

氏名(本籍)	あか 赤	はね 羽	いく 幾	こ 子
学位の種類	博 士 ( 農 学 )			
学位記番号	農 博 第 8 3 7 号			
学位授与年月日	平 成 1 8 年 3 月 2 4 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当			
研究科専攻	農学研究科資源生物科学専攻 (博士課程)			
学位論文題目	水稻収穫後の作土におけるリンの分布とその変動要因 —肥沃度評価の精度向上に向けて—			
論文審査委員	(主 査)	教 授	南 條 正 巳	
	(副 査)	教 授	國 分 牧 衛	
		教 授	三 枝 正 彦	

# 論文内容要旨

## 第一章 序論

リンは近年、世界的に枯渇が懸念される資源の一つである。特にリン資源をほとんど産出しない我国において、リンの効率的利用は重要な課題である。このような中で水田は畑よりもリンの利用率が比較的高く、リン施肥量も少ないことが多いことからリン資源を効果的に利用しやすい食糧生産システムである。しかも、水田作土にはこれまで施与されたリンのかなりの部分は集積したままである。この集積リンは、還元に伴い一部は可給態に変化するため、リンを減肥しつつ利用可能であると期待される。しかし、減肥を続けると水田の生産性が急激に低下する臨界レベルに達すると考えられ、安定な生産を維持するためにはその可給態リンの臨界レベルを精度よく検出する必要がある。

農耕地のリン肥沃度は土壌のリン保持能と可給態リン含量によって評価されるが、水田土壌においては、リン酸イオンの収着・脱着反応の他に酸化還元反応や生物活動の影響があり、リン肥沃度評価の精度を向上する上で検討すべき点が多い。水田土壌では湛水下でリンの可給態化が進む一方、リン保持能の増加あるいは減少がおきる。この酸化還元条件の変化によるリン保持能の増減は、土壌コロイド特性の影響を受ける可能性がある。

水田作土から土壌試料を採取する際には、作土中の養分分布を考慮する必要がある。一般に、水田作土は収穫後の秋耕、春耕、および移植前の代かき等により作土内の養分分布が一旦ほぼ均一化される。しかし、水田作土は湛水により酸化層と還元層に分化し、還元層の土壌から溶出したリンが、酸化層方向へと拡散し、酸化還元境界付近で沈殿集積する可能性がある。窒素については生物活動により表層付近で富化する傾向が報告されており、必ずしもその垂直分布の均一状態は維持されない。また、不耕起栽培の作土では、強還元になりにくいこと、その表面付近に土壌有機物が蓄積されることから耕起法によって酸化還元や生物活性は変化することが知られている。さらには近年普及しつつある移植時の田植機施肥による局所施肥を考慮すると、水田作土のリン分布は均

一でない可能性が高い。

本研究では、水田作土のリン分布に影響する諸要因を検討し、精度高い肥沃度評価をする上での留意点を考察した。第二章では土壌成分のモデル物質を用い、少量の還元剤を添加したときのリン保持能変化を、第三章では、局所施肥された作土におけるリンの分布について、第四章は、作土における各種形態リンの垂直分布を土壌の種類・耕起法の異なる水田で検討した。

## 第二章 部分還元下における土壌成分のリン保持能（モデル実験）

低地土壌に過剰の還元剤を加えるとリン保持能は減少するが、少量の還元剤を添加すると増加する。この後者の過程に関与しうる土壌成分として、和水鉄酸化物と和水鉄酸化物に含まれるアルミニウム水酸化物、交換性カルシウム、マンガン酸化物などが考えられた。ここでは、少量の還元剤（亜二チオン酸ナトリウム（Na）， $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ）を土壌に加え、部分還元（還元し得る土壌成分量より加えた還元剤の量が少ない状態）したときにこれらの要因がリン保持能にどの程度関係するかを検討した。

