

## 水田土壌の窒素無機化とコシヒカリの施肥法

誌名	鹿児島県農業試験場研究報告
ISSN	03888215
著者	古江, 広治 上村, 幸廣 脇門, 英美
巻/号	20号
掲載ページ	p. 127-136
発行年月	1992年3月

# 水田土壌の窒素無機化とコシヒカリの施肥法

古江広治・上村幸廣・脇門英美

## Nitrogen Mineralization of Paddy Soils and Methods of Fertilization for “Koshihikari”

Koji FURUE・Yukihiro KAMIMURA・Hidemi WAKIKADO

シラス水田における早期水稲コシヒカリの高位安定生産施肥法確立のため、まず、玄米収量の年次変動に関わる主気象要因を明らかにし、気象条件によって高収量を得るための施肥窒素の適量は異なることを明確にした。そして、気象状況に対応した施肥法の確立が高位安定生産のためには必要であることを示した。また、反応速度論的手法により土壌窒素の窒素無機化モデル式を設定し、地温データを代入することで、ほ場での窒素無機化パターンの推定を行い、早期水稲栽培期間の無機化パターンの特性、施用有機物の分解特性、有機物連用による無機化量の増大等を明らかにした。さらに高位安定生産のための施肥法の概要を示し、確立すべき個別技術の内容とその問題点を明らかにした。

### 緒 言

本県産コシヒカリは、早期水稲作付面積9,200haのうち98%に相当する9,000haで栽培され「日本一早い新米」として重要な商品作物に位置づけられている。そして、さらに普通期水稲栽培地帯への面積拡大や早進栽培が計画されている。このような状況のなかで土壌肥料分野には、コシヒカリ栽培地帯の広がり、早進化による栽培環境の変化、年次間の気象変化に対応した施肥法の確立等が高位安定生産のために求められている。そのためには、地力窒素をどのように評価するかが大きな課題となると考えられる。

古くから「稲は地力でとり、麦は肥しでとり」と言われ、水稲は地力依存度が高い作物とされている。水稲は一年の内約三ヶ月は湛水下にあり、一般に畑の場合に比べて有機物の消耗は少なく肥沃である。水田における地力とは第一義的には窒素肥沃度であり、土壌生産力を決定づける主要因となっている。水田土壌は0.1%~0.3%程度の全窒素を含有し、そのうち植物にすぐ吸収利用される無機態窒素は、全窒素の1%程度で、そのほかは植物にすぐに利用されない有機態窒素の形で存在している。有機態窒素のうち、無機化されて水稲に吸収される割合は、通常施肥窒素よりも多く甲斐<sup>1)</sup>、小山<sup>2)</sup>らの試算によると窒素吸収量の70~80%に及ぶとしている。このように水田の地力窒素は水稲作にとって重要であり多くの研究がなされてきた。STANFORD・SMITH<sup>3)</sup>が畑土壌窒素の無機化研究に反応速度論の方法を導入して以来、杉原・金野<sup>4)</sup>らが畑土壌の無機化過程の解析に応用し、無機化モデルの設定とその適合度判定、さらに、無機化過程を三つの無機化特性値で説明できることを明らかに

した。そして、金野<sup>5)</sup>が速度論的解析による無機化パラメーターを算出するプログラムを開発し、それを契機にこの解析法を水田土壌の無機化過程に応用した報告<sup>6)</sup>がなされている。

本報は、気象・地力条件に対応した安定多収のためのコシヒカリの施肥が可能か検討し、地温に応じた無機態窒素の発現パターンの解析が可能な速度論的方法によって窒素無機化モデルを構築し、種々のシミュレーションを行うことによって早期水稲栽培期間の土壌窒素無機化の特性を明らかにし、気象条件に対応した施肥法の概要を探る。

### I. 気象条件とコシヒカリの施肥反応

コシヒカリ施肥基準策定のため1982年から1984年の3年間窒素適量試験を実施し、その結果から基肥窒素量0.3kg/a、穂肥窒素量0.2kg/aを施肥基準とした。さらに1985年から1989年の5ケ年、気象条件とコシヒカリの施肥反応の関係を明らかにするため窒素施用試験を実施した。

#### 1. 試験方法

- 1) 試験実施場所：鹿児島県農業試験場内水田（1号田）
- 2) 土 壌 条 件：中粗粒灰色低地土灰褐色系（善通寺統）
- 3) 試験ほ場の化学性：第1表に示す。
- 4) 耕 種 概 要：毎年4月15日頃稚苗（20日苗）を30cm×12cmの栽植密度で、3~4本機械移植し、8月10日前後に収穫した。また、牛ふん主体の堆肥を毎年3月中旬頃1t/10a施用した。

第1表 供試土壌の理化学性

pH (H <sub>2</sub> O)	全窒素 (%)	全炭素 (%)	CEC*	交換性塩基*		
				Ca	Mg	K
5.90	0.122	1.27	10.0	6.0	0.6	0.8

\*乾土100g 当り meq

5) 試験区の構成：各年とも基肥窒素量0.3kg/a - 穂肥窒素量0.2kg/a (以下3-2区と記す。)を標準区として、基肥窒素量及び穂肥窒素量を増減した区を設定した。また1985年、1986年及び1989年には実肥施用試験を、1988年には中間追肥の試験を実施した。穂肥は出穂25日前、実肥は出穂後7日、中間追肥は最高分けつ期10日前をめぐりに施用した。

6) 分析法：作物体の窒素は、硫酸-過酸化水素分解液<sup>8)</sup>をBREMNER<sup>9)</sup>の蒸留装置を用いて定量した。

2. 試験結果及び考察

第2表に無窒素区及び3-2区の年次別玄米収量の変化を示す。無窒素区の玄米収量は、1985年に最高収量47.5kg/a、1987年に最低収量43.4kg/a、その差は約8%であった。また標準施肥3-2区の玄米収量は、1988年に最高収量59.3kg/a、1987年に最低収量49.6kg/aでその差は18%であった。1985年の3-2区の玄米収量を100とすると、年次間の収量変動は2~11%の範囲で、玄米収量の年次間差の大きいことは明らかである。なお、5ヶ年間平均の3-2区に対する無窒素区の玄米収量割合は84%であり、水稻の地力依存度がかなり高かった。これは、牛ふん堆肥連用による結果であると考えられる。

