

B-22 施設栽培休閑期における N_2O 発生要因の 室内培養実験による検討

○仲宗根 安弘¹・前田 守弘^{2*}・藤原 拓³・永禮 英明²・赤尾 聡史⁴

¹興亜開発株式会社（〒700-0975 岡山県岡山市北区今1-7-11）

²岡山大学大学院環境生命科学研究科（〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1）

³高知大学教育研究部自然科学系農学部（〒783-8502 高知県南国市物部乙200）

⁴鳥取大学大学院工学研究科（〒680-0855 鳥取県鳥取市湖山町南4-101）

* E-mail: mun @cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

亜酸化窒素（ N_2O ）による地球温暖化への影響は二酸化炭素（ CO_2 ）の310倍と大きく、 N_2O の温室効果への寄与は CO_2 、メタン（ CH_4 ）について3番目に大きい¹⁾。また、 N_2O の総排出量の3分の1以上は人為起源であり、主として農業からの排出による¹⁾。

ビニルハウス等の施設栽培では、塩類集積を防ぐ目的で休閑期に除塩灌水が行われる。貞松ら（2008）によると、施設栽培では除塩灌漑から1カ月以内に年間 N_2O の93%が放出された²⁾。最近では、施設栽培休閑期に灌水除塩に加えて、土壌病原菌の殺菌を目的とした土壌還元消毒を行う場合がある³⁾。この期間は土壌表面をビニールマルチで被覆し、土壌還元消毒前にコメヌカや堆肥等の有機物を施用する。したがって、土壌は還元状態になりやすく、脱窒過程における N_2O が発生しやすいと予想される。しかし、このような条件で N_2O 発生要因を解析した研究は見当たらない。そこで本研究では、嫌気状態、土壌、土壌水分、有機物添加が異なる条件で室内培養実験を行い、施設栽培休閑期における脱窒過程での N_2O 発生要因を検討した。

2. 試験方法

培養試験条件の概要を表-1に示す。各条件につき3連で試験を行った。岡山県笠岡湾干拓地内のナス施設栽培後作土（2010/7/23に0-15 cm層を採取、これ以降笠岡ナス土壌）、高知大学農学部スイカ施設栽培後作土（2010/7/21に0-10 cm層を採取、高知スイカ土壌）を風乾したものを供試した。土壌の全窒素、全炭素はCNコ

ーダー（ヤナコ分析工業、MT-700 Mark-II）で測定し、無機態窒素は2 M KCl溶液で抽出後、オートアナライザー（BLTEC QuAAstro2-HR）で分析した。また、Giltay培地を使用したMPN法⁴⁾によって土壌脱窒菌数を測定した。

風乾土壌10 gを100 mL容バイアル瓶に秤量した。次いで、土壌水分が最大保水量の55%および100%（これ以降、それぞれ水分55%、水分100%）、土壌硝酸態窒素（ NO_3-N ）含有量が50 mg N kg⁻¹になるように、200 mg N L⁻¹ KNO₃溶液と脱イオン水を用いて調整した。

70℃乾燥後に微粉碎処理をした混合堆肥（牛糞堆肥200 mg、鶏糞堆肥33 mg、米ぬか20 mg）およびトウモロコシ400 mgをバイアル瓶内の土壌に混和した。各有機物の特性を表-2に示す。なお、堆肥とコメヌカは土壌採取を行った笠岡ナス施設栽培圃場にて土壌還元消毒に使用されたもので、実際の施用量に準じて添加量を決めた。トウモロコシは施設栽培圃場におけるクリーニングクロップとして有望であることが報告されており⁵⁾、その土壌鋤き込みを想定した。トウモロコシは笠岡ナス施設栽培圃場にてクリーニングクロップとして栽培したものを、添加量は単位面積あたり収穫量の10倍相当とした。

