

インドにおける新規下水処理システム (UASB+DHS)の実規模実験

水圏土壌環境制御研究室 小野寺崇

指導教官 原田秀樹 大橋晶良

1. はじめに

近年、途上国向けの低コスト型下水処理法として UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)法が注目され、ブラジルやインドなどを中心に建設・運転が行なわれている。しかし UASB 法単独で下水処理を行なった場合、排出基準を満たすだけの処理水質を得ることが難しいため、後段処理を施すことにより処理水質を向上させることが必要とされている¹⁾。そこで活性汚泥法や酸化池法などの既存下水処理法を中心として、UASB 法の後段処理法への適用が試みられているが、活性汚泥法などの高級処理法は運転管理に多大なコストが必要であること、酸化池などの自然の浄化力を利用した処理法では広大な敷地面積が必要であることなどから、未だ途上国に適用可能な下水処理システムの構築には至っていない。このような背景の下、本研究室では新たな下水処理法として DHS (Downflow Hanging Sponge)法を開発し、新規下水処理システム (UASB 法+DHS 法)の研究を続けている²⁾。DHS 法はエアレーションが不要であり、余剰汚泥の発生も少ない低コスト型の下水処理法でありながら、第二世代型 DHS (カーテン型 DHS)のベンチ・スケール実験では 5 年間に及ぶ連続運転期間、平均 BOD 除去率 95%、平均アンモニア性窒素除去率 70%の優れた処理性能を発揮することに成功した³⁾。その結果、インド国の実下水処理場に実規模 DHS リアクターが建造され、実下水処理場への適用に向けた実証実験が行なわれている⁴⁾。そこで本研究では実規模 DHS リアクターの長期連続運転における処理性能を評価することを目

的とした。

2. 実験方法

インド国カルナール下水処理場はインドの首都ニューデリーから北に約 135km に位置している (Fig. 1)。カルナール下水処理場は UASB 法と安定化池法を組み合わせた下水処理法を採用している (Fig. 2)。UASB リアクターは縦 32m、横 24m、高さ 5.5m の形状をしており、10MLD (Million Litter per Day)の許容量を有する。FPU は縦 245m、横 145m、深さ 1.25m



Fig. 1 カルナール市の所在地



Fig. 2 カルナール下水処理場の概要図

であり、 $39,847\text{m}^3$ の容積を有する。UASB リアクターの設計上の水理学的滞留時間 (HRT) は 8.6 時間であり、安定化池は 24 時間である。実規模 DHS リアクターの概要図を Fig.3 に示す。実規模 DHS リアクターはカルナール下水処理場内に建設されており、UASB 処理水の一部を流入水として供給している。実規模 DHS リアクターの形状は直径 5.5m、高さ 5.3m のコンクリートカラムであり、その中にプラスチックシート（長さ 2m）に三角柱型のスポンジバー（断面： $25\times 25\times 35\text{mm}$ ）を接着したスポンジシートが 2 段で配置されている。設計スポンジ容積は 31.1m^3 であり、スポンジ容積を基準とした HRT は 1.49 時間である。UASB 処理水は貯留タンクに集められ、そこで返送水と混合される。実規模 DHS リアクターへの流入水の供給はポンプアップされた後、水頭差で回転する自走式散水機によって行なわれる。流入水はスポンジシートを流下する際にスポンジの内部および外部に捕捉された汚泥によって浄化される仕組みである。このとき、人為的なエアレーションが必要ないことから、運転コストを安価にすることができる。スポンジシートからの流出水はリアクター下部に設けられた沈澱池に送られた後、DHS 処理水として半分は放流され、残り半分は返送水となる。

3. 実験結果と考察

3-1. 長期連続運転性能

本実験における下水と各処理水の代表的な組成を Table 1 に示す。流入下水量は平均 26.3MLD であり、UASB と安定化池の実 HRT は 13 時間と 1.5 日であった。流入下水温度は季節によって変動しており、夏期では 33°C に達しているが、冬期では 15°C まで低下していた。実下水の有機物濃度の平均 BOD-total は 155mg/l であり、平均 COD-total は 443mg/l であった。なお、流入下水中の有機物の 67% は SS 成分として存在していた。VSS/SS 比は 0.64 であり、日本での実験結果と比較すると若干低かったが、これは沈砂池の HRT が短いために、流入下水中に砂分が多く混入したことによるものであると考えられる。なお、極端な工場排水の流入はなかった。

