

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 発展途上国に適した低コスト型新下水道システムの開発に関する研究

下水道研究室 室 長 藤生 和也
主任研究官 管谷 悌治
主任研究官 那須 基
下水処理研究室 室 長 南山 瑞彦
研 究 官 平出 亮輔
研 究 員 桜井 健介

1. はじめに

発展途上国においては、著しい都市化の進展により衛生環境が悪化し、水環境の改善と水資源の確保が、従前にも増して重要となってきている。都市周辺市街地では、都市中心部よりも、排水を処理することへの理解が乏しく、住民は水系伝染病の蔓延や水資源の不足により、劣悪な衛生環境におかれている。これらの課題を解決するには、都市中心市街地に加えて周辺住宅地においても、都市内河川や湖沼等の水質改善を優先して、標準的な下水道整備ではなく、水路、腐敗槽等の既存施設や土壌、植生等を水質向上手法として組み入れた低コスト下水道システムを構築する必要がある。

そこで、本研究では下水道の整備が比較的遅れており、早急な対応が必要と思われるこれら都市周辺の市街地を対象として、住民参加、効率的な下水道管理等のソフト面も考慮しつつ、既存施設の下水収集・処理機能を評価し、土地、気候、安価な労力等開発途上国の特長が活用できる低コスト型の下水道システムを開発する。

2. 発展途上国における低コスト型下水道システムの課題の整理

インターセプター下水道(図-2)は、既存の排水施設を継続使用できることから、下水道整備を進めるに当たって最大の支障となる管渠敷設に係る費用を大幅に節減でき、また遮集管のみの整備により、放流先への流入負荷を確実に低減し、水質改善効果の早期発現を図ることが可能であると考えられている。また、ラグーン法は、標準的な下水処理場に比べ広い処理面積が必要であるが、維持管理費がより少なく済むため、今後汚水処理施設整備が求められる発展途上国の郊外部に適した処理方式であると考えられている。しかし、下水道に関する JICA 開発援助専門家経験者にヒアリングを行った結果、次のような課題が指摘された。

・タイにおけるラグーンの処理場の区域は、インターセプター方式を採用しており、腐敗槽、管渠内での浄化(沈殿を含む)、地下水浸透等により、処理場への流入水濃度が処理水質とほとんど変わらない。腐敗槽の浄化、管渠内の浄化の定量的な評価、ラグーン処理の効率化の検討が必要である。

・バンコクでは、通常水路の底泥は汚く、雨天時には堆積物の巻き上げ等により大幅に悪化する。既設水路、下水側溝にゴミ、砂がたまり、定期的に浚渫が必要であり、極力浚渫しなくてよい卵形管などの水路構造が望ましい。

