

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：32690

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05922・19K21091

研究課題名（和文）バイオ炭によるメタン発酵消化液の清澄化技術の開発 微細藻類培養を目指して

研究課題名（英文）Development of biochar-based purification technology for anaerobic digestion effluent: application for microalgal cultivation

研究代表者

岸 正敏（Masatoshi, Kishi）

創価大学・プランクトン工学研究所・助教

研究者番号：00824020

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：邪魔者であったメタン発酵消化液を化粧品・健康食品原料などの高価値な微細藻類の生産に利用できれば、有機ゴミからエネルギーと有価物を作り出す循環プロセスの重要な収入源となる。しかし消化液には栄養以外にも固形物や病原菌などの夾雑物が存在し、そのままでは高価値な微細藻類の培養に利用できない。栄養塩を残したまま夾雑物を選択的に除去する手法が必要となる。そこで本研究では途上国でも継続して実施できる「適正技術」を組み合わせた消化液処理技術の開発を目指した。その結果、活性汚泥法、砂ろ過、およびバイオ炭ろ過の組み合わせで栄養塩を残存させたまま固形物90%除去、有色物質70%除去、病原菌最大99%除去を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのメタン発酵消化液の処理はほとんどが放流を最終目的として栄養塩除去を主眼としていた。本研究のように後段での有効利用、特に高価値微細藻類の培養を目的とした選択的な清澄化の研究は少なく、今後の発展が期待される分野である。本研究では途上国でも持続的に利用可能な適正技術の開発に注力した。膜ろ過のように高コストかつ途上国での調達が困難な手法ではなく、容易に実施可能な活性汚泥法・砂ろ過・バイオ炭ろ過に着目し、その結果高い清澄化効果を得た。本研究がさらに発展すれば途上国のみならず各国の循環型社会構築に貢献し、SDGsのうち、1 貧困をなくそう、6 安全な水、12 持続可能な消費、等の達成に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Microalgae cultivation using anaerobic digestion effluent (ADE) can valorize the unwanted waste streams into valuable materials for cosmetics and nutraceuticals, which can become the economic driving force for the establishment of the circular economy. However, ADE contains not only nutrients but also contaminants such as solids and pathogens and cannot be used directly for algal cultivation. There is a need to establish a process that can selectively purify the contaminants while leaving nutrients. Therefore, this study aimed to develop a selective purification method by combining various "appropriate technologies" that can be sustainably used in developing countries. As a result, the combination of activated sludge, slow sand filtration, and biochar adsorption allowed >90% solids removal, >70% dissolved colored organics removal, and maximum 99% removal of the pathogen by a simple operation.

研究分野：応用藻類学、環境工学

キーワード：メタン発酵 消化液 清澄化 後段利用 微細藻類 適正技術 循環型社会

みの系列と、砂ろ過の前・後段にそれぞれ後期生物処理とバイオ炭ろ過を組み合わせた処理を実施した。砂濾過には有効径 0.3~1.0 mm の砂を 70 cm 充填した円筒カラムを用いた。好気生物処理には順次回分式活性汚泥法を用いた。これは曝気と汚泥沈降のサイクルを繰り返すことで、消化液中の固形物を分解または凝集・沈殿させ、粒子を取り除くことのできる手法である。活性汚泥法の水理学的滞留時間 5 日間で、消化液の供給 10 分、反応（曝気）21.5 時間、汚泥沈降 2 時間、排水 20 分の合計 24 時間のサイクルを繰り返した。バイオ炭ろ過には純水で洗浄した活性炭を利用し、40 cm 充填した円筒カラムを用いてろ過を実施した。測定項目は大腸菌およびウェルシュ菌生菌数、懸濁態固形物濃度、溶存態有機炭素濃度、栄養塩濃度とした。

4. 研究成果

4-1. バイオ炭のみによる清澄化効果

すべての系列において固形物（50~60%）と溶存有機炭素（6~83%）が除去された。消化液中の大腸菌数は down 区では供給水と比較して約 90%が除去されていたが、up 区では増加する結果となった。これは、down 区では酸素の流入により好気性菌がバイオフィルムを形成して大腸菌群を除去したが、up 区では嫌気性の大腸菌が増殖したと考えられる。栄養塩はアンモニアがほぼ 100%、リンは 65~90%残存した。重金属は、活性炭のみ鉛の 50%程度の除去が見られたが、バイオ炭では除去が見られなかった。

バイオ炭を用いた消化液のろ過により栄養塩を残存させたまま一定程度の微生物・固形物・溶存有機炭素の除去が可能であることがわかった。一方で上記の処理能力には向上の余地があった。固形分除去が不完全であったのは、バイオ炭および活性炭の粒径を 2 mm 程度に粒径を揃えたことに起因すると考えられる。緩速砂ろ過では通常粒径 0.3~0.45 mm 程度の砂を用いるため、既往文献ではメタン発酵消化液固形物の 90%除去を達成している(Tyagi et al., 2009)。バイオ炭は粒子を細かくすると浮遊や流出が起きるため、他の手法との組み合わせが必要と考えられた。そこで、次に活性汚泥・砂ろ過の二つの適正技術との組み合わせ処理を実施した。

