

# 黒ボク土ナシ園における豚糞堆肥の連用と中断による 当年堆肥由来および地力由来一酸化二窒素排出量の評価

下河邊裕二・郷内 武<sup>1)</sup>・藤田 裕  
(茨城県農業総合センター園芸研究所)

## 要約

ナシ園において、化学肥料と堆肥の併用（慣行区）、化学肥料のみ（化学肥料区）、化学肥料の一部を堆肥で代替する（堆肥代替区）という3つの施肥法で連用を続けた。さらに、慣行区に堆肥施用を中断する区（慣行中断区）を設置し、一酸化二窒素（ $N_2O$ ）を中心とした環境パラメータを調査することで、当年施用堆肥由来および地力（連用効果）由来の $N_2O$ 排出量を評価した。当年堆肥由来の $N_2O$ 排出量および排出係数は、それぞれ $-0.17\sim 1.40\text{kg N ha}^{-1}$ および $-0.06\sim 0.47\%$ であり、化学肥料区と比較して大幅に低かった。地力（連用効果）由来の $N_2O$ 排出量は、 $-0.03\sim 1.43\text{kg N ha}^{-1}$ であり、当年堆肥由来 $N_2O$ 排出量よりも大きくなる傾向がみられた。当年堆肥由来排出係数と、堆肥の窒素放出率から推察した地力由来排出係数との合計は、化学肥料区比で約91%であり、長期的には施用した堆肥の多くが分解され、地力由来 $N_2O$ として放出されていると考えられた。以上より、堆肥は、化学肥料と比較して施用当年の $N_2O$ 排出量を低減させるが、長期連用した場合は地力由来の排出によって化学肥料の $N_2O$ 排出量との差が小さくなることが示唆された。

キーワード：一酸化二窒素、排出係数、ニホンナシ、堆肥、土壤炭素

## 1. はじめに

茨城県は集約的な農業である野菜や果樹生産が盛んであり、そのうちニホンナシ（以下ナシ）は主要な作目である。ナシは施肥基準に対して窒素施肥量が多く（Hiraoka and Umemiya, 2000）、本県ナシ栽培では化学肥料と家畜糞堆肥の併用が慣行的に行われており、堆肥に含まれる肥料成分は施肥として考慮されない場合が多い。有機物の過剰施用は一酸化二窒素（ $N_2O$ ）排出量の増大（秋山ら, 2004）、硝酸態窒素（ $NO_3-N$ ）溶脱量の増大（加治ら, 2002）などの原因となる。

これまでに、藤田ら（2014）は、黒ボク土ナシ園において化学肥料に豚糞堆肥を併用する（慣行施肥法）ことにより総窒素投入量が増加し硝酸態窒素溶脱量が増加すること、総窒素投入量を適正化した、化学肥料の一部を堆肥で代替する施肥法（堆肥代替施肥法）は、地下水への窒素負荷低減に有効であることを明らかにしている。また、 $N_2O$ の排出に関して、慣行施肥法で $N_2O$ 排出量が多く、堆肥代替施肥法および施肥窒素の全量を化学肥料で施用する方法ではそれより少なくなる（藤田ら, 2015b；郷内ら, 2019）ことが明らかになっている。

しかし、堆肥の連用において、施用当年の堆肥に由来する $N_2O$ （本報では「当年堆肥由来 $N_2O$ 」とする）およびこれまでに連用し、土壤中に残っている堆肥に由来する $N_2O$ （本報では「地力（連用効果）由来 $N_2O$ 」とする）については評価されていない。

$N_2O$ 等の温室効果ガスの比較にあたり、単純な排出量だけでなく、一単位あたりの活動量から排出される値に変換した「排出係数」を求めることが重要である。温室効果ガスの排出・吸収量の目録である日本国温室効果ガスインベントリにおける排出量の算定等にもこの係数が用いられている。

そこで本研究では、上記の3施肥法の連用を継続し、一部で堆肥の中断を実施することにより、当年堆肥由来および地力（連用効果）由来の $N_2O$ 排出量・排出係数を評価することを目的とした。

## 2. 材料および方法

### 2. 1 供試圃場・作物および栽培管理

1) 現 茨城県農業総合センター生物工学研究所

試験は茨城県農業総合センター園芸研究所内圃場（腐植質普通黒ボク土、T-N：4.51g kg<sup>-1</sup>、T-C：56.8g kg<sup>-1</sup>、pH（KCl）：5.73、各数値は試験開始時）において行い、後述する堆肥中断区以外は2004～2020年まで同一の施肥設計で栽培した。

供試作物はナシ‘幸水’（樹齢25年生：2017年）を用いた。1993年3月に1年生の苗木を植栽し、その後の栽培管理は本県の果樹栽培基準（茨城県農業総合センター，2016）に準じた。植栽距離は7.2m×7.2m互の目（380樹ha<sup>-1</sup>）とした。供試樹同士が隣接するため、2004年3月に区の境界を自走式トレンチャーで幅25cm地表下90cmまでの溝を掘り、ここに高さ90cmの塩化ビニル製畦畔板を挿入して区切り、1区画25m<sup>2</sup>に1樹とした。剪定は毎年1～2月に実施し、剪定枝および落葉はすべて圃場外に持ち出した。また、試験期間中に耕うんおよび灌水は行わなかった。地表面管理は、2012～2014年は株元のみ裸地とする部分草生栽培、2015～2020年は株元を含め全面草生栽培とし、適宜草刈りを実施してその刈り草は圃場から持ち出さず、その場に残した。

試験区は、2016年までは堆肥代替区、化学肥料区、慣行区の3区を設け、1区画25m<sup>2</sup>（1樹）で3反復とした。化学肥料区は本県の果樹栽培基準（茨城県農業総合センター，2016）に準じ、年間で200kg N ha<sup>-1</sup>（基肥100kg N ha<sup>-1</sup>、追肥100kg N ha<sup>-1</sup>）の窒素を施用した。慣行区は、農家慣行法として茨城県内のナシ園の施肥実態（植田，2002）に基づき、化学肥料による基準施肥量に加えて豚糞堆肥を300kg N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>を施用した。また、堆肥代替区は、基準施肥量における基肥窒素を堆肥で代替（全窒素含量を基準）し、追肥は化学肥料区と同様に行った。

2017～2020年の4年間は当年堆肥由来および地力（連用効果）由来のN<sub>2</sub>O排出量を求めるため、堆肥代替区および慣行区に堆肥中断区を設置した。堆肥中断区とチャンバーの位置の模式図を図1に示す。

