

### 3章 庄内地域におけるグライ土壌作土の無機化特性

#### 1. はじめに

山形県庄内地域における水稲の単収は613kg/10a(1985年度)であり<sup>99)</sup>、日本でも有数の高位収穫地帯である。また土壌型は、グライ土壌が水田全体の70%を占めている<sup>98)</sup>。さらに、導入されている品種が、良質米のササニシキ、はえぬきなどであり、生育各時期の窒素吸収量の過不足が、もみ数の不足あるいは倒伏などを引き起こし、収量や品質・食味に大きな影響を与えている。したがって、安定的な収量を継続的に得るためには、水稲の生育診断・予測を行い、きめ細かな追肥対応が必要になるものとみられる。

山形県では、水稲の生育診断予測を実用化し、普及に移している<sup>93)</sup>。この生育診断予測に用いられるデータは、草丈・莖数などの水稲の形態的特徴と気象データである。そして、今後は、水稲の窒素吸収量、炭水化物の体内分布および根の呼吸活性などをモデルに組み込む必要性が指摘されている<sup>93)</sup>。

そのため、水稲の吸収する窒素の大半以上<sup>78)</sup>を占める地力窒素の無機化過程と無機化量を明らかにすることが必要であり、第2章では、山形県内の水田土壌について反応速度論解析により地力窒素の無機化モデルの検討を行った<sup>5)</sup>。それによれば、沖積水田土壌の地力窒素の無機化モデルとして、負の項のある2項モデル $[N=A(1-\exp(-k_a t_a))+B(1-\exp(-k_b t_b))]+C$ 、ただし、A:可分解性有機態窒素量、B:負の項の可分解性有機態窒素量、 $k_a, k_b$ :速度定数、 $t_a, t_b$ :18°C変換日数、C:定数]が適応できることが明らかとなった。

しかしながら、現在まで各地域の代表的な土壌の地力窒素の無機化についてしか研究されていないのが現状である。今後、水稲の生育診断予測に地力窒素の無機化予測を組み込むためには、同一土壌型および同一地域でさらにきめ細かな地力窒素の無機化過程を明らかにする必要がある。

そこで、本章では、庄内地域のグライ土壌の作土を対象として地力窒素の無機化過程を速度論的に解析を行い、地力窒素の無機化特性を明らかにするとともに、水稲による地力窒素吸収の関係を研究した。

## 2. 実験材料および実験方法

### 1) 供試水田土壌

培養実験には、山形県の庄内地域のグライ土壌から、細粒強グライ土壌15点、中粗粒強グライ土壌5点、そして細粒グライ土壌5点の計25点を供試した。なお、No.1の土壌は、第2章で示した庄内土壌である。各土壌の一般理化学性を第7表に示した。全窒素含量についてみると、0.23~0.42%の幅があり、平均で0.32%であった。全炭素含量は、2.0~4.2%で、2%台が16土壌である。C/N比は、大部分の土壌で8~10の値を示した。CECは、15.4~28.5meq/乾土100gであり、平均で22.5meq/乾土100gであった。リン酸吸収係数は、650~1380であり、1200以上の土壌が4点あった。

### 2) 実験方法

実験方法は、第2章に準じた<sup>4)</sup>。すなわち、供試土壌として5mmの篩を通した湿潤土を使用した。供試土壌の一定量(110℃乾土当たり、30g)に脱塩水を添加して密閉したビニール袋を、移植した水田の株間地表下5cmに金網をおき埋設した。なお、培養中は水田を常時湛水とし、ビニール袋の埋設時期は、4回(5月15日、5月23日、6月6日および7月5日)とした。約1週間ごとにビニール袋を回収し、常法によりアンモニア態窒素を定量した。地温すなわち培養温度は、ビニール袋に温度センサーを入れて測定した。

解析にあたっては、負の項のある2項モデルを使用した。ただし、実際の計算は、単純並行型モデルで行った。時期別の地力窒素の無機化量および年次変動の解析にあたっては、1977年から1985年の庄内支場(藤島町)の地表下5cmの地温のデータを使用した。

水稲による地力窒素吸収量は、培養実験で供試した土壌のうち19土壌で検討した。実験は1985年度に行ない、現地圃場において基肥窒素の吸収が終了する7月以降、追肥をしない区を設け、水稲の地力窒素の吸収量を求めた。栽培法は、7月以降追肥をしない他は現地慣行とした。水稲は、7月22日と9月17日の2回、平均的な稲株(3~5株)を採取して、常法により窒素吸収量を求めた。なお、実験に使用した品種は、全てササニシキである。

第7表 供試土壌の化学性(作土)

土壌	pH (H <sub>2</sub> O)	T-N (%)	T-C (%)	C/N比	CEC (meq /100g)	リン酸吸 収係数	二価鉄量 :mg/ 100g	陽起元性 マンガン :mg/ 100g	培養窒素量*		吉野・出 井法によ る係数: (n)	②風乾土/ ①生土比
									生土:4 週間①	風乾土: 4週間②		
1	6.1	0.32	2.29	7.2	19.2	850	168	28	5.2	28.1	0.94	5.4
2	5.7	0.30	2.01	8.7	27.1	1220	272	34	3.7	26.4	1.00	7.1
3	5.5	0.33	3.01	9.4	28.5	1160	166	30	3.9	29.0	1.39	7.4
4	5.2	0.33	2.97	9.0	25.8	1180	344	39	4.4	32.0	0.93	7.3
5	5.3	0.30	2.48	8.3	25.4	1380	208	34	3.7	28.6	1.21	7.7
6	5.3	0.28	2.59	9.3	25.7	1210	100	10	3.2	25.4	1.34	7.9
7	5.2	0.35	3.17	9.1	20.3	720	132	7	1.9	18.7	1.06	9.8
8	5.4	0.25	2.41	9.6	17.7	760	132	7	5.0	20.2	0.94	4.0
9	5.7	0.27	2.66	9.9	19.3	780	154	11	2.5	24.9	0.67	10.0
10	5.6	0.23	2.31	10.0	15.4	710	100	9	2.5	21.9	0.80	8.8
11	5.3	0.29	2.41	8.3	15.8	660	78	6	3.0	21.8	0.83	7.3
12	5.3	0.24	2.06	8.6	15.8	650	39	3	3.0	19.4	0.63	6.5
13	5.6	0.40	3.92	9.8	23.7	990	329	21	4.1	25.9	0.97	6.3
14	5.9	0.42	4.22	10.1	22.6	1010	324	33	4.3	28.2	1.14	6.6
15	5.5	0.42	4.08	9.7	25.4	1220	95	23	4.2	34.2	1.19	8.1
平均	5.5	0.32	2.84	8.9	21.8	970	167	20	3.6	25.6	1.00	7.1
中ラ16	5.6	0.25	2.48	9.9	18.2	830	358	31	3.3	27.2	0.93	8.2
粗イ17	5.1	0.29	2.45	8.5	20.4	880	165	16	6.2	25.2	0.70	4.1
粒土18	5.3	0.39	3.80	9.7	25.7	1210	110	7	6.0	30.4	0.80	5.1
強壤19	5.3	0.38	3.87	10.2	23.0	1130	358	17	4.9	30.9	0.80	6.3
グ20	5.3	0.39	3.25	8.3	22.4	1030	403	22	5.1	30.4	0.77	6.0
平均	5.3	0.34	3.17	9.3	21.9	1020	278	19	5.1	28.8	0.80	5.6
細土21	5.5	0.33	2.81	8.5	23.8	1020	298	13	4.2	24.8	0.85	5.9
粒壤22	5.1	0.38	3.11	8.2	25.7	930	279	10	3.9	23.8	0.93	6.1
グ23	5.2	0.28	2.35	8.4	25.1	960	248	24	2.8	21.5	0.73	7.7
ラ24	4.9	0.26	2.31	8.9	26.4	1000	352	9	2.8	21.2	0.51	7.6
イ25	5.2	0.27	2.21	8.2	24.7	960	200	15	4.1	20.8	0.86	5.1
平均	5.2	0.30	2.56	8.4	25.1	970	275	14	3.6	22.4	0.78	6.5

※培養窒素量(30℃4週間培養):mg/乾土100g

### 3. 実験結果

#### 1) 庄内地域における沖積水田土壌の地力窒素の無機化の特性値

供試した各土壌の無機化特性値を第8および9表に示した。これによれば、いずれの土壌でも、単純並行型のモデルで1つの項が負の項となり、第2章で示した「負の項のある2項モデル」となった。各土壌の分散をみると、大部分の土壌で20以下となり、負の項のある2項モデルがよく適合した。なお、第8および9表に示すように、いずれの土壌でも、単純型モデルにあてはめた時より、負の項のある2項モデルにあてはめた方が、分散が小さくなった。

無機化特性値のうち、可分解性有機態窒素量についてみると、正の項では、7.31~22.68mg/乾土100gであり、平均15.23mg/乾土100gであった。負の項では、0.86~12.20mg/乾土100gで、平均6.50mg/乾土100gであった。

次に、活性化エネルギーについてみると、正の項では、16,000~42,000cal/molであり、平均24,000cal/molであった。負の項では、15,000~49,000cal/molであり、平均32,000cal/molであった。そして、大部分の土壌で、活性化エネルギーは、負の項>正の項であった。

