

◆特集：下水道が守る水、環境、資源の循環◆

モンスーン・アジア地域における下水処理による病原微生物除去

尾崎正明* 諏訪 守**

1. 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る。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となる。そのため、下水を含めた水環境における病原微生物の実態解明とともに、効果的な対策を講ずることが必要となっている。

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た。また、雨水に伴う病原微生物の流出を想定して、平成17～18年度には市内の水路を対象に流量・水質調査を実施した。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する。

2. タイの下水道

タイでは独自の土壤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) とされている。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る。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る¹⁾。

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る。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た。しかし、今回の調査では、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、それらの除去特性を調査した。

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する。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。

3. 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る。一般に、個々の家庭では土壤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する。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。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る。

排水施設は、家庭からの排水と雨水を集める合流管である。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た。遮集管は普段は排水を収集するが、雨天時には雨水が遮集管からあふれないように、途中に設置された堰を開き水路に放流する構造になっている。その結果、市の担当者の話では、晴天時に排水が水路に流れ込まないことから、整備後は水路の

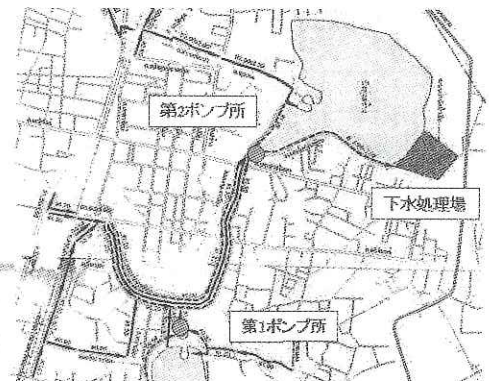


図-1 排水施設の分布 (図面の上が北)

Pathogen Reduction by Sewage Treatment in Monsoon Asia

おいが改善されたようだ。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る。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る。現時点では、オープン水路は第2ポンプ所の上流部の一部区間のみとなっている。

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あった。通常は $1\text{m}^3/\text{sec}$ 未満の流量でも、雨天時は $20\text{m}^3/\text{sec}$ を超えるものとなる。調査結果から、雨天時に水路に流出する汚濁量やラグーン処理施設の水質保全効果について考えたい。

4. 調査計画

4.1 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る。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る。

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) に隣接する二つのラグーン処理施設を対象とした。コンケン市では個々の家庭で土壤浸透式トイレあるいはセプティクタンクが設置されており、その越流水や上澄み流出水が生活排水とともにラグーンに流入すると考えられる。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、ラグーンに流入する。

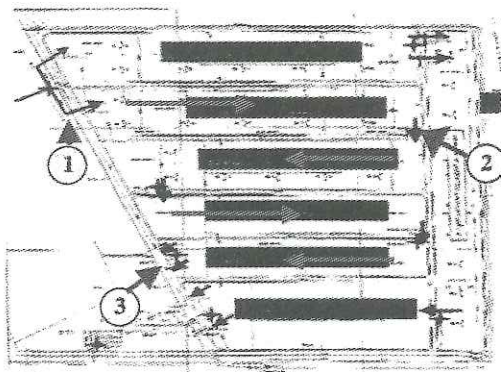


図-2 コンケン市ラグーン処理施設
(①流入、②曝気後、③流出)

各々のラグーン処理施設の概要を図-2、3に示している。

コンケン市のラグーン処理施設は、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、第3池では安定化が行われる。2系列からなり、1系列分の総容量は $46,000\text{m}^3$ 、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日と推定した。

一方、AITのラグーン処理施設は、合流管であり、排水は雨水とともに送水される。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 $2,125\text{m}^3$ 、 $3,360\text{m}^3$ 、水深は 1.7m 、 0.7m となっている。雨季の滞留時間は各々7日、11日、乾季はその2倍と推定される。

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実施した。

4.2 市内水路での実態調査

コンケン市内の水路における実態調査は図-1に示す第2ポンプ所の手前で行った。降雨時の越流水が河川に流入する複数の地点があるが、その最終位置で採水を行ったことになる。平成17~18年度において、降雨に伴い汚濁負荷が上昇した際

