

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3317号

土木研究所資料

調査研究報告書 (平成5年度)

平成6年12月

建設省土木研究所
環境部環境計画研究室

Copyright © (1994) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

調査研究報告書（平成5年度）

環境計画研究室	室長	丹羽	薫
	主任研究員	久納	誠
	〃	天野	邦彦
	研究員	小栗	ひとみ
	〃	長野	幸司
	〃	久保	徳彦
	〃	真田	誠至
	前主任研究員	安田	吾郎

要 旨

平成5年度に環境計画研究室が建設事業に関連した環境計画の充実のための環境評価技術、環境データベース、景観設計支援システムや湖沼の水質浄化に関する研究を行った成果の概要の報告である。

キーワード：環境アセスメント，環境データベース，環境経済評価，景観シミュレータ，景観データベース，地球温暖化，鳥類生息環境，ヒートポンプ，富栄養化対策，密度流，糸状藻類

ま え が き

本報告書は、平成5年度に環境計画研究室において実施した研究成果をとりまとめたものである。

当研究室は、平成5年4月6日付の土木研究所の組織再編成による環境部設立に伴い発足し、建設事業に関連した環境計画の充実のための環境評価技術、環境データベース、景観設計支援システムや湖沼の水質浄化技術に関する研究等を行っている。これらの研究課題の内、環境計画手法の構築に関する諸研究は、当研究室発足に伴い新たに研究を開始したテーマであり、湖沼の水質保全に関する諸研究は従来ダム部水資源開発研究室で実施していた研究を引き継いだものである。

5年度は、試験研究費で3課題、総合技術開発プロジェクトで1課題、河川総合開発事業調査費で5課題、また地方建設局依頼調査試験費で5課題、計14課題について調査研究を実施した。これら各課題について報文等を本調査報告に取りまとめた。また、その他本研究室が発表した報告等についても本調査報告に取りまとめた。

本書巻末に、当研究室で発表した論文の一覧表、当研究室の構成メンバーを掲載した。なお、本報告は、当研究室年度報告の第1号である。

当研究室で取り組んでいる調査研究課題は本省及び地方建設局、その他の行政機関と密接に関連有るものであり、関係各位からの御指導・御鞭撻をお願いするとともに、本研究成果が若干でも現場行政の一助となれば、幸いである。

平成6年12月

土木研究所環境部 環境計画研究室

目 次

まえがき	
環境計画研究室概要	1
今年度の調査研究概要	5
環境計画手法の構築に関する調査研究	
1. 建設事業に関する環境アセスメント技術に関する研究(試験研究費)	11
2. 建設事業に関する環境データベースに関する研究(試験研究費)	17
3. 景観シミュレータ・景観データベースの研究開発(総プロ)	23
4. 湖沼の環境創造技術に関する調査(河総)	29
地球環境に関する調査研究	
5. 地球規模の環境変化が水資源に及ぼす影響に関する調査(河総)	35
自然環境の保全に関する調査研究	
6. 湖沼における鳥類の生態系環境に関する調査(河総)	41
湖沼の水質保全に関する調査	
7. 湖沼密度流の水質に及ぼす影響に関する研究(試験研究費)	47
8. 流動制御による湖沼の富栄養化対策技術に関する調査(河総)	53
9. 生態系を活用した湖沼の水質制御手法に関する調査(河総)	59
10. 夏期の小出水における水質保全対策の検討(テスト)	65
11. ダム貯水池水質保全対策の検討(テスト)	67
12. 貯水池の水質保全に関する調査(テスト)	69
13. 貯水池流動制御システム実験(テスト)	71
建設省技術研究発表会	
14. 糸状藻類を活用した新しい湖沼富栄養化対策	73
土木研究所発表会	
15. 湖沼の水質保全に役立つ水熱エネルギー利用技術の開発	81
土木技術資料	
16. 糸状藻類を活用した湖沼の富栄養化対策技術の開発(1993.11)	85
17. 流動制御によるダム湖の水質保全技術の開発(1993.11)	92
ダム及びダム湖流域環境ワークショップ	
18. EUTROPHICATION CONTROL TECHNIQUES FOR LAKES AND RESERVOIRS IN JAPAN	99

その他に掲載した論文

19. 糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム（環境システム研究） 133
20. 流動制御によるダム湖水質保全システム（ダム工学研究会） 142
21. 我が国での対策事例と新しい水質保全対策
（ダム湖の水質保全シンポジウム） 145
22. 水質保全への生態系の活用の仕方（ダム水源地ネット） 172
23. Chemical Processes of Surface Waters 3)Reservoirs
（Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering） 174
24. ヒートポンプと流動制御を用いたダム湖水質保全システム
（水工学論文集） 177
25. ダム湖における自然環境創出（ダム技術 1993.10） 183
26. 地球温暖化が水資源に及ぼす影響について（Ⅱ）
ー水資源とその利用率の地域差を考慮ー（ダム技術 1993.10） 201
27. ダム現場における濁水処理スラッジの有効利用（ダム技術 1994.3） 209
28. 地球温暖化が流域水文応答に及ぼす影響
ー地球温暖化による流域水文応答の変化の数値実験Ⅳ：ダム利水容量の検討
（地球温暖化のもとでの水資源評価と耐渇水方策に関する総合研究） 216
29. 地球温暖化にともなう水資源への影響とその対策
ー地球温暖化が水資源に及ぼす影響について
（地球温暖化のもとでの水資源評価と耐渇水方策に関する総合研究） 219

参考資料

1. 研究紹介パンフレット 177
 ・景観シミュレータ・景観データベースの研究開発 225
 ・湖沼の新しい富栄養化対策 226
 ・地球環境と建設技術（地球温暖化問題について） 227
2. 研究紹介記事 228
 ・貯水池の総合的な水質保全対策（水道産業新聞） 229
 ・富栄養化対策で新手法（水道産業新聞） 230
 ・藻をもって藻を制す（朝日新聞） 232
3. 文献目録 233
4. 研究室メンバー構成 235

環境計画研究室の概要

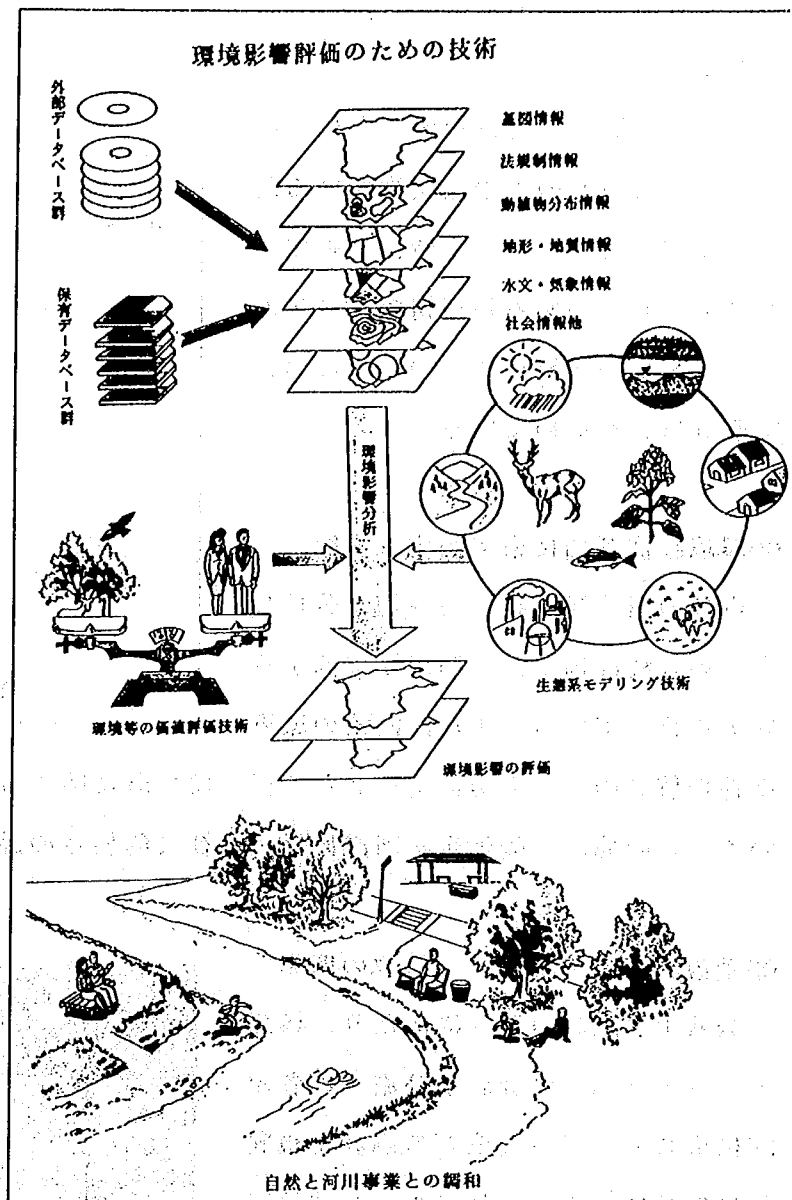
1. 概 要

環境計画研究室は、建設事業に関連した環境計画の充実につながる諸研究を推進するとともに、湖沼の水質浄化技術に関する研究にも取り組んでる。

環境計画の充実に資する研究としては、環境価値の適正な評価を目的とした環境経済評価技術に関する研究、環境に関する情報の早期把握と高度検討の支援を目的とした環境データベースの整備に関する研究、より簡単で高度な景観設計を支援する景観シミュレータ・データベースに関する研究、歴史的・文化美しい湖面のレクリエーション利用的土木施設の評価に関する研究等を進めている。

また、湖沼の水質浄化に資する研究としては、湖沼

内部の水の流動を制御して富栄養化現象の発生や濁水の滞留等を防ぐ技術に関する研究や糸状藻類等の生態機能を活用して窒素・リンの除去等の水質浄化を行う技術に関する研究等を行っている。



環境評価のため技術

2. 研究内容

①環境データベースに関する研究

建設省所管事業の実施にあたって必要な環境に関する様々な情報のデータベース化を図り、円滑なデータ処理を通じて建設事業の円滑な実施を図るための研究を行っている。特に、近年急速に発展しつつある地理情報システム（GIS）の建設行政への応用について調査研究を進めている。

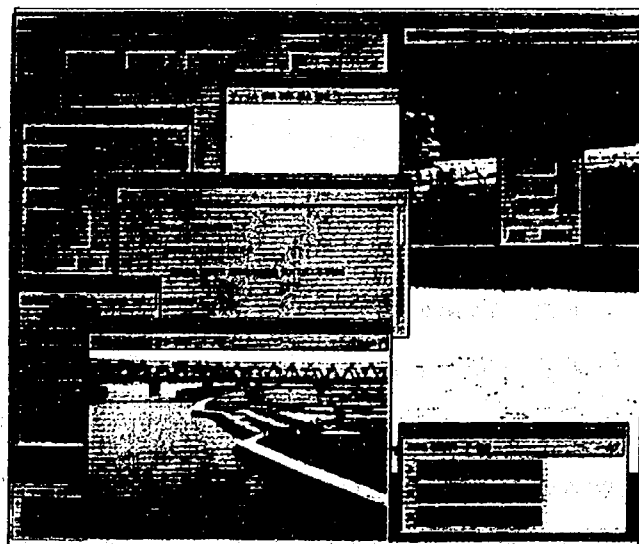
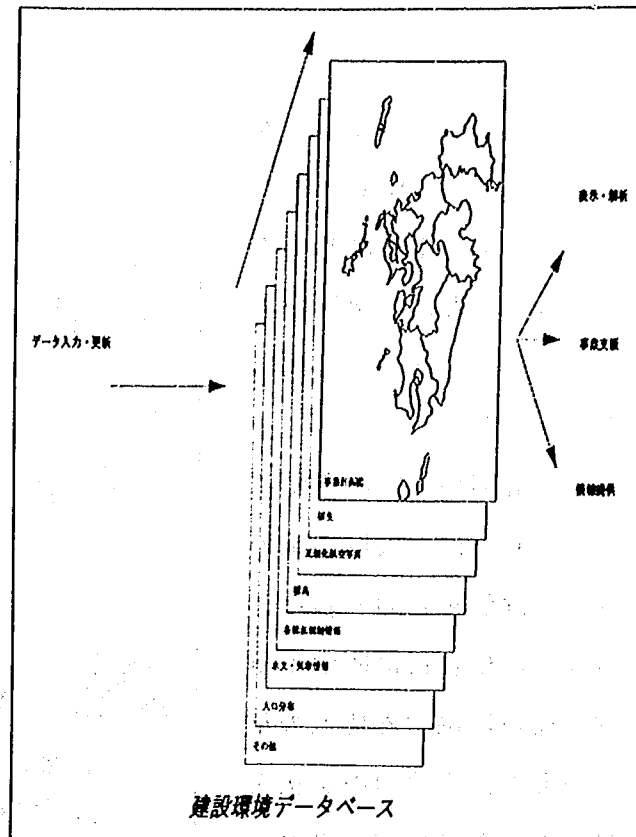
②環境経済評価技術に関する研究

内外の環境経済評価実施例を分析し、今後の各種評価手法の適用性に関する研究を行っている。また、湖沼の環境創造価値等の建設事業に関連した各種の環境財に関する実際の評価調査にも取り組んでいる。この他、二酸化炭素削減に係わる社会的便益の評価に関する研究も進めている。

③景観シミュレータ・景観データベースの開発

公共土木施設の建設にあたり、構想・調査・計画・設計および施工の各段階に応じて、周辺環境との調和を視覚的に容易に予測・評価できる景観検討支援システムの開発が期待されている。

そこで、建設省の事務所職員等が簡単に使用できる、操作性・実用性に優れた景観シミュレータおよび景観データベースの開発を進めている。



景観データベースの出力例

④環境アセスメント技術に関する研究

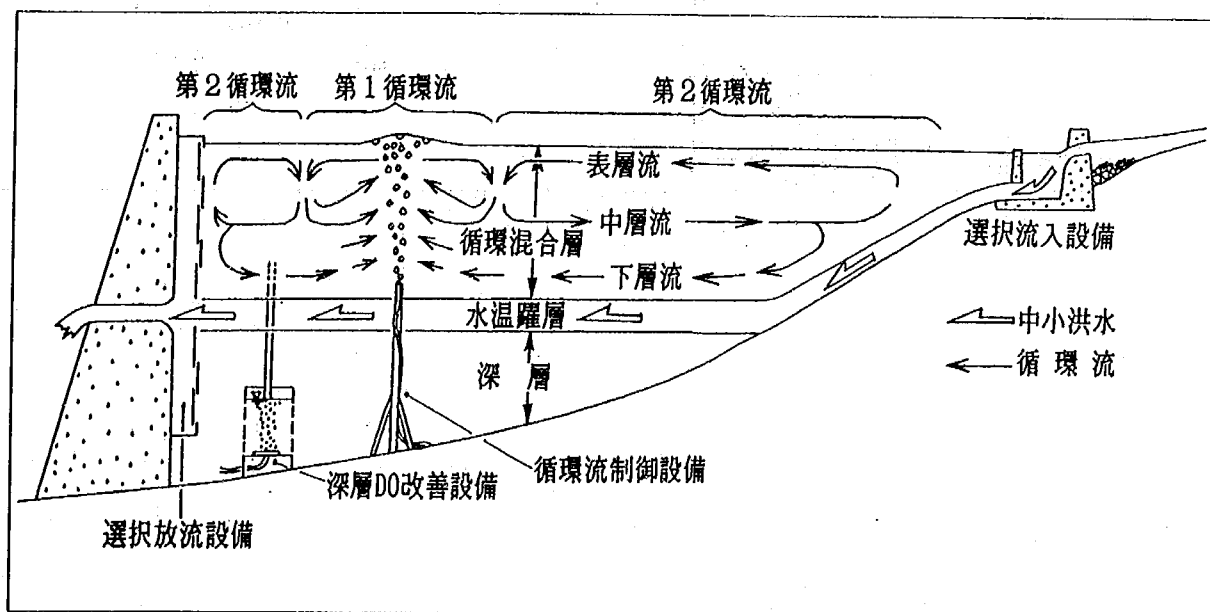
内外の環境アセスメント関連資料を収集し、環境アセスメントの一層の充実に資する技術研究を行っています。

⑥歴史的・文化的土木施設の評価に関する研究

歴史的・文化的土木施設はわが国の歴史・文化の正しい理解のために欠くことのできないものであると同時に、将来の社会資本整備の基礎をなすものです。このため、これら歴史的・文化的土木施設の保存・活用のためにこれらの評価手法について検討します。

⑥湖沼の流動制御技術に関する研究

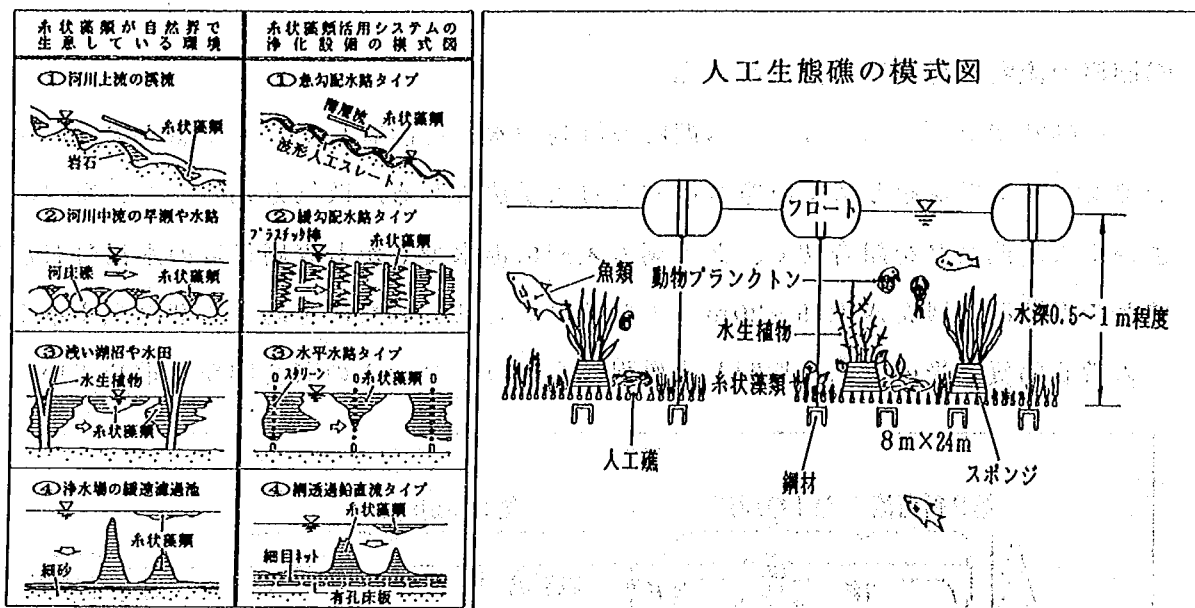
『流動制御システム』は、ダム湖内の流動や水温を制御して、藍藻類や鞭毛藻類が表層で安定した増殖をしにくい環境にする対策手法である。散気方式の曝気、選択流入および選択放流などを組合せて、ダム湖の表層に温水でしかも表層付近の水温分布が均一である循環混合層を水深15～20mまで厚く形成させ、表層に生息する藍藻類や鞭毛藻類への栄養物質と光の供給を抑制し水質保全を行うシステムの研究開発を進めている。



流動制御システムの模式図

⑦生態系を活用した水質浄化技術に関する研究

多くのダム湖や自然湖沼における富栄養化現象として浮遊藻類の異常増殖が問題となっており、その原因は流入河川からの過剰な栄養塩負荷によるものである場合が多い。一方、自然河川や浅い湖沼の湖岸では糸状藻類や水生植物が栄養塩の吸収除去を行っている。また、湖沼では動物プランクトンが生息する環境が整っていれば浮遊藻類を捕食することにより、浮遊藻類が異常増殖するのを防いでいる。このような生態系つまり、糸状藻類、水生植物や動物プランクトン、魚類等を活用することにより、好ましくない浮遊藻類の大量発生を防ぐ水質制御技術の開発を進めている。



5 年 度 の 調 査 研 究 概 要

平成5年度に当研究室で実施した研究課題を内容により分類すると以下のようになる。

- (1) 環境計画手法の構築に関する調査研究
 - 1. 建設事業に関する環境アセスメント技術に関する研究
 - 2. 建設事業に関する環境データベースに関する研究
 - 3. 景観シミュレータ・景観データベースの研究開発
 - 4. ダム湖環境創造技術に関する調査
- (2) 地球環境に関する調査研究
 - 1. 地球規模の環境変化が水資源に及ぼす影響に関する調査
- (3) 自然環境の保全に関する調査研究
 - 1. ダム湖における鳥類の生態系環境に関する調査
- (4) 湖沼の水質保全に関する調査
 - 1. 貯水池密度流の水質に及ぼす影響に関する研究
 - 2. 流動制御による湖沼の富栄養化対策技術に関する調査
 - 3. 生態系を活用した湖沼の水質制御手法に関する調査
 - 4. 三春ダム貯水池水質対策検討調査
 - 5. 夏期小出水における水質保全対策の検討
 - 6. ダム貯水池水質保全対策の検討
 - 7. 貯水池の水質保全に関する調査
 - 8. 貯水池流動制御システム実験

各課題について概要を示す。

(1) 環境計画手法の構築に関する調査研究

- 1. 建設事業に関する環境アセスメント技術に関する研究 (平5～平9 試験研究費)

本研究は、環境の内部目的化の理念に合致した環境アセスメント技術のあり方を検討することを目的とするものである。5年度は内外の環境アセスメント制度資料及び環境アセスメント実施例等を収集しそれらの分析を行った。その結果としてスコーピング、ティアリング等の技術的に注目される点を明らかにした。また、わが国での環境影響評価実施時期の早期化に関しては、円滑な用地買収を可能にする制度の実現等の支援措置が必要であることを明らかにした。さらに、海外の環境アセスメントにおいて注目される最近の技術動向として、電算評価ソフト、地理情報システムの利用等があることを明らかにした。

2. 建設事業に関する環境データベースに関する研究（平5～平7 試験研究費）

本研究は、建設省所管事業の実施にあたって必要な環境に関する様々な情報が量・質とも肥大化、複雑化している現状に鑑み、これらのデータベース化を図り、円滑なデータ処理を通じて建設事業の円滑な実施に資することを目的とする。

本年度は、データベースに求められる基本的性能及びシステムについて検討し、地理情報システム（GIS）の有用性を明らかにした上で、GISに関して基礎調査を行い、①便益を最大とする統一基図の仕様と整備②各種データの入力・更新・利用の効率化、がシステムの課題であることがわかった。

3. 景観シミュレータ・景観データベースの研究開発

（平5～平9 建設技術研究開発調査費）

周辺環境と調和した質の高い社会資本整備がこれまで以上に強く求められている状況の中、土木構造物・建築物の建設にあたって、構想から施工に至る各段階で、周辺環境との調和を視覚的に容易に予測・評価できる景観検討支援システムの開発が期待されている。本研究は、地建事務所等の職員が簡便に使用できる、操作性・実用性に優れた景観シミュレータおよび景観データベースを建築研究所と共同で開発するものである。5年度は、景観検討業務の現状やニーズの把握を目的として実態調査を行うとともに、景観データベースの基本設計および景観データベースとして蓄積するデータの収集を行った。また、最小限の機能を実現したプロトタイプを作成し、開発目標の具体化を図った。

4. ダム湖環境創造技術に関する調査（平5～平9 河川総合開発事業調査費）

本研究は、湖沼における環境の活用や創造に関する事業に関して、どのような条件の下で何をどこまで行うべきかという問題の解決に資する評価手法を求めることを目的としたものである。目的の達成のためには、湖沼に関わる環境便益の現状を評価した上で、今後の技術動向や国民の嗜好の変化を踏まえて長期的な便益を評価する必要がある、5年度においてはその基礎となる評価手法に関する検討を行った。その結果仮想金銭評価法（CVM）、二分選択仮想金銭評価法（DCVM）、ヘドニック旅費法（HTCM）、パラメーター変化モデル（VPM）、ランダム効用モデル（RUM）の適用が有効であることが明らかになった。また、これらの評価手法を適用するに当たっての問題点や注意事項を検討した。

(2) 地球環境に関する調査研究

1. 地球規模の環境変化が水資源に及ぼす影響に関する調査

(平5～平7 河川総合開発事業調査費)

近年、地球環境問題が大きく取り上げられている。本調査では、その内、地球温暖化と酸性雨が水資源に及ぼす影響に関して検討を行う。地球温暖化や酸性雨の今後の動向は未だ不確定な要素が多いので、現在のところ、これらの水資源への影響を定性的に評価することは難しい。そこで、過去の流量データに基づいて10ヶ年第1位相当渇水を対象に計画されている水資源開発の中で、これらの影響の可能性について検討するとともに、今後の必要な対策について検討する。5年度は、全国の主要な水系で、降水量、流出高及び取水高のデータを収集し、気温の上昇した場合の蒸発量の増加による水資源賦存高の減少を補い、現状と同じ水資源安全度を維持するために必要なダムの容量について定性的に分析を行った。

[関連報告書] ・地球温暖化が流域水文応答に及ぼす影響

(地球温暖化のもとでの水質源評価と耐渇水方策に関する総合研究)

・地球温暖化にともなう水質源への影響とその対策

(地球温暖化のもとでの水質源評価と耐渇水方策に関する総合研究)

(3) 自然環境の保全に関する調査研究

1. ダム湖における鳥類の生態系環境に関する調査

(平5～平9 河川総合開発事業調査費)

本調査は、湖沼における鳥類の生息が、周辺の生態系環境の中でどのような位置付けとなっているかを検討し、最終的には、湖沼における鳥類生息環境を適切に創造してゆくのに必要な要因を把握し、今後の事業に活かすことを目的とする。

初年度である5年度は、日本の鳥類の生息環境、各地の湖沼における生息状況に関する調査を行った。その結果、鳥類の密度・数と当該地域の植生構造に密接な相関があり、鳥類の生息環境は周辺森林の保全と創造の問題が大きいこと、また反対に周辺の環境を端的に示す指標としても鳥類が有効であることが明らかになった。さらに、人造湖沼における鳥類の生息環境創造の課題が水面よりも周辺の多様な環境にあることが確認された。

(4) 湖沼の水質保全に関する調査

1. 貯水池密度流の水質に及ぼす影響に関する研究 (平4～平6 試験研究費)

湖水の有効利用のためには、水の量とともに質の管理も適切に行う必要がある。流域から流入される栄養塩類と、水温成層による表層水の滞留により、好ましくない藻類が異常増殖することになり、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭など深刻な問題を引き起こしている。これらの現象は湖水の流動に大きく影響を受けており、湖水の流動を制御することにより、好ましくない藻類の異常増殖を抑制できることが考えられる。また水温成層が形成される時期の湖水の流動は水温差により生じる密度流が卓越している。5年度は、湖沼密度流制御による水質保全の原理の検討、及び散気方式の曝気や流入河川水によって生じる密度流を現地調査により検討した。

[関連報告書] ・流動制御によるダム湖の水質保全技術の開発 (土木技術資料)
・流動制御によるダム湖水質保全システム (ダム工学会)

2. 流動制御による湖沼の富栄養化対策技術に関する調査

(平2～平6 河川総合開発事業調査費)

湖沼における富栄養化現象は、現在、湖沼の水質現象の中でも極めて重要であり、その対策技術の確立が急務となっている。従来より湖沼の流動を制御することによる富栄養化対策の可能性及び効果の評価手法について検討を行ってきた。5年度は、実際に湖沼内において富栄養化対策を講じ、効果を得ることを目的とし、曝気循環及び選択放流等による湖沼の流動制御システムを実施した場合の湖沼の水質変化を現地調査し、その効果を明かにするとともに、流動制御システムの設備構造及び操作方法を検討するものである。

3. 生態系を活用した湖沼の水質制御手法に関する調査

(平5～平9 河川総合開発事業調査費)

湖沼において、浮遊藻類が異常増殖する直接の要因は、無機態のリン (PO_4-P) 等栄養塩類がダム湖に多量に流入することである。産業排水や下水処理水等の高負荷少量水については、 PO_4-P 除去技術が別途研究されている。一方、耕地等の面源負荷や度処理が行われていない下水処理水や畜産排水処理水が流れ込む自然河川の低負荷多量水を対象とした PO_4-P 除去技術は、近年まで開発されておらず、効率的な PO_4-P 除去技術の確立が急がれている。5年度は流入河川水の PO_4-P 等の無機態の栄養塩類を除する『糸状藻類活用システム』についての原理を確立した。

[関連報告書] ・糸状藻類を活用した新しい湖沼富栄養化対策 (建設省技術研究発表会)
・糸状藻類を活用した湖沼の富栄養化対策技術の開発 (土木技術資料)

・糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム（環境システム研究）

4. 三春ダム貯水池水質対策検討調査（平2～平6 地方建設局依頼調査試験費）

現在阿武隈川水系、大滝根川に建設中の三春ダムのダム湖においては、流域の開発が進んでいることから湛水後、富栄養化現象の発生が懸念されており、湛水後の水質保全計画の策定が急務となっている。流動制御システムの循環流制御設備は平常時、洪水時、或いは洪水後とでは各々操作が異なり複雑であるが、水質自動測定装置と接続して自動無人操作とすれば、かなり緻密な操作が可能となり、より高い水質保全効果が期待できる。本調査の5年度の目的は、循環流制御設備の設備構造及びダム湖における配置を検討することを目的とする。

5. 夏期小出水における水質保全対策の検討（平4～平6 地方建設局依頼調査試験費）

ダム上流域から栄養塩類が過剰に流れ込み富栄養化を来したり、降雨時にダム湖内に沈殿しにくい細かい土砂が流れ込み濁水長期化を引き起こしたりする可能性があるダム湖においては、水質保全対策のひとつに流動制御システムがある。しかし、流入河川水の温泉排水による温水化や、日照量が少ないという地域特性等の特殊な条件があるダム湖の場合は、ダム湖表層水温が十分に上昇できず、流動制御システムの機能が十分に発揮しない恐れがあり、それを補完する対策としては、ヒートポンプを活用した水温分布制御システムが考えられるが、システムの水質保全効果及び設備に関する検討を行った。

〔関連報告書〕・湖沼の水質保全に役立つ水熱エネルギー利用技術の開発

（土木研究所発表会）

・ヒートポンプと流動制御を用いたダム湖水質保全システム

（水工学論文集）

6. ダム貯水池水質保全対策の検討（平4～平6 地方建設局依頼調査試験費）

余野川ダムにおいては、流入河川の水質が良好でないことから湛水後の富栄養化現象の発生が懸念されている。このため、本ダム湖の水質保全対策としては流動制御システムが有力である。5年度は、対策に用いる基礎データを得るために、近傍の湛水している実ダムにおいて流入河川水質及びダム湖の水質鉛直分布の経時変化を測定し、栄養塩類を多く含む洪水時の流入河川水が、ダム湖のどの水深に入り込み、それがダム湖の水質にどのような影響を及ぼすのかを把握することを目的とする。

7. 貯水池の水質保全に関する調査（平4～平7 地方建設局依頼調査試験費）

ダム湖において淡水赤潮等の水質障害の原因となっているのは鞭毛藻類等の異常増殖によるものである。このような鞭毛藻類等の異常増殖を阻止するには、流入河川水に含まれる PO_4-P 等の無機態の栄養塩類を糸状藻類を用いて除去する糸状藻類活用システムが有力な手法である。本調査は糸状藻類活用システム等による藻類異常増殖の抑制手法について実験的に検討するものである。糸状藻類を PO_4-P 除去に用いられる利点の一つとして、増殖速度が早く、その分無機態の栄養塩類の吸収能力が高いことがあげられる。本調査の5年度の目的は、現地実験によって糸状藻類の PO_4-P 吸収能力を求めることを目的とする。

8. 貯水池流動制御システム実験（平4～平7 地方建設局依頼調査試験費）

ダム湖の富栄養化対策の有力な一手法である流動制御システムについて現地実験により検討するものである。流動制御システムは、曝気により湖内流動を発生させ、水温躍層を制御して流入栄養塩の湖内滞留を減少させ、貯水池の浮遊藻類の異常増殖を抑制するシステムであるが、本システムの効果及び設備規模を恒久施設が決まる以前に確認しておくために、管理中のダムにおいて流動制御システムの循環流制御設備と入江循環設備について現地実験を行い、その諸効果を調査した。

環境計画手法の構築に関する調査研究

環境の保全及び調和に関する研究

建設事業に関する環境評価

建設事業に関する環境アセスメント技術に関する研究

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

研究員 安田 吾郎

研究員 長野 幸司

1. 研究目的

開発と環境との調和が社会的に強く求められ、建設行政における「環境」の内部目的化が豊かな環境づくりのための基本的方策として位置づけられるなか、環境アセスメント制度の一層の充実、建設省環境政策大綱において環境政策の推進方策の柱として位置づけられたところであり、緊急を要する課題となっている。

一方、EC・カナダ・世界銀行等における近年の環境アセスメント施策の充実や、環境アセスメントを支援する技術としての地理情報システムの発達や環境の経済評価技術応用の普及など、環境アセスメントを取り巻く状況の変化も著しく、新しい状況に対応したわが国の環境アセスメントのあり方が問われている。

このような状況の下、海外諸国における環境アセスメントの制度と運用の実態を調べ、それを参考にわが国における環境アセスメント技術のあり方を求めることを目的として研究を行うものである。

2. 研究方法

本年度は、海外の環境アセスメント制度に関する資料及び実際の環境アセスメント準備書、評価書等の収集を行った。さらに、文献の解読を進め、各国の制度の特徴や運用の実態に関しての情報の集積を図った。

3. 研究結果

3.1 各国の環境アセスメント制度の分析

各国の環境アセスメントの中でも米国の制度は歴史的にも内容的にも特筆されるものがある。また、EU (European Community) の制度は、比較的最近に制度が変更されたものとして注目されるものである。そこで、本稿では、これらに対象を絞って以下に分析を進める。

3.1.1 米国の環境アセスメント

本節においては、①、②項において制度の概要と環境アセスメントの実施対象について簡略に述べた上で、米国の環境アセスメント制度における特徴的な点を③項以下に述べる。

①制度の概要

米国における、環境アセスメントの根拠法令は以下の3つである^{1) p.7}。

a) 国家環境政策法 (NEPA = The National Environmental Policy Act)

b) NEPA施行環境質委員会規則 (The Council on Environmental Quality (CEQ) Regulations for Implementing NEPA)

c) 連邦機関にNEPAの実施を求める環境の質の保護と向上に関する大統領令 11514 号 (大統領令

11991 号にて修正)

このうちNEPAが環境アセスメントの実施を規定する根拠法令であり、NEPA施行規則はその実施の詳細について定めたものである。ちなみに、1970年にNEPAが施行されてからNEPA施行規則ができるまでの期間には、NEPAが大枠のみを定めた法律であったため、運用の過程で運用・解釈をめぐって多数の訴訟が起きた⁴⁾。1979年に施行されたNEPA施行規則は、これらの判例の蓄積や制度運用の経験を踏まえたものとなっている。また、1970年に発令された大統領令 11514 号は、各連邦政府機関に対して公衆の関与の仕方に関する手続きの制定を求めること等を定めている。

米国における一般的な環境アセスメントの流れを図-1に示す²⁾。

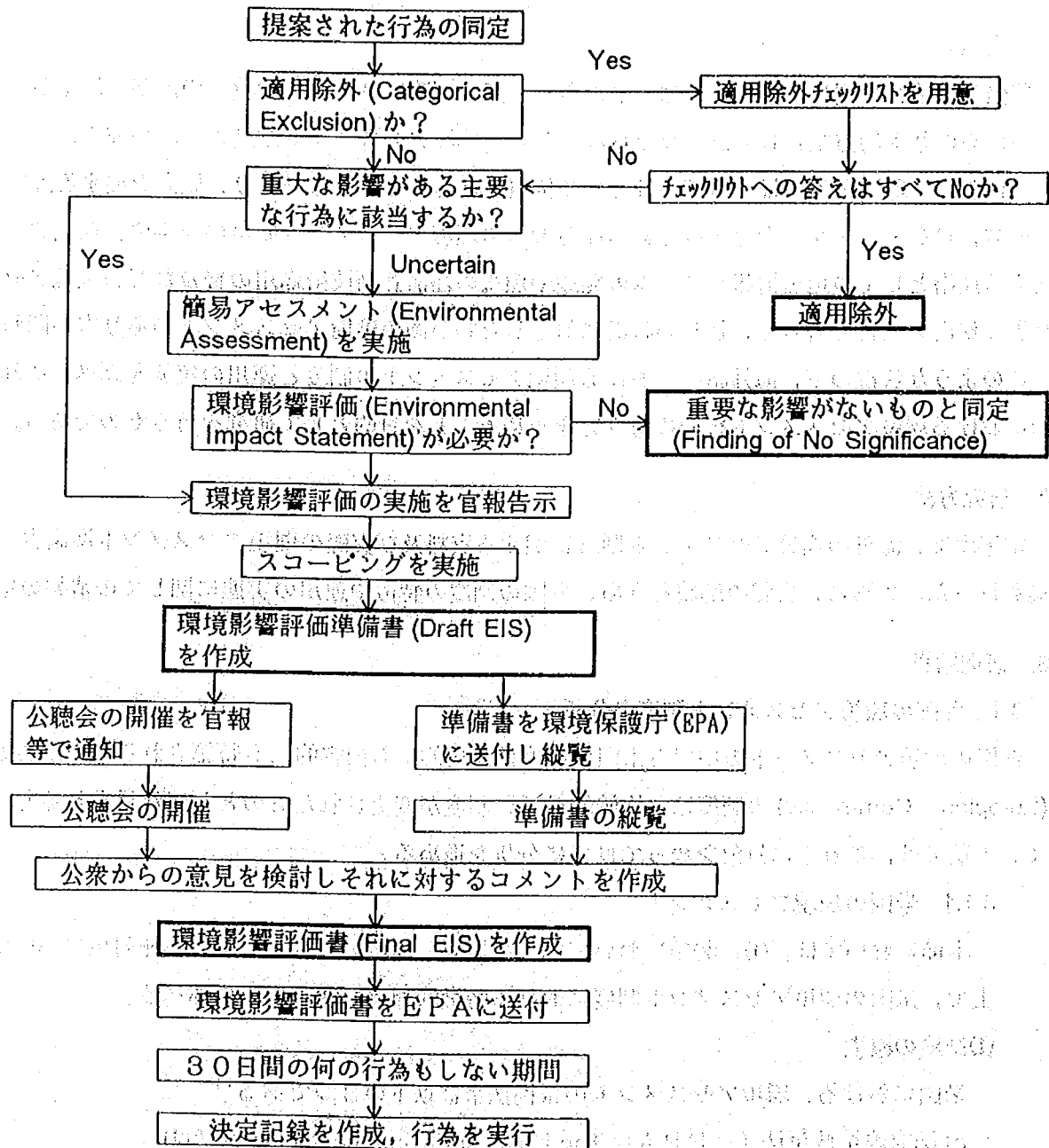


図-1 米国におけるNEPAに基づく環境アセスメント実施フロー

図-1に示されているように、NEPAに基づく環境アセスメントは、必ずしも環境影響評価書 (Environmental Impact Statements) の作成を伴うものではなく、環境への影響が軽微であると見なされる場合には、適用除外 (Categorical Exclusion) または、簡易アセスメント (Environmental Assessment) の実施のみで終了する場合もある。

②環境アセスメントの実施対象

環境アセスメントの実施が必要になる対象について、NEPA 102 条は「人間環境の質に相当な影響を与えるような法案その他主要な連邦政府の行為」と規定しており、さらに「主要な連邦政府の行為」に関する定義をNEPA施行規則 1508 条に示している。主要な連邦政府の行為の中には、連邦が行う主要な事業の他に、連邦の許認可を要する事業、法規の制定を含む連邦の政策決定等が含まれている。この点で、わが国における環境影響評価の対象よりも範囲が広がっている。また、環境アセスメントの実施対象に関して明確な規定はないものの、連邦の各機関でマニュアルを作っている。例えば、内務省の場合には、内務省 516 号マニュアル第6章の中で省内各機関の活動で通常環境影響評価書 (EIS) を作成すべき対象を列挙している。

③注目される諸点

この項では、NEPAにおける主要な注目点について記す。

(a) スコーピング (絞り込み)

スコーピングとは、環境アセスメントの中で検討すべき事項を絞り込む過程のことを指す。具体的には、アセスメントの実施前の段階で、当該プロジェクトの影響を受ける連邦機関、自治体、住民等から懸念事項や代替案に関しての聴取を行い、そこで拾い出された事項を環境アセスメントの中に重点的に取り入れていくといった方法を取る。スコーピングは、評価書ができた段階での不足事項の指摘や、住民等の関心事項との乖離といったことを極力無くするとともに、不要な検討項目に余分な労力をかけないために行うものと言える。(NEPA 施行規則 1501.7 条) なお、スコーピングの実施方法には定式はなく、会議、電話、手紙等を通じて行われる³⁾。

(b) 代替案の検討

スコーピングの過程等を通じて抽出された代替案（「行為を行わない」という代替案も必ず含まれる）について、便益の比較分析を行い、環境影響評価書に提案と代替案とを対比しうる形で提示すべきことが規定されている (NEPA 施行規則 1502.14 条)。同 1502.14 条には、下記 1) ～ 4) の規定が含まれており、恣意的な代替案の選択を防いでいる。

- 1) 全ての合理的な代替案について厳密に検討すること。厳密な検討を行わない代替案については検討対象から削除した理由を記すこと。
- 2) 主導政府機関の所管外であっても合理的な代替案を含めること。
- 3) 行為を行わないという代替案を含めること
- 4) 提案行為又は代替案に、元々は含まれていない適当な保全措置を含めて検討すること

この他、費用便益分析が実施されている場合には、環境影響評価書の参考資料として添付すべきことも規定されている。(1502.23 条)

(c) 政府内の役割分担とティアリング (階層化)

NEPA 施行規則 1501.5,6 条において、環境アセスメントは、主導政府機関 (Lead Agency) と協力政府機関 (Cooperating Agencies) に関する規定を定めている。主導政府機関と協力政府機関の決定手続き、役割分担を定めた背景には、環境アセスメントの対象地域内に複数の政府機関が関係するプロジェクトがある場合に、一つの機関が主務で評価書を作成し、他の機関がデータ提供等のサポートにまわるという米国の環境アセスメントの運用事情がある。わが国の場合であれば、他官庁や地方公共団体等の行う事業計画を予測の前提条件とすることはあっても、共同で環境アセスメントを実施することは基本的にないが、米国の場合にはそれがあるのである (NEPA 施行規則第 1502.4 条に、提案又は提案の一部が相互に密接な関係を有するような場合には事実上一連の行為が単一の環境影響評価書の中で評価されるものとするとの規定がある)。

しかし、主導政府機関がまとめて一つの環境アセスメントを実施できるとは限らず、本体工事と付帯工事に関するアセスメントとを分けて行ったり、広域計画とその部分としての詳細計画のそれぞれについて時期をおいて別の環境アセスメントを実施する場合などもある。このような場合における重複作業を不要とする規定が階層化 (ティアリング) である。NEPA 施行規則中のティアリングに関する規定 (1502.20 条) によれば、ある環境アセスメントにおいて解決済の事項は、爾後の環境アセスメントにおいては前の環境アセスメントの要旨を参考資料として載せれば十分とされている。

(d) 公衆の関与

環境影響評価書に対する公衆からの意見聴取手続として、NEPA 施行規則 1502.19 条に環境影響評価書縦覧に関する規定がある。また、1503 節に意見の表明についての規定がある。さらに、1506.6 条に公衆の関与に関する規定があるほか、1501.7 条にスコーピング参加者に関する規定がある。

評価書作成の一連の流れの中で最も最初に公衆が関与しうるのはスコーピングの段階である。この段階では、公衆の参加は利害関係者 (その行為に賛同しない者も含む) のみとされている。(1501.7 条)

公衆の広範な関与が行われるのは、環境影響評価書案 (Draft) が作成された段階である。1503.1 条は、政府機関は評価書案が作成された後に、公衆の意見を求め、特に関心を有するあるいは、影響を受ける個人又は団体の意見は積極的に求めることとしている。

以上のように米国においては広範な範囲の公衆に意見表明の機会が与えられるが、一方で、公衆の側も、ただ「反対」といった意見は許されないことにも留意する必要がある。1503.3 条により、提案行為についての意見は可能な限り具体的であることが要求されている。

(e) 学際的アプローチの採用の強調

NEPA 102 条では、NEPA の目的達成のために、各連邦機関はシステマチックで学際的なアプローチを採用すべきだとしている。このため、スコーピングの実施等の際には必ずいろいろな専門の人間が入るように運営がなされている²⁾。

(f) 評価書作成事務軽減策

評価書の文書量の軽減に関しては、それまでの評価書が膨大になりすぎてポイントが不明瞭になっている場合が多いことの反省から、他の手続き等との重複を無くし、問題の核心に触れることを中心としてコンパクトに評価書をまとめることを求めている (1500.2(b) 項, 1500.4 条, 1502.2(a) ~ (c) 項)。

3.1.2 EUの環境アセスメント

①制度の概要

EU (European Union) における環境アセスメントは、基本的には加盟各国の国内法に基づいて行われているものである。しかし、EUの前身であるEC (European Community) は、1985年に環境アセスメントの実施に関する理事会指令（以下、EC指令と呼ぶ）を出した。加盟諸国においては、このEC指令に沿った内容の国内法整備を行ってきており、加盟各国の制度は現在ではこの指令に準拠した形になっている。EC指令に対応した国内法整備のやり方は各国まちまちで、ドイツのようにほぼEC指令通りの内容の国内法を整備をしたところもあれば、英国のように基本的には都市農村計画法 (Town and Country Planning Act) 等の既存法の枠の中で対応（環境アセスメントに関する規則は新しく制定）した国もある。また、フランスのように特に何らかの新しい対応なしで指令に対応した国もある。以下には、EC指令の概要を記す。

EC指令は全13条からなる。その内容は、表-1のとおりである。

表-1 環境アセスメントの実施に関するEC委員会指令 (85/337/EEC) 各条の内容

第1条	適用対象に関する一般規定
第2条	指令の各国への適用に関する手続き規定
第3条	対象とする影響の範囲及び環境要素に関する規定
第4条	対象事業に関する規定
第5条	環境アセスメントの実施の担保及び環境アセスメントに含まれるべき内容に関する規定
第6条	政府の関係部局への意見表明の機会の付与及び公衆の関与に関する規定
第7条	国境を越えた影響が生じる場合に影響を及ぼされる国への情報提供義務に関する規定
第8条	開発許可手続きの中で前記5, 6, 7条に基づく情報を考慮することを求める規定
第9条	環境アセスメントに基づく決定の周知に関する規定
第10条	他法に基づく義務の優先、他国への情報供与の限度に関する規定
第11条	指令への対応に関する情報交換等に関する規定
第12条	指令への対応期限等に関する規定
第13条	上乗せ横だし規定の制定を妨げないことに関する規定

EC指令においては、米国のNEPA施行規則のような細かい規定は無いが、対象プロジェクトの範囲や影響の範囲の取り方に関しては比較的明確な記述を行っている。以下の項にはこれらの内容に関して簡略に述べる。

②対象プロジェクト

EC理事会指令では、アセスメントを実施する義務がある事業として、EC理事会指令書 Annex1 に基づく9つの事業を挙げている。また、加盟国の判断において必要と考えられる場合に環境アセスメントを実施するプロジェクトとして、EC理事会指令書 Annex2 に対象事業を記している。建設省所管事業の関連では、「高速道路」が Annex1 事業であり、その他の事業は、Annex2 中の「インフラストラクチャープロジェクト」に含まれている。

③評価内容

EC理事会指令第5条に、環境アセスメントの評価内容に関して規定があり、同条に付属するEC理事会指令書 Annex 3 に、対象項目等に関する記載がある。この中では、下記の点が注目される。

- a) 人口、気候といった、わが国の環境影響評価における評価対象にはなっていない項目が含まれていること
- b) 影響を評価する期間に関して、直接的影響・間接的影響、短期的影響～永続的影響等に区分して検討するよう規定していること
- c) 代替案の検討は、任意実施事項とされており、米国の場合よりは緩い規定となっていること
- d) 大枠的な規定であるためか、わが国の環境アセスメント技術指針にあるような評価項目や調査・評価方法に関する詳しい指定がないこと
- e) マイナス面ばかりではなくプラス面の影響も記述するよう求めていること（米国も同様である。わが国の場合には特に規定はない）
- f) 評価実施に当たって難題（解決できなかった場合も含む）となった事項の明示を求める規定があること

4. まとめと今後の課題

欧米の制度の中で注目される点は、1) 対象事業の範囲の規定、2) 事業サイクルの中での環境アセスメント実施時期、3) 調査・評価項目の決定プロセス、4) 公衆の関与のあり方を中心といった点である。特に、建設省の環境政策大綱でも触れられている計画段階での環境対応に関して、米国ではかなり進んでいるものと言えるが、米国では用地の強制収容が比較的容易にできる等の差異があり、また、ティアリングや官庁間の協力体制等のサポートシステムが存在しているという事情もある。さらに、わが国の場合には、環境アセスメントの段階ではとするとすべての影響が完全に把握されていることが住民等から求められたりするが、欧米のように不明な事項の存在も許容したものと理解されない限り、計画の早期段階での環境アセスメントの実施は困難であろう。この点に関して、米国の事業段階に応じた追加的環境アセスメントの実施を許容するティアリング制度も参考になる。わが国における環境アセスメントの今後を考える際にはこれらの諸点を含めた議論が必要である。今後は、この点についての研究も進めていきたい。また、環境アセスメントにおける評価対象を、日本のように事業毎にあらかじめ特定するのではなく、スコーピング過程を通じて柔軟に決定することは、住民等関係者の懸念に積極的に答えるとともに、不要な調査の実施を省く意味でも注目される。今後は、わが国において、このような視点の導入の可能性についても検討したいと考えている。

最後に、米国等の環境アセスメントにおいて注目される技術的内容としては、費用便益分析の環境アセスメントへの利用、環境アセスメントの評価電算ソフトの開発、地理情報システムの利用等が注目される。これらの内、費用便益分析の利用以外のものは、諸外国においても技術的に最先端の部分に位置するものであり、まだ広く適用されているものではない。しかし、今後の環境アセスメント技術の発展方向を示唆するものであり、今後その実態について一層調査を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Bregman, J.I. and Mackenthun, K.M. (1992) Environmental Impact Statements, Lewis Publishers
- 2) Bureau of Reclamation (1990) National Environmental Policy Act Handbook, Bureau of Reclamation
- 3) Council on Environmental Quality (Apr. 30, 1981) Memorandum for General Counsels, NEPA Liaisons and Participants in Scoping Subjects: Scoping Guidance, pp. 2
- 4) 一方井誠治 (1985) 米国における環境アセスメントー第1回日米環境アセスメントプロジェクト会合の報告を中心にー, 季刊環境研究, No. 53, pp. 91 ~ 100

環境の保全及び調和に関する研究

建設事業に関する環境データベースに関する研究

建設事業に関する環境データベースに関する研究

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

研究員 長野 幸司

1. まえがき

建設省所管事業の実施にあたっては、環境に関する様々な情報が必要である。これらの情報は土木研究所及び各地方建設局や工事事務所が個別に収集しているが、汎用性が乏しく利用度が低い。例えば近年河川局で実施している「河川水辺の国勢調査」にみられるように、収集するデータは量・質とも肥大化、複雑化しており、今後これらのデータベース化を図り、円滑なデータ処理システムを開発する必要がある。また社会資本整備において考慮すべき項目は、さらに多様化しており、これらの情報を効率よく収集し、事業に適切に活かしていくためにもデータベースの利用が期待されている。本研究は、このような状況を鑑み、現状のデータベースシステム及び環境データに関する知見を収集・検討し、建設事業の推進に資する環境データベースの開発に資するものである。

2. 研究目的

建設事業とは国土開発事業であり、国土のデザインである。従って建設事業を実施するにあたって考慮すべき情報は、その属性として位置情報を持つものが多い。既存の環境影響調査書・評価書の内容が主題図をとりまとめたアトラスとなっていることから明らかにしている。すなわち、各データを位置という属性で整理することが効率が良い。また逆に、位置という属性で統合管理することにより、各情報間の関連、問題の所在が明確になり、各種の検討も可能となる。

従って、「空間データを一連の目的のために実世界から収集し、保存し、自由に検索し、変換し、表示するための手段」である”GIS (Geographical Information System ; 地理情報システム)”を、建設環境データベースの基本として考える。本研究の5年度の目的は、GISの内容、現況を把握するとともに、その有効性と課題を明らかにすることである。

3. 研究方法

3. 1 GIS関連の技術開発・利用動向

GISを利用している「データベースシステム(以下「DBS」と略記する。)」の現況について調査した。

3. 2 GIS利用における課題

3. 1の調査結果を踏まえ、GISの普及にあたり課題となっている点を抽出し、その解決策につい

て検討した。

4. 研究結果

4. 1 GIS関連の技術開発・利用動向

本論の前に、GISとは何かについて略述する。

GISとは英語の Giographical Information System の縮訳形であり、日本では「地理情報システム」と言われる。“地理情報システム”は一般名詞であるが、単なる地図のグラフィック表示や地図作成等という非常に狭い概念を印象づけるきらいがあり、本稿では以下GISと表記する。現在のGISの定義は、「空間データを一連の目的のために実世界から収集し、保存し、自由に検索し、変換し、表示するための手段」(Burrough, P. A, 1984)が一般的である。

GISの主要な機能は、地図情報上に多様な属性情報を付加することによる相互の検索機能及び各種数量解析機能である。他にデータの入出力・変換機能、及びユーザインタフェイスがGISを構成する重要な機能である。

またGISのDBSとしての特色は地図情報であるが、この地図情報のデータ形式がラスタ形式とベクタ形式の大きく2つに分類される。表-1にその比較を示す。

形 式	ラスタ	ベクタ
内 容	地図図形を細かく格子に分解してデータを数値化する(メッシュデータを含む)	地図図形を点・線・面等に分類し、それぞれを座標点列として数値化する
属性情報	格子の目に与えられる	地図図形に与えられる
解析機能	△	○
データ入力費用	安価	高価
データ量	比較的少ない	かなり多い

表-1 ラスタ形式とベクタ形式の比較

4. 1. 1 GISの利用現況

GISの利用状況に関して資料収集を行った。網羅的な調査ではないため数字にあまり意味はないが、広い意味でユーザーとしてGISを利用している組織として、国機関7、地方公共団体(第三セクター含む。)13、大学26での導入、利用が確認された。また民間においては測量大手各社が導入、利用、普及を行っており、また、電気、ガス、通信にかかる大企業において、主として施設管理のために利用が進んでいる。

その結果、GISの利用について以下のことが明らかとなった。

- ①わが国のGISの利用は公的機関が先行している。特に地方自治体の計画業務における導入・利用が活発である。この理由として考えられるのは、これらが元来限られた区域における多数の地図を利用していたためであると考えられる。なお全国規模のGISは、例えば気象庁のアメダスのように単一の目的で自己完結的に利用されているものがほとんどであるが、特に民間の利用を前提として整備されたものとしてデジタル道路地図がある。用途が道路利用に限られてはいるものの、全国という対象地域の広さや1年という更新周期を考えると画期的と言える。
- ②民間における利用は現在のところ、ガス、電力、通信、及び地図会社の大手企業に限られていると言える。地図を除けば、施設管理(Facility Management)の効率化(作業を含む)を目的としている。この分野でのニーズはかなり高いものの、中小企業においては費用の問題で導入を見合わせているというのが現状である。
- ③大学関係の利用はリモートセンシング関係のものが多く、また外国に比べてGISそのものを研究対象としていることはほとんど無く、各種データを扱う手段としての利用がほとんどである。

4. 1. 2 GISの歴史

GISの現状は明らかとなったが、ここから課題を抽出するためには現状に至る経緯を把握しておく必要がある。このため、GISの世界的、日本的な流れを調査した。以下に結果を概観するが、特に注意が必要な点は、ハードウェアを始めとするコンピュータの発達が非常に影響している点である。

GISの開発は、'50年代のアメリカの軍事技術開発に始まるといわれている。地形や統計データを踏まえて効果的な戦略を検討することを目的としていた。民事における最初のシステムは'62カナダ土地調査局で開発が始められた農村地帯の開発計画を作成するためのシステムであり、これが本格的なGISの最初のシステムといわれている。同時期にイギリス及びアメリカにおいても研究開発が開始され、特に'60年代後半に開発された「GRID」という、メッシュに統計値を印刷して簡単な地図を作るシステムが広く一般に提供され、GISの応用の基礎が築かれた。当時のデータはコンピュータのデータ容量や演算速度の関係からラスタ形式である。

日本では、'70年代から国土数値情報の整備が始まったが、これはマクロ分析へのアプローチとして考えられていた。とはいえ、世界的に見てもかなり早い時期から地図情報の数値化へ取り組んだといえる。

その後、'80年代から他のリモートセンシング、測量、地図作成の分野からGISの分野への進出が始まった。特にコンピュータの飛躍的な進歩に伴い、ベクター形式のGISが多数発表された。これらは自己完結的であり、システムごとに独自のハードウェアとデータフォーマットを形成していた。これと相まってアメリカ政府は、国勢調査結果や地図データの数値情報化を推進し、民間に対しても安価に配布を始めた。

日本においても同様の流れの中、特に'84のスーパーミニコンの出現により、自治体や民間レベルでのGISへの取り組みの道が開かれた。ハードウェアが小さくなり、場合によっては可搬にできるこ

とが用途を広げ、また、アメリカの基本GISの導入やハードウェア価格の低下による初期投資の低減がGIS導入を後押しした。

'90年を迎えようとする頃からコンピュータのオープン化、コンピュータ通信が急激に進んだ。この影響により、GISのソフトウェアも独自フォーマットのDBSから様々な汎用リレーショナルDBSを通じて他のシステムとデータを共用できるようになり、専用ハードウェアからの解放が進み始めた。さらに演算速度や記憶容量の向上により、ミニコンからWS、EWSへと変化している。

こうした影響から日本では、この時期に行政への利用のための大きなプロジェクトが多く生まれた。その後の経済不況等及びPCの高性能化により、さらなるダウンサイジングが進み、市町村でのGIS検討が動き出している。この場合、データ量の問題は解決されておらず、ネットワーク通信を前提としていることが注目される。

4. 2 GIS利用における課題

以上から明らかとなるGIS利用の問題点は、1)導入にあたっての費用が高い、2)データの更新が容易でない、の2点に集約することができよう。1)については、GISソフトウェア及びディスプレイ、プリンタ、プロッタ等の周辺機器を含むハードウェアの価格の問題と、情報入手の困難さ、に分類される。が、前者はコンピュータ技術の問題であり、昨今急速に改善されている。後者に関してはさらに基図入手の問題と、属性情報入手の問題に分類できる。それぞれについて現況及び今後の展望を検討した。

4. 2. 1 基図の整備について

基図となる位置情報に関しては現在以下の3つの手法が主に利用されている。

1) スキャニング

既存の紙地図をスキャナで読み込みそのまま利用するもので、入力そのものがコピーを取るイメージで簡単に行うことができ、費用も非常に安価である。しかしこの手法によるラスタ形式のデータでは一般に属性情報を付加できず、背景くらいしか使い道がない。なお、スキャナ入力後自動処理でベクタ形式に変換する手法もある。この場合、次のマップディジタル化より高速で、曲線の再現性も高いが、線種(線のもつ属性)の識別が困難である。

2) マップディジタル化

既存の紙地図を元にディジタルイザを用いてデータ入力を行うもので、入力時に属性を付加するためそのデータの応用範囲は広い。しかし、紙地図作成段階の誤差にディジタル化の誤差が加えられることになり、位置精度はかなり落ちる。近年、上記のスキャニングを行った上で、線に対して半自動で属性を付加できるソフトウェアが現れている。

3) デジタルマッピング

「空中写真測量等により、地形・地物に関わる地図情報をディジタル形式で測定し、電子計算機技術により、体系的に整備された基礎的な数値地図情報の構築を図る」(ディジタルマッピング作業要領・同補則(案))ものである(なお、海外においては Digital Mapping とは上記2つを含む地

図の数値情報化全般をいう)。ある意味で紙地図作成の途中段階ともいえ(実際この分野の技術開発は紙地図作成の効率化が大きな目的であった。)、また、標準フォーマットが確立されているため、誤差が紙地図より少なく、データ交換が容易であることを最大の特徴とする。ただし現在のところ費用が極めて高いのが難点である。

これらを踏まえて今後の展望を考えると、やはりデジタルマッピングに期待するところが大きい。問題はコストの縮減であるが、やはりこの分野の技術開発に期待するところが大きい。が、費用増加の要因は航空写真から数値情報化する部分である。従って、例えば宅地造成等の一筆測量の場合、現在でもトータルステーションで数値情報として取得した情報を図化しており、数値情報化の費用はほとんどかからない。また航空写真からの数値化においても、航空写真で得られる情報を最大限数値情報化していることが費用の増大を招いており、今後、航空写真そのものを保管し、必要なときに必要な項目を数値情報化するような対応が有効と考えられる。特に、不要な項目の数値情報化は更新費用・労力に与える影響も大きいので、この削減は重要である。

さらに大きな視野に立ってみると、実施主体や目的ごと別個に、同一地域において基図情報を取得していることに問題がある。必要な属性情報がなんであろうが、GISの定義から明らかであるように位置情報は同一でよいはずである。基図の共有化に際しての最大の問題は、GISの利用目的により必要な位置情報の精度が異なることである。高精度の位置情報を取得するためには情報作成に必要な費用が高くなる。例えば岡山市のGIS-IIは、固定資産・道路管理・上下水道管理等の複数分野にかかる統合的GISであるが、必要な基図精度の調整にかなりの時間と労力を要している。

4. 2. 2 属性情報の入手について

属性情報の入手に関しては、現在のところその属性情報の主題図をディジタル化しているのがほとんどである。この方法では、前述のディジタル化の誤差の問題、情報入手にかかる時間・費用効率等の問題が大きい。

その後、各機関においてGISでの情報管理が行われ始めたが、この場合でも、基本GISソフトでデータの互換ができないことが大きなネックであった。近年になってリレーショナルDBSにより、データベースへアクセスする統一言語(SQL)が登場し問題の解決が図られている。また、最近特にCAD技術の施設管理やGIS分野への利用が加速し、CAD分野における標準的データフォーマット(DXF等)や、CADとの連携が盛んなデータベース分野における標準的データフォーマット(ORACLE、PARADOX等)によってこの問題は解消されつつある。

これらによって日本においても、MT等の媒体を介して数値情報を直接入手する方法が増加している。しかし、将来的には情報ネットワークによる情報のやりとりが必要である。アメリカ等では既にネットワークを用いたGISの構築が始まっている。

ネットワーク化による明確な利点は、データ更新の即時性である。これまでのデータ入手方法では、データ供給者におけるデータ更新がデータ利用者に伝達されず、データ更新の非効率を生じさせてい

た。

逆に問題となるのは情報の価格と情報公開の範囲であるが、前者は近年のオンラインデータベースの状況を鑑みても、基本的には問題がないと考えられる。後者に関しては、情報公開に関する全般的議論を踏まえる必要はあるが、GISにおける情報公開に関して以下の4つの原則が必要であろうと考えられる。

①国または公共団体がその活動により収集したGIS情報は、基本的に公開すべきである。

基本的な行政界、土地利用、各種法規制、自然地理等は、GISの普及にあたり積極的な公開が強く望まれる。またその他国勢調査結果や、雨量・気温、水質、騒音等の各種観測結果等は、近年の情報公開に関する議論においても国民の共有財産と認識されており、下記の③を踏まえた上で、原則として公開すべきであろう。

②私人、法人の所有するGIS情報は公開させるべき理由がない。

個人がその権利として持つ情報をその個人の意志に依らず公開することは私権の侵害である。

③個人情報に関係するGIS情報は、公開の是非について個別に慎重な議論を行う必要がある。

公開の制限を議論するのは、公開によって個人の名誉が不当に傷つけられる場合、著作権を侵害する場合、公益や私権を侵害する恐れのある場合、公開により経済活動における自由競争の原則が破られる場合、である。

④以上の他、基本的に通信、データ交換、データベース構築の秘匿性は保全されなければならない。

上記②③を保証する意味においても、また各データベースの保全に関しても、非常に重要である。

4. 今後の問題点

5年度の研究の結果、GIS普及の問題点は、1)基図整備、2)情報ネットワークのハードウェア及びソフトウェア整備にあることが明らかとなった。今後は、GISの基図整備に関して、基図とすべき各目的物用途に必要な共通の情報項目の検討、基図の精度と費用の関係、基図及び属性情報の精度と活用範囲の関係、これらを総合した基図精度をパラメータとする費用便益分析、を行うことが必要である。

環境計画研究室	室 長	丹羽 薫
	研 究 員	小栗ひとみ
	研 究 員	安田 吾郎
化学研究室	室 長	片脇 清
	主任研究員	守屋 進
システム課	課 長	山本 聡
	課長補佐	浦野 隆

1. まえがき

近年、国民の環境問題への関心の高まりとともに、周辺環境と調和した質の高い社会資本整備がこれまで以上に強く求められている。そこで、公共土木施設・建築物の建設にあたり、構想・調査・計画・設計および施工の各段階に応じて、周辺環境との調和を視覚的に容易に予測・評価できる景観検討支援システムの開発が期待されている。

本研究では、このような背景を踏まえ、公共土木施設・建築物および周辺環境からなる都市や地域の景観をリアルに、かつ時間的な変化をとらえることができ、実用性・操作性が高く、公共土木施設の構造決定や街づくりの方向性などの検討に効果的な景観シミュレータ、および構造物の種類や景観材料に関する景観データベースの開発を行うものである。研究を進めるにあたっては、土木分野、建築分野共通に利用可能なシステムの構築の観点から、建築研究所と共同で一体的に開発を行うものとし、主に景観シミュレータを建築研究所が、景観データベースを土木研究所が担当する体制とした。

2. 研究目的

公共土木施設や建築物の景観設計において、地建事務所等の職員が簡便に使用できる、操作性・実用性に優れた景観シミュレータおよび景観データベースの開発を目的とする。

3. 研究方法

景観検討業務の現状・課題・ニーズの把握およびモデルスタディ対象事業の抽出を目的として、全工事事務所および局営繕部を対象としたアンケート調査を行い、118事務所および5営繕部の計123箇所、155名から回答を得た(回答率60.6%)。また、7工事事務所、1技術事務所、および住宅都市整備公団を対象としてヒアリング調査を行い、アンケート内容の補足、ならびに画像作成に必要なデータの収集を行った。

次に、関連システムやハード・ソフトの技術動向を踏まえた上で、景観データベースの基本設計を行って、データベースの枠組みをまとめるとともに、データベースで蓄積するデータの収集を行った。さらに、最小限の機能を実現したプロトタイプを作成し、開発目標の具体化を図った。

4. 研究結果

4.1 実態調査

4.1.1 景観検討業務の現状・課題

これまでに、101箇所(82.1%)の事務所等が景観検討業務の実施経験を有しており、道路・河川・ダム・砂防・公園・営繕・地域計画・海岸の全事業で、また計画・調査・設計・施工・維持管理の全段階で何らかの景観検討が行われている。それらの大部分は、図面・パースを用いて比較検討を行っているが、CGを利用したものも実施事例231件のうち66件(28.6%)あった。また、今後の合意形成や事業PRにおいて、より具体的なイメージの提示が不可欠であり、その際任意の視点から検討可能なCGは必要なシステムであるとする意見が多かった。

4.1.2 景観シミュレータに必要な機能

景観シミュレータで想定される機能の必要性に関する評価結果から、必要機能および開発優先度を整理した(図-1)。第一優先の機能は、ごく基本的な機能といえるが、このうち色調のシミュレーション機能では、色決めにも使える再現性を有していることが求められている。この他に、季節・天候・経年など時間変化表現機能、および走行シミュレーションなどの動画機能についてのニーズが高かった。

また、景観シミュレータへの構造物データの入力方法として、想定した設計図面からの手入力、標準的な構造物データの利用、CADデータの入力、および自動設計データの利用の他、スキャナー入力、オートデジタイズ機能を必要とする意見が特に多かった。

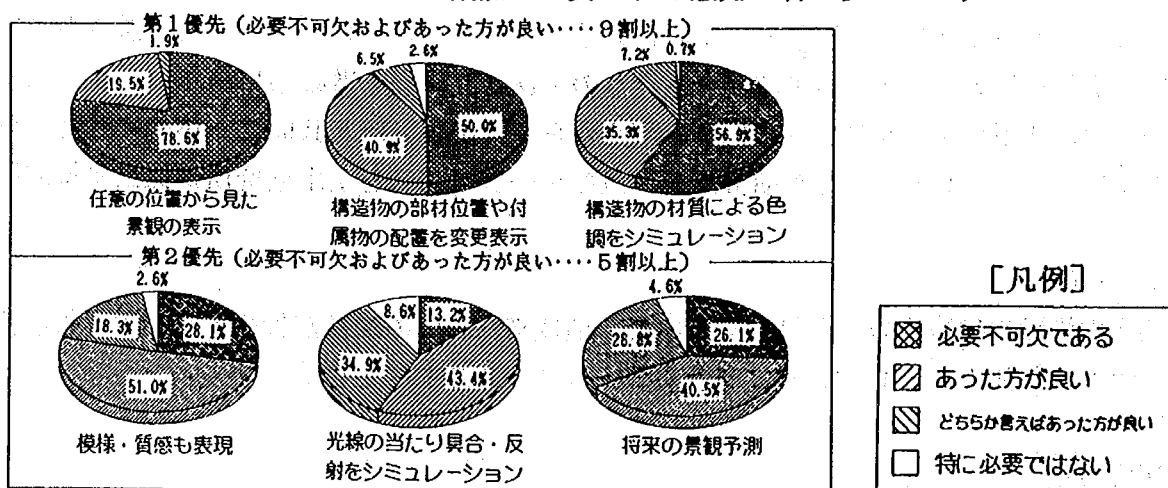
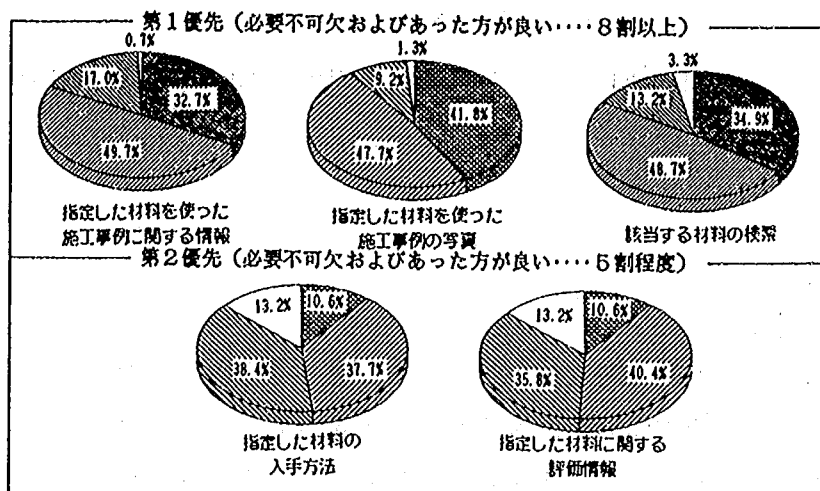


図-1 景観シミュレータの機能

4.1.3 景観データベースに必要な機能

景観データベースで想定される機能の必要性に関する評価結果から、必要機能および開発優先度を整理した(図-2)。その他、検索方法(「周辺の様子と景観対象物との関係から施工事例を検索する」等)や、属性情報の種類(「デザイン会社・担当者名」「デザイン等で留意した点」「施工事例・材料等の長所・短所」「単価・供給状況」等)について意見があった。

また、景観データベースで蓄積するデータの種類について、想定されるデータの他に必要とされるデータ項目を整理したものが表-1である。景観材料25種、景観構成要素(自然物)31種、景観構成要素(人工物)60種のデータが記述されている。



〔凡例〕

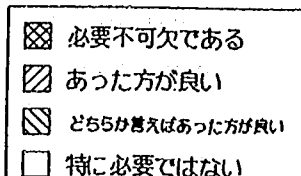


図-2 景観データベースの機能

表-1 蓄積するデータの種類

景観材料	景観構成要素（自然物）	データ種別
コンクリート、舗装、塗料、鋼材、ガラス、ゴム、アクリル、セラミック材、木材、仕上材	樹木、草、石・砂利、土、水面、空・雲	想定されるデータ項目
石材（掘石を含む）、タイル、レンガ、植物、ブロック、ガラス、化粧型枠、ファイン材、発泡スチロール、スチール材、土・砂、水、砂利、レンガ、法枠材、鋼材、鋼管、鋼板、FRP、カーボン・ガラス、鋼材、区画線、瓦、屋根材、窓用材、その他	生物（人、動物、魚、鳥、昆虫）、山・山並み、植物、太陽・光、雲、河川、四季、水・流水、雨、乗り物（自転車・自動車等）、海、波、岩・岩肌、虹、霧・霞、歴史的風土（田園風景等）、山林、影、夜景、月、星、渓谷、渓流・沢、滝、水路、風、火、時間、香り、その他	その他に必要なデータ項目
景観構成要素（人工物）		
周辺建物、高層、照明灯、ガードレール、遮音壁、標識、信号、フェンス、ベンチ、バスストップ、電話ボックス、電柱、ゴミ箱		
乗り物、人間、橋梁、歩道、道路、街路、看板、屋敷、彫刻・壁画・モニュメント、舗装、公園、植栽樹・花壇、横断歩道（橋）、区画線、水路、鉄塔、バス、トイレ、タイル、旗、法面、緑石、視線誘導標、煙突、車止め、滝、水飲み、照明（光）、堤防、水門、樋門・樋管等、路面表示、分譲標、可変情報板、遮光板、料金所施設、地下道入口、電線、案内板、旗竿、柱、消火栓、分電盤、門、遊具、階段、雪崩防止柵、架線物、柵、周辺盛土、ガラス、対向車のヘッドライト、根固め、水制、枕木、排水装置、植生（植栽）、鉄道、線路、住宅地・市街地、高さ・経路空間、その他		

4.1.4 コンピュータの保有状況

コンピュータの保有状況は、図-3のとおりである。また、事務所等では、種々の既存システム専用マシンを有しているため、今後開発するシステムはPC-98などの汎用的なマシンで動作できるようにして欲しいという要求が強い。

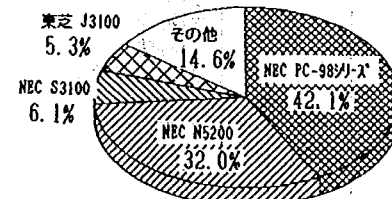


図-3 事務所・営繕部におけるコンピュータの保有状況

4.1.5 その他

アンケートに記述された意見を集約すると、一般の職員が簡単に使えるかなり操作性の高いシステムであることは必須条件である。また、市販のソフトウェアとのデータ互換性に配慮するとともに、システムの導入・運用体制についての検討も必要である。さらに、設計や評価に関するエキスパートシステムの組み込みも必要である。

4.2 開発の基本方針

システムの開発にあたって、「マルチプラットフォームのフリーウェアとしての開発」および「ソースリスト公開を通じてのデータ構造の公開」を原則として、以下の基本方針を設定した。

- ①一般職員が手軽に使える高い操作性を有していること。
- ②必要な機能を柔軟に付加することが可能な高い拡張性を有していること。
- ③機種に依存せず、関連機器の進化にも対応できる高い移植性を有していること。

④色決めにも使える高い再現性と客観性を有していること。

⑥材料の経年劣化や、季節時間天候変化、緑被の成長、周辺市街地の成熟など、時間的な変化を取り入れること。

⑥データ入力の効率化のため、必要なデータベースが用意されていること。

4.3 景観データベースの基本設計

4.3.1 景観データベースの構成

景観データベースは、構造物や景観材料などのデータを蓄積することにより、景観シミュレーションにおける現実感の高い画像の生成を支援するものであり、「優良景観事例データベース」「景観構成要素データベース」および「景観材料データベース」から構成される。それぞれの内容、データの種類および構成は表-2のとおりである。

表-2 景観データベースの構成

	優良景観事例データベース	景観構成要素データベース	景観材料データベース
内 容	景観的に優れた土木施設・建築物の画像情報および景観対策内容や評価などの文字情報を蓄積するとともに、そのうち一部の構造物データをCADデータとして保有する。 構造物の種類、地域特性、整備の目的などの分類やキーワードによって参照したい事例を検索したり、CADデータをスキャナーから取り込んだ現場の写真画像と合成することで構造物タイプの比較検討を行うことが可能である。	景観画像を構成する要素として、遠景の山並み、空、水面などの自然物や、周辺の建物、照明灯などの人工物のデータについて、形状、色などの表示情報や材質、規格などの文字情報を蓄積する。 各々の分類やキーワードにより必要な要素を検索することができるとともに、検索した要素を景観画像へ配置したり、指定範囲へマッピングすることができる。	コンクリートや塗料など主要な土木・建築材料の光学データ、テクスチャデータ（質感）、経年変化データおよび材質・規格などの文字データを蓄積する。 分類やキーワードなどにより欲しい材料の検索ができるとともに、検索した材料を用いて景観シミュレーションにおける材質の変更や経年変化の予測が可能である。
データの種類	1) 河川 2) ダム 3) 海岸 4) 砂防 5) 急傾斜地 6) 道路 7) 橋梁 8) 都市 9) 建築物 10) 下水道 11) その他	1) 河川(河道、堤防、護岸、堰、水門等) 2) ダム(ダム本体、貯水池周辺等) 3) 海岸(海岸堤防・護岸、消波ブロック等) 4) 砂防(砂防ダム、流路工) 5) 急傾斜地(法面工、植栽、落下防止柵) 6) 道路(道路本体構造、道路構造物等) 7) 橋梁(本体形状、橋脚、橋上等) 8) 都市(街並み) 9) 建築物 10) 下水道(処理場) 11) その他(背景要素-自然・人工、人間生物、自動車等)	1) コンクリート 2) 舗装 3) 塗料 4) 鋼材 5) プラスチック 6) ガラス 7) アルミ 8) セラミック材 9) 木材 10) 仕上り塗材 11) 石材 12) ガラス 13) その他
データの構成	1) 画像データ ・写真(構造物の全体・詳細、時間・天候・視点位置の異なるもの、施工前後の風景など) 一事例につき数十点 2) 図形データ ・図面(基本図面、位置図) ・CADデータ(一部) 3) 文字データ ①事業種別、②構造物種別、③名称、④所在地、⑤事業主体、⑥建設年度、⑦費用、⑧設計会社、⑨施工会社、⑩構造形式・主要諸元、⑪整備の背景・目的・方針、⑫設計・制約条件、配慮事項、⑬地域特性、⑭主な整備内容、⑮デザイン上の留意点、特長、見所、⑯評価情報、⑰経年情報、⑱写真情報	1) 3次元形状またはテクスチャデータ データの種類によって、基本パターン(単体、まとまり)を表す3次元形状、3次元形状+テクスチャ、またはテクスチャのいずれか。 2) 文字データ ①分類名、②名称、③形式・規格、④材質・色、⑤価格、⑥入手方法、⑦特長、⑧施工例 3) 画像データ 施工例(施工直後、経年変化) 4) 季節、天候、経年による変化のデータ シミュレーションに必要なデータ	1) 光学特性データ 感覚色度(L*a*b*)、光沢(60度鏡面反射率)等の数値データ 2) 3次元形状またはテクスチャデータ データの種類によって、基本パターン(単体、まとまり)を表す3次元形状、3次元形状+テクスチャ、またはテクスチャのいずれか。 3) 文字データ ①分類名、②用途、③材料名、④規格、⑤材質・色、⑥価格、⑦入手方法、⑧特長、⑨施工例 4) 画像データ 施工例(施工直後、経年変化) 5) 季節、天候、経年による変化のデータ シミュレーションに必要なデータ

4.3.2 景観データベースの管理形態

景観データベースのような多様性の高いデータを扱う形態としては、CAD型データベース、リレーショナル・データベース、オブジェクト指向データベースがある。本データベースでは、データの階層の取り扱いやバージョン管理、図形・画像などの可変長データの取り扱いに対して柔軟な対応が可能なオブジェクト指向データベースを構築する。

4.3.3 景観データベースの提供形態

データの提供媒体としては、データ容量を考慮するとCD-ROM、光磁気ディスク、DATなどに絞られるが、コストやアクセススピードの点でCD-ROMが最も適していると考えられる。したがって、本データベースの提供形態としては、分野別または材料別のCD-ROMを媒体とし、年2回程度の更新および紙面またはオンラインによる最新情報の提供を行うものとする。また、システムにデータの引用頻度の集計機能を組み込むことで、より充実したデータベースとすることが可能である。

表-3 予想データサイズ(当初)

データ種別	1データ当たりの容量		必要な件数 (当初)	合計(圧縮時)
	通常	圧縮時		
優良景観事例	2~5MB	0.5~1MB	200	750MB(150MB)
景観構成要素	0.05~1MB	0.01~0.2MB	500	250MB(50MB)
景観材料	0.1~1MB	0.02~0.2MB	200	100MB(200MB)
合 計				1,050MB(220MB)

表-4 媒体の比較

媒 体	価 格		特 徴		
	装 置	媒体1枚当たり	アクセス	容 量	その他
CD-ROM	10~30万円	数百円(ただし、 最小プレス単位 は数百枚)	速 い	約650MB (5.25インチ) 128MB (3.5インチ)	リード/ライト (書き込み不可) ランダムアクセス
光磁気ディスク	20~50万円	数千円	速 い	約620MB ~1,000MB (5.25インチ)	リード/ライト可能 ランダムアクセス
DAT	20~40万円	数百円	遅 い	約2,000MB	リード/ライト可能 シーケンシャルアクセス

4.4 景観データの収集

4.4.1 優良景観事例データ

河川、ダム、海岸、砂防、急傾斜地、道路、橋梁の各公共土木施設について、既往の文献、研究事例をもとに景観に配慮した設計事例を収集・整理した(343件)。次に、優良景観事例の抽出基準を設定し、整理した設計事例の中から優良景観事例データベースとして取り扱う事例を選定し(128件)、データベースに蓄積すべきデータを収集・整理した。

4.4.2 景観構成要素データ

河川景観を構成する要素の中から、使用頻度の高いと思われる護岸、石・砂利、水面、水辺の草・木、橋(点景としての橋)の5項目について、景観検討業務で必要とされる再現性の確保の観点からデータタイプ(3次元、テクスチャ、関数化)、生成および配置方法を検討した(19件)。

4.4.3 景観材料データ

コンクリート、舗装、塗料、鋼材、プラスチック・ゴム、セラミックス、アルミニウム、木材、仕上げ塗材について、材料メーカー等から収集した試料の光学特性(光沢および感覚色度)を測定し、実測結果、テクスチャ、および材料ごとの色調・外観を整理した(302件)。

4.5 プロトタイプの作成

5年度に作成したプロトタイプでは、以下の機能を実現した。

①優良景観事例の検索・表示

②CAD入力した構造物とスキャナー入力した背景写真の合成表示

・座標入力による背景写真の撮影条件（位置・アングル）の復元

・構造物の色彩の変更（登録色、RGB）

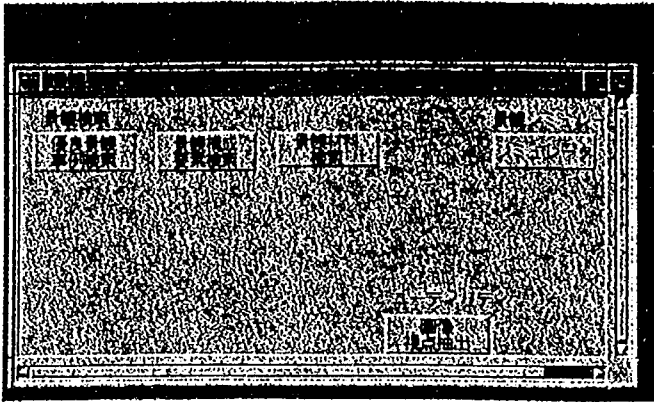


図-4 システム起動画面

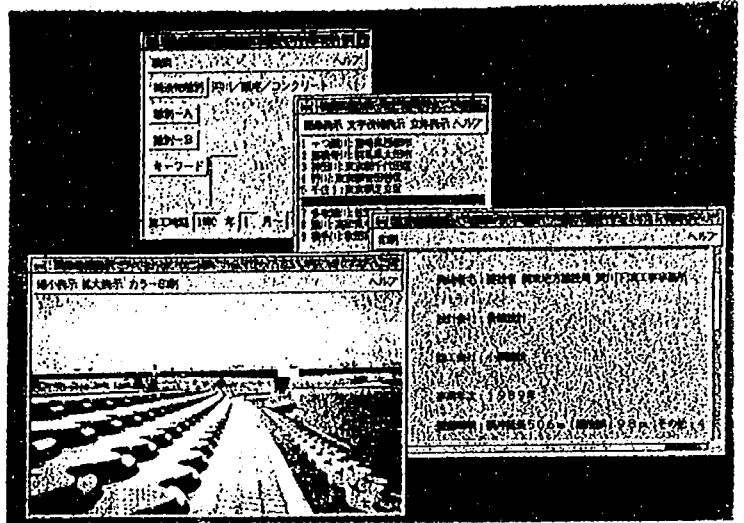


図-5 優良景観事例の検索・表示例

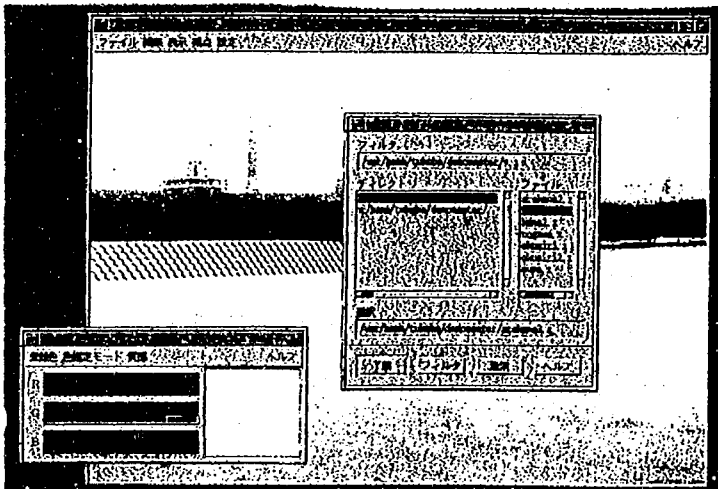


図-6 景観シミュレータ画面表示例(色彩の変更)



図-7 構造物と背景写真の合成表示例

5. 今後の課題

5年度は、研究開発の初年度として、実態調査および基本設計を行い、最小限の機能を実現したプロトタイプを作成した。今後、目標とする実用的な景観シミュレータ・景観データベースを開発するためには、時間変化表現機能および視点移動機能（動画）の開発、景観データベースの構築と蓄積するデータの継続収集を行うとともに、事務所等での試用・評価を通じて順次見直し・改良を加え、操作性の向上および必要な機能・データの充実を図る必要がある。

貯水池の環境機能向上に関する調査
湖沼の環境創造技術に関する調査

建設省土木研究所環境計画研究室 室 長 丹羽 薫
研究員 安田 吾郎
研究員 小栗ひとみ

1. 研究目的

ダムや湖沼開発の計画に当たっては、環境機能の評価を含めた事業の社会的純便益を最大限に高めるために、ダムやダム湖の持つ環境機能の良さを最大限に発揮する施設や、生態系への補償機能を持つ施設等を適切に計画に組み入れていく必要がある。このような主旨に適った施設はダム周辺環境整備事業等により整備が進んできているが、そのような施設をどのような条件の元で作るべきか、あるいはどの程度の規模の施設を作るべきかといった点は明らかとはなっていない。この点を明らかにすることは、ダムや湖沼開発に当たっての環境整備のあり方に明快な論拠を与えるとともに、国民にとって最も便益の高い施設整備を実現する上で非常に重要である。本研究は、上で述べた課題に対して一定の答えを導くことを目的とする。

2. 研究方法

研究目的の達成のためには、下記の点が明らかになることが必要である。

- ①ある条件の環境活用／創造事業を行った場合の社会的純便益
- ②与条件が変化した場合の社会的純便益の変化
- ③環境活用／創造事業に関わる今後の技術動向見込み
- ④国民のニーズ変化に関する動向見込み
- ⑤技術的変革、国民ニーズの変化を考慮した場合にどのような事業の実施が社会的純便益を最大化するかという点に関する検討

上の①、②は環境活用／創造に関わる技術的革新及び国民の嗜好に関する変化を考慮しない場合において、社会的純便益が最大化されるような環境活用／創造のあり方を求めるために必要なものである。本研究においては、まずこの条件における環境活用／創造事業のあり方を検討して行く。一方、一度作られたダム等の土木構造物は相当の長期にわたって供用される点を考慮すると、上の③、④の諸点に関する検討を行わなければ、長期的視野に立った純便益の最大化ができない可能性が高い。技術的革新及び国民の嗜好の変化を確実に予測することは不可能と言えるが、今後の生活パターンの変化等一定の予測可能な要素はあり、これらを基にした予測を行うことはできる。

研究の初年度である5年度には、まず前記①、②を実施するために必要な、社会的純便益の評価手法に関する検討を行う。そのため、環境活用／創造事業の便益を評価する手法に関する既往手法を分析し、それを通じて湖沼の環境活用／創造事業の評価に適した手法を検討する。

3. 研究内容

3.1 便益評価手法の概要

ダムや湖沼開発における環境活用／創造の結果生み出される価値は、総じて公共財の特質を持っており市場価格等を通じた価値評価ができない。公共財供用の便益の評価手法としては、表－1に示すようなものがある”。

表－1に上げた評価法には、それぞれ一長一短がある。表－2にこれらの比較の概要を示す。表－2の中での「サイトの属性」とは、水質（代理指標としては例えばDOやBOD）、視点場の数、湖岸延長、各種付帯施設の有無等を指す。

表－1 公共財供用の便益評価手法

区 分	名 称	分 類	概 要
直接法	①仮想金銭評価法 (CVM) (Contingent Valuation Method)	繰り返し値付け法 (Iterative Bidding)	複数の額に対する支払意志を順次尋ねる
		支払いカード法 (Payment Card)	額が記入されたカードを見せ支払意志を尋ねる
	②二分選択仮想金銭評価法 (Dichotomous Choice CVM)	1 回法 (Single Bounded)	ある特定の額を支払う意志があるか 1 回のみ尋ねる
		2 回法 (Double Bounded)	1 回法で尋ねた後、別の額に変えてもう一度繰り返す
間接法	③ヘドニック資産価値法 (HPM:Hedonic Property Value Method)	土地条件に帰着する便益は、地価に反映することを利用して、土地属性と地価の重相関解析を行い、土地属性の持つ価値を評価する	
	④ヘドニック賃金法 (HWM:Hedonic Wage Method)	職場条件（仕事の危険度等）及び従業員属性（経験年数等）を説明因子とした賃金の重相関分析を行い職場条件の価値を評価する	
	⑤旅費法 (TCM:Travel Cost Method)	評価対象サイトにどれぐらい遠くからどれだけの数の人が訪れているかを調べ、旅行費用と訪問率の関数から需要曲線を導く	
	⑥ヘドニック旅費法 (HTCM:Hedonic Travel Cost Method)	異なる属性を持つサイト群にどこからどれだけ多くの人が訪れているかを調べ、各属性毎の需要関数を導いて各属性毎の便益を評価する	
	⑦パラメーター変化モデル (VPM:Varying Parameter Model)	通常の旅費法により各サイトの需要関数を求めた上で、サイト間での需要関数の相違は各サイトの属性で説明できると見なして重相関分析を行い、各属性量の変化した時の便益を求める	
	⑧ランダム効用モデル (RUM:Random Utility Model)	訪問サイトの決定に際して、各サイトの訪問便益の評価値が決定機会毎にランダムに変化し、毎回最も高い便益が見込まれるサイトを各人が訪問すると仮定する。その上で、各サイトへの訪問率データからどれだけの便益をもたらすかを評価する。	

表-2 各便益評価手法の特徴

番号	略称	主 な 長 所	主 な 短 所
①	CVM	1. 多様な環境創造便益の評価が可能 2. 非使用価値 (Non-Use Value) を測ることができる 3. 嗜好の多様性がある集団に適用可能	1. 評価する財の明確かつ被験者にとってわかりやすい表現が難しい 2. 主観評価であり、評判効果 ¹⁰⁾ 、追従効果の影響を受けやすい 3. 戦略的バイアスを受け得る
②	DCVM	1. CVM の長所と同じ	1. 評価する財の明確な定義が困難 2. 主観評価であり、評判効果 ¹⁰⁾ 、追従効果の影響を受けやすい 3. 多量な調査サンプルを必要とする
③	HPM	1. 客観データに基づく 2. 日本では地価データの入手はさほど困難でなく多量のサンプルを得易い	2. 嗜好の不均一性に伴うバイアスが非ランダムに生じる 2. 情報の不完全性に伴うバイアスが非ランダムに生じる 3. 多重共線性の影響を受けやすい
④	HWM	1. 客観データに基づく 2. データの入手は比較的容易	1. 職種と嗜好の間の相関性に伴うバイアスが生じる 2. 適用範囲が限定される。レクリエーション便益の測定には向かない
⑤	TCM	1. 客観データに基づく 2. レクリエーション便益の測定を主用途としている	1. 複数目的のトリップの評価が困難 2. 移動距離・時間当たりの機会費用の測定に不確定性が含まれる 3. サイトに関する情報が地域間で均一でないと非ランダムなバイアスが生じる 4. サイトの持つ個別属性の評価はできない
⑥	HTCM	1. サイトの持つ個別属性の評価ができる 2. 複数目的を持ったトリップに対応できる 3. 複数のサイトを訪れる行動を説明できる	1. サイトの持つ属性値の評価は調査者の主観基準により行われる 2. サイト属性値の加算性に関する仮定条件の妥当性 3. 移動距離・時間当たりの機会費用の測定に不確定性が含まれる
⑦	VPM	1. サイトの持つ個別属性の評価ができる	1. 複数目的のトリップの評価が困難 2. サイト属性間での多重共線性の影響を受けやすい 3. 移動距離・時間当たりの機会費用の測定に不確定性が含まれる
⑧	RUM	1. 複数のサイトを訪れる行動を説明できる 2. サイトの持つ個別属性の評価も可能である	1. HTCM (⑥) の短所が該当する 2. 代替サイトの選定の仕方で結果が大きく変わる ^{11) p. 20}

表に記した短所のほか、いずれの評価手法にも共通した注意事項としては、オンサイト（評価対象箇所での）調査からデータを収集する場合には、当該サイトを訪れない人々にとっての便益を評価できないほか、適切な補正を施さない限り、訪問頻度に比例した密度で母集団が構成されてしまうという問題が生じる。

3.2 湖沼の環境活用／創造便益に対する各評価手法の適用性

3.2.1 ヘドニック資産価値法(HPM)とヘドニック賃金法(HWM)

表-2に挙げた評価手法の中で、湖沼の環境機能の活用／創造の便益評価手法として一般的に適さないと言えるものは、HPMとHWMである。HPMは、便益が土地に帰着する必要があるが、湖沼の環境機能の主たる利用者であるレクリエーション客にとっての便益は測れない。もっとも、湖畔に立つ住宅からの眺望の価値をHPMにより評価した事例はあり、このような便益を評価することはありえる。もっとも、HPMには、嗜好の非一様性に伴う非ランダムなバイアスの発生を初めとする表-2に挙げたような短所があり、わが国では環境財の評価方法として最も適用例が多く、その評価も楽観的な傾向が見られる¹¹⁾ものの、世界的にはSmith(1993, pp.6)やU.K.Department of Environment(1991,p.53)が示しているように、HPMでは便益の定量的評価はおろか便益が統計的に有意に存在することすら示されない結果がでる場合が多く、むしろあまり使われない傾向にある。HWMについてはHPMよりもさらに適用性は狭くレクリエーション便益の評価への応用は困難である。もっとも、Smith and Kaoru(1987, pp.184)のように、旅行中の時間費用を評価するのにHWMを用いているような例もある。

3.2.2 旅費法(TCM)とその派生手法

TCMは米国では広く用いられている(Smith(1993, pp.3))ものの、複数目的のトリップや代替サイトの扱いが、基本形のままではできないという問題があり、国土が狭く複数目的のトリップや代替サイトの影響がほとんどの場合無視できないわが国では、そのままの形での適用はかなり限定されたものになると考えられる。一方で、TCMの変化型であるHTCMやRUMは複数目的のトリップや代替サイトの考慮も可能になっており、これらの手法はわが国においても適用できる可能性は高い。また、VPMも、その基本形の中ではサイト間の代替効果がモデルに組み入れられないが、各サイトの属性の中に近傍サイトとの代替性を工夫して組み入れる等の工夫により適用可能になる可能性はある。

3.2.3 仮想金銭評価法(CVM)とその派生手法

CVMに関しては、種々のバイアスに対して中立的な調査をデザインすることは相当の注意を要するものではあるが、幅広い評価対象に関して適用可能であることから種々の便益評価において有効である。湖沼における環境評価に関わるもので、Mitchell and Carson(1989)が紹介しているものだけでも、表-3に示すように多数に登る。CVMの問題点とされていたバイアスの問題に関しても研究が進んでその対策や評価も明らかになってきたことから、Smith(1993, pp.8)が述べているように、CVMは現在最も急速に適用が広がっている評価手法の一つとなっている。CVMへの批判の論拠の一つに戦略的バイアス(正直な答えよりも自分にとってより有利となる答えを行おうことによるバイアス)の存在が挙げられることが多いが、この点を解消したものがDCVMである。DCVMにおいては、被験者に示されたシナリオがその通りに受け取られている限りにおいて戦略的バイアスは生じない。もっとも、通常のCVMにおいても、調査文案の設計に注意を払えば戦略的バイアスは実際には余り問題にならないことが示されている^{12) 2) 6)}。このような調査文案の設計法に関してはMitchell and Carson(1989, pp.153-70)が詳しい。

