

## IV. 病原微生物対策技術

## タイにおける下水中病原微生物の除去

## Pathogen Reduction from Sewage in Thailand

お ぎ き ま さ あ き す わ ま も る す や ま あ き こ  
尾 崎 正 明 : 諏 訪 守 : 陶 山 明 子  
Masaaki OZAKI Mamoru SUWA Akiko SUYAMA

## はじめに

モンスーン・アジア都市部においては、都市化の進展、人口の集中などに伴う水環境の悪化が懸念されています。特に、ヒトからの排泄物に含まれる原虫やウイルスなどの汚染を防ぐことは、病原微生物に起因する水系感染症の拡大を防止するためにも重要です。そのため、下水を含めた水環境における実態解明とともに、効果的な対策を講ずることが必要となっています。

土木研究所では、平成16年度からモンスーン・アジア地域に属するタイにおいて、下水中の病原微生物の実態や、現地で採用されているラグーン処理施設での除去特性の解明に取り組んできました。また、雨季の流出を考慮して、平成17年度には市内の水路を対象に流量・水質調査を行いました。ここでは、現地調査で得られた知見に基づき、タイにおける下水中病原微生物の除去について紹介します。

## I. タイの下水道

タイでは独自の土壌浸透式トイレを発達させてきたため、その下水はし尿を含まないグレイウォーター (gray water) とされています。下水処理にはラグーン処理施設が用いられることが多く、藻類の光合成による酸素の発生を廃水の浄化に利用しています。しかし、有機物濃度が非常に低いことから、池が一次生産 (primary production) の場となっている事例が報告されています。

また、ラグーン処理施設は、市民が散歩をしたり、魚を捕まえたりするなど、ある種の憩いの場となっています。これまでは、下水にはし尿等による衛生上の障害が少ないと考えられてきました。しかし、今回の調査では、トイレからの越流水や雨水に伴う流出の可能性があると考え、細菌、原虫、ウイルスなどの病原微生物を対象にして、それらの除去特性を調べています。

さらに、モンスーン・アジア地域に属するため、雨季と乾季の区別があり、雨季には大量の雨水が下水に流入し、薄められた下水の一部が河川に流出します。将来的には、季節変動を考慮した下水道の整備について、提案をしていきたいと考えています。

## II. コンケン市下水道の概要

今回、調査を行ったコンケン市は、タイ東北部に位置する工業都市で、メコン川の支流であるポン川の流域にあります。一般に、個々の家庭では土壌浸透式トイレが使われており、汚泥が一杯になるとバキュームカーが回収します。しかし、最近コンケン市では、市街地のビルや郊外の新興住宅において腐敗槽 (セプティックタンク) の設置を指導しており、その上澄みが生活排水とともに下水道に排水されるようになりました。そのため、下水もグレイウォーターから次第に変化していくものと考えています。

排水施設は、家庭からの排水と雨水を集める合流管です。図1に示すように、最近、市の南側では市街地の水路に沿って遮集管が整備されました。遮集管は普段は排水を収集しますが、雨天時には雨水が

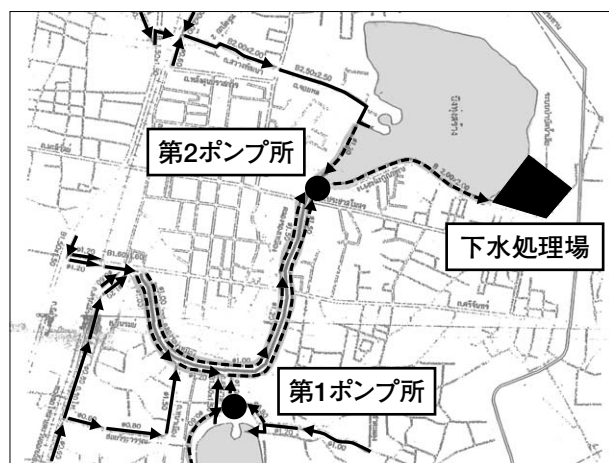


図1 排水施設の分布（図面の上が北）

あふれないように、途中に設置された堰<sup>せき</sup>を開き水路に放流する構造になっています。また、晴天時には排水が水路に流れ込まないことから、市の担当者的話では、整備後は水路のにおいが改善されたそうです。排水施設により集められた排水と一部の雨水は、ラグーン処理施設において処理されます。また、遮集管に沿った水路は、次第に覆蓋され車道として利用されるようになっていきます。オープン水路の部分は、第2ポンプ所の上流部の一部区間のみとなっています。

