

インドで運転されている各種下水処理プロセス の費用対効果に関する評価

佐藤 伸幸¹・大久保 努¹・小野寺 崇¹・大橋 晶良²・原田 秀樹³

¹長岡技術科学大学大学院 エネルギー・環境工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

²長岡技術科学大学 助教授 エネルギー・環境工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

³長岡技術科学大学 教授 エネルギー・環境工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

インド政府はヤムナ河の水質改善のため、ヤムナアクションプランを実施し、34の下水処理場を建設した。本研究では、ヤムナ河流域で運転されている4つの処理プロセス(UASB法、安定化池法、活性汚泥法、好気性ろ床法)の費用対効果について比較評価した。その結果、UASB法や安定化池法では、処理水が排水基準に達しないという課題を抱えているが、流域内の多くの都市で下水処理原価やCOD除去原価(年利を0.75%と仮定した場合)は活性汚泥法や好気性ろ床法より、UASB法や安定化池法の方が小さくなる傾向を示した。

Key Words: sewage treatment process, treatment performance, treatment cost, treatment efficiency, India

1. はじめに

インド国の首都ニューデリーを流下するヤムナ河の水質改善を図るため、1993年よりインド政府は、ヤムナアクションプラン(YAP)を実施し、これまでに34の下水処理場(総処理水量:740,000 m³/d)を建設している。建設された主な下水処理場は、UASB法(16処理場)(前段処理をUASBリアクターで行い、後段処理を仕上げ池法で行う)、安定化池法(16処理場)、好気性ろ床法(2処理場)である¹⁾。YAPが実施される前のヤムナ河流域では、下水処理場はニューデリーのOkhla処理場(活性汚泥法)のみであった。同国では下水道整備は、まだまだ普及初期の段階であり、このYAPを同国における下水道整備のモデル事業とし、今後に役立てたいと考えている。しかしながら、各処理プロセスの処理性能、下水処理原価および費用対効果が解析されておらず、これらを解析することは、同国の下水道計画を効率的に実施していく上で非常に有用であると考えられる。

本研究では、インドで運転されている各処理場(UASB法、安定化池法、活性汚泥法および好気性ろ床法)で水質調査を実施し、各プロセスの処理性能を評価した。さらに、各プロセスの下水処理原価および費用対効果を算出し、比較評価することを目的とした。また、インド国で適用可能な処理プロセスについても提言することとした。

2. 調査方法

(1) 下水処理原価関連データの収集および解析

本研究では、ヤムナ河流域で運転されているUASB法(14処理場)、安定化池法(11処理場)、活性汚泥法(1処理場)および好気性ろ床法(1処理場)で処理されている下水処理場を評価対象とした(図-1)。これらの下水処理施設は、図-2に示すような処理プロセスで処理を行っていた。UASB法は、UASBリアクターで嫌気処理し、その処理水を、機械曝気装置など設置されていない池(仕上げ池)で藻類の働きにより処理される。安定化池法は、機械電気設備をほとんど設置されていない、調査対象の4処理法の中で最もシンプルな処理プロセスである。嫌気性池の主な働きは、有機物の除去である。通性池では、藻類の増殖を促進させる。藻類は熟成池でさらに増殖し、病原性菌や栄養塩を除去する。活性汚泥法では、最初沈殿池、曝気槽、最終沈殿池が設置されている。曝気槽では、縦軸の水平翼を用いて曝気している。好気性ろ床法では、流入下水は凝集沈殿処理され、その処理水は、好気性ろ床で処理される。好気性ろ床では、好気性生物を高濃度に保つため接触材が投入され、また、ろ床底部に設置されたディフューザーによってエアが供給されている。

下水処理原価の算出は、中央および地方政府の報告書などから各処理場の建設費、維持管理費、用地面積のデータを基にして行った。下水処理場の建設費や維持管理

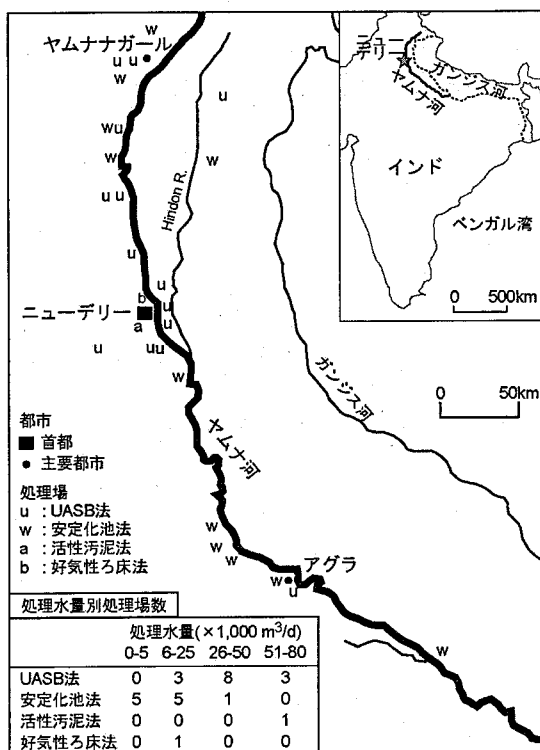
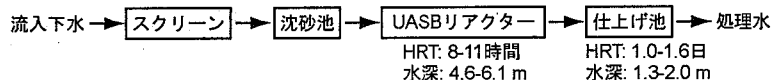


