

水田における窒素の挙動
と水稲の生育・窒素吸収

安 藤 豊

水田における窒素の挙動と水稻の
生育・窒素吸収

安藤 豊

目次

第1章	序論	1
第2章	水田土壌中での施肥および地 カ窒素の挙動	13
第1節	はじめに	13
第2節	水稻の生育初期段階におけ る土壌アンモニアの挙動	16
1)	土壌の種類異なる水田で の基肥および地カ由来の土 壌アンモニアの挙動	16
イ)	実験方法	18
ロ)	結果と論議	25
2)	有機物施用(堆肥及び稲わ ら)と土壌アンモニアの挙 動	41
イ)	実験方法	43
ロ)	結果と論議	48
3)	基肥レベルと土壌アンモニ アの挙動	62

イ)	実験方法	63
ロ)	結果と論議	64
4)	基肥窒素の作土層内での固 定と下層土での固定	69
イ)	実験方法	71
ロ)	結果と論議	73
第3節 水稻の生育中後期における 土壌中の窒素の挙動		
		80
イ)	実験方法	82
ロ)	結果と論議	85
a)	1983年度の幼形期 追肥の挙動	85
b)	3つの追肥実験結果の 比較	89
第4節 地力窒素の無機化と施用窒 素の有機化(培養実験)		
		97
イ)	実験方法	100
ロ)	結果と論議	105
a)	地力窒素の無機化	105

	b) 施用窒素の固定	117
	オ5節 総合論議	125
	オ3章 水稻による施肥及び地力窒素 の吸収と生育	137
	オ1節 はじめに	137
	オ2節 水稻による基肥及び地力窒 素の吸収	141
	1) 土壤の種類異なる水田及 び基肥量の違いによる基肥 及び地力窒素の吸収	141
	イ) 実験方法	143
	ロ) 結果と論議	145
	2) 有機物施用に伴う水稻によ る基肥及び地力窒素の吸収	174
	イ) 実験方法	176
	ロ) 結果と論議	177
	オ3節 水田土壤での窒素の挙動と 茎数の推移ならびに窒素吸 収との関係	193

1)	最高分げつ期と土壤アニモ	
	ニアの挙動	193
イ)	実験方法	194
ロ)	結果と論議	195
2)	生育中後期の水稻に於ける地	
	力窒素吸収と地力窒素の無	
	機化	202
イ)	実験方法	204
ロ)	結果と論議	205
第4節	水稻に於ける追肥窒素の吸収	221
イ)	実験方法	223
ロ)	結果と論議	224
第5節	土壤アニモニア及び水稻の	
	窒素吸収の変異	234
1)	土壤アニモニアの変異	234
イ)	実験方法	236
ロ)	結果と論議	238
2)	水稻に於ける基肥及び地力窒	
	素の吸収の変異	257
イ)	実験方法	259

第1章 序論

窒素は作物の生育収量をもっとも大きく左右する養分であることから、窒素肥沃性は土壌生産力増強の中心となり、窒素施用方法は施肥法の中心となっている。

窒素は水田土壌中で微生物作用を強く受け、また施肥栽培管理や土壌環境の変化によって大きな影響を受ける。従って、窒素の挙動は、各種養分のなかで最も複雑であり、そのため窒素の土壌中での挙動については実用的には重大な問題点が残されている。一方、水稻の窒素栄養生理学は、著しい進歩を遂げているが、圃場における窒素の吸収経過、生育収量に対する貢献のメカニズムは、なお大きく立ち遅れている。

この様に、今日の高度な稲作にとって必要な窒素における土壌と作物の関係に関する研究は、期待されるものが多い。そして、重窒素分析法は最近、著しい進歩を遂げ、圃場における大規模な重窒素利用も可能となり、上

記の問題の研究に、きわめて有効な手段となっている。

さて、著者は、窒素における土壌と水稻の関係のアプローチにあたって、当面最も重要と考えられる以下の問題について研究を進めてきた。すなわち、第1に水田土壌中での窒素の挙動と、それに関与する要因を検討した。第2に、水稻の窒素吸収経過を明らかにし、第3に、水田土壌中での窒素の挙動と、水稻の生育・窒素吸収の関係に焦点をあてた。そして、窒素の水稻生育に果たす役割を検討した。以上の研究では、特に重窒素トレーサー法を使用し、窒素を施用窒素と地力窒素に分け、由来別に、実際の圃場で検討を加えたものである。

水田土壌中での窒素は、アンモニア態ないし有機態として存在する。土壌中での全アンモニア態窒素、基肥由来アンモニア態窒素、地力由来アンモニア態窒素(以下、本論文では各々土壌アンモニア、基肥アンモニア、地

カアンモニアとする)は、直接水稻の生育に関与するので、本研究では特に、アンモニア態窒素の挙動を検討した。

土壤アンモニアの挙動に影響を与える要因を大別すれば、土壤の種類と栽培管理法が挙げられる。栽培管理法を細分すれば、基肥窒素施用量、作期、有機物施用、深耕、密土、排水等の水管理などにわけることができる。

基肥窒素施用量の土壤アンモニアの挙動への影響は、初期の土壤アンモニア量、基肥窒素の有機化量、地力窒素の無機化を通して示される。高橋¹⁾ら、Shoji²⁾ら、野木³⁾は、基肥窒素施用量をかえて土壤アンモニアの挙動を検討し、土壤アンモニア、基肥アンモニアの消失時期は、基肥窒素施用量に無関係にほぼ同じ時期である事を明らかにしている。

作期をかえた時には、温度条件が異なる事が、土壤アンモニアの挙動に対して影響を与える事になる。高橋⁴⁾らによれば、土壤アンモニアの消失時期は、作期すなわち施肥時期に

かかわらず、6月下旬ないし7月上旬となる。一方、温度要因を消去するために、高橋⁴⁾らは、羽生の積算有効温度示数を用い、土壤アンモニアの挙動を検討した。その結果、積算有効温度示数の増加とともに、土壤アンモニア、基肥アンモニアは指数的に減少する事が明らかとされた。

有機物施用に伴う土壤アンモニアの挙動については、多くの研究がなされており、施用有機物のC/N比が土壤アンモニアの挙動に関連しているとされる。例えば広瀬⁵⁾は、畑条件での施用有機物のC/N比が20をこえると、施用有機物の窒素のとり込みが起こるとしている。一方、千葉⁶⁾らは、稲わら施用と同時に土壤改良資材を施用すると、初期のアンモニアの減少は少ないとした。これらの研究の多くは、有機物中の窒素と施用窒素ないし地力窒素を区別していないために、みかけ上のアンモニアの挙動に対する知見しか得られていない。一方、Yoneyama⁷⁾ら、西村⁸⁾らは、ポット

試験で、重窒素でラベルした稲わらを使用して、稲わら中の窒素の水稲による吸収を検討し、初期から稲わら中の窒素が放出される事を明らかにしている。この事実は、土壌アンモニアの挙動に対する有機物の影響は、アンモニアの有機化と無機化を通して明らかにする必要がある事を示唆するものである。

水管理の土壌アンモニアの挙動に与える影響については、中干し、間断かんがい等の水稲生育中期の水管理より、初期の浸透水によるアンモニアの溶脱が顕著に示されている。

佐々木⁹⁾らは、代かき方法によって透水性を変化させた圃場において土壌アンモニアの挙動を検討した。その結果、透水性を附与する事によって、土壌アンモニア量は低く推移する事を明らかにした。一方、小西¹⁰⁾ら、前田¹¹⁾は、ライシメーター試験ないしホット試験により浸透水中アンモニアを測定した結果、溶脱によるアンモニアの減少は少ないとしている。また、前田¹¹⁾は下層土への施肥窒素の残存率を

定量し、作土直下層の残存率を有機化総量の12~19%とした。この前田¹¹⁾の結果は、同一圃場においてなされたもので、透水性の大小によるアンモニアの下層土への移行について検討した例はみられないようである。

以上の様な土壤アンモニアの挙動に影響を与える要因の他に、地力窒素の無機化を促進する作用として、乾土効果^{12),13)}、地温上昇効果^{14),15)}、土壤混和効果¹⁴⁾、反応変換効果¹⁵⁾、腐植解膠効果¹⁵⁾、土壤の加熱効果¹⁶⁾、機械的效果¹⁷⁾、土壤燻蒸効果¹⁸⁾、代かき作業の効果^{19),20)}、作物根系効果²¹⁾、起爆効果²²⁾などが明らかにされている。しかし、実際の圃場で地力窒素の無機化で最も重要な知見は、いついかなる時期に地力窒素がどの程度放出されるかという点である。この問題は、地力窒素の無機化と温度の関係及び無機化速度を明らかにする事によってはじめて解決が可能となる。

地力窒素の無機化は一般に高温程促進されるが、圃場条件での地温は最高でも30℃前後

であり、この範囲で地力窒素の無機化を考える必要がある。畑条件での地力窒素の無機化に関しては、Stanford²³⁾ら、金野²⁴⁾は、洗滌培養法において、地力窒素の無機化速度と温度の関係は、アレニウスの式を適用できるとした。また、地力窒素の無機化は、ミハイルメンテンの式に適用できる事を明らかにした。一方、水田条件では、吉野²⁵⁾らは、地力窒素の無機化量は、静置温度を T とすると、 $(T - 15^{\circ}\text{C})$ と比例し、放物線により近似的に表現できるとした。しかし、水田条件でも地力窒素の無機化速度と温度の関係は、アレニウスの式に従うものとみられるが、検討した例はみられないようである。

土壌の種類によって、土壌アンモニアの挙動がどの様に異なるかは、圃場レベルでは直接比較できない。何故なら、圃場の立地する場所の気象条件の違いをどの様に評価するかが問題だからである。

その為、その立地する場所の気象条件の違

いをある程度消去する方法として、有効温度の導入が庄子ら²⁶⁾によってなされた。その研究によれば、羽生の積算温度示数²⁷⁾と土壤アンモニア、基肥アンモニアの関係は、いずれも指数式で示され、積算有効温度示数400(暦日では、6月下旬ないし7月上旬)には、土壤及び基肥アンモニアはほぼ消失するという。この他の研究は、^{11), 28), 29), 30)}ポット栽培ないし、栽培管理の違いにより有機物含量の異なる水田を利用して土壤の違いを検討しているにすぎない。この様に土壤の種類が土壤アンモニアに与える要因を現地で解明した例は少なく、未だ十分な知見が得られていないのが現状である。

水稻の窒素吸収に関する研究は数多くなされており、水稻の窒素吸収の基肥的パターンと栽培管理との関係についても多くの研究がなされてきている。^{31), 32)}一方、水稻による基肥窒素の利用率を検討したものとしては、西垣ら³³⁾、和田ら³⁴⁾、勝見³⁵⁾、田口ら³⁶⁾、吉野ら³⁰⁾、前田¹¹⁾が拳

けられるが、その平均的利用率は30~35%とみられる。和田ら³⁴⁾によれば、基肥窒素の吸収は、土壤アンモニアの消失する時期に終了する。また小野³⁷⁾によれば、土壤アンモニア量と茎数は同一圃場では正の相関がみられる。しかしながら、水稻の生育・窒素吸収、基肥窒素吸収と土壤アンモニアの挙動を関連付けた研究は少なく、まだ不十分といえる現状である。

水稻による地力窒素吸収と地力窒素の放出量に関連する研究の多くは、一定期間培養後の地力窒素放出量と水稻の吸収量との相関を求めている³⁸⁾。しかし、水稻の窒素吸収時期と草型とは密接に関連し³²⁾、水稻の収量を解析するには窒素吸収パターンを明らかにする必要があることは明白である。吉野、出井²⁵⁾は、無窒素栽培における水稻の窒素吸収経過と、地力窒素の放出パターンが密接に関係していることを明らかにした。実際の栽培条件下、すなわち施肥条件下での地力窒素の放出と水稻

による吸収の関係を検討した例はみられない。

水稻の生育収量と窒素吸収量とは密接に関係している。^{32),39)} これらの研究は、全窒素吸収量との関係を明らかにしているにすぎず、由来別の窒素(基肥、地力、流転窒素)の水稻生育に果たす役割は、水耕実験で前等⁴⁰⁾が葉身長との関係を検討しているにすぎない。前等⁴⁰⁾によれば、水稻の葉身長は、伸長開始から伸長直前までに吸収した窒素量に支配されるという。圃場ないしポット実験では、水稻の窒素吸収を自由にコントロールする事の困難さから、未だ水稻の生育と由来別窒素の関係は明らかにされていなく、今後の大きな課題といえる。

以上の既述の研究の問題点から、水田土壌中の窒素の挙動と水稻生育・窒素吸収の関係を総合的に明らかにし、窒素の水稻生育に果たす役割を明確にするために、次の様な経過で研究を進めた。

水田土壌中での土壌アンモニア、基肥アンモニア、地力アンモニアの挙動を水稻の生育初期と中後期にわけて検討する。生育初期の段階としては、まず土壌の種類別に検討を加える。その際、圃場の立地する気象要因を消去するために、有効温の手法を使用する。そして、有機物の施用の有無、基肥量の違いによる土壌アンモニアの挙動を明らかにする。特に、有機物施用に関しては、あらかじめ重窒素でラベルした稲わらを使用し、施用有機物中の窒素の挙動についても検討を加える。生育中後期の土壌アンモニアの挙動としては、追肥窒素の挙動を定量的に検討する。さらに培養実験で地力窒素の放出と温度の関係を明らかにし、地力窒素の放出過程を明らかにする。

水稻の生育・窒素吸収については、土壌アンモニアの挙動で検討を加えた要因(土壌の種類、有機物施用、基肥量)について、特に土壌アンモニア、基肥アンモニア、地力アン

モニアの挙動と関連して検討を加える。そして、水稻の地力窒素の吸収と地力窒素の放出の関係を明らかにする。また、由来別窒素の水稻生育に果たす役割を明らかにする。最後に、これらの成果をもとに、土壤アンモニアと水稻の生育について総合的に論議する。

第2章 水田土壌中での施肥および地力窒素の挙動

第1節 はじめに

既述の研究⁴⁾によれば、稲作期間は、土壌アンモニアレベルから、最高分けつ期までと、その後の期間に大別される。両期間は、東北地方の水稲生育では、それぞれ初期段階と中^後期段階にほぼ相当する。この期間の土壌アンモニアの挙動は、以下のような基本パターンになるものとみられる。

初期段階では、土壌アンモニアは、田植後徐々に減少し、水稲の分けつが旺盛になる6月初・中旬から急速に減少し、6月下旬ないし、7月上旬にほぼ消失する。この間土壌アンモニア中に占める基肥由来部分は、早い時期ほどその割合が高く、反対に地力窒素由来部分の割合は遅い時期程大きい。そして、中後期には、基肥由来の土壌アンモニアは認められない。これは、一度有機化された基肥窒素が再無機化しがたいためである。

中後期段階では、水稻の根張りが進み、水稻の窒素吸収能が大きくなるので、土壤アンモニアは、追肥時の短期間を除けば、ほとんどみられないのが普通である。

本章では、以上の基本パターンに関連して、第1に、初期段階における土壤アンモニアの挙動が、土壤の種類や、栽培土きわめて重要な基肥レベルや有機物施用によってどのように変化するか。またこの間に基肥由来と地力由来のアンモニアの量比関係がどのように変化するかを明らかにする。第2に、中後期における追肥由来の土壤アンモニアの挙動を明らかにする。そして第3には、土壤アンモニアの挙動を大きく左右する地力窒素の無機化過程と施肥窒素の有機化過程を明らかにする。最後に、本研究の成果をもとに土壤中の施肥および地力窒素の挙動に関して総合的考察を試みる。

なお、本研究は、大部分が水稻の栽培されている圃場において、窒素トレーサー法を使

用し、土壤と作物の相互作用を重視して行なったものである。また、年次や圃場間差をできるだけ解消して、土壤アンモニアの挙動と水稻の生育との関係を結びつけるために、有効温度を採用した。

第2節 水稻の生育初期段階における土壤

アンモニアの挙動

1) 土壤の種類異なる水田での基肥および 地力由来の土壤アンモニアの挙動

水田土壤はとくに母材や透水性によって、様々の種類がみられる。昭和28年に開始された施肥改善事業の分類⁴²⁾では、水田土壤は11の土壤群に大別されている。さらに最近まとめられた農耕地分類⁴³⁾では、水田土壤は、9つの土壤群に大別され、さらに37の土壤統群に分類されている。そして土壤の種類によって、土壤アンモニアの挙動はかなり異なっており、それが水稻の生育に反映していることは経験的によく知られている。

しかし、従来の水田土壤中での土壤アンモニアの挙動に関する研究^{1), 2), 3), 6), 9)}では、同一圃場における栽培方法の違いを検討したものがほとんどである。そこで本研究では、水田土壤の種類が異なっても、土壤アンモニアの挙動の基本パターンが共通的にみられるか否かを検討

する。その際、水田の存在する場所が異なっ
た場合には、気象要因の場所による差を、有
効温度である程度消去できるので、有効温度
を土壌アンモニアの挙動の検討に利用するこ
とにする。

1.) 実験方法

供試圃場：1975年度は、宮城県内で、宮城農業センター、古川農試、愛子試験地、岩沼泥炭地試験地の4圃場を使用した。1980年度は、福島県会津盆地内で、会津坂下町、本郷町、塩川町、新鶴村の4圃場を使用した。

各供試圃場の理化学性を第2-1表に示めした。宮城県内の4圃場についてみると、土壌統群は、宮城農業センターは細粒、灰色低地土・灰色系、愛子は表層腐植質・多湿黒ホク土、岩沼は泥炭土、古川は細粒強グライ土である。各圃場の有機物含量は、土壌統群を反映して、岩沼、愛子、古川、センターの順に低くなる。特に岩沼では、他の圃場の3倍以上の有機物を含有している。CECは、岩沼、センター、古川、愛子の順となっており、岩沼のCECは、有機物及び粘土鉱物によるものとみられる。一方センターのCECは、大部分がスメクタイトによるものとみられる

表 2-1 供試水田土壤の理化学性

供試圃場	土壌種類	有機物含量	CEC	土性
宮城県内供試圃場				
宮城県農業センター	細粒灰色粘土地土灰色系	1.40%	28.7 ^{meq/100g}	L:C
古川豊試	細粒強グライ土	2.40	22.7	S:C
愛子特作試験地	表層腐植質多湿黒ボク土	3.20	12.3	CL
岩沼泥炭地試験地	泥炭土	9.90	30.3	L:C
会津盆地内供試圃場				
会津坂下町	中粗粒灰色粘土地土灰色系	含		CL
本郷町	碎質灰色粘土地土灰色系	含		S:L
塩川町	細粒灰色粘土地土灰色系	富		L:C
新鶴村	強グライ土	富		L:C

。圃場の透水性は、古川がもっとも悪く、水稻は還元障害を受ける。岩沼は本来は排水不良であるが、現在地下水位を下げて排水を良くしている。

会津盆地内の4圃場の土壌統群をみると、新鶴が中粒強グライ土であり、他は灰色低地土である。しかし、同じ灰色低地土であっても、粒径組成や透水性が異なる。すなわち、本郷(礫質灰色低地土灰色系)の土性がもっとも粗く、透水過良の秋落田であり、塩川(細粒灰色低地土灰褐色系)はもっとも細く、同時に地下水位が高い事により、透水が不良となっている。会津坂下(中粗粒灰色低地土灰褐色系)は両者の中間的性質をもつ。新鶴は強グライ土であり、縦浸透は少ないが、隣接する圃場と段差があり、表面排水を行なっている。有機物含量は新鶴、塩川、会津^{坂下}、本郷の順である。

栽培方法:

各圃場の施肥設計を以下に示す。

1975年度は、トヨニシキ稚苗を5月上旬に移植した。施肥量は、 $N : P_2O_5 : K_2O = 7 : 7 : 7 \text{ g/m}^2$ を基肥として移植2日前に全層施用した。栽植密度は、現地圃場の慣行法にあわせて行なった。堆肥その他の栽培管理法は現地標準管理法によった。

1980年度は、ササニシキ稚苗(本郷だけ中苗)を5月中旬に移植した。施肥量は4圃場ともに、 $N : P_2O_5 : K_2O = 4 : 10 : 10 \text{ g/m}^2$ とした。堆厩肥の施用量は新鶴を除き、 1 kg/m^2 であり、新鶴では 2.5 kg/m^2 の厩肥を施用している。栽植密度他の栽培方法は、現地標準管理法によった。

1980年度は、土壤アンモニア

を基肥由来部分と地力由来部分に分ける為に重窒素トレーサー法を使用した。重窒素試験は、6株枠を用い、無窒素区に枠を作土層まで投入し、重窒素でラベルした硫酸を施用

した。1回のサンプリングの反復数は3である。

c. 試料採取及び分析方法:

水稻の株間および株直下に直径7cmの円筒を犁底盤まで挿入し、土壌を採取し、よく混和後分析に供した。各試験区での土壌の採取は3反復とした。

採取した土壌は直ちに、一部は乾土率の測定に供した。乾土率は110°C一昼夜乾燥後測定した。一部は、1M KCl:土壌=10:1の比率でアンモニア⁴⁴⁾を抽出した。抽出液は蒸留法によってアンモニア⁴⁴⁾の定量を行なった。

窒素の分析は、アンモニア⁴⁴⁾の定量を行なった溶液からアンモニア⁴⁴⁾を回収して行なった。すなわち、定量に使用した試料窒素を含む2%ホウ酸液に10N NaOHを添加し、 $\frac{2}{10}$ N HClでアンモニア⁴⁴⁾を回収した。2%ホウ酸液の指示薬としては、BCGとCR⁴⁵⁾を使用した。回収したアンモニア⁴⁴⁾は乾固後、ガラス管に入れ、減圧後封入した。封入したガラス管を加熱し(550°C)、窒

素ガスとし、 ^{15}N アナライザー（日本分光NI
A-1型）で重窒素の存在比を定量した。

以下、この章では、試料採取及び分析方法
は、全てこの節で述べた方法によった。

ロ.) 結果と論議

1975年度の気象概況は、7月中旬まで平年に比べて最高気温が低いが、最低気温が高く、日較差及び日照の少ない状態で経過した。7月中旬以降は高温多照となった。1980年度は、6月は平年に比べて高温で経過したが、7月、8月は低温で経過し、障害型及び遅延型の冷害年であった。

宮城県内で実施した試験の結果を第2-1図に示した。4圃場とも土壌中の土壌アンモニアは6月上旬から急速に減少し、6月下旬から7月上旬には、ほぼ消失している。

圃場毎に詳しくみると、センターは、他の圃場に比較して土壌アンモニアは常に低く推移している。愛子は、センターより常に高く推移するが、岩沼、古川よりは低く推移する。岩沼は、6月中旬頃から急速に減少する。一方古川では、6月中旬から下旬にかけての減少量が他の圃場に比較して少ないのが特徴である。

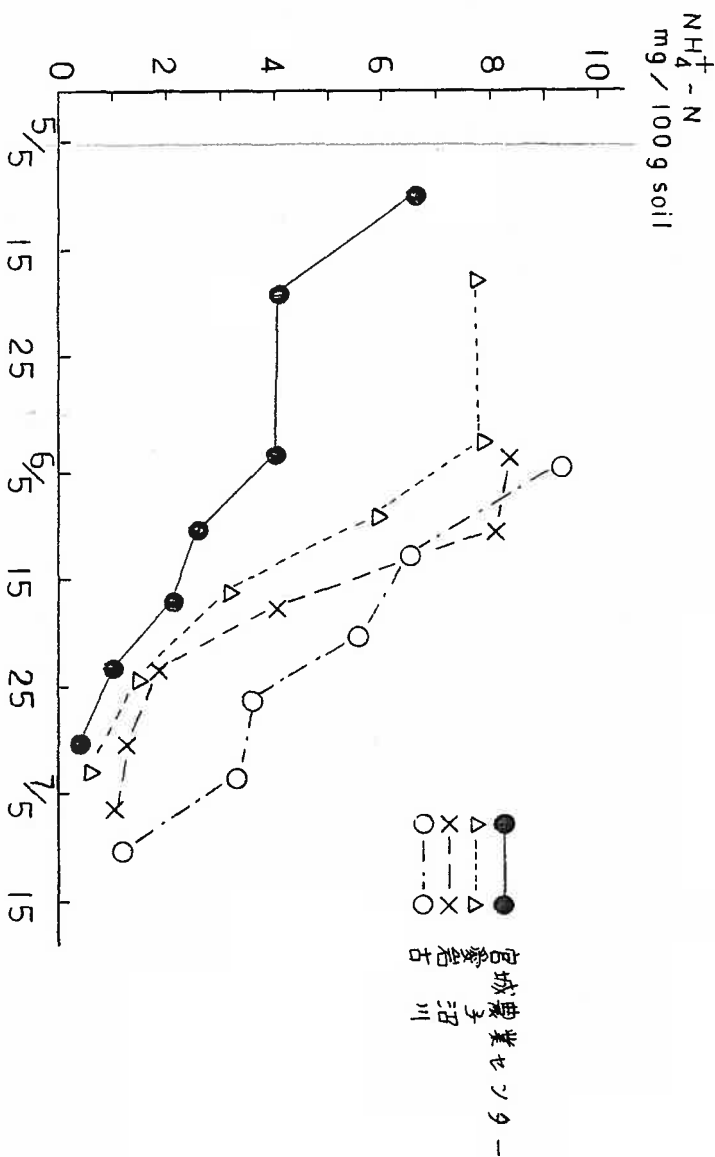


图 2-1 土壤統群の異なる圃場での土壤アミノ酸の挙動

土壤アンモニアは、いずれの圃場でも6月下旬ないし、7月上旬に消失している。後述べるが、会津盆地内の4圃場でも7月上旬には土壤アンモニアは消失する(第2-2図参照)。水稻の根は、移植後から急速に増加し、6月下旬ないし、7月上旬には株間を充まんし、窒素の吸収が著しく高まって来る。また地力窒素の無機化をみると(第2章4節参照)、6月中、下旬には、地力窒素として無機化される易分解部分の分解がほぼ終了する。この結果、土壤アンモニアは6月下旬ないし7月上旬には消失するものとみられる。この時期は、各圃場での水稻の最高分けつ期となっていた。

センターは有機物含量が他の3つの圃場に比べてもっとも低い(第2-1表参照)。1976年度に、愛子試験地を除く3圃場で、重窒素を用いた1975年度と同様の試験での土壤アンモニアを、基肥由来部と地力由来部に分けた結果を第2-2表に示し

カ2-2 表 土壤アソモニ了

中の基肥地力由栗部

園場	月日	土壤アソモニ了 ニ了中の割合%	基肥残存率%	基肥の果アソモニ量 mg/100g	地力由栗アソモニ量 mg/100g
センター	6/8	52.2	35.5	1.34	1.23
	6/22	46.4	10.7	0.17	0.20
岩沼	6/8	48.7	52.5	4.18	4.40
	6/22	36.0	11.3	0.85	1.51
石川	6/5	36.6	40.4	1.75	3.03
	6/24	30.3	32.7	1.33	3.06

400

た。これによれば、土壤アンモニア中の地力
 中心アンモニアは、⁴¹⁾ センター、岩沼、古川で各々 $1.23 \text{ mg}/100\text{g}$, $4.40 \text{ mg}/100\text{g}$, $3.03 \text{ mg}/100\text{g}$ であり、6月下旬のそれは、 $0.20 \text{ mg}/100\text{g}$, $1.51 \text{ mg}/100\text{g}$, $3.06 \text{ mg}/100\text{g}$ であった。又、
 基肥窒素の残存率を6月8日で見ると、センターでは粘土鉱物組成がスメクタイトを主体
 としている事から、施用アンモニア態窒素の
 無機態固定が他の圃場^{41), 47)} に比べて多い事が予想
 される(第二章第4節参照)。これらの事が
 センターで土壤アンモニアを、少なくしてい
 いる原因と思われる。

古川は強グライド土壤であり、排水不良で
 ある。移植期から6月上旬までの古川圃場
 では、田面水に鉄の酸化皮膜が観察された。こ
 の酸化皮膜は、地下水位が高い⁴⁸⁾ ため、作土層
 で還元された鉄が、田面水に拡散移動し、酸
 化沈殿したものである。従って、古川では、
 他の圃場より、作土層の還元状態の進行が速
 いものとみられる。作土層は通常、移植直後

は団粒構造内の酸素、鉄及びマンガンの酸化物の存在及び水稻根の周囲の酸化^的部位と、刈株や、施用有機物の周囲の還元的部位が共存する。この酸化的部位と還元的部位の共存は脱窒を促進するものである。第2-2表の基肥アンモニアの、6月8日から6月24日までの消失率をみると、センターは24.8%、岩沼は41.2%、古川は7.4%と古川がもっとも低い。土壌中の基肥アンモニアは、水稻による利用、有機化、脱窒、溶解によって減少するが、古川では、上記に述べた理由からこの6月上旬からの脱窒による消失も少ないものとみられる。なお、後で述べるが、古川では、水稻による吸収利用もこの時期は少ない。これらの事が、古川での土壌アンモニアが、6月下旬にかけて、他の圃場より高くなった原因とみられる。

岩沼では、移植直後の土壌アンモニア量が、 $11 \text{ mg}/100\text{g}$ 前後と他の圃場より高くなっている。岩沼は、他の圃場と比較して、有機物含

量が高く、100 ml当りの土壤の容積重は他の圃場の $\frac{2}{3}$ 程度であった。従つて、100 ml当りのアンモニア量にすると、約8 mg弱となり、他の圃場とほぼ同様の値となる。

会津盆地内の4圃場での土壤アンモニア及び、基肥アンモニアの推移を、第2-2図に示した。これによると、いずれの圃場でも、土壤アンモニアは、6月中旬頃までは、ほぼ施用量と同程度に推移し、その後急速に減少する。そして、7月上旬頃にはほぼ消失する。基肥アンモニアの推移をみると、6月上旬には、いずれの圃場でもおおまかにみると基肥量の $\frac{1}{4}$ 程度となり、6月下旬にはほぼ消失する。

4圃場間についてみると、本郷が常に他の3圃場に比べて土壤アンモニア、および、基肥アンモニアが少ない。また本郷では、6月中旬の土壤アンモニア中に占める基肥由来の割合が大きいのが特徴である。更に、水稻の影響をあまり受けていない株間につい

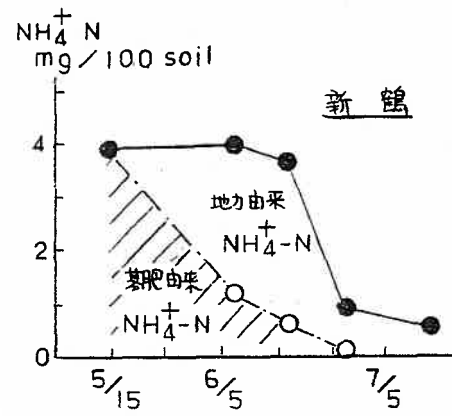
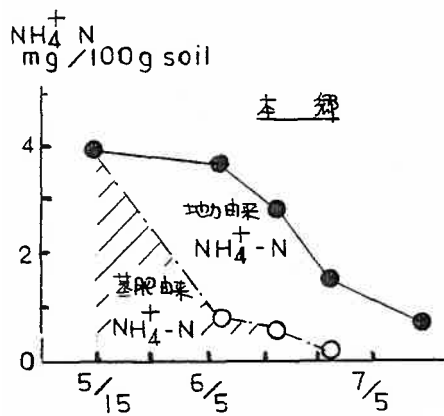
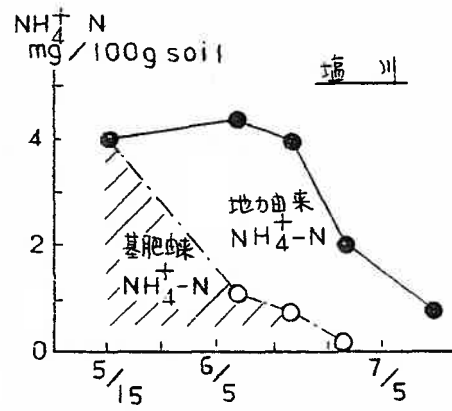
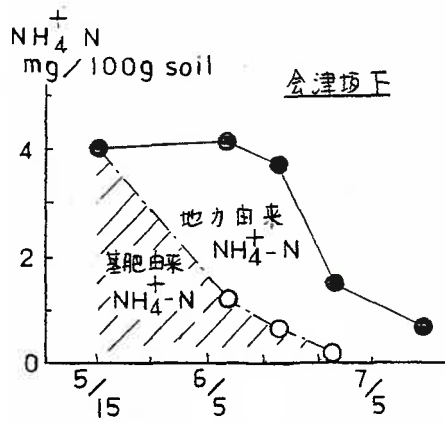
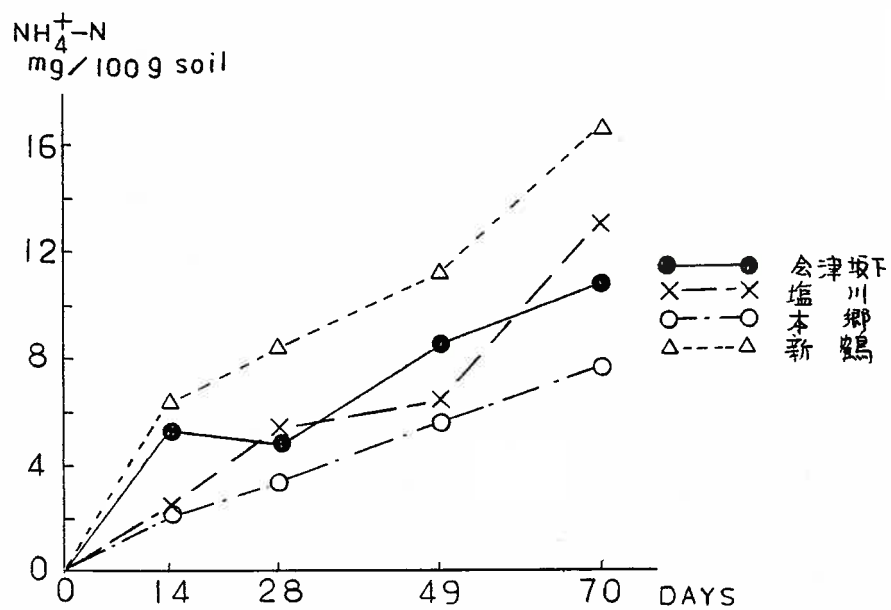


表2-2 土壤アンモニアNが基肥由来
アンモニアの挙動

てみると、6月上旬から中旬にかけての地力アンモニアは、本郷では減少傾向にあるのに対して、他の圃場は増加傾向にある(図示省略)。また、6月上旬の地力アンモニアの絶対量をみると、本郷は他の圃場よりやや高い傾向にある。本郷は、他の圃場に比べて透水が良く、春季の土壤の乾燥も、他の圃場よりも進むものとみられる。乾土効果による地力窒素の無機化速度は初期に速くなる。^{(2), (3)}一方、4圃場の風乾土培養実験(30℃)での地力窒素の無機化量を第2-3図に示したが、これによれば、本郷は、地力窒素の無機化量がもっとも低くなっている。この地力窒素の無機化量と、土壤の乾燥程度の圃場間の差異が、本郷での株間の6月上旬の地力アンモニアが他の圃場より多く、6月中旬には他の圃場より少なくなった原因である。

会津盆地内の4圃場の土壤アンモニアの推移は、宮城県内の4圃場に比べて、圃場



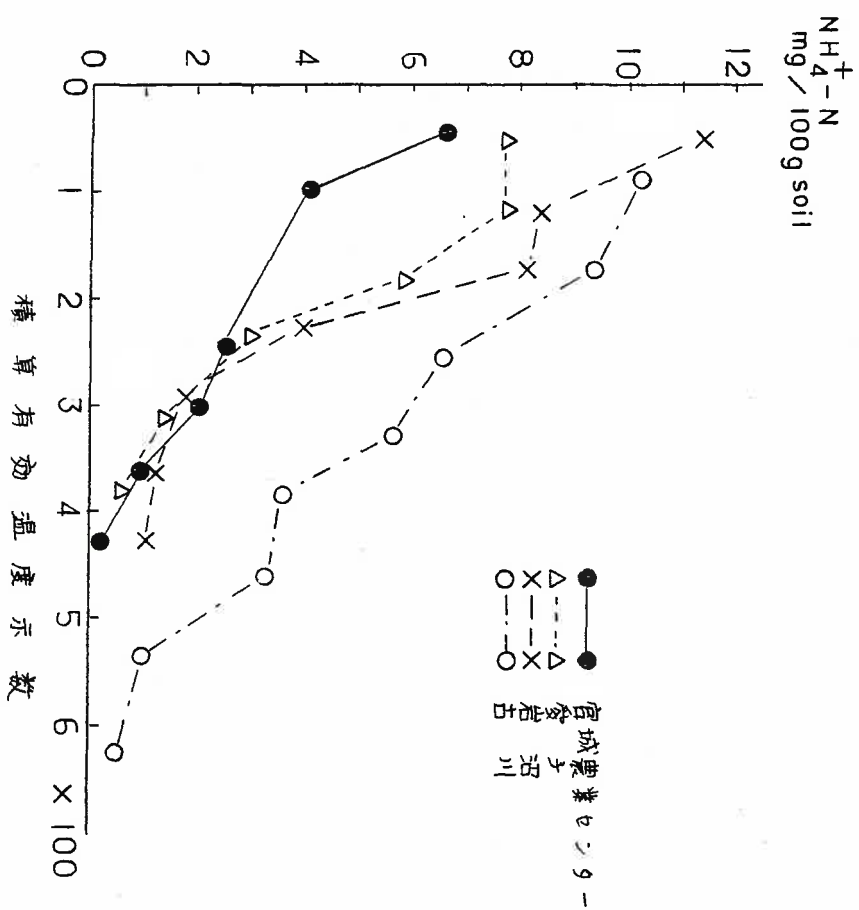
2-3回 培養実験による土壤

了シモノ了の推移(30°C)

間の差は小さい。宮城県内の4ヶ所の圃場は、互いに離れている上に標高にも違いがあり、気温等の気象条件が異なる。これに対して、会津盆地内の4圃場は、同一盆地内で標高もほぼ同じで、近距離にある。従って、会津盆地内の4圃場の気象条件は、ほぼ同一と考えられる。後に詳しく論ずるが、土壌アンモニアの推移は、温度条件の影響を強く受ける。高橋等⁴⁾は、土壌中のアンモニア態窒素の挙動と羽生の積算有効温度示数²¹⁾(AETI)の関係を指数関係で示し、気象条件の差を消去できる事を報告している。そこで、宮城県内の4圃場について、温度条件を消去するために、AETIと土壌アンモニアの関係²⁾を第2-4図に示した。

これによれば、土壌アンモニアは、いずれの圃場でも指数的に減少し、高橋等⁴⁾の結果とよく一致した。各圃場毎に土壌アンモニアの推移をみると、センターは初期の土壌アンモニア量が少なく、AETI

表2-4 土壤のシモニアの挙動と積算有効温度示数



T I 250 付近から、岩沼、愛子と同一の推移を示し、3圃場とも A E T I 400 付近ではほぼ消失する。これに対して、古川の土壤アンモニアは、移植期を除き、常に他の3圃場より多く推移し、かつ消失する時期も遅い。この傾向は、暦日と土壤アンモニアの関係と類似している。既に論じた様に、宮城県内の4圃場では、土壤条件の違いが、土壤アンモニアの推移に、強く影響を与えている事になる。

会津盆地内の4圃場の土壤アンモニアの推移と、宮城県内の4圃場とを比較する事は、基肥量が異なるので厳密にはできない。ただ、会津盆地内の4圃場の土壤アンモニアの推移は、愛子、岩沼と類似している。会津盆地の圃場および、愛子、岩沼は、開田後の年数はかなり経過しており、水田としては安定した状態にあるものとみられる。これに対して、センターは、1972年度に造成した圃場で、水田土壤としては、土壤有機物

等が安定に存在していないものとみられる。
また古川では前述の如く、地下水位が高く⁴⁸⁾、
他の圃場と比較すれば、還元状態の発達が早
い。この事は、土壤中のアミノア
の推移に対して、土壤有機物の存在状態や新
鮮有機物の添加や、透水性、酸化還元系の発
達程度が強く影響する事を示唆するものであ
る。

まとめ

宮城県内の灰色低地土、グライ土、湿性黒ボク土及び泥炭土ならびに、福島県会津盆地内の灰色低地土及びグライ土での初期の土壤アンモニアの挙動に関する研究により次のようなことが明らかとなった。

1.) 土壤アンモニアは、いずれの圃場でも、移植後々々^{減少過程}停滞地味に推移し、6月中旬頃より、急速に減少した。そして、6月下旬から7月上旬にかけてほぼ消失し、水稻は最高分けつ期となった。これを積算有効温度示数との関係で見ると、土壤アンモニアは積算有効温度示数の増加とともに指数的に減少し、積算有効温度示数400～600位で消失した。この消失は、水稻による旺盛な窒素吸収によるものである。

2.) 土壤アンモニアは、いずれの土壤でも初期程、基肥由来部分が多く、経時的に地力由来部分の割合が増加した。そして、最高分けつ期には、基肥由来部分がほとんどなくなっ

ていた。この事は、水稻の基肥窒素の吸収は、いずれの土壤でも、最高分けつ期でほぼ終了することを示唆するものである。

3.)土壤アンモニアレベルは、地力窒素の放出量の多い有機物含量の高い土壤で高く推移した。また、供試圃場の中で、水稻の初期生育が異常還元障害（おそらく二価鉄過剰障害）で阻害された強グライ土壤である古川や、湖底推積物由来の土壤である塩川では、土壤アンモニアの消失時期がかなり遅延した。しかし、この圃場でも土壤アンモニアの消失時期と最高分けつ期は一致した。

3.)粗粒質で排水過良な圃場では、春先の乾燥が他圃場より強く進む事が予想された。そして、この様な圃場では有機物含量が少ない事から、6月中下旬の土壤アンモニア量は、他の圃場より少ないレベルで推移することが明らかとなった。

2.) 有機物施用(堆肥及び稲わら)と土壤アンモニアの挙動

土壤微生物の基質となり得る有機物を水田土壤に多量施用した場合には、水田土壤中のアンモニアの挙動は著しく影響を受ける。たとえば、水田に新鮮有機物を施用すると、土壤アンモニアの新鮮有機物へのとり込みにより土壤アンモニアは減少し、水稻は窒素飢餓になるとされている。⁴⁹⁾しかし、野木³⁾、関矢等⁵⁰⁾は、新鮮有機物の施用が土壤アンモニアの挙動に影響を与えるのは、たとえば関矢等⁵⁰⁾は稲わらを 1 kg/m^2 以上施用した場合、つまり通常の施用量よりも多量に有機物を施用した場合であるとしている。この様に有機物施用に伴う土壤アンモニアの挙動に与える影響は未だはっきりしたものはみられない。さらに、施用有機物中に含まれる窒素は稲作期間中無機化してくるが、この無機化された窒素が土壤アンモニアの挙動に対してどの様な影響を与えるかについて圃場で検討した例はみられ

ないようである。

そこで、ここでは土壤アンモニアの挙動と有機物施用の関係を検討する。その際、重窒素を利用して、有機物施用の基肥としてアンモニアの挙動に与える影響をも検討する。さらに、重窒素でラベルした稲わらを使用して、施用稲わらの分解と、それに伴う重窒素の放出をも考察する。

1.) 実験方法

供試圃場： 供試圃場は、福島農試本場と相馬支場及び会津支場の3圃場である。

各供試圃場の土壌統群は、本場が細粒及び会津支場が中粗粒の灰色低地土灰褐系であるのに対し、相馬支場は、排水不良の細粒強グライ土である。各圃場の主要粘土鉱物組成は、本場がメタハロサイト、Al-バーミキュライト、相馬支場がスメクタイト、会津支場がAl-バーミキュライトである。この粘土鉱物組成の差がCECに反映し、相馬支場のCECがもっとも高く $42.7 \text{ me}/100\text{g}$ 、次いで本場 $16.6 \text{ me}/100\text{g}$ 、会津支場 $14.2 \text{ me}/100\text{g}$ となっている。各圃場の有機物含量は、相馬支場、会津支場、本場の順に少なくなっている(第2-3表)。

栽培方法： 試験区の設計を第2-4表に示した。試験区は、有機物無施用区、推肥 $1000 \text{ g}/\text{m}^2$ 区、稲わら $250 \text{ g}/\text{m}^2$ 区の3種類とした。1978年度は、本場、相馬支場で全区を試験区とした。1978年の会津支場は、

沖2-3表 供試圃場の理化学性

供試圃場	工 壤 統 群	T-C %	T-N %	CEC me/100g	主要粘土鉱物
本 場	細粒灰色低地土灰摺系	1.89	0.30	14.2	クォーツ ハロイサイト A0-バクテライト
相馬支場	細粒強クワ土	3.21	0.30	42.7	クワ クワ
会津支場	中粗粒灰色低地土灰摺系	2.47	0.49	16.6	AR-バクテライト

表2-4 施肥設計

試験区	堆肥	稚木
無施用区	0	0
稚木区	0	250g/m ²
堆肥区	1000g/m ²	0

耕種方法

品 種 : トヨシキ (稚苗)

移 植 期 : 5月中旬

栽 植 密 度 : 30 × 15 cm

施 肥 量 : N : P₂O₅ : K₂O = 6 : 10 : 10 g/m²

全量基肥

堆肥区と有機物無施用区の2区、1979年は、3圃場とも有機物無施用区と稲わら区の2区とした。

この試験区に、トヨニシキ稚苗を5月中旬に30×15 cmの栽植密度で移植した。施肥量は、 $N : P_2O_5 : K_2O = 6 : 10 : 10 \text{ g/m}^2$ で全量基肥として施用した。稲わら、堆肥は湛水直前に施用した。施用した稲わらは、前年度収穫期のものであり、C/N比は約80であった。

土壤アンモニアのうち、基肥由来部と地力由来部に分けるために、第2節1)と同様の重窒素ラベル硫酸を施用した。1978年度は稲わら中の窒素の無機化を検討するためにあらかじめ重窒素でラベルした稲わらも使用した。重窒素ラベル稲わら^{試験}は、1株枠を用いて行ない、反復数は3である。重窒素ラベル稲わら区に施用した硫酸は普通硫酸である。

分析方法； 土壤アンモニア、基肥アンモニアの分析方法は、前節と同様である。施用した稲わらの回収は以下の方法で行なっ

た。杵内の作土を全て、0.5 mmのふるいによつて篩別し、篩上の水稻根を手で除去し、残渣を施用稻わらの未分解部分とした。回収した稻わらは、70°C通風乾燥後秤量し、分析に供した。回収した稻わらは、粉碎後ケルダール分解し、全窒素含量を蒸留法⁵¹⁾で求めた。重窒素の分析は、第2節1)と同様である。

ロ) 結果と論議

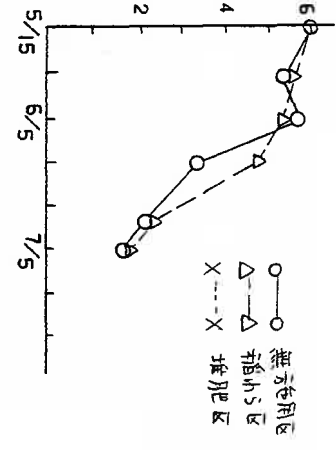
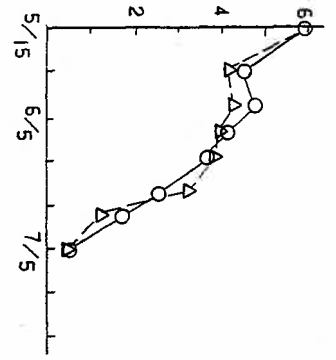
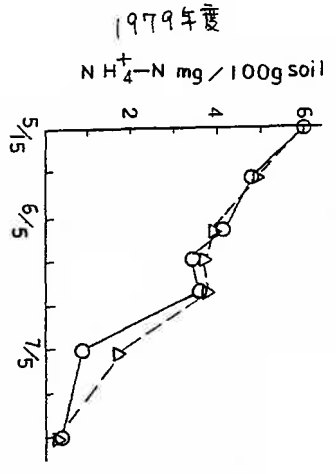
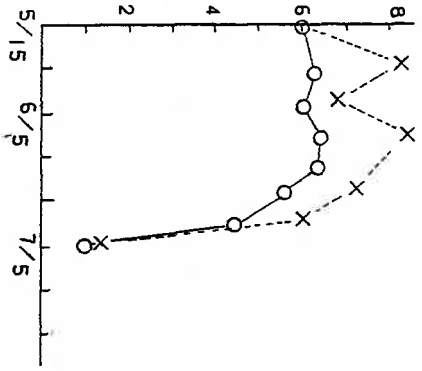
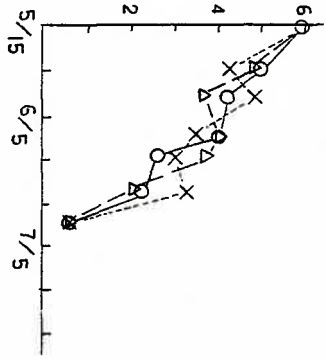
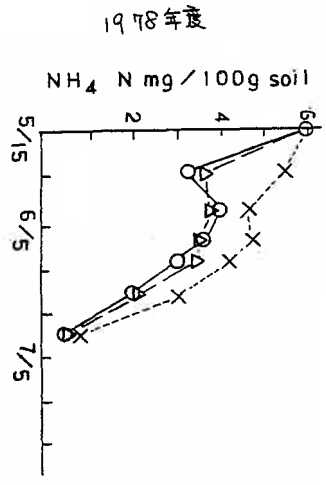
1978年度は、移植後比較的高温に経過し、活着、初期生育はきわめて順調であった。6月第5半旬からは低温寡照で、この傾向は7月第1半旬まで続いた。1979年度は、6月中は高温であったが、7月にはやや低温であった。