市内水路を対象とした流量・水質調査では、雨天時の流出ピークを捉えることを目的としました。しかし、都市内の水路であるため流域面積が小さいことから、1時間以内に流達してしまい、水路での流出ピークを捉えることは困難でした。通常は $1\text{m}^3/\text{sec}$ 程度の流量でも、雨天時は $20\text{m}^3/\text{sec}$ を超えています。調査結果から、雨天時に水路に流出する汚濁量、ラグーン処理施設の水质保全効果を推定したいと考えています。

### Ⅲ. 調査計画

#### (1) ラグーン処理施設での実態調査

東南アジア等で下水処理に用いられることの多いラグーン処理施設は、曝気の有無により、エアレーション池と安定池に分類されます。また、処理水の仕上げのために、植生浄化施設を伴う場合があります。

今回の調査では、コンケン市およびバンコクのアジア工科大学（AIT）に隣接する2つのラグーン処

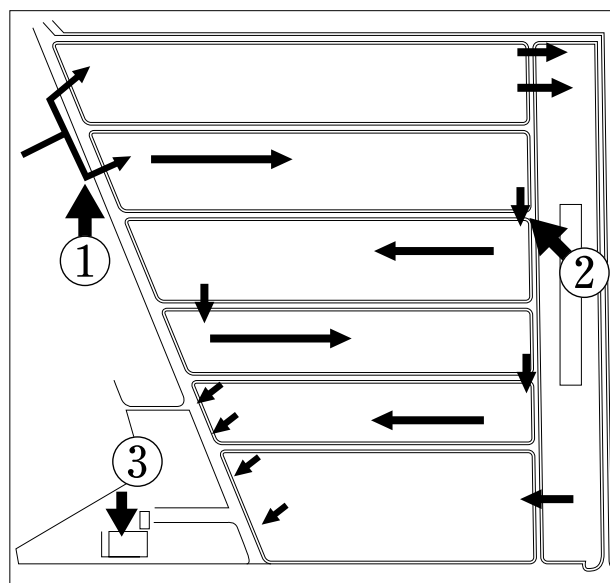


図2 コンケン市ラグーン処理施設  
（①流入、②曝気後、③流出）

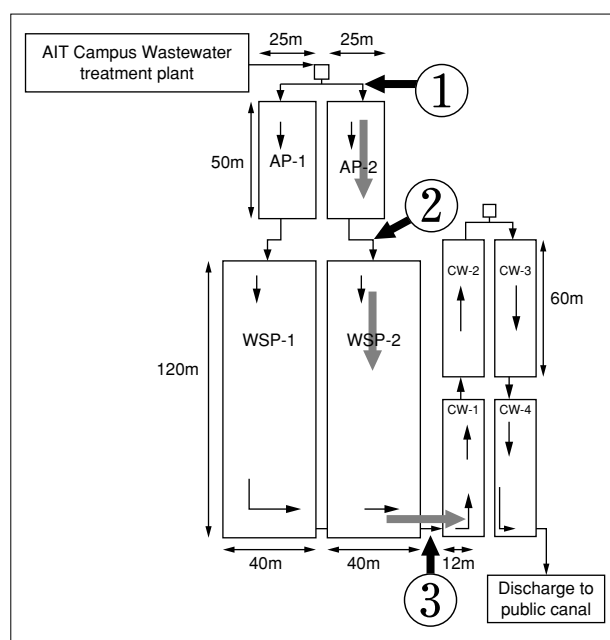


図3 AIT構内のラグーン処理施設  
（①流入、②第1池流出、③流出）

理施設を対象としました。コンケン市では個々の家庭で土壌浸透式トイレあるいはセパティックタンクが設置されており、その越流水や上澄流水が生活排水とともにラグーンに流入するものと考えられます。

