

# 北海道の施設栽培土壌における亜酸化窒素の発生実態と抑制対策

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	林, 哲央 日笠, 裕治 坂本, 宣崇
巻/号	75巻5号
掲載ページ	p. 575-582
発行年月	2004年10月

# 北海道の施設栽培土壌における亜酸化窒素の発生実態と抑制対策

林 哲央\*・日笠裕治\*\*・坂本宣崇\*\*\*

キーワード 亜酸化窒素, 施設栽培, マルチ, 地温, 堆肥

## 1. はじめに

成層圏におけるオゾンの破壊に関与するとともに温室効果ガスである亜酸化窒素 ( $N_2O$ ) は<sup>1,2)</sup>, 主に硝化細菌・脱窒菌等の土壌細菌によって窒素が代謝される際に生成されるので<sup>3-5)</sup>, 投入する窒素量と有機物量を削減し土壌 pH を低下させると<sup>6-10)</sup>, 発生量は減少する。しかし, これらの方法では作物の収量が低下し生産者からの同意が得られ難いため, 現行の収量レベルを維持できる範囲で  $N_2O$  を抑制する技術を開発する必要がある。

$N_2O$  の主要な発生源は自然土壌や海洋等であるが<sup>11)</sup>, 全発生源に占める施肥土壌からの発生割合は工業的発生源 (化石燃料の燃焼等) を上回る。1996 年の IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第 2 次報告書では, 大きな誤差を伴った推定値ではあるが, 施肥土壌からの発生割合を 20% 程度と見積もった<sup>12)</sup>。この最大の人為的発生源を抑制することが農業分野での重要な課題である。そのため, 我が国では 1991 年から農林水産省を中心に施肥土壌からの発生量が全国的に調査され, 北海道においても露地畑からの発生量<sup>13,14)</sup> と発生を抑制する化学肥料や有機物の施用法が示された<sup>15)</sup>。しかし, 施設栽培を対象にして発生実態あるいは抑制対策を示したものは全国的に見当たらない。

露地畑栽培と施設栽培との間には土壌管理方法についていくつかの大きな違いがあり, そのうち以下の点が  $N_2O$  の発生に影響すると想定される。①施設畑では一般に施肥量が多く溶脱がないため, 作土層に無機態窒素が集積しやすい。②被覆環境なので 1 年を通じて地温が露地畑よりも高く推移する。また, 水を人為的かん水に頼るため, 特に葉菜栽培では一時的な過湿と過乾とが繰り返されることが多い。③マルチの使用により地温が高まり土壌水分も保持されるので, 硝化および脱窒が促進される<sup>16-19)</sup>。④堆肥が年間  $10 \text{ kg m}^{-2}$  以上と大量に施用されることも多く, また, 施用堆肥の腐熟度と施用時期 (前年秋～定植直前) が

農家ごとに大きく異なる。⑤北海道では少雪温暖で積雪量が少ない道南地域で特有の形態であるが, 冬期に天井がビニールで被覆され, 作土が裸地のまま放置されている。すなわち, 冬期間の作土の状態が積雪下にある露地畑とは違う。このように両栽培の土壌管理は大きく異なるので, 露地畑栽培で得られた既往の  $N_2O$  発生に関する知見が, そのまま施設栽培にも適用できるとは限らない。

本報告では施設栽培における特徴を踏まえ, 現行の収量レベルを維持しながら  $N_2O$  の発生を抑制するため, まず  $N_2O$  フラックスの実態とその変動要因を明らかにし, さらに,  $N_2O$  発生とマルチ使用法や堆肥施用法などとの関係を検討した。

## 2. 試験方法

### 1) 供試圃場とガス分析法

供試圃場は道南農業試験場内の中粒質普通褐色低地土で, 容積重は  $1.29 \text{ Mg m}^{-3}$ , 最大容水量は  $492 \text{ g L}^{-1}$ , 全炭素は  $23 \text{ g kg}^{-1}$ , 全窒素は  $1.9 \text{ g kg}^{-1}$  であり, 養分の過不足は特に認められなかった。土壌はガス採取と同時に深さ  $0 \sim 0.15 \text{ m}$  から採取し, 水分含量を測定後に風乾させ,  $2 \text{ mm}$  以下に粉碎して pH と硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 濃度を分析した。土壌水分含量は WFPS (孔隙中に占める液相割合, %) で示した。地温 (深さ  $0.1 \text{ m}$ ) もガス採取時に測定した。調査期間中の土壌 pH は下記 2) のいずれの試験でも  $5.8 \sim 6.4$  の範囲で推移した。また, 各試験の規模は 1 区面積  $3.6 \text{ m}^2$ , 2 反復であり, 定点観測はハウレンソウ栽培条件で, その他の試験は裸地条件で測定した。

$N_2O$  ガス採取とそのフラックス算出はクロードチャンパー法<sup>20)</sup>で行った。採取チャンパー (底面積が  $0.097 \text{ m}^2$ , 体積が  $25.2 \text{ L}$ ) を設置した直後および 10 分後にチャンパー内から約  $1 \text{ L}$  の空気を採取し, 各々の  $N_2O$  ガス濃度を測定し, その濃度差からフラックスを算出した。 $N_2O$  ガス濃度は  $^{63}\text{Ni-ECD}$  付きガスクロマトグラフ (島津製作所 GC-14 A, カラムは Porapak Q, キャリアガスは  $\text{CH}_4$  を  $50 \text{ mL L}^{-1}$  含有した Ar) で定量した。 $N_2O$  フラックスは全て  $N_2O$  態窒素 ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) で表示した。以上のガス採取および分析操作は 2) の各試験とも共通である。

### 2) 定点観測と抑制対策

(1) 周年利用型ハウスのハウレンソウ畑における定点観測  
周年被覆ビニールハウスのハウレンソウ畑において,

\* 北海道立道南農業試験場 (現在, 北海道立北見農業試験場 099-1496 北海道常呂郡訓子府町字弥生 52)

\*\* 同上 (現在, 北海道立中央農業試験場 069-1395 北海道夕張郡長沼町東 6 北 15)

\*\*\* 同上 (現在, 財団法人北海道農業近代化技術研究センター 074-1271 深川市広里町 4-1-3)

