

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 —インドでの大規模実証試験—

水圏土壌環境制御研究室 大久保努
指導教官 原田秀樹 大橋晶良

1. 背景

近年インドでは、「聖なる」ガンジス川の最大支流であるヤムナ川が、流域都市から排出される生活排水や工業廃水の増大に伴い水質悪化が深刻な問題となっている。ヤムナ川流域には、首都デリー（Delhi）をはじめ多くの都市が立ち並び、太古から生活用水、灌漑用水、沐浴などに利用されており、数千万人におよぶ流域住民の生活に密着した非常に重要な河川に位置づけられている。そこで現在、ヤムナ川浄化計画事業（Yamuna Action Plan:YAP）がインド政府・環境森林省（Ministry of Environment and Forest:MOEF）・河川局（National River Conservation Directorate:NRCD）により実施されている。このヤムナ川浄化計画事業によりヤムナ川沿いの 19 箇所に、上昇流嫌気性汚泥床（Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB）法が導入されている。UASB 法は維持管理が容易で省エネルギー、低コスト型の下水処理プロセスとして、開発途上国の下水処理技術として注目されている。しかし、UASB 法単独の導入では、流入下水の 6 割前後の有機物除去率しか望めず、有機物や病原菌の除去において放流基準を満たしていないのが現状であり、UASB 法の適切な後段処理プロセスの設置が検討されている。そこで MOEF 及び NRCD は我々の研究グループが長年にわたり研究・開発を続けてきた UASB 法の後段処

理法である DHS（Downflow Hanging Sponge）法に着目し、インド・ハリアナ州カルナル市の下水処理場の実規模プラント（最大処理量 1000m³/day、5600 人規模）を建造し実証実験を開始した。私は、実際に現地に滞在し長期（750 日間）にわたる本下水処理システムの処理性能を連続モニタリングしたので報告する。

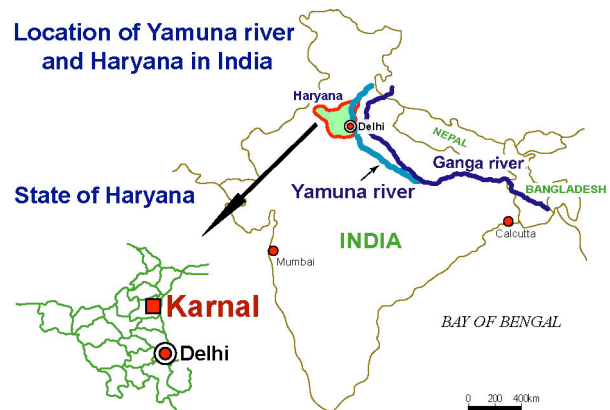


Fig.1 Location of Yamuna river and Haryana in India.

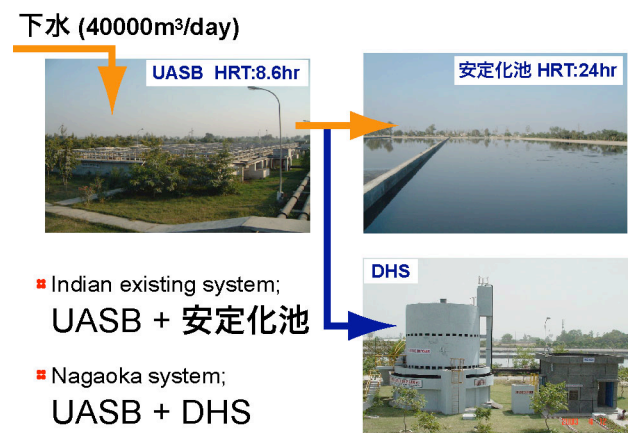


Fig.2 Treatment system of Karnal 40 MLD STP.