一方、AITでは水洗トイレによりし尿はそのまま下水中に排水されて、ラグーン処理施設に流入します。各々のラグーン施設の概要を図2、3に示します。

コンケン市のラグーンは、植生浄化施設は無く、3池のラグーンから構成されており、第1池と第2

池では間欠曝気が、第3池では安定化が行われます。2系列からなり、1系列分の総容量は46,000m<sup>3</sup>、平均水深は約2mであり、ポンプ場の運転状況をヒアリングして滞留時間は3～4日と推定しました。

一方、AITは、下水管は合流管であり、排水は雨水とともにラグーンに送水されます。AITラグーンは曝気施設を持たない2池から構成されており、容量は各々2,125m<sup>3</sup>、3,360m<sup>3</sup>、水深は1.7m、0.7mです。雨季の滞留時間は各々7日、11日、乾季はその2倍と推定されています。

現地調査は、雨季から乾季にかけて、コンケン市ラグーンでは流入下水、第2池流出水、第3池流出水を、AITラグーンでは流入下水、第1池流出水、第2池流出水を、各々3試料について月に1回のペースで採水を行いました。

## (2) 河川での実態調査

コンケンの都市河川における実態調査箇所は図1に示す第2ポンプ所の手前です。降雨時の越流水が河川に流入する複数の地点がありますが、その最終位置で採水を行いました。降雨時の汚濁負荷上昇時に4回、比較対照として晴天時に3回の採水を実施しています。試料分析では水質の他に、濁度、河川流量の測定を行いました。

## (3) 測定方法

各々の調査では、生物化学的酸素要求量 (BOD) や化学的酸素要求量 (COD) などの有機物の指標とともに、各種の微生物についても分析対象としました。対象とした微生物は、腸管系病原細菌としての大腸菌群 (Total coliform) と大腸菌 (*E. coli*) 数、並びに病原微生物としてジアルジア、クリプトスポリジウム、ノロウイルス遺伝子 (以下、ノロウイルスという) です。各々の測定法を以下に示します。

大腸菌群数は平板培養法あるいはMPN法としました。

原虫類のジアルジア、クリプトスポリジウムは、試料を遠心濃縮後、免疫磁気ビーズ法により回収し、間接蛍光抗体染色による顕微鏡観察としました。免疫ビーズはダイナビーズGC-コンボキット (ダイナル社)、間接蛍光抗体染色にはHYDORO-FLUOR-Comboキット (ENSYS Inc.) を用いました。

ノロウイルスは、ポリエチレングリコール沈殿法

により試料中のウイルスを濃縮し、ウイルス濃縮液からのウイルスのゲノムRNAの抽出には、QIAamp Viral RNA Kit (QIAGEN) を使用しました。抽出したウイルスRNAはDNase処理後、RNeasy MinElute Clean up Kit (QIAGEN) を用いて精製しました。Omniscript RT Kit (QIAGEN) を用いた逆転写反応によりcDNAを作製し、リアルタイムPCRにより定量を行っています。使用したプライマーおよびプローブは、食安監発第1105001号「ノロウイルスの検出法について」に準じました。リアルタイムPCR装置はLightCycler (ロシュ・ダイアグノスティクス社) を使用しました。

## IV. 測定結果と考察

### (1) ラグーン処理施設での実態調査

#### — 有機物・大腸菌群数・大腸菌

コンケン市ラグーンにおける調査結果を図4に示します。下水中の有機物の指標である生物化学的酸素要求量 (BOD) は、乾季に高くなることが観察されたものの、期間を通じて10～30mg/Lと低く、ほとんど除去されませんでした。また、化学的酸素要求量 (COD) はBODと比較して高く、値が80～120mg/Lと高くなる乾季では30～50%程度が除去されました。一方、病原微生物の指標である大腸菌群数は、10<sup>3</sup>～10<sup>5</sup>cfu/mLと下水中の値が安定しないものの、有機物と比較すると一定の処理効果が見られました。これに対して大腸菌は、BODやCODなど有機物と異なり、下水中の値は雨季に10<sup>4</sup>cfu/mLと高く、乾季にはほとんど流入が見られませんでした。また、流入の高かった、雨季には安定した処理効果が見られました。

次に、AITラグーンにおける調査結果を図5に示します。下水中のBOD、CODは乾季に入ると次第に増加する傾向が見られ、各々60～100mg/L、150～300mg/Lとコンケン市ラグーンと比較すると高い値が観察されました。また、各々の処理についても、安定した効果が確認されました。

