

氏名	サオ ソチャン SAO SOCHAN		
本籍（国籍）	カンボジア王国		
学位の種類	博士（農学）		
学位記番号	連研第 858 号		
学位授与年月日	令和 6 年 3 月 2 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 地域環境創生学専攻		
学位論文題目	Impact of flooding on soil-water physicochemical properties and microbial communities in floodplain soil （氾濫原土壌における土壌－水の物理化学的性質および微生物群集に対する洪水の影響）		
学位審査委員	主査	山形大学教授	渡部 徹
	副査	山形大学教授	渡邊 一哉
	副査	岩手大学准教授	濱上 邦彦
	副査	弘前大学准教授	坂元 君年

論文の内容の要旨

Flood duration and flood frequency are predicted to increase due to climate change. These flood events govern hydrological regimes and biogeochemical processes, influencing carbon and nutrient cycling, soil functioning, and a wide range of biotic and abiotic interactions. Moreover, the impacts of these floods are intensifying, putting ecological areas at risk, especially those in water level fluctuation zones. These areas serve as biogeochemical hotspots for carbon and nutrient cycling. Therefore, understanding the environmental fate of biogeochemical processes, including physicochemical properties and microbial communities interactions, is crucial in wetland soil-water ecosystems during and after flooding. Although wetlands account for only 6–9% of total land, their carbon stocks contribute to 35% of the global carbon reservoir. Carbon, a major component of dissolved organic matter (DOM), predominantly exists in the form of organic carbon. Despite DOM representing a small proportion of the soil organic matter (SOM), < 2% of the total SOM, it is one of the most active components in ecological environments, serving as a crucial nutrient and energy source for microorganisms. And, soil microbes play a vital role in biogeochemical cycling by regulating SOM decomposition, releasing nutrients, and maintaining soil health.

Many studies have revealed the impacts of floods on carbon and nutrient dynamics in aquatic ecosystems. However, limited attention has been given to wetland ecosystems, particularly river floodplains, which are highly sensitive to hydrological changes and play a vital role in DOM export and import. Thus, further investigation into the effects of both

flood duration and flood frequency in river floodplain ecosystems, including physicochemical properties (i.e. basic properties and DOM composition) and microbial communities, is needed. Addressing this knowledge gap provides valuable insights into nutrient and carbon cycling in floodplain soils affected by floods. This study, which serves as a bridge connecting the findings from lab-scale experiments to future on-site investigations, aims to explore the impact of floods on soil-water ecosystems within river floodplains/wetlands.

Initially, this study focused on the effect of flood duration on the interaction among microbes, DOM and physicochemical properties (i.e. microbial-physicochemical interactions) in river floodplain soil during and after flooding. A flood simulation was carried out through a column experiment in a controlled lab setting, using topsoil (0–10 cm) from a river floodplain in Japan. A moderate flooding depth (15 cm) was subjected to short-term (1 and 3 d), moderate-term (8 d), and long-term (16 and 30 d) flooding. After flood simulation, soil and water affected by the different flood durations, i.e. 1, 3, 8, 16, and 30 days of flooding (FDs), were investigated. Subsequently, the post-flooding soils were monitored by collecting the soils immediately after flooding (iAF), 2, 5 and 30 days after flooding (DAF) under 3, 8 and 16 FDs. This flood duration experiment was divided into four phases. Firstly, the impact of flood duration (i.e. 1, 3, 8, 16, and 30 FDs) on the water quality was examined, focusing on dissolved oxygen (DO), quantity and quality of DOM and its sources, and trace elements in floodwater, as well as the interaction between floodwater and flooded soils. The results indicated a significant decrease in DO at eight days of flooding (8 FDs), which then remained stable until 30 FDs. Prolonged flooding (up to 30 d) increased DOM aromaticity while depleting DO in the floodwater. Moreover, elevated soil pH enhanced the mobilization of trace elements, including macro- (Na, Mg, K, Ca) and micro- (Mn, Fe, Ni, As) elements, promoting their chelation with DOM compounds. During flooding, the breakdown of soil aggregates released bound metals, contributing to DOM and heavy metal mobilization. This resulted in increased these elements in floodwater, potentially affecting the quality of the receiving water body.

