

# 途上国に適用可能なエネルギー最小型・新規下水処理システムの実規模実証テスト

水圏土壌環境制御研究室 桐島佳宏  
指導教官 原田秀樹, 大橋晶良

## 1. 背景

現在インドでは聖なる川として有名なガンジス川の最大支流、ヤムナ川の浄化計画事業 (YAP: YAMUNA ACTION PLAN) が実施されており、19箇所処理場に UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 法が導入されている。しかし UASB 法単独では、6割前後の除去率しか達成できず、有機物や病原菌の除去において排出基準を満たさないという問題点があり、UASB の適切な後段処理法が検討されている。そこでインド政府環境森林省 (MOEF) の河川環境保全局 (NRCD) は、長岡技術科学大学が開発した DHS (Downflow Hanging Sponge) プロセスの実規模プラント (最大処理量 1000 m<sup>3</sup>/日) を、UASB の後段処理システムとしてハリヤナ州カルナール市に建造した。そこで、本プロセスの処理性能を把握するために、現地に滞在し長期連続モニタリングを実施した。

## 2. DHS-G3 リアクターの処理特性

### 2.1 実験方法

まず日本で行った DHS-G3 リアクターの処理特性について報告する。処理装置の概略図を Fig.1 に示す。本実験装置は HRT = 6 hr (UASB) と 2 hr (DHS-G3)、25 °C一定で、スクリーン通過後の実下水を用いた連続実験を行い、良好な処理性能を得た (高橋ら, 2002)。本研究では同じ実験装置を用い、200日間の運転停止後、

無加温で連続実験を行った。

前段 UASB はリアクター総体積 155 L、後段 DHS-G3 は全スポンジ容積 51.6 L、塔長 3.5 m であり、担体として円筒形のスポンジ (φ 22 x 27 mm) をプラスチックネットリング (φ 27 x 27 mm) に挿入したものをランダムに合計 5024 個充填した。スポンジ担体のカラムに対する充填率は 38%で、全スポンジ表面積 13.195 m<sup>2</sup>とした。UASB 処理水を上部より散水し、自然流下する過程でスポンジ表面または内部に付着、捕捉されている微生物によって浄化される機構である。酸素供給はこれまでの DHS と同様に人為的なエアレーションは一切行わず、大気からの自然供給とした。本実験では前段 UASB の HRT = 8 hr、後段 DHS = 2.7 hr で連続運転を行った。

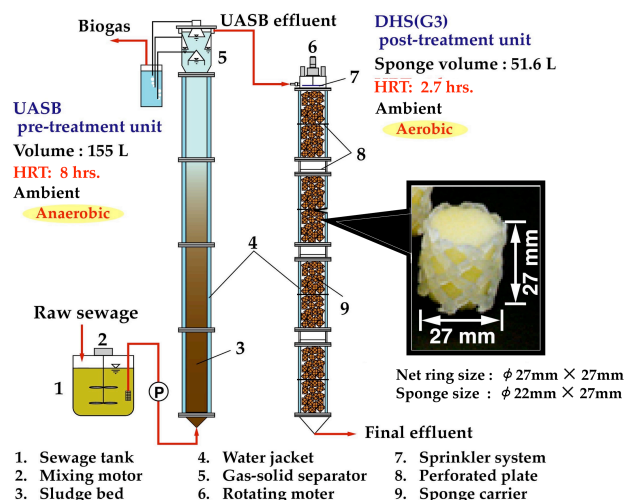


Fig.1 UASB, DHS-G3 システム概略図

## 2.2 目的

本研究では無加温での DHS-G3 システムの処理性能を把握することを目的とした。

## 2.3 実験結果

Table 1.に UASB, DHS-G3 システムの 25 °C, 13.3 °C における処理性能の比較を示す。結果全 COD<sub>Cr</sub> 除去率 82%、全 BOD 除去率 89%、SS 除去率 91%など高温時より若干処理性能は低下したものの、安定した処理水が得られた。

Fig.2 に全 BOD と BOD 負荷の経日変化を示す。最終処理水中の全 BOD は HRT = 8 hr (UASB), HRT = 2.7 hr (DHS-G3)までは良好に処理されていたが、HRT を減少させると除去率が低下し、システムが破綻した。グラフより平均気温 13.3 °C のとき許容全 BOD 容積負荷はスポンジ総体積に対して 2 kgBOD/m<sup>3</sup>·day と判断できた。本システムが低温でも高いパフォーマンスを維持した理由として汚泥保持量が平均 30 g/L·sponge であったものが、平均 38 g/L·sponge に増加したことが挙げられた。

