

高温バイオ炭における養分イオンの溶出・交換・固定挙動の解明

— 前処理条件の違いに着目して —

環境学部環境学科 金 相烈
環境学部環境学科（令和7年度時点） 田中 弥生

1. はじめに

本研究は、本学と鳥取市、株式会社とっとり市民電力、株式会社山陰合同銀行による共同提案として採択された、環境省「脱炭素先行地域プロジェクト」の一環として実施したものである。

本プロジェクトでは、鳥取市佐治地域に導入が進められている木質バイオマス発電「Volter40」から発生する焼却灰（以下、高温バイオ炭）を、地域内で循環利用することを目指している。

鳥取県は日本有数の砂丘地帯を有しており、らっきょう、長ネギ、ながいも、ぶどうなど、砂質土壌の特性を活かした農業が行われている。

砂丘地農業は、排水性や通気性に優れることで病害虫が少なく、品質の高い農作物を栽培できるという利点がある。一方で、砂質土壌は保水力および肥料保持力が低いため、水分や養分が流亡しやすく、施肥回数や灌水回数が増加しやすいという課題を抱えている。

このような背景から、砂丘地農業では土壌の保水性・保肥性を改善できる土壌改良資材の導入が求められている。

これまでの研究では、木質バイオマス由来バイオ炭が多孔質構造を有し、水分保持や土壌改良に寄与する可能性が示されてきた。

一方、本研究で対象としたVolter40由来バイオ炭は、一般的な土壌改良用として製造される低温炭化バイオ炭とは異なり、800℃以上の高温熱分解条件下で発生した副産物である。

このような高温バイオ炭は、表面官能基や陽イオン交換容量（CEC）が低く、イオン性物質に対する吸着性能が低い可能性が指摘されている。

そのため、単純に施用した場合には期待される保肥効果が十分に得られない可能性があり、その特性を整理した上で適切な利用方法を検討する必要がある。一方、高温ガス化炉由来バイオ炭の農業利用に関する知見は限られており、特に前処理条件による養分挙動変化を整理した研究例は少ない。

2. 研究目的

本研究では、Volter40由来高温バイオ炭に対して蒸留水前処理および酸発酵液肥前処理を施し、養分イオンの溶出・交換・固定挙動を整理するとともに、砂丘地農業における土壌改良資材としての利用可能性を検討することを目的とした。

具体的には、以下の点について明らかにすることを目的とした。

- ① 高温バイオ炭施用率の違いが砂丘地土壌の透水挙動に与える影響を評価する。
- ② 未処理バイオ炭における NH_4^+ 、 K^+ 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} の溶出挙動を整理する。

③ 蒸留水前処理による可溶性成分除去の影響を評価する。

④ 液肥前処理による養分保持特性改善の可能性を検討する。

特に、高温バイオ炭はそのままでは吸着性能が低い可能性があるため、液肥との反応による表面改質および養分担持材としての機能付与の可能性について検討した。

3. 研究方法

3.1 Volter40バイオ炭の特徴把握

2025年7月、津和野フォレストエナジー株式会社においてVolter40発電施設（図1）の見学およびヒアリング調査を実施した。

同施設では、主に杉を中心とした未利用木材を燃料として利用しており、含水率約50%の木材を乾燥後、約1000℃で運転されるダウンドラフト型ガス化炉に投入していることを確認した。

また、発電過程で発生した焼却灰は粉碎装置を通じて回収されており、本研究では実際に同施設で発生した高温バイオ炭を実験試料として使用した。

これらの情報は、実験で使用する高温バイオ炭の物理・化学的特性を理解するうえで重要な知見となった。



図1 Volter40発電施設の様子

3.2 透水性評価実験

砂丘地農地土壌に対して、高温バイオ炭を0、3、5、7、10%混合したカラムを作成し、通水実験を実施した。各カラムには蒸留水を注入し、流出開始時間、水の通過時間、流出水pH、および実験終了後の含水率を測定した。

表2 バイオ炭施用率別カラム条件

施用率	砂丘地農地の土壌	バイオ炭	密度
0%	200 mL (約 292.4 g)	0 mL (0 g)	1.46 g/mL
3%	194 mL (約 288.3 g)	6 mL (約 2.0 g)	1.46 g/mL
5%	190 mL (約 282.1 g)	10 mL (約 3.3 g)	1.43 g/mL
7%	186 mL (約 275.9 g)	14 mL (約 5.13 g)	1.41 g/mL
10%	180 mL (約 270.8 g)	20 mL (約 7.33 g)	1.40 g/mL