The second phase was to investigate the effect of flood duration on soil properties and water-extractable dissolved organic matter during and after flooding. The study found that flood duration increased soil pH and electrical conductivity (EC), influencing water-extractable organic carbon (WEOC) and total dissolved nitrogen (TDN) in flooded soil. Post-flooding soil properties and DOM variables varied with time; for example, extended post-flooding periods (up to 30 d) resulted in increased soil EC, DOM fluorophore to WEOC ratio, and TDN, with a smaller molecular weight size in DOM (increased E2:E3 ratio). Additionally, flood durations and post-flooding periods influenced DOM composition through soil physicochemical parameters, such as pH and EC, as confirmed by the structural equation modeling. In the third and fourth phases, the study extended the investigation by examining the interactions between soil microbial communities and soil

physicochemical properties during and after flooding, respectively. The results obtained in these phases showed that the flooded soil was shifted from aerobic to anaerobic conditions at 8 FDs, and the soil in the subsequent drying processes transitioned back to aerobic condition at 5 DAF, influencing soil microbial community and diversity clearly. Flood duration increased the relative abundance of Firmicutes, Actinobacteria, Bacteroidetes and Chlamydiae, which are key bacteria playing an important role in SOM degradation and nutrient releases under the flooding. Moreover, both flood durations and post-flooding periods could either increase or decrease soil bacterial community and diversity, depending on various environmental factors. For example, soil physicochemical properties, such as pH, EC, SOM, WEOC, TDN, and relative DOM, had direct and indirect effects on soil bacterial community and diversity, influencing nutrient cycling. Furthermore, prolonged flooding led to a decrease in bacterial diversity due to DO depletion, while simultaneously promoting an increase in bacterial diversity through SOM degradation. Whereas, extended post-flooding period resulted in increased microbial DOM production, accompanied by a degradation of humic substances in soil. These findings provided insights into SOM decomposition and transformation resulting from soil microbial-physicochemical interactions during and after flooding in river wetland soils.

Afterward, this study further investigated the impacts of flood frequency (repeated flooding) on soil microbial-physicochemical interactions by conducting another column experiment using soil from the same area, a river floodplain in Japan. Similarly to the previous experiment, changes in soil physicochemical properties and soil microbial communities of the flooded soils (iAF, 5, 15, and 30 DAF) were investigated under one-, two-, or three-time floods (i.e. 1-flood, 2-flood, or 3-flood) at 30-day intervals of the drying processes. Principal component analysis revealed significant variations in both repeated flooding and post-flooding effects on soil properties and DOM variables. The post-flooding effect separated flooded soils into three groups: iAF-5 DAF, 15 DAF, and 30 DAF, and these three groups were clearly separated from the first initial soil. On the other hand, the repeated flooding effect demonstrated an obvious distinction between 1-flood and 2-flood versus 3-flood. Moreover, repeated floods (up to 3 times) led to increases in protein-like fraction (tryptophan-like), accompanied by SOM and humification DOM (HIX) degradation, resulting in decreases in the C:N, pH, and a reduction in DOM molecular weight size. Conversely, increased post-flooding days elevated the fluorescence index (FI) and EC, releasing nutrients (TDN content) with smaller molecular sizes (increased E2:E3) due to biological processes (increased BIX) under reduced water content (WC), together with decreased humic-like fractions. These changes are likely a result of complex interactions between microbial activity and organic matter decomposition and associated biogeochemical processes. Furthermore, the increases in relative abundance of Acidobacteria, Proteobacteria, Bacteroidetes, Chlamydiae and Nitrospirae were coupled with SOM and HIX degradation, resulting in the release of soil nutrient (protein-like fraction); this coincided with increased soil acidity and EC due to decreased soil moisture.

This finding indicated that these bacteria play important roles in responding to changes in soil traits, functioning in SOM degradation and nutrient releases. This revealed the complex interactions among microbial-physicochemical properties, providing insights into nutrient cycling in river wetlands. Overall, the present study had significant implications for simulating soil nutrients and functions in areas with hydrological fluctuations, which will be enhanced by the increases in frequency and duration of floods under climate change.