2003 年 12 月 11 日 受付・2004 年 3 月 1 日 受理

日本土壌肥料学雑誌 第 75 巻 第 5 号 p. 575~582 (2004)

表 1 供試した牛糞稲わら堆肥の性状 (乾物当たり)

堆積 期間	乾物率 (g kg <sup>-1</sup> )	C/N (g g <sup>-1</sup> )	全 C 全 N		NH <sub>4</sub> -N NO <sub>3</sub> -N		pH (H <sub>2</sub> O)	電気伝導率 (dS m <sup>-1</sup> )
			(g kg <sup>-1</sup> )		(mg kg <sup>-1</sup> )			
3 ヶ月	185	20.7	359	17.3	148	460	8.5	1.78
1 年	188	18.1	234	12.9	134	776	9.2	3.08

pH および電気伝導率は乾物：水を 1：5 で抽出して測定。

N<sub>2</sub>O フラックスの消長を 4 年間定点観測した。観測期間は 1995 年 5 月～1999 年 4 月で、期間中は平均で約 24 日ごとの頻度で観測し、主にハウレンソウを農家慣行に準じて栽培した。すなわち、1 回当たり 10 g m<sup>-2</sup> の窒素を 1995 年は 5 月 17 日・7 月 16 日・8 月 21 日・12 月 11 日、1996 年は 4 月 24 日・7 月 3 日・9 月 10 日、1997 年は 4 月 27 日・7 月 8 日・10 月 22 日、1998 年は 5 月 27 日・7 月 21 日・10 月 20 日、1999 年は 4 月 2 日に硝酸アンモニウムで施肥し、同時に耕起した後、20 L m<sup>-2</sup> をかん水した。この他に 1996 年は 7 月 31 日・10 月 28 日、1997 年は 8 月 6 日・9 月 23 日、1998 年は 3 月 24 日・8 月 17 日に耕起した後、20 L m<sup>-2</sup> をかん水した。観測期間中にハウレンソウの収量は調査しなかったが、概ね平均的な収穫物が得られていた。

(2) マルチ資材の使用が N<sub>2</sub>O フラックスに及ぼす影響

#### ① ガス採取時におけるマルチの開口穴面積

マルチ使用時の N<sub>2</sub>O フラックスを測定するためには、ポリエチレンマルチに穴を開けてガスを採取する必要がある。そこで、まず開口穴面積割合とフラックスとの関係を検討した。すなわち、透明ポリエチレンマルチ上にチャンバーを設置し、チャンバーの底面積に占める開口部面積の割合を 0, 2.5, 5, 10, 20, 100% (完全被覆～裸地状態) の 6 段階に設定し、フラックスを比較した。ガス採取時以外は開口部分を塞いで地温と土壌水分が処理区ごとに変わらないようにした。試験開始の前日に 10 g m<sup>-2</sup> の窒素を硝酸アンモニウムで施肥し、混和後にかん水しマルチ被覆した。調査は 4 日間で 4 回、2 反復で行い、地温は 21.5～25.7°C、WFPS は 47.2～52.4% の範囲にあった。

#### ② マルチ資材の色

ポリエチレンマルチの色がフラックスに及ぼす影響を比較した。処理は裸地 (対照)、白、黒、透明の 4 処理とし、早春の低温期である 4 月 2 日～4 月 9 日 (1999 年)、夏の高温期である 9 月 11 日～9 月 18 日 (1996 年) の 2 時期に試験を実施した。4 月は地温を高める透明マルチを使用する低温期の作型を、9 月は地温を高めない白マルチ<sup>21)</sup>を使用する高温期の作型を想定した。各調査期間中に 4 日間で 4 回、2 反復で調査した。マルチ上にチャンバーを設置し、上記①の結果に基づき、底面積の 10% の通気穴を開けて採取した。各調査開始の前日に 10 g m<sup>-2</sup> の窒素を硝酸アンモニウムで施肥し、混和後にかん水しマルチ被覆した。なお、低温期の測定は緑肥 (出穂期のエンバク) すき込みの 2 日後から開始した。

(3) 堆肥の施用方法が N<sub>2</sub>O フラックスに及ぼす影響

#### ① 牛糞稲わら堆肥の腐熟度

牛糞稲わら堆肥を施用したときの腐熟度がフラックスに及ぼす影響を明らかにするため、堆積期間の異なる堆肥の施用区および堆肥無施用区 (対照) を設定した。供試した各堆肥は同じ材料 (牛糞と稲わらの混合物) から作り、3 ヶ月間堆積して、強い糞臭が残り黄～黄土色のもの (3 ヶ月区)、1 年間堆積して、糞臭がなく黒褐色のもの (1 年区) とした。施用した堆肥の性状を表 1 に示した。各堆肥を 4 kg m<sup>-2</sup> 調査開始前日に施用し混和、かん水した。1997 年 6 月 25 日～7 月 7 日および 1998 年 7 月 6 日～7 月 17 日の 2 カ年調査した。

#### ② 化学肥料窒素施肥前の堆肥施用時期

化学肥料窒素施肥前の堆肥施用時期とフラックスとの関係を検討した。堆肥の施用時期は化学肥料窒素施肥の 2 週間前 (2 週間前区)、1 週間前 (1 週間前区) および化学肥料窒素と同時に施用 (同時施肥区) とし、また、堆肥無施用で化学肥料窒素施肥のみ行った区 (窒素施肥のみ区) も対照として設けた。堆肥は前項と同じ牛糞稲わら堆肥 (1 年間堆積) を 4 kg m<sup>-2</sup> 施用し、化学肥料窒素は 10 g m<sup>-2</sup> を硝酸アンモニウムで施肥した。1997 年 6 月 25 日～8 月 7 日および 1998 年 7 月 8 日～8 月 18 日の 2 カ年調査した。

