

# 黒ボク土における土壤中リン酸と作物の生育に関する研究

## 第2報 リン酸多量施用に伴う土壤中リン酸及び土壌の各種性質の変化

亀和田國彦・青木一郎・岩崎秀穂\*・粕谷光正\*\*\*・佐藤文政\*\*\*

### I 緒 言

黒ボク土における土壤中リン酸濃度の違いが作物の生育等に及ぼす影響について、前報<sup>1)</sup>で述べた。ほうれんそう、小麦及び大豆の収量は、土壌中可給態リン酸濃度の対数値に対し、近似的に二次曲線に良く適合し、この曲線に基づき求められた各作物の適正值はほうれんそう13~32、小麦26~55、大豆6~26mg/100gであった。一方たまねぎは直線的な関係にあり、一般的収量水準を基準にして求めた適正範囲は、162~380mg/100gであった。また、作物体中のリン酸濃度やたまねぎ貯蔵中の腐敗率は土壌中リン酸濃度に関係があり、さらに作物体中のリンとカリウムの転流は相互に関係していることが推察された。

一方、施用されたリン酸は、土壌に固定され、急速に非可給化し、この性質は黒ボク土で特に大きいことは一般によく知られており、これは作物生育に際してのリン酸供給能力の評価の面で非常に重要な問題である。しかし現在、土壌中でのリン酸の非可給化の速度は定量的には捉

えられておらず、この明確化は土壌改良の効果の評価、または持続性推定の面からも重要な問題である。

また、土壌へのリン酸の多量施用に伴って、陽イオン交換容量(CEC)が上昇する等、土壌のいくつかの性質が変化することについての多数の報告<sup>5, 6, 17, 22, 24, 25, 27, 33)</sup>もある。これらの現象の把握についても土壌改良に伴うリン酸多量施用時の適正な土壌管理を考える場合、重要な問題である。そこで、前報で作物の生育について述べた試験における土壌中リン酸の可給性の経時変化並びに土壌のいくつかの性質の変化について取りまとめたので報告する。

第1表 リン酸添加量及び全リン酸分析値

目標値 TRUOGP(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/100g)	添加量 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> g/m <sup>2</sup>	分析値 mole/kg			
		mole/kg	4か月	9か月	22か月 67か月
2	0	0	0.077	—	— 0.077
10	140	0.020	—	—	—
20	250	0.035	—	—	—
30	480	0.068	0.223	0.186	0.166 0.176
100	850	0.120	0.330	0.235	0.212 0.225
250	1400	0.197	0.453	0.331	0.307 0.300
500	2300	0.324	0.620	0.477	0.397 0.384
1000	3700	0.521	1.140	0.672	0.597 0.576

注。 — は未分析

第2表 分 析 法

項目	方 法	内 容	文 献
全リン酸	過塩酸分解法	濃硝酸—60%過塩酸分解	バナドモリブデン酸発色 3)
可給態リン酸	TRUOG法	0.002N, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 浸出	MURPHY & RILEY 発色法 27)
	BRAYNo.2準法	0.03NNH <sub>4</sub> F, 0.1N HCl浸出	〃 2)
水溶性リン酸		水:土=80ml:2g, 1時間振とう	〃 22)
土壌溶液中リン	遠心分離法	土壌水分を最大容水量の60%に調整後5℃で24時間放置後遠心分離法でpF3.8相当までの溶液を採取	〃 12)
可溶性Fe		1NpH4.5NH <sub>4</sub> OAc浸出	原子吸光法 3)
可溶性Zn		〃	〃 3)
可溶性Al		1NpH4.0NaOAc浸出	アルミニウム比色法 3)
リン酸吸収係数	リン酸アンモニウム法	2.5%リン酸アンモニウム浸吸着	バナドモリブデン酸発色 19)
陽イオン交換容量	セミマイクロSCHOLLENBERGER法		〃 3)
荷電特性		0.1, 0.02, 0.005N NH <sub>4</sub> Cl処理 1N KNO <sub>3</sub> 浸出	NH <sub>4</sub> :インドフェノール法 29) Cl:チオシアン酸水銀比色法

※現栃木県普及教育課

※※故人

※※※現栃木県肥飼料検査所

## II 試験方法

### 1. 供試土壌

分析対象土壌は前報で述べた圃場試験の各処理から各作物収穫後に採取した。リン酸（以下リン及びリン酸はP）施用量は第1表のとおりであった。

### 2. 分析方法

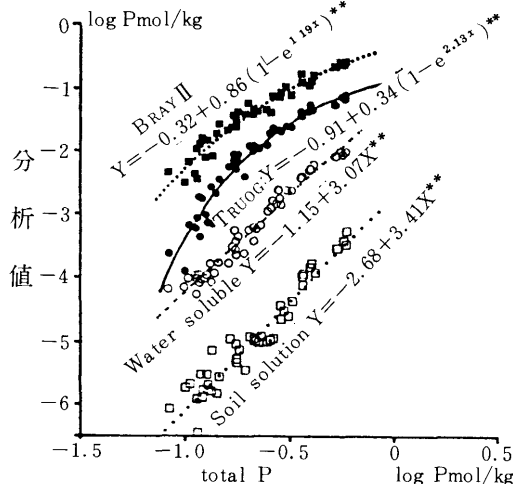
採取された土壌は風乾後2mmの篩で篩別し、P全量（全リン酸）、可給態P及び可溶性アルミニウム等の分析を行った。各分析法は第2表に掲げた。pH-荷電曲線の分析サンプルはさらに1mmで篩別した。

## III 結果及び考察

### 1. 土壌中Pの可給性の評価

土壌中の可給態Pの評価のための各種分析法のうちTRUOG法及びBRAYⅡ準法並びに水溶性P及び土壌溶液中Pの各分析値とP全量との関係を第1図に掲げた。それぞれの分析値は常用対数値で扱った。ここで土壌溶液中Pについては溶液中濃度、他のものについては土壌中濃度である。これらの分析法のうちのいくつかはその分析条件等について検討されている。<sup>12)</sup>

P全量はおおむね $-1.0 \sim -0.01 \log P \text{ mole/kg}$



第1図 total Pと各分析値との関係  
(1986. 6採土, BRAYⅡは1984. 11採土)

の範囲にありこれに対し各分析値は $-6 \sim -0.5 \log P \text{ mole/kg}$ の範囲にあった。分析値の最も大きかったのはBRAYⅡ準法で、以下TRUOG法>水溶性(>土壌溶液)の順であった。水溶性及び土壌溶液中P濃度はP全量に対し直線的な関係にあったがBRAYⅡ及びTRUOG法の値はP全量の増加に対し徐々に傾きが小さくなる曲線的関係にあった。