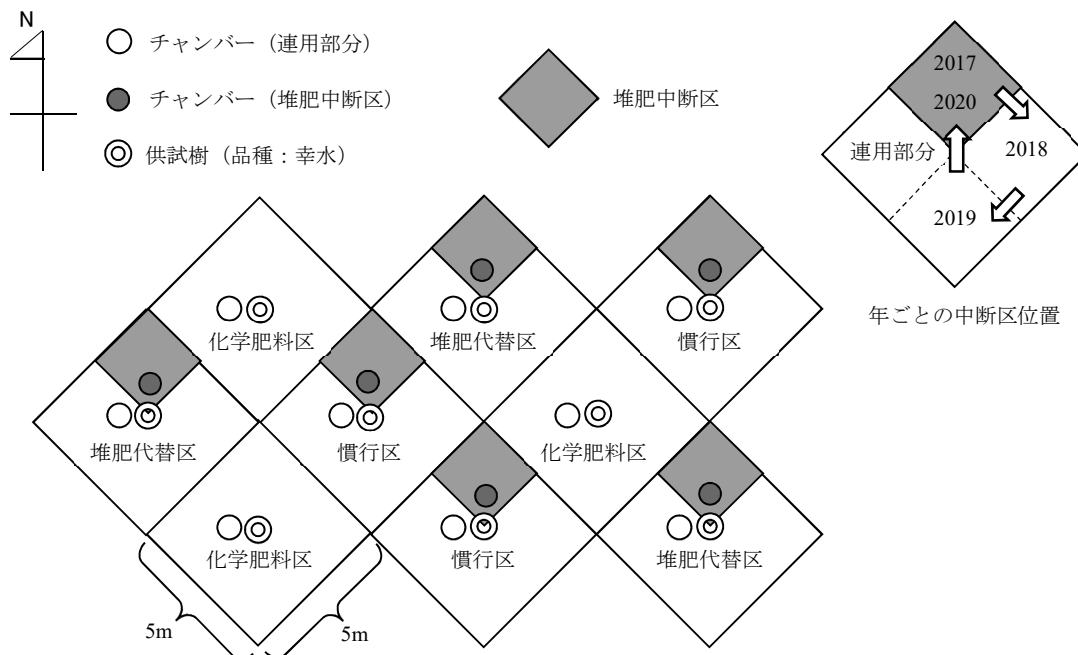


図1 2017～2020年における試験区模式図

堆肥中断区は各区画の1/4の面積とし、毎年位置をずらした。堆肥の連用部分を確保するため、最終年の2020年は2017年と同じ区画を再度中断区とした。このように、堆肥中断区は試験前年度まで堆肥の連用を行い、試験年度に堆肥を中断して化学肥料区と同様の施肥を実施した区とした（2020年のみ2度目の中断となる）。また、圃場の外縁部に窒素施肥および堆肥施用を行わない無窒素区を設けた。2017～2020年における試験区をまとめると、表1のとおりである。

また、堆肥は茨城県下妻市養豚農家で生産されたものを直接入手し、全窒素含量を基準に、基肥（2月または3月）時に施用した。表2に供試堆肥の化学性を示す。

化学肥料は硫酸を用い、基肥の施用は2月または3月に行った。また、追肥については、5月、6月、9月に、それぞれ30、30、40kg N ha<sup>-1</sup>施用した。リン酸、加里はそれぞれ重焼リン、ケイ酸加里を用いて、各区一律に各成分160kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>を基肥として施肥した。肥料は地表面に散布し、耕起は行わなかった。

表1 各試験区における年間の窒素施肥量と堆肥施用量

試験区	肥料種類	施肥窒素量 (kg N ha <sup>-1</sup> )					炭素投入量 <sup>1)</sup> (kg C ha <sup>-1</sup> )
		基肥	追肥1	追肥2	追肥3	合計	
堆肥代替区	化学肥料 <sup>2)</sup>	0	30	30	40	100	-
	堆肥 <sup>3)</sup>	100	0	0	0	100	1291
化学肥料区	化学肥料	100	30	30	40	200	-
慣行区	化学肥料	100	30	30	40	200	-
	堆肥	300	0	0	0	300	3874
慣行中断区	化学肥料	100	30	30	40	200	-
代替中断区	化学肥料	100	30	30	40	200	-
無窒素区	化学肥料	0	0	0	0	0	-

1) 炭素投入量は、2018～2020年の平均値

2) 化学肥料は硫酸を用いた

3) 堆肥は豚糞籾殻堆肥を用い、窒素施肥量は全窒素含量を基準とした

表2 供試堆肥の化学性

	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS/m)	(g kg <sup>-1</sup> )						C/N	水分 <sup>1)</sup> (g kg <sup>-1</sup> )
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	T-N	T-C		
豚糞籾殻堆肥	7.8	8.0	42.0	32.0	50.8	14.5	23.3	298	12.8	430

※値は2018～2020年の平均値

1) 水分は現物あたり、それ以外は乾物あたりの数値

## 2. 2 生育、収量、果実品質

本報では、2017～2020年の4年間を調査期間とした。生育調査は、樹冠面積（4～5月）、新梢の長さ（12月）について実施した。樹冠面積は、主幹を中心に16方位を定め、各方位の主幹から樹冠外縁までの距離を測定し、主幹と隣り合う2方位の樹幹外縁部を直線で結ぶ三角形の面積を算出し、16の三角形面積すべてを合計して求めた。新梢の長さは、枝長10cm以上のものを測定した。収量は、8月中旬から9月上旬に収穫した全果実について重量を測定した。一果重は収量を収穫果数で除して求めた。果実品質は、収穫盛期にそれぞれ1樹当たり10果を採取して、硬度はマグネステーラー硬度計（5/16インチのプランジャー使用）赤道部を測定し、糖度は果汁をBrix糖度計（PR-101α、（株）アタゴ）で測定した。

統計解析は、一元配置分散分析を行い、Tukey法により多重比較した。

## 2. 3 一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) 排出量

調査は藤田ら（2015b）および郷内ら（2019）に準じ、2012～2020年における地表面のN<sub>2</sub>Oフラックスをクロードチャンバー法（八木，1997）で測定した。すなわち、図2に示すように、区画の中央にあるナシ樹主幹から約50cm離れた位置に塩化ビニル樹脂製の円筒（直径25cm×高さ10cm）を5cm程度埋まるように設置（各区3反復）し、以後これを台座とした。なお、無窒素区は圃場の外周部のナシ樹の植栽のない部分に設置した。台座内は、2012～2014年は清耕栽培、2015～2020年は草生栽培とし、草生栽培では適宜地際部で雑草を刈り取り、そのままチャンバー内に残した。ガス採取時は、台座に塩化ビニル樹脂製のチャンバー（直径25cm×高さ5cm）をかぶせ、チャンバー設置直後の0分、10分、20分にチャンバー内ガスを50mlのシリン



図2 台座

ジを用いて30ml採取した。これを真空にしておいた15mlバイアル瓶に注入した。測定頻度は、3月から11月までの期間は週1回、特に堆肥施用および施肥直後は週2～3回行った。地温の低い12月から2月までは2週間～2ヶ月に1回測定を行った。慣行中断区は慣行区の堆肥中断部分に設置したチャンバーからガスを採取し、他の区はそれぞれの堆肥連用部分に設置したチャンバーからガスを採取した。採取した試料のN<sub>2</sub>O濃度はECD付ガスクロマトグラフ（GC-2014、（株）島津製作所）で分析した。分析手法は既報（須藤，2012）に基づいた。年間のN<sub>2</sub>O排出量は、2月1日を1年の区切りとして、台形積分法により算出した。排出係数は、各区の年間N<sub>2</sub>O排出量から無窒素区の年間N<sub>2</sub>O排出量を差し引き、各区の年間施肥窒素量で除して百分率で求めた。降水量は、茨城園研内の気象観測データを用いた。統計解析は、二元配置分散分析を行い、Tukey法により多重比較した。

