

氏名	ムエン, トアン シ NGUYEN, Toan Sy
本籍 (国籍)	ベトナム
学位の種類	博士 (農学)
学位記番号	連研第 719 号
学位授与年月日	平成 30 年 9 月 25 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	<b>Studies on the changes in soil organic matter and rice yield with manure application and climate change based on the over 30 years long-term experiment and statistical data in Yamagata, Japan (土壌有機物と稲収量の年次変動に及ぼす有機物施用と気候変動の影響 : 山形県における長期連用試験と長期統計データからの解析)</b>
学位審査委員	主査 程 為国(山形 教授) 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 has been observed over decades, which is affecting to agricultural productions. There are several researches on the effects of climate change on rice yield, but the effects on rice growing stages during long-term period over 30 years are limited. On the other hand, observations from over 30 years long-term experiments can provide an understanding of the characteristics and functional changes occurring in soils across time with climate change, to help in predicting soil productivity and soil-environment interactions. Natural stable isotopes of C and N ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) are widely used to study the dynamic of soil organic matter (SOM) in various plant-soil ecosystems, but the stable isotope approach is not still applied for long-term experiment in submerged rice paddies. Therefore, three studies were carried out for this thesis to understand how climate change and long-term manures application affect SOM and rice yield based on the over 30 years long-term single rice experiment and statistical data in Yamagata Prefecture, Japan.

In the first part, statistical data was used to test the changes of climate, rice yield and their correlations in four regions in Yamagata Prefecture (Murayama, Mogami, Okitama and Shonai) from 1982-2017. The results showed that temperatures have been increasing significantly in four regions ( $P < 0.05$ ), strongly in summer season during rice growing stages. Long-term observation of its impacts on rice yield and yield components were observed from 1982-2017 in four main rice produced regions. Results showed temperatures of crop season had strong positive correlation with rice yield in the four regions, meanwhile, off season tend to negative effects. There is also strong positive effect of temperatures in two growth stages showed, as well as the 5-day heading on rice yield. Among 4 yield components, 1000-grain weight and ripening percentage have high positive correlations with rice yield, while the panicle/m<sup>2</sup> and spikelet/panicle did not show significant correlation. The long period for DAT (days after transplanting)-HD (heading day) resulted in decreasing yield, while HD-HVD (harvesting day) duration has no correlation. Our results prove that

using rice growth stages in long-term period could be considered as a strong tool to access the effect of climate changes on rice yield.

In the second part, 32 years archive soil samples from plough layer were used to study the changes in SOM and its mineralization potential in a rice paddy during 32 years long-term application of inorganic fertilizers and organic matter from 1983-2014, which is located at the Yamagata Integrated Agricultural Research Center, Yamagata, with five treatments as [1) PK, 2) NPK, 3) NPK + rice straw (RS), 4) NPK + rice straw compost (CM1), and 5) NPK + overdosed rice straw compost (CM3)]. The results indicated that application of rice straw and compost increased significantly soil organic carbon, total nitrogen (SOC and TN) ( $P < 0.05$ ), meanwhile, without RS and CM did not show significant change. The increase in RS, CM1 and CM3 also observed in relatively compared with NPK control. It is interesting that  $\delta^{13}\text{C}$  of all treatments decreased annually, as the effects of RS, CM and the residue from rice plant. The high negative correlation of  $\delta^{13}\text{C}$  values and SOC, proved that  $\delta^{13}\text{C}$  could be an organic content indicator. The changes in  $\delta^{15}\text{N}$  did not show clearly as with  $\delta^{13}\text{C}$ , but we found that RS application led to decrease  $\delta^{15}\text{N}$ , compared to the rest of 4 treatments. Surprisingly, available P increased significantly in all treatments ( $P < 0.001$ ). For identifying the effects of long-term application of organic matter and mineral fertilizers application on the changes in soil C decomposition and N mineralization in a rice paddy, anaerobic incubation experiments were conducted in lab. Decomposed C ( $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  productions) and mineralized N ( $\text{NH}_4^+$ -N production) were measured after 4 weeks anaerobic incubation at  $30^\circ\text{C}$  in submerged condition. The results showed that the mean ratio decomposed C to mineralized N (Dec-C/Min-N) lower as the application of organic matters. The mean ratio Dec-C/Min-N are around 5.6~6.2. We found the trend of ratio Dec-C/Min-N as  $\text{PK} > \text{NPK} > \text{CM1} > \text{RS} > \text{CM3}$ , indicates that the effects of the trend come from rice straw and compost application. The research gives us a better understand of C decomposition and N mineralization after long term inorganic fertilizers and organic matter application.