Table 1. UASB, DHS-G3 システムの 25 °C, 13.3 °C における処理性能の比較

	Sewage		UASB		DHS	
	25°C	13.3°C	25°C	13.3°C	25°C	13.3°C
HRT (hours)	-	-	8		2.7	
Temperature of sample (°C)	26.6	13.3	29.0	13.9	28.5	13.4
pH	6.75	7.21	6.49	7.05	5.96	7.19
ORP (mV)	-174	-171	-109	-102	188	54
DO (mg/L)	0.22	0.7	0	0	4.56	6.07
T-COD (mg/L)	481	505	220	270	32	63
T-BOD (mg/L)	196	227	69	166	7	22
SS (mg/L)	214	250	107	42	9	12
T-N (mgN/L)	52	44	52	37	35	30
T-TKN (mgN/L)	52	44	52	37	14	12
NH <sub>4</sub> -N (mgN/L)	31	18	37	24	6	5
NO <sub>3</sub> -N (mgN/L)	-	-	-	-	20.2	15
NO <sub>2</sub> -N (mgN/L)	-	-	-	-	0.4	3
Total Coliforms (MPN/100mL)	1.8E+07	1.6E+07	8.1E+06	5.2E+06	4.0E+05	5.5E+06
Fecal Coliforms (MPN/100mL)	8.2E+06	1.1E+07	5.8E+06	2.8E+06	9.0E+04	4.1E+05
Removal (%)			By the UASB		By the whole system	
	25°C	13.3°C	25°C	13.3°C	25°C	13.3°C
T-COD	-	-	52	36	93	82
T-BOD	-	-	68	18	97	89
SS	-	-	53	75	96	91
T-N	-	-	-	-	33	35
T-TKN	-	-	-	-	73	73
NH <sub>4</sub> -N	-	-	-	-	77	56
Total Coliforms	-	-	54	68	98	66
Fecal Coliforms	-	-	30	73	99	96

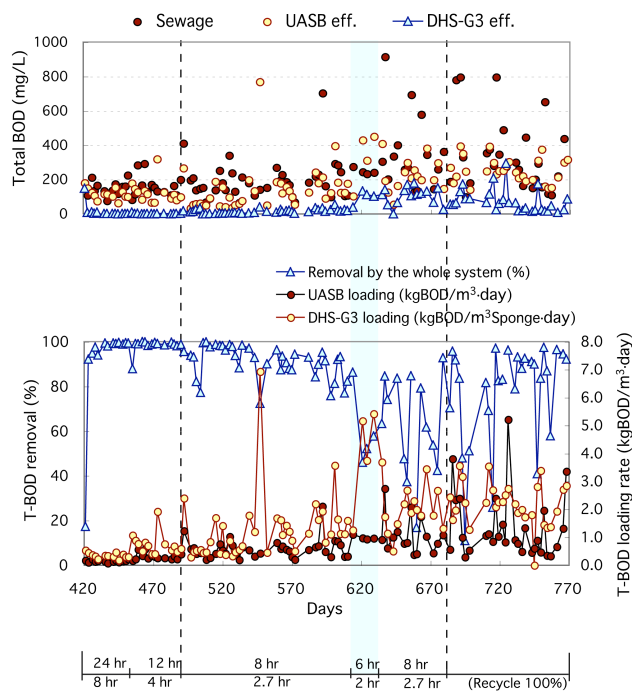


Fig.2 全 BOD, 除去率, 全 BOD 容積負荷の経日変化

## 3. インド実規模実証テスト

### 3.1 実験方法

下水はスクリーンと沈砂池通過後、UASB に流入し、UASB の処理水は FPU を経て放流される。その UASB 処理水の一部を DHS に供給して我々はモニタリングを行っており、サンプリングは下水、UASB, DHS, FPU 各処理水について行った。DHS は通常 HRT = 1.5 hr、返送率 100% (UASB 処理水 500 m<sup>3</sup>/日、返送 DHS 処理水 500 m<sup>3</sup>/日) で運転している。スポンジ総体積は 31.3 m<sup>3</sup> (設計値) で、コンクリートカラム (φ 5.5 × h 5.3 m) に対するスポンジの充填率は 24.7%である。

