

# インキュベーションおよび圃場における地力窒素の動態と水 稲窒素吸収量予測

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	山室, 成一
巻/号	59巻6号
掲載ページ	p. 549-556
発行年月	1988年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# インキュベーションおよび圃場における地力窒素の 動態と水稻窒素吸収量予測\*

山 室 成 一\*\*

キーワード トレーサー  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$ , インキュベーション, 無機化, 有機化, 水稻窒素吸収量予測

地力窒素の出方の簡易定量法とその動向予測は作物の生育制御にとって非常に重要なことと考えられる。このため、地力窒素の出方とその動態の研究は土壤肥沃度研究の最重要問題の一つとして数十年にわたって追究されてきた。最初は土壤中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  や  $\text{NO}_3\text{-N}$  を求めることから始まった。ここでは土壤中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  や  $\text{NO}_3\text{-N}$  の量は土壤から出てきた無機化窒素量と同じと考えられ、その  $\text{NH}_4\text{-N}$  や  $\text{NO}_3\text{-N}$  が経時的に追究されてきた。少量の乾土に水を加え、インキュベーションし、経時的に  $\text{NH}_4\text{-N}$  を求めたものが多かった。研究が進化するなかで、乾土と生土とでは蓄積する  $\text{NH}_4\text{-N}$  や  $\text{NO}_3\text{-N}$  量は大きく異なることがわかり<sup>1)</sup>、乾土による研究成果は水田や畑における地力窒素の動態との関連ではあまり評価されなくなっていった。さらに、硝化脱窒による損失を考慮する必要があることがわかり、脱窒のほとんどないと考えられる生土での密栓インキュベーション法が採用されるようになった。そして、生土中に蓄積してきた  $\text{NH}_4\text{-N}$  量を土壤から出てきた無機化窒素とした。杉原ら<sup>2)</sup>はこの蓄積  $\text{NH}_4\text{-N}$  の増加を土壤無機化窒素の速度論的展開モデル式にあてはめ、地力窒素の出方の診断法を提案した。しかし、この方法は密栓条件下の生土中に集積してきた現存  $\text{NH}_4\text{-N}$  量を土壤から出てきた無機化窒素量としていた。このため、理論値は無機化量であり、実験値は現存  $\text{NH}_4\text{-N}$  量、すなわち、無機化量から有機化量を減じた量になっており、理論と実験との間に明らかな矛盾が存在している。このように、現在行われているインキュベート実験や圃場試験でもいずれの場合も土壤中に現存している  $\text{NH}_4\text{-N}$  量を求めて、これをアンモニア化成長量とし、土壤から出てきた無機化窒素、すなわち、地力窒素としている。しかし、これは無機化

窒素  $\text{NH}_4\text{-N}$  のすべてではなく、そのうちの現に  $\text{NH}_4\text{-N}$  として存在している量にすぎない。土壤から出てきた  $\text{NH}_4\text{-N}$  は同時に進行している有機化、硝化脱窒、水稻吸収等の動きに入り消費されていくためである。微小期間  $T_j$  の  $t_{j0}$  時から  $t_{jn}$  時にかけての無機化量  $M_{jn}$ 、有機化、脱窒、吸収等への移行量  $G_{jn}$  と  $t_{j0}$ 、 $t_{jn}$  時の現存アンモニア、 $\text{NH}_4\text{-N}_{j0}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}_{jn}$  との間には  $M_{jn} - G_{jn} = \text{NH}_4\text{-N}_{jn} - \text{NH}_4\text{-N}_{j0}$  の関係がある<sup>3,4)</sup>ため、現存  $\text{NH}_4\text{-N}_{jn}$  や  $\text{NH}_4\text{-N}_{j0}$  が既知でも無機化量  $M_{jn}$  は求められない。このため、現在の段階では  $^{14}\text{N}$  と  $^{15}\text{N}$  量の変化から無機化窒素を求める  $^{15}\text{N}$  トレーサー法以外に方法はないといっても過言でない。無機化量と有機化量との間の関係が解明されれば、密栓インキュベーションによる現存  $\text{NH}_4\text{-N}$  量からの地力窒素の出方の診断は可能になるが、この関係は微生物のエネルギー源になる炭素量によって大きく変動することが知られており<sup>2)</sup>、密栓インキュベーションによる地力窒素の診断法の確立にはかなりの困難があると考えられる。ここでは、開放および密栓インキュベーションと圃場での地力窒素の出方およびその有機化、脱窒等の動態を  $^{15}\text{N}$  トレーサー法により明らかにし、地力窒素の簡易定量法と水稻の土壤窒素吸収量予測について検討したので報告する。

## 1. 試験方法

### 1) 供試水田および圃場試験区の構成

供試水田およびインキュベーション用生土は九州農業試験場構内の緒方統に分類される細粒質灰色低地土である。圃場試験区は前報<sup>5)</sup>の圃場無窒素区である。

### 2) 圃場でのトレーサー $\text{NH}_4\text{-N}$ 区の設置および $^{15}\text{N}$ 試料採取方法

前報<sup>5)</sup>に記述した。

### 3) 開放インキュベーション区の設置および $^{15}\text{N}$ 試料採取方法

開放インキュベーション用生土は毎週、代表茎数株の作土全層の土壤を圃場で攪拌し、その一部 1 kg 程度を

\* 水田における窒素の循環に関する研究 (第12報)  
本報告の一部は、1987年5月、日本土壤肥料学会九州支部大会において発表した。

\*\* 九州農業試験場 (833 筑後市大字和泉 496)  
昭和63年1月7日受理  
日本土壤肥料学雑誌 第59巻 第6号 p.549~556 (1988)

採取した。これをよく攪拌し、その一部 200~300g で現存 NH<sub>4</sub>-N を定量した。また、生土 200g をトルピカ (300 ml 容) にとり、それに 1.442 mg N のトレーサー NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N (95.7 atom %) を均一に加え、トルピカをそのまま圃場作土層中に置き、そこに水を 100 ml 程度加え灌水状態にした。そして、1 週間後に生土 100g をとり、その現存 NH<sub>4</sub>-N、生土 20g をとり土壤全窒素を求め、それらの <sup>15</sup>N atom % を測定した。

