

牛ふんバーク堆肥を25年間連用した淡色黒ボク土畑のリン酸吸着能

八木哲生^{1,2}・谷 昌幸^{3,6}・笛木伸彦^{4,5}・
田村 元⁴・加藤 拓³・小池正徳³

キーワード リン酸吸着, 最大吸着量, 堆肥連用, 淡色黒ボク土, 活性アルミニウム・鉄

1. はじめに

堆肥など有機物の長期連用試験は、全国で実施され多くの知見が集積している。有機物連用の主な効果を総合的に解析すると、土壌が膨軟化するなどの土壌物理性の改善、土壌有機物や可給態リン酸・交換性塩基などが増加する土壌化学性の改善などが明らかにされており、このような効果は、土壌類型に依存することが指摘されている(上沢, 1991)。

黒ボク土における有機物の連用効果について、特に土壌化学性に着目すると、土壌中の可給態リン酸が顕著に増加することが広く認められている(北島ら, 1985; 安田, 1990; 上沢, 1991; 長坂ら, 1999; 片峯ら, 2000; 家壽多ら, 2003)。また、黒ボク土には、土壌中でリン酸吸着に大きく寄与する活性アルミニウム・鉄成分が多く含まれるが(和田, 1981)、いくつかの有機物連用試験においてリン酸吸収係数が低下することも明らかにされ、土壌のリン酸吸着能が相対的に低下することも示唆されてきた(北川,

1983; 安田, 1990; 上沢, 1991; 家壽多ら, 2003)。

近年の肥料価格高騰とリン資源枯渇の問題に対処するためには、有機物中のリン酸の肥料的効果とリン酸吸着抑制効果に関する上記の知見は極めて重要となる。しかしながら、有機物の連用に伴うリン酸吸着能の抑制効果については、相対的效果が確認されているものの、それを定量的に評価した研究例は見られない。有機物の施用によるリン酸吸着能の抑制効果を適正に評価することは、リン酸施肥の適正化を促進させるための知見として重要である。

本研究では、北海道の淡色黒ボク土畑における25年間の牛ふんバーク堆肥の連用が、土壌のリン酸吸着能に及ぼす影響を定量的に評価するために、土壌のイオン吸着能の評価に広く用いられているラングミュア吸着理論を適用することにより(Xue and Huang, 1995; Eick *et al.*, 1999; Wada and Gunjigake, 1979; 今井, 1981; 今井, 1982; Hiradate and Uchida, 2004)、土壌のリン酸最大吸着量を算出した。その結果、堆肥連用がリン酸吸着能の低下に大きく貢献することを明らかにしたので報告する。

2. 試料および方法

1) 供試土壌

北海道立十勝農業試験場では、1975年より有機物の長期連用試験圃場を設け、コムギ、バレイショ、テンサイ、ダイズの4年輪作を行ってきた。処理区としては、麦稈混合牛ふんバーク堆肥連用区、作物残渣すき込み区、これらを組み合わせた区などが設けられている。本研究では、2000年5月11日に、表1に示した3処理区(化学肥料区、堆肥標準量区、堆肥倍量区の順に隣接して設置)について、コムギ栽培区から畝間の表層18cmの土壌を採取した。1区あたり無作為に10地点から土壌を採取し、よく混合した後、その一部を試料として持ち帰った。採取した土壌を2mm篩に通した後、分析に供した。なお、この圃場の土壌は淡色黒ボク土に分類される(農耕地土壌分類委員会, 1995)。

2) 実験方法

供試土壌のpHはガラス電極法で測定した。全炭素量および全窒素量はCNコーダー(柳本製作所社製MT-500型)を用いた乾式燃焼法により測定した。可給態リン酸量はブレイ第二法により、リン酸吸収係数はリン酸アンモニウム液法により測定した(南條, 1997)。

また、0.2 mol L⁻¹酸性シュウ酸アンモニウム溶液により抽出される土壌中のアルミニウムおよび鉄量を、ICP発光分析法(パーキンエルマー社製Optima 3000DV)により測定した(Blakemore *et al.*, 1987)。この抽出により溶

表1 供試した有機物連用試験圃場の処理区概要

処理区名	化学肥料	堆肥	作物残渣
化学肥料区	施用	無施用	持ち出し
堆肥標準量区	施用	15 Mg ha ⁻¹ 施用	持ち出し
堆肥倍量区	施用	30 Mg ha ⁻¹ 施用	持ち出し

