

南九州における水稲低農薬栽培に関する生産生態学的研究

2. 普通期水稲作における窒素施肥量と栽植密度に対する生育反応と収量性

中釜明紀・松元里志・平山あゆみ*・日高義継**・増田弥生***

(1998年10月10日受理)

Ecological Studies on the Productivity of Rice Plant under Low Pesticide Condition in Southern Kyushu

2. Growth Response and Yielding Ability to Amount of Nitrogen Applied and Planting Density in Normal Season Culture of Rice Plant

Akinori NAKAGAMA, Satoshi MATSUMOTO, Ayumi HIRAYAMA*,
Yoshitsugu HIDAKA** and Yayoi MASUDA***

緒 言

南九州の普通期水稲作では、病虫害発生と被害に関してとくに水稲生育初・中期の海外飛来性害虫が注目されることを前報¹⁾で報告した。これら害虫はいずれも、その発生量と窒素施肥量との関係が明らかで、九州地域における既往の研究結果^{2, 3, 8, 13)}と同様に、窒素施肥量の多い区で被害が増大することが認められた。この結果から水稲の適正な窒素吸収形態と海外飛来性害虫の水稲被害回避を組み合わせた栽培体系確立の可能性を指摘した。

環境保全に留意しつつ水稲の生産水準を維持するためには、総合的防除とくに生態的被害回避による農薬使用量の低減と同時に、作物の養分吸収率を高めて、化学肥料投入量を抑制することの重要性が指摘されている⁹⁾。水稲が吸収する窒素に占める地力窒素の割合は6~7割に達し、施肥由来の窒素より多く^{5, 19)}、九州では地力窒素の多くが普通期水稲の幼穂形成期以降に吸収利用される²⁰⁾ことが知られている。したがって、普通期水稲作において化学肥料投入量を低減するためには、適正な基肥窒素施用量により初・中期の水稲群落態勢を規制し、生育中後期の地力窒素を主体にする吸収窒素の子実生産に対する部分生産能率⁷⁾を高めることが必要である。すなわち、水稲の栄養生長量と生殖生長以降の群落態勢の均衡が重要であると考えられる。

南九州普通期水稲作では、水稲の生育初中期が梅雨期に当たり温度、日照条件の変動が栄養生長に影響する。本報告では、温度、日照条件の変動が大きかった1992年から1994年までの3年間につ

* 現在, 大口農林事務所

Present address; Okuchi Agricultural and Forestry Administration Office

** 現在, 福岡県農業共済組合連合会

Present address; Fukuoka Prefecture Agricultural Insurance Federation

*** 現在, 徳之島農業改良普及所

Present address; Tokunosima Agricultural Improvement Advisory Center

いて窒素施肥量と栽植密度の組み合わせが、栄養生長に及ぼす影響およびそれと生殖生長期の穎花数成立過程、登熟との関連について検討した。同時に、前報で報告した発生害虫による水稻収量への影響についても考察を加えた。

材料および方法

実験は、1992年、1993年および1994年の3年間、鹿児島大学附属農場水田で行った。試験区は、窒素施肥量を3kg/10a (N 0.5)、6kg/10a (N 1.0)および9kg/10a (N 1.5)の3水準、栽植密度を22.2株/m² (D 22)と11.1株/m² (D 11)の2水準とし、これらを組み合わせた6区を2反復とした。ただし、1992年の窒素施肥水準は、N 0.5とN 1.0の2水準であった。3年とも、低農薬条件として、農薬使用を移植50日後(1992年)または30日後(1993年、1994年)にいずれもパダン粒剤を散布した。1993年と1994年では、低農薬条件の対照区として防除区を設定し、粒剤(アドマイヤー、パダン)を3~4回防除適期に散布した。

供試品種は、3年ともヒノヒカリで、1992年では6月8日、1993年、1994年では、6月7日にいずれも1株3本植えとした。

水稻の栄養生長期、幼穂形成期、出穂期に各区5~10株を無作為に抽出して、葉面積と器官別乾物重を測定し、生長解析を行った。1992年と1993年では、幼穂形成期の器官別窒素含有量をセミミクロケルダール法により測定した。

成熟期に各区10株を無作為に採取、風乾後に1株全茎について、一次枝梗数、二次枝梗数および一穂穎花数とそれぞれの退化数を調査し、それぞれの分化数と退化率を算出した。登熟歩合は、1.03の塩水で比重選を行い、登熟粒について5反復で千粒重を測定した。

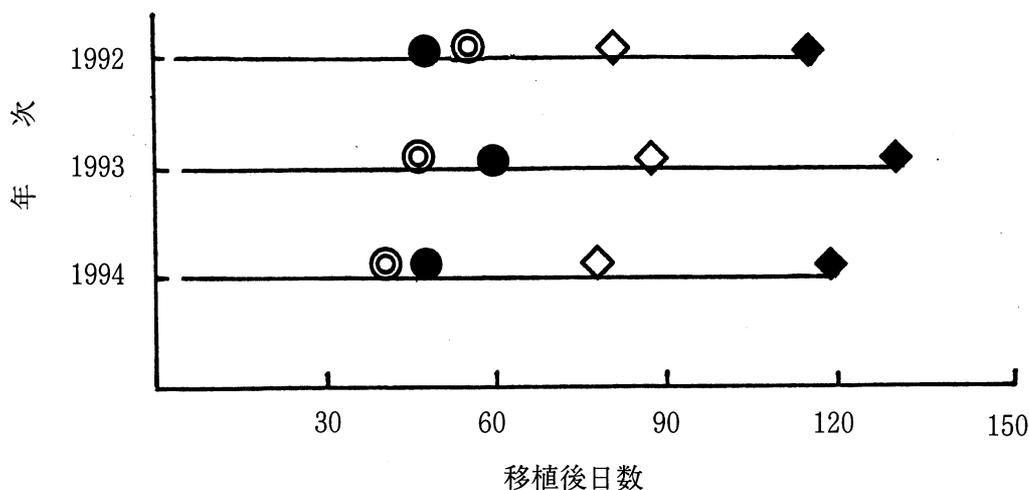
結果および考察

気象条件の特徴と水稻生育経過

前報¹⁾に示したように、1992年、1993年および1994年の実験期間中の気象条件は大きく変化し、それぞれが明らかな特徴を示した。すなわち、1992年では6月初中旬(水稻分げつ初期)から7月中旬まで明らかな日照不足と低温であった。分げつ中期以降日照条件は改善し、生殖生長期から登熟期を通じて気温、日照とも平年並みに経過した。1993年は、全国的な異常気象の年で、6月中下旬(分げつ中期)から8月下旬(出穂期)まで顕著な日照不足と低温で、登熟期間中も低温、寡照に経過した。一方、1994年では、実験期間中を通じて高温多照であった。

