

# ラテンアメリカの持続的農業のための土壌肥培管理技術の事例(6)

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	富田,健太郎
発行元	養賢堂
巻/号	86巻6号
掲載ページ	p. 631-640
発行年月	2011年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## ラテンアメリカの持続的農業のための土壌肥培管理技術の事例〔6〕

## —ブラジルの赤色酸性土壌における肥沃性管理の手法（2）—

富田 健太郎\*

〔キーワード〕: ブラジル, Bray 法, Mehlich No. 1, 粘土鉱物, Olsen 法, pH 依存性陰荷電, Resina 法, リン酸の固定作用, サンパウロ州, 赤色酸性土壌, ゼロポイント・オブ・チャージ (Zero Point of Charge ; ZPC)

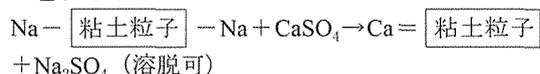
本稿に入る前に: 津波による海水汚染土壌の改良とその土地利用について一案

3月の東日本大震災における津波により、東北から北関東の太平洋沿岸地域の農地は深刻な塩害を受けている。今後、土壌の改良が急務になるものと考えられる。

筆者は海外の劣悪な土壌環境において、野外での栽培比較試験・技術協力の経験（乾燥地での塩類・塩性土壌の経験はないが、コロンビアでの土壌学会参加による知人からの情報入手、セネガルでの塩害土壌改良に関する聞き取り調査およびブラジルにおける酸性土壌の改良情報等…）から、以下のことを簡単に提案する。もちろん、あくまでも参考意見としてお考え頂きたい。なお、本シリーズ（ブラジルの赤色酸性土壌）内で、次の1）に記した石こうの施用効果は、炭酸石灰（ $\text{CaCO}_3$ ；以下、石灰と記す）と比較した形で、本誌に執筆する予定である。

1) 石こう（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）による土壌改良

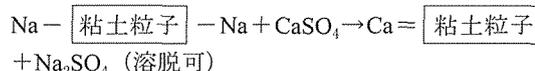
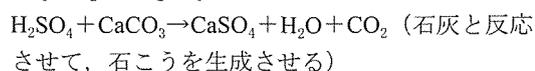
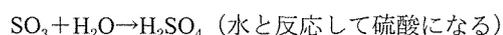
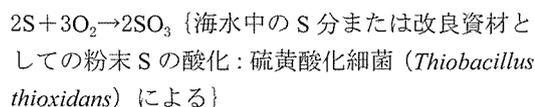
石こうによるNaのリーチングのメカニズムは以下の通りである。



ちなみに、Sandovalら（1972）によると、表層から70cm以内に石こうを含有する塩性土壌での深耕は、表層に石こうを持ち込み、交換性Na飽和度を減少させ、作物栽培が可能であることを示している。

2) 排水・天地返し等によって、海水中のS成分が酸化し、酸性硫酸塩土壌化が懸念されよう。しかしながら、さらに、粉末硫黄ならびに石灰を土壌改良

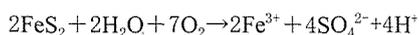
資材として活用する方法がある。そのメカニズムを簡単に記すと、以下のようになる。



このように、生成させた石こうにより、Naを洗い落とす。

3) 水田地帯では、湛水（還元状態）において海水中のS分と土壌中のFeが反応して、Pyrite（ $\text{FeS}_2$ ）が形成されることも懸念されるが（詳細なプロセスは省く）、このPyriteも土壌改良資材として活用する方法もあり、インドで採用されている。

反応のメカニズムは以下の通りで、硫黄酸化細菌の一つである *Thiobacillus ferrooxidans* によって酸化させることで、硫酸を形成させる。



そこに、前記の石灰を投入し、石こうを生成させ、同様の反応を進ませる。

4) 天地返しによる土壌表層の塩分濃度の希釈。

5) 限りある真水資源の有効利用も考慮しながら、脱塩処理を考えていく。

6) 合成ゼオライトの活用（土壌の塩類化によって、窒素を施肥してもアンモニアのガス化が推測されるので、窒素やカリ等の養分の肥効促進ならびに有害金属や物質が存在する場合は、これらの吸着資材として期待できないか）

7) 耐塩性作物品種（耐塩性イネ等）の採用。

8) 水田土壌のみならず、畑地土壌も汚染されていることも考え併せると、石こうやPyriteによる土壌改良は特に畑地で有効かもしれない（好Na性のテンサイを含めた耐塩性作物の選択も）。

\* (株) 宏大 (Kentaro Tomitá)

以上のことから；

海水の流入量・土壌の塩分濃度などの被害状況は多様であると考えられるので、汚染被害の程度や環境修復の厳しさも考慮して、前段階としての先の石こう、石灰および合成ゼオライト等の地域や採用作物の品種別での施肥量比較試験が要求される可能性がある。実際、これらの資材においてどの程度の散布量が要求されるのか把握する必要がある。

我々の食料・家畜の餌としてではなく、バイオエネルギー作物（コメは高カロリー）としての活用を考え（一刻も早い土地の有効利用策としての発想の転換が必要。代替案として考慮すべきか）、増収を図る。これは、重金属汚染土壌におけるファイトレメディエーションとほぼ同じ考えで、有害成分の吸収・収奪も試みる（もちろん、バイオエネルギーの製造においては、これら有害物質の除去技術が必要であるが…）

筆者は、この震災で日本は食料や水の他、ガソリンや電力などのエネルギーの不足を経験したため、化石燃料の代替物であり、かつ地元で生産できるエネルギー源であるバイオエネルギーへの関心が高まると考えている。

## はじめに

前報から、ブラジル、サンパウロ州のカンピナス（Campinas）市にある農業研究所（Instituto Agrônomo, Campinas: IAC）に勤務する José Antonio Quaggio 博士の講演内容を取り上げているが、本稿では、ブラジルの赤色酸性土壌における石灰散布効果、その後で、リン酸の肥沃性評価法について解説していく。もちろん、同博士の講演時間は、約1時間であり、全ての内容を盛り込むことは不可能である。それゆえ、代表的な事項ならびに本誌において紹介してきた内容の一部を盛り込む形で、ブラジルにおける赤色酸性土壌の改良法に関する基本概念をまとめることを目指すものとする。