第2-5図には、1978年度と1979年度の土壤アンモニアの推移を示した。これによれば、いずれの圃場でも、いずれの試験区でも7月上旬には土壤アンモニアはほぼ消失する。この時期は水稻の最高分けつ期となっている。稲わら区と有機物無施用区を比較すると、いずれの圃場でも、いずれの年次でも土壤アンモニアの推移はほぼ同じである。これに対して堆肥区をみると、本場及び会津支場では、土壤アンモニアは有機物無施用区よりも多く推移する。相馬支場では、他の試験区とほぼ同様の推移を示す。相馬支場でのこの様な土壤アンモニアの推

本場

相馬支場

会津支場



- 標準施用区
- △—△ 相馬支場
- ×—× 堆肥区

ホ2-5図

有機物施用に伴う土壌中の NH_4^+ の推移

移の理由については不明である。

第2-5表には、1978年度及び1979年度の土壤アンモニアに占める基肥由来アンモニアの割合を示した。1978年度は、相馬支場の6月9日の稲わら区で、他の2区と比べて基肥由来割合が10%程度低くなっている。しかしながら、他圃場での試験区の間には大きな違いは認められない。1979年度は、6月5日にはいずれの圃場でも稲わら区と無施用区の間には5%程度の違いが認められるが、6月15日ではほとんど差がみられない。6月上旬の5%程度の差は、基肥由来アンモニアの残存量としては、 $0.5 \text{ mg}/100\text{g}$ 程度の差でしかない。以上の結果から、堆肥施用($1000 \text{ g}/\text{m}^2$)により、土壤アンモニアは、無施用区より高く推移する場合があるが、稲わら施用($250 \text{ g}/\text{m}^2$)では、土壤アンモニアの推移には、ほとんど影響しないといえる。

そこで次に、基肥アンモニアの稲わらへの有機化、施用稲わら中の窒素の無機化につい

カ2-5表 土壤アソモニア中の

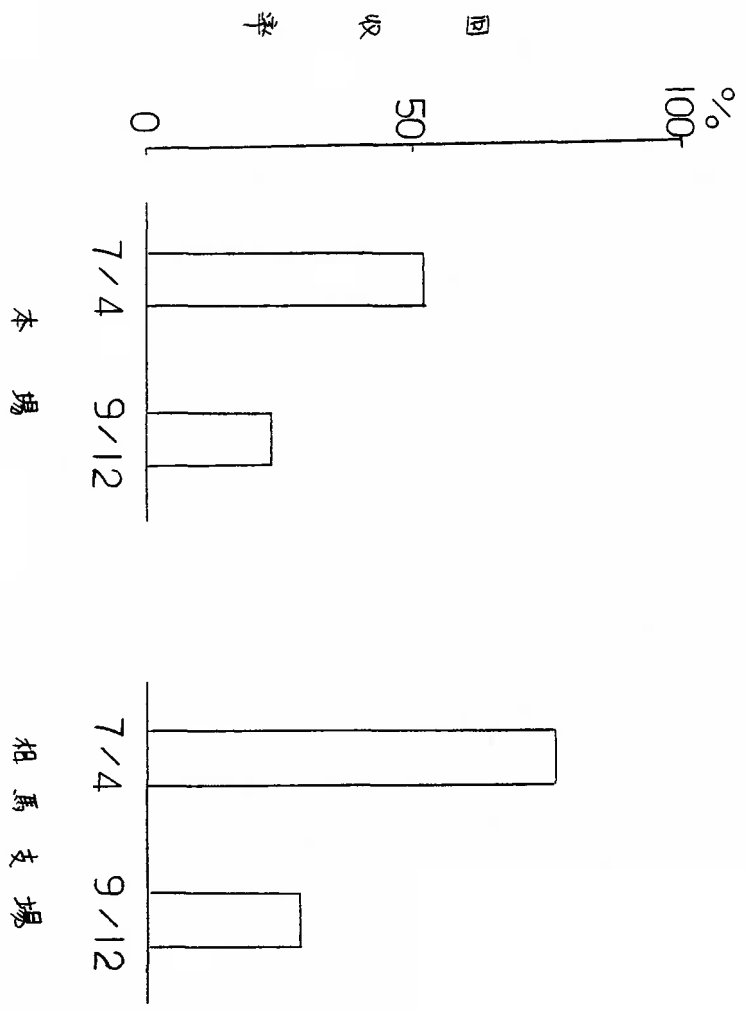
基肥由来アソモニアの占める割合(%)

試験区	本場		相馬支場		会津支場	
	1978	1979	1978	1979	1978	1979
無施用区	60.9	35.4	40.6	20.0		
稲わら区	62.8	41.2	29.6	22.6		
堆肥区	58.0	44.5	43.9	22.6		
	6/2	6/14	6/9	6/22	6/5	6/15
無施用区	46.1	23.2	40.2	32.7	49.6	38.1
稲わら区	52.3	24.1	35.1	N.D.*	54.6	37.7

*: 測定せず

て検討する。

第2-6図には施用稲わらの回収率を示した。稲わらの回収は、 0.5mm の篩を使用した。 0.5mm 以下の部分のC/N比は土壌のそれとほぼ同じであるので、 0.5mm 以下は分解部分として取り扱った。⁵²⁾最高分けつ期頃の回収率は、本場で約50%、相馬支場で約70%、収穫期には、それぞれ20%、30%であり、常に相馬支場の方が回収率が高くなっている。室内培養実験でも同様の結果が得られている。⁵³⁾これは、本場が比較的排水良好であるのに対して、相馬支場が排水不良であり、本場より、より還元的条件で稲わらの分解が進行したこと、また、本場の粘土鉱物がメタハロサイト、Al-バーミキュライトであるのに対して、相馬支場がストクタイトである事を反映したものとみられる。すなわち、稲わらの分解は酸化条件の方が進む事、CECの高い粘土鉱物が稲わら分解を阻害する事⁵⁴⁾を示した結果である。



为2-6回 施用稻わらの回収率

第2-7図には、回収した稲わら中の窒素を由来別に絶対量と各々の比率で示した。基肥由来、稲わら由来、地力由来窒素の各々の比率をみると、稲わら由来窒素は、本場では7月、9月ともに27%であり、相馬支場は7月が17%、9月が27%であった。一方、地力由来窒素の部分についてみると、本場では両時期ともに62%、相馬支場では60~70%を占めている。

この事から、土壤に施用した稲わらは地力窒素を多く有機化する事が示された。この地力窒素の稲わらへの有機化量は、7月では、本場で約 0.9 g/m^2 、相馬支場では約 1.5 g/m^2 である。土壤アンモニアは稲わら区と有機物無施用区にはほとんど差がみられない(第2-5図参照)。したがって、稲わらに有機化された地力窒素量にほぼ相当する量が本来脱窒されるべきものとみられる。脱窒されない部分であるとしても、徐々に有機化が行なわれるものとするれば、土壤アンモニアの挙動に与え

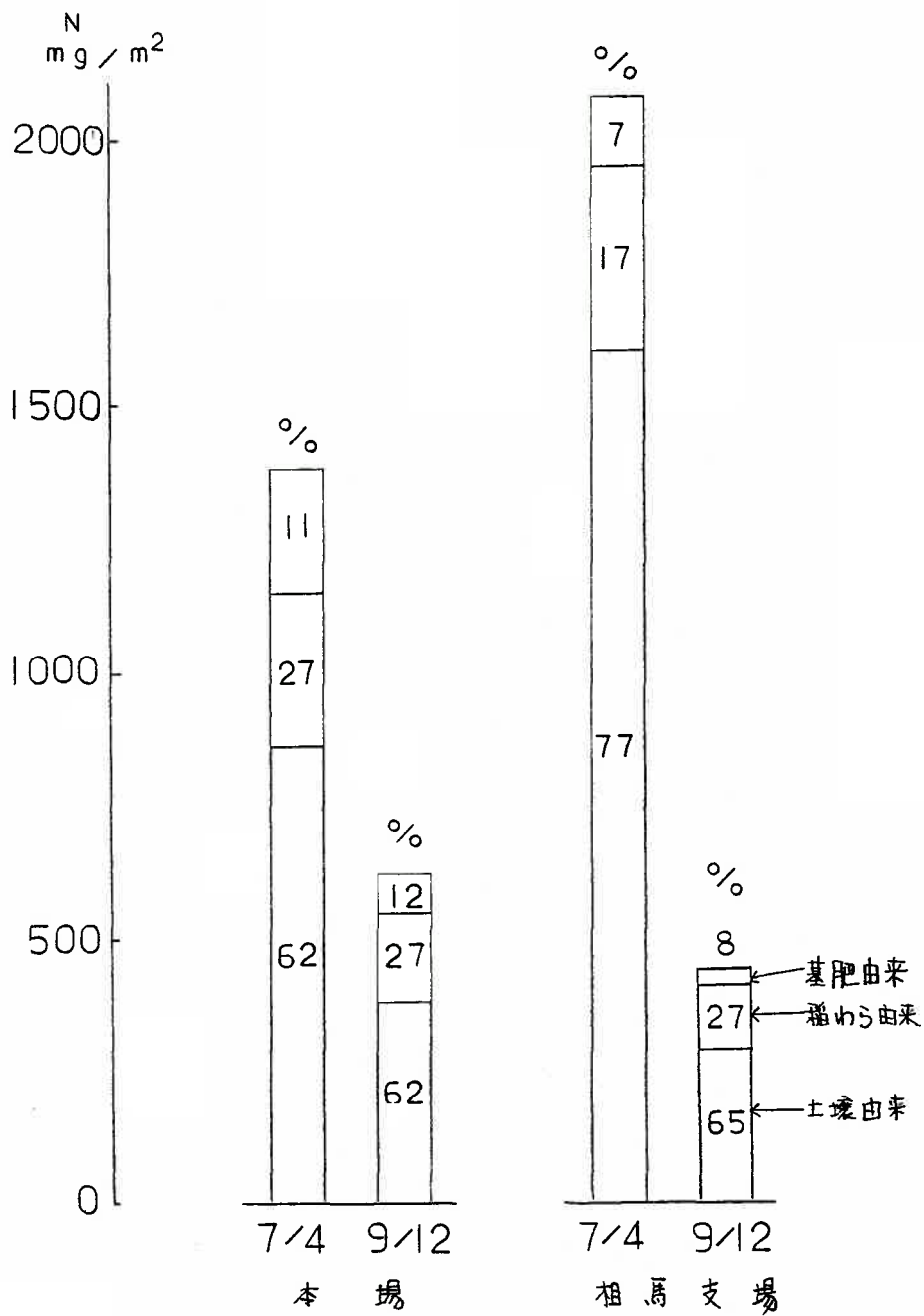


表2-7回 回収稲わら中空素の由来

る地力窒素の稲わらへの有機化の影響は、
250 g/m²の稲わら施用ではほとんどみられな
いことになる。

基肥アンモニアの稲わらへの有機化量をみ
ると、いずれの時期でも、いずれの圃場でも
、回収稲わら中の窒素の約10%程度である。
この基肥アンモニアの絶対量を見ると、最大
で(本場の7月)約140 mg/m²であり、基肥量
の約2%にすぎない。従って、250 g/m²の稲
わら施用の場合には、施用窒素の稲わらへの
基肥アンモニアの有機化はごくわずかである
事がわかる。この事が、第2-5表の土壤ア
ンモニア中の基肥アンモニアの割合が、
稲わら区と無施用区でほとんど差がなかった
原因である。

第2-8図には、施用した稲わら中の窒素
の挙動を示した。回収された部分についてみ
ると、本場、相馬支場ともに稲わらに残存し
ている割合は、7月上旬には25%前後、収穫
期には10%前後となっている。これは逆に、

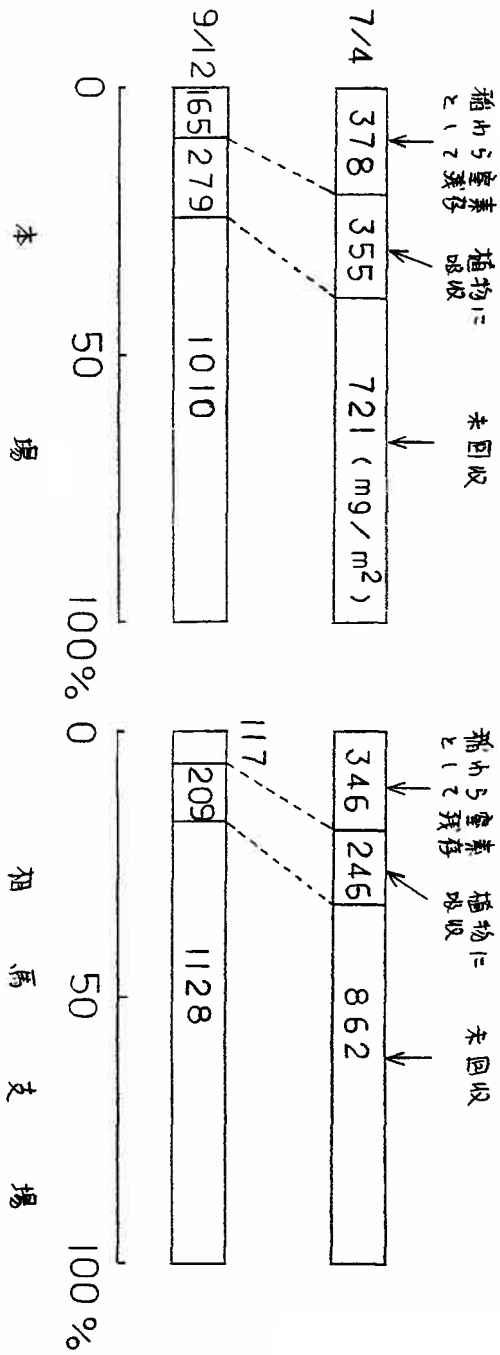


表2-8 本場と祖馬支場での窒素の動態

7月上旬には75%の窒素が未回収及び植物に吸収利用され、施用した稲わら窒素の大部分が、水稻の生育初期段階に分解放出された事を示している。又、收穫期の回収稲わらには10%前後しか残存しない事から、稲わらは、東北地方のように水稻生育初期の低温でも急速に分解し、その後の分解は緩慢であることがわかる。

及川⁵³⁾によれば、稲わら中の窒素が無機化され、土壤中にアンモニアとして存在する量と温度の関係は、培養開始10週目までは15℃と30℃で有意の差がみられない。又、稲わらの分解率と温度の関係をみると、培養開始15週目では15℃と30℃でほぼ同じ50%の分解率を示した。この培養実験の結果は、圃場における本実験の結果とよく一致する。

土壤アンモニアの推移は稲わら区と無施用区で差がみとめられない。従って、稲わらによって有機化された地力由来のアンモニアの減少量を補う形で稲わらから無機化してきた

窒素がアンモニアとして存在する事になる。
そこで、7月上旬の稲わら窒素の未回収部分の絶対量についてみると、本場では 0.72 g/m^2 、相馬支場では 0.86 g/m^2 であった。又、水稻によって吸収された部分は、本場で 0.36 g/m^2 、相馬支場で 0.25 g/m^2 であった。未回収部分と水稻によって吸収された部分の合計は、本場で 1.08 g/m^2 、相馬支場で 1.11 g/m^2 である。これらの量が全てアンモニアとして存在したとすれば、本場では稲わらによって有機化された地力窒素量(第2-7図)を補う量であるが、相馬支場では稲わらによって有機化された地力窒素量よりもなお少ない。すなわち、回収された稲わらに有機化された地力由来窒素の絶対量(第2-7図) 1.6 g/m^2 よりも、稲わらから放出されたアンモニア量 1.08 g/m^2 の方が少ない。この事は、稲わらによって有機化された地力由来の窒素の一部は、本来脱窒によって消失する部分である事を示すものである。

まとめ

福島県農業試験場本場（細粒灰色低地土灰褐色系）、相馬支場（細粒グライ土）、及び会津支場（中粗粒灰色低地土灰褐色系）で、有機物施用の土壤アンモニア、基肥アンモニアの、 CO_2 挙動に与える影響を検討した。さらに、本場及び相馬支場では、重窒素ラベル稲わらを使用して、施用稲わら中の窒素の挙動についても検討を加えた。得られた結果は以下の通りである。

1.) 土壤アンモニアは、稲わら施用（ 250 g/m^2 ）と無施用区では、いずれの圃場でも同様の推移を示した。堆肥施用では、本場、会津支場で土壤アンモニアが他の区よりも高く推移したが、相馬支場では無施用区とほぼ同様に推移した。土壤アンモニアに占める基肥由来の割合は、いずれの圃場でも試験区間に差がみとめられなかった。

2.) 施用した稲わらの回収率は、本場の方が相馬支場より高くなっていた。これは、相馬

支場の土壌の粘土鉱物組成が本場のそれと比べて、稲わらの分解に抑制的である事又、相馬支場の圃場が本場と比べて還元的である事を反映した結果である。回収された稲わら中の窒素を由来別にみると、60%以上が地力由来窒素であった。この稲わらへ有機化された地力由来窒素は本来脱窒作用を受けるものであり、土壌アンモニアの挙動に対するアンモニアの稲わらへの有機化の影響は少ないものと推定された。又、基肥アンモニアの稲わらへの有機化量はごくわずかであった。

3.)稲わら分解に伴う稲わら中の窒素の放出は、ごく初期からなされており、最高分けつ期では75%、収穫期では90%の稲わら中の窒素が放出された。

3.) 基肥窒素レベルと土壤アンモニアの挙動

基肥窒素量が多い場合には、水稻の葉色のおとろえが遅く、その理由としては従来から土壤中に基肥窒素が残存するためであると云われてきた。これに対して、高橋等¹⁾、Shoji²⁾ら、野木³⁾は、基肥量をかえて土壤中のアンモニアの挙動を検討した結果、多肥区でも少肥区とほぼ同じ時期に土壤中のアンモニアが消失する事を明らかにした。

一方、基肥施用はいわゆるプライミングエフェクト(起爆効果²²⁾)によって、地力窒素の無機化を促進する事が知られている。この事実は、培養実験にもとづくものであり、圃場で検討した例はみられない。

そこで、ここでは基肥窒素施用の違いが土壤中のアンモニアの挙動、及び地力窒素の無機化に与える影響について検討する。

1) 実験方法

供試圃場； 供試圃場は宮城県農業センターの圃場で、第2節1)と同一圃場である。実験は1984年度に行なった。

栽培方法； 稚苗ササニシキを5月11日に30×15cmの栽植密度で4本/株移植した。試験区は、基肥窒素を2g/m²、5g/m²、8g/m²の3区とした。リン酸、カリは、P₂O₅、K₂Oとして各々10g/m²をいづれの区にも施用した。栽培管理方法は、宮城県農業センターの標準耕種法とした。

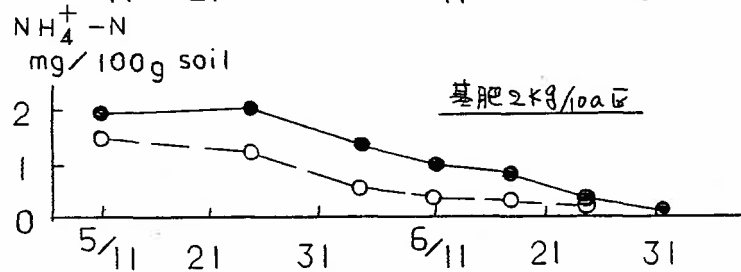
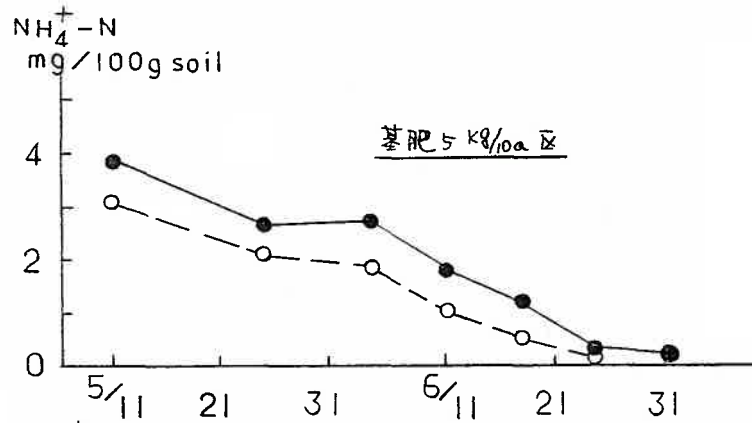
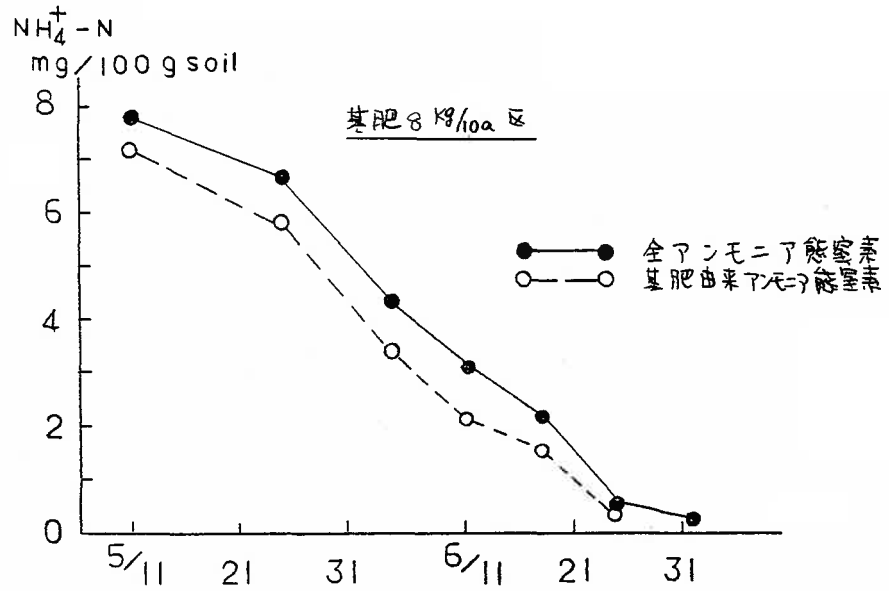
土壌アンモニアのうち基肥由来部分と地力由来部分に分けるために枠試験を行なった。枠試験は、圃場の中に16株相当の木枠(1.2m×0.6m)を作土層に挿入して、重窒素でラベルした硫酸を施用した。

分析方法は、第2節1)と同様である。

ロ.) 結果と論議

1984年度は最高気温で見ると、6月中旬、7月1半旬を除いて平年の最高気温よりやや低く経過した。一方最低気温は、6月下旬を除いて、平年に対して高く推移し、水稻の生育は7月上旬には平年並みとなった。

土壌アンモニアの推移を第2-9図に示した。土壌アンモニアの推移は、いずれの基肥量の区でも移植後減少し、6月下旬には消失した。この時期に水稻は最高分けつ期となった。土壌アンモニアの絶対量は6月下旬までは、基肥量に対応している。すなわち、基肥量のもっとも多い 8 g/m^2 区では、6月下旬まで常に高く推移し、基肥量のもっとも少ない 2 g/m^2 区では、6月下旬まで常に低く推移した。しかし、いずれの区でも6月下旬に消失する事は後に詳しく論ずるが、水稻の7月以降の生育は吸収窒素からみるかぎりにおいて、基肥量の違いには左右されない事を示すものである。



为2-9回基肥窒素量の違いによる
アンモニウム態窒素の推移

土壤アンモニア中に存在する基肥アンモニアの消長を第2-9図に示した。基肥アンモニアは、土壤アンモニアの消長とほぼ同様である。すなわち、基肥由来のアンモニアは、6月下旬にほぼ消失し、絶対量は、基肥量に対応し推移する。又、基肥量が多いほど、土壤アンモニアに占める基肥アンモニアの占める割合は高くなる。

土壤アンモニア及び基肥アンモニアの消長に対して、地力アンモニアの消長は、基肥レベルに対してそれ程大きな影響を受けない(第2-9図)。すなわち、 $2\text{g}/\text{m}^2$ と $5\text{g}/\text{m}^2$ では、地力アンモニアは、ほぼ同様である。 $8\text{g}/\text{m}^2$ 区では、他の2区よりも地力アンモニア量がやや多くなっている。本実験では、土壤中の地力アンモニアが、ただちに地力窒素の無機化量を反映するとはいいがたい。本実験の条件では、無機化された地力窒素は、脱窒、溶脱、水稻による吸収を受ける。³⁵⁾一方、無機化された地

力窒素のみならず、もともと存在していた基肥由来のアンモニアも同様に脱窒等の影響を受ける。これらの作用の受け方に基肥由来と地力由来のアンモニアに差は存在しない。基肥量が多い場合は、無機化されたアンモニアが基肥量が少ない時に比べて、基肥アンモニアによって希釈される率が高くなり、基肥量が少ない時に比べて相対的にこれら作用を受ける確率は少なくなるものとみられる。この事から、 $88/m^2$ での地力アンモニアが他の2区よりも多くなったものとみられる。

これらの事より、基肥レベルの違いは、土壌中のアンモニアの消長に対して、基肥アンモニア量の違いとして影響を与え、地力窒素の無機化に対しては影響を与えないものとみられる。

まとめ

宮城県農業センターの圃場で、基肥窒素量の違い (2 g/m^2 , 5 g/m^2 , 8 g/m^2) が土壌アンモニアの挙動に与える影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

1) いずれの基肥量の区においても土壌アンモニアは、ほぼ同じ時期、6月下旬に消失した。この時期は、最高分けつ期とほぼ一致した。土壌アンモニアは基肥量が多い程、多く推移した。そして、土壌アンモニアに占める基肥アンモニアの割合は、基肥量が多い程多く推移した。

2) 地力アンモニアは、多肥区程多いが、これはプライミングエフェクトによるもので、^{たゞ}脱窒、流亡の作用を受ける確率が少なかったためと思われた。

4.) 基肥窒素の作土層内での固定と下層土での固定

基肥窒素の一部は、水田土壤中アンモニウムとして行動し、水稻によって吸収利用される外に、脱窒、溶脱などの作用を受ける⁵⁵⁾。また基肥窒素の一部は、土壤に有機的、無機的に固定され、水田土壤系に残存し、次年度にも水稻によって一部分吸収利用される⁵⁶⁾。

基肥窒素の水田土壤作土層での有機化量を圃場で検討した報告⁴¹⁾によれば、施用量の20~35%が作土層で有機化するとされている。しかし、施用有機物の質の違いによる作土層の残存率の違いを検討した例はみられないようである。

一方、水田土壤は還元状態にあり、還元状態での無機態窒素は正の電荷をもつアンモニウムイオンとして安定に存在する。これに対して、土壤コロイドは、負の荷電をもつ。水田に施用される基肥窒素量は、 m^2 当りで最大でも10gであるので、100g乾土当りの当量

は 1me 以下となり、土壤のもつ CEC より小さく、施用された窒素は土壤に吸着保持される。しかし、Shoji²⁾らによれば、土壤のもつ CEC の質と量により、土壤に吸着保持されるアンモニウムイオン量と水溶液中に存在するアンモニウムイオン量の量比関係は決定され、CEC よりも少ないアンモニウムイオン量でも全てが土壤に吸着保持されない。この事から、畑土壤に比べて、溶脱される基肥窒素量は少ないにしても、水田土壤での窒素の溶脱は起こりうるものとみられる。前田¹⁾によれば、圃場試験で、下層土に有機化された基肥窒素量は、有機化総量の $10\sim 20\%$ に達するとしている。しかし、土壤群^境が異なれば当然下層土への移行量が異なる事が予想されるが、その検討はなされていない。

そこで、ここでは施用有機物の質と異なる土壤群^境での基肥窒素の下層土での残存^{*}を検討した。

* 基肥窒素の作工層での固定は、有機的固定と無機的固定(粘土鉱物の層間への固定)があるので、ここでは両者をあわせて残存量ない、残存率とした。文献引用のさいは、原文に従う。

1) 実験方法

供試圃場と栽培方法；供試圃場は、福島県農試本場と相馬支場である。供試圃場の理化学的性質は、第2節2)で述べた通りである。栽培方法も第2節2)と同様であるが、重窒素硫酸は高濃度（30ないし50 atom %）を使用した。

試料採取及び分析方法；水田土壌の試料採取は、水稻收穫後行なった。作土層の試料は、枠内から数カ所採取し、よく混和して供試した。下層土の試料は、内容積100 ml、高さ5 cmの三相分析用のコアを使用した。作土層をとり除いた後に、コアを土壌に挿入し、枠内で同一層から4カ所の土壌を採取した。次に、下層土を5 cmとり除いて、同様に試料を採取した。土壌は表層より30 cmまで採取した。

採取した土壌は、風乾後2 mmの篩で篩別した。2 mm以下の部分についてケルダール分解57)により全窒素量を求め、重窒素分析より、基

肥窒素の存在量を求めた。重窒素分析は、前に述べた通りである。

ロ) 結果と論議

第2-6表には、堆肥 1000 g/m^2 施用区の基肥窒素の作土層での残存率を示した。本場での残存率は35%、相馬支場のそれは29%であった。これらの結果は、ほぼ既述の研究結果⁴⁾と一致する。前田¹⁾によれば、基肥窒素の有機化量は、土壌の有機^物含量と正の相関があるとされている。各圃場の炭素含量をみると、本場、相馬支場で各々、89%、321%であり、本実験の結果では有機^物含量と基肥窒素の有機化量とは関連がみられない。

一方、第2-6表には、稲わら 250 g/m^2 施用した時の基肥窒素の作土層での残存率も示した。両圃場とも、堆肥 1000 g/m^2 施用区と比較して作土層への残存率は高くなっている。既に示した回収稲わらへの基肥窒素のとり込み量は、收穫期で 0.1 g/m^2 程度であり、これは基肥量の2%以下である。これに対して、堆肥区と稲わら区の残存率の差は4~10%程度あり、回収稲わらにとり込まれた量では説

表 2-6 表 基肥窒素の土壤残留率(%)

作土層	本場		相馬支場	
	堆肥区	米作区	堆肥区	米作区
作土層	35.3	44.0	29.4	33.5
10-15 cm	2.8	3.3	1.7	2.0
15-20 cm	3.5	3.0	1.3	2.0
20-25 cm	1.2	2.5	0.8	0.8
25-30 cm	0.7	1.3	0.5	0.2
	8.2	10.1	4.3	5.0

明できない。

回収稲わらは、 0.5 mm の篩上に残存した部分としている。 0.5 mm より小さい稲わらの分解物も当然基肥窒素をとり込んでいるはずである。この事が、両圃場で稲わら施用区での基肥窒素の作土層での残存率を高くしたものとみられる。

次に下土層への基肥窒素の移行について検討する。第2-6表には基肥窒素の下層土への移行量も示した。各圃場の下層土への基肥窒素の移行率は、本場で基肥量の9%程度、相馬支場で5%程度であり、圃場間に差がみられる。

基肥窒素量は各圃場とも 6 g/m^2 であり、これを 100 g 乾土当りに換算すると、 6 mg となる。この量は約 0.5 me であり、土壤のもつCECの30~80分の1でしかない。この事からみるかぎりにおいては、各圃場とも基肥窒素は全て土壤に吸着されるようにみられる。一方、Shoji²⁾らによれば、CECの大きさ²⁾と土

壤アンモニアイオンの吸着能力の違いを水溶性アンモニアからみると、同一窒素添加量では、CECの高い土壤の方が水溶性のアンモニア量は少ない。そして、土壤のもつCECより少ないアンモニアの添加でも、水溶性のアンモニアは存在する。この事は、本実験においてもアンモニアが下層に移行する可能性を示し、事実両圃場とも下層へ基肥窒素は移行していた。

本場と相馬支場のCECを比べると、相馬支場は本場の約3倍のCECをもつ。又、土壤統群で示した如く、相馬支場は排水が不良である。従って、相馬支場では本場比べて、作土層内の水溶性のアンモニア量が少ない上に、排水不良で透水に伴う基肥窒素の下層土への移行量が少なくなったものとみられる。

下層土での基肥窒素の残存量は、本場では全残存量の約19%、相馬支場では約13%となった。前田¹⁾は、下層土での基肥窒素の有機化

量は、全有機化量の12~19%とした。本実験でもほぼ同様の値が得られた事から、水田土壌での下層土での有機化量は、ほぼこの範囲に入るものとみられる。

まとめ

透水性の良好な福島農試本場及び不良な相馬支場で、基肥窒素の作土層への残存及び下層土への移行を検討した。さらに、堆肥 (1000 g/m^2) と稲わら (250 g/m^2) を施用した時の基肥窒素の作土層への残存の違いもあわせて検討し、次のようなことが明らかとなった。

1) 堆肥 1000 g/m^2 施用区での作土層への基肥窒素の残存率は、基肥量の $29 \sim 35\%$ であった。稲わら 250 g/m^2 施用では、堆肥区に比べて作土層への残存率が $4 \sim 10\%$ 高くなる傾向があった。稲わら施用に伴う残存率の上昇は、分解の進んだ稲わら部分に関与している事が示唆された。

2) 基肥窒素の土壌への全残存量のうち、 $13 \sim 19\%$ が下層に存在した。下層への基肥窒素の移行は、CECの低い透水性の良好な本場程多く、基肥量の 9% が下層に移行していた。一方、排水不良なCECの高い相馬支場で

も、基肥量の5%が下層に存在していた。

第3節 水稻の生育中後期における土壤中の窒素の挙動

前節で明らかにした様に、水田土壤中のアンモニアは、6月下旬ないし、7月上旬にはほぼ消失する。そして、土壤アンモニアが消失した後の水稻の窒素吸収速度は、地力窒素の無機化速度に依存する。

一方、多収を得るための中後期の水稻生育には、土壤窒素だけでは充分でなく、窒素追肥が今日ごく一般的となっている。この追肥窒素の水田土壤中での挙動の検討は和田ら⁵⁸⁾、山室⁵⁹⁾、Savant⁵⁵⁾らによってなされているが、それらの研究は、水稻による利用率、水稻による利用率と土壤への残存率、追肥窒素の体内分布を明らかにしたにすぎない。

水稻の生育中後期の水稻による地力窒素の吸収と有効積算温度示数の関係は、直線関係で示される⁴⁾。従って、水稻による地力窒素の吸収速度は、0次式で示される事になる。一方、水稻による追肥窒素の吸収速度について

は明らかにされていない。さらに水稻による追肥窒素の吸収速度に大きな影響を与える追肥窒素の水田土壌中での挙動について検討された例はみられない。

そこで本節では、水田土壌中での追肥窒素の挙動を、田面水、土壌中の交換態、土壌への固定から、経時的かつ定量的に検討する。

1.) 実験方法

供試圃場；供試圃場は、宮城農業センターである。供試圃場の一般理化学性は、前節で述べた通りである。実験期間中の日減水深は、平均 0.3 cm/日 であった。

水稻栽培方法；1982年度は、基肥量を $N : P_2O_5 : K_2O = 4 : 10 : 10 \text{ g/m}^2$ とし、ササニシキ稚苗を5月上旬に移植した。1983年度は、基肥量を $N : P_2O_5 : K_2O = 6 : 10 : 10 \text{ g/m}^2$ とし、ササニシキ中苗を5月中旬に移植した。両年度ともに、栽植密度は $30 \times 15 \text{ cm}$ とし、7月上旬に中干しを行なった。

追肥方法；1株の占有面積に相当する塩ビ製の無底枠 ($30 \times 15 \text{ cm}$) を使用し、1株毎に追肥を行なった。枠の設定方法、追肥方法は山室⁶⁰⁾ と同一である。すなわち、あらかじめ平均茎数に近い株を選び、追肥の前日に塩ビ枠を犁底盤まで摺入する。田面水を枠の中に入れ、漏水のない事を確認し、その中に所定量の重窒素硫酸を水溶液として入れ、静かに田

面水を攪拌する方法である。

追肥時期及び追肥量；追肥は1982年度は7月20日（幼形期）と8月9日（出穂期）に、1983年度は7月18日（幼形期）の計3回行なった。追肥窒素量は、 $2\text{g}/\text{m}^2$ とし、1982年度は3 atom%，1983年は30 atom%の重窒素硫酸を施用した。1回の試料採取は1982年7月は4枠、1982年8月と1983年7月は3枠とした。試料採取は、追肥後7～12日まで経時的に行なった。なお、出穂期追肥の水稻には、幼形期追肥は施用していない。

試料採取方法；田面水及び土壌試料の採取にあたっては、枠内に直径10 cmの円筒を2個挿入した。各々の円筒から以下の様な方法で試料を採取した。田面水はピペットを用い、あらかじめ用意した1リポリボンに採取した。土壌は葉ジを用い、表層約1 cm部分と、1～4 cm部分に分けて採取した。そして田面水及び土壌の採取直後にクロロホルムを少量添

加し、微生物の活性をおさえた。植物体は、田面水及び土壌を採取した稗の地上部を採取した。

分析方法；田面水中のアンモニアの抽出は、1Mとなるように塩化カリを採取した田面水に加え、土壌アンモニアの抽出は、土壌：溶液比が1：10になるように1M塩化カリ溶液を加えて行なった⁴⁴⁾。1983年度は、土壌試料の一部を、1M塩化カリ溶液で3回、脱塩水で2回遠沈洗浄し、110°C乾燥後、土壌に固定された追肥窒素の分析に供した⁵⁸⁾。窒素及び重窒素の定量方法は前節と同様である。

ロ) 結果と論議

1982年度幼形期追肥時期は、追肥後6日間、ほぼ 20°C 前後で推移した。1982年度出穂期追肥は、追肥後3日、4日目が 20°C 前後であったが、それ以外は 23°C 以上であった。1983年度幼形期追肥は、追肥日、4日後、6日後が 20°C 、 25.5°C 、 21°C で、それ以外は 23°C 前後で推移した。

a.) 1983年度の幼形期追肥窒素の挙動

追肥窒素の挙動は、1982年度の幼形期追肥、出穂期追肥、1983年度の幼形期追肥の間に大差がなかった。そこで、第2-10図には1983年度を代表として示した。田面水中の追肥由来アンモニア(以下この節ではアンモニアと略す)は追肥直後から指数的に減少し、追肥後2日で追肥量の10%程度となる。そして追肥後7日でほぼ消失する。

一方、土壌中の0~4cmの部位では、追肥後急速にアンモニアが増加する。追肥後2日で最大となり、追肥量の約45%が存在した。

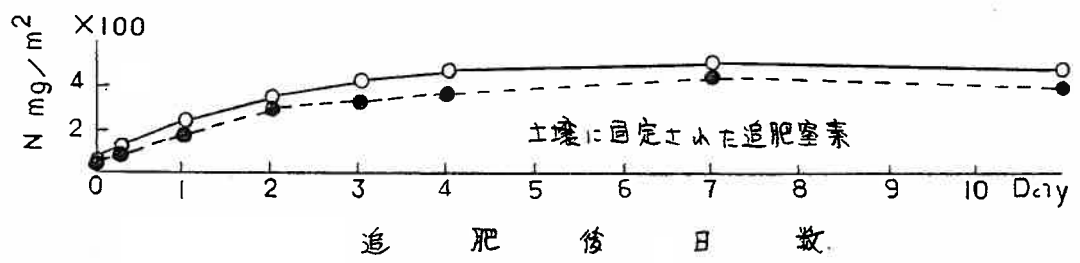
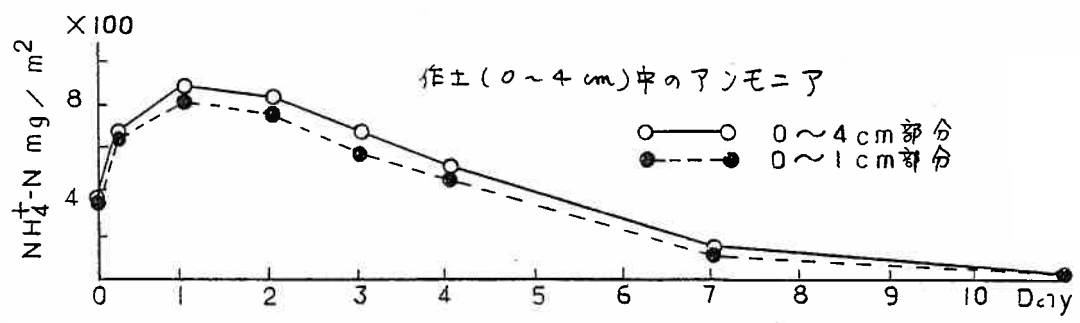
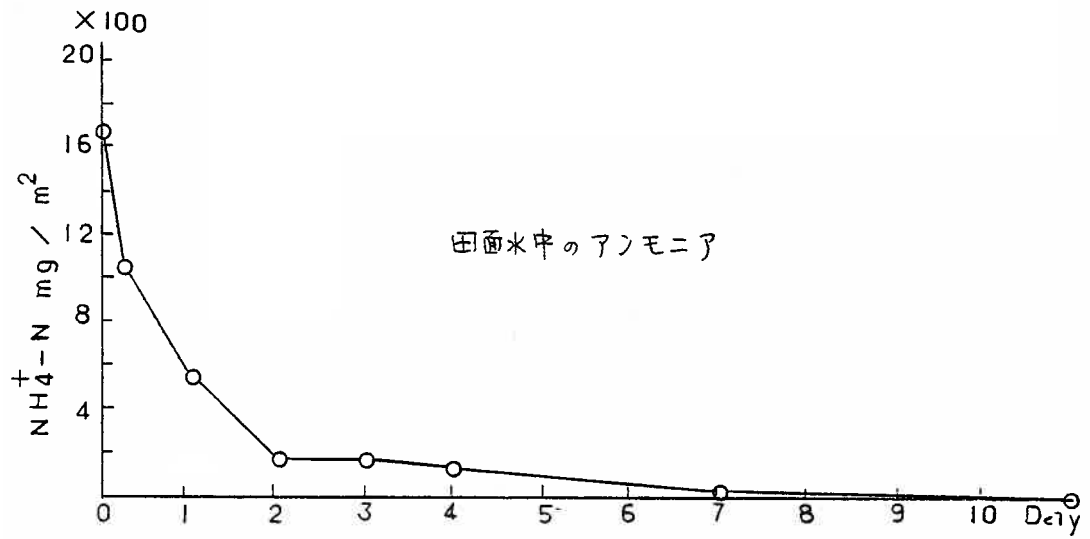


表2-10 追肥窒素の挙動(1983年)

その後直線的に減少し、追肥後約8~12日で
 土壌中のアンモニアは消失する。

土壌中のアンモニアの大部分は、作土下1
 cmの部分に含まれる。これは、本圃場がスメ
 クタイトを主体とする粘土鉱物よりなる土壌
 であること、日減水深が小さいためとみられ
 る。すなわち、スメクタイトによって、交換
 態のアンモニウムイオンが土壌に強く保持さ
 れる事、又、アンモニアの浸透水による下方
 への移動が少ない事が、アンモニアの大部分
 が作土下0~1cmの部分に存在する理由であ
 る。

土壌によって固定^{*}される追肥窒素は、指数的
 的に増加し、追肥後4日ないし5日以後は一
 定となる。0~1cmと1~4cm部位を比較す
 るとアンモニアと同様に固定された追肥窒素
 の大部分は、0~1cm部位にある。これは、
 アンモニアが1~4cm部位にあまり存在しな
 いためである。

土壌により固定された追肥窒素は、追肥量

* 土壌に非置換態として残存する施用窒素には、有機物固定と無機的
 固定がある。ここでは両者を合せて固定とした。引用文献の場合は原文通りと
 した。

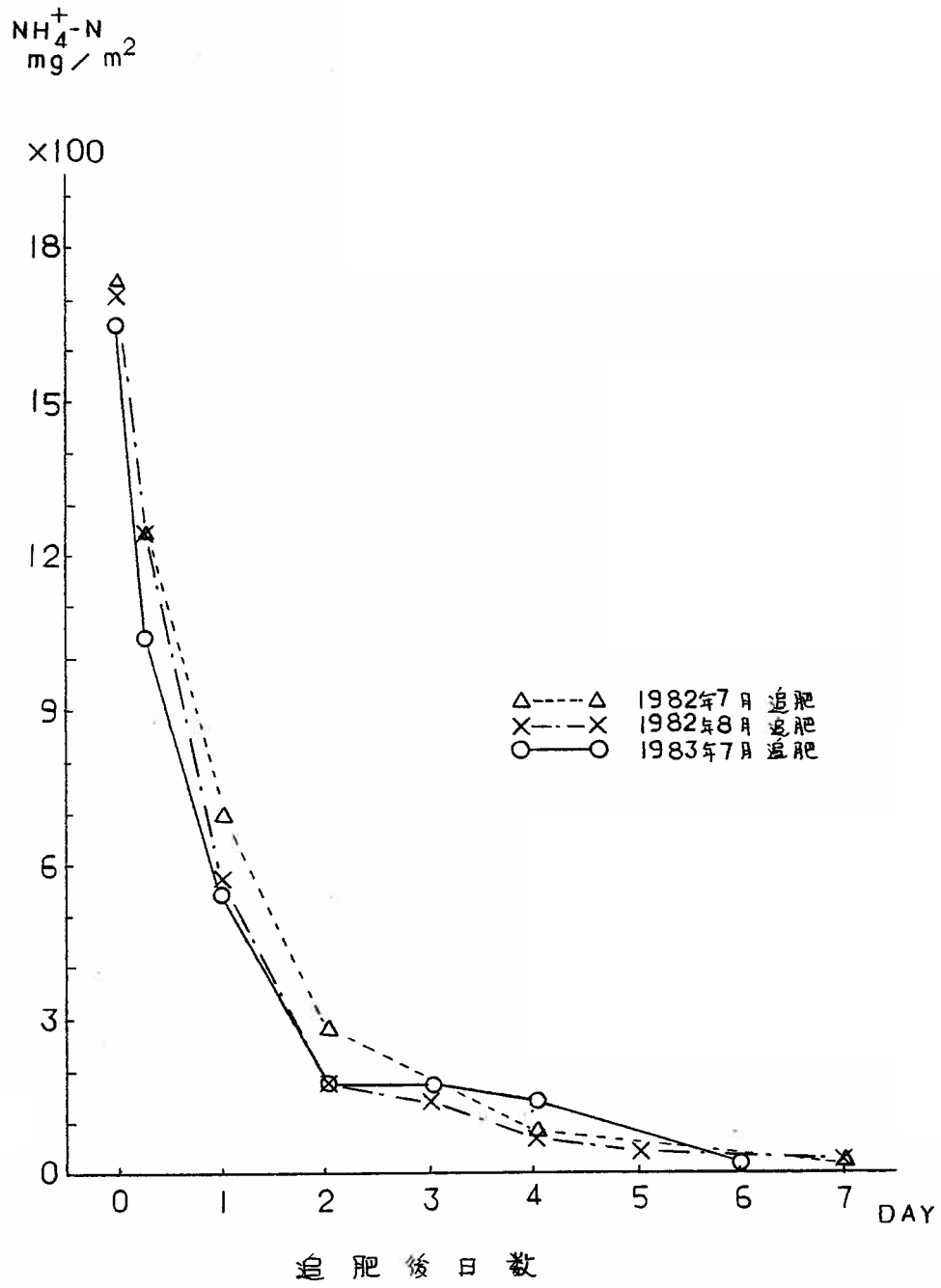
の約20%である。和田等⁵⁸⁾、和田⁶¹⁾は、追肥窒素の土壤への残存率を5~10%とした。一方、山室⁵⁹⁾は追肥窒素の有機化率を約20%としている。山室⁵⁹⁾の追肥時期は、土壤中にアンモニアがかなり存在する時期であり、本実験ないし、和田等⁵⁸⁾、和田⁶¹⁾の実験とは厳密には比較できない。和田等⁵⁸⁾の供試圃場の土壤の主要粘土鉱物は、Al-バーミキュライトであり、層間へのアンモニウムイオンの無機的固定能力は、ストクタイトより劣る。本実験での追肥窒素の土壤への固定率が高かったのは、無機的固定が和田等⁵⁸⁾、和田⁶¹⁾よりも多かつたためとみられる。施用窒素の無機的固定については、次節で言及する。

b.) 3つの追肥実験結果の比較

追肥窒素の挙動は、気象条件、水稻生育の違いによって異なるものとみられる。そこで、追肥時期別、年次別追肥窒素の挙動を、1982年度の幼形期追肥、出穂期追肥、1983年度の幼形期追肥について比較する。

第2-11図には田面水中のアンモニアの挙動を示した。いずれの追肥でも、田面水中の追肥由来のアンモニアは、急速に減少するが、詳細にみると、追肥時期毎に減少量がやや異なる。すなわち、1982年度出穂期追肥と、1983年度幼形期追肥は、追肥6時間後の減少量はやや異なるが、その後はほぼ同様の推移を示す。一方、1982年度幼形期追肥は、他2回に比べて、追肥後3日目まではアンモニアの減少量がやや少ない傾向にある。

