

インドにおける新規下水処理システム(UASB+DHS)のO/M評価

水圏土壌環境制御研究室 高山 大輔
指導教員 大橋 晶良

1. 研究背景

現在、途上国向けの下水処理法として上昇流嫌気性汚泥床 (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB)法が注目され、熱帯・亜熱帯地域を中心に適用が進められている。しかしながら、UASB 単独では十分な処理水質が得られないため、適切な後段処理プロセスを適用する必要がある。

本研究室では、UASBの後段処理法としてDown-flow Hanging Sponge (DHS)法を開発し、その性能評価と途上国への適応性の向上に関する研究を行なっている。DHSは汚泥保持担体にスポンジを用いた好気性処理である。DHSの特長としては、UASBで得られた水頭差によりUASB処理水を導入するためポンプアップに必要な電力が不要となりうること、また流下水はスポンジ担体を滴下する際に大気中から酸素を取り込むため人為的な曝気は一切不要であること、さらに長いSRTを確保して余剰汚泥の発生を大きく抑制できることなどが挙げられる。5年にわたるパイロット・スケールの実験においてDHSの優れた処理性能については実証されている。

2002年より、インド政府・環境森林省(MOEF: Ministry of Environment and Forest)の河川環境保全局(NRCD: National River Conservation Directorate)との間で国際共同研究において、実下水処理場で稼動するUASBの後段処理に日処理水量 500m³/day の実規模DHSリアクターが導入され、1500日を超える長期連続モニタリングから卓越された連続処理性能が実証されてきた。

本研究では実規模 DHS リアクターの維持管理 (Operation/Maintenance : O/M) の面から途上国への適用性を評価することを目的とし、冬季における下水温度の低下、流入下水濃度変動に伴う過負荷、そして、途上国の不安定な電力事情や低い技術力により起こる停電や故障に伴う運転停止がDHSの処理性能に及ぼす影響を評価した。また、DHS余剰汚泥の発生量、維持管理費用の面から従来のUASB後段処理との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 実規模 DHS リアクター (Fig. 1)

DHSリアクターの処理水量は0.5MLDとした。DHSの外部構造は、直径5.5m×高さ5.31mのコンクリートカラムであり、その内部にプラスチックシート(長さ2m)に三角柱のスポンジバー(断面: 25×25×35mm)を接着したスポンジモジュールを上下2段で配置した。設計スポンジ容積は31.1m³であり、スポンジ容積基準のHRTを1.5時間、返送率100%で運転した。またスポンジから剥離した汚泥を捕集するため、リアクター下部に沈殿池を設置した。沈殿池通過後、処理水と返送水に分配した。

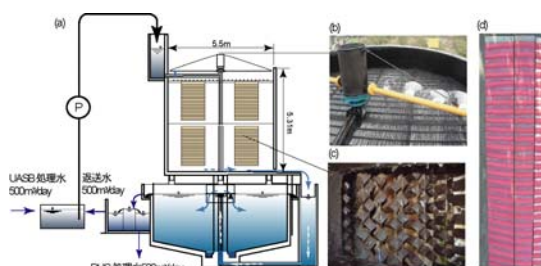


Fig. 1 DHS 概要図

2.2 過負荷実験

本実験では、返送率を 100%から 0%にすることで実規模 DHS リアクターに過負荷を 6 時間与えた。そして、過負荷時と過負荷終了後の処理性能挙動を把握した。

2.3 長期間運転停止実験

本実験では、ポンプを切ることで実規模 DHS リアクターの運転を強制的に 10 日間停止させた。その後、再稼働させて処理水質の回復状況を把握した。なお、運転停止期間中、DHS への人為的な散水および降雨による水の供給はなかった。また、再稼働の際、流量を徐々に上げることは行わず、一気に通常条件に戻して運転した。停止期間中には DHS 内の湿度、スポンジの保水率を測定した。保水率は汚泥と排水を含むスポンジの質量 (Ww) と 105℃で乾燥させた後の質量 (Wd) の差をスポンジ体積 (V) で除して 100 を乗じた値とした。

2.4 DHS 余剰汚泥発生量

沈殿池から排出した余剰汚泥を経時にサンプリングし、その濃度変化から余剰汚泥量を算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 温度の影響

