

総説

光合成能を有するプランクトンを利用した 次世代省エネルギー型廃水処理技術の研究動向

秋月真一^{1)*}, ヘルマン クエバス - ロドリゲス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) グアナファト大学工学部 36000 メキシコ合衆国グアナファト州グアナファト市フアレス通り 77

Next-generation energy-saving wastewater treatment technologies based on photosynthetic capacity of phytoplankton

Shinichi Akizuki^{1)*}, Germán Cuevas-Rodríguez²⁾

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

2) *Division of Engineering, University of Guanajuato, Av. Juárez 77, CP 36000, Guanajuato, GTO, México*

* *Corresponding author: s-akizuki@soka.gr.jp*

2021年4月17日受付, 2021年4月30日受理

Abstract Over the last century, wastewater treatment technologies have evolved greatly along with demographic expansion and in accordance with the development of legislation. Plankton, defined as organisms that drift in aquatic environments, play an important role in wastewater treatment systems. For example, diverse types of bacterio-plankton have the ability to stabilize pollutants in wastewaters. Wastewater treatment technologies have been developed mainly in advanced economies such as in Europe and North America to address environmental pollution in aquatic ecosystems near human populations. Conventional wastewater treatment is primarily based on the activated sludge process and its modifications, which require high energy consumption for aeration and high cost for sludge disposal. These processes are not appropriate in emerging economies where the budget allocated for environmental protection is limited.

Recently, wastewater treatment based on phototrophic plankton, including microalgae and cyanobacteria (purple phototrophic bacteria), have attracted increasing attention because they can utilize natural sunlight as an energy source, and carbon and nutrients, *e.g.* ammonium and phosphate, as their biomass increases. In addition, many types of phototrophic plankton can produce useful metabolic products such as protein, carbohydrate, polyhydroxyalkanoate and carotenoids from wastewater.

In this paper, we focus on the current status and prospects of phototrophic plankton-based wastewater treatment technologies. We focus first on the history of the development of wastewater treatment technologies during the last century and several key technologies including activated sludge, trickling filter, denitrification-nitrification, anaerobic digestion and upflow anaerobic

sludge blanket processes (Section 1). Thereafter, the contents are organized as follows: current status and bottlenecks of conventional plankton-based wastewater treatment technologies (Section 2), research trends of wastewater treatment technologies based on microalgal-bacterial consortium (Section 3), case study one (1) treatment of anaerobic digestion effluent by microalgal-nitrifying bacterial consortium (Section 4), research trends of wastewater treatment technologies based on purple phototrophic bacteria (Section 5), case study two (2) treatment of slaughterhouse wastewater by purple phototrophic bacteria (Section 6), and towards implementation in sunbelt regions (Section 7). The case study sections (Sections 4 and 6) include our recent published and unpublished works to facilitate better understanding of the current status and the effectiveness of phototrophic plankton-based wastewater treatment technologies.

Keywords: biological wastewater treatment; microalgal-bacterial consortium; purple phototrophic bacteria; sunbelt region; high-strength wastewaters

1. はじめに

水の流れに逆って、自らの位置を保てない生物を総じてプランクトンと呼ぶ。プランクトンには、クラゲのように比較的大きな生物から、ウイルスのようにナノメートルスケールの極めて小さな生物まで対象として含まれるが、概ね顕微鏡的な大きさである。プランクトンの中には、適切な環境下で管理することで、水中に含まれる汚濁物質を効果的に除去できる種が多く存在し、人類は古くからその恩恵を受けてきている。例えば、1900年代初頭にイギリス・マンチェスター州 Davyhulme 下水道研究所の Arden & Lockett (1914) により提案された活性汚泥法では、*Zoogloea* 属、*Bucillus* 属、*Pseudomonas* 属等の好気性のバクテリオプランクトンを利用して廃水中の有機汚濁物質を除去している。これは、槽底部から散気管を通じて空気を供給する曝気槽内に好気性バクテリアを高濃度で生育させ、そこに廃水を供給して、廃水中の有機物と一部の無機栄養塩類を除去する手法である。活性汚泥法は、現在に至るまで、都市下水処理を担う主要な技術の一つとして世界各地で利用され続けている。他にも、プランクトンを用いた廃水処理法には以下の手法が例として挙げられる

(Lofrano & Brown 2010) :

- 散水ろ床法：廃水をろ過材に散布し、ろ過材表面に形成された微生物膜との接触反応により、有機性汚濁物質を除去する手法 (1890 年頃～)。
- 硝化—脱窒素法：廃水中のアンモニア成分を、硝化関連バクテリアにより好気環境下で窒素酸化物に酸化する硝化反応と、窒素酸化物を脱窒素関連バクテリアにより無酸素環境下で窒素ガスまで還元する脱窒素反応の組み合わせにより除去する手法 (1950 年頃～)。
- 嫌気性消化法 (メタン発酵)：嫌気性環境下で働く加水分解菌、酸生成菌、メタン生成菌等のバクテリアおよび古細菌 (以下、アーキア) の連続代謝により、高濃度有機性汚濁物質を、メタンを含むバイオガスに転換可能な手法 (1900 年頃～導入開始、初期は Travis Tank, Imhoff Tank の呼称が有名)。
- 上向流嫌気性汚泥床 (Upflow anaerobic sludge blankt: UASB) 法：メタン発酵に関与する嫌気性バクテリアおよびアーキアの持つ自己凝集機能を利用して沈降性の優れた数 mm 程度の顆粒状凝集態 (グラニュール) を形成し、槽内にバイオマスを高密度で保持することで、高有機物負荷での処理を可能とする手法 (1970 年頃～)