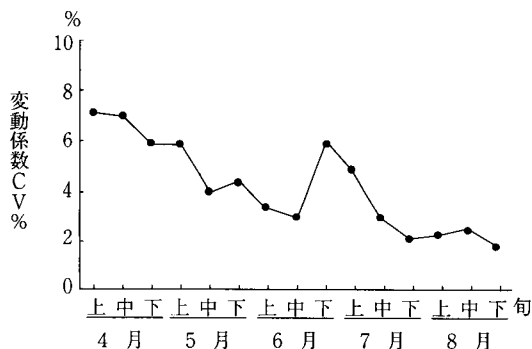
第2表 年次別玄米収量の変化 (kg/a)

区名	年度					平均
	1985	1986	1987	1988	1989	
無窒素区	47.5 (100)	47.4 (100)	43.4 (92)	46.8 (99)	44.1 (93)	45.9
3-2区	55.4 (100)	53.0 (95)	49.6 (89)	59.3 (107)	56.3 (102)	54.7

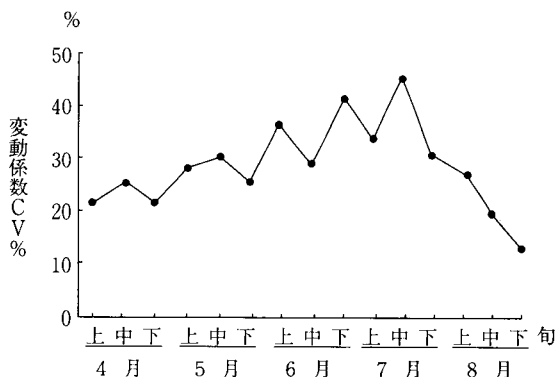
第1図に過去9ヶ年間(1981年~1989年)の早期水稻栽培期間の各旬ごとの平均気温の年次変動を、第2図に日照時間の年次変動を変動係数(CV%)で示す。4月上旬から5月上旬までの期間と梅雨期の6月下旬に平均気温の年次変動が大きく、日照時間の年次変動は梅雨期の6月下旬から7月中旬の間に最も大きかった。

これらのことからコシヒカリの玄米収量の年次間変動は、気象条件としては主に植付期から分けつ期にかかる4月上旬から5月上旬間の気温の年次変動と、出穂期前

後に当たる6月下旬から7月中旬間の日照時間年次変動の大きさによっていると推察された。



第1図 平均気温の旬別年次変動



第2図 日照時間の旬別年次変動

第3図に1985年と1987年の無窒素区の窒素吸収状況を示す。1985年の平均気温は植付け当初から平年値より高く推移した。それに対して、1987年の平均気温は、4月中旬の植付期から5月中旬までは平年値を下回り、その後は平年値と同程度で推移した。

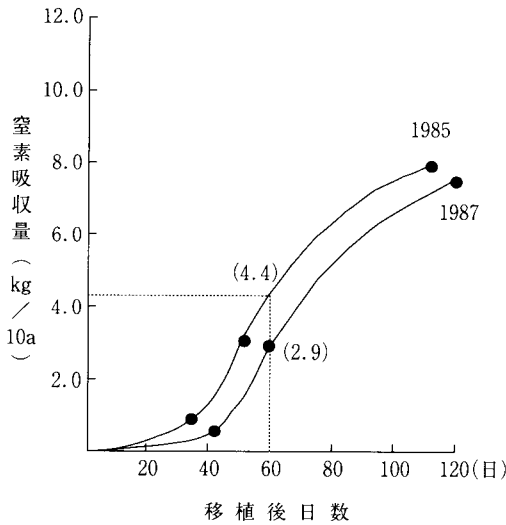
この植付期から分けつ期の低温は、窒素吸収に影響し幼穂形成期における1987年の無窒素区の窒素吸収量は1985年のそれを1.4kg/10a下回り、収穫期にはやや回復したものの、1985年に比べ0.7kg/10a下回った。この幼穂形成期の1.4kg/10aの吸収量差を施肥窒素に利用率40% (基肥窒素の平均的利用率と考え) で換算すると3.5kg/10a相当量となり、基準基肥窒素量を越える。この一例は、コシヒカリを含む水稻の施肥法策定において地力窒素動態解明の重要性を示すものである。

第3表に1985年から1989年までの玄米収量調査結果を示す。植付期から分けつ期にかかる期間の気温の年次変

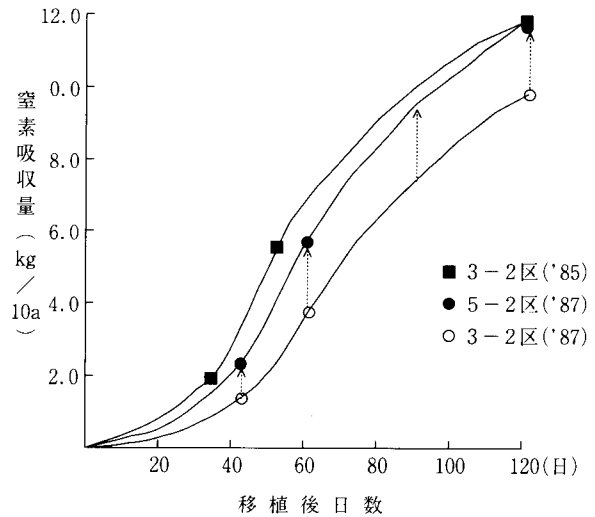
動が大きいことは前に示した。この期間が、平年値より低温の年は1987年及び1988年、高温の年は1985年、1986年及び1989年とに分けられる。第4図に1987年の3-2区及び5-2区と1985年の3-2区の窒素吸収状況を示す。1985年と1987年の3-2区を比較すると、第2図に示した無窒素区の窒素吸収状況と同様、生育初期の低温による地力窒素発現の遅れや生育遅延(特に根系の)から1987年の3-2区の窒素吸収は1985年よりも低く推移した。1985年の窒素吸収よりも低く推移した1987年の3-2区に対して基肥を0.2kg/a増施した5-2区の窒素吸収曲線は、1985年3-2区と同レベルまで上昇している。