2. DHS 実規模リアクターの詳細

DHS デモンストレーションプラントの写真と概略図を Fig.3 に示す。DHS に対する UASB 処理水の供給量は一日当たり最大 1000 m³ (1MLD) であり、その際の HRT は 0.745hr である。DHS の反応部 (Fig.1 (a)) は、直径 5.5 m、高さ 5.31m の円筒コンクリート製で、担体として使用しているスポンジの全スポンジ容量は 31.1 m³ である。また、その下部には SS の沈降を目的として直径 7m、深さ 3.15m、有効容量 109 m³ のクラリファイアーを備えている。DHS 反応部には、2m のプラスチックシートの両面に断面 2.5cm×2.5cm×3.5cm の三角柱状のスポンジメディアを接着したもの (Fig.1 (d)) を 2 段で、合計 2164 枚配置 (設計) している。DHS 反応部容積に対し、スポンジ容積の充填率は 24.7% である。UASB 処理水は一旦 DHS 上部へポンプアップされた後、水頭差で回転する自走式散水機 (Fig.1 (b)) により均一にスポンジへ散水した。

DHS における HRT は全スポンジ容量に対する UASB 処理水の流入量で計算した。Tab.1 に返送を考慮した際の DHS の HRT について示す。返送率 0% では UASB 処理水が 1000 m³.day⁻¹ 流入し、DHS 処理水として全量の 1000 m³.day

¹ が排出される。返送率 DHS100% では UASB 処理水が 500 m³.day⁻¹ 流入し、DHS 処理水は 500 m³.day⁻¹ が排出され、返送水が 500 m³.day⁻¹ 返送される。DHS 上部からの散水量は返送率を変動させても常に 1000m³.day⁻¹ を保ち、流入量と処理水量のみが変動するものである。本好気性 DHS デモンストレーションプラントは従来の長岡でのパイロットプラントと同様に人為的なエアレーションは一切行っていない。

Tab.1 HRT of DHS system.

Recyclation (%)	UASB effluent (m ³ .day ⁻¹)	Recycle (m ³ .day ⁻¹)	DHS effluent (m ³ .day ⁻¹)	DHS HRT (hr)
0	1000	0	1000	0.75
25	875	125	875	0.85
50	750	250	750	1.00
100	500	500	500	1.49
200	330	670	330	2.26
300	250	750	250	2.99

3. DHS 実規模リアクターのスポンジシート充填状況

DHS は桐島によりスポンジシートの落下が報告され、自身によっても確認されている。シートの偏りによる隙間面積も上段で 13%、下段で 16% (画像解析により算出) と報告されている。そのため、UASB 処理水がスポンジと接触せずに短絡し、DHS 処理水に影響を与えていると考えられた。DHS では、UASB 処

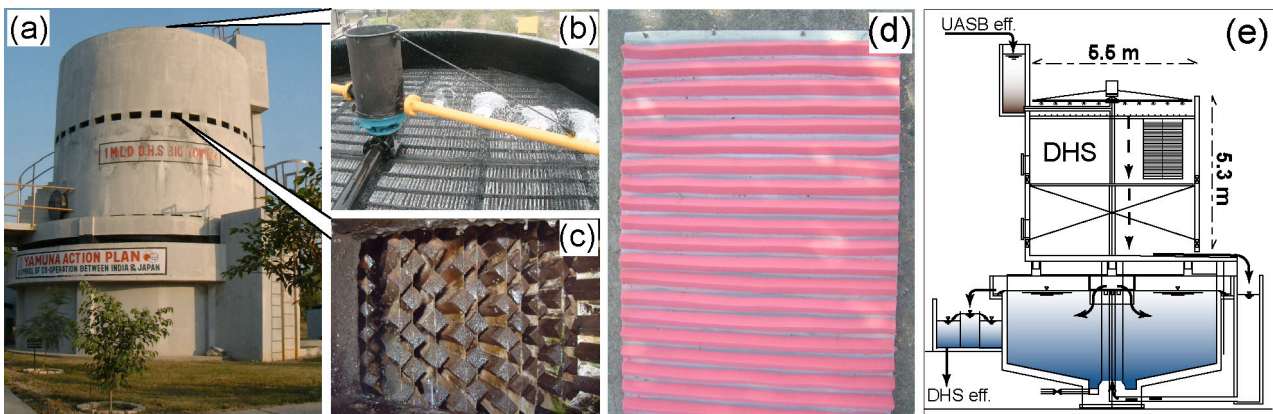


Fig.3 Photographs and schematic diagram of DHS in Karnal 40 MLD STP.