人間の活動と廃水の発生は分ち難い関係で、適切な廃水処理は、周辺環境の水質汚染と富栄養化を防ぐために不可欠である。プランクトンは、我々人類が安全で豊かな生活を維持するための重要な役割を担っている。

近年、従来のバクテリアに代わり、微細藻類や紅色光合成バクテリア等の光合成能を有するプランクトンを利用した廃水処理が注目を集め、国内外を問わず活発な研究活動が行われている (Muñoz & Guieysse 2006, Hülsen et al. 2014, Capson-Tojo et al. 2020)。プランクトンの光合成能を利用した廃水処理に関する研究は、その起源を辿ると 1960 年前後にまで遡る。当時も一部の研究者の間で関心が集められていたが、後述するように従来の廃水処理法の常識からくる誤解や失敗も多く (嶋田・高市 2020)、廃水処理のメインストリームにはならなかった。現代は、人類社会の急激な拡大により、地球上の資源の有限性が世界の共通認識となりつつある。その中で、光合成能を利用した廃水処理は、太陽光という無限に近いエネルギーを利用できるため、数十年の時を経て再び関心が高まってきた。本論文では、“光合成能を有するプランクトンを利用した省エネルギー型廃水処理”に焦点を当て、その研究動向について著者らの研究成果を交えて紹介し、合わせて今後の展望を報告する。

2. プランクトンを利用した廃水処理の現状と課題

先述の活性汚泥法を皮切りとして、20 世紀はバクテリアやアーキアの機能を利用した廃水処理法の開発と普及が進められてきた。これまでに、異なるバクテリアとアーキアの汚濁物質除去能を明らかにするために、温度、pH、溶存酸素濃度、酸化還元電位等の環境要因と処理性能の関係、流入有機物負荷速度の許容範囲とショック応答、反応槽構造の最適化等に関する基礎的な知見が集積され、都市下水から産業廃水に至るまでの多様な廃水の処理効果が実証された。しかし、既存の廃水処理技術は、経済的基盤が安

定し、環境保全対策に費用を投じられる先進国を中心に普及したものであり、環境保全よりも経済成長が喫緊の課題となっている開発途上国にそのまま導入することが難しい。そのため、多くの開発途上国では、未だ廃水処理施設の普及率が乏しいのが現状である。例えば、Liao et al. (2021) は、2010 年の国民一人当たりの平均 GDP と廃水処理普及率の間に強い正の相関が見られることを示し、日本、シンガポール、米国等の 45000 US ドルを超える高 GDP 国では 70% 以上の普及率である一方で、ベトナム、フィリピン等の低 GDP 国の普及率は 15% にも満たないと報告している。2030 年に向けて国連で定めた SDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) では、“未処理の廃水の割合半減 (目標 6.3)” が掲げられている。開発途上国でも効果的かつ持続的に利用可能な廃水処理技術は、今後益々重要性が増すと考えられる。

従来の廃水処理法の多くは、好気的な環境下で働くバクテリアを利用する手法であり、浄化機能を最大限活用するためには機械的な曝気が必要であった。この曝気動力は非常に膨大で、廃水処理施設全体のエネルギー消費量の 45 ~ 75% を占めるとも報告されている (Rosso et al. 2008)。さらに、処理過程で生成したバイオマス (余剰汚泥) が有機性廃棄物となり、別途処分が必要になることも課題である。嫌気性環境下で働くバクテリアとアーキアを利用するメタン発酵では、曝気動力が不必要であり、汚泥生成量が少なく、加えてメタンを高濃度に含むバイオガスが回収できる利点がある。しかし、栄養塩類 (窒素、リン等) の除去が行われず二次処理が必要であることや、都市下水等の低濃度有機性汚濁物質の処理では効果的な処理が見込まないこと等のネガティブな特徴を持ち、従来の好気性処理の代替とはならない。そのため、従来の廃水処理法とは異なる視点からのアプローチが必要である。

3. 微細藻類—バクテリア共存系による 廃水処理技術の研究動向

カリフォルニア大学バークレー校の Oswald の研究グループは、1957年に発表した論文“Photosynthesis in sewage treatment”の中で、微細藻類と好気性バクテリアの共存系による下水処理法を提案した (Oswald & Gotaas 1957)。共存系による処理システム内では、廃水中の有機物を好気性バクテリアにより分解し、二酸化炭素 (CO_2)、無機栄養塩 (NH_4^+ , PO_4^{3-}) と水へと変換され、これらは全て微細藻類の光合成で利用できる。微細藻類—バクテリア共存系による廃水処理に関する網羅的な文献調査に基づき Muñoz & Guieysse (2006) は、有機物量の指標である生物化学的酸素要求量 (BOD) と、栄養塩類の除去に加え、廃水中の多様な重金属類 (Zn, Cr, Cd, Co, Al 等) の吸着または吸収や、病原菌の除去能について整理されている。異なる研究者により、これまで湖沼・河川等の身近な水圏環境に生息する微細藻類の多くが廃水処理に利用できることが明らかとなっている。代表的な属に限っても、*Chlorella* 属、*Scenedesmus* 属、*Dunaliella* 属、*Neochloris* 属、*Chlamydomonas* 属、*Nitzschia* 属、*Cosmarium* 属、*Oedogonium* 属等の有用性が示されている (Muñoz & Guieysse 2006, Mehrabadi et al. 2015, Gonçalves et al. 2017, Udaiyappan et al. 2017)。特に *Chlorella* 属は幅広い pH・温度環境で生育可能で、溶存態有機物への耐性も高いことから、廃水処理に頻繁に用いられている。

