

国立環境研究所特別研究報告

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR - 34 - 2000

自然利用強化型適正水質改善技術の  
共同開発に関する研究  
(開発途上国環境技術共同研究)

Cooperative research on development of water environment  
renovation technology in kingdom of Thailand

平成 6 ～ 10 年度

FY 1994 ～ 1998

NIES



NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立環境研究所

SR - 34 - 2000

自然利用強化型適正水質改善技術の  
共同開発に関する研究  
(開発途上国環境技術共同研究)

Cooperative research on development of water environment  
renovation technology in kingdom of Thailand

平成 6 ~ 10 年度

FY 1994 ~ 1998

環境庁 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

開発途上国環境技術共同研究「自然利用強化型適正水質改善技術の共同開発に関する研究」

(期間 平成6～10年度)

特別研究責任者：森田昌敏

特別研究幹事：稲森悠平

報告書編集担当：稲森悠平・水落元之

## 序

本報告書は平成6年度から平成10年度にかけて実施した開発途上国環境技術共同研究「自然利用強化型適正水質改善技術の共同開発に関する研究」の研究成果をまとめたものである。

東南アジア諸国の中にあつてタイ王国では生活排水の汚濁負荷に対する割合が極めて高く、全汚濁負荷の75%を占めている。また、近年では、富栄養化湖沼の水源において、従来の水質汚濁のみでなく、WHO（世界保健機関）の飲料水質ガイドラインに位置づけられた有毒物質ミクロキスチンを含有するアオコの異常増殖の顕在化が懸念されている。それゆえ、水資源の保全のために、これからさらなる研究が必須なことは当然であるが、予備的研究としての有毒アオコの実態解明及び富栄養化対策は水環境を修復していく上で極めて重要な課題としてとらえられた。タイ王国においては、富栄養化対策は発生源対策、直接浄化対策ともに著しく遅れているのが現状であり、その対策技術の確立は緊急を要しているため、対策の確立化を図り、環境衛生を向上させる必要がある。

これらの点に鑑み、1) タイ王国の水域の水質に関する研究 2) 予備的研究としてのミクロキスチン現存量に関する調査 3) 水処理プロセスにおける水質改善効果の実態調査に関する研究 4) 直接浄化対策としてのエコエンジニアリングを活用した水質浄化に関する研究 5) 熱帯地域における生物活性と処理の高度化に関する研究がタイ環境研究研修センター（Environmental Research and Training Center: ERTC）及びアジア工科大学（Asian Institute of Technology; AIT）と共同で行われた。

その結果、①人口の密集しているクローン（運河）では水質汚濁の進行が著しく、汚濁負荷としては生活排水の占める割合が大きく、衛生面で極めて大きな問題を有すること ②タイ王国の飲料水源として重要な役割を果たす湖沼及び貯水池の多くにおいて富栄養化の進行とミクロキスチンを含有するアオコの異常増殖のみられること ③ヨシやガマといった水生植物を植栽した人工湿地は、高度で安定した浄化能力を有するが、これらの水生植物の再利用が容易でないため、これからは食物源としてリサイクルが可能な水耕植物を活用した浄化技術も必要なこと ④タイ王国の排水処理施設等から分離した微小動物は、温度の影響を受けやすく、高温において高い活性を有することから、熱帯地域の微生物のこのような特性を考慮した合併処理浄化槽の開発と同時に運転管理の適正化が極めて重要な位置づけにあること ⑤食品工場の排水処理施設の沈殿槽において観察されたグッピー等を細菌、菌類、原生動物等が浄化に貢献する従来からの生物学的排水処理に高次捕食者として組み込むことにより余剰汚泥の減少することと同時に、微小動物や小型動物及びナマズ等食用可能な魚類を活用した資源回収型の排水処理システムの開発が今後必要なことなどが明らかとなり、機構解明、技術開発に関しての多くの成果が得られた。

なお、今後残された課題、また新たに発生した重要な課題について研究を充実させることはタイ王国の水環境修復に貢献するところが多大であると考えられる。

当研究で目標とした自然利用強化型浄化技術は省エネ・省コスト・リサイクル型の極めて実用性が高く、住民による管理が可能なシステムであり、制度化され、普及の基盤が整備されれば、

タイ国内はもちろんのこと熱帯地域における水質改善が必要な水源域において極めて甚大な効果をもたらすと考えられる。このような観点から、さらに研究の強化、重点化を図った基礎と応用の研究を推進することは、真の国情に適した技術を定着させていく上でも極めて重要であると考えられる。本研究は当研究所担当研究員のみならず研究所外の客員研究員、共同研究員の多くの方々の御協力と御指導のもとに達成できたものであり、ここに深く感謝の意を表したい。

平成 12 年 3 月

国立環境研究所  
所 長 大 井 玄

## 目 次

1	研究の目的と経緯	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本研究で得られた成果の概要	1
2	研究の成果	3
2.1	タイ王国における水域の実態調査	3
2.1.1	水質汚濁の実態調査	3
2.1.2	有害藻類の現存量調査	6
2.2	水処理プロセス技術を活用した水質浄化	8
2.2.1	嫌気・好気ラグーン処理を活用した高濃度排水処理	8
2.2.2	人工湿地を活用した低濃度排水処理	11
2.2.3	活性汚泥法による高濃度食品排水処理	15
2.3	生態工学プロセス技術を活用した水質浄化	17
2.3.1	抽水植物を活用した水質浄化	17
2.3.2	食用植物を活用した水質浄化	25
2.4	熱帯地域における生物活性と処理の高度化	31
2.4.1	熱帯地域の微小動物の増殖・浄化特性	31
2.4.2	食物網を活用した処理の高度化	33
2.5	総括及び展望	36
[資料]		
I	研究の組織と研究課題の構成	43
1	研究の組織	43
2	研究課題と担当者	43
II	研究成果発表一覧	44
1	誌上発表	44
2	口頭発表	46

# 1 研究の目的と経緯

## 1.1 研究の背景と目的

タイ王国では生活排水、産業排水等の未処理放流により水辺環境の汚濁が著しく進行し、安全な水資源を確保することが困難な状態にある。特に東南アジア諸国の中にあつてタイ王国では生活排水の汚濁負荷に対する割合が極めて高く、全汚濁負荷の75%を占めている。また、近年では、富栄養化湖沼の水源において、従来の水質汚濁のみでなく、WHO（世界保健機関）の飲料水質ガイドラインに位置づけられた有毒物質ミクロキスチンを含有するアオコの異常増殖の顕在化が懸念されている。このミクロキスチンは、青酸カリよりも強い毒性を示しており、世界各地で家畜のへい死、さらにブラジルにおいては人の死亡をもたらしていることなどから、その緊急な対策が急がれている。それゆえ、水資源保全のために、これからさらなる研究が必要なことは当然であるが、予備的研究としての有毒アオコの実態解明、及び富栄養化対策は水環境を修復していく上で極めて重要な位置づけにある課題である。タイ王国においては、富栄養化対策は発生源対策・直接浄化対策ともに著しく遅れているのが現状であり、その対策技術の確立は緊急を要している。このままの状況を放置することは極めて危険であり、特に環境衛生上一刻の猶予も許されない状況にあるものといえる。

これらの点をかながみ、タイ王国の水域の水質に関する研究、予備的研究としてのミクロキスチン現存量に関する調査、水処理プロセスにおける水質改善効果の実態調査に関する研究、直接浄化対策としてのエコエンジニアリングを活用した水質浄化の研究、熱帯地域における生物活性と処理の高度化に関する研究をタイ環境研究研修センター（Environmental Research and Training Center; ERTC）及びアジア工科大学（Asian Institute of Technology; AIT）と共同で行うこととした。本研究は水域の水環境修復を図る上では必要不可欠であり、これらの研究を推進することにより生活排水等の処理方法として、多大な施設とエネルギー消費を伴わない、有用生物を活用した自然の浄化能力を強化した我が国の水環境修復のための水質改善手法の多様化を図る際における基礎ともなる効率的な水処理システムが確立されるものと大きな成果が期待できる。なお、本研究の実

施に当たっては、現地の汚濁発生源の把握や開発した技術を現地へ適用する必要がある、現地での調査・研究が不可欠であり、かつ開発途上国の河川、湖沼等の浄化を図る上では、エネルギーを多量に必要とする技術を用いることは非現実的で、生物の環境浄化能を最大限活用して利用するための技術を開発する必要がある。さらに、生物は国・地域により異なっており、それぞれの自然環境に適した生物を利用しなければ技術として成立しないために、現地における有用生物の探索等を行う必要があることから、現地調査を継続的に行った。すなわち、水質の改善技術における有用生物の分離・培養、熱帯地方に生息する生物を活用した処理の高度化、水処理工学プロセス技術、生態工学プロセス技術を活用した水生植物を植栽したシステムにおける浄化性能、処理能力、さらにリサイクル可能な食べられる水耕植物を活用した浄化システムにおける水質浄化能等について明らかにし、熱帯地域に共通する水環境修復に必要とされる水処理・生態工学プロセス技術を導入した効果的エコシステムリサイクル技術を確立することを目的として本研究を推進した。

## 1.2 本研究で得られた成果の概要

本研究における水環境修復技術の開発のあり方は図1に示すとおりであり、以下のようにサブテーマを設けて研究を実施した。

サブテーマ1「タイ王国における水域の実態調査」では、①タイ王国の河川、クローン（運河、Klong）、湖沼、貯水池等における水質汚濁の実態調査 ②農業用水、工業用水、灌がい用水、飲料水など利水として用いられている湖沼、貯水池における予備的研究としての毒性物質ミクロキスチンの現存量調査を行った。

サブテーマ2「水処理プロセスを活用した水質浄化」では、①高濃度生活排水処理として用いられている嫌気・好気ラグーン処理施設の実態調査とラグーン処理水が河川に与える影響 ②人工湿地を活用した低濃度生活排水処理施設の実態調査 ③活性汚泥法で高濃度食品工場排水を処理している施設の実態調査等を行った。

サブテーマ3「生態工学プロセス技術を活用した水質浄化」では、①直接浄化手法としての抽水植物を活用し

た水質浄化 ②資源リサイクル手法としての食用植物を活用した水質浄化に関する検討を行った。

サブテーマ4「熱帯地域における生物活性と処理の高度化」では、①熱帯地域に生息する浄化能の高い微小動

物の増殖・浄化特性と温度との関係 ②食物網の活用による処理の高度化に関する検討を行った。そしてこれらの成果をもとに開発途上国で今後実施すべき研究の方向性・課題及び展望を総括することとした。

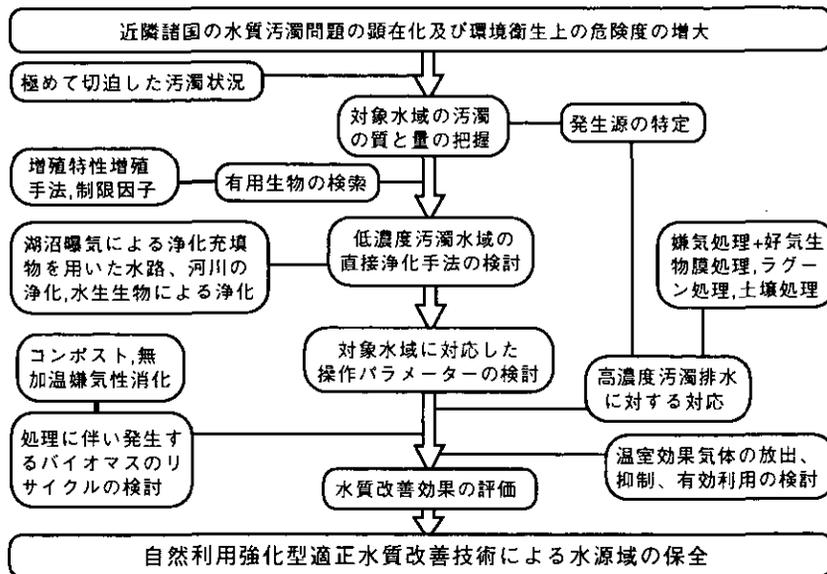


図1 自然利用強化型水環境修復技術の開発に関する研究

## 2 研究の成果

### 2.1 タイ王国における水域の実態調査

環境基本法の理念には「国際的協調による地球環境保全の推進」が位置づけられており、アジア太平洋地域の途上国の環境改善を目指した研究は極めて重要な位置づけにある。なかでもタイ王国は産業活動の活性化、人口増加により各種排水による水域の汚濁が顕在化してきている代表的な国であるといえる。さらに近年では、水源において、従来の水質汚濁のみでなく、WHOの飲料水質ガイドラインに位置づけられ、これからますます研究の重点化を図るべきマイクロキスチンを含有するアオコの異常増殖がみられるようになっており、その対策が急務となっている。そこで本研究では、タイ王国における水質汚濁の現状と、有毒アオコが産生する毒性物質マイクロキスチンの現存量について予備的研究としての実態調査を行い、今後の水質改善対策を図る上での基礎的知見を得ることを目的として検討を行った。

#### 2.1.1 水質汚濁の実態調査

##### (1) はじめに

タイ王国での水質汚濁防止に関する行政は、科学技術環境省が中心となり、水質保全政策全般の企画、調整、水質環境基準及び排水基準の設定、水質モニタリング等を行っている。また、工業省工業事業局でも、産業環境部が排水基準の設定、河川の水質モニタリング等の工場排水規制を行っている。このように行政が水質改善に取り組んでいるにもかかわらず、タイ王国では、汚濁負荷の75%を生活排水が占めており、深刻な社会問題となっている。特にBangkok(バンコク)市内のクローン(運河)では、生活排水がそのままクローンに流れ込んでいるため、腐敗臭が立ちこめ、水色も黒色を呈している。また、チャオプラヤ川では大腸菌数が約100万MPN検出されており環境衛生上好ましくない状況にある。このような状態を改善する目的で、近年では、バンコク首都圏庁などの地方自治体を中心となって下水道事業を実施しているが、下水道事業には多大な資本投下が必要なことや、その普及・下水道システムの完成には多大な時間を必要とすることなどから、下水道事業での早急な水環境改善は困難を伴うものと考えられており、新たな水環境修復技術の開発が求められている。そこで本研究で

は、新たな水環境修復技術を開発する上での基礎的知見を得ることを目的として、タイ王国の河川、クローン、貯水池、湖沼等の水質汚濁の現状を実態調査した。

##### (2) 調査地点

河川、池、クローンとして、バンコクの東部を流れカンボジアを源流とするBang Pakong River(写真1)、人々の憩いの場となっているバンコク市内のQueen Sirikit National Convention Centerの池(写真2)、川岸に民家が並び、生活用水、水耕栽培の場として利用されているKlong 1(写真3)、Klong 2、Klong Rangsitの2地点(Dream World、Thayaburi Post Office)について調査を行った。Klong等については1997年9月、1998年1月、8月、1999年1月の計4回調査を行った。Bang Pakong Riverについては1997年9月、1998年1月の2回調査を行った。

湖沼、貯水池として1998年8月に、Chiang Mais(チェンマイ)大学の学内の貯水池(Angkaew:写真4)、Chiang Mai近郊の貯水池(Mae Tang Reservoir:写真5)、Chiang Maiの北東に位置するKwan Phayao(写真6)、Nakhon Sawan東部のBung Boraphet(写真7)、1999年1月にSakon Nakhonに位置するNong Han、Nakhon Ratchasimaに位置するLam Takong(写真8)、Chonburi Provinceに位置するBang Pra Reservoir(写真9)について調査を行った。AngkaewはChiang Mai大学構内の水道水源として利用されているMae Tang Reservoirは灌がい用水として利用されている。Kwan Phayaoは水道水源、灌がい用水、漁業を利水目的としている。Bung Boraphetは漁業、洪水防止、生活用水を主な利水目的としている。Nong Hanは沈水植物が繁茂しており(写真10)、水道水源、農業用水及び漁業を主な利水目的としている。Lam Takongは水道水源、農業用水、工業用水を主な利水目的としている。Bang Pra Reservoirは水道水源、漁業、農業用水を主な利水目的としている。いずれも調査地点としては各水域の上水の取水場を中心に数カ所とした。なお、本研究で調査した水域の地理学上の位置は図2に示すとおりである。



写真1 Bang Pakong River

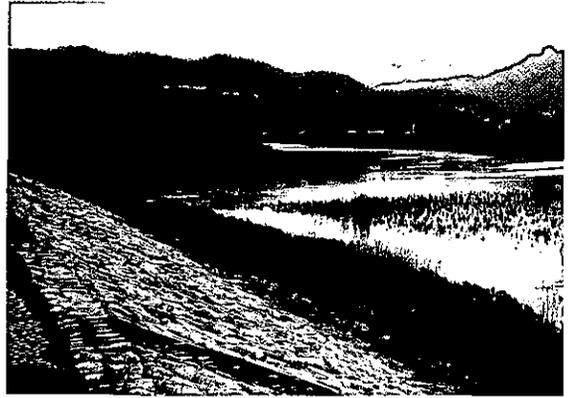


写真5 Mae Tang Reservoir (灌がい用水)



写真2 Queen Sirikit National Convention Center



写真6 Kwan Phayao (水道水源)

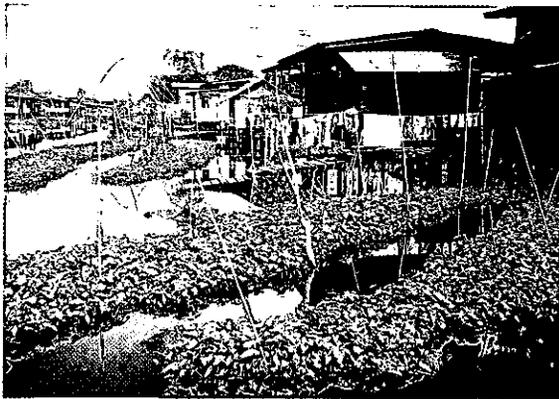


写真3 Klong 1



写真7 Bung Boraphet (利水)



写真4 Angkaew (チェンマイ大学の水道水源)

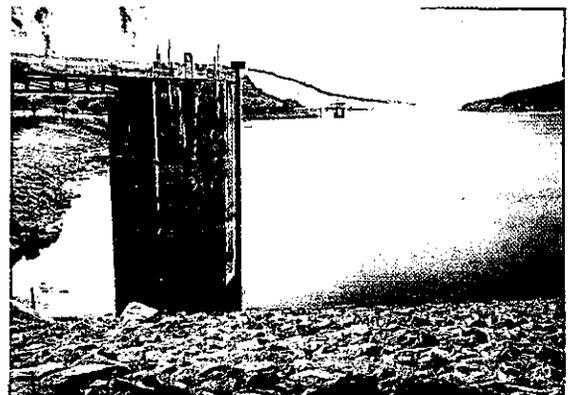


写真8 Lam Takong (水道水源, 農業・工業用水)

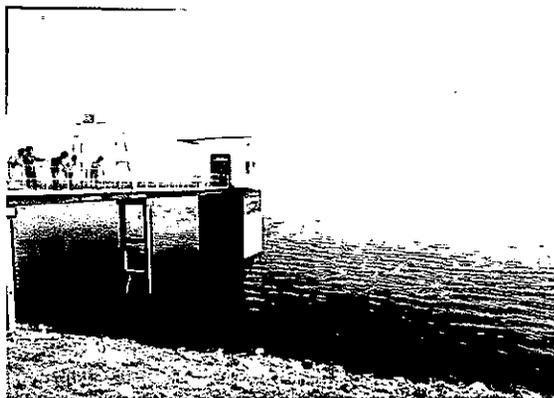


写真9 Bang Pra Reservoir (水道水源, 農業用水)

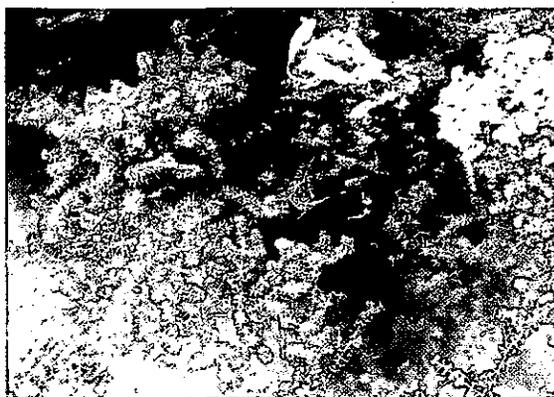


写真10 Nong Han (沈水植物が繁茂)

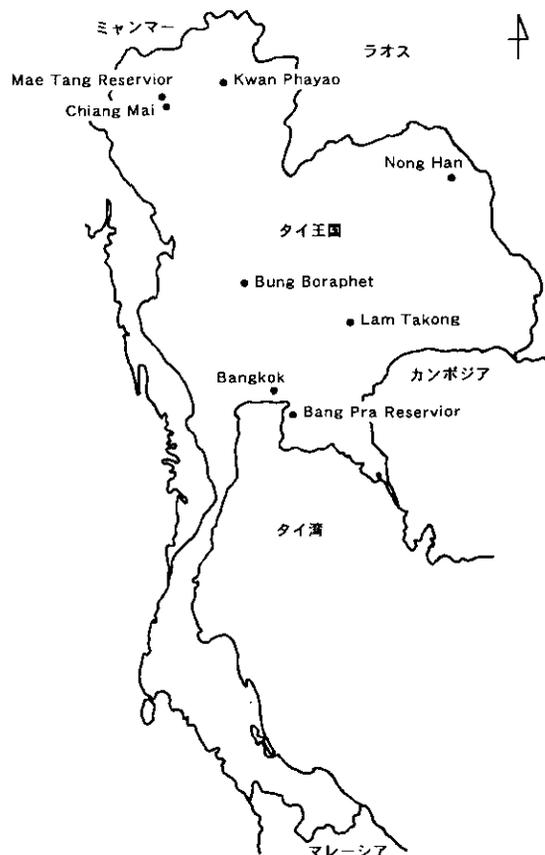


図2 調査水域の地理学上の位置

### (3) 分析項目

各水域について水温, pH, 溶存酸素 (DO), ORP, COD<sub>Mn</sub>, COD<sub>Cr</sub>, BOD, DOC, 浮遊物質 (SS), Chl. *a*, 全窒素, 全リン, 硝酸性窒素, リン酸態リン, アンモニア性窒素, 全菌数, 大腸菌群数の測定を行った。

### (4) 結果及び考察

バンコク市より北へ車で1時間ほど行ったところにあるクローンの水質調査では, Klong 1のような人口の密集しているクローンで水質汚濁の進行が著しく, 溶存酸素の低下がみられることが明らかとなった (表1)。これまで4回の調査で大腸菌群が最大 2,500CFU・ml<sup>-1</sup>

観察され, また, アンモニア性窒素が高濃度に検出されたことから, し尿のたれ流しが行われていることが推察された。また, タイ王国の一般的な家庭では, し尿は宅地内に汚物溜や腐敗槽を設けて地下浸透を行っているが, 汚泥の引き抜きをほとんど行っていないため, 汚水が流出している可能性も考えられた。クローンは人々の生活にとって極めて重要な水資源であるが, その役割を著しく損ねていること, 汚濁負荷としては生活排水の占める割合が大きく, 衛生面で極めて大きな問題を有することが明らかとなった。Bang Pakong River については雨季においては全窒素0.7mg・l<sup>-1</sup>, 全リン0.079mg・l<sup>-1</sup>と日本の都市河川に比較すると低いが, 乾季になると