### 第一節 少量の亜二チオン酸 Na を添加したときの和水鉄酸化物の影響

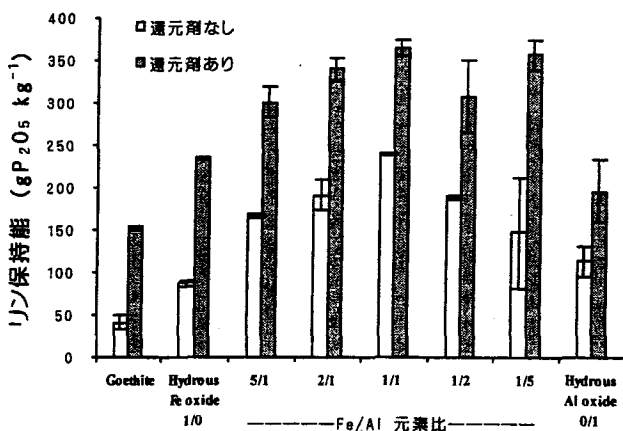


図 1. 部分還元したときの和水鉄酸化物のリン保持能

※エラーバーは STD(標準偏差)。

主要な土壌成分である和水鉄酸化物を部分還元処理したときのリン保持能を検討するために、ゲータイトと、鉄、アルミニウムの元素比の異なる 7 種類の和水酸化物 (Fe/Al = 1/0, 5/1, 2/1, 1/1, 1/2, 1/5, 0/1) を調製し、少量の亜二チオン酸 Na(土壌 2 g 相当のモデル物質に対し, 0.1 g) を加え、部分

還元処理後、さらに 0.14 M リン酸ナトリウム (pH4.3, 0.1 M 酢酸緩衝液) 溶液を加え、反応させた。その結果、鉄、アルミニウムの元素比に関わらず、リン保持能は増加した (図 1)。また、鉄を含まないアルミニウム水酸化物 (Fe/Al = 0/1) でもリン保持能は増加した。よって、この部分還元下の土壌中では和鉄酸化物の影響が大きい、アルミニウム水酸化物の類似成分もリン保持能に影響すると考えられた。

## 第二節 少量の亜二チオン酸 Na を添加したときの交換性カルシウム、酸化マンガンの影響

交換性カルシウムは中性付近でリン保持能に影響を与える。酸化マンガン (IV) は還元により Mn (II) へ変化し、酸化過程においてリン酸マンガンの沈殿を形成する可能性がある。そこでスメクタイト質の八郎型干拓地土壌の Ca 型土壌を調製し、また、和鉄酸化物に酸化マンガン (IV) を段階的に加え (和鉄酸化物 50 mg に酸化マンガン・MnO<sub>2</sub> (IV) を 0, 13, 26 mg 添加)、少量の亜二チオン酸 Na (土壌 2 g に含まれると考えられるモデル物質に対し、0.1 g) を添加し、リン保持能を前節と同様に測定した。その結果、Ca 型と Na 型の間でリン保持能増加量に有意差はなく (図 2)、酸化マンガン (IV) と亜二チオン酸 Na の添加によるリン保持能への影響もみられなかった (図 3)。よって、pH4.3 付近における部分還元条件のリン収着反応に対して交換性カルシウムおよび、酸化マンガンの影響はほぼないことを確認した。