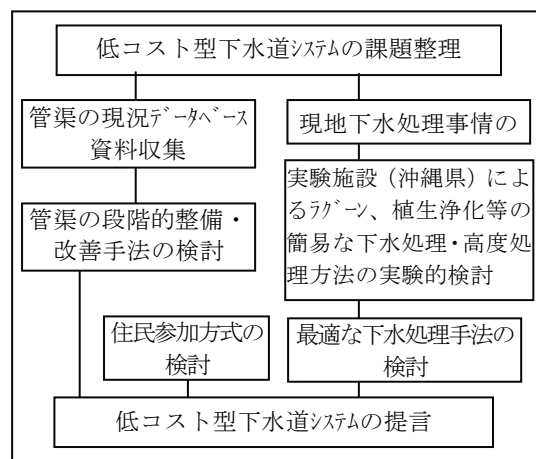


図-1 研究のフロー

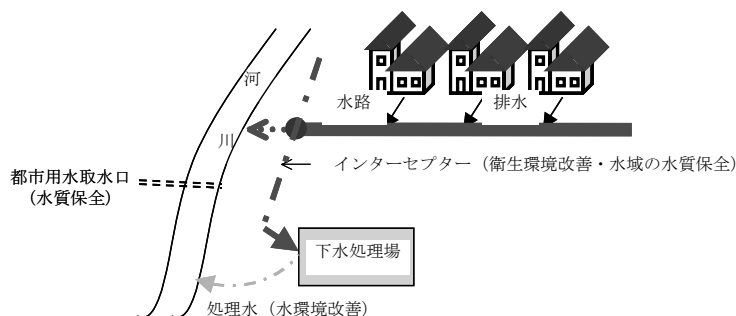


図-2 インターセプター下水道の概念

そこでインターセプター下水道の現状等を調査し、課題の整理を行うと共に解決策について検討を行った。

3. 現地下水処理事情の調査

インターセプター下水道において流入下水の水質が低くなるメカニズムを解明し、ラグーン処理施設において、処理水質が悪化するメカニズムを解明するため、平成 14 年 11 月に、タイ及びインドネシアを対象に、インターセプター下水道及びラグーン処理施設の現地調査を実施した。インターセプター下水道について、現地調査の結果、管内での堆積や浄化の状況については確認できなかったが、雨季では河川水がインターセプターに逆流しており、新たな河川水質汚染が懸念された。また、ラグーン処理水質悪化の原因として、藻類の流出が原因の一つであることが現地調査からも示唆された。

4. 管渠の現況データベース資料収集

4.1 目的・方法

インターセプター下水道の整備・維持管理状況を明らかにし、問題点を把握するために、インターセプター下水道が採用されているタイ王国東北部のコンケン市において、平成 16 年 3 月に下水道管理者へのヒアリング調査及び資料収集を実施した。

4.2 結果

(1) コンケン市のインターセプター下水道の概要

コンケン市は人口約 13 万人、4 万 4 千世帯（2001 年時点）の都市である。多くの家庭は腐敗槽と土壌浸透枡で汚水処理を行っており、市の中心部では既に整備された標準的な下水道に接続している箇所もある。市内から発生する汚水及び雨水の大半は、コンクリートパイプやコンクリート側溝、陶製U字溝などの排水路を経由して、Khlong Rong Muang川の両岸に整備されたインターセプター（全長 11,826m）に流入し、Bung Thung Sang処理場（曝気式ラグーン方式）で処理される（図-3）。インターセプターには雨水吐が 50 箇所あり、雨天時には越流水がKhlong Rong Muang川に流出する。処理場は、流入水量 7.8 万 m^3/d 、流入水BOD160 mg/l 、処理水BOD20 mg/l 、曝気式ラグーン滞留時間 2.6d、安定化池滞留時間 1.5dで設計されているが、実際には晴天時流入水量 4.5～5.5 万 m^3/d 、流入水BOD30～40 mg/l 、処理水BOD10 mg/l 程度である。

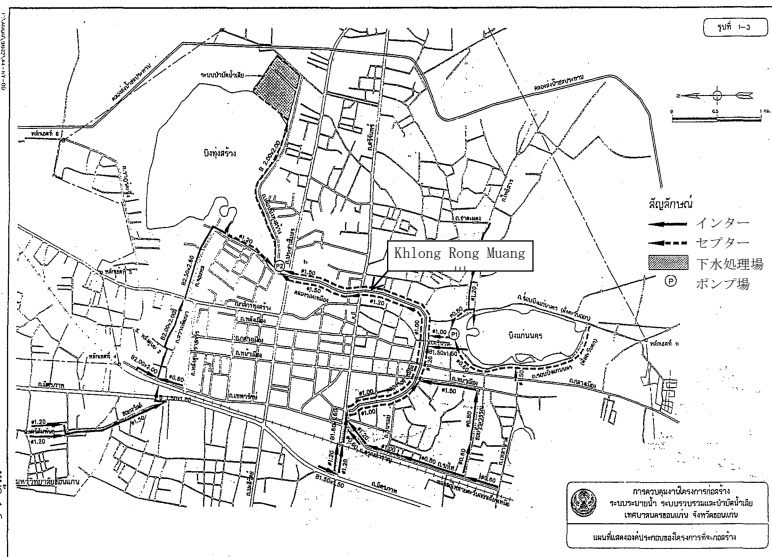


図-3 コンケン市のインターセプター管渠の位置図

(2) コンケン市のインターセプター下水道の問題点

①家庭の腐敗槽・土壌浸透枡

- ・多くの家庭は下水道に未接続で腐敗槽・土壌浸透枡を用いているが、その維持管理について市に権限が無い。
- ・腐敗槽は、定期的に汚泥の引き抜きを行っていないため、高濃度の汚水が排水路に流れ込む原因となっている。
- ・土壌浸透枡が十分に機能していないため、住民による腐敗槽から道路側溝への違法な接続が後を絶たず、雨期に頻発する浸水時には、深刻な問題を引き起こしている。
- ・腐敗槽から汲み取った汚泥の投棄場所は、特に定められておらず、十分な管理がされていない。