### 1. 石灰散布に対する代表的な作物の収量応答

前報等において、熱帯酸性土壌に対して、含有交換性アルミニウム量を考慮した形で数多くの酸性矯正、つまり石灰散布量を決定する公式・回帰式が考案され、また、幾つかの研究機関においても、そ

れらが実施されていることを報じてきた。

しかし、筆者個人としては、オキシソル土壌のように塩基交換容量（Cation Exchange Capacity; CEC）が相対的に低い場合、少量の石灰散布によって酸性矯正を実現させることが可能であり、このようなブラジルでのケースでは、前記公式等が活用できると考えるが、アルティソル土壌ではどうなのであろうか？実際、オキシソルよりも CEC が高いため、前記、考案された公式を採用して、石灰散布量を計算しても、その散布量は莫大となり、経済性という観点からの問題が生じることがある（筆者は、パナマの重粘土質のアルティソルでの酸性矯正試験の実施において、そのことを痛感している）。

そこで、アルミニウム耐性品種を効率的に活用することも含めて、フィールド別での石灰散布水準を変えた栽培比較試験を実施し、経済的にも好都合な散布量を決定することが妥当であるという考えを堅持している（試験研究機関や大学配属であれば、基礎データの確保ならびに若手の育成・学生教育のためにも実験計画法に準じた形が望ましい）。

これは、筆者が取り組んできたパナマに限らず、本報告の対象であるブラジルにおいても該当する事項であり、通常、土壌酸度に対する耐性の度合いは、作物間において大きな差があることは承知の通りである。そこで、石灰に対する作物の収量応答に関しては、作物または品種別で、合理的な酸性矯正法の実施が必要であり、とくに、石灰の経済的施用量の範囲内で立案・実施することが重要である。

## 2. 作物別の石灰水準に応じた収量応答の事例

### 1) 石灰水準に応じた作物の収量動向

図1にラッカセイ（3作平均）、図2にダイズ、図3にトウモロコシ、図4にワタ、図5にヒマワリの石灰水準に応じた収量ならびに土壌の塩基飽和度の動態をそれぞれ示す。

これらの図より、石灰の施用水準に応じて、作物の収量が増大していることが分かる。つまり、石灰の散布は作物の増収にとって有益であるが、一番の重要な要因は、収量と同時に土壌の塩基飽和度の増大に貢献していることであろう。逆に言うと、塩基飽和度を増大させると、有害な交換性アルミニウムを沈殿させることができるということである。