第2-12図には、土壌中のアンモニアの消長を土下0~4cmについて示した。追肥後1~2日間のアンモニアの増加は、田面水か



为2-14 田面水中の追肥窒素の挙動

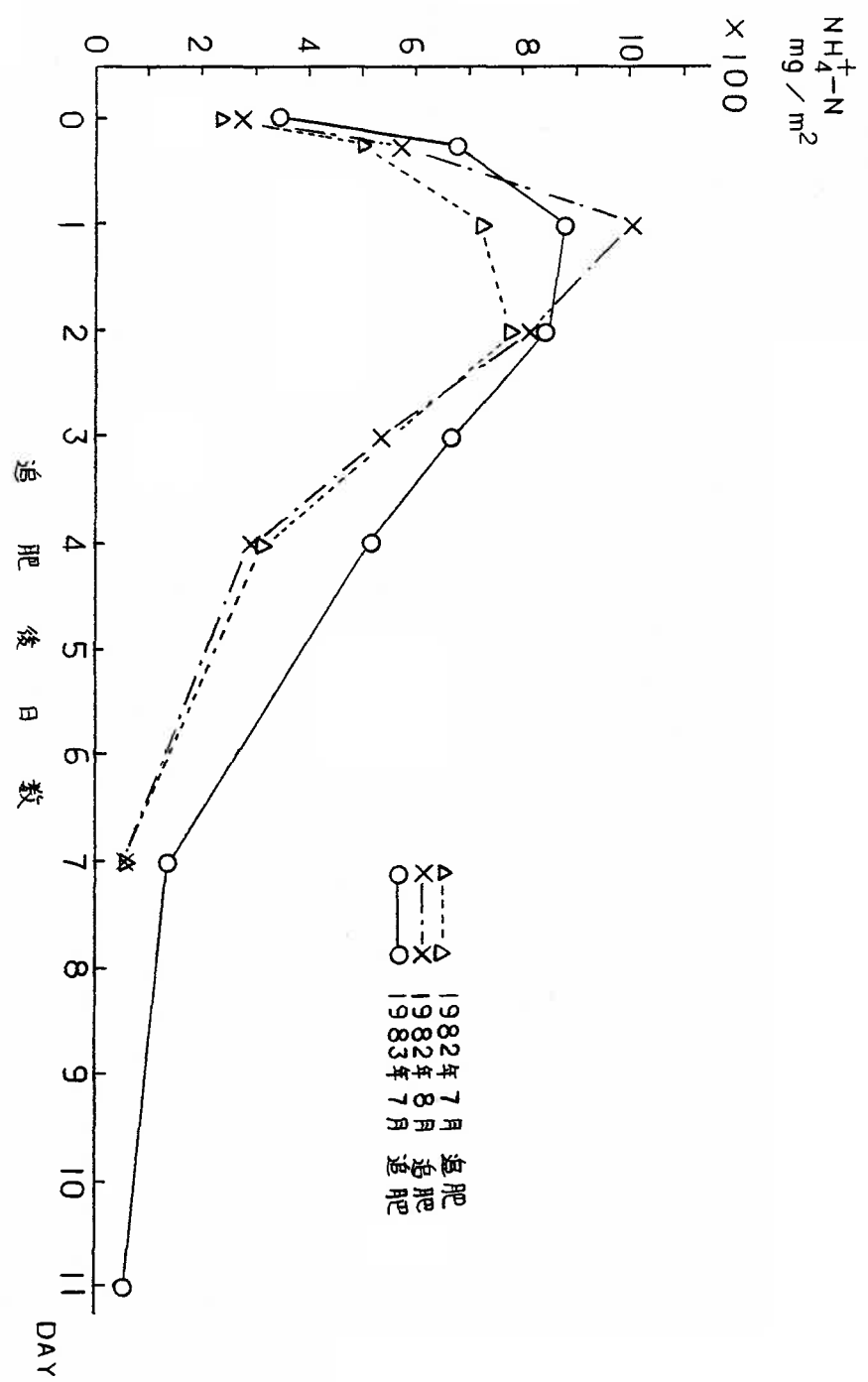


表2-12 土壤中(作土0~4cm)の追肥窒素の挙動

らのアンモニアの減少量の少ない1982年度幼形期追肥では、土壌中のアンモニアの増加量も少ない。又、1982年度出穂期追肥と、1983年度幼形期追肥を比べると、追肥1日後の土壌中のアンモニアに差がみられる。これは、田面水中のアンモニアの消失が、追肥6時間後から1日後で、両追肥時期に差があるためとみられる。すなわち、1982年度出穂期追肥では、追肥6時間後から1日後までの田面水のアンモニアの消失量は約700 mg/m²であるのに対して、1983年度幼形期追肥では約500 mg/m²と差があるためである。いずれにしても、田面水中からのアンモニアの消失は、アンモニアの作土層への移行と強く関係していることを示すものである。

同一圃場で、追肥時期を変えた実験であるので、圃場の透水係数、その他、田面水からのアンモニアの作土層への移行に関与する圃場固有の要因は同一とみる事ができる。一方、水稻の蒸散に伴う日減水深や、拡散速度等

気象条件は追肥時期によって異なる。そこで、追肥時期別に、追肥後2日間の平均気温をみると、1982年度出穂期追肥と、1983年度幼形期追肥がほぼ同様で、1983年度幼形期追肥が、他の2回と比べて低い。気温の高い追肥時期の方が、アンモニアの田面水からの減少量及び土壌中の増加量が多い。気温が高い方が水稻による蒸散量及びアンモニアの拡散速度は速くなり、この事が、田面水中のアンモニアの減少量及び土壌中のアンモニアの増加量に追肥時期により差を生じた原因とみられる。

本圃場の日減水深は、平均0.3 cm/日であった。又、追肥直後の田面水中のアンモニアの濃度は約60 ppmである。そこで、日減水深分の水量が全て下方へ浸透したと仮定した場合、1日で、約 180 mg/m^2 のアンモニアが浸透水に伴って作土層へ移行することになる。実際には、追肥1日後の土壌中のアンモニア量は、 $700 \sim 1000 \text{ mg/m}^2$ である。従って、本圃場では

、田面水から作土層へのアンモニアの移行は、浸透水に伴うよりは拡散による部分が多いものとみられる。

まとめ

水田土壤中での幼形期及び出穂期の追肥窒素の挙動を、田面水、土壤中の交換態、土壤への固定から経時的かつ定量的に明らかにした。得られた結果は以下の通りである。

1.) いずれの追肥時期でも田面水中の追肥由来アンモニアは急速に減少し、作土表層(0~4 cm)の追肥由来のアンモニアは急速に増加する。そして、田面水中の追肥由来アンモニアの消失は、作土層への移行と関係している事が明らかとなった。

2.) 作土層の追肥由来のアンモニアの大部分は0~1 cmに存在し、追肥後2日目までは急速に増加し、その後は徐々に減少する。作土表層に大部分のアンモニアが存在するのは、本土壌がスメクタイトを主体と粘土鉱物組成をしている事、又減水深が小さいためと思われた。

3.) 土壤によって固定される追肥窒素は指数的に増加し、追肥後4日ないし5日以後はほぼ

一定となる。土壌によって固定された追肥窒素量は追肥量の約20%であり、従来の結果より多かった。これは、本土壌での粘土鉱物の無機的固定能が高いためとみられた。

4.) 気象条件の違いにより、これら追肥窒素の挙動には若干の違いが認められた。すなわち、気象条件が良好な時は、田面水からのアンモニアの消失速度及び作土層でのアンモニアの増加速度は速かった。

第4節 地力窒素の無機化と施用窒素の有機化(培養実験)

前節までに、圃場条件下での土壌中のアンモニアの挙動と、それに関与する要因ならびに施用窒素の有機化について検討を加えてきた。このうち温度条件については、水稻の生育に関与する温度要因をとりあげ、羽生の積算有効温度示数²⁷⁾と土壌中のアンモニアの関係を検討した。羽生の積算有効温度示数²⁷⁾と土壌中のアンモニアの消長には、指数の関係がある事が明らかとなっている⁴⁾。しかし、羽生の積算有効温度示数²⁷⁾は水稻の生長に関与する有効温度であるので、直接地力窒素の無機化や施肥窒素の有機化と温度を関係付けたものではない。水田土壌の地力窒素の無機化速度と温度の関係を定量的に検討した例は、2、3みられる²⁵⁾⁶²⁾。

吉野等²⁵⁾は、水田土壌の地力窒素の発現は、 $(T - 15^{\circ}\text{C})$ という有効温と密接に関連しているとした。吉野等²⁵⁾の方法では、温度と無機

化速度は、基準温度以上では直線的な関係となる。一方、金野²⁴⁾は、畑土壌の地力窒素の無機化速度と温度の関係をアレニウスの式にあてはめ、地力窒素の無機化過程を速度論的に検討した。その結果、地力窒素の無機化速度と温度の関係は指数関係が成り立つ事が明らかとなった。水田土壌でも、畑土壌と同様に温度と無機化速度の関係は、指数関係が成立するものとみられる。

金野²⁴⁾の報告は、一定温度条件下での無機化量を検討したものである。Stanford²³⁾らは、培養実験で、温度を定期的にかえて変温条件をつくり、一定温度条件との地力窒素の無機化速度を比較した。そして、温度条件の両者の違いは、無機化速度に影響しないとした。しかし、Stanford²³⁾らの実験では、温度を変えた後の培養時間が長く、自然の変温条件とは大きく異なる。実際の圃場での地力窒素の無機化を検討するためには、自然の変温条件下での温度と地力窒素の無機化速度の関係を明ら

らかにする必要がある。

施用窒素の有機化速度と温度の関係を検討した例はみられない。一方、土壤の乾燥と地力窒素の無機化の^(2),13)関係は、塩入ら⁽¹⁾によって乾土効果として明らかにされている。しかしながら、土壤の乾燥の施用窒素の有機化に及ぼす影響⁽¹⁾について検討した例はみられない。

そこで、本節では、水田土壤の自然変温条件下での地力窒素の無機化速度及び施用窒素の有機化速度と温度の関係を検討した。さらに、土壤の乾燥が地力窒素の無機化、施用窒素の有機化に及ぼす影響を検討したものである。

5.) 実験方法

供試土壌：供試土壌は、宮城県農業センター、及び岩手県農業試験場の各圃場より採取したもので、各圃場の土壌統群は、宮城は前節と同様で、岩手は厚層腐植質多湿黒ボク土である。供試土壌は、風乾後2mmで篩別し実験に供した。宮城土壌は、風乾土壌の他、5mmで篩別した生土も供した。供試土壌の窒素含量は、宮城土壌では、0.154%、岩手土壌では、0.508%である。

培養方法：風乾土ないし生土を110℃乾土当り40gと重窒素ラベル硫酸（宮城土壌では30.2 atom%，岩手土壌では50.3 atom%）を100g乾土当り5ないし10mg窒素相当をビニール袋に入れた。ビニール袋に脱塩水を添加して湛水状態として、袋内の空気をなるべく少なくして密閉した。移植した水田の株間の地表下5cmに金網を置き、上記にビニール袋を埋設した。ビニール袋の埋設時期すなわち、培養開始時期は、宮城土壌では5月10日、5月20日

、6月1日及び6月10日の4回、岩手土壤では、4月20日、5月1日、5月10日、5月20日、6月20日の5回である。

分析方法；地温の測定は、センサー部を培養実験と同様の土壤の入ったビニール袋に入れて行なった。

約1週間毎にビニール袋を採取し、以下の方法で分析を行なった。なお、1回のサンプリングは、3反復とした。

土壤中のアンモニアは、1M KClで抽出後蒸留法で定量した⁴⁴⁾。アンモニア量から、重窒素の分析⁴⁵⁾により、施用窒素由来アンモニア量を引いて、地力窒素の無機化量とした。

土壤に固定された施用窒素の定量は、まずアンモニアの抽出残査を1M KClで3回、その後脱塩水で2回洗滌した土壤⁵⁸⁾について、全窒素含量をケルダール法で求める。そして、土壤中の全窒素中の施用窒素の占める割合を重窒素分析により求め、土壤に固定された施用窒素量を求めた。

重窒素の分析は、前節と同様である。

解析方法

有効温度の求め方；地温と地力窒素の無機化速度、施用窒素の有機化速度の関係は次式のアレニウスの式に従うものとする。

$$K = \text{Exp} \left(\frac{E_a \times (T - A)}{R \times (T + 273) \times (273 + A)} \right)$$

K：無機化ないし有機化速度定数

(1/day)

E_a ：活性化エネルギー (cal/mol)

R：気体定数 (cal/deg/mol)

T：地温 (deg)

A：基準地温 (deg)

金野²⁴⁾は、Aを25°Cとしている。本圃場実験では、地温が11°C～24°Cの温度範囲であるので、18°Cとした*。Kは、 E_a の関数であり、 E_a の値によって、各地温の18°C変換係数が決まる(第2-7表参照)。

* 金野隆*氏との私信によって決定した。金野は、25°Cは水稻の生育にとって、は高すぎる事、又地温の温度範囲から考えて18°Cが妥当であるとした。

1日当りの有効温 (18°C 変換日数) の求め方: 地温の日変化を \sin 曲線と仮定し、最高地温、最低地温より、その日の地温変化を得る。この地温変化により、1時間毎の地温を求め、前述の k をかけて積算する。その積算値を24で除した値を、1日当り 18°C 変換日数 (t) とした。

無機化モデル: 金野²⁴⁾の無機化モデルのうち、単純型と単純並行型を使用した。単純平行型のモデルは次式で示される。

$$N = A(1 - \exp(-k_a \cdot t)) + B(1 - \exp(-k_b \cdot t)) + C$$

t : 18°C 変換日数

N : t における窒素無機化量

A, B, C : 定数

k_a, k_b : A 及び B の無機化ないし有機化速度定数

この式は無機化(有機化)の速い A 部分と、無機化(有機化)の遅い B 部分が並行して進行する無機化モデルである。

実際には t を決定する E_a が未知であり、 k

つ、非線型モデルであるので、 E_a , k_a , k_b の初期値を最初に決める。A, B, Cは、この初期値によって最小自乗法で計算される。そして、測定値より分散を求めてから、 E_a , k_b を順次変化させ、分散の最も小さい E_a , k_a , k_b を最適とする計算を行なった。このモデルのあてはめには、農水省のプログラム⁶³⁾を、FORTRANに変えて使用した。

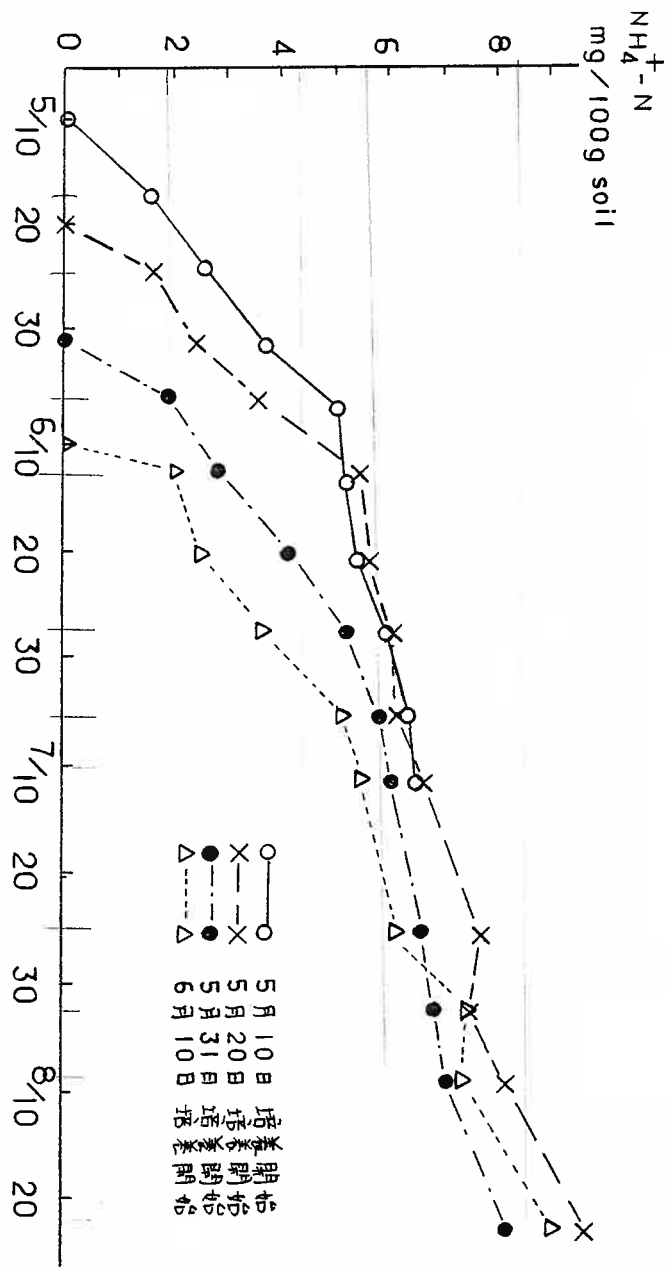
E_a は通常の酵素反応では5000~25000の範囲とされるが、本実験では、 E_a の範囲に制限を設けず、最も適合する E_a を選んだ。

ロ) 結果と論議

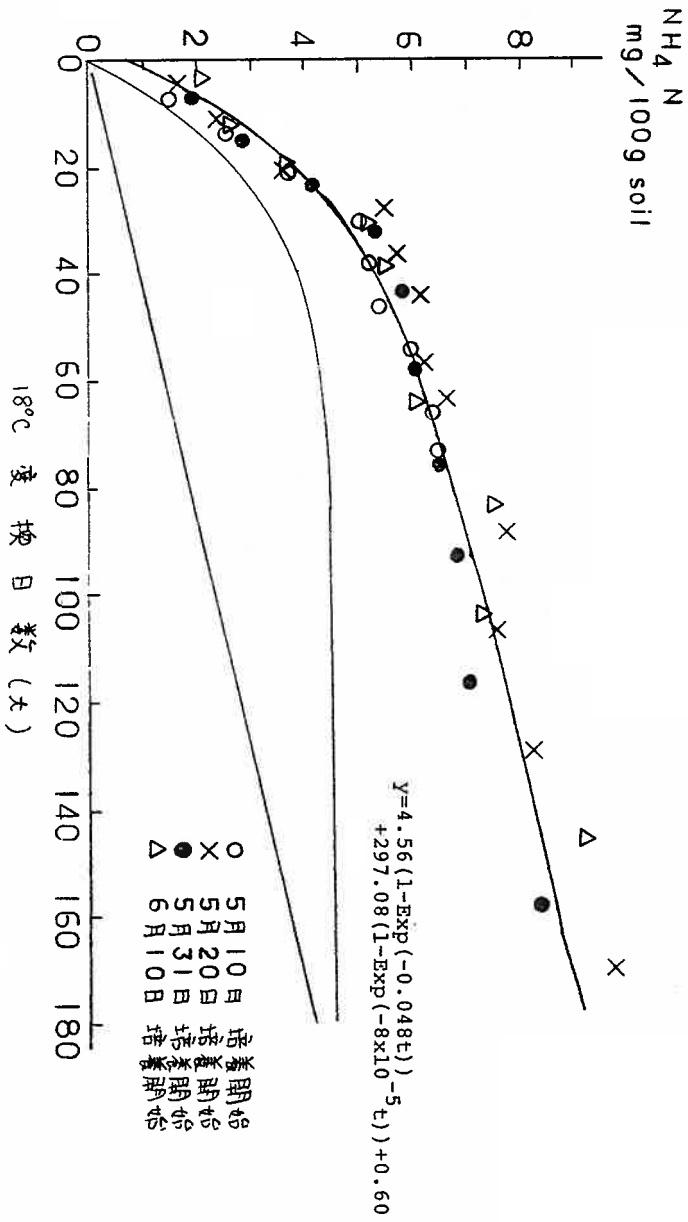
α.) 地力窒素の無機化

第2-13図には、風乾した宮城土壌の地力窒素の無機化量と暦日との関係を示した。これによれば、培養開始時期が遅い程、急激に無機化が進行する。これは、培養^{開始時期}が遅い程地温が高くなっているためである。しかし、いずれの時期に培養を始めても、無機化量が5 mg N / 100g 乾土程度に達するまでは、無機化速度が大きく、その後緩慢になる事が注目される。この事実は、供試土壌の地力窒素の無機化は速く分解する部分とゆっくりと分解する部分の両者が並行している事を示唆するものである。そこで、この地力窒素の無機化過程は、上述のような2成分が並行的に進行していると仮定して、単純並行型のモデルにあてはめることにする。

第2-14図には、単純並行型にあてはめた時の18℃変換日数と地力窒素の無機化量との関係を示した。分散の最も小さい E_a は30000



第2-13圖 地力窒素無機化量の推移 (宮城農業センタ一風乾土壤)



中2-14回地力窒素無機化量と18°C変換日数の関係

(宮城県農業センター-風乾土壤, 活性化エネルギー: 30000)

であり、その時の分散は6.63であった。地力窒素の無機化の速いA部分の50%及び95%が無機化するのに要する日数は、それぞれ14.4日、62.4日であった。なお、95%が無機化するのには、宮城県の平均的な移植日に近い5月10日を起点とすると、6月下旬に相当する。著者等が既に述べた様に(第2節-1)、宮城農業センターでは、水田土壌中のアンモニアのほぼ消失する時期は6月下旬であり、Aの部分の無機化がほぼ終了する時期と一致した。

Bの部分の k_b は 8×10^5 と小さな値となった。本来 k_a に相当する $E_{a a}$ と k_b に相当する $E_{a b}$ とは異なるものとみられる。また、 k_b の値を正確に予測するためには、半減期(8994日)を中心に観測がなされなければならない。これらの問題は今後の検討課題である。

風乾した宮城土壌の地力窒素の無機化量から、生土の地力窒素の無機化量を引いた部分を乾土効果部分とし、単純モデルへあてはめ

を行ない、両者の合成モデルを第2-15図に示した。なお、ここでは、両モデルともに $E_a = 30000$ とした。乾土効果部分の無機化量が50%に達するのに要する日数は17.8日、生土のそれは40.3日であった。また乾土効果部分の無機化量が95%に達するのに要する日数は77.1日、生土のそれは174.2日であった。第2-14図の単純並行型モデルと比較すると、乾土効果部分は、分解の速いA部分に対応し、分解の遅いB部分は生土と対応する。しかし、生土の土壤有機物の中には、分解の速いA部分も存在するため、無機化速度定数 k や、定数項が異なってきたものとみられる。

地力窒素の無機化を検討する場合、通常は一定温度条件下ないし、日平均地温を温度要因として検討が加えられている。しかし、自然条件下では、地温には日較差があり、この日較差は、地力窒素の無機化に対して日平均地温を用いた場合に比べて、誤差を生ずる事が指摘されている。⁽⁴⁾ さらに、一定温度条件下

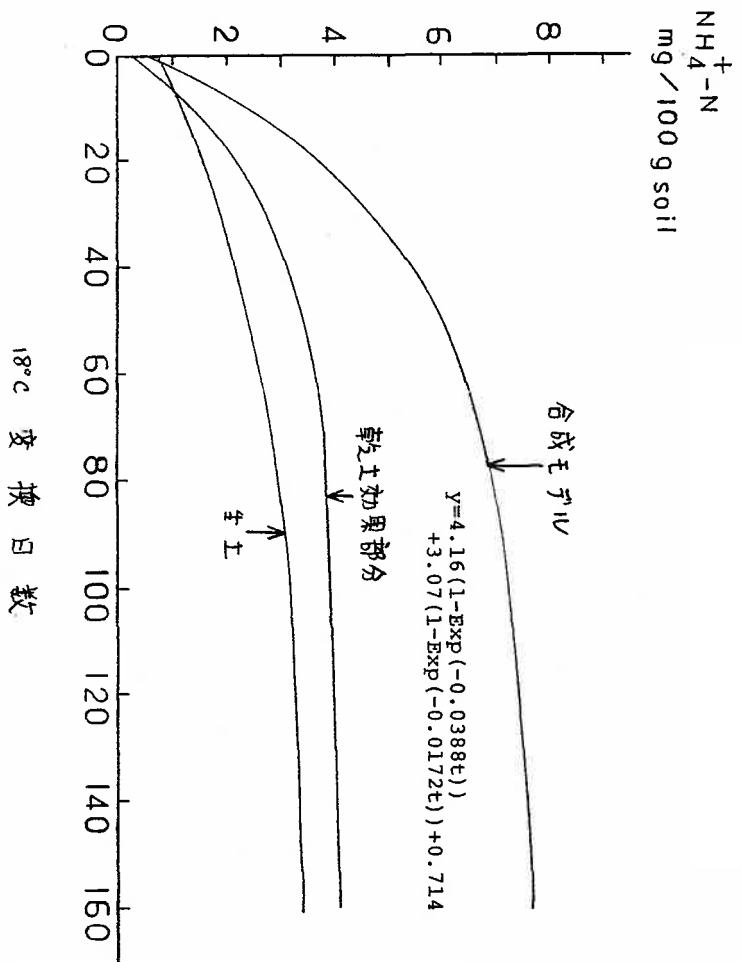


表2-15 図 生土および乾土効果部分の地力窒素の無機化量

(宮城県農業センター土壌, 活性化エネルギー: 30000)

での培養実験では、地力窒素の無機化速度と温度の関係は異なる事が予想される。そこで、一定温度条件(20℃, 25℃, 30℃)で培養実験を行ない、単純並行型へのあてはめを行なった。その結果 $E_a = 10000$ で最もよく適合した。と-3で、各温度の18℃変換日数と E_a の関係を第2-7表に示した。これによれば、 E_a が小さければ、18℃より低い温度では無機化速度が相対的に大きく、18℃より高い温度では、無機化速度が相対的に小さい事がわかる。これらの事は、一定温度条件下の培養実験、ないし、日平均地温を用いての地力窒素の無機化過程では、圃場条件下の地力窒素の無機化量の予測に誤差を生ずる事を示している。

岩手土壤についても地力窒素の無機化過程と18℃変換日数の関係を検討した。岩手土壤では、単純並行型のモデルにあてはめると、分解の速いA部分がいずれの E_a でも負の値となった。そこで、単純型モデルについてあて

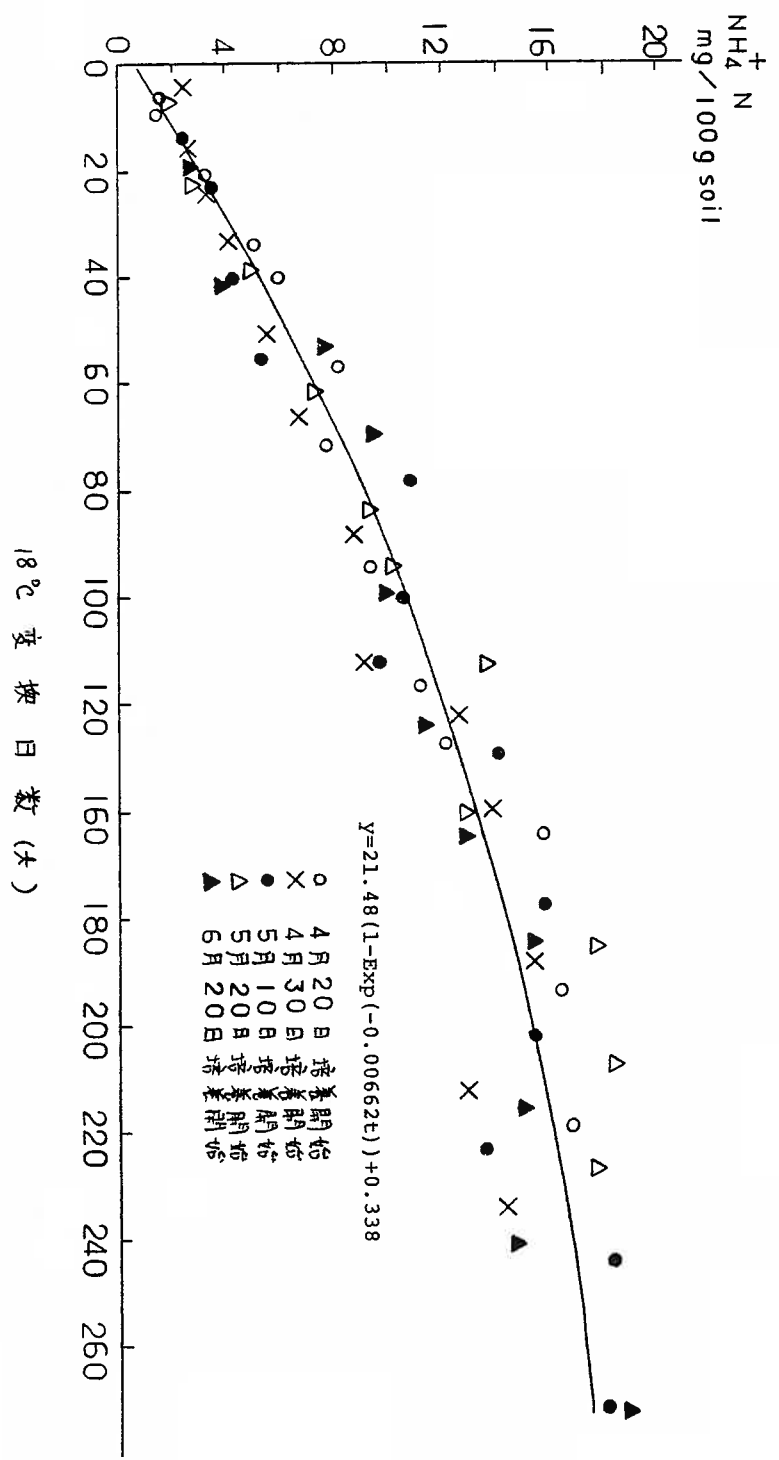
表2-17 温度別 18°C 変換日数と活性化

エネルギーの関係

温度°C	1000	5000	10000	15000	20000	25000	30000
1	0.892	0.563	0.317	0.179	0.101	0.057	0.032
5	0.917	0.649	0.421	0.273	0.177	0.115	0.075
10	0.949	0.770	0.593	0.456	0.351	0.271	0.208
15	0.981	0.908	0.825	0.749	0.680	0.618	0.561
18	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
20	1.013	1.065	1.135	1.209	1.287	1.371	1.461
25	1.044	1.243	1.544	1.919	2.385	2.964	3.683
30	1.076	1.442	2.081	3.001	4.329	6.244	9.007

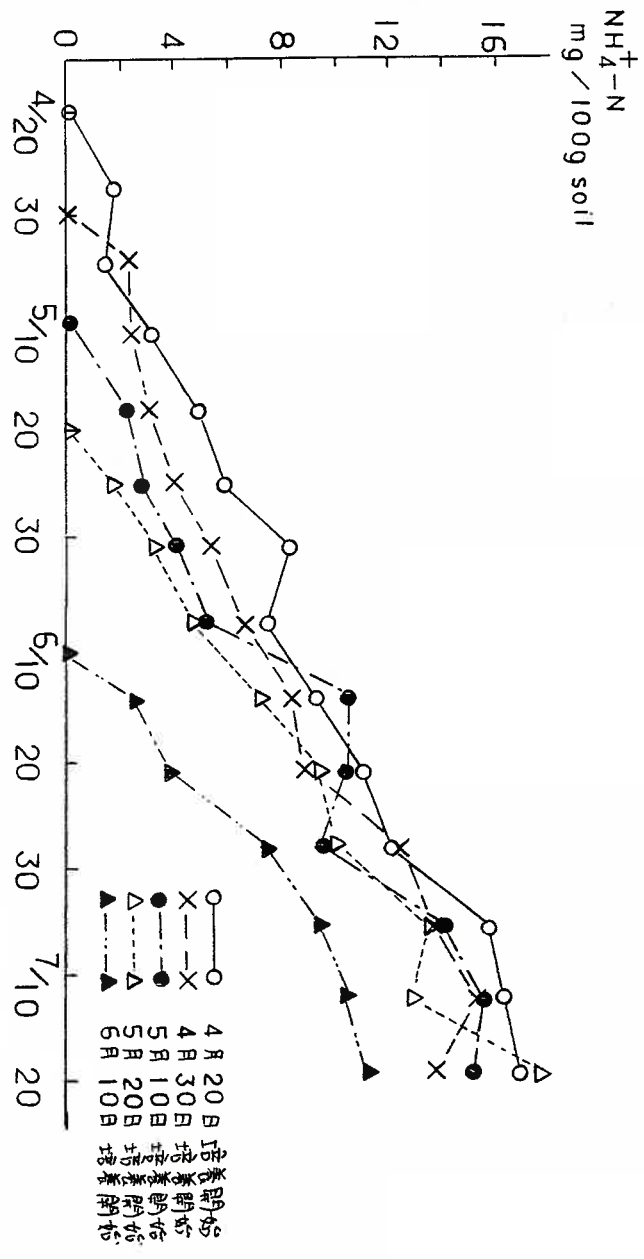
はめを行なった結果、 $E_a = 37000$ が最もよく適合した(第2-16図)。無機化量が50%、95%に達するのに要する 18°C 変換日数は、それぞれ104.7日、347.8日である。宮城土壤に比べて、 E_a が高い所で適合している。この事は、黒ボク水田土壤では、沖積水田土壤に比較して、地温の高い所で地力窒素の無機化が起きる事を示すものである。金野⁶⁵⁾は畑土壤で同様の検討を行ない、黒ボク畑土壤では $E_a = 23000$ 、沖積畑土壤で $E_a = 18000$ という値を得ている。従って、水田土壤でも、沖積土壤と黒ボク土壤では同様の関係、すなわち、黒ボク水田土壤の地力窒素の無機化は、沖積水田土壤の無機化温度より高温域で活発に起きるものとみられる。

岩手土壤の地力窒素の無機化モデルが、単純並行型では、分解速度の大きい部分が負の値を示した。岩手土壤について、暦日と無機化量の関係を第2-17図に示したが、第2-13図と比較して、全無機化量に対する初期の



为2-16回 地力室素無機化量と18°C变换日数の関係

(岩手農業試験場土壤，活性化工程化¹：37000)

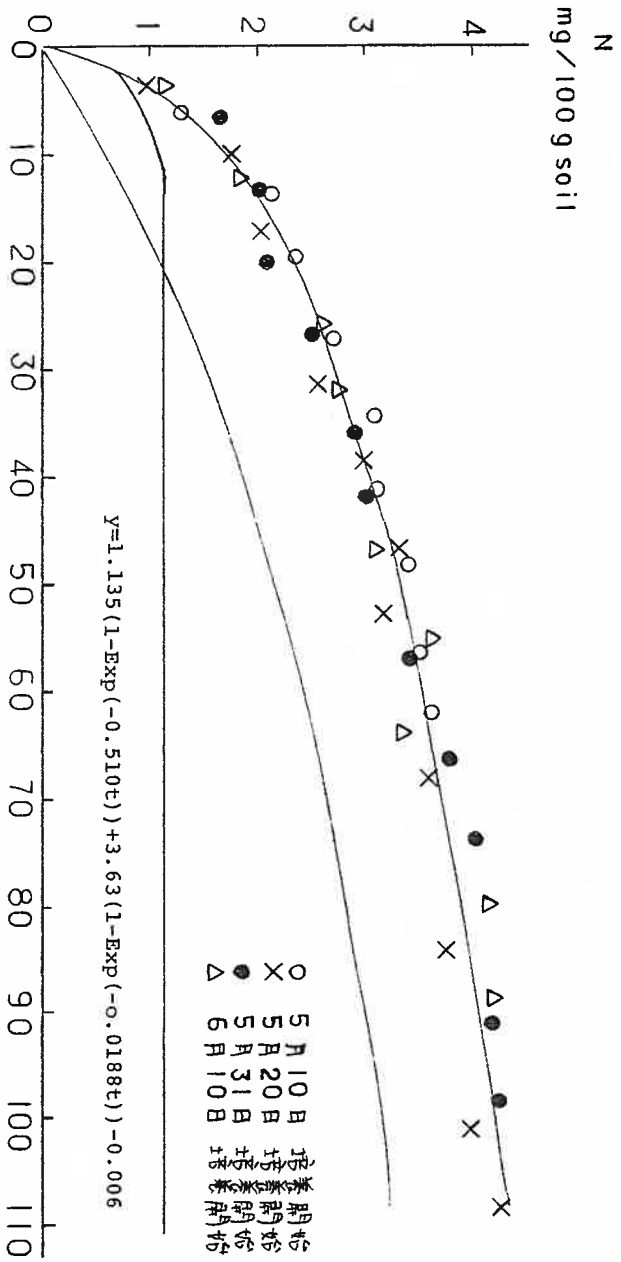


为2-17回 地力窒素無機化量の推移 (岩手農業試験場風乾土壤)

無機化量が少ない。岩手土壤では、全無機化量が多く、分解の速い部分が相対的に少ない事が考えられる。この様な土壤では単純並行型へのあてはめがむずかしくなるものとみられる。

b.) 施用窒素の固定

水田におけるアンモニアの挙動は、地力窒素の無機化と同時に、施用窒素ないし、無機化されたアンモニアの固定によっても影響される。そこで施用窒素の固定と 18°C 変換日数との関係を宮城の風乾土壌について第2-18図に、単純並行型のモデルで示した。 $E_a = 5000$ で最もよく適合し、すみやかに固定される部分での固定量が50%, 95%に達するのに要する 18°C 変換日数は、それぞれ1.4日, 5.9日である。一方、徐々に固定される部分のそれは、それぞれ36.9日, 159.3日であった。宮城の生土で、 100g 乾土当り 10mg 窒素相当のアンモニアを添加し、ただちに固定量を測定した所、添加量の7%が無機的に固定されていた。固定の速い部分の総固定量は、添加量の約11%であるので、この部分の固定の大部分は無機的固定とみられる。これは、宮城土壌がスメクタイトを主体とした粘土鉱物組成であり、スメクタイトによるアンモニウ



和2-18 図 施用窒素の有機化と18°C変換日数の関係

(宮城農業センター-風乾土壤 活性化エネルギー: 5000)

Handwritten notes: $2 \times \frac{1}{2}$ and $\frac{100}{500}$

ムイオンの無機的固定が起きたためとみられる。

施用窒素の有機化についても、生土と乾土効果部分を各々単純型モデル ($E_a = 5000$) にあてはめ、合成モデルを作製した(第2-19図)。

乾土効果部分についてみると、培養開始時から、 18°C 変換日数100日までに固定された施用窒素は 0.42 mg である。これに対して、生土土壌では、 2.90 mg と約7倍と大きな値を示している。無機化量について同様にみると(第2-15図)、乾土効果部分と生土では、ほぼ同量の窒素を無機化している。この事は、土壌の乾燥処理に伴う有機物の変化は、地力窒素の無機化には大きな影響を与えるが、^{(12), (13)}施用窒素の固定に対する影響は小さい事を示している。

第2-18図に示したすみやかに固定される部分が95%された59日における、 $y = 1.135 \times (1 - \text{Exp}(-0.510 \times t))$ の固定量は 1.08 mg であ

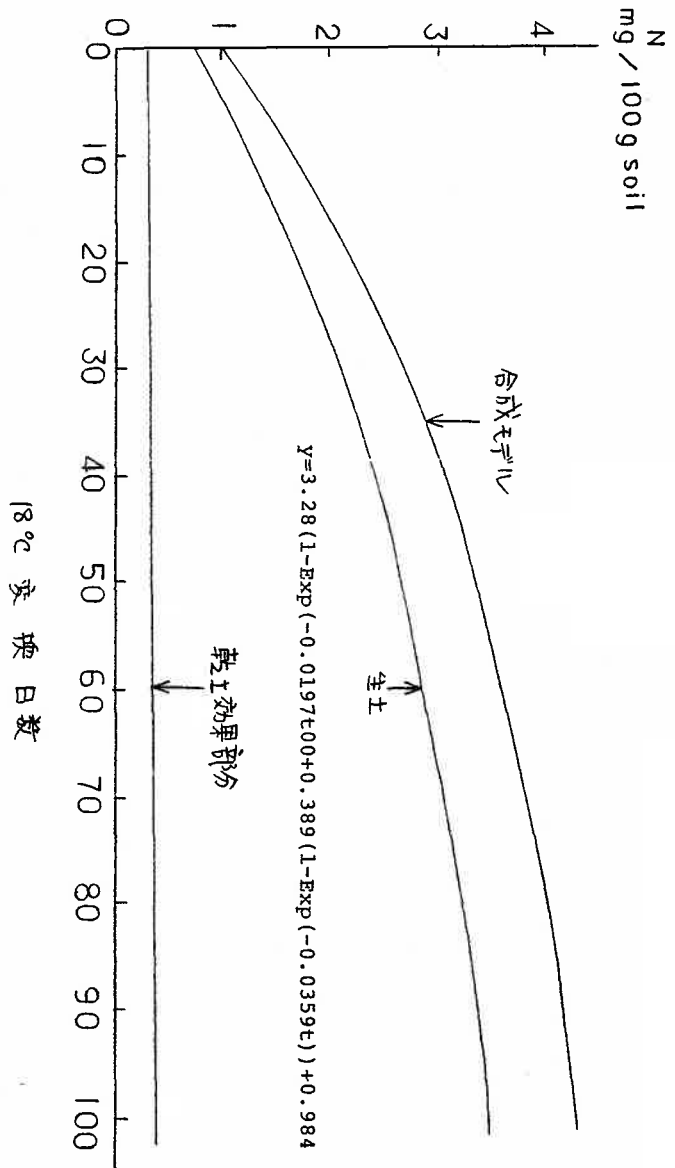


表2-19 圃生土および乾土効果部分の施用窒素の有機化量

(信成農業センター土壌, 活付化エネルギー: 5000)

る。一方、生土による施用窒素の無機的固定は 0.7 mg 相当で、この量に第2-19図で示した乾土効果部分による固定量 0.42 mg を加えると、ほぼ第2-18図のすみやかに固定される部分と匹敵する。従って第2-18図の単純並行型でのすみやかに固定される部分は、無機的固定と乾土効果による固定の含量を示すものとみられる。

施用窒素の固定速度と温度の関係をみると、 $E_a = 5000$ で最もよく適合した。一方、窒素の無機化速度と温度の関係は $E_a = 30000$ であり、固定よりも高い値を示した。第2-7表には E_a と 18°C 変換日数の関係を示したが、 E_a が低い施用窒素の固定は、地力窒素^{の無機化}に比べて低温条件でも活発に起きている事を示すものである。そして、温度変化による影響は、施用窒素の固定が地力窒素の無機化よりも小さい事を示している。

なお、岩手土壌では、固定速度と温度の関係は無機化と同様であった。これは黒ボク土

壤の性質に起因するものとみられるが、今後の検討課題である。

まとめ

自然条件下での地力窒素の無機化速度及び施用窒素の固定速度と温度の関係を検討した。また、土壤の乾燥の無機化及び固定に対する影響もあわせて検討した。

1) 地力窒素の無機化は、分解の比較的速い部分と、分解の比較的遅い部分に分けられた。分解の比較的速い部分からの地力窒素の放出が大部分終了する時期は6月下旬であり、栽培条件下での水田土壤中のアンモニアの消失する時期とほぼ一致した。

2) 自然変温条件下と一定温度の培養条件下での地力窒素の無機化速度と、温度の関係は、同一温度でも18℃変換日数の係数が異なる事が示された。

3) 黒ボク水田土壤は、沖積水田土壤に比べて、地力窒素の無機化が、相対的に地温の高い時に起きる事がわかった。

4) 全無機化量に比べて、相対的に分解の速い部分の無機化量が少ない土壤では、単純並

行型のモデルへの適合がむしろ大きく、単純型のモデルがよく適合した。

5) 施用窒素の固定は、地力窒素の無機化と比較して、より低温でも活発に起きた。土壤の乾燥の影響は、無機化に対しては大きいが、固定に対しては小さかった。

第5節 総合論議

水田土壤中でのアンモニアの挙動は、アンモニアの供給と消失のバランスの結果として示される。アンモニアの供給は、施肥、地力窒素の無機化及びかんがい水による供給（一般には少ない）があげられる。一方、消失としては、水稻による吸収、脱窒、有機化、流亡が主な原因としてあげられる。従って、土壤アンモニアの消長を明らかにするためには、これら要因が、いずれの時期にどのような関係でアンモニアに影響を与えているかを検討する事が重要である。そこで、本研究結果ならびに既往の研究結果を合せて、土壤アンモニアの挙動とその要因を総合的に考察する。

第2-1図に示した土壤アンモニア（地力由来と基肥由来アンモニア）と暦日との関係から、その挙動は4つの時期に分けられる。すなわち、移植後の急激な減少期、その後の比較的安定な時期、急激な減少期、そしてきわめて低レベルの時期である。

一方、アンモニアの供給と消失に関する要因の時期的変化をみると、供給は施肥及び地力窒素の無機化である。基肥窒素は、移植時のアンモニア量をほぼ決定する。地力窒素の無機化は、第4節で示した様に有効温度との関係では、初期に多く後半に少ない。一方、第2-13図で示した様に暦日との関係で見ると、移植日が早い場合や、土壤の乾燥が進んでいない時には、初期の地力窒素の無機化量は少ない。

消失の側をみると、水稻による吸収能力は次章で明らかにする様に、初期に小さく、生育が進むにつれて大きくなる。

脱窒によるアンモニアの消失をみると、野木³⁾によれば硝化抑制剤を使用すると、移植後20日間の土壤中のアンモニアの減少量は対照区の約半分であった。この事は、移植直後は、水田土壤中では、酸化的部位と還元的部位が混在する事により、アンモニアは硝酸化成を受けやすい状態である事を示すものである

。これらの事より、脱窒は初期に活発に行なわれるものとみられる。事実、第4節で行なった培養実験では、施用窒素の回収率は培養開始後1週間で80%しかなく、施用窒素量の20%はごく初期に脱窒したものとみられた。

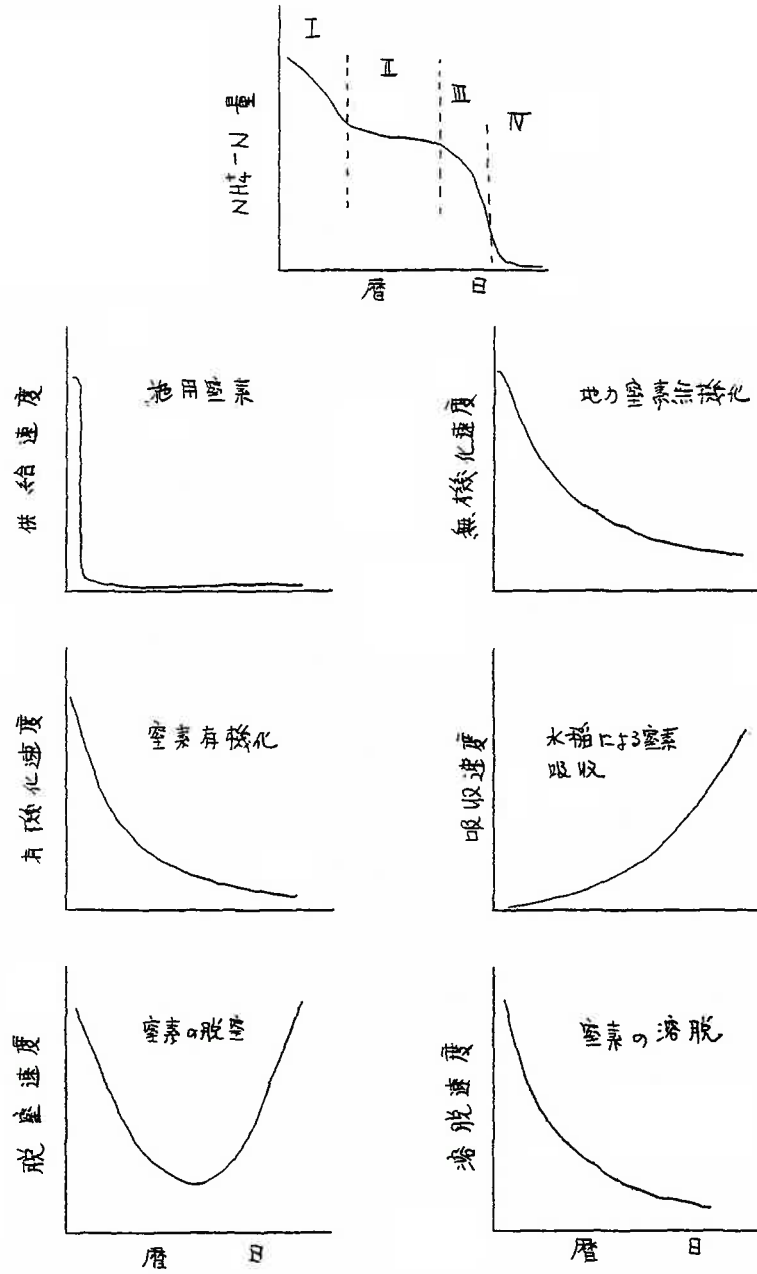
還元状態の進行に伴い、水田土壌中の酸化的部位(溶存酸素, Fe_2O_3 , MnO)が減少し、アンモニアは硝化作用を受けにくくなり、脱窒は減少するものとみられる。その後、水稻の生長に伴い、水稻根量が多くなるにつれて、根圏の酸化的部位が多くなり、脱窒量も増加するものとみられる。以上から、脱窒速度は初期に大きく、その後小さくなり、また大きくなるという経過をたどるものと推定される。

溶脱による土壌アンモニアの消失は、土壌の透水性に関与する土壌構造に支配される。土壌は単粒の粒子よりなるが、この単粒の粒子は有機物等により結合されて、団粒を形成する。さらに耕地では人工的につくられた団

粒の集合である土塊も存在する。水田土壌では代かき作業により、この土塊の一部は破壊されるが、大部分は残り、間隙を多量に存在させる事によって透水性は大きくなる。残存した土塊は稲作期間中に、湛水還元化によって土粒子間の結合力が弱くなり、構造の安定性が低下する。結果として間隙量の減少、土壌の湿潤及び保水力の増大により透水性は低下する。これらの事は、移植直後は透水性が相対的に大きく、徐々に透水性が低下する事を示し、アンモニアの下層への移行(溶脱)も初期に大きい事を示すものである。

以上のアンモニアの供給と消失速度を各要因毎に模式的に第2-20図に示した。また第2-20図には土壌アンモニアの消長も模式的に示した。この図のアラビア数字は前述のアンモニアの挙動の4つの段階を示すものである。

第I段階は、土壌アンモニアの減少時期で、この時期は、供給側からみれば、地力窒素



为2-20图 土壤アムモニアの消長とそれに
関与する要因の模式图

の無機化が大きい時期であるが、それ以上に脱窒、有機化、溶脱による消失が大きい。第Ⅱ段階は、地力窒素の無機化と脱窒、有機化、溶脱及び水稻による吸収がバランスのとれている時期である。第Ⅲ段階は、第Ⅱ段階より、水稻による吸収、脱窒がふえ、地力窒素の放出のうち、分解の速い部分の分解が終了する段階である。第Ⅳ段階は、地力窒素から無機化されたアンモニアが水稻によりただちに利用される段階である。

これらの過程が栽培方法や土壤の種類がかわった時、どの様になるか次に検討する。

土壤の種類は、地力窒素の無機化量(第4節)、溶脱量(第2節-4)、施用窒素の有機化、水稻による吸収(第3章第2節)をかえ、さらに圃場の立地する場所の気象要因の影響が土壤アンモニアの挙動に対する要因となる。このうち気象要因は、羽生の積算有効²⁷⁾温度示数を使用すれば、ある程度消去できる(第2節-1)。施肥窒素の有機化量に関し