堆肥施用量は、年間の生重の施用量を示した。
輪作体系は、コムギ→バレイショ→テンサイ→ダイズの4年輪作。
供試試料は、コムギ栽培区より採取した。

Tetsuo YAGI, Masayuki TANI, Nobuhiko FUEKI, Hajime TAMURA, Taku KATO and Masanori KOIKE: Phosphate adsorption capacity of arable Low-humic Andisols affected by 25-years manure application

¹ 帯広畜産大学大学院畜産学研究科 (080-8555 帯広市稲田町西2線11番地)

² 現在、北海道立総合研究機構根釧農業試験場 (086-1135 標津郡中標津町旭ヶ丘7番地)

³ 帯広畜産大学地域環境学研究部門 (080-8555 帯広市稲田町西2線11番地)

⁴ 北海道立総合研究機構十勝農業試験場 (082-0081 河西郡芽室町新生南9線2番地)

⁵ 現在、北海道立総合研究機構北見農業試験場 (099-1496 常呂郡訓子府町字弥生52番地)

⁶ E-mail: masatani@obihiro.ac.jp

Corresponding Author: 谷 昌幸

2010年4月12日受付・2010年9月24日受理

日本土壌肥科学雑誌 第81巻 第6号 p.594~597 (2010)

出されるアルミニウムおよび鉄は、アロフェンやイモゴライトなどの非晶質・準晶質アルミノケイ酸塩および腐植複合体などに由来する (伊藤, 1997)。

さらに、以下に示す方法により、リン酸の等温吸着実験を行なった。遠沈管に風乾土 1g をとり、 0.1 mol L^{-1} 硝酸カリウム溶液 20 mL を加え、 25°C で 1 時間振とうした後、 0.1 mol L^{-1} 硝酸または 0.1 mol L^{-1} 水酸化カリウム溶液を用いて懸濁液の pH を 5.5 に調整した。 0.1 mol L^{-1} リン酸-カリウム溶液 0~5 mL を 8 段階の量で加え、さらに土壌：溶液比が 1：25 になるように蒸留水を加えた。 25°C で 24 時間振とうした後、約 1000 G で 10 分間遠心分離を行ない、上澄み液を採取した。採取した上澄み液中のリン酸量をリン酸濃度に応じてモリブデンリン黄法またはモリブデン青法により、分光光度計 (日立製作所社製 U-1100 型) を用いて測定した。添加したリン酸量と吸着反応終了後の上澄み液中のリン酸量の差から、土壌に吸着されたリン酸量を求めた。また、pH 4.5 および pH 6.5 におけるリン酸吸着についても同様の実験を行なった。

3) ラングミュアの吸着理論

本実験においては、3 処理区から採取した土壌について、3 段階の異なる pH 毎に、8 段階の異なる濃度のリン酸溶液を添加し、その平衡濃度とリン酸吸着量からラングミュア吸着理論を用いて、土壌によるリン酸の最大吸着量を算出した。

ラングミュア吸着理論は、以下に示すラングミュア吸着式により説明される。

$$C/q = 1/kb + C/b$$

ここで、本実験においては、

q；リン酸の吸着量 ($\text{mg-P}_2\text{O}_5 \text{ g}^{-1}$)

C；吸着反応終了後のリン酸の平衡濃度 ($\text{mg-P}_2\text{O}_5 \text{ L}^{-1}$)

k；吸着定数

b；リン酸の最大吸着量 ($\text{mg-P}_2\text{O}_5 \text{ g}^{-1}$)

とする。

すなわち、横軸に平衡濃度 C、縦軸に (平衡濃度 C) / (吸着量 q) の値をとり、これらのプロットの一回帰直線の決定係数により、ラングミュア吸着式の妥当性を判断した。ラングミュア吸着理論の適用が可能であると判断した場合、一回帰直線の傾き $1/b$ からリン酸の最大吸着量 b を算出した。なお、土壌におけるリン酸吸着現象に対するラ

ングミュア吸着理論の適用については、吸着特性が異なる吸着部位の存在により、ラングミュア吸着式が複数存在すると報告されている (今井, 1981；今井, 1982)。しかし、本研究においては、堆肥の連用が土壌のリン酸吸着能に与える影響を定量的に調べることを目的とすることから、厳密な論議は避け単一の吸着式を用いてリン酸最大吸着量について検討することとした。

