

アロフェン質黒ボク土水田における有効態リン酸の周年変動 と牛ふん堆肥連用の効果

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	齊藤, 奏枝 松野, 更和 平井, 英明 ほか2名,
巻/号	78巻3号
掲載ページ	p. 283-289
発行年月	2007年6月

アロフェン質黒ボク土水田における有効態リン酸の 周年変動と牛ふん堆肥連用の効果*

齊藤奏枝**・松野更和**・平井英明**・加藤秀正**・前田忠信***

キーワード 糸根状斑鉄, プレイ第二抽出法, 穂のリン酸含有率, リン酸収着量

1. 背景と目的

一般に水田では湛水による土壤の還元が進むにつれ、リン酸の有効性が增大するが、その増大割合は土壤のリン酸吸収力や有機物含量などの影響を受けて一定の傾向を示さないことが多い¹⁾。上沢・内田²⁾は、東北地方に分布する土壤を用いて湛水に伴う有効態リン酸含有量の変化を調べた結果、灰色低地土では湛水土壤の有効態リン酸含有量が風乾細土の3.7倍であったのに対して、リン酸吸収係数が2,000を超える黒ボク土では1.1~1.3倍と、ほとんど増大しないことを認めた。さらに上沢・内田²⁾は、リン酸を多施用しても、イネ生育期間中の有効態リン酸含有量が増大しないことを示した。

一方、Nanzyoら³⁾は室内実験による土壤の還元に伴うリン酸収着量の増減メカニズムの解明を試みた結果、灰色低地土においては、微弱な還元で水和酸化鉄によるリン酸収着量は増大するものの、さらに還元が進むと、その水和酸化鉄が二価鉄に変化するため、リン酸収着量は減少するが、アロフェン質黒ボク土の場合は水和酸化鉄含有量が多いために、還元が強く進行してもすべてが二価鉄に変化することはなく、収着量は増加することを報告した。さらに、Akahaneら⁴⁾は水和酸化アルミニウムにおいても還元に伴う同様の現象によってリン酸収着量が増大することを認め、アロフェン質黒ボク土の還元に伴うリン酸収着量の増大に、水和酸化鉄のみならず、水和酸化アルミニウムが寄与することを示唆した。

前田・平井⁵⁾は、牛ふん堆肥連年施用黒ボク土水田では化学肥料連年施用黒ボク土水田に比べて収穫期のイネ植物体のリン酸含有率がより高いことや、有効態リン酸含有量と穂のリン酸含有率との間に有意な相関があることを示したが、堆肥連年施用田の土壤とイネを結ぶ根圏における養分吸収に関して、さらに詳細を明らかにすることが今後の課題であるとした。

これらの実験室および圃場レベルにおける研究成果と課

題を背景として、本試験ではリン酸吸収係数が2,000以上を示すアロフェン質黒ボク土において、イネの生育期間および収穫後にわたる土壤の有効態リン酸含有量の周年変動を分析し、イネの穂のリン酸含有率を高める牛ふん堆肥の施用効果を検討したので報告する。

2. 材料および方法

1) 試料採取圃場および試験田

試験は栃木県真岡市の宇都宮大学農学部附属農場内の黒ボク土水田で行われた。本試験では栽培品種としてコシヒカリを用い、前田・平井⁵⁾の報告にある牛ふん堆肥連年施用・化学肥料無施用田内に設けられた有機栽培田と、化学肥料連年施用・多肥田を対象とした(以下、化学肥料を化肥、連年施用を連用とする)。各試験田の面積は0.1 haである。ここで有機栽培田を用いた理由は、堆肥の圃場レベルでの施用効果をより明確にできると考えたからである。また化肥連用・多肥田(以下、化肥連用田と呼ぶ)を選択したのは、投入した堆肥と化学肥料の全リン酸量がほぼ同等か、若干化肥連用田の方が多かったためである。これらの圃場では1991年以來、牛ふん堆肥・化肥連用圃場試験⁶⁾を継続している。有機栽培田は牛ふん堆肥20 Mg ha⁻¹を施用し、無農薬栽培が行われている。試験には牛ふん、落葉、籾殻、稲わら、麦わらによる自家製堆肥(水分率71.8%, T-C 33.3%, T-N 2.31%, C/N比14.7, P₂O₅ 2.36%, K₂O 2.19% (1999~2005年の平均値))を用いた。化肥連用田は高度化成肥料((10-18-16)および(5-20-20))をそれぞれ全層施肥用および側条施肥用として施用し、追肥は化成肥料(18-0-16)で2回行った。過去9~10年間の平均施肥量は有機栽培田(1997~2005年)で133 kg N ha⁻¹, 136 kg P₂O₅ ha⁻¹, 化肥連用田(1996~2005年)で94 kg N ha⁻¹, 152 kg P₂O₅ ha⁻¹である。本研究では、収量は1997~2005年のデータを、収量構成要素は2003~2005年のデータを用いた。

