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6報 温度が水稻の窒素吸収および土壌中のアンモニア態窒素の消長におよぼす影響*

高橋重郎**・和田源七***・庄子貞雄****

(**宮城農業センター・***熱帯農業研究センター・****東北大学農学部)

著者らは現在までに、基肥窒素および追肥窒素の吸収経過および土壌中での行動についての研究を行なってきた。施肥窒素の吸収は他の要素の吸収と同様に水温、地温および気温に影響される。作期、栽培場所をかえた場合は気象条件が異なるので、水稻の窒素吸収の型も異なるのは当然である。著者らは1969～1972年にわたって圃場試験を行なってきたが、1970年と1971年の実験結果について、水稻の窒素吸収と温度との関係を基肥のみ施用区についてとりまとめた。さらに、一定温度条件下における水稻の窒素吸収についてポット試験を行なつた。これらの結果をもとにして水稻の窒素吸収と温度との関係について考察を加えた。

実験材料および方法

1. 圃場試験 1970年および1971年に旧宮城農試圃場に栽培された基肥のみ施用の水稻および土壌を材料とした。使用された試験区は1970年は早植(5月6日植)と慣行植(5月21日植)の多肥区(150 kg-N/ha)と少肥区(70 kg-N/ha)、1971年は早植(5月6日植)、慣行植(5月24日植)および晩植(6月10日植)の多肥区と少肥区である。生育時期別の窒素吸収量および土壌中のアンモニア態窒素量は前報⁷⁻⁹⁾の値を使用した。積算有効温度示数の水稻の窒素吸収量および土壌中のアンモニア態窒素量に対する関係を調べた。積算有効温度示数の算出には東北農試栽培第2部編の“東北地方における水稻気象生産力の地域性に関する研究”に使用された羽生ら²⁾の生長気温等量を用いた。すなわち第1表に示すように階層別温度値に有効気温係数を乗じて求めた生長気温当量を有効温度示数とし、実験期間の各日における各階層別温度の出現時間(日単位とした)より有効温度示数を算出して積算し積算有効温度示数とした。なお、最高気温と最低気温のみしか得られなかつた日については温度はほぼ、正弦曲線で日変化しているものとみなして有効温度示数を算出した。

2. 人工気象室における実験 1971年に東北大学農

学部の人工気象室で、2種類の温度条件、昼温 30°C、夜温 24°C および昼温 24°C、夜温 19°C の二室を用い、1/5000 アールポットに移植した水稻を移植時より出穂期まで栽培した。施肥量は 2.1% atom excess ¹⁵N 硫酸をポットあたり窒素にて 0.6 g、リン酸およびカリはそれぞれ過石および硫酸にて 0.6 g 施用した。供試品種は水稻ササミノリで5月6日にポットあたり2株2本植えとした。出穂期までに数回サンプリングを行ない、窒素吸収量および土壌中のアンモニア態窒素量を測定した。分析法は前報^{7,9)}と同様である。

3. 水温地温のみが異なる条件下でのポット実験

1972年に農事試験場内で1/5000 アールポットに移植した水稻を 120×150 cm の木わくに入れ、一方を水道水掛け流しとし、一方を静止水とした。平均水温は掛け流し区で 19.2°C、静止水区で 27.4°C であつた。水深は約 3 cm に調節した。施肥量は 2.1% atom excess の ¹⁵N および 10% atom excess の ¹⁵N 硫酸をポットあたり窒素にて 0.4 g、リン酸およびカリをそれぞれ過石および硫酸にて 0.4 g 施用した。供試

第1表 有効気温係数と生長気温当量
(東北農試栽培第二部)

温度階層	温度範囲	有効気温係数	生長気温当量
	～10.0°C	0	0
11	10.1～12.0	0.045	0.50
13	12.1～14.0	0.170	2.21
15	14.1～16.0	0.300	4.50
17	16.1～18.0	0.420	7.14
19	18.1～20.0	0.523	9.94
21	20.1～22.0	0.619	13.00
23	22.1～24.0	0.715	16.45
25	24.1～26.0	0.809	20.23
27	26.1～28.0	0.900	24.30
29	28.1～30.0	0.976	28.30
31	30.1～32.0	1.000	31.00
33	32.1～34.0	1.000	33.00