微細藻類—バクテリア共存系による廃水処理の実用化に向けた試みは、一部の廃水を対象とし進められつつある。例えばスペインでは Aqualia 社を中心とした All-Gas Project が立ち上げられ、HRAP (High rate algal pond) と呼ばれる共存系培養槽を用いたデモプラント施設により、現在日量 2000 m^3 の規模での都市下水処理が行われている (All-Gas Project 2019)。デモプラントは、地中海性気候で比較的温暖なスペイン南部のカディスに建設され、年間を通じて安定した処理が

行われている。さらに、培養槽から排出される余剰バイオマスはメタン発酵によって嫌氣的に分解・バイオガス化し、濃縮したメタンは車両を動かすバイオ燃料として有効利用されている。

2010年以降、Karya et al. (2013) を始めとして、微細藻類—バクテリア共存系による高濃度アンモニア含有廃水処理に関する研究が数多く報告されている (Vargas et al. 2016, Kwon et al. 2019, Sepehri et al. 2020)。アンモニアは、食品製造業に加えて、電子部品製造業、化学薬品・医薬品製造業、メタン発酵施設等の多様な産業施設で発生する廃水に高濃度に含まれ、富栄養化を引き起こす主要な要素であるため、特に適正処理が求められるものの一つである。現状では硝化—脱窒素法による処理が主流であるが、硝化反応に膨大な曝気動力を要し、脱窒素反応にはメタノール等の有機炭素剤の添加が必要となるため、持続的に利用可能な手法ではない (Fig. 1a)。微細藻類—バクテリア共存系において、バクテリア源として硝化関連菌を豊富に含む播種源を利用することで、微細藻類と硝化反応を担う硝化菌との共存系が形成できる。播種源としては、硝化—脱窒素法の好気性汚泥に加え、廃水処理工程の中に硝化反応を組み込んでいる嫌気無酸素好気 (Anaerobic-Anoxic-Oxic: A_2O) 法 (Mishima et al. 1996) やオキシデーションディッチ (OD) 法 (Rittmann & Langeland 1985) の好気性汚泥等が挙げられる。この微細藻類—硝化関連バクテリア共存系においては、機械的な曝気の代わりに、微細藻類の光合成による酸素供給により硝化反応が進行し、曝気動力が大幅に削減できる。また、光合成に伴う微細藻類による部分的な栄養塩除去が進み、脱窒素反応時の窒素負荷を軽減できることから、有機炭素剤の削減も期待できる (Fig. 1b)。

ここで、従来の微細藻類—バクテリア共存系と微細藻類—硝化関連バクテリア共存系におけるアンモニア耐性の違いについて述べたい。従来の共存系では、従属栄養性バクテリアが主要なバクテリア構成員を占めることが多く、廃水中の有機物の無機化と炭素分の除去が得意とされていた。一方で、有機物濃度が低く、無

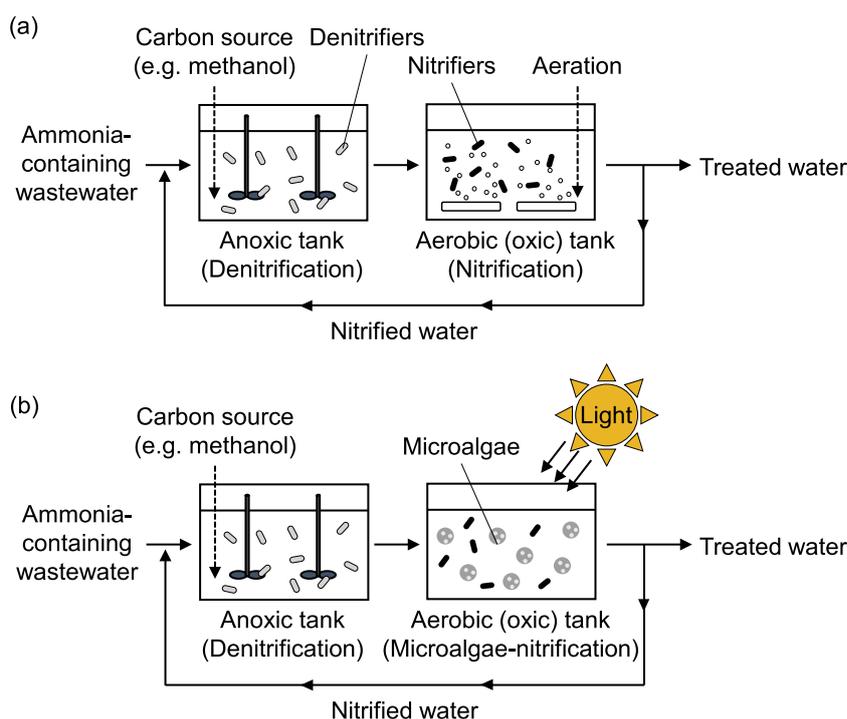


Fig. 1. Conventional nitrification-denitrification processes (a) and consortium of microalgae and nitrifying bacteria (b) for ammonia-containing wastewater treatment.