図-1 調査対象処理場位置図

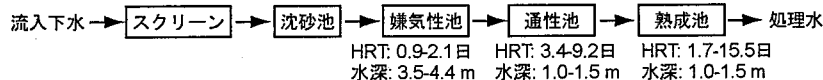
費は、通常、スケールメリットがあるため、処理場の規模が大きくなればなる程、処理水量 1 m^3 あたりの費用は小さくなる²⁾。そのため、処理場の建設費、維持管理費は各プロセスの処理場を4つの処理水量 ($0 - 5,000 \text{ m}^3/\text{d}$, $6,000 - 25,000 \text{ m}^3/\text{d}$, $26,000 - 50,000 \text{ m}^3/\text{d}$, $51,000 - 80,000 \text{ m}^3/\text{d}$) に分けて評価した (図-1)。各処理プロセスの下水処理原価は、建設費、維持管理費 (人件費、薬品費、修繕費、動力費) および用地費より算出した。修繕費は以下の条件に従い算出した; 1) 土木: 建設費における土木工事費の 0.5% (但し、安定化池法は 0.2%)、2) 機械電気: 建設費における機械電気設備費の 3% 、3) 機械電気設備の更新: 7 年毎³⁾。処理場全体の更新年数は、35 年とした³⁾。卸売物価指数を用いて、各種費用は 2002-03 年度の費用に換算した (表-1)。換算した費用を基にして式 (1) および式 (2) を用いて 1 年当たりの下水処理に必要な全費用を算出した。下水処理原価の算出は、算出した下水処理に必要な全費用を処理水量 1 m^3 当たり換算して行った。多くの途上国では、下水道整備の経験に乏しく、また、先進国のような予算を確保することは非常に困難な状況である。そのため、途上国における下水処理場は二国間または多国間援助で建設されている場合が少なくない。このような現状を考慮し、年利は、国際協力銀行が下水処理場建設事業でインドに融資する際に用いる 0.75% とした⁶⁾。

UASB法

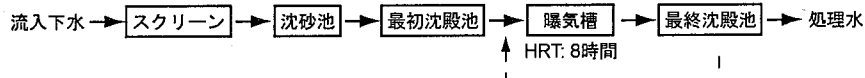
※ HRT: 水理学的滞留時間



安定化池法



活性汚泥法



好気性ろ床法

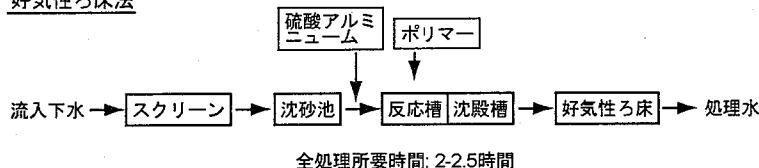


図-2 各処理プロセスフロー

TAC = CRF × IC + OMC (1)
TAC (Total Annual Cost): 1年当たりの全費用
CRF (Capital Recovery Factor): 資本回収係数
IC (Initial cost): 初期投資 (建設費, 用地費)
OMC (Operation and Maintenance cost): 維持管理費

$$CRF = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (2)$$

i: 年利
t: 更新年数

表-1 インド国年度別卸売物価指数
(1993-94 年度 = 100)^{4),5)}

年度	卸売物価 指数	年度	卸売物価 指数
1995-96	112.6	1999-00	145.3
1996-97	112.6	2000-01	155.7
1997-98	132.8	2001-02	161.3
1998-99	140.7	2002-03	166.8

(2) 採水および水質分析

各処理プロセスの処理性能を把握するため, 下水処理原価に関するデータを入手した処理場より採水し (2004 年 2-3 月), 水素イオン濃度 (pH), 溶存酸素 (DO), 化学的酸素要求量 (COD_{cr}), 浮遊物質量 (SS), ふん便性大腸菌群数に関する分析を行った. pH は pH メーター (HORIBA, B-212) で測定した. DO の測定は, DO メーター (TOA DO-24P, TOA OE-270AA) を用いて行った. 処理水の COD_{cr} および SS は, HACH 社の水質分析器 (DR/890) を用いて測定した. ふん便性大腸菌群数の測定は, 「Standard Methods」に従い, Multiple-Tube Technique を用いた⁷⁾.

3. 結果と考察

(1) 各下水処理プロセスの性能評価

各下水処理プロセスの費用対効果を比較するためには, 各プロセスの処理性能 (効果) を把握する必要がある. 下記に水質調査を実施した結果をもとに, 各プロセスの処理性能を比較する.