表1 タイ王国の池およびクローンの平均水質

項目	Sirikit pond	klong 1	klong 2	Rangsit (D.W.)	Rangsit (P.O.)
DO (mg・l <sup>-1</sup> )	2.66	1.14	2.32	1.17	1.34
COD <sub>Cr</sub> (mg・l <sup>-1</sup> )	20	28	8	13	10
T-N (mg・l <sup>-1</sup> )	1.71	4.18	1.03	1.52	1.79
T-P (mg・l <sup>-1</sup> )	0.210	0.838	0.092	0.328	0.239
NH <sub>4</sub> -N (mg・l <sup>-1</sup> )	0.20	2.83	0.14	0.39	0.57
Coliform (CFU・ml <sup>-1</sup> )	4	849	8.3	20	3

約2倍に増加することが明らかとなった(表2)。Bang Pakong River がバンコク湾に流入することを考慮すると、バンコク湾の富栄養化を防ぐ上でさらなる汚濁負荷削減が必要であることが示唆された。

タイ王国の飲料水源として重要な役割を果たす湖沼及び貯水池について調査を行ったところ、全窒素、全リンから評価すると調査した水域は Nong Han 及び Lam Takong を除いて、すべて富栄養化が進んでいると評価される(表3)。chl. a 濃度は日本の富栄養化した湖沼に比べると低いが、日本の湖沼に比較して濁質濃度が高く、日光の水中における減衰が大きく藻類の増殖を制限したものと考えられる。

#### (5) まとめ

本研究は、タイ王国における水域の水質汚濁の実態調査を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) 人口の密集しているクローンでは水質汚濁の進行が著しく、汚濁負荷としては生活排水の占める割合が大きく、衛生面で極めて大きな問題を有することが明らかとなった。

2) タイ王国の気候には雨季と乾季がみられ、Bang Pakong River では、乾季になると全窒素及び全リン濃度が雨季の2倍になることが明らかとなった。

3) タイ王国の上水源として重要な役割を果たす湖沼及び貯水池の多くにおいて富栄養化が進行していることが明らかとなった。

表2 Bang River の水質

項目	1997年9月(雨季)	1998年1月(乾季)
DOC ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	3.30	4.38
T-N ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.70	1.46
T-P ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.079	0.180

表3 タイ王国の湖沼および貯水池の水質

項目	Angkaew	Mae Tang Res.	Kwan Phayao	Bung Boraphet	Nong Han	Lam Takong	Bang Pra
CODMn ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	5	5	5	9	4	4	6
Chl. a ( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )	9.4	2.1	18.6	5.35	4.2	1.7	10.6
SS ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	6.5	77.0	31.0	15.4	4.6	0.4	6.0
T-N ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.90	1.80	1.95	1.65	0.28	0.30	0.71
T-P ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.060	0.150	0.110	0.055	0.028	0.023	0.079

## 2.1.2 有害藻類の現存量調査

### (1) はじめに

富栄養化の進行した湖沼・貯水池では、有毒アオコによる被害例がこれまで数多く報告されており、なかでも1996年にはブラジルで飲料水による死亡事故まで発生している。このようなことから、最近、WHOでは有毒アオコが産生するマイクロキスチンLRを飲料水の規制項目に設け、その規制値を  $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$  としている。2.1.1の水質汚濁の実態調査からも明らかなように、タイ王国の多くの湖沼、貯水池が富栄養化の状態にあることから、有毒アオコの増殖状態及びその毒性物質の顕在化が懸念される。マイクロキスチンは肝機能障害を引き起こす毒素で、7個のアミノ酸からなるポリペプチドであり、LR, YR, RR等の同族体が存在し、現在までに50ほどのマイクロキスチンが分離され、その構造が報告されている。そこで本研究では、毒性の解明が進んでいるマイクロキスチンLR, YR, RRに着目して湖沼・貯水池における予備的研究としての毒性物質の実態調査を行った。

### (2) 調査地点

マイクロキスチンの現存量調査は、湖沼及び貯水池で行った。調査を行った湖沼及び貯水池は、Chiang Mai大学の学内の貯水池(Angkaew)、チェンマイ近郊の貯水池(Mae Tang Reservoir)、Chiang Maiの北東に位置するKwan Phayao, Nakhon Sawan東部のBung Boraphet, Sakon Nakhonに位置するNong Han, Nakhon Ratchasimaに位置するLam Takong, Chonburi Provinceに位置するBang Pra Reservoirの計7カ所で、いずれもサンプリング地点としては上水の取水場を中心に数カ所とした。

### (3) 分析方法

有毒物質マイクロキスチンの分析には高速液体クロマトグラフィー(HPLC)を使用し、カラムにはODSを用いた。分析するサンプルはHPLCに供する前にまず

前処理を行い、有毒微細藻類の細胞内に存在するマイクロキスチンを溶出させる必要があるため、本試験では、有毒物質の回収量が多く、かつ分析値にばらつきが少ない酢酸抽出法を前処理として用いてマイクロキスチンの定量分析を行うこととした。また、ODS シリカゲルを用いた逆相タイプのHPLCは、マイクロキスチンの分析に多く用いられており、微量なオーダーまで検出が可能であるが、定量分析を行う場合、使用する機器の精度を実数値として認知しておく必要がある。本研究ではHPLCを使用するに当たり、上水試験法に従い、定量限界を求めた。その結果、定量限界 (CV=10%) はマイクロキスチンLRについて $0.09 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ となった。WHOでは飲料水におけるマイクロキスチンLRに対する規制基準として、 $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ を採用しているが、本研究で用いるHPLCは規制基準に則したマイクロキスチンの定量分析に十分に対応し得るものと考えられた。

#### (4) 結果及び考察

マイクロキスチンの分析を予備的研究として実施したところ、7カ所の湖沼・貯水池のうちKwan PhayaoとBang Praの2カ所で検出された。Kwan Phayaoにおいて、表層水を採取したサンプルではマイクロキスチンは検出限界以下であったが、プランクトンネットにより藻類を濃縮したサンプルからはマイクロキスチンLR及びRRを検出した。濃縮サンプルのマイクロキスチン濃度及びプランクトンネットのろ過量を考慮して、実際の濃度を計算したところ、マイクロキスチンLR、RRは、それぞれ $0.3 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、WHOの飲料水質ガイドラインのマイクロキスチンLR  $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ に比較すると低いことが明らかとなった(表4)。これは、有毒藍藻類が優占しているものの、光等が制限因子となり有毒藻類の現存量が少なく、マイクロキスチン濃度も低く推移しているためと考えられる。しかしながら乾季になり湖水の濁度が低下した場合、*Microcystis* 属をはじめとする

藍藻類の異常増殖が起こり、マイクロキスチン濃度が増加することが推察された。一方Bang PraではWHOのガイドラインに定められているマイクロキスチンLRは検出することができなかったが上水の取水場付近において $6.2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 、アオコの集積部分において $70.0 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ の全マイクロキスチンを検出した。乾燥重量当たりのマイクロキスチン量はKwan Phayaoにおいて低かったが、これは濁質が多かったためであると推察される。マイクロキスチンRR、YRについては、人の健康に及ぼす影響を解析する上で十分な知見が得られていないため現時点ではガイドラインに定められていないがその毒性は極めて高いことが報告されている。したがってこのような水源の水を飲料水源として用いた場合、マイクロキスチンを摂取し、健康障害を引き起こすおそれがあることが示唆された。このことから、有毒アオコの発生制御のための研究については、これからますます研究の重点化を図ることが必要不可欠な位置づけにあることがわかった。

#### (5) まとめ

本研究は、タイ王国における有毒物質マイクロキスチンの現存量調査を予備的研究として行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

- 1) マイクロキスチン現存量調査を7カ所の湖沼・貯水池で実施したところ、Kwan PhayaoとBang Praの2カ所で検出された。
- 2) Kwan Phayaoでは、マイクロキスチンLRは $0.3 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ と低濃度で、YR、RRもそれぞれ $0.0 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ となり、総マイクロキスチン濃度は $0.8 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。
- 3) Kwan Phayao等では、雨季であったため濁質濃度が高く、日光の水中における減衰が大きく藻類の増殖を制限したものと考えられた。
- 4) Bang Praでは、マイクロキスチンLR及びYRは検出されなかったが、RRが $6.2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 検出された。な

表4 湖沼および貯水池のマイクロキスチン濃度

項目	Kwan Phayao	Bang Pra	Bang Pra (bloom)
microcystin LR ( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.3	0.0	0.0
microcystin YR ( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.0	0.0	49.8
microcystin RR ( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.5	6.2	20.2
Total microcystin ( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.8	6.2	70.0
microcystin/DW ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.03	1.04	0.69

DW:dry weight

お、アオコの集積部では、総マイクロキスチン濃度が  $70.0 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$  と本調査で最も高い値を示した。

5) 乾燥重量当たりのマイクロキスチン量は Kwan Phayao において低かったが、これは濁質が多かったためであると推察された。

6) Kwan Phayao 及び Bang Pra においてマイクロキスチンが検出されたことから、このような水源の水を上水水源として用いた場合、マイクロキスチンを摂取する恐れがあることが示唆された。

## 2.2 水処理プロセス技術を活用した水質浄化

環境基本法の中に「環境への負荷の少ない持続的発展が可能な社会の構築」という極めて重要なテーマがあるが、これを達成させるために生活排水や産業排水から放流される汚濁物質を地域に適合した排水処理技術を用いて除去することは有効な手段の一つと考えられる。開発途上国では、生活排水や産業排水等の未処理放流により水環境の汚濁が著しく進行しており、安全な水資源を確保することが困難な状況となっている。これを改善するためにタイ王国ではラグーン処理や活性汚泥処理などを導入し、また近年では人工湿地を活用した処理方法も用いられるようになってきている。しかしながら、実際これらの処理方法が本質的に環境への負荷軽減に有効であるのかその評価は定まっていないのが現状である。そこで本研究では、①高濃度生活排水処理として用いられている嫌気・好気ラグーン処理施設の実態調査とその処理水が河川に与える影響 ②人工湿地を活用した低濃度生活排水処理施設の実態調査 ③活性汚泥法で高濃度食品工場排水を処理している施設の実態調査を行った。

### 2.2.1 嫌気・好気ラグーン処理を活用した高濃度排水処理

#### (1) はじめに

タイ王国では、その広大な未利用敷地を活用して、生活排水をラグーン処理しているところが多い。この方法は生活排水を池に導いて、池中の藻類の同化作用によって発生する酸素を、好気性細菌の有機物分解に利用させることが大きな特徴となっている。このためラグーン処理はエネルギーコストを極めて低く抑えることができるので、東南アジア地域では有効な処理方式の一つと考えられている。ほとんどの藻類は光合成によって二酸化

炭素と水から炭水化物をつくり、さらに窒素やリンを利用してタンパク質をもつくることのできる自栄養性の生物である。しかし、糖類や有機酸を栄養に摂取する藻類もあり、また暗所でも有機物があれば光合成なしで増殖できる藻類も存在する。このようなことから、少なくとも一時的に他栄養性の性質を表す藻類が存在し、水中の有機物を直接に、除去することも可能である。この場合、有機物を除去しているとはいえ、有機物を酸化しているとはいえ、有機物の酸化はあくまで細菌類によって遂行されている。日本では、生活排水をラグーンで処理しているところはほとんどなく、その処理効果については不明な点が多い。そこで本研究では、嫌気・好気ラグーン処理を活用した高濃度生活排水処理について浄化能力を把握する目的で、その水質改善効果の実態調査を行った。

#### (2) 調査地点

調査はタイ王国の北部に位置するランブーン工業団地で、1996年12月に行った(写真11)。工業団地から排出される生活排水を処理対象とした嫌気・好気ラグーン処理施設は初段の嫌気ラグーン処理と3段の好気ラグーン処理から構成されており、HRT60日、最大処理能力  $5,600 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  で運転できるよう設計されている。なお、工業団地における水収支は工業団地の近くを流れる Kuang 川から  $7,200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  の水供給を行い、 $4,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  の水をラグーン処理したのちこれを Kuang 川へ戻している。また、Kuang 川の水量は工業団地への供給前が  $647,200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 、放流水合流後の水量は  $644,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  であった。図3に放流水の河川への影響を調査するに当たってのサンプリング地点及びラグーン排水処理施設の位置を示した。



写真11 ラグーン処理

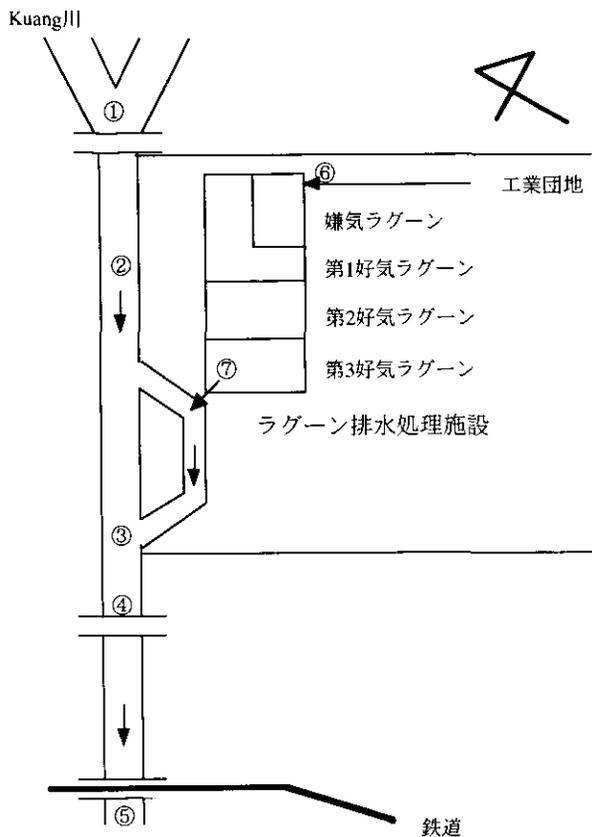


図3 サンプルング地点およびラグーン排水処理施設

### (3) 分析項目及び分析方法

河川水及びラグーン処理水はハイロート採水器を用いてサンプルングした。なお、ラグーン池の検鏡用微小動物試料はサンプルング量をボトルの1/4量程度とし、微小動物が酸素欠乏で死滅するのを防いだ。また、運搬に際しては温度の上昇を防ぐ目的でクーラーボックスを使用し、試料を約10℃に保った。藻類検鏡試験はデジタルピペットで検水0.05mlをけい線付スライドグラスにとり、これに18×24mmのカバーガラスをかぶせて計数を行った。水質分析項目は、気温、水温、pH、溶存酸素濃度(DO)、生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD<sub>Cr</sub>)、浮遊物質(SS)、伝導率、アンモニア性窒素、硝酸性窒素とした。なお、pH及びDOは現場ですみやかに測定した。

### (4) 結果及び考察

#### 1) 嫌気・好気ラグーン処理における水質改善効果

嫌気・好気ラグーン処理における処理水質は表5に示すとおりである。水温は初段の嫌気槽で28.5℃、放流水で30.0℃と高温を維持していた。pHは流入水で7.0、放流水で7.8となりアルカリ側に偏っていた。これは好

気ラグーンで藻類が増殖したことによるものと推察された。COD<sub>Cr</sub>は流入水で408mg・l<sup>-1</sup>、放流水で56mg・l<sup>-1</sup>となり、除去率は86.3%であった。タイ王国における工業団地を対象にした排水基準値はCOD<sub>Cr</sub>で120mg・l<sup>-1</sup>以下であることから判断すると嫌気・好気ラグーンは処理が良好であると考えることができる。BODは流入水で258mg・l<sup>-1</sup>、放流水で18mg・l<sup>-1</sup>となり、BOD除去率は93.0%で有機物の分解が良好であることが明らかとなった。

表5 嫌気・好気ラグーン処理における処理水質の性状

採水地点	流入水	処理水
水温(℃)	28.5	30.0
pH	7.0	7.8
SS(mg・l <sup>-1</sup> )	193	26
COD(mg・l <sup>-1</sup> )	408	56
BOD(mg・l <sup>-1</sup> )	258	18

次にランブーン工業団地におけるラグーン排水処理施設の微生物相を観察した。まず生活排水が流入する嫌気性ラグーンでは繊毛虫緑毛類の *Vorticella microstoma* が多数出現しており優占種となっていた。その他としてはペン毛虫類の *Petalomonas* sp. や肉質虫類の *Amoeba limax* などが出現していた。*Vorticella microstoma* は活性汚泥や生物膜などでもよく出現する種で、BOD-SS負荷が高い施設や生物学的硝化脱窒処理施設のうち溶存酸素が不足している脱窒槽などでよく観察されている。これらのことから嫌気ラグーンは、無酸素あるいは微好気的环境下にあり、有機物負荷が高い状態で運転されているものと推察された。この状況は初段の嫌気処理としては妥当であると考えられる。次に最終処理池である第3好気ラグーンでは輪虫類の *Rotaria* sp. や繊毛虫緑毛類の *V. convallaria* などが優占的に出現していた。これらは活性汚泥や生物膜などで処理が良好なときによく出現する種であり、処理水BODは *V. convallaria* で20mg・l<sup>-1</sup>以下の場合が多いことなどから放流水の処理水質は微生物相からみても良好であると考えられた。以上のことから嫌気ラグーン及び好気ラグーンのいずれでもろ過摂食性の微小動物が優占化しており処理水質の清澄化及びSS分の減量化に効果を発揮しているものと推察された。

なお、ラグーン処理は高濃度の生活排水を池(ラグーン)に導き、池中の藻類の同化作用によって発生する酸

素を細菌類の有機物分解に利用させることが特徴となっており、この点からいえば環境にやさしいクリーンなエネルギーの活用及びエネルギーコストの削減などに効果を発揮しているものと考えられるが、好気ラグーン中には多量の藻類が含まれており生物体としての新たな有機物が生成されていることも明白なことである。近年では、藻類のもつ毒性物質に注目が集まり、特に藍藻類 *Microcystis* 属の産生するミクロキスチンは青酸カリよりも毒性が強いことから、WHO ではこのミクロキスチンを飲料水質ガイドラインに基準化した。この *Microcystis* 属は本施設でも第1及び第2好気ラグーンで出現していることが確認できた。以上のことからラグーン処理を考える場合には、藻類のもつ毒性物質に十分注意を払う必要があると同時に、ラグーンにおける有毒藻類の増殖能を十分に把握しておく必要があるものと推察された。さらに有毒藻類対策をも考慮にいたした運転管理システムの確立が急務であると考えられた。

## 2) ラグーン処理水の河川への影響

ラグーン処理施設からの放流水が河川へ与える影響について検討したところ、放流口の上流部(採水地点1, 2)と下流部(採水地点4, 5)とでは生物相が異なることが明らかとなった。図4には河川における出現種数の比較を行った。これより、放流口の上流部ではプランクトンの出現種数が3~4種類と少ないのに対し、下流部では11種類と多くの種類のプランクトンが出現した。次に放流水(採水地点7)の生物相を調査したところ、10種類のプランクトンが確認された。これにより、放流口下流部の生物相はラグーン排水処理水の影響を受けている可能性が示唆された。図5にはプランクトンの分類階級群ごとの出現頻度を示し、各サンプリング地点ごとの比較を行った。これにより放流口上流部では珪藻類がほぼプランクトンの全体を占めているのに対し、下流部では珪藻類はほとんど出現せず、かわって緑藻類の占める割合が増加している傾向にあることが明らかとなった。なお、ラグーン排水処理水のプランクトンはそのほとんどが緑藻類で占められていたことから、放流口下流部は明らかにラグーン排水処理水の影響を受けているものと考えられた。なお、放流口上流部でよく観察された種は珪藻類の *Cyclotella kuetzingiana*, *Navicula* sp. で、下流部では緑藻類の *Chlorella vulgaris*, *Actinastrum hantzschii*, *Coelastrum sphaericum* などであった。これらの生物を中心として汚水生物学的に評価すると、放流

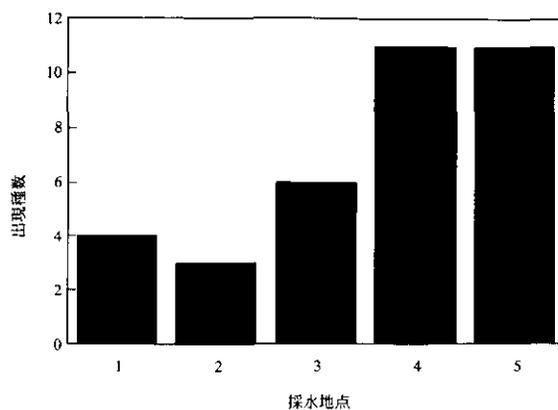


図4 Kuang川の各採水地点における出現種数の比較

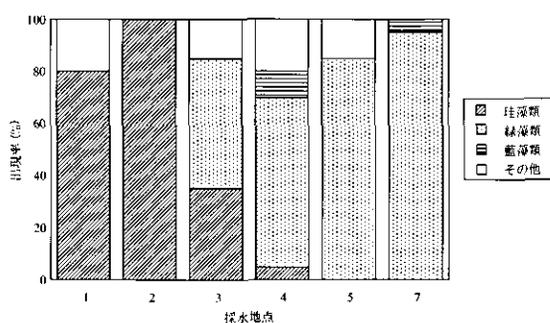


図5 各採水地点における珪藻類、緑藻類、藍藻類の割合

口上流部の水質は $\beta$ 中腐水性の水質に近く、下流部は $\alpha$ 中腐水性寄りの水質であることが推察された。なお、採水地点3は放流水と河川水との合流地点に当たっており、ここでの出現種数は6種類で、またプランクトンの分類階級ごとの出現頻度も珪藻類及び緑藻類がほぼ同程度出現していることなどから、放流口上流部及びラグーン排水処理水の両者の影響を受けているものと考えられた。

次に各サンプリング地点におけるプランクトンの出現個体数を図6に示した。放流口上流部でのプランクトン個体数は $60 \sim 100 \text{ N} \cdot \text{ml}^{-1}$ と少ないのに対して、下流部では $480 \sim 700 \text{ N} \cdot \text{ml}^{-1}$ と多い傾向を示した。また、ラグーン排水処理水のプランクトン総個体数は $3,480 \text{ N} \cdot \text{ml}^{-1}$ で、そのほとんどは緑藻類で、そのほか藍藻類及び無色ペン毛虫類がわずかに出現する程度であった。工業団地における水収支の調査結果より、 $4,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ のラグーン処理水がKuang川へ流され、放流水合流後の水量は $644,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ となることが明らかにされていることから、放流水は少なくとも100倍以上に希釈されるはずである。それにもかかわらず放流口下流部でのプランクトン数が多

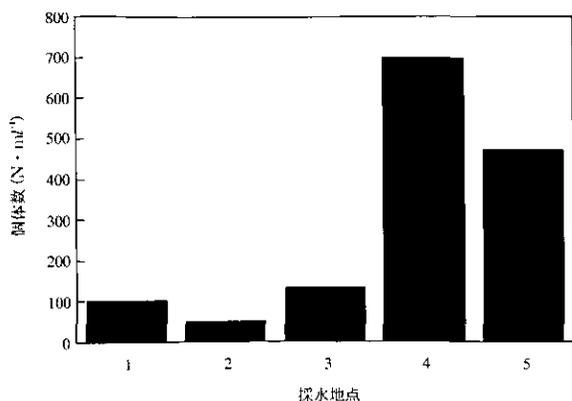


図6 Kuang川におけるプランクトン出現個体数の比較

いということは下流部では栄養塩濃度が高い傾向にあり、植物プランクトンが増加しているのではないかとということが示唆された。次に放流口の上流部及び下流部での理化学的性状の比較検討を行い、その結果を表6に示した。これより、水温、pH、DO、濁度、NO<sub>3</sub>-Nにおいてはほぼ同様な値であったが、NH<sub>4</sub>-Nで異なった値を示した。すなわち、放流口上流部では0.16 mg・l<sup>-1</sup>であるのに対し下流部では1.21 mg・l<sup>-1</sup>と極めて高い値を示した。また、伝導率も上流部では270～280 μS・cm<sup>-1</sup>であるのに対し、下流部では470～570 μS・cm<sup>-1</sup>と高くなっており、栄養塩類が増加していることを裏付けていた。以上のことから、ラグーン排水処理を行うに当たっては、河川環境への影響を考慮して、窒素、リンなどの栄養塩類の除去能力を向上させる嫌気・好気のサイクリック化による脱窒可能な操作条件への変更など運転管理システムの確立が必要であると考えられた。

