

## 畑地における亜酸化窒素の発生と制御方法

鈴木 聡\*

摘要：1993, 1994年に宇都宮市の黒ボク土において窒素施用量, 施用有機物及び肥料の種類による畑地からの亜酸化窒素 ( $N_2O$ ) 発生量の相違を比較した。ハクサイ作での $N_2O$ 発生量は発酵豚ふん区>硫安1.5倍区>稲わら堆肥区, 稲わら堆肥倍量区>硫安区の順であり, 二条大麦作では硫安1.5倍区 >稲わら堆肥区>硫安区>緩効性窒素肥料区の順であり, 硫安の多施用により $N_2O$ の発生量が多くなることが示された。稲わら堆肥の施用には作物の増収効果が認められるが, その反面 $N_2O$ の発生量が高まった。特に易分解性有機物を大量に含む発酵豚ふん区から多くの $N_2O$ が発生したが, その原因として微生物の活性促進に加え, 大量の窒素の無機化及び酸素の大量消費による脱窒の促進効果が推察された。作物の生産性と $N_2O$ 発生制御の二点から易分解性有機物の少ない腐熟の進んだ堆肥の施用が望ましいと考えられる。

2か年間, 全試験区を通じての $N_2O$ の放出率は0.03~0.5%であったが, 年次間の差が大きく, 特に基肥施用直後の温度及び土壌水分に大きな影響を受けることが示された。基肥施用直後に高温, 高水分の条件が整ったときに $N_2O$ フラックスは大きな値を示すが, 時間がある程度経過すると, 高温, 高水分の条件を満たしてもその値は大きくはならなかった。窒素の多施用を控えることや緩効性窒素肥料の施用により土壌中のアンモニア態窒素 ( $NH_4-N$ ), 硝酸態窒素 ( $NO_3-N$ ) 濃度を低く維持することや, 必要以上の多灌水を控えることが $N_2O$ の発生制御に有効であると考えられる。

キーワード：亜酸化窒素 ( $N_2O$ ) の発生, 黒ボク土, 窒素肥料, 硫安, 易分解性有機物, 堆肥, 温度, 土壌成分

### Emission of Nitrous Oxide from Andosol Upland Field and The Artificial Control of It

Satoshi SUZUKI

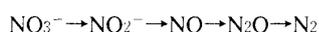
Summary: This study was conducted to elucidate the influence of fertilizer on the emission of nitrous oxide from Andosol upland field. The amount of nitrous oxide emitted from the field of Chinese cabbage in summer was larger in the order of fermented pig manure >> ammonium sulfate (1.5 times rate) > rice straw compost > ammonium sulfate (standard rate). In winter from the field of two-rowed barley, the order was; ammonium sulfate (1.5 times rate) > rice straw compost > ammonium sulfate (standard rate) > slow release nitrogen fertilizer. Emission of nitrous oxide was accelerated by the application of high rate of ammonium sulfate. The application of rice straw compost was good for the yield of Chinese cabbage and barley, but it brought the increase of nitrous oxide emission. Nitrous oxide emission from fermented pig manure plot with a large amount of readily degradable carbon were significantly, depending on enhancement of microorganism activity and denitrification, and mineralization of a large amount of nitrogen. The application of well-decomposed compost with a small amount of readily degradable carbon is recommendable for crop production and depressing the emission of nitrous oxide.

The percentage of emitted nitrous oxide to applied nitrogen varied from 0.03 to 0.5 throughout the experiments. The temperature and soil moisture immediately after the application of basal dressing affected the emission of nitrous oxide positively. Lowering the level of nitrogen or using slow release fertilizer and restriction of irrigation might be effective for reducing the emission of nitrous oxide.

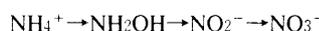
Key words: emission of nitrous oxide ( $N_2O$ ), Andosol, nitrogen fertilizer, ammonium sulfate, readily degradable carbon, compost, temperature, soil moisture

## I 緒言

1970年代までの地球温暖化への寄与率は二酸化炭素の割合が高かったが、1980年代に入ると、メタン、 $N_2O$ 、フロンなどの微量ガスと二酸化炭素との温暖化への寄与率がほぼ1:1となり、将来は微量ガスの寄与率ははるかに高くなることが予想されている<sup>46)</sup>。これらの微量ガスのうちメタン及び $N_2O$ は農業活動にも由来して発生する。メタンは、嫌気条件下で有機物が分解する際に発生する。一方、 $N_2O$ は主に微生物活動による窒素の代謝によって生成され、脱窒<sup>9), 39)</sup>及び硝化<sup>6), 40)</sup>が主要なメカニズムとして挙げられる。脱窒は嫌気条件下で進行し、主な経路は次のように示される。



一方、硝化は好気条件下で進行し、次の経路で示される。



熱帯雨林の伐採、石油及びバイオマスの燃焼、施肥などの人為的な影響により大気中の $N_2O$ 濃度は1980年代に急激に上昇した<sup>27)</sup>。その結果、年間約0.25~0.31%の割合での上昇が報告されている<sup>45)</sup>。メタン1分子当たりの温室効果が二酸化炭素の約20~30倍に相当する<sup>4), 35)</sup>のに対し、 $N_2O$ では、その値は150倍<sup>4)</sup>に達する。また、メタンの大気中での残留年が8~12年であるのに対し、 $N_2O$ では100~200年となり<sup>4)</sup>、大気中での消長が長くなる。これらの特性から今後はメタン以上に $N_2O$ の温暖化への寄与率が高まることが予想される。近年、地球上での $N_2O$ の年間発生量の推定が行われている。Seilerら<sup>51)</sup>は $14 \pm 7TgN$ 、Prinnら<sup>45)</sup>は $20.5 \pm 2.4TgN$ 、Watsonら<sup>50)</sup>は $4.4 \sim 10.5TgN$ 、Khalilら<sup>27)</sup>は $22 \pm 1TgN$ との推定を行っているが、それらの範囲は大きい。また、施肥由来による年間発生量については、Conradら<sup>12)</sup>は $0.005 \sim 2.2TgN$ 、Seilerら<sup>51)</sup>は $1.5 \pm 1TgN$ 、Bouwman<sup>4)</sup>は $1.5TgN$ 、Watsonら<sup>50)</sup>は $0.01 \sim 2.2TgN$ 、Eichner<sup>45)</sup>は $0.02 \sim 0.3TgN$ と推定しているが、これも幅の広いものとなっている。これは、土壤の物理性、pHなどの化学性、温度、土壤水分、施用有機物の種類及び量、窒素施用量など $N_2O$ 発生に関与する不確定な要因が多数存在するためである。また、 $N_2O$ によるオゾン層の破壊も指摘されており<sup>13)</sup>、その発生制御が広く求められている。

本研究では、栃木県の代表的土壤である黒ボク土からの $N_2O$ の発生量への影響について、土壤水分、温度、施肥後経過日数の関係を明らかにした。さらに、 $N_2O$ 発生

に及ぼす窒素施用量、施用有機物の種類について考察を加えたので報告する。

## II 試験方法

### 1. 供試圃場及び試験区の構成

供試圃場は、栃木県農業試験場内(宇都宮市)の畑地で、表層多腐植質黒ボク土である。土性はL、仮比重は0.60、最大容水量は52.4% (生土に対する水分の割合、w/w)である。1993、1994年にハクサイ二条大麦の二毛作体系で $N_2O$ の発生を測定した。ハクサイの供試品種はCR隆徳であり、畝間は60cm、株間は50cmとした。二条大麦の供試品種はミサトゴールドデンであり、畝間は60cm、播種量は0.6kg/aとした。供試圃場では、1988年から1991年までレタス小麦の二毛作体系で、し尿汚泥の施用試験を行っている。試験は各区とも毎年2.6kgN/aの窒素を硫酸で施用し、それぞれの区に0、10、20、60kg/aの汚泥施用を上乗せする形で行われた。汚泥の窒素含量は現物あたり3.8%であり、60kg/a施用区での年間の総窒素施用量は4.9kgN/aに達した。そのため、1992年は圃場の均一化のため、レタス小麦の二毛作体系で化学肥料のみの施用を行った。その結果、第1表に示すように1993年の試験開始時における土壌中の全炭素含量は試験区間で若干異なったが、pH、電気伝導率(EC)、全窒素含量、可給態及び無機態窒素含量はほぼ等しくなった。試験区の処理内容、施用有機物の化学性をそれぞれ第2、3表に示す。なお、それぞれの表の試験区にはアルファベット小文字を付記した。各作において、同一文字の試験区は同一地点での作付けが行われたことを示している。

近年における窒素施用量の増加が $N_2O$ 発生に及ぼす影響を把握するために、ハクサイの作付けでは1993年に硫酸区、硫酸1.5倍区を設置した。また、地力の維持には有機物の施用が不可欠であり、有機物施用量の影響を把握するために稲わら堆肥区及び稲わら堆肥倍量区を設置した。1994年には施用有機物の質的な差異による影響を把握するために、稲わら堆肥倍量区の代わりに発酵豚ふん区を設置した。このとき、有機物由来による窒素量が同じになるように稲わら堆肥、発酵豚ふんの施用量を設定した。また、新たに無肥料区を設置した。1993年は8月31日に基肥を、9月16日に追肥を施用した。基肥、追肥にかかわらず、全区とも窒素は硫酸、リン酸は過石、カリウムは硫酸カリを用いた。また、堆肥の施用、定植も8月31日に行い、収穫は11月4日であった。1994年作での基肥、堆肥、豚ふんの施用及び定植は8月29日に行い、追肥は9月19日、収穫は11月4日に行った。