Fig.2 に水温と UASB 処理水および DHS 処理水の関係を示す。UASB 処理水の全 COD は温度と処理水質に影響があるようには見られなかった。これは UASB 処理水の全 COD は SS 分に大きく影響しているため、温度の影響がほぼ現れなかったと考えられる。しかしながら、一方で、溶解性 COD では 20℃を下回った頃からデータがばらつく傾向を示した。また、それに伴って DHS 処理水の COD 濃度も若干高い値を示すようにな

った。アンモニア性窒素濃度と温度の影響を示した。冬期(12 月下旬~3 月初旬)において、周囲の農家の影響によりアンモニア性窒素の流入量が増加するため、水温の低下とともに UASB 処理水のアンモニア性窒素濃度が上昇している。DHS 処理水は水温が 20℃以下に低下した際に、流入水濃度の増加、温度の低下に伴う硝化菌の活性低下により、DHS 処理水中のアンモニア性窒素濃度は 10~20mg/L と上昇した。

20℃未満で、DHS 処理水質濃度が上昇する傾向が確認された。そこで、Fig. 3 に水温が 20℃未満と 20℃以上のときの各水質項目に対する DHS 除去率を示すことで温度の低下が及ぼす DHS の処理性能への影響を評価した。全 COD、溶解性 COD は 20℃以上において 29mg/L (±10)、19mg/L (±8)、除去率は 93%、86%であった。一方、20℃未満では 40mg/L (±17)、25mg/L、除去率は 90%、81%であった。従って、DHS の有機物除去能は 20℃以下においてもほぼ通常通りの処理性能を発揮していたことから、温度による影響は少ないと考えられる。アンモニア性窒素に関しては、20℃以上で、4mg/L (±4)、除去率は 84%、20℃以下で 13mg/L (±4)、除去率は 61%であった。アンモニア性窒素は、除去率の低下が確認された。アンモニア性窒素除去速度も 20℃以上の 0.33kgNH₄-N/m³/day から 20℃未満では 0.27 kgNH₄-N/m³/day と低下していた。これは、温度により硝化細菌の活性が低下、また、DHS 下部への有機物負荷の増加 (Fig. 4) により硝化細菌の活性が抑制されたためであると考えられる。そして、季節的変動に伴う流入下水のアンモニア性窒素濃度の増加 (20℃以上: 0.41kgNH₄/m³/day→20℃未満: 0.54kgNH₄/m³/day) も原因のひとつであるといえる。

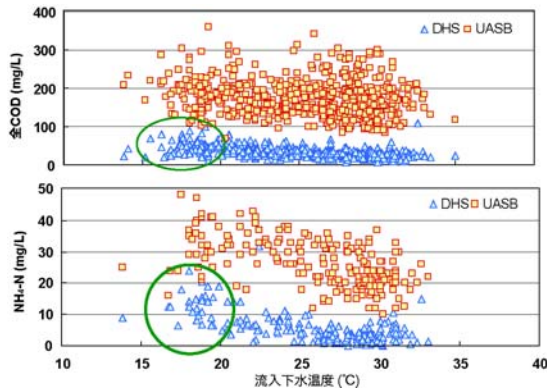


Fig.2 温度と処理水の関係

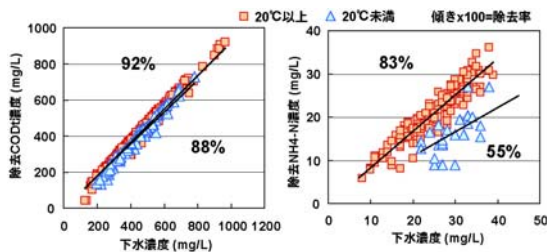


Fig. 3 温度別の COD, NH4-N 除去率

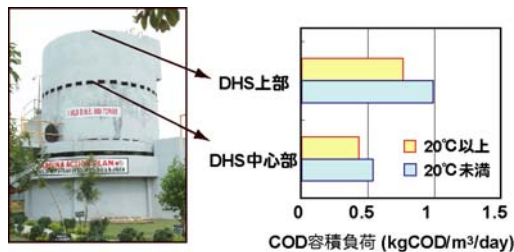


Fig. 4 温度別の DHS 縦軸方向有機物負荷

3.2 過負荷の影響評価

過負荷前後における各水質項目（全 COD、溶解性 COD、アンモニア性窒素、硝酸性窒素、溶存酸素、pH）の経時変化を示す。過負荷 1 ヶ月前の実規模 DHS リアクターへの負荷は $2.6\text{kgCODt}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、 $0.36\text{kgNH}_4\text{-N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、過負荷時において $5.7\text{kgCODt}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、 $0.68\text{kgNH}_4\text{-N/day}$ であった。過負荷前 1 ヶ月間の全 COD 濃度は 26mg/L (± 4) であったが、過負荷により全 COD 濃度は 56mg/L 、溶解性 COD 濃度は 38mg/L まで増加した。全 COD 除

