

## N<sub>2</sub>O and NO Emissions During Tomato Cultivation by Means of Drip Fertigation in a Glasshouse

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 細野, 達夫, 細井, 徳夫 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/00001618">https://doi.org/10.24514/00001618</a>

トマト養液土耕栽培からの  $N_2O$  および  $NO$  放出特性の解明

細野 達夫\*・細井 徳夫\*\*

(平成 19 年 12 月 5 日受理)

 $N_2O$  and  $NO$  Emissions During Tomato Cultivation  
by Means of Drip Fertigation in a Glasshouse

Tatsuo Hosono and Norio Hosoi

## I 緒 論

一酸化二窒素（以下  $N_2O$ ）は二酸化炭素、メタンに次ぐ主要な温室効果ガスであり、その大気中濃度の増加は地球温暖化をもたらす。また、成層圏のオゾン層を減少させる効果もあると考えられている。農耕地への施肥窒素に由来する  $N_2O$  放出量は、全放出量の約 35% を占めるとも推定されており（Kroeze ら, 1999）、施肥窒素量の削減は、施肥窒素由来の  $N_2O$  放出量を削減するための確実な手段である。しかし、収量低下を招かず施肥窒素量を削減するためには施肥効率（肥効）を高める必要がある。灌水に肥料を混入して灌水と施肥を同時に行う、いわゆる養液土耕法は、我が国では主に施設栽培での利用を念頭に研究開発がなされ、生産現場にも普及している。慣行の施肥法に比較して施肥量を大幅に削減できることを示す報告は数多い。施肥量の削減にともない、 $N_2O$  の放出量も削減できると考えられるが、施肥効率が高まればガス化する割合も低下して、 $N_2O$  放出削減効果は施肥量の削減率以上に高くなる、ということも期待される。ただし、養液土耕栽培の施肥効率に関する詳細な研究は少ない（林ら, 2003）。

養液土耕栽培からの  $N_2O$  放出量に関する報告は見あたらないが、土壌への液肥の施用は、粒状や粉状の肥料に

比べて、迅速に  $N_2O$  放出を生じさせることが既往の研究において示されている（Harrison ら, 1995; Hosono ら, 2006）。ただし、それらの場合、施用される液肥中の窒素濃度は、養液土耕の場合と比較するとかなり高濃度である。

一般に土壌が酸化性的な畑条件においては、 $N_2O$  は主として硝酸化成（硝化）の過程で生成されることから、施用窒素の形態を硝酸態にすることにより  $N_2O$  の生成・放出量が抑制（施肥窒素量に対する  $N_2O$  放出量の割合が抑制）されると期待される。通常の固形肥料を用いた栽培の場合、これまでにクロボク土での試験においては、施肥窒素を硝酸態にすることによって  $N_2O$  の放出量が削減できることも示されている（例えば、Akiyama ら, 2002）。しかしながら、畑地でも、灰色低地土のような通気性の悪い土壌の場合では、強い降雨の後などに脱窒によると見られる多量の  $N_2O$  放出が観察される場合が報告されており（澤本ら, 2000）、硝酸態窒素施用による  $N_2O$  放出量削減効果は土壌の物理性および水分条件によって大きく異なると考えられる。

また、硝化が生じる際には、一酸化窒素（以下、 $NO$ ）も発生する。 $NO$  は大気汚染物質の一つであり、対流圏光化学における重要な物質であるが、土壌はその主要な発生源の一つである（Skiba ら, 1997）。土壌水分などの条件によって  $N_2O$  と  $NO$  の発生比率が異なることも

知られており（例えば，Akiyama ら，2000），施肥が環境に与えるインパクトを評価するためには  $N_2O$  と同時に  $NO$  のフラックスも測定する必要がある。

本研究では，原土壌が細粒黄色土の施設畑において養液土耕および慣行施肥によりトマトを栽培して，栽培期間にわたって  $N_2O$  および  $NO$  フラックスの測定を行った。一般に，黄色土畑における施肥窒素量に対する  $N_2O$  放出量の割合は，クロボク土畑などと同じく比較的低い場合が多い（Akiyama ら，2006）が，黄色土でも多施肥が行われ，極端な低 pH となる茶園では大きい場合が多い（前田ら，2001；徳田，2005）。本研究の目的は，第一に，施肥窒素量に対する  $N_2O$  および  $NO$  放出量の割合の慣行施肥栽培と養液土耕栽培での差異を明らかにすること，第二に，養液土耕において施肥窒素を硝酸態のみにした場合の  $N_2O$  および  $NO$  放出量削減効果を明らかにすることである。

なお，慣行施肥栽培を行った試験区の結果の詳細は前報（Hosono ら，2006）にて報告してあるが，本報でも養液土耕と慣行施肥の比較のためにそれらの結果の一部を図表等に用いた。

本研究は，環境省地球環境研究総合推進費（課題番号：B-51[6]（平成 12-14 年度）および S2-3a（平成 15-17 年度））および農研機構運営費交付金（平成 12-16 年度）によって行われた。

## II 材料および方法

### 1 養液土耕栽培と慣行施肥栽培からの $N_2O$ および $NO$ 放出量（試験 1）

この試験に用いた温室は，間口 4.5m，奥行き 10.3m，棟高さ 3.5m，軒高さ 2.1m の南北棟ガラス温室（総床面積 46.35m<sup>2</sup>）である。温室内にはグラスファイバー製のベッド（縦横 8m×0.8m，深さ 0.3m）が 2 列配置（埋設，南北畝）されている。南北の枕地を除くと，温室床面積は 36m<sup>2</sup>（1 ベッドあたり 18m<sup>2</sup>）となる。一般的に，ガスフラックスや施肥量は施設面積あたりの値で表すが，本試験に用いた温室は実用規模の施設ではないため，施設面積として枕地を含む総床面積を用いると枕地，すなわち非栽培区域の面積割合が，想定される実際の生産施設より大きくなってしまふ。そこで，このような場合の慣例に従い，南北の枕地を除いた面積を施設面積として計算に用いた。作土層の厚さは 20cm であり，その下の砂礫層との間には遮根透水シートが敷かれており，根は作土層外には侵入しない。ベッドの下部 1カ所

に排水口がある。作土の原土は，武豊野菜研究拠点内の林地産の細粒黄色土で，前作はトマトである。この施設で，トマト（*Lycopersicon esculentum* Mill.）の長期多段取り（長段）栽培を 2 作行った（表-1 に示す作期 1 および作期 2）。作期 1 は夏秋どり，作期 2 は半促成に近い作型である。パーミキュライト培地へ播種して 2 葉期まで育成した苗を，園芸用育苗培土を充填した育苗ポットに移し，第 1 花房開花期頃まで育苗して育苗培土ごと栽培ベッドへ定植した。1 ベッドあたり 2 条植え（条間，40cm）とし，南北方向の株間は 30cm であり，1 ベッドあたりの個体数は 52（施設面積あたり，52/18≒2.9 本 m<sup>-2</sup>）であった。

慣行施肥法で栽培する「慣行施肥区」と，養液土耕で栽培する「養液土耕区」の 2 処理区を設けた。慣行施肥区においては，基肥として化成肥料（組合化成 8 号，N，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> および K<sub>2</sub>O を各 8% 含有，N はアンモニア性窒素。）を施設面積あたり窒素施用量が 10.7gN m<sup>-2</sup> に相当する 1 ベッドあたり 2.4kg を全層施肥した。作期 1 にのみ，基肥施用の 6 日前に稲ワラ堆肥（乾物あたり窒素 2.5%，炭素 34%，水分率 80%）を，施設面積あたり窒素投入量が 27.8gN m<sup>-2</sup> に相当する 1 ベッドあたり 100kg を全層に混和した。慣行施肥区の追肥は，植物の状態を見ながら，適宜，肥料を灌水に混ぜて行った。追肥用の肥料は，液肥用配合肥料（大塚化学製，OK-F-1）を用いた。OK-F-1 は，N，P，K，Ca，Mg 等を含む，N15% 含有で，NO<sub>3</sub>-N が 8.5%（全窒素の 56%），残りは尿素態である。養液土耕用の肥料も，基本的にはこの OK-F-1 を用いた。作期 1 のある期間においては，養液土耕区は硝酸態窒素（硝酸カルシウム）のみを施用した。その期間は，窒素以外の成分は改良型大塚 1 号（細井，2000）で補給した。

養液土耕区においては，灌水チューブには圧力補正定量吐出機構つき点滴チューブ（Plastro 製，エデン A，吐出位置間隔は 30cm）を用いた。チューブは条を挟んで 2 本（各ベッド，計 4 本ずつ）設置し，トマト 1 個体あたりの吐出口数を 2 とした（図-1a）。

慣行施肥区においても，灌水は点滴灌水装置を用いたが，以下に示すような上記と異なる方法で，灌水が土壤全面に及ぶようにした。内径 13.6mm の硬質ポリエチレンチューブに 30cm 間隔で圧力補正定量吐出機能付き点滴装置（Netafim 社製，CNL ドリッパー，流量，毎時 2ℓ）を接続し，そこから軟質ポリエチレンチューブ（内径 3mm）を 4 分岐させ，各先端に土壤に点滴灌水する装置（Netafim 社製，アロードリッパー）をとり

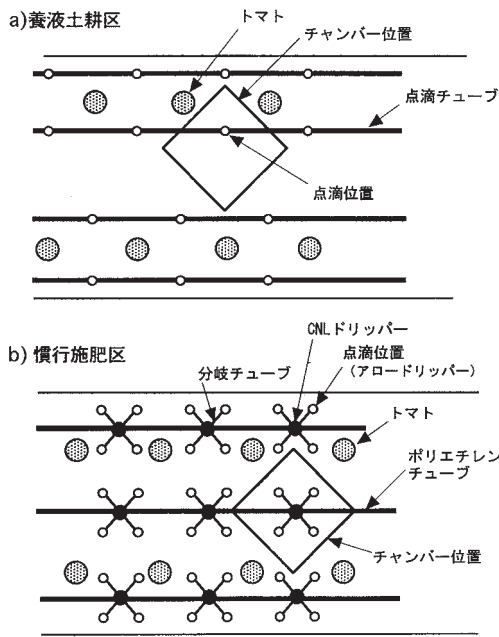


図-1 試験1における点滴位置、チャンバーおよびトマト株の配置の模式図(栽培ベッドを上から見た図)