代表的な組成の経時変化を Fig.4 に示す。UASB 処理水の平均 BOD および COD 濃度はそれぞれ $53 (\pm 17)\text{mg/L}$ 、 $170 (\pm 43)\text{mg/L}$ であった。Fig.4 が示すように、処理水質の変動は大きいので、安定した処理水質を得ることは難しいと考えられる。UASB 単独における平均 BOD 除去率は $66 (\pm 12)\%$ であり、平均 COD 除去率は $59 (\pm 14)\%$ であった。UASB 法を下水に適用した場合の有機物除去率は $60\%\sim 80\%$ と考えられていることから、UASB のパフォーマンス

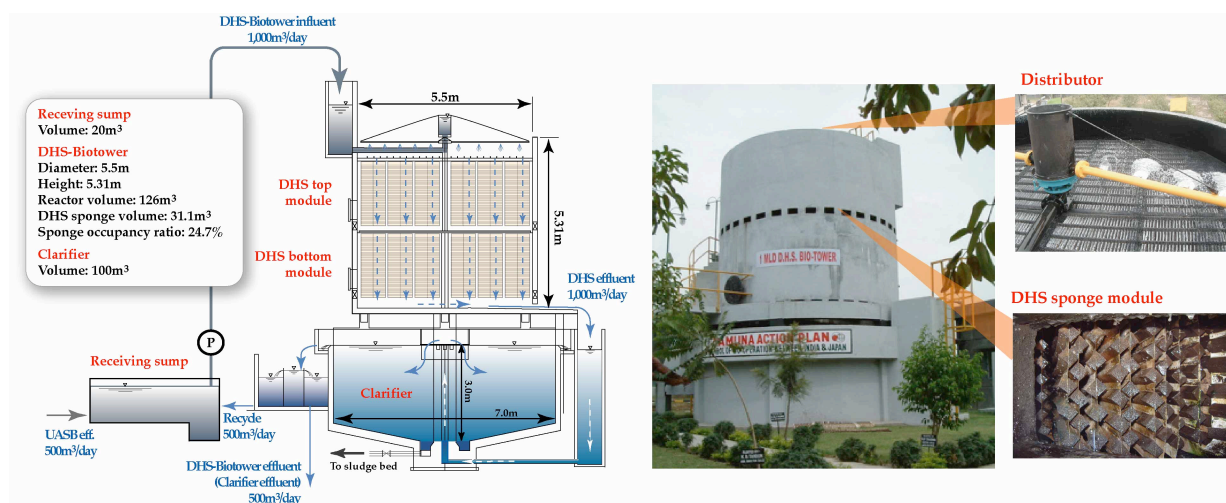


Fig. 3 DHS-Biotower の概要図

スはそれと同様か若干低い程度であったと言える。
なお、UASB によって流入 SS の約 75%が除去されている。これは UASB における HRT が長く確保されていることから、沈殿除去作用が良好に行なわれたと考えられる。

DHS-Biotower における有機物負荷はスポンジ体積を基準とした場合、 $0.88\text{kgBOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ および $2.76\text{kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ であった。DHS-Biotower 処理水の平均 BOD は $5 (\pm 4)\text{mg/L}$ であり、平均 COD は $32 (\pm 13)\text{mg/L}$ であり優れた処理水質であった。また UASB+DHS システムにおける平均 BOD 除去率は $96 (\pm 3)\%$ 、平均 COD 除去率は $92 (\pm 4)\%$ と高い除去率を示していた。Fig.4 から分かるように、DHS は優れた処理水質や高い除去率に加え、そのパフォーマンスが常に安定していることが伺える。UASB 処理水の濃度は変動が大きいいため、その変動を許容することが後段処理には必要である。この結果が示すように、高濃度の有機物が流入した際にも良好な処理水質を保っていたことから、DHS システムは非常に流入濃度の変動に対して許容性に優れた処理システムであると言える。