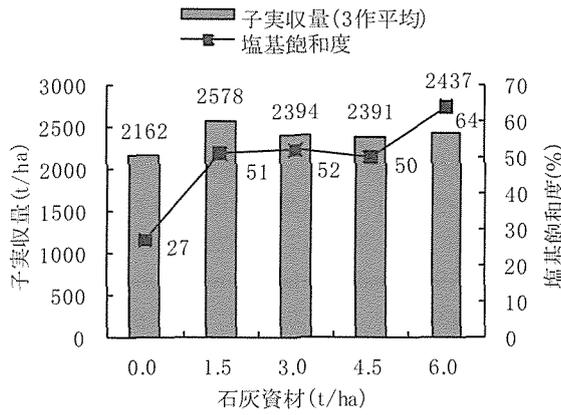


図1 石灰散布水準に応じたラッカセイの子実収量(3作平均)および塩基飽和度の動態  
出典：Quaggioら(1982a)改定

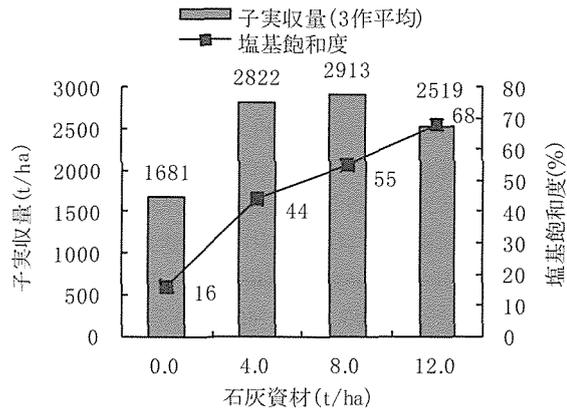


図2 石灰散布水準に応じたダイズの子実収量および塩基飽和度の動態  
出典：Quaggioら(1982b)改定

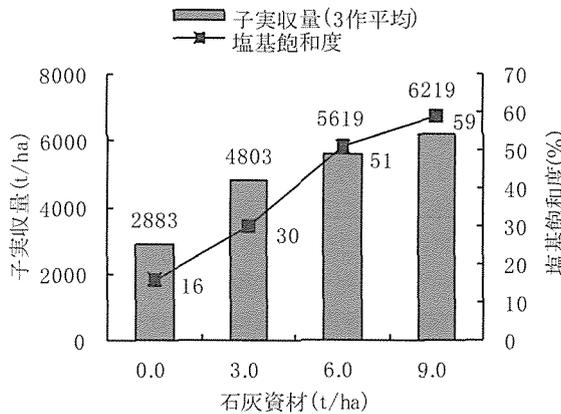


図3 石灰散布水準に応じたトウモロコシの子実収量および塩基飽和度の動態  
出典：Camargoら(1982)改定

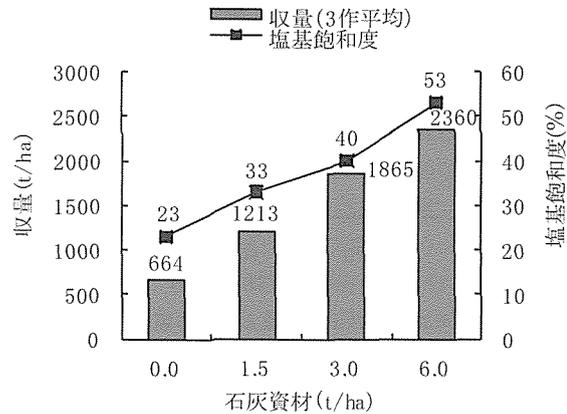


図4 石灰散布水準に応じたワタ収量および塩基飽和度の動態  
出典：Silvaら(1984)改定

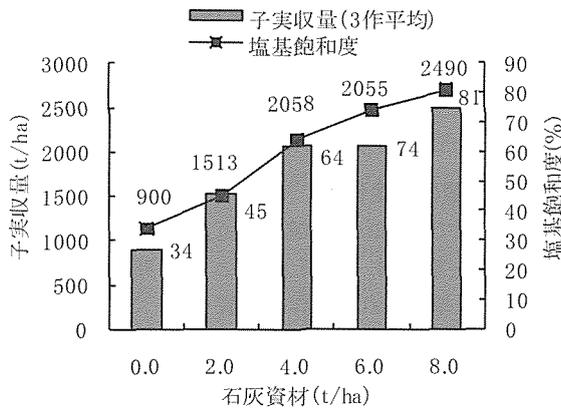


図5 石灰散布水準に応じたヒマワリ収量および塩基飽和度の動態  
出典：Quaggioら(1985)改定

2) 作物の収量と塩基飽和度との関係

ここであらためて、図1~5のデータを活用して、作物の収量と塩基飽和度の関係を見てみる(図6~10)。二次式による収量応答曲線を描いたが、塩基飽和度の増大、つまり、石灰散布による酸性土壌の改良によって、一般的に作物の収量が増加することが分かる。ただ、ここで作物別に見ると、トウモロコシ、ワタおよびヒマワリにおいては、グラフ中の塩基飽和度の範囲内では、正の相関が認められる。これは、これらの試験に採用されたラッカセイやダイズと比較して、これら三作物は酸性耐性が比較的強くない作物であると考えることができないだろうか?ということである。酸性耐性が強ければ、例えば、ラッカセイの場合、塩基飽和度55%において最高子実収量2913kg/haであり、それ以上の68%となると減収している。他方、ダイズでは51%のとき

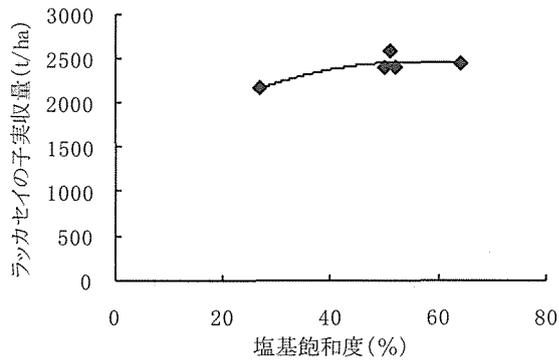


図6 ラッカセイの子実収量と土壤の塩基飽和度における応答曲線  
出典: Quaggio ら (1982a) 改定

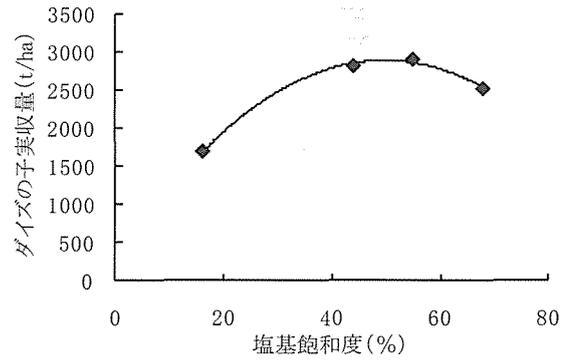


図7 ダイズの子実収量と土壤の塩基飽和度における応答曲線  
出典: Quaggio ら (1982b) 改定

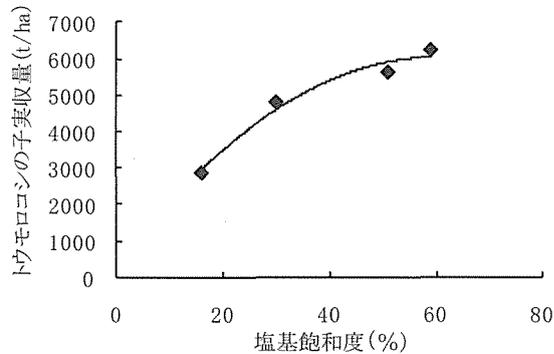


図8 トウモロコシの子実収量と土壤の塩基飽和度における応答曲線  
出典: Camargo ら (1982) 改定

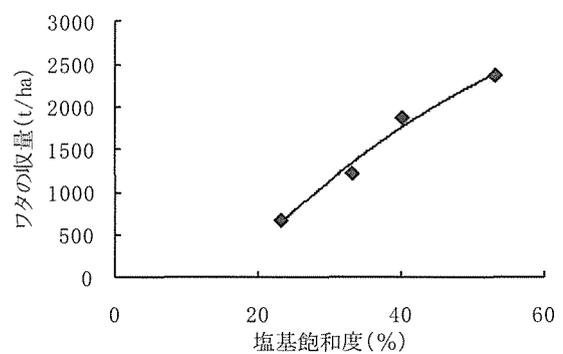


図9 ワタ収量と土壤の塩基飽和度における応答曲線  
出典: Silva ら (1984) 改定

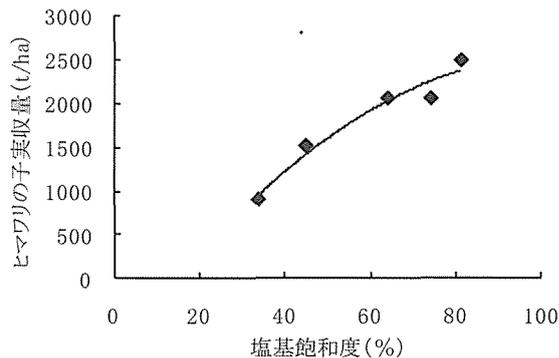


図10 ヒマワリ収量と土壤の塩基飽和度における応答曲線  
出典: Silva ら (1984) 改定

が最高で、それ以降はあまり変化がなかった。つまり、中程度の塩基飽和度にまで土壤を改良しても、作物の増収は期待できる。ところが、塩基飽和度が高くなればなるほど、それに応じて増収が認められるということは、酸度耐性が先のラッカセイや大豆