各試験田において1995年に土壤断面を作成し、土壤試料を平井ら⁶⁾に従って分析した結果を表1に示した。表中のFe_dはジチオナイト-クエン酸塩還元抽出態の遊離酸化鉄を、Al₀, Fe₀, Si₀は水和酸化物含有量の指標となる酸性シュウ酸塩抽出態の鉄、アルミニウム、ケイ素をそれぞれ表している。また、M.I.はメラニック・インデックスである。このデータより、いずれの土壤も統一的土壤分類体系第二次案⁷⁾ではアロフェン黒ボク土に分類される。さ

* 本研究の一部は日本土壤肥料学会関東支部栃木大会(2006年)において発表した。

** 宇都宮大学大学院農学研究科(321-8505 宇都宮市峰町350)

*** 宇都宮大学農学部附属農場(321-4415 真岡市下籠谷443)
2006年11月8日受付・2007年1月12日受理
日本土壤肥料学雑誌 第78巻 第3号 p.283~289(2007)

表 1 各試験田の層別土壌の化学性

試料土壌	層位	深さ (cm)	pH			交換性陽イオン* ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	CEC	γ_1	リン酸 吸収係数	
			H ₂ O	KCl	NaF					
有機栽培土壌	Ap 1	0~15	5.60	4.77	11.41	10.37	39.76	2.00	2,200	
	Ap 2	15~26	5.85	4.92	11.72	10.77	40.56	0.92	2,340	
	Ah 1	26~44	5.77	4.75	11.58	10.52	44.29	1.26	2,380	
	Ah 2	44~63	5.72	4.70	11.65	10.42	47.22	1.49	2,320	
	C	63~95	5.63	5.23	11.31	10.86	18.32	0.70	2,270	
	2 Ah	95~103+	5.23	4.57	10.91	9.80	44.64	3.76	2,250	
化肥連用土壌	Apr	0~23	5.36	4.71	11.70	10.07	40.45	2.06	2,450	
	Ap	23~34	5.42	4.78	11.83	10.20	39.49	1.63	2,520	
	Ah	34~51	5.34	4.68	11.85	10.02	38.79	1.80	2,510	
	C	51~69	5.55	4.92	11.25	10.47	27.05	1.12	2,260	
	2 Ag	69~102+	5.24	4.44	11.54	9.68	37.31	3.83	2,430	
試料土壌	層位	(g kg ⁻¹)					T-C	T-N	C/N	M.I.** (K_{450}/K_{520})
		Fe _d	Al _o	Fe _o	Si _o	T-C				
有機栽培土壌	Ap 1	24.3	46.9	15.8	15.6	95.4	6.13	15.6	1.54	
	Ap 2	28.9	44.8	13.9	14.8	81.1	4.36	18.6	1.51	
	Ah 1	30.6	44.3	12.5	14.2	88.6	4.49	19.8	1.51	
	Ah 2	29.5	43.2	12.0	14.2	84.2	4.32	19.5	1.50	
	C	23.6	67.5	13.4	28.7	12.5	0.86	14.6	1.70	
	2 Ah	14.2	47.7	9.6	15.8	109.3	8.32	13.1	1.56	
化肥連用土壌	Apr	29.1	57.2	19.4	18.2	100.8	5.93	17.0	1.53	
	Ap	35.1	65.3	22.8	20.4	90.3	4.75	19.0	1.52	
	Ah	33.9	60.3	20.8	20.4	91.1	5.00	18.2	1.53	
	C	37.4	54.5	14.8	23.7	30.7	1.95	15.8	1.57	
	2 Ag	28.8	48.0	13.6	15.9	93.1	5.96	15.6	1.54	

* 交換性陽イオンはCa, Mg, K, Naの含量. ** メラニック・インデックス.

表 2 土壌断面記載の概略

調査日	2005年12月1日								
調査地点	栃木県真岡市下籠谷443 宇都宮大学農学部附属農場内水田(北緯36°29'11", 東経139°59'16"(日本測地系))								
気候	照葉樹林(年平均気温12.8°C, 降水量1,266.8mm) (真岡気象台における1978年より1995年の18年間のデータより算出)								
地質・母材	火山性岩石(堆積物), 火山灰(田原ローム層+宝木ローム層, 更新世, 第四紀)								
地形	高位(宝積寺)面の石法寺台地, 人工改変地(標高85m)								
試験田	層位	厚さ (cm)	土色	斑紋結核	ジピリジル 反応	リン酸 吸収係数*			
有機栽培田	App 1	0~18	2.5 YR 2/1	非常に鮮明膜状斑鉄(5 YR 4/6)あり 鮮明糸根状斑鉄(2.5 YR 4/8)あり	—	2,240			
	App 2	18~44	5 YR 2/1	鮮明膜状斑鉄(5 YR 4/6)含む 非常に鮮明糸根状斑鉄(2.5 YR 4/8)あり	—	2,310			
化肥連用田	Apr	0~21	7.5 YR 1.7/1	非常に鮮明膜状斑鉄(2.5 YR 4/6)あり	+	2,400			
	App	21~29	5 YR 2/1	非常に鮮明膜状斑鉄(2.5 YR 4/6)まれにあり	—	2,540			

* リン酸吸収係数は各層位につき3反復測定した.

らに10年後の2005年に, 各試験田において土壌調査ハンドブック⁸⁾に従って断面記載を実施し, 作土層の記載の一部を表2に記した.

