

徳島農技セ研報 No.1
7～13 2014

化学肥料及び各種堆肥の施用が本県灰色化低地水田土における一酸化二窒素の排出量に及ぼす影響

鈴江康文・黒田康文*

Influence of chemical fertilizer or some kinds of manure compost application on N₂O emissions from Gray lowland soil in Tokushima prefecture

Yasufumi SUZUE and Yasufumi KURODA *

要

約

農業由来の重要な温室効果ガスである一酸化二窒素の本県農用地土壌における排出量を評価するため、灰色化低地水田土における化学肥料及び堆肥由来の排出量を調査した。

一酸化二窒素の排出量は年次及び季節により大きく異なったが、秋作では栽培初期、春作では栽培後期から収穫後に多くみられた。

化学肥料及び堆肥を窒素成分で秋作、春作各 25g-Nm⁻² 投入した場合の年間排出量 (mg-N₂O-Nm⁻²) は化学肥料 505, 豚ふん堆肥 494, 鶏ふん堆肥 331, 牛ふん堆肥 152 であり, 排出係数は化学肥料 0.85%, 豚ふん堆肥 0.79%, 鶏ふん堆肥 0.47%, 牛ふん堆肥 0.17% であった。化学肥料と堆肥間に有意な差はみられなかった。

キーワード：一酸化二窒素, 温室効果ガス, 堆肥, 排出係数

keyword : nitrous oxide, greenhouse gas, manure compost, emission factor

緒 言

一酸化二窒素 (以下, N₂O) は地球温暖化係数 (温暖化効果の二酸化炭素に対する単位重量当たりの比) が約 300 倍 (期間 100 年の場合) という強力な温室効果ガスである。人為起源による N₂O 発生源のうち農業活動は地球全体の約 60% を占める最大の発生源であり, おもに施用された化学肥料や堆きゅう肥などに含まれる窒素が微生物活動により硝化, 脱窒される過程で発生することが明らかとなっている³⁾。

その排出量は肥料の種類によって異なると考えられるが十分な知見が得られておらず, 我が国の日本国温室効果ガスインベントリ報告書における N₂O 排出量の算定には化学肥料と有機質肥料で同じ排出係数 0.62% が使用

されている⁴⁾。

この課題を解消するため, 2010 年～2012 年にかけて独立行政法人農業環境技術研究所と本県を含む 10 県の公設試験場が参画し, 有機質資材施用に伴う一酸化二窒素排出量調査が実施された⁸⁾。この調査では有機質肥料として家畜ふん堆肥を対象とし, 有機質肥料施用区, 化学肥料区, 無施用区の排出量を比較した。本県では灰色化低地水田土におけるこれら肥料由来の N₂O 排出量及び排出係数についていくつかの知見を得たので報告する。

なお, 本研究は農林水産省の農業生産地球温暖化対策事業のうち土壌由来温室効果ガス・土壌炭素調査事業により実施した。

*現 南部総合県民局産業交流部〈阿南庁舎〉

材料および方法

1 調査圃場及び耕種概要

調査は徳島県名西郡石井町の県立農林水産総合技術支援センター内圃場で実施した。土壌タイプは細粒質灰色化低地水田土で、調査前の土壌物理性及び土壌化学性は第1表及び第2表のとおりであった。圃場前歴は2008年以前は作付けなし。2009年は水稲単作。2010年9月に水稲収穫後本試験を開始した。

試験は2010年9月～2011年6月(試験A)及び2011年9月～2012年6月(試験B)の2年間実施し、試験Aでは尿素及び牛ふん堆肥、試験Bでは尿素、豚ふん堆肥及び鶏ふん堆肥からのN₂O排出量を調査した。

両試験とも同一圃場を使用し、前作の影響を低減するため試験Bは試験Aの終了後に湛水(2週間)し、除塩した。

試験A, Bともに秋作ハクサイ、春作ハウレンソウの1年2作体型におけるN₂O排出量を測定した。ハクサイ(品種:黄ごころ85)は128穴セル苗を9月末に定植し、試験Aは1月19日、試験Bは12月19日に収穫した。ハウレンソウ(品種:クローネ)は2月末に播種し、試験Aは5月11日、試験Bは4月24日に収穫した。

