

水稻の窒素栄養の動態からみた無施肥田と
施肥田の比較栽培学的研究

奥村俊勝

1988

水稻の窒素栄養の動態からみた無施肥田と
施肥田の比較栽培学的研究

奥村俊勝

1988

目次

第1章 緒言	1
第2章 施肥、無施肥田の水稻生育型の差異と玄米生産力の比較	5
第1節 調査対象とした長期無施肥田と施肥田の特徴の概要	5
第2節 栄養体諸形質の生育パターン	8
(1) 草丈と1株基数の推移	8
(2) LAIと葉の窒素含有率の消長および葉の充実度	8
(3) 地上部の相対生長率(RGR)とT/R比の変化	12
(4) 生産構造の差異	13
第3節 玄米収量と収量構成要素	13
第4節 窒素吸収量と吸収窒素の玄米生産効率	15
第5節 考察	16
第6節 摘要	18
第3章 施肥、無施肥田の土壤窒素の無機化と発現パターンの差異	20
第1節 土壤窒素の無機化力の比較	20
第2節 水田内の土壌環境要因の変動	23
(1) 地温	23
(2) 土壌pH	24
(3) 土壌Eh	26
第3節 土壤窒素の推移	27
(1) 全窒素	27
(2) 水溶出性アンモニア態窒素	28
(3) KCl液可溶アンモニア態窒素	28
第4節 考察	31
第5節 摘要	33

第4章 かんがい水中溶存窒素が水稻の生産力に及ぼす影響	34
第1節 かんがい水による供給窒素の直接的効果と間接的効果	34
第2節 溶存窒素の直接的効果の比較	37
(1) $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の時期的変動	39
(2) 生育・収量および吸収窒素量の差異	39
第3節 考 察	42
第4節 摘 要	45
第5章 土壌の窒素条件と生物的窒素固定能との関係	46
第1節 水稻根圏における窒素固定能	47
第2節 有機栄養微生物量の変動	48
第3節 らん藻の棲息数の比較	51
第4節 考 察	53
第5節 摘 要	54
第6章 施肥、無施肥田における早植効果と密植効果の発現性	56
第1節 移植時期と生育収量との関係	56
第2節 密植効果の発現性の施肥、無施肥田間の差異	59
第3節 考 察	62
第4節 摘 要	64
第7章 栽培品種の土壌の窒素条件に対する適応性の比較	65
第1節 品種特性の発現性	65
(1) 草丈と基数の推移	65
(2) 出穂日の早晚	68
(3) 玄米収量と二、三の収穫物諸形質	68
第2節 考 察	72
第3節 摘 要	74

第8章 総合考察	75
第1節 無施肥田の生育パターンの特徴と玄米生産機構との関係	75
(1) 前期生育型と後期生育型	76
(2) 穂数確保型と穂重増大型	77
(3) 光競合回避型と養分競合回避型	77
第2節 天然供給窒素の発現パターンと収量性との関係	78
(1) 土壌無機化窒素の発現と有効性	80
(2) かんがい水由来の有効態窒素の発現性	83
(3) 生物学的固定窒素の発現と有効性	85
第3節 窒素収支からみた無施肥田の玄米生産機構とその維持	86
第4節 無施肥田の生産機構からみた施肥栽培における窒素施肥法の 改善指針——摘要にかえて——	87
第9章 要約	90
引用文献	95
Summary	102

第1章 緒 言

水稻栽培において、水田に投入される肥料養分の内で最も反応性が高く、重視されているのは窒素成分である。そのために、窒素施肥に関する報告は古くから多数にのぼり、それらには、施肥量と施肥時期を取りあつたもの^{27,65)}、施肥位置に関するもの^{38,66)}、肥料の種類に関連するもの^{56,74)}および耐肥性品種に関するもの²⁾ などがある。肥料は作物の増収を主目的として使用されるので、特別な事例^{42,75,79)}を除き、施用窒素が長期的な土壤環境に及ぼす累積効果についてはほとんど考察されていない。

化学肥料（とくに硫酸）の不足時代には、施肥効率に重大な関心を示した研究例²⁴⁾がみかけられるが、一旦、肥料が豊富に入手できる時代になると病虫害防除剤の発達と相俟って、天然供給窒素（とくに土壤窒素）の利用を軽視した化学肥料の多投による多収穫栽培法¹⁹⁾が追究されてきた。したがって、我が国の稲作は、窒素施用量が世界第一位の多投⁶⁹⁾となっていて、実際的水稻栽培上での問題が顕在化してきている。例えば、基肥の多投によって栄養生長が過剰となり、施肥効率が低下しやすくなった問題⁷⁶⁾や、どのような窒素施肥法が安定多収に必要なかなど⁷¹⁾の問題⁷¹⁾が挙げられるだろう。このような問題解決のために、窒素施用量をいろいろと変えた研究が数多く行われてきたが、その結論に対しては種々の観点からの論議があつて、現在、論争中の問題がかなり多い。

上述した多肥栽培に対して、少面積ではあるが農家の中には化学肥料と農薬をまったく使用しないで水稻を栽培する事例が散見される。この栽培法は、一般にいわれる「自然農法」^{7,11)}といわれるが、その内実は多岐^{4,7,61)}にわたっていて、化学肥料と合成農薬を使用しないことのみが共通している。この栽培法のなかには、有機物還元量が極めて少量で水稻の刈株以外をすべて圃場外に排除する場合から、有機物を化学肥料の代替栄養源として積極的に投入する場合まで含まれている。

このような無施肥栽培では、玄米収量は施肥栽培に比べて低くなるので、一般農家への普及性は乏しく、実践者が信念的に行っているのが実態である。そのために、この農法の定義づけは極めて曖昧であるばかりでなく、生産力向上を目的とする栽培学の研究分野には馴染みがたく、これまでに科学的論究が行われた事例は見られない¹⁹⁾。

しかるに、著者は1976年以来、数ヶ所の長期無施肥無農薬水田の実態調査に取り組む中で、毎年、有機物還元が極めて少ない条件下で予想外の多収となる無施肥田が存在するのを認めた。この事実は、この水田の生産機構が投入窒素量のみでは律し切れないことを示唆し、この生産機構の解明を通して、多肥栽培において生ずる諸問題を検討することは意義深いものと考えた。

上述したように、本研究は、単に窒素投入量と収量性との関係からみて、無施肥田の生産力に高い評価を与えることを目的としたものではない。つまり、現行の多肥栽培において、窒素施肥量や施肥法などで改良を必要とする場合に、無施肥田の生産機構の特徴を施肥田のものと比較して得られる知見が、改善方向を的確にするものと考えた。したがって、本研究は比較栽培学の視点から無施肥田の生産力を解析して、多肥栽培における改善指針を明らかにすることが論旨の中心課題となっている。

本論は第1章の緒言につづく8章より構成されており、各章の主要な内容は次の通りである。

第2章では、無施肥田と施肥田における水稻生育パターンを明らかにして、無施肥田の生産力が予想以上に大きいことを作物学的に解析した。

第3章は、それぞれの生産力を支える窒素供給源のうち、主要な天然供給源となる土壌窒素の無機化力を定量し、現地において無機化に関与する二、三の土壌環境要因の動態を比較した。つぎに、現地水田の土壌における全窒素、水溶性アンモニア態窒素および KCl液可溶アンモニア態窒素の3形態の窒素の動態を調査し、いかなる形態の窒素が実質的に生産力と関係を持つかを検討した。さらに、

その有効態窒素の発現と水稻生育との関係からみて、無施肥田におけるその発現パターンが生産に極めて有利に作用していることを強調した。

第4章では、かんがい水によって供給される窒素を水稻による利用の難易から分別し、それぞれの総量をかんがい水の流入量とそれらの溶存濃度から推量した。また、その供給窒素がどの程度の生産力に相当するかを実験的に評価した結果を述べた。

第5章では、水稻根面と根圏土壌の窒素固定力を施肥、無施肥田について調べて、これら固定窒素が、両水田の生産性にどの程度の寄与をしているかを比較した。また、土壌中の微生物棲息数とその活性を調査し、それらと土壌栄養条件との関連性を検討した。

第6章では、施肥、無施肥田について早植効果と密植効果の発現性を比較し、無施肥栽培によってそれらの効果を発現されることによる増収の可能性を追究した。

第7章では、両水田における品種特性の発現と窒素供給パターンとの関係を解析し、栽培品種の選択によって無施肥田における増収が可能か否かを検討した。

第8章は総合考察である。無施肥田における生育パターンと収量性、および3種類の天然供給窒素の発現と効果を、施肥田のものと対比させて考察し、結論的に、施肥栽培における窒素施肥の改善方針をあきらかにした。

第9章は要約である。

本研究を行うにあたり、京都大学農学部教授堀江 武博士より終始御懇篤な御指導と本論文の御校閲を賜った。また、京都大学農学部教授高橋英一博士ならびに久馬一剛博士から、本論文の作成にあたり有益な御助言と御討論を賜った。ここに深甚なる謝意を表します。

さらに、本研究の発端からその後の研究の遂行において、京都大学名誉教授長谷川 浩博士、近畿大学農学部教授竹内史郎博士から、またプロジェクト研究に

において、近畿大学農学部助教授川村三郎博士をはじめとする関係各位から、それぞれ終始懇切な御助言と多大の御援助をいただいた。これらの各位に衷心より感謝の意を表します。

最後に、本研究に対し、多大の御助力をいただいた近畿大学農学部農学科作物学研究室の卒業生の各位、ならびに研究遂行において多大な御援助をいただいた世界救世教黎明教会の故多田会長をはじめとする教会関係各位に、深甚なる感謝の意を表します。

第2章 施肥、無施肥田の水稻生育型の差異と玄米生産力の比較

調査した両水田の実際栽培において、毎年、外観的に認められた水稻の生育上の特徴は次のようであった。すなわち、N田では、移植から出穂期までの生育は、相対的に貧相であり、葉は概して淡黄色となり、胡麻葉枯の病徴を多くするが、生育減退が生ずるまでには至らない。出穂以後には、全般的に葉色が濃くなり、登熟はゆっくりと進行して秋優り的となる。なお、一筆内の稲体は、生育が不揃いとなり、とくに水口部付近では他所に比べて生育が旺盛である。一方、F田では、生育初期から生育が旺盛で葉も緑色が濃く、一筆内の生育は極めて斉一的である。出穂後には下葉の枯れ上りが激しくなり、登熟は急速に進み、登熟期間が短い。

まず、両水田における過去の栽培史や土壌の特徴の概略を述べ、続いて、上記の外観的な現象を作物学的に解析するために、両水田における水稻の草丈と1株茎数の推移を調査し、さらに地上部の相対生長率、T/R比、および葉部の窒素含有率とLAIの消長、出穂期の生産構造と葉質の違いを比較した。また、玄米収量とその構成要素の調査も行った。これらの調査結果に基づいて、本章では、両水田における水稻の生育パターンと生産機構との関連性について、比較栽培学的視点から解析を行った。

第1節 調査対象とした長期無施肥田と施肥田の特徴の概要

本研究の調査対象とした長期無施肥田（以下N田と略す）は、野洲川流域の沖積平野内の滋賀県栗太郡栗東町辻桑畑437に所在する田中一枝氏所有の面積9aの水田である。このN田では、1951年以来、還元される有機物が水稻の切り株のみであって、無施肥無農薬栽培が長期間に亘って厳格に続けられてきた。

無施肥栽培開始の当初からベニアサヒが栽培されて、聞き取り調査による推定玄米収量は、当初200kg/10a程度であったが、4～5年の後には約300kg/10aまで増加したといわれている。ついで、1975年の株刈による実際の収量調査では、402kg/10aを示し、それ以降、1983年までの年平均玄米収量は約400kg/10aを示してきた。

つぎに、この水田の水管理は、例年、収穫20日前までは掛け流しかんがいを実施されるので、水口より一作中に約4トン/m²のかんがい水が入り、水尻より約2.6トンの水が流失される。したがって、例えば栽培期間を120日として単純に計算すると、この水田の減水深は1.16cm/日となる。また、本水田に対する調査プロジェクト研究者の柘植らの結果⁶²⁾によると、この水田の土性は fine clayであり、乾土のP₂O₅、K₂Oおよび全炭素の含有率は、それぞれ0.16、0.45および0.81%を示し、そのC/N比は18.3であった。

一方、N田の比較対象にされた施肥田（以下F田と略す）は、N田の西側に、3m巾の農道を隔てて隣接していて、面積が約20aの島田和一郎氏所有の水田である。この水田では、例年、日本晴が栽培され、1975年度の株刈調査による実際の玄米収量は597kg/10aを示した。1977年における施肥は、高度化成肥料で基肥として10a当たりN：10kg、P₂O₅：13.6kg、K₂O：12kgを、さらに、NK化成を穂肥として施したので、一作総施肥量は10a当たりN：14.8kg、P₂O₅：13.6kg、K₂O：15.1kgの基肥重点多肥多農薬栽培となっている。また、コンバイン収穫後の水田内に放置された稲わらは、秋耕によって作土中に全量すきこまれる。水管理は、中干し期間を設けるとともに、出穂10日以降には落水した。また、上記の結果⁶²⁾において、土性は fine clayで、乾土のP₂O₅、K₂Oおよび全炭素の含有率は、それぞれ0.57、1.32および1.75%を示し、そのC/N比は16.3であった。

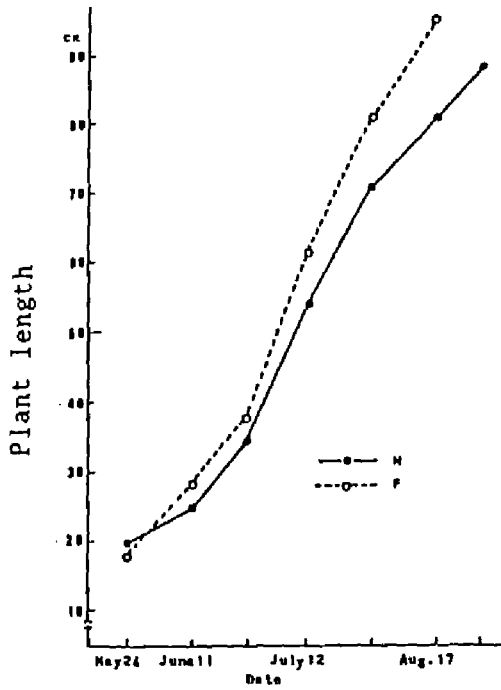


Fig.1. Growth in length of rice plants at fertilized(F) and unfertilized(N) fields.

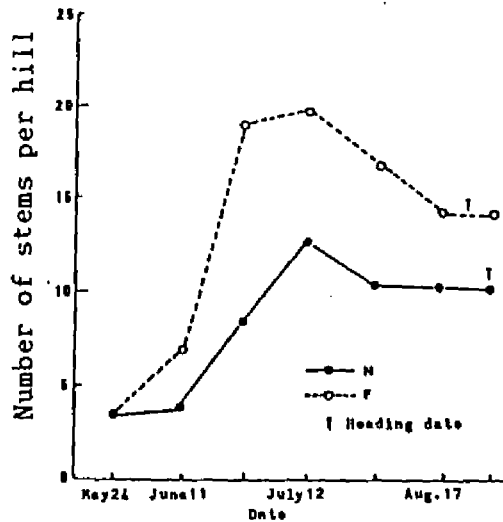


Fig.2. Changes with time in stem number of rice at fertilized(F) and unfertilized (N) fields.

第2節 栄養体諸形質の生育パターン

1977年に、実験結果の解析およびその比較を容易にするために、両水田ともにベニアサヒ品種を栽培した。実験はそれぞれ水口より約20m内部の場所において、1試験区面積を4 m²として2反復制で実施した。両水田とも5月9日に、無施肥育苗の5葉期苗を1 m²当たり19.2株の密度（条間26cm×株間20cm）で手植し、その生育状態を常法によって調査した。

(1) 草丈と一株茎数の推移

各水田における草丈の推移はFig. 1に、一株茎数の推移はFig. 2に示した。草丈の伸長と茎数の増加は、N田よりもF田において全体的に大きくなった。しかし、移植後の約20日間の草丈伸長は、むしろN田が優れ、茎数増加は両水田でほぼ同一となった。それ以後の両形質の推移はF田が優り、とくに草丈は出穂期において区間差が約5 cm程度となった。一株茎数の推移において、最高分げつ数はF田が約8本多くなったが、有効茎数の区間差は約4本にまで縮小した。なお、出穂はN田が約5日遅かった。

以上から、両形質のいずれもがF田で優り、区間差は顕著であるが、しかし、それらの消長パターンは比較的類似することや、生育後期での草丈伸長と有効茎歩合が、施肥をうけないN田で相対的に大きくなることが注目された。

(2) LAIと葉の窒素含有率の消長および葉の充実度

Fig. 3にLAIの消長を、Fig. 4に緑葉の窒素含有率の変化を、また、Fig. 5-1には、出穂期の葉の充実度（本論では単位葉面積当たりの乾物重、比葉重をさす）を、Fig. 5-2には、個体に着生している各葉位ごとの個葉面積をそれぞれ示した。LAIの消長では、全生育期間を通してF田が高く、とくに、幼穂形成期以降から出穂期までの期間中ではN田の約2倍の葉面積を持ち、

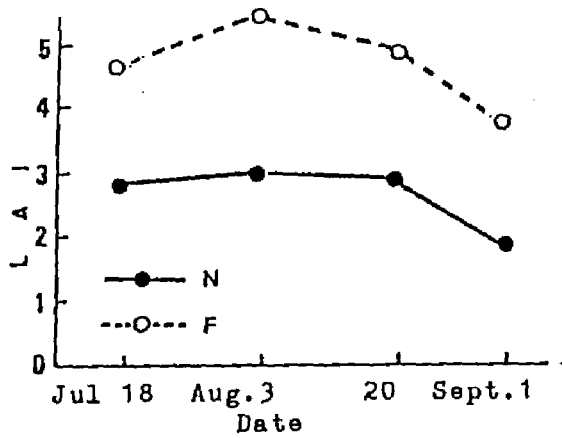


Fig.3. Changes with time in leaf area index of fertilized(F) and unfertilized(N) rice crops.

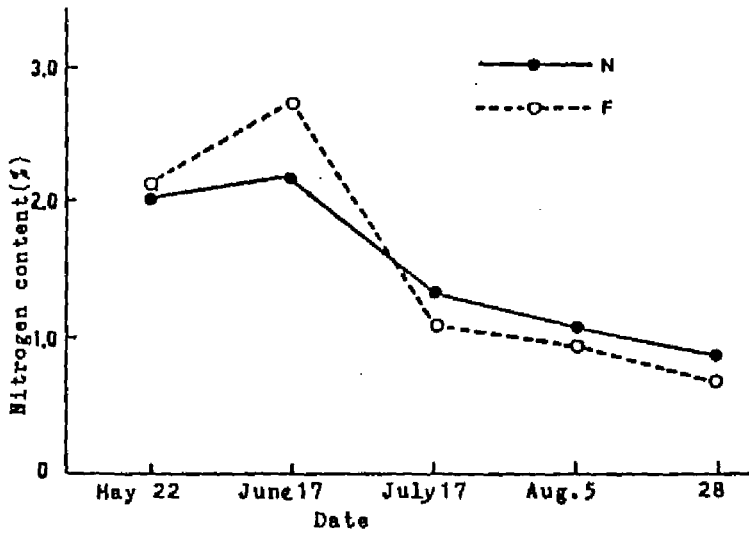


Fig.4. Changes with time in nitrogen content of leaf blade of fertilized(F) and unfertilized(N) rice crops.

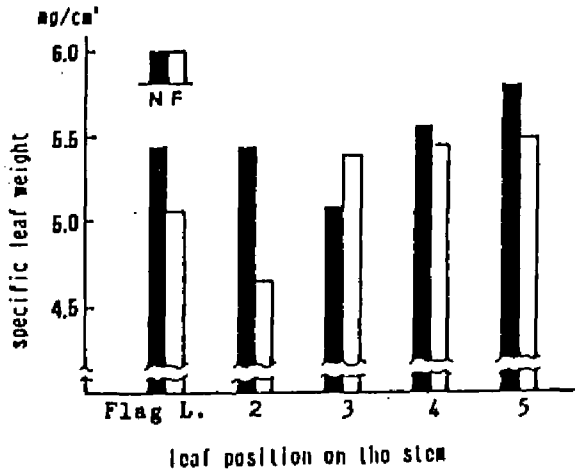


Fig.5-1. Specific leaf weight of the leaves on different nodes of main stem of rice grown at fertilized(F) and unfertilized(N) fields.

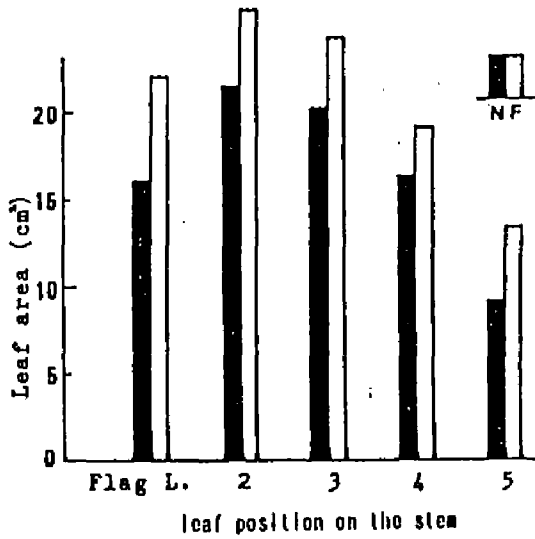


Fig.5-2. Area of each leaf at different position on main stem of fertilized (F) and unfertilized(N) rice crops.

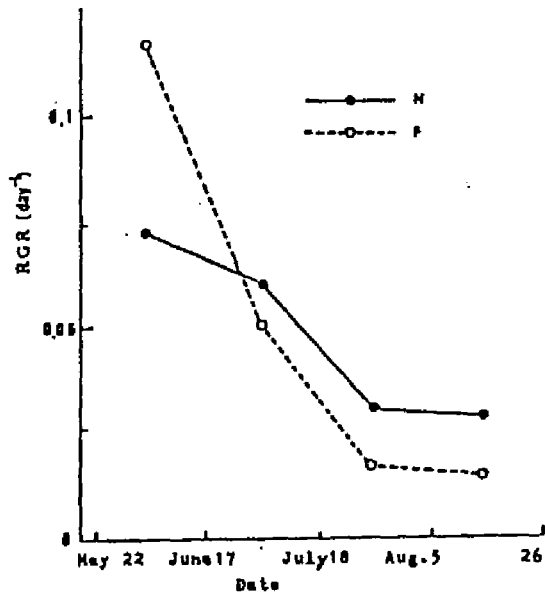


Fig.6. Time changes in relative growth rate of above ground dry weight of fertilised (F) and unfertilized(N) rice crops.

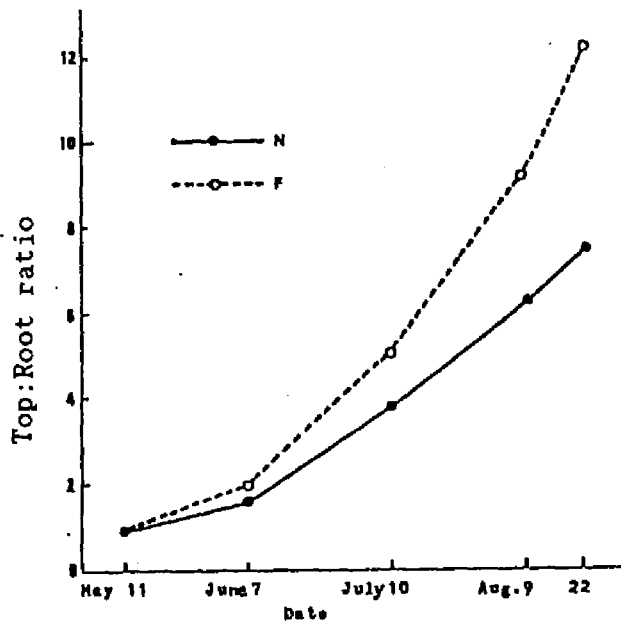


Fig.7. Time changes in top-root ratio of fertilised(F) and unfertilized(N) rice crops.