その結果、5-2区の玄米収量は3-2区の49.6kg/aに対して52.8kg/aで6%の増収となった。

1987年と同じ生育初期低温型の1988年の玄米収量は、標準施肥3-2区は59.3kg/aで、基肥+中間追肥のみの3-(2)-0区は61.3kg/aと60kg/aを越え、3-2区に比べ3%の増収、基肥+中間追肥+穂肥の3-(2)-2区は63.5kg/aで7%の増収となった。このことから、生育前期での低温による吸収窒素の不足を、基肥の増施、中間追肥の施用によって補うことにより増収が可能であることが明らかとなった。また、生育前半の低温は穂肥窒素の肥効にも影響し、高温年の3-2区に対して、穂肥窒素量を増した3-4区の玄米増収率は1985年



第3図 無窒素区の窒素吸収量 ('85, '87)



第4図 窒素施用区の窒素吸収量の推移

第3表 玄米収量調査結果

区名	穂数 本/m <sup>2</sup>	一穂 粒数	千粒重 g	登熟歩合 %	玄米収量 kg/a	指数(I) (%)	指数(II) (%)	年度	生育初期 の気温型
3-2区	542	64.4	19.7	78.0	55.4	100	100	1985	高温型
3-3区	537	64.3	19.7	78.2	61.8	112	112		
3-4区	550	69.8	19.8	82.5	60.7	110	110		
3-2区	440	60.2	20.4	71.8	53.0	100	96	1986	高温型
3-3区	474	63.0	20.4	71.2	55.0	104	99		
3-4区	530	62.5	20.4	71.1	55.0	104	99		
3-2区	374	88.6	17.8	66.9	49.6	100	90	1987	低温型
3-3区	423	84.5	17.7	63.5	49.6	100	90		
5-2区	468	81.0	17.7	64.1	52.8	106	95		
3-2区	515	64.4	19.3	79.6	59.3	100	107	1988	低温型
3-(2)-0区	566	65.4	19.2	78.2	61.3	103	111		
3-(2)-2区	569	73.7	19.3	75.3	63.5	107	115		
3-4区	529	63.0	19.7	75.7	58.5	99	106		
3-2区	550	69.8	18.3	74.9	56.3	100	102	1989	高温型
3-4区	513	76.0	18.4	64.4	58.3	104	105		
5-2区	470	67.2	18.1	59.6	53.3	95	96		

(2) は中間追肥0.2kg/a

が10%, 1986年が4%, 1989年が4%であった。それに対して低温型の1987年及び1988年の穂肥の増施効果は認められない。見方を変えると、高温型の年で、生育前半の窒素吸収が旺盛である年には穂肥を増施することで増収が可能であることを示している。

実肥施用試験を1985年、1986年及び1988年に実施したが、増収効果は認められなかった。これは、早期水稲の実肥時期が地温の高い時期と重なり、地力窒素供給が旺盛であることや試験ほ場に投与した牛ふん堆肥の窒素発現が生育後期から盛んになる(後述する)ことによると推察する。

## 摘 要

早期水稲コシヒカリの玄米収量の年次変動は、気象条件としては主に植付期から分けつ期の4月上旬から5月上旬期間の気温と、出穂期前後の6月下旬から7月中旬の日照時間にかかっていると推察された。

生育前半の気象変動は、分けつ期・幼穂形成期の窒素吸収に大きく影響することを明らかにした。

生育前期に低温であった年の分けつ期・幼穂形成期の窒素吸収は、高温年に比べてかなり低く、そのような年には、基肥窒素の増施、中間追肥施用で増収し、穂肥施用の玄米収量増に対する効果は小さいことを明らかにした。また、逆に生育前期に高温で推移し幼穂形成期までの窒素吸収の多い年には、基肥増施、中間追肥の増収効果は小さく、穂肥増施による増収効果が大きいことを明らかにした。

1985年～1989年の試験期間、玄米収量600kg/10aを上回ったのは、1985年(生育前半高温型年)の3-3区、3-4区及び3-5区で、いずれも3-2区(標肥区)の穂肥だけを増施した区と1988年(生育前半低温型年)の3-(2)区、3-(2)-2区の中間追肥を施用した区であった。気象条件・生育条件に合致した施肥によって600kg/10a以上収量を得ることができた。このことは、気象条件・生育量・土壤条件を的確に捉えた施肥を行うことがコシヒカリの高位安定生産には重要であることを示している。

## II. 水田土壤の窒素無機化

気象条件によって水稲の窒素吸収量は大きく変化し、それに伴って玄米収量も変化することは前章で述べた。本章では、その水稲窒素吸収量の70%～80%を占めるとされる土壤窒素の無機化モデルを反応速度論的方法により、まず構築し、次にその構築されたモデル式を用いて種々のシミュレーションを行い、気象対応型施肥確立の

ために早期水稲期間の土壤中窒素の無機化特性を明らかにする。

### 1. 試験方法

1) 供試土壤：供試した土壤は本場内水田土壤で、以下の4種類、いずれも中粗粒灰色低地土灰褐色系(普通寺統)である。

M-1土壤：早期水稲栽培ほ場(1号水田)で、牛ふん堆肥を1t/10a連用している土壤である。

M-2土壤：M-1土壤と同じほ場の土壤であるが、試験年に堆肥を施用していない土壤である。

S-1土壤：普通期水稲栽培ほ場(12号水田)で1975年から1989年の間有機物を施用していないほ場の土壤である。

S-2土壤：普通期水稲栽培ほ場(12号水田)で1975年から1988年の間稲わらを4t/10a毎年連用したほ場の土壤である。

2) 土壤採取時期：土壤採取は早期水稲ほ場の堆肥施用後1989年3月22日に実施した。S-1, S-2は小麦栽培中であった。

3) インキュベート試験法

供試土壤は、湿潤土のまま2mmのふるいを通し、籾、植物残さ等を取り除いた後、インキュベーションに供した。インキュベーションは、内径20mm、高さ150mmの試験管に乾土で20g相当の湿潤土を入れ、脱イオン水を加え密閉状態とし、インキュベーター内に静置した。培養は、20℃、25℃、30℃の3段階での0～116日間実施し経時的にインキュベーターから取り出し10%塩化カリウム溶液で浸出し、ろ液をBREMNERの水蒸気蒸留法によりアンモニア態窒素を定量した。

