水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究

第80報 普通圃場における硝酸態窒素利用による理想型稲の創作とそれによる増収試験*

松島省三・和田源七**・松崎昭夫

(農林省農業技術研究所)

前報では、硝酸態窒素を利用し、循環灌漑を行なうことによつて土耕栽培でも生育途中で任意に窒素の供給を制限することができ、その結果容易に理想型の稲を作り出すことが可能となり、この理想型の稲によつて増収しうることが立証された³⁾。本報ではこの考え方をさらに進めて、一般圃場への適用について検討を加えたので、その結果について報告する。

実験方法

一般圃場の場合、理想型稲²⁾を作り出す上に困難な点は、生育初期に十分窒素を吸収させて植物体を十分大きくしておきながら（穎花数の確保）、姿勢の運命づけられる時期に窒素の供給を自由に調節する（出穂後の姿勢改善）ことの困難なことである。このために

Table 1. General description of the cultivation methods tested.

Item	Year	1965	1966	1967
Variety		Manryo	Manryo	Manryo
Date of sowing		Mar. 31	Mar. 31	Mar. 31
Date of transplanting		May 26	May 19	May 16
Spacing (hills per m ²)		18.2	18.2	22.2
Number of plants per hill.		3	3	3
Start of nitrogen restriction		June 25	June 27	June 13
Leaf number index		70	71	71
End of nitrogen restriction		July 28	July 29	July 21
(Top-dressing, Just before reduction division stage)				
Leaf number index		90	92	93
Heading		Aug. 17	Aug. 15	Aug. 4
Maturity		Sep. 28	Sep. 29	Sep. 25
Area of a plot (m ²)		10	10	14
Replications		2	2	3

* 昭和43年6月30日受理

** 現在東北大学農学部

第141回講演会（昭和41年4月）において発表

前報の考え方に沿つて、生育前期の追肥には生育の中途での窒素供給を制限しやすい硝酸態窒素 (NO₃-N) を主用した。実験は1965～1967年の3カ年にわたつて実施され、耕種梗概は第1表に示される。また窒素施肥法は第2表にみられるように、基肥窒素 (NH₄-N) 多肥区（倒伏しやすいが、好天に恵まれれば多収をあげる）を対照区とし、これに対して基肥窒素量を対照区の約 1/3 とし、NH₄-N が生育中期の窒素供給制限の障害とならぬようにし、活着後は2～4回 NO₃-N を追肥して分けつを確保する区（追肥区）を設けた。

NO₃-N は土壌の還元層に入ると脱窒によつて失われるとともに、そのままの形で流亡するので、このような損失を少なくするよう保水力のよい圃場（減水

Table 2. Design of nitrogenous fertilizer application.

Year	Treat- ment	Basal dres- sing (g/m ²)	Top-dressing (g/m ²)				Total (g/m ²)		
			Days after transplan- ting		Days after heading				
			12	20	-21	0			
1965	1(Cont.)	24	—	—	4	2	30.0		
	2	8	5.6	5.6	4	2	25.2		
	3	8	8.4	8.4	4	2	30.8		
			12	23	29	35	-19	-12	3
1966	1(Cont.)	24	—	—	—	—	3	3	30
	2	8	4	4	4	4	3	3	30
	3	8	4	5	3	2	3	3	30
			8	15	22	-20	4		
1967	1(Cont.)	25	—	—	—	4	4		33
	2	10	5	5	5	4	4		33
	3	10	5*	5*	5*	4	4		33
			↑	↑		↑	↑		
Nitrogen sources		(NH ₄) ₂ SO ₄	KNO ₃ *Ca(NO ₃) ₂		(NH ₄) ₂ SO ₄				

Note: Phosphorus and potassium were applied at the rate of 24-30 g/m², by calcium superphosphate and potassium sulphate, respectively, as a basal dressing.

Table 3. Grain yields and their components.

