

滋賀県の肥料三要素の長期連用試験における水稻収量と各要素の推移

— 直近 27 年間の解析 —

高山尊之*・園田敬太郎**

Evaluation of the changes in rice yield and soil chemical properties under long-term application of three nutrient elements in Shiga, Japan: Analysis of data over the last 27 years

Takayuki TAKAYAMA and Keitaro SONODA

キーワード：イネ，カリ，炭素，窒素，リン酸

滋賀県農業技術振興センターでは、1933年から長期にわたり水稻の肥料三要素試験を実施している。今回、この調査結果のうち、1992年～2018年の27年間の収量、土壌化学性、三要素の吸収量についてとりまとめ、それらの変化について考察した。

1) 収量：試験開始後約60年を経た1992年以降、無施用区（三要素をいずれも施用しない）やカリ単用区の収量は、完全区（三要素すべての施用に加えて、稲わらを全量還元）の20%程度で推移し、また、窒素単用区とリン酸単用区の収量は完全区の40%程度であった。三要素施用の有無による収量への影響を比較すると、リン酸の影響が最も大きく、次いで窒素となり、カリの影響は小さかった。

2) 窒素：窒素の施用区と施用しない区の間で稲体の窒素吸収量の差は大きかったが、リン酸の施用によって増加する傾向も認められた。また、完全区の土壌中全窒素濃度は増加していたが、稲わらを還元しない区では横ばいから緩やかな減少傾向であった。

3) リン酸：リン酸の施用区と施用しない区の間で稲体のリン酸吸収量の差が大きく、天然供給が極めて乏しいことが理由と考えられた。リン酸無施用区の土壌中全リン酸は20～30 mg-P₂O₅/100 g 存在していたが、可給態リン酸はほぼ消滅していた。

4) カリ：カリの施用区と施用しない区の間で稲体のカリ吸収量の差が明確でなく、カリ吸収量は施用より生育量との関係が大きかった。カリは土壌等からの天然供給が大きいいため、欠乏状況は現れにくいと考えられた。

1. 緒言

窒素、リン酸、カリについて要素欠如処理を長期間にわたり行い、作物の生育や収量そして土壌理化学性への影響を検討する「肥料三要素試験」は、全国の公設農業試験場で実施されてきた¹⁾。こうした試験が開始された1920～30年代は、肥料の多投入にもかかわらず水稻の単収増加が停滞した時期であり、また大豆粕などの有機質肥料から硫酸などの無機質肥料へ移行し、化学肥料が普及していく過渡期であった²⁾。今日では、肥料三要素については新たな課題も生じている。肥料原料および肥料の輸入価格が、2008肥料年度に高騰したことは記憶に新しいが、その後も肥料価格の高騰が起きており、肥料の供給事情が農業者の経営に直接的に影響する問題となっている。また、環境面については、窒素やリンは河川や海洋に流入すれば富栄養化原因物質となることから、環境

保全との関係も深く、三要素施用の効果を探るこうした試験は、政策的にも意義があると考えられる。

1933年に滋賀県立農事試験場（栗太郡治田村渋川：現草津市西渋川）において、「水稻一小麦」を対象に三要素試験が開始された³⁾。試験ほ場の地質は沖積層、非固結堆積岩水積（花崗岩系）、土壌条件は多々良統（褐色土壌粘土質マンガ型）水田で、粘土鉱物はカオリン系が主体である³⁾。試験を開始した1933年から1972年までの40年間のほ場試験の結果については、中田²⁾によってとりまとめられ、水稻作や麦作の収量や土壌化学性に及ぼす三要素の施用効果が明らかにされている。

1974年、農業試験場（旧農事試験場）は蒲生郡安土町大中（現近江八幡市安土町大中）に移設され、これに伴って、三要素試験ほ場の土壌は新たな試験場内のコンクリート枠に充填され、水稻単作の試験が継続された。移転の際に試験ほ場

*Corresponding author, **現 滋賀県農政水産部農村振興課
2022年9月26日受付, 12月24日受理

の土壌がどのように採取されコンクリート枠に充填されたかの詳しい記録は、筆者らが知る限りにおいては見出せていない。しかしながら、土壌の物理性や化学性はかなりの影響を受けたと考えられる。また、移転から 1991 年までの本試験に関わるデータの一部分が欠損しているため、連続したデータとして解析することが難しいと考えられた。よって、本稿では一連のデータが十分に確認できる 1992 年以降の 27 年間についてとりまとめるとともに、水稻生育との関連について考察を行った。

まず、窒素、リン酸、カリの施用の有無が、水稻の収量へ及ぼす影響を検討した。さらに 27 年間にわたる土壌中の三要素量の変化や作付けされた稲体への三要素の吸収量を解析した。

表 1 試験設計

要因	水準	処理の内容	稲わら
窒素	2	施用/無施用	持ち出し
リン酸	2	施用/無施用	同上
カリ	2	施用/無施用	同上

稲わら還元

「窒素施用、リン酸施用、カリ施用」の区についてのみ、稲わらを全量還元する区と稲わら持ち出す区を設定。

表 2 試験区の構成と施用量

試験区名 (試験区記号)	施肥量 (g/m ²)				旧試験の 土壌来歴
	基肥			穂肥	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
無施用区 (0区)	0	0	0	0	C (-) 0区
窒素単用区 (N区)	6	0	0	2	C (-) N区
リン酸単用区 (P区)	0	6	0	0	C (-) P区
カリ単用区 (K区)	0	0	6	0	C (-) K区
無窒素区 (PK区)	0	6	6	0	C (-) PK区
無リン酸区 (NK区)	6	0	6	2	C (-) NK区
無カリ区 (NP区)	6	6	0	2	C (-) NP区
三要素区 (NPK区)	6	6	6	2	C (-) NPK区
完全区 (NPK+RS区)	6	6	6	2	C (+) NPK区

注 1) 窒素は硫酸、リン酸は過リン酸石灰、カリは塩化カリを施用。

注 2) 試験区記号欄の RS は、稲わら全量還元を示す。

注 3) 旧試験は、土壌移転前の旧農業試験場でのほ場試験を指し、稲わら堆肥施用区 (C (+) 区) および稲わら持ち出し区 (C (-) 区) が設定されており、4 要因×2 水準で試験が行われていた。

2. 材料および方法

「窒素」、「リン酸」、「カリ」の 3 つの要因に「施用」、「無施用」の 2 水準をそれぞれ設定した (表 1)。これらの 8 区 (表 2 の無施用区～三要素区) については、収穫時に籾と同時に稲わらも持ち出しており、土壌は 1973 年まで行われてきたほ場試験³⁾の稲わら堆肥無施用区 (C (-) 区) の作土を引き継いだものである。さらに、「窒素施用、リン酸施用、カリ施用」に稲わらを全量還元する区 (表 2 の完全区) を設定した。この区については、ほ場試験³⁾の稲わら堆肥施用区 (C (+) 区) の作土を引き継いでいる。

栽培概要は以下のとおりである。1970 年以前の試験においては水稻品種の変遷があったが、1971 年以降は「日本晴」を供試している。また、滋賀県農業技術振興センター内で観測している気象と水稻の作柄および被害について附表 1 に示した。1992 年から 2018 年の年平均気温と年間降水量は 27 年間の平均値で、各々、14.7°C (13.8°C～15.7°C)、1492 mm (924 mm～1856 mm) である。

(1) 試験場所: 滋賀県農業技術振興センター内の円形コンクリート槽
(2) 試験方法: コンクリート枠試験
内径 100 cm (面積 0.78 m²) のコンクリート槽 (深さ 100 cm 土中埋設)
用水は水道水を利用しており、用水水質は T-N: 1.27 mg/L, T-P: 0.007 mg/L, K: 1.15 mg/L, COD: 0.93 mg/L である (1985 年～1989 年までの平均値)⁴⁾。