第1図に、水稻生育過程の年次間の差異を示した。各年次の水稻生育には、それぞれの気象条件の特徴をよく反映した明確な相違が認められた。すなわち、1992年では、初期生育は抑制され、分げつ増加が停滞したが、幼穂形成期直前の日照条件の改善にともない遅発分げつが急激に増加した。そのため最高分げつ期は、幼穂形成期の約10日後の8月初旬であった。一方、1993年では、初期生育は比較的良好で、初期分げつの増加は順調であった。しかし、分げつ中期以降日照不足と低温のため生育は抑制され、出穂期が1992年および1994年に比べて、約10日遅延した。また、栄養生長中期からの生育の抑制により最高分げつ期を明確に特定できなかったが、幼穂形成期の約10日前から茎数増加は明らかに停滞した。1994年では、高温多照を反映し、初期生育は旺盛で幼穂形成期の約5日前に最高分げつ期に達した。このように、1992年には栄養生長停滞期(vegetative lag phase)¹⁾

が認められなかったのに対して、1993年、1994年には存在し、1993年ではそれが長期化した。



第1図. 水稲生育過程の年次間の差異.

○：最高分げつ期 ●：幼穂形成期 ◇：出穂期 ◆：成熟期

生殖生長期の水稲生育の特徴と穎花数成立

第1表に、1992年と1993年の幼穂形成期における水稲葉身の窒素含有率を示した。幼穂形成期以後まで茎数増加がみられた1992年の各区の窒素含有率は、全般的に茎数増加が抑制された1993年に比べて葉身窒素濃度は高く、窒素施肥量および栽植密度による差異は認められなかった。これに対して、1993年では、総じて標準栽植密度のD22区の窒素濃度が疎植条件のD11区に比べて低く、なかでもN0.5/D22, N1.0/D22区で低い傾向が認められた。

養分吸収に対する温度の影響は、根の発達と根の呼吸速度の変動を通じ、また、光の影響は根への光合成による呼吸基質などの供給と気孔開度の変化による蒸散作用の調節を通じて直接的、間接的に影響する¹⁶⁾。これらを原因として、窒素吸収に対する低温と日照不足の影響は他の多量元素に比べて比較的大きいことが知られている^{1, 15)}。1992年の普通期水稲作期間中の気象条件は分げつ初・中期まで明らかな日照不足と低温であったが、栄養生長後期から高温多照になったのに対して、1993年では栄養生長中期から生殖生長期を通じて明らかな低温寡照で経過した。これが1993年の生

第1表. 生殖生長期の水稲葉身における窒素含有率の比較 (1992年, 1993年)

区*	葉身の窒素含有率 (%)	
	1992	1993
N0.5/D22	3.15	1.76
N0.5/D11	3.09	2.47
N1.0/D22	3.43	1.64
N1.0/D11	3.16	1.95
N1.5/D22	—	2.06
N1.5/D11	—	2.19

* : N0.5, N1.0, N1.5 ; 窒素施肥量がそれぞれ 3 kg/10a, 6 kg/10a および 9 kg/10a. D22, D11 ; 栽植密度がそれぞれ22.2株/m²および11.1株/m².

殖生長期の窒素吸収量が低い水準に抑えられた一因であると推測される。また、第1図に明らかなように、1993年では、vegetative lag phaseが長期化したことも影響したものと考えられる。しかし、1993年の生殖生長期の窒素含有量が気象条件によって全般的に抑制される中で、標準植に比べて疎植条件で一定水準の葉身窒素含有率が維持され、標準植の中では窒素施肥量の多い区で窒素含有率が高くなる傾向が認められた。これは、生育初・中期に降雨による低温・日照不足におちいる頻度の高い南九州普通期水稻作にとって、収量の安定性の観点から考慮すべき点である。

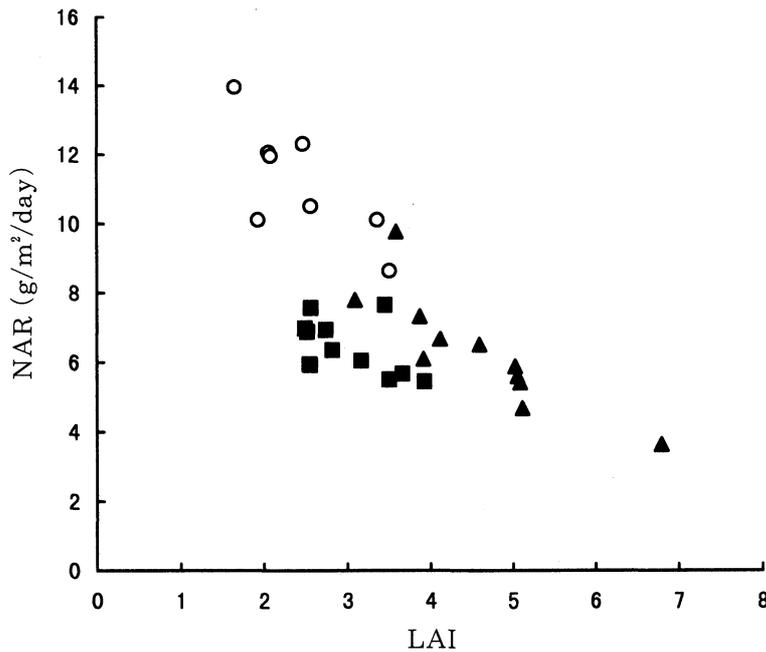
第2表に、幼穂形成期から出穂期までの平均葉面積指数(LAI)、個体群生長率(CGR)および純同化率(NAR)を示した。LAIは、1992年と1993年に比べて1994年で大きく、標準植が疎植に比べて大きく、特にN1.5/D22区の葉面積拡大は顕著であった。しかし、疎植条件でもN1.5/D11区ではN1.0/D22区と同じレベルの葉面積指数であった。1992年と1993年のLAIでは、施肥効果より密度効果が高かった。一方、CGRには、LAIほど明確な年次間差はみられず、1994年のCGRは1992年の標準植のD22区と大差ない値であった。1993年のCGRが全区で低く抑えられたのに対して、1992年では栽植密度の効果が明確であった。NARは、1992年に比べて1993年、1994年で明らかに低かった。しかし、1994年では、両栽植密度とも多肥区ほど低下する傾向が明らかであったのに対して、1993年では両栽植密度とも少肥条件のN0.5区でNARが低下する傾向が認められた。