3. 結果および考察

1) 供試土壌の一般化学性

表 2 に、各処理区の土壌の化学性を示した。堆肥施用区の土壌の pH、全炭素量、全窒素量は化学肥料区よりも高く、全国で実施されている有機物連用試験の結果と一致した (上沢, 1991)。また、可給態リン酸量は、化学肥料区 (303 mg kg^{-1}) < 堆肥標準量区 (532 mg kg^{-1}) < 堆肥倍量区 (851 mg kg^{-1}) の順に大きく、堆肥施用量の増加に伴って顕著に増大した。一方、リン酸吸収係数は、堆肥倍量区 (1640) < 堆肥標準量区 (1760) < 化学肥料区 (1820) の順に大きく、堆肥施用区では化学肥料区よりも 3~10% 低かった。黒ボク土における有機物の長期連用効果については、可給態リン酸が増加することが多くの試験で報告され (北島ら, 1985；安田, 1990；上沢, 1991；長坂ら, 1999；片峯ら 2000；葉上ら, 2009)、またリン酸吸収係数が低下することについても、北川 (1983)、安田 (1990)、家壽多ら (2003) が $20\sim 80 \text{ Mg ha}^{-1}$ の堆肥を 12~15 年間連用した試験で報告している。本研究においても、これらの既報と同様に、堆肥連用による可給態リン酸の増加とリン酸吸収係数の低下が改めて確認された。

2) 堆肥連用が土壌のリン酸最大吸着量に及ぼす影響

図 1 に pH 5.5 における各処理区のリン酸の等温吸着線

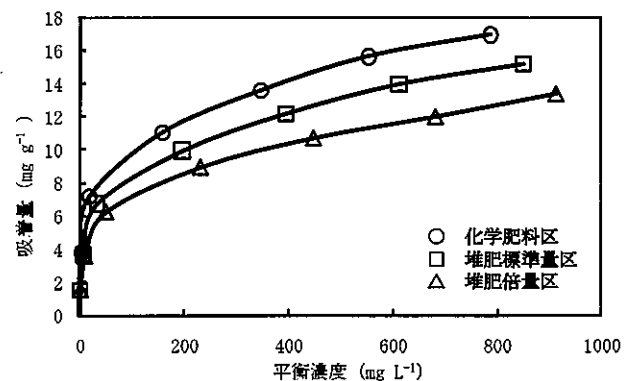


図 1 pH 5.5 における各処理区のリン酸の等温吸着線
平衡濃度および吸着量は P_2O_5 として表した。

表 2 各処理区から採取した土壌の一般化学性および酸性シュウ酸溶液可溶性アルミニウム・鉄量

処理区名	pH (H ₂ O)	全炭素量 (g kg ⁻¹)	全窒素量 (g kg ⁻¹)	可給態リン酸 (mg kg ⁻¹)	リン酸吸収係数	Al ₀ (g kg ⁻¹)	Fe ₀ (g kg ⁻¹)
化学肥料区	5.54	31.3	2.5	303	1820	47.2	15.2
堆肥標準量区	5.68	36.4	3.1	532	1760	44.6	12.3
堆肥倍量区	5.80	39.6	3.3	851	1640	37.9	10.6

可給態リン酸量は、 P_2O_5 として表した。

Al₀；酸性シュウ酸可溶性アルミニウム

Fe₀；酸性シュウ酸可溶性鉄

pH、全炭素量、全窒素量、Al₀ および Fe₀ は、前報 (八木・谷, 2003) からの引用。

を示した。いずれの処理区においても、リン酸吸着量は平衡濃度の上昇とともに大きくなったが、平衡濃度が $100 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ L}^{-1}$ を超えた付近から、リン酸の吸着率は著しく低くなり吸着率は80%を下回った。また、本実験において最もリン酸添加量が多いとき（添加量は $35.4 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ g}^{-1}$ ）、各処理区の吸着率は化学肥料区で48%、堆肥標準量区で43%、堆肥倍量区で38%であった。このときの平衡濃度は、化学肥料区で $787 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ L}^{-1}$ 、堆肥標準量区で $850 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ L}^{-1}$ 、堆肥倍量区で $913 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ L}^{-1}$ であった。いずれのリン酸添加量においても、リン酸吸着量は堆肥倍量区 < 堆肥標準量区 < 化学肥料区の順に大きく、堆肥施用量の増加に伴ってリン酸吸着量は小さくなった。

