

和歌山県の水田における異なる有機物の施用が温室効果ガス発生に及ぼす影響

林 恭平¹・松下修門²・橋本真穂・林 恭弘

和歌山県農業試験場

Influence of Added Different Organic Matter on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in Wakayama Prefecture.

Kyohei Hayashi¹, Nobuto Matsushita², Maho Hashimoto and Yasuhiro Hayashi

Wakayama Agricultural Experiment Station

緒 言

農耕地に堆肥や緑肥といった有機物をすき込むことは、地力を高め生産力を向上させるだけでなく、土壌への炭素貯留効果が期待できる(白戸ら, 2016)。しかし、水田において新鮮な有機物の施用は、湛水による嫌気条件により温室効果ガスであるメタンの発生を増加させる(八木, 1995)。このように、水田での有機物施用は、炭素貯留効果が認められる一方で、温室効果ガスの排出が懸念される。そこで、温暖な和歌山県の気候や黄色土壌において、有機物施用に伴うメタン及び一酸化二窒素の発生について検討したので報告する。なお、本研究は農林水産省の「農地土壌温室効果ガス排出量算定基礎調査事業」(2013~2015年)で実施した。

材料および方法

1. 試験圃場

試験は、県北部紀ノ川中流の支流である貴志川下流沿岸の台地水田地帯に位置している和歌山県農業試験場の水田圃場で行った(2014年1月~2015年10月)。水田圃場は、階段上の棚田を造成後に表土処理しており、土壌は細粒質台地黄色土・強粘質に分類され、減水深は小さく排水が悪い。試験圃場では過去40年以上水稻を作付けしている。

2. 試験区

水稻作付け前に施用する有機物の違いにより次の4つの試験区を設定した。①搬出区(稲わらを持ち出し、堆肥を施用しない)、②稲わら区(稲わらをすき込み、堆肥を施用しない)、③牛堆肥区(稲わらを持ち出し、堆肥をすき込み)、④稲+牛堆肥区(稲わらと堆肥をすき込み)である。試験区は各区45 m² (4.5 m × 10 m)、反復3とした。稲わらのすき込みは刈り取った稲わらを水田から一旦持ち出し、カッターで10 cm程度にカットし、10 aあたり450 kg散布した。堆肥は牛ふんオガクズ堆肥を10 aあたり1 t施用した。稲わらと堆肥をすき込んだ時期は第1表に示した。

¹現在：和歌山県農林水産部農林水産政策局農業農村整備課

²現在：和歌山県農林大学校

第1表 水田の耕種概要

栽培年	有機物施用	耕起	基肥施用	入水・代掻き	移植	中干し期間	出穂	落水	収穫
2014	1/29	5/9	6/10	6/16	6/18	7/23-7/30	8/20	9/22	10/2
2015	12/9(2014年)	5/1, 5/27	6/18	6/18	6/22	7/19-8/4	8/23	9/24	10/5

3. 栽培概要と収量調査

試験期間中の作付けは水稲単作で、品種は「きぬむすめ」を供試し、栽植密度は18.5株/m²とした。施肥は基肥全量施肥とし、セラコートRワン(N:8.0kg/10a, P₂O₅:8.0kg/10a, K₂O:8.0kg/10a)を施用した。主な耕種概要は第1表に示した。収量は、成熟期に平均的な48株を抜き取り、全重、わら重、精粳重、精玄米重、及び千粒重を調査した。

4. メタン(CH₄)および一酸化二窒素(N₂O)発生量の測定

水田から大気へのメタンおよび一酸化二窒素のガスフラックス(1時間あたり1m²に発生するガス量)はクローズドチャンバー法(八木, 1991)で測定した。測定期間は2014年2月19日から2015年10月28日までとした。調査は原則として午前9時から12時に行った。測定頻度は基本的に週1回で、中干し期間中は3日に1回で調査した。ただし、水稲非作付時で気温が低い12月~3月は2週間に1回の頻度とした。ガスの採取はアクリル製のチャンバー(長さ60cm×幅30cm×高さ50cm)で各試験区中央の水稲4株を覆い、チャンバー設置直後の0分、10分、20分にチャンバー内の気体で25mlのシリンジを共洗い後、チャンバー内の気体を15ml採取し、この15mlを真空にしておいた15mlバイアル瓶に注入した。なお、チャンバー内部には空気攪拌用ファンと圧力調整用のテドラーパックを設置した。チャンバーの高さは水稲の生育に合わせて変更し、草丈が50cmを超える頃に中間台座(高さ50cm)を追加して1mとした。採取した気体は、(独)北海道農業研究センターに送り、ガスクロマトグラフィーでガス濃度を測定した。