4-2. 適正技術の組み合わせ：活性汚泥法-砂ろ過-バイオ炭ろ過処理

固形物の処理において、砂ろ過のみでは平均除去率はわずか 20%と低い結果であった（図 3a）。これは遠心分離上澄みに比較的小さな粒子のみが残存しており、ろ過砂の目合をすり抜けたと示唆された。さらに、除去率が低いにもかかわらず、砂の目詰まりが 7 日に 1 回以下の頻度で発生した。一方、適正技術の組み合わせでは固形物除去率が向上した（図 3b）。活性汚泥では平均 61%の固形物が除去された。さらに、興味深いことに、活性汚泥後は砂ろ過の固形物除去率が 65%に向上し、最終処理水の固形物除去率は 91%に達した。遠心後上澄みであり粒子径が小さかったことを考慮すると、砂ろ過のみで 90%を除去した既往文献(Tyagi et al., 2009)と比較しても優れた除去率であると評価できる。

活性汚泥による固形物除去率の向上は粒度分布から説明できる。消化液の粒子は 0.01 から 500 μm 以上と幅広い粒度に分布していることがわかる（図 4a）。一方、活性汚泥法で処理した上澄みの粒子は、小サイズと大サイズの画分が除去され、中サイズの粒子のみ残っていた（図 4b）。本実験において順次回分式活性汚泥法では、小さな粒子は凝集して大きくなり、十分に大きな粒子は 2 時間の沈降時間で沈降し除去されたと考えられる。小サイズの粒子が凝集して粒子径が大きくなったことで、粒径 0.3mm の砂でも十分に補足できるようになり、砂ろ過の性能が向上したと考えられる。このように本研究によって活性汚泥法と砂ろ過の組み合わせが固形物の除去に効果的であることが明らかとなった。

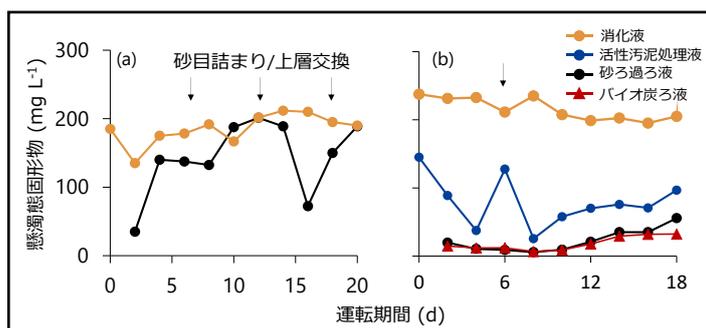


図 3. 固形物除去; (a) 砂ろ過のみ、(b) 適正技術組み合わせ

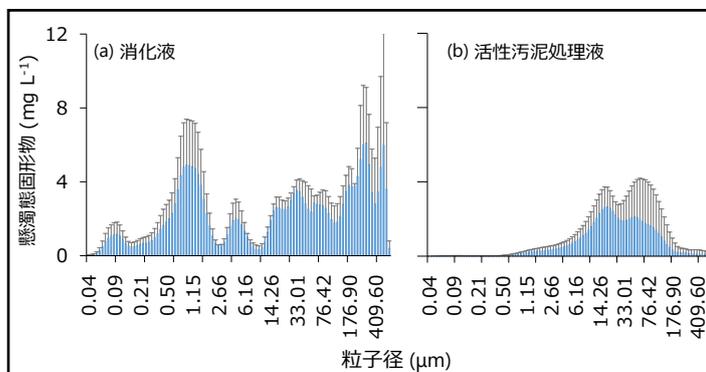


図 4. 懸濁態粒子の粒度分布; (a) 消化液、(b) 活性汚泥法での処理後、粒子密度を一定と仮定して重量に換算した。

本実験においてバイオ炭ろ過は特に溶存有機物の除去に高い効果を示した。溶存有機炭素濃度は活性汚泥および砂ろ過ではほとんど変化しなかったことから、腐植物質のような分解されにくい物質が存在していたことを示唆した。しかし、バイオ炭ろ過では溶存有機炭素濃度が約50%除去された(図5a)。さらに光合成有効放射の吸光度を調べるとバイオ炭ろ過により、砂ろ過液中の有色有機物が70%以上除去されたことが明らかとなった(図5b)。微細藻類の大量培養に利用するためには光透過率が高い方が望ましく、特に一般的に褐色から黒色を呈す消化液の処理において、バイオ炭を組み合わせることによる色調の改善は有益であると示唆された。

大腸菌とウェルシュ菌の除去に対しては、本実験では高い除去率は得られず、むしろ活性汚泥槽において生菌数が増加する結果となった。ところが実験終了前に活性汚泥槽で発生したスラム(槽内に発生する泡状の生成物)を除去したところ、活性汚泥法による大腸菌およびウェルシュ菌は減少に転じ、砂ろ過とバイオ炭ろ過を組み合わせた際の除去率は90%以上に達した。今後適切な処理法を検討することでより高い除去率が得られると期待される。