#### (5) まとめ

本研究は、嫌気・好気ラグーン処理を活用した高濃度生活排水処理の水質改善効果の実態調査と、その処理水が河川に与える影響について検討を加えたもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) 嫌気・好気ラグーン処理は、有機物の除去に効果

が認められ、BOD除去率は93.0%と良好であった。

2) 優占微小動物はろ過摂食性の *Vorticella microstoma*, *V. convallaria*, *Rotaria* sp. などで処理水質の清澄化及びSS分の減量化に効果を発揮しているものと推察された。

3) 好気ラグーン処理の第2池及び第3池において有毒藻類である *Microcystis* 属が出現していることが明らかとなった。このことから、有毒物質ミクロキスティンの顕在化が示唆された。

4) 生活排水対策としてラグーン処理を活用する場合には好気性ラグーン池内で増殖する有毒藻類対策を考慮にいたした運転管理システムの確立が急務であると考えられた。

5) ラグーン処理水の河川への影響を検討したところ、放流口の上流部ではプランクトンの出現種数が3～4種類と少ないのに対し、下流部では11種類と多くの種類のプランクトンが出現し、また、放流口上流部では珪藻類がほぼプランクトンの全体を占めているのに対し、下流部では珪藻類にかわって緑藻類の占める割合が増加している傾向にあることが明らかとなった。

6) 藻類を中心として汚水生物学的に評価すると、放流口上流部の水質はβ中腐水性の水質に近く、下流部はα中腐水性寄りの水質であることが推察された。

7) ラグーン処理水を放流する場合には河川環境への影響を考慮して、窒素やリンなどの栄養塩類の除去能力を向上させる嫌気・好気のサイクリック化による脱窒可能な操作条件への変更など運転管理システムを確立することが必要であり、これからシステムの確立化のための研究を強化することが重要と考えられた。

#### 2.2.2 人工湿地を活用した低濃度排水処理

##### (1) はじめに

生態系に工学の技術を導入することで浄化機能を強化し、環境修復を図る生態工学プロセス技術は、近年、数多くの浄化技術が開発されているが、人工湿地を活用

表6 Kuang川の各採水地点における水質の比較

採水地点	1	2	3	4	5
水温 (°C)	25.2	26.0	26.0	26.0	26.5
pH	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
DO (mg・l <sup>-1</sup> )	6.7	5.8	6.8	6.4	6.5
NH <sub>4</sub> -N (mg・l <sup>-1</sup> )	—	0.16	—	1.21	—
NO <sub>3</sub> -N (mg・l <sup>-1</sup> )	—	0.81	—	0.81	—

した植生浄化法も注目される生態工学プロセス技術の手法のひとつである。植生浄化法とは、水生植物が繁茂する沼沢地帯に生活排水を流入させ、自然の浄化力で水の浄化を図る手法で、湿地を活用している。タイ王国では、未利用の広大な敷地が数多くあることから、植生浄化技術の開発を進めるようになってきている。本研究では、タイ王国における植生浄化法の浄化能力を把握する目的で、人工湿地を活用した低濃度生活排水処理施設の水質浄化能について実態調査を行った。

## (2) 調査地点

調査はタイ環境研究研修センターに近いIAD (Institute of Administration Development) 人工湿地で、1996年11月～1997年3月に行った(写真12)。なお、IADは公務員などが研修を行っている施設である。IAD人工湿地はガマを植栽した人工湿地で、その処理施設の概要は図7に示すとおりである。人工湿地を活用した排水処理は3段からなり、第1湿地帯、池、第2湿地帯の構成となっている。これが並列に一組あり、同時に生活排水の処理を行っている。第1湿地帯では細菌類による有機物の分解及びガマによる栄養塩類の取り込みが行われ、池では植物プランクトン→動物プランクトン→魚



写真12 人工湿地を活用した植生浄化法

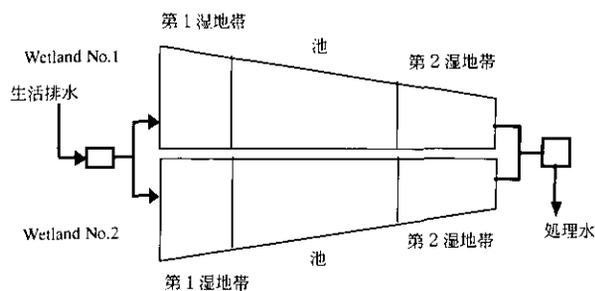


図7 人工湿地帯の概要

という食物連鎖を利用した生態系を取り入れ、細菌類による硝化作用及び植物プランクトンによる栄養塩類の取り込みなどを行い、最後の第2湿地帯では、細菌類による脱窒作用、デトリタスの分解、ガマによる栄養塩類の取り込みが行われるように設計されている。以上のような浄化プロセスを用いて、BOD負荷： $0.71\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  (植栽面積のみでは $1.56\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )、HRT：110日の条件下で処理機能の調査、評価を行った。

## (3) 分析項目及び分析方法

原水は流量升から、処理水は排水ピットからサンプリングを行った。なお、第1湿地帯及び池では小舟を出してサンプリングを行った。また、付着性の微小動物を調査するために植栽されたガマの茎部を採集した。茎はステンレス製のハサミで分割した後サンプリングボトルに入れた。なお、このとき水量はボトルの1/4量程度とし、付着微小動物が酸素欠乏で死滅するのを防いだ。運搬に際しては温度の上昇を防ぐ目的でクーラーボックスを使用し、試料を $10^{\circ}\text{C}$ 程度に保った。水質分析項目は、気温、水温、pH、溶存酸素濃度(DO)、生物学的酸素要求量(BOD)、全窒素、全リンとした。なお、pH及びDOは現場ですみやかに測定した。

## (4) 結果及び考察

低濃度生活排水をガマ植栽人工湿地で処理したときの処理水質は良好で、その結果は表7に示すとおりである。有機物については流入BODが $67\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ のとき処理水BODは $8\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と低く除去率も88.1%と高い傾向にあった。また、窒素、リンについても除去率は高く、それぞれ89.2%、88.9%であった。図8は各処理段階ごとのBOD、全窒素、全リンの変化を調査したものである。この図から明らかなように、第1湿地帯でのBOD除去率はすでに80%以上あり、窒素、リンの除去率もそれぞれ64.9%、67.5%と良好であった。なお、このときの第1湿地帯でのHRTは約34日であった。池(HRT60日)においてはさらに浄化が進みBOD、窒素、リンの

表7 ガマ植栽人工湿地帯における処理水質の性状

項目	BOD( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	T-N( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	T-P( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )
原水	67.0	11.81	1.26
処理水	8.0	1.27	0.14
除去率 (%)	88.1	89.2	88.9

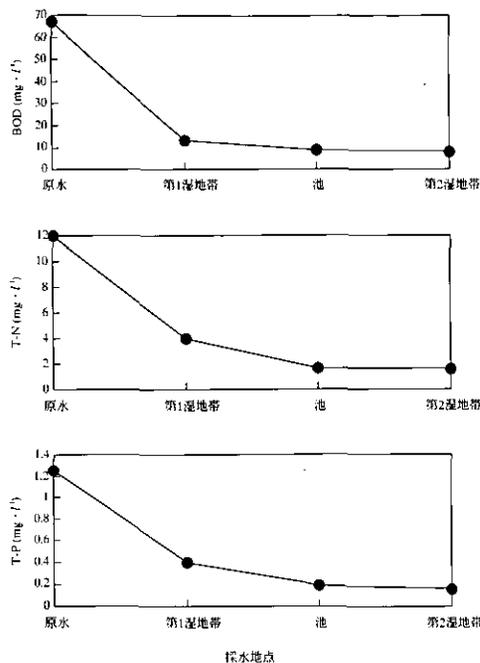


図8 人工湿地帯の各処理段階における水質の変化

除去率はそれぞれ 87.5%, 88.5%, 84.1% となった。第2湿地帯 (HRT16日) を通過した後の最終的な処理水の除去率はそれぞれ 88.1%, 89.2%, 88.9% となり、良好な処理水を得ることができた。これらのことからガマ植栽は有機物、窒素、リンについて浄化能の高いシステムであることが明らかとなった。しかしながら、本処理システムは滞留時間が非常に長く、日常放流される生活排水を処理するには現実的ではないことから、運転条件等の効率化を目指したシステムの高度化が最重要の課題になるものと考えられた。なお、本調査での特徴的なことは、植栽してあるガマの成長が著しく、高さが4~5mにも達することや (写真13)、年間を通して一部分は枯れることがあってもガマ全体が枯れるようなことはなく常に再生が行われていることであった。このようなことから東南アジア地域におけるガマ植栽は地域特性として安定した処理効果が常に期待できるものと考えられた。

次に浄化能を評価するために、植栽してあるガマの一部を切り取り、これに付着している微小動物の調査を行った。また、これとは別に微小動物個体数の定量を行う目的で付着板 (塩化ビニール製) を設置した。表8にガマの茎部に出現した主な微小動物相を示した。総出現種数は31種類で、ベン毛虫類は12種類、肉質虫類は2種類、繊毛虫類は15種類、後生動物は2種類であった。これよりガマ茎部は繊毛虫類とベン毛虫類の多い生物相であることが明らかとなった。第1湿地帯で優占的に



写真13 成長の著しいガマ

表8 ガマの茎部に出現した主な微小動物

区分	種名
ベン毛虫類	<i>Euglena vilidis</i> , <i>E. Caudata</i> , <i>E. acus</i> <i>Phacus pleuronectes</i> , <i>Cryptomonas ovata</i> <i>Anisonema</i> , <i>Entosiphon ovatum</i> <i>Oicomonas termo</i> , <i>Monas guttula</i>
肉質虫類	<i>Euglypha acanthophora</i> , <i>Arcella vulgaris</i>
繊毛虫類	<i>Halteria grandinella</i> , <i>Cyclidium glaucoma</i> <i>Aspidisca costata</i> , <i>Coleps hirtus</i> <i>Vorticella convallaria</i> , <i>Stentor roeseli</i>
輪虫類	<i>Philodina</i> sp., <i>Rotaria</i> sp.

出現したのは植物性ベン毛虫類の *Euglena* 属 (写真14) と *Phacus* 属 (写真15) であった。付着板でもそれぞれ  $3,700N \cdot cm^{-2}$ ,  $1,400N \cdot cm^{-2}$  と多数出現しており優占的であった。このことから第1湿地帯ではガマによる栄養塩類の取り込みだけではなく、植物性ベン毛虫類における栄養塩類の除去効果も少なからず認められるものと推察された。次の処理段階である池では自由遊泳性の繊毛虫類である *Halteria* 属, *Cyclidium* 属やほふく性の繊毛虫類である *Aspidisca* 属などがよく出現していた。これらの微小動物はろ過摂食性の微小動物で主に水中の細菌類や微細なデトリタスを捕食していることから池水の清澄化に有効に働いているものと考えられた。最後の処理段階である第2湿地帯では肉質虫類の *Euglypha* 属や自由遊泳性繊毛虫類の *Coleps* 属 (写真16) などがよく出現していた。*Euglypha* 属及び *Coleps* 属はBOD負荷が低く、硝化の進行した処理施設で頻繁に出現することから、第2湿地帯では有機物量は極めて少なく、硝

化の進行した状態にあるものと推察された。また、*Coleps* 属は細菌類のみならず植物プランクトンをも捕食することから、植物プランクトンの捕食者として位置づけられた。なお、同じ生態的地位として繊毛虫類の *Vorticella* 属 (写真17)、*Stentor* 属、*Epistylis* 属、輪虫類の *Philodina* 属、*Rotaria* 属などをあげることができた。これらの微小動物の出現量は少なかったが食物連鎖としてみれば第1消費者として重要な働きをしているものと考えられた。このようにガマ茎部は多種多様な微小動物で構成されていることから、微小動物の生息場所としても有効であることが裏付けられた。附着板を用いて定量を行った実験では、第1湿地帯で  $5,100N \cdot cm^{-2}$ 、池で  $1,400N \cdot cm^{-2}$ 、第2湿地帯で  $1,600N \cdot cm^{-2}$  となり、十分な量の微小動物が出現していることが明らかとなった。これらのことから、人工湿地を利用したガマ植栽における水質浄化機能は、ガマ本体及びガマ附着性微小動物の働きにより有効に作用しているものと推察された。

しかしながら、第2段目の処理に位置する池において、藍藻類の *Oscillatoria* 属が異常増殖して一時的に処理水質が悪化した経緯があった。このときは池の表層部

全体を藻類が覆い、表面が白色化し、藻類の分解が起こり、周りに悪臭が立ちこめ水質が著しく悪化した。これは調査の結果、流入水量が減少してHRTが長くなったことが原因であることが明らかとなった。このことは最適操作条件下での運転管理システムの確立と池における藻類の役割について再検討する必要があるものと考えられた。また、人工湿地を活用した排水処理を展開する上で、短時間でさらに処理能力を高めるためには直接あるいは間接的に窒素やリンの除去能に優れた水生植物を用いることが必要であると考えられるので、今後は水路実験などを行い、熱帯地方に適した水生植物を探索することが重要であると考えられた。

#### (5) まとめ

本研究は、人工湿地を活用した低濃度生活排水処理についてその水質改善効果の実態調査を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) 人工湿地を活用した低高度排水処理において、ガマ植栽と池を活用した人工湿地は有機物の除去に効果が認められ、BOD 除去率は 88.1% と高い傾向にあっ

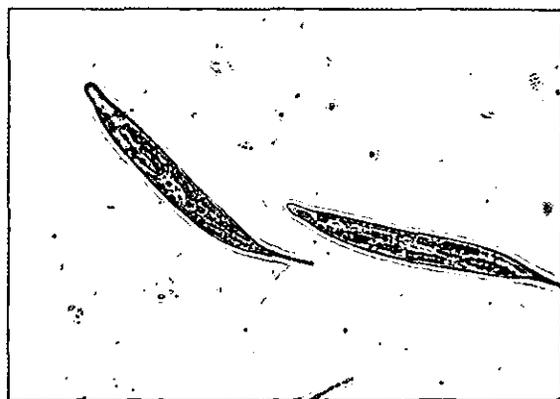


写真14 植物性鞭毛虫類の *Euglena* 属 (×330)



写真16 繊毛虫類の *Coleps* 属 (×330)



写真15 植物性鞭毛虫類の *Phacus* 属 (×330)

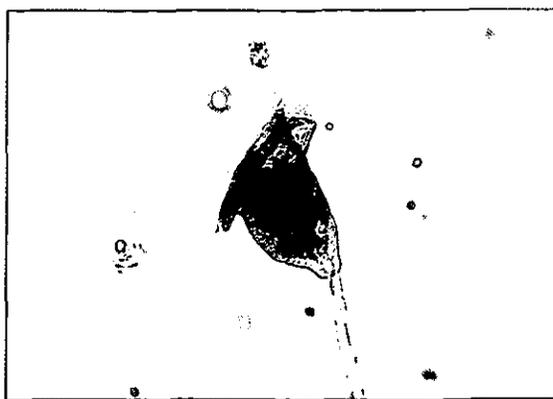


写真17 繊毛虫類の *Vorticella* 属 (×330)

た。また、全窒素や全リンの除去にも効果が認められ、それぞれ 89.2%, 88.9%であった。これらのことからガマ植栽は有機物、窒素、リンの除去について効率の高いシステムであることが明らかとなった。

2) 人工湿地において、ガマは成長が著しく、高さが 4~5 mにも達し、年間を通して一部分は枯れることがあってもガマ全体が枯れるようなことはなく常に再生が行われていた。このことは東南アジア地域におけるガマなどの抽水植物の植栽は地域特性として安定した処理効果が期待できることを示唆しているものと考えられた。

3) ガマ植栽は有機物、窒素、リンについて浄化能の高いシステムであることが明らかとなったが、本処理システムは滞留時間が非常に長く、日常放流される生活排水を処理するには現実的ではないことから、運転条件等の効率化を目指したシステムの高度化が最重要の課題になるものと考えられた。

4) ガマ茎部を検鏡したところ、繊毛虫類とベン毛虫類の多い生物相であることが明らかとなった。このことからガマ茎部は微生物の担体としての役割を担っていることが明らかとなった。

5) 人工湿地を利用したガマ植栽における水質浄化機能はガマ本体及びガマ付着性微小動物の働きにより有効に作用しているものと推察された。

6) 人工湿地を活用した排水処理を展開する上で、短時間でさらに処理能力を高めるためには直接あるいは間接的に窒素やリンの除去能に優れた水生植物を用いることが必要であると考えられるので、今後は水路実験などを行い、熱帯地方に適した水生植物を探索することが重要であると考えられた。

## 2.2.3 活性汚泥法による高濃度食品排水処理

### (1) はじめに

活性汚泥法は、タイ王国でも下水、工場排水の処理方法として用いられており、一般に、浄化率が高い、臭気が少ない、比較的敷地面積が少なくて済むなどの理由から都市部での採用が多い。本研究では、高濃度食品工場排水を処理している活性汚泥処理施設の浄化能力に着目して、その水質改善効果について実態調査を行った。

### (2) 調査地点

1997年9月、1998年1月に Surapon Nichirei Foods の唐揚げ工場の排水処理施設の調査を行った。本処理施設

はばっ気槽容積 3180t, BOD 容積負荷  $0.2\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  の表面ばっ気方式の活性汚泥法で(写真 18)、ばっ気槽 3 槽及び沈殿槽からなる処理施設である。汚泥の引き抜き量は 1 週間に 2~30t として運転を行っている。

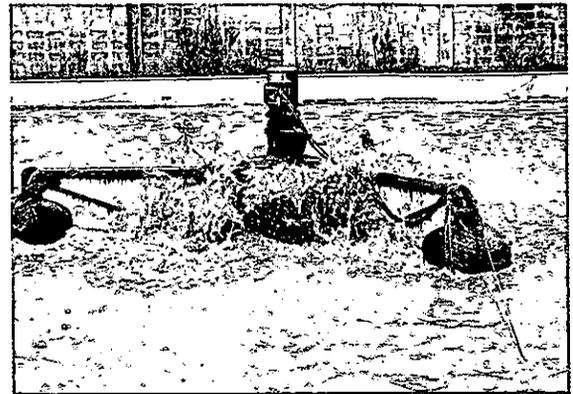


写真 18 表面ばっ気方式の活性汚泥法

### (3) 分析項目

分析項目として各ばっ気槽及び原水、処理水について、水温、pH、溶存酸素 (DO)、ORP、浮遊物質 (SS, MLSS)、硝酸性窒素、リン酸態リン、アンモニア性窒素、全菌数、大腸菌群数について測定を行った。原水、処理水については  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、BOD、全窒素、全リン、透視度についても測定を行った。また、ばっ気槽においては SV30 についても測定を行った。

### (4) 結果及び考察

ばっ気槽において SV30 が約 30%であり、処理水の透視度 1.5m と固液分離が良好に行われていた。本処理施設において BOD 除去率 99%以上、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率 66% と有機物除去能力は極めて高いことが明らかとなった(表 9)。しかしながら、窒素除去率 53%、リンについては処理水の方が高くなっており、栄養塩類の除去能力が極めて低く、有毒物質ミクロキスチンを産生する藍藻類の異常増殖防止の観点から、嫌気・好気条件、間欠ばっ気、循環の組み込みといった栄養塩類の除去能力の

表 9 食品工場排水を処理する活性汚泥法の処理水質

項目	流入	流出	除去率 (%)
BOD( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	1100	3	> 99
$\text{COD}_{\text{Cr}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	157	54	66
T-N( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	49	23	53
T-P( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	7.3	9.4	0

高い処理法への変更が必要であると考えられた。

本処理施設においては透視度1.5mの極めて清澄な処理水が得られているが、本処理施設では沈殿槽にグッピー等の魚類が生息しており（写真19）、汚泥の減量化・処理水の透明化に貢献していることが推察された（図9）。ばっ気槽の微生物の生物相としては、原生動物肉質虫類 *Euglypha tuberculata*（写真20）が優占種であり、その他に繊毛虫類 *Aspidisca* 属（写真21）、*Dorepanomonas* 属、*Coleps* 属、*Chaetospira* 属、*Paramecium* 属、*Epistylis* 属、*Trachelophyllum* 属、*Didinium* 属、*Litonotus* 属、*Vorticella* 属等の原生動物が出現していることが明らかとなった。水温約30℃の条件下、このような原生動物が高い活性を有し、高い捕食能力を有することも汚泥の減量化、処理水の透明化の要因であり、ばっ気槽内における微小動物の定着能の強化の重要なことが明らかとなった。

今後、エネルギー消費を抑え、処理の効率化を図って



写真19 沈殿槽に生息するグッピー；越流堰の陰の部分に数匹のグッピーがみえる

いく上では、日本の技術をそのまま当てはめるのではなく、熱帯地域において浄化に貢献する細菌、原生動物、後生動物といった微生物の酸素消費速度をはじめとする生物学的、化学的な根拠に基づいた操作条件の最適化等に関する検討及びそれに基づいた排水処理技術の開発が必要であると考えられた。

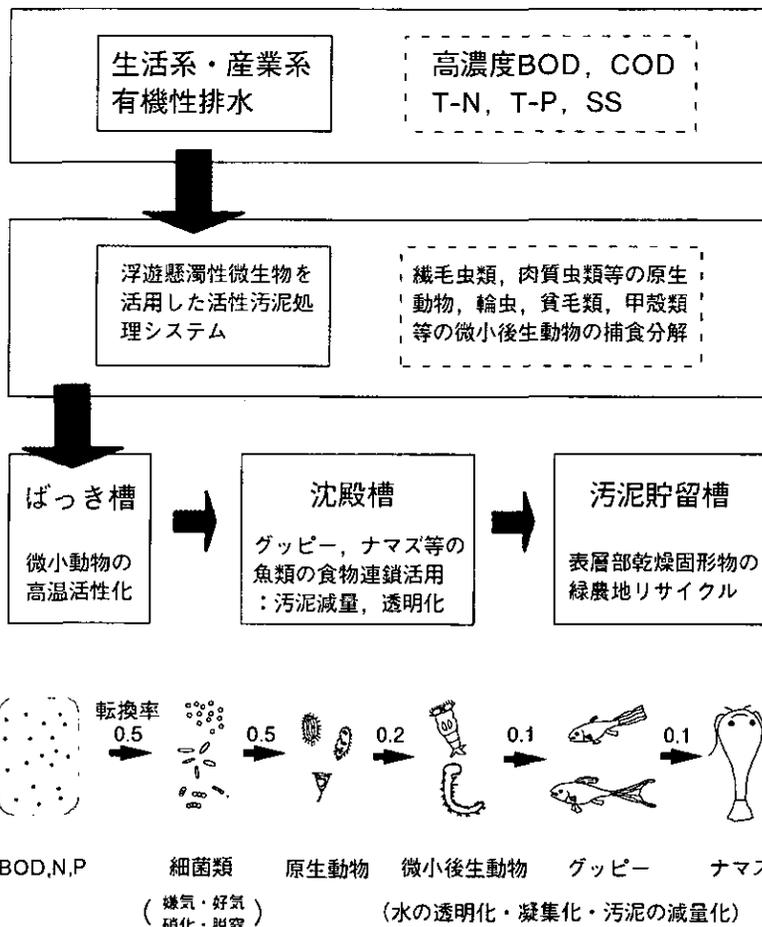


図9 捕食・被食系食物連鎖を活用した水質浄化・汚泥減量化システム

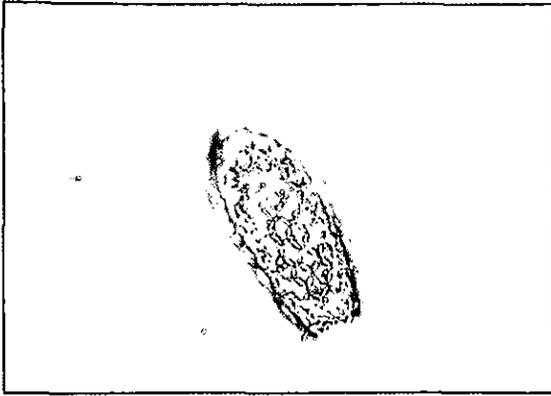


写真20 肉質虫類の *Euglypha* 属 (×442)