次に、無機化速度定数についてみると、正の項では、No.2,5,6および7を除いて約0.01 1/dayであり、大部分の土壌の負の項では、0.01~0.03 1/dayであった。したがって、負の項の地力窒素の無機化速度定数が、正の項、すなわち全地力窒素無機化速度の約2~3倍以上であった。速度定数の小さい土壌のうち、No.2,5および6の土壌はリン酸吸収係数がいずれも1200前後であり、火山灰の混入の可能性が認められた。

#### 2) 推定式による地力窒素無機化量と水稻の地力窒素吸収量との関係

速度論的解析によって求めた推定式による地力窒素無機化量と水稻の地力窒素吸収量の関係を解析し、速度論的解析の有効性について研究した。

基肥窒素が水田土壌中にアンモニア態窒素として残存している時期は、基肥窒素により地力窒素が希釈され、水稻による地力窒素の吸収量と地力窒素の発現量の関係を求めるのは困難であると考えらる。そこで、本実験では、土壌中のアンモニア態窒素が消失する7月中旬以降の水稻による地力窒素の吸収量と

第8表 地力窒素無機化の特性値 (単純型)

土壌型	E a (cal/mol)	A (mg/100g)	k (1/day)	B (mg/100g)	V (分散)		
	1	26000	11.58	0.00192	0.56	12.88	
	2	49000	10.87	0.00712	0.21	13.29	
	3	29000	17.74	0.00216	0.01	16.73	
細 粒 強 グ ラ イ 土 壤	4	27000	21.10	0.00256	-0.30	23.57	
	5	38000	23.01	0.00116	-0.29	62.55	
	6	34000	20.41	0.00132	0.02	21.06	
	7	28000	12.82	0.00380	-0.06	20.29	
	8	35000	14.41	0.00288	-0.02	61.43	
	9	24000	21.25	0.00272	-0.21	23.90	
	10	23000	16.14	0.00272	0.01	18.17	
	11	21000	6.56	0.00572	0.41	11.30	
	12	22000	8.16	0.00388	0.44	12.83	
	13	22000	23.82	0.00240	0.19	27.90	
	14	25000	15.45	0.00216	0.52	16.76	
	15	13000	20.18	0.00356	0.35	21.32	
	中イ	16	45000	10.25	0.00156	0.21	18.34
	粗土	17	23000	11.70	0.00344	0.23	10.94
	粒壤	18	20000	12.63	0.00312	0.16	13.34
グ	19	20000	12.83	0.00288	0.32	17.14	
ラ	20	26000	14.35	0.00256	0.18	12.20	
細土	21	41000	11.82	0.00244	0.022	29.36	
粒壤	22	30000	8.31	0.00572	-0.03	26.54	
グ	23	24000	8.67	0.00508	0.17	18.81	
ラ	24	30000	8.28	0.00428	-0.06	21.02	
イ	25	20000	7.45	0.00908	0.086	14.59	
平均	27800	13.99	0.00345	0.13	21.85		

E a : 活性化エネルギー

k<sub>a</sub> : Aの無機化速度定数

A : 可分解性有機態窒素量, B : 定数

V : 分散

第9表 地力窒素無機化の特性値 (単純並行型)

土壌型	$E_{a_1}$ (cal/mol)	A (mg/100g)	$k_{a_1}$ (1/d)	$E_{a_2}$ (cal/mol)	B (mg/100g)	$k_{b_1}$ (1/d)	C (mg/100g)	V		
	1	19,000	11.45	0.010	24,000	-5.78	0.020	0.99	10.61	
	2	42,000	10.65	0.002	39,000	-2.91	0.008	0.55	12.26	
	3	24,000	17.74	0.010	38,000	-8.58	0.016	0.59	14.12	
細 粒 強 グ ラ イ 土 壌	4	23,000	18.41	0.008	30,000	-5.93	0.024	0.51	17.78	
	5	30,000	22.65	0.004	31,000	-7.80	0.012	0.52	52.33	
	6	24,000	20.63	0.004	23,000	-5.75	0.016	0.79	14.50	
	7	25,000	15.02	0.010	36,000	-6.04	0.020	0.47	15.31	
	8	30,000	21.81	0.010	38,000	-12.20	0.016	0.70	50.22	
	9	21,000	20.56	0.010	24,000	-8.92	0.024	0.61	16.45	
	10	18,000	16.22	0.012	22,000	-7.80	0.026	0.80	12.61	
	11	20,000	7.31	0.010	32,000	-1.89	0.020	0.52	10.97	
	12	22,000	8.78	0.010	41,000	-3.40	0.016	0.71	10.55	
	13	17,000	22.68	0.008	24,000	-8.44	0.020	1.10	16.84	
	14	23,000	15.76	0.010	34,000	-8.34	0.016	1.08	12.42	
	15	23,000	19.34	0.011	15,000	-7.70	0.026	1.02	17.03	
	中イ	16	36,000	13.38	0.004	36,000	-6.48	0.012	0.46	16.95
	粗土	17	23,000	14.02	0.010	31,000	-6.56	0.016	0.48	9.64
	粒壤	18	16,000	13.61	0.011	17,000	-6.21	0.023	0.48	11.77
グ	19	19,000	11.07	0.010	31,000	-4.81	0.020	0.63	14.82	
ラ	20	24,000	15.52	0.010	34,000	-7.63	0.016	0.53	9.65	
細土	21	31,000	17.57	0.010	44,000	-9.70	0.016	0.83	19.77	
粒壤	22	27,000	13.54	0.014	42,000	-7.04	0.020	0.44	22.68	
グ	23	22,000	12.13	0.014	34,000	-6.17	0.024	0.73	14.43	
ラ	24	26,000	11.44	0.012	34,000	-5.59	0.024	0.48	16.66	
イ	25	16,000	9.56	0.008	49,000	-0.86	0.016	0.62	11.66	
平均		24,000	15.23	0.009	32,000	-6.50	0.019	0.67	17.28	

$E_{a_1}$ ,  $E_{a_2}$ : 活性化エネルギー

$k_{a_1}$ ,  $k_{b_1}$ : AおよびBの無機化速度定数

A, B: 可分解性有機態窒素量, C: 定数

V: 分散

地力窒素の発現量の関係を明らかにした。地力窒素の発現量の計算にあたっては通常の栽培条件下では、基肥窒素を施用するため負の項で示される部分も全て脱窒・有機化を受けるとは考え難いこと、負の項が90%無機化するのは大部分の土壤で7月中下旬であることから全無機化を示す正の項の特性値を使用した。

第10表には、7月22日から9月17日までの地力窒素無機化量および水稲による地力窒素吸収量を示した。地力窒素の無機化量の計算にあたっては1985年の庄内支場の5cm地温を使用した。また、地力窒素の無機化量は100g乾土当たりの地力窒素無機化量を仮比重と作土深より補正した。これによれば、7月22日から9月17日の地力窒素無機化量は、2.7~6.7kg/10a(平均4.8kg/10a)であり、飽海土壤と田川土壤に分けて、地力窒素の無機化量を比較すると飽海土壤>田川土壤であった。

一方、水稲による地力窒素の吸収量は、2.1~6.2kg/10a(平均4.1kg/10a)であり、飽海土壤と田川土壤に分けて、水稲による地力窒素吸収量を比較すると、飽海土壤=田川土壤であった。このことから、水稲による地力窒素の平均利用率は、田川土壤で93%、飽海土壤で78%であり、後者より前者の方が優る傾向であった。第7図には、7月22日から9月17日までの水稲による地力窒素吸収量(Y)と地力窒素無機化量(X)の関係を示した。これによれば、両者の間には正の相関関係が認められた( $Y=0.91X-0.23$ ,  $r=0.799^{**}$ )。なお、この期間中に無機化される地力窒素の水稲による平均利用率は86%であった。これを個々の土壤でみると、52%~117%の変異があった。

### 3) 推定式による地力窒素無機化の特徴

第11表には、正の項(全無機化量を示す部分)が50%および90%無機化される暦日を示した。暦日の計算にあたっては、1985年度の庄内支場の5cm平均地温を使用した。50%が無機化するのは、無機化速度定数の小さい土壤( $N_0.2, 5, 6, 16$ および25)を除いて、6月下旬から7月上旬である。一方、90%が無機化するのは、大部分の土壤で9月以降である。