当年堆肥由来および地力（連用効果）由来のN<sub>2</sub>O排出量は、「当年施用堆肥由来＝慣行区－慣行中断」、「地力（連用効果）由来＝慣行中断区－化学肥料区」より算出した（図3）。

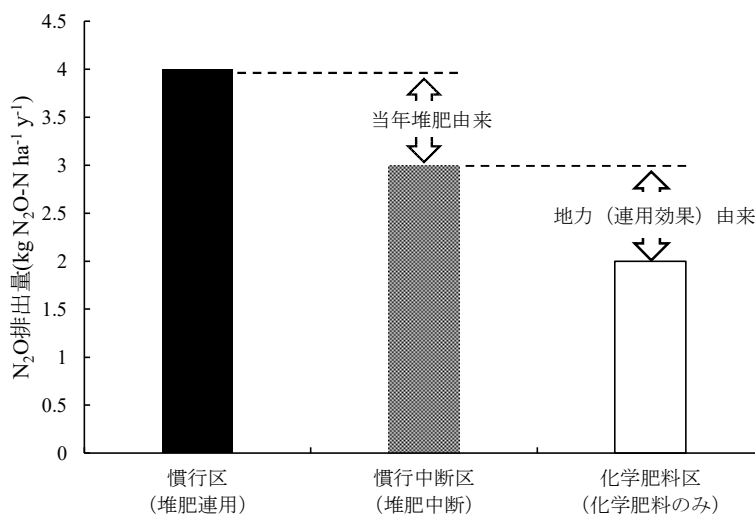


図3 当年堆肥由来および地力（連用効果）由来N<sub>2</sub>O排出量算出の模式図

## 2. 4 土壌の無機態窒素含量の推移

2017～2020年の4年間を調査期間とした。分析用の土壌は、各処理区（3反復）において、区内の堆肥連用部分から深さ0～10cmの層位を検土杖（直径13mm）で採取した。採取頻度は、年間を通じて月2回、特に堆肥施用および施肥直後は週2～3回とした。土壌のアンモニア態窒素は塩化カリウム液浸出法および硝酸態窒素はデバルタ合金還元-微量拡散法（嶋田，1986）でケルダール自動蒸留滴定装置（ペーパデス50s、Gerhardt）により分析した。

## 2. 5 土壌の全炭素含量の推移

土壌は、各年のナシ落葉後から堆肥施用前の12月～2月に採取した。各処理区（3反復）において、区画の中央にある主幹から約1m離れた位置の深さ0～20cmの層位をハンドオーガー（直径70mm、大起理化工業（株））で採取し、分析用の試料とした。採取した土壌は風乾し、2mmのふるいを通したものを全自動元素分析装置（VarioMAX CN、Elementar）で全炭素含量を分析した。各年の土壌炭素含量の推移を最小二乗法により線形近似して、回帰式を求めた。

## 3. 結果

### 3. 1 生育、収量、果実品質

堆肥および基肥の施用方法の異なる3試験区の新梢長は82.2～88.5cm、収量は3.66～3.83kg、一果重は378～382g、硬度は4.0～4.1lbs、果汁糖度は11.3～11.6%の範囲であり、各区とも施肥法の違いによる有意な差は認められなかった（表3）。

表3 堆肥および基肥の施用方法の違いが生育、収量、果実品質に及ぼす影響

試験区	新梢長 (cm)	収量 (kg 樹冠 m <sup>-2</sup> )	果実品質		
			一果重 (g)	硬度 (lbs)	果汁糖度 (Brix%)
堆肥代替区	86.3	3.83	382	4.1	11.6
化学肥料区	88.5	3.67	379	4.0	11.4
慣行区	82.2	3.66	378	4.1	11.3
分散分析 <sup>1)</sup>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

※値は2017~2020年の4年間の平均値

1) n.s. : 5%水準で有意差なし

### 3. 2 N<sub>2</sub>O排出量

2017~2020年における各区のN<sub>2</sub>Oフラックスは、施肥のタイミングでフラックスのピークが現れたが、その大きさは降雨と重なると大きくなる傾向があった(図4)。基肥直後のN<sub>2</sub>Oフラックスのピークは慣行区で大きく、堆肥代替区と化学肥料区はそれより小さい傾向であったが、2020年については慣行区と化学肥料区で同等となった。その他の時期については、慣行区でやや大きい傾向があるものの、施肥法の違いによらずN<sub>2</sub>Oフラックスに大きな差はみられなかった。