図1における平衡濃度 C および吸着量 q を用いて作成した pH5.5 におけるラングミュアプロットの一次回帰直線は、いずれの処理区においても決定係数が0.98以上であり、ラングミュア吸着理論の適用が可能であると判断した。なお、pH4.5 および pH6.5 においても、ラングミュアプロットの一次回帰直線の決定係数は0.98以上であったことから、ラングミュア吸着理論を適用できると判断した。

そこで、図2に各処理区のリン酸最大吸着量を示した。各 pH におけるリン酸最大吸着量は、pH4.5, 5.5, 6.5 でそれぞれ化学肥料区では $18.0, 16.8, 14.8 \text{ g-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 、堆肥標準量区では $16.4, 15.2, 13.6 \text{ g-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 、堆肥倍量区では $14.6, 13.3, 12.1 \text{ g-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ であり、いずれの pH においても堆肥倍量区 < 堆肥標準量区 < 化学肥料区の順に大きく、堆肥施用区では化学肥料区よりも明らかに低かった。また、同一の pH 条件において、各処理区のリン酸最大吸着量を化学肥料区と比較すると、いずれの pH においても堆肥標準量区で約10%、堆肥倍量区で約20%の低下が見られ、低下率は pH の影響を受けなかった。これらの低下率は、前述した堆肥施用区のリン酸吸収係数が、化学肥料区よりも3~10%低下したとことと比較すると顕著に大きかった。したがって、土壌のリン酸吸着能低下に及ぼす堆肥連用効果は、リン酸吸収係数から想定されるよりも大きいことが示唆された。このように土壌のリン酸吸着能が評価方法によって異なった理由は、反応終了時のリン酸濃度に起因すると考えられた。図1に示したように、リン酸添加量が同一の場合、反応終了時における各処理区のリン酸の平衡濃度は、リン酸吸着量が少ない処理区ほど高くなる。つまり、リン酸濃度を1段階で測定するリン酸吸収係数による評価においては、リン酸吸着量が化学肥料区よりも少ない堆肥施用区で、リン酸吸着能が相対的に過大評価されたと考えられた。なお、ラングミュアプロットより算出された吸着定数 k は、pH4.5, 5.5, 6.5 において、化学肥料区では $0.028, 0.031, 0.026 \text{ L mg-P}_2\text{O}_5^{-1}$ 、堆肥標準量区では $0.021, 0.022, 0.026 \text{ L mg-P}_2\text{O}_5^{-1}$ 、堆肥倍量区では $0.017, 0.018, 0.019 \text{ L mg-P}_2\text{O}_5^{-1}$ であり、堆肥の施用量との明瞭な関係は見られなかった。