理水とスポンジとの十分な接触こそが良い処理水を得るための絶対条件である。また、スポンジシート自体にも欠陥があり、スポンジシートの上部に補強剤として用いている FRP (Fiber Reinforced Plastics : 繊維強化プラスチック) の強度が弱いため座屈を生じ、シートの破れやスポンジの剥離による落下が確認されている。桐島は 4 分の 1 円に対し調査を行い、上段で 12~31%、下段で 25~46% のスポンジシートに何らかのダメージを受けていたと報告している。そのため本研究期間中に、損傷の激しいシートの交換およびシートの偏りを修復するために、PARAMOUNT LIMITED 社にスポンジシートを新たに計 200 枚 (シート幅 635mm:100 枚、420mm:60 枚、215mm:40 枚) 発注し、2004 年 2 月 24 日~3 月 2 日 (7 日間) の期間に実務訓練生の小野寺氏とともに交換作業を行った。

下段スポンジシートの確認は上段 4 分の 1 のスポンジシートを取り除き、そのスペースから梯子をおろし内部に進入し、一枚一枚の全スポンジシートの現状および枚数の確認を行った。確認作業を行った際のスポンジシートの配置を Fig.4 に示す。設計書には 210mm 幅のスポンジシートも設置されているはずだが、215mm との判断が困難なため、全て 215mm 幅として数えた。実際に確認すると、上段にはシート幅 635mm:735 枚、420mm:31 枚、215mm:186 枚 (スポンジ容積:12.709m³)、下段にはシート幅 635mm:908 枚、420mm:135 枚、215mm:90 枚 (スポンジ容積:17.539m³)、スポンジ総体積 30.2m³ で設置されていた。設計書と実際のスポンジ総体積には 0.9m³ (シート幅 635mm 換算で約 54 枚に相当) の差が確認され

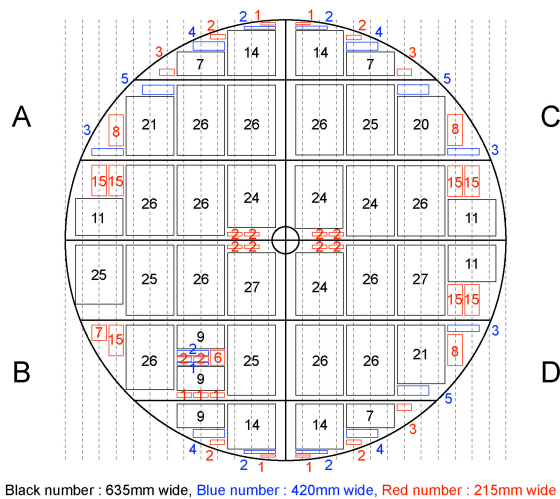
た。実際に落下したスポンジ枚数は 16 枚であったため、その枚数を考慮してもすでに稼働開始 (2002 年 4 月) 段階でスポンジシートが不足していたことが考えられる。これは明らかにインド側業者の手抜き工事であり、監督にも問題がある。

新しいスポンジシートの設置はまず下段からおこなった。作業環境は下水や蛆虫が頬を伝い、劣悪を極めた。設置作業と並行しスポンジの偏りなども修正した。新たに設置したスポンジシートは、上段にシート幅 635mm:100 枚、420mm:51 枚、下段にシート幅 420mm:9 枚、215mm:39 枚設置した。また上段からは損傷が激しいシート幅 635mm:70 枚、420mm:11 枚、215mm:21 枚を取り外した。

交換作業後はスポンジ総容積 31.6m³、スポンジ充填率 25.1% となりスポンジ容積当たりの HRT は日量処理量 1000m³.day⁻¹ で 0.76hr となった。今回の作業によりスポンジシートの充填されていない隙間部分は、スポンジ上段で 13% から 8.5% (計算により算出)、下段で 16% から 14% (計算により算出) にそれぞれ減少した。交換作業終了後、2004 年 3 月 3 日より返送率 100%、日量処理量 500m³.day⁻¹ で再スタートしたが、2005 年 2 月 10 日現在、シートの落下は確認されていない。

