

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

タイにおける安定化池の現地調査から

Feasibility of Greywater Treatment using Algal Growth in the Tropical Monsoon Regions

Field Surveys of Waste Stabilization Ponds in Thailand

中本 信忠*
Nobutada Nakamoto

竹内 準一**
Junichi Takeuchi

要 約

利用可能な化石エネルギー資源に限りがあることから、持続的な開発（sustainable development）は開発途上国のみならず、すべての国が目標とすべき課題で、水質浄化もその例に漏れない。

タイでは独自の土壌浸透式便所を発達させてきたため、その下水は糞尿を含まないグレイウォーター（greywater）が基調である。屋台などから発生した厨房廃水は新鮮な有機物であり、生分解性に優れている。熱帯圏の高水温条件下では自浄作用がいっそう促進されるので、自然の生態系（natural ecosystem）の仕組みに近い手法を採用することで、低コスト・省エネルギーで水質浄化することが可能である。

安定化池（waste stabilization ponds）は電気エネルギーを使って空気を吹き込む代わりに、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。もともと藻類の発生を前提とした廃水処理法であるが、タイでは廃水の有機物濃度が非常に低いので、池が一次生産（primary production）の場となっている事例が多く見られた。

しかし、池を多段化したことで、段階的に浄化が進行し、窒素・リンが効率よく除去されている事例に遭遇した。また、池内で漁獲している場合があり、廃水処理と水産養殖がリンクできる可能性も見られた。さらに、池の容積を流入水量に対して小さく設計することで水流が生じ、植物プランクトンが発生する代わりに付着性の藻類（Cladophora）が発生する。このような糸状性の藻類は網で簡単に回収できるうえ、脱水も容易なので栄養塩の回収を可能にする。脱水した藻体はコンポスト化して肥料にすることが可能である。

以上のように、タイにおける安定化池の状況は問題点もある一方、大幅に改善できる見込みが認められた。本稿では、環境に配慮した衛生処理（environmentally sound sanitation）の中で藻類を利用する水質浄化法の位置付けと実行可能性について考察する。

ABSTRACT

Sustainable development has been referred to as an overall goal for developing as well as developed countries, because of limitations on their available resources. Wastewater treatment should follow these principles, namely, resources and energy-saving strategies.

As the Thai people have adopted traditional sanitation using leaching cesspits, most of

* 元JICA専門家、信州大学繊維学部教授
Former JICA Expert, Professor, Department of Applied Biology, Shinshu University, Japan

** 元JICA専門家、英国エセックス大学大学院生物科学科博士課程
Former JICA Expert, PhD Candidate, Department of Biology, University of Essex, UK

the sewage in Thailand is considered to be “greywater” with less human excreta contamination than true sewage. This greywater consists of fresh organic ingredients, which tend to be easily decomposed by the naturally occurring microorganisms in hot climates. Thus, it can be purified using a low-cost wastewater treatment option very similar to natural ecosystems.

Waste stabilization ponds are one of the energy-saving processes utilizing photosynthetic oxidation instead of mechanical aeration. Although algae are an indispensable component in the process, most of the pond systems in Thailand act as sites for primary production, but not for proper organic decomposition, this being due to the low organic content of the water.

However, it has been proved that the pond systems could be upgraded by adopting a multiple-step treatment process, which would enable the removal of nitrogen and phosphorus. There is also another possible advantage of greywater-fed aquaculture. Higher ratios of inflowing water-to-pond volumes cause slow water currents in pond systems. As a result, filamentous algae such as *Cladophora* replace phytoplankton as primary producers. The algal mat can be harvested easily with a net and dewatered by hand. The harvested algal cells containing a high nutrient concentration can be composted as a fertilizer.

There are still many ways in which waste stabilization ponds in Thailand could be improved as a means of sustainable wastewater disposal and nutrient recycling. This paper discusses the feasibility of greywater treatment linked with algal production in Thailand, with special reference to environmental sanitation.

はじめに

21世紀を迎え、地球上の化石エネルギー資源が限りあるという科学的見地に立ち、持続可能な開発 (sustainable development) はすべての国が目指すべき目標となってきた。タイにおいてもアジェンダ21の掲げる提言を受けて、環境に配慮した循環型社会の形成を志向している^{注1)}。

人間はさまざまな社会活動を行っているが、その存続には「生物としての人間」という制約から逃れることはできないと指摘されている^{注2)}。そのような制約条件の中核として、食糧の摂取と糞尿の排泄が挙げられる。

本稿では、省エネであるだけでなく食糧生産にリンクさせることを可能とする安定化池 (waste stabilization ponds) を用いた廃水処理について、低コストの下水道代替技術 (low-cost alternative sewerage) のひとつとしてその実行可能性 (feasibility) を現地調査の結果を踏まえて論述する。

また、地理的にタイは東南アジアの開発拠点と

なり得る資質を有する。よって、タイの特性に適合した水質浄化法を研究すれば、熱帯モンスーン圏に共通する気候風土に置かれた途上国全般への技術協力への布石になるものと期待される。

I 在来下水道と低コスト廃水処理

公衆衛生のための近代下水道は、コレラ禍対策として19世紀半ばイギリスで創始された^{注3)}。その発想は、生活環境からの排泄物の速やかな排除であった。管渠を通して汚物を河川に廃棄したことで放流先の水質汚濁を新たに招いたが、下水処理技術(散水ろ床法または活性汚泥法)を開発することで対処した。近代下水道の原理は少量の汚物を大量の飲める水を使って長距離運搬することから、最終的にもとの飲料水と汚物に分離できない^{注4)}という欠点を抱えている。元来、糞尿は肥料として資源化が可能な成分であるので、閉鎖性水域に到達すれば富栄養化 (eutrophication) の原因ともなる。