本研究で対象とした下水処理プロセスに流入されてい

る下水に対して詳細な水質分析を行ったところ, 各プロセスは, 概ね以下の範囲を示す下水 (COD_{cr}: 532-727 mg/L, SS: 317-398 mg/L, ふん便性大腸菌群: $1.3 \times 10^6 - 4.5 \times 10^6$ MPN/100mL) を処理していた (表-2). 活性汚泥法および好気性ろ床法は, 概ね 90%以上の良好な COD_{cr} および SS 処理効率を示したのに対し, UASB 法 (UASB リアクター + 仕上げ池) では, 上記プロセスと比較して非常に低い処理効率を示した (COD_{cr} 除去率: 66%, SS 除去率: 36%). 今回調査した UASB プロセスの COD_{cr} および SS 除去率は, 既報で報告されているインド内の UASB プロセス (3 処理場) の各除去効率よりも低く^{8) - 12)}, 本研究で調査した UASB プロセスは, 良好な処理を達成する上で支障をきたす幾つかの問題を内包していることが示唆された. それらの問題の一つとして, UASB リアクターおよび仕上げ池における汚泥管理が適切に行われていないため, SS の除去率が低かったが考えられる¹³⁾. さらに, 仕上げ池の滞留時間が, 1.0 - 1.6 日程度と短すぎることも考えられる. 仕上げ池では, 藻類の増殖によって有機物が除去されるため, 少なくとも藻類の倍加時間以上の滞留時間 (2 - 2.3 日以上) を確保する必要がある¹⁴⁾. これらが, COD_{cr} および SS の除去率を小さくした主な原因として考えられている.

もう一つの処理プロセスである安定化池法では, COD 除去率が 66%, SS 除去率が 54%であった. 安定化池法は, ほとんど人の手を加えない処理プロセスである. 但し, 通性池や熟成池では, 浄化作用を持つ好気性生物が常に十分な日光を受けられるように, 水面に浮遊物があればそれを除去しなければならない. 現地調査では, 水面の浮遊物を若干確認したが, 処理全体に影響を与える程のものではなかった. そのため, 処理性能をさらに向上させる必要がある場合は, 一般的な方策として滞留時間を大きくすることが挙げられる.

調査した全処理場で, ふん便性大腸菌群はほとんど除去されていなかった. その理由は消毒施設がないことが挙げられる. また, UASB 法の仕上げ池や安定化池法の熟成池で大腸菌が除去される場合, pH (>9) や DO (3 - 10 mg/L) が大きくなる傾向を示す^{15), 16)}. しかし, 本水質調査結果では, 仕上げ池と熟成池の pH はそれぞれ 7.4, 7.7, DO はそれぞれ 1.0, 1.3 mg/L と小さかった. 既設の仕上げ池や熟成池での大腸菌除去メカニズムの概念 (機械曝気や薬品を用いず除去すること) をそのまま利用し, pH と DO を大きくするためには, それぞれの池の滞留時間を大きくすることが必要であると考えられる^{15), 16)}.

表-2 水質調査のまとめ

	水温 (°C)	pH	DO (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	ふん便性大腸菌群 (MPN/100mL)*
UASB法						
流入水	20.4 (±2.3)	7.5 (±0.4)		727 (±263)	398 (±205)	6.4 (±0.6)
UASB流出水	20.2 (±2.1)	7.2 (±0.4)		419 (±217)	392 (±214)	6.0 (±0.5)
処理水	19.3 (±1.8)	7.4 (±0.4)	1.0 (±0.6)	248 (±104)	255 (±155)	5.7 (±0.4)
安定化池法						
流入水	21.3 (±0.9)	7.5 (±0.1)		624 (±273)	358 (±212)	6.7 (±0.2)
処理水	20.6 (±0.7)	7.7 (±0.2)	1.3 (±1.1)	212 (±59)	164 (±31)	5.8 (±0.9)
活性汚泥法						
流入水	21.3	7.2		696	317	6.1
処理水	21.3	7.3	5.0	45	10	5.7
好気性ろ床法						
流入水	23.5	7.2		532	337	6.5
処理水	23.2	7.1	5.6	20	21	5.5

Note *: log₁₀ベースで表示

(2) 下水処理原価

次に、費用対効果の“費用”を把握するため、各プロセスの建設費、維持管理費および用地費を基にして下水処理原価を算出した（図-3）。用地単価を 1,000 Rs/m²（地方都市の住宅地）として各プロセスの用地単価を調査したところ、以下に示すような下水処理原価を算出することが可能であった（UASB 法：0.8 - 1.2 Rs/m³、安定化池法：0.8 - 2.6 Rs/m³、活性汚泥法：2.0 Rs/m³および好気性ろ床法：3.6 Rs/m³）。各プロセスの下水処理原価を比較したところ、UASB 法による下水処理は、活性汚泥法や好気性ろ床法より安価であることが判明した。活性汚泥法（処理水量 50,000 - 80,000 m³/d）に対し、UASB 法（同規模）は 39%の下水処理原価であった。また、好気性ろ床法（処理水量 6,000 - 25,000 m³/d）に対し、UASB 法（同規模）は 34%の下水処理原価であった。安定化池法の処理水量 50,000 - 80,000 m³/d のデータはないが、処理水量 26,000 - 50,000 m³/d の下水処理原価と同等またはそれ以下になると推察されるため、活性汚泥法（処理水量 50,000 - 80,000 m³/d）よりも安価になるものと考えられる。そのため、各下水処理プロセスの下水処理原価は、小さい順に 1) UASB 法、安定化池法、2) 活性汚泥法、3) 好気性ろ床法の関係を示すと考えられる。

