

土壤窒素供給力の評価に基づくコシヒカリの施肥法改善

藤原 耕治*・古山 光夫*・播磨 邦夫**・山本 朗**

Improved Application of Nitrogen Fertilizer for a Rice Variety "Koshihikari" Based on the Estimation of Nitrogen Supplying Ability of Paddy Soil

Koji FUJIHARA, Mituo FURUYAMA, Kunio HARIMA and Akira YAMAMOTO

目 次

I 緒 言	1	収量に及ぼす影響	6
II 試験方法	2	3. コシヒカリの窒素保有量と適正施肥量	9
1. 試験地の土壤条件	2	4. 窒素施肥法の改善とその効果	12
2. 施肥処理と栽培条件	2	IV 考 察	13
3. 調査及び分析方法	2	1. 水田の窒素供給力とコシヒカリの生育及び窒	
4. 湛水土壤中における無機化窒素供給量の推定		素吸収経過	13
.....	3	2. 適正施肥窒素量の算定とその適用効果	15
III 試験結果	3	V 摘 要	17
1. 供試水田における窒素供給パターンと水稻の		引用文献	17
窒素吸収経過	3	Summary	18
2. 地帯及び土壤条件の違いがコシヒカリの生育,			

I 緒 言

島根県の水稲奨励品種のなかで、コシヒカリの作付面積が近年急速に拡大し、1991年現在で全水稲作付面積の約67%を占めるに至った。これは、食味の良い米として消費者の評価が高く、有利な価格で販売できるためである。しかし、栽培上の特性として長稈で倒伏抵抗性が弱く、窒素養分の適正必要量の幅が狭いことから、安定生産のためには気象条件や土壤条件に応じたきめ細かな肥培管理が要求される。また最近、米の食味が栽培条件や肥培管理によって大きく変動することが判明しつつあり、コシヒカリについても食味品質

の向上をも考慮した安定生産技術が求められるようになってきている。

コシヒカリの生産安定化と食味向上に必要な条件としては、第1に収量水準に応じた適量の窒素を吸収させること、第2に、稲津²⁾が指摘しているように、単位窒素保有量当りの子実生産量（窒素養分の玄米生産能率）を高めること、又は低下させないこと、第3にそのような肥培管理によって玄米中のたんぱく質含量を一定水準以上に増加させないことがあげられる。そのためにはまず、水田における土壤窒素供給量及び稲体の窒素保有量の診断・予測に基づいて窒素の施肥量及び施肥時期を決定する必要があると考える。

筆者らは、別報¹⁾において、島根県平坦部のコシヒ

かりについて、収量5,500~6,000kg ha⁻¹を目標としたときの稲体の適正窒素保有量について検討し、適正值として幼穂形成期0.0052kg m⁻²、出穂期0.0102kg m⁻²を得ている。

そこで、本報では、気象及び土壌条件が異なる島根県の出雲平坦部と山間部の水田を対象として、稲作期間における土壌からの窒素供給量を速度論的な方法と稲体窒素保有量によって評価するとともに、適正窒素保有量と土壌窒素供給力に基づき策定した窒素施肥法を平坦部の水田に適用し、その有効性について検討したので報告する。

本試験の遂行に終始協力と便宜を賜った元当場環境保全科長山根忠昭博士並びに水田作科、赤名分場、土壌肥料科関係職員及び出雲市農業指導センター営農指導員森山武徳氏にお礼を申し上げる。また、水田における無機化窒素供給量の推定に当たって、土壌窒素の無機化予測プログラム (ENMS) の使用に便宜を賜り、懇切でいねいな助言をいただいた農林水産省農業研究センター土壌肥料部長金野隆光博士に感謝の意を表す。

II 試験方法

1. 試験地の土壌条件

現地試験は、平坦部では出雲市古志町並びに出雲市荻町の水田で行い、山間部は飯石郡赤来町にある当場赤名分場の水田において実施した。供試水田の土壌類型区分と土壌の性質を第1表に示した。古志町の水田は神戸川下流域にある排水良好な乾田で、土壌区分は細粒灰色低地土 (鴨島統) に属する。作土の土性は軽埴土 (LiC) で、土壌のアンモニア生成量が多く、

易分解性有機物量の多い土壌である。荻町の水田は斐伊川の沖積地にある湿田で、土壌区分は中粗粒グライ土 (八幡統) に属する。作土の土性は砂埴土 (SL) で、土壌のアンモニア生成量は比較的少なく、易分解性有機物量はさほど多くない。赤名分場の水田は標高400m前後の山間地の谷底平野にあって、下層50cm以下に礫層を持つ乾田である。土壌区分は礫質灰色低地土 (追子野木統) に属する。作土の土性は埴埴土 (CL) で、黒ボク土の混入があって腐植に富み、易分解性有機物は多い。

2. 施肥処理と栽培条件

現地試験は1987~'89年の3年間実施した。各年次とも試験地共通の処理区として標肥区と無窒素区を設け、1989年には前2か年の試験結果に基づき、平坦部については試験地別に改善区を設置した。試験区は1区面積50m²の2連制 (山間部は1連制) とした。標肥区の施肥量は1m²当り窒素 (N) 0.007kg、リン酸 (P₂O₅) 0.008kg、カリ (K₂O) 0.007kgであった。窒素は基肥に0.003kg、穂肥に0.004kg施用し、リン酸は全量基肥に施用、カリは窒素と同時期に同量施用した。穂肥は出穂20日前と10日前の2回に分けて等量ずつ施用した。無窒素区と改善区のリン酸及びカリについては標肥区と共通の施肥量とした。なお、基肥には塩安、苦土重焼リン及び塩化カリを用い、追肥及び穂肥にはNK化成と塩化カリを使用した。

箱育苗したコシヒカリの稚苗を1m²当たり22.2株 (1株4本植) の栽植密度で本田へ手植えた。平坦部の試験ほ場の移植日は1987年と'89年が5月8日、'88年が5月9日であり、山間部の移植日は'87年が5月7日、'88年と'89年が5月10日であった。

3. 調査及び分析方法

第1表 試験地水田土壌の性質

地帯	土壌の種類	層位	粒徑組成 (%)			土性	T-C	T-N	腐植	CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	アンモニア 生成量* (mg kg ⁻¹)
			砂合計	シルト	粘土						
平坦部	細粒灰色低地土	1 (0-15cm)	34.1	36.2	29.7	LiC	2.40	0.202	4.14	25.5	211
		2 (15-32cm)	46.9	33.7	19.4	CL	1.65	0.130	2.84	19.3	122
平坦部	中粗粒グライ土	1 (0-13cm)	84.9	8.1	7.0	SL	1.34	0.109	2.31	7.2	139
		2 (13-25cm)	87.8	7.4	4.8	LS	0.89	0.071	1.53	5.1	87
山間部	礫質灰色低地土	1 (0-13cm)	50.6	33.2	16.2	CL	3.65	0.274	6.29	16.0	213
		2 (13-24cm)	54.7	31.0	14.3	L	2.64	0.191	4.55	14.1	135

*風乾土を灌水密栓し、30°Cで4週間培養

生育及び収量構成要素は常法により調査した。収量は1区100株の部分刈りにより調査した。稲体窒素保有量は乾物重と窒素濃度の積から求めた。乾物重は、生育時期別に1区当たり平均茎数株を10株抜き取り、地上部のみについて60°Cで熱風乾燥し、部位別に秤量した。稲体窒素濃度は常法により粉碎した試料についてケルダール法により測定した。

作土の残存アンモニア態窒素は、稲株を抜き取ったあと栽植密度サイズ (30×15cm) の鉄板枠を15cmの深さまで打ち込み、枠内の作土をよく混ぜてその一部を採取し、湿潤土のまま2.8mmのふるいを通したのについて、常法により塩化カリウム水溶液でアンモニア態窒素を抽出後、水蒸気蒸留法によって測定した。なお、作土の残存アンモニア態窒素量は、次に述べる無機化窒素供給量と同様に単位ほ場面積当たりの窒素量に換算した。

4. 湛水土壌中における無機化窒素供給量の推定

水稻生育期間における作土層からの無機化窒素供給量は、速度論的方法^{5,10)}に基づき次の手順で推定した。まず、試験地水田の作土を代かき作業の始まる直前に15cmの深さまで採取し、未風乾のまま2.8mmのふるいを通した。その土壌をインキュベーションチューブに詰め、湛水・代かき状態とした後、密栓し、20、25及び30°Cで定温培養した。生成したアンモニア態窒素は200g L⁻¹の濃度の塩化カリウム水溶液で抽出

し、水蒸気蒸留法により定量した。

次に、標準温度変換日数理論^{5,10)}に基づき、培養実験で得られた温度別無機化窒素集積曲線の重ね合わせを行い、最適モデル式とそのパラメータを求めた。このモデル式に現地水田の日平均地温から求めた積算25°C変換日数を代入し、無機化窒素供給量を推定した。これらの計算には、金野⁶⁾の開発した土壌窒素の無機化予測プログラム (ENMS) を用いた。なお、最適モデル式を選ぶための基準としてENMSでは赤池の情報量基準AIC⁹⁾を採用しており、AICの最小値を与えるモデルを最適モデルとした。地温は地中5cmの深さで測定した値である。山間部では地温データの欠測があったので、気温データを一部代用した。

無機化窒素供給量の推定値は、乾土0.1kg当りの窒素量で算出されるので、作土の深さと仮比重から作土重量を求め、単位ほ場面積当たりの供給量に換算した。作土の深さは採土法との整合性を考慮して各試験地とも15cmとした。作土の仮比重は古志町水田が0.89、荻町水田が1.06、赤名分場水田が0.85であった。

III 試験結果

1. 供試水田における窒素供給パターンと水稻の窒素吸収経過

速度論的方法に基づいて培養実験で求めた作土の窒

第2表 培養実験により得られた作土の窒素無機化特性値*
一次単純型モデル式 $N=N_0(1-\exp(-k \cdot t))+B$

土壌の種類	Ea	k	N ₀	B
細粒灰色低地土	90,000±9,200	0.00752±0.00040	195.9±11.1	17.1±7.0
中粗粒グライ土	98,000±13,800	0.00916±0.00516	80.2±17.3	15.2±6.2
礫質灰色低地土	102,100±8,000	0.00570±0.00174	152.0±17.6	14.0±4.3