その最大LAIは5.5を示した。葉の窒素含有率の消長では、生育初期から中期にかけてF田が全般的にかなり高く、最高分けつ期には区間差がさらに拡大した。しかし、その後は区間差が縮小し、幼穂形成期にあたる7月17日以後では逆転してN田が高くなった。つぎに、出穂期の比葉重⁶⁾を葉位ごとにみると、止葉と第2葉ではN田が著しく高くなり、第3葉ではF田がやや高くなったが、平均的にN田の葉がF田よりも充実している様相を呈した。また、葉位別面積はすべての葉位でF田が優れた。

以上より、N田の水稲地上部はF田にくらべて量的には小型となるが、葉の窒素含有率と充実程度が生育後期まで高く保たれ、玄米生産力が比較的になる体制²⁶⁾を生育後期まで維持することが認められた。

(3) 地上部の相対生長率 (RGR) と T/R比の変化

Fig. 6に地上部の相対生長率の推移を、Fig. 7に、T/R比の変化をそれぞれ示した。地上部の相対生長率の変化では、水稲栽培諸例⁴⁸⁾やその他の多くの事例で見られるように、両水田ともに生育が進行するとRGRは漸減するが、その低下速度はF田で急激となった。また、そのRGR値を生育時期別に比較すると、生育初期ではF田が著しく大きくなるが、最高分けつ期以降では逆にN田が優れた。したがって、全期間中の変動巾はN田が比較的になくなった。つぎに、T/R比についてみると、全生育期間を通してN田が常に低く推移し、生育が進むにつれて区間差は拡大した。

以上から、F田の水稲は生育初期に生育量が多くなり、その生育量が玄米収量に直接むすびつかない無駄の多い生育パターンを取り易くなるが、一方、N田の水稲は、生育後期においても組織の老化が緩慢に進み、かつ、玄米生産に直結する出穂後の活性の高い残根量も相対的に多くなる⁶⁰⁾ことが認められた。

(4) 生産構造の差異

Fig. 8に、出穂期の生産構造図を示した。なお、調査はF田の出穂日（8月24日）に行っているため、本図ではN田の穂部は未出穂のため記録されていない。1株の地上部の大きさは、N田がF田よりも小型となるので、葉部をはじめとして各部分の乾物量は少なくなる。しかし、相対的に比較すると、N田では全個体中で葉部の占める割合が他の部分の占める割合よりも高く、かつ着葉が草冠上部に多いことが注目された。また、草冠への光の透過状態も、N田では株もとまで光が達する構造を表して、受光態勢は良好であることがうかがえた。つまり、生産構造からみても、F田では過繁茂的に無駄の多い構造をとることが示されたが、他方、N田では個体が全体的に小さくなることを除いては、生育後期に物質生産からみて好ましい群落構造となることがわかった。これよりN田では、栽植密度を増加させることにより増収が期待できることが示唆された。

第3節 玄米収量と収量構成要素

無施肥栽培の水稻は、施肥栽培の場合にくらべて栄養体が貧相となり、収穫直前の立毛状態から判断すると玄米収量がかなり少なくなるものと予想される。また、村山^{33,34)}の報告にみられる無施肥栽培での水稻収量と窒素施肥量との関係式からみても、その玄米収量は極めて少量に止まることになる。しかし、実際の調査対象のN田の水口付近の立毛状態は、普通の施肥田にくらべても遜色がなく、また、中央部付近の立毛でもかなりの収量が期待できる様相を呈した。そこで、前節で述べた1977年の比較栽培試験の玄米収量とその収量構成要素を株刈り法によって調査し、その結果をTable 1に示した。また、1978年度に各水田で実際栽培された水稻の玄米収量およびその構成要素をTable 1にあわせて示した。なお、1978年の栽培品種は、N田がベニアサヒ、F田が日本晴である。

まず、1977年度に同一品種を比較栽培したときの10a当たり玄米収量をみると、

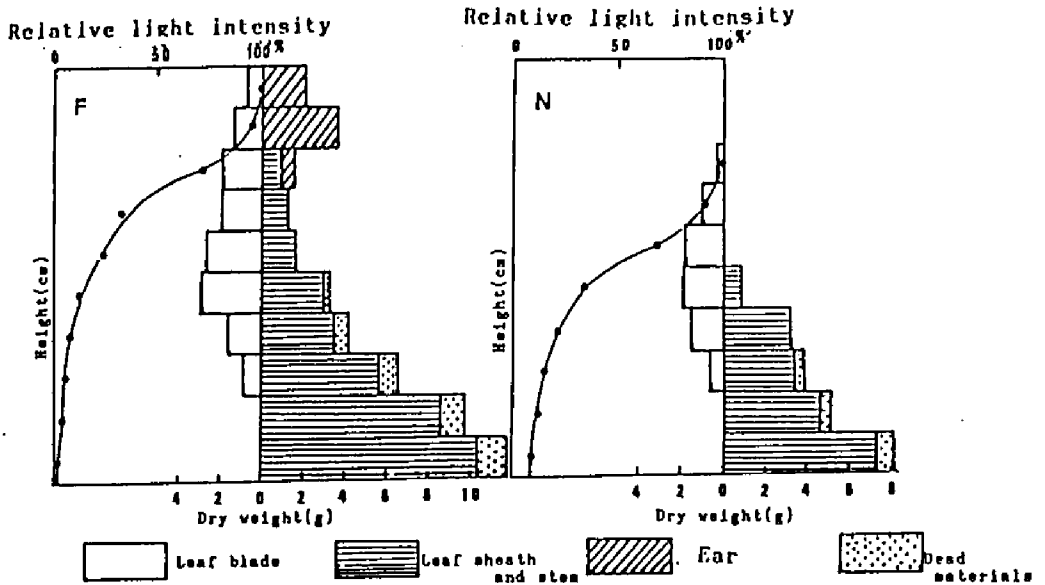


Fig.8. Productive structures of fertilized (F) and unfertilized (N) rice plants at the initiation of heading stage.

Table 1. Grain yield and yield components of fertilized (F) and unfertilized (N) rice crops in 1977 and 1978 experiments.

Items	Grain yields (g/m ²)	Ear number per hill	Grain number per ear	Percentage of ripened grain	1000 grain weight (g)
(1977)					
N (Beniasahi)	403	10.5	85.9	97.4	23.1
F (Beniasahi)	483	13.6	86.9	93.2	23.1
(1978)					
N (Beniasahi)	394	12.5	80.1	96.7	23.2
F (Nippobare)	543	18.9	66.4	97.3	22.4

N田が403kg, F田が 483kgとなり、N田における予想外の多収性が注目された。1978年度の実際栽培における両水田間の収量差と構成要素については、栽培品種が違うことによる影響が考えられるので単純な比較は困難であるが、この場合でもN田で 400kg近い収量が得られたことから、このN田の玄米生産力は、供給窒素レベルからみて比較的に高水準であることが明らかとなった。

つぎに、1977年度の収量構成要素について、それらの各要素の大きさを決定づける生育ステージとの関係からみると、1株穂数は施肥の効果が大きく現れて、とくに生育初期の基肥窒素の効果発現によってF田が約30%多くなった。他方、一穂粒数は区間差が僅かとなり、稔実歩合はN田が高く、玄米千粒重は両田同一となった。

以上から、N田の生産力は、投入窒素量からは律し切れず、とくに、穂が栄養体量に対して比較的に大きくなり、玄米収量は予想以上に安定して高くなることが明らかとなった。また、F田では、穂の充実を相対的に低下させるような出穂後の生産構造となるため、玄米収量が伸びなやむものと思われた。

第4節 窒素吸収量と吸収窒素の玄米生産効率

Table 2に、1978年度の両水田で栽培された水稲1株当たり各部分および全個体の窒素含有量を示した。栽培品種はN田がベニアサヒ、F田が日本晴であって、それぞれ生育期間を通して全個体の窒素含有量が最多となった時期、すなわちN田では出穂後5日に、F田では登熟中期に採取した個体についての調査結果を示している。なお、採取時の生育ステージの差異を反映して、1個体の乾物重は、N田が43.8g, F田が 73.2gであった。また、それぞれの栽植密度は、N田が19.2株/m²(条間26cm×株間20cm)、F田が19.6株/m²(条間30cm×株間17cm)であり、玄米収量はTable 1に示したように、N田は394g/m²、F田は543g/m²となった。

Table 2. Nitrogen content (N mg) of each organ of unfertilized (N) and fertilized (F) rice plants at an early stage of grain filling
(N mg/plant)

Fields	organs						
	Ear	Leaf	Leaf sheath	Culm	Root	Dead part	Total
N	105.2	92.8	44.9	25.3	19.6	7.1	294.9
F	328.0	116.9	40.7	26.7	49.6	43.0	604.4

個体当たり窒素含有量と栽植密度から1㎡当たり窒素吸収量を計算すると、N田は5.662g、F田は11.846gとなり、単位面積当たり稲体の最大窒素吸収量は、F田の水稻がN田のものに比べて2倍になることが認められた。つまり、玄米を1kg生産するのに必要な吸収窒素量は、F田では約21.8g、N田では約14.4gとなり、吸収窒素の玄米生産効率は、N田が約50%ほど相対的に高くなった。

以上から、本調査では栽培品種に違いがあるものの、施肥栽培された水稻は、無施肥栽培の水稻よりも個体乾物量と吸収窒素量は多くなるが、その吸収窒素の玄米生産効率は相対的に低くなるといえた。なお、玄米収量と吸収窒素との関係について、鬼駱ら⁴⁴⁾が報じた調査結果に本実験のF田の結果はほぼ一致したが、N田のような極端に窒素供給が少ない条件で栽培された水稻に対しては、その報告値は適用され難いものと考えた。

第5節 考 察

両水田の生育の特徴をみると、まずN田では、移植後の活着は良好であるが、初期の分けつ増加は緩慢である。生育後半期においても地上部の生育が著しく劣り、F田よりも小型の栄養体となる。しかし、出穂はやや遅れるもののこの時期の葉中窒素量は相対的に高くなり、生産力の高い生産構造が長く維持されて、活力の高い根の残存量も多くなる。したがって、栄養体の大きさに比べて、穂が比較的が大きくなるとともに、生育後期において単位葉面積当たり光合成量も多く

なって、いわゆる秋優り型の生育パターンにより増収するのであろう。

一方、F田では、多量基肥によって活着は遅れるが、活着後から分げつ増加は著しく、最高分げつ期には葉の相互遮蔽や栄養体の過繁茂状態を呈し、無効茎や枯死部分を多くする。出穂はN田より早いですが、出穂後は茎葉の枯死が多発し、かつ葉の窒素含有率の急激な低下が起こり相対的に根量も少なくなる。そのためにソースに比較してシンクが過剰となり、穂の充実が悪化していわゆる秋落ち型の生育パターンを余儀なくされる。つまり、多肥栽培のうち、とくに基肥重点栽培は、竹内ら⁶⁰⁾の報じた生長の失速現象が生じやすい体制に置かれ易いことを示している。一般に、施肥栽培では、品種の生態的特性によって施肥量と施肥法が決定される。したがって、本試験で用いたベニアサヒの生育パターンが、かならずしも施肥栽培における普遍的なパターンを表すとは言い切れない。しかし、無施肥栽培と対比して多肥栽培をみると、基肥窒素が初期生育を過剰にする場合が多いので、乾物生産と玄米収量との関係が不安定となり易く、収量の年次間変動が大きくなりがちになるだろう。

つぎに、各水田における玄米収量と吸収窒素量、および生育パターンと窒素供給パターンとの関係について考察を行う。玄米収量と吸収窒素量との関係において、鬼較ら⁴⁴⁾は、一般に玄米1kgを産出するために約22gの窒素が吸収される必要があると計算しているが、この値はN田の水稲体には適用出来ない。そこで、N田の水稲には第4節で算出した値を当てはめてみると、このN田の水稲は、年間10a当たり約5.7kgの窒素を吸収利用したと計算され、加えて水稲への供給窒素の吸収率を考え合わせると、計算上の吸収量よりもかなり多量の窒素がこの水田に供給されているものと考えられる。一方、F田では、計算上の吸収量が約10.5kgとなり、また、吸収窒素の玄米生産効率においても、N田のそれよりも約30%低くなった。このような生産効率の水田間差の生ずる1つの理由として、総供給窒素量と玄米収量との関係において、いわゆる収量漸減の法則³³⁾が働いたことが挙げられるだろう。したがって、普通の施肥栽培では、どの時期にどれだけ

の窒素を供給することが最も効果的な施肥法であるかが常に追究されていて、本調査のF田でとられる基肥重点多量施肥栽培は、単純な計算からみても、肥効の低下が避けられないものといえる。したがって、一作中に投入される施肥窒素量または天然供給窒素量の多少のみでは、玄米生産力を直接に律することが出来ないものといえるだろう。つまり、N田では生育後期まで水稻の窒素含有量が高く維持される後期栄養型の生育パターンを示すことが指摘できる。したがって、N田の生産力がかんがい水中溶存窒素や生物的固定窒素および土壌の無機化窒素などの時期的供給パターンと深く関係していることが考えられ、加えて、それらの窒素供給パターンが両水田で著しく異なった様相を呈することも予想できる。このことは、各水田の生産力を比較栽培学的に解析するには、それぞれの窒素の時期的変動を明らかにすることが、とくに重要となることを強調するものである。

第6節 摘 要

30年以上続いている長期無施肥田(N田)と通常の施肥田(F田)において、ベニアサヒ品種を試験的に比較栽培して、それぞれの水田の生育パターンと収量性の特徴を調査した。また、地上部の生育と窒素レベルの関係について検討を加えてつぎの結果を得た。

1. 栄養体の生育量は施肥窒素の効果によってF田で大きい、稲体の生育パターンはN田が秋優り型、F田が秋落ち型を示した。

2. N田では、後期に稲の生産構造が良好となり、葉の窒素含有率も多くなった。したがって、出穂後の物質生産とその穂への分配が相対的にF田より効率的になり、モミ/ワラ比が高くて、そのことが予想外の多収を示す作物学的原因となっている。

3. 玄米収量は、F田が多くなったが、N田においても10a当たり約400kgの収量が得られた。この生産力の発現には相当量の天然窒素が、N田に供給さ

れると同時に、その窒素供給の時期的変動の影響の関与が予想された。

4. 収量構成要素は、それらの大きさが決定される時期の窒素供給量に主として支配される。したがって、1株穂数はF田が、そして稔実歩合は僅かであるがN田が優った。

5. 単位面積当たりの水稻体に吸収された最大窒素量は、F田が多くなったが、その吸収窒素の玄米生産効率では、N田がF田よりも約50%高くなった。

第3章 施肥、無施肥田の土壤窒素の無機化と発現パターンの差異

一般に、普通栽培の水稲が吸収する窒素の約50%は無機化された土壤窒素に由来するが、施肥量の増加に伴って、施肥窒素に依存する割合を大きくする³⁴⁾といわれる。一方、無施肥栽培では、無機化した土壤由来の窒素量が収量に強く関係しているものと思われる。水田土壤窒素の無機化に関しては、数多くの土壤学的研究報告^{12,72)}があり、その無機化量は、土壤の全窒素量、地温、pH、および土性などの土壤環境の影響を受けて変動し、さらに、無機化を行う土壤微生物の種類や活力が関与していることが明らかにされている。また、施肥栽培では、施肥窒素のPriming Effect^{47,51,73)}を通じた土壤窒素の無機化の関与も考えられる。

本章において、両水田の土壤窒素の無機化量を湛水静置法⁸⁰⁾によって土壤学的に調査し⁷²⁾、それぞれの土壤の無機化力の大きさを比較して、N田土壤がF田土壤よりも窒素無機化力が大きくなることを明らかにした。また、栽培時の土壤環境要因のうち、土壤の温度、pHおよびEhの一作中の変化を調査し、これらの要因が土壤窒素の無機化量の時期的変動にいかにかかわっているのか、また、土壤中の窒素量の時期的変動が水稲の生育収量にどのような関係を持っているかを、土壤学および栽培学の見地より明らかにしようとした。

第1節 土壤の窒素無機化力の比較

1980年の現地水田で施肥を行う前の4月26日に分析用土壤を水口部（I部）、中央部（C部）、および水尻部（O部）の3地点の8cm深から採取して、直ちに5℃冷蔵庫内に保存した。保存土壤は、吉野氏らの方法⁸⁰⁾に準拠した湛水静置法による土壤窒素の無機化量の測定に順次供試した。この湛水静置法は、温度と無機化量との関係を実験室内で調査する方法であるが、本調査ではその生成した無

機化窒素量をもって無機化力の大きさとして表した。本実験の分析法は9メッシュ篩を通した乾土換算18gの保存土を、内径26mm、深さ10cmのガラス管にいれ、さらに土壌と水の合計量が40mlになるまで蒸留水を注入した。その後、ゴム栓で封入ののち振盪を加え、30℃定温暗黒下で所定の測定日まで静置して還元状態で無機化を図った。各測定日に、静置土壌へ10%塩化加里溶液を250ml注入し、生成アンモニア態窒素を土壌コロイドより置換抽出させて、そのアンモニア量を水蒸気蒸留法によって定量した。

Table 3に、湛水静置処理前の土壌全窒素量を示した。平均的にF田土壌がN田土壌よりも全窒素含有量は多かったが、採取位置による変動は、N田ではI部、C部、O部の順に低下し、F田ではC部が最高となって、両水田で位置的変動の様相が異なった。

Fig. 9に、湛水静置5週間後と10週間後の生成アンモニア態窒素量を示した。採取位置間の変動中は、相対的にN田が大きくなり、とくに静置期間が長くなるとその位置的変動中は拡大したが、一方のF田土壌は全般に位置による変動は小さかった。3地点の平均無機化量は、N田土壌の生成量は処理期間が短い場合には相対的に少ないが、期間が長くなるにつれて加速度的に増加した。一方、F田土壌の無機化量は処理初期には大きいものの、期間が長くなると漸減し頭打ちとなる傾向を示した。すなわち、N田土壌では、 y (生成量) = $a x$ (日数)^b における b 値が1以上の数値の曲線式で示され、F田土壌では、その b 値が0~1の間にある曲線式となって、両水田土壌での無機化窒素の生成パターンが異なった。

Table 3. Total nitrogen contents of permanently fertilized (F) and unfertilized (N) paddy soils sampled from water inlet, central and outlet parts of the respective fields.

Position	Inlet	Center	Outlet	Mean
Fields				
N	159 (mg/100g)	119	120	133
F	192	157	133	161

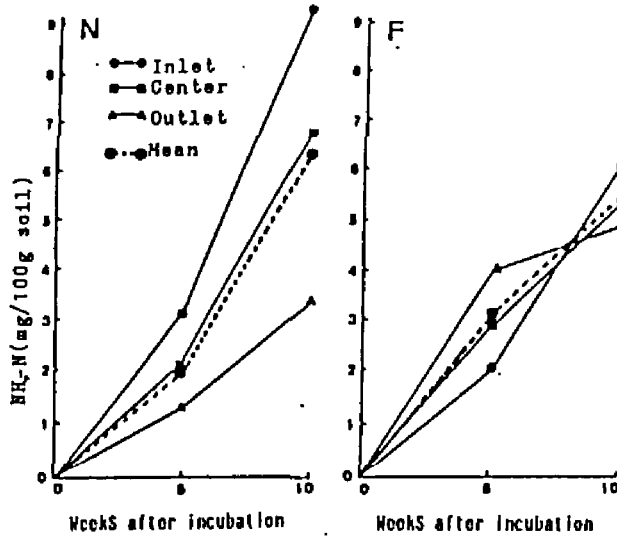


Fig.9. Changes of the soil nitrogen ammonification with time after incubation of soils from fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields. Soils were sampled at water inlet, central and outlet parts at each field.

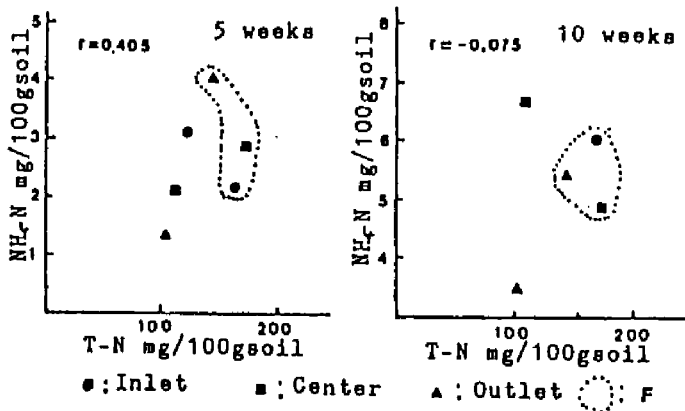


Fig.10. Relation between the total nitrogen and the ammonification at 5 (left) and at 10 weeks (right) after the incubation of soils sampled from different positions of, fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

Fig. 10に、処理前の土壌全窒素量と静置5週間後および10週間後の無機化窒素量との関係を示した。一般に、両者間には正の相関がある⁵⁾といわれているが、供試した土壌の種類の影響を全く考えないで計算すると、2回の測定時とも相関関係は見出せなかった。しかし、N田土壌のみを対象として計算すると、2回の測定とも比較的に高い相関係数が認められたが、F田土壌では負の相関を示した。

以上から、N田土壌は全窒素含有量がF田土壌よりも低いにもかかわらず、潜在的な窒素無機化力が高く、かつ、全窒素量が増大すると無機化窒素量も増し、湛水期間が長くなるに伴って無機化窒素量を指数関数的に増大させる性質を持つことが分かった。

第2節 水田内の土壌環境要因の変動

(1) 地 温

1978年に、生育初期から出穂期まで現地水田の地温を測定した。測定は天候や田面水の有無にかかわらず、調査日の正午に所定位置の株間中央の地表下10cmへ普通の棒状アルコール温度計を挿入して行った。なお、N田はベニアサヒ、F田は日本晴が慣行栽培されていた。測定位置は、それぞれの水口部（水口より内部へ3m入った所）、中央部および水尻部（水尻まで3mの所）の3ヶ所とした。その結果をFig. 11に示した。

全期間を通した地温の時期的変動では、3ヶ所とも生育初期にはかなり低く盛期で最高となり、生育後期に再び低下するという気温追隨型の季節変化を示した。F田では移植直後から基肥の流亡防止のためにかんがい水の取水が中止されているが、N田では掛流しかんがいによって移植時から水が取り入れられる。このため、移植後の僅かの期間、N田の水口部と水尻部の地温はF田よりもやや低く推移したが、その後は全面的にN田が高くなった。また、F田では全期間を通して水口部が最低で、ついで中央部、水尻部の順に地温が高まる傾向となった。一方、

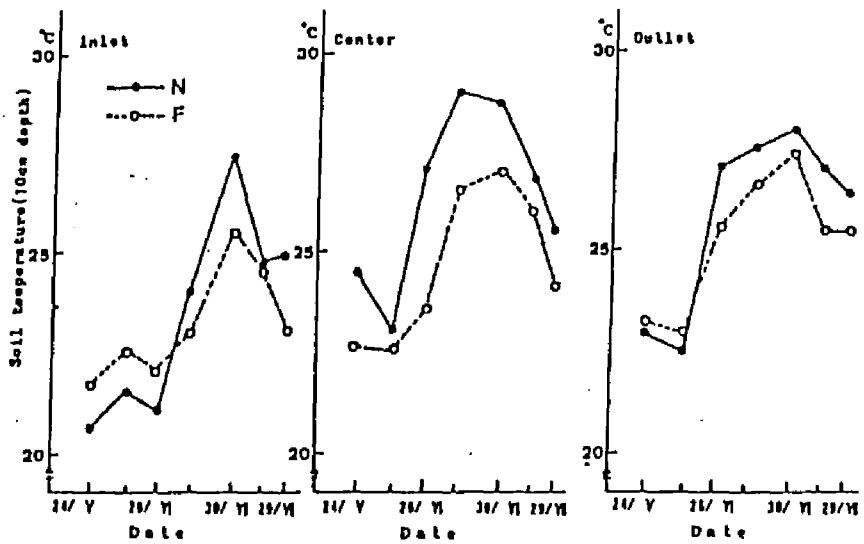


Fig. 11. Time changes in soil temperature at different positions of fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

N田では水口部が最低で、中央部が最高で推移した。以上から、地温の位置的変動は、かんがい水温の影響を強く受けるN田において大きくなるが、平均地温はN田が相対的に高くなり、作期を通してみると、積算の地温差が約50℃高くなることが分かった。

(2) 土壌 pH

1978年の作期中に、両水田土壌の pHの時期的推移を測定した。このため、両水田の中央部の深さ5~10cmの層から土壌を採取し室内に搬入して、その生土に蒸留水を加えて懸濁（生土10gに水25mlを加える）し、上澄液を自動 pHメータにて測定した。移植後から収穫時までの土壌 pHの時期的変化をFig. 12に示した。全生育期間を通してF田の pHは相対的に高く推移し、かつ、時期的変動中も小さかった。一方、N田の pHは、生育初期では低く、盛期に高くなり、生育

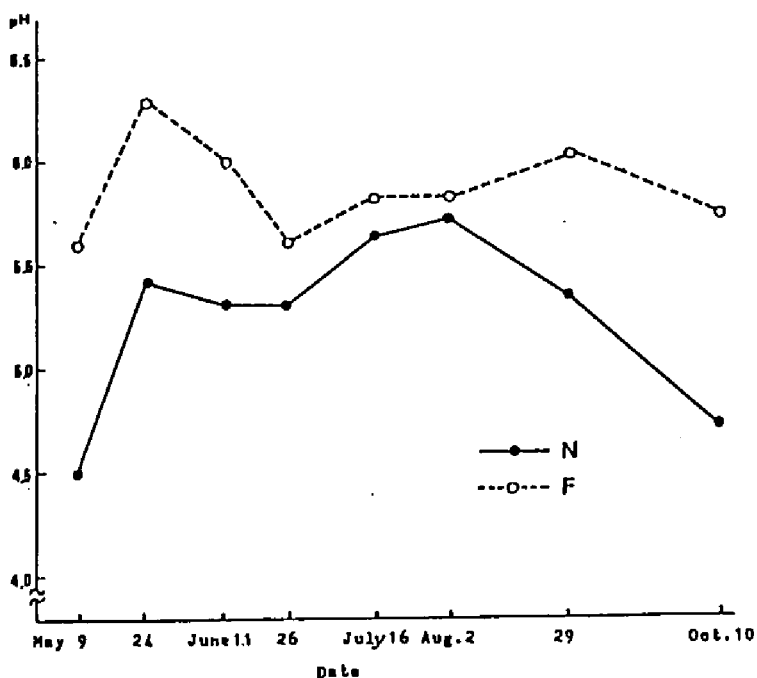


Fig.12. Time changes in soil pH at a central position. of fertilized(F) and unfertilized (N)paddy fields.