去率は 84%から 70%まで低下した。アンモニア性窒素に関しては、過負荷 1 ヶ月前の平均 3.2mg/L (± 0.9) から 12.5mg/L まで増加、アンモニア性窒素除去率は 86%から 63%まで低下した。Fig. 5 に過負荷前と過負荷時における全 COD とアンモニア性窒素の除去速度を示す。全 COD 除去速度は過負荷前には $2.13\text{kgCODt rem}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ (± 0.39) であり、過負荷時には $4.54\text{kgCODt rem}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ (± 0.34) と増加した。そして、アンモニア性窒素除去速度も、通常時に $0.31\text{kgNH}_4\text{-N rem}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ (± 0.05)、過負荷時には $0.36\text{kgNH}_4\text{-N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ (± 0.08) と増加していた。このような COD、アンモニア性窒素の除去速度の増加は、DHS がまだ処理許容の限界に達していないことを示唆しており、 $5.7\text{kgCODt}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、 $0.68\text{kgNH}_4\text{-N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ までの負荷変動を許容できるシステムであることを示している。R. D. TYAGI(1996)らにより $2.1\sim 3.85\text{kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ の負荷に 2 時間活性汚泥は晒されると、リアクター内の溶存酸素濃度は 1mg/L 以下になり、バルキングが発生しやすい環境下（一般的に活性汚泥の溶存酸素濃度は $1.5\sim 2.0\text{mg/L}$ に維持しなければならない）になる。Jean-Jacques (2001) によって、活性汚泥でバルキングが発生した場合、塩素処理によって通常状態に回復するものの、かなりの時間を要すると報告されている。

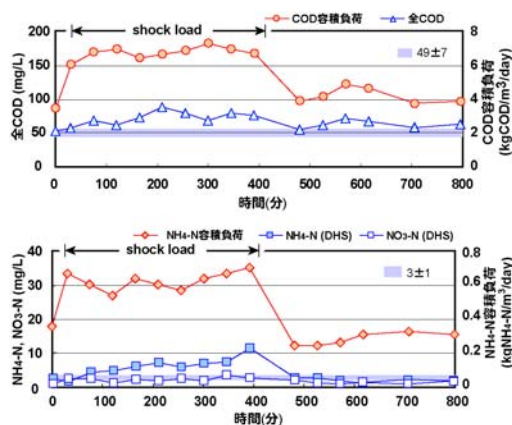


Fig. 5 過負荷時の DHS 処理水経時変化

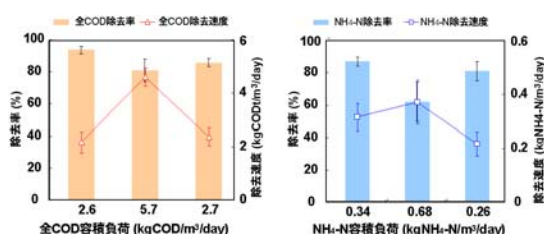


Fig. 6 DHS 除去速度と除去率

3.3 長期間運転停止の影響評価

Fig. 7 運転停止前後における SS, VSS 濃度の経時変化を示す。運転停止の間、人為的な水の供給、また、降雨がなかったことから、再稼動後に乾燥による大量の汚泥剥離流出が懸念された。結果より、再稼動直後に DHS 処理水の SS 濃度は高い傾向を示した。これは、剥離による汚泥の流出に起因した保持汚泥損失とみなすことができる。そこで、DHS の流出 VSS 濃度が運転停止直前と同等になった時間を再稼動後 90 分間とし、その間流出した VSS を DHS の保持汚泥損失量として計算したところ 0.92kgVSS が得られた。この量は、DHS 保持汚泥量（約 870kgVSS）の僅か 0.1%に過ぎず、90 分以降には SS 濃度は安定していた。これより、DHS は 10 日程度の運転停止の後でも、停止前に保持した汚泥を維持できることが判明した。これは、Fig. 8 の運転

