

氏名	タン スエイ 湯 水榮 (TANG Shuirong)
本籍 (国籍)	中国
学位の種類	博士 (農学)
学位記番号	連研第連研 684 号
学位授与年月日	平成 29 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 生物生産科学
学位論文題目	The responses of soil organic carbon and nitrogen contents, and their mineralization to global warming in rice paddy ecosystems (水田生態系における土壌炭素・窒素およびそれらの無機化に及ぼす地球温暖化の影響)
学位審査委員	主査 山形大学准教授 程 為国 副査 俵谷 圭太郎(山形 教授), 青山 正和(弘前 教授), 谷 昌幸 (帯広 教授)

論文の内容の要旨

Global warming is caused by increasing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere, such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide by anthropogenic activities, including intensive agriculture. Rice paddy is worldwide considered as a major source of atmospheric CH₄. Nitrogen (N) is an essential element for plant growth and N cycling in paddy soil is also greatly affected by global warming. Soil organic carbon (SOC) decomposition and N mineralization are closely coupled with each other and would be influenced by climate change and in turn affect C and N cycling in the terrestrial ecosystems. However, so far, the impacts of climate change such as global warming and elevated atmospheric CO₂ concentration ([CO₂]) on SOC and total N (TN) contents, and their mineralization have still not been fully understood in rice paddy ecosystems. Therefore, three level experiments from indoor simulation (via aerobic and anaerobic incubation) to open-field manipulation were conducted in this study.

In the first experiment, Andisol and Inceptisol paddy soils collected from Morioka and Yamagata were firstly pre-incubated at 25°C and 40% water-filled pore space (WFPS) for four weeks, then aerobically incubated under four temperature (±5, 5, 15 and 25°C) and two soil moisture (60% and 100% WFPS) conditions (simulating field condition in Tohoku region, Japan during off-rice season) for 24 weeks, and finally anaerobically incubated at 30°C and under waterlogged conditions (modeling field condition during following rice growth season) for four weeks. The main objective of this experiment was to simulate the effects of soil temperature and moisture condition

on SOC decomposition and N mineralization during off-rice season, and the subsequent CH₄ production during rice growth season in Tohoku region, Japan. The results showed that both aerobically and anaerobically SOC decomposition and N mineralization in Andisol and Inceptisol were significantly affected by soil temperature. However, the significantly stimulated effect of soil moisture on aerobic N mineralization was only found in Andisol probably owing to its higher inorganic N (NH₄⁺-N + NO₃⁻-N) concentration compared with Inceptisol. After 24-week aerobic incubation, CH₄ production during the subsequently anaerobic incubation was quite low and decreased with the increase of previous soil temperature during aerobic incubation. This result implied that high soil temperature and medium moisture during off season was favorable to mitigate CH₄ emission in the following rice growth season. Despite high SOC and TN contents in Andisol, it had less liable C and N contents observed by the ratios of decomposed C (CO₂ + CH₄) to SOC, and mineralized N (NH₄⁺-N production) to TN, compared with Inceptisol. These results suggested that the C and N in Andisol were more stable than Inceptisol with less biodegradability.

In the second experiment, a 5-year continuous soil warming experiment during both rice growth (+2°C above control temperature (CT)) and off-rice (+1°C above CT) seasons was carried out in a single rice paddy field in Tsukuba, Japan to investigate the effect of soil warming on rice biomass, SOC and TN contents, and their mineralization in single rice paddy ecosystem. Soil samples were collected bi-yearly in autumn after rice growth season, and in spring after fallow season, respectively. The 5-year results showed that rice aboveground biomass and root biomass were not significantly increased by soil warming probably due to the decreased N availability expressed by anaerobic NH₄⁺-N production. However, soil warming significantly decreased SOC and TN contents, C decomposition and N mineralization potentials obtained from 4-week directly anaerobic incubation of air-dried soil samples at 30°C and under submerged conditions. This result indicated that soil warming has a trend to decrease SOC and TN contents in rice paddy field, leading to a positive feedback of soil organic matter (SOM) decomposition to future climate change. The annual decreased trend of SOC and TN contents in this study might be mainly ascribed to yearly removal of rice straw after rice harvest. The seasonal variations of SOC and TN contents could be explained by the enhanced C input via plant photosynthesis during rice growth season and accelerated rate of SOM decomposition during off-rice season. After the annual and seasonal soil samples were pre-incubated at 25°C and 40% WFPS for four weeks, CH₄ production during subsequently anaerobic incubation could be ignored compared with CO₂ production, which might be explained by rapid depletion of labile substrates and altered soil microbial communities. Also, the effect of soil warming on C and N mineralization potentials was significantly eliminated by pre-incubation.