Fig.2 に実験条件を示す。サンプリングは午前 9 時前後に行ったが、気温は 5~40°C と非常に寒暖の激しい状況での連続実験であった。下水、各処理水の温度は 10 ~ 34°C であった。運転後半返送率を 100 から 50, 25, 0, 200, 300%

と変化させた。返送率 0%のとき、UASB 処理水の DHS スポンジ体積に対する HRT = 45 min である。また返送率を変えることにより流入負荷を変化させた。

### 3.2 目的

現地インドに実際滞在し、カルナールのプラントで長期にわたってモニタリングを行い、信頼性のあるデータで本システムの安定性を実証することを最大の目的とした。

さらに 1. DHS 処理水と FPU 処理水を比較することで本システム (UASB + DHS) の優位性を実証すること、2. 温度変化が処理水に与える影響を調査すること、3. DHS の返送率を減少させる事により DHS への負荷を上げ、処理性能の限界を見極める、逆に返送率を増加させて大腸菌の除去効果の向上をねらう。4. 余剰汚泥発生 の把握をすることなど、DHS システムの実規模化に向けてプラクティカルな研究を行った。

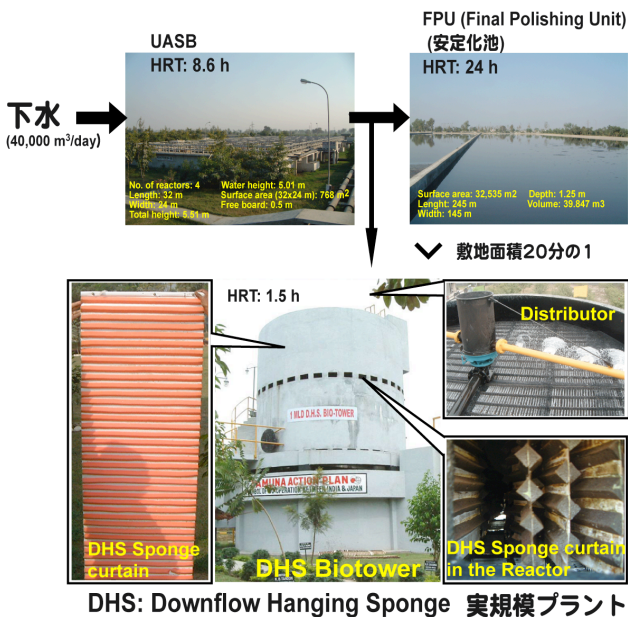


Fig.3 インド・カルナール実規模プラント概要

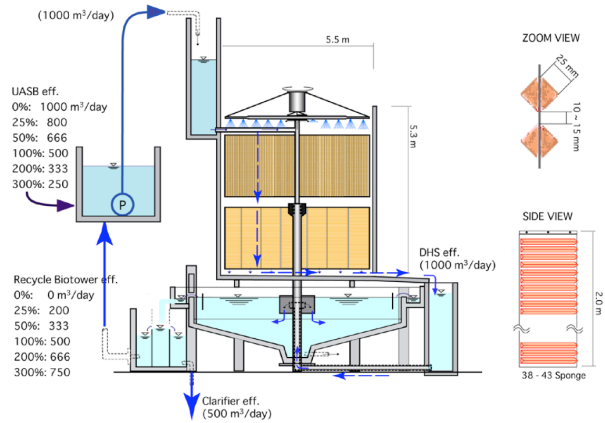


Fig.4 DHS-Biotower 概略図

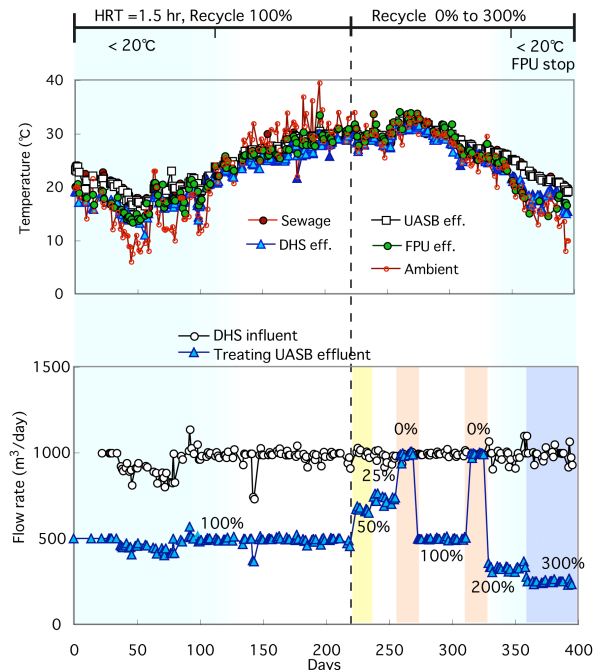


Fig.5 実験条件 (温度、返送率と流量)

### 3.3 実験結果

Fig.6 に DO, 全 BOD, BOD 負荷, BOD 除去率, ふん便性大腸菌群の経日変化を示す。DHS 処理水中の DO は実験全期間の平均で 5.7 mg/L であり、全期間を通じて安定して 4 mg/L 以上含まれた。全期間の平均全 BOD 濃度は 152 mg/L であり、UASB 処理水では 49 mg/L まで除去され、現行システム (UASB + FPU) 処理水では