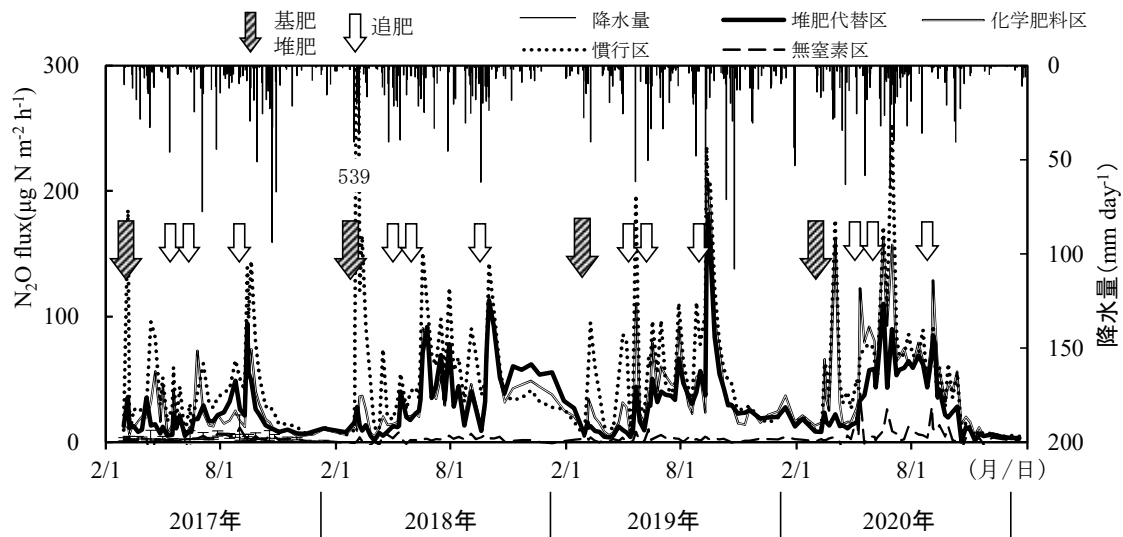


図4 堆肥および基肥の施用方法の違いがN<sub>2</sub>Oフラックスに及ぼす影響および降水量の推移

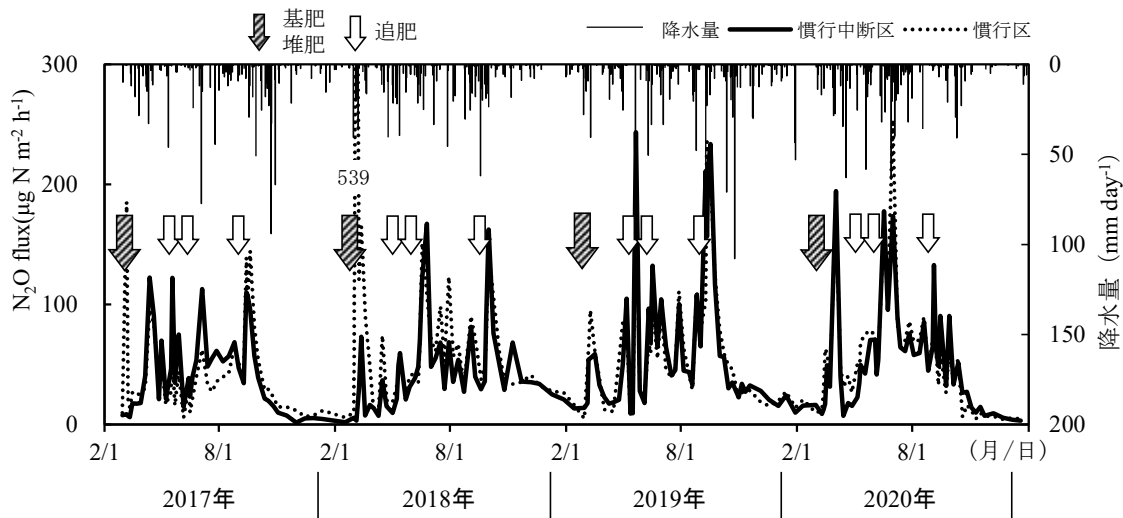


図5 堆肥の中断がN<sub>2</sub>Oフラックスに及ぼす影響および降水量の推移

同時期における慣行区と慣行中断区のN<sub>2</sub>Oフラックスの推移を図5に示す。2017年と2018年の基肥時に慣行中断区で慣行区よりピークが小さくなったが、2019年と2020年の基肥時における両区の差は小さかった。その他の時期については、両区のフラックスは概ね同等で推移した。

年間のN<sub>2</sub>O排出量は、堆肥代替区1.43～3.34kg N ha<sup>-1</sup>、化学肥料区1.56～3.91kg N ha<sup>-1</sup>、慣行区2.95～5.00kg N ha<sup>-1</sup>となった（表4）。年次による差は、2017年が他の年に比べて有意に小さく、施肥法による差は、慣行区と他の2区との間で有意であり、慣行区は化学肥料区、堆肥代替区よりも大きかった。

N<sub>2</sub>O排出係数は、堆肥代替区0.62～1.58%、化学肥料区0.68～1.75%、慣行区0.55～0.96%となった。年次による差は、排出量と同様2017年が他の年に比べて有意に小さかった。一方、施肥法による差は排出量と異なり、化学肥料区と堆肥代替区で慣行区に比べて有意に大きくなった。

表4 堆肥および基肥の施用方法の違いがN<sub>2</sub>O排出量および排出係数に及ぼす影響

年次	試験区	施肥窒素量		N <sub>2</sub> O排出量 <sup>1)</sup> (kg N ha <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O排出係数 <sup>2)</sup> (%)
		化学肥料	堆肥		
2017	堆肥代替区	100	100	1.43±0.34	0.62
	化学肥料区	200	0	1.56±0.13	0.68
	慣行区	200	300	2.95±0.49	0.55
	無窒素区	0	0	0.20±0.04	-
2018	堆肥代替区	100	100	3.34±0.99	1.58
	化学肥料区	200	0	3.12±0.09	1.47
	慣行区	200	300	5.00±0.34	0.96
	無窒素区	0	0	0.18±0.01	-
2019	堆肥代替区	100	100	2.61±0.29	1.20
	化学肥料区	200	0	3.19±0.36	1.49
	慣行区	200	300	4.41±0.71	0.84
	無窒素区	0	0	0.21±0.02	-
2020	堆肥代替区	100	100	2.49±0.55	1.04
	化学肥料区	200	0	3.91±1.00	1.75
	慣行区	200	300	4.18±1.02	0.75
	無窒素区	0	0	0.41±0.19	-
分散分析	年次			** <sup>3)</sup>	**
		2017		b <sup>4)</sup>	b
		2018		a	a
		2019		a	a
		2020		a	a
	施肥法			**	**
		堆肥代替区		b	a
		化学肥料区		b	a
		慣行区		a	b
	交互作用			n.s.	n.s.

1) ±は標準偏差を示す

2) 排出係数 = (各試験区N<sub>2</sub>O排出量 - 無窒素区排出量) / 施肥窒素量 × 100)

3) \*\*は1%水準で有意差あり

4) 各年次、施肥法における異符号間は1%水準で有意差あり (Tukey法による多重比較)

また、当年堆肥由来のN<sub>2</sub>O排出量および排出係数は、それぞれ-0.17～1.40kg N ha<sup>-1</sup>および-0.06～0.47%の範囲であり、4年間の平均値は0.37kg N ha<sup>-1</sup>および0.12%であり、2017～2019年の平均値は0.40kg N ha<sup>-1</sup>および0.13%であった（表5）。地力（連用効果）由来のN<sub>2</sub>O排出量は、-0.03～1.43kg N ha<sup>-1</sup>の範囲であり、4年間の平均値は0.82kg N ha<sup>-1</sup>、2017～2019年の平均値は1.10kg N ha<sup>-1</sup>あった。4年間および2017-2019年の平均でみると、N<sub>2</sub>O排出量は当年堆肥由来よりも地力由来の方が多くなる傾向がみられた。

さらに、2012～2020年までの年次別の積算N<sub>2</sub>O排出量については、慣行中断区を除きいずれの年も一貫して慣行区が最も多くなった（図6）。堆肥代替区と化学肥料区の排出量は、2020年を除いてほぼ同等であり、慣行区と比較して少なく推移した。2018～2020年の3年間は、堆肥代替区と化学肥料区の排出量が

2016年を除いた2012～2017年と比較して多い傾向であった。

表5 当年堆肥由来N<sub>2</sub>O排出量・排出係数および地力由来N<sub>2</sub>O排出量

年次	当年堆肥由来		地力(連用効果)由来
	N <sub>2</sub> O排出量 (kg N ha <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O排出係数 <sup>1)</sup> (%)	N <sub>2</sub> O排出量 (kg N ha <sup>-1</sup> )
2017	-0.04	-0.01	1.43
2018	1.40	0.47	0.47
2019	-0.17	-0.06	1.39
2020	0.30	0.10	-0.03
4年間平均	0.37	0.12	0.82
2017-2019平均 <sup>2)</sup>	0.40	0.13	1.10