CGRとNARの間には、3年とも有意な相関関係は認められなかった。第2表に明らかなよう

第2表. 生殖生長期における葉面積指数(LAI)、個体群生長速度(CGR)、純同化率(NAR)の比較

年次	区*	LAI			CGR (g/m ² /day)	NAR (g/m ² /day)
		幼穂形成期	出穂期	生殖生長期 平均		
1992	N0.5/D22	1.1	3.9	2.5	25.3	11.3
	N1.0/D22	1.3	3.5	3.4	27.6	10.0
	N0.5/D11	0.6	3.0	1.8	17.9	11.8
	N1.0/D11	0.6	3.5	2.1	19.9	13.3
1993	N0.5/D22	2.0	3.1	2.5	19.9	4.8
	N1.0/D22	2.5	3.2	2.9	19.0	6.9
	N1.5/D22	3.4	4.0	3.7	23.8	6.8
	N0.5/D11	2.0	3.1	2.5	17.0	5.9
	N1.0/D11	2.0	3.2	2.6	14.9	6.6
	N1.5/D11	2.4	3.4	2.9	18.1	6.7
1994	N0.5/D22	1.8	5.9	3.9	26.9	7.2
	N1.0/D22	3.9	6.3	5.1	25.6	5.3
	N1.5/D22	5.6	9.0	7.3	24.4	3.7
	N0.5/D11	1.7	5.3	3.5	23.6	7.1
	N1.0/D11	2.0	6.5	4.3	25.6	6.8
	N1.5/D11	3.2	6.9	5.1	26.7	5.6

*: 第1表を参照.



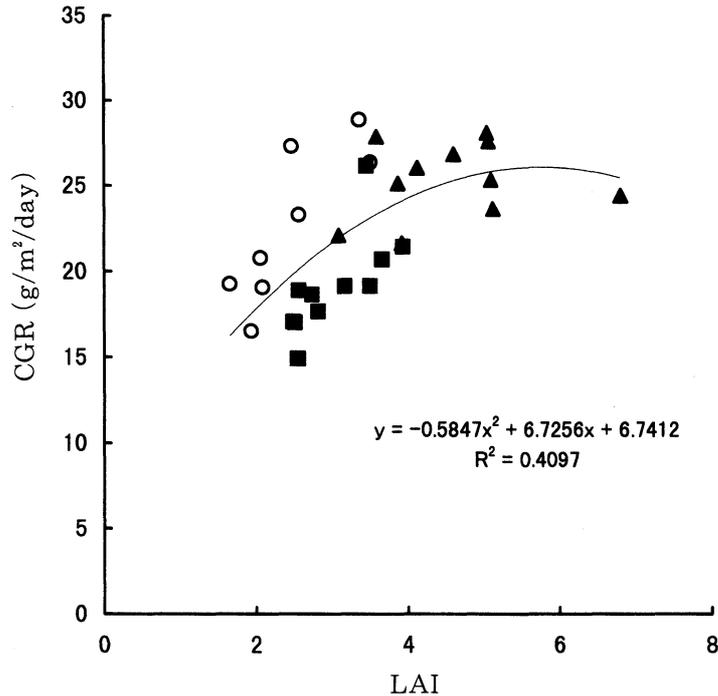
第2図. 純同化率 (NAR) と葉面積指数 (LAI) の関係.

○ : 1992 ■ : 1993 ▲ : 1994

に、1993年と1994年は、同程度のNARであつたが、CGRには、明らかな差がみられたところから、1992年と比較した両年のNARの低下は、異なる原因によるものと考えられた。そこで、第2図にLAIとNARの関係を示した。3年間を通してみると、NARは、LAIの拡大にともない直線的に低下した ($r = -0.625^{**}$)。これを各年次別にみると、1992年と1994年には同様な直線的関係が認められる (それぞれ、 $r = -0.682^*$, $r = -0.856^{**}$) が、1993年には有意な相関関係は認められなかった ($r = -0.465$)。村田¹⁰⁾は、純同化率は主として実同化によって決定され、それは単位同化能力と受光能率で決まるとしている。1992年と1994年のNARには、LAIの拡大にともなう受光能率の低下が関与し、なかでも過度の葉面積拡大をした1994年でのNARの低下が大きかったものと考えられよう。これに対し、水稻の個葉の光合成能率と葉面積当たりの窒素濃度が比例関係にあることは広く認められている^{10, 14, 21)}ので、1993年では生殖生長期における葉身窒素濃度の低下がNAR低下の主な原因であると考えられる。

一方、CGRとLAIとの関係を第3図でみると、1992年と1993年ではいずれも有意な正の相関 ($r = 0.840^{**}$, $r = 0.725^{**}$) が認められた。1994年では、両者間に有意な関係は認められず ($r = 0.176$)、3年を通してみると、むしろLAI 5から6付近を頂点とする2次曲線によく適応した。生殖生長期のLAIが全区で4以下であった1992年では、LAIの拡大にともない直線的に乾物が増加し、標準植と疎植のCGRに明らかな密度間差が生じた。これに対し、著しい葉面積拡大を示した1994年では、ほぼLAI 5以上の区で受光能率の低下から乾物増加が停滞した。1993年のCGRにも1992年の場合と同様に、LAIの拡大にともない直線的な増加が認められるが、同一LAIレベルにおける両年の乾物増加速度を比較すると1993年が明らかに低かった。これには1993年の日照不足と低い葉身窒素含有率にともなう光合成能率の低下が関与したものと考えられる。

第3表に、一次枝梗数、二次枝梗数および一穂穎花数とそれぞれの退化率を示した。1994年の一次枝梗数、二次枝梗数および一穂穎花数とも1992年、1993年のそれらに比べて多かったが、退化率