図2はバイオ炭施用率の違いによる水の通過時間および流出水pHの変化を示す。

図2のように、バイオ炭施用率の増加に伴い、初回注水時の流出開始時間および通水時間が長くなる傾向が認められた。

特に10%施用区では、0%施用区と比較して流出開始までの時間が大きく延長され、水の通過速度が明確に低下した。一方、2回目以降の注水では流出開始時間は短縮される傾向が見られた。また、

実験終了後に測定した含水率はすべて約21%前後であり、施用率による顕著な差は認められなかった。

この結果から、高温バイオ炭は「水分保持量」を増加させるというより、水の移動速度を抑制する機能を有している可能性が示唆された。

さらに、流出水pHはバイオ炭施用区で高い値を示し、施用率増加に伴って上昇する傾向が確認された。しかし、注水を繰り返すことで徐々に低下したことから、高温バイオ炭中のアルカリ性成分が洗い流された可能性が考えられる。

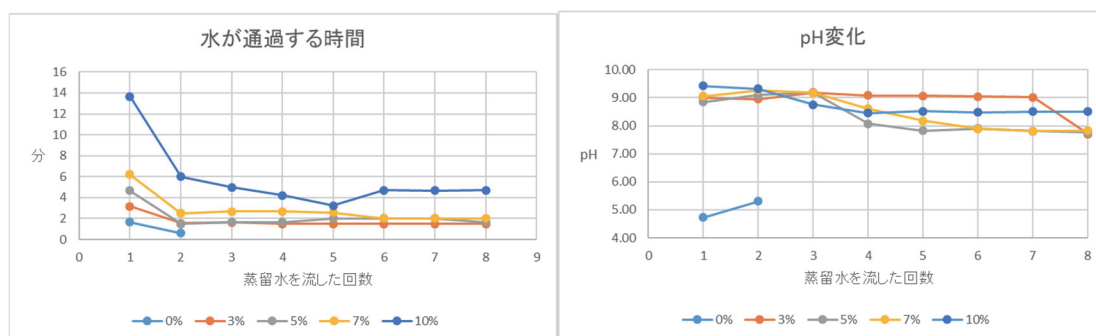


図2 バイオ炭施用率の違いによる水の通過時間および流出水 pH の変化

3.3 蒸留水前処理による溶出挙動評価

未処理高温バイオ炭に対して蒸留水前処理を行い、洗浄液中のイオン濃度を測定した。

図3は各イオンの平衡時間を示す。図3のように、 K^+ および NH_4^+ の濃度変化は1時間以降で大きな変化が見られず、溶出挙動は1時間程度で平衡に達すると判断した。そのため、以降の溶出・交換挙動実験では振とう時間を1時間に設定した。