機化されたアンモニアが高濃度に含有される廃水を対象とした場合、しばしば処理が破綻することが報告されている (Collos & Harrison 2014, Gutierrez et al. 2016, Xia & Murphy 2016)。これは、Anthonisen et al. (1976) による以下の式 (1) で表される遊離アンモニア (NH_3) 濃度が一定レベルに達すると、葉緑体における光リン酸化反応の脱共役阻害が生じ (Crofts 1966)、微細藻類の活性が低下するためである。

$$\text{NH}_3\text{-N} = \frac{\text{NH}_4^+\text{-N} \times 10^{\text{pH}}}{\exp\left(\frac{6344}{273+\text{Temp}}\right) + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

光合成が進むと、重炭酸イオン (HCO_3^-) の減少に伴い pH が上昇し、 NH_3 濃度が増加することで、結果として微細藻類の活性が低下し共存系の崩壊に繋がる。従属栄養性バクテリアの代わりに硝化関連バクテリアを利用することで、アンモニウムイオンが硝化反応を経て硝酸 (NO_3^-) に酸化される。さらに硝化反応ではプロトンが生成するため pH が減少する。そのため、微

細藻類—硝化関連バクテリア共存系では、例え廃水中のアンモニア濃度が高い場合でも、共存系内で NH_3 濃度が増加せず、安定した廃水処理が見込める。

4. ケーススタディー (1) : 微細藻類—硝化関連バクテリア共存系によるメタン発酵消化液処理

メタン発酵は、下水処理過程で発生する余剰汚泥、家畜糞尿、生ごみ、醸造廃水等の多様な高濃度有機性廃棄物と廃水からバイオガスを回収できる技術として成熟し、既に先進国・開発途上国を問わず、各地で導入が進められている (Pike Research 2012, Lora Grando et al. 2017)。しかし、発酵槽から排出される消化液中には、栄養塩類 (特にアンモニア) が高濃度に残存するため、別途、硝化—脱窒素法等による後段処理を施す必要がある。著者らはこれまで、消化液を対象とした微細藻類—硝化関連バクテリア共存系の有用性評価に関する研究を進めてきた (Akizuki et al.

2019, Akizuki et al. 2020a, Akizuki et al. 2021)。既存の微細藻類—硝化関連バクテリア共存系の研究では、温度・pH・光照射強度といった環境要因を制御した実験室内での研究例が大部分を占めている (Karya et al. 2013, Vargas et al. 2016, Rada-Ariza et al. 2017)。しかし、実際の廃水処理は屋外環境下で行うことが想定され、これらの環境要因は季節と時間帯によって大きく変動する。本手法の確立には、屋外環境下で共存系がどのように機能するのかについて知見の集積が必要である。そのため、著者らは屋外環境下における共存系の消化液処理性能を評価し、課題点の抽出と改善策の検討を行った。ここでは、これまでに得られた主要な研究成果について紹介する。

2016年と2017年の夏に、メキシコ・グアナフアト大学工学部の研究施設において、微細藻類—硝化関連バクテリア共存系によるメタン発酵消化液処理実験を実施した。消化液には、事前に孔径 $0.45 \mu\text{m}$ のフィルターでろ過後、純水で希釈したものを用いた。実験の播種試料として混合藻類 (*Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. および珪藻) とオキシデーションディッチ法の好気性汚泥を用い、 0.5 L のガラス製三角フラスコを用いた回分処理を実施した。温度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ と光照射強度 $140 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に制御した実験室内と屋外環境下での処理性能を比較した。その結果、実験室内では7割を超える高いアンモニア除去率が得られ、 NO_3^- の生成が確認された。一方屋外環境下ではアンモニアが高濃度で残存し、 NO_3^- の生成もほとんど見られなかった (Akizuki et al. 2019)。これは、硝化関連バクテリアが光照射に脆弱であり、太陽光照射下で活性が著しく低下したことが主要な原因と考えられる。例えば、Merbt et al. (2012) は、硝化関連バクテリアである *Nitrosomonas europaea* と *Nitrospira multififormis* の活性が、 $500 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の光照射強度下でほとんど100% 阻害を受けたことを報告している。メキシコのように太陽光が豊富に降り注ぐ地域では、日中の光照射強度は高く、夏場では $2000 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を越える (Fig. 2)。そのため、屋外環境下で安定し

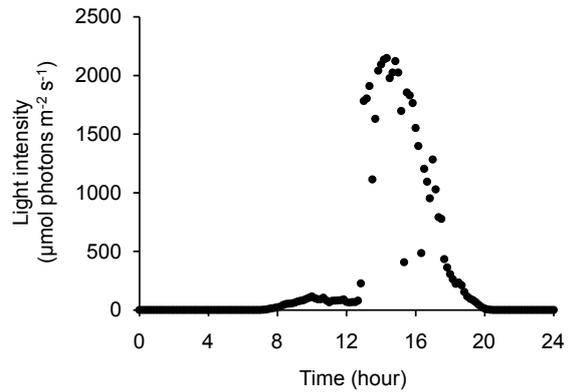


Fig. 2. Diurnal variation in light intensity (photosynthetically active radiation: PAR) at laboratory of Division of Engineering, University of Guanajuato (August, 2017).

て硝化反応を進行させるためには、硝化菌への光阻害を軽減できる何らかの手法を検討する必要がある。

著者らは、硝化関連バクテリアへの光阻害を緩和させるために、微生物固定化担体が利用できるのではないかと考えた (秋月ほか 2020)。微生物固定化担体は、一般的に水に近い比重の材質で空隙構造を取り、微生物がその表面・内部に高密度で付着することで高い廃水処理能力を示す。例えば人間であれば、日差しが強い場合は、カーテンを閉めたり、木陰に隠れたり、家の中にいることで直射日光を避けることができる。バクテリアの場合は、担体が言わばこのような木陰・住処のような役割を持つと期待した (Fig. 3)。そこで、直径 10 mm 程度のポリウレタン製スポンジを担体として用い、 0 から $1600 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の異なる光照射強度条件下で、回分実験による硝化活性評価を行った。

その結果、通常分散状硝化関連バクテリアを用いた系列では光照射強度の増加と共に硝化活性が著しく低下した一方で、担体を利用した系列では、 $1600 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の条件でも暗所と同程度の活性を維持した。