### 3. 試験結果

#### 1) 周年利用型ハウスのハウレンソウ畑における定点観測

調査期間を通じた N<sub>2</sub>O-N の平均フラックスは 27.9 ± 67.0 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (±以下は標準偏差を示す。以下のデータも同様) で、一般にフラックスは 10 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> 以下と低く推移した (図 1)。著しく高まったのは、1998 年 5 月 28 日および同 10 月 21 日の 2 回のみで、各々 425, 269 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> であった。このときの地温は 25.7, 15.3°C、土壌水分 (WFPS) は 52.4, 50.2% と高かった。夏期のフラックスは概ね変動幅が小さく、窒素施肥の直後を除くと 5～10 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> 程度であった。調査期間中の排出係数 (窒素施肥に対する N<sub>2</sub>O-N 排出割合、以下も同じ) は 0.15% であった。

また、地温が 1～3°C 前後と低い 1～2 月の冬期間においても 2～5 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> の小さなフラックスが常に発生しており、7～8 月の夏期における WFPS が低い日のフラックスと同程度であった。これに対して、1998 年 11 月にハウス天井のビニール被覆を除去し 12 月以降を積雪下にする、フラックスは認められなくなった。調査期間を通じた

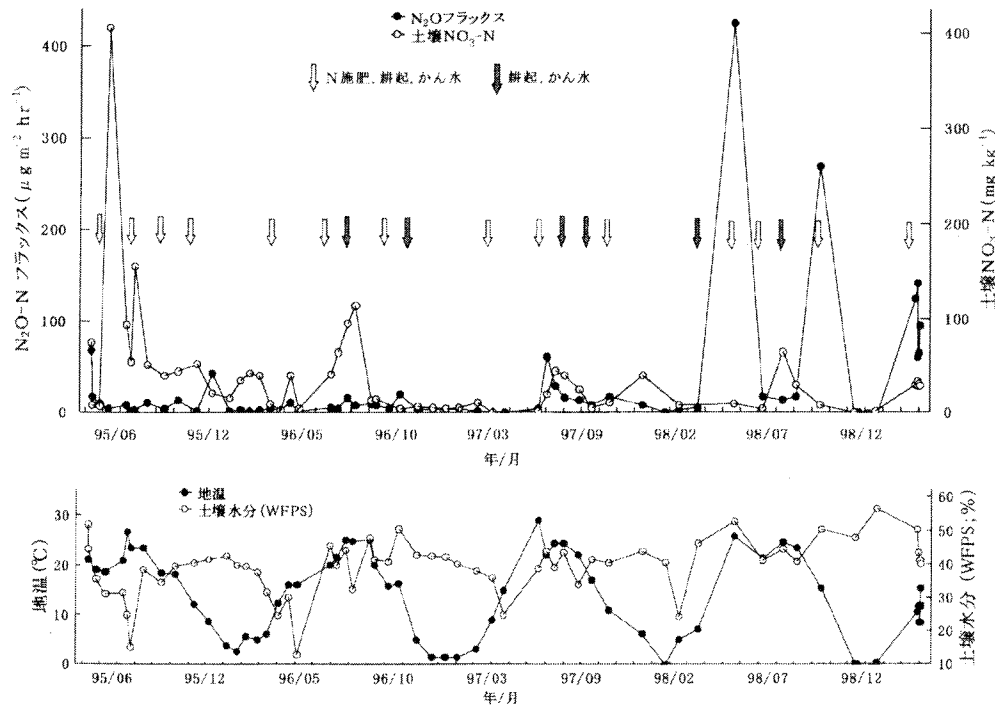


図1 ホウレンソウ栽培ハウス土壌の定点観測における亜酸化窒素 ( $N_2O-N$ ) フラックス、土壌  $NO_3-N$  濃度、地温、土壌水分含量 (WFPS) の推移  
1回当たりの窒素施肥量は  $10\text{ g m}^{-2}$ 。冬季の11～3月は、1998年を除いて無積雪下で測定。横軸の目盛は1カ月。

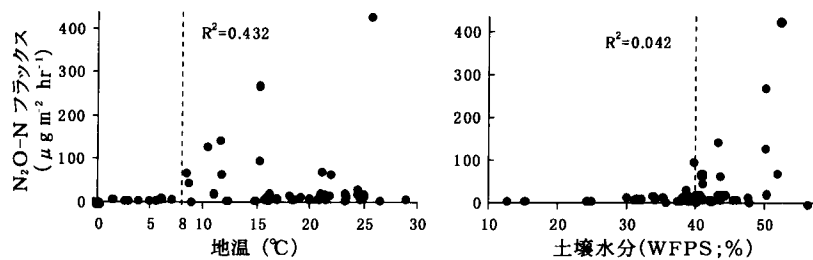


図2 ホウレンソウ栽培ハウス土壌の定点観測における亜酸化窒素 ( $N_2O-N$ ) フラックスと地温、土壌水分含量 (WFPS) との相関

最小値はこのときの1999年1月25日に観測され、 $-8\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ であった。融雪後に再びビニール被覆した4月上旬には、最大  $142\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  のフラックスが認められた。

WFPSや地温とフラックスとの相関は低かった(図2)。ただし、大きなフラックスはWFPSが40%以上、あるいは地温が $8^\circ\text{C}$ 以上のときに発生していた。

土壌  $NO_3-N$  濃度は平均  $37.8 \pm 59.2\text{ mg kg}^{-1}$  (最高406, 最低1)であり、北海道の平均的な露地畑<sup>22)</sup>よりも高く推移していた(図1)。土壌  $NO_3-N$  濃度が  $20\text{ mg kg}^{-1}$  と少ないのに窒素施肥直後に  $62\text{ }\mu\text{g N m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  のフラックス(1997年7月8日)を認めたり、同様に、土壌  $NO_3-N$  濃度が低いにもかかわらず、フラックスが著しく高まった例があった(1998年5月28日)。逆に、土壌  $NO_3-N$  濃度が  $114\text{ mg kg}^{-1}$  と露地畑の水準よりも著しく高いときにフラックスが  $9\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  (1996年8月13日)と低いなど、土壌  $NO_3-N$  濃度とフラックスとの関係

( $R^2=0.065$ ) は判然としないことが多かった。

## 2) マルチ資材の色が $N_2O$ フラックスに及ぼす影響

### (1) 開口穴面積の割合

敷設したマルチの上にチャンバーを設置して開口穴部分の面積とフラックスとの関係を見ると、採取チャンバー底面積に対する開口穴面積の占める割合が5%以下では平均フラックスがやや低いものの、2.5～20%の範囲では裸地条件(100%区)との差は小さかった(図3)。従って、次のマルチ資材の色に関する試験でのガス採取は、底面積に10%の通気穴を開けて行った。