第3図. 生殖生長期における葉面積指数 (LAI) と固体群生長率 (CGR) の関係。
記号は、第2図と同じ。

も明らかに高かった。1993年では1992年と同程度の一次枝梗数，二次枝梗数および一穂穎花数であったが，それらの退化率は1992年に比べて明らかに高く1994年と同程度であった。一方，1993年と1994年のこれら3形質が標準植に比べて疎植区で明らかに増加したのに対して，1992年では特異的に疎植条件で減少した。

このように穎花数の成立過程では，とくに一次枝梗，二次枝梗および一穂穎花の退化率が1992年に比べて，1993年と1994年で増大したことが注目された。退化穎花数は，生殖生長期の乾物増加と密接な関係を持つ^{4, 5, 18)}から，1993年では日照不足によるCGRの低下，1994年では受光能率低下にとまなうCGRの停滞がそれぞれの退化の増加に強く関与したといえる。

1993年，1994年の一次枝梗，二次枝梗および一穂穎花が標準植に比べて疎植条件で明らかに大きかったのに対して，1992年の疎植区が標準植のそれらより特異的に少なかった。これには1992年における遅発分げつの増加が関与しているものと考えられた。そこで第4図に，一穂穎花数と1株内におけるその変動係数との関係を示した。1993年と1994年では，一穂穎花数とその1株内の変動係数との間に一定の関係は認められない。しかし，1992年では疎植条件での一穂穎花数の株内変異が大きい傾向が認められ，この変異の拡大にとまなない一穂穎花数が減少する関係 ($r = -0.496^{**}$) が明らかであった。この一穂穎花数の株内変異の増大は，一穂穎花数の少ない遅発分げつの割合が大きかったことを示唆している。丸山ら¹²⁾は，窒素施用によって一穂穎花数の1株内の変動係数が増加することを報告しているが，本実験の1992年の場合には変動係数の増大と疎植条件との関連が強く，窒素施肥量の増加も関与している。

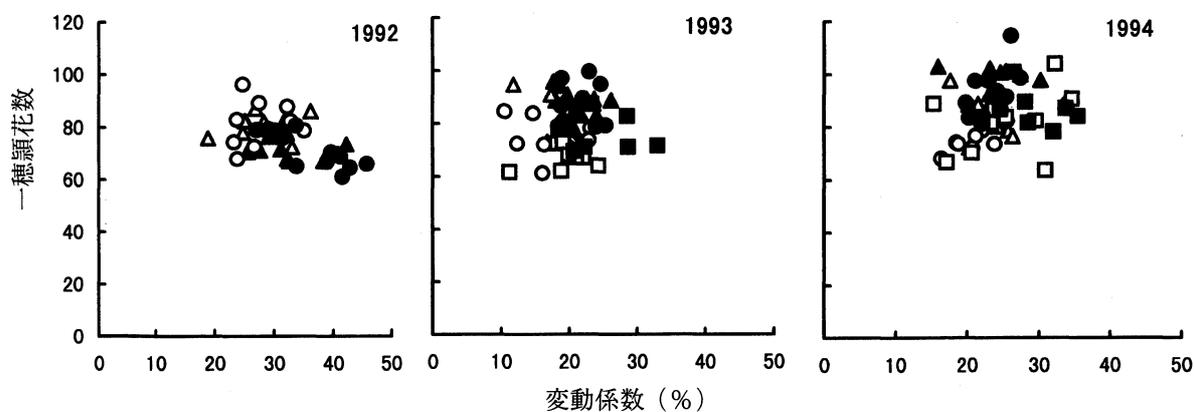
水稻の収量および収量構成要素と害虫による被害様相

第4表に低農薬区の収量と収量構成要素を示した。同時に1993年と1994年についてはそれらの防

第3表. 一次枝梗数, 二次枝梗数および一穂穎花数とそれぞれの退化率

年次	区	一次枝梗数	一次枝梗退化率 (%)	二次枝梗数	二次枝梗退化率 (%)	一穂穎花数	一穂穎花退化率 (%)	
1992	N0.5/D22	9.3a	2.1b	11.1	24.0	80.6a	0.2	
	N1.0/D22	9.9a	3.9a	10.4	26.8	78.5b	0.4	
	N0.5/D11	9.5b	1.0b	9.9	24.4	73.6bc	0.4	
	N1.0/D11	8.0b	2.4ab	10.6	22.1	71.5c	0.4	
1993	N0.5/D22	9.3b	5.1b	11.4a	27.8b	78.7ab	1.1	
	N1.0/D22	9.0b	7.2ab	10.1b	28.9b	73.5b	1.3	
	N1.5/D22	8.6b	8.5a	8.5c	34.1a	67.7b	2.0	
	N0.5/D11	10.1a	3.8b	12.3a	25.9b	87.9a	0.7	
	N1.0/D11	9.7ab	4.9b	12.0a	22.5b	84.3a	1.6	
	N1.5/D11	9.5ab	6.9ab	10.0b	30.6a	77.0ab	1.8	
1994	N0.5/D22	9.9a	3.9c	12.3bc	25.9b	82.5b	1.4	
	N1.0/D22	9.1b	8.1a	10.1c	28.9b	73.7c	0.9	
	N1.5/D22	9.8a	6.7ab	10.9c	35.1a	80.2b	2.3	
	N0.5/D11	10.4a	3.7c	14.6a	27.4b	93.9a	1.3	
	N1.0/D11	10.2a	4.7bc	13.7ab	21.7c	90.5a	0.7	
	N1.5/D11	10.3a	5.5b	12.1bc	37.3a	86.7ab	1.8	
年次平均	1992	9.2b	2.4b	10.5b	24.3b	76.1b	0.4	
	1993	9.4b	6.1a	10.7b	28.3a	78.2b	1.4	
	1994	10.0a	5.5a	12.3a	29.4a	84.6a	1.4	
年次別栽植密度平均	1992	D22	9.6b	3.0c	10.8bc	25.4c	79.6c	0.3b
		D11	8.8d	1.7d	10.3c	23.3c	72.6d	0.4b
	1993	D22	9.0c	6.9a	10.0c	30.1a	73.3d	1.5a
		D11	9.8b	5.2b	11.4b	26.4b	83.1b	1.4a
	1994	D22	9.6b	6.2a	11.1bc	30.0a	78.8c	1.5a
		D11	10.3a	4.7b	13.5a	28.8b	90.4a	1.3a

各年次の区間, 年次平均間および年次別栽植密度間の異なる文字には, 5%水準で有意差あり.



