

## 稲わら堆肥の89年間の連用がイネの収量、リン収支に及ぼす影響

大橋祥範<sup>1)</sup>・伴 佳典<sup>2)</sup>・尾賀俊哉<sup>3)</sup>・加藤恭宏<sup>2)</sup>・糟谷真宏<sup>1)</sup>

**摘要：**愛知県農業総合試験場では、1926年から水田での稲わら堆肥連用試験を継続している。本研究では89年間の稲わら堆肥施用の有無と施用量の違いがイネの収量、リン収支に及ぼす影響を調査した。堆肥の施用により収量が増加し、その効果は施用量75 kg a<sup>-1</sup>と比べて225 kg a<sup>-1</sup>で高かった。この要因として、堆肥連用による土壌肥沃度の向上が考えられた。イネのリン吸収量は投入量より常に少なく、毎年、多量の余剰リンが発生した。堆肥無施用と施用量75 kg a<sup>-1</sup>では土壌の全リン含量が増加する傾向が認められたが、施用量225 kg a<sup>-1</sup>では余剰リン量が極めて多いにもかかわらず、土壌にリンが蓄積する傾向は認められなかった。堆肥施用量の増加により土壌の還元が速やかに進行し、土壌酸化還元電位が-200 mV程度まで低下すると土壌間隙水の溶存態リン濃度が上昇することが確認された。このことから、施用量225 kg a<sup>-1</sup>でリンの蓄積が進まなかった要因の一つとして、他の試験区と比べて還元の進行の程度が大きいことによるリンの溶脱が考えられた。

**キーワード：**長期肥料試験水田、稲わら堆肥、イネ収量、リン収支、リン溶脱

## Effect of 89 Successive Years of Application of Rice Straw Compost on Grain Yields and Phosphorus Balance

OHASHI Yoshinori, BAN Yoshinori, OGA Toshiya, KATO Takahiro and KASUYA Masahiro

**Abstract:** In this study, we investigated grain yields and phosphorus balance of a paddy field in Anjo, Aichi, that had been treated since 1926 with three types of fertilization: (1) only chemical fertilizers, (2) chemical fertilizers plus rice straw compost of 75kg a<sup>-1</sup>, (3) chemical fertilizers plus rice straw compost of 225kg a<sup>-1</sup>.

The grain yield increased with the application of rice straw compost. This effect on increased productivity was higher in chemical fertilizers plus rice straw compost of 225kg a<sup>-1</sup> plot than in chemical fertilizers plus rice straw compost of 75kg a<sup>-1</sup> plot. Successive application of rice straw compost resulted in higher levels of available nitrogen than those obtained using only chemical fertilizers. On the other hand, surplus phosphorus was estimated in all plots. In only chemical fertilizers plot and chemical fertilizers plus rice straw compost of 75kg a<sup>-1</sup> plot, the surplus phosphorus was positively correlated with the total phosphorus. In chemical fertilizers plus rice straw compost of 225kg a<sup>-1</sup> plot, a large amount of surplus phosphorus was estimated. However, in this plot, total phosphorus had not accumulated.

In chemical fertilizers plus rice straw compost of 225kg a<sup>-1</sup> plot, level of soil oxidation-reduction potential was immediately reduced as compared to the other two plots. The phosphorus concentration in leaching water increased under -200mV of soil oxidation-reduction potential. This explains why, in spite of a large amount of surplus phosphorus, phosphorus in the topsoil had not accumulated in this plot.

**Key Words:** Paddy field under a long-term fertilization experiment, Rice straw compost, grain yields, Phosphorus balance, Phosphorus Leaching

## 緒言

愛知県農業総合試験場では、1926年（大正15年）から水田の三要素肥料試験と稲わら堆肥連用試験を継続している。これら試験は、長期にわたる土壌管理の違いがイネの生育、収量、養分吸収量および土壌理化学性に及ぼす影響を調査することで、持続的な水稲栽培に適した土壌管理方法を明らかにすることを目的としている。

これまで、本試験田における土壌理化学性の変化とイネの生育<sup>1)</sup>、施肥窒素の利用率と土壌への蓄積<sup>2)</sup>、窒素吸収量の由来別（土壌、肥料および稲わら堆肥）割合<sup>3)</sup>、土壌中の無機態窒素や水溶性有機炭素の推移<sup>4)</sup>、収量の推移と肥料および稲わら堆肥の施用効果<sup>5)</sup>、土壌微生物相<sup>6)</sup>などが報告されている。

しかしながら、これまでリンの肥効、土壌中での動態の観点からの調査、解析がなされていない。稲わら堆肥区では窒素だけでなくリンの投入量も多くなるため、イネの吸収量や土壌への蓄積状況が堆肥施用の有無によって異なる可能性がある。土壌の蓄積リンはイネの生育を促進するが、徐々に難溶性リンに変化して吸収量が減少すること<sup>7)</sup>、稲わら施用によって土壌の還元が進行すると土壌リンが有効化し、イネのリン吸収量が増加すること<sup>8)</sup>が知られている。

稲わら堆肥が89年間にわたって連用されている本試験田における稲わら堆肥のリン動態に及ぼす影響の評価は、水田における合理的な有機物とリン施肥技術の開発に有用な情報を与える可能性がある。そこで、89年間の稲わら堆肥連用がイネの収量、リン収支に及ぼす影響を解析した。