と比較すると、さほど強くなく、より多くの酸性矯正が必要であると考えられることができる。

いずれにせよ、熱帯の赤色酸性土地帯では、塩基飽和度を高めることである程度の作物の増収が認められるため、石灰散布は土壤改良の基本である。

### 3. 熱帯の赤色酸性土におけるリン酸固定作用のメカニズム

#### 1) リン酸の固定作用

わが国では火山灰土壌が多く分布しているが、この土壌を構成する粘土鉱物として非晶質のアロフェンが挙げられる。詳細は省くが、このアロフェンやイモゴライトがリン酸固定の犯人であり、一度固定されたリン酸は作物に吸収されにくってしまう。他方、熱帯アメリカの強酸性の赤色酸性土壌を構成している粘土鉱物は主にカオリナイトであるが、この土壌でもリン酸固定が顕著であり、施肥リン酸の肥効が低下することが知られている。

2) リン酸の固定作用のメカニズム

ブラジルの赤色ラトソルの改良法の基本は、交換性 Al+H の沈殿ならびに pH 依存性陰荷電の増大を目指した酸性矯正、さらに、交換性 Al 溶出によるリン酸固定作用が顕著であることから、作物にとって実肥と称されるリン酸肥沃度の向上であるといえる。もちろん、酸性矯正によって、ゼロポイント・オブ・チャージ (Zero Point of Charge ; ZPC) よりも高い pH 値にすることによって、リン酸の肥効を促進させることが可能である。

このリン酸肥沃度の判定・評価法は、ブラジルをはじめ、熱帯アメリカ諸国においては多様な方法が存在し、一つの歴史を有していると称して過言ではない。それゆえ、これの歴史的背景に注目することも非常に面白い事項であり、同博士も長時間にわたる講演の中で、リン酸肥沃度の判定・評価法に長い時間をかけていたことを記憶している。

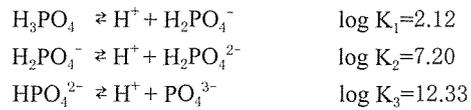
この図 11 では  $H_2PO_4^-$  を取り上げているが、これが、いわゆるリン酸固定作用の模式図として使うことができる。リン酸の固定反応は非常に複雑であるため、ここで全てのことを記すことは不可能であるが (例、前記した火山灰土壌を構成する非晶質のアロフェンやイモゴライトではもっと複雑である)、簡単に記して、ZPC よりも高い pH 値に調整することによって、 $H_2PO_4^-$  は解離する。反対に、ZPC よりも低い pH 値の場合、OH 基と置換されて、 $H_2PO_4^-$  が粘土鉱物の中に取り込まれるということで、同博士もそのことを強く主張されていた。

4. 土壌および植物体におけるリン (P) の動態

1) 土壌中におけるリン酸化合物の形態

オルトリン酸として土壌溶液中に存在するリン (P) は、酸性オルトリン酸  $H_3PO_4$  の誘導体である。

実際、土壌溶液中では、この酸性物質は以下のような形で解離している。



このような化学平衡が生じるとして、酸性土壌においては、土壌溶液中に  $H_2PO_4^-$  の形態が存在している。図 12 に、土壌 pH の違いによる  $H_2PO_4^-$  および  $HPO_4^{2-}$  の存在割合を示す。この図からも分かるように、 $HPO_4^{2-}$  の存在割合は、土壌溶液の pH が 6 以上になると増大する。

さらに、表 1 に土壌溶液中におけるリンの形態の分布 (%) を示す。この表は、同博士の大会講演内容の一つであるが、 $H_2PO_4^-$  の形態が畑地条件よりも、湿潤ならびに施肥灌漑条件下ではその割合が増大する。この形態のリン酸は作物に利用されやすいことで知られている。もちろん、 $HPO_4^{2-}$  の形態も作物に利用されやすい形態であるが、 $H_2PO_4^-$  の形態よりも容易ではない (Prasad and Power 1997)。したがって、pH が高い塩類・アルカリ性土壌では別の意味でリン酸欠乏が生じやすいのであろう。

とにかく、作物に比較的に利用されやすい  $H_2PO_4^-$  の形態の増大が、リン酸肥沃度の向上に大きく貢献している要因の一つあると考えることができよう。

2) 土壌中に存在する無機リン酸化合物

鉄、アルミニウムおよびカルシウムとリン酸化合物 (他の金属類の割合は小さい) の割合は、相対的に pH および粘土画分中に存在する鉱物のタイプや量によって決定される。特に、カオリナイトの他、鉄やアルミニウムの酸化物で支配されている熱帯の赤色酸性土壌では、これらと結合しているリン酸化合物が最も重要なものとなる。逆に、中性またはアルカリ性土壌では、低溶解性であるリン酸カルシ

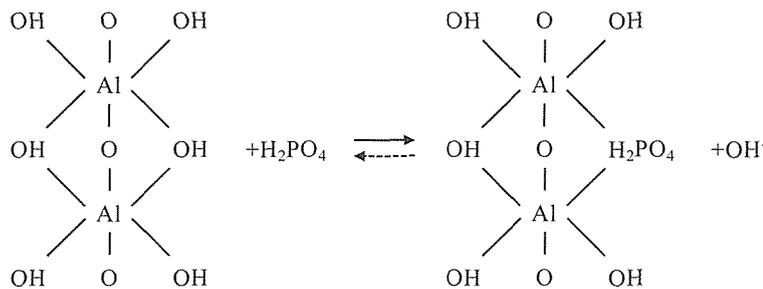


図 11 アルミニウムの水酸化物の表層におけるリン酸固定の模式図  
出典：Raji (1991)

ウムが支配する。表2にブラジルの地域および土壌条件別での土壌中のリンの形態別含有量を示す。これも Quaggio 博士の講演資料の一部であったが、相対的に鉄型リン酸の高いことが分かる。一般的に、熱帯土壌は鉄およびアルミニウム酸化物が豊富である。それゆえ、カルシウム、鉄およびアルミニウムとリンの反応が、土壌のリン酸有効度を決定する。