表-3 CVMを用いた環境活用/創造に関わる既往調査

区 分	調 査 結 果 発 表 論 文	対 象
景観・アメンティ	Blomquist(1984)	景観関連アメンティ
	Boyle and Bishop(1984b)	景観美
	Bergstrom, Dillman, and Stoll(1985)	環境アメンティ
	Hoehn and Randall(1985b)	都市景観場
	O'Neil(1985)	二つの河川サイト
	Randall, Ives, and Eastman(1974)	環境へのダメージ
	Rowe, d'Arge, and Brookshire(1980)	大気中の視界
	Schulze, Cummings, et.al.(1983)	視界
	Tolley, Randall, et.al.(1985)	大気中の視界
	Walsh, Sanders, and Loomis(1985)	自然で景観的に優れた河川
動植物	Hammack and Brown(1974)	渡り鳥(水鳥)
	Meyer(1980)	魚と野生動物
	Stoll and Johnson(1985)	アメリカンロブール
水質・水量	d'Arge(1985)	水質
	Daubert and Young(1981)	流入水
	Davis(1980)	水質
	Gramlich(1977)	水質
	Greenley, Walsh, and Young(1981)	水質
	Hanemann(1978)	水質
	Harris(1984)	水質汚濁制御プログラム
	Jackson(1983)	環境の質
	Loomis(1987a)	水質
	Mitchell and Carson(1981)	淡水の水質
	Mitchell and Carson(1984)	淡水の水質
	Mitchell and Carson(1981)	飲用水質
	Oster(1977)	淡水の水質汚濁
	Smith, V.K. and Desvousges(1986b)	淡水水質便益
	Sutherland and Walsh(1985)	淡水水質
	Willis and Foster(1983)	水質
フィッシング関連	Anderson and Devereaux(1986)	フィッシング用人工岸
	Banford, Knetsch, and Mauser(1977)	淡水フィッシングサイト
	Cameron and James(1987)	レクリエーションフィッシング
	ECO Northwest(1984)	魚群密度
	Mathews and Brown(1970)	鮭のフィッシング
	Meyer(1974a)	鮭に起因するレクリエーション
	Sorg et.al.(1985)	フィッシング
レクリエーション他	Beardsley(1971)	レクリエーション便益
	Brown, Charbonneau, and Hay(1978)	魚及び野生動物のレクリエーション価値
	Cicchetti and Smith(1973)	自然レクリエーションエリアにおける混雑
	Darling(1973)	都市ウォーターパーク
	Davis(1963a)	レクリエーション場
	Dennis and Hodgson(1984)	ボート用施設
	Horvarth(1974)	レクリエーション便益
	Johnson, Shelby, and Bregenzer(1986)	急流レクリエーション
	Michalson and Smathers(1985)	公共キャンプ場使用
	Milon(1986)	人工浜
	Sellar, Stoll, and Chavas(1985)	レクリエーション用ボート
	Smith, N.(1980)	レクリエーション場
	Sutherland(1983)	レクリエーション施設と旅行時間
	Walsh and Gilliam(1982)	自然エリアにおける混雑

(Mitchell and Carson(1989,p.308-15) より抜粋

CVM及びDCVMにおいてより問題となるのは、シナリオにかかわるバイアス (Embedding Bias) と評判バイアス (Reputation Bias) の存在である。例えば、ある湖の水質の改善のための支払意思額を被験者に尋ねた場合、調査者はその湖の水質の改善価値のみを尋ねたつもりでも、被験者の一部は湖下流の河川の水質の改善効果まで見込んだ答えを返すかもしれない。また、別のある人は、水質の改善のためには自分の勤める工場に新たな公害防止措置が求められ、その影響が自分にも及ぶと考えてその分のマイナスも差し引いた答えを返すかもしれない。このようなシナリオにかかるバイアスを無くすには評価対象財の範囲に関する説明が必要となるが、被験者に十分に理解できる説明を簡単に行うことは調査文案の作成上相当の工夫を要する。また、被験者が、調査者あるいは他の第三者から見た自分の評価がCVMへの答えの仕方により悪くなることを恐れることから生じる評判バイアスに関しても、その抑制のためには、調査機関・調査実施者の中立性・信頼性の確保等に関して十分な検討が必要である。

4. まとめと今後の課題

今年の調査の中では、湖沼における環境活用／創造による便益を評価するための手法を調べた。その中で、仮想金銭評価法 (CVM)、二分選択仮想金銭評価法 (DCVM)、ヘドニック旅費法 (HTCM)、ランダム効用モデル (RUM)、パラメーター変化モデル (VPM) が有望であることがわかった。しかし、これらの評価手法を用いた既往調査結果の収集とその分析はまだ十分とは言えず、今後はこの点を一層進めていくこととする。また、調査対象を絞り込み、実際の評価調査を行っていくこととする。そして、実際の評価手法の適用の中から、わが国の実状に最も適した評価手法を種々のケース毎にまとめ、湖沼における望ましい環境活用・創造の実現に活用していきたいと考えている。

参考文献

- 1)Bohm,P.(1972) Estimating Demand for Public Goods: An Experiment, European Economic Review 3, No.2, pp.111-130
- 2)Brookshire,D.S., B.C.Ives and W.D.Shulze(1976) The Valuation of Aesthetic Preferences, Journal of Environmental Economics and Management 2, pp.325-46
- 3)Kaoru,Y.(1993) Nonmarket Valuation of Economic Benefits for the Environmental Resources Paper presented at International Workshop on Construction and Management Technology for Dams, and Enhancement of the Dam Lake Basin Environment for the Next Generation
- 4)Kaoru,Y., V.K.Smith and J.L.Liu(1993) Using Random Utility Models to Estimate the Recreational Value of Estuarine Resources, Resources for the Future Discussion Paper No.94-04, Washington, DC
- 5)Marwell,G. and R.E.Ames(1981) Economists Free Ride. Does Anyone Else? - Experiments on the Provision of Public Goods IV, Journal of Public Economics 15, No.3, pp.295-310
- 6)Mitchell,R.C. and R.T.Carson(1989) Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method, Resources for the Future, Washington, DC
- 7)Smith,K.V.(1993) Nonmarket Valuation of Environmental Resources: An Interpretive Appraisal, Land Economics 69, No.1, pp.1-26
- 8)Smith,K.V. and Y.Kaoru(1987) The Hedonic Travel Cost Model: A View from the Trenches, Land Economics 63, No.2, pp.179-92
- 9)U.K.Department of Environment(1991) Policy Appraisal and the Environment, HMSO, London
- 10)Yasuda,G.(1994) Proposal of the Reputation Model and Its Application to CVM, University of York MSc. Dissertation
- 11)肥田野登(1992) ヘドニック・アプローチによる社会資本整備便益の計測とその展開, 土木学会論文集 No.449/IV-17, pp.37-46

地球環境に関する調査研究

水系開発施設計画調査

地球規模の環境変化が水資源に及ぼす影響に関する調査

環境計画研究室 室長 丹羽 薫

水工水資源研究室 室長 高須修二

研究員 廣瀬昌由

1. はじめに

近年、地球環境問題が大きく取り上げられている。本調査では、その内、地球温暖化と酸性雨が水資源に及ぼす影響に関して検討を行う。しかしながら、地球温暖化や酸性雨の今後の動向には未だ不確定な要素が多いので、現在のところ、これらの水資源への影響を定性的に評価することは難しい。そこで、過去の流量データに基づいて10ヶ年第1位相当渇水を対象に計画されている水資源開発の中で、これらの影響の可能性について検討するとともに、今後の必要な対策について検討する。5年度は、地球温暖化が及ぼす水資源の量の影響に関して検討を行った。

2. 調査目的

地球温暖化については、温室効果気体の濃度が現在の上昇率で上昇を続けば、2030年頃には全球平均気温は、1.2～3.0℃上昇するとされている。これによって、全球平均降水量や蒸発散量が2～9%増加することや、対流性降雨の増加による降水域の集中化や、単位時間の降水量の増加がおこる事が予想されている。これに伴い、わが国の河川の流況は変化することが予想され、量としての水資源にどのような影響を及ぼすか検討する必要がある。一方、酸性雨に関してもすでに欧州で森林に対する被害が報告されているように全球レベルでの進行は間違いなく、わが国の水資源、特にその質に対して何らかの影響を与えることが懸念される。温暖化に伴う流況の変化も加味して質の変化を予測する必要がある。本調査は、水資源をとりまく地球環境問題に対して、その影響を適切に評価し、今後の水資源計画・開発・管理を有効に行うために講じるべき手段を開発することを目的としている。

3. 調査方法

わが国の水資源を考える場合、降水量や蒸発散量が地域的に異なるだけでなく、水利用も地域的に異なる。そこで、まず全国の主要な水系の降水量、流出高、取水高について調査、分析を行った。さらに、ダムの利水容量と新規開発水量の関係を整理し、それらを用いて、気温が上昇した場合の温暖化の影響に関して定性的に分析を行った。

4. 調査結果

4. 1 現在の水資源状況

わが国の水資源の状況をみた時、地域によって降水量、年間の降水パターンが大きく異なるだけでなく、水利用状況も大きく異なる。地球温暖化が進行した場合に水資源がうける影響を適切に評価するには、まず水資源の現状を把握する必要がある。表-1に、全国の主要な水系で求めた流域平均年降水高とその流域からの平均年

流出高、それらの差として求めた平均年損失高、さらに実績の取水高から求めた年取水高と、それが年流出高に占める割合を利用率として示す。わが国の水資源開発は1/10の渇水に対しても水供給が行えるように、計画を策定しているので、表-1には流出高で評価した1/10の渇水時の降水量等も併記している。図-1にはこれらを模式的に示し、さらに取水量については用

表-1 地域別水資源賦存状況

水系名	年降水高 mm	年流出高 mm	年損失高 mm	年取水高 mm	水資源利用率 %
北上川	1607 (1420)	1296 (1030)	311 (390)	158	12 (15)
利根川	1251 (894)	781 (501)	470 (392)	333	43 (66)
木曾川	2551 (1955)	1935 (1306)	616 (649)	437	23 (33)
淀川	1820 (1442)	1303 (901)	517 (541)	659	51 (73)
太田川	2087 (1621)	1654 (1078)	433 (543)	261	16 (24)
吉野川	2510 (1967)	2254 (1608)	257 (359)	477	21 (30)
筑後川	2200 (1332)	1670 (714)	530 (618)	384	23 (54)

注：()内は10年第1位程度の渇水年の表示とした。

途別に内訳を示した。流出高の算出については、なるべく流域全体からの流出を把握できる地点とし、その上流で取水がありその取水した水が、その地点を通過せずに流下することができるだけない地点とした。また上流にダム等がある場合は、日々の流況はダムによる流水調節の影響をうけるが、年間で評価した場合には、その影響は大きくないとした。年取水高については、実績取水量が報告されているものについてはその値を、最大値で整理されているものについては、当該流域、当該利水目的毎の実績値/最大値で補正して集計した。以下の検討では、損失高を流域からの蒸発散量として取り扱うが、表-1をみると一般にいわれている値より、特に四国で蒸発散量が少ない結果となっており、その原因としては雨を精度よく観測できていない事等が考えられる。また本検討では、年流出に対して雪の影響が大きいと思われる地域は現在のところ雪の補正が十分でないために解析対象に含めていない。流出高を算出した地点より上流の流域平均降水量は、その流域の雨量観測所のデータから単純算術平均法もしくはティーセン法で求めた。

4. 2 気温が3℃上昇した時の影響

それぞれの流域について、Hamon式により月平均気温から1日の可能蒸発散量を求め、4.1で算出した年蒸発散量(=年損失量)に補正するための補正係数を求めた。このHamon式と補正係数を用いて、気温が1~3℃上昇した場合の蒸発散量を算出した。この結果、水資源賦存量の変化は図-2のようになる。この時、水需要が変化しないとすると水資源利用率(対渇水年)は図-3のように変化する。一般的に水資源の利用率が変化する場合は、水の需要量に変化することを意味するが、本検討では、水需要は変化せずに、水資源賦存量が変化し、結果的に利用率が変化することになる。

表-2に、各水系毎の全利水容量と建設省所管の近年竣工したダム及び現在建設・計画中でここ1

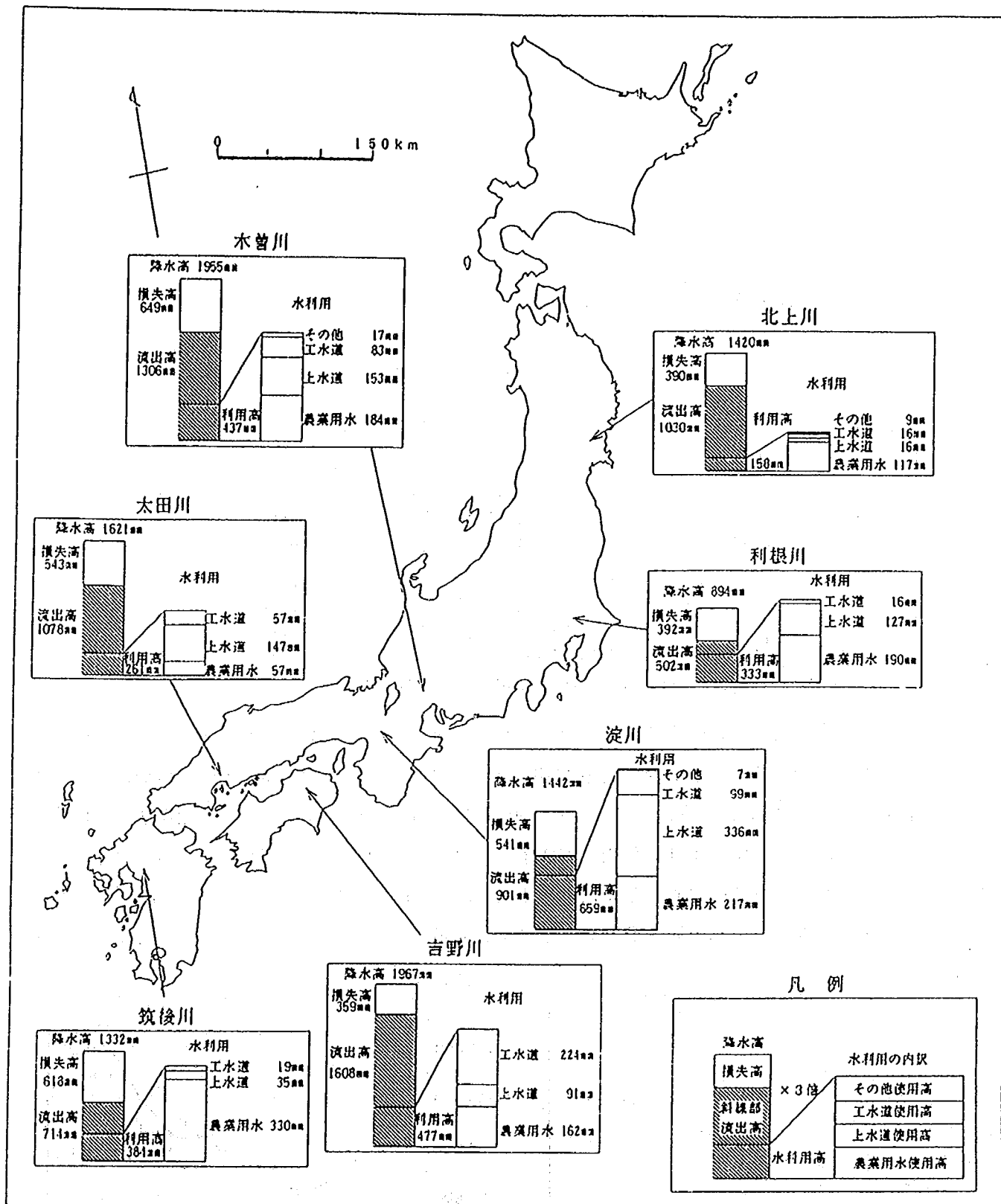


図-1 水資源の状況

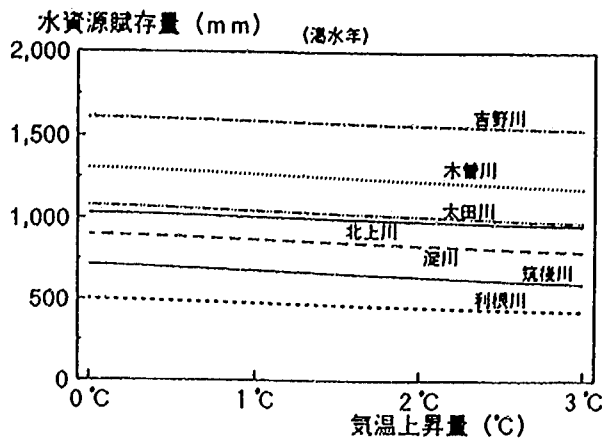


図-2 気温上昇時の水資源賦存量の変化

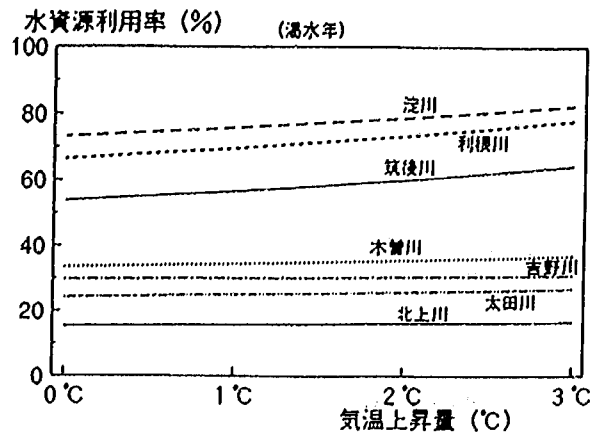


図-3 気温上昇時の水資源利用率の変化

表-2 ダムによる水資源開発状況

水系名	現在竣工ダムの全利水容量 10^3 m^3	近年竣工および建設・計画中のダム*			
		上・工水容量 10^3 m^3	上・工水開発水量 $\text{m}^3/\text{日} (\text{m}^3/\text{S})$	上・工水 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発する必要容量 10^3 m^3	対象ダム数
北上川	267140	13527	146900 (1.7)	7956	5
利根川	596606	173000	1461040 (16.9)	10231	4
木曽川	287181	36400	446700 (5.2)	7040	2
淀川**	90492	50100	1106860 (12.8)	3911	6
太田川	1564	23550	464000 (5.4)	4385	2
吉野川	211210	103900	2022620 (23.4)	4438	2
筑後川	70096	2430	72662 (0.8)	2889	2

*：建設省の資料より上・工水専用の容量を持つダムについてまとめた。

**：淀川については、琵琶湖総合開発事業が行われたが、ここでは含めていない。

0年くらいで完成予定のダムのうち新規の上・工水の開発を行っているダムの上・工水容量とその開発水量を示す。この表をみると、例えば利根川では全利水容量が59,660万 m^3 （1992年現在）で、表-1に示す年間取水高333mmをまかなっており、近年では新規に上・工水を $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発するのに約1,023万 m^3 （現在建設計画中で10年程後で完成予定のダムを含む）の容量が必要となっている。一般に水資源の利用率が高まるにつれて新たに水を $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発するのに必要な容量（新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量）は、増加（ダムによる水資源の開発効率が低下）するといわれている。図-4に、あるモデルダ

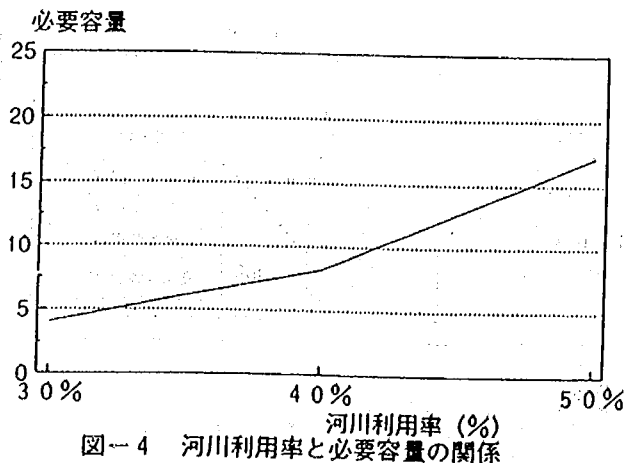


図-4 河川利用率と必要容量の関係

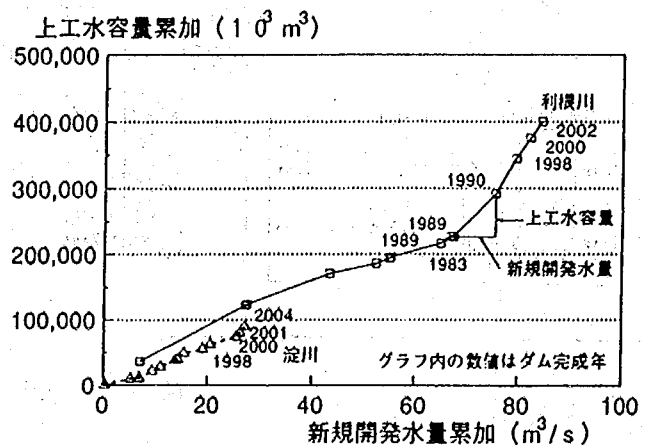


図-5 ダムによる上工水の新規開発水量と容量

ム流域において下流の基準点で確保すべき流量を順次増加させていった場合に1/10の利水安全度を確保するのに必要なダム容量の変化を示すが、利用率が増加するにつれて新規1 m³/s開発容量が増加しており、水利用率が高まるにつれダムによる開発効率が悪くなる事を示している。図-5には、経年的にコンスタントに上・工水の開発が進んでいる利根川と淀川の新規開発水量の合計値とダムの上・工水容量の合計値の変遷を示す（上・工水のみを対象としたのは、期別の変動が少ないためである）。水資源の開発レベルが上がるにつれて、特に近年では新規1 m³/s開発容量が大きくなっている事がわかる。本報においては、現状からの影響を分析するので、表-2に示したように、近年竣工したダム及び間もなく竣工する予定のダムの開発水量と必要容量の関係を用いる。表-1と表-2をみると、地域間の比較では必ずしも利用率の高い水系で、新規1 m³/s開発容量が大きいとは限らない。これは各水系で対象としているダムの数や、水系によっては近年竣工あるいは完成予定のダムの計画が比較的古くに行われたものがある等の影響もあると思われるが、例えば淀川水系では、琵琶湖がある淀川の流出特性を反映しているともいえる。つまり、表-2にしめす新規1 m³/s開発容量は地域による水資源利用率の違いと流況の違いを総合的に表していると考えられる。よってこの関係を用いて、温暖化によって流況が変化した場合に同じ取水量を確保するのに必要な容量の変化を概略検討する。すでに述べた蒸発散の計算方法に従い、温暖化する事で蒸発散量が増加（降水量は変化しないと仮定）し、水資源賦存量が減少すると、結果的に水資源利用率が増加する事になる。そこでここでは簡単のために、水資源賦存量は変化せず水需要が増加して、結果的に水資源利用率が同じになる状態を温暖化が進行して水資源賦存量が減少した状態と等価であるとする。両者の違いについては、別途検討を要する。この仮定に基づいて、気温上昇による水資源の目減り分を、水資源利用率を介して、新規開発水量に置き代えたのが図-6である。蒸発散量が大きく現在の開発水量が多い、利根川、淀川水系で換算新規開発水量が大きいことが分かる。これを利用して、表-2より温暖化した時の必要容量の増加分を算出したのが図-7(a)で、流域面積が大きく、水利用の進んでいる利根川と淀川で必要容量の増加分が大きくなる事がわかる。また、対現状比として利水容量の増加率を示したのが図-7(b)である。例えば、気温が3℃上昇した場合には、利根川で現在と同じ水需要を確保するためには、現在容量の約1.68倍、淀川で同2.14倍、筑後川では同1.41倍、太田川では同1.79倍の容量が必要になってくる。必要容量の増加分を示す図-7(a)で影響の大きい利根川、淀川に加え、太田川、筑後川で増加率が大きくなっている。これは、太田川、筑後川水系では、現状の取水量を比較的少ない利水容量で確保しているため、対現状比でみた時影響が大きくなっている。同じ安全度を確保するために必要な容量という観点では、(a)図で評価できるが、対現状として流域に与えるインパクトを評価するには、(b)図の

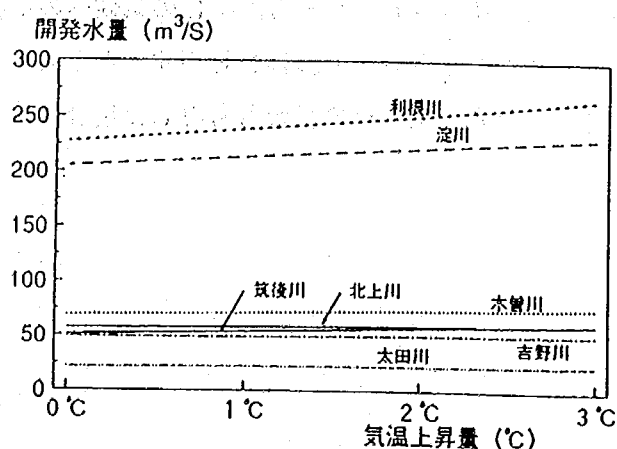


図-6 気温上昇量と換算新規開発水量

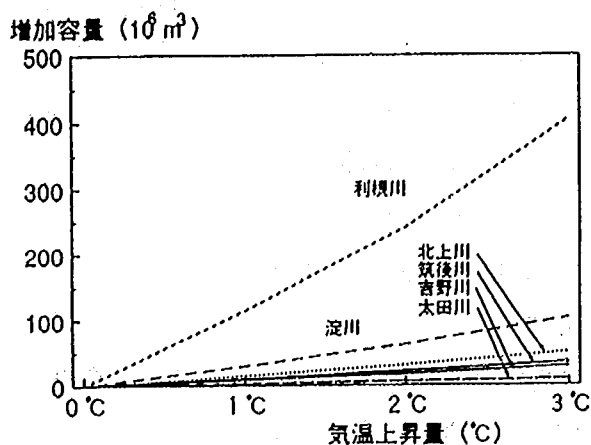


図-7(a) 気温上昇量と増加容量

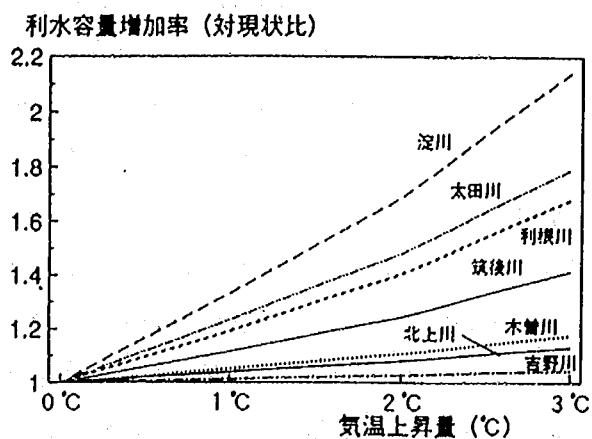


図-7(b) 気温上昇量と容量増加率

ような評価も必要であると思われる。

以上のように気温上昇の影響を概略計算したが、地球温暖化が進行した場合に水資源に及ぼす影響を評価するには、現在のその地域の水資源の開発レベルを考慮しなければならない。ここでは、近年の新規開発水量と必要容量の関係をもちいて必要容量を算出したが、温暖化が進行し、水資源賦存量が減少した場合、それに対応するための容量の増加は、さらに大きいものとなることが予想される。ここまで、非常に概略的に検討を行ったが、既に報告している通り、地球温暖化が水資源に及ぼす影響を評価するには、温暖化が進行した時に、水資源賦存量がどのように変化するかを把握する事が非常に重要であることはまちがいないが、水系によって流出特性と水資源の利用率が異なるので、それらの影響についても評価した上で議論する必要がある事がわかった。

5. おわりに

本報では、日本の代表的な水系で、それぞれの水資源賦存量、利用率を分析し、水資源への地球温暖化進行の影響を現状の利用率と流域の流況の特性を総合的に評価していると考えられる新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量を用いて、現在と同一安全度を確保するのに必要な容量として評価した。その結果、 3°C 気温が上昇した場合、水系によっては現状に比べて2倍以上の容量が必要であるという試算が得られた。

今後は、現在研究されつつある温暖化の気候への影響のより詳しい予測を考慮して温暖化シナリオを作成し、より確かな水資源への影響を評価するとともに、その対策として従来の渇水対策をより進めるために、具体的な目標を温暖化の影響も考慮した場合にはどの程度にすれば適当かについて検討する必要がある。

自然環境の保存に関する研究

11. 貯水池の環境機能向上に関する調査

11.2 湖沼における鳥類の生態系環境に関する調査

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

研究員 長野 幸司

1. まえがき

人造湖の出現はその周辺の生態系を一変させるが、一旦改変された生態系も年月とともに落ちついた生態系へと推移してゆく。しかし地形、標高、水深、水質、気温、結氷、降雪、日射等の条件により自然湖沼に近い豊かな生態系環境に落ちついたり、かなりかけ離れた環境に留まったりする。そこで本調査は、湖沼における鳥類の生息が、周辺の生態系環境の中でどのような位置付けとなっているかを検討し、最終的には、湖沼における鳥類生息環境を適切に創造してゆくのに必要な要因を把握し、今後の事業に活かすことを目的とする。

5年度は初年度であり、鳥類の生息環境づくりに関する知見の収集、及び各地の湖沼における現況の鳥類生息状況調査を行った。

2. 調査目的

自然環境は一般に、人為を加えないことが最良であると思われがちであるが、実際には人間による適切な管理が必要な場合がほとんどである。しかしこの適切な管理に関しての評価や影響に不明の点が多く、手法の確立が期待されているところである。

自然環境はトータルな形で存在しているが、鳥類は、生態系の中で高い位置にあり、また目立ちやすいことから、自然環境を評価する場合にわかりやすい指標であるので、自然環境を作り出す目標として、鳥が住めるという点に着目することは、理にかなった方法であると考えられる。このため鳥類の生息に必要な条件を抽出し、目標とする鳥類が住みつくための環境整備方策を示すことを目的とする。

3. 調査方法

3.1 鳥類の生息環境に関する調査

特に水辺における鳥類の生息環境に関して既存文献を調査した。

3.2 湖沼における鳥類の生息状況に関する調査

各地の湖沼における生息鳥類の種類に関する調査を行った。

4. 調査結果

4.1 鳥類の生息環境に関する調査

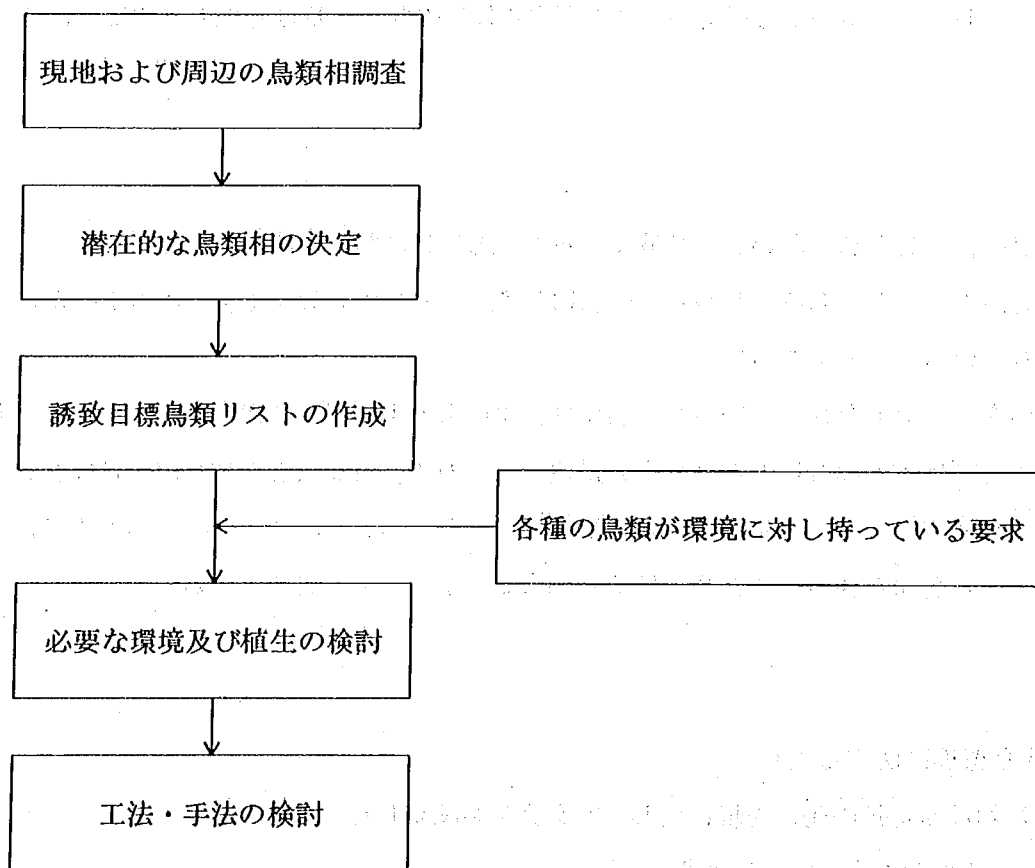
日本の鳥類のうち、海・湖沼・河川などの環境を主な生活場所とするいわゆる水鳥は266種（内96種が日本

で繁殖)であり、それ以外の陸鳥は259種(内繁殖は151種)とほぼ同数となっている、水辺環境に依存する鳥類が非常に多い。ただし、鳥の生活の三大要素である、採餌・休息・営巣(日本で繁殖をしない冬鳥・旅鳥にとっては営巣を除く二大要素となる)のうち、一つあるいは複数の要素において森林・草原といった陸地を必要とする「水鳥」はいくらでも挙げることができる。したがって、多くのいわゆる「水鳥」において「水辺環境」だけを隔離した状態で存在させてもあまり意味がないことに留意する必要がある。

また、鳥類と生息環境に関しての研究は、森林について圧倒的に進んでいるのに対し、草原・河川・湖沼といった環境に関しては、既往の研究成果はほとんど得られない。また本研究の一義的な目的は、人造湖における鳥類生息環境の創造であり、対象となる湖沼の周辺は多くの場合森林である。これらより、以下主として森林性の鳥類について検討を行った。

4.1.1 鳥類誘致手法検討手順

現在、各地で「野鳥の森」などがつくられ、鳥類の誘致が試みられている。こうした場合、必要な手順を以下に示す。



図一 1 鳥類誘致手法検討手順

4.1.2 優占種について

個体数の優占種により鳥類相を端的に示すことができる。ただし、日本の場合四季のうつろいがあり、季節によって優占種が変化することに注意しなければならない。また、優占種により森林が特徴づけら

れ、また逆に森林相により優占種が推定される。

特に森林に生息する鳥類においては、繁殖期に日本に渡来する夏鳥グループ優占率が40%と高い比率を示したのに対し、冬期に日本に渡来する冬鳥グループの優占率は10%台と低い。冬期には留鳥および漂鳥が優占種となり、すべての森林環境で50%以上、中には90%近くに達する優占率をもつ。つまり、日本の森林を特徴づける鳥は、冬期は留・漂鳥、中でもエナガ、シジュウカラ、コガラ、ヒガラ、ヒヨドリ、キクイタダキ、ゴジュウカラ、ホオジロの8種が優占種であり、繁殖期にはヒタキ類、ムシクイ類、ツグミ類のような夏鳥たちである。

4.1.3 森林の種類と鳥類の多様性

各種の森林の中で、鳥類の多様性、すなわち鳥の種類と個体数が比較的多いのは、どのような条件によるものかについて調査した。結果は、一般に

針葉樹林 < 針広混交林、成熟した広葉樹林

人工林 < 2次林 < 天然林

若齢林 < 壮齢林

樹種が少ない < 樹種が多い

であるが、全てではない。従って極端な例（単純な若齢人工林）等を除けば、他の要因の影響も考慮しなければならないものと思われる。

4.1.4 森林の面積と鳥類の多様性

森林、あるいは広い意味では生息地の面積と種数や個体数は、密接な関係にあることが多くの研究により指摘されている。樋口ほか（1982）によれば、都市近郊緑地での調査結果から、生息種数（S）と面積（A）（ha）の関係は次式で近似できるとされている。

$$S = 3 + \frac{55}{(1 + \exp(2.68 - 0.83 \log A))}$$

これによれば、面積が1 ha未満の森林では数種の鳥類しか生息できないが、面積が広くなるに従って生息種数が増え始め、10 haで約10種、100 haで約20種となる。また、観察される鳥類の構成も面積によってある程度決まっていることが知られており、表-1に示す。これをみると、1 ha未満では人里の鳥しか見られないが、10 ha以上になるといかにも好適な環境を連想させる鳥が見られるようになる。

山地の森林でも同様の検討がなされており、は、10 haで約20種、100 haで約30種といわれている。山地での同面積での種数が多いのは、都市の緑地よりも森林の連続性が高いためであると考えられる。すなわち、鳥類の生息環境としての森林を考える場合、

面積が狭い < 面積が広い

周辺から孤立 < 近郊に同様の環境が存在

である。

面積 (ha)	出現鳥類
<1	スズメ、キジバト、ヒヨドリなどのみ
$1 \leq \leq 10$	上記+コゲラ、エナガ、ウグイスなど
$10 <$	上記+キビタキ、サンコウチョウ、イカル、ヤマガラなど

表-1 都市近郊緑地における面積と鳥類の出現状況

4.1.5 各種鳥類の生息環境に関する選好性

林相や面積等の状況が同一と見なせるような環境においても、一方で確認できる鳥類が他方では全く確認できない場合がある。このような傾向は、各種の鳥がよりミクロな一定の環境要素を備えた場所に住み着くという、環境選好に関わる問題である。特定地域に鳥類を誘致することを考えた場合、ある程度「目標種」を定めて環境を整備する必要がある、こうした情報は有用である。

特に、人造湖沼においては、新たな越冬地や渡りの中継点としての機能が期待されている。以下にカモ類の越冬地の条件を列举する。

- 1 水深が 30 cm 以上あること。
- 2 上陸しやすい安全な水辺があること。護岸は、材質よりも緩傾斜であること、棚状の部分があることなどの、構造が重要であった。
- 3 完全に遮蔽されている池では 10m程度の幅でも定着しているが、水際まで人が立ち入れる池で、島や密生した樹林、ヨシ原など遮蔽された場所を背にできる池では 30m以上、全周囲に人が立ち入れる池では 75m以上の幅があること。

4.2 湖沼における鳥類の生息状況に関する調査

各地の湖沼等での鳥類の生息状況を文献によって調べた。なお、文献資料の評価に当たっては、観察の精度、規模、具体的な方法などによる違いを克服するため、以下のような基準で分析を行った。

- 1 日本産鳥類のリストから、今回の調査に関係の深い鳥類のグループを選び出す。選び出す単位は主に分類単位の科であるが、スズメ目の鳥に関しては、亜科もしくはそれに類するグループを基準とした。

2 1で選定した各グループ毎に、何種がその地域の鳥類リストに含まれているかに関して集計した。このような基準で89湖沼について57科に分類した（ただし迷鳥だけからなるグループ（たとえばヤイロチョウ科）などは除外した）。その結果の一部を表ー2に示す。

本調査は文献調査であり、資料毎に調査の精度や期間が異なるためあまり厳密な結論は引き出せないが、大まかな傾向は把握されよう。

まず、山地のダム湖などでは比較的種数が少なく、平地から低山にあって岸の傾斜がなだらかな自然湖沼では、種数が圧倒的に多くなっている。特に種数の多いウトナイ湖、風蓮湖、伊豆沼などは、周辺に湿地、草原、森林など多様な環境を含むのが特徴である。ただし、これらの湖沼は他の湖沼に比べて調査が充実していることは考慮しなければならない。

また、人工的な環境でも狭山湖（多摩湖）、渡良瀬遊水池など場所によっては種数が大変多くなっている湖沼がある。これらは工事終了後長い年月が経っているという共通点はあるものの、十分条件ではない。

5. 今後の問題点

5年度の調査により、鳥類が生息するに必要な一般的な条件に関しては把握された。しかし、特に鳥類の環境選好に関しては、実際の湖沼においてももう少し詳細な条件調査が必要と考えられる。また、湖沼の生息状況調査においても、各湖沼の周辺植生や水質状況といったデータを付加し、また対象湖沼数を拡大して調査を行い、鳥類生息に関する共通因子を抽出することが必要である。

さらに、具体的な湖沼の鳥類生息環境づくりに関する試案を作成し、実際の湖沼において試し、具体的なノウハウへと転換して行くための野外での試験的な研究を行う。

湖沼の水質保全に関する調査

土木技術に関する基礎研究

水の運動に関する研究

湖沼密度流の水質に及ぼす影響に関する研究

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

主任研究員 久納 誠

久保徳彦

真田誠至

1. まえがき

湖水の有効利用のためには、水の量とともに質の管理も適切に行う必要がある。流域から流入される栄養塩類と、水温成層による表層水の滞留により、好ましくない藻類が異常増殖することになり、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭など深刻な問題を引き起こしている。これらの現象は湖水の流動に大きく影響を受けており、湖水の流動を制御することにより、好ましくない藻類の異常増殖を抑制できることが考えられる。また水温成層が形成される時期の湖水の流動は水温差により生じる密度流が卓越している。

4年度は散気方式の曝気循環の流動メカニズムを現地実験により把握した。5年度は、湖沼密度流制御による水質保全の原理の検討、及び散気方式の曝気や流入河川水によって生じる密度流を現地調査により検討した。

2. 研究目的

湖沼の中での流動は、水温差により生じる密度流が卓越する。その現象は、湖沼水と流入河川水との間の水温差により、また曝気を行うと水深の違いによる水温差により、密度流が生じる。これらの密度流を人為的に制御して水質保全に適するように湖沼を流動させる方法を流動制御システムという。

本研究の5年度の目的は、①湖水密度流による水質保全原理を今までの研究成果をもとに流動制御システムとしてまとめる、②前者を補足するために現地調査により第2循環流の範囲を把握する、③流入河川水の水温経時調査により湖沼流入端の密度流の進入水深を検討する、ことを目的とする。

3. 研究方法及び結果

3.1 湖沼密度流による水質保全の原理

流動制御システムは、平常時において湖沼の表層に温水でしかも表層付近の水温分布が均一である循環混合層を、水深概ね15～20mまで厚く形成させ、中小洪水時にもこの層を温存させることにより、表層に生息する藍藻類や鞭毛藻類への栄養塩類と光を抑制することになり、それによって藍藻類等の異常増殖を抑制するシステムである。図－1に流動制御システムの模式図を示す。

一般に自然状態における夏季の水温分布は、図－2に示すように水面で最も高く、水深が深くなるにつ

れて低くなるいわゆる水温成層が形成される。水温成層が形成されると、表層の水は一次躍層を越えて上下に移動し難い安定した水塊となる。このような表層では光が良く得られ、また栄養塩類を多く含む流入河川水が一般に水面下数メートルの水深に侵入して来て栄養塩類の供給も受けられるため、藍藻類や鞭毛藻類が異常増殖するのに適した環境となる。

散気方式の曝気を行うと、循環混合層の中では図-1に示すように第2循環流の表層水が曝気に向かって引き寄せられ、何日か後（例えば8日後）には光が届かない中層部へ循環させられる。よって表層部で増殖しかけた浮遊藻類は暫くの間（例えば8日間の2倍程度）光が届かない暗い中層部に追いやられ、光合成に必要な光が制限されることになる。さらに表層水が曝気引き寄せられている間においても、循環混合層の表層部では水温鉛直分布がほぼ均一であるため、気温の急低下に伴う表層水温の低下等により、表層部の数メートルでは上下の混合がしばしば生じ易い状態にあり浮遊藻類は安定した増殖ができない。

散気方式の曝気により循環混合層が形成されるが、平常時の流入河川水は図-2に示すように常に水温躍層に導かれるとは限らず、循環混合層の下層部に侵入するが多い。一方、循環混合層の下層部で生息する緑藻類や珪藻類はガス泡を持たないために藍藻類と異なり深層へ向かって沈降しやすい。流動制御

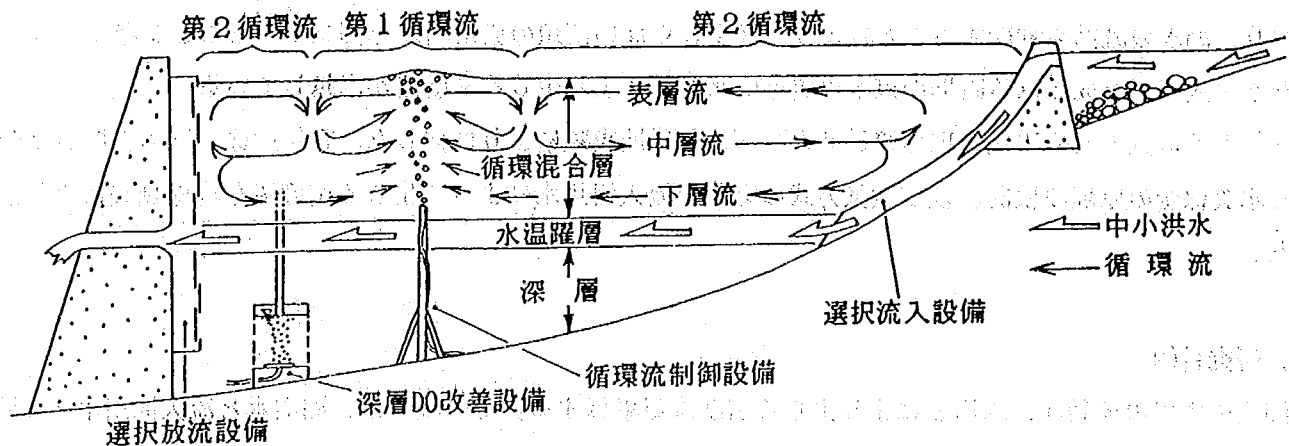


図-1 流動制御システムの模式図

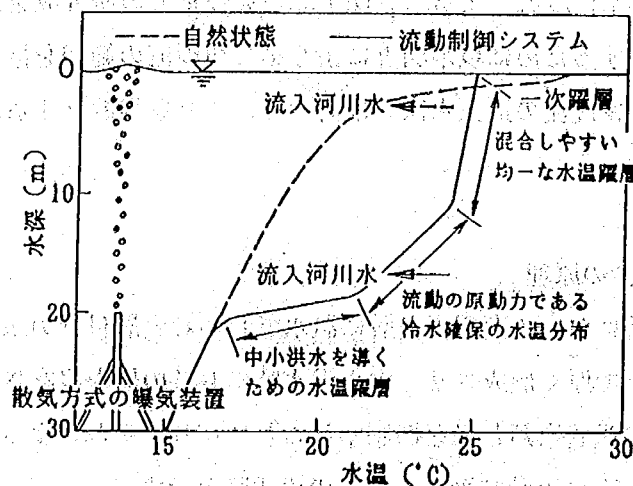


図-2 水温鉛直分布の模式図

システムにおいては、循環混合層の下層部に侵入して来た平常時の流入河川水は、循環混合層の下層部において下流方向へ1km程度も進行する間に流入河川水に含まれていた無機態の栄養塩類がこれらの緑藻類や珪藻類に吸収され、それらはやがて深層へ沈降するため、栄養塩類の底泥への固定が期待できる。結果的に表層で生息する藍藻類に供給される栄養塩類を減少させることになり、藍藻類の異常増殖を抑制できる。さらに循環混合層が図-2に示すように温水でしかもその厚さが15~20mあれば、栄養塩類を多く含んでいる中小洪水時の流入水は平常時の流入河川水よりさらに低温であるため水温躍層へ導かれる。よって、藍藻類が生息している表層部への栄養塩類の混入を減少させることになり、藍藻類の異常増殖防止に役立つ。以上のような流動制御機能を満足する循環混合層における水温鉛直分布の理想的な形状を図-2に示す。水深約10m以浅は温水でしかも均一な水温鉛直分布を持ち、上下の混合が生じやすい層とする。水深約10mから約20mの層の水温は約10m以浅より常時低く保つ必要がある。その理由は、第2循環流を定常的に循環させるには、第2循環流の表層部と下層部との水温差が常時必要なためである。水深20m付近の水温躍層は中小洪水を選択放流設備へ導くためのものである。

3.2 循環流制御設備の設備規模

循環流制御設備の設備規模についての当面の目安としては、湛水面積1km²に対し、水深15mにて単一孔から曝気をする場合、3700ℓ/minの空気量つまり22kW1基のコンプレッサーが必要である。この値は常時稼働させるのに必要な能力であり、一般に水面と水深15mとの水温差が小さくなると流動能力が小さくなるため、湛水面積1km²当たり22kW1基のコンプレッサーの他にもう1基分程度の余裕が必要であり、つまり常用装置の他に常用装置と同程度の予備装置を必要とする。予備装置の大きさはダム湖の条件によりやや異なる。

水質保全に有効に働く循環混合層は、『層内の循環周期』と『水温分布形状の形成速度』との双方の条件を満足する必要がある。循環流制御設備の設備規模の算定は、耶馬溪ダムにて散気方式の単一孔からの曝気を行った現地実験によった。

(1) 循環混合層内の循環周期による算定

平成5年に耶馬溪ダムにおいて、コンプレッサーからの空気量を5000ℓ/minに固定し、曝気水深を3段階に変化させる現地実験を行った。図-3に実験結果を示すが、第2循環流の表層流の流動能力は曝気水深に比例することがわかった。これによると、空気量5000ℓ/minで曝気水深15mの場合の第2循環流の表層流の流動能力は6.5m³/secであることがわかった。

ここで『循環混合層内の循環流』を、『第2循環流における循環混合層の表層3mの厚さの水を、8日間で第1循環流に引き寄せ、その水を第2循環流における循環混合層の中層に押し込み、8日間の2倍程度の期間は暗い層に閉じ込めるような循環』と仮定すると、湛水面積1km²の場合、必要な第2循環流の表層流の流動能力は、次式の計算により4.3m³/secである。

$$\frac{1000000\text{m}^2 \times 3\text{m}}{86400\text{sec/day} \times 8\text{day}} = 4.3\text{m}^3/\text{sec}$$

よって湛水面積 1 km^2 に必要なコンプレッサーは空気量 3300 l/min つまり概ね 22 kW 1 基が必要である。

$$5000 \text{ l/min} \times \frac{4.3 \text{ m}^3/\text{sec}}{6.5 \text{ m}^3/\text{sec}} = 3300 \text{ l/min}$$

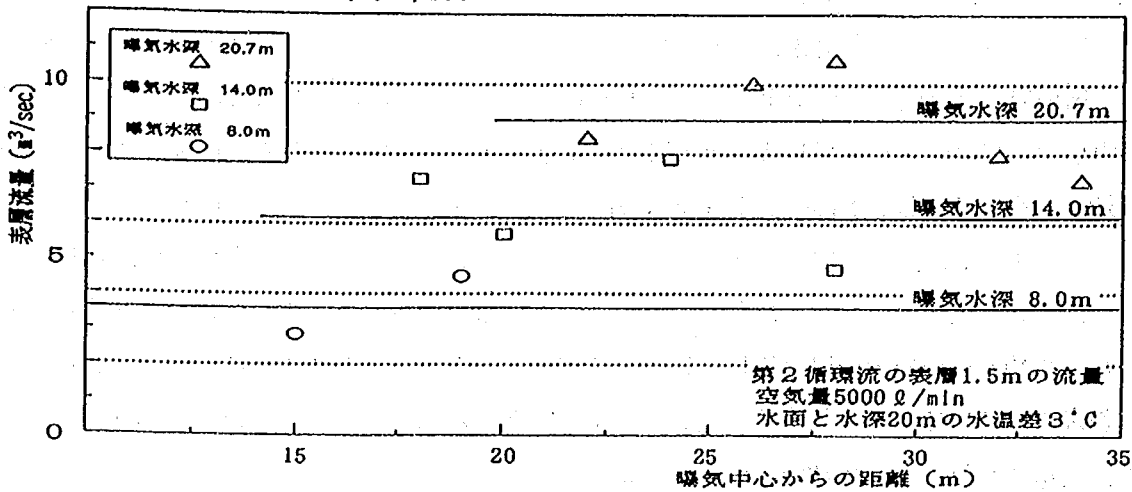


図-3 第2循環流の表層流の流動能力と曝気水深の関係

(2) 循環混合層の水温分布形状の形成速度による算定

平成5年に湛水面積約 1 km^2 の耶馬溪ダムで洪水と洪水の間の11日間に、曝気水深 20 m 、単一孔からの空気量 5000 l/min で曝気を行ったところ、循環混合層の水温鉛直分布形状の約半分が再形成できることがわかった。実験結果を図-4に示すが、11日間の2倍程度の期間があれば、循環混合層の水温鉛直分布形状の全体が再形成できたものと考えられる。

ここで『循環混合層の水温鉛直分布形状の形成』を、『洪水等により水温鉛直分布が低温で均一になった後に、1ヶ月間で循環混合層を再形成できるような能力』と仮定すると、湛水面積 1 km^2 の場合、洪水後に1ヶ月間で厚さ 15 m の或いは 20 m の循環混合層を再形成するのに必要なコンプレッサーは空気量 3700 l/min つまり 22 kW 1 基である。

$$5000 \text{ l/min} \times \frac{11 \text{ day} \times 2}{30 \text{ day}} = 3700 \text{ l/min}$$

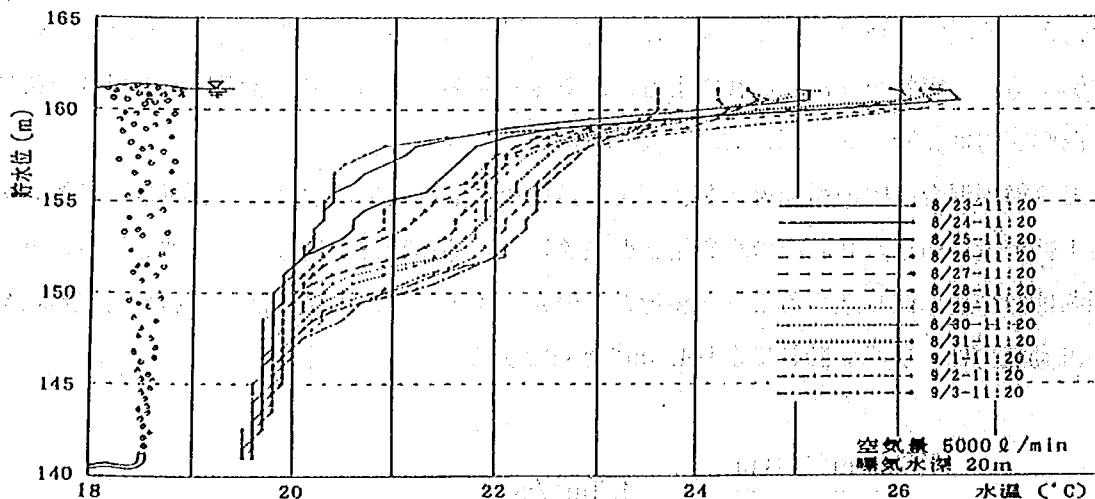


図-4 洪水後における水温鉛直分布の経時変化

3.3 第2循環流の範囲に関する現地調査

ダム湖にて水温成層がある場合に、鉛直方向の流れも含む循環があると鉛直方向に流動している部分は水温成層が乱れる。この特性を用いて散気方式の曝気によって生じる第2循環流の範囲に関する現地調査を行った。平成5年の釜房ダムでは、散気方式の曝気を行っていたが、①大型曝気装置（噴出口φ10mm×8穴）と小型曝気装置（噴出口φ10mm×4穴）との間の100m区間、②大型曝気装置から湖岸に向かって100m区間の2測線で水温鉛直分布を測定した。測線位置図を図-5に、測定結果を図-6に示す。測定時の曝気水深は13.5mである。これによると、各曝気装置から20m程度離れると第2循環流となっているが、それ以遠の水温鉛直分布は概ね同一になっている。よって両区間の範囲内では、第2循環流が終了していないことがわかった。なお2基の曝気装置の間を測定区間にしたのは、曝気装置間は渦が発生しやすい条件にあると想定したからである。以上の測定結果から第2循環流はダム湖岸まで届いていると考えられる。

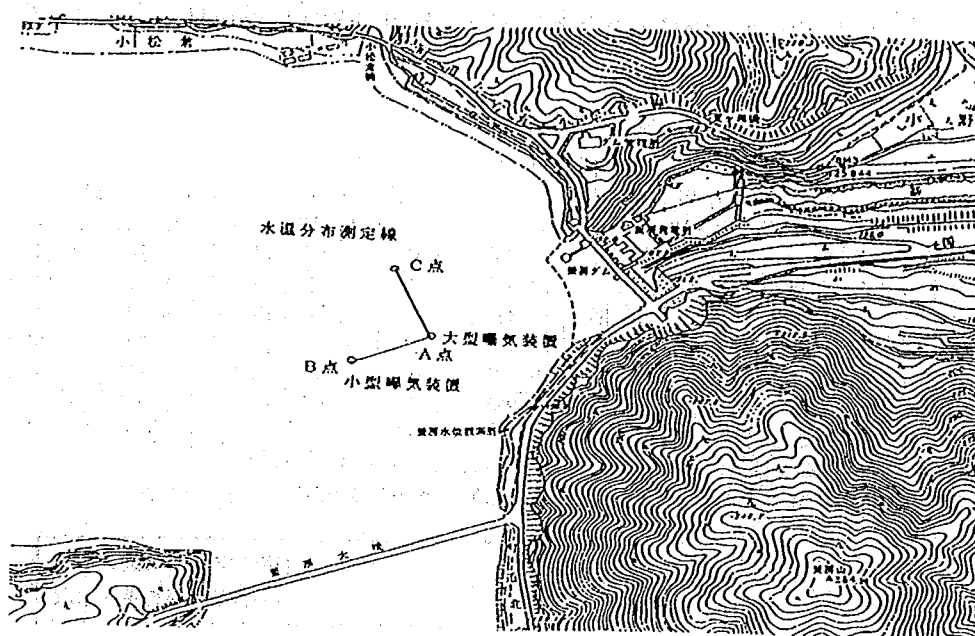


図-5 水温鉛直分布測線位置図

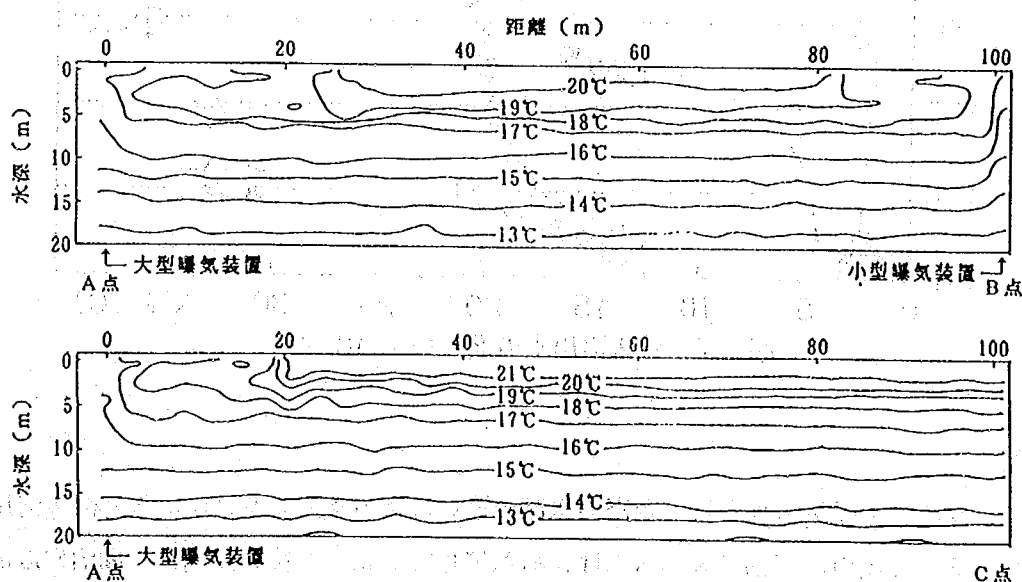


図-6 第2循環流の水温鉛直分布の調査結果

3.4 流入河川水温の日周期調査

流動制御システムは栄養塩類に富む流入河川水を循環混合層の下層部及び水温躍層へ密度流として導く。流入河川水温は晴天の日は夕方と朝方が大きく変動するが、その変動が流入河川水の流入にどのように影響するかについて検討する。流動制御システムを稼働させていない状態、つまり自然状態では図-2に示すとおり、流入河川水は水温が数℃変化するが、概ね一次躍層に導かれる。しかし、流動制御システムを稼働させると、1℃の水温の違いがあれば進入水深が数メートルも異なる場合が多い。Aダムにて現地調査により夏季から秋季にかけての流入河川水温を測定した。結果を表-1に示す。

これによると晴天の12:00~18:00の水温は、日平均水温に比べて約2℃高いことがわかる。図-7にシミュレーション結果をもとに作成した流入河川水の進入水深の模式図を示すが、日平均水温だと、水深22mに進入するが、6時間毎に時間を分けると、進入水深の分布が10m以上にも及ぶことがわかる。よって流動制御システムのもとでの水温・水質シミュレーションの計算の時間間隔は、1日ではなくて、1~6時間に設定する必要がある。

表-1 流入河川水温の日周期調査結果

月	流入河川時間別平均水温					曇天・雨天日の時間別平均水温				
	0~6	6~12	12~18	18~24	平均	0~6	6~12	12~18	18~24	平均
7月	13.85°	14.95°	17.00°	15.65°	15.36°	13.91°	14.23°	14.67°	14.14°	14.24°
8月	15.95°	17.19°	19.93°	17.59°	17.66°	15.10°	15.23°	15.99°	15.41°	15.44°
9月	14.13°	14.91°	17.16°	15.69°	15.47°	14.52°	15.89°	15.83°	14.92°	15.04°
10月	10.55°	11.63°	14.12°	12.24°	12.13°	11.68°	12.25°	13.43°	11.78°	12.28°
11月	9.03°	9.97°	12.59°	10.38°	10.49°	9.16°	9.70°	10.93°	9.19°	9.74°
平均	12.72°	13.75°	16.19°	14.35°	14.25°	13.58°	13.94°	14.79°	13.84°	14.04°
日平均との差	-1.5°	-0.5°	+1.9°	+0.1°		-0.5°	-0.1°	+0.8°	-0.2°	

注1) 平均は、7月~11月における流域面積比により3河川の水温を加重平均した。

注2) 6:00と18:00の水温が2℃以上の日を晴天日、2℃未満の日を曇天・雨天日とした。

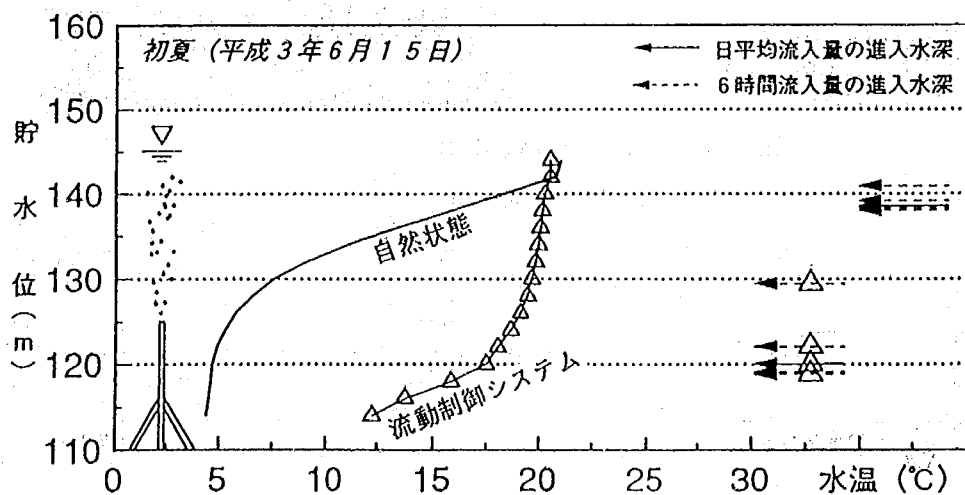


図-7 流入河川水の進入水深の模式図

4. 今後の問題

5年度までに、湖沼にて曝気循環を行った際の水深の違いによる水温差及び湖沼水と流入河川水との間の水温差により生じる密度流の水理的メカニズムは、概ね把握できた。今後の課題は、湖沼密度流による水質モデルの開発を行う必要がある。

貯水池の水質保全に関する調査

流動制御による湖沼の富栄養化対策技術に関する調査

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

主任研究員 久納 誠

久保徳彦

真田誠至

1. まえがき

湖沼における富栄養化現象は、現在、湖沼の水質現象の中でも極めて重要であり、その対策技術の確立が急務となっている。従来より湖沼の流動を制御することによる富栄養化対策の可能性及び効果の評価手法について検討を行ってきた。

4年度までに、曝気によって流動を生じさせ湖沼全体の水質影響調査を実施した。5年度は、流動制御システムの各設備構造の検討を行った。

2. 調査目的

本調査は、実際に湖沼内において富栄養化対策を講じ、効果を得ることを目的とし、曝気循環及び選択放流等による湖沼の流動制御システムを実施した場合の湖沼の水質変化を現地調査し、その効果を明かにするとともに、流動制御システムの設備構造及び操作方法を検討するものである。

本調査の5年度の調査目的は、①流動制御システムの各設備の有機的操作、②循環流制御設備の設備構造、③深層DO改善設備の原理、④入江循環設備の原理、を検討することである。

3. 調査方法及び結果

3.1 流動制御システムにおける各設備の構成

流動制御システムは、図-1に示すように循環流制御設備、選択流入設備、選択放流設備を基幹設備とし、深層DO改善設備、入江循環設備を局所設備とする。本システムは各設備を必要に応じて組合せて設置し、水質自動測定装置と流入量測定装置とからなる情報設備を接続して有機的にかつ遠隔無人により操作される必要がある。図-2に基幹設備と情報設備との組み合わせ例を示す。

例えば、図-2に示すように小洪水によりP04-Pを多く含む水塊が不意に侵入して来た場合は、曝気によりP04-P水塊を巻き上げる可能性がある。よってこの場合も流入部に設置した水質自動測定装置によりP04-P水塊の侵入水深を感知し、即座に無人遠隔操作により曝気水深を変更する。

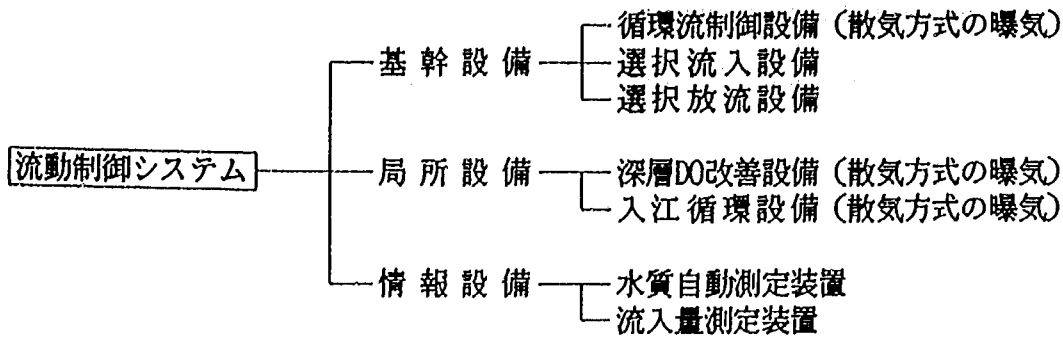


図-1 流動制御システム全体構成図

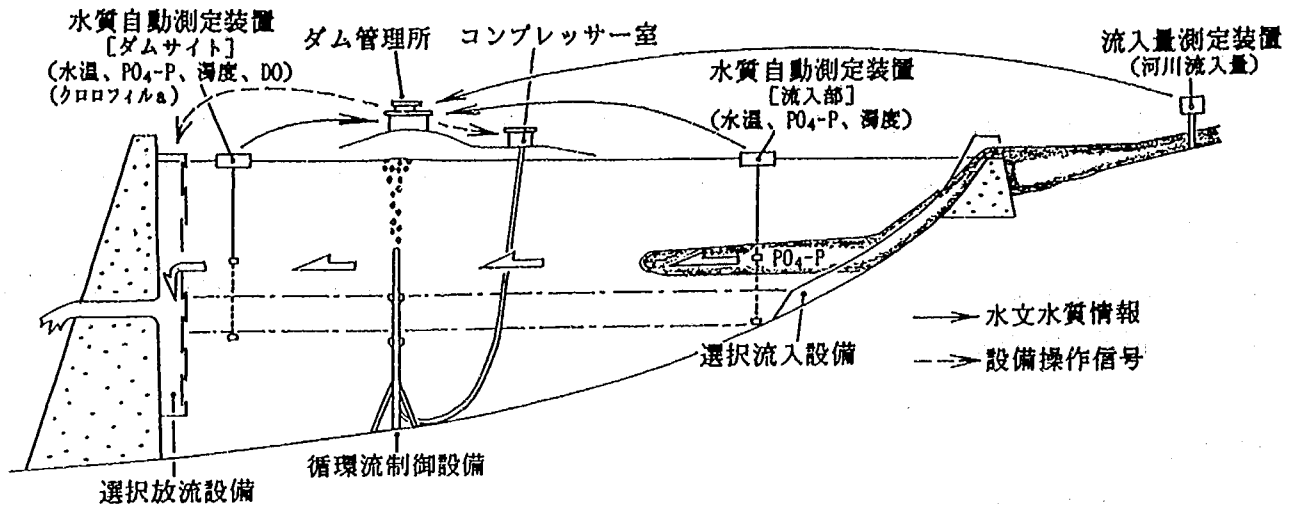


図-2 基幹設備と情報設備との組み合わせ例

3.2 循環流制御設備

散気方式の曝気を行うことによってダム湖の水温鉛直分布を制御する際に重要なのは、洪水等により湖水の水温が全層的に低下した直後に急激に発生する一次躍層の制御である。中規模を越える洪水が来るとそれまで形成された循環混合層がすべて押し流され、ダム湖の水温は表層から深層まで均一な低い水温分布となる。中規模を越える洪水は同時に高い濁質をもたらすために曝気が暫く再開できないうえに、台風一過等の晴天が続けば表層水温は上昇し、数日のうちに $5\sim 10^{\circ}C$ 差の一次躍層が形成される。洪水直後に発生する一次躍層の模式図を図-3に示す。この時流入河川水は一次躍層を滑るように侵入して来る。よって一次躍層をそのまま放置しておけば、藍藻類が大増殖できる環境となる。図-3に示すような水温鉛直分布は、日照が少なく雨量が多い梅雨が一気に明けた時期にもしばしば見られる。

このような水温鉛直分布の際に発生した一次躍層を早期に解消するには、次のような方法が必要である。

(1) 洪水によりもたらされた濁質は日に日に沈降してゆくが、ダムサイトに設けた水質自動測定装置を用いて濁質を巻き上げない曝気可能水深を判断し、濁質の沈降に合わせて無人遠隔操作により水深10m、15m、20m、25mと深めてゆき第2循環流の流動能力を高める。現地実験によって得られた曝気水深と第2循環流の流動能力の関係を図-4に示すが、概ね比例の関係にある。

(2) 洪水直後の一次躍層を解消する場合、現地実験によれば散気方式の曝気は多数孔より単一孔の方が流動能力が高いと考えられる。

(3) 常時稼働させておく常用の曝気装置の基数と概ね同数の予備装置を備えておく。一次躍層が生じた時には予備装置を稼働させる。

(4) 第1循環流が設備の一部であるフロート等に極力阻害されぬように努め、水面にフロートを設けないか、やむを得ずフロートを設ける場合でも極力流動エネルギーを損耗しないような流線型に近い形状が望ましい。

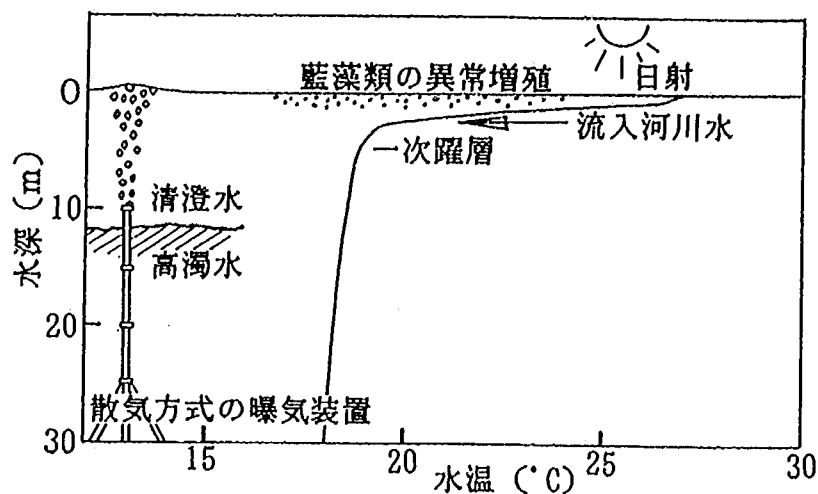


図-3 洪水直後等に生じる一次躍層の模式図

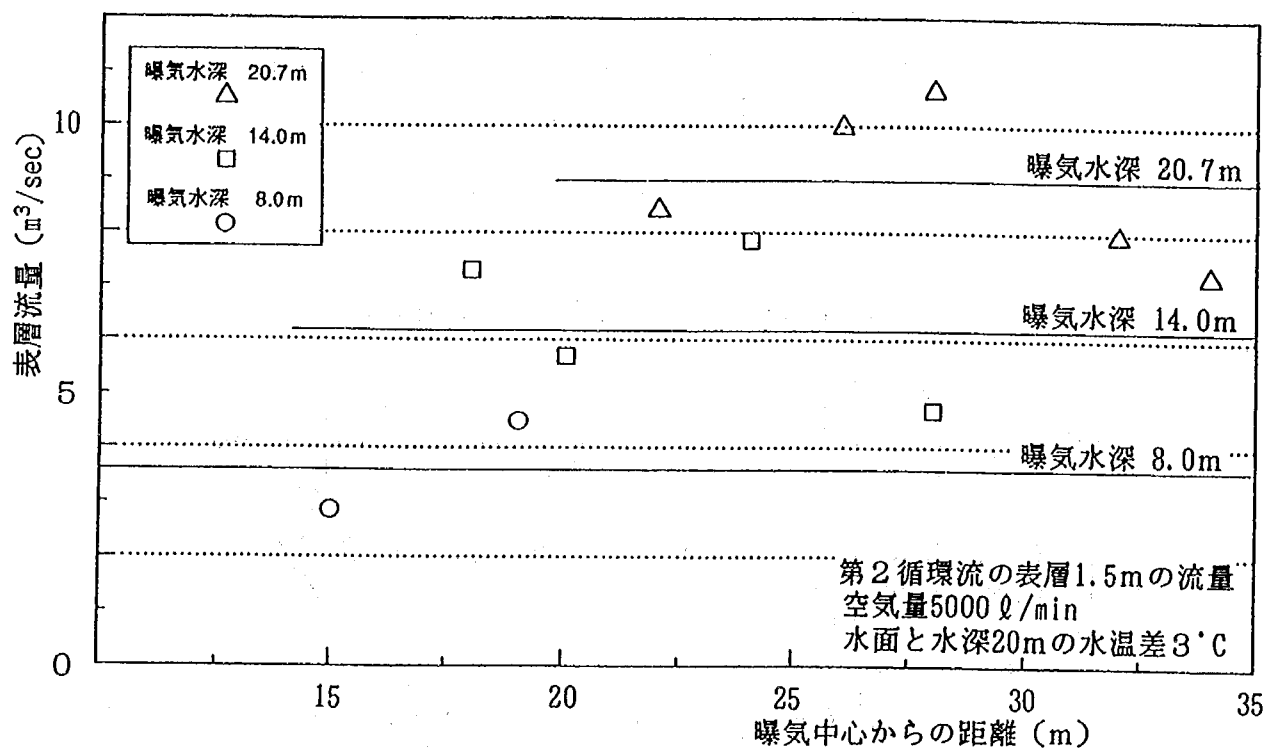


図-4 第2循環流の表層流の流動能力と曝気水深の関係

以上のように一次躍層を解消するのに満足するような機能を持つ循環流制御設備は、曝気水深が5 mおきに切り換え可能な多段式の設備が有効であると考えられ、またこの設置は水質自動測定装置や流入量測定装置と連動させて無人遠隔操作とすることが可能である。

図-5 及び図-6 に示すように、水深10m、15m、20m、25mというように多段状になった散気孔と各々の散気孔に接続した数本の耐圧ホースを有する装置であれば、ダム管理所での容易で確実な遠隔操作が可能となる。この多段式の曝気装置を水質自動測定装置や流入量測定装置に連動させると、洪水時に侵入して来た高負荷の栄養塩類や高濁水を曝気によって循環混合層全体に攪拌してしまわないように、ある河

川流入量或いはある $P0_4$ -P濃度になれば曝気装置を自動的に停止する。洪水後になってダムサイトの水質自動測定装置によりある曝気標高以下が許容される $P0_4$ -P濃度または濁度以下であると判定すれば、その標高より曝気を自動的に再開する。

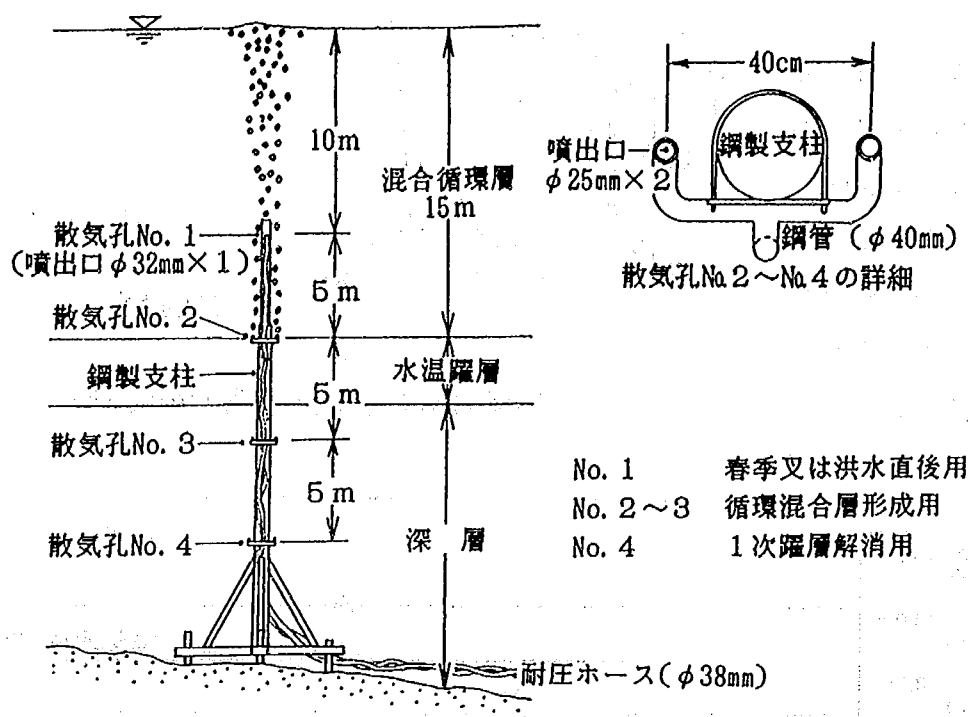


図-5 循環流制御設備（湖底設置型）の設備例

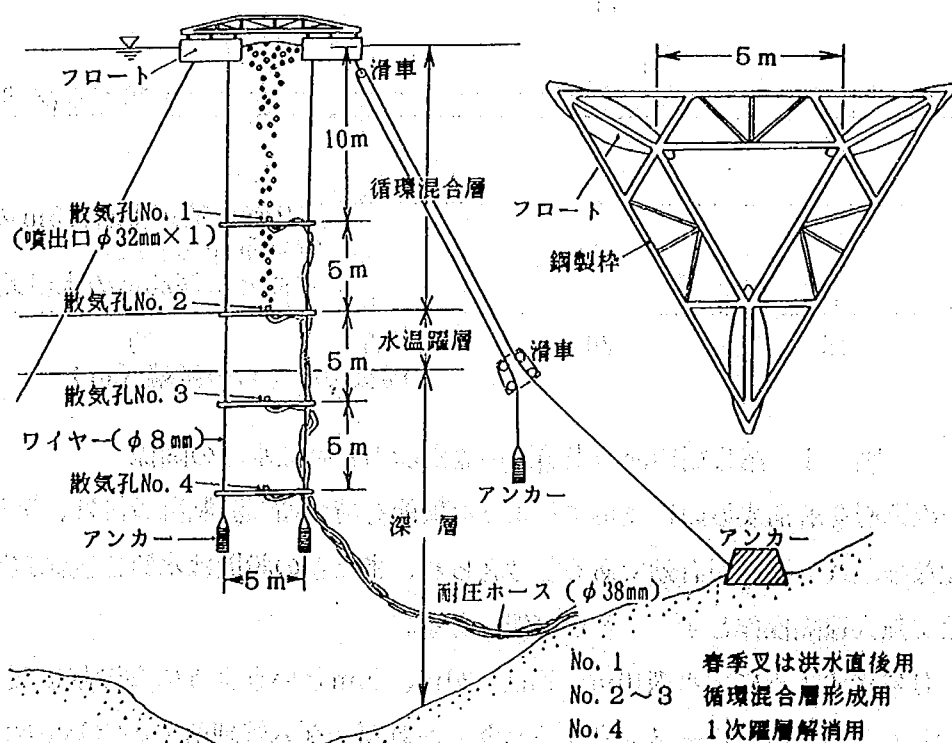


図-6 循環流制御設備（水面設置型）の設備例

3.3 深層DO改善設備の原理

流動制御システムの基幹設備を稼働させた場合、循環流制御設備の曝気水深より深い深層に対しては、流動がほとんど生じないため深層の溶存酸素濃度が低下する恐れがある。ダム湖深層における溶存酸素濃度が低下すると、底泥から栄養塩類や H_2S 、Fe、Mnが溶出し、 PO_4-P を表層に供給したり、洪水後の深層放流の際に異臭を放ったり、上水の異臭や着色の障害が生じたりする。深層DO改善設備は、深層内での曝気により深層水に酸素を供給することにより、底泥からの栄養塩類や H_2S 、Fe、Mnの溶出を抑制する設備である。

深層DO改善設備の原理を説明する。まず湖底に設けた散気方式の曝気装置から多量の気泡を深層水中に噴出させることにより、深層水に対して溶存酸素を供給する。噴出した気泡は上昇してゆくが、曝気装置より4 m程上位に設置された蓋状構造物により気泡が集められ、蓋上部の排気ホースを通してダム湖水面付近に放出される。このとき蓋状構造物内に形成された水面では、上昇流が水面に到達した時点で湖水と空気の界面は激しく変動するので、深層水はこの界面において更に曝気される。

一方、図-7に示すように気泡を連行して生じた上昇流は、蓋状構造物内の水面で気泡を失うことにより上向きの流れから水平方向の流れに変わる。蓋状構造物より浅い水深では水温が高く密度が小さいため、蓋状構造物より浅い水層まで上昇できない。このために蓋状構造物より深い水層内で循環流が生じ、密度流としての第2循環流が発生して深層の遠方水域まで溶存酸素を回復させた水塊を移送させることができる。

このように本設備の特色は、気泡の水中噴出による曝気効果だけでなく、気泡を集める蓋状構造物の中に形成される水面混合による曝気効果が合わさり、さらに蓋状構造物によって深層の範囲内で密度流を生じさせて溶存酸素を回復させた深層水を水平方向へ300m程度（ただし現段階では目標値）遠方に移送させるところにある。

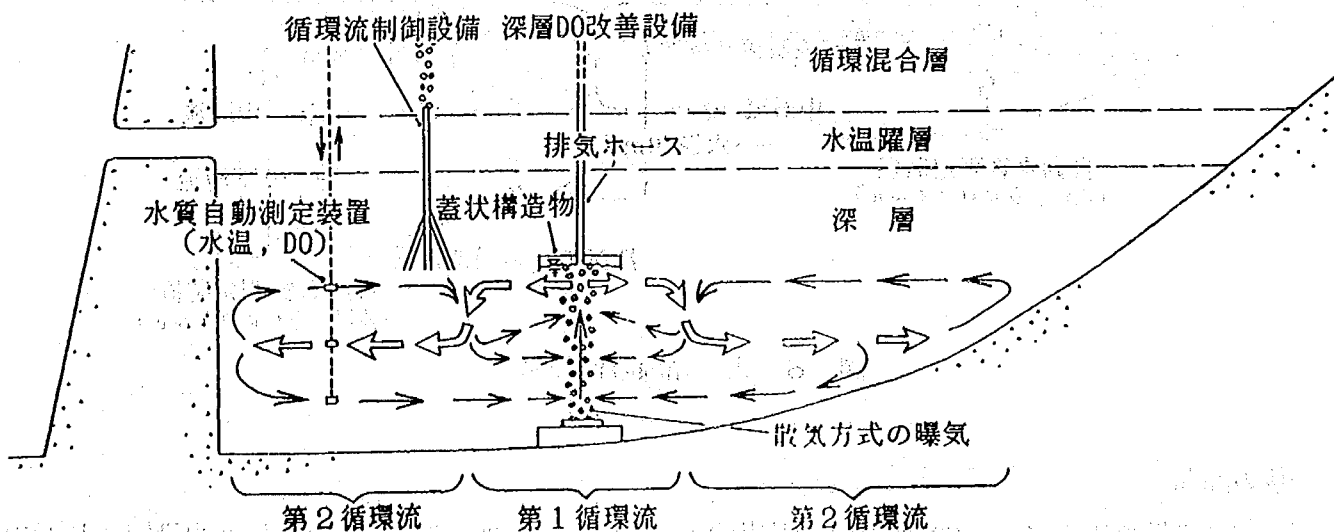


図-7 深層DO改善設備の原理

3.4 入江循環設備の原理

入江水域はダム湖の中でも親水活動の拠点となりやすく、水面の景観が問題とされることが多い。しかし、入江水域（ここでは水深10m以下を対象とする）は、流動制御システムの基幹設備を稼働させても主水域に比べれば滞留しやすい。さらに、入江水域に流入する河川からの栄養塩類の供給が多い場合は、入江水域はダム湖の中で最も浮遊藻類の異常増殖を引き起こしやすい水域となる可能性が高い。浮遊藻類が異常増殖した入江水塊を、曝気によって発生する密度流を利用して効率的に流動させて主水域の水塊と入れ替えることにより、入江水域における浮遊藻類の異常増殖を抑制する。

散気方式の単一孔の曝気を行うと、曝気装置のまわりに図-8に示すような流動が生じる。第2循環流は密度流による流動であり、この第2循環流を用いて入江水域の水を主水域の水と入れ替えることが可能である。図-8に示すように、入江の入口で散気方式の単一孔の曝気を行い、さらに入江の入口に水面から水深2mまでフェンスを設ける。すると、入江水域の表層流と主水域の下層流が引き寄せられて混合し、混合した水が入江水域の中層流及び主水域の中層流として送り込まれることにより、結果的に入江水域の水塊と主水域の水塊とが入れ替わる。

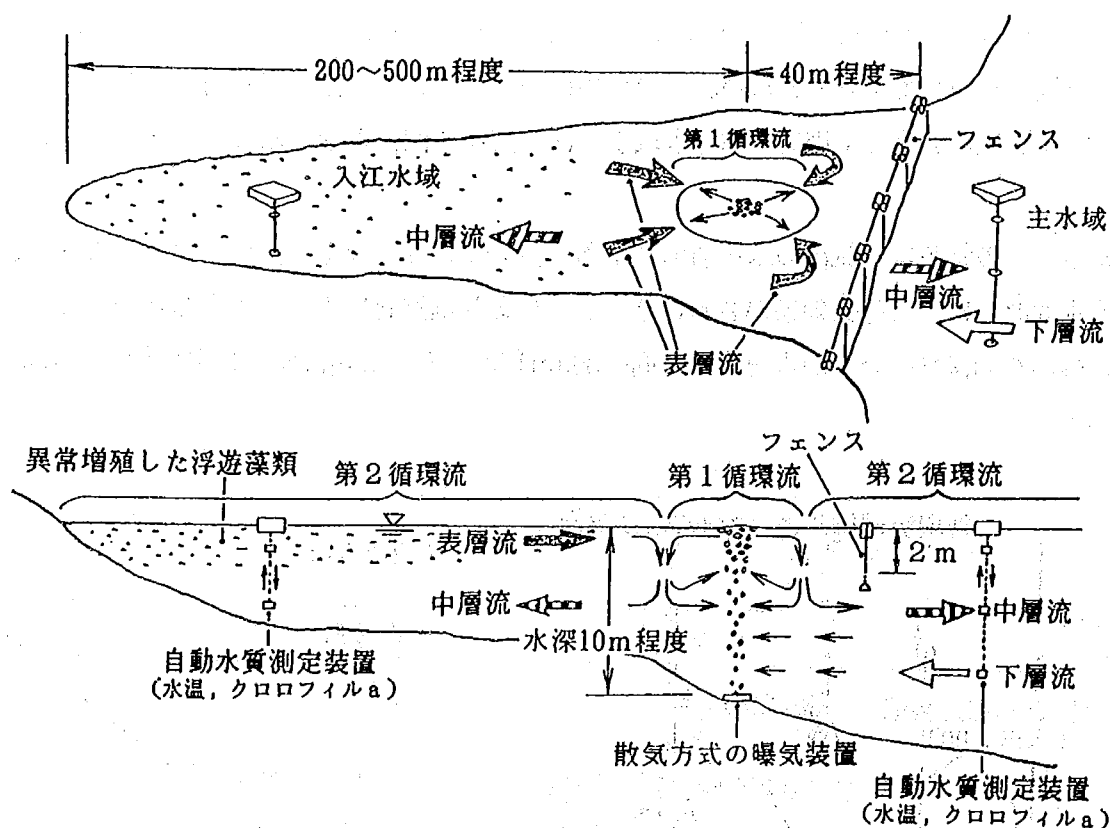


図-8 入江循環設備の原理

4. 今後の問題

循環流制御設備の運用方針及び設備構造の基礎的条件が定まった為、これに基づく恒久的設備により現地測定を行い効果を確認する必要がある。深層D0改善設備及び入江循環設備についての原理を考案したが現地実験により効果を測定し検討する必要がある。

貯水池の水質保全に関する調査

生態系を活用した湖沼の水質制御手法に関する調査

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

主任研究員 久納 誠

久保徳彦

真田誠至

1. はじめに

湖沼において、浮遊藻類が異常増殖する直接の要因は、無機態のリン ($\text{P0}_4\text{-P}$) 等の栄養塩類がダム湖に多量に流入することである。産業排水や下水処理水等の高負荷少量水については、 $\text{P0}_4\text{-P}$ 除去技術が別途研究されている。一方、耕地等の面源負荷や高度処理が行われていない下水処理水や畜産排水処理水が流れ込む自然河川の低負荷多量水を対象とした $\text{P0}_4\text{-P}$ 除去技術は、近年まで開発されておらず、効率的な $\text{P0}_4\text{-P}$ 除去技術の確立が急がれている。

5年度は流入河川水の $\text{P0}_4\text{-P}$ 等の無機態の栄養塩類を除去する『糸状藻類活用システム』についての原理を確立した。

2. 調査目的

本調査は、糸状藻類活用システムに適用可能な糸状藻類の種類、糸状藻類が自然界で生息している環境を把握し、どのような設備構造の浄化設備にするのが適切なのかという、本システムの原理を確立するのが目的である。

3. 調査方法

河川、湖沼、水田、及び浄水場等を現地調査し、また河川水や湖沼水を用いて太陽光の下で行う現地実験により、①糸状藻類の流況環境及び生息季節、②自然界と浄化設備の対応、③浄化設備の設備構造、について調査及び考案した。

4. 調査結果

4.1 糸状藻類の流況環境及び生息季節

本システムに用いられる糸状藻類を表-1に示す。なお糸状藻類は、流況環境により、溪流、早瀬や水路のように急流や緩流に適する種類と、浅い湖沼、水田や浄水場のよう微流に適する種類とがある。また生息に適する季節は、糸状藻類の種類により異なる。

表-1 本システムに用いられる糸状藻類

適性	和名 (学術名)	綱別	流況環境				生息季節			
			急流の中で 基質に付着	緩流の中で 基質に付着	微流の中で 底面に膜状	微流の中で 浮遊か付着	春季	夏季	秋季	冬季
急流 ↑ 緩流 ↓ 微流	カワシオグサ (<i>Cladophora glomerata</i>)	緑藻	○				○	○	○	△
	ヒビミドロ (<i>Ulothrix zonata</i>)	緑藻	○	○			○			(○)
	ディアルマ (<i>Diatoma vulgare</i>)	珪藻	○	○			○	△		○
	メロシラ (<i>Melosira varians</i>)	珪藻	○	○	○		○	△	○	○
	サヤミドロ (<i>Oedogonium</i> sp.)	緑藻	○	○		○	○	○	△	△
	アオミドロ (<i>Spirogyra</i> sp.)	緑藻	○	○		○	○	○	○	○
	オビケイソウ (<i>Fragilaria construens</i>)	珪藻		○	○		○	△	○	△
	アミミドロ (<i>Hydrodictyon reticulatum</i>)	緑藻		○		○	○	○	○	△
	ヒザオリ (<i>Mougeotia</i> sp.)	緑藻				○	○	((○))	○	△
微流	ウキシオグサ (<i>Cladophora crispata</i>)	緑藻				○		○	○	

注1) 本表は久納が1994年5月までに室外で確認したものであり、今後の変更はありうる。

注2) () 書きは雑誌「水」、(())書きは「川と湖の博物館」の記述による。

4.2 自然界と浄化設備との対応

糸状藻類は図-1に示すように河川、湖沼、水田、及び浄水場において、様々な流況環境のもとで生息している。糸状藻類はいずれの場合も無機態の栄養塩類を吸収して生息している。『糸状藻類活用システム』は、河川や浅い湖沼等の自然界で生息している糸状藻類が増殖できる環境を人為的にダム湖近傍に設けることにより、流入河川水及びダム湖表層水から P_{O_4} -Pを除去し、藍藻類や鞭毛藻類の異常増殖を抑制するシステムである。具体的に本システムは、自然界の生息環境を浄化設備の中に忠実に再現させ、次にその設備における流速、水深、基質、糸状藻類の回収、及び設備の洗浄等の構造的な工夫を行って P_{O_4} -Pを吸収除去する効率を高め、さらに回収した糸状藻類の有効利用を計るものである。そのような手順で考案された設備概要を図-1及び表-2に示す。

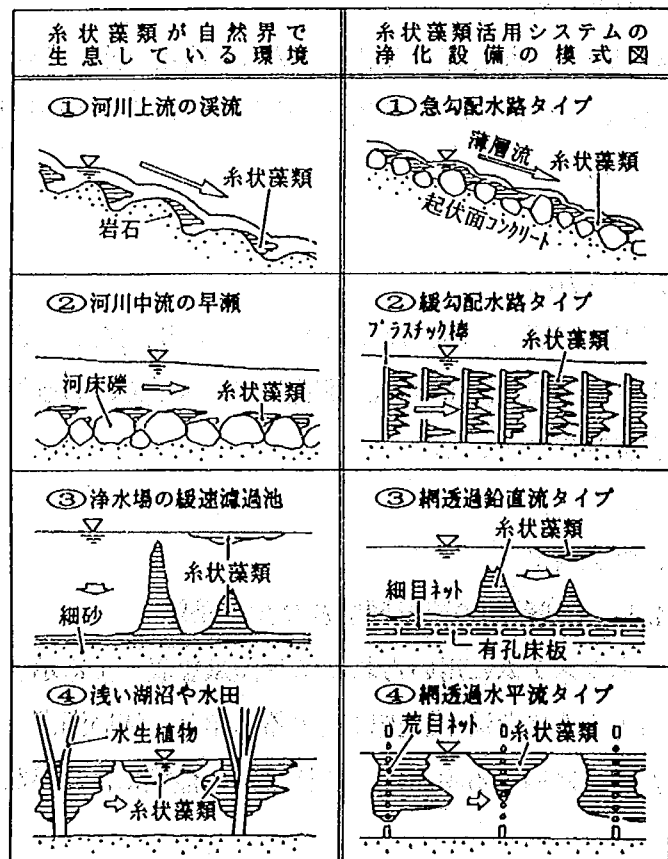


図-1 糸状藻類の自然界での生息環境と浄化設備

表-2 自然界と各浄化設備の対応

自然界		対応する浄化設備	流 況	適する糸状藻類
①	河川上流の渓流 (岩石に付着している)	急勾配水路タイプ (起伏面コンクリートに付着させる)	薄層流 30~50cm/sec 水深 1cm以内 水路長 20m (標準) 水路勾配 15~35%	カワカサ、モシラ、デイトマ、 サミト、アミト、ヒミト
②	河川中流の早瀬 (河床礫に付着している)	緩勾配水路タイプ (プラスチック棒に付着させる)	水平流 10cm/sec 水深 10cm 水路長 200m (標準) 水路勾配 0.5~1%	モシラ、サミト、アミト、 北ケイソウ、デイトマ、ヒミト
③	浄水場の緩速濾過池 (砂面に上載している)	網透過鉛直流タイプ (細目ネットに上載させる)	鉛直流 18cm/hour 水深 30~40cm 水面勾配 なし	モシラ、北ケイソウ、アミト、 アミト
④	浅い湖沼や水田 (水生植物に付着或いは 浮遊している)	網透過水平流タイプ (荒目ネットに付着或いは 浮遊させる)	水平流 10cm/min 水深 30cm 流下長 10m (標準) 水面勾配 なし	サミト、アミト、アミト、 ヒミト、カワカサ

4.3 浄化設備の設備構造

浄化設備の構造上の種類は図-1に示した①~④の4タイプが考えられる。各設備タイプを現地実験した結果をもとに各設備の特徴をまとめると表-3に示すようになる。糸状藻類活用システムにおいて、どのタイプの設備を採用するかは、原水の PO_4 -P濃度、 PO_4 -P除去能力、設備の場所、維持管理の有無、有効利用の有無によって異なる。

表-3 糸状藻類活用システムの各設備タイプの特徴

設備タイプ	原水の PO_4 -P濃度	$1m^3/sec$ を2ha で処理する際の 効果目標	設 置 場 所	維 持 管 理		糸状藻類の有効利用
				糸状藻類の回収	設備の洗浄	
急勾配水路 タイプ	15~50 $\mu g/l$	PO_4 -Pについて 原水25 $\mu g/l$ →処理水10 $\mu g/l$	斜地	自然集積した藻類 の除去が、週1回 ~月1回必要	不 要	不純物が多いが、魚 類養殖施設への自動 供給が可能
緩勾配水路 タイプ	20~150 $\mu g/l$	PO_4 -Pについて 原水30 $\mu g/l$ →処理水10 $\mu g/l$	平地	機械的な回収作業 が、週1回必要	不 要	糸状藻類は新鮮であ り、加工等の有効利 用に適する
網透過鉛直流 タイプ	25~400 $\mu g/l$	PO_4 -Pについて 原水濃度の20~50 %を低下	平地	自然集積した藻類 の除去が、週1回 必要	水槽底面の洗浄が 月1回必要	不純物が多いが、魚 類養殖施設への自動 供給が可能
網透過水平流 タイプ	10~400 $\mu g/l$	PO_4 -Pについて 原水15 $\mu g/l$ →処理水10 $\mu g/l$	湖上 又は 平地	機械的な回収作業 が、週1回必要	水槽底面の洗浄が 回収作業と同時に 必要	糸状藻類は新鮮であ り、加工等の有効利 用に適する

4.3.1 急勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類を基質から回収除去する作業を省力化するために、水路の勾配を大きくして水深を1cm以下の薄層流としたタイプである。急勾配水路タイプの設備例を図-2に示す。水路勾配は15~35%程度となり、さらに勾配を急にしてダム湖水位変動域への設置も考えられる。