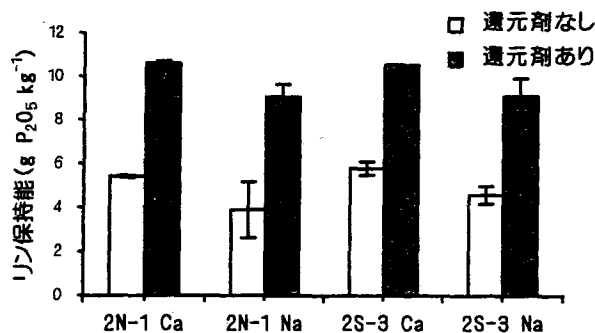


図 2. 部分還元したときの Ca 型, Na 型土壌のリン保持能

Ca 型: 2N-1 Ca, 2S-3 Ca, Na 型: 2N-1 Na, 2S-3 Na

\*エラーバーは STD (標準偏差)。

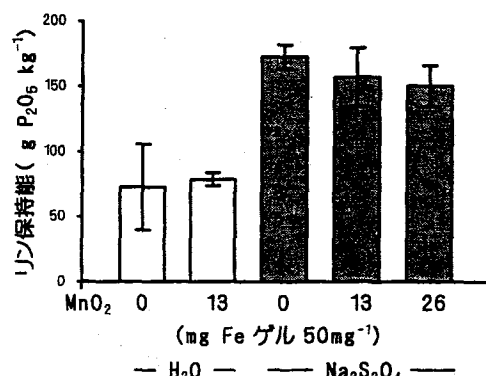


図 3. MnO<sub>2</sub> を添加し、部分還元したときの

和鉄酸化物のリン保持能

\*エラーバーは STD (標準偏差)。

### 第三章 局所施与されたリンの収穫跡地における分布

作土中におけるリンの分布に大きく影響する要因の一つとして、近年普及しつつある施肥田植機による側条施肥の影響を検討した。

#### 第一節 施肥田植機による側条施肥の影響

移植時に側条施肥された水稻収穫跡地 5 圃場（試料名：「宇都宮」，「川渡」，「古川」，「古川ペースト」，「前田」，土壌の種類はそれぞれアロフェン質黒ボク土，非アロフェン質黒ボク土，グライ低地土，灰色低地土。「古川ペースト」ではペースト肥料を使用。）の作土から 2004 年秋に、垂直、あるいは水平方向に土壌を採取し、作土中のリン分布を調べた。「宇都宮」，「川渡」，「古川」，および「古川ペースト」の全リン含量および可給態リン（Truog リン，Bray II リン）の垂直分布においては、いずれの値も施肥位置付近に極大が認められた（図 4，5）。また、「古川」と「古川ペースト」の表層 0~1 cm においては、Bray II リン含量が低くなる傾向があり、生物活動によるリンの形態変化等が考えられた（図 5）。「前田」の Bray II リンの水平分布においては、施肥位置付近で幅約 4~5 cm の極大がみられた（図 6）。可給態リン含量が高くなる垂直方向の範囲は施肥位置付

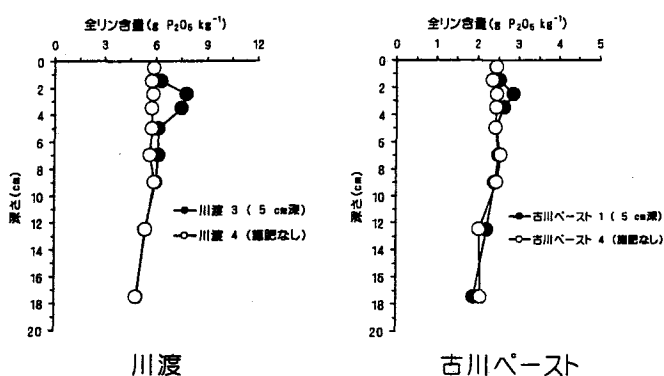


図 4. 側条施肥された作土の全リンの垂直分布

川渡：非アロフェン質黒ボク土，粒状施肥

古川ペースト：グライ低地土，ペースト肥料

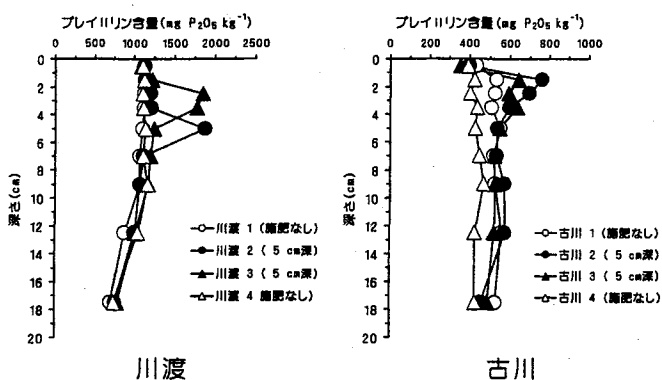


図 5. 側条施肥された作土の Bray II リンの垂直分布

川渡：非アロフェン質黒ボク土，粒状施肥

古川：グライ低地土，粒状肥料

はペースト肥料を使用.)の作土から 2004 年秋に、垂直、あるいは水平方向に土壌を採取し、作土中のリン分布を調べた。「宇都宮」，「川渡」，「古川」，および「古川ペースト」の全リン含量および可給態リン（Truog リン，Bray II リン）の垂直分布においては、いずれの値も施肥位置付近に極大が認められた（図 4，5）。また、「古川」と「古川ペースト」の表層 0~1 cm においては、Bray II リン含量が低くなる傾向があり、生物活動によるリンの形態変化等が考えられた（図 5）。「前田」の Bray II リンの水平分布においては、施肥位置付近で幅約 4~5 cm の極大がみられた（図 6）。可給態リン含量が高くなる垂直方向の範囲は施肥位置付