Year	Treatment	No. of panicles per m ²	No. of spikelets		No. of ripened grains per m ²	Percentage of ripened grains	Weight of 1000 grains	Grain Yields	Grain yield percentage to control
			Per panicle	Per m ²					
1965	1	352	99	34,745	26.1 × 10 ³	75%	26.6 ^g	59.1 ^{kg/a}	100
	2	276	112	31,000	28.2	91	27.9	63.5	107
	3	266	114	30,102	27.7	92	27.8	64.7	109
	4	358	93	33,353	24.3	73	25.1	51.1	
1966	1	354	86	30,409	20.1	66	26.4	44.6	100
	2	303	88	26,749	22.0	82	27.5	50.9	114
	3	303	88	26,649	23.7	89	27.3	54.4	122

Note: 1. Mean values of two replication.

2. Treatment No. 4 is an ordinary cultivation.

3. Some values in table 3, 6, 7 and Fig. 7 have been written in Agr. and Hort., Vol. 42: 533-536, 685-688, (1967).

深約 10 mm) で試験を行なった。また分けつ期間中は施した NO₃-N が流亡しないよう水管理に注意した。6 月中下旬、葉令指数 70~71 の頃田面水の入れかえによつて窒素制限処理を行なった。しかし 1967 年のみは水不足のため自然に中干し状態となつて窒素の供給が制限された。姿勢のほぼ決定し終る時期(7 月下旬、葉令指数 90~93)と穂揃期に窒素の追肥を行ない、出穂後の葉の同化能力を高く維持するようつとめた。田面水中 NO₃-N の定量はデバルダ合金法⁷⁾を用い、植物体の分析は常法によつた。

経過の概要

1965 年は苗代期に異常低温があり、移植が予定より 2 週間ほどおくれた。本田期に入つてもしばしば異常

低温に見舞われ、初期生育が抑制された。6 月以降は天候が回復すると共に正常に生育した。1966 年は本田初期の生育がやや抑制され、1965 年と類似の傾向にあつたほか、9 月下旬台風に見舞われたが刈取り直前のため被害は軽微であつた。1967 年は生育初期に好天に恵まれて、葉令、茎数ともに例年にない生育を示し、6 月末の生育状態からすれば相当の収量が期待された。しかしこの年はヒメトビウンカの大発生(飛来数は平年値の 10 倍以上に達した)のため、7 月に入るとシマハガレ病が多発し罹病穂率は 40% (罹病株率 80~90%) に達した。このため収量成績については、1965 と 1966 の兩年のものについて検討を加え、1967 年の試験結果は 6 月下旬(シマハガレ発病以前)までに調査したもののみを掲げた。

実験結果および考察

収量および収量構成要素 収量および収量構成要素の調査結果を第 3 表に示した。第 3 表によれば、生育中期の窒素の肥効を制限して姿勢の調節を図つた区(追肥区)は兩年を通じて対照区よりも多収となつており 7~22% の増収率を示した。1966 年は倒伏程度が割合に大きく、登熟期の曇雨天とともに収量にマイナスの要因が重なり絶対収量ではそれほど大きくはない。しかし、1965 年の追肥区はいずれもアール当たり 60 kg 以上の収量を示し、当試験圃場としては、過去にみられない多収であり、注目に値するものである。つぎに、これらの増収の原因を収量構成要素の点から分析してみよう。まず収量を大別すると、単位面積当たり登熟粒数(比重 1.06 以上)と精粒(または玄米)

Fig. 1. Changes in the number of tillers per m²

Table 4. Longitudinal length of unhulled grains (1966).

Treatment	Length of grains	Standard deviation
1	7.14 mm	0.04 mm
2	7.45***	0.04
3	7.46***	0.02

Note: 1. Measurements were carried out on 6 groups of 40 grains which were randomly sampled.

