

メタン発酵－紅色光合成細菌共存系による模擬養鶏 屠殺場廃水処理性能の評価

秋月真一^{1)*}, 藤原正明²⁾

1) 創価大学プランクトン工学研究所 〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

2) 創価大学理工学部 〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

Treatment of synthetic poultry slaughterhouse wastewater using a consortium of anaerobic digestion microorganisms and purple phototrophic bacteria

Shin-ichi Akizuki^{1)*} and Masaaki Fujiwara²⁾

1) *Institute of Plankton Eco-engineering, Soka University, 1-236, Tangi-machi, Hachioji, Tokyo, 192-8577, Japan*

2) *Faculty of Science and Engineering, Soka University, 1-236, Tangi-machi, Hachioji, Tokyo, 192-8577, Japan*

* *Corresponding author: akizuki@soka.ac.jp*

2023年5月5日受付, 2023年5月16日受理

Abstract As global population increases and living standards improve in developing countries, the demand for meat is increasing, resulting in the rise of highly concentrated organic wastewater generated from poultry processing. An effective method for treating this wastewater is through anaerobic digestion, which converts it into biogas as an energy source using anaerobic microorganisms. However, while this process effectively removes organic carbon, nutrients such as nitrogen and phosphorus remain in high concentrations in the effluent, necessitating secondary treatment facilities such as separate nitrification and denitrification tanks. Purple phototrophic bacteria are microorganisms that can uptake organic matter and nutrient-rich pollutants in wastewater, accumulating protein and carbohydrate in their cells. Since both anaerobic digestion and purple phototrophic bacterial processes occur under anaerobic conditions and have similar suitable environments such as pH and temperature, they can potentially be integrated into a single reactor. This study proposes a new process using a consortium of anaerobic digestion microorganisms and purple phototrophic bacteria for simultaneous treatment of organic carbon and nutrients from poultry slaughterhouse wastewater. The performance of the proposed simultaneous process was compared with that of the only-anaerobic digestion process and only-purple phototrophic bacterial process in a 19-day batch experiment at $33 \pm 2^\circ\text{C}$ under anaerobic conditions. Synthetic poultry slaughterhouse wastewater was used as the substrate, and anaerobic digestion sludge collected from a mesophilic anaerobic digestion plant and *Rhodospseudomonas capsulata* were used as the inoculums.

In the simultaneous process, biogas production and organic carbon (chemical oxygen demand)

removal progressed first with and without infrared light irradiation, followed by an increase in bacteriochlorophyll *a* concentration, an indicator of the biomass of purple phototrophic bacteria. These results indicate that the anaerobic digestion process and purple phototrophic bacterial process functioned in a single reactor, although there was a time gap between the two processes. Despite uniform substrate input, the simultaneous process produced higher biogas (276-337 mL) than the only-anaerobic digestion process (138 mL), possibly due to degradation of some purple phototrophic bacteria biomass as feedstock for anaerobic digestion. In the simultaneous process, organic carbon removal efficiencies ranged from 40 to 81%, similar to or lower than the removal efficiency of the only-anaerobic digestion process (81%). In purple phototrophic bacteria added conditions, nitrogen removal was not confirmed, indicating low nutrient removal capability. The treatment performance of the simultaneous process can be enhanced by improving light permeability using flat-panel reactors or granular anaerobic sludge and acclimation of purple phototrophic bacteria with highly concentrated organic wastewater before using it as an inoculum.

Keywords: Integrated process; photosynthetic bacteria; biogas recovery; carbon removal; bacteriochlorophyll *a*

1. 序論

人口増加と開発途上国の生活レベルの向上に伴い、世界の食肉需要は増加の一途を辿っている。特に家禽肉は手頃な価格、健康的なイメージ、宗教的問題の少なさから先進国・開発途上国を問わず需要増加が著しく、2011～2013年は8600万トンであった年間消費量が2024年には1億1100万トンを超えると推定されている(農林水産政策研究所2015)。家禽肉需要の増加は、必然的に養鶏場数、ひいては屠殺や鶏糞尿・鶏卵の洗浄水に起因する汚濁物質濃度の高い廃水発生量の増加に直結する。養鶏場廃水の未処理での放流は、周辺水環境の汚染に繋がるため、しばしば機械的曝気を利用した生物学的浄化槽を設け処理を施している(Jia et al. 2012)。しかし、曝気は膨大な電力を消費するため、経済的基盤が脆弱であり、環境問題よりも経済発展を優先せざるを得ない開発途上国への普及は困難であった。2000年以降、養鶏場廃水中の有機物を嫌気性微生物の働きを利用したメタン発酵によりバ

イオガス化し、エネルギー源として回収する手法が着目されてきた(Salminen & Rintala 2002)。しかし、メタン発酵では有機炭素分(化学的酸素要求量 Chemical oxygen demand: COD)は効果的に除去される一方で、窒素(N)やリン(P)等の栄養塩類は除去されず、発酵処理液中に高濃度に残存する。そのため、二次処理施設として硝化槽、脱窒素槽等を別途設ける必要があり、メタン発酵によるエネルギー回収という利点を相殺することが課題であった。