### (2) マルチ資材の色

マルチ資材の色がフラックスに及ぼす影響を季節ごとに比較すると、低温期である4月のフラックスの平均値は裸地区が  $98\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  であった。各マルチの被覆でフラックスは  $125\sim 149\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  に高まったが、資材の色による差は認められなかった(表2)。このときの各処理区の

WFPS は 43.1~50.2%, 地温は 11.5~14.6°C であった。

一方, 高温期である 9 月のフラックスの平均値は裸地区が  $11 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 白マルチ区が  $26 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  であった。これに対して, 透明マルチ区では  $357 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  と有意に高かった (表 3)。WFPS は裸地区で 43.7%, 各マルチ

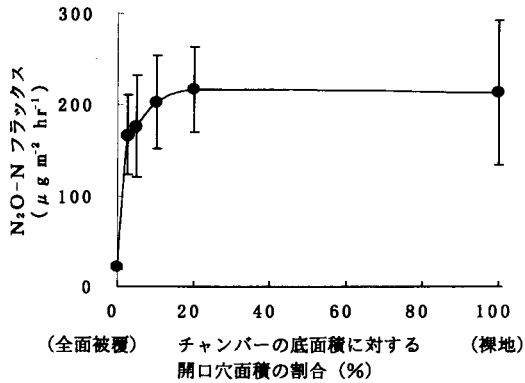


図 3 ガス採取時におけるポリエチレンマルチ開口穴部の面積割合と亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O-N}$ ) フラックスとの関係  
●は各平均値, 垂線は標準偏差。

区では 47.0~47.3% で資材間の差は認められなかった。しかし, 地温は透明 ( $28.4^\circ\text{C}$ ) > 黒 ( $25.8^\circ\text{C}$ ) > 白 ( $23.7^\circ\text{C}$ ) > 裸地 ( $23.1^\circ\text{C}$ ) の順に高く, フラックスの大きさと対応していた。

### 3) 堆肥の施用方法が $\text{N}_2\text{O}$ フラックスに及ぼす影響

#### (1) 牛糞稲わら堆肥の腐熟度

2 カ年の平均フラックスは堆肥無施用区, 1 年区, 3 カ月区が各々 6, 76, 608  $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  であった。堆肥施用直後に高まったフラックスは急激に低下し, 5~10 日で処理区間差はなくなり, また, 1 年区よりも 3 カ月区のほうが常に高く推移した (図 4)。調査期間中の土壌  $\text{NO}_3\text{-N}$  は 3 区とも 1~25  $\text{mg kg}^{-1}$  と低かった。

#### (2) 窒素施肥前の堆肥施用時期

同時施肥区では 2 カ年とも化学肥料窒素施肥直後に著しく大きなフラックスが出現し, その後急減した (図 5)。また, 同区の化学肥料窒素施肥後の 2 カ年平均フラックスは  $216 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  で, 窒素施肥のみ区の  $30 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  よりも有意に高かった (Tukey 法,  $p < 0.05$ )。しかし, 2 週前区または 1 週前区の化学肥料窒素施肥後の 2 カ年平均

表 2 低温期におけるポリエチレンマルチの色が亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O-N}$ ) フラックスに及ぼす影響 (1999 年 4 月 2 日~4 月 9 日測定 of 平均値)

処 理	$\text{N}_2\text{O-N}$ フラックス ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	排出係数 (%)	土壌水分 (WFPS; %)	地温 ( $^\circ\text{C}$ )	土壌 $\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
裸地(無被覆)	$97.9 \pm 31.8$ a	0.17	$43.1 \pm 3.7$	$11.5 \pm 2.2$	$30 \pm 2$
白色	$148.6 \pm 40.1$ a	0.26	$49.8 \pm 0.8$	$12.0 \pm 2.1$	$31 \pm 5$
黒色	$128.4 \pm 39.1$ a	0.22	$50.4 \pm 1.0$	$13.9 \pm 2.4$	$29 \pm 5$
透明	$124.8 \pm 27.5$ a	0.22	$50.2 \pm 0.8$	$14.6 \pm 3.1$	$23 \pm 4$

窒素施肥量は  $10 \text{ g m}^{-2}$ 。±以下は標準偏差。同符号間に有意差なし (Tukey 法,  $p < 0.05$ )。

表 3 高温期におけるポリエチレンマルチの色が亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O-N}$ ) フラックスに及ぼす影響 (1996 年 9 月 11 日~9 月 18 日測定 of 平均値)

処 理	$\text{N}_2\text{O-N}$ フラックス ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	排出係数 (%)	土壌水分 (WFPS; %)	地温 ( $^\circ\text{C}$ )	土壌 $\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
裸地(無被覆)	$11.0 \pm 2.1$ a	0.02	$43.7 \pm 2.4$	$23.1 \pm 2.4$	$59 \pm 12$
白色	$26.3 \pm 14.2$ a	0.05	$47.3 \pm 0.7$	$23.7 \pm 1.5$	$60 \pm 10$
黒色	$66.0 \pm 36.1$ a	0.08	$47.0 \pm 0.6$	$25.8 \pm 2.1$	$53 \pm 17$
透明	$357.2 \pm 262.4$ b	0.37	$47.3 \pm 0.3$	$28.4 \pm 2.3$	$52 \pm 27$

窒素施肥量は  $10 \text{ g m}^{-2}$ 。±以下は標準偏差。異符号間に有意差あり (Tukey 法,  $p < 0.05$ )。

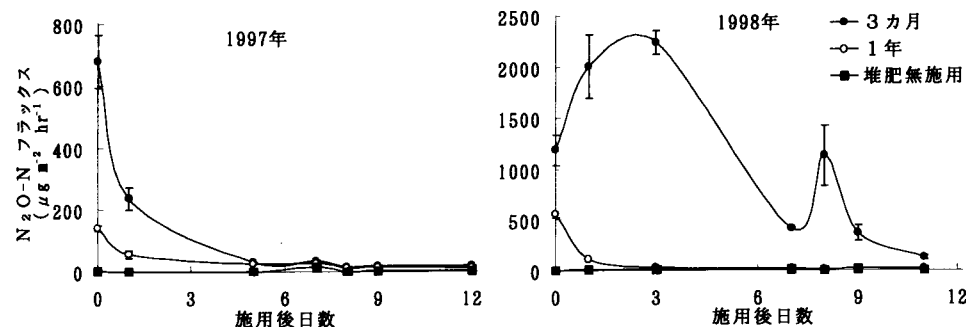


図 4 堆肥の腐熟度と亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O-N}$ ) フラックスとの関係