一次並行型モデル式 $N=N_{01}(1-\exp(-k_1 \cdot t))+N_{02}(1-\exp(-k_2 \cdot t))+C$

土壌の種類	Ea ₁	Ea ₂	k ₁	k ₂	N ₀₁	N ₀₂	C
細粒灰色低地土	49,000	109,700	0.0263	0.00391	56.4	177.7	10.6
	±13,800	±15,500	±0.0096	±0.00044	±6.0	±11.9	±6.6
中粗粒グライ土	55,700	110,900	0.0905	0.00458	18.7	80.0	8.0
	±22,200	±26,000	±0.0306	±0.00118	±8.4	±19.9	±4.1
礫質灰色低地土	43,100	113,900	0.0521	0.00378	21.0	161.8	7.7
	±25,500	±10,900	±0.0044	±0.00080	±10.3	±32.3	±3.0

*3か年の平均値±標準偏差で示した

N: 無機化窒素集積量 (mg kg⁻¹), Ea: 見かけの活性化エネルギー (J mol⁻¹)

k: 25°Cにおける反応速度定数 (day⁻¹), N₀: 可分解性有機態窒素量 (mg kg⁻¹), B, C: 定数 (mg kg⁻¹)

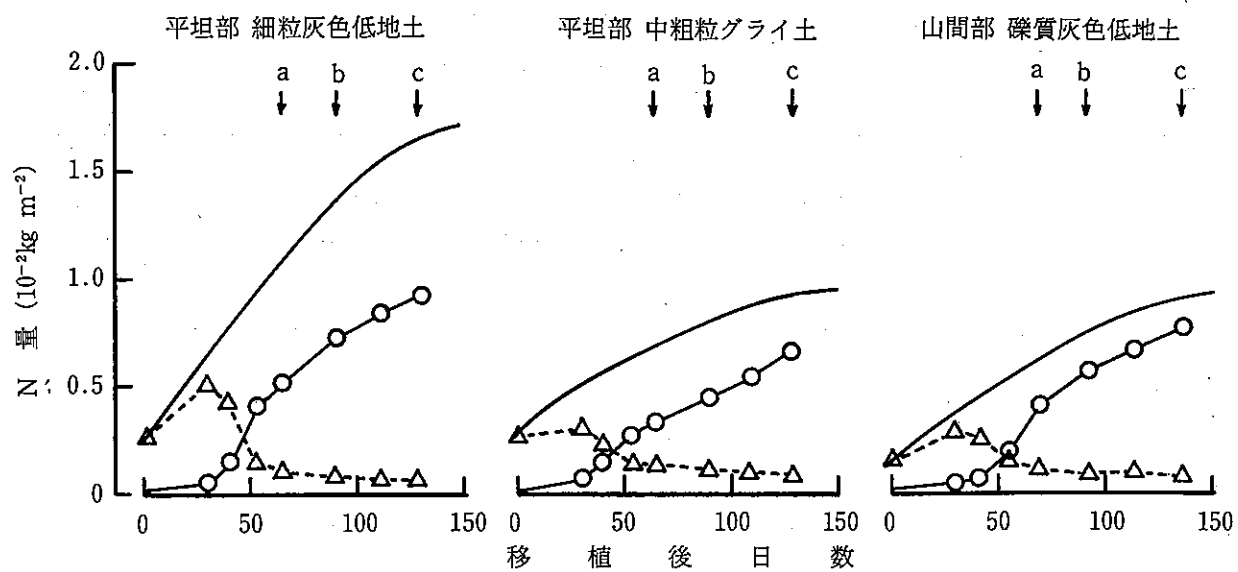
素無機化特性値を第2表に示した。無機化特性値は一次単純型モデルと一次並行型モデルについて求めた。細粒灰色低地土水田、中粗粒グライ土水田ともに単純型よりも並行型モデルの適合性が高く、礫質灰色低地土水田に対しては1989年を除いて並行型モデルが適合した。作土の可分解性有機態窒素量 (N_{01} , N_{02}) の値は、細粒灰色低地土水田で最も高く、礫質灰色低地土水田がこれに次いでおり、中粗粒グライ土水田では両水田土壌の2/5~1/2程度と少なかった。また、細粒灰色低地土水田では可分解性窒素量の1/4程度が分解速度定数の大きい画分 (N_{01}) であった。一方、中粗粒グライ土水田及び礫質灰色低地土水田では可分解性窒素のほとんどが分解速度定数の小さい画分 (N_{02}) であった。見かけの活性化エネルギー (E_{a1} , E_{a2}) は土壌間で大差がなかったが、分解速度定数 (k_1 , k_2) は中粗粒グライ土水田で大きい傾向が認められた。また、細粒灰色低地土水田と礫質灰色低地土水田の速度定数を比較すると、 k_2 には大差がないが、 k_1 の値は後者で大きかった。

稲作期間に作土から無機化してくる窒素量(無機化窒素供給量)の推移を、水稻の窒素吸収経過並びに作土の残存アンモニア態窒素量の推移と対比して第1図に示した。無機化窒素供給パターンは、速度論的方法により培養実験で得られた最適モデル式に試験地水田

の地温データから計算した25°C変換日数を代入して求めた推定曲線である。各水田とも無機化窒素供給量及び水稻の窒素吸収量には年次変動がみられた。しかし、地帯又は土壌の種類間における相対的な差異については、各年次とも同一の結果が得られたので、ここでは3か年の平均値を図示し、できるだけ平面的なパターンを把握しようとした。

第1図の残存アンモニア態窒素の推移から明らかのように、移植時にはすでに作土にアンモニア態窒素の集積がみられ、その量は、平坦部水田で1㎡当り0.0025kg前後、山間部水田で0.0015kg前後であった。なお、無機化窒素供給量の推定に当たっては、移植時の推定集積量が実測値に近似するように、移植日までに経過した日数の無機化量への寄与を25°C変換日数で見積り、モデル計算を行った。

移植後の日数経過に伴う無機化窒素供給量(推定累積値)の推移を見ると、第1図に示したように平坦部の細粒灰色低地土水田では移植期からほぼ直線的な増加パターンを示したが、平坦部中粗粒グライ土水田及び山間部礫質灰色低地土水田では移植期における速度が最も大きく、移植期~移植後30日頃にかけて曲線の勾配が次第に緩やかとなった。その後は各水田とも単調な増加パターンを示し、移植後30日~100日前後まではほぼ直線で近似できた。この時期の直線の勾配



第1図 無窒素区における作土の無機化窒素供給パターンとコシヒカリの窒素吸収経過 (1987~'89年の平均値)
 — 無機化N供給パターン —○— 地上部N保有量 - - -△- - - 作土残存NH₄-N量
 a: 幼穂形成期 b: 出穂期 c: 成熟期

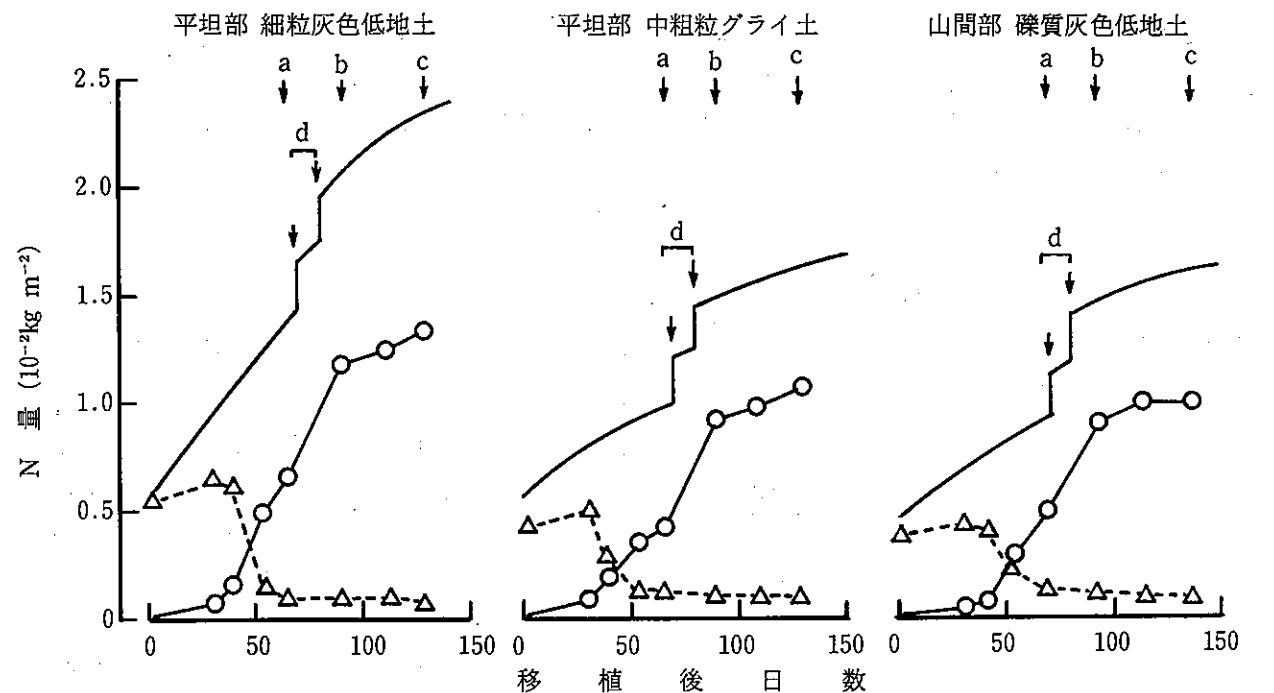
(平均窒素供給速度)は、試験地水田のなかでは平坦部の細粒灰色低地土水田が最も大きく、平均速度は $1.2 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 程度と推定された。これに対し、平坦部の中粗粒グライ土水田の供給速度は $0.46 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、山間部の礫質灰色低地土水田では $0.58 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で、平坦部の細粒灰色低地土の2/5~1/2程度と推定された。また、移植後100日頃から無機化窒素の供給速度が徐々に低下し、成熟期には推定累積供給量がほぼ上限値に達した。