1) 排出係数=N<sub>2</sub>O排出量/慣行区における堆肥の施肥窒素量×100

2) 2020年は、2017年に続いて2回目の中断であるため、他の3年のみでも算出した

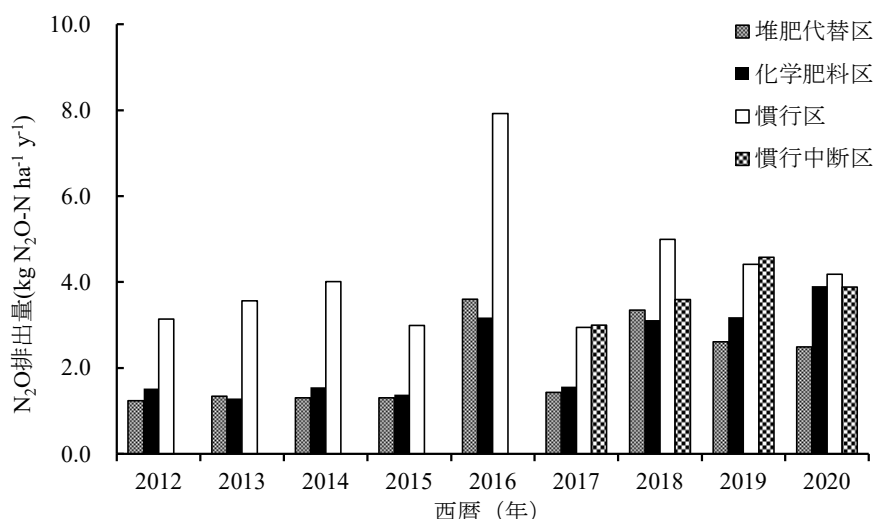


図6 堆肥および基肥の施用方法の違いが年次別積算N<sub>2</sub>O排出量に及ぼす影響

### 3. 3 土壌の無機態窒素含量の推移

2017～2020年における各区の土壌中アンモニア態窒素含量は、図3に示したN<sub>2</sub>Oフラックスの推移と同様、施肥時にピークが現れる傾向がみられた(図7)。特に基肥直後のピークが大きかったが、堆肥代替区では、慣行区および化学肥料区と比較してピークが小さかった。2020年の夏には、いずれの試験区でも大きなピークが認められた。基肥以外の時期については、各区概ね同等で推移した。

同時期における各区の土壌中硝酸態窒素含量は、アンモニア態窒素と同様、施肥時にピークが現れる傾向があったが、含量は全体的にアンモニア態窒素よりも小さかった(図8)。硝酸態窒素においても、堆肥代替区で慣行区および化学肥料区と比較して基肥直後のピークが小さかった。

### 3. 4 土壌の全炭素含量の推移

2004～2020年における土壌炭素含量は、慣行区において最も年次変動が大きかったが、線形近似させた直線の傾きから求めた年変化量は0.0033% y<sup>-1</sup>(回帰は5%水準で有意差なし)であり、ほぼ横ばいで推移した(図9)。化学肥料区の年変化量は-0.0308% y<sup>-1</sup>(回帰は1%水準で有意)、堆肥代替区は-0.0301% y<sup>-1</sup>(回帰は1%水準で有意)であり、ともに同程度の減少傾向を示した。