アンモニア性窒素の経時変化を Fig.4(D)に示す。嫌気性システムである UASB においては有機体窒素の分解によりアンモニア性窒素が生成するが、アンモニア性窒素の硝化反応は発生していない。このため流入下水のアンモニア性窒素濃度よりも、UASB 処理水中のアンモニア性窒素濃度が若干高い値を得ている。安定化池処理水における平均アンモニア性窒素濃度は $25 (\pm 9)\text{mg/L}$ であった。つまり安定化池においてアンモニア性窒素がほとんど除去されていなかった。一方の DHS-Biotower 処理水における平均アンモニア性窒素濃度は $5 (\pm 5)\text{mg/L}$ であり、除去率は $81 (\pm 14)\%$ となったことから、DHS システムは高い硝化能を有していることが確認され

た。

ふん便性大腸菌群の経時変化を Fig.4 (E)に示す。流入下水の平均ふん便性大腸菌群数は $8.0 \times 10^6\text{MPN}/100\text{mL}$ であり、UASB 処理水では $4.4 \times 10^6\text{MPN}/100\text{mL}$ であった。そのため、UASB により下水のふん便性大腸菌群の約 40%の除去率にとどまった。DHS-Biotower 処理水におけるふん便性大腸菌群は平均 $1.3 \times 10^5\text{MPN}/100\text{mL}$ であり、対数除

Table 1 各処理水質の総括

測定項目	下水	UASB 処理水	DHS 処理水	安定化池 処理水
	平均	平均	平均	平均
pH	7.2 (0.2)	7.0 (0.1)	7.9 (0.1)	7.3 (0.1)
溶存酸素, mg/l	0	0	5.5 (1.0)	0
全BOD, mg/l	155 (48)	53 (17)	5 (4)	40 (14)
全COD, mg/l	443 (141)	170 (43)	32 (13)	135 (40)
溶解性COD, mg/l	143 (47)	80 (21)	21 (10)	62 (18)
ふん便性大腸菌群, MPN/100ml	8.0×10^6	4.4×10^6	1.3×10^5	1.5×10^6
アンモニア性窒素, mg/l	25 (7)	26 (8)	5 (5)	25 (9)
硝酸性窒素, mg/l	ND	ND	6 (3)	ND
浮遊性物質, mg/l	220 (102)	48 (12)	12 (4)	42 (12)
水温, °C	15-33			
処理水量, MLD	25.6			
除去率		UASB	UASB + DHS	UASB + FPU
全BOD, %		64 (12)	96 (3)	72 (11)
全COD, %		59 (14)	92 (4)	67 (13)
溶解性COD, %		40 (21)	84 (5)	53 (21)
ふん便性大腸菌群, 10g		0.3	1.9	0.9
浮遊性物質, %		75 (10)	90 (5)	77 (10)

(): 標準偏差, ND: 検出限界以下

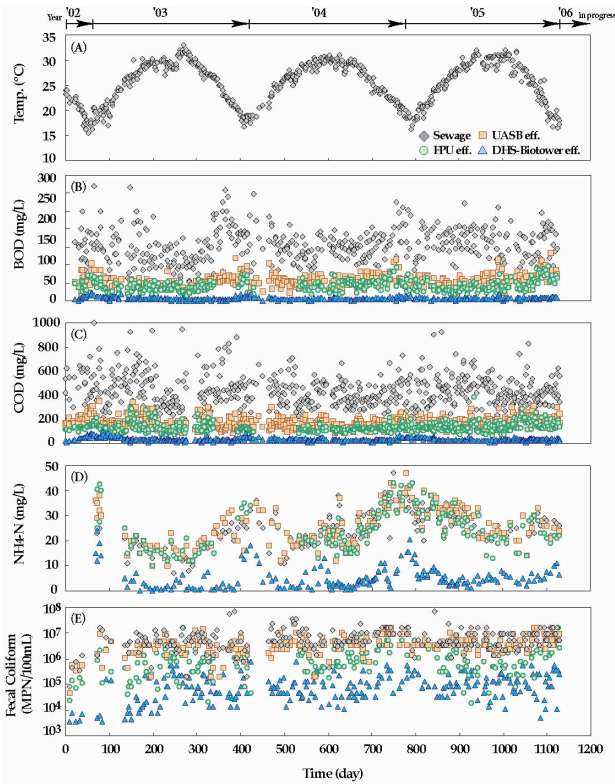


Fig.4 各処理水質の経時変化

(A)温度, (B)BOD, (C) COD, (D) NH4-N, (E)F.C.