註. 生長気温当量を有効温度示数とした。

生長気温当量を1日を単位として積算したものを積算有効温度示数とした。

* 昭和50年6月18日受理

第1図 積算有効温度示数と水稻体内窒素量との関係

第3図 積算有効温度示数と土壌中のアンモニア態窒素量との関係
註 記号は第1図に同じ

第2図 積算有効温度示数と水稻体内の基肥由来窒素量との関係 (少肥)

第4図 積算有効温度示数と土壌中の基肥由来アンモニア態窒素量との関係 (少肥)

品種は水稻ササミノリで8月19日にポットあたり1および3株2本植えとした。ほぼ1週間おきにサンプリングを行ない、大部分の区の土壌中にアンモニア態窒素がほとんど認められなくなる時期まで栽培した。分析試料の調整および分析法は前報^{7,9)}と同様である。

実験結果および考察

1. 圃場試験 水稻の窒素吸収に対する積算有効温度示数は品種・土壌条件によつて異なることが羽生²⁾・村上⁵⁾によつて報告され、村上⁵⁾は有効温度の上限および下限は土壌条件・品種によつて変化する。

第5図 移植時期の差が水稻の窒素吸収経過におよぼす影響（少肥）

第6図 移植時期の差が水稻の窒素吸収速度におよぼす影響（少肥）

ることを報告している。積算有効温度示数と水稻体内窒素量との関係は第1図に示される。この図の中には年度の異なる試験区、早植より晩植まで前述の全試験区を含んでいる。第1図にみられるように、両者の関係は指数関数で示される部分と直線で示される部分との二つの部分よりなっている。指数曲線部分と直線部分との交点は積算有効温度示数が400前後のところにありとみられる。すなわち、積算有効温度示数が400前後までは水稻体内の窒素量は指数的に増加するが、有効積算温度示数が400をこえると水稻体内窒素量はほぼ直線的に増加する。有効積算温度示数が400に達するのは水稻の生育よりみればほぼ分けつ最盛期直後にあたり（穂首分化期直前ごろ）、この時期まで水稻の分けつは指数的に増加している。また、この時期は土壤中にアンモニア態窒素がほとんど認められなくなる時期と一致している。多肥区と少肥区における窒素吸収量の差は第1図よりみて、移植後日数の経過とともに

積算有効温度示数が400に達するまで増加して行くが、その後は両者の差はほとんど変化しない。また、基肥由来窒素の吸収量と積算有効温度示数との関係は第2図に示される。体内の基肥由来窒素量は積算有効温度示数が400前後までは指数的に増加するが、それ以後は水稻体内の基肥由来窒素量の増減はほとんどみられない。このことは、基肥窒素の吸収はこの時期までに終了したことを示している。

一方、土壤中のアンモニア態窒素の推移と積算有効温度示数との関係をみれば、両者の間には指数関数的な関係がみられ、土壤中のアンモニア態窒素は積算有効温度示数の増大にともない指数的に減少し、穂首分化期直前ごろには土壤中にはそれは認めがたくなり、以後出穂期ごろまで指数的に減少している（第3図）。また、土壤中の基肥由来アンモニア量と積算有効温度示数との関係は第4図にみられるように、全アンモニア態窒素と同様な傾向を示した。

そこで、仙台における平年気温をもとにして、田植

第7図 気地温の差が水稻の窒素吸収経過および土壤中のアンモニア態窒素の消長におよぼす影響

後の窒素吸収経過を第1図の式にて算出し、X軸に暦日をとって示したのが第5図である。第5図によれば、指数曲線部分は早植ほど長く、晩植ほど短い。これは積算有効温度示数が400に達するまでの日数が早植ほど長いためである。しかし、指数曲線部分と直線部分との交点が積算有効温度示数400にあるとみられるのは必ずしもあたらず、後述するように、土壌の種類および施肥法・栽植密度などによつてその交点は変化するものとみられる。村上ら³⁾の指摘するように、土壌条件の差により水稻の窒素吸収におよぼす温度の影響が異なること、松崎⁴⁾および島田⁵⁾の指摘するように施肥位置が異なると施肥窒素の吸収期間が異なるなどの報告よりすべての水田で指数曲線部分と直線部分との交点が積算有効温度示数400前後にあるとは考えにくい。