成熟期までの無機化窒素供給量(推定累積値)は、平坦部の細粒灰色低地土水田において 0.017 kg m^{-2} に達し、このうち幼穂形成期までに 0.011 kg m^{-2} の窒素が供給された。これらの値は同じ平坦部の中粗粒グライ土水田の1.6~1.8倍に相当した。山間部の礫質灰色低地土水田は、風乾土を30°Cで4週間インキュベーションして得られるアンモニア態窒素生成量が多いにもかかわらず、成熟期までの無機化窒素供給量は 0.0091 kg m^{-2} 、幼穂形成期までのそれは 0.0062 kg m^{-2} と推定され、平坦部の中粗粒グライ土水田より若干少なかった。

コシヒカリの窒素吸収経過と作土の無機化窒素供給パターンを対比してみると、まず、平坦部及び山間部水田とも移植後30日前後までは窒素の供給速度が吸収

速度を上回り、作土中にアンモニア態窒素の集積が認められた。アンモニア態窒素の集積量は、移植後30日前後に最大値に達し、その量は平坦部中粗粒グライ土水田及び山間部水田の $0.0027 \sim 0.0030 \text{ kg m}^{-2}$ に対し、平坦部の細粒灰色低地土水田では 0.0050 kg m^{-2} 前後と多かった。その後、平坦部水田では窒素吸収速度が急速に高まり、移植後40~50日にかけて全生育期間中最大となって、土壌からの窒素供給速度を上回った。この時期、作土中のアンモニア態窒素量は急速に低下し、移植後55日(7月1日)前後には残存窒素量は両水田土壌とも $0.0012 \sim 0.0014 \text{ kg m}^{-2}$ 程度になった。これは、乾土1kg当り8~10mgに相当する窒素量である。一方、山間部でも類似した対応関係がみられるが、詳細にみると、窒素吸収速度が最大となる時期は移植後55日~70日にかけてであり、平坦部より15日前後の遅れが認められた。このため、残存窒素量が乾土1kg当り10mg以下となるのは移植後70日(7月15日)頃であった。平坦部及び山間部水田とも残存窒素量がそれ以上大きく低下しなくなった時点で、窒素吸収速度は無機化窒素供給速度にほぼ等しくなり、その後は土壌の窒素供給速度に近似した速度で窒素が吸収された。

第2図には、標肥区における窒素供給パターンとコ



第2図 標肥区における窒素供給パターンとコシヒカリの窒素吸収経過 (1987~'89年の平均値)
 — N供給パターン —○— 地上部N保有量 - - -△- - - 作土残存NH₄-N量
 a: 幼穂形成期 b: 出穂期 c: 成熟期 d: 穂肥

シヒカリの窒素吸収経過を示した。ここでは、無機化窒素供給量に基肥及び穂肥窒素量を加算し、施肥を加味した窒素供給パターンとして図示した。

第2図を第1図と対比してみると、標肥区では基肥窒素の施用により移植時の作土に残存する窒素量が増加し、これに対応して移植後30～55日における水稻の窒素吸収速度も無窒素区に比べ増加していることがわかる。しかし、無窒素区と同様に、残存窒素量の減少に伴って窒素の吸収速度も低下し、残存窒素量が下限に達した後は、吸収速度が供給速度に律速される傾向がうかがわれた。なかでも、無機化窒素の供給速度が小さい平坦部の中粗粒グライ土水田において吸収速度の低下が顕著で、移植後40日～幼穂形成期における窒素吸収量が他の水田に比べ少ない特徴が認められた。また、幼穂形成期から出穂期にかけ、穂肥の施用に対応して窒素吸収速度が顕著に増大し、それぞれ施用しない場合に比べ細粒灰色低地土水田で2.6倍、中粗粒グライ土水田で4.4倍、礫質灰色低地土水田で2.5倍に高まった。しかし、出穂期以降は窒素吸収速度が急速に低下し、出穂期～成熟期における吸収量は標肥区よりむしろ無窒素区で多かった。

標肥区における作土中の残存窒素量は無窒素区に類似したパターンで推移し、窒素量が下限値に達する時期は無窒素区とほとんど差がなかった。なお、穂肥の施用で出穂前20日～10日にかけて作土の残存窒素量が一時的に増加した(データ省略)が、出穂期にはすでに無窒素区並に残存量が低下していた。これは、この時期の窒素吸収速度が大きいため、穂肥として施用した窒素が出穂期までにほぼ消失したことを示してい

る。
2. 地帯及び土壌条件の違いがコシヒカリの生育、収量に及ぼす影響

各試験年次におけるコシヒカリの生育ステージの経過を第3表に示した。第4表には無窒素区と標肥区におけるコシヒカリの収量及び収量成立に関連する諸形質を示した。また、標肥区における茎数の推移と葉身窒素濃度の推移を第3図及び第4図に示した。

まず、標肥区における生育及び収量の年次変動を第3表及び第4表よりみると、1987年は初期から生育が旺盛で、分けつの発生数が多く、生育ステージの進みも平年に比べて速かった。このため、平坦部の細粒灰色低地土水田と山間部の礫質灰色低地土水田では最高茎数が多くなり、穂数も前者は1㎡当り440本、後者で430本と多く、総粒数は35,000粒を上回った。しかし、両試験地水田とも登熟が不良で、収量は他の年次と同等か若干少なめであった。他方、1988年及び'89年は、生育ステージの進みが遅れ、'87年に比べて幼穂形成期及び出穂期が平坦部で9日、山間部で3～5日程度遅かった。平坦部水田では、両年とも初期の分けつ発生は緩慢であったが、分けつ期後半の茎数増加割合が大きく、穂数では1988年の細粒灰色低地土水田を除き'87年と大差なかった。一穂粒数及び総粒数については、1988年は'87年に比べいずれもやや少なかったが、'89年は'87年と同水準にあった。山間部水田では、1988年及び'89年は初期生育が強く抑制されたうえ、分けつ期後半の回復が十分でなく、穂数、総粒数とも'87年を大きく下回った。平坦部、山間部とも、1988年及び'89年は登熟が比較的良好で、収量は

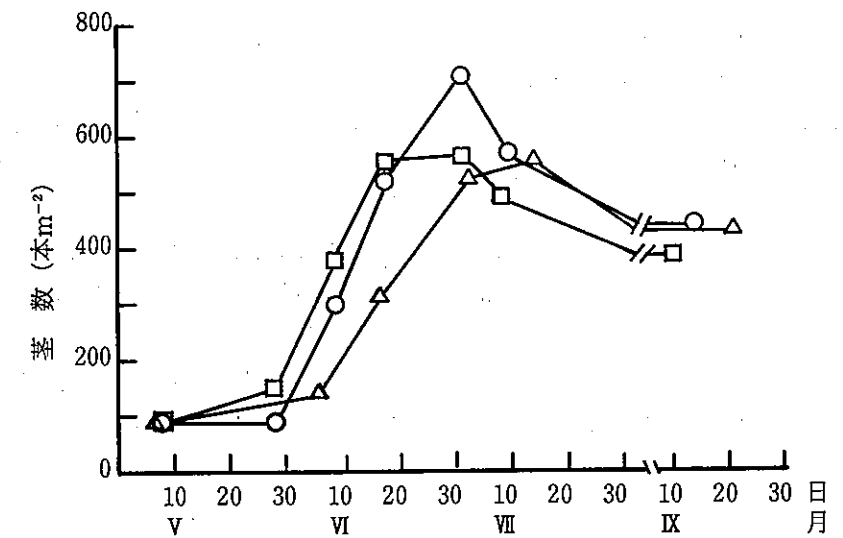
第3表 標肥区におけるコシヒカリの生育ステージ (月・日)

地帯	土壌の種類	年次	移植期	幼穂形成期	出穂期	成熟期
平坦部	細粒灰色低地土	1987	5. 8	7. 7	8. 1	9.14
		1988	5. 9	7.12	8. 8	9.16
		1989	5. 8	7.14	8. 8	9.14
平坦部	中粗粒グライ土	1987	5. 8	7. 5	7.30	9.10
		1988	5. 9	7.12	8. 7	9.16
		1989	5. 8	7.14	8. 8	9.14
山間部	礫質灰色低地土	1987	5. 7	7.14	8. 7	9.21
		1988	5.10	7.17	8.10	9.22
		1989	5.10	7.19	8.10	9.22