‘3 カ月’は 3 カ月間堆積した堆肥を施用, ‘1 年’は 1 年間堆積した堆肥を施用, ‘堆肥無施用’は窒素施肥のみ。垂線は標準偏差。各堆肥施用量は  $4 \text{ kg m}^{-2}$ 。

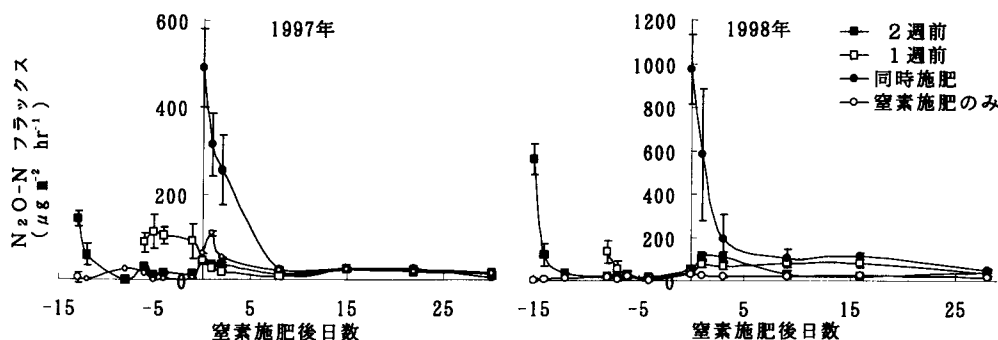


図5 堆肥施用時期と亜酸化窒素 ( $N_2O-N$ ) フラックスとの関係

‘2週前’は化学肥料窒素施肥の2週間前に堆肥施用，‘1週前’は同1週間前に堆肥施用，‘同時施肥’は化学肥料窒素と堆肥を同時施用。垂線は標準偏差。化学肥料窒素施肥量は  $10 \text{ g m}^{-2}$  で各区とも共通，各堆肥施用量は  $4 \text{ kg m}^{-2}$ 。

フラックスは各々  $40 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  であり，窒素施肥のみ区との差は認められなかった。すなわち，堆肥を施用する際に化学肥料窒素施肥よりも1週間以上に予め施用すると，化学肥料窒素施肥時のフラックスが施肥のみ堆肥無施用条件と同程度で推移した。さらに，全調査期間の2カ年平均フラックスを見ても，同時施肥区 ( $216 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) > 2週前，1週前区 ( $57, 53 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) > 窒素施肥のみ区 ( $19 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) で，同時施肥区が有意に高かった (Tukey 法,  $p < 0.05$ )。窒素施肥後の排出係数を算出すると1997年には同時施肥区 (0.51%) > 窒素施肥のみ区 (0.20%) > 2週前，1週前区 (0.15, 0.14%)，1998年には同時施肥区 (1.01%) > 1週前区 (0.45%) > 2週前区 (0.30%) > 窒素施肥のみ区 (0.12%) であった。

土壌  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は堆肥施用によって僅かに高まり，窒素施肥後の2カ年平均が，同時施肥区，2週前区，1週前区で各々  $51, 58, 49 \text{ mg kg}^{-1}$ ，窒素施肥のみ区で  $36 \text{ mg kg}^{-1}$  であった。

#### 4. 考 察

##### 1) 施設栽培の土壌環境と $N_2O$ フラックス

4年間の定点観測の平均フラックス ( $28 \pm 67 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) は北海道における露地畑の測定事例<sup>13-15)</sup>と同程度であり，施設栽培条件が特に  $N_2O$  発生量を増加させることは本調査の範囲では認められなかった。排出係数は窒素施肥量が露地畑よりも多いため，上記の事例よりも小さくなった。排出係数の算出に当たり無窒素条件下の発生量を差し引いていないため，土壌窒素に由来する発生量分を過大評価しており，施肥窒素に由来する排出係数はさらに小さかったと考えられる。なお，この点は次項以下の抑制対策試験における排出係数についても同様である。また，夏期のフラックスが低く，その変動幅も小さかった。これらの一因として，本ハウスでは土壌への水供給をかん水のみ relied ため，夏期の土壌表層は乾燥傾向にあったことが指摘できる。

フラックスと土壌水分含量，地温，土壌  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度などの土壌環境との関係を見ると，これらの間に一定の傾向

が示されないことが多かった。観測1年目には一時的に土壌  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が  $400 \text{ mg kg}^{-1}$  を超えたが，これは観測年の施肥に由来するものではなく，前年までの施肥に由来して観測開始前に下層に残存していたものと推察する。土壌  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度との関係について露地畑の例では，一般に土壌  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が多いと  $N_2O$  フラックスは高まるが<sup>23-27)</sup>，両者の関係を認めなかった報告もある<sup>28)</sup>。また，降雨後や地温が高いと大きな  $N_2O$  発生ピークが出現<sup>29-37)</sup>するが，ハウレンソウ畑の観測で  $250 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  以上の大きな  $N_2O$  発生ピークが認められたのは，WFPS，地温がともに高い状態のときであった。いずれにしても，本調査では被覆によって地温を確保するとともに人為的なかん水により過湿と過乾，あるいは耕起による繰り返しが繰り返されており，このような頻りに攪乱される条件では1つの要因が  $N_2O$  発生の高低に反映しなかったと考える。これらのことから，施設栽培における  $N_2O$  は主に土壌水分と地温の両方が高いときに発生すると結論できる。