4) 密栓インキュベーション区の設定および <sup>15</sup>N 試料採取方法

密栓インキュベーション用生土は窒素肥料無施用区の作土を数 kg、6 月 17 日に採取し、それらをよく混合し、2mm のふるいを通し、水を加えて水田状態にした。そして、6 月 20 日に密栓用 300 ml 容円柱容器に生土 200g ずつ入れ、水で満たし密栓し、圃場作土層中に置いた。毎週 1 容器ずつ圃場から取り出しトレーサー NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N を加え、それを再び圃場作土層中に置き、その 1 週間後に同様に現存 NH<sub>4</sub>-N、土壤全窒素およびその <sup>15</sup>N atom % を測定した。

5) 試料の <sup>15</sup>N atom % 測定

試料の <sup>15</sup>N atom % 測定は発光分光分析法<sup>6)</sup>で行った。

6) 土壤有機態窒素からの無機化量の求め方

ある短期間 T<sub>j</sub> (これは順に t<sub>j0</sub>, t<sub>j1</sub>, ..., t<sub>ji</sub>, ..., t<sub>jn</sub> から成り立っている) におけるインキュベーション区は無機化量 M<sub>jn</sub> は前報<sup>5)</sup> の式 (13) より、

$$M_{jn} = [N_{jn} - (N_{j0}^{15} N_{jn} / N_{j0})]$$

第 1 表 無窒素区およびインキュベーション区における地力窒素の出方 (g/m<sup>2</sup>, mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>\*)

期 間 T <sub>j</sub> t <sub>j0</sub> ~t <sub>jn</sub>	無窒素区		密栓インキュベーション区				開放インキュベーション区				
	M <sub>jn</sub>	N <sub>j0</sub> **	N <sub>jn</sub> **	<sup>15</sup> N <sub>jn</sub> / <sup>15</sup> N <sub>j0</sub>	<sup>15</sup> R	M <sub>jn</sub>	N <sub>j0</sub> **	N <sub>jn</sub> **	<sup>15</sup> N <sub>jn</sub> / <sup>15</sup> N <sub>j0</sub>	<sup>15</sup> R	M <sub>jn</sub>
6/20~6/27	0.95	1.11	1.74	0.572	0.5950	1.42	1.11	1.57	0.590	0.5193	1.25
6/27~7/ 4	1.90	1.74	2.54	0.619	0.6260	1.83	1.09	1.80	0.457	0.4732	1.85
7/ 4~7/11	2.07	2.54	2.98	0.633	0.6405	1.70	1.14	1.86	0.490	0.4974	1.81
7/11~7/18	2.19	2.98	3.52	0.648	0.6470	1.96	1.16	2.04	0.505	0.5110	2.02
7/18~7/25	2.28	3.52	4.02	0.646	0.6801	2.10	0.56	1.74	0.517	0.4807	2.05
7/25~8/ 1	2.21	4.02	4.83	0.716	0.7338	2.27	0.46	1.69	0.447	0.4359	2.18
8/ 1~8/ 8	2.25	4.83	5.62	0.752	0.7683	2.26	0.37	1.61	0.425	0.4250	2.15
8/ 8~8/15	1.57	5.62	5.96	0.785	0.8086	1.72	0.26	1.45	0.425	0.4319	1.98
8/15~8/22	1.27	5.96	6.24	0.833	0.8508	1.38	0.35	1.27	0.439	0.4513	1.62
8/22~8/29	1.18	6.24	6.65***	0.869***	0.8863	1.30	0.39	1.21***	0.464***	0.4758	1.46
8/29~9/ 5	1.12	6.65	7.06	0.904	0.9060	1.10	0.38	1.14	0.488	0.4984	1.33
9/ 5~9/12	1.16	7.06	7.51	0.908	0.9145	1.15	0.37	1.10	0.509	0.5110	1.25
9/12~9/19	0.90	7.51	7.72	0.921	0.9195	0.84	0.41	1.07	0.513	0.5599	1.13
9/19~9/26	0.76	7.72	7.84	0.918	0.9165	0.79	0.52	1.14	0.611	0.6582	1.01

\* 各インキュベーション区は作土全層から採取した生土 200g を供試したが、この量は圃場無窒素区の 1 栽植様式単位の作土全量 9000g/0.045m<sup>2</sup> の 1/45 にあたるのでその M<sub>jn</sub> の単位を mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup> とした。

\*\* ここではトレーサー NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N 量を減じた値を示した。

\*\*\* 8/22, 9/5 における値の平均値として求めた。

$$\ln(1/^{15}R)]/(1-^{15}R) \quad (1)$$

である。ただし、N<sub>j0</sub>, N<sub>jn</sub> および <sup>15</sup>N<sub>j0</sub>, <sup>15</sup>N<sub>jn</sub> は T<sub>j</sub> 期間の t<sub>j0</sub> 時、t<sub>jn</sub> 時の現存 NH<sub>4</sub>-N 量および現存トレーサー NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N 量である。

$$^{15}R = \sqrt{(^{15}N_{jn}/^{15}N_{j0})(^{15}N_{j+1n}/^{15}N_{j+10})}$$

である。また、圃場無窒素区の M<sub>jn</sub> の求め方は前報<sup>5)</sup> に記述した。

7) 土壤無機化窒素からの移行量と有機化量, 脱窒量等の求め方

(1) 移行量: ある短期間 T<sub>j</sub> における移行量 G<sub>jn</sub> は次式より求めた<sup>4)</sup>。

$$G_{jn} = M_{jn} - \{(N_{jn} - ^{15}N_{jn}) - (N_{j0} - ^{15}N_{j0})\}$$

(2) 有機化量, 脱窒量: インキュベーション区における有機化量 A<sub>jn</sub>, 脱窒量 D<sub>jn</sub> の求め方は次式のとおりである。

$$G_{jn} = \{G_{jn}/(g_{jn} + g_{j+1n})\}(g_{j0n} + g_{j+10n})$$

ただし、ベクトル G<sub>jn</sub>=(A<sub>jn</sub>, D<sub>jn</sub>), ベクトル g<sub>j0n</sub> は t<sub>j0</sub> 時に施用したトレーサー NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N の t<sub>jn</sub> 時における有機化割合 a<sub>j0n</sub>, 脱窒割合 d<sub>j0n</sub> のベクトル表示 (a<sub>j0n</sub>, d<sub>j0n</sub>) である。g<sub>jn</sub>=a<sub>j0n</sub>+d<sub>j0n</sub> である。また、圃場無窒素区におけるこれらの値は前報<sup>5)</sup> に記述した。