続いて、バイアル瓶をブチルゴム栓とアルミキャップで密閉した。異なる嫌気状態を作成するため、一部のバイアル瓶の気相を窒素ガス（ N_2 ）で置換した。試料は35℃で培養し、気相が空気の試料に関しては処理直後（0）、6、12、24、48、72、168、240時間後に、 N_2 置換の試料に関しては0、6、12、24、48、72時間後にバイアル瓶内のガスを最大で0.5 mL採取し、ECD付きガスクロマトグラフ（SHIMADU GC-8A ECD）を用いて N_2O 濃度を測定した。水分100%で気相を N_2 置換した有機物無添加の培養試料について、培養開始から3、6、12、18時間

表-1 培養試験における土壌、気相、有機物、水分条件

土壌	気相	有機物	水分	温度
笠岡湾干拓地 ナス施設栽培後土壌	空気	なし	55%	35℃
			100%	
		混合堆肥	55%	
			100%	
		トウモロコシ	55%	
			100%	
	N ₂ 置換	なし	55%	
			100%	
		混合堆肥	55%	
			100%	
		トウモロコシ	55%	
			100%	
高知大学農学部 スイカ施設栽培後土壌	空気	なし	55%	35℃
			100%	
	N ₂ 置換	なし	55%	
			100%	

後に採取したガスに含まれるN₂Oの窒素および酸素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{18}\text{O}$ 値) を質量分析計 (Finnigan MAT252) で分析した。また、試験終了時の土壌について、無機態窒素を分析した。

3. 結果および考察

(1) 土壌特性

笠岡ナス土壌では全炭素量 (TC) 20 g kg⁻¹, 全窒素量 (TN) 1.8 g kg⁻¹, NO₃-N 28.6 mg kg⁻¹, NH₄-N 11.2 mg kg⁻¹ であり, 高知スイカ土壌では TC 20 g kg⁻¹, TN 1.0 g kg⁻¹, NO₃-N 6.4 mg kg⁻¹, NH₄-N 4.2 mg kg⁻¹ であった。MPN法による土壌脱窒菌数は, 高知スイカ土壌 $5.4 \times 10^3 \text{ g}^{-1}$ > 笠岡ナス土壌 $1.3 \times 10^3 \text{ g}^{-1}$ であった。

(2) 気相、土壌、水分条件がN₂O発生に及ぼす影響

気相条件においては, 水分 55% の場合, 高知スイカ土壌 (232 ppm_v) では岡山ナス土壌 (19 ppm_v) よりも最大 N₂O 濃度が高かった (図-1)。両土壌とも, 培養 168 時間までは水分 100% の方が 55% より N₂O 濃度が高かった。しかし, 高知スイカ土壌の水分 100% では 240 時間後に N₂O 濃度が減少し, 土壌水分による違いは小さくなった。

試験終了時の土壌 NO₃-N 含有量は, 岡山ナス土壌の水分 55, 100% でそれぞれ 88, 38 mg kg⁻¹, 高知スイカ土壌で 78, 0.3 mg kg⁻¹ であり, 水分 55% では初期含有量 (50 mg kg⁻¹) より増加した。これは水分 55% では培養中に有機態窒素の無機化, 硝化が進んだためと思われる。

気相 N₂ 置換の結果を図-2 に示す。N₂ 置換では, 空気条件よりも N₂O 濃度の最大値が大きくなった。しかし, 水分 100% では 6 時間, 水分 55% では 12 時間を経過すると N₂O 濃度が速やかに低下し, 岡山ナス土壌水分 100% で 0.1 ppm_v, 55% で 0.1 ppm_v, 高知スイカ土壌水分 100% で 23 ppm_v, 55% で 0.1 ppm_v にまで減少した。このように, より嫌気的な条件では, いったん気相に放出された N₂O

