

家畜ふん堆肥に含まれるリンの特性についても、小柳ら (2005) は言及しており、ほとんどのリンが水に不溶で「ク溶性 (クエン酸溶性)」であった。小柳らは、リンの形態はカルシウム型として存在していると抽出分析から指摘しているが、植物 (飼料作物) 遺体中のカルシウムは細胞壁中のペクチン物質の3次元構造を維持するように結合しており、堆肥中でもその形態で存在していると思われる。また、堆肥中の微生物菌体内にあるリンは、核酸を始めリン酸エステル、細胞膜のリン脂質などであり、すべて「有機態のリン」として存在している。「ク溶性」リンの測定に使われるクエン酸溶液の作用によって、リンの抽出時には細胞壁中のカルシウムもリンと同時に溶解する。したがって、堆肥中のリンは有機態あるいは無機態にかかわらず抽出時にカルシウムと再結合できるため、抽出前の堆肥中のリンがカルシウムに直接に結合していたとは限らない。

このように、微生物菌体の細胞壁、あるいは植物遺体の残渣に覆われたリンが土壌へ投入された時、土壌の吸着部位には堆肥中のリンは接触しない。作物根がこの有機物 (微生物菌体も含めて) に包まれたリンに到達すると、根圏における酸性条件下 (根表面の pH として5.6程度) でカルシウムと結合したリンは溶解する。カルシウムと結合していない有機態リンは植物根、および微生物 (菌根菌も含む) から分泌する酸性フォスファターゼ (丸山・和崎, 2017; Sato *et al.*, 2015) によって、無機リンへ変換され、作物根へと吸収されるであろう (阿江, 2016)。バーミキュライト培地で栽培時に、根がバーミキュライトの層間に入り込んでいるのがしばしば観察されるが、植物残渣その他の有機物で覆われた塊 (堆肥) の中へ根が侵入している様子を想起させる。

表6 水稲→麦の二毛作体系で50年間以上行われた長期連用試験における収量比 (小河ら (2004) から作成)

	堆肥施用の有無	三要素	無カリ	無リン	無窒素	無肥料
水稲*	有り	100	106	106	81	80
	無し	96	85	85	48	26
麦*	有り	100	96	77	35	32
	無し	56	38	20	19	18

* 稲わら堆肥施用・三要素区の収量を100とした。この区の収量については、水稲では510kg/10a、麦では540kg/10aであった。

3. 水稲→麦長期連用試験における 稲わら堆肥の卓越した効果 (兵庫県の場合)

稲わら堆肥と三要素の化学肥料とを組み合わせた長期連用試験が多く県の県で行われてきた。近年、人件費などを理由に試験継続に疑義がもたれ、試験が中断されることが多い。兵庫県では今も試験が続けられており、50年間の試験結果が小河ら (2004) によって報告されている。リンだけでなく、カリについても興味深い現象が明らかになっているが、これについては、水稲が一次鉱物を風化させるだけでなく、土壤炭素の蓄積に関与するなどの推察と温暖化対策としての水田利用のテーゼを阿江・松本 (2012) が紹介している。

話をリンに戻そう。旧兵庫県農業試験場 (明石市) では、1951年から肥料三要素および稲わら堆肥施用の有無についての試験が沖積水田 (灰色低地土) で水稲→麦 (小麦あるいは裸麦) 二毛作体系で行われている。試験場が移転しても、この長期連用試験の土壌は移転した加西市 (兵庫県立農林水産技術総合センター) へ移され、今も試験が続行されている。2004年に発表された小河らの報告から稲わら堆肥のリンの肥効が化学肥料よりも遙かに優れていることを紹介する。

