

B-58 UASB-DHS-A₂SBRシステムを用いた 下水の処理特性評価

大槻洸太¹・山本将光¹・Aida Azrina Azmi¹・幡本将史¹・高橋優信²
・久保田健吾²・原田秀樹²・上村繁樹³・大久保努³・多川正⁴・山口隆司^{1*}

¹長岡技術科学大学大学院工学研究科 環境システム工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

³木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1)

⁴香川高等専門学校 建設環境工学科 (〒761-8058 香川県高松市勅使町355)

*E-mail: ecoya@vos.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

上昇流嫌気性汚泥床 (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) 法と下降流懸垂型スポンジ (Down-flow Hanging Sponge: DHS) 法を組み合わせたシステム (以降, UASB-DHS システムと称する) は, 曝気を用いない省エネルギー型のシステムであり, 高い有機物除去性能と硝化性能を有しており, 余剰汚泥発生量も少なく, 活性汚泥法に代わる下水処理プロセスとして普及段階に入りつつある¹⁾³⁾。

UASB-DHS システムの処理水質は, 活性汚泥法と同等であり, 硝酸態窒素やリンが残留する。したがって UASB-DHS システムの普及を拡大して展開するためには, UASB-DHS システムの特徴を活かした高度処理システムの開発が望まれる。UASB-DHS システムに導入する栄養塩除去システムは, このシステムの特徴である高い経済性を欠くことがないよう, 低コストでの高度処理が実現可能な生物学的処理法の導入が不可欠となる。

近年では, 窒素・リンの除去方法として, 脱窒性リン蓄積細菌 (Denitrifying Phosphorus Accumulating Organisms: DPAOs) を利用したシステムが注目され, 研究が進められている。DPAOsを利用したシステムは, DPAOsを嫌気環境と無酸素環境のサイクルに曝すことにより, 窒素・リンの同時除去が可能であり, 脱窒細菌とリン蓄積細菌を用いる既存の窒素・リンの除去方法と比べ, 余剰汚泥発生量や脱窒に必要な有機物量が少量であるといった利点を有する。

我々はUASB-DHS処理水からの栄養塩除去を目的に, DPAOsを利用した嫌気/無酸素回分式リアクター (Anaerobic/Anoxic Sequencing Batch Reactor: A₂SBR) をUASB-DHSシステムの後段に組み込んだ新規の下水高度処理シ

ステムを開発した。本研究では, UASB-DHS-A₂SBRシステムの長期連続処理実験を行い, 有機物・SS除去性能, 窒素・リン除去特性, 発生汚泥量について評価を行った。

2. 実験方法

(1) 実験装置および運転条件

図-1に, 本実験に用いたUASB-DHS-A₂SBRシステムの概要図を示す。実験に用いたUASBは, 高さ4.7 m, カラム内径0.56 m, 全容積1,178 Lとした。DHSは, スポンジ総容積454 L, スポンジ充填率53 %とした。DHSに用いたスポンジ担体は, プラスチックネットリング (φ33 mm × 33 mm) に立方体のスポンジ (33 mm) をはめ込んだもの (G32タイプ) をボックス内にランダムに充填した。A₂SBRは, 高さ0.86 m, 外寸0.5 m, 全容積200 Lとした。UASB-DHS-A₂SBRシステムは長岡中央浄化センター内に設置し, 無加温条件 (流入下水温: 9-28℃) で連続運転を