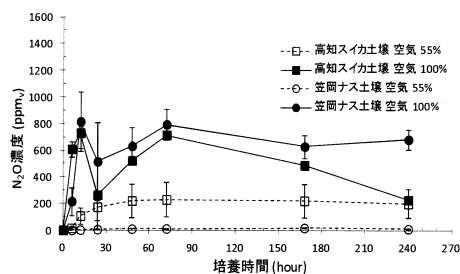


図-1 気相空気条件で土壌水分がN₂O発生に及ぼす影響 (注) 誤差線は標準偏差を示す。

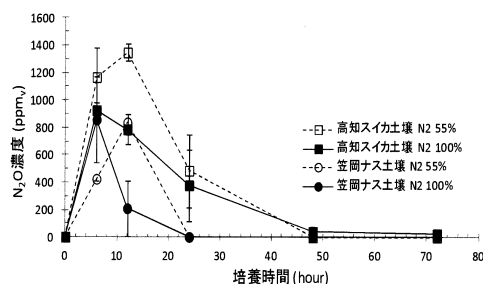


図-2 気相N₂条件で土壌水分がN₂O発生に及ぼす影響

が再び土壌中で還元されると思われる。N₂O の N₂ 還元に伴って, 残存 N₂O の $\delta^{15}\text{N}$ 値, $\delta^{18}\text{O}$ 値は上昇することが知られている⁹⁾。そこで, N₂O 減衰が早かった気相 N₂ 水分 100% 笠岡土壌において N₂O の $\delta^{15}\text{N}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定した。その結果, N₂O 濃度の低下に伴って, $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{18}\text{O}$ 値が -8.9‰ から 12.8‰, 5.1‰ から 29.1‰ にそれぞれ上昇した。このことから, N₂O 還元が間接的に確認できた。

試験終了時には両土壌とも NO₃-N は残存していなかった。本試験で添加した NO₃-N がすべて N₂O になるとすると, 気相 N₂O 濃度は約 4500 ppm_v ($50 \text{ mg kg}^{-1} \times 10/1000 \text{ kg}/4/2 \times 22.4 \text{ L} \times (273+35)/273/100 \text{ mL}$) となり, 観察結果の 4~5 倍に相当する。本試験では, 土壌: 気相比が十分に大きいため, 土壌間隙に残存する N₂O は少ないと考えられる。これらのことから, 土壌中で生成された N₂O の大半は, 速やかに N₂ に還元されたために, 本試験では検出されなかったものと思われる。

以上の結果について土壌の違いに改めて着目すると, 高知スイカ土壌の方が N₂O 濃度が速やかに上昇し, 高濃度になる傾向にあった。これは, 高知スイカ土壌で脱窒菌数が多かったことが一因と考えられる。

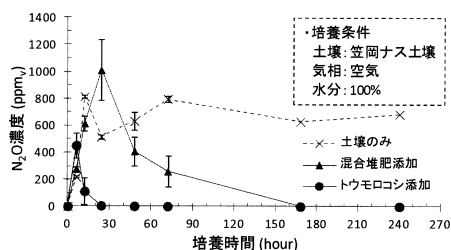
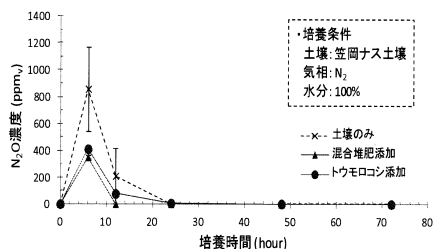
(3) 有機物添加がN₂O発生に及ぼす影響

笠岡ナス土壌を用いて, 気相空気条件, 水分 100% で有機物を添加した場合の結果を図-3 に示す。有機物を添加すると, 気相 N₂ 置換の場合と同様に, N₂O 濃度はいったん上昇するが, その後減少した。混合堆肥の場合,

表2 有機物の全炭素・全窒素および無機態窒素含有量

	全炭素含有量 (g kg ⁻¹)	全窒素含有量 (g kg ⁻¹)	CN比	NO ₃ -N含有量 (mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N含有量 (mg kg ⁻¹)
牛糞堆肥	293.1±7.8*	21.3±0.4	13.8	0.7±0.1	86.4±9.8
鶏糞堆肥	234.6±1.0	33.5±1.4	7.0	5.7±1.0	552.4±48.7
米ぬか	514.9±0.5	28.4±0.4	18.1	2.7±0.1	94.6±2.9
トウモロコシ	390.1±2.6	22.3±0.3	17.5	804.1±75.1	77.8±5.6