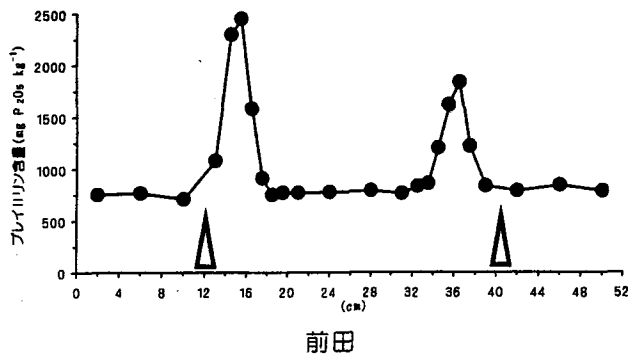


図 6. 側条施肥された作土の Bray II リンの水平分布

前田: 灰色低地土, 粒状施肥

※△は稲株位置. 試料は条間を深さ 2~5 cm, 条方向に約 12 cm, 水平方向に約 1~4 cm の 24 部位に分けて採取した.

近を中心に, 黒ボク土では 2 cm, グライ土では 3 cm, 水平方向には 4~5 cm であった. 以上のように, 水田作土のリン分布には収穫後も局所施肥の影響が強く残っていた. これらのリンの垂直分布を交換性カリウム, マグネシウム, カルシウムの垂直分布と比較したところ, 特に交換性カリウムの分布はリンと異なり, 施肥位置に極大は見られなかった.

## 第二節 側条施肥されたリンの分布とリン保持能との関係

側条施肥されたリンは広い範囲に拡散せず, 施肥位置付近に留まっていた (第三章第一節). 土壌のリン保持能よりも施肥量が少なければ, 施肥リンは作土中で移動しにくいはずである. 土壌のリン保持能は酸化還元状態の変化にも影響を受けるので, 亜二チオン酸 Na 添加で酸化還元状態が変化したときのリン保持能とリン施肥量を比較した. 黒ボク土 (「宇都宮」, 「川渡」) は活性アルミニウム含量が高く, 酸化的条件下でもリン保持能はリン施肥量より充分に高い. そして, 水和鉄酸化物含量も多いので, 還元の進行に

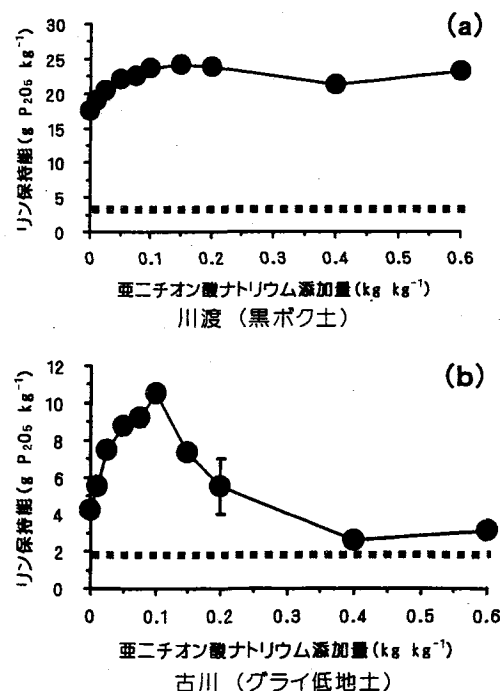


図 7. 酸化還元状態が変化したときのリン保持能の変化

※点線は施肥範囲を深さ 2.5 cm, 幅 4.5 cm, 容積重 1 と仮定したときの施肥リン量.

伴いリン保持能が緩やかに増加し、亜二チオン酸 Na は活性 Al とリンの反応も高めるため、リン保持能が大きく減少することはなかった (図 7 a)。一方、グライ低地土 (「古川」, 「古川ペースト」) は、弱い還元状態において一旦リン保持能が増加したが、さらに亜二チオン酸 Na の添加量を増やすとリン保持能は減少した。しかし、還元が十分に進んだときでもそのリン保持能が側条施肥リンの量よりも高かったために、施肥リンは作土中で移動しにくい状態であったと解釈された (図 7 b)。