2) 試料採取時期および採取方法

2003年はイネの生育期間中毎月, 2004年4月から2006年3月の2年間は, イネの生育期間を問わず毎月土壌を採取した. イネ移植後から収穫直後(5~9月)までの期間はステンレス製の100 mL採土円筒を用い, 各試験田3カ所のイネの株間から300 mLずつ土壌を採取し, ビニール袋に入れて混合, 密封し, 分析試料とした. イネの非生育

期間中(10~4月)は移植ごてを用い, 各試験田3カ所の作土層15 cmからそれぞれ10回土壌を採取し, ビニール袋に入れて混合, 密封し, 分析試料とした.

酸化還元電位は前田ら⁹⁾に従い, ポータブルORP計PシリーズRM-12P(TOA-DKK製)白金複合電極を用い, 各試験田3カ所の土壌深さ5 cmに設置し, 約2週間に1回の割合で測定した.

また上記の試料とは別に, 収穫直後, 各試験田6カ所のイネの株間からステンレス製100 mL円筒管で未攪乱土を採取し, 三相分布を求めた.

穂の成分含有率を調べるためのイネ植物体試料の採取方法は、前田・平井⁹⁾に従った。収穫期に各試験田生育調査地点3カ所において、それぞれ連続した10株の穂数を調査し、その3地点周辺から、それぞれ平均穂数株を掘り取り、計3株を分析試料とした。採取したイネ植物体に付着した土壌を洗い流してから株ごとに稈+葉鞘、葉身、穂に切り分け、80°Cで一昼夜乾燥後、乾物重を測り、裁断・粉碎して0.5 mmの篩を通したものをデシケーターに保存し、分析試料とした。

3) 試料調製および分析・調査方法

有効態リン酸：土壌試料はブレイ第二法（準法）で抽出し、アスコルビン酸還元モリブデン青法により発色させ、日立330型自記分光光度計で吸光度を測定した。実験書¹⁰⁾では風乾細土を用いることになっているが、供試したアロフェン質黒ボク土の風乾細土水分含量は約10%と高いため、実験書に記載されている方法に従うと土：液比が1：22程度となり、土：液比=1：20から大きく外れてしまう。また、上沢・内田¹⁾は湿潤土を用いてリン酸を分析する場合には乾土：抽出液比=1：10（ただし、湿潤土中の水分は考慮していない）を用いているが、この比率を用いた場合、アロフェン質黒ボク土では抽出液量が少なくなり、後述の活性鉄の分析が液量不足のため困難となる。これらの理由から、乾土：抽出液比=1：20を保つため、採取直後に試料の水分率を測定し、その翌日、乾土2.5 g相当に対し抽出液を50 mL加え、1分間手で振とうし、No.6のろ紙（φ=150 mm）でろ過したろ液を発色させ、その吸光度を測定することによって有効態リン酸含有量を求めた。また、各年の収穫跡地土壌を風乾し、同様の方法で有効態リン酸含有量を求めた。

活性鉄：上記湿潤土のブレイ第二法（準法）ろ液を用い、偏光ゼーマン原子吸光光度計（日立製Z-6100型）でその鉄濃度を測定し、これを以下の理由により活性鉄とみなした。すなわち、湿潤土試料を用いて、常法の酢酸塩緩衝液抽出法¹¹⁾およびブレイ第二法（準法）により求めた鉄含有量の関係を吟味したところ、回帰式は $y=0.712x+30.76$ ($r=0.928$, $p<0.001$, $n=12$)であったことから、ブレイ第二法（準法）による抽出鉄（以下、活性鉄と呼ぶ）の値は、湛水、落水に伴う鉄の挙動を検討することが可能であると考えられたため、この方法を採用した。

リン酸吸収係数：試料をリン酸アンモニウム液法¹²⁾で

抽出し、抽出液をバナドモリブデン酸法により発色させ、その吸光度を測定した。

穂の成分含有率：収穫期作物体の粉末状試料を硝酸-過塩素酸分解後、分解液をアスコルビン酸還元モリブデン青法で発色させ、吸光度を測定してリン酸含有率を求めた。窒素・炭素含有率はNCアナライザー（Sumitomo Chemical Sumigraph NC-80 A）によって測定した。

収量、収量構成要素は従来法¹³⁾に従って調査した。

3. 結果および考察

1) 作物体の特徴

(1) 収量および収量構成要素

各試験田の収量、収量構成要素を表3と図1に示した。1997~2005年の収量の年次変動をみると、化肥連用田の収量は6 Mg ha⁻¹でほぼ頭打ちとなっているが、有機栽培田の収量は化肥連用田に劣るものの、年々増収する傾向にあった。9年間のうち、1998年と2003年は天候不良年であり、各年の作況指数は全国で98, 90, 栃木県で93, 92であった¹⁴⁾。この2年は化肥連用田で極端な減収となったが、有機栽培田では化肥連用田ほどの減収は起こらず、1998年は同等、2003年は化肥連用田を上回った。2003年は化肥連用田の登熟歩合が7月、8月中旬の低温・日照不足のため41.8%と低下したのに対し、有機栽培田の登熟歩合は82.0%と良好であった（表3）。