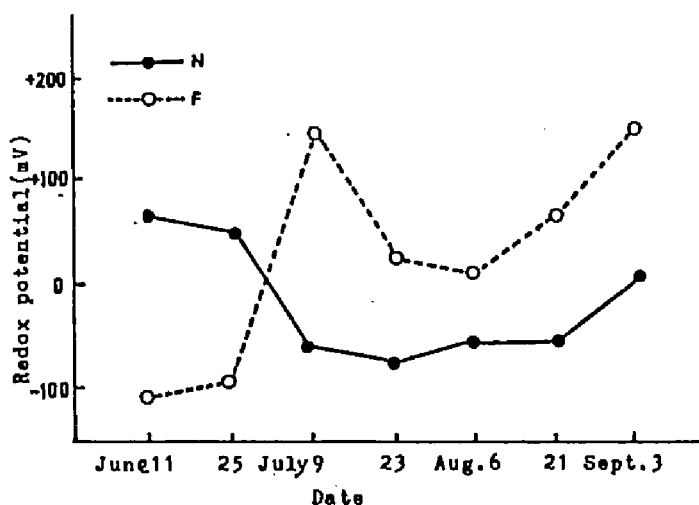


Fig.13. Time changes in soil redox potential at water inlet of fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

終期の落水後に再び急激に低下するパターンを示し、この変化は一般に弱酸性土壌でみられるパターンに一致した¹⁷⁾。なお、全生育期間中の pH の最高値は、F 田が 6.3, N 田が 5.7 で、さらに最低値は、F 田が 5.6, N 田が 4.5 であって、これは、一般に水稻生育に直接的影響を与える土壌 pH 値¹⁷⁾の許容範囲内の値であるので、両水田とも水稻の生育に対する土壌 pH の影響は極めて小さいと思われた。

(3) 土壌 Eh

1980年に、両水田の水口付近の土壌の酸化還元電位 (Eh) を測定した。測定は生育中期から出穂後までの期間において、酸化還元電位差計の白金一本電極の探知部を、その都度、地表下約 10cm に丁寧に挿入して行った。なお、一般に、飽水土壌中では酸化還元反応の平衡点が容易に得られるとされているが、現地測定では再現性が低下する⁵²⁾ので、測定値は 3ヶ所 (約 10cm 間隔) の平均で示した。また、一般に酸化還元電位は、土壌 pH を 6 または 7 に補正して、E_{h6} ないしは E_{h7} で表されているが、本調査では記録値をそのまま表示し、その時期的変化を Fig. 13 に示した。両水田の Eh の推移を比較すると、N 田では、生育初期から中期にかけてはプラス値で推移し、その後に急速な低下が生じて 9 月までマイナス値が続いた。一方、F 田では、移植直後から急激な還元化が進み、6 月中に強いマイナス値を示し、追肥と中干しの一時的落水期の 7 月上旬から急速にプラス値へ移行し、収穫前の落水によってさらに上昇した。Eh の時期的変動の大きさは、両水田とも全期間を通してプラス 150mV からマイナス 100mV の範囲にあった。

以上のような土壌 Eh の変化の様相から考えると、全期間を通して硫化水素などの発生は、両水田ともに見られないことに加えて、N 田では、水田に還元された少量の残存した有機物は、7 月以降より緩慢な分解をはじめることが予想される。一方、F 田では、多量に水田に還元された稲藁等の有機物は、生育初期から分解が始まるが、中干し後にはその分解が衰えることも考えられる。

第3節 土壤窒素の推移

1981年に、両水田における土壤全窒素、蒸留水可溶性アンモニア態窒素および10%KCl可溶性アンモニア態窒素の生育期間中の変化を調べた。このための土壤採取は、生育初期から出穂期にかけて、およそ3週間隔で水田中央部の直径2m内の3ヶ所で地表下5~10cm深より行った。採取した生土壤は、空気に晒すことなく採取地でビンに密封し、直ちに室内へ搬入して分析に供した。土壤全窒素の分析は、生土の一部を通風乾燥させて、ケルダール法にて行った。蒸留水可溶性アンモニア態窒素は、一定量の生土(乾土換算で約25g程度)を200ml容の三角フラスコに入れ、蒸留水を100ml加えて約30分間攪拌した後に一昼夜静置させ、その上澄液を45ミクロンのミリポアフィルターで濾過し、その濾液のアンモニア濃度をネスラー法にて比色定量した。KCl可溶性アンモニア態窒素は、上の分析で用いた蒸留水の代りに、10%KCl液を用いること以外はすべて上と同様の方法で定量を行った。

(1) 全窒素

土壤全窒素量の時期的変動の測定結果をFig.14に示した。乾土100g当たりの全窒素量は、圃場への還元有機物量の多少が反映されて、全期間を通してF田土壤がN田土壤よりも約40~50mg多く存在した。なお、その含有量は幼穂形成期ごろが最低になって、全般的な消長パターンは両水田で似ていた。全期間を通じた6回測定の平均値は、F田が約160mg、N田が約120mgであった。したがって、仮に両水田とも作土層の深さを15cm、土壤の仮比重を1.0として計算すると、1㎡当たり土壤中の全窒素量は、N田では180g、F田では240gとなる。土壤中の全窒素量と水稻生育量とは相関が高いことは多くの研究者^{27,49,63)}によって認められている。しかし、本論文の第2章で認めたように、水稻体が1作中に吸収利用する窒素量は、N田では1㎡当たり約5.7gであり、F田では約11.8gである。すな

わち、水稻の生育に必要な窒素が土壌窒素のみで賄われたと仮定しても、その吸収窒素量の土壌窒素量に対する割合は、N田が約 3.2%、F田が約 4.9%となつて、両水田とも土壌窒素の利用率はかなり低くなり、この仮定による計算値は、川村ら¹⁶⁾の報告とはほぼ一致した。したがって、土壌中の全窒素量の多少のみが、それぞれの水田の生産力を示す直接的要素とならないものと考えられる。つまり、F田のごとく、肥料窒素が施用された場合でも、その量が全窒素量中に占める割合は極めて小さく、かつ、土壌中の全窒素の大部分は有機態として存在しているので、水稻の生育や生産力と土壌の窒素量との関係の解析に対しては、全窒素のみの分析では不十分である場合の多いことを示しているだろう。

(2) 水溶性アンモニア態窒素

Fig. 15 に、水溶性アンモニア態窒素量の時期的推移を示した。両水田ともに全期間を通して水溶性アンモニア態窒素は乾土100g当たり0.3 ~1.5 mgとなり、全窒素量よりも著しく低かった。なお、F田はN田よりもこの窒素量は全般に多く、とくに施肥によって生育初期と7月下旬でそれが顕著に多くなった。

通常、土壌中のアンモニアは、土壌コロイドに吸着されていて、容易には土壌水中に放出されない¹⁷⁾が、この水溶性のアンモニアは、コロイドに吸着されずに存在し、水稻が容易に吸収利用できる形態の窒素である。この水溶性アンモニアは、F田では施肥窒素の影響が大きいですが、しかし、その量は両水田ともに極めて少量であるので、この形態の窒素量が、それぞれの水田での水稻生育を律しているものとは考えられない。

(3) KCl液可溶アンモニア態窒素

10% KCl液によって溶出されたアンモニア態窒素量の推移を、Fig. 16 に示した。この窒素の消長パターンは、水溶性窒素の消長と類似していたが、その含有量は、水溶性窒素量にくらべて全般的に、F田で約10倍、そしてN田では約

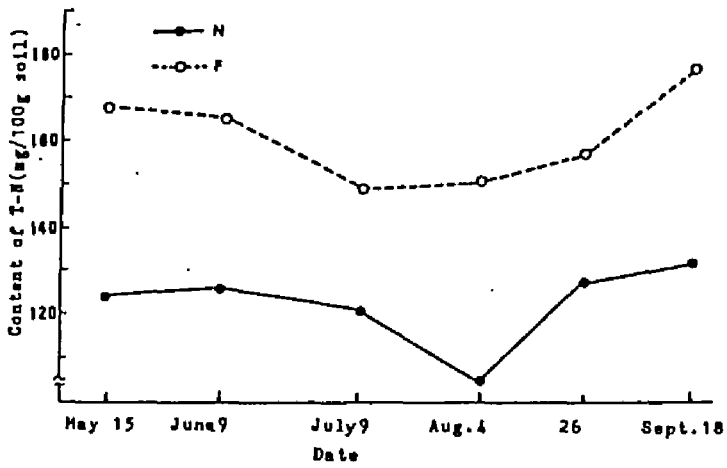


Fig.14. Time changes in total soil nitrogen at the central position of fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

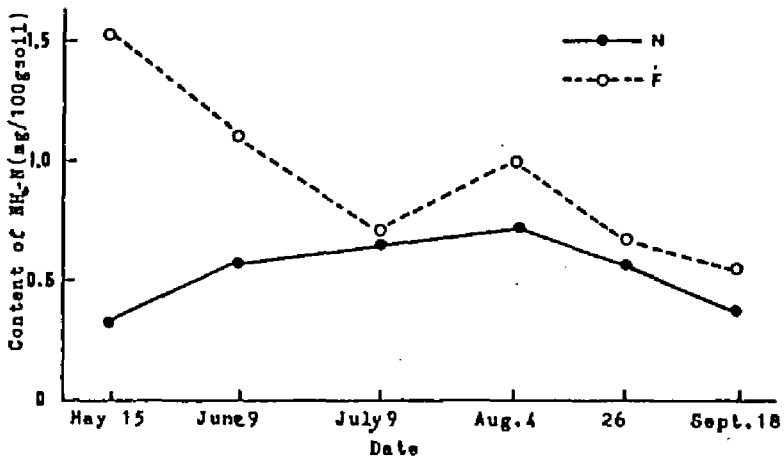


Fig.15. Time changes in water soluble NH₄-N in the soil at the central position of fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

12倍の多量となつて、とくにN田では7月上旬から8月下旬までは約15倍多く含有した。両水田間のKCl溶出性アンモニアの時期的消長パターンの違いを比較すると、F田では生育初期にそれが極めて多いが、6月以降に急減し、7月の追肥によって僅かに上昇し、その後には再び急減するパターンを示した。一方、N田では、移植直後から6月上旬までは低レベルで推移するが、地温上昇に伴って急増し、6月下旬以降ではF田を凌駕し、8月上旬にピークとなるパターンを示した。したがって、和田ら^{63,64)}の報告にみられるごとく、このF田の基肥窒素は、かなり急速に消失する性質を有することが分かった。土壌コロイドに吸着されているアンモニア態窒素のうち、化学的に置換されて溶出する窒素は、一般に水稻が吸収利用できる形態の窒素と考えられている²²⁾。したがって、この形態の窒素量とその消長パターンが、それぞれの水田における生産力の大きさと、生育パターンの変化に深く関係しているのは確実である。本測定におけるこの窒素の消長パターンは、鬼鞍ら⁴⁴⁾が報じている土壌窒素の供給様式と一致するが、とくにF田でこの形態の窒素が急減する場面が多くみられたことから、一般に施肥栽培にお

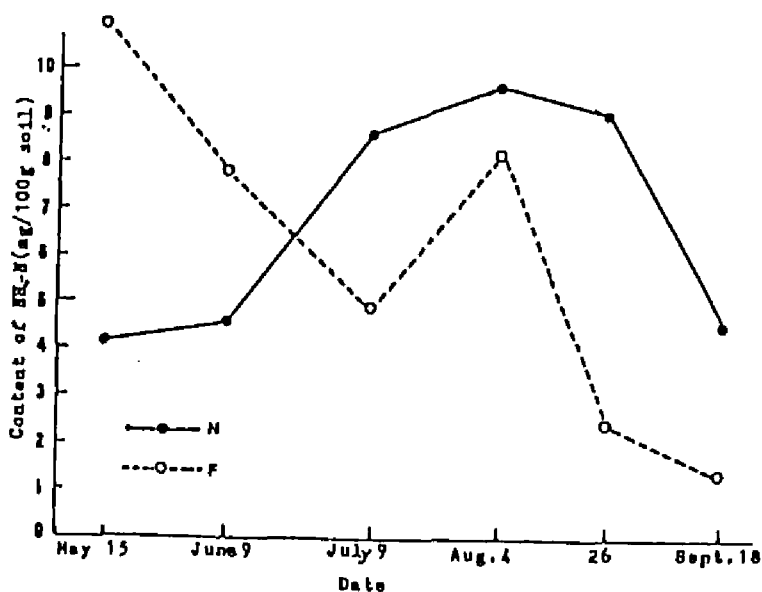


Fig. 16. Time changes in 10% KCl solution soluble $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil of fertilized (F) and unfertilized (N) paddy fields.

いて施肥された無機態窒素の有機化 がかなり多量に生じていることがうかがわれて興味深い。

第4節 考 察

以上の測定結果より、土壌窒素を無機化させる潜在的能力、いわゆる土壌窒素の無機化力は、F田土壌よりもN田土壌がかなり大きくなり、これより一作を通してみた無機化窒素の発現量では、大差となる可能性が示唆された。また、無機化力の水田内の位置による変動はN田土壌が大きくなったが、これはN田の水口部での無機化量が、その他の位置よりも著しく多くなったために生じた現象である。つまり、N田では土壌全窒素量と無機化量が比例関係にあるので、水口部に沈積した懸濁物質(SS)が、全窒素量ひいては無機化量を多くしている。したがって、N田の水口付近の水稲は、無機化窒素を吸収利用して、栄養体の生育と玄米収量を増大させるものと考えられる。一方、F田土壌では、全窒素量と無機化量の間に関係がみられなかったが、これは永年にわたり施肥が行われた土壌は、地力窒素の発現力が不安定となることを示唆していて興味深い。

つぎに、土壌窒素の無機化に影響を与える土壌環境のうち地温についてみると、生育初期ではN田の水口部がF田よりも低いのが、年間の平均地温はN田が高く推移して、一作の積算地温では両水田間で大差が生じたものと考えられる。この原因は、長谷川ら¹⁰⁾が報じているように、N田では掛流しかんがい水温に直接的に反映したことによるものと考えられる。また、F田では全面に亘り施肥効果が発現し、水稲の草冠が大きくなって、地表面が完全に覆われて地温上昇が強く抑えられることから、位置の変動は小さく、かつ、その地温はN田より相対的にやや低温で推移する。したがって、両水田におけるこのような地温の違いは、土壌窒素の無機化の発現に大差をもたらすことの原因となる。つまり、地温と土壌窒素の無機化との関係を栽培学的な面からみても、N田の生育状態が、地温上昇を

通して無機化量を増すので、無機化窒素が水稻に及ぼす効果は、F田よりもN田でかなり大きくなるものといえる。

土壌 pHは、両水田ともに極端な値を示さず、両水田間の差異が水稻の生育や土壌窒素の無機化に直接的影響を及ぼすものとは考えられない。なお、一般的に、生理的酸性肥料が施用された水田は、酸性土壌に傾きやすい¹⁷⁾とされているが、F田よりもN田で pH値は低くなった。この理由のひとつは、掛流しの塩基に対する溶解効果が関与していることが考えられる。土壌Ehと土壌窒素の無機化には直接的関係はないものと思われるが、N田の土壌Ehが6月下旬まで高電位で推移したのは掛流しかんがいによる酸素補給が良好であったことと、地温上昇がF田よりも遅くれて土壌有機物分解が緩慢であったことによる。つまり、N田では生育初期には、土壌窒素の無機化はほとんど進まないものと考えられる。一方、F田では土壌有機物が初期から急速に分解されて還元化が促進され、同時に土壌窒素の無機化も大きくなったものと考えられる。

つぎに、土壌窒素のうち、全窒素量はF田がN田よりもかなり多くなったが、これは稲わら等の還元などの有機物投入量が相対的に多いためである。しかし、水稻が吸収利用する窒素は無機態窒素であるので、この全窒素量の多少が水稻生産力に直接的影響を及ぼすとは考えられない。水溶性アンモニア態窒素量もまた、F田で多くなったが、これは施肥の影響が直接的に反映したものであろう。しかし、この窒素は全窒素量やKCl抽出窒素量にくらべて極めて少量であるので、この形態の窒素の多少が水稻生産力に影響を与えるとは考えられない。KCl液可溶アンモニア態窒素は、水稻に直接吸収される形態の窒素であって、とくにN田では土壌窒素の無機化したものがこれを占めて、水稻への供給窒素の主体となっているものと考えられる。この窒素量は水溶性の窒素に比べ著しく多くなったが、その時期的変動パターンは両水田で大きく異なった様相を示した。したがって、この窒素の土壌中含有量とその時期的発現パターンが、それぞれ的水稻生育や収量に極めて強く関係してくることが強調できるだろう。

第5節 摘 要

施肥田（F田）と無施肥田（N田）の土壤窒素の無機化力を土壌学的に比較するために、両水田からの土壌を湛水静置法によって調査した。また、両水田の無機化に関与する土壌環境のうち、地温、土壌 pH、および土壌 Eh の時期的変化を調査し、それらと土壤窒素の無機化との関連性を検討した。さらに、現地水田における土壤全窒素量と水溶出性および KCl 液可溶性のアンモニア態窒素の時期的変化をも合わせて調査し、つぎのような結果を得た。

1. 湛水静置法によって無機化される窒素量は、F田土壌よりもN田土壌が多くなった。無機化窒素の発現量は、N田土壌では時間の経過とともに指数的に増大したが、F田土壌では直線的な増大に止まった。これより、N田土壌の無機化力は湛水期間が長くなるにつれて増大し、さらに、N田土壌がF田土壌よりも無機化され易い性質を持つことが分かった。

2. 地温の時期的変化は気温変化に追従するが、その位置的变化は両水田間で大きく異なり、とくに水口部では、かんがいの有無の影響を強く受けて特異的となった。一作を通した平均地温は、栄養生長量の少ないN田がF田よりも高くなるので、窒素の無機化量はN田が多くなることが推定された。

3. 土壌 pHの時期的な変動幅はN田よりF田で小さくなったが、全般的にみて、土壤窒素の無機化に対する土壌 pHの関与の程度は小さいものと考えられた。また、土壌 Ehの時期的変化は、それぞれの水田土壌中の有機物量とかんがい水量および地温の変化によって決められるので、土壤窒素の無機化に関連性を持つことが示唆された。

4. 土壌中の全窒素量と水溶出性アンモニア量は、水稻体に吸収される量からみて、水稻の生産力を直接に表す場合が少ないが、KCl液可溶性アンモニア態窒素量は水稻の生産にとってかなり有効な指標となり、この窒素発現の時期的消長パターンが、とくにN田の生産力を決定する要因となることが強調された。

第4章 かんがい水中溶存窒素が水稻の生産力に及ぼす影響

一般に、水稻栽培ではかんがい水が多量に使用されるので、その効果に対して種々の視点から評価した研究報告^{23,45)}が多くみられる。本章では、かんがい水の効果を供給窒素の利用面からみるために、かんがい水に溶存して供給される窒素が、水稻の生育にどの程度の効果を与えているかを作物学的視点から明らかにしようとした⁴⁰⁾。まず、N田でのかんがい水由来の窒素養分を、当年の水稻に直接的効果を与える部分と、その他の間接的効果を及ぼす部分に分けて、それぞれの供給量を実測した。つぎに、現地水田内で、かんがい水量の調整が可能な小区画を設置して、かんがい水中の溶存アンモニア態窒素が水稻に及ぼす効果を調べた。それらの調査結果から、N田ではかんがい水によって供給される無機態窒素が玄米生産に大きな効果を持つが、F田では、それが小さくなる理由について解析を進めた。

第1節 かんがい水による供給窒素の直接的効果と間接的効果

施肥(F)、無施肥(N)の両水田ともに、生育中期以後になると水口付近の水稻の立毛が著しく良好となり、とくにN田ではその傾向が一段と強くなる。このような様相は、山間地や冷水のかんがい水田を除いて一般によく見られるが、この生育の良好となる原因や効果の発現機構については、深く考察された報告例はみかけない。これは、施肥栽培ではかんがい水中の窒素の効果が比較的によく、かつ、取水量も制限されて、施肥窒素がかんがい水からの供給窒素の効果発現をマスクすることに起因していると考えられる。これらのことから、F田におけるかんがい水の効果を評価するには、かんがい水量と肥効発現との関係³⁶⁾、かんがい水の透水効果³⁰⁾、栽培中の水管理の問題^{20,31)}、かんがい水温に関する問題¹⁰⁾

等が重要となるものといえるだろう。

一方、N田では、約120日間、常時、掛流しかんがいが行われている。1977年に取水口で水量を実測し、加えて降雨や隣接の水田からの流入水量などで修正して概算した当水田での年間取水量は、1㎡当たり約4トンに相当する。なお、川村ら¹⁸⁾も同水田の取水量を1㎡当たり10トンとしているが、これは取水が最も多い時期の流入量と総かんがい日数とから推算されていて、かなり大目に見積もられているきらいがある。しかし、いずれにしても、中干し等で実測は出来ない取水の制限されるF田に比べて、多量のかんがい水がこのN田に取り入れられることには間違いはない。したがって、Fig. 17に示したN田に取り入れられるかんがい水中溶存アンモニア態窒素濃度の時期的変動とその平均濃度から判断して、このN田へは、一作中に1㎡当たり約1.4g相当のアンモニア態窒素が圃場外部から取り込まれ、水稻の生育収量に直接的効果を及ぼすことは容易に考えられる。

一般に、かんがい水中には動植物遺体の分解物や微生物などが、SS(懸濁物質)として存在している。このSSは、かんがい水の流入に伴って水田内に運び込まれ、水流が水田内でゆるくなった場所に土壌有機物の一部として土壌に沈殿し、微生物の分解をうけて無機態窒素を徐々に土壌中または水中に放出する。したがって、このSSもかんがい水由来の供給窒素の一部と考えられるが、このSS中の窒素は、水稻が直接に吸収利用できない。つまり、SSは天然供給窒素の一部であるが、その効果発現は、土壌窒素の無機化を通して行われるので、当年度の水稻に対しては、間接的効果を及ぼすものとして理解するのが正しいだろう。N田に流入するかんがい水中のSS量の推移をFig. 18に示した。この時期的消長と平均濃度および概算の流入かんがい水量に基づいて考えると、N田へのSSの年間流入量は、1㎡当たり乾物約16gとなり、永年に亘る累積量は莫大となる。また、そのSSの窒素含有率を、仮にこの水田のかんがい水路内の泥の窒素含有率とほぼ同じ程度の約0.2%¹⁸⁾として計算すると、SSによって持ち込まれる窒素量は、1㎡当たり年

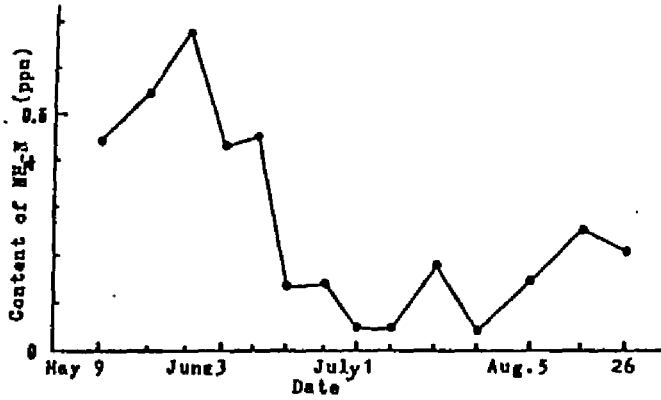


Fig.17. Seasonal variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ content in the irrigation water to unfertilized paddy field.

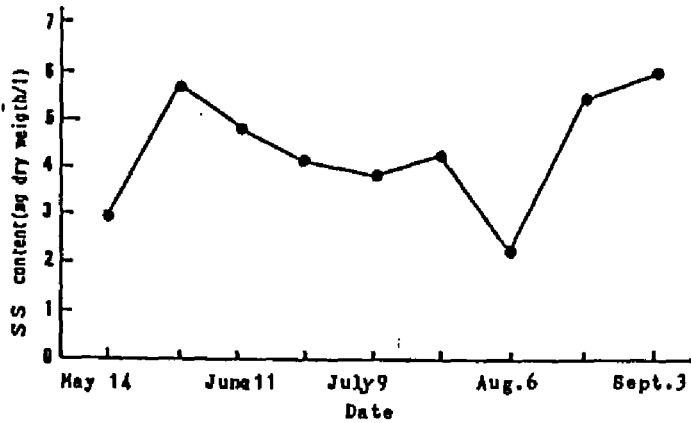


Fig.18. Seasonal variation of the content of suspended solid(SS) in the irrigation water to unfertilized paddy field.