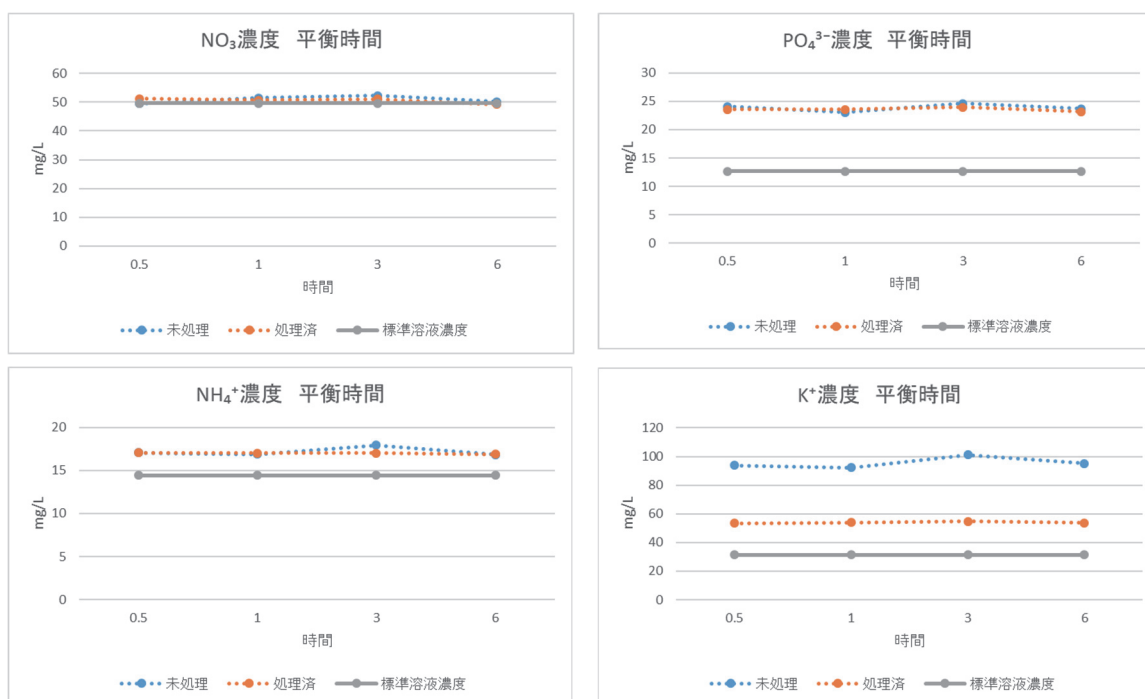


図3 各イオンの平衡時間

また、図4は蒸留水前処理後の洗浄液中の溶出イオン濃度を示す。図4のように、 K^+ 濃度が4017.1mg/Lと非常に高い値を示した。

一方、 NH_4^+ は低濃度であったことから、高温バイオ炭には可溶性カリウムが大量に含まれていることが明らかとなった。

この結果は、これまでの研究で指摘されていた「バイオ炭からの K^+ 溶出傾向」を支持する結果であり、高温バイオ炭が強いカリウム供給源となる可能性を示している。

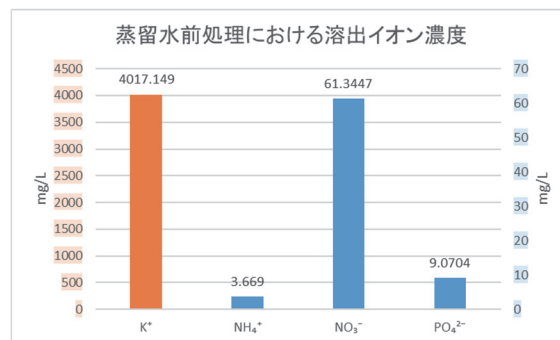


図4 蒸留水前処理前後の溶出イオン濃度

3.4 初期濃度別溶出・交換挙動実験

未処理高温バイオ炭を用いて、 NH_4^+ 、 K^+ 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} の溶出・交換挙動を評価した。表2は溶液中に含まれる各イオンの濃度を示す。

表2 栄養塩標準溶液に含まれる各イオンの濃度

希釈	K^+	NO_3^-	NH_4^+	PO_4^{3-}
原液(100 %)	312.80 mg/L	496.00 mg/L	114.30 mg/L	126.80 mg/L
5 倍希釈(20 %)	62.56 mg/L	81.2 mg/L	28.86 mg/L	25.36 mg/L
10 倍希釈(10 %)	31.28 mg/L	40.60 mg/L	14.43 mg/L	12.68 mg/L
20 倍希釈(5 %)	15.64 mg/L	24.80 mg/L	7.22 mg/L	6.34 mg/L
50 倍希釈(2 %)	6.26 mg/L	9.92 mg/L	2.88 mg/L	2.54 mg/L

三角フラスコに各希釈標準溶液（5希釈、10希釈、20希釈、50希釈）100mLと未処理バイオ炭0.1gを投入し、1時間振後、溶液を0.45 μ mメンブレンフィルターでろ過して得られた溶液のイオン濃度