2 試験区の構成

試験規模は1区42m²(6m×7m)の3連で行った。試験区の構成を第3表及び第4表に示した。

使用した堆肥の化学性を第5表に示した。分析は鹿児島

第1表 試験開始前土壌の物理性

容積重 g cm ⁻³	三相分布 (pF1.5)			粒径組成				土性	可給態窒素含量 mg kg ⁻¹
	固相 %	液相 %	気相 %	粗砂 %	細砂 %	シルト %	粘土 %		
1.13	40.1	55.1	4.8	4.8	18.2	54.5	22.5	SiCL	14.3

第2表 試験開始前土壌の化学性

pH H ₂ O	EC dS m ⁻¹	全炭素 %	全窒素 %	交換性塩基			可給態リン酸 mg kg ⁻¹
				CaO mg kg ⁻¹	MgO mg kg ⁻¹	K ₂ O mg kg ⁻¹	
7.34	0.16	1.59	0.16	2396	602	75	247

第3表 試験Aの窒素施用量 (g m⁻²)

試験区	秋作 (ハクサイ)			春作 (ハウレンソウ)				合計
	基肥 9/27	追肥① 10/18	追肥② 11/4	基肥 2/28	追肥① 4/14	追肥② 4/25	追肥③ 5/2	
無窒素	-	-	-	-	-	-	-	0
化学肥料	14	7	4	14	4	4	3	50
牛ふん堆肥	25	-	-	25	-	-	-	50

※化学肥料区は尿素を使用した。

リン酸は秋作16g m⁻², 春作13g m⁻², 加里は秋作26g m⁻², 春作20g m⁻²をそれぞれリンスター及び塩化加里で全試験区に施用した。

第4表 試験Bの窒素施用量 (g m⁻²)

試験区	秋作 (ハクサイ)			春作 (ハウレンソウ)				合計
	基肥 9/28	追肥① 10/20	追肥② 11/3	基肥 2/28	追肥① 4/7	追肥② 4/15	追肥③ 4/21	
無窒素	-	-	-	-	-	-	-	0
化学肥料	14	7	4	14	4	4	3	50
鶏ふん堆肥	25	-	-	25	-	-	-	50
豚ふん堆肥	25	-	-	25	-	-	-	50

※化学肥料区は尿素を使用した。

リン酸は秋作16g m⁻², 春作13g m⁻², 加里は秋作26g m⁻², 春作20g m⁻²をそれぞれリンスター及び塩化加里で無窒素区及び化学肥料区に施用した。

第5表 使用堆肥の化学性（新鮮重あたり）

	水分 (%)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	C/N	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	AD可溶窒素 (g kg ⁻¹)
牛ふん堆肥	48.5	18.9	1.22	15.5	662	104	4.8
鶏ふん堆肥	24.1	28.1	2.94	9.6	2632	13	12.0
豚ふん堆肥	26.4	32.2	3.15	10.2	1843	16	17.2

島県農業開発総合センターに依頼した。牛ふん堆肥と鶏ふん堆肥は市販品で牛ふん堆肥はおがくずを副資材として堆積方式により製造されたもの、鶏ふん堆肥はおがくずを副資材として堆積方式により製造されたものに炭化鶏ふんを20%混合したものを使用した。豚ふん堆肥は県畜産研究課で密閉縦型発酵方式により製造されたものを使用した。

3 調査及び分析方法

N₂O 排出量の調査は、作付期間中は1週間に1回、非作付期間は2週間に1回を基本とし、施肥直後や耕耘後など発生が見込まれる時期は1週間に2回行った。ガス採集はクローズドチャンバー法により行った。チャンバーはアクリル製の底面50×50cm、高さ60cmのものを使用した。地面とチャンバーとの隙間をなくすため、チャンバーの底面に合わせたチャンバーベースを秋作ではハクサイ1株、春作ではホウレンソウ20～25株を囲うように埋設した。ガス採集は午前9時から午前11時までの間に行い、チャンバー内の空気を設置後10分間隔で3回アルミバッグに採集した。N₂O濃度はECD検出器付きガスクロマトグラフィー（GC14A、島津製作所製）を用いて測定し、フラックスを算出した。測定期間中のN₂O発生量は台形法にて算出した。