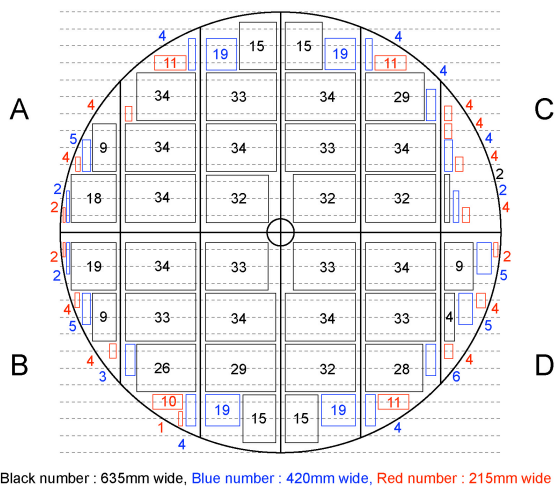
また、交換作業期間の 7 日間は DHS の流入を停止したが、再スタート時にもスポンジには十分な保水が確認され、保持汚泥の剥離等は見られなかった。時期の影響にもよるが、若干の停止期間を経てもスポンジへの汚泥および水分の保持を持続できるものと考えられる。

❖ DHS media in top element



Black number : 635mm wide, Blue number : 420mm wide, Red number : 215mm wide

❖ DHS media in bottom element



Black number : 635mm wide, Blue number : 420mm wide, Red number : 215mm wide

Fig.4 Layout of filling sponge sheets before repair.

4. DHS 実規模リアクターによるインド都市下水の連続処理性能

4. 1 目的

世界初の DHS 実規模プラントのパフォーマンスを把握するため、測定、実験には細心の注意を払い、我々研究チームによる精度の高い実験により長期連続モニタリングは行われた。カルナール下水処理場では現行システムとして UASB+ 安定化池 (Final Polishing

Unit:FPU) 法が導入されており、モニタリング全期間を通じて現行システムと新規システム UASB+DHS 法の処理水の比較検討を行った。本研究では長期に及ぶ DHS モニタリング結果より、開発途上国での下水処理における本システムの優位性および将来性を示すことを最大の目的とした。

4. 2 実験方法

水質分析に使用した試料は、Karnal 40MLD-STP における流入下水、UASB 処理水、DHS 処理水、FPU 処理水の 4 試料を採取した。サンプリング場所において気温、水温、pH を測定し、DO、COD_{Cr}、BOD、SS、Turbidity、NH₄-N、NO₃-N、ふん便性大腸菌群数の測定を処理場実験室にて行った。

試料は各々 500 ml ずつポリエチレン製容器に採取し処理場実験室まで運搬し、DO については BOD 瓶に採取し運搬した後、直ちに測定した。溶解性試料については ADVANTEC-GB140 濾紙 (0.4 μm) を通過したものをを用いた。測定方法は下水道試験法 (1997 年版) および Standard method (20th edition, 2002) に準じて行った。

4. 3 実験結果

下水の全 BOD は、全期間の平均で 152 (±51) mg/L、UASB 処理水で 52 (±17) mg/L、安定化池処理水で 42 (±19) mg/L であった。一方、DHS 処理水は全期間で 5 (±4) mg/L と非常に良好な水質が得られており、グラフからもその非常に安定した処理性能が伺える。除去率は UASB で 64 (±13) %、UASB+安定化池で 70 (±15) %、それに対し UASB+DHS