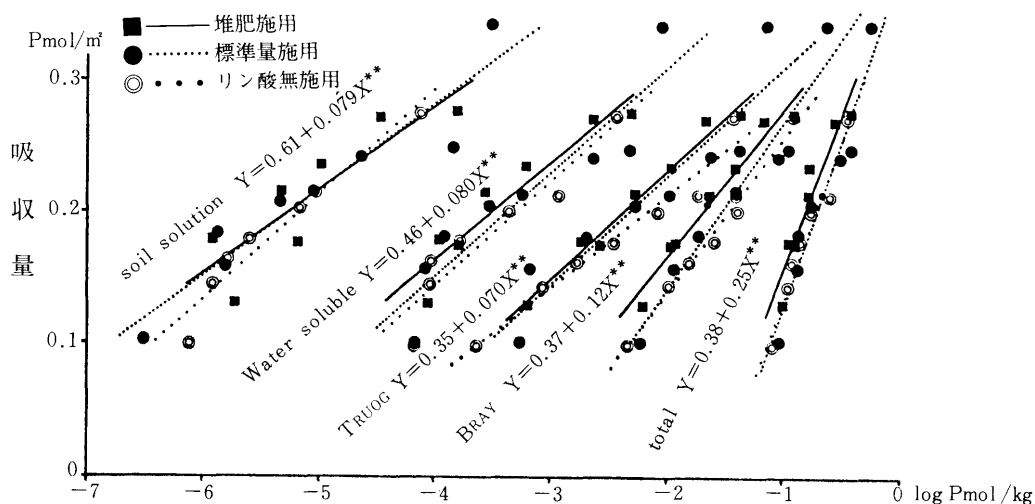
また可給態P (TRUOG法)の増加に対し作物のP吸収量が直線的に増加することは前報<sup>11)</sup>で述べたが、これに加え他の3種の分析値についても施肥区分系列別に作物のP吸収量との関係を第2図に示した。各分析値共に作物のP吸収量に対し直線的関係にあった。

P全量の増加に対し、各分析法とも単純に増加していること、並びに分析値の対数値に対し、作物のP吸収量がいずれもおおむね直線的関係にあることは、Pの可給性に対し各分析法間の差がないことを示すもので、さらにこれらの条件下(同一土壌内)では何れの分析法も可給態Pの指標として用いられることを示すものである。

土壌中P濃度の比較的低い水準で、実際の作物によるP吸収量に最も近い値が得られる分析法はTRUOG法であるがいずれにしても土壌中P高水準では作物のP吸収が頭打ちとなり、分析値=吸収量の関係は成り立たなくなる。また泥炭土、沖積土及び火山灰由来土において<sup>32</sup>Pを用いて実施されたA-valueと分析値との比較による各種分析法の優劣の評価<sup>26)</sup>では、TRUOG法やBRAYⅠ法に比べてBRAYⅡ法がA-valueに良く一致したとされた。

可給態Pの評価にTRUOG法を用いた、各種土壌における各種作物の生育と土壌中リン酸濃度との関係に関する取りまとめ<sup>10)</sup>では、土壌の種類の違いにより同一分析値に対する作物の反応が異なるとしている。この事は作物生育反応に対する土壌中Pの可給性の評価法としてTRUOG

黒ボク土における土壤中リン酸と作物の生育に関する研究 (第2報)



第2図 各分析値P濃度とP吸収量(ほうれんそう, 小麦, 大豆及びたまねぎ合計)との関係

注. 図中の回帰式は, リン酸無施用処理

法は, 異なった種類の土壤間のPの可給性については正当に評価していないことを示しており, この点では適当でないことを示すものである.

一般に土壤中養分の評価にあたっては容量因子と強度因子の両面から捉える必要がある. 先に示した5種類の分析法を分類すると, P全量は容量因子, 土壤溶液中P濃度は強度因子, TRUOG法及びBRAY II準法は中間的なものであろう.

生育中の作物に対して環境として与えられるものは, 強度因子である. 種類の異なった土壤間におけるTRUOG法と土壤溶液中P濃度との関係の比較では, 同一のTRUOG法分析値に対し, 黒ボク土より, 灰色低地土の方が土壤溶液中P濃度は高く<sup>14)</sup>先に述べた取りまとめ<sup>10)</sup>で, TRUOG Pに対する作物収量ピークが黒ボク土に比べ灰色低地土で低い濃度のところに来ることの原因であることは確かであろう. この事は, 種類の異なった土壤間の比較を含め, 土壤中リン酸の可給性の評価法として, 土壤溶液が優れていることを期待させるものである.

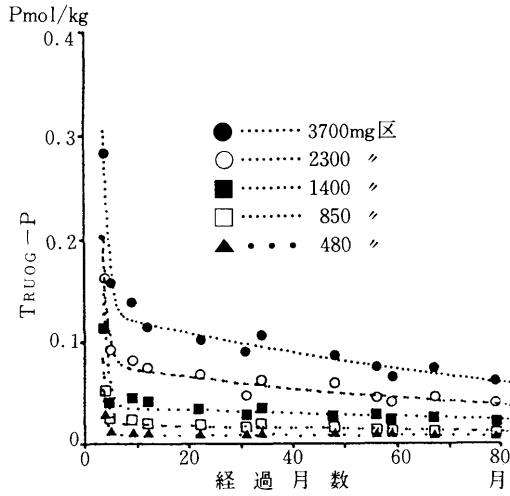
一般に黒ボク土のPは非晶質の $Al(OH)_2H_2PO_4$ であるとされているが, いずれにしても土壤溶液中のPは, 難溶性リン酸塩の溶解平衡, 又は固相に対する吸着平衡の上に決定されると考え

られる.<sup>1,13,14)</sup> この様に強度因子も容量因子を背景にして発現されるもので, ある程度の時間の経過を考えた当該土壤の生産力を評価しようとした場合は, さらに容量因子が重要となってくる. したがって, 土壤の生産性の評価としての分析法を考えた場合, 現在は, この中間的な方法を選択することになろう. いずれにしても各種土壤間でのリン酸の可給性を同等に評価する方法の開発が望まれる.

## 2. 土壤中Pの経時変化

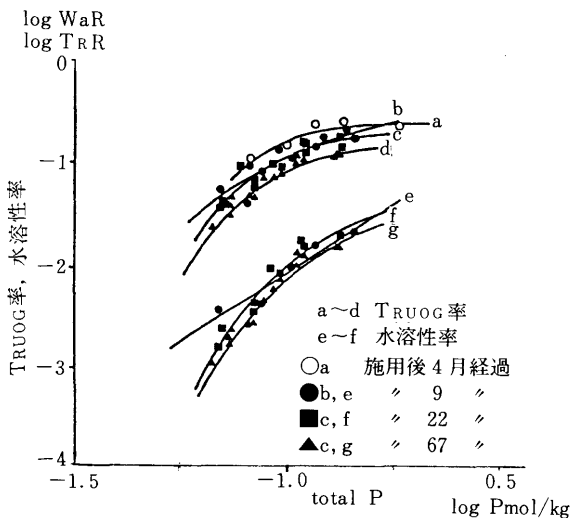
土壤中P全量及びTRUOG Pの経時変化を第1表及び第3図に示した. P全量は各リン酸水準共に施用後9ヵ月経過まで急速に低下したが, その後79ヵ月経過まで各々がほとんど一定の値で推移した. またTRUOG Pは, 施用直後にはP全量と同様, 各P水準土壤とも急速に低下したが, その後は緩やかに減少している. 施用直後のP全量の急速な減少は, 作物耕作の開始に伴う耕起深の増加がその主な原因と考えられた.