In the third part, the labile organic matter through extractable pools by hot water and water extracted methods were carried out for understanding how the quality and quantity of labile organic matter affect by long-term organic matter application. Soil samples were collected after a 31-years of long-term experiment as shown above. The amounts of hot water extracted organic carbon and nitrogen (HWEOC and HWEON) at  $80^\circ\text{C}$  and 16 hours, water extracted organic carbon and nitrogen (WEOC and WEON) at room temperature, and their  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  were measured for both surface (0-15 cm) and subsurface (15-25 cm) layers. The ratios of soil to water were 1:1.5 and 1:10 for both hot water and water extraction procedures. The results showed that the amounts of extracted organic carbon and nitrogen (EOC and EON) from hot water and water extraction had a high correlation with those of bulk soil, which increased with the organic matter application, compared to NPK treatment. The  $\delta^{13}\text{C}$  values of HWEOC and WEOC ranged from -28.3 to -26.4‰, similar to the original rice straw and rice straw compost. There was no correlation between  $\delta^{13}\text{C}$  values and amounts of HWEOC (or WEOC). Meanwhile, the  $\delta^{13}\text{C}$  values of bulk soils ranged from -25.7 to -23.2‰, and decreased after long-term application of organic matters for both RS and CM treatments compared to the NPK treatment. These results demonstrate that HWEOC and WEOC originated from rice plants photosynthesis and the organic matter application, and not from the original bulk soil. The significant positive correlations between amounts of hot water or water extracted organic C (or N) and available

N ( $P<0.001$ ) implied not only HWEOC, but also WEOC, HWEON and WEON could be used as integrated indexes for soil quality in this long-term experiment.

In conclusion, this study showed that the warming phenomenons had been observed in four areas in Yamagata Prefecture, mostly happened in summer rather than winter. As the results, rice yields were affected strongly with the temperature in crop season (June-September), as well as in two growth stages of rice plant (DAT-HD and HD-HVD) ( $P<0.05$ ). The application of rice straw and compost increased soil organic matter and soil fertility. Interestingly, stable  $\delta^{13}\text{C}$  could be an useful and sensitive carbon tracer, and affected by its C pools. Further studies on labile pools of organic matter in long time duration, therefore, strongly recommended to conduct.

## 要旨和訳：

地球温暖化は数十年間にわたって観察されており、農業生産にも影響を与えている。気候変動が稲収量に及ぼす影響についてはいくつかの研究があるが、30年以上の長期間にわたって、稲の各生育段階への影響は限られている。一方、30年以上の長期連用試験から得た結果は、土壌生産性と土壌および環境相互作用や、気候変動に伴って土壌特性と機能性の変化などの予測に役に立っている。様々な植物・土壌生態系における土壌有機物の動態変動を研究するために炭素と窒素の安定同位体自然存在比( $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ )が広く利用されているが、湛水条件での水田長期連用実験には安定同位体アプローチはまだ応用されていない。そこで、本研究では、山形県における30年以上の長期間にわたる長期連用試験と官署統計データに基づいて、気候変動と有機物施用が土壌有機物と稲収量にどのように影響するかを明らかにするために3つの研究を行った。

研究1では、1982～2017年の36年間に、山形県の4地域(村山、最上、置賜、庄内)における気候、稲収量およびそれらの相関関係の変化を統計的に分析した。その結果、稲作期の夏期には4つの地域でも気温が著しく上昇していることが示された( $P<0.05$ )。また、1982年から2017年にかけて、4地域における稲収量および収量構成四要素への影響を分析した。その結果、稲栽培期間中の気温が4つの地域でも稲収量と強い正の相関を示した。一方、休耕期間の気温が稲収量に悪影響を及ぼす傾向があることも示した。4つの稲収量構成要素のうち、千粒重と登熟歩合は稲収量と正の相関を示したが、面積あたり穂数と穂あたり粒数は有意な相関を示さなかった。以上の結果より、稲生育の各段階における気候変動が稲収量に与える影響は異なることを明らかにした。