上記のように夾雑物の良好な除去が見られたが、栄養塩、特に無機窒素はほぼ全量を残存させることに成功した。消化液から活性汚泥、砂ろ過、バイオ炭まで無機窒素濃度は減少せず、むしろやや増加した(図6)。活性汚泥および砂ろ過における無機窒素濃度増加の原因として、消化液中の有機態窒素の分解が考えられる。また、バイオ炭ろ過後の無機窒素の増加は、純水洗浄後のバイオ炭に残存していたアンモニウムが、消化液に含まれる他の陽イオンの働きにより溶出したためと考えられる。したがって、本技術において無機窒素の減少は見られず、選択的清澄化に成功したと判断できる。

本研究により適正技術の組み合わせによりメタン発酵消化液を選択的に処理し、栄養塩を残したまま夾雑物の除去ができることが明らかとなった。今後は夾雑物除去効果の向上と、異なるメタン発酵消化液への応用が必要である。また社会実装化には清澄化消化液による微細藻類生産および生産された藻類バイオマスの品質の検証を実施する必要がある。さらに、藻類バイオマスが食用品質であったとしても、廃棄物による食品生産には法律等の規制がかかる場合があり包括的な対処が必要である。今後の循環型経済の構築に向けたさらなる発展が望まれる。

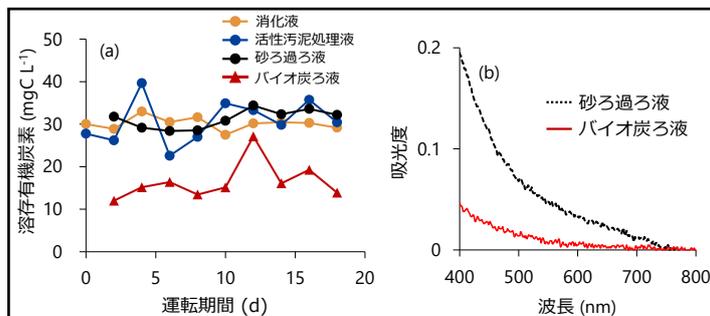


図5. バイオ炭による溶存有機物の除去効果; (a) 溶存有機炭素、(b) 光合成有効放射の吸光度

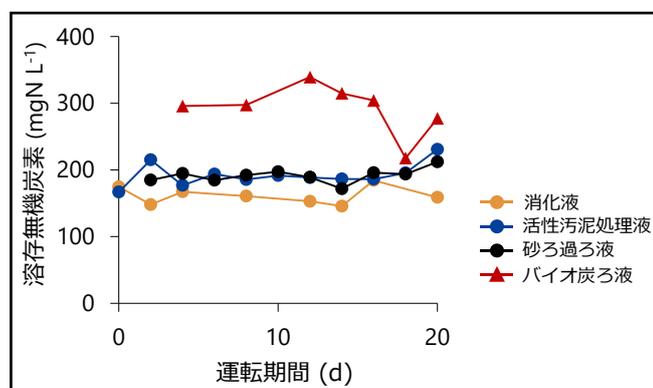


図6. 各処理の溶存無機窒素への影響

引用文献

- de-Bashan, L.E., Bashan, Y., 2004. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water Res.* 38, 4222–4246. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.014>
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., Mukome, F.N.D., 2017. Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *J. Environ. Manage.* 197, 732–749. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>
- Hamoda, M.F., Al-Ghusain, I., AL-Mutairi, N.Z., 2004. Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse. *Desalination* 164, 203–211. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)00189-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)00189-4)
- Markou, G., Vandamme, D., Muylaert, K., 2014. Using natural zeolite for ammonia sorption from wastewater and as nitrogen releaser for the cultivation of *Arthrospira platensis*. *Bioresour. Technol.* 155, 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.122>
- Tyagi, V.K., Khan, A.A., Kazmi, A.A., Mehrotra, I., Chopra, A.K., 2009. Slow sand filtration of UASB reactor effluent: A promising post treatment technique. *Desalination* 249, 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.12.049>
- Walker, M., Iyer, K., Heaven, S., Banks, C.J., 2011. Ammonia removal in anaerobic digestion by biogas stripping: An evaluation of process alternatives using a first order rate model based on experimental findings. *Chem. Eng. J.* 178, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.027>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 M. Kishi, A. Fujita, M. Sekine, K. Okamura, T. Toda
2. 発表標題 Purification of anaerobic digestion effluent for edible microalgae culture: combination of appropriate technologies.
3. 学会等名 Algal Biomass, Biofuels, & Bioproducts (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田明則・関根睦実・岸正敏・岡村和夫・戸田龍樹
2. 発表標題 順次回分式活性汚泥法と緩速砂濾過の組み合わせによるメタン発酵消化液の清澄化
3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸正敏・藤田明則・関根睦実・戸田龍樹
2. 発表標題 メタン発酵消化液の清澄化における活性炭処理の効果
3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤田 昭則 (Fujita Akinori)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
エチオピア	パハルダール大学	インジバラ大学		