第12表には、時期別地力窒素の無機化割合を示した。地温は、1981~1985年

第10表 地力窒素無機化量と水稻による地力窒素吸収との関係

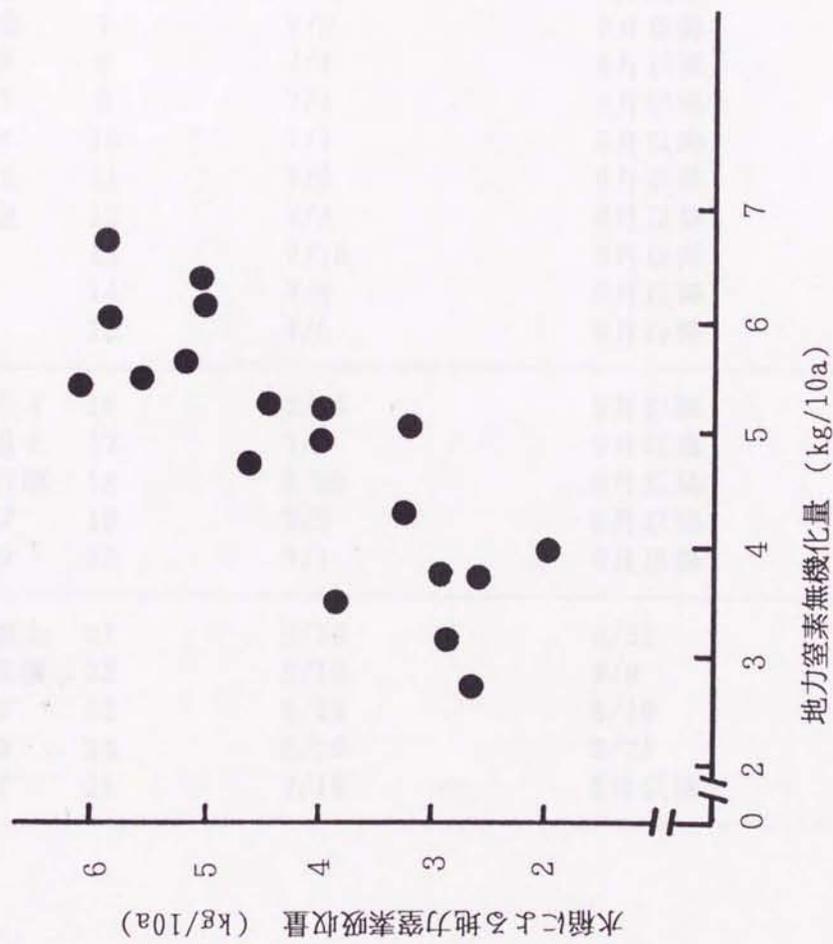
土壤		(A)7/22~9/17	(B)7/22~9/17		a:	b:	f	地力窒素利用率 (A)/(B) (%)
		水稻による地力窒素吸収量 (kg/10a)	地力窒素無機化量 (kg/10a)	地力窒素無機化量 (mg/乾土100g)	仮比重 g/cm <sup>3</sup>	作土深 (cm)		
飽海 土壤	1	5.1	5.6	4.7	0.74	1.6	1.18	9.0
	2	5.9	6.7	5.7	0.74	1.6	1.18	8.8
	3	5.0	6.2	7.2	0.66	1.3	0.86	8.0
	4	3.1	5.0	5.8	0.62	1.4	0.87	6.1
	5	2.1	4.0	4.2	0.74	1.3	0.96	5.2
	6	3.3	4.3	4.0	0.77	1.4	1.08	7.6
	7	4.0	5.2	5.7	0.76	1.2	0.91	7.6
	8	4.0	5.0	5.5	0.76	1.2	0.91	8.0
	9	4.7	4.7	4.0	0.76	1.3	1.19	10.0
平均	4.1	5.2	5.2	0.73	13.7	1.00	7.8	
田川 土壤	10	4.5	5.3	4.6	0.83	1.4	1.16	8.5
	11	2.6	3.7	3.7	0.83	1.2	1.00	6.9
	12	3.0	3.7	3.4	0.83	1.3	1.08	8.1
	13	3.9	3.5	2.9	0.86	1.4	1.20	11.1
	14	6.2	5.3	4.5	0.78	1.5	1.17	11.7
	15	2.7	2.7	1.9	0.82	1.7	1.39	10.1
	16	2.9	3.2	2.4	0.92	1.5	1.38	8.9
	17	5.1	6.3	6.2	0.78	1.3	1.01	8.0
	18	5.9	5.8	4.3	0.90	1.5	1.35	10.2
	19	5.6	5.5	4.7	0.78	1.5	1.17	10.3
平均	4.2	4.5	3.9	0.83	14.3	1.19	9.4	

①水稻による地力窒素吸収量

無追肥区（基肥窒素のみ施用）から、7月22日と9月17日に平均的な株から乾物重および窒素吸収量を求めた。

②地力窒素無機化量

反応速度論的解析により求めた無機化特性値と1985年度の庄内支場（藤島町）の地温（5cm）から、7月22日から9月17日までの地力窒素の無機化量を求めた。



第7図 地力窒素発現量と水稻による窒素吸収量の関係

第 1 1 表 地力窒素の無機化割合が50%、90%になる暦日

土壌型	全無機化部分			
	50%	90%		
	1	7/5	9月以降	
	2	9/3	9月以降	
	3	7/3	9月以降	
	4	7/14	9月以降	
細 粒 強 グ ラ イ 土 壤	5	8/8	9月以降	
	6	8/18	9月以降	
	7	7/3	9月以降	
	8	7/4	9月以降	
	9	7/4	9月以降	
	10	7/1	9月以降	
	11	7/6	9月以降	
	12	7/4	9月以降	
	13	7/18	9月以降	
	14	7/4	9月以降	
	15	7/6	9月以降	
	中イ	16	7/15	9月以降
	粗土	17	7/3	9月以降
	粒壤	18	6/30	9月以降
	グ	19	7/5	9月以降
ラ	20	7/1	9月以降	
細土	21	6/30	8/25	
粒壤	22	6/19	8/9	
グ	23	6/22	8/18	
ラ	24	6/26	8/21	
イ	25	7/19	9月以降	

第12表 時期別地力窒素無機化量の割合(%)

土壌型	5/15~6/30	7/1~8/10	8/11~9/15
1	4.9	3.7	1.4
2	2.7	4.8	2.5
3	5.1	3.7	1.2
4	4.6	3.9	1.5
細粒	5	4.4	2.1
強	6	4.1	2.2
グ	7	3.7	1.2
ラ	8	3.7	1.2
イ	9	3.4	1.3
土	10	3.6	1.3
壤	11	3.6	1.3
12	5.1	3.7	1.2
13	4.6	3.7	1.7
14	5.1	3.7	1.2
15	5.4	3.3	1.3
中イ	16	4.4	1.4
粗土	17	3.7	1.2
粒壤	18	3.8	1.0
グ	19	3.6	1.3
ラ	20	3.4	1.2
細土	21	3.8	9
粒壤	22	3.2	6
グ	23	3.3	7
ラ	24	3.5	9
イ	25	3.5	1.3
平均	49.4	37.3	13.2

の5年間の庄内支場の5 cm平均地温を使用した。窒素無機化量の計算は、全無機化量を示す正の項の特性値を使用した。これによれば、無機化速度定数の小さい土壌（No. 2, 5, 6および16）を除くと、生育初期（5月15日~6月30日）、中期（7月1日~8月10日）および後期（8月1日~9月15日）の地力窒素の平均無機化割合は、それぞれ52%、36%および12%である。一方、無機化速度定数の小さい土壌のそれは、それぞれ35%、44%および21%であり、最北支場の黒ボク土壌の地力窒素の無機化割合と同様の傾向であった。

#### 4) 地力窒素無機化の年次変動と活性化エネルギーの関係

水稻の多収に重要な要因には、受光態勢、もみ数の確保、登熟歩合の向上等があげられる。これを、水稻の窒素吸収の時期からみれば、生育中期の窒素吸収が関与している。そこで、正の項の無機化特性値（可分解性有機態窒素量、無機化速度定数、活性化エネルギー）を用いて、水稻の地力窒素の吸収量の年次変動を計算した。第13表には、水稻の生育中期（7月12日~8月15日）に無機化した地力窒素の最大値、最小値、平均値、変動係数および無機化量の範囲を示した。計算にあたっては、地温は、庄内支場の1977年~1985年までの5 cm地温を使用した。なお、ここでは生育中期を7月12日以降としたが、これは土壌中のアンモニア態窒素が確実に消失した後の時期を示す。これによれば、水稻生育中期の地力窒素の無機化量の各土壌毎の平均値は、1.67~5.31mg/ 乾土100gであり、土壌間で差がみられた。また、この無機化量の9年間の土壌毎の平均は、可分解性有機態窒素量と高い正の相関を示す傾向が認められた（第8図、 $r=0.631^{***}$ ）。

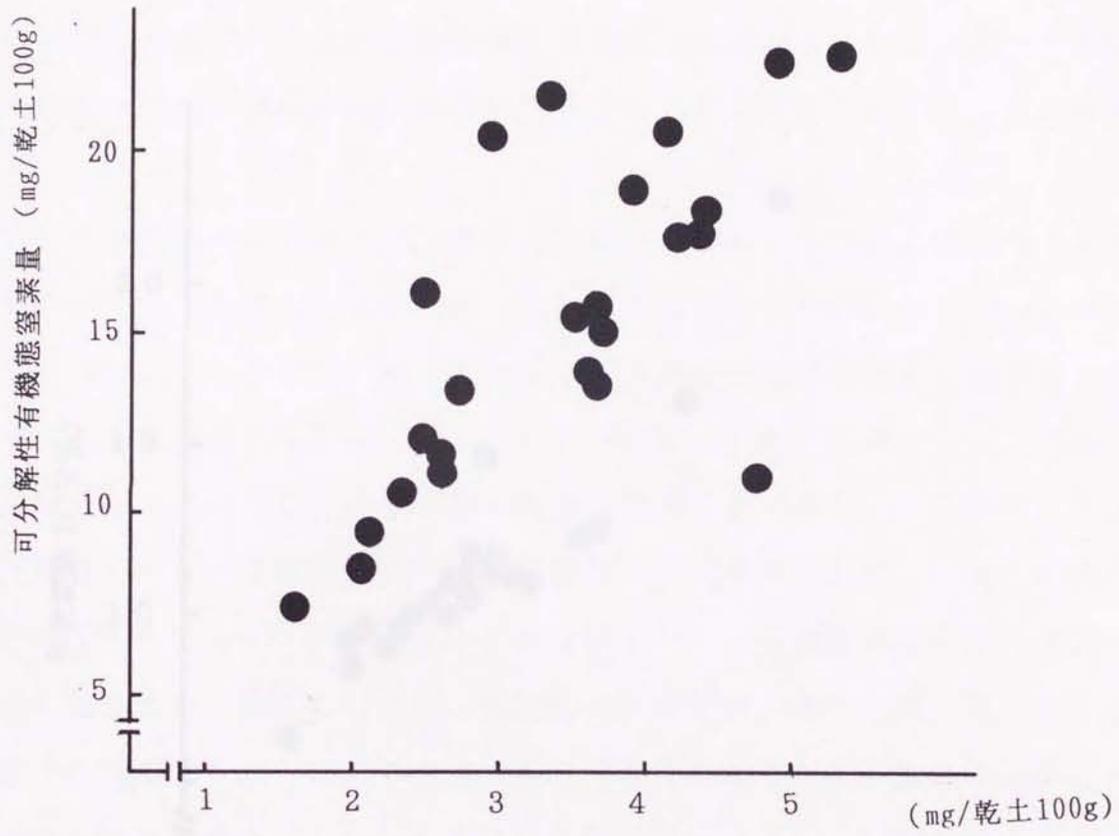
一方、水稻生育中期の地力窒素無機化量の土壌毎の年次変動を絶対値で見ると、最大無機化年次と最小無機化年次の差は、0.53~2.77mg/ 乾土100gであり、平均で1.26mg/ 乾土100gである（第13表）。この値を、仮比重1 g/ cm<sup>3</sup>、作土深を15cmとして10aに換算すると、1.89kg/10aとなり、水稻に及ぼす影響も大きいと考えられ、地力窒素の無機化量を予測することの重要性がうかがえる。