②管渠

- ・家庭への下水道の接続が進んでいない。
- ・市の中心エリアはその周辺部よりも低地になっているため、雨天時には周辺部からの雨水が市の中心部に集まり、インターセプターの排水能力を超過する。

- ・インターセプター内の堆積により流下能力の低下が懸念されるが、管渠の維持管理方法に関するガイドラインがなく、維持管理を行う人的・財政的余裕もないため、適切な維持管理が行われていない。

③下水処理場

- ・安定化池からの処理水は、緑色を呈している。処理水放流口付近は、嫌気状態となっている。
- ・計画処理能力は、下水道接続が進んだ状態を想定しているが、現時点では BOD の流入負荷量は計画の 2 割弱に過ぎず、施設能力が過大になっている。したがって、流入負荷量に応じ適切な維持管理方法を検討する必要がある。

5. 管渠の段階的整備・改善手法の検討

インターセプター下水道は、既存の排水路を利用することから、管渠の整備費用を大幅に抑制する効果がある。その反面、標準下水道には見られないインターセプター下水道特有の問題点も抱えている。

従って、インターセプター下水道の整備を基本としつつ、その問題点の解消も踏まえた、段階的整備・改善手法について整理した。

5.1 土砂・ゴミ等の堆積防止

インターセプター下水道は雨天時等における土砂の流入や、開渠部におけるゴミの混入など流下能力を阻害する要因が多い。そこで土砂堆積については、管渠を卵形とする方法やインバートを設けることが考えられる。また、ゴミ等の混入については、開渠区間の暗渠化やスクリーンの設置などが考えられる。

5.2 啓蒙活動

現状では、住民の下水道システムに関する理解は十分ではなく、また、施工業者についても技術的に未熟な業者が多く見られる。そこで、住民の環境意識を高め、下水道システムへの理解と協力を得るため、住民への講習会（環境や下水道に関する）の開催、パンフレットの配布、ポスター、看板等の設置などを行うことが考えられる。また、業者に対する啓蒙活動として、下水道管理者による技能講習会を実施し、その受講を義務付けることなどが考えられる。

5.3 工場排水規制に係る法整備

発展途上国では、直接、生産に結びつかない施設への投資余力が小さいことから、有害物質を多く含む工場排水を前処理しないままに下水道に受け入れる場合が多く、管渠を傷つける大きな要因となっている。そのため、工場排水を規制する法制度を確立することが必要である。

6. 屋外実験施設を使用したラグーン処理機能の改善に関する検討

6.1 目的

当検討では、事前に行った開発援助専門家へのヒアリングにより、下水処理場に流入してくる生下水が計画に比べかなり低い場合があることや、ラグーン処理水の BOD 上昇の原因が槽内で繁殖した藻類の流出であること等の現地に即した情報を得、以下の 2 検討項目を抽出し、屋外実験施設を用いた実験により、検討を行うことが目的である。実験は、日本唯一の亜熱帯地域である沖縄県において、同県との共同研究で行った。

- 1) 低負荷流入水におけるラグーンの適正維持管理に関する検討
- 2) ラグーン後段に植生帯を設置した高度処理実験に関する検討

6.2 実験方法

実験では、沖縄県具志川浄化センター内のラグーン処理実験施設を使用した。実験施設の概略図を、図-4 に示す。実験施設は、大きく分けて流入下水混合槽・ラグーン処理施設・植生帯流入タンク・植生帯の 4 施設からなる。流れとしては、流入下水混合槽からでた流入下水が、ラグーン処理施設で処理され、その処理水が植生帯に流入する。

(1) 低負荷流入水におけるラグーンの適正維持管理に関する検討

熱帯・亜熱帯地域の発展途上国の処理場の中には、下水管路内において下水に沈降・浄化作用が加わり、常時、計画値に比べかなり低負荷の流入水が処理場に流入している現状がある。このため当実験においては、浄化センター本施設の 1 次処理水を処理水で希釈して、ラグーンに流入させ、処理状態を確認することで、低負荷条件での適切な維持管理に関する検討を行った。