ただし，無積雪下のハウスでは，冬期間の低温下でも常に  $N_2O$  が発生していたことは注目すべき点である。カナダにおいて気温が氷点下で地温が  $2\sim 3^\circ\text{C}$  の露地畑で  $N_2O$  発生を認めた例があり<sup>35)</sup>，本調査と一致していた。図1のフラックスの推移から冬期の発生量を積分して試算すると，1995年5月～1998年3月の全発生量のうち，約26%が各年の11～3月に発生していた。これは無視できない量であるため，北海道の施設土壌における年間発生量を推定するには冬期間の発生量を考慮すべきと考える。

なお，1998年11月に被覆を除去しハウスを積雪下においたところ，冬期間の  $N_2O$  発生は全く認められなかった。しかし，積雪地帯では春の融雪後に大量の  $N_2O$  が発生することもあり<sup>6,34,38)</sup>，冬期間にハウスを積雪下におくことが年間発生量の抑制につながると判断するには，調査事例を増やすなど詳細な検討が必要である。

##### 2) マルチ資材の使用による $N_2O$ フラックスの抑制

マルチ被覆する目的の1つに作型に合わせた地温の制御があり，これによる  $N_2O$  抑制の可否を検討した。

低温期 (4月上旬) に透明マルチを用いると，この時期

のマルチの目的である地温上昇 (14.6°C) を達成したが、フラックスは地温を高めない白マルチを用いた場合と同程度であった (表2)。一方、高温期 (9月上旬) の透明マルチは地温を裸地よりも5°C以上高め (28.4°C)、フラックスも裸地より約32倍高くなった (表3)。しかし、白マルチは地温上昇が小さく、フラックス増加も裸地の2倍程度に抑制した。

このように2つの時期で透明マルチの使用について異なる結果を得たが、これは主に地温レベルに起因すると考える。土壤中での硝化が最大活性を示す温度は25~30°Cであり、脱窒では30~45°Cである<sup>39)</sup>。15°C以下では、硝化・脱窒活性が低下する<sup>39,40)</sup>。高温期における透明マルチの地温は硝化、脱窒ともにほぼ最大活性の範囲に入る。しかし、低温期の透明マルチの地温は高まっても15°C以下であったため、両活性が低くマルチによる温度差がフラックスに反映しなかったと推察する。

以上のことから、N<sub>2</sub>O発生を増加させないためには、地温を上昇させるべき低温期には透明マルチを、地温を抑制すべき夏期には白マルチを使用するのが適当である。すなわち、作型に合わせた合理的なマルチ資材の選定がフラックスを抑制し、この方法は既存技術であるため収量レベルを低下させない<sup>41)</sup>。なお、排出係数は0.02~0.37%の範囲にあったが、本試験は裸地状態で行っており、これらの排出係数は作物体による窒素吸収を考慮しないため過大に、あるいは作物根からの有機物供給を考慮しないため過小に評価されていた可能性がある。この点は次項における排出係数についても同様のことが言える。

### 3) 堆肥の施用方法によるN<sub>2</sub>Oフラックスの抑制

3カ月区における2カ年の平均フラックスは1年区の8倍であったが、このとき堆肥によって施用した全窒素量は1年区より1.3倍多い程度であった。供試堆肥は牛糞と稲わらを混合して堆積したものであることから、堆積期間の短いほうが易分解性有機物に富み、土壌施用後にアンモニウム態窒素も集積しやすいものと推察できる。従って、硝化細菌・脱窒菌等がこれらを消費して硝化・脱窒が進行し、それに伴ってN<sub>2</sub>Oが多く発生したと考える。すなわち、牛糞稲わら堆肥の施用に当たって腐熟を進行させてから施用することが、N<sub>2</sub>Oの抑制に見かけ上有効と言える。しかも、いわゆる完熟堆肥の施用は施設栽培における基本技術であるため、腐熟の不十分な堆肥の施用は避けるべきである。ただし、家畜糞尿等が腐熟する過程においてもN<sub>2</sub>Oが発生するので<sup>42,43)</sup>、堆肥からのN<sub>2</sub>Oの総発生量を論じるには、これらの過程も含めて検討する必要がある。なお、C/Nの大きい堆肥を施用すると土壌無機態窒素の有機化が起こることから、堆肥の腐熟度とN<sub>2</sub>O発生量との関係は堆肥に用いる材料によって異なる可能性がある。

堆肥施用と化学肥料窒素施肥を同時に行うと、化学肥料窒素施肥後のフラックスは化学肥料窒素施肥のみの堆肥無施用区よりも著しく高まったが、野菜畑での既存技術である化学肥料窒素施肥の2週間前または1週間前に堆肥を施

用すると、化学肥料窒素施肥後のフラックスが堆肥無施用区と同程度になった (図5)。これらの理由は、次のように理解できる。堆肥と化学肥料を同時に施用すると、堆肥に含まれる硝化細菌や易分解性有機物等が化学窒素肥料に加わる。このため、硝化細菌の増加が硝化を促進させるとともに、易分解性有機物の供給が脱窒を促進させ、結果的にN<sub>2</sub>O発生を著しく高める。しかし、堆肥を窒素施肥の2~1週間前に予め施用しておく、窒素施肥時には堆肥中のそれらが既にある程度減少・消費されており、その分硝化および脱窒が促進されずフラックスも低下したのであろう。ただし、この結論は腐熟の進んだ堆肥を施用することが前提になり、腐熟の不十分な堆肥では1週間前に施用しても窒素施肥後のフラックスが高まる可能性がある。

これらのことから、C/Nの比較的小さい堆肥の場合、腐熟の進んだ堆肥を化学肥料窒素施肥よりも1週間以上前に施用することで、化学肥料窒素施肥時のN<sub>2</sub>O発生を堆肥無施用条件と同程度にまで低下させることができる。従って、堆肥施用に係わるこのような野菜畑の基本技術を順守すると、現行の収量水準を維持しながらN<sub>2</sub>Oの発生を抑制できる。

## 5. 要 約

北海道の施設栽培において現行の収量レベルを維持しながら亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) の発生を抑制するため、まずN<sub>2</sub>Oフラックスの実態とその変動要因を明らかにし、さらにN<sub>2</sub>O発生とマルチ使用法や堆肥施用法との関係について検討した。