近年、オーストラリアのクイーンズランド大学の研究チームが発端となり、紅色光合成細菌(Purple phototrophic bacteria: PPB)を利用した廃水処理と有用物質生産に関する研究が再び注目を集めている(Hülse et al. 2014, 2016, 2018)。PPBが赤外光照射下で廃水中の汚濁物質を体内に取り込み、タンパク質・炭水化物等を蓄積する特徴に着目したもので、回収したPPBは餌料・飼料として有効利用できる。しかし、PPBバイオマスの平均体組成はCOD:N:P比で100:6:1であるが、廃水のCOD:N:P比はその種類によって大きく異なり、PPB

と同じ比率になることの方が稀である。そのため、PPBを用いた廃水処理研究では、処理水にCODまたは栄養塩類が残存することが報告されている (Hülse et al. 2018)。例えば Yaakob et al. (2018) によると、養鶏屠殺場廃水はCODに対する栄養塩の割合が低く、COD:Pは平均で1000:1を超える。このような廃水をPPBで処理した場合、主にP律速でCODが取り込まれず、処理水には高濃度のCODが残存すると考えられる。

メタン発酵関連菌とPPBは共に嫌気条件下で反応が進行し、pHや温度等の至適生育環境が比較的近似していることから (Speece 1996, Lu et al. 2021)、両微生物を単一槽に共存させる“メタン発酵-PPB共存系”が構築できる可能性がある。この共存系では、主要なCOD除去をメタン発酵が担い、一部のCOD除去と栄養塩類除去をPPBが担うことで、養鶏屠殺場廃水の適正処理を単一槽で進めることができる。さらに、バイオガスによるエネルギー回収と有用物質を蓄積したバイオマス回収を同時に行うことで、廃水から有価物への転換も期待できる。そこで本研究では、模擬廃水を用いた回分実験により、共存系、メタン発酵単独、PPB単独それぞれの処理性能を比較し、メタン発酵-PPB共存系による養鶏屠殺場廃水処理の有用性を評価することを目的とした。

2. 材料と方法

2.1. 基質と播種試料

基質には、肉エキス粉末、グリセロール、塩化アンモニウム、リン酸二水素カリウム等で構成される模擬養鶏屠殺場廃水 (Cao & Mehrvar 2011) を3倍濃縮したものをを用いた。播種試料には、下水汚泥を原料とした中温嫌気性消化槽由来の消化汚泥と、市販のPPB含有液 (主要種 *Rhodospseudomonas capsulata*、シマテック) をを用いた。嫌気性消化汚泥は槽から採取後、 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ で数日間放置し、残存有機物分を除去してから実験に用いた。PPB含有液は遠心分離操作 (4000 rpm、10分) により上澄み液と固形分に分け、上澄み液を取り除いた

後の濃縮バイオマスを実験に用いた。

2.2. 実験条件

反応槽には有効容積0.5 Lのメジウム瓶を用い、播種試料として嫌気性消化汚泥とPPBを混合した条件 (ADS-PPB条件、ADS: Anaerobic digestion sludge)、嫌気性消化汚泥のみを用いた条件 (ADS条件)、およびPPBのみ用いた条件 (PPB条件) を設けた。各条件において、投入基質CODおよび全N濃度はそれぞれ 4592 mg L^{-1} 、 733 mg-N L^{-1} とし、ADSとPPBの初期添加量は揮発性有機物 (Volatile solid: VS) 基準で 2.95 g L^{-1} に統一した。ADS-PPB条件では、赤外光強度 (単位: W m^{-2} 、波長: 850 nm) を0 (暗所: Dark)、9.1 (弱光: Weak)、15.3 (強光: Strong) の3条件設定した。PPB条件には弱光条件を用いた。また、ADS条件では、汚泥由来のバイオガス生成量を評価するために基質無添加の条件を設けた (ADS-NS、NS: No substrate)。基質と播種試料を混合した後、窒素ガス (N_2) で反応槽内を置換することで嫌気環境を形成し、温度 $33 \pm 2^\circ\text{C}$ 、攪拌条件下で19日間の回分実験を実施した。Fig. 1に実験条件概要を示した。

2.3. 分析項目

試料採取は実験0、2、4、7、11、19日目の計6回行った。懸濁液中のpH、酸化還元電位 (Oxygen redox potential: ORP)、バクテリオクロロフィルa濃度 (BChl. a) を測定し、懸濁液を孔径 $0.45 \mu\text{m}$ のシリジフィルターでろ過したろ液については、溶存態COD (soluble COD: sCOD) と溶存態全N濃度 (soluble TN: sTN) を測定した。pHとORPは、それぞれ卓上pHメーター (Seven Compact pH/Ion meter S220、Mettler Toledo) とデジタルORPメーター (YK-23RP、Mother Tool) を用いて測定した。懸濁液中のBChl. a濃度は、アセトン/メタノール溶媒 (78:22 v/v) を用いて抽出後、吸光光度計 (DR3900、Hach) による測定と Lambert-Beer 式を用いて算出した (Liaaen-Jensen & Jensen 1971, Brotosudarmo et al. 2015)。sCODとsTNはHach社の試薬を用い、