40 mg/L (除去率 70%) と殆ど除去されないのに対し、新規システム (UASB + DHS) 処理水ではわずか 6 mg/L (除去率 96%) と非常に良好であった。DHS の BOD 負荷は返送率 100% で運転したとき 0.8 kgBOD/m<sup>3</sup>·day 前後であった。既往の知見より DHS は水理的負荷に強く、有機物負荷に弱いと言われている (Madan et al., 2003)。DHS-G3 システムが低温状態でも 2 kgBOD/m<sup>3</sup>·day までは耐えられたことから、返送率を段階的に減少し、本 DHS システムにかかる負荷を増加させることにした (計算上返送を停止しても BOD 負荷が 2 kgBOD/m<sup>3</sup>·day を超えることはまずないと判断できた)。返送を停止し、UASB 処理水の処理量を 2 倍 (1000 m<sup>3</sup>/day) にしたとき、BOD 負荷は最大で 2.1 kgBOD/m<sup>3</sup>·day まで増加したが、処理水質の悪化は殆ど見られなかった。このときの UASB 処理水の HRT はわずか 45 min であった。

Table 2 に返送率 100%での処理性能一覧を示す。全 COD<sub>Cr</sub>、全 BOD、SS の除去率は UASB + FPU では 70%前後であったが、UASB + DHS では 90%以上の卓越した処理性能であった。アンモニア性窒素の除去率においても 76%と良好であった。ふん便性大腸菌においては UASB + FPU が 10<sup>1</sup> オーダー程度の除去しかできないのに対し、UASB + DHS では 10<sup>2</sup> オーダーの除去が可能であった。冬期間中著しい温度低下があったが、BOD 除去率 80%以上を常に維持し、安定していた。

Table 2 返送率 100%での処理性能一覧

	Sewage	UASB eff.	DHS eff.	Removal	FPU eff.	Removal
DO (mg/L)	0	0	5.6	-	0	-
COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	493	195	42	90 %	145	68 %
BOD (mg/L)	151	49	8	96 %	37	74 %
SS (mg/L)	241	91	12	95 %	145	68 %
F - coli	4.9×10 <sup>6</sup>	5.6×10 <sup>6</sup>	5.9×10 <sup>4</sup>	2.3 log	1.1×10 <sup>6</sup>	1.0 log
NH <sub>4</sub> -N (mgN/L)	19	23	7	76 %	24	-