1) ホウレンソウのハウス栽培畑で4年間にわたり定点観測を行った結果、N<sub>2</sub>O-Nフラックスは平均28 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (最大425, 最小-8) であった。また、地温が1~3°C前後と低い冬期間においても、天井をビニールで被覆した無積雪下の場合には小さなN<sub>2</sub>O発生が常に認められた。N<sub>2</sub>Oは主に土壌水分と地温の両方が高いときに発生することが明らかとなった。

2) 地温を高めるべき低温期に透明マルチを使用すると、地温が上昇しても15°C程度であるため、フラックスは低く白マルチと同程度であった。一方、地温を抑制すべき高温期の透明マルチでの被覆は、地温が28°Cと著しく高まり、フラックスも裸地の30倍以上大きかった。これに対して、白マルチの場合は地温を上昇させないので、フラックスの発生は低かった。

3) 3カ月間堆積した牛糞稲わら堆肥を施用したときの2カ年平均フラックスは、1年間堆積した堆肥より約8倍高い608 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>であった。

4) 堆肥施用と窒素施肥を同時に行うと、窒素施肥後の2カ年平均フラックスは216 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>で、施肥のみで堆肥無施用よりも約7倍高かった。しかし、窒素施肥の1週間以上前に予め堆肥を施用すると、フラックスは著しく低下した。

5) 以上の結果から、施設栽培において作型に合わせて

合理的にマルチの色を選定すると、 $N_2O$ 発生量は裸地条件と同程度になり、腐熟の進んだ堆肥を化学肥料窒素施肥よりも1週間以上前に施用すると、 $N_2O$ 発生量は堆肥無施用で化学肥料窒素のみ施肥した条件と同程度になることが明らかとなった。従って、これらの適正な栽培管理法は、 $N_2O$ 発生の抑制に貢献していると考えられる。

**謝 辞** 北海道立道南農業試験場 大村邦男博士（現天北農業試験場研究部長）には本研究の取りまとめに当たり多くの助言を頂戴し、同中央農業試験場 能代昌雄農業環境部長、並びに同 木曾誠二博士には本稿をご校閲頂いた。以上の各位に謝意を表する。

## 文 献

- Sahrawat, K. L. and Keeney, D. R. : Nitrous oxide emission from soils. *Adv. Soil Sci.*, **4**, 103~104 (1986)
- Organisation for Economic Co-Operation and Development : Environmental Indicators for Agriculture, p. 35~36, OECD Publications, Paris (1997)
- Yoshida, T. and Alexander, M. : Nitrous oxide formation by *Nitrosomonas europaea* and heterotrophic microorganisms. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **34**, 880~882 (1970)
- Bremner, J. M. and Blackmer, A. M. : Nitrous oxide emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science*, **199**, 295~296 (1978)
- Anderson, I. C. and Levine, J. S. : Relative rate of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers. *Appl. Environ. Microbiol.*, **51**, 938~945 (1986)
- Goodroad, L. L., Keeney, D. R. and Peterson, L. A. : Nitrous oxide emissions from agricultural soils in Wisconsin. *J. Environ. Qual.*, **13**, 557~561 (1984)
- Egginton, G. M. and Smith, K. A. : Nitrous oxide emission from a grassland soil fertilized with slurry and calcium nitrate. *J. Soil Sci.*, **37**, 59~67 (1986)
- Nishio, T., Kanamori, T. and Fujimoto, T. : Effect of organic matter, moisture content and other environmental factors on denitrification in topsoils of an upland field. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **34**, 97~105 (1988)
- Linn, D. M. and Doran, J. W. : Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, 1267~1272 (1984)
- Blackmer, A. M. and Bremner, J. M. : Inhibitory effect of nitrate on reduction of  $N_2O$  to  $N_2$  by soil microorganisms. *Soil Biol. Biochem.*, **10**, 187~191 (1978)
- Khalil, M. A. K. and Rasmussen, R. A. : The global sources of nitrous oxide. *J. Geophys. Res.*, **97**, 14651~14660 (1992)
- 鶴田治雄：地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生，土肥誌，**71**，554~564 (2000)
- 大橋優二・木曾誠二・林 哲央・後藤英次：農耕地からの温室効果ガス発生実態と対策技術，北農，**62**，319~322 (1995)
- 澤本卓治・波多野隆介：北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの $N_2O$ フラックス，土肥誌，**71**，659~665 (2000)
- 大橋優二：化学肥料及び有機物施用が亜酸化窒素発生に及ぼす影響，北農，**67**，232~236 (2000)
- Beauchamp, E. G., Trevors, J. T. and Paul, J. W. : Carbon sources for bacterial denitrification. *Adv. Soil Sci.*, **10**, 133~134 (1989)
- Goodroad, L. L. and Keeney, D. R. : Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content. *Soil Biol. Biochem.*, **16**, 39~43 (1984)
- Bremner, J. M. and Shaw, K. : Denitrification in soil I. Methods of investigation. *J. Agric. Sci.*, **51**, 22~39 (1958)
- Folorunso, O. A. and Rolston, D. E. : Spatial and spectral relationships between field-measured denitrification gas fluxes and soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 1087~1093 (1985)
- Jury, W. A., Letey, J. and Collins, T. : Analysis of chamber methods used for measuring nitrous oxide production in the field. *ibid.*, **46**, 250~256 (1982)
- Decoteau, D. R., Kasperbauer, M. J. and Hunt, P. G. : Mulch surface color affects yield of fresh-market tomatoes. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, **114**, 216~219 (1989)
- 今野一男：網走地方の畑作地帯における有機物および土壌の窒素評価と施肥対応，北海道立農試報告，**98**，42~52 (2001)
- Davidson, E. A., Matson, P. A. and Brooks, P. D. : Nitrous oxide emission controls and inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**, 1145~1152 (1996)
- Egginton, G. M. and Smith, K. A. : Losses of nitrogen by denitrification from a grassland soil fertilized with cattle slurry and calcium nitrate. *J. Soil Sci.*, **37**, 69~80 (1986)
- Cochran, V. L., Elliott, L. F. and Papendick, R. I. : Nitrous oxide emissions from a fallow field fertilized with anhydrous ammonia. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 307~310 (1981)
- Ryden, J. C. : Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate. *J. Soil Sci.*, **34**, 355~365 (1983)
- Thornton, F. C. and Valente, R. J. : Soil emission of nitric oxide and nitrous oxide from no-till corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**, 1127~1133 (1996)
- Aulakh, M. S., Rennie, D. A. and Paul, E. A. : Gaseous nitrogen losses from cropped and summer-fallowed soils. *Can. J. Soil Sci.*, **62**, 187~196 (1982)
- Duxbury, J. M. and McConnaughey, P. K. : Effect of fertilizer source on denitrification and nitrous oxide emissions in a maize-field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**, 644~648 (1986)
- Mosier, A. R., Guenzi, W. D. and Schweizer, E. E. : Soil losses of dinitrogen and nitrous oxide from irrigated crops in northeastern Colorado. *ibid.*, **50**, 344~348 (1986)
- Anderson, I. C. and Levine, J. S. : Simultaneous field measurements of biogenic emissions of nitric oxide and nitrous oxide. *J. Geophys. Res.*, **92**, 965~976 (1987)
- Mosier, A. R. and Hutchinson, G. L. : Nitrous oxide emissions from cropped fields. *J. Environ. Qual.*, **10**, 169~173 (1981)
- Conrad, R., Seiler, W. and Bunse, G. : Factors influencing the loss of fertilizer nitrogen into the atmosphere as  $N_2O$ . *J. Geophys. Res.*, **88**, 6709~6718 (1983)



