

第 III 章 リン鉱石直接施用効果の検証

ガーナ農家圃場におけるリン鉱石直接施用効果

リン鉱石は、重過リン酸石灰 (TSP) や過リン酸石灰 (SSP) に代わる安価なリン肥料として有望な資源である (Chien *et al.*, 2010)。トーゴ、モロッコをはじめとするアフリカ各国にはリン鉱床の存在が確認されており、その適切な施用方法の検討は急務である。中でも、リン鉱石を直接圃場に施用した際の肥効は、リン鉱石利用における基礎的な知見となり得る。

前年度試験において、リン鉱石直接施用がガーナ稲作におけるイネ収量増加に有効であることが示された。その施用効果は TSP を十分に代替できると判断された (JIRCAS, 2011)。しかしながら、前年度試験の結果は、計 4 地点における単年度の試験結果であり、その普遍性及び再現性を評価する必要がある。また、リン鉱石は化学肥料に比して残効が高いことが知られており、リン鉱石直接施用における残効の評価は、適正施用量を明らかにするために必要であると考えられる。

そこで、本年度試験においては、前年度試験と同様にリン鉱石直接施用によるイネ増収効果を明らかにするとともに、その残効を評価することとした。

材料及び方法

調査地

ガーナ共和国ノーザン州タマレ市近郊及びアシャンティ州クマシ市近郊の稲作圃場を対象とした。ただし、アシャンティ州試験地におけるイネ生育が大幅に遅れ、データ解析が不十分なため、本稿においては、ノーザン州における試験結果について報告する。

試験設定

リン鉱石直接施用効果の再現性評価試験

ノーザン州タマレ市近郊及びアシャンティ州クマシ市近郊の各 2 地点において 0kg、67.5kg、135kg、270kg P_2O_5 ha^{-1} のリン鉱石直接施用区 (それぞれ Control、RP-Low、RP-Mid、RP-High 区) を設定した。また対照として、270kg P_2O_5 ha^{-1} の TSP 施用区 (WSP 区) を設定した。全ての処理区には、基肥として、ガーナ北部地域の稲作における化学肥料施用量の推奨値である 60 kg N ha^{-1} の硫酸アンモニウム及び 30 kg K_2O ha^{-1} の塩化カリウムが施用された。なお、リン鉱石はイネ移植の一週間前に施用さ

れ、窒素肥料の半量とカリ肥料及び TSP は、移植一週間後に施用した。窒素肥料の残り半量については、追肥として移植五週間後に施用した。各処理の概要を表 III-1 に示す。

表 III-1. 二つの調査対象地域の調査圃場における施肥設計(kg ha⁻¹)

Treatments	P source	Ashanti			Northern		
		P ₂ O ₅	N	K	P ₂ O ₅	N	K
Control	None	0	90	60	0	0	0
RP-Low	BRP	67	90	60	67	60	30
RP-Mid	BRP	135	90	60	135	60	30
RP-High	BRP	270	90	60	270	60	30
WSP	TSP	270	90	60	270	60	30
WSP-Rec	TSP	60	90	60	-	-	-

リン鉱石直接施用効果の残効評価試験

前年度実施したリン鉱石直接施用効果試験の試験区を二分割し、リン肥料の連年施用区と隔年施用区を設定した。連年施用区においては、上述のリン鉱石施用水準と全く同じ水準で、本年度試験を実施した。隔年施用区においては窒素及びカリウム肥料は前年と同様に施用し、リン肥料については全て無施用とした。

分析方法

両調査地域において、表層 0-20cm 深の土壌を採取し、風乾後、2mm 径の篩で篩別した。この風乾細土試料を以下の各項目の分析に供試した。

土壌 pH は、風乾細土試料 1g あたりに 2.5ml の蒸留水を加え、一時間振とうしたものを静置し、上澄みについてガラス電極法により pH を測定した。全炭素については Sumigraph NC220F を用いた乾式燃焼法、もしくは Walkley-Black 法により定量した (Walkley & Black, 1934)。なお、Walkley-Black 法は IUSS により定法として紹介されており、乾式燃焼法による定量値と比較検討が可能である。全窒素は乾式燃焼法及びケルダール蒸留法 (Bremner & Mulvaney, 1982) により定量した。

有効態リン含量は Bray and Kurtz (1945) に従って抽出後、モリブデン青法により発色し、分光光度計により定量した。

結果

各調査地の土壌条件の概要

各調査地における土壌 pH、全炭素、全窒素及び有効態リン濃度等の土壌特性を表 III-2 に示す。前年度試験開始前の土壌では、ノーザン州の 2 村の土壌条件につい

ては、pH はいずれも弱酸性条件であり、有効態リン濃度に大きな差異が認められた。しかしながら、本年度の栽培前土壌においては有効態リン濃度の差異は小さくなっていった。

表 III-2. 調査地における土壌の化学的諸性質

Location	pH (H ₂ O)	Ava-P Bray-1 mgP kg ⁻¹	T-C %	T-N %	C/N	Exchangeable Cations				Exchangeable Acidity			eCEC	BSR %
						Ca	Mg	Na	K	H	Al	Sum		
						cmolc kg ⁻¹								
Fuu	5.70	2.55	0.97	0.07	12.8	4.46	1.48	0.12	0.13	0.39	0.24	0.63	6.81	90.8
Gbrimah	5.52	2.09	0.40	0.04	10.1	2.44	0.80	0.15	0.09	0.50	0.52	1.02	4.51	77.3

ノーザン州におけるリン鉱石直接施用がイネ収量に及ぼす影響

リン鉱石直接施用における施用量が収量に及ぼす影響について、前年度試験結果を図 III-1 に、また本年度試験結果を図 III-2 に示す。本年度試験においては、試験地の一つである Fuu 村における旱魃の影響で、試験区のイネが不稔もしくは枯死したため、収量調査が実施出来なかった。そこで、本年度試験結果については Gbrimah における試験結果のみを示す。

ノーザン州調査地においては、完全無施用のゼロ施用区とリン無施用区である NK 区を設定している。ゼロ施用区は農家慣行と考えられ、リン施用の影響を評価するには NK 区を対照として比較する必要がある。ノーザン州におけるリン鉱石直接施用はイネ収量に対し有効に作用するとともに、その施用量が多いほどイネ収量は高い値を示した。しかし、調査地における NK 区のイネ収量は約 3.3t ha⁻¹ であり、リン鉱石多量施用区である RP-H の値とほぼ同値であった。また完全施肥区である TSP 区では 2.6t ha⁻¹ であり、リン無施用区である NK 区は各処理区におけるイネ収量において最高水準の収量を示した。

この結果は、NK 区と他の処理区の差異が施用したリン酸量のみであることから、TSP を含むリン肥料を施用したことで、イネ生育が制限された可能性を示している。可能性としては、多量に施用されたリンが土壌中の微量必須元素等と反応することで不溶化し、植物不可給態となることで制限要因になる等の可能性が考えられる。しかしながら、低リン酸土壌である当該調査地において、リン酸よりも大きく作用する植物栄養学的な生育制限要因は考えにくい。原因は明らかでないが、リン無施用区が完全施肥区の収量を大幅に上回ったことから、この NK 区収量をリン鉱石直接施用効果の評価に組み込むのは適切でないと考えられる。

そこで、化学肥料施用区と比較すると、全てのリン鉱石施用区のイネ収量は TSP 区の収量との間に顕著な差異は認められず、ほぼ同様の収量を得られることが示され

た。また、有意差はないもののリン鉱石施用量の増加に伴い、収量の増加が認められた。この結果は、リン鉱石直接施用により、化学肥料を代替することが出来るという前年度結果を支持している。しかしながら、旱魃等の影響により、リン鉱石直接施用効果の再現性が十分に評価されたとは言えないため、赤道森林帯における結果の解析と、次年度試験において継続的に評価することが肝要であると考えられる。

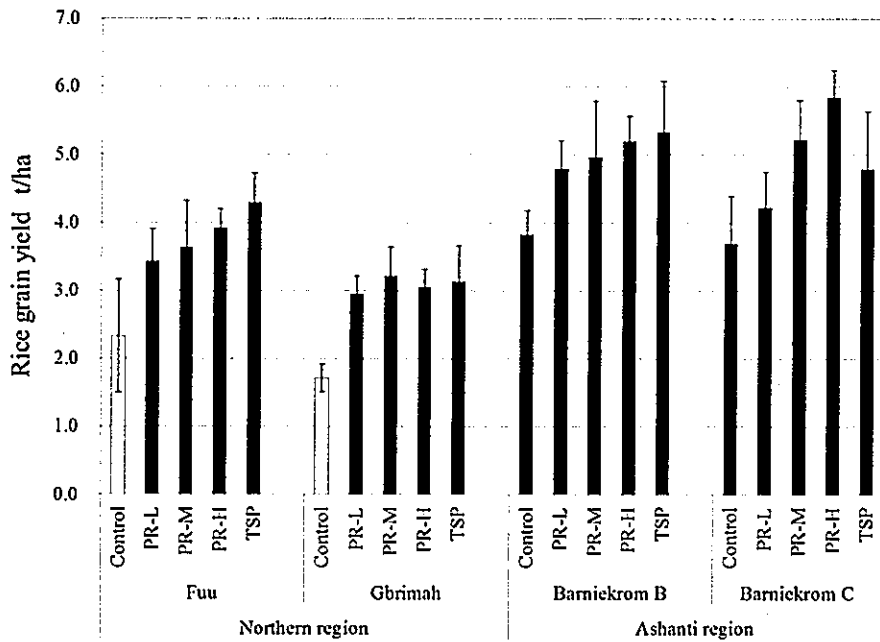


図 III-1. リン鉱石直接施用がイネ収量に及ぼす影響(2010 年度結果より)

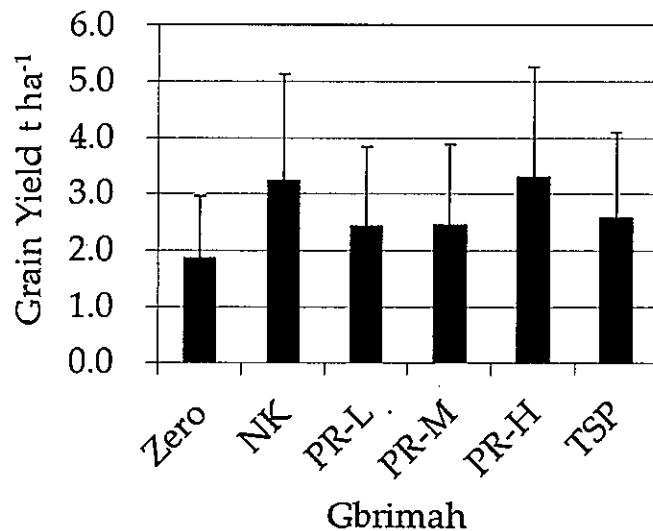


図 III-2. ノーザン州におけるリン鉱石直接施用がイネ収量に及ぼす影響

また、2010 年度試験終了後のノーザン州及びアシャンティ州の各 2 地点における、イネ栽培前及び栽培後土壌の有効態リン含量を図 III-3 に示す。籾収量と同様に、リン鉱石の施用量に応じて、栽培後土壌試料の有効態リン含量は高い値を示した。このことから、リン鉱石直接施用により、土壌中有効態リン含量を維持もしくは増加させることが出来ると考えられる。さらに、リン鉱石施用区においては、前年度試験において溶出することなく残存した画分も多いと考えられ、本年度の稲作におけるリン鉱石の残効について検証する必要がある。

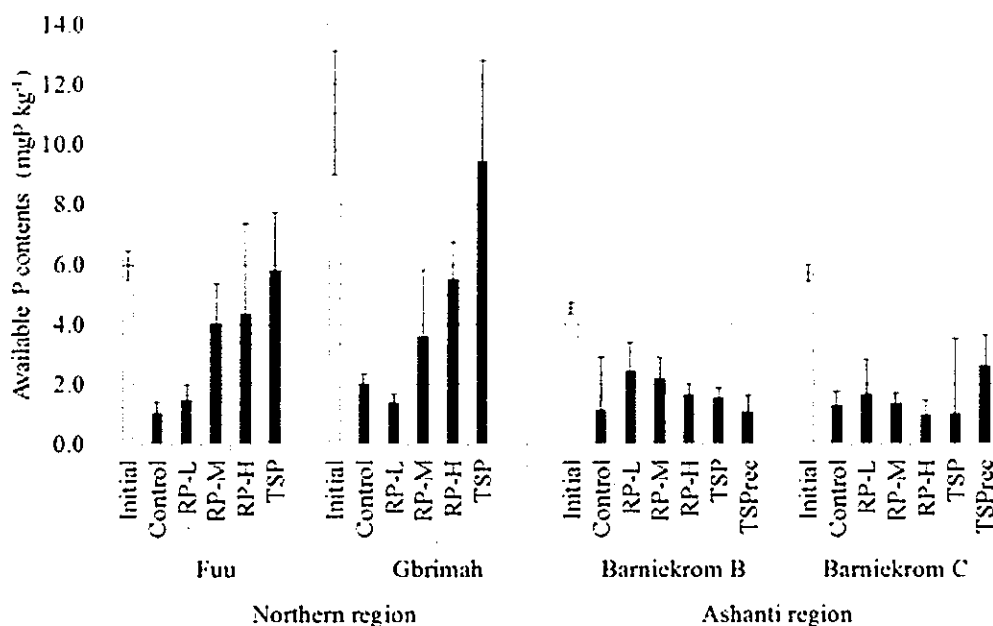


図 III-3. リン鉱石直接施用が栽培後の有効態リン濃度に及ぼす影響 (2010 年度結果より)