次に、微細藻類と硝化関連バクテリアを固定化した担体を有効容積 35 L (深さ 10 cm) のパドル攪拌型培養槽に投入し、メタン発酵消化液の連続処理を実験室内と屋外環境下で実施した (Akizuki et al. 2021)。

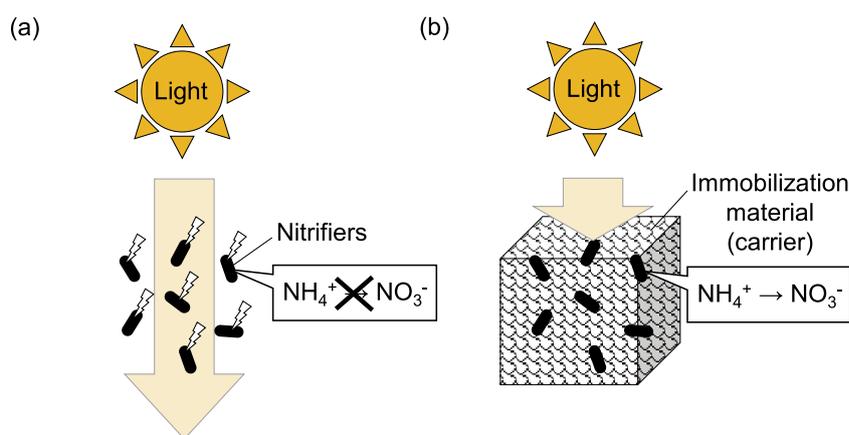


Fig. 3. Light stress on nitrification process (a) and mitigation of light stress by immobilization materials (b).

メタン発酵消化液には、脱水後の上澄みを純水で希釈したものを用いた。実験室内での入射光照射強度を $1000 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とし、明暗周期 12 時間、温度 $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ で運転を行った。水理的滞留時間 (HRT) を 5 日とし、担体を投入した系列と、通常の分散状硝化関連バクテリアを投入した系列での処理性能を比較した。その結果、担体投入系列では安定した硝化が見られ、最終的に投入窒素の約 4 割が NO_3^- へと変換された。一方で、分散状系列では、硝化反応の中間体生成物である亜硝酸 (NO_2^-) が高濃度に蓄積した。硝化反応は、 NH_4^+ を NO_2^- まで酸化するアンモニア酸化細菌 (Ammonia oxidizing bacteria: AOB) と NO_2^- を NO_3^- まで酸化する亜硝酸酸化細菌 (Nitrite oxidizing bacteria: NOB) の連続代謝によって進む。NOB は AOB と比較して光照射による阻害を強く受けることが知られており (Diab & Shilo 1988)、分散状系列では NOB に対する光阻害が顕著に表れたと考えられる。結果として、担体投入系列では分散状系列と比較して約 10 倍の高い硝化活性を示し、担体による光阻害の緩和効果が確認された。

担体投入により培養槽内の光照射強度がどの程度減衰するかを明らかにするために、ランベルト・ベールの法則を元に、担体投入系列と分散状系列における槽深度毎の光照射強度を算出する以下の式を設定した。

$$I_x = I_0 \exp \left\{ - \left(N_{\text{carrier}} \times \alpha_{\text{carrier}} + C_{\text{algae}} \times \alpha_{\text{algae}} + C_{\text{nitrifiers}} \times \alpha_{\text{nitrifiers}} \right) \times \text{depth} \right\} \quad (2)$$

$$I_x = I_0 \exp \left\{ - \left(C_{\text{algae}} \times \alpha_{\text{algae}} + C_{\text{nitrifiers}} \times \alpha_{\text{nitrifiers}} \right) \times \text{depth} \right\} \quad (3)$$

ここで、 I_x は培養槽の各深度における光強度 (単位: $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 I_0 は入射光強度、 N_{carrier} は培養槽の単位容積 (cm^3) あたりの理論的担体存在量、 C_{algae} と $C_{\text{nitrifiers}}$ はそれぞれ培養槽内の微細藻類と硝化バクテリア濃度、 α_{carrier} 、 α_{algae} および $\alpha_{\text{nitrifiers}}$ はそれぞれ担体、微細藻類および硝化バクテリアの光減衰係数、depth は培養槽深度を示す。両系列の槽深度毎の光照射強度を算出した結果、分散状系列では槽底部でも $985 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光照射強度となり、入射光強度がほとんど減衰せずに底まで到達していた。一方で、担体投入系列では、槽底部の光照射強度は $64 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、担体が光を遮る役目を果たしていたことが明らかとなった (Fig. 4)。このような光阻害の緩和効果は、担体だけに限らず、硝化関連バクテリアのグラニュール化 (Akizuki et al. 2020b) や、ブラックカーボンを添加した遮光ゲルによる固定化 (Nishi et al. 2020) によっても得られることが明らかとなっている。

