

	ナカシマ ミキ
氏 名	中嶋 美幸
本籍（国籍）	東京都
学位の種類	博士（農学）
学位記番号	連研第 661 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当課程博士
研究科及び専攻	連合農学研究科 寒冷圏生命システム学
学位論文題目	Decomposition of rice straw during the off-rice season and methane emission during rice growth season from paddy fields in a cold temperate region of Japan: monitoring and modeling（日本の寒冷地水田における休耕期稲ワラ分解と夏季メタン放出量に関する研究）
学位審査委員	主査 山形大学 准教授 程 為国 副査 花山 奨(山形 准教授)、村井 麻理(岩手 客員教員)、杉山 修一(弘前 教授)、岡田 益己

論文の内容の要旨

Methane (CH₄) is the most important greenhouse gas after carbon dioxide (CO₂) and is responsible for approximately 17% of the anthropogenic global warming effect. Rice paddy is a major source of atmospheric CH₄, and is responsible for approximately 11% of anthropogenic CH₄ release. Also paddy soil has high rice productivity and sustainability for growth of world population. Therefore, reducing CH₄ emission from submerged rice paddy is a world demand to confront both problem of global warming and food insecurity. In Japanese single crop systems, rice straw as a by-product after grain harvest commonly left on the field directly. Left and incorporated rice straw would be partly decomposed aerobically in the fallow season and remained part would become substrates of CH₄ production in next rice growing season. Though a-quarter of total Japanese rice field areas is in the northeast (Tohoku) region, with cool climate condition, there is a few studies on the effect of winter temperature and moisture on the aerobic decomposition of rice straw, and on the CH₄ emission from next rice growing season. The purposes of this study were to understand how the aerobic decomposition of rice straw during fallow season in Tohoku region can be affected the CH₄ emission during following rice growth season, and to compute the mitigation effect of CH₄ emission from the paddy field in Tohoku region by model evaluation.

Firstly, An incubation experiment was carried out with Andisol paddy soil, which was

sampled from the field in Morioka, Iwate, Japan. Experimental was designed as full factorial combination of four temperature levels ($\pm 5^{\circ}\text{C}$, 5°C , 15°C and 25°C) and two moisture levels (60% and 100% of water filled pore space), with both bulk soil and soil mixed with 2% $\delta^{13}\text{C}$ -labeled rice straw. Straw decomposition rate was calculated by three different parameters of CO_2 emission, soil organic carbon (SOC) contents and its $\delta^{13}\text{C}$ value. The results indicated that both temperature and moisture affected the rate of rice straw decomposition during the 24-week aerobic incubation period. Rates of rice straw decomposition were not only increasing with high temperature, but also with high moisture conditions. The rates of rice straw decomposition were more accurately calculated by CO_2 production compared to that calculated by the change in the SOC content, or in its $\delta^{13}\text{C}$ value. According to CO_2 measurement, decomposition rate of rice straw carbon became smaller with decrease of incubation temperature and was less than 14% even after 24week incubation in $\pm 5^{\circ}\text{C}$ temperature condition (12 hour intervals of 5°C and -5°C condition) which was designed to model the freezing- thawing cycles occurred during fallow season in Tohoku region.

Secondly, A field experiment was performed to validate the effect of autumn tillage (straw incorporation) depth on CH_4 emission from paddy field in next rice growth season, in an Andisol paddy field in Morioka, Iwate, Japan during 2012 to 2014. CH_4 emission from paddy field in rice growth period with two levels of tillage depth in autumn (conventional: 15cm, shallow: 7cm) were measured periodically. Overall the four years with three rice growth seasons experiment, CH_4 emission was not affected by tillage depth in autumn. Though the decomposition rate of rice straw would be affected by both of temperature and moisture condition in generally, cumulative CH_4 emission in early days of rice growth period was correlated only with cumulative air temperature during the days after straw incorporation in previous fallow season in this study. Numerical simulation of soil water content revealed that the high permeability of experimental field have made the soil water content low soon after drainage of flooding water. These results indicated that the CH_4 mitigation mechanism of autumn shallow tillage was limited by soil water condition in fallow season, and thus the mitigation effect of shallow autumn tillage would appear only in the field where water content would become high in fallow season.

Thirdly, a model evaluation for CH_4 mitigation effect of shallow autumn tillage in paddy fields was performed with a comprehensive process-based model, DNDC-Rice. DNDC-Rice model can did a correct estimation of cumulative CH_4 emission in 6 experimental fields around Japan. For evaluating the hypothesis which was obtained from the field experiment carried out in Morioka, virtual condition of high soil water content in the field during the fallow season was set to the model. However, DNDC-Rice model showed that cumulative CH_4 emission in following rice growth season is not affected by autumn tillage depth even with

high soil water content in fallow season. After the current model was revised to increase the degree of inhabitation on organic matter decomposition by excess water, the revised model showed that even not significant, but the trend is CH₄ emission decrease by autumn shallow tillage only with high soil water content condition.