TRUOG P値に代わりTRUOG率(TRUOG P値/P全量)とP全量との関係を第4図に示した. TRUOG率の対数値は, P全量の対数値に対し緩やかな右上がりの曲線を描き, 時間の経過と共に下方に移動する傾向があった. また第5図



第3図 TRUOG Pの経時変化

にP施用後の各P水準のTRUOG率の変化を示した。TRUOG率の対数値はP施用後9ヵ月経過以降は右下がりの直線に回帰した。施用後9ヵ月以前については、P全量水準が大きく変化したため、次に述べるP全量水準の違いによる影響を排除するため、回帰式計算のデータとしては取り扱わなかった。またP施肥量の違いに関しては、P施用量の多い処理ほど高かった。水溶性Pの値についても同様の処理(第4,5図)をしたが、これについても同じ傾向であった。



第4図 total PとTRUOG率, 水溶性率との関係

以上から、ある時期のTRUOG P又は水溶性Pは、P全量とリン酸施用後の経過時間によって決定されると考えられる。この事について整理すると次のとおりである。

まず、経過時間とTRUOG率または水溶性率との関係については、P全量一定の条件下での関係が成り立つ。

$$\log TRR = at + bt \cdot m \quad \text{〔式1〕}$$

ただし、TRRはTRUOG率、atは定数、btは係数、mはリン酸施用後の経過月数。さらにP全量とTRUOG率との関係については、経過時間一定の条件下で次の関係が成り立つ。

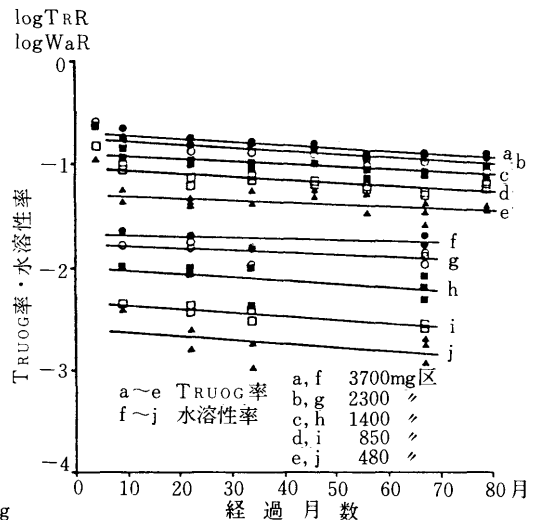
$$\log TRR = ap + bp(1 - e^{-k \cdot \log Top}) \quad \text{〔式2〕}$$

ただし、apは定数、bp及びkは係数、TopはP全量。

〔式1〕を変形して

$$TRR = e^{at} \cdot e^{bt \cdot m} \quad \text{〔式1'〕}$$

同様に〔式2〕を変形して



第5図 TRUOG率及び水溶性率の経時変化

黒ボク土における土壤中リン酸と作物の生育に関する研究（第2報）

$$TRR = e^{ap+bp} \cdot e^{-bp \cdot Top-k} \quad \text{〔式2'〕}$$

が得られる。〔式1'〕及び〔式2'〕から

$$TRR = f \cdot e^{at} \cdot e^{ap+bp} \cdot e^{bt \cdot m} \cdot e^{-bp \cdot Top-k} \quad \text{〔式3〕}$$

で、これを整理するとP全量とP資材施用後の経過時間をパラメータとするTRUOG率に関する次式が得られる。

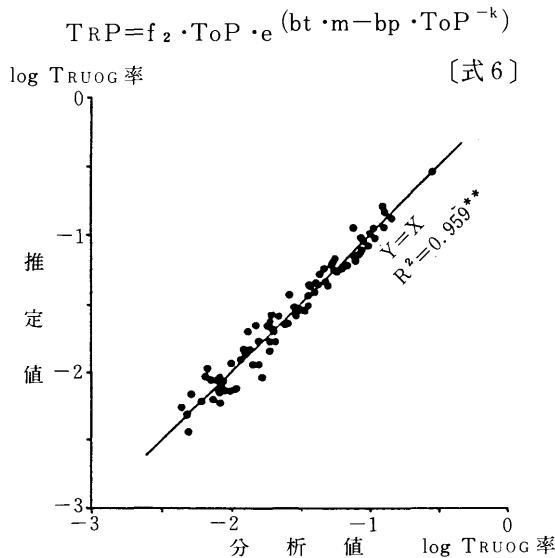
$$TRR = f_2 \cdot e^{(bt \cdot m - bp \cdot Top^{-k})} \quad \text{〔式4〕}$$

ここでf及びf<sub>2</sub>は係数。

一方TRUOG PとTRUOG率との関係については次式で表わされる。

$$TRP = ToP \cdot TRR \quad \text{〔式5〕}$$

ここでTRPはTRUOG P。したがって、〔式4〕及び〔式5〕からP全量とP資材施用後の経過時間をパラメータとするTRUOG Pに関する次式が得られる。



第6図 TRUOG率の分析値と推定値との関係

本試験の分析値をこのモデルに当てはめて回帰式を求め、検討を進めた。本報では対数は全て常用対数で扱った。

TRUOG Pについては、次の式が得られた。

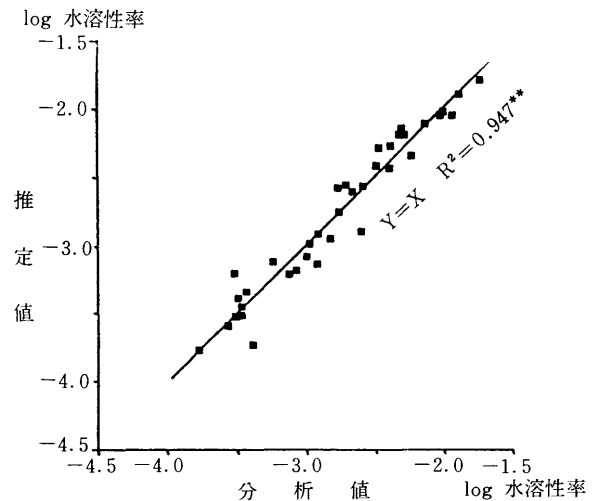
$$TRP = 0.331 \cdot ToP \cdot 10^{(-0.00179 \cdot m - 0.135 \cdot ToP^{-0.965})} \quad \text{〔式7〕}$$