ては、本実験の結果は、土壤間に差がみられた(第2節-4)が、その原因は不明であった。この点については今後の検討課題といえよう。

施肥窒素の溶脱量は、土壤のCEC、透水性、構造と密接に関連する。CECは水田土壤では一般に $10 \sim 40 \text{ me}/100\text{g}$ 程度である。施肥量は、青森県のように寒冷地で初期生育確保のために基肥量を多くする地域でも m^2 当り 10g 前後である。この量は土壤 100g 当りに換算しても 0.7 me 相当であり、土壤に全て吸着される量である。しかし、Shoji²⁾らが報告している様に、この基肥窒素の一部は水溶液に存在する。そして基肥窒素のうち、水溶液に存在する量と土壤に吸着する量の比率は、CECの質と量に関係する。すなわち、一定負荷電に由来するCECは、より多くの基肥窒素を土壤に吸着する。一定負荷電は2:1型の粘土鉱物の同像置換に由来するが、2:1型鉱物は、水田土壤では一般により細かい部分

に多く存在する。従って、CECが大きい圃場では、土性が細かく、透水性も不良となる場合が多くなる。また、東北地方の水田の存在する地形面は、扇状地ないし蛇行帯であり、蛇行帯の後背湿地帯には、より土性の細かい2:1型鉱物を多く含む水田が存在する事が知られている。⁶⁶⁾ 後背湿地帯では地下水位が高い事により、透水性はより悪くなる。これらの結果CECの高い圃場では、溶脱を受けにくくなる事が予想される。

透水係数は、粗孔隙量と高い相関があるとされ、⁶⁷⁾ 仮比重が小さい程透水係数が大きくなる事が予想される。多湿黒ボク土ないし泥炭土では仮比重が小さい。これは、土壤の腐植が団粒化を促進するためである。⁶⁸⁾ この様な土壤ではCECは、変異荷電に由来するので、透水性が良い事と、土壤が施肥窒素を吸着する能力が低い事が、基肥窒素の溶脱を大きくしているものとみられる。

現在、東北地方では、基盤整備が進み、大

型機械の導入が積極的にみられる。大型機械の導入に伴い、土壤の圧密が進み、耕盤の硬度は増大している。⁶⁹⁾この為、本来透水の良好な圃場においても透水不良となる例が多くなっている。本研究で使用した会津盆地内の本郷もそのような圃場である。本郷での土壤アンモニアの挙動は、基本的には、他の圃場とかわらず、溶脱による土壤アンモニアの挙動に与える影響を把握する事はできなかった。

地力窒素の無機化量もまた、土壤アンモニアの挙動に影響を与える。地力窒素の無機化速度は温度の関数であり、土壤固有のものである。すなわち、沖積水田では黒ボク水田に比べてより低温から地力窒素の無機化がおこる(第4節)。一般に黒ボクの水田は山間高冷地に多く分布し、水稻の生育初期段階は、低温に経過する事が多い。従って、黒ボク水田では、初期の地力窒素の放出量が少ない事になる。この事は、黒ボク土の有機物のC/N比が高い事にも関連している。また、黒ボク

水田では、沖積水田に比較して後半の地力窒素の無機化量が多い。また、分解放出される地力窒素のうち、比較的早く分解される部分の95%が分解される時期は、沖積水田では6月下旬であり、土壌アンモニアの挙動の第Ⅱ段階の終了時と一致している。

一方、同じ沖積水田土壌でも、有機物含量の多少により、放出される地力窒素も異なり、土壌アンモニアの挙動も異なる。たとえば、宮城農業センターは有機物含量が少なく、土壌アンモニアに占める地力アンモニアの占める割合は、他圃場に比べて少なく地力窒素の放出量が少ない。この結果、5月下旬から6月上・中旬にかけての土壌アンモニアが他圃場では基肥レベルとほぼ同じ状態で第Ⅱ段階の比較的安定な状態を維持するのに対して、宮城農業センターでは、低いアンモニアレベルで推移する事になる(第2-1図)。従って第Ⅰ段階の土壌アンモニアの初期の減少は、地力窒素の無機化量の少ない土壌

でより顕著に示される。

有機物施用に伴う土壌アンモニアの挙動に与える影響は、稲わら 250 g/m^2 ではほとんどみられなかった。これは、稲わらを施用する事によって窒素の有機化が促進するが(第2節-4)、その有機化される窒素は本来脱窒されるべき窒素であったためと推定された。また、稲わらによって有機化される基肥窒素量はごくわずかであり、土壌アンモニア中の基肥窒素の割合も、稲わら無施用区とほぼ同じであった。この事は、従来からいわれている C/N 比の大きい新鮮有機物施用による窒素飢餓⁴⁹⁾が 250 g/m^2 の施用量ではみられない事を示すものである。また、施用した稲わらは、低温条件でも分解が進む事も注目される。

基肥量の違いによる土壌アンモニアの挙動に与える影響としては、初期のアンモニアレベルの違いとプライミング効果による地力窒素の無機化促進が考えられる。地力窒素の無機化促進については、本実験では認められな

いようである。しかし、無機化されたアンモニアが脱窒、その他アンモニアの消失に関する作用を受ける割合が、基肥量が多い時には相対的に減少する。この結果として、基肥量が多い時には、地力由来のアンモニア量が増大する事になる。なお、基肥量を変えても、第IV段階のはじまる時期がほぼ同じである事は、水稻の生育を考える上で重要な事と思われる。

追肥を行なった時の土壌アンモニアの挙動に関しては次章で論ずる事にする。

第3章 水稻⁽¹⁻⁵³⁾施肥及び地力窒素の吸収と生育

第1節 はじめに

最近の圃場における重窒素の研究によって、水稻の施肥及び地力窒素の吸収量や吸収過程がようやく明らかになりつつある。

たとえば、東北地方における多くの圃場試験の結果⁴⁾によれば、基肥窒素の平均的利用率は約30%であり、その吸収は最終分けつ期でほぼ終了している事が明らかとなっている。また追肥窒素(穂肥)の平均的利用率は約50%であり、その吸収は約1週間ではほぼ終了する。一方、地力窒素の吸収量は6月から急速に増加し、水稻の全生育期間吸収されるが、6月下旬~7月上旬(乾土効果)及び梅雨明けの7月下旬(地温上昇効果)にそれぞれ吸収のピークがみられる。そして、地力窒素の吸収量は多肥稲作でも、全窒素吸収窒素の大半を占め、稲作における地力窒素の重要性が再確認されている。

水稻の窒素吸収過程を有効温度との関係で

みることは、年次による気象変動や場所による気象の差をほぼ消去してデータを比較できるという大きなメリットがある。たとえば、上述の水稻の窒素吸収過程を、羽生の積算有効温度示数⁶⁾との関係でみると、2つの関係式で示される⁴⁾。すなわち、生育初期の指数式と中後期の直線式である。指数式の期間は、土壌アンモニアが充分にある時であり、6月下旬ないし、7月上旬までである。直線式の部分は、地力窒素の無機化に対応する時期である。

一方、重窒素の利用による、水稻の栄養生理、特に窒素の転流に関する研究には、いくつかの注目すべきものがある。たとえば、窒素は水稻体内を循環し、生長器官の窒素源の50%以上を占める事がある事が明らかになってきている⁷⁰⁾。また茎葉部の窒素は根へも移行し、生長に利用される事が認められている⁷¹⁾。水稻の生長との具体的な関係としては、転流窒素が、葉身の抽出後の生長に大きな役割を

果す事が示されてきた。⁴⁰⁾

しかしながら、稲作にとって最も重要な、圃場レベルでの水田土壌中での施肥及び地力窒素の挙動と水稻の窒素吸収過程及び水稻の生育、あるいは、生育に対する窒素の貢献を結びつける研究成果はこれまでほとんどみられていない。

そこで、本章では、第1に土壌の種類や有機物施用に伴って前述の水稻の窒素吸収の基本パターンがどのように変わるかを検討する。第2に、土壌アンモニアの挙動と水稻の生育との関係を、分けつ推移から、また水稻の生育中期の地力窒素の吸収を地力窒素の無機化から明らかにする。第3に追肥窒素の吸収過程と土壌中での追肥窒素の挙動との関係を検討する。そして第4に、基肥、地力窒素及び転流窒素の水稻生育に果す役割について論ずる。なお、窒素の生育に果す役割を検討する前に、土壌アンモニア及び水稻の窒素吸収量の変異について明らかにする。最後に、

本研究の成果をもとに、土壌中のアンモニアの挙動と水稻の生育、窒素吸収について総合的に論議する。

第2節 水稻による基肥及び地力窒素の吸収

1.) 土壌の種類異なる水田及び基肥量の違いによる基肥及び地力窒素の吸収

水稻の収量と窒素総吸収量との間には密接な関係があり、その窒素吸収時期は草型と密接³²⁾に関係していることが知られている。そして高収量レベルの稲作にとっては、施肥及び地力窒素の吸収経過を明らかにする事は、きわめて重要な事である。最近のこの方面の研究では、一圃場での窒素吸収経過を明らかにした例³¹⁾はみられるが、土壌統群別に比較検討した例は少ないようである。更に土壌アンモニアの挙動と、水稻の生育、窒素吸収の関係についての研究はほとんどみられない。

一方、基肥量をかえた時の、水稻窒素吸収についての既応の研究^{1),2),3)}によれば、水稻の生育初期に基肥窒素の吸収は終了するとされている。しかしながら、これらの研究は、地力窒素の放出量と基肥量の多少についての検討及

び、基肥及び地力窒素の吸収経過との関係については論じられていない。

そこで、ここでは、土壤の種類異なる圃場での水稻による基肥及び地力窒素の吸収と水稻の生育及び、基肥量の多少と地力窒素放出との関連についての研究成果を述べる事にする。

イ. 実験方法

供試圃場は、第2章第2節で述べた宮城県内の4圃場（宮城農業センター、愛子、古川、岩沼）と、会津盆地内の4圃場（会津坂下、本郷、新鶴、塩川）である。試験区は第2章第2節で述べた区の外に本郷、新鶴では、現地水田の慣行施肥量の区も設けた。すなわち、本郷では基肥窒素量を 6 g/m^2 、新鶴では 2 g/m^2 とした。栽培方法は、第2章第2節に示した通りである。

水稻によって吸収された窒素を基肥由来部と地力由来部に分けるために、重窒素を用い梓試験を行なった。梓試験は第2章第2節で述べた通りである。

植物体試料は、6月上旬より、約7日～10日間隔で採取し、梓毎に分析に供した。試料は採取後 70°C で2昼夜通風乾燥後秤量した。乾燥後の試料は粉碎し、ケルダール分解後、蒸留法によって窒素の定量を行なった⁵¹⁾。重窒素の分析は日本分光 NIA-1型によった⁴⁵⁾。

以下この章では、分析法その他は上述と同様の方法で行なう。

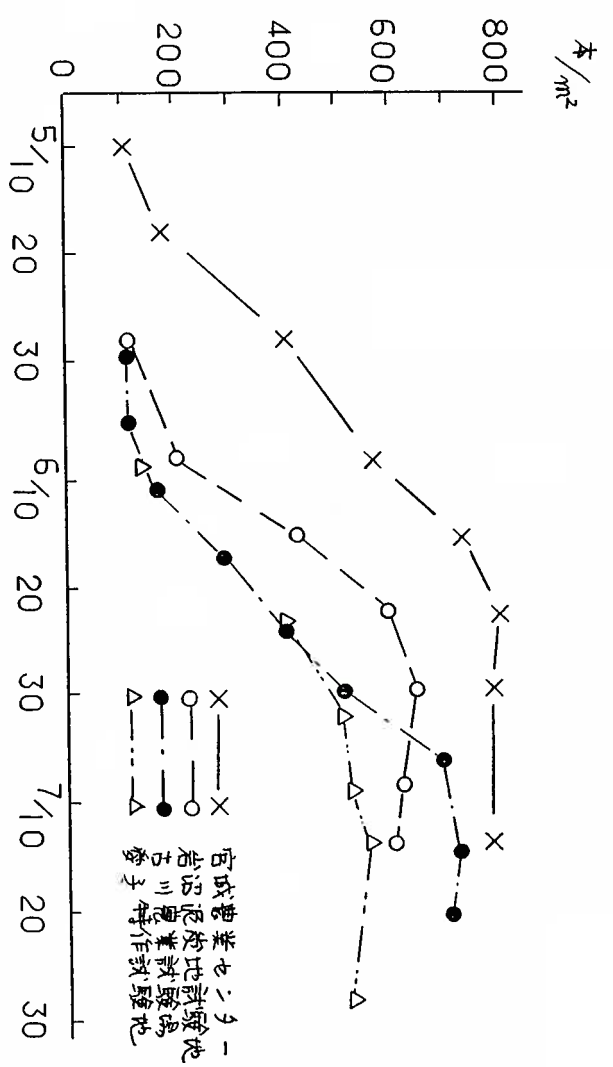
ロ. 結果と論議

α. 宮城県内4圃場の場合

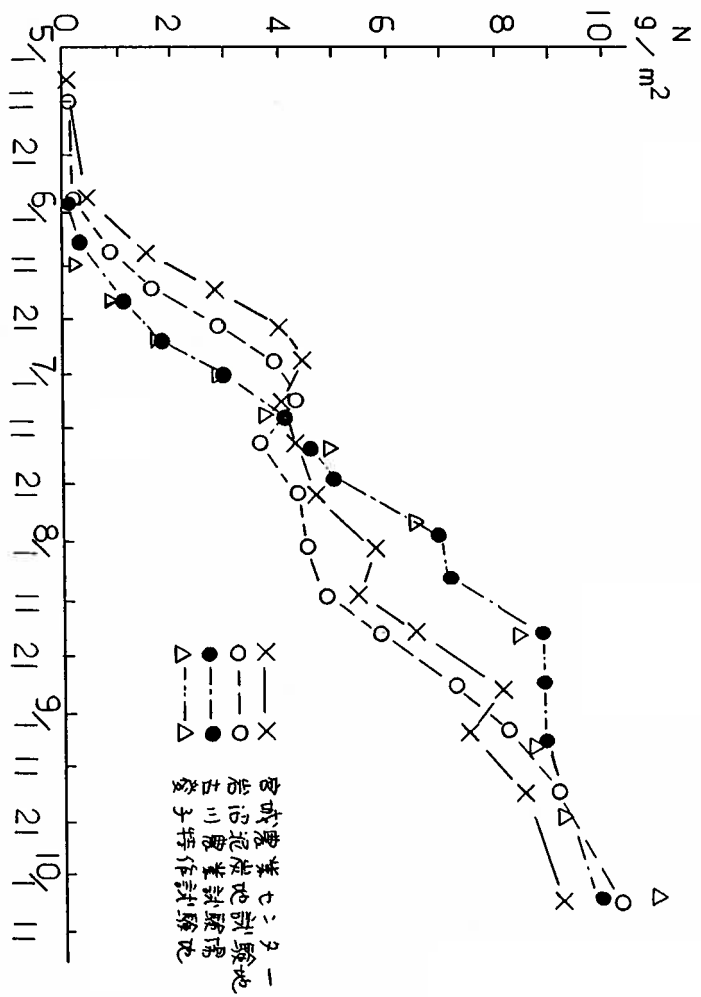
宮城県内の4圃場についての生育概況を茎数で示したのが第3-1図である。宮城県農業センター(以下センターとする)は茎数の増加が最も早く、古川、愛子が最も遅くなっている。また水稻による窒素吸収経過を第3-2図に示した。これによれば、水稻の初期の窒素吸収量は、水稻の茎数の増加とよく対応している事が示される。

土壤アンモニアの挙動でも示したが(第2-1図)、宮城県内の4圃場は、作期、気象条件が異なり、圃場間で直接比較できない。そこで、羽生の積算有効温度示数²⁷⁾と茎数及び窒素吸収の関係を第3-3図、第3-4図に示した。

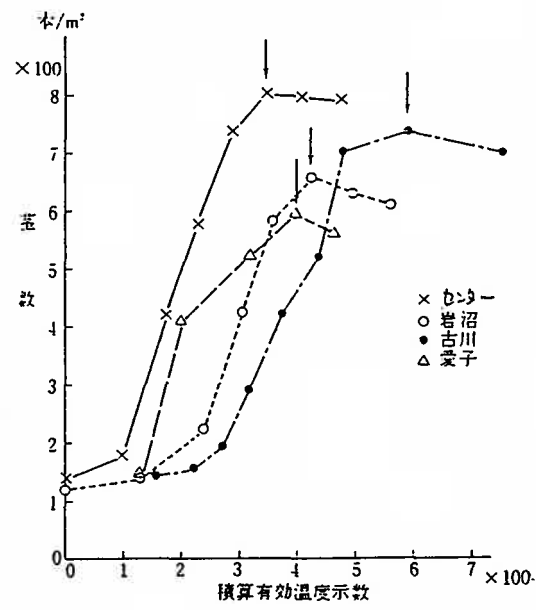
これらによれば、暦日で示した時には、愛子、古川の茎数、水稻の窒素吸収は遅いが、積算有効温度示数で示すと、愛子は、生育初期には、センターに次いで茎数の増加が早い



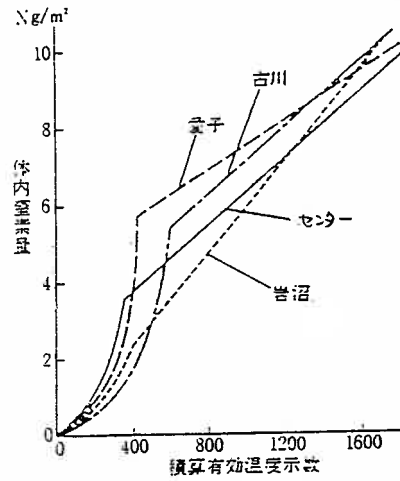
第3-1圖 莖数の推移



水稲に於ける窒素吸収量の推移



才3-3四 積算有効温度示数と茎数の関係
(矢印は最高合1期)



センター	$y = 0.175 \times (1.009)^x$	$r = 0.966^{***}$
	$y = 1.94 + 0.45 \times 10^{-2}x$	$r = 0.966^{***}$
岩沼	$y = 0.054 \times (1.010)^x$	$r = 0.977^{***}$
	$y = -0.149 + 0.60 \times 10^{-2}x$	$r = 0.987^{***}$
古川	$y = 0.093 \times (1.007)^x$	$r = 0.962^{***}$
	$y = 2.78 + 0.44 \times 10^{-2}x$	$r = 0.884^{***}$
愛子	$y = 0.115 \times (1.009)^x$	$r = 0.962^{***}$
	$y = 4.37 + 0.32 \times 10^{-2}x$	$r = 0.898^{***}$

表3-4 積算有効温度示数と水稻の窒素吸収

ことがわかる。

水稻の窒素吸収と積算有効温度示数との関係は、いずれの圃場でも、指数曲線と直線によって示される。この関係は、高橋等⁴⁾の報告と一致する。水稻の窒素吸収が指数関係式で示される時期は土壤アンモニアが充分にある時期であり(第2章第2節参照)、水稻の窒素吸収が制限因子となっていない時期である。この時期の水稻の窒素吸収が茎数の増加と対応していることから、各圃場の水稻の窒素吸収は、分けつの発生に関与する要因と密接に関与している事が推察される。そこで以下に、各圃場の分けつ発生と各土壤の関係を検討する。

古川土壤は強グライ土壤であり、代かきによって著しく膨軟となり、深植となりやすい。事実、水稻根の付け根から、上部の白色部分が4~5cmと長く、深植となっていた。また、本土壤は湛水直後から地下水位が上昇し、稲作期間中は常時作土内に停滞する⁴⁸⁾。従っ

て、土壤の還元化が急速に進行する事は、第2章第2節で示した通りである。このような異常還元下では、生成する有機酸及び多量の2価鉄もまた、深植とともに、水稻の分けつを抑制したものとみられる。

岩沼土壤は、泥炭土壤であり、代かきによって古川土壤と同様に膨軟になり易い。従って、本土壤もまた古川土壤と同様に深植となった。さらに岩沼は、排水施設の関係で深水となり易かった。

しかしながら、古川土壤のような異常還元による障害は認められなかった。なお古川では、他の圃場に比べて5月に乾燥した西風の吹く日が多く、蒸散量が多くなり水稻の初期生育に何んらかの影響を与えている可能性もある。この問題については、湿度との関係もあり、今後の検討が必要とされる。

後述するように、基肥窒素の吸収は指数部でほとんど終了している事から、一次式で示される水稻の窒素吸収は、地力窒素の吸収経

過を示している。直線の勾配をみると、岩沼
＞センター＞古川＞愛子の順となっている。
一方、各土壌のアンモニア化成量をみるとし
第3-1表)、岩沼＞愛子＞古川＞セン
ターの順で、水稻による窒素吸収量とは必ず
しも一致しない。

たとえば、土壌のアンモニア化成量が大き
い愛子で、水稻の地力窒素吸収量が小さかつ
た理由は次のように考えられる。愛子は湿性
黒ボク土壌であるため、室内培養によって測
定されたアンモニア量が圃場でのアンモニア
生成量を大きく上まわったためとみられる。
従来から、水田の地力窒素の評価法として広
く塩入の乾土効果^(12,13)が利用されてきた。しかし
、この方法による測定結果は湿田タイプの圃
場では水稻の窒素吸収量と必ずしも一致しな
い場合の多い事が知られている。愛子も湿田
タイプであるために、室内培養によるアンモ
ニア化成量の測定結果と圃場での水稻の地力
窒素の吸収量との間にくい違いが生じたもの

オ3-1表 供試土壤の
アモニア化成量*

土 壤	化成量
セ ン タ ー	9.4 mg/100g soil
岩 沼	23.3
古 川	14.2
愛 子	20.2

* 風乾土 4週間培養(30°C)

とみられる。また古川の場合も同様に考えられる。

また、第2章で明らかにした様に地力窒素の放出速度は、各土壌にとって固有のものともみられる。たとえば、初期に地力窒素が放出されやすいタイプと後期により放出されやすいタイプの土壌がある。従って、第3-1表で示した4週目の室内実験でのアンモニア化成量と水稻による地力窒素の吸収量とは直接結びつかない事があるものとみられる。

重窒素硫酸を利用して測定した基肥窒素の利用率は、圃場間に大きな差が認められた(第3-2表)。すなわち、センターでは30%以上という高い値に対して、他のいずれの圃場でも、利用率で、10%程度低い値となっている。また、いずれの圃場でも、基肥窒素がほぼ消失する時期の利用率と、出穂期の利用率との間には大差が認められない。この事は、土壌アンモニアの消失した以降、基肥窒素の利用が認められないという従来³⁴⁾の結果と

ホ3-2表 基肥窒素の利用率および土壌中の
アンモニアの基肥由来割合

	基肥窒素の利用率		土壌中のア ンモニアの 基肥由来割 合(6月F前)
	基肥窒素消失時	出穂期	
センター	34.9%	29.6%	46.4%
岩沼	24.2%	22.8%	36.0%
古川	18.2%	20.7%	30.3%
登子	27.0%	25.3%	—

一致する。

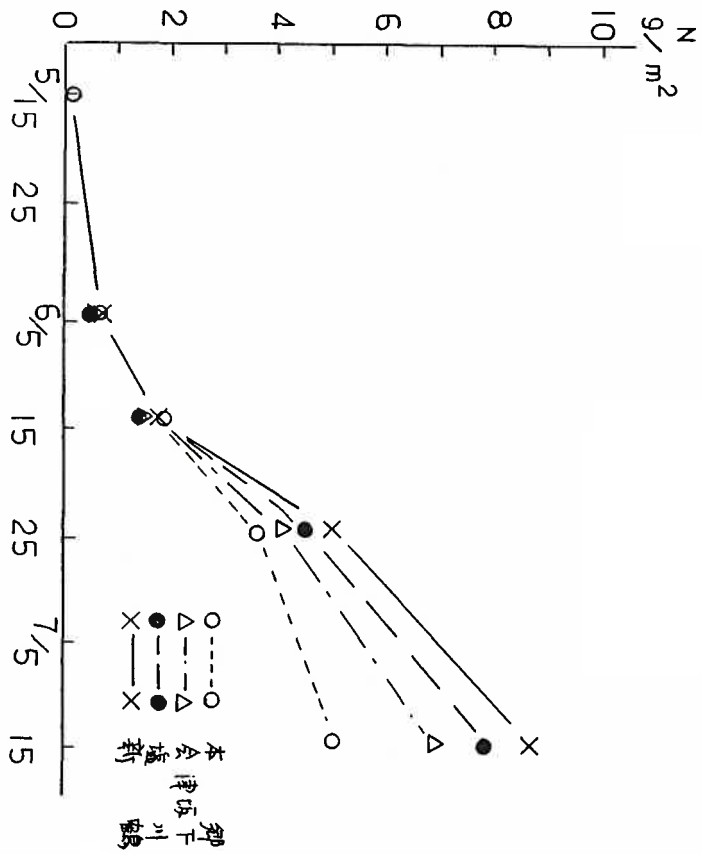
基肥窒素の利用率は、土壤アンモニアの基肥由来の割合と密接に関係しているようである。この点については、後で詳しく検討する。

b.) 会津盆地内4圃場の場合

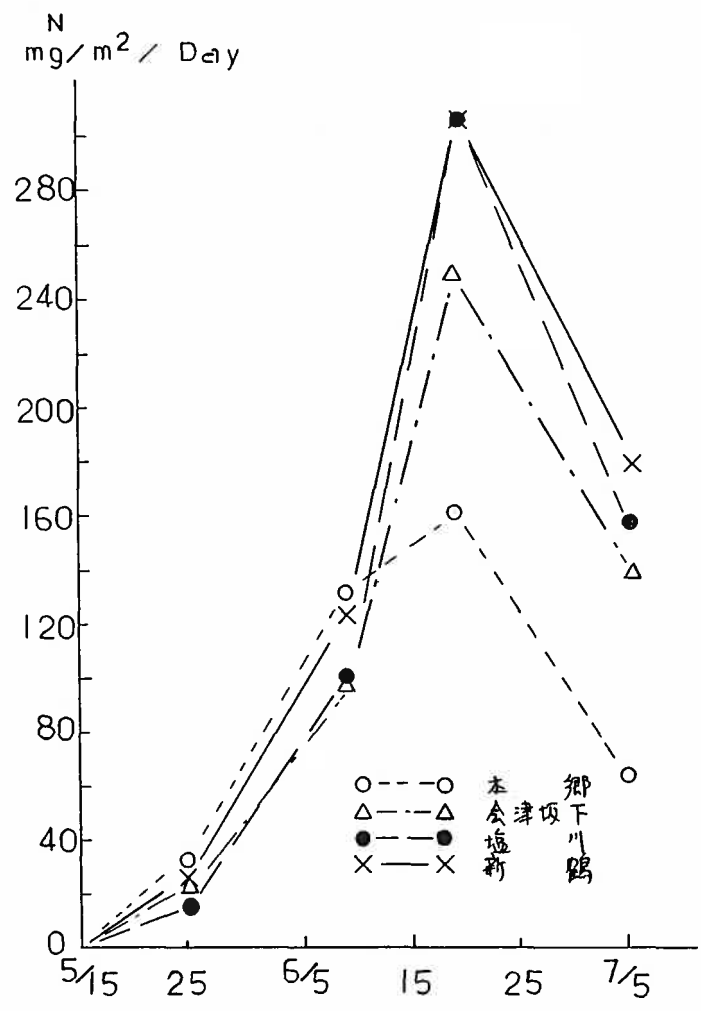
水稻の中後期の窒素吸収量は地力窒素の放出量と関係している事を示したが、この点については後に詳しく検討する予定であるので、ここでは、幼穂形成期までの窒素吸収について検討する。

第3-5図には、幼形期までの各圃場の基肥4kg/10a区的全窒素吸収量を示した。これによれば、6月中旬までは各圃場の窒素吸収量には大きな差が認められないが、その後は新鶴、塩川、^{会津}坂下、本郷の順で全窒素の吸収量が多い。

全窒素吸収量は積算値であるので、時期別の窒素の吸収量を直接示さない。そこで第3-6図には、^全窒素の吸収速度を示した。これによれば、5月下旬では、本郷の^全窒素吸収速度が最も大きく、ついで、新鶴、^{会津}坂下、塩川の順である。6月^初旬になると^{会津}坂下、塩川はほぼ同じとなる。6月中旬になると様相が一変し、各圃場間の差が大きくなる。すなわち、



水稻に於ける全窒素吸収量の推移



才3-6回 水稻に与る全窒素吸収速度

新鶴、塩川が最も大きく、本郷の2倍程度の吸収速度があり、両者の間に^全坂下がある。7月上旬では、新鶴、塩川、^全坂下、本郷の順となっている。

基肥窒素施用量が $4\text{ kg}/10\text{ a}$ レベルでは、^全窒素の吸収速度は、初期(5月下旬)には本郷が大きく、6月になると本郷の吸収速度が小さくなる。一方、塩川は逆に5月下旬から6月上旬の吸収速度が他圃場に比べると小さく、6月中旬の吸収速度が、新鶴では、6月下旬まで吸収速度が大きいのが特徴である。

第2-2図に示した土壤アンモニアの推移をみると、6月10日までの各圃場のアンモニア量には差がみられない。一方、6月24日では、本郷のアンモニアが最も少なく、他圃場はほぼ同じであり、7月2日では塩川が最も多くなっている。このことから、本郷の水稻による^全窒素吸収速度が6月中下旬で小さくなるのは、土壤アンモニアが制限要因になっているためとみられる。一方、新鶴で、7月上旬

の全窒素の吸収速度が大きい事の説明は土壤アンモニアの推移からは説明できない。そこで次に、全窒素吸収速度に対して、水稻の基肥窒素及び地力窒素の吸収速度について検討する。

第3-7図には、基肥窒素の、第3-8図には地力窒素の吸収速度を示した。基肥窒素の吸収速度をみると、5月下旬では新鶴、本郷がほぼ同じで、^{念建}坂下、塩川の順に小さくなっている。6月中旬では塩川だけが基肥窒素の吸収速度が小さく、他の3圃場はほぼ同じである。6月下旬になると本郷の吸収速度が6月中旬に比べて小さくなっているが、他圃場では6月中旬よりも大きい。そして、^{念建}坂下、新鶴、塩川の順である。7月上旬には、塩川が最も大きく新鶴、^{念建}坂下、本郷の順となっている。

地力窒素の吸収速度をみると、初期は全窒素の吸収速度と同じであるが、6月中旬になると、新鶴の地力窒素の吸収速度が、全窒素

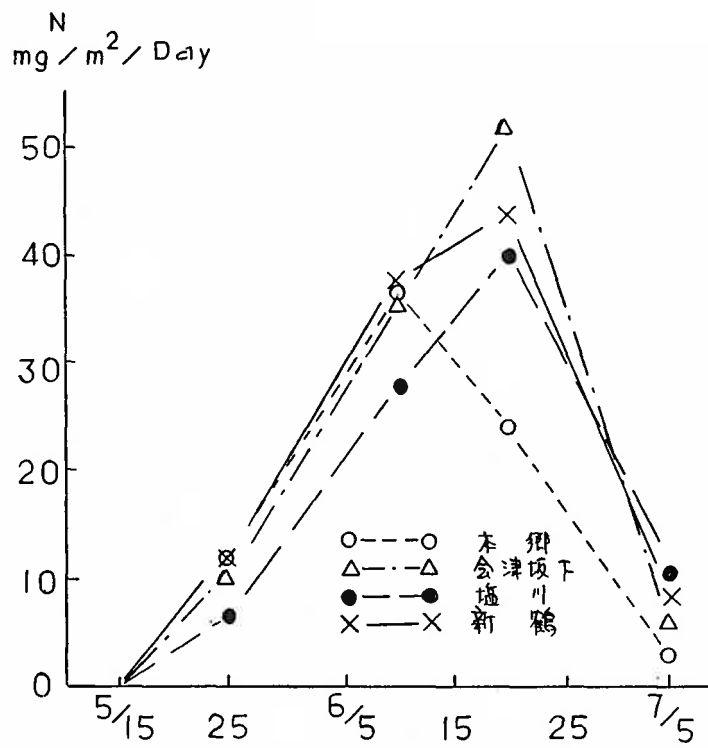
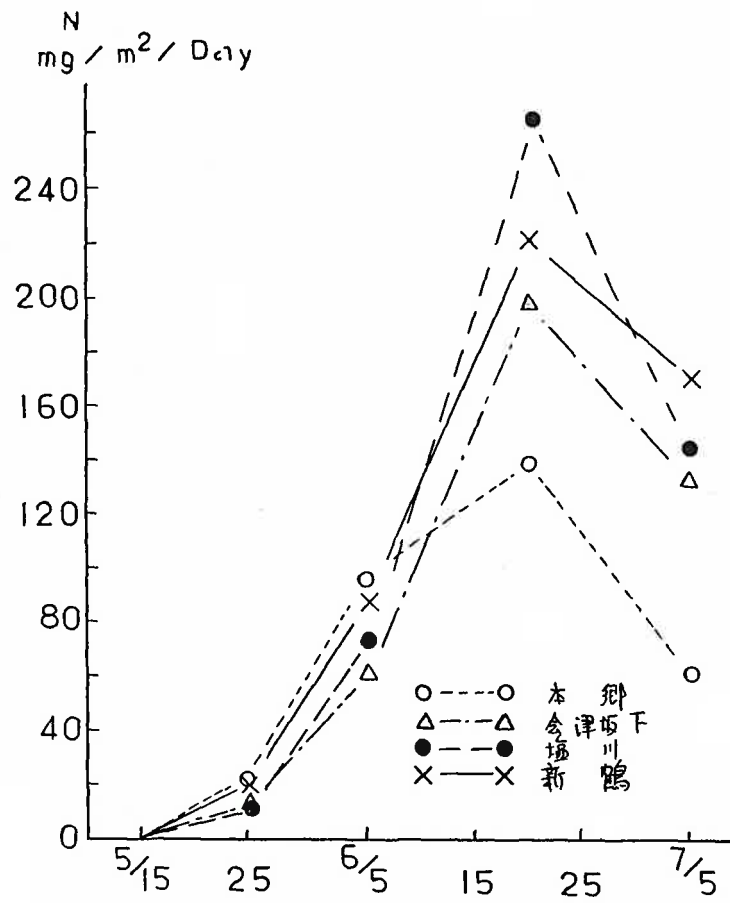


图3-7 水稻による基肥窒素吸収速度



才3-8回 水稻に与る地力窒素吸収速度

の吸収速度と異なる。すなわち、全窒素の吸収速度では塩川と同じであったが、地力窒素の吸収速度は、塩川よりやや劣る。

7月上旬の塩川の基肥窒素の吸収速度が他圃場より大きく、また地力窒素の吸収速度が新鷺に次いで大きいのは、第2-2図で示したように、土壤アンモニアが他圃場に比べて7月上旬に多く残存するためである。本郷が、6月中旬から地力窒素及び基肥窒素の吸収速度が小さくなる事と、新鷺の7月上旬の地力窒素の吸収速度が、土壤アンモニアが消失するにもかかわらず、塩川より大きいのは、次の理由によるものとみられる。

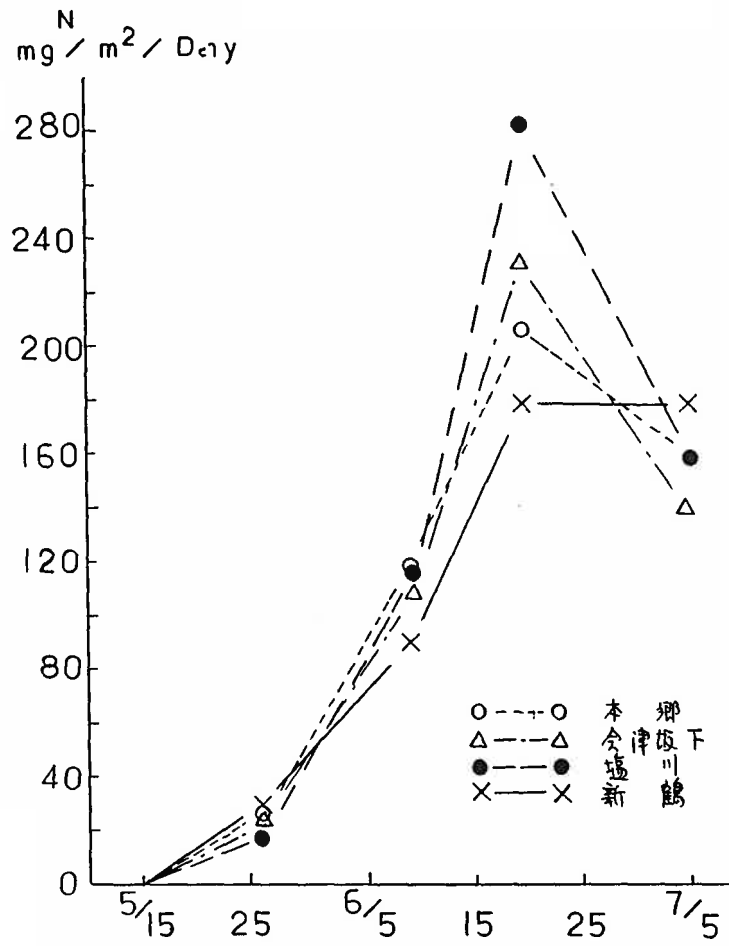
第2-2図の土壤アンモニアをみると、6月中旬の本郷では、他圃場よりも $0.5 \text{ mg}/100 \text{ g soil}$ 程度低い値を示す。土壤アンモニアが充分ある時でも、基肥レベルに対応した窒素の吸収がみられる。この事は、土壤アンモニアの多少により、水稻の窒素吸収量に差がある事を示し、この事が6月中旬からの、本郷の窒素

吸収速度を小さくしたものとみられる。一方、新鷗では、第2-3図に示した様に、地力窒素の放出量が他圃場に比べて大きい。新鷗の基肥窒素の吸収速度は低下しているにもかかわらず、地力窒素の吸収速度が大きい事は、この培養実験の地力窒素の放出が大きい事と対応するものである。

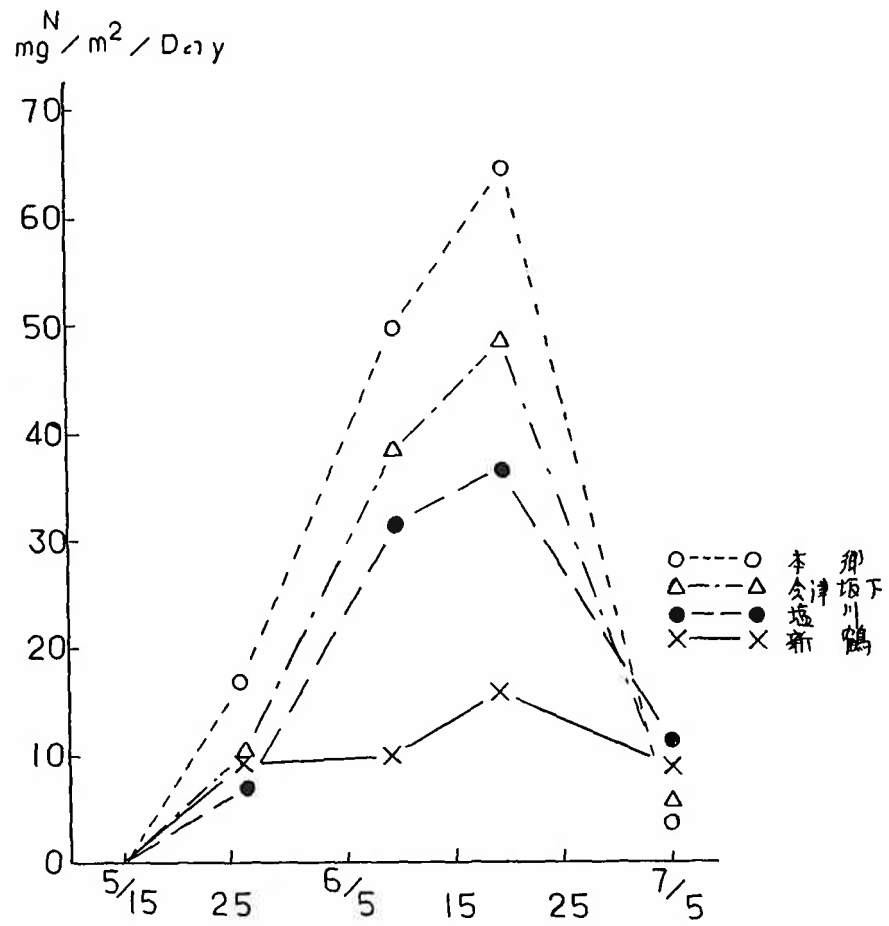
全窒素の吸収速度を圃場毎に比較すると、5月下旬・6月上旬は、本郷が、それ以降は塩川、新鷗が大きい。すでに第2章で述べた様に、本郷のCECは低い。CECの低い土壤では、CECの高い土壤に比べて土壤中のアンモニアは、相対的に土壤溶液に多くなる²⁾。これは、特に水稻の活着期には、水稻の窒素吸収に有利である。この事が、本郷の水稻による5月下旬、6月上旬の窒素の吸収速度が、他圃場よりも大きかった理由である。一方、初期に窒素吸収速度の小さい塩川は、会津盆地の中央部に位置し、排水不良である。そのため、古川と同様に、初期から還元化が

進み、水稻の初期生育が、阻害されたものとみられる。

6月下旬ないし7月上旬には、本郷では、第2章で示した様に地力窒素の放出量が少なく、この事がこの時期の水稻による地力窒素吸収速度を小さくしたものとみられる。一方、塩川では、地温の上昇に伴い、初期の還元の原因となった易分解部分の分解が終了し、水稻の生育も回復する。その結果、土壤アンモニアに対応して、地力窒素の吸収速度が大きくなったものとみられる。新鶴では、6月下旬ないし7月上旬の地力窒素の放出が多く、地力窒素の吸収速度も大きい。この結果、新鶴では基肥4 kg/10a施用では、水稻は過繁茂となる。一方、本郷では前述の如く6月^上旬以降の地力窒素の吸収が少ないので、基肥4 kg/10a施用では、水稻は十分な生育量を確保できない。これらの事より、本郷及び新鶴の慣行基肥量はそれぞれ6 kg/10a, 2 kg/10aとなっている。そこで、次にこれら慣行基肥量での水稻



才3-9四 水稻に与る全窒素吸収速度
(慣行基肥量区)



才3-10回 水稻に於ける基肥窒素吸収速度
(慣行基肥量区)

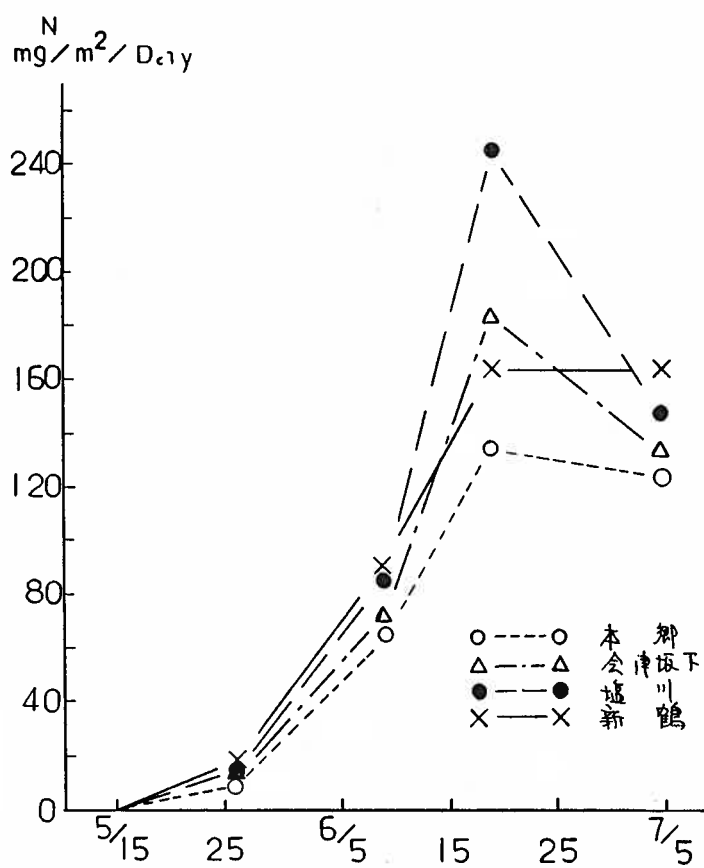


图3-11 水稻土壤氮素吸收速度

(横行基肥量区)

の窒素吸収速度を検討する。

第3-9図、第3-10図、第3-11図には各々慣行基肥量での全窒素吸収速度、基肥窒素吸収速度、地力窒素吸収速度を示した。全窒素の吸収速度をみると、 $4 \text{ kg}/10\text{a}$ の基肥量に比べると、6月中旬の吸収速度に大きな違いが認められる。すなわち、 $4 \text{ kg}/10\text{a}$ の基肥量では、6月中旬の吸収速度は塩川、新鶴が同じで最も大きかったのが、新鶴の吸収速度が最も小さくなっている反面、本郷の吸収速度が大きくなっている点である。さらに7月上旬では、本郷の吸収速度が $4 \text{ kg}/10\text{a}$ の基肥量に比べて大きくなっているが、新鶴では、 $4 \text{ kg}/10\text{a}$ の基肥量の吸収速度とほぼ同じである。

この傾向は、基肥窒素の吸収速度で、より顕著である。すなわち、6月中旬の基肥窒素の吸収速度は本郷が最も大きく、新鶴が最も小さくなっている。基肥窒素の吸収速度に対して地力窒素の吸収速度では、 $4 \text{ kg}/10\text{a}$ の基肥量と慣行基肥量の間には大きな違いがみられ

ない。この事は、第2章第2節で既に述べた通り、基肥窒素施用量を変えても地力窒素の放出量は変わらないという結果と一致する。すなわち、水稻による地力窒素の吸収量は、基肥窒素施用量と無関係である。

まとめ

土壌の種類異なる宮城県内の4圃場(宮城県農業センター, 愛子, 古川, 岩沼)及び会津盆地内4圃場(会津坂下, 本郷, 新鷲, 塩川)で、水稻の基肥及び地力窒素の吸収と水稻の生育を検討した。さらに、会津盆地内4圃場では、基肥窒素量の違いによる基肥及び地力窒素の吸収経過を明らかにした。得られた結果は以下の通りである。

1.) 水稻の全窒素吸収と、積算有効温度示数(羽生)との関係は、いずれの圃場でも指数曲線と直線式によって示された。そして、指数曲線で示される時期は、土壌アンモニアが充分にある時であり、圃場間の全窒素吸収経過の違いは、圃場での基数の増加に対応していた。

2.) 水稻による基肥窒素の吸収は、土壌アンモニアが消失した後には、ほとんどみられな

り。そして、水稻による基肥窒素の利用率は、

20~35%であった。一方、水稻による地力窒素の吸収と積算有効温度指数との関係は、水稻の生育中後期には、直線式で表わされる事が示された。

3.) 基肥窒素施用量の多少により基肥窒素の水稻による吸収速度は異なる。すなわち、基肥窒素施用量の多い時は、基肥窒素の吸収速度が大きくなる。一方、地力窒素の吸収速度は、基肥窒素施用量の多少にかかわらず、同一圃場ではほぼ同一であった。

2.) 有機物施用に伴う水稻による窒素及び地力窒素の吸収

水稻の生育に与える有機物施用の影響は、初期と中後期に分けて考える事ができる。初期生育に対する影響としては、堆肥施用では、初期生育促進効果等プラスの面が強調されている。⁷²⁾一方、稲わら施用では、施用初年目には窒素飢餓、生育障害物、強還元による生育抑制がみられる等マイナスの面が強調される。しかし、稲わらの連年施用によって生育抑制が軽減され、プラスの面がでてくるとされている。^{6), 73)}次に中後期においては、堆肥施用区では、窒素の放出が持続的に続くことにより、窒素吸収がスムーズにおこなわれるといわれ、稲わらでも窒素の放出が盛んになり、生育の促進がみられる反面、初期生育の遅延に伴い、登熟不良がみられる場合があるとされている。^{72), 73)}