## 畑地における亜酸化窒素の発生と制御方法

第1表 耕起前における土壌の化学性

年 度	試 験 区 名	pH	EC	T-C	T-N	C/N	可給態	無機態	Truog
		H <sub>2</sub> O	mS/cm	%	%		N	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
供試作物							mg/100g	mg/100g	mg/100g
1993 ハクサイ	a. 硫 安 区	6.1	0.17	9.15	0.54	16.9	5.4	3.8	5.2
	b. 硫 安 1.5 倍 区	6.1	0.18	9.01	0.53	17.0	5.6	3.7	6.3
	c. 稲 わ ら 堆 肥 区	6.2	0.17	9.45	0.53	17.8	5.1	3.3	6.3
	d. 稲 わ ら 堆 肥 倍 量 区	6.2	0.18	9.05	0.54	16.8	5.1	3.2	6.5
1993 二条大麦	a. 硫 安 区	5.8	0.18	9.26	0.56	16.5	4.6	3.4	6.9
	b. 硫 安 1.5 倍 区	5.8	0.23	8.78	0.56	15.7	4.2	3.0	8.2
	c. 稲 わ ら 堆 肥 区	6.0	0.15	9.59	0.58	16.5	5.0	2.1	8.6
	d. 緩 効 性 窒 素 肥 料 区	6.0	0.17	8.79	0.60	14.7	4.4	1.8	8.3
1994 ハクサイ	a. 硫 安 区	5.9	0.17	8.88	0.57	15.6	4.1	2.2	11.2
	b. 硫 安 1.5 倍 区	5.9	0.21	8.89	0.54	16.5	3.9	3.0	11.7
	c. 稲 わ ら 堆 肥 区	5.9	0.17	9.20	0.58	15.9	5.0	3.6	11.4
	d. 発 酵 豚 ぶ ん 区	5.9	0.18	9.38	0.59	15.9	4.5	2.7	10.9
	e. 無 肥 料 区	6.3	0.06	9.44	0.58	16.3	2.6	1.7	5.9
1994 二条大麦	a. 硫 安 区	5.8	0.18	8.98	0.54	16.6	4.0	1.3	11.7
	b. 硫 安 1.5 倍 区	5.6	0.21	9.15	0.58	15.8	4.1	1.2	15.0
	c. 稲 わ ら 堆 肥 区	5.9	0.17	9.43	0.60	15.7	3.6	1.7	15.5
	d. 緩 効 性 窒 素 肥 料 区	5.9	0.18	9.43	0.59	16.0	3.7	2.3	14.0
	e. 無 肥 料 区	6.3	0.05	9.42	0.58	16.2	2.7	1.7	6.0

第2表 試験区の構成 (kg/a)

供試作物	試験年度	試験区名	堆肥* 豚ぶん*		基 肥			追 肥	
					N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	K <sub>2</sub> O
ハクサイ	1993,1994	a. 硫 安 区	—	—	2.0	2.8	2.0	0.5	0.5
	1993,1994	b. 硫 安 1.5 倍 区	—	—	3.0	2.8	2.0	0.75	0.5
	1993,1994	c. 稲 わ ら 堆 肥 区	200	—	2.0	2.8	2.0	0.5	0.5
	1993	d. 稲 わ ら 堆 肥 倍 量 区	400	—	2.0	2.8	2.0	0.5	0.5
	1994	e. 発 酵 豚 ぶ ん 区	—	31.4	2.0	2.8	2.0	0.5	0.5
1994	e. 無 肥 料 区	—	—	—	—	—	—	—	
二条大麦	1993,1994	a. 硫 安 区	—	—	0.6	0.9	0.8	—	—
	1993,1994	b. 硫 安 1.5 倍 区	—	—	0.9	0.9	0.8	—	—
	1993,1994	c. 稲 わ ら 堆 肥 区	100	—	0.6	0.9	0.8	—	—
	1993,1994	d. 緩 効 性 窒 素 肥 料 区	—	—	0.6	1.4	1.2	—	—
	1994	e. 無 肥 料 区	—	—	—	—	—	—	—

注. \* 施用量は現物当たり.

第3表 施用有機物の化学性 (乾物当たり)

年 度	供試作物	有機物名	pH*	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-C	T-N	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	水分**
			H <sub>2</sub> O	mg/100g	mg/100g	%	%		%	%	%	%	%
1993	ハクサイ	稲わら堆肥	7.9	1.2	27.7	32.5	1.72	18.9	1.68	1.54	0.69	4.93	80.6
1993	二条大麦	稲わら堆肥	7.9	7.1	129	22.3	1.86	12.0	0.70	3.12	0.51	2.49	65.6
1994	ハクサイ	稲わら堆肥	6.9	24.5	216	25.2	2.05	12.3	1.37	1.25	0.56	3.06	67.8
1994	ハクサイ	発酵豚ぶん	8.0	285	10.2	36.1	5.53	6.5	8.28	6.25	2.57	4.41	26.7
1994	二条大麦	稲わら堆肥	7.3	0.9	118	26.0	2.16	12.0	1.45	5.76	0.68	3.75	68.3

注. \* 現物当たり (1:2.5), \*\* 現物当たり

二条大麦の作付けでも1993, 1994年ともハクサイ作と同様に硫安区, 硫安1.5倍区, 稲わら堆肥区を設置した。また, 二条大麦は生育期間が長いために緩効性窒素肥料の施用が一般的になっており, N<sub>2</sub>O発生量の低減が報告されていることから, 緩効性窒素肥料区を設置した。1994年には無肥料区を設置した。1993年は11月9日に基肥, 堆肥の施用, 播種を行った。緩効性窒素肥料区では

被覆尿素40日タイプを全窒素の20%配合したL886号<sup>36)</sup>(窒素8%, リン酸18%, カリウム16%)を基肥として施用した。なお, L886号は窒素源として他に硫安, リン安が配合されている。他の3区では, 窒素, リン酸, カリウムともハクサイ作と同じ資材を用いた。追肥は行わず, 収穫は1994年6月16日であった。1994年作での基肥, 堆肥の施用, 播種は11月7日であり, 収穫は1995年

6月16日であった。

土壌水分は $N_2O$ 発生に大きな影響を及ぼす<sup>1), 19), 20), 28), 34), 41), 49)</sup>。当試験では土壌水分及び窒素施用後の経過時間が $N_2O$ 発生に及ぼす影響を明らかにするために、試験期間の2年間を通じて灌水は一切行わなかった。また、ハクサイ、二条大麦の生育に適正なpHは6.0~6.5であるが、1993年の二条大麦作付け以降は若干この値を下回るようになった。しかし、石灰施用により土壌及び微生物からの易分解性有機物の抽出が報告されており<sup>37)</sup>、無機態窒素の生成による $N_2O$ 発生の助長が考えられた。このため石灰施用によるpHの調整も2か年間行わなかった。

## 2. 亜酸化窒素発生量の測定方法

メタン採取用のチャンバーは100cmの高さであった<sup>54)</sup>が、 $N_2O$ の濃度の増加は極めて微量であるため、チャンバーの高さを低く設定する必要があった。その場合、生育の後半には植物の成長によってチャンバーの被覆が不可能になることが考えられた。そこで、チャンバー被覆地点にはハクサイの植え付けを行わなかった。二条大麦作では、 $N_2O$ の測定を草丈が低い2月までとし、チャンバー被覆地点での植え付けを行った。

平均にならした圃場に底面60cm×60cm、高さ20cmのステンレス製チャンバーをかぶせ、0、10、20分後にミニポンプを用いてチャンバー内の空気をテドラーバッグ®に採取した。採取した空気は、ミニポンプを用いて5mlの計量管を取り付けたバルブシステムに導入し、電子捕獲検出器(ECD)付きのガスクロマトグラフを用いて $N_2O$ を定量した。装置はHewlett Packard HP-5890IIで、ポラパックQ(80~100メッシュ)を充填したステンレスカラム(内径2mm、長さ2m)を装着し、キャリアーガスとして窒素を30ml/minの流量に、注入口、試料気化室、カラム、検出器の温度をそれぞれ100、100、70、330℃に設定した。0、10、20分後の $N_2O$ 濃度から単位時間当たりの $N_2O$ 濃度の増加を求め、陽・福士<sup>39)</sup>の方法に基づき、単位時間、面積当たりのフラックスを算出した。各測定日から次の測定日までの時間幅をとり、その期間中の相加平均フラックスにその時間幅を掛け、それらを合計することにより、栽培期間中の発生量を算出した。なお、基肥施用当日には $N_2O$ の測定を行っていないので、当日のフラックスはゼロとして計算した。測定は各区2連、施肥直後から2週間後までは約1~5日の間隔で行い、それ以降は1~2週間の間隔で行った。また、二条大麦の作付けでは、12月以降には測定間隔が1か月になる場合もあった。

土壌水分<sup>6), 21), 26), 43)</sup>、pH<sup>28)</sup>、温度<sup>28)</sup>が硝化速度や脱

窒等に影響を及ぼすため、 $N_2O$ の調査と同時に表面から5cmの深さの土壌を採取してpH、土壌水分の測定を行った。また、転倒式ます型自記雨量計を設置して降雨量の測定を行った。さらに、自記温度計を設置し、2、5cmの深さの地温を測定した。

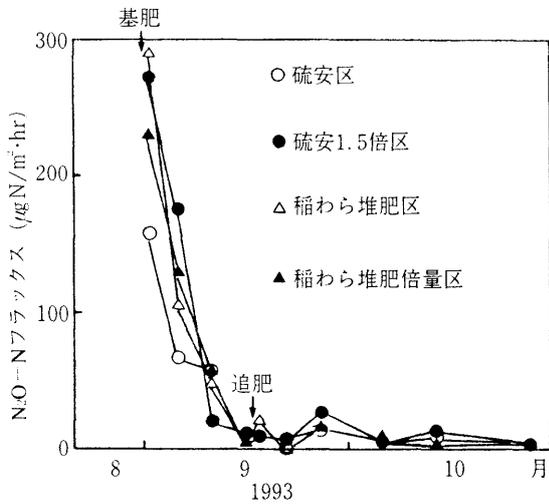
## III 結果

1993年におけるハクサイ作付け時の $N_2O-N$ フラックス、土壌pH、土壌水分、温度の推移を第1~4図に示す。なお、基肥施用翌日の日平均気温は24.9℃であり、2、5cmの深さの日平均地温はそれぞれ26.7℃、26.9℃であった。また、各区の土壌水分は36~38% (生土に対する水分の割合、w/w、以下同様)であり、それらの値は最大容水量の69~73%に相当した。このときの $N_2O-N$ フラックスは各区とも栽培期間中の最大値を示し、それぞれの値は硫安区 $157\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、硫安1.5倍区 $274\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、稲わら堆肥区 $291\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、稲わら堆肥倍量区では $231\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ であった。フラックスはその後急激に減少し、基肥施用10日後の値は施用翌日の7~37%となった。その間、日平均気温は18~24℃で、地温は2、5cmとも19~26℃で推移した。これらの値は基肥施用翌日に比べると若干低かった。また、土壌水分は各区ともほぼ34~38%で推移し、基肥施用翌日と同程度であった。その後さらに各区ともフラックスは減少し、施肥1か月後ではほとんど同じレベルになった。第1図が示すように、 $N_2O$ の大部分は施肥直後に発生しており、栽培期間中の全発生量に対する累積発生量は、基肥施用5日後には各区で37~53%に達した。また、基肥施用10日後では61~74%であった。