本タイプの基質はコンクリートに粒径4cm程度の碎石を埋め込んだ起伏面コンクリートとする。急流に適した糸状藻類は仮根により碎石やコンクリートにしっかりと付着するが、この流速のもとでは、成長した糸状藻類は水流の抵抗に耐えられなくなって途中から切れて流下し、末端水路を経て沈澱槽に自然に集積する。またこの流速と水路勾配のもとでは、水路底に糸状藻類の死骸が堆積しにくく、たとえ堆積しても噴出する水流により容易に洗浄でき、維持管理もし易い。

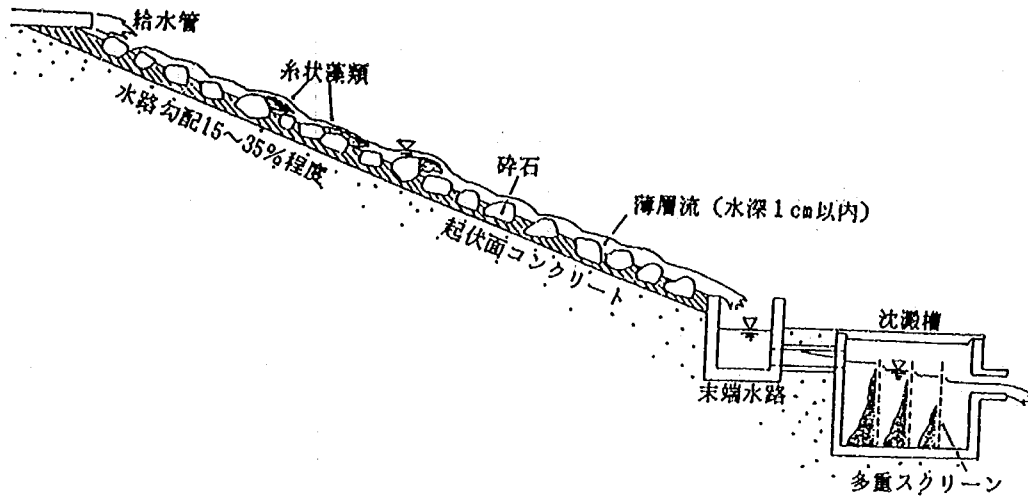


図-2 急勾配水路タイプの設備例

4.3.2 緩勾配水路タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類が増殖するのに最も効率的な流速、水深、及び基質を与え、糸状藻類を基質より定期的に回収除去して安定増殖させようとするタイプである。緩勾配水路タイプの設備例を図-3に示す。

流れのもとでは糸状藻類の細胞のまわりの水が次々と入れ替わるため、糸状藻類は水中に溶存している PO_4-P を次々と吸収でき、増殖速度は一躍高くなる。最も効率的な流速は10cm/sec、水深は10cm程度にあると想定している。本タイプの基質は剣山のように鉛直方向に立てた $\phi 3 \sim 5$ mmの多数のプラスチック棒から成る。通水を開始すると、河川水中に含まれる糸状藻類がプラスチック棒に付着し、やがて増殖する。回収方法は、まず排水弁及び排水ゲートを開けると水位が下がり、剣山基質はフロートの浮力を失って降下するが、同時に剣山基質に付着していた糸状藻類は有孔床板の穴にかき取られるように有孔床板上にとり残される。次に走行式のモップ或いは水流で糸状藻類を末端水路に導き網籠に集めることにより回収除去する。糸状藻類の回収作業は定期的に例えば1週間に1度の頻度で行う。糸状藻類を安定増殖させるには、水路の所々に藻体供給ヤードを設けると良い。

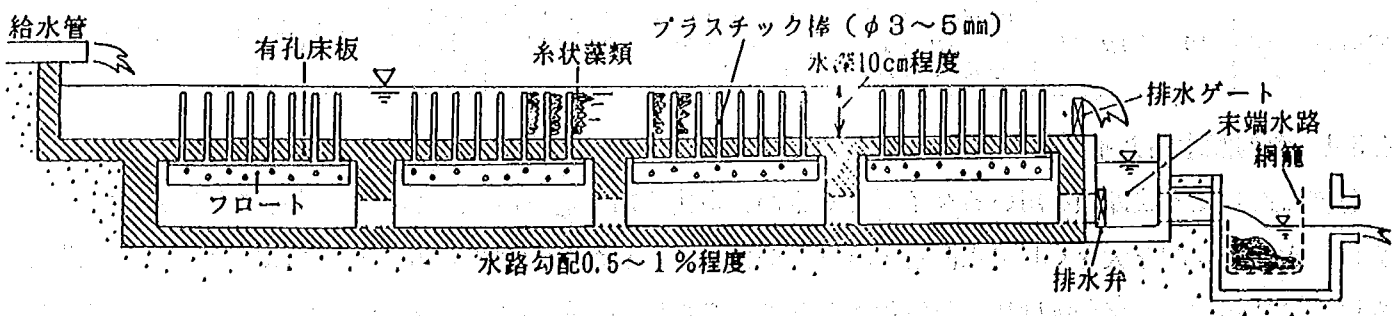


図-3 緩勾配水路タイプの設備例

4.3.3 網透過鉛直流タイプ

微流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、有孔床板の上に細目ネットを載せ、その上に水層部を持った構造である。網透過鉛直流タイプの設備例を図-4に示す。水層部は水深が30~40cmと浅く、鉛直流速は18cm/hourとなっており、微流に適した糸状藻類が細目ネット上に生息しやすい構造となっている。原水の適切な PO_4-P 濃度は $25\mu g/l$ 以上であり、下水処理水等の高濃度の PO_4-P 除去にも適する。

糸状藻類が付着或いは上載する基質となる細目ネットは、2~3mmの細かい目であり、ポリエチレンから成っている。通水を開始すると、河川水中に含まれている糸状藻類が底面の細目ネット一面に糸状藻類が付着或いは浮漂して、やがて増殖する。糸状藻類は成長すると光合成による気泡を付着させ、直径5~50cmの繊維状の塊となって浮上して来るが、越流スロープの付いた回収器により容易に回収できる。糸状藻類が生息し続けると、やがて細目ネットの上に糸状藻類の死骸等による有機物が堆積して PO_4-P を溶出し易くなる。よって定期的に例えば1ヶ月に1度の頻度で、噴出する水流により細目ネットの洗浄を行う。

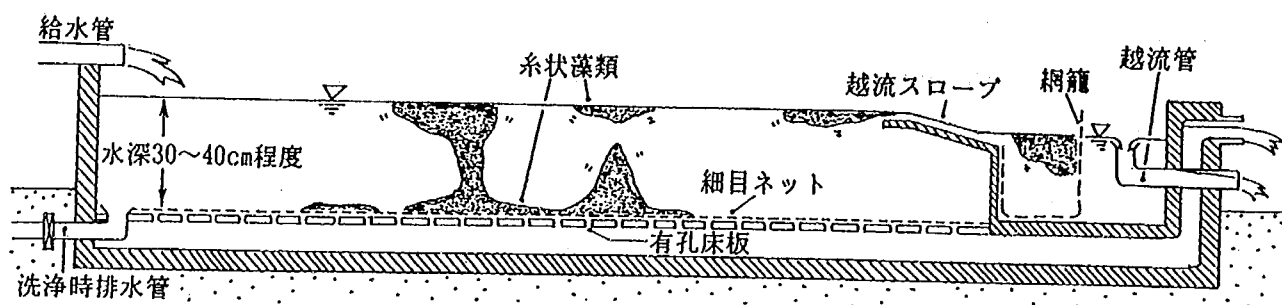


図-4 網透過鉛直流タイプの設備例

4.3.4 網透過水平流タイプ

微流に適した糸状藻類、特に糸状緑藻を用いるタイプであるが、間仕切が荒目ネットでできており、湖面に浮上させる構造となっている。網透過水平流タイプの設備例を図-5に示す。水層部は水深30cm、水平流速10cm/minとなっており、微流に適した糸状緑藻が間仕切の荒目ネットに付着しやすい構造となっている。本タイプはダム湖表層水を対象とする。

本タイプの基質は50cm程度の間隔で設置した間仕切の荒目ネットであり、15~30mmの荒い目となっておりポリエチレンから成っている。通水を開始すると、糸状緑藻が間仕切の荒目ネットにからまるように付着して増殖する。また本タイプは、糸状緑藻が優占種となりやすい。特に4月から10月にかけて糸状緑藻の活性が高く、

増殖するのに適している。

また糸状緑藻は荒目ネットに付着して常

に水面付近に

いるため、洪水による短期

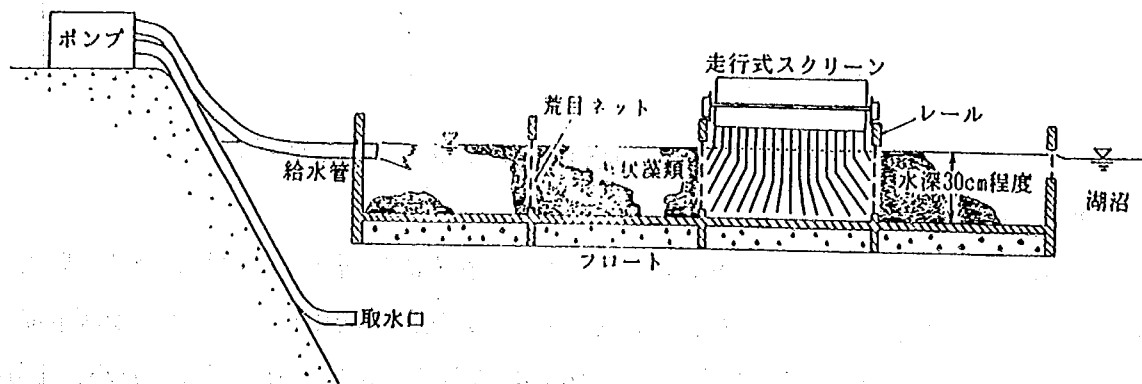


図-5 網透過水平流タイプの設備例

間の濁水に対しても光量が十分に得られ濁水にもかなり耐えられる。

糸状藻類の回収は、間仕切の荒目ネットから伸びて来た糸状藻類を、水層部の上を走行可能なスクリーンによりレーン毎にかき集めるように回収する。すべてのレーンを同時に回収せず、例えば定期的に1レーンおきに回収すると糸状藻類の活性を常に高く保つことができる。

4.3.5 糸状藻類の $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸収能力実験

糸状藻類が単位生息面積当たり単位時間当たりどれだけのリンを吸収するかを調べるために、霞ヶ浦湖岸にて糸状藻類活用システムの $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸収能力実験を行った。表-4に実験条件を示す。

原水と処理水の $\text{D} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ 濃度とリン吸収能力の経日変化を図-6に示す。これによると、原水の $\text{D} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ の30%を除去できる。

項 目	実 験 条 件
設 備 タ イ プ	網透過鉛直流タイプ
原 水 の 供 給 法	霞ヶ浦湖水を軽石濾過した水
鉛 直 流 速	30 cm/hour
リン吸収能力算定法	原水と処理水との $\text{D} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ の差
生 息 糸 状 藻 類 名	主がメロシラ、従がアオミドロ

表-4 $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸収能力実験の実験条件

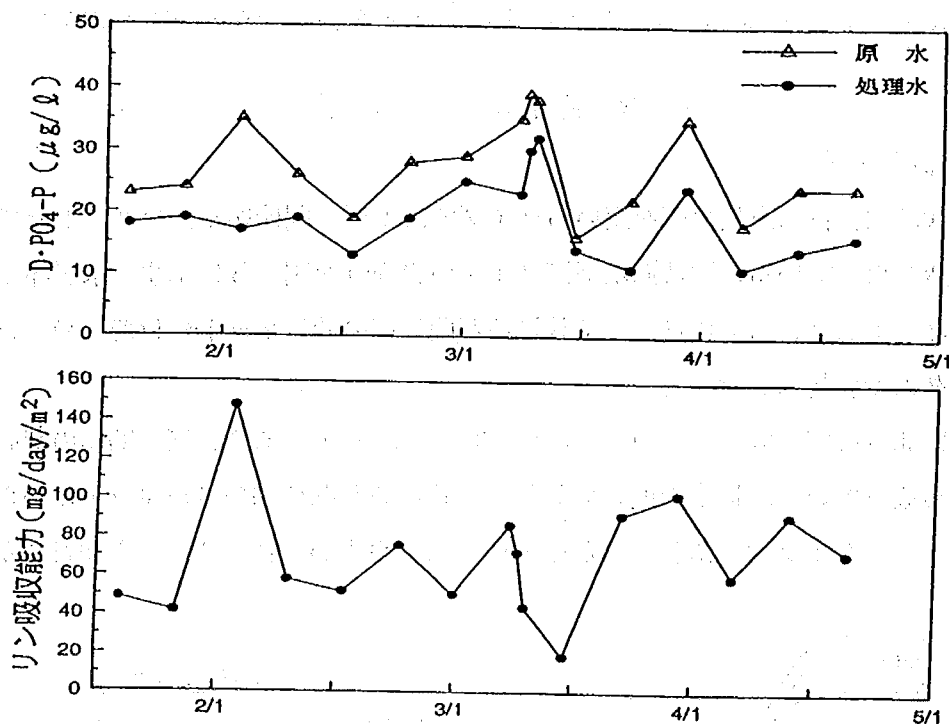


図-6 網透過鉛直流タイプの実験結果

5. 今後の問題

ダム湖の富栄養化対策として、多量の流入河川水やダム湖表層水を対象としたリン除去、特に $\text{PO}_4\text{-P}$ を除去するには、『糸状藻類活用システム』が有効である。糸状藻類活用システムのリン吸収能力は、原水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度、設備の構造、維持管理の方法、有効利用の有無等の条件により、異なるため、より効率的な設備構造に改良を行う必要がある。

夏期の小出水における水質保全対策の検討

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫
主任研究員 久納 誠
久保 徳彦
真田 誠至

1. まえがき

ダム上流域から栄養塩類が過剰に流れ込み富栄養化を来したり、降雨時にダム湖内に沈殿しにくい細かい土砂が流れ込み濁水長期化を引き起こしたりする可能性があるダム湖においては、水質保全対策のひとつに流動制御システムがある。しかし、流入河川水の温泉排水による温水化や、日照量が少ないという地域特性等の特殊な条件があるダム湖の場合は、ダム湖表層水温が十分に上昇できず、流動制御システムの機能が十分に発揮しない恐れがあり、それを補完する対策としては、ヒートポンプを活用した水温分布制御システムがある。

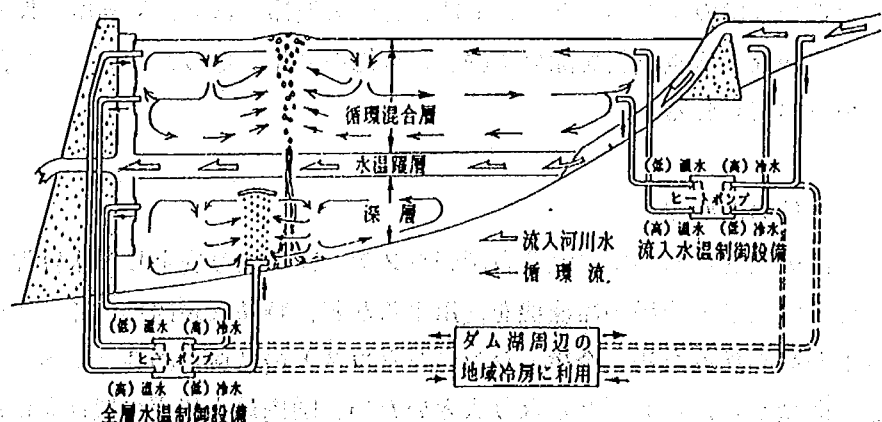
4年度は、流動制御システムの検討の一環として、流入河川水の進入水深の調査や、シミュレーションによる選択流入設備の効果検討を行った。5年度は、水温分布制御システムによる水質保全効果及び、実ダムでの設備に関する検討を行った。

2. 調査目的

流動制御システムにヒートポンプを用いて水質保全を行う水温分布制御システムは、梅雨、冷夏等の影響や、気候の地域特性により流入河川水よりダム湖内の水温の方が低くなりやすいダム湖での水質保全を行うことを目的とし、さらに本システムを稼働させることによりダム湖周辺地域の冷房を行うことができる。本調査の5年度の目的は、水温分布制御システムの水質保全効果及び設備規模を把握することを目的とする。

3. 調査方法

流動制御システムによる水質保全を行っているダム湖では、流入河川からダム湖表層へ供給される栄養塩類を、散気方式の曝気装置により循環混合層を暖めることによって水深15~20mにある水温躍層に導き、表層で増殖する浮遊藻類への栄養補給を行いにくい環境をつくる。しかし循環混合層を暖



図一 水温分布制御システムの模式図

める熱エネルギーは太陽熱及び主に流入河川水であるため、梅雨、冷夏、及び天候不順などの場合には、十分に水温を上げることができず流入河川水が表層に進入するため、表層に栄養塩類を供給することになる。そこで、ヒートポンプを用いて流入河川水や深層水から熱を取り、その熱で循環混合層を暖め水質保全の上で理想的な水温鉛直分布に制御するものである。図-1に水温分布制御システムの模式図を示す。散気方式の曝気により流動制御を行ったAダム（湛水面積3.9k㎡）において、水温分布制御システムを稼働させた場合とさせなかった場合による水温鉛直分布をシミュレーション計算を用いて検討を行った。また、実ダムに設置した場合の設備規模をBダム（湛水面積3.0k㎡）をモデルとして算定した。

4. 調査結果

4. 1 シミュレーション計算による水質保全効果の検討

ダム湖水温鉛直分布と流入河川水温のシミュレーション結果の一例を図-2に示す。この図より散気方式の曝気を行うことによって循環混合層が厚く形成される事がわかり、図の右側にある矢印は河川水の進入水深を示すが、流動制御システム、さらに水温分布制御システムを行うことによって栄養塩類を多く含んだ河川水をより深い水深に導くことが可能となり表層への栄養補給がなされにくい環境をつくり出すことが可能となる。

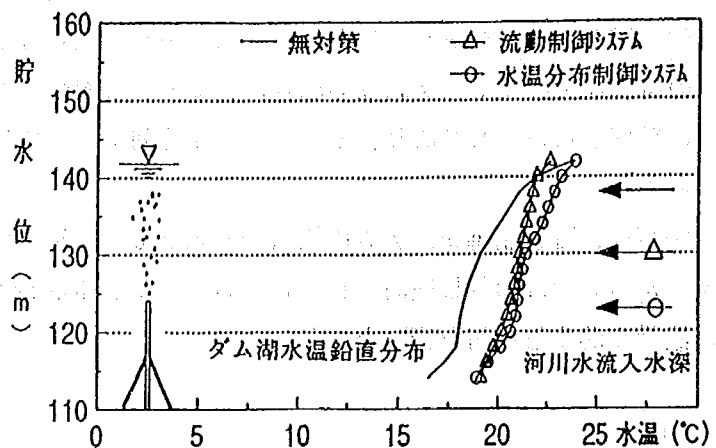


図-2 梅雨におけるシミュレーション結果

4. 2 水温分布制御システムの設備検討

水温分布制御システムをBダムで水質保全を行うと仮定して、必要な設備規模の検討を行った。流入水温制御設備、全層水温制御設備の両案で検討した。その結果、どちらの案でも熱源設備として冷凍機が国内最大規模の機種を3台使用し、その他循環ポンプ、配管等を入れると概算工事費は約70億円となり、またこの設備のランニングコストは、特殊大型冷凍機のため高度な保守・維持管理が必要なため管理用発電でまかなえる電気料を除いて約1.6億円/年となった。なおこの設備により冷房能力として東京都庁2棟分が得られる。

5. 今後の問題点

今回の検討において水温分布制御システムは、より安定した水質保全効果を得られる事がわかったが、設備が国内最大規模の冷凍機を使用するなど、特殊な設備になるため保守・維持管理がかかりランニングコストが高くなるため、今後、ランニングコストの低減が必要となる。しかし、今回モデルに選んだダム湖は湛水面積が3.0k㎡とかなり大きいので、国内最大規模の機種を使用する事になったが、これより湛水面積の小さいダム湖ではランニングコストがかなり低減できると予想され、実用化が十分に考えられる。

ダム貯水池水質保全対策の検討

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

主任研究員 久納 誠

久保徳彦

真田誠至

1. まえがき

余野川ダムにおいては、流入河川の水質が良好でないことから湛水後の富栄養化現象の発生が懸念されている。このため、本ダム湖の水質保全対策としては流動制御システムが有力である。4～5年度は、対策に用いる基礎データを得るために、近傍の湛水している実ダムにおいて流入河川水質及びダム湖の水質鉛直分布の経時変化を測定した。

2. 調査目的

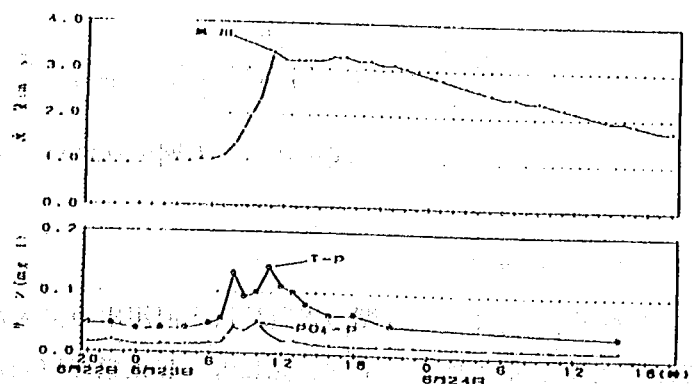
本調査では、栄養塩類を多く含む洪水時の流入河川水が、ダム湖のどの水深に入り込み、それがダム湖の水質にどのような影響を及ぼすのかを把握することを目的とする。

3. 調査方法

観測を行ったAダムは、堤高29.0m、総貯水容量1,510万 m^3 、湛水面積2.15 km^2 、流域面積51.8 km^2 の多目的である。本ダム湖では曝気循環が行われているが、平成5年は7月13日に開始し、9月8日に停止させた。各水質項目の鉛直分布を平成5年4月7日から11月4日まで測定した。また、出水時の流入河川水質の経時変化を測定した。

4. 調査結果

一雨降水量39mmの小洪水時における流入河川のリン濃度の測定結果を図一1に示す。洪水時にダム湖に流入するT-P、 PO_4 -Pの総量は流入水量とリン濃度の積であり、平常時に比べるとはるかに多い量の栄養塩類がダム湖に入ったことがわかる。ダム湖と流入河川の水溫経時変化を図一2に、 PO_4 -P鉛直分布の経時変化を図一3に、クロロフィルa鉛直分布の経時変化を図一4に示す。図一2に示す出水A～Dは図一3に示すダム湖の PO_4 -P及び図一4に示すクロロフィルaに対応しており、出水Aに対応してお



図一1 小洪水時の流入河川のリン濃度測定結果

り、出水Aのように出水がダム湖の浅い層に進入した場合はクロロフィルaが上昇しやすいことがわかった。

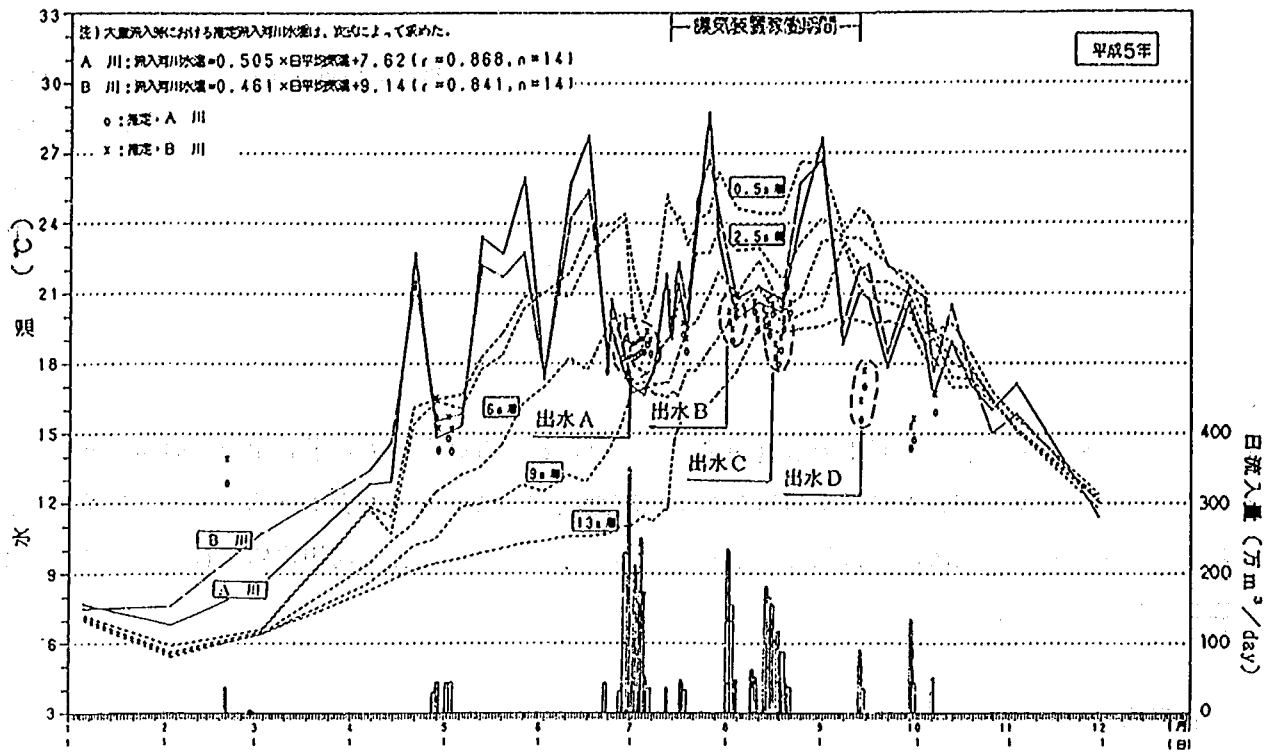


図-2 ダム湖と流入河川の水温の経時変化

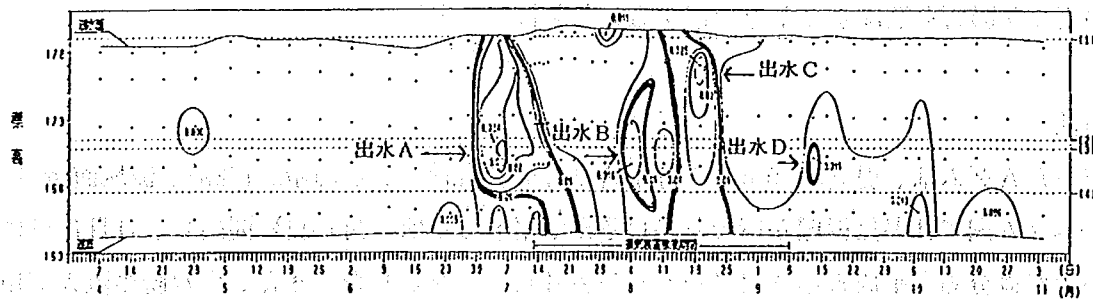


図-3 ダム湖の PO_4-P 鉛直分布の経時変化

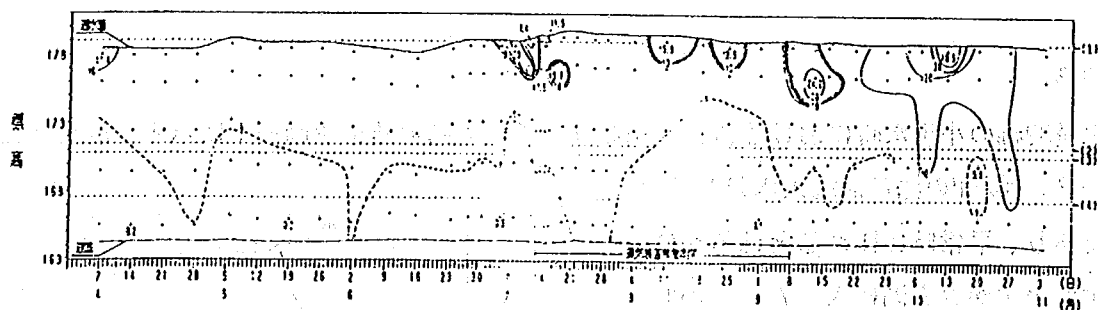


図-4 ダム湖のクロロフィルa鉛直分布の経時変化

5. 今後の問題点

現地観測により、ダム湖の水質は流入河川水の流入水深に大きく関与していることがわかった。今後の課題としては、出水によってダム湖に混入した栄養塩類がどれくらいの距離を流下したら減少するのかを現地観測により確かめる必要がある。

貯水池の水質保全に関する実験

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫

主任研究員 久納 誠

久保徳彦

真田誠至

1. まえがき

ダム湖において淡水赤潮等の水質障害の原因となっているのは鞭毛藻類等の異常増殖によるものである。このような鞭毛藻類等の異常増殖を阻止するには、流入河川水に含まれる $\text{P0}_4\text{-P}$ 等の無機態の栄養塩類を糸状藻類を用いて除去する糸状藻類活用システムが有力な手法である。本調査は糸状藻類活用システム等による藻類異常増殖の抑制手法について実験的に検討するものである。

4年度は糸状藻類を活用した糸状藻類活用システムの原理を把握するために、糸状藻類を用いた現地実験を行った。5年度は糸状藻類のリン除去能力の把握を現地実験により行った。

2. 調査目的

糸状藻類を $\text{P0}_4\text{-P}$ 除去に用いられる利点の一つとして、増殖速度が早く、その分無機態の栄養塩類の吸収能力が高いことがあげられる。本調査の5年度の目的は、現地実験によって糸状藻類の $\text{P0}_4\text{-P}$ 吸収能力を求めることを目的とする。

3. 調査方法

糸状藻類が単位生息面積当たり単位時間当たりにどれだけのリンを吸収するかを調べるために、霞ヶ浦湖岸と印旛沼の流入河川である桑納川にて、糸状藻類活用システムの $\text{P0}_4\text{-P}$ 吸収能力実験を行った。原水の供給法、リン吸収能力算定法、及び生息した糸状藻類の種類を表-1に示す。

表-1 糸状藻類の $\text{P0}_4\text{-P}$ 吸収能力実験の実験条件

タイプ	原水の供給法	リン吸収能力算定法	糸状藻類名
急勾配水路タイプ	霞ヶ浦湖水を軽石濾過した水	原水と処理水との $\text{P0}_4\text{-P}$ の差	メロシラ、カワシオグサ
緩勾配水路タイプ	霞ヶ浦湖水	糸状藻類のリン含有量と回収量	メロシラ、アオミドロ、サヤミドロ
網透過鉛直流タイプ	桑納川の河川水を礫間浄化した水	原水と処理水との $\text{P0}_4\text{-P}$ の差	アミミドロ

4. 調査の結果

原水のD・P₀₄-P濃度とリン吸収能力の経日変化を図-1に示す。これらの糸状藻類の実験結果と水生植物の文献によるデータを図-2にまとめた。図-2によると糸状藻類は水生植物よりリン吸収能力が10倍程度高く、特に原水のD・P₀₄-P濃度が30 $\mu\text{g/l}$ 以下の低い場合にも糸状藻類は高いリン吸収能力を示すことがわかった。

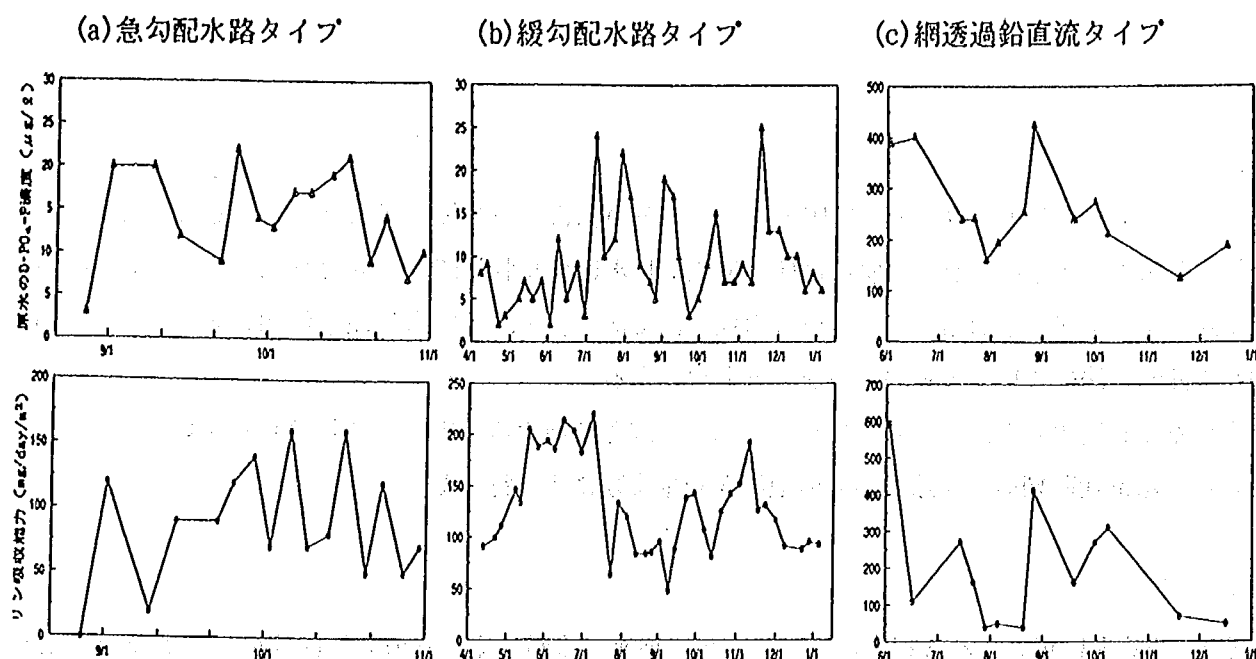


図-1 各タイプにおける現地実験におけるリン吸収能力

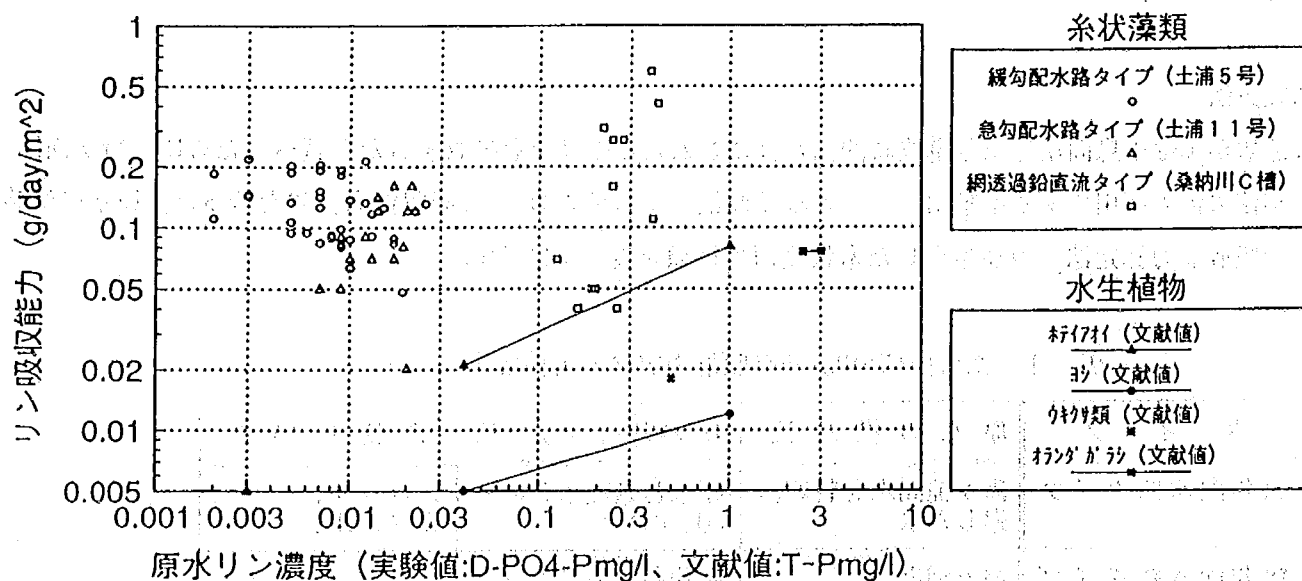


図-2 糸状藻類と水生植物とのリン吸収能力の比較

5. 今後の問題

糸状藻類活用システムによるリン吸収能力は、設備の構造と原水リン濃度により異なるため、いろいろな組み合わせで現地実験を行う必要がある。

貯水池流動制御システム実験

環境計画研究室 室 長 丹羽 薫
主任研究員 久納 誠
久保 徳彦
真田 誠至

1. まえがき

ダム湖の富栄養化対策の有力な一手法である流動制御システムについて現地実験により検討するものである。流動制御システムは、曝気により湖内流動を発生させ、水温躍層を制御して流入栄養塩の湖内滞留を減少させ、ダム湖の浮遊藻類の異常増殖を抑制するシステムであるが、管理中のダムにおいて流動制御システムを実験装置により稼働させ、システムの諸効果を調査する。

5年度は、流動制御システムのうち循環流制御設備と入江循環設備について現地実験を行った。

2. 調査目的

九州地方建設局管内のダム湖において流動制御システムを採用する予定があるが、本システムの効果及び設備規模を恒久施設が決まる以前に確認しておくために、実ダムにおける現地実験を行うことを目的とする。

3. 調査方法

Aダムにおいて表-1に示すような実験条件にて現地実験を行った。

表-1 実験用曝気装置概要

項 目	循 環 流 制 御 設 備	入 江 循 環 設 備
実 験 期 間	平成5年7月19日～10月5日	平成5年9月24日～9月28日
空 気 量	5,000 l/min	500 l/min
曝 気 水 深	水深20.7m, 14m, 8m (多段式の水面設置型)	水深 8 m
噴 出 口	単一孔 $\phi 25$ mm	単一孔 $\phi 25$ mm
制御流動の 対象水深	ダム湖主水域 (概ね1.1 km ²)	辻沢入江 (概ね1.5 ha)
主な追跡項目	*水温・濁度・DO鉛直分布 *クロロフィルa及び植物プランクトン	*水温鉛直分布 *クロロフィルa, b, c

4. 調査結果

4.1 循環流制御設備

平成5年度は出水が多発し、水質の経時変化が捕捉し難い年であった。しかし、8月23日から9月3日の出水間のクロロフィルaの経日変化を見ると、曝気装置に近い0.2km地点は大きくなり、遠い1.3km地点は小さくなっているが、これは循環流制御設備を稼働させた場合に予想される第2循環流の表層が曝気装置の方向に向かう動きと一致しており、実験で用いた5,000ℓ/minの空気量は主水域の流動を制御するのに適量か、それ以上であることがわかった。図-1に日流入量の変化図を図-2にクロロフィルaの経日変化図を示す。

4. 2 入江循環設備

入江循環設備の現地実験を4日間行い水質の変化を観測した。図-3に現地実験平面図を図-4にクロロフィルaの経時変化を示す。

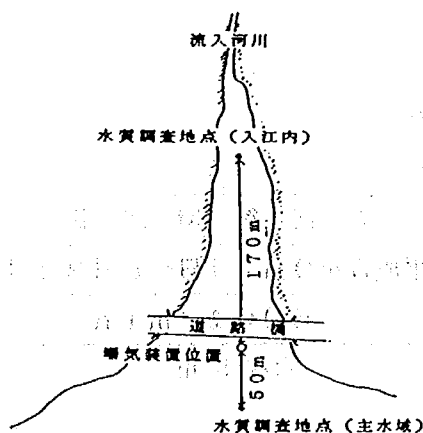


図-3 現地実験平面図

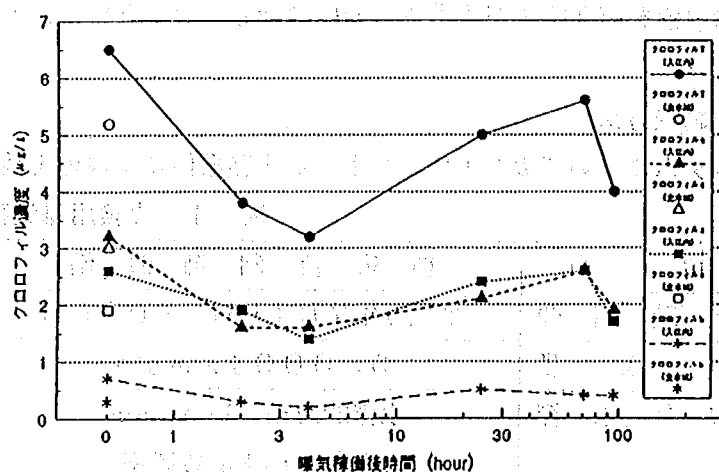


図-4 クロロフィルaの経時変化

図-4より、入江内の水塊は4時間で主水域の水塊と入れ替わることがわかり、入江循環設備は入江内部の水質保全手法として有効であることがわかった。

5. 今後の問題点

5年度の循環流制御設備及び入江循環設備の現地実験は、記録的な降雨等の天候不順の影響を受けてしまい想定していたほど顕著な水質保全効果が得られなかった。更に現地実験を重ねることにより各設備の効果を把握する必要がある。

建設省技術研究発表会

糸状藻類を活用した新しい湖沼富栄養化対策

土木研究所 環境部環境計画研究室 室長 丹羽 薫
主任研究員 久納 誠
○ 久保 徳彦
真田 誠至

1. はじめに

自然湖沼、遊水池、ダム湖など多くの湖沼では、流域から栄養塩類が過剰に流れ込むために、水中の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。湖沼の栄養塩類が増える結果、藍藻類等の好ましくない浮遊藻類が異常増殖することになり、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭、湖沼沿岸の異臭、魚類のへき死、親水性活動の阻害などの深刻な問題を引き起こしている。従来、藻類の増殖要因となる無機態リン（ PO_4-P ）を河川水から効率的に除去する技術はなかった。本報文は、糸状藻類による自然浄化能力を活用して流入河川水等から PO_4-P 等の栄養塩類を除去する技術を開発したので報告するものである。

2. 糸状藻類活用システム

2.1 システムの概要

本報文で報告する『糸状藻類活用システム』は、河川や浅い湖沼に一般に生息している糸状藻類が増殖できる環境を人為的に湖沼に与えることにより、流入河川水から PO_4-P 及び $T-P$ を、湖沼表層水から PO_4-P 及び浮遊藻類を除去し、藍藻類等の好ましくない藻類の異常増殖を阻止し、さらに放流水から浮遊藻類及びカビ臭物質を除去するシステムである。このように本システムは、自然河川等にて水質浄化に役立っているエコシステムを湖沼において人為的に作り出し、最大限に活用するものである。本システムの模式図を図-1に示す。

2.2 糸状藻類の種類

糸状藻類とは顕微鏡レベルで細胞が列車のようにつながっている藻類を指す場合と、肉眼レベルで毛糸や木綿糸のように糸状になっている藻類を指す場合があるが、ここでは後者を指す。糸状藻類は身近なところに見られ、本システムに関係の深い糸状藻類を表-1に示す。なお糸状藻類は、溪流や水路のように急流に適する種類と、浅い湖沼や

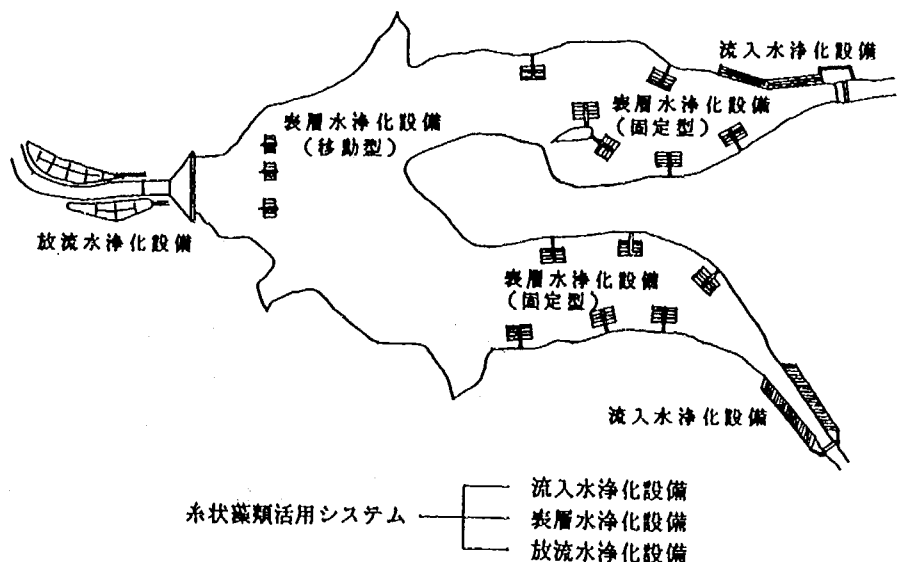


図-1 糸状藻類活用システムの模式図

水田のように緩流に適する種類とに大きく二分できる。

2.3 糸状藻類を湖水の水質浄化に用いる利点

糸状藻類は浮遊藻類やホテイアオイ等の高等な水生植物に比べて、湖水を水質浄化するのに適合した多くの利点を有しており、以下に示す。

適性	名称	綱別	特性
急流	カワシオグサ (Cladophora glomerata)	緑藻類	丸くならない点を除いてマリモと全く同じ属の藻類である。
	ヒビミドロ (Ulothrix sp.)	緑藻類	山間の溪流の岩石に着生する代表的な藻類である。
	サヤミドロ (Oedogonium sp.)	緑藻類	細胞分裂が特異で、細胞間でサヤや朱色の丸い生卵器など特色が多い。
	メロシラ (Melosira varians)	珪藻類	浄水場の緩速砂濾過で重要な役割を果たす藻類である。
	アオミドロ (Spirogyra sp.)	緑藻類	糸状藻類の中でも栄養価が高く有効利用の点で注目すべき藻類である。
緩流	アミミドロ (Hydrodictyon reticulatum)	緑藻類	肉眼でも一見多角形の模様をしたレース編みを思わせる美しい藻類である。
	ウキシオグサ (Cladophora crispata)	緑藻類	カワシオグサは溪流の岩石に着生するが、本種は水面に浮遊して生息する。

①糸状藻類は富栄養化に起因する現象（アオコ、淡水赤潮、カビ臭等）の原因とならない。

②糸状藻類は増殖速度が早く、その分無機態の栄養塩類の吸収能力が高い。例えば、水生植物の代表であるホテイアオイの倍加日数が約2週間であるのに対し、糸状藻類は概ね数日である。

③ホテイアオイやアシ等は葉面からの蒸散によって水分を大気中に放出してしまうが、糸状藻類は水中に生息するため貴重な湖水を失うことはない。

④糸状藻類が生息するには付着あるいは上載できる基質が必要であり、この基質を人為的に操作することにより糸状藻類の生息を制御できる。

⑤糸状藻類が生息する適応温度は、低い水温でも可能であるため、冬期も概ね生息が可能である。従ってアオコが発生する季節よりも先に糸状藻類を増殖させて栄養塩類を取り続けることができる。またホテイアオイが西日本の夏期しか増殖に適さないのに対して、糸状藻類は地域性と季節性の点で幅が広く有利である。

⑥糸状藻類は浮遊藻類に比べ低い無機態の栄養塩類濃度でも生息が可能である。かなり低い濃度となっても、糸状藻類のまわりの水が次々と入れ替われば栄養塩類を吸収することができる。

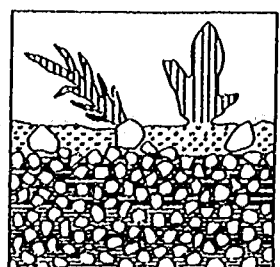
⑦浮遊藻類と異なり、糸状藻類は水からの分離除去がスクリーン等で容易にできる。

⑧糸状藻類は栄養価が高いものが多く、アユやワカサギ等の魚類や鶏等の家畜の良質なエサとなる³⁾。

2.4 各浄化設備が有する浄化機能

糸状藻類が生息している河床周辺における水質浄化機能を考えてみると、図-2に示すようになる。流入水、表層水、放流水の各浄化設備は、除去すべき物質や生息させたい糸状藻類が急流に適するか緩流に適するかのタイプにより、図-2の①～④に示す浄化機能の適用が決まる。各浄化設備が有する浄化機能を表-2に示す。なお、各浄化設備は前処理と本処理の二段階で処理することを基本とする。ただし、T-P、浮遊藻類及び濁質が少ない場合等は前処理を省略し本処理のみとしても十分機能を果たす。

図-2及び表-2の検討により、各浄化設備が保持すべき浄化機能は次のようにまとめられる。



- ①立体的に生息する糸状藻類—— PO_4-P を吸収除去する
- ②濾過膜となる糸状藻類—— PO_4-P を吸収除去する
浮遊藻類やSSを捕捉除去する
- ③粒子間の好気性細菌等—— 糞臭物質を分解除去する
- ④粒子間の物理的濾過—— 浮遊藻類やSSを捕捉除去する

図-2 糸状藻類等の浄化機能

(1)流入水浄化設備
…平常時において、流入河川水が湖沼に入る直前の段階で流入河川水に含まれる PO_4-P 及び $T-P$ を除去し、湖沼に混入するリンを減少させる設備である。流入地点付近に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設けることにより、糸状藻類に PO_4-P を吸収除去させる。 $T-P$ は軽石濾過により除去する。

表-2 各浄化設備が有する浄化機能

設備名	糸状藻類の適性	除去したい物質	浄化機能と除去物質	
			前処理	本処理
流入水浄化設備	緩流タイプ	PO_4-P $T-P$	④粒子間の物理的濾過 ↓ $T-P$ 除去 濁質除去 糸状藻類除去	①立体的に生息する糸状藻類 ②濾過膜となる糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
	急流タイプ			①立体的に生息する糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
表層水浄化設備	緩流タイプ	PO_4-P 浮遊藻類	④粒子間の物理的濾過 ↓ 浮遊藻類除去 濁質除去	①立体的に生息する糸状藻類 ②濾過膜となる糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
	急流タイプ			①立体的に生息する糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
放流水浄化設備	緩流タイプ	浮遊藻類 カビ臭物質	④粒子間の物理的濾過 ↓ 浮遊藻類除去	②濾過膜となる糸状藻類 ③粒子間の好気性細菌等 ④粒子間の物理的濾過 ↓ カビ臭物質除去 浮遊藻類除去

(2)表層水浄化設備…湖面上に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設け、中小洪水等で表層に

混入して来た PO_4-P を藍藻類や鞭毛藻類等の好ましくない浮遊藻類が吸収してしまう前に、糸状藻類に吸収除去させる設備である。同時に好ましくない浮遊藻類そのものを軽石濾過により除去する。

(3)放流水浄化設備……利水を含む正常流量を補給するため下流に放流する水を、異臭味障害が発生しやすい期間において、藍藻類等の好ましくない浮遊藻類を軽石濾過により、カビ臭物質を砂濾過により除去する設備である。

3. 前処理設備

3.1 流入水浄化設備での前処理の役割

流入水浄化設備は、流入河川水に含まれる PO_4-P 及び $T-P$ を除去するのが目的である。前処理で $T-P$ を除去し、本処理で PO_4-P を除去するのが基本とする。流入河川水は洪水後暫くは濁度が高くなるが、本処理で用いられる糸状藻類に濁質が被るのは増殖させる上で望ましくないため、前処理の段階で濁質を除去するのが良い。そこで流入水浄化設備では、 $T-P$ 除去、濁質除去を目的とした前処理を行う。

3.2 表層水浄化設備での前処理の役割

表層水浄化設備は、湖水に含まれる PO_4-P と、アオコのもととなる藍藻類や淡水赤潮のもととなる鞭毛藻類等の好ましくない浮遊藻類そのものを除去するのが目的である。前処理で浮遊藻類を除去し、本処理で PO_4-P を除去するのを基本とする。本処理で用いられる糸状藻類が付着性の浮遊藻類や洪水後の濁質に覆われるのは増殖させる上で望ましくないので、前処理の段階でこれらを除去するのが良い。そこで表層水浄化設備では浮遊藻類除去及び濁質除去を目的とした前処理を行う。

4. 本処理設備

4.1 設備タイプの構造上分類

本処理設備の構造上のタイプは、活用する糸状藻類が緩流に適するか急流に適するかによって二分され、またその設備が陸上用なのか湖上用なのかによっても分かれる。これを図にまとめると図-3のようになる。

4.2 緩勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類が増殖するのに最も効率的な流速、水深及び基質を与え、糸状藻類を基質より定期的に回収除去して安定増殖させようとするタイプである。

急流に適した糸状藻類は流されないように仮根を持つことによってしっかりと基質に付着している。急流のもとでは糸状藻類の細胞のまわりの水が次々と入れ替わるため、糸状藻類は水中に溶存している PO_4-P を次々と吸収でき、増殖速度は一躍高くなる。最も効率的な流速は15cm/sec、及び水深は20cm程度にあると想定している。水路勾配は0.5～1%程度である。

本タイプの基質は流れを横断する方向に張られたフェンス状の形をしており、 $\phi 3 \sim 5$

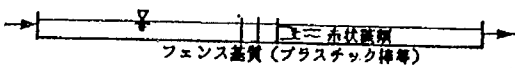
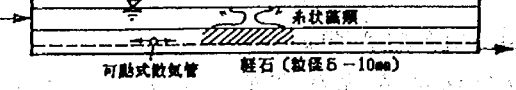
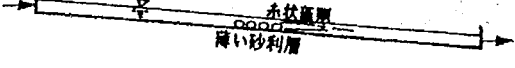
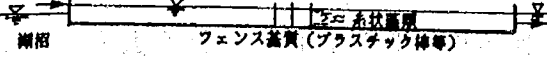
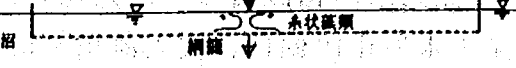
区分項目	急流に適した糸状藻類	緩流に適した糸状藻類
流入水浄化設備 (陸上用)	緩勾配水路タイプ 	軽石透過タイプ 
	急勾配水路タイプ 	
表層水浄化設備 (湖上用)	緩勾配水路タイプ 	網籠タイプ 
放流水浄化設備 (陸上用)		砂濾過タイプ 

図-3 本処理設備の構造

mmのプラスチック棒やひも等から成る。基質や水路底に付着した糸状藻類は定期的にエッジにより櫛で梳かすようにかき採り、側水路に寄せ集め、水流により水路下流端に流すことにより回収除去する。これらの一連の回収作業は人力ではかなりの手間となるため、回収作業を自動化する必要がある。

4.3 急勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類を回収除去する作業を簡略化するために、水路の勾配を大きくして流速を50~100cm/secに高め、水深を数cmの薄層流としたタイプである。水路勾配は5~15%程度となる。本タイプの基質は薄く敷いた砂利や粗面コンクリートとする。この流速のもとでは、成長した糸状藻類は水流の抵抗に耐えられなくなって途中から切れて流下し、水路下流端の固定スクリーンに自然に集積する。

4.4 軽石透過タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、軽石層の上に水層部を持った構造である。水層部は水深が30cmと浅く、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、糸状藻類が流入河川水の PO_4-P を吸収除去する。軽石層は粒径5~10mmで厚さ5cm程度の軽石から成っており、糸状藻類が付着する基質となるが、軽石粒子間の物理的な濾過作用は期待しない。

糸状藻類は成長すると光合成による酸素を多く含む気泡を付着させて浮上し、直径5~50cmの繊維状の塊となるため、スロープ式回収器により容易に回収できる。糸状藻類が生息し続けると、やがて軽石層表面で濾過閉塞するか、または軽石粒子間に有機物が堆積して PO_4-P を溶出する原因となるので、1ヶ月に1回程度の頻度で可動式散気管により軽石を舞い上がらせて洗浄を行う。

4.5 網籠タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、底板が有孔ボードでできた浮上式の網籠となっている。有孔ボードの上は水深30cmの水層部となっており、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、さらに散水によって鉛直流動が得られるような構造となっている。糸状藻類の回収は、糸状藻類が酸素を多く含む気泡を付着して浮上しているところ、または有孔ボード直上に堆積しているところを可動式スクリーンにより除去する。

4.6 砂濾過タイプ

本タイプは4.2~4.5に示した各タイプのように PO_4-P を除去するのが目的ではなく、カビ臭物質を除去するのが目的である。

図-4に砂濾過タイプの設備例を示す。砂層の上に水層部を持った構造であり、緩流に適した糸状藻類を活用する。水層部は水深が30cmと浅く、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっ

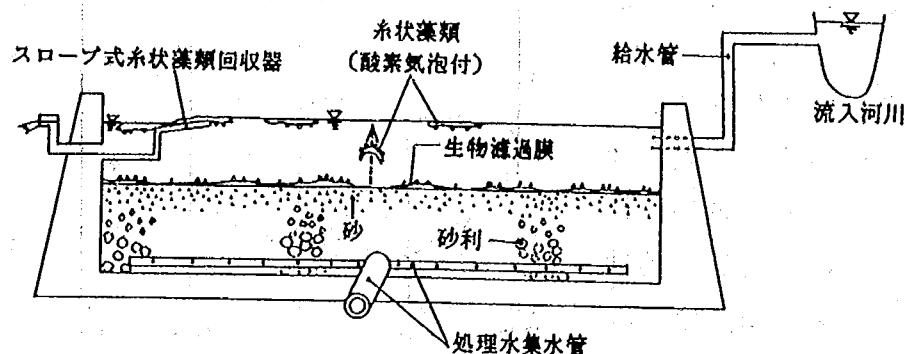


図-4 砂濾過タイプの設備例

いる。砂層は粒径1mm程度の細砂となっており、砂粒子間の浄化作用によりカビ臭物質や浮遊藻類の除去を行う。本タイプにおいては、砂層直上の糸状藻類が光合成によって常に酸素を多く含む気泡を付け、昼夜を問わず砂粒子間に酸素を供給するために、砂粒子間が好気性となり、カビ臭物質等の有機化合物の分解を期待できる。

5. 現地実験

5.1 前処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした軽石濾過による前処理実験を行った。実験装置を図-5に示す。砂利層の上に粒径3mmの軽石層を厚さ15cm設けた。1m³/secの流入河川水を0.5haの設備で前処理することを想定し、濾過速度として72cm/hourを目標に与え続けた。なお軽石層の粒子間に捕捉された浮遊藻類の死骸や濁質は、軽石層の直下に埋設された固定式散気管から気泡を出し、軽石を舞い上がらせて洗浄するという方法を週1回の頻度で行った。

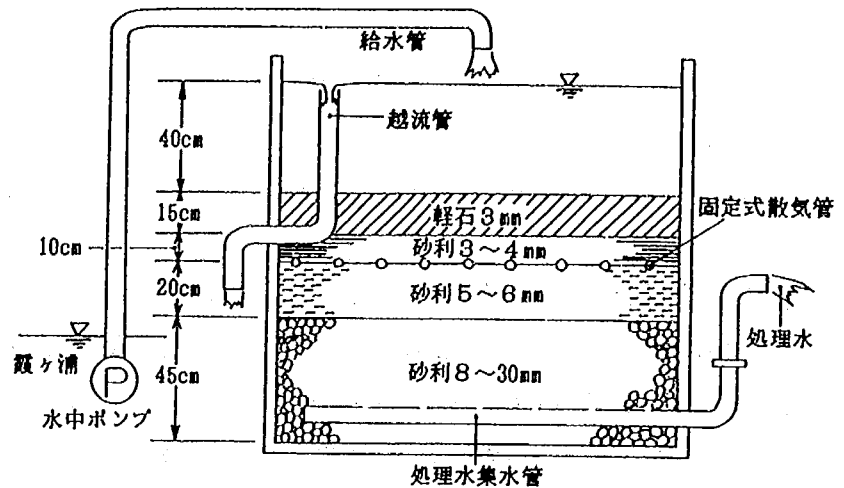


図-5 前処理設備の実験装置

2カ月実施した実験の結果を図-6に示す。通水開始直後は軽石表面に生物膜が生成されず浄化効果は小さい。しかし通水開始1週間以降はT-Pの除去率は55%程度、クロロフィルa

の除去率は85%程度、濁度の除去率は90%程度であった。なお、PO₄-Pの溶出はわずかであった。

本実験に対し実際の設備では、①軽石層厚を15cmから20cmまで厚くする、②流速72cm/hourを2倍程度まで上昇させる、③洗浄方式を固定式散気管から可動式散気管に変える、④砂利層を一切設けず軽石層のみとする、等

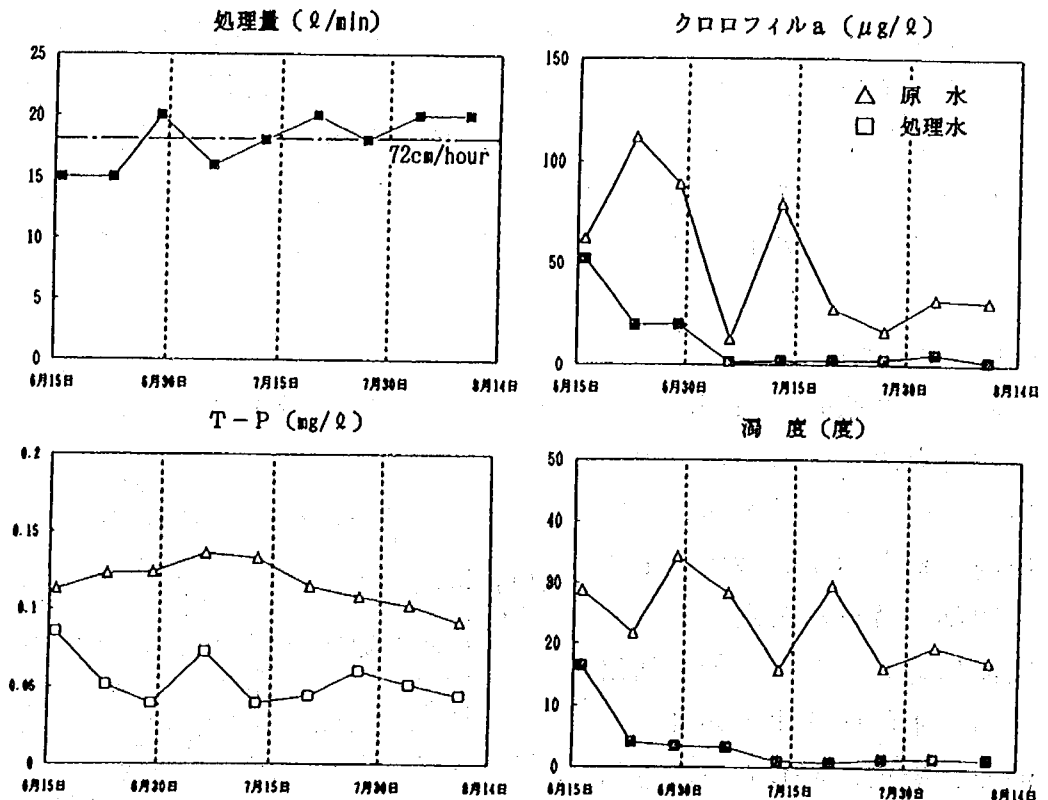


図-6 前処理による水質の測定結果

を実施すれば、さらにT-P,クロロフィルa,濁度の除去効果が向上し、 $PO_4\text{-P}$ の溶出も概ね防止できると考えられる。

5.2 本処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした緩勾配水路タイプでの実験を行った。実験装置を図-7に示す。水路幅は40cm、水深は8cmであり、ポンプで湖水を供給し、流速は10cm/secが得られるようにした。基質の形はフェンス状とし、 $\phi 3\text{mm}$ の麻ひもを二重にしたものを1段、2段、4段、6段と2カ月おきに増加していった。なお水流方向のフェンス基質の間隔は4cmとした。フェンス基質の上流側にはメロシラ (*Melosira varians*; 珪藻類) 付の河床礫を置き、糸状藻類供給ゾーンとした。

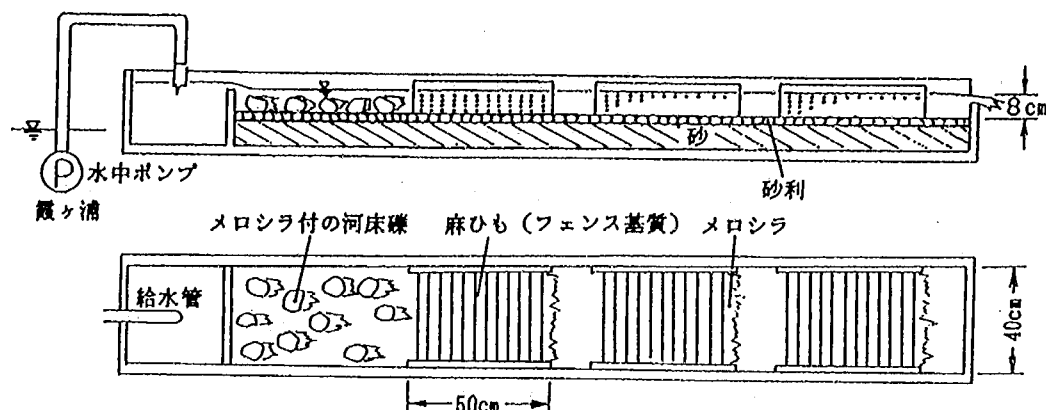


図-7 本処理設備の実験装置

基質にはメロシラが海苔のように付いたが、概ね週1回の頻度で可動式のエッジでかき取り湿潤重量と乾燥重量を測定した。またメロシラに含まれるリンの重量を測定したが、乾燥重量1g当り2.6mgであった。図-8に測定結果を示す。回収した糸状藻類の乾燥重量、単位面積当りの麻ひも延長、原水の水温、原水の $PO_4\text{-P}$ 濃度の経時変化を示す。回収した糸状藻類の乾燥重量は、原水の $PO_4\text{-P}$ 濃度との関係は見出せず、単位面積当りの麻ひも延長には比例関係が見られる。原水の水温も影響を及ぼしているように見える。

麻ひもが4段になった4~5月の2ヶ月間では、1日1m²当たりの回収された

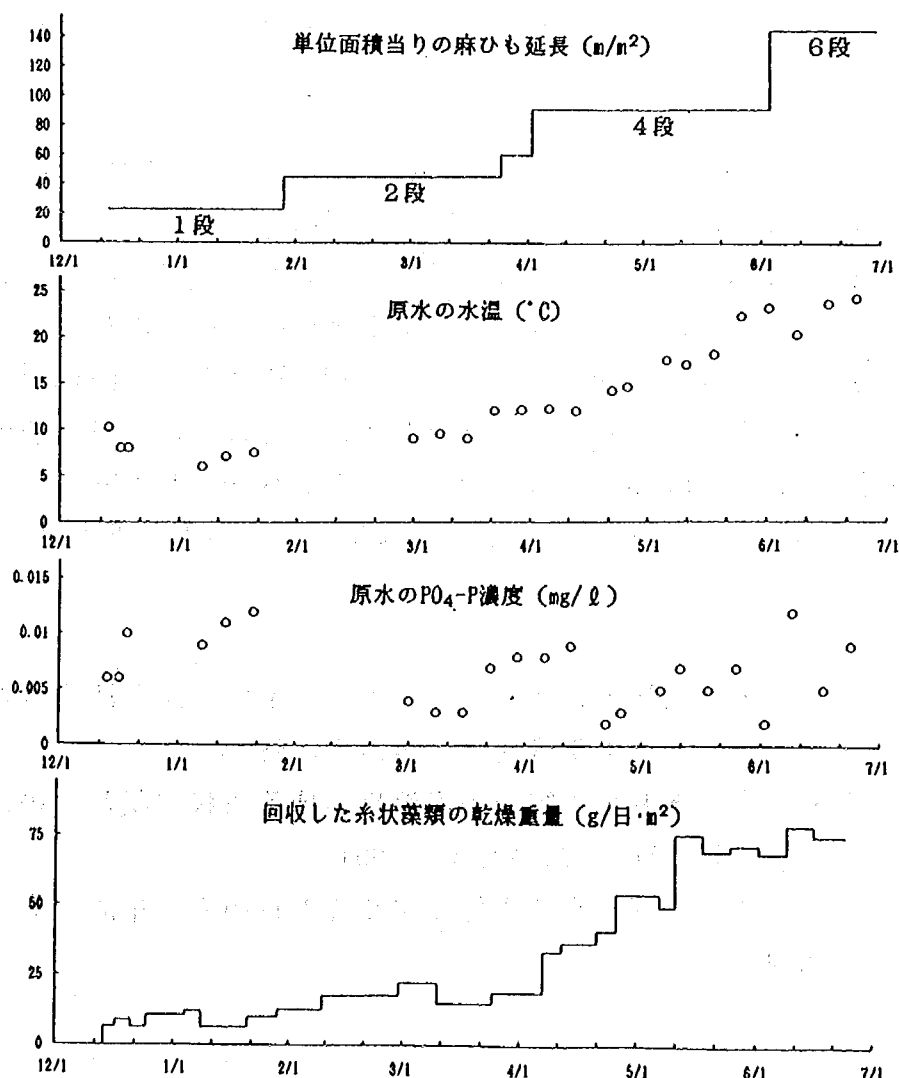


図-8 回収した糸状藻類の乾燥重量等の測定結果

糸状藻類の乾燥重量は概ね $50\text{g}/\text{日}\cdot\text{m}^2$ であり、リン重量に換算すると $130\text{mg}/\text{日}\cdot\text{m}^2$ となる。糸状藻類に含まれるリン重量は糸状藻類が湖水中の $\text{P}_0\text{-P}$ を吸収したものである。ここで図-9に示すように、 $1\text{m}^3/\text{sec}$ の流入河川水を 1ha の浄化設備で処理すると仮定すると、次式のように $\text{P}_0\text{-P}$ 濃度を $15\mu\text{g}/\text{L}$ 低下させたという計算になる。なお図-8によると原水の $\text{P}_0\text{-P}$ 濃度が数 $\mu\text{g}/\text{L}$ 程度の低濃度となっても藻類回収量が落ちておらず、このことは本タイプの大きな利点である。

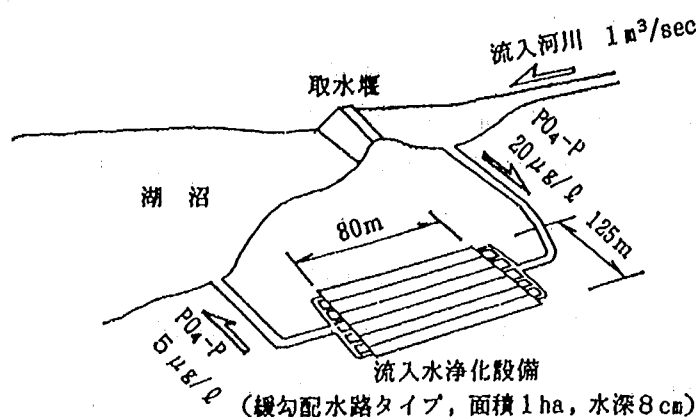


図-9 糸状藻類活用システムの設備例

$130\text{mg}/\text{日}\cdot\text{m}^2$ (P除去量)

$$= 15\text{mg}/\text{m}^3 (= 15\mu\text{g}/\text{L}; \text{P}_0\text{-P低下量}) \times 86400\text{m}^3/\text{日} \times \frac{1}{10000\text{m}^2}$$

本実験に対し実際の設備では、①水深を 8cm から 20cm 程度まで上昇させる、②流速を $10\text{cm}/\text{sec}$ から $15\text{cm}/\text{sec}$ 程度まで上昇させる、③糸状藻類が付着する基質に工夫を加えて改良する、等を実施すれば、さらに $\text{P}_0\text{-P}$ の除去効果が向上すると考えられる。

6. 結び

- (1) 湖沼の富栄養化対策として多量水を対象としたリン除去、特に $\text{P}_0\text{-P}$ を除去するには、『糸状藻類活用システム』が有効である。
- (2) 糸状藻類活用システムでは、T-P、浮遊藻類、濁質の除去を目的とした前処理と、 $\text{P}_0\text{-P}$ 、カビ臭物質の除去を目的とした本処理の2段階に分けて水処理をするのが望ましい。
- (3) 現地実験の結果、前処理設備ではT-P、浮遊藻類、濁質をよく除去でき、本処理設備では $\text{P}_0\text{-P}$ をよく除去でき、それをもとに現地における設備規模を算定すると、前処理設備で $1\text{m}^3/\text{sec}$ 当り 0.5ha 、本処理設備で $1\text{m}^3/\text{sec}$ 当り 1ha となる。浄化能力はさらに向上できると考えられ、湖沼の富栄養化対策としての実用化の可能性が確認できた。

参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；糸状藻類を活用した貯水池水質保全対策、土木学会水理委員会水工学論文集、第37巻、1993
- 2) 中本信忠・坂井正；緩速ろ過池における糸状珪藻とその連続培養の重要性、日本水処理生物学会誌、Vol.27、No. 1、1991
- 3) 飯山郁子・坂井真奈美；緑藻アオミドロの食品学的評価、山陽女子短期大学研究紀要X、1984

土木研究所発表会

湖沼の水質保全に役立つ 水熱エネルギー利用技術の開発

環境部環境計画研究室 丹羽 薫

〃 久納 誠

〃 ○ 久保徳彦

1. はじめに

地球温暖化が問題となっている中で、CO₂の削減は早急に実現すべき課題となっている一方、冷房等のエネルギー需要は今後とも大きく見込まれている。ダム湖等の湖沼は膨大な水量を有しており、夏季に冷水が多量に得られることにより熱エネルギー源として潜在的な価値を有している。

ダム湖の表層において、水温鉛直分布が均一でしかも流入河川水より水温が高い表層を厚く形成させると、好ましくない藻類の異常増殖を制御できるが、夏季にヒートポンプから出る温排水は、ダム湖表層における水温分布を制御するための熱源として活用する。このようにダム湖を水熱エネルギー源として使うだけでなく、ヒートポンプから出る温排水をダム湖水質保全に活用できる水熱エネルギー利用技術を開発したので報告する。

2. 方 法

2.1 ヒートポンプの温排水を活用した水温分布制御システムの開発

ヒートポンプによる温排水は常に水質悪化を招くとは限らず、利用方法によっては水質保全につながることも可能である。ここでは対象のダム湖を夏季に流動制御が可能な回転率の低いダム湖に絞り、ヒートポンプによる熱利用後の温排水をダム湖の水温鉛直分布の制御に活用して、水質保全に役立たせる水温分布制御システムについて述べる。図-1に水温分布制御システムの模式図を示す。

近年ダム湖流域の開発などにより、リン及び窒素等の栄養塩類が過剰に流れ込むために、いくつかのダム湖では湖水の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。湖水の栄養塩類が増える結果、好ましくない藻類が異常増殖することになり、アオコやカビ臭等の問題を引き起こす場合もある。

流動制御による水質保全手法は、流入河川からダム湖有光層へ供給される栄養塩類の削減、及び藻

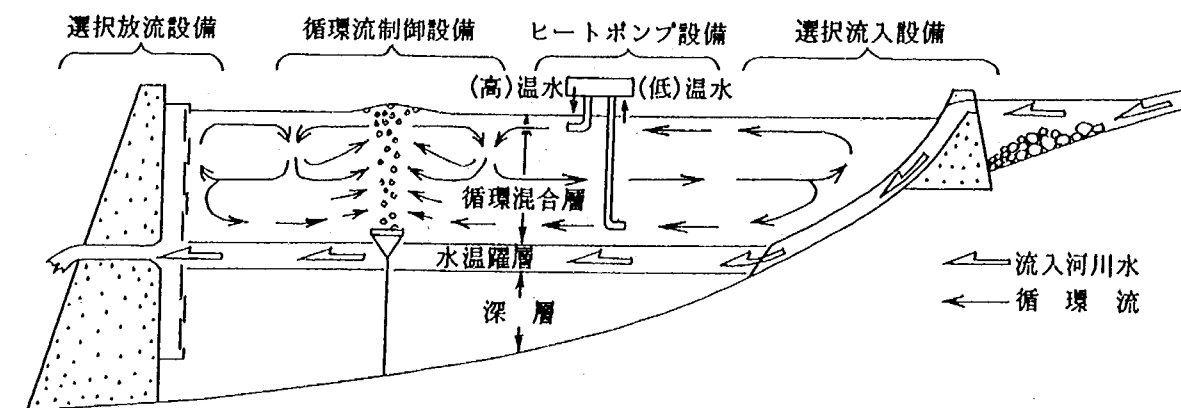


図-1 水温分布制御システムの模式図

類への日射量抑制を目的としたものである。そのメカニズムは散気管方式の曝気装置により、水温躍層の位置を好ましくない藻類が発生する有光層よりはるか下に移動させ、栄養塩類を多く含む河川流入水を水温躍層に導き、選択放流設備により速やかにダム湖内から放流するものである。また、循環混合層を厚くして水温鉛直分布をほぼ均一にすることにより、湖水の密度を均一にして常に上下に混合し易い状態にする。循環混合層が有光層の数倍に至る深度まで存在すれば有光層で生息する藻類は時々有光層の下に深く追いやられことになり、藻類の光合成できる時間を大幅に短くすることにより、藻類の異常増殖を阻止することができる。

曝気によって循環混合層を形成させる際、層厚に対し日射量が少ないと、水温の低い循環混合層しか形成できない。一般に概ね5月から11月においては流入河川水温はダム湖表層水温より低いが、梅雨期、大規模な洪水の直後、或いは冷夏は流入河川水温に比べてダム湖表層水の方が低くなり易い。循環混合層の水温が流入河川水温より低い場合は、流入河川水を循環混合層に混入させてしまい、栄養塩類を有光層に供給することになり、好ましくない藻類の増殖を招く恐れがある。図-2に示すように、日射量だけでは水温が不足している循環混合層にヒートポンプから出る温排水を与えることで、より効果的な循環混合層を形成させることが可能である。このように、ヒートポンプの温排水による加熱が十分にある場合は、循環混合層は適切な温水となり流入河川水をより確実に水温躍層へ導き、選択放流設備から速やかに放流することが可能となる。

2.2 シミュレーション計算による

湖水利用熱エネルギーの算出方法

散気管方式の曝気装置を用いて循環混合層を形成する際の、湖水の流動を再現できる鉛直一次元モデルを説明する。空気量 3700 l/min 、曝気水深 $15\sim 20\text{ m}$ の場合、曝気装置から 35 m 離れた位置の水平流速の鉛直分布は現地観測及び再現計算の結果、図-3に示す流速分布となることがわかった。循環混合層の上部及び下部の層から湖水を引き寄せ、中間の層へ湖水を押し出す。ただし、曝気装置からダム湖に押し出される湖水の水平流速は水深方向に三角形分布しているものとし、その最大値の水深は押し出される湖水の水温とダム湖の水温とが等しい標高とする。さらにヒートポンプを稼働させると図-3に示すような密度流が新たに生じる。分割層毎の流出及び流入量に換算

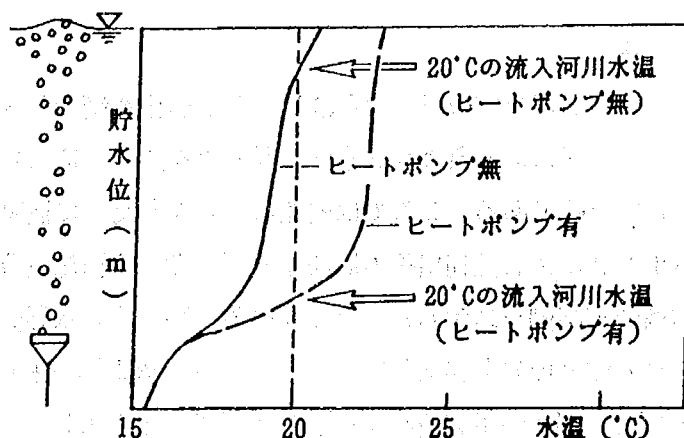


図-2 ヒートポンプの温排水を活用した水温分布制御

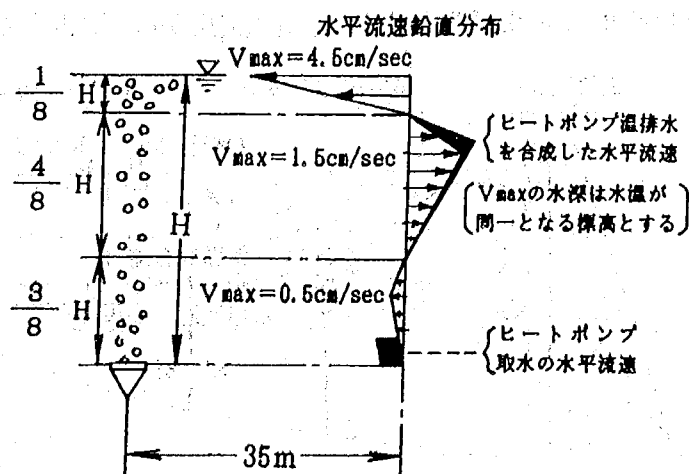


図-3 シミュレーションに用いた水平流速分布モデル

した上で鉛直一次元モデルに組み込み、シミュレーション計算により半月間で1°C上昇させるのに必要な熱量を算出し、これを湖水利用熱エネルギーとする。

Aダムにおいて、平成4年8月10日から26日にかけて循環混合層の水温をヒートポンプの温排水により1°C上昇させる場合を想定し、シミュレーション計算を行った。計算条件は、日射量及び気温が平年と冷夏の場合、ヒートポンプが有無の場合という条件にした。

2.3 簡易計算による湖水利用熱エネルギーの算出方法

2.2ではシミュレーション計算による湖水利用熱エネルギーの算出方法を述べたが、ここではシミュレーション計算を行わないでも簡易計算で算出できる方法を述べる。日当りの湖水利用エネルギーについては、図-4に示すように各水深ブロック毎に貯水容量 $V\text{m}^3$ と日当り上昇水温 $\Delta t^\circ\text{C/day}$ との積を出しブロック全体の和より算出する。この方法により半月間で1°C上昇させるのに必要な熱量を算出する。循環混合層の厚さは一般に15~20m必要であるので、水面から水深15~20mまでを利用可能とした。概略計算では、平常時及び洪水時の下流放流による熱の排出、ヒートポンプの温排水受け入れによるダム湖表面水温の上昇に伴う大気への放熱を考慮して、以上のように算出した値に放熱係数Aを掛けた値を簡易計算による湖水利用熱エネルギーの値とする。

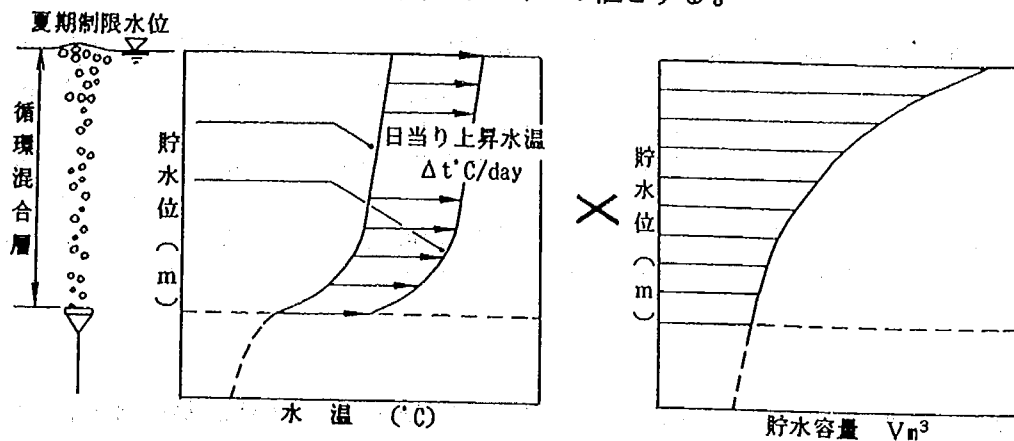


図-4 湖水利用熱エネルギー算出の簡易計算の模式図

3. 結果

図-5にシミュレーション計算による結果を示すが、ヒートポンプを稼働させ水温差 $\Delta T=10^\circ\text{C}$ の温排水を $Q=1.8\text{ m}^3/\text{sec}$ を供給させれば、半月間で循環混合層全体の水温を1°C上昇させ、さらに循環混合層における水温鉛直分布の水温勾配をさらに小さくすることができることがわかった。シミュレーション計算によるAダムの日当り湖水利用熱エネルギーは1,600 Gcal/dayとなる。一方、簡易計算による熱エネルギーの計算値は980 Gcal/dayであり、シミュレーション計算による日当り湖水利用熱エネルギーは簡易計算の1.6倍となるため、放熱係数は $A=1.6$ である。

現存する冷房サイクルのCOP(成績係数: Co-efficient of Performance)は大きく見積もって4~5であり、さらに搬送ロスによる効率の低下(搬送距離100mに付きCOPで0.15の低下)等を考慮して、 $\text{COP}=2.5$ を用いて施設供給エネルギーの算定を行った。表-1には温度成層が形成される数ダムについて簡易計算により算出した結果を示す。

Aダム(湛水面積 3.9 km^2)を対象に、湖水利用熱エネルギーを用いて共同住宅に冷房を供給するこ

とを想定し、供給可能な施設規模を検討した。1,100 Gcal/dayの施設供給エネルギーにより延べ床面積2,600,000 m²、戸数 31,000戸の共同住宅の冷房がヒートポンプで可能となる。

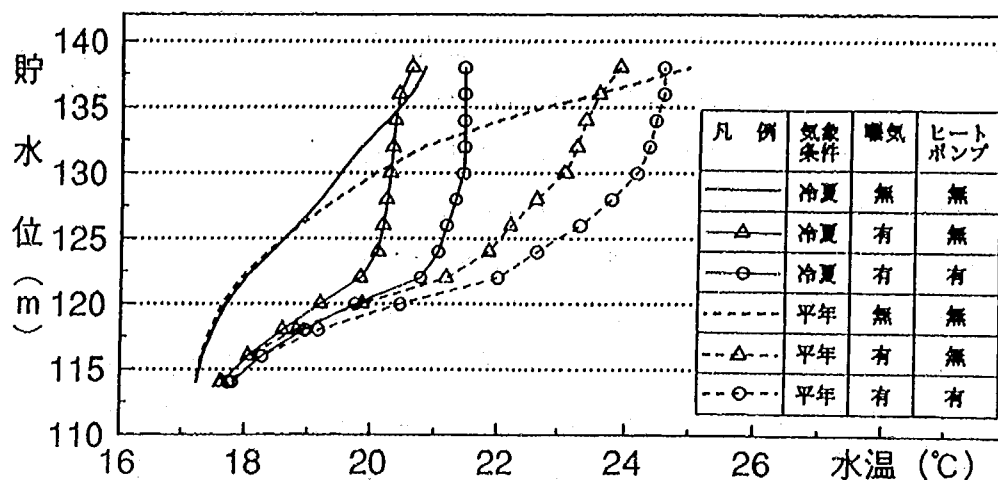


図-5 水温分布制御システムのシミュレーション結果

表-1 簡易計算による各ダム湖における施設供給エネルギー

ダム湖	湛水面積	循環混合層	放熱係数	湖水利用熱エネルギー	COP	施設供給エネルギー
A	3.90km ²	20 m	A=1.6	1,600 Gcal/day	2.5	1,100 Gcal/day
B	0.90km ²	15 m	A=1.6	690 Gcal/day	2.5	490 Gcal/day
C	3.04km ²	15 m	A=1.6	2,200 Gcal/day	2.5	1,600 Gcal/day

4. まとめ

(a) ダム湖の水熱エネルギーをヒートポンプを活用して取り出す際に、熱利用後の温排水をダム湖の水温鉛直分布の制御に活用する『水温分布制御システム』は、湖水利用熱エネルギーの規模をダム湖の規模に応じたものとすれば、有効な水質保全手法となる。

(b) ダム湖の湖水利用熱エネルギーの算出手法は、シミュレーション計算と簡易計算による2手法を構築した。湛水面積3.9 km²のAダムを例にとって概略計算してみると、20mの循環混合層の水温を半月間で1℃上昇させる能力を持つヒートポンプ施設であれば、これと同時にダム湖に隣接する31,000戸の共同住宅の冷房が可能となる。

(c) 今後の課題としては、ヒートポンプを活用した水温分布制御システムの通年運用についての検討が必要である。

参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；貯水池流動制御による水質保全対策、土木学会水理委員会水工学論文集、第37巻、1993
- 2) ダム熱エネルギー利用指針(案)，ダム水源地環境整備センター、1992

土 木 技 術 資 料

◆環境特集◆

糸状藻類を活用した湖沼の富栄養化対策技術の開発

丹羽 薫* 久納 誠** 久保徳彦*** 真田誠至****

1. はじめに

自然湖沼、遊水池、ダム湖などの湖沼のうちいくつかににおいては、流域の開発が進み、生活排水や畜産排水が完全に処理されないまま流入河川へ多量に流れ込むために、湖水中の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。栄養塩類が増えると、藍藻類や鞭毛藻類等の好ましくない藻類が異常増殖し易くなる。さらに藻類が異常増殖すると、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭、湖沼沿岸の異臭、魚類のへき死、親水活動の阻害などの問題を引き起こす恐れがある。

従来、藻類の増殖要因となる無機態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)を河川水から効率的に除去する技術はなかった。本報文は、糸状藻類による自然浄化能力を活用して流入河川水等から $\text{PO}_4\text{-P}$ 等の栄養塩類を除去する技術を開発したので報告するものである。

2. 糸状藻類活用システム

2.1 システムの概要

本報文で報告する『糸状藻類活用システム』は、河川や浅い湖沼に一般に生息している糸状藻類が増殖できる環境を人為的に湖沼に与えることにより、流入河川水から $\text{PO}_4\text{-P}$ 及び T-P を、湖沼表層水から $\text{PO}_4\text{-P}$ 及び浮遊藻類を除去し、藍藻類等の好ましくない藻類の異常増殖を阻止し、さらに放流水から浮遊藻類及びカビ臭物質を除去するシステムである。このように本システムは、自然河川等にて水質浄化に役立っているエコシステムを湖沼において人為的に作り出し、最大限に活用するものである。本システムの模式図を図-1に示す。

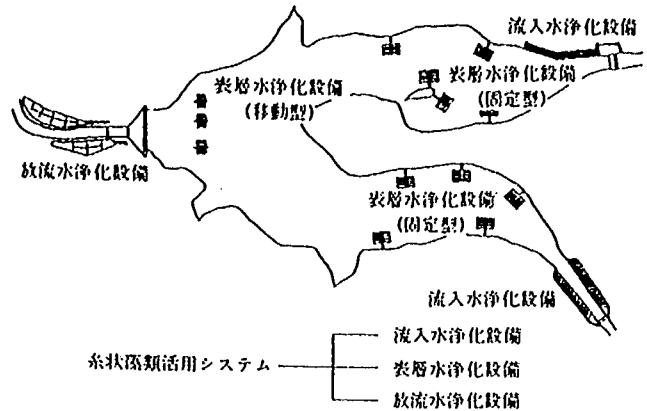


図-1 糸状藻類活用システムの模式図

2.2 糸状藻類の種類

糸状藻類とは顕微鏡レベルで細胞が列車のようにつながっている藻類を指す場合と、肉眼レベルで毛糸や木綿糸のように糸状になっている藻類を指す場合があるが、ここでは後者を指す。糸状藻類は身近なところに見られ、本システムに関係の深い糸状藻類を表-1に示す。なお糸状藻類は、溪流や水路のように急流に適する種類と、浅い湖沼や水田のように緩流に適する種類とに大きく二分できる。

表-1 本システムに関係の深い糸状藻類

適性	名称	綱別	特性
急流	カワシオグサ (<i>Cladophora glomerata</i>)	緑藻類	丸くならない点を除いてマリモと全く同じ属の藻類である。
	ヒビミドロ (<i>Ulothrix</i> sp.)	緑藻類	山間の溪流の岩石に着生する代表的な藻類である。
	サヤミドロ (<i>Oedogonium</i> sp.)	緑藻類	細胞分裂が特異で、細胞間のサヤや朱色の丸い生卵器など特色が多い。
	メロシラ (<i>Melosira varians</i>)	珪藻類	浄水場の緩速砂濾過で重要な役割を果たす藻類である ¹⁾ 。
	アオミドロ (<i>Spirogyra</i> sp.)	緑藻類	糸状藻類の中でも栄養価が高く有効利用の点で注目すべき藻類である ²⁾ 。
緩流	アミミドロ (<i>Hydrodictyon reticulatum</i>)	緑藻類	肉眼でも一見多角形の模様をしたレース編みを思わせる美しい藻類である。
	ウキシオグサ (<i>Cladophora crispata</i>)	緑藻類	カワシオグサは溪流の岩石に着生するが、本種は水面に浮遊して生息する。

2.3 糸状藻類を湖水の水質浄化に用いる利点

糸状藻類は浮遊藻類やホテイアオイ等の高等な水生植物に比べて、湖水を水質浄化するのに適合

した多くの利点を有しており、以下に示す。

- ①糸状藻類は富栄養化に起因する現象（アオコ、淡水赤潮、カビ臭等）の原因とならない。
- ②糸状藻類は増殖速度が早く、その分無機態の栄養塩類の吸収能力が高い。例えば、水生植物の代表であるホテイアオイの倍加日数が約2週間であるのに対し、糸状藻類は概ね数日である。
- ③ホテイアオイやアシ等は葉面からの蒸散によって水分を大気中に放出してしまうが、糸状藻類は水中に生息するため貴重な湖水を失うことはない。
- ④糸状藻類が生息するには付着あるいは上載できる基質が必要であり、この基質を人為的に操作することにより糸状藻類の生息を制御できる。
- ⑤糸状藻類が生息する適応温度は、低い水温でも可能であるため、冬期も概ね生息が可能である。従ってアオコが発生する季節よりも先に糸状藻類を増殖させて栄養塩類を取り続けることができる。またホテイアオイが西日本の夏期しか増殖に適さないのに対して、糸状藻類は地域性と季節性の点で幅が広く有利である。
- ⑥糸状藻類は浮遊藻類に比べ低い無機態の栄養塩類濃度でも生息が可能である。かなり低い濃度となっても、糸状藻類のまわりの水が次々と入れ替われば栄養塩類を吸収することができる。

- ⑦浮遊藻類と異なり、糸状藻類は水からの分離除去がスクリーン等で容易にできる。
- ⑧糸状藻類は栄養価が高いものが多く、アユやワカサギ等の魚類や鶏等の家畜の良質なエサとなる³⁾。

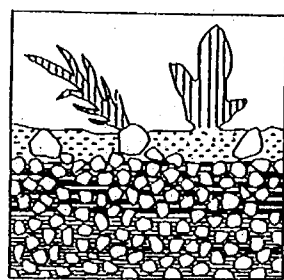
2.4 各浄化設備が有する浄化機能
糸状藻類が生息している河床における水質浄化機能を考えると、図-2に示すようになる。流入水、表層水、放流水の各浄化設備

は、除去すべき物質や生息させたい糸状藻類が急流に適するか緩流に適するかのタイプにより、図-2の①～④に示す浄化機能の適用が決まる。各浄化設備が有する浄化機能を表-2に示す。なお、各浄化設備は前処理と本処理の二段階で処理することを基本とする。ただし、T-P、浮遊藻類及び濁質が少ない場合等は前処理を省略し本処理のみとしても十分機能を果たす。

図-2及び表-2の検討により、各浄化設備が保持すべき浄化機能は次のようにまとめられる。

(1) 流入水浄化設備……平常時において、流入河川水が湖沼に入る直前の段階で流入河川水に含まれる PO_4-P 及び T-P を除去し、湖沼に混入するリンを減少させる設備である。流入地点付近に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設けることにより、糸状藻類に PO_4-P を吸収除去させる。T-P は砂利濾過により除去する。

(2) 表層水浄化設備……湖面上に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設け、中小洪水等で表層に



- ①立体的に生息する糸状藻類 — PO_4-P を吸収除去する
- ②濾過膜となる糸状藻類 — PO_4-P を吸収除去する
浮遊藻類やSSを捕捉除去する
- ③粒子間の好気性細菌等 — カビ臭物質を分解除去する
- ④粒子間の物理的濾過 — 浮遊藻類やSSを捕捉除去する

図-2 糸状藻類等の浄化機能

表-2 各浄化設備が有する浄化機能

設備名	糸状藻類の適性	除去したい物質	浄化機能と除去物質	
			前処理	本処理
流入水浄化設備	緩流タイプ	PO_4-P T-P	④粒子間の物理的濾過 ↓ T-P 除去 濁質除去 付着藻類除去	①立体的に生息する糸状藻類 ②濾過膜となる糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
	急流タイプ			①立体的に生息する糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
表層水浄化設備	緩流タイプ	PO_4-P 浮遊藻類	④粒子間の物理的濾過 ↓ 浮遊藻類除去 濁質除去	①立体的に生息する糸状藻類 ②濾過膜となる糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
	急流タイプ			①立体的に生息する糸状藻類 ↓ PO_4-P 除去
放流水浄化設備	緩流タイプ	浮遊藻類 カビ臭物質	④粒子間の物理的濾過 ↓ 浮遊藻類除去	②濾過膜となる糸状藻類 ③粒子間の好気性細菌類等 ④粒子間の物理的濾過 ↓ カビ臭物質除去 浮遊藻類除去

混入して来た $\text{PO}_4\text{-P}$ を藍藻類や鞭毛藻類等の好ましくない浮遊藻類が吸収してしまう前に、糸状藻類に吸収除去させる設備である。同時に好ましくない浮遊藻類そのものを砂利濾過により除去する。

(3) 放流水浄化設備……利水を含む正常流量を補給するため下流に放流する水を、異臭味障害が発生しやすい期間において、藍藻類等の好ましくない浮遊藻類及びカビ臭物質を砂利濾過や砂濾過により除去する設備である。

3. 前処理設備

3.1 流入水浄化設備での前処理の役割

流入水浄化設備は、流入河川水に含まれる $\text{PO}_4\text{-P}$ 及び T-P を除去するのが目的である。前処理で T-P を除去し、本処理で $\text{PO}_4\text{-P}$ を除去するのが基本とする。流入河川水は洪水後暫くは濁度が高くなるが、本処理で用いられる糸状藻類に濁質が被るのは増殖させる上で望ましくないの、前処理の段階で濁質を除去するのが良い。また流入河川水には本処理で増殖させようとしている糸状藻類の他に様々な付着性の浮遊藻類が含まれている。そこで特に通水初期の段階において、適切な糸状藻類を安定増殖させるためには供給水に含まれる付着性の浮遊藻類を除去して適切な糸状藻類を優占種にするのが望ましい。そこで流入水浄化設備では、 T-P 除去、濁質除去及び付着藻類除去を目的とした前処理を行う。

3.2 表層水浄化設備での前処理の役割

表層水浄化設備は、湖水に含まれる $\text{PO}_4\text{-P}$ と、アオコ等のもととなる藍藻類等の好ましくない浮遊藻類を除去するのが目的である。前処理で浮遊藻類を除去し、本処理で $\text{PO}_4\text{-P}$ を除去するのが基本とする。本処理で用いられる糸状藻類が付着性の浮遊藻類や洪水後の濁質に覆われるのは増殖させる上で望ましくないの、前処理の段階でこれらを除去するのが良い。そこで表層水浄化設備では浮遊藻類除去及び濁質除去を目的とした前処理を行う。