齊藤ら¹⁵⁾は灰色低地土水田の慣行区（化肥連用）と有機・無農薬区において10年間の連用試験を行い、収量の年次変動を比較したところ、慣行区に比べ有機・無農薬区が5~10%前後の減収（試験初年度は37%、2年目は48%）で経過した。冷害年（1993年）は慣行区に比べ有機・無農薬区の収量が22%高くなり、その理由を穂数が

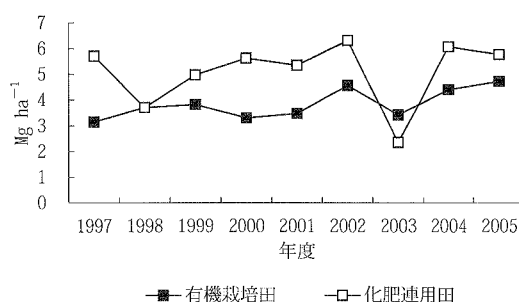


図1 過去9年間の収量の推移

表3 収量および収量構成要素

Year	栃木県の作況指数	試験田	収量 (Mg ha ⁻¹)	穂数 (本 m ⁻²)	一穂粒数 (粒/本)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)
2003年	92	有機栽培田	3.42±0.16	188±10	105±8	82.0±2.7	21.1±0.2
		化肥連用田	2.35±0.48	242±13	109±8	41.8±5.7	20.3±0.6
2004年	107	有機栽培田	4.40±0.43	244±19	108±7	84.6±4.9	21.4±0.2
		化肥連用田	6.07±0.17	330±28	107±5	84.8±3.2	22.6±0.3
2005年	102	有機栽培田	4.72±0.23	234±19	114±16	92.7±2.0	21.6±0.2
		化肥連用田	5.77±0.18	326±25	115±1	83.8±0.5	21.3±0.5

$n=3$, ±SD.

表 4 穂の成分含有率

試験田	穂の成分含有率		
	P ₂ O ₅ (%)	N (%)	N/P 比
2003年 有機栽培田	0.591±0.077	1.10±0.06	1.89±0.37
2003年 化肥連用田	0.548±0.020	1.11±0.07	2.04±0.17
2004年 有機栽培田	0.522±0.031	1.10±0.03	2.11±0.10
2004年 化肥連用田	0.424±0.033	1.08±0.08	2.56±0.38
2005年 有機栽培田	0.565±0.020	0.89±0.04	1.58±0.05
2005年 化肥連用田	0.466±0.014	0.93±0.03	2.00±0.03

n=3, ±SD.

多く、登熟歩高が高かったためであると報告している。このため、冷害年に有機栽培圃場で収量が安定する傾向には、灰色低地土とアロフェン質黒ボク土共通の特徴として、その高い登熟歩高が関係していると考えられた。

(2) 穂のリン酸含有率

各年における穂の成分含有率を表 4 に示した。この表において、リン酸含有率は化肥連用田に比較して有機栽培田の方が高かった。また、投入全リン酸量が化肥連用田の方が高い場合であっても、有機栽培田の方が穂のリン酸含有率が高くなる傾向を 3 年にわたって確認でき、化肥連用田に比べて堆肥連用田の穂のリン酸含有率が高いという前田・平井⁵⁾の報告が裏付けられた。登熟と三要素吸収量との関係について、本谷・鎌田¹⁶⁾はリン酸の吸収量が少ないと登熟は抑制されると報告しており、有機栽培田で穂のリン酸含有率が高くなったことによって高い登熟歩高が維持されることが、冷害年においても安定した収量が得られる一因であると推察された。

2) 有効態リン酸含有量の周年変動

(1) 湛水下での有効態リン酸含有量

図 2 に 2004 年度および 2005 年度の有効態リン酸含有量の推移を示した。イネ移植日の 1 週間前 (5 月) から 8 月まで水田は湛水管理されていたが、この間、有効態リン酸含有量は有機栽培田の土壤 (以下、有機栽培土壤) で 10.4±1.5~13.5±0.4 mg, 化肥連用田の土壤 (以下、化肥連用土壤) では 6.4±1.5~11.3±0.5 mg/100 g (n=3) であり、入水後徐々に減少、もしくは低いレベルのまま推移した。図 3 に示した 2005 年度の活性鉄は、6 月から 7 月にかけて急激に、7 月から 8 月にかけては緩やかに増加した。また、図 4 の 2005 年の湛水期間中の酸化還元電位の推移を考慮すれば、6 月下旬から 8 月上旬にかけて、各試験田で還元がかなり進行していると考えられるが、有効態リン酸は増大しなかった。有効化したリン酸がイネによって即時に吸収された可能性を考慮し、2005 年は化肥連用田内にイネ無栽植区 (1 m², 3 反復) を設け、同様にイネ生育期間中の有効態リン酸含有量を求めたが、その分析値は化肥連用土壤とほぼ等しい値を示した (図 3)。

上沢・内田²⁾は、多湿黒ボク土 (リン酸吸収係数 2,390) と灰色低地土において、水田の湛水期間中、活性二価鉄の生成量は緩慢に増加し、多湿黒ボク土では 7 月から 8 月にかけて著しく増加する。一方、灰色低地土の有効