堆肥連用に伴って土壌のリン酸吸着能が低下した理由

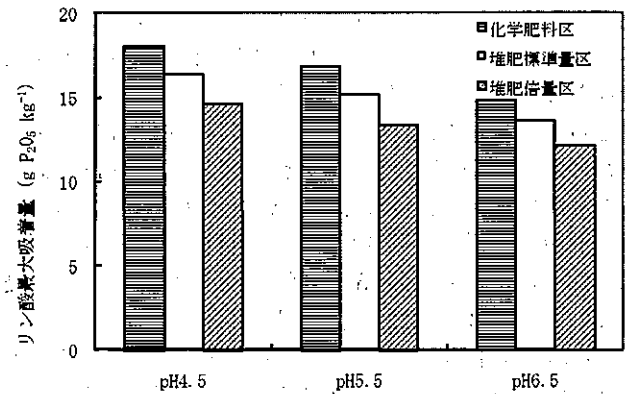


図2 各 pH における各処理区のリン酸最大吸着量

は、堆肥に由来する低分子有機酸などの溶存有機物が、配位子交換することによるリン酸の可溶化 (Fox *et al.*, 1990)、リン酸吸着サイトに対して競合的に作用すること (Hu *et al.*, 2001)、さらには堆肥由来のリン酸が蓄積したことなどが考えられる。一方、黒ボク土においてリン酸吸着能に大きく寄与する活性アルミニウムおよび鉄成分に着目すると (Wada and Gunjigake, 1979; 吉田, 1981)、 0.2 mol L^{-1} 酸性シュウ酸アンモニウム溶液により抽出される土壌中のアルミニウム (Al) 量および鉄 (Fe) 量は、堆肥連用によって明らかに低下した (表2)。また、活性アルミニウムおよび鉄量の指標として広く用いられる $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 量についても (Soil Survey Staff, 1998)、化学肥料区で 54.8 g kg^{-1} 、堆肥標準量区で 50.7 g kg^{-1} 、堆肥倍量区で 43.1 g kg^{-1} であり、堆肥施用量の増加に伴って顕著に低下した。本試験圃場では、堆肥施用区の $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 量の低下割合 (8~21%) が、リン酸最大吸着量の低下割合 (10~20%) とほぼ対応していることから、堆肥連用に伴う $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 量の低下がリン酸最大吸着量を低下させた一因である可能性が考えられた。

本研究において、堆肥連用に伴って土壌のリン酸吸着能が顕著に低下することが定量的に明らかになった。しかしながら、前述した個々の要因がどの程度リン酸吸着能の低下に寄与したかについては明らかにできなかった。今後、堆肥由来のリン酸がどのような形態で土壌中に蓄積されているかを詳細に検討することによって、堆肥連用がリン酸の有効性に与える影響、およびそのメカニズムを明らかにできると考えられる。

3) 堆肥施用区における作土のリン酸吸着能の低下

前項では、単位重量当たりの土壌のリン酸吸着能を定量的に評価し、土壌のリン酸吸着能は堆肥連用に伴って大きく低下することを明らかにした。一方で、圃場において作土に相当する土壌のリン酸吸着能を評価し、圃場レベルでのリン酸吸着能を把握することは、堆肥連用効果の適切な評価と今後のリン酸施肥技術の開発に向けて重要である。そこで、各処理区の容積重 (化学肥料区; 0.82 Mg m^{-3} 、堆肥標準量区; 0.75 Mg m^{-3} 、堆肥倍量区; 0.69 Mg m^{-3}) を元に (中津・田村, 2008)、作土 20 cm、pH 6.5 の条件

におけるリン酸最大吸着量を単位面積当たりで試算した。その結果、単位面積当たりの作土のリン酸最大吸着量は、化学肥料区で $24.3 \text{ Mg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 、堆肥標準量区で $20.4 \text{ Mg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 、堆肥倍量区で $16.7 \text{ Mg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ と試算された。この試算に基づいて堆肥施用区のリン酸最大吸着量を化学肥料区と比較すると、堆肥標準量区では約16%、堆肥倍量区では約31%リン酸吸着能が低下したと考えられた。これらの低下率は、単位重量当たりの低下率（約10~20%）と比較すると顕著に大きかった。したがって、堆肥連用は単位重量当たりの土壌のリン酸吸着能を低下させることに加えて、作土の容積重を低下させることを通じて、圃場における作土のリン酸吸着能を大きく低下させることが明らかになった。

4) まとめ

化学肥料および牛ふんパーク堆肥 ($15\sim 30 \text{ Mg ha}^{-1}$) を25年間連用した北海道の淡色黒ボク土畑において、土壌のリン酸吸着能を定量的に評価することを試みた。リン酸吸着能の指標であるリン酸吸収係数は、従来の有機物連用試験の結果と同様に、堆肥連用に伴って低下した（低下率3~10%）。一方、ラングミュアの吸着理論を適用して算出した堆肥施用区のリン酸最大吸着量は、リン酸吸収係数から見込まれるよりも低かった（同10~20%）。また、堆肥施用区において、圃場における作土のリン酸最大吸着量を単位面積当たりで評価すると、さらなる低下が見込まれた（同16~31%）。以上のことから、土壌のリン酸吸着能は堆肥連用に伴って著しく低下することが明らかになり、堆肥連用の重要性が再確認された。今後、リン資源を有効活用するためには堆肥連用などの土壌管理ならびにその効果を適切に評価することがますます重要となる。