表3に土壌中に存在する無機リン酸化合物を示す。通常、前記酸性土壌では、鉄およびアルミニウム型リン酸が支配しているのに対して、アルカリ土壌では、カルシウム型リン酸、主にアパタイトが支配する。また、土壌中のこれらの化合物を発見することは非常に難しいとされている。実際、鉱物学的手法によって同定することが困難なのは、無機リン酸化合物であるという。しかし、同表に示した土壌中のこれら化合物内にある不純物は、一般的に溶解性が高いことで知られている。つまり、このことが、植物にとっての P の有効性を高める要因になるとして考慮されている。

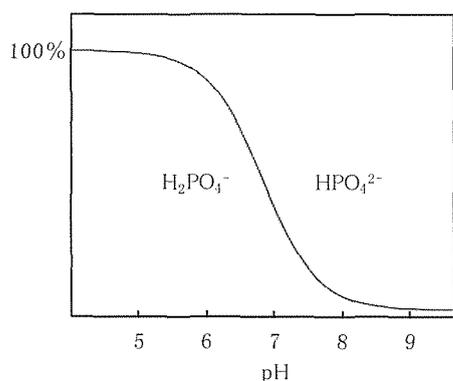


図12 土壌 pH の違いによる H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> および HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> の存在割合  
出典: Raji (1991)

表2 ブラジルの地域および土壌条件別での土壌中の P の形態別含有量

地域および土壌条件	土壌中の P の形態 (mg/kg)		
	P-Al	P-Fe	P-Ca
Bahia (Cabala & Fassbender 1971)			
Cepec	103	863	241
Rio Branco	25	267	38
Goias (Bahia Filho & Braga 1975)			
LE	34	44	36
LE	334	313	112

LE: Latossolo Escuro (暗色ラトソル)  
出典: Guaggio 博士の講演資料 (2009)

さらに、図13においては、表3で示した主な無機リン酸化合物の中の6種類における溶液中の H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> (対数表示) および pH の活性の関係を示す。鉄およびアルミニウムと結合したリン酸化合物の溶解性は、pH の増大とともに増大するが、カルシウムと結合した場合は反対の傾向が認められ、pH の低下とともに増大する傾向が認められる。

つまり、土壌中にこれら無機リン酸化合物が同時に存在する場合、pH6 付近において、これらの溶解性が一番高いということが分かったのである。

一般的に、土壌中に不純物や不完全結晶化合物が存在する場合、これらの溶解によって、含有されているリンも溶解される。

### 3) 土壌の有機リン酸化合物

本稿では詳細なことは触れないが、土壌固相において、主に、リンはオルトリン酸として、前記した鉄、アルミニウムおよびカルシウムのような金属と結合しているが、この他、有機物と結合していることを忘れてはいけない。特に、有機物と結合してい

表1 土壌溶液中におけるリンの形態の分布 (%)

リン酸の形態	加地条件	湿潤条件	施肥灌水
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>			
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	76.3	85.7	97.6
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	18.3	12.3	1.5
MgHPO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2.5	0.8	0.1
CaHPO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2.3	0.7	0.1
CaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.6	0.3	0.5
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.1	0.2	0.2
Total	100	100	100

クエン酸による抽出

出典: Guaggio 博士の講演資料 (2009)

表3 土壌中で生じる無機リン酸化合物

主な無機化合物	化学式	生産原因
ストレンタイト	FePO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	酸性土壌
ビビアナイト	Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	酸性土壌
バベライト	Al <sub>3</sub> (OH) <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O	酸性土壌
バリサイト	AlPO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	酸性土壌
リン酸ジカルシウム	CaHPO <sub>4</sub>	肥料との反応により生成
リン酸オクトカルシウム	Ca <sub>8</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	肥料との反応により生成
ヒドロキシアパタイト	Ca <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub>	中性およびアルカリ土壌
フッ素アパタイト	Ca <sub>10</sub> F <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub>	中性およびアルカリ土壌

出典: Raji (1991)

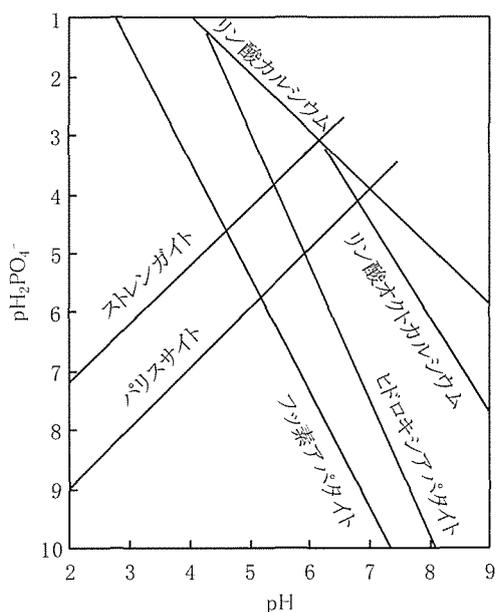


図 13 pCa=2.50 のカルシウムの活性に対する 6 種の無機リン酸化合物の溶解等温線 Olsen & Khasawneh (1980)

るリン酸の主な形態は  $H_2PO_4^-$  である。

土壌中の有機態リンは、有機炭素の割合と比較した場合、C:P 比として約 50:1 であるということ、その開きは大きい。実際、様々な形態のリン化合物が、土壌有機物中において同定されており、主なものとして、イノシトールリン酸、リン脂質および核酸が挙げられる。

4) 土壌および植物体におけるリンの有効性

図 14 に、一般的なリン酸施肥による土壌中での P の有効性の変化ならびに植物の栄養に及ぼす P の図式的概略を示す。肥料として土壌に施用されたリン酸は、土壌溶液によって溶解される。ところが、土壌粒子による P 固定作用が強いことや、土壌中に形成されたリン酸化合物の溶解性が低いことにより、P は土壌の固相に移動して、部分的に有効態 P として留まるが、やがて非有効態へと変化していく。有効態 P は、平衡状態を維持するために、土壌溶液内の P 含有量が低下した場合、これが溶け出してくる。もちろん、植物によって P が吸収された場合、土壌溶液内の P 濃度が減少するのは当然である。また、一般的に、土壌中に存在する P 含有量が低い場合、土壌溶液への P の放出・移動も低くなる。