これらの研究は、施用窒素と堆肥窒素あるいは稲わら窒素を区分していないため、有機

物施用区における基肥窒素の役割が不明な点が多い。そこで本節では、基肥窒素と有機物中の窒素を区別し、それぞれの窒素の吸収経過を追跡する。

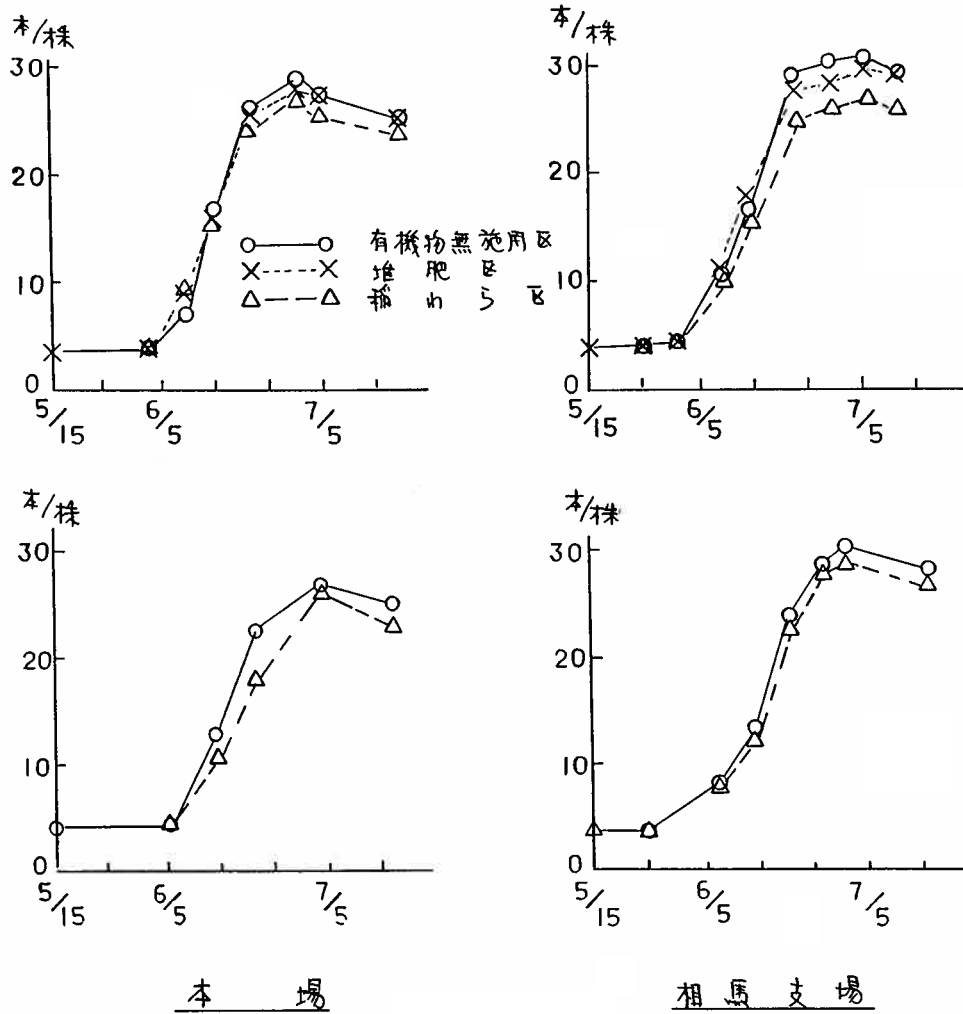
1. 実験方法

栽培方法及び分析方法は第2章2節及び前節に述べた通りである。

0. 結果と論議

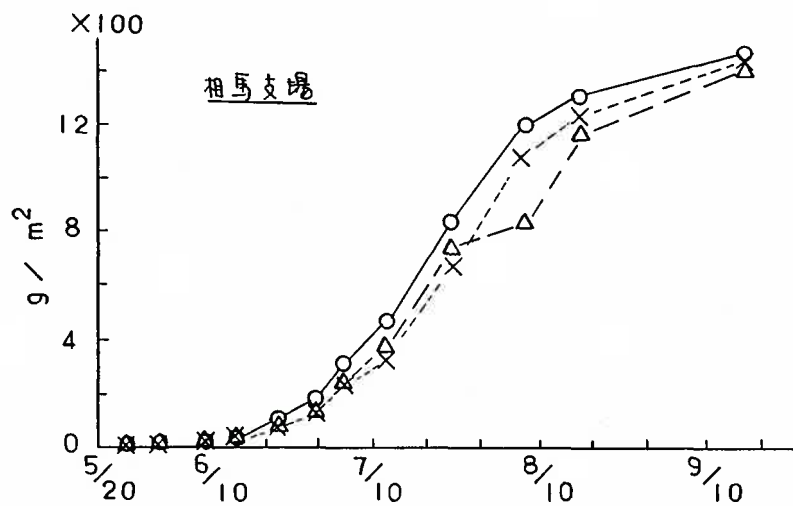
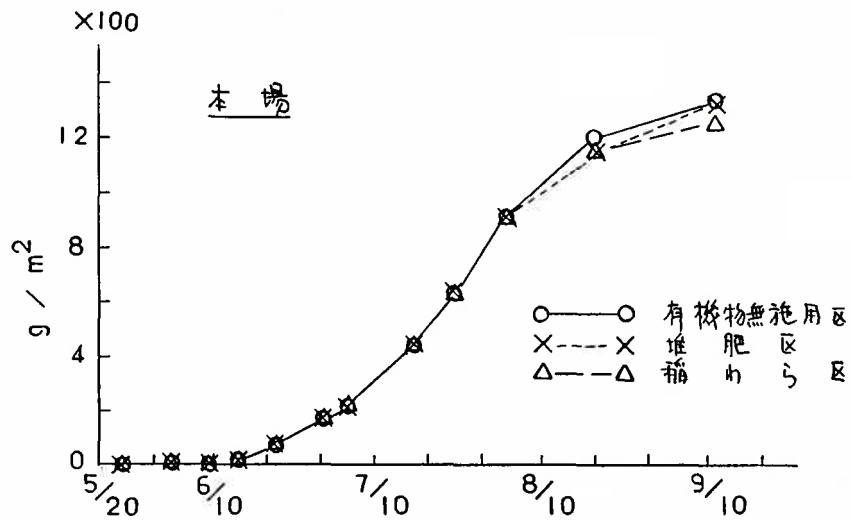
会津支場は本場と同様の生育を示したので、以下には本場と相馬支場について検討する。第3-12図には茎数の推移を示した。これによれば本場、相馬支場ともに6月4日頃から茎数の増加がみられ、6月下旬ないし、7月上旬に最高分け時期をむかえている。各処理間の差をみると、両圃場とも、有機物無施用区が最も茎数が多く、ついで堆肥区、稻わら区の順になっている。しかし、本場と相馬支場では、処理区の間茎数の量に違いが認められる。すなわち、本場では、最高分け時期の処理区の間は2本/株であるのに対して、相馬支場は4本/株と相馬支場での処理区の間が大きくなっている。

第3-13図には、乾物量の推移を示した。乾物量は、茎数の推移と同様の傾向である。すなわち、処理区間の差をみれば、有機物無施用区が最も良く、堆肥区、稻わら区の順である。また、本場では相馬支場に比べて処理



相3-12回 有機物施用に伴う基数の推移

(上回: 1978年度, 下回: 1979年度)



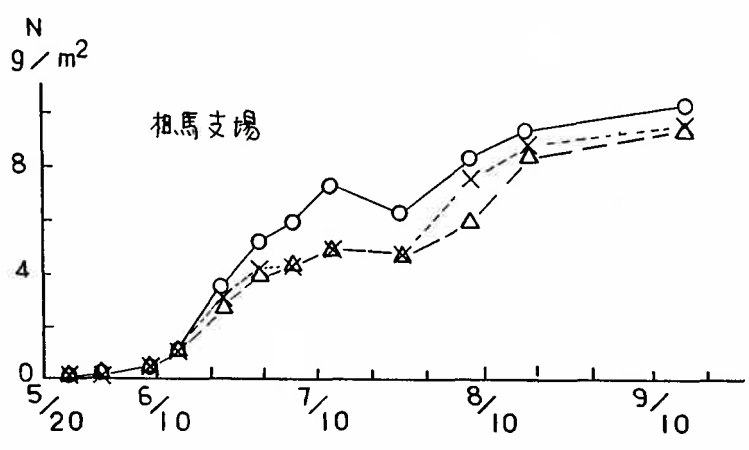
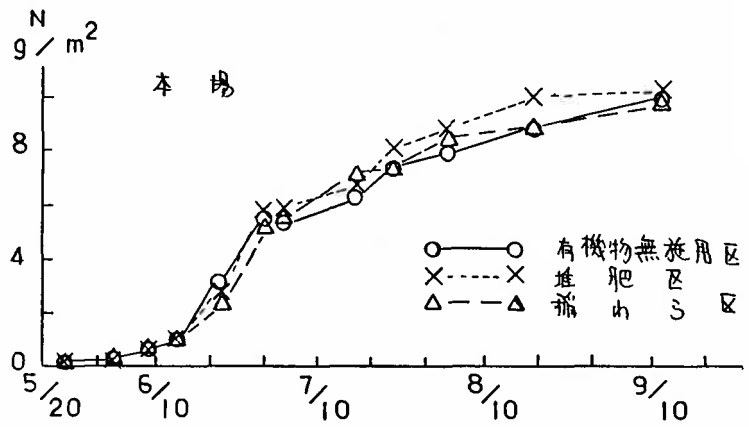
相-13回 有機物施用に伴う乾物重の推移

(1978年度)

区間の差は小さく、特に生育初期ではその差がみられない。

第3-14図には、水稻による窒素吸収経過を示した。これによれば、本場では、堆肥区で初期の窒素吸収が他の区と比べてやや多くなる傾向がみられる。これに対して相馬支場では、有機物無施用区で最も窒素を吸収し、堆肥区、稲わら区との差は大きい。堆肥区と稲わら区の差はほとんどみられない。

以上の結果、水稻の初期生育に対する有機物施用の影響は圃場によって異なる事は明らかである。そこで、初期の窒素の吸収^{第3-16図}について以下に検討を加える。第3-15図には窒素の吸収速度を7月上旬までにみたものである。これによれば、前述の傾向、本場では、堆肥施用に伴ない窒素吸収がやや良好になり、稲わら施用はほとんど影響がない事、相馬支場では、有機物施用に伴い初期生育の抑制がみられる事が示されている。この事は、排水の比較的良好な灰色低地土灰褐系の本場や会



才3-14回 有機物施用に伴う全窒素吸収量の推移 (1978年度)

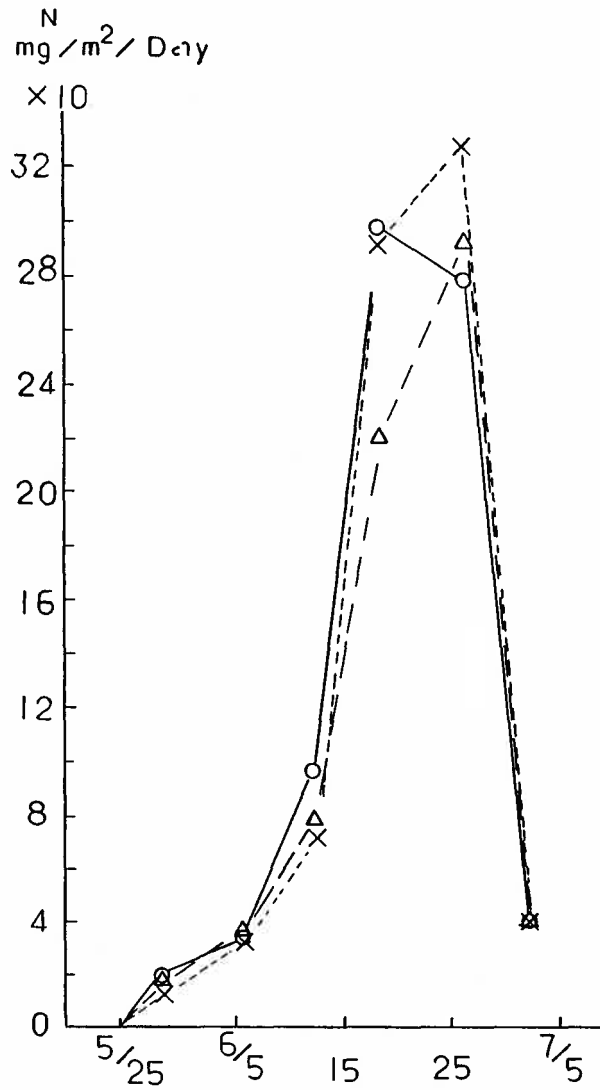
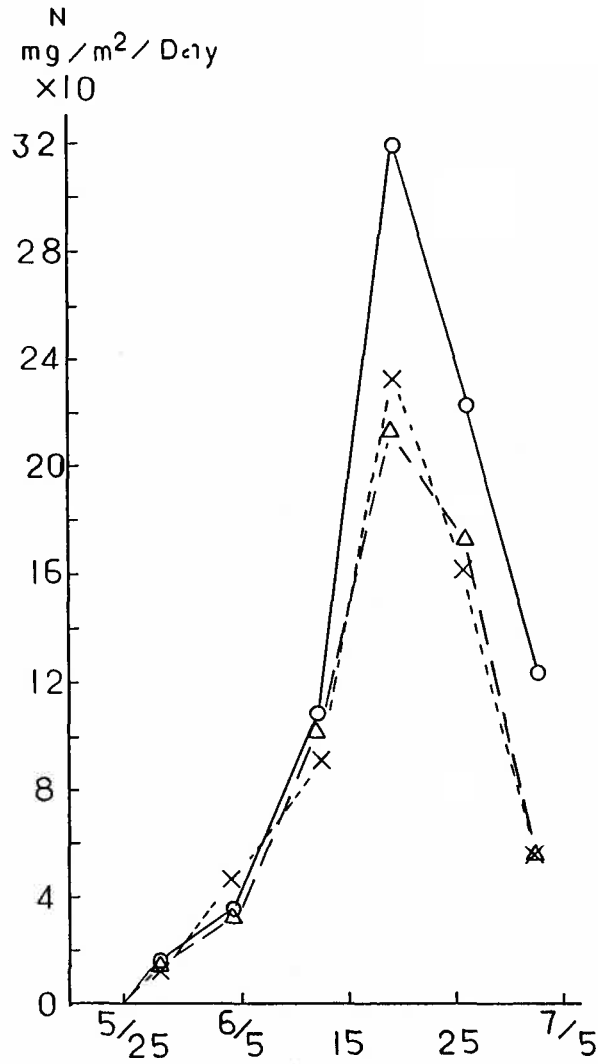


表3-15 有機物施用に伴う全窒素吸収

速度の推移 (本場, 1978年度)

(○—○; 有機物無施用区, x---x; 堆肥区, △ △; 縮小区)



才3-16回 有機物施用に伴う全窒素吸収

速度の推移 (相馬支場, 1978年度)

(○—○; 有機物無施用区, X---X; 堆肥区,
△---△; 稲わら区)

津支場では、有機物の質によって水稻の初期生育に対してアラスの効果がある場合とほとんどみられない場合がある。^事一方、排水不良のグライ土壌である相馬支場の場合には、有機物の質に関係なく初期生育が抑制されることを示している。この事は、排水不良の土壌では、従来から、有機物施用により初期生育が抑制されるという報告と一致する。^{6), 72), 73)}また、排水良好な土壌でも稲わら施用初年目には、初期生育が抑制される事があるが、本実験では、稲わら施用量が通常の半分の250 Kg/10aであったため、排水良好な本場、会津支場では初期生育の抑制がみられなかったものとみられる。

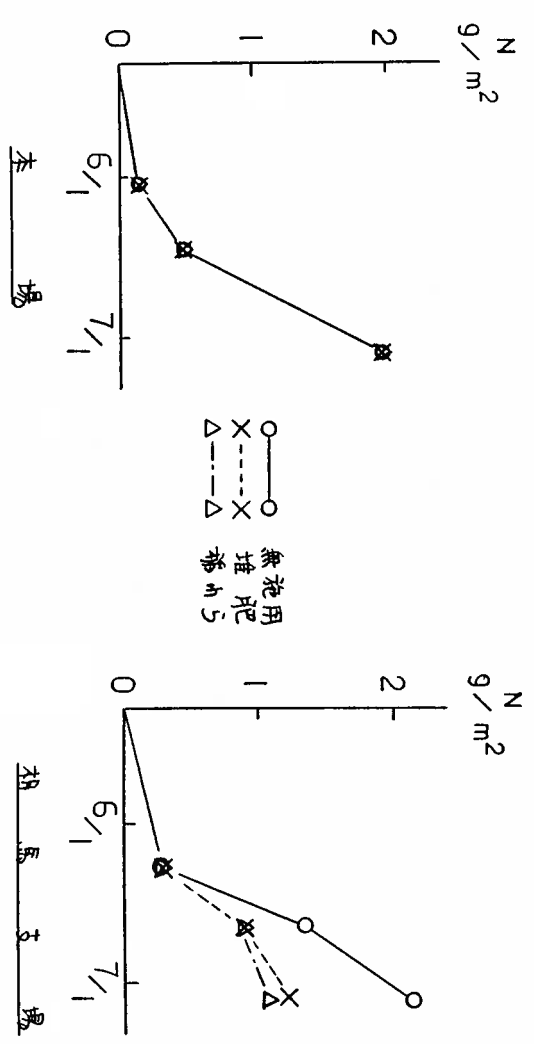
有機物施用に伴う初期生育の抑制が起きると、窒素の後ぎき、特に最高分けつ期の遅れや、穂首分化期頃の窒素吸収量が多くなること⁷⁴⁾が報告されている。しかし、本実験では、第3-12図で示した如く、相馬支場の最高分けつ期は、いずれの処理区でも7月5日頃で

処理区間の差は認められない。また窒素の吸収経過、特に窒素の吸収速度はいずれの処理区でも同一のパターンを示している。この事は、初期生育の抑制が起きる事と、生育の遅延とは無関係である事を示すものとみられる。

本場及び相馬支場における基肥窒素の利用率を第3-3表に、基肥窒素の吸収経過を第3-17図に示した。両圃場の初期の基肥窒素吸収経過は、全窒素の吸収経過と類似している。すなわち、本場では処理区間にほとんど差がなく、相馬支場では、無施用区の基肥窒素の吸収利用が最も良好である。第2章で明らかにした様に土壤アンモニア中の基肥由来割合は、処理区間に差がみられない。また相馬支場では、土壤アンモニア量にも処理区間の差がみられない。従って、相馬支場で有機物無施用区で、基肥窒素の吸収利用が最も良好なのは、有機物無施用区の水稲の生育(たとえば茎数で示されるように)が、還元障害

才3-3表 有機物施用と水稻による
基肥窒素の利用率

	本場	相馬支場
有機物無施用区	32.1%	35.0%
稲巾5区	32.3	17.4
堆肥区	30.8	20.0



第3-17圖 有機物施用に伴う窒素の吸収経過

が最も少なく、良好であったためとみられる。一方本場では、土壌アンモニア量は堆肥区が最も多い。しかし、水稻による窒素吸収は処理間に差がない事から、基肥窒素の吸収利用も同じになったものとみられる。

従来から稲わら使用に伴い、初期生育が抑制され、窒素の吸収が抑えられるとされている。^{(6), (22), (23)} この原因については、窒素飢餓⁽²⁵⁾や生育阻害物質が発現する等報告されている。相馬支場では、稲わら等の有機物の施用に伴い、初期生育が抑制されているが、土壌アンモニア量に差がみられない。これは第2章で検討した様に、稲わら施用に伴って、基肥窒素の稲わらへのとり込みがみられるが、それに見合う量の窒素が稲わらから放出されているためである。一方、土壌アンモニアと稲わら施用の関係については、野本³⁾は500 kg/10aの稲わら施用、⁵⁰⁾ 原田は、400 kg/10aの稲わら施用までは土壌アンモニアの推移は無施用区とかわらない事を示している。また排水良好な本場で

は、稲わら施用に伴う生育抑制がみられない。これらの事より、稲わら施用に伴う初期生育の抑制は、土壌アンモニアの不足からくる窒素飢餓でない事は明白である。

水稻生育中後期に対する有機物施用の効果としては、有機物からの窒素の放出により、^{(72), (73), (74)} 水稻窒素吸収量の増加があるとみられている。そこで、稲わら施用区について、この点について検討することにする。第2-8図に示した、施用稲わら窒素の挙動によれば、最高分けつ期と収穫期の水稻による稲わら窒素の吸収量を比較すると、本場、相馬支場いずれの圃場でも、最高分けつ期の方が高い値を示す。一方、稲わら窒素の未回収部分についてみると、最高分けつ期の未回収部分より、本場では4割、相馬支場では3割収穫期で増加している。また稲わら窒素として残存する部分も、最高分けつ期に比べて、収穫期では両圃場ともに半分以下となる。これらの事より、稲わら窒素は、水稻の生育中後期において

、水稻によって直接は利用されない事がわかる。しかし、第2-7図より、回収稲わら中の土壌由来の窒素もまた最高分けつ期から、収穫期にかけて、本場では約 500 mg/m^2 、相馬支場では約 1300 mg/m^2 減少する。従って、水稻生育中後期の稲わら施用による窒素の放出量の増加は、^地窒素のターンオーバーによるものとみられる。

まとめ

堆肥及び稲わらの施用に伴う水稻による基肥及び地力窒素の吸収を土壤の種類が異なる福島農試本場、会津支場（ともに灰色低地土灰褐系）及び相馬支場（強グライ土壤）で検討した。

1.) 水稻の生育を茎数で見ると、いずれの圃場でも有機物無施用区が多かったが、排水不良の相馬支場でその差はより顕著であった。一方、施用有機物の質の違いによる茎数の差は認められなかった。乾物重の推移は、茎数の推移と同様の傾向がみられた。

2.) 水稻生育初期の全窒素吸収速度は、本場では堆肥区でやや大きいが、相馬支場では有機施用により小さくなった。この事は、有機物施用に伴う水稻の窒素吸収が土壤条件に左右される事を示すものである。相馬支場での水稻生育初期の窒素吸収が、有機物施用によって低下するのは、土壤アンモニアの欠乏による窒素飢餓ではなく、生育阻害による低

下であった。

3.) 生育初期の基肥窒素の吸収は、いずれの圃場でも、いずれの区でも、全窒素の吸収経過とほぼ同様である。そして、土壤アンモニアの消失した後の基肥窒素の吸収はみられなかった。

4.) 生育中後期に施用稲わらから放出される稲わら窒素の水稻による利用は、ほとんどみられなかった。一方、生育初期に稲わらに一度有機化された土壤窒素は、生育中後期に再無機化され、水稻によって利用されるものとみられた。この事は、水稻生育中後期に稲わら施用に伴う窒素放出量の増加は、^地窒素のターンオーバーによる事を示すものである。

第3節 水田土壌での窒素の挙動と莖数の推移ならびに窒素吸収との関係

1.) 最高分けつ期と土壌アンモニアの挙動

水稻の分けつの確保は、穂数を確保の上で重要である。分けつの発生に関する研究は多くあり、温度条件、物理的条件、栄養条件が分けつ発生に関与している事が明らかにされている。^{76), 77), 78), 79)} 一方、最高分けつ期がいかなる要因で決定されるかは種々論議されているが、圃場条件下で検討した例はTanaka等に報告されているにすぎない。⁸⁰⁾ Tanakaらによれば、水稻の窒素含量が2%より低くなると分けつは停止するとされるが、窒素含量を支配する要因は明らかではない。

そこで、本節では、圃場で水稻の最高分けつ期を決定する要因、とくに土壌アンモニアの挙動との関連について検討した。

1. 実験方法

宮城県内の4圃場及び、有機物施用試験で使用した福島県内の3圃場について検討した。栽培方法、その他は第2章で述べた通りである。

ロ. 結果と論議

土壤アンモニアは、先に明らかにしたように、移植後減少し、低い値でほぼ一定となる（第2-1図、第2-5図）。この時期は、6月下旬から7月上旬と、特に宮城県内の4圃場では大きな差がみられる。一方、圃場での茎数の推移は、第3-1図、第3-12図にみられる通りで、最高分けつ期を第3-4表に示した。これを土壤アンモニアがほぼ一定になる時期と比較すると、両者はほぼ一致する事がわかる。

木内ら⁷⁾は東北農試（大曲市）において、コンクリート枠に、泥炭、沖積埴土、沖積砂土を充填して、土壤アンモニアの消長と水稻の茎数の推移との関係を検討した。その結果、土壤中の置換性アンモニア濃度が $2 \text{ mg}/100\text{g}$ 乾土では、分けつが緩やかであるか、停止し、 1 mg 以下では全く停止あるいは減少する事がわかり、本圃場試験と同様な結果を得ている。

水稻の窒素吸収経過は、すでに明らかにし

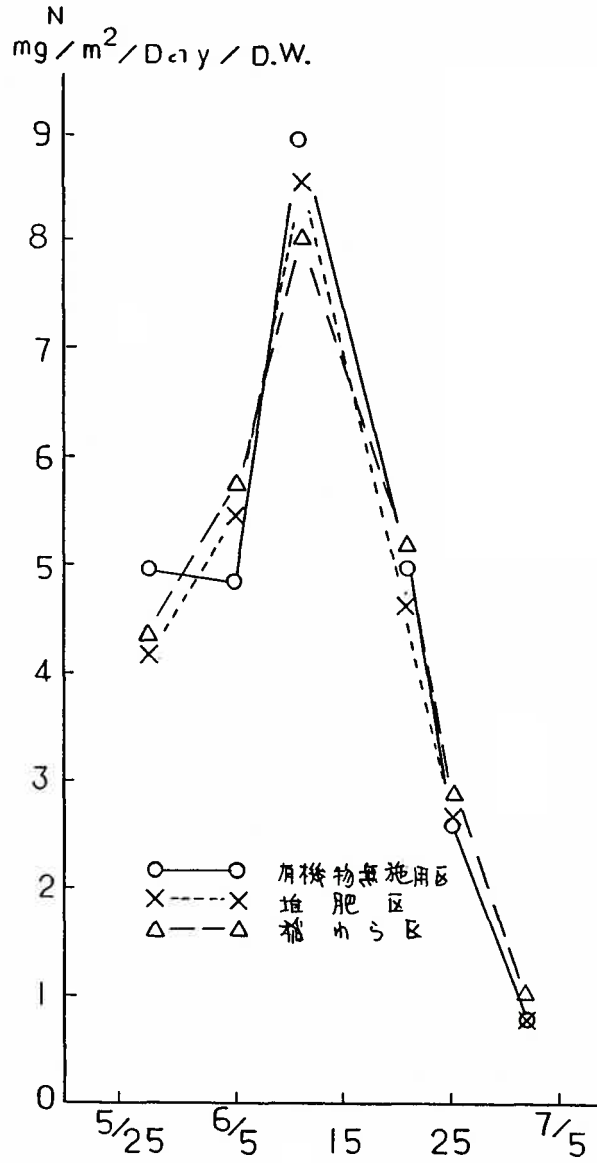
表-4 最高分げつ期，土壤アンモニア
消失時，最高分げつ期の窒素含量，窒素
集積量が 1mg/d.w./日 以下に到る時の関係

圃場	最高分 げつ期	土壌アン モニア消失時	窒素 含量	窒素集積速度 が 1mg/d.w./日 以下に到る時
福島農試本場	6/30	6/29	2.53%	6/30
相馬支場	7/5	6/30	1.69	6/30
会津支場	7/4	7/4	—	—
宮城農試第一	6/22	6/22	2.20	6/22
米沼	6/29	6/29	1.73	6/29
古川	7/10	7/14	2.21	
愛子	7/9	7/9	2.86	7/9

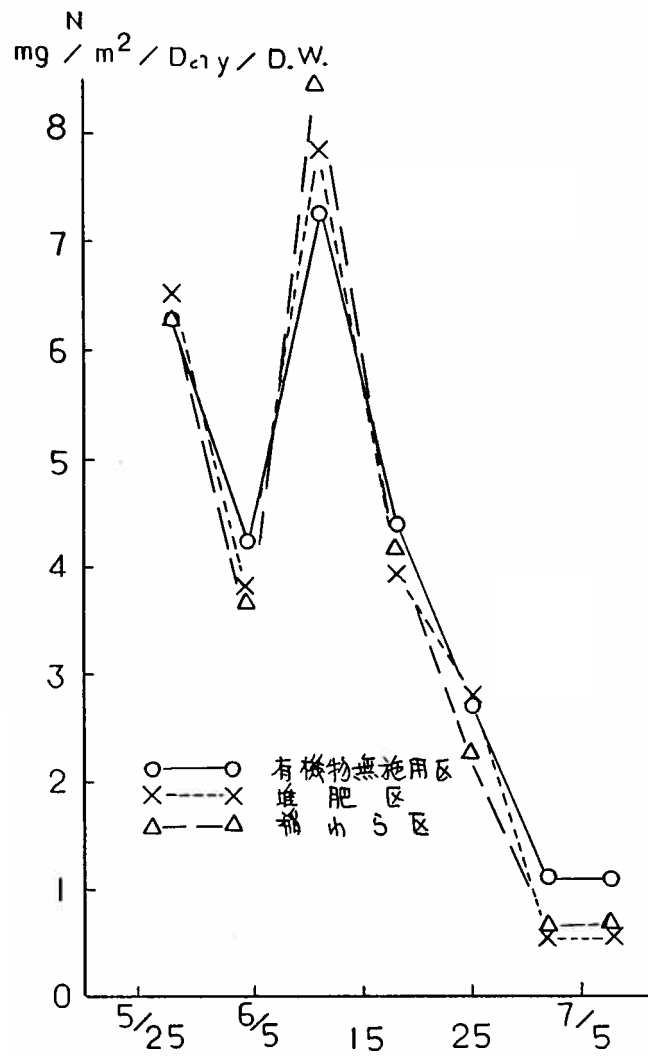
たように、積算有効温度示数との関係で、指数回帰式と一次回帰式によって示され(第3-4図)、両式の交点は、土壤アンモニアが消失する時期ならびに最高分けつ期と一致する。

一方、福島県内の3圃場の水稻による窒素の吸収経過をみると、6月中の窒素吸収は指数的に増加するのに対して、7月以降の吸収は、ほぼ直線的に増加する。窒素吸収が指数的に増加する時期は、土壤アンモニアが豊富にあり、土壤アンモニアは水稻の窒素吸収に対する制限因子とはならず、基数は急速に増加する。これに対して、窒素吸収が直線的に示される時期は、土壤アンモニアがほぼ消失する時期からはじまり、水稻は地力窒素のみを吸収する段階である。従って、この段階では、分けつが指数的に増加するのに必要な窒素の供給が不可能となるはずである。そこで、水稻の窒素集積量と体内濃度との関係について検討する。

福島県内の²圃場における水稻の窒素集積量を第3-18^{表(194)}図に示した。ここでいう窒素集積量とは、1日当りの水稻乾物1g当りの窒素吸収量(mg)である。この窒素集積量は、移植後、一時減少する圃場もあるが、いずれの圃場でも6月中旬頃に最大となる。この時期は分けつ盛期と一致する。窒素集積量が1mg以下となる時期を第3-4表に示した。これによるといずれの圃場でも1mg以下となった時期と最高分けつ期はほぼ一致している。この結果も先の木内らの⁽⁷⁾コンクリート枠試験の場合と一致している。さらに水稻の窒素含量を宮城県内と福島県内でみると、1.7%から2.8%にわたり、平均で⁸⁰⁾2.2%となっている。この値は、従来から報告されている最高分けつ期の水稻体内窒素濃度とほぼ一致する。しかし、圃場によって窒素含量にバラつきがみられた。この理由としては、主として茎数の測定ならびに、植物体の分析を一週間おきに実施したことによるものとみられる。な



和3-18回 有機物施用に伴う窒素集積
速度の推移 (本場, 1978年度)



才3-19回 有機物施用に伴う窒素集積速度の推移 (相馬支場, 1978年度)

ぜなら、この時期の水稻窒素^含量は急速に減少する事、また各圃場ともかならずしも正確に最高分けつ期のサンプリングを実施したとはいいがたいからである。

以上から、土壤アンモニアは、移植後急速に減少し、圃場によって異なるが、6月下旬ないし、7月中旬にいたってほぼ消失する。この時期までは、水稻は豊富な土壤アンモニアを吸収し、旺盛な分けつを行なう。土壤アンモニアが消失する前後から、水稻の窒素吸収は主として、地力窒素の供給に依存することになり、水稻の窒素集積量及び体内濃度は急激に低下する。このため、水稻は最高分けつ期をむかえるものと考えられる。従って、本研究のように宮城県内、福島県内では、水稻の分けつ期は、生育ステージではなく、土壤アンモニア濃度が急激に減少し、そのため水稻の栄養条件が大きく影響を受けることによって決定されると結論される。

2.) 生育中後期の水稻による地力窒素吸収と 地力窒素の無機化

地力窒素の放出量と、水稻による窒素吸収量との関係を検討した例は多くみられるが、その多くは、一定培養期間後の地力窒素放出量と、水稻による地力窒素吸収量との関係を見てみるにすぎない。しかし、土壤アンモニアが充分にある時期、すなわち、東北地方では6月下旬までの、水稻による土壤アンモニアの利用率は不明であるが、基肥窒素の利用率は約30%にすぎない。この事は、初期に放出される地力窒素は、水稻に吸収利用されない部分がかかなり存在する事を示すものである。従って、一定期間培養後の地力窒素放出量と、水稻による地力窒素吸収量とは直接関連付ける事はあつかしい。

一方、すでに明らかにした如く、土壤アンモニアの消失後の水稻による地力窒素の吸収は、放出された地力窒素量を反映しているものとみられる。そこで、ここでは、水稻生育

中期の地力窒素の放出と、水稻による地力窒素の吸収について検討する。

1. 実験方法

栽培方法：1983年度宮城農業センター
—気象科圃場において移植日を5回に分けて
水稲の栽培試験を行なった。移植日は、4月
15日、4月20日、5月2日、5月10日、5月
20日である。基肥として $N : P_2O_5 : K_2O = 6$
: 9 : 7 (g/m^2) を使用した。

試料採取：植物体は約10日毎に採取し、
分析に供した。分析方法その他は前述の通り
である。

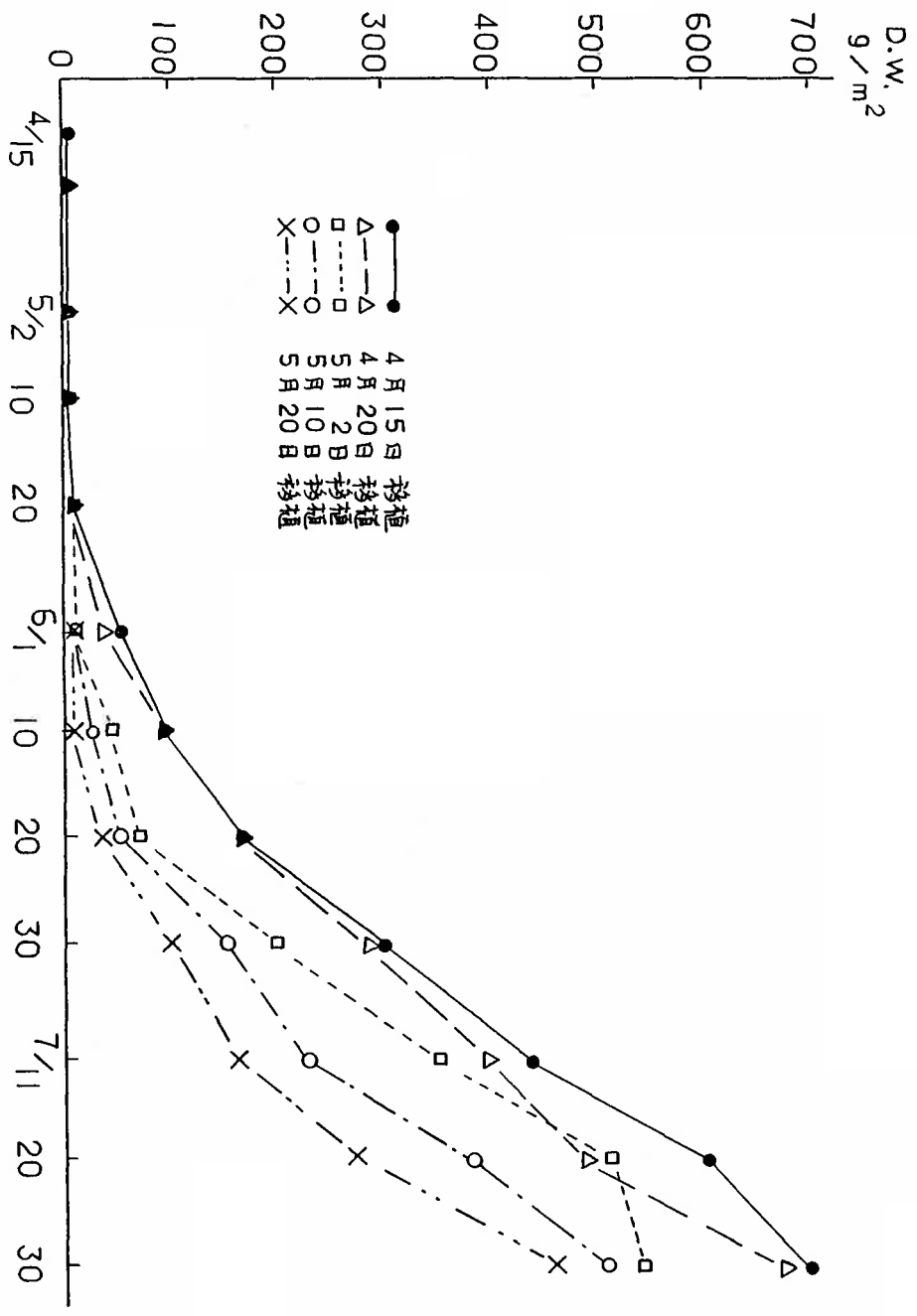
なお、本節では、宮城県の実況試験の結果
もあわせて使用した。

ロ.結果と論議

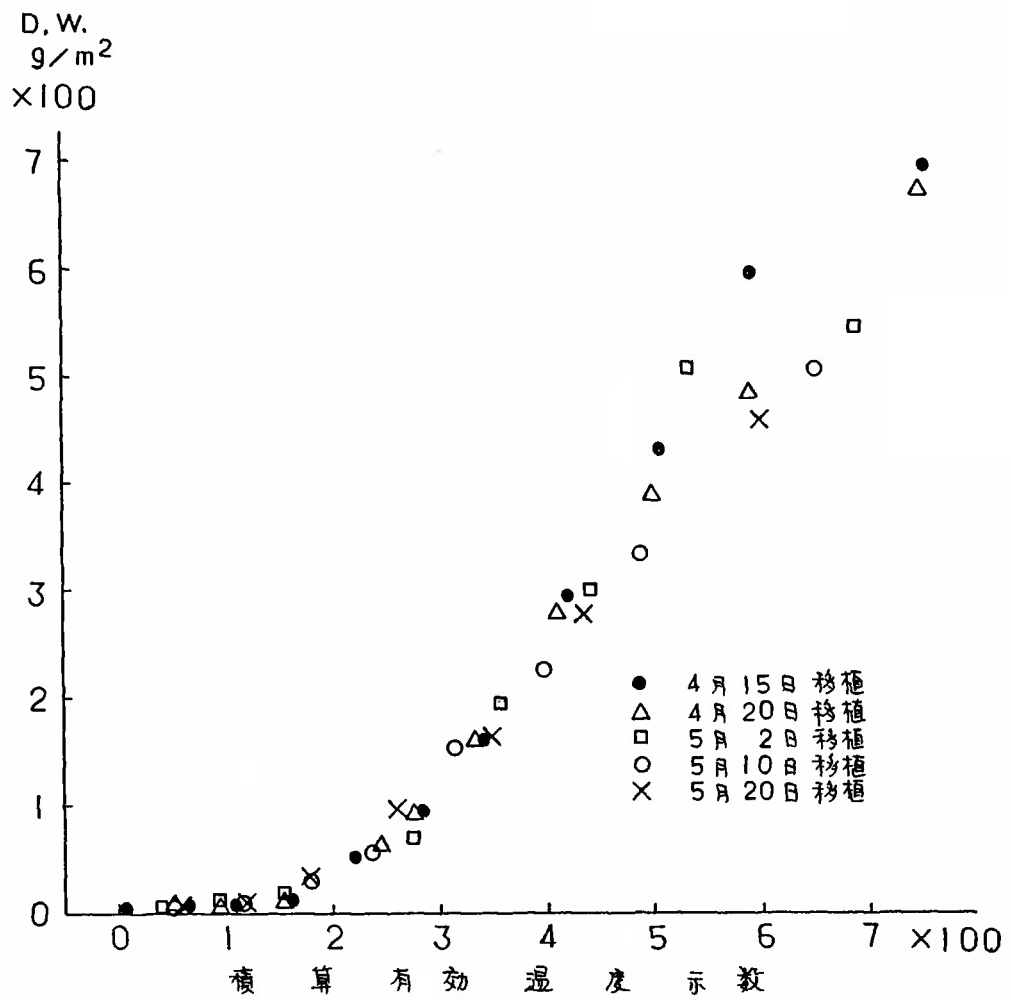
1983年度の気象概況は、気温は4月はやや平年より高く、5月は平年並、6月7月はやや低く経過した。

各移植期毎の乾物重の推移について第3-20図に示した。これによれば、移植期が早ければ早い程、同一暦日における乾物重量は多くなる。この関係を有効積算温度示数²⁷⁾(羽生)の関係でみたものが、第3-21図である。有効積算温度示数を指標に使用すると、既に述べた如く、作期に関係なく、ほぼ同一積算温では同一の乾物重量となる。

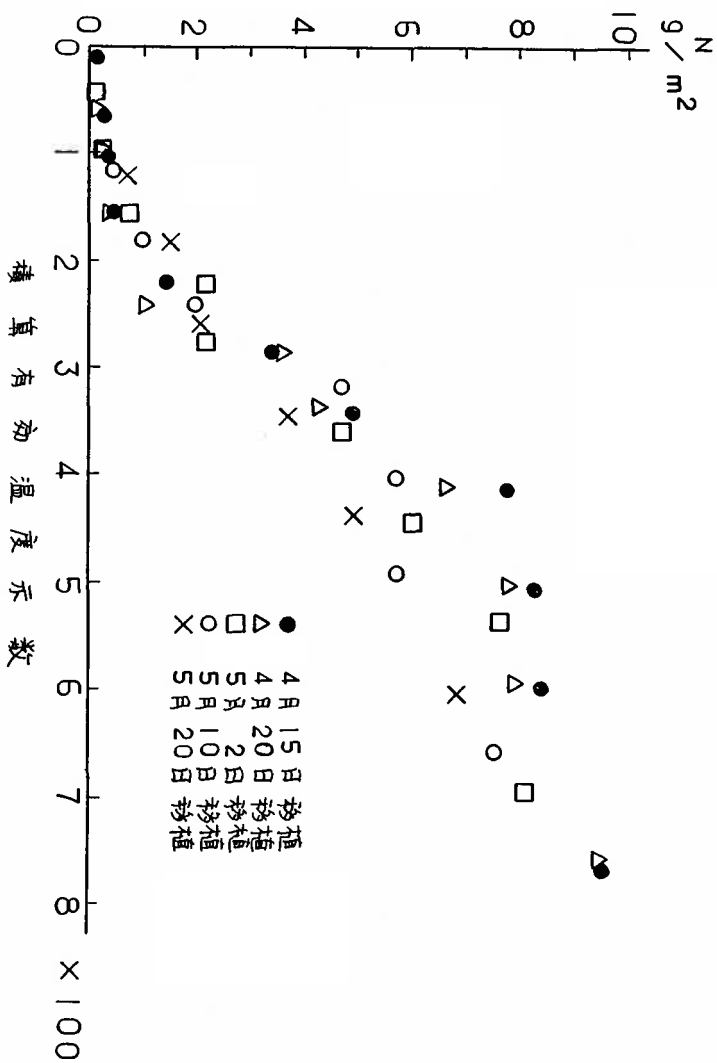
第3-22図には、水稻による全窒素吸収量と羽生の積算有効温度示数²⁷⁾との関係を示した。これによれば、既に述べた様に、生育初期は指数曲線、中後期は直線式で示される。ところで、両式の相関係数をみると、初期は0.964と非常に高いが、中後期は、0.759と初期に比べると低い。第3-4図で示した宮城県内の4圃場の結果をみると、初期と中後期



为3-20图 水稻の乾物重の推移



水3-21図 水稻の乾物と積算有効温度示数



和3-22回 水稻に於る 全窒素吸収量と 積算有効温度示数

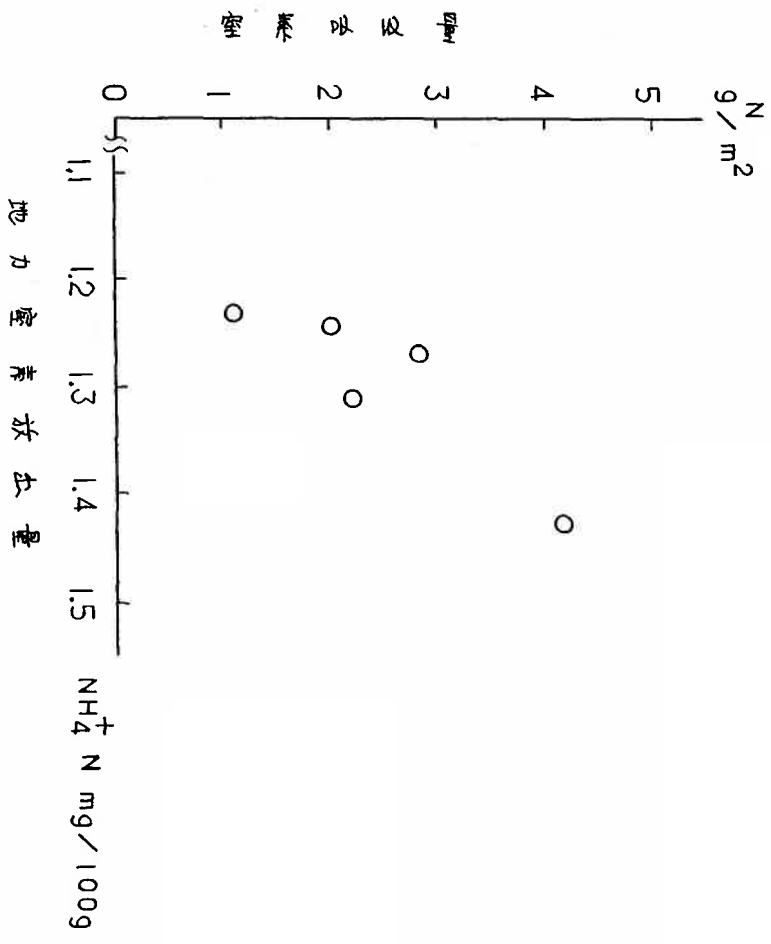
の相関係数は、センター、岩沼ではほぼ同じであるが、古川、愛子では中後期が低い。これらの事は、一つには、羽生の温度に対する重み付けが、水稻生育に対する重み付けであり、²⁷⁾地力窒素の無機化に対する重み付けと異なる事、また、第2章で明らかにした様に地力窒素の無機化が有効温度（ 18°C 変換日数）に対して、直線的でないことによるものと思われる。

そこで、第2章第4節で明らかにした 18°C 変換日数による地力窒素の無機化速度と、水稻による地力窒素の吸収との関係を検討する。7月中の水稻による地力窒素の吸収量を第3-5表に示した。これによれば、移植期が遅くなるに従って、地力窒素の吸収量が多くなる傾向がある。第2章第4節で推定した同一圃場の地力窒素の無機化量から、各移植期の7月中の地力窒素の無機化量と水稻による地力窒素の吸収量との関係を第3-23図に示した。これによれば、水稻生育中期の地力窒

表3-5 水稻 1-53

7月の窒素吸収量

移植期	窒素吸収量
4月15日	1.15g/m ²
4月20日	2.05
5月 2日	2.65
5月10日	2.15
5月20日	4.15



水3-23回 地力窒素放出量と水稻に于る窒素吸収量

(宮城農業センタ一、作期の通山)

素の吸収量と中期の地力窒素の放出量との間には高い相関がある事がわかる。この事は、いずれの移植期であっても、7月中に加わる温度は同一であるので、6月までに加わった温度によって、7月の地力窒素の吸収量が決定される事を意味している。

一方、年次が異なれば、7月中に加わる温度は当然異なる。そして、6月までに加わった温度と7月中に加わる温度の両者が、水稻による中期の地力窒素の吸収量を決定するものとみられる。そこで次に、宮城県農業センターで行なっている作況試験の結果と、地力窒素の放出量との関係を検討する。

第3-6表には、昭和50年から昭和58年までの生育中期の水稻による地力窒素の吸収量を示した。(昭和51年度は、地温のデータがないので省略)。作況試験では、水稻の生育中期以降は、生育ステージにあわせて試料採取を行なっているので、年次により、地力窒素の吸収期間は異なっている。第3-6表によ

表3-6 水稻 1-5区
地力窒素吸收量*

年次	窒素吸收量
1975年	2.96g/m ²
1977	2.30
1978	2.64
1979	3.00
1980	1.70
1981	4.75
1982	1.53
1983	2.91

* 年次1-5区の吸収期間は異なる。

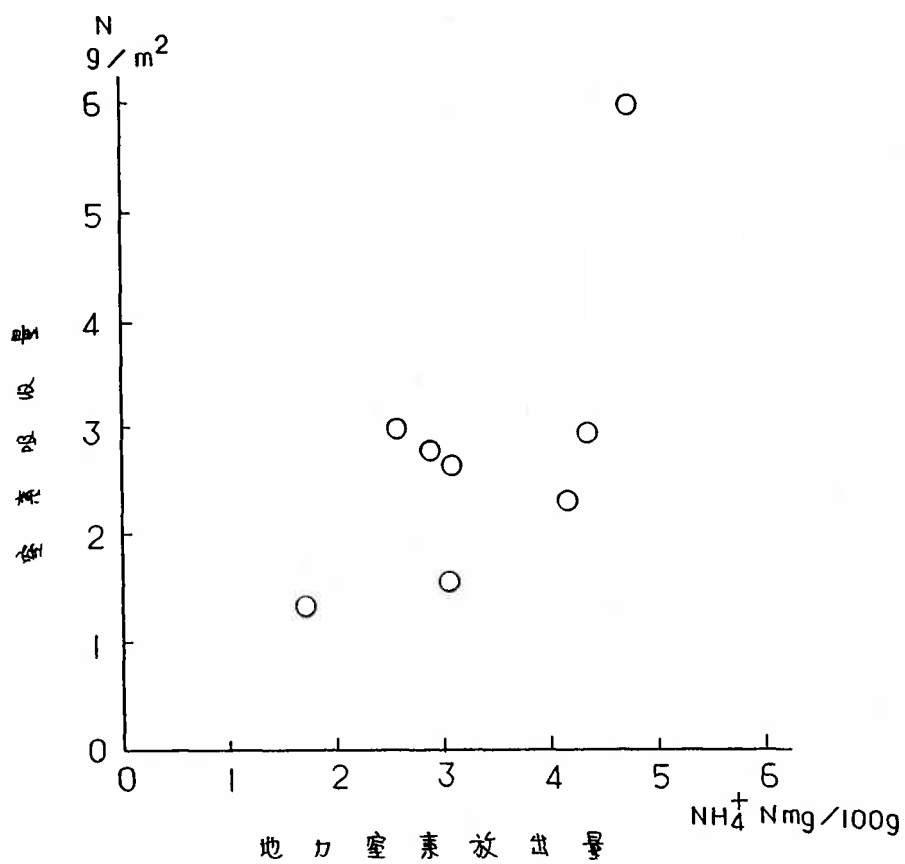
れば、地力窒素の吸収量の多いのは昭和56年度で 4.75 g/m^2 、最も少ないのは昭和57年度で 1.53 g/m^2 で、平均 2.72 g/m^2 、変異係数は34%である。