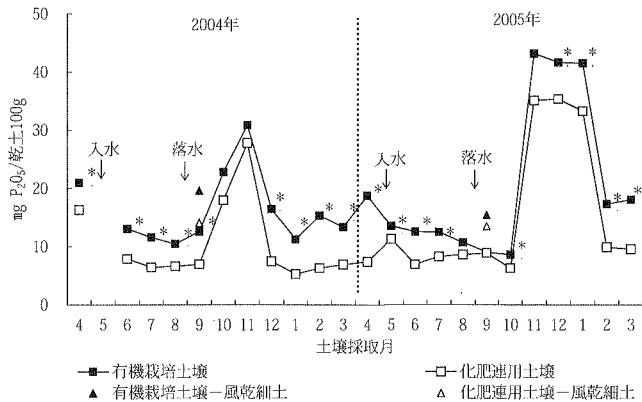


図 2 ブレイ II リン酸含有量の周年変動 (2004・2005 年度)

*: 各月の有機栽培土壤と化肥連用土壤の値を比較したとき、5%以上の水準で有意差があることを示す。F 検定による等分散性の検定を行った後、平均値の差の検定を t 検定によって行った。n=3.

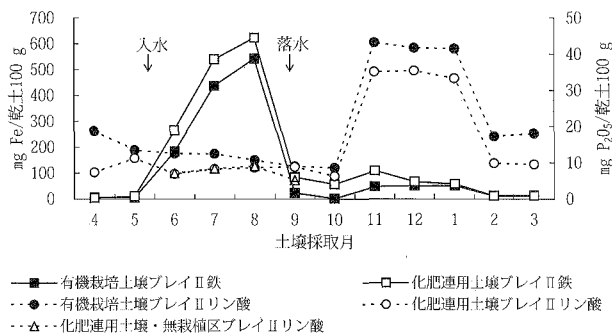


図 3 ブレイ II 鉄、ブレイ II リン酸含有量の周年変動 (2005 年度)

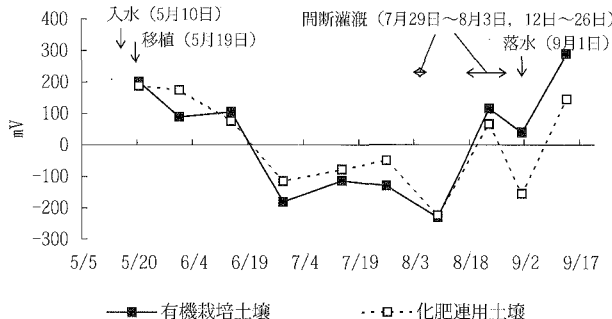


図 4 酸化還元電位の推移 (2005 年度)

態リン酸含有量は活性二価鉄と同様に増加する傾向にあるが、多湿黒ボク土においては活性二価鉄が急増したにもかかわらず、有効態リン酸含有量はほとんど変化しないことを報告している。また、加藤ら¹⁷⁾は表層腐植質多湿黒ボク土水田において、コシヒカリ生育期間中の水溶性リン酸含有量が極めて低いことを報告している。これらのことから、リン酸吸収係数が 2,000 以上の黒ボク土水田においては、湛水とその後の還元の進行によってもリン酸は有効化しないと考えられた。

表 1 に示したように、Fe₀ と Al₀ の値は、有機栽培土壤ではそれぞれ 15.8 g kg⁻¹, 46.9 g kg⁻¹, 化肥連用土壤で

は 19.4 g kg^{-1} , 57.2 g kg^{-1} と、非常に高い。Nanzyo ら³⁾や Akahane ら⁴⁾は、この Fe_0 値や Al_0 値に匹敵する和水平酸化鉄や和水平酸化アルミニウムを含有する黒ボク土を用いた室内実験において、湛水に伴い還元が進んでもリン酸吸着量が維持されるばかりでなく、それが増大することを認めた。このため、アロフェン質黒ボク土水田圃場では、和水平酸化鉄や和水平酸化アルミニウムの含有量が高いため、その吸着量が減少するのではなく、逆に増大し、リン酸が有効化しにくいと考えられた。

(2) 畑状態での有効態リン酸含有量

両試験田とも、9月上旬から落水し、その後は翌年のイネ移植日約1週間前に入水するまで、圃場は畑状態で経過した。図2によれば、2年度とも落水開始後1~2カ月で有効態リン酸含有量が急激に増加し始め、1~3カ月間は有機栽培土壌では $30.9 \pm 1.5 \sim 43.2 \pm 5.5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ($n=3$)、化肥連用土壌では $27.8 \pm 3.8 \sim 35.4 \pm 1.9 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ($n=3$) と、湛水期間中よりも高いレベルを維持し、その後急激に減少した。

湛水下では低い値を示す有効態リン酸含有量が、落水後の酸化条件下で増加し、さらに乾燥が進んだ12~2月に減少し、翌年の入水前には再び一定のレベルに落ち着く現象や、冬期の有効態リン酸含有量の極大値が風乾細土の有効態リン酸含有量(図2)よりも高くなる現象は、これまでに報告されておらず、黒ボク土水田におけるリン酸の可給化のメカニズムを考える上で重要である。つまり、これらの現象は、アロフェン質黒ボク土水田におけるリン酸の有効化は、湛水後の還元の進行によるものではなく、落水による還元的条件から酸化的条件への変化の過程で起こることを示唆している。