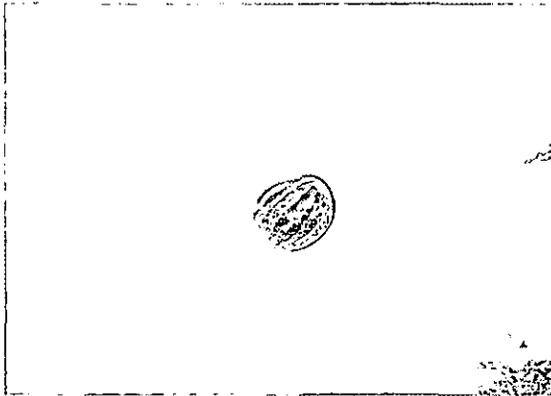


写真21 繊毛虫類の *Aspidisca* 属 (×442)

#### (5) まとめ

本研究は、活性汚泥法で高濃度食品工場排水を処理している施設の実態調査を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) 食品産業排水を処理している活性汚泥では、高濃度汚濁物質の除去に効果が認められ、BOD除去率は99%以上と極めて良好であった。しかしながら全窒素の除去率は53%、リンに至っては全く除去されておらず、栄養塩類の除去能力が極めて低いことが明らかとなった。

2) 透視度1.5mと極めて清澄な処理水が得られているが、本処理施設では沈殿槽にグッピー等の魚類が生息していることから、汚泥の減量化・処理水の透明化にこれらが貢献していることが推察された。

3) 水温約30℃の条件下、微小動物が高い活性を有し、高い捕食能力を有することも汚泥の減量化、処理水の透明化の要因であり、ばっ気槽内における微小動物の定着能の強化の重要なことが明らかとなった。

4) エネルギー消費を抑え、処理効率を図っていく上で、熱帯地域において浄化に貢献する細菌や微小動物の

酸素消費速度をはじめとする生物学的あるいは化学的な根拠に基づいた操作条件の最適化などに関する検討及びそれに基づいた排水処理施設の開発が今後必要であると考えられた。

5) 微小動物の定着化は食品排水処理対策に限らず、はん用的に重要なことが明らかにされたことから、浄化システムへの微小動物の大量定着化の操作条件の確立が必要であると考えられた。

### 2.3 生態工学プロセス技術を活用した水質浄化

湿地や干潟の活用など、いわゆる環境生態工学の視点に立った水質浄化技術については米国環境保護庁をはじめイギリス、オランダ、ドイツ、オーストリア、デンマークなどの欧州諸国においても重要な位置づけにあることを指摘し、植物の根圏を活用した浄化システムの構築などを目指して数多くの研究がなされはじめている。これまでに、自然湿地 (Natural Wetland) や人工湿地 (Constructed Wetland) などの研究事例の報告がなされているが、いずれも浄化能の長期的継続能力に関する検討が不十分であることや適正運転条件に関する基礎的知見の集積が不十分であるなど、未解明な部分が数多く残されている。また、水生植物の再資源化の観点から考えると、食用植物や観賞用植物を栽培できる水耕栽培技術を活用した水質浄化も重要となる。本研究では、タイ王国における水生植物を活用した植生浄化法の検討を、抽水植物及び食用植物を用いて実験的に検証することとした。

#### 2.3.1 抽水植物を活用した水質浄化

##### (1) はじめに

自然湿地の代表的抽水植物であるアシヤマコモについては、日本をはじめ温帯に属する地域において、冬季など地上部が枯死する季節があり、植物体の生長も季節により大きく左右されるため、その浄化に果たす役割も季節的な変動が大きいことが指摘されている。しかしながら、タイ王国においては乾季・雨季・雨季などの季節性は有するものの年間を通じて温暖な気候のため、アシなどは一年中生長を続けているという特殊性を持っている。こうした地域特性は、同一種の植物を活用した浄化機構を考えた場合でも、大きく異なる浄化特性を示すことを意味しており、それぞれの気候に応じた運用管理手法の開発が必要であることを示唆している。そこで本

研究では、地域特性に適合した水生植物を探索する目的で、タイ王国に生息する水生植物のうち、抽水植物に着目して、その水質浄化能について実験的検討を行った。

(2) 実験方法

1) 実験装置

実験は、ERTC (タイ環境研究研修センター) に水生植物植栽浄化実験装置を設置して行った。実験装置は図10に示すとおり、長さ10m、幅1mのコンクリート製水路に、60cm厚で土を充てんしたもの4基を用いた(写真22、23)。各水路には、図11に示すとおり、アシ (Reed: *Phragmites australis*: 写真24)、ヒメガマ (Cattail: *Typha angustifolia*: 写真25) 及びフトイ (Bulrush: *Schoenoplectus validus* = *scrpus lacus-*

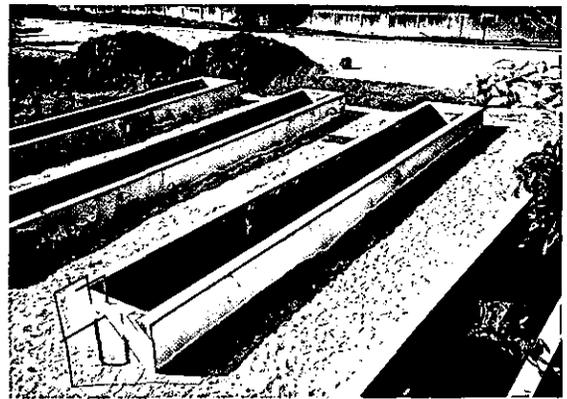


写真22 準備中の水生植物植栽浄化実験装置  
水路の後方に水路投入用の土壌と水の短絡流を防ぐための土嚢が置かれている。

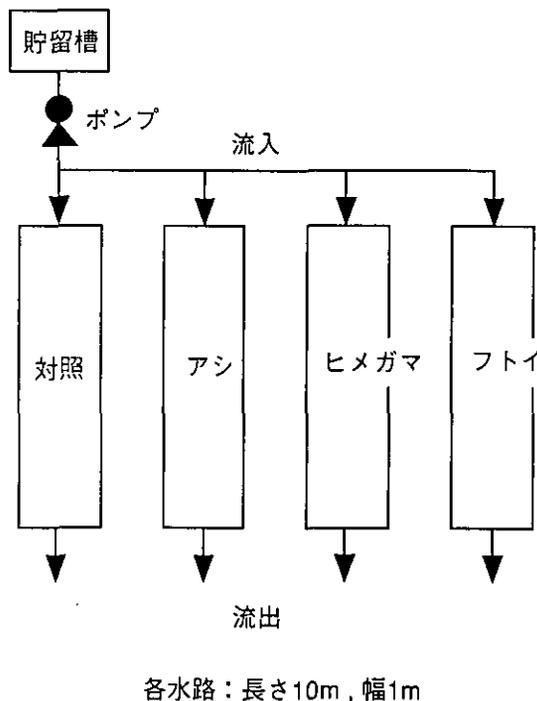


図10 実験装置の概要



写真23 実験中の水生植物植栽浄化水路の外観  
左から対照、アシ、ヒメガマ、フトイの各水路。対照水路の後方には原水タンクがみえる



写真24 アシ植栽水路の状態

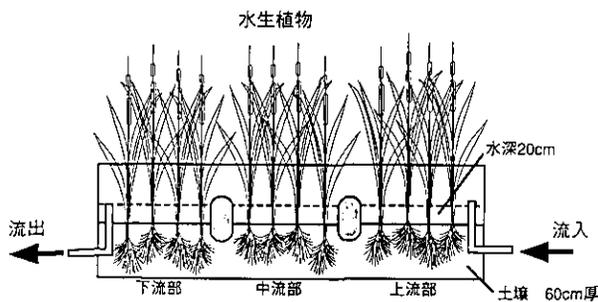


図11 実験水路の構造

tris:写真26)を植栽し、水深20cmとなるよう生活雑排水をポンプ流入させた。なお、植栽しない水路すなわち未植栽水路を対照として用い比較検討を行った。流入水の短絡流が生じにくいよう、10mを3区画に区切って表層部に水流をとどめる堰を設置した。流入水は、ERTCの厨房などからである生活雑排水を貯留タンク



写真25 ヒメガマ植栽水路の状態



写真26 フトイ植栽水路の状態

クのために用いた。この生活雑排水を定量ポンプにて、1日1回各水路に320 l 流入させた。各水路の滞留時間は6日間に設定した。通水は1997年4月より開始した。なお、通水開始15カ月経過後の1998年6月に一時通水停止、1998年10月に再度通水を開始して、原水流入停止と再開後の比較により水生植物の再生能力の検討を行った。

### 2) 分析項目及び分析方法

流入水及び処理水について、通水開始6カ月経過した1997年9月及び同10カ月経過した1998年1月に水質分析を行った。分析項目は、気温、水温、pH、溶存酸素濃度(DO)、酸化還元電位(ORP)、生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、全溶存性窒素(DT-N)、全リン(T-P)、全溶存性リン(DT-P)、アンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N)、亜硝酸性窒素(NO<sub>2</sub>-N)、硝酸性窒素(NO<sub>3</sub>-N)、リン酸性リン(PO<sub>4</sub>-P)及び透視度(Transparency)とした。

植栽した水生植物については、植物体の全高及び茎の直径、生息密度について区画法を用いた調査を行った。区画法には10×10cmの方形区を用い、10m延長の水

路を上流部(Upper)、中流部(Middle)、下流部(Lower)に分けて各流部それぞれ3区画以上の設定で調査を行った。調査時期は水質分析と同様に通水開始6カ月経過した1997年9月及び同10カ月経過した1998年1月とした。また、各水生植物の水中部の茎について、付着している付着性微生物の現存量及び生物相について生物顕微鏡及び実体顕微鏡を用いた検鏡を行い検討を加えた。

通水開始15カ月目の1998年6月から9月の約3カ月にわたり原水通水を停止し、1998年10月から通水を再開させ、3カ月にわたる断水状態が供試水生植物の生長にいかなる影響を及ぼしたかについて1998年12月に水生植物調査を行い検討を加えた。

### (3) 結果及び考察

#### 1) 水質浄化特性

図12は通水開始10カ月経過後の1998年1月における、流入水及び各実験水路処理水の透視度(Transparency)を比較したものである。この図から流入水の18.8cmという透視度に対して、フトイ(Bulrush)と未植栽水路では透視度の向上が認められず、ヒメガマ(Cattail)では24.2cmと透視度が高まり、アシ(Reed)で28cmと最も高い透視度が得られた。アシで最も高い透視度が得られたのは、後述する植物体の生育密度と密接な関係があると考えられる。すなわち、水生植物が密生して浮遊懸濁物を除去するフィルター効果が最も高かったこと、及び植物体密度の高まりに対応して付着微生物現存量の増大が認められたことに起因するものと考えられる。

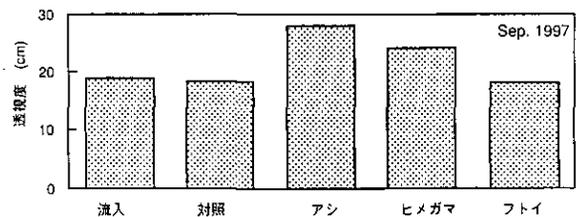


図12 水生植物植栽水路における処理水透視度の比較

図13は通水開始10カ月経過後の1998年1月における、流入水及び各実験水路処理水の生物化学的酸素要求量(BOD)を比較したものである。対照(Control)、アシ(Reed)、ヒメガマ(Cattail)、フトイ(Bulrush)それぞれの水路のBOD除去率は、88%、89%、80%、72%であった。この図から、各水路とも高いBOD除去

率を示していることが明らかである。換言すれば、未植栽水路でも高いBOD除去率が示されており、十分な滞留時間が確保された条件においては、生物分解性の高い有機物は抽水植物の有無にかかわらず除去可能であることも明らかである。すなわち、本実験における未植栽水路には高密度にナンゴクアオウキクサ (*Lemna aquinoctialis* = *L. paucicostata*) が生息していることから、本種も抽水植物と同様に高い有機物除去能を有することが明らかである。

図14は、上が通水開始6カ月後の1997年9月、下が通水開始10カ月後の1998年1月における、流入水及び各実験水路処理水のpHを比較したものである。一般に水生植物、特に沈水性の種類が高密度に生息する水域では光合成活性に起因してpHの上昇が認められることが知られている。また、硝化反応もpHに大きな変動を生じさせることが知られている。しかしながら、本実験区に用いた抽水植物については大きなpH変動を生じさせないことが明らかとなった。

図15は、上が通水開始6カ月後の1997年9月、下が通水開始10カ月後の1998年1月における、流入水及び各実験水路処理水の溶存酸素濃度(DO)を比較したものである。流入水の溶存酸素濃度は1997年9月で $0.22 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、1998年1月で $1.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であるが、いずれの水路においても溶存酸素濃度が高まっており、1997年9月のヒメガマ(Cattail)では $1.72 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ と流入水の8倍濃度にまで高まっている。各水路の溶存酸素濃度飽和度は、1997年9月では、流入水が2.9%であるのに対して対照(Control) 18.4%、アシ(Reed) 20.3%、ヒメガマ(Cattail) 21.8%、フトイ(Bulrush) 12.1%であった。これらの溶存酸素濃度の向上は水路内における再ばっ気及び水路内付着珪藻などの光合成による酸素供給に起因するものと考えられる。

図16は、上が通水開始6カ月後の1997年9月、下が通水開始10カ月後の1998年1月における、流入水及び各実験水路処理水の酸化還元電位(ORP)を比較したものである。流入水の酸化還元電位は1997年9月で $-70 \text{ mV}$ 、1998年1月では $-215 \text{ mV}$ といずれも還元状態に近い低溶存酸素条件を示唆するものであるが、処理水においては、1997年9月ですべてプラスの値、1998年1月でもフトイを除いて酸化条件に近づいていることを示していた。これらの結果は図15に示す溶存酸素濃度の結果を裏づけるものである。

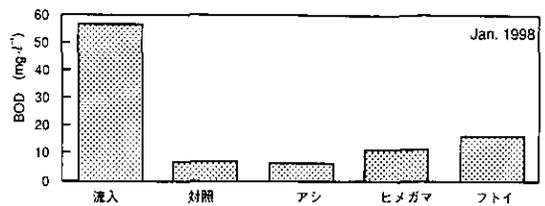


図13 水生植物植栽水路における処理水BODの比較

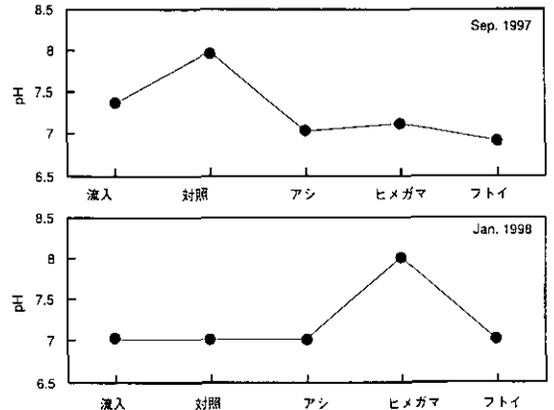


図14 水生植物植栽水路におけるpHの比較

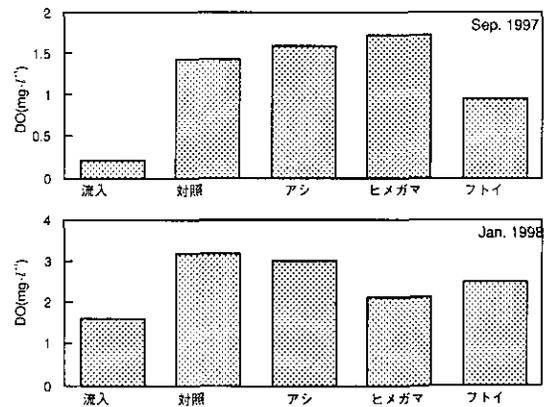


図15 水生植物植栽水路における溶存酸素濃度の比較

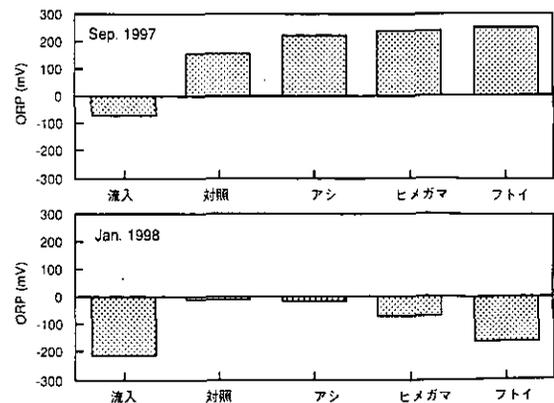


図16 水生植物植栽水路における酸化還元電位の比較

図 17 は、上が通水開始 6 カ月後の 1997 年 9 月、下が通水開始 10 カ月後の 1998 年 1 月における、流入水及び各実験水路処理水の全溶存性有機炭素濃度 (DOC) を比較したものである。1997 年 9 月の調査時には流入水の全溶存性有機炭素濃度が  $7.2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  と低いため、処理水の全溶存性有機炭素濃度に大きな差は認められなかったが、1998 年 1 月には流入水の全溶存性有機炭素濃度が  $27.9\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  と高く、処理水ではフトイの  $22.4\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、除去率約 20% を除いていずれの水路においても 50% 以上の除去率を示した。ここでも未植栽水路の全溶存性有機炭素濃度が低いことが明らかであり、図 13 に示した生物化学的酸素要求量の傾向と一致しており、ナンゴクアオウキクサの関与が示唆された。

図 18 は、1998 年 1 月における、流入水及び各実験水路処理水の化学的酸素要求量 (COD<sub>C</sub>) を比較したものである。流入水に対する COD 除去率で比較すると、対照 (Control) 60%, アシ (Reed) 68%, ヒメガマ (Cattail) 56%, フトイ (Bulrush) 35% であった。ここでも図 17 に示した全溶存性有機炭素濃度 (DOC) と同様にフトイの有機物除去能が低いことが示された。化学的酸素要求量 (COD<sub>C</sub>)、全溶存性有機炭素濃度 (DOC) 及び生物化学的酸素要求量 (BOD) などの有機物指標の検討結果から、有機物除去には供試抽水植物中でアシが最も高い効果を示し、次いでヒメガマ、フトイの順となることが明らかとなった。また、未植栽水路に繁茂した浮遊性植物のナンゴクアオウキクサも有機物除去には大きく貢献することが明らかとなった。今後の検討課題として、未植栽水路を遮光して植物の関与しない対照系を設定して、供試水生植物の水質浄化能を検討する必要があると考えられる。

図 19 は、1997 年 9 月における、流入水及び各実験水路処理水の全窒素濃度 (T-N) 及び全溶存性窒素濃度 (DT-N) を比較したものである。流入水に対する窒素除去率で比較すると、対照 (Control) 58%, アシ (Reed) 90%, ヒメガマ (Cattail) 89%, フトイ (Bulrush) 89% であった。窒素除去能に関しては、BOD, COD, DOC などの有機物指標に比較して未植栽水路よりも抽水植物植栽水路において高い効率を示すことが明らかとなった。これは、未植栽水路に繁茂した浮遊性植物であるナンゴクアオウキクサに比較して、アシ (Reed)、ヒメガマ (Cattail)、フトイ (Bulrush) などの抽水性植物が窒素除去に大きく貢献できることを示唆するも

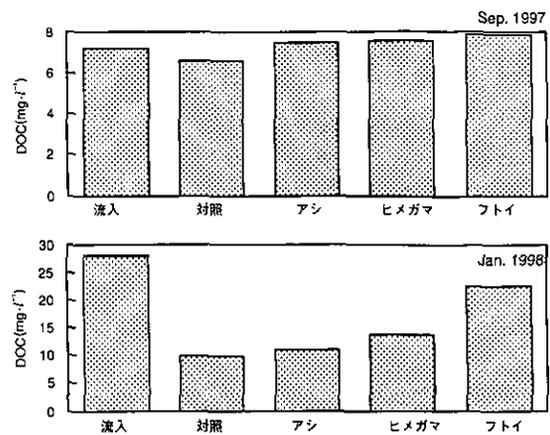


図 17 水生植物植栽水路における処理水溶存性有機炭素濃度の比較

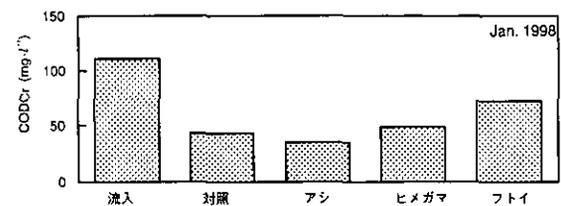


図 18 水生植物植栽水路における処理水 COD 濃度の比較

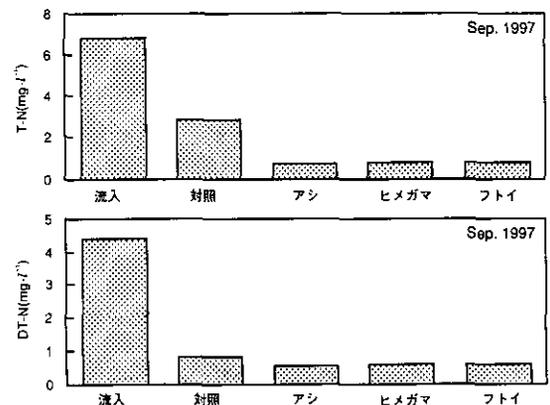


図 19 水生植物植栽水路における処理水窒素濃度の比較

のである。植物が窒素を吸収することによる窒素除去効果については、比較的少ないものであることが明らかにされている。このことは、窒素除去が、主に硝化脱窒反応によるものであることを示唆するものである。抽水性の植物は地下茎を発達させるため、土中において脱窒反応が最も盛んとなる酸化・還元界面の絶対的容量増加に寄与することに起因するものと考えられる。すなわち、硝化反応は植物体の茎・根などの表面のような好氣的な部分において進行し、土壤深部は嫌氣的条件となり炭素供給源として機能して、

好気条件と嫌気条件との界面が脱窒反応に大きく寄与する場所となる。地下茎のごく近傍は酸化条件となるために、地下茎の存在が、好気・嫌気条件の界面を著しく増大させる役割を担うと考えられる(写真27)。



