

ベトナムにおける微生物・植生による水質浄化 —滋賀県水環境ビジネス海外展開事業化モデル事業における取り組み—

小田柿喜暢*・木下盛年**・堤 幸一***

佐藤圭輔****・惣田 訓****

キーワード：散水ろ床，人工湿地，ガラス発泡体，植物，ベトナム

1. はじめに

滋賀県は、水環境関連の産業・研究機関の集積や水環境保全の取り組みを活かした水環境ビジネスの展開を図るため、「しが水環境ビジネス推進フォーラム研究・技術分科会」を運営している。大洋産業㈱とそのベトナム法人企業である DEWX を中心とする本事業チームも、2020年度からこの支援を受け、さらに海外の水環境の課題解決に貢献し、県の経済の活性化を目的として中小企業に交付する「滋賀県水環境ビジネス海外展開事業化モデル事業補助金」の採択をえて、「ベトナムにおける微生物・植生による水質浄化事業」を継続している。ベトナムでは、経済発展の一方、汚水処理設備が未普及の地域もある¹⁾。亜熱帯気候であるベトナムには、汚水処理設備として微生物や植物を活用したものが適しているため、散水ろ床と人工湿地を組み合わせた汚水処理設備によって生物化学的酸素要求量(BOD)や栄養塩類の除去を目的とする分散型施設の開発・普及事業を計画した。コロナ禍の影響によって計画は遅延したが、ハノイ土木大学や日越大学との連携によって、2023年よりパイロット装置による現地実証試験を開始することができた。ここでは、その進捗状況を報告する。

2. 散水ろ床と人工湿地の特徴

散水ろ床は、電力消費が少ない好気処理であるが、処理水質は、それほど良好ではない。その後

段に人工湿地を配置すれば、基質による浮遊物質やリンのろ過・吸着、微生物による硝化・脱窒、植物による栄養塩類の吸収によって水質を向上させることができる。

散水ろ床と人工湿地を組み合わせた事例として、クロアチアの研究例²⁾では、砂利を基質とした散水ろ床とガマとアブラガヤを植えた人工湿地で都市下水を処理している。インドの研究例³⁾では、川石を充填した散水ろ床とイネ科植物を植えた人工湿地で生活排水を処理している。ギリシャの研究例⁴⁾では、礫やゼオライトを充填した散水ろ床とヨシを植栽した人工湿地でワイン醸造廃水を処理している。これらの研究では、ろ材に天然の石や砂利などを用いており、汚濁耐性のある水生植物が用いられている。

一方、下水処理水の農業利用に関する関心も高まっており、灌漑利用に向けた国際ガイドラインでは、生食、加工作物、非食用、種子作物・工芸作物に応じた BOD, SS, 糞便性大腸菌群に関する水質が提示されており⁵⁾、実践的な事例も報告されている⁶⁾。

本事業の汚水処理設備は、少ないエネルギー消費量で処理を達成し、野菜や花卉を育成することを特徴としている。太陽光パネルと蓄電池を用いてポンプを稼働させる。廃棄されたガラス瓶を主原料とする発泡ガラスをろ材に用い、人工湿地に野菜を植える。このガラス発泡体は、水質浄化用に開発されたものであり、土壌改良剤としても用いられ、トマトやオクラが栽培された実績もあ

Wastewater Purification Using Microorganisms and Vegetation in Vietnam: A Case Study of the Shiga Prefecture Water Environment Business Overseas Expansion Commercialization Model Project

*大洋産業㈱ ODAGAKI, Yoshinobu

**DEWX VIETNAM CO.,LTD. KINOSHITA, Moritoshi

***㈱とーく TSUTSUMI, Koichi

****立命館大学 SATO, Keisuke, SODA, Satoshi

る⁷⁾。人工湿地で栽培するヨウサイ (*Ipomoea aquatica*) は、東南アジアで広く食され、栄養塩類の吸収能力も高い⁸⁾。金属類や腸内細菌が含まれない生活雑廃水や食品加工廃水を処理対象とすれば、人工湿地から収穫し、人間や家畜が食することも可能である。維持管理に高度な技術は必要ではないが、目詰まりへの対応や、作物収穫のための現地雇用を生み出し、適正技術として定着することを理想とする。