(3) 穂のリン酸含有率と有効態リン酸含有量の関係

2003~2005年の穂のリン酸含有率と、イネ生育期間中の6月(分けつ盛期)、7月(幼穂形成期)、8月(出穂~穂揃い期)、9月(収穫期)の湿潤土および収穫後の風乾細土の有効態リン酸含有量との関係を解析し、表5に示した。このうち、7月湿潤土および9月風乾細土の有効態リン酸含有量と、穂のリン酸含有率との関係をそれぞれ図5、6に示した。これらの図表において、風乾細土でも穂のリン酸含有率との相関関係は認められるが(1%水準)、湿潤土では、より高度に有意な相関関係(0.1%水準)が認められた。これは、穂のリン酸含有率や土壌の有効態リ

ン酸含有量が化肥連用田よりも有機栽培田において高い傾向が、7月の湿潤土を用いるとより明確に表されることを示している。さらに2004~2005年においても、水田の湛水日数が短い6月や、落水後の9月よりも、土壌の還元が進んだ7月の湿潤土の方が相関係数の危険率は5%から0.1%へと低くなり、有意性が高くなった。最高分けつ期付近の茎葉のリン酸含有率はイネの生育期間と同一期間湛水した土壌の分析値と相関関係が認められた報告¹⁸⁾を考慮すると、イネのリン酸含有率と有効態リン酸含有量の関連性の評価には、土壌の還元が進行した幼穂形成期頃の湿潤土の有効態リン酸の値が適切であると考えられた。

3) 土壌の形態と物理性

図2より、各試験土壌の有効態リン酸含有量を比べると、2年間を通して有機栽培土壌が化肥連用土壌を上回っていることが分かる。リン酸の全投入量は、有機栽培田では $136 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ kg ha}^{-1}$ 、化肥連用田では $152 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ kg ha}^{-1}$ と、有効態リン酸含有量とは逆の関係にあった。ここで表2に示した各試験田作土層の断面記載を比較すると、落水、収穫後では、有機栽培田のApg1、Apg2層では鮮明な糸根状斑鉄が認められた。これは水稻根圏で二価鉄が酸化されたことを示すものである。図4に示した作土層の酸

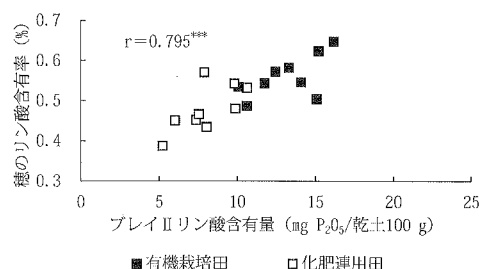


図5 穂のリン酸含有率と7月(幼穂形成期)湿潤土の有効態リン酸含有量の相関

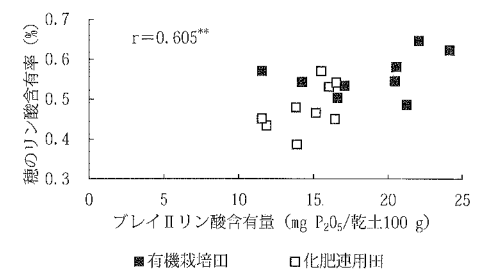


図6 穂のリン酸含有率と9月(収穫期)風乾細土の有効態リン酸含有量の相関

表5 穂のリン酸含有率と有効態リン酸含有量の相関関係

対象年	湿潤土				風乾細土
	6月 (分けつ盛期)	7月 (幼穂形成期)	8月 (出穂~穂揃い期)	9月 (収穫期)	9月 (収穫期)
2004~2005年 (n=12)	r 0.683 p *	0.918 ***	0.707 *	0.308	0.383
2003~2005年 (n=18)	r 0.795 p ***	0.795 ***	0.797 ***	0.635 **	0.604 **

*: 5%水準で有意, **: 1%水準で有意, ***: 0.1%水準で有意.

表 6 各試験田における 2004~2005 年度の表層土壌の三相分布

表層の種類	気相	液相	固相	液相/固相比
有機栽培土壌	10.6 a	61.6 b	27.9 a	2.22 b
化肥連用土壌	9.1 a	64.6 a	26.3 b	2.46 a

表中のアルファベットが同じであれば、有意水準 5% で差がないことを示す。F 検定による等分散性の検定を行った後、平均値の差の検定を t 検定によって行った ($n=12$)。

化還元電位から、7、8 月は十分な湛水によって還元が進行しているが、有機栽培田の作土層では、土壌が還元状態にあっても、イネの根によって根圏は比較的酸化的な状態にあったと考えられる。一方、化肥連用田の Apr 層では、落水後に酸化還元電位が上昇 (図 4) してもジピリジル反応が陽性で、二価鉄の存在を示すことから、一部は還元的状態のままであると考えられた。また、三相分布をもとに液相/固相比を算出し、一定量の乾土が保持している水の量を比較すると (表 6)、化肥連用土壌の方が高く、統計的に有意であった。つまり有機栽培田に比べて化肥連用田の作土層では、落水しても水が抜けず、二価鉄が生成する還元的な状態が部分的に維持されていると考えられた。