開発途上国における衛生問題が安全な飲料水の確保と糞尿の処理であるのにもかかわらず、西欧

表 - 1 衛生対策と資源回収の視点から見た廃水の類型化*

タイプ	内容	特徴
真正下水**	トイレ, 台所, 風呂	下水道・合併式浄化槽の対象
ブラックウォーター	トイレ廃水	旧式浄化槽の対象(希釈尿)
グレイウォーター	台所, 風呂	タイの下水(屋台廃水を含む)
ライト・グレイウォーター	風呂・洗顔	タイの家庭雑廃水
イエローウォーター	尿	即効性液体肥料になる
ブラウンウォーター	糞***	コンポスト原料になる

注) * Henze and Ledin (2001) の類型化をもとに, タイの実情に応じて加筆修正をした。

** BOD値200mg/l以上を想定している。

*** 感染症のリスクがあるが, 正しくコンポスト化が行われれば衛生障害はない。

で発達した下水道がこの両者を混合することを原理としていることに留意しておく必要がある。すなわち、途上国では西欧型下水道が最適の選択であるとは限らない。今後、その土地の地域特性に応じた下水道の代替手法 (alternatives) を適宜、戦略的に開発していく必要がある。

1. 代替下水道技術の世界的な動向

代替下水道は、在来下水道に対して、低コスト下水道 (low-cost sewerage) あるいは環境持続型下水道 (sustainable sewerage) とほぼ同義語として使われている。これまでに考案されてきた糞尿処理は、水で洗い流す方法 (wet sanitation) と水を使わない方法 (dry sanitation) とに大きく分類することが可能である。

後者の水を使わない方法は、エコサン (ecological sanitation) とも呼ばれ、糞尿分離型の便器を採用して尿は水溶性肥料として回収し、糞便はコンポスト化する。これは水資源を節約し水環境を全く汚染しない、いわば“封じ込め”型の糞尿処理であるので、環境持続性の点では最も優れるが、在来型下水道の水洗トイレとの使用感の差が激しく、エコサンが確実に普及していくためには糞尿に対する社会的、文化的な要因も大きく関与してくるといわれている^{注5)}。

下水道の建設以前の段階で、タイでは廃水を発生源別に個別処理する政策を採ってきた。用便後、水で洗うタイ式水洗便所もその一環であるが、ビルや工場等では建築法で規制し、個別の浄化設備を設置する方針で対応してきた。したがって、糞

尿が直接、下水管に入ることはない。そこに下水の集水 処理システムを構築することは、取りも直さず下水処理を二重に行うことを意味する。

1999年末までにタイ全土で32カ所の公共下水処理場が稼働しているが、各施設に共通している傾向は、流入下水の濃度が低く、設計値の半分以下になっている点である^{注6)}。

その主な原因が後述のように、下水に糞尿が混入しない点と、高水温の条件下で廃水が速やかに微生物分解を受けてしまう点にある。

2. タイの地域特性

下水の定義は排泄物を水系運搬するシステムであることから、“糞尿を水で希釈した物質”といえる^{注7)}。しかしながら、占領政策の影響を受けていないタイでは独自の土壌浸透型のタイ式水洗便所を発達させてきた^{注8)}。

さらに、タイ人は屋台等で外食することが多く、固形物である残飯は回収されるものの、スープ等は路地の側溝から廃棄される。タイではこれが下水の起源になる。すなわち、タイの下水は真正の下水ではなく、スープを希釈したような新鮮な有機物組成であり、糞尿の混じらない廃水は特別にグレイウォーター (greywater) と呼ばれている^{注9)}。これが、タイの水質浄化を語るうえで欠かせない著しい一特徴となっている。

近年、廃水は衛生対策と資源回収の両方の視点から、その水質の持つ特性に応じて分類体系化がされている (表 - 1)。

熱帯モンスーン帯に属するタイでは年間の水温

に変動はないが、雨季と乾季の区別があり、雨季には洪水に見舞われやすい。洪水対策（flood control）は、下水道の役割のひとつであるが、下水管敷設の目的はタイでは、第一義的に雨水排除であった^{注10}。これは西欧型下水道が、コレラ禍対策のため糞尿を生活環境から速やかに排除する意図で発達してきたという背景と大きく異なる点である。

下水処理場が建設される以前に敷設され、路面の溢水を防御するために設置された下水管渠は互いに連結し合い^{注11}、末端が運河への排水ポンプ場あるいは洪水調整池に接続している。

既設の下水管は一種の雨水貯留槽の役目を果たし、平坦な土地では下水管の勾配も乏しいため廃水の輸送は押し出される形で流れる^{注12}。そのため、廃水が発生源から末端の下水処理場に到達するまでに5日程度を要すると推定されている^{注13}。この時間の長さや廃水の組成、高い水温^{注14}の諸条件が重なって、下水が薄いという特徴を生み出している。

現在までに、バンコクでは運河の手前で廃水を堰き止めるインターセプター管が新設されてきているが、易分解性のグレイウォーターが発生源に近い場所から微生物分解を受けるといった基本構図に変わりはない。その結果、雨季には大量の雨水で希釈を受ける一方、乾季には管内で微生物による分解作用が進行し、年間を通じてタイの下水の濃度は低くなる。