リン鉱石直接施用における残効の評価

リン鉱石は TSP に代表される化学肥料に比べ溶解度が低く、それゆえに残効が高いと考えられている(FAO, 2004、Bationo *et al.*, 1985)。図 III-4 に本年度ノーザン州の 2 地点において実施されたリン鉱石残効評価試験の結果を示した。両調査地点の連年施用区において、リン鉱石施用量に伴いイネ籾収量が増加したことから、リン鉱石直接施用は有効であると考えられる。しかしながら、その残効については大きな差異が認められた。Gbrimah における隔年施用区が、連年施用区の収量に対して、RP-L 区で 52.5%、RP-M 区で 39.1%、RP-H 区で 67.9%の収量に留まったのに対して、Fuu においては、それぞれ 84.6%、80.4%、99.9%と顕著に高い値を示した。この結果から、ギニアサバンナ帯の稲作地帯において、リン鉱石の残効が期待できる地点と期待できない地点があることが示唆された。しかし、その残効は、リン鉱石に特有のものではなく、TSP においてもほぼ同様の結果が示された。なお、Gbrimah における TSP の残効は

48.5%であり、Fuu においては 94.9%だった。

このようなリン鉱石を含むリン肥料の残効における地点間差異は、各地点の水分環境の差異に起因すると推察される。今後、リン鉱石の残効評価並びに直接施用効果の詳細を明らかにするために、当該地域における水分環境の変化を明らかにする必要があると考えられる。

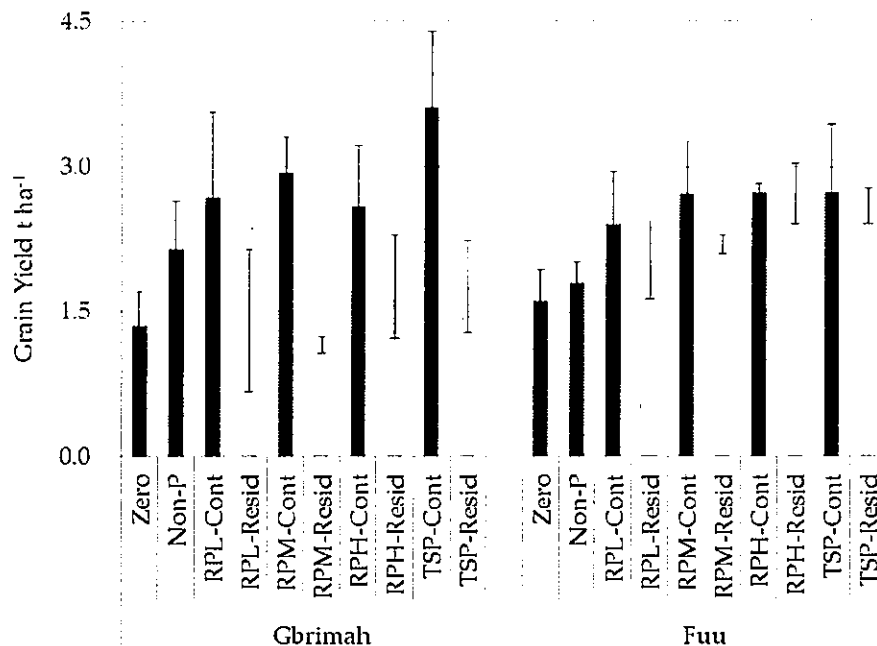


図 III-4. ノーザン州試験地におけるリン鉱石の連年施用及び隔年施用がイネ収量に及ぼす影響

リン鉱石直接施用の効果と土壌条件の関係

供試したリン鉱石は酸性条件でより溶解度が高くなると考えられる。図 III-5 にブル

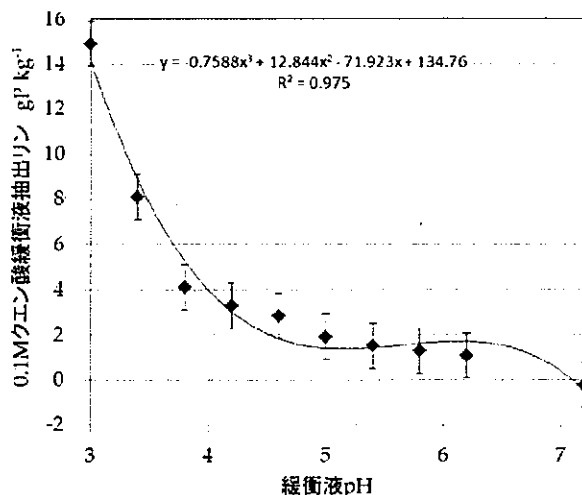


図 III-5. ブルキナファソ産リン鉱石の溶解における pH 依存性

キナファソ産リン鉱石の溶出と pH の関係を示した。リン鉱石の pH 依存性は、0.1M クエン酸緩衝液に対する溶出率で検討した。クエン酸緩衝液による溶出特性は pH3.0からpH4.0までの間に大きく減少し、強酸性環境において pH 依存性が高いことが示された。一方で、調査地の土壌 pH 環境と同じ水準である、pH4.0 から pH6.0 の間では、いずれも低い溶出率を示し、pH 依存性が比較

的低いことが示された。

また、前年度試験報告において、調査地におけるリン鉱石の溶出特性が、pH よりも土壌中有効態リン含量に影響されることを報告した(図 III-6)。これは、土壌中におけるリン鉱石溶解に及ぼすリン強度因子の影響の大きさを示していると考えられる。一方で、土壌 pH との関係が認められなかった理由として、年間の土壌 pH の変動が大きい可能性についても言及した。即ち、土壌試料採取時の土壌 pH と年間の平均土壌 pH の差異は大きいと考えられ、リン鉱石施用後の土壌 pH の経時変化とリン鉱石の可溶性との関係を検討する必要があると考えた。しかしながら、本年度、イネ栽培期

表 III-3. ノーザン州の2試験地における土壌 pH の年間変動

	Gbrimah	Fuu
7月	5.83	5.60
8月	5.29	5.67
9月	6.14	5.50
10月	5.76	5.56

間中に採取した表層土壌試料の土壌 pH について、Gbrimah 及び Fuu における土壌 pH の年間変動は大きくないことが明らかになった(表 III-3)。これらの結果から、調査地におけるリン鉱石の溶出特性は、土壌 pH によって規定されている可能性は低いと考えられた。

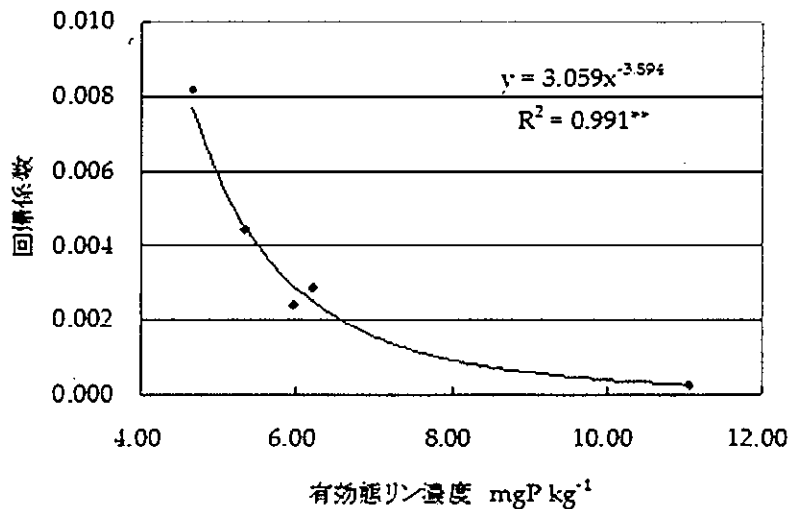


図 III-6. 調査地における栽培前有効態リン濃度とリン鉱石直接施用効果の関係(リン鉱石直接施用効果:リン鉱石施用量とイネ収量の関係における一次回帰式の回帰係数)

農家圃場における技術実証について

本稿第 II 章の有機物施用効果において、農家による技術実証圃場における試験結果を報告した。農家技術実証圃場においては、有機物施用に加え、リン鉱石直接施用区及び TSP 施用区を対照区とともに設定しており、ノーザン州に分布する多様な土壌環境下におけるリン鉱石直接施用効果の普遍性を検証することが出来る。

方法

農家実証圃場における試験設計は第 II 章に詳しく示した。本稿では農家実証圃場におけるリン鉱石直接施用関連試験区について述べる。農家実証圃場におけるリン鉱石直接施用関連試験区は、完全無施用区 (Zero)、対照区 (NK)、リン鉱石施用区 (NK+RP)、TSP 施用区 (NK+TSP) があり、完全無施用区は農家慣行と考えられる。NK 区についてはリン無施用区であり、窒素及びカリウムについては、ノーザン州稲作における推奨施用量 ($N60\text{kg ha}^{-1}$ 及び $K30\text{kg ha}^{-1}$) を施用した。NK+RP 区は窒素及びカリウム肥料に加えて、リン鉱石にて $135\text{kgP}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 施用した。また、NK+TSP 区は完全化学肥料施肥区であり、窒素及びカリウムに加えて TSP で $135\text{kgP}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 施用した。栽培品種は GR18 を用いた。

結果

図 III-7 に調査した 6 地点の各処理区の平均収量を示した。イネ籾収量は、農家慣行である完全無施肥区においては、約 1.6t ha^{-1} であったのに対して、完全施肥である TSP 施用区において約 3.1t ha^{-1} と高い値を示した。リン鉱石施用区においても約 2.7t ha^{-1} と TSP 施用区の 86% の収量を得たことから、TSP を代替することは可能と考えられる。しかし一方で、対照区である NK 区収量については約 2.7t ha^{-1} と高い値を示し、NK 区との比較ではリン鉱石施用の効果は皆無であると判断される。この結果は Gbrimah におけるリン鉱石直接施用効果 (図 III-2) で示された結果と同様であり、原因は明らかでない。なお、この結果はイネ籾収量だけではなく、地上部バイオマス量にも現れている (図 III-8)。

この場合のリン鉱石直接施用効果の評価は難しく、前述したように、リン鉱石直接施用の効果適切に評価出来ているとは考えにくい。今後の検討を要する。

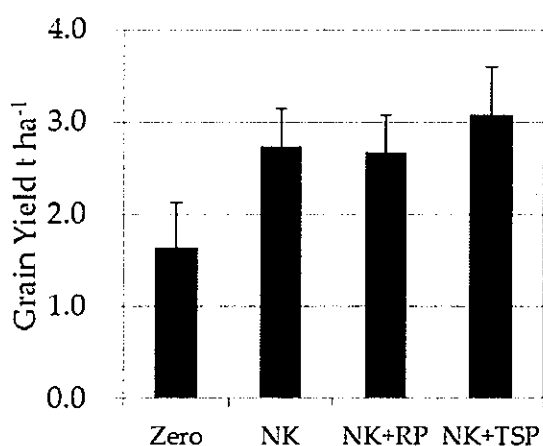


図 III-7. ノーザン州農家実証圃場におけるイネ籾収量に及ぼすリン鉱石直接施用効果、エラーバーは標準誤差 (n=6)

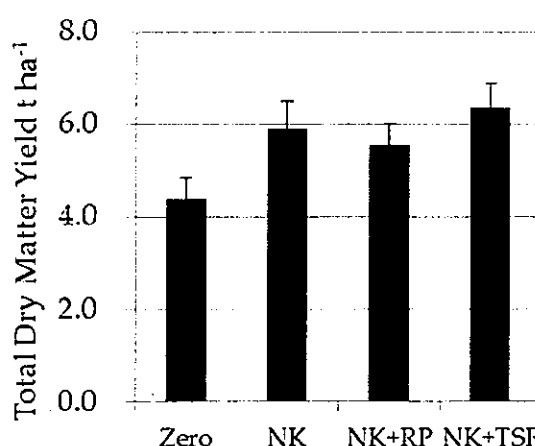


図 III-8. ノーザン州農家実証圃場における地上部バイオマス量に及ぼすリン鉱石直接施用効果、エラーバーは標準誤差 (n=6)

まとめ

前年度試験と同様に、リン鉱石の直接施用によりイネ収量は増加した。またイネ収量はリン鉱石の施用量に伴い増加した。TSP 施用と比較して、十分に高い収量を確保出来たことから、リン鉱石直接施用は有効であると考えられる。一方で、本年度試験では対照区の収量が高く、対照区と比較して収量の増加は確認出来なかった。このことから、本年度試験においては、リン鉱石直接施用効果の再現性並びに普遍性の確認は出来なかったと結論づけるべきである。現在、赤道森林帯に位置するアシャンティ州の収量調査が実施中であり、2011 年度のアシャンティ州におけるリン鉱石直接施用効果を詳細に検討する必要があると考えられる。また今後、詳細な検討を継続する必要があると思われる。

リン鉱石直接施用時の残効については、地点によっては高い残効が期待できることが示された。残効の大小は、栽培圃場の土壌環境、水分環境などによって規定されていると推測される。残効が強く期待できる地点では、次作におけるリン鉱石の必要施用量を、より削減することが可能であると考えられ、化学肥料に対する優位性はより強くなると期待される。

また、ブルキナファソ産リン鉱石のガーナ稲作圃場における溶解特性について、土壌 pH の影響が小さい可能性が示唆された。リン鉱石溶解に及ぼす要因は多く存在すると考えられるが、特に土壌中有効態リン濃度の低い地点において、リン鉱石直接施用のイネ収量に及ぼす効果が大きいことが明らかになった。今後、リン鉱石直接施用効果及びその残効に及ぼす主な環境要因を明らかにすることで、稲作圃場の土壌特性等を考慮した適切なリン鉱石施用方法を提案出来ると考えられる。