途上国の予算は限られているため、短期間で多額の資金調達が求められる下水処理場の建設費は、通常、二国間や多国間援助によって賄われる場合が多い。一方、下水処理場の維持管理費は、通常、受益者からの使用料や

自国の予算で賄う。そのため、特に、維持管理費の小さな処理プロセスが望まれる。活性汚泥法や好気性ろ床法は維持管理費が下水処理原価の 80%を超えており、運転開始後の負担が非常に大きくなる。一方、UASB 法は 40 - 50%程度、安定化池法は 15 - 40%程度であり、下水処理原価に占める維持管理費を考慮した場合においても活性汚泥法や好気性ろ床法に比べ、普及し易い条件であると考えられる。

また、図-3 に示した維持管理費の項目別（人件費、薬品費、修繕費、動力費）の比率を図-4 に示す。UASB 法および好気性ろ床法では修繕費（それぞれ 51 - 60%、37%）、安定化池法では人件費（73 - 86%）、活性汚泥法では動力費（64%）が最も大きな維持管理費の項目であった。各プロセスとも建設費に比べ、維持管理費が大きい。特に活性汚泥法や好気性ろ床法はその差が大きい。そのため、それぞれの維持管理費で占める割合が大きい動力費や修繕費に無駄がないか設計時に十分な検討を行うと同時に、日常の維持管理においても留意することが、コスト削減につながる重要な注意事項であると考えられる。

図-3 では、下水処理場は処理水量が大きければ大きい程、下水処理原価が小さくなることを示した。UASB 法では、処理水量 6,000 - 25,000 m³/d から処理水量 26,000 - 50,000 m³/d へ規模が大きくなると下水処理原価は、3 割程度減少する。また、処理水量 26,000 - 50,000 m³/d から処理水量 50,000 - 80,000 m³/d へ規模が大きくなった時の下水処理原価の減少は 1 割程度である。そのため、

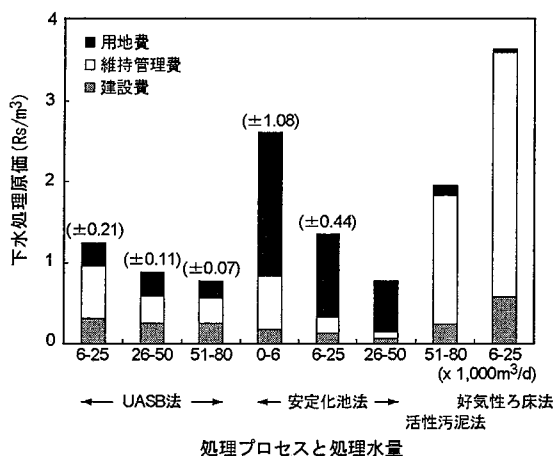


図-3 下水処理原価^{3), 17) - 41)}
(年利0.75%, 用地単価1,000 Rs/m²)

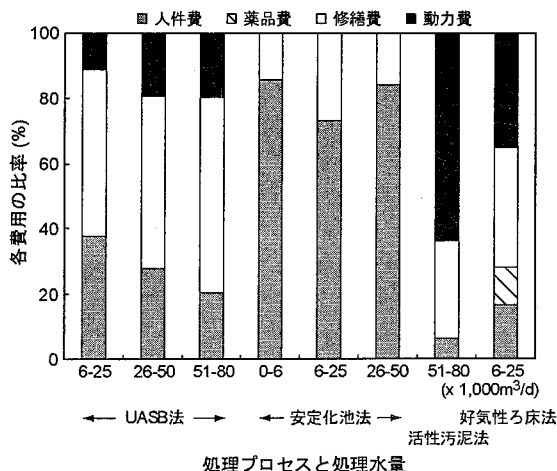


図-4 維持管理費における各費用別比率^{3), 17) - 41)}

UASB 法は、処理水量 26,000 m³/d 以上の処理場を計画することが効率的であると考えられる（但し、過疎地など無理に処理水量を大きくするために処理区域を大きくするような処理場計画は、もちろん避けるべきであろう）。

安定化池法では、滞留時間が大きいので、広大な用地を必要とする。そのため、下水処理原価に占める用地費の割合が 68 - 82% であり、用地単価によって、下水処理原価は大きく変化する。図-3 では用地単価を 1,000 Rs/m²（地方都市の住宅地）と仮定したが、用地単価が 1/10 程度の地方都市の郊外では、安定化池法は最も安価な処理プロセスになる。一方、ニューデリーでは用地単価が 3 倍程度（3,000 Rs/m²）であり、安定化池法は活性汚泥法や好気性ろ床法と同程度の下水処理原価になる。近年の

インドの経済成長は著しく、今後 10 年間ににおいても高い経済成長率（7-8%程度）が予測されており⁴²⁾、用地単価が年々上昇することが考えられる。そのため、安定化池法の採用を決定したら、できる限り早期に用地を確保することが重要であると考えられる。