また、地力窒素の無機化量の年次変動を、変動係数で見ると、6.1~22.7%の範囲である。変動係数と活性化エネルギーの関係（第9図）をみると、正の

第13表 地力窒素無機化の年次変動

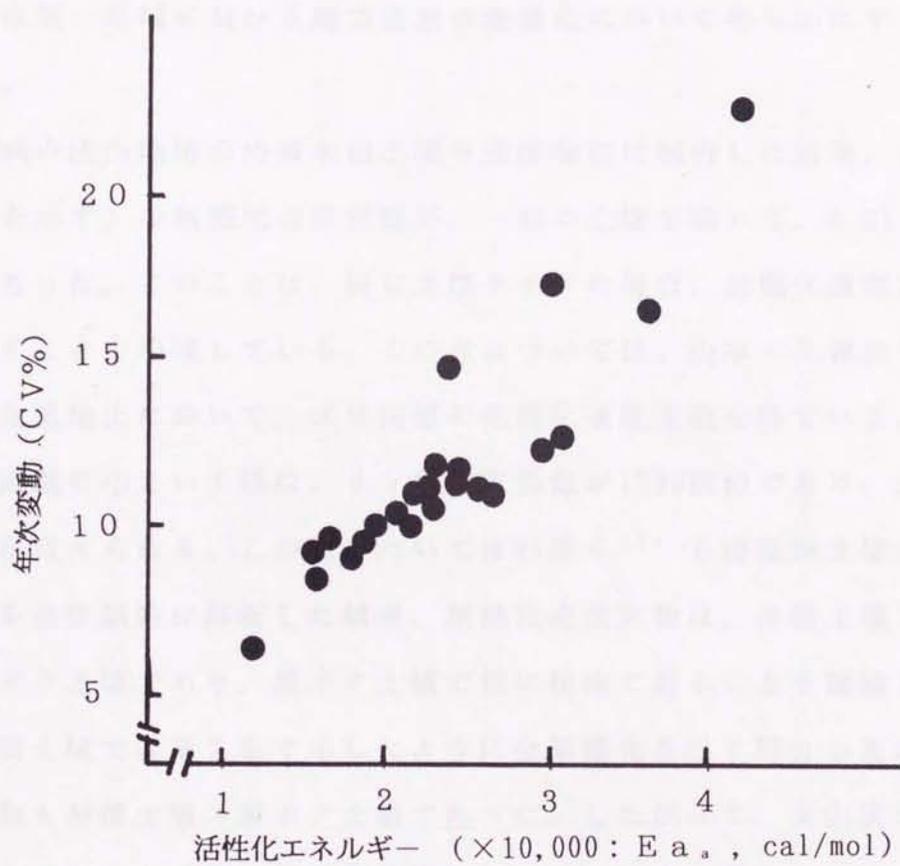
土壌型	平均 (mg/乾土100g)	C V * (%)	最大 (mg/乾土100g)	最小 (mg/乾土100g)	変動巾 (mg/乾土100g)	
	1	2.59	9.2	2.89	2.09	0.80
	2	2.25	22.7	3.24	1.48	1.76
	3	4.21	11.3	4.72	3.25	1.47
	4	4.41	11.8	5.07	3.43	1.64
細 粒 強 グ ラ イ 土 壤	5	5.25	17.4	6.54	3.77	2.77
	6	4.13	14.7	5.02	3.16	1.86
	7	3.68	11.2	4.13	2.85	1.28
	8	3.30	11.0	3.70	2.57	1.13
	9	2.94	8.3	3.23	2.45	0.78
	10	2.51	9.6	2.80	2.03	0.77
	11	1.67	10.0	1.87	1.34	0.53
	12	2.05	10.7	2.30	1.61	0.69
	13	4.94	9.5	5.57	4.08	1.49
	14	3.71	11.0	4.16	2.89	1.27
	15	3.91	6.1	4.21	3.44	0.77
中 粗 粒 壤 グ ラ	16	3.74	16.3	4.43	2.60	1.83
	17	3.59	11.5	4.02	2.75	1.27
	18	5.31	12.4	5.91	3.91	2.00
	19	4.75	10.4	5.33	3.78	1.55
	20	3.54	8.9	3.90	2.90	1.00
細 土 粒 壤 グ ラ イ	21	4.28	12.6	4.78	3.13	1.65
	22	2.72	10.9	3.06	2.06	1.00
	23	2.49	9.8	2.74	1.96	0.78
	24	2.56	11.0	2.83	1.95	0.88
	25	2.05	9.1	2.30	1.71	0.59

\* : 変動係数



地力窒素無機化量 (7月12日~8月15日)

第8図 地力窒素無機化量 (7/12~8/15)と可分解性有機態窒素量の関係



第9図 活性化エネルギーと地力窒素発現量の年次変動の関係

相関がみられる ( $r=0.764^{***}$ )。前述のごとく、本実験で供試した大部分の土壌の全地力窒素無機化の速度定数が0.01 1/day前後であることから、ある期間の地力窒素発現の年次変動は活性化エネルギーで示されることになる。

#### 4. 考察

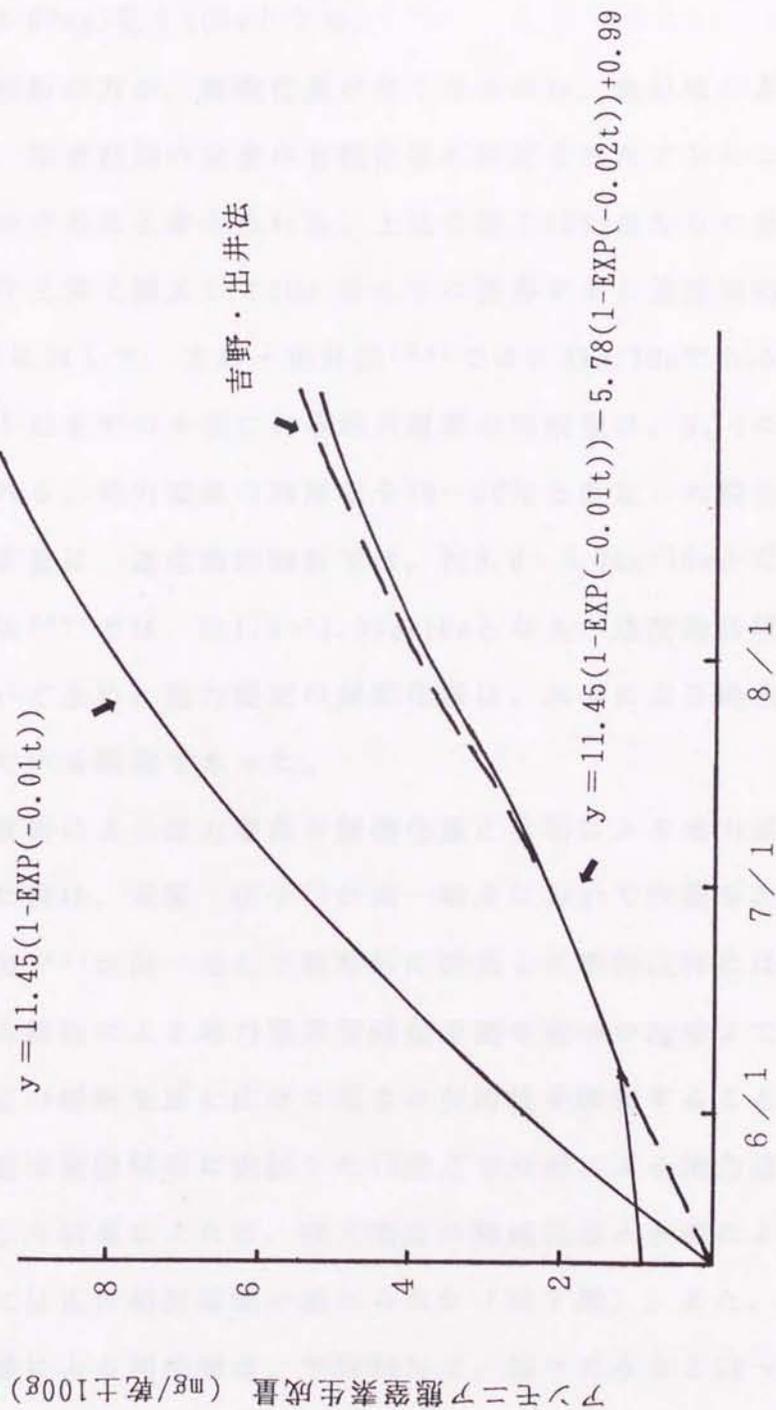
水田土壌における速度論的解析に関しては、安藤・庄子<sup>2)</sup>、山本・久保田<sup>12)</sup>による各地域の代表的な土壌の地力窒素の無機化の研究しかないのが現状である。前述したように、生育診断予測をきめ細かに行うためには、同一土壌型あるいは同一地域における地力窒素の無機化について明らかにすることが必要である。