3. タイにおける水質汚濁と廃水処理の現状

1997年に深刻な経済危機に直面したものの、タイは東南アジアでは急速な経済発展に成功してきた国とされている。そのため、開発の進行に呼応して水質汚濁をはじめとする環境汚染が拡大したと理解されている^{注3}。

一般的に、それは妥当な見解であろう。しかし、熱帯圏特有の高い水温と降水量という条件が自浄作用（self-purification）を促し、水環境の有機汚濁を軽減させるプラスの要因になっていることも見逃してはならない。

タイの下水道は洪水防止という第一義的な目的

から、まず雨水貯留として下水管渠網だけが導入された。下水管の勾配も乏しく、汚水を積極的に終末処理場に輸送する設計になっていないため、集水能力の点で極めて劣っている。

タイは平坦な土地が多く、下水を効率良く輸送するには勾配をつけて中継ポンプ所を経由しながら集水するか、ポンプで圧力をかけて圧送する必要がある。しかし、既設の都市では大規模な改修工事が必要となり、新設工事の場合でも初期投資のみならず、動力ポンプの維持管理費がかかり、現実的といえない。

そのような制約条件があるためタイには何らかの代替下水道技術がふさわしいと思われるが、公共の建物やアパートに設置されている個別浄化施設（回転円板法が多い）以外に導入例に乏しい。

なお、郊外に新たに造成された工場団地では、専用の廃水処理施設を設置していることが多く、下水管に勾配を設け、中継ポンプ所を介して糞尿と生活廃水、処理した工場廃水を一緒に流している。小規模の西欧型下水道の状況に似ているが、このような処理施設は適正な規模で設計されているため問題がない^{注15}。したがって、タイの下水処理場が抱える問題は流入下水の濃度が低いことに起因しているといえる。

II タイにおける安定化池の機能評価

タイの下水の水質は生分解性が良好で、濃度が低いという共通した性質を持つ。そのことから、薄い廃水を安定化池で処理すると有機物の無機化が進行しすぎて、回帰する栄養塩のために藻類が大量発生して逆に有機物生産の場になりやすい。これは、下水処理の本旨からすれば大きな欠陥である。しかし、このような矛盾して見える既設の安定化池でも、“環境持続性”という観点から見たら改善できる見通しがあるので、報告する。

1. ウボン・ラチャタニ処理場

1) 現場概要

タイ東北部にある、エアレーテッド・ラグーン

図 - 1 下水処理場の施設レイアウト

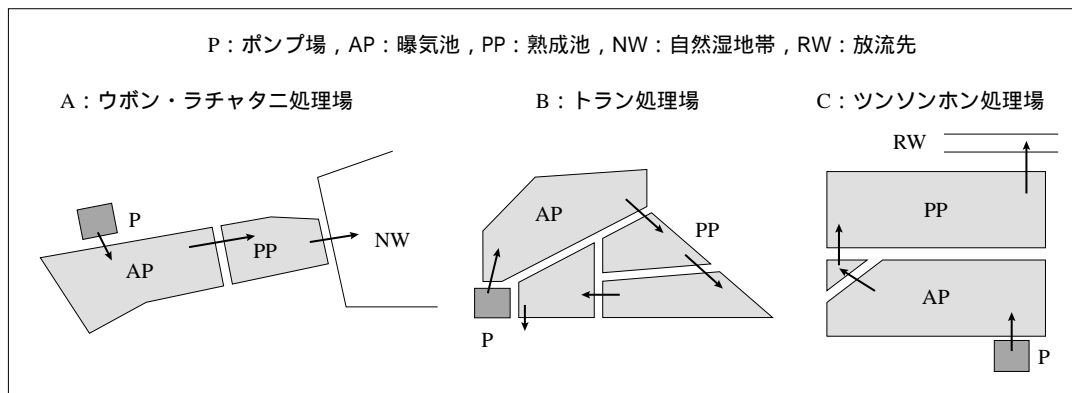


写真 - 1 アオコ (ランソウ) が安定化池の岸に集積した状態



法 (aerated lagoon) を採用した下水処理場である。しかし、実質的には安定化池 (waste stabilization pond) と同じ外観であった^{注16)}。水面はアオコ (主にランソウ類の Microcystis 属) のために緑色のペンキを流したような状態 (写真 - 1) で、廃水中の有機物分解で生じた窒素・リンなどの栄養塩が熱帯の豊富な日射を受け、植物プランクトンが大増殖していることがわかる。ここでは、市役所が池内での漁獲を規制する政策を採っていた。

2) 現地調査

現地調査は1998年6月と99年7月の2回、実施した^{注17)}。調査課題は、市役所側が曝気用水中攪拌機の電気代を節約したいという意向があり、節電のため曝気装置を間欠運転した場合の問題点を検討することであった。

なお、施設全体のレイアウトは図 - 1 の A で、曝気池 (aeration pond) と熟成池 (polishing pond)

の2池構成となっている。水深3mの曝気池 (面積 : 2万4000m²) には、7台の曝気装置が備え付けられている。流入下水のBOD値は35mg/l程度で、この値は日本での通常下水の半分以下であり、処理施設に到達する前に下水管渠内ですでに微生物分解が進行していることを意味している。

処理水のBOD値は6mg/l程度で、非常に無機化が進行していることを示唆する。また、ろ液のCOD値 (重クロム酸法) が順次低下しているため、溶存有機物の除去能は機能していることを意味する。しかし、総有機物量の目安となるCOD値では、流入下水の値 (67mg/l) に対して処理水の値 (83 mg/l) が逆転現象を示している^{注18)}。曝気池の滞留時間は28日で、この施設が有機物の分解の場を通り越し有機物の生産の場となっていることを意味する。それは植物プランクトンの現存量を表すクロロフィル量にも表れている。