一方、下水中の大腸菌群は10<sup>7</sup>～10<sup>9</sup>MPN/100mL、また、大腸菌は10<sup>6</sup>～10<sup>8</sup>MPN/100mLと高く、特に乾季において安定した処理効果が見られました。処理特性として、BOD、CODに関しては第1池の

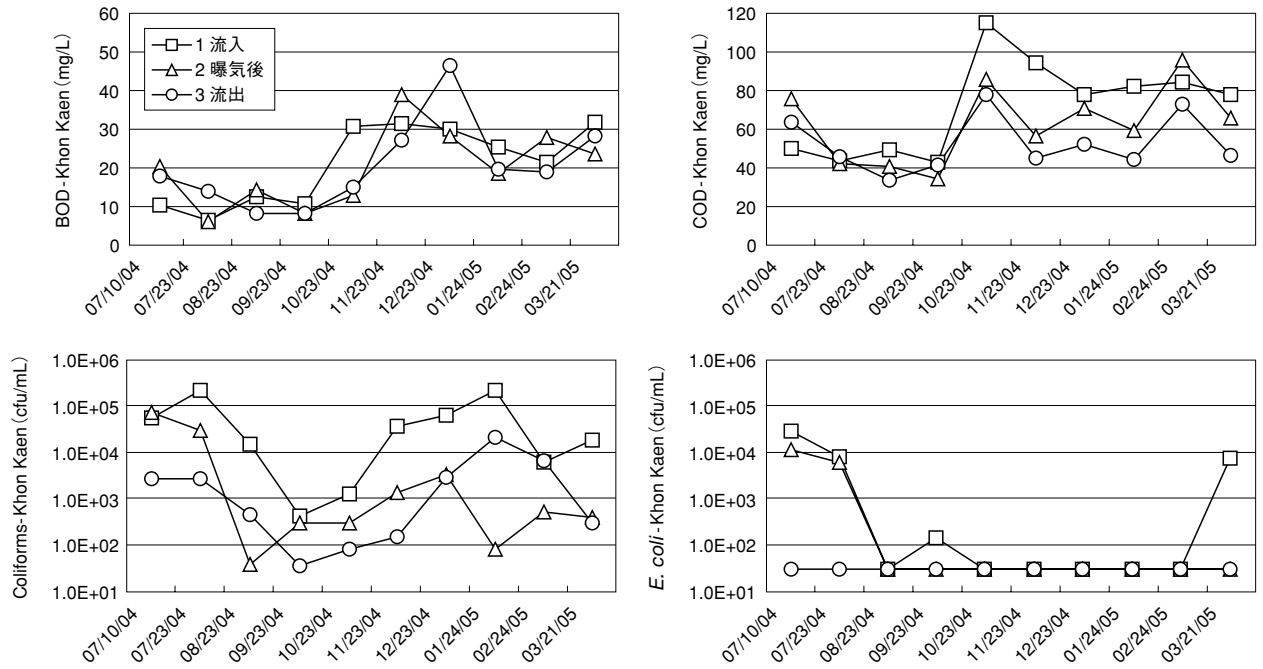


図4 コンケン市ラグーンにおけるBOD、COD、大腸菌群および大腸菌の処理特性

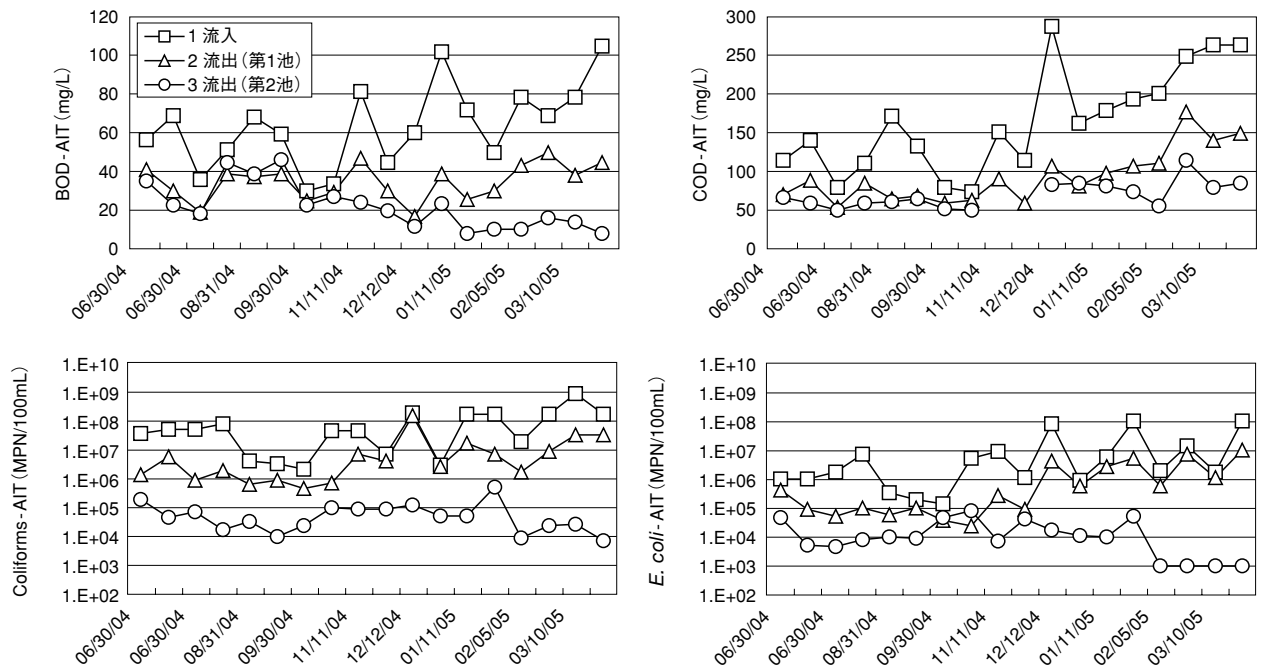


図5 AITラグーンにおけるBOD、COD、大腸菌群および大腸菌の処理特性

効果が、大腸菌群、大腸菌に関しては第2池の効果が大きい傾向が観察されました。

コンケン市とAITを比較すると、AITでは下水中の有機物の値が高くなるだけでなく、下水中の大腸菌群、大腸菌の濃度も1オーダー以上高くなることが分かりました。特に、大腸菌はシーズンを通じて高い値を示しており、水洗トイレから尿が下水中に直接排出されることが原因と考えられました。

処理特性については、BOD、CODが下水中の濃度や季節変動に伴う影響を受けやすいのに対して、大腸菌群、大腸菌は比較的安定していることが分かりました。以上に示したように、ラグーンにおいて大腸菌群、大腸菌といった指標細菌が安定して処理されることから、それらが指標としている腸管系病原細菌による水系感染症の拡大防止に対し、一定の効果を有するものと推測しています。

## (2) ラグーン処理施設での実態調査—病原微生物

表1に原虫とウイルスの測定結果を、比較のため、大腸菌群の測定結果とともに示します。ノロウイルスはGI型とGII型がコンケン市およびAITの全流入下水から検出されました。AITの流入下水から検出されたノロウイルスの最大濃度は、コンケン市の流入下水と比較して1～2オーダー程度高いものでした。原虫類のうち、ジアルジアはAITの流入下水中の最大濃度はコンケンのもよりも2オーダー高いものでした。クリプトスポリジウムはAITの流入下水での検出割合は比較的高いものでしたが、その検出濃度はジアルジアと比較して低濃度でした。また、コンケン市の流入下水からはクリプトスポリジウムは検出されませんでした。

このように、コンケン市とAITの流入下水において、大腸菌群だけでなく各病原微生物濃度に大きな違いが見られましたが、これは下水の排除方式の違いを示すだけでなく、割合は少ないもののコンケン市におけるし尿の混入を示すものと考えています。コンケン市では各々の家庭に土壤浸透式トイレあるいはセプティックタンクが設置されていますが、AITに比較して流入割合は低いものの、し尿を含む下水がラグーンへ流入している可能性があると考えています。