In the third experiment, an open-field 5-year experiment combined with elevated [CO₂] (+200 ppm above the ambient [CO₂] treatment) and elevated soil temperature (+2 °C above CT) during rice growth season was conducted in a single rice paddy field in Tsukuba-FACE site, Japan since

2010 to estimate the interactive effects of elevated soil temperature and atmospheric [CO₂] on amount and components of SOM in rice paddy soil. As a whole, the increased trend of averaged SOC and TN contents induced by elevated [CO₂] was observed in the first soil layer (0-10 cm). Contrary to elevated [CO₂], soil temperature had a trend to decrease SOC and TN contents in the first soil layer. SOC decomposition and N mineralization potentials were also increased by elevated [CO₂] and decreased by elevated soil temperature. The fraction of new plant-derived C into paddy soil due to elevated [CO₂] under control and elevated soil temperature conditions, calculated by $\delta^{13}\text{C}$ values of decomposed C (CO₂+CH₄ productions) was both 34.0% in first soil layer under two temperature conditions. In the second soil layer (10-20 cm), it was 18.1% in control soil temperature and 16.4% in elevated soil temperature. This result indicated that plant-derived decomposable C in the soils was not affected by elevated soil temperature.

In conclusion, these results in this study showed that both aerobic and subsequently anaerobic SOC decomposition and N mineralization were significantly affected by soil temperature and moisture at aerobic incubation conditions. Soil warming significantly decreased SOC and TN contents in plow soil layer observed by stimulated C decomposition and N mineralization potentials, and insignificantly increased rice biomass in rice paddy ecosystem, thus, probably leading to a positive feedback of SOM decomposition to future climate change. Elevated [CO₂] had a trend to enhance SOC and TN contents larger than their mineralization resulting in an increased SOC stocks and sequestration in rice paddy ecosystem. The combined effects of soil warming and [CO₂] on SOM amount and components should be further studied under different rice paddy fields.

要旨和訳：

集約農業を含む人為活動によって大気中における二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素などの温室効果ガスの濃度上昇が地球温暖化を引き起こしている。水田は、CH₄の主要な放出源である。窒素は植物成長のために必要な元素であり、また土壌中の窒素循環も地球温暖化に影響される。土壌中における有機態炭素 (SOC) の分解と窒素無機化は、互いに密接に連動し、気候変動に影響されて、陸域生態系における炭素・窒素の循環に影響を与える。しかしながら、地球温暖化と大気中 CO₂濃度上昇が、水田生態系における炭素・窒素およびそれらの無機化にどのように影響を与えるかについてはまだ不明である。従って、本研究では、室内のモデル実験、開放的な水田で温度上昇ならびに温度と CO₂濃度の同時上昇の野外圃場において、水田生態系における土壌炭素・窒素およびそれらの無機化に及ぼす地球温暖化の影響に関する実験を行った。

まず、室内のモデル実験においては、東北地方の盛岡市と山形市にある黒ボク土と灰色低地土の水田圃場から採取した土壌を、25°CとWFPS 40%の水分条件で4週間前培養した後、それぞれ温度4段階(±5, 5, 15, 25°C)と水分2段階(WFPSの60, 100%)の異なる処理を行い、24週間好氣的に培養し、その後それらのサンプルを30°C、湛水条件下で4週間嫌氣的に培

養した。東北地方の水田圃場において、休耕期間における土壌有機物の分解とイネ生育期間中における CH₄生成が、土壌温度と水分にどのように影響されるかをモデル実験で明らかにするのは、本室内培養実験の主要な目的であった。その結果、土壌温度と水分は、好気条件とそれに続いての嫌気条件でも、2種類土壌の SOC 分解に与える影響は有意であったが、窒素無機化に与える影響は、黒ボク土と灰色低地土の間で異なった。好気培養後の嫌氣的な培養では、好気培養時の温度が高ければ高いほど、有機物分解からの CH₄生成量が低かった。このことにより、休耕期の高気温と適切な土壌水分は、稲生育期間中に土壌有機物由来の CH₄排出量を抑制することが示唆される。また、炭素分解量と SOC 量および窒素無機化量と全窒素量 (TN) の割合は、灰色低地土より黒ボク土のほうが低かったことから、黒ボク土の土壌有機物の安定性が灰色低地土より高かった。