それぞれクロム法（水銀フリー）とペルオキシ二硫酸カリウム分解法によって測定した（DR3900、Hach）。播種試料中の VS 濃度は常法（American Public Health Association 1998）に準拠して測定した。

COD 除去率は、以下の式（1）により算出した。

$$\text{COD除去率 (\%)} = \left(1 - \frac{s\text{COD}_{\text{last}}}{s\text{COD}_{\text{initial}}}\right) \times 100 \quad (\text{式 1})$$

ここで、 $s\text{COD}_{\text{initial}}$ と $s\text{COD}_{\text{last}}$ はそれぞれ投入基質 sCOD 濃度と、実験終了時の sCOD 濃度を表している。

バイオガス生成量は、ガス生成に伴う反応槽上部空間の圧力上昇をデジタル圧力計（KDM30、Krone）に測定し、ボイル・シャルルの法則を用いて算出した。PPB 条件で生成されたバイオガス組成を調べるために、水素（ H_2 ）濃度と二酸化炭素（ CO_2 ）濃度を検知管式気体測定器（GV-100、Gastec）により測定した。

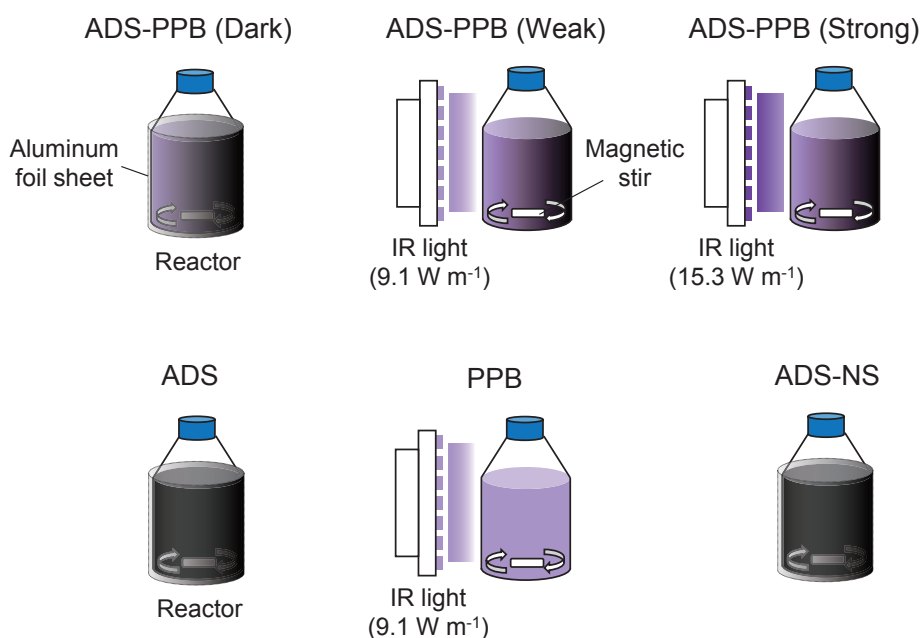


Fig. 1. Illustration of experimental apparatus. ADS: Anaerobic digestion sludge; PPB: Purple phototrophic bacteria; NS: No substrate; IR: Infrared. Aluminum foil sheet was used to block light from the outside.

3. 結果と考察

3.1. pH と ORP

ADS-PPB 条件と ADS 条件における pH は、実験開始から 5 日目にかけて減少後、7 日目にかけて上昇する傾向を示し、6.7 ~ 7.4 の範囲を推移した（Fig. 2a）。この結果は、模擬養鶏屠殺場廃水中の有機化合物の加水分解による有機酸生成とメタン発酵に

よるバイオガス化が生じたことを示唆している。一方で、PPB 条件における pH は実験期間を通し緩やかに減少し、実験最終日に 6.1 を示した。メタン発酵と *Rhodospseudomonas capsulata* 等の紅色非硫黄細菌が好む pH 範囲は、それぞれ 6.5 ~ 8.2（Speece 1996）と 6.0 ~ 9.0（Lu et al. 2021）であり、共存系条件か単独条件（ADS または PPB 条件）かに関わらず至適範囲に収まっていた。ORP は全条件で嫌

氣的な値を示し、特に ADS-NS を除く条件で $-100 \sim -300$ mV の強い嫌気環境が維持されていた (Fig. 2b)。嫌気性プロセスであるメタン発酵が円滑に進むためには -200 mV 以下の ORP 値が望ましく (Moletta

2005)、PPB は $-200 \sim -300$ mV の低 ORP 環境でも生育すると報告されているため (Izu et al. 2001)、ORP 値も至適範囲に収まっていた。