2. Asterisks mean significant differences at the level of 0.1%.

千粒重に二分しえられる。第3表からも明らかなように、追肥区が増収となつたのは、この両者がともに大きかつたためである。千粒重が大きいのは、主として出穂後の姿勢が改善されたために倒伏程度が軽く（または倒伏せず）出穂後の光合成産物の供給が順調であつたことと（第2図）、減数分裂期に入る前に窒素の追肥を受けたため、“もみガラ”が大きく形成されていたことによる（第4表）。また、単位面積当たり登熟粒数が追肥区で大きいのは、登熟歩合が13~23%も高まつたからである。追肥区の登熟歩合が高いのは、千粒重の場合と同じ原因によるが若干異なる点は、追肥区の単位面積当たり穎花数が対照区のそれより少ないことも一因であろう。このように、生育の後半に決定される収量構成要素には、ほぼ予期したとおりの成果がみられたが、生育前半に決定される要素、単位面積当たり穎花数（＝単位面積当たり穂数×1穂穎花数）については、追肥区の目的が十分達せられたとはいいがたい、すなわち追肥区の単位面積当たり穂数が兩年とも対照区（基肥区）より少ないからである。茎数の増加経過を第1図に示してあるが、3か年を通して最高分げつ期ごろの茎数に約100本/m²の差がみら

Table 5. Ratio of the number of bearing tillers to the maximum number of tillers.

Year	Treatment	Max. No. of tillers per m ²	No. of panicles per m ²	Ratio of bearing tillers
1965	1	455	342	75.3%
	2	364	276	75.9
	3	358	266	74.3
1966	1	504	355	70.5
	2	392	304	77.6
	3	428	304	71.1

Fig. 2. Changes in the dry weight of whole plants per m².

Fig. 3. Changes in total nitrogen content in leaf-blades.

Fig. 4. Changes in the amounts of absorbed nitrogen per m².

れ、この差が穂数にそのまま反映している。したがって有効茎歩合はほぼ同じか、追肥区が若干高いかにみられる(第5表)。要するに本実験は、単位面積当たり穂数確保の点でなお不十分であつたといえよう。1965年の追肥区の1穂穎花数がやや多いのは、穂数が少ないこと、減数分裂期直前を狙った追肥の時期が結果的にやや早かつたことによる。

乾物重の推移 第2図に地上部乾物重の増加経過を示した。窒素の供給を制限すると乾物重の増加が鈍り、追肥区の窒素制限期間中の乾物増加量は対照区に比して約20% 少なかった(1965)、窒素供給再開後は

Fig. 5. Changes in phosphorus content and amounts of absorbed phosphate (1965).

Fig. 6. Changes in potassium content and amounts of absorbed potassium (1965).

Table 6. Deepness of the leaf-colour expressed by chlorophyll meter ($-\log T$).

Year	Treat- ment	Time of measurement				Heading
		Days after -N treatment			At end of -N treat- ment	
		0	14	25		
1966	1	0.61	—	0.54	0.49	0.52
	2	0.57	—	0.43	0.37	0.44
	3	0.56	—	0.44	0.41	0.49
1967	1	—	0.48	0.49	0.42	0.47
	2	—	0.38	0.41	0.39	0.48
	3	—	0.40	0.42	0.37	0.51

Note: Mean values of 10 leaves in each measurement.

逆に追肥区の乾物増加量が大きく、出穂後の乾物増加量は対照区に比して10~15% (1965) および37~55% (1966)の増加を示した。これが追肥区の登熟歩合を高め収量を増す上に直接寄与したものと思われる。