慣行施肥区では、CNLドリッパーから吐出される灌水を周囲の4つの点滴位置(アロドリッパー)に分岐させた。

つけた。このアロドリッパーがベッド全面に縦横15cm間隔で配置(トマト1個体あたりの点滴位置数が6)されるようにした(図-1b)。

養液土耕区では、1日に1回、設定した量の肥料原液が混合タンクに添加され、水道水と混合された液がポンプで灌水される。混合タンクに添加された肥料は、極端に灌水回数が少ない日以外は、ほぼ当日中に土壤に施用された。肥料(窒素)添加量は適正な葉面積を保つように、生育時期によって調整した。定植後しばらくは、前作の残留肥料成分等で生育可能であったため灌水(地下水)のみとし、灌水同時施肥を開始したのは、結果的には第2果房が肥大を開始するところであった。この手法の元となるシステム(細井ら, 2001)においては、1日の灌水回数は土壤のpFにより制御されるが、本研究では体積含水率により制御した。いずれの作期も、ベッド下部の排水口からの排水は全栽培期間にわたってほとんどなかった。

## 2 施肥窒素の形態の異なる養液土耕栽培からのN<sub>2</sub>OおよびNO放出量(試験2)

試験に用いた温室は、間口8m、奥行き24m、棟高さ4m、軒高さ2.1mの南北棟ガラス温室の北半分に、隔離ベッド(くみあいドレンベッド、縦横9m×0.9m、平均深さ0.25m)を3列設置し、そのうち2列をガスフラックス測定試験に用いた。施設面積は、南半分の非栽培区

表-1 試験1(作期1と作期2)および試験2(作期3)におけるトマト栽培スケジュール(日付はいずれも年/月/日)と品種

	播種	基肥施用 <sup>a</sup>	定植	栽培終了 <sup>b</sup>	品種
作期1	2002/1/17	2002/3/11	2002/3/18	2002/10/3	サターン
作期2	2002/9/5	2002/10/21	2002/10/30	2003/7/8	ルネッサンス
作期3	2003/10/15	-	2003/12/19	2004/7/14	ラクナファースト

<sup>a</sup> 基肥施用は慣行施肥区のみ

<sup>b</sup> 植物(地上部)を撤去した日

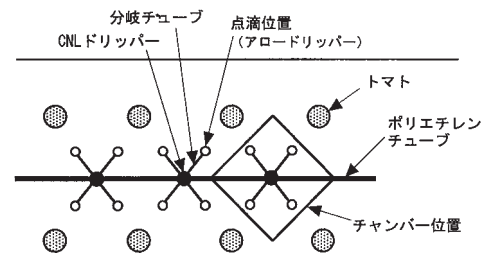


図-2 試験2における点滴位置、チャンバーおよびトマト株の配置の模式図(栽培ベッドを上から見た図)

CNLドリッパーから吐出される灌水を周囲の4つの点滴位置(アロドリッパー)に分岐させた。

域および北側の枕地を除いた面積とし、1ベッドあたり19.1m<sup>2</sup>であった。充填されている土壤の原土壤は試験1と同じであるが、1997年にメロンを栽培した後、無植栽で風乾状態であった。上記と同様に2条植えて条間、株間も同じである。1ベッドあたりの個体数は60本(施設面積あたり、60/19.1≒3.1本m<sup>-2</sup>)である。

定植日、品種、栽培終了日は、表-1の作期3に示した。

2列のベッドいずれにおいても試験1と同様のシステムで養液土耕栽培を行ったが、各ベッド(区)で施肥窒素の形態を変えた。すなわち、CN区は窒素を硝酸カルシウム(大塚2号)により供給し、窒素以外は前述の大塚1号改により供給する区であり、対照区は肥料に、前述のOK-F-1を用いる区とした。

養液土耕システムは、試験1におけるものと同様のシステムを用いたが、点滴装置の構成は試験1の慣行施肥区と同様であった。ただし、点滴位置(アロドリッパー)の配置数はトマト1個体あたり2本とした(図-2)。灌水量は、試験1と同じく土壤の体積含水率を指標にして自動制御した結果、ベッド下部の排水口からの排水はほとんどなかった。

### 3 N<sub>2</sub>O および NO フラックスの測定方法

#### a 測定システムの概要

土壌からの N<sub>2</sub>O および NO のフラックスの測定には、通気式チャンバー法を用いた (Hosono ら, 2006). この方法は、ポンプを用いてチャンバーに一定流量で空気を導入すると同時に、もう 1 台のポンプを用いて同じ流量でチャンバー内空気を吸引し、導入空気 (チャンバー入口空気) および吸引空気 (チャンバー出口空気) 中のガス濃度を測定するものである (図-3).

チャンバーを被せた場所からの N<sub>2</sub>O および NO フラックスは、定常状態を仮定して、以下の式により計算した.

$$F_c = \frac{m \cdot 10^3}{22.4} (C_{out} - C_{in}) \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot 60 \cdot \frac{273}{(273 + T_c)} \quad (1)$$

ここで、 $F_c$  はチャンバーを被せた土壌の表面からのフラックス ( $\text{mg h}^{-1}$ ),  $C_{out}$  および  $C_{in}$  はチャンバー出口および入口空気中の N<sub>2</sub>O または NO 濃度 (ppbv),  $f$  はチャンバーへの通気流量 ( $\ell \text{ min}^{-1}$ ),  $T_c$  はチャンバー内気温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $m$  は N<sub>2</sub>O または NO の分子量, 22.4 は 0 $^{\circ}\text{C}$  で 1 気圧における気体 1mol の体積 ( $\ell$ ) である.

N<sub>2</sub>O 濃度の計測には、ガス相関法式 NDIR 分析計 (Thermo Electron 社製, Model 46C), NO 濃度の計測には化学発光方式 NO<sub>x</sub> 分析計 (Thermo Electron 社製, Model 42C) を用いた. N<sub>2</sub>O 分析計を通過した排気を NO<sub>x</sub> 分析計に導入した. なお、これらのガス分析計の精度については次項で説明する.

ポンプは定流量回路つきミニポンプ (柴田科学製, MPΣ-300) を用いた. チャンバーへの通気流量は、主として  $1.3 \ell \text{ min}^{-1}$  に設定した.

チャンバーは透明塩化ビニル製、角形で、大きさ 30cm (w) × 30cm (d) × 22cm (h) であった. 内壁にあたる部分には、ガスの吸着等を抑制するために透明な FEP 粘着シートを貼付した. チャンバーは、土壌中深さ約 2cm まで埋め込んだ木枠の上に置いた. チャンバー下部にはシリコンスポンジを貼り付け、木枠とチャンバーとの間に隙間ができないようにした. また、日射がチャンバー内に透過すると地温および気温が著しく増加するので、チャンバー上面に発泡スチロール製の日よけを被せた.

なお、トマトの植物体を常にチャンバー内に入れて測定することは非常に困難であり、すべての試験において、土壌面からの放出のみを測定した. 土壌中で生成された N<sub>2</sub>O の植物体を通した放出については、無視できない量があることを示唆する報告もある (例えば, Chang ら, 1998) が、湛水条件でなければ、植物体を通した N<sub>2</sub>O 放出量は小さいという報告 (Yan ら, 2000) もあり、未解明の問題である (Nishimura ら, 2005).

#### b 測定手順

試験 1 における慣行施肥区と養液土耕区におけるガスフラックスの計測は以下のようにして行った. 各区に対して 1 台ずつのチャンバー (合計 2 台) を用い、分析部

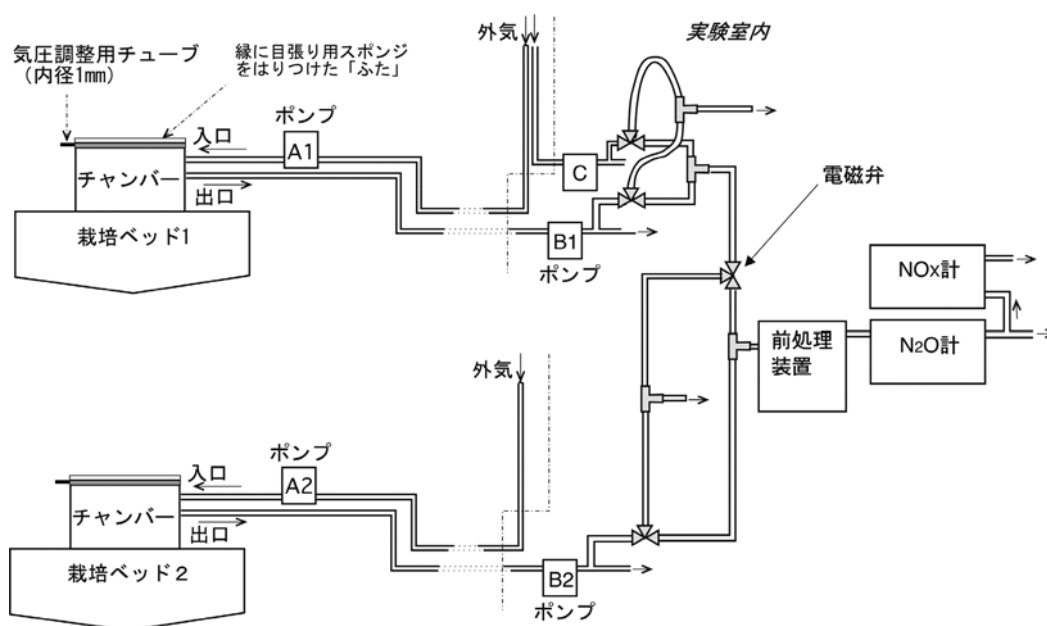


図-3 通気式チャンバー法による N<sub>2</sub>O および NO 放出速度フラックス測定の概念図



へ導入する空気を一定のサイクルで切替えた。サイクルは、基本的には、外気を10分間→チャンバー1の出口からの空気を10分間→外気を10分間→チャンバー2の出口からの空気を10分間→外気を10分間、という40分間の過程を繰り返した。式1の $C_{out}$ として、各チャンバー出口からの空気中の濃度を用い、 $C_{in}$ には、 $C_{out}$ 測定前後の外気中濃度の平均値を用いた。従って、各処理区、40分間に1つのガスフラックスデータが得られた。なお、 $C_{in}$ と $C_{out}$ のN<sub>2</sub>O濃度については、分析部へ導入する空気を切替えてから2分後から10分後までの8分間平均値を使用した。これは、分析計のセル中の空気が切替え前の空気と置換されて濃度測定値が安定するまでに1分間程度を要するからである。NO濃度は、さらにN<sub>2</sub>O分析計の通過時間等を考慮し、導入空気を切替えてから5分後から10分後までの5分間平均値を使用した。N<sub>2</sub>O分析計は、8分間平均値を用いることにより5ppbv以下のN<sub>2</sub>O濃度差を検出でき、また、NO<sub>x</sub>計は、5分間平均値を用いることにより1ppbv以下のNO濃度差を検出できると考えられた(Hosonoら、2006)。本研究で用いた底面積0.09m<sup>2</sup>のチャンバーで通気流量を1.3ℓmin<sup>-1</sup>に設定すると、 $C_{in}$ と $C_{out}$ の濃度差がN<sub>2</sub>Oで5ppbv、NOで1ppbvは、それぞれ5.4μgN<sub>2</sub>O-Nm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>および0.5μgNO-Nm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>のフラックスに相当する。一般的な農耕地からのN<sub>2</sub>OおよびNOフラックスの測定には使用可能な精度である。このN<sub>2</sub>O分析計およびNO<sub>x</sub>計は、少量の空気サンプル中の濃度を測定することはできないため、閉鎖式チャンバー法でのフラックス測定には適用が難しいが、本研究のような通気式チャンバー法には利用可能と考えられる。N<sub>2</sub>Oについては流路中での分解や吸着が少ないので、半閉鎖式(循環式)チャンバー法にも適用できる可能性がある。