3. 現地実証試験の条件

ベトナムのバクニン省にある小さな下水処理場の敷地内にパイロット装置を設置した。下水処理場は、嫌気槽(沈殿槽)とオキシデーションディッチ (W 8 m × L 32 m × D 1.25 m, 処理時間 24h) で構成された設計処理量 40 m³/日の施設である。ベトナムの生活排水に関する国家技術基準 B (QCVN 14: 2008/BTNMT) として、pH 5 ~ 9, BOD 50 mg/L, 全懸濁物質 (TSS) 100 mg/L, 総溶解固形物 1000 mg/L, 硫化水素 4 mg/L, 動植物油脂 20 mg/L, アンモニア態窒素 10 mg-N/L, 硝酸

態窒素 50 mg/L, リン酸態リン 10 mg-P, 大腸菌群 5,000 MPN/100 mL, 界面活性剤 10 mg/L を満たすように供用されている。パイロット装置の試運転では、この処理水を本装置によって、さらに浄化することを目的とした。

パイロット装置の構成を図1と写真1に示す。バスケット (W 50 × L 78 × H 45 cm) に粒径 10 ~ 30 mm のガラス発泡体 (ポラス α PG1030, 空隙率約 60%, 比表面積 80 m²/g, 榎鳥取再資源化研究所) をろ材として充填した。プラスチック槽 (W 180 × L 97 × H 97 cm) 内にこのバスケットを 3 列 × 3 段で積み上げ、容器の底を沈殿槽とし、有効面積 1.17 m², 深さ 1.29 m の散水ろ床とした。また、粒径 3 ~ 10 mm のガラス発泡体 (ポラス α PG 310) をバスケット (W 37.5 × L 56 × H 30 cm) に充填し、プラスチック槽 (W 114 × L 85 × H 93 cm) 内に 2 列 × 2 段に積み上げ、人工湿地とし、3 槽を直列させた。なお、人工湿地の各槽の側面には、開口部が複数あり、パイプの接続場所を変えることで水位を調節することができる。

実験は 2023 年 10 月 28 日から 2024 年 2 月 28 日まで実施した。装置は 2 系列あり、A 系の人工湿地槽はヨウサイが播種され、B 系は何も植えない対照系とした。12 月中旬にはヨウサイの生長が不良となり、A 系にイネ科牧草 (*Paspalum*