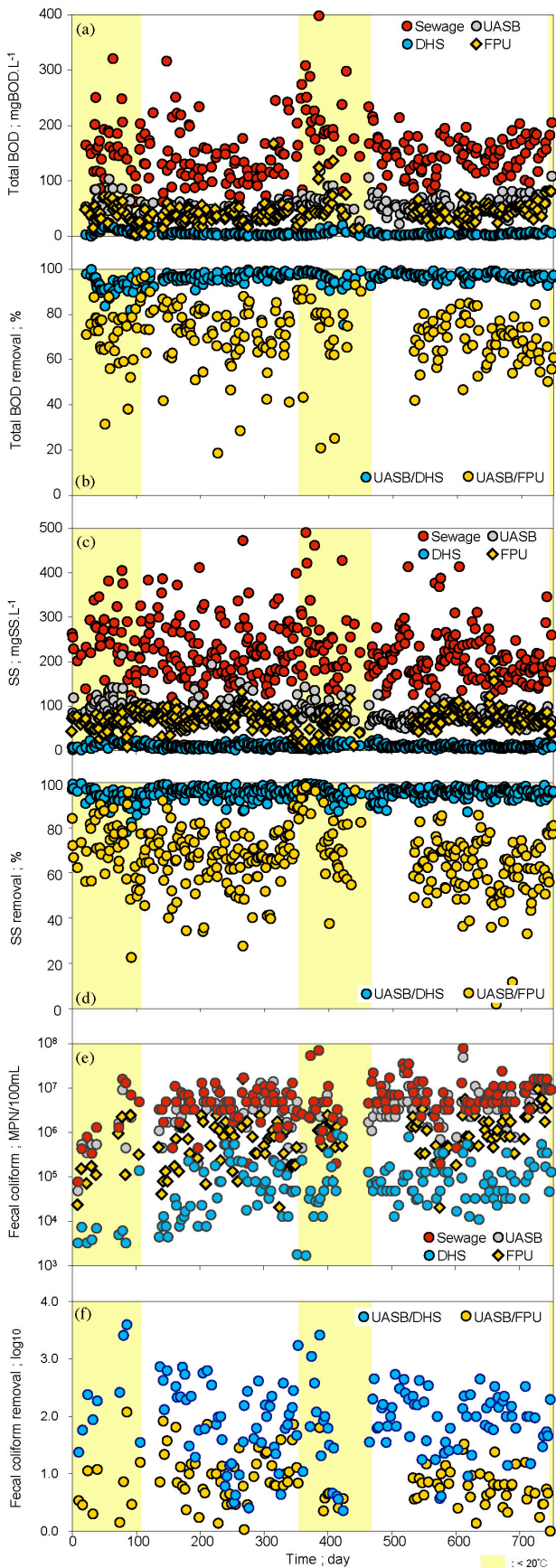


Fig.5 Time course of BOD, SS and Fecal coliform concentration and removal.

では 96 (±3) %を達成した。DHS 処理水は、全くエネルギーを使わずに活性汚泥法と同等の非常に高い処理水質を得ることができた。DHS 上部スポンジでは、BOD 負荷が 2.3 kgBOD/m³/day、BOD 除去速度が 1.3 kgBOD/m³/day と、下部のスポンジに到達するまでに、有機物の約 55%が除去されており、COD と比べて BOD の高い除去速度が確認された。

SSは下水で 227 (±85) mg/L で流入した後、UASB 処理水も安定したパフォーマンスを示しており 83 (±22) mg/L であった。一方、安定化池処理水は、堆積汚泥の浮遊流出や藻類の流出により処理水質に幅があり、73 (±73) mg/L であった。DHS では全期間を通して 10 (±5) mg/L であった。除去率は UASB が 60 (±14) %、UASB+安定化池で 66 (±16) %となっており、ここでも安定化池における SS 除去能の乏しさが伺える。24hr の HRT を経ているにも関わらず、安定化池単独での除去率は僅か 6%にとどまっていた。UASB+DHS では全期間で 95 (±3) %と非常に高い除去率を維持した。SS 収支は、流入下水 SS 量に対し、UASB で 23%、DHS で 4%の余剰汚泥が発生していた。標準活性汚泥法では最初沈殿池、生物反応タンクおよび最終沈殿池において、除去 SS 量当たり 100%の汚泥が発生することから、汚泥発生量も非常に少ないことが確認でき、汚泥処分等を考慮すると非常に有効なシステムであることが証明された。

ふん便性大腸菌群は下水で 5.01x10⁶ MPN/100mL、UASB では殆ど処理されず 2.51x10⁶ MPN/100mL、安定化池処理水では 6.31x10⁵ MPN/100mL、DHS では 5.01x10⁴

