

熊本県の二毛作水田への生産残渣や堆肥などの有機物連用は炭素貯留効果があり，メタン発生との収支計算から温室効果削減すると推定。

The continuous application of organic materials such as crop residues and compost to double-cropping paddy fields in Kumamoto Prefecture has had a carbon sequestration effect. Based on a calculation balanced with methane emissions, this application is shown herein to have reduced greenhouse gas emissions.

田中一成・水上浩之*・柿内俊輔
(生産環境研究所)

Issei TANAKA, Hiroyuki MIZUKAMI and Shunsuke KAKIUCHI
(Agro-environmental Research Institute)

要 約

温室効果ガス排出の削減が地球規模の課題となっており、熊本県でも「みどりの食料システム戦略」に基づき農林水産業のゼロエミッション化が図られている。農業分野で排出する温暖化ガスの約50%はメタンで、その60%は水田から発生しており、水田から発生するメタンの削減が求められている。一方、水田への有機物施用は土壌への炭素貯留効果が期待できる反面、メタン発生量増加が懸念される。そこで、本研究では水稲・小麦二毛作体系において長期の有機物施用による土壌への炭素投入量とメタン発生量の関係を明らかにすることを目的とした。そのため、慣行の化学肥料と刈り株・根を水田に鋤き込んだ化肥区と、慣行に加えて麦稈・稲わら・牛ふん堆肥の3種を組み合わせた有機物施用区を設定し、2010年から10年以上連年施用した。水田からのメタン発生量および土壌からの炭素排出量を求めるために水稲作付期間中のメタン発生速度（メタンフラックス）を測定し期間中の積算メタン発生量を単位面積当たりの炭素量に換算、また土壌炭素含有率・作土深・仮比重の推移を調査し単位面積当たりの土壌炭素貯留量を求めた。また各試験区の連用最終年2023年のメタン発生量を連用開始前の2007年のデータと比較した。一方、連用最終年2023年の有機物連用試験における炭素投入量と、水稲作付期間中のメタン発生量の炭素換算量を比較した。その結果、①有機物連用前と連用終了後で、どの有機物組み合わせ試験区においても有機物を連用することで水稲作付期間中のメタン発生量は増加し、有機物組み合わせ試験区では、約5.9～11.3倍増加率に差がある、②有機物を連用すると土壌炭素貯留量因子内の土壌の炭素含有率が増加し、有機物組み合わせ試験区間では0.1～0.5ポイント程度増加率に差があり土壌への炭素貯留効果が得られる、③水田における有機物連年施用最終年2023年のメタン発生量と有機物施用による土壌への炭素投入量で収支をとると、炭素投入量がメタン発生による炭素排出量を322～565 kg-C/10 aを上回ることが明らかになった。以上の結果から、熊本県の黒ボク土水田における水稲・小麦の二毛作体系において、水田に麦稈・稲わら・牛ふん堆肥の有機物を連年施用した水田から発生するメタン量は増えるが、その量は有機物の鋤き込みによる炭素投入量に比べ少なく、差し引きでは土壌への炭素貯留による温室効果削減の効果に寄与できると考えられた。

キーワード：水田，有機物施用，メタン，土壌炭素貯留

I 緒言

地球温暖化により近年地球全体の平均気温が上昇傾向にあり、その主因として人間の活動による温室効果ガスの排出増加が指摘されている¹⁾。

農林水産分野における排出源別の温室効果ガス排出量

地球温暖化係数*：ある温室効果ガスが一定期間（通常100年）にわたって地球温暖化にどれだけ寄与するかを、二酸化炭素（CO₂）を1とした相対値で表した指標

*現熊本県産業技術センター

を比較すると、燃料燃焼に伴う二酸化炭素の排出（1430万トン）が最も多く、次いで稲作由来のメタン発生（1307万トン）となり、稲作由来のメタン発生は農林水産分野から排出される温室効果ガスの27.3%を占める²⁾。また、メタンの地球温暖化係数*は28で、地温暖化への影響は

二酸化炭素に比べ大きい。このため水田からのメタン発生量を抑制することは農林水産部門における地球温暖化対策において大変重要である。

稲作由来のメタンの発生源である水田へ有機物を投入した場合、湛水による嫌气的条件下で有機物が分解され、多量のメタンガスが生成・放出されることが知られており³⁾、堆肥や稲わら等の有機物を水田へ施用することは土壤肥沃度を高める反面、メタン発生量を増加させる可能性が指摘されている⁴⁾。

熊本県の水稲作は、農業算出額が328億円で耕種部門の14%(2023年)を占める⁵⁾等、重要な品目のひとつである。熊本県における水田の作付け体系は、水稲単作だけでなく二毛作体系も含まれている。裏作として栽培される作物は飼料作やキャベツ・ブロッコリー等の露地野菜作もあるが、麦作の面積が最も多い⁶⁾。

熊本県農業研究センターでは、黒ボク土水田における水稲・小麦の二毛作体系において、有機物施用による土壤への炭素投入量と炭素貯留量の関係を明らかにすることを目的とし、2010年から連用試験を実施している。

熊本県ではこれまで水稲・小麦の二毛作体系において、有機物の長期連用が土壤への炭素貯留および水田からのメタン発生量に及ぼす影響は明らかになっていない。そこで、本研究では、連用試験開始から10年以上が経過した2022年および2023年の水稲作付期間中におけるメタン発生量を測定し、連用開始前である2007年のデータとの比較を行った。併せて、水稲・小麦の収量ならびに土壤中の炭素含有率および炭素貯留量の2010年から2023年の推移を解析した。また、稲わらや麦稈といった新鮮な有機物の施用がメタン発生量に大きく影響していると考え、2023年単年について、土壤へ投入される炭素量を有機物由来、土壤から持ち出される炭素量をメタン発生量として、試験区毎の炭素収支を試算し、水稲・小麦の二毛作体系における有機物の施用が温暖化に与える影響を検討したので報告する。

II 材料および方法

1 試験区の設定

熊本県農業研究センター生産環境研究所は、2006年から2010年まで農林水産省プロジェクト研究に参画し、田畑転換栽培が温室効果ガス排出量および土壤炭素収支に与える影響を明らかにするための試験を実施した。試験は水田を6区に分け、有機物を施用せず水稲を連作する慣行区、有機物として堆肥を施用し水稲を連作する堆肥区、大豆作後に水稲作を実施する復元田区を各2反復ずつ設けて実施した(第1図)。2010年水稲作は有機物を施用せず、化学肥料のみで均一栽培を行った。