長期連用試験の試験区は、三要素の化学肥料 (窒素、リン酸、カリ) 区と、三要素のそれぞれを欠如した3区 (無窒素、無リン、無カリ) と無肥料区の5区からなる。この5区には、それぞれ稲わら堆肥の「あり、なし」区があり、合計10区から成り立っている。50年間の試験のうち、最も収量の高い区 (稲わら堆肥+三要素施用区) の水稲の平均精玄米重 (510kg/10a)、および麦の平均子実重 (540kg/10a) の収量を100として、各試験区の収量の比 (50年間での平均収量比) を表6に示した。化学肥料の施用量は、窒素は硫酸アンモニウムで年間約10kg-N/10a程度、リンは過リン酸石灰で年間11.8kg-P₂O₅/10a、カリは塩化カリで年間16.2kg-K₂O/10a、それぞれ施用されていた。稲わら堆肥に含まれる養分については、1993年に施用した稲わら堆肥について養分含量が記載されているが、

堆肥の養分含量は一定ではなく、年次によって大いに異なると思われる。そこで、全国的に平均化されていると思われる農林水産省が公表した稲わら堆肥のリン酸濃度の値(0.2%, 表2を参照; この値は小河ら(2004)の報告よりはリンの含量が若干多いが、議論の本質には影響がない)を用いて議論する。施用された稲わら堆肥は水稲、麦に対して年間1.5t/10a(水稲, 麦作ごとに0.75t/10a)施用されている。それゆえ、年間約3kg-P₂O₅/10aのリンが堆肥で供給されていると計算できる。

まず、無リン(窒素・カリ添加)区について検討しよう。堆肥なし(化学肥料)の無リン区の水稲収量は、堆肥ありの三要素区との比で85となっている。同じ無リン区でも堆肥ありの場合の収量比は106となっており、これはきわめて多収である。すなわち、堆肥中のリン(約3kg-P₂O₅/年)施用は、堆肥なしの化学肥料三要素区のリン施用(11.8kg/年, 収量比96)よりも効率が良いことになる。この現象は裏作である麦の収量比については、一層驚くべき数値を呈する。堆肥なしの無リン区の麦収量比は20と極めて低いが、堆肥ありの無リン区は、堆肥の施用で収量比は77に跳ね上がった。堆肥なしの三要素区の麦収量比は56であり、化学肥料リンだけでは麦の収量の回復は望めなかった。堆肥中には化学肥料の三要素以外に様々な栄養素が含まれる事は理解できるが、これら未知の化学物質がリンの代替効果をもたらすとは思えない。この結果は、堆肥中に含まれるリンの全量以上にリンが効率的に利用されていることを示している。

堆肥の施用で土壌中の可給態リンがどう変化したかを考察しよう。水稲→麦の収量が最も低い区である堆肥なしの無肥料区のトルオーグリン酸は0mg-P₂O₅/kg, ブレイ No. 2リン酸は33mg-P₂O₅/kg(通常100g単位であるがkg単位での表記に注意)であるが、50年間堆肥を投入してつづけた堆肥あり・無肥料区のトルオーグリン酸は9mg-P₂O₅/kg, ブレイ No. 2リン酸は76mg-P₂O₅/kgであった。これは、堆肥中のリンが50年間でトルオーグリン酸が0から9mg-P₂O₅/kgへ増加蓄積したことを示している。しかし、堆肥なしの無リン区も同様にトルオーグリン酸は0mg-P₂O₅/kg, ブレイ No. 2リン酸は30mg-P₂O₅/kgときわめて低いが、堆肥あり・無リン区のトルオーグリン酸の値は2mg-P₂O₅/kg, ブレイ No. 2リン酸で31mg-P₂O₅/kgあり、無肥料区と比べて堆肥による土壌への蓄積量は少ない。したがって、堆肥あり・無リン区では施用された堆肥がきわめて効率的に水稲および麦に吸収・利用されており、土壌への蓄積が少ないことを証明している。無リン区について、堆肥の施用で水稲→麦の増収が観察されたが、その増収に要するリンの要求量は3~4kg-P₂O₅/10aであるが、堆肥からのリンの施用量は3kg-P₂O₅/10aと算出された。この事から、堆肥の肥効率の高さが理解できる。なお、堆肥の施用で土壌中の有機態リンが増加するとの疑念はあるが、堆肥のリンは化学肥料のリンと同様に土壌中では無機態として行動して蓄積することについては Otani

and Ae (1997) が実証している。小河らが示した堆肥の増収効果のメカニズムについては、未だ十分に明らかにされておらず、さらに検討すべき課題と考えている。