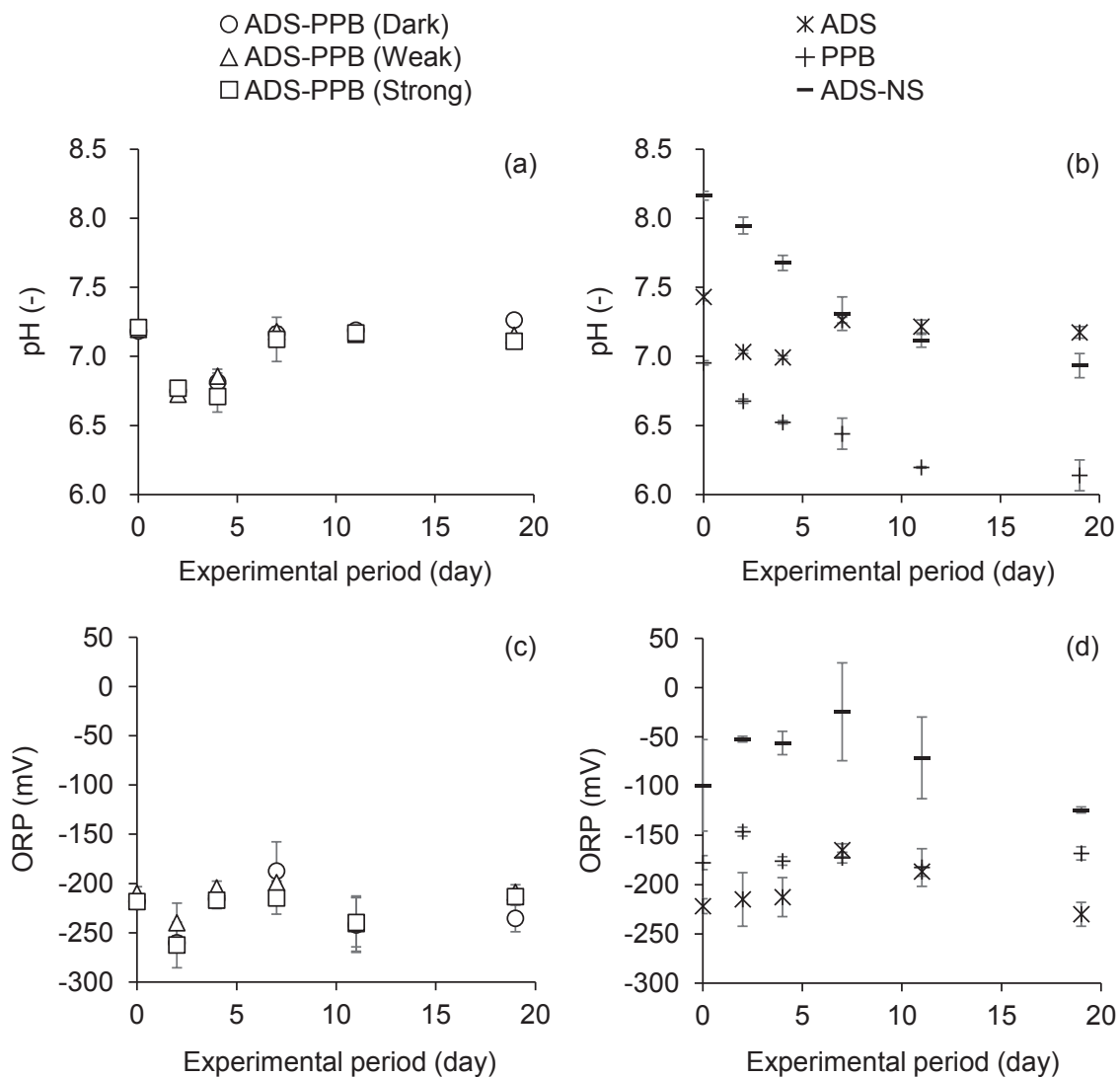


Fig. 2. Variations of pH and ORP for all conditions. (a) pH for ADS-PPB conditions; (b) pH for single conditions; (c) ORP for ADS-PPB conditions; (d) ORP for single inoculum conditions.

3.2. 積算バイオガス生成

ADS-PPB 条件における積算バイオガス生成量は暗所下 (Dark) で比較的高く (337 ± 68 mL)、強光下 (Strong) で比較的低い値 (276 ± 32 mL) を示した (Fig. 3a)。PPB は暗所下での化学合成従属栄養環境と比較

して、光従属栄養環境でより活発にバイオマス合成を行うことが知られている (Mata-De-la-Vega et al. 2022)。本研究では、暗所でより活発にメタン発酵によりバイオガス化が進み、一方で、強光条件下では PPB による有機炭素の取り込みが活発化した可能性が示唆された。投

入基質量は均一にも関わらず、ADS-PPB 条件と比較して、ADS 条件では低いバイオガス生成量 (138 ± 8 mL) を示した (Fig. 3b)。両条件間に大きな差が見られた理由として、PPB の一部がメタン発酵の原料となり分解されていた可能性が挙げられる。

PPB 条件でバイオガスが生成した理由として、嫌気的な光従属栄養環境下で生じる H_2 生成が考えられた

が (Chen et al. 2007)、分析の結果 H_2 は生成されておらず、 CO_2 生成が確認された。酢酸等の有機酸を基質とした光従属栄養環境では、PPB の増殖に伴い CO_2 を生成する代謝が進むことが知られており (Mckinlay & Harwood 2010)、本研究でも同様の反応が生じたと考えられる。