基肥施用16日後の9月16日に追肥を行った。翌日のフラックスにわずかな増加は認められたが、基肥施用時のような大きい値は得られなかった。追肥翌日の日平均気温は21.7℃、2、5cmの深さの日平均地温はそれぞれ22.7℃、23.1℃であり、基肥施用時よりやや低かった。また、各区の土壌水分は33~37%であり、基肥施用時と同程度であった。このような条件下で追肥を行ってもフラックスは大きな値を示さず、追肥以降の全試験区を通じてのフラックスの最大値は、硫安1.5倍区における9月26日の $28\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ であった。また、 $10\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 以下の場合が多く、フラックスがゼロの場合もあった。9月14日の24.5mmの降雨以降、15日の0.5mmを除いて22日まで降雨が全く無く、その間、土壌水分は9月17日には34%、21日には31%に低下した。その後は収穫まで35~38%で推移した。気温、地温とも9月16日から20日までは21~24℃で推移したが、それ以降は20℃以下となり、以

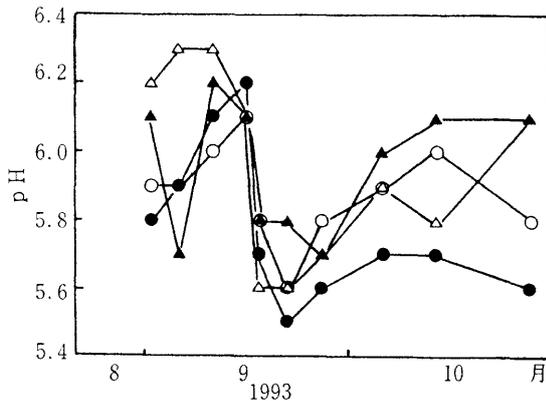
後収穫まで次第に低下した。また土壌pHは全区を通じて5.5~6.3で推移し、その値は、稲わら堆肥倍量区>稲わら堆肥区>硫安区>硫安1.5倍区の順に高かった。栽培期間中の $N_2O$ の発生量は、硫安区 $27.5mgN/m^2$ 、硫安1.5倍区 $50.6mgN/m^2$ 、稲わら堆肥区 $42.8mgN/m^2$ 、稲わら堆肥倍量区では $42.7mgN/m^2$ であった。

1994年におけるハクサイ作付け時の $N_2O-N$ フラックス

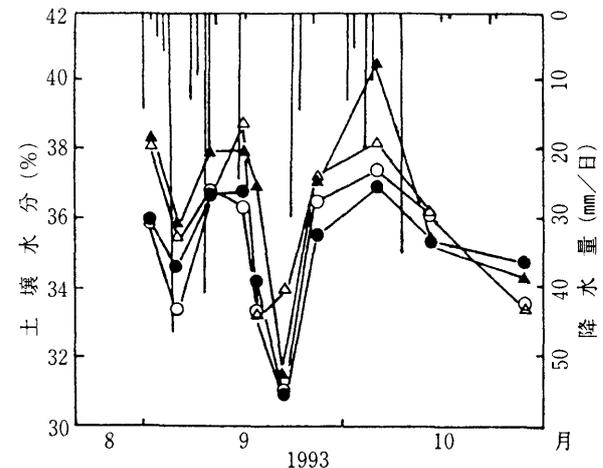


第1図  $N_2O-N$ フラックスの推移

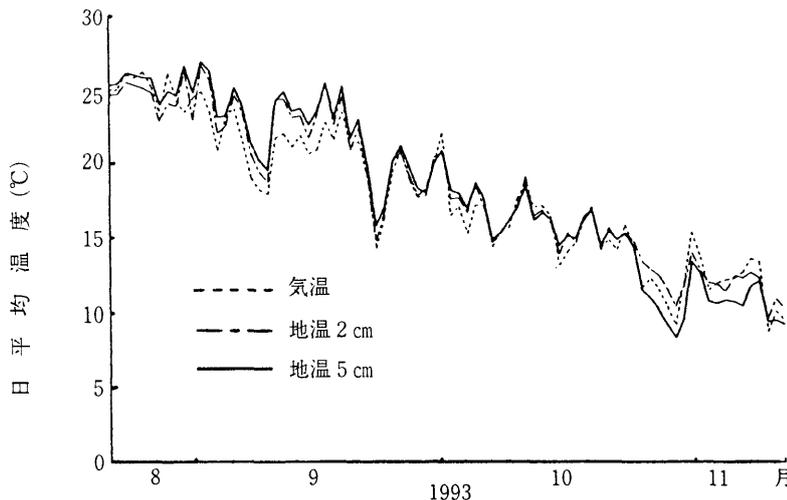
注. 第1~3図において同一記号は同一区を示す



第2図 土壌pHの推移

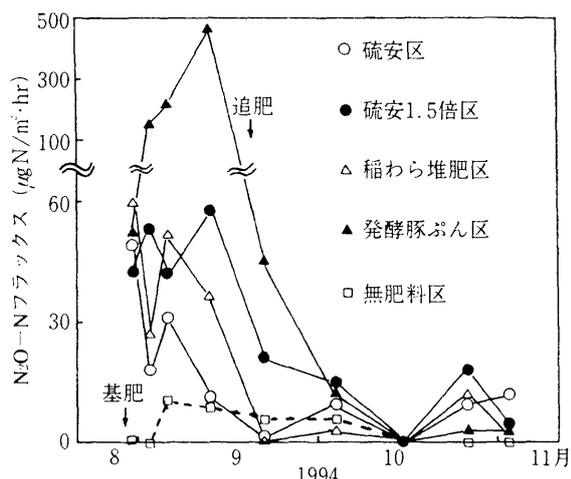


第3図 土壌水分の推移と降水量



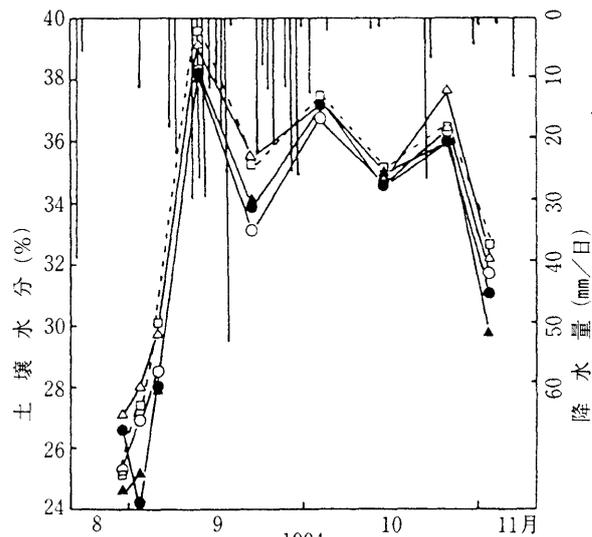
第4図 気温・地温の推移

ス、土壌pH、土壌水分、EC、温度の推移を第5~9図に示す。硫安区、硫安1.5倍区、稲わら堆肥区の $N_2O-N$ フラックスは1993年と異なった消長を示した。施肥翌日の日平均気温は $27.1^{\circ}C$ 、2、5cmの深さの日平均地温はそれぞれ $30.2^{\circ}C$ 、 $28.3^{\circ}C$ であり、前年に比べていずれも高かった。一方、各区の土壌水分は24~27%であり、それらの値は最大容水量の46~52%に相当し、前年に比べて低い値であった。基肥施用翌日のフラックス値は硫安区 $50\mu gN/m^2\cdot hr$ 、硫安1.5倍区 $43\mu gN/m^2\cdot hr$ 、稲わら堆肥区では $60\mu gN/m^2\cdot hr$ で、1993年の15~30%の値であった。その後、基肥施用7日後まで日平均気温は25~ $30^{\circ}C$ で、土壌水分は30%以下で推移し、1993年に比べて温度は高く、土壌水分は低く推移した。硫安区のフラックスは基肥施用14日後には $12\mu gN/m^2\cdot hr$ に減少したが、他の2区は、若干の変動が認められるもののほぼ同じレベルで推移した。その後施肥14日後まで温度は1993年の施肥1日後よりも高いレベルで推移した。また、この間の96mmの降雨により土壌水分は38~40%に達し、温度、土壌水分の条件に限れば1993年の基肥施用翌日のレベル