4) 速度論的解析方法

インキュベーション試験結果を以下の速度論的方法により解析し窒素無機化モデル式を求めた。

金野<sup>5)</sup>らは、畑土壤の地力窒素の無機化速度と地温の関係は反応を酵素反応と想定し、アレニウスの式に従うものとした。今回の解析では、水田土壤の地力窒素の無機化速度も下記に示すアレニウスの式に従うものとした。

$$k = A \exp(-E_a / RT) \quad (1)$$

k：速度定数 (day<sup>-1</sup>)      A：定数

E<sub>a</sub>：みかけの活性化エネルギー (cal/mol)

R：気体定数      T：絶対温度

また、地力窒素無機化と時間の関係はミハイル・メンテンの式に従うものとし、第4表に示す杉原らのモデルのうち単純型モデルを使用した。

第4表 窒素無機化の基本的な反応モデルと反応速度式<sup>9)</sup>

反応モデル	内容	反応速度式(積分式)
1. 単純型	$A \xrightarrow{k} N$ 有機態窒素Aが無機化する	$N = N_0[1 - \exp(-k \cdot t)]$
2. 単純並行型	$A \xrightarrow{k_1} N$ $B \xrightarrow{k_2} N$ 有機態窒素A, Bが無機化する	$N = N_0[1 - \exp(-k_1 \cdot t)] + N_1[1 - \exp(-k_2 \cdot t)]$
3. 有機化・無機化並行型	$A \xrightarrow{k} N \rightarrow M$ 窒素の無機化と有機化が進む	$N = N_m(1 - \exp(-k_m \cdot t)) + N_0[1 - \exp(-k \cdot t)]$

$$N = N_0 (1 - \text{EXP}(-kt)) + B \quad (2)$$

N: 窒素無機化量      k: 速度定数  
No: 潜在的に無機化する有機態窒素量  
t: 時間                B: 定数

(1)と(2)の式から地温を知ることによって地力窒素無機化量の推定が可能となる。なお、Ea, k, No, Bの算出にはEaとkの値を変えて、最小二乗法を用いて繰り返し計算し、分散が最小となった時の値を最適パラメータとする金野<sup>6)</sup>のプログラムを用いた。

2. 試験結果及び考察

1) 供試土壌の化学性

第5表に供試土壌の化学性を示す。稲わらを多量連用したS-2土壌が、全炭素含有率、全窒素含有率、陽イオン交換容量及び可給態窒素含量ともに最も高かった。堆肥単年施用の有無(M-1とM-2土壌)によって大きく土壌化学性は変化しないが、M-1土壌の全炭素含有率及び可給態窒素含量はM-2土壌を上回った。

第5表 供試土壌の化学性 乾土100g当り

土壌の種類	pH (H <sub>2</sub> O)	全炭素 %	全窒素 %	CEC meq	可給態窒素量 (mg)
M-1 土壌	5.90	1.28	0.122	10.0	12.6
M-2 土壌	5.90	1.27	0.122	10.0	12.4
S-1 土壌	6.50	1.01	0.100	8.72	8.3
S-2 土壌	6.02	3.09	0.250	12.7	23.3

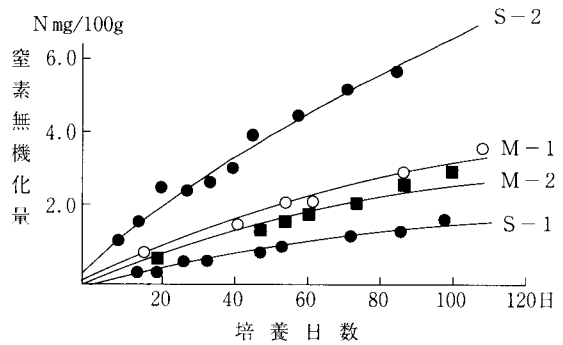
2) 土壌窒素無機化解析

4種類の土壌を用いて、30℃でインキュベーションを行った結果を第5図に示す。いずれの土壌についても速度論的に導かれる窒素無機化の単純モデル式によく適合

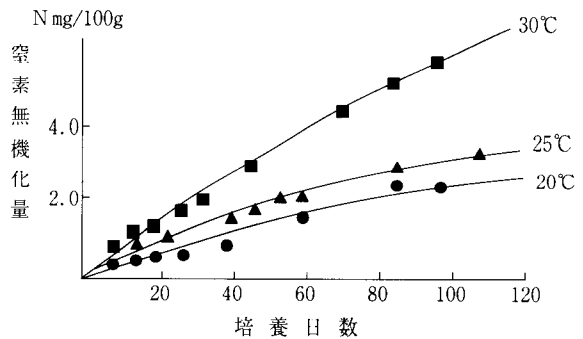
した。

第6図にM-1土壌の温度別(20℃, 25℃, 30℃)インキュベーション結果を示す。温度別インキュベーション結果も単純モデル式によく適合した。次にアレニウスの式を用いて、25℃に3つの温度別曲線を重ね合わせることによって最適モデル式と3つの無機化特性値を得た。25℃重ね合わせ曲線も第7図に示す通り最適モデル式によく適合した。また、他の3つの土壌についても同様であった。

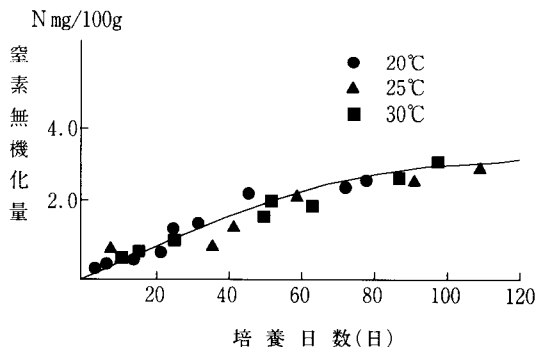
得られた4種の土壌の無機化特性値を第6表に示す。Noは、潜在的に無機化する窒素量で、この値が大き