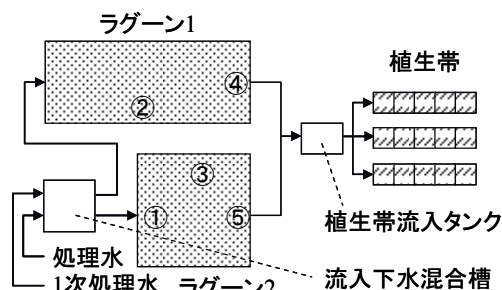


図-4 ラグーン施設の概略図

実験施設としては、図-4の流入下水混合槽とラグーン1・2である。流入下水混合槽では、浄化センター本施設より生下水と処理水を引き入れ、目標BODの混合流入水を作成し、ラグーンに流入させた。混合槽の容量は3 m³で、ラグーンへの流入水量は最大50 m³/dまで上げられる。次にラグーン処理施設は、2つのラグーン（通性嫌気性安定化池）で構成した。ラグーン2池は共に、容量100 m³、水深2 mであるが、池の形状が異なっている。ラグーン1は、14×5.5 mの長方形の形状であり、ラグーン2は8.6×8.6 mの正方形とした。実験では、流入水の設定をBOD 50, 100, 200 mg/L、HRT 30, 20, 10, 5, 2 dに変更し、処理状態を確認しながら、適正な維持管理について検討を行った（BOD 200 mg/L、HRT 2 dの設定は、負荷が高すぎ、その後の実験に影響があるため、設定しなかった）。実験中は、週1回の水質測定およびサンプリングを行い、図-4の図中の番号のポイントでサンプリングを行った。各名称を順番に①流入水、②ラグーン1槽内、③ラグーン2槽内、④ラグーン1処理水、⑤ラグーン2処理水とした。測定項目は、水温・pH・DO・ORP・SS・BOD・COD・大腸菌群数・クロロフィルaの測定を行った。

(2) ラグーン後段に植生帯を設置した高度処理実験に関する検討

ラグーンにおいて、ある程度の処理水質が維持できることは確認されている。しかし、処理水中に藻類が含まれているため、処理水と流入水がほぼ変わらないBODの値を示し、藻類の流出が問題となっている。また、ラグーンは、大腸菌のような病原性微生物の除去を考慮したものではないため、その処理が十分ではない。このため、ラグーン後段に植生帯を設置し、処理水のさらなる高度化についての検討を行った。

実験施設としては、図-4の植生帯流入タンクと植生帯である。植生帯流入タンクは、植生帯への流入水（ラグーン処理水）の流量調節・分配を行うものである。容量は0.5 m³であり、ラグーン処理水を3つに分配できる構造とした。植生帯は、外寸1,337×864×793 mmの容器（0.5 m³）に、赤土を水深20cmになるように敷き詰め、現地で自生しているヨシを植付けた。その容器を縦に5つ並べたものを1系列として、合計3系列の植生帯を作製した。うち1系列は、ヨシを植付けないブランク系列とし、簡易の土壌浄化法として処理状態を確認するものとした。サンプリングポイントは、植生帯流入水を流入タンクで採取し、あとは各系列ごとに中間点で槽内の水を、最終槽の末端で処理水を採取した。実験は、各系列に同時期・同処理水を流入させ、ブランクと植生帯槽の対照実験を行うこととした。

6.3 実験結果

(1) 低負荷流入水におけるラグーンの適正維持管理に関する検討

各設定条件の処理状態として、図-5にT-BOD・D-BOD・DO・ORP・クロロフィルa・大腸菌群数の設定HRTごとの平均値を示す。T-BODの図より、流入BOD 200 mg/LのHRT 5 dの処理水で高い値を示しているものの、その