【和訳】

洪水の長さや頻度は気候変動によって増加することが予測されている。これらの洪水イベントは、水文学的状況や生物地球化学的プロセスを規定しており、炭素や栄養成分の循環、土壌の機能、そして、広い範囲の生物学的または非生物学的な相互作用に影響を与える。さらに、これらの洪水の影響は強まっており、環境保護地域、特に水位が変動する区域を危険にさらしている。これらの地域は、炭素や栄養成分の循環のための生物地球化学的ホットスポットとして機能している。したがって、物理化学的特性と微生物群集の相互作用を含めて、生物地球化学的プロセスの環境動態を理解することは、洪水期間中および洪水後の湿地における土壌-水生生態系にとって極めて重要である。湿地は全土地のわずか 6~9%しか占めていないが、そこでの炭素貯蔵は地球上の炭素蓄積の 35%を説明している。溶存有機物 (DOM) の主たる成分である炭素は、大部分は有機炭素の形態で存在している。土壌有機物 (SOM) のわずかな割合 (<2%) に過ぎない DOM にも関わらず、それは生態学的環境における最も活動的な成分の一つであり、微生物の重要な栄養源かつエネルギー源として機能している。そして、土壌微生物は、SOM の分解、栄養の放出、そして、土壌健全度の維持を制御することによって、生物地球化学的な循環における極めて重要な役割を果たしている。

数多くの研究が、洪水が水域生態系における炭素や栄養成分の動態に及ぼす影響を明らかにしてきた。しかしながら、湿地、特に水文学的变化に非常に敏感で DOM の流出や流入に重要な役割を果たしている河川氾濫原の生態系に対しては、限定的な注目しか払われてこなかった。よって、河川氾濫原の生態系における洪水の長さや頻度の両方の影響について、物理化学的特性 (すなわち、基礎的な特性と DOM の構成) と微生物群集を含めて、さらなる研究が必要とされている。この知識のギャップに対応することは、洪水に影響される氾濫原土壌における栄養成分と炭素の循環に関する有益な洞察を提供する。したがって、ラボスケールの実験からの知見を将来の現地調査に結び付ける架け橋としての役割を果たす本研究は、河川氾濫原や湿地における土壌-水生生態系に対する洪水の影響を調べることを目的とする。

この研究は初めに、洪水期間中および洪水後において、河川氾濫原の土壌の微生物、DOM、物理化学的特性の間の相互作用 (すなわち、微生物-物理化学的相互作用) に対する洪水の長さの影響に焦点を当てた。制御された実験室環境で、日本のある河川氾濫原で採取した表層土壌 (0~10 cm) を用いたカラム実験を行うことで、洪水シミュレーションを実施した。中程度の規模の洪水 (水深 15 cm) を短期 (1 日間, 3 日間), 中期 (8 日間), 長期 (16 日間, 30 日間) に渡って試験した。洪水シミュレーションの後、1, 3, 8, 16, 30 日目に、洪水の長さの影響による土壌-水環境の変化を調べた。引き続き、3, 8, 16 日間の洪水に曝された

洪水回数と洪水後の影響の両方に有意な変動があることを明らかにした。洪水後の影響は、洪水に曝された土壌を3つのグループ（直後～5日目、15日目、30日目）に分け、その3つともに初期の土壌とは明らかに区別された。一方で、洪水回数の影響は、1回目と2回目は同様であったが、3回目だけ有意に異なっていた。さらに、洪水の繰り返し（3回まで）はタンパク様画分（トリプトファン様）の増加を、SOMと腐植DOM（HIX）の分解とともに導き、CN比、pHの低下とDOM分子量の減少をもたらした。反対に、洪水後の日数は蛍光指数（FI）とECを上昇させ、水分（WC）低下のもとでの生物反応（BIXの上昇）のために栄養成分（TDN成分）を放出するとともに、腐植様画分が減少した。これらの変化はおそらく、微生物活動と有機物分解の間での複雑な相互作用と関連する生物地球化学プロセスの結果であろう。さらに、Acidobacteria, Proteobacteria, Bacteroidetes, Chlamydiae, Nitrospiraeの相対存在量の増加は、土壌の栄養成分（タンパク様画分）の放出をもたらすSOMとHIXの分解と連動しており、これは土壌水分の低下による土壌酸性度とECの上昇と同期していた。この知見は、これらの細菌がSOM分解と栄養成分放出の機能を果たしながら、土壌の性質の変化に対応する重要な役割を担っていることを示した。このことは、微生物-物理化学的特性の間の複雑な相互作用を明らかにしており、河川湿地の土壌における栄養成分の循環に関する洞察を提供している。全体的に見て、本研究は、気候変動下で洪水の頻度と期間が増すことによって促進されるであろう水文学的変動を受ける地域において、土壌の栄養成分と機能をシミュレーションするための重要な意義を有していた。