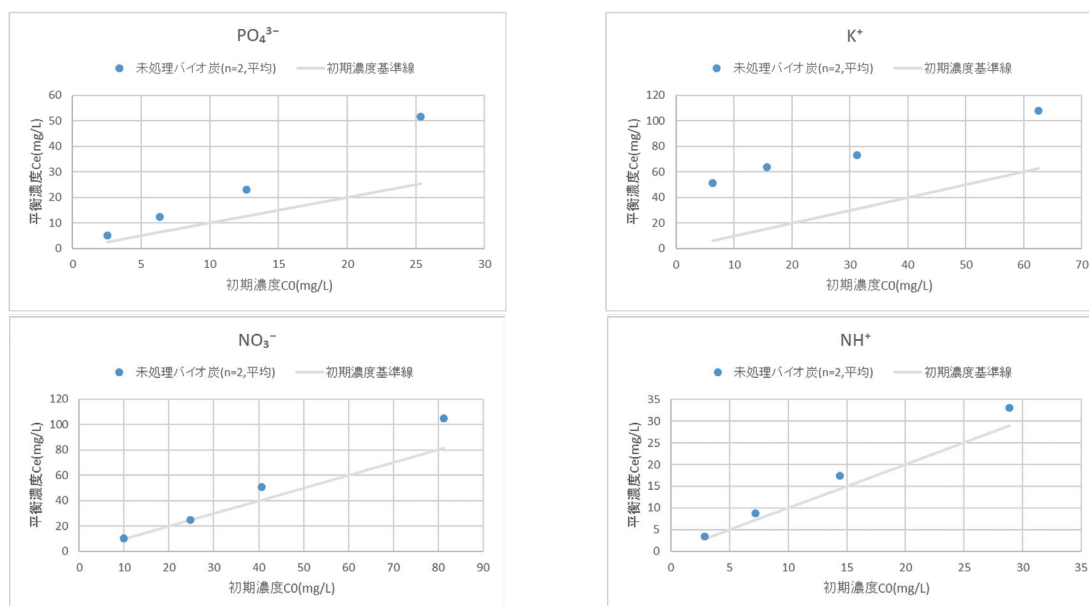


図5 各イオンの初期濃度と平衡濃度の関係

をイオンクロマトグラフィーで測定した。初期濃度 C_0 と平衡濃度 C_e から各成分の吸着量 q を算出し、等温線を作成した。図5は各イオンの初期濃度と平衡濃度の関係を示す。

その結果、すべてのイオンにおいて吸着量 q は負の値を示し、「吸着」より「溶出」が卓越していた。特に K^+ は、初期濃度条件にかかわらず平衡濃度が著しく高くなり、多量の K^+ がバイオ炭から溶出していることが確認された。

NO_3^- および PO_4^{3-} についても、高濃度条件では平衡濃度上昇が確認され、溶出傾向が認められた。

これらの結果から、未処理高温バイオ炭は「養分保持材」というより、「養分供給源」としての性質が強いことが示唆された。

3.5 液肥前処理による養分保持特性の変化

液肥前処理による養分保持特性の変化を評価するため、液肥処理した高温バイオ炭を用いて溶出・交換挙動実験を行った。まず、三角フラスコに10倍希釈標準溶液100mLと液肥処理したバイオ炭を0.1g（乾燥重量換算）を投入し、試料は液肥処理時間24時間および72時間のdry試料およびwet試料とし、各条件2連で実施した。1時間振とう後、 $0.45\mu m$ メンブレンフィルターでろ過して得られた溶液のイオン濃度をイオンクロマトグラフィーで測定する。各実験におけるpHを表3に示す。

表3 各試料のpH

試料	pH	試料	pH	
液肥原液	3.08	24時間液肥処理後の試料 (dry 状態)	7.72 (1回目)	7.83 (2回目)
2倍希釈液肥	3.15	24時間液肥処理後の試料 (wet 状態)	7.75 (1回目)	7.52 (2回目)
液肥前処理溶液 (24時間)	5.69	72時間液肥処理後の試料 (dry 状態)	7.62 (1回目)	7.10 (2回目)
液肥前処理溶液 (72時間)	5.90	72時間液肥処理後の試料 (wet 状態)	6.10 (1回目)	6.19 (2回目)

その結果を図6に示す。図6のように、液肥前処理試料では NH_4^+ および PO_4^{3-} の保持傾向が確認された。

特に K^+ は、初期濃度条件にかかわらず平衡濃度が著しく高くなり、多量の K^+ がバイオ炭から溶出していることが確認された。

NO_3^- および PO_4^{3-} についても、高濃度条件では平衡濃度上昇が確認され、溶出傾向が認められた。

これらの結果から、液肥前処理によって一部養分の保持特性が改善される可能性が示唆された。一方で、 K^+ の溶出は依然として大きく、高温バイオ炭特有の可溶性カリウムの影響が強いことが確認された。