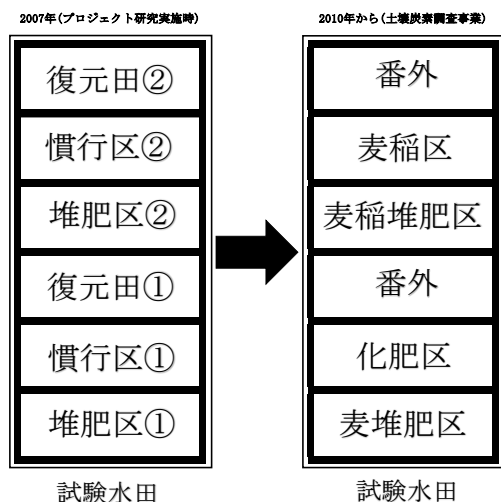
2010年播種の小麦作からは同一の水田において新たに土壤炭素調査事業を開始し、現在も継続している。土壤炭素調査事業は土壤への有機物施用の違いによる土壤炭素貯留量変動への影響を明らかにすることを目的として実施している。土壤炭素事業では調査の対象を水稲・小麦二毛作体系として、新たに4処理区を設けた。すなわち有機物を施用せず化成肥料のみで栽培を行う化肥区(化成肥料+小麦{刈株+根}+稲{刈株+根})、収穫後の麦稈・稲わらを全量土壤に鋤き込む麦稲区(化成肥料+小麦{刈株+根+麦稈}+稲{刈株+根+稲わら})、麦稈は鋤き込み、稲わらは圃場外に持ち出し、小麦栽培前に牛ふん堆肥を1t/10a施用する麦堆肥区(化成肥料+小麦{刈株+根+麦稈}+稲{刈株+根}+堆肥)、化成肥料に加え麦稈・稲わらを鋤き込み、小麦栽培前に牛ふん堆肥を1t/10a施用する麦稲堆肥区(化成肥料+小麦{刈株+根+麦稈}+稲{刈株+根+稲わら}+堆肥)の4区を設け、土壤炭素貯留量の推移等を調査した。

2006年から実施した農林水産省プロジェクト研究における試験区割りと2010年小麦作から開始した土壤炭素調査事業における試験区割りにおいて、1試験区の大きさはほぼ同じである(第1図)。このため、同一地点間の調査結果を比較することで、期間中の圃場管理の影響を明らかにすることができると思われる。そこで、プロジェクト研究時の水稲連作区(慣行区①②および堆肥区①②)のメタン発生量(2007年)と土壤炭素事業を10年継続した後の4つの区の2022年および2023年のメタン発生量を比較した。プロジェクト研究実施時の施肥体系における有機物の施用は、堆肥区①②のみである。このため、土壤炭素事業(2010小麦作開始)における化肥区と麦稲区をプロジェクト研究時に堆肥を施用していなかった位置に設置し、堆肥区と麦稲堆肥区をプロジェクト研究時に水稲作前に牛ふん堆肥2t/10aを施用していた位置に設定した。なお、プロジェクト研究時の復元田区にあたる場所には土壤炭素事業では番外として試験区は設定していない。

試験水田の土壤は多腐植質厚層多湿黒ボク土であるが、作土には灰色低地土を客土し1989年に造成している。また試験水田は排水性が悪く小麦作で湿害が生じたため、土壤炭素事業開始7年後の2017年11月に全面に弾丸暗渠を施工した。

試験での栽培品種は、小麦:「シロガネコムギ」、水稲:「森のくまさん」を用いた。

【ほ場図】



第1図 試験区の構成

【2007年】
 慣行区①②：化成肥料のみで水稲を連作，有機物の施用なし
 堆肥区①②：化成肥料に加え有機物として堆肥を施用し水稲を連作
 復元田①②：田畑転換栽培で大豆作後び水稲を栽培
 【2010年から】
 化肥区：有機物を施用せず化成肥料のみで栽培
 麦稲区：収穫後の麦稈・稲わらを全量土壌に鋤き込み
 麦堆肥区：稲わらは圃場外に持ち出し，小麦栽培前に牛ふん堆肥を1t/10a施用
 麦稲堆肥区：麦稈・稲わらを全量土壌に鋤き込み，小麦栽培前に牛ふん堆肥を1t/10a施用

第1表 耕種概要

		34cm	
小麦	条間	34cm	
	基肥	2021年11月17日	2022年11月21日
	播種	2021年11月19日	2022年11月21日
	追肥(1回目)	2022年1月21日	2023年1月20日
	追肥(2回目)	2022年2月21日	2023年2月20日
	踏圧	2回	
水稲	培土	1回	
	収穫	2022年5月26日	2023年5月22日
	栽植密度	17.5株/m ²	22.6株/m ²
	基肥	2022年6月16日	2023年6月16日
	移植	2022年6月22日	2023年6月22日
	中干し	2022年7月22日 ～29日	2023年7月25日 ～8月3日
収穫	2022年10月4日	2023年10月10日	

2 試験区の構成

試験区は1区240 m² (16 m×15 m, 反復なし) とし計8区を設置した(第1図)。稲わら・麦稈を鋤き込む区(麦稲区, 麦堆肥区, 麦稲堆肥区)では鋤き込むわらの量は揃えず，区毎に毎年生育した麦稈・稲わらを全量鋤き込んだ。牛ふん堆肥は，牛ふん尿を主原料とし，副資材としておがくずと籾がらが使用されている市販の牛ふん堆肥(商品名：まんま堆肥(JA 菊池))を用いた。

化学肥料による施肥量は県施肥基準に準じ全区共通とした。すなわち，小麦は基肥を複合燐加安42(商品名：「ベスト444」(ジェイカムアグリ㈱))と過りん酸石灰灰を用いて，N-P₂O₅-K₂O：5.0-7.5-5.8 (kg/10 a) 施肥した。追肥は2回行い，尿素入り窒素加里化成2号(商品名：NK2号(ジェイカムアグリ㈱))を用い1回あたりN-

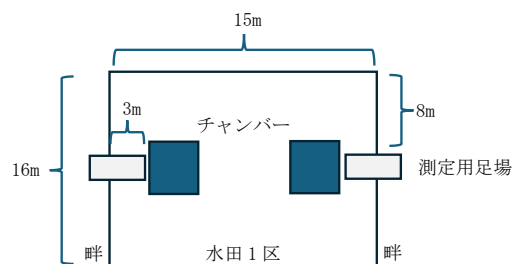
P₂O₅-K₂O：2.0-0-2.0 (kg/10 a) 施肥した。基肥と追肥の合計施肥量はN-P₂O₅-K₂O：9.0-7.5-9.8 (kg/10 a) とした。水稲はLPコート入り複合2000-D45号(商品名：ひとつりパートII(ジェイカムアグリ㈱))を用いた全量基肥施肥でN-P₂O₅-K₂O：8.0-4.0-4.0 (kg/10 a) 施肥した。