コンケン市のラグーン施設におけるノロウイルスの除去率は、GI型82.4～99.99%以上、GII型0～99.99%以上、AITのラグーン施設ではGI型0～99.9%以上、GII型56.2～99.99%以上と、採水日によって大きく変動しました。コリファージの浮遊状粒子（藻類など）への吸脱着現象に溶存酸素濃度が影響を及ぼす報告があることから、ウイルス除去率とラグーン内の溶存酸素濃度や日照時間、降水量、BOD、COD、SS、季節（乾季、雨季）との関係を整理しましたが、有意な相関は見られませんでした。

ジアルジアの除去率はコンケン市ラグーンでは99.3～100%、AITラグーンでは94.6～100%であり、大腸菌群の場合にはコンケン市ラグーン0～99.6%、AITラグーン98.1～99.9%であり、一部のデータを除けば、ジアルジアと大腸菌群はラグーンにより比較的安定して除去が行われていました。

両ラグーン処理施設において、ノロウイルスの除去率は大きな変動を示しており、放流先の水質リス

クを低減させるために、これらの要因を解明するとともに、安定した除去を行うための対策を講じる必要があるものと考えています。

## (3) 河川での実態調査

コンケン市市街地河川における降雨時の調査結果を表2に示します。総検体数22検体のうち、クリプトスポリジウムはすべて不検出、ジアルジアは10検体の試料（検出割合45%）から $5.0 \times 10^0 \sim 2.0 \times 10^2$  (cysts/L) 濃度、ノロウイルスは1検体（検出割合9%）からGI型が $1.6 \times 10^2$  コピー/L、GII型が $5.3 \times 10^2$  コピー/L濃度検出されました。これらの検出濃度・割合は、表1に示した流入下水中の各病原微生物検出濃度・割合と比較して特段の濃度上昇等は見られませんでした。これは土壤浸透式トイレあるいはセプティックタンクの設置により病原微生物の流出が抑制されている、もしくは雨水により希釈されているものと考えています。現在、越流水の影響を受けない平常時（晴天時）の河川水について引き続き調査を行っています。

## V. 流域内の水利用

コンケン市ではラグーン処理施設からの放流水が、市近郊の小河川を経て、メコン川の支流であるポン川に流入します。小河川には多くの魚網が設置されており、漁が盛んに行われているようです。また、住民が水浴をしている様子も伺えました。そのため、処理水中の病原微生物だけでなく、雨天時に水路へ排出されるものまで考慮して、水系感染症のリスクを評価する必要があると考えています。

現在、飲用水として都市部ではペットボトルが、郊外部では雨水が主に利用されています。各戸に配水される水道は、浄水処理は行われているものの、途中での汚染が懸念されるためか、主に雑用水として利用されています。

今回の調査では、既存の土壤浸透式トイレにより病原微生物の流出が1～2オーダー程度抑制されることが分かりました。流域内の水系感染症の発症を防ぐことを目的として、既存の水利用システムを考慮した、最適な水利用システムについて提案していきたいと考えています。

表1 各病原微生物の検出濃度範囲と除去率

病原微生物 地点	大腸菌群 (cfuor MPN/ml)	ノロウイルス GI 型 (copies/L)	ノロウイルス GII 型 (copies/L)	ジアルジア (cysts/L)	クリプトスポリジウム (oocysts)	
記載データ	H16. 6月～H17. 2, 3月	H16. 6月～H17. 3月		H16. 6月～H17. 3月		
コンケン	流入下水	$4.4 \times 10^2 \sim 2.3 \times 10^5$	$8.6 \times 10^3 \sim 9.7 \times 10^5$	$4.1 \times 10^2 \sim 1.6 \times 10^5$	ND $\sim 1.5 \times 10^2$ [13/16]	ND [0/16]
	第2池 流出水	$4.0 \times 10^1 \sim 3.0 \times 10^4$	ND $\sim 1.7 \times 10^4$	ND $\sim 1.7 \times 10^4$	ND $\sim 2.2 \times 10^1$ [4/16]	ND [0/16]
	第3池 流出水	$3.8 \times 10^1 \sim 2.2 \times 10^4$	ND $\sim 6.9 \times 10^3$	ND $\sim 1.0 \times 10^4$	ND $\sim 1.0 \times 10^0$ [1/16]	ND [0/16]
	除去率 の範囲	0% $\sim$ 99.6%	82.4% $\sim$ 100%	0% $\sim$ 100%	99.3% $\sim$ 100%	—
	平均 除去率	83.2%	95.2%	89.0%	99.9%	—
AIT	流入下水	$2.1 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^6$	$2.7 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^7$	$1.1 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^6$	$2.6 \times 10^2 \sim 1.8 \times 10^4$ [21/21]	ND $\sim 1.6 \times 10^1$ [14/21]
	第2池 流出水	$4.6 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^6$	$6.2 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^6$	$1.3 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^6$	$1.1 \times 10^1 \sim 4.1 \times 10^2$ [13/13]	ND $\sim 2.0 \times 10^0$ [2/13]
	第3池 流出水	$7.0 \times 10^1 \sim 5.0 \times 10^3$	$3.6 \times 10^1 \sim 4.2 \times 10^5$	ND $\sim 6.0 \times 10^4$	ND $\sim 5.6 \times 10^1$ [20/21]	ND [0/21]
	除去率 の範囲	98.1% $\sim$ 99.9%	0% $\sim$ 99.9%	56.2% $\sim$ 100%	94.6% $\sim$ 100%	100%
	平均 除去率	99.6%	74.1%	92.1%	99.4%	100%