去率で 1.9Log (98.7%)の優れた処理性能を発揮した。これは先進国における高級処理システムである活性汚泥法とほとんど同程度であった。しかしながら、DHS-Biotower 処理水が WHO の排出基準である 10^3 MPN/100mL やインドの灌漑用水の排出基準である 10^4 MPN/100mL を満たすことは難しい。そのため、DHS の後段に塩素処理などの殺菌プロセスを負荷する必要があると言える。

3-2. 物質収支

Fig.5 にカルナール下水処理場における COD マスバランスを示す。流入下水の 70%程度は SS 由来であった。UASB による処理で約 60%の COD が除去される。その多くが SS 由来の COD であることから、SS 成分が UASB リアクター内で分解され、溶解性 COD となっていることが示唆された。また固形物がリアクター内で沈殿除去され、緩やかな速度で分解が行なわれていることも考えられる。FPU および DHS-Biotower に流入する UASB 処理水の COD は約半分が溶解性であるが、FPU では、UASB リアクターとは逆に COD-particle が上昇している。これは、FPU において沈殿除去により COD が減少するが、一方で algae の光合成により植物細胞などの固形性有機物が生成され処理水中に流出したものと

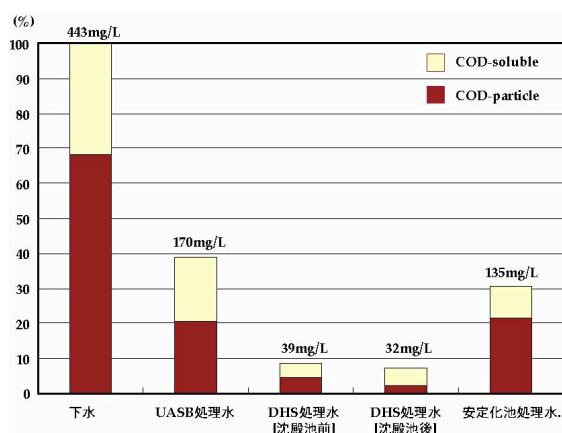


Fig.5 COD マスバランス

と考えられる。なお、FPU 処理水中の COD は流入 COD の約 30% (136mg/L)が残存していた。一方の Clarifier 処理水における処理水質は 32mg/L であり、流入下水の 90%以上が除去された。なお、UASB リアクターにおいて除去された COD は硫酸還元の際に消費されることや嫌気分解によりメタンガスとなること、汚泥として堆積していることが考えられる。Clarifier 処理水中の SS は 7mg/L であることから、Clarifier に蓄積 SS の分解 COD を無視すれば、余剰汚泥の蓄積量は 7mgSS/L となった。このため、DHS-Biotower は余剰汚泥の発生量を著しく削減可能な処理システムであると言える。無論、DHS 処理水においても十分に良好な処理水質を満たしているため、Clarifier を介さずに排出すればまったく余剰汚泥の発生しない処理法となる。

3-3. 温度の影響評価

カルナール下水処理場に流入する下水の温度は冬期の 15℃から夏期の 33℃の範囲で変動している。スポンジを流下する水の一部が蒸発し、気化熱により水温を奪うために最大で 3℃程度の温度の低下が見られた。FPU は流量の割には表面積が小さく、夏期には灼熱の気温とともに強烈な太陽光にさらされるため 2℃ほど水温が上昇することもあった。

Fig.6 (A)に BOD-total と温度の関係について示す。UASB 処理水の BOD-total は水温が 25℃以下まで低下すると、徐々にばらつきが大きくなっていることが伺えるが、大きく処理水質が悪化したような傾向は見られなかった。一方の DHS-Biotower 処理水は水温が 22℃を超えるとデータのばらつきがほとんどなくなっていることから、生物分解が容易な BOD 成分はほとんど除去されているものと考えられる。低温域においては若干水質が悪化しているように見られたが、それでも平均 10mg/L 程度の良好な処理