3 栽培方法および収量調査

水稲は概ね6月20日頃機械移植し，10月上旬に各区につき50株を2カ所で地際から刈取り収量調査用試料とした。小麦は概ね11月20日頃条播し，5月下旬に各区につき3.6 m²を2反復で地際から刈取り収量調査用試料とした。有機物の施用および施肥は，水稲は移植4日前の代掻き時，小麦は播種前日を行うことを基本とした。なお，2022年および2023年の耕種概要は第1表のとおりである。

4 メタンフラックスの測定

水稲作付期間中のメタンフラックスをクローズドチャンバー法⁷⁾により，水稲移植後から収穫前まで各区2カ所(各試験区の中央，畔から約3 m, 第2図)，週1回，9～12時の間に測定した。チャンバーはアクリル製透明チャンバーで高さの異なる2種類を用いた。稲体経由で放出されるメタンを測定するため，メタンフラックスを測定する際はチャンバー内に水稲6株が入るようにした。水稲の草丈を考慮し，移植から概ね4週間は高さの低いチャンバー(60 cm×60 cm×40 cm)を使用し，その後収穫までは高さの高いチャンバー(60 cm×60 cm×100 cm)を用いてガスの採取を行った。ガスはチャンバーを密閉して0分後，10分後，20分後に採取した。採取したチャンバー内ガスのメタン濃度を水素炎イオン化検出器(FID)付きガスクロマトグラフ(GC-14A：㈱島津製作所製)で測定し，メタン濃度の経時変化を直線回帰し，メタンフラックスを算出した。メタンフラックスから各測定日のメタン発生量をもとめ，各測定日間を直線補間し，水稲栽培期間中の積算メタン発生量を求めた。なお，2007年水稲作付期間中のメタン発生量は水上らの結果(熊本県農業研究センター生産環境研究所単年度成績，データ未公表)を用いた。



第2図 メタンガス採取用チャンバー設置位置(模式図)



写真1 メタンガス採取の様子

5 土壌炭素含有率の測定⁸⁾

土壌は各年水稻収穫後に作土を採取した。採取方法は、対角線採土法に従い、各区5か所から作土を採土し、それら土壌をよく混合してその1~2kgを分析試料とした。土壌は風乾後、植物根および粗大有機物を取除き2mmの篩を全通させ測定用試料として供試した。全炭素含有率は乾式燃焼法により全炭素をNC-TRINITY(棚住化学分析センター製)で測定した。区毎に全炭素含有率と連用年数の一次回帰式をもとめ、その傾きを1年あたりの全炭素含有率の増加率とした。また、土壌採取時に各区の中央で作土深および100cm³の試料採取用円筒を用いて仮比重を測定した。区毎に仮比重と連用年数の一次回帰式をもとめ、その傾きを1年あたりの仮比重の増加率とした。

6 炭素貯留量

有機物の鋤き込み等による炭素貯留量の変化は作土のみとして、各年の作土への炭素貯留量は藤富らの報告⁹⁾を参考とした式(1)により算出した。

$$C = \sigma \times d \times (tc/100) \times 10000 \quad \dots \text{式(1)}$$

C:炭素貯留量(t/ha), σ :作土の仮比重(t/m³), d:作土深(m), tc:作土炭素含有率(%)

また、区毎に各年の炭素貯留量と連用年数の一次回帰式をもとめ、その傾きを1年あたりの炭素貯留量の増加率とした。

7 2023年炭素収支の試算

土壌への炭素投入量(kg-C/10a)は各区への麦稈・稲わらの鋤き込み及び堆肥投入由来とし、土壌からの炭素排出量は各区からのメタン発生由来とした。麦稈および稲わらの重さは収量調査の結果を用いた。堆肥、麦稈および稲わらの炭素含有率は乾式燃焼法により分析し求めた。メタンによる土壌からの炭素排出量は測定したメタンフラックスより算出した。収支は式(2)により算出した。

$$\delta C = (C_{\text{manure}} + C_{\text{wheat}} + C_{\text{rice}}) - C_{\text{methane}} \quad \dots \text{式(2)}$$

δC :炭素収支, C_{manure} :牛ふん堆肥由来炭素,

C_{wheat} :麦稈由来炭素, C_{rice} :稲わら由来炭素,

C_{methane} :メタン由来炭素

δC が正の場合は土壌に炭素が貯留していることを示し、負の場合は土壌から炭素が損出していることを示す。

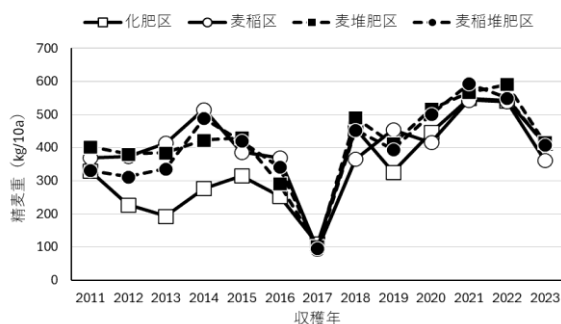
III 結果

1 小麦および水稻の収量の推移

小麦の収量(精麦重)の推移を第3図に示す。試験開始時の2011年産は、化肥区331kg/10a, 麦稲区370kg/10a, 麦堆肥区403kg/10a, 麦稲堆肥区332kg/10aと各区ほぼ同程度の収量であった。その後2016年産までは有機物を施用した麦稲区, 麦堆肥区, 麦稲堆肥区の収量は2011年産収量と同等か多く推移した。一方, 有機物を施用していない化肥区の収量は他の3区に比べ少なく, 2011年産の収量と同等か低く推移した。2017年産は播種時に降雨があり, 湿害のため発芽率が悪くいずれの区も低収量となった。弾丸暗渠施工後の2018年産以降は収量に区間差はみられなかった。2011年産~2016年産の収量の平均は, 化肥区267kg/10a, 麦稲区405kg/10a, 麦堆肥区385kg/10a, 麦稲堆肥区372kg/10aとなり, 化肥区を100とすると麦稲区は157, 麦堆肥区は148, 麦稲堆肥区は143となった。2018年産~2023年産の収量の平均は, 化肥区456kg/10a, 麦稲区447kg/10a, 麦堆肥区499kg/10a, 麦稲堆肥区484kg/10aとなり, 化肥区を100とすると麦稲区は100, 麦堆肥区は110, 麦稲堆肥区は107となった。13作平均では, 化肥区342kg/10a, 麦稲区401kg/10a, 麦堆肥区416kg/10a, 麦稲堆肥区403kg/10aとなり, 化肥区を100とすると麦稲区は125, 麦堆肥区は127, 麦稲堆肥区は122となった(第2表)。

麦稈重は2013年産麦稲区において623kg/10aと多かったが, 概ね収量と同様の推移を示した。2013年麦稲区を除き, 麦稈を鋤き込んでいる3区においては大きな区間差はみられず, 麦稈重の13作平均は麦稲区396kg/10a, 麦堆肥区390kg/10a, 麦稲堆肥区387kg/10aとなり, 概ね同量の麦稈を鋤込んだ(第4図)。