第4図. 一穂穎花数とその株内の変動係数との関係.

△ : N1.5/D22 ▲ : N1.5/D11 ○ : N1.0/D22 ● : N1.0/D11 □ : N1.5/D22 ■ : N1.5/D22

除区に対する比率も示した。まず、これらの収量形質の防除区に対する比率から低農薬条件における水稻被害をみると、千粒重を除く収量構成要素と収量に有意差のある区が認められた。しかし、登熟歩合を除く要素の有意差には区による一定の傾向はなく、散発的であるため低農薬条件にともなう被害とは認められない。一方、登熟歩合の有意差は、両年の標準ならびに疎植条件の多肥区にいずれも認められ、登熟歩合の低下が明らかに低農薬にともなう被害であるといえる。前報¹⁰⁾に示したように、実験期間中の3年間には、水稻病害の顕著な発生はなく、セジロウンカ、トビイロウンカおよびコブノメイガなどの海外飛来性害虫の発生が多かった。したがって、防除区に対する登熟歩合の低下は、低農薬条件下での害虫被害であると考えられた。1992年と1993年では、水稻生育初期にセジロウンカが大量飛来した。1992年では、飛来次世代幼虫が大量発生し、水稻葉鞘部への吸汁害は疎植条件の窒素多肥の区ほど大きかった。これに対して、1993年の幼虫増殖は少なく、被害は軽微であった。1992年には低農薬区に対する防除区を設けなかったため、セジロウンカによる収量および収量構成要素への影響を評価できなかったが、セジロウンカの吸汁害は、水稻生育初期ほど大きいのが、その後補償作用により水稻体が回復する例が多く^{3, 8)}、1992年の観察結果も同様であった。

1993年ではコブノメイガ幼虫の顕著な増殖が幼穂形成期前から生殖生長期を通してみられ、水稻

第4表. 低農薬条件における収量および収量構成要素と防除区に対する比率

年次	区	穂数 (/m ²)	穎花数 (×10 ² /m ²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	収量 (g/m ²)					
1992	N0.5/D22 ¹⁾	331.1a	—	265.9a	—	90.6	—	23.1b	—	556.7a	—
	N1.0/D22	347.8a	—	273.4a	—	89.3	—	22.7b	—	554.0a	—
	N0.5/D11	293.3b	—	215.9b	—	90.0	—	24.0a	—	466.8b	—
	N1.0/D11	329.6ab	—	235.0b	—	90.5	—	23.4ab	—	495.5ab	—
1993	N0.5/D22	264.4b	(0.9*) ²⁾	234.1	(0.9)	86.6a	(1.0)	26.0	(1.0)	525.7	(0.9)
	N1.0/D22	301.9ab	(0.9)	219.8	(0.8*)	87.2a	(1.0)	26.2	(1.0)	501.7	(0.8)
	N1.5/D22	340.4a	(1.0)	229.6	(0.9)	77.2b	(0.9**)	25.9	(1.0)	460.2	(0.9)
	N0.5/D11	268.6b	(1.0)	236.1	(1.2)	85.0a	(1.0)	25.6	(1.0)	515.0	(1.2*)
	N1.0/D11	263.1b	(0.8)	221.3	(0.9)	83.5a	(1.0)	25.7	(1.0)	474.1	(0.9)
	N1.5/D11	304.6ab	(0.9)	233.0	(0.8)	81.9ab	(0.9*)	25.8	(1.0)	491.4	(0.9)
1994	N0.5/D22	401.8b	(1.0)	329.2	(0.9)	65.7ab	(0.9)	25.0	(1.0)	534.6	(0.8)
	N1.0/D22	477.3a	(1.0)	347.6	(1.0)	65.3ab	(0.9)	25.1	(1.0)	572.3	(0.9)
	N1.5/D22	481.0a	(0.9)	389.9	(1.0)	62.8b	(0.8*)	24.4	(1.1)	602.8	(0.8)
	N0.5/D11	350.8b	(1.0)	328.5	(1.1)	68.4ab	(0.9)	25.6	(0.9)	572.8	(0.9)
	N1.0/D11	366.6b	(1.0)	347.2	(1.0)	72.4a	(1.1)	24.7	(1.0)	596.7	(1.0)
	N1.5/D11	431.1ab	(1.1)	376.6	(1.1)	60.3b	(0.8*)	24.3	(1.0)	551.8	(0.9)
平均	1992	325.7b		247.7b		90.1a		23.3		518.3b	
	1993	290.8c		228.9c		83.6b		25.9		494.7c	
	1994	418.1a		353.2a		65.5c		24.9		571.8a	

¹⁾ : 第1表を参照。

²⁾ : 括弧内の数字は、防除区に対する比率。

*, ** : 防除区からそれぞれ5%および1%水準で有意差あり。

各年次の区間および年次平均間の異なる文字には、5%水準で有意差あり。

の被害葉率は多肥条件で高かった。1994年では、出穂期以後にトビイロウンカ幼虫の大量発生が観察され、発生密度は多肥で繁茂度の大きい区ほど高くなる傾向がみられた。したがって、両年の多肥区における登熟歩合への影響はそれぞれ1993年ではコブノメイガ、1994年ではトビイロウンカによるものと考えられた。被害程度は、1994年のトビイロウンカのほうが大きい傾向にあったが、両年とも収量への影響を特定できなかった。これは、コブノメイガによる被害葉は防除区でも一定の比率を示したこと、およびトビイロウンカの株被害は試験圃場の中央部に偏る傾向があり、いずれも抽出個体間の収量の変動が大きかったためと考えられた。しかし、幼穂形成期以降のコブノメイガ幼虫による水稻上位葉への食害および出穂以降のトビイロウンカ幼虫による吸汁害が水稻の収量形質に影響することは明らかであり^{2, 13)}、いずれも葉色が濃く、繁茂度の大きい区で被害が大きくなった。このことから栄養生長期の水稻生育経過の差異が生殖生長期以降の害虫被害に重大な影響を与えるという井上ら²⁾の指摘は、低投入稲作を考慮する上から十分に留意すべきことである。