## 材料及び方法

### 1 試験区の構成

本研究は愛知県安城市篠目町（作物研究部水田利用研究室）の水田で実施した。土壌は洪積世に堆積した非固結水成岩に由来する細粒黄色土礫沼統（土性LiC）に分類

される<sup>9)</sup>。

試験区の構成は表1のとおりである。すべての試験区に消石灰11.1 kg a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>を施用した。窒素、リン、カリウムを施肥する「三要素区」、三要素に加えて稲わら堆肥を75 kg a<sup>-1</sup>施用する「堆肥区」、同じく225 kg a<sup>-1</sup>施用する「堆肥3倍量区」と、消石灰のみを施用する「無肥料区」を調査、解析対象とした。それぞれの試験区は無底のコンクリート枠で区切られている。

施肥方法については、窒素は硫酸を用いて基肥と2回の穂肥として分施した。リン、カリウムは全量を基肥として、それぞれ過リン酸石灰、塩化加里で施肥した。稲わら堆肥は前年の収穫時に持ち出した稲わらを原料として次のとおり調整したものを用いた。すなわち、約6 cmに細断した稲わらに乾物重に対して1%の硫酸を加えて、水分調整した後に堆積し、その後1か月毎に切り返しと水分調整を行い、約5か月間堆積した。

### 2 栽培概要

供試品種は愛知県内での作付品種の変遷に伴って、栄神力（1926～1934年）、千本旭（1935～1943年）、東海千本（1944～1959年）、愛知旭（1960～1961年）、金南風（1962～1963年）、クサブエ（1964～1965年）、金南風（1966～1970年）、日本晴（1971～1986年）、月の光（1987～1993年）、日本晴（1994～2011年）と変更し、2012年から9品種目となるあいちのかおりSBLを用いている。

毎年4月に1回目の耕起を行い、5月に消石灰と稲わら堆肥を施用した後に2回目の耕起を行った。続いて、施肥と代かきを行った後に苗を移植した。移植時期と栽植密度は供試品種ごとに変更し、栄神力は6月下旬に15株m<sup>-2</sup>、千本旭は7月上旬に18株m<sup>-2</sup>、東海千本、愛知旭、金南風およびクサブエは6月下旬に18株m<sup>-2</sup>、月の光は6月上旬に21株m<sup>-2</sup>、日本晴は6月上旬に1971～1986年が18株m<sup>-2</sup>、1994～2011年が22.2株m<sup>-2</sup>、あいちのかおりSBLは6月上旬に22.2株m<sup>-2</sup>であり、1株3本植とした。

移植後はそれぞれ適期に1週間程度の中干しを行った。収穫は地際から刈り取って、地上部をすべて持ち出した。

灌漑水は矢作川の河川水を取水する明治用水を利用した。

表1 試験区の構成と施肥量

試験区	N <sup>1)</sup> g a <sup>-1</sup>				P <sup>2)</sup> g a <sup>-1</sup>			K <sup>3)</sup> g a <sup>-1</sup>	稲わら堆肥 kg-FW a <sup>-1</sup>
	試験年数				試験年数				
	1-29	30-41	42-86	87-89	1-29	30-86	87-89		
無肥料区	—	—	—	—	—	—	—	—	—
三要素区	940	850	1000	1100	327	358	380	470	—
堆肥区	940	850	1000	1100	327	358	380	470	75
堆肥3倍量区	940	850	1000	1100	327	358	380	470	225

1) 硫酸、2) 過リン酸石灰、3) 塩化加里を使用。

### 3 稲わら堆肥の分析

稲わら堆肥の成分分析に供する試料は、試験51～54、56、57、77、80年目および83～89年目の施用時に採取した。試料は水分を測定するとともに、風乾、粉碎して、全炭素、全窒素、全リン含量および全カリウム含量を測定した。全炭素含量と全窒素含量はチューリン法およびガンニング変法、または乾式燃焼法（MACRO CORDER JM1000CN、ジェイ・サイエンス・ラボ株式会社、京都。N. C-ANALYZER SUMIGRAPH NC-800、NC-22F、住化分析センター株式会社、大阪）で測定した。また湿式灰化試料について、全リン含量をバナドモリブデン酸法で、全カリウム含量を原子吸光度計（Z-6100、株式会社日立製作所、東京。Z-5310、株式会社日立ハイテクノロジーズ、東京）で測定した。

### 4 灌漑水の分析

灌漑水の水質については、試験51、54、55、60、65、70、88年目および89年目の水稲栽培期間に、pH、電気伝導率、全窒素濃度、全リン濃度、カリウム濃度を測定した。pHはガラス電極法で、電気伝導率は電気伝導率計で測定した。全窒素濃度はフェノール硫酸法で測定した硝酸態窒素とケルダール窒素の合計、または化学発光法（TN-5、三菱化成株式会社、東京）で測定した。全リン濃度はペルオキシ二硫酸カリウム分解モリブデン青吸光度法で測定した。カリウム濃度は試料をろ過した後、原子吸光度計で測定した。

### 5 土壌分析

土壌分析は試験51年目から実施した。収穫後から次作耕起前までに試験区内の複数箇所から作土を採取して混合し、風乾細土を調整した。分析項目は、全炭素含量、全窒素含量、全リン含量とした。全炭素含量および全窒素含量は、チューリン法およびケルダール法、または乾式燃焼法で測定した。全リン含量はフッ化水素酸で分解した後モリブデン青吸光度法で測定した。

試験88年目（2013年10月25日）には、作土深を試験区内5か所で計測するとともに、100 mLの採土円筒で土壌を採取し、実容積法で三相分布と容積重を測定した。

また、本研究で対象とした試験区と、それ以外の無窒素区（三要素区から窒素を除いた区）、無リン区（三要素区からリンを除いた区）、無カリウム区（三要素区からカリウムを除いた区）、三要素区（消石灰無施用）、無肥料区（消石灰無施用）の作土について2013年3月13日に採取した土壌の可給態窒素含量を湛水状態での保温静置法で測定した。