試験2においても、試験1と同様に、2つの処理区に対して1台ずつのチャンバー(合計2台)を用いたが、分析部へ導入する空気の切替サイクルは、外気：10分間→チャンバー1の出口空気：10分間→チャンバー2の出口空気：10分間→外気：10分間、という30分間の過程を繰り返した。式1の $C_{in}$ には、チャンバー出口空気測定の前後20分間の値を用いた。すなわち、各処理区、30分間に1つのガスフラックスデータが得られた。通常は外気中のN<sub>2</sub>OおよびNO濃度の経時変化は小さいため、このサイクルでもフラックス評価の精度は低下しないと判断した。なお、試験2では、いずれの区も養液土耕栽培であるが、試験1の結果から、灌水施肥後すぐにフラックスが増加し始めることが予想された。そこ

で、灌水施肥開始時刻を各区の $C_{out}$ 測定開始の10分前になるように制御した。

試験1、試験2とも、ガスフラックスの測定位置は、各処理区2ヶ所とした。2ヶ所同時の測定ではないが、2日おきにその2ヶ所の間で場所を移動したので、長期間(例えば、1ヶ月～栽培期間全体)で見れば2連の測定とみなせる。

### c NOフラックス測定値の補正

NOの場合、土壌からのフラックスを通気式チャンバー法で計測する際に、通気流量が小さいと過小評価される問題点が明らかとなっている。既往の事例(例えば、Slemrら、1991; Butterbach-Bahlら、1997)からは、NOフラックスの正確な評価には、毎分1回の換気回数に相当する通気流量が必要と推察されている。本研究では、N<sub>2</sub>O濃度差を測定する際の精度の問題から、通気流量は主として1.3ℓmin<sup>-1</sup>(換気回数に換算して0.065回min<sup>-1</sup>)と、小さく設定した。この通気流量での測定は、N<sub>2</sub>Oフラックスの評価には影響が少ないと判断される一方で、NOフラックスはかなり過小評価されると推察された(Hosonoら、2006)。本報の結果においては、Hosonoら(2006)で示した、NOフラックスの大きさと過小評価率との関係を用いて、NOフラックスの値を補正した。

### d 各処理区におけるN<sub>2</sub>OおよびNOフラックスの評価方法

本研究の場合、隔離ベッド栽培であるので、ベッド以外の部分(通路)へは肥料は施用されない。また、養液土耕においては、水分および肥料が行き渡る場所は点滴位置付近の湿潤域に限られる。乾燥して肥料の存在しない場所からのN<sub>2</sub>OおよびNOのフラックスは非常に小さいと考えられる。隔離床栽培でのガス放出量を地床栽培や露地栽培での放出量と比較するため、あるいは慣行施肥区と養液土耕区の放出量を比較するためには、施設面積あたりのフラックスを計算する必要がある。

試験1の慣行施肥区においては、チャンバー設置位置のフラックスがベッド全面からのフラックスを代表し、かつ通路部分からの放出はゼロと仮定し、以下の式で施設面積あたりのフラックスを計算した。

$$F_f = \frac{F_c \cdot A_b}{A_c \cdot A_f} \quad (2)$$

ここで、 $F_f$ は施設面積あたりのガスフラックス、 $A_c$

はチャンバーの底面積、 $A_b$ はベッドの面積、 $A_f$ は1ベッドあたりの施設面積である。

試験1の養液土耕区および試験2において、土壌の湿潤部位は、目視によれば、チャンバーに覆われた場所に含まれていた。また、湿潤部位から非湿潤部位へのガスの水平方向の拡散により、非湿潤部位からも $N_2O$ や $NO$ の放出が若干あると考えられるが、湿潤部位近傍の乾燥部位もほぼチャンバー内に含まれていると判断された。その場合、通路からの放出はゼロと仮定すると、施設面積あたりのフラックスは以下の式により計算される。

$$F_f = \frac{F_c \cdot n_d}{n_c \cdot A_f} \quad (3)$$

ここで、 $n_d$ はベッド全体の点滴位置の数、 $n_c$ はチャンバーに含まれる点滴位置の数であり、試験1の養液土耕区の場合は1、試験2の場合には4であった。養液土耕区において非湿潤部位からのフラックスをゼロと仮定したことの妥当性については、実際に非湿潤部位からのフラックスは測定していないので評価できない。

#### 4 環境計測および土壌分析

温室内外の気温・湿度を自作の通風筒にいれた温湿度センサ（Campbell社製CS500）で、チャンバー内の気温・湿度は同じセンサで無通風・放射よけ無しの条件で測定した。チャンバー設置位置（各区2ヶ所、計4ヶ所）の土壌中深さ2cmおよび5cmの地温を熱電対（各深さ2本）で、同じ箇所土壌の体積含水率をTDRプローブ（Campbell社製、CS615、各位置1本のみ）で測定した。データロガー（Campbell社製、CR10X）で以上の要素を計測・記録するとともに、体積含水率に基づく灌水の制御を行った。なお、本研究の結果における土壌水分の表記は、畑地からの $N_2O$ 放出に関する既往の研究にならい、土壌の空隙率に対する液相（水分）の割合を示す飽和度（Water Filled Pore Space、以後、WFPS）で表す。本研究の試験に用いた土壌の空隙率は約0.6であったので、WFPSは0.6を体積含水率で除することにより求めた。

土壌分析（硝酸態窒素濃度、EC、pH）は定植日付近（基肥施肥後）と栽培終了（植物撤去）後にのみ行った。採取した生土の含水率を測定し、乾土：水の重量比が1：5になるように蒸留水を加え、30分間振とう後、pHとECを測定した。その後、上澄み液中の硝酸イオン濃度を小型反射式光度計（Merck社製、RQflex Plus）により測定した。栽培終了時の土壌は、作土の深さ0-5cm、

5-10cm、10-15cm、15-20cmの各層から採取した。養液土耕区においては、さらに、乾燥域と湿潤域とにわけて採取した。栽培開始前のベッド内の土壌は、均一になるようにスコップでよく攪拌したので、深さ別には採取しなかった。なお、栽培終了時の植物撤去は、茎を地際から5cmくらいの位置で切って、それより上の地上部を廃棄し、数日後に残った茎を引き抜いた。その際、太い根は茎と共に除去されたが、大部分の細根は土壌中に残存した。

### III 結果と考察

#### 1 灌水施肥後の短期的な $N_2O$ および $NO$ フラックスの変化

##### a 灌水施肥後のフラックス変化（試験1）

試験1における、灌水施肥後の短期的な $N_2O$ および $NO$ フラックスの変化の例を図-4、図-5、図-6、図-7に示した。結果は以下の4点にまとめられる。

①灌水施肥による $N_2O$ フラックスは、施肥に対応して短時間のうちに増大した。ほとんど全ての場合で、フラックスのピークは灌水施肥後1時間以内に生じていた。

②灌水終了から1~2時間後には $N_2O$ フラックスが灌水開始前のレベルに戻った。ただし、前回の灌水から1~2時間以内に次の灌水が始まるような場合には、灌水開始前のレベルに戻る前に、再びフラックスが増加した。

③ $N_2O$ フラックスは、夏季には、夜間から翌朝の第1回目の灌水施肥開始前の時間帯にはゼロ近くで推移する日が多かった（図-5、図-7）が、5月頃は毎日の第1回の灌水施肥開始前にも、 $5 \mu g N_2O-N m^{-2} h^{-1}$ 以上のフラックスがあり、その灌水施肥に対応しない $N_2O$ フラックスの変化は地温の変化に対応していた（図-4）。

④ $NO$ フラックスは、冬から春には灌水施肥後短時間のピークが明瞭でない傾向があった（図-4、図-6）が、夏季には $N_2O$ フラックスの変動パターンとほぼ同期していた（図-5、図-7）。

なお、試験1では基本的には前述のように養液土耕区、慣行施肥区の両区ともに40分間に1つのフラックス測定データが得られるようにしたが、養液土耕区における灌水施肥後のフラックス変化が大きいので、慣行施肥区よりも養液土耕区のフラックス測定頻度を多くした時期もあった（図-7）。

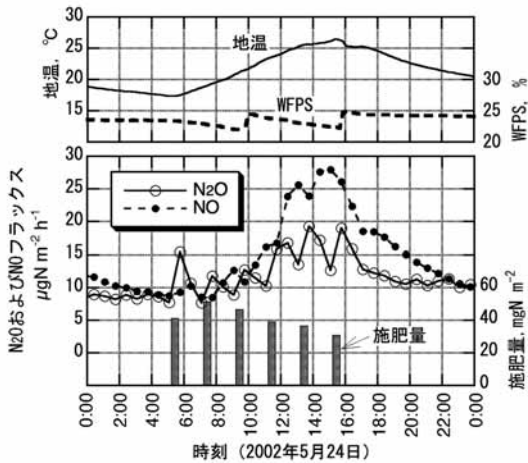


図-4 養液土耕区におけるN<sub>2</sub>OおよびNOの放出速度(フラックス)、施肥N量、地温および土壌水分の日変化(2002年5月24日)