MPN/100mL と対数除去率で $2\log_{10}$ 、99%を達成したのに対し安定化池では $0.8\log_{10}$ の対数除去率にとどまっておりました。活性汚泥法での対数除去率は $2-3\log_{10}$ であり、DHS システムが人為的エアレーションを一切行っていないことを踏まえると、非常に低コストで活性汚泥法に劣らない効果的なふん便性大腸菌群の除去が行われたと言える。

Fig.6(a)に温度と BOD 除去率の関係を示す。水温は $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ 付近、気温では $2\sim 49^{\circ}\text{C}$ まで非常に激しい温度変動があり、除去率も若干温度が低いと低下しておりますが、全期間を通して温度による影響は殆どみられずに安定した除去率を示しました。Fig.6(b)に DHS における温度とアンモニア除去の関係を示す。上記に DHS のアンモニア除去能は卓越した値を示したと述べたが、特に水温 20°C 以下では著しい除去率の低下が確認された。硝化菌が温度の影響を受け活性が低下したものと考えられる。DO はエアレーションや送風なしで自然に取り込まれ、DHS 処理水で 5.5mg/L 前後溶存していた。高い DO 濃度により硝化反応が促進され、全期間におけるアンモニア除去率は $82 (\pm 5) \%$ を達成した。アンモニア性窒素は富栄養化の原因、水産物への悪影響の原因ともなるため、これらの観点からも UASB+DHS が達成した卓越した除去性能は開発途上国における最適な下水処理方式であると考えられる。

【参考文献】

桐島佳宏, 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機規模実証テスト, 長岡技術科学大学修士論文, 2004

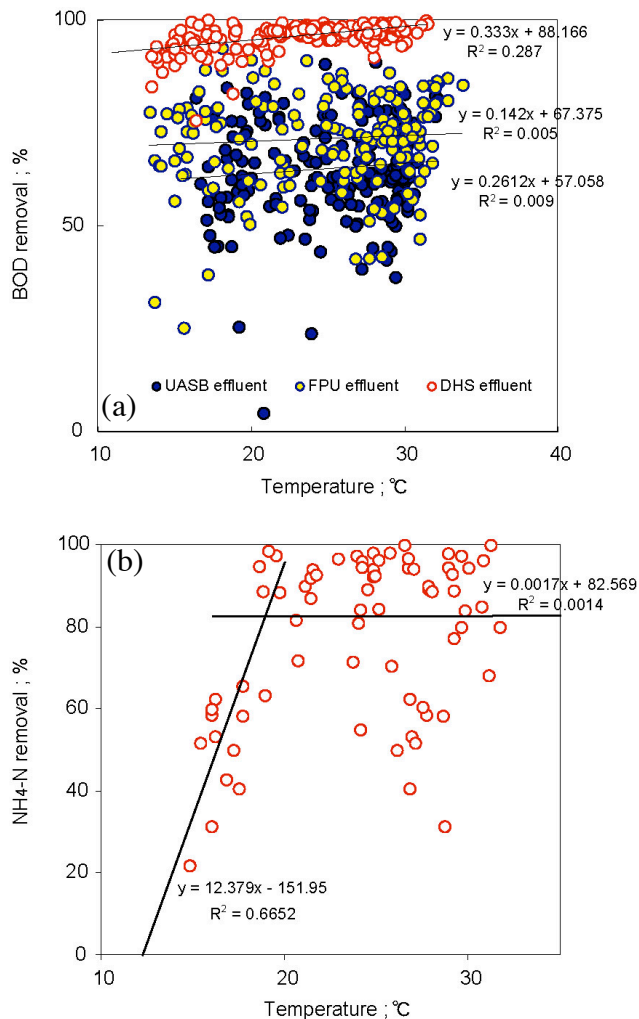


Fig.6 (a) Relationship between BOD removal and temperature. (b) Relationship between NH4-N removal and temperature.

Madan, T. (2003). Development of self-sustainable municipal sewage treatment system consisting of UASB and DHS (Down-flow Hanging Sponge) reactors for developing countries –Upgrading DHS post-treatment system for UASB treating municipal sewage, Master thesis submitted to Nagaoka University of Technology.

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.