第5図 4種の土壌の窒素無機化曲線(30℃)



第6図 温度別窒素無機化曲線(M-1土壌)



第7図 25℃重ね合せ曲線(M-1土壌)

第6表 パラメーターの値 (25℃)

土壌の種類	No	B	k	活性化エネルギー E <sub>a</sub>
M-1 土壌	11.46	0.18	0.0022	22,010
M-2 土壌	8.41	0.02	0.0031	20,010
S-1 土壌	7.72	0.17	0.0018	27,000
S-2 土壌	13.68	0.56	0.0037	20,995

いほど地力窒素量が大きいことを示している。kは土壌窒素無機化速度の大きさを示し、この値が大きい無機化速度は速い。

NoはS-1土壌が最も大きく以下M-1土壌、M-2土壌、S-2土壌の順であった。これは、可給態窒素含量に対応していた。kをM-1土壌とM-2土壌と比較すると、試験直前のきゅう肥の施用によってkは小さくなった。またS-1土壌とS-2土壌を比較すると稲わら連用でkは大きくなった。有機物を連用することでNo及びkは大きくなるが、単年の有機物施用ではNoは大きくなるが、kは小さくなった。

3) シミュレーション試験

反応速度論的方法によって導いたモデル式と実測地温を用いて、種々の窒素無機化パターン予測を行った。

① 早期と普通期栽培期間との窒素無機化パターンの違い

早期水稲は温度の低い時期に移植し、徐々に地温の上昇する状態で生長し、温度が最も高い時期に稔実するのに対して、普通期水稲は早期水稲に比べて温度の高い時期に移植し、初期よりも高い気温で生長し、温度が次第に下降する時期に稔実するという違いがある。このような温度変化の違いが土壌窒素無機化に及ぼす影響をシミュレーションにより比較し、早期水稲栽培期間中の窒素無機化の特性を明らかにする。なお、シミュレーションにはM-1土壌、地温(田面下約5cm)は農試内ほ場の早期栽培期間(1989年4月13日~8月10日)及び普通期栽培期間(1989年6月20日~10月15日)を用いた。

第8図に作期別の推定窒素無機化量の推移を示す。普通期の窒素無機化量は、当初から高く、後半やや緩慢な発現となるものの、全般を通じて早期水稲を上回って推移した。早期の窒素無機化量は、移植後80日頃まで直線的に上昇しその後はさらに無機化速度を増した。一日平均地温の水稲栽培期間の積算値は、普通期では約3300℃で、早期では普通期の約85%に当たる約2800℃であった早期水稲栽培期間中の窒素無機化量の推定値は、普通期の約65%であった。

第7表に期間別窒素無機化割合を示す。1989年早期水稲期間中の窒素無機化割合(総窒素無機化量に対する各

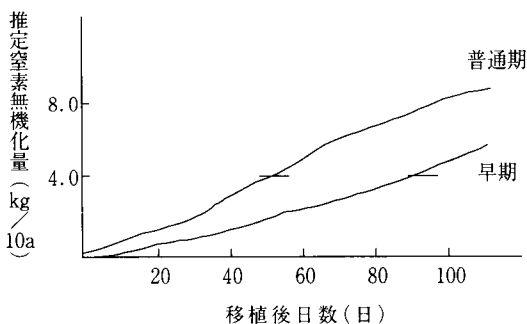
期間の窒素無機化量の割合)は、幼穂形成期~出穂期を除いて順次高くなり、最も高い割合になったのは生育終期の出穂期~成熟期であった。これに対して普通期の窒素無機化割合は、最高分けつ期~幼穂形成期までは順次高くなり、その期間をピークとして生育後半は順次低くなった。出穂期以降の登熟期間の窒素無機化割合を早期と普通期と比較すると、早期43.2%、普通期26.5%と早期がかなり大きい。このことは、普通期水稲では、実肥の玄米収量増に対する施用効果が認められるのに対して早期水稲では認められないことと合致している。窒素無機化の面から、早期水稲には生育前半の追肥効果が、普通期水稲には生育後半の追肥効果が期待できると推察する。また、逆に無機化窒素発現の過多の影響は、普通期水稲では生育前半の茎数過多に強く現れ、早期水稲では生育後半の登熟、米質等に強く現れると推察される。

② 堆きゅう肥の有無による窒素無機化パターンの違い

堆きゅう肥単年施用の早期水稲期間中の窒素無機化に及ぼす影響についてのシミュレート(1989年早期間の地温を用いた。)結果を第9図に示す。M-1土壌は、試験直前に堆肥を施用した土壌、M-2は施用していない土壌である。M-1土壌の窒素無機化量は、当初はM-2土壌よりもやや高く、6月下旬以降堆きゅう肥の急速な分解のために、M-1とM-2土壌の無機化量の差は大きくなって推移した。堆肥単年施用の窒素無機化量に対する影響は生育後半に大きく現れることが明らかになっ

第7表 作期別の期間窒素無機化割合(1989年) %

生育ステージ	早期	普通期
I. 移植期~分けつ期	10.9	11.0
II. 分けつ期~最高分期	13.3	19.7
III. 最高分期~幼形期	17.3	22.0
IV. 幼形期~出穂期	14.9	20.5
V. 出穂期~成熟期	43.2	26.5



第8図 作期別地温の窒素無機化量への影響

た。このことは、前述した実肥の効果にも関連すると考  
える。

上村<sup>11)</sup>は、有機物の種類によって分解過程が異なり、  
有機物の窒素量を揃えて施用した場合でも、水稻の生育  
過程や収量が異なることを明らかにし、各種有機物の無  
機態窒素含量、継続的な無機化量及び分解過程を考慮し  
た施肥体系が必要であることを指摘している。各種の有  
機物がほ場還元されている状況下で、各種有機物の分解  
過程を解明することは施肥法確立のために不可欠であ  
り、その解明のためには反応速度論的手法が有効である  
と考える。