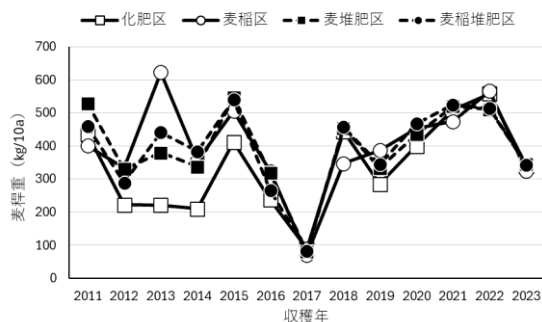
水稻の収量(精玄米重)の推移を第5図に示す。水稻の収量は試験期間を通じて大きな区間差はみられず同等の収量が得られた。13作平均では, 化肥区571kg/10a, 麦稲区563kg/10a, 麦堆肥区584kg/10a, 麦稲堆肥区569kg/10aとなり, 化肥区を100とすると麦稲区は99, 麦堆肥区は102, 麦稲堆肥区は100であった(第2表)。稲わら重も試験期間を通じて, 区間差はみられず, 稲わらを鋤き込む2つの区の水稲重の13作平均は, 麦稲区740kg/10a, 麦稲堆肥区739kg/10aとなり, 概ね同量の稲わらを得ることが出来た(第6図)。



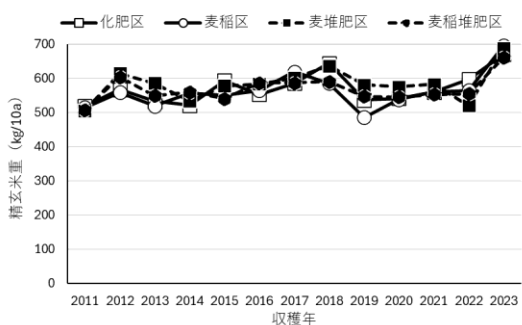
第3図 小麦収量の推移

第2表 小麦および水稲の収量

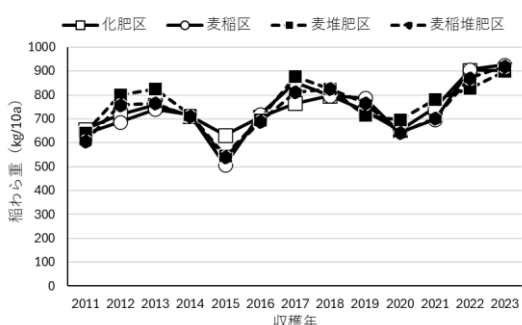
試験区名	小麦				水稲			
	2011年~2016年 (6作平均)		2018年~2023年 (6作平均)		2011年~2023年 (13作平均)		2011年~2023年 (13作平均)	
	精麦重 kg/10a	収量指数	精麦重 kg/10a	収量指数	精麦重 kg/10a	収量指数	精玄米重 kg/10a	収量指数
化肥区	267	100	456	100	342	100	571	100
麦稲区	405	157	447	100	401	125	563	99
麦堆肥区	385	148	499	110	416	127	584	102
麦稲堆肥区	372	143	484	107	403	122	569	100



第4図 麦粒重の推移



第5図 水稲収量の推移



第6図 稲わら重の推移

2 水稲作付期間中のメタン発生量の比較

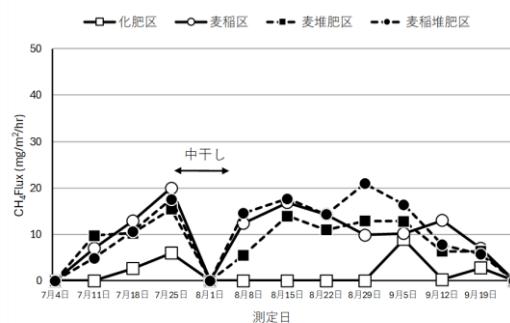
水稲作付期間中における 2007 年のメタンフラックスの推移を第7図に示す。メタンフラックスはいずれの区も期間を通じて 10 mg/m²/hr を下回った。メタンの発生は移植 45 日後に慣行区①で 3.9 mg/m²/hr、堆肥区で 5.5 mg/m²/hr のピークを示した。その後は発生量が減少し、9 月下旬まで顕著なメタンフラックスは認められなかったが、収穫時の落水期に堆肥区で慣行区①で 3.8 mg/m²/hr、堆肥区①で 8.7 mg/m²/hr のピークがみられた。メタンフラックスから算出したメタンの総発生量は、慣行区①で 4.9 g/m²、慣行区②で 3.7 g/m²、堆肥区①で 5.9 g/m²、堆肥区②で 5.3 g/m²と堆肥区がやや多い傾向であった(第3表)。

水稲作付期間中における 2022 年のメタンフラックスの推移を第8図に示す。2022年7月1日のメタンフラックスは、有機物の施用がない化肥区が 0.1 mg/m²/hr 以下であったのに対して、有機物を施用した3区では、麦稲区 3.8 mg/m²/hr、麦堆肥区 8.5 mg/m²/hr、麦稲堆肥区 7.3 mg/m²/hr で移植 10 日後からメタンの発生が見られた。有機物を施用した3区の生育期間の比較では、麦堆肥区に対し、麦稲区、麦稲堆肥区のメタンフラックスが大きい傾向がみられ、中干し後湛水を開始した後はいずれの区においてもメタンの発生がみられた。さらに麦稲区と麦稲堆肥区では9月上旬に期間中で最も大きなフラックスのピークがみられた。メタンフラックスから算出したメタンの総発生量は、化肥区で 14.5 g/m²、麦稲区で 53.0 g/m²、麦堆肥区で 34.0 g/m²、麦稲堆肥区で 52.7 g/m²であり、有機物を施用した区で多い傾向であった(第3表)。

2023 年のメタンフラックスの推移を第9図に示す。2023年のメタンフラックスは、移植約10日後ではいずれの区においても発生はみられず、移植約20日後から有機物を施用している麦稲区、麦堆肥区ならびに麦稲堆肥区においてメタンの発生がみられた。一方、有機物を施用していない化肥区では移植約30日後からメタンの発生がみられた。その後いずれの区においてもメタン発生量は増加し、中干し前のピークは、化肥区が 6.0 mg/m²/hr、麦稲区が 20.0 mg/m²/hr、麦堆肥区が 15.4 mg/m²/hr、麦稲堆肥区が 17.5 mg/m²/hr であった。中干し期間中にはいずれの区においてもメタンの発生はみられなかった。中干し後湛水を再開した後も化肥区のメタンフラックスは 0~8.9 mg/m²/hr と低い値で推移したが、有機物を施用した麦稲区、麦堆肥区ならびに麦稲堆肥区では 15~20 mg/m²/hr 程度まで増加し、9月5日までの期間で中干し前のピークと同等かやや低い値で推移した。メタンフラックスから算出したメタンの総発生量は、化肥区で 6.8 g/