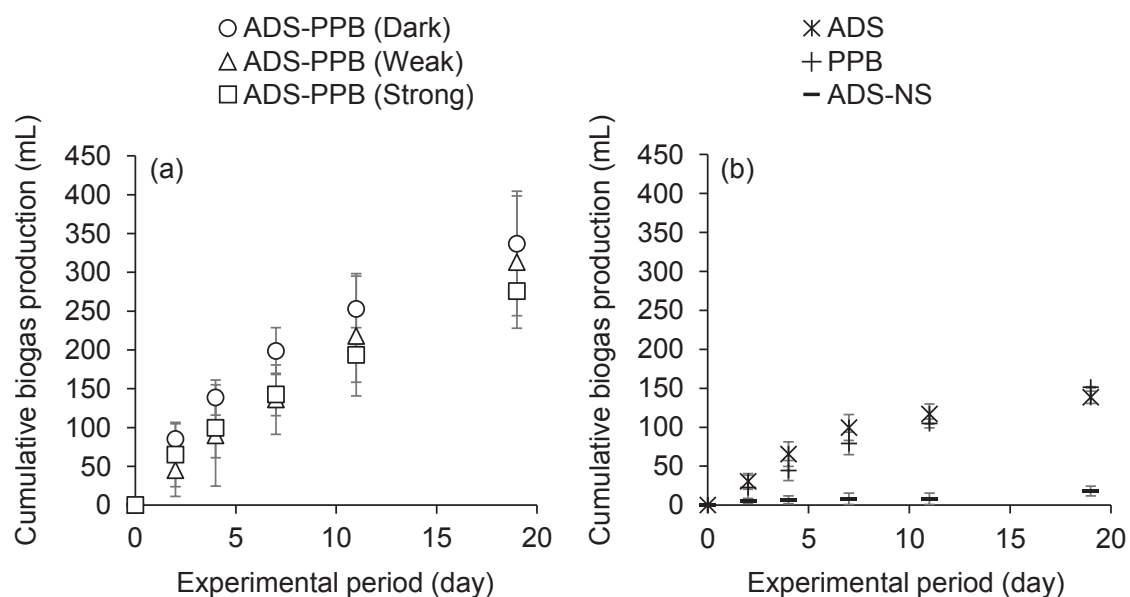


Fig. 3. Variation of cumulative biogas production for all conditions. (a) ADS-PPB conditions; (b) single inoculum conditions.

3.3. 有機炭素と窒素処理性能

ADS-PPB 条件では、sCOD 濃度は実験開始から 2 日目までに増加し、その後実験期間を通し減少する傾向を示した (Fig. 4a)。これは、基質および PPB バイオマスの一部が分解された後、共存系により利用されたことを示唆している。ADS 条件では、ADS-PPB 条件と比較して速やかに sCOD 濃度が減少した。一方で、PPB 条件では sCOD は除去されず、実験期間を通して蓄積し続けた (Fig. 4b)。投入基質の COD 除去率を比較すると、ADS-PPB (Dark) 条件と ADS 条件で 81% の高い値を示した (Fig. 5)。PPB は従属栄養環境下において赤外光照射によりバイオマス合成を促進するため、

光照射下の ADS-PPB 条件の方が暗所よりも高い COD 除去率が得られると期待していたが、本研究では反対の結果となった。特に、弱光下 (Weak) では暗所下の約半分の COD 除去率を示し、弱光環境は共存系の有機炭素処理性能に好ましくない影響を与える可能性が示唆された。PPB 条件では COD 除去が進行しなかった。PPB を用いた有機性廃水処理を行う場合、前処理として可溶化槽を設け、廃水中の成分を有機酸まで分解することが望ましいとされている (嶋田・高市 2020)。本研究では、他条件と比較を行うために、可溶化槽を設けずに処理を行った結果、効果的な COD 除去が生じなかったと考えられる。

全条件において sTN 濃度の減少は見られず、反対に実験期間を通して徐々に増加する傾向が見られ (Fig. 6)、本研究では PPB による栄養塩類除去は効果的には進まなかったことが示された。ADS-PPB 条件では、

PPB の一部がメタン発酵により分解された結果バイオマス由来の sTN 濃度が増加し、PPB 条件では、可溶化工程を経なかったため PPB が基質を利用し難く、結果として廃水由来の N 成分が残存したものと考えられる。