③ 稲わら連用の有無による窒素無機化量の違い

第10図に稲わら連用の有無による窒素無機化量に及ぼ  
す影響についてのシミュレート（1989年早期栽培期間の  
地温を用いた。）結果を示す。S-2土壌は稲わらを  
4 t / 10 a, 15年間連用した土壌、S-1土壌は15年間  
有機物を施用していない土壌で、いずれも普通期水稻栽  
培土壌である。

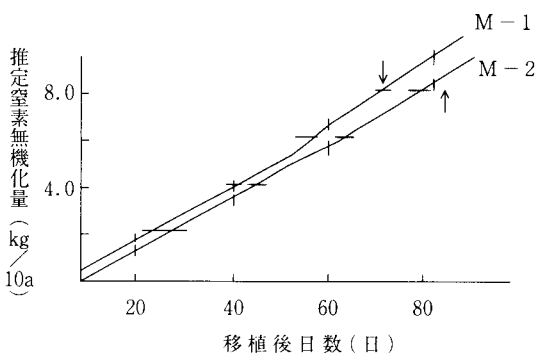
稲わら連用による土づくりの結果、早期水稻栽培期間  
中に発現する窒素量は有機物無施用に比べて2.4倍にも達  
した。ほ場の窒素無機化量及びそのパターンは、投入有  
機物の量、質による土づくり来歴によって大きく異なる  
ことが推察され、有機物の量、質の違いによる易分解性  
窒素の集積、その分解過程を明らかにし、簡易な土壌窒  
素診断（無機化量、パターン）による施肥法の確立が必  
要である。

④ 年度別窒素無機化量

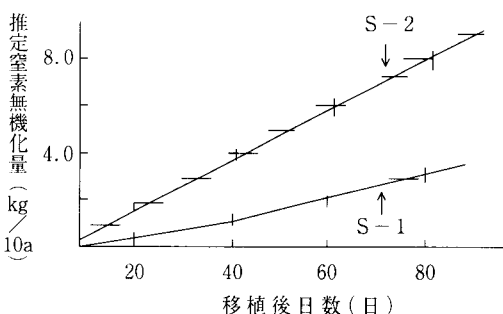
第11図に1988年と1989年の早期栽培期間の地温をそ  
れぞれ代入し、S-1土壌の窒素無機化モデル式を用いた  
窒素無機化のシミュレーション結果を示す。また、第8  
表にS-1土壌を採取したほ場の1988年と1989年の3-  
2区（標肥区）の水稻体の窒素吸収状況を示す。

1988年の平均気温は、4月中下旬に1989年よりかなり  
低く、その後6月上旬までは1989年と同程度、6月中旬  
から7月中旬までは、1989年よりも高く推移し、それ以  
降は同程度であった。

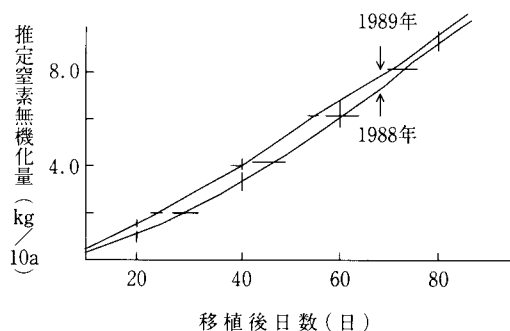
1988年の土壌窒素無機化速度（シミュレーション曲線  
の傾き）は、4月中旬から5月上旬の間は1989年を下回  
り、5月中旬から6月中旬には1989年と同程度、6月中  
旬から7月中旬までは、1989年を上回った。このシミュ  
レーション結果は気温変動をよく反映していた。また、  
水稻体の窒素吸収状況も、1988年の生育初期の低温によ  
る窒素吸収の抑制、中期以降の高温による窒素吸収量の  
増大等土壌窒素無機化シミュレーション結果とよく対応  
していた。気温-土壌窒素無機化-窒素吸収量の三者関



第9図 堆きゅう肥単年施用の窒素無機化への影響



第10図 稲わら連用の有無が土壌窒素無機化に及ぼす影響



第11図 年度別推定窒素無機化量（S-1土壌）

第8表 3-2区の水稻体の窒素吸収状況  
（1988年、1989年）

	kg / a			
	5月24日	6月9日	7月15日	収穫期
1988年	0.19	0.45	1.38	1.21
1989年	0.28	0.65	1.46	1.30

係を土壌窒素無機化シミュレーションはよく反映した。



ほ場の窒素無機化量は反応温度である地温に左右されるために、シミュレーションは、ほ場の地温を用いている。また、気温と地温の関係は水稻の生育ステージによって一定でないことも知られている。しかし、気温が、水田中の地温より広い範囲で測定利用されていることを考えると、地温と気温の関係を明らかにし、気温を用いた窒素無機化の推定を行うことで、広い適用が可能であると考える。

### 摘 要

地温データから土壤窒素無機化量を予測するために、速度論的方法により土壤窒素の無機化モデル式を4種の土壤について求めた。求めたモデル曲線は単純型モデルによく適合した。

求めたモデル式と地温データを用いて、種々のシミュレーションを行った。

まず、早期水稻栽培期間と普通期水稻栽培期間の地温データを用い早期と普通期の窒素発現の違いを比較した。早期期間の1日平均地温の積算値は、約2800℃で、普通期期間の3300℃に対して、約85%にあたったが、早期期間の窒素無機化量は、普通期の約65%であった。また、普通期の窒素発現のピークは最高分げつ期から幼穂形成期にあたるが、早期は生育後半に窒素発現が大きくなることを明らかにし、追肥効果の期待できる時期を推察した。

次に堆肥の単年施用の早期栽培期間の窒素無機化量に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。単年施用の堆肥は、6月下旬まではほとんど窒素発現量に対して影響はないが、気温の高くなる6月下旬以降急速に有機物が分解し、生育後半の窒素発現量が大きくなることを明らかにした。このことから、施肥法を考える上で投入有機物の分解過程を明らかにする必要性と、反応速度論的方法による解明の可能性を指摘した。