同様に水溶性Pについては次の式が得られた。

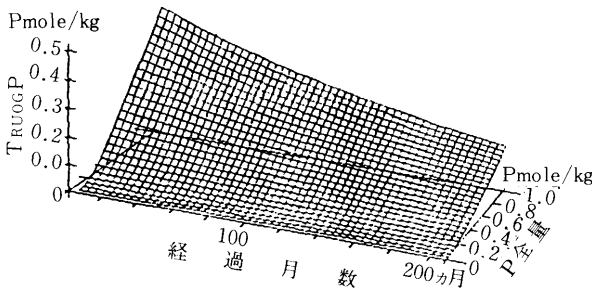
$$WaP = 0.116 \cdot ToP \cdot 10^{(-0.00193 \cdot m - 0.477 \cdot ToP^{-0.711})} \quad \text{〔式8〕}$$

これらの式に基づくTRUOG P及び水溶性Pの計算値と分析値の関係を第6、7図に掲げた。これらの関係の回帰係数はTRUOG PではR<sup>2</sup>=0.959、水溶性PではR<sup>2</sup>=0.947で、それぞれ高い相関が得られ、これらの回帰式が、土壤中Pの可給性について、よく説明していると判断された。

ここで求めた回帰式は、土壤の種類によってその定数及び係数が異なってくるもので、他の土壤には適用できないと考えられるが、このモデルは多くの土壤に適用されると考えられる。



第7図 水溶性率の分析値と推定値との関係



第8図 予測式に基づく経過時間とP全量に対するTRUOG Pの予測値

比較的長期にわたる土壌のP改良を考える場合、このモデルにより施用後の経時的可給態P含量が推定できる。この式について、P全量の経時的变化が無いとしたときのP施用後200ヶ月までのTRUOG率の推定値を第8図に示した。

これらの回帰式からは経過時間に関する半減期が計算され、この値はそれぞれTRUOG率については168ヶ月、水溶性率については156ヶ月であった。

古賀野<sup>16)</sup>は多湿黒ボク土、水田における経時的試験で、当該年のBRAY Pの分析値が前年の分析値に対し、常に一定の割合で減少することから、やはり次の式を導いた。

$$P_t = P_0 e^{-\lambda t}$$

ここで $p_t$ は $t$ 年後のBRAYリン酸量、 $p_0$ はある年のBRAYリン酸量、 $\lambda$ はその土壌のBRAYリン酸の減少定数。さらにこのモデルによる回帰式から半減期を求め、この値は、9.3年(112月)とし、同様に、泥炭土壌で行われた試験結果から半減期を、3.03年(36月)とした。多湿黒ボク土での値も本試験の値の約1/2程度で、この差は土壌または水田と畑状態の違い、あるいは分析法の違いによるものと考えた。

一般に、黒ボク土へのP施用に伴う急速なPの非可給化は、リン酸アルミニウム、リン酸鉄、またリン酸カルシウム等の難溶性塩の生成、並

びに粘土または腐植表面への吸着がその原因であるといわれている。

近年、加藤ら<sup>13, 14)</sup>の難溶性塩の溶解度積を用いた検討や、NANZYO<sup>19)</sup>の赤外線吸収スペクトルを用いた方法によって、その多くの部分が非晶質 $Al(OH)_2H_2PO_4$ であることが明らかにされた。更に、Pの土壌への施用によって1次的に生成された非晶質 $Al(OH)_2H_2PO_4$ は、2次的な反応として、時間の経過に伴って、徐々に結晶化されバリサイトになると言われている。<sup>8)</sup>溶解に関する平衡定数は非晶質 $Al(OH)_2H_2PO_4$ が $pk^{\circ}_{so} = 27.8$ 、一方バリサイトは $pk^{\circ}_{so} = 30.5$ <sup>1)</sup>で、後者は前者よりかなり小さい。

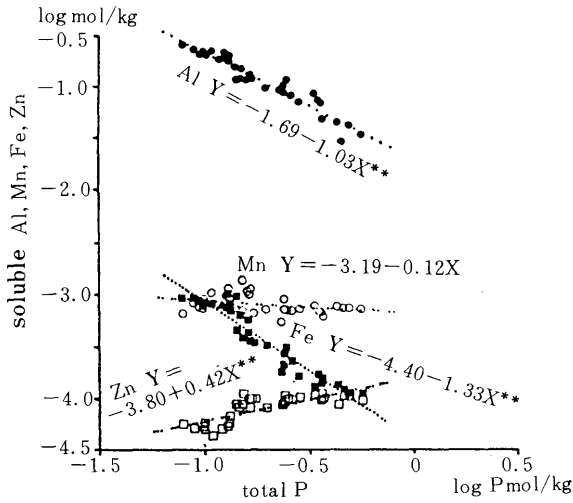
したがって、土壌中Pの溶解度はP施用直後の急速な非可給化が終了した後も徐々に非可給化が進むと考えられ、先に述べた本試験の緩やかなPの非可給化はこの結晶化に伴うものと考えた。

### 3. 土壌中金属元素濃度

各P水準土壌の各種金属元素の弱酸可溶性画分等とP全量との関係を第9図に示した。各々の分析法は先に述べたとおりで、一般的な方法で実施した。

各々の分析値の対数をプロットすると、マンガン(Mn)はP全量の増加にかかわらずおおむね一定の値で、アルミニウム(Al)及び鉄(Fe)は右下がりの直線的関係に、また亜鉛(Zn)は右上がりの直線的関係にあった。

一般に、火山灰を母材とする土壌でのPの非可給化には先に述べたとおり、PとAl及びPとFeによる難溶性塩の生成が大きく関与しているとされ、土壌中のPの増加による活性なAl及びFeの減少が容易に予測できる。また、灰色低地土を用いて実施された実験<sup>4)</sup>では、P増加にともない、Znが減少し、当該土壌に栽培された大豆のリン酸過剰障害は、Zn欠乏と推定されており、この結果は、本報で示した結果には一致しない。これは、黒ボク土で、活性なAlが多



第9図 total Pと各金属可溶性濃度との関係 (1987.6採土)

く、Pが優先的にAlと反応した結果であろうか。

P全量とZn全量との関係を実数でプロットすると、第10-1図のとおりで、Pの増加に対し、Znは直線的に増加している。またZn全量に対する、可溶性Znの関係は、第10-2図のとおりで、これらの関係から、Pと可溶性Znの直線関係は、Zn全量の増加によるものと推察された。第10-1図の回帰直線の傾きは、 $0.764 \times 10^{-3}$ で、仮にZnの増加が資材に起因とした場合、溶脱等によるP及びZnの作土域からの移動を無視すれば、資材(重焼リン)約P1300 moleに対し、Zn1 moleが含まれていたと推定される。