山形県の庄内地域の沖積水田土壌を速度論的に解析した結果、正の項（全無機化量を示す）の無機化速度定数が、一部の土壌を除いて、0.01 1/dayとほぼ一定であった。このことは、同じ土壌タイプの場合、無機化速度定数が一定の値を示すことを示唆している。この点については、山本・久保田<sup>12)1)</sup>、北田<sup>12)</sup>が灰色低地土において、ほぼ同様の無機化速度定数を得ている。なお、無機化速度定数の小さい土壌は、リン酸吸収係数が1200前後であり、火山灰の混入の影響が考えられる。この点については杉原ら<sup>85)</sup>も湿潤畑土壌の地力窒素の無機化を速度論的に解析した結果、無機化速度定数は、沖積土壌>花こう岩土壌>黒ボク土壌であり、黒ボク土壌で低い傾向であることを指摘している。また、水田土壌では第2章で示したように全無機化を示す部分の正の項の無機化速度定数も沖積土壌>黒ボク土壌であった。したがって、火山灰が混入した沖積水田土壌の地力窒素の無機化速度定数は、沖積土壌のそれに比べて小さいと考えられる。火山灰の混入していない庄内地域の沖積グライ土壌の地力窒素無機化速度定数は、大部分が約0.01 1/dayとみられる。

一方、可分解性有機態窒素量および活性化エネルギーは、土壌によって異なり一定の傾向は見いだせなかった。

さらに、第10図に示すように、速度論的解析による正の項で示される全無機化量は、吉野・出井<sup>126)</sup>が得たアンモニア態窒素量に比べ高い傾向であった。

例えば、No. 1の土壌について、1985年の地温を用いて本実験で得られた正の



第10図 吉野・出井法と速度論的解析法の比較

項で計算すると5月15日から7月1日までの無機化量は、5.8mg/乾土100gとなる。一方、吉野・出井法に従って、 $(Y=6.74 \times ((T-15) \times D) / 1050) 0.8336$ 、ただし、Tは地温、Dは日数、30℃一定温度培養により求めた)の式により計算すると、無機化量は2.03mg/乾土100gとなる。

速度論的解析の方が、無機化量が多くなるのは、負の項のある2項モデルを利用すると、培養初期の窒素の有機化等が測定されたアンモニア態窒素に上積みされるためであると考えられる。上記の乾土100g当たりの地力窒素無機化量を仮比重と作土深で補正して10a 当たりに換算すると速度論的解析では7.4kg/10aとなるのに対して、吉野・出井法<sup>126)</sup>では2.6kg/10aである。なお、5月15日から7月1日までの水稲による地力窒素の吸収量は、No.1の土壤では約3~4kg/10aである。地力窒素の利用度を40~50%と仮定した場合、水稲が利用可能な地力窒素量は、速度論的解析では、約3.0~3.7kg/10aとなるのに対して、吉野・出井法<sup>126)</sup>では、約1.0~1.3kg/10aとなり、速度論的解析による無機化特性値を用いて求めた地力窒素の無機化量は、水稲による地力窒素の吸収量とほぼ対応している傾向であった。

速度論的解析による地力窒素の無機化量と水稲による地力窒素の吸収量の関係を検討した例は、安藤・庄子<sup>2)</sup>が同一地点において作期をかえて行った事例、山本・久保田<sup>121)</sup>が同一地点で経時的に調査した事例以外には報告されていない。速度論的解析による地力窒素無機化予測を現場の段階まで拡大して利用するためには点の解析を面に広げた場合の有用性を確認することが必要である。

そこで、速度論的解析に供試した19地点で水稲による地力窒素の吸収量についても研究した結果によれば、地力窒素の無機化量と水稲による地力窒素の吸収量との間には正の相関関係が認められた(第7図)。また、無機化された地力窒素の水稲による利用率は、平均86%で、個々にみると52~117%の変異があった。このように、作土層から無機化してくる地力窒素の利用率が、圃場によって異なる原因については、以下の理由が考えられる。水稲の吸収する地力窒素の起源を作土層と下層土に分離しないで、全て作土層から無機化したものとしている点である。すなわち、下層土の肥沃性を加味しないことにあるもの

とみられる。また、水管理、栽植密度などの栽培方法により、根の活性が異なるが<sup>92)</sup>、本実験では現地慣行栽培としたために、根の窒素吸収能力が異なることが予想される。これらのことにより、圃場ごとに作土層から無機化される地力窒素の利用率が異なるものとみられる。しかしながら、全体的にみると地力窒素の無機化量と水稻の地力窒素吸収量の間には、正の相関が認められることから、負の項のある2項モデルの正の項を使用して、地力窒素の水稻による吸収量を推定できる可能性を示すものである。

次に、負の項のある2項モデルの正の項を使用した時期別の地力窒素無機化の割合を生育前期(5/15~6/30)、中期(7/1~8/10)および後期(8/11~9/15)で見ると無機化速度定数の小さい土壌を除いて、それぞれ、52%、36%および12%であり土壌間差は小さかった。1984~1986年の3カ年平均で見ると、鶴岡市安丹地区における生育前期、中期および後期の水稻の時期別の窒素吸収割合は、それぞれ4.4、5.7および1.4g/m<sup>2</sup>であった。生育中期の追肥窒素の水稻による利用率を約50%<sup>78)</sup>とすると、生育中期に10a当たり4kg追肥した場合、生育中期の地力窒素吸収量は3.7g/m<sup>2</sup>(5.7g/m<sup>2</sup>-2g/m<sup>2</sup>)となり、生育中期および後期の地力窒素の吸収量の比率は、この地点では73:27となる。この地点(鶴岡市安丹)の土壌は、本実験で使用した土壌と異なるが、沖積土壌であり、リン酸吸収係数も小さい。本実験で得られた時期別地力窒素無機化割合は、生育中期および後期に限定して考えると、無機化速度定数が0.01 l/dayの土壌では、生育中期および後期の地力窒素無機化割合は、75:25である。この結果は、水稻の時期別地力窒素吸収割合と類似している。以上の事実から、庄内地域の大部分の沖積由来のグライ水田土壌の地力窒素の無機化は前半型であると考えられる。

一方、無機化速度定数の小さい土壌の時期別無機化割合を生育前期(5/15~6/30)、中期(7/1~8/10)および後期(8/11~9/15)で見ると、それぞれ、35%、46%および21%であり、多湿黒ボク土壌である最北土壌と同じ傾向であった。このことから、火山灰の混入している可能性のある土壌の地力窒素の無機化は、沖積土壌よりも後半型であると考えられる。

このように、速度論的解析による地力窒素の無機化予測が有効に活用されるには、追肥診断に利用され、稲の生育の安定化に寄与することが重要である。本実験で供試した土壌の生育中期（7/12～8/15）における地力窒素の無機化量の年次変動をみると、最大無機化年次と最小無機化年次の差は0.53～2.77mg/100g乾土で、平均1.26mg/乾土100gであった。この1.26mg/乾土100gを窒素追肥で補うとすれば、水稻による追肥窒素の利用率を約50%とし<sup>7,8)</sup>、仮比重を1g/cm<sup>3</sup>、作土深を10cmとして計算すると約2.5kg/10aとなる。最大無機化年次と最小無機化年次の差が、窒素追肥量として2.5kg/10aに相当することになり、水稻の収量安定、品質向上のために、地力窒素の無機化量を把握することの重要性を示すものとみられる。

以上の結果、沖積グライ水田土壌における水稻の地力窒素の吸収量は、速度定数が0.01 l/dayでほぼ一定であることから、可分解性有機物および活性化エネルギーによって支配されるものと考えられる。

## 5. 要約

山形県庄内地域の水田土壌（グライ土壌）について、自然変温条件下で速度論的解析を行った結果をもとに、地力窒素無機化の特徴について明らかにした。得られた結果は以下の通りであり。

①庄内地域のグライ土壌の地力窒素の無機化は、負の項のある2項モデルに適合した。正の項の無機化速度定数は、火山灰が混入していない土壌では、0.01 l/day 前後であり、負の項のそれは、0.01～0.03 l/dayであった。一方、活性化エネルギー、可分解性有機態窒素量は一定の傾向がみられなかった。

②水稻の生育中期以降の地力窒素吸収量と、正の項で計算した地力窒素無機化量の間には、正の相関が認められた。

③正の項、すなわち全無機化部分が50%および90%無機化するのは大部分の土壌で、それぞれ6月下旬～7月上旬および9月以降である。また、庄内のグライ土壌の地力窒素は、水稻の生育前期に50%以上が無機化されることが明らかとなった。