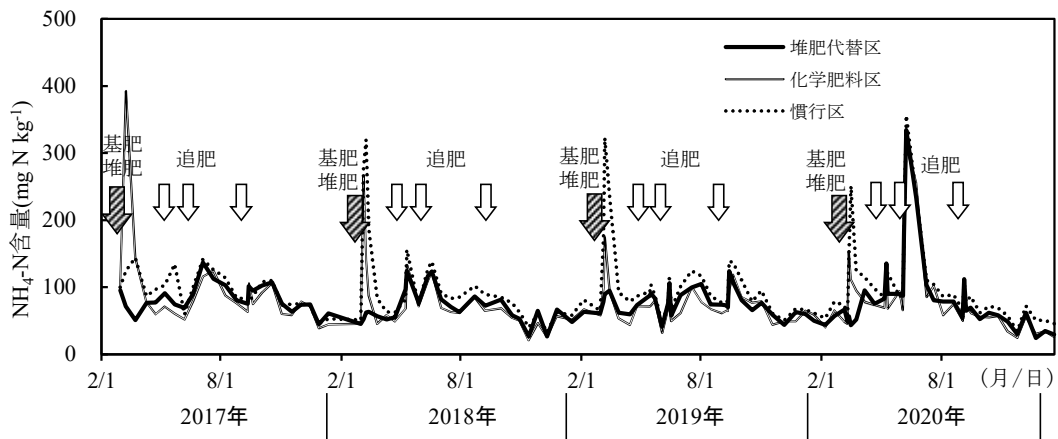


図7 堆肥および基肥の施用方法の違いが土壌中のアンモニア態窒素含量に及ぼす影響

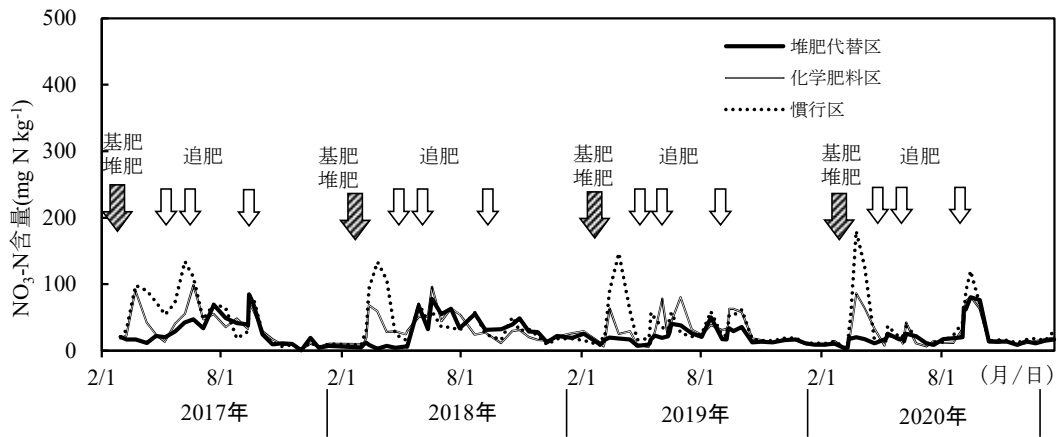


図8 堆肥および基肥の施用方法の違いが土壌中の硝酸態窒素含量に及ぼす影響

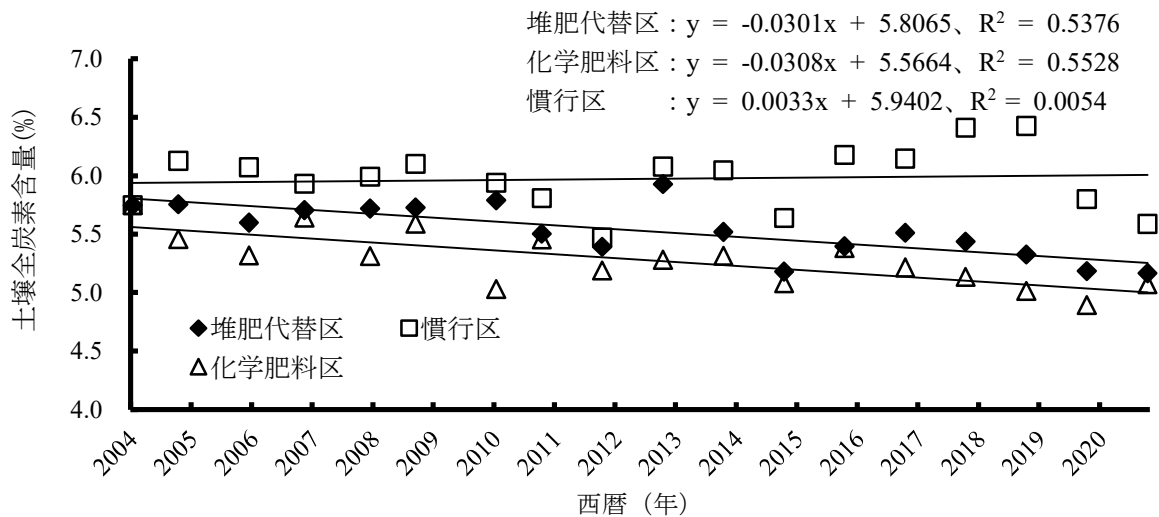


図9 堆肥および基肥の施用方法の違いが土壌全炭素含量に及ぼす影響

#### 4. 考察

##### 4. 1 生育、収量、果実品質

生育・収量・果実品質は、本研究の試験期間2017～2020年で施肥法の違いによる有意な差は認められな



かった。2004～2016年までに本研究と同様の設計で行った調査においても試験区間で差が認められなかった（藤田ら，2014；郷内ら，2019）。このことから、黒ボク土ナシ園において、基肥を堆肥で代替し堆肥中の窒素成分を含む総窒素量を適正化した施肥法は、長期間にわたり生育・収量・果実品質が維持できると考えられる。また、地上部の窒素吸収量は、これまでの期間（2004～2016年）に処理区間に差がない（藤田ら，2014）ことが明らかになっている。生育や収量に差が認められなかった本試験期間において、同様に地上部窒素吸収量は処理区間に差がなかったと考えられる。

#### 4. 2 2017～2020年におけるN<sub>2</sub>O排出の傾向

2017～2020年におけるN<sub>2</sub>O排出量は、2012～2016年までの結果と比較して慣行区と堆肥代替区および化学肥料区との差が小さく、排出係数は慣行区よりも他の2区で有意に大きくなった。この結果は、藤田ら（2015b）および郷内ら（2019）が報告している、排出係数は施肥法の違いにより差はないとする2016年までの結果とはやや異なる。

その要因を解析するため、これまでの試験（藤田ら，2015b；郷内ら，2019）において慣行区と他の2区に間に差が大きかった基肥直後のN<sub>2</sub>Oフラックスについて、2012～2016年の期間を含めて慣行区と化学肥料区の降水量との比較を行った（表6）。その結果、いずれの年も基肥後最初に降雨のあった日またはその翌日に慣行区と化学肥料区の差が大きくなるピークがみられた。基肥によると考えられる慣行区の最も大きなピークは、2012～2016年は基肥施用8～30日後（2015年はそれ以降）に認められたが、2017～2019年は基肥施用7日後までに認められた。2020年は、基肥施用による慣行区と化学肥料区のフラックスの差がほとんどみられなかったが、基肥後最初に降雨のあった日またはその翌日に調査を実施しなかったため、慣行区の基肥直後のピークを逃した可能性が高い。そのため、後述する当年堆肥由来および地力（連用効果）由来N<sub>2</sub>O排出量の評価は、2020年を除いて考察する必要がある。

また、2012～2016年は、追肥後を中心とした基肥直後以外の時期においても、慣行区で他の2区よりもN<sub>2</sub>Oフラックスが高く推移する傾向がみられたが（藤田ら，2015b；郷内ら，2019）、2017～2020年は差が小さいまたは同等となる傾向であった。郷内ら（2019）は、裸地栽培から草生栽培に切り替えた後のN<sub>2</sub>O排出量の増加について、より嫌氣的になり、脱窒が増加した可能性があると考えしている。本試験期間では4年間とも草生栽培で管理しており、裸地栽培期間を含んだ2016年までの期間と比較して、脱窒由来のN<sub>2</sub>O排出量が増加しやすい条件であった可能性がある。さらに、2012～2020年までの月別降水量を比較してみると（表7）、試験区間の排出係数の傾向が2016年までのものと近かった2017年を除き、2018～2020年は、3～7月までの期間に安定して多めの降水量があった。

したがって、安定した降水量と草生栽培による嫌氣的になりやすい状態が重なり、試験区を問わずN<sub>2</sub>Oが発生しやすく、慣行区と他の2区のN<sub>2</sub>O排出量の差が小さくなったため、慣行区で他の2区よりも有意に排出係数が低くなったと考えられる。

#### 4. 3 土壌の全炭素含量

本研究における土壌炭素について、藤田ら（2015a）が試験開始時の2004～2013年までの10年間について、堆肥代替区ではほぼ横ばいで、化学肥料区ではやや減少傾向、慣行区ではほぼ横ばいで推移したと報告している。その後、郷内ら（2019）が2016年までの結果を加えた13年間について、堆肥代替区は化学肥料区と同等に減少傾向、慣行区ではほぼ横ばいで推移したと報告している。2017～2020年の結果を加え、17年間の推移をみた本研究においても、慣行区はほぼ横ばい、堆肥代替区と化学肥料区は同等に減少傾向となり、郷内らと同様の推移を示した。郷内ら（2019）は、慣行区において、炭素施用量と土壌に残る炭素量（慣行区と化学肥料区の炭素変化量の差）の関係から投入した堆肥由来炭素の約92%が分解されると考察している。同様の比較を堆肥代替区で実施すると、17年間の調査において堆肥代替区と化学肥料区の土壌炭素の年変化量がほぼ同じであることから、長期的にみると、試験区を問わず投入した堆肥由来炭素の多くが分解されると考えられる。