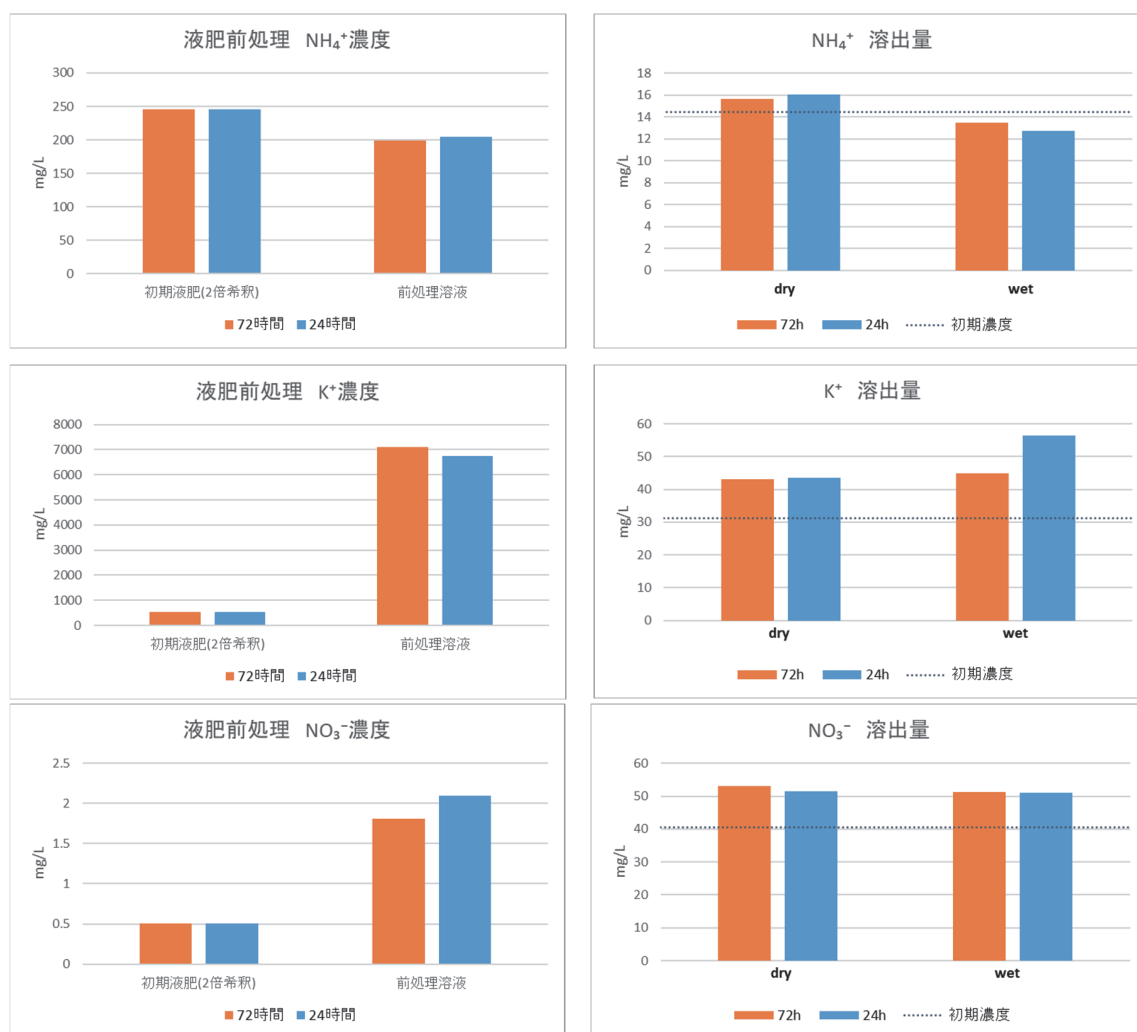


図6 液肥前処理における各イオン濃度および溶出量の変化

4. 結論と今後の課題

本研究では、高温ガス化炉由来バイオ炭の施用率によって砂丘地土壤の通水挙動が変化し、前処理条件によって養分イオンの溶出・保持挙動が異なることを確認した。

高温バイオ炭は砂丘地土壤に対して一定の通水速度抑制効果を示す一方、未処理状態ではK⁺を中心とした養分供給源としての性質が強いことが確認された。

また、液肥前処理を施すことでNH₄⁺およびPO₄³⁻の保持が確認され、高温バイオ炭の機能を調整できる可能性が示唆された。

以上より、高温バイオ炭は、通水速度の抑制と養分供給の両面から、砂丘地土壤の改良資材として利用できる可能性があると考えられる。

今後は、CECや表面官能基分析などの化学的評価に加え、実際の砂丘地農地における長期栽培試験を実施し、最適な施用量および前処理条件を検討していく必要がある。将来的には、木質バイオマス発電副産物を地域農業へ循環利用する地域循環型資源利用モデルへの展開が期待される。