土壌中における P の有効性の評価において、植物による吸収や溶脱による損失というのは、短期間での影響は小さいものである(図 14 の  $K_4$  および  $K_5$ )。この概略では、肥料中の P も含めて、土壌溶液、有効態および非有効態に大きな関心が集まるであろう。いずれにせよ、土壌に可溶性リン酸肥料が施用された場合、その大部分は土壌の固相に移動し、有効態 P および土壌溶液中の P を高めることになる。

5. 土壌の有効態リン分析における歴史的背景

世界の様々な地域において、多様な有効態リン(P)分析法が存在している。この元素の挙動に関しては、間接的であれ、一種の複雑性があると考えざるを得ない。それに実際、幾つかの分析法間において、これらの一致性に欠けていることも事実である。簡単にいうと、問題は抽出の過程ではなく、各々の異なった方法間で同様の結果が得られず、比較が困難であるということである。このような状況の中、多くの場合、土壌分析法が単純かつ安価であることも含めて、例えば、土壌の有効態リンを評価する方法に関してもその有効性を信用させるという傾向にあるといえる。したがって、このような理由から、多くの場合、土壌分析は経験則に基づくものであり、土壌の P の挙動に関しては十分に熟知されたものとはなっていないのも事実である。

また、他の養分についても、抽出法に関する専門的な仕事が存在していない。抽出液も多様であり、濃度、pH、土壌溶液および振とう時間との関連において、水、酸性画分が支配している溶液、強酸の希釈液、塩基性画分支配による溶液および塩溶液が使

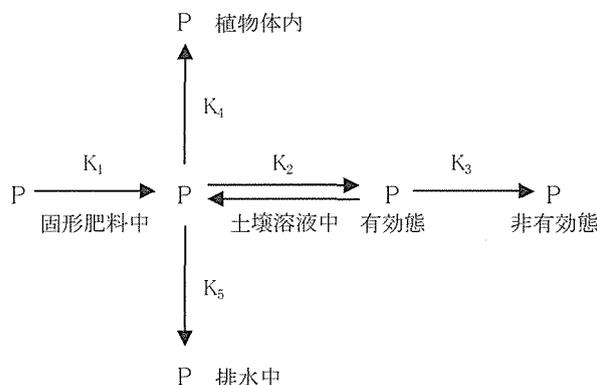


図 14 植物の栄養に及ぼす P の図式的概略の説明 出典：Larsen (1971)

用されている。また、各抽出技術における変化は、異なった結果を生むこととなり、各々の抽出法と各々の地域におけるキャリブレーションを標準化させることが必要であるのはいうまでもない。しかし、異なった方法が地域間で比較されたとしても、実際の視点から、ある方法が有用であると判断された場合、それが採用されるというのも事実である。

#### 6. かつてのブラジル、サンパウロ州における 土壌の有効態リンの抽出液について

##### 1) 基本は酸性抽出液を使う

Kamprath および Watson (1980) の原理に従って記していくと、一般的に、酸性抽出液を用いた溶解作用が基本原則となっている。抽出液の pH を 2~3 に調整することによって、酸抽出液はリン酸カルシウムの溶解を行う。それと同時に、鉄型およびアルミニウム型も溶解されるが、その量は極僅かである。酸抽出液によって溶解される順をまとめると、 $P-Ca > P-Al > P-Fe$  となる。

なお、ブラジルでは、1960年代の中頃から、2つの酸性 P 抽出液が採用されていたという歴史があるので、その方法を紹介しておく。

##### 2) 0.025M $H_2SO_4$ による抽出法

当時、IAC に勤務していた Catani & Cargantini (1954) によって、発展・確立化された古典的な方法である。この方法は、土壌 4g に対して、抽出液 100mL の割合で使用されていた。ところが、1965年から、土壌と抽出液の割合は  $10cm^3$  と 100mL に変更され、結果的に  $100/4=25$  であったのに対して、 $100/10=10$  というように、その比が約半分となった。

##### 3) 0.05M HCl+0.0125M $H_2SO_4$ による抽出法

もう一つが 0.05M HCl + 0.0125M  $H_2SO_4$  であり、Mehlich によって考案され、以降、Thomas & Peaslee (1973) により分析公定法として取りまとめられている。この方法は、Mehlich No.1 またはノースカロライナ法と称され、1965年からブラジルのサンパウロ州を除いた全ての州において採用されている<sup>1)</sup>。オリジナルは土壌 4g に対して、抽出液 20mL であったが、ブラジルでは、前記 0.025M  $H_2SO_4$  法と同様、土壌  $10cm^3$  に対して抽出液 100mL が採用されている(筆者が赴任していたパナマも同じである)。

<sup>1)</sup> : ブラジル農牧研究公社 (Empleza Brasileira de Pesquisa Agropecuária ; EMBRAPA) は依然としてこの

Mehlich No.1 を採用しているが、サンパウロ州以外の州でも、大学や試験場によっては次報で報告する Resina 法に変更しているとのことである。これはサンパウロ大学の Prof. Dr. Takashi Muraoka からの私信であり、補足事項を 5) で触れる。

#### 4) 二つの酸性抽出液の共通点

この二つの P 抽出法は、強酸性の抽出液を採用していることが共通点であり、その結果、実際に類似な傾向が観察されていることから、抽出 P は、ほぼ類似なものとして考慮されている。とにかく、前記した事項であるが、酸性抽出液は、土壌の Ca-P を抽出するものであり、かろうじて、Al-P や Fe-P も抽出する (Kamprath & Watson 1980)。

主に赤色土壌に含有されている鉄やアルミニウムの酸化物およびカオリナイトは、ブラジルの土壌の大部分を占めている。そして、土壌中の P とこれらの酸化物との関係については、鉄型およびアルミニウム型として結合した形で存在しているということになる。実際、酸性抽出液は、このような土壌での P 抽出にとって、良策ではないかもしれない。事実、リン酸の施用およびリン酸肥料に対する応答において、作物の生産性が良好または低くとも、粘土質土壌は P 含有量が極端に低いという結果からも確認されている。pH が約 2 である酸性抽出液では、図 13 の試験結果も含めて、これらが欠乏状態にあることが分かる。つまり、低 pH 抽出液の採用は、Ca-P の抽出には最も有効であるが、Fe および Al-P の溶解には不適であるということである。