2. 試験結果および考察

1) 土壤無機化窒素の出方

各インキュベーション区および圃場無窒素区の無機化量 (地力窒素の出方) の推移は第 1 表のとおりである。

圃場無窒素区は移植直後は少なく、0.95 gであったが、6月27日～7月4日1.90 g、7月11日～18日2.19 g、7月18日～25日2.28 g/m<sup>2</sup>と増加していった。これから8月上旬まで同様な値で経過したが、それ以後8月15日～22日1.27 gとなり、9月5日～12日1.16 g、9月19日～26日0.76 g/m<sup>2</sup>とさらに減少していった。次に、密栓インキュベーション区の無機化量は6月27日～7月4日1.83 mg、7月11日～18日1.96 mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>と圃場無窒素区よりやや少なかったが、7月末から8月末にかけては8月1日～8日2.26 mg、8月15日～22日1.38 mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>とやや多かった。しかし、9月に入ると圃場無窒素区のそれとほとんど同程度に少なくなった。密栓インキュベーション区での無機化窒素の推移は圃場無窒素区のそれに比べてわずかにおくれて出てきている。しかし、各期間の無機化量について両区間差はわずかであった。次に、開放インキュベーション区の週間無機化量は6月27日～7月4日1.85 mg、7月11日～18日2.02 mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>と圃場無窒素区よりやや少なかったが、7月25日～8月8日は同じになった。しかし、8月8日以後は8月15日～22日1.62 mg、9月5日～12日1.25 mg、9月19日～26日1.01 mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>と少し多かった。このように、各期間の無機化量は8月中旬以後少し多かったが、各期間ごとの無機化量の推移は圃場無窒素区と同様であった。開放インキュベーションを6月20日に全部作り、順次検討してみる必要があったと考えられる。

以上検討してきたように、開放、密栓インキュベーションおよび圃場無窒素区の地力窒素の出方は各期間とも各区であまり相違がないと考えられた。このため、圃場無窒素区の地力窒素の出方はその生土のインキュベーション試験で十分検討可能であることがわかった。(1)式の現存NH<sub>4</sub>-N、すなわち、N<sub>j0</sub>、N<sub>jn</sub>には施肥窒素の現存NH<sub>4</sub>-N量も含まれるので、地力窒素をすべての有機態窒素からの無機化量(施肥由来有機態窒素および施用有機物中窒素からの無機化量などを含む)とすると圃場施肥試験区の地力窒素の出方もその生土のインキュベーション試験で検討可能であると考えられる。また、(1)T<sub>j</sub>期間を1週間ではなく、たとえば1日間と非常に短く式のとると、(1)式の<sup>15</sup>N<sub>jn</sub>/<sup>15</sup>N<sub>j0</sub>と次の期間のそれはほとんど同じ値になると考えられるので、<sup>15</sup>Rの代わりに、<sup>15</sup>N<sub>jn</sub>/<sup>15</sup>N<sub>j0</sub>を用いて、すばやく、土壤の窒素無機化速度が診断できると考えられる。

密栓インキュベーション区における現存NH<sub>4</sub>-N量の推移は第1表より明らかなように、6月20日1.11 mg、7月18日3.52 mg、8月15日5.96 mg、9月12日7.51

mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>と増加していったが、9月末には増加の勢いがやや衰えた。この集積されたNH<sub>4</sub>-Nを無機化窒素量としている人たちが多いが、これは密栓インキュベーション区のアモニアプールの大きさあるいは現存NH<sub>4</sub>-N量である。

## 2) 土壤無機化窒素からの有機化量、脱窒量および水稻吸収量

各インキュベーション区におけるトレーサー-NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>Nの1週間後における有機化、脱窒の割合は第2表のとおりである。また、圃場無窒素区および各インキュベーション区のアモニアプールからの移行量とその有機化量、脱窒量および水稻吸収量(吸収量は圃場無窒素区のみ)は第3表のとおりである。まず、圃場無窒素区では各期間の移行量は無機化してきた窒素とおよそ同量程度であることがわかる。6月20日～27日1.10 g、7月4日～11日2.12 g、7月18日～25日2.56 g/m<sup>2</sup>と多くなっていった。7月11日～8月15日にかけては無機化量より移行量のほうがやや多かった。しかし、8月15日～22日1.25 g、9月5日～12日1.09 g、9月19日～26日0.75 g/m<sup>2</sup>と少なくなった。有機化量は初期の6月20日～7月18日は移植時を除いて0.83～1.10 gと多かったが、それからは水稻吸収が多くなるとともに減少し、7月18日～9月26日ではほとんど0.31～0.64 g/m<sup>2</sup>であった。脱窒量は6月20日～27日0.39 g、7月4日～11日0.67 g、7月18日～25日1.20 gと多くなったが、それ以後は少しずつ少なくなり、8月15日～22日0.22 g、9月12日～19日0.04 g/m<sup>2</sup>とわずかになった。ま

第2表 トレーサー NH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N の1週間後における動態(割合)