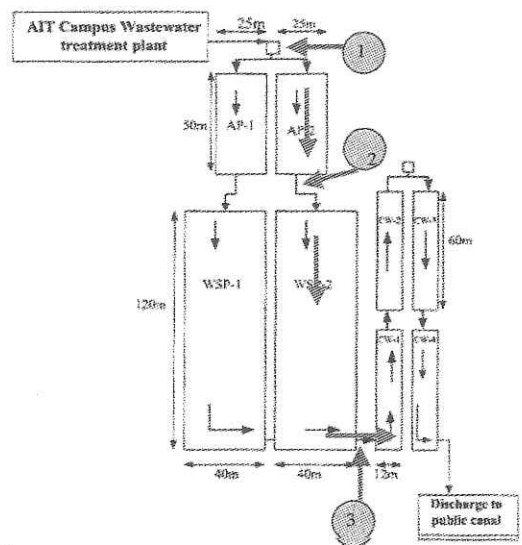


図-3 AIT構内のラグーン処理施設
(①流入、②第1池流出、③流出)

に実施した調査のうち、流出ピークもしくはピーク直後の流出を含むと思われる測定結果について分析を行った。試料分析では水質の他に、濁度、河川流量の測定を行った。

4.3 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)、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) である。

各々の測定法を以下に示す。大腸菌群数は平板培養法あるいはMPN法とした。原虫類のジアルジア、クリプトスポリジウムは、試料を速心濃縮後、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を抽出した。抽出したウイルスRNAは精製後、逆転写反応によりcDNAを作製し、リアルタイムPCRにより定量を行った。

5. 測定結果と考察

5.1 ラグーン処理施設での実態調査—有機物・大腸菌

コンケン市ラグーン及びAITラグーンにおける調査結果を図-4に示す。コンケン市ラグーンでは、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、ほとんど除去されなかった。一方、病原微生物の指標である大腸菌は、BODと異なり、下水中の値は雨季に 10^4 cfu/mLと高いのに対して、乾季にはほとんど流入が見られなかった。また、流入の高い雨季には安定した処理効果が見られた。

次に、AITラグーンでは、下水中のBODは乾季に入ると次第に増加する傾向が見られ、60~100mg/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た。また、処理についても、安定した効果が確認された。一方、下水中の大腸菌は 10^6 ~ 10^8 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た。処理特性として、BODに関しては第1池の効果が、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、下水中の大腸菌の濃度も1オーダー以上高くなることが分

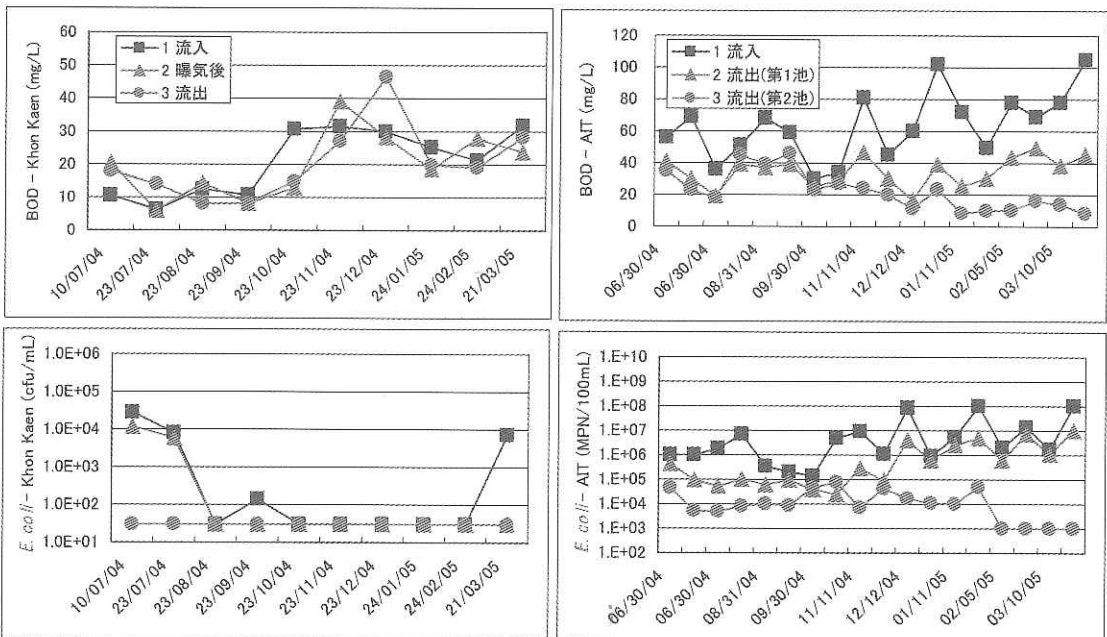


図-4 コンケン市ラグーン及びAITラグーンにおけるBODおよび大腸菌の処理特性

かった。特に、大腸菌はシーズンを通じて高い値を示しており、水洗トイレからし尿が下水中に直接排出されることが原因と考えられた。処理特性については、BOD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、大腸菌は比較的安定していることが分かった。