5. 圃場における土壌Ehの測定

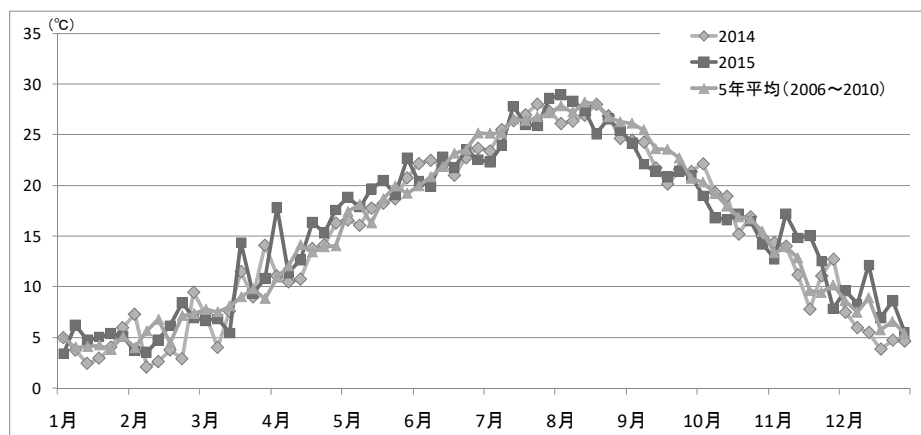
土壌Ehは、ポータブル土壌Eh計(PRN-41, 藤原製作所製)を水田圃場深さ5cmに設置した白金電極に接続し、ガス採取時に測定した。白金電極は各試験区中央の3か所に設置し、反復3とした。測定は水稲作付け期間中に行い、頻度は基本的に週1回であるが、中干期間中は3日に1回測定を行った。

結 果

1. 気象

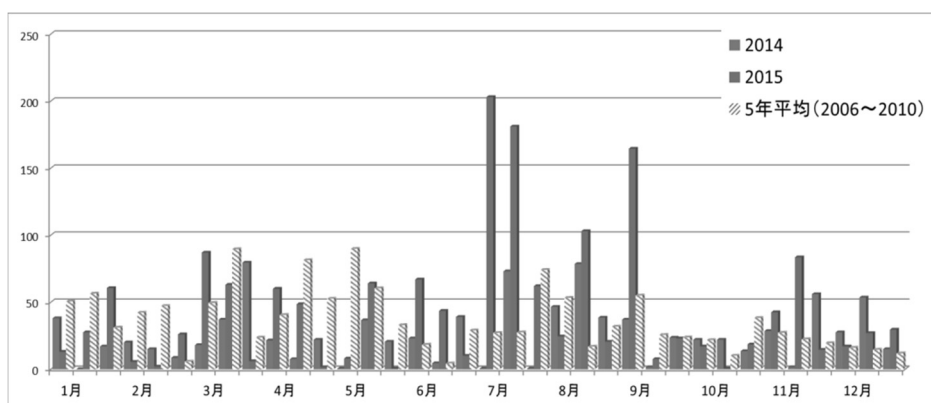
調査を行った2014年の平均気温は15.1℃、2015年は15.8℃で、5年平均15.5℃と差はなかった。また、水稲栽培期間中(6~10月)の平均気温は、2014年が23.0℃、2015年が23.8℃で、5年平均23.5℃と同様に推移した(第1図)。

年間降水量は、2014年が947mmと5年平均より少なく(5年平均比約70%)、2015年が1633mmと5年平均よりも多かった。特に2015年は7月から9月の降水量が多かった(第2図)。