ブルキナファソ産リン鉱石の直接施用と有機物添加

目的

ブルキナファソ産リン鉱石の直接施用と有機資材の添加が、酸性土壌におけるイネの成長に及ぼす影響を明らかにする。

材料と方法

土壌: ガーナのノーザン州の2カ所、すなわち Gbrimah 村 (N09° 28. 826, W000° 45. 568) と Nabogu 村 (N09° 44.561, W000° 49.419) の、表層 0~20 cm 深の水田土壌を採取し、風乾し、2 mm 径の篩にかけた。化学分析を行った結果は、表 III-4 の通り。

表 III-4. インキュベーション試験に使った土壌の特性

パラメータ	Gbrimah	Nabogu
pH(1:2.5 水抽出)	4.9	5.0
電気伝導度 ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	62	52
圃場容水量 (%)	27	25
有効態リン=Bray 1 法 (mg kg^{-1})	1.8	2.6
有効態リン=Olsen 法 (mg kg^{-1})	1.2	1.3

添加物質:ブルキナファソ産リン鉱石(BPR)は微粉碎し 1 mm 径の篩を通したものを
用いた。乳牛の糞(CM)は60°C、稲わら(RS)は70°Cで48時間乾燥させた。両者はど
もに微粉碎し、土壌と混ぜる前に1 mm 径の篩を通した。表 III-5 にはBPRの、表 III-6
には CM と RS の性質を示した。

表 III-5. この調査で使ったブルキナファソ産リン鉱石の化学的性質

パラメータ	値
全リン (%)	14.9
P2O5 相当量 (%)	34.1
2%クエン酸可溶性リン (g kg^{-1})	61.0
2%クエン酸可溶性リン (%)	6.10
カルシウム (g kg^{-1})	282

表 III-6. この調査で使った有機物の化学的性質

パラメーター	牛糞 (CM)	稲わら (RS)
全窒素 (%)	1.40	0.53
全炭素 (%)	45	37
C/N 比	32	70
C/P 比	61	527
リン (g kg ⁻¹)	7.3	0.7
カルシウム (g kg ⁻¹)	9.7	2.8
カリウム (g kg ⁻¹)	4.5	16.8
マグネシウム (g kg ⁻¹)	3.0	0.9
ナトリウム (g kg ⁻¹)	1.7	0.2
アルミニウム (mg kg ⁻¹)	115	n.d.
ホウ素 (mg kg ⁻¹)	10.0	4.6
銅 (mg kg ⁻¹)	27.0	n.d.
鉄 (mg kg ⁻¹)	382	245
マンガン (mg kg ⁻¹)	121	371
亜鉛 (mg kg ⁻¹)	84.2	n.d.

インキュベーション法: 篩をかけた 150 g の土壌を 300 mL 容のガラスビーカーに計り取り、BPR (120.8 mg)、CM (201 mg)、RS (1.5 g) の添加物質並びに窒素源として硫酸 (NH₄)₂SO₄ を 47.15 mg 混ぜ合わせ、再びビーカーに戻した。

処理は 3 連で、①添加物なしのコントロール、②稲わら添加=+RS (乾土あたり 1%、ヘクタールあたり 9 トンあるいは同 7 kg リン施用に相当)、③牛糞添加=+CM (ヘクタールあたり 1.34 トンあるいは同 9.8 kg リン施用に相当)、④リン鉱石添加=+BPR120 (ヘクタールあたり 120 kg のリン施用)、⑤+BPR+RS、⑥+BPR+CM、⑦+BPR+RS+CM、並びに⑧可溶性リン酸=+KH₂PO₄ (ヘクタールあたり 120 kg のリン施用) を、それぞれ湛水条件と陸畑条件で設定した。

添加物を加えた土壌は、圃場容水量の 50% になるよう蒸留水で調整した。これらは温度コントロール付きのインキュベーター (IC801、ヤマト器機) の中で、リン源を土壌と反応させるため (プレインキュベーション)、気温 30°C、相対湿度 65% に設定して 2 週間置いた。これらの添加土壌は一週間毎に重さを計り、失われた水分を補った。

インキュベートした土壌のサンプリングとイネの移植: 土壌を 14 日間プレインキュベーションし、この時をインキュベーション後 (DAI) 0 日とし、土壌のサンプリングを行った。陸畑条件の土壌は引き続き同じ土壌水分を保った一方、湛水条件では蒸留水を加えて土壌表面の上 1 cm まで水を張った。インキュベーションはさらに 28 日間継続し

(28DAI)、再び土壌サンプルを採取した。その後、葉齢 3 のイネ(IR74) 苗をこれらのビーカーに移植し、平均気温が30°Cのいわゆる熱帯温室で28日間培養した。植物が枯死した場合は、必要に応じて苗の再移植を行った。ビーカーは、毎日配置を変更し、受ける光の量や強さが変わらないように配慮した。調査では、肥料を入れずに水耕した苗を使用し、移植前の平均の地上部と地下部乾重はそれぞれ6.2と5.5 mg、リン含有濃度は同じく4,464と2,321 mg kg⁻¹で、種子のそれは2,322 mg kg⁻¹であった。

植物の生長: イネの生長は、植物高、葉齢、分けつ数を移植後 56 日目、すなわち56DAI に調査した。地上部と地下部を分けて採取し、洗浄後 80°C で 48 時間乾燥させて乾重量を測定した。これらについて、リン濃度の測定も行った。

植物体中の全リン量: 灰化法で測定した。約 50 mg の粉碎した植物試料を磁製のつぼに入れ、550°C のマッフル炉で 2 時間焼いて灰にした。冷却した灰を 0.5 mL の 0.5 規定塩酸で洗いながら遠沈管に取り、蒸留水を加え、よく攪拌し 10 mL にフィルアップした。灰分は 3,000 回転で 5 分間遠心分離し、上澄みを Murphy & Riley (1962) の方法に従ったリン定量の試料とした。リン吸収量は、リン濃度と乾重量を乗じて算出した。

イネのバイオマス生産に対するリン肥料の農学的効果 (RAE: relative agronomic effectiveness): 以下の式で算出した。

$$\%RAE = 100 \times \frac{\text{リン肥料処理区の乾重量} - \text{コントロール区の乾重量}}{\text{KH}_2\text{PO}_4 \text{ 区の乾重量} - \text{コントロール区の乾重量}}$$

土壌分析:

含水率: 約 1 g の新鮮土壌を秤取り、105°C のオーブンで 24 時間乾燥させ、土壌の含水率(%)を、減少した水の重量を風乾土の重量で除し 100 を乗じて算出した。

pHと電気伝導度 (EC): 土壌に、固液比 2.5 になるよう蒸留水を加えて、60 分攪拌し、遠心後の上澄みについて pH と EC を、それぞれ堀場製作所製の B-212 と B-173 で測定した。

Bray 1 法による可給態リン: 土壌試料に、土壌 1 g あたり 10mL の Bray 1 抽出液 (0.025N の塩酸+0.03N のフッ化アンモニウム)を添加し 1 分間振盪した。

Olsen 法による可給態リン: Olsen 抽出液 (pH8.5 に調整した 0.5N の炭酸水素ナトリウム溶液)を、土壌 1g あたり 20mL の比率で添加し、活性炭を加えた後 30 分間振盪し

た。抽出液は、リン定量前に 0.5N の硫酸で中和した。

水溶性のリン: 土壌 1 g あたり蒸留水を 10 mL 添加し 5 分間振盪抽出した。

リンの定量: 上述の各方法で抽出した土壌抽出液中の無機リンは、それぞれ Murphy & Riley (1962)の方法で定量した。アスコルビン酸によるモリブデン青法を用い、分光光度計(島津製作所 UV-2400PC)で 710 nm の吸光度を測定した。

結果

植物の成長とリン蓄積に対するリン肥料の影響

Gbrimah 土壌では湛水条件でも陸畑条件でも、イネの乾重は、BPR 区、 KH_2PO_4 区、BPR+CM 区、並びに CM 区で、コントロール区に比べ増加した(図 III-9、表 III-7)。地上部のリン含有濃度とリン吸収量はいずれのリン肥料添加処理でも増加したが、湛水条件では KH_2PO_4 区、BPR 区、BPR+RS+CM 区で高く、陸畑条件では KH_2PO_4 区、BPR 区、BPR+CM 区で高かった(表 III-7)。地上部リン吸収量は、湛水条件ではリン肥料添加処理によって増加したが、陸畑条件では RS 区と BPR+RS 区で減少した(表 III-7)。植物高と葉齢はいずれの水分条件でも、コントロール区に比べ BPR 区、BPR+CM 区、 KH_2PO_4 区、並びに CM 区で増加した(表 III-8)。地下部乾重は水分条件にかかわらず、RS 添加区を除くすべての処理区でコントロール区に比べ増加した(表 III-9)。地下部のリン含有濃度は、両水分条件で KH_2PO_4 区と BPR 区でコントロール区に比べ高かった(表 III-9)。

Nabogu 土壌では湛水条件でも陸畑条件でも、イネの乾重は BPR 区、 KH_2PO_4 区、BPR+CM 区、並びに CM 区でコントロール区に比べ増加した(図 III-10、表 III-10)。地上部のリン含有濃度とリン吸収量はいずれのリン肥料添加処理でも増加したが、湛水条件では KH_2PO_4 区、BPR 区、BPR+RS+CM 区で高く、陸畑条件では KH_2PO_4 区、BPR 区、BPR+CM 区で高かった(表 III-10)。地上部リン吸収量は、湛水条件ではリン肥料添加処理によって増加した。植物高はいずれの水分条件でも、BPR+CM 区、BPR 区、CM 区並びに KH_2PO_4 区でコントロール区に比べ高かった。葉齢は湛水条件で、BPR+CM 区、BPR 区、CM 区並びに KH_2PO_4 区でコントロール区に比べ高く、陸畑条件では BPR+CM 区、BPR 区、並びに CM 区でコントロール区に比べ高かった(表 III-11)。地下部乾重は、湛水条件で RS を添加した区を除くすべての処理区でコントロール区に比べ増加した(表 III-12)。地下部のリン濃度は湛水条件の場合、 KH_2PO_4 区、BPR+RS+CM 区、BPR+CM 区で、陸畑条件の場合 KH_2PO_4 区、BPR 区、BPR+CM 区でコントロール区に比べ高くなった(表 III-12)。

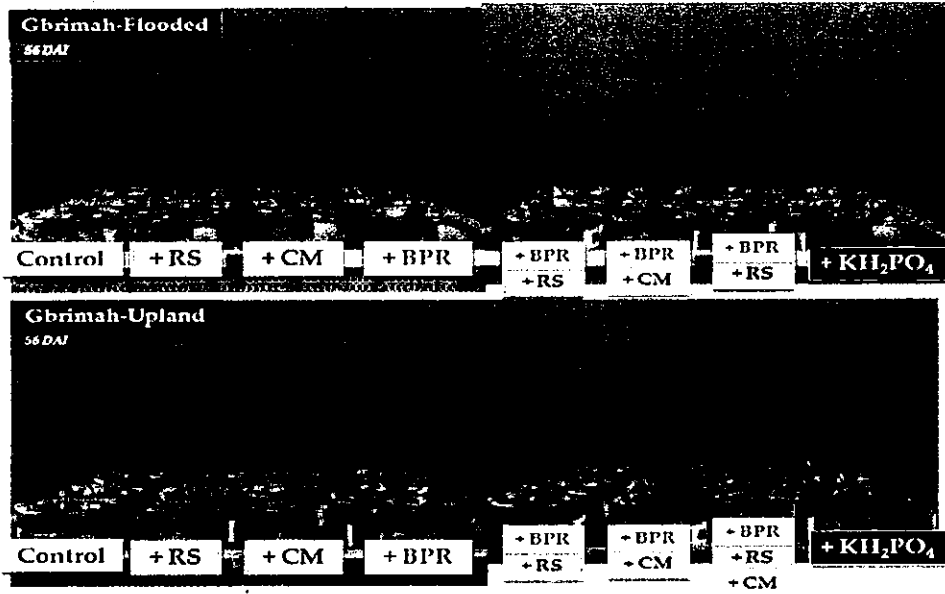


写真 III-1. 種々のリン源を加えた Gbrimah 土壌で生育したイネ植物の生長 (播種 56 日後)