以上のように、ラグーン処理施設においては、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された。

5.2 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あった。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、コンケンのものよりも2オーダー高いものであった。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あったが、その検出濃度はジアルジアと比較して低濃度であった。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なかった。

以上のように、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も大きな違いが見られた。AITにおける濃度の高さは下水の排除方式の違いを示すものであり、コンケン市における病原性微生物の検出はし尿混入

の可能性を示すものと考えられる。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るが、雨水に伴う流出だけでなくし尿処理施設からの越流により、シーズンを通じてし尿を含む排水がラグーンへ流入している可能性がある。

コンケン市ラグーンでのノロウイルス除去率は、GI型82.4~99.99%以上、GII型0~99.99%以上、AITラグーンでは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²⁾、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）との関係を整理したが、有意な相関は見られなかった。

一方、ジアルジア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、大腸菌群除去率はコンケン市ラグーンでは0~99.6%、AITラグーンでは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た。

以上のように、ラグーン処理施設におけるノロウイルスの除去率は大きな変動を示していることから、放流先の水質リスクを低減させるためには、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。

5.3 市内水路での実態調査

コンケン市内水路における平成17年度の調査結果を表-2に示す。降雨時の汚濁負荷上昇時や晴

表-1 各病原微生物の検出濃度範囲と除去率

地 点	微生物	大腸菌群	ノロウイルスG1	ノロウイルスG2	ジアルジア	クリプトスポリジウム
		(cfu or MPN/ml)	(copies/L)	(copies/L)	(cysts/L)	(oocysts/L)
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	4.4E+2~2.3E+5	8.6E+3~9.7E+5	4.1E+2~1.6E+5	ND~1.5E+2 [13/16]	ND [0/16]
	第2池流出水	4.0E+1~3.0E+4	ND~1.7E+4	ND~1.7E+4	ND~2.2E+1 [4/16]	ND [0/16]
	第3池流出水	3.8E+1~2.2E+4	ND~6.9E+3	ND~1.0E+4	ND~1.0E+0 [1/16]	ND [0/16]
	除去率の範囲 (%)	0~99.6	82.4~100	0~100	99.3~100	—
	平均除去率 (%)	83.2	95.2	89.0	99.9	—
AIT	流入下水	2.1E+4~9.0E+6	2.7E+4~1.8E+7	1.1E+4~2.0E+6	2.6E+2~1.8E+4 [21/21]	ND~1.6E+1 [14/21]
	第1池流出水	4.6E+3~1.6E+6	6.2E+4~2.2E+6	1.3E+4~1.3E+6	1.1E+1~4.1E+2 [13/13]	ND~2.0E+0 [2/13]
	第2池流出水	7.0E+1~5.0E+3	3.6E+1~4.2E+5	ND~6.0E+4	ND~5.6E+1 [20/21]	ND [0/21]
	除去率の範囲 (%)	98.1~99.9	0~99.9	56.2~100	94.6~100	100
	平均除去率 (%)	99.6	74.1	92.1	99.4	100

原虫類の欄〔 〕内：下段検体数、上段検出検体数

表-2 コンケンの都市河川の調査結果

各調査時の 平均流量範囲 (m ³ /s)	項目	大腸菌 (MPN/100ml)	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G1 (copies/L)	ノロウイルスG2 (copies/L)
降雨時流量	検出濃度範囲	5.1E+3 ~ 3.5E+4	ND	5.0E+0 ~ 2.0E+2	1.6E+2	5.3E+2
1.6 ~ 12.6	検出/分析検体数	10/10	0/22	10/22	1/22	1/22
晴天時流量	検出濃度範囲	1.2E+3 ~ 9.2E+5	ND	2.0E+0 ~ 2.6E+1	4.6E+2 ~ 9.3E+2	1.3E+2 ~ 1.1E+4
0.32 ~ 1.56	検出/分析検体数	10/10	0/15	11/15	2/15	15/15
晴天時流量	検出濃度範囲	6.5E+4 ~ 7.7E+5	ND ~ 2.0E+0	2.0E+0 ~ 5.8E+1	8.1E+4 ~ 9.3E+5	4.4E+4 ~ 3.2E+5
0.11 ~ 0.17	検出/分析検体数	15/15	1/15	15/15	15/15	15/15