In conclusion, the results from this study showed that, to decrease CH₄ emission from following rice growth season, it is very important to improve aerobic decomposition of rice straw in early period of former fallow season with relatively higher temperature, especially in cold region such as Tohoku region, Japan, where winter cool climate retard the decomposition rate of organic matters. Further researches are needed to reveal the mechanism of CH₄ mitigation options for application of adequate strategies in the different regions with different climate, soil and farming management conditions.

要旨和訳：

メタン(CH₄)は二酸化炭素 (CO₂) に次いで放射強制力の大きな温室効果ガスであり、人為的要因による温室効果の約 17%が CH₄によるものである。水田は大気中に存在する CH₄の主要な放出源であり、人為的要因により発生した CH₄ の約 11%が水田由来である。生産性と持続性を兼ね備えた水田稲作はイネ栽培において重要な役割を持ち、水田由来の CH₄ を削減する実用的な対策を模索することは地球温暖化のみならず世界人口の増加に伴う食糧需要の増大に対応するための世界的な課題である。昨今日本の単作稲作において一般的にイネ収穫時の副産物として生成される稲ワラは圃場に直接散布される。散布・すき込みされた稲ワラは休耕期の酸化分解を経て翌年のイネ生育期における CH₄生成の基質となる。日本の水田面積のおよそ 2.5 割が東北地方に分布するが、この東北地方の特徴である冬季の低温が休耕期の酸化分解率および翌年の CH₄ 放出量に与える影響について研究した例は少ない。本論文では日本寒冷地の気象条件を考慮し、休耕期における稲ワラの酸化分解率と CH₄放出量との関係を明らかにすること、ならびに水田からの放出 CH₄量を削減する緩和策を評価することを目的として室内試験、圃場試験、モデル評価を行った。

室内試験では、岩手県盛岡市の黒ボク土壌を用いて、温度・水分量が稲ワラの好気分解率に及ぼす影響を調べた。試験には安定同位体 ¹³C でラベルした稲ワラを用い、異なる 3 手法 (CO₂発生量、土壌有機炭素含量 (SOC)、SOC の δ¹³C 値) で分解率を算出してその水分・温度応答を比較した。試験は水分 2 条件 (WFPS60%および 100%)、温度 4 条件 (±5°C、5°C、15°C、25°C) の要因実験として実施し、24 週間の培養期間中ヘッドスペースの CO₂濃度、SOC および SOC の δ¹³C 値について定期的なサンプリングを行った。解析の結果、分解率を算出する 3 手法のうち、CO₂発生量を用いたものが最も高い精度および水分・温度・培養期間の各条件への応答性を示した。CO₂発生量から算出した稲ワラの炭素分解率は温度の低下に伴い低下し、東北地域の冬季気象を模した±5°C

(12 時間毎に 5°C、-5°C を繰り返す) 条件では 24 週間の培養後でも 14% 以下に留まった。

圃場試験では、秋耕起時稲ワラをすき込む深さが寒冷地水田からの CH₄ 放出量に及ぼす影響を評価するため岩手県盛岡市に位置する黒ボク水田圃場において 2011 年の秋から 2014 年の夏まで検証試験を行った。秋の耕起深 (通常: 15cm、浅耕: 7cm) を試験条件として設置し、翌年のイネ生育期間中の CH₄ 放出量を定期的に測定した。3 年間の試験の結果より、本試験において秋の耕起深は翌年の CH₄ 放出量に影響を及ぼさないことが明らかとなった。一般に稲ワラ分解率は温度と水分の双方に影響を受けるが、本試験においては CH₄ 放出量 (イネ生育期間初期) の年間差は前年の稲ワラすき込み直後の積算気温のみと相関があることが示された。数値シミュレーションの結果、本試験圃場は透水性が高く落水後直ちに土壤の水分量が減少することが明らかとなった。このことから、秋耕起深の浅化による CH₄ 放出量削減メカニズムは過剰水分による分解阻害の改善であり、この緩和策が CH₄ 削減効果を発揮するのは休耕期に水分が過剰となる圃場に限られると考えられた。

モデル評価では、包括的プロセスベースモデル DNDC-Rice を用いて秋耕起深を浅くすることによる CH₄ 削減効果の評価を行った。本評価に先立って行った検証計算では、DNDC-Rice モデルは日本の 6 地点における慣行秋耕起深 (15cm) 圃場からの積算 CH₄ 放出量を精度よく推定した。圃場試験で得られた仮説を検証するため、休耕期の土壤水分が高い条件を仮想条件として追加した。モデル評価の結果、休耕期の土壤水分は仮想条件の設定により増加したが、秋の耕起深が CH₄ 放出量に及ぼす影響は休耕期の土壤水分が高い条件でも明らかでなかった。過剰水分による有機物分解の阻害程度を増加させる試行的なモデル改変を行うと秋耕起の浅化は土壤水分が高い条件でのみ有意ではないものの CH₄ 放出量を減少させる傾向を示した。