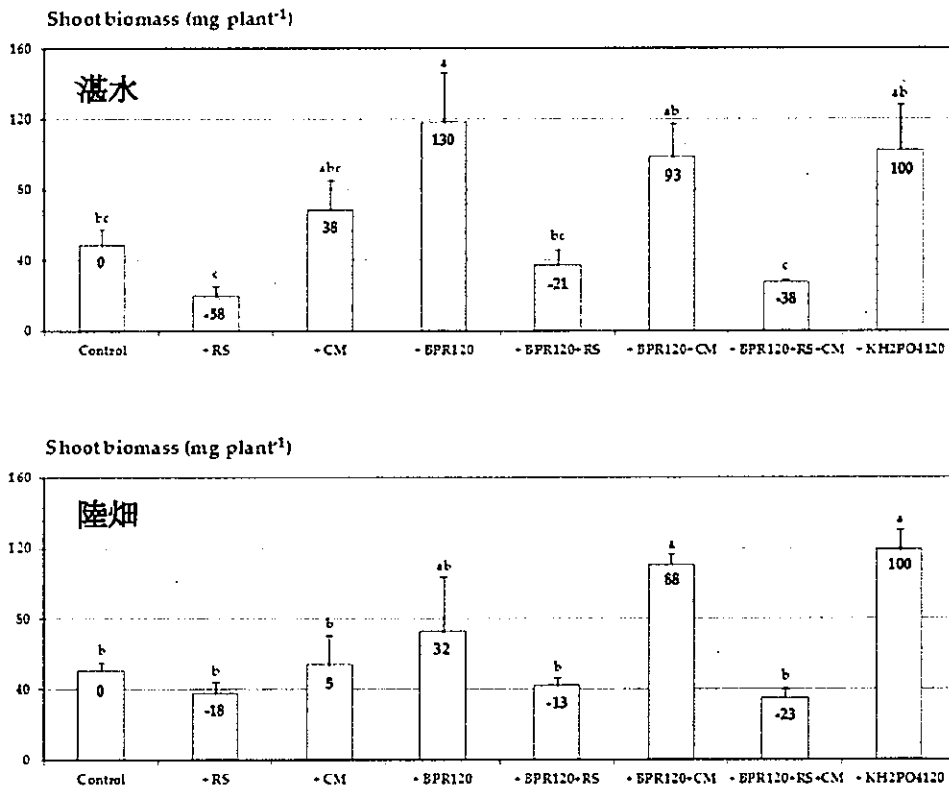


図 III-9. 種々のリン源を加えた Gbrimah 土壌で生育したイネ植物の地下部バイオマス量 (播種 56 日後)

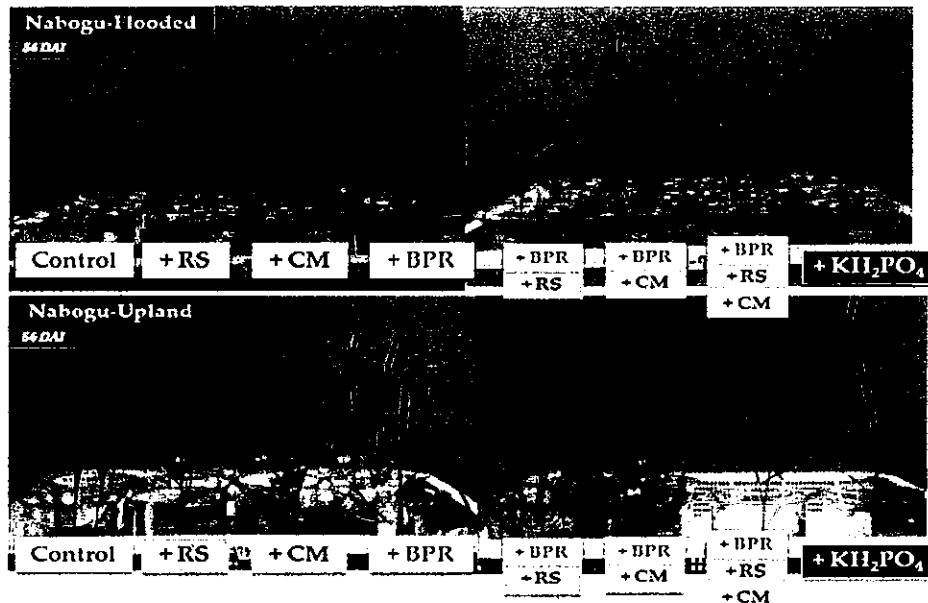


写真 III-2. 種々のリン源を加えた Nabogu 土壌で生育したイネ植物の生長（播種 56 日後）

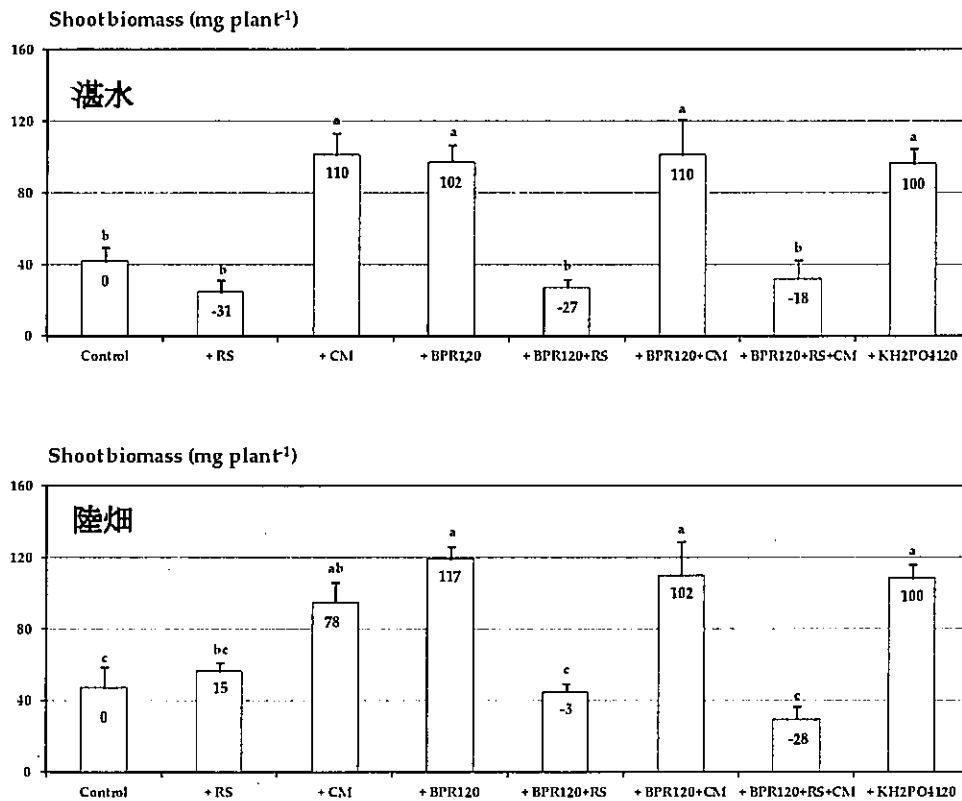


図 III-10. 種々のリン源を加えた Nabogu 土壌で生育したイネ植物の地下部バイオマス量（播種 56 日後）

表 III-7. イネ品種 IR74 の播種後 56 日後の地上部乾重、リン濃度並びにリン吸収量

処理	GBRIMAH											
	乾重 (mg)				リン濃度 (mg / kg ⁻¹)				リン吸収量 (mg plant ⁻¹)			
	平均	SE	陸畑	SE	平均	SE	陸畑	SE	平均	SE	陸畑	SE
1) コントロール	48 ± 8	bcd	51 ± 4	bcde	820 ± 116	i	1162 ± 38	hi	38 ± 1	d	59 ± 1	d
2) + 稲わら	20 ± 4	e	38 ± 5	cde	2698 ± 146	defg	971 ± 63	hi	53 ± 3	d	37 ± 3	d
3) + 牛糞	69 ± 14	abcd	54 ± 13	abcde	1672 ± 109	ghi	2005 ± 86	fgh	113 ± 3	cd	107 ± 5	cd
4) + リン鉱石120	118 ± 22	a	73 ± 26	abcde	3733 ± 305	cd	4098 ± 361	bc	453 ± 11	ab	314 ± 20	bcd
5) + リン鉱石120+稲わら	37 ± 7	cde	42 ± 4	cde	2562 ± 194	efg	1237 ± 102	hi	93 ± 1	cd	51 ± 4	d
6) + リン鉱石120+牛糞	98 ± 16	abcd	111 ± 5	ab	3007 ± 253	def	3310 ± 378	cde	297 ± 14	bcd	364 ± 3	abc
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	28 ± 1	e	35 ± 4	de	3112 ± 99	cde	1845 ± 46	ghi	87 ± 3	cd	65 ± 1	d
8) + リン酸二水素カリウム120	102 ± 21	abc	119 ± 9	a	5069 ± 142	ab	5235 ± 344	a	515 ± 23	ab	630 ± 4	a
リン施用 (P)	***				***				***			
水条件 (W)	n.s.				**				n.s.			
P x W	n.s.				***				n.s.			

異なるアルファベットは、Tukey-Kramerの方法で、危険率0.05%以下で有意な差があることを示す

表 III-8. イネ品種 IR74 の播種後 56 日後の植物高、葉齢並びに分げっ数

処理	植物高 (cm)						葉齢						分げっ数								
	灌水			陸畑			灌水			陸畑			灌水			陸畑					
	平均	SE		平均	SE		平均	SE		平均	SE		平均	SE		平均	SE				
1) コントロール	21 ± 0.8	cd	ef	21 ± 1.8	bc	defgh	5.4 ± 0.3	bc	def	5.2 ± 0.2	cd	ef	0 ± 0	a	0.3 ± 0.3	a					
2) + 稲わら	15 ± 1.3	h		19 ± 0.9	defgh		4.3 ± 0.3	f		4.9 ± 0.1	def		0 ± 0	a	0 ± 0	a					
3) + 牛糞	26 ± 2.1	abcd		24 ± 3.3	abc	defg	6 ± 0.1	abcd		6.1 ± 0.2	abcd		0 ± 0	a	0 ± 0	a					
4) + リン鉱石120	30 ± 0.8	ab		26 ± 3.1	abc	def	6.4 ± 0.1	abc		6.1 ± 0.4	abcd		1 ± 0.6	a	0.3 ± 0.3	a					
5) + リン鉱石120+稲わら	18 ± 0.4	efgh		19 ± 1	defgh		4.7 ± 0.2	ef		5.5 ± 0.2	bcde		0 ± 0	a	0 ± 0	a					
6) + リン鉱石120+牛糞	30 ± 0.5	a		25 ± 0.8	abc	defg	6.3 ± 0.1	abc		7 ± 0.1	a		0.7 ± 0.3	a	0.7 ± 0.3	a					
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	17 ± 1.1	fgh		17 ± 0.6	gh		4.8 ± 0.1	ef		4.8 ± 0.2	ef		0 ± 0	a	0 ± 0	a					
8) + リン酸二水素カリウム120	29 ± 1.5	abc		27 ± 1.9	abcd		6.3 ± 0.4	abc		6.5 ± 0.2	ab		0 ± 0	a	0.7 ± 0.3	a					
リン施用 (P)	***						***												*		
水条件 (W)	n.s.						*												n.s.		
P x W	n.s.						n.s.												n.s.		

異なるアルファベットは、Tukey-Kramerの方法で、危険率0.05%以下で有意な差があることを示す

表 III-9. イネ品種 IR74 の播種後 56 日後の地上部乾重、リン濃度並びにリン吸収量

処理	GBRIMAH											
	乾重 (mg)			リン濃度 (mg/kg ⁻¹)			リン吸収量 (mg plant ⁻¹)					
	灌水	平均	SE	陸畑	平均	SE	灌水	平均	SE	陸畑	平均	SE
1) コントロール	21 ± 4	bc	21 ± 1	bc	528 ± 56	e	677 ± 46	de	11 ± 1	d	14 ± 1	cd
2) + 稲わら	20 ± 5	bc	19 ± 5	c	897 ± 139	de	670 ± 70	de	16 ± 3	cd	12 ± 3	d
3) + 牛糞	32 ± 4	bc	19 ± 6	c	875 ± 22	de	1025 ± 38	de	28 ± 3	bcd	19 ± 5	cd
4) + リン鉱石120	54 ± 9	abc	24 ± 10	bc	1401 ± 19	bcd	2005 ± 38	ab	76 ± 11	ab	49 ± 20	bcd
5) + リン鉱石120+稲わら	32 ± 5	bc	29 ± 7	bc	874 ± 159	de	914 ± 68	de	26 ± 1	cd	26 ± 4	cd
6) + リン鉱石120+牛糞	47 ± 12	abc	85 ± 2	a	1381 ± 190	bcd	1215 ± 59	cde	61 ± 14	abc	104 ± 3	a
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	25 ± 2	bc	25 ± 1	bc	1255 ± 11	bcdde	963 ± 35	de	31 ± 3	bcd	24 ± 1	cd
8) + リン酸二水素カリウム120	48 ± 15	abc	59 ± 13	ab	2361 ± 384	a	1854 ± 292	abc	103 ± 23	a	101 ± 4	a
リン施用 (P)		***				***						***
水条件 (W)		n.s.				n.s.						n.s.
P × W		*				*						n.s.

