

氏名	ADHENA TESFAU BEKELE		
授与した学位	博士		
専攻分野の名称	環境学		
学位授与番号	博甲第	7 2 9 3	号
学位授与の日付	2 0 2 5 年 3 月 2 5 日		
学位授与の要件	環境生命科学研究科 環境科学専攻 (学位規則第 4 条第 1 項該当)		
学位論文の題目	Development of sediment microbial fuel cells to reduce CH ₄ and CO ₂ emissions from straw-amended paddy soil (稲わら施用水田土壌からの CH ₄ および CO ₂ 排出抑制に向けた底質微生物燃料電池の開発)		
論文審査委員	准教授 宗村 広昭	教授 森 也寸志	教授 前田 守弘
学位論文内容の要旨			
<p>Straw returning into paddy soil enhances soil organic matter which usually promotes the emission of greenhouse gases (GHGs) to the atmosphere. The application of sediment microbial fuel cells (SMFCs) to paddy soil activates power-generating microorganisms and enhances organic matter biodegradation. This thesis explored the development of SMFCs to reduce GHG emissions, particularly methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), from paddy soil amended with rice straw while generating electricity. The study is organized into six chapters.</p> <p>In Chapter 1, the thesis highlighted the importance of reducing GHG emissions from paddy fields and introducing SMFCs as a potential solution. Chapter 2 reviewed related literature that addresses the topic and research questions surrounding GHG emissions, specifically CH₄ and CO₂, from paddy soil. It discussed the potential effects of returning rice straw to the soil and various mitigation measures, including applying biochar, anaerobic methane oxidation (AOM), and SMFCs. In Chapter 3, the thesis investigated the effects of SMFCs on CH₄ and CO₂ emissions in straw-amended paddy soil. Results showed that SMFCs maintained higher anodic potential values and significantly reduced cumulative CH₄ emissions when combined with straw amendment, while CO₂ emissions remained unaffected. Microbial community analysis revealed a dominance of Firmicutes, Clostridiales, and Acidobacteriales on the anode of straw-amended SMFCs, contrasting with the prevalence of Methanomicrobiales in treatments without SMFCs. In Chapter 4, we aimed to explore the effects of combining rice straw-derived biochar with SMFC as an integrated approach to reduce CH₄ emissions from straw-amended paddy soil. The results demonstrated that SMFC operation alone reduced cumulative CH₄ emissions by 38.5%, while the combination of biochar and SMFC further decreased emissions by up to 60% compared to the control. Microbial diversity analysis revealed that biochar addition enriched methane-oxidizing bacteria, while SMFC operation suppressed hydrogenotrophic methanogens, particularly Methanoregula. The study concludes that coupling biochar and SMFC technologies can effectively mitigate methane emissions from straw-treated paddy soil, with biochar made from leftover rice straw showing an interactive effect on SMFC operation. Chapter 5 presented another integrated study focusing on Mn-dependent AOM alongside SMFC. We examined the combined effects of SMFCs and manganese (Mn) oxide addition on CH₄ and CO₂ emissions in straw-amended paddy soil. Results showed that Mn addition in SMFC treatments led to more stable long-term current generation. Notably, CH₄ emissions were significantly reduced in SMFC treatments with Mn addition, demonstrating a synergistic effect between SMFC operation and Mn-dependent anaerobic methane oxidation. CO₂ emissions increased with Mn addition but were lower in SMFC conditions. Chapter 6 concluded that SMFCs showed significant promise in mitigating CH₄ emissions from straw-amended paddy soils while potentially generating electricity and without substantially affecting CO₂ emissions. We suggested future studies focus on conducting long-term field studies to assess the sustainability of these integrated approaches in real- fields.</p>			

論文審査結果の要旨

稲わらを土壌還元した水田は酸化還元電位が下がりやすく、メタン(CH₄)が発生しやすい。底質微生物燃料電池(SMFC)は底質の有機物分解で生じた電子を酸素が豊富な上層水に外部電気回路を介して伝達する新たな発電システムである。本研究では、SMFCを適用することによって底質の酸化還元電位を高く維持し、CH₄の排出を抑制することを考えた。また、SMFCとバイオ炭あるいはマンガン(Mn)酸化物施用との組み合わせを提唱する。底質にバイオ炭を混和すれば、底質の孔隙率が上昇し、底質への酸素供給が可能になるだけでなく、底質の導電性が高まり、SMFC効率の向上が期待できる。Mn酸化物施用により、酸化還元電位を高く維持するとともに、Mn酸化細菌によるSMFC効率の向上を図る。しかしながら、稲わら施用水田土壌を対象に、SMFCとバイオ炭やMn酸化物の組み合わせによって、CH₄排出の削減を試みた研究はみあたらない。そこで本論文では、SMFC単独、SMFCとバイオ炭あるいはMn酸化物を組み合わせた実験室規模の装置（高さ25cm、内径9cmのカラム）を作成し、水田からのCH₄およびCO₂排出量削減効果と発電性能を調べた。具体的には次の課題を設けた。

- 1) SMFCを用いた稲わら施用水田土壌からのCH₄およびCO₂排出削減効果
- 2) バイオ炭とSMFCの組合せによる稲わら施用水田土壌からのCH₄およびCO₂排出削減効果
- 3) Mn酸化物とSMFCの組合せによる稲わら施用水田土壌からのCH₄およびCO₂排出削減効果

1) については、稲わら添加あり・なし、SMFC作動あり・なし条件の装置を25℃で70日間静置した。その結果、SMFC作動によって底質の酸化還元電位は高く維持され、CH₄排出量が減少した ($p < 0.05$)。

アノード周辺の底質菌叢を比較すると、SMFC作動なしの場合、作動ありよりもCH₄生成古細菌が優勢であった。このことから、SMFCによって底質が比較的酸化条件になったためCH₄排出量が減少したことが証明された。底質にバイオ炭を混和（0%、1%、2%）した試験2) では、バイオ炭とSMFCの組み合わせることによって、SMFC作動なしに比べて、CH₄排出量を6割削減できた。一方、バイオ炭無添加のSMFCでは4割の削減率にとどまった。底質菌叢解析の結果、バイオ炭はCH₄酸化細菌を増加させ、SMFCによって水素資化性CH₄生成古細菌の増殖が抑制されたことがわかった。試験3) では、Mn酸化物の添加によって発電性能が長期間にわたって高く維持された。また、Mn酸化物とSMFCの組合せでCH₄排出量は有意に減少した。すべての試験でSMFCによってCO₂排出量が増加することはなかったが、Mn酸化物施用によってCO₂排出が増加した。

以上のことから、SMFCに加えて、バイオ炭やMn酸化物を底質に添加することによって、CO₂排出量に大きな影響を与えることなく、CH₄排出量を削減し、SMFCの発電性能が向上することがわかった。これらは、水田土壌におけるCH₄排出削減技術のひとつとしてSMFCの有効性を示唆したものである。

よって、本論文は学術的に高く評価でき、博士（環境学）の学位に値するものと認められる。