4. 本処理設備

4.1 設備タイプの構造上分類

本処理設備の構造上のタイプは、活用する糸状藻類が緩流に適するか急流に適するかによって二分され、またその設備が陸上用なのか湖上用なのかによっても分かれる。これを図にまとめると図-3 のようになる。

4.2 下向式砂濾過タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、砂層部の上に水層部を持った構造である。図-4 に下向式砂濾過タイプの設備例を示す。水層部は水深が 30 cm と浅く、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、糸状藻類が流入河川水の $\text{PO}_4\text{-P}$ を吸収除去する。砂層部は粒径 1~3 mm 程度の砂となっており、砂粒子間の浄化作用によりカビ臭物質除去や浮遊藻類除去を行う。

一般的に粒子間浄化は嫌気性であるとカビ臭物

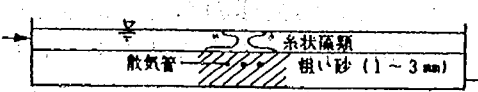
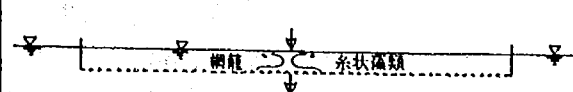
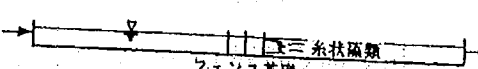
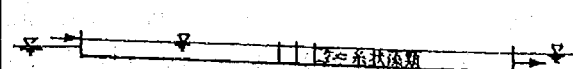
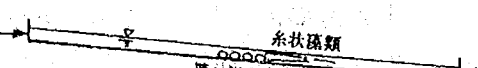
区分項目	陸 上 用	湖 上 用
緩流に適した 糸 状 藻 類	下向式砂濾過タイプ (流入水・放流水浄化設備) 	網 籠 タ イ プ (表層水浄化設備) 
急流に適した 糸 状 藻 類	緩勾配水路タイプ (流入水浄化設備) 	緩勾配水路タイプ (表層水浄化設備) 
	急勾配水路タイプ (流入水浄化設備) 	

図-3 本処理設備の構造

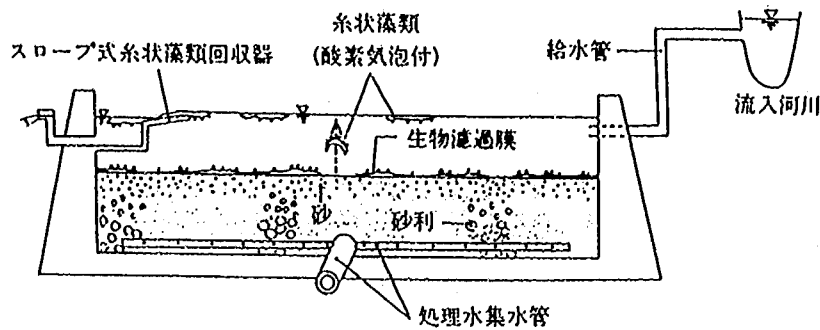


図-4 下向式砂濾過タイプの設備例

質等の有機化合物の分解能力は小さい。しかし本タイプにおいては、砂層直上の糸状藻類が光合成によって常に酸素を多く含む気泡を付け、昼夜を問わず砂粒子間に酸素を供給するために、砂粒子間は好気性となり、カビ臭物質等の有機化合物の分解を期待できる。砂の粒径は粗くしすぎると、砂粒の表面積が不足して好気性細菌が十分に働けなくなる。よって放流水浄化設備の場合は砂の粒径を1 mm 程度に細かくする。

流入水浄化設備の場合はカビ臭物質を除去する必要がないので砂の粒径は2~3 mm 程度にする。

緩流に適した糸状藻類は成長すると光合成による気泡を付着させて浮上するが、その際生物濾過膜ごと浮上するため、濾過閉塞は生じにくい。また浮上した糸状藻類は直径5~50 cm の繊維状の塊となるため、スロープ式回収器により容易に回収できる。ただし水層部に糸状藻類を生息させても1~2ヶ月もすれば濾過閉塞してしまうので、その場合は砂層部に埋設してある散気管により濾過膜洗浄を行い濾過閉塞を解消する。

4.3 網籠タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、底板が硬質ネットでできた浮上式の網籠となっている。硬質ネットの上は水深30 cm の水層部となっており、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、特に6月から9月にかけて糸状緑藻が増殖するのに適した環境となる。糸状藻類の回収は、糸状藻類が気泡を付着して浮上しているところ、または硬質ネット直上に沈降しているところを可動式スクリーンにより除去する。

4.4 緩勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類が増殖するのに最も効率的な流速、水深及び基質を与え、糸状藻類を基質より定期的に回

収除去して安定増殖させようとするタイプである。

急流に適した糸状藻類は流されないように仮根を持つことによってしっかりと基質に付着している。急流のもとでは糸状藻類の細胞のまわりの水が次々と入れ替わるため、糸状藻類は水中に溶存している $\text{PO}_4\text{-P}$ を次々と吸収でき、増殖速度は一躍高くなる。しかし流

速が高すぎると湖水との接触時間が短くなり結果的に $\text{PO}_4\text{-P}$ の除去量が低下する。最も効率的な流速は15 cm/sec、及び水深は20 cm 程度であると想定している。水路勾配は0.5~1%程度である。本タイプの基質は流れを横断する方向に張られたフェンス状の形をしており、 $\phi 3\sim 5$ mm のプラスチック棒やひも等から成る。基質や水路底に付着した糸状藻類は定期的にエッチにより櫛で梳かすようにかき採り、側水路に寄せ集め、水流により水路下流端に流すことにより回収除去する。これらの一連の回収作業は人力ではかなりの手間となるため、回収作業を自動化する必要がある。

4.5 急勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類を回収除去する作業を簡略化するために、水路の勾配を大きくして流速を30~100 cm/sec に高め、水深を数 cm の薄層流としたタイプである。水路勾配は5~15%程度となる。本タイプの基質は薄く敷いた砂利や粗面コンクリートとする。この流速のもとでは、成長した糸状藻類は水流の抵抗に耐えられなくなって途中から切れて流下し、水路下流端の固定スクリーンに自然に集積する。またこの流速のもとでは水路底に糸状藻類の死骸が堆積しにくく維持管理もし易い。なお通水の一部を循環させると糸状藻類は安定増殖する。

5. 現地実験

5.1 前処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした上向式砂利濾過の実験を行った。実験装置を図-5 に示す。砂利面上は薄層流とした。1 m³/sec の流入河川水を0.5 ha の設備で前処理することを想定し、上向流の流速として72 cm/hour を目標に与え続けた。なお砂利層底部に堆積した有機物は、週1回の頻度で、

砂利層底部から散気しながら下向流による逆洗を与えて洗浄した。数カ月実施した実験の水質の測定結果を図-6に示すが、T-Pの除去率は6割程度、濁度の除去率は9割程度、クロロフィルaの除去率は8割程度であった。なお水層部には糸状藻類であるメロシラ (*Melosira varians*; 珪藻類) やサヤミドロ (*Oedogonium* sp.; 緑藻類) が生息し、本処理設備に給水する前処理水の糸状藻類優占種をメロシラやサヤミドロに制御することができた。

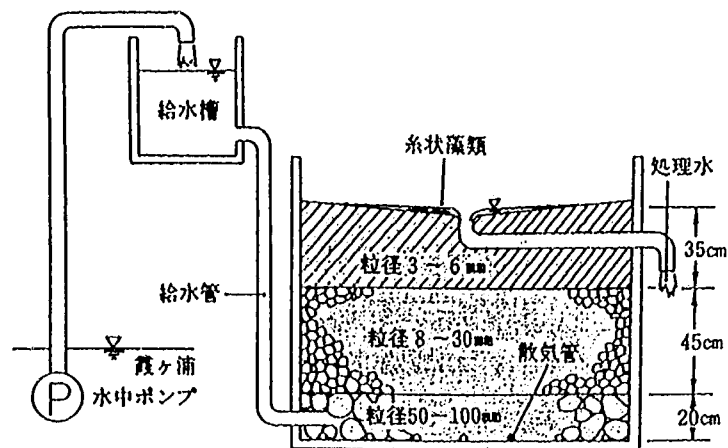


図-5 前処理設備（上向式砂利濾過）の実験装置

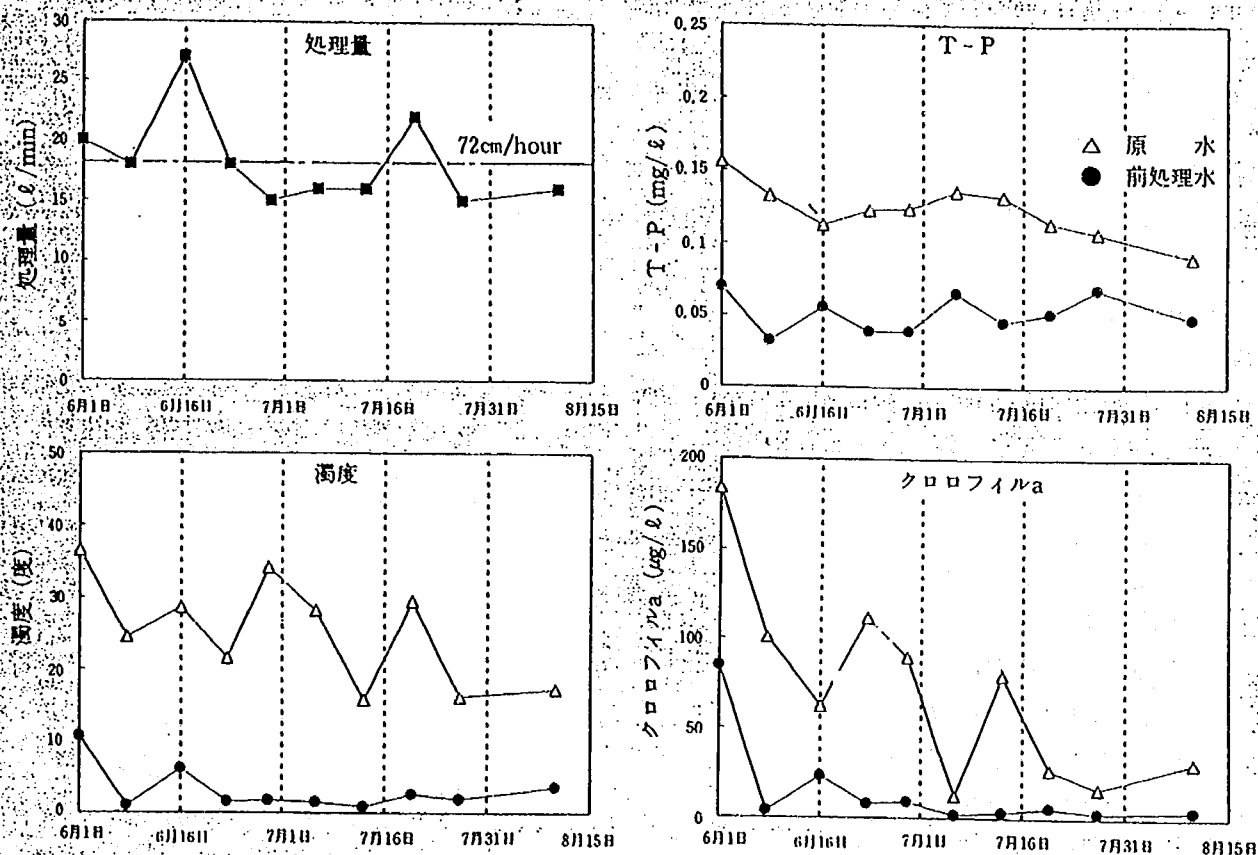


図-6 前処理による水質の測定結果

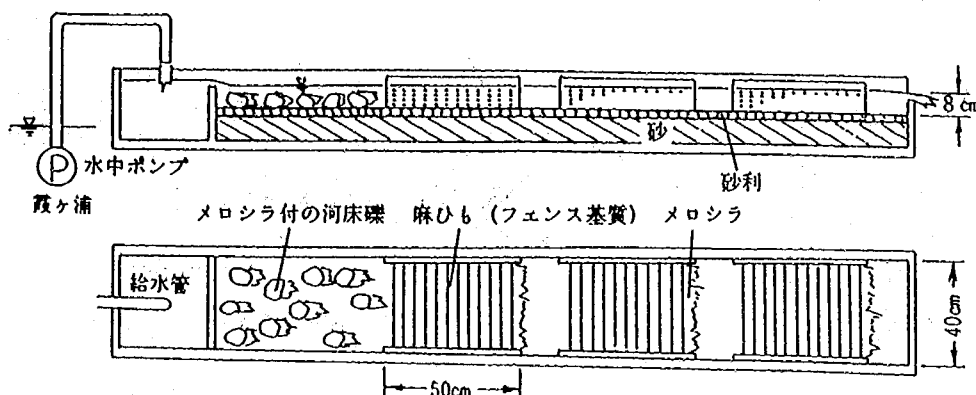


図-7 本処理設備（緩勾配水路）の実験装置

5.2 本処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした緩勾配水路タイプでの実験を行った。実験装置を図-7に示す。水路幅は40 cm、水深は8 cmであり、ポンプで湖水を供給し、流速は10 cm/secが得られるようにした。基質の形はフェンス状とし、 $\phi 3$ mmの麻ひもを二重にしたものを1段、2段、4段、6段と2カ月おきに増加していった。なお水流方向のフェンス基質の間隔は4 cmとした。フェンス基質の上流側にはメロシラ (*Melosira varians*; 珪藻類) 付の河床礫を置き、糸状藻類供給ゾーンとした。

基質にはメロシラが海苔のように付いたが、概ね1週間に1度の頻度で可動式のエッチでかき取り湿潤重量と乾燥重量を測定した。またメロシラに含まれるリンの重量を測定したが、乾燥重量1 g 当り 2.6 mg であった。図-8に測定結果を示す。回収した糸状藻類の乾燥重量、単位面積当りの麻ひも延長、原水の水温、原水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の経時変化を示す。回収した糸状藻類の乾燥重量は、原水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度との関係は見出せず、単位面積当りの麻ひも延長には比例関係が見られる。原水の水温も影響を及ぼしているように見える。

麻ひもが4段になった4~5月の2ヶ月間では、1日1 m^2 当たりの回収された糸状藻類の乾燥重量は概ね $50 \text{ g/day}\cdot\text{m}^2$ であり、リン重量に換算すると $130 \text{ mg/day}\cdot\text{m}^2$ となる。糸状藻類に含まれるリン重量は糸状藻類が湖水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ を吸収したものである。ここで図-9

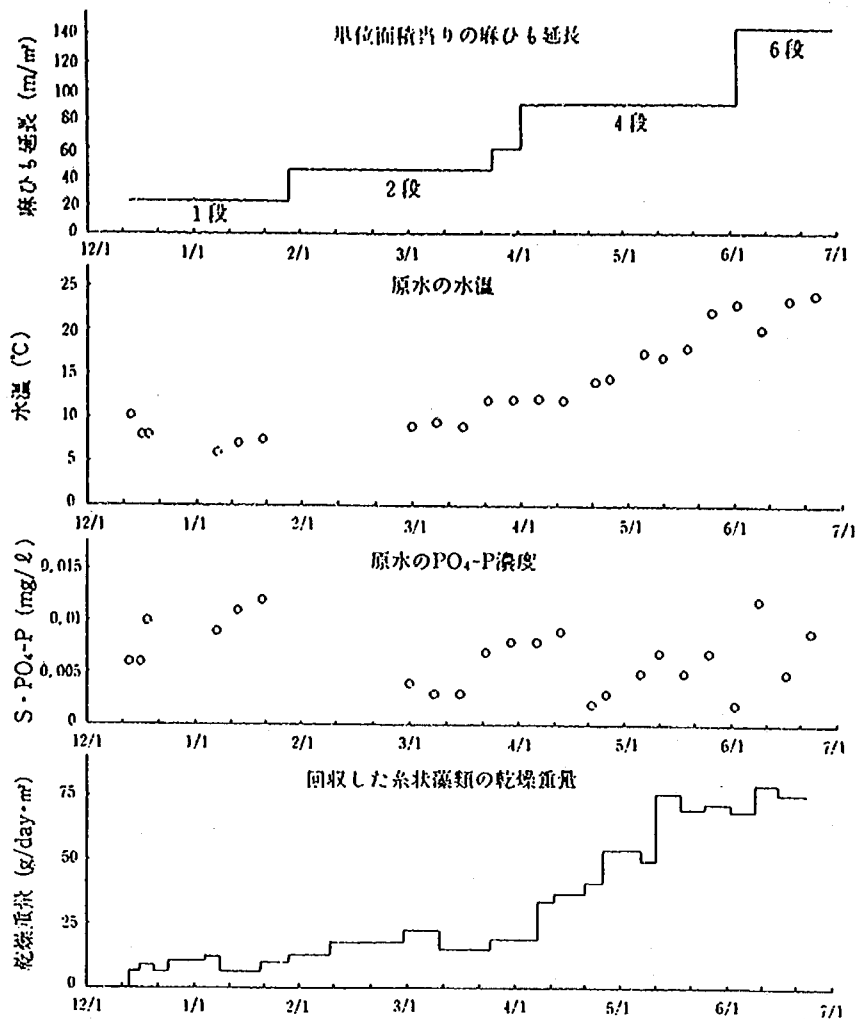


図-8 回収した糸状藻類の乾燥重量等の測定結果

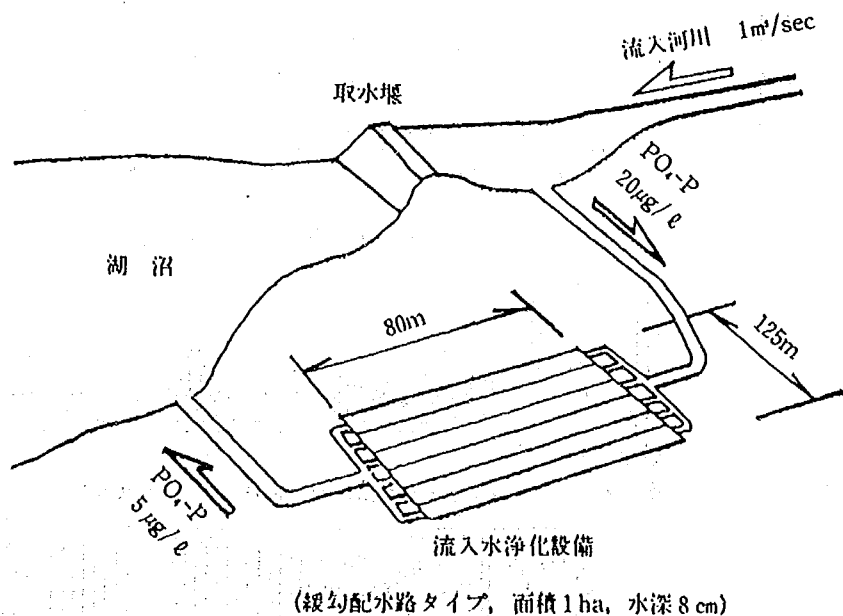


図-9 糸状藻類活用システム(緩勾配水路タイプ)の設備例

に示すように、 $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ の流入河川水を 1 ha の浄化設備で処理すると仮定すると、次式のように $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を $15 \mu\text{g}/\ell$ 低下させたという計算になる。なお図-8 によると原水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が数 $\mu\text{g}/\ell$ 程度の低濃度となっても藻類回収量が落ちておらず、このことは本タイプの大きな利点である。

$$\begin{aligned} & 130 \text{ mg/day} \cdot \text{m}^2 (\text{P 除去量}) \\ &= 15 \text{ mg/m}^3 (=15 \mu\text{g}/\ell; \text{PO}_4\text{-P 低下量}) \\ & \quad \times 86,400 \text{ m}^3/\text{day} \times \frac{1}{10,000 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

本実験に対し実際の設備では、①水深を 8 cm から 20 cm 程度まで上昇させる、②流速を 10 cm/sec から 15 cm/sec 程度まで上昇させる、③糸状藻類が付着する基質に工夫を加えて改良する、等を実施すれば、さらに $\text{PO}_4\text{-P}$ の除去効果が向上すると考えられる。

6. まとめ

(1) 湖沼の富栄養化対策として多量水を対象としたリン除去、特に $\text{PO}_4\text{-P}$ を除去するには、『糸状

藻類活用システム』が有効である。

(2) 糸状藻類活用システムでは、 T-P 、浮遊藻類、濁質の除去を目的とした前処理と、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、カビ臭物質の除去を目的とした本処理の2段階に分けて水処理をするのが望ましい。

(3) 現地実験の結果、前処理設備では T-P 、浮遊藻類、濁質をよく除去でき、本処理設備では $\text{PO}_4\text{-P}$ をよく除去でき、それをもとに現地における設備規模を算定すると、前処理設備で $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 当り 0.5 ha 、本処理設備で $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 当り 1 ha となる。浄化能力はさらに向上できると考えられ、湖沼の富栄養化対策としての実用化の可能性が確認できた。

参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩; 糸状藻類を活用した貯水池水質保全対策, 土木学会水理委員会水工学論文集, 第37巻, 1993
- 2) 中本信忠・坂井正; 緩速ろ過池における糸状珪藻とその連続培養の重要性, 日本水処理生物学会誌, Vol. 27, No. 1, 1991
- 3) 飯山郁子・坂井真奈美; 緑藻アオミドロの食品学的評価, 山陽女子短期大学研究紀要X, 1984

流動制御によるダム湖の水質保全技術の開発

丹羽 薫^{*} 久納 誠^{**} 久保徳彦^{***} 山下芳浩^{****}

1. はじめに

ダム湖を自然環境の核として活用して行こうという動きが強まっている中、いくつかのダム湖では流域から栄養塩類が過剰に流れ込むために、湖水の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。ダム湖の富栄養化による問題を解決するには、①流入河川水から藻類が異常増殖する要因となる栄養塩類を除去すること、②ダム湖の流動を制御して藻類の異常増殖を阻止すること、③藻類が異常増殖する以前に藻類そのものを除去すること、があげられる。この中で最も維持管理が容易なのが②の流動制御であり、全自動化が可能である。本報では新たなダム湖の富栄養化対策手法として『流動制御システム』を開発したので報告する。なお、本システムは中小洪水による濁水長期化対策にも有効である。

2. 流動制御システムの概要

流動制御システムは、平常時においてダム湖の表層に温水でしかも水温分布が均一の循環混合層を、有光層の数倍に至る水深まで厚く形成させ続け、中小洪水時にもこの層を温存させることにより、有光層に生息する藍藻類等の好ましくない藻類への栄養塩類と光を制御することになり、それによって藍藻類の異常増殖を抑制するシステムである。図-1に流動制御システムの模式図を示す。

一般に夏季の水温分布は水面で最も高く、水深が深くなるにつれて低くなるいわゆる水温成層が形成される。水温成層が形成されると、表層の水は上下に移動し難い安定した水塊となり、表層では光も良

く得られるため、藻類が異常増殖するのに適した環境となる。

散気管方式の曝気装置により循環混合層が形成されると、水温鉛直分布がほぼ均一であるため、気温の急低下に伴う表層水温の低下や強風等による上下の混合が常に生じ易い状態になる。循環混合層が有光層の数倍に至る水深まで存在すれば、有光層で増殖しかけた藻類は光が届かない有光層の下に追いやられ、光合成ができなくなるため、異常増殖は抑制される。

藍藻類は細胞内に気泡を持ってゆっくりと浮上することができるが、緑藻類や珪藻類は流動がなければ沈降するしかない。上下の混合流を生じるような流況のもとでは、自ら浮上することができない緑藻類や珪藻類が混合流に乗って有光層に戻って来て増殖できるような環境となる。結果的に藍藻類に供給される栄養塩類を減少させることになり、藍藻類の異常増殖を抑制できる。

さらに循環混合層が温水でしかもその厚さが有光層の数倍あれば、栄養塩類を多く含んでいる中小洪水時の流入水を水温躍層へ導くことができ、藍藻類が生息している有光層への栄養塩類の混入を減少させることになり、藍藻類の異常増殖防止に役立つ。

濁水長期化対策としては、中小洪水時の高濁水を水温躍層に導き、表層の清澄水を温存するのが望ましい。散気管方式で循環混合層を厚くするこ

Development of Measures for
Reservoir Water Quality
Conservation by Current Control

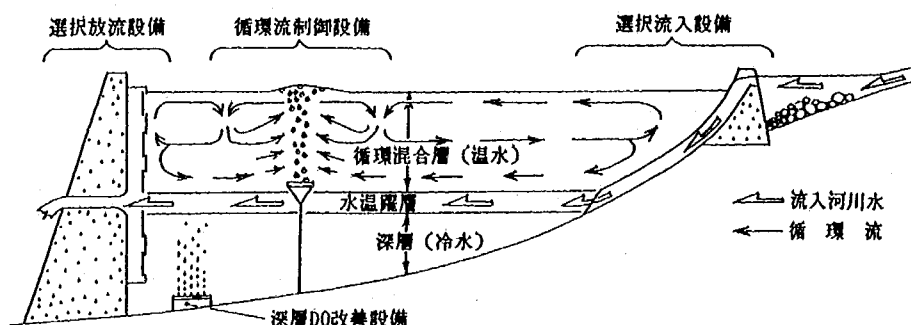


図-1 流動制御システムの模式図

とは、濁水長期化対策にもなる。散気管方式により循環混合層を厚く形成してゆく場合における水面付近の水温は、日射による熱エネルギーをはじめとする湖水と大気との熱収支バランスにより定まるが、日射エネルギーが優勢であるため、水面付近の水温低下はわずかしなく、むしろ循環により日射エネルギーが循環混合層下部にまで移送され、循環混合層全体の水温は上昇する。従って冷水対策として表層取水を行っている場合、取水可能な層が厚くなるため有利となる。

従来ダム湖では、選択取水設備及び曝気循環設備がそれぞれ単独の目的で設置されてきたが、ダム湖内の水温躍層標高を積極的にコントロールしてダム湖内の流動を制御しようとするものではない。ここで開発した流動制御システムは、中小洪水時の放流口を有光層の数倍の水深にあたる標高に設け、散気管方式の曝気装置により安定した水温躍層を放流口標高付近に作り、高負荷の栄養塩類及び高濁水を含む流入河川水をできるだけすみやかにダム湖から放流させる。ダム湖上流端においても流入河川水を有光層の湖水と極力混合させることなく水温躍層に導き入れるために選択流入設備を新たに設けるものである。

なお、ダム湖深層の溶存酸素を改善し底泥の栄養塩類の溶出を防止する深層DO改善設備もこのシステムに含まれる。

3. 各設備の目的と構造

3.1 循環流制御設備

循環流制御設備は、散気管方式の曝気装置を用いて、ダム湖の表層に温水でしかも水温分布が均一の循環混合層を、有光層の数倍に至る厚さになるように形成させる設備である。

散気管方式の曝気で注意しなければならないのは、洪水時に高負荷の栄養塩類や高濁水が循環混合層に混入して来た場合に、曝気によって循環混合層全体に攪拌してしまわないことである。散気管方式の曝気装置は位置を容易に上下動できる構造になっており、自動水質観測装置を監視しながらダ

ム湖及び流入河川水の水温及び水質状況に応じてダム湖の流動を制御することが可能である。洪水時は曝気を停止し、洪水終了後は清澄水の下限水深に曝気装置の設置標高を一致させてから曝気を開始する。その後は清澄水の下限水深の降下に伴い、曝気装置の設置標高を降下させることにより、循環混合層を再形成させる。

3.2 選択流入設備

選択流入設備は、概ね5月から11月までの期間においてダム湖上流端にて平常時及び中小洪水時の流入河川水を、温水でしかも清澄を保っている循環混合層と極力混合させることなく、ほぼ確実に水温躍層へ導くことができる設備である。

最近ダム湖上流端に堆砂除去、水質浄化及び親水活動を目的として副ダムが造られつつあるが、選択流入設備はこの副ダムの越流部に工夫を加えたものである。選択流入設備の設備例を図-2に示す。この設備例の場合、平常時及び小規模洪水時の流入河川水は、管水路を通して循環混合層と全く混合することなく水温躍層へ導く。中規模洪水時の流入河川水は水中導流壁間の開水路を通して、循環混合層と極力混合させることなく水温躍層へ導く。洪水時の流入河川水には掃流土砂及び浮遊土砂が多く含まれるが、副ダムにより掃流土砂はカットされるため、管水路や水中導流壁間の開水路には浮遊土砂しか通過しない。浮遊土砂はフラッシュにより除去できるので、水路の維持管理は容易である。

3.3 選択放流設備

選択放流設備は、平常時には清澄水、洪水時には高濁水を水温躍層付近から、洪水後暫くしてからは清澄水を循環混合層からというように任意の標高より大量に放流できる設備である。

貯水量の何割かが入れ替わるような中規模の洪水が発生したとしても、水温躍層に流入して来た

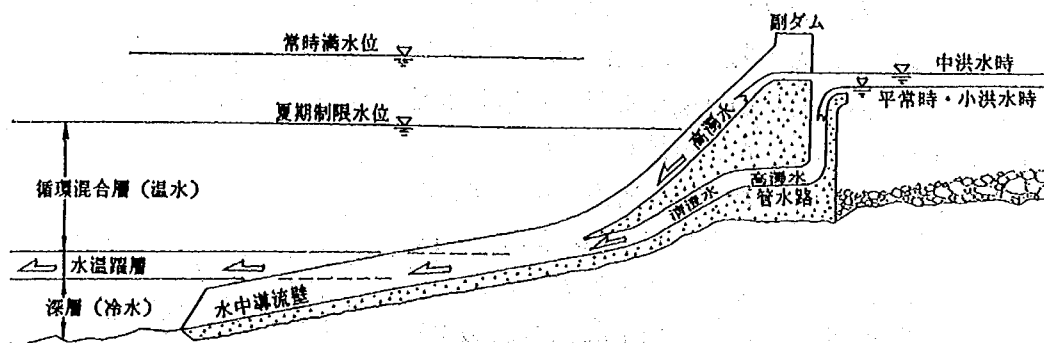


図-2 選択流入設備の設備例

大量の高濁水を、洪水直後の暫くの間
にこの設備により放流できてしまえば、
循環混合層にかなりの量の清澄水を温
存することが可能となる。

3.4 深層DO改善設備

循環流制御設備を稼動させた場合、
散気管方式の曝気装置より深い深層に
対しては流動はほとんど生じないため、
深層の溶存酸素濃度が低下する恐れが
ある。ダム湖深層における溶存酸素濃
度が低下すると、底泥から栄養塩類や
 H_2S 、Fe、Mnが溶出し、洪水後の深
層放流の際に異臭を放ったり、上水の
異臭や着色の障害が生じたりする。深
層DO改善設備は、曝気により酸素を供
給することにより、底泥からの栄養塩
類や H_2S 、Fe、Mnの溶出を抑制させ
る設備である。

装置は散気管方式の空気量の少ない
曝気装置を用いるが、曝気水深は湖底
付近で底泥を巻き上げない水深に固定
する。曝気による気泡が水温躍層を乱
すことがないように、細かい噴出口を
広い範囲に分散させて設け空気量を少量とし気泡
は細粒とすることが必要である。

4. 循環混合層の現地実験

4.1 循環混合層の形成

釜房ダム（堤高45.5m、総貯水容量4,530万 m^3 、
湛水面積3.9 km^2 、流域面積195 km^2 ）では、平成4
年には大型タイプの空気揚水筒1基を含む6基の
間欠式揚水筒方式の曝気装置を稼動させていた。
本実験は間欠式揚水筒方式を6基とも平成4年8
月10日より約1ヶ月のあいだ散気管方式に切り換
え、その期間のダム湖の水温鉛直分布を追跡した。
なお両方式ともコンプレッサーの動力は同一とし
た。図-3にダム湖の曝気装置近傍の水温鉛直分
布を示すが、散気管に切り換えた翌日と概ね水温
鉛直分布が均一になった17日後をとり出して、両
方式の比較を容易にした。散気管方式の方が気泡
に連行される水量が多いために、循環効率が高く
なり、循環混合層が厚くなっているのがわかる。
また図-3の時期における河川水温は概ね20℃で
あるが、散気管方式は間欠式揚水筒方式に比べ、

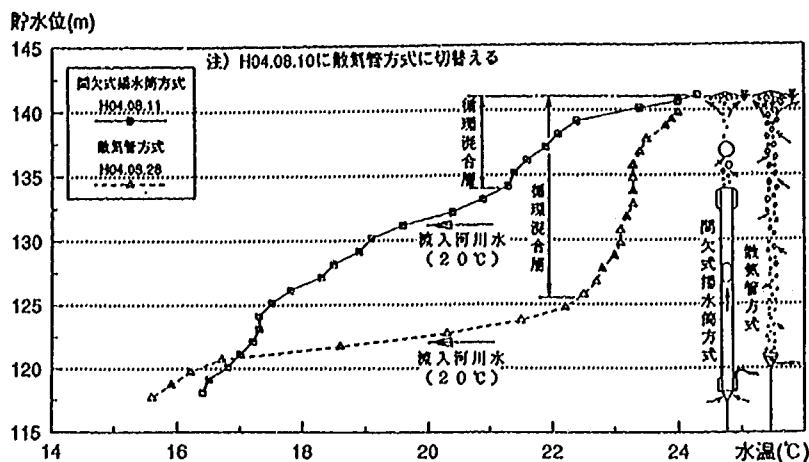


図-3 間欠式揚水筒方式と散気管方式の水温鉛直分布の比較

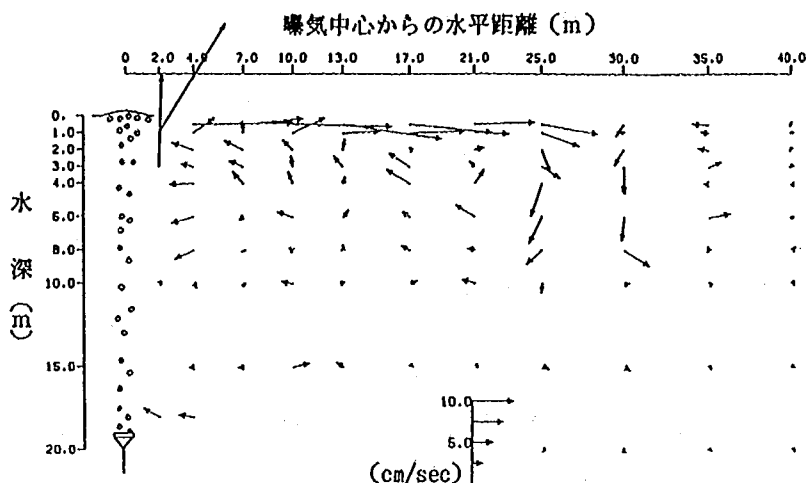


図-4 散気管方式の曝気による流動測定結果

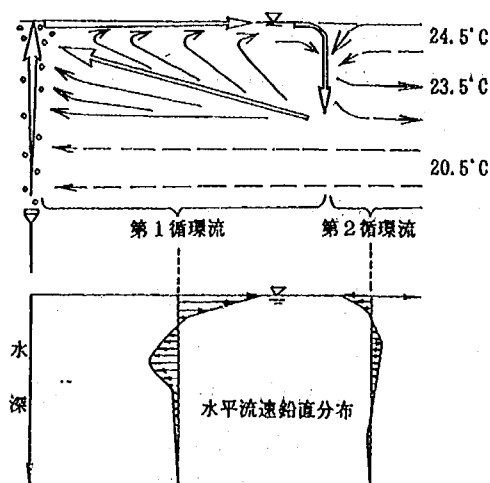


図-5 第1循環流と第2循環流の模式図

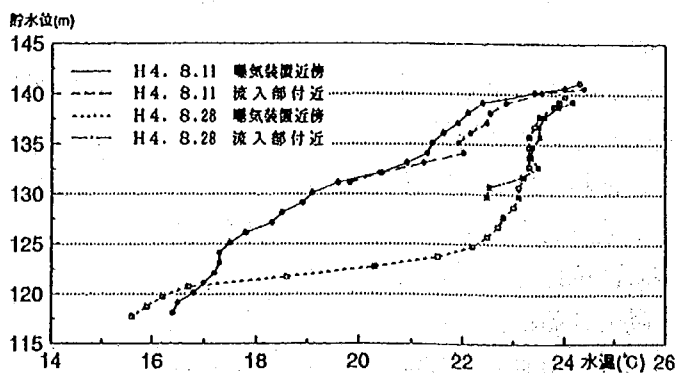


図-6 曝気装置近傍と流入部付近の水温鉛直分布

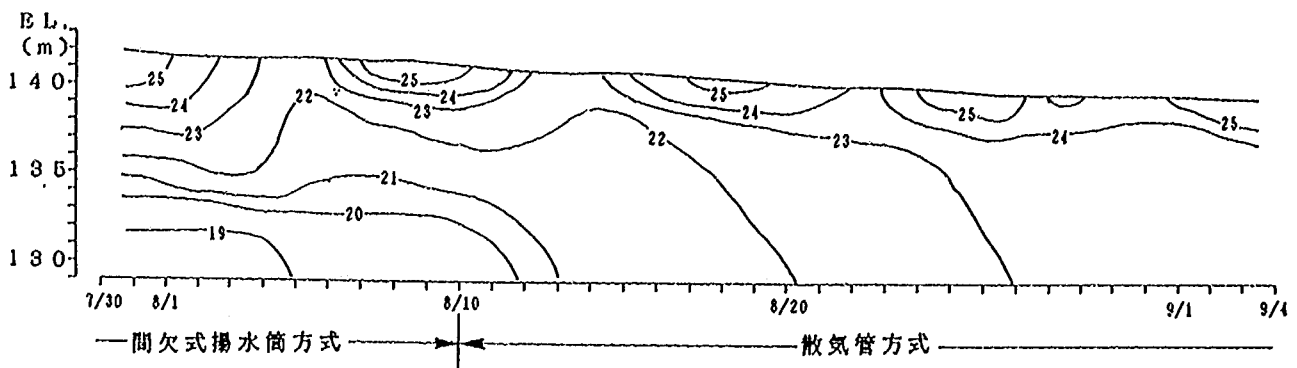


図-7 ダム湖中央部の水温鉛直分布の経時変化

循環混合層が高温でしかも厚いために、中小洪水時の流入河川水を10m程度も深い水深へ導くことができる。

4.2 循環混合層の流動

大型タイプの散気管方式の曝気装置（出力22KW、空気量3,700 l/min）周辺の流動を二次元及び三次元の電磁流速計を用いて測定した。測定結果を図-4に示す。散気管方式の曝気装置周辺の水の挙動は、図-5に示すような二つの循環流となっている。第1循環流は、まず曝気による気泡の上昇に伴い気泡周辺の水が連行される。次に気泡により持ち上げられた水が水平方向に流れを変え表面流が生じる。曝気中心から概ね30m離れると水平の流れは急に鉛直下向きの流れに変わり、ある水深まで降下すると流れは気泡や表面流の方向に向かう。この第1循環流の外側にはその鉛直下向きの流れに連行されて第2循環流が生じている。一方、図-6に示すようにダム湖の流入部付近（曝気装置から1,450m地点）の水温鉛直分布は曝気装置近傍の水温鉛直分布とほぼ等しくなっており、水温鉛直分布はダム湖の端まで短時間に伝達される。

以上の観測をもとに散気管方式の曝気による水の挙動を推測する。散気管からの曝気により第1循環流が生じる。第1循環流は、図-5に示すように第1循環流外側の浅い層から温水（24.5℃）を、第1循環流外側の深い層から冷水（20.5℃）を引き寄せ、両者を混合して中間水温（23.5℃）とし、これを第1循環流外側の中間水深付近に押し出す働きをする。押し出された中間水温の湖水は、浅い層の温水と深い層の冷水との間を楔のように割り続けるようにしてダム湖上流端まで運ばれる。この結果、表層の日射エネルギーはこの密度流に乗って循環混合層全体に運ばれることになる。これが観測では第2循環流として見られる。

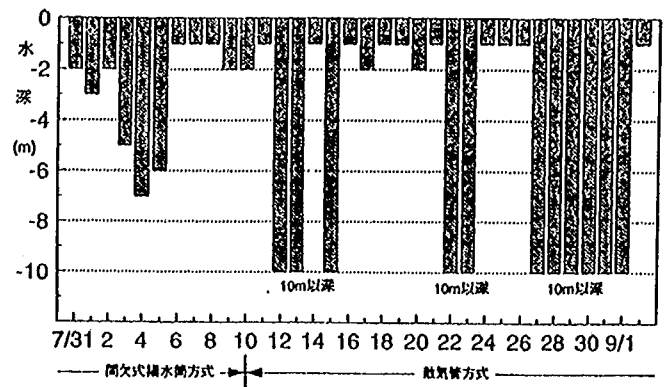


図-8 水面からの平均温度勾配が
0.1℃/m以下である水深の経時変化

4.3 循環混合層における水温鉛直分布の経時変化

一旦厚い循環混合層が形成されると日々の気象によって有光層の水温が循環混合層下部の水温より低下する機会が多く生じるようになる。有光層の水温が循環混合層下部の水温程度まで低下すると密度差が小さくなり有光層の湖水は循環混合層下部の湖水と入れ替わり易い状態となり、強風時などはその働きが顕著になる。図-7にダム湖中央部における水温鉛直分布の経時変化を示す。このデータをもとに、水面からの鉛直方向の平均水温勾配が0.1℃/m以下である水深を求め、その経時変化を図-8に示す。表層における水温がほぼ均一である層の厚さは、間欠式揚水筒方式では最大でも7mであったが、散気管方式では10m以上の日が週に数日出現している。このことは循環混合層を厚く形成させると、週に数度有光層の水が鉛直方向に10m以上も移動するような混合流を生じ易い状態になっていることを示す。

5. 小洪水時における流入河川水の水質

青野ダム（堤高29.0m、総貯水容量1,510万m³、湛水面積2.15km²、流域面積51.8km²）において、一雨降水量38mmの小洪水時の際に、流入河川水のリン濃度の測定を行った。図-9に流入河川のリン濃度の測定を行った。

ン濃度測定結果を示す。洪水時にダム湖に流入するT-P、 PO_4 -Pの総量は流入水量と栄養塩類濃度の積であり、平常時に比べるとはるかに多い量の栄養塩類がダム湖に入ったことがわかる。

このように小洪水時には PO_4 -P濃度が高いが、洪水の規模が大きくなるに従い洪水全体の PO_4 -P濃度は希釈されて低くなる傾向がある。しかし大洪水時でもその初期においては PO_4 -P濃度が高いために、大洪水時の初期流入水についても中小洪水時と同様に確実に水温躍層に導いて PO_4 -Pを有光層に混入させない対策が重要となる。

6. システム稼動時のシミュレーション計算

6.1 散気管方式における水温予測計算手法

現地観測により得られた測定結果をもとにして、散気管方式の曝気循環によるダム湖の流動を再現できる鉛直一次元モデルの概要を述べる。4.2の観測結果で述べたようにダム湖全体の水質保全に直接寄与するのは循環混合層のうち第2循環流である。そこで第2循環流に着目して循環混合層を的確かつ簡便に再現できる鉛直一次元モデルを作成する。4.2に示した流動測定結果より得られた大型（空気量3,700 l/min）の際の第2循環流における水平流速の鉛直分布（曝気中心から35m離れた位置）を、図-10に示すような簡略化したモデルとし、分割層毎の流出及び流入量に換算した上で、鉛直一次元モデルに組み込んだ。大型1基及び小型（空気量950 l/min）5基を稼動させていたが、小型の能力算定については流出及び流入量が空気

量に比例するものと仮定して計算した。予測計算は、散気管方式に切り替えた平成4年8月11日から27日まで実施した。計算結果を図-11に示すが、計算値は実測値に概ね一致したため、散気管方式の曝気循環のもとでの水温鉛直分布の経時変化は、このように第2循環流の水平流速より算定する手法によって予測計算することが可能であると考えられる。

6.2 洪水時の流動制御システム

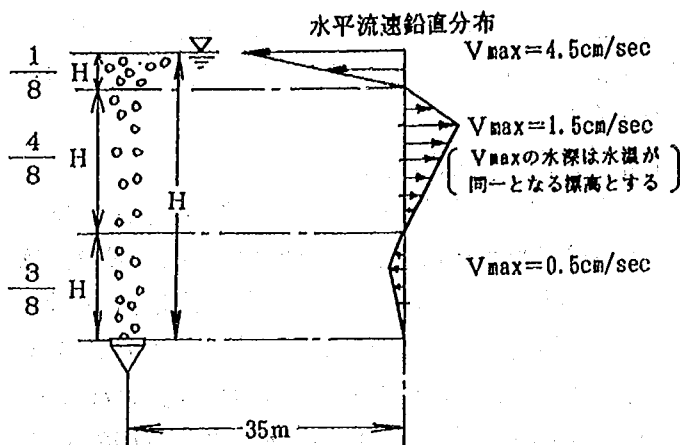


図-10 シミュレーション計算に用いた水平流速分布モデル

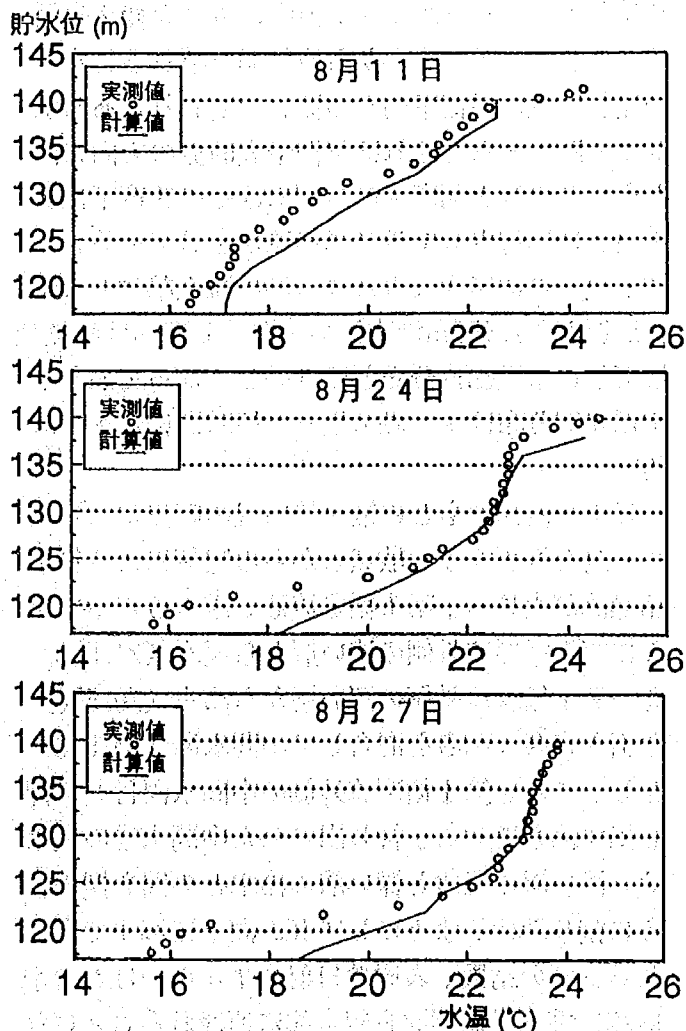


図-11 実測値とシミュレーション計算結果

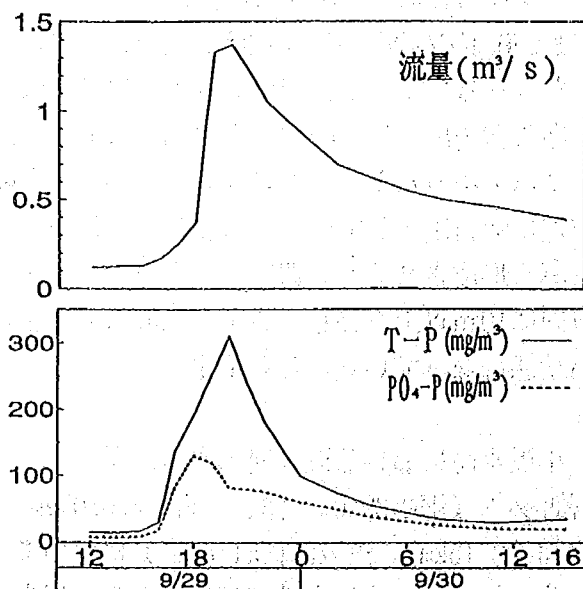


図-9 流入河川における小洪水時のリン濃度

循環混合層が有る場合と無い場合とにおいて、流入河川水がダム湖のどの水深に入り込むかを、6.1で開発した鉛直一次元モデルを用いて予測計算を行った。散気管方式の曝気装置により、循環混合層を厚く保っている釜房ダムの平成4年8月27日に洪水が生じたと仮定した。図-12に示すような回転率0.25回のモデル洪水を与え、コンジットゲートで流入水の50%を一定率放流させると仮定した。洪水時の水温及び濁度の鉛直分布を図-13に示す。回転率0.25回の洪水が来た場合、循環混合層が有る場合は無い場合に比べて、表層付近に残る清澄水の水深が5m程度増加することがわかった。

7. まとめ

(a) 曝気循環により水温躍層標高を有光層の数倍に至る水深に制御し、それに合わせて洪水時における流入水の流入標高及び放流水の放流標高を制御する流動制御システムは、有光層で生息する好ましくない藻類への栄養塩類の供給を減少させることになり、藻類の異常増殖を抑制するのに効果が高いと考えられる。

(b) 循環混合層を有光層の数倍に至る水深まで形成させると、循環混合層では水温鉛直分布がほぼ均一となって上下方向の深い混合流がしばしば生じることになり、有光層で生息する好ましくない藻類の光合成時間を大幅に短くすることにより、藻類の異常増殖を抑制するのに効果が高いと考えられる。

(c) 循環混合層を厚く形成させるには、間欠式空気揚水筒方式より散気管方式の曝気循環の方が効率が高い。

(d) 循環混合層は曝気循環により生じる第2循環流により形成され、ダム湖全体に一樣に広がる。

(e) 散気管方式の曝気循環によるダム湖の流動を再現できる鉛直1次元モデルを構築した。

参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠；総合的な貯水池水質保全対策技術の開発、ダム技術、No. 75、1992
- 2) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；貯水池流動制御による水質保全対策、土木学会水理委員会水工学論文集、第37巻、1993
- 3) 丹羽薫・天野邦彦・三浦進；貯水池富栄養化

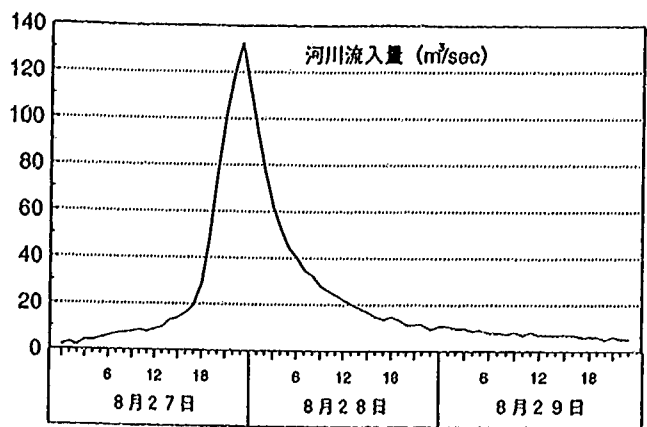


図-12 シミュレーション計算で入力した洪水波形

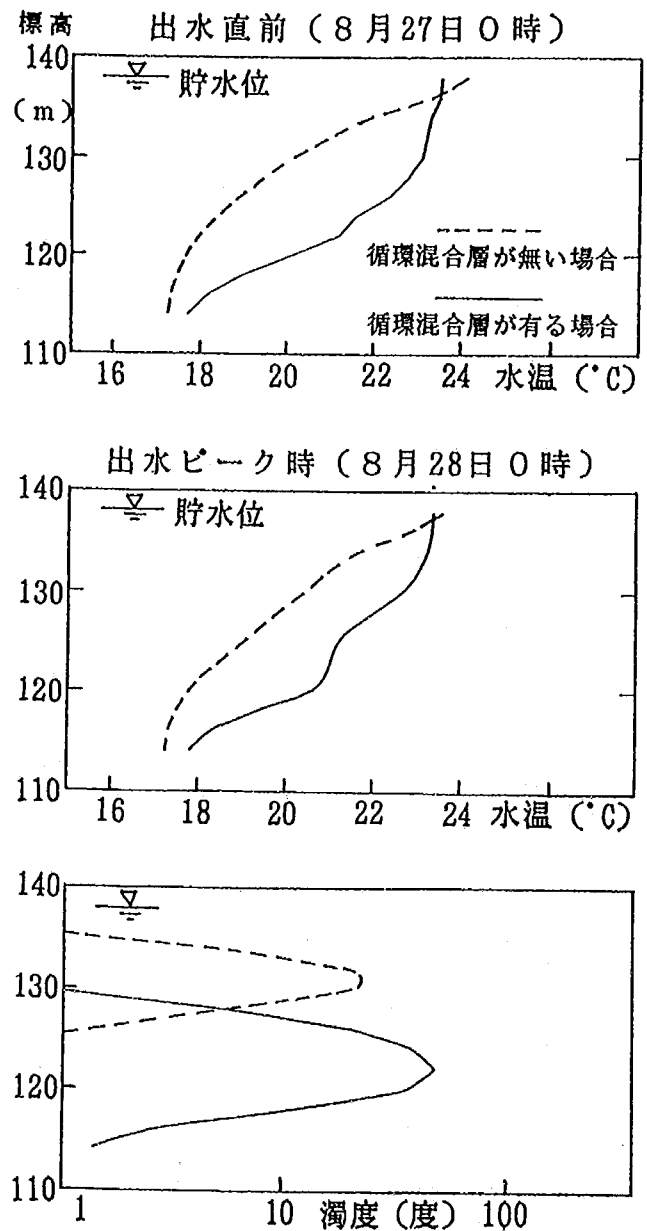
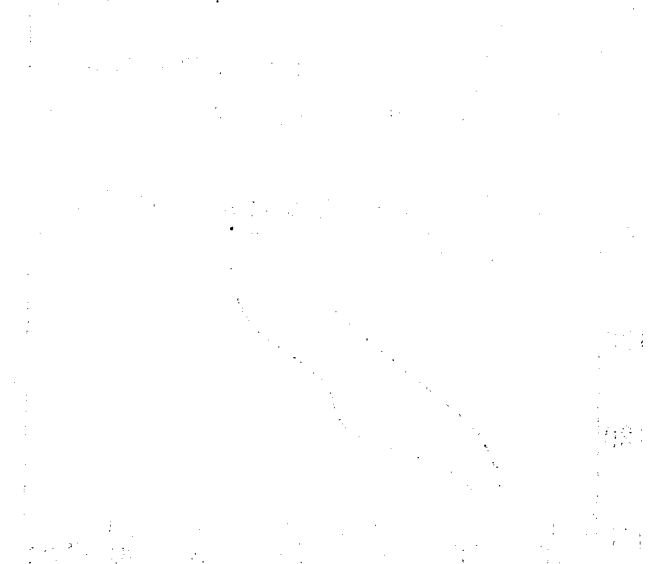


図-13 洪水時のシミュレーション計算結果

対策としての曝気循環法に関する検討、ダム工学、No. 3、1991

- 4) 浅枝隆・池田裕一・Jörg IMBERGER；不連続な密度界面をもつ成層中におけるBubble Plumeの挙動と成層の時間推移、土木学会論文



ダム及びダム湖流域環境ワークショップ

EUTROPHICATION CONTROL TECHNIQUES FOR LAKES AND RESERVOIRS IN JAPAN

KAORU NIWA
MAKOTO KUNO
TOKUHIKO KUBO
SEIJI SANADA

Environmental Planning Division, Environmental Department
Public Works Institute, Ministry of Construction

1. Structure of comprehensive new eutrophication control techniques

In Japan, many reservoirs and natural lakes have eutrophied due to increasing levels of nutrient in reservoirs which have washed down in large quantities from the catchment areas. In these waters, blue-green algae and flagellate algae become dominant species and grow abnormally, causing serious problems such as algae blooms, fresh water red tide, the musty odor of city water, foul smelling reservoir shores, unnatural death of fish, and are generally unpleasant.

At the Environmental Planning Division of the Public Works Institute at the Ministry of Construction, we are currently developing a set of measures to effectively preserve the quality of water of dams and reservoirs under all kinds of weather conditions. Figure 1 shows the menu of eutrophication control measures for dams and reservoirs presently being undertaken by our division. These measures can be broadly divided into 4 groups. Groups I to III are either under development or ready to be developed, while studies on group IV have just started.

Facilities in group I remove nutrient substances such as phosphorous and nitrogen from inflowing rivers before they flow into dams and reservoirs. This group consists of the following systems:

- Filamentous algae system, which removes inorganic phosphorous from inflowing river waters during non-flood periods through absorption by filamentous algae;
- Inflow water bypass system, in which inflowing river waters during non-flood periods are diverted downstream of dams so that they do not enter the dammed water;
- Minor flood storage system, which is mainly designed to remove inorganic phosphorous during minor floods (in this system, flood waters are stored in an inlet valley and are purified before being discharged into the dams); and
- Fallen leaf removal system, which is designed to remove fallen leaves from inflowing river waters.

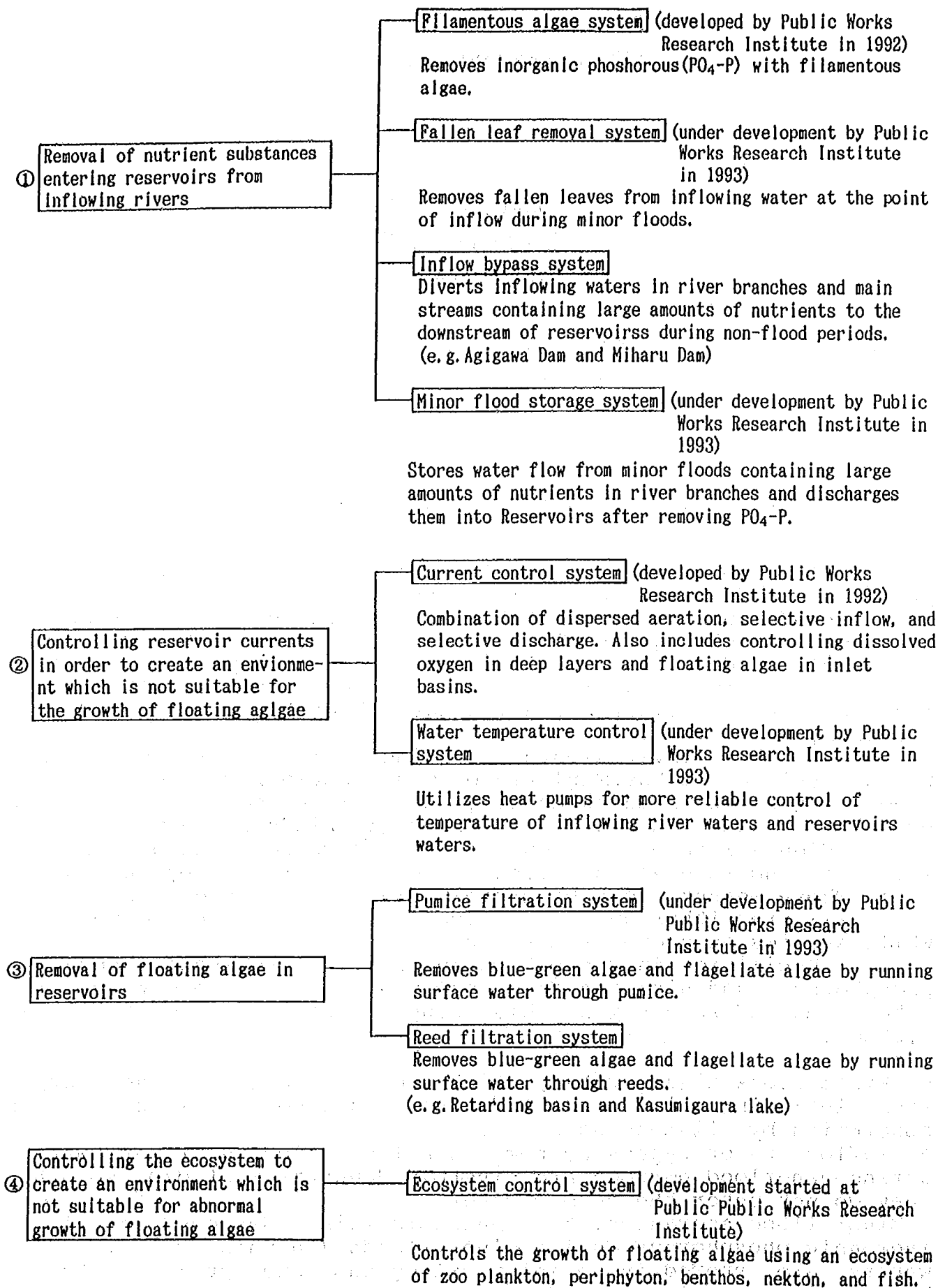


Figure 1. Menu for eutrophication control of reservoirs and lakes

Facilities in group II control the water currents inside reservoir in order to create an environment which restricts the stable growth of blue-green algae and flagellate algae on the surface. This group consists of a current control system, which is a combination of dispersed aeration, selective inflow and selective discharge, and a water temperature control system, which utilizes a heat pump to control the currents more reliably.

Facilities in group III remove algae varieties such as blue-green algae and flagellate algae before they grow abnormally and cause algae bloom and fresh water red tide. This group consists of a pumice filtration system, which removes algae varieties by filtration using pumice, and a reed filtration system, which removes algae varieties from reservoirs just as abnormal growth of algae starts by running the reservoir water through reeds.

In group IV, the ecosystem within the reservoir is controlled to create an environment which restricts the abnormal growth of blue-green algae and flagellate algae. This group consists of an ecosystem control system, which utilizes zoo plankton, periphyton varieties, benthos, nekton, and fish in order to control the growth of different algae.

2. Filamentous algae system

2.1 Introduction

The abnormal growth of floating algae is caused by large amounts of inorganic phosphorus ($\text{PO}_4\text{-P}$) in reservoir water. Research into ways of removing high concentrations of $\text{PO}_4\text{-P}$ from small amounts of water such as industrial drainage and sewage is being conducted separately. Although large volumes of water with low loads such as sewage and urea are treated with water flows from basins into natural rivers without plane loads such as cultivated lands or intensive treatment, techniques for removing $\text{PO}_4\text{-P}$ from these kinds of water have only recently been developed. At the Public Works Research Institute, we have developed techniques for removing inorganic nutrient such as $\text{PO}_4\text{-P}$ from inflowing river water by utilizing the purification ability of macrophytes called filamentous algae. Details of this filamentous algae system have already been published.¹⁾²⁾ This report describes the structure of the facilities of this system.

2.2 Filamentous algae system

2.2.1 Outline of system

In the filamentous algae system described here, an artificial environment is set up in a reservoir which is conducive to the growth of this algae type, normally found in rivers and marshes. This algae removes $\text{PO}_4\text{-P}$ from inflowing river water and surface water and prevents abnormal growth of blue-green and other undesirable algae. Figure 2 illustrates the natural environments in which filamentous algae grow. In all cases, the filamentous algae grow by absorbing inorganic nutrient. Thus, this system effectively sets up and utilizes an artificial eco-

system in the reservoir conducive to the fixation of $P_{O4}-P$ normally found in natural rivers. This system also includes facilities to eliminate musty odor substances from discharge water. Figure 3 shows some examples of how these facilities are configured in reservoirs.

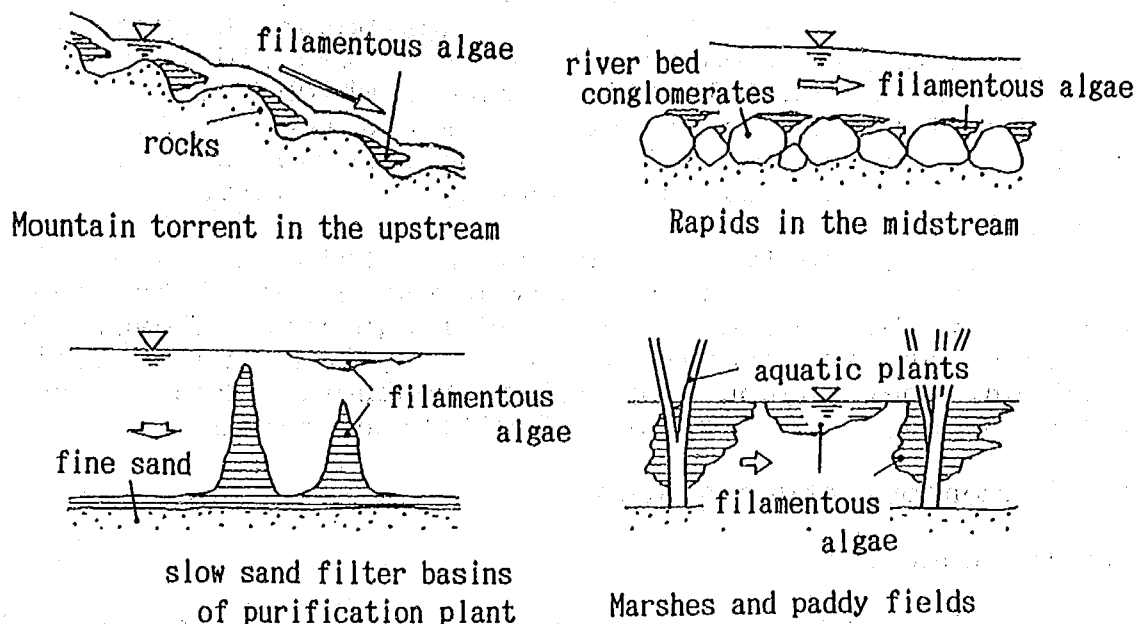


Figure 2. Natural environments inhabited by filamentous algae

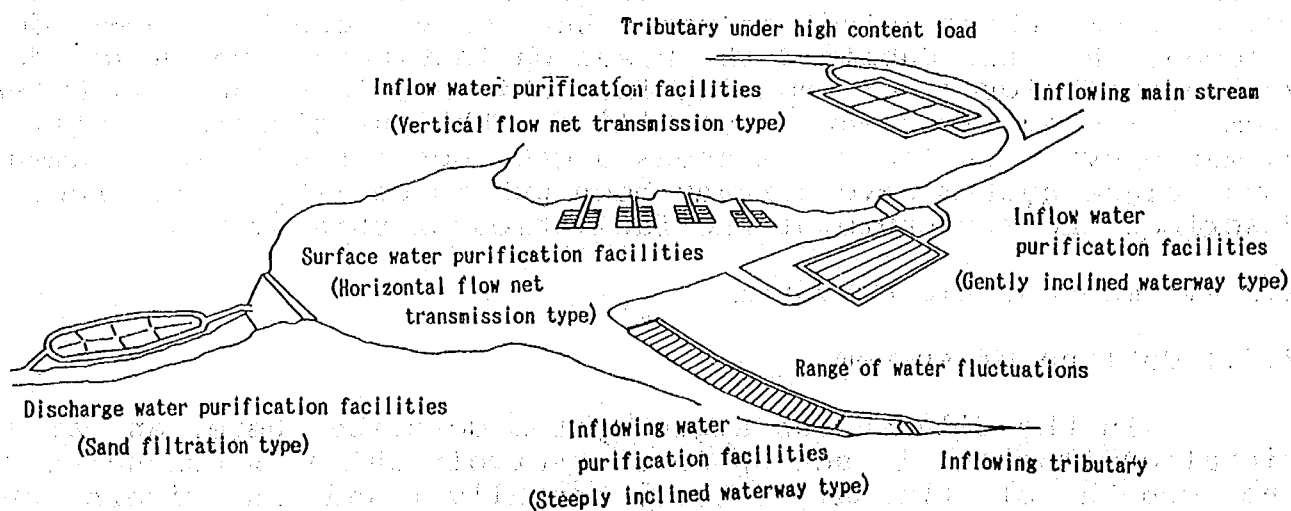


Figure 3. Example of facility layout

2.2.2 Types of filamentous algae

Marine algae are large periphyton living in sea water. The fresh water equivalent to periphyton is filamentous algae. The term filamentous algae used in this report refers to algae which looks to the naked eye like wool or cotton. Table 1 lists some types of filamentous algae related to this system; filamentous algae can be broadly classified into two types: one found in mountain torrent, rapid river, and waterways, and the other in gentler streams such as marshes, and paddy fields. The seasons suitable for growth are different for each type of filamentous algae.

Table 1. Types of filamentous algae and system

Algae type	Name	Class	Features in water				Growing season			
			Adheres to substrates in rapid rivers	Adheres to substrates in gentle streams	Forms membranes at the bottom of gentle streams	Floats in masses in gentle streams	Spring	Summer	Autumn	Winter
Rapid river ↑ ↓ Gentle stream	<i>Cladophora glomerata</i>	Green algae	○				(○)	○	○	△
	<i>Ulothrix</i> sp.	Green algae	○				○			(○)
	<i>Diatoma vulgare</i>	Diatoms	○	○			((○))	△		○
	<i>Oedogonium</i> sp.	Green algae	○	○	(○)		○	○	△	△
	<i>Melosira varians</i>	Diatoms	○		○		○	△	○	○
	<i>Fragilaria construens</i>	Diatoms	○		○			△	○	△
	<i>Spirogyra</i> sp.	Green algae	○	○		○	○	○	○	○
	<i>Mougeotia</i> sp.	Green algae		○		○			○	○
	<i>Hydrodictyon reticulatum</i>	Green algae				○	○	○	○	△
Gentle stream	<i>Cladophora crispata</i>	Green algae				○		○	○	

Note : Information in () is from the publication "Water"
Information in (()) is from the "Museum of Rivers and Lakes"

2.2.3 Advantages of filamentous algae in water purification

Filamentous algae has a number of advantages over floating algae and high aquatic macrophytes such as water hyacinth for the purification of inflowing river waters and reservoirs. Specifically, filamentous algae:

1. does not cause eutrophication (algae bloom, freshwater red tides, musty odor)
2. grows rapidly and therefore absorbs inorganic nutrient more efficiently. As can be seen from Figure 4 which compares the

- ability of filamentous algae and aquatic plants such as water hyacinth to absorb $\text{PO}_4\text{-P}$, filamentous algae can absorb approximately 10 times as much $\text{PO}_4\text{-P}$ as aquatic plants 3)
3. does not waste valuable reservoir water as it lives in the water whereas water hyacinth and reed discharge moisture into the atmosphere by evaporation from the surface of the leaves
 4. requires a substrate to adhere to or lie down on. The growth of algae can be controlled by controlling the shape and size of the substrate
 5. can adapt to low temperatures and thus survive even the winter. Therefore, it is possible to grow filamentous algae before the growing season of algae broom in order to continue to absorb the nutrient. It is also more adaptable in terms of location and season than the water hyacinth which can grow only during summer in western Japan
 6. unlike floating algae, it does not require high concentrations of inorganic nutrient, and can absorb nutrient even at quite low concentrations if the surrounding water is constantly changing
 7. can be separated from water and removed (e.g. with screens) more easily than floating algae
 8. contains nourishment and serves as excellent feed for fish as well as livestock such as chicken⁵⁾.

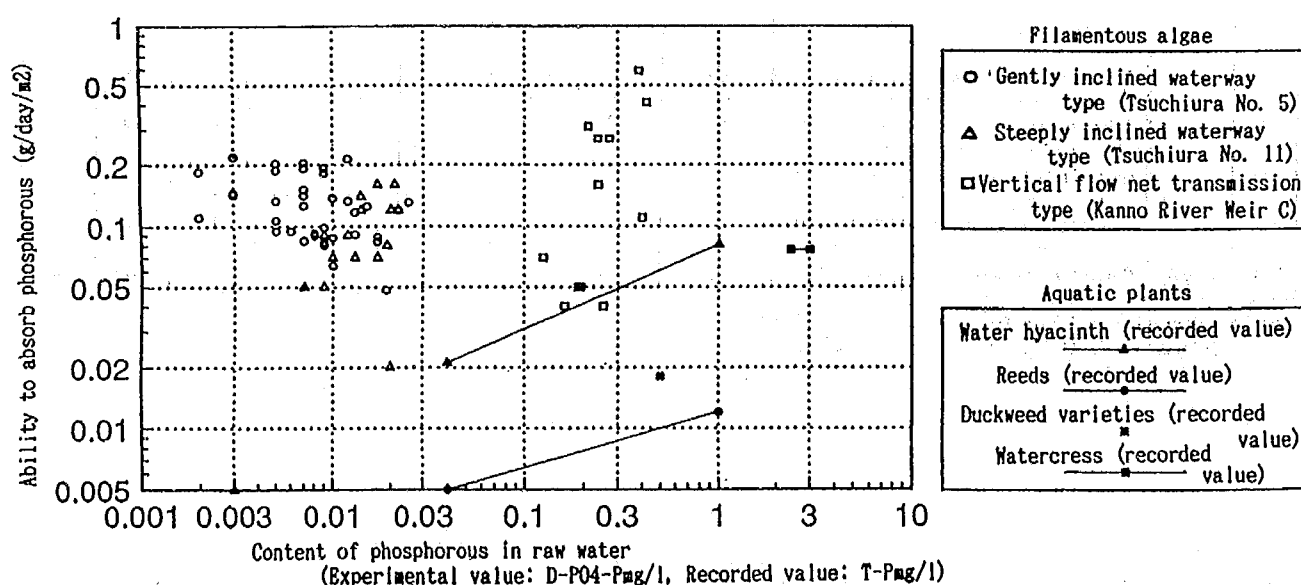


Figure 4. Comparison of ability of filamentous algae and aquatic plants to absorb $\text{PO}_4\text{-P}$

2.2.4 Natural growth environment of filamentous algae and purification facilities

As shown in Figure 2, filamentous algae grows in rivers, lakes, paddy fields, and water purification plants under various hydraulic conditions. In this system, an artificial environment is set up in lakes which is conducive to the growth of this type

of algae. This enables the filamentous algae to absorb $\text{PO}_4\text{-P}$. The system accurately reproduces the natural growth conditions of filamentous algae inside the purification facilities, and the absorption efficiency and removal of $\text{PO}_4\text{-P}$ are enhanced by designing the facility appropriately (velocity and depth of water, substrate, gathering of filamentous algae, cleaning of the facility). Figure 5 and Table 2 outline the facilities examined above.

The purification facilities can be broadly classified into the following three types according to the type of raw water.

(1) Inflowing water purification facilities

Inflowing water purification facilities decrease the phosphorus in the reservoirs under normal conditions by removing $\text{PO}_4\text{-P}$ from the inflowing river waters just before they flow into the reservoir. These facilities provide a substrate to which filamentous algae adhere; the filamentous algae then remove $\text{PO}_4\text{-P}$ through absorption. These facilities can also be used to remove $\text{PO}_4\text{-P}$ in sewage and urea-treated water.

(2) Surface water purification facilities

Surface water purification facilities provide a substrate to which filamentous algae adhere. These facilities are designed to remove $\text{PO}_4\text{-P}$, which is mixed into the reservoir during medium and minor floods, by absorption by filamentous algae before the $\text{PO}_4\text{-P}$ are absorbed by undesirable floating algae such as blue-green algae and flagellate algae.

(3) Discharge water purification facilities

Discharge water purification facilities remove undesirable algae varieties such as blue-green algae and musty odor substances by sand filtration from water discharged downstream and provide a normal flux supply in periods when odors are easily generated. Blue-green algae are removed by pumice filtration whereas musty odor substances are removed by sand filtration.

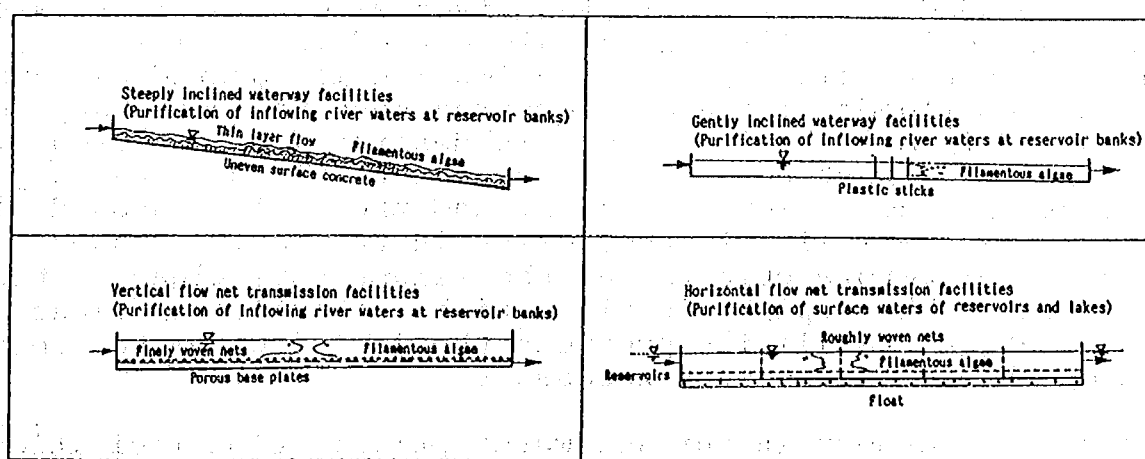


Figure 5. Diagram of purification facilities

Table 2. Correspondence of purification facilities with the natural world

Natural world		Corresponding purification facilities	Water conditions	Suitable filamentous algae
①	Gentle streams upstream (adheres to rocks)	Steeply inclined waterway type facilities (adheres to uneven concrete)	Thin layer flow : 30~50cm/sec Approximate water depth : 1cm Length of waterway : 40m Inclination of waterway : 15~35%	<i>Cladophora glomerata</i> <i>Melosira varians</i> <i>Diatoma vulgare</i> <i>Degonium</i> sp. <i>Spirogyra</i> sp. <i>Ulothrix</i> sp.
②	Rapids midstream (adheres to river bed conglomerates)	Gently inclined waterway type facilities (adheres to plastic sticks)	Horizontal flow : 10~12cm/sec Water depth : 15cm Length of waterway : 160m Inclination of waterway : 0.5~1%	<i>Melosira varians</i> <i>Degonium</i> sp. <i>Spirogyra</i> sp. <i>Fragilaria construens</i> <i>Diatoma vulgare</i> <i>Ulothrix</i> sp.
③	Slow filtration reservoirs at water purification macrophytes (lies on top of sand surface)	Vertical flow net transmission type facilities (lies on top of finely woven nets)	Vertical flow : 36cm/hour Water depth : 30cm Inclination of water surface : None	<i>Melosira varians</i> <i>Fragilaria construens</i> <i>Spirogyra</i> sp. <i>Hydrodictyon reticulatum</i>
④	Shallow lakes and paddy fields (adhere to aquatic macrophytes or float)	Horizontal flow net transmission type facilities (lies on top of roughly woven nets or float)	Horizontal flow : 20cm/min Water depth : 30cm Length downstream : 10m Inclination of water surface : None	<i>Degonium</i> sp. <i>Mougeotia</i> sp. <i>Hydrodictyon reticulatum</i> <i>Spirogyra</i> sp. <i>Cladophora crispata</i>

Note : the conditions of filamentous algae habitats are indicated in parentheses

2.3 Pretreatment facilities

2.3.1 Pretreatment procedures

Inflowing water purification facilities and surface water treatment facilities are the main form of treatment, but pretreatment is still performed when necessary. In the case of discharge water purification facilities, treatment is conducted in two stages, pretreatment and main treatment.

2.3.2 Pretreatment in inflowing water purification facilities

Inflowing water purification facilities are designed to remove PO₄-P contained in inflowing river waters. Large amounts of suspended solid in inflowing river waters interfere with the photosynthesis of filamentous algae used in the main treatment, and filamentous algae are less effective if covered by suspended solid from floods. Therefore, pretreatment to remove any suspended solid from inflowing rivers is desirable. Furthermore, many kinds of epiphytic algae other than filamentous algae are present in the inflowing rivers, and these algae should also be removed (especially if they exist in the early stages of the water flow) before cultivating the filamentous algae in the case of undesirable epiphytic algae with filamentous algae. Thus, purification facilities pretreat the inflow water to remove mud and epiphytic algae when necessary.

2.3.3 Pretreatment in surface water purification facilities

The object of surface water purification facilities is to remove PO₄-P from reservoir water, and also to remove undesirable epiphytic algae before the main treatment, since these may hinder the growth of the filamentous algae used in the main treatment. Thus, in surface water purification facilities, pretreatment removes the epiphytic algae when necessary.

2.3.4 Pretreatment in discharge water purification facilities

The object of discharge water purification facilities is to remove musty odor substances. Although filtration using fine sand is the main type of treatment, the sand tends to become clogged when large quantities of floating algae are present. It is therefore necessary to remove most of the floating algae before performing the main treatment by pretreatment in discharge water purification facilities.

2.4 Main treatment facilities

2.4.1 Types of facilities

There are various types of main treatment facilities: three types of inflowing water purification facility and one type of surface water purification facility as shown in Figure 5, and one type of discharge water purification facility.

2.4.2 Steeply inclined waterway type

The facilities of this type provide an environment for rapid-river filamentous algae to grow. In order to reduce the effort of collecting and removing filamentous algae from substrates, the velocity of the current is increased to 30-50 cm/sec by increasing the inclination of the waterway. The current forms a thin layer of water about 1cm deep. Figure 6 shows an example of a steeply inclined waterway facility. This type is suitable for inflowing river waters containing large amounts of phosphorus with a raw water PO_4-P content of 15-50mg/l, but is not appropriate when the filamentous algae needs to be used the most effectively. The inclination of the waterway is typically 15-35% and can be increased depending on the range of water levels in the dam. The substrate used is an uneven concrete surface with 5cm gravel embedded.

Although rhizoids of rapid-river filamentous algae rhizoids to gravel and concrete, grown filamentous algae cannot withstand water flowing so fast, breaks midway and flows downstream to accumulate naturally in the precipitation tank at the end of the waterway. Moreover, dead filamentous algae does not accumulate sedimentation of the waterway under such a fast water flow and steep inclination. Even if accumulation does occur, it can be cleaned easily by water hammering, thus enabling easy maintenance. The filamentous algae can be grown steadily by circulating part of the running water.

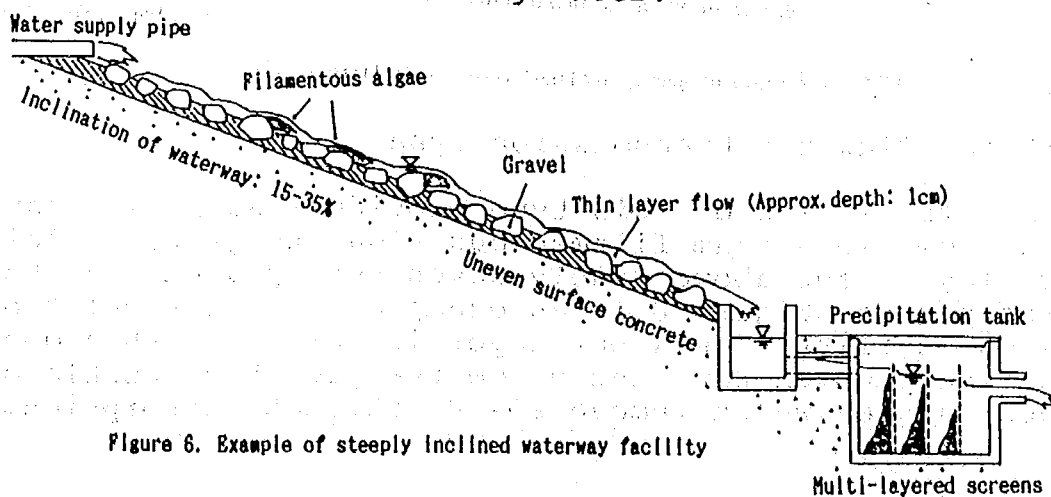


Figure 6. Example of steeply inclined waterway facility

2.4.3 Gently-inclined waterway type

In this type, an environment is provided which is suitable for the growth of rapid-river filamentous algae. The velocity and depth of water and substrates are set to the most favorable for the growth of filamentous algae, and filamentous algae are gathering and removed from substrates regularly to encourage a steady growth. Figure 7 shows a typical gently-inclined waterway facility. Such facilities are appropriate for inflowing river waters containing large amounts of phosphorus with a raw water PO₄-P content of 15-50mg/l. This type makes effective use of filamentous algae.

As the water surrounding the cells of the filamentous algae changes constantly, the filamentous algae can absorb PO₄-P dissolved in the water at all times, growth rate. However, if the velocity of the flowing water is too fast, the rate of removal of PO₄-P decreases as the flowing water does not have sufficient time to make contact with the reservoir water. Also, if the water is too deep, the growth of filamentous algae will slow down as the sunlight will not penetrate to the bottom of the waterway. Thus, the most effective velocity of flowing water is 10-12cm/sec, and the most effective depth of water is approximately 15cm. The inclination of the waterway is 0.5-1%.

The substrates of this type consist of numerous plastic sticks of ϕ 3-5mm which are placed perpendicularly resembling the sticks used in flower arranging. The filamentous algae which adheres to the substrate is collected on porous base plates by moving the substrates up and down. Then, the flowing water collects the algae at the end of the waterway where they are gathering. This regular gathering requires considerable manpower, and the process needs to be automated.

To further stabilize the filamentous algae, yards should be provided to supply the algae at several places in the waterway, and to circulate part of the running water.

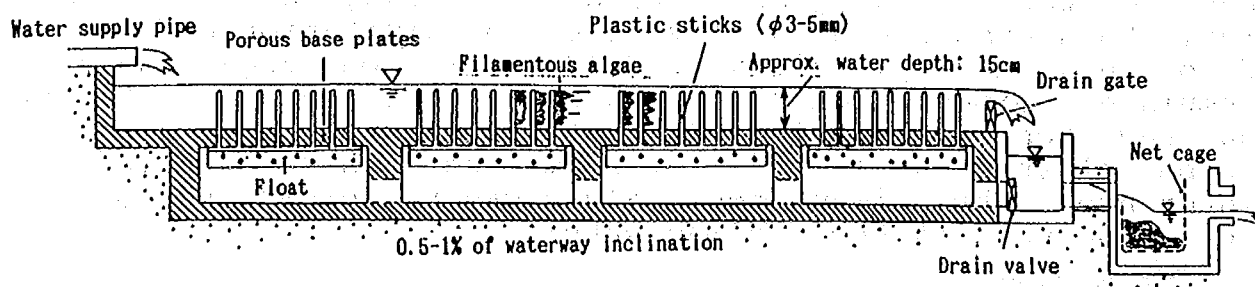


Figure 7. Example of gently inclined waterway facility

2.4.4 Vertical flow net transmission type

The facilities of this type provide a suitable environment for the gentle-stream filamentous algae to grow, consisting of water layers set above finely woven nets placed on top of porous base plates. Figure 8 is an example of a vertical flow net transmission facility. The water layer is shallow with a depth of 30cm. The finely woven nets encourage the growth of gentle-stream filamentous algae which remove PO₄-P through absorption. The

appropriate PO₄-P content of raw water is more than 50mg/l, and thus such facilities are suitable for removing high content PO₄-P as in sewage, but not for inflowing river waters with a PO₄-P content of less than 50mg/l. The finely woven nets which act as substrates for the filamentous algae to stick to or lie down on are made of polyethylene woven at intervals of 2-3mm.

Filamentous algae grow to become a fibrous mass with diameters of 5-50cm by adhering to bubbles formed by photosynthesis. These masses float up and are easily by sloped gathering box. As the filamentous algae continue to grow, organic matter including dead algae accumulate onto the finely woven nets, and as PO₄-P tends to dissolve from these accumulations, the nets must be cleaned regularly by water hammering.

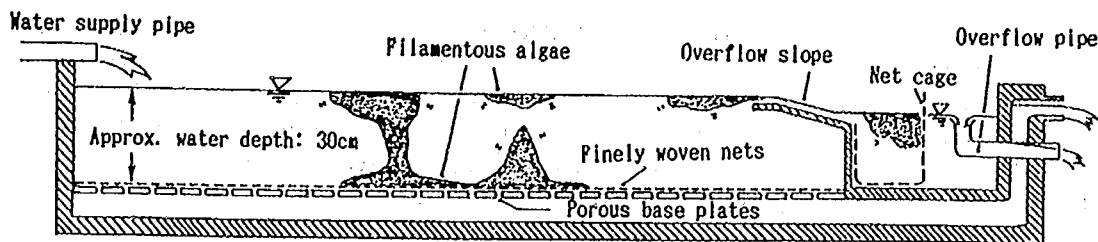


Figure 8. Example of vertical flow net transmission facility

2.4.5 Horizontal flow net transmission type

These facilities are suitable for gentle-stream filamentous algae such as filamentous green algae, consisting of partitions and base plates of roughly woven nets which float on the surface of reservoirs. Figure 9 is an example of a horizontal flow net transmission facility. Water layers 30cm deep are set on top of the base plates made of roughly woven nets. This structure allows gentle-stream filamentous algae to adhere easily to the roughly woven nets acting as partitions, and is especially suitable for the growth of filamentous green algae between May and October. Although this type is intended for surface water of reservoirs and lakes, the PO₄-P content of raw water must exceed 10mg/l at all times (including non-flood periods). Furthermore, filamentous green algae which are the dominant species for this type can endure turbid water caused by floods for short periods of time. The filamentous algae which adheres to the partitions of the roughly woven nets must be regularly gathering by movable screens.

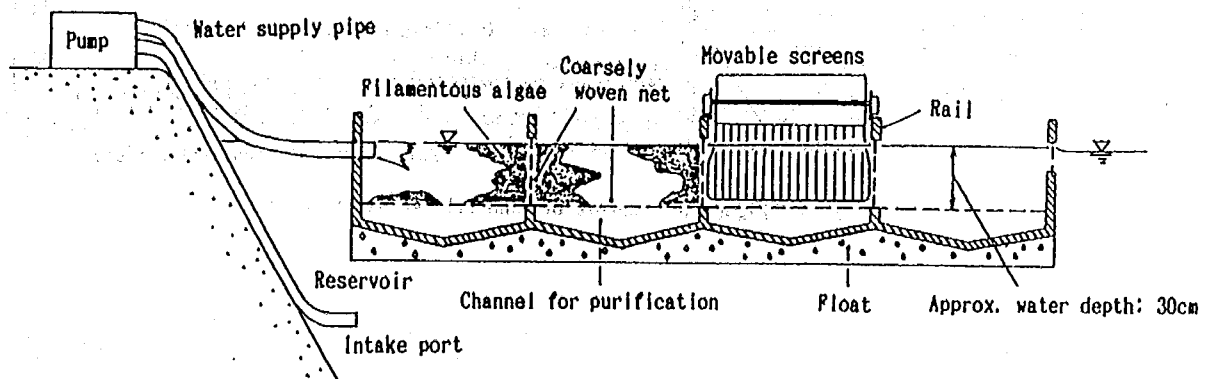


Figure 9. Example of horizontal flow net transmission facility

2.4.6 Sand filtration type

The object of this type of facility is not to remove PO₄-P as in facilities described so far in sections 2.4.2 to 2.4.5, but to remove substances which cause musty odors. Figure 10 is an example of a sand filtration facility for the growth of gentle-stream filamentous algae. It consists of a water layer set above a gravel layer placed on top of a sand layer. The gravel layer is approximately 5cm thick and the gravel can be cleaned easily with air and the water flow. The tank is shallow with a depth of 30cm, suitable for gentle-stream filamentous algae. The sand particle diameter is approximately 1mm, and it removes musty odor substances such as 2-MIB and diosmium by purification between sand particles.

When the purification between sand particles is anaerobic, the sand is generally not so effective for decomposing organic matter such as musty odor substances. In this method, however, the filamentous algae in the water layer carries oxygen obtained by photosynthesis at all times and supplies oxygen to the sand particles night and day. Therefore, the space between particles becomes aerobic, enabling organic compounds such as musty odor substances to decompose. If the diameter of the sand particles is too large, the aerobic bacteria will not be able to decompose the compounds due to lack of surface area of sand. Thus, the sand layer must consist of more than 30cm of sand with particle diameter of approximately 1mm.

Even when floating algae are removed in the pretreatment stage, the filtration tends to become clogged in a few months. This can be solved by cleaning the gravel layer using a movable wash pipe.

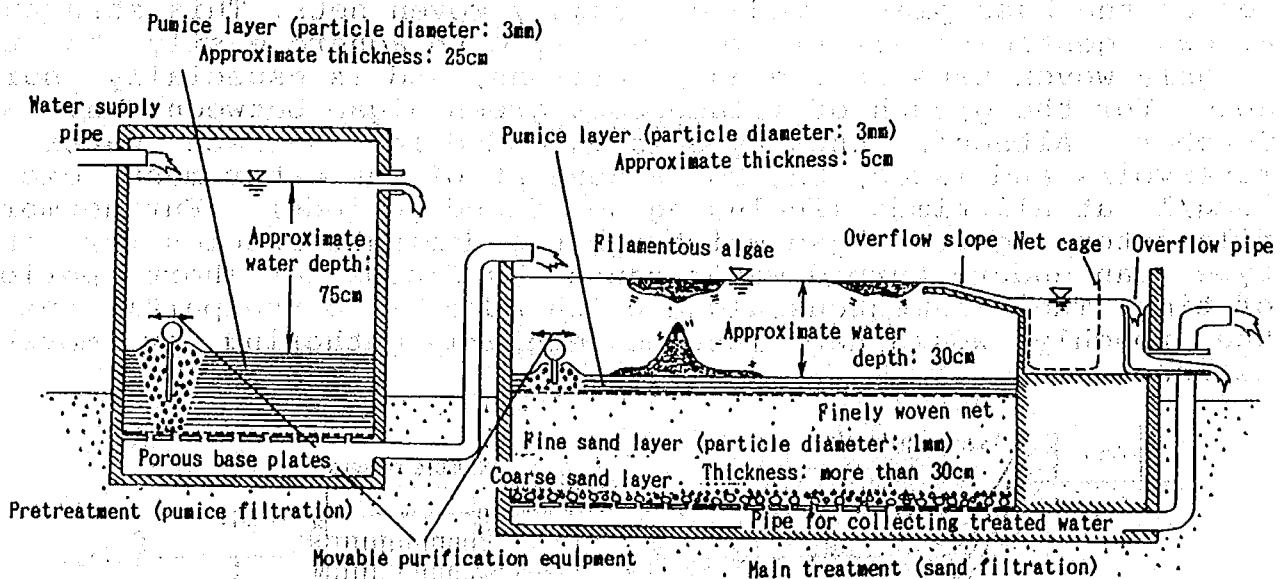


Figure 10. Example of sand filtration facility

2.5 Conclusions

(1) The most effective method for controlling the eutrophication of reservoirs is the filamentous algae system, which is designed to remove phosphorus (PO₄-P in particular) from large quantities of inflowing river waters and surface waters of reservoirs.

(2) The type of facility depends on conditions such as the PO₄-P content of the raw water, the installment location, whether the facility can be managed, and the degree of effectiveness required (see Table 3).

(3) Field experiments demonstrated that the system removes PO₄-P well. The removal effect of PO₄-P was calculated based on the facility standards for each site. When 1 ha was treated at 1m³/sec, PO₄-P was reduced from 20mg/l, which is the content in the raw water, to 10mg/l with steeply inclined waterway facilities, 20mg/l to 5mg/l with gently inclined waterway facilities, 15mg/l to 10mg/l with horizontal flow net transmission facilities, and 10% of the content of raw water with vertical flow net transmission facilities (see Table 3).

Table 3. Conditions for filamentous algae system facilities

Facility	PO ₄ -P concentration of raw water (C) $\mu\text{g/l}$	Target values of effects when treating 1ha at 1-3m/sec	Installation location	Maintenance		Effective utilization of filamentous algae
				Gathering of filamentous algae	Cleaning of facilities	
Steeply incline waterway facility	15<(C)<50	20 $\mu\text{g/l}$ of PO ₄ -P in raw water $\rightarrow$ 10 $\mu\text{g/l}$ in treated water	Slopes	Must remove naturally accumulated algae once a week or month	Unnecessary	Can be supplied automatically to culture ponds although they contain large amounts of impurities
Gently incline waterway facility	15<(C)<50	20 $\mu\text{g/l}$ of PO ₄ -P in raw water $\rightarrow$ 5 $\mu\text{g/l}$ in treated water	Flat land	Must mechanically gather algae once a week	Unnecessary	Filamentous algae are fresh and appropriate for effective utilization by processing
Vertical flow net transmission facility	50<(C)	Decrease the concentration of PO ₄ -P in raw water by 10%	Flat land	Must remove naturally accumulated algae once a week	Must clean the bottom of water tanks once a month	Can be supplied automatically to culture ponds although they contain large amounts of impurities
Horizontal flow net transmission facility	100<(C)	15 $\mu\text{g/l}$ of PO ₄ -P in raw water $\rightarrow$ 10 $\mu\text{g/l}$ in treated water	Reservoir surfaces	Must mechanically gather algae once a week	Must clean the bottom of water tanks once a month	Filamentous algae are fresh and appropriate for effective utilization by processing
Sand filtration facility	10<(C)	Decrease the concentration of 2HIB in raw water by 50%	Flat land	Must remove naturally accumulated algae once a week	Must clean the pumice layer once a month	Can be supplied automatically to culture ponds although they contain large amounts of impurities

References

- 1) Kaoru NIWA, Makoto KUNOH, Minoru OHNISHI and Yoshihiro YAMASHITA: Countermeasures for reservoir water quality conservation using filamentous algae, Collected Hydraulic Engineering Papers, Hydraulic Committee, Japan Society of Civil Engineers Vol.37, 1993
- 2) Kaoru NIWA, Makoto KUNOH, Minoru OHNISHI and Yoshihiro YAMASHITA: Measures for lake water quality conservation using filamentous algae, Environmental Systems Research, Environmental Systems Committee, Japan Society of Civil Engineers Vol.21, 1993

- 3) Toru MISHIMA: Bio filter system purification system using aquatic macrophyte s, Hedoru, No.33, 1985
- 4) Nobutaka NAKAMOTO and Masashi SASAKI: The importance of continuous culture of filamentous diatoms in slow sand filters, Journal of Japan Water Treatment Biological Society Vol.27 No.1, 1991
- 5) Ikuko IIYAMA and Manami SAKAI: Sitological evaluation of green algae spirogyra, Research Proceedings X of Sanyo Junior College 1984

3. Fallen leaf removal system

3.1 Outline

Depending on the vegetation and geographical conditions of the basin of lakes and marshes, there are cases where leaves which had fallen from forest trees into the basin flow into reservoirs and cause eutrophication. In autumn and winter, large amounts of undecomposed leaves flow into lakes and marshes due to medium and minor floods. These leaves accumulate and decompose in a short period of time resulting in dissolution of inorganic nutrient into reservoirs. In such cases, it is necessary to remove the fallen leaves contained in river waters before the primary outflows from floods flow into lakes and marshes.