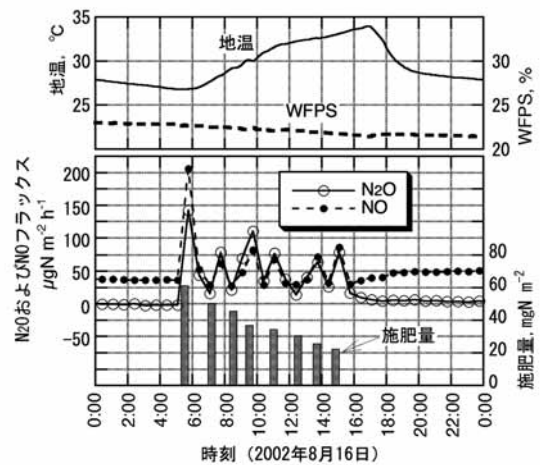


図-5 養液土耕区におけるN<sub>2</sub>OおよびNOの放出速度(フラックス)、施肥N量、地温および土壌水分の日変化(2002年8月16日)

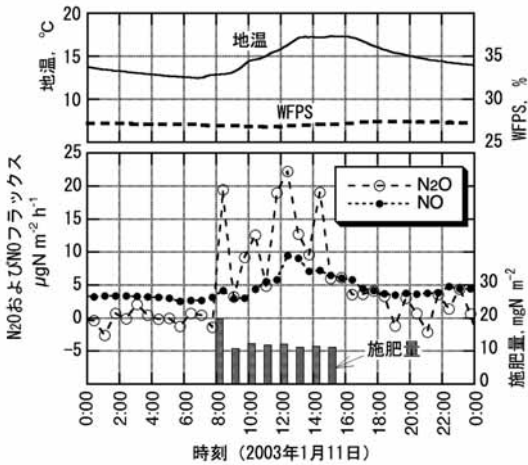


図-6 養液土耕区におけるN<sub>2</sub>OおよびNOの放出速度(フラックス)、施肥N量、地温および土壌水分の日変化(2003年1月11日)

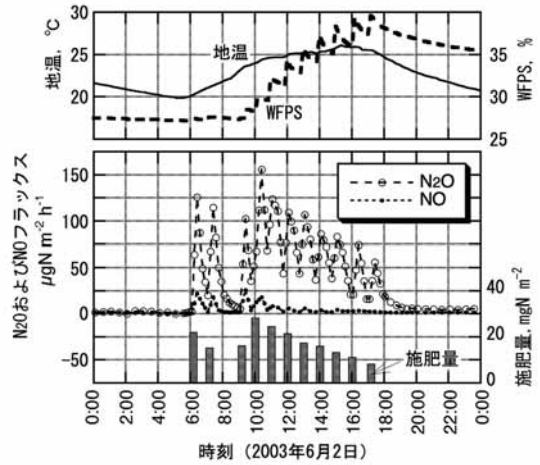


図-7 養液土耕区におけるN<sub>2</sub>OおよびNOの放出速度(フラックス)、施肥N量、地温および土壌水分の日変化(2003年6月2日)

**b 灌水施肥後のフラックスの変化(試験2)**

試験2のCN区では、灌水に混ぜる窒素成分を硝酸態窒素のみにした。この場合のN<sub>2</sub>Oフラックスも、前項と同じく、灌水施肥後短時間のうちに増大した(図-8、図-9)。

1日のうちでのN<sub>2</sub>Oフラックスの最大ピークは、CN区では窒素施用量が最大となる灌水(通常、早朝に行われるその日の第1回目の灌水)の後に生じていたが、対照区では2回目の灌水以降に生じる場合が多かった。

一方、NOについては、CN区では灌水施肥に対応したフラックスは見られなかった。対照区における灌水施肥後のNOフラックスの変化については試験1と同様の結果であった。

**c 灌水施肥後短時間におけるN<sub>2</sub>OおよびNOフラックスの変化についての考察**

液肥を施用すると、短時間のうちにN<sub>2</sub>Oフラックスのピークが生ずる現象は、既往の報告にもあり(Conradら, 1983; Harrisonら, 1995), また土質や土壌水分状態によっても異なることも考えられるが、本研究の結果からは、液肥施用とほぼ同時にN<sub>2</sub>Oの生成が生じ、数分から1時間以内という極めて短時間にフラックスのピークが生じることがわかった。

慣行施肥区における追肥の際には、養液土耕区よりも多量の窒素が施用されたにも関わらず、当該日のN<sub>2</sub>O放出量は養液土耕区の方がむしろ多い場合が多かった。この原因は不明であるが、土壌中の窒素濃度、水分条件



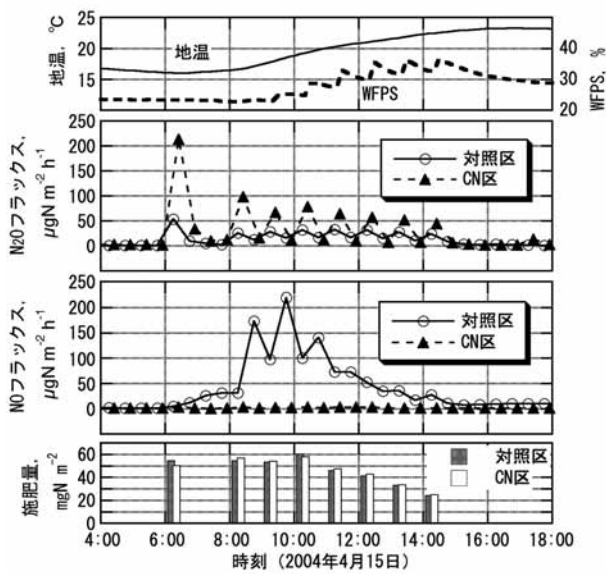


図-8 施肥窒素の形態の異なる養液土耕栽培からの  $N_2O$  および  $NO$  の放出速度 (フラックス), 施肥 N 量, 地温および土壌水分の日変化 (2004年4月15日)

CN区: 硝酸態窒素のみ, 対照区: 硝酸および尿素.

などが両区で異なることが, 微生物による硝化・脱窒に何らかの影響を与えているためと想像される.

一方,  $NO$  については, 試験1の養液土耕区および試験2の対照区において, 冬から春にかけて, 灌水施肥に対応した  $NO$  フラックスのピークが明瞭でなかった (図-4, 図-6, 図-8). この理由としては地温の影響が推察される.  $NO$  は主として硝化の過程で生成, 放出されるが, 灌水とともに施用された尿素がアンモニア化し, さらに硝化を受けるのにはある程度の時間を要する. 低温期には尿素のアンモニア化, 硝化に時間がかかり,  $NO$  フラックスの増加も施肥から一定の時間が経過した後になるものと推察される. 一方, 夏季の高温時にはそれらの反応が迅速に進むため, 灌水施肥後急速に  $NO$  フラックスの増加が見られた (図-5, 図-7, 図-9) と解釈できる.

試験2において, 硝酸態窒素のみを灌水施肥したCN区で灌水施肥後  $N_2O$  が即座に発生していたことは, CN区では脱窒により  $N_2O$  が発生していたということを示す. 試験1の養液土耕区および試験2の対照区においても, 硝化の遅延が推察された春の低温期に,  $N_2O$  フラックスが灌水施肥に対応して即座に増加していたことは, それらの区でも, 施用されたOK-F-1に含まれている硝酸態窒素の脱窒により  $N_2O$  が生成されていた可能性を示唆する. 一般に, 畑地で土壌水分の高くない場合で

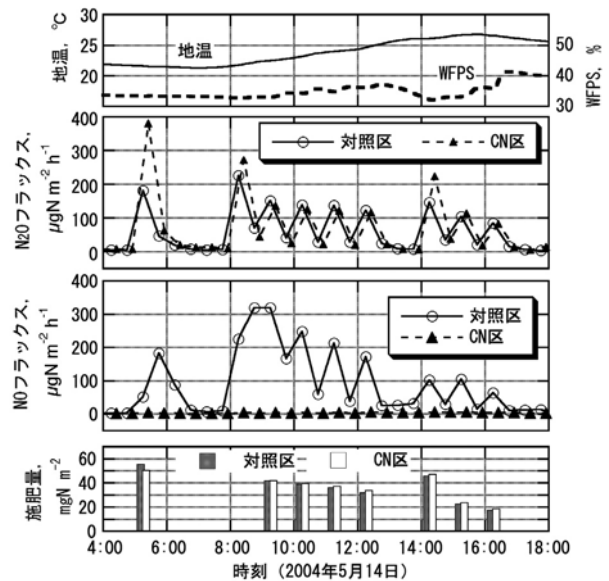


図-9 施肥窒素の形態の異なる養液土耕栽培からの  $N_2O$  および  $NO$  の放出速度 (フラックス), 施肥 N 量, 地温および土壌水分の日変化 (2004年5月14日)

CN区: 硝酸態窒素のみ, 対照区: 硝酸および尿素.

は  $N_2O$  は主として硝化の過程で生じる (Bremner ら, 1978) が, 畑土壌においても強い降雨や灌水の後には脱窒が生じることが明らかにされている. 例えば, Sexstone ら (1985) は排水性のよい砂壤土畑で, 降雨や灌漑の後, 2時間後と12時間後に脱窒速度を測定し, 2時間後では脱窒が盛んに生じていたのに対して12時間後では脱窒速度が非常に小さかったことを報告している. これら既往の研究からも, 本研究の比較的排水性のよい黄色土畑において, 灌水同時施肥の直後に脱窒が生じ, その過程で  $N_2O$  が生成されたという可能性は十分考えられる. なお, 畑条件では土壌全体が嫌気状態になるわけではなく, 部分的に, 脱窒に必要な嫌気的な領域ができると考えられている. また, 十分好気的に見える場合でも, 団粒の内部などに局所的に嫌気的な部位ができて脱窒が生じうると考えられている (西尾, 1994).