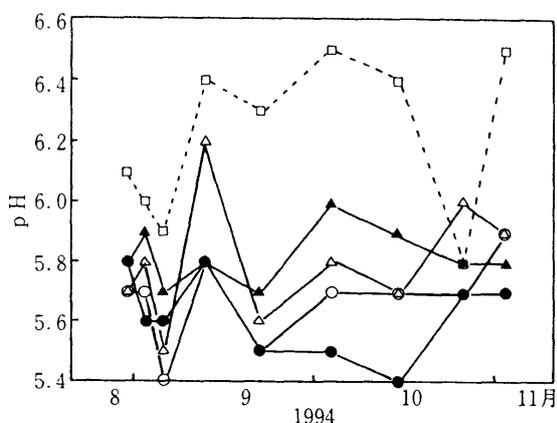


第5図 N<sub>2</sub>O-Nフラックスの推移

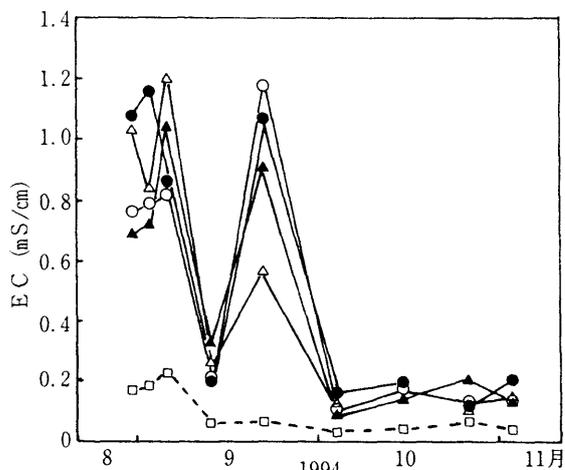
注. 第5～8図において同一記号は同一区を示す



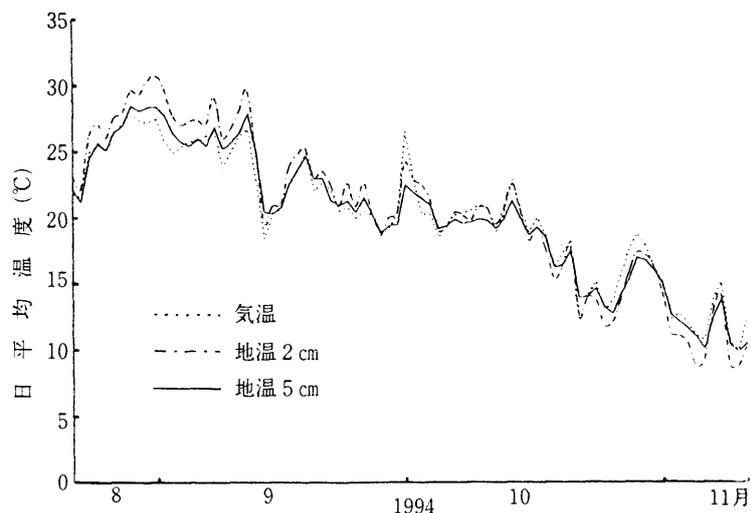
第7図 土壌水分の推移と降水量



第6図 土壌pHの推移



第8図 ECの推移

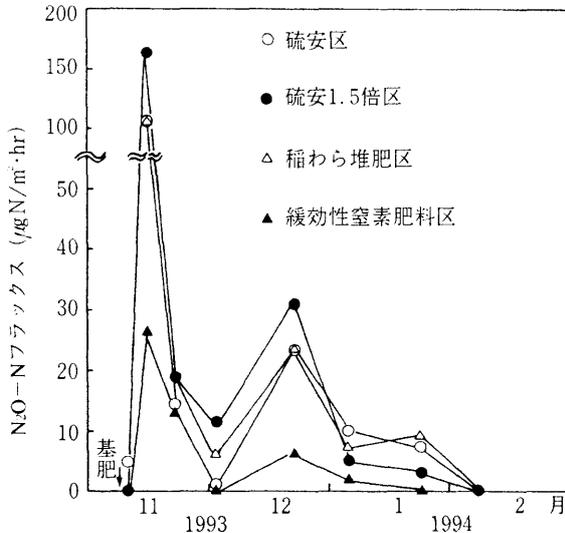


第9図 気温・地温の推移

に達した。しかし、施肥14日後のフラックス値は硫安1.5倍区が若干増加しただけで、他の2区はむしろ減少した。追肥以降は、各区とも大きなフラックスを生じず、1993年と同様の消長を示した。また、土壌水分、日平均気温、地温も同様であった。栽培期間中の全発生量に対

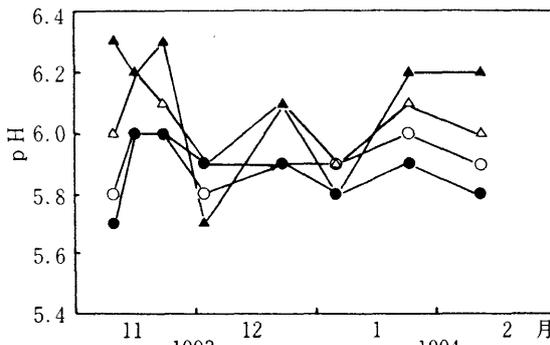
する累積発生量は、基肥施用4日後では、前記3区で11~23%であった。また、基肥施用14日後では44~59%であり、累積割合は1993年に比べて低かった。

発酵豚ふん区における $N_2O-N$ フラックスは前記3区と異なった消長を示した。施肥1日後のフラックスは $53\mu g N/m^2 \cdot hr$ で、前記3区と同じレベルであったが、施肥4日後 $154\mu g N/m^2 \cdot hr$ 、7日後 $219\mu g N/m^2 \cdot hr$ と増加を続け、14日後には $467\mu g N/m^2 \cdot hr$ の最大値を示した。その後は急激な減少を示し、他の3区と同程度のレベルで推移した。栽培期間中の全発生量に対する累積発生量は、基肥施用4日後では5.5%に過ぎず、前記3区に比べて低い割合であったが、14日後では54%、23日後では93%に増加した。一方、無肥料区のフラックスは極めて小さい値で推移し、栽培期間中の最大値は $11\mu g N/m^2 \cdot hr$ であった。栽培期間中の $N_2O$ 発生量は、硫安区 $16.0mg N/m^2$ 、硫安1.5倍区 $36.5mg N/m^2$ 、稲わら堆肥区 $17.9mg N/m^2$ 、発酵豚ふん区 $145.4mg N/m^2$ 、無肥料区では $8.9mg N/m^2$ であった。

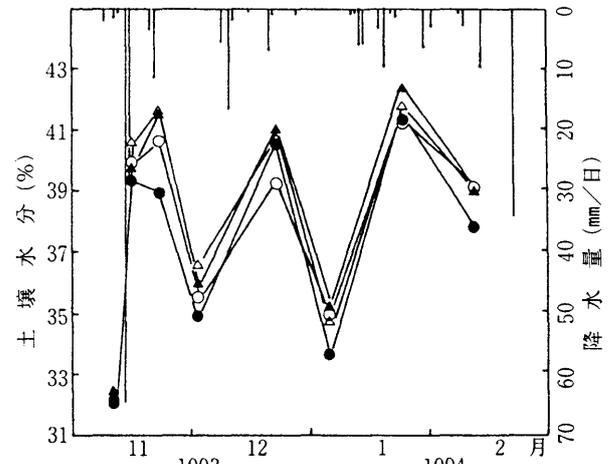


第10図  $N_2O-N$ フラックスの推移

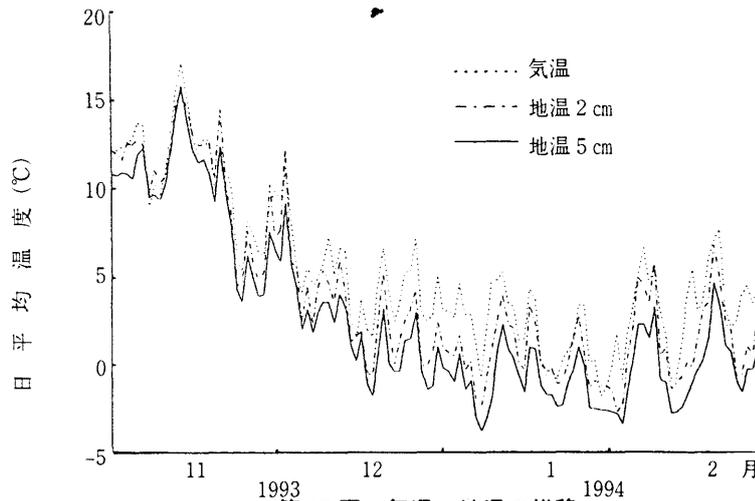
注. 第10~12図において同一記号は同一区を示す



第11図 土壌pHの推移



第12図 土壌水分の推移と降水量

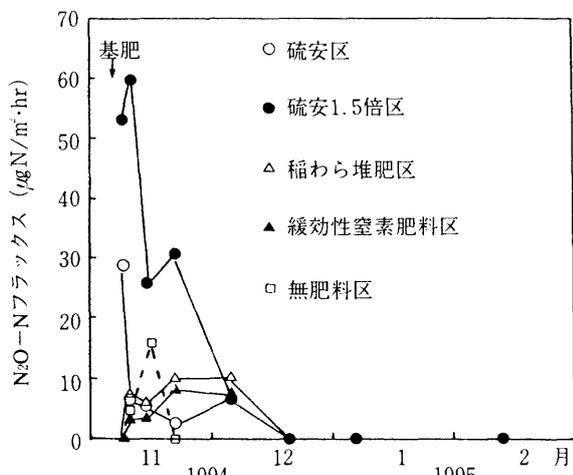


第13図 気温・地温の推移

基肥施用翌日のECは、施用窒素量を反映して硫安区で0.77mS/cm、硫安1.5倍区で1.07mS/cmであった。また、稲わら堆肥区で1.29mS/cm、発酵豚ふん区で0.69mS/cmであった。基肥施用後7日間は硫安1.5倍区、稲わら堆肥区のECが硫安区に比べて高く推移したが、無肥料区を除

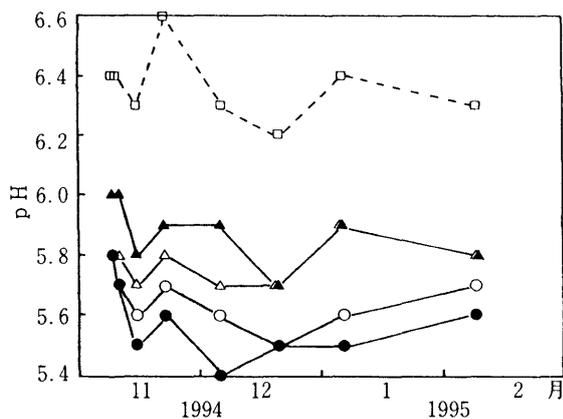
く全区とも基肥施用7日後から14日後の間の降雨の影響によりECは著しく低下し、14日後では各区ともほぼ等しい値を示した。追肥により各区とも一時的に著しい増加を示したが、その後は0.2mS/cm以下の低いレベルで推移した。土壌pHは無肥料区では5.9~6.3で推移した。また、他の4区はほぼ5.4~6.0で推移し、その値は、発酵豚ふん区>稲わら堆肥区>硫安区>硫安1.5倍区の順で高かった。