停止から 10 日後のスポンジ保水率の結果から、運転停止の間もスポンジ担体が 80~100%近い保水率を維持したことにより、汚泥の乾燥が防止されたためだと考えられる。10 日間、スポンジが高い保水率を維持することができたのは、DHS 内が高い湿度が保たれていたためである。

Fig. 9 に運転停止前後における各水質項目（全 COD, 溶解性 COD, アンモニア性窒素, 硝酸性窒素, ふん便性大腸菌軍, 溶存酸素, pH）の経時変化を示す。本実験では 10 日間の運転停止の間、DHS に対して人為的な酸素や基質の供給を全く行わなかったことから処理性能の低下が懸念された。V. Urain らは、標準活性汚泥法が 10 日間の飢餓状態（曝気あり）に晒された場合、微生物の死滅や溶菌により処理性能が著しく低下すると報告している。しかしながら、COD については、運転開始直後に全 COD で 40mg/L 以下、溶解性 COD は 20mg/L 程度と、運転停止前と同等の良好な処理水質を得た。また、アンモニア性窒素に関しては、運転停止前と比較すると若干高い傾向を示したが、90 分後には 5mg/L、540 分後には 2mg/L と運転停止前と同程度の値を示した。

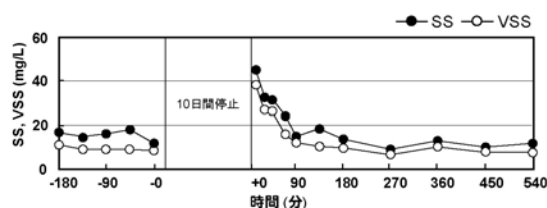


Fig. 7 DHS 保持汚泥損失量

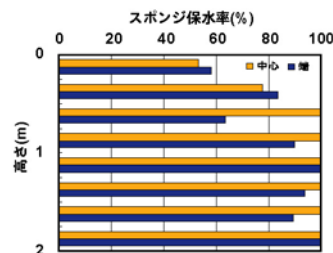


Fig.8 停止 10 日目のスポンジ保水率

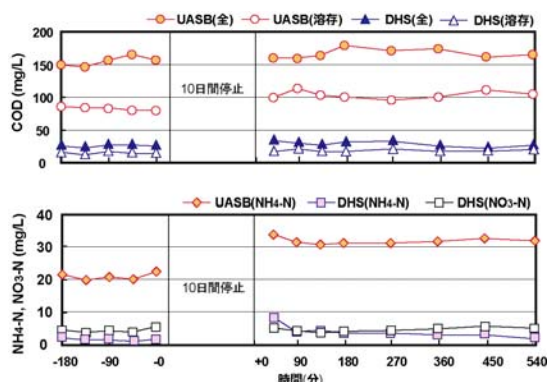


Fig. 9 停止前後の DHS 処理水経時変化

3.4 DHS 余剰汚泥発生量

DHS の沈殿池から 3/18-4/18、4/19-5/12、12/20-1/25 の間に蓄積した汚泥の引き抜きを行った。余剰汚泥量は、それぞれ、48.5kgSS (20.4kgVSS)、118.9kgSS (39.5kgVSS)、79kgSS (40kgVSS) であった。つまり、平均 2.90kgSS/日 (平均 1.80kgVSS/日) の余剰汚泥が蓄積していた。除去 COD 当たりの SS 蓄積量を算出すると。実験値では、平均 0.04kgSS/kgCOD removed であった。この値は、活性汚泥法 (1.04~1.12kgVSS/kgBOD removed) (Metcalf & Eddy, 2003) UASB の後段に浸漬ろ床法を用いた場合 (HRT=0.5 時間、0.37kgTS/kgCOD removed)、回転円板法を用いた場合 (HRT=1.5 時間、0.29~0.33kgVSS/kgBOD) (Goncalves, et al. 1997, Pontes et al., 2003) と比較してはるかに小さい結果となった。

3.5 維持管理費比較

実規模 DHS リアクター、500m³day⁻¹ (日処理人口 3125 人、下水排出量 160 L.day⁻¹inhab⁻¹←東京設計事務所より) の一人あたりの維持管理費を算出すると、0.9US\$.inhab.⁻¹year⁻¹ であった (DHS 設計書、カルナール下水処理場電気代領収書)。Fig. 10 に従来の UASB 後段処理と