次に、屋外実験を 2019 年の夏場 (7 月 ~ 9 月) に創

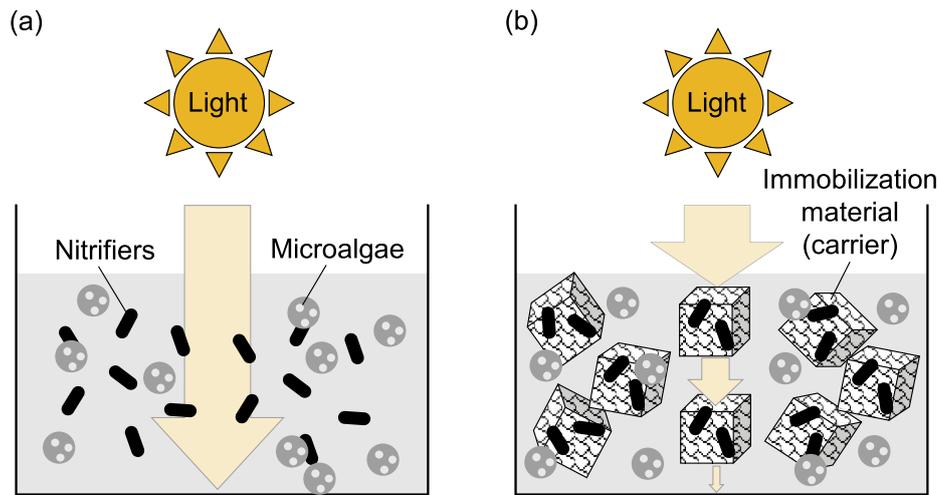


Fig. 4. Penetration of incident light in microalgae-dispersed nitrifiers reactor (a) and microalgae-immobilized nitrifiers reactor (b).

銚子大学工学部棟の一角で実施した。屋内実験と同型の培養槽に担体を投入し、メタン発酵消化液の連続処理を実施した。光照射強度が $1500 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を越える快晴日が続いたが、実験期間後半には安定した NO_3^- の蓄積が見られ、屋外環境下でも安定した硝化の進行が確認された (Akizuki et al. 2020a)。一方で、屋外環境下で半年～1年以上の長期的に運転した際のプロセス安定性や、温度・光照射強度等の環境要因の変動と処理性能の関係性に関する知見は少なく、今後はこれらについての研究に取り組む必要がある。

5. 紅色光合成細菌を利用した廃水処理の研究動向

紅色光合成細菌は光合成細菌に含まれ、嫌気または好気的環境下において、特に赤外光波長域の光を照射することで有機性廃水中の炭素、窒素、リンを同時に除去する機能を持つ。さらに、廃水処理過程で生成するバイオマス中には、高濃度のタンパク質、炭水化物、脂質や、微生物産生プラスチック成分 (ポリヒドロキシアルカン酸エステル: PHA)、カロテノイド等の有用物質を蓄積することも可能である (Capson-Tojo et

al. 2020)。紅色光合成細菌を利用した廃水処理に関する研究は、近年オーストラリア・クイーンズランド大学 Hülsen らの研究が発端となり火が付き、これまでに都市下水、養鶏場廃水、酪農場廃水、製薬工場廃水等の多様な廃水処理への有用性が報告されている (Hülsen et al. 2014, 2016, 2018, Lu et al. 2019)。

実は紅色光合成細菌を用いた廃水処理は、世界に先駆けて1960～70年代にかけて日本で開発が進められてきた技術であり (Kobayashi et al. 1966, Kobayashi & Tchan 1973)、1980年代には、国内で10か所近い実処理施設が稼働していた (嶋田・高市 2020)。しかし、当時主流であった活性汚泥法の経験により培われた生物学的廃水処理技術の常識から運転管理に関する誤解が生じ、紅色光合成細菌を用いた廃水処理技術がその後広がりを見せることはなかった。嶋田・高市 (2020) はその一つとして、高有機物濃度廃水を活性汚泥法の経験に合わせて意図的に希釈し低有機物濃度にして処理を続けることで、槽内に紅色光合成細菌バイオマスが維持できなかった点を挙げている。1980年代から現在に至るまで廃水処理技術は急速に発展し、活性汚泥法以外の様々な手法が社会に広く普及した。その過程で、廃水処理に関与する多種多様なプランクトンの機能に対する知見と

理解が飛躍的に深まり、先のような誤解による失敗も起き難くなったと考えられる。紅色光合成細菌は光合成能を持つプランクトンとして、今後微細藻類と同様に、廃水処理のメインストリームの一つになる可能性を秘めている。

6. ケーススタディー (2) :

紅色光合成細菌による屠殺場廃水処理

人口増加に伴い食肉の需要は高まることは必然であり 1970 年代から現在にかけて、世界の食肉消費量は約 3 倍に増加している (FAO 2017)。食肉需要の増加は、屠殺場での屠畜解体作業に伴い発生する、血液や残渣を含む廃水の発生量増加に直結する。屠殺場廃水は、有機物に加えて、窒素やリン等の栄養塩類、ウイルス、病原菌を含むため、適正な処理を施す必要がある。しかし、中南米・東南アジア・アフリカ等の地域では、未処理か粗放的な処理に留まる事例が多い。例えばメキシコでは、年間 800 万トンの屠殺場廃水が発生しているが、その約 7 割は未処理で下水管や河川に直接放流されている (Hernández et al. 2018)。紅色光合成細菌は、屠殺場廃水のような栄養塩類を高濃度を含む有機性廃水の処理に適すると報告されている (Hülse et al. 2016)。しかし、これまで紅色光合成細菌を利用した屠殺場廃水処理に関する研究報告例は無かった。

そこで著者らは、グアナファト大学工学部の実験室で事前に培養した紅色光合成細菌を播種試料として、グアナファト州の食肉処理施設の屠殺場廃水処理を行った。温度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ で、培養槽側面から波長 850 nm の赤外光を照射した系列と暗所系列の 2 系列を比較する回分処理を実施した。その結果、赤外光照射系列では、処理開始から 5 日程度で化学的酸素要求量 (Chemical oxygen demand: COD)、リン酸 (PO_4^{3-})、溶存態窒素が効果的に除去され、最終的な除去率は COD と PO_4^{3-} で 9 割、溶存態窒素で 7 割を超える結果が得られた。暗所系列では、8 割前後の