第5図に示したPとAl及びFeとの関係は、次のとおり整理される。

$$[Al] \cdot [P]^{1.03} = 10^{-1.69} \quad \text{〔式9〕}$$

$$[Fe] \cdot [P]^{1.33} = 10^{-4.40} \quad \text{〔式10〕}$$

この関係は、[P]と[Al]及び[Fe]が平衡的な関係にあることを示すもので、土壤中のPと可溶性Alは1 mole : 1 mole, Pと可溶性Feは1.3 mole : 1 moleの関係で対応しているものである。

土壤中Al濃度は、非晶質Al(OH)<sub>3</sub>の溶解反応によって規定される<sup>1,13)</sup>とされており、本報の可溶性Alの浸出条件であるpH 4における平衡状態におけるAl濃度は、約 $10^{-2.3}$ Mで、P低水準サンプルの浸出液中濃度におおむね一致した。高リン酸水準サンプルで可溶性Alが少ないのは、Al(OH)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>の生成に伴うAlの溶解度の低下によるものと推定できる。

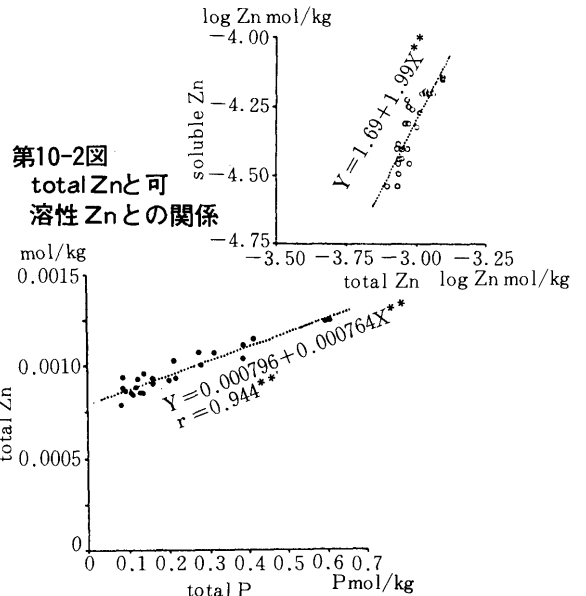
#### 4. リン酸吸収係数

本試験で分析を行ったP吸収係数は、土壤保全事業等<sup>20)</sup>広く実施されているが、土壤のP吸収容量とは直線関係にはないと言われている<sup>15,18)</sup>

南条ら<sup>18)</sup>は、この分析法の欠点を補う方法を検討し、この方法が、無機非晶質成分含量と直線関係のあることを確認している。また次に示した両者の値の関係を示す補正式を提示している。

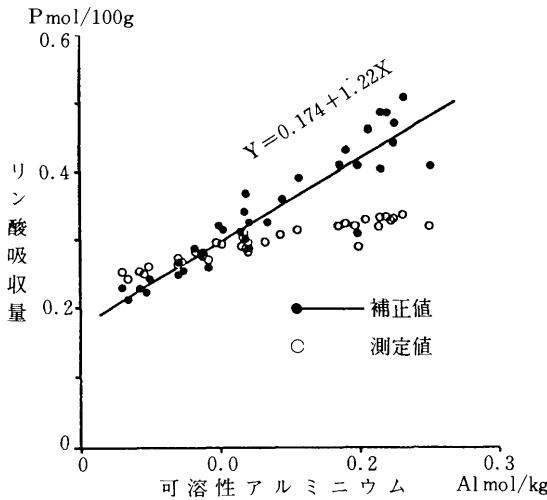
$$V = x \cdot \left( \frac{710}{2690 - x} \right)^{0.45} \quad \text{〔式11〕}$$

Al量とP吸収量との関係については、特定のAl画分がP吸収量と関係が深いとする報告<sup>9, 31, 32)</sup>



第10-1図 total Pとtotal Znとの関係

第10-2図 total Znと可溶性Znとの関係



第11図 可溶性アルミニウムとリン酸吸収量との関係

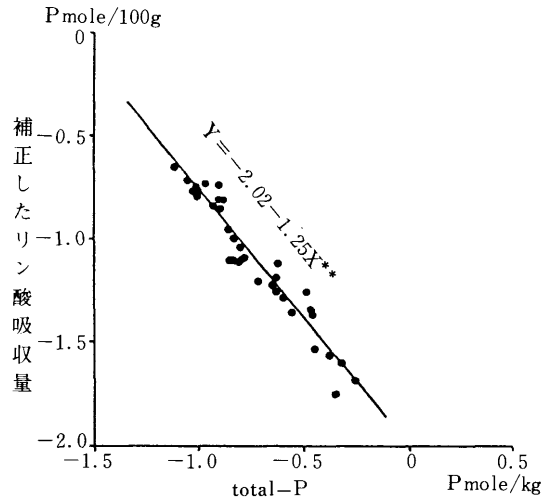
があり、またそれらの報告では、そのAlがリン酸吸収の主要因と推定している。可溶性AlとP吸収係数及び補正されたP吸収量との関係を第11図に示した。補正されたP吸収量と可溶性Alとの関係はややばらつきが大きいものの直線的な関係にあり、Al可溶性画分とP吸収との関係が期待される結果であった。

またP全量と補正されたP吸収量との関係を第12図に掲げた。両者の関係は、可溶性アルミニウムとP全量との関係と同様に、各々の対数値間で、直線的に減少した。

### 5. CEC

土壤に対するP施用が土壤のCECを上昇させることは、以前から多数報告されている<sup>5,17,22,25,27</sup>。各P水準の土壤に対し、常法(セミマイクロSCHOLLENBERGER法)によるCECとP全量との関係を第13図に示した。P施用後4ヶ月~79ヶ月までの間に5回分析し、各々の時期において、CECはP全量の対数値に対しおおむね直線的に増加した。

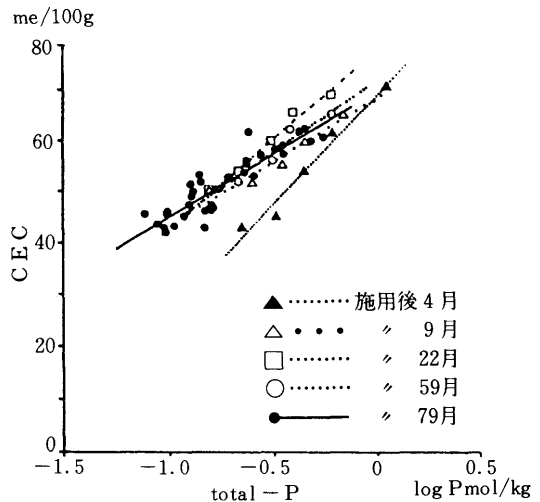
5回の時期別分析値を比較すると、第1回目の施用後4ヶ月が他に比べて、目立って低く回帰直線の傾きも他と異なっている。これは、前述の、土壤と施用されたPとの間の1次の反応