(3) 供試作物: 水稻「日本晴」(1971 年から継続)

(4) 栽培様式: 19 株/槽, 1 株 4 本植え, 5 月中旬植え

(5) 施用内容: 表 2 のとおり

(6) 作物体調査項目: 1992 年以降, 籾, 稲わらを採取し, 精玄米重, 千粒重, 穂数を調査。また, 籾, 稲わらを用いて, 養分吸収量を測定。

(7) 土壌調査項目: 1992 年, 1999 年, 2009 年, 2018 年に収穫後の土壌 (作土約 15 cm 深) を採取し, 全窒素 (T-N) 濃度, 全リン酸 (2018 年は欠測), 可給態リン酸, 交換態カリウム, 非交換態カリウム (2018 年は欠測), 全炭素 (T-C) 濃度を測定。

(8) 作物体および土壌分析方法: 作物体および土壌の分析は, 「土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質および植物体分析法⁵⁾」, 「土壌環境分析法⁶⁾」, 「肥沃度測定のための土壌養分分析法⁷⁾」に従った。なお, 土壌可給態リン酸は, トルオーグ法により分析した。また, 非交換態カリウムについては 1M 熱硝酸抽出法により分析した。

(9) 統計解析法: 各試験区の収量, 穂数, 千粒重, 養分吸収量について, 分散分析の検定を行った後, 多重比較検定を Tukey 法 (BellCurve[®]エクセル統計) により行った。また, 三要素の収量に与える効果検証は, 3 元配置分散分析により行った。

本文中の試験区の表記は, 表 2 の試験区名および試験区記号を採用している。

3. 結果および考察

3. 1 三要素処理が水稻収量に及ぼす影響の解析

1992 年以降の水稻収量 (精玄米重) の推移を図 1, 平均値を図 2 に示した。収量の原データは附表 2 に示した。試験開始から約 60 年が経過した 1992 年以降の各区の水稻収量は,

緩やかな増加または減少の傾向および年次によるばらつきが認められるものの、概ね安定していると思われた。収量の多寡によって、無カリ区 (NP 区)、三要素区 (NPK 区) および完全区 (NPK+RS 区) の高位グループ、窒素単用区 (N 区)、リン酸単用区 (P 区)、無窒素区 (PK 区) および無リン酸区 (NK 区) の中位グループ、無施用区 (0 区) およびカリ単用区 (K 区) の低位グループに大分できた。窒素を施用している試験区 (N 区、NK 区、NP 区、NPK 区、NPK+RS 区) では年次によるばらつ

きが比較的大きかったが、その理由は判然としなかった。三要素のうち、リン酸施用と窒素施用が収量の多寡を大きく決定づけていることがうかがえ、特にリン酸施用の影響が大きいと考えられた。一方で、カリ施用は、収量への寄与は小さいことが考えられた。そこで、どの要素の影響が大きく現れるのかを解析した。

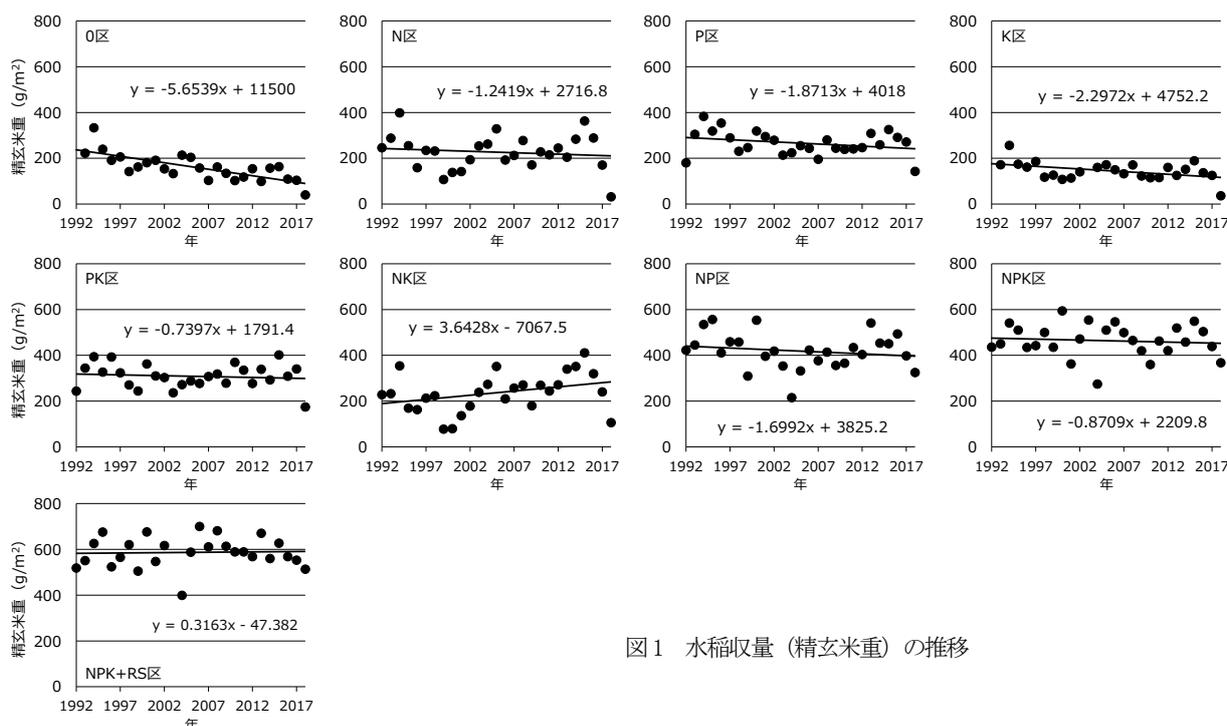


図1 水稲収量 (精玄米重) の推移

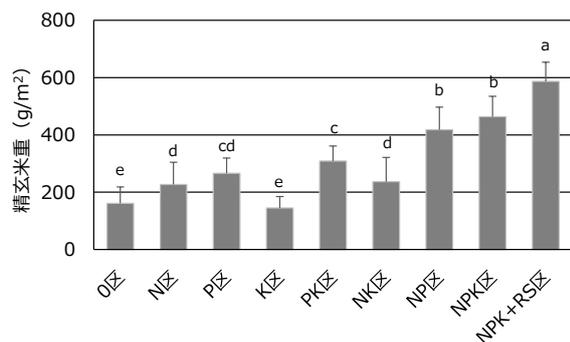


図2 各試験区の収量

注1) 異なる符号間には5%水準で有意差がある (Tukey法).
注2) 1992年~2018年の平均値.

まず、三要素の効果を検証するため、完全区 (NPK+RS 区) を除いた8試験区間で3元配置分散分析を行った (表3)。主要因についてみてみると、「窒素施用の有無」、「リン酸施用の有無」について1%水準の高い有意性が認められた。同時に、交互作用については、「リン酸と窒素」、「リン酸とカリ」の間に有意性が確認されたが、主効果に比べて小さいものであった。つまり、リン酸施用条件下で窒素施用とカリ施用の効果が大きく発現すると考えられた。また、収量への寄与率 (全

体平方和に占める要因の平方和) を計算すると、「リン酸施用の有無」は47%、「窒素施用の有無」は22%となり、80年以上にわたって三要素試験を継続すると、リン酸と窒素の施用効果が収量への決定的な要因になることが示唆された。カリ施用効果については、これまでに住田ら⁸⁾によって報告されているとおり、比較的小さいことがうかがえた。

表3 水稲収量についての分散分析表

変動因	自由度	平方和	分散	F
主効果				
窒素施用の有無 (N)	1	718854	718854	163.06 **
リン酸施用の有無 (P)	1	1573171	1573171	356.85 **
カリ施用の有無 (K)	1	22065	22065	5.00 *
2因子交互作用				
N×P	1	74945	74945	17.00 **
N×K	1	2730	2730	0.62
P×K	1	29498	29498	6.69 *
3因子交互作用				
N×P×K	1	1616	1616	0.37
誤差	205	903749	4409	
全体	212	3312521		

注) **は1%水準, *は5%水準で有意を示す.