Daum ら (1997) はキュウリ等のロックウール栽培における脱窒速度を測定しているが, ロックウールキューブ (25cm×20cm, 厚さ7.5cm) 内でも点滴位置からの距離により脱窒量が大きく異なり, 点滴位置直下における脱窒量が最も大きいことを示している. 本研究の養液土耕区においては, WFPS は点滴位置直下が最も高く, 点滴位置から離れるに従い減少し, 極端に乾燥している位置が生じた (図-10). 養液土耕においても, 特に点滴位置直下の湿潤域で脱窒が盛んに生じるという可能性

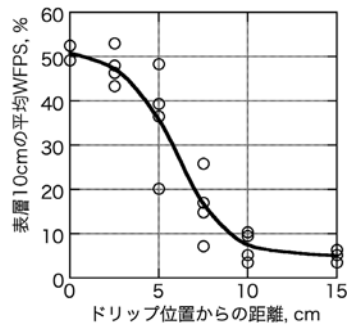


図-10 養液土耕区における WFPS の水平分布の例 (2002年8月23日)

図中の曲線は、おおよその傾向を示したものである。

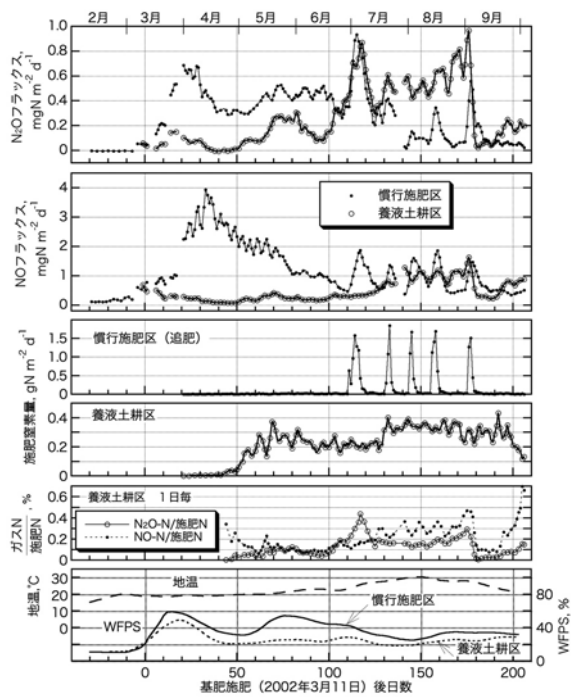


図-11 慣行施肥区および養液土耕区における N<sub>2</sub>O および NO の放出速度フラックス，施肥 N 量，地温および土壌水分の推移 (作期 1)

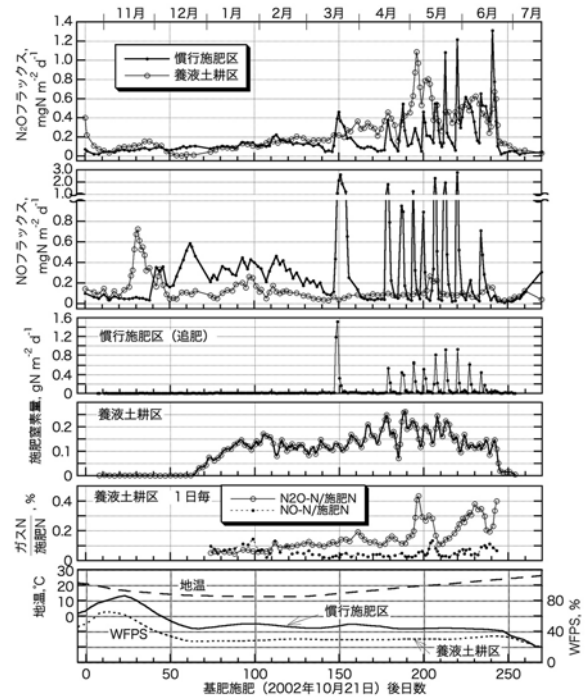


図-12 慣行施肥区および養液土耕区における N<sub>2</sub>O および NO フラックス，施肥 N 量，地温および土壌水分の推移 (作期 2)

は大いに考えられる。

なお、図-10 における点滴位置直下の WFPS は 50% 程度と、一般に土壤からの N<sub>2</sub>O 放出で脱窒由来が優先すると考えられている WFPS80%以上 (Davidson ら, 2000) と比較すると乾燥条件である。図-10 のデータを計測したのは 2002 年 8 月 23 日であり、その時期には、後述のように脱窒はあまり生じていなかったものと推察される。図-10 は灌水直後の計測値ではなく、表層 10cm の平均的な WFPS であることを考慮すれば、図-10 の場合より平均的に WFPS が高い期間においては、少なくとも灌水中や直後に WFPS が 80% を超えるよう

な湿潤な部分が生じる可能性が高いと考えられる。

## 2 栽培期間を通じての N<sub>2</sub>O および NO フラックスの変化，および栽培期間全体の N<sub>2</sub>O および NO 放出量

### a 養液土耕区と慣行施肥区の比較 (試験 1)

試験 1 の各作期における栽培期間中の N<sub>2</sub>O および NO 放出量 (1日あたり) の推移を、地温、土壌水分 (WFPS)、施肥窒素量の推移と併せて、図-11 および図-12 に示した。また、養液土耕区における 1日毎の施肥窒素量に対する N<sub>2</sub>O および NO 放出量の割合 (以

下、「 $N_2O-N$ ／施肥 $N$ 比」および「 $NO-N$ ／施肥 $N$ 比」、あわせて「ガス $N$ ／施肥 $N$ 比」についても示した。この、ガス $N$ ／施肥 $N$ 比は、単純に、 $N_2O$ および $NO$ フラックスの日積算量を当日の施用窒素量で除したものであるが、詳しくは後述する。なお、図-11および図-12中の全ての項目については、トレンドを見やすくするために3日間移動平均値を示し、日毎の変化が大きくない時期については、その3日間移動平均値を2~3日おきにプロットした。

作期1においては、6月下旬までは養液土耕区の $N_2O$ および $NO$ 放出量は慣行施肥区と比較すると明らかに小さく、定植後40日目頃には $N_2O$ および $NO$ ともほとんど放出が見られなくなった。しかし、その後、施肥量の増加にしたがってフラックスも増加し、 $N_2O$ フラックスに関しては養液土耕区の方が慣行施肥区よりも大きく、 $NO$ フラックスは慣行施肥区と同程度という傾向であった。また、養液土耕区において、施肥窒素を硝酸態のみにした期間（9月4日~9月19日）には $N_2O$ フラックスは約1/10に、 $NO$ フラックスも約1/5に激減した。施肥窒素の形態を硝酸態窒素のみにしたことによる $N_2O$ フラックスの大きな減少は、試験2の結果（1-bおよび次項）とは矛盾する結果であるが、作期1の当該期

間（9月4日~9月19日）には、脱窒があまり生じていなかったものと推察される。この原因の詳細は不明であるが、作期1の5月から7月下旬にかけて、結果的に土壤水分が非常に低く推移しており、脱窒が生じにくい状態になっていた可能性が考えられる。また、試験1の養液土耕区と試験2における灌水法（点滴装置）やベッド（作土の充填方法）の差異が土壤水分などに影響したことも考えられる。

栽培期間を通じた養液土耕区と慣行施肥区における $N_2O$ および $NO$ の放出強度については、総投入窒素量が両区で若干異なるため、投入窒素量に対する放出量の比で比べてみると、養液土耕区では慣行施肥区に対して、 $N_2O$ が76%、 $NO$ は32%、 $N_2O+NO$ は41%であり、いずれも養液土耕区の方が小さかった（表-2）。

作期2においても、養液土耕区では、施肥を開始する直前の12月中旬（慣行施肥区の基肥施肥後60日目頃）には $N_2O$ 、 $NO$ とも、慣行施肥区に比べて放出量が非常に小さくなった。しかし、灌水に肥料を混入し始めてからは、 $N_2O$ フラックスは慣行施肥区と同程度となり、慣行施肥区の第1回目の追肥の直前、 $N_2O$ フラックスが小さくなった3月中旬以降は、慣行施肥区で追肥により多量の窒素が施用された日を除き、概ね養液土耕区の方

表-2 栽培期間の積算 $N_2O$ および $NO$ 放出量（試験1）

作 期・区	施肥窒素量, $gN m^{-2}$	総放出量 ( $mgN m^{-2}$ ) 平均±標準誤差 <sup>a</sup>		放出量／施肥窒素量 %		
		$N_2O-N$	$NO-N$	$N_2O-N$	$NO-N$	
作期1	慣行施肥区	60.4 <sup>b</sup>	64.7±1.8	269.9±19.7	0.11	0.45
	養液土耕区	68.9 <sup>b</sup>	55.8±4.0	99.8±1.6	0.08	0.14
作期2	慣行施肥区	23.2	39.7±5.3	69.7±2.8	0.17	0.30
	養液土耕区	24.5	58.3±1.5	31.6±0.6	0.24	0.13

<sup>a</sup> 各区2箇所の測定点のデータを別々に積算した（平均±標準誤差）。

<sup>b</sup> 作期1の施肥窒素量は、堆肥由来の施用量 $27.8gN m^{-2}$ を含む。

表-3 試験1における土壤中硝酸態窒素濃度、pHおよびEC

年／月／日	区 <sup>a</sup>	$NO_3-N$ ( $mg/100g$ 乾土)	pH (1:5) ( $H_2O$ )	EC (1:5) ( $dS m^{-1}$ )	試料採取時期
2001/9/7	—	12.0	6.4	0.35	前作植物撤去後
2002/3/27	慣 行	13.2	6.5	1.75	基肥施用16日後
	養 液	10.2	7.1	0.45	
2002/10/4	慣 行	3.9	6.3	1.4	植物撤去後
	養 液	9.4	6.7	2.9	
2002/10/25	慣 行	11.1	6.1	4.0	基肥施用4日後
	養 液	9.2	6.9	2.0	
2003/7/24	慣 行	0.9	6.0	1.9	植物撤去後
	養 液	2.8	7.2	1.3	

<sup>a</sup> 「慣行」は慣行施肥区、「養液」は養液土耕区を示す。

養液土耕区の各値は乾燥域と湿润域の各深さの平均値である。



が大きかった。一方、NO フラックスについては、栽培開始（基肥施肥）後 30 日付近に養液土耕区でのみ、大きなピークが見られたが、その後 3 月中旬までは養液土耕区の NO フラックスは概ね慣行施肥区の半分程度で推移した。慣行施肥区では、追肥時には、養液土耕区の 10~20 倍の大きな NO フラックスが見られた。養液土耕区の NO フラックスは夏季でも冬季間（1 月~3 月）とほぼ同じレベルであった。養液土耕区で NO フラックスが小さい理由として、以下の 2 つの要因により、養液土耕では NO フラックスに寄与する土壌域が非常に狭くなるということが考えられる。①一般に養液土耕では点滴灌水のため湿潤域が狭く、根域も狭い（中野、2002）。灌水は狭い範囲に集中するために、その部分の WFPS は大きくなりやすく、硝化が生じにくい条件になる。そのため、NO が主として生成するのは狭い湿潤域の中でも周縁部等、WFPS が比較的小さい場所に限られると推察される。②しかも、NO は土壌中の深い場所で生成されたものは土壌に吸着されるためほとんど大気中へ放出されず、表層土壌で生成されたものだけが NO フラックスに寄与する（Hosen ら、2000）。