#### 第四章 水田作土における化学形態の異なるリンの分布

化学形態の異なるリンの垂直分布を測定し、その挙動に影響する要因を検討した。

##### 第一節 水田作土における化学形態の異なるリンの垂直分布

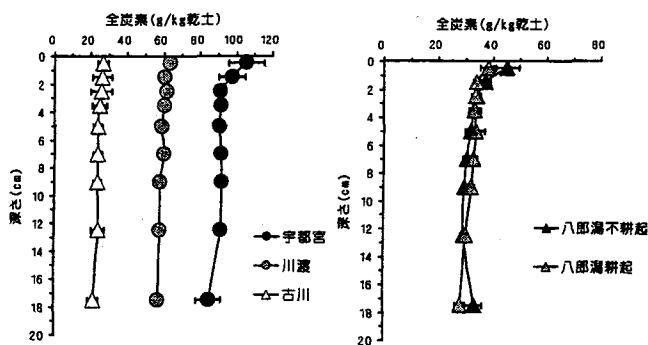


図 8. 水田作土の全炭素の垂直分布

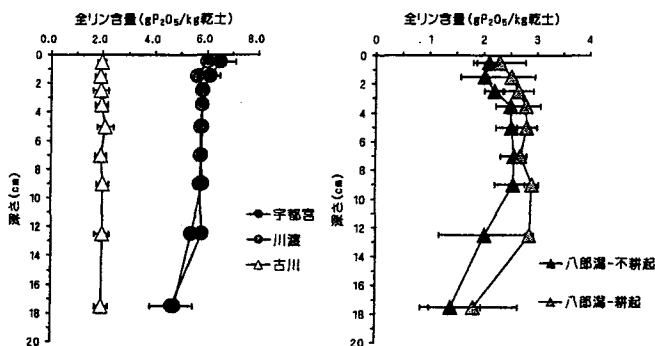


図 9. 水田作土の全リンの垂直分布

第三章で検討した、水稻収穫跡地 3 圃場 (試料名: 「宇都宮」, 「川渡」, 「古川」) と耕起法の異なる 2 圃場から (試料名: 「八郎瀧不耕起」, 「八郎瀧耕起」, それぞれの耕起法になって 5 年目) の作土から垂直方向に土壤

を採取し、作土中における化学形態の異なるリン (全リン, Bray II リン, 有機態リン (Hedley 法)) の分布および全炭素, 全窒素含量の分布を調べた。側条施肥のあった圃場では、

側条施肥部をさけて土壌を採取した。作土における全炭素，全窒素および全リン含量は，黒ボク土（「宇都宮」，「川渡」）>低地土壌（「古川」，「八郎潟不耕起」，「八郎潟耕起」）であり，有機態リン含量は黒ボク土>>低地土壌であった。全炭素，全窒素含量の垂直分布はいずれの圃場においても極表層0~1 cmで高い傾向であり，表層付近における生物活動の影響が示唆された(図8)。全リン含量の垂直分布は作土表層0~3 cmにおいて一定の傾向がみられなかった(図9)。低地土壌の表層付近でBray IIリン分布は相対的に低く(図10)，有機態リンは相対的に高くなっていた(図11)。

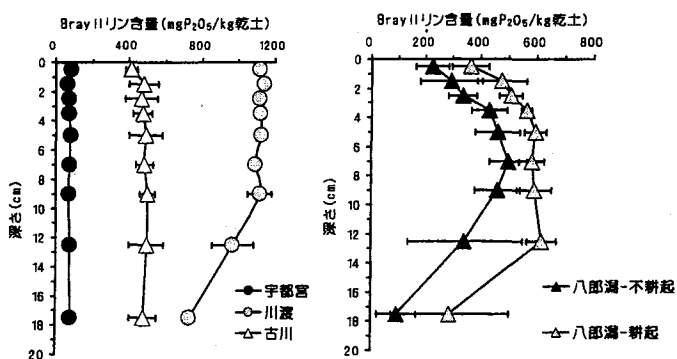


図 10. 水田作土の Bray IIリンの垂直分布

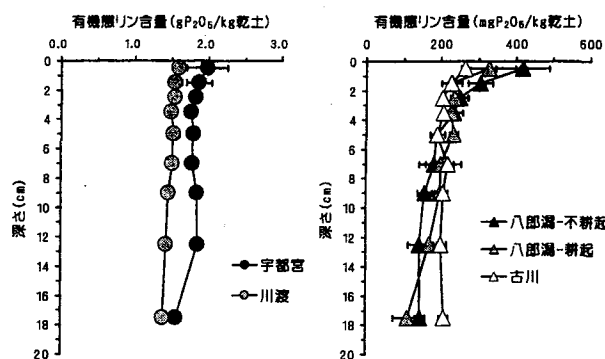


図 11. 水田作土の有機態リンの垂直分布

## 第二節 水田作土における全リンおよび可給態リン，有機態リン含量の相互関係

水田作土中の Bray IIリン含量と有機態リン含量の垂直分布の傾向パターンの違いを比較するために，全リン含量に対する Bray IIリンと有機態リンの割合をそれぞれ  $\text{Bray IIリン} / \text{全リン} \times 100$ ， $\text{有機態リン} / \text{全リン} \times 100$  で求めた。作土の0~3