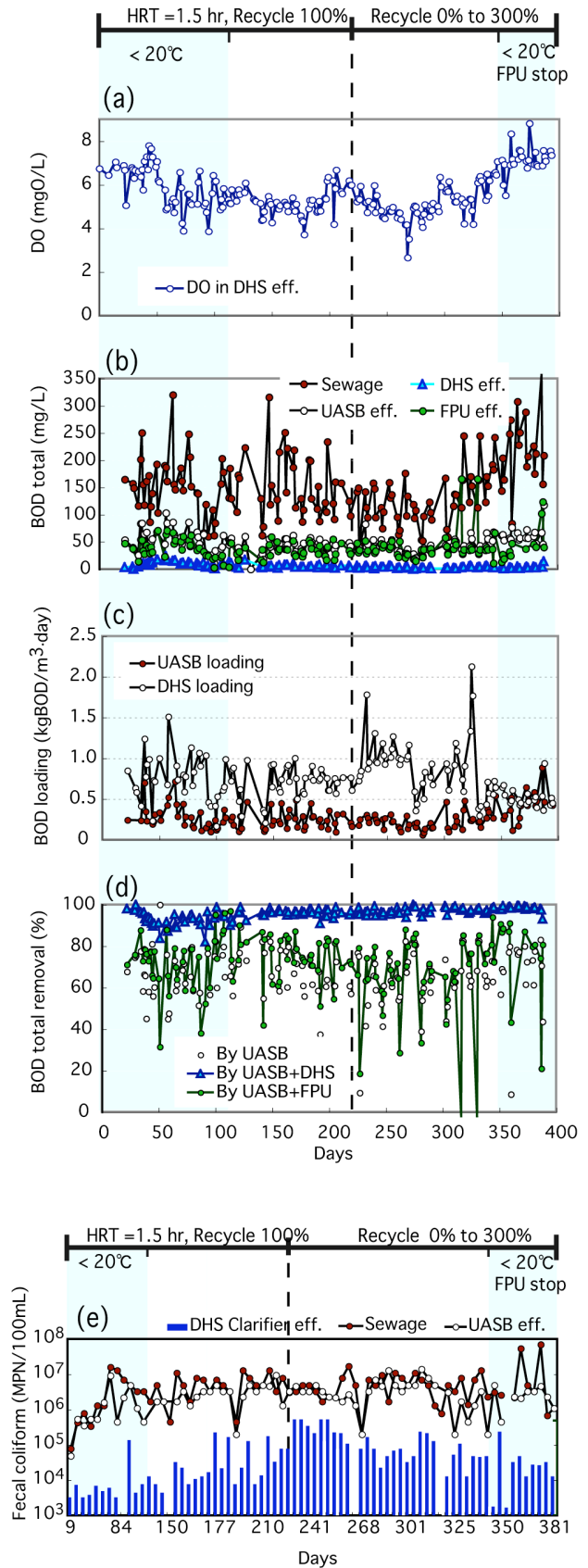


Fig.6 (a) DO, (b) 全 BOD, (c) BOD 負荷, (d) BOD 除去率, (e) ふん便性大腸菌群の経日変化

Table 3 に各返送率での DHS 処理水質の比較を示す。返送を停止したところ、返送率 100%の結果と比較して、アンモニア性窒素が 81%から 64%に、ふん便性大腸菌群の除去が  $10^2$  オーダーから  $10^1$  オーダーへ低下したが、それ以外の水質に悪影響は殆どみられなかった。運転後期、大腸菌除去の促進をねらって逆に返送率を増加させたが、効果は見られなかった。

Table 3 各返送率での DHS 処理水質の比較

	Recycle 100%	Recycle 50%	Recycle 25%	Recycle 0%	Recycle 200%	Recycle 300%
Experimental period	222 + 39 days	13 days	20 days	13 + 13 days	31 days	40 days
Flow rate, m <sup>3</sup> /day	1000	1000	1000	1000	1000	1000
UASB eff., m <sup>3</sup> /day	500	666	800	1000	333	250
HRT, hour	1.50	1.12	0.94 = 56 min	0.75 = 45 min	2.24	2.99
kgBOD/m <sup>3</sup> Sponge/day						
Ambient temp., °C	22.5	29.6	29.6	27.9	23.3	14.2
UASB eff. BOD, mg/L	48.8	46.5	45.1	38.9	58.5	64.7
Actual BOD loading						
kgBOD/m <sup>3</sup> Sponge.day	0.78	1.00	1.16	1.25	0.62	0.52
Removal	UASB + DHS	UASB + DHS	UASB + DHS	UASB + DHS	UASB + DHS	UASB + DHS
BOD-total, %	95 (3)	96 (1)	96 (1)	97 (1)	98 (1)	98 (1)
CODcr-total, %	91 (5)	91 (3)	92 (3)	92 (3)	94 (2)	94 (4)
CODcr-soluble, %	82 (11)	83 (9)	86 (7)	84 (10)	86 (6)	86 (8)
Suspended solids, %	95 (3)	96 (2)	95 (3)	95 (3)	95 (2)	97 (2)
NH <sub>4</sub> -N, %	81 (17)	87 (8)	85 (13)	64 (8)	96 (2)	95 (4)
Fecal Coliforms, log	2.2	1.9	0.9	1.3	2.2	2.2
F:Coli counts, log	4.8	4.9	5.6	5.3	4.6	4.7