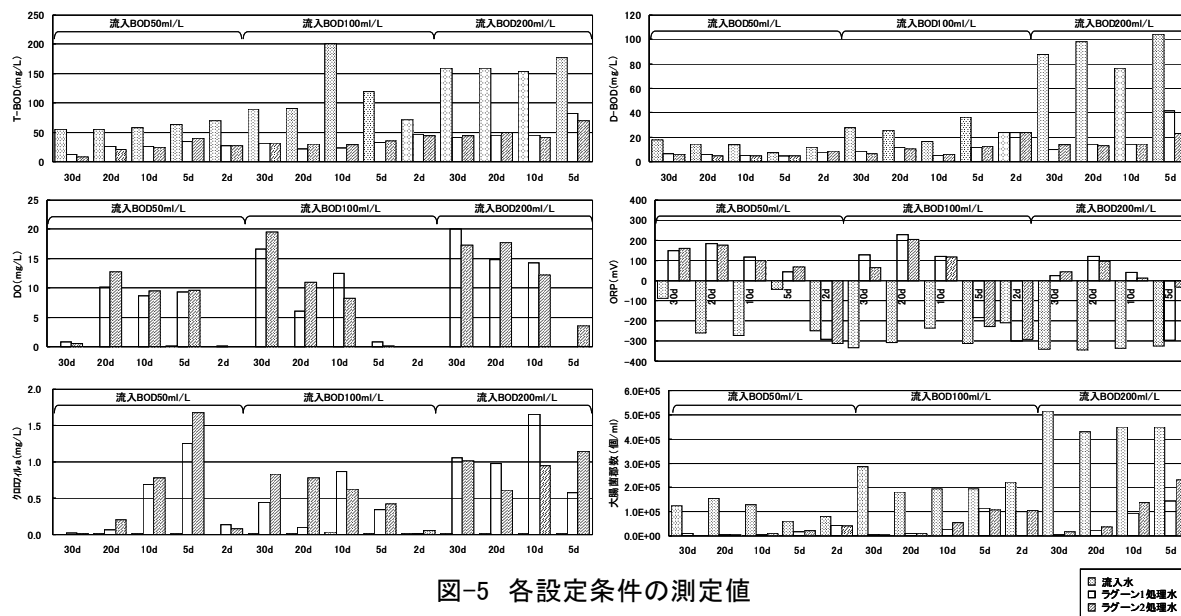


図-5 各設定条件の測定値

他の条件に関しては処理水の水質にさほど大差はなかった。しかし、全体的な傾向として、BOD 負荷が高い設定条件の方が、処理水のT-BODも比較的高い値を示していた。次にラグーン槽内の状態としてDO・ORPを

見ると、流入 BOD 50 mg/L の HRT 2 d、流入 BOD 100 mg/L の HRT 5, 2 d、流入 BOD 200 mg/L の HRT 5 d の処理水の DO がなく、ORP もマイナス値で嫌氣的な状態であることを示している。クロフィル a の値は、流入 BOD 50 mg/L の HRT 2 d と流入 BOD 100 mg/L の HRT 2 d でほとんど検出されていない（ここで、流入 BOD 50 mg/L の HRT 30 d の DO・クロフィル a 値が低いのは、実験初期段階に水温が低く、流入負荷の設定も低く、藻類の繁殖が良好に行えていなかったためである）。この結果から次の 2 つのことが考えられる。1 つは、藻類の繁殖がありクロフィル a もあるが、藻類からの酸素の供給より槽内で消費される酸素の方が多いため、槽内の DO が低い値を示した。2 つ目は、藻類を槽内に維持することができなくなったため、DO やクロフィル a の値が低い値を示した。1 つ目の原因としては、流入負荷が高過ぎるため、好氣的に処理する物質の供給が増加し、槽内の藻類が光合成により生成する酸素量より、好気処理に使用される酸素量の方が多くなったため、槽内の DO が維持できなくなった。もしくは、HRT が短いため、光合成で生成された酸素が、処理水と一緒に槽外に排出され、DO が維持できなくなってしまったとも考えられる。2 つ目の原因としては、流入負荷が増えることで、アンモニア性窒素などの藻類繁殖に悪影響を与える毒性物質の濃度が高まり、槽内で藻類の繁殖が進まなくなったため、もしくは、短い HRT のため、藻類の繁殖速度より処理水と一緒に槽外へ排出される藻類の速度の方が速まり、槽内に藻類が維持できなくなったとも考えられる。今回の調査では、詳細な理由は不明だが、単一もしくは複数の原因により、発生したと考えられる。次に D-BOD を確認すると、流入 BOD 50 mg/L では HRT 2 d が、流入 BOD 100 mg/L では HRT 2 d が、流入 BOD 200 mg/L では HRT 5 d が高い値を示している。藻類を含まない溶解性のみの値であるため、流入水と処理水の値がほぼ同程度であるということは、流入水の処理が完全に行われないまま処理水として流れ出ていると考えられ、T-BOD に関しても、処理水中に藻類と未処理の下水が混在していると考えられる。このように、T-BOD のようなトータルサンプルのみの確認では、その値が未処理の下水由来なのか、それとも処理中に発生した藻類の影響なのか、確認することは不可能である。そのため、その他の因子に関しても合わせて確認することが必要である。ラグーン処理では、反応槽内に溜めた下水に藻類が十分に繁殖し、その藻類から発生される酸素を使い、下水中の汚濁物質を好気処理することが基本であるため、藻類濃度を示すクロフィル a や槽内酸素濃度の DO 値が重要であり、その他、処理水中の藻類を含まない溶解性のみの汚濁負荷の指標である D-BOD が重要な指標となる。今回の実験により、汚濁物の処理を考えた場合、ラグーンがシステムとして機能している設定条件は、流入 BOD 50 mg/L の場合 HRT 5 d 以上、流入 BOD 100 mg/L の場合 HRT 10 d 以上、流入 BOD 200 mg/L の場合 HRT 10 d 以上が必要である。