加藤ら¹⁷⁾は稲わら連用田の作土層 (0~20 cm) において、糸根状斑紋を観察するとともに斑紋結核が明らかに増加し、その色も鮮明であったと報告した。平井ら¹⁹⁾はイネの根を画像処理し根色を定量化した結果、堆肥施用区では根域中で褐色根の占める割合が大きく、化肥施用・堆肥無施用区では黒色根の占める割合が大きくなることを示した。さらに平井ら¹⁹⁾は、イネの根は、健全な生育によって酸化力が強くなると周辺に酸化鉄の沈殿を生じて褐色を示すが、生理的障害や老化によって生育が不健全になると腐敗が起こり、その周辺は嫌気的狀態となり、硫酸還元反応が進行して硫化鉄の沈殿を生じ、黒変化する²⁰⁾ため、化肥施用・堆肥無施用区に比べ、堆肥施用区の根圏は酸化的状態になっていたと報告した。

本研究においては、有機栽培田の作土層は、落水後、強還元状態から酸化的状態に変化したが、化肥連用田の作土層は湛水期間のような強還元状態ではないものの、落水後も還元的状態が部分的に維持されていた。この相違は、土壌の物理的性質やイネの根の酸化力の違いに起因するものと考えられた。

4) アロフェン質黒ボク土におけるリン酸の可給化に及ぼす牛ふん堆肥連用の効果

以上、得られた結果をまとめると、次のとおりである。
1) 化肥連用田に比べ、有機栽培田では収量が冷害年でも安定し、穂のリン酸含有率が高かった。2) 作土層において、リン酸の有効性は、イネの生育期間中の強還元的条件下で低くなり、落水後、酸化的条件に変化する過程で高まる傾向にあった。また、穂のリン酸含有率と有効態リン酸含有量との相関関係は、湛水日数の比較的長く、還元が十分進行した湿潤土を用いたときに高度に有意となった。3)

有効態リン酸含有量は、化肥連用土壌よりも有機栽培土壌の方が年間を通じて高かった。4) 土壌断面の斑紋より、有機栽培田の作土層の根圏は酸化的に保たれる傾向を示していたが、化肥連用田の作土層の根圏は還元的状態が維持される傾向を示していた。

これらの結果より、リン酸吸収係数が 2,000 以上を示すアロフェン質黒ボク土において、化肥連用田に比べ、有機栽培田でイネの登熟に関係するリン酸含有率が高まった理由は、生育期間中においても有効態リン酸含有量が高く維持されたためであると考えられた。しかしこれについては、湛水期間中還元が進行しても有効態リン酸含有量は増大しなかったため、還元の進行以外の有効態リン酸が高まるメカニズムを考える必要がある。それは強還元下でもイネの根圏が酸化的に維持されることによるリン酸の濃集²¹⁾や、リン酸収着量の減少³⁾、リン酸収着サイトに対する牛ふん堆肥の抑制的作用^{22,23)}以外に、イネの生育期間中に根圏の部分的酸化条件下でリン酸の可給化が促進されたものと推察された。

4. 摘 要

アロフェン質黒ボク土水田において牛ふん堆肥および化肥連用試験を行い、有機栽培田と化肥連用田の有効態リン酸の周年変動をモニターし、イネ植物体の穂のリン酸含有率や土壌断面形態との関連性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) リン酸の有効性は水田の湛水期間中 (還元条件下) は低下し、落水後 (酸化条件下) 高まる傾向にある。
- 2) 有効態リン酸は、化肥連用土壌よりも有機栽培土壌で一貫して高い。
- 3) 登熟に関わる穂のリン酸含有率と湛水後期 (幼穂形成期) の湿潤土の有効態リン酸含有量との間には、高度に有意な相関関係が認められる。
- 4) 土壌断面形態の斑紋から、牛ふん堆肥・化肥の連用により、有機栽培田では根圏が酸化的に、化肥連用田では根圏が還元的に保たれるため、有機栽培田においては、リン酸が有効化しやすく、収着しにくい土壌環境が生成される。

謝 辞：本研究を進めるに当たり、宇都宮大学農学部の星野幸一技官よりご助言頂きました。北海道農業試験場の橋本 均氏には土壌分析に関して、また宇都宮大学附属農場の塩沢敏夫技官、齊藤栄三郎技官、山口則勝技官、手塚貴光技官、遠藤浩彰技官には、試験圃場および作物体の管理に関して多大なご協力を頂きました。ここに記し、深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) 上沢正志・内田好哉：寒冷地水田における土壌磷酸肥沃度の測定方法、東北農試研報、67, 77~95 (1982)
- 2) 上沢正志・内田好哉：多湿黒ボク土水田における磷酸肥沃度と水稻の生育反応並びに寒冷地水田土壌の磷酸肥沃度水準について、同上、68, 69~77 (1983)