第4表 無窒素区及び標肥区におけるコシヒカリの生育、収量及び収量構成要素

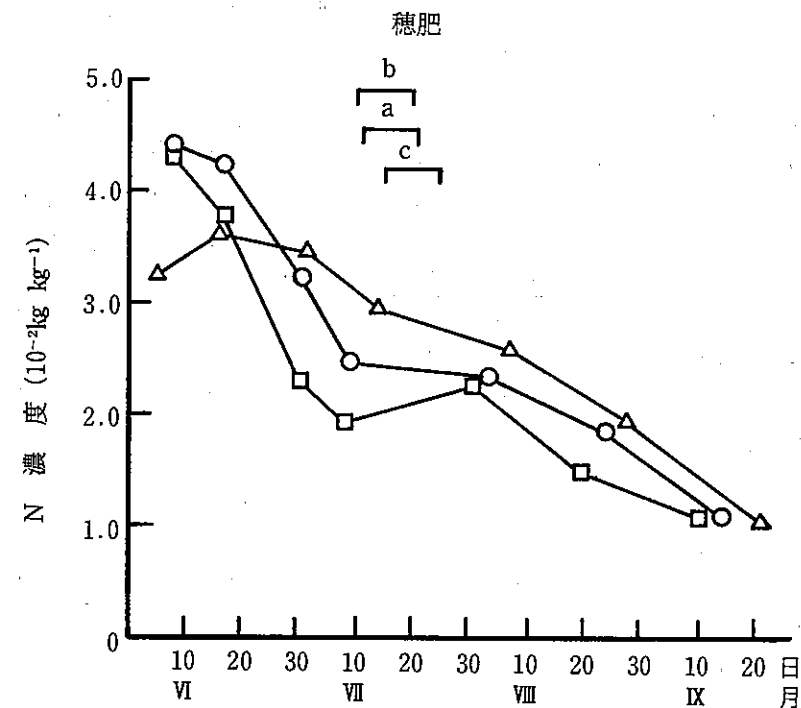
処理区	地帯及び土壌の種類	年次	最高茎数 (本m ⁻²)	LAI (出穂期)	穂数 (本m ⁻²)	1穂粒数	総粒数 (10 ³ m ⁻²)	登熟歩合 (%)	玄米千粒重 (10 ⁻³ kg)	籾/わら	玄米重 (10 ³ kg ha ⁻¹)	倒伏程度* (収穫期)
無窒素区	平坦部 細粒灰色低地土	1987	655	4.78	403	68.7	277	90.7	21.6	1.08	53.9	3
		1988	556	4.12	366	65.3	239	91.9	21.4	0.924	47.0	2
		1989	578	4.88	406	72.8	295	88.9	21.2	1.05	55.7	3
		平均	596	4.59	392	68.9	270	90.5	21.4	1.02	52.2	-
	平坦部 中粗粒グライ土	1987	475	2.76	322	57.3	185	93.3	21.7	0.970	37.2	1~2
		1988	442	3.11	300	50.9	153	93.1	21.7	0.771	30.8	0
		1989	466	3.12	306	60.8	186	92.5	21.0	1.00	36.1	0
		平均	461	3.00	309	56.3	175	93.0	21.5	0.914	34.7	-
	山間部 礫質灰色低地土	1987	442	3.84	342	80.1	274	83.9	20.6	1.29	47.4	0
		1988	366	3.09	331	78.9	261	92.7	21.7	1.34	52.5	0
		1989	416	2.10	344	64.8	223	93.3	21.8	1.28	45.3	0
		平均	408	3.01	339	74.6	253	90.0	21.4	1.30	48.4	-
標肥区	平坦部 細粒灰色低地土	1987	707	5.88	441	80.8	356	73.5	22.0	1.07	57.3	5
		1988	642	7.47	429	77.8	334	78.8	22.0	0.988	57.8	5~6
		1989	625	6.02	452	79.6	360	79.0	21.1	1.08	59.9	4~5
		平均	658	6.46	441	79.4	350	77.1	21.7	1.05	58.3	-
	平坦部 中粗粒グライ土	1987	561	4.54	388	68.9	267	90.5	22.6	1.12	54.3	3
		1988	589	4.90	390	64.5	251	93.7	23.7	1.02	55.7	3
		1989	604	4.91	383	69.3	265	90.4	22.6	1.06	54.1	2
		平均	585	4.78	387	67.6	261	91.5	23.0	1.07	54.7	-
	山間部 礫質灰色低地土	1987	559	5.17	431	81.4	351	71.8	20.9	1.32	52.8	3
		1988	415	3.68	380	78.9	300	82.3	22.0	1.44	54.4	0~1
		1989	451	3.17	363	77.1	280	91.1	22.2	1.38	56.6	1
		平均	475	4.01	391	79.1	310	81.7	21.7	1.38	54.6	-

*倒伏程度 0 (無), 1 (微) 10~15', 2 (少) 16~30', 3 (中) 31~60', 4 (多) 61~70', 5 (甚) 穂が地上につく, 6 (挫折)



第3図 標肥区におけるコシヒカリの茎数の推移 (1987年)

○平坦部 細粒灰色低地土 □平坦部 中粗粒グライ土 △山間部 礫質灰色低地土



第4図 標肥区におけるコシヒカリの葉身窒素濃度の推移 (1987年)

○平坦部 細粒灰色低地土 □平坦部 中粗粒グライ土 △山間部 礫質灰色低地土

穂肥 a: 平坦部 細粒灰色低地土, b: 平坦部 中粗粒グライ土, c: 山間部 礫質灰色低地土

'87年と同等かそれをやや上回った。なお、平坦部の中粗粒グライ土水田は、他の水田に比較して、収量及び収量構成要素の年次間差が小さかった。一方、無窒素区の収量及び収量成立に関連する形質をみると、収量を除いては標肥区と同様の変動傾向が認められた。無窒素区では登熟歩合や千粒重の年次間差が比較的小さく、収量は総粒数の多少に支配される傾向にあった。

1987年に水稻生育が旺盛であったのは、移植期から7月上旬まで比較的好天に恵まれ、高温多照に経過したためと考えられる。また、登熟が劣った理由としては、総粒数が多かったことと、7月中旬以降の日照不足と台風12号による倒伏の影響があげられる。ただし、平坦部の中粗粒グライ土水田では登熟歩合が90%台と高く、登熟への気象条件の影響はほとんど認められなかった。これは総粒数が少なかったためであろう。1988年と'89年に初期の分けつ発生が抑制されたのは、5月下旬～6月中旬の低温と日照不足が原因と考えられる。

次に、試験地間において水稻の生育、収量及び収量成立に関連する諸形質を比較すると、分けつ期の茎数増加速度は、第3図のように山間部水田より平坦部水田が明らかに大きく、最高分けつ期に達する時期は平

坦部水田で6月末～7月始めであったが、山間部水田ではこれより2週間程度遅い7月中旬頃であった。また、山間部水田における最高分けつ期の茎数は平坦部の中粗粒グライ土水田と同等かやや少なめであったが、有効茎歩合が高いため穂数では山間部水田の方がむしろ上回った。なお、第3表に示したように、山間部水田では幼穂形成期が平坦部水田に比べ5～9日遅く、出穂期は2～7日遅かった。平坦部の中粗粒グライ土水田と細粒灰色低地土水田で茎数の推移を比較すると、初期生育は中粗粒グライ土水田の方が良好で、移植後40日頃までの茎数も多かった。しかし、細粒灰色低地土水田では、移植後40日以降の茎数増加割合が大きく、最高分けつ期の茎数は中粗粒グライ土水田より多くなり、穂数でも後者を上回った。このような地帯又は土壌条件に起因する生育経過の相対的な差異については試験年次によらずほぼ同一の結果が得られた。

葉身窒素濃度の推移についても、第4図のように試験地による明瞭な差が認められた。すなわち、平坦部水田では移植後の葉身窒素濃度の上昇が速やかで、6月上旬には窒素濃度が最大値に達したのに対し、山間部水田では6月15～20日に最大となった。更に、最大

となった時点の葉身窒素濃度は平坦部水田の方が高く、6月20日前後まで山間部水田より高めに推移した。その後幼穂形成期にかけて平坦部水田で窒素濃度の低下が著しく、6月30日前後(最高分けつ期)以降は逆に濃度低下が緩やかな山間部水田の方が終始高めに推移した。また、平坦部の中粗粒グライ土水田では細粒灰色低地土水田に比べて、活着後の稲体窒素濃度の上昇は速やかであることが葉色の観察から推察されたが、移植後30日以降は生育日数の経過に伴う葉身窒素濃度の低下速度が大きく、細粒灰色低地土水田に比べて常に低い濃度で推移した。また、中粗粒グライ土水田では穂肥の施用による葉身窒素濃度の上昇が顕著であった。

無窒素区の収量及びこれに関連する形質のうち登熟歩合と千粒重は試験地による差が小さかったが、それ以外の形質については、第4表に示したように、いずれも顕著な差が認められた。無窒素区の玄米収量は、平坦部の細粒灰色低地土水田が3か年平均で5,220kg ha⁻¹と供試水田の中では最も高く、山間部の礫質灰色低地土水田が4,840kg ha⁻¹でこれに次いで高かった。平坦部の中粗粒グライ土水田の収量はそれらを大幅に下回り、3年間の平均収量は細粒灰色低地土水田の66%程度であった。単位面積当りの穂数及び総粒数は平坦部の細粒灰色低地土水田が最も多く、山間部の礫質灰色低地土水田がこれに次ぎ、平坦部の中粗粒グライ土水田は最も少なかった。無窒素区における収量の試験地間差はこの総粒数の違いに起因していた。平坦部の細粒灰色低地土水田では1㎡当り穂数が366～406本、総粒数が23,900～29,500粒に達し、窒素無施用でも中粗粒グライ土水田の標肥区に匹敵する粒数が生産された。

一方、標肥区の玄米収量については、無窒素区ほど試験地による顕著な差は認められなかったが、平坦部の細粒灰色低地土水田の収量は他の試験地に比べて高く、平坦部の中粗粒グライ土水田と山間部の礫質灰色低地土水田の収量はほぼ同等の水準にあった。

平坦部の細粒灰色低地土水田の標肥区では倒伏が著しく、3か年とも倒伏程度が4(多)を超えていた。出穂期の葉面積指数(LAI)は5.9～7.5と大きく、1㎡当り総粒数は33,000～36,000粒の範囲にあり、登熟歩合は80%を下回っていた。一方、平坦部の中粗粒グライ土水田では、出穂期のLAIは4.5～4.9程度で、収穫期の倒伏程度も3(中)を上回ることにはなかった。また、収量構成要素のうち1㎡当り総粒数は26,000粒

前後で、目標とした32,000粒を大きく下回った。山間部の礫質灰色低地土水田では、出穂期のLAIは1987年が5.2で平坦部の中粗粒グライ土水田よりも大きかったが、'88年及び'89年は3.2～3.7程度と中粗粒グライ土水田よりかなり小さい値を示した。両水田の単位面積当りの穂数には大差がなかったが、一穂粒数は山間部水田の方が多く、総粒数では中粗粒グライ土水田を上回った。更に、平坦部水田におけるコシヒカリの粒/わら比は1.0前後であったのに対し、山間部水田では1.3～1.4と高く、生産された乾物の粒への分配率が山間部で高い特徴が認められた。

各試験地水田における窒素の施用効果を無窒素区と標肥区との比較でみると、平坦部の中粗粒グライ土水田では、窒素施肥により出穂期LAI、穂数及び総粒数が顕著に増加し、玄米収量は58%増加した。これに対し、平坦部の細粒灰色低地土水田と山間部の礫質灰色低地土水田では、窒素施肥により出穂期LAIが30～40%、総粒数が20～30%増加したものの、登熟歩合の低下割合が大きく、収量の増加率は12～13%程度にとどまった。