藻類が活発に光合成を行うと炭酸塩の平衡が崩れアルカリ化するが、藻類の密集している表面水のpH値は10に近い高い数値を示していた。

通常、夜間には光合成が停止し酸素放出がないため、溶存酸素 (DO) が消費される可能性がある。夜間におけるDOの減少をシミュレーションするため、池水を孵卵瓶に入れアルミホイルで包んだ暗瓶を現場に浸せきして経時的なDOの消長 (呼吸量) を測定したところ、初期の過飽和分の消失以降は、DOの減少は緩慢であった (図 - 2)。

また、昼間におけるDOの鉛直分布を観測すると、

図 - 2 暗瓶中の溶存酸素(DO)の経時的変化

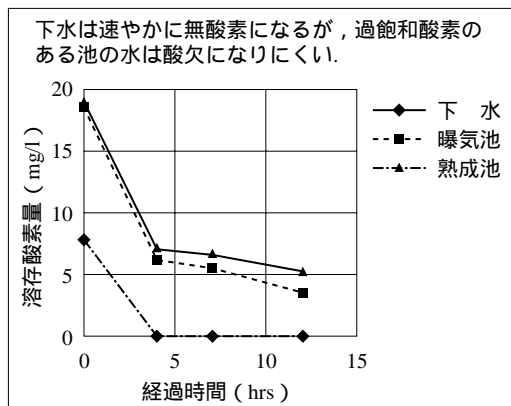


写真 - 2 ウボン・ラチャタニ処理場の後背地にある自然湿地帯の景観



表 - 2 ウボン・ラチャタニ処理場における水質測定結果

1999年7月22日調査 (単位はmg/l <クロロフィルa濃度のみ, μg/l >で表示)

	BOD*	COD	ろ液COD	クロロフィルa
流入水	35	67	43	----
曝気池 (Aeration pond)	---	92	22	354
熟成池 (Polishing pond)	6	83	11	289

注) *PWD定期調査での分析値。

底層直上水 (水深2.5m) でもDOが2.5mg/l程度は常時確保されていることが判明した。

市役所の協力を得て、実際に一昼夜、曝気装置を完全停止させ、翌朝 (夜明け前) の最もDO値が低下する時間帯の底層水DO値の測定も行ったが、約2.0mg/lのレベルにあり、現状であれば、酸素欠乏に至らないことが判明した。

当該施設での水質実測値を、表 - 2に示す。

3) 改善策および所見

実測データから判断して、当該施設では藻類の光合成によって十分な量のDOが供給されるため曝気は不要である。しかし、池の底に汚泥が蓄積してきたような場合には、底層水がDO不足になる恐れも否定できず、そのような場合には機械曝気によるDO補給、または底泥の浚渫が必要となる可能性がある。しかし、タイでは処理施設の稼働年数が少ないため、これまで安定化池から底泥を浚渫したという実績はない^{注19)}。

池から流出する藻類は二次的な有機物汚染になり得るが、後処理施設としてロックフィルター^{注20)}や人工湿地 (constructed wetlands) を設置すれば、

流出藻体の捕捉が可能となる。ウボン・ラチャタニでは立地条件を利用してもともとあった自然の湿地帯 (写真 - 2) に処理水を放流することで対処していた。安定化池はその外見に反して揚水ポンプを備えた土木構造物であり、たとえ低湿地に造成したような場合でも盛土するなどして洪水時でも水没は免れるように設計されている。

放流先の自然湿地帯は2回目の調査時には水没していたが、余剰有機物を湿地の土壌有機物に転化し固定 (埋没) 化する手法は自然に即した汚泥の処分法のひとつとして評価できる。

99年には水深2mの熟成池 (面積: 6500m²) で水生植物 (ハス) が繁茂し始めていた。また、放流先の水路ではおびただしい量の水生植物が繁茂し、地元住民の漁業に支障が出る恐れが生じていた。これらの余剰生産物は刈り取る必要があるが、施設内での漁獲を許可したり、さらに積極的に淡水養殖を組み合わせることで、過剰の栄養塩を循環利用できる余地が残されている。インドでは、下水を利用した淡水養殖 (wastewater-fed aquaculture) が確立している^{注21)}。特に、タイでは廃水への糞尿

表 - 3 トラン処理場における水質測定結果

1999年7月19日調査(単位はmg/l<クロロフィルa濃度のみ, μg/l>で表示)

	COD	ろ液COD	BOD	MBOD*	MBOD-N**	MBOD-P***	クロロフィルa
流入水	50	41	33	25	21	9	----
曝気池	164	33	27	33	32	>43	192
熟成池 1	76	---	15	---	---	---	109
熟成池 2	53	---	14	---	---	---	72
熟成池 3	48	30	11	6	14	4	49

注)* 有機物を添加して、無機栄養分を測定(数値は、利用可能な栄養塩類量を示す)。

** 有機物とリンを添加して、無機窒素分を測定(数値は、利用可能な窒素量を示す)。

*** 有機物と無機窒素を添加して、リン分を測定(数値は、利用可能なリン量を示す)。

の混入率が低いため衛生上の障害も少なく、廃水処理と水産養殖を有機的にリンクさせていくうえで有利な条件にある。

2. トラン処理場

1) 現場概要

南部タイにあるエアレーテッド・ラグーン法の下水処理場である。ここも内容上は、安定化池で曝気装置は機械維持のためすでに間欠運転されていた。施設内での漁獲は一切規制を受けていなく、池の中に捕獲用の刺し網が設置されていた。ここでは、魚類だけでなく、淡水産のエビも漁獲されていた。