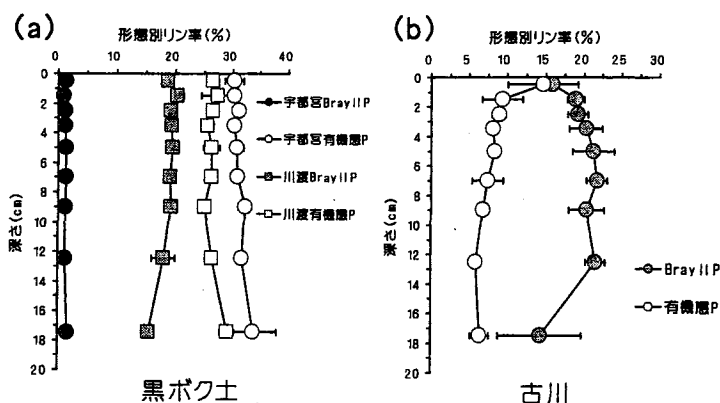


図 12. 水田作土における全リン含量に対する Bray IIリン含量および有機態リン含量の割合の垂直分布①



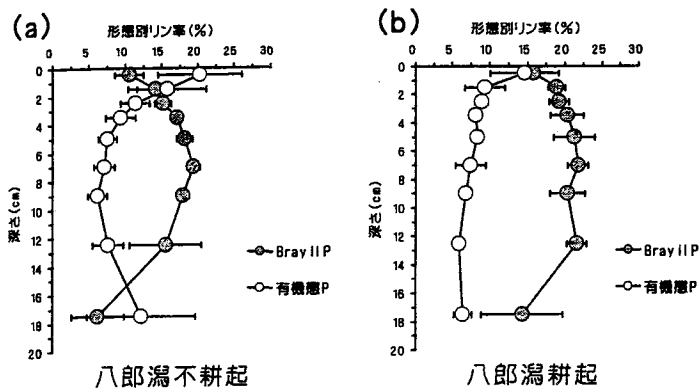


図 13. 水田作土における全リン含量に対する Bray II リン含量および有機態リン含量の割合の垂直分布②

で約 10%であったが、作土 0~3 cm 付近では約 20%となっていた (図 12 b , 図 13). 低地土壤の作土表層付近における Bray II リンの減少分と有機態リンの増加分が近似したことから、作土表層において可給態リンから有機態リンへの形態変化があったと考えられる。この傾向は長期の不耕起により生物活動の影響が表層に蓄積した「八郎瀉不耕起」で顕著であった (図 13 a). 黒ボク土では、全リン含量および有機態リン含量が高く、また全リン含量に占める有機態リン含量が約 30%と高かったことから、作土表層におけるリンの有機化が明らかでなかった (図 12 a).

## 第五章 総合考察

本研究では、水田作土におけるリン分布が施肥法や生物活動の影響を強く受け、不均一であることを明らかにした。特に施肥田植機による側条施肥の影響は近年の新しい現象である。生物活動による垂直分布の変動は全炭素、全窒素含量に関する既往の研究からある程度推測し得るものであったが、極表層における Bray II リン含量の低下と有機態リンの増加との対応は生物活動の影響を強く示唆するものである。

これらの結果は水田土壤の可給態リン含量評価の精度向上に試料採取法の側

cm を除いた低地土壤の全リン含量に対する Bray II リン含量は約 20%であったが、作土 0~3 cm 付近ではそれが約 10%と低下した (図 12 b , 図 13). 一方、全リン含量に対する有機態リン含量は、作土の 0~3 cm を除いた低地土壤