3. コシヒカリの窒素保有量と適正施肥量

コシヒカリの稲体地上部窒素保有量を第5表に示した。山間部の礫質灰色低地土水田は、平坦部の細粒灰色低地土及び中粗粒グライ土水田に比べて、窒素施用の有無にかかわらず、移植期～移植後55日前後(平坦部の最高分けつ期)の生育初期における水稻の窒素吸収量が少なく、また、成熟期の窒素保有量に対する生育初期の保有量の比率も山間部水田で低い傾向が認められた。一方、山間部水田では、移植後55日前後から幼穂形成期にかけての窒素吸収量が平坦部水田より多く、幼穂形成期の窒素保有量は平坦部の細粒灰色低地土水田には及ばないものの中粗粒グライ土水田を上回った。出穂期以降の各時期における窒素保有量は、無窒素区では平坦部細粒灰色低地土水田が最も多く、次いで、山間部礫質灰色低地土水田、平坦部中粗粒グライ土水田の順であり、標肥区では平坦部細粒灰色低地土、平坦部中粗粒グライ土、山間部礫質灰色低地土の順であった。ただし、1987年の標肥区では山間部水田が平坦部の中粗粒グライ土水田を若干上回った。

平坦部の細粒灰色低地土水田と中粗粒グライ土水田では、移植後40日前後までは後者の窒素保有量がやや多い傾向が認められたが、その後は逆転し、細粒灰色低地土水田における窒素保有量が中粗粒グライ土水田を終始上回った。

第5表 無窒素区及び標肥区におけるコシヒカリの稲体地上部窒素保有量

処理区	地帯及び 土壌の種類	年次	N 保有量 (10 ⁻² kg m ⁻²)						
			移植後 30日目	移植後 40日目	最高 分けつ期*	幼穂 形成期	出穂期	出穂後 20日目	成熟期
無窒素区	平坦部 細粒灰色低地土	1987	0.066	0.182	0.520	0.540	0.730	0.900	0.960
		1988	0.037	0.129	0.330	0.477	0.619	0.749	0.808
		1989	0.035	0.092	0.339	0.510	0.791	0.836	0.973
		平均	0.046	0.134	0.396	0.509	0.713	0.828	0.914
	平坦部 中粗粒グライ土	1987	0.093	0.182	0.280	0.300	0.440	0.560	0.700
		1988	0.047	0.123	0.211	0.308	0.405	0.500	0.606
		1989	0.041	0.097	0.276	0.346	0.442	0.524	0.619
		平均	0.060	0.134	0.256	0.318	0.429	0.528	0.642
	山間部 礫質灰色低地土	1987	0.025	0.053	0.210	0.370	0.600	0.670	0.800
		1988	0.029	0.080	0.155	0.461	0.556	0.704	0.743
		1989	0.024	0.061	0.195	0.369	0.539	0.627	0.738
		平均	0.026	0.065	0.187	0.400	0.565	0.667	0.760
標肥区	平坦部 細粒灰色低地土	1987	0.085	0.214	0.540	0.650	1.140	1.360	1.370
		1988	0.045	0.151	0.504	0.623	1.201	1.124	1.255
		1989	0.049	0.100	0.422	0.672	1.177	1.227	1.357
		平均	0.060	0.155	0.489	0.648	1.173	1.237	1.327
	平坦部 中粗粒グライ土	1987	0.130	0.264	0.370	0.380	0.880	0.950	1.070
		1988	0.059	0.180	0.339	0.413	0.930	0.969	1.138
		1989	0.051	0.119	0.332	0.466	0.907	0.989	0.969
		平均	0.080	0.188	0.347	0.420	0.906	0.969	1.059
	山間部 礫質灰色低地土	1987	0.032	0.057	0.310	0.480	1.040	1.240	1.100
		1988	0.029	0.072	0.226	0.496	0.799	0.884	0.947
		1989	0.040	0.079	0.300	0.470	0.821	0.833	0.887
		平均	0.034	0.069	0.279	0.482	0.887	0.986	0.978

*移植後55日前後(6月30日~7月4日)で平坦部の莖数が最も多くなった時期

第5表の窒素保有量を筆者ら¹⁾の得た平坦部のコシヒカリの適正窒素保有量と対比してみると、3か所のうち、平坦部の細粒灰色低地土水田では、標肥区で適正値を上回っており、無窒素区でも幼穂形成期の保有量は平均0.0051kg m⁻²と、ほぼ適正水準に達していた。これに対し、平坦部の中粗粒グライ土水田と山間部水田では、無窒素区はもちろん標肥区の保有量も適正値を下回っていた。

なお、成熟期における標肥区の地上部窒素保有量に占める土壌由来窒素(無窒素区の窒素保有量)の割合は、山間部礫質灰色低地土水田が3か年平均で78%と最も高く、次いで平坦部細粒灰色低地土水田の69%、

平坦部中粗粒グライ土水田の61%の順であった。

第6表には単位窒素保有量当たりの穂数、総穂数及び玄米収量を示した。これらの数値は目的とする収穫物生産に対する窒素養分の効率を示す指標となることから、窒素の生産能率と呼ばれる。山間部水田における窒素の穂数生産能率は、各年次とも平坦部の中粗粒グライ土水田には及ばないものの、細粒灰色低地土水田よりも高く、その穂数生産能率は平坦部の両水田を上回った。玄米生産能率についても、1987年に山間部水田で平坦部の中粗粒グライ土水田より若干低い値が得られた以外は、いずれも山間部水田の方が生産能率が高かった。平坦部の細粒灰色低地土水田と中粗粒

第6表 標肥区におけるコシヒカリの単位窒素保有量当り穂数、総穂数及び玄米収量

地帯	土壌の種類	年次	穂数生産能率* ¹ (10 ³ 本kg ⁻¹)	籾数生産能率* ² (10 ⁵ kg ⁻¹)	玄米生産能率* ³ (kg kg ⁻¹)
平坦部	細粒灰色低地土	1987	67.8	31.2	41.8
		1988	68.9	27.8	46.1
		1989	67.3	30.6	44.1
		平均	68.0	29.9	44.0
平坦部	中粗粒グライ土	1987	102.1	30.3	50.7
		1988	94.4	27.0	48.9
		1989	82.2	29.2	55.8
		平均	92.9	28.8	51.8
山間部	礫質灰色低地土	1987	89.8	33.8	48.0
		1988	76.6	37.5	57.4
		1989	77.2	34.1	63.8
		平均	81.2	35.1	56.4

*1 1m²当り穂数/幼穂形成期の稲体窒素保有量 (kg m⁻²)

*2 1m²当り総穂数/出穂期の稲体窒素保有量 (kg m⁻²)

*3 玄米収量 (kg m⁻²)/成熟期の稲体窒素保有量 (kg m⁻²)

第7表 土壌窒素供給量と適正窒素保有量から求めたコシヒカリの適正施肥量

地帯	土壌の種類	適正N保有量* ¹ (10 ⁻² kg m ⁻²)		作土の無機化N供給量 (10 ⁻² kg m ⁻²)		土壌N吸収量 (10 ⁻² kg m ⁻²)		N利用率 (%)		適正N施肥量 (10 ⁻² kg m ⁻²)	
		幼穂 形成期	出穂期	移植期~ 幼穂形成期	幼穂形成期 ~出穂期	移植期~ 幼穂形成期	幼穂形成期 ~出穂期	基肥	穂肥	基肥	穂肥
平坦部	細粒灰色低地土	0.52	1.02	1.08	0.29	0.509	0.204	46.3	80.3	0.02	0.37
平坦部	中粗粒グライ土	0.52	1.02	0.69	0.12	0.318	0.111	34.0	93.8	0.59	0.41
山間部	礫質灰色低地土	0.52* ²	0.91* ³	0.62	0.14	0.400	0.165	27.3	60.0	0.44	0.38

*1 目標収量を5,500~6,000kg ha⁻¹とした場合の適正保有量 *2 穂数生産能率から計算 *3 籾数生産能率から計算

グライ土水田では、各年次とも籾数生産能率は前者が若干高いものの、穂数生産能率及び玄米生産能率はいずれも後者が高かった。

前述のように、各試験地水田の標肥区におけるコシヒカリの窒素保有量が適正値を上回っているか、又は逆にそれを下回っていることが判明したので、試験地水田別に適正施肥量の算出を試み、計算結果を第7表に示した。適正施肥量は、島根県の施肥基準に従い基肥と穂肥による施用を想定したものであり、別報¹⁾と同様に土壌からの窒素供給量と適正窒素保有量に基づいて計算した。なお、計算に用いた数値はいずれも3か年の平均値を用いた。また、山間部のコシヒカリについては最適生育相並びに適正窒素保有量が未検討で

あったので、ここでは平坦部に準じて1m²当り適正穂数を420本、適正籾数を32,000粒とし、第6表に示した窒素の穂数生産能率と籾数生産能率から上記の穂数及び籾数を生産するのに必要な窒素保有量を求めた。その結果、幼穂形成期の適正保有量は0.0052kg m⁻²で平坦部と一致したが、出穂期の適正保有量は0.0091kg m⁻²と平坦部よりやや少なめとなった。なお、山間部水田の標肥区の窒素保有量は、1987年を除いてこの適正値を下回っていた。

施肥量の計算によって求めた基肥窒素の適正量は、平坦部の細粒灰色低地土水田でわずか0.0002kg m⁻²であったのに対し、平坦部の中粗粒グライ土水田及び山間部の礫質灰色低地土水田では、それぞれ0.0059kg

m⁻², 0.0044kg m⁻²と慣行の標準施肥量 (0.003kg m⁻²) よりかなり多くなった。他方、穂肥窒素の適正量は0.0037~0.0041kg m⁻²の範囲にあって、地帯又は土壌条件による差は小さく、しかも標準施肥量 (0.004kg m⁻²) に近い値が得られた。