表6 慣行区および化学肥料区における基肥施用後のN<sub>2</sub>Oフラックスと降水量の関係

年次	降水量(mm)およびN <sub>2</sub> Oフラックス ( $\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	基肥施用日との日数差									
		前日	当日	翌日	2日後	3日後	4日後	5日後	6日後	7日後	8~30日後
2012	降水量	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	12.5	0.0	2.0	38.0	93.0 (積算値)
	慣行区フラックス	-	-	-	-	139.2	-	-	72.0	-	145.5 (最大値)
	化学肥料区フラックス	-	-	-	-	5.0	-	-	9.9	-	38.1 (最大値)
	慣行-化学肥料	-	-	-	-	134.2	-	-	62.1	-	107.4
2013	降水量	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0 (積算値)
	慣行区フラックス	-	56.2	-	-	-	-	-	-	-	297.5 (最大値)
	化学肥料区フラックス	-	3.9	-	-	-	-	-	-	-	64.8 (最大値)
	慣行-化学肥料	-	52.3	-	-	-	-	-	-	-	232.7
2014	降水量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5 (積算値)
	慣行区フラックス	1.7	-	4.6	-	-	3.6	-	-	-	279.4 (最大値)
	化学肥料区フラックス	2.0	-	1.1	-	-	2.0	-	-	-	19.7 (最大値)
	慣行-化学肥料	-0.3	-	3.5	-	-	1.6	-	-	-	259.6
2015 <sup>1)</sup>	降水量	41.0	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.5 (積算値)
	慣行区フラックス	-	-	-	-	6.0	-	-	-	9.7	54.0 (最大値)
	化学肥料区フラックス	-	-	-	-	1.4	-	-	-	4.5	11.4 (最大値)
	慣行-化学肥料	-	-	-	-	4.5	-	-	-	5.2	42.6
2016	降水量	0.1	0.0	1.9	24.0	0.1	0.0	0.0	2.2	0.0	48.7 (積算値)
	慣行区フラックス	18.8	-	21.1	-	61.6	-	-	162.4	-	554.8 (最大値)
	化学肥料区フラックス	11.3	-	10.7	-	16.8	-	-	36.6	-	76.9 (最大値)
	慣行-化学肥料	7.5	-	10.4	-	44.7	-	-	125.8	-	477.8
2017	降水量	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	76.5 (積算値)
	慣行区フラックス	-	-	185.1	-	18.4	-	-	14.3	-	30.2 (最大値)
	化学肥料区フラックス	-	-	12.4	-	6.0	-	-	10.8	-	20.6 (最大値)
	慣行-化学肥料	-	-	172.7	-	12.4	-	-	3.4	-	9.6
2018	降水量	0.0	20.5	2.5	0.0	17.0	36.5	2.0	0.0	0.0	48.5 (積算値)
	慣行区フラックス	-	-	538.8	-	-	-	121.0	-	-	164.5 (最大値)
	化学肥料区フラックス	-	-	9.2	-	-	-	36.4	-	-	36.9 (最大値)
	慣行-化学肥料	-	-	529.6	-	-	-	84.6	-	-	127.7
2019	降水量	15.0	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	0.0	40.5	0.0	13.0 (積算値)
	慣行区フラックス	-	-	46.7	-	64.2	-	-	95.1	-	59.8 (最大値)
	化学肥料区フラックス	-	-	12.2	-	34.6	-	-	29.9	-	19.8 (最大値)
	慣行-化学肥料	-	-	34.4	-	34.4	-	-	65.2	-	40.0
2020	降水量	0.0	0.0	0.0	13.5	0.5	0.0	0.0	0.0	2.0	92.0 (積算値)
	慣行区フラックス	12.0	-	25.1	-	-	63.0	-	-	58.9	177.2 (最大値)
	化学肥料区フラックス	15.3	-	14.1	-	-	66.2	-	-	34.2	161.8 (最大値)
	慣行-化学肥料	-3.4	-	11.0	-	-	-3.2	-	-	24.7	15.3

1) 2015年は、他の年と異なり、基肥30日後よりも後のタイミングで基肥によると考えられる大きなピークが現れた(郷内ら、2019)

表7 2012~2020年における月別降水量

月	月別降水量 (mm) <sup>1)</sup>									
	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	
1	35	55	26	91	84	21	37	7	124	
2	74	36	172	60	31	28	10	55	32	
3	154	51	83	97	65	81	168	85	101	
4	109	133	129	85	125	103	87	78	169	
5	313	85	124	84	193	69	168	97	151	
6	178	99	291	163	154	40	102	150	192	
7	126	72	157	170	71	178	104	98	208	
8	56	64	85	87	325	82	107	119	42	
9	155	131	45	278	266	142	255	141	55	
10	136	333	284	39	127	343	51	291	142	
11	58	16	73	151	104	43	38	105	13	
12	58	32	64	38	68	18	25	54	9	
合計	1,451	1,104	1,530	1,341	1,613	1,146	1,150	1,277	1,234	

1) 2012~2015年は美野里のアメダス観測データ、2016~2020年は園芸研究所内の気象観測データを使用した

#### 4. 4 堆肥代替施肥の利点

堆肥代替施肥により、慣行施肥と比較して窒素負荷を中心とした環境負荷の低減効果が認められることは、すでに明らかになっている（藤田ら, 2014・2015b ; 郷内ら, 2019）。また郷内ら（2019）は、堆肥代替施肥と大気圏および水圏への環境負荷の総合評価が同等となる化学肥料のみの施肥との比較においても、環境中にすでに放出された反応性窒素をいかに効率よく利用するかが重要である（江口ら, 2018）という視点から、堆肥という既に環境中に放出された反応性窒素を使用することで、地域における反応性窒素のプールを増大させないメリットがあると考察している。本研究では、それらに加え、堆肥代替区は同じ施肥窒素量の化学肥料区と比較しても施肥時の土壤中の無機態窒素の急激な増加がないことが示唆されたことから、3施肥法のなかで、堆肥代替施肥法が最も環境負荷に配慮した施肥法としてナシの安定生産に有効と考えられる。

#### 4. 5 当年堆肥由来および地力（連用効果）由来 $N_2O$ 排出量の評価

当年堆肥由来の $N_2O$ 排出量および排出係数は、2017～2020年の4年間で年次変動が大きかったが、2度堆肥を中断している2020年を除いた3年間の排出係数の平均値は0.13%であり、同年の化学肥料区の排出係数の平均値1.39%と比較して大幅に低かった。藤田ら（2014）は、本研究で毎年使用している豚糞堆肥の埋設試験において、堆肥の窒素残存率から投入後年数別の窒素放出率を推定している。それによれば、施用当年に堆肥中の約56%の窒素が放出するとされており、半分以上が施用当年に放出されるものの、一定量の窒素は翌年以降に残存すると仮定できる。一方、化学肥料は無機態窒素であるため、化学肥料由来の $N_2O$ は施用当年にほとんど排出されると推察される。それらのことから、施用当年でみた場合、化学肥料よりも堆肥の方が $N_2O$ の排出が少なくなると考えられる。

地力（連用効果）由来の $N_2O$ 排出量は、当年堆肥由来と同じく年次変動が大きかったが、3年間の平均で $1.10\text{kg N ha}^{-1}$ であった。地力由来の $N_2O$ については、排出された $N_2O$ に対する窒素施用量が不明なため、排出係数は算出できないが、化学肥料区と比較するため、先の藤田ら（2014）の窒素放出率の推定を利用して排出係数を試算した。つまり、1年前に施用した堆肥からは、投入2年目の窒素放出率（12.7%）、2年前に施用した堆肥からは、投入3年目の窒素放出率（7.9%）と算出していき、堆肥の施用を開始した2004までの毎年の値を列挙し、その値それぞれに対し各年の堆肥由来の投入窒素量 $300\text{kg ha}^{-1}$ をかけて積算したものを、地力由来の窒素施用量として計算した。3年間の中間年である2018年を基準とすれば、地力由来の窒素施用量は約 $113.7\text{kg ha}^{-1}$ と計算され、排出係数は $1.10/113.7 \times 100 \approx 0.97\%$ と仮定できる。同年（2017～2019年）の化学肥料区の排出係数の平均値1.21%と比較してやや低いが、当年堆肥由来の排出係数0.13%を加えると1.10%であり、化学肥料区比で約91%であった。この結果は、土壤炭素について先に考察した、長期的には慣行区でも施用した堆肥の90%近くが分解され、堆肥代替区ではそのほとんどが分解されるという推察と大きく矛盾しない。さらに、堆肥代替区では、 $N_2O$ 排出量が長期にわたり化学肥料区と同等であることから、当年堆肥由来と地力堆肥由来の合計 $N_2O$ は、化学肥料由来の $N_2O$ と同等の排出量になっていると示唆される。