の維持管理費の比較を行った。なお、UASB-DHS システムの維持管理費は、それぞれの維持管理費を単純に足し合わせたものである。Fig. 11 より UASB-DHS システムが従来のシステムよりも省エネ型であることが分かる。Fig. 11 にそれぞれのシステムの COD 除去率と維持管理費の関係を示す。UASB-DHS システムは、他の後段処理システムよりも O/M 費用が安価な上に、非常に優れた処理性能を持っていることが明らかである。そのため、UASB-DHS システムは途上国に導入するに当たり非常に有利なシステムであるといえる。

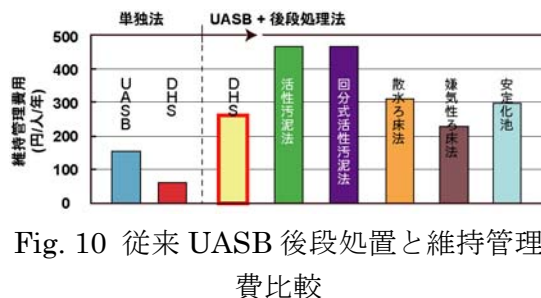


Fig. 10 従来 UASB 後段処理と維持管理費比較

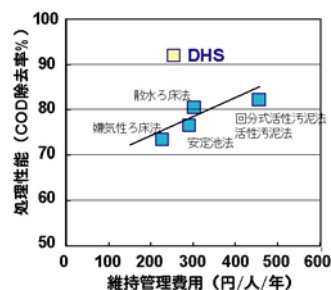


Fig. 11 維持管理費と処理性能の関係

4. 結論

- 1) DHS の有機物除去能は水温低下の影響を受けず、良好な処理性能を維持することができた。しかしながら、アンモニア性窒素除去能は流入下水温度 20℃未満において若干低下した。
- 2) DHS は全 COD 容積負荷 5.7kgCODtm⁻³.day⁻¹、アンモニア性窒素容積負荷 0.68kgNH₄-N. m⁻³.day⁻¹ までの負荷を許容することができ、流入下

水濃度の変動に対して高い耐性を持ったプロセスであることが示唆された。

- 3) DHS は途上国におけるトラブルを想定した10日間の強制的な運転停止に対しても、スポンジの高い保水力により汚泥の乾燥が防止されたため、再稼動後には迅速に処理性能が回復することができた。
- 4) 余剰汚泥発生量は、DHS の特徴である高い汚泥保持汚泥能力が発揮され、57日という長いSRTが確保されたことから0.04kgSS/kg 除去CODと従来の好気性プロセスと比較して非常に少ない値を得た。
- 5) DHS は、従来のUASB後段処理よりも維持管理費が非常に安価で省エネ型のプロセスであることが示された。

以上より、DHS は優れた処理性能とともに、運転の持続性を有しており、さらに省エネ型であることから途上国への適応性が高いプロセスであるといえる。

5. 参考文献

- R. D. TYAGI(1996), Dynamic behavior of the activated sludge process under shock loading Application of the floc model, *Water Research*, 30, 7, 1605-1616
- Jean-Jacques (2001), Influence of transient substrate overloads on the proliferation of filamentous bacterial populations in an activated sludge pilot plant, *Water Research*, 35, 1, 129-134
- V. Urbain, E. Pys, J. C. Block, J. Manem(1993), Composition and activity of activated sludge under starvation conditions, *Environmental Technology*, 14, 731-740
- Metcalf & Eddy, Wastewater engineering Treatment and reuse fourth edition, Tata McGraw Hill Edition 2003
- Goncalves, R.F., Araujo, V.L. and Chernicharo, C.A.L. (1997) Association of a uasb reactor and a submerged aerated biofilter for domestic sewage treatment. *Water Science and Technology*, 36(6/7), 375-382.
- Pontes, P.P., Chernicharo, C.A., Frade, E.C. and Porto, M.T. (2003) Performance evaluation of an UASB reactor used for combined treatment of domestic sewage and excess aerobic sludge from a trickling filter. *Water Science and Technology*, 48(6), 227-34
- Document of the detail of DHS Bio-tower
- 1.0 MLD capacity disinfection pilot plant with biotower DHS system at 40 MLD sewage treatment plant