期 間 T <sub>j</sub> t <sub>j0</sub> ～t <sub>jn</sub>	密 栓 インキュベーション区		開 放 インキュベーション区	
	有機化	脱 窒*	有機化	脱 窒
6/20～6/27	0.391	0.037	0.339	0.071
6/27～7/ 4	0.310	0.071	0.433	0.110
7/ 4～7/11	0.330	0.037	0.385	0.125
7/11～7/18	0.283	0.069	0.385	0.110
7/18～7/25	0.352	0.002	0.386	0.097
7/25～8/ 1	0.285	-0.001	0.501	0.052
8/ 1～8/ 8	0.263	-0.015	0.518	0.057
8/ 8～8/15	0.197	0.018	0.458	0.117
8/15～8/22	0.145	0.022	0.465	0.096
8/22～8/29	0.120	0.011	0.445	0.091
8/29～9/ 5	0.094	0.002	0.426	0.086
9/ 5～9/12	0.090	0.002	0.452	0.039
9/12～9/19	0.086	-0.007	0.439	0.048
9/19～9/26	0.076	0.006	0.347	0.042

\* 7月18日以後脱窒0として取り扱うことにする。

第3表 アンモニアプールからの移行量とその有機化量, 脱窒量および吸収量 (g/m<sup>2</sup>, mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>)

期間 $T_j$ $t_{j0} \sim t_{jn}$	圃場無窒素区				密栓インキュベーション区			開放インキュベーション区		
	$A_{jn}$	$D_{jn}$	$P_{jn}$	$G_{jn}$	$A_{jn}$	$D_{jn}$	$G_{jn}$	$A_{jn}$	$D_{jn}$	$G_{jn}$
6/20~6/27	0.66	0.39	0.05	1.10	0.68	0.09	0.79	0.64	0.15	0.79
6/27~7/4	0.86	0.55	0.19	1.60	0.88	0.15	1.03	0.89	0.25	1.14
7/4~7/11	1.10	0.67	0.35	2.12	1.07	0.19	1.26	0.84	0.25	1.09
7/11~7/18	0.83	1.07	0.56	2.46	1.28	0.14	1.42	0.90	0.24	1.14
7/18~7/25	0.59	1.20	0.77	2.56	1.60	0.00	1.60	0.74	0.13	0.87
7/25~8/1	0.56	0.88	0.91	2.35	1.46	0.00	1.46	0.90	0.05	0.95
8/1~8/8	0.73	0.63	0.94	2.30	1.47	0.00	1.47	0.77	0.14	0.91
8/8~8/15	0.48	0.35	0.87	1.70	1.38	0.00	1.38	0.64	0.15	0.79
8/15~8/22	0.31	0.22	0.72	1.25	1.10	0.00	1.10	0.58	0.12	0.70
8/22~8/29	0.35	0.23	0.55	1.13	0.89	0.00	0.89	0.53	0.11	0.64
8/29~9/5	0.45	0.20	0.42	1.08	0.69	0.00	0.69	0.50	0.07	0.57
9/5~9/12	0.62	0.10	0.37	1.09	0.70	0.00	0.70	0.47	0.05	0.52
9/12~9/19	0.64	0.04	0.26	0.93	0.63	0.00	0.63	0.42	0.05	0.47
9/19~9/26	0.55	0.04	0.17	0.75	0.67	0.00	0.67	0.35	0.04	0.39

た、水稻吸収量は6月20日~27日0.05gとわずかであったが、それ以後7月4日~11日0.35g、7月25日~8月1日0.91g/m<sup>2</sup>と直線的に増していった。そして、8月中旬まで同様な値であったが、それ以後8月15日~22日0.72g、8月29日~9月5日0.42g、9月12日~19日0.26g/m<sup>2</sup>と直線的に減少していった。

次に、密栓インキュベーション区での移行量は、脱窒量が初期に少しあるだけなので、ほとんど有機化量になっていることがわかる。有機化量は6月20日~7月11日では圃場無窒素区とほとんど同じようであったが、それ以後、水稻がないため急に圃場無窒素区より多くなり、7月18日~25日1.60mg、8月8日~15日1.38mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>であったが、それ以後減少し、8月29日~9月5日0.69mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>となった。第1表から明らかなように、現存NH<sub>4</sub>-Nは増加していつているにもかかわらず、有機化量が7月下旬からはかえって減少していることは微生物の増殖に必要な有効態炭素源が初期から十分になく、7月下旬ころからかなり不足してきていることを示しているものと考えられる。

次に、開放インキュベーション区での移行量は圃場無窒素区よりかなり少なく、密栓インキュベーション区よりも少なく推移していることがわかる。6月20日~27日0.79mgと密栓インキュベーション区と同じであったが、7月18日~25日0.87mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>と密栓区よりかなり少なくなった。そして、8月中旬から減少し、8月15日~22日が0.70mg、9月5日~12日0.52mg、9月19日~26日0.39mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>となっていた。有機化量は7月上旬までは密栓インキュベーション区と同じようであったが、それ以後は7月18日~25日0.74mg、

8月8日~15日0.64mg、8月29日~9月5日0.50mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>と密栓区よりかなり少なかった。脱窒量はトレーサーNH<sub>4</sub>-<sup>15</sup>N施用時の十分な攪拌のため酸化層と還元層の分化が破壊され、非常に少なくなっていることがわかる。これは、脱窒の減少による現存NH<sub>4</sub>-Nの増加を示しているものと考えられる。有機化量が密栓インキュベーション区より少ない理由は土壌由来の有効態炭素源にそれほど相違がないにしても、たえず生成するバイオマス炭素由来の有効態炭素源が、圃場無窒素区と密栓インキュベーション区の有機化量の推移から明らかなように、開放インキュベーション区でかなり少ないことによるものと考えられる。

### 3) 水稻の窒素吸収量簡易診断法

前報<sup>5)</sup>で明らかにしたように、各期間における有機化量、脱窒量、水稻吸収量への移行ベクトル  $G_{jn}$  は、

$$G_{jn} = N_{j0}(g_{j0n})_{ad.} + \int_0^1 (a+bt) \times \{g_{j0n} + (g_{j+10n} - g_{j0n})t\} \times \{(1 - e^{-k(1-t)}) / (1 - e^{-k})\} dt$$