写真27 抽水植物の地下根茎の発達状況

図20は、1997年9月における、流入水及び各実験水路処理水の窒素形態に着目して比較したものである。この図から、流入水に $3.44 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ という高濃度で存在したアンモニア性窒素はいずれの水路においても硝化され、未植栽水路に $0.1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ とわずかなアンモニア性窒素が残存するものの、抽水植物においては全く検出されないまでに硝化反応が進行することが確認できる。

窒素と同様に富栄養化に大きく関与する無機栄養塩であるリンに着目すると、図21に示すとおり、全リン(T-P)、全溶存性リン(DT-P)のいずれにおいても、窒素と同様に、未植栽水路に比較して供試抽水植物において除去効果が高いことが明らかとなった。リン除去には植物の吸収による効果が大いといわれることから、地下茎を発達させる抽水植物において、その吸収活性が高まったものと考えられる。懸濁性のリンについては沈殿により取り除かれ、土壌に堆積しているが、地下茎の働きにより好気条件を保つことができ、リンの溶出が抑えられるものと考えられる。以上のことから、抽水植物を活用したBOD、窒素、リンについての浄化機構は図22のように模式化することができる。

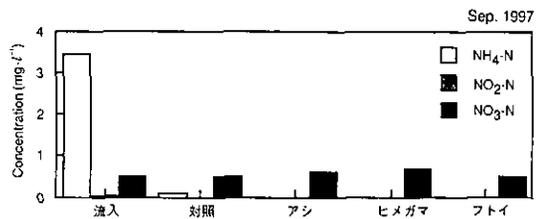


図20 水生植物植栽水路における形態別の窒素濃度の比較

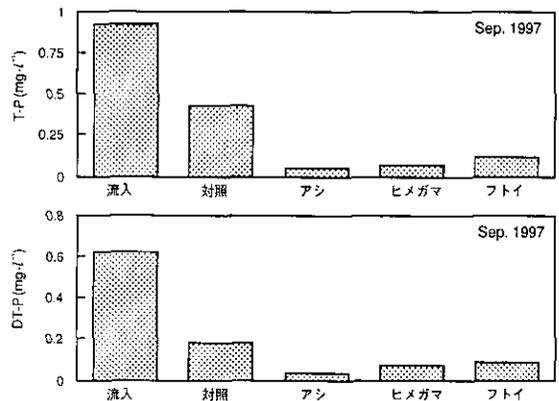


図21 水生植物植栽水路における処理水リン濃度の比較

## 2) 水生植物体現存量

図23は、実験水路内部を短絡流防止用に設置した堰を境に上流部(Upper)、中流部(middle)、下流部(Lower)に分けて、各々における1997年9月における供試水生植物の水面からの高さを比較したものである。同様に図24は、水面から70cm部分の茎の直径を比較したものである。これらの値は、区画(コドラート)法にて3区画以上の方形区内の全植物を計測した値を基に算出したものである。これらの図から、1997年9月においては、上流部、中流部、下流部において植物体の生長に著しい差異は認められないことが明らかである。厳密に比較すると、アシ(Reed)及びヒメガマ(Cattail)については、高さ及び茎の直径とも流入部に近い上流部において低く、流下して浄化が進行するにしたがって高く、太くなる傾向が認められる。逆にフトイ(Bulrush)については、上流部で最も高く、太い状態を示し、流下に伴い低く細くなる傾向が認められる。しかしながら、その差は小さく大きな変化はないといえる。水生植物植栽浄化法を適応した施設の植物は、一般には流入部の植物体が高さ、太さに富み最も生育がよく、流下して浄化が進行するに伴い生育が制限されて高さ、太さともに貧弱になるものと考え

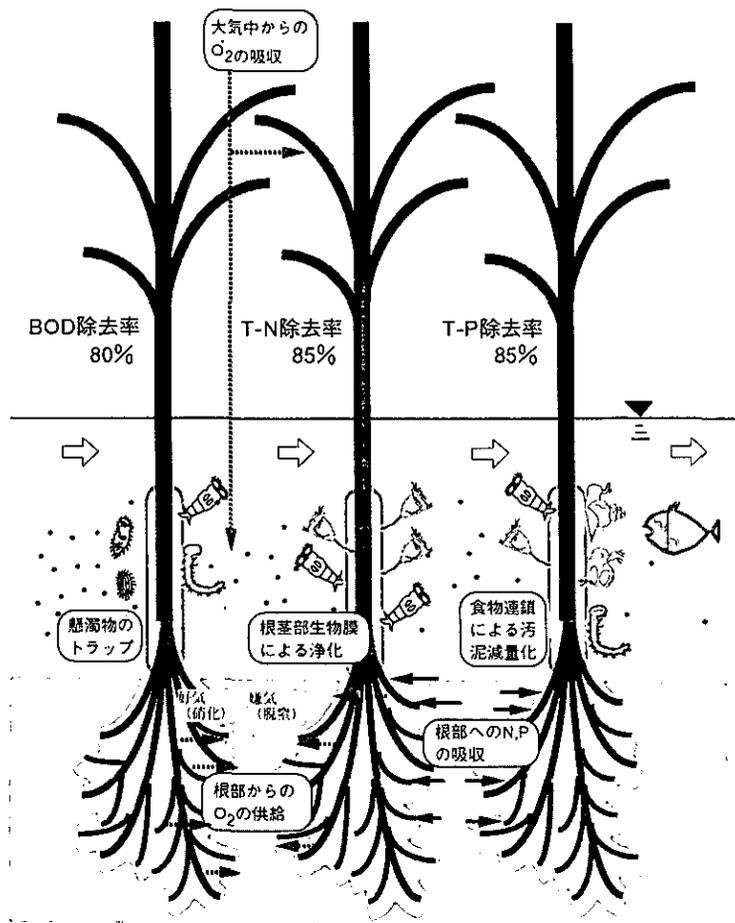


図22 抽水植物植栽システムによる浄化機構

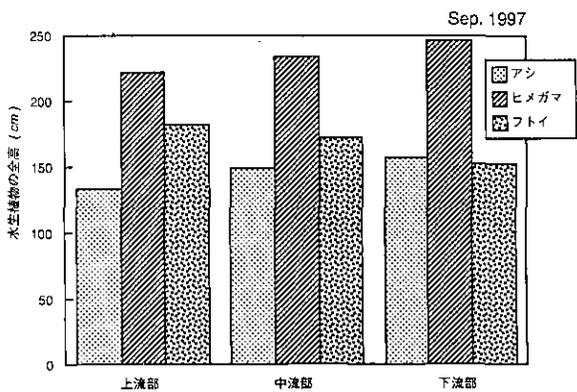


図23 水生植物植栽水路における植栽された水生植物の全高の比較

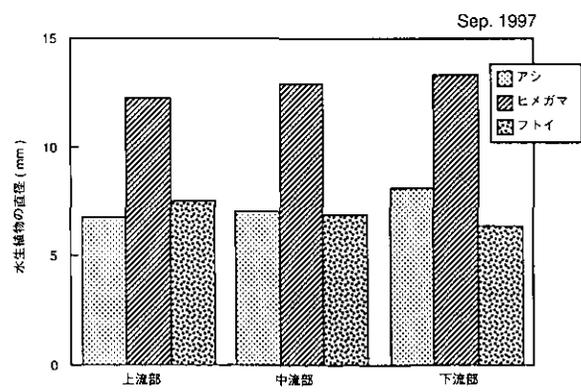


図24 水生植物植栽水路における植栽された水生植物の茎部直径の比較

られる。1998年1月に再度行った同様の計測結果を図25及び図26に示す。この図では、流入部に近い上流部で植物の生育が最も順調で流下に伴い高さ・茎の太さともに減少する傾向が認められるようになった。先の1997年9月期の状態では、いまだ通水初期の生育阻害の影響が出ていたものと考えられる。また、図25に示した植物体の高さの比較を流下

距離に着目して見ると、アシでは流下に伴い高さが減少していることが明らかであるが、ヒメガマとフトイについては、流下に伴う高さの減少がほとんど認められない。図26に示した茎の直径についても同様で、アシについては下流部の直径が細くなっていることが明らかであるがヒメガマとフトイについては、ほぼ均一の茎直径を示している。これらの事実、

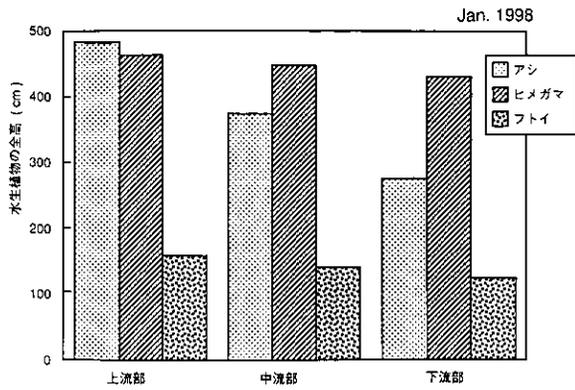


図25 水生植物植栽水路における植栽された水生植物の全高の比較

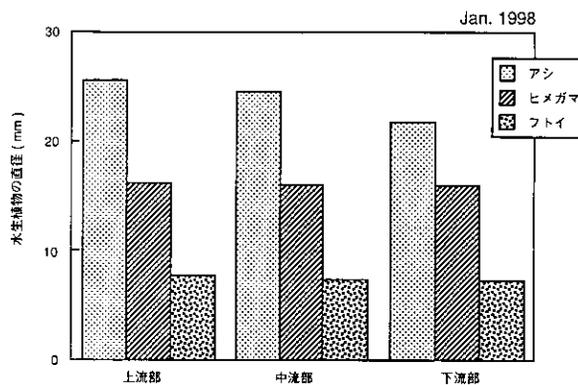


図26 水生植物植栽水路における植栽された水生植物の茎部直径の比較

ヒメガマとフトイの生育は既に飽和状態に達しつつある条件にあり、アシに関しては、いまだ中流部から下流部において栄養律速による生長不十分状態が認められていることを示唆するものである。

図27は、抽水植物の茎部が区画(コドラート)内において占める被度、いわゆる専有面積の割合を、上流部と下流部に分けて比較検討したものである。上の図は1997年9月の状態を示したものであるが、下の図に示す1998年1月の状態と比較して明らかに被度が小さく、生長不十分の状態であることがわかる。一方、下の図で示した1998年1月の場合にはアシで被度32%、ヒメガマで被度23%を示し、ほぼ飽和状態であることがわかる。特にヒメガマでは茎の周囲に葉が幾重にも重なり、片側で7重にもなる葉の専有面積も考慮に入れば、混雑度はアシを上回るほどであり、飽和に達しているといえる。上流部と下流部の比較を行うと、高さや直径について認められたとおりアシではさらに下流部に生長の余地が残されていることがわかるが、ヒメガマとフトイに

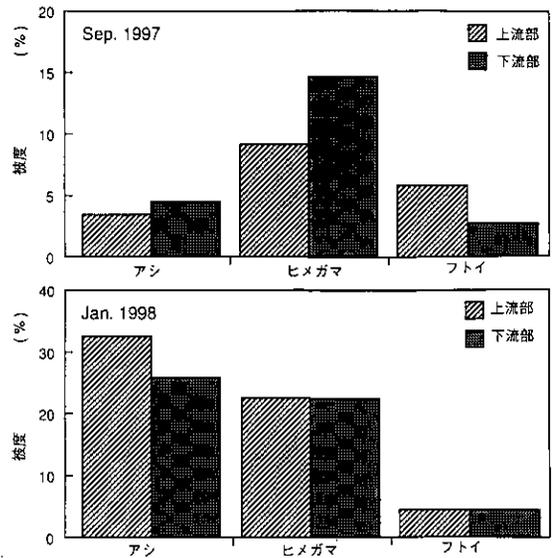


図27 水生植物植栽水路における植栽された水生植物の被度の比較

については既に生長極大が下流部にまで達してしまっていることがわかる。今後、下流部まで生長が飽和した条件の後、有機物・窒素・リン除去能がいかなる挙動を示すかを、アシ・ヒメガマ・フトイについて検証することが重要であると考えられる。また、このような指標をもって、水生植物体の刈り取りを行う適期を判断することが、有効な刈り取り効果を期待する上で重要になると考えられる。

#### (4) まとめ

本研究は、生態工学プロセス技術を活用した水質浄化のうち、抽水植物を活用した水質浄化技術の開発を主目的に実験的検討を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) 水生植物を活用した水質浄化手法は、設備投資を小さく抑えることが可能であり、維持管理も容易で安価であるという長所をもつ一方で、広大な敷地を占有するため広い場所が必要で、刈り取った植物体の利用法を検討しておくことが必要となるなどの短所も併せもっている。

2) 供試抽水植物の中ではアシが最も高い水質浄化能を示すことが明らかとなった。自然水域においてもアシの生育はおう盛で、砂質で水際のなだらかな地形の部分であれば水深2mほどの場所から完全な陸上部にまで十分な水吸収が確保されれば生育可能で、また嫌気状態となっているヘドロ状の土壌においても生育可能であ

るなど、広い適応力を有している。さらに、地下茎が土壌中へ酸素供給を行う効果を有するため、還元状態の土壌を酸化する働きを有し、ヘドロ状の土壌を改良する効果も期待できるものと考えられた。

3) 水生植物体自身による窒素吸収能力には大きな効果を期待できないものの、植物体自身に付着する細菌・菌類・原生動物・微小後生動物・微細藻類などのペリフィトンが硝化・脱窒や有機物の酸化に大きく寄与するものと考えられた。

4) 抽水植物を活用した植生浄化法では、収穫植物体の効率的活用法を見だし、刈り取り効果による窒素・リンの系外持ち出しシステムの構築を考えることが課題である。

5) 広大な土地を確保しやすく、施設費・維持費ともに低く抑えることが重要な条件となる東南アジア諸国では、今後ますますこうした生態工学の水資源保全技術が重要な位置づけになるものと考えられた。

### 2.3.2 食用植物を活用した水質浄化

#### (1) はじめに

タイ王国をはじめとする東南アジアでは、急速な経済発展と経済危機の激動によって、環境の維持改善が後送りになっているのが現状である。なかでも重要な輸出産業であるエビ養殖は自らが水質悪化の原因でもあるが、周辺の河川や海域が汚濁したために、養殖池の水質を改善する水を外から導入できなくなり、エビが死んだり味が低下し異臭が付くなどして競争力を失っている。従来、栄養塩をリサイクルしてきた産業のうち、農業が化学肥料の使用や畜産を通じて汚濁源になったり、水産業が養殖を通じて汚濁源になるなど、栄養塩の排出が増える一方で、リサイクルシステムが消えていく現状を変革しなければ、富栄養状態の改善は極めて困難なものと考えられる。このようなことから食用植物や魚介類生産を通じた新たなリサイクルシステムを構築することは環境保全及び有価物の生産という点において意義のあるものである。日本で食用植物や花きを栽培し、富栄養化した水の浄化と栄養塩のリサイクルに成功した水耕生物ろ過法は、比較的 low コストで実施が可能で、野菜や花、堆肥などの有価物が取り出され、魚介類の増殖にも有効であることがこれまで実施で証明されている。そこで本研究では予備的研究として水耕生物ろ過法をタイ王国で実践し、水質浄化に優れ、なおかつ有用物としての

価値のある水生植物の探索とその栽培技術に関する検討を行った。

#### (2) 方法

##### 1) 実験装置

##### ① 構造と機能

AIT (アジア工科大学) の研究棟群の北に設置してあるコンクリート製実験用酸化池に連結する形で、図 28 のように長さ 10m、幅 50cm、水路壁高さ 20cm、傾斜 1/100 の水路を平行に A、B、C の 3 本設置し、酸化池の水をポンプでくみ上げて流し、処理水が酸化池に戻る構造を造った (写真 28)。各水路への給水量は基本的に 1 本当たり日量 15m<sup>3</sup> とし、また 7.5m<sup>3</sup> の比較実験も行った (写真 29)。なお、酸化池に供給されている水は、AIT 敷地内の研究施設や居住区のすべての排水を集め、沈殿槽と腐敗槽を経た水の一部である。

##### ② 栽培植物

日本の夏の栽培実験結果等から、花きを含めタイ王国

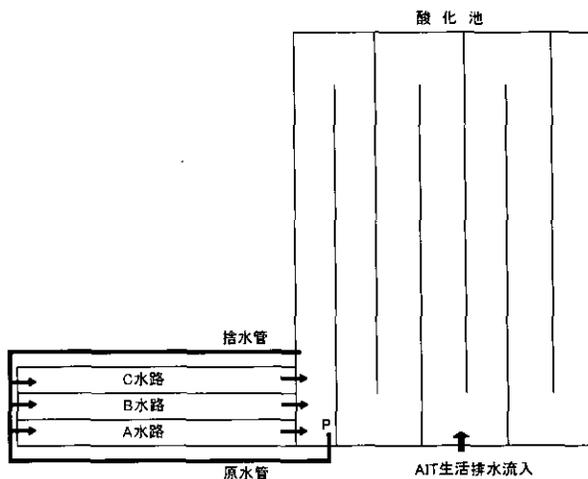


図 28 水耕栽培屋外実験水路



写真 28 実験水路全景：フェイズIV実験準備中の状態

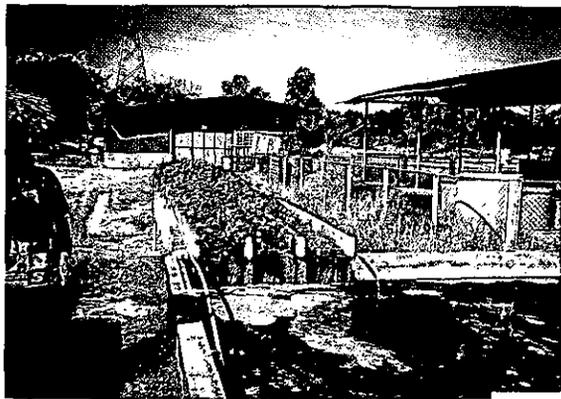


写真29 水路に給水し植物を栽培しているところ  
A, B水路のクウシンサイはよく成長しているが、C水路のミズオジギソウは枯れている。右のパイプから落ちている水は水量調整のための逃がし水

で浄化に適すると考えられる植物を選定し水路に配置した。

### ③ 水路生態系操作

水耕生物ろ過法では、原水中の有機物を基に、栽培植物の根茎表面に生じる生物膜を一次消費者とする小動物の生態系が形成され、有機物が栄養塩を多く含む泥に変化し、そこから栽培植物が栄養塩を吸収して成長し、根茎を増やすシステムが形成されて、水が浄化される仕組みとなっている。小動物は自発的に水路に定着するが、生物膜を食べて新たな生物膜の発達を促進する小型巻き貝の定着は、連続する水系に浄化水路の環境に適する種が生息しているかどうかなどの要素に左右され、適切な種が繁殖するまでは植物の生長や浄化作用が低下することがわかっている。そこで本研究ではタイ王国における水耕生物ろ過生態系の構築に資する知見を集積することを重要な位置づけとしているので、AIT構内の池や水路に生息していたサカマキガイ、モノアラガイ、ヒメモノアラガイ、ヒメタニシ、その他数種の小型巻き貝を最初の実験開始と同時に水路に放流することとした。その後、サカマキガイとヒメモノアラガイが水路で増殖することがわかったので、実験条件の変更等で水路の洗浄乾燥を行ったあとの実験再開に際しては、この2種を放流することとした(写真30)。

### 2) 分析項目

各水路の原水と処理水、収穫した植物や最後に残った泥について分析を行った。現場測定項目としては気温、水温、pH、溶存酸素、採水後室内分析項目としてはCOD、SS、T-P、T-N(ケルダール窒素の割合が大であることを踏まえフェイズIIからTKN)、収穫後計量分析



写真30 クウシンサイ根茎マット上を埋め尽くすほど増殖しているサカマキガイ

項目としては生重量、乾重量、窒素リン含有率とした。

### 3) 調査分析方法

現地調査は温度計、携帯式測定電極を使用して測定した。室内分析は「APHA, AWWAandWPCF, 1992」の水及び汚水標準測定法に従って分析した。

### 4) 実験期間と設定条件

本実験においては3~4カ月ごとに設定条件を変更し、フェイズI~IIIの実験を行って結果をまとめたが、現地では実験を継続中である。実験期間、水質調査期間、設定条件は下記のとおりである。

#### フェイズI

実験期間 1997年9月16日~11月8日

調査期間 1997年9月22日~11月7日

A水路に東南アジアから中国にかけて大量に消費され、日本でも評価の高いクウシンサイ(写真31)、C水路にタイ王国だけで大量に消費されるミズオジギソウ、B水路にクレソンとその他の植物を栽培した。栽培するクウシンサイの品種は、種子から栽培して成長した株を抜き取り販売するタイプとした。

#### フェイズII

実験期間 1997年12月3日~1998年2月27日

調査期間 1997年12月15日~1998年2月25日

A, B水路ともフェイズIと同じクウシンサイを栽培し、B水路の給水量を日量7.5m<sup>3</sup>とした。C水路ではその他の植物を栽培した。

#### フェイズIII

実験期間 1998年3月16日~1998年6月12日

調査期間 1998年4月20日~1998年6月10日

A, B水路には水辺に栽培して伸張した枝を収穫する品種のクウシンサイを栽培し、各水路の末端とA水路の

2 m おきに高さ 6 cm のブロックによる堰を設置した。  
C水路ではその他の植物を栽培した。

### (3) 結果及び考察

#### 1) フェイズごとの植物の生育特性

フェイズ I : クウシンサイの成長はマット状の根の固まり (写真 32) を 10 月後半に形成するまで遅く、水路全面を占有するのは 10 月末になった。ミズオジギソウは



写真 31 クウシンサイの茎と葉  
若い茎と葉が大量に流通し消費されている。



写真 32 クウシンサイが水路に形成する根のマット



写真 33 開花を始めたミズオジギソウ  
若い葉の黄化も始まっている。

10 月初旬に水路全面に広がったが、10 月下旬に開花した後にはほとんど枯死した (写真 33)。クレソンは 10 月初旬にマット状の根の固まりを形成し、中旬には約 4 m にわたって水路の全幅を密な群落で覆ったが、同時に黄化と矮小化が進み、害虫の発生もあって 11 月にはほとんど枯れた (写真 34)。他の植物は多くがいったん成長し



写真 34 左 A 水路のクウシンサイ、中央 B 水路のクレソン、  
右 C 水路のミズオジギソウ、クレソン  
ミズオジギソウの成長がクウシンサイより早いことが  
わかるが、中央のクレソンは矮小で黄化している。

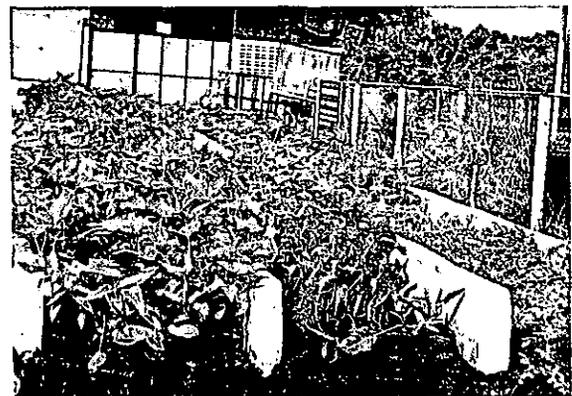


写真 35 A, B 水路で順調に成長中のクウシンサイ  
右の C 水路で試作植物が死滅したあとも栽培を広めたところ、  
手前には生き残ったクレソンとミズオジギソウが見える。



写真 36 生殖成長に転換したクウシンサイが咲かせている花

たあと腐敗した。

フェイズⅡ：クウシンサイの成長は順調であった(写真 35) が1月末からの開花結実時期に、成長速度は幾分遅くなった(写真 36)。他の植物は多くがいったん成長したあと腐敗した。