The fallen leaf removal system performs continuous and efficient gathering and removal of fallen leaves from the primary outflows of floods containing large amounts of leaves without using any power, thus decreasing the amount of nutrient which flow into lakes and marshes in the form of fallen leaves.

3.2 Fallen leaf gathering facilities

Figure 11 is an example of the fallen leaf gathering facilities in use. Gathering is performed at rivers only at the beginning of floods. It is not performed at normal times. Therefore, this system is designed to activate in situations where the water flow exceeds the normal amount (between 3m³/sec and 10m³/sec for example). It is necessary to investigate the amount of leaves contained in each site in order to determine the maximum value for the operation system.

As shown in Figure 11, river waters containing large amounts of leaves are discharged into columnar net cages from eccentric points. While the waters flow through the net cages, leaves are caught inside. The force of the discharged water hits a part of the cage thus causing rotation of the columnar cages. At the other side of the cage where water is being discharged, small amounts of water under high pressure are sprayed from outside the cages in order to remove the leaves which had adhered to the inside of the cages. This allows easy gathering of the leaves caught inside the cages. The above procedures performed successively will enable the continuous removal of leaves from river waters with out using any power.

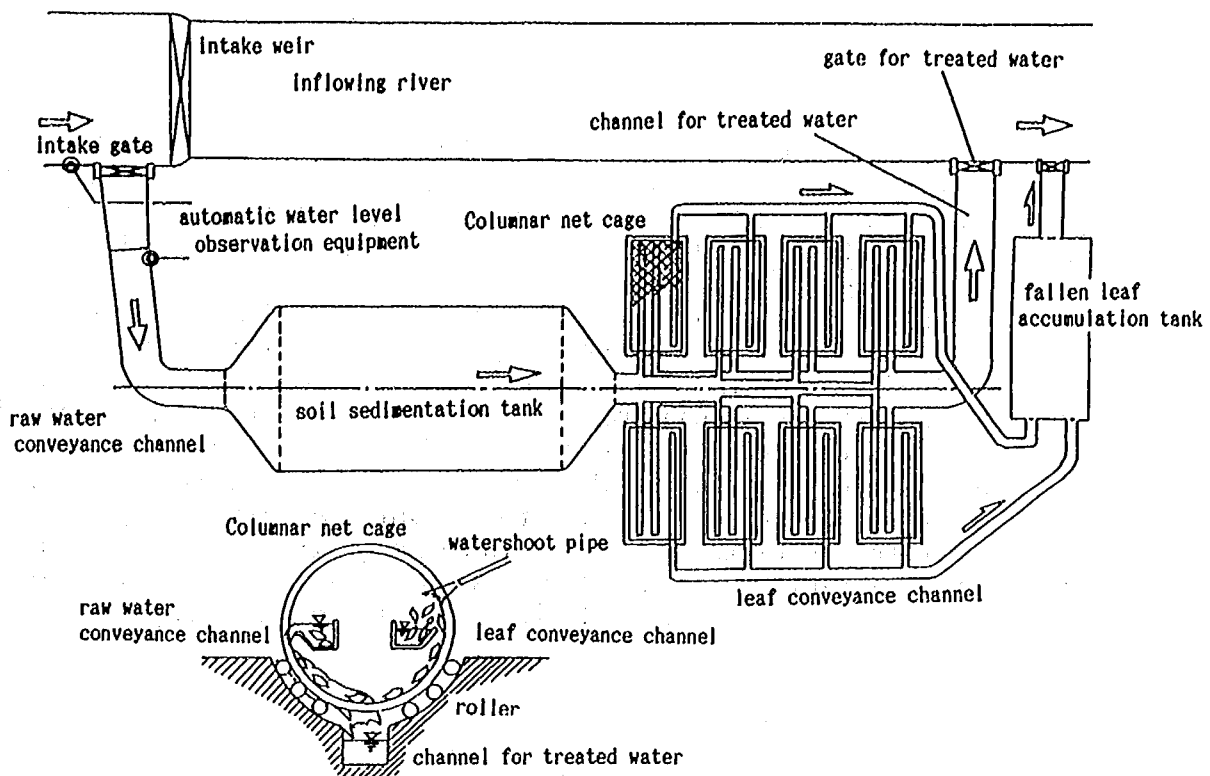


Figure 11. Example of fallen leaf removal facilities in use

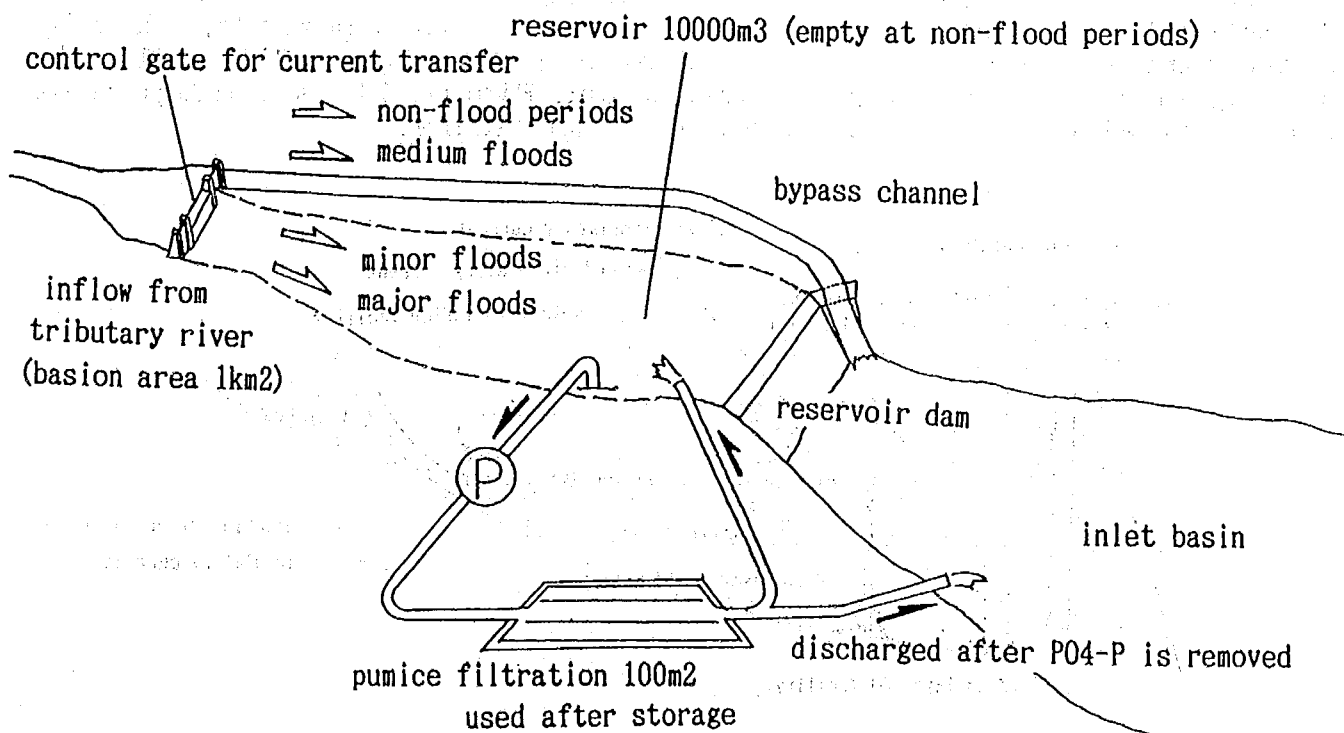


Figure 12. Example of Minor flood storage system in use

4. Minor flood storage system

4.1 Outline

It is common for primary outflows of medium and minor floods to contain $\text{PO}_4\text{-P}$ in high densities. In this system, the primary outflows are stored in reservoir dams with small capacities. The stored water is discharged into the inlet basin after $\text{PO}_4\text{-P}$ is removed. Figure 12 is an example of minor flood storage system facilities in use. In order to remove $\text{PO}_4\text{-P}$, the following method may be considered. Floating algae which grow in the reservoir absorb $\text{PO}_4\text{-P}$. Then, the algae varieties are removed by pumice filtration. It is desirable to perform dispersed aeration in the reservoir in order to restrict the priority species of floating algae to green algae and diatoms. Furthermore, exchanging the pumice layer used for filtration once a year is preferred to cleaning the pumice from the maintenance point of view. In the cases where filamentous algae system is in operation, letting the filamentous algae absorb the $\text{PO}_4\text{-P}$ is also an effective method.

5. Current control system

5.1 Theory of current control system

The current control system regulates the supply of nutrients and sunlight to blue-green algae and flagellate algae in the euphotic zone by creating a warm-water circulating mixolimnion of even temperature distribution. This layer is maintained at a constant thickness several times that of the euphotic zone (15 to 20 meters) at surface reservoir during non-flood periods, thereby preventing the abnormal growth of blue-green algae. Figure 13 is a diagram of current control system and Figure 14 is a diagram of the vertical distribution of water temperature.

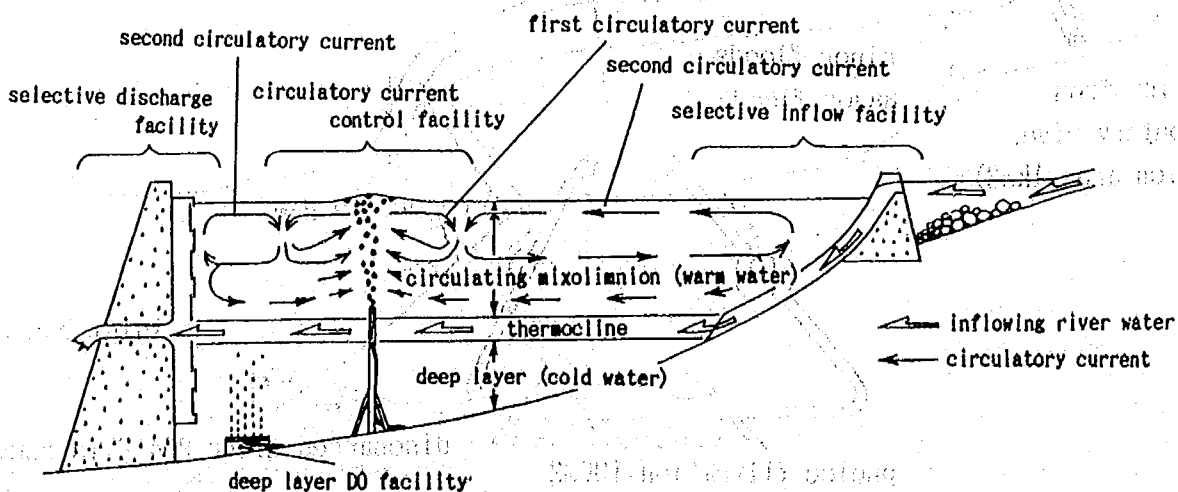


Figure 13. Diagram of current control system

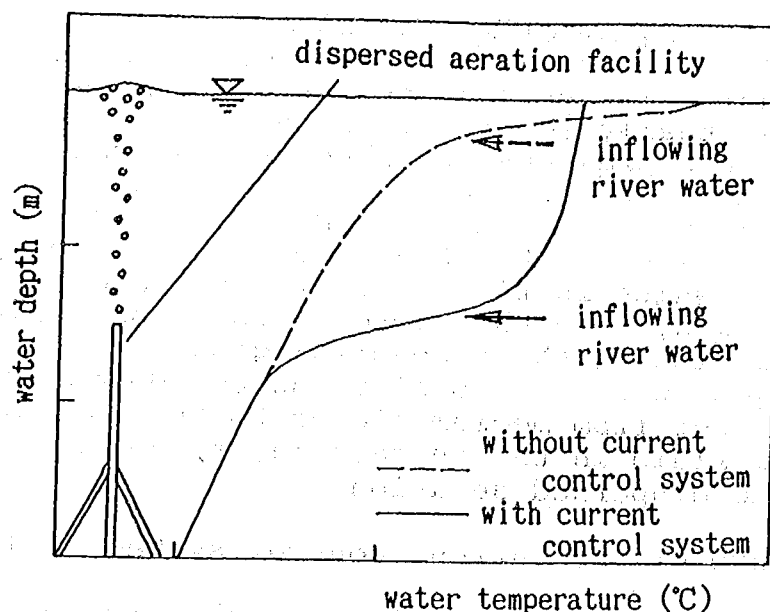


Figure 14. Diagram of vertical distribution of water temperature

In the summer periods, the temperature of water usually forms a stratification with the highest temperature at the surface and gradually becoming lower as the depth increases. When this stratification is formed, the surface water becomes a stable mass which does not mix vertically. Light can be obtained easily in this kind of surface water, and inflowing river waters containing much nutrients enter into depths of a few meters from the surface, thus providing an environment suitable for the abnormal growth of green algae and flagella algae.

When dispersed aeration is performed, surface water of the dispersed aeration as is shown in the second circulatory current in Figure 13. After a few days later (8 days later for example), the surface water is circulated into the dark zone under the euphotic zone where sunlight cannot reach. Thus, the floating algae varieties which had started growing in the euphotic zone are driven off into the dark zone without any light for some time (twice as long as 8 days for example), and are unable to perform photosynthesis. Furthermore, the vertical distribution of water temperature is virtually uniform even while the surface water is drawn by aeration. When the temperature of surface water drops due to a sudden drop in the atmospheric temperature, vertical mixing takes place readily, thus preventing the stable growth of floating algae varieties.

Dispersed aeration creates an environment suitable for the growth of algae varieties such as green algae and diatoms which do not cause algae bloom or freshwater red tide. While blue-green algae varieties are capable of rising slowly with oxygen bubbles, green algae and diatoms will sediment in the absence of stream condition. When water currents are caused by circulation, a part of the green algae and diatoms will float on the current and return back to the euphotic zone where they are able to grow. At non-flood periods, inflowing river waters enter

below the circulating mixolimnion and move downstream. Nutrients contained in these waters are absorbed by green algae and diatoms in the few hundred meters that they travel. As the green algae and diatoms eventually sediment, the nutrients settle onto the bottom mud. This prevents the abnormal growth of blue-green algae by restricting their supply of nutrients.

Furthermore, when the mixolimnion consists of warm water which is several times as thick as the euphotic zone, waters from medium flooding (which is rich in nutrients) are forced into the thermocline and away from the euphotic zone containing blue-green algae, thus restricting their abnormal growth.

Prolonged water turbidity can be addressed by forcing highly turbid water from medium floods to the thermocline, leaving supernatant fluid in the surface layer, and by increasing the thickness of the dispersed aeration.

5.2 The structure of the current control system facilities

The installation of a few circulatory current control facilities for dispersed aeration in reservoir waters does not necessarily give effective results. As shown in Figure 15, the current control system is comprised of circulatory current control facilities, selective inflow facilities and selective discharge facilities as main facilities, and deep layer DO facilities and inlet control facilities as supplementary facilities. It is necessary to combine the appropriate facilities, and operate them organically with automatic water quality observation equipment. The effects of this system and the corresponding equipments are indicated in Table 4.

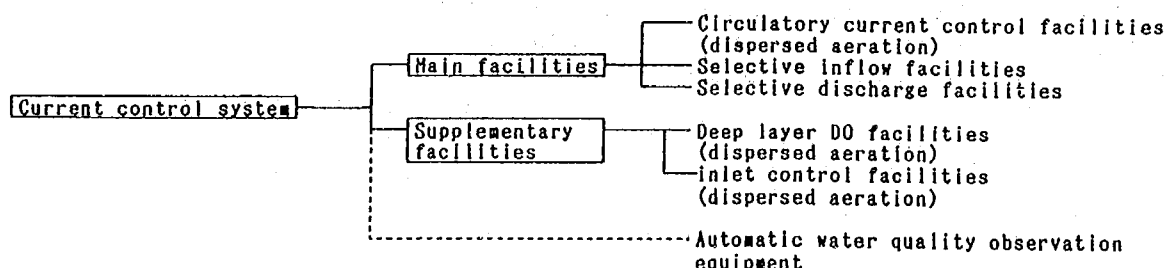


Figure 15. Overall structure of current control system

Table 4. Effects of current control system and the facilities

	Effects on the reservoir	Effects on algae growth	Required equipments
1	Forms a circulating mixolimnion with uniform water temperature and depth of a few times that of the euphotic zone	Restricts sunlight in the circulating mixolimnion and prevents the dominant species of blue-green algae in the surface layer	Circulatory current control facilities
2	Forces the inflowing waters of non-flood periods containing a large amount of nutrients (PO_4-P) to the layer under the circulating mixolimnion	Green algae and diatoms sediment and fix on the bottom mud after absorbing PO_4-P	Circulatory current control facilities Selective inflow facilities
3	Forces the waters from medium and minor floods containing nutrients (PO_4-P) to the thermocline and immediately discharges them from reservoir	Restricts the supply of nutrients to the blue-green algae in the euphotic zone	Circulatory current control facilities Selective inflow facilities Selective discharge facilities
4	Improves the dissolved oxygen (DO) in the deep layer	Prevents the dissolution of nutrients from bottom mud	Deep layer DO facilities
5	Controls water current in the inlet basin	Restricts the water flows from blue-green algae which tend to occur in the inlet basin where water accumulate	Inlet control facilities

5.3 The size of circulatory current control facilities

In order to perform aeration for water with an area of 1km^2 from a single hole 15m deep, a compressor with an output of 22KW and air capacity of 3700l/min is required at all times. As the circulatory capacity decreases with the decrease in the temperature difference between the surface and 15m below, a surplus equivalent to a compressor of the same capacity is necessary as a spare equipment. The size of this spare equipment may differ according to the conditions of the dam.

The following data were obtained from field tests conducted at Yabakei Dam for dispersed aeration using a single nozzle.

(i) Data 1

Field tests were conducted at Yabakei Dam in 1993 for 3 kinds of aeration depths with the air capacity of the compressor set at 5000l/min . As Figure 16 shows, the circulatory capacity of the surface current in the second circulatory current was in proportion to aeration depth. According to the results, the circulatory capacity of the surface current in the second circulatory current was $6.5\text{m}^3/\text{sec}$ for aeration depth of 15m and air capacity of 5000l/min .

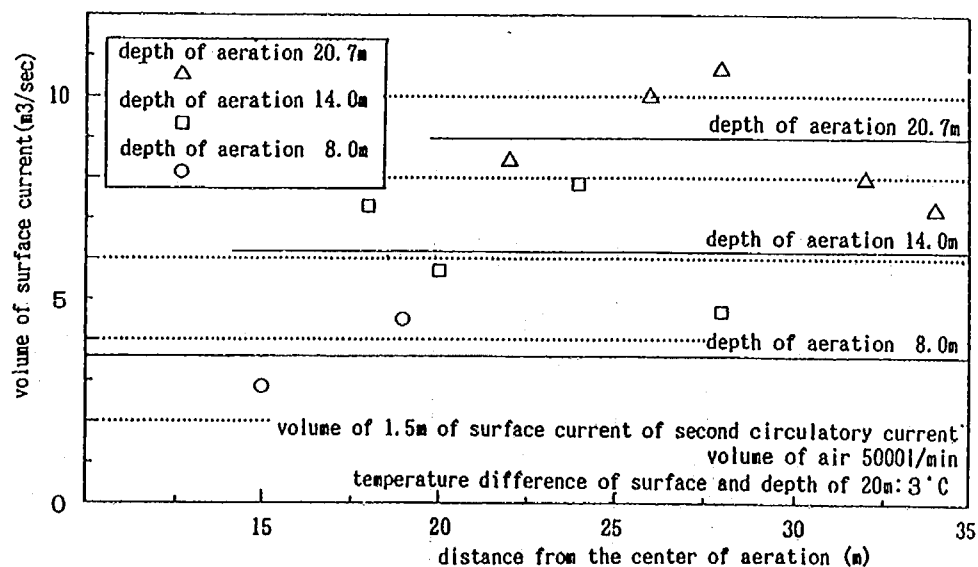


Figure 16. The relationship between circulatory capacity of surface current of second circulatory current and depth of aeration

Assuming here that "surface water 3m deep (second circulatory current) is drawn towards the center of aeration (first circulatory current) in 8 days, pushed into the middle layer of circulating mixolimnion (second circulatory layer), and kept in the dark for about twice the length of 8 days", the necessary circulatory capacity of the surface current in the second circulatory current will be $4.3\text{m}^3/\text{sec}$ for 1km^2 of water according to

the following equation.

$$\frac{1000000\text{m}^2 \times 3\text{m}}{86400\text{sec/day} \times 8\text{day}} = 4.3\text{m}^3/\text{sec}$$

Thus, a compressor with an output of 22KW and air capacity of 3700l/min is required for an area of 1km².

$$5000\text{l/min} \times \frac{4.3\text{m}^3/\text{sec}}{6.5\text{m}^3/\text{sec}} = 3300\text{l/min} \Rightarrow 3700\text{l/min}$$

(ii) Data 2

Field tests were carried out at Yabakei Dam (approximate area of water 1km²) in 1993 for 11 days in between floods by conducting aeration with air capacity of 3700l/min from a single nozzle 15m deep. As a result, it was possible to rehabilitate nearly half of the circulating mixolimnion. From the test results in Figure 17, it can be concluded that all of the circulating mixolimnion can be rehabilitated in about twice the length of 11 days.

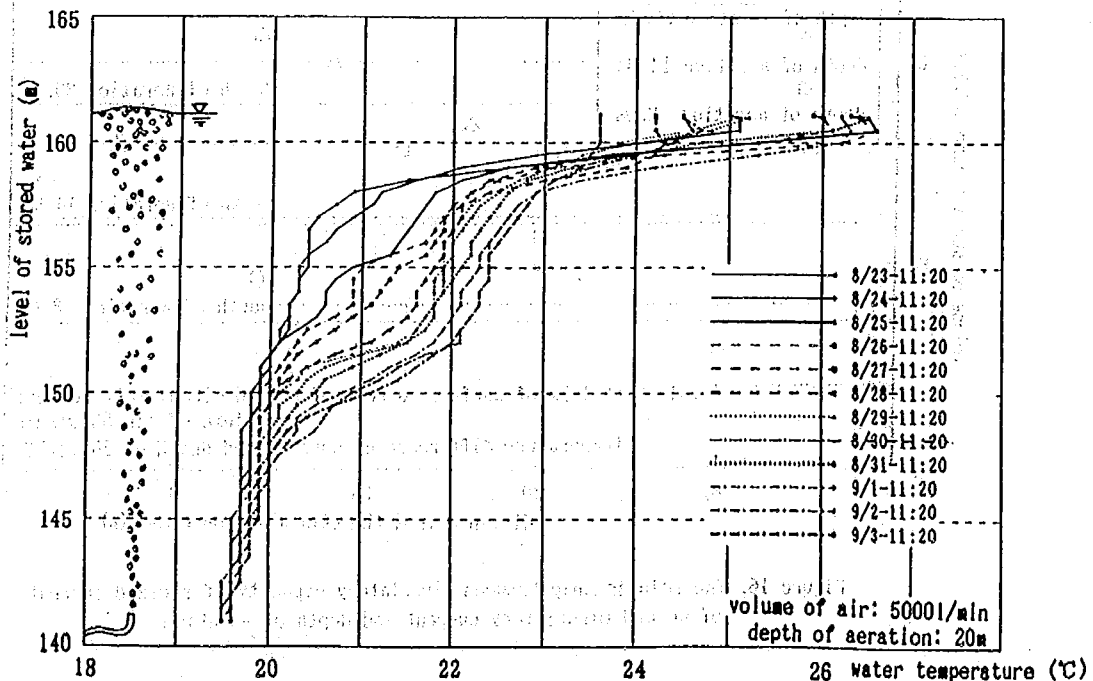


Figure 17. Change of vertical distribution of water temperature after floods with the passage of time

Assuming here that "it is possible to rehabilitate the circulating mixolimnion in 1 month after a flood has unified the vertical temperature distribution at a low temperature", a compressor with an output of 22KW and air capacity of 3700l/min is required to rehabilitate the circulating mixolimnion with an area of 1km² and depth of 15 or 20 meters in a period of 1 month after a major flooding.

$$5000\text{l/min} \times \frac{11\text{days} \times 2}{30\text{days}} = 3700\text{l/min}$$

5.4 Layout of circulatory current control facilities

When installing circulatory current control facilities, a few facilities should be installed together at one place on the reservoir surface in front of dams.

At non-flood periods, inflowing river waters enter into the layer below the circulating mixolimnion. As the waters pass through the layer, the nutrients contained are absorbed by green algae and diatoms. As the aeration of circulatory current control facilities should not raise the unabsorbed nutrient salts up to the surface, the facilities should be installed at the downstream end of the reservoir if possible.

From the field tests conducted at Kamafusa Dam in 1992, it was found, as shown in Figures 18 and 19, that vertical distribution of water temperature caused by dispersed aeration (from single nozzle) was conveyed to a point 1450m away from the aerator (near the upstream end).

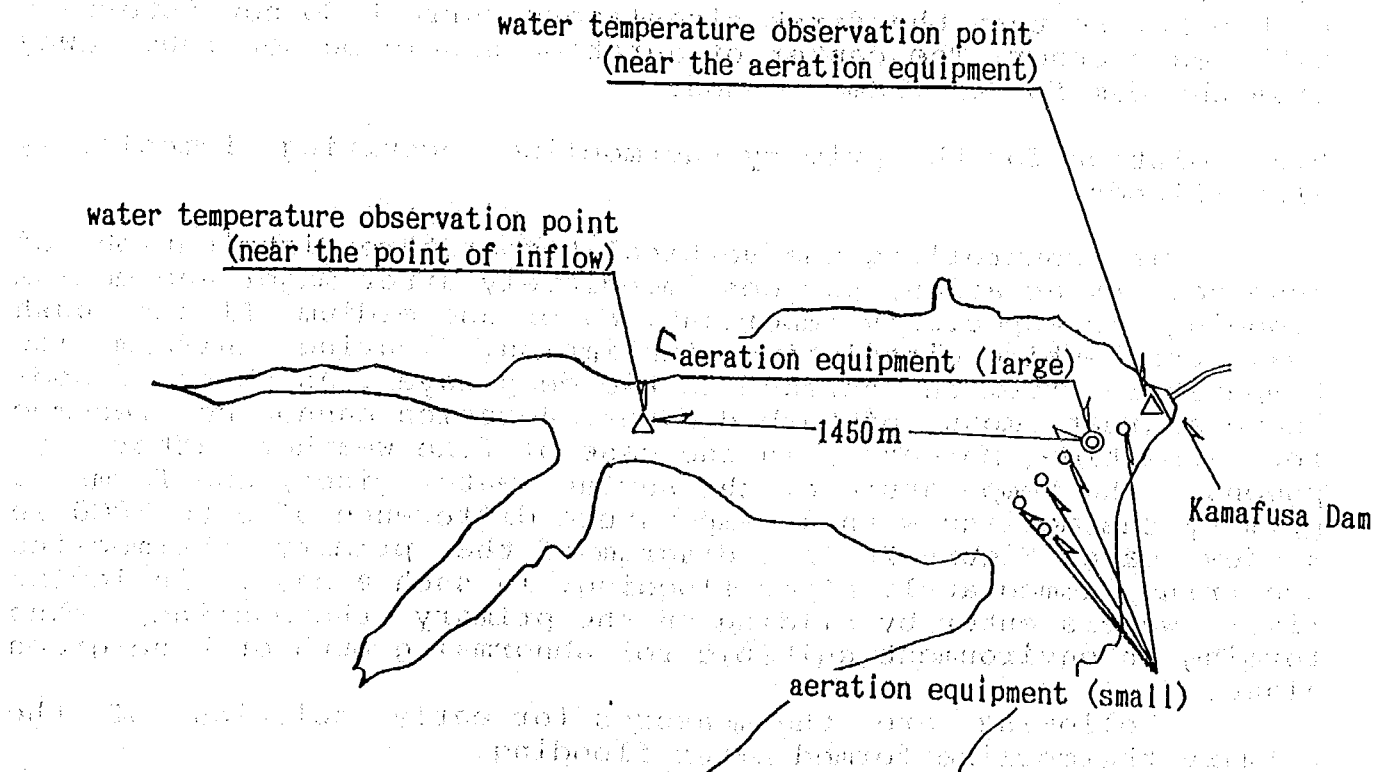


Figure 18. Observation points for the vertical distribution of water temperature at Kamafusa Dam

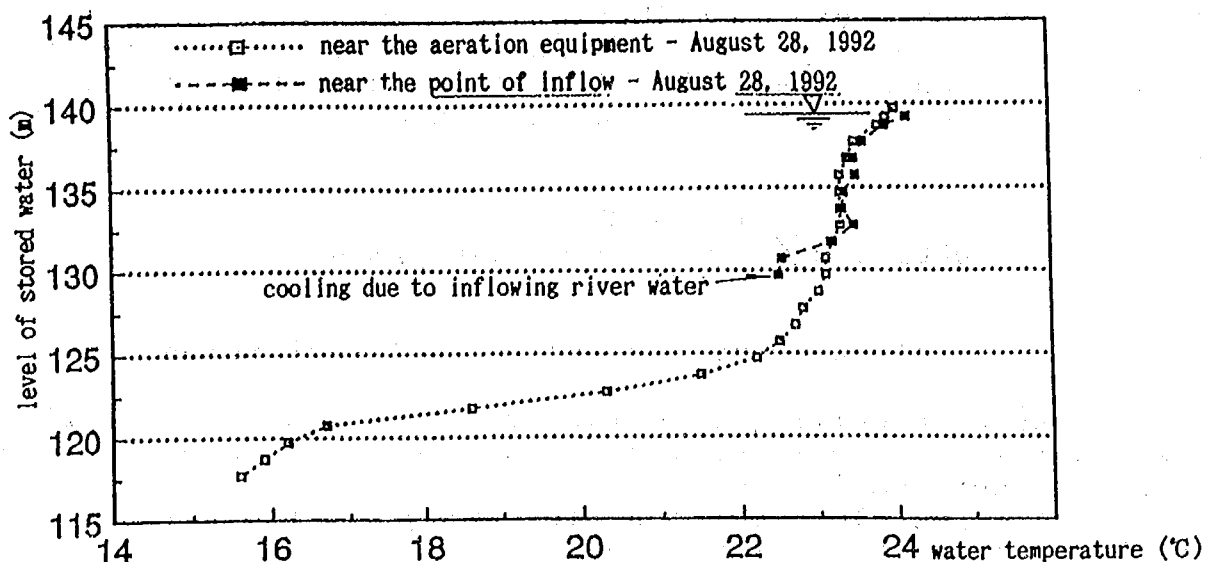


Figure 19. Vertical distribution of water temperature near the aeration equipment and 1450m away from the aeration equipment

Furthermore, it is desirable from the maintenance point of view that the aeration conditions can be supervised from a operation office at the site. Another advantage in concentrating the facilities at one place is easier installation of compressor rooms and preparation of electricity. However, it is necessary to keep the center of aeration for each facility 100m apart from each other so that the first circulatory current do not interfere with each other. The center of aeration should be set 100m away from the dam for the same reason.

5.5 Solution for the primary thermocline occurring immediately after floods

In controlling the vertical temperature distribution of reservoir by aeration, periods immediately after major and medium flooding is especially important. Major and medium floods push away the entire circulating mixolimnion, leaving uniform low temperature from the surface to the deep layer. As these floods leave a great amount of turbid water, aeration cannot be resumed for some time. Moreover, in the case of fine weather after typhoons, the temperature of the surface water rises, and forms a primary thermocline with a temperature difference of 5 to 10°C in a few days. Figure 20 is a diagram of the primary thermocline occurring immediately after flooding. In such a case, inflowing river waters enter by sliding on the primary thermocline, thus forming an environment suitable for abnormal growth of blue-green algae.

Following are the measures for early solution of the primary thermocline formed after flooding.

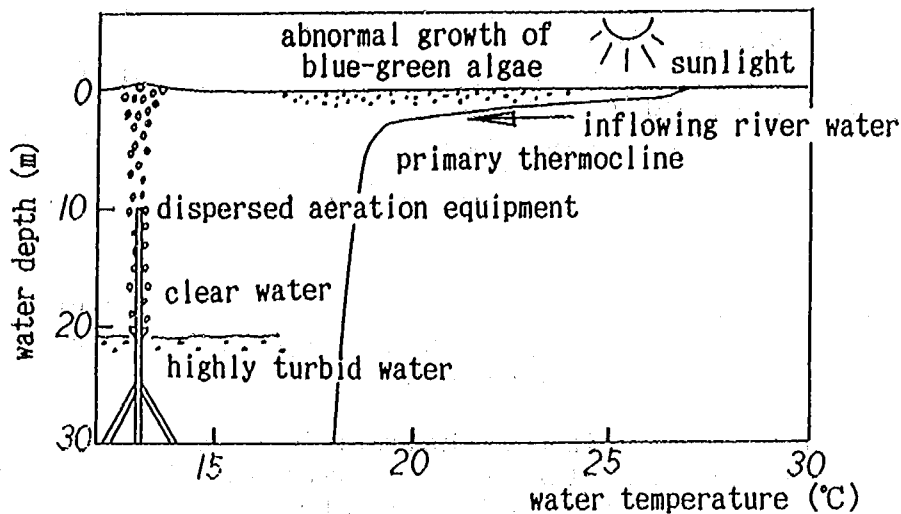


Figure 20. Primary thermocline occurring immediately after flood

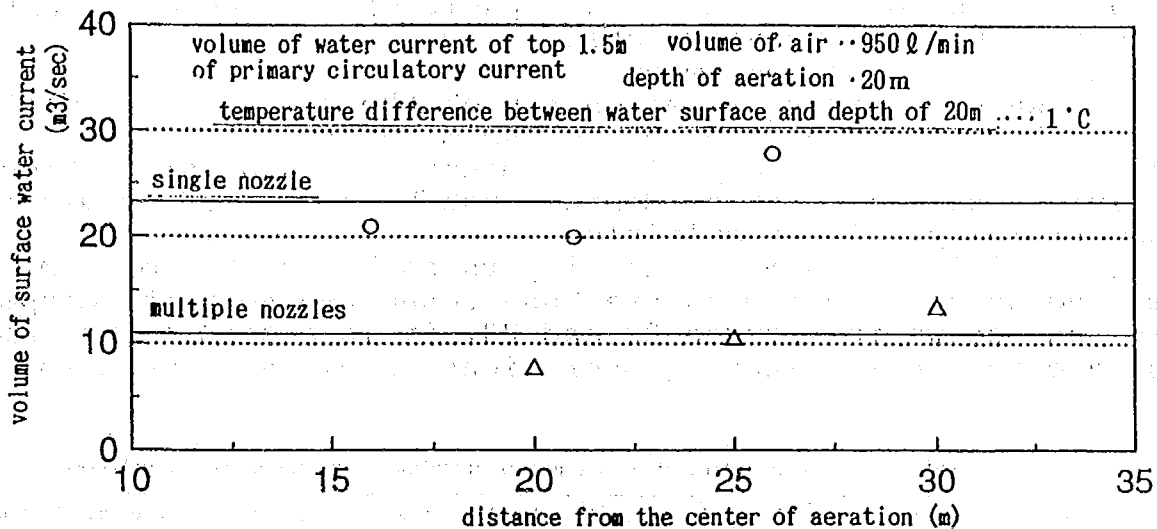


Figure 21. Comparison of the circulatory capacities of primary circulatory currents from single and multiple nozzle

(1) Use the automatic water quality observation equipment in order to determine the depth of aeration which will not cause turbid water. Enhance the circulatory capacity of first circulatory current by lowering the equipment to depths of 10m, 15m, 20m, 25m and so on (this will be controlled automatically). As shown in Figure 16, the relationship between the depth of aeration and the circulatory capacity of second circulatory current is in proportion. If water masses containing PO₄-P much from minor flooding happen to enter, it is necessary to raise the PO₄-P water masses by aeration. The automatic water quality observation equipment will perceive this and automatically change the depth of aeration immediately.

(2) In solving the primary thermocline after flooding, aeration using a single nozzle is considered to have higher circulatory

capacity than aeration using multiple nozzles. As the vertical temperature distribution below the primary thermocline is uniform after major and medium floods, the temperatures of the first and second circulatory currents are the same. Thus, the circulatory capacity of second circulatory current is controlled by the motive power of first circulatory current. As the circulatory capacity of first current is higher for single nozzle compared to multiple nozzles, it is more efficient to use the single nozzle.

(3) Prepare the same number of spare aeration equipments as the normal equipments, and operate the spare equipments upon the formation of primary thermocline.

(4) Make sure the primary thermocline is not obstructed by floats. It is best not to place floats on the surface of water, but when it cannot be avoided, use floats with streamlined shapes which will consume the least circulatory energy.

The circulatory current control facility capable of solving primary thermocline as described above is a multiple staged type which can be switched for every 5 meters of aeration depth. Furthermore, it must be capable of unattended operation engaged with the automatic water quality observation equipment.

When a winch is set on top of the float, many difficulties will be encountered by the dam manager. Switching of aeration will have to be performed manually, and distortions of pressure hose and aeration depths must be confirmed by divers in high turbidity. With a multiple staged facility with multiple dispersion holes at 10m, 15m, 20m, 25m, and so on, and a pressure hose connected to each dispersion hole as shown in Figures 22 and 23, it is possible to conduct easy and reliable switching operations from the compressor room.

Table 5. Characteristics of both types of circulatory current control facilities

Items for Judgement	Reservoir bottom installation type	Reservoir surface installation type
Disturbance of first circulatory current	○ None	△ None in most situations
Management of thermocline height	○ Possible to maintain constant thermocline height	△ Difficult to maintain constant thermocline height in the presence of considerable water level changes
Interference concerning usage of water surface and driftwood	○ None	△ Steel floats interfere
Effect of the changes in water level in summertime	△ Is not appropriate for dam reservoirs with considerable amount of change in water level	○ Appropriate for dam reservoirs with considerable amount of change in water level
Relocation of facilities within the reservoir	△ Relocation is not possible	○ Relocation possible
Installation at the time of dam construction	○ Easy installation is possible before fill up; can be used before completely filled	△ Cannot be installed until water level is considerably high
Installation after dam is filled	△ Installation is possible provided that flat land exists 30m deep	○ Installation is possible in all dams regardless of the form of the bottom surface form

When this multiple aerator is engaged with the automatic water quality observation equipment, it is possible to stop the aerator when the volume of inflowing river water reaches a certain point so that the influence of aeration does not mix the large amount of nutrient salts or high turbidity water into the entire circulating mixolimnion. When the water above the height of aeration has lower turbidity or $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration than a fixed amount, aeration is resumed from that height.

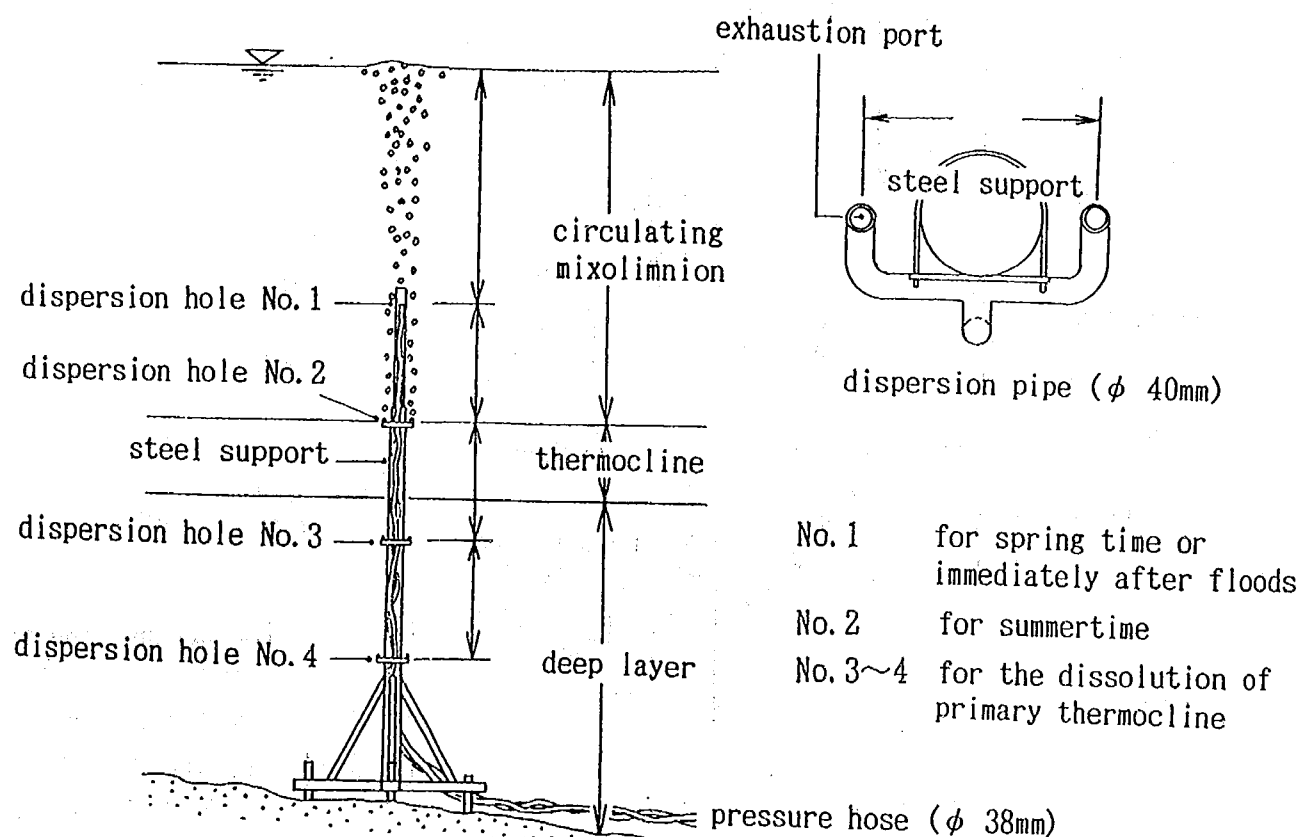


Figure 22. Multi-layered current control facility
(for installation at reservoir bottom)

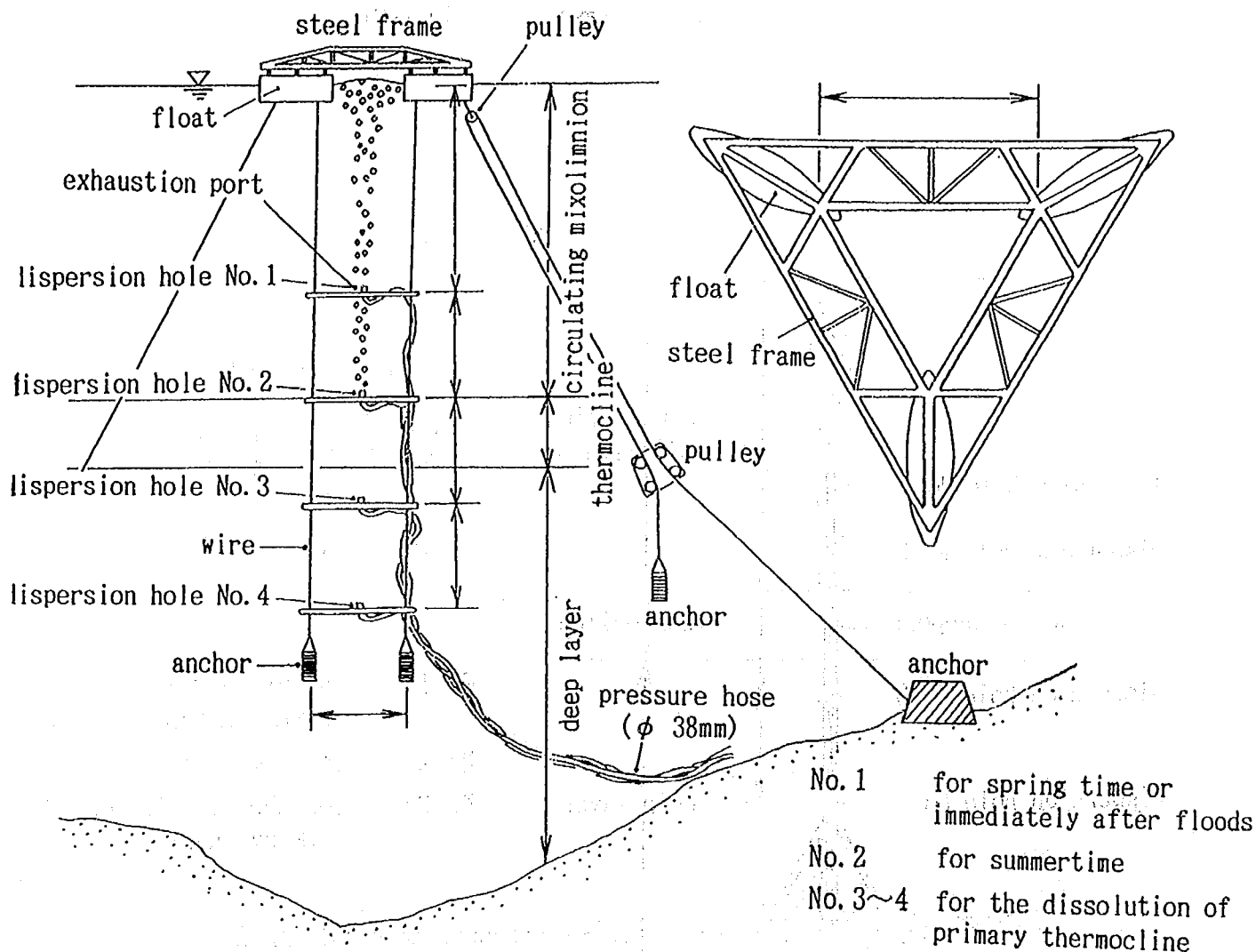


Figure 23. Multi-layered current control facility
(for installation at reservoir surface)

References

- 1) Kaoru NIWA, Makoto KUNOH, Minoru OHNISHI, and Yoshihiro YAMASHITA: Countermeasures for reservoir water quality control by water current control system, Collected Hydraulic Engineering papers, Hydraulic Committee, Japan Society of Civil Engineers Vol.37, 1993
- 2) Kaoru NIWA, Makoto KUNOH, Minoru OHNISHI, and Yoshihiro YAMASHITA: Development of measures for reservoir water quality conservation by current control, Civil Engineering Journal VOL. 35, No.11, 1993

6. Water temperature control system

6.1 Outline of system

Water temperature distribution control system utilizes a heat pump for a more complete effect of current control system.

Generally speaking, the temperature of the surface water of reservoir are higher than that of the inflowing river waters in the seasons from spring to autumn. However, the temperature of the surface water may become lower than or equal to that of the inflowing river waters during the rainy seasons and cold summers as well as immediately after major floods. The temperature of the whole circulating mixolimnion formed by aeration may be lowered when enough sunlight cannot be obtained. Inflowing river waters enter into the layer above the circulating mixolimnion when its temperature is higher than that of the circulating mixolimnion, thus supplying nutrients to the euphotic layer causing abnormal growth of algae bloom and fresh-water red tide.

Figure 24 is a diagram of the water temperature control system. This system utilizes a heat pump in order to control the water temperature to an ideal form for water quality conservation by lowering the water temperature of inflowing river waters and deep layers in reservoirs as well as raising the temperature of circulating mixolimnion which cannot obtain enough heat energy from sunlight. When water heat taken from the deep layer is discharged by aeration, a content current which circulates the deep layer is produced. This current content can carry water masses which contains a large amount of dissolved oxygen from aeration to the edge of the deep layer. Table 6 lists the effects of water quality conservation for the different seasons with the water temperature system in operation. When the water temperature distribution and the temperature of the inflowing river water of a reservoir are sufficiently controlled with heat pumps, the circulating mixolimnion is maintained at a higher temperature than the inflowing river waters regardless of seasons. This restricts algae bloom and prolongation of turbidity by leading the turbid inflowing river waters containing nutrients in to the thermocline.

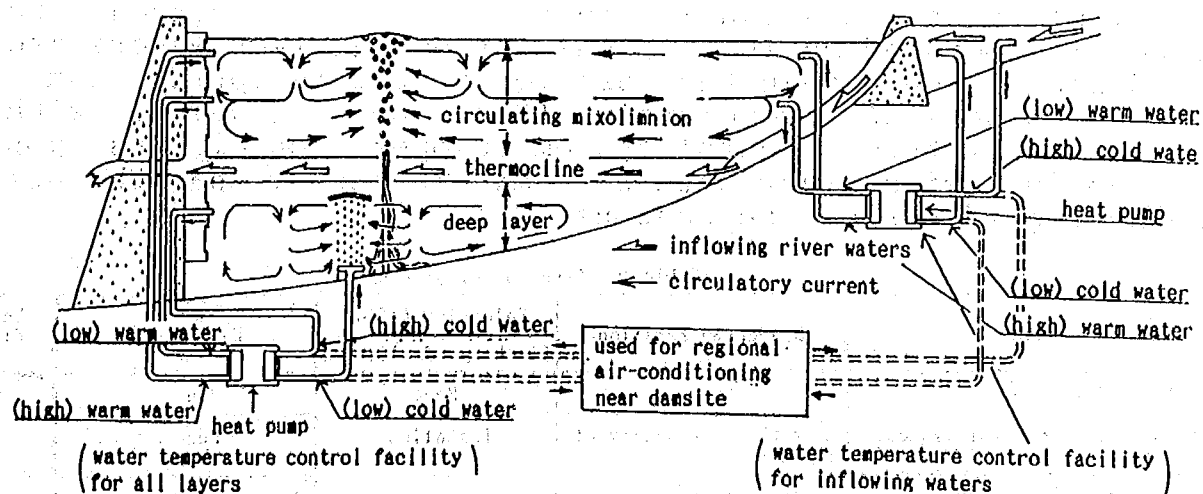


Figure 24. Diagram of water temperature control system

From the viewpoint of effective use of energy, it is desirable to supply the water heat energy from rivers and reservoirs to regional air-conditioning via heat pumps. As a result of simulated calculations, it was confirmed that the combined use of heat pumps and current control systems at dam reservoirs enables both water quality control and regional air-conditioning.

Table 6. Effect of water quality conservation by water temperature control system

Control of water temperature	Resulting phenomenon	1. Spring time	2. Rainy season, cold summer	3. Summer times	4. Post flood periods
Bring the water temperature of circulating mixolimnion close to the average atmospheric temperature	Water temperature distribution near the surface becomes uniform enabling easy mixing of reservoir water	—	△ Prevents algae bloom	□ Breaks primary thermocline and prevents algae bloom	⊙ Breaks primary thermocline and prevents algae bloom
	Temperature of water discharged downstream rises	△ May prevent cold water	—	—	—
Bring the water temperature of the inflowing river waters lower than the circulating mixolimnion	Lead the turbid inflowing river waters containing nutrients to thermocline	⊙ Prevents freshwater red tide	⊙ Prevents algae bloom in rainy seasons and cold summers	□ Prevents algae bloom	⊙ Prevents algae bloom
	Lead the turbid waters from small and medium floods to thermocline	○ Prevents prolonged turbidity	○ Prevents prolonged turbidity	□ Prevents prolonged turbidity	○ Prevents prolonged turbidity
Lower the temperature of deep layer	Mix air at the same time causing density current in the deep layer	—	○ Improves DO	⊙ Improves DO	△ Postpones worsening of DO
Utilize cooling heat for regional air-conditioning		—	△ Can be used for facility air-conditioning	⊙ Can be used for facility air-conditioning	⊙ Can be used for facility air-conditioning

⊙: Measures possible with water temperature control system which are especially effective

○: Measures possible with water temperature control system which are effective

△: Measures possible with water temperature control system which are effective to some extent

□: Possible with single use of current control system but should be supplemented with water temperature control system

6.2 Investigation by simulations

Simulations were conducted for Dam A with basin area of 195km² and water area of 3.9km². Cases of simulations are shown in Tables 7 and 8. Simulations were conducted for the period from April 1 to October 31 of 1991 which was a year of unstable weather.

The vertical distribution of water temperature and temperature of inflowing river waters for each season obtained from the simulations are shown in Figure 25. When the current control system is operated by itself, the inflowing river waters are led to depths higher than the aeration depths in spring and rainy season as well as immediately after floods. However, with the water temperature control system in operation, it was possible to lead inflowing river waters 20 meters deeper than the aeration depths regardless of the seasons.

Table 7. Cases of simulation

Case	Dispersed aeration	Selective Inflow Discharge facilities	Heat pumps	Legends of Figure 25
Without treatment	None	None	None	—
With current control system in operation	4 with air capacity of 3700 m^3/min	Installed	None	—△—
With water temperature control system in operation	4 with air capacity of 3700 m^3/min	Installed	4 with 0.84 $\text{m}^3/\text{sec} \times 10^\circ\text{C}$	—⊙—

Table 8. Conditions for the calculation of simulations

Items	April	May	June	July	August	September	October
Target depth of circulating mixolimnion	←		→				
	Approximately 10m		Approximately 20m				
The ratio of cooling heat used for regional air-conditioning	←		→		→		→
	0%		10%	50%	70%	30%	0%

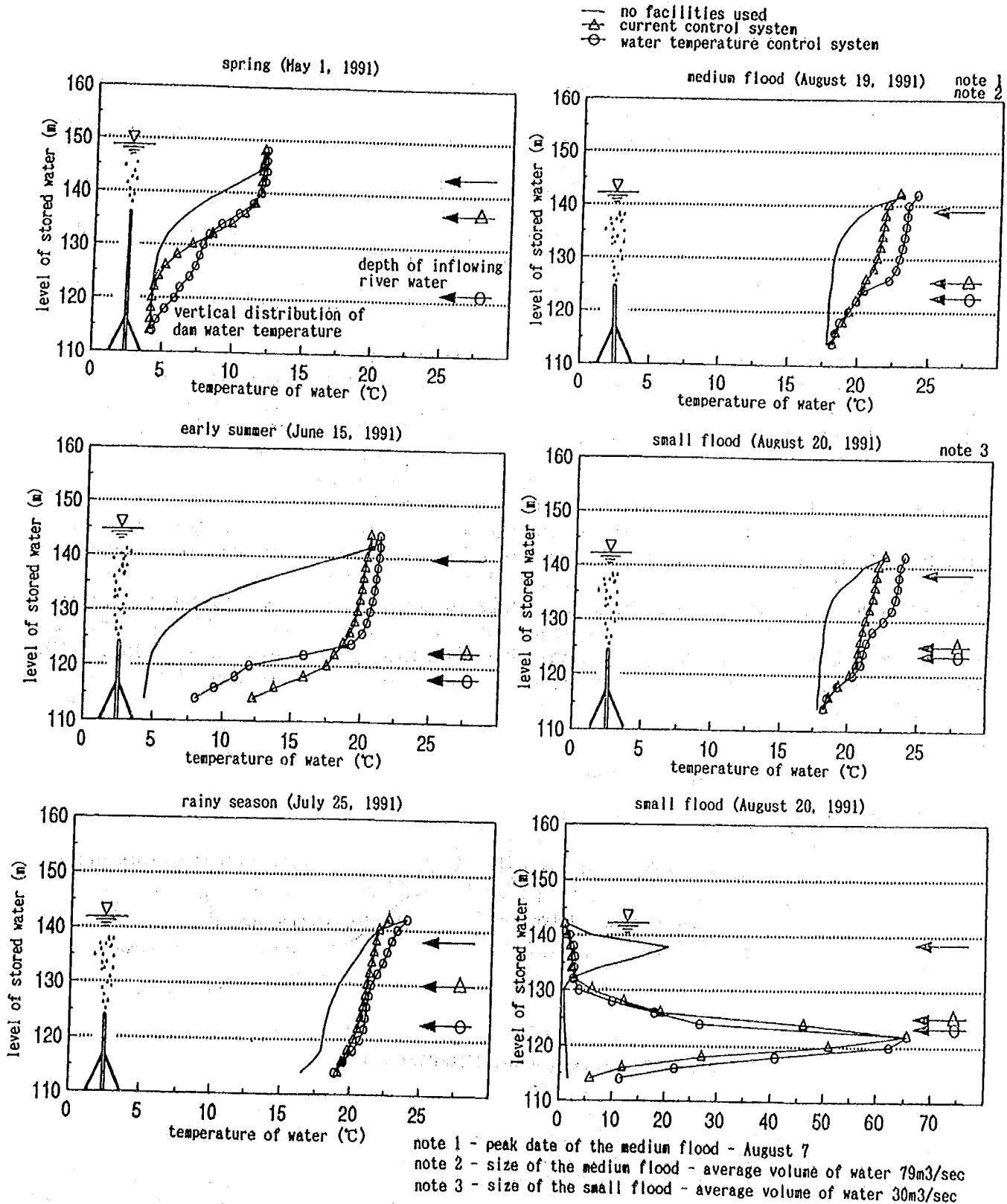


Figure 25. Results of the simulations concerning the vertical distribution of water temperature of reservoir and the depth of inflowing river waters

References

1) Kaoru NIWA, Makoto KUNO, Tokuhiko KUBO, Eichi FURUSATO: Use of heat pumps and current control to preserve water quality in reservoirs, Collected Hydraulic Engineering papers, Hydraulic Committee, Japan Society of Civil Engineers Vol.38,1994

7. Pumice filtration system

7.1 Outline of system

The appropriate method to prevent the abnormal growth of floating algae is to remove them from the lake surface before they turn into algae bloom and freshwater red tide. Pumice filtration system removes the floating algae varieties (such as blue-green algae and flagellate algae) by running the lake water through a pumice layer. The pumice layer can be used semipermanently by cleaning it regularly by an easy automated method. Figure 26 is the diagram of pumice filtration system.

Water containing much floating algae varieties are collected through an overflow pipe floating on the lake surface where floating algae grow. The pumice layer is approximately 25cm in thickness with fine particles with diameters of 3-5mm. A biographical membrane formed on the porous surface of the pumice captures the floating algae and removes them from raw water. The pumice layer must be washed regularly (once a week) in order to avoid decline of its filtering capacity and to remove excessive P04-P from dissolving. As pumice is very light with a specific gravity of 1.2, it is very easy to make it float with air bubbles. A movable washing pipe installed on top of the pumice layer washes it by making it float with air bubbles and water current. The highly ductile water produced from washing is collected in the sedimentation tank. 95% of this water will separate as supernatant fluid within a few hours. As the supernatant fluid has low concentration of P04-P, it can be discharged into the lake. The sedimentated sludge can be dehydrated and used effectively as a fertilizer.

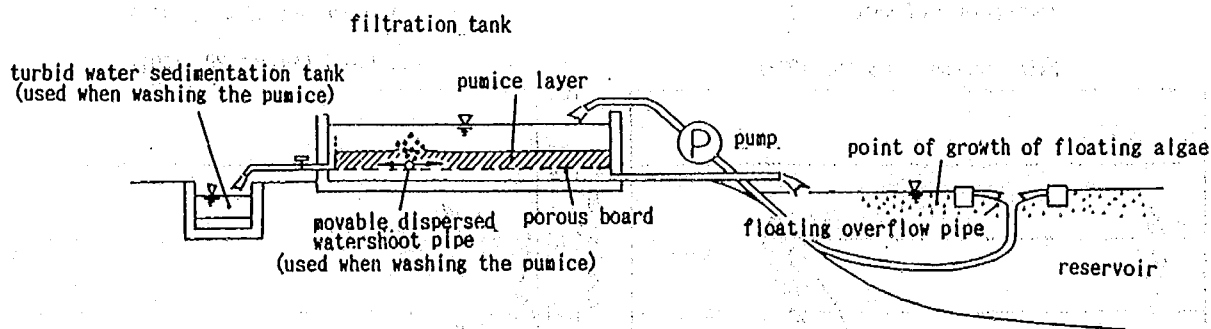


Figure 26. Diagram of pumice filtration system

7.2 Theory of the removal of floating algae

Excessive floating algae in lakes result in algae bloom, freshwater red tides, and foul smell. It is possible to prevent this abnormal growth by removing floating algae at a speed faster than the speed of their growth (For example, algae will increase by 5 times in 5 days at the most, which means they increase by 1.4 times in a day. Therefore, it is effective to decrease them at a rate of 0.71 times a day). Assuming here that surface water with euphotic zone 1.5m deep is treated for 5 days by pumice filtration with equipments with an area of 1% that of the lake, the necessary removal rate is 80% for the filtration speed of 30m/day.

(1) The growth rate of floating algae

$$(1.4\text{times/day})^5 = 5\text{times}$$

(2) The conditions for removal rate capable of preventing abnormal growth

$$(1.4\text{times/day}) * (0.71\text{times/day}) < 1$$

(3) Removal rate of floating algae

$$1 - (0.71\text{times/day})^5 = 80\%$$

(4) Filtration rate

$$1.5\text{m} / (5\text{days} * 0.01) = 30\text{m/day}$$

As the number of cells of floating algae is in correlation with chlorophyll a, it is possible to use chlorophyll a as a substitute in performing the calculations.

It is necessary to prevent P₀₄-P from flowing out as much as possible as P₀₄-P serves as a nutrient for floating algae causing their abnormal growth.

7.3 Field tests

A preliminary test was conducted at the shore of Lake Kasumigaura using the lake water as raw water. The equipment which was used is shown in Figure 27. The pumice layer is 25cm thick with particle size of 3mm. Under the assumption that inflowing river water of 1m³/sec is being treated with an equipment of 0.5ha, filtration was performed at a velocity of 72cm/hour. Dead floating algae and suspended solid captured between the particles were washed once a week by making the pumice float by air bubbles and water current discharged from a manual cleaning pipe.

The test was executed for 3 months with the results shown in Figure 28. Filtration effect was small at the beginning before the biological membrane was formed. After 1 week, however, chlorophyll a was seen to decrease by 90% (43mg/l to 4.3mg/l) and T-P by 55% (103mg/l to 47mg/l).

Assuming that facility area is 1.5% of the lake area, the reduction rate of floating algae is calculated to be 0.63 times/day. This value multiplied by the increase rate of floating algae (1.4 times/day) will result in a value less than 1 which means the abnormal growth is restricted. The turbidity showed a decrease of 90% (19 degrees to 2.6 degrees). As this turbidity was not caused by inorganic materials, it is not possible to determine its efficiency for discharged water.

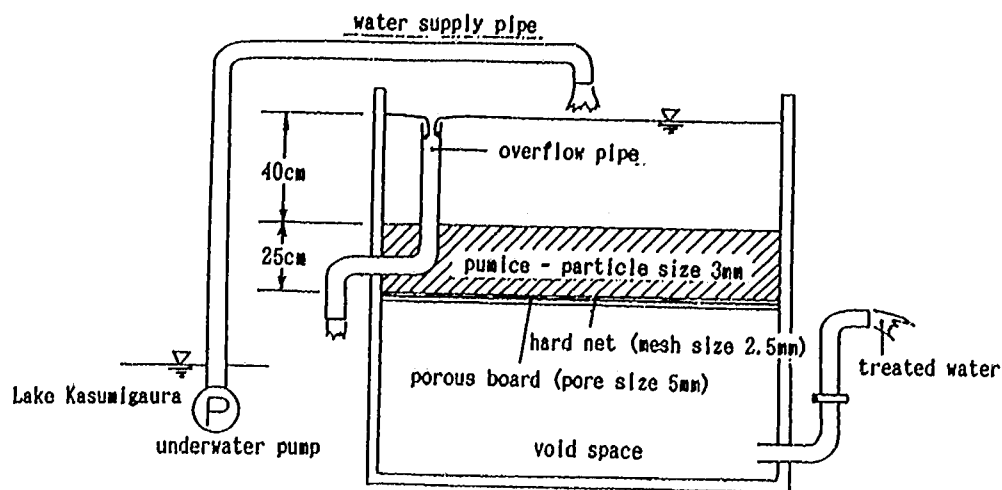


Figure 27. Testing equipment for pumice filtration

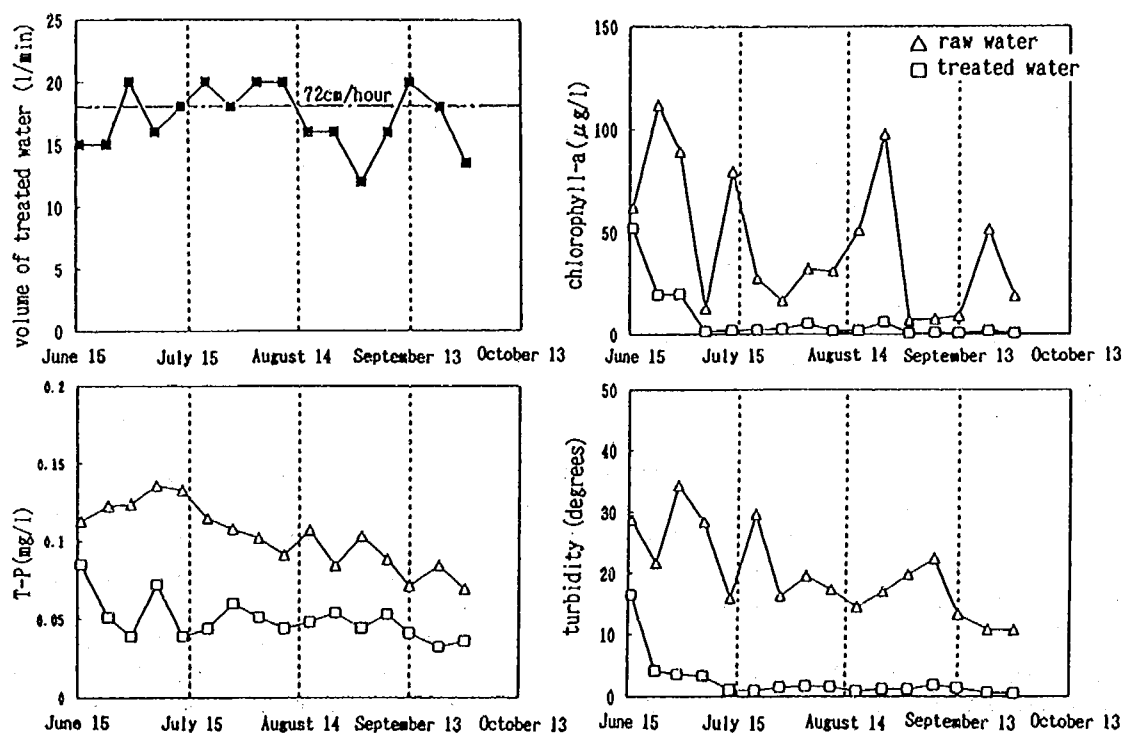


Figure 28. Change of water quality over time concerning raw water and treated water under testing

Table 9. Results of test concerning removal of floating algae

Items		raw water (number of cells)	treated water (number of cells)	removal rate (%)
completely floating algae		89,352	9,522	89.3
<i>Oscillatoria</i> sp.	blue-green algae	71,150	8,734	87.7
<i>Cyclotella</i> sp.	diatoms	4,766	75	98.4
<i>Aphanizomenon</i> sp.	blue-green algae	4,320	432	90.0
<i>Phormidium tenue</i>	blue-green algae	1,555	5	99.7
<i>Aphanocapsa</i> sp.	blue-green algae	1,310	144	89.0
<i>Anabaena</i> sp.	blue-green algae	1,166	0	100.0
Chlorophyll a		97.4 $\mu\text{g/l}$	6.0 $\mu\text{g/l}$	93.8

Table 9 lists the results of the investigation conducted on August 24 concerning the reduction rate of floating algae. Raw water is compared to water treated by pumice filtration. The reduction rates for representative algae varieties are: 100% for *Anabaena* sp.; 99.7% for *Phormidium tenue*; and 87.7% for *Oscillatoria* sp. Chlorophyll-a showed a reduction rate of 93.8% which is similar to the rates indicated above.

7.4 Size of facilities and the objectives for the cleaning ability

Table 10 indicates the objectives for technical development concerning pumice filtration system for the time being along with the results from preliminary testing mentioned in 7.3.

Table 10. Objectives for pumice filtration system

Items	Results of preliminary testing	Objectives for technical development
Area of facility	1.5% of the lake area	1% of the lake area
Capacity of facility	Treats at a rate of 1m ³ /sec for 0.5 ha	Treats at a rate of 1m ³ /sec for 0.3ha
Velocity of filtration	72cm/hour	120cm/hour
Chlorophyll a	Removal of 90%	Removal of 80%
T-P	Removal of 55%	Removal of 45%
P O ₄ -P	Dissolution of approximately 10% of raw water T-P	Little dissolution
Turbidity	Removal of 90%	Removal of 80%
Frequency of exchanging pumice	Does not change for 3 months	A few years
Frequency of cleaning pumice	Once a week by hand	Once a week by full automation

その他に掲載した論文

糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム

MEASURES FOR LAKE WATER QUALITY CONSERVATION USING FILAMENTOUS ALGAE

丹羽 薫^{*}、久納 誠^{*}、久保 徳彦^{*}、山下 芳浩^{**}

Kaoru NIWA^{*}, Makoto KUNOU^{*}, Norihiko KUBO^{*}, Yoshihiro YAMASHITA^{**}

ABSTRACT ; Abnormal growth of undesirable algae caused by eutrophication has brought water quality problems of algae bloom or musty odor in some lakes. Measures against the phenomenon are to prevent undesirable floating algae from rapid increase. The lake water quality conservation proposed in this paper provides an environment to grow desirable algae, filamentous algae, which works to remove PO_4 -P and T-P from the river pouring into the lake and the lake surface, resulting that increase of undesirable floating algae is to be prevented in the lake. Besides the system works to remove undesirable algae and musty odor from the discharge flow. Explained and reported in this paper are on characteristics of the lake water quality conservation using filamentous algae and field experiments confirming the measure to be effective for lake water purification.

KEYWORDS ; water quality, eutrophication, algae-control method, filamentous algae, phosphate phosphorous

1. まえがき

自然湖沼、遊水池、ダム湖など多くの湖沼では、流域から栄養塩類が過剰に流れ込むために、水中の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。湖沼の栄養塩類が増える結果、藍藻類等の好ましくない藻類が異常増殖することになり、アオコや淡水赤潮、水道水のカビ臭、湖沼沿岸の異臭、魚類のへき死、親水性活動の阻害などの深刻な問題を引き起こしている。著者らは糸状藻類を活用した湖沼の水質保全手法を紹介してきたが¹⁾、本報文はさらに具体的な対策手法を『糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム』（以下、『糸状藻類活用システム』と言う）としてまとめ、現地実験結果も含めて報告するものである。

2. 糸状藻類活用システム

2.1 システムの概要

本報文で提案する『糸状藻類活用システム』は、河川や浅い湖沼に一般に生息している糸状藻類が増殖できる環境を人為的に湖沼に与えることにより、流入河川水から PO_4 -P及びT-Pを、湖沼表層水から PO_4 -P及

* 建設省土木研究所環境部環境計画研究室

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

** (株)建設技術研究所 (前建設省土木研究所部外研究員)

CTI Engineering Co., Ltd.

び浮遊藻類を除去し、藍藻類等の好ましくない藻類の異常増殖を阻止し、さらに放流水から浮遊藻類及びカビ臭物質を除去するシステムである。このように本システムは、自然河川等にて水質浄化に役立っているエコシステムを湖沼において人為的に作り出し、最大限に活用するものである。本システムの模式図を図-1に示す。

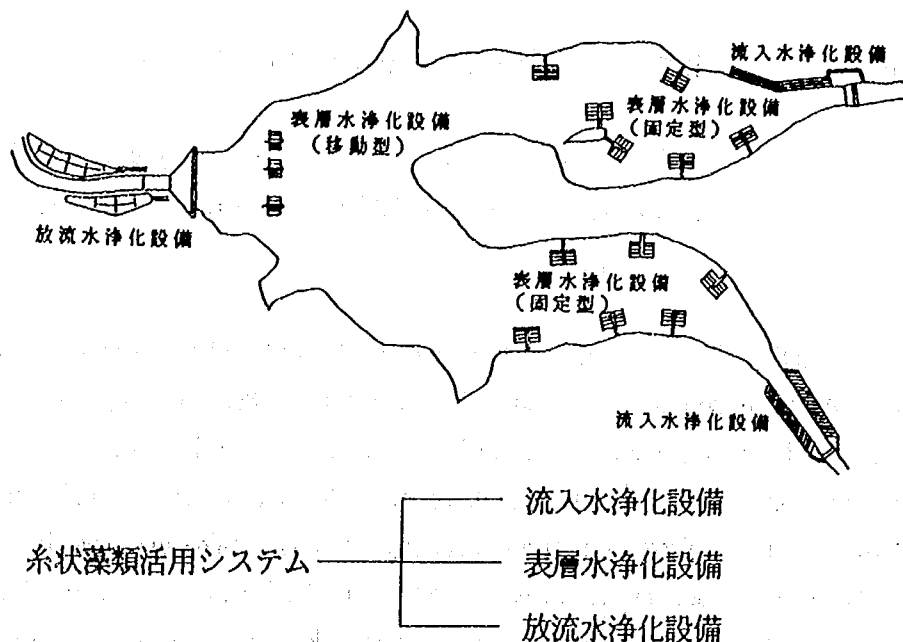


図-1 糸状藻類活用システムの模式図

2.2 糸状藻類の種類

糸状藻類とは顕微鏡レベルで細胞が列車のようにつながっている藻類を指す場合と、肉眼レベルで毛糸や木綿糸のように糸状になっている藻類を指す場合があるが、ここでは後者を指す。糸状藻類は意外と我々の生活に関連しており、本システムに関係の深い糸状藻類を表-1に示す。なお糸状藻類は、溪流や水路のように急流に適する種類と、浅い湖沼や水田のように緩流に適する種類とに大きく二分できる。

表-1 本システムに関係の深い糸状藻類

適 性	名 称	綱 別	特 性
急 流	シオグサ (<i>Cladophora glomerata</i>)	緑藻類	丸くならない点を除いてマリモと全く同じ属の藻類である。
	ヒビミドロ (<i>Ulothrix</i> sp.)	緑藻類	山間の溪流の岩石に着生する代表的な藻類である。
	サヤミドロ (<i>Oedogonium</i> sp.)	緑藻類	細胞分裂が特異で、細胞間のサヤや朱色の丸い生卵器など特色が多い。
	メロシラ (<i>Melosira varians</i>)	珪藻類	浄水場の緩速砂濾過で重要な役割を果たす藻類である ²⁾ 。
緩 流	アオミドロ (<i>Spirogyra</i> sp.)	緑藻類	糸状藻類の中でも栄養価が高く有効利用の点で注目すべき藻類である ³⁾ 。
	アミミドロ (<i>Hydrodictyon reticulatum</i>)	緑藻類	肉眼でも一見多角形の模様をしたレース編みを思わせる美しい藻類である。

2.3 糸状藻類を湖水の水質浄化に用いる利点

糸状藻類は浮遊藻類やホテイアオイ等の高等な水生植物に比べて、湖水を水質浄化するのに適合した多くの利点を有しており、以下に示す。

- ①糸状藻類は富栄養化に起因する現象（アオコ、淡水赤潮、カビ臭等）の原因とならない。
- ②糸状藻類は増殖速度が早く、その分無機態の栄養塩類の吸収能力が高い。例えば、水生植物の代表であるホテイアオイの倍加日数が約2週間であるのに対し、糸状藻類は概ね数日である。
- ③糸状藻類が生息するには付着あるいは上載できる基質が必要であり、この基質を人為的に操作することにより糸状藻類の生息を制御できる。
- ④糸状藻類が生息する適応温度は、低い水温でも可能であるため、冬期も概ね生息が可能である。従ってアオコが発生する季節よりも先に糸状藻類を増殖させて栄養塩類を取り続けることができる。またホテイアオイが西日本の夏期しか増殖に適さないのに対して、糸状藻類は地域性と季節性の点で幅が広く有利である。
- ⑤糸状藻類は浮遊藻類に比べ低い無機態の栄養塩類濃度でも生息が可能である。かなり低い濃度となっても、糸状藻類のまわりの水が次々と入れ替われば栄養塩類を吸収することができる。
- ⑥浮遊藻類と異なり、糸状藻類は水からの分離除去がスクリーン等で容易にできる。
- ⑦糸状藻類は栄養価が高いものが多く、アユやワカサギ等の魚類や鶏等の家畜の良質なエサとなる^{3) 4)}。

2.4 各浄化設備が有する浄化機能

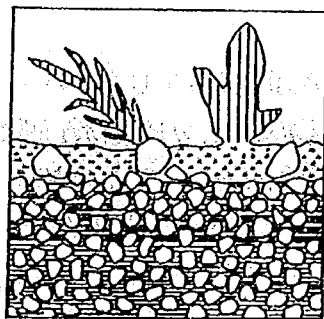
糸状藻類を活用した浄化設備が有する機能を考えると、図-2に示すようになる。流入水、表層水、放流水の各浄化設備は、除去すべき物質や生息させたい糸状藻類が急流に適するか緩流に適するかのタイプにより、図-2の①～④に示す浄化機能の組み合わせが異なる。各浄化設備に適用すべき浄化機能の組み合わせを表-2に示す。なお、各浄化設備は前処理と本処理の二段階で処理することを基本とする。ただし、T-Pや浮遊藻類が少ない場合等は前処理を省略し本処理のみとしても十分機能を果たす。

図-2及び表-2の検討により、各浄化設備が保持すべき浄化機能は次のようにまとめられる。

(1) 流入水浄化設備……平常時において、流入河川水が湖沼に入る直前の段階で流入河川水に含まれる PO_4 -P及びT-Pを除去し、湖沼に混入するリンを減少させる設備である。流入地点付近に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設けることにより、糸状藻類に PO_4 -Pを吸収除去させる。T-Pは砂利濾過や砂濾過により除去する。

(2) 表層水浄化設備……湖沼の湖面上に糸状藻類が付着して増殖できる基質を設け、中小洪水等で表層に混入して来た PO_4 -Pを藍藻類や鞭毛藻類等の好ましくない浮遊藻類が吸収してしまう前に、糸状藻類に吸収除去させる設備である。同時に好ましくない浮遊藻類そのものを砂利濾過により除去する。

(3) 放流水浄化設備……利水を含む正常流量を補給するため下流に放流した水を、異臭味障害が発生しやすい期間において、藍藻類等の好ましくない浮遊藻類及びカビ臭物質を砂利濾過や砂濾過により除去する設備である。



- ①立体的に生息する糸状藻類 —— PO_4 -Pを吸収除去する
- ②濾過膜となる糸状藻類 —— PO_4 -Pを吸収除去する
浮遊藻類やSSを捕捉除去する
- ③粒子間の好気性細菌等 —— 加臭物質を分解除去する
- ④粒子間の物理的濾過 —— 浮遊藻類やSSを捕捉除去する

図-2 糸状藻類等の浄化機能

表-2 各浄化設備における浄化機能の組合せ

設備名	糸状藻類による判別	除去したい物質	浄化機能と除去物質	
			前処理	本処理
流入水浄化設備	緩流タイプ	PO ₄ -P T-P	④粒子間の物理的濾過 ↓ T-P除去 濁質除去	①立体的に生息する糸状藻類 ②濾過膜となる糸状藻類 ④粒子間の物理的濾過 ↓ PO ₄ -P除去 T-P除去
	急流タイプ			①立体的に生息する糸状藻類 ↓ PO ₄ -P除去
表層水浄化設備	緩流タイプ	PO ₄ -P	④粒子間の物理的濾過 ↓ 浮遊藻類除去 濁質除去	①立体的に生息する糸状藻類 ②濾過膜となる糸状藻類 ↓ PO ₄ -P除去
	急流タイプ	浮遊藻類		①立体的に生息する糸状藻類 ↓ PO ₄ -P除去
放流水浄化設備	緩流タイプ	浮遊藻類 カビ臭物質		②濾過膜となる糸状藻類 ③粒子間の好気性細菌等 ④粒子間の物理的濾過 ↓ カビ臭物質除去 浮遊藻類除去

3. 前処理設備

3.1 流入水浄化設備での前処理の役割

流入水浄化設備は、流入河川水に含まれるPO₄-P及びT-Pを除去するのが目的である。前処理でT-Pを除去し、本処理でPO₄-Pを除去するのが基本とする。流入河川水は洪水後暫くは濁度が高くなるが、本処理で用いられる糸状藻類に濁質が被るのは増殖させる上で望ましくないので、前処理の段階で濁質を除去するのが良い。また流入河川水には本処理で増殖させようとしている糸状藻類の他に様々な糸状藻類及び浮遊藻類が含まれている。そこで特に通水初期の段階において、適切な糸状藻類を安定増殖させるためには供給水に含まれる藻類の種類を制御して適切な糸状藻類を優占種にするのが望ましい。そこで流入水浄化設備では、T-P除去、濁質除去及び藻類種制御を目的とした前処理を行う。

3.2 表層水及び放流水浄化設備での前処理の役割

表層水浄化設備は、湖水に含まれるPO₄-Pと、アオコ等のもととなる藍藻類等の好ましくない浮遊藻類を除去するのが目的である。放流水浄化設備は湖水に含まれる好ましくない浮遊藻類とカビ臭物質を除去するのが目的である。表層水浄化設備では前処理で浮遊藻類を除去し、本処理でPO₄-Pを除去するのが基本とし、放流水浄化設備では前処理で浮遊藻類を除去し、本処理でカビ臭物質を除去するのが基本とする。本処理で用いられる糸状藻類が付着性の浮遊藻類や洪水後の濁質に覆われるのは増殖させる上で望ましくないので、前処理の段階でこれらを除去するのが良い。そこで表層水及び放流水浄化設備では浮遊藻類除去及び濁質除去を目的とした前処理を行う。

3.3 前処理設備の構造

上向式砂利濾過は、比較的低濃度のT-P除去、短期間の濁質除去、及び藻類種制御が必要な流入河川水の前処理に適している。ここで藻類種制御とは、砂利層で糸状藻類や浮遊藻類を除去し、本処理設備につながる水層部に本処理で増殖させるべき糸状藻類を生息させておくことを示す。つまり糸状藻類の種供給の役割をする。なお維持管理として週に1度程度の頻度で、砂利層底部に堆積した有機物を砂利層底部の散気管による散気と下向流による逆洗排水を行うことによって除去し、水層部に堆積した糸状藻類の死骸は散気管によって攪拌させ排水することにより除去する。なお高濁度の洗浄水を処理する沈澱槽等が必要である。

下向式砂利濾過は、比較的高濃度の浮遊藻類の除去及び長期間の濁質除去が必要な湖水の前処理に適している。湖水に浮遊藻類が過剰に存在する場合は、短期間で砂利粒子間にて濾過閉塞するが、濾過材料を軽石等の比重が軽い材質にすれば、砂利層直下に設置した散気板によって砂利層洗浄ができる。この場合も高濁度の洗浄水を処理する沈澱槽等が必要である。

4. 本処理設備

4.1 設備タイプの構造上分類

本処理設備の構造上のタイプは、活用する糸状藻類が緩流に適するか急流に適するかによって二分され、またその設備が陸上用なのか湖上用なのかによっても分かれる。これを図にまとめると図-3のようになる。

糸状藻類による判別	陸 上 用	湖 上 用
緩流に適した糸状藻類	下向式砂濾過タイプ (流入水・放流水浄化設備) 	網籠タイプ (表層水浄化設備)
急流に適した糸状藻類	緩勾配水路タイプ (流入水浄化設備) 	緩勾配水路タイプ (表層水浄化設備)
	急勾配水路タイプ (流入水浄化設備) 	

図-3 構造によって分類した設備タイプ

4.2 下向式砂濾過タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、砂層部の上に水層部を持った構造である。図-4に下向式砂濾過タイプの設備例を示す。水層部は水深が30cmと浅く、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、糸状藻類が流入河川水の PO_4-P を吸収除去する。砂層部は粒径1~3mm程度の砂となっており、砂粒子間の浄化作用によりT-P除去やカビ臭物質除去を行う。

一般的に粒子間浄化は嫌気性であるとカビ臭物質等の有機化合物の分解能力は小さい。しかし本タイプに

においては、砂層直上の糸状藻類が光合成によって常に酸素を多く含む気泡を付け、昼夜を問わず砂粒子間に酸素を供給するために、砂粒子間は好気性となり、カビ臭物質等の有機化合物の分解を期待できる。砂の粒径は粗くしすぎると、砂粒の表面積が不足して好気性細菌が十分に働けなくなる。よって放流水浄化設備の場合は砂の粒径を1mm程度に細かくする。

流入水浄化設備の場合はT-P除去が目的であるので砂の最小粒径を2mm程度に設定する。なおT-Pの除去率を落としてもかまわない場合は砂利や軽石としても良い。

緩流に適した糸状藻類は成長すると光合成による酸素を多く含む気泡を付着させて浮上するが、その際生物濾過膜ごと浮上するため、濾過閉塞は生じにくい。また浮上した糸状藻類は直径5~50cmの繊維状の塊となるため、スロープ式回収器により容易に回収できる。ただし水槽部に糸状藻類を生息させても1~2ヶ月すれば濾過閉塞してしまうので、その場合は砂層部に埋設してある散気管により濾過膜洗浄を行い濾過閉塞を解消する。なお、通水後暫くとも濾過閉塞しつつある期間は、 PO_4-P の除去量が著しく低下する。

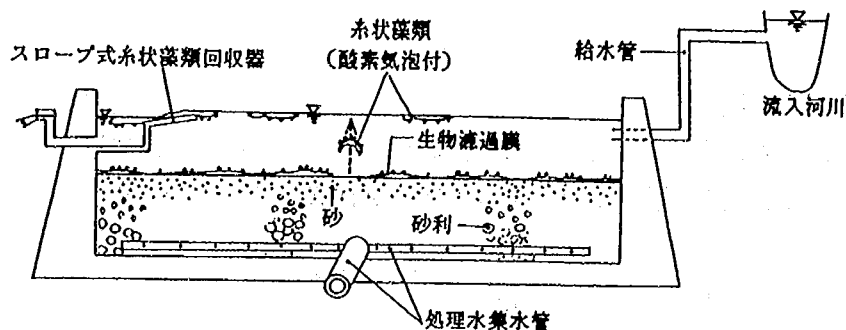


図-4 下向式砂濾過タイプの設備例

4.3 網籠タイプ

緩流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、底板が有孔ボードでできた浮上式の網籠となっている。有孔ボードの上は水深30cmの水層部となっており、緩流に適した糸状藻類が生息しやすい環境となっており、さらに散水によって鉛直流動が得られるような構造となっている。糸状藻類の回収は、糸状藻類が酸素を多く含む気泡を付着して浮上しているところ、または有孔ボード直上に堆積しているところを可動式スクリーンにより除去する。

4.4 緩勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類が増殖するのに最も効率的な流速、水深及び基質を与え、糸状藻類を基質より定期的に回収除去して安定増殖させようとするタイプである。

急流に適した糸状藻類は流されないように仮根を持つことによってしっかりと基質に付着している。急流のもとでは糸状藻類の細胞のまわりの水が次々と入れ替わるため、糸状藻類は水中に溶存している PO_4-P を次々と吸収でき、増殖速度は一躍高くなる。しかし流速が高すぎると湖水との接触時間が短くなり結果的に PO_4-P の除去量が低下する。最も効率的な流速は15cm/sec、及び水深は20cm程度にあると想定している。水路勾配は0.2%程度である。本タイプの基質は流れを横断する方向に張られたフェンスであり、 $\phi 3\sim 5$ mmの麻ひもや竹材、プラスチック棒等から成る。基質や水路底に付着した糸状藻類は定期的にエッジにより櫛で梳かすようにかき取り、側水路に寄せ集め、水流により水路下流端に流すことにより回収除去する。これらの一連の回収作業は人力ではかなりの手間となるため、回収作業を自動化する必要がある。

4.5 急勾配水路タイプ

急流に適した糸状藻類を用いるタイプであるが、糸状藻類を回収除去する作業を簡略化するために、水路の勾配を大きくして流速を50~100cm/secに高め、水深を数cmの薄層流としたタイプである。水路勾配は5~

15%程度となる。本タイプの基質は薄く敷いた砂利や粗面コンクリートとする。この流速のもとでは、成長した糸状藻類は水流の抵抗に耐えられなくなって途中から切れて流下し、水路下流端の固定スクリーンに自然に集積する。またこの流速のもとでは水路底に糸状藻類の死骸が堆積しにくく維持管理もし易い。ただし、糸状藻類と水との接触時間が短すぎるため $PO_4\text{-P}$ の除去量は低くなり、さらに糸状藻類の成長に波ができるため除去量が不安定になる。

5. 現地実験

5.1 前処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした上向式砂利濾過の実験を行った。実験装置を図-5に示す。8~100mmの粗い砂利65cmの上に3~6mmの細かい砂利を35cm載せ、砂利面上は薄層流とした。1 m^3 /secの流入河川水を0.5haの設備で前処理することを想定し、上向流の速度として72cm/hourを目標に与え続けた。なお砂利層底部に堆積した有機物は、下向流による逆洗を与えて洗浄した。

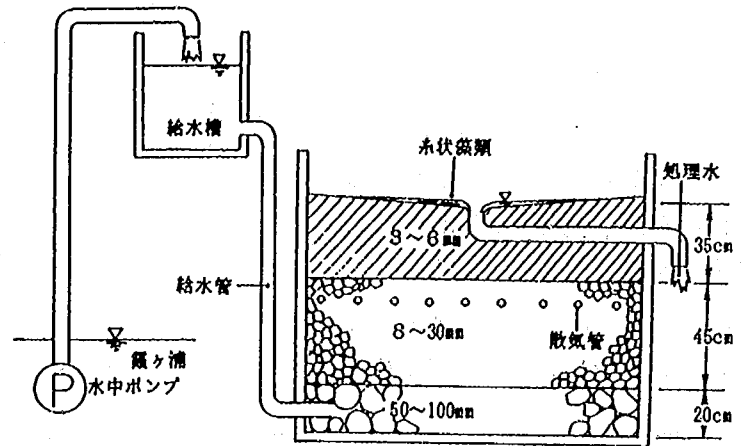


図-5 前処理設備（上向式砂利濾過）の実験装置

数カ月実施した実験の結果を図-6に示す。

砂利層底部の洗浄を月に2度の頻度で行った6月の水質データを見ると、T-Pの除去率は6割程度、濁度の除去率は9割程度、クロロフィルaの除去率は8割程度であった。なお水層部には糸状藻類であるメロシラ (*Melosira varians*; 珪藻類) やサヤミドロ (*Oedogonium* sp.; 緑藻類) が生息し、本処理設備に給水する前処理水の藻類優占種をメロシラやサヤミドロに制御することができた。

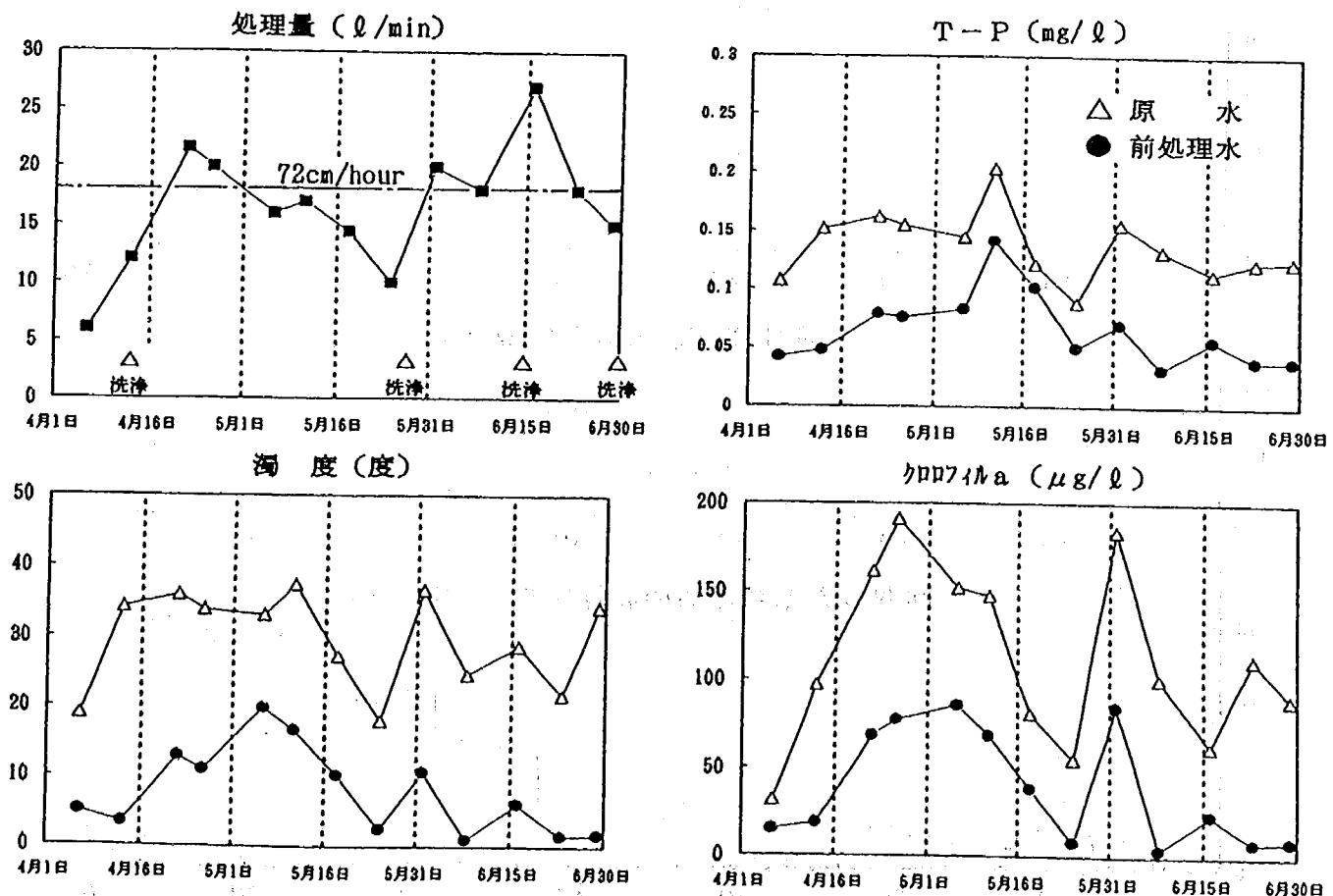


図-6 前処理による水質の測定結果

5.2 本処理設備の処理能力実験

霞ヶ浦湖岸で湖水を原水とした緩勾配水路タイプでの実験を行った。実験装置を図-7に示す。水路幅は40cm、水深は8cmであり、ポンプで湖水を供給し、流速は10cm/secが得られるようにした。基質はフェンスとし、 $\phi 3\text{mm}$ の麻ひもを二重にしたものを1段、2段、4段、6段と2カ月おきに増加していった。なお水流方向のフェンス基質の間隔は4cmとした。フェンス基質の上流側にはメロシラ (*Melosira varians*; 珪藻類) 付の河床礫を置き、糸状藻類供給ゾーンを設けた。

基質にはメロシラが海苔のように付いたが、概ね1週間に1度の頻度で可動式のエッジでかき取り、湿潤重量と乾燥重量を測定した。またメロシラに含まれるリンの重

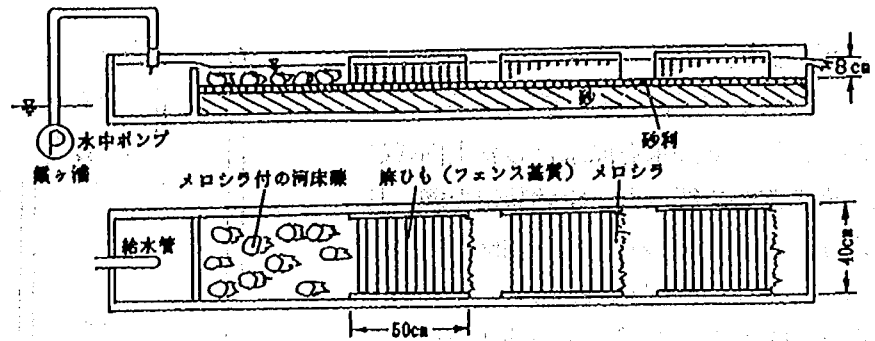


図-7 本処理設備（緩勾配水路タイプ）の実験装置

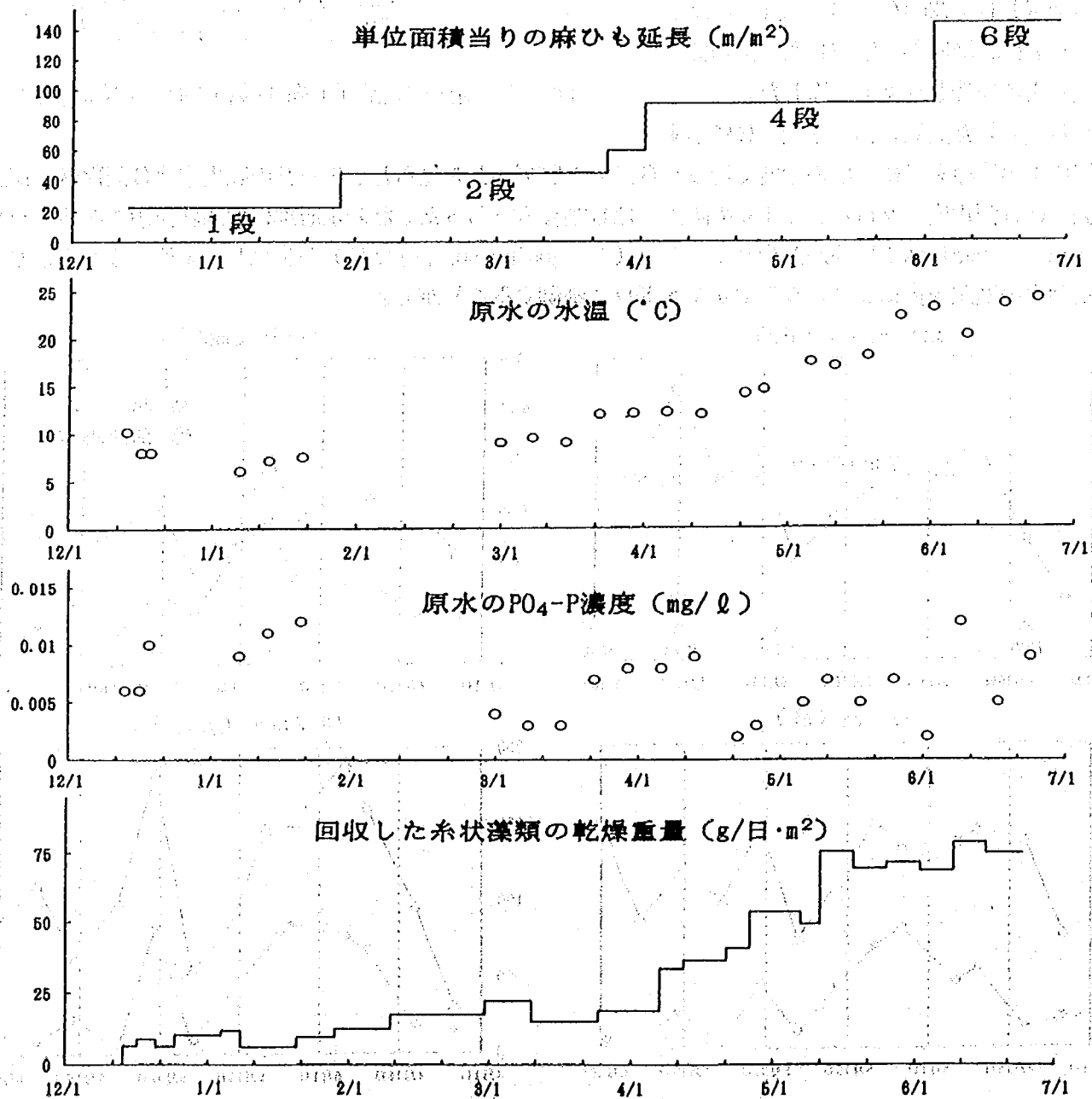


図-8 回収した糸状藻類の乾燥重量等の測定結果

量を測定したが、乾燥重量1g当たり2.6mgであった。図-8に測定結果を示す。回収した糸状藻類の乾燥重量、単位面積当りの麻ひも延長、原水の水温、原水の PO_4-P 濃度の経時変化を示す。回収した藻類の乾燥重量は、原水の PO_4-P 濃度との関係は見出せず、単位面積当りの麻ひも延長には比例関係が見られる。原水の水温も影響を及ぼしているように見える。