である。したがって、各期間における水稻吸収量  $P_{jn}$  は、

$$P_{jn} = N_{j0}(p_{j0n})_{ad.} + \int_0^1 (a+bt) \times \{p_{j0n} + (p_{j+10n} - p_{j0n})t\} \times \{(1 - e^{-k(1-t)}) / (1 - e^{-k})\} dt \quad (2)$$

となる。水稻窒素吸収量簡易診断のモデル式は(2)式の内容を変えることなくできるだけ簡略化したものにする必要があると考えられる。

(1) 圃場無窒素区における窒素吸収量簡易診断: まず、単純な試験区である圃場無窒素区について検討した

い。前報<sup>5)</sup>の第1表から明らかなように、 $^{15}N_n/^{15}N_0$ の推移は移植期から出穂4週間前まで直線的に減少し、それから出穂1週間前までは同様な値をとり、それ以後直線的に増加している。これらの動きは西南暖地普通期移植水田に共通しているものと考えられる。したがって、 $^{15}N_{j_n}/^{15}N_{j_0}$ の推移の概略は分けつ期、幼穂形成期～出穂期、登熟期にそれぞれ1点ずつ求めれば十分に推定できることがわかる。また、前報<sup>5)</sup>の第3表から明らかなように、トレーサー $^{15}N$ の1週間後における吸収割合 $p_{j_0n}$ の推移は移植期から出穂4週間前まで直線的に増加し、それ以後出穂期までは同様な値をとり、出穂期からは直線的に減少している。したがって、 $^{15}N_{j_n}/^{15}N_{j_0}$ 値と同様に分けつ期、穂形成期、登熟期にそれぞれ1点ずつの実測値があれば $p_{j_0n}$ は推定できる。次に、 $N_{j_0}$ の吸収割合( $p_{j_0n}$ )<sub>ad.</sub>の推移は概略、移植期から出穂4週間前までは( $p_{j_0n}$ )<sub>ad.</sub>=0.5 $p_{j_0n}$ 、それより出穂期までは( $p_{j_0n}$ )<sub>ad.</sub>= $p_{j_0n}$ 、出穂以後は出穂*i*週間後では( $p_{j_0n}$ )<sub>ad.</sub>= $0.4\left(\frac{1}{2}\right)^{i-1}p_{j_0n}$ と指数関数的に衰えているので( $p_{j_0n}$ )<sub>ad.</sub>はほとんど無視できると考えられる<sup>5)</sup>。すると、各期間における水稲吸収量の診断モデル式は(2)式で**b=0**とおいて、

$$\hat{P}_{j_n} = \alpha N_{j_0} p_{j_0n} + \frac{M_{j_n}}{1-^{15}R} \times \left[ \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1-^{15}R}{\ln ^{15}R} - \frac{^{15}R(1-\ln ^{15}R)-1}{(\ln ^{15}R)^2} \right\} p_{j+1_0n} + \left\{ \frac{1}{2} + \frac{^{15}R(1-\ln ^{15}R)-1}{(\ln ^{15}R)^2} \right\} p_{j_0n} \right] \quad (3)$$

となる。ただし、 $\alpha=0.5$ (幼穂形成期直後まで)、1(幼穂形成期直後～出穂期)、0(出穂以後)である。無窒素区では前述したように、 $N_{j_0}$ 、 $^{15}N_{j_n}/^{15}N_{j_0}$ 、 $p_{j_0n}$ については各4点程度の実測値よりそれらの推定値が求まるため、 $M_{j_n}$ も計算できる。したがって、水稲窒素吸収量の簡易推定量も(3)式より求められる。しかし、インキュベーションのデータだけから $\hat{P}_{j_n}$ を求めるときには工夫が必要である。(3)式は次のように書ける。すなわち、

$$\hat{P}_{j_n} = \alpha N_{j_0} p_{j_0n} + M_{j_n} (\beta p_{j+1_0n} + \gamma p_{j_0n}) \quad (4)$$

ただし、 $\beta$ 、 $\gamma$ は $t_{j_0}$ 時から $t_{j_n}$ 時までたえず無機化してきた窒素の吸収割合を $t_{j_0}$ 時に無機化した窒素の $t_{j_n}$ 時における吸収割合 $p_{j_0n}$ と $t_{j+1_0}$ 時に無機化した窒素の $t_{j+1_n}$ 時における吸収割合 $p_{j+1_0n}$ で表わしたときの両者のかかわりを示す値であり、

$$\beta = \frac{1}{1-^{15}R} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1-^{15}R}{\ln ^{15}R} + \frac{1-^{15}R(1-\ln ^{15}R)}{(\ln ^{15}R)^2} \right\},$$

$$\gamma = \frac{1}{1-^{15}R} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1-^{15}R(1-\ln ^{15}R)}{(\ln ^{15}R)^2} \right\}$$

である。 $^{15}R$ と $\beta$ 、 $\gamma$ の関係を数値表にしておけば便利で

ある。ここでは移植期～分けつ期および出穂期以後は $^{15}R \geq 0.1$ 、分けつ盛期～出穂期は $^{15}R < 0.1$ であったが、そのときの $\beta$ 、 $\gamma$ は $0.22 \leq \beta \leq 0.26$ 、 $0.38 \leq \gamma \leq 0.41$ および $0.26 \leq \beta \leq 0.33$ 、 $0.41 \leq \gamma \leq 0.46$ であったので、移植期～分けつ盛期および出穂期以後は $\beta=0.24$ 、 $\gamma=0.40$ 、分けつ盛期～出穂期は $\beta=0.31$ 、 $\gamma=0.45$ として、各 $p_{j_0n}$ の推定値とインキュベーションより求めた $M_{j_n}$ から水稲窒素吸収量の簡易推定量が(4)式より求められる。なお、各 $p_{j_0n}$ と水稲乾物量との関係が明らかになってくれば $p_{j_0n}$ は直接求める必要はなくなってくるものと考えられる。