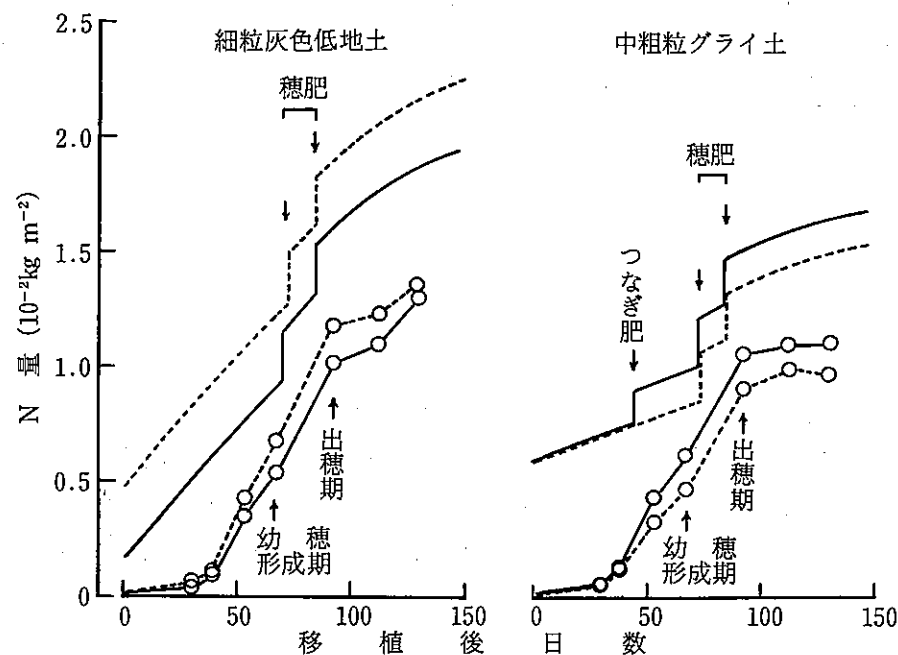
4. 窒素施肥法の改善とその効果

前項で述べたコシヒカリの適正施肥量は、3か年 (1987~'89年) の平均窒素保有量を基礎として算出したものであるが、1987~'88年の2か年の試験結果からもほぼ同じ数値が得られた。そこで、1989年には平坦部水田を対象として、第8表に示すような土壌類型別の窒素施肥法を策定し、その効果について検討した。施肥法の策定にあたっては、慣行の施肥法を基本型とし、これに部分的な修正を加えた。平坦部の細粒灰色低地土水田では、算出した基肥窒素の適正量が0.0002kg m⁻²とわずかであったので、基肥窒素は無

施用とした。中粗粒グライ土水田では基肥窒素の適正量が0.0059kg m⁻²と計算されたが、ここでは基肥窒素を増施するかわりに移植後40日目につなぎ肥として窒素0.0015kg m⁻²を施用した。これは、第2図及び第5表から明らかなように、中粗粒グライ土水田では初期生育が旺盛で分けつ期前半の窒素吸収量が比較的多いためと、移植後40日~幼穂形成期における窒素吸収速度が小さく、この時期の窒素供給量が不足していると判断されたためである。この時期の施肥窒素の利用率は50%程度と推定されるので、つなぎ肥から吸収される窒素量に基肥と土壌から吸収される量を合わせると、幼穂形成期までに適正水準に近い窒素量が吸収される計算になる。穂肥窒素については適正量が0.0037~0.0041kg m⁻²で、しかも土壌の種類による差が小さいことから、ここでは慣行の標肥と等量の0.004kg m⁻²とした。ただし、細粒灰色低地土水田で

第8表 土壌類型別の窒素施肥法 (1989年, 平坦部)

土壌の種類	施肥 N 量 (10 ⁻² kg m ⁻²)					合計
	基肥	つなぎ肥	穂 肥			
			出穂25日前	出穂20日前	出穂10日前	
細粒灰色低地土	—	—	0.2	—	0.2	0.4
中粗粒グライ土	0.3	0.15	—	0.2	0.2	0.85



第5図 窒素施肥法の改善がコシヒカリの窒素吸収経過に及ぼす影響 (1989年, 平坦部)

----- N供給パターン } 標肥区
 -○- N保有量 }
 ----- N供給パターン } 改善区
 -○- N保有量 }

第9表 改善区におけるコシヒカリの生育, 収量及び収量構成要素 (1989年, 平坦部)

土壌の種類	最高莖数 (本m ⁻²)	LAI (出穂期)	穂数 (本m ⁻²)	1穂粒数	総粒数 (10 ³ m ⁻²)	登熟歩合 (%)	玄米千粒重 (10 ⁻³ kg)	籾/わら	玄米重 (10 ³ kg ha ⁻¹)	収量比 ^{*1}	倒伏程度 ^{*2} (収穫期)
細粒灰色低地土	534	5.38	413	79.6	328	83.0	21.6	1.08	58.7	98	3~4
中粗粒グライ土	601	5.49	408	76.3	311	90.2	22.0	1.15	61.5	114	3

*1 標肥区を100とした指数

*2 倒伏程度 0 (無), 1 (微) 10~15°, 2 (少) 16~30°, 3 (中) 31~60°, 4 (多) 61~70°, 5 (甚) 穂が地上につく, 6 (挫折)

第10表 改善区におけるコシヒカリの単位窒素保有量当り穂数, 総粒数及び玄米収量 (1989年, 平坦部)

土壌の種類	穂数生産能率 ^{*1} (10 ³ 本kg ⁻¹)	粒数生産能率 ^{*2} (10 ⁵ kg ⁻¹)	玄米生産能率 ^{*3} (kg kg ⁻¹)
細粒灰色低地土	77.1	32.4	45.2
中粗粒グライ土	66.8	29.4	55.7

*1 1m²当り穂数/幼穂形成期の稲体窒素保有量 (kg m⁻²)

*2 1m²当り総粒数/出穂期の稲体窒素保有量 (kg m⁻²)

*3 玄米収量 (kg m⁻²)/成熟期の稲体窒素保有量 (kg m⁻²)

は、基肥窒素を無施用としたので、1回目の穂肥を慣行より5日早め、出穂25日前に施用した。

モデル式と地温データから推定した無機化窒素供給量に施肥窒素量を加えて得た窒素供給パターンを水稻の窒素吸収経過と対比して第5図に示した。細粒灰色低地土水田では、基肥窒素を無施用としたことで、幼穂形成期までの窒素吸収量が慣行の標肥区に比べ減少し、改善区における幼穂形成期及び出穂期の窒素保有量はそれぞれ0.0054kg m⁻², 0.0101kg m⁻²とほぼ適正水準にまで低下した。また、第9表に示すように、施肥法の改善は玄米収量の増加には結びつかなかったものの、基肥窒素無施用でも目標とする穂数及び総粒数が確保され、慣行の標肥区にほぼ匹敵する収量が得られた。更に、改善区では倒伏が軽減されるとともに、登熟歩合が向上した。中粗粒グライ土水田では、つなぎ肥を施用したことにより移植後40日~幼穂形成期の窒素吸収量が増加し、幼穂形成期並びに出穂期の窒素保有量はそれぞれ0.0061kg m⁻², 0.0106kg m⁻²と適正値を若干上回った。また、施肥法の改善によって穂数及び1穂粒数が増加し、1m²当たり総粒数も31,000粒まで増加して、玄米収量は14%高まった。

標肥区のLAIをみると細粒灰色低地土水田が6.0、中粗粒グライ土水田が4.9と両水田の間で明瞭な差が認められたが、改善区ではそれぞれ5.4及び5.5となっ

て、両者のLAIが接近した。

改善区における単位窒素保有量当りの穂数, 総粒数及び玄米収量を第10表に示した。これを標肥区と比較してみると、細粒灰色低地土水田では施肥法の改善により穂数生産能率, 粒数生産能率及び玄米生産能率がいずれも若干増加した。一方、中粗粒グライ土水田では、新しい施肥法の適用によって穂数生産能率は低下したが、粒数生産能率及び玄米生産能率には変化がなく、つなぎ肥の施用によって玄米生産能率が低下することはなかった。

IV 考 察

1. 水田の窒素供給力とコシヒカリの生育及び窒素吸収経過

水稻の生育は気温や日射量など気象条件の影響を強く受けると同時に、養分環境によっても規制され、特に窒素供給量に強く支配されることは周知の事実である。更に、本試験の結果からも明らかなように、通常の栽培条件で水稻が吸収する全窒素量のうち、60~80%は土壌由来窒素であり、水田土壌の無機化窒素供給量とその時期的推移は水稻生育の変動要因として極めて重要であると考えられる。

近年、水稻の窒素吸収パターン又は窒素保有量の診

断と予測に基づく施肥管理法の開発が進められ、その有効性が実証されつつあり^{4,8,16)}、本報でも窒素保有量に基づく地帯別、土壌類型別の適正施肥量の算出を試みた。このような施肥管理を行うためには、目標収量を得るのに必要な稲体の適正窒素保有量とともに、水田土壌からの窒素供給量について定量的な知見が必要である。本試験では、水田土壌からの窒素供給量を評価するため、無窒素栽培水稻の窒素保有量を測定するとともに、速度論的方法により作土の無機化窒素供給パターンを推定した。また、この無機化窒素供給パターンに施肥窒素量を加え、これを窒素の供給パターンとして図示した。

鳥山¹³⁾は、高橋ら¹¹⁾の見いだした水稻の窒素吸収パターンの変曲点を境にして、窒素無機化の進行過程を二つのphaseに区分できることを示し、それぞれの過程における窒素吸収パターンの変動要因を論じている。この考えに準拠し、窒素の供給パターンとコシヒカリの窒素吸収経過との対応関係をみると、第1図及び第2図に示したように、供給速度と吸収速度の相対的な大きさによって次のように生育ステージを区分できることがわかる。第1期は移植期～移植後30日頃までの時期であり、第2期は移植後30日前後～最高分けつ期(山間部水田では幼穂形成期)、第3期は最高分けつ期～成熟期までの時期である。なお、筆者らの区分は、コシヒカリの窒素吸収過程に即して生育ステージを3期に分けた点で鳥山の区分と異なるが、第1期～第2期は鳥山のphase Iに、第3期はphase IIにほぼ対応している。