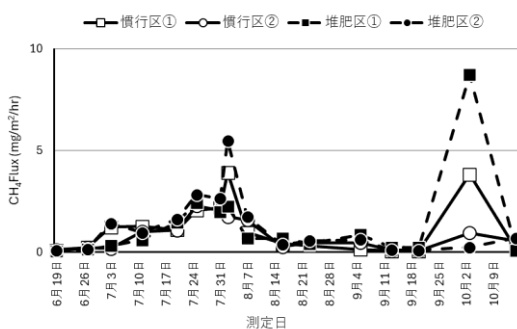
m², 麦稲区で41.7 g/m², 麦堆肥区で35.1 g/m², 麦稲堆肥区で44.2 g/m²であり, 2022年と同様に有機物を施用した区で多い傾向であった(第3表).

有機物連用試験開始前の2007年と試験12年経過後の2023年のメタン発生量を比較すると, 有機物を施用していない化肥区では, 約1.4倍程度の増加であったのに対して, 有機物を施用した麦稲区は約11.3倍, 麦堆肥区は約5.9倍, 麦稲堆肥区は約8.3倍に増加し, 有機物を連用した試験区で発生量の増加が大きい傾向であった(第3表).



第9図 2023年のメタンフラックスの推移

1) 移植日: 2023年6月22日, 中干し期間: 7月25日~8月3日, 収穫日10月10日



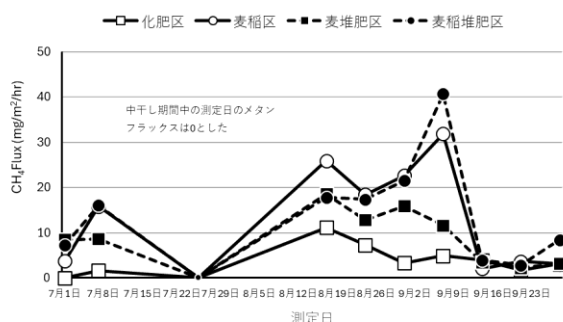
第7図 2007年のメタンフラックスの推移

1) 移植日: 2007年6月18日, 中干し期間: 7月31日~8月5日, 収穫日: 2007年10月6日

第3表 水稻作付期間中の総メタン発生量

	2007年	2022年(参考)	2023年	2023年
	kg/10a	kg/10a	kg/10a	/2007年
化肥区	4.9	14.5	6.8	1.4
麦稲区	3.7	53.0	41.7	11.3
麦堆肥区	5.9	34.0	35.1	5.9
麦稲堆肥区	5.3	52.7	44.2	8.3

注) 2022年は測定機器の不調により欠測期間があるため参考値とした。



第8図 2022年のメタンフラックスの推移

1) 移植日: 2022年6月22日, 中干し期間: 7月22日~29日, 収穫日: 10月4日
2) 欠測期間: 2022年7月14日~8月10日

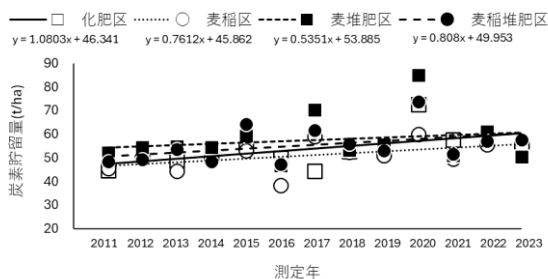
3 作土中の炭素含有率と炭素貯留量の推移

作土中の炭素含有率の推移を第10図に示す. 作土中の炭素含有率は概ね麦稲堆肥区>麦堆肥区>麦稲区>化肥区の順に高く 2.6~4.1%の範囲で推移し, 有機物を施用した3つの区が有機物を施用していない化肥区に比べ高い傾向であった. 試験期間を通じた炭素含有率の増加率は, 麦堆肥区>化肥区>麦稲堆肥区>麦稲区の順で高く, 有機物施用の影響はみられなかった. 試験期間を通じた土壌炭素含有率の平均値は, 化肥区 3.1%, 麦稲区 3.2%, 麦堆肥区 3.5%, 麦稲堆肥区 3.6%で, 堆肥を施用した麦堆肥区および麦稲堆肥区が堆肥を施用していない化肥区および稲麦区に比べ高い傾向であった(第4表). 有機物を施用していない化肥区の土壌炭素含有率の平均値 3.1%と比較して, 麦稲区で0.1ポイント, 麦堆肥区で0.4ポイント, 麦稲堆肥区で0.5ポイントの増加がみられた.

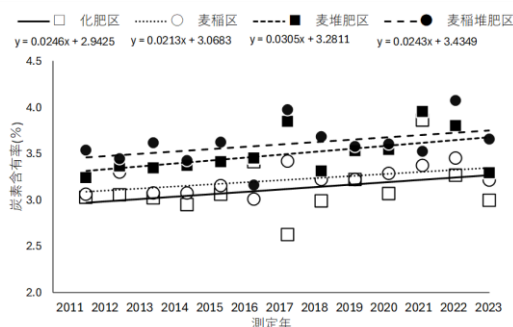
作土深の推移を第11図に示す. 作土深は一定の増減傾向はみられず, いずれの区も16cm程度で推移した. 試験期間を通じた平均値は, 化肥区 16.1cm, 麦稲区 16.0cm, 麦堆肥区 16.2cmおよび麦稲堆肥区 15.8cmであった(第4表).

仮比重の推移を第12図に示す. 仮比重は有機物を施用していない化肥区で試験期間を通じた平均値が1.08と最も大きかった. 有機物を施用した3つの区では, 試験開始4年目(2014年)までの平均は麦堆肥区>麦稲区>麦稲堆肥区の順で大きい傾向があった. 試験開始5年目(2015年)以降は有機物を施用している3区の仮比重に大きな差はみられなかった. 試験期間を通じた変化率は化肥区と麦稲堆肥区で増加傾向, 麦稲区は横ばいかやや減少傾向, 麦堆肥区は減少傾向であった. 試験期間を通じた平均値は, 化肥区 1.08 kg/L, 麦稲区 0.99 kg/L, 麦堆肥区 1.02 kg/Lおよび麦稲堆肥区 0.97 kg/Lであった(第4表).