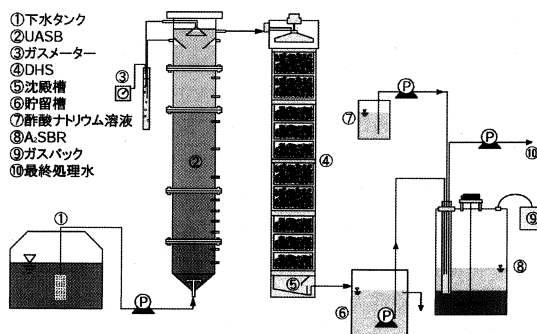


図-1 UASB-DHS-A₂SBRシステム概要図

行った。供給下水は、スクリーン通過後の分流式下水を容量約2 m³のタンクに一時貯留したものを用いた。植種汚泥として、UASBは中温下水消化汚泥を約500 L、A₂SBRは活性汚泥を約50 L用いた。DHSは植種なしとした。各リアクターの水力学的滞留時間 (Hydraulic retention time: HRT) は、UASBが8 hr、DHSが3.1 hr、A₂SBRが12 hrとした。

A₂SBRは、嫌気/無酸素の1サイクルを6 hrとし、1サイクル開始時に有機物の添加と撹拌を行い、開始から90分間を嫌気条件とした。嫌気条件終了後はUASB-DHS処理水50 Lをリアクター内に供給し、無酸素条件下で270分間撹拌混合運転を行った。その後、無酸素条件下で沈降分離を60分間行った後に槽内の上澄水50 LをA₂SBR処理水として排出した。A₂SBR槽内の汚泥濃度 (SS基準) は、汚泥の引抜きを継続的に行うことで2,000 mg·L⁻¹程度に調節した。A₂SBRへの添加有機物は酢酸と酢酸ナトリウムの混合液を用い、酢酸と酢酸ナトリウムの比率を調整することで、槽内のpHを7.4±0.3に制御した。また、有機物の添加量はIWA活性汚泥モデルNo.2dからリン除去に必要な最小量を算出し⁴⁾、添加COD/流入P (g/g) で25になるよう調節した。

(2) 分析方法

水質分析に供した試料は、下水 (下水タンク内)、UASB処理水、DHS処理水およびA₂SBR処理水である。溶解性成分の分析については、保留粒子径0.4 μmのガラス繊維ろ紙 (GB140, ADVANTEC) を通過した試料を用いた。分析項目は、SS、VSS、BOD、COD_G (以降、CODと称する)、硝酸態窒素、全リンとした。COD、全リン濃度の分析には、多項目水質分析計 (DR-2800, HACH) を用いた。硝酸態窒素濃度の分析には、イオンクロマトグラフ (LC-20-ADsp, Shimadzu) を用いた。その他の一般分析項目は、下水試験方法⁹⁾に従った。

3. 実験結果と考察

(1) 有機物およびSS処理性能

図-2は、UASB-DHS-A₂SBRシステムの処理性能としてCOD、SS濃度の経日変化を示す (UASB-DHS運転0-956日間、A₂SBR運転700-956日間)。流入下水温が17℃以上の期間を夏期、17℃以下の期間を冬期とした。夏期の平均COD濃度は、流入下水329±77 mg·L⁻¹、UASB処理水174±85 mg·L⁻¹、DHS処理水43±48 mg·L⁻¹、A₂SBR処理水31±20 mg·L⁻¹を示した。夏期の平均SS濃度は、流入下水103±62 mg·L⁻¹、UASB処理水40±31 mg·L⁻¹、DHS処理水18±26 mg·L⁻¹、A₂SBR処理水13±10 mg·L⁻¹を示した。