さらに、稲わら連用の有無による土づくりの違いが窒素無機化量に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。早期栽培期間中に発現する窒素量は、稲わら連用による土づくりの結果、稲わら無施用に比べて2.4倍も高かった。現場の多様な土づくり来歴に対応するために窒素無機化量及びそのパターンを明らかにできる簡易な土壤窒素診断が必要であると考えた。

最後に、1988年と1989年の早期栽培期間の地温データから年度別の窒素無機化のシミュレーションを行った。気温、土壤窒素無機化、水稻体の窒素吸収の三者の関係は土壤窒素発現のシミュレーションによって、よく説明できた。しかし、広い範囲での適応のために地温と気温

との関係を明らかにし、気温による窒素無機化の推定が必要であると考えた。

### Ⅲ. 総合論議

生育期間の気象条件(主に気温)によってコシヒカリの窒素吸収は大きく変動し、その結果玄米収量も年次間で変動することを明らかにした。また、その気象変化による土壤窒素発現に対応した施肥を行うことで玄米収量が増収することを示し、気象対応型の施肥が高位安定生産のためには必要であることを明らかにした。

#### 1. 気象対応型の施肥の概要

気象条件に対応した高位安定生産のための施肥法を確立するためには、①目的とする収量を得るための理想生育及び窒素吸収パターンの設定 ②栄養診断に基づく窒素吸収量の把握 ③土壤窒素無機化量の推定が必要であると考える。

具体的にはある期間に必要とする窒素の不足を追肥で補うとすると以下の算出法により施用量が決定できる。

診断時の理想窒素吸収量 A

実際の窒素吸収量 B  
(栄養診断で求める)

必要とする期間の土壤窒素吸収量 C  
(地温と推定式から求める)

追肥量 D / 利用率 = A - B - C

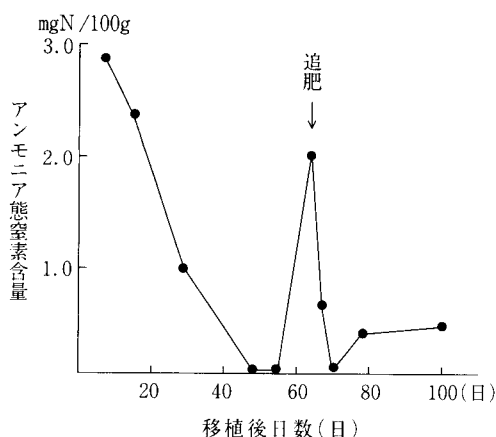
#### 2. 理想窒素吸収パターン

試験場内の過去のデータから算出可能である。しかしコシヒカリの栽培地の広がりや早進化に対応するためには、県内を気象、土壤、地形条件等を勘案して地帯区分し、それぞれの地帯の理想窒素吸収パターンを明らかにする必要があると考える。また、高収量への窒素吸収パターンは一律ではなく、高品質生産技術も考え合わせると、いくつかの窒素吸収パターンの設定が必要と考える。

#### 3. 窒素栄養診断

第12図に1987年3-2区の施肥窒素の土壤中での消長を示した。0.3kg/aの基肥窒素は47日(1988年も47日であった。)かけて緩やかに消失し、0.2kg/aの穂肥窒素は急速に吸収され追肥後7日目にはほとんど消失した。

このことは、水稻の生育初期には根の生育量が窒素吸収の律因子となり、中期以降は土壤中のアンモニア態



第12図 施肥窒素の消長（3-2区、1987年）

窒素濃度が窒素吸収の律速因子となることを示している。

窒素吸収、窒素栄養診断、追肥の効果を考える場合、土壌中にアンモニア態窒素があっても根系の未発達のために吸収できない期間と吸収量が地力窒素発現量と同等以上（いわゆる定常状態）となり追肥窒素を旺盛に吸収できる期間とに分ける必要がある。

この転換期（基肥窒素消失時期）は、生育ステージでは最高分けつ期よりやや早い時期と考えられ、早期水稲の窒素無機化の特徴（生育前半に無機化量が少なく、生育後半に多い）や中間追肥による増収例からも茎数確保に非常に重要な時期であると考えられる。また、反面この時期の過剰の窒素供給は過繁茂や節間伸長を引き起こし生育後期の登熟に大きく影響すると考えられる。これらのことから、この時期の栄養診断は非常に重要な意味を持つと考える。また、出穂25日前の窒素追肥（穂肥）の収量増に対する効果はよく知られている。

今回の試験結果からは、早期水稲の栄養診断による追肥の増減で特に収量に影響のある時期は植え付け後約45日前後と約60日と考えられ、この2つの時期の窒素栄養診断が重要であると考えられる。

第9表に5月24日及び6月10日（試験期間の平均的調査日）の水稲体の窒素吸収量と草丈、茎数の相関係数を示す。各係数は1%水準で有意であり、草丈×茎数（草丈と茎数の積）と各時期の窒素吸収量との相関係数が最も高く、以下草丈、茎数の順であった。このことから、草丈×茎数を計測算出することにより各時期の水稲体の窒素吸収量の推定が可能であると考えられる。現在、透過光による吸光度の差を利用して非破壊的にクロロフィル含量を計り、その結果から水稲体の窒素含有率を推定する方法も開発されており、葉緑素計値を含めたさらに精度

の高い窒素吸収量の推定も可能であると考えられる。

第9表 窒素吸収量との相関

	窒素吸収量 (kg/a)	
	5月24日	6月9日
草丈 (m)	0.670*	0.653*
茎数 (本/㎡)	0.556*	0.599*
草丈 × 茎数	0.856*	0.739*
標本数	13	25
帰式	$Y = 0.00155X - 0.165$	$Y = 0.00152X - 0.060$
	Y: 窒素吸収量	X: 草丈 × 茎数