式(1)より算出した作土中の炭素貯留量の推移を第13図に示す。各年の炭素貯留量を比較すると概ね堆肥を施用している麦堆肥区と麦稲堆肥区が大きく、堆肥を施用していない化肥区と麦稲区が小さい傾向であり、試験期間を通じた平均値は、化肥区 53.9 t/ha, 麦稲区 51.2 t/ha, 麦堆肥区 57.6 t/ha および麦稲堆肥区 55.6 t/ha であった。土壌中の炭素貯留量の増加率は、化肥区>麦稲堆肥区>麦稲区>麦堆肥区の順で大きくなり、試験期間を通じてすべての区で増加傾向であった。作土中の炭素貯留量の期間を通じた平均は麦堆肥区>麦稲堆肥区>化肥区>麦稲区の順に高かった(第4表)。



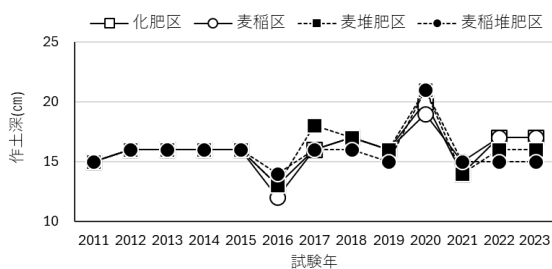
第13図 作土中の炭素貯留量の推移



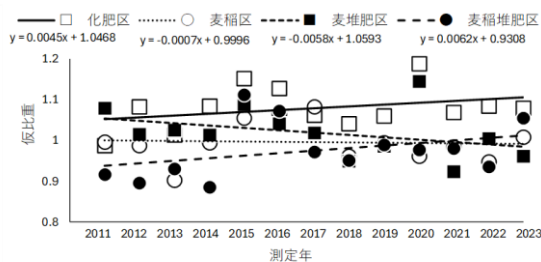
第10図 作土中の炭素含有率の推移

第4表 作土中の炭素含有率、作土深、仮比重および炭素貯留量の試験期間平均

	土壌炭素含有率 (%)	作土深 (cm)	仮比重	炭素貯留量 (t/ha)
化肥区	3.1	16.1	1.08	53.9
麦稲区	3.2	16.0	0.99	51.2
麦堆肥区	3.5	16.2	1.02	57.6
麦稲堆肥区	3.6	15.8	0.97	55.6



第11図 作土深の推移



第12図 仮比重の推移

4 水稻・小麦二毛作体系水田での炭素収支

各区への麦稈・稲わらの鋤き込み量および堆肥投入量と、麦稈・稲わらおよび堆肥の炭素含有率から土壌への炭素投入量を算出した。また、各区からのメタンフラックスよりメタンによる土壌からの炭素排出量を算出した。この炭素投入量と炭素排出量から、式(2)をもちいて2023年における水田の炭素収支の試算を行った(第5表)。化肥区では炭素投入を行わないためメタン発生量分の5 kg-C/10aが土壌から持ち出され、有機物を施用する麦稲区・麦堆肥区・麦稲堆肥区ではメタン発生による炭素持出し量を炭素投入量が上回り、土壌へ炭素が貯留される結果となった。2023年は麦稲区で355 kg-C/10a, 麦堆肥区で322 kg-C/10a, 麦稲堆肥565 kg-C/10aの炭素が土壌に貯留すると試算した。

第5表 水稻・小麦二毛作体系水田での炭素収支(2023年)

	年間炭素投入量 kg-C/10a				メタン発生量② kg-C/10a	収支 ①-②
	麦わら由来	稲わら由来	牛ふん堆肥由来	合計①		
化肥区	0	0	0	0	5	-5
麦稲区	137	248	0	386	31	355
麦堆肥区	146	0	202	348	26	322
麦稲堆肥区	146	250	202	598	33	565

注1) ①はメタン発生量に0.75を乗じて算出した。

注2) 全区とも水稻および小麦の刈株・根の投入量は調査していないため加算されていない。

IV 考察

1 有機物の連用が小麦および水稻の収量に与える影響

試験2作目の2012年産~2016年産において、有機物を施用した3つの区(麦稲区・麦堆肥区・麦稲堆肥区)の小麦収量は試験1作目(2011年産)の収量(化肥区: 331 kg/10a, 麦稲区: 370 kg/10a, 麦堆肥区: 403 kg/10a, 麦稲堆肥区: 332 kg/10a)に比べて同等から多く、化肥区の収量は同等から少なく推移した(第3図)。堆肥および麦稈・稲わらの有機物を土壌に施用した場合、土壌の物理性や理化学性が改善され、排水性の向上や土壌中の肥

料成分が増加することが知られている¹⁰⁾。試験を実施した水田は黒ボク土に作土として灰色低地土を客土し造成されており、生産環境研究所内の他の黒ボク土水田に比べ排水性が悪く、湿害が起きやすい。本試験では 2017 年の暗渠施工以降は各区の小麦の収量差が縮小したため（第 3 図）、それ以前の 2012 年～2016 年の期間は主に有機物施用により排水性が向上し、小麦の収量が維持または増加したと考えられる。他方、有機物を施用していない化肥区では 2011 年～2016 年の期間に排水性の改善がなく、湿害の影響等により小麦が減収したと考えられる。

一方、湿害の影響を受けにくい水稻収量は試験区間で差がなかったことから、有機物施用による土壤中の肥料成分の増加等の効果はなかったと考えられる。

2 有機物連用がメタン発生に及ぼす影響

2007 年水稻作付期間中のメタンフラックスは低く推移した（0.1～8.7 mg/m²/hr）が、8 月 2 日（最大値：5.5 mg/m²/hr）と 10 月 3 日（最大値：8.7 mg/m²/hr）の 2 回ピークがみられた（第 7 図）。中干し期間中の 8 月 2 日にメタンの発生があり、中干し後もメタンの発生が続いた理由として、水田が暗渠施工前で排水性が悪かったことと、8 月 2 日～6 日に 155.5 mm の降雨があり十分な中干しの効果が得られなかったためと考えられる。また、収穫日（10 月 6 日）前は 9 月 17 日から降雨がなかったため、収穫のための落水により土壌が乾き生じた亀裂によりわずかではあるが土壌中に保持されていたメタンガスが直接放出され、10 月 3 日のメタン発生になった可能性がある¹¹⁾。2023 年水稻作付期間中のメタンフラックスは移植一定期間後からメタンが発生し、中干し期間中に一旦メタンの発生はなくなり、再入水後に再びメタンの発生がみられ、概ね Yagi and Minami¹²⁾ と同様の推移を示した。2023 年において湛水開始からメタンの発生がみられるまで、概ね 10～30 日要した。鈴木¹³⁾ は湛水後メタン発生に要する日数を黒ボク土で 30～45 日、灰色低地土で 10～15 日と報告している。本試験の水田は黒ボク土に灰色低地土を客土し造成しているため、黒ボク土と灰色低地土の中間的な日数を要した可能性がある。メタンの発生は土壌中炭素含有量だけでなく、微生物活性や酸化還元電位とも関係が深いとされ、とりわけ水稻生育前半は土壌中の易分解性有機物含量、生育後半は酸化還元電位と関係が深いことがわかっている¹⁴⁾。土壌中の酸化還元電位は土壌中の有機物を好氣的に利用する微生物の活動が活発になること等で低下する。化肥区において中干し後のメタン発生量が少なかった要因の 1 つとして、土壌中に微生物に利用可能な有機物が少ないことで還元が進まなかったことも考えられ、今後は酸化還元電位の推移等の測定も必要と考えられた。