2) 現地調査

調査は1999年7月に衛生工学課(Sanitary Engineering Division: SED)からの要請を受けて実施した。この調査の目的は、当該施設の熟成池での藻類の発生量が他の安定化池と比べて少なく、結果的に良好に運転されていることから、その成功した理由を探るために行ったものである。

施設全体のレイアウトは図-1のBである。水深は曝気池が3m、熟成池は2mである。面積は、曝気池が最大の4万7000m²、3つの熟成池は順次、2万1000m²、1万9500m²、2万1000m²となっている。特徴は、流入点と放流点が近いという空間的な制約から4池構成にして下水を迂回させている点である。そのため、結果的に通常の2池設計に比べて多段化したことになる。

4池構成が奏効してか、廃水の浄化は段階的に進行していることが判明した。そのため各池の間に

水質の環境勾配が生じ、植物プランクトンの現存量を表すクロロフィル量が順次、減少していた(表-3)。トランの最終池でのクロロフィル量は、典型的な例であるウボン・ラチャタニのそれに比べて80%以上も削減されており、多段化すれば安定化池法で半ば宿命的であるとされた余剰藻体の流失が問題にならないことが示唆された。

MBOD法^{注22)}により栄養塩の制限因子を判定してみたところ、曝気池では窒素に対してリンが余った状態であり、最終の熟成池では窒素もリンも不足した状態であることが判明した。窒素飢餓であることは、水中に窒素固定能のあるランソウ類(*Anabena*属など)が観察されたことから裏付けられた。さらに、段階的な処理により最終池では好気状態が保たれて、リンが粘土鉱物の鉄分やアルミ分と共沈除去されたものと推定される。多段化により藻類の生産が抑制を受けている事実を、水質面からも裏付ける結果となった。

3) 改善策および所見

当施設は供用開始後1年の処理場であったが、最終池での藻類発生が抑制されているという点で成功した例である。その要因としては、たまたま設計者がレイアウトの都合上、4池構成と多段化したことにあると考えられる。また、最終池の水深を浅くすると、底まで好気状態が保たれるため、リンの除去も実現する。

この知見から、藻類の過剰発生が見られる既存の安定化池でも池を多段化することで浄化が段階的に進み、最終放流地点での処理水質が大幅に改善される可能性が見込まれる。また、原理的に見

写真 - 3 脱水された余剰藻類のマット
(ツンソンホン処理場で)



て漁獲することは水中からの栄養分を回収する行為にほかならないので、漁獲は積極的に推奨したほうが藻類増殖を抑制することにつながると思われる。

3. ツンソンホン処理場

1) 現場概要

ドンムアン空港の近くに位置する住宅団地に付属したツンソンホン下水処理場の廃水は、糞尿が混じる下水である。この下水処理場では糸状性藻類の繁殖があり、これを人力で定期的に駆除しているバンコク首都圏庁 (Bangkok Metropolitan Administration: BMA) の下排水部 (Department of Drainage and Sewerage: DDS) からの依頼で調査が実施された。

2) 現地調査

調査は1999年7月に実施された。処理施設のレイアウトは図 - 1 のCである。流入下水のBOD値は平均70mg/lと若干高めであった。着水井では嫌氣的分解が進み、水は黒色を呈していた。

曝気池(水深: 3.7m、面積: 1万2500m²)の岸辺には、ミジンコ類(*Daphnia*, *Alona*, *Bosmina*) が多数観察された。また、熟成池(水深: 1.5m、面積: 4350m²)では糸状緑藻のシオグサ(*Cladophora*) が底一面に繁茂していた。池は浅く緩い流れがあるため(滞留時間: 1.5 ~ 4日)、止水域に優占する植物プランクトンが定着する代わりに糸状性藻類に置

換されたと思われる。光合成によって生産された酸素の気泡により水底から剥離し、藻体はスカム化(油分や生物の死骸、分解発酵カスが水面に浮いている状態)して浮遊していた。

3) 改善策および所見

剥離浮上した藻の回収は、週に3回程度、人力により網で行っていた。回収した藻体の脱水は、アオコなどと比べ非常に容易である(写真 - 3)。余剰藻体は廃棄物としてそのまま処分されているが、せっかく吸収した栄養塩類を含んでいるので、適当に処理すれば肥料として再資源化が可能である。高温好気消化(aerobic digestion) によるコンポスト化は、余剰藻体を有効利用する最も簡便な手法であろう^{注23)}。

流入水量に対して池容積を小さく設計すれば、池内に緩い水流が生じる。また、池の深度を浅くすれば、浮遊性植物プランクトンの代わりに着生する糸状藻類を繁殖させることができる。このように水理学的な設計値を工夫することにより、発生する藻類の種類を人為操作(manipulation) し、グレイウォーターから栄養塩を除去するのみならず余剰の藻体をバイオマス(生物資源)として回収し、有効利用できる可能性がある。

また、糸状性藻類のかたまりは微小動物が生息する場も提供する。そこで発生するミジンコは養殖上、魚類の格好の餌料となる。廃水処理と食糧生産とは対極にあるかのように見えるが、物質循環の面では“表裏一体”となるべき関係なのであろう。

III タイに適した下水処理のオプション

西欧型下水道は糞尿と水道水を混合することを前提に設計されているが、タイでは糞尿を下水道に取り込んでいないことが最大の特徴となっている。したがって、その利点を生かすなら、糞尿と生活雑廃水であるグレイウォーターを分別したまま下水処理計画を立てることが合理的である。