### 6 収量調査と養分吸収量

収量調査は、各試験区内2か所の連続する10株を対象として実施した。イネの窒素吸収量とリン吸収量の調査は試験51年目から行った。収量調査とは別に2か所から連続する3株を採取し、分析に供した。ただし、70～72年目は調査を行わなかった。試料は籾と稲わらに分けて、稲わら堆肥と同様の方法で全窒素含量と全リン含量を測

定した。

### 7 土壌間隙水のリン濃度と土壌酸化還元電位

試験89年目に土壌表面から深さ5 cmと15 cmの土壌間隙水の溶存態リン濃度を測定した。土壌間隙水は、代かき後8、12、19、26、33、54、61日目および69日目に珪酸ガラスフィルターを通じて、減圧、吸引して採取した。試料は現場で孔径0.45 μmのニトロセルロースメンブランフィルターで濾過し、冷蔵して持ち帰った。溶存態全リン濃度はペルオキシ二硫酸カリウム分解モリブデン酸青吸光度法で測定した。

また、土壌表面から深さ5 cmの土壌酸化還元電位を測定した。代かき後1、4、8、12、19、26、33、50、54、61日目および69日目に携帯用酸化還元電位計PRN-41型（株式会社藤原製作所、東京）を、あらかじめ圃場内に設置した白金電極に接続して測定した。測定は各試験区8連で行った。

灌漑水と雨から土壌へのリン供給量を算定するために、田面水の作土浸透速度を測定した。すなわち、塩ビ枠を耕盤層より深くまで挿入し、ポリエチレン性のふたをして、塩ビ枠内の水位変化を毎月1回測定した。

## 試験結果

### 1 稲わら堆肥

試験51～54、56、57、77、80年目および83～89年目に施用した稲わら堆肥の成分含量を表2に示した。

稲わら堆肥の水分含量は0.68～0.83 g g<sup>-1</sup>であったが、89年目のみ0.49 g g<sup>-1</sup>と著しく少なかった。炭素、窒素、リン含量およびカリウム含量の変動幅は大きく、それぞれ258～386 g kg<sup>-1</sup>、12.8～28.4 g kg<sup>-1</sup>、1.0～5.2 g kg<sup>-1</sup>、3.3～38.1 g kg<sup>-1</sup>であった。

表2 稲わら堆肥の成分含量

試験年数	水分 g g <sup>-1</sup>	C <sup>1)</sup> g kg <sup>-1</sup>	N <sup>1)</sup> g kg <sup>-1</sup>	C/N	P <sup>1)</sup> g kg <sup>-1</sup>	K <sup>1)</sup> g kg <sup>-1</sup>
51	0.76	—	22.2	—	4.6	20.0
52	0.76	269	21.2	12.7	2.4	23.3
53	0.68	258	25.5	10.1	5.2	37.5
54	0.74	294	28.4	10.4	2.5	26.4
56	0.80	258	21.0	12.3	2.1	31.6
57	0.79	310	21.1	14.7	1.6	38.1
77	0.83	—	16.4	—	5.0	27.0
80	0.79	—	20.1	—	1.9	13.2
83	0.74	311	14.0	22.2	1.0	4.5
84	0.74	341	12.8	26.6	1.3	3.3
85	0.77	280	17.4	16.1	1.9	13.5
86	0.80	283	17.6	16.1	1.8	18.0
87	0.77	355	13.0	27.3	1.1	6.9
88	0.81	386	14.4	26.8	1.3	5.7
89	0.49	373	15.6	23.8	1.9	20.0

1) 乾物あたり。

## 2 灌漑水

試験51、54、55、60、65、70、88年目および89年目の灌漑水の水質を表3に示した。採水回数に違いはあるものの、51～89年目で水質に大きな違いは見られなかった。全窒素濃度 $0.40\sim 1.04\text{ mg L}^{-1}$ 、全リン濃度 $0.04\sim 0.12\text{ mg L}^{-1}$ と、生活排水等による汚染の見られない水質であった。

## 3 土壌理化学性

全炭素含量、全窒素含量、全リン含量を図1に示した。全炭素含量、全窒素含量ともに堆肥3倍量区>堆肥区>三要素区>無肥料区の順に多かった。いずれの試験区で

表3 灌漑水の水質

試験年数	採水回数	pH	EC dS m <sup>-1</sup>	TN mg L <sup>-1</sup>	TP mg L <sup>-1</sup>	K mg L <sup>-1</sup>
51	1	7.0	0.05	—	0.08	1.9
54	2	7.1	0.06	1.04	0.04	1.3
55	3	7.7	0.05	0.61	0.04	1.0
60	4	7.0	0.06	0.40	0.04	1.2
65	1	6.9	0.10	0.84	—	2.8
70	2	7.2	0.05	0.63	0.12	0.7
88	2	7.6	0.06	—	0.06	1.6
89	18	7.4	0.07	0.54	0.07	1.4

も全炭素含量は増加する傾向が見られたが、堆肥3倍量区ではその増加量が多かった。同区では全窒素含量も他の試験区と比べて増加する傾向が見られた。全リン含量は無肥料区を除いて大きな差は見られなかったが、三要素区と堆肥区で増加する傾向が見られた。

試験88年目における作土深、固相率、容積重を表4に示した。作土深は無肥料区、三要素区は9.8 cm、堆肥区は10.0 cm、堆肥3倍量区は10.8 cmと大きな違いはなかったが、堆肥3倍量区では他の区と比べて固相率が低く、容積重が小さかった。

2013年3月13日に採取した土壌の全炭素および全窒素含量と可給態窒素含量の関係を図2に示した。全炭素含量、全窒素含量ともに可給態窒素含量ときわめて強い正の相関が認められた。