地力窒素の無機化と活性化エネルギーの関係は、この圃場では $E_a = 48000$ であり、次のような無機化の式が得られている。

$$y = 13.29 \times (1 - \text{Exp}(-0.042x)) + 1.76 \quad (V=47.7)$$

この式により、各年次の生育中期の地力窒素の無機化量を求め、水稻による地力窒素の吸収量との関係を求めたのが、第3-24図である。両者には、密接な ($r=0.737$)、直線的な関係がある事が示されている。

ところで、気象科及び作況の圃場での水稻による地力窒素の吸収量と地力窒素の放出量との回帰係数はしより小さく、地力窒素の放出量の評価が実際の水稻による吸収量より過少評価されている。この原因については不明であるが、圃場における水稻による地力窒素の吸収量と培養実験による地力窒素の放出量



才3-24回地力窒素放出量と水稻による

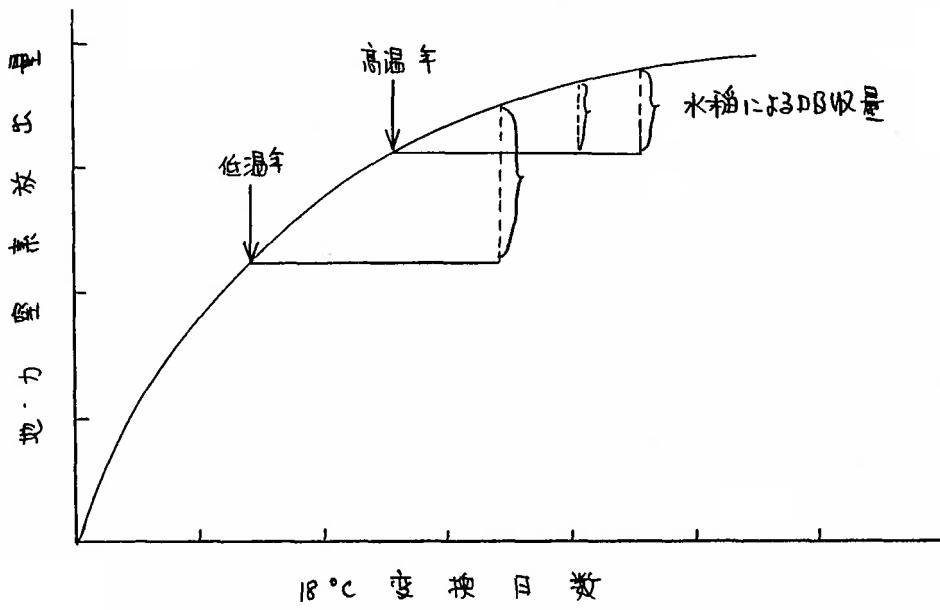
窒素吸収量 (官成農業センター、作試圃)

の差の原因は、次のように考えられる。

まず第一に、圃場は開放系であり、無機化したアンモニアは、水稻による吸収作用の他に溶脱、脱窒等の作用を受ける。この様な系での地力窒素の無機化は、土壤アンモニアがきわめて低レベルの条件で行なわれる。一方培養実験では、閉鎖系であるので無機化したアンモニアが系内に残存するためにアンモニアの地力窒素の無機化に対する集積効果がみられる²⁵⁾。第二に、作土層の厚さは10 cmとして計算しているが、実際の圃場では、圃場によって異なるが12 cm程度であるので地力窒素の作土層での無機化量が過少に評価される。第三に、水稻根は下層まで伸長するので、量的には多くないが下層土からのアンモニアも吸収する⁸¹⁾。

いずれにしても、培養実験による地力窒素の無機化量と水稻による地力窒素の吸収量との間には相関があり、両者の回帰係数は、圃場固有の値となる。これを模式的に示したの

が第 3 - 25 図である。初期が低温年の時には、 18°C 変換日数が少なく、地力窒素の無機化過程では、立ちあがりの部分に 6 月 30 日が位置する。これに対して、高温年では、易分解性部分の分解が終了し、地力窒素の放出が緩慢になった所に位置する。そのため、7 月中の温度が同一であっても低温年では易分解性の窒素が残存するので地力窒素の放出量は多くなる。初期の温度が同一であっても 7 月中の温度が異なる場合には、当然高温条件の時の方が地力窒素の無機化量が多くなる。この様に 7 月中の水稻による地力窒素の吸収量は、6 月までの温度と 7 月中の温度の両者が関係する事は明らかである。



相-25 地力窒素放出量の模式図

まとめ

土壤アンモニアの挙動と水稻の初期生育、特に水稻の莖数の推移との関係を、宮城県内及び、福島県内の圃場について検討した。また、水稻生育中期の地力窒素の吸収量と18℃変換日数による地力窒素の放出との関連を、作期及び年次をかえて検討した。

1.) いずれの圃場でも、土壤アンモニアが消失する時期に、水稻は最高分けつ期をむかえた。この時の水稻の窒素濃度は約ふゑ%であった。また水稻の1日当り1g乾物当りの窒素集積量が1mgより低下すると最高分けつ期となる。これらの結果は、水稻の最高分けつ期は、水稻の生育ステージではなく、窒素栄養条件に支配される事を示すものである。

2.) 水稻生育^中期の地力窒素の吸収量と培養実験により求めた、同期間の地力窒素放出量との間には高い正の相関が認められた。18℃変換日数と地力窒素放出の関係は指数式で示されるので、水稻生育中期の地力窒素の放出

量は、生育初期及び中期の温度に支配される事が明らかとなった。

第4節 水稻による追肥窒素の吸収

水稻による追肥窒素の吸収については、最近庄子等⁴¹⁾、Savant⁵⁶⁾らによってまとめられている。それによれば、水稻による追肥窒素の利用率は、出穂期までは追肥時期が遅い程高くなり、利用率は約50%程度である。一方、東北地方の追肥窒素の利用率も平均で約50%程度である⁴¹⁾。これらの報告は、全て利用率についてだけ検討したものである。追肥窒素に関する研究は、これ以外では吸収経過や水稻体内分布を検討したものもみられる⁵⁸⁾。

追肥窒素の水稻による吸収利用は、土壌中の追肥窒素の挙動と密接に関連する。しかし、従来の研究は前述^{41, 56, 58)}の如く、利用率ないし体内分布に注目する研究であるので、土壌中の追肥窒素の挙動と関連させたものはほとんどみられない。特に利用率は、各種要因、例えば水稻の生育状況、脱窒その他に強く影響されるものとみられ、土壌中の挙動と水稻による吸収を経時的かつ定量的に把握する事は

栽培上重要と思われる。

そこで、本節では、水稻による追肥窒素の吸収経過を明らかにし、土壌中の追肥窒素の挙動との関連を明らかにする。

1. 実験方法

第2章第3節と同様である。

0. 結果と論議

第3-26図には、水稻によって吸収された追肥窒素の経時的变化を、1982年度及び1983年度の幼形期追肥について示した。これによれば、水稻によって吸収される追肥窒素は、追肥当日は少なく、2日目から急速に吸収をはじめ、追肥後約10日で追肥窒素の吸収は終了する。和田等⁵⁾によれば、追肥窒素の水稻による全吸収量の90%の吸収は、追肥後1週間程度で終了するという。本実験でも、約7日で、全吸収量の80~90%の吸収が終了した。

1982年度と1983年度では、追肥窒素の吸収経過がやや異なる。すなわち、1982年度は、1983年度に比べて追肥後2日目から4日目の追肥窒素の吸収量が多い。兩年の気象条件をみると、追肥後7日間の平均気温、平均日射量は、1982年は 20.5°C 、 $9.4 \text{ MJ}/\text{m}^2$ で、1983年は 22.5°C 、 $14.1 \text{ MJ}/\text{m}^2$ である。気象条件からみるかぎりにおいて

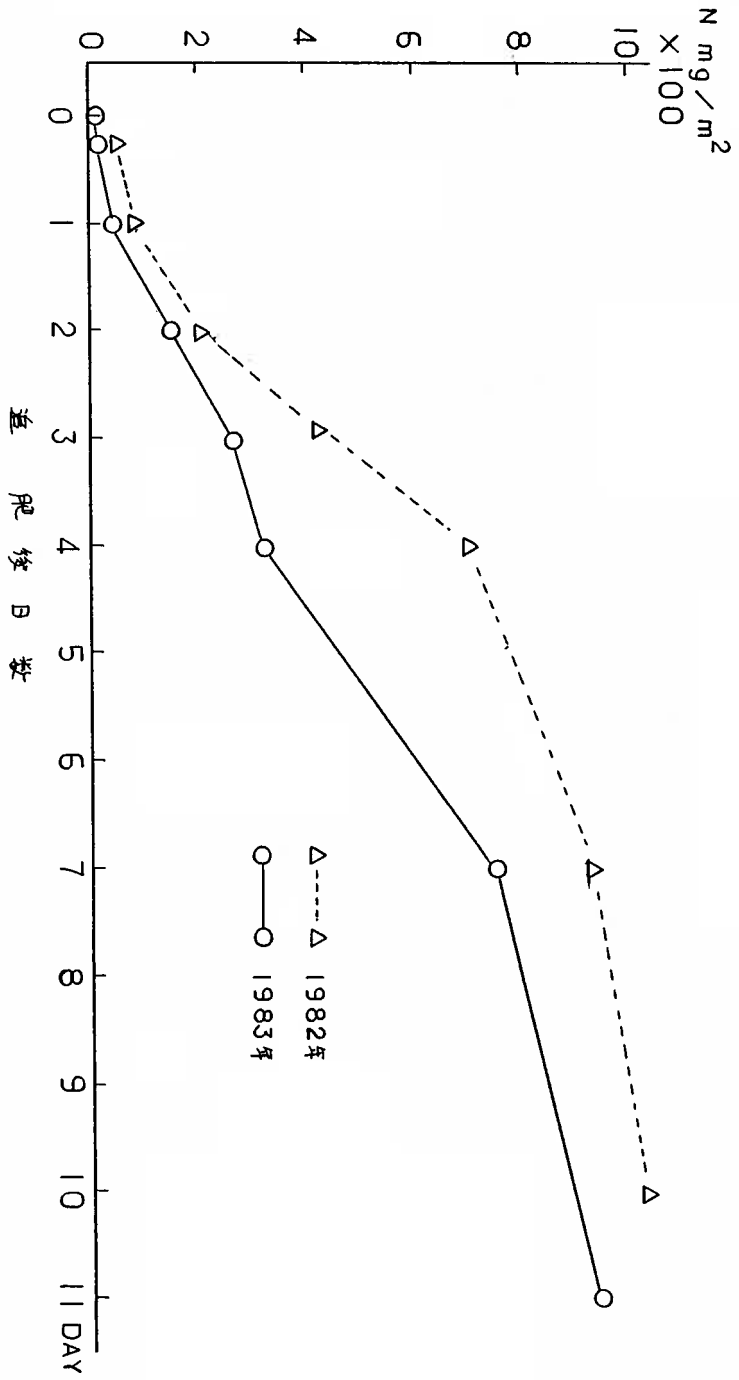


图 3-26 水稻による追肥窒素の吸収

は、1983年度の方が追肥窒素の吸収には有利と思われる。

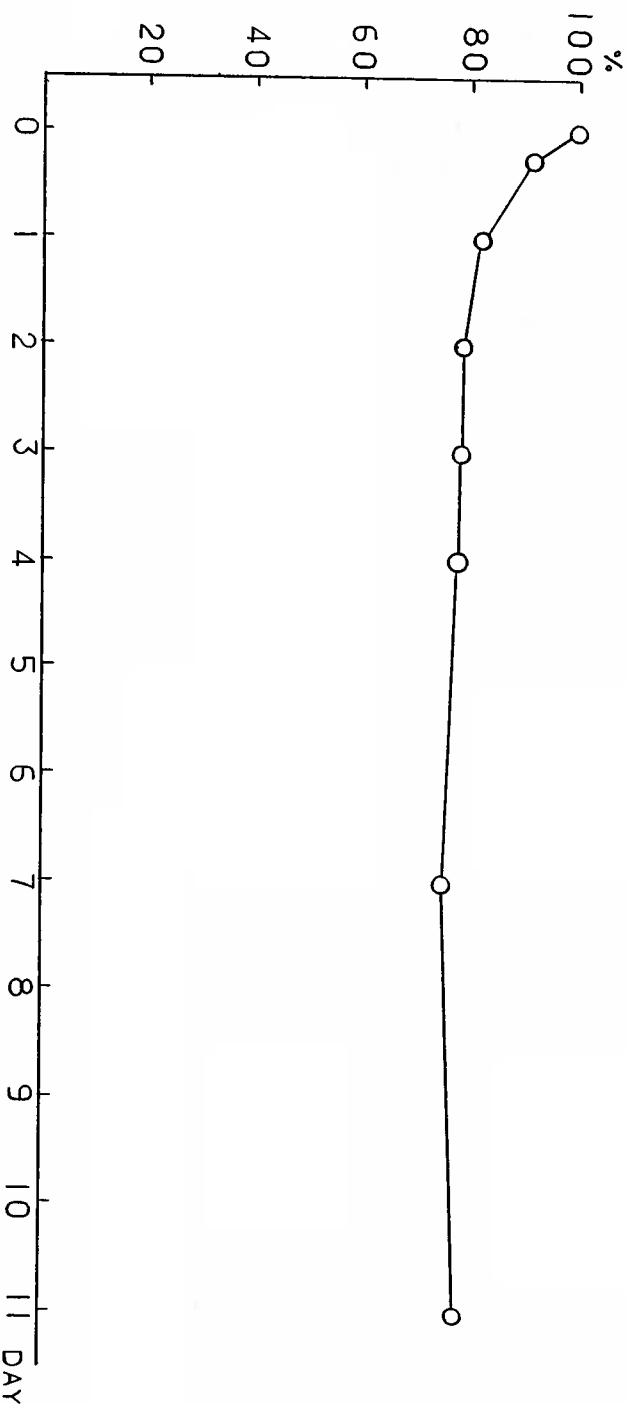
一方、水稻の生育量をみると、追肥直後の乾物量には差がみられなかったが、体内窒素濃度は、1982年度は1.06%、1983年度は2.16%と大きな違いが認められた。1982年度は、生育初期の土壤アンモニア

の消失時期が6月20日前後であるのに対し、1983年度は7月上旬であった。また、1982年度と1983年度は基肥量が1983年度の方が多い。この消失時期及び基肥量の違いが、水稻体内窒素濃度の違いを生じさせたものとみられる。そして、水稻体内窒素濃度の違いが、追肥窒素の吸収速度に違いを与えたものとみられる。

第2-12図の土壤アンモニアの減少と水稻による窒素の吸収経過とはよく対応する。すなわち、水稻による追肥窒素の吸収の早い1982年度は、土壤アンモニア減少が早い。

また、第3-27図には、1983年度の追肥窒素の回収率を示したが、追肥窒素の回収率は、追肥後2日目頃からほぼ一定となる。これらの事より、土壤アンモニアの減少は、主として水稻の吸収によるものとみられる。第2-11図^(表2-12)で示した様に追肥当日の土壤アンモニアは、田面水から作土表層に急速に移行する。また、作土層0~1cm部位と1~4cm部位を比べると、作土層の追肥窒素の90%以上が0~1cm部位に存在する。これらの事より、水稻の追肥窒素の吸収は、作土表層0~1cmで大部分が行なわれる筈である。この事は、土壤のCECが大きく、かつ透水性が小さい事が大きく関係している。

水稻による追肥窒素の利用率は1982年度幼形期追肥、出穂期追肥、1983年度幼形期追肥でそれぞれ、51.8%、45.1%、47.5%であり、有意な差はみられなかった。庄子⁴⁾等によれば、東北地方の追肥窒素の利用率の平均は約50%であり、本実験の結果もこれと



追肥後日数

为3-27日追肥窒素回收率推移

一致した。本実験では前述の如く、追肥窒素の吸収経過が、1982年度と1983年度の幼形期追肥では異なっていた。それにもかかわらず、追肥窒素の利用率に違いがみられなかった理由は以下の様に考えられる。

本圃場では、CECが高く、土壌によるアンモニアの吸着は強いものとみられる。また、本圃場の日減水深は0.3 cm/日程度であるので、下層への移行も比較的少ないとみられる。事実、作土表層0~1 cmに存在したアンモニア量は土壌中に存在するアンモニア量の85~90%に達していた。このような圃場では、作土層に存在するアンモニアは安定に存在し、水稻によって利用されるものとみられる。これに対して、土壌によるアンモニアの吸着能の低い圃場では、作土層のアンモニアは拡散によって酸化層へ移行し、脱窒する事が考えられる。⁸²⁾このような圃場では、水稻の追肥窒素の吸収速度は、追肥窒素の利用率を左右するものとみられる。つまり、追肥窒素の吸収速

度の遅い年次は脱窒量が多くなり、追肥窒素の利用率の低下をきたすものとみられる。

追肥窒素の回収率を第3-27図に示したが、追肥窒素の回収率は、追肥直後から減少し、追肥後3日目で約79%となり、その後はほぼ一定となった。本圃場では、土壌中のアンモニアの挙動(第2-12図)で示した様に、追肥窒素の下層への移行は少ない。従って、未回収部分の大部分は、脱窒、揮散により消失したものとみられる。

水田からの脱窒量を直接測定した報告⁸³⁾によれば、脱窒量は基肥だけの場合、1作で0.8 kg/aであり、稲作期間中大きな変化がなかった。稲作期間を120日とすると、1日当りの脱窒量は 70 mg/m^2 となる。一方、本実験の田面水のpHよりやや低いpH6.5の条件で、ガスライシメーターによるアンモニア揮散量は $70 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ であった。⁸⁴⁾本実験では、追肥窒素の未回収量は追肥1日後で 300 mg/m^2 であり、上述の報告の合計量より多い。

これは、本実験では、追肥により多量の窒素が施用されたために、脱窒量が増大したこと、また風によって、水田直上部のアンモニアガスの除去がアンモニア揮散量を増大させたためとみられる。

まとめ

水稻による追肥窒素の吸収経過と土壤中の追肥由来アンモニア態窒素の挙動の関係を、穂肥及び実肥について検討した。

1.) 水稻による追肥窒素の吸収は追肥後7~10日でほぼ終了した。水稻による追肥窒素の吸収経過は、年次によって異なっており、この原因としては、気象条件の違いより追肥時の水稻の体内窒素濃度が挙げられた。しかし、いずれの追肥時期でも追肥窒素の利用率は約50%でほぼ同じであった。

2.) 水稻の追肥窒素の吸収は、作土表層(0~1 cm)で、大部分が行なわれるものとみられた。これは、本圃場では、日減水深が小さく、CECが高いため、追肥由来アンモニア態窒素の大部分が作土表層に分布するためである。また、土壤中の追肥由来のアンモニア態窒素の減少は、水稻による吸収と対応していた。

3.) 追肥窒素の回収率は約75%であり、追肥

後3日目からほぼ一定となった。未回収部分の大部分は脱窒、揮散により消失したものとみられる。追肥窒素の脱窒・揮散量は、追肥後1日目で 300 mg/m^2 であった。

第5節 土壤アンモニア及び水稻の窒素吸収の変異

1.) 土壤アンモニアの変異

前章までは、比較的狭い範囲でなるべく均一系にした条件下での土壤アンモニアの挙動及び水稻による窒素吸収について検討してきた。しかし、水田土壤中には刈株などの有機物残渣の存在、代かきの不均一性などによって、地力由来や施肥由来のアンモニアの不均一な分布が予想される。

和田⁸⁵⁾は、水田土壤に特徴的な微生物の存在を検討し、硫酸還元菌の分布が有機物の周辺で多い事、マンガン酸化菌は分解程度の低い植物遺体上に分布することを明らかにしている。一方、樋口⁸⁶⁾らは、水田の地力窒素の不均一性を検討し、全窒素、全炭素の変動係数は5%以下である事、培養窒素の変動係数は12%以下であることを明らかにしている。これらの結果は、土壤窒素の無機化の変動は少ない事を示すものである。一方、施肥された圃場

での土壌アンモニアレベルの変動を検討した事例は見られない。

そこで本節では、稲作期間中の水田作土層の土壌アンモニアの分布について検討した。

なお、本節では、各由来別アンモニアを明確にするために、前節までに使用していた

土壌アンモニア、基肥アンモニア、地力アンモニアを各々、全アンモニア、基肥由来のアンモニア、地力由来のアンモニアとした。また本節で土壌アンモニアを使用する場合は、各由来別アンモニアの総称とした。

1. 実験方法

供試圃場は、宮城県農業センター及び岩沼泥炭地試験地の圃場である。供試圃場の理化学性は第2章に示した通りである。試験は1981年度と1982年度の両年度行なった。

試験区は、1981年度は $2.1 \times 1.8 \text{ m}$ 、1982年度は $1.5 \times 1.5 \text{ m}$ の木枠を圃場内に埋め込み、重窒素硫酸を施用した。窒素施肥量は、1981年度は、 5 g/m^2 、1982年度は、 2 g/m^2 、 4 g/m^2 、 10 g/m^2 とした。5月上旬に稚苗ササニシキを $30 \times 15 \text{ cm}$ の栽植密度で移植した。その他の栽培方法は、宮城県の標準耕種法で行なった。

試料採取は、1981年度は移植期、6月8日に、1982年度は6月3日、6月10日、6月17日、6月23日に行なった。試料採取は、4株の中心位置から行なった。1981年度は一枠より24カ所、1982年度は一枠より10カ所行ない、それぞれ別個に分析を行

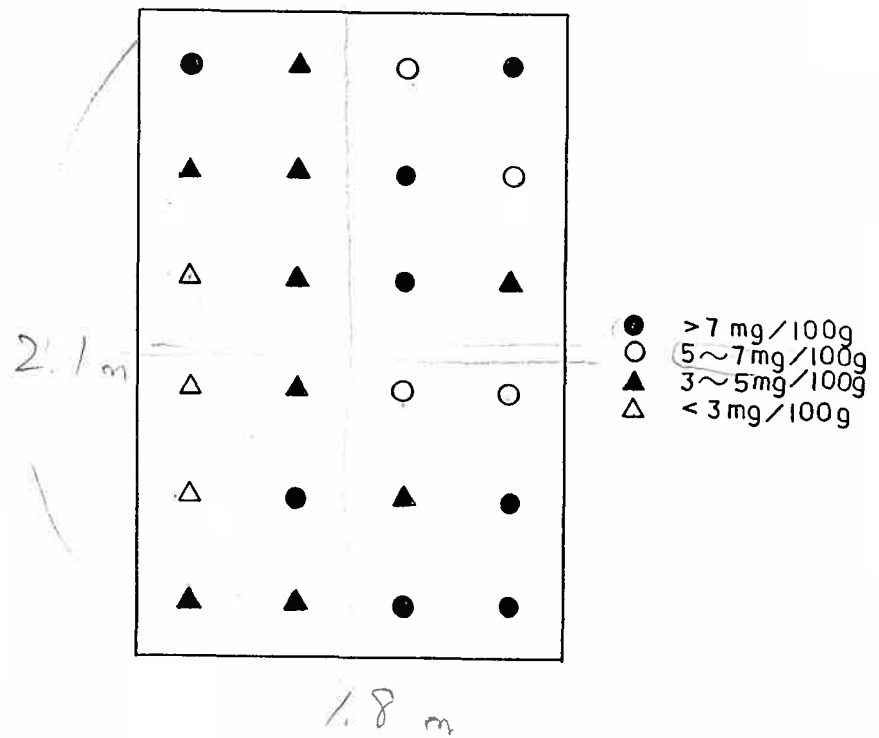
なった。分析法は、第2章第2節と同様である。

ロ. 結果と論議

1981年度と1982年度の6月の気象概況をみると、1981年度は例年に比べると低温であり、1982年度は高温に経過した。

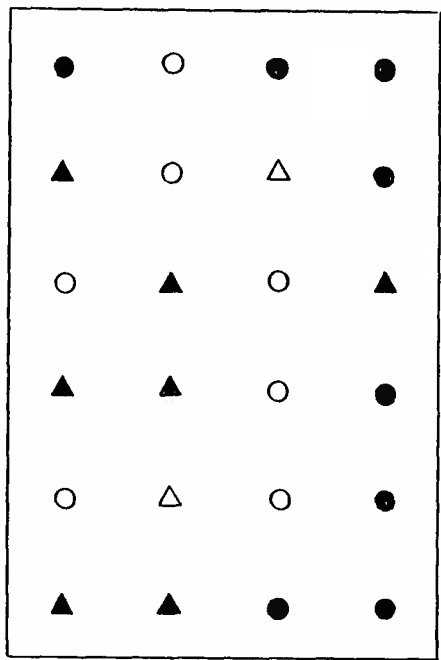
1981年度に調査した土壤の全アンモニアの分布についてみよう。第3-28 ^{表3-29} 図には、移植期の全アンモニアの分布を示した。センター圃場についてみると、全アンモニア量が 3 mg/100g soil 以下の箇所が24カ所中3カ所、 7 mg/100g soil 以上の箇所が7カ所と変異が大きい。同様に岩沼圃場でも 4 mg/100g soil 以下が24カ所中2カ所、 8 mg/100g soil 以上が8カ所であった。この様に水田土壤中では、全アンモニアは移植期から大きな変動を示している事は明らかである。以下において、この原因について検討する。

第3-7表には、センター、岩沼両圃場の移植期の全アンモニア、基肥及び地力由来のアンモニア、アンモニア中の基肥由来アンモ



为3-28图 土壤アミノニアの分布

(農業センター園場, 秋収期, T-2)



- > 8 mg / 100g
- 6 ~ 8 mg / 100g
- ▲ 4 ~ 6 mg / 100g
- △ < 4 mg / 100g

表3-29 土壤アンモニアの分布
(岩沼圃場, P-2)

表3-7 土壤中の全アミノ酸、基肥由来、
地方由来アミノ酸の変異(移植期)

平均 変異 係数 %	全NH ₄ ⁺ -N量(a) mg/100g		基肥由来NH ₄ ⁺ -N量(b) mg/100g		地方由来NH ₄ ⁺ -N量 mg/100g		b/a × 100 %
	T-1	T-2	T-1	T-2	T-1	T-2	
4.90	6.48	4.67	6.37	0.22	0.10	95.1	98.6
10.51	20.52	10.51	20.52	0.41	0.33	100.0	100.0
2.86	1.26	2.53	1.10	0.00	0.00	85.9	87.1
34.7	66.9	38.9	68.7	63.9	102.0	5.0	5.3

岩沼圃場

平均 変異 係数 %	P-1		P-2		P-1		P-2	
	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2
8.51	8.70	6.86	6.70	1.32	1.70	83.5	79.2	
10.94	12.27	8.95	10.67	1.70	2.91	97.8	87.1	
6.33	5.43	4.82	3.63	0.19	1.05	76.1	66.8	
29.1	21.6	20.3	24.3	27.6	23.3	6.1	7.3	

* 変異係数(%)

ニアの割合の各々の平均、最大、最小、変異係数について示した。表中では、同一試験で2反復（センター圃場をT-1, T-2, 岩沼圃場をP-1, P-2とする）の実験を行ない、各々について示した。移植期のセンター圃場についてみると、T-1とT-2の全アンモニアの平均値が $4.90 \text{ mg}/100\text{g}$ と $6.48 \text{ mg}/100\text{g}$ と差がある。全アンモニアの範囲をみると、T-1では $7.65 \text{ mg}/100\text{g}$, T-2では $19.26 \text{ mg}/100\text{g}$ といずれの場合でも非常に大きい。その結果、変異係数もT-1で35%, T-2で67%と大きくなっている。T-1とT-2では本来同一試験であるので平均値は同じになるはずであるが、変異が大きく、試料採取箇所による差が大きいため、異なる値となったものとみられる。

岩沼圃場の移植期について、全アンモニアの平均値をみると、P-1, P-2で各々 $8.51 \text{ mg}/100\text{g soil}$, $8.70 \text{ mg}/100\text{g soil}$ でほとんど差がみられない。変異係数を見ても、各々29.1%, 21.6%で通常の栽培試験における水稻の窒素吸収

量の変異係数に近い。

センターと岩沼の土壌を比較すると、センター土壌は有機物含量が少なく、粘土含量が多い。この為、乾燥すると固い大きな塊を形成し、水分を与えても容易に泥状化しにくい。一方、岩沼土壌は有機物含量が高く、乾燥後に水分を与えると容易に泥状化する。この両者の違いが、作土中の全アンモニアレベルの変異係数の違いをもたらしているものとみられる。

後述する様に、全アンモニアと基肥由来アンモニアの相関が高い事からも、上述の全アンモニアの変異に対して、基肥由来アンモニアの分布が密接に関与している事は明らかである。

移植期の全アンモニアに占める基肥由来アンモニアの割合は、センター圃場では95~98%、岩沼圃場では79~83%であった。基肥由来のアンモニアの全アンモニアに占める割合の変異係数は5~7%と小さい。これは、移

植期の地力由来のアンモニアの絶対量が、基肥由来のアンモニア量の絶対量に比べて小さいためである。センター圃場と岩沼圃場では、基肥由来のアンモニアの全アンモニアに占める割合に違いがみられる。これは、岩沼圃場での地力窒素由来のアンモニアが多いためである。

岩沼圃場では、移植期に地力由来のアンモニアが 1.5 mg 程度存在し、センター圃場では 0.2 mg 程度しか存在しない。岩沼圃場がセンター圃場に比べて、地力由来アンモニアが高い値を示す原因の一つには、アンモニアの表示法が考えられる。通常、土壌アンモニアの表示は、 100 g 乾土当りの mg で示す。容積当りの乾土量で見ると、岩沼圃場は泥炭土壌であるので、その容積重は小さく、 100 ml 当りの乾土量は 66 g であった。一方、センター土壌では、 100 ml 当り 100 g である。従って、単位容積当りの地力由来のアンモニア量は、岩沼圃場の移植期では $1.0 \text{ mg}/100 \text{ ml}$ 、センター圃場の

それは $0.2\text{mg}/100\text{ml}$ となり、その差は 100g 乾土当りよりも小さくなる。これでもなお、岩沼圃場はセンター圃場の5倍のアンモニア態窒素を保持している事になる。

岩沼土壤は前述の如く、有機物含量が高い事から、地力窒素の発現量がセンター土壤に比べて多い。そして、移植前に入水する事によって、岩沼土壤では地力窒素が発現し、この結果として、センター土壤に比べて移植期から地力窒素量が多くなったものとみられる。

基肥由来のアンモニアは、その絶対量及び変異係数は、全アンモニアのそれとほぼ同様である。

6月8日のセンター圃場と岩沼圃場の全アンモニア、地力及び基肥アンモニア、全アンモニアの基肥由来割合を第3-8表に示した。地力由来のアンモニアを除いて、いずれの項目でもその平均値は移植期に比べて減少している。この結果は第2-1図と同様である。

表3-8 土壤中の全アミノ酸、基肥由来、地力由来アミノ酸の変異(6月8日)

	全NH ₄ -N量(a) mg/100g		基肥由来NH ₄ -N量(b) mg/100g		地力由来NH ₄ -N量 mg/100g		b/a × 100 %	
	T-1	T-2	T-1	T-2	T-1	T-2	T-1	T-2
平均値	2.66	3.00	1.92	2.12	0.74	0.88	68.1	67.3
最大値	6.30	5.40	5.30	3.98	1.06	1.48	84.1	81.3
最小値	0.69	0.95	0.25	0.44	0.44	0.45	36.8	38.1
変異係数	47.2	41.0	58.5	50.3	21.8	23.8	15.8	15.3

	炭沼圃場			
	P-1	P-2	P-1	P-2
平均値	6.87	6.69	4.37	4.09
最大値	13.11	9.13	8.03	6.18
最小値	4.33	2.98	2.17	1.27
変異係数	31.2	20.2	42.5	27.9

	P-1		P-2	
	P-1	P-2	P-1	P-2
平均値	61.9	60.1	61.9	60.1
最大値	75.5	69.1	75.5	69.1
最小値	54.0	42.5	54.0	42.5
変異係数	10.9	10.4	10.9	10.4

* 変異係数(%)

。各項目の変異係数をみると、センター圃場では全アンモニアと基肥由来割合は大きくなっており、地力由来のアンモニアは小さくなっている。岩沼圃場では、基肥由来のアンモニアの変異係数が大きくなっている。一方、センター圃場の基肥由来のアンモニアの変異係数は、移植期と6月8日でほぼ同じである。(この傾向は6月23日も同様である。)全アンモニア及び基肥由来のアンモニアの変異係数が移植期からほぼ1ヵ月経過しても大きくなるか、ほぼ同じである事は、アンモニアが土壤中であまり移動しない事を示している。移動があるとするれば、濃度が均一になる傾向がみられるはずである。センター土壌と岩沼土壌のCECは、 $28.7 \text{ ml}/100\text{ml soil}$ 、 $30.3 \text{ ml}/100\text{ml soil}$ と大きい事から、アンモニアの大部分は土壌の交換座に吸着保持されている。

第3-9表には、基肥窒素量をかえた時の全アンモニア、基肥及び地力由来アンモニア、基肥由来割合の平均値及び変異係数を経時

表 3-9 土壤中全了シモニ了, 基肥由来
 表 3-9 表 土壤中の全了シモニ了, 基肥由来

地力由来了シモニ了の变化

N-1 平均値 mg/100g CV%	全NH ₄ -N (a)			基肥由来NH ₄ -N (b)			地力由来NH ₄ -N			b/a x 100 ^{*2}		
	6/3	6/10	6/17	6/3	6/10	6/17	6/3	6/10	6/17	6/3	6/10	6/17
N-1 ^{*1} 平均値 mg/100g CV%	1.58	0.98	0.39	0.76	0.26	0.13	0.82	0.60	0.27	46.7	31.0	25.9
N-2 ^{*1} 平均値 mg/100g CV%	29.0	33.6	44.7	39.6	33.1	47.1	21.2	24.7	50.7	14.7	22.8	24.3
N-3 ^{*1} 平均値 mg/100g CV%	1.29	0.60	0.32	0.46	0.14	0.05	0.83	0.45	0.23	35.6	24.1	18.4
	39.1	43.7	40.8	69.3	53.8	53.3	52.8	44.2	46.5	48.3	34.2	43.5
	5.21	3.40	1.22	4.27	2.43	0.70	0.95	1.11	0.52	77.6	69.0	49.0
	45.4	37.0	71.6	56.1	44.7	92.2	32.4	51.8	46.3	14.8	16.0	27.8

*1 N-1; 標肥区, N-2; 少肥区, N-3; 多肥区
 *2 1% 表示

的に示した。地力由来のアンモニアを除く、各項目の平均値は、基肥量の多い程高い値を示している。例えば、全アンモニアは多肥区で最も多く、次いで標肥区、少肥区の順となっている。この事は、1981年度及び1982年度の結果から、変異係数が大きく、かつ巾が大きくても、区全体としては基肥量に対応する事を示すものである。

出井⁸⁷⁾は、水稻生育期間中の作土層内のアンモニアの分布を検討した。その結果によれば、アンモニアの分布は、稻株からの距離や、作土層の深さによって経時的に変化し、不均一となっている。出井⁸⁷⁾の結果は、水田作土層内で、稻株、深さの影響による不均一性を示しているが、本実験は、稻株からの距離、深さは各試料採取箇所をほぼ同一である。この事は、初期の土壤アンモニアの不均一性は、水稻の吸収による影響ではない事を示すものである。なお、水稻の吸収が旺盛となる時期には、土壤アンモニアは、出井⁸⁷⁾と同様に株直

下は、株間に比べて、低い値を示す(データ省略)。

土壤中の地力由来のアンモニアの分布をみると、その変異係数は、40~120%と大きい。金沢⁸⁸⁾らは、水田土壤の全窒素量の変異係数が10%以内である事を報告している。この事は、ただちに、地力窒素の無機化に伴う地力由来のアンモニアの分布が変異係数で10%以内になる事を示すものではない。地力窒素の無機化の要因、例えば微生物や有機物、土塊の不均一分布などが、地力由来のアンモニアの分布に関与するものとみられる。また、全窒素含量が同一であっても、無機化に関与する窒素量、すなわち第2-14図で示した易分解部分の窒素量が異なる事が考えられる。例えば、樋口⁸⁶⁾らは、全窒素含量の変異係数が、67~5%の各種水田作土層を用い、pH7のリン酸緩衝液で抽出されるアンモニアを検討した。その結果、アンモニアの変異係数は、20.0~60.0と大きかった。これらの事より、水

田作土層内の地力由来のアンモニアの不均一性は、地力窒素の無機化の環境条件の不均一性や作土層内の窒素中の易分解部分の多少によるものとみられる。

全アンモニアの分布の不均一性に関する要因を検討するために、全アンモニアと基肥由来及び地力由来のアンモニアとの相関関係を第3-10表~第3-13表に示した。1981年度は、岩沼、センター圃場ともに、移植期から6月23日まで、全アンモニアと基肥由来のアンモニアとの相関は非常に高い。これに対して、全アンモニアと地力由来のアンモニアの相関は、移植期では、負の相関ないし、相関係数が非常に低い。そして、全アンモニアと地力由来のアンモニアの相関は、時間の経過とともに高くなる。1982年度は、全アンモニアと基肥由来アンモニアの関係は、少肥区では相関係数が小さく、標肥区、多肥区では高い。地力由来のアンモニアとの相関は、少肥区、標肥区でいずれの時期でも高

表3-10 全アンモニアと
基肥由来アンモニアの相関

	移植期	6/8	6/23
P-1	0.965	0.992	0.952
P-2	0.971	0.981	
T-1	0.998	0.997	0.980
T-2	0.999	0.993	

表3-11

全アンモニアと基肥由来
アンモニアの相関関係

	<u>移植期</u>	<u>6/8</u>	<u>6/23</u>
P-1	0.047	0.795	0.950
P-2	0.191	0.726	
T-1	-0.540	0.841	0.702
T-2	-0.401	0.813	

表3-12全アンモニアと窒素比率アンモニアとの相関関係

	6/3	6/10	6/17
N-1	0.980	0.775	0.813
N-2	0.512	0.879	0.440
N-3	0.993	0.978	0.994

N-1; 標肥区
 N-2; 少肥区
 N-3; 多肥区

表 3-13全アミノ酸と地力由来アミノ酸との相関関係

	6/3	6/10	6/17
N-1	0.939	0.905	0.965
N-2	0.781	0.984	0.940
N-3	-0.431	0.349	0.961

N-1 ; 標肥区
 N-2 ; 少肥区
 N-3 ; 多肥区

いが、多肥区では、6月中旬頃まで低い。1982年度の少肥区の全アンモニア中の基肥由来のアンモニアの割合は、6月3日、6月10日、6月17日で、各々35.6、24.1、18.4%と低くなっている。これに対して、1981年度はセンター、岩沼圃場ともに50%以上、1982年度の標肥区ではやや低いが、多肥区では49%以上である。全アンモニアに占める基肥由来のアンモニアの占める割合が高い事が、全アンモニアと基肥由来アンモニアとの相関を高めたものとみられる。これらの事は、6月上旬までの土壌中の全アンモニアの土壌中での分布は、基肥由来のアンモニアの分布に強く支配される事を示すものである。

2.) 水稻による基肥及び地力窒素の吸収の変異

前節で土壤アンモニアの変異について検討し、全アンモニア、基肥由来アンモニアの変異係数が大きい事を示した。土壤アンモニアの分析は点であるのに対して、水稻が窒素を吸収する範囲は広く、水稻の窒素吸収の変異はアンモニアの変異程は大きくない事が予想される。事実柳沢等⁸⁹⁾によれば、水稻の全窒素吸収量の変異係数は20%程度である。

重窒素を利用した圃場試験でしばしば経験される事であるが、水稻の基肥窒素の吸収量は、試験区毎に違いがみられる。精密圃場の試験であってもかなり大きな変異がみられる事から、一般的な栽培条件では、この変異がさらに大きくなる事が考えられる。水稻の吸収する基肥窒素や地力窒素の変異は、水稻の生育に果たす役割を検討する際に重要な要因となる。しかし、従来の報告では、水稻の基肥窒素や地力窒素の吸収量の変異について検討

した例はみられない。

そこで本節では、水稻の吸収する基肥及び地力窒素の変異について検討する。

4. 実験方法

供試圃場、栽培方法は、1) 土壤アンモニアの変異で述べた通りである。水稻は一株毎に採取し、分析に供した。分析に既に述べた方法をこなした。

ロ. 結果と論議

1981年度と1982年度の気象概況は既に記した通りである。1981年度は、土壌アンモニアが、平年に比べて約10日~14日程度遅れて消失した。このため最高分けつ期は7月中旬となった。1982年度は、6月上旬まで比較的高温であり、6月中下旬は比較的低温であった。移植期から6月下旬までの温度をみると、積算有効気温示数²⁷⁾(羽生)では、ほぼ平年並であった。このため土壌アンモニアは6月下旬にほぼ消失し、この時期に最高分けつ期をむかえた。基肥量の違いでみると、少肥区の基数が最も少なく、多肥区で最も多くなった。なお、ここでいう土壌の全アンモニアは、1981年度は24点、1982年度は10点の平均値である。

土壌アンモニアは、既に示した様に変異が大きい。これに対して、水稻の生育は、生育調査区でみると、基数では変異係数が20%前後であった。採取した水稻の形質について第

为3-14表 水稻各形質の变化係数(6月22日)

草丈	茎数	鞘物	空 莖 量	空 莖 量 (a)	莖 肥 量 (b)	地 力 量	a/b
セニ夕一 8.6	26.8	20.9	8.3	20.7	24.8	23.6	9.4
岩 沼 5.8	21.4	21.4	6.4	22.4	27.1	20.3	7.8

为3-15表 水稻各形質の變異係數 (8) (7月 22日)

	草丈	莖數	鞘物	空莖量	空莖 吸收量(a)	莖肥量 吸收量(b)	地力空莖 吸收量	σ^2/b
セニウ一	4.6	22.8	27.1	7.7	29.1	45.3	25.8	21.6
岩沼	4.3	21.1	21.4	7.7	22.9	27.9	22.5	11.9

3-14表、第3-15表に示した。

6月上旬についてみると、センター、岩沼圃場ともに草丈、窒素含有率、全窒素吸収量に占める基肥由来窒素吸収量の割合の変異係数は小さく10%以下である。その他は20~30%の変異係数を示す。7月下旬についてみると、センター圃場の基肥窒素吸収量の変異係数を除いて、6月上旬と同様の傾向がある。

柳沢⁸⁹⁾らによれば、分けつ期の乾物重の変異係数は11.7~34.1%、窒素含有率のそれは2.9~5.5%、そして収穫期の全窒素吸収量の変異係数は25.4%である。本実験では、窒素含有率の変異係数がやや高い傾向にあるが、乾物重、窒素吸収量のそれは、柳沢⁸⁹⁾らの結果と同様であった。

第3-14表及び第3-15表で注目すべき点は、水稻の基肥窒素吸収量の変異係数が、他の形質に比べて大きい事である。既に明らかにした様に、全アンモニア、特に基肥由来のアンモニアの分布の変異は非常に大きい

。この基肥由来のアンモニアは点としての分析であり、水稻の窒素吸収範囲は、土壤の分析に供した部分より広い範囲にわたっている。従って、水稻の吸収した基肥窒素の変異は、土壤中の基肥由来のアンモニアの変異に比べて小さくなるはずである。事実、第3-8表と第3-14表を比較すると、水稻の基肥窒素量の変異係数の方が小さくなっている。

1982年度の水稻の生育及び変異係数について第3-16表に示した。1981年度とほぼ同様の傾向がある。すなわち、各形質の変異係数は、基肥窒素の吸収量の変異係数を除いて20%前後である。各形質の変異の経時的变化を標準区で見ると、茎数、乾物重、窒素含有率、全窒素吸収量では、生育の進展に伴う顕著な変化はみられない。一方、全窒素吸収量中の基肥由来窒素の割合の変異係数は、6月上旬頃10%と低く、徐々に増加しながら、6月中旬頃から25%前後で一定となる。なお、7月30日の基肥由来窒素の割合の変異

水稲の生育と各形質の变化

(1982年富城産米センター)

日付	平均 CV*	株数 本/株	乾物 g/株	葉素量 %	葉素収 mg/株	葉素収 mg/株	地口葉素 mg/株	Q/b × 100 %
6/3	平均 CV*2	15.1	699*1	3.94	27.49	15.64	11.85	56.8
		26.5	22.6	8.1	23.0	25.1	26.3	10.0
6/10	平均 CV	32.3	2.23	2.41	53.56	28.07	25.49	51.4
		16.1	21.2	10.9	23.0	35.5	21.1	15.9
6/17	平均 CV	38.2	3.6	1.97	71.45	30.81	40.64	41.0
		16.1	20.3	12.7	26.5	51.5	18.2	27.1
7/1	平均 CV	41.6	8.0	1.31	105.60	37.99	67.61	34.5
		18.9	20.4	10.4	25.0	43.6	17.9	23.7
7/12	平均 CV	34.2	10.2	1.20	121.68	36.04	86.32	28.9
		16.6	20.3	6.3	21.4	41.9	19.8	26.7
7/21	平均 CV	30.8	10.9	1.11	120.51	28.12	92.75	23.2
		15.2	20.0	9.3	18.8	32.8	19.1	24.8
7/30	平均 CV	31.6	14.9	1.38	204.73	38.74	166.00*3	18.1
		19.4	26.4	15.1	27.3	62.5	25.1	42.4

*1: mg/株 *2: % *3: 追肥葉素収量

係数が大きいのは、7月21日に追肥したためである。基肥窒素の吸収量の変異係数をみると、6月上旬から徐々に増加し、6月中旬に最大となりその後徐々に減少する。基肥窒素の吸収経過は、6月上旬に吸収速度が大きく、その後吸収速度が小さくなり、7月上旬には吸収速度がゼロとなる。吸収速度がゼロとなった以降は、変異係数には変化がみられないはずである。実際には、7月上旬から中旬にかけて変異係数は小さくなる。これは、前節でみられた様に、重窒素試験用の枠間に、全アンモニアの平均値に 違いがみられる事を反映しているものとみられる。

第3-17表には、7月12日における基肥量の違いによる各形質の変異係数を示した。これによれば、基肥量の違いによる各形質の変異係数は差がみられない。

柳沢⁸⁹⁾によれば、水稻の乾物重の変異は、無窒素区に比べて、施肥区でやや大きくなる程度であり、施肥によるバラツキの度合は大

为3-17表 基肥量の 達 1) に 于 3 水稻各形質

の 変異係数 (%)

差数	草物	窒含量	窒素吸収量 (a)	基肥窒素吸収量 (b)	地力窒素吸収量	b/a	
少肥区	16.8	19.4	6.3	19.5	44.3	16.9	29.9
標肥区	16.6	20.3	6.3	21.4	41.9	19.8	26.7
多肥区	18.7	21.0	8.9	26.2	39.2	16.3	14.6

きくないとしている。しかし、既に明らかにした様に、土壤全アンモニア、基肥由来アンモニア及び水稻による基肥窒素吸収量の変異係数は大きい。その反面、水稻の生育は柳沢らの⁸⁹⁾いう変異係数の範囲に入る。この事は、基肥窒素の吸収のバラつきを補償した形で水稻の生育は進むといえる。そこで、次節では、水稻の各個体の生育に果す、基肥窒素及び地力窒素の役割について検討する。

まとめ

稲作期間中の土壌中の全アンモニア、基肥由来、地力由来アンモニア、全アンモニア中に占める基肥由来アンモニアの分布と変異について検討を加えた。そして、全アンモニアの分布の不均一性の原因を明らかにした。さらに、水稻の吸収した全窒素吸収量、基肥由来、地力由来窒素吸収量、全窒素中の基肥由来割合の変異についても検討を加えた。得られた結果は以下の通りである。

1.) 土壌中の全アンモニア、基肥由来アンモニアの変異係数は、移植期から、6月中旬まで20~70%と大きな値を示した。この変異係数の大小は土壌の性質によって大きく左右され、有機物含量の高い土壌では代かきによる泥状化の容易で変異係数が小さい傾向がみられた。

一方、全アンモニアに占める基肥由来アンモニアの占める割合の変異は小さかった。また、地力由来アンモニアの変異は大きく、こ

の原因は、土壤中の有機物の不均一性によるものとみられた。

2) 土壤中の全アンモニアと基肥由来アンモニアの間には高い相関がみとめられた。一方全アンモニアと地力由来アンモニアの間には一定の傾向がみられなかった。この事は、全アンモニアの変異は施肥の不均一性によるものである事を示している。

3) 基肥窒素量施用量の異なる区では、変異係数が大きく、かつ巾が大きくても、区全体の平均値は、基肥量に対応する。

4) 水稻の各形質の変異係数は、基肥窒素吸収量を除いて、約20%前後であった。水稻の基肥窒素吸収量の変異係数は、土壤アンモニアの変異係数より小さく、これは、土壤アンモニアの分析が点であるのに対して、水稻の基肥窒素の吸収が一定の範囲を行なわれるためである。

第6節 基肥及び地力窒素の水稻生育に果たす役割

水稻に吸収された窒素の水稻生育に果たす役割については、従来から多くの研究がなされている。例えば、水稻の全窒素吸収量と水稻の収量との相関が高い事³⁹⁾、穂首分化期に吸収された窒素と節間伸長とは密接に関係している事³²⁾、また一度吸収された窒素は転流によって新器官にも分布する事が明らかにされている事などである。^{40), 70), 71)}

しかしながら、従来の圃場レベルの研究では、施用窒素と地力窒素を区別していないため、基肥窒素、追肥窒素、地力窒素の水稻生育に対する貢献は、ほとんど明らかになっていない。

そこで、本節では、由来別窒素の水稻生育に果たす役割を生育時期別に検討する。

1. 実験方法

供試した水稻は、前節で使用した試料と、1979年度に福島農試本場及び相馬支場で行なった試験の試料である。福島県で行なった試験の供試圃場、施肥量、栽培法は、第2章第3節、第4節で述べた通りである。重窒素硫酸は、 2.1×1.8 mの木枠を圃場内に埋め込み、そこに施用した。水稻試料は7月上旬に採取し、各個体毎に分析に供した。分析方法は第3章と同様である。