既存の糞尿処理に問題があるとすれば、それは唯一、土壌浸透式のタイ式便所が土壌や地下水を

汚染する可能性があることである。そこで、既存のタイ式便所をコンポスト・トイレにすれば糞尿が外界に出ることなく、肥料化することができる。副産物である有機性肥料は、農業国であるタイが土壌を改良し、農業生産を維持していくうえでも有用であると考えられる。

一般に、糞尿を個別処理した場合、別に発生する生活雑廃水としてのグレイウォーターの処理には、人工湿地 (constructed wetlands) が推奨されることが多い²⁴⁾。しかし、タイの風土では、湿地が蚊やハエなどの不快昆虫の発生要因になり得るので、安定化池による処理法が望ましいと考えられる。池であれば益虫であるトンボ類の発生を促し、さらに水産養殖池を兼ねれば漁獲もできるので一石二鳥といえる。

タイの地域特性を生かしたまま、既存の安定化池を改善していく具体的な技術オプションを、以下に提案してみたい。

1. 水産養殖とのリンク

グレイウォーターは安定化池で処理し、かつ廃水を栄養源として水産養殖に利用することが可能である。グレイウォーターは分解が速やかであるため、酸欠が生じにくい。したがって、曝気にかかる動力費が不要となる。しかも、糞尿が入らないためグレイウォーターを使って水産養殖をしても、衛生上の問題が生じるリスクも少ない。さらに魚類が介在すると生態系が高次化するため、藻類の発生も抑制される結果になると考えられる。

海水が浸入する沿岸域の下水処理場では、海産魚が定着している例も見られた。そのような立地ならラグーン (安定化池) を造成して、下水を利用した海産魚の養殖も可能であろう。エビの養殖が盛んであるタイでは、グレイウォーターを栄養にして餌料を生産し、エビの孵化場や養殖場に組み合わせることも可能であると考えられる。タイ国立エビ養殖研究所の研究者プー博士によれば、そもそも安定化池と養殖池には技術的にも共通する部分が多いため、養殖に使用した海水を浄化して放流したり、循環利用をする取り組みが試みら

れているとのことである。

2. 多段化による高度処理

広大な安定化池を1つ設置するより、池を分割したほうがさまざまな面で利点が多い。まず、多段化によって環境勾配が生じ栄養塩が段階的に削減されるのはトラン処理場の例が証明しているが、その原理はどの安定化池にも適用可能であろう。

また、池を分割することで、余った池を浅い沼地にすれば、商品作物が栽培できる。実際、ウボン・ラチャタニ処理場の熟成池の浅い沿岸帯では野菜のパックブン (Phak bung) が自生していた。

さらに水深を浅くして湿地帯とすれば、流出した余剰藻体を捕集して土壌有機物として埋設固定化することも可能である。有機物が溜まった底泥や土壌は定期的に空干しすることで、好気的な分解にさらすことが可能である。それには熱帯の無尽蔵な太陽光が、底土の乾燥に利用できる。

なお、処理水量の伸びに応じて施工を段階的に進めるため、安定化池を多段化することは下水道の計画設計という面でも合理的である。

3. 余剰藻体のコンポスト化

一般に安定化池は大きな面積が必要とされ、都市近郊では敬遠されることがある。しかし、池を小さく設計することで意図的に糸状性藻類を発生させてグレイウォーター中の栄養塩を吸収した後、余剰バイオマスとして回収ができる。

ただし、藻体だけでは繊維分が主体であるため、コンポスト化する場合、反応速度が緩慢となる心配がある。そのような場合、都市で発生する残飯などの生ゴミと一緒に混ぜて再資源化するというオプションも考えられる。

なお、シオグサだけでなくホテイアオイ (water hyacinth) やウキクサ (duckweed) も同様に、コンポスト化が可能な余剰バイオマスである。粗繊維分と栄養塩類を多く含有する有機性肥料は、農業国であるタイの土壌の地力を維持または回復するためにも貢献すると思われる。

おわりに

本稿では、藻類を利用した水質浄化法を環境持続性の点で極めて有望であるととらえた。池やラグーンを用いた廃水処理法は、活性汚泥法とその変法（オキシデーションディッチ法）が主流である日本には皆無であるため技術的なノウハウの蓄積に乏しいが、昨今では低コストかつ省エネであるという理由で各国で検討されつつある^{注25}。ドイツに前例があるが、イギリスのような寒冷な気候でも二酸化炭素の固定および排出量削減の意味から導入すべきとの動きが出ている。

本研究では、既存の安定化池の問題点を指摘するとともに、実測データを提示しながらその改善策を示した。今回、提案した藻類を利用した水質浄化の技術オプションは、下水の性状を問わずあらゆる下水に適用可能と考えられる。本稿に記した筆者らの見解が今後、タイの安定化池を機能改善し、有効利用に結び付くことを期待したい。

併せて、安定化池の実例のない日本の下水道技術者の中には藻類を専門とする人材に乏しいので、技術移転をするドナー側の技術協力指針の一助となれば幸いである^{注26}。

下水道システムの発展以前には、どの地域でも糞尿処理に独自の工夫を凝らしてきた。特に、アジアでは西欧よりも循環型社会を巧みに形成してきた歴史がある。その土地で、長年の風雪に耐えてきた古来のシステム^{注27}は、それなりの合理性を有したシステムといえる。その意味では経済条件、生活様式、土地条件に合う場合には新たな手法を付与して改善していくことが、技術移転の実務としては望ましい姿であろうかと思われる^{注28}。