次に、つくば市にある農業環境研究所内水田に、4反復の温暖化区と対照区を設け、単作稲作水田生態系における稲の生育、土壌 SOC と TN およびそれらの無機化に及ぼす土壌温暖化の影響を調査するために、水稻生育期間（湛水期、対照温度 (CT) + 2°C以上）と休耕期間（落水期、CT + 1°C以上）に土壌加温実験を5年間継続して行った。土壌サンプルは毎年水稻の収穫後の秋と休耕期の後の春に2度採集した。その結果、稲の地上部バイオマスと根バイオマスは、温暖化の影響が見られなかった。しかし、温暖化は SOC と TN を有意に減少させ、また、30°C・湛水条件、4週間で測定した炭素分解量および窒素無機量も有意に減少させた。SOC と TN は、年々減少傾向にあり、収穫後の稲わらをすべて持ち出すことによるものだと考えられる。季節性の SOC と TN 含量の変動は、水稻生育期間中における植物光合成を介した炭素のインプットと、休耕期間中における SOC の分解を介した炭素のアウトプットによるものと考えられる。さらに 25°C・40%WFPS で4週間前培養を行った風乾土壌サンプルは、前培養を行わない土壌サンプルと比べると、土壌炭素分解量と窒素無機量に及ぼす温暖化の影響は、前培養より消失されたことを明らかにした。

そして、実験3では、つくばみらい市にある FACE 実験施設において、土壌温度と大気 CO₂濃度の同時上昇が、水田土壌中有機物の量と質にどのように影響を与えるかを調べるため、実施5年後の各処理区の跡土壌を採集し分析を行った。イネ生育期間中の土壌温度と大気 CO₂濃度の上昇幅は、対照区より 2°Cと 200ppm であった。その結果、全体傾向としては、土壌表層 (0-10cm) の SOC と TN 含量は CO₂の濃度上昇によって増加し、土壌温度上昇によって減少した。炭素分解量と窒素無機化量に及ぼす温度と CO₂の濃度上昇の影響は、SOC と TN 含量と同様であった。大気 CO₂濃度上昇処理区においては、 $\delta^{13}\text{C}$ 値を用いて計算した易分解炭素量（嫌気培養実験から生成された CO₂と CH₄の総量）のうち、新しい植物由来の炭素画分は二つの温度条件下でどちらも 0-10cm の表層で 34.0%であった。10-20 cm の下層においては、対照温度区は 18.1%、温度上昇区は 16.4%であった。この結果より、稲から土壌への炭素転流には、温度上昇に及ぼす影響がなかったことが示唆された。

以上3つの実験結果をまとめると、好気培養をする時の土壌温度と水分は、好氣的及びその後の嫌氣的な SOC の分解に有意に影響を与えることを示唆した。温度上昇は、単作稲

作水田土壌中の SOC と TN 含量および炭素分解量と窒素無機化量を有意に減少させ、将来の気候変動に正のフィードバックをもたらす恐れがあり、一方、大気 CO₂の濃度上昇は、炭素の分解と窒素無機化より、SOC と TN 含量を増加させる傾向があり、水田生態系における炭素の貯蔵を増加させると考えられる。単作稲作水田と異なる水田生態系における土壌有機物に及ぼす温度と大気 CO₂濃度の上昇の影響は、今後更なる研究が必要である。

論文審査の結果の要旨

地球温暖化と大気中 CO₂濃度上昇が、陸域生態系における炭素・窒素およびそれらの無機化にどのように影響を与えるかに関しては未知の点が多く、特に水田生態系に与える影響はまだ不明である。本論文は、室内のモデル実験、周年開放系温暖化実験水田圃場ならびに温度と CO₂濃度の同時上昇の野外圃場において、水田生態系における土壌炭素・窒素およびそれらの無機化に及ぼす地球温暖化の影響に関する研究結果をまとめたものである。