第1図 気温の推移（於：和歌山県農業試験場）

年間平均気温，2014年：15.1℃，2015年：15.8℃，5年平均：15.5℃
農業試験場内の気象観測装置で測定



第2図 降水量の推移（於：和歌山県農業試験場）

年間降水量 2014年：947 mm，2015年：1633 mm，5年平均：1322 mm
農業試験場内の気象観測装置で測定

2. メタンフラックスと排出量

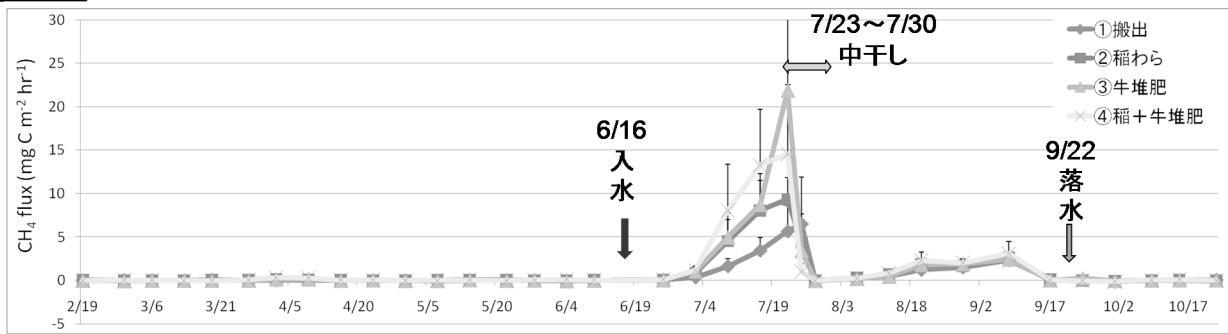
作付け期間における2014年のメタンフラックスは、移植後から増加し、中干し直前に最大のピークとなり、中干し時の落水により0付近まで急激に低下し、中干し後の入水以降は低く推移した。一方、2015年のメタンフラックスは、移植後から増加し、中干し期間中に最大のピークとなり、中干し終了時に0付近まで低下した後、中干し後も増加した。また、非作付け期では、2015年に3月末から4月にかけて増加が認められた（第3図）。

メタンの排出量は作付け期のほうが非作付け期より多く、2014年は④稲＋牛堆肥区 $6.7(\text{gCH}_4/\text{m}^2)$ と最も多かったが、各試験区において有意な差はなかった。2015年は②稲わら区が $17.4(\text{gCH}_4/\text{m}^2)$ で最も大きくなった。各試験区の値は、2014年より2015年で高く、稲わらをすき込んだ②稲わら区と④稲＋牛堆肥区の差は、他の区に比べてより高くなった（第2表）。

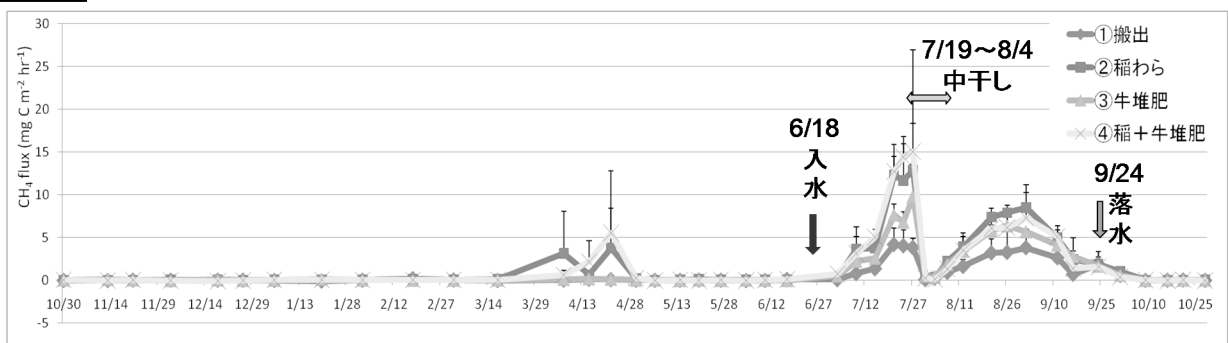
3. 一酸化二窒素フラックスと排出量

一酸化二窒素フラックスは、非作付け期間には耕耘後にピークがみられ、作付け期では中干し終了時にピークがみられた（第4図）。一酸化二窒素の排出量は、作付け期に比べて非作付け期のほうが値は高く、①搬出区が他の区よりも高い傾向であった（第2表）。