- 3) Nanzyo, M., Kanno, H. and Obara, S.: Effect of reducing conditions on P sorption of soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**, 1023~1028 (2004)
- 4) Akahane, I., Nanzyo, M. and Takahashi, T.: Significance of hydrous iron oxides in enhancing P sorption of soils with the addition of sodium hydrosulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$). *ibid.*, **50**, 1317~1320 (2004)
- 5) 前田忠信・平井英明：堆肥連年施用水田と化学肥料連年施用水田における土壌の理化学的特性の変化と低農薬栽培した水稲の根系，養分吸収，収量，日作紀，**71**，506~512 (2002)
- 6) 平井英明・橋本 均・田中治夫・伊藤豊彰：日本の統一土壌分類体系—第二次案 (2002)—を用いた男体山東麓地域に分布する土壌の分類と国土調査の土壌分類との対比，ペドロジスト，**48**，16~23 (2004)
- 7) 日本ペドロジー学会第四次土壌分類・命名委員会：日本の統一土壌分類体系—第二次案 (2002)—，90 pp.，博友社，東京 (2003)
- 8) 日本ペドロジー学会編：土壌調査ハンドブック，改訂版，165 pp.，博友社，東京 (1997)
- 9) 前田忠信・久保二郎・平井英明：堆肥連年施用有機水田における堆肥多量施用と水管理が水稲の生育，収量と温室効果ガスの発生に及ぼす影響，日作紀，**74**，58~64 (2005)
- 10) 土壌環境分析法編集委員会編：土壌環境分析法，p. 269~270，博友社，東京 (1997)
- 11) 土壌養分測定法委員会編：土壌養分分析法，p. 318~319，養賢堂，東京 (1994)
- 12) 土壌環境分析法編集委員会編：土壌環境分析法，p. 262~264，博友社，東京 (1997)
- 13) 前田忠信：堆肥連年施用水田と化学肥料連年施用水田における低農薬栽培した水稲収量の年次変動とその要因，日作紀，**70**，525~529 (2001)
- 14) 栃木県：平成18年度稲麦大豆等生産推進資料，p. 113 (2006)
- 15) 齊藤邦行・黒田俊郎・熊野誠一：水稲の有機栽培に関する継続試験—10年間の生育収量，日作紀，**70**，530~540 (2001)
- 16) 本谷耕一・鎌田嘉孝：三要素用量試験からみた火山灰水田における施肥法，東北農試研報，**15**，33~53 (1959)
- 17) 加藤弘道・茂垣慶一・本田宏一・石川 実：火山灰水田における有機物の連用効果に関する研究—第1報 有機物の連用が水稲の生育・収量および養分吸収におよぼす影響について，茨城農試研報，**25**，37~54 (1986)
- 18) 志賀一一・山口紀子・栗崎弘利：寒地稲作における土壌の磷酸肥沃度及び磷酸施肥の効果に関する研究，北農試研報，**113**，95~107 (1976)
- 19) 平井英明・平本未希・千嶋英明・前田忠信：水稲根色評価への画像解析の応用と作物体および土壌溶液のケイ酸含量との関連性，宇都宮大農学部農場報告，**17**，1~9 (2000)
- 20) 若尾紀夫：V土壌における養分の動態 硫黄の酸化と還元，農業技術体系 土壌施肥編1 (土壌の働きと根圏環境)，p. 109~112，農文協，東京 (1987)
- 21) 古川秀顕：水田土壌とリン酸，日本土壌肥料学会編，p. 5~58，博友社，東京 (1984)
- 22) Brady, N. C. and Raymond, R. W.: *The Nature and Properties of Soils*, p. 467~468, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1996)
- 23) Hiradate, S. and Uchida, N.: Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**, 665~675 (2004)

Availability of Phosphate throughout the Year and the Effect of Continuous Application of Cattle Manure in the Paddy Fields Derived from an Allophanic Andosol

Kanae Saito, Sawa Matsuno, Hideaki Hirai, Hidemasa Kato and Tadanobu Maeda*
(Grad. Sch. Agric., Utsunomiya Univ., *Exp. Farm, Fac. Agric., Utsunomiya Univ.)

In the paddy fields derived from an allophanic Andosol, continuous application experiments of cattle manure and the chemical fertilizer were performed in order to 1) monitor the annual change of the phosphate availability throughout two years and 2) investigate the relationship between the phosphate contents of the rice plants and the soil characteristics. As a result, the following findings were observed; 1) the phosphate availability in the paddy fields examined tended to decrease gradually during the flooded condition (under reductive condition), while it tended to increase drastically after harvest (under oxidic condition). 2) The available phosphate contents were continuously larger in the soils developed under the cattle manure-based organic farming than in the soils developed under chemical fertilizer-based ordinary cultivation. 3) The phosphate contents of the ears in the ripening stage were significantly correlated ($p < 0.001$) with the values of the available phosphate extracted from the field-moist soils taken at the late stage of the paddy soil flooding (the panicle formation stage of the rice plant). 4) Based on the observation of the soil profiles, some distinct thready iron mottles were observed in the plow layer of the soils developed under the organic farming, while no thready iron mottle was observed but the α - α' dipyridyl reaction was positive in the plow layer of the soils developed under the chemical fertilizer based cultivation. Thus, it was suggested that the continuous application of the cattle manure in the organic farming should keep the soil rhizosphere relatively oxidic and increase phosphate availability as compared to the soils developed under the continuous application of the chemical fertilizer.

Key words Bray II extraction method, phosphate content of the ear, phosphate sorption, thready iron mottle

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., **78**, 283-289, 2007)