また、1984年度にも第2章第2節3)の試験について、枠内16株のうち内側4株を使って検討した。

ロ 結果と論議

1 a) 生育初期

水稻の生育は、伸長的形質と増量的形質に分けられるが、各形質は相互に関連する。そこで形質間の相関係数を第3-18表～第3-23表に示した。1981年度及び1982年度の各形質の相関係数をみると、柳沢ら、本田⁸⁹⁾、山室⁶⁰⁾がすでに明らかにしているように、茎数と乾物重の間には、 0.6 から 0.8 の相関がみられる。一方、草丈と乾物重の間の相関は低い。柳沢ら⁸⁹⁾はこの事実に基づいて、水稻の生育調査、試料採取に対する変異を小さくするため代表株選定法を確立した。

全窒素吸収量と水稻の各形質の関係をみると、全窒素吸収量と最も相関が高いのは乾物重である。その相関係数は 0.9 以上である。初期生育の全窒素吸収量との関係(1982年度)をみても、乾物重との相関係数が最も高い。この事から、窒素の水稻生育に果たす役割をみるための指標として、乾物重が最も有効

水3-18表 水稻各形質の相関関係(6月8日)

宮城県豊田市(1981年度)

草丈	草数	乾物重	空葉台量	空葉 吸收量(a)	基肥窒素 吸收量(b)	地力窒素 吸收量	$b/a \times 100$
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.163	0.163	-0.258	0.144	0.706	0.386	0.545	0.775
0.392	0.609	1.000	0.198	0.926	1.000	1.000	1.000
0.048	0.206	-0.258	0.198	0.706	0.386	0.545	0.775
0.420	0.707	0.917	0.144	1.000	1.000	1.000	1.000
0.436	0.662	0.824	0.193	0.926	1.000	1.000	1.000
0.208	0.486	0.692	-0.011	0.706	0.386	0.545	0.775
0.247	0.208	0.692	0.198	0.294	0.625	-0.455	1.000

表19-3 水稻各形質の相關關係 (6月8日)

岩沼 (1981年度)

草丈	莖數	乾物重	窒素含量	窒素吸收量(a)	基肥窒素吸收量(b)	地力窒素吸收量	$b/a \times 100$
1.000	0.153	0.617	1.000	0.264	1.000	0.737	1.000
0.445	0.445	0.056	-0.013	0.959	0.376	0.899	-0.011
-0.137	0.396	0.574	0.264	0.958	1.000	0.652	0.737
0.396	0.323	0.574	0.264	0.958	1.000	0.652	0.737
0.441	0.441	0.565	0.049	0.899	-0.011	1.000	-0.011
-0.020	-0.020	0.194	0.268	0.417	0.652	0.737	1.000

表 3-20 水稻各因子質の相關關係 (6月3日)

(1982年度)

変数	乾物重	窒素含量	窒素吸収量(a)	基肥窒素吸収量(b)	地力窒素吸収量	$b/a \times 100$
乾物重	1.000					
窒素含量	0.884	1.000				
窒素吸収量	-0.038	-0.089	1.000			
窒素吸収量(a)	0.845	0.937	0.256	1.000		
基肥窒素吸収量(b)	0.811	0.882	0.199	0.921	1.000	
地力窒素吸収量	0.695	0.793	0.270	0.871	0.621	1.000
$b/a \times 100$	0.140	0.112	-0.076	0.072	0.448	-0.418

表 2-13 水稻各形質の相關關係 (6月10日)

(1982年度)

変数	変数	乾物重	窒素含量	窒素 吸収量(a)	基肥窒素 吸収量(b)	地力窒素 吸収量	$b/a \times 100$
乾物重	1.000	1.000					
窒素含量	0.705	-0.177	1.000				
窒素吸収量(a)	-0.075	0.876	0.311	1.000			
基肥窒素吸収量(b)	0.637	0.679	0.489	0.904	1.000		
地力窒素 吸収量	0.539	0.745	-0.194	0.613	0.217	1.000	
$b/a \times 100$	0.458	0.305	0.540	0.563	0.850	-0.285	1.000

水3-22表 水稻各形質の相關關係 (6月17日)

(1982年度)

基 数	基 数	乾 物 重	空 稈 含 量	窒 素 吸 收 量 (a)	基 肥 窒 素 吸 收 量 (b)	地 力 窒 素 吸 收 量	b/a X 100
1.000		1.000		1.000			1.000
乾 物 重	0.820		0.217	0.630	1.000		
空 稈 含 量	0.158	0.217		0.924		1.000	
窒 素 吸 收 量 (a)	0.730	0.890	0.630		1.000		
基 肥 窒 素 吸 收 量 (b)	0.645	0.773	0.648	0.924		1.000	
地 力 窒 素 吸 收 量	0.480	0.614	0.219	0.572	0.216		1.000
b/a X 100	0.498	0.566	0.583	0.722	0.192	-0.110	1.000

表 2-3 水稻各形質の相關關係 (7月1日)

(1982年度)

基 数	基 数	干 物 重	窒 素 含 量	窒 素 吸 收 量 (a)	基 肥 窒 素 吸 收 量 (b)	地 力 窒 素 吸 收 量	$b/a \times 100$
1.000		1.000					
干 物 重	0.712	1.000					
窒 素 含 量	0.402	0.244	1.000				
窒 素 吸 收 量 (a)	0.756	0.912	0.613	1.000			
基 肥 窒 素 吸 收 量 (b)	0.740	0.867	0.582	0.942	1.000		
地 力 窒 素 吸 收 量	0.632	0.798	0.538	0.888	0.682	1.000	
$b/a \times 100$	0.676	0.683	0.507	0.739	0.905	0.372	1.000

である事が明らかである。そこで、以下の検討では、基肥窒素、地力窒素の水稻生育に果たす役割を、乾物生産の観点から検討することにする。

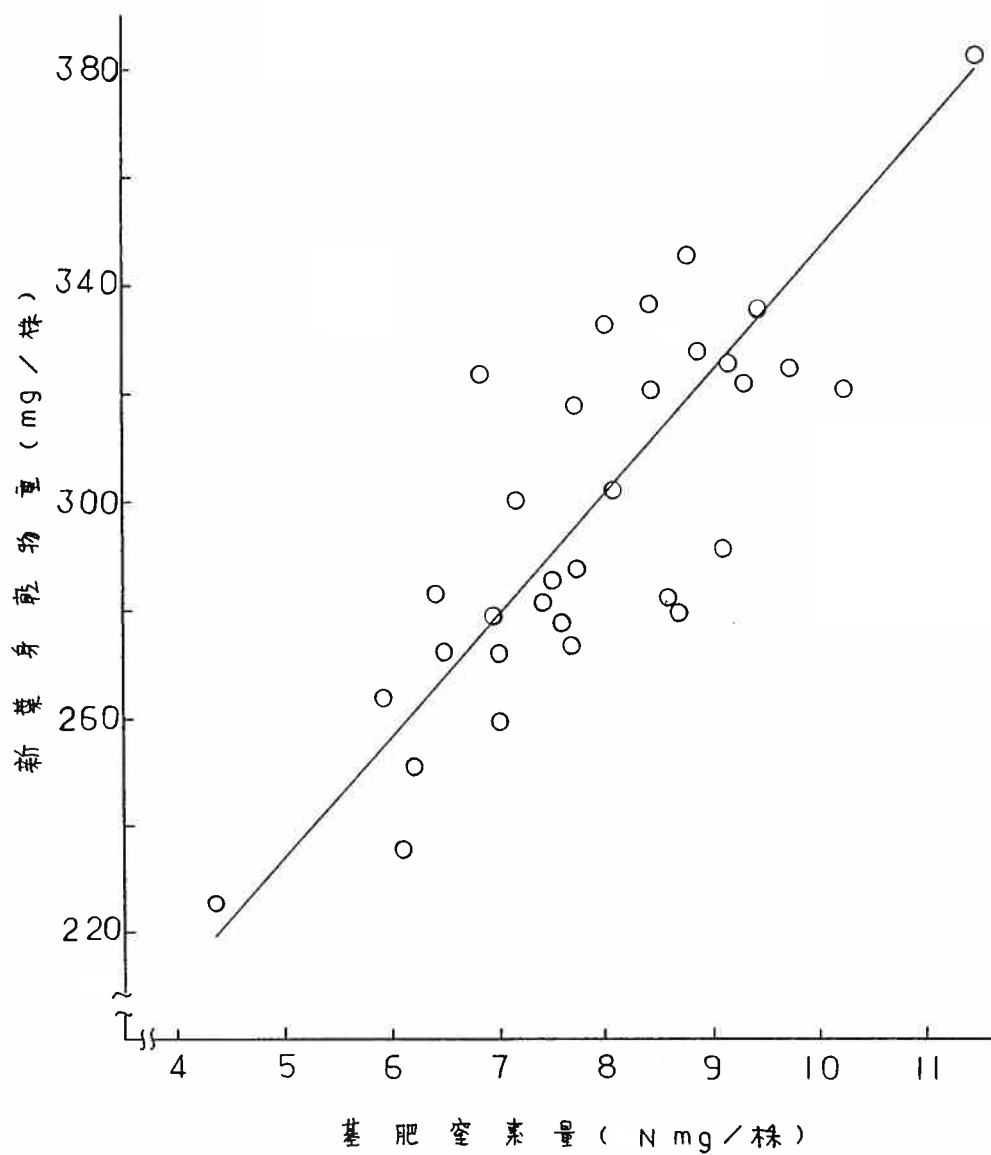
1981年度の6月上旬における基肥窒素及び地力窒素の水稻による吸収量と乾物重との相関をみると、センター圃場の基肥窒素と地力窒素の吸収量と乾物重の相関係数がやや低くなっているが、いずれも密接な正の相関がみられる。この事は、基肥窒素も地力窒素も乾物重に対して大きな役割を果たしている事を示している。一方、1982年度についてみると、基肥窒素、地力窒素の吸収量は、やはり乾物重との間に正の相関がみられる。しかし、基肥窒素と地力窒素の吸収量のどちらが乾物重との間に相関が高いかは、その時期によって異なり、一定の傾向はみられない。

基肥窒素と地力窒素は、乾物生産に同時に寄与しているので、基肥窒素及び地力窒素の吸収量と乾物重との間の単純相関を求める事

はできない。そこで、基肥窒素の乾物生産に果す役割を考える時に、地力窒素の吸収量を一定にして、地力窒素吸収量を定数項に入れて、基肥窒素の乾物生産に果す役割を検討する。

第3-30図には、1981年度のセンター圃場の6月上旬について、地力窒素の吸収量を平均値の10%の変動をもつものとして、地力窒素吸収量を定数項に入れた回帰直線を示した。個体数は33で、全体の約4割である。相関係数をみると、0.854で、全体でみた基肥窒素吸収量と乾物の相関係数(第3-18表)よりやや高くなっている。回帰係数は22.73であり、水稻によって吸収された基肥窒素1mgで約23mgの乾物を生産する事になる。

同様にして、基肥窒素の吸収量を一定にした時の、地力窒素吸収量と乾物生産の関係を第3-31図に示した。個体数は26で、全体の約3割である。相関係数は全体でみた時とほぼ同じである。回帰係数をみると、25.02で、



3-30 新葉身乾物重と新葉身中基肥窒素量の関係 (地力窒素量を一定にした新葉身について)

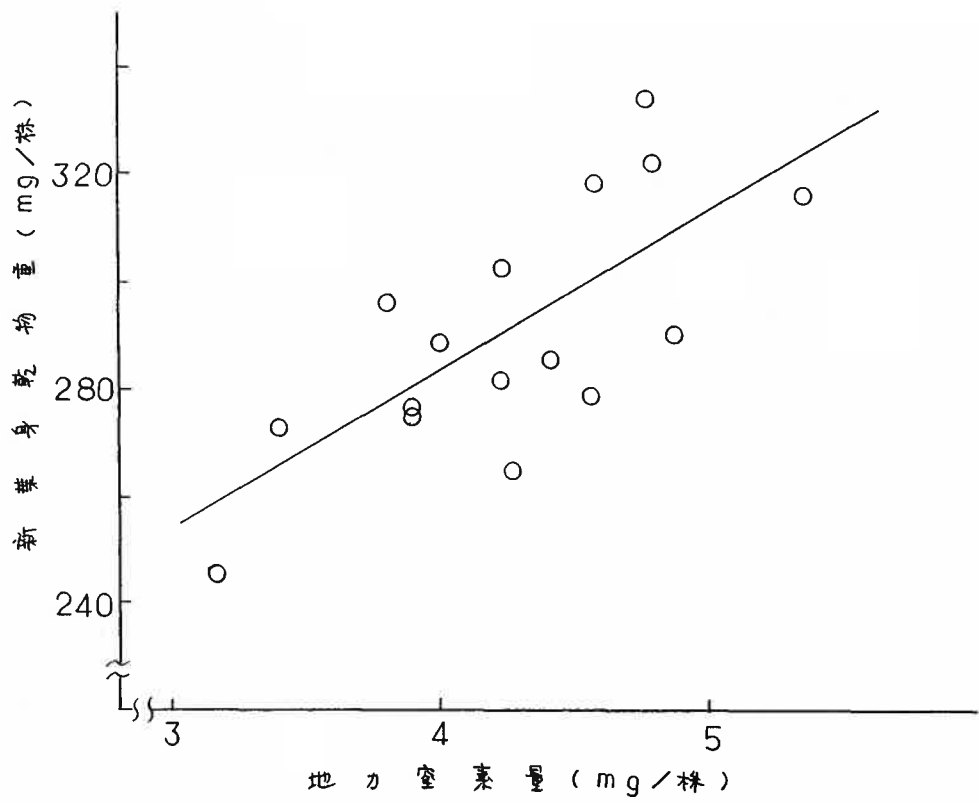


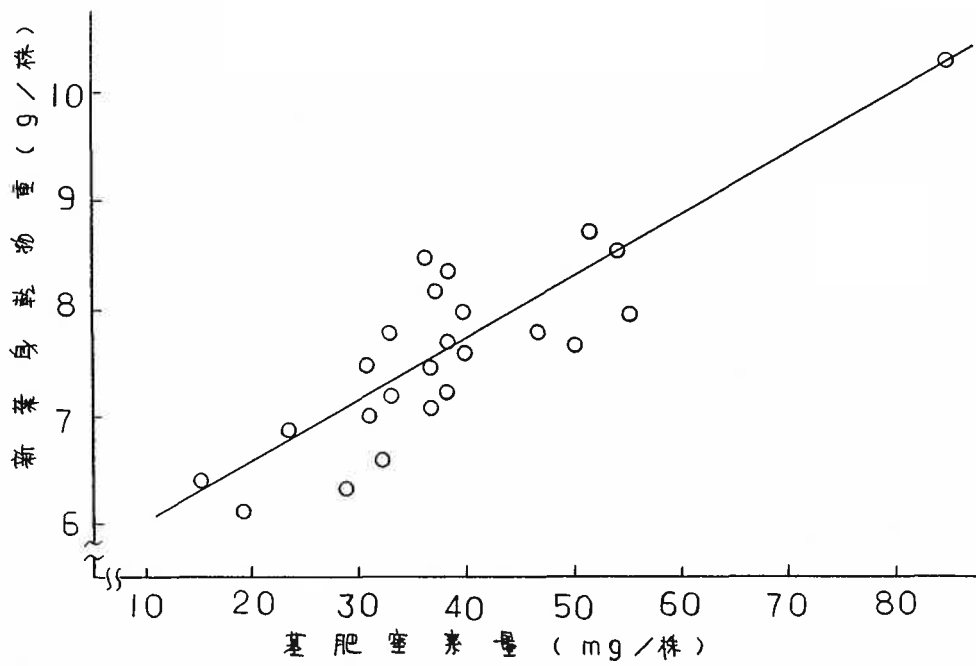
表3-31 新葉身乾物重と新葉身中地力窒素量の關係 (基肥窒素量を一定にした新葉身に於て)

基肥窒素の吸収量と乾物重との回帰係数よりやや高くなっている。

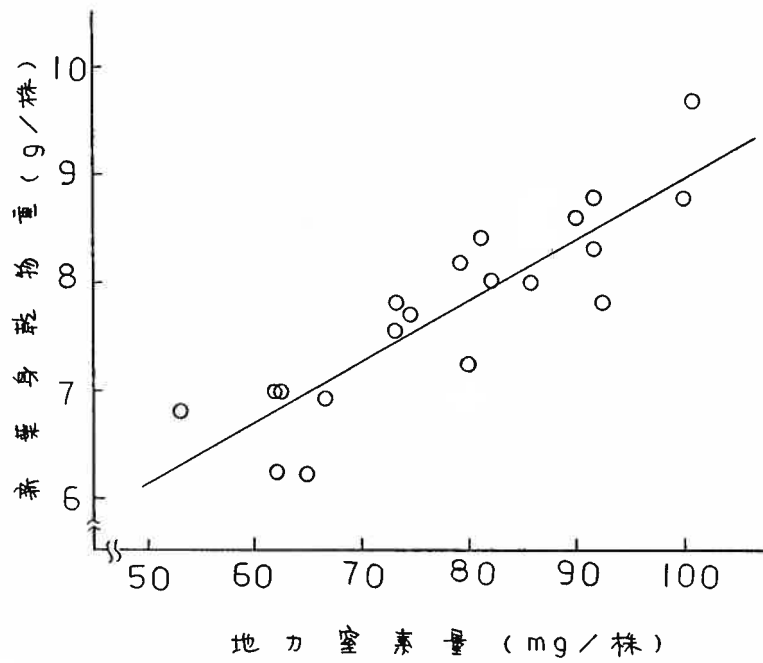
基肥窒素及び地力窒素の吸収量と乾物生産の回帰係数の95%信頼限界⁹⁰⁾は、前者が $27.8 \leq b \leq 17.76$ 、後者が $36.7 \leq b \leq 13.3$ であり、両者の回帰係数は同一とみなせる。

同様に1981年度の7月22日のセンター圃場の水稻について検討する。第3-32図には、地力窒素吸収量、第3-33図には基肥窒素吸収量を一定にした時の基肥窒素吸収量及び地力窒素吸収量と乾物重との関係を示した。それぞれの回帰係数は、0.058、0.057とほぼ同一であった。これらの結果は、基肥窒素と地力窒素が生育初期の乾物生産に対して、単位重量当りについては同等の役割を果たしている事を示すものである。従って、基肥窒素と地力窒素は水稻の乾物生産時には、それらの含量の割合に応じて寄与している事になる。

次に、全窒素中に占める基肥窒素の割合に関係する要因について検討する。



32回 新葉身乾物重と新葉身中基肥窒素量の關係 (地力窒素量を一定にした新葉身について)



73-33圖 新葉身乾物重と新葉身地力窒素量の關係 (基肥窒素量一定にして新葉身に於いて)

第3-24表には、センター、岩沼圃場の、6月上旬の稲体の全窒素に占める基肥窒素の割合と、移植期及び6月上旬の土壤中の全アンモニア態窒素に占める基肥由来アンモニア態窒素の割合を示した。移植期と6月上旬の全アンモニア中の基肥由来割合の平均値と稲体の全窒素中の基肥窒素割合とはよく一致する。第3-25表には、福島県内で行なった試験(第2章第2節, 第3章第2節)で、水稻が6葉期から8葉期に吸収した窒素中の基肥窒素割合を示した。これをみると、稲体の基肥窒素割合は、8葉期よりも6葉期の土壤アンモニアの基肥窒素割合と関連が深い。

一方、第3-26表には、センター、岩沼圃場の最高分けつ期(7月上旬)の稲体の基肥窒素割合と移植期、6月上旬、6月下旬の土壤アンモニアの基肥窒素割合を示した。これによれば、稲体の基肥窒素割合は、いずれの時期の土壤アンモニアの基肥窒素割合よりも低い。これらの事より、6月上旬までは、水

表 3-24 水稲体内窒素 あるいは土
 壌アンモニア中の基肥由来割合

	水稲体内 窒素中の基肥 由来割合(%)	土壌アンモニア中の基肥由来割合		
		移植期	6月8日	平均
P-2	71.8%	79.2%	60.1%	69.7%
T-2	85.6%	98.6%	67.3%	83.0%

表3-25 水稻体内窒素 あるいは
 土壤 アンモニア に占める
 基肥 由来窒素の割合
 (%)

	稲体	土壤アンモニア	
	6葉期から 8葉期に0.2 以上の窒素 を含む	6葉期	8葉期
本場	50.9	51.4	29.3
相馬支場	22.3	17.6	10.1
会津支場	36.5	24.9	14.0
塩川	27.0	26.2	15.8
本郷 1*	27.6	17.3	14.4
2*	43.0	29.5	14.9
新鶴 1*	31.2	25.8	15.8
2*	10.7	10.3	6.4

* 本郷 1; 4kg/10a 基肥区

2; 6kg/10a 基肥区

新鶴 1; 4kg/10a 基肥区

2; 2kg/10a 基肥区

表3-26 水稻体内窒素および土
壤アンモニア中の基肥由来割合

	水稻体内 窒素中の基肥 由来割合(%)	土壤アンモニア中の基肥由来割合		
		移植期	6月8日	6月23日
P-1	37.3%	83.5%	61.9%	44.0%
T-1	34.6%	95.1%	68.0%	44.9%

稲体内の全窒素中の基肥窒素割合は、土壤アンモニアの基肥窒素割合と密接に関連している事は明らかである。そして、生育の進展に伴い、水稻体内の全窒素中の基肥窒素割合を、土壤アンモニアの基肥窒素割合から推定するのはむずかしくなる事を示している。

土壤アンモニアは、移植期には大部分基肥由来のアンモニアで占められる。時間の経過とともに、地力窒素の放出がさかんになり、土壤アンモニア中の大部分が地力由来のアンモニアとなる。一方、第2章で明らかにした様に、土壤アンモニアは、水稻によって吸収されるのみならず、脱窒、溶脱、有機化⁵⁵⁾等の作用を受ける。そして、ある時期のアンモニアは、これらの作用の結果として示される。以上から、6月中旬頃から、水稻体内の全窒素中の基肥窒素割合と土壤アンモニアの基肥窒素割合が、直接的に関連しなくなるのは、アンモニアの挙動に水稻の吸収以外の要因が大きく関与し、それらの結果として土壤アン

モニアの基肥窒素割合が示されるためである。

いずれにしても、土壤アンモニアの基肥窒素割合が高い土壤程、水稻体内の窒素中の基肥窒素割合が高く、基肥窒素の水稻乾物生産に重要な役割を果す事は明らかである。

b) 生育中期

既に明らかにした様に、水稻による基肥窒素の吸収は、東北地方では基肥量に関係なく、最高分げつ期に終了する。一方、和田等³⁴⁾は、水稻による基肥窒素の吸収が終了した後でも基肥窒素は転流によって、新しく形成される器官に存在する事を明らかにしている。基肥窒素を多量に施用した時には、生育の中後期においても、多肥の影響が、その生育、例えば葉色や草丈にみられる。この事は、基肥窒素は、生育の中後期に水稻体内で盛んに転流し、その生育に大きな関係がある事を示すものである。

一方、重窒素トレーサー法による和田等³⁴⁾の圃場における基肥及び追肥窒素の転流の研究ならびに Mae^{91,92)}、Yoneyama^{93,94)}、Tatsumi⁹⁵⁾の水耕栽培水稻の窒素の転流に関する研究によって、水稻体内では、窒素が容易に転流する事が明らかにされている。しかし、この様な転流窒素の水稻の生育に対する役割を定量的に研究した

例はみられない。そこで、ここでは、生育初期に吸収された基肥窒素ならびに地力窒素が転流によって、水稻の中期の生育に対して、いかなる貢献をするかを定量的に検討する。

一般に、旺盛に生育する新器官は、その他の部位に比べて、最も窒素を必要とする。そのため、地上部全体の乾物重と基肥窒素吸収量との関係よりも、新器官、すなわち新葉身の乾物重と基肥窒素吸収量との関係の方が、転流基肥窒素の役割を正確に把握できるものと考えられる。そこで、生育中期の新器官である12、13、止め葉の葉身について検討する。

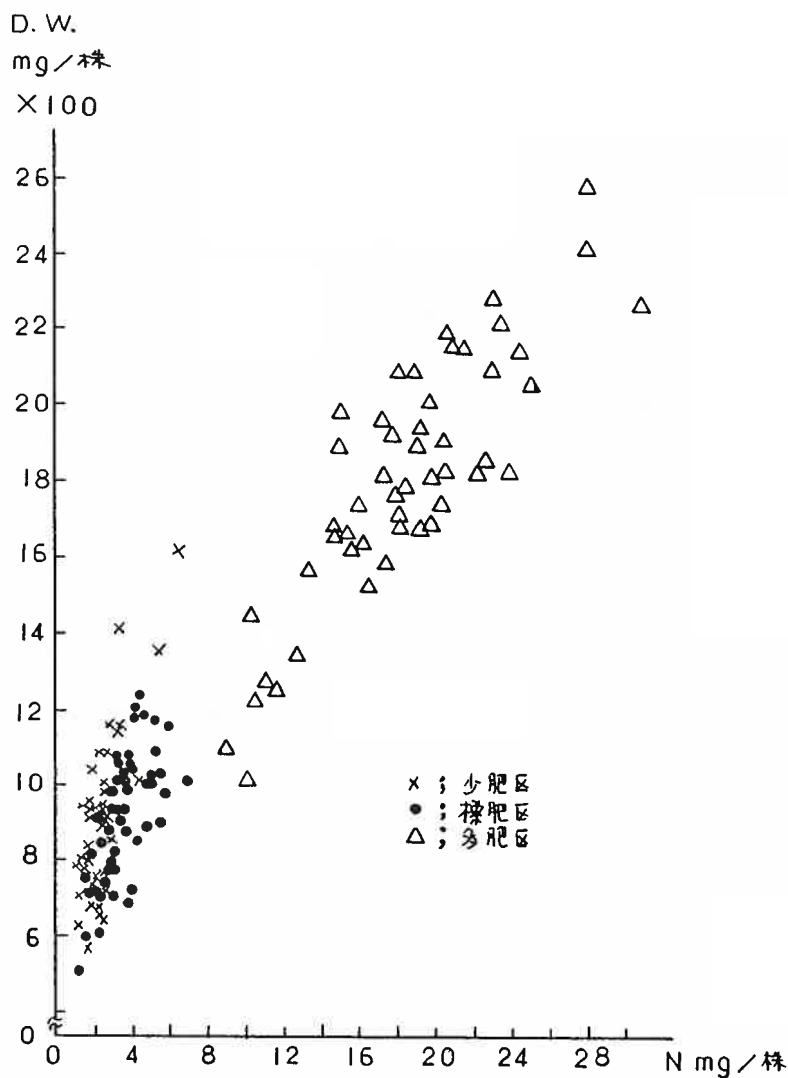
基肥窒素の吸収が終了する6月下旬には、11葉が伸長をはじめているとみられる。このことは、12葉以降の葉身の伸長時に基肥窒素の新たな吸収がないので、12葉から止め葉までに含まれる基肥窒素は全て転流してきた事を示すものである。

そこで、これらの葉身の乾物重と葉身中の

基肥窒素量との関係を第3-34図から第3-35図までに示した。図から明らかな様に、いずれの葉位でも、新葉身の乾物重と、基肥窒素吸収量との間には、直線的な関係がある。この事は、転流窒素が、生育中期の新葉身の乾物生育に大きく貢献する事を示すものである。

生育初期で検討した様に、乾物重の形成には地力窒素も関与している。そこで、地力窒素の影響を除去するために3葉について、少肥区、標準区、多肥区について、各々地力窒素を一定にした時の基肥窒素吸収量と新葉身の乾物重との関係を第3-36図に示した。基肥窒素吸収量と新葉身の乾物重との間には、高い正の相関があり、明らかに基肥窒素は転流により新葉身の乾物重の生産に寄与していることがわかる。

水稻によって吸収された地力窒素も基肥窒素と同様に転流し、中期の生育に一定の役割を果しているはずである。そこで、全転流窒



ホ3-34回 新葉身乾物重と葉身中の
基肥窒素吸収量 (13葉展開時)

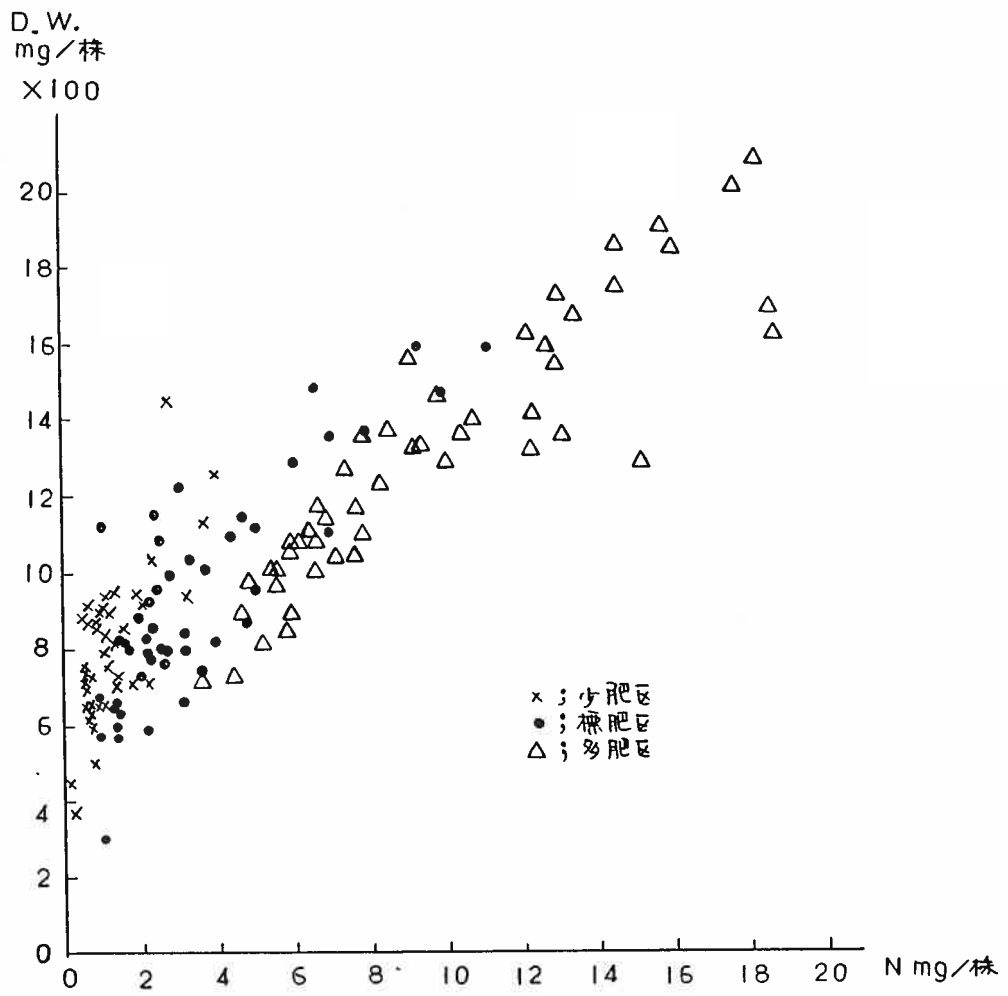


表3-35 新葉身乾物重と葉身中の

基肥窒素吸収量(止め葉展開時)

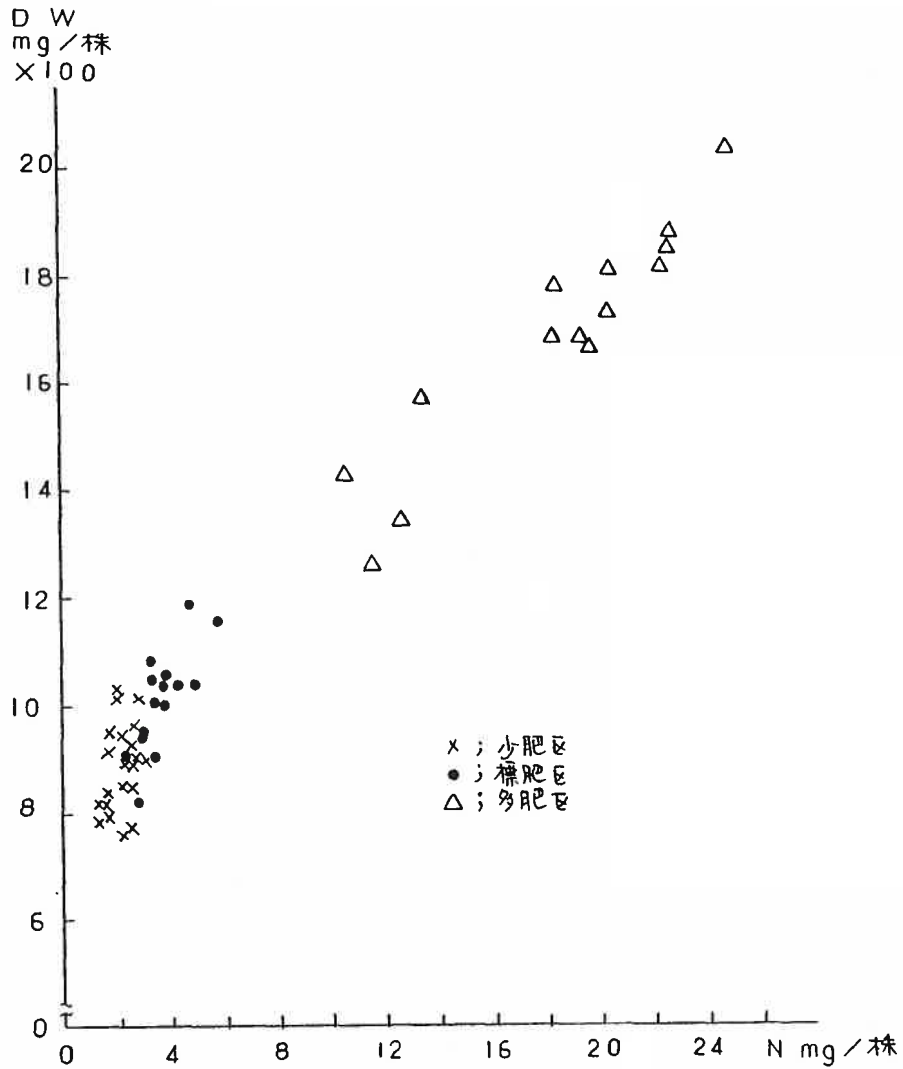


表3-36 新葉身乾物重と葉身中の
基肥窒素量 (13葉展開時, 地力窒素量は一定)

窒素量を以下の様に推定した。

水稻の新器官の形成と窒素の流入、流出についてみると、葉身が展開するまでは、窒素は、流入だけである。そして、その後の成熟に伴って窒素の流入と流出が同時に起きる⁹⁴⁾。従って、新葉身の展開直後に、転流窒素量を推定すれば、窒素の再流出を考慮しなくてよい事になる。そこでここでは、展開直後の新葉身について流入した全転流窒素を以下の式に従って推定した。

$$x = \frac{b \times c}{a_1} + \frac{(1-b) \times c}{a_2}$$

x : 新葉身中の全転流窒素(土壤由来+基肥由来)量

a_1 : 新葉身が分化してから、抽出開始直前(以下伸長前期とする)までに転流してきた窒素の中で、基肥由来窒素の占める割合

a_2 : 新葉身の抽出直後から、展開終了(以下伸長後期とする)までに転流し

てきた窒素の中で、基肥由来窒素の
占める割合

b : 新葉身の伸長前期の全窒素量が、展
開終了時の新葉身の窒素に占める割
合

c : 新葉身中の基肥由来の転流窒素(以
下転流基肥窒素とする)量

a_1 , a_2 は、転流が稲体のどの部位に由来す
るかによって異なる。Yoneyama⁹³⁾ は、 n 葉位の
新葉の生長には $(n-2)$ 葉の葉身窒素が転
流窒素源となっていると推定した。 $(n-2)$
葉位の窒素中の基肥由来窒素の占める割合
は、稲体全体の基肥由来割合とほぼ一致する
。さらに、転流窒素源は、 $(n-2)$ 葉に由
来するだけでなく、他の部位に由来する可能
性を考慮すれば、 b_1 , b_2 は稲体全体の窒素中
の基肥窒素由来割合とする事は妥当とみられ
る。そこで、 a_1 , a_2 は新葉身の分化時と葉身
の抽出時、すなわち、 $(n-2)$ 葉及び n

- 1) 葉の展開終了時の稲体の基肥窒素由来割合とした。

b は、水稻の栄養条件、葉令によって異なる。前等⁴⁰⁾によれば、葉身の分化から展開終了時まで、同一窒素濃度 (28 ppm) で栽培した12葉身のbは $\frac{1}{2}$ である。また、抽出から展開終了時までの窒素濃度を3倍にした場合は $\frac{1}{4}$ である。本実験では止め葉展開時に追肥を施用している。そこで、13葉については、bを $\frac{1}{2}$ 、止め葉については $\frac{1}{4}$ とした。

c は、新葉が分化した時点で、基肥窒素の吸収が終了していれば、新葉の展開後に含まれる基肥窒素量と等しい。前述の如く、12葉以降の葉は、基肥窒素の吸収が終了してから分化したので、葉身中の基肥窒素量は全て転流基肥窒素量cとなる。

この式に従って転流窒素量を1982年度の止め葉と1984年度の12葉葉身について推定したのが、第3-37図である。両年度ともに葉身中の窒素に占める全転流窒素の割合は、少肥

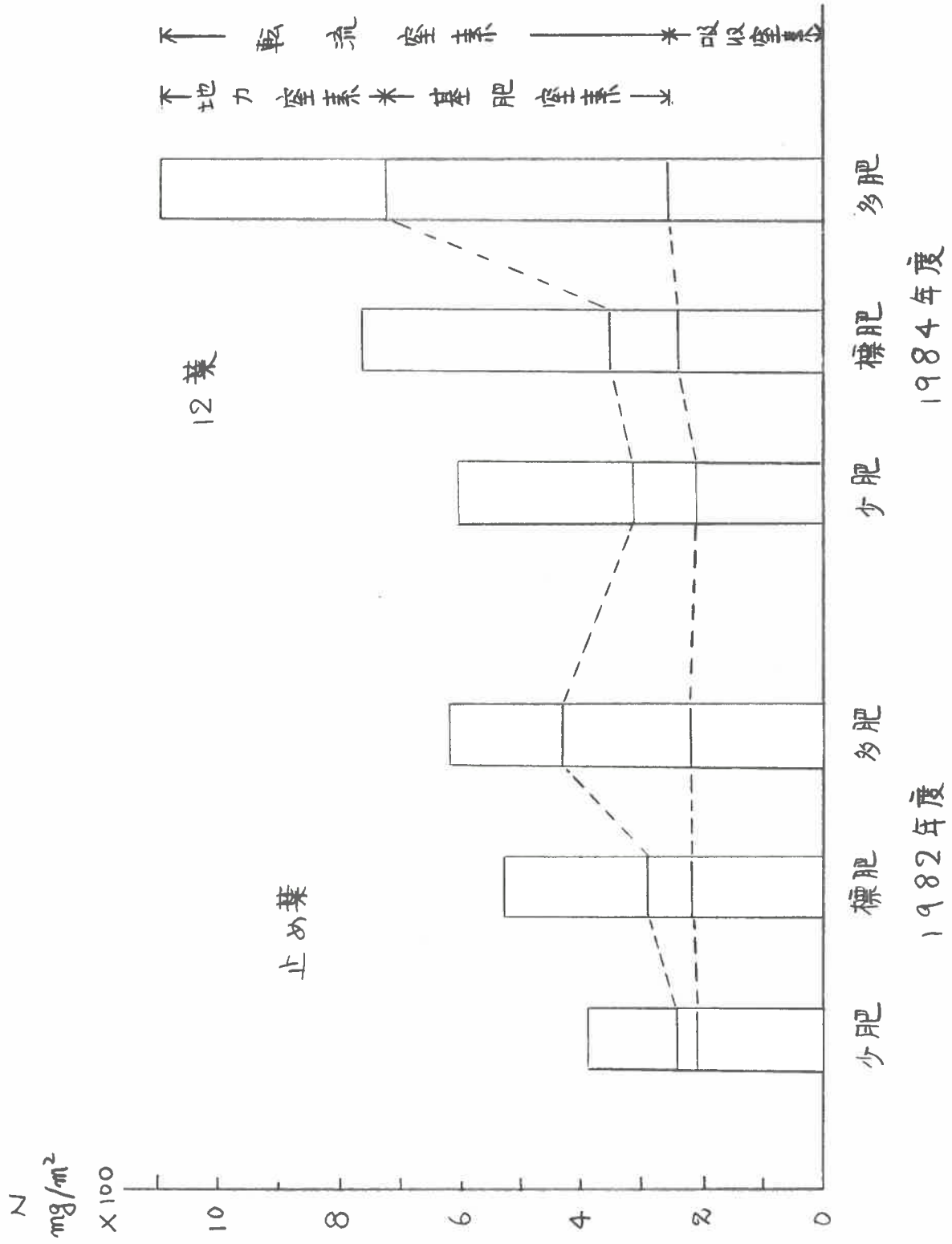


表3-37 図 新葉身中窒素の由来

区がもっとも低く、標肥区、多肥区の順とな
 っており、その割合は、45~77%である。
 Madsen⁹²⁾ Ohira⁹²⁾によれば、水耕実験で全転流窒素の
 占める割合は45~63%であった。本実験の場
 合、圃場条件であるので全転流窒素の推定に
 は仮定を立てて計算を行った。その結果は
 水耕実験⁹²⁾のそれと類似しており、この様な操
 作および仮定で、圃場での新葉身の全転流窒
 素量の推定は、可能なものと思われる。

全転流窒素の内訳をみると、少肥区では、
 大部分が地力由来の転流窒素（以下転流地力
 窒素とする）である。これに対して、多肥区
 では、転流基肥窒素が半分以上を占めている。
 この事は、基肥量が多い程、相対的に転流
 基肥窒素が、生育中期の水稲の生育に、大き
 な役割を果す事を示すものである。

吸収窒素量をみると、少肥区、標肥区、多
 肥区で、ほぼ一定の値を示す。7月に入ると
 、水稲根は作土層に充満することから、地力

窒素の無機化によって放出される窒素は、基肥量に無関係に、水稻によってほぼ吸収される。そのため、少肥区、標肥区、多肥区の新葉身の吸収窒素量が同一になったものとみられる。なお、^{1982年度の}止め葉展開時に追肥窒素を28%、いずれの区でも施肥した。新葉身の吸収窒素量に差がないことから、追肥窒素の利用率は、いずれの区でもほぼ同じとみられる(標肥区での利用率50%)。

1982年度の止め葉葉身および1984年度の12葉葉身中の全転流窒素の絶対量および葉身窒素に占める割合は、少肥区、標肥区、多肥区の順に大きくなり、このことが第3-37図で示された。そこで、1982年度の13葉葉身について次に検討する。

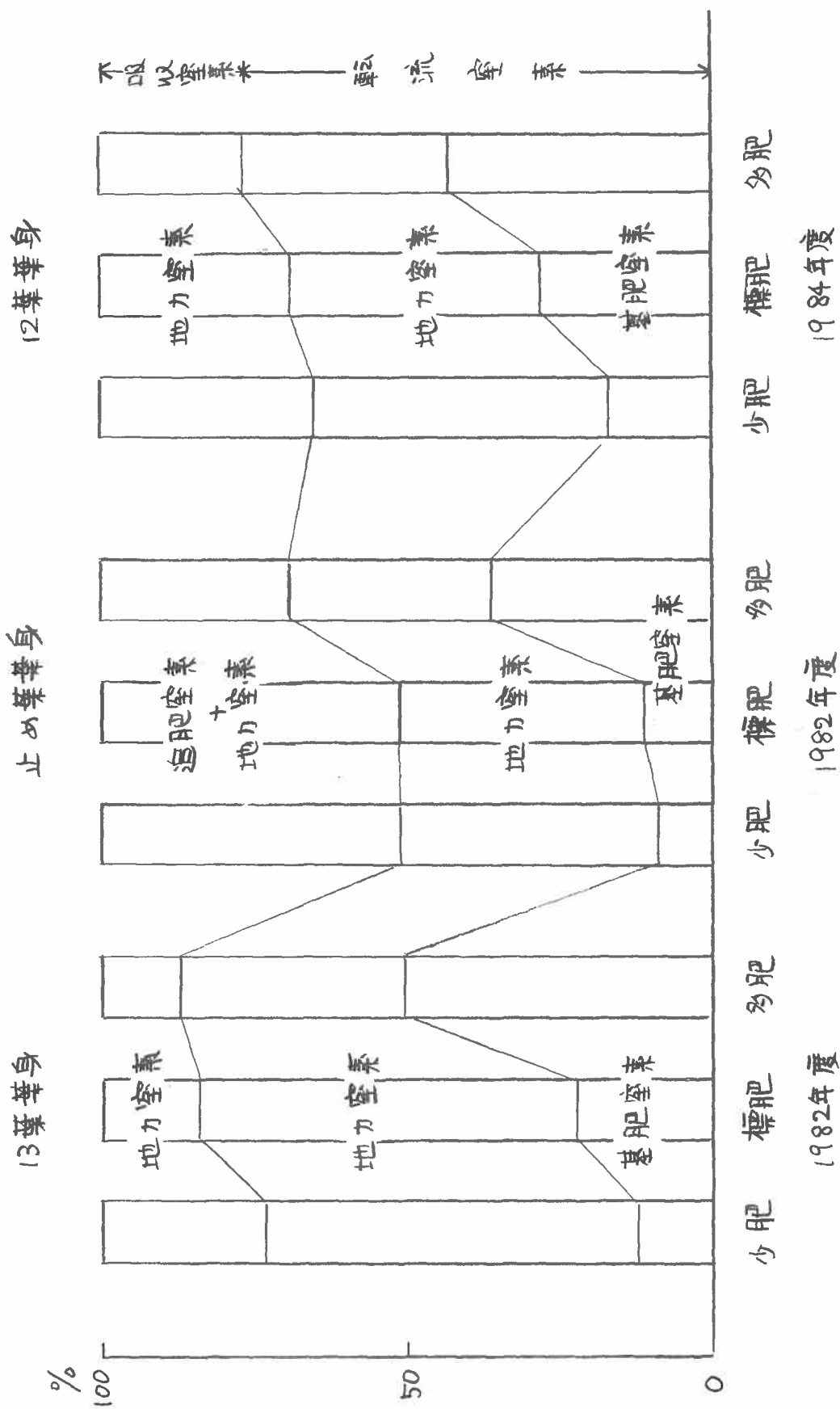
既に述べた如く、土壤アンモニアの消失した後の新器官の吸収窒素量は、基肥量と無関係である。そこで^{1982年度の}13葉について、標肥区で吸収窒素量を求め、少肥区と多肥区のそれは、標肥区の吸収窒素量と同一であるとして全転

転流窒素量を求めた。

第3-38図には、1982年度、1984年度について、葉身中の窒素の内訳を示した。これによれば、いずれの葉位でも、いずれの年度も、基肥量が多い程、転流窒素量及び、葉身窒素に占める全転流窒素の割合が高くなる。

前・大平⁴⁰⁾は、水耕実験で、葉身の伸長前期(分化から抽出直前まで)の培養液の窒素濃度を変えて、展開時の葉身中の全転流窒素を検討している。その結果、全転流窒素は、培養液の窒素濃度の差による葉身の伸長前期の窒素吸収量の差に大きく影響されるとした。本実験では、基肥量の多少によって、葉身伸長前期の窒素吸収量に差はみられない。しかし、葉の分化時点での窒素吸収量は、基肥量が多い程多くなる。従って、葉の分化時点での窒素吸収量が、全転流窒素量と、葉身窒素中の全転流窒素の割合に大きく関与しているものとみられる。

これらの転流窒素が水稻の生育に対してど



才3-38図 新葉身中の窒素の内訳

1984年度

1982年度

1982年度

の様な役割を果しているかについて、次に検討する。

第3-39図には新葉身中(13葉, 止め葉)の全転流窒素量と、新葉身の乾物重の関係を示した。吸収窒素量は、基肥量、葉位にかかわらず、ほぼ一定なので、吸収窒素を定数項に入れた単純相関である。

乾物重と転流窒素量との関係は、直線的であり、相関係数は、0.99と非常に高い。土壤アンモニアが消失した後の吸収窒素量は、水稻の生育量と無関係である事は既に述べた。吸収窒素量が、基肥量と無関係で一定である事は、吸収窒素により形成される生育中期の乾物重は、基肥量に関係なく一定であることを示すものである。一方、窒素用量試験で、土壤アンモニアが消失した後の水稻の中期生育は、基肥窒素量と対応する事はよく知られている。さらに、全転流窒素量は、基肥窒素施用量と対応することは既に明らかにした。これらの事より、基肥窒素施用量の多少による