1993年における二条大麦作付け時の $N_2O-N$ フラックス、土壌pH、土壌水分、温度の推移を第10~13図に示す。 $N_2O-N$ フラックスは各区とも施肥1日後では極めて小さい値またはゼロであった。このときの日平均気温は9.6℃で、2、5cmの深さの日平均地温はそれぞれ10.3℃、9.3℃であった。また、各区の土壌水分は32%であり、それらの値は最大容水量の61%に相当した。施肥6日後には各区ともフラックスが増加し、それぞれ栽培期間中の最大値を示した。それぞれの値は硫安区106 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、硫安1.5倍区163 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、稲わら堆肥区106 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、緩効性窒素肥料区では27 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ であり、

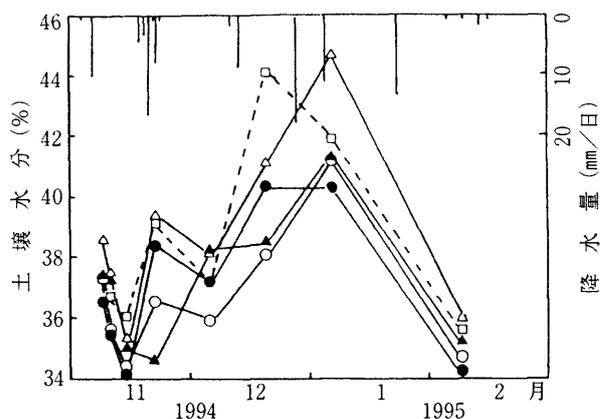


第14図  $N_2O-N$ フラックスの推移

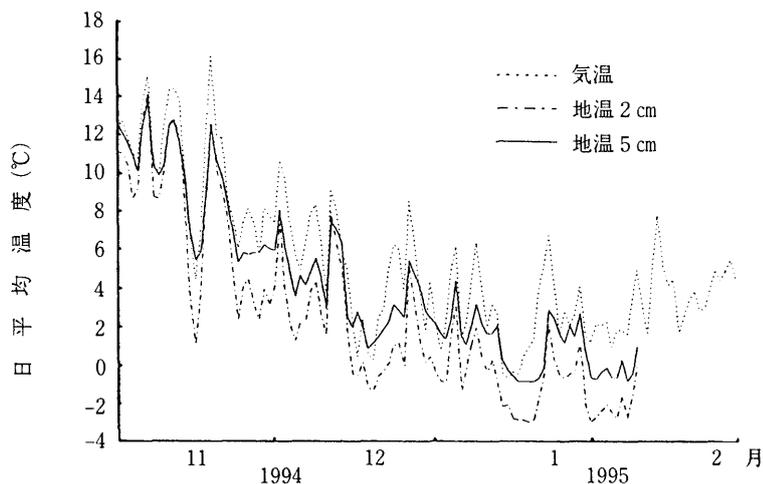
注. 第14~16図において同一記号は同一区を示す



第15図 土壌pHの推移



第16図 土壌水分の推移と降水量



第17図 気温・地温の推移

緩効性窒素肥料区の値は他の3区に比べて小さかった。また、全栽培期間を通じてのフラックスも小さく推移した。施肥1日後から6日後までの日平均気温は10~17℃、日平均地温は9~15℃で推移し、施肥1日後に比べて若干高く経過した。また土壌水分は施肥6日後には39~41%に上昇し、それらの値は最大容水量の74~78%に相当した。フラックスはその後急激に減少し、20 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 以下のレベルで推移した。12月下旬にフラックスは若干増加したが、土壌水分の上昇と一致した。このときの日平均気温は3.5℃、2、5cmの深さの日平均地温はそれぞれ1.4℃、-0.4℃であった。このような低温下でのフラックスの増加は2か年を通じて他に認められなかった。栽培期間中の全発生量に対する累積発生量は、施肥6日後では各区で16~21%であり、施肥14日後では45~51%であった。また土壌pHは全区を通じて5.7~6.3で推移し、その値は、緩効性窒素肥料区>稲わら堆肥区>硫安區>硫安1.5倍区の順で高かった。栽培期間中の $\text{N}_2\text{O}$ 発生量は、硫安區35.9 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、硫安1.5倍區47.4 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、稲わら堆肥區37.6 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、緩効性窒素肥料区では9.9 $\text{mgN}/\text{m}^2$ であった。

1994年における二条大麦作付け時の $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ フラックス、土壌pH、土壌水分、温度の推移を第14~17図に示す。 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ フラックスは施肥1日後では稲わら堆肥区、緩効性窒素肥料区ではゼロで、硫安區29 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 、硫安1.5倍区では53 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ であった。このときの日平均気温は10.4℃で、2、5cmの深さの日平均地温はそれぞれ8.7℃、10.3℃であった。また、各区の土壌水分は37~39%であり、それらの値は最大容水量の71~74%に相当した。施肥3日後には、硫安區のフラックスは急激に減少した。また、稲わら堆肥区、緩効性窒素肥料区でもフラックスは認められたが、その値は小さかった。以後これらの3区は10 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 以下のレベルで推移した。硫安1.5倍区では施肥3日後のフラックスが59 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ と若干増加した。その後施肥14日後までは30 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ であったが、12月上旬以降は10 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 以下となり、他の3区と同レベルとなった。また、12月下旬及び1月上旬には土壌水分が40~42%に上昇したが、全ての区のフラックスはゼロであった。栽培期間中の全発生量に対する累積発生量は、他の作付けと違い、硫安區、硫安1.5倍区と稲わら堆肥区、緩効性窒素肥料区との間で差が大きかった。施肥7日後では、硫安區、硫安1.5倍區37~39%、稲わら堆肥區11%、緩効性窒素肥料区では25%であった。また、14日後では、硫安區、硫安1.5倍區51~63%、稲わら堆肥區30%、緩効性窒素肥料区では73%であった。無肥料区のフラックスは極めて小さい値で推移

第4表 ハクサイ、二条大麦の収量

供試作物	試験区名	結球重または子実重 (kg/a)	
		1993年	1994年
ハクサイ	a. 硫安區	509(100)	573(100)
	b. 硫安1.5倍區	522(103)	607(106)
	c. 稲わら堆肥區	503(99)	572(100)
	d. 稲わら堆肥倍量區	599(118)	—
二条大麦	d. 発酵豚ふん區	—	613(107)
	a. 硫安區	26.3(100)	30.9(100)
	b. 硫安1.5倍區	31.1(118)	15.4(50)
	c. 稲わら堆肥區	39.8(151)	37.2(120)
	d. 緩効性窒素肥料区	29.1(111)	33.6(109)

注. ( ) 内の数字は収量指数を示す。

し、栽培期間中の最大値は16 $\mu\text{gN}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ であった。栽培期間中の $\text{N}_2\text{O}$ 発生量は、硫安區5.0 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、硫安1.5倍區19.7 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、稲わら堆肥區7.6 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、緩効性窒素肥料区5.2 $\text{mgN}/\text{m}^2$ 、無肥料区では2.5 $\text{mgN}/\text{m}^2$ であった。

ハクサイ、二条大麦の収量を第4表に示す。ハクサイの収量は、硫安1.5倍區、稲わら堆肥區、発酵豚ふん区とも硫安區と同等であった。稲わら堆肥倍量區のみ増収が認められた。硫安1.5倍區では、二条大麦への増収が1993年には認められたが、pHが5.6に低下した1994年には収量が半減した。緩効性窒素肥料区の二条大麦への増収効果は2か年を通じて認められた。また、特に稲わら堆肥區の増収が著しかった。

#### IV 考察

本研究では窒素源として硫安を施用したため、 $\text{N}_2\text{O}$ 発生第一段階として硝化が、第二段階として硝化によって生じた $\text{NO}_3^-$ を電子受容体とした脱窒が考えられる。最大容水量の65%以下では脱窒量はわずかである<sup>7)</sup>が、本研究では土壌水分がこの値を越す場合は少なく、脱窒量は少ないとも考えられる。一方、Sexstone<sup>32)</sup>らは団粒構造が発達した土壌では好気条件下でも土壌団粒及び団粒間などの微小孔隙では局部的に水で満たされ、嫌気状態の部分が生じ脱窒が起こることを示した。このことから有機物含量が高い土壌の微小部位では嫌気状態の保持が考えられ、有機物含量が高い黒ボク土では好気条件下でも脱窒が起こることが報告されている<sup>40)</sup>。これらの理由により黒ボク土で実施した本研究でも、好気条件下で脱窒が起こりうると考えられる。土壌水分が最大容水量の50~60%のとき、硝化速度は最大になる<sup>26, 43)</sup>。Goodroag・Keeney<sup>20)</sup>は高水分条件のときに $\text{NO}_3^-$ 生成量に対する $\text{N}_2\text{O}$ 生成量の比率が飛躍的に増大することを示している。また、最大容水量の60~80%を越すと飛躍的に $\text{N}_2\text{O}$ が生成され、水分の増加による微生物の活性化及び酸素の低下

による脱窒菌の活性化が考察されている<sup>19)</sup>。本研究での最高水分は最大容水量の84%のときであるが、以上のことから本研究の範囲では土壌水分が多いほどN<sub>2</sub>Oの発生量が多くなると考えられる。また、硝化は25~35℃、脱窒は30~45℃前後で最大活性を示す<sup>26)</sup>。10~30℃の条件では30℃で最もN<sub>2</sub>Oの発生が多いこと<sup>20)</sup>、温度10℃の上昇でN<sub>2</sub>O-Nフラックスが2~3倍増加すること<sup>3, 14)</sup>が示されている。