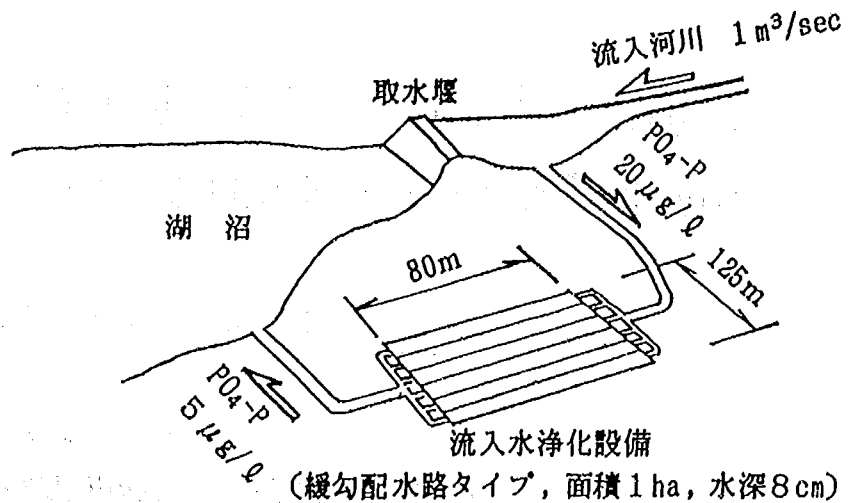


図-9 糸状藻類活用システム（緩勾配水路タイプ）の設備例

麻ひもが4段になった4～5月の2ヶ月間では、1日1m²当りの回収された糸状藻類の乾燥重量

は概ね50g/日・m²であり、リン重量に換算すると130mg/日・m²となる。ここで図-9に示すように、1m³/secの流入河川水を1haの浄化設備で処理すると仮定すると、次式のように PO_4-P 濃度を15µg/l低下させたという計算になる。なお原水の PO_4-P 濃度が数µg/l程度の低濃度となっても藻類回収量が落ちておらず、このことは本タイプの大きな利点である。

$$130\text{mg/日}\cdot\text{m}^2 (\text{リン除去量}) = 15\text{mg/m}^3 (=15\mu\text{g/l}; \text{リン低下量}) \times 86400\text{m}^3/\text{日} \times \frac{1}{10000\text{m}^2}$$

本実験に対し実際の設備では、①水深を8cmから20cm程度まで上昇させる、②流速を10cm/secから15cm/sec程度まで上昇させる、③糸状藻類が付着する基質に工夫を加えて改良する、等を実施すれば、さらに PO_4-P の除去効果が向上すると考えられる。

6. まとめ

- (1) 湖沼の富栄養化対策として多量水を対象としたリン除去、特に PO_4-P を除去するには、『糸状藻類活用システム』が有効である。
- (2) 糸状藻類活用システムでは、T-P、浮遊藻類、濁質の除去を目的とした前処理と、 PO_4-P 、カビ臭物質の除去を目的とした本処理の2段階に分けて水処理するのが望ましい。
- (3) 現地実験の結果、前処理設備はT-P、浮遊藻類、濁質をよく除去でき、本処理設備では PO_4-P をよく除去でき、それをもとに現地における設備規模を算定すると、前処理設備で1m³/sec当り0.5ha、本処理設備で1m³/sec当り1haとなり、湖沼の富栄養化対策としての実用化の可能性が確認できた。

参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；糸状藻類を活用した貯水池水質保全対策、土木学会水理委員会水工学論文集、第37巻、1993
- 2) 中本信忠・坂井正；緩速ろ過池における糸状珪藻とその連続培養の重要性、日本水処理生物学会誌、Vol. 1, No. 1, 1991
- 3) 飯山郁子・坂井真奈美；緑藻アオミドロの食品学的評価、山陽女子短期大学研究紀要X、1984
- 4) 坂井正・中本信忠他；緩速ろ過池で繁殖する藻類とその有効利用、環境科学年報（信州大学）、No. 14、1992
- 5) 森下郁子；川の健康診断～清冽な流れを求めて、NHKブックス290、日本放送出版協会、1977

流動制御によるダム湖水質保全システム

Measures for Reservoir Water Quality Conservation by Current Control

丹羽 薫^{*}、久納 誠^{*}、久保徳彦^{*}、山下芳浩^{**}

1. はじめに

本報では新たなダム湖の富栄養化対策手法として、流入河川水と表層水の流動を制御し、藍藻類等の好ましくない藻類の異常増殖を制御する『流動制御システム』を開発し、現地観測によりその流動特性を明らかにするとともに、水質予測評価に用いるための数値解析モデルについて報告する。

2. 流動制御システムの概要

流動制御システムは、平常時においてダム湖の表層に温水でしかも水温分布が均一の循環混合層を、有光層の数倍に至る水深まで厚く形成させ続け、中小洪水時にもこの層を温存させることにより、有光層に生息する藍藻類等の好ましくない藻類への栄養塩類と光を制御することになり、それによって藍藻類の異常増殖を抑制

するシステムである。図-1に流動制御システムの模式図を示す。

筆者らはこの循環混合層を効率的に形成するには散気管方式の曝気循環が優れていることを現地実験により明らかにしている¹⁾。

3. 現地観測による循環混合層の流動把握

釜房ダム（堤高45.5m、総貯水容量4,530万 m^3 、湛水面積3.9 km^2 、流域面積195 km^2 ）において、大型タイプの散気管方式の曝気装置（出力22KW、空気量3,700 $\text{L}/\text{分}$ ）周辺の流動を測定した。測定結果を図-2に示す。散気管方式の曝気装置周辺の水の挙動は、図-3に示すような二つの循環流となっている。第1循環流は、まず曝気による気泡の上昇に伴い気泡周辺の水が連行される。次に気泡により持ち上げられた水が水平方向に流れを変え表面流が生じる。曝気中心から概ね30m離れると水平の流れは急に鉛直下向きの流れに変わり、ある深度まで降下すると流れは気泡や表面流の方向に向かう。この第1循環流の外側にはその鉛直下向きの流れに連行されて第2循環流が生じている。一方、図-4に示すようにダム湖の流入部付近（曝気装置から1,450m地点）の水温鉛直分布は曝気装置近傍の水温鉛直分布とほぼ等しくなっている。

以上の観測をもとに散気管方式の曝気による水の挙動を推測する。散気管方式の曝気により

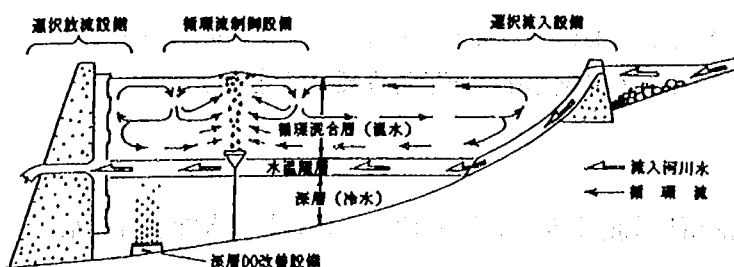


図-1 流動制御システムの模式図

* 建設省土木研究所 環境部 環境計画研究室

** (株)建設技術研究所 (前建設省土木研究所部外研究員)

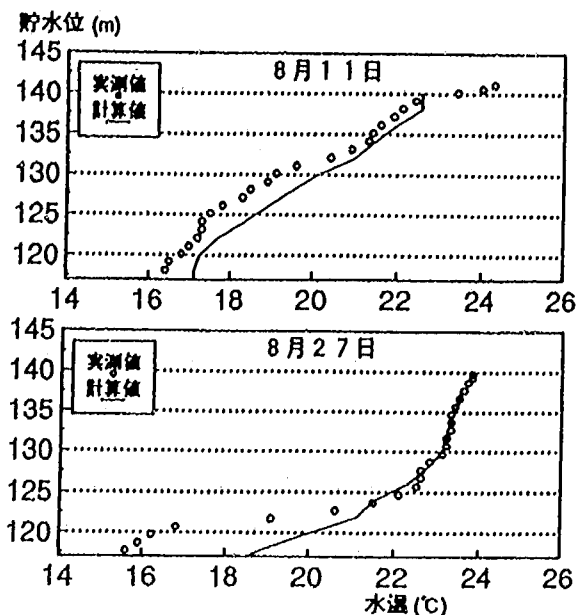


図-6 実測値とシミュレーション計算結果

ため、散気管方式の曝気循環のもとでの水温鉛直分布の経時変化は、このように第2循環流の水平流速より算定する手法によって予測計算することが可能であると考えられる。

4-2 洪水時の流動制御システムの効果

循環混合層が有る場合と無い場合とで流入河川水がダム湖のどの水深に入り込むのかを予測計算によって検討した。鉛直一次元モデルを用いて予測計算を行った。散気管方式の曝気装置を稼働させ、循環混合層を厚く保っている釜房ダムの平成4年8月27日に洪水が生じたと仮定した。図-7に示すような回転率0.25回のモデル洪水を与え、コンジットゲートで流入水の50%を一定率放流させると仮定した。洪水時の水温及び濁度の鉛直分布を図-8に示す。回転率0.25回の洪水が来た場合、循環混合層が有る場合は無い場合に比べて、表層付近に残る清澄水の水深が5m程度増加することがわかった。

5. まとめ

(a) 現地実験観測により散気管方式の曝気循環によるダム湖内の循環流、水温分布特性を明らかにした。循環混合層は曝気循環により生じ

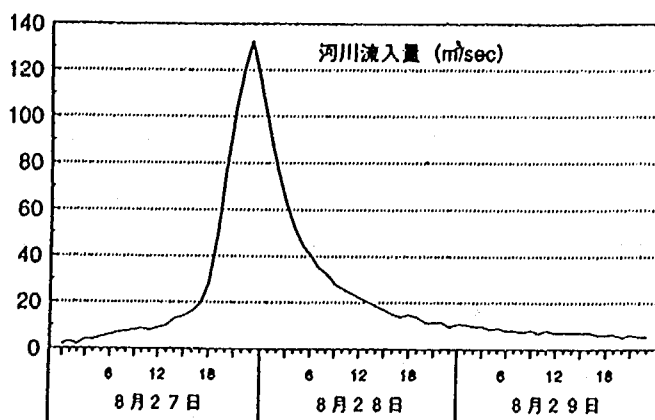


図-7 シミュレーション計算で入力した洪水波形

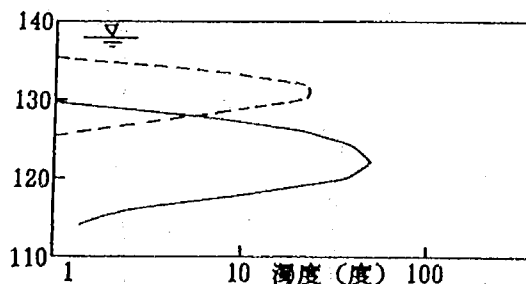
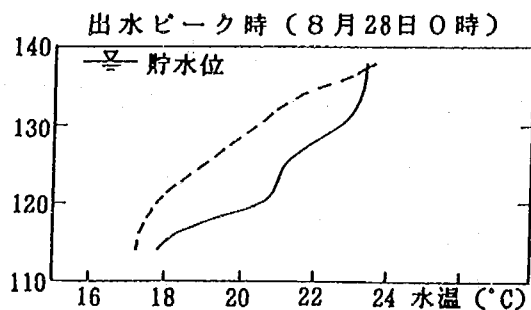
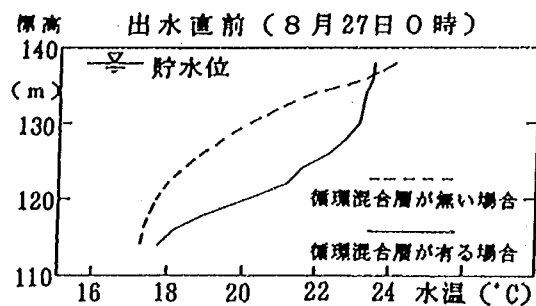


図-8 洪水時のシミュレーション計算結果

る第2循環流により形成され、ダム湖全体に一樣に広がる。

(b) 散気管方式の曝気循環によるダム湖の流動を再現できる鉛直1次元モデルを構築した。

参考文献 1) 丹羽薫、久納誠、大西実、山下芳浩；貯水池流動制御による水質保全対策、土木学会水工学論文集、第37巻、1993

第1循環流が生じる。第1循環流は、図-3に示すように第1循環流外側の表層から温水(24.5°C)を、第1循環流外側の深層から冷水(20.5°C)を引き寄せ、両者を混合して中間水温(23.5°C)とし、これを第1循環流外側の中間水深付近に押し出す働きをする。押し出された中間水温の湖水は、表層の温水と深層の冷水との間を楔のように割り続けるようにしてダム湖上流端まで運ばれる。この結果、表層の日射エネルギー

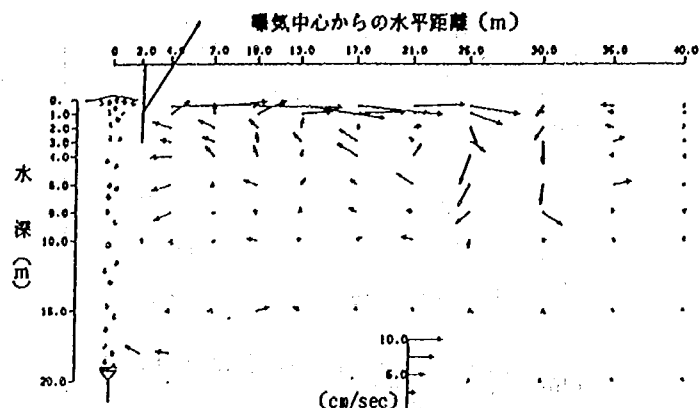


図-2 散気管方式の曝気による流動測定結果

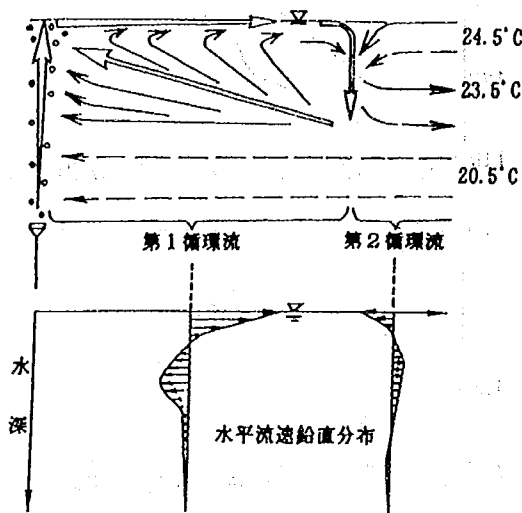


図-3 第1循環流と第2循環流の模式図

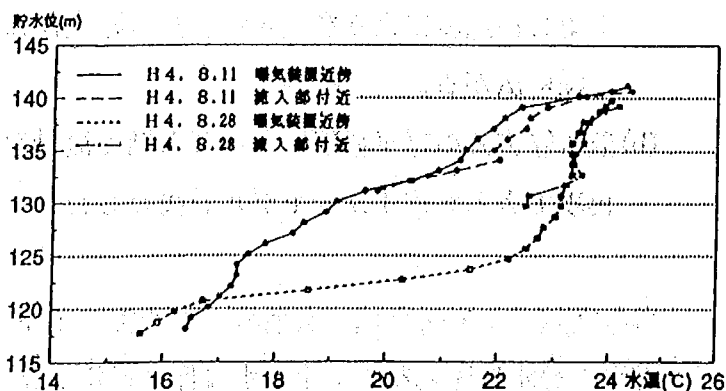


図-4 曝気装置近傍と流入部の水温鉛直分布

はこの密度流に乗って循環混合層全体に運ばれる。これが観測では第2循環流として見られる。

第1循環流は曝気装置周辺の局所的な流れであり、ダム湖全体の水質保全に効果のある循環混合層の形成は第2循環流によるものである。

4. システム稼動時のシミュレーション計算

4-1 散気管方式における水温予測計算手法

現地観測により得られた測定結果をもとにして、曝気により生ずる水平方向の流動より水温鉛直分布の予測計算手法の概要を述べる。ダム湖の水質予測をするうえで第2循環流によって形成される循環混合層を的確かつ簡便に再現することが必要であり、第2循環流に着目して鉛直一次元モデルを作成する。3.に示した流動測定結果より得られた空気量3,700 l/分の際の第2循環流における水平流速の鉛直分布(曝気中心から35m離れた位置)を、図-5に示すような簡略化したモデルとし、分割層毎の流出及び流入量に換算した上で、鉛直一次元モデルに組み込んだ。大型(空気量3,700 l/分)1基及び小型(空気量950 l/分)5基を稼動させていたが、小型の能力算定については流出及び流入量が空気量に比例するものと仮定して計算した。予測計算は、散気管方式に切り替えた平成4年8月11日から27日まで実施した。計算結果を図-6に示すが、計算値は実測値に概ね一致した

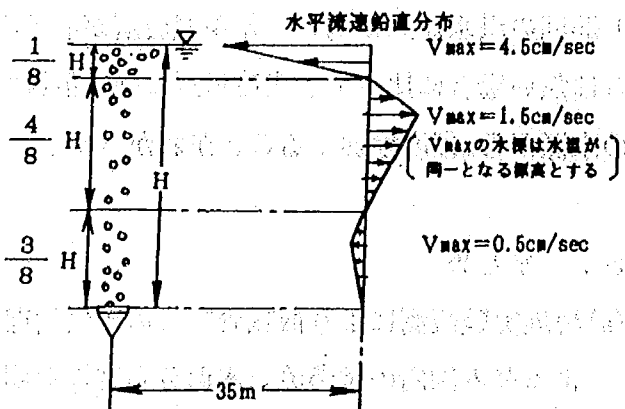


図-5 シミュレーションに用いた水平流速分布モデル

我が国での対策事例と新しい水質保全対策

建設省土木研究所 環境部

環境計画研究室長 丹 羽

薫

御紹介いただきました建設省土木研究所の環境計画研究室長の丹羽でございます。私の方からは「我が国での対策事例と新しい水質保全対策」という課題でお話しさせていただきますが、ただいま水源地センターの福田部長の方から総括的な話がございましたので、特に新しい水質保全対策の方をメインといたしましてお話しさせていただきたいと思っております。

対策手法の説明に入る前に、ダム湖の水質保全の位置づけというものを考えてみたいと思います。ダム湖の環境というものは大きく分類しますと自然環境と生活環境に分けられます。自然環境では貴重種の保全とか豊かな生態系の保全、また種の豊富さということが目標となります。生活環境では美しい景観をつくるとか、ダム湖をレクリエーションの場とする、こういったことでダム湖と水源地のある地域の活性化の核としていくということが期待されています。

そもそもダム湖というと、山地の河川のところに広い面積の水面を確保する、水の量を確保するということで、基本的に自然環境、生活環境が豊かになる要素が非常に強いわけです。それをうまく整備していくことで非常にいい環境がつくっていただけるわけです。

ダム湖の水質保全は多くの面に関係しています。この関係を図に示しました。(図-1)

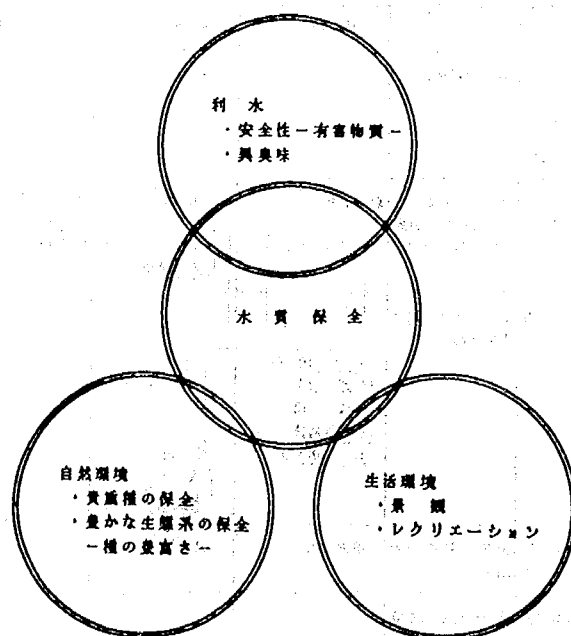


図-1

まず、下流域の環境ということがありますが、もう一つ大きなことで水をどう使うか、それに伴う水質保全ということでございます。また、単に利水上の安全、または利水上よい水質が下流地点で確保されていればよいということではなくて、ダム湖のある地点でも美しい環境が形成されるために水質保全が必要だということ。また、最近特に図の下の方の要素が強くなってきていると思います。したがってましてダム湖の水質保全の目標を決めるときに問題になるわけでございますが、最近求められる水質保全の目標がだんだん高まってきているというふうに思います。それともう一つはそれぞれの種類によって目標とする水質も違ってくるということが言えます。

次に対策手法について先ほど総括的に福田さんの方からお話ございましたけれども、私なりにこれを分類してみるとわかりやすいのではないかと思います。つづいたものでございます。(表-1) 対象として流域対策、ダム湖の流入河川とか湖内対策、それと放流水、下流へ出す水をきれいにして出す。あとは利水施設でそれぞれのところがやるということはあるわけでございますが、そのうちの特にダム管理者、河川管理者の対策のメーンとなるところで見てみたいと思います。それぞれの目的がどういうふうに位置づけられるのか、また対策手法としては物理的な手段を用いるもの、生物、生態系を活用したもの、また化学的な処理を行うものということで分類してみました。

表-1

ダム湖水質保全対策
(富栄養化対策を主として)

対象域	目的	対策手法		
		物理的	生物的	化学的
流域 発生源 (点源 面源)	流出負荷削減			
本日 取り 上げる 範囲	ダム湖 流入部 流入負荷削減 特に溶解性無機態 栄養塩類の削減	貯留水池 バイパス	植生浄化 アシ原 ホテイアオイ ホテイ草類	リン吸着剤 土壌 栄養沈降
	湖内 藻類が増殖し難い 環境制御	流動制御 選別取水 循環 選別放流 ヒートポンプ	ハバ T-L-1000 藻類 藻毛 藻石	
	放流水 藻類・異臭等の 削減	選別取水	緩速濾過	
利水施設	用途に応じた水質 確保			

下線——を付した対策手法を中心に説明する

まず流域からは流出負荷の削減、ダム流入部ではダム湖への流入負荷の削減ということでございます。流入負荷、栄養塩類のうち特に溶存性の無機態の栄養塩類をとるのが大切であるということを御承知おきいただきたいと思います。といいますのは流入塩類のうちの割合で行きましたら懸濁態の方が多いわけでございます。それと浅い自然湖沼の場合には懸濁態のものも入ってきてそこに沈殿する。その再溶出ということにかなりのウェートがあるわけでございますが、ダム湖のような深い湖沼の場合には、底に沈殿して底からの溶出という割合がそれほど多くございません。したがって、特に入ってくる栄養塩類の中でも水に溶け込んでいる栄養塩類を削減するのが重要である。

貯水池の中で浮遊性の藻類が異常に増殖して問題になるわけでございますが、水に解けている状態の栄養塩類といいますのは、その浮遊性の藻類の即栄養塩になるものでございます。それを削減する必要がありますが、懸濁態の栄養塩を落とすのに比べて難しい問題でございますので、特に注意する必要があるということで御承知おきいただきたいと思います。

次に湖内対策といたしましては、今度は藻類が増殖しにくい環境条件をつくらせてやるのが基本となるかと思えます。これはよく言われておりますように藻類増殖のためには単に栄養塩だけではなくて光の制限ということもありますので、光の制限をするということ。それともう一つは水中での食物連鎖を利用するわけでございますが、一部の浮遊性の藻類の増殖が問題になるわけでございますので、それを食べてくれるような動物プランクトンとか、もっとほかの動物なども増えやすい状況になるとよいということが言えます。もう一つ放流取水については浮遊性の藻類とか異臭味を削減してなるべく出したいということがございます。

それから対策でいろいろ書いておりますが、四角で囲っておりますのは両方にまたがるという意味で囲っております。また下に二重線を引きましたのは土木研究所の方で最近新しい水質保全対策として開発に取り組んでいるものを書いてございます。ダム湖の流入部のところでは前貯水池というのが一つありますが、先ほど申しましたところでは懸濁態は多く落ちるんですが溶存性のものはちょっと落ちにくいわけでございます。バイパスは流入部の対策でもありますし湖内両方に関係してくるわけ話でございますが、これは確実に削減できるものでございます。

ただ、これも費用が相当かかるということがあるので、どこにでもできるというものではないということから、生物的、化学的に引き下げようということでございますが、一般

に化学的に薬品を使うのは非常にコストがかかるというのと、水の中に大量にまくのは他への影響があるとぐあいが悪いので河川管理者として使いづらいところがあるわけですが、現実に使われているのではリン吸着剤、凝集沈殿、土壌というようなところでは、化学的な手法は大々的に使うにはコストの面で使いにくいところがございます。生物的方法といたしましては植生浄化がございます。従来アシ原、ホテイアオイがダム湖の流入部、湖内の両方で使われてきておりますが、高等植物を使うというのは必ずしも効率がよくない。問題となります浮遊性の藻類とどちらが早く増えるかといいますと、下等なものほど一般に早く伸びますので、それに比べて高等植物はなかなか伸びにくいので効果が悪いということがあるわけがございます。

それに対しまして同じ藻類の仲間なんですけど、浮遊性の藻類のように後の回収がしにくいというのではなくて、後の利活用がしやすい糸状藻類というものを使ってやれば非常に効果が上がるということがわかってきているところがございます。

もう一つ湖内の方の対策といたしましては、流動制御とここに書いてございますが、この流動制御と言いますのは選択流入、曝気等による循環と選択放流を組み合わせたものがございます。従来の技術で曝気循環というものと、選択取水と言っておりますものがあります。ここでは選択放流といいましてそれよりちょっと規模が大きくという意味で書いております。選択取水とか曝気循環は個々の要素技術として開発されてきておりますが、それらをうまく組み合わせてやればもっと効果が上がります。そこに選択流入も組み合わせると、さらによいということがわかってきております。手法としては物理的なことがメインでございますが、湖内での生態系の変化を与えるという意味では生物的な対策の要素もあります。

流動制御をヒートポンプでさらに補強するということがございます。

湖内におけるもう一つの対策としてろ過というのを書いてございます。湖内対策で基本としては藻類が増殖しにくい環境をつくるということでございますが、水質とか水理条件によりましてはどうしても藻類の増殖が避けられないところもございます。また淡水赤潮のように相当水質がよい状況でも発生する藻類がございます。そういったところで美観の面で何とか対策をとりたいというときには、ろ過することも考えておく必要があると思います。これにつきましても従来長毛ろ過等が行われております。あるいは木炭浄化というものもございますが、私どもが調べてみましたところでは、ろ過する方法は基本的には何でもいわけですが、目詰まりが起らないようにするというのが一番基本であります。そ

のためには逆洗のしやすい軽石を使うと非常に管理しやすいということがわかってきました。

放流取水については藻類や異臭味をとるということでございますが、選択取水ではなるべくよい水のところを選んで取って行こうということでございます。なおかつ、もっとよい水にして藻類とか異臭味を削減して出したいというときでしたら、浄水などで行われております緩速ろ過までやれば非常にいい水を出せることがわかってきております。

次にお手元に別途一枚紙が配られていると思いますが、きょう特にお話ししたい新しい技術面といたしまして湖内の流動制御というもの、それと糸状藻類を活用したシステム、この二つをメインにお話ししたいと思います。(図-2、表-2)

湖沼の新しい富栄養化対策

自然湖沼やダム湖では、富栄養化に伴い好ましくない浮遊藻類が異常増殖して、アオコや淡水赤潮、異臭味が発生しているところがあります。土木研究所では、こうした好ましくない浮遊藻類の異常増殖を阻止する画期的な対策方法を開発しました。本システムは糸状藻類を活用して流入水及び湖水から栄養塩類を除去する「糸状藻類活用システム」と流入河川水及び湖水の流動を制御して浮遊藻類の増殖し難い環境を作り出す「流動制御システム」からなります。

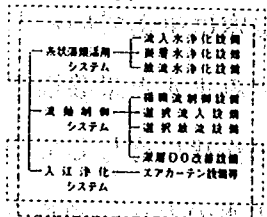
糸状藻類活用システムの特徴

- ①糸状藻類は、自然河川や浅い湖沼で一般に生息
- ②無機物のリンや窒素の吸収能力が高い
- ③四季を通じて概ね活用可能
- ④増殖のコントロール及び回収が容易
- ⑤魚や家畜の良質なエサとなり、有効利用が可能

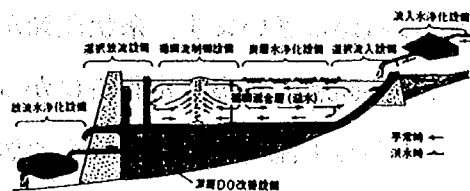
流動制御システムの特徴

- ①散気管方式の曝気循環装置を用いて有光層の数倍の厚い循環混合層を形成
→ 循環混合による光制限及び藍藻類の優占阻止
- ②栄養塩類を含んだ流入水を水温層間に導き、すみやかにダム湖から放流
→ 有光層への栄養塩類供給を制限
- ③深層DOの改善
→ 底泥からの栄養塩類溶出防止
- ①②③による藍藻類等の異常増殖の防止

湖沼における適用



ダム湖における適用



新しい富栄養化対策の全体構成図



自然河川に生息する糸状藻類 (メロシラ)



糸状藻類の生息環境を再現する実験

建設省土木研究所

〒305 茨城県つくば市地 1 番地 1 号 0296(64)2211



Public Works Research Institute

図-2

表-2 対策システムの概要と特色

システム名	概 要	特 色
糸状藻類活用 シ ス テ ム	流入河川水及び湖沼表層水の無機態の栄養塩類を除去して浮遊藻類の異常増殖を抑制する。	・流入河川水から PO_4-P を削減させる。 ・広い面積が必要である。
流 動 制 御 シ ス テ ム	湖沼及び流入河川水の流動を制御して湖沼表層を浮遊藻類が異常増殖できない環境にする。	・平均水深が10m以上の湖沼に適する。 ・維持管理が容易である。
軽 石 濾 過 シ ス テ ム	湖沼表層において異常増殖しかけた浮遊藻類をアオコや淡水赤潮になる以前に除去する。	・常時藻類が異常増殖する湖沼に適する。 ・比較的狭い面積で良い。

流動制御というものは散気管で曝気循環して循環流を起こして、表層に比較的温い水の層を厚くつくる。こうしますと流入水の方が通常冷めたくて下にもぐり込んでくれるということで水の流れがつかれます。入ってくる流入水は栄養塩負荷が高いわけですが、それは表層へ行く分をできるだけ少なくして直接下流へ出すようにする。厚く形成した表層では循環流を起こしているので光制限というような形で藻類の増殖を抑制できる。それから底の方については酸欠になる場合もありますが、回転率によって関係ない場合もございますが、そういうときには深層DOの改善施設も設けておくということでございます。

もう一つ糸状藻類というのは自然河川にどこでも生えているものでございます。自然河川のどこでも生えていますが、水質の条件とか河床の条件によって糸状藻類が生えやすいところ生えにくいところがございます。糸状藻類が豊富に生えているところでは、そこで栄養塩類を吸着してしまして、実際に水質をはかってみますと栄養塩濃度が非常に低い状況でございます。ですから下流河川においても水質の浄化に寄与していることがわかるかと思えます。ただ、自然のままで置いておきますと出水のときは剥離されてドーンと流れるというようなことになりますので、人為的な施設を設けてうまく管理してやろうというものでございます。糸状藻類というのは非常にコントロールしやすいわけですが、自然の河川におきましても糸状藻類を魚が食べているわけでございますので、それをまた魚に食べさせるとか、あるいは家畜に食べさせることも可能でございます。

糸状藻類の活用システムは、流入河川さらに湖沼の表層水からも栄養塩類を取ることができます。流量制御の方はダム湖のような深い湖沼で非常に有効なシステムでございます。しかも、これは維持管理もほとんど要らない楽なシステムでございます。

もう一つは軽石ろ過というのを提案してございます。

まず流動制御のメカニズムについてお話ししたいと思います。(図-3) これは先ほどの図を拡大したものでございますが、このあたりの循環がどうなっているかといいますと、この気泡で水が連行されて上がって行く。我々は1次循環と称しておりますが、それによってこのあたりで大きな循環が生じております。その外側では下から上がったものと上のちょっと温かい水とがまざって下にもぐり込むわけでございますが、それは内側に来るのと外側に来るのがございます。

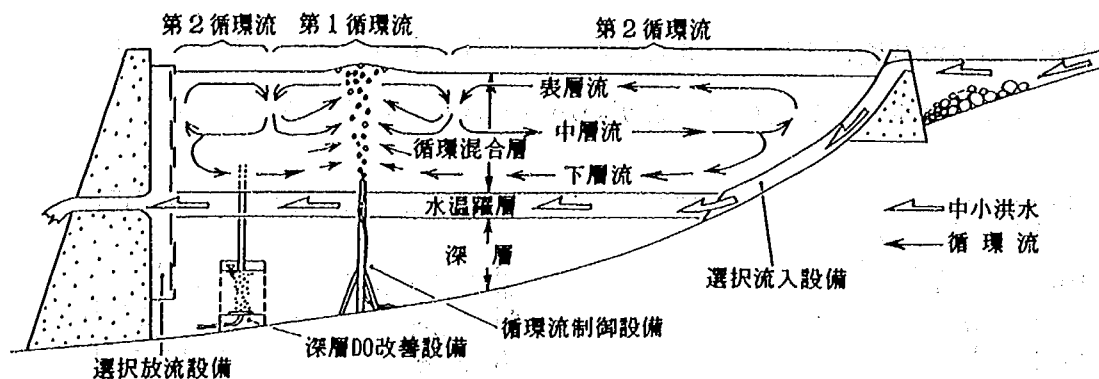


図-3 流動制御システムの模式図

外側に来たものがずっと流れて行って、これは2次循環と称しておりますが、これが貯水池全体に広がっていくという形になっております。その水平流速をはかったものがこれでございます、(図-4) 1次循環のところでは下からの水が気泡に連行されて上がっていくということで、それで横向きの流れがあり、上では外向きの流れが生じていることがわかります。貯水池全体の水質改善に寄与するのは、1次循環に伴って生じます2次循環の方が貯水池全体に寄与するわけでございますが、これは表面では内向きの流れ、一番下の方

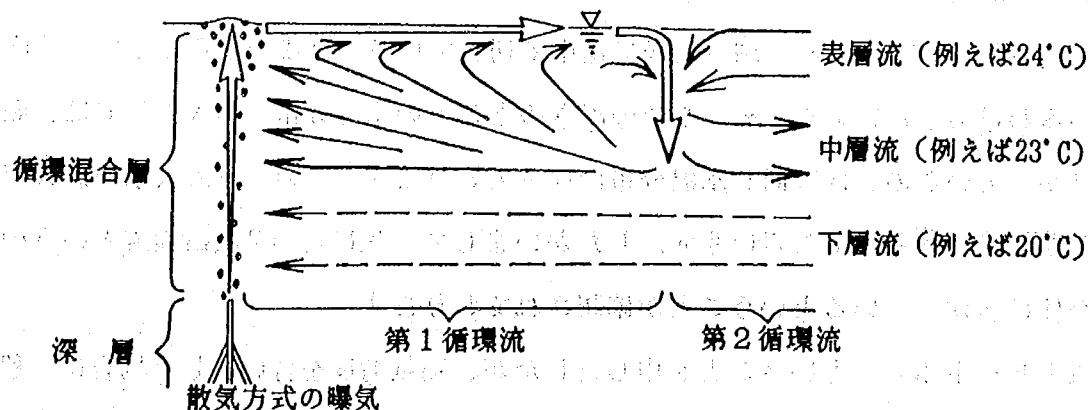


図-4 第1循環流と第2循環流の模式図

でも内向きに中心部に連行になっている。その真ん中のところで外向きに流れるという形が観測されております。

先ほど来、散気管による曝気ということをおっしゃっていますが、建設省所管ダムでも従来間欠式揚水筒というものをあるダムで設けておりましたが、それと散気管方式と同じ空気量をほぼ同じ深さから出すということで比較して、それで水温分布がどういうふうに変化していくか。これもほぼ同じ気象条件のときを選んでやったわけですが、従来の間欠式揚水筒の場合ですとかなり緩やかな水温分布の変化になっておりますが、散気管にしますと連行量が非常に多いということで、シャープな水温躍層を深いところにつくって、しかも表層の循環混合層は厚い循環混合層がつくられております。したがって散気管方式のものが相当効率がいいということがわかってきたわけでございます。(図-5)

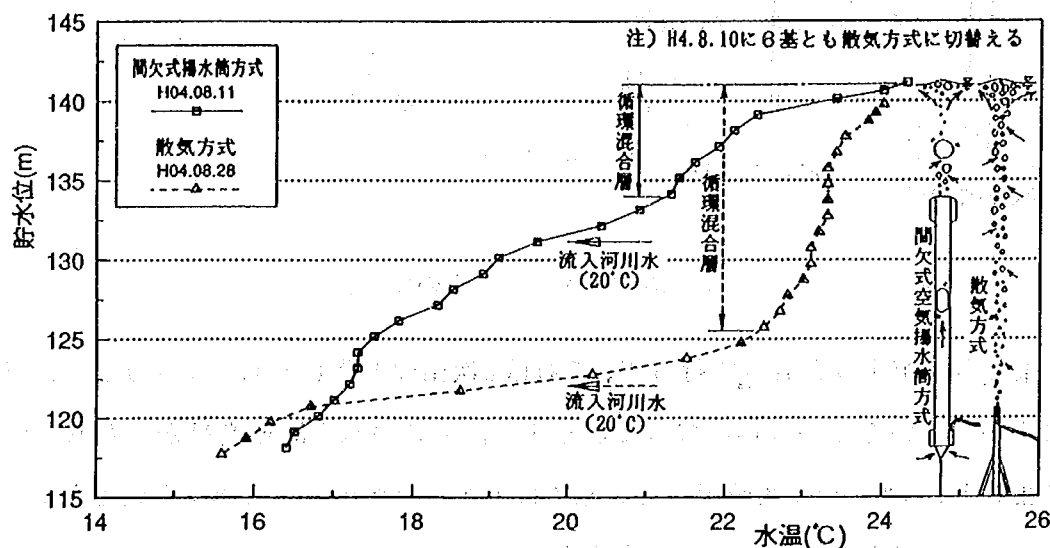


図-5 間欠式揚水筒方式と散気管方式の水温鉛直分布の比較

ただ、これが本当に貯水池全体に効くのかということをお心配の方もありますが、水温分布の測定結果を見ますと貯水池全体に広がっているのが解ります。(図-6) ダム上流部、流入部付近のところで測った図で途中で切れているのは浅いからここは一番底になっているわけでございます。そこまでの深さのところの水温分布につきましては、湖心付近ではかっているのとほぼ同じ水温分布になっております。この辺は流入水の影響でちょっと差が出ているわけでございます。したがって、先ほどの2次循環流というのは貯水池全体に広がっているということが確認されております。

先ほどヒートポンプということをお申しましたが、曝気循環を行いました場合に一般には水温分布、こういったシャープなくっきりとした表層、温い層が厚くなっておりますが、こ

ここにシャープな躍層ができるというのは非常に理想的なのですが、これは全部日射で温ま
 っていくものでございますから、気象条件によってはなかなかうまくいかない場合もござ
 います。それを補うものとしてヒートポンプの活用というものがございます。(図-
 7) ヒートポンプで表層の水温を温める。温めたということは反対にヒートポンプで冷めた
 い熱が外に出せるわけでございます。それを地域の冷房に使おうというものでございま
 す。したがって、貯水池の水質保全のために温い層を厚く形成させることに寄与する
 とともに地域の冷房、両方に役に立つということが言えるわけでございます。

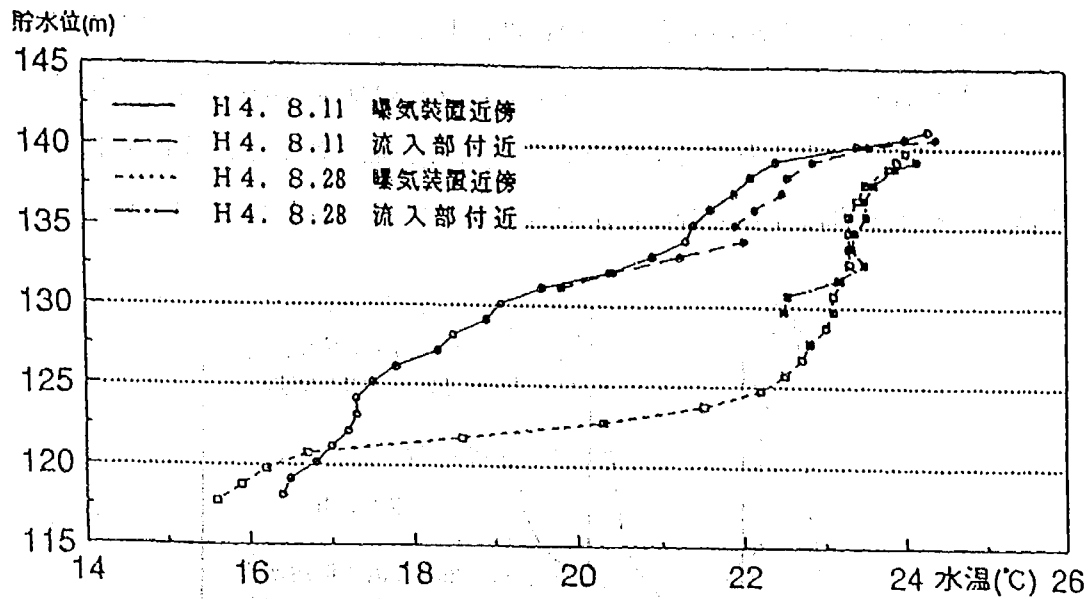


図-6 曝気装置近傍と流入部付近の水温鉛直分布

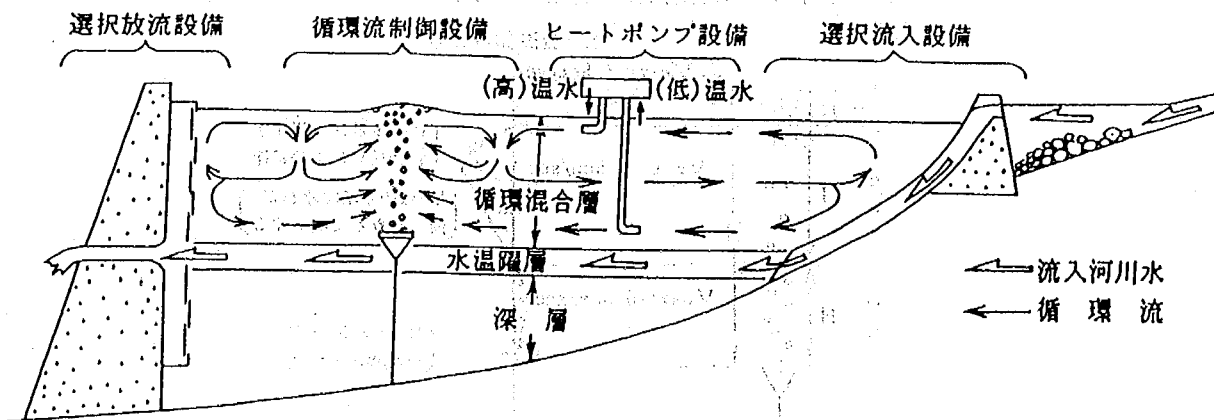
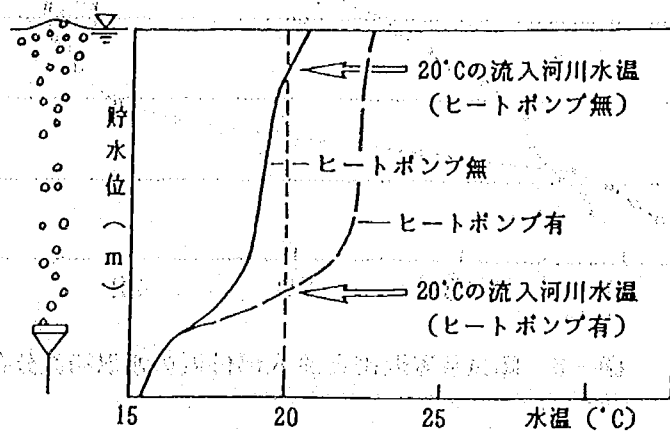


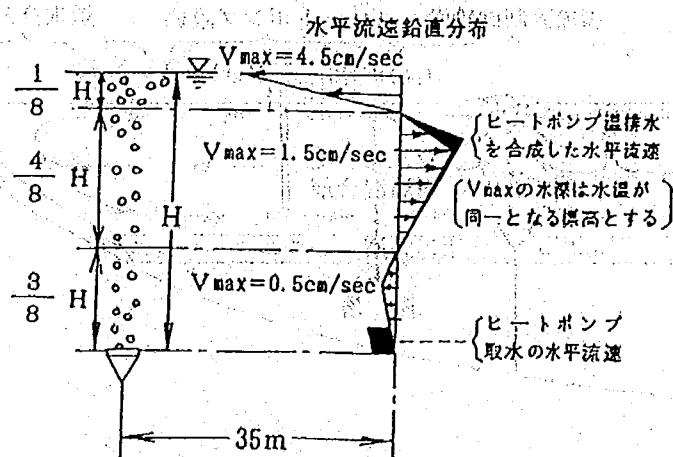
図-7 水温分布制御システムの模式図

この技術は実は今までヒートポンプ自体は開発されているわけでございますけれども、実際にヒートポンプを用いることによって貯水池の水質にどう影響をするのかがよくわからなかったわけでございます。逆に水温がちょっと高くなるということで水質に悪い影響を与えるのではないかとということも懸念されるところもあったわけです。ところがうまく運用してみますと、悪くなるどころか貯水池の水質保全にも役立てることができることがわかったわけでございます。そういうことで一石二鳥の技術として今後推奨できるのではないかと考えております。

そのヒートポンプを使うことでどう役立つかといいますと、気象条件が悪いときには先ほどの曝気循環をしましても水温分布がこの程度にしかない場合もございます。そのときには流入水が有光層の上の方に入ってきてしまうということがございます。そのときにヒートポンプで上の層をより温くするということで、理想的な水温分布を形成させる。それから流入水を下の方に押し込むことができるわけでございます。(図-8)



ヒートポンプの温排水を活用した水温分布制御



シミュレーションに用いた水平流速分布モデル

図-8

今までの話をスライドを使って説明したいと思います。

これは日本庭園の栗林公園でございます。(写真-1) 最初にダム湖の環境というものを総合的に考える必要があるということを申しましたが、日本人の水に対する感覚、思い入れというものは日本庭園を見ればよくわかるんじゃないかと思います。美しい自然を褒めることに山紫水明という言葉がございますが、人工的に美しい山や池や川を庭園の中につくって、それをめでてきたということがあるわけでございます。ダム湖というものも地域の水文化を創造していく、水文化の核になるということを目指してやっていくべきではないかと思っております。



写真-1

これは、あるダムのアオコの発生した状況でございます、悪いときにはこんなになる場合もございます。(写真-2)



写真-2

これも別のダムでアオコが浮いているところでございます。(写真-3)

これは淡水赤潮で、あるダムの上流端のところでございます。(写真-4) 淡水赤潮の発

生については上流端のところで発生することが多いわけですが、スライドで右が上流で左の方がダム湖でございます。ちょうど流入部のところでくっきりと線が見えているところでございます。

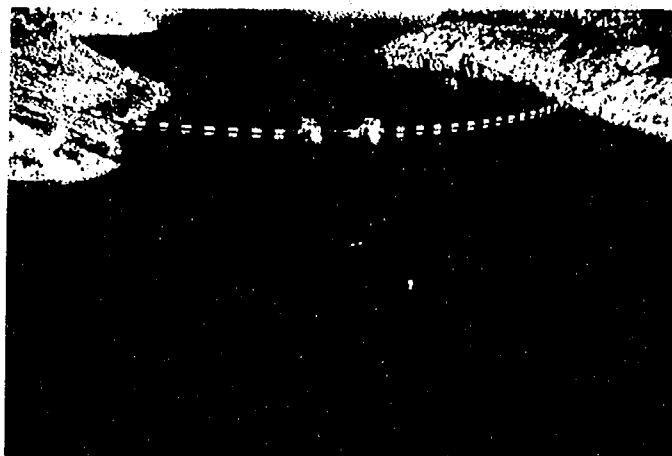


写真－3



写真－4

この対策といたしまして曝気循環の実験を行っているところでございます。これは沖縄のダムでやっているところでございます。(写真－5)



写真－5

これは下にもぐって曝気を出している所を写した写真でございます。(写真-6)



写真-6

今出ていました空気が上の方にだんだん広がってきまして、上のところではこういう形で出ております。(写真-7)

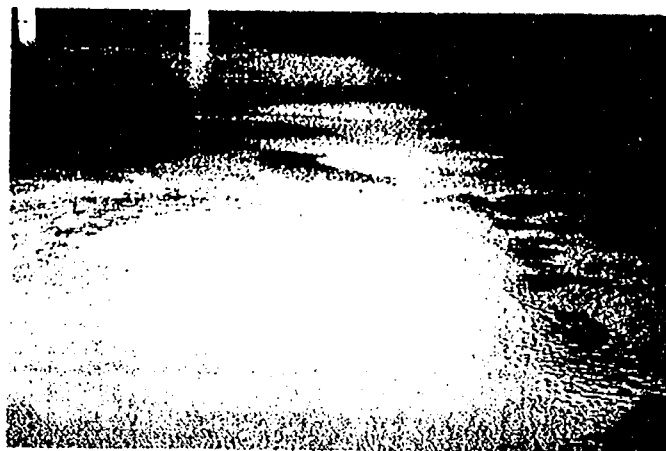


写真-7

次に、私どもで開発しております技術の2番目のものとしまして、糸状藻類を使った技術を御紹介したいと思います。(図-9) 糸状藻類というのは先ほど申しましたように広い意味での植生浄化の一環ということになるかと思いますが、非常に効率よく無機態のリン、窒素がとれるというのが特徴でございます、この場合に流入部のところで削減するのがメインだというふうに考えているわけでございますが、湖沼のところで出水で入ってきたときのものを対象にして湖面でやるとか、あるいは放流水を浄化して出すということも可能でございます。

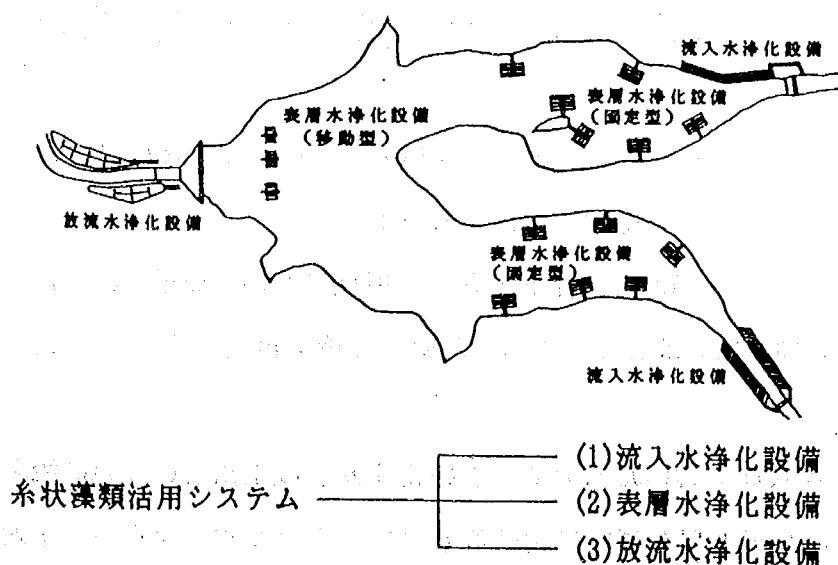


図-9 糸状藻類活用システムの模式図

糸状藻類としてどんなものを使っているのか。これはそれぞれの川に自然に生えているもので、それぞれの川といいまして大体どこでも条件さえ同じであれば、水質とか流速とかが同じようなものであれば日本中、あるいは世界中どこでも似たようなものが発生いたします。この名称といたしましてはカワシオグサ、ヒビミドロ、サヤミドロ、メロシラ、アオミドロ、アミミドロ、ウキシオグサというもので、これは私どもで施設を設けて自然に生えるようにしているんですが、川の中にもともとあって自然に増殖している藻類でございます。急流のタイプで生えやすいもの、緩流タイプでゆっくりした流れのところで生えやすいものとかございます。(表-3)

表-3 本システムに関係の深い糸状藻類

適性	和名(学術名)	綱別	特性
急流	カワシオグサ (<i>Cladophora glomerata</i>)	緑藻	丸くならない点を除いてマリモと全く同じ属の藻類である。
	ヒビミドロ (<i>Ulothrix</i> sp.)	緑藻	山間の渓流の岩石に着生する代表的な藻類である。
	ディアトマ (<i>Diatoma vulgare</i>)	珪藻	群体はジグザグ形であり、他の糸状藻類に群体ごと付着する場合が多い。
	サヤミドロ (<i>Oedogonium</i> sp.)	緑藻	細胞分裂が特異で、細胞間のサヤや朱色の丸い生卵器など特色が多い。
	メロシラ (<i>Melosira varians</i>)	珪藻	浄水場の緩速砂濾過で重要な役割を果たす藻類である。
	オビケイソウ (<i>Fragilaria construens</i>)	珪藻	茶色のモズクのように見えるがばらばらになり易く、メロシラに似ている。
緩流	アオミドロ (<i>Spirogyra</i> sp.)	緑藻	糸状藻類の中でも栄養価が高く有効利用の点で注目すべき藻類である。
	ヒザオリ (<i>Mougeotia</i> sp.)	緑藻	和名は接合時にあたかも膝を屈したような形になることに由来する。
	アミミドロ (<i>Hydrodictyon reticulatum</i>)	緑藻	肉眼でも一見多角形の模様をしたレース縞みを思わせる美しい藻類である。
	ウキシオグサ (<i>Cladophora crispata</i>)	緑藻	カワシオグサは渓流の岩石に着生するが、本種は水面に浮遊して生息する。

藻類の種類といたしましては緑藻類と珪藻類でございます。後ほどスライドで具体的にどんなものかというものをお見せしたいと思います。

このOHPには、糸状藻類が自然界で生息する環境について簡単な絵で書いたものがございますが、浄化設備の原理はこの絵で示した生息環境を再現させることと言えます。(図-10)

これは簡単な模式図で書いたものがございますが、陸上用というのは流入水を考えております。(図-11) 湖上用が湖内に設けるものがございます。浄水場の緩速ろ過のように砂にずっと通していく。これは別に砂できれいにするというのではなくて、その砂の表面

に糸状藻類が繁殖してくるわけでございます。そこで栄養塩をとっていこうというものでございます。緩勾配の流れのところに基質を設けて藻類を繁殖させよう。もう少し急勾配にして下に砂利層のようなものを設けてそこで繁殖させるというタイプもございます。

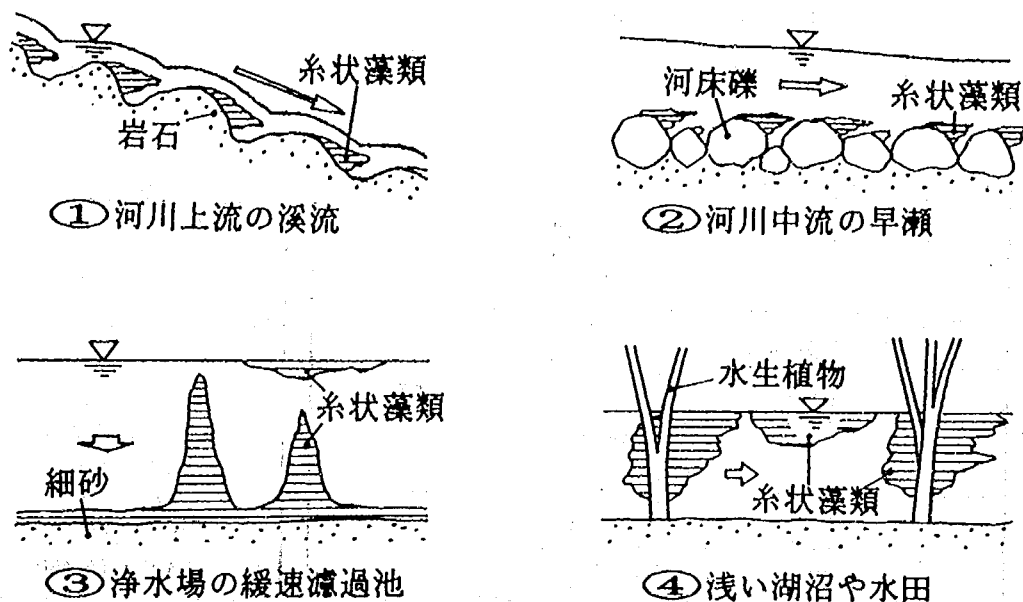


図-10 糸状藻類の自然界での生息環境と浄化設備

糸状藻類による判別	陸上用	湖上用
緩流に適した糸状藻類	下向式砂濾過タイプ (流入水・放流水浄化設備) 	網籠タイプ (表層水浄化設備)
急流に適した糸状藻類	緩勾配水路タイプ (流入水浄化設備) 	緩勾配水路タイプ (表層水浄化設備)
	急勾配水路タイプ (流入水浄化設備) 	

図-11 設備構造によって分類した浄化設備

この糸状藻類というのはどのくらい栄養塩がとれるのか。ほかの高等植物と比べて非常にいいぞということを言いましたが、特にその中でも処理水のリン濃度と浄化能力、特に先ほど申しました容存性の無機態リンということで $D-PO_4-P$ に着目して、それがどれくらいとれるかということを書いてございます。(図-12) この糸状藻類の実験については私どもの実験値でございますが、ほかのものにつきましては文献から得たものでございます。

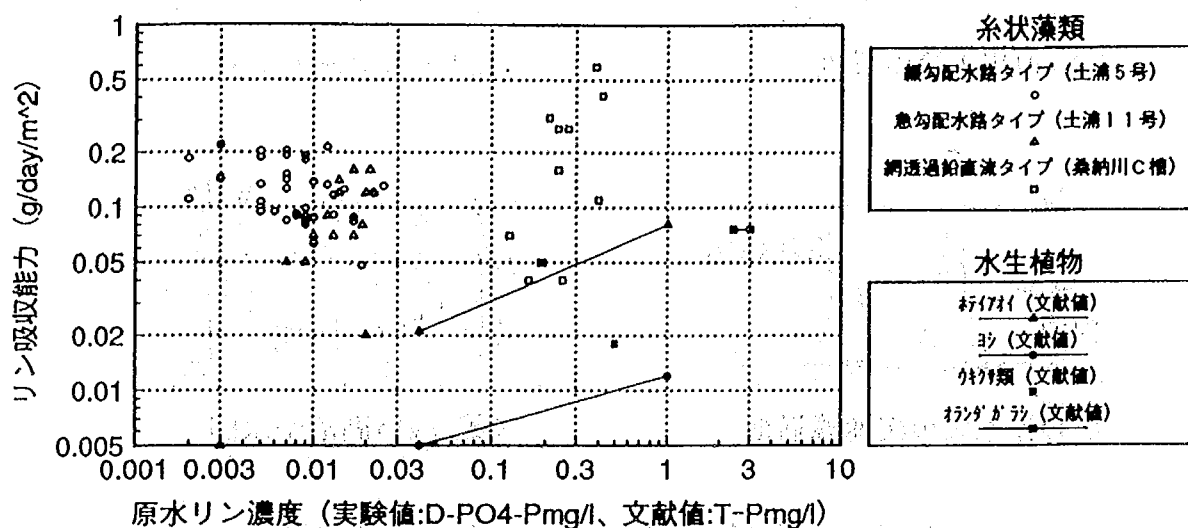


図-12

よく使われているアシ原というのが抜けているのではないかとと思われるかもしれませんが、これにつきましては先ほどの福田さんの話のところにもありましたように、これは条件によりまして $D-PO_4-P$ についてみますと再溶出してきているケースもあります。これは気象条件とか酸素の状態がどうかということにもよるわけでございますが、きちっとまとめられるデータが余りございませんのでプロットしておりません。いずれにしましても、これを見ていただきますと高等植物に比べて、これは対数グラフで書いてございますので糸状藻類の方は格段に栄養塩の吸着能力が高いなということがわかっていただけるかと思えます。

これは三春ダムの支川の水の量、ほぼ全量ぐらいを対象として大規模な実験をしているところでございます。(写真-8) 先ほど糸状藻類というものは魚のえさになるんだということで、実際に魚が食べているところの写真を撮ったものでございます。(写真-9) これはテラピアでイズミダイとも言っておりますが、その魚がアオミドロを食べているところでございます。

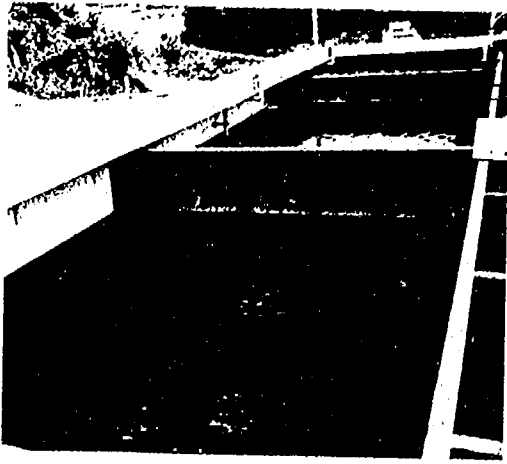


写真-8



写真-9

また先ほどのスライドの続きを使って説明させていただきます。

これはお手元のパンフレットにも入っておりますが、土木研究所があります筑波の近くの土浦の霞ヶ浦に入る支川でございます。(写真-10) ここにも藻類がいっぱい生えております。

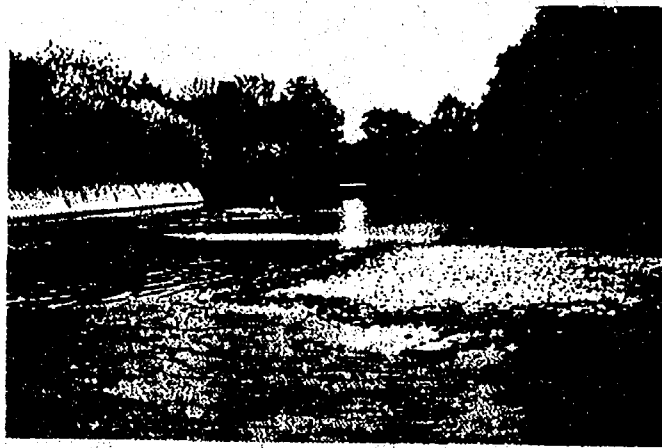


写真-10

先ほど示しましたところを上からのぞいて写真を撮ったのがこういう状況でございます、河床にメロシラがいっぱい生えているところでございます。(写真-11)

これは筑波市内の都市公園でございますが、糸状藻類をバケツですくい上げておりますが、条件がいいといっぱい手ですくえるほど生えております。(写真-12)

これは三春ダムへ流入する川の上流でございますが、そこでもこういった藻類が繁殖しております。(写真-13)

これは沖縄の河川なんです、これも下にいっぱい生えているんですが、気温が高いほど増殖しやすいので良く繁殖いたしております。(写真-14)

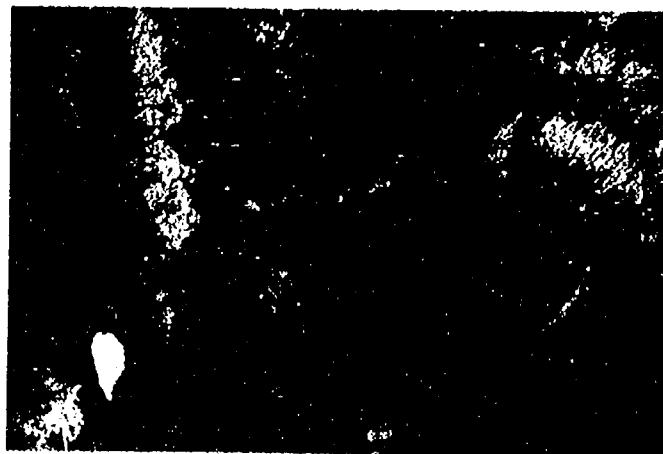


写真-11



写真-12

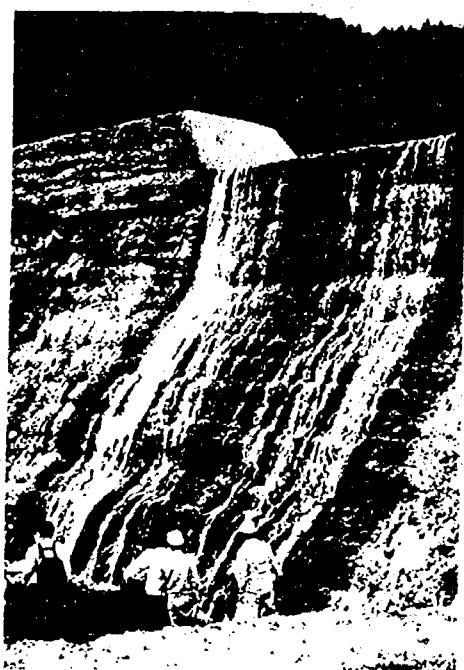


写真-13

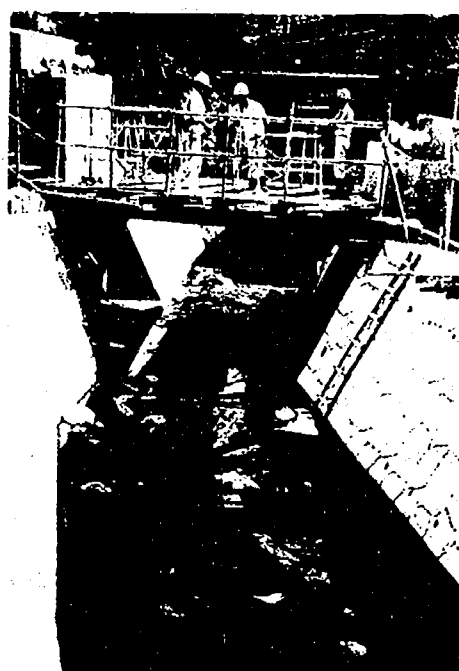


写真-14

これは、ある浄水場のところで、浮いているのが糸状藻類のメロシラでございます。(写真-15) これは浄水場で水の下に砂があるわけなんですけれども、メロシラというのは、底で繁殖したら気泡をもってプカッと剥離して上に浮いてきます。浮いてきたものをオーバーフローさせて流しておりますが、そういった形で処理を簡略化しております。(写真-16)

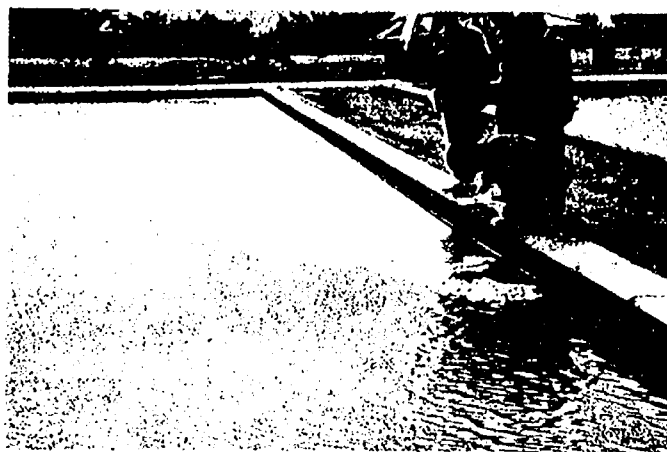


写真-15



写真-16

これは私どもでやっております実験槽なんです、今の浄水場と同じような感じでございます。ここではメロシラを繁殖させることを目的でやっておりますので、非常に浅い水深にして太陽光線を当てて目いっぱい繁殖させて、上に船のようなものが見えておりますのは、そこに集まってきて横に流すようにしております。(写真-17)

これは印旛沼の流入支川で非常に流入負荷の高い川でございますが、そこで実験しているもので、初めは水質が余りにも悪いので糸状藻類をやっても目詰まりするんじゃないかとちょっと心配しておりました。しかし、やってみますと糸状藻類が良く増殖して栄養塩が除去されて、しかも安定的に目詰まりもなく動いている状況でございます。(写真-18)



写真-17

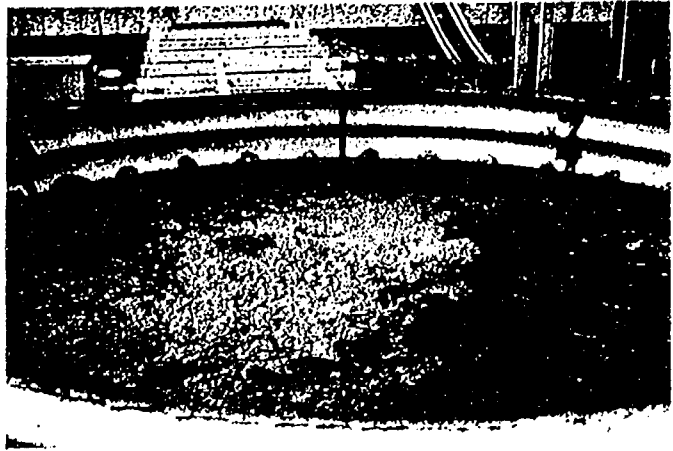


写真-18

これは土浦の方でやっております。先ほど上からのぞいたものがございしますが、そこで増殖してきたものでアミミドロというものでございしますが、非常に取りやすいもので、こんなに生えていますというのを示したものです。(写真-19)

これは緩流タイプという横に水を流すタイプでございしますが、そこでひも状の基質を設けたもので、図-11の中段左に示したタイプになります。(写真-20)



写真-19

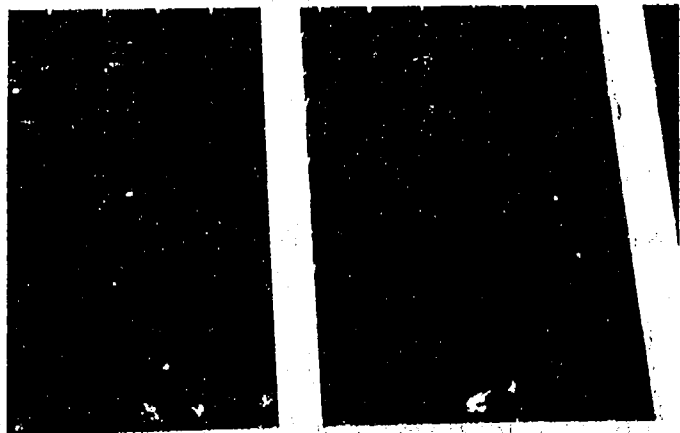


写真-20

これは急流タイプ、下のタイプでございします。下は砂利にしてありまして、そこでもよ

く生えております。(写真-21)

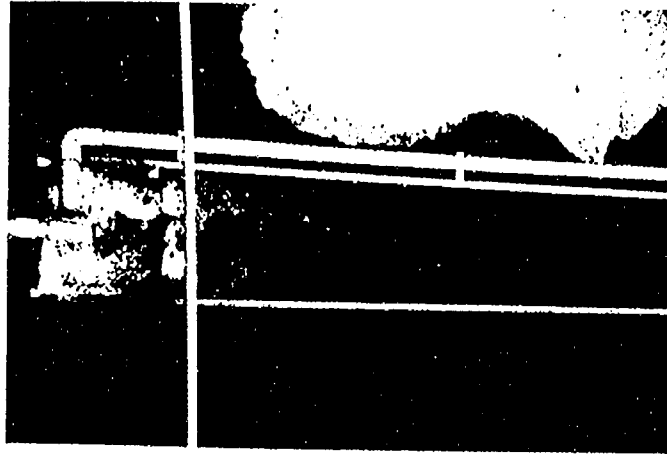


写真-21

小さなものが泳いでいるのは、ちょっと大き目のが金魚で、小さい魚がグッピーという魚ですが、それを飼っております。この小さい魚は藻類自体を食べさせるというよりも、そこで発生する虫を食べさせるようにしております。こういった生態系を使おうとしますと都合の悪いものもいろいろ生えたり増えたりしますので、それらを生態系を活用して処理していくという組み合わせが必要になってくると思います。(写真-22)

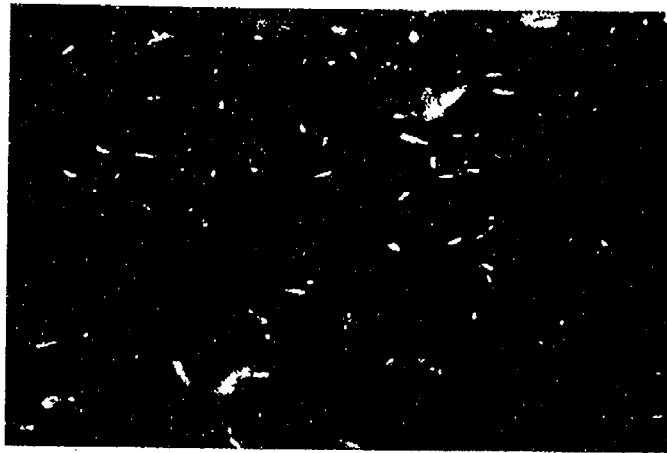


写真-22

次に軽石ろ過の説明に入りますのでございます。藻類が生えにくい環境にするといったんですけれども、どうしても生えざるを得ないこともある。そのときにどうするかということで、従来からオアコ浚渫船とかいろいろ行われていまして、それはそれで結構なんでございますが、最近また簡易なろ過としては木炭浄化なども行われております。基本的には藻類というのは結構粒子が大きいので、どんな方法でやってもとれるということがわかりました。

そうすると、あとは目詰まりの問題があります。その目詰まりをしにくくしておくというのが一つございますけれども、目詰まりまではいかなくても、ほっておくと藻類が分解して再溶出いたします。流れている河川の浄化の場合でしたら PO_4-P の再溶出というのはそれほど心配しなくていいわけでございますけれども、初めに申しましたようにダム湖とか自然湖沼の閉鎖性水域のところでは PO_4-P の再溶出をできるだけ少なくする必要があります。そのためにはとれた藻類をいつまでも置いておくのではなくて、できるだけ洗浄して落としていく必要がございます。そのために逆洗のしやすさという面に着目しまして軽石というものを選びました。

(表-4)

表-4 軽石濾過システムの目標値

項 目	現 地 実 験 結 果	目 標 設 計 値
設 備 面 積	対象湖沼面積の1%	対象湖沼面積の1%
設 備 能 力	0.5haで $1\text{ m}^3/\text{sec}$ 処理	0.4haで $1\text{ m}^3/\text{sec}$ 処理
濾 過 速 度	72cm/hour	80cm/hour
SS除去率	90%除去	85%除去
T-P	55%除去	50%除去
PO_4-P	原水T-Pの10%程度溶出	原水T-Pの5%程度溶出
濁 度	90%除去	85%除去
軽石取替頻度	3ヶ月は変状しない	2年間程度
軽石洗浄頻度	週1回、手動式	1~2週に1回、自動式

もう一つは逆洗のしやすさだけに限るんでしたら、もっと高価なものを選べばプラスチック材とかあるんですが、日本は火山国ですので軽石は豊富にございますので非常に安くで大量に仕入れられるということから軽石に注目したものでございます。これは実験開発しているところでございますが、相当の成果を得ているところでございます。(写真-23)

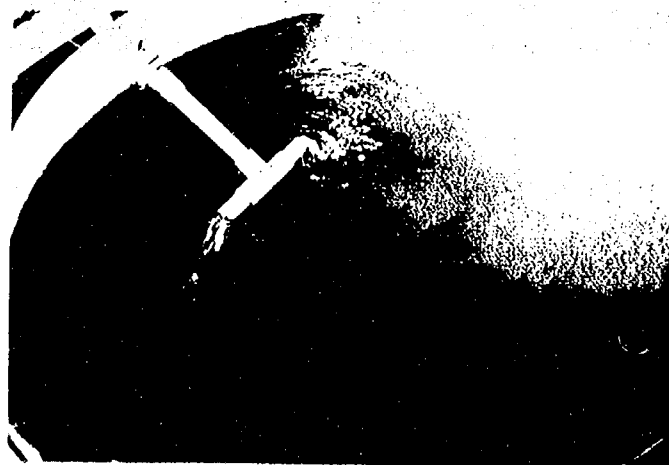


写真-23

これが洗浄しているところでございます。水と空気で洗浄しているわけでございますが、軽石ということで軽いので非常に容易に行われるわけでございます。(写真-24)



写真-24

湖内対策ということでは大体終わったわけでございますが、あわせて流域対策の重要性も訴えておきたいということで二、三のスライドをお見せしたいと思います。これは建設中のダムの上流部でございますが、例えば畑地が豊富にあるようなところで、もともと山地でございますので、それも木が生えていたところを切り開いて畑にしたところでございますので、こういった傾斜を持っております。それでちょっと雨が降ると表土が流れる。また火山灰とかそういう流れやすい土であれば、ちょっと雨が降れば真っ黒に流れてしまうということがあります。こういった場合ダム湖だけの対策ということではとても追いつかない。流域全体で単にダムというだけではなくて河川全体の水質浄化ということに取り組む必要がある。その典型的な例としてお見せしたものでございます。(写真-25)



写真-25

これはちょっと季節が違いますが、同じキャベツ畑です。この場合キャベツがある場

合でも隣の方は土が出ているとか、キャベツが植えてあるところでも上から見ますと何割かの土がありますので相当流れるというような状況がございます。(写真-26)



写真-26

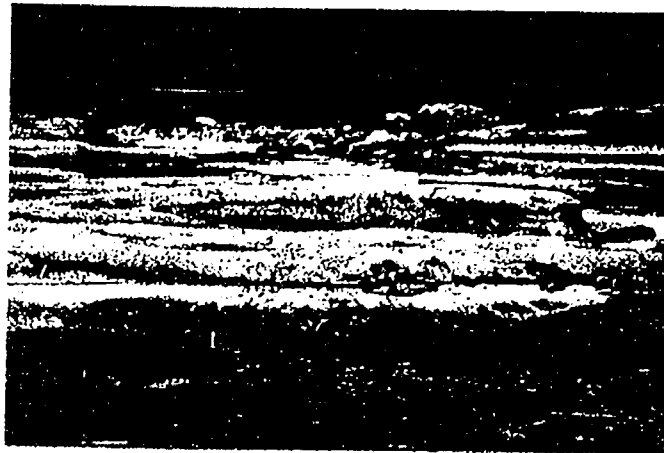
これは別の例なんですけど、必ずしも一般的というわけではないんですが、流域で場合によってはこういうことも起こるんだということで御承知おきいただきたいわけですが、通常、流域対策としては生活排水、家畜、先ほどの畑とか人為系のところを注目するわけですが、場合によっては自然系の負荷が相当高くて、その自然系の負荷が原因で富栄養化現象が生じているところもございます。これはダムの上流のところでは葉っぱが積もっているところがございますが、これがダムの流入部では沢山積もった状態になっております。(写真-27)



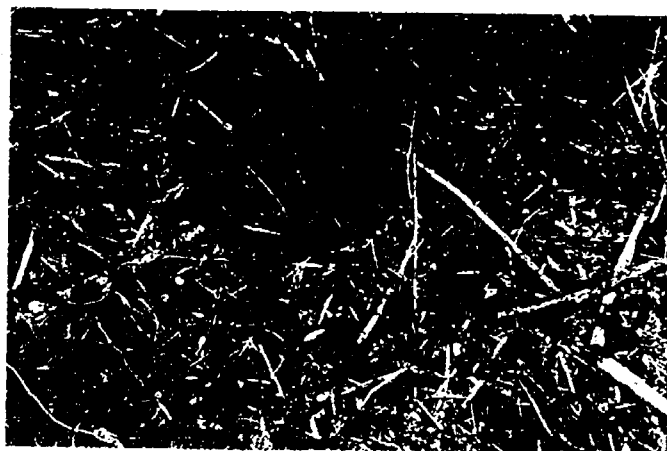
写真-27

これは単に流入部のところに土砂がたまっているだけのように見えるかもしれませんが、よく見ますとこの中に葉っぱがいっぱいたまっております。(写真-28) それを近くで見たものが次のスライドです。(写真-29) このように砂の間に葉っぱがいっぱいたまっ

ています。これだけ葉っぱが多いと特に流入部のところで多く堆積しますので、そこからのリンの溶出も相当あります。ここに挙げている以外のダムでもこういう例が見られまして、こういった条件のダムでは貯葉ダムと申しますが、葉っぱを流入部のところでためて、それを定期的に取りするような貯水池のようなものも必要かと思います。



写真－28



写真－29

最後に一つ申しておきたいことは、こういった水質保全の対策を、特に今日は水質の中でも富栄養化対策が今問題になっているダムが多いということから、富栄養化対策にポイントを絞ってお話をいたしました。ただ、ほかの問題、濁水問題について例えば選択取水なんかはもう解決しているかといったら必ずしもそうではございませんで、先ほど申しましたようにダム流域で求められている水質がだんだん高くなってきているということもあって、さらに濁水問題について取り組んで行かなければならないところもございます。

今回は水質保全という面から、本当に水質保全に直接寄与する方法だけをお話したわけですが、初めに申しましたようにダム環境を総合的につくっていくということと考えますと、後の水質保全をするときに景観も考慮してもうちょっと見栄えのよいも

のをつくっていくとか、それらのものと組み合わせてやっていくとかそういったことも必要かと思ひますし、また一つの方法としましてはヒートポンプのように地域の冷熱供給と組み合わせることも重要かと思ひます。

以上で私のお話を終わらせていただきます。

質 疑 応 答

○質問1 (井芹 西日本技術開発)

糸状藻類による処理についてちょっと教えていただきたいと思うんですが、糸状藻類を使う場合は光がどうしても必要になってくるので、水を処理する範囲というのは薄っぺらいものになってしまうのではないかなと思うんです。例えば土壌浸透だと積み上げた厚さで処理していけるんですけども、藻類の場合はどうしても面的に広げなければいけないという問題で、一般の河川に適用した場合水量との関連がどうなるかということですね。現実的に可能かどうかということですね。それと濁水に対して糸状藻類というのは非常に弱いものですから、そういうときの対応策みたいなものは考えられているのかどうかということなんですか。

丹羽 まず1点目の話でございますが、どれだけ水質をきれいにするかということがあるわけですが、例えば流入河川で $\text{PO}_4 - \text{P}$ がちょっと高いようなところ、 $20\text{mg}/\ell$ のところを $5\text{mg}/\ell$ に、すなわち $15\text{mg}/\ell$ 、75%削減する。それで毎秒1トンの水量で1ヘクタールぐらいでできるなど思っております。それと洪水時の話でございますが、確かに濁り水が入ると、これは種類によるんですけども、特に珪藻類の場合は非常に弱ります。そのためには川の中につくるのではなくて横にバイパスのような形をつくって、洪水時はそこには入らないようにするというのが一番いいかと思ひます。仮に濁水をかぶって一時的に弱ったとしても自然河川においてはどうなっているかといいますと、一時的には弱って減りますが、また増殖してくる。すぐもとに戻るといひますが自然状態でのサイクルになっております。もちろん人為的にそれを処理施設としてやろうとすれば、より効果が高い方がいいわけでございますので、そのためには出水時の水は入ってこないようにした方がいいと思ひます。

○質問2 (阿部 四電技術コンサルタント)

河川にアオミドロ、ただいまOHPで拝見したんですが、遠方ですからちょっと読み取れなかったんですが、アオミドロというのは糸状藻類と考えてよろしいわけですね。

丹羽 そうでございます。

阿部 それは富栄養化防止ということで非常によろしいわけでしょうか。

丹羽 富栄養化防止というのはどういう意味でとるかでございますが、アオミドロを増殖することでアオミドロに栄養塩を吸着させる。それで湖沼の水質を浄化しようという意味では役立つと思います。

今おっしゃいましたのはアオミドロが生えていること自体の評価ということでございますか。

阿部 さようでございます。実はダム下流の残留域の滞水したところにアオミドロがあると。何かこれは悪い結果じゃないかというような批判もあったものですから。これは河川の残留域、それとダムの上流の方にも調査いたしますと見られたわけでございます。ですから、むしろリン等があるからアオミドロが増殖したのか、あるいは自然の状態ではアオミドロがあるからこの河川はいいかとか、その辺の評価をどういうふうにと考えたらいいかということをお伺いしているわけです。

丹羽 そこはちょっと評価は難しいところがあると思うんですが、アオミドロが生えていること自体で、例えば浮遊性の藻類の増殖のようにアオミドロが生えることによって具体的に何か問題が起きるのかどうかということになると思いますが、私の知る限りではアオミドロが生えることによって何か障害を与えているというようなものは余り聞いたことがございませんが、そういう意味では、これは河川の栄養塩類にとって水質浄化に役立てるいい植物なんだよということを御理解いただいたらいいんじゃないかというふうに思います。

阿部 ありがとうございます。安心いたしました。

時の話題

水質保全への生態系の活用の仕方

—ひと工夫してみませんか—

建設省土木研究所 環境計画研究室長 丹羽 薫

ダム湖や自然湖沼の富栄養化対策として、各地でアシ原やホテイアオイの利用が試みられてきましたが、栄養塩類の除去効率がそれほど高くないために、本格的に実用化されるには至っていません。土木研究所では生態系を活用した効率的な栄養塩除去技術として、増殖速度の高い糸状藻類を用いた「糸状藻類活用」システムを新しく開発し、現場への適用を図っています。

1. 従来の植生浄化

水の華を形成する浮遊性の藻類の増殖に必要な栄養塩類をアシやホテイアオイも吸収しますから、植生を使った浄化は基本的には自然の水質浄化能力を活用した望ましい理念に基づいていると言えます。しかし、高等植物は藻類に比べて極めて成長速度が遅く栄養塩類を吸収する水質浄化能力には限界があります。

2. 糸状藻類の活用

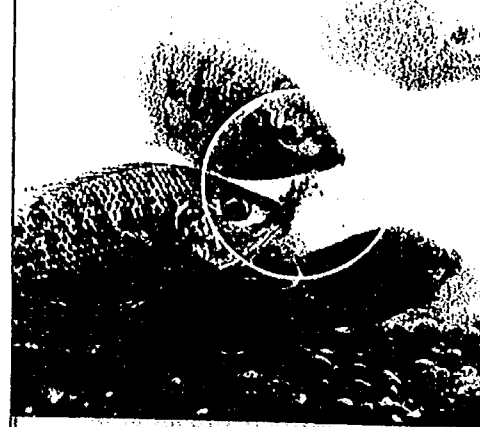
そこでもっとも栄養塩吸収能力の高い植物を使えないかということで登場したのが糸状藻類です。浮遊性藻類の増殖を同じ藻類の仲間である糸状藻類を使って抑制しようというものです。糸状藻類には次のようなすぐれた特色があります。

- ① 自然河川や浅い湖沼で一般に生息する。
- ② 無機態のリンや窒素の吸収能力が高い。
- ③ 四季を通じておおむね活用可能。
- ④ 増殖のコントロールおよび回収が容易。
- ⑤ 魚や家畜の良質なエサとなり、有効利用が可能。

糸状藻類が増殖しやすい環境を作れば簡単に増やすことが可能です。

3. 魚や鳥との組み合わせ

糸状藻類は自然界では魚や水棲昆虫が好んで食べています。従って増殖した糸状藻類は剥離したものが自動的に集まるようにしたり、または機械的に回収して集めて魚のエサとすることが出来ます。また糸状藻類は鳥や家畜のエサとしても使えます。



糸状藻類(アオミドロ・白練円内-)を食べる魚(イヅミダイ)

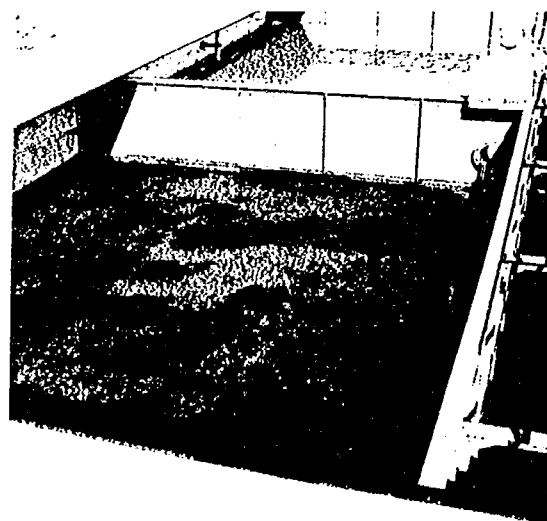


糸状藻類活用システムで増殖したアミミドロ

このように糸状藻類と魚や鳥を組み合わせることにより生態系を有効に活用した水質保全システムができ、さらに地域産業の発展にも寄与することが期待されます。

4. 現場への適用例

土木研究所で開発した糸状藻類活用システムは現在、現場への適用を進めているところです。霞ヶ浦の桜川流入部、印旛沼の流入支



三春ダム流入支川に設けられた実験施設

川である桑納川および建設中の三春ダム流入支川で現地実験をしています。このうち桑納川は生活排水による汚濁負荷が極めて高い河川ですが、本システムでは無機態のリンや窒素を効率良くしかも安定して除去しています。また、三春ダムでは、一つの流入支川からの普段の流入量全量を対象とする大規模な施設としています。糸状藻類活用システムが各地で使われることを期待しています。

JOURNAL OF HYDROSCIENCE AND HYDRAULIC ENGINEERING

Special Issues/1993

3) Reservoirs

a) Present State of Reservoir Water Quality Analysis

The quality of water in a reservoir is sometimes taken up as a social problem depending on the physical, chemical and biological state of reservoir water, and also the social awareness about it. Reservoir water, no matter how bad, is sometimes not perceived as a problem by the public. However, water in one reservoir is sometimes considered to be a problem even if its quality is superior to that of some other reservoirs. Studies on the human aspects of this issue, such as the utilization of water and the relationship to the basin, have been conducted by various research organizations and administrative agencies in Japan. With this background, the physical, chemical and biological aspects were studied, and the mechanisms related to water quality are now being clarified.

The phenomenon of water cooling sometimes occurs in reservoirs of the strata type and its effect on dams is another topic being studied. With regard to turbid water, many studies have been made on its relation to agricultural practice (rice cultivation) (e.g., Uemori and Watanabe, 1969). For example, Nakamura et al (1980) analyzed the factors responsible for causing prolonged water turbidity in multipurpose dams throughout the country. There are many more similar hydraulic and experimental studies such as those by Ashida and Egashira (1975) and Nakamura and Adachi (1978).

Amano and Niwa (1992) investigated eutrophication in the nation's multipurpose dams, focusing on the relations between water properties (temperature, transparency, pH, COD, T-P, SS, etc.) and meteorological conditions. They also investigated the cause of plankton and clarified the water characteristics when outbreaks of plankton occur. Further studies by Morikita et al (1987) clarified the mechanism of eutrophication mainly by phyto-planktons.

b) Water Quality Prediction

When a large reservoir forms in a natural river course as a result of dam construction, the water quality sometimes change due to the retention of the flowing water. Various effects on the natural and social environment often leads to confrontation, making it necessary to predict and evaluate countermeasures. This section describes methods adopted for predicting temperature change (water cooling), prolonged water turbidity and eutrophication with changes of water quality.

Temperature Change (water cooling)

Simulation models for predicting water cooling in dam reservoirs are already in practical use (e.g., Miyanaga *et al.*, 1979 and Iwasa and Noguchi, 1975). These are vertical one-dimensional models, and are adequate when the changes are slow and uniform in a horizontal stratum, as with temperature change of water in a reservoir. However the applicability of one-dimensional models is limited if isothermal lines cease to be horizontal due to the complicated shape of a reservoir or turbid flood water. Iwasa and Matsuo (1981) prepared a two-dimensional model divided into horizontal and vertical elements to solve this problem and use it in a successful simulation test on an existing reservoir.

Prolonged Water Turbidity

A variety of turbid water simulation models such as the box model, one-dimensional model, two-dimensional model and three-dimensional model are available at present.

The box model developed by the Public Works Research Institute, Ministry of Construction(1973), excludes reservoir depths below the secondary metalimnion as a dead water region, and regards the secondary metalimnion and above as one or two boxes with the assumption that turbidity in the box or boxes is uniform. However, for a large reservoir, the model assumptions tend to be somewhat unrealistic. In the absence of test data, exhaustive research is difficult since the secondary metalimnion has to be located from the outside. On the other hand for smaller dam reservoirs, the model has produced fairly satisfactory results. It also has the advantage in terms of cost when many simulations are necessary due to short computational time requirement.

A number of one-dimensional models have been developed to predict the behaviors in a reservoir in more detail than the box model(*e.g.*, Aki and Shirasuna, 1973). When predicting turbidity, for example, the models compute the vertical one-dimensional distribution of turbidity from the equation of balance for suspended matter for a control volume, similar to the model for predicting and analyzing water temperature. In this case, since the water temperature must be known in order to calculate the flow, a one-dimensional model is always used together with a water temperature model. Generally, the one-dimensional model is suitable for predicting and analyzing long-term, average turbidity, but it is unsuitable if the tip of a turbid water mass descends through the reservoir and accumulates at the start of inflow.

When the propagation of turbidity and the movement of a turbid water mass in a reservoir is analyzed, a control volume is used. The reservoir is divided in the vertical and the longitudinal horizontal direction, and hydromechanical principles (equation of continuity, law of conservation of momentum, law of turbidity balance, law of water temperature balance) are applied. The two-dimensional model of Iwasa and Matsuo (1981) is based on this concept. Two dimensional models are suitable for predicting and analyzing the phenomena during a flood and other events associated with turbidities, but they are unsuitable for long-term prediction due to the large computational time requirement .

Morikita and Amano(1991) developed a model (quasi-two-dimensional model) connecting blocks by advection using a vertical one-dimensional model for each of the blocks that consider the planar uniformity of water quality. The reproducibility of this model is generally satisfactory but it is necessary to select the appropriate model depending on the purpose of the analysis. To increase the accuracy of such models, programs are being improved so that more than one grain size of suspended matter can be handled, and the relation between turbidity, which is a practical turbidity controlling index, and SS concentration is being studied.

Eutrophication

In the fields of limnology and ecology, the problem of eutrophication in reservoirs has been investigated in the recent past. Efforts are being made to test the realities, extract the main elements and study the relations between these elements. A number of mathematical models for analyzing the changes in the major elements of water quality have been developed. These are dynamic models that regard water as one or more completely mixed areas. They approximate the dynamic balance in the low-order ecosystem mainly of phytoplanktons and stress the biological and chemical changes of water quality. These ecological models include the one-box model of Inoue and the model of Aida and Ebise(1973) which is divided horizontally into two or three strata. However reproducing phenomena by using these models involves many problems because the quantities of outflow and inflow of a reservoir are large and the advection heat and material involved in the outflow and

inflow directly or indirectly affect water temperature and change the water quality concentrations to a large extent. Thus one-dimensional and two-dimensional models incorporating the kinematic behavior of reservoir flows and water temperature changes have been developed (*e.g.*, Miyanaga *et al.*, 1973 and Iwasa *et al.*, 1981). At present, Matsuo *et al.* (1990) are developing a three-dimensional model using an orthogonal curvilinear coordinate system which includes topographical forms.

c) Water Quality Preserving Measures

No complete measures to preserve water quality for dam reservoirs are available yet. Rather, different measures for different reservoirs are being implemented on a trial basis. In the past, selective intake equipment were effective in dealing with the problem of water cooling, while selective intake equipment, maintaining reservoir bank slopes and speeding up the setting of matter causing turbidity were mainly used to counteract prolonged turbidity. Aeration has been the chief countermeasure against eutrophication. Research into many remaining unknown physical mechanisms of eutrophication and behaviors of flowing water is presently in progress (*e.g.*, Kojima, 1984 and Asaeda and Nakai, 1989).

One recent study by Takada and Kudo (1992) investigates measures to preserve water quality taking advantage of prolonged retention of water. This aims to reduce the dangers of eutrophication by maintaining the state of water, held for a long time, and thereby speeding up self-purifying processes inherent in retained water such as the perishing, decomposition and settlement of plankton. In order to prolong retention of water in a reservoir, all or part of the required discharge from the reservoir is supplied by a bypass channel from a location above the reservoir.

The system of creating good quality dam reservoir water developed by Niwa and Kuno (1992) is worth mentioning. It comprises of a "flow control system" to control flow within the reservoir and a "water purifying system" to treat water with filamentous algae and is likely to be highly effective in preserving water quality.

The "flow control system" combines an aerating and a circulating unit with an air diffusing pipe, a selective inflow unit and a selective discharge unit. This system continues during normal operation to form a thick circulating and mixing layer of warm and clear water in the surface stratum of the reservoir. It maintains this layer even in a flood, and thus controls the supply of light and nutrient salts to the undesirable algae living in this stratum, thereby preventing the outbreak of these algae.

The "water purifying system" artificially creates an environment in which desirable filamentous algae can multiply. It prevents the outbreak of undesirable floating algae by removing T-P and T-N from water flowing into the reservoir and removing inorganic nutrient salts from the surface stratum of the reservoir. It can also remove algae and musty-smelling substances from the discharged water. This system includes a deep-stratum DO improving unit to improve dissolved oxygen in the deep strata of reservoirs.

ヒートポンプと流動制御を用いたダム湖水質保全システム

Use of heat pumps and current control to preserve water quality in reservoirs

丹羽 薫^{*}・久納 誠^{**}・久保徳彦^{***}・古里栄一^{****}

By Kaoru NIWA, Makoto KUNOU, Norihiko KUBO and Eiichi HURUSATO

The authors advocate a current control system to enhance water quality in reservoirs¹⁾ via a combination of dispersed aeration and selective inflow/discharge facilities. Although from spring to autumn the temperature in the surface layer of the reservoir is usually higher than that of inflowing river water, it may drop lower during the rainy season, in cold summers or directly after major flooding. When this happens, turbulent river water heavy in nutrient salts enters the reservoir surface layer, leading to potential eutrophication and long-term turbidity.