水質を維持していた。UASB 処理水の BOD-total は水温が 25℃以下まで低下すると、徐々にばらつきが大きくなっていることが伺えるが、大きく処理水質が悪化したような傾向は見られなかった。一方の DHS-Biotower 処理水は水温が 22℃を超えるとデータのばらつきがほとんどなくなっていることから、生物分解が容易な BOD 成分はほとんど除去されているものと考えられる。低温域においては若干水質が悪化しているように見られたが、それでも平均 10mg/L 程度 of 良好な処理水質を維持していた。**Fig.6 (B)**に COD-total を**(C)**に COD-soluble を示した。UASB 処理水の COD-total 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 COD-total は SS 分に大きく依存しているため、温度の影響が封殺されたものと考えられる。一方で、COD-soluble では 20℃を下回った頃からデータにばらつきが生じはじめた。また、それに伴って DHS-Biotower 処理水も若干高い値を示すようになった。つまり、温度が低下することにより溶解性有機物の除去性能が低下する傾向があると考えられる。**Fig.6 (D)**にアンモニア性窒素の温度の影響を示した。なお、UASB 流入下水の濃度とほぼ同じである。先に述べたように冬期には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-Biotower 処理水は 20℃くらいまでは処理水濃度は低い状態を維持していたが、20℃を超えたところから流入負荷の増大に加え、温度の低下に伴って硝化菌の活性が低下することにより、処理水中のアンモニア性窒素濃度が上昇している。**Fig.6 (D)**に処理水中のふん便性大腸菌群と温度の関係について示した。なお、アンモニア性窒素と同様に UASB ではふん便性大腸菌の除去はほとんど行なわれないため、DHS-Biotower 処理水のみをデータとして載せた。

水温が高い条件下においても、DHS-Biotower 処理水中のふん便性大腸菌の濃度が低下することは無かった。そのことから、水温が高く微生物活性が高い条件下においてもふん便性大腸菌の除去効率は上昇しないことが示された。また低温域のふん便性大腸菌群については、一見するとそれほど影響がないように見られるが、図中に示した初年度のデータを除けば、水温の低下とともに濃度が高くなる傾向があることが示唆された。