第1期の特徴は、窒素供給速度が吸収速度より大きいため、作土中に無機化窒素の集積が認められることである。この時期は、まだ水稻の窒素要求量が少なく、それよりはるかに多い窒素が集積しているため、残存窒素量や供給速度がその時点における水稻の生育量や窒素吸収量の主要な制限因子とならない段階と考えられる。第2期の特徴は、吸収速度が生育日数の経過とともに急速に高まり、ついには供給速度を上回るようになって、残存窒素の急激な減少が認められることである。第2期における吸収速度の増大は、地上部生育量の増加にともなう窒素要求量の増大と、根系の発達によるものと推察される。この時期には、主として残存窒素量が吸収速度の制限因子になるものと考えられるが、その減少とともに供給速度因子の影響が次第に支配的になってくるものと考えられる。なお、丹野¹²⁾は総合計量化方式の生育予測・診断技術におい

て、移植後30日目を最初の重要な診断時期として位置づけ、この時期の作土のアンモニア態窒素(NH₄-N)量を説明変数とすることで、最高分けつ期の茎数を高い精度で予測できることを報告している。このことは、第2期における茎数や窒素吸収量の増加速度の主要な制限因子が残存窒素量であることを裏づけている。第3期は、残存窒素量がそれ以上大きく減少することのない下限値に達したのち、それがほぼ同じ水準で推移する時期であり、水稻の窒素吸収が水田の窒素供給速度に近似した速度で進行することが特徴である。この期間のうち、最高分けつ期～出穂期にかけては水稻の窒素要求量が大きく、窒素吸収能力も極めて高い時期である。しかし、残存窒素はすでに下限値にあることから、窒素の供給速度それ自体が吸収速度の律速因子になっていると考えられる。一方、出穂期～成熟期にかけては窒素要求量及び吸収能力とも徐々に低下することが知られている¹⁷⁾が、同時に無機化窒素供給速度も低下する時期である。したがって、出穂期までと区別して第4期とも呼ぶべき期間であるが、少なくとも根の養分吸収能力が高く維持されている間は、窒素供給速度が吸収速度を規制しているものと推察される。

山間部の礫質灰色低地土水田では平坦部水田に比較して、水稻の生育ステージの進みが遅れ、分けつ期における茎数、窒素保有量など量的質質の増加も抑制された。上述の観点からみると、山間部水田においても、生育ステージの第1期では窒素供給量が水稻の生育や窒素吸収の制限因子になることはなく、更に第2期についても、残存窒素量及び窒素供給速度は平坦部の中粗粒グライ土水田と同等かむしろ上回っていることから、窒素供給量の不足が生育及び窒素吸収抑制の主要な原因とは考えられない。したがって、山間部水田において初期生育が抑制されるのは、窒素供給量以外の要因によるものとするのが妥当であり、なかでも生育初期の気温が山間部で低いことが大きく影響していると考えられる。また、このように窒素の吸収量が窒素供給量よりむしろ生育量によって規制されていることが、山間部水田で葉身窒素濃度が高く推移する原因と考えられる。

平坦部の細粒灰色低地土水田と中粗粒グライ土水田で水稻の生育及び窒素吸収パターンを比較した結果、土壌の窒素供給力は前者で高いにもかかわらず、水稻の初期生育は後者が勝り、移植後40日頃までの茎数及び窒素吸収量は後者の方が多かった。しかし、細粒灰

色低地土水田では、移植後40日～最高分けつ期における茎数増加割合が大きく、また、移植後40日以降の窒素保有量でも中粗粒グライ土水田を大きく上回った。

生育ステージの第1期では窒素の残存量や供給速度が制限因子とならないことを上で述べた。ところで、伊藤³⁾は土壌中のアンモニア態窒素(NH₄-N)が水稻根に吸収される過程を数値的に解析し、水稻根へのNH₄-Nの移行におけるマスフローの寄与は小さく、ほとんどが拡散によるものであるとの結果を得ている。また、鳥山・古賀野¹⁵⁾は、水稻の初期生育に及ぼす土壌溶液中のNH₄-N濃度の影響を土耕条件で検討した結果、土壌の粘土含量の違いによって、同一施肥量でも土壌溶液中のNH₄-N濃度に著しい差を生じ、窒素10 mg kg⁻¹の増加に対し軽埴土では1 mg L⁻¹、砂土では6 mg L⁻¹の濃度上昇が起こること、更に、その濃度差に応じて、移植後3～4日で葉色や葉身長に差が生じることを認めている。なお、土壌の陽イオン吸着能は粘土含量だけでなく粘土鉱物組成によっても異なり、一般に陽イオン交換容量の大きい粘土鉱物が多いほど土壌溶液中NH₄-N濃度は低下するものと考えられる。一方、鳥山ら¹⁴⁾は、培養液循環速度が毎分10Lの流動水耕培養装置を用い、水耕液中窒素濃度が分けつ初期の水稻の生育及び窒素吸収量に及ぼす影響について検討した結果、0.3～20 mg L⁻¹の濃度範囲では分けつ初期の生育量や窒素吸収量に差が認められず、0.3 mg L⁻¹以下の非常に低い濃度領域でのみ培養液中窒素濃度の影響が認められることを報告している。また、その理由として、静止液法や土耕条件の場合にはNH₄-Nの水稻根面までの拡散速度が水稻根のNH₄-N吸収速度の律速因子となるのに対し、流動水耕培養では水耕液中のNH₄-Nの拡散速度がNH₄-N吸収速度の律速因子にならないことをあげている。

本試験では供試水田における土壌溶液中のNH₄-N濃度の測定を行っていないが、上述の知見を勘案すれば、第1期における作土の残存NH₄-N量は、細粒灰色低地土水田で多いものの、土壌溶液中のNH₄-N濃度は、粘土含量が少なく陽イオン交換容量の小さい中粗粒グライ土水田の方がむしろ高いことが予想され、その濃度差も数mg L⁻¹レベルに達することが推定される。しかも、水稻根系の未発達な第1期では、作土層における窒素量自体が制限因子とならず、土壌溶液中のNH₄-N濃度又はその拡散速度が窒素吸収速度の律速因子になることから、土壌溶液中のNH₄-N濃度

が高く、NH₄-Nの拡散速度が大きい中粗粒グライ土水田で窒素吸収速度が速まり、初期生育も促進されたものと考えられる。

一方、第2期の後半以降においては、水稻根系の発達に伴って窒素の拡散速度が律速因子でなくなるため、中粗粒グライ土水田に比較して窒素供給速度が大きく残存窒素量も多い細粒灰色低地土水田で窒素吸収速度が勝り、生育が旺盛となることは容易に理解される。また、この時期、中粗粒グライ土水田では水稻の生育量に対し窒素供給速度が相対的に小さいため、葉身窒素濃度が急速に低下したものと推察される。

2. 適正施肥窒素量の算定とその適用効果

作土の無機化窒素供給量の多い平坦部の細粒灰色低地土水田では、標肥区におけるコシヒカリの窒素保有量が、適正窒素保有量を超えていた。また、倒伏程度や収量構成要素からみても窒素保有量の水準が過剰域にあることがうかがわれた。これに対し、無機化窒素供給量の少ない中粗粒グライ土水田では、標肥区における窒素保有量が適正値を下回っており、収量構成要素からみても窒素保有量が不足していることが示唆された。山間部のコシヒカリについては、最適生育相及び適正窒素保有量が明らかでなかったため、穂数生産能率と初数生産能率から、1 m²当り穂数420本、総粒数32,000粒を生産するのに必要な窒素保有量を求め、これを適正保有量とみなした。山間部水田の標肥区におけるコシヒカリの窒素保有量は、1987年を除いてこの適正値を下回っていた。

このように供試水田の標肥区ではいずれも窒素保有量が適正水準と一致しないことが判明したので、地帯別・土壌類型別にコシヒカリに対する適正施肥量を求めた。基肥窒素の適正量は0.0002～0.0059 kg m⁻²の範囲にあって、地帯又は土壌の種類間における差が顕著であった。一方、穂肥窒素の適正量はその差が小さく、しかも慣行の標準施肥量に近い値が得られた。

ところで、適正施肥量は、土壌から供給される窒素量と適正窒素保有量との差を補うのに必要な窒素量であり、基肥については幼穂形成期における適正窒素保有量と同時期の無窒素栽培水稻の窒素保有量との差から計算される。基肥窒素の適正量はその差を基肥で補うことを想定した場合の窒素量である。しかし、この計算方式では、基肥を含め分けつ期追肥や中間追肥など幼穂形成期までに吸収が完了する時期に施される施肥は全て採用可能であり、そのうちのどの方法が最適であるかを判定することはできない。最適の施用時期と

量を決定するためには移植期～幼穂形成期における理想的な窒素吸収パターンを明らかにする必要があるが、この点については未検討であったため、施肥法の策定にあたっては実際的水稲生育及び窒素吸収量の推移を考慮して判断した。なお、島根県におけるコシヒカリの施肥基準では基肥と穂肥の組合せが基本となっており、分けつ期追肥や中間追肥は倒伏防止の観点から原則として施用しないこととしている。適正施肥量はこの施肥基準を前提として算定していることから、新しい施肥法の策定にあたってはこの基準を基本型として、これに部分的な修正を加えることを原則とした。

上述の観点から策定した施肥法を平坦部水田に適用した結果、細粒灰色低地土水田ではコシヒカリの窒素保有量が適正水準に接近し、穂数及び総粒数とも目標数が確保されたうえ、倒伏が軽減され、登熟歩合も向上した。また、基肥窒素無施用でも慣行の標肥区に匹敵する収量が得られることを実証した。なお、細粒灰色低地土水田では、基肥窒素無施用でも窒素が量的に不足することはないと考えられるが、先に述べたように、生育ステージの第1期では土壤溶液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が制限因子となって、初期生育が不安定となる可能性があり、栽植密度を高めるなど耕種的な対応も必要となろう。

中粗粒グライ土水田では、新しい施肥法の適用により、慣行の標準施肥量では不足領域にあった窒素保有量を適正水準かやや多めの水準にまで高めることができた。また、窒素保有量の増加に伴って総粒数が顕著に増加し、玄米収量では慣行の標肥区を14%上回った。

島根県ではコシヒカリに対するつなぎ肥や出穂前25日前後の早い穂肥は施用しないのが一般的である。それは、移植後40日前後～幼穂形成期における窒素施肥が下位節間の伸長を促し、倒伏を助長する危険性があるからである。しかしながら、供試した中粗粒グライ土水田のように窒素供給力の小さい水田では、この時期の窒素施肥が増収技術として有効なことを本試験の結果は示唆している。そこで、一般水田のコシヒカリに対してつなぎ肥や早期の穂肥を適用する場合には、その要否を的確に判定することが極めて重要となる。その際、水稲の生育や窒素保有量の診断とともに、生育ステージ第2期の作土残存窒素量並びに第2期～第3期における作土からの窒素供給速度が有力な判断基準になるものと考えられる。この基準を明らかにする