体内成分の推移 葉身全窒素含有率および地上部の窒素吸収量を第3図および第4図に示した。窒素の供給を制限すると、追肥区の葉身窒素濃度が急激に低下するのがみられる。この葉身窒素濃度の低下と対応して葉色もうすくなる。葉色の変化を葉緑素計りで測定した値を第6表に示す。窒素制限処理後25日目には兩年とも色の差がきわめて明らかである。窒素吸収量も窒素制限期間中は増加速度が鈍り、追肥区は対照区に比して第4図に見る通りかなり明らかに低下し、正確に計算すると20% から50% も少なくなっている。しかし、減数分裂期直前(出穂前約20日)の窒素追肥を受けて、葉身中 N% の低下がとまり、葉色および窒素吸収量も回復して出穂期にはこの差が小さくなっている。窒素制限期間中に吸収された窒素は基肥に施用された $\text{NH}_4\text{-N}$ の残り、と、土壌中の窒素および灌漑水中の窒素に由来するものであろう。

磷酸およびカリの吸収経過を第5および第6図に示した。磷酸の含有率および吸収量は窒素とほぼ同様の経過を辿るが、カリ含有率には処理による差異がほとんどみとめられない。カリ吸収量も出穂期までは窒素の場合と同じように経過するが、成熟期のカリ含有量は出穂期のそれより少なく、茎葉から溶脱するものとみられた。カリの出穂後の溶脱には区間差はみられなかつた。

葉鞘および稈の炭水化物含有率の推移を第7図に示した。窒素制限処理を受けると、粗デンプン含有率が増大し、とくに出穂期には対照区との差が最大になつ

Fig. 7. Changes in contents of carbohydrates in culms and sheaths (1965).

ている。このデンプンは出穂後の光合成産物とともに追肥区の登熟歩合を高めた一因と考えられる。全糖含有率も出穂期には追肥区の方が高いが、窒素制限期間中は判然とした差がみられなかった。

窒素制限処理による外部形態の変化 窒素制限処理開始後最初にみられる変化は草丈の短縮である。第8図にみられるように、処理開始後2週間目にはこの差が明らかにみとめられ、3週目にはさらにこの差が拡大する。これはその当時伸長中の葉（主稈葉数を16とすると上から数えて2～4枚目の葉）と下位の節間の伸長が抑制された結果である。このことはほぼすべての器官の生長が完了した時期（出穂後約2週間）の調査結果からも明らかである。すなわち、第7表にみら

Fig. 8. Changes in plant height.

れるように、上から数えて、2、3枚目の葉身長は、追肥区のほうが対照区に比して明らかに短縮している。またこれら葉身長と同じ時期に伸びる下位節間も追肥区で著しく短縮しており、このため稈長も追肥区のほうが明らかに短い。下位節間長および稈長が短いために、追肥区は倒伏程度が軽く、このことは上位葉身長が短いことと相まって、登熟歩合の向上に役だっている。

止葉の長さには窒素制限処理の影響がみられないが、これは葉令指数 90～92 の時期に穎花の退化防止の追肥を施したためである。すなわち主稈葉数16枚とすると、上から数えて2枚目の葉が約半分位伸びた時期に追肥をしてあるのでそのあと伸長する止葉の長さには区間差がみられないのであろう。また、穂長(B_0)および止葉の長さ(B_1)には差がみられないのに、上

Table 7. Morphological characters affected by nitrogen restriction treatment.

Year	Treatment	Length of panicle (cm)	Length of leafblade (cm, from above)			LAI at heading stage	Stem length (cm)	Length of inter nodes (cm, from above)				Degree of lodging
			1	2	3			3	4	5	6	
1965	1	22.2	41	54	59	6.3	99	17.0	12.0	7.4	4.1	3
	2	22.7	42	49	52	4.5	90	13.2	7.8	5.3	3.3	0
	3	22.8	41	49	51	4.6	88	13.2	7.6	4.9	2.5	0
1966	1	20.1	35	47	52	5.5	93	17.7	10.8	6.4	2.3	4
	2	21.1	34	43	47	4.2	86	14.1	8.8	4.9	1.3	2
	3	21.3	36	44	47	4.3	87	14.0	8.6	4.8	1.1	2

Note: 1. Numerals in the table are averaged values which are obtained from the measurements of 15-20 main stems at milk ripening stage.