間32mgとなり、さらに、そのSSが沈殿する範囲は、水口付近で多量となるので、Table 2に示したように、水口付近の土壌中の全窒素量が高くなった。

さらに興味深いことは、普通水田で認められる施肥窒素の土壌窒素発現に対するPriming Effect⁶⁸⁾に似た現象が、N田において生じる可能性が示唆されたことである。つまり、生育初期に、比較的高濃度の無機態窒素が多量にかんがい水から供給されると、その窒素を利用して土壌微生物の活性が増大し、土壌窒素の無機化が促進されたり、水稻根量を増加させて、生育後半に窒素吸収量を増大させる可能性である。仮に、この効果がN田で顕著に起こっているとすると、それは、外部由来の無機態窒素が、内部的な土壌窒素の無機化に対して間接的効果の上で相互作用を持つことを意味している。

以上から、かんがい水によってN田に供給される窒素を細かく分類し、それぞれの窒素が水稻の生育や収量にどの程度の効果を持つかを定量分析することは極めて困難である。つまり、N田における生産要因としてのかんがい水中溶存窒素の効果を評価するには、直接的、間接的および相互作用に及ぼす効果のすべてを加えたものから行わなければならない。そこで、次節のような実験手法によって、かんがい水中の溶存窒素の直接的効果を調査しようとした。

第2節 溶存窒素の直接的効果の比較

両水田におけるかんがい水溶存アンモニア態窒素（この節では以下、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と略記する）の直接的効果の発現力を、次のような実験手法⁴⁰⁾を用いた試験によって比較した。比較試験は、1979年に行ったが、F田では日本晴を、そしてN田ではベニアサヒを栽培した。移植後に、Plate 1に示すように、水田内に畦畔板で取り囲まれた3m×3mの閉鎖（C）区と、C区に隣接してかんがい水が自由に通過できる開放（O）区を設けた。C区の水深は、O区とほぼ同一であって、蒸散や浸透による損失を補うだけの給水を行った。なお、かんがい水は両水田が同一



Plate 1. View of experimental treatment with balky plastic board on the unfertilized paddy field.

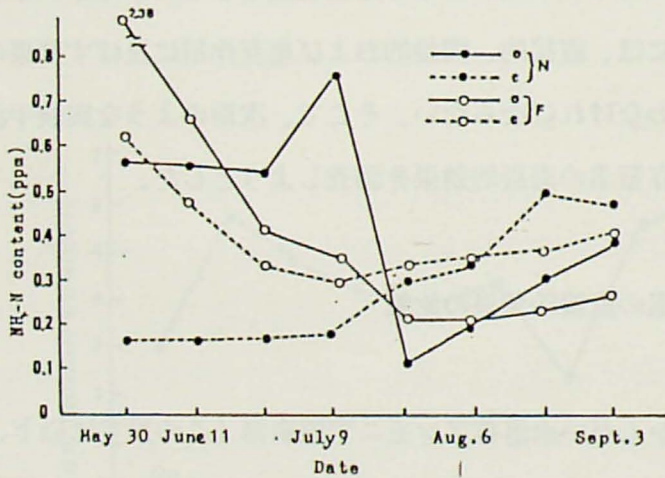


Fig.19. Seasonal variation in $\text{NH}_4\text{-N}$ contents of irrigation water at enclosed(c) and open(o) plots respectively at fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

In the open plot, surface irrigation water freely passed, whereas in the enclosed plot, the irrigation water were shut out and pure water was irrigated as the water level decreased.

水路から取水され、水口間の距離は約10 m程度であるので、両水田のかんがい水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度は同一とみなせる。したがって、両水田ともに両区のかんがい水に関する相違点は、区内を通過する総かんがい水量と $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量が違うのみであるので、水稻の生育と収量上の区間差は、通過する $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の影響が強く反映したものと考えた。

(1) $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の時期的変動

それぞれの区内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を経時的にネスラー法で比色定量して、Fig. 19 に示すような時期的変動を得た。F田のO区は、生育初期に2.38ppm と異常な高濃度を示したが、以後、急激に低下し、7月下旬には0.20ppmの最低値に達し、その後、僅かに再上昇が見られた。他方のC区は、生育初期から低濃度で推移し、7月上旬に最低となったが、その後は漸増して7月下旬以降ではO区の濃度を上回った。一方、N田のO区での推移パターンと平均濃度は、Fig. 17 で示した傾向とほぼ一致して、生育初期から比較的到高濃度で推移し、その後、一時的に急上昇がみられたが、それにつづいて急減が生じた。他方のC区は、生育初期には低濃度であったが、7月中旬に上昇が始まり、生育後期にピークとなる推移パターンを示した。

以上から、同一水田内の両区における処理の効果が、当初の予測通りに発現し、かんがい水由来の窒素供給量における区間差やその量の時期的変動が、かなり大差となることが明らかとなった。

(2) 生育・収量および吸収窒素量の差異

両水田の開放(O)および閉鎖(C)区の1株茎数の推移の比較を、Fig. 20 に示した。F田では、最高分げつ期までの分げつ増加速度はC区が大きくなったが、最高分げつ期以後に無効分げつが多発して、出穂期にはO区とほぼ同数となり、さらに、登熟期になると、O区の有効茎が僅かに多くなって有効茎歩合は高

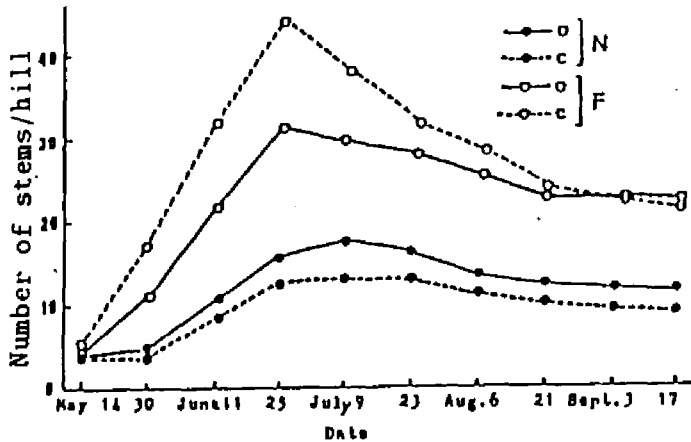


Fig.20. Time changes in the numbers of stems at the open(o) and enclosed(c) plots of the fertilized(F) and the unfertilized(N) paddy fields.

くなった。

一方、N田では、ほぼ一作を通して、O区の茎数は、C区よりも約3本多い状態で推移したが、有効茎歩合では区間差が小さくなった。また、N田よりもF田が分げつ数は全般に多くなり、かつ、最高分げつ期に早く到達するが、これらの現象は、両水田の栽培品種が違うことによって生じたものと考えられる。以上から、茎数の消長は、供給される $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の多少にかかわらず、それぞれの品種および栽培条件と窒素レベルに従った形で推移するが、有効穂数は、ともにO区が相対的に高くなることが分かった。

つぎに、玄米収量と収量構成要素、および二、三の収穫物形質をTable 4に示した。玄米収量は、両水田ともO区がC区よりも高収となり、それぞれのC区を100として換算すると、F田では110、N田では154となった。つまり、かんがい水から供給される $\text{NH}_4\text{-N}$ を含めた無機態窒素が玄米収量に及ぼす相対的な効果は、おおよそF田は10%、N田は50%となった。これらの玄米収量の区間差は、栽培品種の特性による差と考えるにはかなり大きいと思われる。したがって、N

Table 4. Yields, yield components & some characters of harvested plant.

Items Plots(Var.)	Hulled rice yields(g/m ²)	Ear number per hill	Grain number per ear	Percentage of ripened grains	1000 grain weight(g)	Culm length (cm)	Straw dry weight per hill(g)	Grain/Straw weight ratio	Percentage of fruitful culms
N-O	421.2	10.1	82.8	94.0	22.8	78.3	20.2	1.04	60.1
N-C (Baniasahi)	274.1	6.8	91.3	94.7	23.0	74.1	18.7	0.94	54.0
F-O	607.7	23.5	64.0	87.5	20.9	80.3	41.3	0.80	75.3
F-C (Nipponbare)	552.5	21.1	57.4	86.6	20.8	80.0	33.2	0.80	48.3

N-O and N-C denote the open and the enclosed irrigation plots at unfertilized paddy field, and F-O and F-C those plots at fertilized field.

田の玄米収量は、F田の場合よりも、かんがい水から供給される $\text{NH}_4\text{-N}$ に強く依存していることが明らかであろう。

収量構成要素のうち、N田では1株穂数がO区で、1穂粒数がC区でそれぞれ多かった。一方、F田では、4要素ともO区がC区よりも僅かに大きかった。収穫物形質のうち、N田では稈長、1株わら重、モミ/ワラ比、および有効茎歩合のすべてにおいて、O区がC区よりも高くなったが、F田では、1株わら重と有効茎歩合がO区で高くなった。

さらに、玄米収量に対する吸収窒素の生産効率に基づいて概算した各区の1㎡当たり水稻体の吸収窒素量は、N田ではO区が6.1g、C区が4.1gとなり、F田ではそれぞれ13.2gと12.0gになった。

以上から、N田では、生育初期から中期にかけて、かんがい水から供給される $\text{NH}_4\text{-N}$ が栄養体の生育、とりわけ分けつ増加に強く影響を及ぼし、そして、生育後期にはかんがい水以外からの窒素供給を受けて収量が確保されるが、F田では、このかんがい水の効果は、収量の向上にはほとんど無効であることが分かった。

第3節 考 察

かんがい水によって供給される窒素の効果を解析するとき、それが水稻の生育収量に直接反映する部分と、間接的なものに分けて考える必要がある。直接的効果は、かんがい水中に溶存する無機態窒素が、当年度の水稻に吸収されて発現する効果を指すので、この効果の発現力は、流入するかんがい水の量と無機態窒素の濃度によって第1義的に決められるといえるだろう。したがって、SSなどのように、その年に直接利用できない窒素が、一旦、土壌に取り込まれて、後年の窒素発現のソースとなる有機態窒素は、間接的効果を持つものと考えられる。つまり、間接的効果はかんがい水の介在のもとで土壌窒素の無機化に関与する地温や土壌Ehと土壌pHおよび土壌微生物などの土壌の環境要因を通して発現する

ので、その効果の定量化は著しく困難である。また、このN田には、掛流しかんがい水によって常に低濃度の無機態窒素が一年を通して供給されている。この窒素は、量的には少ないものの、Priming Effectを通して土壌窒素の無機化を促進する一因⁴³⁾となることも考えられるので、この場合には直接的効果の溶存無機態窒素が、間接的効果として働くものとして認めることができる。

以上から、間接的効果は、F田よりもN田で全般的に強く発現するといえるが、F田では施肥窒素の直接的効果の発現が、間接的効果の発現力にくらべて著しく大きいので、間接的効果の発現が認められ難いものと考えられる。

つぎに、直接的効果を見るために特設した実験手法の有効性を、湛水中の窒素濃度の推移と関連づけて考察する。本調査における5月30日は、N田では移植後約3週間が経過した時期に当たり、F田では移植後約1ヶ月に相当する。したがって、この時期にF田のO区での濃度が高くなったのは、移植直後の活着肥とかんがい水の取水量の減少によるものであろう。5月30日以降の急減は、水稻の施肥窒素の吸収と多量のかんがい水の取り入れによる結果を示し、追肥による濃度上昇も認められなかった。同じくC区では、6月以降、O区よりも低濃度で推移したが、これは、閉鎖処理後には、かんがい水からの窒素の補給がなかったことを表している。N田では、生育初期に溶存アンモニア濃度の高いかんがい水が多量に取り入れられるので、O区はC区よりも相対的に湛水中の窒素濃度が高くなるが、地温上昇が著しくなる生育中期以降には、土壌窒素が無機化されて湛水中に放出され、C区の濃度上昇がみられるものと考えられる。以上から、閉鎖処理によって、閉鎖区内へのかんがい水由来のアンモニア態窒素の補給が遮断され、両区の水稲生育上で生じた差は、かんがい水由来の窒素の直接的効果を反映した差であると考えることができる。

つぎに、作物学的視点から、かんがい水中溶存窒素の直接的効果について考察する。一般に、穂の大きさや充実程度は、生育後期における窒素供給量と密接な関係にあるとする報告が多い。このことから、N田のC区で、1穂粒数、登熟歩

合ならびに玄米千粒重が大きくなる一因は、この区の湛水中の溶存窒素濃度が、生育後期に急増したことに求めることができるだろう。しかし、この区には、7月以降は新しくかんがい水が補給されていない。したがって、この区の窒素濃度の上昇は、停滞水による水地温の相対的な高まりによって、土壌からの無機化窒素の水中への放出量が増大したことによるものと考えられる。また、収量構成要素は、互いに相反関係にあるので、上述のすべての構成要素が共に大きくなった原因を、かんがい水由来窒素の直接的効果の発現であるとみるのは困難である。さらに、O区でも穂の形質が高く確保されることから、水稻収量に対するかんがい水由来窒素の直接的効果の発現は、N田においてすら生育後期には極めて小さくなるといえるだろう。

つぎに、このN田の水稻体の吸収窒素量のO区とC区との差は、計算により1㎡当たり2.0gとなることを示した。したがって、供給された窒素がすべて水稻に吸収されたと仮定して単純に考えると、この2.0gの窒素は、かんがい水によって賄われたものと見なせる。他方、Fig. 17で推定したように、このN田の一作中にかんがい水によってもたらされるアンモニア態窒素量は1㎡当たり1.4gである。つまり、吸収窒素量の区間差の70%が、かんがい水中アンモニア態窒素によって賄われ、さらに、SS由来の窒素量は極めて少ないことから、残りの30%、つまり0.6gがかんがい水中の硝酸態窒素に由来することを示し、このN田ではかんがい水由来の無機態窒素の効果が著しく大きくなることを裏付けるものといえる。

一方、F田においては、その直接的効果はN田での効果に比べて全般的に著しく低くなるものと思われる。つまり、施肥窒素のマスク現象が強いので、玄米収量や栄養体量ではO区とC区とでほとんど差異がみられなかったことが指摘できる。また、茎数増加と湛水中の窒素濃度とに負の相関がみられ、さらにその茎数増加と玄米収量が相反した。つまり、このF田では、生育初期には施肥窒素が両区とも多量に存在し、さらに地温はC区が相対的に高くなるので、この区の茎数増加が大きくなったものと考えられる。そのためにC区の有効茎歩合が低下して、

玄米収量がO区よりも低くなったものと思われる。したがって、かんがい水中の溶存窒素の直接的効果発現は、F田ではかなり小さいものといえるだろう。

第4節 摘要

水稻の生育収量に対して、かんがい水中溶存窒素がいかほどの効果を及ぼすのかを検討し、さらに、施肥、無施肥田における効果発現パターンと生産機構との関連性について、特設した試験方法にもとづいて比較調査した。結果の概要は次のごとくになった。

1 かんがい水によって供給される窒素は、当年に水稻が直接吸収する無機態窒素と、直接吸収されずに、一旦、土壌に取り込まれ、後ほど土壌微生物の分解をうけて無機化される有機態窒素（大部分が懸濁物質）に大別でき、それぞれの窒素が水稻に与える効果を、直接的効果と間接的効果としてみるのが妥当であることを明らかにした。

2 直接的効果と間接的効果の両者は、ともにF田よりもN田で著しく発現するが、両者が相互作用によって、土壌窒素の無機化を促進する可能性のあることが示唆された。

3 一作中に流入するかんがい水量は、F田に比べてN田が約4～5倍多くなった。したがって、N田における直接的効果の発現は、かんがい水の溶存窒素濃度が高い生育初期に顕著となるが、生育後期にその濃度が低下するにつれて効果の発現も低下し、最終的に玄米生産に対するかんがい水中の溶存窒素の効果は、かなり低下した。

4 概算的にみて、玄米生産に及ぼす直接的効果は、N田がF田よりも約5倍ほど大きく発現したが、それは、F田におけるその効果が、高濃度で施用された基肥窒素の発現によってマスクされることによる結果であることが分かった。

第5章 土壌の窒素条件と生物的窒素固定能との関係

生物的窒素固定は、マメ科植物の根粒に代表される共生的固定と、らん藻などの非共生的固定とに大別される^{1,37)}。無機栄養微生物が空中窒素を非共生的に固定¹⁾して、土壌窒素を富化することは古くから認められているので、この様式の固定に関与する微生物の研究例は数多い。

水田土壌の主な固定生物は光合成らん藻類であって²⁸⁾、東南アジア諸国での水稲栽培において、それらのらん藻が積極的に施肥代替物として利用され、玄米収量が向上した報告もみられる^{8,29)}。有機栄養土壌微生物もまた、空中窒素を固定することでよく知られた生物であって、そのうちでも好気性菌のアゾトバクターによる固定は有名であり²⁹⁾、さらに、嫌気性菌のクロストリデウムが、固定力を持つことも知られている¹⁷⁾。また、近年、水稲根圏における従属栄養微生物が、“ゆるい共生”のもとで空中窒素を固定して、その窒素を水稲に供給することが知られ⁷⁸⁾、とくに熱帯の無施肥栽培水稲に対する主な窒素供給源となる事例が報告されている⁷⁷⁾。

上記の3種類の非共生的窒素固定作用には、微生物活性が強く関与するので、それらの固定力が土壌環境や根圏の生物的要因によって変動することは明らかであろう。したがって、天然供給窒素の一部である生物的固定窒素の効果を比較栽培学の視点から解析する場合には、それぞれの水田土壌における窒素条件と固定力の発現との関係を明らかにして、固定窒素が水稲の生産力に対してどの程度の寄与をもつかを調査する必要がある。しかし、それらの微生物の生化学や機能性については、著者の力の及ぶところでない。そのために、本章では施肥、無施肥田での根圏における窒素固定能の時期的変化について比較し、土壌微生物やらん藻に関しては、それらの棲息数と窒素固定力や活性とが比例することを前提にして、それぞれの棲息数の時期的変化を調査した。

第1節 水稲根圏における窒素固定能

1977年に、両水田の水稲根面と土壌における窒素固定能をアセチレン還元法で調査して、その固定能と土壌の窒素レベルとの関係を検討した。

まず、分析用の根と土壌は、直径 12.5cm、長さ15cmの円筒型鉄製のroot core サンプラーを用いて、一作中に各水田より5反復で5回採取した。coreの採取は、地上部が取り去られた切株を中央にして、サンプラーを土壌に打ち込んで行った。このcoreを氷の入ったアイスボックスに入れて現地から実験室にすばやく搬入し、core内の全根と土壌を取り分け、そのうちの土壌は、5cm深までを上層土、他を下層土として2層に分別した。根と土壌はそれぞれ別個にアセチレン還元法⁹⁾による窒素固定能分析に供した。

アセチレン還元法による窒素固定能分析はつぎのように行った。まず、100 ml 容三角フラスコに、根では生重3gを、土壌では湿潤土20gを入れ、空気90%とアセチレン10%の混合気を培養気相として封入し、30°C、暗条件下で3日間培養した。生成エチレンの分析のためのガスクロマトグラフは島津のFID型GC-4を使用し、ポラパックNを充填した2m長の内径3mmのステンレスカラムに、60ml/minでN₂キャリアーガスを流した。生成エチレン量にもとずいて窒素固定量を計算するには、モル比による方法⁹⁾があるが、本調査の場合は、乾物または乾土1g当たり24時間の生成量をnmol単位で表した。

Fig. 21 に、水稲根面における窒素固定能の時期的推移を示した。窒素固定能は生育初期から出穂期（8月18日）まではN田が相対的に高く推移し、出穂後になるとF田が僅かに高くなった。したがって、5回の測定日の還元速度の平均値は、N田が0.68、F田が 0.25×10^3 nmol/g root/dayを示し、一作を通した単位根重当たりの固定能は、N田がF田よりも約2.7倍高く推移した。また、N田では、最高分けつ期（7月21日）から出穂までの盛夏期に急激な増加がみられ、出穂期におけるF田とN田のアセチレン還元速度は、それぞれ0.3、および 2.0×10^3 nmol

/g root/day となり、N田の方が顕著に高かった。以上から、N田における水稻根面の固定量は作期の大半においてF田よりも多くなるが、時期的変動の大きさも著しいことが分かった。なお、作期中の1㎡当たり根の平均乾重は、N田が88g、F田が155gとなった。したがって、生育日数を120日とすると、概算の1㎡当たり根の1作中に行うアセチレン還元量は、N田が 71.8×10^6 nmol、F田が 46.5×10^6 nmol となり、相対的にN田が1.5倍多くなった。

Fig. 22 に、それぞれの根圏土壌の窒素固定能の時期的推移を示した。水稻根面の場合に比べて2層とも全般に時期的変動が小さく、かつ、生成エチレン量も極めて少なかった。つまり、根圏土壌の固定能は、土壌の窒素条件にかかわらず、根面の固定能よりも著しく弱いことをあらわしている。このことはROVIRA⁵³⁾の報告と一致しており、土壌の非共生的微生物のうち、水稻根面での活性に直接的な関係をもたない微生物の固定力は、極めて少ないことを意味している。したがって、根圏から離れたところに棲息する土壌微生物の固定能は、施肥などによる土壌窒素の変化の影響を受けることが少ないものと言える。

第2節 有機栄養微生物量の変動

窒素固定微生物のうちの好気性で有機栄養を営み、かつ、固定窒素を水稻体に供給する遊離窒素固定細菌（以下遊離細菌と略す）と、土壌有機物を分解して窒素を水稻に供給するその他の有機栄養細菌（以下好気性細菌と略す）との現地水田における時期的変動を、1977年に調査した。両水田とも中央部付近の土壌を調査対象とし、調査はN田では移植直前から収穫時まで、F田では移植5日後から収穫直後までとし、この間のこれら微生物量の時期的変動を追跡した。このために両水田から採取した表層土を供試して希釈平板法³⁷⁾によって調査した。

遊離細菌数については、希釈平板法によるアゾトバクター基礎培地で得られた接種2週間後の細菌コロニー数を計測した。これはアゾトバクターなどの遊離窒

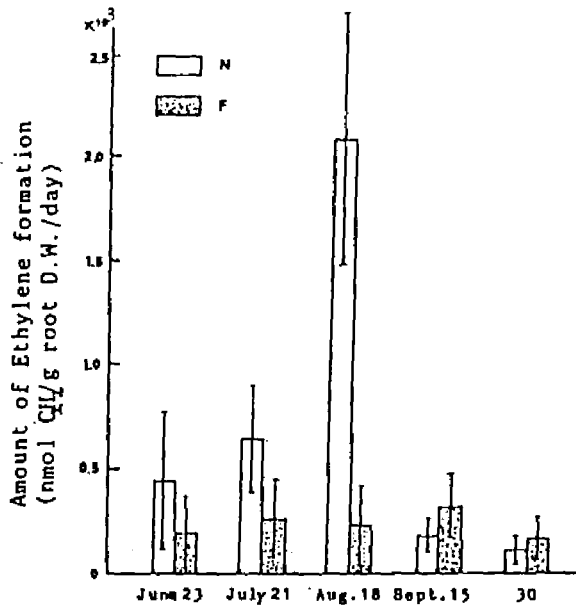


Fig.21. Time changes in nitrogen fixation activity of rice rhizospheres at fertilized (F) and unfertilized paddy fields.

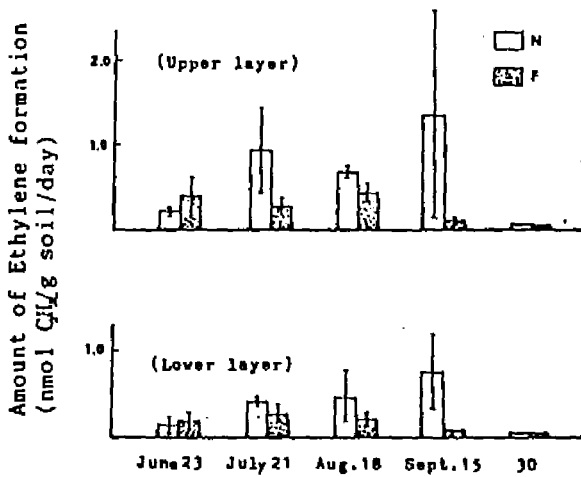


Fig.22. Time changes in nitrogen fixation activity of paddy soils at fertilized(F) and unfertilized(N) fields. Top: the activity of 0-5cm depth soil layer. Bottom: that of 5-10cm depth layer.

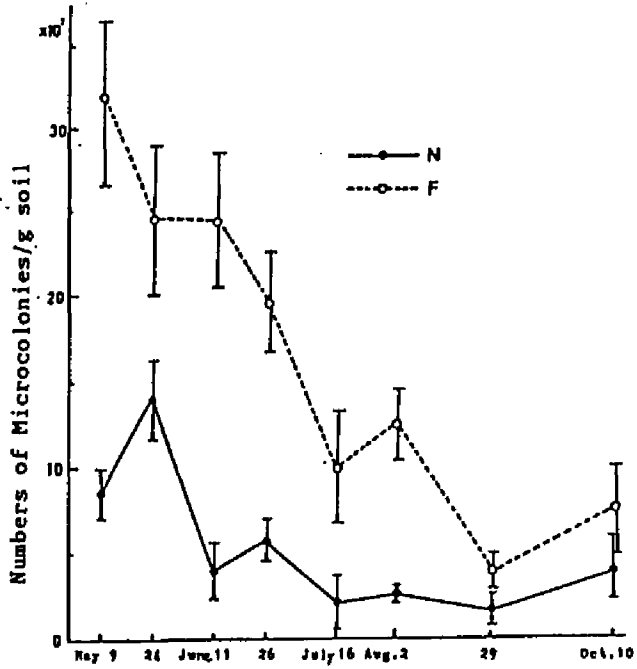


Fig.23. Seasonal variation in the number of non-symbiotic nitrogen fixing bacteria in the soil of fertilized(F) and unfertilized (N) paddy fields.