ガス採集時に地温を測定するとともに、深さ5cm付近の土壌を採取し含水比及び無機態窒素量を測定した。体積含水率（WFPS）は試験Aでは携帯型の土壤水分計であるHydrosense（Campbell社製）を用いてガス採集時に測定し、試験BではDecagon社製の土壤水分計（10HS）とデータロガーを用いて連続測定を行った。機器の違いによる測定値の誤差を補正するため、両試験で得られた測定値を採取土壌から得られた含水比と仮比重から算出した体積含水率で補正式を作成し、補正した。

結果

1 試験期間中の環境条件及びN₂Oフラックスの季節変動

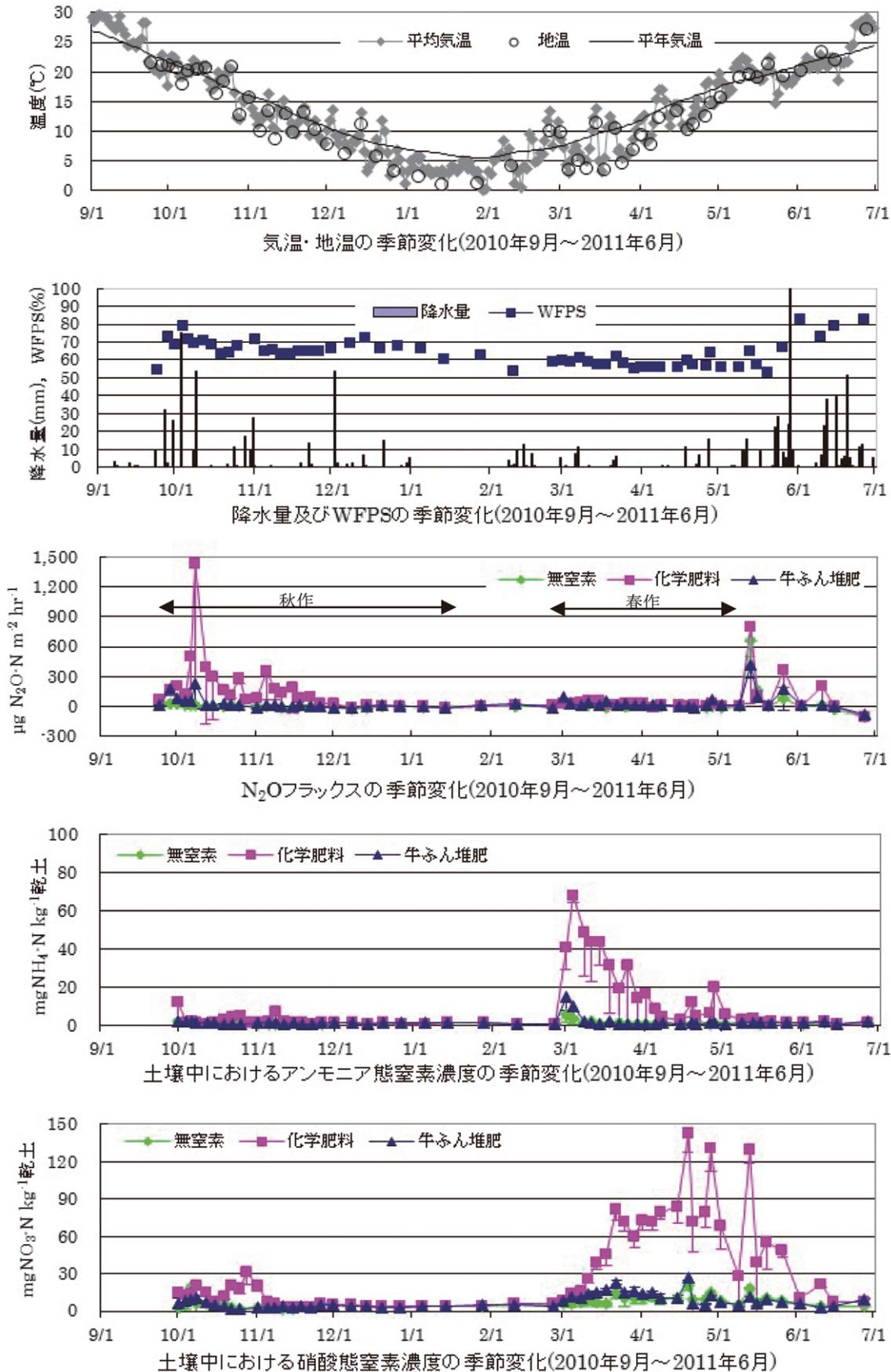
試験A及び試験Bの気温、地温、降水量、WFPS、N₂Oフラックス、アンモニア態窒素（NH₄-N）濃度、硝酸態窒素（NO₃-N）濃度の季節変化を第1図及び第2図に示した。