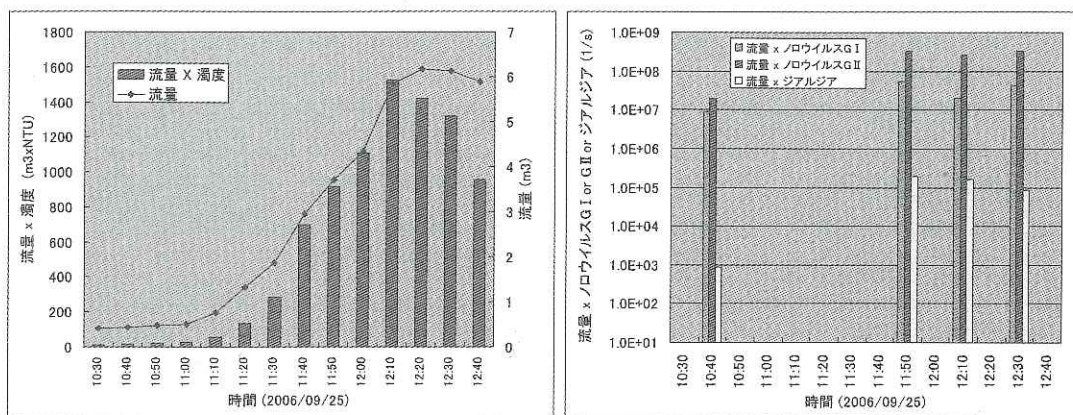


図-5 コンケン市市内水路での実態調査結果

天時における水路での病原微生物の最大検出濃度は、流入下水の検出濃度と比較して同レベルであった。この結果より、雨水に伴う流出が、土壌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られた。

平成18年度の調査結果を図-5に示す。流量と濁度の積で濁度負荷量を示すが、汚濁負荷量は流量の増加時に急激に増大し、ピークの後急速に減少するという、限られた汚濁源の場合に現れる「ファーストフラッシュ」の波形を描く。これに対してノロウイルスやジアルジアの負荷量は、大きな汚濁源を持つ場合に当てはまる流量相似の波形を描き、降雨に伴う高濃度な下水の流出は認められなかった。

以上のように、市内水路では一定量の病原微生物が確認されたことから、し尿処理施設からの流出経路など汚濁負荷源の究明とともに、その対策が今後の課題と考えられた。

6. 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ボン川に流入する。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た。また、住民が水浴をしている様子も伺えた。そのため、処理水中の病原微生物だけでなく、水路に存在す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。

今回の調査では、土壌浸透式トイレや腐敗槽（セプティックタンク）により排水中の病原微生物濃度が1~2オーダー程度抑制されることが分かった。今後は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、最適な排水処理システムについて提案していきたいと考えている。

7. まとめ

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除去率が低い結果であった。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伺えた。

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た。ラグー



写真-1 腐敗槽

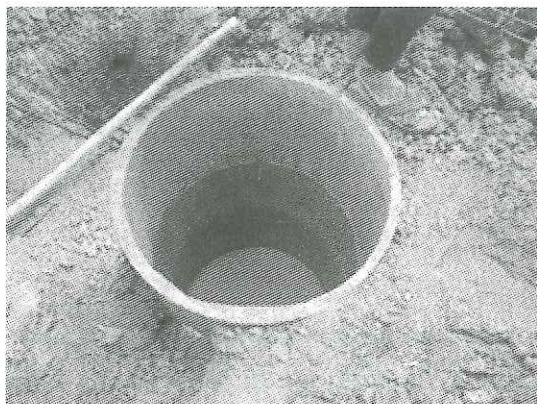


写真-2 土壤浸透式トイレ

ンでのノロウイルス除去率は比較的大きな変動を示したが、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た。

コンケン市市内水路では、写真-1、2に示す土壤浸透式トイレあるいは腐敗槽（セプティックタンク）から越流したと想定される病原微生物が、シーズンを通じて一定量存在していた。しかし、雨天時において、高濃度の病原微生物を含む一時的な下水流出の増大は確認されなかった。

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。

参考文献

- 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) 大垣眞一郎ほか：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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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

- 8) 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
- 9) 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

尾崎正明*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループリサイク
ルチーム上席研究員
Masaaki OZAKI

諏訪 守**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループリサイク
ルチーム主任研究員
Mamoru SUWA