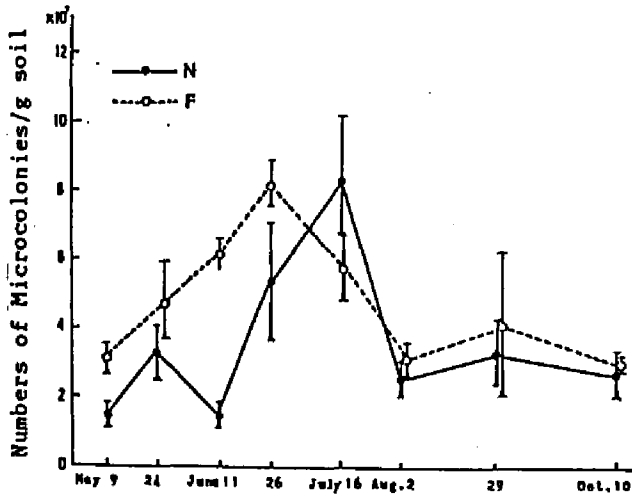


Fig.24. Seasonal variation in the number of aerobic bacteria in the soil at fertilized (F) and unfertilized(N) paddy fields.

素固定細菌が、窒素固定力を最も強く発現する培養日数に相当する。好気性細菌はアルブミン寒天培地上で得られる細菌コロニー数を計測した。ともに生菌計数は、5次希釈による培地シヤーレ上の5試料平均コロニー数で表示した。

遊離細菌数の時期的変動と調査日ごとの培地上の標準偏差をFig. 23に示した。遊離細菌数の時期的変動では、N田は移植直後に一時的な増加がみられ、その後は漸次減少して、収穫直前の落水開始時に再上昇するパターンを示した。一方、F田は全般にN田の変動パターンと類似するが、減少時の低下量はN田よりも顕著となった。菌数は全期間を通してF田がN田よりも有意に多く、とくに生育初期の水田間差は大きくなった。

好気性細菌数の時期的変動と偏差をFig. 24に示した。時期的変動において、菌数はともに湛水以前では少なく、湛水後に急増し、盛夏に最多となり、落水期を迎えて急減するパターンを示した。菌数は6月下旬まではF田が僅かに多かったが、7月では一時的にN田が多くなり、その後では有意な水田間差が認められなかった。

第3節 らん藻の棲息数の比較

1980年に、水稻の生育中期における現地水田で棲息するらん藻量を培地繁殖法によって調査した。供試土壌は両水田ともに水口、中央および水尻の3ヶ所から7月15日に採取したが、それぞれの水田では慣行栽培がなされていて、F田には当年度の肥料がすでに施用されていた。採取土壌は蒸留水で10倍に希釈し、その上澄液を培地への植え付け試料とした。一般に、らん藻類の実験培地は、調査対象となるらん藻種によって異なっているが、本調査ではその種を同定していないので、多種のらん藻が生育可能な3種類の統一培地を参考文献³⁷⁾にもとづいて選り出して使用した。培地への植え付けは、無菌箱中でそれぞれの培養基をいれたシヤーレの培地表面に、スプレーによって試料を散布する方法で行った。培養は、

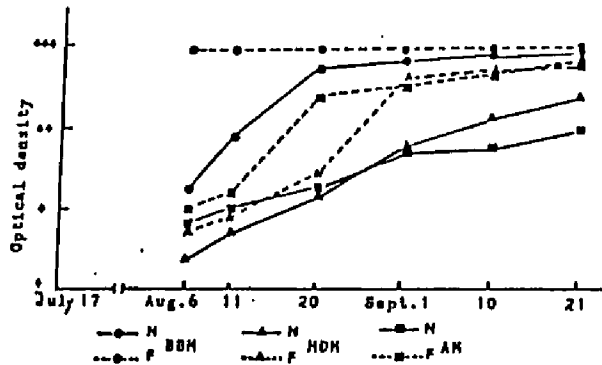


Fig.25. Time changes in the number of blue green algae on different culture mediums of BBH, HDH and AH .

The algae were isolated from sampled soils from fertilized (F) and unfertilized (N) paddy fields. The numbers of the algae were represented as optical density of the occupation of the clones on the media as follows: +++; above 50%, ++; 50-30%, +; 0-30%, ±; 0%.

30℃、自然日長下で、7月17日から9月21日まで行い、その間の培地におけるコロニーの発達程度を追跡調査した。Fig. 25 に、中央部土壌より採取したらん藻が3種類の培地上において増殖する状態を示した。

3種類の培地とらん藻の生育程度との関係を見ると、全般に、BBH 培地が他の2種の培地よりも生育が良好となり、このBBH 培地が本実験におけるらん藻の生育に対して最適培地であることが分った。そこで、このBBH 培地上の生育程度を比較すると、F田試料は、植え付けの2週間後ですでに緑色コロニーが培地全面に蔓延したが、N田試料では、その間の生育が相対的に遅く、全面蔓延に達するのに4週間かかった。また、他の2種の培地上での生育状態も、全般にF田がN田よりも早く生育する傾向となった。

以上から、水稻の生育中期における現地水田でのらん藻の棲息数は、F田がN田よりも多くなることが明らかとなった。

・第4節 考 察

宮川ら³²⁾や佐野ら⁵⁵⁾は、根面の窒素固定能には水稻品種によって差異があると指摘している。このことから、本実験においても両水田の栽培品種の違いが、固定能の発現に影響を与えていることも考えられる。しかし、著者のポット実験の結果⁴¹⁾によると、水稻の品種にかかわらず、根や土壌の状態が固定能発現に強くかかわっていることが認められた。つまり、F田の固定能がN田よりも低くなることは多くの研究^{3,78)}で認められているように、土壌栄養条件が根面における固定能発現に強く関与していることを強調することに加えて、施肥栽培における根圏の固定窒素が、水稻の窒素供給源として栽培的意義を持ち得ないことを表していると考えてよいだろう。

一方、無施肥栽培における根圏の固定窒素量はかなり多くなり、さらに、その発現様相は稲の窒素要求度が高くなる時期に多く発現するパターンをとることから、N田においては、この固定窒素が生産要因として重要な働きをもつものといえるだろう。なお、両水田ともに盛夏期において窒素固定能は最高値を示し、根面の固定能が根自身の活力の影響を強くうけることを示唆した。したがって、根の生育生理と固定能との関係は今後の主要研究課題となるだろう。また、両水田ともに、根を含まない土壌の固定能は、根面のそれにくらべて極めて低い。したがって、N田においてさえ、根から離れた土壌に棲息する微生物により固定される窒素は少量に止まり、玄米生産力としては、土壌中で固定される窒素の効果は小さなものといえる。

つぎに、土壌細菌に関して考察を進めると、一般に、遊離細菌とはアゾトバクターが中心となる細菌群を指すものと考えられ、かつ、このアゾトバクターは好気性細菌である。この点から細菌数の消長をみると、湛水によって土壌の還元が強まるにつれて、棲息菌数は減少するものと一般に考えられる。しかし、生育初期の土壌Eh値はF田がより還元化の強いことを示しているにもかかわらず、こ

の遊離細菌数はF田で有意に多くなった。そのために、この細菌群による固定窒素量はN田よりもF田で多くなるものと考えられるが、これらの菌が棲息する土壌の窒素固定能は、前にみたように著しく小さいので、この固定窒素の生産への関与は極めて小さいものといえるだろう。

つぎに、好気性細菌群中の菌種は多数あるが、そのうちの条件的嫌気性菌⁷⁰⁾は、土壌中の酸素が消失しても生存できる。したがって、土壌の酸素含有量よりも有機物含有量が、これらの菌の生育にとってより重要となる。つまり、生育初期にF田でこの菌数が多かったのは、水田に還元された有機物の量がN田よりも多いことによるものと思われる。なお、第3章のKCl液可溶アンモニア態窒素の消長パターンにおいて、N田では7月以降にその発現量が多くなることを認めている。その原因のひとつとして、この菌数の増加がアンモニア態窒素の発現力に関与することを示唆できて興味深い。

つぎに、らん藻の棲息に関してみると、水稻の生育中期ではその数はF田で相対的に多くなった。この原因として、らん藻の生育は一般的に棲息地の土壌 pH がアルカリ性である場合に促進され、かつ、らん藻のリン酸要求度も大きい²⁹⁾ことが指摘できる。つまり、F田には化学肥料が多施されて、リン酸の補給が多く、かつ、土壌 pH がN田よりもアルカリ側で推移したために、F田のらん藻棲息数が多くなったものといえるだろう。

第5節 摘 要

生物体の空中窒素固定量と土壌栄養条件との関係を見るために、施肥、無施肥田について、水稻根と土壌の窒素固定能および土壌微生物の棲息状態を実験的に分析・調査した。結果の概要は次の通りとなった。

1. 両水田の水稻根面と土壌の空中窒素固定能を、アセチレン還元法によって定量した。水稻根面の固定能は、N田の水稻がF田のものに比べて全期間に亘っ

て相対的に高くなり、とくに生育盛期では水田間差は極めて大きくなった。したがって、この固定窒素がN田の水稲生育に対して比較的大きな効果を持つが、F田ではその効果が極めて小さくなるものと推察された。土壌の固定能は、根面の固定能に比べて両水田ともに著しく小さくなり、水田間差も認められなかった。したがって、根から離れた土壌中で固定される窒素量は少なく、土壌の栄養条件にかかわらず、水稲生育に効果を持たないことが推察できた。

2. 生物的窒素固定作用をもつ土壌微生物のうち、非共生の有機栄養微生物とらん藻の両水田における棲息数を比較し、土壌栄養条件がそれらの微生物の生育に及ぼす影響を検討した。窒素固定能をもつ有機栄養微生物のうち、好気性固定細菌数は一作を通してF田がN田よりも多かった。有機物を分解利用する好気性細菌数は水稲の生育初期にはF田が多くなったが、生育中期以降には水田間差が認められなくなった。らん藻の棲息数はF田がN田よりも多くなる傾向を示した。

3. 上記の微生物による窒素固定量は、土壌栄養条件にかかわらず、土壌の固定量が少ないことからみて極めて少量に止まると考えられた。したがって、それらによる固定窒素の水稲生育に及ぼす効果は、施肥、無施肥田ともに極めて小さいと推察された。

第6章 施肥、無施肥田における早植効果と密植効果の発現性

施肥技術が関与できない無施肥田において多収を図るには、栽培時期、栽植密度および栽培品種などの改良が必要であろう。近年の水稲作は安定多収を目指して早植傾向が強まり、実際に、早植による増収事例が数多く報告されているが、その増収効果を窒素供給と関連させて解析した報告は少ない。本調査の対象としたF田も、近隣の水田と同じく5月上旬に稚苗を機械移植して増収を図っている。この地域全体が一斉に早植されるのは地域の水利慣行によるが、この中で、N田は例年、6月上旬に成苗が手植され、F田よりも移植が約1ヶ月遅い。したがって、このN田の移植期をF田に同調させることは、水利慣行上は容易であるばかりでなく増収の可能性も期待できる。

水稲栽培での栽植密度と生育・収量との関係を述べた報告は多い^{13,14,16,21,57)}が、それらのすべては施肥栽培における事例であって、土壌の窒素レベルが極めて低い場合についての報告はみられない。N田の水稲は、個体の葉面積が少ないにもかかわらず、個葉の充実と受光感勢が良好となることは第2章において明らかにしたところである。したがって、N田においては栽植密度を高めて葉面積の増大を図ることが、増収に直結する可能性は高いものと思われる。

本章では、まずはじめに、移植時期の早晚と収量性との関係を窒素供給パターンの面から解析し、無施肥栽培での早植効果発現の可能性について栽培学的に検討した。つぎに、栽植密度の変化がそれぞれの水田の生育と収量に及ぼす効果を比較して、N田での増収が密度効果にもとづいて発現するか否かを検討した³⁹⁾。

第1節 移植時期と生育収量との関係

1978年に、施肥、無施肥の両水田の一画でTable 5に示すように、早植(5月

Table 5. Experimental plots, transplanting date and density in the transplanting date experiment at fertilized and unfertilized paddy fields.

Plots (Symbol)	Transplanting date	Density
Early Transplanting (E)	May 11	19.2 hill/m ²
Late Transplanting (L)	June 7	19.2

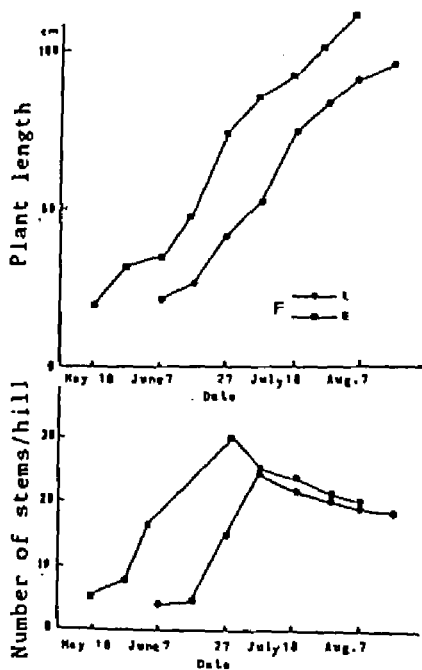


Fig. 26-1. Time changes in plant length and number of stem of early (E) and late (L) transplanted rice at fertilized paddy field.

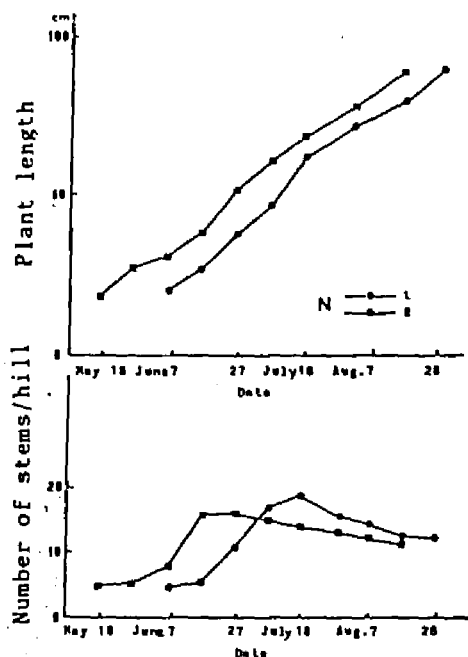


Fig. 26-2. Time changes in plant length and number of stem of early (E) and late (L) transplanted rice at unfertilized paddy field.

11日植、E区)と遅植(6月7日植、L区)を設け、移植時期の違いが生育収量に及ぼす効果を明らかにする実験を行った。両水田ともベニアサヒを供試し、早植、遅植とも播種日を変えて無施肥育苗した5葉苗を1株3個体で19.2株/㎡の密度で移植した。両田とも管理はそれぞれの慣行としたが、F田における基肥は、両区とも5月8日に施用し、新たにL区の基肥は施していない。したがって、第3章のFig. 16でみたように、土壌中の有効態窒素量は、F田ではL区の方がE区よりもそれが少なくなるが、N田では逆にL区の方が多くなる。

Fig. 26に、施肥、無施肥田それぞれにおける早植区と遅植区の草丈と一株茎数の推移を示した。出穂期の草丈は、N田では両区がほぼ同じ長さとなったが、F田ではL区が僅かに短くなった。なお、草丈の伸長速度における区間差はともに認められなかった。1株茎数の推移をみると、N田の最高分げつ数と有効穂数においては、移植の早晩の影響が現れず区間差は認められなかった。一方、F田では、E区の最高分げつ数はL区に比べて著しく多くなったが、無効分げつも相対的に多発して、出穂期における茎数の区間差は僅かとなった。なお、F田では生育初期の分げつ増加速度は両区ともに急激となったが、この現象は、竹内ら⁶⁰⁾の報じた基肥の加速効果の一つの発現形態と考えられる。

両区の玄米収量と収穫物諸形質およびそれぞれの形質についてのE/L比数をTable 6に示した。玄米収量において、N田では早植と遅植の区間差がほとんどみられなかったが、F田ではE区がL区よりも約22%増収を示した。収量構成要素と収穫物諸形質においても、N田では早植による増大効果がほとんど発現されなかったが、F田では1㎡当たり穂数とわら重などの形質が早植によって著しく増加した。

以上から、F田では、早植効果が穂数の顕著な増加を通して玄米の増収をもたらすものと考えられるが、他方、N田では、移植時期を約1ヶ月早めても、その効果が収量や収穫物の増加として発現しないことが分かった。

第2節 密植効果の発現性の施肥、無施肥田間の差異

1978年に、施肥、無施肥田における栽植密度と収量との関係を明らかにするために比較実験を行った。N田の実際栽培で用いられている栽植密度を標準にして、Table 7に示すように栽植密度の異なる5区（1区の面積、7.5 m²）を設定し、一連制の試験を実施した。無施肥育苗のベニアサヒ5葉期苗を1株5本として5月11日に手植したが、その他の管理はそれぞれの水田の慣行に従った。

Fig. 27 に、各密度区におけるN田での1 m²当たり茎数に対するF田のそのの比数の推移を示す。本図は錯綜をさけて標準、+50、-50の3区のみを示したが、+25と-25の両区はそれぞれの密度の中間的な推移となった。この比数の変化をみると、生育初期にはF田で高密度区ほど茎数増加が大きくなったが、生育盛期になるとその増加が緩慢となり、最高分けつ期以降から出穂期にかけて、密度の疎密にかかわらずその比数はほぼ同数となった。つまり、本実験の密度の範囲では、N田においては栽植密度と1 m²当たり茎数増加とには一定の関係が見られないが、F田ではそれら両者間に比例関係のあることが示された。

各密度区の玄米収量、収量構成要素および収穫物諸形質をTable 8に示した。1 m²当たり玄米収量は、すべての区でF田がN田よりも多収となったが、とくに栽植密度が密になるにつれて、玄米収量の水田間差は拡大する傾向を示した。なお、N田では最高収量が標準の密度区で得られたが、F田では+25区が最高となり、全般に密度が増すほど高収となる傾向を示した。

収量構成要素のうち、1 m²当たり穂数と粒数は全区でN田よりもF田が多くなったが、全区を単純に平均すると、穂数ではほぼ2倍、粒数では1.7倍となり、いずれもF田が多くなった。穂実歩合と玄米千粒重は水田間差がどの区においても見られなかった。

収穫物形質のうち、平均稈長は、N田では密度が疎になるほど長くなったが、F田では一定の傾向を示さなかった。1株わら重はともに疎植区ほど重くなった

Table 6. Grain yield and yield components of early(E) and late(L) transplanted rice crops at fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

Items	Fields		F		Ratio E/L (%)	
	N		L		N	F
	E	L	E	L		
Grain yields (g/m ²)	366	355	593	486	103	122
Number of panicles per m ²	215	219	390	303	98	128
Number of grains (x100/m ²)	175	164	273	227	106	120
Percentage of ripened grains	94.7	95.7	96.4	96.5	99	100
1000-grain weight (g)	22.8	23.5	23.0	23.6	97	97
Culm length (cm)	73.8	73.6	94.6	88.2	100	107
Weight of straw(g/m ²)	544	484	1031	859	112	120
Percentage of fruitful culm	70.0	61.0	53.8	62.0	115	87
Grain:Straw ratio (%)	81.5	90.3	69.8	69.2	90	100

Table 7. Experimental plots and planting densities adopted for the density experiment at fertilized and unfertilized paddy fields.

Items	Hill space within row	Interrow space	Planting density
Plots			
-50%	30.0 ^{cm}	34.6 ^{cm}	9.6 hills/m ²
-25%	26.0	27.0	14.3
Standard	20.0	26.0	19.2
+25%	20.0	21.0	23.8
+50%	20.0	17.2	29.1

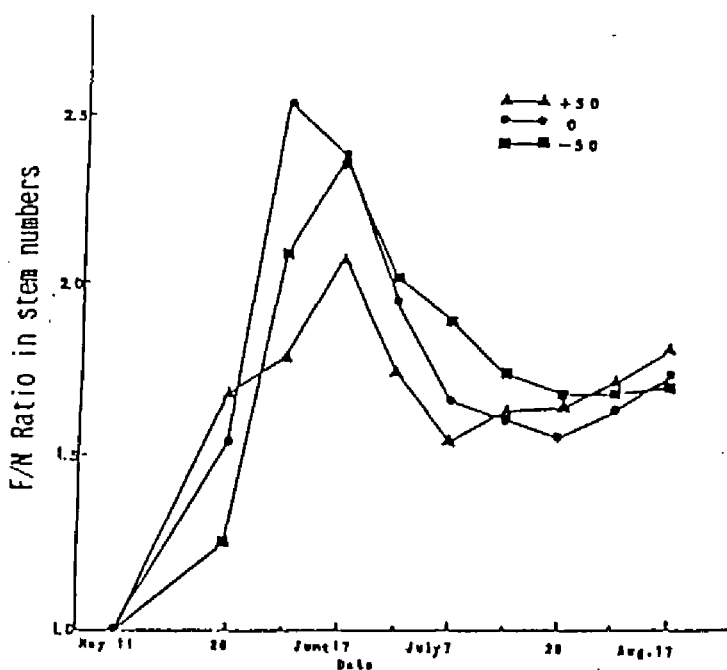


Fig. 27. Time changes in F/N ratio, the ratio of stem numbers at fertilized paddy field to those at unfertilized one, for rice crops at standard(0), 50% more than standard(+50) and at 50% less than standard(-50) planting densities.

が、1㎡当たりのわら重では一定の傾向が見られなかった。有効茎歩合は、ともに疎植になるほど高くなる傾向を示したが、同じ密度間で対比すると、全般にN田がF田よりも高くなった。モミ/ワラ比は、密度の疎密にかかわらず、全体的にN田がF田よりも顕著に高くなった。また、穂重の株内における変動はF田が僅かに小さかった。

以上から、N田における玄米収量は、栄養体の生育量によって決定されるものといえるが、F田ではそれら两者間にはほとんど関連性は認められないことが明らかとなった。つまり、N田では1株基数や栄養体形質の増大が、穂形質の充実 に直接反映して玄米収量を高くする。したがって、N田では栽植密度を密とせず に、株内の各茎の充実を図ることが増収への一つの方向であることが分かった。

Table 8. Grain yields, yield components and some characters of harvested plants for rice crops at different planting densities at fertilized(F) and unfertilized(N) fields.