また、稲わらを持ち出し処理する三要素区 (NPK 区) と稲わらを全量還元処理する完全区 (NPK+RS 区) の平均収量に

は有意差が認められ、有機物施用による増収効果がみられた(図2)。

3. 2 要素欠乏の収量構成要素への影響

1992年以降の各試験区の平均穂数を図3、千粒重を表4に示した。要素欠乏により穂数に顕著な差が認められ、収量と同様の傾向が認められた。また、千粒重においても要素欠乏の影響が認められ、リン酸を施用していない試験区(0区、N区、K区、NK区)の千粒重は、施用している試験区(P区、PK区、NP区、NPK区、NPK+RS区)に比べて小さい傾向にあった。

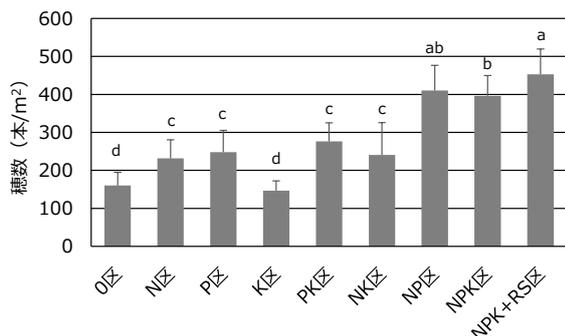


図3 各試験区の穂数

注1) 異なる符号間には5%水準で有意差がある (Tukey法).
注2) 1992年~2018年の平均値。ただし、1992年、1995年、2014年~2017年は欠測。

表4 各試験区の千粒重

試験区	千粒重
	g
無施肥区 (0区)	21.5bc
窒素単用区 (N区)	21.4bc
リン酸単用区 (P区)	22.1ab
カリ単用区 (K区)	21.0 c
無窒素区 (PK区)	22.3 a
無リン酸区 (NK区)	21.2 c
無カリ区 (NP区)	22.4 a
三要素区 (NPK区)	22.6 a
完全区 (NPK+RS区)	22.3 a

注1) 異なる符号間には5%水準で有意差がある (Tukey法).

注2) 1992年~2018年の平均値。ただし、1992年、2014年、2015年は欠測。

3. 3 土壌中の三要素 (窒素、リン酸、カリ) および炭素の推移

1992年、1999年、2009年、2018年の土壌中の三要素および炭素の分析結果を図4~7に示した。

3. 3. 1 土壌中全窒素 (T-N) の推移

試験開始60年以上経過した作土の土壌中全窒素 (T-N) 濃度の推移は、完全区 (NPK+RS区) のみが、継続して増加傾向にあった(図4)。また、完全区 (NPK+RS区) 以外の試験区は、

窒素施用の有無にかかわらずほぼ横ばいの推移を示し、安定していた。2018年収穫後の土壌において、最も高かったのは完全区 (NPK+RS区) の0.16%であった。最も低いカリ単用区 (K区) は0.06%であり、完全区 (NPK+RS区) とカリ単用区 (K区) の試験区間差は年々拡大傾向にあった。また、リン酸を施用している試験区 (P区、NP区、NPK区) は0.08~0.09%であったのに対し、施用していない試験区 (0区、N区、K区、NK区) は0.06~0.07%と低かった。完全区 (NPK+RS区) のみ増加傾向であったことは、稲わらを全量還元することにより、有機物由来の窒素が補給されていると考えられた。三要素試験とは別に、ほ場レベルで実施している水稻連作の試験⁹⁾では、稲わらの還元により土壌窒素量はほぼ増減なく維持されていることが示されているが、この三要素試験で増加傾向を示したことはコンクリート槽での試験であるため系外への流出が少ないためと考えられた。これに対して、稲わらを還元していない試験区は、窒素施用の有無にかかわらず土壌中の全窒素量は減少しており、収穫時の稲わらの持ち出しにより地力の低下が起きていることが考えられた。また、リン酸施用区では、平均収量が高く地上部の持ち出し量が多いにもかかわらず、土壌に残存する窒素量がリン酸を施用していない区に比べて多かった。この理由として、リン酸を施用することで、地上部に比例して地下部の根量が多くなっていることや、ラン藻による窒素固定や根域でのイネ-窒素固定菌による協同的窒素固定といった系外から何らかの土壌への窒素供給が起きている可能性が考えられた¹⁰⁾。さらに、窒素単用区 (N区) の土壌中全窒素濃度は、窒素を施用しているにもかかわらず無施肥区 (0区) やカリ単用区 (K区) などと同様に低く推移した。このことは、8 g-N/m²の化学肥料の施用を続けても土壌への蓄積効果は認められないことを示唆しており、後述のとおり、施用による土壌への影響が認められたカリやリン酸とは異なる動態を有していることが考えられた。

3. 3. 2 可給態リン酸および全リン酸の推移

3. 3. 2. 1 可給態リン酸

可給態リン酸は、いずれの測定年度でもリン酸を施用しない無施肥区 (0区)、窒素単用区 (N区)、カリ単用区 (K区)、無リン酸区 (NK区) ではほぼ0 mg-P₂O₅/100gであり、枯渇している状況であった(図5)。一方、リン酸を施用した区は10 mg-P₂O₅/100g程度を維持していた。このように、6 g-P₂O₅/m²の化学肥料の施用を続けると、滋賀県の水田土壌の改良目標値¹¹⁾である可給態リン酸10~20 mg-P₂O₅/100gは維持されることが考えられた。また、三要素区 (NPK区) と完全区 (NPK+RS区) の値がほぼ同様であることから、稲わら還元処理は、可給態リン酸の土壌蓄積にはほとんど影響しないと考えられた。

3.3.2.2 全リン酸

全リン酸は可給態リン酸と同様に、リン酸を施用しない区で低く、施用した区で高い値を示した。リン酸無施用の各区で20~30 mg-P₂O₅/100g、リン酸施用の各区では80~120 mg-P₂O₅/100gであり、リン酸の施用の有無により大きな差があっ

た。リン酸無施用の各区においても低量ながら全リン酸が認められたことから、リン酸無施用を継続すると可給態リン酸はほぼ枯渇するが、非可給態のリン酸は試験開始から60年経過しても存在しつづけることが明らかとなった。