This report describes the Water Temperature Control System, designed to enhance water quality in reservoirs by addressing these specific problems. This system regulates the vertical temperature distribution in the reservoir and the temperature of inflowing river water using heat pumps.

Keywords : reservoir, water quality, eutrophication, algae-control method, heat pump

1. はじめに

筆者らはダム湖において、散気管方式の曝気と選択流入・放流設備を組合せた『流動制御システム』により水質を保全できることを示している¹⁾。このシステムは、ダム湖の表層において水温鉛直分布が均一でしかも流入河川水より水温が高い表層を厚く形成させるとともに、河川水がダム湖へ流入する水深及びダム湖から放流する水深を制御することにより、好ましくない藻類の異常増殖を抑制するものである。一般に春季から秋季にかけてダム湖表層水温は流入河川水温より高い。しかし梅雨、冷夏、及び大規模な洪水の直後は流入河川水温に比べてダム湖表層水の方が低くなることもあり、その場合は栄養塩類や濁質に富む流入河川水がダム湖表層に流れ込み、富栄養化現象や濁水長期化現象を招く恐れもある。この問題を解決し、ダム湖の水質保全を図るため、ダム湖の水温鉛直分布と流入河川水温をヒートポンプを用いて制御する『水温分布制御システム』を開発したので報告する。なお本システムを稼動させると夏季において発生する余剰の冷排水をダム湖周辺の地域冷房として利用することも可能である。

* 正会員 建設省土木研究所環境計画研究室 室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

** 正会員 同室 主任研究員

*** 正会員 同室

**** (株)環境調査技術研究所 技術部

2. 水温分布制御システムの開発

近年ダム湖流域の開発などにより、リン及び窒素等の栄養塩類が過剰に流れ込むために、いくつかのダム湖では湖水の栄養塩類が増加して富栄養化を来している。湖水の栄養塩類が増える結果、好ましくない藻類が異常増殖することになり、アオコやカビ臭等の問題を引き起こす場合もある。

ダム湖の流動を制御することによる水質保全手法は、流入河川からダム湖有光層へ供給される栄養塩類の削減、及び藻類への日射量抑制を目的としたものであり、筆者らは実ダムでの現地実験を実施した¹⁾²⁾。そのメカニズムは散気管方式の曝気装置により、水温躍層の位置を好ましくない藻類が発生する有光層より下へ移動させ、栄養塩類を多く含む河川流入水を水温躍層へ導き、選択放流設備により速やかにダム湖内から放流するものである。また、循環混合層を厚くして水温鉛直分布をほぼ均一にすることにより、湖水の密度を均一にして常に上下に混合し易い状態にする。循環混合層が有光層の数倍に至る深度まで存在すれば有光層で生息する藻類は順次有光層の下に深く追いやられることになり、藻類の光合成できる時間を大幅に短くすることにより、藻類の異常増殖を抑制することができる。

一般に春季から秋季にかけてダム湖表層水温は流入河川水温より高いが、梅雨、冷夏、及び大規模な洪水の直後は流入河川水温に比べてダム湖表層水温が同じか低くなることもある。図-1にAダムの流入河川水温とダム湖表層水温を示す。例えば、Aダムにおける平成2年の梅雨は日射量が少ないためにダム湖表層水温が高くなれず、平成元年の9月は大洪水にみまわれてダム湖の水温がほぼ均一な低温になってしまっている。このような事実によると、曝気によって循環混合層を形成させる場合、日射量が少ないと循環混合層全

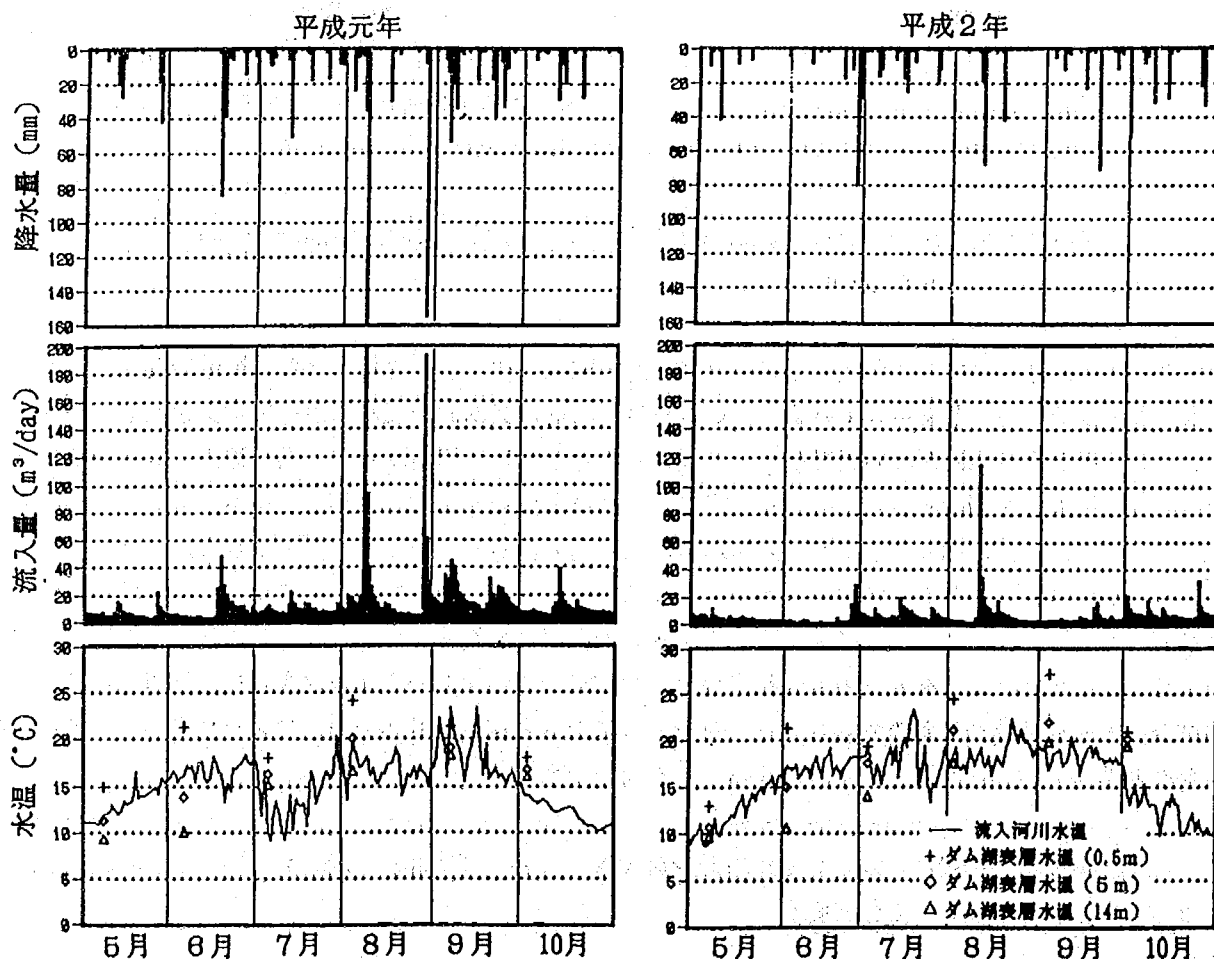


図-1 Aダムでの流水河川水温とダム湖表層水温

体の水温の低下を招くことが予想される。循環混合層の水温が流入河川水温より低い場合は、流入河川水を循環混合層の上層に混入させてしまい、栄養塩類を有光層に供給することになり、アオコや淡水赤潮など好ましくない藻類の異常増殖を招く恐れがある。

図-2に水温分布制御システムの模式図を示す。本システムはヒートポンプを用いることにより、流入河川水や深層の湖水より水熱を取り出し水温を低下させ、日射量だけでは熱量が不足気味の循環混合層の水温

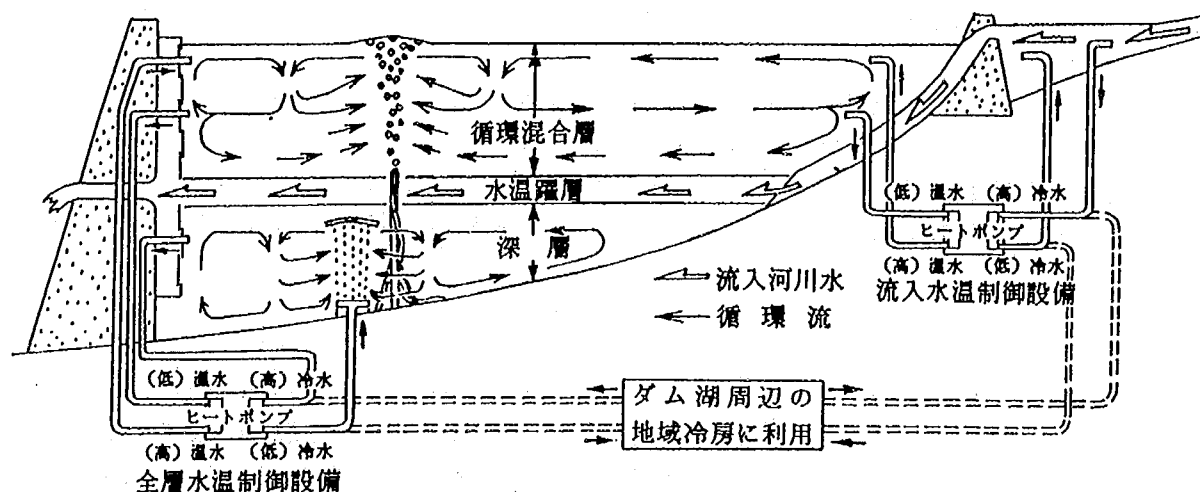


図-2 水温分布制御システムの模式図

表-1 水温分布制御システムの水質保全等の効果

水温の制御	生じる現象	1. 春季	2. 梅雨・冷夏	3. 夏季	4. 洪水直後
循環混合層の水温を平均気温に近づける	水面付近の水温分布が均一となり湖水が混合し易い	—	△7ㄱ対策となる	□一次躍層を破壊でき7ㄱ対策となる	◎一次躍層を破壊でき7ㄱ対策となる
	下流への放流水温が高くなる	△冷水対策となる場合もある	—	—	—
流入河川水の水温を循環混合層より下げる	栄養塩と濁水を含む流入河川水を水温躍層へ導く	◎淡水赤潮対策となる	◎梅雨・冷夏明の7ㄱ対策となる	□7ㄱ対策となる	◎7ㄱ対策となる
	濁水を含む中小洪水を水温躍層へ導く	○濁水長期化対策となる	○濁水長期化対策となる	□濁水長期化対策となる	○濁水長期化対策となる
深層の水温を下げる	同時に空気混入させ深層に密度流を生じさせる	—	○DOを改善できる	◎DOを改善できる	△DOの悪化を遅らせる
冷排水を地域冷房に利用する		—	△施設冷房に利用できる	◎施設冷房に利用できる	◎施設冷房に利用できる

◎；水温分布制御システムにより実現可能な対策手法であり、特に有効なもの

○；水温分布制御システムにより実現可能な対策手法であり、有効なもの

△；水温分布制御システムにより実現可能な対策手法であり、やや有効なもの

□；流動制御システムのみでも実現可能であるが、水温分布制御システムにより補完されるもの

を高めることにより、水質保全の上で理想的な水温分布に制御するものである。深層の湖水より水熱を取り出し、散気とともに流出させると、深層を循環させる密度流が生じるため、散気により溶存酸素を多く含ませた水塊を密度流に乗せて深層の端まで運ぶことができる。水温分布制御システム稼動時における水質保全等の季別の効果を表-1に示す。このように、ヒートポンプを用いてダム湖の水温分布と流入河川水温の制御を十分に行えば、梅雨、冷夏、及び大規模な洪水の直後を問わず循環混合層の水温は流入河川水より高くなり、栄養塩類や濁質に富む流入河川水をより確実に水温躍層へ導けるため、アオコの発生や濁水長期化を概ね抑制できる。

一方、エネルギーの有効利用の観点から、河川やダム湖の水熱エネルギーをヒートポンプにより地域冷房に供給することが望まれている³⁾。しかしながらダム湖にヒートポンプを導入した場合、ダム湖水質に与える影響が不明であった。本研究ではシミュレーション計算により検討を行った結果、ダム湖においてヒートポンプを流動制御と同時に用いた場合は、水質保全と地域冷房とを併用できる事が明らかとなった。

3. 水温分布制御システム稼動時のシミュレーション計算

3.1 計算手法

散気管方式の曝気装置を用いて循環混合層を形成する際の、湖水の流動を再現できる鉛直一次元モデルを説明する。空気量3700 l/min、曝気水深15~20mの場合、曝気装置から35m離れた位置の水平流速の鉛直分布は現地観測及び再現計算の結果、図-3(a)に示す流速分布となることがわかった²⁾。循環混合層の上部及

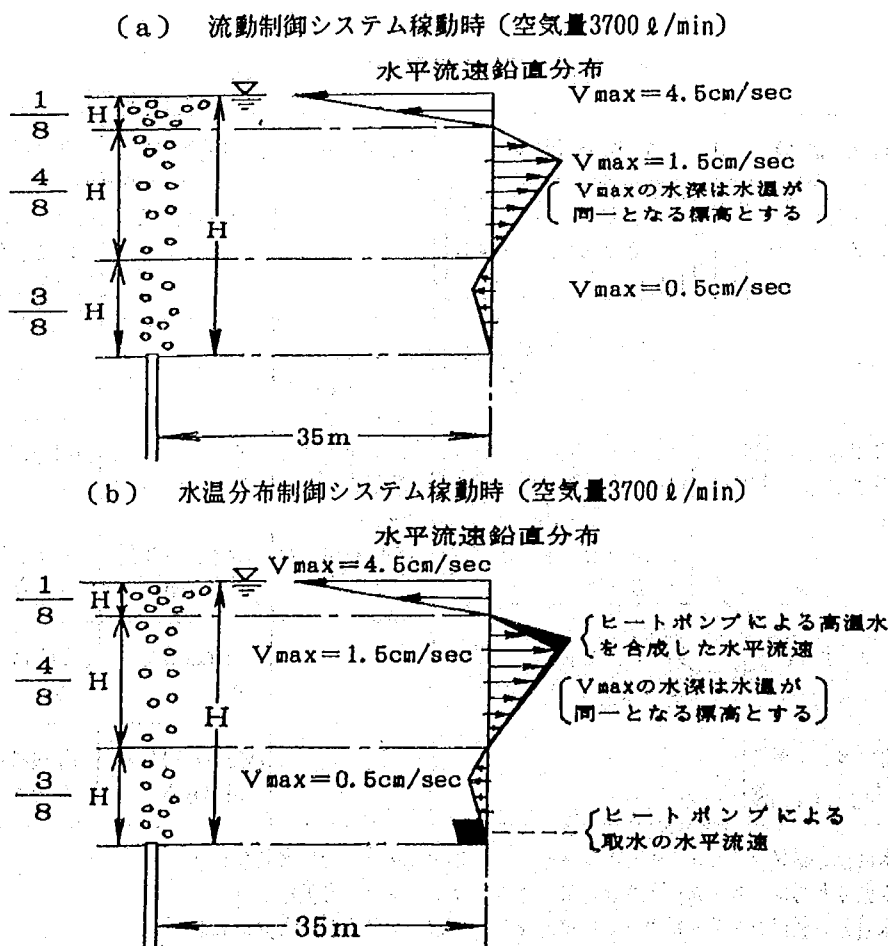


図-3 シミュレーション計算に用いた水平流速分布モデル

び下部の層から湖水を引き寄せ、中央の層へ湖水を押し出す。ただし、曝気装置からダム湖に押し出される水平流速は三角形分布しているものとし、その最大値の水深はダム湖の水温鉛直分布と等しい標高とする。さらにヒートポンプを稼働させ循環混合層の水温を上昇させると図-3(b)に示すような密度流が新たに生じる。これらの密度流を分割層毎の流出及び流入量に換算した上で、ダム湖水理・水質の数値解析モデルである鉛直一次元モデルに組み込む⁴⁾。

3.2 計算条件

水温分布制御システムは図-2に示すように流入水温制御設備と全層水温制御設備の2種が考えられるが、ここでは前者の設備が稼働するとしてシミュレーション計算を行った。このシミュレーション計算において、流入河川水より水熱を取り出すには、鉛直一次元モデルに流入する河川水温を低下させれば良い。ただし、地域冷房により水熱を取り出す夏季の間は、流入河川水温を低下させるために与える冷熱の量を調節する。

シミュレーション対象は流域面積195km²、湛水面積3.9km²のAダムとし、シミュレーションケースは表-2及び表-3に示すケースとした。シミュレーション期間は、天候の不安定な年であった平成3年4月1日から10月31日までとする。なお洪水時における散気管方式の曝気とヒートポンプの作動及び停止については、流入河川水量が40m³/sec以上になると停止させ、濁度が40度以下になると再開させるものとする。

表-2 シミュレーションのケース

ケース	散気管方式の曝気	選択流入放流設備	ヒートポンプ	図-4の凡例
未対策	なし	なし	なし	—
流動制御システム稼動時	3700ℓ/minを4台	設置	なし	—△—
水温分布制御システム稼動時	3700ℓ/minを4台	設置	0.84m ³ /sec×10℃を4台	—○—

表-3 シミュレーションの計算条件

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
循環混合層の目標厚さ	概ね10m		概ね20m				
冷熱のうち地域冷房に供する割合	0%		10%	50%	70%	30%	0%

3.3 計算結果

各季別のダム湖水温鉛直分布と流入河川水温のシミュレーション結果を図-4に示す。流動制御システムのみを稼働させると、春季、梅雨、洪水後においては流入河川水は曝気水深より浅い標高に導かれることがわかる。しかし水温分布制御システム稼動時は流動制御システム稼動時に比べ、春季、梅雨、洪水後にもかかわらず、流入河川水を曝気水深より下の概ね20mの水深に導くことができることがわかった。

4. まとめ

(a) ヒートポンプを流動制御と併用してダム湖の水温鉛直分布と流入河川水温を制御する『水温分布制御システム』は、春季、梅雨、冷夏、洪水後でも流入河川水を確実に曝気水深より下の水温躍層へ導くことができ、ダム湖の富栄養化現象や濁水長期化現象に対してより有効な水質保全手法となる。

(b) 水温分布制御システム稼動時における水温及び濁度のシミュレーション計算手法を構築した。

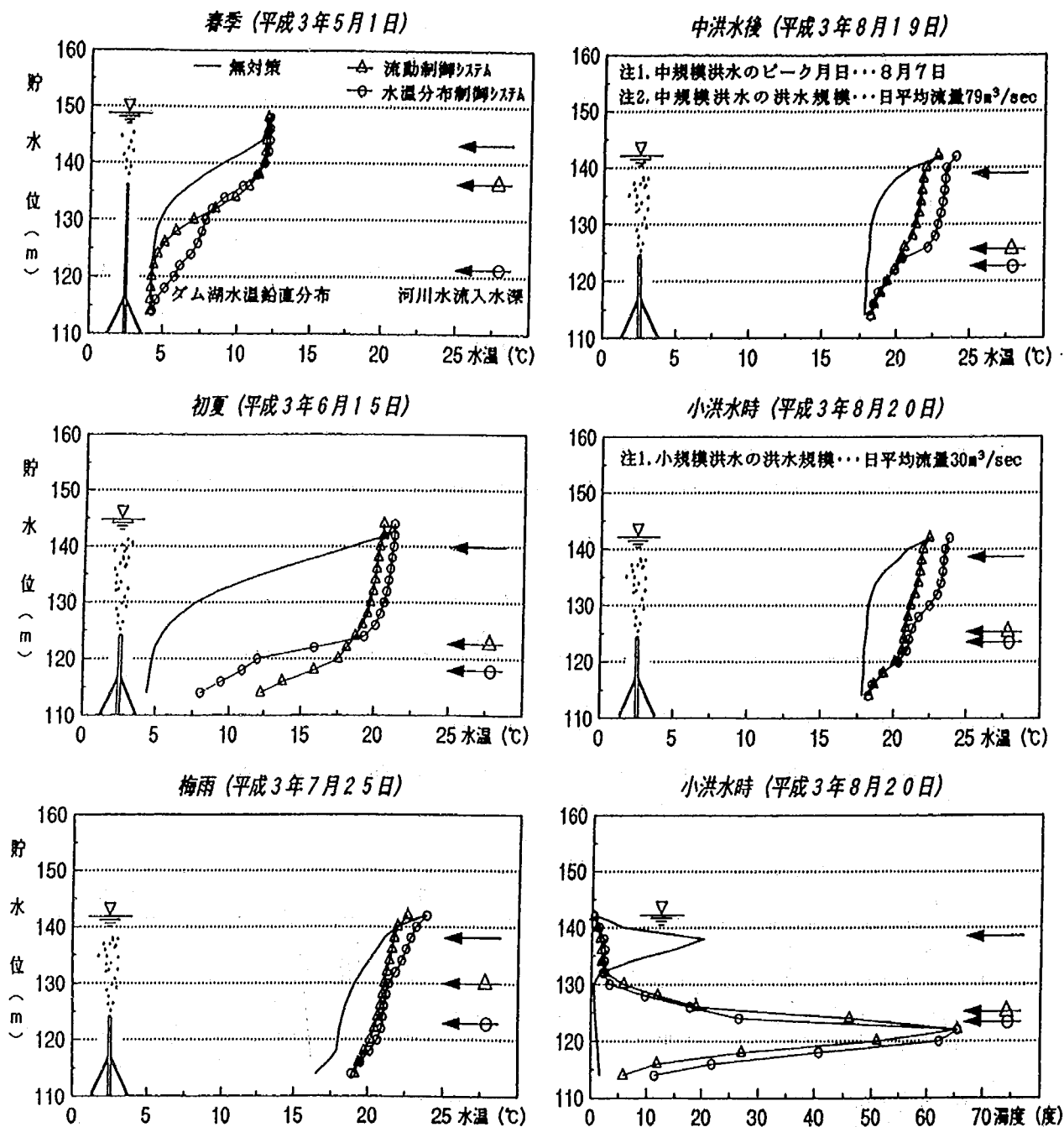


図-4 ダム湖水温鉛直分布と河川水流入水深のシミュレーション結果

参考文献

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；貯水池流動制御による水質保全対策、土木学会水理委員会水工学論文集、第37巻、1993
- 2) 丹羽薫・久納誠・久保徳彦・山下芳浩；流動制御によるダム湖の水質保全技術の開発、土木技術資料35-11、1993
- 3) (財)ダム水源地環境整備センター編；ダム熱エネルギー利用指針(案)、1992
- 4) 森北佳昭・天野邦彦；貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究、土木研究所報告、第182号-1、1993

ダム湖における自然環境創出



出席者 石田 力三／南川 幸
西田 穂積／丹羽 薫
下村 周
司会 藤本 保

(敬称略・順不同)

司会 皆様には、お忙しいところ本日の座談会に出席していただきましてありがとうございます。テーマは「ダム湖における自然環境創出」ということでございます。

ダム事業への社会的要請は近年多種多様化してきました。治水・利水はもちろんですが、生態系の保護を特に配慮したダムづくりであるとか、あるいは新しくできるダム湖を生かした地域文化の創造だとか、地域振興も期待されてきているわけです。

ダムを新しく造るということは、新たな水面を創出するということで、環境への影響が良きにつけ悪しきにつけ全くゼロということは当然ないわけですが、ダムの事業を実施するに当たっては今までも自然環境を十分配慮してきており、自然環境とバランスの取れた河川開発を推進しているところです。特に、ダム周辺に動植物が多数生息するようなダムにおきましては、動植物の保護であるとか、増殖、あるいはこれらを観察するような施設を整備することによりまして、豊かな自然環境を創出して、併せてダム湖の親水性を高め、人々と自然とのふれあいを増進させ、自然の宝庫としてのダム湖づくりをめざしているところです。

例えば、本誌「ダム技術」の1992.11月号に

も紹介されていますが、大阪府にあります箕面川ダムは、自然環境保全の取り組みに対して、環境庁の認可団体であります(財)環境調査センターより、1993年6月に環境賞を受賞しています。ダムでこういった環境賞をもらえるのは画期的なことではないかと思っております。沖縄総合事務局の漢那ダムでは、これも本誌で紹介されておりますが、マングローブの植栽であるとか、あるいは潜在的な自然植生を用いた周辺斜面の緑化など、各ダムそれぞれいろいろな工夫をして自然環境保全、あるいは創出に努めているところです。

しかしながら、ダム湖という環境条件における自然の生態の創成ということでは、人工的な環境のなかでの野性生物の定着にはまだまだわからないところも多く、また、基礎的な経験も不足しており、このような課題に対して総合的に取り組んでいく必要があると考えています。このような背景から、今回のテーマとしまして「ダム湖における自然環境創出」というものを取り上げることとしました。よろしくお願いします。

☒ 豊かな自然と共存のために ☒

司会 それではまず「豊かな自然と共存のために」ということで、山間、谷筋、ダム湖の自然環境のポテンシャルについて日頃イメージされてい

ることについてご意見をお聞きしたいと思います。

まず北里大学で水産増殖学を担当されていて、魚類の繁殖など環境保全に関する研究をされています石田先生にお願いいたします。

石田 私がダムに始めて関心を持ちましたのは、だいぶ古い話ですが昭和27年のことです。私はこの年に東京大学農学部水産学科に進学しました。ちょうどそのころ、多摩湖畔のダム水路の工事の最終場面を見学に行ったことがあります。その現場では、山を削ってしまって堰堤を造るという、我々にはとても考えられないようなたいへんな規模の工事に驚かされました。その頃は、そのようにしかダムを意識しておりませんで、普通の治水・利水のためということは知っていましたが、環境保全と関連づけて考えたことはありませんでした。

水産の増殖学科につきましては、当時の教官が大島泰雄先生という方で、この方はたいへんユニークな発想をされていて、試験のときにノート・参考書は持ってきてよろしいということで、よくよく先生に聞いてみますと、試験の間だけでもノートをよく読ませるのが目的だとのことでした。その先生が試験の一番最後に自由課題として、ダム湖の利用というものを出题されました。「これは得点とは関係ないけれども、いいのを書いて私を“あっ”といわせればプラスアルファの点数をあげましょう。」ということで、いわゆる「治水・水利、ダム本来の目的の他なんでもよろしい、あるいは水産、魚のことにこだわる必要は

ないので、何でもいから考えなさない。」ということでその問題が出されました。

そのときに、私は魚類専門なものですから、そこで魚を飼って捕るとか、または当時の新しいこととしてはイケスで養殖するとか、それからダム周辺の遊歩道とかを挙げたことをおぼえています。そのようなことで、少し以前まで一般に行われていたことは当時私が考えていたようなこととあまり変わっていないと思います。

最近では自然環境保全というようなことがいわれているのですが、保全のなかに先ほどの司会者のお話中の表現をお借りしますと、“人間とのかかわり合い”というなかに、ある意味で自然を利用しようとする考えがあり、これとまた別に少し次元を異にした純粋な自然保護というのがまた別にあるのかなと、どうもそのあたりが近頃分らないところです。ただ、これは私どもが育った時代を考えますと、あまりにも開発に対する反撥が行き過ぎているのではないだろうか。これは、私の場合は専門ではない話ですが、最近ではそのようなことも考えています。

司会 どうもありがとうございました。続きまして名古屋女子大学で植物生態学を担当されています南川先生にお願いいたします。

南川 私は植物集団とその地方の気候風土、さらに微立地環境との関係の分析的、また総合的な研究いわゆる植物群落生態学に携わっている者です。今、最も問題なのは都市域の拡大に伴い多くの生き物の住处である丘陵と、その谷間の改変およびリゾート開発などで改変されつつある標高300 m~1,000 mの山地帯ではないでしょうか。これらの自然の中には、日本で発生・分化し、私たちの祖先と進化共存し、地球上で日本だけに生きている、いわゆる種の基準種の生物が在り、それらに大ダメージを与えつつあるのではないか。沿岸から平野部は開発しつくされ、亜高山・高山帯は何とか保護されつつある現在、今国民が大きな期待をよせており評論家も異口同音に唱えているのは、丘陵部およびその周辺と、日本の地形地質上重要な使命をもつ治水機能、国民生活をはじ

石田 力三氏

北里大学講師



め社会・経済の基盤をなす利水、それに失われつつある山地帯の自然を未だ温存しつつある多くのダム湖の自然の温存と、さらなる自然づくりでありましょう。

ダム湖は、建設後ある時間を経て周辺の向斜森林や草地、集水地域の森林、溪流辺の植生と一つの統合された自然生態系を形成していくものです。ですから、ダム湖の自然づくりに当たっては、ダム湖および関係山地を一つの統合された自然として考え、対処することが最も大切です。それにつれ、ダム湖は建設省等、周辺の林地は主として林野庁その他の如く、管轄を異にしていることは、その自然づくりの面ばかりではなく、集水山地や上流域よりダム湖への土砂の流入による堆砂量の増大をくい止め、長くダム湖の機能を維持する上でもこの点は問題ではないでしょうか。

また現地調査でダム湖所在の周辺の住民と話をしてみますと、ダム関連で最も期待されているのは、その道路とレジャー施設などの整備による地域社会の活性化のようですが、それは、それぞれの地域の人々の当然な願いでありましょう。また、そのことはダム湖を核とした自然を護ってゆくためには、その地域に愛着をもち、故郷とする人々とダム管理者が一体となって、よりよい自然づくりを進めていく素地として大切なことだと思います。

この意義あるダム湖の自然づくりに当たって、先に述べましたように、ダム湖やその周辺には小さいながら各種の湿地や山地にその地域固有の生物が生え、また生活を営んでいます。例えば東海地方でみますと約 600 万年前（中新世末期）存在した東海湖周辺で発生・分布した美花をつけるシデコブシ・シラタマホシクサをはじめ数種の植物などもダム湖周辺の湿地に生育しています。これらは、ダム湖あってこそその湿地であることから、より広域的に保護し、また観光資源としても活用し、ダム湖を中心として人間をはじめ諸生物を含めた自然をどう整え構成していくかということを基本としていくことが大切ではないでしょうか。

司会 流域一体となって考えていかなければな

らないという鋭いご指摘をいただきましたが、我々としてもダム湖を保全するためには、ダムの管理区域内だけではなく、流域対策が必要だということで、例えば、周辺の植林事業（グリーンベルトⅡ種事業）などを行っており、副次的に、生態系保全にもつながって行くと思っておりますが、努力しているところです。

研究者という立場からいろいろとご意見をいただいたわけですが、次はダム技術者の立場から土木研究所でダムの計画・管理などを担当されています西田ダム新技術研究官をお願いいたします。

西田 私自身ダムに携わってきましてここ 10 年あまりくらいで、自然というものに対するダム技術者の認識の内容が変わってきているように思います。端的に申し上げますと、10 年あまり前にはどちらかといいますと、ダム湖をつくったことに伴う周辺の環境整備、この場合の環境と申しますのは主に人間の利用、もしくは周辺住民の方々の生活のためのものであり、そのような目的のための周辺の環境整備などが関心の中心でした。

ところが最近の議論の中心は、従前の河川・水辺そういったものが有する自然をいかに保全していくか、また新たに出現した水辺・ダム湖を中心とする水辺にどのような自然環境を創り出していくのか、またそれをどうやって維持していくのか、こういったふうに議論の内容が変わってきていると思っています。

その変化は、自然というものに対する社会一般の考え方の変化であり、生物としての人間が未来

西田 穂積氏

建設省土木研究所
ダム部ダム新技術
研究官



にわたって持続的な繁栄をこの地球上で続けていくためには、適切な自然環境の確保が基礎的条件であるという考え方ですが、そのような考え方が一般的なものとなってきつつあることに対応していると思います。

我々ダム技術者に対しても、ダム事業を進めるに当たって、自然への深い理解と自然環境の保全・回復、並び新たな創出について一層の技術的な努力が必要と考えています。

少し前までは、貯水池についての環境問題の一つに、冷水の放流、濁水の長期化といったテーマがありました。そういったものにつきましてはかなりの程度、私どもは技術的に解決してきたと考えています。現在、我々が直面していて、取り扱っていかないといけない、自然環境の保全・回復・創造というテーマに対して、従来と異なる取り扱い方、対応の仕方が必要なのかもしれません。今後研究を進めていくことにより、かなりの程度対応できるのではないかと考えています。「自然にやさしいダムづくり」というテーマに向かっていろいろな方々のご知恵、ご協力をいただきながら技術開発を進めていきたいと思っています。

司会 ありがとうございます。続きまして同じく土木研究所で自然環境保全、水質保全、景観を担当されています丹羽環境計画研究室長に環境研究者の立場からお願いいたします。

丹羽 近年、ダムの環境について多くの方からの要望・期待が高くなってきています。その背景には二つあると思います。一つは国際的な自然保護の高まりということで、特に湿地保全に対する要望が強いことです。もう一つは自然型のアウトドアのレクリエーション指向の高まりがあります。一つ目の点について述べると、地球規模で環境が大きく変わって行く中で、豊かで貴重な自然を守り育てようという意識の高まりがあります。今年釧路で開かれたラムサール会議では、水鳥を含む生物の多様性を保つ上で湿地の重要性が謳われています。ここでのいう湿地は広く人造湖であるダム湖も含んでいます。

丹羽 薫氏

建設省土木研究所
環境部環境計画研究
室長



建設省においてもこれからの施策に関わって来るものとして、今年6月に豊かな環境づくり委員会から「豊かな環境づくりのために」が提言されていますが、その中で「質の高い環境を備えた国土の形成に向けて」と述べられており、建設行政において優れた環境を創造することが大きな柱の一つになって行くと思います。

優れた自然環境を創る上で、ダム湖の果たす役割はダム湖の持つ特性からして大きいものがあります。ダム湖は、完成して年月が経つと周りとの調和して自然豊かな湖沼となります。自然湖沼と基本的に変わらないといえます。ダム湖ができたことにより、鳥がたくさん集まって来て鳥獣保護区となっている所が多くあります。また自然に親しむ場所としても使われています。ダム湖に対する国民の要望が、治水・利水から環境まで多面的に広がってきたわけです。ダム湖の環境創りをする上での基本姿勢として、環境と一口にいてもいろいろな要素があるわけで、貴重な自然を守り育てる「自然環境保全型」と人間が親しむための自然環境を創造する「レクリエーション型」とに分けて考えることが必要だと思います。

司会 続きまして(財)ダム水源地環境整備センターでダム湖の環境整備についていろいろ研究・指導されています下村参与からお願いいたします。

下村 一般にダムが建設される地点は、山間部に設置している。それから自然環境の豊かな場合が多い。そういう状況のところにはダムが建設されて貯水池が出現すると、これまでの環境がある程

下村 周氏

(財)ダム水源地環境
整備センター参与



度影響を受けて変化するという事は避けられない。その場合、現状をどういうふうにとらえてどう対応していくか。対応の考え方が重要だと考えています。一般には、自然環境の保全、復元、創出ということを考えると、保全、それから復元については従来のものを積極的に残していく、あるいは環境が持っている機能を持続させていく、さらには失われる機能の回復を対象とします。創出についてはこれまでとは異なる新しい環境を出現するということなのですが、特に創出ということについてはこれまでの環境が変わって、新しい環境が出現する。これを将来どういうふうに導いていくのか、その点を検討していくことが重要であると考えます。また、ダム周辺の環境をどういう方向に持っていくか、貯水池周辺の適正な利用と保全の問題などがあると思いますが、それをどう考えるのか、それからいずれの課題についても長期的・計画的な視野に立って検討していく必要があると思います。それから先ほども触れられましたがスケールを大きくして見ていく必要があります。具体的に見てみますと周辺整備をどこまで考えるか。かなり広い地域全体を考えるのか。あるいはダムの周辺を対象としてとらえるのか考え方をしっかりしたものにすることが大切だと思います。

特にダム本体周辺をはじめとして、湖岸から水際線にかけての景観についても十分な配慮が必要だと思います。それから、最近では特に自然環境の保全と相まって、それを自然教育の場とか、あるいは自然観察、自然を体験する場として生かして

いこうという考え方がありますが、今後ダムにも求められるようになると思います。そういう対応も併せて考えていくことが必要だと思います。

司会 いろいろとご意見をありがとうございました。最近の開発課の新規施策・重点施策などは、まさに環境に着目したものが多く、我々としても力を入れているところです。また、皆さんのご意見をうかがってみますと、ダムあるいはダム湖を新しくつくっていく中で、何とか自然との共存は可能なのかなと思っています。ダム湖は時間がたてばそれが自然のものになるという意味で、潜在的自然への回帰促進を図り、その一方で先生方お二人のお話がありましたように、その周辺地域の活性化とつながるようなダムの整備も必要であるということだと思います。それがダムの自然を守ることにつながっていくと思います。

☒ 水際環境における生息環境づくり ☒

司会 それでは次の話題に移ります。ダム湖におきまして自然生態系のシンボルとなる動植物の生息環境をどうやってつくったらいいいのか。「生息環境づくり」につきまして水質とか水温、水の流れ、深さ、いろいろな水際環境の着目点などについてお聞かせ願いたいと思います。まず石田先生をお願いします。

石田 水のなかで生息する生物を対象にして考えますと、水環境としてはダム湖の水温と水位変動のほか周辺の環境としては水質の問題なども考えられます。それから、水際、水辺環境とも関連しますが、水辺の工事の問題も重要で、こういったようなものが魚以外の水生生物、水生昆虫などに与える影響も考えて工事を実施して欲しいと思います。それから水辺の環境としましては、こういったようなものの産卵の場所、または稚魚、幼虫などの生活の場、隠れ場としまして水際線とか、湖岸に関連しまして水際の緑化なども必要でしょう。

司会 水際環境に関しては、ダムはどうしても水位変動があります。最近、計画されたダムはその点についてはだいぶ改善が進んでいます。その

話はあとで下村さんのほうからお話を伺いたいと思います。それでは南川先生のご意見をお願いします。

南川 先ほど申しましたように、ダム湖を核とし、その溪流および溪畔林地などの集水地域およびダム湖をとりかこむ尾根筋から、山谷などの向斜面の林地およびダム湖よりの流出河川などを一体として自然づくりを考えることが基本でしょう。

ダム湖およびその谷筋を回ってみますと、各ダムがそれぞれの気候風土のもと、その地域の地形地質・谷風をはじめ微気象などの総合された、ダム湖を核とした自然の反射鏡のようにかたくななまでにそれぞれの個性のあるダム風景といえる自然を形づくっています。水位増減のあるダム湖にあたって、その流入部のバックウォータ付近をはじめとする水際部から流入岸边にはツルヨシ、ネコヤナギなどの挺水植生が生育し、多くの水生昆虫や両生類・魚類が生を営み、その外側の林地にはササ類、細網根の多い樹木が群生し、そこにはまた多くの生物が住み、一面にこれらの溪畔植生は地形の崩壊や谷斜面のエロージョンを防いでいます。

このような地形の現状より、ダム湖周辺の諸施設の整備と共に、溪流および周縁一帯の集水山地、ダム湖の囲む向斜山地を含めた水際環境の自然づくりを関係諸機関と密接連絡のもとに計画を進めることが望まれます。

司会 どうもありがとうございました。下村さん先ほど申し上げましたが水位変動についてご意

見がありましたらお願いいたします。

下村 ダムにおいて、水際環境が湖岸から水際線の間が生態系にとっても、景観などにとっても最も重要なところになっているのではないかと思います。そのあたりの状況をいろいろ把握して自然環境をどう利用するかを検討していくことになると思います。水位変動が少ない、そういうことがポイントになろうかと思います。水面の条件は、植生とか魚とかその他の生物にとって生息条件として重要なものとなっているので、ダムの計画のほうからもそういう検討がなされるべきだと思います。オールサーチャージ方式は、常時満水位が1年間つづいて一定である計画です。これを採用しているのは全国でも治水ダム、いわゆる洪水調節を主目的としたダムが現在多いです。一般的に年間通じて水位が一定しているところのダムを見ますと、完成後数年経ってくるとサーチャージ部分の植生が豊かになって、周辺の植生環境などに近づいているところがたくさんあります。そういうことで計画的にもオールサーチャージ方式が取ればいいのではないかと思います。

それから、水位を一定に保つということでは、副ダムを上流などにつくって、そこに常時水を貯めるということで、これは水位変動が一年間一定して保てるので、面積的には貯水池の一部になりますが、いい環境がつくれるのではないかと思います。それから、水際環境について先ほどもありました裸地対策ですが、ダムごとにこれまでも試験植栽など検討が行われて成果が出つつありますが、抜本的な対策を見つけることは、経済的な面も含めて今後の研究を持つところがまだ多くあると思います。

石田 オールサーチャージ方式というのは余力のあるダムづくりと同じように考えていいんですか。

下村 オールサーチャージですから、利水のため貯水位を一定にしてその条件で管理するということです。サーチャージ部分まで常時満水位を上げて活用するという制限水位方式のダムに比較して、一部効率的でない場合もありますが、環境

南川 洋氏

名古屋女子大学
客員教授



(司会)
藤本 保氏

建設省河川局開発課
開発調整官



面、計画面など全般的な判断をして決めるべきだと思います。

☒ ダム湖環境における生息環境づくり ☒

司会 それでは先に進めさせていただきますが、次にダム湖あるいはダム湖流入河川内、周辺地域といった場所における生息環境づくりについて、具体的な事例などを含めて西田さんのほうからお願いします。

西田 ダム建設によって生まれる貯水池は全く新しく生まれた湖であり、空間的規模や流速などの物理的特性において、従前の河道とは全く異なるものとなります。従って、ダム湖の生物生息環境について考える際には、ダム湖とその上流河道並びにそれに隣接する水際空間、そして場合によっては陸上の空間においてどのような生態系を創造ないしは保全・回復していくかを検討しなければなりません。

特に、その中心となるダム湖について考えますと、天然湖沼と五つほど異なる点が考えられます。その一つ目は先ほどからもお話が出ておりましたように、水位変動が大きく、また急激に生じるという点です。それから二つ目は従来比較的溪谷などの形状をしていたところでございますので、なだらかな斜面、湖棚と申しますか、そういった棚的なものが形成しにくい。それから三つ目に、先ほどの水位変動と関連しますが水生植物が定着しにくい。それから四つ目としては植物性プランクトンに比べまして底棲生物が少ないし貧困である特徴がございます。それからまた五つ目

として大きな流入河川を持っているという点があります。

これらの問題点は互いに密接に関係しているわけですが、最初に申し上げました水位変動が大きいということは、その時期が魚など生物に大きな影響を与える。例えば、魚の産卵時期とそれが重複しますと、魚が産卵を嫌がるといった事態が生じてまいります。また湖棚がない、適当な傾斜地がないということは、魚のすみかや産卵場所の確保を困難としている。一方、これらの対応策も種々研究されております。例えば産卵床についての一つの事例を紹介させていただきますと、これは関東のあるダムですが、コイやフナの受精卵を水位変動から守るため10 m四方のフロートをつくり、それにナイロン製の人工藻を取り付けたところ、極めて良好な卵の付着状況を得たという報告があります。こういった事例は湖内に産卵床を確保することについての可能性を示唆していると思います。

また、流速のあるところへの産卵を好む魚については、流入河川の河床を安定させ、それから濁りの早期沈静化が必要となってきます。これにつきましても、例えば、バイパス水路のようなもので魚のための生息場所・産卵場所を確保してやるといったことが可能ではないかと考えています。そういった研究をこれから進めていかなければいけないと考えています。

また、湖棚につきましてもご紹介させていただきますと、これは東北地方のダムですが、自然の地形なのですが水際から湖心方向に向かって、連続した緩勾配の地形が残されているという事例があります。そういったところでは水草が繁っていて、また水鳥も飛んで来ていますし、魚の格好の住処・産卵場所になっているという事例があります。こういった事例についてももう少し研究してみることが必要ではないかと考えています。

司会 次にダム湖における生息環境づくりということで、それぞれの動植物には適地などがあると思いますが、検討をするに当たっての留意点がありましたら丹羽さんからお願いします。



丹羽 ダム湖で生息環境創りをする場合、ダム湖にはどんな特性があって環境としてどういったものを目指すのか、またその目標をどう実現していくのかということが問題となります。ダム湖は、自然湖沼と比較して水位変動が大きいので、生息環境として厳しいという特性がありますが、やはりその中でより豊かな生息環境を目指すことになります。では豊かな生息環境とは何かというと、生息する生物の種類が豊富なことがその指標になると思います。さらに欲張ればそれぞれの地域で貴重だ、といわれている種の生息できる環境にすることです。

では、豊かな生息環境を創るにはどうするかといいますと、まず豊かな生息環境を持つ自然湖沼の条件を調べると参考になります。こうした湖沼では水際の水生植物群落が生物の宝庫となっています。一方、ダム湖では一般に水位変動が避けられませんが、計画で水位変動を少なくするものとしてオールサーチャージ方式を採用するとか、上流端に副ダムを設けて水位変動の少ない部分を設ける、また本川や支川の流入部に湿地帯を設けることも効果的です。

また、鳥類の生息環境を考えた場合、周囲の山とダム湖が連続していることが大切です。周辺湖岸道路については、少なくとも片方はなるべく設けないことが大切です。

南川 ちょっとお伺いいたします。水位変動の

少ないダム湖の上流部に当たっては、泥土上にヨシが繁茂している付近では水の浄化にも機能を発揮し、生物が息づくから少しでもその方式の護岸も考えてみるのもよいと考えますが、現地管理者の方は、そんなことは問題外でとにかく貯水量の確保が大事だといっておられますが、現地でも自然づくりの問題も考えに入れていくべき時がきていると考えますがいかがでしょうか。

下村 先ほども申し上げましたが、ダム管理者は治水目的、それから利水目的に従ってダム操作を行っておりますがご指摘の考え方を持っている方の多いようです。一方、治水施設や水質源開発施設の整備状況や自然環境に対する考え方の推移状況とも密接に関連すると思いますが、治水計画・利水計画、環境問題も含めて、全般がうまく整合性が取れたようなダムがいいダムだというふうに私も思っています。そういうふうに質を高めていくという方向で、今後検討していく必要があるように思います。

司会 丹羽さん、いろいろなダムで最近ビオトープなどをやっているでしょう。

丹羽 現在建設中のダムや最近完成したダムでは、特にそれぞれのダムで工夫されて生態環境の保全にも取り組んでおられます。ダム湖の周辺部に積極的にビオトープを造っているものとして、例えば今建設中の宮ヶ瀬ダムや最近完成した茨城の飯田ダムなどがございます。

生息環境を整備するには、まずそれぞれのダム湖でどんな生物を対象とするのか、また人々との接触をどんな形態とするのかコンセプトを決める必要があります。例えば先ほど述べた飯田ダムでは、近くに国蝶のオオムラサキがいることから、オオムラサキを一つの目玉としてオオムラサキの好むエノキ林を入江周辺に植えています。また、沖縄の福地ダムでは、幻の魚となったリュウキュウアユの成育に取り組み、漢那ダムではダム下流のマングローブの植栽やダム本体にカニやハゼの魚道を設けています。また琵琶湖でのアユの陸封化は有名ですが、いくつかのダム湖において自然創生アユ（陸封化アユのことを自然創生アユと呼ばれている）が見られ、野村ダムでは自然創生アユがダム上流に昇りやすくするため、ダム上流の堰に魚道を設けるなどの施設整備を行っています。

司会 ダムの場合はかなり上流に位置するものですから、湿地というのはなかなか難しいと思いますが、適地があるところについては考えていきたいと思っています。例えば、渡瀬遊水池では今いろいろ実験をしていますけれども、そこにはもともとヨシが生えていまして、これらを利用して水質浄化実験をしておりますが、たしかに効果があるということで、それを取り入れていこうかと考えているところでございます。

南川 藤本さんが話されましたように、研究は着実に進められているようで、現地の管理では、

流入部付近における植物を基盤とした生息環境は、水鳥にも水生生物にも確かに効果的な生態的事情はよく理解されてみえますが、実は貯水量確保のため、この帯の土砂も除去されています。大きなマスナスにならない範囲で、この流入部の一部だけでも配意されると少しでも効果があると思います。

西田 南川先生がおっしゃったような事を適切に行うためには、これからやっていくダムについては、計画段階から検討してみるべきですし、既設のダムについても検討してみる必要があると思います。

司会 先生がおっしゃっていたのは、これから造るダムだけではなくに、いま現在できているダムについてもいろいろ工夫をしていけばいいのではないかと。たしかに流入河川のところについては、工事中はまだ溪流ですので、なかなかそういう環境ではなくて、管理に移ってある時間がたった後、そういう環境が自然に出てくると思います。そういったところを無理にいじらずにそのままの状態でおけばいい環境ができるのではないかと。という発想ですね。

下村 それと上流からの流入もそうですが、貯水池の地形によっては入り込んだ沢の部分がありますが、そういうところをうまく利用していくと、南川先生がおっしゃるような形に持っていくのは可能だと思います。先ほどの宮ヶ瀬ダムの例も東沢という一つの沢を利用してビオトープを形造っています。

また、先ほどの飯田ダムも非常に入り組んだ貯水池の形状をしており、それぞれの沢について、湿地を主体にした生物の生息地をつくるという努力をしています。今の貯水池のなかでもそういうやり方をしていけば、徐々にいいものが出ていくのではないかと思います。

南川 今、生態系の保全などいわなくても、身近な自然の構成種を保護・温存していくべき時にきています。我々人間を含め、現在の生物の保全を考えないと、弱い生物から絶滅していきます。そのため、建設省の方でも手をさしのべていま



す。例えば、木曽三川の下流において、現在絶滅しかけているタコノアシやフジバカマを、平成3年度から生育最適環境を研究して増殖保護活動を実施しています。地域社会でも、そこまで建設省の方でも対応するようになったのかと見方が変わりつつあるのは事実です。このようなことは、きわめて時宜を得た豊かな自然水辺づくりへの対応であろうと存じます。

司会 個別のダムについてご指導いただければ私どものほうも勉強していきたいと思います。

ところで石田先生、いままでダムの上流域というか周辺についていろいろと議論されていますけれども、やはり下流域の環境にも配慮する必要がありますが、いかがでしょうか。

石田 西田さんがいちばん最初におっしゃいましたように、下流のほうの冷水・濁水問題などにつきましては、たしかに社会経済的な面からの対応で、問題としてかなり解決しているのではないかと思います。研究面では、たしかに対応策ができていていると思っています。例えば、対応策があまりにも適切なために、濁りの実験ができなくなってしまったこともあります。

以前、濁水がどういう具合にアユ釣りに影響があるかということで調査してみましたら、上流のダムサイトで非常に巧みにコントロールされており、ふだんなら濁りが回復するまでに2週間は十分余裕があると思って、一生懸命調査をやっていたら、3日で濁りがほとんどなくなってしまうのです(笑)。実験ができなくなるからあまりうまくやっては困ると閉口しました。そのくらいうまくできるんです。しかし実際問題としてはまだまだ対応は十分進んだわけではない。特に下流のほうで、冷水・濁水の影響に悩まされているのもありますので、そういった問題は、下のほうへのコントロールということもまだまだ十分ではないように思われます。

一つは先ほどどなたからかもお話が出ていたように、水系を一体で考える必要がある。たしかに例えば直轄ダムはうまくやれましても、下流に他省庁のダムがあると、これに口出しするわけにい



きませんから、かなり大きな問題なんでしょうね。ですから、立地条件ということを一括化で考えることはかなり重要ではないかと思います。やはり水系一体で考えませんと、陸上動物と水の中の生物とは生態的につながっていますので、下流のほうまで考えなければいけないと思います。

西田 石田先生のおっしゃるとおりでございまして、土木研究所ではダムの計画、設計、施工そして管理といったトータルな規模でダムについて研究が行われています。

しかし、自然環境というものについて考える場合、ダムと貯水池にのみ範囲を限定して考えるのではなく、上下流の河川を通して全体的に考えるという視点も必要だと思います。また生態系を考える時には水の中だけではだめで陸上も視野に加えなければならない場合もあると思います。そのようなことから、現実に行政サイドでも河川環境管理基本計画を策定してきているところです。私ども研究サイドでもさらに視点を広げて行かねばならないと思います。

司会 我々ダム技術者はわりあい勝手なことばかり言っているようにも思いますので、先生方からいろいろご意見があるのではないかと思います。南川先生、先ほど発言はいただきましたが、さらに何かあればお願いいたします。

南川 少しまとめておきましたが、建設省の方でも日本列島におけるダム湖および付近の自然生態について調査把握を企画実施されているようですが、先ず、ダム管理のための自然条件の把握に

加え、ダム湖の所在する山地域を含む各地方（植物相区分位の程度で）の自然環境条件、植物・動物相の概要を調査把握しておき、その地方の地域整備計画とも相俟ってダム湖の自然づくりの整備計画をたてる。その実施に当たっては詳細な調査を実施し、それぞれのダム湖および周辺の個性、すなわち生きた自然界の基盤をなす緑地の潜在自然植生を把握しておき、その一帯の遷移（サクセション）・生き様を知り、生態系列のどの過程でどんな技法をどう人為的に手助けをしてやれば、最も早くダム湖の地域に合った安定した自然づく

りができるかを判定して施業するような手段や手引書を作成すれば現在のダム管理者も徐々に自然豊かなダム湖へと導くことが可能になるのではないのでしょうか。

石田 もう一つ、このVc（図-1 参照）という静岡から和歌山までを見ていると、いわゆるアマゴとヤマメの分布境界線と植物分布の境界線とはぴったり一致するんですよ。アマゴというのは太平洋側の神奈川の相模湾から西のほうへずっと行きまして、それから四国の瀬戸内、それから大分県の瀬戸内、Vcの範囲とぴったり合っていま

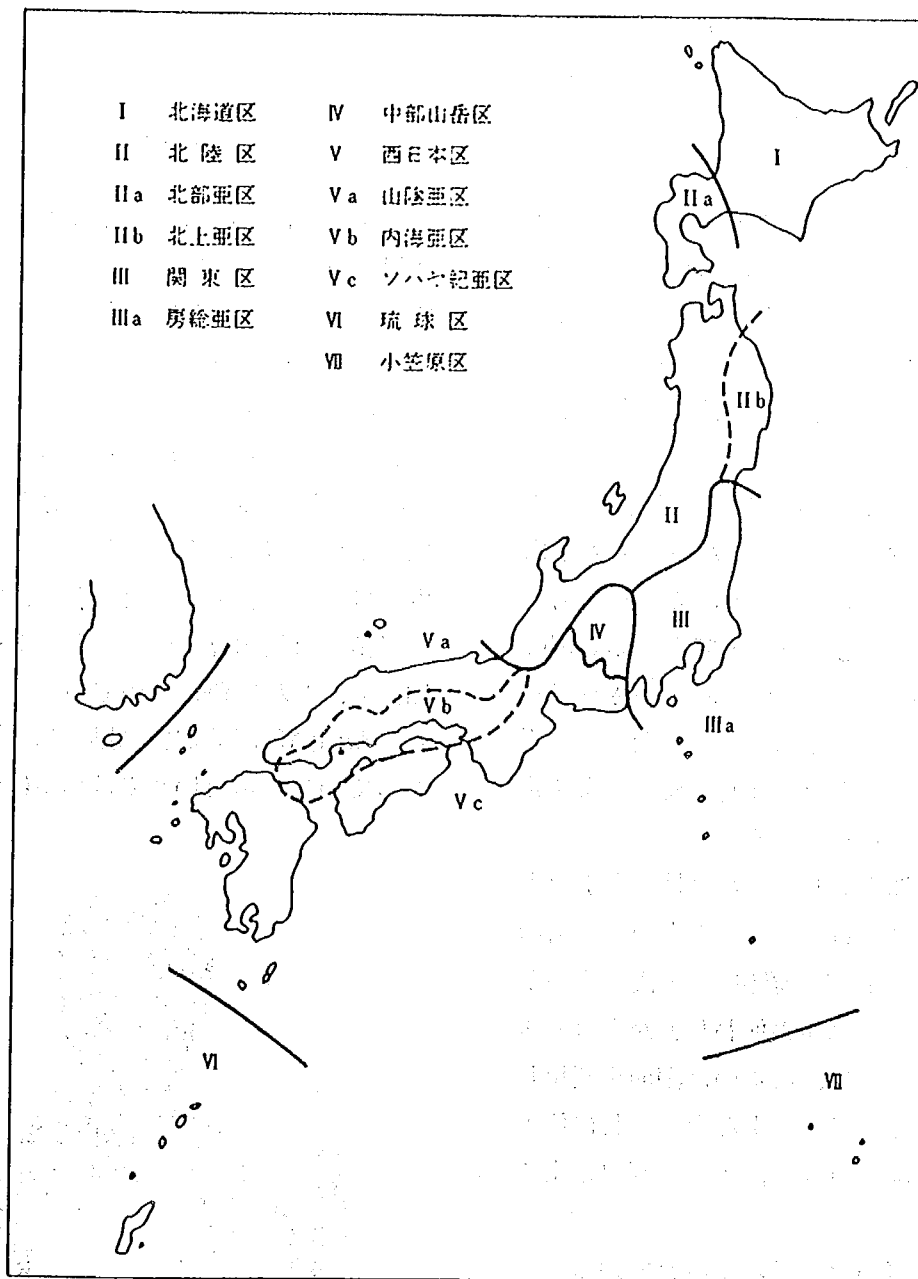


図-1 日本の植物相区分 (Hara 1959)

すよね、

南川 自然環境下での魚類の分布も相関性があるのですね。

司会 いま直轄・水資源開発公団のダムについては水辺の国勢調査を行っています。河川では以前から実施していますが、ダムについてももうそろそろまとまってくるようになっております。

ところで、ダムの自然の環境を考えるとともに自然環境の保全あるいは創出という視点と、もう一つ先ほどから出ておりましたダム湖周辺地域の環境づくりで空間を利用するといった視点があると思いますが、その点で考えなければいけないことがありましたらお願いいたします。

下村 環境づくりのなかで、これまでダム湖の周辺がどういうふうにご利用されていたか、あるいはどういうふうに整備されていたかということとその変遷で見てみますと、まず昭和30年代に多目的ダム法等が設整備れてダムの需要もそれに伴って増加して来たわけですが、最初はもちろんダムあるいはダム湖の出現やダム工事そのものが珍しいというようなとらえ方で「観る」という利用のされ方が主体でした。

やがて社会情勢なども変遷してきたわけですが、昭和50年代になりますとダム周辺環境整備事業がスタートしています。ダム湖周辺を利用してもいいのではないかとということでダム湖周辺の空間を利用するというような使われ方がされてまいりました。これはダム湖周辺での空間、平地を利用したのテニスコートとか運動公園とか遊歩道などがこれに該当するわけです。

それからさらに進みまして、社会情勢もアウトドア志向というかエコロジーブームといったものが出てきたということで、昭和60年代ぐらいから体験するといったレベルの使われ方がされてきました。これはキャンプ、あるいは湖面を利用したスポーツといった、イベントなどがこれに代表されますが、貯水池の特性を活用した利用が出てきました。

最近ではダム周辺の自然環境に触れて知る、あるいは学ぶというふうなレベルの利用が行われる

ようになって来ています。これはダム湖周辺の自然、あるいは生態系などを学習するというか、観察するといったレベルの使い方がされています。これは先ほどのビオトープとかダム本体、あるいはダムの計画を学んだり、あるいは周辺の自然環境のなかで自然を学ぶといった使われ方が増えてきています。

こういうことでそれぞれ年月を重ねるにしたがって使われ方も多様化してきていますし、あるいは中味的にも高いレベルの使い方も発生してきているということで、これに合ったようなダムのほうでの対応が必要となって来ているように思います。

司会 ありがとうございます。

☒ 維持管理手法 ☒

司会 次に、いろいろな自然環境創出、あるいは保全をしていくにいたしましても、その後の維持管理が重要ではないかと思います。維持管理については、やはりダム管理者だけではなくて地域との連帯が大切だと思います。

こういったダム湖の良好な環境を維持していくための手法につきましてご意見をうかがいたいと思います。事例紹介などがございましたら石田先生のほうからお願いしたいと思います。

石田 事例紹介ということで奥只見ダム（銀山湖）で、これは魚についての一つの例ですけれども、銀山湖は湖面が新潟県と福島県の両県にまたがっていて、魚というのはべつに県境とは関係あ



りませんから（笑）、そういう意味では魚の資源を片方の県だけで管理することには無理があるわけですが、ここでは主として新潟県側の事例を紹介します。ここにはダムができるまでは、降海性のヤマメが入っていき、これが海に行くと大きくなりサクラマスとなって帰ってきます。

ところが、ダムが構築されるとヤマメは海との往来は遮断され、湖が海の代わりになります。そして、ここで大きくなったものが湖沼型サクラマスで、川ではせいぜい 30 cm くらいにしかならないイワナもダム湖では 50 cm 以上になります。このような大形のマス類が湖で成育して河川に上がって産卵します。そこで流入する河川は全面的に通年禁漁であり、その代わり湖面においては釣りを楽しむことができます。

このダム湖と流入河川の魚類の維持管理を行っているのは、漁協、遊漁者からなる団体で、実際の管理業務には漁協組合員が当たり、成果をあげているとのこと。漁協に所属する人々は、従来その水域に親しんできましたから、水域・魚への愛着は非常に強いのですが、ややもすれば視野が狭いきらいがありますから、ダム周辺に新たに開発された魚を管理するには、組織面では幅広い人材を入れた第三セクター方式をとり、ワーキンググループとしては漁協に関係していた人々を活用することが有効ではないかと思えます。

司会 そういった環境づくりが計画段階から地域も含めいろいろな人々のご意見を取り入れた組織が大切だと思いますが、丹羽さんいかがでしょうか。

丹羽 いま石田先生のほうから外部の力を借りてやっていけばいいのではないかという話でしたが、それは私も大切なことだと思います。

いま魚のほうでお話ございましたけれども、魚以外の面でも、近年、各地にいろいろな自然保護に取り組んでいる団体がございます。そういうところもうまく活用していくのがいいのではないかと思います。もちろん市町村の行政組織とも連携を取って、地域住民とも連携を必要です。私が



住んでおります茨城の霞ヶ浦では、沢山の自然保護活動団体がありますが、それらが行政組織とも連携してうまく機能しているようです。また、つくば市の近郊の土浦市に穴塚大池という農業用溜池があります。この池の周囲は開発の進んでいる首都圏の中で豊かな自然が残されている所で、この池には全国的に少なくなっているオニバスが生えています。農業用の溜池ですから管理者は生態系保全などとてもできない。そうすると地域の自然保護団体が一生懸命オニバスの保全に取り組んでいます。

一方、多目的ダムでは管理者がしっかりしていますが、ダム湖周辺の自然環境の保全と創造についても全てダム管理者がやらねばならないと抱え込んでしまうのではなくて、外部の協力もうまく得ながらやった方が良くと思います。自然に親しむための環境づくりでは、計画段階から熱心に取り組んでくれる地元の市町村や住民組織などを入れ込んでやれば、完成後の維持管理についても積極的に協力が得られると思います。

司会 下村さん、いかがでしょうか。

下村 従来、ダム貯水池の周辺整備につきましては、だれが管理するかというのがいちばん課題になっていたわけですが、内容的にどういう管理をするかということと、費用の話の二つあるように思います。内容的には先ほどからも出ていますように、ダム貯水池においても環境機能が非常に重要視されていることで、ビオトープなど

の整備が始まっていますし、これからどんどん増えていくと思います。そういうことでダム管理にとっても環境機能の維持増進というのは大きなウェイトを持って重視されてくるのではないかと思います。そういう点から考えてもダム本来の機能を高める周辺整備施設などの維持管理についても、ダム管理者側に少しシフトしていてもいいのではないかと思います。

それから第三セクターによる管理というのがかなり増えてきています。必ずしもうまくいっているものばかりではありません。第三セクターの経営環境も含めたあり方みたいなものを施設計画などの初めの段階から考えておくべきだと思います。

司会 いろいろ施設を造りますが、当然計画段階から考えて造っていく必要があるということですね。

□ 今後の課題 □

司会 それでは最後になりますが、まとめという意味で今後の課題についてご意見をいただきたいと思います。最初に石田先生からは「ダム湖を魚のすみ場」という側面からお考えをお聞かせ願えればと思います。

石田 先ほどから丹羽さんのいわれましたダム湖の基本的な考え方には、私はかなりショックを受けまして、これはどういう具合にしなければいけないのか、私はいわゆる適地で適種を育てて、それを繁殖するなりして利用するという立場でずっと育ててきたものですから、どうもそういう経済的見地から考えやすいものですから、丹羽さんがおっしゃいました人々が親しむための自然環境というものについて考えさせていただきたいと思います。

もう一つ、貴重な自然を守るということにはたしかに非常にノルタルジューは感ずるのですが、具体的に考えてみると、どうもこちらのほうにまでは十分に配慮がおよばないというところをお許し願いたいと思います。

目的の多様化ということにつきましては、これ

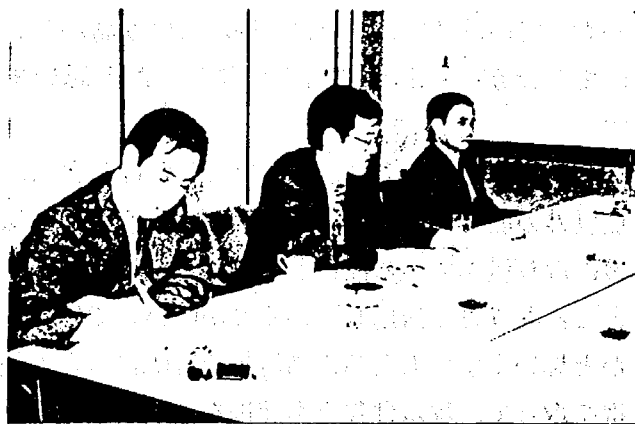
は先ほど下村さんもおっしゃいましたように、魚を通してダム湖を活用するという面もだんだん多様化されまして、初めのころは養殖や漁業を対象、遊魚、スポーツ、最近ではバード・ウォッチングならずフィッシュ・ウォッチングも考えられます。さらにはいわゆる富栄養化対策として多少でも周辺から流入するN、Pを魚体として取り上げることによって、水質浄化のためになるような面もあります。

それから適地には適種ということで、日本は非常に狭い国土でありますけれども、意外に東北から南西までいろいろな生態系が、先ほど南川先生がお話いただきましたように、やはりこの面からも、目的の多様化というものを組み合わせて考える必要があるのではないかと思います。

なお、他の地方において開発のために絶滅してしまったようなものの保存を、ダム湖の周辺で許すことの可否については、まだ私の頭のなかでははっきりいたしません。このへんをもう少し考えてみたいと思います。

例えば、過去に平地において我々の開発行為によって失われた生物に対して、標高が200 m、300 m ダム周辺に好適な環境を作って、そこでその生物の繁殖を図る。また魚なら魚で低いところに生息していたものを、ダム周辺に移して保護することが、果して環境の保全であり、正しい創生であろうか、今のところ私にはまだわからないということです。

司会 ありがとうございました。難しいお話ですが、私どもとしては、そういった同じ条件がも



しできるならばということで、そういった自然を再生できたかなという思いでいろいろなところで取り組んでいるところです。

石田 ですからここで考えますのは、むしろそれならばよそから動物なり植物を持ってこなくて、そのダム周辺において実際に繁殖していた、その土地での適種がひとりでに繁殖するような環境を作ってあげて、あとは生物がはびこるままに任せるというのがベターではなかろうか。そのへんはどちらがいいか私もはっきりわかりません。

先ほど南川先生がおっしゃいましたように近頃は、地域の方がダムというものを地域活性の場として非常に期待していることが大きい。それならばダムはやはり呼び物になったり、貴重な魚を入れるのがいいかなということがありまして、名もない魚とってはいけなんでしょうけれども、俗にいわれる名もない魚は自然に任せるほうがいいのかなという具合に思われます。

南川 先ほどからのお話のように、ダム湖所在地の皆さんの大きな期待にそえるよう各分野の技術をもって対応していかなければならないと思いますが、ここで一つ留意しなければならないのが園芸植物や外来の植物の導入により、それぞれのダム湖および一帯の生物界の攪乱であります。侵入した帰化生物は繁殖力が強く、またたく間にその地域本来の生物は駆逐されてしまい、各々のダム湖および付近の自然生態系は変貌してしまうことになります。

世界的なハイレベルの建設技術によるダム湖の諸施設をどのようにして整備するかということと共に固有の自然生態系を保持しつつ豊かな自然づくりを進めていくか、その辺が難しいことだと考えます。

下村 先ほども出ました宮ヶ瀬のビオトープですが、湿地に移植する植物については貯水池になる予定の地域のヨシなどの近隣の植生を移植しようということでやっています。

南川 ビオトープの考え方・対処は好ましいことですね。



下村 それから小山をつくってそこに穴を掘って、周囲にいる小動物の生息できるような場所を作っていますが、それもとぶんそこに普段からいるようなものが来るのではないか、それから昆虫などについても同じような考え方で生息場所を提供しようとしているのですが、考え方はいろいろあると思いますが、結果的には石田先生、西田さんがおっしゃったような形になればと考えています。

西田 下村さんがおっしゃったことと同じかもしれませんが、ダムは河川を含めてある一定の地域を水没させて湖に変えます。しかしそれがその地域の生物の種を全滅させることにはつながらないと思います。

植物の場合は、動物よりも環境変化への適応力は小さいと思われませんが、標高の変化を避けるためにダム下流に貴重な植物種の多種を考えるなど様々な工夫により種の保存を図ることは不可能ではないと思います。

司会 話がいろいろでましたけれども他に何かございましたらお願いいたします。

南川 現在のあるダム湖に対しては先ほどから魚道などの話がありましたが、それぞれのダム湖を核とし、その集水域、向斜面および下流域の各生物相を精査しておきまして、その地域に持ちこむ生物の種は、ダム湖および周辺の生態系を攪乱する憂いのある生物の種群はさけることの配慮が必要です。

多様化へのニーズに対応し、可能なかぎり対応することに努めるべきでしょうが、施策の実施に当たっては地域固有の生態系を把握し、それらと共存しつつ光彩を添えるものを取り入れ、美しく豊かなダム湖を核とした自然づくりを展開することが望まれます。

司会 ありがとうございます。いま南川先生がおっしゃられたそういった観点から西田さん何かございましたらお願いいたします。

西田 特に現在重要と考えるのは、従前の河川を魚類が自由に上下流を移動している場合の対応です。その場合、隘路としては2点考えられます。第1点は、貯水池と下流河道の連絡です。これにつきましては私ども現在魚道の研究を進めていまして、だいたい20~30mぐらいの高さのダムまでは階段式の魚道で対応できるのではないかと考えています。

現在施工中の北海道のダムでは、貯水池の水位変動に追従可能な階段式の魚道の設置を進めています。ただそれよりも高い場合につきましては階段式はなかなか難しく、そのような高いダムにはフィッシュロック式の魚道が適当ではないかと考えています。土木研究所ではシャフト式と呼んでいます。ダム堤体内に設置する魚道について研究しています。

第2点は、貯水池上流河道の整備です。アユ、ヤマメといった魚の産卵は上流河道に遡上して行われますので、ダム湖においてもアユ、ヤマメ、イワナなどの自然再生を可能とするには、上流河

川に適切な産卵場所とそこへ至る通路の確保が必要になります。一般的にダムの上流端、特に従来の流入河川についてはゴミや細かな土粒子の堆積などが見られますが、魚類の生息環境とこの様な現象との関係はどうか、また、生息環境を改善するにはどうすればよいかということがあります。これはこれからの課題と考えています。

最後になりましたけれども、こういった自然環境を保全し、また創出していくうえではしっかりとした計画が重要ではないかと思っています。

石田 魚道のお話が出ましたけどもそこでお願いなのですが、ダムの影響を考えた場合にはぜひ下り用の魚道を考えていただきたいものです。たしかに上がる魚道はかなりありますけれども、上ったきりでは例えば、ダムより上で産卵しますと十分な資源補充が期待できませんので、何か下るようなことができるものをぜひ開発していただきたいと思っています。

宮中ダムで降下の実験をしましたら、思っていたよりも下らず非常に困ったのですが、何か効果的な方式を考えていただきたいものです。

司会 それにつきましては、今後も研究していきたいと思っています。続いて丹羽さんの方からご意見をうかがいたいと思います。

丹羽 第一に今後のダムといたしまして、ダム事業の目的のなかに環境創造を正式に位置づけることがあると思います。これは先日出された豊かな環境づくり委員会からの提言にも述べられている建設事業における環境内部目的化を目指す一つになると思います。既に米国ではダム建設において野生生物保護やレクリエーションの場の提供を事業の目的に正式に位置づけて連邦政府の仕事としてやっています。

次にダムごとに環境の位置づけを行うということで、先ほど自然環境保全型、レクリエーション型と申しましたけれども、ダムによってはそのダムの地域のなかでその両方を求められています。特に地元のほうからはその両方をやってくれといわれるところもあると思います。また、別のダムによっては、ここは山奥だから人は近づけない、



例えば利根川の八木沢ダムはダムサイトまではいけますが、その奥は行く道がありません。ほんとうの山奥のダムで自然環境を守る必要があるところは周辺道路をつくらないといった必要があるだろうと思います。そうすることによって貴重な自然、もともとそこにあるもの、あるいは何らかの移植したものを守るということも大切だと考えます。一方、レクリエーション型のダムの場合でも、このダムのどの地域においてレクリエーション型にするのかという位置づけをきっちりしておく必要があります。

いずれの形で整備していくにしても、今のところ具体的整備手法はマニュアル化されておらず、これからのマニュアル作りの取り組みが必要だと思います。例えば、付け替え道路一つにしても湖岸を鉢巻き状に覆うことは環境保全上よくないと思います。最低限、例えば片側だけにしておくとか、湖岸にずっと道路があるというようなことはしないで、レクリエーションの必要なところにだけ湖岸にアクセスできるといった手法もあるのではないか。

次に、周辺地域との一体的な整備です。これは自然環境だけではなくて、水質保全とかいろいろな面で大切ですので、これも建設省としてさらにそれを進める制度、体制づくりも検討する必要があると思います。

最後に情報提供、PR についてです。これは単に自然保護だけではないのですが、特にレクリエーション型のダムを造りますと、そこに人がたくさん集まってきます。そうするとそこにダム並びに河川に関するいろいろな知識、それは事業の目的ということもあるでしょうし、その流域のなかで水がどんなふうに使われて、どんなふうに流れていくかという情報も提供する。あるいはダム地域の文化、野生生物に関する情報を提供するといった情報提供の場をしっかり作っていただけたらと思います。これにつきましても最近のダムでけっこう資料館をつくってきてはおられますけれども、見ておりますとまだまだその中身の充実を図る必要があると思っています。こういうことは

ダムの自然環境を創造するというダムの価値が高くなればなるほどそういうった情報提供も必要性が高くなると思います。

司会 どうもありがとうございます。続きまして今後の課題ということで下村さんお願いいたします。

下村 今後の課題として先ほども出ていましたが、適性の保全と利用ということだと思います。これは社会条件、あるいは自然条件などがダムごとでそういう位置づけが変わってくるわけですから、例えば一つのダムを取っても、一つのダムのなかでの保全、あるいは利用のすみ分けを考えていく必要があります。あるいはダムごとのすみ分けも必要ではないか。それは条件などによって特性を持っているわけですから、それに合ったような仕方をしていく必要があります。

もう一つは環境の管理計画を検討することだと思います。まずダムの環境をどういうふうに持っていくかという基本理念、基本原則を立てる必要があるのではないかと。これは広域的、あるいは長期的な見方によってダムの計画段階から設計、施工、管理に至るまでの考え方をつくる必要があります。

3 点目は景観のデザインです。これはダム本体を中心にしてデザインの検討が行われてきていますが、本体も含めて貯水池全体の、特に水辺周辺の景観、それから付け替え道路を含めたダム工事にかかるデザインも、環境の一つのテーマとして今後改善していく必要があるのではないのでしょうか。

もう一つはそれぞれいろいろな課題があるわけ



ですけれども、対策技術の検討です。裸地対策とか法面緑化などの対策をはじめ、いろいろ難しい課題があります。そのへんの研究を今後重ねていく必要があるのではないかと思います。

司会 ダムというとすぐ自然破壊だと単絡する人が非常に多いわけですが、少し異なった見方をしてみたいと思います。いま地球環境が叫ばれておりますが、地球環境というときにはCO₂の問題があります。ある試算によれば、例えば、ダムを造る目的の一つには、水力発電もあるわけですが、水力発電の規模を1万kWぐらいのものを造りますと、それに代わるものを石油火力としますと、年間だいたい1,000万t、ドラム缶約5万本の石油を代わりに消費せざるを得ないということです。

石油を燃やしますと、CO₂が発生しますが、このCO₂を森林に固定させるとすると、例えば、天ヶ瀬ダムの場合は、約188haのダム湖面積があるわけですが、水力発電をのせることによって約50倍の森林面積に相当しているのではないという試算もございます。一方、利水を見

ましても、例えば海水を淡水化すればダムを造らなくてもいいではないかという議論もありますけれども、海水を淡水化すると非常にエネルギーを使いまして、毎秒1m³の水を淡水化しますと試算によれば約1,700万tの石油に相当し、それを燃やさないで毎秒1m³の水ができないということになります。こういう点でもダムというのはたしかに自然環境に影響を与えますけれども、もう少し大きな地球環境という面から見ると非常に地球にはやさしい事業ではないかと思います。

いずれにしても我々が管理しているダムは現在、約350ぐらいありますし、現在実施中のダムが330ぐらいありますので、環境についてもいろいろな施策を組み合わせましてよりよいダムを造っていきたいと考えています。

本日はいろいろと貴重なご意見をうかがってきたわけですが、こういった意見を十分踏まえまして、今後のダム造りを考えていきたいと思っております。

どうも本日は長時間にわたり熱心な討論をありがとうございました。

地球温暖化が水資源に及ぼす影響について（Ⅱ）

—水資源とその利用率の地域差を考慮—

建設省土木研究所環境部環境計画研究室 丹 羽 薫*
 “ “ ダム部水工水資源研究室 廣 瀬 昌 由**
 “ “ 環境部環境計画研究室 天 野 裕 史***

1. ま え が き

地球温暖化が水資源に及ぼす影響については、降水量の増減率と気温上昇量のシナリオを想定し、その条件下で流出計算を行いその流況を現況と相対的に比較している研究が多い¹⁾。筆者らも同様のアプローチを行い、主にダムによる水資源開発を念頭に分析を行ってきた²⁾。特に、降雨特性の大きく異なる地域を対象にその降雨特性の違いが与える影響について比較検討を行い、降雨特性の異なる地域によって温暖化の影響が異なるであろう結論を得ている。

一方で、日本では水資源利用率が地域によって大きく異なるため、地球温暖化の進行に伴い水資源が受ける影響を評価する場合、その地域が現在どのような水資源の開発レベルであるかによって、その影響が大きく異なることが予想される。そこで本報文では、それぞれの地域の代表的な流域について、現在の水資源の状況および水利用の状況を整理し、気温上昇時の影響について分析を行った。さらにモデルダムを対象に現在通常 10 ケ年に 1 回の渇水を対象にたてている利水計画の安全度を高めた場合、温暖化の影響はどのように予想されるかについて検討を行った。

2. 水資源利用率の地域差を考慮した場合の温暖化の影響

(1) 現在の水資源状況

わが国の水資源の状況をみた時、地域によって降水量が大きく異なるだけでなく、水利用も大きく異なる。地球温暖化が進行した場合に水資源が受ける影響を適切に評価するには、まず水資源の現状を把握する必要がある。表-1 に、全国の主要な水系で求めた流域平均年降水高とその流域からの平均年流出高、それらの差として求めた平均年損失高、さらに実績の取水量から求めた年取水高と、それが年流出高に占める割合を利用率として示す。わが国の水資源開発は 1/10 の渇水に対

表-1 地域別水資源賦存状況

水系名	年降水高 (mm)	年流出高 (mm)	年損失高 (mm)	年取水高 (mm)	水資源 利用率 (%)
北上川	1,607 (1,420)	1,296 (1,030)	311 (390)	158	12 (15)
利根川	1,251 (894)	781 (501)	470 (392)	333	43 (66)
木曽川	2,551 (1,955)	1,935 (1,306)	616 (649)	437	23 (33)
淀川	1,820 (1,442)	1,303 (901)	517 (541)	659	51 (73)
太田川	2,087 (1,621)	1,654 (1,078)	433 (543)	261	16 (24)
吉野川	2,510 (1,967)	2,254 (1,608)	257 (359)	477	21 (30)
筑後川	2,200 (1,332)	1,670 (714)	530 (618)	384	23 (54)

注：() 内は 10 年第 1 位程度の渇水年の表示とした。

・ 室長
 ・ 研究員
 ・ 部外研究員

しても水供給が行えるように、計画を策定しているので、表-1には流出高で評価した1/10の渇水時の降水量なども併記している。図-1にはこれらを模式的に示し、さらに取水量については用途

別に内訳を示した。流出高の算出については、なるべく流域全体からの流出を把握できる地点とし、その上流で取水がありその取水した水が、その地点を通過せずに流下することができるだけな

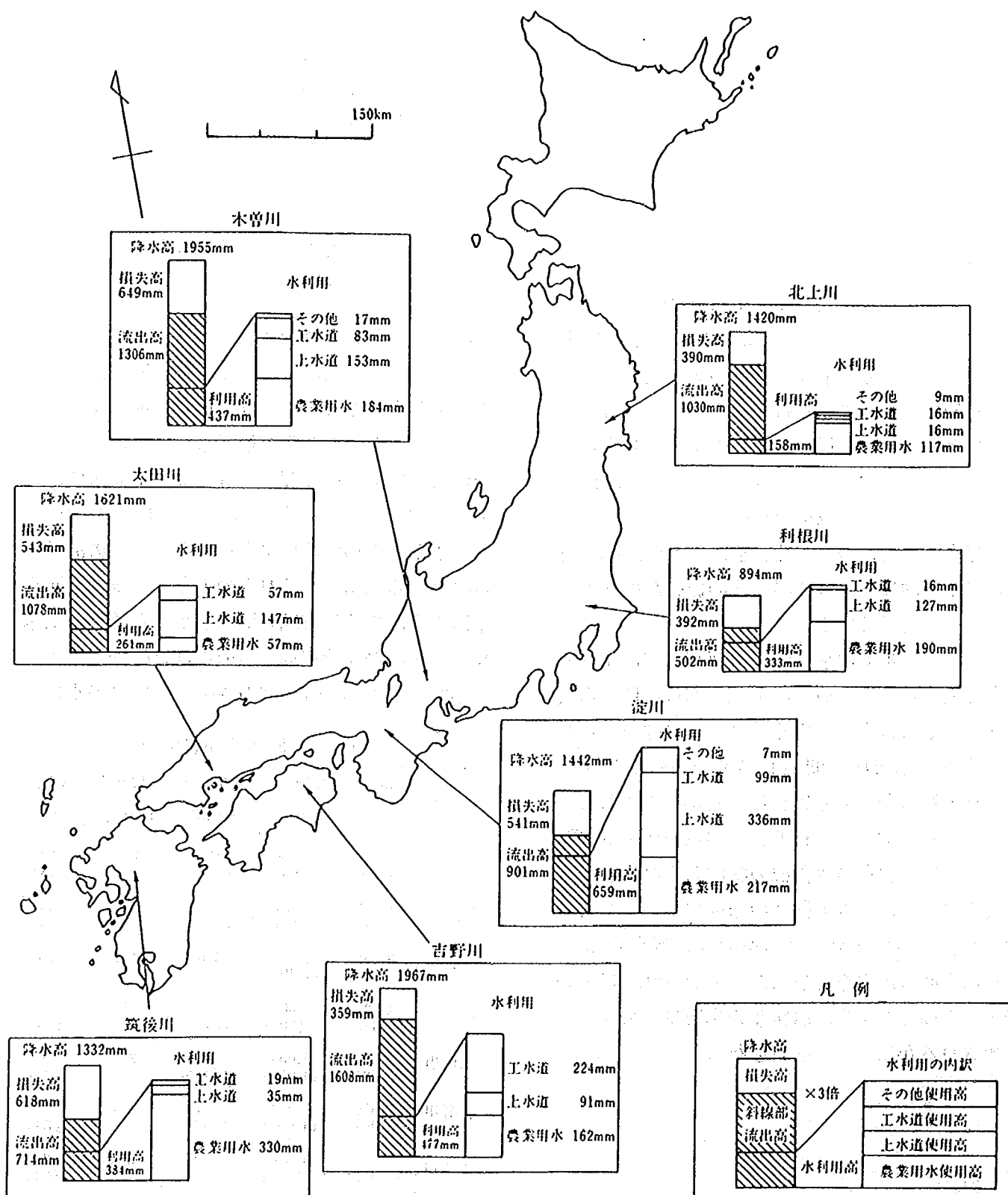


図-1 地域別水資源賦存量状況

い地点とした。また上流にダムなどがある場合は、日々の流況はダムによる流水調節の影響を受けるが、年間で評価した場合には、その影響は大きくないとした。年取水高については、実績取水高が報告されているものについてはその値を、最大値で整理されているものについては、当該流域、当該利水目的ごとの実績値/最大値で補正して集計した。以下の検討では、損失高を流域からの蒸発散量として取り扱うが、表-1 をみると一般にいわれている値¹⁾より、特に四国で蒸発散量が少ない結果となっており、その原因としては雨を精度よく観測できていないことなどが考えられる。また本検討では、年流出に対して雪の影響が大きいと思われる地域は現在のところ雪の補足が十分でないために解析対象に含めていない。流出高を算出した地点上流の流域平均降水量は、その流域の雨量観測所のデータからの単純算術平均法もしくはディーセン法で求めた。

(2) 気温が3℃上昇した時の影響

それぞれの流域について、Hamon 式により月平均気温から年間の可能蒸発散量を求め、2.1 で算出した年蒸発散量 (=年損失量) に補正するための補正係数を求めた。この Hamon 式と補正係数を用いて、気温が1~3℃上昇した場合の蒸発散量を算出した。この結果、水資源賦存量の変化は図-2 のようになる。この時、水需要が変化しないとすると水資源利用率 (対渇水年) は図-

3 のように変化する。一般的に水資源の利用率が変化する場合は、水の需要量が変わることを意味するが、本検討では、水需要は変化せずに、水資源賦存量が変化し、結果的に利用率が変化する

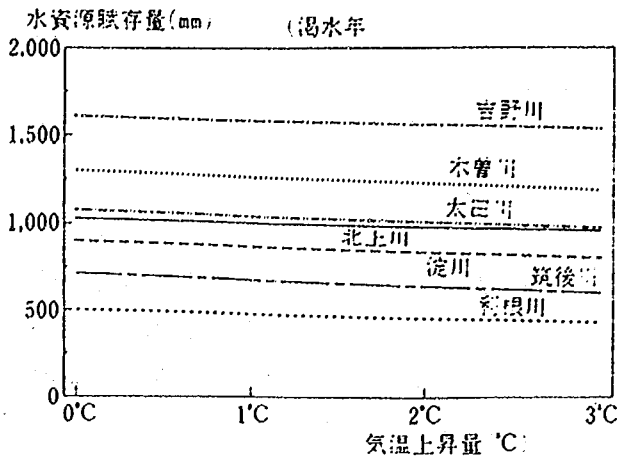


図-2 気温上昇時の水資源賦存量の変化

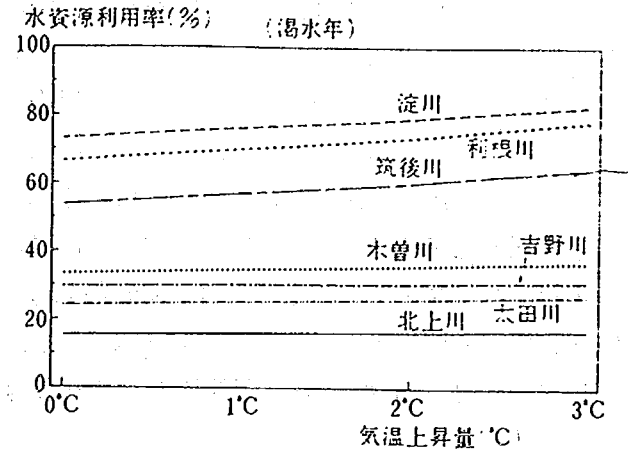


図-3 気温上昇時の水資源利用率の変化

表-2 ダムによる水資源開発状況

水系名	現在竣工ダムの全利水容量 10 ³ m ³	近年竣工および建設・計画中のダム*			
		上・工水容量 10 ³ m ³	上・工水開発水量 m ³ /日 (m ³ /s)	上・工水 1 m ³ /s 開発 する必要容量 10 ³ m ³	対象ダム数
北上川	267,140	13,527	146,900 (1.7)	7,956	5
利根川	596,606	173,000	1,461,040 (16.9)	10,231	4
木曾川	287,181	36,400	446,700 (5.2)	7,040	2
淀川**	90,492	50,100	1,106,860 (12.8)	3,911	6
太田川	1,564	23,550	464,000 (5.4)	4,385	2
吉野川	211,210	103,900	2,022,620 (23.4)	4,438	2
筑後川	70,096	2,430	72,662 (0.8)	2,389	2

* : 建設省の資料より上・工水専用の容量を持つダムについてまとめた。

** : 淀川については、琵琶湖総合開発事業が行われたが、ここでは含めていない。

ことになる。

表-2 に、各水系ごとの全利水容量⁵⁾と建設省所管の近年竣工したダムおよび現在建設・計画中でここ 10 年くらいで完成予定のダムのうち新規の上・工水の開発を行っているダムの上・工水容量とその開発水量を示す。この表をみると、例えば利根川では全利水容量が 59,660 万 m^3 (1992 年現在) で、表-1 に示す年間取水高 333 mm をまかなっており、近年では新規に上・工水を 1 m^3/s 開発するのに約 1,023 万 m^3 (現在建設計画中で 10 年程後で完成予定のダムを含む) の容量が必要となっている。一般に水資源の利用率が高まるにつれて新たに水を 1 m^3/s 開発するのに必要な容量 (新規 1 m^3/s 開発容量) は、増加 (ダムによる水資源の開発効率が低下) するといわれている⁶⁾。図-4 に、あるモデルダム流域において下流の基準点で確保すべき流量を順次増加させていった場合に 1/10 の利水安全度を確保するのに必要なダム容量の変化を示すが、利用率が増加するにつれて新規 1 m^3/s 開発容量が増加しており、水利用率が高まるにつれダムによる開発効率が悪くなることを示している。図-5 には、経年的にコンスタントに上・工水の開発が進んでいる利根川と淀川上・工水の新規開発水量の合計値とダムの上・工水容量の合計値の変遷を示す

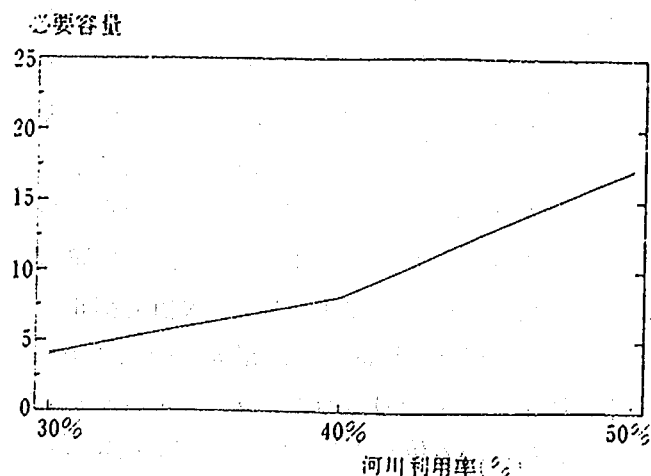


図-4 河川利用率と必要容量の関係

(上・工水のみを対象としたのは、期別の変動が少ないためである)。水資源の開発レベルが高まるにつれて、特に近年では新規 1 m^3/s 開発容量が大きくなっていることがわかる。本報文においては、現状からの影響を分析するので、表-2 に示したように、近年竣工したダムおよび間もなく竣工する予定のダムの開発水量と必要容量の関係をを用いる。表-1 と表-2 をみると、地域間の比較では必ずしも利用率の高い水系で、新規 1 m^3/s 開発容量が大きいとは限らない。これは各水系で対象としているダムの数や、水系によっては近年竣工あるいは完成予定のダムの計画が比較的古くに行われたものであるなどの影響もあると思われる

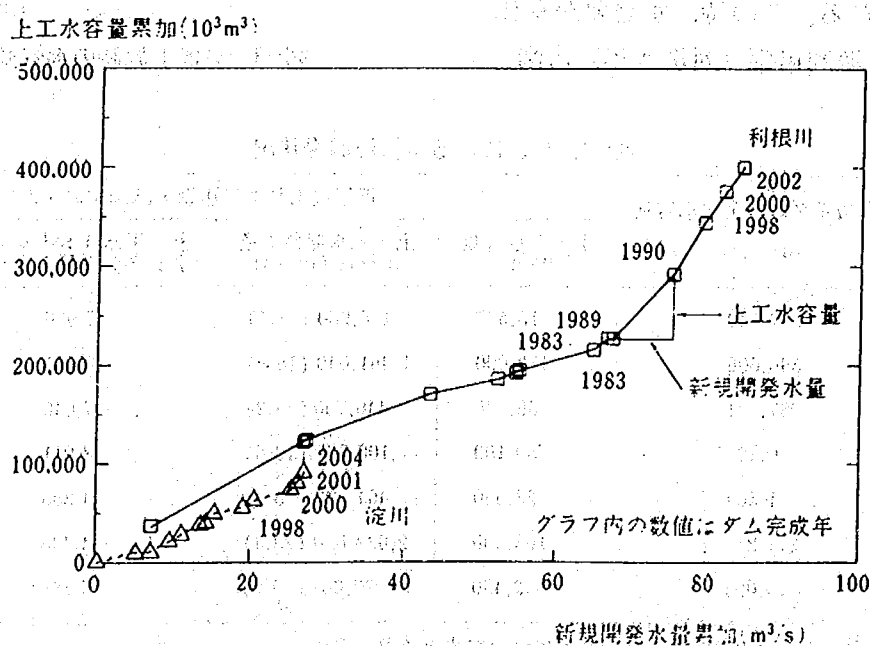


図-5 ダムによる上工水の新規開発水量と容量

るが、例えば淀川水系では、琵琶湖がある淀川の流出特性を反映しているともいえる。つまり、表-2に示す新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量は地域による水資源利用率の違いと流況の違いを総合的に表していると考えることができる。よってこの関係を用いて、温暖化によって流況が変化した場合に同じ取水量を確保するのに必要な容量の変化を概略検討する。すでに述べた蒸発散の計算方法に従い、温暖化することで蒸発散量が増加（降水量は変化しないと仮定）し、水資源賦存量が減少すると、結果的に水資源利用率が増加することになる。そこでここでは簡単のために、水資源賦存量は変化せず水需要が増加して、結果的に水資源利用率が同じになる状態を温暖化が進行して水資源賦存量が減少した状態と等価であるとする。両者の違いについては、別途検討を要する。この仮定に基づいて、気温上昇による水資源の目減り分を、水資源利用率を介して、新規開発水量に置き代えたのが図-6である。蒸発散量が大きく現在の開発水量が多い、利根川、淀川水系で換算新規開発水量が大きいことが分かる。これを利用して、表-2より温暖化した時の必要容量の増加分を算出したのが図-7(a)で、流域面積の大きく、水利用の進んでいる利根川と淀川で必要容量の増加分が大きくなることがわかる。また、対現状比として利水容量の増加率を示したのが図-7(b)である。例えば、気温が 3°C 上昇した場合には、利根川で現在と同じ水需要を確保するためには、現在容量

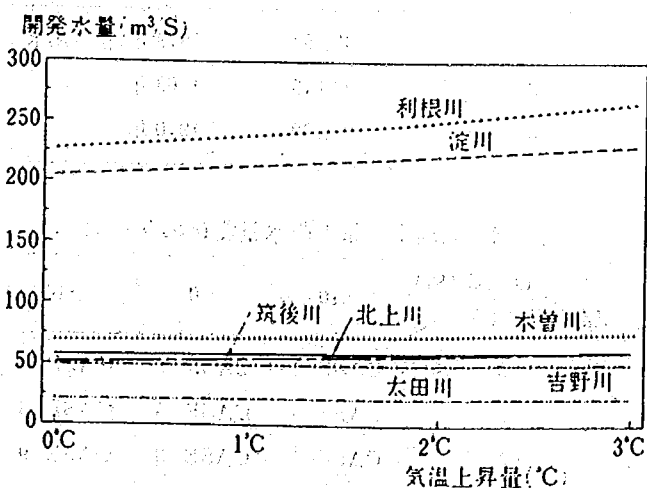


図-6 気温上昇量と換算新規開発水量

の約1.68倍、淀川で同2.14倍、筑後川では同1.41倍、太田川では同1.79倍の容量が必要になってくる。必要容量の増加分を示す図-7(a)で影響の大きい利根川、淀川に加え、太田川、筑後川で増加率が大きくなっている。これは、太田川、筑後川水系では、現状の取水量を比較的少ない利水容量で確保しているの、対現状比でみた時影響が大きくなるためである。同じ安全度を確保するために必要な容量という観点では、(a)図で評価できるが、対現状として流域に与えるインパクトを評価するには、(b)図のような評価も必要であると思われる。

以上のように気温上昇の影響を概略計算したが、地球温暖化が進行した場合に水資源に及ぼす影響を評価するには、現在のその地域の水資源の開発レベルを考慮しなければならない。ここで

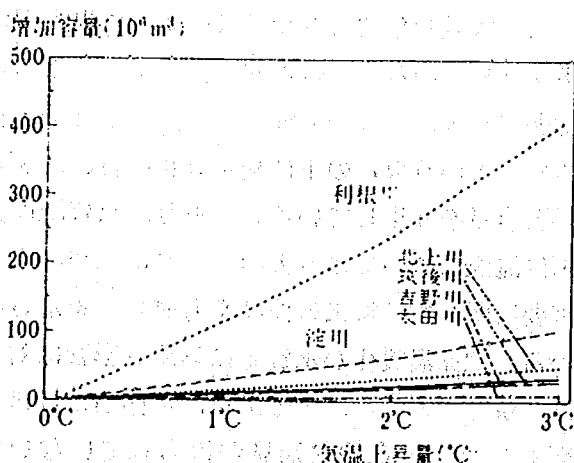


図-7 (a) 気温上昇量と増加容量

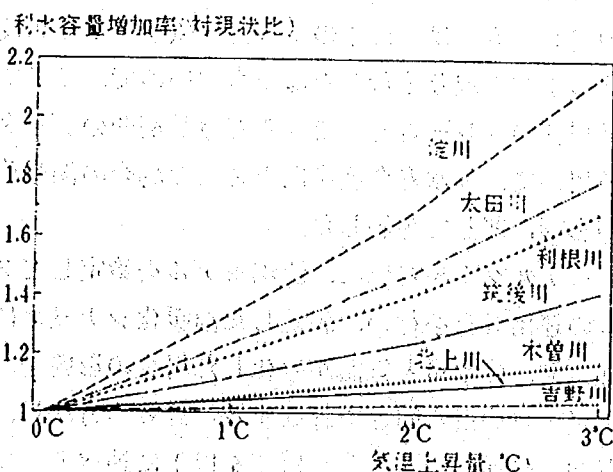


図-7 (b) 気温上昇量と容量増加率

は、近年の新規開発水量と必要容量の関係をを用いて必要容量を算出したが、温暖化が進行し、水資源賦存量が減少した場合、それに対応するための容量の増加は、さらに大きいものとなることが予想される。ここまで、非常に概略的に検討を行ったが、既に報告している通り²⁾、地球温暖化が水資源に及ぼす影響を評価するには、温暖化が進行した時に、水資源賦存量がどのように変化するかを把握することが非常に重要であることは間違いないが、水系によって流出特性と水資源の利用率が異なるので、それらの影響についても評価した上で議論する必要があることがわかった。