表4 作土深と作土の固相率および容積重

試験区	作土深 cm	固相率 L L <sup>-1</sup>	容積重 g mL <sup>-1</sup>
無肥料区	9.8	54.1	1.44
三要素区	9.8	50.2	1.32
堆肥区	10.0	47.1	1.22
堆肥3倍量区	10.8	40.1	1.03

注) 調査日：2013年10月25日。

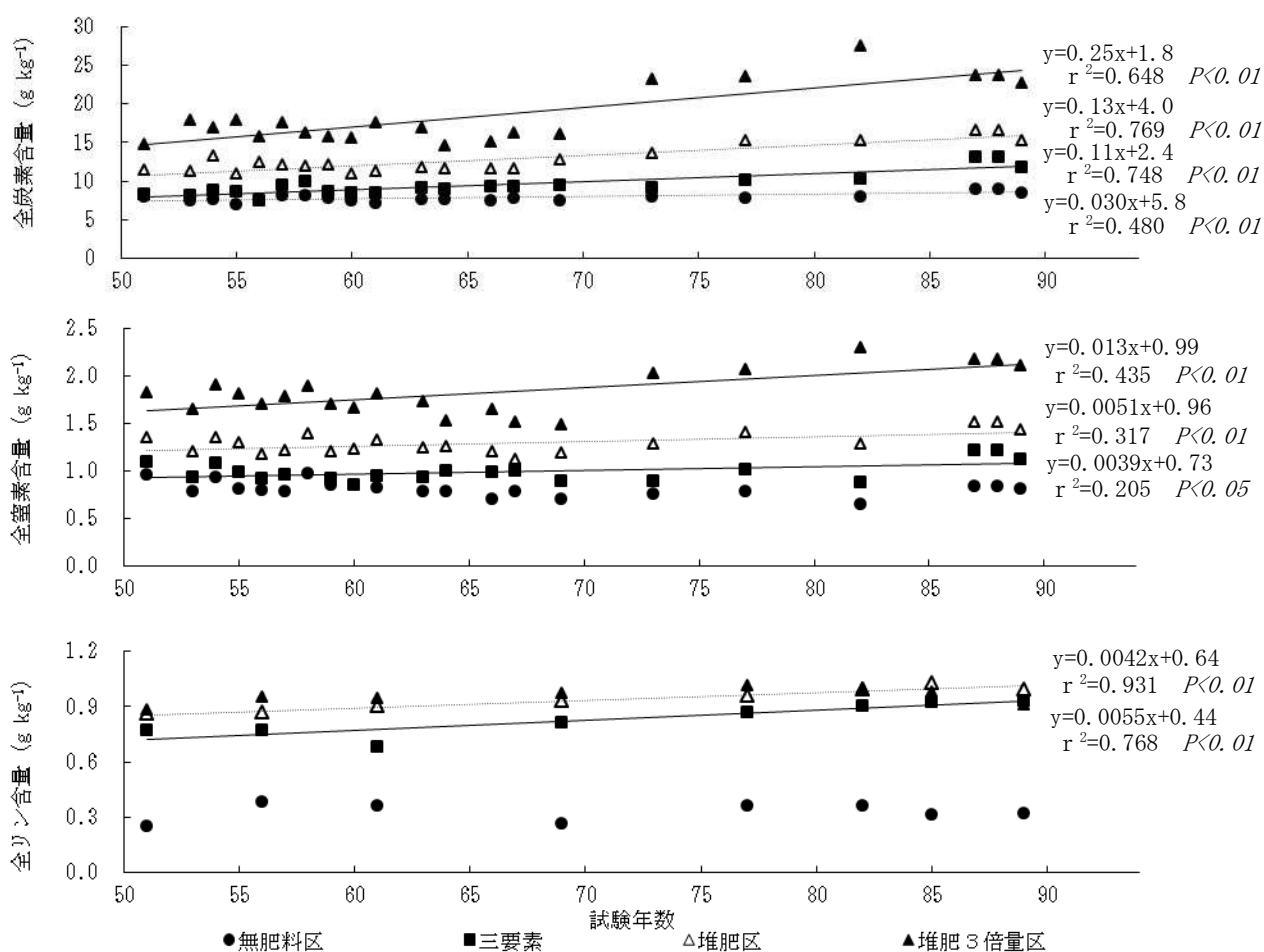


図1 土壌の全炭素含量、全窒素含量と全リン含量

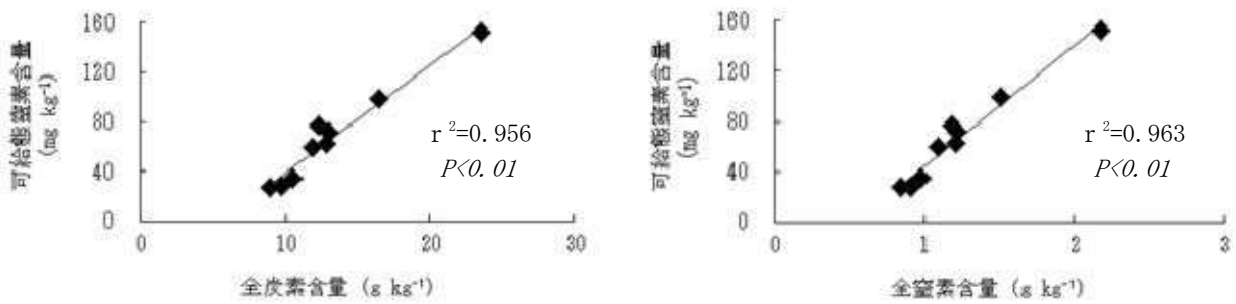


図2 全炭素および全窒素含量と可給態窒素含量の関係（採土日：2013年3月13日）

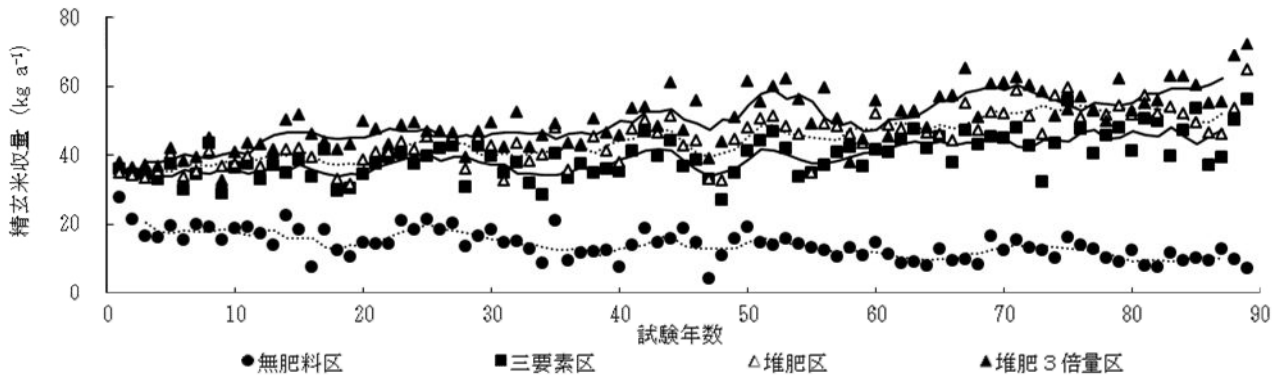


図3 精玄米収量（実測値と5年移動平均）

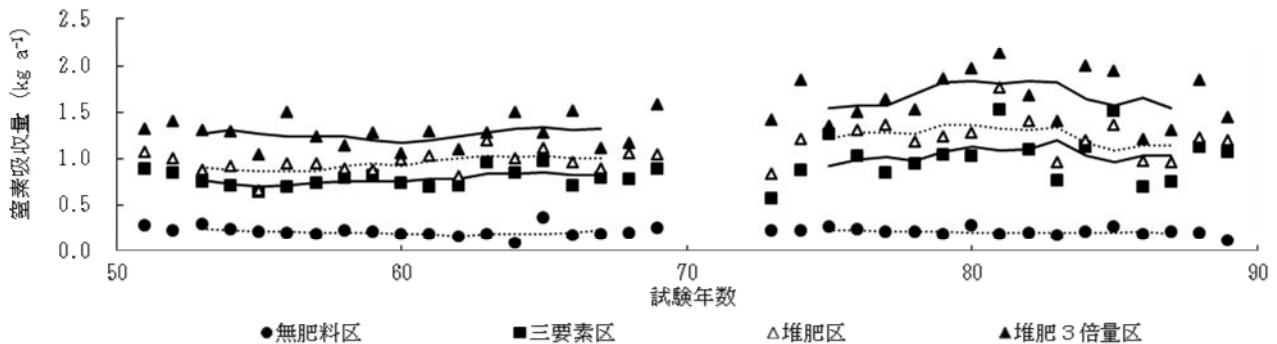


図4 窒素吸収量（実測値と5年移動平均）

#### 4 精玄米収量と窒素吸収量

試験1～89年目の各試験区における精玄米収量の実測値とその5年移動平均を図3に示した。精玄米収量は堆肥3倍量区>堆肥区>三要素区>無肥料区の順に多かった。5年移動平均の収量で見ると、三要素区、堆肥区および堆肥3倍量区で精玄米収量は増加する傾向であり、無肥料区では減少する傾向であった。

試験51～89年目の各試験区における窒素吸収量の実測値とその5年移動平均を図4に示した。精玄米収量と同様に窒素吸収量も、堆肥3倍量区>堆肥区>三要素区>無肥料区の順に多かった。

#### 5 リン収支

各試験区におけるリン収支を算出し、表5に示した。リン投入量は化学肥料、稲わら堆肥、灌漑水および雨由来の合計値とした。当該年に稲わら堆肥を分析してい

ない場合は、表2に示したリン含量のうち水分含量が大きく異なる89年目を除いた平均値 $2.4 \text{ g kg}^{-1}$ から算出した。灌漑水由来のリンの負荷量は、全リン濃度と浸透速度 ( $3.70 \pm 0.26 \text{ mm d}^{-1}$ ) から算出した。当該年に灌漑水を分析していない場合は、表3に示した全リン濃度の平均値 $0.06 \text{ mg L}^{-1}$ を用いた。雨由来のリンの負荷量は89年目に測定した11回の全リン濃度の加重平均値 $0.009 \text{ mg L}^{-1}$ と気象庁の年間降水量データ（愛知県岡崎）から算出した。灌漑水と雨由来のリンの負荷量は化学肥料由来の $358 \sim 380 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と比べて、それぞれ $1.7 \sim 5.0 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $0.16 \sim 0.33 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と僅かであった。この手順で得られたリン投入量は、無肥料区では $2 \sim 5 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、三要素区では $360 \sim 383 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、堆肥区では $380 \sim 484 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、堆肥3倍量区では $417 \sim 732 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。

リン吸収量は各試験区で変動はあるものの、三要素区では $80 \sim 330 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、堆肥区では $80 \sim 361 \text{ g a}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と大

差なかったが、堆肥3倍量区では160~481 g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>とリン吸収量が多かった。無肥料区では15~108 g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と少なかった。