これらの下水処理原価を、新潟県長岡市で運転されている長岡中央浄化センター（活性汚泥法、97,000 m³/d）と比較した。同センターでの下水処理原価は 22 円/m³（8.5 Rs/m³、年利 0.75%換算）程度であった⁴³⁾。長岡市における汚水分の下水道管理費（処理場、ポンプ場、管きよに関する資本費および維持管理費）は、215 円/m³で、全国平均（209 円/m³）とほぼ同額であると考えられる^{43), 44)}。また、下水道管理費全体の維持管理費の内、処理場の維持管理費は、長岡市では 54%（全国平均：53%）であった⁴⁵⁾。そのため、長岡市における下水道事業の各費用は、かなり全国平均に類似していると想定できる。もし、長岡市における下水処理原価（8.5 Rs/m³）を全国平均に置き換えることができると仮定し、ヤムナ河流域の用地単価（100 - 3,000 Rs/m²）を含め比較すると、インドで運転されている活性汚泥法（処理水量：50,000 - 80,000 m³/d）は、日本の 1/4 程度の下水処理原価となる（図-3）。また、好気性ろ床法（処理水量：6,000 - 25,000 m³/d）は、日本の 1/2 程度である。インドの GDP（1 人当たり）は、日本の 1/10 程度であり⁴⁶⁾、GDP 比を越える下水処理原価を示した活性汚泥法や好気性ろ床法によって下水道整備を実施することは、インド国において大きな負担と考えられる。一方、UASB 法（処理水量：26,000 - 50,000 m³/d、50,000 - 80,000 m³/d）は、用地単価がそれぞれ 900 Rs/m² 程度（地方都市の住宅地）、1,400 Rs/m² 程度（ニューデリー周辺都市の住宅地）までは、GDP 比以内に治まり、活性汚泥法や好気性ろ床法に比べ普及しやすい条件であると考えられる。また、処理水量が 25,000 m³/d 以下では用地単価に関わらず、GDP 比を越える。そのため、UASB 法は、処理水量 26,000 m³/d 以上の処理場が普及しやすい条件であると言える。また、安定化池法も処理水量 6,000 - 50,000 m³/d では下水処理原価が GDP 比内に治まる。しかし、処理水量 6,000 - 25,000 m³/d では用地単価が 500 Rs/m² 程度以下、処理水量 26,000 - 50,000 m³/d では用地単価が 1,100 Rs/m² 程度以下でないと GDP 比内にならないため、採用箇所が UASB 法に比べると若干限定的であると言える。

(3) COD 除去原価

前述のように調査対象となった各処理プロセスは、異なる処理性能（効果）、異なる下水処理原価（費用）を示した。ここでは、単位重量あたりの汚濁負荷量の削減にどれだけの投資が必要か、即ち、各処理プロセスの費用対効果を比較する。費用対効果の指標として、施設の代表的な水質管理指標の一つとして考えられる COD 除去費

表-3 COD 除去原価
(年利 0.75%, 用地単価 1,000 Rs/m²)

処理プロセス	処理水量 (m ³ /d)	下水処理原価 (Rs/m ³)	COD除去原価 (Rs/kgCOD)
UASB法	6,000-25,000	1.25	2.60
	25,000-50,000	0.88	1.84
	51,000-80,000	0.77	1.61
安定化池法	0-5,000	2.61	6.34
	6,000-25,000	1.35	3.28
	25,000-50,000	0.77	1.87
活性汚泥法	51,000-80,000	1.95	3.00
好気性ろ床法	6,000-25,000	3.62	7.08

を用いた。COD 除去費は、各プロセスの下水処理原価をそれぞれの COD 除去量で除して算出した(表-3)。その結果、同規模(処理水量: 50,000 - 80,000 m³/d)の活性汚泥法に対し、UASB 法は 54% 程度の COD 除去原価であった。また、同規模(処理水量: 6,000 - 25,000 m³/d)の好気性ろ床法に対し、UASB 法は 37%, 安定化池法は 46% の COD 除去原価であった。

これまでの原価は、用地単価を 1,000 Rs/m² と仮定して算出したものである。この用地単価を変化させ、地方都市の郊外(用地単価: 100 Rs/m²)からニューデリー(用地単価: 3,000 Rs/m²)での処理場建設を想定し、COD 除去原価を算出した(図-5)。その結果、処理水量 6,000 - 25,000 m³/d では、用地単価が 640 Rs/m² より大きくなると、UASB 法は安定化池法より、また、用地単価が 2,580 Rs/m² より大きくなると、好気性ろ床法が安定化池法より COD 除去原価が小さくなった。用地単価 100 - 3,000 Rs/m² の範囲では、UASB 法は好気性ろ床法より安い傾向を示した。処理水量 51,000 - 80,000 m³/d では用地単価に左右されることなく、UASB 法は活性汚泥法より COD 除去原価が小さくなった。そのため、インドの多くの都市において COD 除去原価は、活性汚泥法や好気性ろ床法より UASB 法や安定化池法の方が小さくなる傾向を示すと考えられる。

前述の下水処理原価同様、我が国とインドの COD 除去原価を比較する。長岡市中央浄化センターでの COD 除去(一年間の平均)は、555 mg/L と報告されている⁴⁰⁾。この値を用いると COD 除去費は、40 円/kgCOD (15 Rs/kgCOD) 程度と算出される。インドの活性汚泥法における COD 除去費は、2.8 - 3.4 Rs/kgCOD (用地単価: 100 - 3,000 Rs/m²)