( ) Standard deviation  
ND not detectable

Fig.7 にリアクター高さ方向プロファイル結果、DO, DHS スポンジ内保持汚泥量を示す。DO はエアレーションなしで自然に取り込まれ、2 m 流下した地点で飽和に近かった。DHS スポンジの保持汚泥量を測定したところ、場所によってムラがあったが平均で上段のスポンジシートが 24 gSS/L·sponge、下段のスポンジシートが 29 gSS/L·sponge であった。これは活性汚泥法の 10 倍程度の高い汚泥保持量である。

Fig.8 に DHS まわりの SS 収支を示す。DHS で発生する余剰汚泥量は DHS に流入する全 SS 量に対して 17%程度で、これは下水に含まれる全 SS 量に対して、わずか 5%程度であった。この余剰汚泥は UASB に返送することも可能である。余剰汚泥が殆ど発生しない理由は SRT が 55 日間と極めて長いためと推察された（活性汚泥法の 10 倍程度の値であった）。

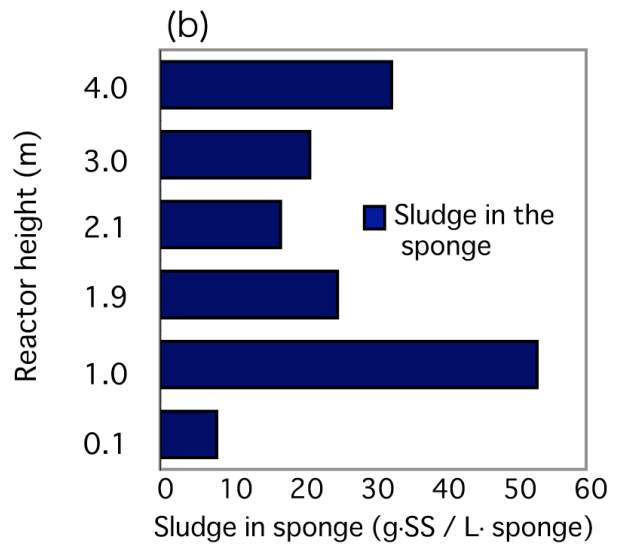
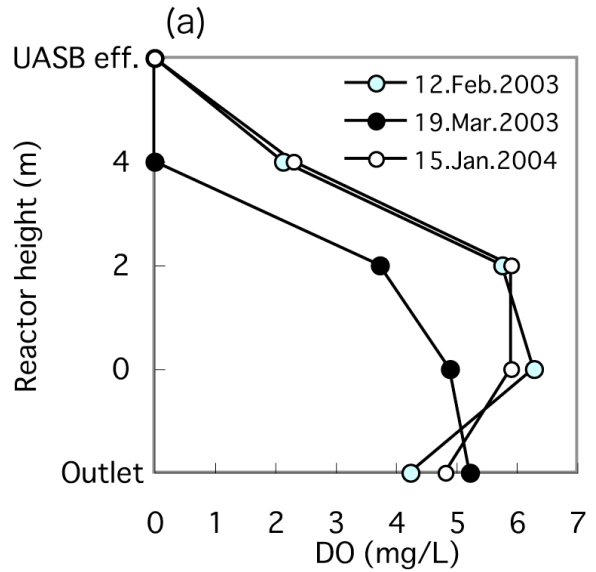