*2連の平均±標準偏差

図3 気相空気での有機物添加がN₂O発生に及ぼす影響図4 気相N₂での有機物添加がN₂O発生に及ぼす影響

24時間後に1009 ppm_vまで達し、その後緩やかに減少し、試験終了時には0.1 ppm_vになった。一方、トウモロコシの場合は、6時間後にN₂O濃度が439 ppm_vで最大になり、その後急速に減少した。トウモロコシはNO₃-N含有量が高く(表2)、施用量が多いため、その添加に伴って0.16 mgのNO₃-Nが土壌に加わる。初期土壌の有するNO₃-Nは0.5 mgであり、その1/3に相当する。それにもかかわらず、N₂Oとしての出現濃度は無添加と比較して低かった。これは、トウモロコシは堆肥よりも易分解性であるため、NO₃-Nが速やかにN₂まで脱窒したためと思われる。一方、混合堆肥は遅分解性の牛糞堆肥の割合が高いため、脱窒がゆっくりと進行したと考えられる。

気相N₂条件で有機物を添加すると、最大N₂O濃度が空気条件よりも低く、気相に放出されたN₂Oは24時間以内に速やかに消失した(図4)。このことから、有機物添加においても気相N₂置換によってN₂Oの放出が抑制されることがわかった。

4. まとめ

施設栽培休閑期におけるマルチ被覆下での灌漑および土壌還元消毒がN₂O発生に及ぼす影響因子を室内培養実

験により検討した。気相、土壌、土壌水分、有機物などが異なる条件で土壌10 gを100 mLバイアル瓶内で密閉培養し、気相に放出されたN₂O濃度の経時変化を調べた。その結果、嫌気条件や有機物施用等により還元が進行しやすい土壌条件ほど気相N₂O濃度が高くなることがわかった。また、培養を継続すると、いったん気相に放出されたN₂Oが再び土壌中でN₂に還元されることが示唆された。

以上のことから、N₂O透過性の低いマルチを利用することによって、灌漑や土壌還元消毒時に生成するN₂Oの放出を低減できる可能性が示された。本試験では、その他の温室効果ガスであるCO₂やメタンについては検討しなかった。今後はこれらのガスの発生条件も考慮した総合的な評価が必要である。

謝辞：本研究はJST、CRESTの補助により実施した。安定同位体分析に関しては岡山大学兵藤不二夫氏、農業環境技術研究所中島泰弘氏、全窒素・全炭素分析に関しては岡山大学嶋一徹氏、土壌採取に際しては岡田忠氏、山根信三氏にご協力いただいた。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) IPCC(気候変動に関する政府間パネル)：第4次評価報告書 第1作業部会報告書政策決定者向け要約、気象庁、p5 (2007)
- 2) 貞松篤志、藤原拓、大年邦雄、前田守弘：施設園芸ハウスにおける湛水が亜酸化窒素の生成・放出に及ぼす影響、環境工学研究論文集、Vol. 45, pp.459-466, 2008.
- 3) 新村昭憲：還元消毒法の効果と原理、農業および園芸、Vol.85, pp.810-816, 2010.
- 4) 土壌微生物研究会編：新編土壌微生物実験法、養賢堂、1992.
- 5) 井上賢大、近藤圭介、藤原拓、前田守弘、高岡昌輝、大年邦雄、山根信三、永禮英明、赤尾聡史：クリーニングクロップ栽培と湛水の組み合わせによるハウス土壌集積塩類の除去特性、環境工学研究論文集、Vol. 47, pp. 273-279, 2010.
- 6) Pérez T.: Factors that control the isotopic composition of N₂O from soil emissions. Flanagan LB, Ehleringer JR, Pataki DE(eds) "Stable Isotopes and Biosphere-Atmosphere Interactions: Processes and Biological Controls," Elsevier, San Diego, pp.69-84, 2005.