たとえば、圃場無窒素区における現存 $NH_4-N$ は6月27日0.96、7月4日1.26、8月1日0.52、8月8日0.48、8月29日0.42、9月5日0.46g/m<sup>2</sup>であり、 $^{15}N_{j_n}/^{15}N_{j_0}$ は6月27日～7月4日0.249、8月1日～8日0.013、9月5日～12日0.107、同じく $p_{j_0n}$ はそれぞれ0.075、0.484、0.435のみ既知であったとする。また、密栓インキュベーション区における現存 $NH_4-N$ は7月4日2.54、8月8日5.62、9月12日7.51、26日7.84mg/10<sup>-3</sup>・m<sup>2</sup>であり、 $^{15}N_{j_n}/^{15}N_{j_0}$ は6月27日～7月4日0.619、8月1日～8日0.752、9月5日～12日0.908、19日～26日0.918のみ既知であったとする。すると、各点を直線でつないで空白点を求め、窒素吸収量簡易予測値は第4表のようになる。これより明らかなように、 $^{15}N$ トレーサー法による水稲窒素吸収量の予測はかなり正確であることがわかる。これに対して、山本ら<sup>7)</sup>、長野間ら<sup>8)</sup>の「密栓インキュベーション蓄積 $NH_4-N$ から圃場 $NH_4-N$ を減じた量が水稲吸収全窒素量に等しい」として求めた窒素吸収予測値は窒素吸収量実測値<sup>5)</sup>とは移植期～分けつ盛期および出穂3週間前から出穂期にかけて大きな相違があった。これは、密栓インキュベーション区での現存 $NH_4-N$ 量を無機化窒素量と誤解していることが主因であると考えられる。

(2) 圃場施肥窒素区における窒素吸収量簡易診断のモデル式：(3)式の $N_{j_0}$ は基肥全層施肥窒素を含むことができる。追肥表層施肥窒素は施用時に無機化してきた窒素の $p_{j_0n}$ と同様に取り扱うことができる。その理由は表層施用溶存 $NH_4-N$ と全層施用溶存 $NH_4-N$ の水稲吸収割合はほとんど相違がないからである(第5表参照)。また、 $M_{j_n}$ のなかに、施肥由来再無機化窒素が含まれる<sup>5)</sup>こと、さらに、土壌由来無機化窒素は施肥窒素の有無によってほとんど影響されないと考えられる<sup>9)</sup>こと、しかも幼穂形成期以後の追肥窒素の再無機化はその施用量の10%程度と考えられ、ほとんど無視できることなどから、圃場施肥窒素区における窒素吸収量簡易診断モデル

第 4 表  $^{15}\text{N}$ トレーサー法による圃場無窒素区吸収量簡易予測(N g/m<sup>2</sup>)

期 間 $T_j$ $t_{j0} \sim t_{jn}$	<sup>a</sup> $N_{j0}$	<sup>a</sup> $\frac{^{15}\text{N}_{jn}}{^{15}\text{N}_{j0}}$	<sup>a</sup> $M_{jn}$	<sup>b</sup> $(N_{j0})$	<sup>b</sup> $(\frac{^{15}\text{N}_{jn}}{^{15}\text{N}_{j0}})$	<sup>b</sup> $(M_{jn})$	<sup>a</sup> $p_{j0n}$	<sup>c</sup> $\hat{P}_{jn}$	<sup>d</sup> $(\hat{P}_{jn})$	<sup>e</sup> $[\hat{P}_{jn}]$	<sup>f</sup> $P_{jn}$
6/20~6/27	0.66	0.308	1.34	1.31	0.592	1.46	0.000	0.02	0.04	0.78	0.05
6/27~7/ 4	0.96*	0.249*	1.99	1.92	0.619*	1.69	0.075*	0.18	0.16	0.50	0.19
7/ 4~7/11	1.26*	0.189	1.85	2.54*	0.646	1.86	0.175	0.37	0.36	0.49	0.35
7/11~7/18	1.08	0.131	1.93	3.16	0.672	2.02	0.277	0.56	0.56	0.81	0.56
7/18~7/25	0.89	0.072	2.32	3.77	0.699	2.07	0.380	0.90	0.83	0.78	0.77
7/25~8/ 1	0.71	0.013	2.25	4.39	0.725	2.11	0.484	1.03	0.95	0.95	0.91
8/ 1~8/ 8	0.52*	0.013*	2.08	5.00	0.752*	2.12	0.484*	0.92	0.91	0.83	0.94
8/ 8~8/15	0.48*	0.013	1.91	5.62*	0.783	1.79	0.484	0.96	0.89	0.45	0.87
8/15~8/22	0.44	0.013	1.43	6.00	0.814	1.59	0.484	0.74	0.80	0.28	0.72
8/22~8/29	0.38	0.044	1.22	6.34	0.846	1.53	0.484	0.60	0.73	0.36	0.55
8/29~9/ 5	0.42*	0.075	1.14	6.78	0.877	1.25	0.459	0.35	0.43	0.37	0.42
9/ 5~9/12	0.46*	0.107*	1.06	7.13	0.908*	1.09	0.435*	0.30	0.30	0.38	0.37
9/12~9/19	0.50	0.138	1.04	7.51*	0.913	0.86	0.410	0.27	0.22	0.24	0.26
9/19~9/26	0.54	0.170	1.01	7.68	0.918*	0.82	0.386	0.24	0.20	0.11	0.17

<sup>a</sup> 圃場無窒素区, <sup>b</sup> 密栓インキュベーション区, <sup>c</sup> (3)式より計算, <sup>d</sup> (4)式より計算, <sup>e</sup> 密栓インキュベーション区の  $(N_{jn}-N_{j0})$ -圃場無窒素区の  $(N_{jn}-N_{j0})=[\hat{P}_{jn}]$ とした, 山本らの予測法, <sup>f</sup> 圃場無窒素区の窒素吸収量修正値 (前報<sup>5)</sup>参照).