異なるアルファベットは、Tukey-Kramerの方法で、危険率0.05%以下で有意な差があることを示す

表 III-10. イネ品種 IR74 の播種後 56 日後の地上部乾重、リン濃度並びにリン吸収量

処理	NABOGU											
	乾重 (mg)		リン濃度 (mg / kg ⁻¹)		リン吸収量 (mg plant ⁻¹)							
	湛水	陸畑	湛水	陸畑	湛水	陸畑						
平均	SE	平均	SE	平均	SE	平均	SE					
1) コントロール	42 ± 6	c	47 ± 10	c	1022 ± 100	e	1122 ± 140	e	42 ± 3	h	50 ± 6	h
2) + 稲わら	25 ± 5	c	56 ± 4	bc	2598 ± 63	bcd	1173 ± 139	c	65 ± 13	gh	67 ± 13	gh
3) + 牛糞	101 ± 10	a	95 ± 9	ab	1895 ± 58	de	1788 ± 106	de	191 ± 14	efg	168 ± 6	fgh
4) + リン鉱石120	97 ± 8	ab	119 ± 6	a	4945 ± 75	a	3144 ± 94	b	479 ± 33	ab	376 ± 29	bcd
5) + リン鉱石120+稲わら	27 ± 4	c	45 ± 4	c	2974 ± 99	b	1186 ± 171	e	80 ± 8	gh	52 ± 4	h
6) + リン鉱石120+牛糞	101 ± 16	a	110 ± 15	a	2752 ± 76	bcd	2937 ± 317	bc	281 ± 49	def	315 ± 23	cde
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	32 ± 8	c	30 ± 6	c	3158 ± 270	b	1958 ± 279	cde	97 ± 20	gh	57 ± 11	h
8) + リン酸二水素カリウム120	96 ± 7	ab	109 ± 6	a	4230 ± 277	a	5217 ± 362	a	410 ± 55	bc	562 ± 15	a
リン施用 (P)		***				***		***				***
水条件 (W)		*				***		***				n.s.
P x W						***		***				**

異なるアルファベットは、Tukey-Kramerの方法で、危険率0.05%以下で有意な差があることを示す

表 III-11. イネ品種 IR74 の播種後 56 日後の植物高、葉齢並びに分げつ数

処理	NABOGU						分げつ数			
	植物高 (cm)			葉齢			分げつ数			
	灌水	平均	SE	灌水	平均	SE	灌水	平均	SE	
1) コントロール	20 ± 0.3	bc	17 ± 2	c	5 ± 0.1	efg	5.9 ± 0.2	de	0 ± 0	a
2) + 稲わら	15 ± 0.3	c	20 ± 0.8	bc	4.5 ± 0.2	g	6.1 ± 0	cd	0 ± 0	a
3) + 牛糞	29 ± 1	a	25 ± 1.3	ab	6.4 ± 0.3	abcd	7.1 ± 0	ab	0 ± 0	a
4) + リン鉱石120	29 ± 1.2	a	26 ± 0.5	ab	6.3 ± 0.2	bcd	7.3 ± 0	a	1 ± 0	a
5) + リン鉱石120+稲わら	16 ± 1.8	c	18 ± 1.1	c	4.2 ± 0.1	g	5.6 ± 0.3	def	0.7 ± 0.7	a
6) + リン鉱石120+牛糞	30 ± 1.1	a	26 ± 1.3	ab	6.1 ± 0.1	cd	7 ± 0.1	abc	0.7 ± 0.3	a
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	18 ± 1	c	14 ± 1.9	c	4.5 ± 0.1	g	4.9 ± 0.1	fg	0 ± 0	a
8) + リン酸二水素カリウム120	27 ± 2	ab	26 ± 0.4	ab	6.2 ± 0.3	bcd	6.2 ± 0.4	bcd	0 ± 0	a
リン施用 (P)			***				***			**
水条件 (W)			*				***			U.S.
P × W			**				**			U.S.

異なるアルファベットは、Tukey-Kramerの方法で、危険率0.05%以下で有意な差があることを示す

表 III-12. イネ品種 IR74 の播種後 56 日後の地上部乾重、リン濃度並びにリン吸収量

処理	NABOGU						リン濃度 (mg/kg ⁻¹)						リン吸収量 (mg plant ⁻¹)							
	乾重 (mg)			リン濃度 (mg/kg ⁻¹)			リン濃度 (mg/kg ⁻¹)			リン濃度 (mg/kg ⁻¹)			リン濃度 (mg/kg ⁻¹)			リン濃度 (mg/kg ⁻¹)				
	灌水	平均	SE	陸畑	平均	SE	灌水	平均	SE	陸畑	平均	SE	灌水	平均	SE	陸畑	平均	SE		
1) コントロール	17 ± 4	c	32 ± 12	abc	646 ± 65	f	633 ± 96	f	11 ± 2	g	18 ± 4	fg	25 ± 2	fg	40 ± 4	defg	62 ± 8	bcde	51 ± 4	def
2) + 稲わら	19 ± 3	c	49 ± 1	abc	1397 ± 167	abcde	811 ± 91	ef	61 ± 8	cde	100 ± 5	a	28 ± 1	efg	24 ± 6	fg	62 ± 8	bcde	95 ± 1	ab
3) + 牛糞	56 ± 11	abc	53 ± 4	abc	1148 ± 79	bcdef	954 ± 41	cdef	34 ± 9	defg	20 ± 5	fg	95 ± 14	abc	88 ± 8	abc	1539 ± 98	abcd	1588 ± 80	abc
4) + リン鉱石120	40 ± 3	abc	64 ± 5	ab	1539 ± 98	abcd	1588 ± 80	abc	1775 ± 238	ab	1959 ± 300	n	1775 ± 238	ab	1959 ± 300	n	1276 ± 13	abcdef	829 ± 52	def
5) + リン鉱石120+稲わら	22 ± 1	c	30 ± 9	bc	1276 ± 13	abcdef	829 ± 52	def	1604 ± 98	abc	1413 ± 227	abcde	1604 ± 98	abc	1413 ± 227	abcde	1604 ± 98	abc	1567 ± 78	abc
6) + リン鉱石120+牛糞	40 ± 7	abc	71 ± 12	a	1604 ± 98	abc	1413 ± 227	abcde	55 ± 9	abc	49 ± 13	abc	55 ± 9	abc	49 ± 13	abc	55 ± 9	abc	49 ± 13	abc
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	23 ± 7	c	20 ± 4	c	1567 ± 78	abc	946 ± 86	cdef	***				***				***			
8) + リン酸二水素カリウム120	55 ± 9	abc	49 ± 13	abc	1775 ± 238	ab	1959 ± 300	n	**				**				*			
リン施用 (P)																				
水条件 (W)																				
P x W																				

異なるアルファベットは、Tukey-Kramerの方法で、危険率0.05%以下で有意な差があることを示す

土壌の性質に対するリン肥料の影響

インキュベートに伴う土壌 pH の変化

Gbrimah 土壌の pH は、0～28 DAI の間すべての処理で増加する傾向にあったが、その後 56 DAI では減少した(図 III-11)。インキュベーション前(0 DAI)では、BPR 並びに有機物を添加した土壌で pH がコントロール(4.6)に比べやや高かった(4.6～4.9)。28 DAI では、ほとんどの処理における土壌 pH はコントロールに比べ高く(5.0～5.1)、陸畑条件(4.9～5.1)よりも湛水条件(5.2～6.4)で、とりわけ BPR+RS+CM 区と RS 区の湛水条件で高くなった。BPR 区、CM 区並びに BPR+CM 区の陸畑条件を除いては、pH はコントロール区よりも低くなった。56 DAI においては、pH はやや下がったが 0 DAI の値に比べれば高かった。稲わら(RS)を加えた土壌は、水条件に係らず、他の資材を添加した土壌に比べて高い pH を維持した。一方、湛水した BPR 区と陸畑条件の BPR 区、CM 区、BPR+CM 区、並びに KH_2PO_4 区では、コントロールに比べて低くなった。

Nabogu 土壌でも、pH はすべての処理区で 0～28 DAI にかけて上昇し、56 DAI にはやや下がった(図 III-11)。インキュベーション前(0 DAI)では、リン肥料を添加した土壌で pH がコントロール(4.7)に比べやや高かった(4.7～5.1)。28 DAI でも、湛水条件で処理区の土壌 pH (5.4～6.5)はコントロール区(5.3)に比べ高く、とりわけ稲わらを施用した区で高かった。陸畑条件における CM 区、BPR 区、BPR+CM 区の土壌 pH は、コントロール区(4.9)に比べ差はなかった。56 DAI においては、pH はやや下がったが 0 DAI の値に比べれば高かった。稲わら(RS)を加えた土壌は、水条件にかかわらず他の資材を入れた土壌に比べて高い pH を維持した。一方、湛水した CM 区と BPR 区、BPR+CM 区並びに KH_2PO_4 区、陸畑条件の BPR 区、CM 区、並びに BPR+CM 区ではコントロール区に比べて pH 値が低くなった。

インキュベートに伴う電気伝導度の変化

Gbrimah 土壌では、ほとんどの処理区の EC 値は 0～56 DAI を通じて時間の経過とともに減少した(図 III-11) 0 DAI では、湛水、陸畑の両水分条件下において、EC 値は RS 区、BPR+ RS 区、BPR+RS+CM 区、及び KH_2PO_4 区で増加した。28 DAI では、特に RS 施用が含まれる処理区において、EC 値がコントロール区と比較して大幅に減少した。この傾向は湛水条件で顕著であった。対照的に陸畑条件においては RS 区、BPR+RS 区、BPR+RS+CM 区、及び KH_2PO_4 区において、EC は高い値を示した。56 DAI における EC 値は、陸畑条件における RS 区を除いて、湛水、陸畑の両土壌水分条件下において、コントロール区と比較して顕著に減少した(図 III-11)。

Nabogu 土壌でも、大半の処理区の EC 値は 0～56 DAI を通じて時間の経過とともに減少した(図 III-11)。0 DAI では、湛水、陸畑の両水分条件下において、EC 値は、 KH_2PO_4 区、RS 区、BPR+RS+CM 区、及び BPR+ RS 区で増加した。28 DAI では、

特にRS施用が含まれる処理区において、EC値がコントロール区と比較して大幅に減少した。この傾向は湛水条件で顕著であった。対照的に、陸畑条件においては全ての有機資材施用区において、コントロール区よりも高いEC値が認められた。56 DAIにおけるEC値は、湛水条件におけるRS区、陸畑条件におけるBPR+RS区、BPR+RS+CM区及びKH₂PO₄区を除いて、湛水、陸畑の両土壤水分条件において、コントロール区に比較して顕著に減少した(図 III-11)。

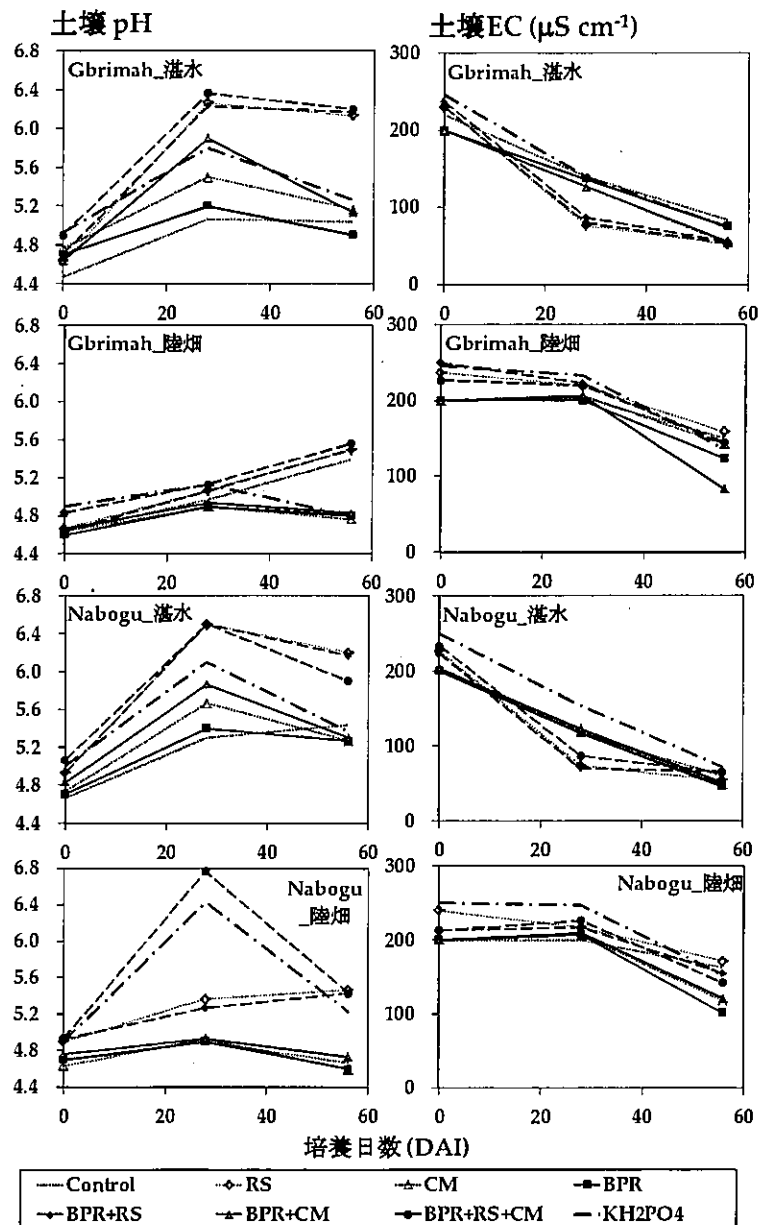


図 III-11. 各種リン資材を施用した Gbrimah 及び Nabogu 土壌における pH 及び EC 値の変化。なお略号はそれぞれ BPR;ブルキナファソ産リン鉱石、RS;稲わら、CM;牛糞を示す。

土壤中の有効態リンについて

様々なリン資材を施用した Gbrimah と Nabogu 両方の土壤における、Bray1 抽出液、Olsen 抽出液、並びに水によって抽出された各種の有効態リンについて図 III-12-14 に示した。BPR と有機資材施用後の土壤から抽出されたリンにおいて、各種の溶液抽出リンの間に弱い相関が認められた。一方で KH_2PO_4 区における Olsen 抽出リンと水抽出リンの間には強い相関関係が認められた(図 III-15)。Bray1 抽出液は Olsen 抽出や水抽出に比較してより多くのリンを抽出すると考えられる。 KH_2PO_4 区における各種の抽出リン量を他の処理区と比較すると、Bray1 抽出の場合 11~250 倍、Olsen 抽出の場合 10~450 倍、水抽出の場合 3~59 倍の高い値を示した。