第12図 全リン酸とリン酸吸収量

が済んでない状態で、土壤粘土の変化が不完全な状態と考えられ、したがって、土壤のCECの発現も十分ではなかったと推察した。その後、CECは上昇し、施用後22ヶ月が最も高く、それ以降は、徐々に減少する傾向にあった。

黒ボク土に対するP添加土壤のCECの上昇と経時的な減少については他にも報告<sup>27</sup>があるが、これによればCEC上昇は、施用直後急速に上昇し、5ヶ月後が最も高く、P 1 mmoleに対するCEC上昇は0.84 meqであったものが



第13図 total-PとCEC(常法)との関係の経時変化



その後徐々に減少し、1年後には、0.53 meq になったとしている。先にも述べたとおり土壌へのP吸着量とCECの増加量は、直線的ではなくP水準が低いほどCEC増加率は高い傾向にあるが、本試験でCECがもっとも高かった22ヶ月後の増加率はおおむね0.54～1.17 meq/Pmole、また69ヶ月後には、0.45～1.12 meq/Pmoleであった。先の報告に比べ、経時的な減少の程度はやや小さい傾向はあるが、増加率の水準は、近い値にあった。

また $\text{KH}_2\text{PO}_4$ で前処理された火山灰土壌のCEC増加率は、各種土壌で多少のばらつきはあるもののおおむね0.6meq/Pmoleであったと報告<sup>25)</sup>され、さらに、各種鉄質熱帯土壌に対する $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 前処理後のCEC増加率は0.8 meq/Pmole前後であったと報告<sup>17)</sup>されており、本試験の結果と同水準にあった。

平衡溶液にリン酸塩を用いたカチオン吸着実験に関する報告として、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ や $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 溶液を用いた場合、KClや $\text{NaNO}_3$ 等他の酸根を持つ塩を用いた場合より、吸着量が多くなる<sup>24)</sup>。またpH7、1N酢酸アンモニウムでCEC43.1 meq/100gだった黒ボク土がリン酸アンモニウムでは185.3meq/100gになったという報告<sup>21)</sup>もある。

一方、一般にCEC発現に対してpHと塩類濃度が影響すると言われ<sup>29)</sup>特に火山灰由来の、アロフェンやAl、Fe腐植複合態を母材とする土壌は、陰荷電の多くの部分がpH依存性で、CECに対するpHの影響が非常に大きいとされている。さらにWADA, OKAMURA<sup>30)</sup>は、土壌のタイプ別にCECに対するpHと塩類濃度の影響を明らかにするためこれら2種のファクターとCECとの関係を次の式で示している。

$$\log \text{CEC} = a + b \cdot \text{pH} + c \cdot \log [C] \quad \text{〔式12〕}$$

ここで、a、b及びcは定数及び係数、[C]は平

衡溶液の塩類濃度。

更にここで、前述のCECに対する土壌P濃度の影響を明らかにするため、本試験の処理土壌について、P施用後79ヶ月の土壌について、WADA, OKAMURA<sup>30)</sup>の方法により各P水準土壌のpH-荷電曲線を測定し、その結果を第14-1～3図に示した。土壌への吸着処理には0.005～0.1Nの $\text{NH}_4\text{Cl}$ を用い、平衡溶液のpHは3～8の範囲で5水準であった。各サンプルのP全量は第14-1図に示した。

各リン酸水準とも各々の平衡溶液濃度でpHの上昇に対し、陰荷電量(CEC)は上昇し、陽荷電量(AEC)は減少した。また、土壌への吸着処理の $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度の上昇に対し、CECは増加した。

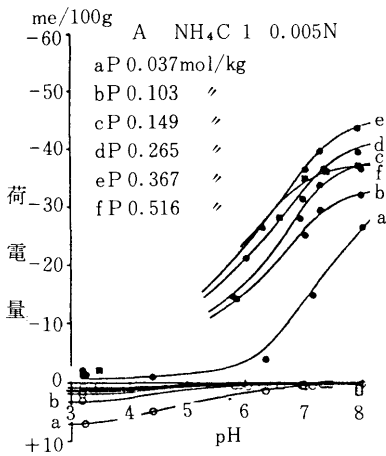
土壌P水準別にこれらの関係を見ると、サンプルfを除き、pH及び $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度の各水準で、リン酸水準が高いものほどCECは高く、またAECは小さくなった。またサンプルaを除き、pHの高い領域でのCECの増加の程度が頭打ちになる傾向にあった。サンプルaは、試験圃場に隣接する森林の表土で未耕土であり、リン酸水準が最も低い土壌である。

またサンプルfは、当該サンプルの採取の約1年前に、重焼リンの追加と、作土深を約2倍にする深耕を施した処理区の土壌であった。特に高pH領域でのCECの頭打ちが激しく、他のサンプルとは、異なったパターンを描いた。

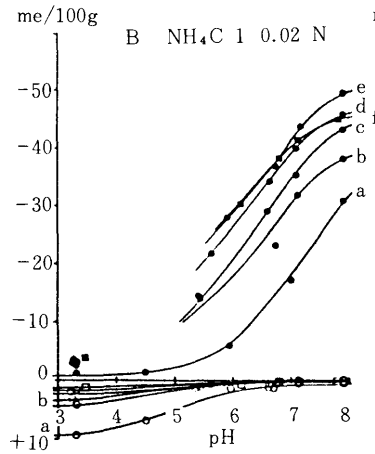
また、pHの影響を排除するため第14-3図からpHに対するCECを読み取り、土壌のリン酸濃度との関係を第15図にプロットした。各pHにおける両者の関係は、右上がりの直線に回帰し、この関係は、次の式で表せる。

$$\log \text{CEC} = d + f \cdot \log [P] \quad \text{〔式13〕}$$

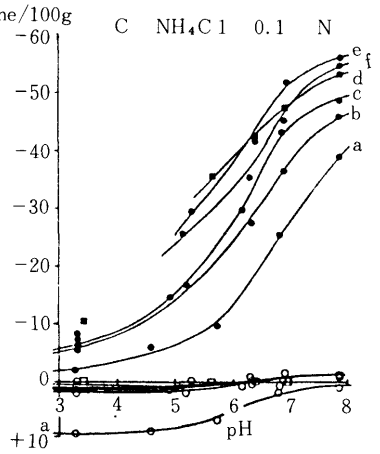
ここで、d、fは定数及び係数、[P]は土壌中リン酸濃度。式12及び式13はそれぞれ次のとお