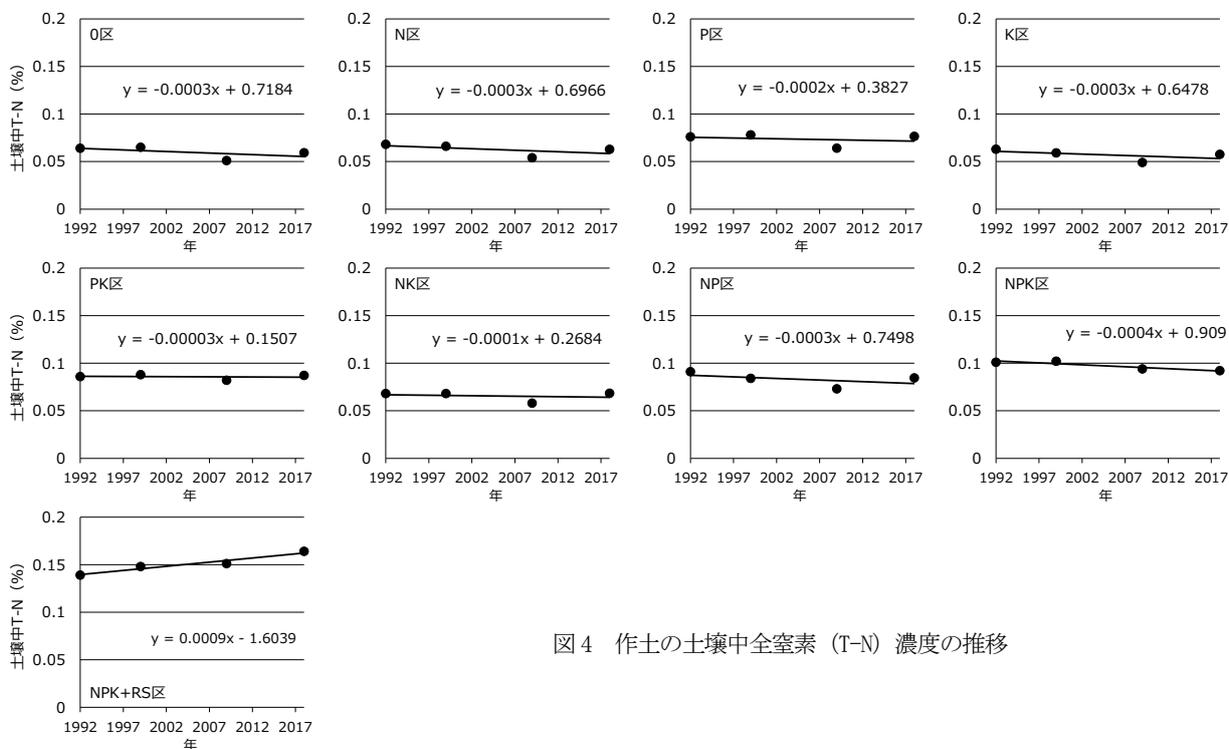


図4 作土の土壤中全窒素 (T-N) 濃度の推移

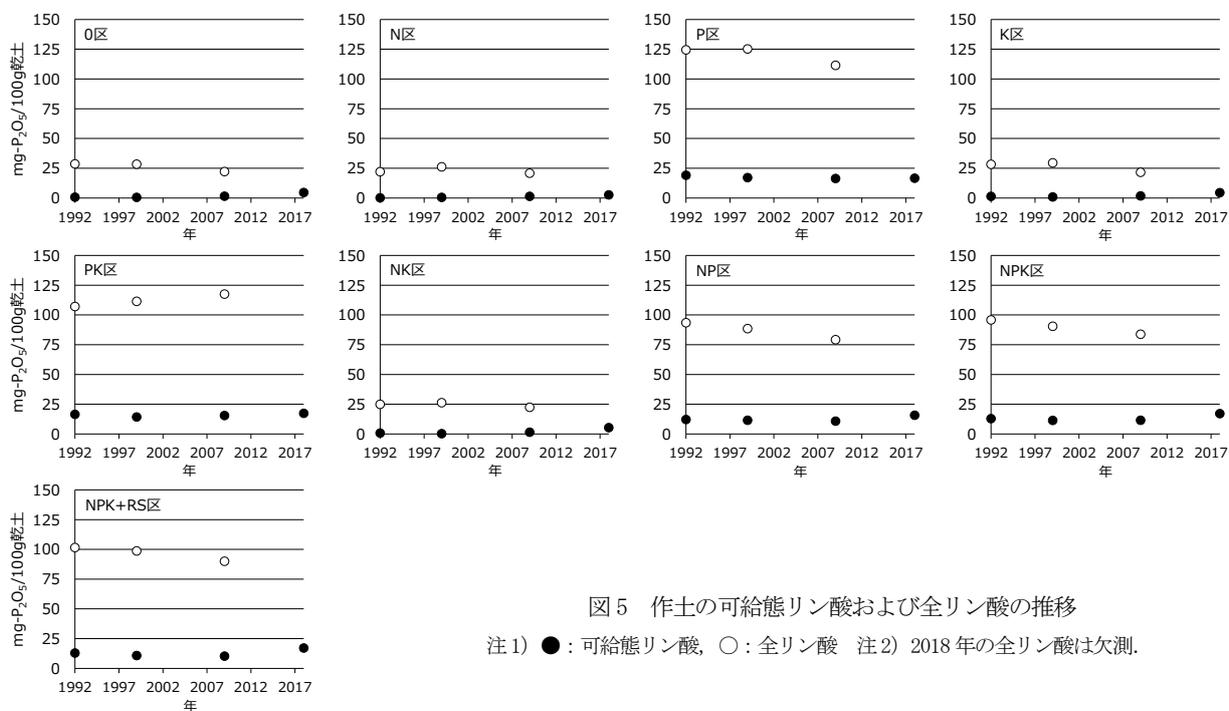


図5 作土の可給態リン酸および全リン酸の推移

注1) ● : 可給態リン酸, ○ : 全リン酸 注2) 2018年の全リン酸は欠測。

3. 3. 3 交換態カリウムおよび非交換態カリウムの推移

3. 3. 3. 1 交換態カリウム

交換態カリは、カリ無施用の各区 (0 区, N 区, P 区, NP 区) であっても低い値であるが、2~4 mg-K₂O/100g 程度は維持されており (図 6)、土壌等からの天然供給が考えられた。最も高い値を示したカリ単用区 (K 区) は 10 mg-K₂O/100g 程度であった。

藤澤ら¹²⁾が灰色低地土で行った長期無カリ栽培試験 (1930 年~2006 年) でも、交換態カリウムは 70 年以上を経ても 4 mg-K₂O/100g 程度を維持し、変化が小さく安定していることが報告されており、本試験結果と同様の傾向にあった。これらのことから、交換態カリウムは無施用を続けても可給態リン酸のように枯渇することはないと考えられた。

3. 3. 3. 2 非交換態カリウム

非交換態カリウムは、カリ単用区 (K 区) で 70~80 mg-K₂O/100 g と最も高く、次いで無リン酸区 (NK 区)、無窒素区 (PK 区) で高かったが、各区とも 50~60 mg-K₂O/100g であり、試験区間の差が比較的小さかった。

また、各試験区とも 1992 年と 2009 年に採取した土壌の間に大きな差がなく、経時的な変化も小さいことが分かった。このことから、土壌には大きなカリ供給能があることが考えられ、無カリ処理を行っても、水稲にカリ不足が顕在化してこない理由の一つと考えられた。

また、阿江ら¹³⁾および糟谷ら¹⁴⁾は、土壌一次鉱物が風化作用をうけ崩壊する過程で、構造的なカリウムが交換態カリウムとして多く土壌に供給されるため、水稲はこれを利用し、本来、窒素と同程度の要求量があるカリの欠乏は出にくいとしている。本試験において、無カリ区 (NP 区) でも、水稲は比較的順調に生育し、三要素区 (NPK 区) と同等の収量を確保し、三要素の中で収量への寄与が小さかったことは、このような土壌からのカリの天然供給があることが考えられた。

3. 3. 4 土壌中全炭素 (T-C) の推移

土壌中全炭素 (T-C) 濃度の推移を図 7 に示した。土壌中全炭素は、土壌中全窒素と同様に完全区 (NPK+RS 区) で明確に蓄積傾向が認められた。他の区は概ね横ばいで推移し安定していた。土壌中全炭素が最も低いのは、リン酸を施用しておらず、水稲生育量の小さい無施用区 (0 区)、カリ単用区 (K 区)、窒素単用区 (N 区)、無リン酸区 (NK 区) で、0.6% 程度であった。比較的水稲生育量の大きいリン酸施用区 (P 区, PK 区, NPK 区, NPK+RS 区) では、リン酸を施用していない区に比べて土壌中全炭素は高かった。これは水稲の地上部は持ち出しているものの、地下に存在する根部の重量がリン酸施用によって増加したためと考えられた。また、完全区 (NPK+RS 区) の土壌中炭素は 2018 年の調査で 1.7% であり、稲わらを還元することで一定量を土壌中に炭素を貯留する効果が期待できると考えられた。