リン投入量とリン吸収量の差を余剰リン量とした。余剰リン量は三要素区で30~280 g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、堆肥区で48~322 g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>および堆肥3倍量区で26~495 g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と変

動が大きかったが、常に余剰リンが発生した。また、51~89年目までの余剰リン積算量は三要素区では6049 g a<sup>-1</sup>、堆肥区では6555 g a<sup>-1</sup>、堆肥3倍量区では8284 g a<sup>-1</sup>であった。一方、無肥料区では余剰リン量が-106~-12 g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>で、51~89年目までの余剰リン積算量は-1783 g a<sup>-1</sup>であった。

表5 リン収支<sup>1)</sup> (g a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>)

試験 年数	無肥料区			三要素区			堆肥区			堆肥3倍量区		
	投入	吸収	余剰	投入	吸収	余剰	投入	吸収	余剰	投入	吸収	余剰
51	3	55	-52	361	175	185	444	216	228	609	242	367
52	3	40	-37	361	148	213	404	175	229	489	190	299
53	3	59	-56	361	168	193	484	189	296	732	237	495
54	2	108	-106	360	330	30	409	361	48	506	481	26
55	2	43	-42	360	143	217	401	143	258	485	191	293
56	3	58	-55	361	197	164	392	260	133	455	337	119
57	3	49	-46	361	191	170	386	225	161	436	257	180
58	3	60	-57	361	190	171	402	210	192	486	220	266
59	3	40	-37	361	200	161	402	230	172	486	270	216
60	2	30	-28	360	80	280	402	80	322	485	160	325
61	3	30	-27	361	170	191	402	210	192	486	270	216
62	3	50	-47	361	200	161	402	220	182	486	250	236
63	3	60	-57	361	320	41	402	320	82	486	350	136
64	3	26	-23	361	223	138	403	230	173	486	268	218
65	3	82	-79	361	199	162	403	228	175	486	230	256
66	3	40	-37	361	180	181	403	200	203	486	310	176
67	3	50	-47	361	230	131	402	240	162	486	250	236
68	3	50	-47	361	190	171	402	230	172	486	250	236
69	3	60	-57	361	240	121	402	270	132	486	340	146
70 <sup>2)</sup>	5	54	-48	363	207	157	405	246	159	488	280	208
71 <sup>2)</sup>	3	54	-51	361	207	154	402	246	156	486	280	205
72 <sup>2)</sup>	3	54	-51	361	207	154	402	246	156	486	280	205
73	3	49	-46	361	146	215	403	201	202	486	274	211
74	3	54	-51	361	199	162	402	254	149	486	304	182
75	3	54	-51	361	245	116	402	277	125	486	277	209
76	3	47	-44	361	253	108	402	289	114	486	287	198
77	3	49	-46	361	186	175	424	272	152	551	281	269
78	3	39	-36	361	218	143	403	256	146	486	277	209
79	3	35	-32	361	232	129	403	268	134	486	315	171
80	3	61	-58	361	219	141	391	272	119	452	351	101
81	3	41	-38	361	286	75	403	291	112	486	347	139
82	3	29	-26	361	191	170	402	219	184	486	258	228
83	3	55	-52	361	203	158	380	244	135	417	277	140
84	3	33	-30	361	210	151	387	220	167	439	300	139
85	3	52	-49	361	266	95	394	228	166	460	256	205
86	3	46	-43	361	198	163	389	241	148	445	263	182
87	3	51	-48	383	212	171	402	263	139	439	288	152
88	3	36	-33	383	245	137	401	250	151	438	327	111
89	3	15	-12	383	190	194	458	232	227	608	223	386
平均	3	49	-46	363	208	155	405	237	168	491	278	213

1) 投入：過リン酸石灰、稲わら堆肥、雨、灌漑水。吸収：イネ体地上部（全量持ち出し）。余剰= 投入-吸収。

2) 試験70~72年目の吸収はそれぞれの試験区の65~69、73~77年目の平均値。

## 6 余剰リン積算量と作土の全リン含量

余剰リン積算量と作土の全リン含量の関係を図5に

示した。三要素区と堆肥区では余剰リン積算量と全リン含量に正の相関関係が見られたが、堆肥三倍量区では、その相関は認められなかった。

7 土壌間隙水のリン濃度

各試験区における土壌表面から深さ5 cmと15 cmの土壌間隙水の溶存態リン濃度を図6に示した。作土である深さ5 cmにおいて、代かき後8日目、54日目、69日目に堆肥3倍量区では、三要素区および堆肥区と比べて溶存態リン濃度が高かった。堆肥3倍量区では深さ15 cmにおいても、代かき後12日目、61日目、69日目に三要素区お

よび堆肥区と比べて溶存態リン濃度が高かった。三要素区では26日目に堆肥区および堆肥3倍量区と比べて溶存態リンが高かった。

各試験区における深さ5 cmの土壌酸化還元電位を図7に示した。堆肥区と堆肥3倍量区では、代かき後および中干し終了後、速やかに酸化還元電位が低下した。特に、堆肥3倍量区では8~33日目および54~69日目に-200 mV以下と他の試験区と比べて低かった。また、三要素区では堆肥区および堆肥3倍量区と比べて緩やかに酸化還元電位が低下して、初めて-200 mV以下になったのは代かき後26日目であった。