本研究でも施肥後、N<sub>2</sub>Oの発生には温度及び土壌水分の影響が大きいことが示された。硫安区におけるN<sub>2</sub>O-N

フラックスと温度、土壌水分との関係をハクサイ作、二条大麦作についてそれぞれ第5、6表に示す。ハクサイ作では、1993年の施肥翌日の土壌水分は35.9%で、この値は最大容水量の68.5%に相当した。一方1994年の施肥翌日の土壌水分は25.3%で、最大容水量の48.3%に相当した。また、気温、地温とも1993年に比べて1994年の方が高かった。Goodroag・Keeney<sup>20)</sup>が土壌水分、温度の条件が共に揃ったときにN<sub>2</sub>O-Nフラックスが大きくなるように、硫安区の施肥翌日のフラックスは1993年が1994年の3.1倍であり、夏作のようにある程度の温度

第5表 硫安区（ハクサイ作）におけるN<sub>2</sub>O-Nフラックスと気温、地温、土壌水分

年度	1993					1994				
	月日	日平均		土壌水分 %	N <sub>2</sub> O-N フラックス $\mu\text{gN}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	日平均	日平均地温(℃)		土壌水分 %	N <sub>2</sub> O-N フラックス $\mu\text{gN}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
		気温 ℃	2 cm				5 cm	気温 ℃		
8.29		24.3	23.9			27.3	29.2	28.0		
	30	23.5	26.2			27.1	30.2	28.3	25.3	50
	31	24.5	23.0			27.4	30.6	28.3		
9.1	1	24.9	26.7	35.9	157	25.7	29.7	27.7		
	2	23.6	25.6			24.8	27.6	26.3	26.9	18
	3	20.9	22.1			25.3	26.9	25.6		
	4	23.2	22.6			25.7	27.2	25.3		
	5	23.8	24.7	33.4	72	25.6	27.3	25.9	28.5	31
	6	21.6	23.5			26.1	26.9	25.3		
	7	19.1	20.7			26.3	29.0	26.7		
	8	18.3	19.5			23.7	26.0	25.1		
	9	18.0	18.6			25.0	26.6	25.6		
	10	21.8	24.4	36.8	29	26.1	28.0	26.3		
	11	22.1	24.4			26.6	29.5	27.8		
	12	21.2	23.2			22.7	24.9	24.8	38.3	12

注. 基肥施用時期は1993年が8月31日, 1994年が8月29日.

第6表 硫安区（二条大麦作）におけるN<sub>2</sub>O-N発生量と気温、地温、土壌水分

年度	1993					1994				
	月日	日平均		土壌水分 %	N <sub>2</sub> O-N フラックス $\mu\text{gN}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	日平均	日平均地温(℃)		土壌水分 %	N <sub>2</sub> O-N フラックス $\mu\text{gN}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
		気温 ℃	2 cm				5 cm	気温 ℃		
11.7	7	13.5	12.4			15.0	14.1	13.8		
	8	8.8	9.7			10.4	8.7	10.3	37.3	29
	9	10.2	11.0			9.9	8.6	9.8		
	10	9.6	10.3	32.1	5	12.4	10.1	10.4	35.6	7
	11	11.0	10.7			14.3	12.5	12.4		
	12	13.1	12.3			14.4	12.8	12.7		
	13	15.4	14.7			13.7	11.8	11.5		
	14	17.0	15.4			9.5	8.0	9.6	34.4	5
	15	15.2	14.5	39.9	106	6.4	3.2	6.8		
	16	12.8	13.0			4.4	1.0	5.4		
	17	11.9	12.4			7.3	4.1	5.9		
	18	12.8	12.4			12.5	9.3	8.9		
	19	12.7	12.6			16.1	12.5	12.5		
	20	9.8	10.5			12.0	10.1	10.6		
	21	12.3	14.4			11.8	9.0	9.8	36.5	2
	22	11.3	10.1	40.6	15	8.8	7.7	8.5		

注. 基肥施用時期は1993年が11月9日, 1994年が11月7日.

が確保された条件では土壤水分の影響が大きいことが明らかとなった。1993年には、その後土壤水分は比較的高い条件で維持したが、フラックスは急激な減少を示した。N<sub>2</sub>O-Nフラックスは施肥間もない頃ピークを形成した後、急激な減少を示すことが報告されている<sup>45)</sup>。一方、1994年には土壤水分は低いレベルで推移し、それに伴ってフラックスも小さいレベルにとどまった。9月12日には土壤水分が急激に上昇するが、フラックスの増加は認められなかった。このように基肥施用直後に硝化及び脱窒に良好な条件が整ったときにN<sub>2</sub>O-Nフラックスは大きな値を示すが、時間がある程度経過するとその値は大きくはならなかった。このようなN<sub>2</sub>O-Nフラックスの施肥後の時間依存性は次のように考えられる。まず、硝化の段階では、土壤に施用されたNH<sub>4</sub>-Nは速やかにNO<sub>3</sub>-Nに変わると考えられる<sup>35)</sup>。それと同時に有機化も進行するため硝化の基質として必要なNH<sub>4</sub>-Nは時間の経過と共に減少する。次に脱窒の初期にはN<sub>2</sub>Oの発生割合が多いが、時間の経過と共に窒素ガスの割合が増し、最終的には窒素ガスだけが生成される。この原因はNO<sub>3</sub>還元酵素、N<sub>2</sub>O還元酵素の活性化の進行によってN<sub>2</sub>O生成能をN<sub>2</sub>O還元能が上回ることにある<sup>16), 31)</sup>。また、脱窒菌は従属栄養微生物が多いため<sup>26)</sup>、脱窒量と易分解性有機物含量とは相関が高く<sup>8), 42), 53)</sup>、培養実験でグルコースを添加した土壤の保存期間が長くなるほど<sup>33)</sup>、温度が高くなるほど<sup>5)</sup>脱窒能は、脱窒菌のエネルギー源である易分解性有機物と共に減少することが明らかとなっている。1994年の基肥施用14日後の温度、土壤水分が1993年の基肥施用翌日のレベルに達したにもかかわらず、フラックスが著しく小さかったことはこのような理由によると考えられる。

二条大麦作では、1993年の施肥翌日の土壤水分は32.1%で、この値は最大容水量の61.3%に相当した。一方1994年の施肥翌日の土壤水分は37.3%であり、最大容水量の71.2%に相当した。また、気温、地温は1993年、1994年とも10℃前後であった。両者ともフラックスは小さかったが、土壤水分が高い1994年の方が大きかった。1993年は散布4日後から6日後まで日平均気温が15℃を超え、土壤水分も39.9%に上昇した。それに伴ってフラックスも急激に増加した。また、フラックスが最大値を示した後急激に減少する傾向はハクサイ作の場合と同様であった。一方、1994年は水分は35%以上で推移したが、温度があまり上昇しなかった。Kaiら<sup>25)</sup>は窒素の有機化が10℃以下でもあまり阻害されないのに対し、無機化は20℃以下では著しく阻害されることを報告している。1994年の硫安区及び硫安1.5倍区では施肥1日後にフラッ

クスが認められたのに対して、稲わら堆肥区ではフラックスがゼロであったことから1994年は1993年に比べて無機化以上に有機化が進行したことの裏付けとなりうる。温度が上昇しなかった1994年は硝化の基質であるNH<sub>4</sub>-Nが有機化によって減少したため、栽培期間を通じて大きなフラックスは生じなかったと考えられる。

追肥後、水分含量が増加してもフラックスが増加しないことをRyden・Lund<sup>48)</sup>も報告している。基肥施用時のNH<sub>4</sub>-N濃度は耕起深さを15cmとすると、仮比重0.60から硫安区で220ppm、硫安1.5倍区で330ppmと計算される。また、硫安区に比べて硫安1.5倍区のN<sub>2</sub>Oフラックスは大きく推移した。このことは、NH<sub>4</sub>-N添加量が200ppmまでは硝化速度が増加するが、300ppm添加では阻害されることと一見矛盾する<sup>36)</sup>。しかし、土壤に吸着されるものもあり、全てのNH<sub>4</sub>-Nがイオン化されているわけではない。このことから、硫安1.5倍区の施用量では硝化を阻害するほどNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度が高くはないと考えられる。谷崎<sup>55)</sup>は、基肥では表層混和により硫安の溶解が速やかに進行するのに対し、追肥では表面施用であるため硫安の溶解が遅れることを考察している。追肥後大きなN<sub>2</sub>O-Nフラックスが生じないことの原因に追肥の表面施用によるNH<sub>4</sub>-Nのイオン化の遅れが考えられる。しかし、追肥後、土壤水分の増加と共にN<sub>2</sub>O-Nフラックスの著しい増加も報告されており<sup>55)</sup>、土壤の種類、窒素源の種類、気象要因などを更に詳しく研究する必要がある。

植物の根圏では酸素消費による脱窒の促進<sup>10)</sup>、バイオマスの増加による硝化、脱窒の促進<sup>29)</sup>などにより、非根圏に比較してN<sub>2</sub>O発生量の増加が報告されている。しかし、本研究の場合はハクサイを播種してから定植までの期間が15日程度であり、根圏が発達していないこと、前述のようにN<sub>2</sub>O発生量の大半を基肥施用直後に占めることから、植え付けを行わなくてもN<sub>2</sub>Oの発生量を過小評価することにはならないと考えられる。

各試験区でのN<sub>2</sub>O発生量及び放出率を第7表に示す。放出率は各区の発生量から無肥料区の発生量を差し引き、それを肥料及び有機物の無機態窒素の含量で除して求めた。1993年は無肥料区を設置していないため、1994年の無肥料区の値を差し引いて求めた。同一区での発生量はハクサイ、二条大麦作のいずれも1993年の方が1994年に比べて多いため、1994年の値を使用すれば放出率を過小評価することにはならない。放出率は全区を通じて0.03~0.5%であり、Minami<sup>38)</sup>の報告とはほぼ同じであった。また、同一区を比較すると、発生量が多かった1993年は発生量の少なかった1994年の1.5~13.3倍であった。ハクサイ作での放出率は発酵豚ふん区>硫安1.5倍区>稲