収量および収量構成要素には、千粒重を除いて明らかな年次間差がみられ、 m^2 当たり穂数、 m^2 当たり穎花数および m^2 当たり収量など量的形質では、1994年が最も大きく、次いで1992年、1993年の順であった。一方、登熟歩合についてみると、1992年が最も高く、次いで1993年であり、1994年ではこれらに比べて大きく低下した。このように各年次には、それぞれの気象条件の相違を反映し、特徴的な収量成立が認められた。そこで、年次別にその特徴をみると、栄養生長初中期の日照不足と低温による初期生育の抑制がみられ、その後日照条件が改善された1992年では m^2 当たり穂数と m^2 当たり穎花数に密度効果が明らかで、D22区で多かった。D22区の登熟歩合は疎植条件に比べて低下せず、いずれも高い比率を示した。したがって、収量には m^2 当たり穎花数との相関関係が明らかで ($r=0.916^{***}$)、収量にも明らかな密度間差が認められた。

水稻の初期生育は順調であったが、分けつ中期から登熟期まで日照不足と低温が長期化した1993年では、全般的に他年次に比べて穂数に抑制傾向が強かった。その中で穂数増加に窒素多肥の効果が認められ、標準植条件のN1.5/D22区で明らかに多く、次いで疎植条件でもN1.5/D11区で多かった。しかし、 m^2 当たり穎花数には、穂数の増減は影響せず明確な区間差は認められなかった。全般的に高い水準の登熟歩合が認められたが、穂数の多かったN1.5/D22区、N1.5/D11区で低下する傾向が明らかであった。しかし、登熟歩合の変異は比較的少なく、収量には穎花数との相関関係 ($r=0.864^{***}$) が明らかで、栽植密度、窒素施肥量による区間差は認められなかった。

栄養生長期から登熟期まで高温多照に経過した1994年では、他年次に比べて穂数は明らかに多かった。とくに標準植の多肥ほど多く、N1.5/D22区、N1.0/D22で明らかな穂数増加がみられた。疎植条件でも多肥のN1.5/D11区でN1.0/D22区と大差ない穂数が確保された。 m^2 当たり穎花数も他年次に比べて明らかに多く全区で 300×10^3 以上であった。しかし、1993年の場合と同様に、穂数の区間による増減が m^2 当たり穎花数に反映されず、穎花数に区間差はみられなかった。登熟歩合は、全区で他の年次に比べて大きく低下し、N1.5/D22区、N1.5/D11区の低下が大きかった。収量にはいずれの構成要素とも有意な相関関係は認められず、また明らかな区間差もみられなかった。

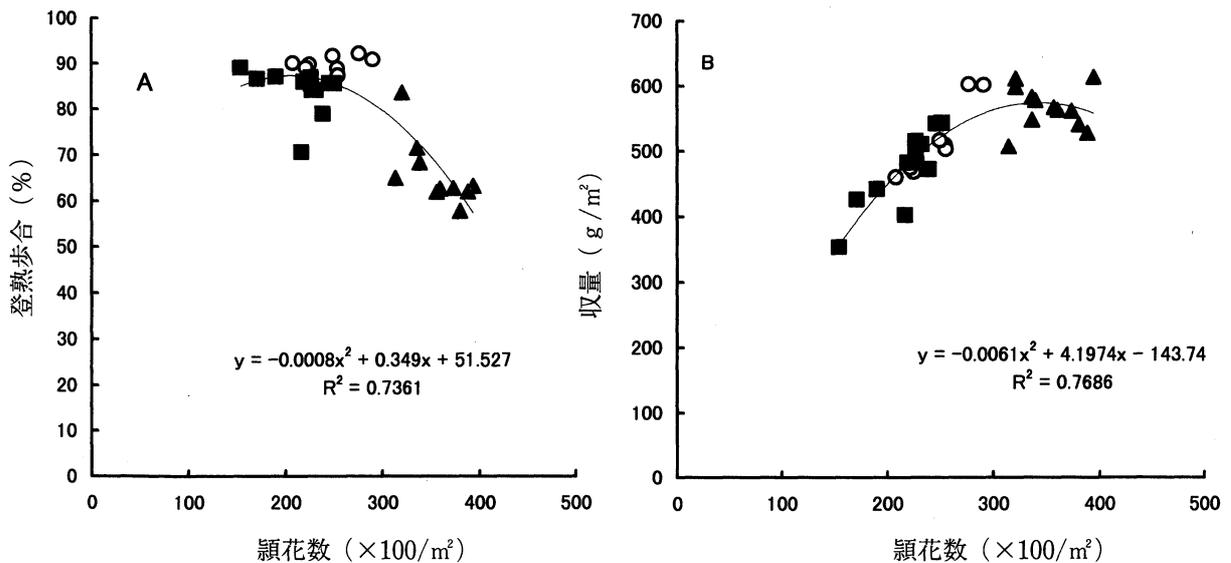
m^2 当たり穂数には、3年間とも明らかな区間差が認められ、1992年では密度効果が明らかであった。これは水稻の初期生育が抑制されるなかで、疎植条件での穂数確保が困難であったことを示すものと考えられる。一方、1993年と1994年の穂数には気象条件の相違を反映して、その水準に大きな開きがあったが、いずれも標準植の窒素多肥ほど穂数は多く、疎植でも窒素多肥区で多かった。ところが、1992年の m^2 当たり穎花数には、穂数の区間差を反映して密度効果が明確であったのに対して、1993年と1994年の穎花数には明確な栽植密度と窒素施肥量による差は認められなかった。

1993年の生殖生長期における一穂穎花数の成立過程には、低日射条件と葉身窒素濃度の低下（第1表）によるCGRの低下が顕著であった（第2表）。また、1994年では、1992年に比べて生殖生長期のLAIが著しい拡大を示したが、受光能率の低下から1992年と大差ないCGRにとどまった。この1993年の生殖生長期における乾物増加の停滞および1994年のLAIに対する乾物増加率の低下は、一次枝梗、二次枝梗など一穂穎花数構成要素の退化率を1992年に対比して明らかに増加させ、LAIの大きい標準植のN1.5/D22区で多く、疎植でもN1.5/D11区で多かった（第3表）。この穎花数成立過程での退化数の増大が m^2 当たり穂数の処理間差を相殺し、1993年と1994年に m^2 当たり穎花数の処理間差が認められなかった主要な一因と考えられる。