Bray1 抽出リンは、両土壤条件及び両水分条件下におけるほぼ全ての処理区で、0 DAI から 28 DAI までわずかに増加し、その後 28 DAI から 56 DAI まで低下した。しかしながら、BPR 施用区における Bray1 抽出リンは、陸畑条件下の Nabogu 土壤を除き、全ての土壤、水分条件下において、増加傾向を示した(図 III-12)。

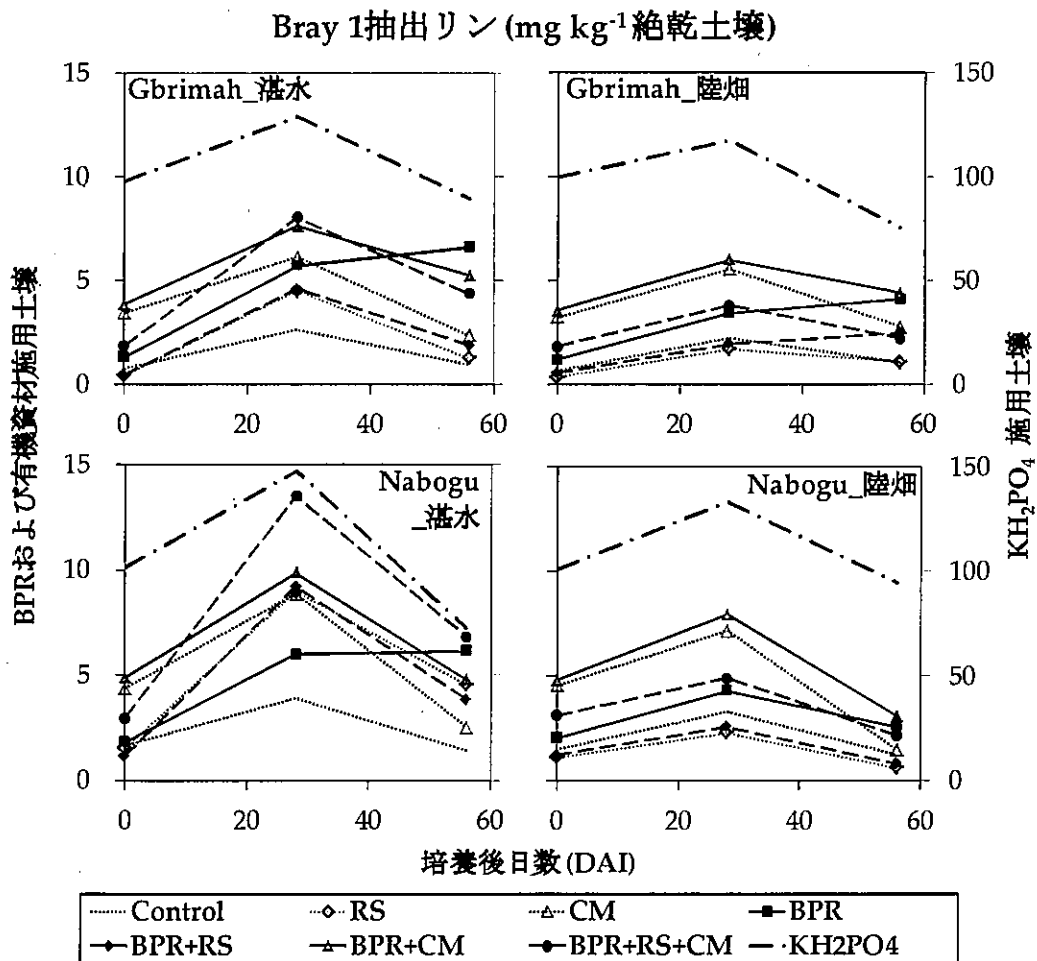


図 III-12. 各種リン資材を施用した Gbrimah 及び Nabogu 土壤における Bray 1 抽出リンの変化 なお略号はそれぞれ BPR;ブルキナファソ産リン鉱石、RS; 稲わら、CM;牛糞を示す。

各種資材を施用した土壌における Olsen 抽出リンは、Gbrimah 土壌では湛水条件下の RS 区、BPR+RS 区、及び陸畑条件下の CM 区、Nabogu 土壌では湛水条件下の BPR 区、BPR+CM 区、RS 区、BPR+RS 区、及び陸畑条件下の BPR 区と BPR+CM 区では培養期間を通して増加傾向を示したが、他の処理区においては、各種の土壌及び水分条件下において、0 DAI-28 DAI の間にわずかながら減少傾向を示し、以後 28 DAI-56 DAI の間に増加した(図 III-13)。

各種資材施用後の土壌から抽出された水抽出リンは、大半の処理区では、各種の土壌及び水分条件下において、DAI 0 から DAI 28 にかけてわずかに減少し、28 DAI から 56 DAI の間に増加した。しかし、湛水条件下における BPR 区の水抽出 P は両土壌環境において、培養期間を通して増加傾向を示した(図 III-14)。

Olsen抽出リン (mg kg⁻¹絶乾土壌)

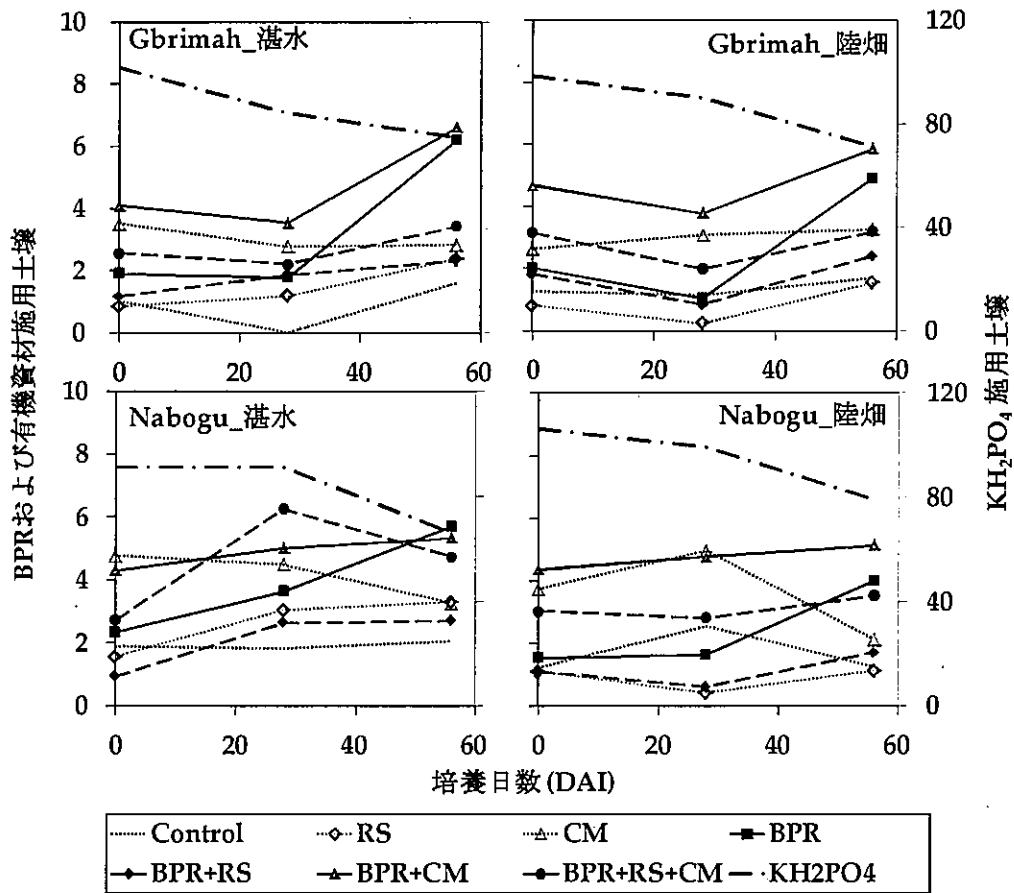


図 III-13. 各種リン資材を施用した Gbrimah 及び Nabogu 土壌における Olsen 抽出リンの変化 なお略号はそれぞれ BPR;ブルキナファソ産リン鉱石、RS ; 稲わら、CM;牛糞を示す。

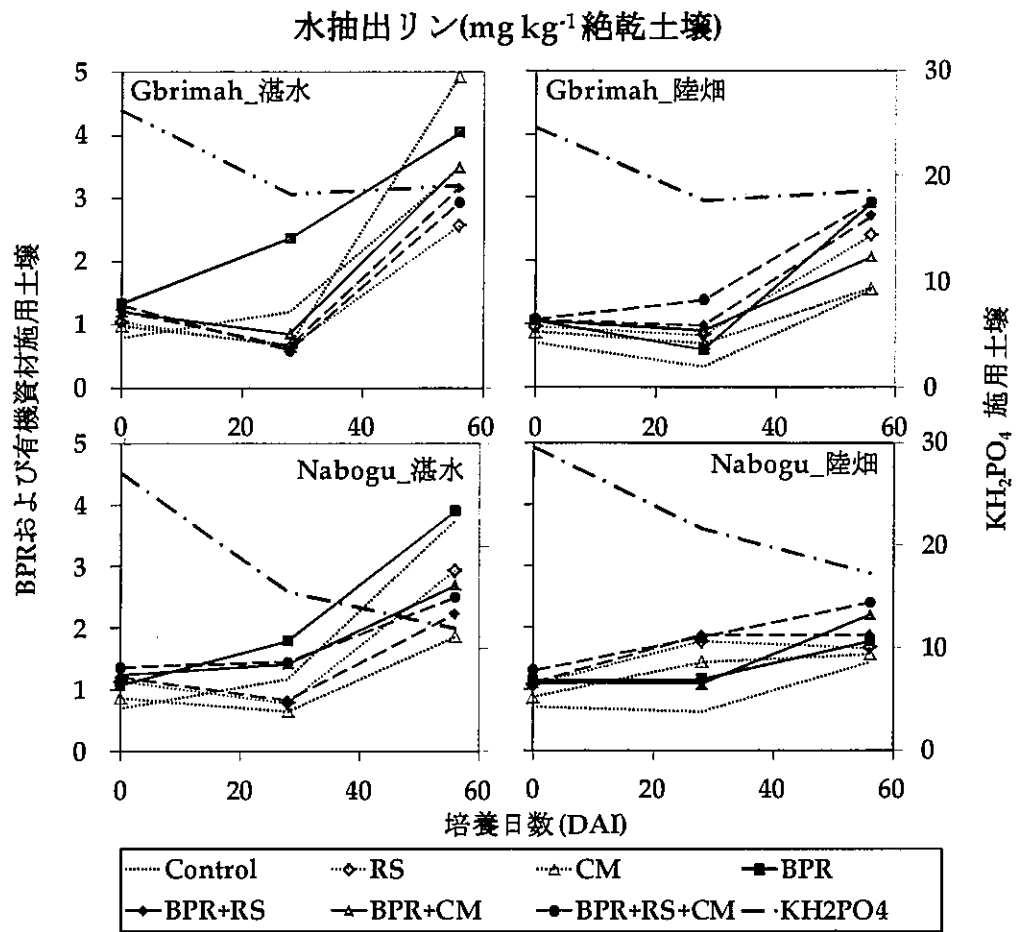
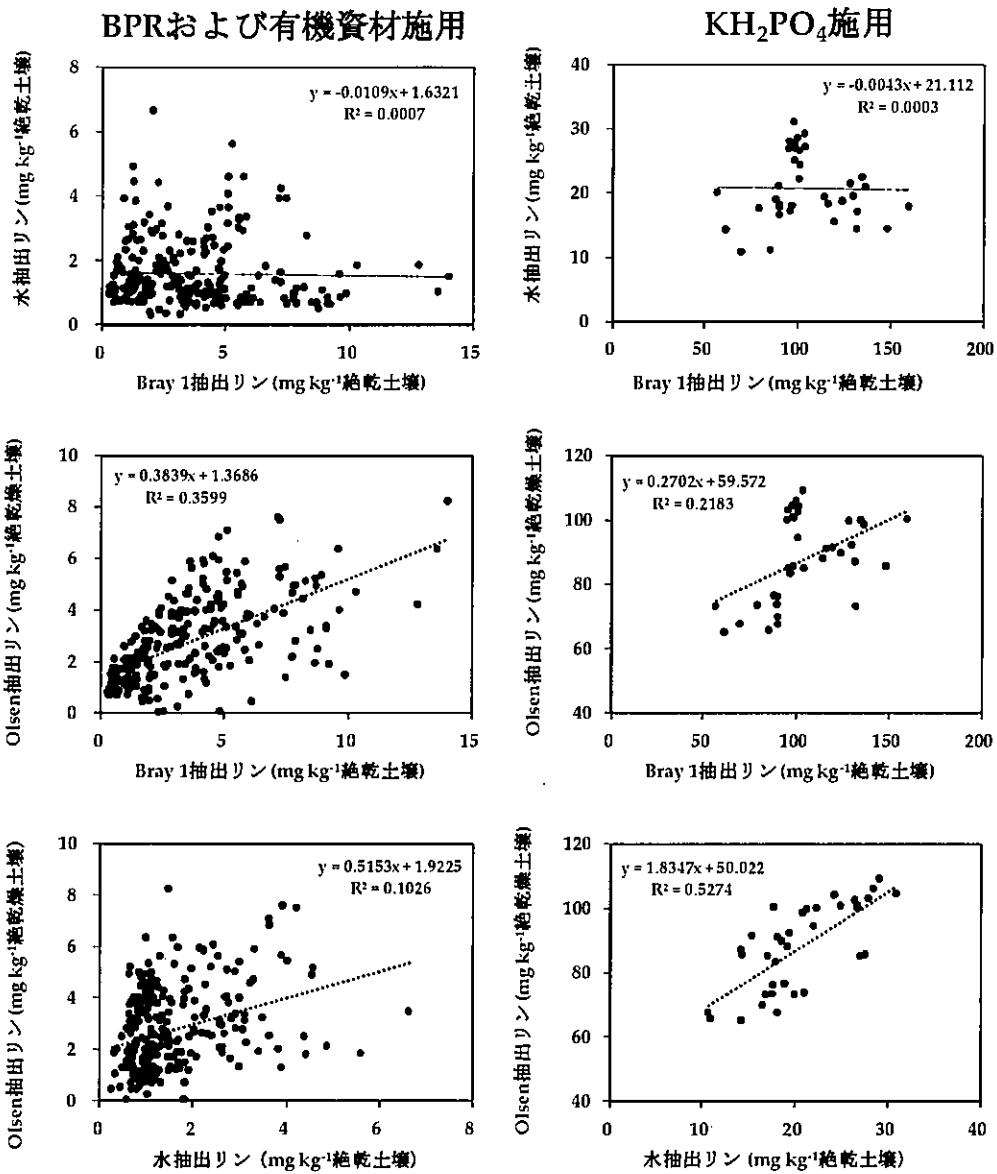