COD と PO_4^{3-} 除去は見られたものの、除去速度は赤外光照射系列と比較して約 1/5 であり、赤外光照射により紅色光合成細菌の廃水処理性能が飛躍的に向上することが示された (未発表)。暗所系列でも一定の COD と PO_4^{3-} 除去が得られた理由として、紅色光合成細菌の多様な代謝経路が挙げられる。実験で用いた紅色光合成細菌は、元々実廃水 (ビール工場廃水のメタン発酵消化液) に太陽光を照射し長期に渡り順養したものであり、複数の紅色光合成細菌種が混在していたと考えられる。紅色光合成細菌には光合成従属栄養性以外にも、光合成独立栄養性、化学合成従属栄養性等の異なる代謝を取る種が存在し、暗所系列では、播種試料に内在していた化学合成従属栄養性の紅色光合成細菌種が機能したと推察された。

実処理を屋外環境下で実施する場合、夜間の光照射の有無は、エネルギー消費量の増減に関わる重要な要素である。本実験により、暗所下においても一定の割合で屠殺場廃水中の汚濁物質処理は進むが、その処理性能は光照射下と比較して低下することが明らかとなった。屋外環境下において自然光のみで廃水処理を行う場合は、夜間の処理水質が劣化する可能性がある。そのため夜間は、(1) 処理槽への廃水供給速度を低下する、(2) 赤外光照射装置を用いて別途光エネルギーを供給する、等の対策が必要と考えられる。

7. サンベルト地域での導入を目指して

光合成能を有するプランクトンを利用した廃水処理は、従来の機械的な曝気を伴う好気性細菌を主流とした廃水処理と比較し、省エネルギーでかつ有用物質を生産可能な技術として今後さらに重要性が高まると期待される。このような光エネルギーを利用した技術は、特に地球上の北緯 35 度から南緯 35 度の範囲に位置する比較的温暖で太陽光が豊富な“サンベルト地域”での利用に最も適している。サンベルト地域には、廃水処理施設の普及率が低い東南アジア、中南米、ア

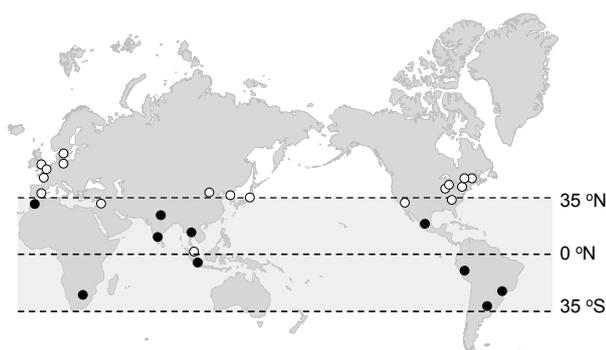


Fig. 5. Sewage treatment coverage levels in different cities around the world (Year: 2014). White symbols: high coverage city (>85%); black symbols: low coverage city (<70%). Data source: UESI (2021).

フリカ等の開発途上国が集約している (Fig. 5)。本技術に関する研究を進め、知見とノウハウを蓄積することで、経済的基盤の有無に関わらず導入可能な次世代型廃水処理技術として成熟する可能性がある。

今後は、これまでモデル地域として研究を進めてきたメキシコに加え、現在、本学が科学技術振興機構 (JST) および国際協力機構 (JICA) による地球規模環境課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) の支援を受けて国際共同研究を進めているエチオピアをモデル地域の一つとして選定し、本技術に関する共同研究開発に積極的に取り組みたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費助成事業 (若手研究 (B) 17K12851) および矢崎科学技術振興記念財団の国際交流援助 (2017 年度 共同研究 (前期)) の支援により実施された。研究で用いたバクテリア試料は、横浜市北部汚泥資源化センターおよびグアナファト市下水処理場から提供を受けたものであり、関係者の皆さまに厚く御礼申し上げます。

引用文献

Akizuki S, Cuevas-Rodríguez G, Toda T (2019) Microalgal-nitrifying bacterial consortium for ener-

gy-saving ammonia removal from anaerobic digestate of slaughterhouse wastewater. *J Water Process Eng* 31: 100753.

Akizuki S, Cuevas-Rodríguez G, Toda T (2020a) Anaerobic digestion effluent treatment using microalgae and nitrifiers in an outdoor raceway pond with fluidized carriers. *Water Sci Technol* 82(6): 1081–1091.

Akizuki S, Natori N, Cuevas-Rodríguez G, Toda T (2020b) Application of nitrifying granular sludge for stable ammonium oxidation under intensive light. *Biochem Eng J* 160: 107631.

Akizuki S, Cuevas-Rodríguez G, Toda T (2021) Nitrification of anaerobic digestate using a consortium of microalgae and nitrifiers in an open photobioreactor with moving bed carriers. *Chemosphere* 263: 127948.

秋月真一・西健斗・戸田龍樹・井田旬一 (2020) 硝化菌の光阻害緩和を目的とした固定化技術. *ケミカルエンジニアリング* 65(1): 19–24.

All-Gas Project (2019) Project website information. <http://www.all-gas.eu/en/> (2021 年 4 月 16 日アクセス)

Anthonisen et al. (1976) Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *J Water Pollut Control Fed* 57: 835–852.

Arden E, Lockett WT (1914) Experiments in the oxidation of sewage without the aid of filters. *J Soc Chem Ind* 33: 523–539.

Capson-Tojo G, Batstone DJ, Grassino M, Vlaeminck SE, Puyol D, Verstraete W, Kleerebezem R, Oehmen A, Ghimire A, Pikaar I et al. (2020) Purple phototrophic bacteria for resource recovery: Challenges and opportunities. *Biotechnol Adv* 43: 1075657.