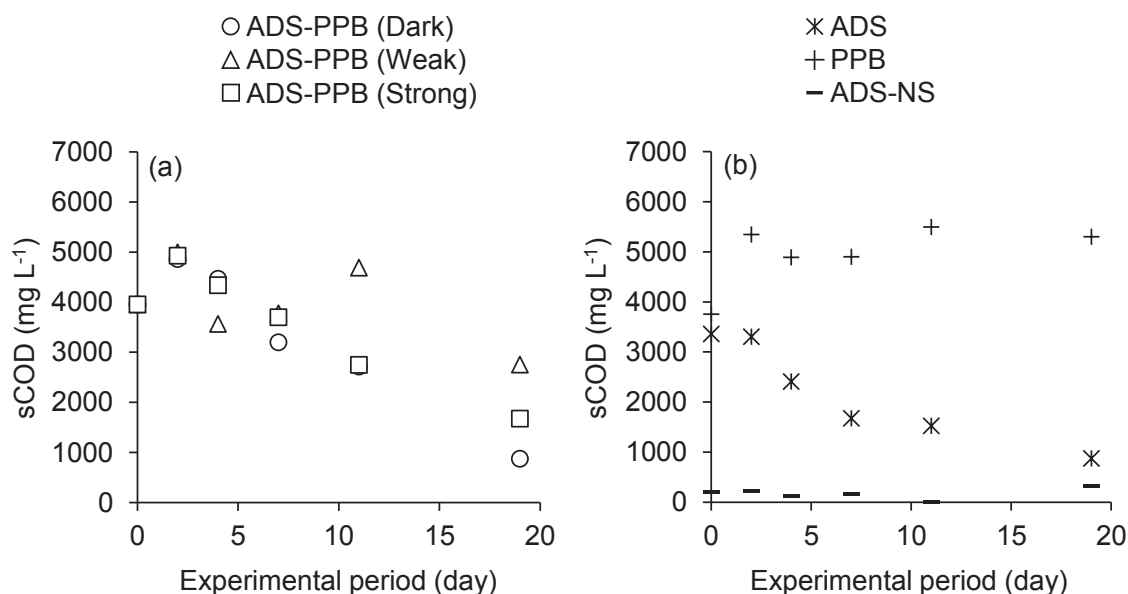


Fig. 4. Variation of sCOD concentration for all conditions. (a) ADS-PPB conditions; (b) single inoculum conditions.

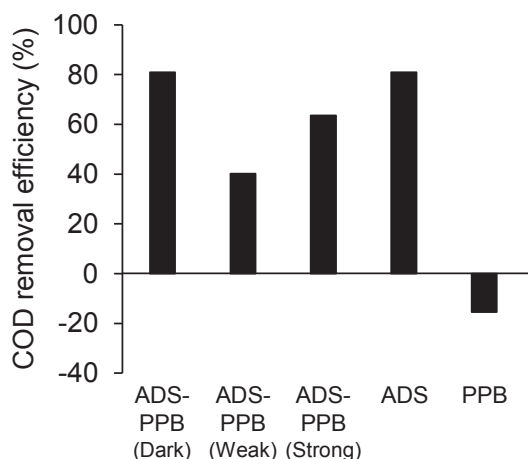


Fig. 5. COD removal efficiency for all conditions.

3.4. BChl. a 濃度

ADS-PPB 条件における BChl. a 濃度は、実験開始

から4日目にかけて徐々に減少しており、一部の PPB バイオマスが分解されたことが示された (Fig. 7)。一方で、BChl. a 濃度は7日目以降から増加し始め、特に12日目から19日目にかけて大幅な増加が見られた。この結果から、実験前半はメタン発酵のみが機能したが、後半は PPB、もしくはメタン発酵と PPB の両プロセスが機能したと考えられた。時間的な縦分けはあるものの、メタン発酵関連菌と PPB が単一槽で共存できる可能性が示された。PPB 条件における BChl. a 濃度は、実験開始から12日目にかけて減少傾向が見られた後、ADS-PPB 条件と同様に12日目から19日目にかけて増加した。しかし、ADS-PPB 条件と PPB 条件では BChl. a 濃度が増加したにも関わらず、顕著な COD 除去と N 除去が起きなかった (Figs 5, 6)。これは、PPB 増殖に伴う COD と栄養塩類の摂取量が sCOD 濃度と sTN 濃度を減少させる程大きくなかったことを示唆している。