フェイズⅢ：クウシンサイの成長は実験期間を通じて順調であった。他の植物は多くがいったん成長したあと腐敗した。なお、継続中の実験では花や鉢物で流通しているオオフサモ、シュロガヤツリ、ポンテデリアの3種が順調に成長した。

これらの結果を考察すると以下に示すとおりである。

- ①タイ王国でも、マット状に発達した根の固まりが形成されることが、植物の成長性と浄化能力を高めるのに重要であると考えられた。
- ②日本では、常緑多年草の生理状態が植物体を量的に増大させる栄養成長から開花結実の生殖成長に切り替わると、病害虫に弱くなる現象が見られる。寒暖の差の少ないタイ王国においてはこうした現象を予想していなかったが、ミズオジギソウでは開花結実による植物の弱体化が顕著であった。クウシンサイは、日本では開花に伴って成長の低下とヨトウムシやアブラムシによる食害が明確に観察されたが、タイ王国では軽微な影響にとどまるようであった。以上のことから、地域に適合した水生植物の抽出が極めて重要と考えられた。
- ③フェイズⅢで使用した、伸張した枝葉を収穫するクウシンサイは、開花とその影響による成長低下が起こりにくいように品種改良されており、浄化に適する品種と考えられた。
- ④継続中の実験では花や鉢物で流通しているオオフサモ、シュロガヤツリ、ポンテデリアの3種が順調に成長し、浄化と作物生産の両立が可能と考えられたが、どれも流通量が少なく、クウシンサイに替わる植物にはならないと推察された。
- ⑤実験に使用した原水はCODが $100\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を越えることもある汚濁水で、栽培できる植物に限られるが、試験栽培した多くの植物がいったん成長したあと腐敗したことから、汚濁レベルが低ければタイ王国でもより多くの作物が栽培可能であると考えられた。

## 2) フェイズごとの水質特性

フェイズⅠ：植物の生育不良に対応して浄化は明確でなく、特に窒素ではミズオジギソウとクレソンが濃度を

低下させているのにクウシンサイは濃度が増加していた。DOは当初増加しているが、10月半ばから明確でなくなった。

フェイズⅡ：フェイズⅠに比べて汚濁物質の減少と溶存酸素の増大が明確となった。水量負荷が1/2のB水路処理水は溶存酸素が明確に多かった以外はA水路とほとんど変わらず、汚濁物質の除去速度は約1/2であった。

フェイズⅢ：TKNの低下が明確でないが、他の項目では実験開始から終了まで汚濁物質の除去と溶存酸素の増大がみられた。平均値を比較するとA水路の方が多くの酸素が供給されているが、窒素、リンについてはB水路の方が多く除去されていた。

これらの結果を考察すると以下に示すとおりである。

- ①クレソンはフェイズⅠで矮小化し水路の40%に繁茂しただけなのに、浄化では同時並行で栽培したクウシンサイを上回る成績を上げた。夏の霞ヶ浦湖水に対してクレソンがクウシンサイの2/3程度の浄化能力を発揮することから、実験に使用した原水よりCOD濃度が低くDOの多い水の浄化にはタイ王国でもクレソンが使えるものと考えられた。
- ②水耕生物ろ過法は、最低 $10\text{m}^2$ 、植物によっては $100\text{m}^2$ 以上の面積で実施した場合に水上の生態系が安定し、植物の害虫による壊滅を免れた。また、1日 $1\text{m}^2$ 当たり $1\sim 3\text{m}^3$ の原水を供給することによって、生物膜の活性が保たれた。なおベンチスケールでは浄化環境の再現が困難であり、原水の栄養塩濃度を操作して原水質と浄化能力の関係を解明するのではなく施設面積と原水の供給が確保された場所で、与えられた原水について処理実験を行った。AITではこれまで設定できなかった高濃度の窒素、リンを含む原水を使って処理実験を実施することができた。これらのデータについて窒素、リンの原水濃度と除去速度の相関関係を調べた。その結果は図29及び図30に示すとおりである。この相関が得られたことによって異なる原水を対象として実験又は実践中の浄化方法と水耕生物ろ過法の浄化能力の比較が可能になった。
- ③フェイズⅠでは処理水のDO濃度は上昇したもののCODはほとんど減少しなかった。これはDOが水中の植物プランクトンの光合成によって供給されたので、光合成量に対応する有機物が水中で合成されたためと考えられた。これに対してフェイズⅡ、Ⅲのクウ

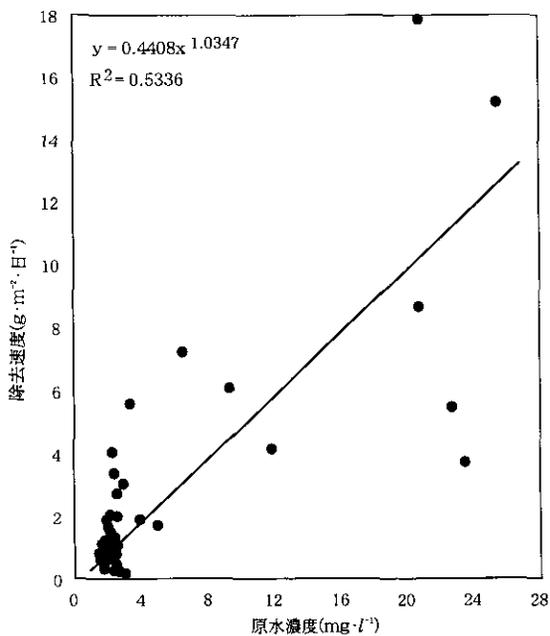


図29 土浦およびタイビオパークより求めた全窒素の原水濃度と除去速度の関係

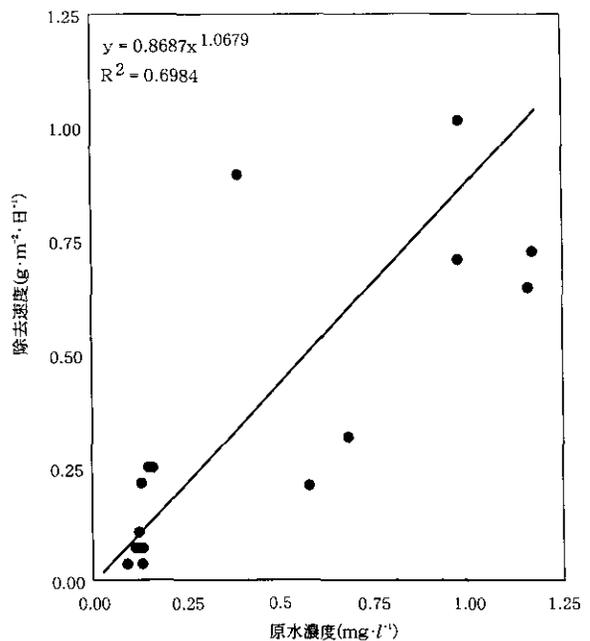


図30 土浦およびタイビオパークより求めた全リンの原水濃度と除去速度の関係

シンサイはCODを低下させながらDOを増大させている。光合成に伴い生産されたり気孔から取り込んだ酸素が水中に供給されているが、光合成で植物が生産した有機物の多くは収穫と乾燥-堆肥化によって水路から持ち出されるので水に回帰することはないものと考えられた。なお、クウシンサイは酸素の供給と同時に窒素、リンも除去し、これも収穫と堆肥化で取り出され、藻類増殖のポテンシャルが低下するものと考えられた。

- ④ フェイズⅡの結果から、除去率を下げずに水量負荷をあげて除去速度を高めることが可能な水量負荷の範囲の存在が示唆された。
- ⑤ 水路に水や泥を滞留させ、人工的に嫌気好気状態の並立を実現すれば、少なくとも脱窒を促進できるのではと考えられたが、フェイズⅢで設定した程度の改変では効果が認められなかった。

### 3) フェイズごとの生息動物の分布特性

フェイズⅠ：水中では投入した数種類の巻き貝のうちサカマキガイとヒメモノアラガイだけが高密度に増殖し(写真30参照)、他は消滅した。肉食性の水生小動物が全く見られなかった。原水に比較的少なく酸化池では壁面に分散しているカイミジンコが水路では優占し、特に給水部付近で底面を埋め尽くすほど密集していた(写真37)。植物表面ではヨトウムシなど日本でもしばしば出現する

害虫がまず発生したが、1カ月以内に見られなくなり、有毒の毛を持つドクガ(写真38)や、葉にしがみつくとほとんど攻撃不可能な背甲を持つカメノコハムシなど、天敵に対抗する手段を持つ害虫が多く出現した。植物から吸汁するハダニが1カ所10cm四方ほどの範囲で集団発生し、葉が白くなった。クモヤアシナガバチは実験開始当初から水路周辺で頻繁に見られた。

フェイズⅡ：水中の動物相に変化はなかった。植物表面では、カメノコハムシの仲間成虫の体長約20mm、幼虫もとげが多く集団でクウシンサイの葉と茎を食害するゴマダラジンガサハムシ(写真39)が1m<sup>2</sup>当たり2~3個体見られ、幼虫の集団がいるところでは葉の密生した中に10cm立方程度の空間ができていた。ハダニはC水路の下流に水路幅一杯長さ約2mの範囲で集団発生し、葉が白く脱色した。

フェイズⅢ：水中の動物相に大きな変化はなく、さなぎの抜け殻からガガンボの生息がわかった。植物表面では、最初から現れたクモヤアシナガバチなどに加えてテントウムシの幼虫と成虫が見られ、ダニやアブラムシは全く見られなかった。なお、継続中の実験では水路にヒキガエルが住み着き、ほとんど害虫が発生しなくなり、水中では汚濁に強いガムシの幼虫が水生肉食小動物として初めて見つかった。水路周辺ではヘビの抜け殻が見かけられ、生態系の中で高次に位置する消費者が出現す

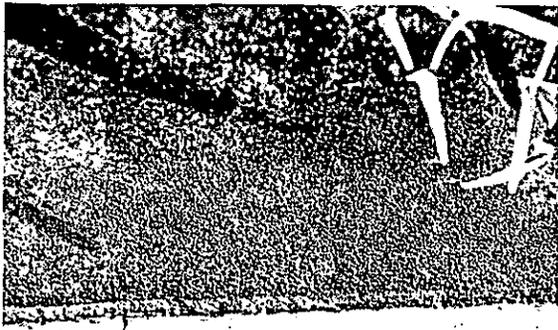


写真 37 水路底面に集まったカイミジンコ



写真 38 クウシンサイの葉を食べているドクガ幼虫  
ミズオジギソウなども食害する。



写真 39 ゴマダラジガサハムシの終齢幼虫が、集団でクウシンサイの葉を食い尽くし茎をかじっているところ

るようになっている。

これらの結果を考察すると以下に示すとおりである。

水上では時間とともに動物相の変遷が見られ、生態系の多層化が進行していた。日本ではこのように狭い施設でカエルが定着した例はなく、このことは気温の変動が少なく、餌の発生量が安定しているためと考えられた。水中では動物相の変遷がほとんど見られないが、これは

この実験で使用した水質で生き抜ける動物に限られるためと日本のような気温の季節変動がないためと考えられた。

#### 4) フェイズごとの植物収穫量と栄養塩除去量

フェイズⅠ：収穫とたまった泥の計量は植物の生育不良のため行うことができなかった。

フェイズⅡ：実験期間中 A 水路では 23kg, B 水路では 16kg の野菜が収穫され、そこに含まれていた窒素とリンは A で 71g, 5.4g, B で 31g, 2.9g であった。

フェイズⅢ：実験期間中 A 水路では 16kg, B 水路では 13kg の野菜が収穫され、そこに含まれていた窒素とリンは A で 90g, 2g, B で 73g, 1.5g であった。

実験終了時に泥と根の形で水路に残っていた窒素とリンは A で 318g, 8.5g, B で 152g, 7.3g であった。

これらの結果を考察すると以下に示すとおりである。

植物の収穫量は 10m<sup>2</sup> 当たり月 10～15kg で、フェイズのはじめに毎回苗から始めたにしては多くの収穫があった。栄養塩の除去量に対する、収穫された植物と泥に含まれていた量の比率は日本では 60～70% であったが、フェイズⅢの B 水路の結果ではリンで約 3%、窒素で約 50% で、特にリンの行方不明量が多かった。水路ではユスリカの幼虫が肉食水生昆虫に捕食されることなく多数生息しており、これが羽化してリンを持ち出しているものと考えられた。

以上の成果から、食用植物を活用した浄化は、タイ王国における水質浄化を、有価物の生産を通じた栄養塩のリサイクルを行いながら、低コストで実現できるものと考えられた。実験に使用した原水よりも COD 濃度の低い汚濁水を浄化する場合には、より多種の植物が栽培可能と考えられるが、その際、水中で肉食小動物を含む生態系が形成されると予想され、その安定性や、浄化能力に対する影響が注目される。今後は、よりスケールアップした施設を使い、安定した生態系のもとに長期にわたる運用を行い、実用性と浄化効率を追求する研究の重点化を図る必要があるものと考えられた。

#### (4) まとめ

本研究は、生態工学プロセス技術を活用した水質浄化のうち、食用植物を活用した水質浄化技術の開発を主目的に実験的検討を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) タイ王国で COD50～100 mg・l<sup>-1</sup> の水の浄化裁

培に最も適しているのは東南アジアから中国にかけて広く栽培され大量に消費されているクウシンサイであることが明らかとなった。

2) クウシンサイは、窒素、リンを除去するとともに、水中に酸素を供給し、CODを低下させDOを向上させることが明らかとなった。

3) タイ王国でも植物の生殖成長に伴う浄化活性低下が見られるが、日本より軽くすむことが明らかとなった。

4) 水路にはサカマキガイとユスリカの幼虫が常に高密度で生息し、日本で見られる小動物構成の変動とそれに伴う浄化能力の低下は観察されなかった。これはCOD濃度の高い水中で生きられる肉食小動物がいないためと、年間を通じて気温の変化が少ないためと考えられた。

5) 実験水路の総面積が $15\text{m}^2$ と狭いにもかかわらず、水上の小動物構成は日本で運用してきた施設よりも早く複雑化し、安定した。

6) 熱帯地方で問題となっている害虫の多発とそれに対抗する農薬の多用に対して、本方式は熱帯でも安定して再現が可能な有機農法であることが明らかとなった。

7) 熱帯地方で行われる水耕生物ろ過法の効率と再現性、安定性は日本よりも高いことが明らかとなった。

## 2.4 熱帯地域における生物活性と処理の高度化

水生植物を活用した植生浄化法では、水生植物のみならず、根茎部に付着する微小動物や細菌類も水質浄化に貢献している。また、発生源対策として有効である合併処理浄化槽でも微生物の浄化能が処理水質に影響を及ぼしている。さらに、食物連鎖を長くすることで、汚泥の減量化、処理水の透明度の向上が可能になる。このようなことから、熱帯地方に生息し、水質浄化に優れた生物を水処理プロセスで活用することができれば、処理の高度化が実現できるものと考えられる。そこで本研究では、熱帯地方における処理の高度化を考えるうえで、熱帯地方に生息し高い浄化能を有する生物に着目して、その増殖特性に関する研究と食物網を活用した汚泥の減量化に関する研究を行った。

### 2.4.1 熱帯地域の微小動物の増殖・浄化特性

#### (1) はじめに

タイ王国等の熱帯地域の湖沼や貯水池といった水源

においても富栄養化の進行が著しく、有毒物質ミクロキスティンを含む藍藻類の異常増殖がみられ、水質改善が要望されており、また、湖沼、貯水池の浄化対策として合併処理浄化槽の整備といった発生源対策が極めて重要な位置づけにあることなどから、熱帯地域の生物学的反応速度や熱帯地域の生物の特性を考慮した処理技術及び管理手法の開発が急務となっている。本研究では排水処理施設において汚泥の減量化や処理水の透明化に貢献し、良好な処理状況の指標となる原生動物をタイ王国の浄化施設等から分離し、その特性と浄化に果たす役割を明らかにすることを目的として、増殖特性及び浄化特性と温度との関係について検討を行った。

## (2) 実験方法

### 1) 供試原生動物

1997年9月にERTC(タイ環境研究研修センター)に設置してある生活排水を処理している植生浄化施設において、水生植物の茎部に付着した生物膜から分離した原生動物繊毛虫類 *Vorticella convallaria* (写真40)及び同時期に生活排水による汚濁が進行しているKlongRangsitに生息しているホテアオイに付着した生物膜から分離した原生動物下毛目(Hypotrichida)の一種を用いた(写真41)。生物膜を採取したときの水温は *V. convallaria* で $28^{\circ}\text{C}$ 、Hypotrichidaで $31^{\circ}\text{C}$ であった。また、比較のため日本の排水処理施設から分離した原生動物繊毛虫類 *Vorticella cupifera* についても検討を行った。

### 2) 分離方法

溝つきスライドグラスを用いたピペット洗浄法により微小動物を洗浄後、細菌10種を懸濁させたLE培地に接種し、培養を行った。タイ王国から分離した原生動物は $20^{\circ}\text{C}$ 、静置条件において1年間継代培養を行い増殖が安定した後実験に供した。

### 3) 供試培地

乾燥レタスと卵黄の抽出液からなるLE培地を超純水により2倍に希釈したものを用いた。食物源として各微小動物と共存する細菌群を乾燥重量として $50\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ になるように懸濁させた。

### 4) 培養条件

100ml容三角フラスコに培地を25ml分取し、約10日間 $25^{\circ}\text{C}$ において前培養した微小動物を $5\text{N}\cdot\text{ml}^{-1}$ になるように接種した後、*V. convallaria*、*V. cupifera* につ

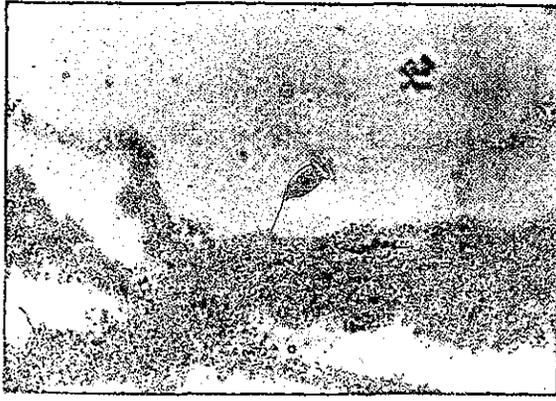


写真40 繊毛虫類の *Vorticella convallaria* (×165)



写真41 繊毛虫類 下毛目 (Hypotrichida) (×330)

いては10～35℃, Hypotrichida については15～40℃の間で静置培養を行った。経日的にサンプリングを行い顕微鏡観察により個体密度を計測した。

### (3) 結果及び考察

#### 1) タイ王国から分離した原生動物の増殖特性

日本の排水処理施設から分離した *V. cupifera* は10℃から35℃の範囲で増殖がみられたが(図31), タイ王国から分離した *V. convallaria* は10℃では増殖しなかった(図32)。*V. cupifera* は培養後期にシストを多く形成したが, *V. convallaria* はシストを形成せず, 培養開始時からテロトロクが多くみられ, 1,000N・ml<sup>-1</sup>を超えて観察された系もあった。繊毛虫類の Hypotrichida (下毛類) では15℃, 20℃においては6日間では全く増殖を示さず, 25℃から40℃の範囲で増殖を示した。日本において分離した原生動物繊毛虫類の多くは35℃を超えると増殖しないことが報告されているが, タイ王国から分離した Hypotrichida については35℃を超えても増殖が可能であり高温に適應していることが明らかとなった。本研究では日本産の原生動物1種類, タイ王国

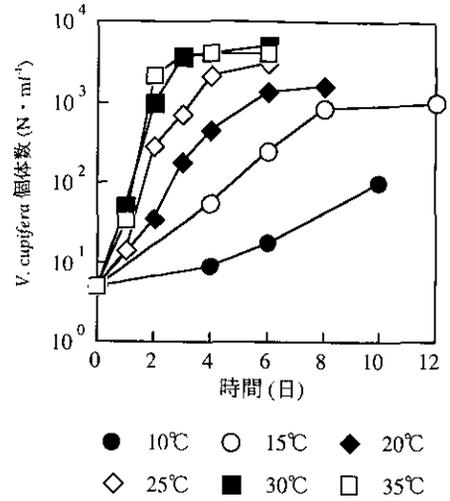


図31 日本において分離した *Vorticella cupifera* の各温度における増殖曲線

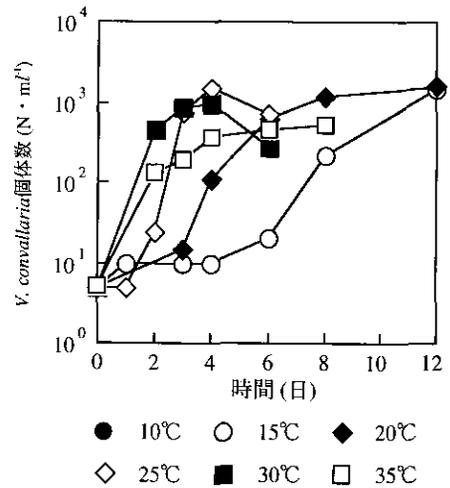


図32 タイ王国において分離した *Vorticella convallaria* の各温度における増殖曲線

産の原生動物2種類の温度に対する増殖特性を検討したが, これよりタイ王国産の原生動物について共通していることは, 低温に対して増殖能が極めて低いということである。これは, 日本と異なりタイ王国では年間の平均気温が25℃を超え, しかも年間の気温差が小さいことなどから, 低温に対しての増殖能が極めて低いものと考えられた。

#### 2) タイ王国から分離した原生動物の増殖に及ぼす温度の影響

*V. cupifera* の最大比増殖速度は35℃で最大となり2.94d<sup>-1</sup>, *V. convallaria* は30℃で最大となり2.75d<sup>-1</sup>であった(図33, 34)。Arrhenius plotにより, *V. cupifera* については10℃から25℃, *V. convallaria* については

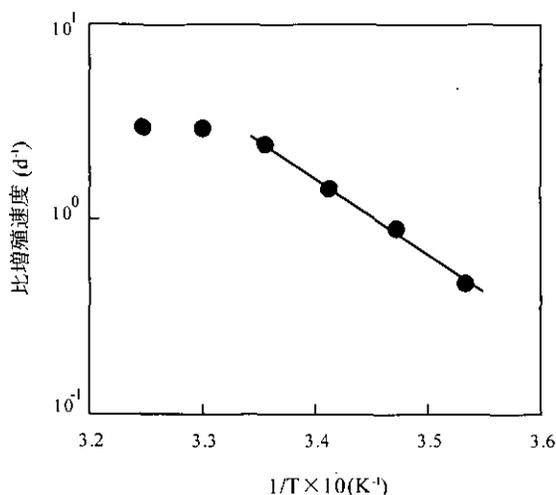


図33 *Vorticella cupifera* の比増殖速度に及ぼす温度の影響

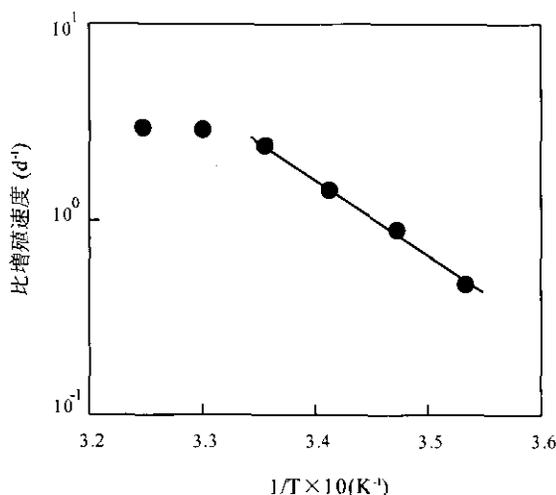


図34 *Vorticella convallaria* の比増殖速度に及ぼす温度の影響

15℃から25℃における傾きから増殖の温度に対する依存性の指標となる活性化エネルギーを求めたところ、*V. cupifera*で  $75.0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ( $17,900 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), *V. convallaria*で  $85.7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ( $20,400 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ )であった。なお、Hypotrichidaの最大比増殖速度は30℃で最大となり  $0.63 \text{ d}^{-1}$ であった。35℃では最大比増殖速度は約  $0.37 \text{ d}^{-1}$ と低下がみられるが、40℃においても  $0.34 \text{ d}^{-1}$ ほど同様の値を示した。原生動物の活性化エネルギーについては、*Vorticella microstoma*で  $18,300 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ , *Aspidisca costata*で  $13,800 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ , *Paramecium caudatum*で  $20,500 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ , *Tetrahymena pyriformis*で  $18,400 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ などがこれまでに明らかにされており、このデータと本実験の結果とを比較すると、タイ王国で分離した *V. convallaria* は活性化エネ