④ある期間に無機化される窒素の年次変動は、活性化エネルギーと正の相関が



## 第4章 庄内地域におけるグライ土壌下層土の無機化特性

### 1. はじめに

水稻の吸収する窒素の大半は地力由来窒素である<sup>7,8)</sup>。この吸収された地力窒素は水田の作土層および下層土の土壌有機物から無機化してきた窒素である。第3章において、庄内地域のグライ水田土壌の作土層からの地力窒素の無機化について速度論的に解析を行った結果、地力窒素の無機化過程は負の項のある2項モデルによく適合することを報告した。そして、正の項の無機化速度定数は0.01 1/day前後、負の項のそれは0.01~0.03 1/dayとほぼ一定であること、また、活性化エネルギーおよび可分解性有機態窒素量は、土壌によってその値が異なることを認めた。

一方、下層土については水稻の吸収する地力窒素のうち約9~30%が下層土からの地力窒素に由来し、下層土から無機化した窒素もまた水稻の生育にとって重要であることが指摘されている<sup>33, 50, 51, 73, 74, 75)</sup>。したがって、下層土の地力窒素の無機化過程を明らかにすることは、水稻の生育・収量を考える上で重要と思われる。しかしながら、下層土の地力窒素の無機化過程についてはほとんど研究されていない。

そこで、本章では、庄内地域の水田の下層土について、速度論的解析により、①地力窒素の無機化特性値を明らかにし、②作土層の地力窒素の無機化特性値と比較し、さらに③水稻の地力窒素吸収に果たす下層土の役割について研究した。

### 2. 実験材料および実験方法

#### 1) 供試土壌

第3章で供試した水田より任意に8点を選び、その下層土を供試した。供試土壌は表層より15~25cm部位を4月中旬に採取した。

各土壌の一般理化学性を第14表に示した。供試土壌の窒素含量は0.21~0.45%であり、平均0.30%であった。C/N比は、大部分の土壌で8~10であった。陽イオン交換容量は13.2~24.9meq/乾土100gであった。リン酸吸収係数は680

第14表 供試土壤の化学性（下層土）

土壤	pH (H <sub>2</sub> O)	T-N (%)	T-C (%)	C/N比	CEC (meq /100g)	リン酸吸 収係数	*培養窒素量		吉野・出 井法によ る係数： (n)	②風乾土 — 比 ①生土
							生土：4 週間 ①	風乾土： 4週間②		
1	5.5	0.32	2.80	8.8	24.9	1200	1.2	19.6	1.45	16.1
2	5.3	0.29	2.21	7.5	15.8	710	1.1	14.2	1.42	13.5
3	5.5	0.21	1.37	6.5	13.2	680	1.8	20.2	1.44	11.1
4	5.3	0.36	3.26	9.1	20.6	990	1.0	18.3	1.64	18.9
5	5.0	0.45	5.19	11.5	21.6	1170	1.8	23.1	1.13	12.8
6	5.3	0.25	2.48	10.0	19.9	1000	1.6	15.6	1.00	9.6
7	5.2	0.21	2.13	9.9	17.5	820	0.6	13.5	1.54	22.1
8	5.1	0.27	2.81	10.4	18.9	830	2.5	20.4	1.10	8.1
平均	5.3	0.30	2.78	9.2	18.9	925	1.5	18.1	1.34	14.0

※培養窒素量（30℃ 4週間培養）：mg/乾土100g

~1200であり、平均925であった。

## 2) 培養方法

自然変温条件下の培養方法は、前章に準じた。ビニール袋の埋設時期は4回（5月27日、6月3日、6月11日および6月18日）とした。約1週間ごとにビニール袋を回収し、常法によりアンモニア態窒素量を定量した。培養温度はビニール袋に温度センサーを入れて測定した。

定温培養実験（30℃）は、吉野・出井<sup>126)</sup>の方法に準じて行った。なお、培養はすべて2連で行った。

## 3) 解析方法

地力窒素の無機化モデルは、負の項のある2項モデルを使用した。また、解析結果を利用して、庄内地域の下層土の地力窒素の時期別無機化量を1987年の庄内支場の下層土（地表下20cm）の地温データを用いて計算した。

## 4) 水稲による窒素吸収量

培養実験に供試した土壤のうちNo.1土壤を用いて1986年現地圃場において基肥窒素のみを施用して水稲による窒素吸収量を算出した。水稲は、6月30日、8月10日および9月18日の3回採取し、乾物重を測定したのち、常法により窒素吸収量を求めた。なお、6月30日までの地力窒素吸収量は、基肥窒素利用率を30%<sup>77)</sup>として計算により求めた。利用可能地力窒素無機化量は、地力窒素の無機化量に作土および下層土の深さ・仮比重を乗じて求めた。なお、地力窒素の無機化量の算出にあたりNo.1土壤の正の項の無機化特性値を使用し、地温は1986年度の庄内支場（藤島町）の5cmと20cm地温を使用した。

また、参考のために、本場土壤（細粒灰色低地土）を供試して上記と同様に基肥窒素のみを施用し、水稲による窒素吸収量を算出した。水稲は、7月1日8月7日および9月17日の3回採取し、乾物重を測定したのち、常法により窒素吸収量を求めた。6月30日までの地力窒素吸収量は、基肥窒素利用率を30%<sup>78)</sup>として計算により求めた。

さらに、利用可能地力窒素量は、地力窒素の窒素無機化量に深さと仮比重を乗じて求めた。なお、地力窒素の無機化量の算出にあたっては、第2章で示し

た本場土壌の正の項の無機化特性値を使用して、1986年度の本場（山形市）の地表下5cmと20cmの地温を使用して求めた。

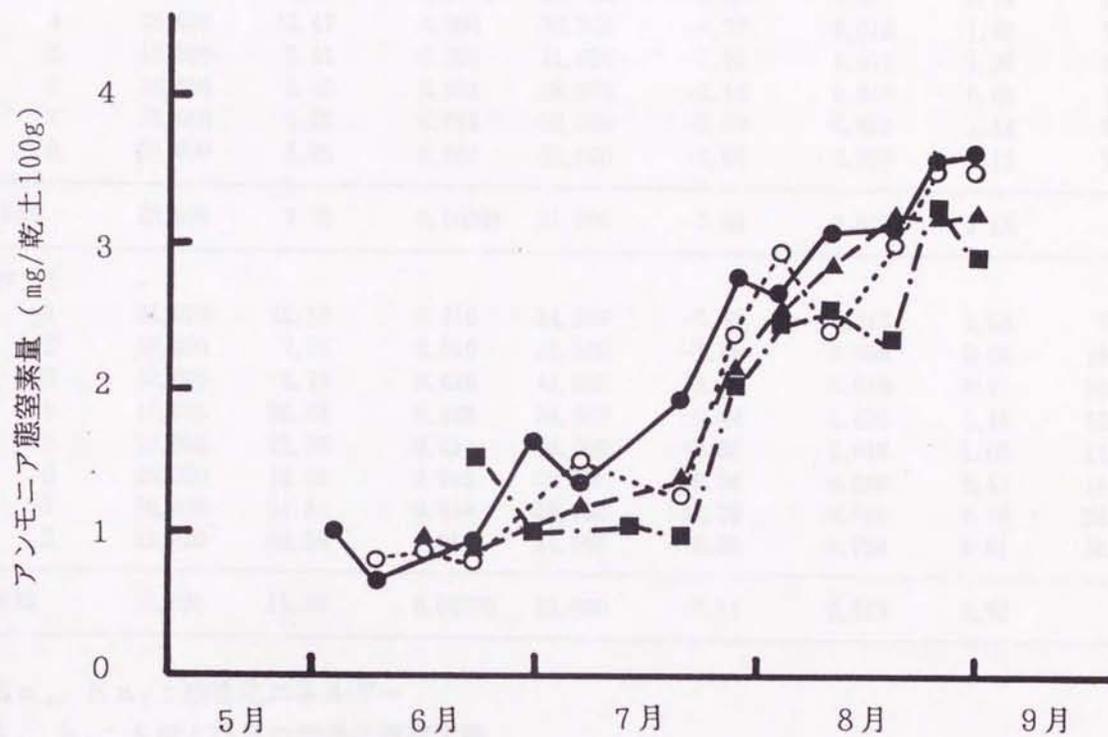
### 3. 実験結果

#### 1) 下層土の地力窒素無機化特性値

下層土の培養期間中のアンモニア態窒素量の推移は、いずれの土壌でもほぼ同様であったので、第11図には、No.1土壌を例としてアンモニア態窒素の推移と暦日との関係を示した。両者の関係は、作土のそれと類似し、培養開始時期が遅くなると、アンモニア態窒素量の増加が急速に進む傾向が認められた。このことは、培養開始時期が遅いほど地温が高いことから（5月下旬18.4℃、6月中旬21.0℃）、下層土の地力窒素の無機化も作土と同様に地温に左右されることを示すものである。

作土と下層土の地力窒素の無機化特性値を比較する場合、その無機化モデルは同一であることが望ましい。第3章では、作土の地力窒素の無機化の解析にあたっては、負の項のある2項モデルを用いた<sup>15)</sup>。そこで、下層土の無機化モデルを負の項のある2項モデルとして解析を行った。ところで、負の項のある2項モデルは、地力窒素の無機化と無機化されたアンモニア態窒素の有機化が同時に進行するモデルである。これは、第2章でも示したように、易分解性の炭素の多い土壌でみられるモデルである<sup>4, 15)</sup>。そこで、下層土の熱水抽出炭素量をみると（抽出法<sup>5)</sup>は、第2章と同様）、平均22.9mg/乾土100gであり、畑土壌（平均10.0mg/乾土100g）の約2倍の値を示した。このことは、水田の下層土でも作土と同様に無機態窒素の有機化が無視できないことを示し、負の項のある2項モデルが適合する可能性を示すものである。事実、第15表が示すように、下層土の地力窒素の無機化は、負の項のある2項モデルで分散が小さく、よく適合した。