つぎに、水稻の窒素吸収速度について検討した。第6図に移植後の日数の経過と吸収速度との関係を示した。それによると移植時期の早いほど窒素吸収速度のピークは早い時期に、移植時期のおそいほどおそい時

期にみられるが、ピークに達するまでの日数は早植ほど長く、晩植ほど短い。ピークの高さは早植は低く、晩植は高い。すなわち、移植時期のおそいほど急激に窒素吸収速度の増大がみられる。これらは晩植ほど生育初期の気温が高いためである。窒素吸収速度のピークの高さおよびその時期は水稻の生育・収量構成要素に大きな影響をおよぼす。これについては次報にて報告する。

水稻体内窒素量と積算有効温度示数との関係の推移が指数曲線部分と直線部分の二つに分けられることを前述した。この原因について若干の考察を試みる。水稻体内窒素量が指数的に増加している期間、すなわち積算有効温度示数が400になるまでの期間は、いわゆる栄養生長期にあたり根数および根重がほぼ指数的に増加する時期であり³⁾、しかも土壌中にはアンモニア態窒素が十分に存在している⁷⁾。そして、水稻の根量および根重がほぼ指数的に増加する幼穂形成期までは水稻体内の窒素量の推移は根量および根重の推移と一

第8図 積算有効温度示数と水稻体内窒素量および土壌中のアンモニア態窒素量との関係

第9図 水地温の差が水稻の窒素吸収および土壌中のアンモニア態窒素の消長におよぼす影響

第10図 積算有効温度示数と水稻体内窒素量との関係 (水・地温一定)

第11図 積算有効温度示数と土壌中のアンモニア態窒素量との関係

致するとみられる。このことより、この期間では、水稻の窒素吸収力（根の活力と根数との積）が水稻体内窒素量増加の制限因子になつていとみられる。一方、水稻の体内窒素量が直線的に増加する期間すなわち、積算有効温度示数が400をこえた後は水稻は幼穂形成期に入り、根数はほぼ一定となり土中の根の分布密度も大きく³⁾、土壌中のアンモニア態窒素量は非常に少ない。したがつて、この期間は土壌中の有機態窒素の無機化した部分は短時間の間に稲にとりこまれるか消失して行くと考えられ、水稻体内窒素量の増加は土壌の窒素供給力すなわち地力が制限因子になつてゐるのではないかとみられ、勾配の急なほど土壌あるいは灌漑水の窒素供給力いわゆる地力が高いと考えられる。この現象は基肥のみ施用条件下でみられるもので追肥が施用された場合はまったく異なつてくる。前報¹⁰⁾で指摘したように追肥により窒素の吸収パターンは容易に変化するからである。

2. 人工気象室における実験 窒素の吸収経過および土壌中のアンモニア態窒素の推移は第7図に積算有効温度示数と水稻体内窒素量および土壌中のアンモニア態窒素量との関係は第8図に示される。全窒素・基肥由来窒素ともに気温の高いほどすみやかに吸収され、基肥窒素の吸収期間、土壌中にアンモニア態窒素が認め難くなるまでの期間は高温区で短い。しかし、基肥窒素の水稻による回収率は高温区と低温区との間に差がなく、みかけの基肥窒素の回収率にも差はみられなかつた。それは圃場での値⁹⁾に比し非常に高かつた。この原因については後報で報告する予定である。

積算有効温度示数と水稻体内窒素量との関係を見ると、積算有効温度示数が600前後までは両者の間には

指数関係が認められるが、600以上になると両者の間には指数関係が認められなくなり直線関係が認められる。また図には示さなかつたが、窒素吸収速度は高温区は低温区に比し、生育初期より高く、その最大値も高く、最大値に達するまでの日数も少ない。

一方、土壌中におけるアンモニア態窒素の消長と積算有効温度示数との関係を見ると、両者の間には圃場における場合と同様に指数関係が認められ、積算有効温度示数が600前後になつた時に土壌中にアンモニア態窒素は認め難くなる。