\* 実測値, なお, 9月26日の  $(N_{j0})$  実測値は 7.84 であった.

第 5 表 施用時溶存  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  の水稻吸収割合 (%)

期 間 $T_j$ $t_{j0} \sim t_{jn}$	施用 $^{15}\text{N}$ の種類	表層施用	全層施用
6/27~7/ 3	トレーサー $^{15}\text{N}^*$	4.4	3.7
7/ 3~7/10	トレーサー $^{15}\text{N}^*$	8.7	9.6
7/24~7/26	肥料 $^{15}\text{N}^{**}$	28.0	33.5
7/24~7/29	肥料 $^{15}\text{N}^{**}$	49.8	57.2
8/16~8/18	肥料 $^{15}\text{N}^{**}$	43.9	43.3
8/16~8/21	肥料 $^{15}\text{N}^{**}$	60.7	59.4

\* 99.7 atom %  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  0.3 g/m<sup>2</sup> を無窒素区に施用, 1987年.

\*\* 10.3 atom %  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  4.0 g/m<sup>2</sup> を施肥窒素区中に併設した $^{15}\text{N}$ 区に施用 (全層施用区は注射器で全層に無作為に施用), 1986年.

式は圃場無窒素区のそれが基本になり, 次のように表わすことができる.

$$\hat{P}_{jn} = aN_{j0}p_{j0n} + N_{tj0}p_{j0n} + \frac{M_{jn}}{1-^{15}R} \times \left[ \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1-^{15}R}{\ln ^{15}R} - \frac{^{15}R(1-\ln ^{15}R)-1}{(\ln ^{15}R)^2} \right\} p_{j+10n} + \left\{ \frac{1}{2} + \frac{^{15}R(1-\ln ^{15}R)-1}{(\ln ^{15}R)^2} \right\} p_{j0n} \right] \quad (5)$$

ただし,  $N_{j0}$  のなかには基肥窒素が幼穂形成期ごろまで含まれる.  $N_{tj0}$  は追肥窒素であり,  $M_{jn}$  のなかには幼穂形成期ごろまで基肥由来窒素の再無機化量が含まれる. (5)式は施肥窒素が基肥窒素のみの区に追肥窒素が独立して加わってくることを意味している. 基肥窒素のみの区では幼穂形成期以後の  $^{15}\text{N}_{jn}/^{15}\text{N}_{j0}$  値の推移は無

窒素区のそれと同じように単純であるのでこの区より  $M_{jn}$ ,  $p_{j0n}$ ,  $\alpha$  値を求め, この区の  $\hat{P}_{jn}$  を計算し, これに  $N_{tj0}p_{j0n}$  を加えるようにすると一般施肥窒素区の  $\hat{P}_{jn}$  値は安定的に求めることができるものと考えられる.  $\alpha$  については今後検討されよう.

### 3. 要 約

$^{15}\text{N}$  トレーサー法を用い, インキュベーション区と圃場無窒素区での地力窒素の出方とその有機化, 脱窒等への移行量ならびに水稻窒素吸収量予測法について検討した.

1) 開放, 密栓インキュベーション, 圃場無窒素区とも地力窒素の出方は同じようであった. このため, インキュベーション法でも圃場における地力窒素の出方の簡易測定が可能になった. 1週間当たりの無機化窒素は移植期の6月下旬で1.0~1.4gであったが, 7月初旬1.7~2.1g, 下旬2.1~2.3gと増加し, それ以後は8月中旬1.3~1.6g, 9月中旬0.9~1.1g/m<sup>2</sup>と減少していった.

2) 土壌無機化窒素からの有機化, 脱窒などへの移行は圃場無窒素区とインキュベーション区で大きく異なっていた. 移行量は圃場無窒素区で多く, ついで密栓インキュベーション区, 開放インキュベーション区の順であった. 密栓インキュベーション区での有機化量は開放インキュベーション区でのそれよりかなり多かった. 脱窒量は圃場無窒素区で一番多く, ついで開放インキュベーション区, 密栓インキュベーション区の順であった. 密

控インキュベーション区は密植直後にわずかにあるのみであった。

3) 圃場無窒素区における窒素吸収量簡易予測式は、

$$\begin{aligned} \hat{P}_{jn} &= \alpha N_{j0} p_{j0n} + \frac{M_{jn}}{1-^{15}R} \\ &\times \left[ \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1-^{15}R}{\ln ^{15}R} - \frac{^{15}R(1-\ln ^{15}R)-1}{(\ln ^{15}R)^2} \right\} p_{j+10n} \right. \\ &\left. + \left\{ \frac{1}{2} + \frac{^{15}R(1-\ln ^{15}R)-1}{(\ln ^{15}R)^2} \right\} p_{j0n} \right] \\ &= \alpha N_{j0} p_{j0n} + M_{jn}(\beta p_{j+10n} + \gamma p_{j0n}) \end{aligned}$$

である。ただし、 $\alpha=0.5$  (幼穂形成期直後まで)、1 (幼穂形成期直後～出穂期)、0 (登熟期) である。また、 $\beta$ 、 $\gamma$  は  $\beta=0.24$ 、 $\gamma=0.40$  (分けつ盛期～出穂期を除く期間)、 $\beta=0.31$ 、 $\gamma=0.45$  (分けつ盛期～出穂期) である。 $N_{j0}$  は  $T_j$  期間のスタート時における現存  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $p_{j0n}$  は同じくスタート時施用トレーサー  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  の終時における水稻吸収割合、 $M_{jn}$  は  $T_j$  期間における無機化窒素量、 $^{15}R = \sqrt{(^{15}N_{jn}/^{15}N_{j0})(^{15}N_{j+1n}/^{15}N_{j+10})}$  であり、 $^{15}N_{j0}$ 、 $^{15}N_{jn}$  はトレーサー  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  の  $T_j$  期間のスタート時および終時における値である。各  $N_{j0}$ 、 $^{15}N_{jn}/^{15}N_{j0}$  および  $p_{j0n}$  の3～6点の実測値から  $T_j$  期間の各推定値を求め、これと水稻採取株より求めた窒素吸収量と比較したところかなりよく適合していた。