\*1%水準で有意

### 3. 土壌窒素無機化量の推定

今回の窒素無機化パターン解析は、早期水稲期間の地温と窒素無機化量との関係を主に明らかにするため単純モデル型で行い、地温と窒素無機化量との関係は明らかにすることができた。しかし、上野<sup>12)</sup>らは、可分解性有機態窒素 (No) は、地温の関わる画分の他に水田入水前の乾燥程度に関わる乾土効果画分が重要であるとして、単純型モデルよりも単純平行型モデル（比較的速く分解する画分と緩やかに分解する画分の合成モデル）が実際の水田土壌の窒素無機化量の推定には最適であるとした。また、小畑<sup>13)</sup>は本県における早期水稲での乾土効果は普通期水稲よりも大きいことを指摘している。さらに著者<sup>14)</sup>らは早期水稲にケイ鉄を施用することによって、無機態窒素の発現が促進され（アルカリ効果）、その窒素発現の促進は玄米収量に影響することも明らかにしている。

より精度の高い土壌中の窒素無機化量の推定のためには地温の他に窒素無機化に影響すると考えられる因子を含めたモデル化の検討が必要であると考えられる。しかし、現段階では地域ごとの地力窒素発現予測（地力窒素発現マップ）等には十分単純型モデルで対応できると考える。

## 要 約

第1章で早期水稲コシヒカリの玄米収量の年次変動性とそれに関わる気象条件を明らかにした。また、その気象条件による窒素吸収量の増減を明らかにし、それに対応した施肥を行うことで、増収が可能であることを示し、気象条件対応型の施肥が重要であることを明らかにした。

第2章では速度論的方法により、土壌窒素の無機化モデル式を求めた。求めた無機化モデル式と地温を用い、早期水稲と普通期水稲栽培期間の窒素無機化パターンを比較することで早期水稲栽培期間の窒素無機化特性を明らかにし、さらに追肥効果の期待できる時期を推察した。また、単年度施用の堆きゅう肥の窒素発現時期や土

づくりの違いによる早期栽培期間中の窒素無機化量が大きく異なることをシミュレートして示した。また、土壤窒素の無機化推定を広い範囲で行うために、地温と気温の関係を明らかにする必要があるとした。

最後に、気象・土壤条件に対応した施肥法の考え方を示した。追肥量の算出方法、地帯別理想窒素吸収パターンの必要性、栄養診断の時期、方法等について示した。さらに窒素無機化パターンが、地温だけでなく、土壤の乾燥程度や土壤改良資材の投入で変化し得ることを示し無機化モデル式には改良の余地があるとした。

コシヒカリの施肥を考えるうえで、栽培の地域、時期の広がり、田畑輪換、二毛作、投入有機物の多様化等窒素発現の変動要因が多くなり、固定的な施肥法では対応が難しくなっている。さらに、良質米志向の高まりから品質面に重点を置いた施肥法の構築も必要となってきた。他方、土壤、気象の情報はメッシュ情報システムの開発により居ながらにして瞬時に広い範囲の情報が入手可能となりつつある。これらの情報と本報で提示した土壤・気象対応型施肥の確立により、現場への土壤窒素発現情報・追肥情報等の具体的な有効な情報の提供が可能となると考える。

この土壤・気象対応施肥の完成のためにはさらに現場等の事例を踏まえた窒素無機化予測、窒素栄養診断の各個別技術の確立と改善が必要である。

### 引用文献

- 1) 甲斐秀昭 1986, 農地生態系における窒素循環の定量的把握, 学術月報 39 41-46
- 2) 小山雄生 1975,<sup>15</sup>N利用による水田土壤窒素肥沃度測定の実際と生産力, 土肥誌 46 260-269
- 3) STANFORD, G. and SMITH, S. J. 1972, Nitrogen Mineralization Potentials of Soils. Soil

- Sci. Soc. Am - proc. 36 465-470
- 4) 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, 農技研報 1 127-166
- 5) 金野隆光 1983, 非線形モデルのあてはめ, 土壤肥料試験のための統計計算用Basicプログラム, 農技研化学部資料 1 79-111
- 6) 山本富三・久保田忠一 1986, 速度論的解析による水田土壤の無機化特性, 土肥誌 57 481-486
- 7) 藤井弘志・安藤 豊・佐藤俊夫・荒垣憲一・中西政則・佐藤之信 1989, 沖積水田土壤の地力窒素無機化モデルについて, 土肥誌 60 1-7
- 8) 水野直治・南 松男 1980, 硫酸-過酸化水素による農作物中 N, K, Mg, Ca, Mn 定量のための迅速前処理法 土肥誌 51 418-420
- 9) BREMNER, J. M. 1965. Total Nitrogen in Methods of Soil Analysis, Part 2 1149-1176, American Society of Agronomy, Inc. Publisher, Madison, Wisconsin.
- 10) 杉原 進 1990. 土壤窒素の無機化予測と温度, 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 36-61
- 11) 上村幸廣 1991. 南九州シラス水田土壤の生産性増強に関する研究, 鹿農試報 19 34-53
- 12) 上野正男・佐藤之信・熊谷勝己・大竹俊博 1990. 速度論的解析法による土壤窒素発現システム, 土肥誌 61 273-281
- 13) 小畑秀雄 1961. 水稻二期作栽培における養分吸収に関する研究 鹿農試特別研究報告 32-33
- 14) 古江広治・上村幸廣 1990. 早期水稻コシヒカリに対するけい酸質肥料の施用効果, 九農研 9 52

### Summary

In order to establish fertilization method of obtaining constantly higher yield of early season paddy rice "Koshihikari", We carried out several experiments.

The outlines obtained are as follows.

- 1) We explained the reason why the yields of rice were different every year from aspects of weather, and explained proper quantity of nitrogen fertilizer to obtain higher yield of rice was different by weather condition.
- 2) We indicated necessity of establishment of nitrogen fertilization method for obtaining constantly higher yield of rice.
- 3) We instituted model equation of nitrogen mineralization of soil by kinetic method, and assumed nitrogen mineralization rate of soil by temperature of underground of paddy field.
- 4) We explained some specificities of nitrogen mineralization of paddy soil and organic matter during growth of early seas on paddy rice.
- 5) We indicated outline of nitrogen fertilization method, and explained some substances and problems of several techniques for obtaining