第14-1図 リン酸水準別の pH—荷電曲線 (A)



第14-2図 リン酸水準別の pH—荷電曲線 (B)



第14-3図 リン酸水準別の pH—荷電曲線 (C)

り変形される。

$$CEC = 10^a \cdot 10^{b \cdot pH} \cdot [C]^c \quad \text{〔式12'〕}$$

$$CEC = 10^d \cdot [P]^f \quad \text{〔式13'〕}$$

両式から

$$CEC = g \cdot 10^{b \cdot pH} \cdot [C]^c \cdot [P]^f \quad \text{〔式14〕}$$

が得られる。ここで  $g$  は係数。更に両辺の対数をとって、

$$\log CEC = \log g + b \cdot pH + c \cdot \log [C] + f \cdot \log [P] \quad \text{〔式15〕}$$

となる。

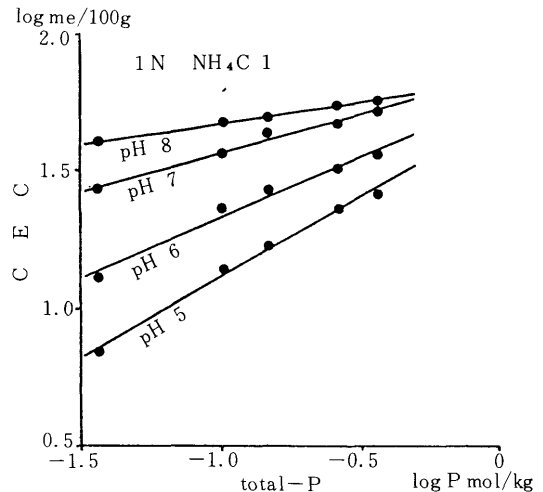
本試験の pH—荷電曲線の分析値からこの式により求められた回帰式は次のとおりである。

$$\log CEC = 0.337 + 0.279 \cdot pH + 0.259 \cdot \log [C] + 0.460 \cdot \log [P] \quad \text{〔式16〕}$$

また AEC に関しても同様の関係が認められ、これらの回帰式の各標準回帰係数及び重相関係数を第3表に示した。各々の重相関係数は C E

C 0.928, A E C 0.585 で、特に C E C に関してこの式は良く説明していると判断された。さらに C E C に関する各標準回帰係数を比較すると、 $pH \ 0.876 > [P] \ 0.307 \geq [C] \ 0.265$  で、pH の影響が最も大きく、次いで  $[P]$ 、 $[C]$  がおおむね同程度と判断され、黒ボク土に対する P 施用による C E C の上昇の効果は、溶液中塩類濃度の上昇と同程度の影響力があると判断された。

この回帰式に基づく C E C の推定値と、分析



第15図 各pH水準におけるtotal—Pと C E C との関係

第3表 CEC及びAECに対する各回帰係数及び定数

項目	CEC				AEC			
	定数	pH	log[C]	log[P]	定数	pH	log[C]	log[P]
回帰係数	0.337	0.279	0.259	0.460	8.06	-0.840	0.055	-8.94
標準回帰係数		0.876	0.265	0.307		-0.286	0.001	-0.457
(重相関係数)	(R <sup>2</sup> =0.928)				(R <sup>2</sup> =0.585)			

値との関係を第16図に示した。本式はCEC、AECの推定を目的とするものではないが、特にCECの高い領域で推定値が分析値より高くなる傾向がある。これは先に述べたとおり、P高水準土壌は、pHの高い領域でpHの上昇に対し直線的に上昇せず頭打ちになっているのに対し、回帰式では、直線を当てはめており、推定値がこの領域のCECを過大に評価しているのが主な原因である。

#### IV 総合考察

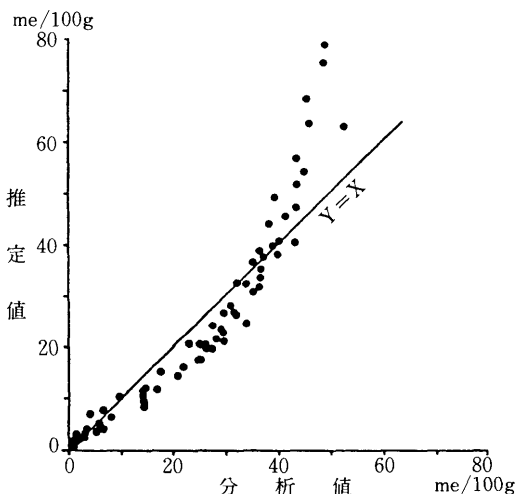
黒ボク土にPを施用したときの問題点は、そのほとんどがPの特異吸着に関係するものである。最も大きな問題は、作物に対するP供給に関わるPの非可給化で、耕地土壌としての黒ボク土の最も大きな特徴であり、欠点となっている。これは、本試験の結果や他の報告から判断し、急速に進行する土壌中活性Alとの反応に

よる非晶質Al(OH)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>の生成と緩やかに進行する結晶化によるものと考えられるが、現在、この溶解度を高める手段は、開発されていない。したがって現在、黒ボク土のPに関する土壌管理は、この土壌とPとのシステムの中で考えざるをえないもので、このシステムによるPの非可給化の程度と速度を適切に予測し、それに応じた対策が必要であろう。

黒ボク土に対するP多量施用は、当該土壌に対する最も有効な改良対策として多数実施されており、P施用後急速に可給化率が減少し、その後は徐々に減少することは、経験的に一般に知られている。本試験の結果の分析から、P多量施用後の可給態Pの半減期は、150~170月程度と推定され、約14年で1/2になることが予測され、土壌管理のよりどころの一つとなることが期待される。

またP吸着にともなって、活性Al及びFeが減少し、おそらくこのことによって、P吸着量が減少することが明らかとなったが、P施用量と、P吸着量減少量を比較すると、この事に関しては実際の土壌管理上の大きなメリットになったとは言いがたい。

さらに、P吸着量1mole当り0.8meq程度CECが上昇し、CEC決定の要因としてのP濃度は、溶液中塩類濃度と同程度の影響力があることが明らかとなった。黒ボク土のCECはその多くの部分がpH依存性であり、P吸着に伴うCEC増加分についてもやはりpH依存性で、元来腐植質黒ボク土は、CECが大きいことと考え併せると、この点でも大きなメリットとは考えにくい。



第16図 CEC分析値と推定値との関係

これらの黒ボク土に対するP多量施用に伴ういくつかの土壌の性質の変化から考えると、一定水準以上の生産性を確保するためのPに関する黒ボク土の管理は、施肥P（非可給化していないP）の高い可給性を有効に活用しながら、必要最小限の可給態P水準を常に維持するようにするのが最も効率的であろう。