各有機物のメタン発生量への寄与を検討するため有機物が施用されている 3 区でメタン発生量（2023 年）を比較した（第 3 表）。施用した有機物の寄与を比較するため、各区のメタン発生量から元来共通の土壌有機物等の寄与として化肥区のメタン発生量を減じると、麦稲区 34.9 g/m²、麦堆肥区 28.3 g/m²、麦稲堆肥区 37.4 g/m²であった。麦稲区と麦稲堆肥区の比較により堆肥の寄与 2.5 g/m²、麦堆肥区と麦稲堆肥区の比較により稲わらの寄与 9.1 g/m²、稲わらと麦稲区の比較により麦稈の寄与 25.8 g/m²と算出することができる。2023 年の結果では、メタン発生量に対する稲わらと堆肥の寄与は麦稈に比べてかなり小さかった。麦稈と稲わらを同時に湛水処理した場合、メタン発生量は稲わらが大きくなる¹⁵⁾。しかし、本試験では稲わらと堆肥は小麦作付け前に施用しているため湛水開始時には易分解性有機物が減少しメタン発生への寄与が小さくなったと考えられる。水田に施用された有機物の分解の難易は、易分解性有機物である熱水可溶有機物含量により評価が可能である。また、水田からのメタン発生量には熱水可溶有機物、屎にセルロースおよびセルロース含量が影響している¹⁶⁾ ためこれらの成分についての分析を行うことでより詳細な検討は可能になると考えられる。また、熊谷ら¹⁷⁾ によると、秋に稲わらを施用した区から発生するメタンは、春に牛ふん堆肥を施用した区から発生するメタンに比べ多く、稲わらと堆肥を比較した場合、稲わらの方がメタン発生に対する寄与は大きい。更に、水田への稲わらの施用はメタン放出を促進するが、堆肥の施用は顕著な影響を与えないことが知られてきており¹³⁾、今回の結果と合致するものであった。

3 土壌中炭素含有率と貯留量の推移

土壌の炭素含有率について、有機物を施用していない化肥区においても土壌の含有率の増加率が正であったが、これは小麦および水稻の根および刈り株の鋤き込みによるものと考えられる。

有機物を施用した区のうち麦稲区と麦堆肥区を比較すると、稲わらによる炭素投入量（248 kg-C/10 a（2023 年））は牛ふん堆肥（202 kg-C/10 a（2023 年））に比べ多いが、炭素含有率および炭素貯留量いずれも麦堆肥区が麦稲区に比べ大きかった。このことから、炭素貯留効果には有機物に差があり、牛ふん堆肥は稲わらに比べ炭素貯留効果が高いと考えられる。また、先述のとおり、稲わらは牛ふん堆肥に比べメタン発生に対する寄与が大きい。このため、水田のみを対象とした場合、稲わらと堆肥の交換施用は土壌からのメタン発生量を減少させ、炭素貯留量を高めることが期待できる。一方、堆肥化過程で発生する一酸化二窒素¹⁸⁾ は地球温暖化係数が 265 と大きい

ことから、稲わらと製造過程まで考量した堆肥との交換施用による地球温暖化への影響は更に詳細な評価が必要と考えられる。

また、式(1)で算出した炭素貯留量の試験期間を通じた増加率は、化肥区が最も大きくなった(第13図)。土壌中の炭素貯留量を式(1)で算出する場合、炭素含有率だけでなく仮比重と作土深の変化にも影響される。試験期間中に耕起に用いたロータリーの変更はなく、耕耘速度も一定で行っているため作土深はほぼ一定と考えられるので、仮比重の変化の影響が大きくなる。仮比重は有機物を施用していない化肥区が大きく、有機物を施用している区では小さくなる傾向がある(第12図)。このため、化肥区の炭素貯留量は過大に評価され、有機物を連用している区では過小評価されやすくなる。こうした評価上の偏りを是正するため、有機物連用圃場での炭素貯留量の推移を適切に評価する手法として Equivalent soil mass 法が提案された¹⁹⁾。本法は基準となる土壌の質量(soil mass)を定め、その質量に合わせて計算上のサンプリング深さを調整する方法である。本試験においては化肥区を過大評価した懸念があるため、有機物連用による炭素貯留量の推移を検討するためには今後 Equivalent soil mass 法を適応することも必要と考えられた。

4 炭素収支の観点からみた有機物施用の意義

2023年の炭素収支の試算(第5表)から、有機物を施用しない化肥区ではメタン発生による炭素損失のみが生じ、土壌炭素が減少する結果となった。一方、有機物を施用する3つの区はいずれも炭素投入量がメタン発生による炭素損失を上回った。また、これら3つの区は実測においても土壌炭素含有率と土壌炭素貯留量のいずれも増加しており土壌への炭素貯留効果が確認された。有機物施用は土壌炭素の貯留量の増大だけでなく、メタン発生量の増加という負の側面も持っている。更に今回の試算には刈り株や根等の有機物、水稲作中に発生するCO₂、小麦作中の畑状態で発生するCO₂は考慮していないため、それらのCO₂発生量によっては土壌の炭素損失が大きくなる懸念もある。滝本ら²⁰⁾によると、岡山県における大麦-水稲二毛作体系において麦稈と稲わらを焼却処理しない場合の炭素収支は土壌への吸収を示すとされている。このため、今回測定していないCO₂を考慮した場合においても、有機物を施用した区においては炭素を貯留する効果を有すると考えられる。

今回の試験により、本県における水稲・小麦二毛作体系において有機物施用による炭素貯留とメタン発生の双方を考慮した場合、有機物を施用することでメタン発生量は増加するが、土壌への炭素投入量がそれを上回り土壌炭素貯留により温室効果削減に寄与できることが明らかになった。

また、稲わらを堆肥に置き換えることで更にメタン発生量を抑制し、土壌炭素貯留量を増加させる可能性があることも明らかにした。今後は水田からのメタン発生量を抑制する秋耕、中干し期間の拡大、水管理の工夫等の技術と組み合わせて体系的に温室効果ガス発生を削減する技術の開発が必要と考えられる。