2014年

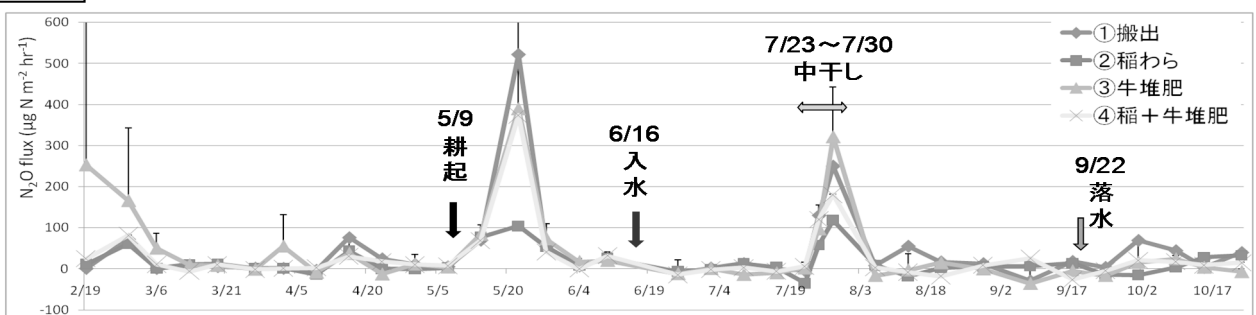


2015年

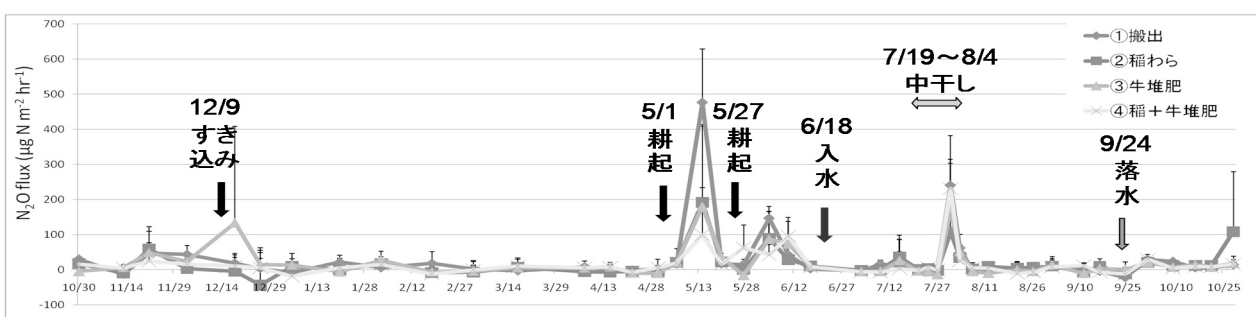


第3図 異なる有機物の施用がメタン (CH₄) フラックスに及ぼす影響
誤差範囲は標準偏差の正值を示す (n=3)

2014年



2015年



第4図 異なる有機物の施用が一酸化二窒素 (N₂O) フラックスに及ぼす影響
誤差範囲は標準偏差の正值を示す (n=3)

第2表 異なる有機物の施用がCH₄とN₂Oの排出量に及ぼす影響

2014年

試験区	CH ₄ 発生量 (g CH ₄ /m ²)			N ₂ O発生量 (g N ₂ O-N / m ²)		
	年間	作付け期	非作付け期	年間	作付け期	非作付け期
①搬出	4.3 ns	4.2 ns	0.0 ns	0.24 ns	0.07 ns	0.17 ns
②稲わら	6.7 ns	6.6 ns	0.0 ns	0.10 ns	0.02 ns	0.08 ns
③牛堆肥	8.7 ns	8.6 ns	0.0 ns	0.22 ns	0.04 ns	0.19 ns
④稲+牛堆肥	9.6 ns	9.4 ns	0.2 ns	0.16 ns	0.04 ns	0.13 ns