文 献

- Blakemore, L. C., Searle, P. L., and Daly, B. K. 1987. Extractable iron, aluminium and silicon. In L. C. Blakemore *et al* (ed.) *Methods for Chemical Analysis of Soils*, p. 71-76. New Zealand Soil Bureau Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, NZ.
- Eick, M. J., Brady, W. D., and Lynch, C. K. 1999. Charge properties and nitrate adsorption of some acid southeastern soils. *J. Environ. Qual.*, 28, 138-144.
- Fox, T. R., Comerford, N. B., and McFee, W. W. 1990. Kinetics of phosphorus release from Spodosols: Effects of oxalate and formate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1441-1447.
- 葉上恒寿・高橋良学・高橋 喬・中野亜弓・佐藤千秋・小田島ルミ子・新毛晴夫・小野剛志・多田勝郎 2009. 非アロフェン質黒ボク土における有機物連用効果. 岩手県農業研究センター研究報告, 9, 1-19.
- Hiradate, S., and Uchida, N. 2004. Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50, 665-675.
- Hu, H. Q., He, J. Z., Li, X. Y., and Liu, F. 2001. Effect of several organic acids on phosphate adsorption by variable charge soils of central China. *Environment International*, 26, 353-358.
- 今井秀夫 1981. 火山灰土壌のリン酸吸着能について、リン酸吸着に及ぼす平衡 pH の影響. 土肥誌, 52, 11-19.
- 今井秀夫 1982. リン酸吸着に関する最近の話題. 土肥誌, 53, 249-260.
- 伊藤豊彰 1997. 選択溶解法による可溶性鉄・アルミニウム・ケイ素. 土壌環境分析法編集委員会編・土壌環境分析法, p. 288-297. 博友社, 東京.
- 片峯美幸・亀和田國彦・鈴木康夫・伊藤良治・中山高一・内田文雄 2000. 黒ボク土畑における各種有機物の20年間連用が作物生育ならびに土壌化学性に及ぼす影響. 栃木県農業試験場研究報告, 50, 79-91.
- 北川靖夫 1983. 淡色黒ボク土畑への堆肥連年施用に伴う腐植および非晶質無機成分の変化. 土肥誌, 54, 50-52.
- 北島 昂・古賀 進・渡辺弘道 1985. 有機物連用が土壌及び作物に及ぼす影響. 熊本県農業試験場報告, 9, 33-46.
- 長坂克彦・中村保一・松野 篤 1999. 有機物の長期連用が淡色黒ボク土の理化学性及び物理性に及ぼす影響. 山梨県総合農業試験場研究報告, 9, 1-10.
- 中津智史・田村 元 2008. 30年間の有機物（牛ふんパーク堆肥および収穫残さ）連用が北海道の淡色黒ボク土の全炭素、全窒素および物理性に及ぼす影響. 土肥誌, 79, 139-145.
- 南條正巳 1997. 土壌化学. 土壌環境分析法編集委員会編・土壌環境分析法, p. 195-385. 博友社, 東京.
- 農耕地土壌分類委員会 1995. 農耕地土壌分類第3次改訂版, 農業環境技術研究所資料第17号, 農業環境技術研究所, つくば.
- Soil Survey Staff 1998. Keys to Soil Taxonomy, 8th ed., United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- 上沢正志 1991. 化学肥料・有機物の連用が土壌・作物収量に与える影響の全国的解析. 農業技術, 46, 393-397.
- Wada, K., and Gunjigake, N. 1979. Active aluminum and iron and phosphate adsorption in ando soils. *Soil Sci.*, 128, 331-336.
- 和田光史 1981. 土壌粘土によるイオンの交換・吸着反応. 日本土壌肥料学会編 土壌の吸着現象—基礎と応用—, p. 5-57. 博友社, 東京.
- Xue, J., and Huang, P. M. 1995. Zinc adsorption-desorption on short-range ordered iron oxide as influenced by citric acid during its formation. *Geoderma*, 64, 343-356.
- 八木哲生・谷 昌幸 2003. 長期有機物連用圃場における黒ボク土の荷電特性. 土肥誌, 74, 743-748.
- 安田 傑 1990. 火山灰畑土壌における有機物連用の影響. 愛媛県農業試験場研究報告, 30, 59-63.
- 家壽多正樹・八槨 敦・戸辺 学・安西徹郎 2003. 黒ボク土における有機物および土壌改良資材の連用が作物収量および土壌に及ぼす影響. 土肥誌, 74, 673-677.
- 吉田 稔 1981. 土壌のリン酸保持容量測定法の諸問題. 土肥誌, 52, 372-374.