原虫類の欄 [ ]内：上段検出検体数、下段検体数。ND：不検出

表2 コンケン市の都市河川の調査結果

	クリプトスポリジウム (oocysts/L)	ジアルジア (cysts/L)	ノロウイルス GI 型 (copies/L)	ノロウイルス GII 型 (oocysts)
検出濃度範囲	ND	$5.0 \times 10^0 \sim 2.0 \times 10^2$	$1.6 \times 10^2$	$5.3 \times 10^2$
検出／分析検体数	0/22	10/22	1/22	1/22

ND：不検出

## おわりに

コンケン市ではグレイウォーターのため有機物濃度が低く、ラグーンの除去率が低い結果でした。

一方、し尿を含むAITの場合は、特に乾季において有機物が安定して処理される傾向がうかがえました。

また、下水排除方式の違いにより、流入下水中の病原微生物濃度に大きな違いが見られました。ラグーンでのノロウイルスの除去率は比較的大きな変動を示しましたが、ジアルジアおよび大腸菌群の除去は安定して行われていました。

コンケン市では土壌浸透式トイレあるいはセプティックタンクが設置されているため、病原微生物の流出がある程度抑制されていると考えられました。雨天時においても、特に河川への汚濁負荷流出の上昇は見られませんでした。

本研究の一部は、文部科学省人・自然・地球共生プロジェクト「アジア・モンスーン地域における水資源の安全性に関わるリスクマネジメントシステムの構築」により行われました。また、本調査はアジア工科大学のシピン博士、コンケン大学のパイラヤ博士と共同で実施したものです。

## 文 献

- 1) 中本信忠ほか：熱帯モンスーン圏における藻類を利用した水質浄化の可能性, 国際協力研究, **18-1** (35) : 17-28, 2002.
- 2) 尾崎正明：タイ・コンケン市における生活排水対策, 土木技術資料, **48-2** : 11-12, 2006.
- 3) 諏訪守ほか：ラグーンによる病原微生物の除去特性, 第41回下水道研究発表会講演集, 942-944, 2004.
- 4) 諏訪守ほか：タイにおける病原微生物の実態とラグーンにおける除去, 第39回水環境学会年会講演集, 538, 2005.
- 5) 陶山明子ほか：リアルタイム RT-PCR法による下水および下水処理水中の腸管系ウイルスの検出, 第39回水環境学会年会講演集, 626, 2005.
- 6) 陶山明子ほか：日本およびタイにおける腸管系ウイルスの実態と下水処理施設における消長, 第42回下水道研究発表会講演集, 927-929, 2005.
- 7) 尾崎正明ほか：タイにおける下水排除方式とラグーンによる除去特性, 第43回下水道研究発表会講演集, 743-745, 2006.
- 8) 陶山明子ほか：タイにおける病原微生物の定量とラグーンによる除去特性, 第43回下水道研究発表会講演集, 896-898, 2006.
- 9) 大垣真一郎ほか：酸化池内でのコリファージの挙動に及ぼす日射の影響, 衛生工学研究論文集, **22** : 163-172, 1986.