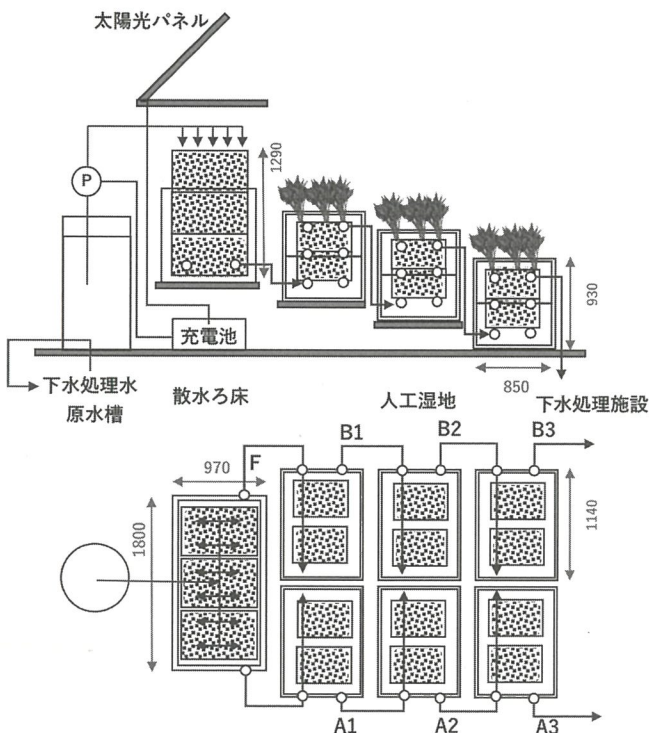


図1 散水ろ床と人工湿地を組み合わせた廃水処理システムのパイロット装置の立面図と平面図

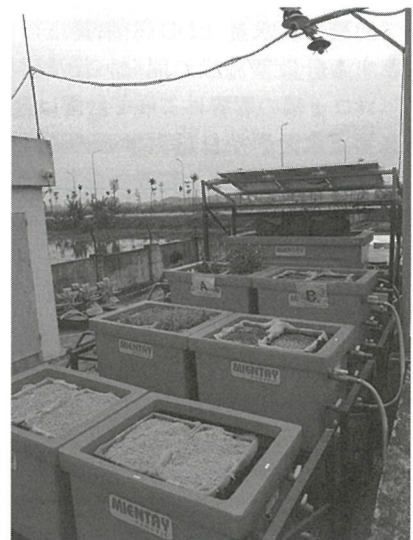


写真1 散水ろ床と人工湿地を組み合わせた廃水処理システムのパイロット装置の外観

atratum) を播種した。下水処理場の塩素消毒前の処理水を小型枙に導水し、浮遊物質を沈降させ、散水ろ床にポンプ (AC 220 V, 20 W) で導水した。散水ろ床の処理水は重力によって人工湿地に流入させた。装置には、太陽光パネル (120 W × 3 枚) と蓄電池 (1000 Wh) が付属しており、系統電力と独立して稼働させた。

12月初旬までは両系ともに流入量を10 m³/日に設定した。一般的な散水ろ床の水量負荷は1~3 m³/m²/d, BOD 負荷は0.3 kg/m³/d 以下である⁹⁾。本条件では、散水ろ床の滞留時間が約20分であり、水量負荷は8.5 m³/m²/d と非常に高いが、処理対象の BOD を30 mg/L とすると、負荷量は0.26 kg/m³/d である。人工湿地では、硝酸態窒素を主とする全窒素25 mg/L を含む汚水を処理する場合、植栽のある人工湿地で6日程度の滞留時間が必要との設計例がある¹⁰⁾。本条件では、人工湿地の3槽を通過する滞留時間は約3.9時間と短い設定である。

4. 現地実証試験の実験結果

ベトナム北部の9~11月は晴天も多く、太陽光によってポンプが順調に稼働し、流量は8.3~10.5 m³/日となり、A系で12~74%, B系で14~68%の水量が蒸発散で失われた。

採水を週に1回実施し、BOD, 全窒素(T-N), 全リン(T-P)を分析した。実測期間を通じて、処理効果が最も明らかなのはBODであった。図2に示すように、BOD濃度は、原水が26.9±7.4 mg/L, 散水ろ床の処理水が24.0±8.5 mg/L, さらに人工湿地A3とB3の処理水がそれぞれ18.1±7.1 mg/L, 17.3±6.5 mg/Lとなり、両系に有意差はなかったものの、処理経路に沿って着実に低減した。濃度基準で計算すると、除去率が約35%であるが、蒸発散によって水量が80%に減少しているとすると、質量基準の除去率は約50%と推定される。

T-P濃度は原水が7.2±1.9 mg/L, 散水ろ床が8.1±2.0 mg/L, 人工湿地のA3とB3の処理水がそれぞれ7.4±1.5 mg/L, 7.8±1.8 mg/Lとなった。濃度の変動幅が大きく、処理後の濃度が微増しており、蒸発散で15~20%の水分が失われ、リンが濃縮されたと考えられる。T-N濃度は、原