さらに、表6からは、麦よりも水稲がはるかに土壌からのリンの吸収能力に優れているかがうかがえる。水稲の堆肥なし・三要素区の収量比は96に対して、堆肥なし・無リン区の収量比が85という「多収性」についても水稲と土壌との特有の効果を考える必要があるだろう。

小河ら(2004)の50年以上続けられた長期連用試験の結果の前には、たじろぐばかりである。昔、自説と違う発表があると、「そんなことはあり得ない!」とのたまう偉い先生がおりましたが、作物・土壌の研究は理論が先にあるわけではない。現象を合理的に解釈できる柔軟性が必要なのです。最後に、研究の新しさとは、分析技術の新しさではなく、新しいコンセプトを提案することに意義がある。もし、提案が間違えであればさらに新しいコンセプトを提案する。昔の報文を読み直そう。

文 献

- 阿江教治 2016. 堆肥中のリン酸を上手に使う—深堀! 土づくり考—。ヤンマーホールディングス株式会社。https://www.yanmar.com/jp/agri/agri_plus/soil/articles/11.html
- 阿江教治・松本真悟 2012. 作物はなぜ有機物/難溶性成分を吸収できるのか—根の作用と腐植蓄積の仕組み。農文協, 東京。
- 黒田章夫・滝口 昇・加藤純一・大竹久夫 2005. 資源枯渇の効き予測とそれに対応したリン有効技術開発。環境バイオテクノロジー学会誌, 4, 87-94.
- 丸山隼人・和崎 淳 2017. 低リン条件で房状の根を形成する植物の機能と分布低リンストレスに対する植物の適応機構。化学と生物, 55, 189-195.
- 農林水産省 2008. 土壌管理のあり方に関する意見交換会報告書。
- 農林水産省草地試験場 1983. 昭和58年度家畜ふん尿処理利用研究会会議資料。
- 小河 甲・桑名健夫・牛尾昭浩・清水克彦・牧 浩之・吉倉淳一郎・渡辺和彦 2004. 稲わら堆肥および肥料三要素の長期間(50年)連用が水稲・麦の収量に及ぼす影響。近畿中国四国農研, 5, 3-9.
- 岡山県 2014. 家畜ふん堆肥の現状と肥効。家畜ふん堆肥施用の手引。https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/388931_2254762_misc.pdf
- Otani, T., and Ae, N. 1997. The status of inorganic and organic phosphorus in some soils in relation to plant availability. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 43, 419-429.
- Otani, T., and Ae, N. 2001. Interspecific differences in the role of root exudates in phosphorus acquisition. In N. Ae, J. Aihara, K. Okada, and A. Srinivasan (eds.) *Plant nutrient acquisition: New perspectives*, p. 101-119. Springer, Tokyo.
- 尾和尚人 1996. わが国の農作物の養分収支。環境保全型農業研究連絡会ニュース, No. 33. http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/techdoc/d otoku/hozen_news033.pdf
- 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。新潟県農業総合研究所畜産研究センター研究報告, 15, 6-9.
- Sato, T., Ezawa, K., Cheng, W., and Tawarayama, K. 2015. Release of acid phosphatase from extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 61, 269-274.

辻本涼太・野網よしの・井汲芳夫・鈴木武志・阿江教治 2007.
Heatphos 法によって製造される人工リン鉱石の施肥効果につ
いて, 土肥誌, **78**, 245-252.
山口県畜産振興協会 2009. 堆肥の正しい理解と上手な利用方法.

<http://yamaguchi.lin.gr.jp/taihiriyou2009.pdf>
全国農業協同組合連合会肥料農業部 2008. 土壌診断なるほどガイ
ド. 日本制作社. [https://www.zennoh.or.jp/eigi/research/pdf/
manual_03.pdf](https://www.zennoh.or.jp/eigi/research/pdf/manual_03.pdf)