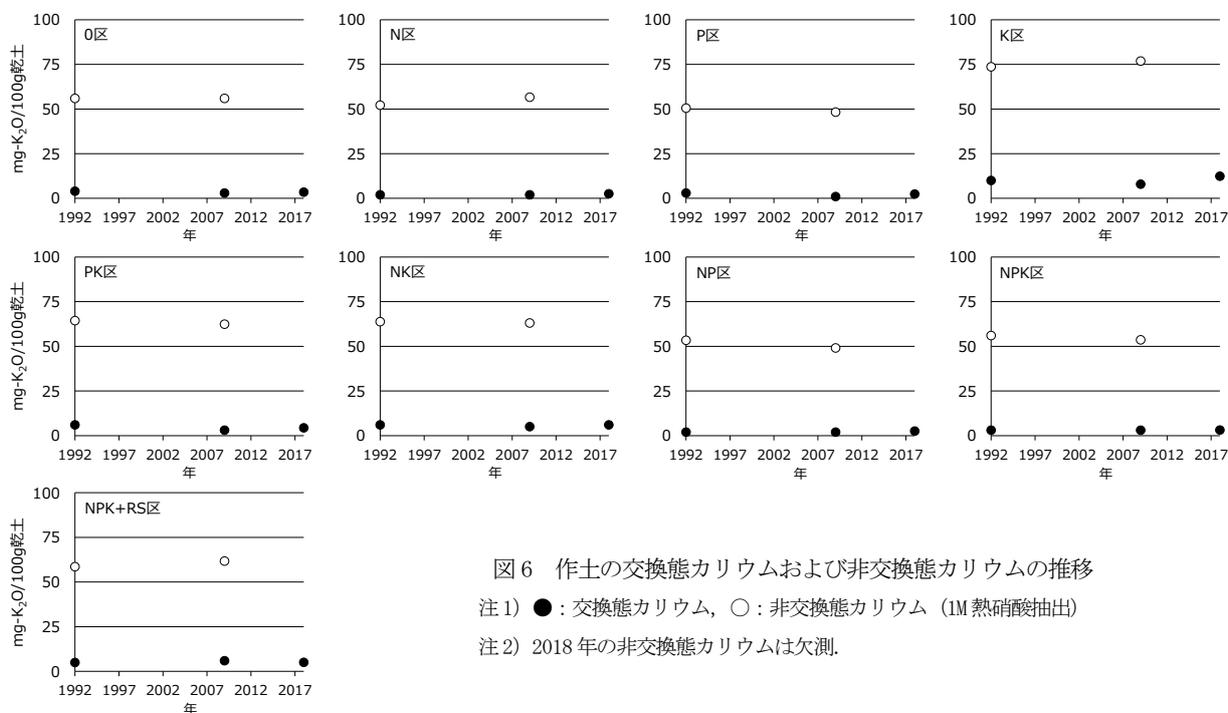


図 6 作土の交換態カリウムおよび非交換態カリウムの推移
 注 1) ●: 交換態カリウム, ○: 非交換態カリウム (1M 熱硝酸抽出)
 注 2) 2018 年の非交換態カリウムは欠測。

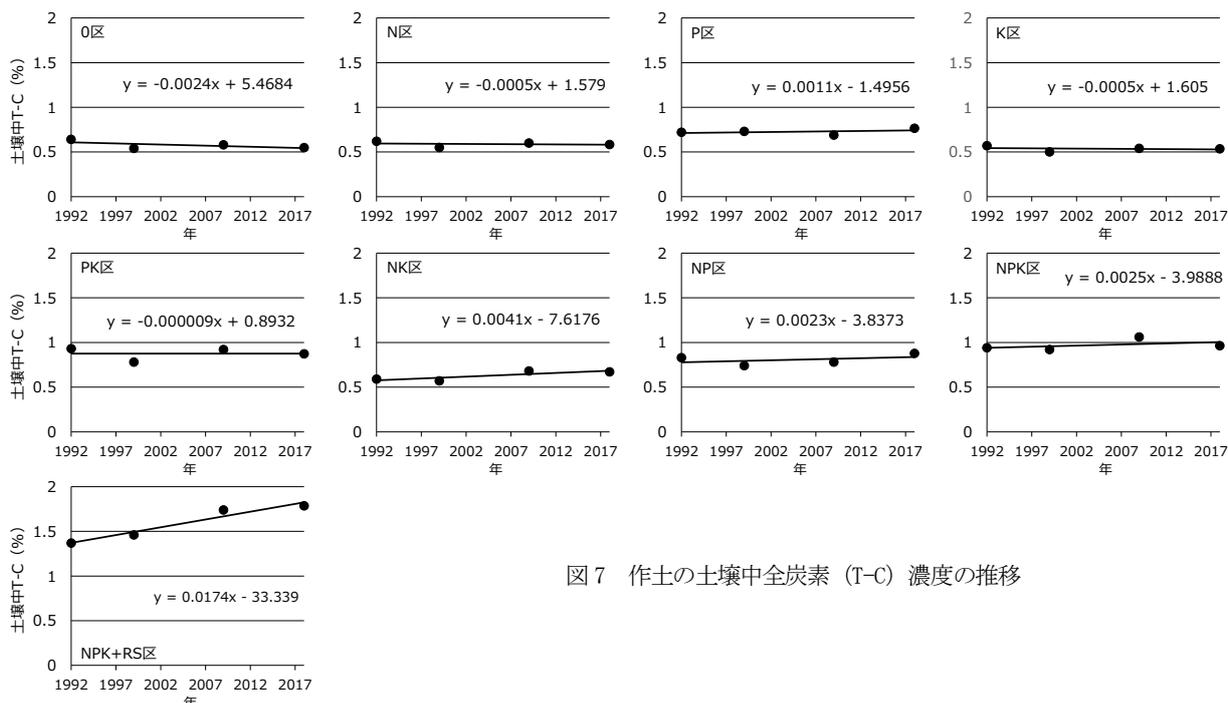


図7 作土の土壤中全炭素 (T-C) 濃度の推移

3. 3. 5 窒素成分の吸収量

水稻地上部の窒素吸収量を図8に示した。窒素吸収量は、完全区 (NPK+RS区) で 11.1 g-N/m^2 となり、他の全ての試験区に対し有意に多かった。次いで三要素区 (NPK区) と無カリ区 (NP区) で 8 g-N/m^2 程度と多かった。無リン酸区 (NK区)、無窒素区 (PK区)、窒素単用区 (N区)、リン酸単用区 (P区) はほぼ同水準の $4\sim 5 \text{ g-N/m}^2$ であった。最も少なかったのは、カリ単用区 (K区) の 2.5 g-N/m^2 および無施用区 (O区) の 2.6 g-N/m^2 であった。窒素を施用しないリン酸単用区 (P区) が窒素単用区 (N区) と同程度の窒素吸収量であり、またリン酸を施用した区 (PK区, NP区) の窒素吸収量がリン酸を施用していない区 (K区, N区) と比べて増加していることから、リン酸の存在が窒素吸収に積極的な役割を果たしていると考えられた。また、三要素施用区 (NPK区) に比べて完全区 (NPK+RS区) の窒素吸収量が多かったことは、還元された稲わらから窒素供給があったためと考えられた。

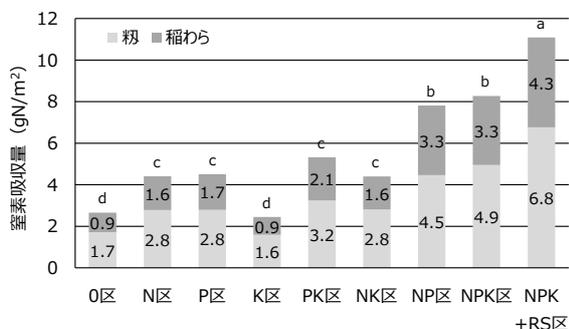


図8 各試験区の窒素吸収量

注1) 異なる符号間には5%水準で有意差がある (Tukey法)。
 注2) 1993年～2018年の平均値。1994年～1996年, 2004年, 2014年～2017年は欠測。