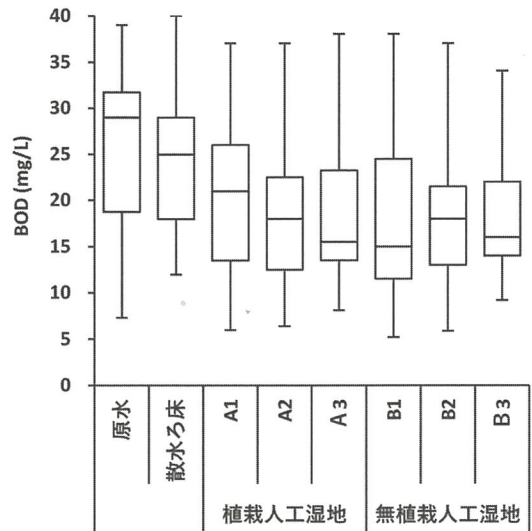


図2 散水ろ床と人工湿地を組み合わせた廃水処理システムにおける BOD 濃度の変化

水が40±7 mg/L, 散水ろ床が37±9 mg/L, 人工湿地A3とB3の処理水がそれぞれ35±9 mg/L, 36±10 mg/Lと微減した。このT-Nの95%以上はアンモニア態窒素が占めており、硝酸態窒素の濃度は、高い場合でも12 mg/L未満であった。蒸発散で濃縮される以上にヨウサイによるアンモニア態窒素の吸収や脱窒が生じたと考えられたが、散水ろ床における硝化は不十分であり、効果的な栄養塩類除去を行うには、滞留時間の延長が必要である。

大腸菌群は、原水が1.6×10⁶ MPN/100 mLと高かったが、人工湿地A3とB3の処理水がそれぞれ4.0×10⁵ MPN/100 mLと3.3×10⁵ MPN/100 mLにまで減少した。人工湿地で収穫した作物を生食や飼料として利用するには、国際ガイドライン (ISO, 2020) を踏まえ、原水を塩素消毒しておく必要がある。

また、下水処理場のオキシデーションディッチでは大量の発泡が観察され、陰イオン界面活性剤 (MBAS) 濃度が0.82 mg/Lであり、多量の洗剤が含まれていることが示唆された。1回だけの測定であるが、その処理水であり、パイロット装置に流入する原水のMBAS濃度は0.54 mg/L, A3とB3の処理水がそれぞれ0.40 mg/L, 0.44 mg/Lであった。

ヨウサイの収穫量を図3に示す。10月末から12

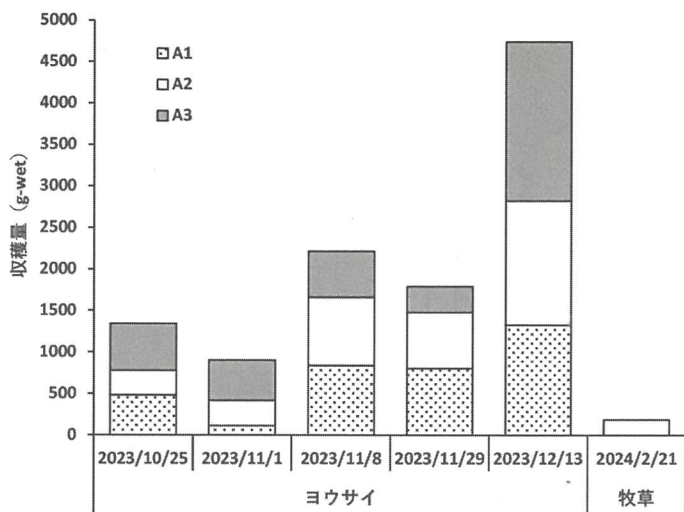


図3 散水ろ床と人工湿地を組み合わせた廃水処理システムにおけるヨウサイと牧草の収穫量

月にかけて、5回合計11 kg-wetの収穫ができた。収穫したヨウサイ中の窒素とリンの含有量は、それぞれ 4.9 ± 0.6 mg/g-wetと 0.66 ± 0.08 mg/g-wetであった。したがって、ヨウサイの収穫によって窒素とリンがそれぞれ53 gと7.2 g除去されたことになる。これはヨウサイの最終収穫日までに装置に流入した窒素とリンのそれぞれ0.28%と1.6%程度である。また、ヨウサイの栄養の含有量は、生育環境によって異なり、窒素は27~70 mg/kg-dry、リンは3.8~8 mg/kg-dryである⁸⁾。