3. 水田地温のみを変えた場合 異なる二つの栽植密度で行なつた。実験期間中の水地温は低温区は最高21.5°C、最低17.5°C、平均19.2°Cであり、高温区は最高32.5°C、最低17.5°C、平均27.4°Cであつた。第9図に各区の窒素吸収経過を示した。3株植は1株植に比し、高温区は低温区に比し基肥窒素の吸収が終了する時期は早いとみられる。基肥窒素の吸収が終る時期は高温3株植、1株植、低温3株植、1株植の順であり、数値は省略したが、基肥由来のアンモニアが土壌中に認めがなくなる時期の水稻の基肥窒素吸収量は高温区と低温区、1株植区と3株植区との間に差は認めがたい。しかし、低温1株植区は最終サンプリング時の10月24日にもまだ土壌中にアンモニア態窒素が残存しており、水稻の窒素吸収量はわずかに少なかつた。しかし、土壌と水稻による基肥窒素の回収量の合計は株数密度の差によつて多少の差はみられるが、有意の差はなく、温度の差による窒素回収率にもほとんど差は認められなかつた。

同一植付本数別に水・地温の積算有効温度示数と水稻体内窒素との関係を第10図に示した。両者の間には3株植では積算有効温度示数が550になるまでは指数関係が、1株植ではそれが650になるまでは指数関係が認められ、積算有効温度示数がこれらの点をこえると両者の間には低温処理区の点数は少ないが直線関係が認められる（直線部分は低温区の点が少ないので、回帰式については必ずしも指数部分の回帰式とは同一レベルで論じうることは限らない）。すなわち、変曲点は1株植と3株植で異なり、圃場の場合とも異なつた。一方、土壌中のアンモニア態窒素量と積算有効温度示数との間には圃場・人工気象室における場合と同様に指数関係が認められ、3株植区の方が1株植区に比しアンモニア態窒素の減少速度が高い⁹⁾。アンモニア態窒素が土壌中に認め難くなるのは積算有効温度示数が3株植で550前後、1株植で650前後であるとみられる。これら三つの実験を通してみると、水稻の生

育初期における窒素吸収および土壌中のアンモニア態窒素の消長に直接的に影響をおよぼしているのは水・地温であるとみられる。

圃場試験でもポット試験でも、自然条件下でも人工気象条件下でも、基肥のみ施用の水稻の窒素吸収と積算有効温度示数との関係は指数関数で示される部分と一次関数で示される部分の二つより成る。しかし、その常数の値は必ずしも一定でなく、しかも指数関数の範囲・一次関数の範囲が栽培条件・実験条件によつて異なる。本実験でも栽植密度・栽培様式がかわることによつて指数曲線と直線との交点が異なってくる。しかも、それはいずれの栽培条件下でも土壌中にアンモニア態窒素が認めがたくなる時までの積算有効温度示数にて示される。指数関数部分の範囲は密植でよりせまう、圃場条件の場合はポット条件の場合よりせまかつた。この原因は、土壌中に基肥由来アンモニア態窒素の存在する期間が栽培条件によつて異なることにあるとみられる。3株植では1株植より早い速度で土壌中のアンモニア態窒素が消失する。また、本実験では圃場は基肥がほぼ10 cmの層に混合されたのに対し、ポット実験では基肥がほぼ20 cmの層に混合された。この施肥位置の差が土壌中のアンモニア態窒素の消長および水稻の窒素吸収経過に影響を与えたものとみられる。施肥位置の差が窒素吸収経過および土壌中のアンモニア態窒素の消長に影響を与えることは島田⁹⁾・松崎⁴⁾をはじめとして多くの研究者が認めている¹⁾。

摘 要

水稻の窒素吸収におよぼす温度の影響を知るために、基肥のみ施用で作期をかえて圃場に栽培した水稻、人工気象室および水槽に栽培した水稻について、水稻の窒素吸収過程と積算有効温度示数との関係を調査した。

1. 水稻の体内窒素量と積算有効温度示数との関係は積算有効温度示数が400までは指数関数で示され、400以上では一次関数にて示される。これは多肥区・少肥区ともに同様であり、常数のみが異なる。

2. 土壌中のアンモニア態窒素は出穂期までは積算有効温度示数の指数関数にて示され、積算有効温度示数が400をこえるとほとんど認められなくなる。

3. 窒素吸収速度は生育初期は指数的に増加して最大値に達し、その後急減して一定となる。早植するほど早い時期に窒素吸収速度のピークがみられるが、生育初期の温度が低いためにピークまでの期間が長く、ピークも低い。これに対し、晩植するほどピークのみ