安定化池を用いた水質浄化法は、途上国への開発援助を通じ、先進国でも環境持続化技術を再考する機会になり得ることを如実に示している。

謝辞

現地での調査に際してご同行いただいたタイ人カウンターパート、ピヤバン氏（PWD、MRD部）、モントン氏（PWD、SED部）、ソムチャイ氏（BMA、DDS部）ほかの

関係各位に感謝の意を表したい。また、JICA派遣専門家として日本にない安定化池を現地調査する貴重な機会を提供していただいた国際協力事業団（JICA）に感謝したい。

注釈

- 1) タイの下水道に関連するアジェンダ21に基づき策定された指針によると、タイ政府は、地方への分権化（decentralisation）および公社化を進め、全国で40カ所の下水処理場の建設と、バンコク市内で発生する下水の半分を処理することを目指している。また、下水汚泥などの有機性廃棄物を利用する堆肥化プラントの建設も視野に入れている。
<www.un.org/esa/earthsummit/thai-cp.htm#chap21>
- 2) スウェーデン大使館・環境問題ジェネラリストの小沢徳太郎氏による「21世紀も人類は動物である」という指摘。<www.angel.ne.jp/~ozawa/>
- 3) 近代下水道はコレラ禍対策のため、イギリスで始まった。当時の行政担当者Chadwick卿は、公衆衛生の創始者として知られている。Acheson, M.A.: *The Chadwick Centenary Lecture, Engineering for Public Health*, James, C.P., Eden, G.E. ed., p3-17, Ellis Horwood, New York, 1992.
- 4) 世界銀行のGoodland博士らによって、環境持続性の面で近代下水道に弱点のあることが指摘された。この見解は国連環境計画（UNEP）が提供する関連サイトを通じ参照することができる。
<www.unep.or.jp/ietc/Publications/INSIGHT>
- 5) スウェーデン国際開発協力庁（Sida）が刊行したEcological Sanitationマニュアルは、日本トイレ協会によって翻訳された。松井三郎（監訳）：エコロジカル・サニテーション、（社）日本トイレ協会、p90, 2001.
- 6) 公共事業局（Public Works Department: PWD）材料検査部（Material and Research Division: MRD）のピヤバン女史からの聞き取り調査（BMA Bangkok Metropolitan Administration: バンコク首都圏庁 所轄分を含む）による。
- 7) 下水中の物質の起源としては、糞便由来、土壌由来、工場由来、その他（畜産、臨床、実験室等）が理論上、考えられる。竹内準一：都市下水処理場における日和見感染菌の生態的地位、微生物と環境の相互作用、天野富美夫編、学会出版センター、p85-98, 1999。
- 8) ドイツ開発銀行のStoll博士によれば、タイの一般家庭の便所は、2槽式の土壌浸透槽を持つleaching cesspoolである。閉塞したような場合、BMA清掃部局が要請に応じてバキュームカーで汚泥を排除する。Stoll, U.: *Municipal Sewage Sludge Management*, Asian Institute of Technology, 83pp, Bangkok, 1996.
- 9) 廃水の類型化は、デンマークのHenzeとLedin（Henze, M., Ledin, A.: "Types, characteristics and quantities of classic, combined domestic wastewaters", *Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation*, Lens, G., Zeeman, G., Lettinga, G. ed., IWA Publishing, London, p57-