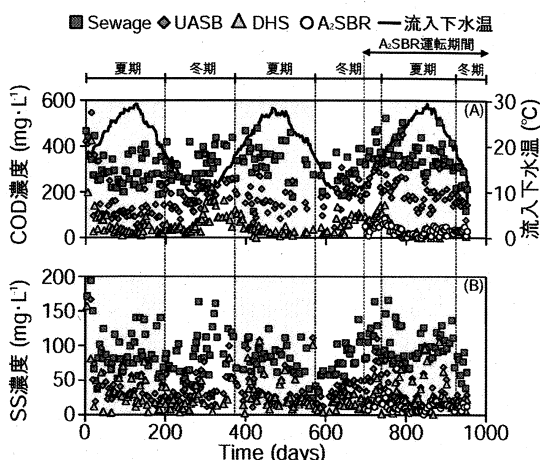


図-2 COD、SS濃度の経日変化
(A)COD濃度、(B)SS濃度

冬期の平均COD濃度は、流入下水301±76 mg·L⁻¹、UASB処理水186±60 mg·L⁻¹、DHS処理水67±44 mg·L⁻¹、A₂SBR処理水33±13 mg·L⁻¹を示した。冬期の平均SS濃度は、流入下水85±31 mg·L⁻¹、UASB処理水35±19 mg·L⁻¹、DHS処理水24±15 mg·L⁻¹、A₂SBR処理水13±3 mg·L⁻¹を示した。

全運転期間におけるCOD除去率の平均は、UASB単槽で45±19%、UASB-DHSシステムで83±16%、UASB-DHS-A₂SBRシステムで91±6%を示した。UASB単槽での下水処理では、一般的に処理水の全COD濃度は100-200 mg·L⁻¹程度が限界であることが報告されている⁷⁾。本UASBリアクターのCOD除去性能も既報の結果と同程度であった。

全運転期間におけるSS除去率の平均は、UASB単槽で60±22%、UASB-DHSシステムで77±20%、UASB-DHS-A₂SBRシステムで88±8%を示した。

(2) 窒素およびリン除去特性

図-3はA₂SBRへの流入水および流出水の硝酸態窒素濃度と全リン濃度の経日変化 (運転700-1,000日間) を示す。A₂SBRは運転開始から88日間は、汚泥馴養期間とした。88日目以降の硝酸態窒素濃度は、流入水18±6 mg·N·L⁻¹、流出水4±3 mg·N·L⁻¹を示した。硝酸態窒素の平均除去率は78±13%であった。流入水の全リン濃度は4.0±0.6 mg·P·L⁻¹であり、UASB-DHSシステムの処理水には4 mg·P·L⁻¹程度のリンが残留していた。また、流出水の全リン濃度は0.7±0.3 mg·P·L⁻¹であり、A₂SBRによるリン除去率は83±13%であった。したがって本システムは、窒素とリンの同時除去が可能であった。また、A₂SBR槽内の汚泥中のリン含有率は、949日目に0.10 g-P-g-MLSS⁻¹に達した。この値は、既存の生物学的リン除去システムのリン含有率0.03-0.04 g-P-g-MLSS⁻¹と比べ、高いことから資源とし

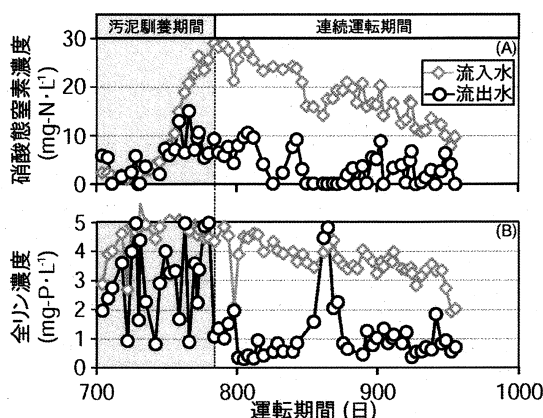


図-3 A₂SBRへの流入水および流出水の硝酸態窒素、全リン濃度の経日変化。
(A)硝酸態窒素濃度、(B)全リン濃度

での利用も期待できる。

本研究のA₂SBRの流入水、つまりUASB-DHS処理水の水質は過去のUASB-DHSシステムを用いた下水処理の水質と同等であった^{8)・10)}。また、A₂SBRの処理性能は一時的に起こった突発的なリン除去性能の悪化とリアクター立ち上げ期間を除いて、夏季および冬季でも関係なく良好なものであった。したがって、UASB-DHSシステムにA₂SBRを組み合わせることで、無曝気下水の高度処理が達成できると考えられる。