研究2では、1983年から2014年までの32年間の無機と有機物肥料を長期施用した水田における土壌炭素・窒素およびそれらの無機化能の変化を調べるために、32年間のアーカイブ土壌試料を用いて分析を行った。山形県農業総合研究センター構内にある長期連用試験の5つの処理区、即ち(1) PK、(2) NPK、(3) NPK + 稲わら(RS)、(4) NPK + 稲わら堆肥(CM1)、(5) NPK + 過剰稲わら堆肥(CM3)を研究対象とした。その結果、稲わらや堆肥の施用は土壌有機態炭素(SOC)、全窒素(TN)が有意に増加した( $P<0.05$ )。一方、長期稲栽培の影響で、すべての処理の $\delta^{13}\text{C}$ の値が、年々低下してきた。また $\delta^{13}\text{C}$ 値とSOCの高い負の相関があるから、 $\delta^{13}\text{C}$ が土壌有機物の変化指標として可能であることを明らかにした。 $\delta^{15}\text{N}$ の変化は $\delta^{13}\text{C}$ のような明確的な変動がなかったが、5つの処理の中に、RS施用区の $\delta^{15}\text{N}$ は他処理区より低下したことを見出した。さらに可給態リンはすべての処理区において長期連用期間に伴って有意に増加した( $P<0.001$ )。水田土壌炭素分解および窒素無機化の変化に対する有機物の長期施用の影響

を調べるために、室内での嫌気培養実験も行った。湛水条件下 30°C で 4 週間の嫌気培養後、易分解性炭素(Dec-C、CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> 生成量)および無機化窒素 (Min-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 生成量) を測定した結果、5 つの処理区の中に、Dec-C/Min-N 値の順は、PK> NPK> CM1> RS> CM3 であり、有機物施用処理区がやや低かった。平均的に Dec-C/Min-N は約 5.6~6.2 であった。

研究 3 では、易分解性有機物の質と量がどのように長期有機物連用に影響されるかを明らかにするために、熱水抽出法を用いて抽出可能な不安定な有機物の測定を行った。研究 2 で述べた長期連用試験の水田圃場において、31 年目の秋に採取した土壌試料を供試した。80°C 16 時間熱水で抽出した有機態炭素と窒素(HWEOC と HWEOON)、室温で抽出した水抽出有機態炭素と窒素(WEOC と WEON)およびそれらの  $\delta^{13}\text{C}$  と  $\delta^{15}\text{N}$  の値を、表層(0-15cm)と下層(15-25cm)に分けて測定した。また抽出するとき、土壌と水の割合は 1:1.5 と 1:10 で、両方とも行った。その結果、熱水抽出有機態炭素と窒素の量は、NPK 処理と比較して有機物施用で増加し、土壌の SOC と TN と高い相関を示した。HWEOC と WEOC の  $\delta^{13}\text{C}$  値は、元の稲わらと稲わら堆肥と同様に-28.3~-26.4%であった。 $\delta^{13}\text{C}$  値と HWEOC (または WEOC)の量との間に相関はなかった。一方、土壌炭素の  $\delta^{13}\text{C}$  値は、-25.7~-23.2%の範囲であり、NPK 処理と比較して RS 処理および CM 処理の両方で有機物の長期適用後に低下した。これらの結果は、HWEOC および WEOC の炭素源は、元土壌からではなく、イネの光合成および有機物施用に由来することを明らかにした。本研究では熱水抽出および水抽出土壌有機態炭素と窒素は、可給態 N との間に有意な正の相関( $P < 0.001$ )があるので、HWEOC だけでなく、WEOC、HWEOON と WEON も土壌性質の変化を判断する指標として可能であることを明らかにした。

全体を纏めると、山形県の 4 つの地域における温暖化は、最近の 30 年間の間に確実に進んでいる。また夏季の温暖化の進行は冬季より激しい。稲収量およびイネの 2 つの生育段階(移植から出穂と出穂から収穫)の期間は、その年の 6 月から 9 月までの温度に強く影響される( $P < 0.05$ )。また、稲わらと稲わら堆肥の施用は土壌有機物を増加させると同時に土壌の窒素肥沃度を促進させる。さらに、易分解性有機物と水溶性有機物などの土壌炭素源において、炭素安定同位体の自然存在比の  $\delta^{13}\text{C}$  は、有用かつ敏感性がある炭素トレーサーであることを本研究で明らかにした。なお、長期間にわたる水田土壌中の易分解性有機物の動態変動についてはさらなる研究が必要である。