これらのことから、堆肥は、化学肥料と比較して施用当年の $N_2O$ 排出量を低減させるが、長期連用した場合は地力由来の排出によって化学肥料の $N_2O$ 排出量との差が小さくなり、その傾向は堆肥の施用量が少ないほど強くなると考えられる。

#### 4. 4 おわりに

日本国温室効果ガスインベントリ報告書（地球環境研究センター・国立環境研究所, 2021）によると、「その他の作物」において無機質窒素肥料と有機質窒素肥料の排出係数は同じ（0.62%）として $N_2O$ 排出量の算出に使用されている。本研究の当年堆肥由来および地力由来の $N_2O$ 排出量・排出係数の結果は、具体的な数値変更等の材料となるには至らないものの、有機質窒素肥料と無機質窒素肥料の排出係数を再検討する際の1根拠となりうると考えられる。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門の須

藤重人博士、秋山博子博士には一酸化二窒素の測定に係るご助言と分析機器の使用についてご配慮いただきました。また、茨城県農業総合センター園芸研究所の鶴谷陽子様には試料分析にご尽力いただきました。ここに記して深謝申し上げます。

## 付記

本研究の一部は、農林水産省の「農地土壌炭素貯留等基礎調査事業（農地管理技術検証）」により実施した。

## 引用文献

- 秋山博子・八木一行・須藤重人・西村誠一（2004）農耕地への有機物施用は亜酸化窒素の主要な排出源のひとつである。平成15年度農業環境研究成果情報。  
[http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/sinfo/result/result20/result20\\_24.html](http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/sinfo/result/result20/result20_24.html)（2021年12月17日アクセス）。  
地球環境研究センター・国立環境研究所（2021）日本国温室効果ガスインベントリ報告書2021. pp. 5-48.
- 江口定夫・柴田英明・種田あずさ・新藤純子・松本成夫・森 昭憲・中島泰弘・朝田 景・志村もと子・林 健太郎・中辻敏朗（2018）食糧生産～消費過程における窒素利用効率と環境への窒素負荷－消費者影響の重要性と活用方向－. 土肥誌89：249-259.
- 藤田 裕・清水 明・江口定夫・板橋 直・折本善之・飯村 強（2014）黒ボク土ナシ園における豚糞堆肥の窒素肥効を考慮した施肥法の窒素収支改善効果. 土肥誌85：175-184.
- 藤田 裕・杉浦裕義・飯村 強（2015a）黒ボク土ナシ園における豚糞堆肥連用が土壌炭素含量と二酸化炭素発生に及ぼす影響. 土肥誌86：29-32.
- 藤田 裕・佐野智人・大浦典子・須藤重人・飯村 強（2015b）豚糞堆肥連用黒ボク土ナシ園における一酸化二窒素発生量の評価とこれに影響する要因の解析. 土肥誌86：109-113.
- 郷内 武・藤田 裕・佐野智人・大浦典子・須藤重人・朝田 景・江口定夫（2019）黒ボク土ナシ園における豚糞堆肥を活用した代替施肥による大気圏および水圏への窒素負荷軽減効果. 土肥誌90：363-371.
- Hiraoka K and Umemiya Y（2000）Estimation of nitrogen, phosphorus and potassium in relation to chemical fertilizer application in Japanese orchard fields. JARQ. 34：87-92.
- 茨城県農業総合センター（2016）Ⅱ 栽培基準 1. ナシ. 茨城県果樹栽培基準. pp. 11-49.
- 加治俊幸・勝田雅人・吉田真一（2002）有機物と被覆尿素を組み合わせた茶園の減肥と収量・品質および溶脱窒素濃度. 九州農業研究64：74.
- 嶋田典司（1986）アンモニウム態窒素. 硝酸態窒素. 土壌標準分析・測定法（土壌標準分析・測定委員会編）. 博友社, 東京, pp. 105-118.
- 須藤重人（2012）酸化還元研究の新展開-土壌の酸化還元がもたらす現象を追う-3. ガスクロマトグラフによる農耕地温室効果ガス計測法. 土肥誌70：599-605.
- 植田稔宏（2002）ナシ園土壌の施肥実態調査結果について. 農業茨城54：50-51.
- 八木一行（1997）温室効果ガス発生・呼吸量. 土壌環境分析法（土壌環境分析法編集委員会編）. 博友社, 東京, pp. 129-138.

# **Evaluation of N<sub>2</sub>O Emissions from Compost Applied in the Current Year and Soil Fertility by Continuous and Interruption Application of Swine Manure Compost in Japanese Pear Field**

**Yuji SHIMOKOUBE<sup>1</sup>, Takeru GONAI and Yutaka FUJITA**

## **Summary**

In a pear orchard, we investigated nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions and other environmental parameters using three fertilizer application methods. The methods used were (a) common method; the application of swine manure in addition to standard application of chemical fertilizer, (b) chemical method; only chemical fertilizer, and (c) reduced method; replacing part of standard application of chemical fertilizer with swine manure.

In addition, an interruption of compost application was set up in the common method, and environmental parameters such as nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) were investigated to evaluate N<sub>2</sub>O emissions from compost applied in the current year and from soil fertility (continuous application effect).

The N<sub>2</sub>O emissions and emission factors from compost applied in the current year were -0.17-1.40 kg N ha<sup>-1</sup> and -0.06-0.47%, respectively, which were much lower than those in the chemical fertilizer plots.

N<sub>2</sub>O emissions from soil fertility (continuous application effect) were -0.03-1.43 kg N ha<sup>-1</sup> and tended to be higher than N<sub>2</sub>O emissions from compost applied in the current year.

The sum of emission factors from compost applied in the current year and from soil fertility inferred from the nitrogen release rate of compost was about 91% of that in the chemical fertilizer plots, suggesting that much of the applied compost was decomposed and released as N<sub>2</sub>O emissions from soil fertility in the long term.

These results suggest that compost reduces N<sub>2</sub>O emissions compared to chemical fertilizer in the current year, but the difference between compost and chemical fertilizer becomes smaller after long-term continuous use due to N<sub>2</sub>O emissions from soil fertility.

**Keywords: nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), emission factor, Japanese pear, swine manure compost,  
soil carbon**

---

1 Address: Ibaraki Agricultural Center Horticultural Research Institute, 3165-1 Ago, Kasama, Ibaraki 319-0292, Japan