V 謝辞

土壌炭素事業を歴代担当し収量データ等を提供して下さった、城秀信氏、身次幸二郎氏、松森信氏、甲木哲哉氏、富永純司氏、白尾謙典氏、宮崎裕子氏、津田拳臣氏、宇梶徳史氏に厚くお礼申し上げます。また、長期にわたり圃場管理をいただいている熊本県農業研究センター生産環境研究所土壌環境研究室の方々には大変お世話になりました。

VI 引用文献

- 1) IPCC WG1 国内支援事務局(2022): 政策決定者向け要約
- 2) 農林水産省(2024): 農林水産省地球温暖化対策計画について
- 3) 八木一行(2011): 温室効果ガス発生抑制と土壌炭素蓄積. 農業環境研究叢書第18号, 76-95.
- 4) 木村真人・村瀬潤(1992): 水田土壌中におけるCO₂とCH₄の動態-大気へのフラックス-. 土壌の物理性第65号11-20.
- 5) 農林水産省(2025): 令和5年農業産出額及び生産農業所得(都道府県別), 大臣官房統計部経営・構造統計課
- 6) 熊本県(2022): 令和4年度(2022年度)熊本県水田収益強化ビジョンについて
- 7) 陽捷行・八木一行(1988): 水田から発生するメタンのフラックスの測定法. 日本土壌肥科学雑誌第59号, 459-463.
- 8) 財団法人日本土壌協会(2001): 土壌, 水質及び植物体分析法.
- 9) 藤富慎一・黒柳直彦・小田原孝治・山口修(2014): 福岡県の二毛作水田における有機物施用による炭素貯留効果. 福岡県農業総合試験場研究報告, 33.
- 10) 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎(2022): 土壌肥料用語辞典. 96.
- 11) 村松 康彦(2009): 水田土壌からのメタンガス放出抑制技術の開発とインドネシアにおける普及のための基礎研究. 千葉大学学位申請論文, 78-80.
- 12) Kazuyuki Yagi & Katsuyuki Minami (1990): Effect of organic matter application on methane emission from

- some Japanese paddy fields Soil Sci.Plant Nutr, 36, 599-610.
- 13) 鈴木聡 (1995) : 水田から発生するメタンの有機物施用を中心とした制御方法. 栃木県農業試験場研究報告, 43.
- 14) 松本次郎・南山泰宏・赤堀 伸串・高橋克征 (2002) : 有機物施用水田におけるメタンの発生抑制対策, 日本土壤肥料学雑誌第73巻第3号, 315-318.
- 15) 江 耀宗・李 喬木・松本 聡 (2000) : 各種植物残渣の添加が水田土壌のメタンおよび二酸化炭素の生成に及ぼす影響. 日本土壤肥料学雑誌第71巻, 210-215.
- 16) 三浦吉則 (1996) : 農耕地からの温室効果ガス発生実態と発生軽減技術の確立. 福島県農業試験場研究報告, 33, 15-21.
- 17) 熊谷勝巳・塩野宏之・森岡幹夫・長沢和弘・中川文彦 (2010) : 稲わら春すき込みに代えて家畜ふん堆肥を施用した水田におけるメタン発生の特徴と低減効果. 山形県農業研究報告, 2.
- 18) 宮竹 史仁・寺井 咲百合・谷 昌幸・加藤 拓・小池 正徳・前田 高輝・前田 武己・岩渕 和則 (2012) : 堆肥化の初期過程で発生する一酸化二窒素(N₂O)の排出挙動. 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会要旨集, 361-362.
- 19) 農研機構農業環境変動研究センター・中央農業研究センター (2016) : 農地管理実態調査の定点調査及び基準点調査における土壌炭素調査実施方法 (調査マニュアル2016).
- 20) 滝本貴弘・岩田 徹・山本 晋・三浦健志 (2010) : 岡山県南部における大麦-水稲二毛作地における CO₂ と CH₄ フラックス特性の報告. 農業気象 66巻, 181-191.

Summary

The continuous application of organic materials such as crop residues and compost to double-cropping paddy fields in Kumamoto Prefecture has had a carbon sequestration effect. Based on a calculation balanced with methane emissions, this application is shown herein to have reduced greenhouse gas emissions.

Issei TANAKA, Hiroyuki MIZUKAMI, Shunsuke KAKIUCHI

The reduction of greenhouse gas emissions in Japan's Kumamoto Prefecture includes efforts to achieve zero emissions in agriculture, forestry, and fisheries based on the Green Food System Strategy. Approximately 50% of the greenhouse gases emitted from the Prefecture's agricultural sector are methane, and ~60% of this methane is generated from paddy fields; reducing the methane emissions from paddy fields is thus required. However, although the application of organic matter to paddy fields is expected to enhance the sequestration of carbon in the soil, such an application may also increase methane emissions. This study investigated the relationship between carbon input into the soil and methane emissions under a long-term application of organic matter in a rice-wheat double-cropping system. Two types of plots were established and examined for >10 years starting 2010: (i) chemical fertilizer plots, in which conventional chemical fertilizer was applied and rice stubble and roots were incorporated into the Andosol paddy field, and (ii) organic-matter application plots in which three types of organic materials were added in combination to the conventional practice (wheat straw, rice straw, and cattle manure compost). For the measurements of methane emissions from the paddy fields and carbon emissions from the soil, the methane emission rate (methane flux) was measured during the rice-growing period, and the cumulative methane emissions during that period were converted to carbon per unit area. Changes in the soil carbon content, plow layer depth, and bulk density were measured to estimate the soil carbon sequestration per unit area. The methane emissions in 2023 (the final year of continuous application in each experimental plot) were compared with the date from 2007 (before the start of the continuous application). The carbon input in 2023 was compared with the carbon-equivalent amount of methane emissions during the rice-growing period. The three major findings were as follows. (1) Compared to the period before the continuous application of organic matter, the methane emissions during the rice-growing period increased in all of the organic-matter combination plots after long-term application, and the rate of increase differed among the organic-matter combination plots by 5.9 to ~11.3 times. (2) The continuous application of organic matter increased the soil carbon content (which is one of the factors determining soil carbon sequestration), and differences in the rate of increase were observed among the organic-matter combinations plots (~0.1–0.5%), indicating a carbon sequestration effect in the soil. (3) When the carbon balance was calculated using methane emissions in 2023 and the carbon input to the soil through organic-matter application, the carbon input exceeded the carbon emissions from methane by 322–565 kg C per 10 a. These results obtained with a rice-wheat double-cropping system on paddy fields in Kumamoto Prefecture demonstrated that although the methane emissions increased

from paddy fields in which organic materials such as wheat straw, rice straw, and cattle manure compost were applied continuously, the level of emission was lower than the carbon input provided by incorporating these organic materials. The net effect is thought to contribute to a mitigation of greenhouse gases through carbon sequestration in the soil.

Key words: paddy field, organic matter application, methane, soil carbon accumulation