Planting density	Fields									
	Unfertilized					Fertilized				
	-50	-25	S	+25	+50	-50	-25	S	+25	+50
Items										
Weight of hulled rice (g/m ²)	360	359	366	339	329	548	571	593	618	585
Number of ear (/m ²)	168	179	215	217	212	304	368	390	390	419
Number of grains (×100/m ²)	160	160	175	161	154	256	270	273	292	279
Percentage of ripened grains(%)	97.7	97.9	94.7	96.0	96.0	97.3	95.2	96.4	98.1	95.9
1000-grain weight(g)	23.2	23.2	22.8	22.9	22.8	23.1	22.9	23.0	22.5	22.6
Culm length (cm)	78.0	77.3	73.8	71.2	70.6	95.9	96.4	94.6	97.1	93.0
Weight of straws(g/m ²)	520	528	544	500	494	1033	1081	1003	1099	1125
Percentage of fruitful culms(%)	86.6	70.6	70.0	59.1	48.3	79.8	63.0	53.8	45.9	48.5
Grain:straw ratio(%)	84.3	83.2	85.1	84.1	83.9	65.0	64.7	69.8	69.8	64.5
Weight of a straw(g)	3.1	3.0	2.5	2.4	2.3	3.4	2.9	2.6	2.8	2.7
Weight of an ear(g)	2.8	2.6	2.2	2.0	1.9	2.3	2.0	2.0	2.1	1.8
CV of weight of ear in the hill(%)	28.0	24.6	27.4	30.2	31.5	23.7	24.9	24.9	23.4	29.0

第3節 考察

早植の増収効果は、N田ではほとんど発現せず、F田でのみ生じた。これらの現象を窒素の供給パターンと水稻生育に関連づけて考えると、F田では生育前期に生育が促進されるので、5月上旬の早期に移植が行われた場合、基肥の効果が

強く現れて栄養体の増大が顕著となり、そのことが玄米収量の増加に役立つものと考えられる。一方、生育後期に生育が旺盛となって、秋優り的な生育パターンをとるN田では、5月上旬における水田土壌中の可給態窒素は極めて少量に止まっている。そのために、窒素供給面で制約を受けて早植による生育促進効果が発現できない。しかし、土壌中の可給態窒素量が増加を始める6月上旬に移植する場合には、生育初期から窒素供給が良好であって、このことが活着とその後の生育を促進して収量形成に直接結びつく。したがって、N田では、早植しても玄米収量にほとんど効果が無いものと考えられる。

つぎに、栽植密度の疎密が玄米収量に及ぼす影響について考えてみよう。施肥栽培における玄米収量と栽植密度との関係についての実験例は多く^{25,26)}、それらによると、一般に土壌肥沃度が低い場合には、栽植密度を高めることが栽培上有利であると結論されている。本実験のF田ではやや高密度の場合に多収となり、密度効果が玄米収量上に発現した。しかし、単位面積当たり地上部乾物重は全区でほぼ等量となって、いわゆる収穫物一定の法則²¹⁾に適合した。すなわち、栽植密度が密になると個体間の養分競争や相互遮蔽が激しくなって、窒素供給が十分な場合ですら乾物生産が限界を示し、ひいては玄米収量が頭打ちするといえる。一方、N田では土壌中の可給態窒素レベルが生育初期には著しく低いので、栽植密度が密になると窒素養分に対する個体間競争は移植直後から激化し、穂が小型化して玄米収量の向上は望めない。他方、栽植密度が過度に疎になると、単位面積当たり穂数の不足によって玄米収量は向上しない。

以上の現象は、第3章で述べたように、N田の生産力が主として土壌の潜在窒素供給力の大きさに依存して発現することを強調したものである。したがって、地力窒素の供給力を無視した形で密植効果を狙う増収法はN田では不可能であると考えられる。

第4節 摘 要

施肥田（F）と無施肥田（N）の玄米収量に及ぼす早植効果と密植効果の発現について、現地圃場の一面で比較実験を行って検討した。その結果の概要はつぎの通りとなった。

1. 玄米収量に及ぼす早植効果はF田では顕著に発現したが、N田ではほとんどみられなかった。この原因としては、それぞれの水田土壤中の可給態窒素養分の供給パターンが異なっていることに求めることができた。

2. N田では栽植密度の増加が玄米収量に結びつかなかったが、その一つの理由は、生育初期における土壤中の可給態窒素に対する競合の激化に求められた。したがって、N田では、全生育期間を通して光条件は競合要因にならないが、栽植密度の増加は一定の地積内の窒素競合を激化させ、有効穂数の減少と穂の小型化を引き起こして、玄米収量を顕著に低下させるものといえた。

3. F田では栽植密度を増加させると、個体間の光競合が激しくなって穂が小型となる。他方、疎植の場合には、分けつ数と有効穂数が不足して収量の向上はもたらされない。したがって、F田では、施肥量が同一の場合には、いずれの栽植密度においても玄米収量はほぼ一定となった。

第7章 栽培品種の土壌の窒素条件に対する適応性の比較

施肥栽培における水稲品種の生育反応に関する報告は数多く^{15,50,59)}あって、とくに実際栽培上の施肥窒素量と収量に関係して、耐肥性品種についての研究が多い。しかし、無施肥栽培における品種問題についての報告はほとんどみることが出来ない。

本章では、無施肥田（N田）で長年の間に栽培されてきたベニアサヒ品種に加えて、通常、多肥下で栽培される数品種を栽培して、土壌の窒素レベルと品種特性の発現との関係を解析した。また、得られた知見にもとづいて、N田に対して適応力の高い品種特性を明らかにすると同時に、奨励品種のN田への導入の可能性を探った。

第1節 品種特性の発現性

1977年に、現地の施肥、無施肥田の一画で品種比較試験を行った。供試品種はTable 9に示した6品種であって、1品種の試験面積は両水田ともに4㎡として2反復で試験を行った。5月9日に、6品種ともに無施肥育苗の5葉苗を1株3本で1㎡当たり19.2株の密度で手植した。その他の管理は、施肥、無施肥田それぞれの慣行によって行った。収穫はそれぞれの品種ごとに出穂約50日後に行った。なお、供試品種の早晩性は滋賀県で普通栽培された場合について示されている。

(1) 草丈と茎数の推移

草丈と1株茎数の推移は、データ表示に錯綜を避けるために、供試品種の早晩性と草型を代表してコシヒカリ（早生、穂重型）、中生新千本（中生、穂数型）

Table 9. Characteristics of rice cultivars used for the comparative experiment at fertilized and unfertilized paddy fields.

Characteristics Varieties	Culm length	Plant type ^a	Earliness
Fujiminori	Moderate	W.	Ext.early
Sasanishiki	Short	N.	Early
Koshihikari	Moderate	W.	Early
Nakate shinsenbon	Short	N.	Medium
Norin 22	Long	W.	Late
Beniasahi	Long	W.	Late

^a W:Panicle weight type, N:Panicle number type.

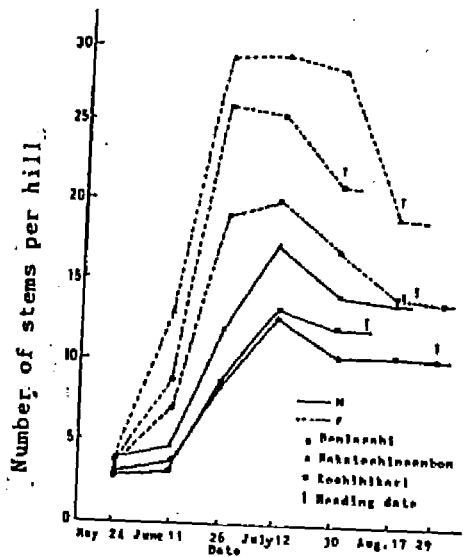
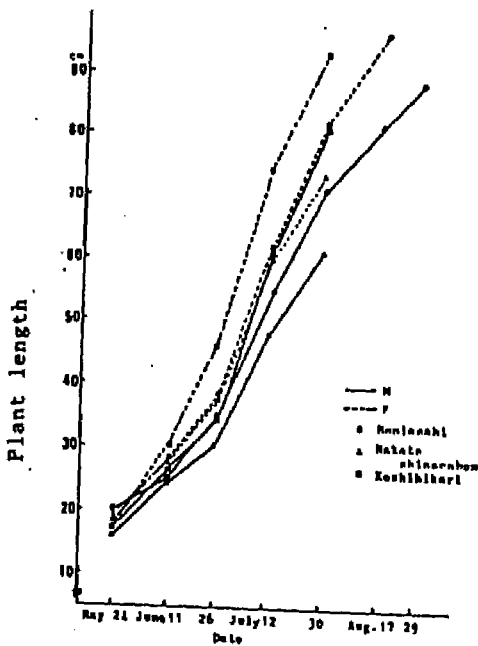


Fig. 28. Changes with time in plant length of respective rice cultivars grown at fertilized (F) and unfertilized (N) paddy fields.

Fig. 29. Changes with time in stem numbers per hill of different rice cultivars at fertilized (F) and unfertilized (N) paddy fields.

Table 10. Heading date of varieties at fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

Varieties Fields	Fujiminori	Sasanishiki	Koshihikari	Nakate shinsenbon	Norin 22	Beniasahi
F	July 18	July 25	July 25	Aug. 7	Aug. 7	Aug. 17
N	July 18	July 28	Aug 1	Aug. 17	Aug. 17	Aug. 21
Difference (days)	0	3	7	10	10	4

-67-

Table 11. Hulled rice yields(g) per 1m² for different cultivars at fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

Varieties Fields	Fujiminori	Sasanishiki	Koshihikari	Nakate shinsenbon	Norin 22	Beniasahi
F	514.6	624.0	579.8	495.4	464.6	485.8
N	309.2	382.1	410.9	357.1	357.1	403.2
Difference	205.4	241.9	168.9	138.3	107.5	82.7

およびベニアサヒ（晩生、穂重型）の3品種について、Fig. 28 と Fig. 29 にそれぞれ示した。

草丈の推移をみると、生育初期には同一品種における伸長速度の水田間差が小さかったが、生育中期以降からその差が拡大し、最終的に3品種ともに草丈はF田で優った。つぎに、1株莖数の増加は生育初期からいずれの品種もF田で大きく、最高分けつ期にもF田が早く到達する傾向がみられた。両水田間におけるそれぞれの品種ごとの莖数増加速度を比較すると、穂数型の中生新千本が3品種の中で最も水田間差は大きくなり、ベニアサヒは最も小さくなった。最高分けつ数の水田間差はコシヒカリが最大で、ついで中生新千本、ベニアサヒの順となり、有効穂数においても最高分けつ数の様相と同傾向を示した。

(2) 出穂日の早晚

Table 10に、6品種の出穂日とその水田間差を示した。出穂日は1株中で50%の出穂が確認された日とした。出穂は全体的にみてN田で遅くなる傾向が認められたが、フジミノリとベニアサヒを除き、晩生品種ほど水田間差が拡大する傾向を示した。水稻の幼穂分化には高温と短日が関与し、早生品種は感温性が高く、晩生品種は感光性の高いのが普通である³⁵⁾。したがって、晩生品種の出穂日が両水田で大きく異なったことは、それらの品種の穂ばらみ期間における稲体内の栄養状態が、出穂に深く関与していることが考えられて興味深い。

(3) 玄米収量と二、三の収穫物形質

Table 11に、6品種の1㎡当たり玄米収量とその施肥、無施肥による差を示した。F田ではササニシキと中生新千本が多収性を示し、一方、N田ではコシヒカリとベニアサヒが多収となった。すなわち、F田では穂数型品種が、N田では穂重型品種がそれぞれ多収性を示した。また、収量の水田間差が最大となった品種はササニシキであり、最少はベニアサヒとなって、早生品種ほどその間差が拡大

する傾向を示した。なお、N田において最も低収であったフジミノリの収量は約300kg/10aであった。したがって、第2章で示したように、玄米1kgの生産には少なくとも約14.4gの窒素が吸収される必要があるとする計算に基づいてみると、N田においてさえ、約4.3kg/10a以上の窒素養分が、なんらかの形でフジミノリに供給されることを示して興味ある現象であった。

Table 12. Yield components and characters of harvested rice crop of different cultivars at fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

Characters	Culm length (cm)	Number of ear per hill	Number of grains per ear	Percentage ripened grains (%)	Straw weight per hill (g)	1000-grain weight (g)	Grain yield per hill (g)	
Fields								
Varieties								
Fujimino-ri	F	75.7	16.0	89.5	93.7	29.0	21.68	26.8
	N	67.9	9.3	85.1	95.3	20.8	22.26	16.1
Sasani-shiki	F	68.0	23.6	89.4	88.3	30.1	20.50	32.5
	N	60.3	11.8	84.9	95.8	17.5	21.58	19.9
Konhihi-kari	F	74.8	20.9	86.6	87.8	33.0	21.24	30.2
	N	67.2	12.0	87.6	95.5	22.3	22.22	21.4
Nakatesh-inoenbon	F	67.4	18.7	59.2	92.7	33.3	21.82	25.8
	N	59.2	13.6	62.7	93.8	22.7	23.08	18.6
Norin22	F	84.4	13.0	90.9	94.0	29.6	20.92	24.2
	N	80.3	9.6	96.5	95.2	23.4	21.92	18.6
Beniasahi	F	85.9	13.6	86.9	93.2	40.3	23.16	25.3
	N	76.2	10.3	85.9	97.4	28.0	23.13	21.0
Mean	F	76.0	17.6	83.8	91.6	32.6	21.56	27.5
	N	68.5	11.0	83.8	95.1	22.5	22.36	19.3
t-test of fields	P<0.001 ***	P<0.001 ***	P=0.8	P=0.05	P<0.001 **	P=0.01 **	P<0.001 ***	

Table 13. Coefficients of variation(CV,%) of the characters of harvested plants among rice cultivars at fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

Character	Culm length	Number of ear per hill	Number of grain per ear	Percentage ripened grain	Straw weight per hill	1000-grain weight	Grain yield per hill
Fields							
F	11.2	14.7	13.4	1.2	17.1	2.8	10.1
N	10.3	25.6	14.5	3.1	12.9	4.3	11.7

Table 12は、それぞれの品種の収量構成要素と収穫物諸形質および6品種合計の平均値とその値のt検定結果を示した。収量構成要素のうち、1株穂数は全体的にF田で多くなり、水田間差が最も大きい要素であった。1穂粒数は水田間に有意差がみられず、稔実歩合と玄米千粒重は有意にN田で高くなった。収穫物諸形質のうち、平均稈長と1株わら重および1株玄米重はF田で大きかった。品種にかかわらず、稈長や1株穂数がN田よりF田において大きくなるのは当然であるが、しかし、草型や早晚性の異なる品種の施肥反応は異なっているものと考えられる。このことを明確にするため、つぎのような解析法を試みて、窒素供給量の多少によって変化する形質とそうでない形質を調査した。

まず、6品種をひとつの母集団とみなして、それぞれの水田ごとに各形質の平均値を出し、その値をそれぞれの水田におけるその形質の量とする。つぎに、各形質について6品種平均値と各品種の実測値から、6品種間の変動を出し、その変動の大きさを比較する。すなわち、施肥、無施肥田それぞれにおいてTable 12に示した各形質の品種間変動についての変動係数(CV)を求めた。

一般に、品種特性は施肥された場合における形質反応の大きさを表されるので、両水田間でCVの大きさが等しくなる形質は、窒素供給量にかかわらず、各品種が特性を発揮するものとし、CVの大きさの異なる形質は、6品種のうちの1つ以上が窒素供給量の多少によって反応性を異にするものとした。すなわち、本実験において、F田での変動が各形質についての一般的な品種間変動を示すが、N田での変動は、無施肥という条件が与えられた場合の施肥栽培に対する品種間変動の大きさを示すことになる。

Table 13に、両水田における各形質についての6品種のCVを示した。相対的にN田で変動がとくに大きい形質は、1株穂数であり、小さい形質は1株わら重となり、1穂粒数や稔実歩合のCVは僅かにN田が大きくなった。以上から、無施肥栽培を行うことで品種間変動を大きくする形質は、栄養体形質であって、変動を受けにくい形質は生殖体形質であると思われた。

第2節 考 察

一般的に、肥沃地では穂数型品種の栽培が穂重型品種に比べて有利となることに加えて、施肥は実際に栽培する品種の生態型を考慮して決定するのが普通である。これらのことを背景にして、品種特性と形質発現との関連性に対する考察を窒素供給量の面から進める。まず、草丈の伸長に関してみると、生育初期の可給窒素量はN田に比べてF田で著しく多いにもかかわらず、この時期の草丈伸長は全品種ともに気温が低い為に、水田間差が小さかった。しかし、生育後期には、すべての品種ともF田の草丈が相対的に長くなり、水田間差が大きくなった。すなわち、F田における追肥が伸長節間の生育に影響を及ぼし、ひいては草丈の伸長を促した結果によるものであろう。

つぎに、茎数増加について考えると、品種にかかわらず栄養生長期における窒素供給量の多少の影響は、茎数の消長上に強く発現したが、このことは多くの研究結果と一致するものである。つまり、F田では窒素の供給が充分に行われるので、それぞれの品種の分けつ力に対応した特性が表現されるが、他方、N田では窒素供給が不足していて特性の発現が抑制され、とくに穂数型品種においてその傾向が強まった。したがって、ベニアサヒやコシヒカリなどの穂重型品種が、N田における収量向上にとって役立つものといえるだろう。

つぎに、出穂の早晚に関してみると、一般に、幼穂分化の早晚は一つの品種特性であり、また分化から出穂までの日数は品種や栽培条件の影響を受け難いとされている。ところが、本実験ではすべての品種において出穂日がN田で相対的に遅くなった。このことは、分化後の幼穂発育がN田で緩慢となることを示唆することに加えて、このことがN田における登熟の進行を遅くすることになんらかの関係をもつと考えられて興味深い。なお、ベニアサヒの出穂日の水田間差は他品種に比べて小さくなったが、この品種のN田への適応性の高さが、出穂日の変動の小さいことに関係していることをうかがわせた。

つぎに、収量と収量構成要素に関してみると、収量構成要素のうち、1株穂数は全品種でF田が有意に多くなったが、これは基肥窒素の茎数増に及ぼす効果が顕著に発現した結果である。1穂粒数では水田間に有意差がみられなかったが、この理由は、F田では1株穂数の増加による1穂粒数の低下によるものである。稔実歩合と玄米千粒重は全品種ともにN田で高くなったが、この原因は単位面積当たり粒数が少なかったことに加えて、生育後期の土壌窒素の無機化がN田で高くなり、出穂後での葉色や受光態勢が相対的に良好となって、登熟期の光合成量が高く維持されたことによるものと思われる。このことは、品種にかかわらず、無施肥栽培においては合成デンプンの穂への集積が効率よく行われ、かつ、稲体が高い光合成活性を維持する態勢を持つことを示唆するものと言えるだろう。

つぎに、収穫物諸形質についての品種間の変動係数(CV)に関してみると、1株穂数のCVはN田がF田よりも大きくなり、1株わら重ではF田が大きくなったが、その他の形質のCVでは、両水田間の差がほとんど認められなかった。このことは、無施肥下では供給窒素量が極めて少ないため、窒素反応の穂形質に対する品種特性が表現され難いことを示唆するものと考えられる。すなわち、近年の水稻奨励品種は、一般に窒素肥料を基肥に多施し、生育初期で茎葉の生育を旺盛にすることを前提にして育成されたものであるので、N田のような無施肥栽培では栄養体形質に関わる品種特性が発揮され難いものといえるだろう。なお、すべての品種の稈長は相対的にN田で短くなるが、そのCVはF田の値とほとんど変わらない。つまり、窒素供給量が違っても、稈長の品種間変動の相対値は一定となるとともに、最終的にその稈長が生育後半の窒素供給量によって決められることを表している。したがって、N田では稈長の伸長程度が、穂の大きさに強く影響を及ぼす可能性のあることが示唆できる。また、F田の1株穂数のCVはN田より小さくなって、生育後期の窒素供給が相対的に少なくなる場合には、穂数型品種の茎数増加の効果が穂数確保の上に発現できないことを表した。さらに、N田の1株わら重のCVはF田よりも小さくなり、無施肥栽培でも、穂重型品種

は生育後期の生育が良好に保たれることを表すものと思われる。

以上から、品種特性と窒素供給量との関係を見ると、供試した6品種のうち、無施肥田で特性発現の高い品種は中晩生のベニアサヒであって、これは穂重型である。なお、N田では6品種のうちフジミノリの収量が最少となったが、これはフジミノリが極早稲の穂重型であることによって生じたものである。つまり、この品種は栄養生長期が著しく短く、かつ、このN田では栄養生長期には土壤窒素の発現が低いことから、玄米が低収になったものと考えられる。したがって、草型にかかわらず、早生品種のN田への適応性は著しく低くなるといえる。

本研究では、玄米の品質特性は検討していないが、N田での品種特性や品質と窒素供給との関連性の究明は今後の課題として残される。しかし、N田で生産された玄米の品質は、相対的に良好であるとする報告⁴⁶⁾もある。このことから、N田では低収打破に向けての技術的解決が最優先されねばならないだろう。

第3節 摘 要

本章では、生態的特性の違う6品種の水稲を施肥田(F)と無施肥田(N)に比較栽培して、それぞれの品種特性の発現と窒素供給量との関係を解析し、さらに、N田において玄米収量を高く確保しうる品種特性を明らかにして、良質米品種のN田への導入の可能性を検討した。その結果の概要は次の通りであった。

窒素供給量の影響が強く発現する生育形質は、1株基数、1株穂数および1株わら重などの栄養体形質であった。したがって、N田では、土壤の窒素無機化パターンと水稲の窒素要求パターンとが同調的に変化する穂重型で後期栄養効率がよい晩生品種の収量が高くなった。このことは、供試品種のうちでベニアサヒなどの晩生品種が、無施肥田に対する高い適応性を示す理由の一端を説明している。また、一般的に良質米とされるコシヒカリが、N田においてかなりの収量を確保して、この品種の無施肥栽培への導入の可能性の高いことが示唆された。

第8章 総合考察

最近、農学研究における実験結果の解析法として、現象の差異を比較的観点より分析する方法が発展しつつあり、得られた知見が農業技術の進歩に貢献してきている。高橋⁵⁸⁾はこの解析法の有用性を認めて、それぞれの現象を比較的に考察する方法論の発展は、学界の定説を深めるのでなくて、今まで気付かなかった見方や研究の糸口を見出し、学問の進歩にとって有効であると評価している。

本研究で取り扱った施肥田（F田）では化学肥料が多投され、過去から発展してきた水稻栽培に関する知識が玄米生産に応用されている。一方、無施肥田（N田）では、確立した栽培技術（とくに窒素栄養に関する技術）はほとんど利用されていないが、例年、約400kg/10aの玄米収量が安定的に得られている。したがって、この水田の生産機構と窒素栄養の得失を栽培学的に解析し、現行の水稻栽培に照らし合わせて、広く普及している窒素栄養に関する技術を再検討し、現行の水稻栽培法の改善指針についての考察を本章で行う。

第1節 無施肥田の生育パターンの特徴と玄米の生産機構との関係

水稻の生育調整は窒素施肥法や施肥量などの操作を通じて一般に行われることより明らかなように、窒素養分は生育パターンに影響し、さらには生産機構に変化をもたらす。玄米収量は、本研究においては供試品種や栽植密度にかかわらず、F田がN田よりも多収となった。しかし、F田の多収性の一方で、ベニアサヒ品種がN田に適切な密度で栽培されると、その収量は予想外に多収でかつ安定していた。この事実を、作物学的視点からの比較にもとずいて考察を進める。

(1) 前期生育型と後期生育型

N田の水稻生育パターンは、生育初期には葉色が全体的に淡く、地上部生育が貧弱であり、株基部に太陽光が十分に透過できる構造となっている。分けつ増加と地上部の生長速度は緩慢であるが、発生した茎は太くなり、加えて地上部全体が小型となる。生育中期から葉部の生長が旺盛となり葉色も回復する。出穂後には物質生産力が高い受光態勢となり根量も比較的多くなる。出穂は遅れるが有効茎歩合は高く、かつ、穂の充実は良好となる。すなわち、生育中期以降の RGRと生殖体の生育が比較的大きくなり、シンクとソースの発達がうまくバランスされてモミ/ワラ比が高くなる。そのために、いわゆる秋優りの生育を示し、比較的到高収が得られるものと考えられる。

一方、F田では、多量基肥が移植後の活着を一時的に遅らすが、活着直後から分けつ増加と地上部生育が急激に進み、発生した茎は細長くなる。したがって、生育初期から葉面積が多く、草冠の田面被覆は強くなる。生育中期以降は、地上部の過剰生育が、相互遮蔽の増大と生産構造の悪化を引き起こして、無効茎や枯死部および根の劣化を多発させる。その結果、生育後期の RGRが相対的に低く、茎の充実不良と穂の小型化が生じる。すなわち、地上部の生育に比べて、穂の発育が相対的に悪くなって、モミ/ワラ比が低くなる。そのために、玄米生産に結びつかない生育の無駄が多い、いわゆる秋落ち型の生育となり、潜在的収量性が十分に発揮できない生産機構になりやすいものと考えられる。

以上のことから、作物学的にみて、水稻栄養体の生育が生育前期において比較的旺盛となる、いわゆる前期生育型のパターンを示す場合には、玄米収量は必然的に限界を持ち、不安定とならざるを得ないものと考えられる。一方、穂の形質の生育が促進される後期生育型のパターンを示す場合には、一穂類花数と登熟が優れて増収が得やすいものといえる。このことを昨今の施肥栽培に適用すると、ある一定の収量レベルまでは、多量基肥により分けつ増進をはかるV字型稲作²⁶⁾にくらべて、生殖生長期に生殖器官の増大をはかる深層追肥稲作⁶⁶⁾が、潜在的な

多収性は高くなるものと考えられる。

(2) 穂数確保型と穂重増大型

品種特性の発現性と生育パターンおよび収量性との関係についてみると、一般に、水稻収量は単位面積当たり初数と登熟歩合の積でほぼ決定され、この両者の間には相反関係があるといわれている。単位面積当たり初数を増大させる方向は、初期生育の促進により分けつ数の増大を図って、穂数確保に重点を置く方向と、初期生育を抑制し、穂の大型化を図って穂の充実に重点を置く方向に大別できる。本研究のN田では穂重型品種が、F田では穂数型品種が多収性を示した。つまり、初数増大の方向として、前者には穂重型が、後者には穂数型が適応されているが、しかし、N田においては両型ともに、初数が比較的少ないことで、穂の大型化に伴うシンクの過大化が起こらない。このことは、穂重型品種の特性が十分に発揮できる場合には、増収の可能性が高いことを表すものと考えられる。そこで、現代、我が国の水稻栽培で主流となっている短程の穂数型品種は、基肥重点栽培を行うと、前期生育型を辿り、必然的に短小穂となって玄米収量が頭打ちしやすいものと考えられる。これらに反して、普通栽培における穂重型品種の利用は、穂の形質増大を主眼として増収を図るためには有効となることが示唆できる。

(3) 光競合回避型と養分競合回避型

水稻栽培において栽植密度が増大した場合の競合要因は、一般に、地上部での光量と地下部での養分量（とくに窒素養分量）である。本研究におけるN田の出穂期の生産構造から判断すると、地上部の相互遮蔽が少なく、群落内への透過光量が多くて、栽植密度の増大が増収に直結することは容易に予想できた。しかし、実際に密度を増大させると、幼穂分化期以降の窒素栄養競合が激しくなり、結果的に穂形質が小型化して密度効果が発現しなかった。一方、F田においても、密度増は生育中期以降の地上部の相互遮蔽を増大させ光競合を激化させるので、無

効分けつと枯死部が増発して密度効果が現れず、密度増が増収に結びつかなかった。以上のことから、密度効果の発現に対する環境要因の制約回避を光競合型と養分競合型に大別して考えてみる。

生育中期の光競合が回避できる生育パターンの場合には、出穂期以降に栄養分を十分に補給すれば、収量性が向上する余地は大きい。他方、生育調整が不良のために、生育早期から光競合が生じる生育パターンをとれば、光競合の回避が困難であることに加えて、穂の形質の充実が悪く必然的に収量は向上しない。一方、光競合がなくて養分競合が幼穂形成期以後に回避できる生育パターンをとる場合には、穂の充実が良好で増収の可能性は高まるものと考えられる。

以上から、養分競合回避型の生育パターンよりも、光競合回避型のパターンが増収効果を高くするだろう。さらに、それぞれの回避型パターンの調節は、種々の栽培事項の改良によって行われるが、それを施肥法との関連性からみると、光競合型生育パターンは主に基肥重点型施肥法によってもたらされ、また、養分競合回避型の生育パターンを取るためには追肥重点型施肥法が有効であることは明らかであろう。

第2節 天然供給窒素の発現パターンと収量性との関係

本研究のN田での玄米生産に必要な窒素量からみて、この水田の一作中には、施肥以外からの窒素、いわゆる天然供給窒素が1㎡当たり少なくとも5.7g以上供給されていると計算された。一方、F田では、施肥窒素量によって第一義的に収量が決定されるので、発現した天然供給窒素の水稻による吸収量は極めて少量に止まり、生産力としての効果も施肥窒素にマスクされてみられない。

一般に、水田での窒素収支計算におけるインプット源として、土壤無機化窒素は天然供給窒素に含まれない。しかし、水稻の栽培学的視点からみれば、この無機化窒素は天然供給窒素の大部分を占めるものである。したがって、実際には、

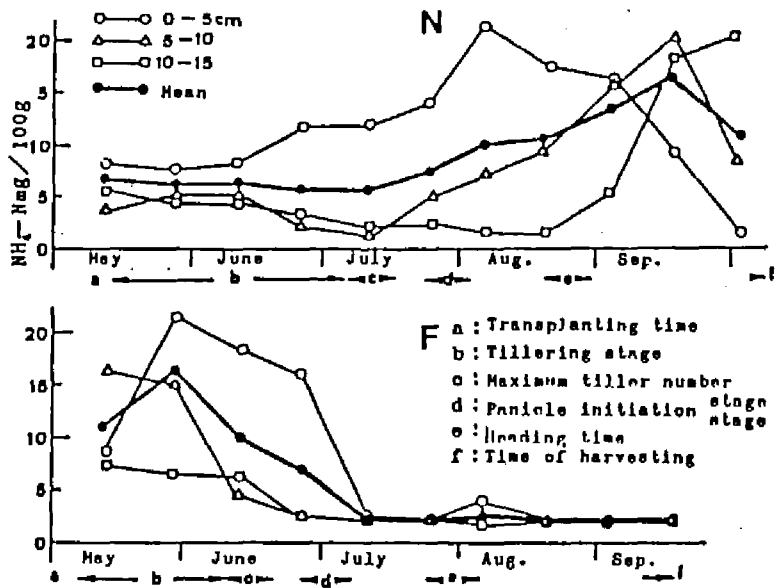


Fig.30. Changes of 10%KCl solution soluble $\text{NH}_4\text{-N}$ in each soil layer of fertilized(F) and unfertilized(N)paddy fields.