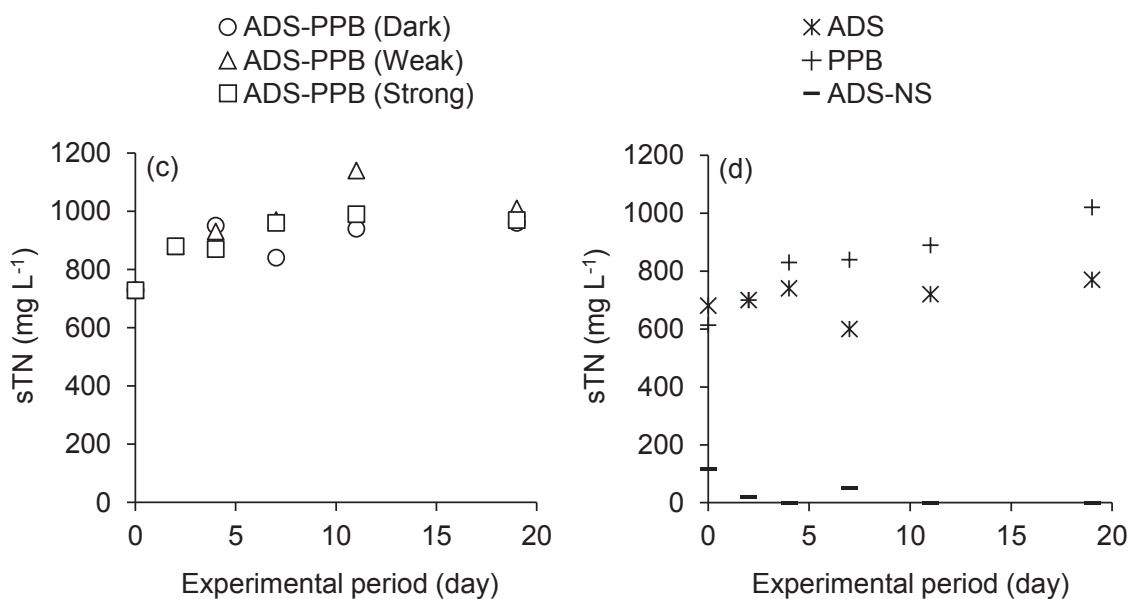


Fig. 6. Variation of sTN concentration for all conditions. (a) ADS-PPB conditions; (b) single inoculum conditions.

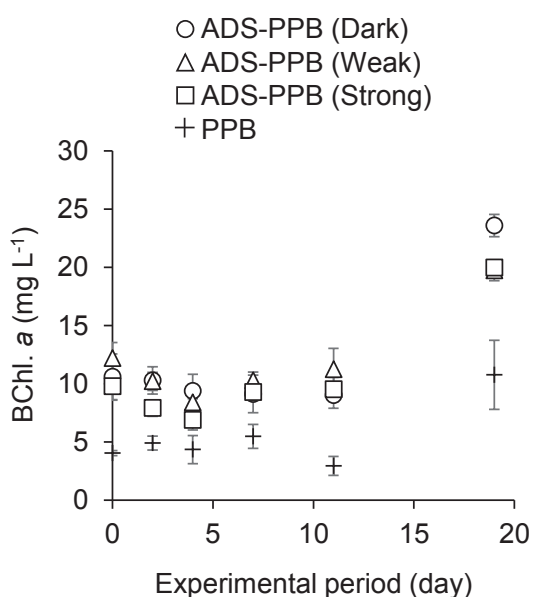


Fig. 7. Variation of BChl. a concentration for all conditions.

3.5. メタン発酵-PPB 共存系による廃水処理性能向上に向けて

3.1 ~ 3.4 で述べた結果から、本研究では、メタン発酵-PPB 共存系は機能し、有機炭素除去と BChl.

a 濃度の増加が確認されたものの、従来のメタン発酵を越える廃水処理性能は得られなかった。処理性能を向上させるためには、(1) 光透過性の向上と (2) 高濃度有機性廃水への PPB バイオマス事前順養等の対策が効果的と考えられる。

(1) 光透過性の向上

本研究では、分散状の ADS と PPB を混合し実験を実施した。しかし、ADS は濃い黒色を呈しているため、混合状態では赤外光が効率的に PPB に照射されなかった可能性がある。例えば微細藻類の大量培養でよく導入されているフラットパネル型反応槽 (Kumar et al. 2010) や、ADS が顆粒状に凝集したグラニュール汚泥 (Schmidt & Ahring 1996) を用いることで、遮光性の高い ADS と混合した際にも効果的に光を透過できると期待される。

(2) 高濃度有機性廃水への PPB バイオマスの事前順養

本研究で播種試料として用いた PPB は、熱帯魚・観賞魚用水槽の水質浄化細菌として販売されているもので、それを高濃度に濃縮して利用した。元々の用途

が高濃度有機性廃水処理ではないため、高有機炭素・栄養塩負荷環境下に曝されて直ぐには機能しなかった可能性がある。一方で、本研究で用いた ADS は、高濃度有機性廃棄物（下水汚泥）を処理していたメタン発酵槽から採取したものであり、養鶏場廃水等の高濃度有機性廃水にも実験開始直後から効果的に対応できたと考えられる。そのため、高濃度有機性廃水に事前に順養した PPB バイオマスを播種試料として用いることで、PPB の廃水処理への寄与率が向上し、メタン発酵-PPB 共存系が効果的に進む可能性がある。実験終了後も 2. 材料と方法に記載した条件下で各反応槽を置き続けていたところ、約 1 か月後に PPB 条件において、赤外光照射の受光面にバイオフィルムの形成が確認された。この結果は、高濃度有機性廃水に PPB を長期間暴露することで、高濃度に耐え得るバイオマスが順養された可能性を示唆している。