面から寄与すると考えられる。田植機施肥された水田ではその施肥位置を無視すると測定結果に大きなバラツキを生じる可能性が高い。従って、このような水田では当該年に施与された部分をさけて、前年までの施肥の影響が均一化された部分を採取する必要がある。当該年の施肥残存部分は、ブレイⅡ準法の測定値に換算すると、今回の測定値では「川渡」で最大  $40 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 、「古川」で最大  $14 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$  と推定される。さらに極表層の生物活動による影響も無視できない。したがって、深さ方向に作土全体を代表するように試料を採取する必要がある。

田植機施肥の影響が収穫後も作土中に強く残っている事実は水稻に対するリン施肥の効果を生産現場においてさらに詳細に検討するための材料となる。側条施肥されたリンの一部しか利用されないならば、施肥量はさらに減らせる可能性がある。しかしながら、施肥リンの効果は初期の水稻へのリン供給力に表れ、生育に影響する。特に寒冷地においては、初期生育の確保が必須である。したがって、リンの減肥は、生育初期における影響を配慮して検討していく必要がある。

また、水田表層で可給態リンが有機態リンに変換される現象については、さらにその強度と普遍性の検討が必要である。それらが確認されればリンの有機化、再無機化のサイクルと水稻によるリン利用率向上との関係を評価していく価値がある。Märder ら (1999) は有機質肥料を施用した土壌では微生物バイオマスの放出が早いことを報告している。これは微生物バイオマスより放出された有機態リンが、加水分解されやすく、植物に利用可能なリンプールであることを示唆している。土壌に固定された施肥リンが生物活動により有機化することは、土壌蓄積リンの有効化あるいは再利用に繋がる。即ち、施肥リンを作物に利用されやすい作土の部位に濃縮させるような技術開発の糸口になる可能性がある。

## 論文審査結果要旨

リンは肥料の三要素のひとつとして農耕地に多量に施与される。しかし、土壌に対する収着が強いために作物による利用率は低い。しかも、リン資源の大産地はモロッコ、フロリダ半島、コラ半島に局在し、その寿命も危ぶまれるに至っている。リン資源の主要な消費先は肥料製造であり、資源延命のためには土壌中の可給態リン含量を正確に評価し、効果の低いリン施肥は控える必要がある。

本論文では水田作土の可給態リン含量を評価する際の試料採取法に関係する事項について新知見が明らかにされた。それは近年の施肥法に起因するものと水田作土表面の生物活動によるものである。特に前者は可給態リンの測定値に与える影響が大きい。慣行栽培における水田作土は毎年耕起、代掻きされ、一旦均一化される。従前のリン施肥は耕起前の元肥中心であり、リンの分布も一旦均一化された。しかし、近年の施肥田植機の普及により、施肥は田植えと同時にされる。窒素やカリは溶解しやすいので施肥位置に留まらないが、リンは土壌に固定され、水稻等に利用されなかったリンは施肥位置に残存することが明確に検出された。この結果は定性的には黒ボク土水田でも、低地土水田でも同様であった。黒ボク土はリン固定力が強いのでリンが施肥位置に留まる事実は理解しやすいが、低地土でも類似の結果であった。低地土では還元が進むと第2鉄は第1鉄に変換され、リンを固定しにくくなるが、粘土鉱物端面等の活性Alには固定されうる。低地土でも施肥田植機による施肥リンがその場に検出されたのは施肥量が還元状態のリン保持能よりも少ないためと推定された。

もう一つの可給態リン分布に影響する因子は田面付近の生物活動であった。炭素や窒素の含量は田面付近の生物活動により増加することは既知である。この部分で生物遺体が増加するならその内部に保持されるリンも増加するはずである。このことは田面における可給態リンの減少と有機態リンの増加として検出された。この効果は、耕起区ではあまり大きなものにならないようであったが、不耕起水田では相対的に大きかった。

以上の結果から、可給態リン測定の際の土壌試料採取は施肥田植機による施肥位置を避け、深さ方向には作土全体を均一に反映する採取法が必要であることが明らかになった。施肥田植機による施肥位置は機械の施肥ノズルの位置関係やわずかに田面に残るノズルの通過跡からかなり推定可能である。今回の発見は、今後、リンの残存状況が精密に測定されれば、1作期間における田植機施肥されたリンの収支が、同位体に頼らずに現場において評価される可能性が出てくる。これが達成されれば、全作までの部分とあわせてリン肥沃度評価の精度はさらに向上するであろう。

以上から、本論文は博士（農学）を授与するにふさわしいと判断した。