2. Degree of lodging was classified into 6 grades (0=none~5=heavy) by observation at maturity.

Table 8. Absorption percentage of nitrogen for a week after top-dressing to the total amount of nitrate nitrogen top-dressed (1967).

Treatment	Source of nitrogen	Amounts of $\text{NO}_3\text{-N}$		Absorption percentage (B/A × 100)
		Top-dressed at June 6 (A)	Absorbed by rice plants for a week after top-dressing (B)	
2	KNO_3	5 g/m ²	0.63 g/m ²	12.6%
3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	5	1.15	23.0

から数えて3, 4節間 (N_2 , N_3) は追肥区が明らかに短く、葉身と節間の同時伸長の関係は必ずしも瀬古ら⁶⁾の結果とは一致していない。しかし葉面積指数は上位2, 3葉が短いので追肥区で小さくなっている。

硝酸態窒素の利用率 水田に硝酸態窒素を用いた場合は、主として土壌の還元による脱窒と土壌に吸着されないために流亡するという二つの理由から、アンモニア態に比し、著しく肥効が劣る⁴⁾。この実験においても、脱窒あるいは流亡による損失はかなりの量に達している。すなわち、第8表にみられるように、10葉期の水稻に追肥した硝酸態窒素の利用率は約13~23%であり、したがって、アンモニア態窒素の利用率は50%とすれば、その1/2~1/3程度である。つまり施用窒素量の1/2~2/3は植物体に利用されずに失われたことになる。しかし、追肥時には田面を露出させ、または浅水にするなど水管理に注意すれば、さらにこの利用率を高めることも困難ではないとみられ、目下その実験中である。このように硝酸態窒素は利用率の点では不利であるが多量に施しても、生育途上のある時期にこれを除去することができるので、窒素の供給を人為的に調節するにはきわめて便利な窒素源である。

植物体内で蛋白合成が行なわれる際に硝酸態窒素は一旦、アンモニア態まで還元されてからアミノ酸にとりこまれるが、この際に呼吸基質の消耗を招くためか⁶⁾、生育初期には、アンモニア態窒素で培養したものより硝酸態窒素で培養したほうが、生育が劣る傾向がある。したがって、初期の生育を旺盛にするためには、アンモニア態窒素を併用する必要がある。

硝酸態窒素追肥区はいずれも登熟歩合が高く、しかも成熟期にも稈や葉鞘中に充分に澱粉が残存していることからみて、本実験は単位面積当たりの穀数がまだ

不足であつたものと考えられる。そこで、さらに初期の生育を旺盛にして茎数を増しより多くの穀数をうる事ができれば、その後に窒素を制限することによつて、出穂前貯蔵澱粉を多くし、出穂後の受光態勢をよくしうるうえに、さらに穂肥および穂揃期肥を施すことによつて単位葉面積当たり同化量を多くすることができるので、登熟歩合も高まり、収量も必然的にさらに増大するものと考えられる。

摘 要

一般圃場において理想型稲をつくるため、生育初期の追肥に硝酸態窒素を用いて水稻を栽培し次の結果を得た。

1) 分げつ期までに施肥された硝酸態窒素は、姿勢の運命づけられる時期に田面水のいれかえ、または中干しによつて除去することができ、窒素供給制限の目的が達成された。このことは窒素吸収量の低下によつて、また間接的には葉色の褪色・茎数や乾物増加率の減少および上位葉身長・稈長・下位節間長の短縮等によつて証明された。

2) 窒素供給制限の結果、出穂後の稲の姿勢が改善されて、単位面積当たり穀数は対照区より少なかったが登熟歩合が著しく高くなり収量が増大した。

3) とくに注目すべき点は、下位節間が非常に短くなつて倒伏に強くなつたこと、出穂前の貯蔵澱粉が著しく多くなり登熟歩合が高められやすいと考えられる点である。

4) 以上の結果、一般圃場でも硝酸態窒素を利用して、生育中期に窒素供給を容易に制限することができ、このようにして理想型稲をつくり出すことにより、容易に増収できる途のあることが実証された。