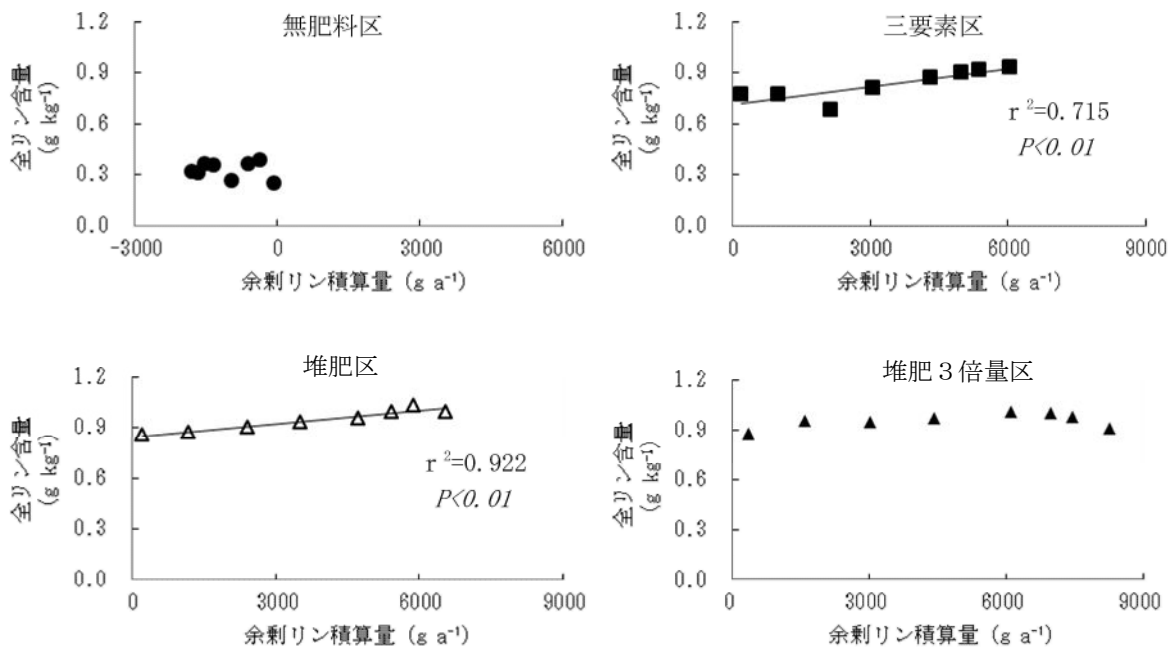


図5 余剰リン積算量と土壌の全リン含量の関係

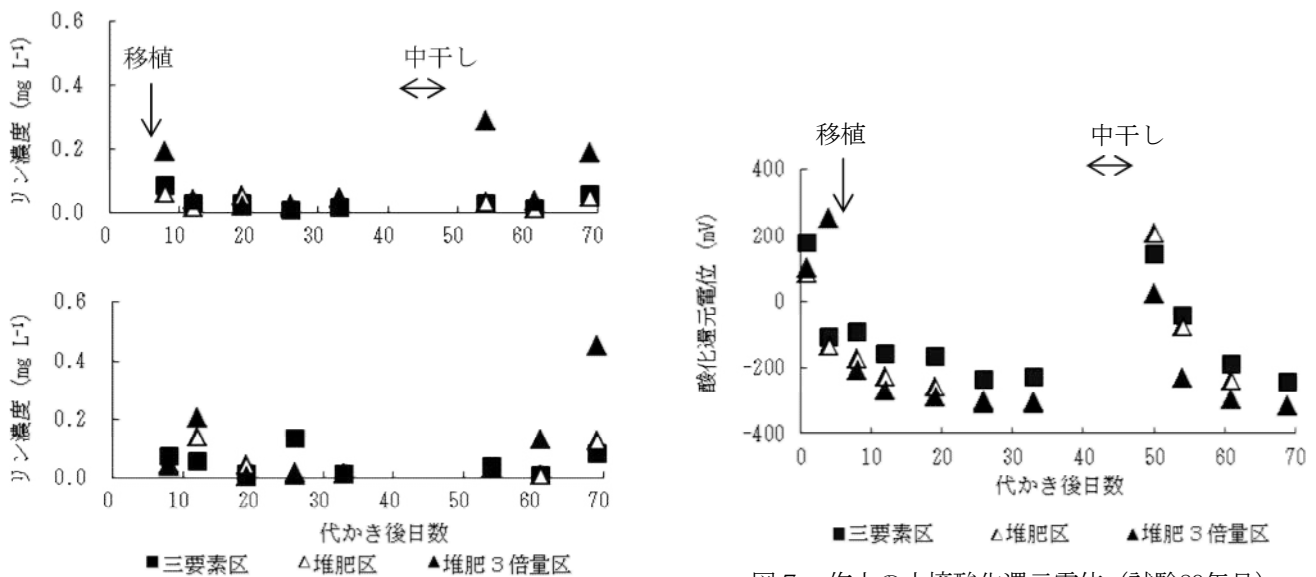


図6 土壌間隙水中の溶存態リン濃度 (試験89年目、上図：深さ5 cm、下図：深さ15 cm)

図7 作土の土壌酸化還元電位 (試験89年目)

## 考 察

精玄米収量と窒素吸収量は堆肥3倍量区>堆肥区>三要素区>無肥料区の順に多かった(図3、図4)。中西ら<sup>10)</sup>は本試験田における41年目までの調査結果から精玄米収量について同様の報告をしている。41年目以降、品種が3回変更されているが、稲わら堆肥の施用と施用量の違いがイネの収量に及ぼす影響は89年目まで継続していた。