本研究の結果、特に冬季の低温が有機物の分解を遅延させる冷涼な地域 (東北地方) では、休耕期初期の比較的温度が高い時期に投入有機物の好気分解を推し進めることが肝要であることが示された。気象・土壤・管理方法の異なる地域に適切な緩和策を導入するためには緩和策のメカニズム解明が求められ、今後更なる研究が必要である。

論文審査の結果の要旨

地球温暖化の緩和策としては、水田由来の CH₄ を削減することが世界的な課題である。日本の単作稲作において一般的にイネ収穫時の副産物として生成される稲ワラは圃場に直接散布され、散布・すき込みされた稲ワラは休耕期の酸化分解を経て翌年のイネ生育期における CH₄ 生成の基質となる。本論文は日本寒冷地の気象条件を考慮し、休耕期における稲ワラの酸化分解率と CH₄ 放出量との関係を明らかにすること、ならびに

水田からの放出 CH_4 量を削減する緩和策を評価することを目的として室内試験、圃場試験、モデル評価を行ったものである。

室内試験では、岩手県盛岡市の黒ボク土壌を用いて、温度・水分量が稲ワラの好気分解率に及ぼす影響を調べた。試験には安定同位体 ^{13}C でラベルした稲ワラを用い、異なる3手法 (CO_2 発生量、土壌有機炭素含量 (SOC)、SOC の $\delta^{13}\text{C}$ 値) で分解率を算出してその水分・温度応答を比較した。試験は水分2条件 (WFPS60%および100%)、温度4条件 ($\pm 5^\circ\text{C}$ 、 5°C 、 15°C 、 25°C) の要因実験として実施し、培養期間は24週間とした。解析の結果、分解率を算出する3手法のうち、 CO_2 発生量を用いたものが最も高い精度および水分・温度・培養期間の各条件への応答性を示した。 CO_2 発生量から算出した稲ワラの炭素分解率は温度の低下に伴い低下し、東北地域の冬季気象を模した $\pm 5^\circ\text{C}$ (12時間毎に 5°C 、 -5°C を繰り返す) 条件では24週間の培養後でも14%以下に留まった。

圃場試験では、秋耕起時稲ワラをすき込む深さが寒冷地水田からの CH_4 放出量に及ぼす影響を評価するため、岩手県盛岡市に位置する黒ボク水田圃場において2011年の秋から2014年の夏まで検証試験を行った。秋の耕起深 (通常:15cm、浅耕:7cm) を試験条件として設置し、翌年のイネ生育期間中の CH_4 放出量を定期的に測定した。3年間の試験の結果より、本試験において秋の耕起深は翌年の CH_4 放出量に影響を及ぼさないことが明らかとなった。一般に稲ワラ分解率は温度と水分の双方に影響を受けるが、本試験においては CH_4 放出量 (イネ生育期間初期) の年間差は前年の稲ワラすき込み直後の積算気温のみと相関があることが示された。よって、秋の浅耕が CH_4 削減の緩和策としては、休耕期に水分が過剰となる圃場に限られると考えられた。

モデル評価では、包括的プロセスベースモデル DNDC-Rice を用いて秋耕起深を浅くすることによる CH_4 削減効果の評価を行った。本評価に先立って行った検証計算では、DNDC-Rice モデルは日本の6地点における慣行秋耕起深 (15cm) 圃場からの積算 CH_4 放出量を精度よく推定した。圃場試験で得られた仮説を検証するため、休耕期の土壌水分が高い条件を仮想条件として追加した。モデル評価の結果、休耕期の土壌水分は仮想条件の設定により増加したが、秋の耕起深が CH_4 放出量に及ぼす影響は休耕期の土壌水分が高い条件でも明らかではなかった。過剰水分による有機物分解の阻害程度を増加させる試行的なモデル改変を行うと秋耕起の浅化は土壌水分が高い条件でのみ有意ではないものの CH_4 放出量を減少させる傾向を示した。

以上のように、本論文は、室内試験、圃場試験とモデル評価を行った結果により、寒冷地水田における休耕期間稲ワラ分解率が明らかにし、盛岡市にある黒ボク土水田圃場においては秋の耕起深は翌年の CH_4 放出量に影響を及ぼさないことが明らかにした。また秋の耕起深が夏の CH_4 放出量に及ぼす影響は、休耕期の土壌水分に制御されることがモデル評価で明らかにした。

よって本審査委員会は、「岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準」に

則り審査した結果、本論文を博士（農学）の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

学位論文の基礎となる学術論文

主論文

1. Miyuki Nakajima, Weiguo Cheng, Shuirong Tang, Yasuaki Hori, Eiko Yaginuma, Satoshi Hattori, Susumu Hanayama, Keitaro Tawaraya, Xingkai Xu (2016) Modeling aerobic decomposition of rice straw during off-rice season in an Andisol paddy soil in a cold temperate region of Japan: Effects of soil temperature and moisture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62: 90-98.

Doi:10.1080/00380768.2015.1121116.