図 III-14. 各種リン資材を施用した Gbrimah 及び Nabogu 土壌における水抽出リンの変化。なお略号はそれぞれ BPR;ブルキナファソ産リン鉱石、RS; 稲わら、CM;牛糞を示す。



☒ III-15. Bray 1、Olsen、水抽出の各抽出法によって抽出されたリンの関係

考察

BPR 直接施用がイネ生育に及ぼす影響

Gbrimah 土壌では、湛水条件において、BPR 直接施用はイネの地上部乾物重を増加させ、RAE では可化学肥料に対し 130%と高い値を示した。また、CM と BPR の複合施用でもイネ地上部乾物重を増加させ RAE で 93%という結果を示した(写真 III-1、図 III-9、及び表 III-13)。陸畑条件では、RAE で 88%だったことから、両水分条件下で十分に有効なリン資材として活用できると考えられるが、BPR と CM の複合施用においては、比較的、湛水条件下で有効である。

Nabogu 土壌では、BPR 直接施用、BPR+CM、及び CM 区でイネ地上部乾物重の増加が認められた。この時の RAE は湛水条件ではそれぞれ 102、110、110%であり、また、陸畑条件ではそれぞれ 117、102、78%の値を示した(写真 III-2、図 III-10 及び表 III-13)。この結果は、BPR 直接施用、BPR と CM の複合施用、及び CM の単独施用も二つの水分条件下において、イネ生育に化学肥料と同程度に有効な肥料であることを示している。

一方で、RS 施用を含む処理区、すなわち、RS 区、RS+BPR 区及び RS+CM+BPR 区では、土壌条件及び水分条件に関係なく、イネ生育には有効とはならなかった(表 III-13)。

BPR 区、CM 区及び BPR+CM 区のリン資材としてのイネ全乾物重に及ぼす効果は、Gbrimah 及び Nabogu 土壌の湛水条件下における地上部乾物重の結果と一致して、有効であると考えられた(図 III-16 及び表 III-13)。しかしながら、Gbrimah 土壌における BPR+CM 区の RAE、及び Nabogu 土壌における BPR 区、BPR+CM 区、CM 区では、イネ全乾物重は陸畑条件でより増加する傾向を示した(表 III-13)。この結果は、イネの根系発達が地上部バイオマス生産において重要な役割を果たしているものと推察される。湛水条件下において、地下部バイオマスは対照区に比較して、ほとんどの試験区で増加傾向を示しているものの、全ての根系発達が RAE に直接影響を及ぼすわけではないと考えられる。地下部乾物重量と各種資材から溶出した有効態リンとの関係については、より詳細な検討がなされるべきであると考えられる。

草丈及び葉齢は、植物乾物重の結果と同様の結果を示した(表 III-8 及び III-11)。同様に、イネ地上部及び地下部におけるリン吸収量については、BPR や各種有機資材の施用に伴って増加した植物体中リン濃度を反映して、土壌中有効態リン含量の増加に伴って高い値を示した(表 III-7、9、10、及び 12)。

全乾物重量(地上部+地下部), mg

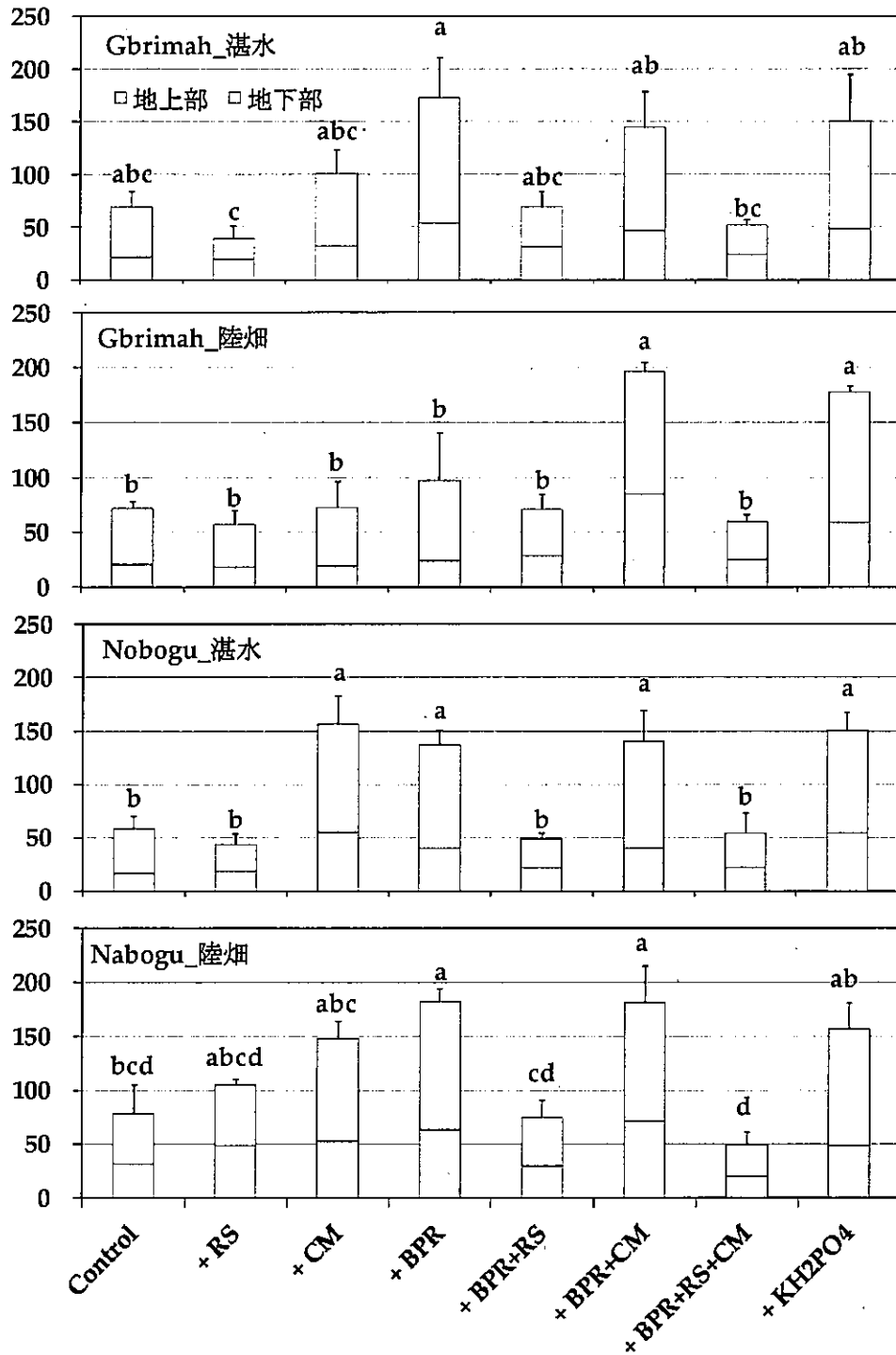


図 III-16. 種々のリン源を加えた Gbrimah 及び Nabogu 土壌で生育したイネ植物の地上部、地下部、全バイオマス量 (播種 56 日後)

表 III-13. 化学肥料に対する各種リン資材の地上部バイオマス、全バイオマス量に関する相対農学的効率(RAE %)

処理	%RAE (地上部乾物重量)				%RAE (全乾物重量)			
	Gbrimah		Nabogu		Gbrimah		Nabogu	
	湛水	陸畑	湛水	陸畑	湛水	陸畑	湛水	陸畑
1) コントロール	0	0	0	0	0	0	0	0
2) + 稲わら	-53	-18	-31	15	-37	-14	-16	33
3) + 牛糞	38	5	110	78	39	1	107	89
4) + リン鉱石120	130	32	102	117	127	24	85	133
5) + リン鉱石120+稲わら	-21	-13	-27	-3	-1	-1	-10	-4
6) + リン鉱石120+牛糞	93	88	110	102	93	117	89	131
7) + リン鉱石120+稲わら+牛糞	-38	-23	-18	-28	-21	-11	-4	-37
8) + リン酸二水素カリウム120	100	100	100	100	100	100	100	100

BPR 及び有機資材の直接施用が土壤肥沃度に及ぼす影響

土壤酸性 (pH)

BPR、RS、CM 等の資材を施用した土壤の pH は、無施用の場合と比較して高い値を示した。湛水土壤条件下では、より高い値が認められた。酸性土壤における pH の上昇は一般にリンの有効性を高める。また、アルミニウムやマンガンの作物に対する毒性を低減する効果もあるとされている(Sahrawat, 2005)。RS 施用に伴う土壤 pH の上昇傾向は、湛水条件でも陸畑条件でも、他の有機資材に比べて高かった。RS 施用は、湛水土壤において、土壤有機物量の増加をもたらす、窒素供給能を高めると考えられる。しかしながら、培養試験における RS 施用は、イネ乾物量の増加には、効果的に作用しなかった。本試験において確認された 4.5~6.8 という範囲の土壤 pH は、イネ生育にとって劇的な生育変化を引き起こすファクターにはならず、また、土壤溶液中のリン酸二水素イオンの分布にも影響しなかった。

BPR 区、BPR+CM 区及び CM 区は、イネ栽培後及び 56 日間培養後に、わずかに低い値を示し、有機資材施用区において、資材由来のわずかに溶出したリンに影響されたと思われるイネ生育状態と一致した傾向を示した。イネは根圏近傍でプロトンの供給を通じて、リンの溶解と有効態リンの増加を引き起こすことが出来たと推察される。一方で、高い濃度で有効態リンを供給した KH_2PO_4 区では pH が低い値を示した。この結果は恐らく、過剰なリン酸等の陰イオンに対する、植物根による直接的なプロトン供給の影響によるものと思われる (Kirk and Saleque, 1995)。

土壤の電気伝導度(EC)について

土壤に有機資材を施用し攪拌した後の 14 日間の前培養において、RS 区、BPR+RS 区、BPR+RS+CM 区及び KH_2PO_4 区において EC が上昇した。これは土壤肥沃度に

関連する指標としての EC が、各種イオンの溶出により上昇したことを示している。栽培後 0~28 日間では EC が、BPR 区、RS 区、CM 区及び KH_2PO_4 区で植物生育が無い状態で大きく低下した。また陸畑条件よりも湛水条件下で顕著だったことから、幾つかの土壤肥沃度関連の特性値が、特に湛水条件下で各種リン資材の施用に影響されていることを示している。湛水条件の還元状態にある土壤では、溶存酸素量が少なく、この結果、土壤環境中の吸脱着反応を含むイオン平衡反応及び土壤中の主要栄養塩及び微量元素の有効性を減少させた可能性がある。このような傾向は BPR や有機資材の施用に伴って増加する可能性があると考えられる。

培養土壤におけるイネ生育は、特に多量のリンが施用された際、また、有機資材が湛水条件において施用された際に EC の低下をより大きくした。この傾向はイネの生育がリンを含む幾つかの栄養塩の植物可給性を減少させたことを示唆している。植物体によって吸収されたリンは植物の乾物生産に利用された。一方、土壤中の有効態リンの減少は、土壤の有機及び無機表面による、吸収、固定、吸蔵等の反応によって、植物不可吸態のリンに形態を変化したことによると思われる。また、リン可吸性の減少は土壤への有機物施用と強く関連している。

土壤有効態リンについて

培養土壤から抽出した有効態リン量は、土壤環境や水分環境によって、大きな変動を示した。 KH_2PO_4 区は他のどの処理よりも試験期間中を通じて高い値を示した。前年度の試験では、土壤有効態リンが幾つかの土壤特性の影響と植物体の吸収によって、減少することを明確に示している。

リン量の変化（リン収支）について、28~56 DAI における 150g の土壤試料での試験結果から計算した。その結果、 KH_2PO_4 区は他のどの処理区よりも多くのリンが固定化されたことが示された。また、土壤条件や水分条件に関係なく、植物に吸収されたリン量は、他の処理区に比較して低かった(図 III-17, 18)。このリンの固定化は、粘土鉱物との反応によるものと考えられる。対照的に、BPR と有機資材施用区におけるリンの固定化は、施用された有機物由来の新しい遊離性の画分を含む土壤有機物によるものであると考えられる。