4) 圃場施肥窒素区における窒素吸収量簡易予測式は無窒素区のそれが基本になり、基肥窒素のみの区に追肥窒素が独立して加わってくる内容になり次式で表わせよう。

$$\begin{aligned} \hat{P}_{jn} &= \{\alpha N_{j0} p_{j0n} + M_{jn}(\beta p_{j+10n} + \gamma p_{j0n})\} \\ &+ N_{tj0} p_{j0n} \end{aligned}$$

ただし、{ } 内は基肥窒素のみの区より求められる。 $N_{j0}$  のなかには基肥窒素が含まれる。 $M_{jn}$  のなかには幼穂形成期ごろまで基肥由来窒素の再無機化量が含まれる。 $N_{tj0}$  は追肥窒素施用量である。 $\alpha$  は土壌吸着  $\text{NH}_4\text{-N}$  の土壌溶液溶存  $\text{NH}_4\text{-N}$  に対する水稻吸収割合の比であり、今後検討されよう。

## 文 献

- 1) 塩入松三郎・青峰重範：休閑期に於ける水田土壌乾燥の效果に就いて、農事試験時報，1～30 (1940)
- 2) 杉原 進・金野隆光・石井和夫：土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法，農環技研報，1，127～166 (1986)
- 3) BLACKBURN, T.H.: Method for measuring rates of  $\text{NH}_4^+$  turnover in anoxic marine sediments, using a  $^{15}\text{N-NH}_4^+$  dilution technique. *Appl. Environ. Microbiol.*, **37**, 760～765 (1979)
- 4) 山室成一：強粘質半湿田とその乾田化水田における土壌窒素の無機化とその有機化、脱窒および水稻による吸収，土肥誌，**58**，309～315 (1987)
- 5) 山室成一：水田における窒素の動態に関する $^{15}\text{N}$ トレーサー法の理論的展開，同上，**59**，538～548 (1988)
- 6) YAMAMURO, S.: The accurate determination of nitrogen-15 with an emission spectrometer. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **27**，405～419 (1981)
- 7) 山本富三・久保田忠一・真鍋尚義：速度論的方法による水稻生育期間中の土壌窒素無機化量の推定，土肥誌，**57**，487～492 (1986)
- 8) 長野間宏ら東北地域土壌窒素無機化パターン研究グループ：東北地域における土壌窒素無機化パターンのモデルとその活用技術の現状，農業技術，**43**，161～164，208～213 (1988)
- 9) 山室成一：施肥由来有機態窒素の再無機化量の求め方と「プライミング効果」，土肥要旨集，**34**，310 (1988)

## Behavior of Soil Nitrogen in a Paddy Field and the Incubation Soil and a Rapid Estimate of the Rate of Absorption by Rice Plant

Shigekazu YAMAMURO

(Kyushu Natl. Agric. Exp. Stn.)

Mineralization of soil nitrogen and transfer from mineralized soil nitrogen to assimilation denitrification in a paddy field and in the incubated soil, and a rapid estimate of the rate of absorption by rice plant by using the  $^{15}\text{N}$  tracer technique were examined.

1) Mineralization: The rates of mineralization in anaerobic incubation, aerobic incubation, and a paddy field of no application were nearly the same. For this reason, a rapid estimate of the rate of mineralization in paddy field was possible by applying the tracer  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  to the incubated soil. The amount of mineralization for a week was 1.0-1.4 mg in the week June 20-27 of the planting time, and then increased by 1.7-2.1 mg in the week July 4-11, 2.2-2.3 mg/10<sup>-3</sup>·m<sup>2</sup> in the week July 25-Aug. 1. Then it lowered rapidly by 1.3-1.6 mg in the week Aug. 22-29, 0.9-1.1 mg/10<sup>-3</sup>·m<sup>2</sup> in the week Sep. 12-19.

2) Transfer from mineralized soil nitrogen to assimilation and denitrification: The field experi-



ment of no application yielded the greatest amount of transferred nitrogen, followed by the aerobic incubation, and by the anaerobic incubation. The amount of assimilation in the anaerobic incubation was larger than that in the aerobic one. The field experiment produced the greatest amount of denitrification, followed by the aerobic incubation. Denitrification in anaerobic incubation was observed to be slight immediately after starting.

3) A model formula on a rapid estimate of absorption by rice plant in paddy fields of no application: The estimate of absorption,  $\hat{P}_{jn}$ , for a given period,  $T_j$ , (composed of successive times  $t_{j0}$ ,  $t_{j1}$ , ...,  $t_{ji}$ , ...,  $t_{jn}$ ) can be written:

$$\hat{P}_{jn} = \alpha N_{j0} p_{j0n} + M_{jn} (\beta p_{j+10n} + \gamma p_{j0n}).$$

Where  $\alpha=0.5$  (from planting to young panicle initiation), 1 (from panicle initiation to flowering), 0 (after flowering);  $\beta=0.24$ ,  $\gamma=0.40$  (all stages except active tillering-flowering),  $\beta=0.31$ ,  $\gamma=0.45$  (active tillering-flowering).  $N_{j0}$ : the amount of  $\text{NH}_4\text{-N}$  existing at the time of  $t_{j0}$ ,  $p_{j0n}$ : the ratio of distribution of the tracer  $\text{NH}_4\text{-}^{15}\text{N}$  applied at random into soil by an injection at  $t_{j0}$  to absorption by rice plants.  $M_{jn}$ : mineralization during a period  $T_j$ .  $\hat{P}_{jn}$  calculated from a few measured values agreed nearly with the measurement of absorption by rice plant.

*Key words* tracer  $^{15}\text{N}$ , incubation, mineralization, transfer from mineralized soil nitrogen, a rapid estimate of absorption

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 59, 549-556, 1988)