試験期間中の気象条件をみると試験Aでは11月～3月にかけて平年よりも気温が低い日が多く、試験Bではおおむね平年並みであった。降水量は、秋作では試験Aは栽培開始直後に、試験Bは栽培開始直前に大雨がみられ、いずれの年も栽培開始直後の土壤水分は高かった。試験Bでは栽培初期のWFPS値は50～60%と低かったが、これは畝立直後でありセンサーと土壌の接地面積が少なく正確に測定できなかったためと考えられる。春作では試験Aは栽培期間を通じて降水量が少なく乾燥気味で推移したのに対し、試験Bは10mm前後の雨が7～10日おきにみられ、土壤水分も高い値で推移した。

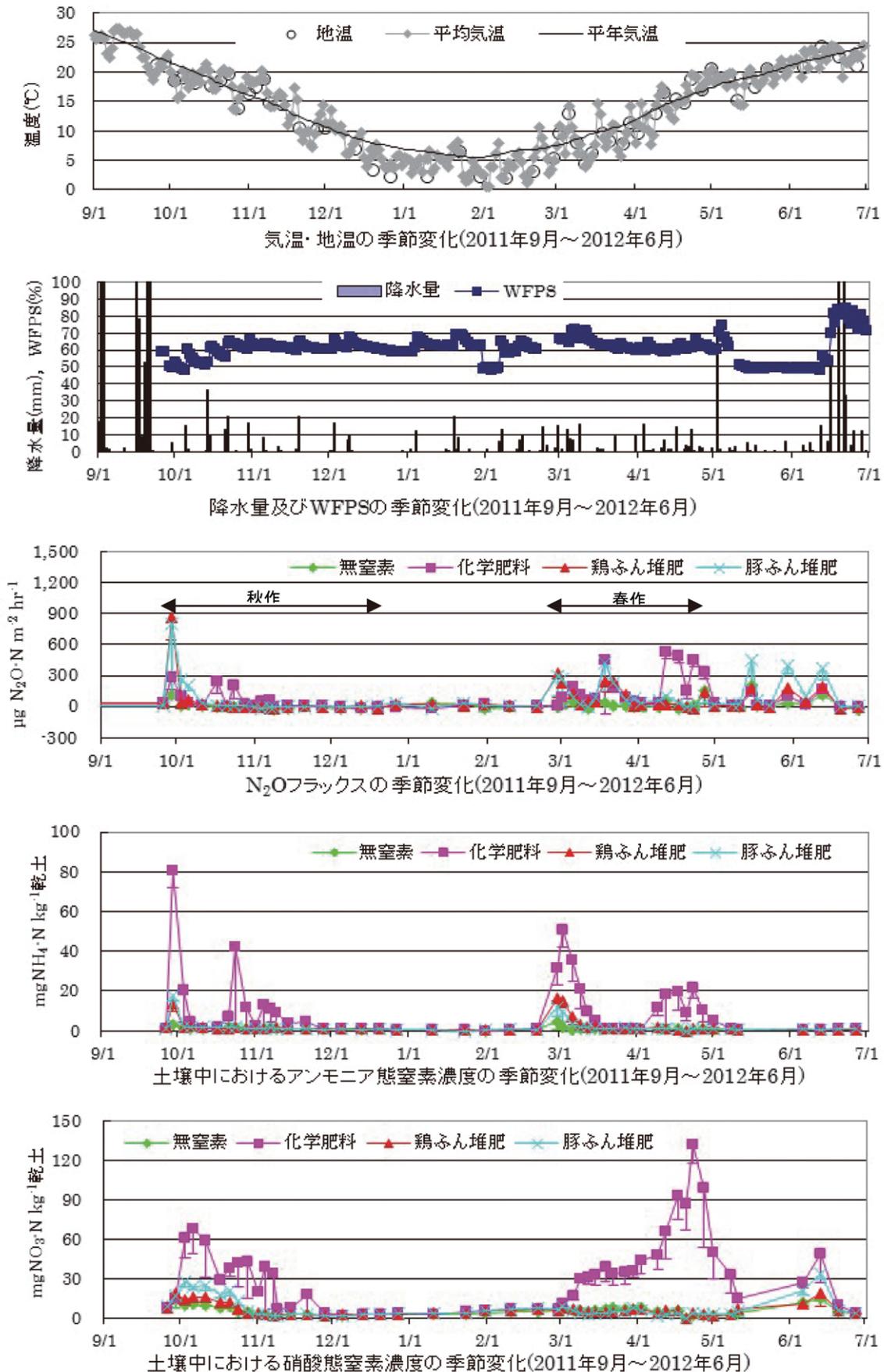
土壌中無機態窒素濃度は、試験A、試験Bともに秋作では数日で硝化されたのに対し、春作では1ヶ月以上かかった。春作では生成されたNO₃-Nは栽培後期まで徐々に増加し、収穫前に急激に低下した。