ギーが他種に比べると高い傾向にあるということが明らかとなった。このことは温度に対して感受性が高いことを示している。以上はまだ2種類のタイ王国産原生動物において得られた知見であり、さらなる知見の集積が必要であるが、温度に対する増殖特性や高温域における細菌の捕食能等を調べることで、タイ王国といった熱帯地域において、原生動物等の浄化に果たす役割を最大限に活用し、高度な合併処理浄化槽を開発・管理する上で極めて重要であり、さらなる研究の強化を行うことが必要不可欠な位置づけにあることが示唆された。

#### (4) まとめ

本研究は、排水処理施設において汚泥の減量化や処理水の透明化に貢献し、良好な処理状況の指標となる有用微小動物の増殖特性に及ぼす温度の影響について検討を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) タイ王国で分離した有用微小動物 *V. convallaria* は10℃以下では増殖せず、また、繊毛虫類のHypotrichida (下毛類) においては20℃以下での増殖はみられなかった。このことから、熱帯地方の微小動物は低温に対して増殖能が極めて低いということが示唆された。

2) 日本において分離した原生動物繊毛虫類の多くは35℃を超えると増殖しないが、タイ王国から分離したHypotrichida (下毛類) については35℃を超えても増殖が可能であり高温に適応していることが明らかとなった。

3) タイ王国で分離した *V. convallaria* は活性化エネルギーが他種に比べると高い傾向にあることが明らかとなった。

#### 2.4.2 食物網を活用した処理の高度化

##### (1) はじめに

生物処理において流入する溶存態の有機物負荷は、主に細菌類によって資化され、菌体すなわち固体に変換される。生物処理反応槽においては、菌体に変換された流入負荷を原生動物や袋形動物、環形動物などの微小動物が食物源として捕食する食物連鎖からなる複雑な食物網が形成されている。生物処理においては、発生する余剰汚泥の処理・処分の負担を軽減するために、汚泥の発生量をできる限り少なくする処理プロセスを操作する

ことが望まれている。すなわち、細菌類、原生動物、微小後生動物などで構成される食物網が複雑に関連し、生物処理反応槽内の生態系全体としての収率 (Yield) を低く抑えることが重要である。

これまでの研究により、生物処理において、細菌類・菌類などによって資化された有機物は、原生動物、微小後生動物など食物連鎖高次のニッチェを占める生物に捕食により変換されていく。この過程において呼吸により消散される炭素分が処理効率を高め、汚泥の減量化に大きく貢献することが明らかにされている。

本研究では、タイ王国バンコク郊外の実規模の食品工場排水処理施設において、最終沈殿池に小型魚類のグッピー (guppy: *Poecilia reticulata*) が高密度に生息し、沈殿池内に流入する活性汚泥を捕食している事例において、この施設の魚類の生息密度を調査し、汚泥の減量化にどのような貢献を果たしているのかについて、グッピーの捕食活性などに関する実験的検討を加えることとした。

## (2) 実験方法

1) 個体数の推量: 標識放流法により最終沈殿池内のグッピーの現存量を統計的に推量した。すなわち、餌誘引を用いたトラップ捕獲により、池内のグッピーを採集し、最終個体の体長を計測したのち、腹びれの一部をハサミで切り取り個体標識して再放流した (写真 42, 43)。後に同様の手法にて再捕獲し、採集個体に占める標識された個体数から次式により全生息量を統計的に推量した。

$$\text{推定個体数} = (\text{標識した個体数} \times \text{再捕獲個体数}) \div \text{再捕獲個体中の標識された個体数}$$

なお、トラップは表層、中層、底層に各1を設置し、捕獲時間は20分間とし、再捕獲までに1時間の間隔を設定した。誘引飼料としては、市販の「テトラグッピーフード」を用いた。

2) グッピーの収率の検討: 市販の90cmガラス水槽にタイ王国内の自然水域で一般に認められる水温28℃の水を用意し、活性汚泥を食物源としてグッピーの継代培養を行った。これら継代培養グッピー株を用いて、市販の60cmガラス水槽を使った収率の検証を行った。

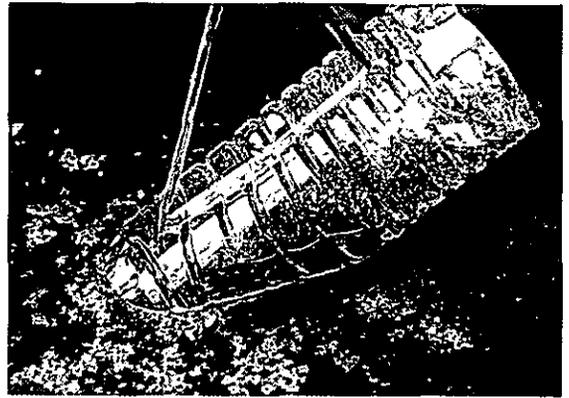


写真42 ベットボトル製簡易捕獲器によるグッピーの採集



写真43 採集されたグッピーは計測・標識して再放流した

## (3) 結果及び考察

標識放流法により当初捕獲・標識した個体数は137個体、放流後再捕獲時の個体数は211個体、再捕獲時の個体中の標識された個体数は4個体、最終沈殿池の容積は、縦5m×横5m×水深3m=75m<sup>3</sup>であった。よって最終沈殿池内に生息するグッピーの推定個体数は、7,200個体、推定個体密度は1m<sup>3</sup>当たり95個体であることが明らかとなった。

最終沈殿池内のグッピー個体の局在分布については、捕獲標識及び再捕獲時に採集された個体は、各々表層44, 59個体、中層44, 67個体、底層51, 85個体であり、底層の生息密度が高い傾向が認められた。

図35は、グッピーの個体サイズ分布について、捕獲した個体から無作為に抽出した標本10個体を用いて体長と湿重量との関係を調べた結果を示したものである。この図からグッピーの体長と湿重量には高い相関 ( $r=0.96$ ) のあることが明らかである。また、図36は、標識放流の際にトラップにて捕獲したグッピー (総個体数137個体) の体長の分布を示したものである。グッピーの最大体長: 31.3mm, 最小体長: 19.3mm, 平均体長:

24.4 mmであった。これらの結果から、最終沈殿池内のグッピー現存量は、平均体長24.4 mm、平均湿重量0.379 g、総個体数7,200個体、総湿重量2,730 g、単位容積当たりの湿重量36 g・m<sup>3</sup>となることが明らかとなった。また、表層・中層・底層別の体長の平均値はそれぞれ24.3 mm、24.9 mm、24.0 mmであり生息水深別のグッピー体長に有意な差は認められなかった。

図37は、グッピーの捕食量と成長量から個体変換率、いわゆる収率を明らかにするための検討結果を示したものである。図の横軸はグッピーの捕食した活性汚泥量を乾燥重量にて示したもので、縦軸は活性汚泥を捕食して成長したグッピーの体重増加量を示したものである。この図の直線の傾きから活性汚泥を食物源とした場合のグッピーの収率は0.08であることがわかる。これまでに明らかにされている微小動物類の細菌からの収率、すなわち、原生動物繊毛虫類で平均0.49、袋形動物輪虫類

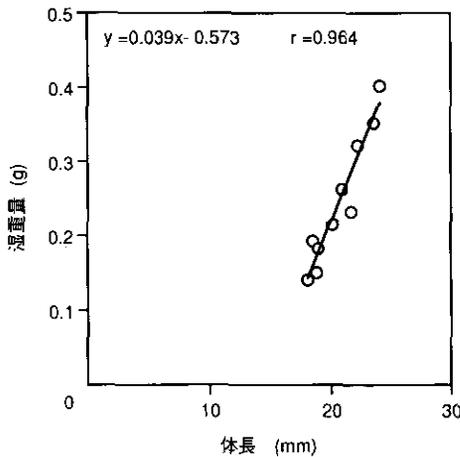


図35 グッピー (Poecilia reticulata) の体長と湿重量との関係

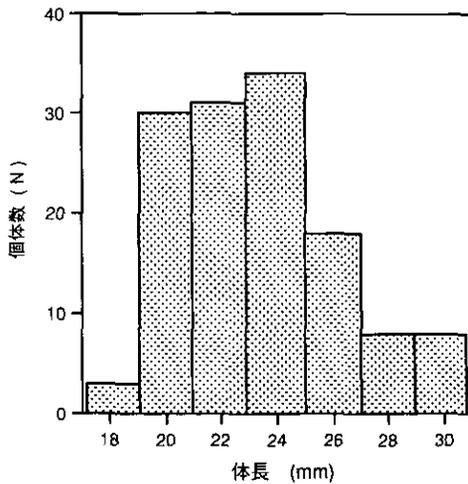


図36 グッピー体長の分布

で平均0.4、環形動物貧毛類で平均0.18というデータと併せて考えると図38に示すとおり、原生動物→輪虫類→ミミズ類→グッピーの順に収率が低下していることが明らかである。このことはすなわち、呼吸により消散される炭素分が増大し、余剰汚泥の発生量が低く抑えられることを意味するものであり、維持管理コストの低減につながり処理の効率化を図る上で非常に重要な位置づけにあると結論づけられる。

また、検証を行った食品加工場の最終沈殿池ではグッピーのほかにナマズ類の姿も認められた。このナマズ類は捕獲することができなかったため、種の同定を行うことはできないものの、肉食あるいは雑食であることは明らかである。このことは、-視認されたナマズ類は、グッピーを食物源として捕食し、先の食物網をさらに高度化させ、処理を効率化させる働きを担っていると推測される。

このように、さらに食物網の高次化を踏まえた研究の重点化の必要なことが明らかとなった。

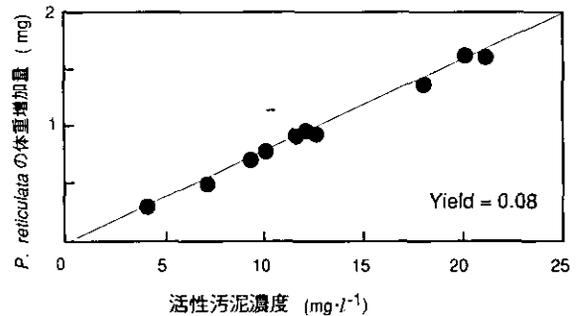


図37 グッピーの活性汚泥補食量と体重増加量との関係

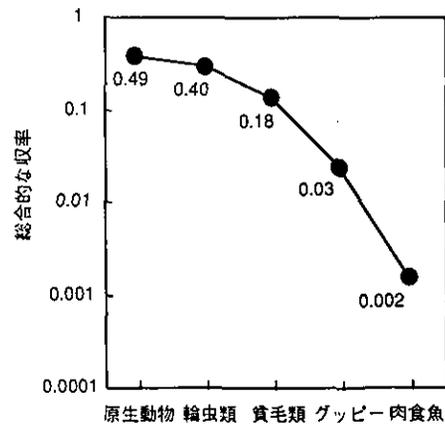


図38 食物連鎖における細菌を基点とした場合の総合的収率

#### (4) まとめ

本研究は、熱帯地域における生物活性と処理の高度化のうち、食物網を活用した処理の高度化について検討を行ったもので、得られた成果は以下のようにまとめられる。

1) 細菌・菌類・原生動物などを中心に考察されてきた生物学的処理に、微小後生動物や小型魚類、肉食魚類、鳥類など、より高次の生態的地位を占める生物群を関与せしめ食物網を複雑にして、長い食物連鎖を形成させることが生態工学の応用として非常に重要となることが明らかとなった(図39)。

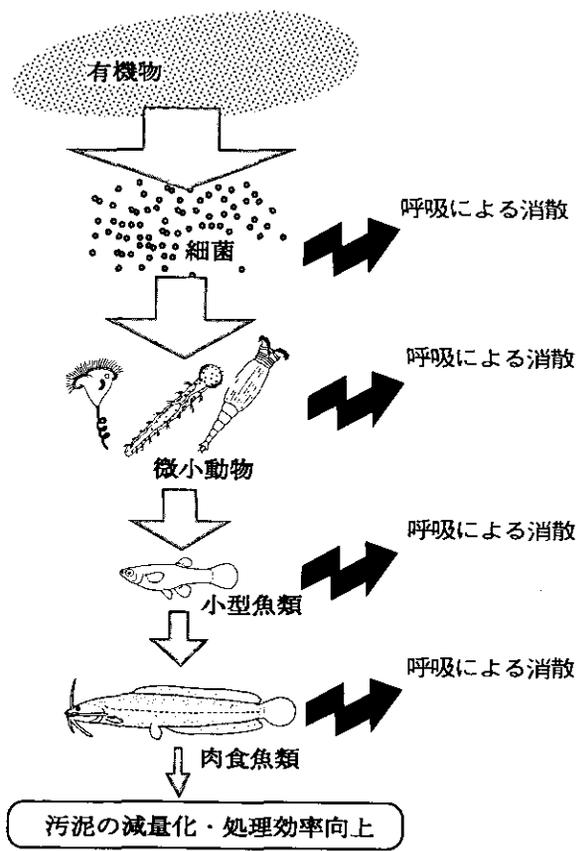


図39 食物網の活用による処理の効率化の可能性模式図

2) 食物網を活用した処理の高度化は、呼吸により消散される炭素分が増大するので、余剰汚泥の発生量が低く抑えられ、維持管理コストの低減化につながるため処理の効率化を図る上で非常に重要な位置づけにあるものと推察された。

3) 肉食性の魚類やこれらを捕食する鳥類や両生類など多くの生物を総合的に捕らえ、最終的には魚などを捕獲する漁師など、いわゆる人類の存在をも視野に入れた総合的な生態系解析手法を用いた検討を行うことにより、特定地域の環境容量の試算が可能になると考えられた。

4) 生態系の食物網を通じた総合評価を試みる上で、微小動物や小型動物の捕食・増殖活性や増殖に及ぼす環境因子の影響などに関する基礎的知見の集積がますます重要な位置づけになることが示唆された。

#### 2.5 総括及び展望

環境基本法の理念には「国際的協調による地球環境保全の推進」が位置づけられており、アジア太平洋地域の途上国の環境改善を目指した研究は極めて重要な位置づけにある。タイ王国などは産業活動の活性化、人口増加により各種排水による水域の汚濁が顕在化してきている。このような水質汚濁を改善することを目的とした技術開発研究として「タイ王国における自然利用強化型水環境修復技術の開発に関する研究」を推進し、以下のような知見を得た。

タイ王国の河川、貯水池、湖沼における水質汚濁の現状を把握し、今後の水質改善対策を図る上での基礎的知見を得ることを目的として検討を行い、人口の密集しているクローンでは水質汚濁の進行が著しく、汚濁負荷としては生活排水の占める割合が大きく、衛生面で極めて大きな問題を有することが明らかとなった。さらに、タイ王国の飲料水源として重要な役割を果たす湖沼及び貯水池の多くにおいて富栄養化が進行していることが明らかとなった。さらにKwan PhayaoやBang Pra Reservoirといった水道水源において、WHOの飲料水質ガイドラインに位置づけられたマイクロキスチンを含有するアオコの異常増殖がみられることが予備的研究から明らかとなった。マイクロキスチンは青酸カリよりも強い毒性を示し、世界各地で家畜の死亡をもたらし、さらにはブラジルにおいて人の死亡をもたらしている。そのような水源の保全という意味からも有毒アオコの実態解明、対策の確立・強化はタイ王国の水環境を修復していく上で極めて重要な位置づけにある。しかしながら、タイ王国の国情に適した適切な富栄養化対策は発生源対策・直接浄化対策ともに遅れているのが現状である。

ヨシヤガマといった水生植物を植栽した人工湿地が高度で安定した浄化能力を有すること、根圏への酸素供給により、高い硝化・脱窒能力を有すること、ヨシヤガマのコンポスト化技術が重要であること等が明らかになった。しかしながら、ヨシヤガマといった水生植物は再利用が難しく、環境負荷の少ない社会を構築する上では限界があることがわかってきたため、これからは食物

源としてリサイクルが可能な水耕植物を活用した浄化技術が必要ながわかり、今後の課題として残された。

タイ王国の食品工場をはじめとする排水処理施設や人工湿地を活用した低濃度汚濁水の処理施設において、処理効率を高める上で原生動物や後生動物の定着能の強化が必要であることが示唆された。さらに、タイ王国の排水処理施設等から原生動物を分離し、様々な温度条件下培養し、増殖特性を調べたところ温度の影響を受けやすく、高温において高い活性を有することが明らかとなり、このような熱帯地域の微生物の特性を考慮した合併処理浄化槽の開発と同時に運転管理の適正化が極めて重要な位置づけにあり、今後の課題として残された。また、食品工場の排水処理施設の沈殿槽において観察されたグッピー等の魚類の役割を室内実験により検討したところ、細菌、菌類、原生動物等が浄化に貢献する生物学的排水処理にグッピー等の高次捕食者を組み込むことにより余剰汚泥が減少することが示唆され、微小動物や小型動物の捕食、増殖活性に関するさらなる知見の収集及びナマズ等食用可能な魚類を活用した資源回収型の排水処理システムの開発が今後の課題として残された。

以上の得られた知見を踏まえ今後以下に示すような研究が必要になるものと考えられる。

#### 1) 湖沼等の水源域における有毒微細藻類の質と量の調査に関する研究

熱帯地域の湖沼において異常増殖する有毒微細藻類の種類や有毒物質についてはWHOでガイドラインが示され、その重要性が指摘されているにもかかわらず、明らかにされていない。そこで、これからの研究ではタイ王国の水源域に発生する有害微細藻類の研究調査を強化して行い、発生源対策並びに直接浄化対策を図る上での基礎的知見を得ることとする。採取した湖沼水から有毒微細藻類株を分離し、その培養条件を検討する。毒性が明らかとなった株は大量培養し、毒素の抽出、分画精製、NMR、MS、化学分解等の手段を用いた化学構造の解析を行う。このような有毒藻類対策にかかわる研究の重点化が必要不可欠である。

#### 2) タイ王国における原生動物、後生動物の遺伝資源保存とその特性に関する研究

タイ王国の有毒微細藻類発生水域において、有毒微細藻類を捕食・分解する原生動物や後生動物をスクリーニング・分離・同定し、水温、pHといった環境条件と捕

食速度及び有毒物質の分解速度との関係を調べ、安全な水源を確保する上で極めて重要な役割を果たす有用微小動物を活用した有毒物質の分解技術を確立する上での基礎的知見を得る。さらに、これらの有毒藻類を捕食分解する能力及び汚濁物質を分解する微小動物の遺伝子源の保存強化と活用法の検討のさらなる重点化が必要不可欠である。

#### 3) 再資源化可能な水耕栽培植物の探索と導入手法に関する研究

ヨシやガマといった水生植物は有機物、窒素及びリンの浄化能力は高いが再資源化が難しく、浄化システムとして実際に普及させることが困難であることがこれまでの研究成果により、明らかとなってきた。これからの研究では、ヨシやガマの代わりに発生源対策や直接浄化対策に活用可能で食物源となりうる水耕栽培植物のスクリーニングを目的とし、タイ王国に生息している様々な水耕栽培植物について窒素・リンの吸収速度を測定し、その特性を調べる。重金属の取り込み・蓄積性を測定し、資源としての価値を評価解析する。また、窒素及びリンの吸収能力と同時に、水生植物を活用した浄化手法では根圏への酸素の供給能力が窒素の除去能力の制限因子となるので、根圏の発達の度合いや他の植物の侵入に対する抵抗性を考慮に入れて有用な水耕栽培植物を選択し、その最適操作条件の確立を行う研究の重点化が必要不可欠である。

#### 4) 水生植物と水耕栽培植物の最適組み合わせによる浄化システムの高度化に関する研究

資源化が可能な水耕栽培植物を活用した污水処理システム及び湖沼水の直接浄化技術の開発を3)を踏まえて行う。生活系排水や有毒微細藻類が発生した湖沼水を直接水耕栽培植物に流すことは、食料として再利用する上で衛生面、健康面から問題を引き起こす可能性があることから、前段でヨシやガマを植栽した水路で処理を行い、その処理水を、水耕栽培植物を植栽する水路に流し処理の高度化と水生植物、水耕栽培植物の再資源化を行う。ここでは、まず前段における大腸菌群や有毒アオコの除去性能について負荷量や滞留時間を運転パラメータとした検討を行う。さらに処理システムとしての浄化能力と後段の水耕栽培における生産効率を最適化するために、前段と後段の組み合わせ、水耕栽培の傾斜角度・水位、間引きの周期と量といった運転条件について検討を行う。さらには、有毒微細藻類を効率よく捕食・分解

する微小動物をヨシやガマを植栽した水路に高密度に定着化させ、有毒物質の効率的な分解が可能なシステム化の開発を行う。このようなタイ王国に適した最適システム化の開発研究の重点化が必要不可欠である。

#### 5) 高度簡易分散型生活排水・汚泥処理システムの技術開発に関する研究

タイ王国で従来から排水の簡易処理手法として行われているラグーン処理はこれまでの調査結果に基づくと有機物除去能力は高いが栄養塩類の除去能力が低いことが明らかとなった。そこでこれからの研究では、従来のラグーン処理に対する嫌気・好気条件、間欠ばっ気、循環の組み込みを、浄化に貢献する微生物群の年間を通して30℃といった環境条件下における酸素消費速度等の評価に基づいて行い、汚濁負荷量に対する適切な設計操作条件の確立と必要面積等を計算する上で必要な知見を得る。

日本における高度合併処理浄化槽の設計の考え方に對し、タイ王国における微生物の浄化反応速度を取り入れ、タイ王国における適切な高度合併処理浄化槽の構造、特に水温と生物相に着目し、その生物処理機能を十分に考慮して提案する。さらにはヤシガラといったタイ王国の地域未利用資源を活用した担体への微生物の付着特性を、従来日本で使われているプラスチック担体と比較し、実施への応用の可能性とばっ気強度や充てん量といった最適運転条件について検討を行う。

水生植物植栽浄化法において生育したヨシやガマを補助担体として活用した亜熱帯地域における余剰汚泥の高温好気発酵法を開発する上で必要な運転操作条件を明らかにする。このように分散型処理システムとしての最適化の開発研究の重点化が必要不可欠である。