室内のモデル実験では、盛岡市と山形市にある黒ボク土と灰色低地土の水田圃場から採取した土壌を、25℃と WFPS 40%の水分条件で4週間前培養した後、それぞれ温度4段階(±5, 5, 15, 25℃)と水分2段階(WFPSの60, 100%)の異なる処理を行い、24週間好氣的に培養し、その後それらのサンプルを30℃、湛水条件下で4週間嫌氣的に培養した。その結果、土壌温度と水分は、好気条件とそれに続いての嫌気条件でも、2種類土壌の有機態炭素(SOC)分解に与える影響は有意であったが、窒素無機化に与える影響は、黒ボク土と灰色低地土の間で異なった。好気培養後の嫌氣的な培養では、好気培養時の温度が高ければ高いほど、有機物分解からのCH₄生成量が低かった。このことにより、休耕期の高気温と適切な土壌水分は、稲生育期間中に土壌有機物由来のCH₄排出量を抑制することが示唆される。また、炭素分解量とSOC量および窒素無機化量と全窒素量(TN)の割合は、灰色低地土より黒ボク土のほうが低かったことから、黒ボク土の土壌有機物の安定性が灰色低地土より高かった。

周年開放系温暖化実験水田圃場試験では、つくば市にある農業環境研究所内の水田を利用し、水稻生育期間(湛水期、対照温度(CT)+2℃以上)と休耕期間(落水期、CT+1℃以上)に土壌加温実験を5年間継続して行った。その結果、稲の地上部と根バイオマスは、温暖化の影響が見られなかった。しかし、温暖化はSOCとTNを有意に減少させ、また、30℃・湛水条件、4週間で測定した炭素分解量および窒素無機量も有意に減少させた。季節性のSOCとTN含量の変動は、水稻生育期間中における植物光合成を介した炭素のインプットと、休耕期間中におけるSOCの分解を介した炭素のアウトプットによるものと考えられる。

温度とCO₂濃度の同時上昇の野外圃場のFACE実験では、実施5年後の各処理区の跡土壌を採集し、土壌の分析と室内の培養実験を行った。その結果、全体傾向としては、土壌表層(0-10cm)のSOCとTN含量はCO₂の濃度上昇によって増加し、土壌温度上昇によって減少した。炭素分解量と窒素無機化量に及ぼす温度とCO₂の濃度上昇の影響は、SOCとTN含量と同様であった。大気CO₂濃度上昇処理区においては、 $\delta^{13}\text{C}$ 値を用いて計算した易分解炭素

量（嫌気培養実験から生成された CO₂と CH₄の総量）のうち、新しい植物由来の炭素画分は二つの温度条件下でどちらも 0-10cm の表層で 34.0%であった。10-20 cm の下層においては、対照温度区は 18.1%、温度上昇区は 16.4%であった。この結果より、稲から土壌への炭素転流には、温度上昇に及ぼす影響がなかったことが示唆された。

以上のように、本論文は、室内培養と野外の圃場実験から得た結果により、土壌温度と水分は、好氣的及びその後の嫌氣的な土壌有機物分解に有意に影響を与え、また土壌温度上昇は、単作稲作水田土壌中の SOC と TN 含量および炭素分解量と窒素無機化量を有意に減少させ、一方大気 CO₂の濃度上昇は、SOC と TN 含量を増加させる傾向があり、水田生態系における炭素の貯蔵を増加させることを明らかにした。

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. Tang, S., Cheng, W., Hu, R., Nakajima, M., Guigue, J., Kimani, S.M., Sato, S., Tawaraya, K., Xu, X. (2016) Decomposition of soil organic carbon influenced by soil temperature and moisture in Andisol and Inceptisol paddy soils in a cold temperate region of Japan. *Journal of Soils and Sediments*, DOI: 10.1007/s11368-016-1607-y (First Online: 25 November 2016, <http://link.springer.com/article/10.1007/s11368-016-1607-y>).

参考論文

1. Tang, S., Cheng, W., Hu, R., Guigue, J., Kimani, S.M., Tawaraya, K., Xu, X. (2016) Simulating the effects of soil temperature and moisture in the off-rice season on rice straw decomposition and subsequent CH₄ production during the growth season in a paddy soil. *Biology and Fertility of Soils*, 52: 739–748. DOI:10.1007/s00374-016-1114-8
2. Nakajima, M., Cheng, W., Tang, S., Hori, Y., Yaginuma, E., Hattori, S., Hanayama, S., Tawaraya, K., Xu, X. (2016) Modeling aerobic decomposition of rice straw during off-rice season in an Andisol paddy soil in a cold temperate region, Japan: Effects of soil temperature and moisture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62: 90–98. Doi: 10.1080/00380768.2015.1121116