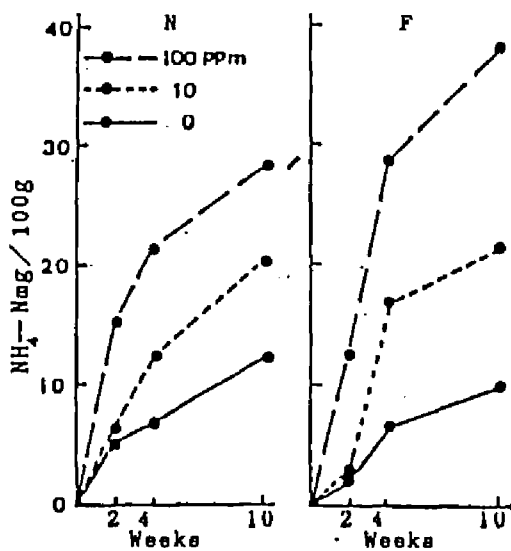


Fig.31. Changes with time in the soil nitrogen ammonification under different ammonium concentration of incubation water, for soils sampled from fertilized(F) and unfertilized(N) paddy fields.

当年度の直接的な天然供給窒素としては、土壤無機化窒素とかんがい水由来の無機態窒素の両者が、主要な供給源としてあげられるだろう。また、生物的固定に由来する窒素も、窒素収支のインプット源として認められていて、とくに最近、無施肥田の水稲根圏における固定窒素が生育収量に影響を及ぼすことが報じられ、この生物的固定窒素も天然供給窒素と考えられる。そこで、本節では、N田における上記3種の天然窒素源の動態をF田のそれと比較して、栽培学的視点から水稲の収量性と関連させて考察を進める。

(1) 土壤無機化窒素の発現と有効性

土壤窒素は、その形態が無機態となって初めて水稲への有効供給源となる。したがって、化学肥料の施用の有無にかかわらず、土壤の全窒素量の多少は、その土壤の窒素栄養に関する生産力の直接的指標にはならない。つまり、その水田の窒素に関する生産力は、土壤の無機態窒素、すなわちアンモニア態窒素の発現量によって決定されると考えられる。第3章で述べたKCl液可溶アンモニア態窒素の時期的変動の調査と同じ方法によって、1983年に、両水田の土壤深度別の可溶アンモニア態窒素の時期的変動を調査して、その結果をFig. 30に示した。上、中、下層の3層平均濃度の推移パターンは、両水田ともにFig. 16にみられたパターンと同傾向を示した。各層別に見ると、N田の発現様相は、水稲の生育が進むにつれて無機化の発現層が地表層から深層に移動し、発現時期は異なるものの最大発現量は3層ではほぼ等しくなり、このN田の土壤窒素の無機化に有効な作土層深は、少なくとも15cm程度にまで達することが分かる。一方、F田では、下層には肥料窒素が混入されていなくて、この水田の窒素無機化に有効な作土層深は約10cm程度であることが認められた。したがって、N田において発現したKCl可溶アンモニア態窒素の作期を通した3層平均の濃度は、Fig. 30によってみると、約6mg/土壤100gであり、さらにこの土壤の仮比重を1.0として計算すると、一作中に発現するアンモニア態窒素量は、このN田では1㎡当たり約9gと

概算される。このアンモニア態窒素量は、F田における施肥窒素量の約60%に相当し、他方、F田の土壤中KCl可溶アンモニア態窒素の大部分が施肥に由来する窒素と考えられる。したがって、F田土壤の無機化窒素の効果は、施肥窒素によってマスクされて外観的に認められない。つまり、それぞれの水田での窒素栄養供給パターンは、N田では地力窒素依存型となり、一方、F田では施肥窒素依存型になっているものといえるだろう。

Fig. 31 に、3章で述べた湛水静置法を応用して、かんがい水供給の窒素濃度が両水田土壤の無機化力に及ぼす効果を比較した結果を示す。湛水静置法における培養湛水に¹⁵N 標識硫酸を添加して、窒素成分が100ppm, 10ppm, および無添加となる3処理区を作り、それぞれにおける真の無機化窒素量を測定した。その結果、N田土壤では湛水の窒素濃度が低い場合には、その無機化量はF田土壤より多くなり、その濃度が高くなるにつれて逆傾向を示した。つまり、低濃度のアンモニア態窒素を含有したかんがい水が掛け流しされるN田において、このかんがい水中の窒素が土壤窒素を無機化させる Priming Effect の高いことを示しているものと考えられる。

以上から、F田の施肥窒素量のほぼ60%に匹敵する土壤の無機化窒素が、N田において土壤から発現する原因は、N田土壤の潜在無機化力が比較的に大きいことに加えて、実際栽培での地温上昇の効果の発現性が顕著であることに求められ、さらに、掛け流しかんがい水由来の窒素が、Priming Effectを通して、N田の土壤窒素の無機化力を高めることも一因になるものと考えられるだろう。つぎに、両水田におけるKCl可溶アンモニア態窒素の時期的変動パターンは、両水田間で著しい違いが見られた。F田では、基肥の多投により、生育初期でその発現が最高となり、水稻の窒素要求が強くなる生育中期から急減し、以降は低水準で推移して追肥による上昇もほとんどみられない。一方、N田では、生育初期はその発現が著しく低く、生育の進行に伴って上昇するパターンとなり、その消長傾向はF田とは逆になった。すなわち、水稻への有効態窒素の供給パターンがF田では

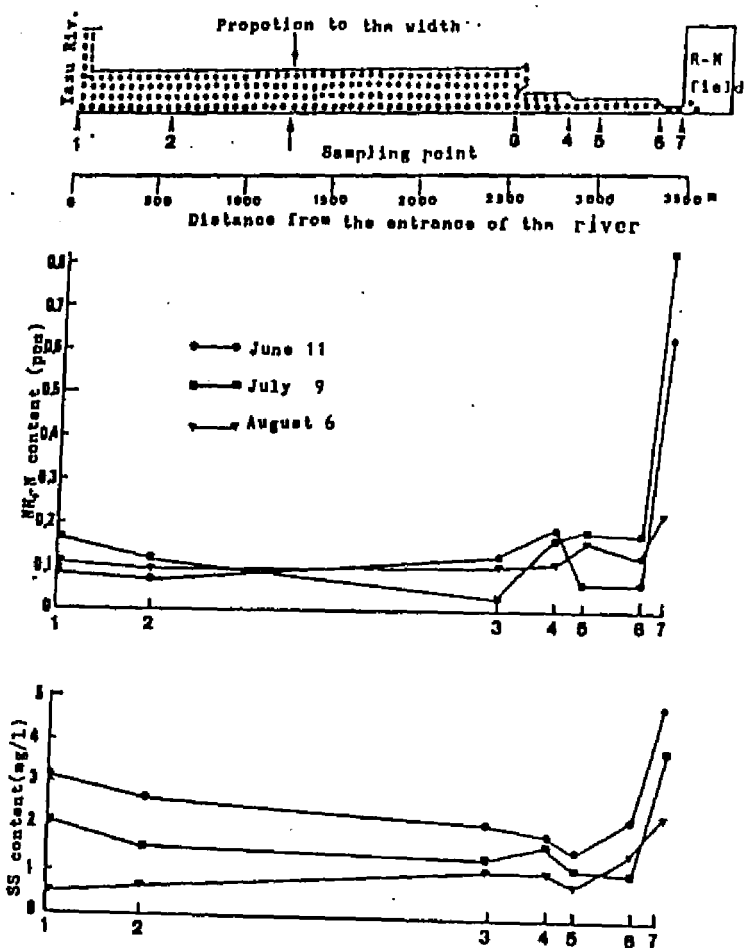


Fig.32. Top: The schematic representation of irrigation stream to unfertilized paddy field(N) and the water sampling points. Middle: Changes with the sampling point along the stream in the NH₄-N content of irrigation. Bottom: Changes with the sampling point in the content of suspended solid (SS) in the water.

前期栄養供給型となり、N田では後期栄養供給型となった。両水田の水稻生育型と対応して、前期栄養供給型のF田では前期生育型となって秋落ちになりやすく、一方、後期栄養供給型のN田では、後期生育型となって秋優りになることが強調される。したがって、N田においては、移植時期が遅れても収量減は生じないが、F田ではそれが著しい減収原因となるだろう。

以上から、現代、我が国の施肥法において、基肥に依存する施肥法は、後期重点型施肥法に比べて施肥効率のみならず、地力窒素の利用面においても不利な施肥法であるものと考えられる。また、近年の水稻作では、安定多収を目標として早植えされる傾向が強く、実際に早植えの増収効果も報告されている⁵⁴⁾。しかし、一般に、早植効果の発現は、生育初期の低温による生長抑制の制約を、多投基肥によって回避して生ずる面が強い。したがって、早植栽培法はエネルギー多投式の窒素損失を無視した栽培となっているものと思われる。

(2) かんがい水由来の有効態窒素の発現性

第4章で述べたように、かんがい水溶存の無機態窒素が玄米生産に及ぼす効果を実験的に定量すると、おおよそF田では10%、N田では50%の増収効果を示し、かんがい水由来の天然供給無機態窒素の生産寄与率はN田で高くなるといえる。

東南アジアの無施肥田における窒素収支を調査したWetselaar⁶⁷⁾は、窒素のインプット源として、かんがい水由来が約1.1kg/10a/年であると計算している。また、我が国においても、年間のかんがい水由来の天然養分が10a当たり250kgの玄米生産を行うと一般的にいわれる。本研究のN田での一作中にかんがい水由来するアンモニア態窒素量は、かんがい水量と溶存濃度から計算して、約1.4kg/10a/作になった。一方、F田では取水量が相対的に少ないので、流入アンモニア態窒素量はN田のその20%程度となるだろう。したがって、そのかんがい水供給アンモニア態窒素のすべてが、水稻体に吸収されると仮定した玄米生産に及ぼす寄与程度は、計算上、F田では極めて小さくなるが、N田では約25%程度にな

ると計算できる。

計算上の寄与程度と前述の実験上の増収効果との差異は、かんがい水溶存アンモニア態窒素が土壌窒素の無機化の程度に及ぼす強さによって生ずるものと考えられる。つまり、流入するかんがい水中のアンモニア態窒素濃度は、水稻の生育初期に高く中期以降で極めて低くなる変動パターンを示す。このことが、前節で述べたように、N田における水稻の初期生育を維持し、低濃度のアンモニア態窒素の絶え間ない補給が、生育後期の土壌窒素の発現を促進してPriming effectを生じさせるので、実験上における増収効果を高めるものと思われる。

上記のかんがい水中アンモニア態窒素濃度の時期的な変動要因を探るために、取水路のかんがい水中アンモニア態窒素濃度を測定し、その結果を Fig. 32 に示した。両水田へのかんがい水は、野洲川から図中の1番地点より基幹水路に分水され6番地点まで巾の広い分水路を流れる。6番地点から7番地点（N田の水口）までの狭いかんがい水路の両側はすべて普通の栽培田となっている。生育初期の6月11日、中期の7月9日、後期の8月6日の3回、それぞれ所定地点の溶存アンモニア態窒素濃度を測定した。生育初期と中期には、6番地点から7番地点に至るまでに、その濃度は異常に増加する。この増加は周囲の普通田への施用基肥と追肥窒素が、かん水路に流出したことによって生じたものと考えられる。つまり、N田へのかんがい水溶存アンモニア態窒素濃度の変動要因が、近隣の施肥田における肥料施用にあるといえるだろう。したがって、立地やかんがい水の上流の環境によってかんがい水中の窒素濃度が著しく異なり、竹内ら⁶⁰⁾が明らかにしたように、このことが無施肥田間における玄米生産力に較差をもたらす原因となることが多いものといえる。このことから、無施肥田における掛け流しかんがいは溶存養分が玄米生産にとってプラスに働く場合と、地温上昇が抑制されて無機化量を少なくするマイナス効果を示す場合があって、掛け流し法の評価は複雑となるだろう。しかし、普通栽培田では、その掛け流し法は施肥窒素の流出を促進するので、実施されるべきでないといえる。

(3) 生物的固定窒素の発現と有効性

Wetselaar⁶⁷⁾は、東南アジアの伝統的な無施肥田における窒素収支のインプット源として、生物的固定窒素量が、年間、10 a当たり1.8～10kgにも達するが、その量は土壌条件によって大巾に変動することを明らかにし、加えてこの固定窒素が、無施肥田での主要な天然窒素の供給源になっている場合の多いことを報告している。しかし、作物栄養学的にみて、当年度の玄米生産に及ぼす固定窒素の直接的効果に関しては言及していない。その理由としては、生物的固定窒素がインプット源としてかなり重要であるにもかかわらず、その窒素の定量が困難であり、かつ、水稻生産への寄与程度が簡単に測定出来ないことによると思われる。さらに、微生物学的にみても、窒素を固定する微生物は種類が多くて、それぞれの微生物活性の決定要因は複雑なものとなる。したがって、本研究における両水田の生物的固定窒素の定量とそれの玄米生産に対する概算的な寄与率の評価は不明とならざるを得ない。そこで、本研究における生物的固定窒素に関する考察は、両水田における微生物の棲息数と水稻根圏でのニトロゲナーゼ活性を、栽培学的視点から比較するに止めた。

一般に、生物的な固定窒素量は、土壌微生物の増殖程度とはあまり関係がなく、むしろ土壌の環境要因の違いによって増減させられ、そのうちで、とくに土壌中のアンモニア態窒素レベルが低いほど普遍的に窒素固定活性が高くなるといわれている。したがって、F田では土壌に還元される有機物量が多いので土壌微生物数は多くなるが、その窒素固定活性は相対的に低くなる。一方、N田では水稻根圏と土壌微生物の窒素固定活性が比較的高まり、固定窒素量は多くなる。そのために、N田での玄米生産に対する固定窒素の寄与程度は、F田のものに比べて著しく高くなるものと推察できる。

以上から、化学窒素肥料が多投される現行水稻栽培では、生物的固定窒素の利用の意義は小さくなるが、投入する無機態窒素量を比較的減らして、生物的固定窒素を活用した省肥型の多収穫栽培法の確立が、今後、我が国においても志向

される必要があると思われる。なお、土壌微生物の活性は投入有機物の量や質によっても影響をうける。したがって、水稻栽培において水田に還元された有機物が示す効果を土壌改良や土壌窒素の富化の面からの検討のみでなく、土壌微生物の窒素固定との関係からの考察を進めることが、栽培学的分野においてかなり重要となるものと思われる。

第3節 窒素収支からみた無施肥田の玄米生産機構とその維持

化学肥料の投入や有機物の還元がない調査対象のN田の玄米収量は、長年に亘ってほぼ 400g/m²のレベルが維持されている。したがって、第2章4節でみたように、このN田における玄米生産に必要な当年度一作当たりの稲体の吸収窒素量は、少なくとも5.7g/m²になると計算できる。ここで、単純にその5.7gの天然供給源の内訳を概算してみると、かんがい水由来の窒素量は、第4章3節において評価したように2.0gを示した。つぎに、生物的固定の窒素量のうち、直接的に吸収されるものとして、水稻根面で固定される窒素のみを取り上げると、第5章1節において示したように、一作の1 m²当たり根によるアセチレン還元量は、7180 × 10⁹ nmol になると評価できた。そこで、理論的にアセチレン還元量と窒素固定量の比率を3 : 1として、1 m²当たりの根面における一作の固定窒素量を計算すると、約 0.68gとなる。したがって、単純に計算すると、当年度の1 m²当たりの玄米生産に必要な窒素量、5.7gのうちの約3 gが土壌の無機化に由来するといえるだろう。さらに、このN田には、その他の由来源が未知の窒素も供給されるが、一応、ここでは、上記の既知の3供給源の玄米生産に対する寄与率を評価してみると、かんがい水由来の窒素が35.0%、地力由来窒素が53.0%、そして根面での生物的固定由来窒素が12.0%となった。

つぎに、N田における長期的な土壌窒素の維持について考える。このN田では、前節で概算したように、土壌窒素が年間9g/m²無機化し、そのうちの3 gが水稻

に吸収されているにもかかわらず、土壌全窒素量は作期中で一旦減少するものの、作期の終りには作期初めの量まで回復した。また、川村¹⁸⁾も、当水田の土壌全窒素量が、1975年から1978年までの4年間、ほぼ一定値を維持したことを報じている。したがって、このN田では一度無機化された窒素、およびなんらかの形でインプットされた窒素のうち、水稻に吸収されなかった窒素が、土壌中で再有機化される割合を大きくすることが推察できて興味深い。なお、水稻に吸収された3gの土壌窒素に対する回復源としては、Table 2 よって刈り株残査由来が約0.5g、Fig. 22よって根圏土壌における生物的固定由来が約3.4gになると概算でき、さらに、他の未知のインプット源の存在もあるので、それらによって、その3gの回復は、十分に賄われるものと考えられる。

第4節 無施肥田の生産機構からみた施肥栽培における窒素施肥法の改善指針 —— 摘要にかえて ——

本研究で取り扱ったN田は、外因的に取り込まれる窒素量からみて予想外の多収性を示した。F田と比較して、このN田の地上部生育とそれを支える窒素供給動態が以下のような特徴を持ち、それらが体系的に組み合わされて、多収原因になっているものと考えられる。

1. 初期生育が抑制されるが、このことが生育後期において、調整可能な後期生育型の生育パターンをとり、多収性の秋優り的生育につながる生産機構となる。
2. 出穂期におけるイネの姿勢と太陽光の株もとへの透過量が良好となり、地力窒素の発現に直結する地温上昇を大きくすると同時に、葉の充実が良好で、光合成量が高く維持される生産構造を示す。
3. 出穂期から登熟期にかけてのシンクとソースのバランスが相対的に良好となり、モミ/ワラ比を高くするので、吸収窒素の生産効率が大きい無駄の少ない生産機構となる。

4. モミ数確保が穂の充実に重点を置いた生育パターンと、それに対応した穂重型品種の栽培によってもたらされ、登熟歩合も相対的に高くなる。

5. 天然窒素供給パターンに見合った適切な栽植密度で栽培すると、全生育期間を通して光合成が生じ難い生育パターンとなり、一定の穂数が確保されて玄米生産が行われる。

6. このN田土壌は潜在的な無機化力が大きい性質を持ち、加えて、窒素供給源となる作土層が厚い。したがって、実際の水田での土壌無機化窒素の発現量は、施肥田における施肥由来の窒素量のほぼ60%に達し、その収量は低いものの、水稻が必要とする窒素を十分に賄う能力を有する。

7. 土壌無機化窒素が水稻の生育後期にピークを示すパターンで発現し、この発現パターンが水稻の窒素要求パターンに合致して、秋優り的生育を支えている。

8. 掛け流しかんがい水供給の有効態窒素が、生育初期には水稻に直接吸収されるが、生育後期には、その溶存窒素が土壌窒素に対してPriming Effectを発現させるので、土壌窒素の無機化が富化される。また、生物的固定窒素の発現が大きく、その発現パターンが水稻の窒素要求とかなり一致している。

以上から、現行の施肥栽培において、潜在的収量性を最大限にまで発揮させる栽培法への指針として、結論的につぎのことが指摘できる。

まず第一に、生育パターンが後期生育型となり、秋優り的生育をとる栽培が極めて重要となる。そのような栽培には、窒素の多投を抑制し、生育中期以降で、追肥による生育調整が可能となる窒素の少量基肥とする。第二は、モミ数確保は、主に穂の充実と一穂穎花数の増加の方向で行うことである。これは、モミ/ワラ比の高い生産構造を形成することによって達成されるが、このための施肥は、深層追肥のような追肥重点型にすることであるだろう。また、栽培品種は、その施肥法に対応して品種特性が十分に発現できる穂重型品種の採用をもう一度考慮する必要がある。第三は、窒素多投からもたらされる生産過剰を回避し、さらに省エネルギー型施肥法を確立するために、地力窒素を十分に活用した栽培法が行

われる必要があろう。そのためには、生育初期の生育抑制と生育中期以降での光競合の激化を避けた栽培の必要性のために、適正な栽植密度の栽培を行い、窒素の施肥法としてより合理的な分施肥法の開発が必要と考えられる。

第9章 要 約

近年、我が国の水稲栽培は、多種の化学肥料と合成農薬が世界に類をみないほどに多投され、そのことを基盤にして安定多収を狙う省力栽培技術が確立されて普及している。その成果も全国的に目覚ましく、窒素肥料の多投化が玄米収量を飛躍的に向上させている実際的事例は多い。したがって、窒素の水田への多投は、施肥効率を度外視して増収効果のみを強調し、その多投が農業生産上のみならず、農業以外で引き起こしている問題は全般的に考慮されてこなかった。

一方、ごく一部であるが、水稲の多肥多農薬栽培に対して、栽培様式とその目的を異にする無施肥無農薬栽培の行われる水田が全国に散在する。この栽培法は、生産性向上が主目的となる栽培学の立場からみれば、重要性に欠けて異端的であるが、そのうちには化学肥料施用は勿論のこと、稲わら還元さえおこなわれない極端な無施肥栽培田も存在する。

1975年以来、著者は、多肥多農薬水田に囲まれて、小面積で長年に亘ってつけられている数筆の長期無施肥無農薬栽培水田において、その水稲の玄米生産機構を実態調査して来た。このような水田は一般に水稲栽培に関する知識と諸技術が応用できる余地を持たない。したがって、それらの水田の科学的な実態調査やそれに関する栽培学的な研究報告は今までに行われていないので、その水田での玄米収量は必然的に極めて低くなるものと考えられてきた。しかし、著者の実態調査の中で、投入窒素量が外見的に皆無である水田の玄米収量が予想以上の多収となる事例を認めた。この事実が、本研究に着手させる契機となった。