化学肥料区のN₂Oフラックスの季節変化をみると、試験Aの秋作では元肥及び追肥直後にフラックスのピークが数回みられた。元肥後のフラックスは特に高く約1500 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹であった。一方、春作では栽培期間中は明確なピークはみられなかった。試験Bでは秋作、春作ともに施肥後にピークが確認されたが、試験Aの秋作でみられた元肥後の高いピークは確認されず、最大のピークは春作の追肥後で533 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹であった。

堆肥は全量元肥時に施用したため、N₂Oフラックスのピークも元肥後に1～数回みられた。ピークの高さは最も高いもので秋作では牛ふん堆肥区が228 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹、鶏ふん堆肥区が861 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹、豚ふん堆肥区が806 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹であった。春作では牛ふん堆肥区が89 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹、鶏ふん堆肥区が317 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹、



第1図 試験 A 期間中の環境条件及び N₂O フラックスの季節変化
注) 図中のエラーバーは標準偏差を示す。



第2図 試験B期間中の環境条件及びN₂Oフラックスの季節変化

注) 図中のエラーバーは標準偏差を示す。

第6表 試験AのN₂O排出量及び排出係数

試験区	秋作(積算期間9/24~2/25, 154日)			春作(積算期間2/25~6/27, 122日)			全期間(積算期間9/24~6/27, 276日)		
	投入N量 (g m ⁻²)	N ₂ O排出量 (mg-N ₂ O-N m ⁻²)	排出係数 (%)	投入N量 (g m ⁻²)	N ₂ O排出量 (mg-N ₂ O-N m ⁻²)	排出係数 (%)	投入N量 (g m ⁻²)	N ₂ O排出量 (mg-N ₂ O-N m ⁻²)	排出係数 (%)
無窒素	0	-7	-	0	73	-	0	66	-
化学肥料	25	377	1.53	25	181	0.43	50	558	0.98
牛ふん堆肥	25	51	0.23	25	101	0.11	50	152	0.17

排出係数 = (各試験区排出量 - 無窒素区排出量) / 投入窒素量 × 100

第7表 試験BのN₂O排出量及び排出係数

試験区	秋作(積算期間9/26~2/21, 148日)			春作(積算期間2/21~6/27, 127日)			全期間(積算期間9/26~6/27, 275日)		
	投入N量 (g m ⁻²)	N ₂ O排出量 (mg-N ₂ O-N m ⁻²)	排出係数 (%)	投入N量 (g m ⁻²)	N ₂ O排出量 (mg-N ₂ O-N m ⁻²)	排出係数 (%)	投入N量 (g m ⁻²)	N ₂ O排出量 (mg-N ₂ O-N m ⁻²)	排出係数 (%)
無窒素	0	18	-	0	81	-	0	98	-
化学肥料	25	89	0.29	25	362	1.13	50	451	0.71
鶏ふん堆肥	25	95	0.31	25	236	0.62	50	331	0.47
豚ふん堆肥	25	129	0.45	25	365	1.14	50	494	0.79