られる時期はおそいが、生育初期の温度が高いため、窒素吸収速度は急激に上昇し、ピークまでの期間も短かく、ピークの高さも高い。

4. 気温および水温をコントロールした場合も一般圃場と同様な傾向が認められるが、指数曲線部分と直線部分との交点は圃場試験の場合と異なる。また、密植により、指数曲線部分と直線部分との交点はより低い積算有効温度示数のところに移るとみられる。

5. 水稻体内窒素量と積算有効温度示数との関係が指数曲線で示される部分では、水稻の窒素吸収力が制限因子となり、両者の関係が直線で示される部分では土壌の窒素供給量が制限因子になつているものと考えられる。

引 用 文 献

1. BROADBENT, F. E. and D. S. MIKKELSEN 1968. Influence of placement on uptake of tagged nitrogen. *Agron. J.* **60**: 674—677.
2. 羽生寿郎・内島立郎 1962. 作物の生育と気象との関連に関する研究 第1報 水稻の出穂期と気温との関係 *農業気象* **18**: 109—118.
3. 稲田勝美 1967. 水稻根の生理的特性に関する研究 —とくに生育段階ならびに根の age の観点において— *農技研報* **D16**: 19—156.
4. 松崎昭夫 1974. 水稻生育中期における窒素吸収制限とその栽培学的意義に関する研究 *農技研報* **A21**: 27—129.
5. 村上利男・和田道宏・吉田善吉 1973. 寒冷地における水稻生育の気象反応に関する定量的研究 *東北農試報告* **45**: 33—100.
6. 島田晃雄 1970. 養分吸収からみた深層追肥 *農園* **45**: 99—103.
7. 庄子貞雄・和田源七・斉藤公夫・新保 到・高橋重郎 1971. 水田における窒素の動態と水稻による窒素の吸収について 第2報 基肥窒素の土壌中における行動 *日作紀* **40**: 281—286.
8. 高橋重郎・庄子貞雄・野木照修・和田源七 1973. 同 第5報 栽培条件の異なる場合の基肥窒素の土壌中での行動ならびに水稻による窒素吸収 *日作紀* **42**: 91—96.
9. 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎 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1報 基肥窒素の吸収 *日作紀* **40**: 275—280.
10. 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎・斉藤公夫・新保 到 1971. 同 第3報 追肥窒素の土壌中における行動ならびに水稻による吸収 *日作紀* **40**: 287—293.

The Fate of Fertilizer Nitrogen Applied to the Paddy Field and its Absorption by Rice Plant

VI. Influence of a thermal factor on the soil ammonium nitrogen and the absorption of nitrogen by rice plant.

Juro TAKAHASHI*, Genshichi WADA**, and Sadao SHOJI***

(*Miyagi Prefectural Agriculture Center, Natori, **Tropical Agriculture
Research Center, Tokyo, ***Faculty of Agriculture, Tohoku University, Sendai)

Summary

The influence of a thermal factor on the soil ammonium nitrogen and its absorption by rice plants grown under the field and controlled conditions were studied. It was shown that the absorption of nitrogen by the rice plants was closely related to the accumulated effective thermal index (AETI) given by T. Hanyu and T. Uchijima (1962).

The amount of nitrogen per unit area absorbed by the plants (y) grown in the field was closely related to the AETI consisting of an exponential equation ($y = cd^x$) for the early growth stage and linear one ($y = ax + b$) for the middle and late growth stages. The crossing point of these equations was the AETI of about 400. The similar equations excepting the b parameter were obtained for both low and high dosages of basal nitrogen. But the crossing point of these equation was varied by the cultural conditions, especially plant density and placement of fertilizer.

Soil ammonium nitrogen decreased exponentially after transplanting. Almost all of the nitrogen disappeared at the AETI of about 400, or at the commencement of ear-primordia formation. Therefore, it was assumed that the rate of nitrogen absorption of the rice plants was the limiting factor in the exponential part. On the other hand, the rate of supply of soil ammonium nitrogen, or the rate of mineralization of soil organic nitrogen was assumed to be the limiting in the linear part.