また、本試験田では51年目以降、作土の全炭素含量と全窒素含量は増加傾向にあり、堆肥の施用量に応じて増加率は高まる傾向であった(図1)。2013年3月13日の全炭素含量および全窒素含量と可給態窒素含量との関係を見ると、図2のようにきわめて強い正の相関が認められた。堆肥施用による土壌への有機物の蓄積に伴って、可給態窒素含量が増加していると考えられる。稲わら堆肥の施用効果の一つとして有機物の集積と可給態窒素の増大が知られており<sup>11-12)</sup>、塩田ら<sup>3)</sup>は稲わら堆肥の窒素利用率は13~15%で化学肥料の58~61%と比べて低いが、土壌に蓄積して可給態窒素として効果が発現することを報告している。こうした土壌肥沃度の向上が、窒素吸収量とイネの収量増加の要因と考えられた。

一方、余剰リン積算量と作土の全リン含量の関係をみると、三要素区と堆肥区では、余剰リン積算量の増加に伴って、全リン含量が増加する傾向が認められるのに対して、より余剰リン量の多い堆肥3倍量区では、土壌中にリンが蓄積する傾向は認められなかった(図5)。試験88年目における作土のリン現存量を土壌の全リン含量と仮比重、作土深(表4、図1)から計算すると、三要素区は12.0 kg a<sup>-1</sup>、堆肥区は12.1 kg a<sup>-1</sup>、堆肥3倍量区は10.1 kg a<sup>-1</sup>であった。試験開始51年目以降の平均の余剰リン発生量はそれぞれ0.15、0.17、0.21 kg a<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であり、堆肥3倍量区が他の試験区と比べて余剰リン発生量が多いにもかかわらず、明らかにリンの蓄積が少なかった。

堆肥3倍量区では作土の土壌間隙水の溶存態リン濃度が移植から8日後、54日後、69日後に他の区よりも高く、リンの溶出量が多くなっていた。また、深さ15 cmでは、12日後、61日後、69日後に堆肥3倍量区の溶存態リン濃度が他の区よりも高かった。有機物施用により土壌の酸化還元電位が低下してリンの溶解性が高まることが知られている<sup>13, 14)</sup>。本試験田でも酸化還元電位が-200 mV程度まで低下した時点で作土の土壌間隙水中の溶存態リン濃度が上昇していることから(図6、図7)、稲わら堆肥を施用した区では、当該年度の稲わら堆肥投入に加えて蓄積した土壌有機物(図1)の影響により土壌の還元進行の程度が大きく、リンの土壌からの溶出と下方への溶脱を促しているものと考えられた。特に、堆肥3倍量区は入水後に他の区よりも早い時期に酸化還元電位が低下し、より低い値を示す頻度が高いことからリンの溶出量が多く、余剰リン積算量に見合うリン蓄積が見られないと考えられた。

以上のように、稲わら堆肥施用は、有機物の蓄積に伴って可給態窒素を増加させることによってイネの増収効果をもたらす一方、リンについては、堆肥の施用量が多いと還元による溶出と溶脱が進む結果、余剰リンの作土への蓄積を生じさせないと考えられた。今後は、リン酸施肥に関して、稲わら堆肥と化学肥料由来リンの土壌中動態の解明により、施用したリンが溶脱されることなく有効に利用される施肥体系を検討する必要がある。

## 引用文献

1. 塩田悠賀里, 稲垣明, 長谷川徹, 沖村逸夫. 四要素および堆肥の長期施用による水田土壌の理化学的変化と水稻の生育について. 愛知農総試研報. 12, 52-60 (1980)
2. 塩田悠賀里, 長谷川徹, 沖村逸夫. 無肥料, 化学肥料単用および堆肥連用水田土壌における施肥窒素の動向. 愛知農総試研報. 14, 53-59 (1982)
3. 塩田悠賀里, 佐野勝昭, 沖村逸夫. 水稻の窒素吸収からみた稲わら堆肥連用の短期および長期的評価. 愛知農総試研報. 16, 43-51 (1984)
4. 塩田悠賀里, 長谷川徹, 沖村逸夫. 堆肥連用水田土壌の無機態窒素、水溶性有機炭素、酸化還元電位、pH等の推移. 愛知農総試研報. 17, 106-114 (1985)
5. 靱井隆志, 井澤敏彦. 77年間継続した四要素無施用区と堆肥施用区にみられる水稻玄米収量の経年推移と各要素の施用効果. 日作紀. 76, 288-294 (2007)
6. 塩田悠賀里, 長谷川徹, 沖村逸夫. 長期にわたる四要素および堆肥の欠除が水田土壌の微生物性に及ぼす影響. 土と微生物. 29, 3-9 (1987)
7. 東海林覚. 蓄積リン酸の水稻の生育、収量におよぼす影響ならびに水稻の作付けによる土壌リンの形態変化について. 土肥誌. 42, 118-123 (1971)
8. 東海林覚. 土壌リンの有効化に及ぼすケイカル、稲わらおよびクエン酸塩の施用効果. 土肥誌. 52, 253-259 (1981)
9. 土壌統の設定基準および土壌統一覧表第2次案. 農林省農業技術研究所化学部土壌第3科
10. 中西秋四郎, 沖村逸夫, 加藤虎治, 有沢道雄, 河合伸二. 水稻に対する継続40年間の要素試験成績について(第1報). 愛知農試彙報. 24, 46-60 (1970)
11. 三浦吉則. 稲わら堆肥、稲わら長期連用水田における蓄積地力窒素による水稻増収効果. 農業および園芸. 82, 1198-1202 (2007)
12. 武田容子, 柴田和幸, 橋本秀司. 黒ボク土水田における有機物の長期連用効果. 栃木農試研報. 49, 15-23 (2000)
13. 金野隆光, 弘法健三. 透水条件下における水田土壌の物質変化(第2報)水田土壌のリン酸について. 土肥誌. 41, 225-229 (1970)
14. 飯村康二. 湛水下の水田土壌におけるリン酸の溶解度上昇の原因について. 土肥誌. 76, 199-200 (2005)