本研究の目的は、上記の無施肥田における玄米生産機構と天然からの窒素栄養の発現との関係を解明すると同時に、得られた知見を比較栽培学的視点より検討して、化学肥料が多投される現行の水稲栽培上で、多施肥によって発生する諸問題を解明することである。すなわち、無施肥田の生産性を維持する窒素養分に関

係する要因とその発現様式をまず解析して、それらの諸要因が施肥田と無施肥田での玄米生産に及ぼす栽培学的効果を比較した。その結果にもとづいて、結論的に多肥多農薬栽培での窒素栄養の得失を解明し、今後の温暖地の水稻栽培における窒素供給または窒素施肥の指針を明らかにしたものである。

第1章は緒言であり、本研究の目的とその背景となる問題点、および本研究の水稻栽培上での意義を論述した。

第2章では、現地の施肥および無施肥の両水田の栽培史とその土壌特性を述べ、それらの水田における栽培試験によって水稻体諸形質と玄米収量を比較検討し、無施肥栽培水稻の生産機構が秋優りの生育を示して、これが立毛検査で認めた無施肥田の予想外の高収性をもたらす原因であることを明らかにした。すなわち、無施肥栽培では、水稻の地上部形質が、とくに生育後期で顕著に増大すると同時に、イネの姿勢や体内窒素含有率およびT/R比などが施肥栽培水稻に比べて良好となり、穂の充実を向上させ、さらに、供給窒素量が相対的に少ないにもかかわらず、吸収窒素の玄米生産効率が施肥田のものに比べて約50%ほど高くなって、10アール当たり400kg程度の収量性を示すことを明らかにした。一方、施肥田の生産機構は、生育初期での過剰生育と出穂後の生育の相対的低下のために、とくに穂の充実不良が生じて本来的に、いわゆる秋落ち型となる体制となっている。したがって、基肥重点栽培では、窒素栄養の肥効や生産効率が、必然的に低下する生育パターンを取ることを明らかにした。

第3章では、窒素の主要な天然供給源である土壌窒素に関して、両水田での様相を、土壌学的に検討した。すなわち、湛水静置法により両水田土壌の無機化力を比較し、その土壌無機化に関与する地温、土壌pHと土壌Ehの土壌環境要因の時期的変動を調査した。さらに、土壌中の全窒素、水溶性とKCl液可溶性の

アンモニア態窒素の3形態の窒素の消長を、室内分析を通して作物栽培学的視点から検討した。湛水静置法による土壤窒素無機化量は施肥田土壤よりも無施肥田土壤で多くなり、潜在的な無機化力は無施肥田が大きくなることが分かった。土壤環境要因のうち、地温は無施肥田が全般的に高く推移し、地温と無機化窒素の発現性とは強い関係のあることが示唆された。土壤 pHは施肥田が相対的に高く、土壤Ehはかんがい水量と還元された有機物量によって変動したが、これらの要因は、土壤窒素の無機化力には直接的関係を示さなかった。土壤中の3形態の窒素のうち、全窒素量と水溶出性アンモニア態窒素量は、両水田ともに水稻の生育・収量を支配する要因にならないことを明らかにした。しかし、置換により土壤コロイドから溶出されるアンモニア態窒素は、とくに無施肥田では水稻の生産力に直結する要因であることをあきらかにした。そのことに加えて、その窒素の時期的変動パターンが両水田において対照的推移を示し、このことが、両水田の水稻生育パターンと対応的であることを認めた。

第4章では、かんがい水の供給窒素養分について、単年度の水稻生育に直接的影響を与える溶存アンモニア態窒素と懸濁物質(SS)に代表される有機態窒素とに分けて、それぞれの窒素の供給の様相と収量に及ぼす影響を現地水田における実験を通して栽培学的に比較検討した。かんがい水の推定流入量と溶存アンモニア態窒素濃度から計算して、一作中に水田へかんがい水によって供給されるアンモニア態窒素量は無施肥田が多くなり、したがって、かんがい水由来の天然窒素の玄米収量への寄与率は、無施肥田が35%となり、施肥田のそれに比べてかなり高くなった。また、無施肥田では、掛け流しによって生育後期まで低濃度のアンモニア態窒素がかんがい水によって供給される。このことが、無施肥田での秋優り生育に直接貢献すると同時に、Priming Effectを通して、土壤窒素由来の天然供給窒素量を富化させる一因となることが示唆された。一方、施肥田におけるかんがい水中溶存窒素の効果は、栽培学的にみて小さいことが明らかとなった。

かんがい水によって供給されるSS量は、無施肥田で相対的に多くなったが、そのSSの影響は、両水田ともに水口付近のごく限定された位置でのみ発現するので、SSの窒素栄養の栽培的効果は、当年度に限ってみると両水田ともに小さいことが判明した。しかし、長期的にみればその効果はかなり大きくなるといえた。

第5章では、生物的固定窒素の発現と有効性に関して、アセチレン還元法によって土壌と水稻根圏の窒素固定能を両水田間で比較し、さらに現地水田における好気性窒素固定菌とらん藻の棲息数の変動を調査した。水稻根面と土壌の窒素固定能は、全般的に無施肥田が施肥田よりも高くなった。そのために、とくに水稻根圏における固定窒素は無施肥田では玄米生産要因として重要性を持つが、施肥田では施肥窒素が、それらの固定能を抑制して、その固定窒素の栽培的重要性は極めて小さくなることが推察できた。土壌中の好気性細菌とらん藻の棲息数は全般に施肥田が多くなったが、それらの微生物の固定窒素は、両水田土壌のアセチレン還元力の大きさから見て、両水田ともに極めて少量に止まることが分かった。

第6章では、両水田における移植の早晚と栽植密度が玄米収量に及ぼす影響を、それぞれの水田での窒素供給パターンと関連させて検討した。玄米収量に対する早植効果は、施肥田で基肥の影響を強くうけて発現したが、無施肥田では、無機化窒素の供給が生育初期は少ないので、その効果はまったく現れなかった。玄米収量に対する栽植密度効果は両水田ともに現れなかったが、その作物学的原因として、施肥田では光競合の激化によって穂が小型化することがあげられた。一方、無施肥田では窒素養分の競合が強まり、有効穂数の減少と穂の小型化によって密度効果が発現しないことが認められた。

第7章では、両水田において生態的特性の違う6品種を比較栽培して、それぞれの品種特性の発現性と窒素供給パターンとの関係を分析し、長期に亘って無施

肥田で栽培されてきたベニアサヒ品種の有利性の原因と、無施肥田に適応性が高く増収が期待できる良質米品種の導入の可能性とを検討した。その結果、無施肥田では、有効態窒素の供給が生育後期に高まるので、晩生の穂重型品種が秋優的生育を示して収量性が優るが、一方、施肥田では、茎数増加の大きい穂数型品種が収量性を高くすることが明らかとなった。

第8章は総合考察である。施肥、無施肥田における水稻の生育パターンと収量性の差異を、施肥窒素ならびにかんがい水、土壌および生物的固定に由来する天然供給窒素の発現動態と関係づけて考察し、その結果に基づいて、現行の施肥栽培における窒素の施肥法の改善方針を論究した。すなわち、無施肥田の生産力は、生育前期の養分競争をさけて、穂形質の増大に重点を持つ後期生育型の生育パターンによって発現し、その生育型を支えるように、天然供給窒素が発現することで維持されていることを強調した。したがって、普通栽培における収量向上に向けての最適な施肥法としては、少量基肥による穂重増大を目指す施肥体系、つまり、適量追肥の有利性が明らかであって、このような施肥体系に適する品種の栽培が、今後の水稻作においては追及されるべきことを明らかにした。

引用文献

1. ALLISON F.E. 1973. Soil Organic Matter and Its Role in Crop Production : 76-205.
2. 秋元真次郎 1939. 水稻に於ける稲熱病罹病性に対する生理学的研究(予報). 日作紀 11 : 165-167.
3. CASTRO K.I. and TOKIO YOSHIDA 1977. Nitrogen fixation throughout growth and Varietal differences in nitrogen fixation by the rhizosphere of rice planted in pots. Plant and Soil 48 : 613-619.
4. 右吉佐和子 1975. 複合汚染(上). 新潮社、東京 : 170.
5. 出井嘉光 1975. 水田における有機物の集積と分解. 土肥誌 46 : 251-254.
6. 江原 薫 1970. 栽培学大要. 養賢堂、東京 : 50-51.
7. 福岡正信 1975. わら一本の革命. 柏樹社、東京 : 7-46.
8. GRIST D.H. 1965 Fertilizers and Manures, Rice : 218-225.
9. HARDY R.W.F., R.D. Holsten, E.E. Jackson and R.C. Burns 1968. The Acetylene - Ethylene Assay for N_2 Fixation : Laboratory and Field Evaluation. Plant Physiol, 43 : 1185-1207.
10. 長谷川 浩・竹内史郎・奥村俊勝 1979. 長期無施肥田における水稻の位置的変動(Ⅱ). 近畿大農学部紀要 12 : 109-115.
11. ———— . ———— . ———— 1981. 自然農法の栽培科学的調査研究. 自然農法研究 : 163-170.
12. 広瀬春明 1973. 各種植物遺体の有機態窒素の加水態土壌における無機化について. 土肥誌 44 : 157-163.

13. 星野達三・柿木 彰・佐竹徹夫 1957. 築地に於ける水稻栽培の解析的研究. 日作記 26 : 89.
14. 石井龍一・角田公正・町田寛康 1972. 作物の生育・収量に及ぼす栽植の不均一性の影響に関する研究(第2報). 日作記 41 : 57-62.
15. 角田重三郎 1953. 水稻の肥沃地向品種と瘦地向品種との比較. 日作記 21 : 209-210.
16. 神田巳季男・柿崎洋生 1956. 水稻の栽植密度に関する個体群生態学的研究(予報). 日作記 25 : 59.
17. 川口桂三郎 1977. 土壌学概論. 養賢堂、東京 : 52-242.
18. 川村三郎・中島照夫 1979. 長期無施肥水田土壌における二、三の植物養分の動態について. 近畿大学農学部紀要 12 : 157-169.
19. 川山信一郎 1976. 日本作物栽培論. 養賢堂、東京 : 73-219.
20. 香山俊秋・宮坂 昭・江口和雄 1962. 渾田における水管理に関する作物学的研究VI. 日作記 30 : 143-145.
21. KIRA T., H. OGAWA and H. SAKAZAKI 1953. Interspecific competition among higher plant. 1. Jaur. Inst. Polytech. Osaka City Univ. D1 : 1-16.
22. 京大農芸化学教室 1969. 農芸化学実験書. 産業図書、東京 : 251.
23. HATUSHIHA S. 1962 Some Experiments on Soil-Water-Plant Relationship in the Cultivation of Rice. 日作記 31 : 115-121.
24. 松尾英俊 1978. FAOから見た肥料の現状と展望. 土肥誌 49 : 39-51.
25. 松尾孝嶺・角田重三郎 1950. 草型を異にする稲品種の硫酸施用並びに栽植密度に対する反応. 日作記 19 : 94-98.

26. 松島省三 1973. 稲作の改善と技術 養賢堂、東京 : 10-68.
27. ———・真中多喜夫 1959. 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究 (L1). 日作紀 27 : 432-434.
28. HILLBANK J.W. 1974. The Biology of Nitrogen Fixation : Association with blue green algae : 238-264.
29. HISHIOSHIN E.N. and V.E. SHILNIKOVA 1971. Nitrogen Fixation by Blue-Green Algae Biological Fixation of Atmospheric Nitrogen : 284-309.
- 30 三浦隆攻楼 1933. 排水地と停滞水地との稲田に於ける水稻の根の発育関係 日作紀 5 : 305-313.
31. HIYASAKA A. 1964. Effect of Drainage on CO₂ Exchange and Some Characters Related to Grains Yield of Rice Plant. 日作紀 33 : 90-93.
32. 宮川修一・名取一好・渡部忠世 1978. 水稻根群における窒素固定能力の品種間差について. 近畿作育会報 23 : 9-12.
33. 村山 登 1974. 近年における水稻収量水準の向上と施肥の効率(1). 農業技術 29 : 298-302.
34. ——— 1974. 「水稻の収量限界向上に対する研究」の結果からみた収量(2) 日本作物学会 158回講演会シンポジウム要旨 : 27-28.
35. 野口彌吉 1931. 稲の開花に対する外界の影響について (続報). 日作紀 3 : 22-23
36. 野島致馬・田中市郎・上村幸正 1962. 排水が水稻の生育に及ぼす影響 (第1報) 日作紀 30 : 321-324.
37. 生越 明 1975. 土壌微生物実験法 養賢堂、東京 : 21-27.
38. 奥村俊勝・竹内史郎・長谷川 浩 1982. 水稻に対する窒素の深層追肥効果に対する研究 (第2報). 日作紀 51 : 58-64.

39. _____ . _____ . _____ 1979. 無施肥田における水稻の生育・収量に及ぼす栽植密度の影響. 近畿大農学部紀要 12 : 127-134.
40. _____ . _____ . _____ 1981. 長期無施肥田における掛け流し灌漑の効果. 近畿作育会報 26 : 10-14.
41. _____ . _____ . _____ . 小島 仁 1981. 長期無施肥田と施肥田の水稻根圏における窒素固定能の比較. 近畿作育会報 26 : 6-9.
42. _____ . _____ . 平松 求. 1982. 水稻栽培における肥料成分の流出について (第2報). 近畿作育会報 27-47.
43. _____ . _____ . 長谷川 浩. 1982. 無施肥田と施肥田における土壌窒素の無機化量の比較. 近畿作育会報 27 : 81-84.
44. 鬼鞍 豊・吉野 喬・前田乾一 1975. 稲作期における土壌窒素の有効化過程. 土肥誌 46 : 255-259.
45. 小野存二郎 1931. 稲品種間の耐旱性と土壌水分欠乏に対する形態学的及び生理学的特性並びに収量の変化に就いて. 日作紀 3 : 91-116.
46. 大西俊夫・石立 広・奥村俊勝 1979. 無施肥および施肥田産米の理化学的特性と食味. 近畿大農学部紀要 12 : 149-155.
47. 大山信雄 1975. 暖地水田における地力窒素の発現様式. 土肥誌 49 : 297-302.
48. 長田明夫・村田吉男 1965. 水稻の葉面積当たり光合成能力の品種間差と乾物生産. 日作紀 33 : 454-459.
49. _____ . _____ 1965. 水稻品種の光合成と耐肥性に関する研究 (第3報). 日作紀 33 : 460-466.
50. _____ . _____ 1962. 水稻品種の光合成と耐肥性に関する研究 (第1報). 日作紀 30 : 220-223.

51. 小山雄生 1975. ^{15}N 利川による水田土壌窒素肥沃度測定の実験と生産力 土肥誌 46
260-269.
52. PATRICK Wm. H. Jr. and I. C. Mahapatra 1968. Transformation and availability to
rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*
20 : 323-355.
53. ROVIRA A. D. 1965. Plant root exudates and their influence upon soil microorg-
anisms. *Ecology of Soil Born Plant Pathogens* : 170-186.
54. 佐木啓智・杉木勝男・宇田昌義・鈴木喜一郎 1959. 栽培時期を異にする水稻の生育
経過に関する研究. 日作記 27 : 333-336.
55. 佐野芳雄・広田幸敏 1979. 窒素固定するイネの研究. 自然 10 : 92-101.
56. 深城貞義 1933. 稲の水田に於ける培養液の酸度濃度並びに含窒素塩類の形と分蘗と
の関係. 日作記 5 : 142-147.
57. 武田友四郎・広田 修. 1970. 水稻の栽植密度と子実収量との関係. 日作記 40 :
381-385.
58. 高橋英一 1974. 比較植物栄養学. 養賢堂、東京:1-10.
59. 高橋保夫・岩田岩保・馬場 勉 1959. 水稻品種の耐肥性に関する研究 (第1報)
日作記 28 :22-24.
60. 竹内史郎・奥村俊勝・長谷川 浩 1979. 無施肥田と施肥田における水稻の生育反応
の差異. 近畿大農学部紀要 12 : 135-140.
61. 田中 稔 1976. 知作農法の原理. 農文協、東京 : 54-55.
62. 柘植利久・松本貞義 1979. 水稻の長期無施肥栽培田の土壌に関する知見. 近畿大学
農学部紀要 12 : 171-188.
63. 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎・斎藤公夫・新保 到 1971. 水田における窒素の動
態と水稻による窒素吸収について (第3報). 日作記 40 : 287-293.

64. ———— . ———— . ———— 1971. 水田における窒素の動態と水稲による窒素吸収について(第1報)、日作紀 40 : 275-280.
65. ———— . 松島省三 1962. 水稲収量成立原理とその応用に関する作物学的研究(LXI) 日作紀 31 : 15-18.
66. 和田 定・工藤哲夫 1966. 深層追肥による水稲品種の反応に対する研究 I. 日作紀 34 : 425-431.
67. WEISLAAR R. 1981 Nitrogen input and outputs of an unfertilized paddy field. Terrestrial Nitrogen Cycles Ecol. Bull. 33 : 573-583.
68. WESTERMAN R. L. and KURZ L. T. 1973. Priming Effect of N-labeled fertilizers on Soil Nitrogen in Field Experiments. Soil Sci. Soc. Ameri. Proc. 37 : 725-727.
69. 山田 登 1977. 東南アジアの稲作(5). 農業技術 32 : 71-76.
70. 山田常雄 1960. 生物学辞典. 岩波書店、東京 : 476-477.
71. 山根一郎 1982. 水田土壌学. 農文協、東京 : 308-341.
72. 山下鏡一 1978. 水田における有機物の効果と問題点. 土肥誌 49 : 52-60.
73. 山室成一 1986. 表層および全層施肥 $\text{NH}_4\text{-N}$ と土壌無機化窒素の有機化、脱窒および水稲による吸収. 土肥誌 57 : 13-22.
74. 飯田隆治・熊沢喜久雄・折谷隆志 1974. 水稲葉における $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の同化過程におよぼすサイトカイニンの影響について. 日作紀 43(2) : 117-118.
75. 吉田武彦 1975. 多肥集約農業 -- その伝統と評価. 科学 45 : 616-621.
76. ———— 1978. 水田軽視は農業を亡ぼす. 農文協、東京 : 114-119.
77. 吉田富男 1975. 生物圏での空中窒素の固定. 化学と生物 13 : 80-87.

78. YOSHIDA T. and ROSABEL R. ANCAJAS 1973. Nitrogen Fixing Activity in Upland and Flooded Rice Fields. Soil Sci. Soc. Ameri. Proc. 37 : 42-46.
79. 吉野 実 1977. わが国における湖沼の富栄養化と農業. 農業技術 32 : 7-12.
80. 吉野 喬・出井嘉光 1972. 水田土壌の窒素の有効化過程に関する研究(第2報) 土肥要旨集. 18 : 28.

Comparative agronomic studies of unfertilized and fertilized rice crops in relation to nitrogen dynamics

Summary

In the recent rice production in Japan, large amounts of fertilizers and chemicals are generally applied. Although nitrogen fertilizers have brought a remarkable effect on the rice yield, they may become a source of environmental pollution and give rise to many problems in rice culture.

On the other hand, it is sometimes recognized that paddy fields in which commercial fertilizers, composts and any kind of agriculture chemicals have not been used for a long time. Those fields have not produced a higher yield on an average. However, the unfertilized paddy field at Ritto Shiga, on which the surveys of the present study have been made, produced actually 400kg/10a of brown rice yield almost every year. Therefore, the clarification of production mechanism on this field appears to be useful for the development of a more effective and efficient fertilizer management method.

Comparative surveys have been made on rice production processes between at this unfertilized field(N field) and at traditional fertilized one(F field). It is the main purpose of this paper to clarify how to gain such

a high yield at the N field and what to be the relation between production mechanism and nitrogen dynamics, and find, as a goal, solutions to the problem on the fertilizer managements.

This paper consists of nine chapters. The first chapter is the introduction, and describes the purpose of this study.

In the second chapter, comparison was made of the growth attributes and the yields between both fields. It became clear that, the growth of rice at the unfertilized field was initially poor, but it became more and more vigorous at later stages and the final yield unexpectedly high(Fig.8), showing a growth type of autumn vigor. On the contrary, the crop at the fertilized field showed an excessive vegetative growth, and its growth declined at later stages, showing a typical pattern of autumn decline of the growth. The final yield at the fertilized field was, thus, restricted to the level of 550kg/10a, while that at the unfertilized field was about 400kg/10a.

In the third chapter, firstly, the degree of mineralization of soil nitrogen was compared for both field soils by use of submerged incubation method. This value in the N field was higher than that in the F field(Fig. 9). Accordingly, it became clear that the brown rice yield at the N field was significantly influenced by

the mineralized nitrogen(Fig.10). Secondly, comparisons between the F and N fields were made of ammonification dynamics of soil nitrogen and of soil characteristics of soil temperature, soil pH and redox potential(Eh). It was proved that the soil at the N field had relatively enormous ammonification, and that the soil temperature at the N field was higher than that at the F field over the cropping season(Fig.11). The soil pH and Eh had little relation to the ammonification(Fig.12&13).

Subsequently, the three forms of soil nitrogen, the total nitrogen, water soluble $\text{NH}_4\text{-N}$ and 10% KCl solution soluble $\text{NH}_4\text{-N}$, were investigated in relation to the crop growth patterns. The amounts of water soluble $\text{NH}_4\text{-N}$ and total nitrogen had not an immediate connection with the productivity. The strongest relation was observed between the volume of exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ (KCl soluble) and the growth pattern of the crop. The exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ increased at later growing period at the N field, which resulted in the yield increase(Fig. 16).

In the fourth chapter, the results of investigation on the effects of naturally supplied nitrogen from irrigation water upon the crop were described. The effect was analyzed by dividing it into direct and indirect effects. On the direct effect, the N field received eight times as much the water supplied nitrogen over a

year as the F field, most of which was supplied at early growing season (Fig. 19). Since the effect of fertilizer on the crop at the F field was much greater than that at the N field, the nitrogen from irrigation water had little effect on the rice production at the F field (Table 4). On the indirect effect, the amount of suspending substance in the irrigation water and the priming effect of the irrigation water on the mineralization of soil nitrogen were larger at the N field than at the F field (Fig. 18).

In the fifth chapter, the relation between biological nitrogen fixing activity and the level of soil nitrogen was investigated on both the fields by use of acetylene reduction method. The nitrogen fixation activity of rice rhizosphere was about 100 times as much as that of the paddy soil. The activity of the rhizosphere was significantly higher at the N field than that at the F field (Fig. 22), whereas the activity of the soil was not significantly different between the two fields (Fig. 22).

The numbers of nitrogen fixing soil micro-organisms were larger at the F field than at the N field, but the effect of them on the crop productivity was not so largely different between both fields (Fig. 23, 24 & 25).

In the sixth chapter, effects of planting density and transplanting time on the rice yield were examined at both the fields and the possibility of yield in-

crease in the N field was discussed. A remarkable effect of early transplanting was observed at the F field because of a large amount of basal dressing, while at the N field any appreciable effect of it was not observed (Table 6).

The increase of planting density did not increase the rice yield at both fields, because the amount of available ammonium nitrogen released from soil was limited at the N field and the mutual shading was intensified at the F field. As a consequence of the above factors, the size of panicles became smaller with increasing the density (Table 8).

In the seventh chapter, the growth and yield characteristics of ecologically different rice cultivars were investigated in relation to the dynamics of applied and naturally supplied nitrogens at both the fields, and possibility of introduction of high quality rice cultivars into the N field was discussed. It became clear that Beniasahi, a late maturing variety, had a higher adaptability to the N field in general (Table 11), because it could efficiently utilize the mineralized ammonium from soil at the later growth stage. Since high quality rice Koshihikari belongs to the same ecotype as Beniasahi, a late maturing and panicle weight type, it is suggested that this cultivar should also show a high adaptability to the N field.

The eighth chapter is general discussion, in which growth and developmental patterns of fertilized and unfertilized rice crops were compared and discussed in relation to the nitrogen dynamics of both fields. It was postulated that the growth pattern of autumn vigor type observed at the N field has higher possibility to break down the barrier of rice yield increase than that of autumn decline type of the fertilized crop. It was emphasized that autumn vigor growth pattern of rice at unfertilized paddy field was realized by the coincidence of the mineralization pattern of soil nitrogen and the pattern of nitrogen demand of the cultivar.

The ninth chapter is summary and conclusion. From the comparative studies on rice crop growth and nitrogen dynamics at the fertilized and the unfertilized paddy fields, important suggestions were derived for further studies to break the barriers of yield increase and to develop a more efficient and effective way of managements of fertilized rice crop.

These are;

1. To pay more attentions to the growth characteristics and the cultivation method of late maturing and panicle weight genotype than the prevailing panicle number types.
2. To establish an effective method of split application

of nitrogen fertilizers with a small basal dressing, so as to realize the crop growth pattern of 'autumn vigor' type. The fertilizer topdressing into deeper soil layer is one of the very promising ways to this.

3. To develop a more effective method of utilization of naturally supplied nitrogens through the mineralizations and biological fixations.

4. To adopt a suitable planting density in order to promote the soil nitrogen mineralizations by highering soil temperature and to avoid heavy mutual shading at later growth stages.