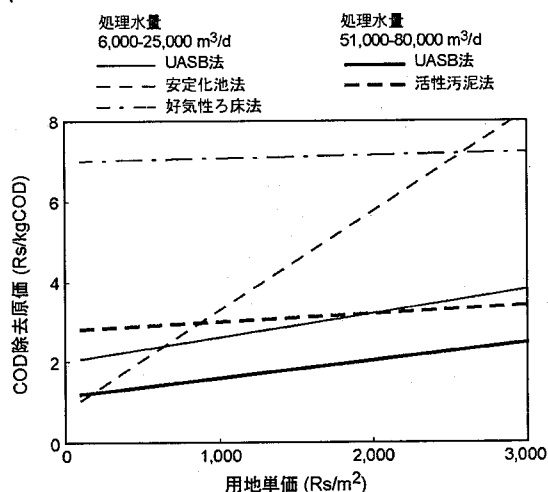


図-5 COD 除去原価
(年利 0.75%)

であり、日本の 1/5 程度である。また、好気性ろ床法は 1/2 程度であった。日本との GDP 比 (1/10) を考慮した場合、インドでの活性汚泥法(処理水量: 50,000 - 80,000 m³/d)や好気性ろ床法は、費用対効果においても、大きな負担であると言える。一方、UASB 法(処理水量: 26,000 - 50,000 m³/d, 50,000 - 80,000 m³/d)は、用地単価がそれぞれ 500 Rs/m² 程度、900 Rs/m² 程度(地方都市)までは、GDP 比以内に治まる。処理水量が 25,000 m³/d 以下では用地単価に関わらず、GDP 比を越える。また、安定化池法(処理水量: 0 - 6,000 m³/d)では、用地単価に関わらず、GDP 比を越える。しかし、処理水量: 6,000 - 25,000 m³/d, 26,000 - 50,000 m³/d では、用地単価がそれぞれ 300 Rs/m² 程度、800 Rs/m² 程度(地方都市)までは GDP 比内に治まる。そのため、COD 除去費からも UASB 法や安定化池法は活性汚泥法や好気性ろ床法に比べ、普及し易い条件であると考えられる。

(4) 今後の課題

インドの排水基準では、COD が 250 mg/L, SS が 50 mg/L と設定されている。COD 除去原価が、UASB 法や安定化池法より大きい活性汚泥法や好気性ろ床法では、排水基準を満たしていた。一方、UASB 法や安定化池法の処理水は、多くの処理場で排水基準が満たされていなかった。具体的には、COD の排水基準は UASB 法では 5 処理場、安定化池法では 1 処理場、SS の排水基準は UASB 法および安定化池法の全処理場で満たされなかった。これは大きな問題であり、“処理性能”で述べたような対策を講じる必要がある。対策によっては下水処理原価や COD 除去原価が大きくなることも考えられ、十分に検討する必要がある。

本論文では費用対効果の指標として COD 除去費を用いたが、SS 除去費も重要であると考えられる。用地単価 1,000 Rs/m², 年利 0.75%, 処理水量 6,000-25,000 m³/d の条件で、本調査結果をもとに SS 除去費を算出すると、1) 安定化池法 (6.96 Rs/kgSS), 2) UASB 法 (8.71 Rs/kgSS), 3) 好気性ろ床法 (11.47 Rs/kgSS) と示すことができる。同様に、処理水量 51,000-80,000 m³/d では、1) UASB 法 (5.38 Rs/kgSS), 2) 活性汚泥法 (6.37 Rs/kgSS) と算出される。COD 除去費と同様に、安定化池法や UASB 法よりも活性汚泥法や好気性ろ床法の SS 除去費の方が高くなる傾向を示すものである。

インドでは、下水処理人口はまだ小さく、多くの年月をかけて、下水処理場を建設する計画である。そのため、今後も多量の未処理下水が公共水域に放流されることになる。このような未処理水の放流をできる限り早期に軽減するための一方策として、排水基準には満たないが、COD 除去原価が小さい UASB 法や安定化池法を広く採用し、同じ投資額でより多くの汚濁負荷量を削減することも重要ではないかと考えられる。

また、下水処理技術の開発も盛んに行われている。その一例として、UASB 法の後段処理法の 1 つとして、DHS (Down Hanging Sponge) 法 (処理水量: 1,000 m³/d) が、インドで約 4 年間の連続運転に成功している。DHS 法は、散水ろ床の概念を用い、微生物の増殖の場としてスポンジを用いている。DHS 法の建設は非常に容易であり、途上国の人材でも十分可能である。機械的な曝気装置や薬品が不要、維持管理が容易であるだけでなく、滞留時間が 2 時間程度と短く、仕上げ池のような大きな用地を必要としない。また、処理水は 6-10 mgBOD/L, 7-11 mgSS/L と先進国も含め、多くの国々の基準をクリアしている⁴⁸⁾。本論文では、ヤムナ河流域で運転されている下水処理場を調査対象としたが、他の既存下水処理プロセスやこのような新規処理技術についても効率的な下水道整備の一方策として検討されるべきであろう。