Fig.7 リアクター高さ方向プロファイル結果  
(a) DO, (b) DHS スポンジ内保持汚泥量

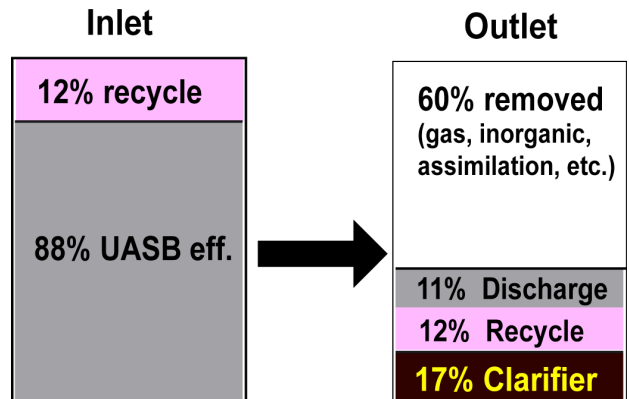


Fig.8 DHS まわりの SS 収支

Fig.9 にカルナール処理場の COD 収支を示す。下水中の 66%は固形性の COD 成分で占められており、34%が溶解性の COD 成分である。これが UASB を通過後、メタンガスや汚泥増殖として 61%が除去され、39%が流出する (22% 固形性 COD、17%溶解性 COD)。メタンガス分 50%と汚泥増殖分 11%は実測値ではなく計算値である (論文 p.112,113 参照)。FPU を通過後はわずか 10%しか除去されず、処理水には流入下水の 30%の COD が残存する (14%固形性 COD、16%溶解性 COD)。一方、DHS 通過後は流入下水に対して 31%が除去され、8.5%のみ流出する (2.7%固形性 COD、5.8%溶解性 COD)。カルナール下水処理場の場合、現在平均で12.6トンの下水CODが流入してきており、UASB で 5.0 トンの COD が流出する。FPU システムでは 3.7 トンの COD が流出するのに対し、DHS システムでは 1.1 トンのみ流出する。

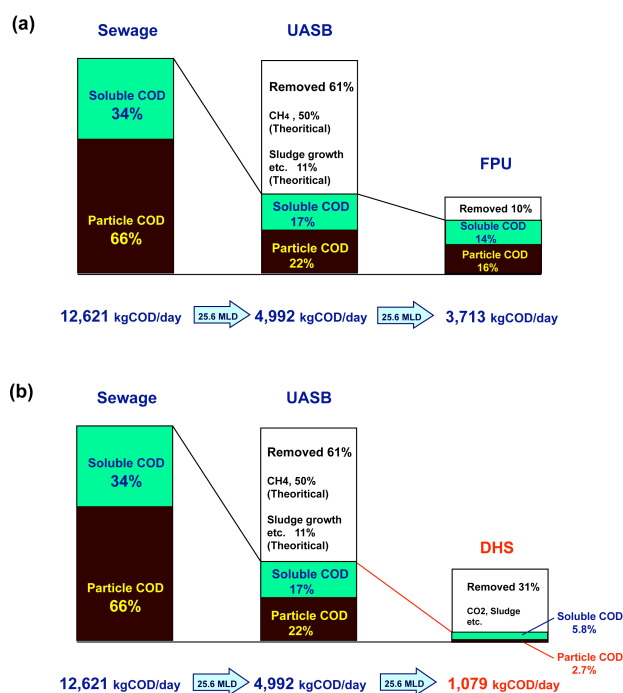


Fig.9 カルナール処理場の COD 収支  
(a) UASB + FPU, (b) UASB + DHS

#### 4. まとめ

- 長期のモニタリング結果、現行システム (UASB+FPU) と比べ、本システム (UASB+DHS) の安定性・優位性が実証された。
- 温度変化、返送率の変化にも DHS は安定した処理性能をみせ、その水質に大きな変動はなかった。
- DHS の BOD 容積負荷 (スポンジ体積に対する) は、HRT=45 min という短時間にもかかわらず最大 2.1 kgBOD/m<sup>3</sup>·day を許容した。
- 余剰汚泥発生量は全流入 SS 量に対して、17%であった。これは、高濃度の汚泥保持能からくる SRT が 55 日間と非常に長いためである。

#### 5. 課題

施工業者の設計ミスにより、DHS 内で処理水が短絡している箇所が多く見つかった。そこに新しいスポンジシートを入れるなどして充填率を上げ、返送なしで長期のモニタリングを行う。

#### [参考文献]

高橋優信, 発展途上国に適用可能なエネルギー最小型の下水処理プロセスの開発～スポンジ担体散水ろ床 (DHS-G3) リアクターの処理特性～, 長岡技術科学大学修士論文, 2002

M. Tandukar, S. Uemura, A. Ohashi and H. Harada, Development of Self-Sustainable Sewage Treatment System Consisting of UASB and DHS (Downflow Hanging Sponge) Reactors, -Process Performance at Two Different Hydraulic Retention time-, IWA ASIAN WATERQUAL, 2003, Proceeding