3-4. 返送の影響評価

本連続実験では返送率 100%の実験条件で連続モニタリングを行なっている。そこで、返送が処理水質に及ぼす影響を調べるため、同一 HRT の条件下

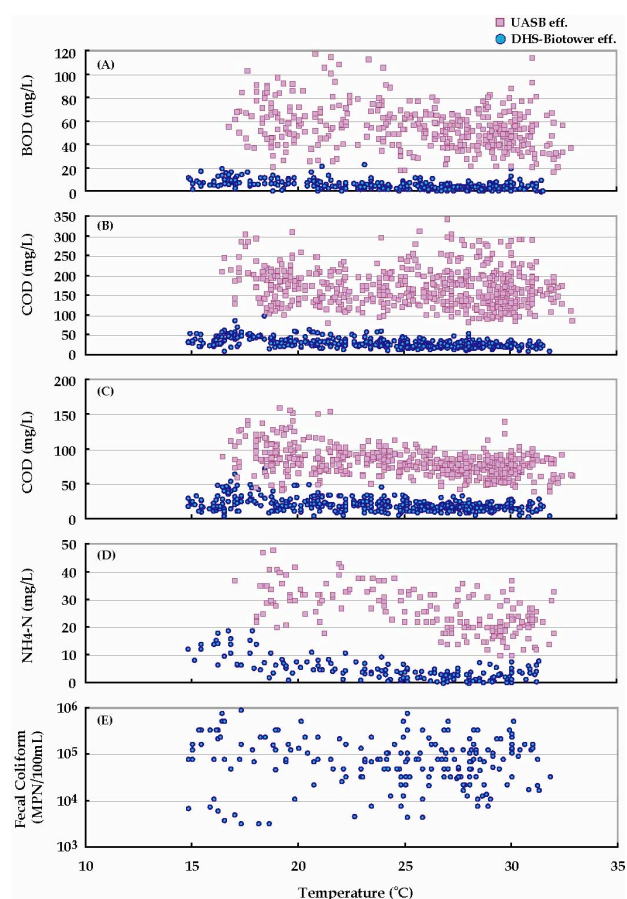


Fig.6 処理水質と水温の関係

(A) BOD-total, (B) COD-total, (C) COD-soluble,

(D) NH4-N, (E) Fecal coliform

において返送の有無による処理水質の影響を評価した。なお、実験は冬期と夏期の2回行った。**Fig7**に冬期、**Fig.8**に夏期の実験結果を示す。なお、流入水質のBODやCODはほぼ同一の結果であった。冬期と夏期のデータを比較すると、温度の高い夏期の方が返送率100%および0%がともに良好な処理水質を得た。しかしながら、返送率0%と100%を比較しても夏期および冬期の実験において、一貫して顕著な差が確認されたパラメータは無かった。そのためHRT1.5時間の実験条件下においては、返送による処理水への影響はないことが示された。したがって、UASB処理水をDHSリアクターに直接供給し、返送を行わずに適切な処理水を得ることは十分に可能であることを示唆している。

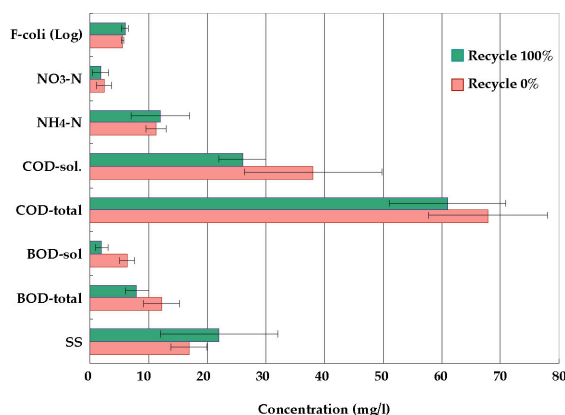


Fig.7 返送の有無による処理水質の違い (冬期)

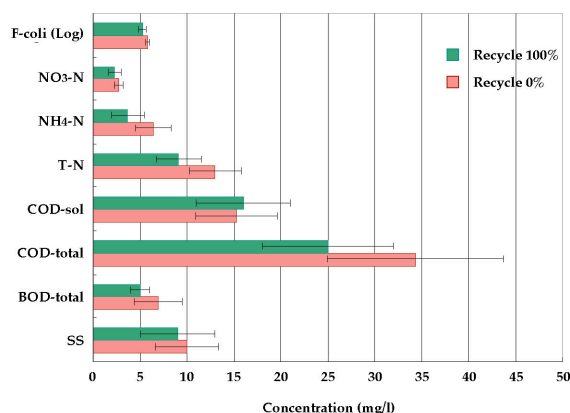


Fig.8 返送の有無による処理水質の違い (夏期)

4. 結論

実規模 DHS リアクターは1100日を越える連続運転期間、最終処理水質は平均BODが5mg/L、平均CODが32mg/Lの優れた有機物除去性能を発揮していた。さらに、長期連続運転を継続している現在でも、優れた処理性能を維持していることが明らかとなった。ふん便性大腸菌除去およびアンモニア性窒素除去はそれぞれ約99%、81%の高い除去率を達成した。

実規模 DHS リアクターは著しく余剰汚泥の発生量を削減可能であることが明らかとなった。

最終処理水質と水温との関係から、UASB+DHSシステムは温度の低下する冬期においても、処理水質をほぼ維持していることが明らかとなった。

本リアクターにおいて返送の有無で処理水質の比較を行なったが、顕著な差は確認されなかった。

参考文献

- 1) Van Haandel, A. and Lettinga, G. (1994). Anaerobic sewage treatment –A practical guide for regions with a hot climate- John Wiley & Sons
- 2) タンドカールマダン, 大久保努, 小野寺崇, 上村繁樹, 大橋晶良, 原田秀樹, (2004). UASB と第四世代 DHS リアクターから構成される新規下水処理システムの開発, 環境工学研究論文集, 41, 155-164.
- 3) Machdar, et. al., (1997). Combination of a UASB reactor and a curtain type DHS (downflow hanging sponge) reactor as a cost-effective sewage treatment system for developing countries. Wat. Sci. Tech., pp. 83-88.
- 4) 大久保 努, 開発途上国のためのエネルギー最小消費型 新規下水処理プロセスの開発 –インドでの実規模実証実験-, 長岡技術科学大学修士論文, 2005