- 72, 2001.) に詳しい(表 - 1に改変し, 再録).
- 10) BMAのマスタープランによる. Pollution Control Department: Bangkok Metropolitan Region Wastewater Management Plan Vol. 5, Macro Consultants Co. Ltd., 1993.
 - 11) 古賀みな子専門家(1999年度派遣)の調査によって, 矩形の管渠内では土砂の堆積が起りやすく, バンコク市内では有効容積の半分近くが砂に没している状態であることが判明した.
 - 12) 松井博孝専門家(1997-98年度派遣)が流況によって逆向きに流れる下水管のあることを初めて指摘した. その後, 筆者らも雨天時に目撃した. これは, 管渠の勾配が乏しいためである.
 - 13) 発生源で採取した新鮮下水を自己分解させた場合に実測されたBOD値の減衰および原生動物相の遷移から, 下水の処理場への到達日数は平均5日程度と見積もられた. 竹内準一, 古賀みな子, 大村浩, 中本信忠: 熱帯の水環境と下水道(1)グレイウォーターと活性汚泥の性状, 水, 44(4), p24-31, 2002.
 - 14) 一般に, 生物反応は温度に著しく影響を受け, Q_{10} 値という指標が用いられる. おおむね Q_{10} 値は2~3であり, これは温度が10 上昇すると反応速度が2~3倍増大することを意味する.
 - 15) 工場団地に付属する廃水処理施設には, 見学者に開放されている施設もある. たとえば, バンコク北部郊外にあるNava Nakorn地区など.
 - 16) エアレーテッド・ラグーンの定義は, Leeds大のMara教授による“返送汚泥のない活性汚泥法”と定義されている(Mara, D. D.: *Sewage Treatment in Hot Climates*, 166pp, Wiley, Chichester, 1975.). すなわち, 処理施設内の水は活性汚泥フロックのために褐色を呈していなければ不自然であることになる.
 - 17) PWDのMRDが実施している全国の下水処理場を対象とする水質監視の定期試験の一環としてカウンターパートらに同行した(1998年度).
 - 18) BODは生物化学的酸素要求量のこと, 酸素瓶の中に閉じ込めた溶存酸素の減衰で測定する(20 5日間で標準法). 増殖期の藻体が試料に混入してもBOD値は意外と低く出るが, 死滅期の藻体では逆にBOD値が高くなる. CODは試料を酸化剤(重クロム酸)で強制酸化させた場合の酸化剤の消費量から還元物質として有機物量を求めた化学的酸素要求量. 重金属汚染を嫌う日本では, 酸化剤として安全な過マンガン酸を用いるため, 同じ試料でもCOD値はかなり低くなるので二国間のデータを比較する際, 注意を要する.
 - 19) バンコクの運河から底泥を採取した経験のある永岡保行専門家(1998年度派遣)によれば, 底泥はほぼ完全に酸化されており, 有機物はかなり無機化が進行していたことが報告された. また, 大村浩専門家(1999年度派遣)の調査によると, 運河底泥には高分子有機物を分解する細菌が優占していることが観察された. これらの事例から判断して, 熱帯圏ではヘドロが溜まりにくく, 底泥の浚渫頻度は低く抑えられる可能性が予測できる.
 - 20) 安定化池から流出する藻類を捕捉するロックフィルターに関しては, Leeds大学の付属土木技術研究所の下記サイトに紹介がある.
<www.leeds.ac.uk/civil/cefi/water/wsp/wsp-uk.html>
 - 21) 下水利用水産養殖は, インドのカルカッタなどで盛んである. Edwards, P., Pullin, R.S.V., ed.: *Wastewater-Fed Aquaculture*, 298pp., Asian Institute of Technology, Bangkok, 1990.
 - 22) M (Modified) BOD法は, 筆者が1974年にブラジルで開発したバイオアッセイ技術で, 湖沼法を適用する際に琵琶湖の制限因子を決定する場合にも応用された例がある. 中本信忠: 生物利用可能栄養物質を評価するMBOD法, 月刊下水道, 18(2), p17-23, 1995.
 - 23) 藻類のグリーン堆肥はヴェトナムで, 窒素固定ランソウを利用してきた歴史がある. Postgate, J.: *Microbe and Man*, 3rd ed., p122-123, Cambridge Univ. Press, 1992. なお, 余剰藻体は高温好気消化法を用いて堆肥化が可能であることについては, 古賀みな子専門家(1999年度派遣)が実証実験を行った.
 - 24) グレイウォーターとその簡易処理法に関しては各々, 下記のサイトに詳しい説明がある.
たとえば<www.greywater.com/synopsis.htm>あるいは, <www.clivusmultrum.com/greywater.html>を参照.
 - 25) これまでポンドによる廃水処理は熱帯圏に適用されてきたが, 温帯や寒帯でも安定化池が実現可能であるとして, 普及のための支援団体が設立され, 技術指針も発表された. Arther, J.P.: *Notes on the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries*, 106pp, The World Bank, Washington DC, 1983. Mara, D., Person, H.: *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterranean Countries*, 112pp, European Investment Bank/Lagoon Technology International, Leeds, 1998.
 - 26) 本稿で提案した技術の適用範囲は, タイと似た風土にある東南アジアを中心とした熱帯モンスーン圏が妥当であると考えられる.
 - 27) 既存の下水管渠は洪水防止を主眼とした構造であり, 糞尿を能動輸送するには勾配も足りない. 日タイの技術者は平坦な土地に十分な勾配を確保した管渠を施工し直すのは, 技術的にも財政的にも困難が伴うものと現時点で考えている. また, 西洋式便器が導入されても, タイ人は用便後に紙を使わず, 水で洗う古来の習慣を捨てていない.
 - 28) 早瀬隆司: グローバリゼーションと途上国の持続可能な開発への環境上の課題, 国際協力研究, 15, No.1 p71-79, 国際協力事業団国際協力総合研修所, 1999.

参考文献

- 1) 石橋良信, 滝沢智: タイの水環境問題, 水環境学会誌, 21, p69-13, 1998.

中本 信忠（なかもと のぶただ）

国際協力事業団インドネシア陸水研究開発センター，同タイ国下水道研修センター専門家（その間、スリ・ランカなどで水道の技術指導．また、ブリティッシュカウンシルを通じて英国各地の浄水場の緩速ろ過池を調査）を経て、

現在、信州大学繊維学部教授．植物生態学専攻．

〔著書・論文〕

生でおいしい水道水 ナチュラルフィルターによる緩速ろ過技術，築地書館．

建設省・日本河川水質年鑑，山海堂．（共著）

環境微生物工学研究法，技報堂出版．（共著）

バイオアッセイ法による水中の生物利用可能栄養物質量の推定，下水道協会誌，1989．

Limnological Studies on the Rio Doce Valley Lakes, Brazil, Brazilian Academy of Sciences (co-author), "Evaluation of available nutritional matters in aquatic environments by use of heterotrophic activity," *Verh. Internat. Verin. Limnol*, 1981.

竹内 準一（たけうち じゅんいち）

英国リーズ大学工学部客員研究員，国際協力事業団タイ国下水道研修センター専門家を経て、

現在、英国エセックス大学大学院生物科学科博士課程在籍中．微生物生態学専攻．

〔著書・論文〕

エアレーションタンクの微生物 検鏡と培養の手引 ，日本下水道協会．（共著）

下水処理に必要な生物の知識，日本下水道事業団，新版・微生物学実験法，講談社サイエンティフィク．（共著）

"Influence of nitrate on the bacterial flora of activated sludge under anoxic condition," *Water Sci. & Tech*, 1990.