全般的に m^2 当たり穎花数が多かった1994年の登熟歩合は他年次に比べて低くかった。中でもN1.5/D22区、N1.5/D11では明らかに低く、1993年でも同様に年次内で比較的多数の穂数が確保されたN1.5/D22区、N1.5/D11の登熟歩合は他区に比べて低くかった。この m^2 当たり穎花数と登熟歩合の関係から最適穎花数¹⁸⁾の存在が示唆された。そこで、第5図に m^2 当たり穎花数と登熟歩合(A)ならびに収量(B)との関係を示した。まず、穎花数と登熟歩合の関係では、穎花数22000個/ m^2 付近を頂点とする2次曲線によく適合し、それ以上の穎花数で登熟歩合は低下した。この穎花数での登熟歩合は89.6%という高い値が推定された。一方、 m^2 当たり穎花数と収量の間を見ると、穎花数32000~34500個/ m^2 あたりに最高収量574.8~578.3 g/ m^2 が推定され、収量に対する最適穎花数の存在が確認された。

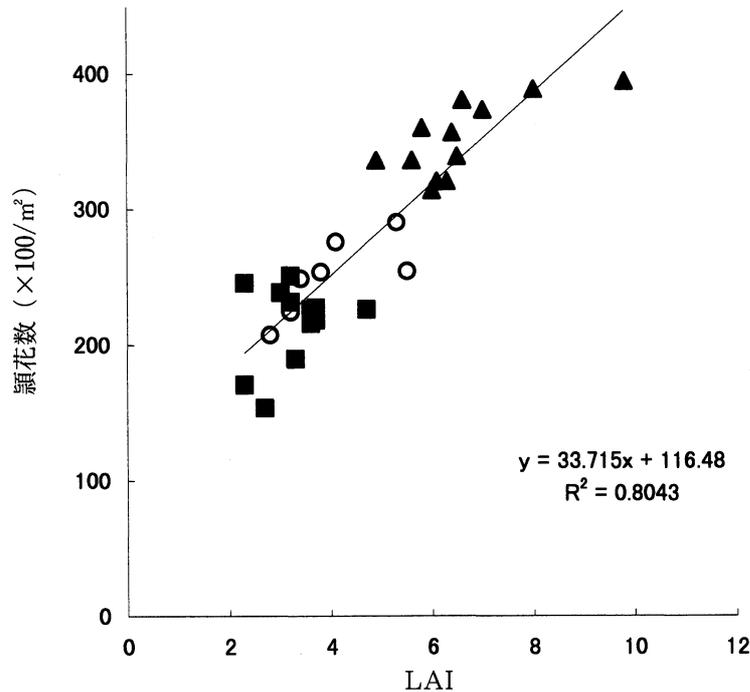
収量構成要素の中で、千粒重が収量の制限因子になることは少なく、 m^2 当たり穎花数、次いで登熟歩合が主要な収量の限定要素である^{12, 21)}。その中で m^2 当たり穎花数は、 m^2 当たり穂数と一穂穎花数で構成される。 m^2 当たり穂数は、栄養生長期中に有効分けつとして成立するから、 m^2 当たり穂数の多少は、LAIと密接に関連して、生殖生長期以降の一穂穎花数および登熟形質の成立を規制する。本実験でも第6図に明らかのように、 m^2 当たり穎花数と出穂期LAIには有意な直線関係が認められ、最適穎花数32000~34500個/ m^2 を確保するために必要なLAIは、6.0~6.8と推定された。

低投入稲作では、作物の吸収率を高めるために子実生産に対する窒素の部分生産能率を高めるこ



第5図. 穎花数と登熟歩合(A)および収量(B)の関係。

記号は、第2図と同じ。



第6図. m²当たり穎花数と LAI の関係.
記号は, 第2図と同じ.

とが重要である⁷⁾. すなわち, 南九州における低投入稲作を確立するためには, 最適穎花数を確保するのに必要な LAI の範囲に初期生育を規制し, 幼穂形成期以降の窒素吸収を高めることが基本的に必要である. これは, 寒暖地間の水稲生育の比較をもとに暖地稲作の問題点として従来から指摘されてきたことを着実に実施することに他ならない.

得られた最適穎花数とそれを確保するために必要な LAI から本実験の栽植密度と窒素施肥量をみると, 気象条件が良好であった1994年では, 栽植密度に関わらず少肥条件が採用される. また, この LAI の範囲内であれば, トビイロウンカの被害は軽減できるものと考えられる. しかし, 日照条件が悪かった1993年では, 出穂期 LAI が3.4~4.0で一穂穎花数構成要素の退化が増えたこと, 初期生育が抑制された1992年では, 疎植条件で穎花数の確保が困難であったことなどが指摘される. したがって, 安定的な生産を維持するなかで低投入稲作を進めるためには, さらに多数の品種と環境条件下で病害虫発生生態を含めた最適穎花数やその確保に必要な LAI に関連するデータを蓄積する必要がある. 同時に, 地力窒素発現量と吸収量は水田土壌の肥沃度で異なる²⁰⁾から, 地力増強も進められなければならない.

要 約

1992年, 1993年および1994年に, 栽植密度2水準, 窒素施肥量3水準を組み合わせた6区で, 低農薬条件における水稲の生育と収量性について検討した.

1. 1992年の幼穂形成期における水稲の葉身窒素含有率は, 1993年に比べて高かった. 1993年では, 疎植条件の水稲葉身窒素含有率が標準植条件に比べて高かった.