栽培期間を通した総投入窒素量に対する放出量の比は、養液土耕区では慣行施肥区に対して、N<sub>2</sub>O が 139%、NO は 43%、N<sub>2</sub>O+NO は 78% であり、N<sub>2</sub>O に関しては養液土耕区の方が大きくなった（表-2）。

いずれの作期でも、N<sub>2</sub>O フラックスは栽培時期後半には養液土耕区の方が慣行施肥区よりも大きくなる傾向であったが、作期 1 における慣行施肥区では、基肥施肥直後から大きな N<sub>2</sub>O フラックスがあり、栽培期間を通した積算 N<sub>2</sub>O 放出量は養液土耕区よりも大きくなった。それに対し、作期 2 では栽培開始時期が 12 月で、低温により基肥中のアンモニア態窒素の硝化が抑制されたため、慣行施肥区において基肥施肥後の N<sub>2</sub>O フラックスが栽培時期後半に比較して低く推移し、結果として、栽培期間を通した積算 N<sub>2</sub>O 放出量、および積算窒素投入量に対する N<sub>2</sub>O 放出量の比は養液土耕区の方が大きくなったと考えられる。

養液土耕区では、作期 1 および作期 2 とも、栽培開始後しばらく、灌水に肥料を混入させない時期に、N<sub>2</sub>O および NO フラックスの小さなピークが見られた。このピークは、灌水にともない前作の残存無機態窒素と前作トマトの残根由来の易分解性有機物により脱窒が活性化された可能性が考えられる。脱窒が生じるためには窒素源に加えて、微生物のえさとなる有機態炭素も必要である。Nishimura ら（2005）は、ライシメータ畑にお

ける自動化クローズドチャンバー法による N<sub>2</sub>O フラックスの連続測定の結果、基肥として化学肥料を施用した後、比較的長い間 N<sub>2</sub>O フラックスのピークが見られなかった一方、作物（陸稲、小麦、ダイズ）の収穫直後には N<sub>2</sub>O フラックスの顕著な増加を観察した。この結果は、易分解性有機物の供給が N<sub>2</sub>O フラックスを増大させることを示唆している。

本研究のような施設栽培、特に隔離床栽培では、栽培終了時に灌水を停止した後、土壌が乾燥するため土中に残った根のかなりの部分が分解されずに残り、また、栽培終了時に土壌に残っていた無機態窒素も硝化・脱窒作用を受けずに残存する割合が高かったと推察される。そのため、次作の開始からしばらく、それら由来の N<sub>2</sub>O および NO フラックスが認められるものと推察される。また、作期 2 では、この栽培初期のピーク時には、養液土耕区の N<sub>2</sub>O および NO フラックスが慣行施肥区よりも大きい傾向が認められた。この原因として、両区において残根量や土壌の湿潤状況（土壌水分の空間分布）が異なっていたことなどが考えられる。

#### b 窒素の形態の異なる養液土耕の比較（試験 2）

全栽培期間にわたって、施肥窒素を硝酸態窒素（硝酸カルシウム）でのみ行う区（以下、CN 区）と、硝酸および尿素を含む肥料（OK-F-1）で行う区（以下、対照区）とを比較した結果を図-13 に示す。冬から春にかけて、CN 区における N<sub>2</sub>O フラックスは対照区よりも大きかった。2 月から 4 月における、CN 区および対照区の N<sub>2</sub>O フラックスの関係をプロットすると（図-14）、硝酸態窒素の施用量の比率（CN 区の 56%）との関連が推察された（特に 3 月と 4 月）。この時期には、対照区においても硝化があまり生じておらず、主に脱窒によって N<sub>2</sub>O が生成・放出されていたものと推察される。その後、4 月中旬以降、両区の N<sub>2</sub>O 放出量の差異は小さくなっており、徐々に N<sub>2</sub>O 生成に対する硝化の寄与が増加したものと推察される。

一方、NO については、初期には CN 区でも対照区と同程度の放出量がみられたものの、その後は CN 区の NO 放出量は非常に少なくなった。CN 区の NO 放出量が非常に少ないのは、NO が主に硝化の過程で生成されるためと考えられる。CN 区においてわずかに見られる NO の放出は、点滴位置からやや離れた硝化に好適な水分条件の場所において、トマトの根から滲出する有機物や生育中に死んだ根などが無機化する際に生成されたアンモニア態窒素が硝化される過程で生じたものと想像さ



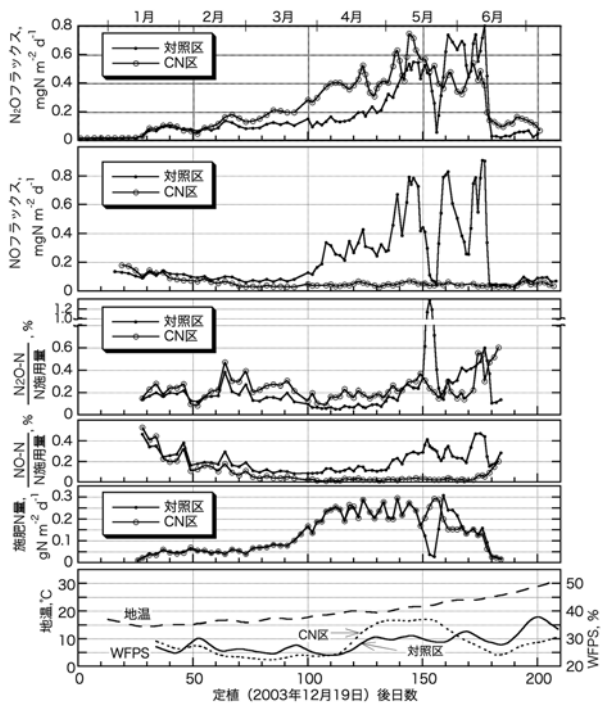


図-13 施肥窒素の形態が異なる養液土耕栽培からの N<sub>2</sub>O および NO フラックス, 施肥 N 量, 地温および土壌水分の推移 (試験 2)

CN 区: 硝酸態窒素のみ, 対照区: 硝酸および尿素.

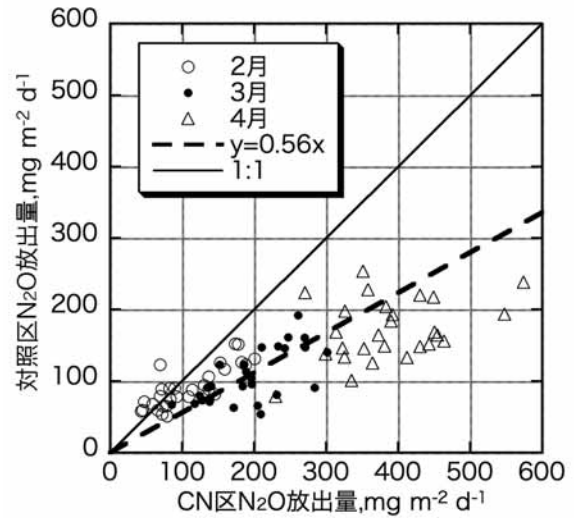


図-14 CN 区と対照区の N<sub>2</sub>O フラックスの比較 (2004 年 2 月~4 月)

図中の実線は  $x=y$  の直線, 破線は「 $y=0.56x$ 」の直線を示す. 0.56 は, CN 区の硝酸態窒素施用量に対する対照区の硝酸態窒素施用量の比率に等しい.

表-4 施肥窒素の形態の異なる養液土耕栽培の栽培期間を通しての N<sub>2</sub>O および NO 放出量 (試験 2)

区 <sup>a</sup>	施肥窒素量, gN m <sup>-2</sup>	総放出量 (mgN m <sup>-2</sup> ) 平均±標準誤差 <sup>b</sup>		放出量/施肥窒素量 %	
		N <sub>2</sub> O-N	NO-N	N <sub>2</sub> O-N	NO-N
CN 区	21.2	48.6±0.6	13.1±0.1	0.23	0.06
対照区	20.6	35.7±5.6	45.3±2.7	0.17	0.22

<sup>a</sup> CN 区: 硝酸態窒素のみ, 対照区: 硝酸および尿素.

<sup>b</sup> 各区 2 箇所の測定点のデータを別々に積算した.

表-5 試験 2 における土壌中硝酸態窒素濃度, pH および EC

年/月/日	区	NO <sub>3</sub> -N (mg/100g 乾土)	pH (1:5) (H <sub>2</sub> O)	EC (1:5) (dS m <sup>-1</sup> )	試料採取時期	
2003/12/25	CN	27.5	5.6	3.2	栽培開始前	
	対照	17.3	5.6	2.2		
2004/7/15	CN	乾燥域	57.4	6.0	5.4	植物撤去後
		湿潤域	0.0	6.5	1.5	
	対照	乾燥域	74.5	5.8	4.5	
		湿潤域	2.9	6.4	1.2	

れる. 両区ともに, 栽培開始からしばらくの間, ある程度の NO 放出量が見られたのは, 試験 1 と同様, おそらく栽培開始後の灌水によりいわゆる乾土効果によって前作の残根の分解が進行し, 生じたアンモニア態窒素の硝化の過程で NO が生成・放出されたためと推察さ

れる. 栽培初期に, NO 放出量に比べて N<sub>2</sub>O 放出量が非常に小さかった原因は, WFPS が小さかったことなどが考えられるが, その時期の WFPS のデータが欠測となっており, 詳細は不明である.