年間：2014年2月19日～2014年10月30日（うち作付け期：6月18日～10月2日）

2015年

試験区	CH ₄ 発生量 (g CH ₄ /m ²)			N ₂ O発生量 (g N ₂ O-N / m ²)		
	年間	作付け期	非作付け期	年間	作付け期	非作付け期
①搬出	6.0 b*	6.1 ns	0.1 ns	0.21 ns	0.03 ns	0.18 ns
②稲わら	17.4 a	14.7 ns	2.7 ns	0.11 ns	0.03 ns	0.08 ns
③牛堆肥	11.3 ab	11.0 ns	0.3 ns	0.17 ns	0.02 ns	0.14 ns
④稲+牛堆肥	16.1 a	14.0 ns	2.1 ns	0.11 ns	0.03 ns	0.08 ns

年間：2014年10月30日～2015年10月28日（うち作付け期：6月22日～10月5日）

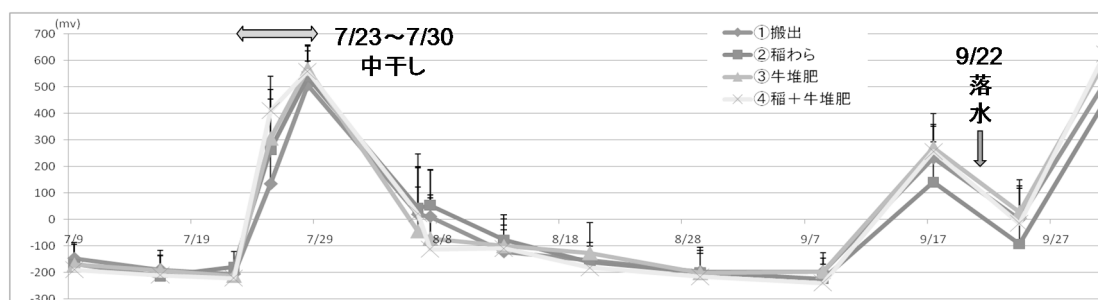
*数値の後に記されているアルファベットはTukey法において5%水準で異符号間に有意差有り、

nsは有意差なし (n=3)。

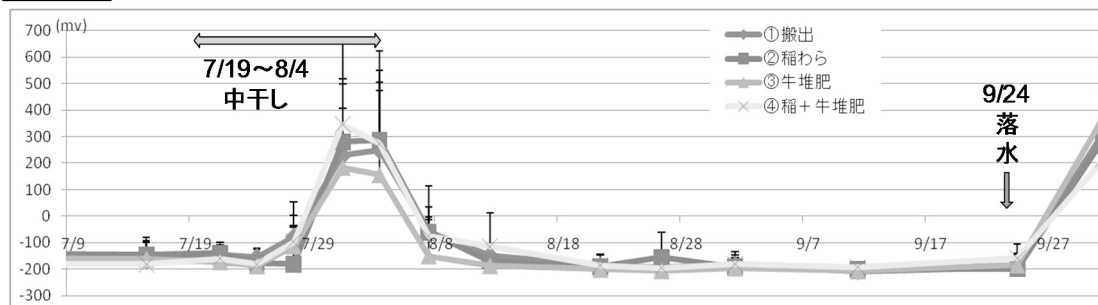
4. 土壌Eh

土壌Ehは入水から中干しまでマイナスの値で推移し、中干し後の落水によりプラスの値となり、中干し終了時に最も高い値となった。中干し時の2014年ピーク値は500mv以上となり、2015年は400以下と、2014年がより高い値となった。中干し後の入水で再びマイナスの値となったが、2014年は9月中旬にプラスの値となった。全体的に、2014年は2015年よりも高い値で推移した（第5図）。

2014年



2015年



第5図 異なる有機物の施用がEh（土壌還元電位）に及ぼす影響

誤差範囲は標準偏差の正值を示す (n=3)

5. 収量調査

精玄米重量は、2014年は②稲わら区が588 kg/10aと最も多く、続いて①搬出区、④稲+牛堆肥区、③牛堆肥区の順であったが、2015年は③牛堆肥区が509 kg/10aと最も多く、続いて④稲+牛堆肥区、②稲わら区、①搬出区の順となったが、各試験区で有意な差はなかった。全ての試験区で、2015年より2014年で収量は多かった（第3表）。