第7表 N<sub>2</sub>O - Nの発生量(栽培期間中)

供試作物	年度	試験区名	有機物の① 無機体N g/m <sup>2</sup>	基肥② N g/m <sup>2</sup>	追肥③ N g/m <sup>2</sup>	④=①+ ②+③ g/m <sup>2</sup>	N <sub>2</sub> O⑤ 発生量 mgN/m <sup>2</sup>	⑧* = ⑤ - (⑥ or ⑦) mg/m <sup>2</sup>	放出率 ⑧ / ④ %
ハクサイ	1993	硫安区	—	20	5	25	27.5	18.6	0.074
		硫安1.5倍区	—	30	7.5	37.5	50.6	41.7	0.11
		稲わら堆肥区	0.11	20	5	25.1	42.8	33.9	0.14
		稲わら堆肥倍量区	0.22	20	5	25.2	42.7	33.8	0.13
ハクサイ	1994	硫安区	—	20	5	25	16.0	7.1	0.028
		硫安1.5倍区	—	30	7.5	37.5	36.5	27.6	0.074
		稲わら堆肥区	1.5	20	5	26.5	17.9	9.0	0.034
		発酵豚ふん区	0.68	20	5	25.7	145.4	136.5	0.53
		無肥料区	—	—	—	—	8.9⑥	—	—
二条大麦	1993	硫安区	—	6	—	6	35.9	33.4	0.56
		硫安1.5倍区	—	9	—	9	47.4	44.9	0.50
		稲わら堆肥区	0.82	6	—	6.8	37.6	35.1	0.52
		緩効性窒素肥料区	—	6	—	6	9.9	7.4	0.12
二条大麦	1994	硫安区	—	6	—	6	5.0	2.5	0.042
		硫安1.5倍区	—	9	—	9	19.7	17.2	0.19
		稲わら堆肥区	0.78	6	—	6.8	7.6	5.1	0.075
		緩効性窒素肥料区	—	6	—	6	5.2	2.7	0.045
		無肥料区	—	—	—	—	2.5⑦	—	—

注\*. 1993年は無肥料区を設置しなかったため、1994年の無肥料区の値を差し引いた。

わら堆肥区、稲わら堆肥倍量区>硫安区の順となった。窒素の多施用によりN<sub>2</sub>Oの発生量は多くなる<sup>11, 47</sup>。硫安1.5倍区の施用量では硝化を阻害するほどNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度が高いことはないことを前述のように考察した。硫安1.5倍区での放出率が高かった理由は、硫安1.5倍区のECが基肥施用7日後まで硫安区に比べて高く推移したことから推察されるように、硝化におけるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>あるいは脱窒におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度がそれぞれの反応を阻害しない濃度の範囲において<sup>2, 30</sup>、基質の消失が遅くなるため<sup>11, 47</sup>であろう。

堆肥区が硫安区に対して放出率が高くなることは次のように考えられる。硝化菌はアンモニア酸化菌、亜硝酸酸化菌とも独立栄養菌が多いが、従属栄養性の糸状菌や細菌も存在する<sup>40</sup>。脱窒菌はほとんどが従属栄養菌である<sup>26</sup>。また、稲わらの畑地施用は、好気性細菌による酸素消費及びセルロース分解菌によるエネルギー源の増加をもたらす。脱窒菌による脱窒作用を促進する<sup>17</sup>。このように有機物施用は硝化菌、脱窒菌以外の微生物の活性も高め、間接的に硝化、脱窒能を高めると考えられる。脱窒量と易分解性有機物含量との相関が高いことは前述した。稲わら堆肥中には、より分解されやすいグルコースよりもセルロースの方がはるかに多く含まれている。このことが、稲わら堆肥区と稲わら堆肥倍量区との間にN<sub>2</sub>O発生量に差が生じなかったことの原因と考えられる。NH<sub>4</sub>-Nは稲わら堆肥のC/N比が17以上のときは有機化が、13以下のときには無機化が進行する<sup>22</sup>。その他

に共存する易分解性有機物の質によっても有機化及び無機化が規制される。すなわち、NH<sub>4</sub>-Nの有機化と無機化との転換期は従属栄養微生物に利用されるグルコースが消失する時期であり、このとき生成したNH<sub>4</sub>-Nはセルロースが共存する場合には、セルロースの分解が始まると再び有機化される<sup>23</sup>。これらのことからグルコースよりセルロースを多量に含む稲わら堆肥はその腐熟度によって有機化を経ないまでも無機化の量は少ないと考えられる。一方、汚泥<sup>41</sup>、きゅう肥<sup>50</sup>、スラリー<sup>10</sup>の施用によりN<sub>2</sub>Oが著しく発生する。これらは易分解性有機物を多量に含むことで一致する。また、発酵豚ふんもセルロースをあまり含まず、多量の易分解性有機物を含むので、一旦有機化されることなく多量の窒素を無機化することが考えられる。さらに酸素の大量消費による脱窒の促進効果が稲わら堆肥よりはるかに大きいと考えられる。

二条大麦作での放出率は1993年が硫安区、硫安1.5倍区、稲わら堆肥区が0.50~0.56%となり、ほぼ同程度となった。したがって1994年の値を中心にして比較すると硫安1.5倍区>稲わら堆肥区>硫安区>緩効性窒素肥料区の順となり、ハクサイ作と同じ傾向を示した。被覆硫安を施用した場合にはN<sub>2</sub>Oの発生量が少ない例<sup>55</sup>が、またアセトアルデヒド縮合尿素であるCycro-Di-Urea (CDU)を施用した場合にはむしろ発生量が多くなる例<sup>24, 57</sup>が報告されている。本研究では1993年は緩効性窒素肥料区の方が硫安区に比べてはるかに放出率は小さかった。逆に

1994年は両区とも発生量は少ないながらも、緩効性窒素肥料区の方が放出率はわずかながら大きかった。すなわち、硝化が起こりうる条件では硫酸区の方が緩効性窒素肥料区より窒素レベルは高いが、低温で有機化が進行する条件では逆に緩効性窒素肥料区の方が窒素レベルを高く維持するとも考えられる。このように緩効性窒素肥料といえども条件によっては速効性肥料よりも $N_2O$ の放出率が高くなることも考えられた。

土壌pHが7前後のときに硝化が、pHが6~9のときに脱窒が速やかに進行する<sup>26)</sup>が、本研究の範囲では、土壌pHと $N_2O$ 発生量との明確な関係は得られなかった。しかし、最後の作付けである1994年の二条大麦作では、窒素の多施用によって硫酸1.5倍区のpHが5.4~5.8で推移し、 $N_2O$ 放出率は硫酸区の4.5倍に達した。この値は他の3作での0.9~2.6倍に比べて高かった。低いpHでは $N_2O$ から窒素ガスへの還元が阻害され $N_2O$ が多発生する<sup>16, 18)</sup>ことから窒素の多施用を控えるべきである。1994年には二条大麦の収量が半減したように、一般に酸性条件では作物の生育は抑制される。このため、pHを石灰で調整することが必要になるが、易分解性有機物の抽出<sup>37)</sup>により $N_2O$ の放出を誘引するとも考えられる。このような観点から一層窒素の利用率の向上が求められる。そこで、今後は緩効性窒素の使用が有効な手段となる。しかし気象条件、肥料の種類などによっては発生が多くなることも考えられ、併せて肥効の面との評価が必要になる。また、今後は家畜ふんや汚泥のように易分解性有機物の多い有機物の利用機会が増すことが予想される。易分解性有機物を多量に含む発酵豚ふんは化学肥料単用に比べてはるかに多くの $N_2O$ を放出する。 $N_2O$ の大量発生を防ぐには発酵を進行させ、易分解性有機物含量を少なくしてから施用するなどの注意が求められるようになるであろう。発酵豚ふんは、ハクサイに対して顕著な増収効果を示さなかったが、 $N_2O$ の発生量は多かった。稲わら堆肥を倍量施用すると顕著に増収したが、 $N_2O$ の発生量はほとんど増加しなかった。作物の生産性と $N_2O$ 発生の制御の二点から腐熟の進んだ堆肥の施用が望ましいと考えられる。また、施肥直後の高い土壌水分は多くの $N_2O$ 発生をもたらすので、必要以上の多灌水を控えることが求められ、水田転換畑や排水不良畑での排水対策が急務となる。一般に作物の生産性向上のためには耕起は不可欠であるが、日本では排水不良水田の通気性改善を主な目的として不耕起栽培が増えている。畑地では条件によって、不耕起は多水分の条件を保ち、 $N_2O$ の多発生をもたらすとの報告もある<sup>1, 34)</sup>。一方、耕起によって土壌中の易分解性有機物の分解が容易になり、 $N_2O$ の発

生が多くなるとの報告もあり<sup>32)</sup>、耕起、不耕起が $N_2O$ の発生へ及ぼす影響への詳細な検討が必要である。

本研究の遂行に当たり、鈴木京子主任技術員には終始、土壌、有機物等の分析を行って頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表す。

## 引用文献

1. Aulakh, M. S., Rennie, D. A. and Paul, E. A. (1982) Gaseous nitrogen losses from cropped and summer-fallowed soils. *Can. J. Soil Sci.* 62 : 187-196.
2. Blackmer, A. M. and Bremner, J. M. (1979) Stimulatory effect of nitrate on reduction of  $N_2O$  to  $N_2$  by soil microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 11 : 313-315.
3. Blackmer, A. M., Robbins, S.G. and Bremner, J. M. (1982) Diurnal variability in rate of emission of nitrous oxide from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 : 937-942.
4. Bouwman, A. F. (1990) *Soils and greenhouse effect.* John Wiley and Sons, Chichester, U. K..
5. Breitenbeck, G. A. and Bremner, J. M. (1987) Effects of storing soils at various temperature on their capacity for denitrification. *Soil Biol. Biochem.* 19 : 377-380.
6. Bremner, J. M. and Blackmer, A. M. (1978) Nitrous oxide:Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science* 199 : 295-296.
7. Bremner, J. M. and Shaw, K. (1958) Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification. *J. Agric. Sci.* 51 : 40-52.
8. Burford, J. R. and Bremner, J. M. (1975) Relationships between the denitrification capacities of soils and total water-soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 7 : 389-394.
9. Burford, J. R. and Stefanson, R. C. (1973) Measurement of gaseous losses of nitrogen from soils. *Soil Biol. Biochem.* 5 : 133-141.
10. Christensen, S. (1983) Nitrous oxide emission from a soil under permanent grass:Seasonal and diurnal fluctuations as influenced by manuring and fertilization. *Soil Biol. Biochem.* 14 : 393-399.
11. Cochran, V. L., Elliott, L. F., and Papendick, R. I. (1981) Nitrous oxide emission from a fallow field fertilized with anhydrous ammonia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 : 307-310.
12. Conrad, R., Seiler, W. and Bunse, G. (1983) Factors influencing the loss of fertilizer nitrogen into the atmos-