(3) 発生污泥量評価

除去CODに対するVSS転換率(污泥転換率)は、UASBで0.016 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹、DHSで0.218 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹、A₂SBRで0.029 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹であった。UASBを用いた場合の污泥転換率は、埋立て浸出液の処理(容積負荷1~2.4 kgCOD·m⁻³·day⁻¹)で0.053 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹という報告¹¹⁾がある。この結果に対して、本UASBの污泥転換率は、非常に小さい値であった。これはUASB内部の污泥が高濃度に保持されたことにより、COD-VSS負荷が0.045 gCOD·gVSS⁻¹·day⁻¹という低いレベルを維持したことが要因であると考えられる。好気性微生物の污泥転換率は一般的に0.5といわれており、DHSはその転換率を下回った。DHSはスポンジ担体に污泥を高濃度に保持できるため増殖した污泥は系内で滞留・分解し、余剰污泥としての流出が抑制されたと考えられる。A₂SBRの污泥転換率は夏季(0.037 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹)に比べ、冬季(0.019 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹)に低い値を示した。

Kubaらは、嫌気/無酸素サイクルを利用した窒素、リン除去の試験を行い、脱窒性リン蓄積細菌の污泥転換率が、SRT 14日で0.230-0.240 g-VSS·g-COD_{removed}⁻¹、SRT 8日で0.250-0.280 g-VSS·g-COD_{removed}⁻¹であったと報告している⁹⁾。

これに対して、今回使用したA₂SBRの污泥転換率は、1オーダー低い値を示した。

4. まとめ

本研究では、UASB-DHS-A₂SBRシステムの長期連続処理実験を行い、有機物・SS除去性能、窒素・リン除去特性の評価および発生污泥量の評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) UASB-DHS-A₂SBRシステムは、全運転期間において、流入下水の全COD、BOD、SS濃度はそれぞれ324±104 mg·L⁻¹、202±103 mg·L⁻¹、94±54 mg·L⁻¹であり、最終処理水ではそれぞれ40±43 mg·L⁻¹、8±10 mg·L⁻¹、16±30 mg·L⁻¹であった。本システムは安定した処理性能を発揮した。
- (2) A₂SBRは槽内pHを7.4±0.3に制御し、炭素源として酢酸をC/P比25 (g/g) で添加したところ、硝酸態窒素除去率78%、全リン除去率83%を達成した。
- (3) UASB-DHS-A₂SBRシステムの污泥転換率は0.263 gVSS·gCOD_{removed}⁻¹と低く維持されていた。

謝辞：本研究実施にあたり、長岡中央浄化センターから研究の場の提供を頂きました。また、本研究の一部は、JST-JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業「エネルギー最小消費型の下水処理技術の開発」及び科学研究費補助金から助成を受けて遂行しました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) Onodera, T. et al., *Bioresour. Technol.*, Vol. 136, pp. 136-175, 2013.
- 2) Tawfik, A. et al., *Water Research*, Vol. 40, pp. 1877-1883, 2006.
- 3) Tawfik, A. et al., *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 29, pp. 210-219, 2006.
- 4) Kuba, T. et al., *Biotech. Bioeng.*, Vol. 52, pp. 685-695, 1996.
- 5) Kuba, T. et al., *Water Research*, Vol. 30, pp. 1702-1710, 1996.
- 6) (社)日本下水道協会：下水試験方法上巻, 1997.
- 7) Lettinga, G. et al., *Biotech. Bioeng.*, Vol. 115, pp. 1701-1723, 1983.
- 8) 角野晴彦ら, 環境工学研究論文集, Vol. 40, pp. 431-440, 2003.
- 9) タンドカールマダンら, 環境工学研究論文集, Vol. 41, pp. 69-77, 2004.
- 10) 高橋優信ら, 環境工学研究論文集, Vol. 41, pp. 175-186, 2004.
- 11) Fang, H.H.P. et al., *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 52(10-11), pp. 41-49, 2005.