下層土の無機化特性値を活性化エネルギーについてみると、正の項は18,000～35,000cal/molであり、平均28,000cal/molであった。負の項は20,000～41,000cal/molであり、平均31,000cal/molであった（第15表）。また、可分解性有機態窒素量についてみると、正の項は4.99～12.47mg/乾土100gであり、平均



第11図 アンモニア態窒素量と暦日の関係

● : 5月27日培養開始、○ : 6月3日培養開始  
 ▲ : 6月11日培養開始、■ : 6月18日培養開始

第15表 地力窒素無機化の特性値

土壌型	$E_{a_a}$ (cal/ol)	A (mg/100g)	$k_a$ (1/d)	$E_{a_b}$ (cal/mol)	B (mg/100g)	$k_b$ (1/d)	C (mg/100g)	V
下層土								
1	28,000	6.29	0.004	38,000	-2.63	0.010	1.21	4.40
2	33,000	6.70	0.004	33,000	-2.96	0.016	1.34	3.79
3	30,000	4.99	0.0038	20,000	-2.50	0.012	0.79	5.62
4	28,000	12.47	0.004	32,000	-4.37	0.016	1.46	5.92
5	18,000	9.44	0.004	41,000	-1.72	0.010	1.32	9.29
6	26,000	6.40	0.004	28,000	-2.18	0.010	0.89	7.01
7	35,000	7.02	0.004	30,000	-3.57	0.012	1.14	7.65
8	25,000	8.95	0.004	22,000	-2.84	0.020	1.13	5.48
平均	28,000	7.78	0.00398	31,000	-2.83	0.013	1.16	
作土								
1	24,000	15.52	0.010	34,000	-7.63	0.016	0.53	9.65
2	20,000	7.31	0.010	32,000	-1.89	0.020	0.52	10.97
3	23,000	8.78	0.010	41,000	-3.40	0.016	0.71	10.55
4	17,000	22.68	0.008	24,000	-8.44	0.020	1.10	16.84
5	23,000	15.76	0.010	34,000	-8.38	0.016	1.08	12.44
6	25,000	15.02	0.010	36,000	-6.04	0.020	0.47	15.31
7	30,000	21.81	0.010	38,000	-12.20	0.016	0.70	50.22
8	21,000	20.56	0.010	24,000	-8.92	0.024	0.61	16.45
平均	23,000	15.93	0.00975	33,000	-7.11	0.019	0.72	

$E_{a_a}$ ,  $E_{a_b}$ : 活性化エネルギー

$k_a$ ,  $k_b$ : AおよびBの無機化速度定数

A, B: 可分解性有機態窒素量, C: 定数

V: 分散

7.78mg/ 乾土100gであった。負の項は、1.72~4.37mg/ 乾土100gであり、平均2.83mg/ 乾土100gであった。一方、無機化速度定数は、正の項ではほとんどの土壤で0.004 1/dayと一定であり、負の項では0.01~0.02 1/day であった。したがって、負の項の速度定数は正の項の約3倍となる。

次に、下層土の無機化特性値と作土のそれを比較するために、同一土壤における作土の無機化特性値を第15表に示した。作土の無機化特性値が下層土より大きい項目は、正の項と負の項の無機化速度定数、正の項の可分解性有機態窒素量及びNo.5土壤を除いた負の項の可分解性有機態窒素量であった。逆に、下層土の無機化特性値が作土より大きい項目は正の項の活性化エネルギーであった。他の特性値には一定の傾向が認められなかった。

## 2)下層土の地力窒素無機化の特徴

第16表には、作土および下層土の正の項（全無機化を示す）が50%および90%無機化される暦日と18℃変換日数を示した。これによれば、50%無機化するのは、作土では7月上旬であるのに対して下層土では8月中旬である。90%無機化するのは、作土では9月以降であるのに対し、下層土では稲作期間の終了後である。

第17表、12図にはNo.1土壤の作土および下層土の時期別地力窒素無機化量および水稻による時期別地力窒素吸収量を示した。なお、水稻の分枝根の分布は土壤表面より25~27.5cmになると急激に減少することから、下層土深を10cm（土壤表面より15~25cm）として時期別無機化量を計算した。水稻の地力窒素吸収量を時期別にみると、6月下旬までが2g/m<sup>2</sup>、7月上旬から出穂期ころまでが4.5g/m<sup>2</sup>、出穂期から成熟期までが3g/m<sup>2</sup>であった。一方、生育前期、中期および後期における作土からの地力窒素無機化量は、それぞれ7.9、6.7および2.2g/m<sup>2</sup>であった。このことは、出穂期から成熟期にかけて水稻の吸収する窒素量は作土から無機化した窒素量だけでは不足であることを示す。

さらに、第18表には、本場土壤における水稻による地力窒素吸収量と利用可能地力窒素量の関係を示した。これによれば、第12図と同様に7月から出穂期までは、作土の利用可能地力窒素量が、水稻による地力窒素量に対応している。

第16表 地力窒素の無機化が50%, 90%おきる暦日

土壌No.	作 土				下 層 土			
	50%		90%		50%		90%	
	18℃養分日数	暦日	18℃養分日数	暦日	18℃養分日数	暦日	18℃養分日数	暦日
1	69	7/9	230	9月以降	173	8/9	576	稲作期間終了後
2	69	7/11	230	"	173	8/1	576	"
3	69	7/9	230	"	181	8/9	600	"
4	87	7/23	288	"	173	8/9	576	"
5	69	7/8	230	"	173	8/31	576	"
6	69	7/7	230	"	173	8/13	576	"
7	69	7/4	230	"	173	7/30	576	"
8	69	7/10	230	"	173	8/14	576	"
平均	72	7/9	238	9月以降	174	8/11	579	稲作期間終了後

第17表 時期別地力窒素無機化量と水稲による地力窒素吸収量について

項目	月日	生育初期 5月15日~6月30日	生育中期 7月1日~8月10日	生育後期 8月11日~9月18日	計
地力窒素 無機化量 (kg/10a)	作土	7.9 (47)	6.7 (40)	2.2 (13)	16.8
	下層土	1.7 (32)	2.3 (43)	1.3 (25)	5.3
水稲による地力窒素 吸収量(kg/10a)		2.0 (21)	4.5 (47)	3.0 (32)	9.5

( ) : 時期別比率 (%)

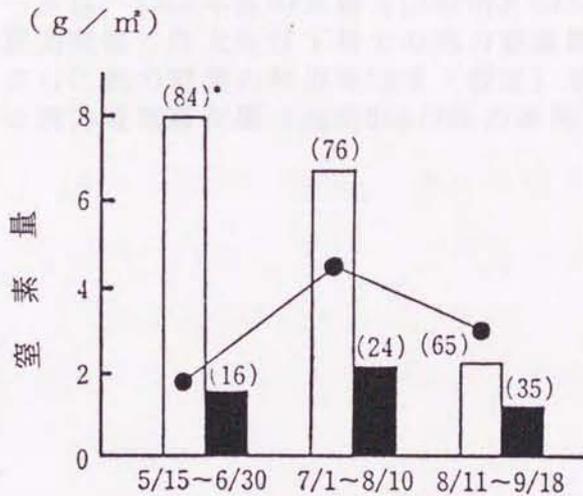
①地力窒素の無機化量の算出に利用した式

	$N_0$	$k$	$E a$	深さ	仮比重
作土	15.9	0.00975	23000	15cm	0.76
下層土	7.8	0.004	28000	10cm	0.74

※地温のデータは、1986年度の庄内支場（藤島町）の5cm及び20cm地温を使用した。

②水稲による地力窒素吸収量（基肥6kg/10aのみ施用した。）

6月30日までの地力窒素吸収量は、基肥窒素の利用率を30%として計算により求めた。



●, 水稲による地力窒素吸収量; □, 作土由来窒素無機化量 (作土深 15 cm, 仮比重 0.76); ■, 下層土由来窒素無機化量 (下層土深 10 cm, 仮比重 0.74).

\* ( ) 内は層別割合.