4. まとめ

本研究では、インドで運転されている各種下水処理プロセスの処理性能、下水処理原価、費用対効果を示した。その結果、UASB 法や安定化池法はインドの排水基準を満たさないが、活性汚泥法や好気性ろ床法より費用対効果において有利であることを示した。また、維持管理の強化で、UASB 法の処理性能は向上するものと考えられているため、他処理プロセスと比較した場合、費用対効果がさらに有利になるものと考えられる。

本論文では、インド人の手で維持管理されている既存施設の現況を把握し、その上で比較することが重要では

ないかと考えたため、排水基準を満たしていない UASB 法や安定化池法を、処理水が排水基準を満たしている活性汚泥法や好気性ろ床法と比較した。もし、排水基準を満たすことが絶対条件になると、UASB 法や安定化池法は、施設を改善することになる。その場合にはそれなりの投資が必要となり、下水処理原価が大きくなる。また、改善方法によっては、費用対効果の優位性も失うこともあるため、詳細な検討が求められる。

インドでの下水処理原価や費用対効果は、日本の値と比較した場合、両国の GDP 比より大きくなる場合が多いことを示した。これは、インド人またはインド国政府にとって下水処理は、大きな負担であると考えられる。そのため、下水道整備を推進するためにも低コスト化は非常に重要であると考えられる。同国における現況のシステムでは難しいと考えられるが、場合によっては、排水基準を優先するより、費用対効果が有利な処理プロセスの採用により、汚濁負荷量の削減を優先することも河川水質の改善を図る一方策として考えられる。

備考

USD 1=48.27 Rs (2002/03 年度の平均)⁴⁹⁾

USD 1=125 円 (2002 年の平均)⁵⁰⁾

参考文献

- 1) Central Pollution Control Board: Status of Sewage Treatment Plants in Ganga Basin. Delhi, India. 2003.
- 2) 日本下水道協会: 流域下水道整備総合計画調査、指針と解説. 1999.
- 3) Japan International Cooperation Agency: The study on water quality management plan for Ganga River in the Republic of India, final report, Vol. III-11. 2005.
- 4) Central Statistical Organisation: Statistical abstract India 1998. Ministry of Statistics and Programme Implementation, New Delhi, India. 1999.
- 5) Central Statistical Organisation: Statistical abstract India 2003. Ministry of Statistics and Programme Implementation, New Delhi, India. 2004.
- 6) JBIC:
<http://www.jbic.go.jp/japanese/oec/standard/yenloan/index.php>. 2005.
- 7) American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed., Washington, DC., USA. 1998.
- 8) Draaijer, H., Maas, J.A.W., Schaapman, J.E., and Khan, A.: Performance of the 5 MLD UASB Reactor for Sewage Treatment at Kanpur, India. Water Science and Technology, Vol. 25, No. 7, pp. 123-133, 1992.
- 9) Tare, V., Ahammed, M., and Jawed, M.: Biomethanation in