ことは今後の課題であるが、少なくとも窒素供給速度が今回供試した中粗粒グライ土水田の速度 $0.46 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ より小さい水田ではつなぎ肥の必要性が高いものと推察される。

標肥区におけるコシヒカリの出穂期LAIは細粒灰色低地土水田と中粗粒グライ土水田で顕著な差が認められたが、窒素施肥法の改善によっていずれも5.5付近に接近した。深山・岡部⁷⁾は千葉県を代表的水稲品種の最適生育相について検討し、コシヒカリを含む3品種の出穂期の最適LAIは5～6の範囲にあることを報告している。筆者らの試験における改善区のLAIはこの最適範囲にあり、このことは、最適窒素保有量と土壤窒素供給量に基づいて策定した施肥法が、穂数や総粒数など同化産物の受容系容量だけでなく、LAIの適正化にも有効であることを示唆している。更に、平坦部水田では、新しい施肥法の適用で単位窒素保有量当りの総粒数及び玄米収量が低下することはなく、細粒灰色低地土水田ではむしろ若干増加した。窒素養分の粒数生産能率及び玄米生産能率は吸収された窒素が収量成立に有効に寄与しているか否かを判断する指標として重要であり、施肥法の改善に当っては窒素保有量の最適化と同時に、生産能率の向上をも指向する必要があると考える。特に、窒素の玄米生産能率をできるだけ高く維持することは食味向上の必要条件であることが指摘されており²⁾、この観点からみても策定した施肥法は各水田土壤の窒素供給力に十分適合しており、実用に耐えうるものであると考えられる。ただし、細粒灰色低地土水田では中粗粒グライ土水田に比べて改善区の収量が若干劣るうえ玄米生産能率が依然として低く、なお改善の余地も残されている。

本試験では、速度論的手法により作土の無機化窒素供給パターンを推定し、水稲の窒素吸収過程との対応関係を把握した。今後この手法をさらに発展させ、無機化窒素供給パターンから水稲の窒素吸収量を予測できれば、最適施肥量の算定に便利である。そのためには、無機化窒素供給パターンの年次変動の要因解明とその評価、予測精度の向上、無機化窒素の水稲による利用率などさらに検討すべき課題も多い。また、水稲に対する窒素供給力要因として、土壤溶液中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度、残存 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量、無機化速度の3因子があり、生育ステージの推移に伴って窒素吸収量を支配する因子も変遷することを述べた。このうち最も基本的で影響力の大きいものは無機化速度であり、これは速度論的手法の導入によって初めて数値化された因子で

ある。良食味米の安定生産のためには、水稲の栄養診断技術の普及とともに、このような土壤窒素供給力に関する定量的な知見に基づく肥培管理法の確立が重要と考える。

V 摘 要

平坦部と山間部の水田において、稲作期間における土壤窒素供給力を評価するとともに、これに基づきコシヒカリに対する窒素の適正施肥量を算定した。また、適正施肥量を基に策定した施肥法を平坦部水田に適用して、その有効性を検討した。

1. 稲作期間における作土の無機化窒素供給パターンを速度論的に推定した結果、各試験地水田とも移植後30日前後から100日前後までは直線で近似できる単調な増加パターンを示し、この時期の平均的な無機化窒素供給速度は、平坦部細粒灰色低地土水田で $1.2 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、平坦部中粗粒グライ土水田で $0.46 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、山間部礫質灰色低地土水田では $0.58 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。

また、コシヒカリの生育ステージを3期に区分し、地帯又は土壤条件による水稲生育や窒素吸収パターンの変動要因を解析した。

2. 各水田の土壤窒素供給量とコシヒカリの適正窒素保有量から適正施肥量を計算した結果、基肥窒素の適正量は、平坦部細粒灰色低地土水田で 0.0002 kg m^{-2} 、中粗粒グライ土水田で 0.0059 kg m^{-2} 、山間部礫質灰色低地土水田で 0.0044 kg m^{-2} と水田の土壤窒素供給力に応じて顕著な差が認められた。一方、穂肥窒素の適正量は $0.0037 \sim 0.0041 \text{ kg m}^{-2}$ の範囲にあって地帯又は土壤条件による差は比較的小さかった。

3. 適正施肥量に基づき策定した施肥法を平坦部水田のコシヒカリに適用したところ、稲体窒素保有量の最適化とともに単位面積当り総粒数及び出穂期LAIの適正化が図られた。その結果、細粒灰色低地土水田では、倒伏の軽減や登熟歩合の向上が認められ、中粗粒グライ土水田では慣行区に比べて玄米収量が14%増加した。また、改善区の収量は $5,900 \sim 6,200 \text{ kg ha}^{-1}$ と目標の水準に達しており、新しい施肥法の適用による玄米生産能率の低下も認められなかった。

引用文献

1) 藤原耕治・古山光夫・山根忠昭 (1991)：コシヒ

カリの窒素施肥反応と適正保有量。島根農試研報 25：15-29。

2) 稲津 脩 (1985)：道産米の食味特性とその改善技術について (北海道土壤肥料懇話会第32回シンポジウム：農産物の品質をめぐる土壤肥料的諸問題)。北海道土壤肥料研究通信, p.1-16。

3) 伊藤純雄 (1992)：水稲根周辺における窒素移動のモデル的解析。土肥誌63：652-657。

4) 北田敬宇・宮川 修・塩口直樹 (1991)：水稲の理想的な窒素吸収パターンと土壤窒素無機化予測によるシステム施肥法。土肥誌62：585-592。

5) 金野隆光・杉原 進 (1986)：土壤生物活性への温度影響の指標化と土壤有機物分解への応用。農環研報1：51-68。

6) 金野隆光 (1988)：土壤窒素無機化の特性評価と窒素供給量予測プログラム。関東東海地域農業関係試験研究機関開発ソフトウェア一覧 (1987年版), IV-2~IV-3, 農研センター。

7) 深山政治・岡部達雄 (1984)：水稲の品種特性と最適窒素保有量。土肥誌55：1-8。

8) 深山政治・岡部達雄 (1986)：水稲の窒素吸収特性の品種間差と施肥法。土肥誌57：272-279。

9) 中川 徹 (1979)：あてはめ法の新しいアプローチ。ぶんせき1979：230-237。

10) 杉原 進・金野隆光・石井和夫 (1986)：土壤中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法。農環研報1：127-166。

11) 高橋重雄・和田源七・庄子貞雄 (1976)：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6報) 温度が水稲の窒素吸収および土壤中のアンモニウム態窒素の消長に及ぼす影響。日作紀45：213-219。

12) 丹野文雄 (1988)：総合計量化方式によるコシヒカリ、ササニシキの生育予測と診断技術。土肥誌59：423-428。

13) 鳥山和伸 (1990)：水稲の生育予測と土壤窒素の無機化 (日本土壤肥料学会編：水田土壤の窒素無機化と施肥)。博友社, p.125-156。

14) 鳥山和伸・飯村康二・関矢信一郎 (1987)：窒素供給量を規制した流動水耕法とそれによる水稲窒素吸収様式の定量的制御。土肥誌58：452-459。

15) 鳥山和伸・古賀野完爾 (1989)：根圏 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が水稲の初期生育に及ぼす影響。土肥要旨集35：267。

- 16) 上野正夫・熊谷勝巳・富樫政博・田中伸幸 (1991) : 土壤窒素と緩効性被覆肥料を利用した全量基肥施肥技術. 土肥誌62 : 647-653.
- 17) 山室成一 (1989) : ^{15}N トレーサー法による水稲根の活力診断. 土肥誌60 : 445-450.

Summary

On paddy fields located in low-lying plain region and valley bottom plain area of higher altitude region in Shimane prefecture, optimum rate of nitrogen application for rice variety "Koshihikari" was evaluated on the basis of the estimation of N supplying ability of the paddy soils. The improved methods of N fertilization based on the results were examined on the paddy soils in low-lying plain region.

1. The time course of cumulative amount of N mineralized from plow layer during rice growing season was predicted by kinetic method of estimation of N mineralization. It was found that the amount of mineralized N linearly increased during the growing period from 30 to 100 days after transplanting and the average rate of N mineralization during this term was $1.2 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for Fine-textured Gray Lowland soils in low-lying plain region, $0.46 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for Coarse-textured Gley soils in the same region and $0.58 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for Gravelly Gray Lowland soils in higher altitude region.

In addition, growth duration of "Koshihikari" could be divided into three periods, and in the respective period the factors affecting the pattern of growth and N uptake that was typical of each of the paddy soils were analyzed.

2. The optimum amount of basal N calculated from the difference between the amount of soil N absorbed by plant and the optimum amount of N in plant was 0.0002 kg m^{-2} for Fine-textured Gray Lowland soils, 0.005 kg m^{-2} for Coarse-textured Gley soils and 0.0044 kg m^{-2} for Gravelly Gray Lowland soils, respectively. Thus considerable differences were noted among the figures depending on the N supplying ability of the soils. On the other hand, the optimum amount of topdressing N at panicle formation stage determined based on the same procedure was 0.0037 to 0.0041 kg m^{-2} depending on the kinds of soils, and the differences among these figures were relatively small.

3. As the result of the improved practices of N application for "koshihikari", not only the amount of N in plant but also the number of spikelets per unit land area and the leaf area index approximated to the reasonable value, respectively. Consequently, lodging of rice plant was reduced and the percentage of ripened grains was heightened on Fine-textured Gray Lowland soils, and the brown rice yield on Coarse-textured Gray Lowland soils was increased by 14 % compared to the yield under the currently recommended practices of N application. Furthermore, brown rice yields of $5,900$ to $6,200 \text{ kg ha}^{-1}$, which were as high as the target yield in this experiment, were achieved by using the improved practices of N application, and the efficiency of N for grain production, expressed as grain yield per unit uptake of N, was not lowered.