今後は、これらの改善策を講じて再度メタン発酵-PPB 共存系の構築を試み、省エネルギー・資源循環型の養鶏屠殺場廃水処理技術の開発を目指す。

4. 結論

本研究では、メタン発酵-PPB 共存系による模擬養鶏屠殺場廃水処理の有用性を評価するために、模擬廃水の回分処理実験において、共存系の ADS-PPB 条件、メタン発酵単独プロセスの ADS 条件、PPB 単独プロセスの PPB 条件の性能を比較した。ADS-PPB 条件では、明暗条件に関わらず、まず初めにバイオガス生成と COD 除去が進み、その後 BChl. *a* 濃度が増加する結果が得られ、単一槽で共存系が成立したことが示された。しかし、COD 除去性能は ADS 条件と同程度かそれ以下を示し、顕著な N 除去は確認されなかった。フラットパネル型反応槽の利用や嫌気性消化汚泥の凝集化により光透過性を向上する、PPB バイオマスを播種試料として用いる前に高濃度有機性廃水で順養する等の手法を取り入れることで、共存系の処理性能が改善できると期待される。

5. 謝辞

本研究は、公益財団法人前川報恩会 2020 年度学術研究助成の支援により実施された。実験で用いた嫌気性消化汚泥試料は、神奈川県横浜市北部汚泥資源化センターから提供を受けたものであり、関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。本研究の化学分析の一部は、創価大学理工学部共生創造理工学科 修復生態学研究室の機器・装置によって行われたものであり、戸田龍樹教授を始め研究室の皆様に感謝の意を表す。

引用文献

- American Public Health Association (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed), American Public Health Association, Washington, DC, 1220 pp.
- Brotosudarmo THP, Limantara L, Heriyanto, Prihastyanti MNU (2015) Adaptation of the photosynthetic unit of purple bacteria to changes of light illumination intensities. *Procedia Chem* 14: 414–421.
- Cao W, Mehrvar M (2011) Slaughterhouse wastewater treatment by combined anaerobic baffled reactor and UV/H₂O₂ processes. *Chem Eng Res Des* 89: 1136–1143.
- Chen CY, Lu W-B, Wu JF, Chang JS (2007) Enhancing phototrophic hydrogen production of *Rhodospseudomonas palustris* via statistical experimental design. *Int J Hydrog* 32: 940–949.
- Hülßen T, Barry EM, Lu Y, Puyol D, Keller J, Batstone DJ (2016) Domestic wastewater treatment with purple phototrophic bacteria using a novel continuous photo anaerobic membrane bioreactor. *Water Res* 100: 486–495.
- Hülßen T, Batstone DJ, Keller J (2014) Phototrophic bacteria for nutrient recovery from domestic wastewater. *Water Res* 50: 18–26.

- Hülse T, Hsieh K, Tait S, Barry EM, Puyol D, Batstone DJ (2018) White and infrared light continuous photobioreactors for resource recovery from poultry processing wastewater – a comparison. *Water Res* 144: 665–676.
- Izu K, Nakajima F, Yamamoto K, Kurisu F (2001) Aeration conditions affecting growth of purple nonsulfur bacteria in an organic wastewater treatment process. *Syst Appl Microbiol* 24: 294–302.
- Jia Y, Gao C, Zhang L, Jiang G (2012) Effects of pre-fermentation and influent temperature on the removal efficiency of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in slaughterhouse wastewater by using SBR. *Energy Procedia* 16: 1964–1971.
- Kumar A, Ergas S, Yuan X, Sahu A, Zhang Q, Dewulf J, Malcata FX, van Langenhove H (2010) Enhanced CO_2 fixation and biofuel production via microalgae: Recent developments and future directions. *Trends Biotechnol* 7: 371–380.
- Liaaen-Jensen S, Jensen A (1971) Quantitative determination of carotenoids in photosynthetic tissues. *Meth Enzymol* 23: 586–602.
- Lu H, Zhang G, He S, Zhao R, Zhu D (2021) Purple non-sulfur bacteria technology: a promising and potential approach for wastewater treatment and bioresources recovery. *World J Microbiol Biotechnol* 37:1–15.
- Mata-De-la-Vega JF, Akizuki S, Sakai HD, Cuevas-Rodríguez G (2022) Slaughterhouse wastewater treatment using purple phototrophic bacteria: A comparison between photoheterotrophic and chemoheterotrophic conditions. *Biochem Eng J* 179: 108273.
- McKinlay JB, Harwood CS (2010) Carbon dioxide fixation as a central redox cofactor recycling mechanism in bacteria. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107: 11669–11675.
- Moletta R (2005) Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion. *Water Sci Technol* 51: 137–144.
- 農林水産政策研究所 (2015) 2024 年における世界の食料需給見通し-世界食糧需給モデルによる予測結果-。農林水産省, 28 pp.
- Salminen E, Rintala J (2002) Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review. *Bioresour Technol* 83: 13–26.
- Schmidt JE, Ahring BK (1996) Review granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Biotechnol Bioeng* 49: 229–246.
- 嶋田敬三・高市真一 (2020) 光合成細菌の利用。“光合成細菌—酸素を出さない光合成—”。裳華房, 東京, 302 pp.
- Speece RE (1996) *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Archae Press, Tennessee, 393 pp.
- Yaakob MA, Mohamed RMSR, Al-Gheethi AAS, Kassim AHM (2018) Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater. *Chem Eng Trans* 63: 637–642.