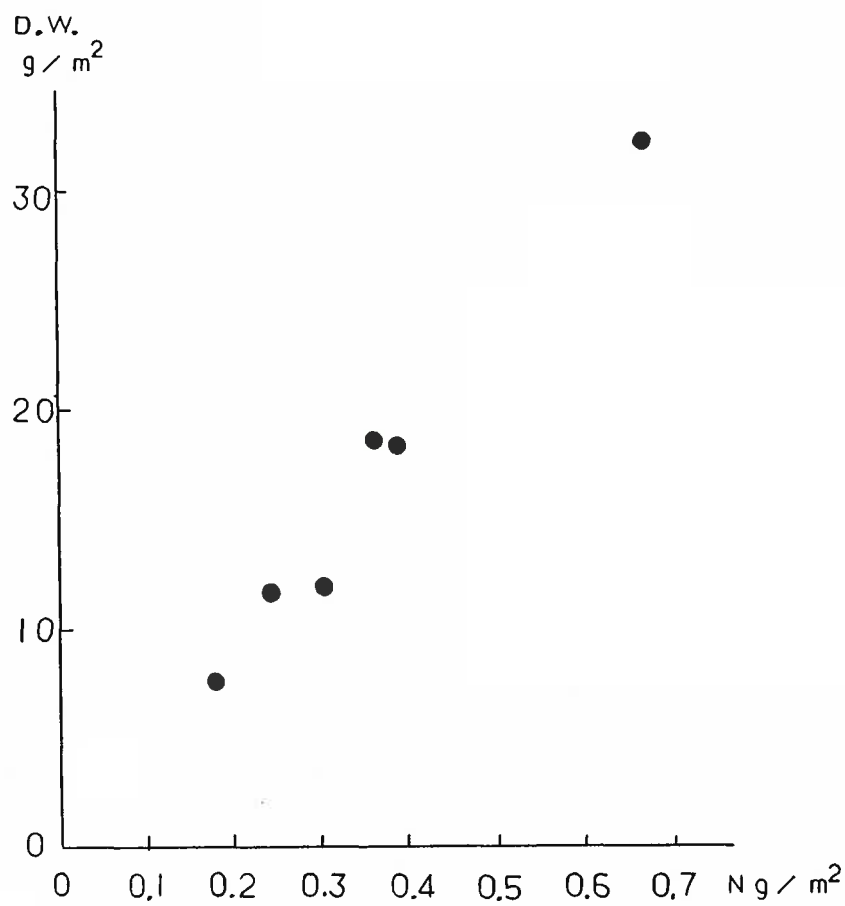


表3-39 生育中期における新葉身
乾物重と転流窒素の関係

水稻の中期生育の違いは、全転流窒素量に起因する事は明らかである。転流基肥窒素量と転流地力窒素量を比較すると、転流地力窒素量は、試験区による差が小さい(第3-37図)。例えば、13葉では、少肥区の転流地力窒素量は、 150 mg/m^2 、多肥区のそれは、 170 mg/m^2 である。一方、転流基肥窒素量を同じ13葉で見ると、少肥区のそれは 240 mg/m^2 、多肥区は 670 mg/m^2 と約3倍の違いがある。この事から、水稻の中期の生育は、転流基肥窒素の差に大きく依存するといえる。

水稻の生育制御の一つに、中期の中干しによる受光能勢の改善がある。これは周知の如く、窒素の中断により、草型を制御し、光の利用効率を高める方法である。³²⁾ 中干しにより、水稻の吸収窒素量は減少するが、⁹⁶⁾ 本実験から明らかになように、⁴⁰⁾ 吸収窒素量の減少は、相対的に全転流窒素の葉身窒素に占める割合は増加させる。前、太平によれば、葉身の伸長前期までの窒素栄養条件によって葉身長は決

定される。従って、中干し以前の水稻の窒素
吸収量が多い場合には、窒素の中断によって
制御される範囲は小さくなるものとみられる
。本実験では、多肥区と標肥区の草丈が、生
育中期に、初期より差が大きくなったのは、
この事を示すものである。

まとめ

水稻の生育初期及び中後の生育に果す、基肥窒素、地力窒素の役割を検討した。その際、水稻の生育を示す形質と窒素吸収の関係を調査し、窒素の水稻生育に果す役割を最も有効に表わす形質をまず明らかにした。得られた結果は、以下の通りである。

1.) 水稻の窒素吸収量と各形質の相関の中では、生育初期・中期を通じて乾物重が最も高かった。この事實は、窒素の水稻生育に果す貢献は、乾物重を指標とする事が最も有効である事を示すものである。

2.) 生育初期段階の水稻の乾物重と、全窒素吸収量、基肥窒素吸収量、地力窒素吸収量には密接な関係が認められた。また、地力窒素の吸収量を一定にした時の、基肥窒素吸収量と乾物重の間には正の高い相関が認められた。同様にして、地力窒素吸収量と乾物重の関係をみても、高い正の相関がみられた。この様にして求めた基肥窒素吸収量ないし、地

力窒素吸収量と乾物重の回帰係数は同一であり、基肥窒素及び地力窒素は単位乾物生産には同等の役割を果たしている事が明らかとなった。この事は、水稻の全窒素吸収量中の基肥窒素と地力窒素の比率に応じて乾物生産に寄与している事を示すものである。

3.) 水稻の全窒素吸収量中の基肥窒素の比率は、6月中旬頃までは、土壤アンモニア中の基肥由来アンモニアと地力由来アンモニアの比率と高い相関が認められた。

4.) 水稻生育中期に形成される新葉身に含まれる基肥窒素は全て転流窒素であるが、この基肥窒素量と新葉身の乾物重には高い正の相関があった。そして、新葉身中の地力窒素量を一定にした時にもこの相関は認められた。

5.) 新葉身に含まれる転流窒素(地力+基肥窒素)量を推定した結果、多肥区程転流窒素量は多く、吸収窒素量は基肥窒素施用量に関係なく一定であった。転流窒素の内訳をみ

ると、多肥区程、基肥窒素が多く、生育初期に吸収した基肥窒素が中期にも一定の役割を果たす事が明らかとなった。

6.) 転流窒素量と新葉身の乾物重の間には高い正の相関が認められ、生育中期の水稻生育制御には、初期の窒素吸収量も重要な要因となる事が明らかとなった。

第7節 論議

水稻の窒素吸収には、様々な要因が関係している。例えば、水稻の生育を支配する温度、有機物施用、土壤中の可給態の窒素量等である。従来の研究の多くは、単一の要因、例えば、有機物施用と水稻の窒素吸収の⁷²⁾関係性を検討したにすぎない。しかし、現実の圃場では、様々な要因が同時に水稻の窒素吸収に影響を与えている事は論をまたない。そこで本節では、今まで検討してきた要因と、水稻の窒素吸収の関連を同時に検討する。

水稻による窒素吸収と温度の関係は、有効積算温度を利用する事によってよく説明できる。村上⁹⁷⁾によれば、水稻の生育初期と中後期の水稻生育に対する有効温度は異なる。水稻の生育は、初期は栄養生長期間であり、中後期は生殖生長期間であるので、当然水稻の温度に対する反応が異なる事は予想される所である。同時に、土壤中の可給態窒素の存在量からこれをみると、初期は、土壤アンモニア

態窒素が充分にあり、中後期は追肥をしなければ、地力窒素の無機化によってのみ可給態窒素が供給され、土壤アンモニア量は極めて低いレベルで推移する時期である。従って、水稻の窒素吸収量は、初期では通常の場合、水稻の窒素吸収能力が制限要因となり、中後期は地力窒素の無機化量が制限要因となる。

水稻の生育と温度の関係をみると、植物体の生長に有効な下限値及び飽和上限値が存在する。⁹⁷⁾この考え方に基づいて、第3章第1節の作期をかえた実験より、水稻の窒素吸収の上限値、下限値を初期生育について求めた結果、 $16^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}$ が求まった。一方、水稻の生育中後期について同様に求めた所、 $20^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}$ であった(データ省略)。同一圃場について地力窒素の無機化について同様の手法で、第2章第4節の培養実験で仮に上限値と下限値を求めた所、全培養期間中で有効温度範囲に差はなく、上限値は認められず、下限値は²⁵⁾ 14°C であった。また吉野らによれば、地力

窒素の無機化の下限値は 15°C であるが、上限値の設定はない。これらの事より、水稻の生育に關与する温度要因と地力窒素の無機化に關与する温度要因は異なると云える。先に述べた如く、生育初期は、水稻の窒素吸収能が、水稻の窒素吸収量の制限要因となる。そこで、生育初期の窒素吸収に対しては、水稻の有効温度である羽生の積算有効温度示数²⁷⁾を用い、中後期は第2章第4節で明らかにした 18°C 変換日数を用いて以下論ずる。

水稻の初期の窒素吸収と、羽生の積算有効温度示数の関係は、指数関数で示される。第3-4図によれば、指数部分の立ち上がりは圃場によって異なる。これは、第3章第2節で論じた如く、土壤のもつ諸性質が水稻の窒素吸収に影響を与えたものである。例えば、古川では、還元障害と深植によって指数の立ち上りあかりが最も遅くなっている。また、第3-6図で示した様に、会津盆地内では、本郷のごく初期の窒素吸収速度は、他圃場に比

べて大きい。これは本郷土壤のCECが低く、置換性のアンモニア態窒素量に比べて水溶性のそれが多いためである²⁾。会津盆地内での基肥量を変えた試験によれば、基肥量が多い程、全窒素吸収量は多くなるが、地力窒素の吸収量には大きな違いが認められない。一方、有機物施用の有無と生育初期の窒素吸収の関係をみると、土壤アンモニア及び、基肥アンモニアには違いがみられないが、窒素吸収量には違いがみられる場合がある。これは、土壤型により、有機物施用に伴う生育阻害、例えば還元障害がみられるためである。生育中期についてみると、追肥を行なった場合、追肥から約1週間程度は、土壤中にアンモニア態窒素が存在する(第2-12図)。追肥を行なった時は、第3-26図から明らかのように、水稻の窒素の吸収能が窒素吸収量の制限要因となる。これに対して、追肥が行なわれない場合は地力窒素の無機化量が、水稻の窒素吸収の制限要因となる。地力窒素の無機化は

有効温度に支配され、その無機化パターンは、積算有効温に対して、 $y = (1 - \text{Exp}(-kaX)) + A$ (但し、 y : 無機化量、 ka : 速度定数、 A : 定数) で示される。この無機化パターンは、初期に無機化量が多く、中後期には少ないパターンである。従って、水稻の初期生育期間中にどれだけ温度が加わるかと、中後期に加わる温度によって、水稻の生育中期の窒素の吸収量が異なる(第3-25図)。

追肥窒素を施用した時の、追肥窒素の土壤中での挙動と水稻による吸収は、追肥窒素の行方と、その行方に関する過程から、追肥窒素の挙動を3つの段階に分ける事ができる(第3-40図)。

第1段階は、追肥後24時間、第2段階は、1日後から2日後まで、第3段階は、3日後以降である。

第1段階は、田面水のアンモニアが作土に移行し、アンモニアの土壤による固定(有機的・無機的)が土壤で起きる段階である。ま

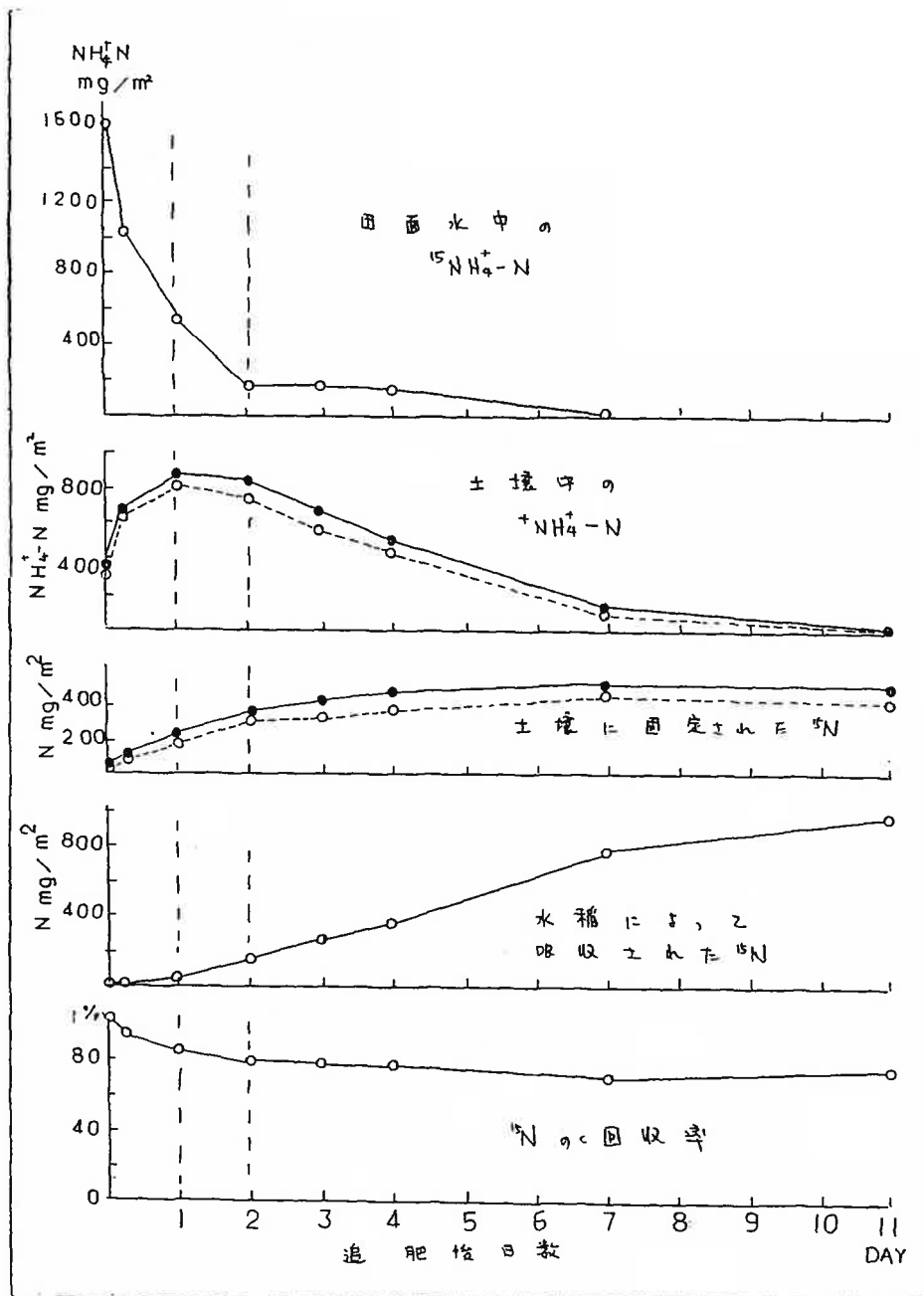


表3-40 追肥窒素の挙動

た、この段階では、アンモニアの揮散や脱窒が盛んに起きる時期である。第2段階は、第1段階の過程に加えて、水稻による追肥窒素の吸収が本格的に行なわれる。第3段階は、主に水稻による追肥窒素の吸収がみられる段階である。第3段階は、圃場によっては脱窒がみられる。

これらの段階毎の過程は、第3段階を除いて、圃場条件、気象条件等による変化はないが、段階毎の所要時間及び、各過程に参与する追肥窒素の量は変化するものとみられる。

例えば、本研究で明らかのように、気温が高い程、アンモニアの田面水から作土層への移行時間を短縮させる。また、水稻の窒素吸収能力の増大は、水稻の追肥窒素吸収速度を増大させ、第3段階の時間を短縮させる。さらに、CECの低い圃場ないし、透水性の良好な圃場では、第3段階に脱窒、流亡が加わるので、水稻の窒素吸収能力は、利用率と密接に関与するものとみられる。なお、圃場条

件とこれら諸過程の関係については、今後の検討課題といえる。

水稻の生育を示す形質のうち、茎数は、土壤アンモニアの挙動と密接な関係がある。茎数の増加にとって重要な事は、水稻の単位乾物当りの窒素吸収量である。これを土壤側からみれば、土壤中に存在する可給態の窒素量であるといえる。普通の栽培条件下では、初期には土壤中にアンモニアが充分存在するので、茎数増加に対して、土壤中の可給態窒素量は、制限とはならない。しかし、移植後50~60日経過すると、土壤アンモニアは消失し、土壤中の可給態窒素は地力窒素の放出に依存する。この段階になると、水稻の茎数の増加はみられなくなり、最高分けつ期となる。(第3-4表)。この関係は、東北地方では栽培方法を変えても成り立った。

ところで、水稻は他畑作物に比べて、その生育の変異が小さいといわれている。しかし、土壤アンモニア、水稻による基肥窒素の吸

収の変異をみると、かなり大きい(例えは第3-16表)。これは、施肥ムラによるものであるが、水稻の生育ないし窒素吸収量の変異係数は小さい。この事は、水稻の生育に対する、基肥窒素、地力窒素の役割を考える上で重要な事と思われる。

そこで、基肥窒素、地力窒素の水稻生育、特に新形成器官の乾物生産との関係を見ると、基肥窒素も地力窒素も新形成器官の乾物生産に対しては同様の貢献をしている事がわかった。そして、生育初期段階では、土壤アンモニアの基肥由来割合と、水稻の吸収した窒素中のそれとはきわめて高い相関あった(第3-25表)。このことは、各圃場での基肥窒素、地力窒素の水稻生育に果たす役割は、土壤アンモニアから推定できる事を示すものである。

一方、基肥窒素吸収量と地力窒素吸収量との間には正の相関が認められるが(例えは第3-18表)、その相関係数は低い。この事は

、土壤中での基肥アンモニアの少ない場所では、相対的に地力窒素を吸収し、地力窒素が水稻生育に対して補償的な役割を果たしている事を示すものである。

水稻は生育全般を通じて、一度吸収した窒素を古い器官から新しい器官に転流させる事によってダイナミックに生育している。転流窒素の新形成器官中の窒素に占める割合は、基肥窒素量が多い程、多くなる。また、生育中後期には、水稻の吸収する窒素量は、水稻の前歴にかかわらず、ほぼ同一である。従って、水稻生育中期の基肥量の違いによる生育量の違いは、転流窒素量の違いに支配される(第3-39図)。この事は、生育中期の窒素中断により、受光態勢の良化にはおのずと限界がある事を示すものである。

ところで、水稻の収量向上のためには、早期の茎数確保、草型を良くする事、後期の窒素吸収量の増大が指摘³²⁾されている。この問題を土壤アンモニアの挙動、水稻の窒素吸収及

び転流、窒素の水稻生育に果す役割から検討することにする。

水稻の早期の茎数確保のためには、多くの要因があげられるが、窒素吸収との関係からみれば、充分量の窒素施用による土壤アンモニアの増加が必要である⁹⁷⁾。特に、活着期前後には、水稻の窒素吸収能力が低い事から、水溶性のアンモニアが交換態のアンモニアよりも重要となる(第二章第2節)。同一土壤での交換態のアンモニアの増加は、水溶性のアンモニアの増加をもたらすので、窒素の施用量の増大は、初期の茎数増加にとって重要である。しかし、窒素施用量を多くし、水稻の窒素吸収量を増加させる事は、水稻の生育中期の転流によって草型を乱す可能性がある(第三章第6節)。ところで、窒素の施用法について塩入⁹⁸⁾が窒素の水稻による効率的利用の観点から全層施肥法を提唱してから、基肥窒素は通常作土層全体に施用される。これに対して、山形県では、活着期の表層追肥が行

なわれている。⁹⁹⁾ 仮に、基肥窒素量を $6 \text{ kg}/10\text{a}$ とし、作土層の厚さを 10 cm とすると、 100 g 乾土当りの窒素量は 6 mg となり 0.5 me となる。これに対して基肥量を $4 \text{ kg}/10\text{a}$ 、活着期追肥を $2 \text{ kg}/10\text{a}$ とすると、基肥窒素は、 100 g 乾土当り、 4 mg 、 0.3 me となる。一方、追肥は、ごく表層に存在するので、仮に、 1 mm の部位と 1 cm の部位に存在したとすれば、 100 g 乾土当り、 200 mg (追肥窒素の存在を 1 mm とした時) $\sim 20 \text{ mg}$ (追肥窒素の存在を 1 cm とした時) で、 $14 \text{ me} \sim 1.4 \text{ me}$ となり、局所的に水溶性アンモニア濃度は高くなる。この様な施肥法をとる事により、水稻による総窒素吸収量は、全量全層基肥施用とした時と比べて同程度以下となるので、草型を乱だすことなく、初期の茎数が確保されるものとみられる。

草型をよくするためには、穂首分化期頃の水稻の窒素吸収をおさえる事が重要であるとされている。³²⁾ しかし、水稻の生育中期に形成される器官に含まれる窒素の大部分が転流窒

素である事は(第三章第6節)、中期の窒素
中断によつてのみでは、草型をよくすることは
不可能である。基肥窒素の吸収が終了した
後での転流窒素量は、ほぼ基肥窒素吸収量と
対応する(第三章第6節)。また、水稻中期
の地力窒素の吸収量は、水稻の生育量と無関
係であることから、草型の改良のためには、
適正な基肥窒素の施用量が重要な課題となる
。

従来から経験的に、基肥窒素の多用は、水
稻中期の草型を乱だすとされ、その原因とし
て、基肥窒素の土壤中への残存が考えられて
きた。しかしながら、第二章第2節で明らか
にした様に、土壤アンモニアの消失時期は、
基肥量に関係なくほぼ同時期である。この事
は、基肥窒素施用量を増大し、中干しによつ
て土壤アンモニアの制御をし、水稻の生育制
御を行なうという考え方が基本的に誤りであ
る事を示すものである。基肥窒素の多用は、
初期の水稻による基肥窒素の吸収量の増大を

もたらし、生育中期の転流によって草型を悪化させるからである。

適正な基肥窒素施用量を明らかにするためには、水稻生育中期の窒素吸収量とそれに対応した転流窒素量（地力及び基肥）及び、窒素の中期の生育に果たす役割を定量的に把握する事が重要である。水稻の生育中期の地力窒素の吸収量は地力窒素の放出量に対応し、地力窒素の放出量は、生育初期及び中期の気象条件と密接に関係する（第3章第3節）。一方、追肥窒素の水稻による吸収は、東北地方では平均で50%程度で大きな違いはみられない。従って、水稻生育中期の窒素吸収量は、気象条件によってある程度予測が可能となる。一方、水稻の生育初期の窒素の吸収量は、積算有効温度（第3章第2節）を使用し予測する事が可能である。従って残された問題としては、水稻の中期の窒素吸収量と初期の窒素吸収量に基づく転流窒素量の量比関係を明らかにする事と思われる。

本研究では、水稻の中期の新葉身の乾物重と転流基肥窒素量ないし全転流窒素量が密接に関連する事を明らかにした(第3章第6節)。この様な手法を用いる事によって、はじめて、水稻の生育中期の生育と基肥窒素の関係を明確にできるものと思われ、適正な基肥窒素施用量の定量的な把握が可能になるものと思われる。

後期の窒素吸収量の増大に関しては、本研究ではほとんど触れなかった。しかしながら、単年度の有機物施用では、後期の窒素の放出がみられなかった事(第3章第2節)、及び施用稲わら中の窒素の分解放出が初期により多く起こる事(第2章第2節)は、土壤からの後期の窒素放出を考える上で注目し値するものである。

第4章 総括

窒素は、水稻の生育収量をもっとも大きく左右する養分である。それ故、窒素肥沃性は土壤生産力増強の中心となり、窒素施肥法は施肥法の中心となっている。そして、今日の高度な稲作に就いても、最も重要な問題は、圃場レベルでの水稻の生育と土壤中での窒素の挙動の関係を明確にし、窒素の水稻生育に果す役割を明らかにする事であると考えられる。その為には、由来別窒素（施用窒素および地力窒素）の土壤中での挙動を明らかにし、水稻の吸収窒素の由来を明確にする必要がある。そして、由来別窒素の水稻生育に果す役割を定量的に把握する事が重要と思われる。

本研究では、この様な観点から、重窒素トリーサー法を使用して、主に圃場条件下での施用窒素、地力窒素の挙動ならびに水稻の生育との関係を明らかにし、窒素の水稻生育に果す役割を明確にすることを試みたものである。すなわち、福島県内および宮城県内の各

農試本支場や現地水田において、土壤アンモニアの挙動とその要因、水稻の生育・窒素吸収および両者の相互関係、そして窒素の水稻生育に果たす役割について検討を行い、つぎの結果を得た。

1. 水田土壤における基肥、地力由来窒素の挙動

1) 水稻の生育初期段階における土壤アンモニアの挙動

a. 宮城県内および福島県内の灰色低地土、グラウ土、湿性黒ボク土および泥炭地で土壤アンモニア、基肥アンモニア、の挙動を検討したところ、土壤アンモニア、基肥アンモニア、はいずれの圃場でも移植後や^{減少後}停滞気味に推移し、6月下旬頃より急速に減少した。6月下旬ないし7月上旬にほぼ消失し、最高分げつ期となった。これを積算有効温度示数との関係でみると、積算有効温度示数の増加とともに土壤アンモニア、基肥アンモニア、は指数的に減少し積算有効温度示数400～

600でほぼ消失した。土壤アニモニアは、いずれの土壤でも初期程基肥由来部分が多く、経時的に地力由来部分の割合が増加した。土壤の種類による土壤アニモニアの消失の違いでは、地力窒素の放出の多い土壤でアニモニアレベルは高く推移し、水稻の生育が阻害される圃場では、土壤アニモニア、基肥アニモニアの消失時期は遅くなった。

b. 福島農試本場，相馬支場，会津支場で、有機物施用の土壤アニモニア，基肥アニモニアの挙動に与える影響ならびに施用稲わら中の窒素の挙動について検討した。土壤アニモニアは、稲わら施用（250%）と無施用区では、いずれの圃場でもほぼ同様に推移したが、本場，会津支場では無施用区より高く推移した。土壤アニモニアに占める基肥アニモニアの割合は、いずれの圃場でも試験区間に差がみられなかった。施用した稲わらの回収率は、本場より相馬支場の方が高く、粘土鉱物組成と還元の進行が稲わらの分解に

関与していったものとみられた。稲わらへの基肥窒素の固定量はごくわずかであったが、地力窒素の固定量は多かった。しかしながら、土壌アンモニアの挙動に対して、稲わらの地力窒素の固定の影響はほとんどみられなかった。稲わらの分解は、ごく初期から盛んにおこなわれ、最高分けつ期までに稲わら窒素の75%が分解放出された。

c. 宮城農業センターで基肥窒素施用量をかえて、土壌アンモニアの挙動について検討した所、土壌アンモニアは基肥量が多い程多く推移し、かつ土壌アンモニア中の基肥アンモニアの占める割合も多く推移した。しかしながら、土壌アンモニアの消失する時期は、基肥量の多少に関係なく、6月下旬であった。また、地力窒素の放出量は基肥量とは無関係であった。

d. 透水性良好な福島農試本場と不良な相馬支場で、基肥窒素の作土層および下層土での残存を推肥、稲わら区で検討した。推移区

の作土層での基肥窒素の残存率は29~35%であり、稲わら区のは、4~10%高くなっていた。基肥窒素の土壌への全残存量のうち13~19%が下層土に存在した。下層土の基肥窒素の残存率はCECの低い透水良好な本場で多く、9%、相馬支場では5%であった。

2) 水稻生育中期における土壌中での窒素の挙動

幼形期および出穂期の追肥窒素の挙動を、宮城農業センターで田面水、土壌中の交換態、土壌への固定から検討した。田面水中の追肥由来アンモニアは、いずれの追肥時期でも急速に減少し、追肥後3日目まで追肥量の5~10%程度となった。作土表層の追肥由来アンモニアは、追肥後2日目までは急速に増加し、その後は徐々に減少し、追肥後7~17日でほぼ消失する。なお、追肥由来のアンモニアの85~90%は0~1cm部位に存在した。土壌によって固定されるアンモニアは、

追肥後指數的に増加し、追肥後4~5日以後はほぼ一定となる。土壤によつて固定される追肥窒素は、追肥量の約20%であった。気象条件が良好な時には、田面水からの追肥由来アミノニアの消滅、および作土表層での追肥由来アミノニアの増加速度は早かった。

3) 地力窒素の無機化と施用窒素の固定

自然変温条件下での地力窒素の無機化速度及び施用窒素の固定速度と温度の関係を培養実験で検討した。地力窒素の無機化は分解の比較的速い部分と、分解の比較的遅い部分に分けられた。そして分解の比較的速い部分からの地力窒素の放出が終了する時期は土壤アミノニアの消滅する時期とほぼ一致した。黒ボク土壤と沖積土壤を比較すると、黒ボク土壤は比較的高温域での地力窒素の無機化が活発である事がわかった。また、施用窒素の固定は、地力窒素の無機化と比較してより低温でも活発に起った。

2. 水稻による施肥及び地力窒素の吸収と

生育

1) 水稻による基肥及び地力窒素の吸収

a. 土壌の種類異なる宮城県内および福島県内の計8圃場で、水稻の基肥及び地力窒素の吸収と水稻の生育を検討した。さらに、福島県内では基肥窒素の違いによる基肥及び地力窒素の吸収経過を明らかにした。水稻の全窒素吸収と積算有効温度示数(羽生)との関係は、いずれの圃場でも指数式と直線式によって示された。そして、指数式で示される時期は、土壌アンモニアが充分にある時期であり、その期間に基肥窒素の吸収は終了する。また基肥窒素施用量の多少により、基肥窒素の吸収速度は異なるが、地力窒素の吸収速度は同一圃場ではほぼ同一であった。

b. 土壌の種類異なる福島県農試本支場で堆肥、稲わら施用に伴う水稻による基肥及び地力窒素の吸収を検討した。水稻の生育(茎数及び乾物重)は、いずれの圃場でも有機物無施用区がもっとも良かったが、施用有機

物の質による違いはみられなかった。水稻生育初期の全窒素吸収速度は、土壌条件に左右された。すなわち、排水良好な圃場では、堆肥区でやや良好であったが、排水不良な圃場では、有機物施用によって低下した。この有機物施用による全窒素吸収速度の低下は、土壌アンモニアの欠乏によるものではなく、生育阻害物質によるものである。基肥窒素の吸収は、全窒素の吸収経過とほぼ同様であったが、土壌アンモニアの消失した後の基肥窒素の吸収はみられない。生育中後期に稲わらから放出されてくる窒素は基肥窒素のターンオーバーによるものではなく、地力窒素のターンオーバーによるものである。

2) 水田土壌での窒素の挙動と茎数の推移ならびに窒素吸収との関係

土壌アンモニアの挙動と水稻の初期生育の関係と、水稻生育中期の水稻による地力窒素吸収と地力窒素の放出との関係を宮城県内および福島県内の圃場について検討した。いず

この圃場でも、土壌アンモニアが消失する時期に水稲は最高分げつ期をおかえた。水稲の1日当り1g乾物当りの窒素集積量が1mgより低下すると水稲は最高分げつ期となり、最高分げつ期は水稲の生育ステージではなく、窒素栄養条件に支配される事があきらかとなった。水稲の生育中期の地力窒素の吸収量と18℃変換日数による地力窒素の放出量との間には高い相関があった。このことは、水稲生育中期の地力窒素の吸収は、生育初期及び中期の温度に支配されることを示すものである。

3) 水稲による追肥窒素の吸収

水稲による追肥窒素の吸収経過と、土壌中の追肥由来アンモニアの挙動の関係を検討した。水稲による追肥窒素の吸収は、追肥後7~10日でほぼ終了し、土壌中の追肥由来アンモニアの消失と密接に関係した。水稲による追肥窒素の利用率は約50%であり、追肥窒素の全回収率は約75%であった。未回収

部分の大部分は脱窒・揮散により失はわれたものとみられた。

4) 土壤アニモニア及び水稻の窒素吸収の変異

全アニモニア、基肥由来、地力^由来アニモニアの変異について検討した。全アニモニア、基肥由来アニモニア、地力由来アニモニアの変異係数は20~70%と大きく、変異係数の小さい圃場は、有機物含量が高く、代かきにより、容易に泥状化しやすい圃場であった。全アニモニアの変異は施肥⁴らによるものであるが、地力由来アニモニアの変異は、土壤中の有機物の不均一性にによるものである。一方、水稻の基肥窒素吸収の変異は、土壤アニモニアの変異より小さいが、地力窒素、全窒素吸収の変異より大きかった。

5) 基肥および地力窒素の水稻生育に果す役割

a. 生育初期

生育初期の水稻の乾物量と、全窒素吸収量

基肥窒素吸収量，地力窒素吸収量との間には高い正の相関が認められた。また，地力窒素ないし基肥窒素吸収量を一定にした時の基肥窒素吸収量ないし地力窒素吸収量と乾物重の間の回帰回数は同一であり，基肥窒素と地力窒素は乾物生産に対して同等の役割をしていることが明らかとなった。そして，水稻の全窒素吸収量中の基肥窒素と地力窒素の比率と土壌アミノ酸中のそれとの間にも高い相関がみとめられた。

6. 生育中期

新葉身に含まれる転流窒素（地力＋基肥）量を推定した結果，多肥区程転流窒素量が多かった。転流窒素の内訳は，多肥区程，基肥に由来する窒素が多く，生育初期に吸収した基肥窒素が生育中期にも一定の役割を果すことが明らかとなった。転流窒素量と新葉身の乾物重との間には高い正の相関が認められ，生育中期の水稻生育制御には初期の窒素吸収量をも考慮しなければならない事が明らかと

謝辞

本研究を遂行し、本論文を作成するにあたっては、東北大学農学部庄子貞雄教授には、有効な御助言、暖かい御援助をいただき、また御校閲を賜った。東北大学農学部助手三枝正彦博士、助手山田一郎博士には、懇切な助言と、激励をいただいた。東北大学農学部佐々木武雄前技官、塚越茂技官には、実験の一部につき御援助いただいた。東北大学農学部佐々(現加藤)郁子、峯村敦子、中村みさ子、大庭結花、奥田裕子各氏には実験および整理にあたって御援助いただいた。

宮城県農業セニター工壌肥料部、同農産部、同作物保護部、古川農業試験場、福島県農業試験場化学部、同会津支場、同相馬支場の皆さまには、圃場試験にあたって御協力していただいた。

本研究の遂行にあたっては、東北大学農学土壌立地学研究室の卒業生清野克彦、遠藤(現新発田)恵美子、小林(現平野)紀美子、

藤原(遠藤)尚子, 及川勉, 相沢喜美, 木村和彦の諸氏および学生平林秀規氏の御協力をいただいた。

ここに上記各位に対して深謝の意を表します。最後に, 東北大学農学部前教授故増井淳一博士には, 暖かい御援助をいただいた。ここに御冥福を祈り感謝の意を表します。

引用文献

1.) 高橋重郎・和田源七・野木照修 : 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5報 栽培条件の異なる場合の基肥窒素の土壌中の行動ならびに水稻による窒素吸収. 日作紀, 42, p.91-96(1973)

2.) S. Shoji, T. Nogi and K. Suzuki : Absorption of fertilizer and soil nitrogen by rice plants under the various cultural conditions of different paddy fields, I. Relationships between the rate of basal nitrogen and nitrogen absorption by rice plants. Tohoku J. of Agricultural Research, 25, p.113-124 (1974)

3.) 野木照修 : 水田土壌における基肥窒素の行動と水稻による吸収利用について, 東北大修論 (1974)

4.) 高橋重郎・庄子貞雄・野木照修・和田源七 : 水田における窒素の動態と水稻による吸収について, 第6報 温度が水稻の窒素吸収および土壤中のアンモニア態窒素の挙動に与える影響について, 日作紀, 45, p. 213-219 (1976)

5.) 広瀬春朗 : 各種植物遺体の有機態窒素の畑状態における無機化について, 土肥誌, 44, p. 157-163 (1973)

6.) 千葉満男・島津了司・武藤和男・内田修吉 : 水田における稲わら施用と稲作の安定化, 岩手農試報, 22, p. 81-117 (1980)

7.) T. Yoneyama and T. Yoshida : Decomposition of rice residue in tropical soil, I. Nitrogen uptake by rice plants from straw incorporated, fertilizer (ammonium sulfate) and soil, Soil Sci. Plant Nutr., 23, p. 33-40 (1977)

8.) 西村 桓夫・久末 勉 : 有機物(堆肥, 稲わら)からの窒素供給, 東北農業研究, 21, p.109-110 (1978)

9.) 佐々木 信夫, 他 : 水田利用の近代化に関する研究, 岩手農試報, 19, p.1-12 (1975)

10.) 小西 千賀三・山崎 欣多 : リンゲ施用水田における養分の消長に関する研究, 第1報 ライシメータ試験, 北陸農業研究, 3, p.1-62 (1955)

11.) 前田 乾一 : 水田に施用された窒素の行動の定量的評価, 農研センター研報, 1, p.121-192 (1983)

12.) 塩入 松三郎・青峰 重範 : 湛水状態の土壌中における窒素の形態変化, 土肥誌, 12, p.406-410 (1938)

- 13.) 塩入松三郎・青峰重範 : 休閑期に於ける、水田土壤乾燥の效果に就いて, 農林省農事試験場臨時報告, p. 1-30 (1940)
- 14.) 松入松三郎 : 水田の土壤化学, p. 1-64, 大日本農会 (1943)
- 15.) 原田登五郎 : 水田土壤の有機態窒素の無機化とその機構に関する研究, 農研技報, B9, p. 123-199 (1959)
- 16.) 三井進午 : 土壤加熱の效果に関する研究, 農事試報, 62, p. 1-48 (1948)
- 17.) 原田登五郎・林龍三・近本明雄 : 土壤の機械的処理と有機態窒素の無機化促進効果, 土肥誌, 35, p. 21-24 (1964)
- 18.) 小山雄生・渋谷政夫 : 重窒素(^{15}N)利用による窒素地力の測定法, 農業技術, 29

p. 414-416 (1976)

19.) 野々山芳夫・吉澤孝之・坂井弘 : 水稻の麦跡不耕起機械化直播栽培技術体系の確立に関する研究, 中国農試報, D6, p.20-32 (1973)

20.) 坂上行雄・松原弘一郎 : 水田土壤の有機態窒素の無機化に及ぼす湛水直後土壤かくはんの影響, 第2報 シロカキ作業に伴う水田土壤肥沃度, 土肥誌,

21.) 林龍三・原田登五郎 : 根系による土壤有機態窒素の無機化促進について, 土肥誌, 35, p.123-126 (1964)

22.) R. D. Hauck : Use of transers for soil and fertilizer nitrogen research, Adv. Agron., 28, p.219-266 (1976)

23.) G. Stanford, M.H. Freere and D.H. Schwaininger
; Temperature coefficient of soil nitrogen
mineralization, Soil Sci., 115, p.321-323
(1973)

24.) 金野隆光 : 土壌中の生物活性と温度,
土壌の物理性, 41, p7-16 (1980)

25.) 吉野喬・出井嘉光 : 土壌窒素供給力の
有効積算温度による推定法について, 農
事試報, 25, p.1-62 (1977)

26.) 庄子貞雄・野木照修・高橋重郎・和田源
七 : 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8報 圃場条件の
異なる場合の基肥窒素の行動と窒素吸収の
比較, 日作紀, 45, p.226-231 (1976)

27.) 羽生寿郎・内島立郎 : 作物の生育と気
象の関連に関する研究, 第1報 水稻の出

穂期と気温の関係, 農業気象, 18, p.109-118 (1962)

28.) Z. Aleksic, H. Broeshart and V. Middeloe :
Shallow depth placement of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ in submerged rice soil as related to gaseous losses of fertilizer nitrogen and fertilizer efficiency. Plant and Soil, 29, p.338-342 (1968)

29.) 前田乾一・鬼鞍豊 : 水稻ポット試験における水管理と施肥窒素収支の関係, 土肥誌, 47, p.99-105 (1976)

30.) 吉野喬・出井嘉光 : 水田土壌における施肥窒素の行方および窒素肥料の土壌無機化に及ぼす影響, 農事試報, 28, p.91-113 (1978)

31.) 高橋重郎 : 表東北地域における水稻生育型改善に関する研究—特に生育と窒素吸

収パターンの関係について一, 宮城農業
センター研究報告, 45, p.1-58 (1975)

32.) 松島省三 : 稲作の改善と技術, 養賢
堂, (1973)

33.) 西垣晋・渋谷政夫 : 水田土壤中におけ
る窒素の行動について, アイソトープ研
究利用総覧, 第1回日本アイソトープ会議
報告書, p.506-512 (1956)

34.) 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎 : 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, p.275-279 (1971)

35.) 勝見太 : 水田土壤中における施肥窒素
の行動, 福井農試報, 9, p.1-14 (1972)

36.) 田口喜久治・水野要蔵・野口巖 : 地

- 域別にみた土壌窒素の発現と施肥窒素の吸収, 東北農業研究, 15, p.67-71 (1974)
- 37.) 小野充 : 施肥法の開発 - 側条施肥技術 - 東北農業研究, 講演要旨, p.16-20 (1984)
- 38.) K.L. Sahrawat : Nitrogen availability indexes for submerged rice soils, Adv. Agron., 36, p.415-451 (1983)
- 39.) 和田源七 : 水稻収量成立に及ぼす窒素栄養の影響 - とくに出穂期以後の窒素の重要性について, 農技研法A, 16, p.27-167 (1969)
- 40.) 前忠彦・大平幸次 : 生長中の水稻葉身を構成する窒素の由来と窒素栄養, 土肥誌, 54, p.401-405 (1983)
- 41.) 庄子貞雄・前忠彦 : 無機養分と水の動態, 作物の生態生理 佐藤実編 文永堂

(印刷中)

42.) 農林省振興局研究部 : 施肥改善事業成績 (1957)

43.) 農技研化学部土壤第3科 : 農耕地土壤の分類 (1983)

44.) J. M. Bremner : Inorganic forms of nitrogen, In methods of soil analysis. Part 2 (C. A. Black, Ed.), p. 1179 - 1237, American society of agronomy, Madison, Wisconsin (1965)

45.) 狩野広美・米山忠克・熊沢喜久雄 : 発光分光分析法による重窒素の定量について, 土肥誌, 45, p. 549-559 (1974)

46.) C. M. Preston : The availability of residual fertilizer nitrogen immobilized as clay-fixed ammonium and organic N, Can. J. Soil Sci., 62

- , p.479-486 (1982)
- 47.) 日本粘土学会 : 粘土ハンドブック,
p.847, 技報堂 (1967)
- 48.) 宮城県古川農業試験場 : 昭和51年度稲
作試験成績書
- 49.) 熊田恭一 : 土壌学, p45, 朝倉書店
- 50.) 原田登五郎 : 粗大有機質肥料の施用効
果, 土壌肥料全編, 農林省振興局研究部
監修, p431 (1968)
- 51.) 作物分析法委員会 : 栄養診断のための
栽培植物分析測定法, 養賢堂 (1975)
- 52.) 木村真人・田中準昭・和田秀徳・高井廉
雄 : 水田圃場における粗大植物遺体の分
解経過, 第1報 粗大植物遺体の重量およ

の炭素率の経時的変動, 土肥誌, 51,
p. 169-174 (1980)

53.) 及川勉 : 水田状態における窒素の消長
に関する研究, 東北大修論 (1979)

54.) 吉田堯・甲斐秀昭・原田登五郎 : 土壤
の易分解性有機物の集積に関する研究,
I. 土壤の理化学性と易分解性有機物の集積
との関係, 九大農学芸誌, 26, p. 67-84
(1972)

55.) N. K. Savant and S. K. De Datta : Nitrogen
transformations in wetland rice soils, Adv. Agron.
, 35, p. 241-302 (1982)

56.) T. Koyama, M. Shibuya, M. Tokuyasu, T.
Shimomura, T. Ide and K. Ide : Balance sheet
and residual effects of fertilizer nitrogen in
Saga paddy field. Proc. Int. Seminar on

SEFMIA, Tokyo, p.289-296 (1977)

57.) 土壤養分分析法委員会 : 土壤養分分析法, 養覽堂 (1970)

58.) 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎・斉藤公夫・新保到 : 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3報 追肥窒素の土壤中における行動ならびに水稻による吸収, 日作紀, 40, p.287-293 (1971)

59.) 山室成一 : 水田土壤中における施肥窒素の有機化, 脱窒および水稻による吸収について, 土肥誌, 52, p.141-148 (1981)

60.) 山村成一 : 標識窒素追跡法による試料間変異とその要因, 北陸農試報, 21, p.147-168 (1978)

61.) 和田源七 : 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10報 マ
レイシア国サバ州の水田における施肥窒素
の動態, 日作紀51(別2), p.37-38(1982)

62.) 鬼鞍豊・吉野喬・前田乾一 : 稲作期に
おける土壌窒素の有効化過程, 土肥誌,
46, p.255-259(1975)

63.) 金野隆光 : 土壌肥料試験のための統計
計算用 BASIC プログラム, 農業技術研究
所化学部資料第1号(1983)

64.) 金野隆光・杉原進・山本富三 : 汚泥中
の有機態窒素の形態と肥効について, 第7
報 汚泥窒素の生態気候区分別の無機化予
測, 農技研肥料化学科資料, 249, p.78-98
(1983)

65.) 東北農試環境部土壌肥料第2研究室 :
土壌窒素供給力の診断法, 東北地域土壌
肥料関係ブロック会議資料II, 主なる成

果の概要 (1982)

66.) 庄子貞雄 : 水田土壤の粘土鉱物, 東北の土壤と農業 日土肥大会運営委員会, p. 61-72 (1973)

67.) 古賀汎 : 温州ミカン園における下層土の物理性に関する研究, 四国農試報, 25, p. 119-232 (1972)

68.) 秋山豊 : 土壤の物理性と植物生育, 土壤物理研究会編, p. 76, 養賢堂 (1979)

69.) 大山信雄 : 有機物施用および深耕による生産力増強, 東北農業研究, 講演要旨, p. 5-12 (1984)

70.) 米山忠克 : 作物の生長と窒素の転流 [1] - I. 窒素の栄養構造と転流 -, 農及園, 57, p. 373-378 (1982)

71.) 巽二郎 : 作物の生長と窒素の転流(3) -
II. 作物根の生長と窒素の転流 - , 農及園
57, p.631-638(1982)

72.) 関矢信一郎・本谷耕一 : 水田土壌中の
窒素の行動に関する研究 - とくに有機物と
の関係について - , 東北農試報, 36,
p.1-26(1968)

73.) 農林水産技術会議 : 水田における稲わ
らの施用法と施用基準, p.1-199(1968)

74.) 大山信雄 : 暖地水田における地力窒素
の発現様式 - 有機物の施用および土壌管理
法の影響 - , 土肥誌, 46, p.297-302(1975)

75.) 山根一郎 : 水田における有機酸とガス
の生成, 水田土壌学, 川口桂三郎編,
p.320, 講談社(1978)

76.) 高橋成人 : 水稻の分げつ機構に関する
一知見 I., 日作紀, 25, p. 73-74 (1956)

77.) 木内知見・石阪英男 : 水稻の収量形成
過程に及ぼす栄養条件の影響, 土肥誌,
31, p. 285-291 (1960)

78.) 木内知見・大向信平・宇佐見昭宣・高橋
紅 : 水稻の収量形成過程と土壤中の窒素
・加里条件との関係, 土肥誌, 32, p. 300
- 304 (1961)

79.) 船越三郎 : 挿秧深度が水稻の生育・収
量に及ぼす影響, 日作紀, 31, p. 69-72
(1962)

80.) A. Tanaka and C.V. Garcia : Studies of the
relationship between tillering and nitrogen uptake
of rice plant, 2. Relation between tillering and
nitrogen metabolism of the plant, Soil Sci.

Plant Nutr., 11, p. 129-135 (1965)

81.) 関矢信一郎・志賀一 : 北海道における
水田土壌中の窒素の動態と水稻の窒素吸収
パターンについて, 土肥誌, 46, p. 280 -
285 (1975)

82.) 甲斐秀昭 : 水田土壌中における窒素形
態変化と有効性, 水田土壌学, 川口桂三
郎編, p. 230, 講談社 (1978)

83.) 小管伸郎 : 湛水土壌における脱窒の研究,
農及園, 54, p. 495-500 (1979)

84.) P. L. G. Velk and E. T. Craswell : Effect
of nitrogen source and management on ammonia
volatilization losses from flooded rice soil
systems, Soil Sci. Soc. Am. J., 43, p. 352
-358 (1979)

85.) 和田秀徳 : 土の微生物, 土壤微生物学
会編, p. 141-158, 博友社(1981)

86.) 樋口太重・小野信一・内田好哉・古賀汎
: 水田土壌の不均一性および緩衝液抽出
法による評価, 土肥誌, 54, p. 377-382(1983)

87.) 出井嘉光 : 水田, 畑, 牧草地における
サンプリング, 草野秀, 鬼鞍豊, 新田一
彦著, p. 54-56, 講談社(1974)

88.) 金沢晋二郎・金澄玉・長谷部亮・高井康
雄 : 水田土壌の微生物および化学性に
関する分析値のバラツキ, 土肥誌, 52,
p. 187-192(1981)

89.) 柳沢宗男・高橋治助 : 水田の生産力要
因の解析に関する栄養生理学的研究,
農技研報, B 14, p. 41-171(1964)

90.) スネデカー・コクラン : 統計的方法,
岩波書店, p. 148 (1972)

91.) T. Mae and K. Ohira : The remobilization of
nitrogen related to leaf growth and senescence
in rice plants (*Oryza sativa* L.), *Plant &
Cell Physiol.*, 22, p. 1067-1074 (1981)

92.) T. Mae and K. Ohira : Relation between leaf
age and nitrogen incorporation the leaf of rice
plant (*Oryza sativa* L.), *Plant & Cell Physiol.*,
23, p. 1019-1024 (1982)

93.) T. Yoneyama : Nitrogen nutrition and growth of
the rice plant, I. Nitrogen circulation and
protein turn over in rice seedlings, *Soil Sci.
Plant Nutr.*, 23, p. 237-245 (1977)

94.) T. Yoneyama : Nitrogen nutrition and growth
to the rice plant, II. Considerations concerning

the dynamics of nitrogen in rice seedlings,
Soil Sci. Plant Nutr., 24, p.191-198 (1978)

95.) J. Tatsumi and Y. Kono : Translocation
of foliar-applied nitrogen to rice roots, Japan
Jour. Crop. Sci., 50, p. 302-310 (1981)

96.) 米野操・田中順一・板垣賢一・青柳栄助
・田中伸幸 : 水稻生育中期の水管理に伴
う土壌の2・3の性質と生育収量に及ぼす
影響, 山形農試報, 17, p. 45-57 (1982)

97.) 村上利男・和田道宏・吉田善吉 : 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, 45, p. 33-100 (1973)

98.) 塩入松三郎 : 水稻作に対する窒素肥料
の施用法について, 施肥改善奨励資料特
第2輯, 大日本農会 (1942)

(三井進午 : 水田の脱窒現象一発見と波

紋一，養賢堂， p.7 (1978)

99) 稻作指針 : 山形県農林水産部， p. 17
(1984)