第12図 作土および下層土に由来する地力窒素の時期別無機化量と水稲による時期別地力窒素吸収量

第18表 時期別地力窒素無機化量と水稻による地力窒素吸収について

項目 期間	(A)水稻による 地力窒素吸収量 (kg/10a)	利用可能地力窒素量(kg/10a)			(A)	(A)
		(B)作土	下層土	(C)計	比 (B)	比 (C)
7月1日~8月7日	3.6	3.6	1.4	5.0	100%	138%
8月8日~9月17日	2.5	1.6	1.1	2.7	62%	106%

①地力窒素の無機化量の算出に利用した式

	$N_0$	$k$	$E a$	深さ	仮比重
作土	10.09	0.0244	1000	15cm	1.23
下層土	6.69	0.0043	1000	12cm	1.24

地温のデータは、1986年度の本場（山形市）の5cm及び20cm地温を使用した。  
 ※利用可能地力窒素：作土及び下層土の地力窒素無機化量に、それぞれ深さ  
 仮比重、さらに地力窒素の利用率70%（仮定）を乗じて求めた。

②水稻による地力窒素吸収量（基肥6kg/10aのみ施用した。）

しかし、出穂期から成熟期までは、作土の利用可能地力窒素は、水稲による地力窒素吸収量の約60%しか満たしていないことから、明らかに、作土のみの地力窒素供給だけでは、水稲の地力窒素吸収量は不足することを示している。

#### 4. 考察

下層土が、水稲の生育に及ぼす影響の程度は土壌条件や肥培管理によっても異なるが、一般に水稲による窒素吸収量の増大に下層土が貢献していることが指摘されている。しかし、土壌学的見地から下層土の地力窒素の無機化過程を速度論的に研究した事例は、金田<sup>3,2)</sup>が輪換水田で行った以外には極めて少ない。そこで、本章では、庄内地域のグライ土壌の下層土を供試して、速度論的解析により地力窒素の無機化の特徴を明らかにした。

下層土の地力窒素の無機化モデルは、作土のそれと比較検討する目的で負の項のある2項モデル<sup>4, 15)</sup>にあてはめた。なお、単純型モデルのあてはめも同時に行ったが、負の項のある2項モデルの方が分散が小さく、よく適合した。このことは、下層土においても作土と同様に無機化したアンモニア態窒素の有機化が無視できないことを示していると考えられる。

また、下層土の無機化特性値のうち正の項の無機化速度定数が0.004 1/dayと一定であった。なお、作土の場合、無機化速度定数は、火山灰が混入すると小さくなる傾向が認められたが<sup>4, 15)</sup>、下層土では火山灰が混入している可能性のある土壌でも無機化速度定数は一定であり、火山灰の混入が無機化速度定数に影響を及ぼさなかった。その他の可分解性有機態窒素量、活性化エネルギーについては、一定の傾向が認められなかった。このことから、作土と同様に下層土の正の項（全無機化）における地力窒素の無機化量は、無機化速度定数がほぼ一定であるため、可分解性有機態窒素量、活性化エネルギーによって決定されるといえる。

下層土の無機化特性値と作土のそれとの比較において、正の項の可分解性有機態窒素量が作土で下層土より多い理由の1つには、全有機態窒素量の違いが上げられる。すなわち、作土では全有機態窒素量の平均は0.325%であるのに対して、下層土のそれは平均0.3%であった。さらに、正の項の可分解性有機態窒

素量は絶対量だけでなく、全有機態窒素量に占める割合も作土が下層土より高かった。すなわち、その割合は作土では平均値で4.8%であるのに対して、下層土では2.6%であった。この理由は作土と下層土の存在する環境の違いが影響しているものと考えられる。

庄内地域では、有機物資材として、ほとんどの圃場で稲わらだけが施用されている。また、水稻根は下層土に比べ作土に多く分布している<sup>11)</sup>。したがって、作土は下層土に比べ水稻根や稲わらなどの粗大有機物がより供給されやすい環境にある。さらに、水田の作土は下層土に比べ、水分や温度などの環境変化が大きい。このため、作土では圃場条件下でも新鮮有機物の供給量が多い反面、その新鮮有機物や土壌有機物の変質が進行しやすい条件にあるといえる。一方、下層土は比較的安定な環境条件で存在し、供給される粗大有機物の量も少ない。以上より、作土には全有機態窒素や易分解性有機態窒素が下層土に比較して集積しやすいものと考えられる。そこで、易分解性有機態窒素量の1つの指標として風乾土のアンモニア態窒素生成量(30℃、4週間培養)を作土と下層土で比較した<sup>22)</sup>(第19表)。アンモニア態窒素生成量は作土>下層土であり、さらにアンモニア態窒素生成量が全有機態窒素量に占める割合は、作土では平均7.6%、下層土で平均6.0%であった。この結果は、作土の土壌有機物が下層土のそれと比較してより変質を受け、易分解性有機態窒素が集積していることを示している。以上の理由により、作土の正の項の可分解性有機態窒素量が下層土のそれに比べて、量および全有機態窒素量に占める割合が高くなったものと考えられる。

正の項の無機化速度定数が作土で下層土より大きく、活性化エネルギーが下層土で大きい理由も下層土の有機物が作土のそれより変質を受けていないことにあるものと考えられる。上記の点については、作土および下層土における生土と風乾土の30℃・4週間後のアンモニア態窒素の生成量の比からもうかがえる(19表)。つまり作土の方が下層土よりも風乾土に対する生土のアンモニア態窒素の生成量が多くなっている。下層土に比べて作土の方がより分解しやすい形態になっていることが推察される。

第19表 アンモニア態窒素生成量

土壌 No.	アンモニア態窒素量(mg/乾土100g)*			
	作 土		下層土	
	生土	風乾土	生土	風乾土
1	5.1	30.4	1.8	23.1
2	3.0	21.8	1.2	19.6
3	3.0	19.4	1.1	14.2
4	4.1	25.9	1.8	20.0
5	4.3	28.2	1.0	18.3
6	3.3	27.2	1.6	15.6
7	5.0	20.2	0.6	13.5
8	3.5	24.9	2.5	20.4
平均	3.9	24.8	1.4	18.1

\*30℃で4週間培養。

正の項（全無機化を示す）が50%および90%無機化するのに要する日数が、下層土の方が作土に比べて長くかかるのは、下層土の地力窒素無機化の無機化速度定数が作土のそれに比べて小さいこと、下層土の地温が作土のそれに比べて低いことによると考えられる。この点については、作土と下層土における吉野・出井法による係数（ $n$ ）によってもうかがえる。すなわち、作土は $n < 1$ であり、下層土は $n > 1$ となっている。吉野・出井によれば $n < 1$ の場合は前半型の無機化パターン、 $n > 1$ の場合は後半型の無機化パターンであることを指摘している<sup>126)</sup>。このことは、下層土の地力窒素の無機化パターンが作土に比べて後半型であり、特に水稻の生育後期に重要な役割を果たすことを示唆するものである（第14表）。第12図で示したように、移植から成熟期までの水稻による地力窒素吸収量は9.5kg/10aであるのに対して、作土のみの利用可能地力窒素量は8.3kg/10aとなり、水稻による地力窒素吸収量を下回る。これに対して作土に下層土を加味した場合の利用可能地力窒素量は9.9kg/10aとなり、水稻による地力窒素吸収量と同程度になる。このように、特に生育後期において、下層土の地力窒素の無機化の特徴を反映して、水稻による地力窒素吸収量への寄与が大きくなることが示唆される。

また、水稻の吸収する地力窒素のうち約9~30%が下層土からの地力窒素に由来し、下層土から無機化した窒素も水稻の生育にとって重要であることが指摘されている<sup>2, 50, 51, 73, 74)</sup>。

本研究でも、8月11日から9月18日の水稻の窒素吸収量の不足分だけ下層土に由来すると仮定すると、全窒素吸収量に占める下層土由来の窒素の割合は約7%となる（8/11から9/18までの水稻による窒素吸収量 - 8/11から9/18までの作土からの地力窒素無機化量） / （基肥窒素量 × 利用率 + 水稻による時期別窒素吸収量）。しかし、水稻は移植1月後には下層土由来の窒素を吸収していることから、水稻の全吸収窒素量に占める下層土由来の窒素の割合はさらに高くなることが考えられる。そこで、下層土由来窒素の水稻の吸収した窒素に占める割合の最大値を以下のようにして求めた。すなわち、水稻の吸収する地力窒素の作土と下層土の地力窒素の無機化量の割合として移植直後から計算した。

その結果、下層土由来の窒素吸収量の全窒素吸収量に占める割合は22%となった〔(5/15から6/30までの水稲の地力窒素吸収量×地力窒素無機化の層別割合) + (7/1から8/10までの水稲の地力窒素吸収量×地力窒素無機化の層別割合) + (8/11から9/18までの水稲の地力窒素吸収量×地力窒素無機化の層別割合)〕 / [全地力窒素吸収量]。したがって、本圃場での水稲の全窒素吸収量に対して下層土由来の窒素の占める割合は7~22%の範囲にあるものと推定される。この結果は、従来の下層土由来の窒素が全吸収窒素に占める割合(9~30%)と一致<sup>73, 74)</sup>し、下層土由来の窒素が水稲生育に果たす役割を示すものである。

このように、水稲の生育(窒素吸収)について、下層土の役割は極めて重要であり、精度の高い追肥診断システムおよび普及性を考えた地力窒素発現地図については、作土だけでなく下層土の窒素肥沃性も加味した立体的な地図の作成が必要であると考えられる。特に、食味の向上を考慮した場合、生育量に対応した生育後半の地力窒素の供給が重要な要素となってくることから、生育後半型における無機化パターンの下層土の地力窒素の供給に関する情報は、必要項目であると考えられる。

## 5. 要約

山形県庄内地域における水田土壌の下層土の地力窒素の無機化について、自然変温条件下で速度論的解析を行った。そして、下層土の無機化特性値と作土のそれと比較した。

①負の項のある2項モデルは分散が小さく下層土の地力窒素の無機化によく適合した。

②地力窒素の無機化特性値のうち無機化速度定数は、正の項では0.004 1/day前後で一定であり、負の項は0.01~0.02 1/dayであった。活性化エネルギー、可分解性有機態窒素量は一定の傾向が見られなかった。

③下層土と作土の無機化特性値を比較すると、無機化速度定数は、正の項、負の項ともに、可分解性有機態窒素量は、正の項が常に作土>下層土であった。負の項の可分解性有機態窒素量および正の項の活性化エネルギーは、大部分、下層土>作土であった。