論文審査の結果の要旨

溶存有機物（DOM）は、土壌有機物（SOM）の分解や栄養の放出に関与する土壌微生物にとって、重要な栄養源かつエネルギー源となっている。洪水が水域生態系における炭素や栄養成分の動態に及ぼす影響に関する多くの研究が行われてきた一方で、水文学的变化に敏感でDOMの変換や輸送に重要な役割を果たす河川氾濫原の生態系に対する注目は限定的であった。本研究では、土壌の物理化学的性質（DOMの構成も含めて）と微生物群集に着目したラボスケールの実験を通じて、河川氾濫原の土壌-水生生態系に対する洪水の長さや頻度の両方の影響を調べた。本研究で得られた主たる成果を以下にまとめる。

1. 河川氾濫原の表層土壌を用いたカラム実験で、短期～長期に渡る中規模洪水（水深15cm）のシミュレーションを行った。土壌水の水質に着目すると、洪水8日目にDOが有意に減少し、それは30日目まで安定していた。長期の洪水（16～30日間）は、洪水中のDOを枯渇させる一方でDOMの芳香族性を増加させた。さらに、土壌pHの上昇は、多量元素（Na、Mg、K、Ca）、微量元素（Mn、Fe、Ni）とヒ素の可動化を強め、それらのDOM化合物とのキレート化を促進した。

2. 上記1の実験では、洪水の長期化は、土壌pHと電気伝導度（EC）を上昇させ、土壌中の水で抽出される有機炭素と総溶存窒素（TDN）に影響を与えた。また、洪水後の土壌の性質とDOMパラメータは経過時間とともに変化した。洪水の長さや洪水後の経過時間が、pHやECのような土壌の物理化学的性質を通じてDOMの構成に影響を与えるプロセスは、構造

方程式モデリングでも確認された。

3. 上記1の実験では、洪水8日目に土壌が好気条件から嫌気条件に変化し、乾燥過程では洪水後2~5日目で好気条件に戻った。これらは土壌微生物群集やその多様性に影響を与えていた。洪水が長くなるにつれて、SOMの分解と栄養成分の放出に関わる主要な細菌である Firmicutes、Actinobacteria、Bacteroidetes、Chlamydiae の相対存在量が増加した。

4. 河川氾濫原の土壌を用いた別のカラム実験を実施し、土壌の微生物-物理化学的相互作用に対する洪水頻度（30日間の乾燥を挟む3回の洪水）の影響を調べた。主成分分析の結果、洪水後の乾燥過程の土壌は4つのグループ（洪水前、洪水直後~5日目、15日目、30日目）に分けられた。洪水回数の影響は、1回目と2回目は同様で、3回目のみ有意に異なっていた。洪水の繰り返しは、タンパク様（トリプトファン様）画分の増加、SOMと腐植DOMの分解を促し、CN比、pHの低下とDOM分子量の減少をもたらした。洪水後の乾燥過程では、蛍光指数とECが上昇し、水分低下のもとでの生物反応によって栄養成分（TDN成分）が放出されるとともに、腐植様画分が減少した。

以上のように、本論文は、気候変動下で洪水の頻度と期間が増すことで促進されるであろう水文学的変動を受ける河川氾濫原のような地域において、土壌の栄養成分と機能をシミュレーションするために重要な知見を提供している。しかも、その知見は、土壌の物理化学的性質と微生物群集の相互作用に着目しながら総合的にまとめられている。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

Sochan Sao, Susan Praise, Toru Watanabe (2023)

Effect of flood duration on water extractable dissolved organic matter in flood plain soils:
A laboratory investigation
Geoderma 432: 116392

Sochan Sao, Vannak Ann, Masateru Nishiyama, Susan Praise, Toru Watanabe (2023)

Tracing the pathways by which flood duration impacts soil bacteria through soil properties
and water extractable dissolved organic matter: A soil column experiment
Science of the Total Environment 902: 166524