パイロット装置の流入水から処理水までのカドミウム、鉛、水銀の濃度は、定量限界である0.001 mg/L未満であり、ヒ素は0.001~0.003 mg/Lであった。また、ヨウサイのカドミウムと水銀の含有量は、定量限界の0.004 mg/kg未満であり、ヒ素は <0.02 ~ 0.048 mg/kg、鉛は <0.01 ~ 0.030 であった ($n=6$)。市場で購入したヨウサイの金属の含有量も、カドミウムと水銀が定量限界未満であり、ヒ素と鉛はそれぞれ <0.02 mg/kgと <0.01 mg/kgであった ($n=1$)。収穫したヨウサイを飼料などに利用することで生じるリスクは、有害金属に関しては市場に流通しているものと変わらないといえる。

12月からは3 m³/日に流量を設定したが、曇雨天が多くなり、太陽発電のみでは、ポンプが作動しない時間が増えてしまい、正確な流量の把握はできなかった。ヨウサイの代わりに播種した牧草

も2月に収穫できたが、わずかな量であった。

5. 今後の課題

パイロット装置の試運転は、滞留時間が短い条件ではあったが、BODの除去効果が確認でき、ヨウサイも良好に栽培できた。太陽光と系統電力を併用し、滞留時間を半日以上に延長した条件で、栄養塩類や大腸菌群、MBASの除去効果の検証を継続する。また、ヨウサイだけでなく、冬季でも成長でき、水質浄化能力が高く、付加価値の高い現地の植物を摸索する。

参考文献

- 1) 惣田訓, 南哲朗; 水質総合指標によるベトナム・ハロン湾の水質汚濁状況の解析, 環境技術, 49, (4), p.209-213, 2020.
- 2) Vucinic, A. A., Hrenovic, J., Tepes, P.; Efficiency of subsurface flow constructed wetland with trickling filter, Environ. Technol., 33, (11), p.1323-1330, 2012.
- 3) Maheesan, P. M., Srinikethan, G., Harikumar, P. S.; Performance evaluation of integrated treatment plant of trickling filter and constructed wetland, Inter. J. Eng. Sci. Technol., 3, (1), p.305-317, 2011.
- 4) Akratos, C. S., Tatoulis, T. I., Tekerekopoulou, A. G.; Biotreatment of winery wastewater using a hybrid system combining biological trickling filters and constructed wetlands, Appl. Sci., 10, (2), 619, 2020.
- 5) ISO16075-2: 2020, Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects- Part 2: Development of the project, 2020.
- 6) 尾崎保夫, 長岡祥子, 市成剛; 浄化槽と簡易BGF水路を組み合わせた野菜や果物などの生産システム—野菜や果物の収穫とその安全性について—, 用水と廃水, 66, (2), p.140-150, 2024.
- 7) 井上光弘; リサイクル資材を用いた節水灌漑技術の開発と海外への展開, 農業農村工学会誌, 83, p.11-14, 2015.
- 8) 藤田正憲, 森本和花, 河野宏樹, Silvana PERDOMO, 森一博, 池道彦, 山口克人, 惣田訓; 水質浄化に利用可能な植物データベースの構築, 環境科学会誌, 14, (1), p.1-13, 2001.
- 9) 芳倉太郎; 生物膜法による水処理, 生活衛生, 40, (6), p.339-352, 1996.
- 10) Reed, S. C., Crites, R. W., Middlebrooks, E. J.著, 石崎勝義, 楠田哲也 監訳; 自然システムを利用した水質浄化—土壌・植生・池などの活用—, 技報堂出版, p.173-286, 2001.