なお, 5 月中旬から 6 月上旬にかけて, CN 区と対照

区の日施用窒素量が異なったのは、対照区の液肥供給ポンプ（液肥を灌用水タンクに供給するポンプ）の不具合による。

栽培期間を通した総投入窒素量に対する放出量の比は、CN区では対照区に対して、 $N_2O$ が132%、 $NO$ は28%、 $N_2O+NO$ は74%であった（表-4）。CN区の方が対照区よりも積算 $N_2O$ 放出量が多い結果となったのは、対照区では初期の $N_2O$ 放出量が小さかったため、夏秋作型で栽培すれば異なる結果になる可能性も十分考えられる。

### c 日毎の施用窒素量に対する $N_2O$ および $NO$ フラックスの割合

灌水施肥に対応して短時間のうちに $N_2O$ および $NO$ のフラックスが増加し、それ以外の時間帯はフラックスが極めて小さい場合が多く見られた（例えば、図-6、図-8）。夜間から翌朝の第1回目灌水までの $N_2O$ および $NO$ フラックスがゼロに近い場合、毎日の $N_2O$ および $NO$ 放出量は、ほとんど当日に施肥した窒素由来である可能性がある。2004年5月20日前後の対照区において、液肥供給ポンプの不具合により水のみ灌水された場合には $N_2O$ および $NO$ の日放出量が非常に小さくなったことから、少なくともある時期においては、毎日の $N_2O$ および $NO$ 放出量のほとんどが当日に施肥された窒素由来であったと推察される。その場合、図-11、図-12、図-13に示した養液土耕区における、 $N_2O-N$ ／施肥 $N$ 比および $NO-N$ ／施肥 $N$ 比は、毎日の施肥窒素量がどの程度、 $N_2O$ および $NO$ として大気中に放出されたかを示す。

ただし、栽培開始後しばらくなど、灌水施肥のタイミングに対応しない $N_2O$ および $NO$ のフラックスが認められた期間があった（特に $NO$ ）。それらの期間における、日毎のガス $N$ ／施肥 $N$ 比には当日に施肥された窒素由来のフラックスに加えて、灌水施肥のタイミングに対応しないフラックスの寄与も含まれる。例えば、図-4の2002年5月24日における $N_2O$ の日放出量のうち、灌水施肥のタイミングに対応しないフラックスの寄与は80%以上と推定された。特に、窒素施用量が非常に小さい期間については、ほとんどが灌水施肥のタイミングに対応しないフラックスであるので、図には日窒素施用量が $0.02gN\ m^{-2}\ d^{-1}$ 以上の日のみ示してある。

灌水施肥のタイミングに対応しないフラックスの寄与が非常に小さい期間も含め、 $N_2O-N$ ／施肥 $N$ 比は0.1から0.5%程度、 $NO-N$ ／施肥 $N$ 比は0.01から0.6%程

度であり、平均的な値は、表-2および表-4に示した各試験区における全期間の放出量／施肥窒素量比の値と同じオーダーであった。

### 3 施肥窒素レベルとトマトの収量（試験1）

今回の試験における窒素施肥量は、各区での生育が適正（目標としては葉面積指数が3~4程度）になることを目指して調節した。その結果、本試験での収量レベルは、1作あたり15~18t/10a程度であり、作期毎では各試験区の間での収量や茎葉の乾物重にも差が認められなかった（データは示さず）。試験1において各作期の慣行施肥区および養液土耕区の総窒素施肥量（化学肥料による）は、結果的には同程度となり、愛知県の施肥基準に近い値となった（作期1は夏秋作型の施肥基準28kgN/10a、作期2は半促成作型の施肥基準24kgN/10aと比較）。施設栽培では一般に、除塩などのために多量に灌水する場合を除いて、肥料の流亡が少なく、また、トマトは非常に低濃度の窒素を吸収できる特性をもつことから、慣行の施肥でも施肥効率は比較的高いものと考えられる。また、通常の施設野菜栽培で肥効が小さくなる原因として、全面全層施肥では施肥範囲全体に根域が及ばない、ということも指摘されている（久保，1991）。本研究における慣行施肥区のような、隔離床で土壌の容量が比較的小さく、かつ土壌全体が湿潤状態になるような条件では、肥料が存在する範囲と根域が一致することも考えられ、それも肥効を高める要因になると推察される。実際、本試験での栽培終了時における土壌中への残存無機窒素量は、特に作期1において慣行施肥区よりも養液土耕区の方が大きい結果となった。

林ら（2003）は、施設栽培トマトについて、慣行施肥と養液土耕の肥効の差異について実験を行った結果、適正な施肥レベルにおいては養液土耕の肥効が大きかったと報告しているが、同報によれば、窒素不足のレベルおよび窒素過剰なレベルでは両者で肥効に顕著な差異は認められておらず、養液土耕により生産現場で安定的に肥効を高めることが、必ずしも容易ではないことが想像される。

### 4 総合考察

$N_2O$ および $NO$ は土壌中窒素の硝化あるいは脱窒の過程で副産物あるいは中間生成物として生成される（楊，1994）。従って、概念的に述べれば、硝化・脱窒作用が起こる前に植物が肥料を吸収してしまえば $N_2O$ および $NO$ の生成および放出は抑制されることになる。

これまでに、水耕栽培においては、根の周りの養液の流動性を保てば硝酸態窒素の吸収速度は極低濃度においても維持されることが、いくつかの作物について示されている (Maruo ら, 2004). 細井 (2000) は、湛液循環式の水耕栽培において、毎日早朝に硝酸カルシウム溶液を循環養液に添加する窒素日施用方式で長期間トマトを栽培し、窒素施用直前の養液中の硝酸濃度をトレースレベル ( $N$  で 1ppm 以下) に保ちつつ、良好な生育を確保できることを示している。養液土耕においても、多頻度灌水という特長により根面付近の養液の流動性が保たれる (池田, 2005) ことから、トマトなどの場合では施用窒素のほとんどが当日のうちに吸収されることも期待される。

しかし、上記の結果 1 から、養液土耕では、灌水施肥と同時に即座にガス化が生じ、 $N_2O$  および  $NO$  が生じることが示された。すなわち、養液土耕において灌水施肥される窒素全てを、硝化・脱窒が生じる前にトマトが吸収することはないということである。

試験 1 の結果、栽培期間全体の積算施肥窒素量に対する  $N_2O$  放出量の比は、慣行施肥区と養液土耕区で同程度であり、養液土耕区における日々の  $N_2O-N$ /施肥  $N$  比もそれらに近い値であった。

試験 2 の結果から、黄色土を原土壌とする場合での養液土耕では施肥した硝酸態窒素が即座に脱窒し ( $N_2$  にまでなる量は不明)、その過程で  $N_2O$  が生じる、ということが強く示唆された。一方、尿素を施用した場合についても、試験 1 の養液土耕区と試験 2 の対照区の結果から、施用後極めて短時間のうちに  $N_2O$  および  $NO$  の放出 (すなわち、尿素のアンモニア化とその後の硝化) が生じると考えられた。ただし、試験 2 の対照区の結果などから、低温時期には施用された尿素が硝化されるまでに時間がかかり、 $N_2O$  および  $NO$  の放出までの時間が長くなるとともにガス放出量も小さくなる可能性が示唆された。

結論として、少なくとも黄色土を原土壌とする場合、養液土耕により慣行施肥栽培よりも施肥効率が増加 (すなわち、作物の生育・収量を減少させずに施肥量を削減) した場合にも、施肥窒素の形態に関わらず、 $N_2O-N$ /施肥  $N$  比は低下しない可能性がある。すなわち養液土耕による  $N_2O$  放出量の削減率は、最大でも施肥窒素量の削減率と同程度と推測できる。一方、 $NO-N$ /施肥  $N$  比は、養液土耕により大きく低下すると考えられた。

ただし、本研究の養液土耕区では、栽培終了時に土壌中に窒素がかなり残存していたことから、生育期間中の

日々の施用窒素量が過剰であった日も少なくないと考えられる。日々の  $N_2O-N$ /施肥  $N$  比および  $NO-N$ /施肥  $N$  比は、生育期間中に若干の変動が見られた。もし、窒素施用量が適切な時期には  $N_2O-N$ /施肥  $N$  比および  $NO-N$ /施肥  $N$  比が小さかったとすれば、日々の窒素施用量をより適切に制御することにより、栽培期間全体の  $N_2O$  および  $NO$  放出量の削減に加えて、 $N_2O-N$ /施肥  $N$  比および  $NO-N$ /施肥  $N$  比も減らすことができ、逆に、本研究の場合以上に過剰な窒素が日々施用された場合には、それらの比はさらに増加するという可能性も考えられる。しかし、作物の日々の窒素要求量に対する相対的な窒素施用量が、 $N_2O-N$ /施肥  $N$  比および  $NO-N$ /施肥  $N$  比に及ぼす影響についてはさらに研究が必要である。なお、日々の作物の肥料吸収量に基づいて、適正な日々の肥料施用量を決定・制御する方法について、最近、篠原ら (2007) はハウレンソウの養液土耕栽培において、日射比例制御の有効性を示すとともにその実用化について検討しており、トマトでもその応用が期待される。

既往の研究では黄色土露地畑における  $N_2O-N$ /施肥  $N$  比は種々の土壌の畑地と比較して、クロボク土畑などと同じく低いレベルにある (Akiyama ら, 2006)。本研究の各試験区における  $N_2O-N$ /施肥  $N$  比の値もそれらと同レベルあるいはそれ以下である。硝化・脱窒反応は土壌の物理性 (マクロおよびミクロスケールでの通気性等) にも大きく影響され、硝化・脱窒に伴う  $N_2O$  および  $NO$  の発生量、 $N_2O$  と  $NO$  の発生比率は土壌の種類によって大きく異なるので、原土壌が黄色土以外の場合や肥料あるいは堆肥の施用履歴などにより土壌の理化学性が異なる場合には、本研究とは大きく結果が異なる可能性がある。また、本研究で  $N_2O-N$ /施肥  $N$  比が低かった原因としては、栽培作目がトマトで施肥効率が高いことも影響していると推察される。従って、施設野菜栽培一般や養液土耕栽培からの  $N_2O$  放出量について全般的に論ずるには、他の土壌や作目での調査が必要である。

#### IV 摘 要

施設トマト栽培における施肥窒素量に対する  $N_2O$  および  $NO$  放出量の割合の慣行施肥栽培と養液土耕栽培での差異を明らかにするとともに、養液土耕において施肥窒素を硝酸態のみにした場合の  $N_2O$  および  $NO$  放出量削減効果を明らかにすることを目的として、黄色土を



原土壌とする土壌を充填した隔離ベッドで、養液土耕および慣行施肥でトマトを栽培し、栽培期間中の N<sub>2</sub>O および NO 放出量を通気式チャンバー法により連続的に測定して以下の結果を得た。