引用文献

1. 稲田勝美 1965. 作物生葉の緑色程度ならびに葉緑素含量の測定法とその応用に関する研究, 第2報. 日作紀 33: 301—308.
2. 松島省三・和田源七・田中孝幸・星野孝文 1963. 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究, 第67報. 高収量成立原理の探索と実証 (1) 日作紀 32: 48—52.
3. ———・松崎昭夫・鈴木英男・阿部秀男 1968. 同第79報. 日作紀 38: 1—10.
4. 塩入松三郎 1942. 水田の脱窒現象に就て. 土肥誌 16: 104—116.
5. 瀬古秀生・佐本啓智・鈴木嘉一郎 1957. 水稻地

- 上部諸器官の發育経過に関する研究 1. 東近農試 物の生理 岩波書店 p. 227—228.
 報裁 4: 1—15. 7. 肥料分析法 1957. 農技研資料 B4: 7—9.
 6. ボナー・ゴールストーン (高宮・小倉訳) 1955. 植

Analysis of Yield-Determining Process and Its Application to Yield-Prediction and Culture Improvement of Lowland Rice.

LXXX. An experiment on maximizing yield by controlling the plant growth to form an 'ideal plant type' by means of the application of nitrate nitrogen in an ordinary paddy field

Seizo MATSUSHIMA, Genshichi WADA and Akio MATSUZAKI
 (National Institute of Agricultural Sciences, Konosu, Saitama)

Summary

In the previous report the authors reported that one could easily obtain high yields by using a circulating irrigating method combined with the application of nitrate nitrogen. By this method one could exactly take the nitrogen off the soil at a given growth stage for controlling the growth of rice plants. In the present experiment, furthermore, the authors tried to apply the same principle as the above to an ordinary paddy field without the circulating irrigation method.

The main points in conducting the experiment were the following three points: (1) In order to ensure the necessary and sufficient number of bearing-tillers for obtaining a target yield by the time of 70 in 'leaf-number-index', and to take nitrogen off the soil without difficulty during the critical period in which the plant type after heading is definitely predetermined, much amount of nitrate nitrogen in stead of ammonium nitrogen was given at the early growth stage. (2) In order to take nitrogen off the soil immediately during the critical period, logged water which contained nitrate nitrogen in the paddy field was completely drained out, and fresh water which contained no nitrogen was again irrigated. (3) In order to increase the rate of carbon assimilation after the critical period, nitrogen was again top-dressed at the end of the critical period (about 20 days before heading) and at the full heading time.

Water permeability in the experimental field was at a rate of 10~15 mm per day. The results might be summarized as follows.

1. Nitrate nitrogen applied at the early stage of growth was quite effective for increasing the number of tillers, and it could be taken off the soil by exchanging logged water in the field for fresh water at the beginning of the critical period. The success in restricting the nitrogen supply in the paddy field mentioned above could be recognized directly by the remarkable decrease in the nitrogen content of leaf-blades, and be checked indirectly by the discoloration of the plant and the retardation in increasing rate of the number of tillers and the dry-matter during the period, and furthermore by shortening of leaf-blades, culms and internodes in length at maturity.

2. Accordingly, the type of plants was improved to a near ideal type by the above-mentioned treatment, and, as a result of it, treated plots were higher than the control in the percentage of ripened grains and in the grain yield as seen in table 3.

3. It was quite noticeable that the treated plants (1) had gained a high lodging resistance which was mainly ascribed to the shortening of lower internodes in length, and (2) has yielded high percentages of ripened grains which was largely ascribed to abundant accumulation of starch in culms and leaf-sheaths before heading.

4. From the results of the present experiments it was strongly proved that if one would utilize nitrate nitrogen at the early stage of growth, one could make the plant type ideal with ease by taking nitrogen off the soil at the critical period, and could obtain high grain yield through the "ideal plant".