第3表 異なる有機物の施用が水稻の収量に及ぼす影響

2014年

	全重 (kg/10a)	わら重 (kg/10a)	精粳重 (kg/10a)	精玄米 (kg/10a)	千粒重 (g)
①搬出	1377 ns	642 ns	721 ns	588 ns	22.3 ns
②稲わら	1469 ns	698 ns	755 ns	612 ns	22.4 ns
③牛堆肥	1357 ns	656 ns	686 ns	555 ns	22.4 ns
④稲+牛堆肥	1436 ns	707 ns	711 ns	585 ns	22.5 ns

2015年

	全重 (kg/10a)	わら重 (kg/10a)	精粳重 (kg/10a)	精玄米 (kg/10a)	千粒重 (g)
①搬出	1282 ns	689 ns	553 ns	441 ns	23.5 ns
②稲わら	1359 ns	712 ns	599 ns	481 ns	23.4 ns
③牛堆肥	1432 ns	754 ns	637 ns	509 ns	23.3 ns
④稲+牛堆肥	1452 ns	778 ns	629 ns	507 ns	23.6 ns

nsは有意差なし (n=3)

考 察

本調査では、水田から発生する温室効果ガスとしてメタン及び一酸化二窒素を調査した。これらは大気中に含まれる量は微量であるが温室効果への影響は高く、二酸化炭素（CO₂）を1とした場合、メタンはその25倍、一酸化二窒素は298倍にも相当する（IPCC, 2007）。水田では、圃場に水を湛えるため土壌が還元状態となり、絶対嫌気性菌であるメタン生成菌の活動が活発化し、メタンが大量に生成される。メタンと一酸化二窒素の発生量を比較しても、メタンのほうが圧倒的に多く（第2表）、水田から発生する温室効果ガスはメタンが重要視されている（須藤, 2011）。

2014年は降水量が少なく、2015年は降水量が多い年（2014年の1.7倍量）であり、メタンの発生には降水量の影響があったと考えられる。そのため、2015年は湛水していない非作付け期間の3月末から4月にかけてもメタンフラックスの増加が認められた。この時期は降雨で溜まった水が圃場から抜けず土壌が還元状態であったと考えられる。また、通常、中干し落水をすれば、土壌が乾燥しすぐにメタンフラックスは0付近まで急激に低下するが、2015年は7月後半に243mmの降水量があり、中干し落水後も降雨によって水が抜けなかったことから、土壌Ehはすぐには上がらず、メタンフラックスは中干し期間中に最大のピークとなり低下が遅くなった。その一方で、2014年は7月後半の降水量が4mmと少なく、中干し落水後メタンフラックスは速やかに低下した。更に、2014年の中干しは、地表面を固くし圃場内を沈むことなく歩きまわれる程、土壌を乾燥させた。中干し

期間における土壌 Eh の最高値も 2014 年は高く、中干しで土壌がより乾燥したと言える。須藤(2011)は、中干しの延長はメタンの発生抑制に効果的であることを報告しており、土壌の乾燥が進むことで、その後のメタン発生が抑制される。このことから、2014 年は中干し以降にメタン発生が抑制されるほど中干し時に土壌が乾燥したと推察できる。

一酸化二窒素の発生量は、メタンとは対照的に 2014 年に多い傾向であった。一酸化二窒素の発生は主に施肥窒素の硝化や脱窒過程で起こるとされ、施肥直後や降雨などにより土壌水分が高まった際にみられる(楊ら, 1991)。本調査では、作付け期では中干し時に、非作付け期間は圃場を耕起した後に一酸化二窒素フラックスの増加が認められた。一酸化二窒素の発生メカニズムは複雑で、モデル化が今後の研究課題であると言われている(白戸ら, 2016)が、湛水状態の水田よりも畑地で発生が多く(塩野ら, 2014)、土壌の好気的な変化が一酸化二窒素発生を促進していると考えられた。