#### 5) 6. のタイトルで「かつて」と記した理由

ブラジルでは前記二つの酸性抽出液が採用されたが、結果的には、この低 pH 酸性抽出液の採用はサンパウロ州内では 1983 年までであり、この年を境にして、Resina 法に置き換わった。それゆえ、「かつて」という言葉を前に付けたが、その主な理由は、筆者が JATAK 嘱託研究員時代、Prof. Dr. Takashi Muraoka を訪問したときに分かった。同博士によると、ブラジルで産出されるアラクシャ (Araxá) 産のリン鉱粉末 (低活性) をリン酸肥料として用いる場合に、一つのアクシデントが発生したのである。リン鉱粉末は重過石と違って難溶性であることは承知の通りである。当時、ブラジル農牧研究公社 (Empleza Brasileira de Pesquisa Agropecuária ; EMBRAPA) がこのリン鉱粉末を施用した土壌を先の Mehlich No.1 法で有効態 P を抽出して、土壌の

リン酸肥沃度を評価し、土壌のリン酸肥沃度は高いという誤った結論を出したというのである。なぜ、「これが誤りか？」という、この強酸性抽出液は、リン鉱粉末中の P までも溶解・抽出してしまうということで、土壌の有効態 P 含有量を過剰評価したのである。ところが、作物の生育は悪く、リン酸欠乏に近い状態であったという。つまり、同産地のリン鉱粉末は低活性であるため溶解が緩慢で、P が溶解されても土壌に速やかに固定されてしまうため、作物にとって、リン酸の肥効がほとんど期待できないということが明らかとなったのである。その後、ブラジルの赤色酸性土壌の特性を考慮して、溶成リン肥（以下、溶リンと記す）が普及した。

このような背景から、作物に利用されやすい P を評価する意味で、Raij, B. van. 博士らによって Resina 法が考案され、次報で取り上げる。

いずれにせよ、ブラジル国内ではこの Mehlich No.1 法と Resina 法の二つが公定法として採用されていることは事実である。

#### 7. 高 pH 抽出液ならびに多様な溶媒を混合した抽出液の事例

現在、ブラジルでは採用されていないが、高 pH 抽出液ならびに多様な溶媒を混合した抽出液を紹介する。

##### 1) Olsen 法

土壌表層に吸着されたリン酸は、硫酸塩、重碳酸塩、クエン酸、乳酸または酢酸塩のような他のアニオンによって交換することができる。これらのアニオンの存在は、酸性溶液の存在下では P の再吸着を減少させる。そこで、1954 年、Olsen によって考案された方法が Olsen 法であり、pH を 8.5 に調整した 0.5mol/L の重碳酸ナトリウム (NaHCO<sub>3</sub>) 溶液を抽出液として使う。この方法は主にコスタリカで採用されており、本誌前報等においても紹介した。

この方法の原理は、溶液の pH が増大すると、鉄およびアルミニウムと結合したリンは、鉱物の加水分解によって解放される。pH8 の NaHCO<sub>3</sub> 溶液では、Al, Fe および Ca と結合したリン化合物の溶解が容易になるということである。

##### 2) Mehlich No.3 法

フッ素はアルミニウムとの結合が最も効果的であり、土壌粒子に結合されるといった特性を有してい

る。土壌に存在する P は主にリン酸二カルシウムであるが、フッ素がカルシウムと反応することで、フッ化カルシウムとなって沈殿し、その一方でリン酸が抽出される。また、クエン酸および乳酸を含めたアニオン（主に有機酸）も、アルミニウムと結合するという特性を有している。

そこで、1984 年、Mehlich によって考案された方法が Mehlich No.3 であり、多様な溶媒を混合したものを抽出液として用いている。これは前報（当誌本年 3 月号）で詳しく紹介したが、その組成は、0.2mol/L 酢酸 + NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0.25mol/L + (NH<sub>4</sub>F) 0.015mol/L + HNO<sub>3</sub> 0.013mol/L + EDTA 0.001mol/L であり、特に、Ca-P および Al-P の抽出に適している（前報で報告したように、やがてコスタリカでは Mehlich No.3 が公定法として変更されるかもしれない）。

#### 8. 次報では

次報では、同博士の講演内容に沿って、サンパウロ州で土壌分析公定法となっている Resina 法を中心に、その応用事例も含めた形で解説する。

#### 引用図書および文献

- Arias, Jiménez. C. A. 2007. Suelos Tropicales. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. pp.20-24, 107-114.
- Camargo, A. P. de, Raij, B. van, Cantarella, H., Rocha, T. R. da, Nagai, Y. & Mascarenhas, H. A. A. 1982. Efeito da calagem nas produções de cinco cultivos de milho, seguidos da algodão e soja. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.17, pp.1007-1012.
- Catani, R. A. & Gargantini, H. 1954. Extração de fósforo do solo pelo método Neubauer e por métodos químicos. *Brgantia*, Campinas, 13: 55-62.
- Fenchel, T and T. H. Blackburn. 1979. Bacteria and Mineral Cycling. Academic Press. New York. pp.225.
- 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎 1998. 土壌肥料用語事典. 農山漁村文化協会. pp.338.
- García, A. O. 2003. Tipos de suelos salinos. En : Triana, M. P., Silva, R. L., Gómez, M. I, y Peñaloza, G. (eds). Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo. Publicación de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, D. C., Colombia. pp.85-96.
- Kamprath, E. J. & Watson, M. E. 1980. Conventional soil and tissue testing for assessing the phosphorus status of soils. In: Symposium on Role of Phosphorus in Agriculture. Tennessee Valley 1976. Proceedings. Madison, America Society of Agronomy. pp.433-469.
- Larsen, S. 1971. Residual phosphate in soils. In: HMSO. (ed). Residual value of applied nutrients. London. pp.34-41(Technical Bulletin 20).