測定期間中の大腸菌群数の値は、各流入 BOD 設定値で HRT が短くなるごとに値が大きくなっていく傾向にあった。流入 BOD 50 mg/L であれば HRT 5 d から、流入 BOD 100 mg/L であれば HRT 10 d から、流入 BOD 200 mg/L であれば HRT 20 d から値が増加した。今回の実験では、処理が良好に行えている場合、大腸菌群数は 1.0×10^4 個/ml 程度に抑えることが可能であった。

(2) ラグーン後段に植生帯を設置した高度処理実験に関する検討

図-6 に、各 HRT ごとの処理水が安定した期間のみの T-BOD、クロフィル a の平均値を示す。HRT がblankで 5d、植生帯 1 で 5d、植生帯 2 で 5d（以下、「HRT blank, 植生帯 1, 植生帯 2 d」と表示する。）以上の設定条件では、植生帯処理水は流入水に比べ T-BOD、クロフィル a とともに低く、植生帯の遮光、沈殿効果が見られた。しかし、HRT 2, 1, 2d 設定時には、T-BOD、クロフィル a とともに、HRT 2d の植生帯 2 で若干上昇、HRT がその半分の

設定の植生帯 1 ではさらに高い値を示し、特に T-BOD に関しては流入水に近い値であった。さらに、それ以降に行った短い HRT 条件では、両項目ともに比較的高い値を示し、T-BOD では流入水に比べ処理水が若干低い値であったが、クロフィル a は