## 論文審査の結果の要旨

地球温暖化は数十年間にわたって観察されており、農業生産にも影響を与えている。30 年以上の長期間にわたって、気候変動が稲の各生育段階に与える影響に関する研究が限られている。一方、30 年以上の長期連用試験から得た結果は、土壌生産性と環境保全の評価に役立つ。そこで、本研究では、山形県における 30 年以上の長期間にわたる長期連用試験と官署統計データに基づいて、気候変動と有機物施用が稲収量と土壌有機物にどのように影響するかを明らかにするために 3 つの研究を行った。

研究 1 では、1982~2017 年の 36 年間に、山形県の 4 地域(村山、最上、置賜、庄内)における気候、稲収量およびそれらの相関関係の変化を統計的に分析した。その結果、稲作期の夏期には 4 つの地域でも気温が著しく上昇していることが示された( $P < 0.05$ )。稲栽培期間中の気温が 4 つの地域でも稲収量と強い正の相関を示した。また、4 つの稲収量構成要素のうち、千粒重と登熟歩合は稲収量と正の相関を示したが、面積あたり穂数と穂あたり

収量は有意な相関を示さなかった。以上の結果より、稲生育の各段階における気候変動が稲収量に与える影響は異なることを明らかにした。

研究 2 では、1983 年から 2014 年までの 32 年間の無機と有機物肥料を長期施用した水田における土壌炭素・窒素およびそれらの無機化能の変化を調べるために、32 年間のアーカイブ土壌試料を用いて分析を行った。山形県農業総合研究センター構内にある長期連用試験の 5 つの処理区、即ち (1) PK、2) NPK、3) NPK + 稲わら、4) NPK + 稲わら堆肥、5) NPK + 過剰稲わら堆肥を研究対象とした。その結果、稲わらや堆肥の施用は土壌有機態炭素 (SOC)、全窒素 (TN) が有意に増加した ( $P < 0.05$ )。一方、長期稲栽培の影響で、すべての処理の  $\delta^{13}\text{C}$  の値が、年々低下してきた。また  $\delta^{13}\text{C}$  値と SOC の高い負の相関があるから、 $\delta^{13}\text{C}$  が土壌有機物の変化指標として可能であることを明らかにした。

研究 3 では、研究 2 で述べた長期連用試験の水田圃場における 31 年目の秋に採取した土壌試料を用いて、易分解性有機物の質と量に及ぼす長期有機物連用の影響を調べた。80°C 16 時間熱水で抽出した有機態炭素と窒素 (HWEOC と HWEON) と、室温で抽出した水抽出有機態炭素と窒素 (WEOC と WEON) およびそれらの  $\delta^{13}\text{C}$  と  $\delta^{15}\text{N}$  の値の測定を行った。その結果、熱水抽出有機態炭素と窒素の量は、NPK 処理と比較して有機物施用で増加し、土壌の SOC と TN と高い相関を示した。HWEOC と WEOC の  $\delta^{13}\text{C}$  値は、元の稲わらと稲わら堆肥と同様に -28.3 ~ -26.4‰ であった。 $\delta^{13}\text{C}$  値と HWEOC (または WEOC) の量との間に相関はなかった。これらの結果は、HWEOC および WEOC の炭素源は、元土壌からではなく、イネの光合成および有機物施用に由来することを明らかにした。

全体を纏めると、山形県の 4 つの地域における温暖化は、最近の 30 年間の間に確実に進んでいる。また夏季の温暖化の進行は冬季より激しい。稲収量およびイネの 2 つの生育段階 (移植から出穂と出穂から収穫) の期間は、その年の 6 月から 9 月までの温度に強く影響される ( $P < 0.05$ )。また、稲わらと稲わら堆肥の施用は土壌有機物を増加させると同時に土壌の窒素肥沃度を促進させる。さらに、易分解性有機物と水溶性有機物などの土壌炭素源において、炭素安定同位体の自然存在比の  $\delta^{13}\text{C}$  は、有用かつ敏感性がある炭素トレーサーであることを本研究で明らかにした。

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. Nguyen-Sy, T., Cheng, W., Guigue, J., Kimani, S.M., Wibowo, W.A., Tawaraya, K., Watanabe, T., Wu, J., Xu, X. (2018) Water extractable organic carbon and nitrogen and their natural stable isotopes from long-term experiment in a Japanese rice paddy. *Journal of Wetlands Environmental Management*, 6(2), 60-73.