本調査では、有機物の施用はメタンの発生量を増加させたが、収量については試験区で有意な差として表れなかった。しかし、2015 年には有機物を施用した試験区で収量は多い傾向にあり、これまでの有機物施用に関する研究(浅井ら, 2016)からみても、生産性の面ではやはり有機物を施用するほうが好ましいと考えられる。八木(1995)は、水田において有機物の施用によりメタン発生量は大きく変動し、堆肥は稲わらの施用に比べ、年間のメタン発生量増大効果が極めて小さくなるとしている。本調査において、異なる有機物の施用によるメタンの発生は、2014 年には有意な差として表れなかったが、連年施用した 2015 年には稲わらを施用した区で多かった。一方で、稲わらはケイ酸や加里等の含有率が高く、稲わらの全量還元は無機養分の供給効果があり(林ら, 2002)水稲栽培において全国的にも勧められている。水田への有機物施用を稲わらから堆肥に換えることで温室効果ガスの削減は期待できるが、現状では水田への稲わら施用を前提とした温室効果ガス削減技術が求められる。このことから、温室効果ガスの削減を目的とした水稲栽培を行う場合、中干しで土壌の乾燥を進める水管理が望ましいと考えられた。

摘 要

温暖な和歌山県の気候や黄色土壌において、有機物施用に伴うメタンおよび一酸化二窒素の発生について検討した。

- 1 一年を通して降水量が多かった 2015 年は、非作付け期間にもメタンフラックスの増加が認められた。降水量が少なかった 2014 年は、中干しで土壌の乾燥が進み、中干し以降のメタン発生が抑制された。メタンの発生には、降水量の影響が考えられた。
- 2 一酸化二窒素の発生は、作付け期では中干し時に、非作付け期間は圃場を耕起した後に一酸化二窒素フラックスの増加が認められた。
- 3 本調査では、異なる有機物の施用によるメタンの発生は、2014 年には有意な差として表れなかったが、2015 年には稲わらを施用した区で多かった。

謝 辞

本調査の実施にあたり、遠方より和歌山県農業試験場まで足を運び、調査のご指導・ご助言を頂

いた、北海道農業研究センターの永田修氏、農業環境技術研究所の大浦典子氏及び佐野智人氏、大阪府立環境農林水産総合研究所の佐野修司氏に深く感謝の意を表します。メタンおよび一酸化二窒素発生量の測定では、ガス濃度を測定して頂いた北海道農業研究センターの伊藤由美氏に厚くお礼申し上げます。最後に、水田の圃場管理から調査環境を整え、多大なる協力を頂いた川口博史氏、南泰行氏、北橋秀紀氏、調査をお手伝いいただいた北橋恵美子氏、中西静香氏、西川明日香氏、森谷育世氏に心からお礼申し上げます。

引用文献

- 浅井辰夫, 飛奈宏幸, 前田節子, 西川浩二. 2016. 15年間継続栽培した水稻有機栽培の生育, 収量および食味値. 日作紀. 85, 274-281.
- 塩野宏之, 齋藤寛, 中川文彦, 西村誠一, 熊谷勝巳. 2014. 積雪寒冷地の稲わら春すき込み水田における田畑輪換がメタン・一酸化二窒素発生に及ぼす影響. 土肥誌, 85, 420-430.
- 白戸康人, 麓多門, 片柳薫子, 岸本文紅, 三島慎一郎. 2016. 日本の農地における土壌の炭素貯留と温室効果ガスの緩和策. 農林水産技術 4(2): 4-9.
- 須藤重人. 2011. 環境にやさしい農業—農業と地球の温暖化—. 圃場と土壌, 10&11, 33-37.
- 林恭弘, 森下年起. 2002. 黄色水田における稲わら, ケイカルと熔リンの連用が土壌と水稻の生育に及ぼす影響. 和歌山農林水産技セ研報 2. 99-114.
- 八木一行. 1991. 温室効果ガス発生・九州, 土壌環境分析法編集委員会編土壌環境分析法, p.129-138 博友社, 東京
- 八木一行. 1995. 水田からのメタン発生とその支配要因, p. 93-98. 環境保全型農業大辞典 1 農文協編,
- 楊宗興, 陽捷行. 1991. 土壌生態系のガス代謝と地球環境 3 土壌からの亜酸化窒素発生. 土肥誌, 62, 654-661.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007, Climate Change 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry, Cambridge Univ. Press, New York.