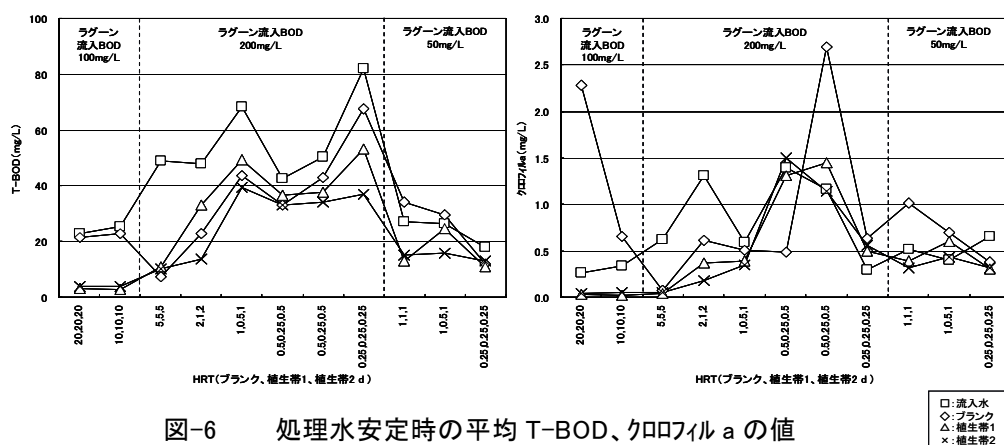


図-6 処理水安定時の平均 T-BOD、クロフィル a の値

流入水と処理水がほぼ同程度であった。この理由としては、HRT を短く設定することで、池への送水量が多くなったことにより、植生帯の遮光や沈降作用により藻類濃度の低下の効果が現れる前に、池内の水が押し流されてしまうため、流入水と処理水がほぼ同様の値になったと考えられる。T-BOD とクロフィル a の差に関しては、様々な含有物を含む T-BOD に比べクロフィル a 値に影響する藻類の方が高い浮遊性を持っているため、T-BOD のうち比較的比重が重いものが先に沈降し、軽い藻類はほぼすべてが水に押し流され、濃度に差が生じたと考えられる。このため、植生帯の適切な HRT は、押し出し流れの影響を若干受けているものの、クロフィル a 値が比較的低い値であり、かつ T-BOD の影響も低い、HRT2d が藻類流出を抑制するための限界ラインであると考えられる。

7. 最適な下水処理手法の検討

財政的な余裕に乏しい発展途上国においては、建設費及び維持管理費が安価となり、かつ運転、維持管理が容易である処理方法を選定する事が重要である。具体的には、①電力事情、②技術的な成熟度、③気候条件への配慮、④低濃度流入水質への対応性、⑤維持管理性を勘案して処理方式を選定する必要がある。

これまで発展途上国では、主として、標準活性汚泥法、安定化池法、オキシデーションディッチ法、エアレーティッドラグーン法が採用されてきた。

上述の条件を勘案すると、安定化池法は、嫌気性池＋通性池＋熟成池から構成される処理方式であり、他の処理方式に比べて必要用地が大きい反面、池構造は簡素で、かつ機械的な装置を全く必要としない利点があることから、用地的な制約がない場合は、発展途上国に最も適する処理方式であると考えられる。

8. 住民参加方式の検討

住民の下水道システムに関する理解が十分ではないことから、住民参加方式の検討を行うにあたり、タイにおける住民参加の状況について調査を行った。

その結果、タイにおいては、下水道事業に関する住民参加はほとんど行われておらず、地域社会は下水道の必要性、メリット・デメリットに無関心である。このことにより、下水処理場の建設が始まり、維持管理費の回収を考える用になった時点で問題が発生しているようである。また、地域社会は、下水処理よりも洪水防止の利益が優先される傾向にある。

しかしながら、Dankhantod 市の事例では、住民が計画の実施、ゴミ拾い、水路の保全を行っており、結果的に、水路の汚濁、美観の改善につながった。また、このことにより低コストの植生浄化システムを可能とした。このことから、住民参加の必要性を裏付ける一つの事例であると考えられる。

9. まとめ

今回の調査では、タイ及びインドネシアにおける現地調査や、沖縄におけるラグーン（安定化池）の実験結果等を踏まえて低コスト型下水道システムの開発に関する検討を行ってきた。その結果、これまでにわかったいくつかの課題を解決しなければならないことを前提に、急激に悪化している発展途上国の環境改善に対して、即効性があり、低コストで簡便な方策として、下記項目を提言としてまとめた。

(1) インターセプターによる下水道整備の推進

①管渠内への汚泥の堆積防止、②住民や施工業者への啓蒙活動、③工場排水の流入を防止する法制度の整備、④河川水の逆流を防ぐ技術の開発

(2) 低コストで維持管理の容易な処理方式の採用

①ラグーン（安定化池）方式の採用、②池構造の簡素化、③インターセプター管内での汚水浄化の適切な評価

今後は、現地調査によるさらなる情報収集行い、知見の集積に努める必要があると共に、各種の調査研究において低コスト型下水道システムを構築するために有望であると判断される新たな手法等については、実験施設を設けるなどして現地での採用を積極的に進め、その適用性を見極めることも必要である。

謝辞:

本研究の一部は、沖縄県と国土技術政策総合研究所の共同研究「ラグーンおよび後段処理システムに関する研究」（平成 13～16 年度）として実施されている。協力をいただいた沖縄県の関係各位に御礼申し上げる次第である。

なお、本調査研究は、政府開発援助研究費により実施されたものである。