①養液土耕では、施肥窒素の形態が「尿素+硝酸態窒素」、「硝酸態窒素のみ」のいずれの場合も、灌水施肥の直後から N<sub>2</sub>O フラックスが増大し、短時間（1時間以内）のうちにピークが生じた。施肥窒素の形態が「尿素+硝酸態窒素」の場合には、NO も灌水施肥直後から増加した。その際の NO フラックスの変化パターンは、高温期には N<sub>2</sub>O フラックスの変化に追従して変化したが、低温期には放出のピークが数時間遅延した。

②養液土耕区の N<sub>2</sub>O フラックスは、栽培初期には慣行施肥区よりも小さかったが、栽培時期後半には慣行施肥区よりも大きくなる傾向であった。一方、NO フラックスは概して慣行施肥区の方が大きかった。

③養液土耕区における栽培期間を通じた窒素投入量に対する積算 N<sub>2</sub>O 放出量の比は、夏秋作型に近い作期 1 では慣行施肥区の約 0.8 倍、半促成作型に近い作期 2 では約 1.4 倍であった。NO については養液土耕区の方が小さかった（慣行施肥区の 0.3 から 0.4 倍）。

④養液土耕栽培（半促成に近い作型）で、施肥窒素を硝酸態窒素のみにした区（CN 区）と硝酸態窒素および尿素を施用する区（対照区）とで、生育期間にわたっての総窒素施肥量に対する N<sub>2</sub>O および NO の総放出量の比率を比較すると、N<sub>2</sub>O-N/施肥 N 比は CN 区の方が対照区より大きく（約 1.3 倍）、NO-N/施肥 N 比は CN 区の方が対照区よりも小さかった（約 0.3 倍）。

以上の結果から、黄色土施設畑でのトマト栽培で、栽培期間中の総窒素施肥量がほぼ同じ場合、施肥窒素量に対する N<sub>2</sub>O 放出量の割合は、養液土耕によりあまり低下しないこと、施肥窒素量に対する NO 放出量の割合は、養液土耕、特に施用窒素の形態を硝酸態窒素のみにすることで大きく低下することが明らかとなった。

## 引用文献

- 1) Akiyama, H., H. Tsuruta and T. Watanabe (2000): N<sub>2</sub>O and NO emission from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere: Global Change Sci.*, **2**, 313-320.
- 2) Akiyama, H. and H. Tsuruta (2002): Effect of chemical fertilizer form on N<sub>2</sub>O, NO and NO<sub>2</sub> fluxes from Andisol field. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **63**, 219.
- 3) Akiyama, H., X. Yan and K. Yagi (2006): Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils in Japan: Summary of available data. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **52**, 774-787.
- 4) Bremner, J. M. and A. M. Blackmer (1978): Nitrous oxide. Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science*, **199**, 295-296.
- 5) Butterbach-Bahl, K., R. Gasche, L. Breuer and H. Papen (1997): Fluxes of NO and N<sub>2</sub>O from temperate forest soils: impact of forest type, N deposition and of liming on the NO and N<sub>2</sub>O emissions. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **48**, 79-90.
- 6) Chang, C., H. H. Janzen, C. M. Cho and E. M. Nakonechny (1998): Nitrous oxide emission through plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**, 35.
- 7) Conrad, R., W. Seiler and G. Bunse (1983): Factors influencing the loss of fertilizer nitrogen into the atmosphere as N<sub>2</sub>O. *J. Geophys. Res. -Oceans and Atmospheres*, **88**, 6709-6718.
- 8) Daum, D. and M. K. Schenk (1996): Gaseous nitrogen losses from a soilless culture system in the greenhouse. *Plant Soil*, **183**, 69.
- 9) Daum, D. and M. K. Schenk (1997): Evaluation of the acetylene inhibition method for measuring denitrification in soilless plant culture systems. *Biol. Fertil. Soils*, **24**, 111-117.
- 10) Davidson, E. A., M. Keller, H. E. Erickson, L. V. Verchot and E. Veldkamp (2000): Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. *Bioscience*, **50**, 667-680.
- 11) Harrison, R. M., S. Yamulki, K. W. T. Goulding and C. P. Webster (1995): Effect of fertilizer application on NO and N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural fields. *J. Geophys. Res. -Atmospheres*, **100**, 25923-25931.
- 12) 林康人・新妻成一・久保省三 (2003)：灌水施肥（養液土耕）栽培の肥効は高いのか-施肥量を段階的に変えた場合のトマトの施肥窒素利用率。土肥誌, **74**, 175-182.
- 13) Hosen, Y., H. Tsuruta and K. Minami (2000): Effects of the depth of NO and N<sub>2</sub>O productions in soil on their emission rates to the atmosphere: analysis by a simulation model. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **57**, 83-98.
- 14) 細井徳夫 (2000)：窒素少量分施による養液栽培トマトの葉面積制御。野菜茶試研報, **15**, 81-95.
- 15) 細井徳夫・細野達夫・中野明正 (2001)：トマト個体群葉面積の適正制御が可能な養液土耕装置の開発。野菜・茶業研究成果情報, 1-2.
- 16) Hosono, T., N. Hosoi, H. Akiyama and H. Tsuruta (2006): Measurements of N<sub>2</sub>O and NO emissions during tomato cultivation using a flow-through chamber system in a glasshouse. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **75**, 115-134.
- 17) 池田英男 (2005)：植物の根と周辺の無機要素の分布と流れからみた根域の養水分管理。日本土壌肥料学会編, 養液土耕と液肥・培地管理, 7-27. 博友社, 東京.
- 18) Kroeze, C., Mosier, A. and Bouwman, L. (1999): Closing the global N<sub>2</sub>O budget: A retrospective analysis 1500-1994. *Global Biogeochem. Cycl.*, **13**, 1-8.
- 19) 久保研一 (1991)：野菜の施肥窒素利用特性。季刊肥料, **59**, 36-44.
- 20) 前田美恵子・久野智香子・北村秀教 (2001)：茶園土壌からの亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) の放出量の推定。愛知県農総試研報, **33**, 109-114.
- 21) Maruo, T., M. Takagaki and Y. Shinohara (2004): Critical nutrient concentration for absorption of some vegetables. *Acta Hort.*, **644**, 493-499.



- 22) 中野明正 (2002): 野菜の施設生産における土壌ストレス緩和技術に関する研究. 野菜茶研研報, **1**, 181-240.
- 23) Nishimura, S., T. Sawamoto, H. Akiyama, S. Sudo, W. G. Cheng and K. Yagi (2005): Continuous, automated nitrous oxide measurements from paddy soils converted to upland crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **69**, 1977-1986.
- 24) 西尾隆 (1994): 耕地土壌の脱窒過程. 土肥誌, **65**, 463-471.
- 25) 澤本卓治・波多野隆介 (2000): 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.
- 26) 篠原温・塚越覚・林菜穂子・丸尾達・北条雅章 (2007): ホウレンソウの養液土耕における日射比例型制御による硝酸濃度低減化技術の実用化. 園学研, **6**, 195-199.
- 27) Sexstone, A. J., T. B. Parkin and J. M. Tiedje (1979): Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 99-103.
- 28) Skiba, A. E., D. Fowler and K. A. Smith, 1997: Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: sources, controls and mitigation options. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **48**, 139-153.
- 29) Slemr, F. and W. Seiler, 1991: Field study of environmental variables controlling the NO emission from soil and the NO compensation point. *J. Geophys. Res.*, **96**, 13017-13031.
- 30) 徳田進一 (2005): 茶園からの亜酸化窒素発生量削減技術. 茶研報, **100**, 45-48.
- 31) Yan, X., S. Shi, L. Du and G. Xing (2000): Pathways of  $N_2O$  emission from rice paddy soil. *Soil Biol. Biochem.*, **32**, 437-440.
- 32) 楊宗興 (1994): 亜酸化窒素の生成過程. 陽捷行編著, 土壌圏と大気圏-土壌生態系のガス代謝と地球環境, 91-94, 朝倉書店, 東京.

# N<sub>2</sub>O and NO Emissions During Tomato Cultivation by Means of Drip Fertigation in a Glasshouse

Tatsuo Hosono and Norio Hosoi

## Summary

Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and nitric oxide (NO) fluxes that occurred during long-term tomato cultivation in planters in a glasshouse were continuously measured using the flow-through chamber method over the course of three cultivation periods. The tomatoes were cultivated by means of drip fertigation (i.e., simultaneous fertilization with drip irrigation). The soil used in the planters was a fine-textured clay-loamy yellow soil. In the former 2 cultivation periods, nitrogen was applied with a compound fertilizer containing nitrate-N and urea-N in drip fertigation plots (DF plots) and the plots with conventional fertilization (i.e., pre-plant basal application and the following top dressings) were adopted as control plots (CF plots). In the third cultivation period, the tomatoes were cultivated by means of drip fertigation in both plots. In one of the plots, nitrogen was applied only with calcium nitrate (CN plot); and a compound fertilizer containing nitrate-N and urea-N was applied in the other plot (control plot).

The following conclusions could be drawn:

1) In both cases of applying fertilizers containing nitrate and urea or containing only nitrate as nitrogen, after every drip fertigation (1 to 10 times a day with the 1 to 15 min duration each time), immediate increases in N<sub>2</sub>O fluxes were observed, with a very short period of peak emissions (within 1 hour). NO fluxes also increased immediately after drip fertigation of the fertilizer that included urea (i.e., in the DF plots in the 1st and 2nd cultivation periods and in the control plot in the 3rd cultivation period). In those plots, the changing pattern in NO fluxes was similar with that of N<sub>2</sub>O fluxes in the warmer season but the peak period of NO fluxes was delayed several hours in the cooler season.

2) Daily N<sub>2</sub>O emissions in the drip fertigation plot (DF plot) were lower than those in the conventional fertilization plot (CF plot) during the peak periods after basal application of fertilizer in the CF plot. However, daily N<sub>2</sub>O emissions in the DF plot gradually increased with an increase in the daily amount of nitrogen applied, and tended to be larger than that in the CF plot during the latter period within each cultivation period. Daily NO emissions were lower in DF plots than in CF plots in most cases.

3) Total amounts of N<sub>2</sub>O emissions during the entire cultivation periods in the DF plot were 0.8 times and 1.4 times of those in the CF plot in the first cultivation period which started in the spring season (March) and in the second cultivation period which started in the winter season (November), respectively. Total amounts of NO emissions in the DF plots during the two cultivation periods were smaller than those in the CF plots by a factor of 0.3 to 0.4.

4) In the 3rd cultivation period which started in the winter (December), the percentages of total applied N emitted as N<sub>2</sub>O and NO in the CN plots were 1.3 times and 0.3 times compared with those in the control plots, respectively.