差し引き法で算出した施用窒素利用率について比較した (図9)。リン酸を施用しない窒素単用区 (N区) および無リン酸区 (NK区) が30%程度と低かったが、リン酸が供給されていることにより無カリ区 (NP区) と三要素区 (NPK区) では49～55%に上昇した。リン酸が施用されている試験区で一律に施用窒素利用率が高かったことからリン酸の存在が窒素吸収に及ぼす影響が大きいと考えられた。

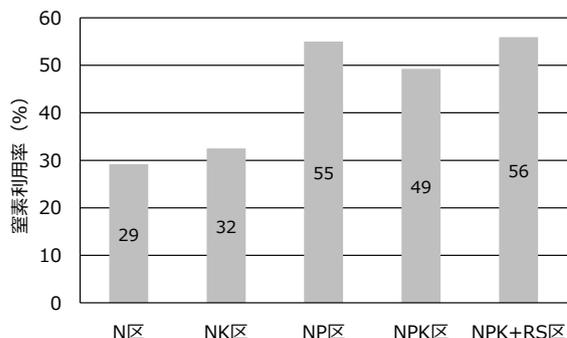


図9 施用窒素利用率

注) 1993年～2018年の平均値。1994年～1996年, 2004年, 2014年～2017年は欠測。

3. 3. 6 リン成分の吸収量

水稻地上部のリン酸吸収量を図10に示した。リン酸吸収量は、完全区 (NPK+RS区) は $5.9 \text{ g-P}_2\text{O}_5/\text{m}^2$ であり、他の全ての試験区に対し有意に多かった。次に、三要素区 (NPK区) と無カリ区 (NP区) が $5 \text{ g-P}_2\text{O}_5/\text{m}^2$ 程度で、無窒素区 (PK区) とリン酸単用区 (P区) も 3.3 および $2.8 \text{ g-P}_2\text{O}_5/\text{m}^2$ と比較的多かった。無施用区 (O区)、窒素単用区 (N区)、カリ単用区 (K区)、無リン酸区 (NK区) は、 $1.0 \text{ g-P}_2\text{O}_5/\text{m}^2$ 程度と低かった。リン酸が施用されていない試験区はいずれも同等に少な

く、リン酸施用区と明確に差が認められた。これはリン酸の天然供給量が少ないことによると考えられた。また、リン酸単用区 (P 区) と無カリ区 (NP 区) との間や無窒素区 (PK 区) と三要素区 (NPK 区) に有意差があることから、窒素施用がリン酸の吸収に対して有利に作用していると考えられた。一方、リン酸単用区 (P 区) と無窒素区 (PK 区) と間には有意差が無かったことから、カリはリン酸の吸収に大きな影響は及ぼさないと考えられた。

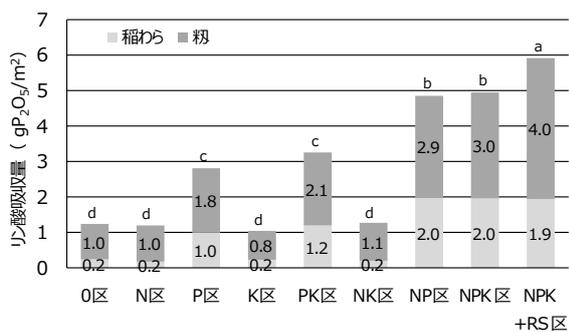


図 10 各試験区のリン酸吸収量

注 1) 異なる符号間には 5 %水準で有意差がある (Tukey 法).
 注 2) 1993 年～2018 年の平均値. 1994 年～1996 年, 2004 年, 2014 年～2017 年は欠測.

施用したリン酸成分の利用率について比較した (図 11). 窒素を施用しないリン酸単用区 (P 区) および無窒素 (PK 区) で 26～37 %, 窒素を施用した無カリ区 (NP 区) および三要素区 (NPK 区) で 50 %超となった。このことから、窒素施用がリン酸の吸収を促進していることが確認できた。

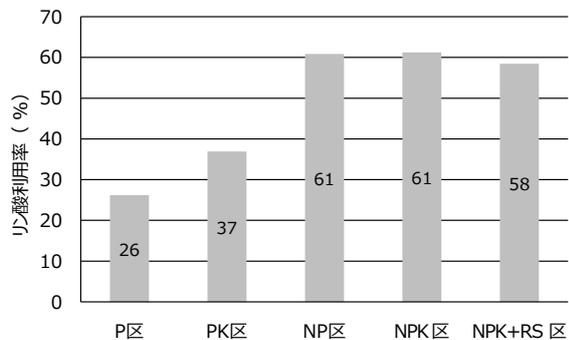


図 11 施用リン酸利用率

注) 1993 年～2018 年の平均値. 1994 年～1996 年, 2004 年, 2014 年～2017 年は欠測.

3. 3. 7 カリ成分の吸収量

水稻地上部のカリ吸収量を図 12 に示した。カリ吸収量は、完全区 (NPK+RS 区) で 14.1 g-K₂O/m² と有意に多く、次いで多い三要素区 (NPK 区) の 8.2 g-K₂O/m² の 1.7 倍であった。これは、稲わらが還元されることにより供給されるカリ成分量の違いによるものと考えられ、稲わら還元によるカリの供給は大きいことが示唆された。無窒素区 (PK 区)、無リン酸区 (NK 区) は 6 g-K₂O/m² 程度、無カリ区 (NP 区) は 5 g-K₂O/m² 程度であった。窒素単用区 (N 区)、リン単用区 (P 区)、カリ

単用区 (K 区)、無施用区 (O 区) が 3～4 g-K₂O/m² の吸収量と低かった。カリ単用区 (K 区) は、無施用区とはほぼ同等であり、窒素単用区 (N 区) やリン酸単用区 (P 区) よりも少なく、カリ成分単用では、カリの吸収量に影響を及ぼしにくいと考えられた。このようにカリ吸収量は、カリ施用の有無よりむしろ生育量との関係が深いと考えられたため、次に施用カリの利用率を求めた。

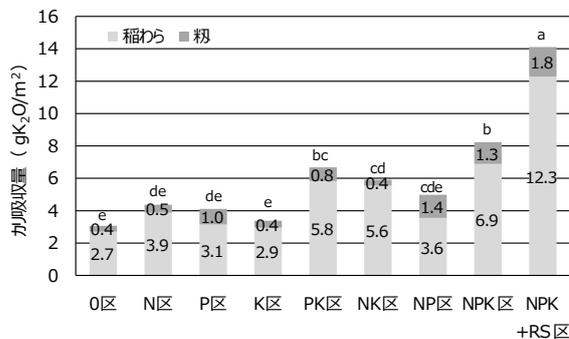


図 12 各試験区のカリ吸収量

注 1) 異なる符号間には 5 %水準で有意差がある (Tukey 法).
 注 2) 1993 年～2018 年の平均値. 1994 年～1996 年, 2004 年, 2014 年～2017 年は欠測.