Collos Y, Harrison PJ (2014) Acclimation and toxicity of high ammonium concentrations to unicellular algae. *Mar Pollut Bull* 80: 8–23.

Crofts AR (1966) Uptake of ammonium ion by chloroplasts, and the mechanism of amine uncoupling. *Biochem Biophys Res Commun* 24: 127–134.

Diab S, Shilo M (1988) Effect of light on the activity and survival of *Nitrosomonas* sp. and *Nitrobacter* sp. isolates from fish ponds. *Bamidgeh* 40: 50–56.

Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (2017) The future of food and agriculture: Trends and challenges. FAO, Rome, Italy, 180 pp.

- Gonçalves AL, Pires JCM, Simões M (2017) A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Res* 24: 403–415.
- Gutierrez J, Kwan TA, Zimmerman JB, Peccia J (2016) Ammonia inhibition in oleaginous microalgae. *Algal Res* 19: 123–127.
- Hernández SC, Jiménez LD, Bueno García JA (2018) Potential of energy production from slaughterhouse wastewater. *Interciencia* 43: 558–565.
- 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.
- Hülßen 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.
- Karya NGAI, van der Steen NP, Lens PNL (2013) Photo-oxygenation to support nitrification in an algal-bacterial consortium treating artificial wastewater. *Bioresour Technol* 134: 244–250.
- Kobayashi M, Matsumoto H, Okuda A (1966) Distribution and significance of photosynthetic bacteria. *J Sci Soil Manure* 37: 447–450.
- Kobayashi M, Tchan YT (1973) Treatment of industrial waste solutions and production of useful by-products using a photosynthetic bacterial method. *Water Res* 7: 1219–1224.
- Kwon G, Kim H, Song C, Jahng D (2019) Co-culture of microalgae and enriched nitrifying bacteria for energy-efficient nitrification. *Biochem Eng J* 152: 107385.
- Liao Z, Chen Z, Wu Y, Xu A, Liu J, Hu H-Y (2021) Identification of development potentials and routes of wastewater treatment and reuse for Asian countries by key influential factors and prediction models. *Resour Conserv Recy* 168: 105259.
- Lofano G, Brown J (2010) Wastewater management through the ages: A history of mankind. *Sci Total Environ* 408: 5254–5264.
- Lora Grando R, de Souza Antune AM, de Fonseca FV, Sánchez A, Barrena R, Font X (2017) Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renew. Sustain. Energy Rev* 80: 44–53.
- Lu H, Zhang G, Zheng Z, Meng F, Du T, He S (2019) Bio-conversion of photosynthetic bacteria from non-toxic wastewater to realize wastewater treatment and bioresource recovery: A review. *Bioresour Technol* 278: 383–399.
- Mehrabadi A, Craggs R, Farid MM (2015) Wastewater treatment high rate algal ponds (WWT HRAP) for low-cost biofuel production. *Bioresour Technol* 184: 202–214.
- Merbt SN, Stahl DA, Casamayor EO, Martí E, Nicol GW, Prosser JI (2012) Differential photoinhibition of bacterial and archaeal ammonia oxidation. *FEMS Microbiol Lett* 327: 41–46.
- Mishima K, Nishimura T, Goi M, Katsukura N (1996) Characteristics of nitrification and denitrification of the media-anaerobic-anoxic-oxic process. *Water Sci Technol* 34: 137–143.
- Muñoz R, Guieysse B (2006) Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Res* 40: 2799–2815.
- Nishi K, Akizuki S, Toda T, Matsuyama T, Ida J (2020) Development of light-shielding hydrogel for nitrifying bacteria to prevent photoinhibition under strong light irradiation. *Process Biochem* 94: 359–364.
- Oswald W, Gotass H (1957) Photosynthesis in sewage treatment. *Trans Am Soc Civ Eng* 122: 73–105.
- Pike research (2012) Methane recovery and utilization in landfills and anaerobic digesters: Municipal solid waste, agricultural, industrial, and wastewater market report on analysis and forecasts. Pike Research, Boulder, USA, 87 pp.
- Rada-Ariza AM, Lopez-Vazquez CM, van der Steen NP, Lens PNL (2017) Nitrification by microalgal-bacterial consortia for ammonium removal in flat panel sequencing batch photo-bioreactors. *Bioresour Technol* 245: 81–89.
- Rittmann RE, Langeland WE (1985) Simultaneous de-

- nitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches. *J Water Pollut Control Fed* 57: 300–308.
- Rosso D, Stenstrom M, Larson L (2008) Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. *Water Sci Technol* 57: 973–978.
- Sepehri A, Sarrafzadeh M-H, Avateffazeli M (2020) Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio. *J Clean Prod* 247: 119164.
- 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, pp. 261–272.
- Udaiyappan AFM, Hasan HA, Takriff MS, Abdullah SRS (2017) A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. *J Water Process Eng* 184: 202–214.
- Urban Environment and Social Inclusion (UESI) (2019) Water and equity: results of pilot cities. <https://data-drivenlab.org/urban/issue-profiles/water/> (2021年4月17日アクセス)
- Vargas G, Donoso-Bravo A, Vergara C, Ruiz-Filippi G (2016) Assessment of microalgae and nitrifiers activity in a consortium in a continuous operation and the effect of oxygen depletion. *Electron J Biotechnol* 23: 63–68.
- Xia A, Murphy JD (2016) Microalgal cultivation in treating liquid digestate from biogas systems. *Trends Biotechnol* 23: 265–275.