- 34) Goodroad, L. L. and Keeney, D. R.: Nitrous oxide emission from forest, marsh, and prairie ecosystems. *J. Environ. Qual.*, **13**, 448~452 (1984)
- 35) Mosier, A. R., Guenzi, W. D. and Schweizer, E. E.: Field denitrification estimation by nitrogen-15 and acetylene inhibition techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**, 831~833 (1986)
- 36) Denmead, O. T., Freney, J. R. and Simpson, J. R.: Studies of nitrous oxide emission from a grass sward. *ibid.*, **43**, 726~728 (1979)
- 37) Blackmer, A. M., Robbins, S. G. and Bremner, J. M.: Diurnal variability in rate of emission of nitrous oxide from soils. *ibid.*, **46**, 937~942 (1982)
- 38) Goodroad, L. L. and Keeney, D. R.: Nitrous oxide emissions from soils during thawing. *Can. J. Soil Sci.*, **64**, 187~194 (1984)
- 39) 土壤微生物研究会編: 土の微生物, p. 362~372, 博友社, 東京 (1981)
- 40) Keeney, D. R., Fillery, I. R. and Marx, G. P.: Effect of temperature on the gaseous nitrogen products of denitrification in a silt loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43**, 1124~1128 (1979)
- 41) 川岸康司・土屋武彦・土屋俊雄: 道央北部における夏どりレタスの生育, 収量に及ぼすマルチ資材と窒素施用量の影響, 北海道立農試集報, **63**, 1~10 (1991)
- 42) Willers, H. C., Derikx, J. L., Ten Have, P. J. W. and Vijn, T. K.: Emission of ammonia and nitrous oxide from aerobic treatment of veal calf slurry. *J. Agric. Eng. Res.*, **63**, 345~352 (1996)
- 43) Petersen, S. O., Lind, A. M. and Sommer, S. G.: Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. *J. Agric. Sci. Camb.*, **130**, 69~79 (1998)

### Nitrous Oxide Emission from Greenhouse Fields in Hokkaido and Methods to Reduce the Emissions

Tetsuo Hayashi<sup>1</sup>, Yuji Hikasa<sup>2</sup> and Nobumitsu Sakamoto<sup>3</sup>  
 (Hokkaido Donan Agric. Exp. Stn.; present addresses: <sup>1</sup>Hokkaido  
 Kitami Agric. Exp. Stn., <sup>2</sup>Hokkaido Cent. Agric. Exp. Stn.,  
<sup>3</sup>Hokkaido Agric. Modern. Tech. Res. Cent.)

We monitored nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from greenhouse fields in Hokkaido over four years, and discussed factors influencing the emissions. The effects of some field management practices such as mulching and manure application on N<sub>2</sub>O emissions were studied in order to evaluate N<sub>2</sub>O mitigation efficiencies of these practices while maintaining current yield levels.

1) Mean N<sub>2</sub>O flux was 28 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (max. 425, min. -8) from the greenhouse field where spinach was cultivated. N<sub>2</sub>O flux increased when both its soil temperature and soil moisture were relatively high. Slight N<sub>2</sub>O was emitted constantly from the greenhouse field even during winter when the soil temperature was approximately in a range between 1 and 3°C.

2) When clear polyethylene mulch covered the soil in early spring, N<sub>2</sub>O flux was at the same level as that from a no mulch field, which was attributed to the fact that the mulch did not raise the soil temperature enough. When the clear mulch was used in summer, 30 times as much as N<sub>2</sub>O was emitted from the no mulch field, which was attributed to the mulch increasing the soil temperature up to 28°C. On the other hand, white mulch did not increase N<sub>2</sub>O flux even in summer, since it did not increase the soil temperature. These results suggest that choosing an appropriate mulch color contributes to regulating the soil temperature and mitigating the N<sub>2</sub>O flux.

3) When immature manure, made from a mixture of cattle slurry and rice straw, was applied to a field, the mean N<sub>2</sub>O flux was 608 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> over the two years' experiment. It was as 8 times as large as that when a matured one was applied.

4) When manure and nitrogen fertilizer were simultaneously applied to a greenhouse field, the mean N<sub>2</sub>O flux was 216 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> over the two years' experiment and it was 7 times as large as that when nitrogen fertilizer was solely applied. However, when manure was applied more than a week before application of nitrogen fertilizer, the flux was as low as that when nitrogen fertilizer was solely applied.

5) Based on these results, it was demonstrated that proper management practices of a greenhouse field such as the choice of appropriate mulch color to regulate the soil temperature and application of matured manure more than a week before application of nitrogen fertilizer, enabled the mitigation of N<sub>2</sub>O emission from the field.

*Key words* greenhouse, manure, mulch, nitrogen application, nitrous oxide

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., **75**, 575-582, 2004)