- Olsen, S. R. & Khasawneh, R. E. 1980. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: Stelly, M. (ed). The role of phosphorus in agriculture. Madison. American Society of Agronomy. pp.364-410.
- Quaggio, J. A. 1983. Critérios para calagem em solos do Estado de São Paulo. Piracicaba, pp. 76. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-ESALQ/USP.
- Quaggio, J. A. 1986. Reação do solo e seu controle. In: Dechen, A. R. e Carmello, Q. A. C. (Eds.). Simpósio avançado de química e fertilidade do solo, Piracicaba. Anais. Piracicaba, ESALQ. 53-86.
- Quaggio, J. A. 2000. Acidez e calagem em solos tropicais. Instituto Agrônomo (IAC), Campinas-SP, Brasil. pp.3-76.
- Quaggio, J. A., Dechen, A. R. & Raij, B. van. 1982a. Efeito da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.6, pp.182-194.
- Quaggio, J. A. Mascarenhas, H. A. A. & Bataglia, O. C. 1982b. Respostas da soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de cerrado. II-Efeito residual. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas. v.6, p113-118.
- Quaggio, J. A., Raij, B. van e Malavolta, E. 1985a. Alternative use of the SMP buffer solution to determine lime requirement of soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 16, 24-60.
- Quaggio, J. A., Sakai, M., Ishimura, I., Saes, L. A. e Bataglia, O. C. 1985b. Calagem para a rotação feijão-milho verde em solo orgânico do Vale do Rio Ribeira de Iquapé (SP). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas. v.2: 225-261.
- Quaggio, J. A., Ramos, V. J., Bataglia, O. C., Raij, B. van e Sarai, J. 1985c. Calagem para a sucessão batata-triticale-milho, utilizando-se calcários com diferentes teores de magnésio. Bragantia. v.44: 391-406.
- Quaggio, J. A., Ungaro, M. R. G., Gallo, P. B. e Cantarella, H. 1985d. Sunflower response to lime and boron. In: International Sunflower Conference, 11., Mar del Plata, 1985. Proceeding. Mar del Plata, International Sunflower Association. 209-215.
- Prasad, R. and J. E. Power. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture, Lewis Publishers, Boca Raton, New York. pp.107-111, 171-178, 191-192, 233-234.
- Raij, B. van. 1991. Fertilidade do solo e adubação. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. São Paulo, Brasil. pp.29-46, 138-162, 181-203.
- Raij, B. van, Cantarella, H., Quaggio, J. A. e Furlani, A. M. C. 1996. Recomendações de adubação e calagem no Estado de São Paulo. 2. ed Campinas, Instituto Agrônomo. pp.300.
- Raij, B. van. e Quaggio, J. A. 1997. Methods used for diagnosis and correction of soil acidity in Brazil: an overview. In: Moniz, A. C., Furlani, A. M. C., Shafert, R. E., Fageria, N. K., Rosolem, C. A. e Cantarella, H. (Eds.). International Symposium on plant-soil interactions at low pH, Belo Horizonte. Proceedings. Campinas, Brazilian Soil Science Society. pp.205-214.
- Sandoval, F. M., J. J. Bond and G. A. Reichman. 1972. Deep plowing and amendment effect on a sodic clay pan soil. Trans. ASAE 15: 681-687.
- Silva, N. M., Carvalho, L. H., Hiroce, R. & Kondo, J. I. 1984. Resposta do algodoeiro à aplicação de calcário e cloreto de potássio. Bragantia, Campinas, v.43, pp.643-658.
- Silva, R. L. 2003. Las propiedades químicas del suelo y su fertilidad. En : Triana M. P., Silva, R. L., Gómez, M. I. y Peñaloza. G. (Eds.). Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá. Bogotá, Colombia. pp.31-37.
- Thomas, G. W. & Peaslle, D. E. 1973. Testing soil for phosphorus. In: Walsh, L. M. & Beaton, J. D, eds. Soil testing and plant analysis. 2. ed. Madison. Soil Science Society of America. pp.115-132.
- 富田健太郎 2004. ブラジル連邦共和国が採用している土壌分析・土壌診断に基づいた施肥勧告 [1] - EMBRAPA 法 - 農業および園芸 79(11):1163-1168. 養賢堂.
- 富田健太郎 2005. ブラジル連邦共和国が採用している土壌分析・土壌診断に基づいた施肥勧告 [2] - サンパウロ州における公定法 (Part 1) - 農業および園芸 80(6):664-671. 養賢堂.
- 富田健太郎 2006. 熱帯アメリカの酸性土壌の矯正とリン酸肥沃度の向上 [3] - 各種土壌の有効態 P 抽出液の組成とその特性 (1) - 農業および園芸 81(3):392-399. 養賢堂.
- 富田健太郎 2006. 熱帯アメリカの酸性土壌の矯正とリン酸肥沃度の向上 [6] - ブラジル, サンパウロ州における作物の P 吸収量と関係のある土壌 P の交換・抽出法 - 農業および園芸 81(6):682-690. 養賢堂.
- 富田健太郎 2007. ブラジル, サンパウロ州における土壌肥料学的研究事例 [1] - ブラジル, サンパウロ州の土壌特性および酸性矯正法を中心に - 農業および園芸 82(10):1106-1114. 養賢堂.
- 富田健太郎 2010. ラテンアメリカの持続的農業のための土壌肥培管理技術の事例 [1] - 本タイトル執筆背景および中米コスタリカで開催されたラテンアメリカ土壌学会に参加して - 農業および園芸 85(9):921-930. 養賢堂.
- 富田健太郎 2010. ラテンアメリカの持続的農業のための土壌肥培管理技術の事例 [2] - ラテンアメリカ土壌学会の技術案内旅行 (Gira Técnica) の稲作グループに参加して - 農業および園芸 85(10):1028-1036. 養賢堂.
- 富田健太郎 2011. 農業・園芸関係ボランティアのための基礎土壌肥料 [1] - 土壌と植物体における養分の動態および土壌を構成している粘土と有機物 - 農業および園芸 85(12):1209-1218. 養賢堂.
- 富田健太郎 2011. ラテンアメリカの持続的農業のための土壌肥培管理技術の事例 [3] - コスタリカの土壌分析公定法について: Mehlich No.3 導入の可能性 - 農業および園芸 86(3):359-369. 養賢堂.
- 富田健太郎 2011. ラテンアメリカの持続的農業のための土壌肥培管理技術の事例 [5] - ブラジルの赤色酸性土壌における肥沃性管理の手法 (1) - 農業および園芸 86(5):545-554. 養賢堂.