排出係数 = (各試験区排出量 - 無窒素区排出量) / 投入窒素量 × 100

豚ふん堆肥が 420 μg-N₂O-Nm⁻²hr⁻¹ であった。

その他特徴的な現象として、春作では試験A、試験Bともに全試験区において収穫後に3回ピークがみられたが、秋作では確認されなかった。

2 N₂O排出量及び排出係数

試験A及び試験BのN₂O排出量及び排出係数を第6表及び第7表に示した。全期間を通じたN₂O排出量についてみると、試験Aでは排出量の多い順に化学肥料、牛ふん堆肥、無窒素、試験Bでは豚ふん堆肥、化学肥料、鶏ふん堆肥、無窒素であった。しかし、いずれの試験でも化学肥料と各堆肥との間に有意な差はみられなかった。化学肥料区では秋作では試験Aは試験Bの約4倍、春作では試験Aは試験Bの約1/2であり、年次変化がみられた。また、同じ試験区でも秋作と春作で約2~4倍の季節変化がみられた。

N₂O排出係数は大きい順に化学肥料0.85% (試験A、Bの平均)、豚ふん堆肥0.79%、鶏ふん堆肥0.47%、牛ふん堆肥0.17%であったが、排出量と同様に各資材に有意な差はみられなかった。

考 察

N₂O排出量は年次及び季節により大きくばらついた。N₂O排出量に及ぼす要因には肥料の量や種類以外にも土壌水分、土壌温度、土壌pH、土壌容積重などの環境要因が指摘されている⁵⁾。今回みられた年次や季節によ

るばらつきもその時々々の環境要因の違いが硝化、脱窒作用に関与する微生物活動に影響したためと考えられる。

本試験で得られた化学肥料からの排出係数は0.85%であった。この値は、前述した日本独自の排出係数0.62%より高かった。Akiyamaら¹⁾は排水性の悪い土壌からのN₂O排出量は高く、排水性の良い土壌からの排出量は低いことを明らかにしており、排水性の良い土壌では0.32%、排水性の悪い土壌では1.40%であった。本試験の灰色化低地水田土は排水性の悪い土壌に分類されており、そのことが排出係数の高さに影響したと考えられる。

我々が参画した調査における各肥料の排出係数の全期平均値は大きい順に、化学肥料0.89%、鶏ふん堆肥0.88%、豚ふん堆肥0.62%、牛ふん堆肥0.31%であった⁸⁾。牛ふん堆肥は化学肥料に比べて排出係数が小さくなる傾向がみられたが、本試験でも同様の傾向がみられた。また、本試験では鶏ふん堆肥より豚ふん堆肥の排出係数が高かったが、今回使用した密閉縦型発酵方式による豚ふん堆肥は乾燥豚ふんに近く腐熟度が低いものであった。上菌ら⁹⁾は培養試験で、N₂O排出量と資材のAD可溶窒素含量に有意な相関がみられたことを明らかにしている。今回使用した各種堆肥のAD可溶窒素含量は多い順に豚ふん堆肥、鶏ふん堆肥、牛ふん堆肥であり、N₂O排出係数の大きさと傾向が一致していた(第5表、第6表、第7表)。

春作では収穫後にN₂Oの排出がみられた。無窒素区でも発生がみられたことから、その排出源は主に作物残渣からと考えられる。今回の試験では肥料由来のN₂O

排出量を評価するため、試験 A では地上部を持ち出し、試験 B では直根まで持ち出したが、土壌中に残った細根から発生したものと考えられる。作物残渣は日本国温室効果ガスインベントリ報告書⁴⁾においても農用地の土壌からの N₂O 排出源の一項目とされているが、今回の試験でも特に春作においてその重要性が明らかとなった。秋作で作物残渣からの排出がみられなかったのは地温が低かったことが原因と考えられる。