#### 6) 汚濁水域の水質改善システムの効果的導入手法の開発に関する研究

本研究で開発した様々な処理システムを、それぞれの特長を最大限に生かし、集水域においてどのように面的整備していけば負荷削減効果が高まり有毒微細藻類の発生を抑制することができるのかについてこれからの研究においてシミュレーションを行い評価する。タイ王国の水環境保全に係る基準等は極めてあまく、幾ら技術開発しても、制度として根付かない限り普及しないため、日本の水質汚濁行政を再整理し、日本の二の舞を演じないよう、タイ王国におけるこのような技術の導入に

関する制度や政策の適正なあり方をタイ王国の研究者と共同で提案し、開発した技術が社会に浸透できるような基盤を確立する研究を推進する。

これまでのタイ王国における研究を通じて、AIT（アジア工科大学）やERTC（タイ環境研究研修センター）などのカウンターパートを確立することができた。今後残された課題、また新たに発生した重要な課題について研究を充実させることはタイ王国の水環境修復に貢献するところが多大であると考えられる。最近、WHOの飲料水質ガイドラインにミクロキスティンが設定されたが、これからの研究において水生植物や水耕栽培植物を活用した発生源対策や湖沼の直接浄化手法を開発することにより、WHOが定めた飲料水ガイドラインを満足する安全性を確保する上での極めて有効な知見がタイ王国ではじめて得られることとなる。これからの研究の目標である自然利用強化型浄化技術は省エネ・省コスト・リサイクル型の極めて実用性が高く住民による管理が可能なシステムであり、制度化され、普及の基盤が整備されれば、タイ国内はもちろんのこと熱帯地域における水質改善が必要な水源域において極めて甚大な効果をもたらすと考えられる。

日本のこれまでの水質汚濁防止行政の実績を踏まえ、タイ王国のこれまでの基準作りの問題点を抽出し、どのような技術導入が適切かを検討することにより、国情に適した中核技術導入の方向性や負荷削減対策、面整備のあり方を提案することが可能となる。省エネ・リサイクル型の水源における有毒微細藻類発生防止技術を提案し、水環境保全の推進に係る基盤を整備していくことにより、タイ王国の水環境修復技術、政策の面からの波及効果は極めて甚大であると考えられる。このような観点から残された課題を順次解決していくべく研究の強化を、さらには重点化を図った基礎と応用の研究をますます推進することは、真の国情に適した技術を定着させていく上でも極めて重要であると考えられる。

なお、これらを踏まえたタイ王国における水環境修復技術の開発のあり方は図40に示すとおりであり、これらの技術開発を推進し真の水環境の健全化に資する日本とタイ王国との国際共同研究の強化が必要不可欠であると考えられる（図41）。

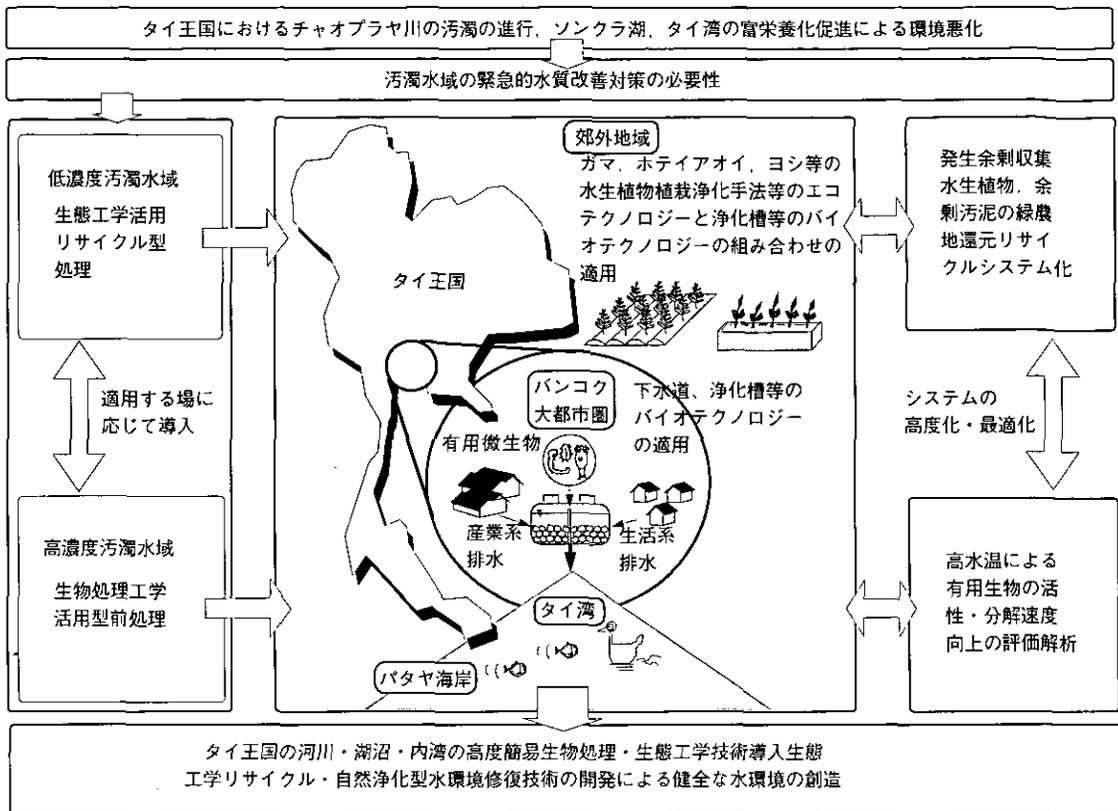


図40 タイ王国における水環境修復技術の開発のあり方

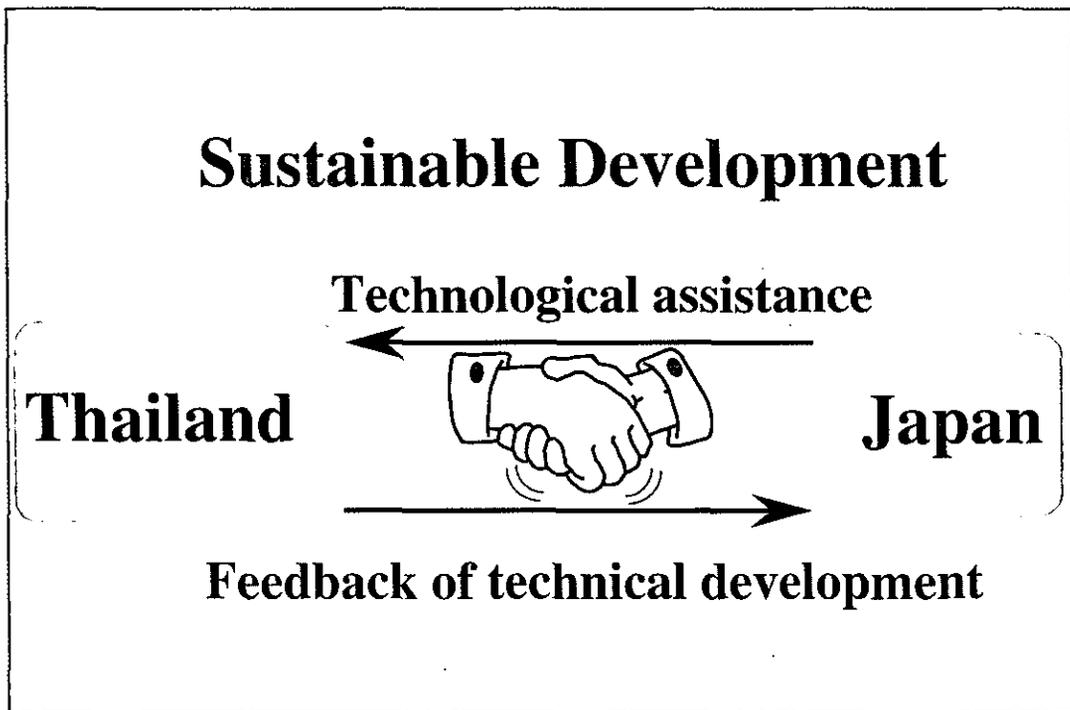


図41 国際的協調による地球環境保全の推進

## [資 料]

## I 研究の組織と研究課題の構成

### 1 研究の組織

#### [A 研究担当者]

地域環境研究グループ

統括研究官

森田昌敏

水環境改善国際共同研究チーム

稲森悠平・高木博夫・水落元之

地球環境研究センター

中島興基

水土壤圏環境部

相崎守弘

水環境工学研究室

西村 修

#### [B 客員研究員]

林 紀男	(千葉県立中央博物館)	(平成6, 9, 10年度)
須藤 隆一	(東北大学)	(平成6, 7, 9, 10年度)
孔 海南	(中国環境科学研究院)	(平成6~8年度)
藤本 尚志	(東京農業大学)	(平成8, 10年度)
松村 正利	(筑波大学)	(平成7~10年度)
平田 彰	(早稲田大学)	(平成7, 9年度)
戎野 棟一	(東邦大学)	(平成8, 10年度)
杉浦 則夫	(筑波大学)	(平成7, 9, 10年度)
東 照雄	(筑波大学)	(平成7~10年度)
長坂 實上	(茨城大学)	(平成7年度)
高橋 力也	(東京農業大学)	(平成8, 10年度)
保坂 義男	(茨城県企業局)	(平成9年度)
青山 莞爾	(東邦大学)	(平成9年度)

### 2 研究課題と担当者(\*客員研究員)

#### (1) タイ王国における水域の実態調査

稲森悠平・水落元之・高木博夫・西村 修・相崎守弘・青山莞爾\*・林 紀男\*・藤本尚志\*・戎野棟一\*・杉浦則夫\*・保坂義男\*

#### (2) 水処理プロセスを活用した水質浄化

稲森悠平・水落元之・高木博夫・西村 修・孔 海南\*・青山莞爾\*・林 紀男\*・藤本尚志\*・戎野棟一\*・杉浦則夫\*・保坂義男\*

#### (3) 生態工学プロセス技術を活用した水質浄化

稲森悠平・水落元之・西村 修・孔 海南\*・須藤隆一\*・藤本尚志\*・平田 彰\*・杉浦則夫\*・長坂實上\*・高橋力也\*

#### (4) 熱帯地域における生物活性と処理の高度化

稲森悠平・水落元之・西村 修・須藤隆一\*・松村正利\*・平田 彰\*・東 照雄\*・長坂實上\*・高橋力也\*

#### (5) 総括および展望

稲森悠平・水落元之・西村 修・中島興基・森田昌敏・須藤隆一\*・松村正利\*・東 照雄\*・長坂實上\*・高橋力也\*

## II 研究成果発表一覧

### 1 誌上発表

発表者	題目	掲載誌	巻(号)	ページ	刊年
稲森悠平, 西村 修, 林 紀男, 須藤隆一	有用微生物を活用した環境修復	用水と廃水	36	675-680	1994
稲森悠平, 西村 修, 高井智丈, 須藤隆一	水源保全のための高度処理浄化槽の 技術開発・普及のあり方	月刊生活排水	14 (155)	1-10	1994
稲森悠平, 矢板橋芳生, 桜井敏郎	インドネシア国における合併処理浄 化槽の機能調査とそれに基づく生活 排水対策のあり方	Adv. Purif. Waste- water	(34)	5-22	1994
稲森悠平, 水落元之, 西村 修, 藤本尚志	土壌浸透法を用いた排水処理と窒素 負荷量	環境と測定技術	21 (12)	8-18	1994
稲森悠平, 岩見徳雄, 兪 順珠, 近山憲幸	農山村地域における有機廃棄物の高 温好気発酵法による資源循環高度処 理	用水と廃水	37	50-56	1995
須藤隆一, 孔 海南, 小沼和博, 藤本尚志, 稲森悠平	高濃度有機性排水処理の動向	環境管理	31	801-811	1995
稲森悠平, 孔 海南, 呉 暁磊, 須藤隆一	高濃度有機性排水処理の高度化の重 要性と動向	用水と廃水	37	785-794	1995
稲森悠平, 孔 海南, 松村正利, 須藤隆一	水環境保全のための国際共同研究の 動向と展望	用水と廃水	38	7-16	1996
稲森悠平, 孔 海南, 水落元之	アジア太平洋地域における水環境修 復技術と国際協力	水処理生物学会誌	33	1-13	1997
T. Takai, A. Hirata, K. Yamauchi, Y. Inamori	Effects of temperature and volatile fatty acids on nitrification-denitrification activity in small-scale anaerobic-aero- bic recirculation biofilm process	Wat. Sci. Tach.	35 (6)	101-108	1997
I. Yokota, Y. Inamori, J. Nakajima	On-site treatment systems of domestic wastewater	TECH MONITOR	14 (3)	27-32	1997
中島 淳, 稲森悠平	生活排水の断続曝気処理施設におけ る低負荷運転時の窒素除去特性	水環境学会誌	20	519-525	1997
稲森悠平, 小池晃代, 板山朋聡, 岩見徳雄, 戎野棟一	<i>Microcystis</i> 属の多糖質特性に及ぼ す窒素濃度の影響	国立環境研究所研究報 告	138	12-15	1998
李 保瑛, 杉浦則夫, 稲森悠平, 西村 修, 東 照雄, 須藤隆一	鞭毛虫類 <i>Monas guttula</i> によるカビ 臭産生藻類 <i>Phormidium tenue</i> の分 解に及ぼす温度の影響	水環境学会誌	21 (4)	224-229	1998

発 表 者	題 目	掲 載 誌	卷 (号)	ページ	刊年
稲森悠平, 西村 修, 木村賢史, 徐 開欽	生態工学を活用した低汚濁海水の浄化	化学工業	49	449-457	1998
稲森悠平, 小沼和博	食料品製造業排水の現状と法規制	月刊食品工場長	(12)	12-15	1998
稲森悠平, 小沼和博	食品工場排水の工程内対策と排水処理対策	月刊食品工場長	(13)	22-24	1998
稲森悠平, 小沼和博	食品工場排水の既存排水処理施設の高度・効率化	月刊食品工場長	(14)	40-41	1998
稲森悠平, 小沼和博	食品工場排水の処理コストと新たな処理システムの開発	月刊食品工場長	(15)	62-63	1998
稲森悠平, 小沼和博, 須藤隆一	窒素・リンの抜本的な負荷削減策を —産業排水高度処理技術の開発と方向—	月刊 地球環境	29 (5)	16-21	1998
西村 浩, 徐 開欽, 稲森悠平, 須藤隆一, 竹川 愛, 戎野棟一	カルシウム系焼結セラミックス担体を充填したバイパス式嫌気好気循環汚濁水路浄化法における浄化特性	環境工学研究論文集	35	395-401	1998

## 2 口頭発表

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	年月
俞 順珠, 徐 胤洙, 稲森悠平, 岩見徳雄, 近山憲幸	養豚排水の高温好気発酵プロセスによる処理特性	第28回日本水環境学会年会	宇都宮	6.3
孔 海南, 中西 弘, 稲森悠平, 須藤隆一	自己造粒・生物膜循環プロセスのUSB反応タンクにおける分解・除去特性	第28回日本水環境学会年会	宇都宮	6.3
志村一彦, 大野 茂, 孔 海南, 稲森悠平	嫌気自己造粒・好気生物膜循環法における醸造排水の高度処理	第28回日本水環境学会年会	宇都宮	6.3
稲森悠平, 金 周永	韓国における水質改善システムの開発と普及の必要性	第28回日本水環境学会年会	宇都宮	6.3
朴 恵環, 柳 在根, 柳 弘一, 徐 胤洙, 稲森悠平	韓国の湖沼環境の現状とその対策研究	日本水処理生物学会第31回大会	横浜	6.10
稲森悠平, 岩見徳雄, 近山憲幸, 須藤隆一	高温・好気生物膜発酵法による高濃度有機廃棄物の分解と廃食用油添加の効果	第29回日本水環境学会年会	広島	7.3
T. Takai, A. Hirata, K. Yamauchi, Y. Inamori	Effects of temperature and VFA on nitrification-denitrification activity in small-scale anaerobic-aerobic recirculation biofilm process	3rd. Int. Spec. Design & Oper. SWTP	Malaysia	7.10
孔 海南, 呉 暁磊, 稲森悠平, 須藤隆一	高濃度活性汚泥・中空糸膜分離法における膜のクロスフロー式と吸引式の比較	日本水処理生物学会第32回大会	大阪	7.11
高井智丈, 朝井欣哉, 田村明威, 平田 彰, 山海敏弘, 稲森悠平	嫌気好気流動床による厨房排気水の高度処理に関する研究	日本水処理生物学会第32回大会	大阪	7.11
稲森悠平, 高井智丈, 松村正利, 山内健太郎, 山海敏弘	生物学的硝化脱窒反応に及ぼす pH, 揮発性有機酸の影響	日本水処理生物学会第32回大会	大阪	7.11
藤井邦彦, 稲森悠平, 松村正利, 杉浦則夫	高温好気発酵法に出現する好熱性細菌の特性	日本水処理生物学会第32回大会	大阪	7.11
稲森悠平, 安藤 洋, 東 照雄	高温好気発酵法による有機廃棄物の分解特性	日本水処理生物学会第32回大会	大阪	7.11
西村 浩, 稲森悠平, 松村正利, 小野木三津子, 寺村昌忠	地域未利用資源としての建設副産物等の植毛加工接触材を用いた水質浄化特性	第30回日本水環境学会年会	福岡	8.3
長坂實上, 佐藤義典, 清水輝彦, 稲森悠平	流入負荷変動が改良型小型合併処理浄化槽の処理機能に及ぼす影響	第30回日本水環境学会年会	福岡	8.3
稲森悠平	アジア太平洋地域における水環境修復技術の国際協力	日本水処理生物学会第33回大会	つくば	8.11

発表者	題 目	学会等名称	開催都市名	年 月
稲森悠平	アジア太平洋地域における水環境修復技術と国際協力	日本水処理生物学会第33回大会	つくば	8.11
稲森悠平, 高橋典子, 西村 浩, 戎野棟一, 小野木三津子	生物膜法への未利用資源由来担体の活用による処理機能特性	日本水処理生物学会第33回大会	つくば	8.11
藤本尚志, 末長巨行, 高橋力也, 国安克彦, 稲森悠平	有用微小動物輪虫類, 貧毛類および縁毛類のポリプロピレン製担体への定着特性	日本水処理生物学会第33回大会	つくば	8.11
片岡伸介, 大内山高広, 稲森悠平	機能強化微生物を用いた汚泥減量化処理処分システムの実施設での活用	日本水処理生物学会第33回大会	つくば	8.11
安藤 洋, 稲森悠平, 水落元之, 池田亮子, 東 照雄	高温好気発酵法によるアオコの分解特性	日本水処理生物学会第33回大会	つくば	8.11
孔 海南, 稲森悠平, 水落元之, 孫 鉄行, 李 培君	生活排水を処理する土壌トレンチからの地球温暖化ガスの発生特性	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
西村 浩, 稲森悠平, 松村正利, 小野木三津子, 寺村昌忠	廃プラスチックを活用した植毛加工接触材充填方式による浄化特性	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
藤本尚志, 稲森悠平, 加藤 慎, 国安克彦, 高橋力也	有用輪虫類および貧毛類の増殖に及ぼす洗米排水由来微量物質の効果	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
Lu X., Y. Inamori	Degradation Mechanism of Cyanobacteria and Toxins under Biological Process	第32回日本水環境学会年会	習志野	10.3
池田亮子, 東 照雄, 稲森悠平, 岩見徳雄, 朴 炫建	高温好気発酵による有機廃棄物の分解能向上における最適操作条件の解析	第32回日本水環境学会年会	習志野	10.3
林 紀男, 国安克彦, 稲森悠平, 須藤隆一	魚類による捕食圧が池水生態系に及ぼす影響	第32回日本水環境学会年会	習志野	10.3
Lu K., Ding G., Y. Inamori	Removal Of Cyanobacterial Toxins By Means Of Contact Oxidation Bioreactors	日本水処理生物学会第34回大会	広島	9.11
稲森悠平, 斉藤 猛, 保坂義男, 杉浦則夫, 染谷敬幸, 青山莞爾	富栄養化湖沼で発生するアオコ由来の有毒物質の現存量の実態調査	日本水処理生物学会第34回大会	広島	9.11
稲森悠平, 池田亮子, 岩見徳雄, 東 照雄	高温好気発酵法における浄化槽汚泥の処理特性	日本水処理生物学会第34回大会	広島	9.11
山本泰弘, 稲森悠平, 孔 海南, 松村正利, 岩淵健司	中国・韓国における実証高度生物ろ過プロセスの処理特性評価	日本水処理生物学会第34回大会	広島	9.11

発 表 者	題 目	学会等名称	開催都市名	年 月
岩見徳雄, 稲森悠平, 板山朋聡, 杉浦則夫	原生動物鞭毛虫類 <i>Monas guttula</i> の捕食・分解過程における <i>Microcystis</i> 属産生有毒物質の Microcystin RR, YR, LR の消長	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
斉藤 猛, 稲森悠平, 杉浦則夫, 松村正利	アオコ発生自然水域に由来する微生物群の microcystin 分解能	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
稲森悠平, 亀山恵司, 杉浦則夫, 戎野棟一, 斉藤 猛	有毒物質ミクロキスチンの富栄養化湖沼における挙動とその環境因子の評価解析	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
小浜暁子, 稲森悠平, 山田一裕, 西村 修, 須藤隆一	肉食性原生動物 <i>Dileptus anser</i> の捕食特性	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
林 紀男, 国安克彦, 稲森悠平, 須藤隆一	袋型動物輪虫類 (ワムシ) の増殖に及ぼす環境因子の影響	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
柳 承和, 柳 在根, 黄 薫真, 竹下俊二, 水落元之, 稲森悠平	韓国の水環境の現状と高度処理対策	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
丁 国際, 多田千佳, 稲森悠平, 須藤隆一	アオコ発生時期の富栄養化湖沼における動物プランクトンの特性	第 33 回日本水環境学会年会	仙 台	11. 3
藤本尚志, 相馬正壽, 鈴木昌治, 高橋力也, 稲森悠平	有毒藍藻類 <i>Microcystis viridis</i> の連続培養による microcystin 産生特性の解析	日本水処理生物学会第 35 回大会	静 岡	10. 11
古屋 昇, 山中 晋, 稲森悠平, 水落元之, 照沼 洋	河川特性を考慮した生物膜河川・水路浄化法における適正導入条件の評価解析	第 33 回日本水環境学会年会	仙 台	11. 3
石橋良信, 中里広幸, 稲森悠平, Khin Thida LINN, 滝沢 智	熱帯地方における水耕栽培法とその生態的特徴	第 33 回日本水環境学会年会	仙 台	11. 3
林 紀男, 国安克彦, 稲森悠平, 須藤隆一	水干しによるため池の浄化	第 33 回日本水環境学会年会	仙 台	11. 3
藤本尚志, 早川賢一, 鈴木昌治, 高橋力也, 大内山高広, 林 紀男, 稲森悠平	熱帯地域タイ王国から分離した微小動物の増殖に及ぼす環境因子の影響	第 33 回日本水環境学会年会	仙 台	11. 3
照沼 洋, 稲森悠平, 松村正利, 須藤隆一	生活排水により汚濁が進行した河川・水路水からの栄養塩類直接浄化システムの開発	第 33 回日本水環境学会年会	仙 台	11. 3

REPORT OF SPECIAL RESEARCH FROM  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所特別研究報告

SR-34-2000

---

平成12年3月31日発行

編集 国立環境研究所 編集委員会

発行 環境庁 国立環境研究所

〒305-0053 茨城県つくば市小野川16番2

電話 0298-50-2343 (ダイヤルイン)

---

印刷 株式会社 イセブ

〒305-0005 茨城県つくば市天久保2丁目11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053 Japan

March 2000

本報告書は再生紙を使用しています。