2. 1992年の生殖生長期の LAI は, 1994年に比べて明らかに小さかったが, CGR は1994年のそ

れと大差ない大きさであった。また、NAR は、1993年、1994年に比べて明らかに大きかった。1994年の LAI は大きく、標準栽植密度の多肥区で顕著な拡大を示したが、CGR の増加は LAI の大きな区で明らかに停滞した。1993年の CGR は LAI との間に高い正の相関関係が認められたが、CGR は小さかった。

3. 1994年の一次枝梗、二次枝梗および一穂穎花数は、1992年、1993年に比べて多かった。一方、それらの退化率は、1992年に比べて1994年と1993年で多く、多肥区ほど多くなる傾向があった。

4. 1993年と1994年のN1.5/D11区とN1.5/D22区の登熟歩合には、防除区に対して有意差が認められ、それぞれコブノメイガおよびトビロウカによる被害であると推定された。

5. m^2 当たり穂数と穎花数は、1994年が最も大きかった。一方、1994年の登熟歩合は、1992年、1993年に比べて大きく低下した。

3年間の収量と m^2 当たり穎花数の間には、最適穎花数が認められ、32000~34500個/ m^2 であると推定された。また、その穎花数を確保するために必要な LAI は、6.0~6.8と推定された。

引用文献

- 1) 藤原彰夫・石田 博：冷害稲の栄養生理。第2報。最高分けつ期における低温および遮光処理の影響。土肥誌，34：101-106 (1963)
- 2) 井上栄明・深町三郎：施肥・防除体系の異なる水田でのコブノメイガの発生生態と被害。九病虫研究会報。36：106-107 (1990)
- 3) 井上栄明・田中 章：施肥体系の異なる水田でのセジロウカによる生育阻害。九病虫研究会報。37：87-90 (1991)
- 4) 石井康彦・玖村敦彦：水稻の幼穂発育過程の生理学的研究。第3報。幼穂発育期の温度が個体のシンク，ソースの大きさおよび両者の比率に及ぼす影響。日作紀。54 (別2)：17-18 (1985)
- 5) 石井康彦・玖村敦彦：水稻の幼穂発育過程の生理学的研究。第6報。茎別にみた幼穂分化期の乾物生長と穎花の分化・退化との関係。日作紀。56 (別2)：17-18 (1987)
- 6) 小山雄生： ^{15}N 利用による水田土壌肥沃度測定の実際と生産力。土肥誌。62：439-444 (1975)
- 7) 木村次郎・千葉春男：窒素養分の水稻生産能率に対する吸収経過による分解的研究。土肥誌，17：479-497 (1943)
- 8) 清田洋次・奥原國秀：セジロウカの被害解析。第1報。水稻生育初期における成虫密度と被害との関係。九病虫研究会報，36：95-96 (1990)
- 9) 松尾孝嶺：環境農学概論。p.187-214，農文協，東京 (1994)
- 10) 村田吉男：水稻の光合成とその栽培学的意義に関する研究。農技研報，D9：1-170 (1961)
- 11) 中釜明紀・松元里志・日高あゆみ・日高義継・増田弥生：南九州における水稻低農薬栽培に関する生産生態学的研究。1. 普通期水稻作における海外飛来性害虫の発生消長と水稻被害。鹿大農場研報，23：1-12 (1998)
- 12) 丸山幸夫・椛木信幸・田嶋公一：日本稲およびインド稲の窒素に対する生育反応。第1報。窒素施肥によるわら重と穎花数増加の品種間差異。日作紀，57(3)：470-475 (1988)
- 13) 菖蒲一郎・山口純一郎・松崎正文・田中茂男：異なる施肥条件下でのトビイロウカによる減収。九病虫研究会報，38：55-56 (1992)
- 14) 武田友四郎・玖村敦彦：水稻における収量成立過程の解析。日作紀，26：165-175 (1957)

- 15) 高橋治助・柳沢宗男・河野通佳・矢沢文男・吉田武彦：作物の養分吸収に関する研究。農技研報, B4 : 1-83 (1955)
- 16) 武長 宏：Ⅱ. 第2章. 第4節. 環境要因と養分吸収. 稲学大成第二巻. 生理編. p.204-216, 農文協, 東京 (1990)
- 17) 津野幸人・稲田伸由・清水 強：主要作物の収量予測に関する研究. 2. 水稲群落の乾物生産と体内窒素ならびに日射量との関係. 日作紀, 28 : 188-190 (1959)
- 18) 和田源七：水稲収量に及ぼす窒素栄養の影響—とくに出穂期以降の窒素の重要性について—. 農技研報, A16 : 27-167 (1969)
- 19) 山本富三・田中浩平・角重和浩：暖地水田における地力窒素発現パターンと施肥診断. 第1報. 地力窒素発現が暖地水稲ニシホマレ, ヒノヒカリの生育・収量に及ぼす影響. 日作紀, 61(3) : 369-374 (1992)
- 20) 山本富三・田中浩平・角重和浩：暖地水田における地力窒素発現パターンと施肥診断. 第2報. 水田土壌の窒素無機化特性と水稲生育期間中の窒素吸収パターン. 日作紀, 62(3) : 363-371 (1993)
- 21) 吉田昌一：1. 稲の生長と発育. 稲作科学の基礎. p.1-70, 博友社, 東京 (1986)

Summary

In normal season culture of rice plant, growth and yield ability under low pesticide condition were investigated in 1992, 1993 and 1994. Experimental plots were composed by combination of two levels of planting density and three levels of amount of nitrogen applied.

1. In panicle formation stage, percentages of nitrogen content of leaf blade in 1992 were higher than those in 1993. In 1993, percentages of nitrogen content of leaf blade in the sparse planting plots were high in comparison with those in the standard planting plots.

2. In 1992, LAI in reproductive stage was evidently small as compared with that in 1994. However, there was no wide difference between CGR in 1992 and 1994. NAR in 1992 was large in comparison with those in 1993 and 1994.

LAI in 1994 was large and increased remarkably in heavy manuring plot of standard planting condition. Increments of CGR were stagnant remarkably in plots, which showed large LAI. In 1993, high positive correlation was observed between CGR and LAI and CGR was relatively small.

3. Primary rachis branches, secondary rachis branches and number of spikelets per panicle in 1994 were large as compared with those in 1992 and 1993. While, degenerated numbers of those in 1994 and 1993 were larger than those in 1992 and they tended to increase in heavy manuring plots.

4. The percentages of ripened grain in heavy manuring plots in 1993 and 1994, significantly differs from those in control plots and they were estimated to be damaged caused by rice leaf roller (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée) in 1993 and by brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) in 1994, respectively.

5. Number of panicles and spikelets per m² were the largest in 1994, On the other hand, percentage of ripened grain in 1994 was remarkably low compared with those in 1992 and 1993. Between yields and number of spikelets per m² through the three years, optimum number of spikelets were recognized and it was estimated to be within the range of 32000 to 34500 per m².