秋作では栽培初期、春作では栽培後期及び収穫後の排出が多く、これらの時期の排出削減対策が重要であるとされる。これらの時期に排出量が多い理由は、各作において比較的気温が高い時期であること、秋作では元肥の施用、春作では追肥の施用及び作物残渣のすき込みにより土壌中窒素濃度が増加することによると考えられる。Akiyama ら²⁾は圃場試験の文献値を収集し、統計解析を行うことにより、慣行肥料に比べて硝化抑制剤入り肥料で 38%、被覆肥料で 35% の平均的削減効果があると評価している。本県でも森本ら⁶⁾が硝化抑制剤入り被覆窒素肥料を用いることで N₂O 排出量を低減できることを確認しており、栽培初期に N₂O の排出が多い秋作では元肥に緩効性肥料を施用するなど急激な窒素の無機化を抑制することが効果的ではないかと考えられる。一方、春作では収穫前の追肥の多用を避けることと収穫残渣の持ち出しが低減に効果的と考えられる。大橋ら⁷⁾は作物残渣をすき込む場合、残渣の種類、すき込む位置、処理方法により N₂O 排出量が大きく異なるとしている。今後、収穫残渣からの排出を低減できる処理方法の開発が期待される。

本県の農用地土壌からの N₂O 排出量の評価の試験は緒についたばかりであり、年次変動や土壌タイプ別の排出量、肥料と堆肥を混用した場合の排出量、排出削減対策、他の温室効果ガスを含めた収支など残された課題は多く、更なる検討が必要である。

摘 要

本県農用地土壌における一酸化二窒素の排出量を評価するため、灰色化低地水田土における化学肥料及び堆肥由来の排出量を調査した。

- 1) 窒素 50g-Nm⁻² を秋作、春作の 2 回に分けて投入した場合の年間排出量 (mg-N₂O-Nm⁻²) は化学肥料 505、豚ふん堆肥 494、鶏ふん堆肥 331、牛ふん堆肥 152 であった。
- 2) 排出係数は化学肥料 0.85%、豚ふん堆肥 0.79%、鶏ふん堆肥 0.47%、牛ふん堆肥 0.17% であった。

- 3) 化学肥料と堆肥間に有意な差はみられなかった。

引用文献

- 1) Akiyama H., X. Yan and K. Yagi (2006) : Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct N₂O emissions from agricultural soils in Japan : Summary of available data. *Soil Science and Plant Nutrition*, 52 : 774 ~ 787
- 2) Akiyama H., X. Yan and K. Yagi (2010) : Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils : meta-analysis. *Globa Change Biol.*, 16 : 1837 ~ 1846
- 3) Ciais P. and C. Sabine (2013) : Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 4) 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス (2014) : 農用地の土壌. 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 独立行政法人国立環境研究所 (茨城) : 6-25 ~ 6-45
- 5) 木村真人 (2004) : 大気窒素の動態と食糧・農業問題. 農業生態系における炭素と窒素の循環, 独立行政法人農業環境技術研究所 (茨城) : 76 ~ 89
- 6) 森本昌子・黒田康文・横田香 (2008) : 硝酸化成抑制剤入り被覆窒素肥料による窒素負荷低減対策. 徳島農研報, (5) : 25 ~ 34
- 7) 大橋優二・佐藤龍夫 (2007) : 秋季の作物残渣のすき込みが畑地からの亜酸化窒素 (N₂O) 発生に及ぼす影響. 北海道立農試集報, 91 : 51 ~ 58
- 8) 須藤重人・大浦典子・佐野智人・仁科一哉 (2015) : 有機質資材施用に伴う一酸化二窒素発生量調査 (平成 22 ~ 24 年度) とりまとめ. 平成 24 年度土壌由来温室効果ガス・土壌炭素調査事業報告書, 温暖化対策土壌機能調査協議会 (東京) : 191 ~ 232
- 9) 上蘭一郎・仁科一哉・大浦典子・古江広治 (2013) : 豚ふん堆肥, 鶏ふん堆肥の酸性アタージュメント可溶性窒素量による一酸化二窒素発生量の評価. *日本土壌肥料学会誌*, 84(2) : 104 ~ 107