### V 摘 要

腐植質黒ボク土における、リン酸多量施用後の土壌中Pの可給性の変化と土壌の各種性質の変化を把握するため、各種分析と分析結果に対する検討を行い、その概要は、次のとおりであった。

1. TRUOG法, BRAY II法, 水溶性及び土壌溶液中P分析値とP全量との関係は、各々の対数値において直線または、単純な曲線の関係にあり可給性の指標としての分析法としては優劣の差がないと考えられた。
2. 土壌中Pの可給化率は、P全量と施用後の経過時間に規定されることを見だし、TRUOGPに関し次の式を導いた。  

$$TRP = 0.331 \cdot T_oP \cdot 10^{(-0.00179 \cdot m - 0.135 \cdot T_oP - 0.965)}$$
 この回帰式の半減期は、168月であった。
3. P全量の増加に対し、可溶性Al及びFeは両項目対数値で、直線的に減少し、Pとの反応による難溶化によるものと考えた。
4. 補正されたP吸収量は、可溶性Alと直線的な関係にあり、P吸収に可溶性Alが関係していると考えた。
5. P多量施用により、CECが0.8meq/Pmole程度増加した。pH-荷電曲線を測定し、CECに対するP濃度の影響の程度を検討し、溶液中塩類濃度と同等であることを見いだした。

### 引用文献

1. G. H. BOLT, M. G. M. BRUGGENWERT 編著, 岩田進午・三輪叡太郎・井上隆弘・陽捷行 訳: 土壌の化学, 129~138 (1980)
2. R. H. BRAY・L. T. KURTZ: Soil Sci; 59, 39~45 (1945)
3. 土壌養分分析法委員会: 土壌養分分析法, 225~227 (1976), 養賢堂
4. 二見敬三・藤井浩: 兵庫農総センター研報, 33, 21~26 (1985)
5. G. P. GLILLMAN・R. L. FOX: Soil Sci. Soc. Am. Proc; 44, 934~938 (1980)
6. N. GUNJIGAKE・K. WADA: Soil Sci; 132, 347~352 (1981)
7. 原田靖生: 土肥誌, 55, 273~283(1984)
8. PA HO HSU: Soil Sci; 133, 305~313 (1982)
9. 本名俊政・大羽裕: 土肥誌, 56, 306~313 (1985)
10. 亀和田國彦他(関東土壌養分基準検討会): 土壌養分の適正水準と上限値に関する研究, 5~30 (1987)
11. 亀和田國彦・岩崎秀穂・粕谷光正・佐藤文政: 栃木農試研報, 33, 17~32 (1987)
12. 金子文宣・渡辺春郎: 千葉農試研報, 27, 53~59 (1986)
13. 加藤秀正・本島俊明・岡 紀邦: 土肥誌, 56, 285~291 (1985)
14. 加藤秀正・岡 紀邦・亀和田國彦: 土肥誌, 58, 27~34 (1987)
15. 川村三郎・中島照夫: 土肥誌, 43, 364~370 (1972)
16. 古賀野完爾: 水田土壌とリン酸, 59~86 (1984), 日本土壌肥料学会編, 博友社
17. T. MEKARU・G. UEHAYA: Soil Sci. Soc. Am. Proc; 36, 296~300 (1972)
18. 南条正巳・鶴野慶吉・渡辺裕: 土肥誌, 55, 325~331 (1984)

黒ボク土における土壤中リン酸と作物の生育に関する研究 (第2報)

19. M. NANZYO: COMMUN. in Soil Sci. Plant Anal; 18, 735~742 (1987)
20. 農林水産省農産園芸局農産課: 土壤環境基礎調査における土壤, 水質及び作物体分析法, 86~87 (1979)
21. 小野信一・内田好哉: 土肥誌, 50, 555~560 (1979)
22. R. L. PARFITT・R. J. ATKINSON: Natur, 264, 740~741 (1976)
23. J. C. RYDEN・J. K. SYERS: Soil Sci; 123, 353 (1977)
24. E. B. SCHALSCHA・P. F. PRATT・T. Kinjo・J. AmarA: Soil Sci. Soc. Am. Proc; 36, 912~914 (1972)
25. E. B. SCHALSCHA・P. F. PRATT・D. SOTO: Soil Sci. Soc. Am. Proc; 38, 539~540 (1974)
26. 庄子貞雄・三宅正紀・竹内豊: 北海道農試彙報, 84, 33~39 (1964)
27. 竹迫紘 (関東土壤養分基準検討会): 土壤養分の適正水準と上限値に関する研究, 41~49 (1987)
28. E. TRUOG: Jor. Am. Soc. Agr. : 22, 874~882 (1930)
29. 和田光史: 土壤の吸着現象, 5~57 (1981), 日本土壤肥料学会編, 博友社
30. K. WADA・Y. OKAMURA: Proc. Int. Seminar on Soil Environment and Fertirity Management in Intensive Agricultur. Soc. Sci. Soil Manure, Japan, Tokyo. 811~815 (1977)
31. 吉田稔・宮内信文: 土肥誌, 46, 89~93 (1975)
32. 吉田稔・金谷浩: 土肥誌, 46, 505~511 (1975)
33. 吉川義一・吉田徹志・恒石義一: 土肥誌, 54, 505~511 (1983)

Studies on the relation between soil and growth of crops in Andosols

(II) Alterations in soil phosphorus and several properties of

soil arise from heavy fertilization of phosphorus

Kunihiko KAMEWADA, Ichiro AOKI, Hideho IWASAKI

Mitsumasa KASUYA and Fumimasa SATO

### Summary

In order to determine the change of availability of soil phosphorus (henceforth abbreviated as P) and several properties of soil, various analysis of soil and investigation of the results was done. The conclusion is roughly as follows.

1. Since the relation between the logarithmic value of P measured by BRAY No. 2 method, TRUOG method, water-soluble P, soil-solution P and the value of total P was linear or simple curvilinear, it was assumed that there is little to choose between each method.

2. It was found that available ratio of soil P was determined by total P and passage of time till P fertilization, and so next equation about TRUOG P was derived.

$$\text{TRP} = 0.331 \cdot \text{ToP} \cdot 10^{(-0.00179 \cdot m - 0.135 \cdot \text{ToP} - 0.965)}$$

The half-life of TRUOG P was calculate as 168 months by the equation.

3. The logarithmic value of soluble Al and Fe decreased in proportion to the logarithmic value of total P density. It suggested that it arised from slightly solubilization by reaction with P.

4. Since the relation between quantity of corrected P adsorption and density of soluble Al was linear, it was assumed that soluble Al was related to P adsorption.

5. Heavy fertilization of P arised increment of 0.8meq/Pmole of CEC.

Measuring the pH-charge curve, it was found that density of P has a great influence upon CEC as same as concentration of salinity in soil solution.

( Bull. Tohigi Agr.  
Exp. Stn. No.35 : 63~76 )