施用カリ利用率を図 13 に示した。カリ単用区 (K 区) の施用カリ利用率は 5 %と低かった。これは生育量が小さいため、施用されたカリの多くが利用されなかったことによるものと考えられた。また、3. 4. 3. 1 の項で示したように、土壌中の交換態カリ濃度が高いことから示唆された。一方、無窒素区 (PK 区)、三要素区 (NPK 区)、完全区 (NPK+RS 区) は、施用カリ利用率が 50 %程度あり、施用されたカリが効率的に利用されていた。カリは、稲わら還元によって施用量以上の易吸収性のカリがほ場に供給されるが、総じてカリは再利用されやすい反面、生育量が小さければ吸収されず、流亡しやすいと考えられた。

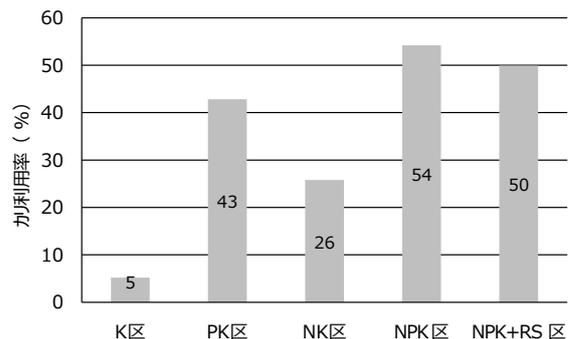


図 13 施用カリ利用率

注) 1993 年～2018 年の平均値. 1994 年～1996 年, 2004 年, 2014 年～2017 年は欠測.

園田ら¹⁵⁾が滋賀県竜王町で行った水田群を巡る栄養塩類の発生負荷量調査では、カリの流入負荷量は 62.6～91.8 kg-K/ha あり、窒素の 3 倍以上、リン酸の 20～40 倍あることが示されている。一方で、流出負荷も大きく、差引排出負荷量 (流出負荷量－流入負荷量) は平均で +67.5 kg-K/ha であっ

た。水稲ではカリ欠乏が現れにくく、現状で施肥基準や施肥法について問題となることは少ない。しかしながら、カリ肥料の原料の多くを海外からの輸入に依存しているため、肥料費高騰やこれに伴う資源の有効利用の観点から、有機質資材を活用したカリ減肥などの効率的な施肥を目的とした研究が今後より重要になってくると考えられた。

4. 謝辞

本研究は、80年以上にわたり多くの研究者、技術員が関わり継続してきたものである。関係者の総力でデータが積みあがったものであり、関係各位に心から謝意を表すものである。試験内容を整理するにあたり、ほ場試験についてまとめられた中田博士の論文をおおいに参考にした。また、環境研究部環境保全係の職員の協力を改めて感謝の意を表す。

5. 引用文献

- 1) 金森哲夫, 2000. 国公立試験研究機関における有機物・肥料等の長期連用試験の現状について. 土肥誌. 71(2) : 286-293.
- 2) 木村真人・三枝正彦, 2009. 日本土壌肥料学会の歩み, 日本農学会編「日本農学 80 年史」 1 章「土壌・肥料・植物栄養学」, 養賢堂. 1-7.
- 3) 中田均, 1979. 肥料三要素およびたい肥の長期連用が土壌生産力におよぼす影響の数理統計的解析. 滋賀農試特報. 13 : 6-16.
- 4) 柴原藤善・河村正彦・小林正幸, 1994. 水田におけるわら施用が排水水質および土壌微生物に及ぼす影響—とくに稲わら施用による水稲非作付期の硝酸塩流出軽減について—. 滋賀農試研報. 35 : 1-18.
- 5) 財団法人日本土壌協会, 2001. 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法.
- 6) 土壌環境分析法編集委員会, 1997. 土壌環境分析法, 博友社.
- 7) 土壌養分測定法委員会, 1970. 肥沃度測定のための土壌養分分析法, 養賢堂.
- 8) 住田弘一・大山信雄・野副卓人・佐藤智男, 1990. 要素欠如処理にみられる水稲の生育, 収量及び養分吸収特性と土壌養分の動態. 東北農試研報. 82 : 19-45.
- 9) 柴原藤善・武久邦彦・小松茂雄・波部恒昭, 1999. 水稲に対する有機物および土づくり肥料の連用効果 (第1報) 水稲の生育収量, 養分吸収および土壌の化学性の変化. 滋賀農試研報. 40 : 54-77.
- 10) 米山忠克・赤尾勝一郎, 1998. 非マメ科植物に共生窒素固定系を賦与するための研究戦略と問題点 2. 根圏の窒素

固定からエンドファイテック窒素固定. 土肥誌. 69(4) : 403-409.

- 11) 滋賀県農政水産部, 2002. 土づくり技術対策指針.
- 12) 藤澤春樹, 清藤文仁, 境谷栄二, 岩谷香緒里, 2009. 寒冷地水稲の長期無カリ栽培における収量変動および堆肥施用. 青森県農林総合研究センター研究成果情報.
- 13) 阿江教治・松本真悟, 2012. 作物はなぜ有機物・難溶解成分を吸収できるのか. 社団法人農山漁村文化協会. 167-189.
- 14) 糟谷真宏・安藤薫・尾賀俊哉・大橋祥範・久野智香子, 2022. 愛知県の 95 年間の長期連用試験における水稲の収量と土壌化学性の変化および土壌カリウム供給機構について. 土肥誌. 93(1) : 1-11.
- 15) 園田敬太郎・徳田裕二・岡本佐知子・田中靖志・北野亮・大橋恭一, 1997. 水田群からの栄養塩類発生負荷量調査(第1報). 滋賀農試研報. 38 : 57-65 (1)

Summary

The Shiga Prefectural Agricultural Technology Promotion Center has been carrying out a long-term study of three nutrient elements in paddy rice since 1933. This report presents a discussion of changes in yield, soil chemistry, and the absorption of the three nutrient elements during the 27 years of 1992–2018.

1) Yield: Since the year 1992, about 60 years after the start of study in this area, yields in the group without fertilizer application (without application of any of the three nutrient elements) and the straight potassium group were about 20% of those of the complete group (returning the whole amount of rice straw in addition to application of all the three nutrient elements) over time. Yields of the straight nitrogen group and in the straight phosphoric acid group were about 40% of those in the complete group. Effects of application of the three nutrient elements on yield were compared, showing the effect of phosphoric acid as the greatest, followed by nitrogen. Potassium was less effective.

2) Nitrogen: A significant difference was found in nitrogen absorption of the rice plant between groups with and without nitrogen application. The total nitrogen content in soil increased in the complete group, but it leveled off or showed a slightly decreasing tendency in the group where rice straw was not returned.

3) Phosphoric acid: A significant difference was found in phosphate absorption of the rice plant between groups with and without phosphoric acid application, which was regarded as attributable to the extremely low natural supply. The total phosphoric acid content in soil in the group without phosphoric acid application was 20–30 mg-P₂O₅/100 g, whereas available phosphoric acid was almost eliminated.

4) Potassium: No clear difference was found in potassium absorption between groups with and without potassium application. Potassium absorption was more related to growth than to application. Results suggest that there was great amount of natural supply of potassium such as from soil. Therefore, potassium deficiency was unlikely.

附表1 気象データ、作柄および被害の概要

年度	年平均気温 ℃	積算降水量 mm	積算日照時間 hrs	作柄および被害の概要
1992	14.4	1419	1748	籾数多い, 高夜温で登熟緩慢
1993	13.9	1856	1498	低温・寡照, 台風7号、穂いもち多発
1994	15.3	924	2164	生育期間が高温・多照・寡雨、干害の発生
1995	14.1	1436	1901	5月中旬に大雨で冠水, 登熟期間が高温・多雨
1996	13.8	1377	1699	登熟期間が高温・多照
1997	14.6	1533	1726	台風9号 (7/26) によるもみずれ, いもち病多発
1998	15.7	1779	1449	台風7号・8号および秋雨前線の停滞で穂発芽多発
1999	14.9	1626	1642	籾数多い, 出穂期の強風、高夜温で登熟緩慢
2000	14.9	1604	1861	籾数やや多い, 登熟期間が高温・多照・寡雨
2001	14.7	1315	1929	籾数やや多い, 登熟期間が高夜温
2002	14.7	1057	1792	生育登熟期間が高温、少雨
2003	14.3	1746	1544	低温・日照不足・いもち病大発生
2004	15.2	1452	1916	生育・登熟期間高温, 登熟は順調、風水害は多い
2005	14.4	1031	1836	生育・登熟期間高温, 登熟は順調、風水害は多い
2006	14.4	1382	1671	日照不足による穂数減, 登熟は順調
2007	14.8	1291	1818	籾数やや少ない, 登熟期間が高温・多照・寡雨
2008	14.5	1225	1814	籾数もやや多い, 登熟は順調
2009	14.5	1351	1813	籾数平年並み, 8月上旬の曇天で登熟がやや緩慢
2010	14.9	1670	1823	籾数平年並み, 登熟は順調
2011	14.4	1662	1805	登熟期間の日照不足や風水害
2012	14.3	1731	1823	登熟期間が高温・多照
2013	14.6	1520	1922	籾数やや多い, 登熟期間が高温・多照・寡雨
2014	14.3	1583	1851	8月の多雨, 日照不足
2015	15.0	1801	1747	8月上中旬の猛暑, 9月中下旬の長雨
2016	15.3	1627	1720	8月上中旬の猛暑・多照, 9月中以降の長雨
2017	14.3	1745	1588	有効茎歩合の低下, 出穂後の日照不足
2018	15.1	1556	1722	登熟平年並み