- phere as  $N_2O$ . *J. Geophys. Res.* 88 (C11) : 6709-6718.
13. Crutzen, P. J. (1970) The influence of nitrogen oxides on atmospheric ozone content. *Q. J. Res. Metrol. Soc.* 96 : 320-375.
  14. Denmead, O. T., Freney, J. R. and Simpson, J. R. (1979) Studies of nitrous oxide emission from a grass sward. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43 : 726-728.
  15. Eichner, M. J. (1990) Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data. *J. Environ. Qual.* 19 : 272-280.
  16. Firestone, M. K., Firestone, R. B. and Tiedje, J. M. (1980) Nitrous oxide from soil denitrification: Factors controlling its biological production. *Science* 208 : 749-751.
  17. 柴原藤善・長谷川清善・小林正幸・小林達治・高橋英一(1990)稲わら施用による施設土壌の硝酸塩除去と微生物相の変化. *滋賀農試研報* 31:1-13.
  18. Focht, D. D. (1974) The effect of temperature, pH, and aeration on the production of nitrous oxide and gaseous nitrogen—a zero-order kinetic model. *Soil Sci.* 118 : 173-179.
  19. Freney, J.R., Denmead, O. T., and Simpson, J. R. (1979) Nitrous oxide emission from soils at low moisture contents. *Soil Biol. Biochem.* 11 : 167-173.
  20. Goodroad, L. L. and Keeney, D. R. (1984) Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content. *Soil Biol. Biochem.* 16 : 39-43.
  21. Greaves, J. E. and Carter, E. G. (1920) Influence of moisture on the bacterial activities of the soil. *Soil Sci.* 10 : 361-387.
  22. 広瀬春朗(1973) 稲わらおよび稲わら堆肥の分解とアンモニア態窒素の有機化過程. *土肥誌* 44:211-216.
  23. 広瀬春朗・熊田恭一(1970) 畑状態におけるグルコースとセルロースの分解とアンモニア態窒素の有機化過程, 水田土壌の窒素経済に関する研究(第6報). *土肥誌* 41:262-266.
  24. 北海道立中央農業試験場環境化学部環境保全科・北海道立道南農業試験場研究部土壌肥料科(1995)道内の農耕地から発生する温室効果ガス1. 畑における亜酸化窒素( $N_2O$ )の発生実態「北海道農業試験会議資料」.
  25. Kai, H., Ahmad, Z. and Harada, T. (1969) Factors affecting immobilization and release of nitrogen in soil and chemical characteristics of the nitrogen newly immobilized. I. Effect of temperature on immobilization and release of nitrogen in soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 15 : 207-213.
  26. 甲斐秀昭(1981) 土壌における窒素の動態 p352-372, 「土の微生物」土壌微生物研究会編. 博友社 東京.
  27. Khalil, M. A. K. and Rasmussen, R. A. (1992) The global sources of nitrous oxide. *J. Geophys. Res.* 97 : 14651-14660.
  28. de Klein, C. A. M. and van Logtestijn, R. S. P. (1996) Denitrification in grassland soils in the netherlands in relation to irrigation, N-application rate, soil water content and soil temperature. *Soil Biol. Biochem.* 28 : 231-237.
  29. Klemetsson, L., Berg, P., Clarholm, M. and Schnurer, J. (1987) Microbial nitrogen transformations in the root environment of barley. *Soil Biol. Biochem.* 19 : 551-558.
  30. Lalisie-Grundmann, G., Brunel, B. and Chalamet, A. (1988) Denitrification in a cultivated soil : Optimal glucose and nitrate concentrations. *Soil Biol. Biochem.* 20 : 839-844.
  31. Letey, J., Valoras, N., Hadas, A. and Focht, D. D. (1980) Nitrous oxide evolution from irrigated land. *J. Environ. Qual.* 9 : 227-231.
  32. Li, C., Frolking, S. E., Hariss, R. C. and Terry, R. E. (1994) Modeling nitrous oxide emissions from agriculture : A Florida case study. *Chemosphere*, 28 : 1401-1415.
  33. Limmer, A. W. and Steele, K. W. (1982) Denitrification potentials : Measurement of seasonal variation using a short-term anaerobic incubation technique. *Soil Biol. Biochem.* 14 : 179-184.
  34. Linn, D. M., and Doran, J. W. (1984) Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 1267-1272.
  35. 巻出善紘(1988)大気中の微量気体と地球環境. *化学と生物*26:50-53.
  36. Malhi, S. S. and McGill, W. B. (1982) Nitrification in three alberta soils : Effect of temperature, moisture and substrate concentration. *Soil Biol. Biochem.* 14 : 393-399.
  37. 丸本卓哉・岡野正豪・西尾道徳(1990) 火山灰草地土壌の微生物バイオマス窒素の無機化に及ぼす石灰施用の影響. *土と微生物*36 : 5-10.
  38. Minami, K. (1987) Emission of nitrous oxide ( $N_2O$ )

- from agro-ecosystem. JARQ. 21 : 22-27.
39. 陽 捷行・福士定雄 (1982) 土壌から発生する  $N_2O$  フラックスの測定法. 土肥誌53 : 525-529.
40. 陽 捷行・大西 将・福士定雄 (1983) 土壌中の硝酸化成の過程で発生する  $N_2O$ . 土肥誌 54 : 277-280.
41. Mosier, A.R., Hutchinson, G. L., Sabey, B. R. and Baxter, J. (1982) Nitrous oxide emission from barley plots treated with ammonium nitrate or sewage sludge. J. Environ. Qual. 11 : 78-81.
42. Myrold, D. D. and Tiedje, J. M. (1985) Establishment of denitrification capacity in soil : Effect of carbon, nitrate and moisture. Soil Biol. Biochem. 17 : 819-822.
43. Pal, D. and Broadbent, F. E. (1975) Influence of moisture on rice straw decomposition in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39 : 59-63.
44. Papan, H., von Berg, R., Hinkel, I., Thoene, B. and Rennenberg, H. (1989) Heterotrophic nitrification by *Alcaligenes faecalis* :  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $N_2O$ , and  $NO$  production in exponentially growing cultures. Appl. Environ. Microbiol. 55 : 2068-2072.
45. Prinn, P., Cunnold, D., Rasmussen, R., Simmonds, P., Alyea, F., Crawford, A., Fraser, P. and Rosen, R. (1990) Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. J. Geophys. Res. 95 : 18369-18385.
46. Ramanathan, V., Cicerone, R. J., Singh, H. B. and Kiehl, J. K. (1985) Trace gas trend and their potential role in climate change. J. Geophys. Res. 90 : 5547-5566.
47. Ryden, J. C. (1983) Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate. J. Soil Sci. 34 : 355-365.
48. Ryden, J. C. and Lund, L. J. (1980) Nature and extent of directly measured denitrification losses from some irrigated vegetable crop production units. Soil Sci. Soc. Am. J. 44 : 505-511.
49. Ryden, J. C. and Lund, L. J. (1980) Nitrous oxide evolution from irrigated land. J. Environ. Qual. 9 : 387-393.
50. Rolston, D. E., Hoffman, D. L. and Toy, D. W. (1978) Field measurement of denitrification : I. Flux of  $N_2$  and  $N_2O$ . Soil Sci. Soc. Am. J. 42 : 863-869.
51. Seiler, P. J. and Conrad, R. (1987) Contribution of tropical ecosystems to the global budgets of trace gases, especially  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$  and  $N_2O$ . p133-160, "Geophysiology of Amazonia. Vegetation and climate interactions" ed. by Dickinson, R. E., John Wiley and Sons, New York.
52. Sexstone, A. J., Revsbech, N.P., Parkin, T. B. and Tiedje, J. M. (1985) Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J. 49 : 645-651.
53. Stanford, G., Vanderpol, R. and Dzienia, S. (1975) Denitrification rates in relation to total and extrable soil carbon. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39 : 284-289.
54. 鈴木 聡 (1995) 水田から発生するメタンの有機物施用を中心とした制御方法. 栃木農試研報43 : 35-46.
55. 谷崎 司 (1992) 黒ボク畑土壌から発生する亜酸化窒素. 山口農試研報44 : 55-58.
56. 栃木県経済農業共同組合連合 (1993) 「平成5肥料年度肥料取扱目解説及び作物別施肥例」. p23.
57. 鶴田治雄・八木一行・広瀬竜郎・荒谷 博 (1995) 窒素施肥土壌からの  $NO$  および  $N_2O$  の発生(1) 尿素及び緩効性肥料からの  $NO$  および  $N_2O$  のフラックス測定. 土肥要旨集 41 p220.
58. Watson, R. T., Rodhe, H., Oeschger, H. and Siegenthaler, U. (1990) Greenhouse gases and aerosols p1-40, "Climate change, The IPCC scientific assessment" ed. by Houghton, J. T., Jenkins, G. J. and Ephraums, J. J., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
59. Wjltjer, J. and Delwiche, C. C. (1954) Investigations on the denitrifying process in soil. Plant and Soil. 5 : 155-169.
60. Yoshida, T. and Alexander, M. (1970) Nitrous oxide formation by *Nitrosomonas europaea* and heterotrophic microorganisms. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34 : 880-882.