KH_2PO_4 のような水溶性リン資材から供給された過剰なリンは、特に有機物含量の少ない土壤環境においては、遅効ないし緩効性のリン肥料に比べ、より粘土鉱物に吸着される。BPR や、稲わら、牛糞などの比較的水溶性リンの少ない資材の施用は、土壤粘土鉱物による吸収量も少ないと思われる。本研究では、BPR 及び BPR+CM 区で溶出したリンが KH_2PO_4 区よりも植物生育に有効であると考えられる。リン資材としての BPR と牛糞の同時施用は、酸性の低リン土壤環境において、湛水及び陸畑の両条件でリンの利用効率を高め、草丈や葉齢、地上部、地下部乾物量などの植物生育を高める結果になるとと思われる。しかしなが

ら、施用資材からのリン溶出、植物体によるリン吸収、土壌中でのリン難溶化など、BPR 及び有機資材のリン溶出に係るメカニズムについては、より詳細に議論されるべきであると考える。

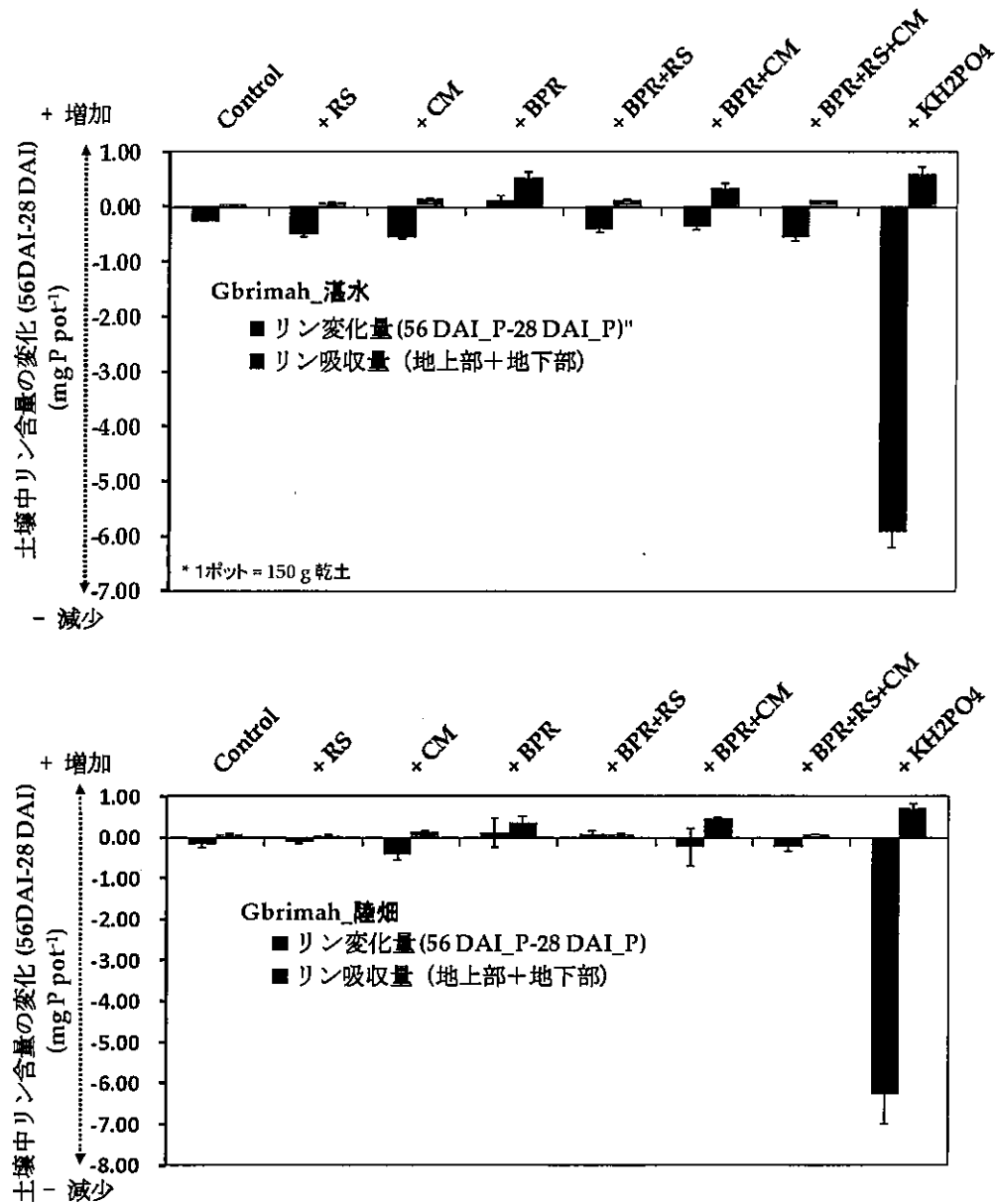


図 III-17. 培養開始後 28 日後から 56 日後にかけての Gbrimah 土壌における土壌中リン含量の変化量—灌水および陸畑条件下における培養試験の結果—

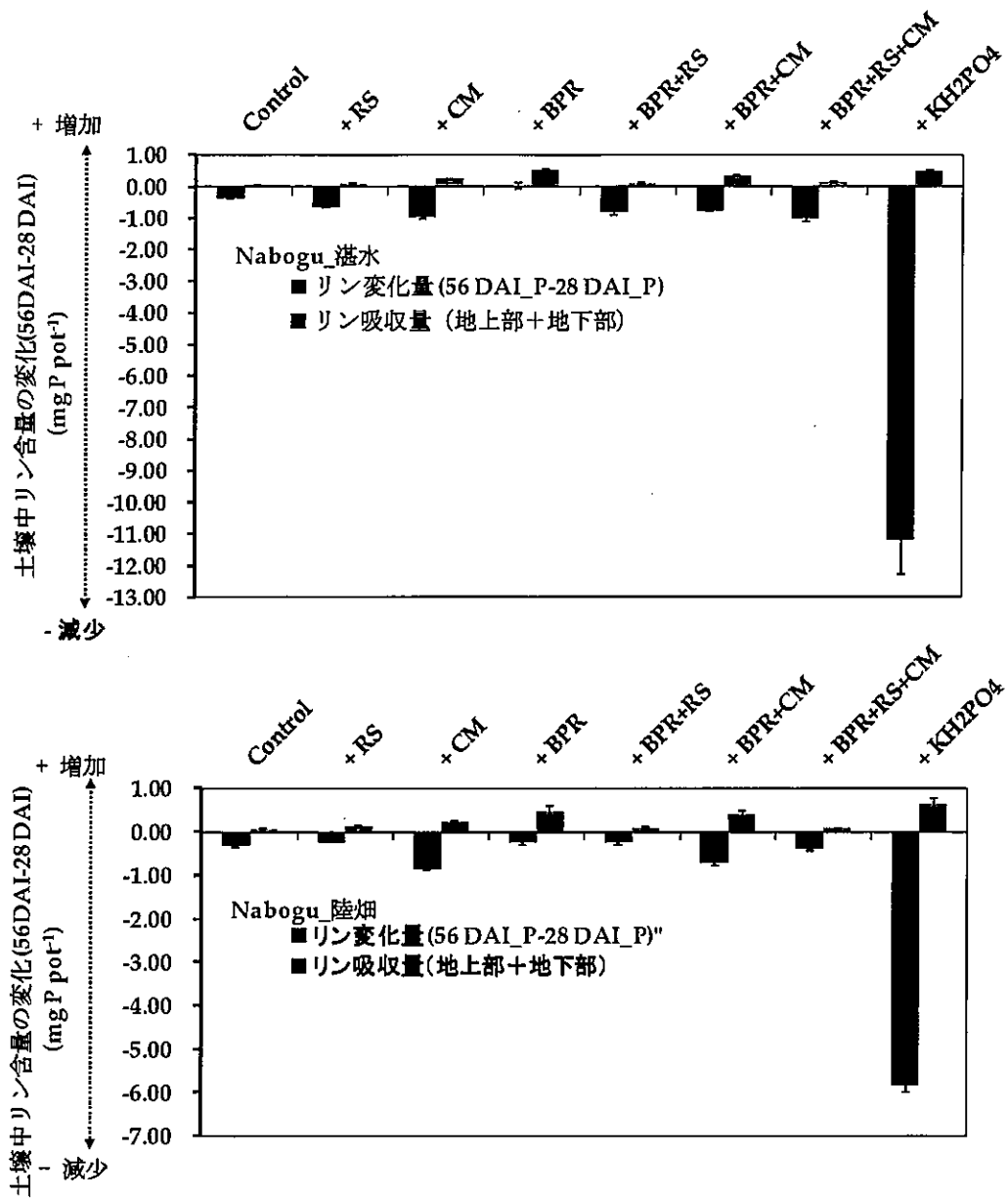


図 III-18. 培養開始後 28 日後から 56 日後にかけての Nabogu 土壌における土壌中リン含量の変化量—湛水および陸畑条件下における培養試験の結果—

要約

1. Gbrimah 土壌では、湛水条件における BPR 直接施用が、化学肥料に比較してより高い効果を示した。また、BPR と牛糞の同時施用では、水分条件に関係なく、化学肥料と同程度のイネ増収効果が認められた。
2. Nabogu 土壌では、水分条件に関係なく、BPR 区及び BPR+CM 区において、化学肥料施用区よりも高い収量を示した。また牛糞施用は、湛水条件では化学肥料よりも高い収量を、また陸畑条件では化学肥料と同程度の収量を示した。
3. 土壌の性質と植物の活動が直接的に土壌中のリン可溶性に影響を与えた。ガーナ稲作における各種リン資材施用において、土壌中の有効態リン量は、土壌による固定及び植物による吸収によって減少する。
4. 水溶性リン肥料(KH_2PO_4)から溶出したリンの大部分は、土壌の粘土鉱物により固定され、このように固定されたリンは植物不可吸態であった。一方、BPR 及び有機資材施用では、リンの固定化は比較的少なく、また土壌中におけるリンの固定化は有機物によってなされた可能性がある。
5. 本研究から、化学肥料に比べて、BPR 単独施用及び BPR と牛糞の同時施用が、植物生長に寄与することが期待される。BPR と牛糞の同時施用は、酸性の低リン土壌環境において、湛水及び陸畑の両条件でリンの利用効率を高め、植物生育を高める結果になると思われる。

引用文献

- Bationo A, Mughogho SK, Mokwunye U 1985: Agronomic evaluation of phosphate fertilizers in tropical Africa. Proceedings of a symposium on Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in Sub-Saharan Africa, 25-28 March 1985, Lome, Togo.
- Bissonnais YL 1996: Soil characteristics and aggregate stability. In Agssi M (ed.) Soil erosion, conservation, and rehabilitation, Marcel Dekker, 41-60.
- Bray RH, Kurtz LT 1945: Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science., 59, 39-45.
- Bremner DC, Mulvaney JM 1982: Total nitrogen. In Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). Methods of Soil Analysis. Number 9 Part 2, American Society. of Agronomy.
- Buri, M. M., Iassaka, R. N., Fujii, H. and Wakatsuki, T. 2009: Comparison of Soil Nutrient status of some Rice growing Environments in the major Agro-ecological zones of Ghana. International Journal of Food, Agriculture & Environment – JFAE. Accepted 26/5/2009
- Chien S.H., Luis I. Prochnow, Robert Mikkelsen 2010: Agronomic Use of Phosphate Rock for Direct Application, Better Crops 94 21-23.
- Food and Agriculture Organization 2004: Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No.13, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Ikerra ST, Semu E, Mrema JP 2007: Combing *Tithonia diversifolia* and minjingu phosphate rock for improvement of P availability and maize grain yields on a chromic acrisol in Morogoro, Tanzania. In Bationo A, Waswa B, Kihara J, and Kimetu J (eds). Advances in integrated soil fertility management in Sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities, Springer, 333-344.
- Issaka RN, Buri MM, Adjei EO 2010. Characterization of indigenous resources in Ghana; Locally available soil amendments and fertilizers for improving and sustaining rice production. Report submitted to JIRCAS, Japan.
- Iyamuremye F, Dick RP 1996: Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Adv. Agron.*, 56, 139-185
- JIRCAS 2010: The study of improvement of soil fertility with use of indigenous resources in rice systems of sub-Sahara Africa. Business Report 2009. 177 pp.
- JIRCAS 2011: The study of improvement of soil fertility with use of indigenous resources in rice systems of sub-Sahara Africa. Business Report 2010.

pp92-102.

- Kirk GJD, Saleque MA 1995: Solubilization of phosphate by rice plants growing in reduced soil: prediction of the amount solubilized and the resultant increased in uptake. *Euro J. Soil Sci.*, 46, 247-255.
- Mclean EO 1982: Soil pH and lime requirement. In Page AL, Miller RH, and Keaney DR (eds). *Methods of Soil Analysis*. Number 9 Part 2, Am. Soc. of Agron.
- Murphy J, Riley JP 1962: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, 27, 31-36.
- Prasad R, Power JF 1997: *Soil fertility management for sustainable agriculture*. CRC Lewis publishers, New York. pp.356.
- Sahrawat KL 2005: Fertility and organic matter in submerged rice soils. *Curr. Sci.*, 88(5), 735-739.
- Saunders WMH 1965: Phosphate retention by New Zealand soils and its relationship to free sesquioxides, organic matter, and other soil properties. *N.Z. J. Agric. Res.*, 8, 30-57.
- Thomas GW 1982: Exchangeable cations. In Page AL, Miller RH, and Keaney DR (eds). *Methods of Soil Analysis*. Number 9, Part 2. *Am. Soc. of Agron.*
- Walkley A, Black IA 1934: An examination of the method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science.*, 37, 29-38.
- Windmeijer PN, Andriessse W 1993: *Inland valleys in West Africa; An ago-ecological characterization of rice-growing environments*. ILR IPubl. No.52, ILRI, Wageningen, Netherlands, 160 pp.