附表2 水稻収量

年度	精玄米重 (g/m ²)									精玄米重 (g/m ²)									
	1区 O	2区 N	3区 P	4区 K	5区 PK	6区 NK	7区 NP	8区 NPK	9区 NPK+RS	年度	1区 O	2区 N	3区 P	4区 K	5区 PK	6区 NK	7区 NP	8区 NPK	9区 NPK+RS
1933	359	374	361	346	359	423	379	443	495	1967	171	270	218	196	278	321	417	389	514
1934	231	162	237	219	266	409	224	421	450	1968	171	204	228	181	359	203	342	341	387
1935	279	183	291	303	321	526	216	504	488	1969	143	226	201	175	219	275	349	391	507
1936	300	131	318	323	325	483	170	489	519	1970	115	243	211	159	236	269	296	350	443
1937	250	274	266	284	282	399	243	411	466	1971	92	161	185	124	184	187	363	397	492
1938	210	182	227	240	237	370	224	398	471	1972	144	250	215	170	212	272	365	385	527
1939	213	210	261	170	200	384	400	455	501	1973年～1991年の予-外は欠測									
1940	199	297	266	204	224	354	269	425	383	1992	-	246	180	-	243	228	422	436	519
1941	157	201	196	188	227	250	205	379	402	1993	222	288	305	172	344	232	445	450	551
1942	227	271	301	213	286	331	303	455	447	1994	333	399	383	256	394	354	535	541	626
1943	191	288	204	211	223	334	264	379	439	1995	240	255	319	174	327	169	556	510	676
1944	191	293	266	199	247	323	283	375	491	1996	191	159	354	162	392	163	410	435	524
1945	106	142	149	127	164	160	218	292	294	1997	206	235	290	186	323	213	459	442	565
1946	170	289	194	204	211	360	268	269	286	1998	142	232	231	118	271	223	458	500	621
1947	188	218	254	221	279	275	294	363	444	1999	162	107	247	127	244	77	309	435	505
1948	206	316	264	196	313	282	339	420	520	2000	181	138	319	108	362	79	553	594	676
1949	211	305	240	234	334	306	303	449	528	2001	191	142	295	114	310	136	396	362	547
1950	209	269	271	225	262	301	350	378	446	2002	154	194	279	141	303	178	418	471	617
1951	171	230	201	179	259	270	316	382	427	2003	133	254	214	-	236	238	353	554	-
1952	209	269	255	197	279	246	326	385	342	2004	214	262	224	160	272	273	215	274	399
1953	178	180	206	200	368	222	206	319	329	2005	204	329	255	172	288	351	332	510	588
1954	156	224	234	154	281	195	371	378	432	2006	158	193	243	150	277	209	423	546	700
1955	228	276	315	232	378	342	466	505	512	2007	103	213	196	132	307	257	376	499	611
1956	196	279	241	181	284	292	317	413	431	2008	162	278	280	171	318	270	414	465	681
1957	174	226	227	182	271	219	347	404	519	2009	134	171	244	123	278	179	356	420	614
1958	191	244	236	185	237	276	338	394	438	2010	103	228	239	115	369	269	365	360	589
1959	163	228	230	162	220	267	339	356	395	2011	118	215	241	116	335	244	434	462	589
1960	199	248	244	183	298	256	352	391	431	2012	155	245	247	160	277	271	403	421	568
1961	110	129	157	113	194	199	286	362	368	2013	99	205	309	126	339	340	541	519	670
1962	149	230	217	157	281	271	340	394	436	2014	157	283	259	152	293	351	453	458	560
1963	149	293	233	156	239	281	389	466	468	2015	163	363	326	189	401	411	451	548	627
1964	191	201	341	148	230	249	328	443	472	2016	109	289	292	137	308	319	494	503	568
1965	163	178	244	228	136	230	525	464	535	2017	104	170	271	125	340	240	398	439	553
1966	120	212	192	177	186	257	369	418	494	2018	40	32	143	37	174	106	325	367	513

注1) 1933年～1971年までは水稻-小麦栽培体系を実施。
 注2) 水稻品種：1993年は「滋賀中神24号」、1934年～1959年は「滋賀旭27号」、1960年～1970年は「新山吹」、1971年～は「日本晴」。

附表3 乾物あたりの作物体成分含有率

		成分含有率 (%)								
		1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	9区
		0	N	P	K	PK	NK	NP	NPK	NPK+RS
稲わら	N	0.41	0.48	0.48	0.39	0.46	0.45	0.58	0.51	0.50
	P	0.04	0.02	0.12	0.04	0.11	0.02	0.15	0.13	0.10
	K	1.00	0.98	0.76	1.10	1.08	1.23	0.52	0.91	1.21
	Ca	0.31	0.33	0.40	0.31	0.39	0.37	0.44	0.43	0.31
	Mg	0.06	0.08	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05
	SiO ₂	12.3	12.4	10.6	13.3	9.3	12.2	8.0	7.9	12.1
籾	N	0.86	0.98	0.86	0.85	0.85	0.95	0.90	0.88	0.91
	P	0.22	0.16	0.27	0.20	0.27	0.16	0.30	0.30	0.31
	K	0.26	0.24	0.31	0.27	0.31	0.24	0.31	0.33	0.36
	Ca	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02
	Mg	0.09	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.10	0.09	0.09
	SiO ₂	5.01	4.90	4.25	5.04	4.05	5.05	3.47	3.35	4.08

注) 1993年～2018年の平均値。1994年, 1995年, 1996年, 2004年, 2014年～2017年は欠測。

附表4 土壌化学性

		pH	T-C	T-N	CEC	可給態	可給態	置換性塩基		
						P ₂ O ₅	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O
		H ₂ O	(%)	(%)	(me/100g乾土)	(mg/100g乾土)				
1区	0	6.4	0.58	0.06	5.8	1.78	7.5	99.2	8.9	3.4
2区	N	5.9	0.59	0.06	6.1	1.08	4.8	93.1	5.6	2.2
3区	P	6.4	0.73	0.07	7.0	17.2	5.5	140.8	6.0	2.1
4区	K	6.6	0.54	0.06	5.8	2.05	6.2	100.7	8.3	10.4
5区	PK	6.4	0.88	0.09	7.1	15.9	4.9	140.9	6.5	4.6
6区	NK	5.8	0.63	0.07	5.5	1.95	4.6	89.8	6.1	6.5
7区	NP	5.7	0.81	0.08	6.8	12.6	4.2	115.3	3.6	2.1
8区	NPK	6.0	0.97	0.10	7.3	13.2	4.9	138.8	4.8	3.3
9区	NPK+RS	6.1	1.59	0.15	9.1	12.7	7.4	180.0	7.8	7.3

注) 1992年, 1999年, 2009年, 2018年の平均値。