- domestic and industrial waste treatment - an Indian scenario. Proc. 8th Int. Conf. on Anaerobic Digestion, Japan. Vol. 2, pp. 255-262, 1997.
- 10) Starkenburg, W.V., Maas, J.A., Kazmi, K.A., and Wiegant, W.M.: The Mirzapur Domestic Wastewater UASB Treatment Plant: Six years of Operation. Proc. 9th Int. Conf. on Anaerobic Digestion, Belgium. Part 2, pp. 567-569, 2001.
 - 11) Wiegant, W.M., Khan, A., Khan, P., and Schaapman, J.E.: Modular Design of UASB Plants for Domestic Wastewater in Haryana State, India. Proc. 9th Int. Conf. on Anaerobic Digestion, Belgium. Part 2, pp. 151-153, 2001.
 - 12) Hammad, S.M.: Performance of a full scale UASB domestic waste water treatment plant. J. Inst. Public Health Eng. of India. Vol.1, pp. 11-19, 1996.
 - 13) Sato, N., Okubo, T., Onodera, T., Ohashi, A., and Harada, H.: Prospects for a Self-sustainable Sewage Treatment System - A Case Study on Full-scale UASB System in India's Yamuna River Basin -. Journal of Environmental Management, 2006. (*in press*)
 - 14) Arceivala, S.J.: Wastewater Treatment for Pollution Control. Second ed. Tata McGraw-Hill, New Delhi, India, 1998.
 - 15) Cavalcanti, P.F.F., Haandel, A. van, and Lettinga, G.: Polishing ponds for post-treatment of digested sewage part 1: flow-through ponds. Water Science and Technology, Vol.44, No.4, pp. 237-245, 2001.
 - 16) Mara, D.: Design manual for waste stabilization ponds in India. Leeds, England. 1997.
 - 17) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 10 MLD UASB sewage treatment plant, Yamunanagar (City Centre). Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 18) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 25 MLD UASB sewage treatment plant, Yamunanagar (Camp Area). Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 19) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 40 MLD UASB sewage treatment plant, Karnal. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 20) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 10 MLD UASB sewage treatment plant, Panipat Zone-I. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 21) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 35 MLD UASB sewage treatment plant, Panipat Zone-II. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 22) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 30 MLD UASB sewage treatment plant, Sonapat. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 23) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 45 MLD UASB sewage treatment plant, Faridabad Zone-II. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 24) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 50 MLD UASB sewage treatment plant, Faridabad Zone-III. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 25) Public Health Engineering Department: Detailed project report, 30 MLD UASB sewage treatment plant, Gurgaon. Government of Haryana, Chandigarh, India. 1995.
 - 26) Haryana PWD Public Health Department, Karnal: Detailed project report for STP Zone-II 8 MLD oxidation pond under Yamuna Action Plan project. Chandigarh, India. 1998.
 - 27) Haryana PWD Public Health Department: Detailed project report for sewage treatment plant based on oxidation ponds and pumping stations in Chhachhrauli town (Dist. Yamunanagar). Chandigarh, India. 1999.
 - 28) Haryana PWD Public Health Department: Detailed project report for sewage treatment plant based on oxidation ponds and pumping stations in Radaur town (Dist. Yamunanagar). Chandigarh, India. 1999.
 - 29) Haryana PWD Public Health Department: Detailed project report for sewage treatment plant based on waste water stabilization pond and pumping station in Gharaunda town (Dist. Karnal). Chandigarh, India. 2000.
 - 30) Haryana PWD Public Health Department: Detailed project report of sewage treatment plant for Palwal, Dist. Faridabad. Chandigarh, India. 2000.
 - 31) Uttar Pradesh Jal Nigam, Ghaziabad: Detailed project report of sewage treatment plant - Tha Ghaziabad. India. 1997.
 - 32) Uttar Pradesh Jal Nigam, Mathura: Detailed project report for prevention of pollution of river Yamuna at Mathura. India. 1997.
 - 33) Uttar Pradesh Jal Nigam, Agra: Detailed project report for prevention of pollution of river Yamuna at Agra, 2.25 MLD oxidation pond at Bhuri Nagla - Agra. India. 1998.
 - 34) Uttar Pradesh Jal Nigam, Etawah: Revised detailed project report for S.T.P. & effluent channel at town under Yamuna Action Plan. India. 1999.
 - 35) Uttar Pradesh Jal Nigam, Noida: Revised project report of 34 MLD UASB sewage treatment plant at Sector-50 Noida. Part-I, India. 2000.
 - 36) Uttar Pradesh Jal Nigam, Ghaziabad: Revised detailed project report of sewage treatment plant - Cha Ghaziabad, India. 2000.
 - 37) Uttar Pradesh Jal Nigam, Agra: Revised D.P.R. of 78 MLD UASB sewage treatment plant at CIS Yamuna area Agra. India. 2000.
 - 38) Uttar Pradesh Jal Nigam, Mathura: Revised detailed project for prevention of pollution of river Yamuna at Vrindavan, India. 2000.
 - 39) Uttar Pradesh Jal Nigam, Saharanpur: Revised detailed project report 38 MLD UASB type STP at Saharanpur, India. 2000.
 - 40) Uttar Pradesh Jal Nigam, Muzaffarnagar: Revised detailed project report of facultative type stabilization ponds at Muzaffarnagar, India. 2000.
 - 41) Uttar Pradesh Jal Nigam, Mathura: Revised detailed project sewage

treatment plant of Masani Nala, Mathura, India. 2001.

- 42) 日本経済新聞: 2005 年 2 月 15 日の記事より.
- 43) 長岡市: 長岡市下水道の概要 (長岡地域), 2005.
- 44) 早川雅章: 下水道経営の健全化に向けた取組み. 月刊下水道, Vol. 28, No. 1, pp. 13-16, 2005.
- 45) 日本下水道協会: 平成 15 年度版 下水道統計 財政編, 第 60 号の 2, 2005.
- 46) United Nations Development Programme: Human Development Report 2005; International cooperation at a crossroads, Aid, trade and security in an unequal world. New York, USA, 2005.
- 47) Tandukar, M.: Development of self-sustainable municipal sewage treatment system consisting of UASB and DHS (Down-flow Hanging Sponge) reactors for developing countries. 長岡技術科学大学, 博士論文, 2006.
- 48) 小野寺 崇, 大久保 努, MD. S. Miah, 井町 寛之, 大橋 晶良, 原田 秀樹, 上村 繁樹: インドでの UASB+DHS による新規下水処理プロセスの実規模実験, 第 39 回日本水環境学会年会講演集, pp. 405, 2005.
- 49) Madras Consultancy Group, Chennai: <http://www.indianindustryprofiles.com/newindiainvestment.ppt>. 2004.
- 50) 東京三菱 UFJ 銀行: 内部データより, 2006.

COST EFFECTIVENESS OF VARIOUS SEWAGE TREATMENT PROCESSES OPERATED IN INDIA

Nobuyuki SATO, Tsutomu OKUBO, Takashi ONODERA, Akiyoshi OHASHI,
and Hideki HARADA

The government of India constructed 34 Sewage Treatment Plants (STPs) under the Yamuna Action Plan in order to restore water quality in Yamuna River. This paper evaluates cost effectiveness of such treatment processes as Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Waste Stabilization Pond (WSP), Activated Sludge Process (ASP), and Biological Aerated Filter (BAF) operated in Yamuna River Basin. As a result, the effluents of the UASB and the WSP did not achieve the standard in India. However, when annual interest was assumed at 0.75%, sewage treatment cost and COD removal cost for the UASB and the WSP tended to be less than ones for the ASP and the BAF in the basin.