3. 利水安全度を向上した場合の温暖化の影響

現在、建設省では基本的には、利水安全度 1/10 で水資源開発施設の整備を行っているが、一方で計画規模 (1/10 安全度) を超える渇水に対しても、壊滅的な被害を受けないように異常渇水対策を進めている¹⁾。基本的には、ダムによる水資源開発計画は過去の流況と同じ流況が今後も再現されるという仮定の下に利水計算を行い、ダムの必要容量を算出している。つまり、水資源開発計画は流況については過去のデータに基づいて、水需要に関しては将来の伸びを考慮して策定されている。地球温暖化が水資源に与える影響に対しては、現在のところ、その進行、水循環に及ぼす影響も含めて確定的な知見が得られていない以上、明確な対応策を計画、実施することは、現段階では難しいと思われる。現在の水資源開発計画のフレームでは、将来の不確定な気象・水象の変化の予測を取り込むことはできないので、ここでは現在のフレームで、できるだけ長期間のデータを用いて、利水安全度を向上させた場合の温暖化の影響に関して評価した。

モデルダムを対象に、流出モデルを策定してダムの運用計算を行い、想定した温暖化シナリオに従って、降水量と気温が変化した場合の影響を、不足%日や渇水回数で評価する。計算の方法は、既報²⁾の通りであるが、概略を以下に述べる。まず、対象とするモデルダム、A ダムは、九州地方

北部に位置し、1963～1992 年の 30 年間の年平均降水量が 2,435 mm、同年平均流出高が 2,069 mm である。下流基準点に対して、その地点で確保すべき流量が不足する場合に、ダムから放流を行い補給する。本報ではこの下流基準地点を、その上流域がダム流域の 6 倍 (ダム流域も含む) を持つ地点とし、残流域からの流出量は、ダム地点流量から流域面積比換算で求めた。また、その確保すべき流量は、かんがい期：非かんがい期=2：1 で、平均の流出量に対して、水資源利用率が 40% となるように算出した。この利用率は、表-1 の平年値を考慮すると若干大きいが、今後の水需要の伸びも考慮しやや大きめの値とした。

以上の条件で、1963～1992 年の流況に対してダムの運用計算を行い、このダムでの基準点補給のために必要なダム容量を大きい順位に 3 位まで表-3 に示す。現在、確保すべき利水安全度は、1/10 (=3/30) であり、表-3 より 30 年第 3 位の必要容量 $20,200 \times 10^3 \text{ m}^3$ を、概ね現在確保すべき 1/10 利水安全度を満たすために必要利水容量とみなすことができる。

こうして算出したダム容量に対して、表-4 に示す温暖化シナリオに基づいて分析を行った。降水量に関しては現在の降水パターンは変化せずその量だけが変化し、気温上昇は蒸発散量に影響を

表-3 必要ダム容量

順位	必要容量 (10^3 m^3)	生起年
1	40,584	1978 年(福岡渇水)
2	24,613	1968 年
3	20,109	1970 年

表-4 気温上昇量と降水量変化のケース

気温上昇 (°C)	降水量 (%)		
	-10	±0	±10
±0	CASE 1	CASE 2	CASE 3
-1	CASE 4	CASE 5	CASE 6
-2	CASE 7	CASE 8	CASE 9
-3	CASE 10	CASE 11	CASE 12

与えるとする。その結果、この地域で戦後最大の
 渇水（福岡渇水 8,160 不足%・日）が起こった昭
 和 53 年で、現状 (CASE 2) でも約 7,420 不足%
 ・日の渇水が生じている。表-4 に示したそれぞ
 れの温暖化シナリオの基での違いを比較すると、
 温暖化の影響により気温上昇が生じれば、いずれ
 も不足%・日が増加し渇水は深刻なものとなる。
 降雨が変化無く気温が 3℃上昇する (CASE 11)
 と、既往最大渇水 7,420 不足%・日 (CASE 2)
 はほぼ倍の 15,487 不足%・日となる (図-8)。
 そこで、利水安全度を約 1/30 まで上昇させ、利
 水容量として $40,600 \times 10^3 \text{ m}^3$ を確保した場合に
 ついて、同様のシナリオに基づいて評価した。図
 -9 に各温暖化シナリオに基づく計算結果を図-8
 と同様に示す。また図-10 には、30 年間の渇水
 の生起回数を示す。降水量が 10%減少し、気温

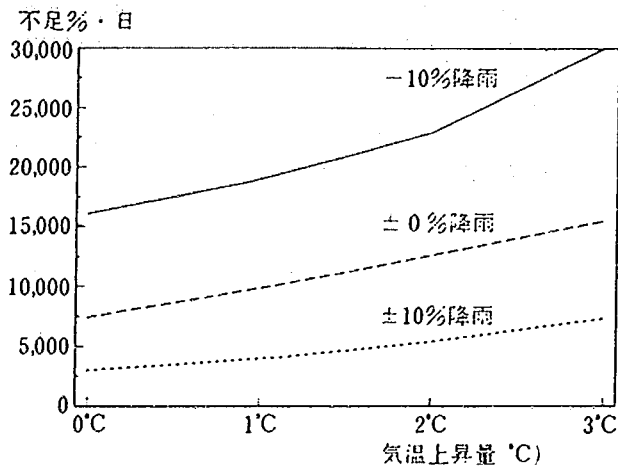


図-8 気温上昇量と不足%・日 (利水安全度 1/10)

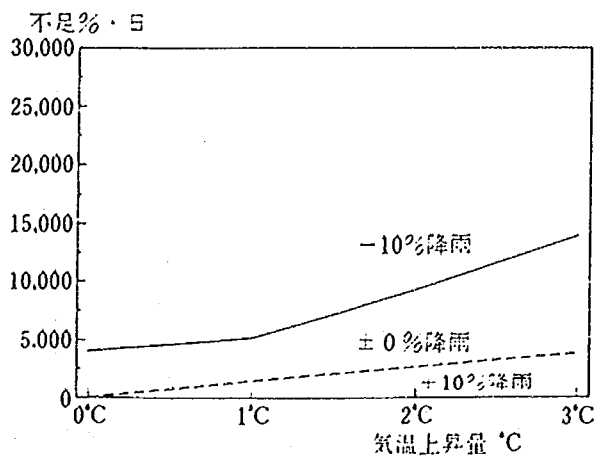


図-9 気温上昇量と不足%・日 (利水安全度 1/30)

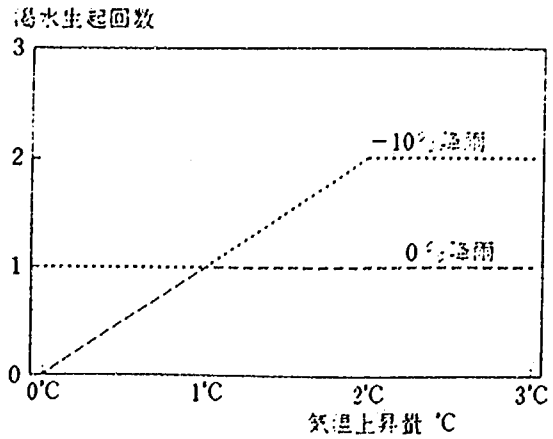


図-10 気温上昇量と渇水生起回数の関係

が 3℃上昇した場合 (CASE 12) は、対象とした
 30 年間で渇水が 2 回生起し、その不足%・日は、
 13,857 に達している。気温が 3℃上昇して、降水
 量に変化しなかった場合 (CASE 11) は、渇水の
 生起回数は 1 回、不足%・日は 3,825 で抑えられ
 ている。つまり、渇水の生起回数だけで評価する
 と、気温が 3℃上昇し、降水量が 10%減少する厳
 しい状態になっても、30 年に 2 回ということ
 で、現在の利水安全度は満たされていることになる。
 しかしながら、一般的にいわれている許容で
 きる最大規模の渇水の不足 %・日、2,000%・
 日⁸⁾ よりはるかに多い。

現在、建設省が鋭意進めている異常渇水対策の
 一貫としての渇水対策容量の計算手法に沿い本報
 文では分析を行ったが、対象とした 30 年間の水
 文データに関して、この流域では約 1/30 利水安
 全度を確保することで、頻度的には現状レベルの
 安全度を確保することができた。これは、もちろ
 ん表-3 に示す様に、本流域では渇水に対するた
 めに必要な 30 年 1 位の利水容量が、同 2, 3 位に
 比べて大きいことが大きな要因であると思われ
 る。従って、他の流域においても、1/30 の利水
 安全度を確保すれば同じ効果が得られるかについ
 ては検討を要す。また、本報文の計算フレームで
 は、蒸発散量が気温のみに支配されているため、
 また、あくまで過去 30 年間のデータをベースに
 温暖化シナリオを用いて解析しているので、不足
 %・日の増加量には、気温上昇量が支配的になっ
 ている。

4. おわりに

本報文では、日本の代表的な水系で、それぞれの水資源賦存量、利用率を分析し、水資源への地球温暖化進行の影響を現状の利用率と流域の流況の特性を総合的に評価していると考えられる新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量を用いて、現在と同一安全度を確保するのに必要な容量として評価した。その結果、 3°C 気温が上昇した場合、水系によっては現状に比べて2倍以上の容量が必要であるという試算が得られた。しかし、現状の水資源開発計画のフレームを考えると、温暖化のみの対策を講じることは、現段階で難しい。そこで、現在の渇水対策をすすめ、利水安全度を向上させた場合に関して、温暖化の影響を評価した。非常に簡単なシナリオでしか評価できないが、対象としたモデル流域では利水安全度を $1/30$ まで高めると、水資源からみて温暖化の影響が想定される最大限の厳しいものであっても、頻度の面からは現在の $1/10$ 安全度を確保できることが分かった。

今後は、現在研究されつつある温暖化の気候への影響のより詳しい予測を考慮して温暖化シナリ

オを作成し、より確かな水資源への影響を評価するとともに、その対策として従来の渇水対策をより進めるために、具体的な目標を温暖化の影響も考慮した場合にはどの程度にすれば適当かについて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、宝壽、小尻利治、牧宏幸、TAN BOON LAY：温暖化による流域水文応答変化に関する検討、水文・水資源学会 1991 年研究発表会要旨集、pp.138-141, 1991
- 2) 丹羽燕、廣瀬昌由、宮井貴大：地球温暖化が進行した場合に水資源に及ぼす影響の地域比較、ダム工学 No.9, pp.9-17, 1993
- 3) 建設省土木研究所：利水計画における流況把握の研究、第 23 回建設省技術研究発表会、1969
- 4) 近藤純正、中園信、渡辺力、桑形恒男：日本の水文気象 (3)、水文・水資源学会誌 Vol.5, No.4, 1992
- 5) (財) 日本ダム協会：ダム年鑑 1992
- 6) 中沢式仁、今村瑞穂、石崎勝義、中村昭：渇水時の水管理に関する計画学的研究、土木研究所資料第 1508 号、1979
- 7) 森北佳昭、児玉好史：異常渇水対策の必要性和その推進について、第 4 回水資源に関するシンポジウム前刷集、pp.251-256
- 8) 池淵周一（研究代表者）：水資源システムにおける安全度概念の定式・定量化と計画論への応用に関する総合的研究、京都大学防災研究所、1988

ダム建設現場における濁水処理 スラッジの有効利用(1)

建設省土木研究所 竹林 征三*

” 丹羽 薫**

(財)国土開発技術研究所センター 梶原 日出隆***

” 中村 健一****

” 楠見 正之****

1. はじめに

ダム建設工事にともない発生する濁水は、現場内に設置される濁水処理施設で処理され、水質基準を満足する上澄み水が河川に放流される。濁水処理プラントで処理される濁水には、ダム本体周辺での諸作業に伴うダムサイト濁水と骨材製造に伴う骨材プラント濁水があるが、その発生量は一般的に骨材プラント濁水が多い。濁水処理プラントでの処理過程で、濁水中に含まれる微細粒子は沈降分離槽の底に凝集沈澱し、高濃度の懸濁液となる。この高濃度の懸濁液はスラッジと呼ばれ、泥水ポンプなどで沈降分離槽の底から引き抜かれ、貯留池にそのまま排出される場合と加圧脱水機で脱水され脱水ケーキとして排出される場合とがある。前者の場合は、貯留池に堆積したスラッジは最終的に表層を被覆あるいは固化処理され、後者の場合は所定の土捨て場で埋立処分にされるのが一般的である。

資源のリサイクルの重要性がさげられる昨今、他分野においては下水処理場における汚泥を原料としたレンガ製造、コンポスト化など、副産物、廃棄物の資源再利用技術の研究が積極的におこなわれており、ダム現場における濁水処理スラッジ

の処分方法を見直し、資源としての再利用の検討が必要と考えられる。本報文は、ダム建設工事で発生する濁水処理スラッジの内、特に骨材プラント濁水から排出される濁水処理スラッジに着目し、その資源化について可能性の検討を進めるものである。ここでは、これまでの検討成果の中間報告を本号と次号の2回に分けて行う。

2. 濁水処理の現状

(1) 濁水処理の実態

ダム現場における濁水処理スラッジの排出状況を「改訂版ダム建設工事における濁水処理¹⁾」の実態調査結果を参考に、下記に示す。

(i) 濁水の発生源

ダム建設工事により発生する濁水は、骨材製造プラントの洗浄水に起因する骨材プラント濁水とダムサイトのコンクリート工事などの諸作業にともなうダムサイト濁水およびその他の雨水、湧水、付帯工事に伴う濁水がある。濁水の発生量は、骨材プラント濁水 470 m³/h (36 件の平均値)、ダムサイト濁水 124 m³/h (19 件の平均値)であり、骨材プラント濁水が多い。

(ii) 濁水処理方式

過半数のダムにおいて、濁水に凝集剤を添加し沈降槽(シックナ)で浮遊物を沈澱させる、機械処理方式とよばれる形式が採用されている。

* ダム部長

** 環境部環境計画研究室長

*** 調査一部次長

**** ” 参事

(iii) 濁水処理の基本的な処理系統

機械処理方式のうち 70.6 % がシックナと脱水機の組合せ, 17.6 % がシックナと沈澱池を組み合わせる方式が採用されている。よって, 現状においてスラッジは脱水ケーキとして排出されるケースが多いといえる。

(iv) 凝集剤

ダム現場においては, 無機凝集剤 (PAC: ポリ塩化アルミニウム) と高分子凝集剤 (アニオン性) が併用されるケースが多い。使用濃度は, PAC が 10~150 ppm, 高分子凝集剤が 0.3~10 ppm 程度である。両者とも通常の使用範囲において, 人体などへの毒性は問題ないとされている。

(v) スラッジ, 脱水ケーキの最終処分

沈澱池のスラッジをそのまま放置あるいは沈澱池のスラッジを表面処理して放置する場合が 24 %, 沈澱池から土捨場へ運搬処分する場合が 12 %, シックナに沈澱したスラッジを脱水処理し脱水ケーキとして土捨場に埋立処分する場合が 63 % であり, 脱水ケーキとして土捨場で埋立処分されるケースが最も多い。

(vi) 脱水ケーキ含水率

脱水ケーキの含水率は 42 ダムの平均で 32.3 % である。

(vii) 濁水スラッジの発生量

スラッジの発生量はダムサイト, 原石山の性状等により異なるが, コンクリートダムにおいては, 量的に骨材製造に伴うスラッジが支配的である。骨材製造に伴うスラッジの発生量 (平均ダスト率) は, 骨材原石の岩質, 採取方法などにより異なるが, 原石山から採取される場合では原石投入量の 11.0~14.3 %, 河床砂礫の場合では平均 6.1 % 程度となっている。

(2) 濁水処理スラッジの法的取扱い

建設工事の濁水処理により生じた濁水処理スラッジは, 一般に無機性の汚泥であり, 廃棄物の処理および清掃に関する法律における産業廃棄物に該当し, 収集, 運搬, 処分は同法律に従わなければならない。しかしながら, 同法律の運用に関

しては各都道府県にまかされているため, 現場によっては, 濁水処理スラッジを工事現場で脱水処理し含水比を下げるにより, 産業廃棄物としないで一般土砂として扱う場合もある。よって, その処理に関しては各都道府県に確認する必要がある²⁾。

一般的に, 「建設廃棄物処理ガイドライン (厚生省)³⁾」において, 土砂として扱うことができる限界の土の物理特性としてコーン指数 $q_c=2 \text{ kg/cm}^2$ 以上 (一軸圧縮強度 $q_u=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 以上) という目安が示されている。

3. 濁水処理スラッジの基本特性

濁水処理スラッジの基本特性を把握するために, 施工中の 4 ダムから採取したスラッジを試料として成分特性, 物理特性, 焼成特性を分析した結果を以下に示す。なお, 分析に用いたスラッジはいずれも骨材製造プラントの濁水処理施設から採取したものである。骨材の岩種は, A ダムが粘板岩, 砂岩, B, C ダムが花崗岩, D ダムが火山礫凝灰岩である。

(1) 成分特性

ダム現場から採取した濁水処理スラッジの, X 線回折分析による鉱物の定性分析結果を表-1 に, けい酸質原料の化学分析方法による鉱物の定量分析結果を表-2 に示す。

表-1 より, ダム骨材の岩種による差はそれほどなく, 石英, 長石はいずれの試料にも認められる。また, 表-2 より, 酸性酸化物である SiO_2 , 中性酸化物である Al_2O_3 , Fe_2O_3 , アルカリ酸化物である Na_2O , K_2O , アルカリ土類金属酸化物である MgO , CaO で成分の約 99 % を占めて

表-1 濁水処理スラッジの鉱物定性分析結果

	鉱 物 種 別	骨材岩種
Aダム	石英, 斜長石, 正長石, 緑泥石, 雲母, カオリン, モンモリロナイト, 炭酸カルシウム	粘板岩, 砂岩
Bダム	石英, 斜長石, 正長石, 緑泥石, 雲母, カオリン, モンモリロナイト	花崗岩
Cダム	石英, 斜長石, 正長石, 緑泥石, 雲母, カオリン	花崗岩
Dダム	石英, 灰長石, 束沸石	火山礫凝灰岩

表-2 濁水処理スラッジ化学成分定量分析結果

単位 (%)

	強熱減量 ig. loss	二酸化 けい素 SiO ₂	酸 アルミニウム Al ₂ O ₃	酸 第二鉄 Fe ₂ O ₃	酸 カルシウム CaO	酸 マグネシウム MgO	酸 ナトリウム Na ₂ O	酸 カリウム K ₂ O	合 計
Aダム	4.1	68.0	14.6	4.1	1.3	1.4	2.3	3.7	99.5
Bダム	2.1	69.4	16.2	2.6	0.7	0.1	3.9	4.4	99.4
Cダム	1.8	67.5	17.6	2.7	0.4	0.2	4.8	4.9	99.9
Dダム	6.0	54.0	16.9	9.4	6.9	4.0	2.2	0.6	100.0

表-3 濁水処理スラッジ粒度分布分析結果

単位 (%)

	粘 土 分 D ≤ 5 μm	シルト分 5 μm < D ≤ 74 μm	細 砂 分 74 μm < D
Aダム	29.2	64.4	6.4
Bダム	12.1	67.8	20.1
Cダム	18.3	65.3	16.4
Dダム	36.5	56.0	7.5

いることがわかる。また、SiO₂とAl₂O₃で全体の70.9～85.6%を占めており、スラッジの主成分であるといえる。

pHは7.4～8.4の範囲であり、いずれもほぼ中性であった。

(2) 物理特性

(i) 粒度分布

表-3に濁水処理スラッジの粒度分布分析結果を示す。表より、いずれのダムのスラッジも土の粒度区分におけるシルト分に相当する部分が56.0～67.8%と最も多く、粘土分36.5～12.1%、細砂分20.1～7.5%となっている。これらの粒度構

成を土質分類に当てはめると、日本統一土質分類法におけるF：細粒土に相当する。

(ii) 比重、湿潤密度、含水比

比重は2.59～2.67となっており、骨材の比重と同程度である。また、湿潤密度、含水比は、脱水機の有無、形式により左右される項目であるが、脱水ケーキとして排出される場合で湿潤密度が1.837～1.955 t/m³、含水比が27.4～32.8%の範囲であった。

(iii) 粒子形状

図-1に骨材岩種が火山礫凝灰岩のダムにおける濁水処理スラッジの電子顕微鏡による拡大映像の一例を示す。図より、スラッジ粒子の形状は、角張った複雑な形をしていることがわかる。

(3) 焼成特性

窯業原料としての可能性を探るために、基礎的な焼成実験を行った。

焼成特性として、高温で焼いたときの色調、表面の焼結状態の観察、圧縮強度の測定を行った。

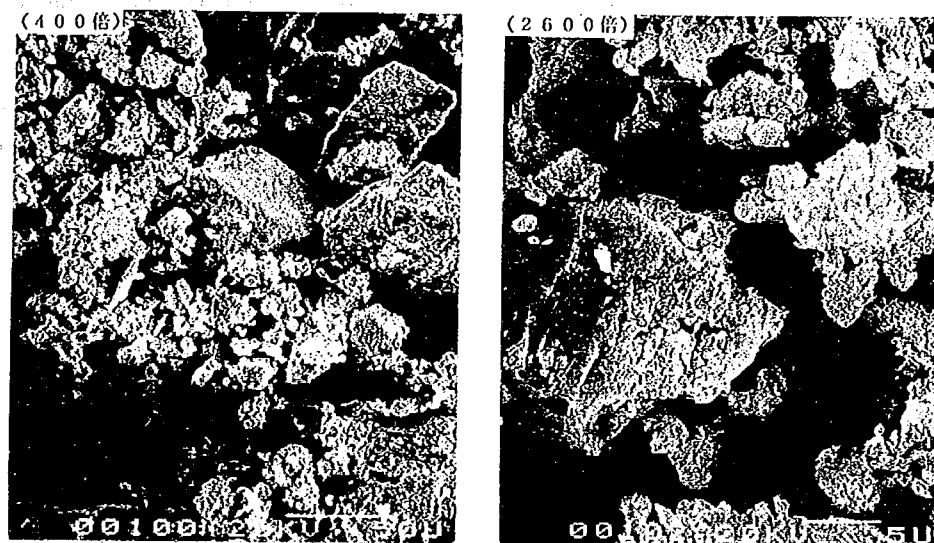


図-1 濁水処理スラッジの電子顕微鏡による拡大映像の一例
(骨材岩種：火山礫凝灰岩)

表-4 焼成後の圧縮強度 (単位: kgf)

	焼 成 温 度 (°C)			備 考
	800	1,000	1,200	
Aダム	6.9	23.2	191.0	圧縮強度は全荷重で表示している。
Bダム	13.4	21.0	453.0	
Cダム	2.3	10.6	271.0	

実験条件は、試料の含水比を 20 % 程度に調整した後に、手作業で直径 15~18 mm の球形に成形し、乾燥後に電気炉を用い 800, 1,000, 1,200 °C の 3 段階の温度で焼成するものとした。

(i) 色 調

焼成前には淡灰色の供試体が焼成することにより 800, 1,000°C では赤褐色、1,200°C では茶褐色に色の変化したが、岩種による顕著な差はない。

(ii) 焼結状態

800, 1,000°C で焼成した供試体は、表面の焼結状態はいずれの岩種においても指で触れると供試体表面の粒子が容易に指に付着する程度であり、非常に弱い。

1,200°C で焼成した供試体は、いずれも表面の焼結状態が緻密で、表面が若干溶融して光沢があり板ガラスに傷を付けることができる硬度を有している。

焼結前後の供試体の大きさの変化は、Aダムにおいてはほとんど無いのに対し、B, C ダムにおいては 1,200°C での焼成後に直径で約 15 % 程度収縮した。これは、Aダム骨材の岩種が粘板岩であるのに対し B, C ダムは花崗岩であることから、岩種の違いに関係があるものと考えられる。

(iii) 焼成強度

焼成後の圧縮強度を表-4 に示す。

焼成後の圧縮強度は、供試体に加えた全荷重で 800°C 焼成時が 2.3~13.4 kgf, 1,000°C 焼成時が 10.6~23.2 kgf の範囲であるのに対し、1,200°C 焼成時は 191~453 kgf の範囲となり飛躍的に増加した。1,200°C 焼成時の圧縮強度は Aダム < Cダム < Bダムの順に大きい値を示し、供試体の表面が溶融し光沢をもつものほど大きくなっている。

4. 濁水処理スラッジへの既存建設副産物

・廃棄物利用技術の適用

(1) 既存の建設副産物・廃棄物利用技術

濁水スラッジの有効利用の手がかりとするために、下水汚泥、浄水汚泥、建設系汚泥、製造業系汚泥などの分野に着目し、汚泥を対象とする既存の利用技術について調査を行った。

調査した結果によると、汚泥の利用用途の主要なものとしては、有機質汚泥の有機成分を利用するコンポスト、燃料化あるいは、有機汚泥の焼却灰、無機質汚泥の無機成分を利用する農業資材化、建設資材化、窯業原料などである。調査した中からダムの濁水処理スラッジの有効利用に参考になると考えられる利用技術を下記に示す。

(i) 下水汚泥焼却灰

都道府県の下水道局が開発、実用化した下水汚泥焼却灰の利用技術⁴⁾

・軽量細粒材

灰を造粒、乾燥、焼成した多孔質材

・溶融スラグ骨材

灰を高温で溶融し冷却固化した骨材

・レンガ

灰を圧縮成形し高温で焼成したレンガ (灰 100 %)

(ii) 浄水場汚泥

神奈川県広域水道企業団が開発した浄水場から排出される汚泥の利用技術⁵⁾

・乾燥粒土 (さがみ粒土)

汚泥を造粒脱水し熱風乾燥した人工土壌

(iii) 砂利工場汚泥

園芸資材メーカーが開発した砂利工場から排出される脱水ケーキの利用技術

・焼成多孔質材 (クレイボール)

脱水ケーキを造粒し焼成した多孔質人工土壌

(2) 濁水処理スラッジ有効利用の可能性

ダムの濁水処理スラッジと類似性のある浄水場汚泥、下水汚泥の無機成分の利用用途を参考に、濁水処理スラッジの適用性を検討した結果を以下に示す。

表-5 各種汚泥の化学成分

単位：％

化学成分 汚泥種別		強熱減量 lg. loss	二酸化ケイ素 SiO ₂	酸化アルミニウム Al ₂ O ₃	酸化鉄 Fe ₂ O ₃	酸化カルシウム CaO	酸化マグネシウム MgO	一酸化ナトリウム Na ₂ O	一酸化カリウム K ₂ O	三酸化イオウ SO ₃	二酸化チタン TiO ₂	一酸化マンガン MnO	備考
ダム汚泥	A ダム	4.1	68.0	14.6	4.1	1.3	1.4	2.3	3.7	—	—	—	脱水ケーキ
	B ダム	2.1	69.4	16.2	2.6	0.7	0.1	3.9	4.4	—	—	—	沈殿池スラッジ
	C ダム	1.8	67.5	17.6	2.7	0.4	0.2	4.8	4.9	—	—	—	脱水ケーキ
下水汚泥	無機(石灰)系	7.9	30.2	12.2	5.2	28.2	2.5	0.7	1.0	3.9	—	0.02	焼却灰
	高分子系	2.9	32.2	19.1	8.4	10.3	2.6	1.6	1.2	2.0	—	0.3	焼却灰
浄水場汚泥	A 浄水場	20.7	39.9	24.1	5.7	0.4	2.4	3.5	3.2	—	0.6	0.1	脱水ケーキ
	B 浄水場	2.2	56.6	27.3	5.9	0.9	1.6	0.8	4.7	—	—	—	脱水ケーキ

表-6 ポルトランドセメントの化学成分

単位：％

セメント種別	強熱減量 ig. loss	二酸化ケイ素 SiO ₂	酸化アルミニウム Al ₂ O ₃	酸化鉄 Fe ₂ O ₃	酸化カルシウム CaO	酸化マグネシウム MgO	三酸化イオウ SO ₃
普通ポルトランドセメント	0.5	22.0	5.2	3.2	65.1	1.3	1.8
早強ポルトランドセメント	0.9	20.8	4.8	2.8	66.0	1.2	2.7
超早強ポルトランドセメント	1.3	19.9	4.9	2.7	65.6	1.3	3.8
中熱ポルトランドセメント	0.6	23.0	4.2	3.6	64.6	1.2	1.9

表-7 各種汚泥の物性値

項目 汚泥種別		比重	湿潤密度 (t/m ³)	含水比 (%)	粒度分布(%)			備考
					細砂分	シルト分	粘土分	
ダム汚泥 スラッジ	A ダム	2.67	1.92	27.4	6	65	29	脱水ケーキ
	B ダム	2.61	1.64	50.5	20	68	12	沈殿池スラッジ
	C ダム	2.63	1.84	32.8	16	66	18	脱水ケーキ
下水汚泥焼却灰		2.58~3.23	0.55~0.90	0	38	62	—	焼却灰
浄水場汚泥		—	—	60.0	0	46	54	脱水ケーキ

*) 74 μ m < 細砂分 $\leq$ 420 μ m 5 μ m < シルト分 $\leq$ 74 μ m 粘土分 $\leq$ 5 μ m

(i) 化学成分の利用

表-5 に各分野の汚泥の化学成分⁶⁾、表-6 にセメントの化学組成⁷⁾を示す。

表-5 より、ダムの骨材プラント濁水から発生する濁水処理スラッジは下水汚泥に比較し、CaO 成分が少なく、肥料原料、土質安定材、土壌改良材などへ CaO 成分を利用する用途に対しては、適用性が低いと考えられる。

表-6 より、セメントの化学組成は、濁水処理スラッジと共通する成分があることがわかる。また、セメントメーカーによって、汚泥を含む各種産業廃棄物を受け入れセメント製造の燃料、原料として利用する技術が開発されている⁸⁾ことから、スラッジをセメント原料の一部として利用で

きる可能性があると考えられる。しかしながら、セメント原料とする場合アルカリ骨材反応の防止のため、セメント中の総アルカリ量 (Na₂O + K₂O) が問題となり、注意を要する。国内セメント中のアルカリ量は 0.3~1.1 % の範囲であるといわれている⁹⁾。

(ii) 物理特性の利用

表-7 に各分野の汚泥の物性値、表-8 に道路土工施工指針¹⁰⁾における道路用材料としての土性の評価目安を示す。

表-8 より、いずれの汚泥も日本統一土質分類法における細粒土の粒度区分に属し、盛土材として利用する際は締固め特性、圧密特性、強度特性などを事前に確認しておく必要のある材料であ

表-8 道路用材料としての土性の一般的評価の目安

日本統一分類		盛土材料	路床材料	盛土の基礎地盤	備 考
(岩塊・玉石)*		△	×	○	破碎の程度によって使用区分を考える。
礫 IGI		○	○	○	
礫質土 IGI		○	△	○	有機質、火山灰質の細粒土を含む(GO, GV など) ものは盛土材料、盛土基礎としても△
砂 ISI		○	○	○	ゆるい飽和した地盤では盛土基礎として△
砂質土 ISFI		○	△	○	有機質、火山灰質の細粒土を含む(SO, SV) ものは、盛土材料、盛土基礎としても△、ゆるい飽和した地盤では盛土基礎として△
F 細粒土	シルト IMI	△	△	△	
	粘性土 ICI	△	△	△	
	火山灰質粘性土 IVI	△	△	△	
	有機質土 IOI	△	×	△	
高有機質土 IPII		×	×	△	

○：ほぼ問題がないもの △：注意して用いるか、何らかの処理を必要とするもの

×：用いられないもの (注)・(岩塊・玉石)は日本統一土質分類名ではない

「道路土工施工指針」(社)日本道路協会

る。過去の利用事例においても、天日乾燥、一般土砂との混合、造粒乾燥、セメントなど固化材の添加など、なんらかの加工を加えて使用されるケースが多い。

ダムの濁水処理スラッジは、他分野の汚泥と物性値が大差ないことから、実績のある同様の手法により盛土材などへ利用することが可能であると考えられる。

(iii) 窯業原料への利用

焼成実験の結果より、濁水処理スラッジを 1,200℃ で焼成すれば焼結することがわかったが、通常の焼き物の焼成温度が素焼き：800～900℃、本焼き：1,200～1,450℃ の範囲¹¹⁾であることを考慮すると、素焼きに相当する温度での焼結が不足しているといえる。この原因として、濁水処理スラッジは通常の焼き物素地に比較して粘土成分(カオリンなどが不足していることと、粒径が粗いことが考えられる。濁水処理スラッジを窯業原料として利用する場合、粘土原料の混入率と焼成特性、焼成物の品質などの関係を実験的に把握しておく必要がある。

(iv) 適用性

以上の検討結果をふまえ表-9 に、化学成分の利用、物理特性の利用、窯業原料への利用に対する濁水処理スラッジの適用性をまとめて示す。

表-9 ダムの濁水処理スラッジの既存有効利用用途への適用性

項目 利用方法	利 用 用 途	骨材プラント濁水処理スラッジ	備 考
化学成分の利用	肥料原料	×	○：適用性大 △： " 中 ×： " 小
	土質安定材・改良材	×	
	土壌改良材	×	
	セメント原料	△	
物理特性の利用	盛土材料	○	
	埋戻し材料	○	
	客土		
	路床・路盤材	○	
	アスファルトフィラー 注入材	○ ○	
窯業原料への利用	軽量骨材	○	
	レンガ、ブロック	○	
	陶磁器	△	
	瓦	△	

骨材プラント濁水処理スラッジ：骨材製造に伴う濁水処理スラッジ

表より用途によっては、既存の利用技術の範囲で濁水処理スラッジを利用することが可能であると考えられる。

5. 濁水処理スラッジの有効利用用途

濁水処理スラッジへの既存の廃棄物利用技術の適用性、工業製品の代替原料としての適用性、加工方法の難易、ダム現場内利用の可否、利用可能

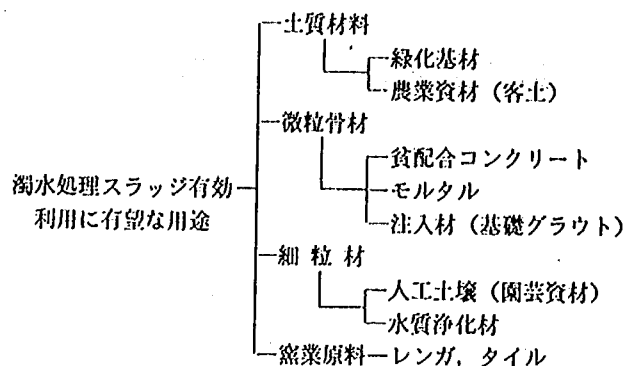


図-2 濁水処理スラッジ有効利用に有望な用途

<有効利用用途>		<ダム現場内利用工種>	
◎土質材料	緑化基材	法面緑化	
	農業資材	周辺緑化、農地復旧(客土)	
◎微粒骨材	貧配合コンクリート	ダム本体コンクリート	
	モルタル	法面吹付け、裏込め注入	
	注入材	堤体基礎グラウト	
◎細粒材	人工土壌	ダム周辺緑化	
	水質浄化材	河川浄化	
◎窯業原料	レンガ、タイル	ダム周辺修景、建築壁材	
	スラグ骨材	ダム本体コンクリート	

図-3 濁水処理スラッジのダム現場内の有効利用用途

量、実績の有無、過去にあまり研究されていない分野の優先、付加価値の高い用途への志向などの観点から、濁水処理スラッジの有効利用用途として今後研究開発が望まれる用途を図-2のとおり抽出した。

6. 濁水処理スラッジのダム現場内における有効利用

(1) ダム現場内の有効利用用途

ダム建設過程で排出する廃棄物である濁水処理スラッジの有効利用用途としては、ダム現場内で加工し、現場内で利用できる用途が理想的であると考えられる。ダム現場内において濁水処理スラッジの有効利用が可能と考えられる用途を図-3に示す。

(2) 濁水処理スラッジの有効利用量

図-3に示した用途の内、ダム本体コンクリート、法面吹き付けモルタル、堤体基礎グラウト、修景用レンガなどの用途への利用可能量を試算した結果、相当量をダム現場内で利用できる可能性があることがわかった。

以下、次号において濁水処理スラッジの有効利用に有望な用途について実験を行った結果を示す。

(次号目次)

7. 適用性確認実験

(1) 濁水処理スラッジの微粒骨材としての適用性実験

(2) 濁水処理スラッジの細粒材としての適用性実験

(3) Eダムにおける水質浄化実験

8. まとめ

9. おわり

参 考 文 献

- 1) 改訂版ダム建設工事における濁水処理、財団法人日本ダム協会
- 2) 建設工事における濁水・泥水の処理工法、鹿島出版会
- 3) 建設廃棄物処理ガイドライン、ぎょうせい
- 4) リサイクル読本、東京都下水道局
- 5) 上田哲夫：神奈川県内広域水道企業団における浄水場発生ケーキの有効利用、工業用水、第287号、1982.8
- 6) 建設系廃棄物の処理と再利用、財団法人省エネルギーセンター
- 7) コンクリート工学、技報堂
- 8) 西脇正矩：産業廃棄物のセメント焼成用燃料及び原料としての再生活用、クリーンジャパン82、1990.5
- 9) セメント化学雑論、セメント協会
- 10) 道路土工施工指針、社団法人日本道路協会
- 11) 化学便覧 応用編、丸善

3.5 地球温暖化による流域水文応答の変化の数値実験Ⅳ：ダム利水容量の検討¹⁴⁾

3.5.1 想定した温暖化シナリオ

ここで想定した温暖化シナリオは Table 3.2.1 に示した温暖化シナリオの中の11ケースの年間一様シナリオである。これらの条件と計算ケースを改めて Table 3.5.1 に示す。ここでCASE2は現況を表す。ここでも降水量, 気温ともそのパターンは変化せず降水量あるいは温度だけが変化するとした。

Table 3.5.1 Simulation cases and warming conditions

降水量(%) 気温上昇(°C)	-10	±0	+10
±0	CASE 1	CASE 2	CASE 3
+1	CASE 4	CASE 5	CASE 6
+2	CASE 7	CASE 8	CASE 9
+3	CASE10	CASE11	CASE12

3.5.2 対象流域とその特性

解析対象流域は, 九州北部 (Aダム), 四国瀬戸内側 (Bダム) および東北太平洋側 (Cダム) の3流域である。各ダム流域の1981年~1990年の10年間の, ダム地点の年平均降水量, ダムへの流域からの年平均流出高, 年平均蒸発散量 (= 年降水量 - 年流出高), 流域面積およびかんがい期間を Table 3.5.2 に示す。また, 100km²に換算した流況曲線を Fig. 3.5.1 に, 半旬流量と河川利用率30, 40, 50, 60%の割合で求めたその地点の確保すべき流量と実流量に対する不足量の累加曲線を Fig. 3.5.2 に示す。Aダムは, 他の流域と比べて年降水量が多いこともあり, 豊水流量から平水流量にかけて流況が非常によいが, BダムとCダムを比較すると平均降水量は大きな違いがないにもかかわらず, その流況は大きく異なり, Cダムに比べ

Table 3.5.2 Hydrological characteristics of each basin

対象流域	Aダム 九州北部	Bダム 四国瀬戸内側	Cダム 東北太平洋側
流域面積	18.9 km ²	28.0 km ²	740.0 km ²
年間降水量	2654.3 mm	1264.4 mm	1225.8 mm
年間流出高	2170.4 mm	606.6 mm	918.3 mm
年間蒸発散量	483.9 mm	657.8 mm	307.5 mm
かんがい期	5/1-10/31	6/20-9/20	5/15-9/3

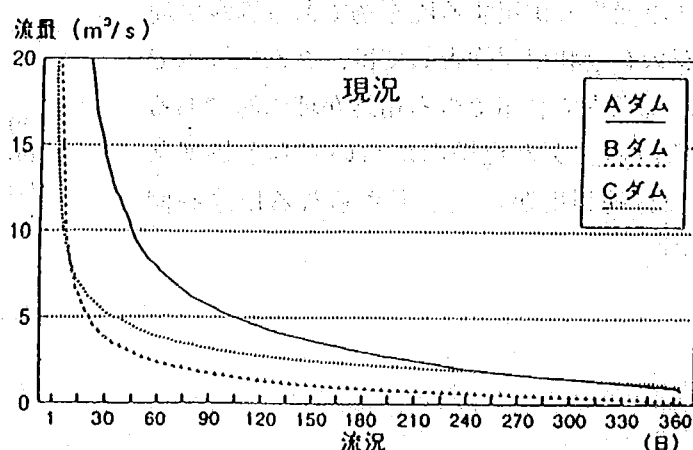


Fig. 3.5.1 Flow regime of each basin

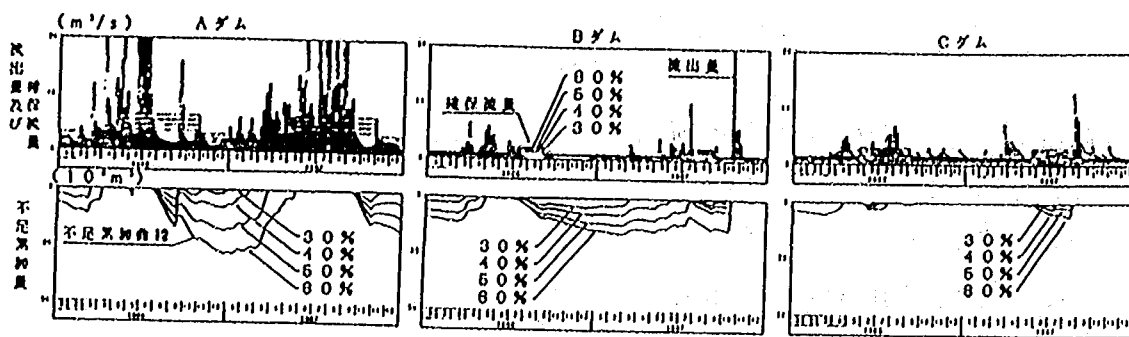


Fig. 3.5.2 Discharge, secure necessary flow and cumulative deficit (per 100 km²)

てBダムの方が低水時の流況がかなり悪いことが分かる。さらに、個々のダムの特徴を見れば、Aダムでは6、7月の梅雨期の流出量が多く、BダムではAダム同様6、7月の流出量が多いがその絶対量はAダムより少なく、台風の影響の有無により年毎の流況は大きく異なる。Cダムでは融雪によると思われる流出のため3月から5月にかけての流出量が他の月より大きい。

3.5.3 解析方法

各流域に対して流出モデルとして、4段のタンクモデルを用い、日単位で流出計算を行った。また、Cダムに関しては、融雪があるので、流域を約250m四方のメッシュに分割し、メッシュ毎に降雪・積雪・融雪を考慮したモデル¹⁾を適用し、タンクモデルへの入力値は、このモデルにより各メッシュ毎に求めた融雪量と降雨量を流域平均した値とした。蒸発散量については Hamon式より算出した可能蒸発散量を年間水収支により補正した。

ダムによる水資源開発への影響の検討に際しては、ダムから利水補給を行う際にその放流量を決定する下流基準地点は、その上流域がダム流域の6倍（ダム流域を含む）を持つ地点とし、残流域からの流出量は、ダム流域の5倍とした。また、その確保すべき流量は、かんがい期：非かんがい期=2：1で、1981～1990年の流出量に対して河川利用率が40%となるように算出した。以上の条件で、1981～1990年の流況に対して1/10の利水安全度が確保できるように利水容量を算出した。

3.5.4 結果と考察

(a) 流況変化

各ダムにおける10年平均の流況曲線についてCASE2（温暖化なし）とCASE11（ $\Delta T = 3^\circ\text{C}$, $\Delta P = 0\%$ ）の比をとって図示したものが Fig. 3.5.3 である。この図で特徴的なのは、AダムおよびBダムでは、概ね低水時の方が流量の違いが大きく、温暖化なしの場合の

80～60% 程度に流量が減少している。一方、Cダム流域では中位での差が大きく、渇水時の流量には大きな差はみられない。これは、温暖化により3月後半の降雪が降雨に変わるとともに、融雪の時期が早まるためにこの期間の流況が良くなり、年最小流量の発生する時期が夏期に移動するためであると思われる。

(b) 利水安全度および利水容量の変化

前述の条件のもとで Table 3.5.2 の温暖化シナリオに基づいてダムの運用計算を行い、その結果を不足%・日を指標にして代表的なケースのみを示したものが Fig.

3.5.4, Fig. 3.5.5 である。また、各ダムの渇水回数の変化を Fig. 3.5.6 に、1/10の利水安全度を確保するためのダム容量の変化を単位面積当たりで示したものを Fig. 3.5.7 にそれぞれ示す。

Fig. 3.5.5 をみると、蒸発散量の大きいBダムおよびAダムでは降水量が10%増加しても気温が3℃上昇すれば不足%・日は増大し、水資源の安全度は低下する。このことから、蒸発散量の変化が水資源に極めて大きな影響を及ぼすことが分かる。同様なことは Fig. 3.5.7 から読み取れる。また、Fig. 3.5.7 から蒸発量の多いBダム、Aダム、Cダムの順に単位面積当たりのダム容量が大きくなっていることが分かる。しかし、蒸発量の小さいCダムでは1/10の安全度を確保するための容量の増加率は非常に大きくなっている。これは、Cダムではここで想定した河川利用率40%の確保流量を少ない容量で確保できるため、気温上昇による影響を対現状比でとらえた場合大きくなるからである。すなわち、現状の自然流量と水資源の開発レベルがどのような水準にあるかによって温暖化が進行した場合において同一安全度を確保するために必要な容量の対現状比は大きく異なる。

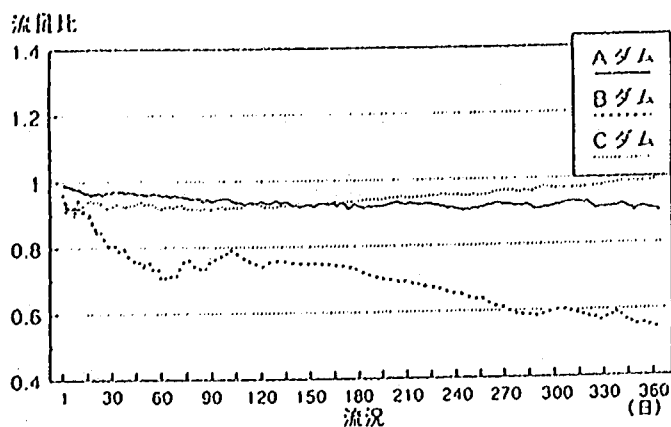


Fig.3.5.3 Comparison of the predicted flow regime between case 2 and 11

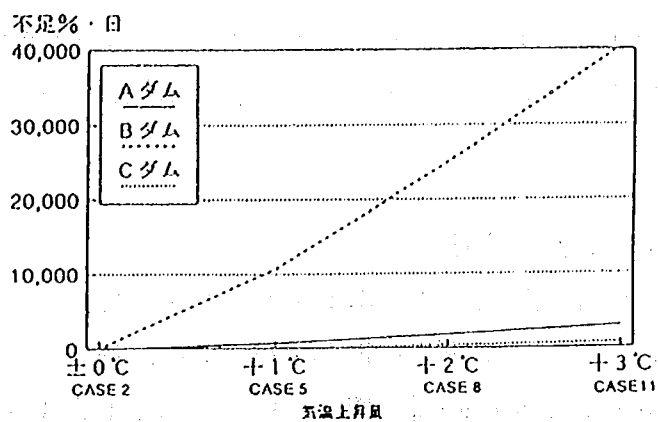


Fig.3.5.4 Predicted total deficit for the case 2, 5, 8 and 11

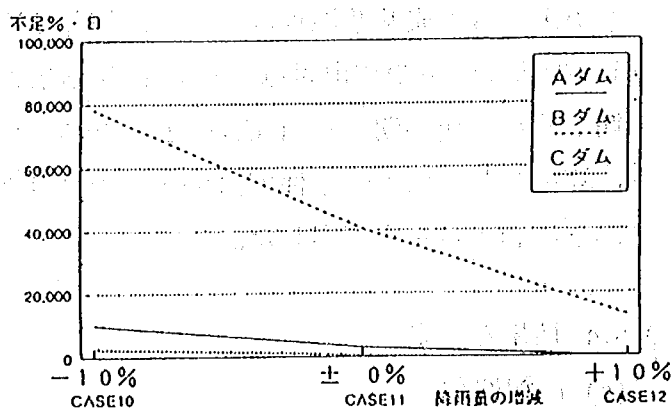


Fig.3.5.5 Predicted total deficit for the case 10, 11 and 12

4. 地球温暖化にともなう水資源への影響とその対策

4.1 はじめに

近年地球環境問題で話題になっている地球温暖化現象は、気候・水環境、ひいては水資源にもその影響を及ぼすことが予測されている。しかしながら、現在のところ具体的にどのような影響が現れるのかについては、気温の上昇や降雨量の増減が予想されてはいるものの、その季節的な変動や地域的な影響の差異などの評価までには至っていない。このような観点から、本章では時空間的にスケールが異なる以下の課題についての議論を行い、今後個々の課題の中で地球温暖化の影響をどのように取り込むかの問題提起を行った。

まず、4.2では、降水量の増減率と気温上昇量のシナリオを想定し、日本における代表的な水系の流域について流出計算を行い、その流況を現在の流況と相対的に比較することによって温暖化が利水安全度に与える影響の検討を行った。次に、4.3では水需給システムと水利用（水需要）システムを対象として、温暖化による水需要量の変化について、全国の水文条件が異なる地域の需要量データを基にシナリオを作成し、水資源管理に与える影響について考察を行った。また、4.4では貯水池の効率的な低水操作を達成するために、パターン分類による流況予測と長期天気予報を基にした水量予測を結合させたエキスパートシステムとしての操作モデルの構成を試みた。最後に4.5では、福岡市を例にとり、利水安全度と経済運用の両者を考慮した河川取水とダム取水の取水量決定システムの構築を考えた。4.6では、4.2～4.5での成果を踏まえた上で、地球温暖化にともなう水資源への影響とその対策として一つの提言を行った。

4.2 地球温暖化が水資源に及ぼす影響について

4.2.1 概要

地球温暖化が水資源に及ぼす影響については、降水量の増減率と気温上昇量のシナリオを想定し、その条件下で流出計算を行いその流況を現況と相対的に比較している研究が多い²⁾。筆者らも同様のアプローチを行い、降雨特性の異なる地域によって温暖化の影響に差異があるという結論を得ている³⁾。また、日本では水資源利用率も地域によって差があるため、地球温暖化が進行すればその地域の水資源の開発レベルに応じてその影響も異なることが予想される。そこで本研究では、日本における代表的な水系の流域について、現在の水資源の

(4章：丹羽,小尻,神野,杉山,横江,蔵重)

状況及び水利用の状況を整理し、気温上昇時の影響について分析を行った。さらにモデルダムを対象に現在通常10ヶ年に1回の渇水を対象にたてる利水計画の安全度を高めた場合、温暖化の影響がどの程度軽減されるかについて検討を行った。

4.2.2 水資源利用率の地域差を考慮した場合の温暖化の影響

a) 現在の水資源状況

わが国の水資源の状況をみた時、地域によって降水量が大きく異なるだけでなく、水利用も大きく異なる。地球温暖化が進行した場合に水資源がうける影響を適切に評価するには、まず水資源の現状を把握する必要がある。Table 4.2.1 に、全国の主要な水系で求めた流域平均年降水高とその流域からの平均年流出高、それらの差として求めた平均年損失高、さらに実績の取水量から求めた年取水高と、それが年流出高に占める割合を利用率として示す。わが国の水資源開発は1/10の渇水に対しても水供給が行えるように、計画を策定しているの

Table 4.2.1 Water resources volume at different river basins

水系名	年降水高 mm	年流出高 mm	年損失高 mm	年取水高 mm	水資源利用率 %
北上川	1607 (1420)	1296 (1030)	311 (390)	158	12 (15)
利根川	1251 (894)	781 (501)	470 (392)	333	43 (66)
木曽川	2551 (1955)	1935 (1306)	616 (649)	437	23 (33)
淀川	1820 (1442)	1303 (901)	517 (541)	659	51 (73)
太田川	2087 (1621)	1654 (1078)	433 (543)	261	16 (24)
吉野川	2510 (1967)	2254 (1608)	257 (359)	477	21 (30)
筑後川	2200 (1332)	1670 (714)	530 (618)	384	23 (54)

注：（ ）内は10年第1位程度の渇水年の表示とした。

b) 気温が3℃上昇した時の影響

それぞれの流域について、Hamon式により年間の可能蒸発散量を求め、2.1で算出した年蒸発散量（＝年損失量）を補正するための補正係数を求めた。このHamon式と補正係数を用いて、気温が1～3℃上昇した場合の蒸発散量を算出し、水資源賦存量の変化を求めた結果を Fig. 4.2.1 に示す。さらに、水需要が変化しないと仮定して水資源利用率（対渇水年）の変化を求めた結果を Fig. 4.2.2 に示す。

Table 4.2.2 に、各水系毎の全利水容量⁴⁾と建設省所管の近年竣工したダム及び現在建設・計画中で10年以内に完成予定のダムのうち新規の上・中水の開発を行っているダムの上・中水容量とその開発水量を示す。一般に水資源の利用率が高まるにつれて新たに水を

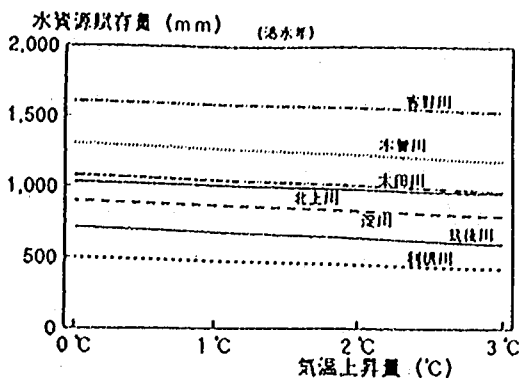


Fig. 4.2.1 Change of water resources volume with temperature rise

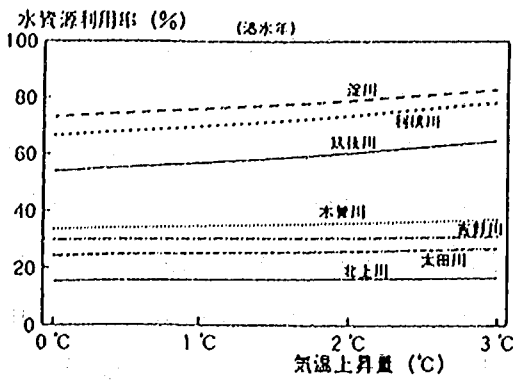


Fig. 4.2.2 Change of water usage rate with temperature rise

Table 4.2.2 State of water resources development through dam reservoirs

水系名	現在竣工ダムの全利水容量 10^3 m^3	近年竣工および建設・計画中のダム ¹			
		上・工水容量 10^3 m^3	上・工水開発水量 $\text{m}^3/\text{日} (\text{m}^3/\text{S})$	上・工水 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発 する必要容量 10^3 m^3	対象 ダム数
北上川	267140	13527	146900 (1.7)	7956	5
利根川	596606	173000	1461040 (16.9)	10231	4
木曾川	287181	36400	446700 (5.2)	7040	2
淀川 ^{**}	90492	50100	1106860 (12.8)	3911	6
太田川	1564	23550	464000 (5.4)	4385	2
古野川	211210	103900	2022620 (23.4)	4438	2
筑後川	70096	2430	72662 (0.8)	2889	2

*：建設省の資料より上・工水専用の容量を持つダムについてまとめた。

**：淀川については、琵琶湖総合開発事業が行われたが、ここでは含めていない。

$1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発するのに必要な容量（新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量）は、増加（ダムによる水資源の開発効率が低下）するといわれている³⁾。Table 4.2.1 と Table 4.2.2 より、地域間の比較では必ずしも利用率の高い水系で、新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量が大きいとは限らないことが判る。これは各水系で対象としているダムの数や、水系によっては近年竣工あるいは完成予定のダムの計画が比較的古くに行われたことや、また各流域における流出特性の影響と考えられる。すなわち、Table 4.2.2 に示す新規 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 開発容量は地域による水資源利用率の違いと流況の違いを総合的に表していると考えられる。よってこの関係を用いて、温暖化によって流況が変化した場合に同じ取水量を確保するのに必要な容量の変化を検討することができる。気温上昇による水資源の目減り分を、水資源利用率を介して、新規開発水量に置き換え

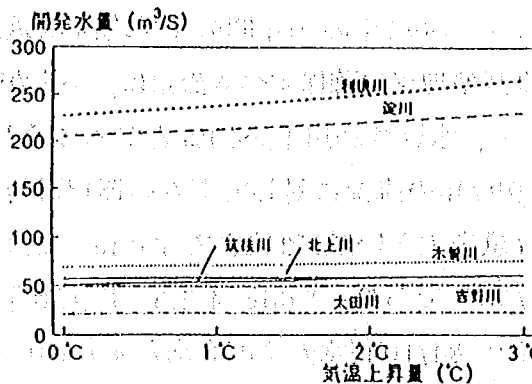


Fig. 4.2.3 Relation between newly developed water resources and temperature rise

たのが Fig. 4.2.3 である。蒸発散量が大きく現在の開発水量が多い利根川、淀川水系で換算新規開発水量が大きいことが分かる。これを利用して、Table 4.2.2 より温暖化した時の必要容量の増加分を算出したのが Fig. 4.2.4(a) で、流域面積が大きく、水利用の進んでいる利根川と淀川で必要容量の増加分が大きくなる事がわかる。また、対現状比として利水容量の増加率を示したのが Fig. 4.2.4(b) である。必要容量の増加分を示す Fig. 4.2.4(a) で影響の大きい利根川、淀川に加え、太田川、筑後川で増加率が大きくなっている。これは、太田川、筑後川水系では、現状の取水量を比較的少ない利水容量で確保しているため、対現状比でみたときに、影響が大きくなっていると考えられる。同程度の安全度を確保するために必要な容量という観点では、Fig. 4.2.4(a) で評価できるが、対現状として流域に与えるインパクトを評価するには、Fig. 4.2.4(b) のような評価も必要であると思われる。

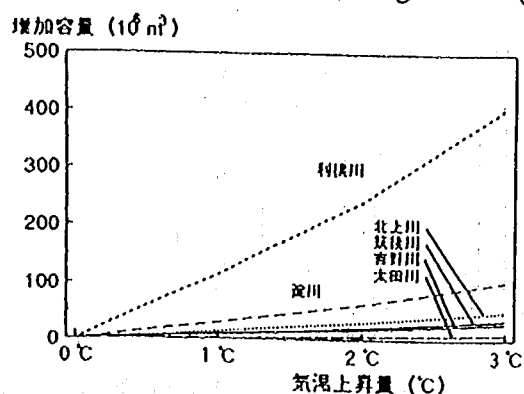


Fig. 4.2.4(a) Increased capacity with temperature rise

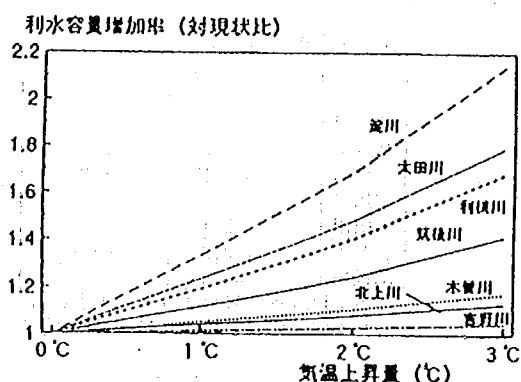


Fig. 4.2.4(b) Increased rate of capacity with temperature rise

4.2.3 利水安全度を向上した場合の温暖化の影響

現在、建設省では、基本的には利水安全度1/10で水資源開発施設の整備を行っているが、地球温暖化が水資源に与える影響に対しては、現在のところ、確定的な知見が得られていない以上、明確な対応策を計画、実施することは現段階では難しいと思われる。ここでは現在のフレームで、できるだけ長期間のデータを用いて、利水安全度を向上させた場合の温暖化の影響に関して、不足%・日や渇水回数で評価した。まず、対象とするモデルのAダムは、九州地方北部に位置し、1963～1992年の30年間の年平均降水量が2,435mm、同年平均流出高が2,069mmである。下流基準地点の確保すべき流量は、かんがい期：非かんがい期＝2：1で、平均の流出量に対して、水資源利用率が40%となるように算出した。

以上の条件で、1963～1992年の流況に対してダムの運用計算を行い、このダムでの基準点補給の為に必要なダム容量を大きい順に3位まで Table 4.2.3 に示す。現在、確保すべき利水安全度は、1/10（＝3/30）であり、Table 4.2.3 より30年第3位の必要容量20,200×103m³を、概ね現在確保すべき1/10利水安全度を満たすために必要利水容量とみなすことができる。こうして算出したダム容量に対して、Table 4.2.4 に示す温暖化シナリオに基づ

Table 4.2.3 Necessary storage capacities

順 位	必要容量(10^3m^3)	生 起 年
1	40584	1978年 (福岡治水)
2	24613	1968年
3	20109	1970年

Table 4.2.4 Applied cases

降水量(%)	-10	± 0	+10
気温上昇(℃)			
± 0	CASE 1	CASE 2	CASE 3
+ 1	CASE 4	CASE 5	CASE 6
+ 2	CASE 7	CASE 8	CASE 9
+ 3	CASE10	CASE11	CASE12

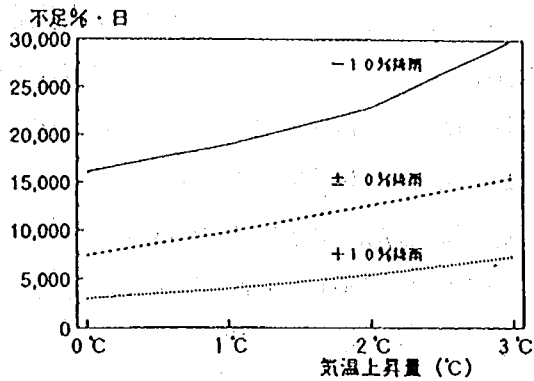


Fig. 4.2.5 Drought situation with temperature rise (probability=1/10)

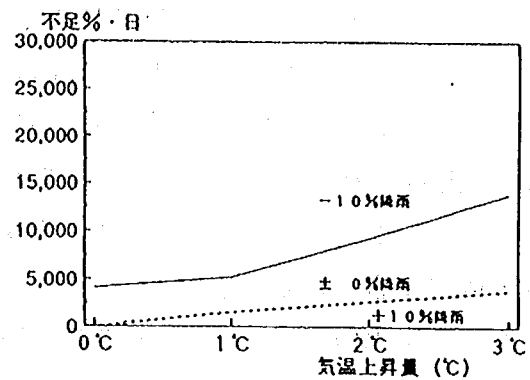


Fig. 4.2.6 Drought situation with temperature rise (probability=1/30)

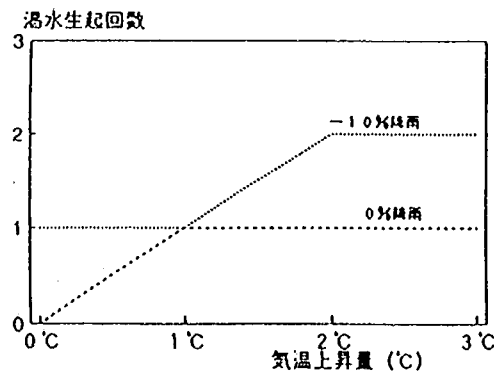


Fig. 4.2.7 Relation between temperature rise and drought occurrence frequency

いて分析を行った。その結果を Fig. 4.2.5 に示す。次に、利水安全度を約1/30まで上昇させ、利水容量として $40,600 \times 10^3\text{m}^3$ を確保した場合について、同様のシナリオに基づいて評価した。Fig. 4.2.6 に各温暖化シナリオに基づく計算結果を Fig. 4.2.5 と同様に示す。また Fig. 4.2.7 には、30年間の渇水の生起回数を示す。降水量が10%減少し、気温が 3°C

上昇した場合（CASE12）は、対象とした30年間で渇水が2回生起し、その不足%・日は、13,857に達している。気温が3℃上昇して、降水量が変化しなかった場合（CASE11）は、渇水の生起回数は1回、不足%・日は3,825で抑えられている。すなわち、渇水の生起回数だけで評価すると、気温が3℃上昇し、降水量が10%減少する厳しい状態になっても、30年に2回ということで、現在の利水安全度は満たされていることになる。しかしながら、一般的に言われている許容できる最大規模の渇水の不足%・日、2000%・日⁹⁾よりはるかに多い。

4.2.4 結論

本研究では、日本の代表的な水系で、それぞれの水資源賦存量、利用率を分析し、水資源への地球温暖化進行の影響を、現状の利用率と流域の流況の特性を総合的に評価していると考えられる新規1m³/s開発容量を用いて、現在と同一安全度を確保するのに必要な容量として評価した。その結果、3℃気温が上昇した場合、水系によっては現状に比べて2倍以上の容量が必要であるという結果が得られた。しかし、現状の水資源開発計画のフレームを考えると、温暖化のみの対策を講じることは現段階で難しい。そこで現在の渇水対策をすすめ、利水安全度を向上させた場合に関して、温暖化の影響を評価した。非常に簡単なシナリオにおける評価にすぎないが、対象としたモデル流域では利水安全度を1/30まで高めると、水資源からみて温暖化の影響が想定される最大限の厳しいものであっても、頻度の面からは現在の1/10安全度を確保できることが分かった。

Figure 1. Comparison of the results of the evaluation of the required capacity for maintaining the same level of water security under the assumption of a 3°C increase in temperature and a 10% decrease in precipitation (CASE12) and the results of the evaluation of the required capacity for maintaining the same level of water security under the assumption of a 3°C increase in temperature and no change in precipitation (CASE11).

Figure 1 is a line graph comparing the required capacity for maintaining the same level of water security under two different scenarios. The X-axis represents the required capacity (m³/s) on a logarithmic scale, ranging from 1 to 100. The Y-axis represents the frequency of occurrence (times/year) on a linear scale, ranging from 0 to 10. The graph shows two data series: CASE11 (No change in precipitation) and CASE12 (10% decrease in precipitation). CASE11 shows a required capacity of approximately 10 m³/s, while CASE12 shows a required capacity of approximately 30 m³/s. The frequency of occurrence for CASE11 is approximately 5 times/year, while for CASE12 it is approximately 2 times/year.

参 考 資 料

景観シミュレータ・景観データベースの研究開発

■総合技術開発プロジェクト「美しい景観の創造技術の開発」

総合技術開発プロジェクトは、行政ニーズに対応した各分野共通の課題を取り上げ、産学官の連携により総合的に研究を実施する制度です。総合技術開発プロジェクト「美しい景観の創造技術の開発」は、周辺環境と土木構造物・建築物が美しく調和し、しかも、地域の歴史・文化および生態系に配慮した社会資本の整備に必要な技術を研究・開発し、その実現を図ることを目的としたものです。

■景観シミュレータ・景観データベースの研究開発

公共土木施設や建築物の構築にあたり、計画・調査・設計および施工の各段階に応じて視覚的な景観検討が容易にできるコンピ

ュータグラフィックス(CG)は、有効な景観向上の支援システムです。現在、コンピュータ機器の性能・技術の向上、低廉化が進んでおり、これを踏まえ、現場で実用的に使用できるCGシステムの開発が期待されています。

このため、「美しい景観の創造技術の開発」の1テーマである「景観シミュレータ・景観データベースの研究開発」では、公共土木施設、建築物および周辺環境からなる都市や地域の景観をリアルに、かつ時間的な変化をとらえることができ、実用性・操作性が高く、公共土木施設の構造決定や街づくりの方向性などの検討に効果的なCGシステムおよび構造物の種類や景観材料に関する景観データベースを開発します。

システムの特長

計画段階での施設配置や構造決定を支援します。

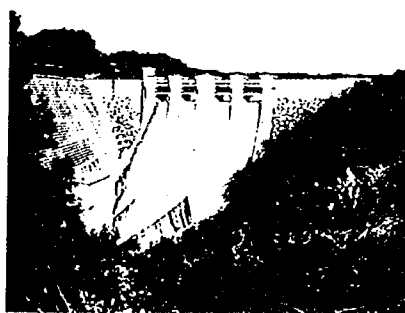
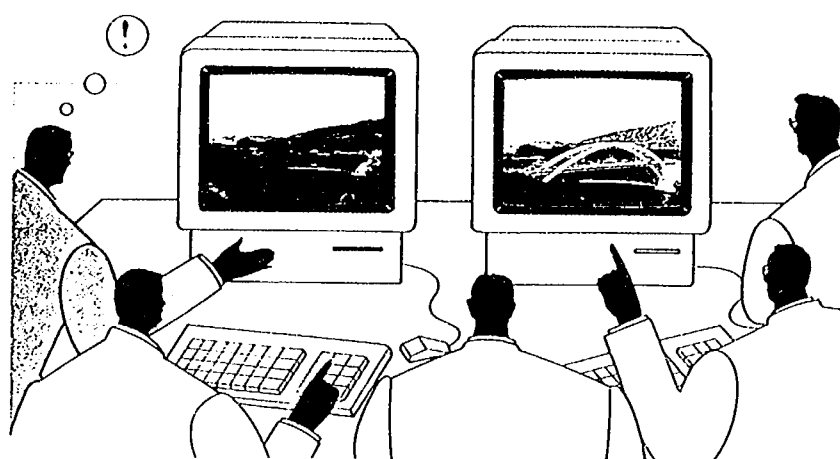
- 写真等から作成したリアルな背景映像とCG画像とを組み合わせ、施設の配置計画や構造方針の検討を行うことができます。
- 景観的に優れた構造物のデータベースを用いて、様々な様式の構造物の比較検討が容易にできます。

構造物の詳細なデザインや材料・色彩の決定を支援します。

- 任意の視点からの景観検討ができます。また、視点を移動しながらの動画による検討も可能です。
- 自動設計などのCADデータを容易に読み込んで、景観検討を行うことができます。
- 欲しい色や材質を持った材料を容易に検索できます。また、材質や光線の具合などの細部にまで現実感のある画像を用いた検討ができます。

構造物や都市景観の時間的な変化の検討を支援します。

- 季節、時刻および天候による景観の変化を検討することができます。
- 汚れや塗料の退色といった構造物の経年劣化による景観の変化を検討することができます。
- 都市計画要件(高度制限等)の変更による街並みの変化を検討することができます。



歴史性を演出したデザイン



新しい時代を演出したデザイン



濃い緑が印象的な夏の街路景観



明るい黄葉が際立つ秋の街路景観

湖沼の新しい富栄養化対策

自然湖沼やダム湖では、富栄養化に伴い好ましくない浮遊藻類が異常増殖して、アオコや淡水赤潮、異臭味が発生しているところがあります。土木研究所では、こうした好ましくない浮遊藻類の異常増殖を阻止する画期的な対策方法を開発しました。本システムは糸状藻類を活用して流入水及び湖水から栄養塩類を除去する「糸状藻類活用システム」と流入河川水及び湖水の流動を制御して浮遊藻類の増殖し難い環境を作り出す「流動制御システム」からなります。

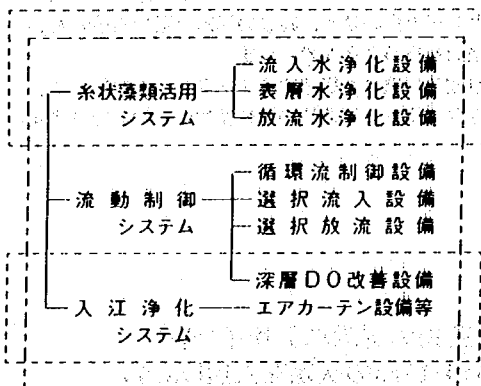
糸状藻類活用システムの特徴

- ①糸状藻類は、自然河川や浅い湖沼で一般に生息
- ②無機態のリンや窒素の吸収能力が高い
- ③四季を通じて概ね活用可能
- ④増殖のコントロール及び回収が容易
- ⑤魚や家畜の良質なエサとなり、有効利用が可能

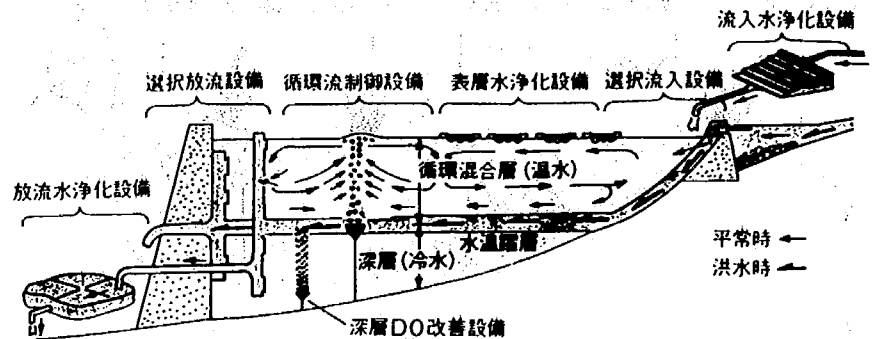
流動制御システムの特徴

- ①散気管方式の曝気循環装置を用いて有光層の数倍の厚い循環混合層を形成
 - 循環混合による光制限及び藍藻類の優占阻止
 - ②栄養塩類を含んだ流入水を水温躍層に導き、すみやかにダム湖から放流
 - 有光層への栄養塩類供給を制限
 - ③深層DOの改善
 - 底泥からの栄養塩類溶出防止
- ①②③による藍藻類等の異常増殖の防止

湖沼における適用



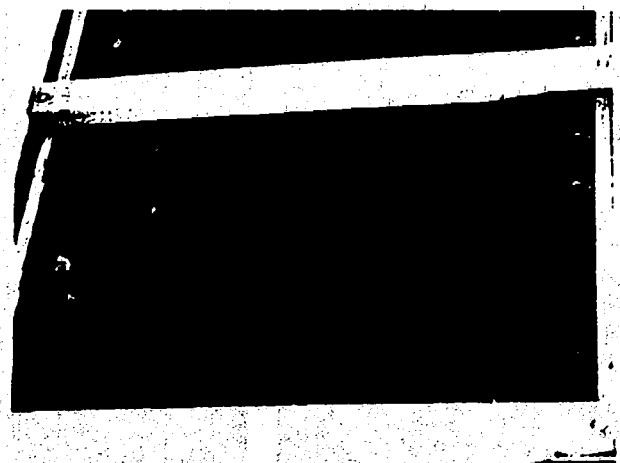
ダム湖における適用



新しい富栄養化対策の全体構成図



自然河川に生息する糸状藻類（メロシラ）



糸状藻類の生息環境を再現する実験

地球環境問題と建設技術（地球温暖化問題について）

人間は暮らしに適したよりよい生活環境を求め、常に自然に働きかけてきました。しかし、産業革命以来の人間の生産活動の増大等による影響や被害は、近年に至り国境を超え地球規模にまで広がり、地球環境問題として顕在化してきました。そして、平成4年6月には地球サミットがブラジルで開催されるなど、国際的な関心も高まってきています。

さて、社会資本整備とは人間のよりよい生活環境の創造であり、地球環境問題の解決に向かって、建設技術研究開発の果たすべき役割は極めて大きいといえましょう。

さまざまな地球環境問題のうち、建設事業に最も直接的に関連するものは、“地球温暖化”です。

地球温暖化問題の把握



図-1 温暖化による環境への影響

地球温暖化によりこのようなさまざまな影響が複合的に引き起こされることが懸念されています。

地球温暖化の影響予測



図-3 地球温暖化と水資源

地球温暖化により、降水量や蒸散量等が変化し、新たな水資源の開発が必要となります。(水工水資源研究室)

“地球温暖化”問題は、CO₂等の温室効果ガス濃度の増加の問題といわれます。増加の主な原因は、一般に自動車や火力発電での化石燃料の大量消費によるCO₂の排出増大と、熱帯林等の消滅によるCO₂の吸収減少といわれています。これらの結果として、生物相の変化、海面上昇等水文環境の変化が懸念されるわけです。

今のところ因果関係のシステムが明確ではありませんが、問題の根が深く解決には根本的な対策が必要であること、また現在予測されている影響も重大であり早期の対応が必要とされていること、等により、「原因の除去(CO₂の排出抑制、吸収増大)」及び「影響への対応」の双方から研究開発を行っています。

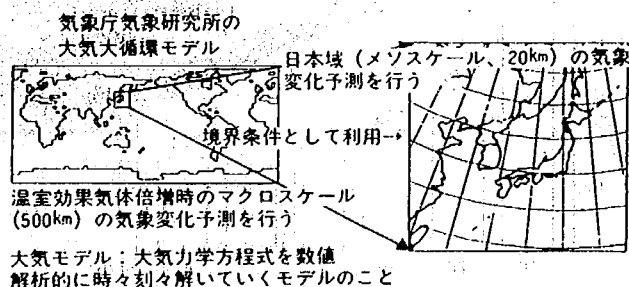


図-2 温暖化による気象変化予測

地球温暖化時に日本域における気象変化を予測するための大気モデルの開発を行っています。(水文研究室)

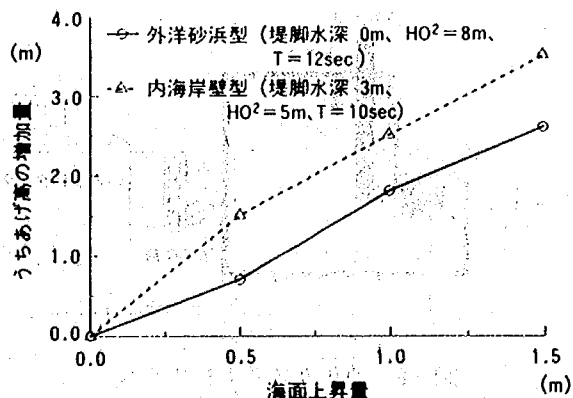


図-4 海面上昇に伴ううちあげ高の変化

海面が1m上昇すると、うちあげ高は1.8~2.3mも増加します。(海岸研究室)

地球温暖化の原因に関する調査研究

土木事業におけるCO₂排出量の内訳

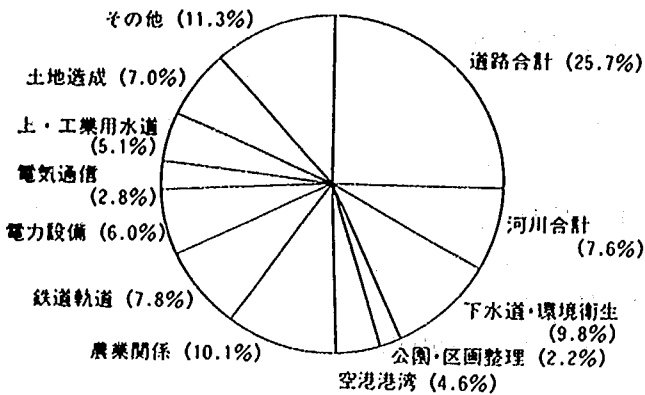


図-5 土木事業における CO₂ 排出量

全産業の CO₂ 排出量の約 10% が土木事業によるもので、そのうち、道路部門が約 1/4 を占めています。

(化学研究室)

温室効果ガスの発生抑制・吸収技術

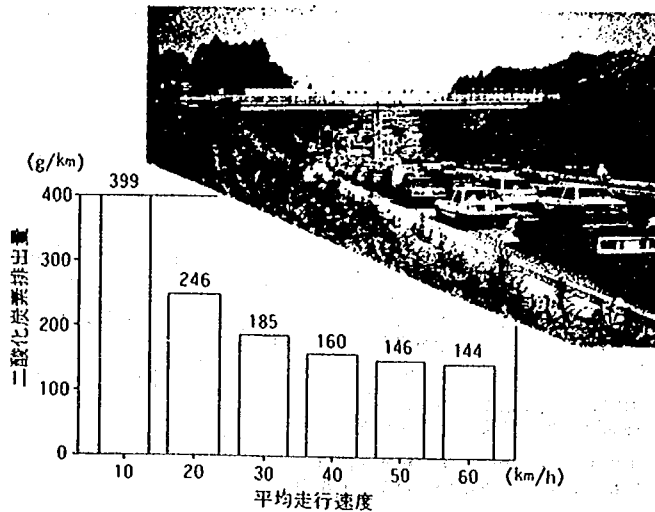


図-6 CO₂ 排出の少ない道路整備

渋滞は、CO₂ 多量排出の原因。質の良い効率的な道路ネットワークが必要です。

(交通環境研究室)

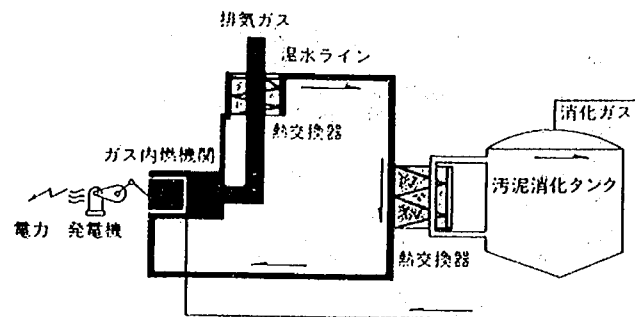


図-8 消化ガス発電システム

下水汚泥処理プロセスで発生する消化ガス（メタン（温室効果ガスの 1 つ）含有量約 60%）を有効利用したガス発電システムです（現在わが国で 16 基、年間発電量約 5 千万 kWh が稼働中）。

(汚泥研究室)

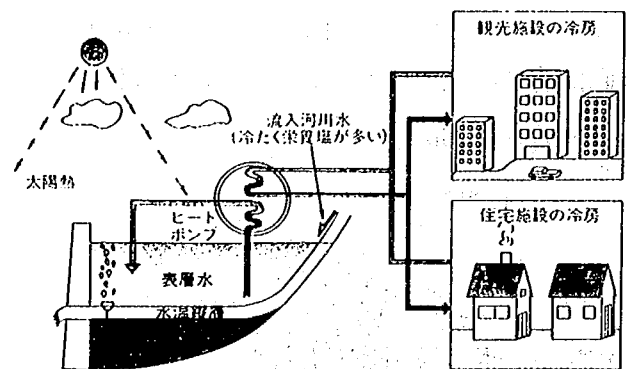


図-7 ヒートポンプ（冷房への利用例）

化石燃料以外のエネルギーとしてヒートポンプの活用が期待されています。貯水池でのヒートポンプには水質改善効果も期待できます。

(環境計画研究室)



写真-1 高架下の緑化

高架の上、下、壁面等の植物の生育が困難な空間の緑化を可能にする技術開発を行っています。(緑化生態研究室)

建設省土木研究所環境部長 水谷敏則

建設省
土木研究所

富栄養化対策で新手法

曝氣に加え選別流入も

「流動制御システム」
総合的に貯水池保全

建設省主計局の選別計開図表（資料表五）は、ダム水他の水利設備として「河川利用システム」を分類した。これは、堤堰、閘門用いられていゝ場合を「選択取水」を意味する「択取」と、さらに選択取水などの狭い中流を加ふダム湖の運動面商するところの「河川利用システム」を、取水他の設備がなを「河川利用システム」から、本表の河川に大きな割合別得て「河川利用システム」の分類は大きい。

効果的な散気管方式

[illegible]

図一）流動制御システム全体構成図

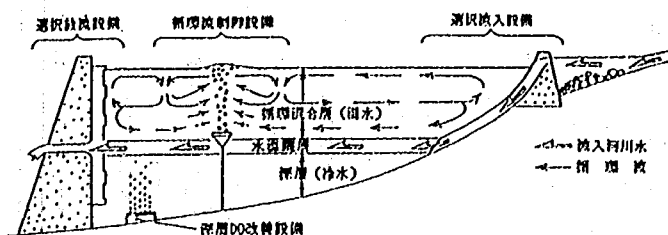
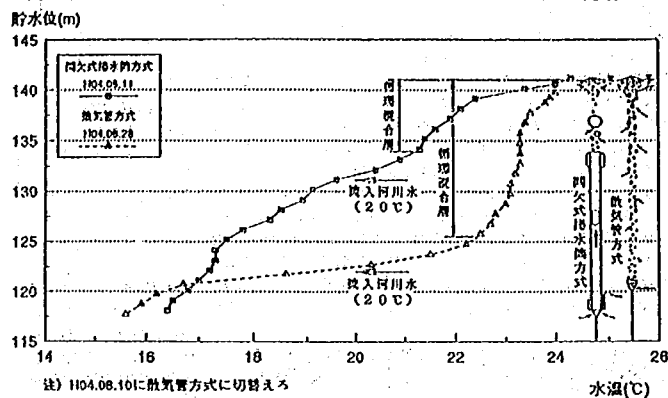


図-2 現地実験による散気管方式と間欠式空気揚水筒方式との効率の比較



注) H04.08.10に散気管方式に切替える

[illegible]

水矣。學者は、當時の流入水の
性質種類が多い場合や小洪
水時の高麗水害、洪水氾濫部
へ導き、留滞設備等との配合
が努力せられる。これに、
湛留放流設備が加わること
で、洪水氾濫部と流入した
高麗水を導くことが容易き、

図-1 ダム湖や遊水池の富栄養化対策メニュー

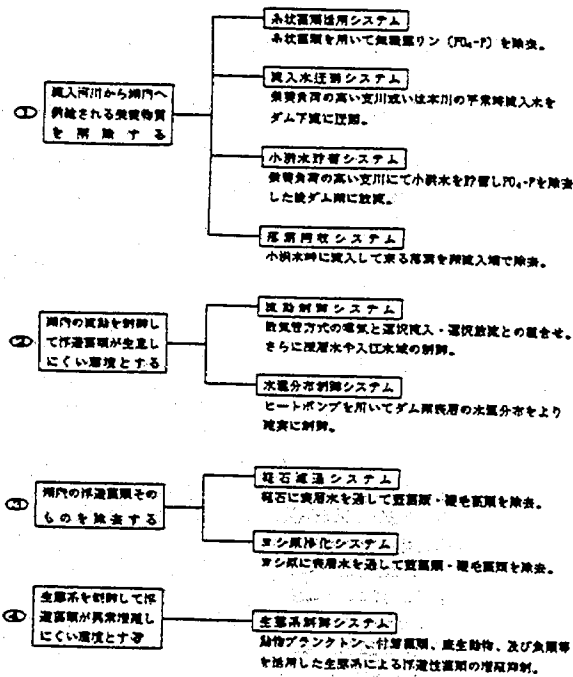


表-2 散気管方式の導入におけるキーポイント

散気管	期待する効果	守るべき鉄則
湖内汚濁削減	大きな汚濁削減	●ホースと開口部でしかも一孔からの散気が必要 ●湖内汚濁に生じる水面の汚濁を防ぐためのフロート等がないことが必要 ●湖内汚濁に生じる汚濁の汚濁を防ぐための材料がないことが必要
湖内DO改善	多くの空気を導入	●小口径で多数の開口部からの散気が必要 ●湖内汚濁に生じる汚濁を防ぐためのフロート等がないことが必要
入江汚濁削減	均一なエアカーテン	●散気管をホースに等しい口径にすることが必要 ●散気管を水平に保つことが必要

散気管方式の導入は、湖内汚濁削減、湖内DO改善、入江汚濁削減の3つの効果が期待できる。しかし、散気管方式の導入には、いくつかの鉄則を守ることが必要である。まず、湖内汚濁削減のために、ホースと開口部でしかも一孔からの散気が必要である。また、湖内DO改善のために、小口径で多数の開口部からの散気が必要である。さらに、入江汚濁削減のために、均一なエアカーテンを形成するために、散気管をホースに等しい口径にすることが必要である。また、散気管を水平に保つことが必要である。

貯水池の総合的な水質保全対策

～求められる新しい発想～



「貯水池の水質保全対策」は、貯水池の水質を改善するための総合的な対策である。貯水池の水質は、流入河川の水質、湖内の流動、湖内の汚濁物質、生物系などの要因によって決まる。したがって、貯水池の水質保全対策には、これらの要因を総合的に考慮する必要がある。

貯水池の水質保全対策には、4つの主要な対策がある。① 流入河川からの栄養物質の削減、② 湖内の流動の制御、③ 湖内の汚濁物質の削減、④ 生物系を制御して汚濁物質を削減する。これらの対策を組み合わせることで、貯水池の水質を改善することができる。

貯水池の水質保全対策には、いくつかの鉄則を守ることが必要である。まず、湖内汚濁削減のために、ホースと開口部でしかも一孔からの散気が必要である。また、湖内DO改善のために、小口径で多数の開口部からの散気が必要である。さらに、入江汚濁削減のために、均一なエアカーテンを形成するために、散気管をホースに等しい口径にすることが必要である。また、散気管を水平に保つことが必要である。

効率的な散気管方式

耶馬溪ダム等で導入予定

散気管方式は、貯水池の水質を改善するための有効な手段である。散気管方式は、湖内に空気を導入することで、湖内汚濁を削減し、湖内DOを改善する。また、散気管方式は、入江汚濁を削減する効果もある。

散気管方式の導入には、いくつかの鉄則を守ることが必要である。まず、湖内汚濁削減のために、ホースと開口部でしかも一孔からの散気が必要である。また、湖内DO改善のために、小口径で多数の開口部からの散気が必要である。さらに、入江汚濁削減のために、均一なエアカーテンを形成するために、散気管をホースに等しい口径にすることが必要である。また、散気管を水平に保つことが必要である。

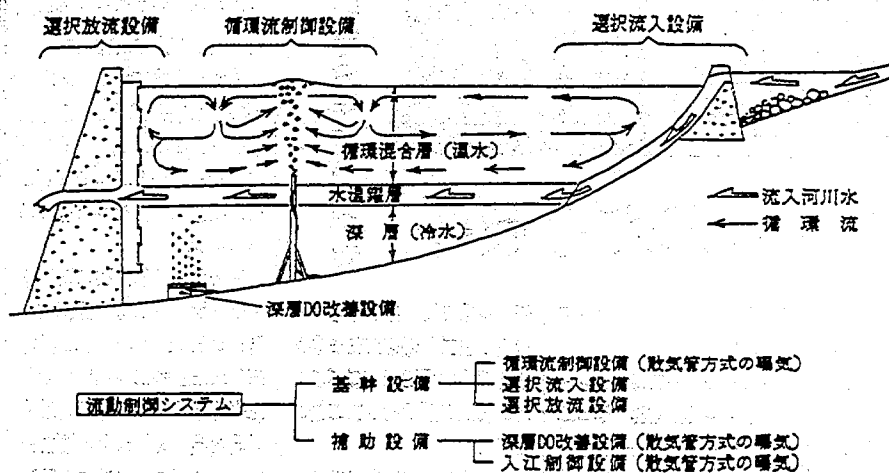
ダム湖や遊水池等の富栄養化対策

環境省 国土院 水質汚濁対策課 久納 誠

図-1 散気管方式の導入の概要

- ① 散気管方式の導入による湖内汚濁削減の概要
 - 湖内汚濁削減による湖内汚濁削減の概要
- ② 湖内DO改善の概要
 - 湖内DO改善による湖内DO改善の概要
- ③ 入江汚濁削減の概要
 - 入江汚濁削減による入江汚濁削減の概要

図-2 流動制御システム全体構成図



この図は、河川の流動制御システム全体の構成を示している。図の中心には、河川の断面が描かれており、上層には「循環混合層(温水)」が存在し、その下には「水温躍層」があり、最下層には「深層(冷水)」がある。右側から「流入河川水」が流入し、左側へ「循環流」が流れている。主要な設備として、上右に「選択流入設備」、中央に「循環流制御設備」、上左に「選択放流設備」、そして底部中央に「深層DO改善設備」が配置されている。右下の凡例によると、「基本設備」には循環流制御設備(散気管方式の曝気)、選択流入設備、選択放流設備が含まれ、「補助設備」には深層DO改善設備(散気管方式の曝気)と入江制御設備(散気管方式の曝気)が含まれる。

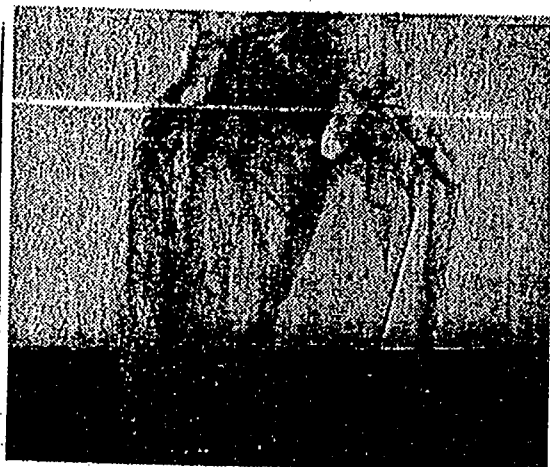
藻をもって藻を制す

糸状藻類使う
新しい浄化法

アオコや赤潮防ぐには

湖沼、ダムなどに夏に発生する困り者のアオコや赤潮発生を防ぐために、兄弟分の糸状藻類に水中のリンや窒素を吸収させる新しい水質浄化システムを建設省土木研究所(茨城県つくば市)が開発した。この「藻には藻を」という方法、ホテイアオイやアシ類といった植物を使えば従来の方法に比べ、十倍も浄化能力が高いという。この藻類は魚や家畜のエサにもなり、一石二鳥もめではない。

糸状藻類
アミミドロやアオミドロなど、河川や湖沼に普通に見られる糸状の藻類。わき水が流れる岩肌など、水の中にも生え、ほぼ一年中繁殖できる。マリモもこの仲間。



新しい水質浄化システムの実験で繁殖したアミミドロ(土木研究所提供)

従来より10倍の効率

建設省土木研が開発

浮遊性藻類という微生物の異常増殖が、アオコや淡水赤潮の原因。循環が悪い湖沼やダムなどで夏に発生する。水道水をかき出したり、腐った沿岸に臭いを漂わせたりするほか、魚を窒息死させたりもする。

浄水場などでは活性炭や木炭を使っている過回収・脱臭したり、ポンプで湖水をかき回したりと、様々な対応療法を

取っているが、発生そのものを防ぐには、家庭排水や農畜産物から湖沼に流れ込むリンや窒素を減らさなければならぬ。

下水処理場などで固形物を取り除き、一見きれいになった水でも、中にはリン、窒素が溶け込んでいます。これを安く大量に除去するのは難しい。リンや窒素をよく吸収して育つホテイアオイなどを、流入河川や沿岸に植える作戦も取られているが、効果はパツとしない。

「魚が藻を食べる場所を作ったり、乾燥させて二ワトリや豚の自然食に回せば、生態系を有効利用したシステムになる」と、同研究所環境計画研究室の丹羽篤彦氏は実用化に期待している。

ただ、よほど水たまりと浮遊藻類に負けてしまふため、水の流れを適度に起こさなければならぬ。また、土台はコンクリートに砂利を埋め込んだだけ、といった単純な形の

方が都合がいい。構造を複雑にすると糸状藻類の除去が難しくなり、枯死して再び水にリン、窒素を放出してしまうからだ。

藻類は、水に溶けたリンの濃度が高くなるにつれて繁殖しやすくなるので、リンの除去能力が浄化の性能を喪失。試算では、広さ一畝、深さ八センチの皿のような処理場に毎秒一リットルの河川水を流して糸状藻類を繁殖させると、「一畝当たり二リットルあったリンが五リットルに減るとい

に害を及ぼさない。これにリンや窒素などの栄養を横取りさせようというわけだ。

糸状藻類が土台を備えた処理施設を用意し、他の微生物をあらかじめフィルタリなどで除いてから施設に流し込むという二段構えの戦略を立てた。

アオコの発生に悩む茨城県・鹿嶋市や千葉県・印旛沼の流入河川などで実験した結果、体積は数日で倍になり、従来の植物より約十倍浄化効率が良かった。育った藻は手ですぐろだけではがれ、回収も簡単だった。

環境計画研究室文献目録

論文名	著者名	書籍名	発行所	巻号	頁	発行年月日
糸状藻類を活用した湖沼の富栄養化対策技術の開発	丹羽 薫 久納 誠	土木技術資料	建設省土木研究所	Vol 35	20～ 26	1993.11
流動制御によるダム湖の水質保全技術の開発	丹羽 薫 久納 誠	土木技術資料	建設省土木研究所	Vol 35	26～ 32	1993.11
糸状藻類を活用した湖沼水質保全システム	丹羽 薫 久納 誠 山下 芳裕	環境システム研究	土木学会	Vol. 21	419～ 427	1993.5
流動制御によるダム湖水質保全システム	丹羽 薫 久納 誠 久保 徳彦	第4回ダム工学研究発表会	ダム工学研究会	4	25～27	1993.5
我が国での対策事例と新しい水質保全対策	丹羽 薫	ダム湖水質保全シンポジウムテキスト	ダム水源地環境整備センター		9～16	1993.11
水質保全への生態系の活用の仕方	丹羽 薫	ダム水源地ネット	ダム水源地環境整備センター	1993.12	6～7	1993.12
Chemical Processes of Surface Waters: 3) Reservoirs	Kaoru Niwa	Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering	JSCE	No. SI-3	166～ 169	1993
ヒートポンプと流動制御を用いたダム湖水質保全システム	丹羽 薫 久納 誠 久保 徳彦 古里 栄一	水工学論文集	土木学会	38巻	307～ 312	1994.2

論文名	著者名	書籍名	発行所	巻号	頁	発行年月日
ダム湖における自然環境創造	丹羽 薫 他	ダム技術	ダム技術センター	No.8 5	15～ 32	1993. 10
地球温暖化が水資源に及ぼす影響について(Ⅱ)	丹羽 薫 廣瀬 昌由 天野 裕史	ダム技術	ダム技術センター	No. 8 5	40～ 47	1993. 10
ダム現場における濁水処理スラッジの有効利用	竹林 薫 丹羽 他	ダム技術	ダム技術センター	No. 9 0	42～ 48	1994. 3
地球温暖化が流域水文応答に及ぼす影響	丹羽 薫 他	地球温暖化のもとでの水質源評価と耐渇水方策に関する総合的研究(科研費研究成果報告書)		No.0330 2046	36～ 64	1994. 3
地球温暖化にともなう水資源への影響とその対策	丹羽 薫 他	同上		No.0330 2046	65～ 91	1994. 3
貯水池の総合的な水質保全対策	久納 誠	水道産業新聞	水道産業新聞社	第3173	26	1994. 1
富栄養化対策で新手法		水道産業新聞	水道産業新聞社	第3167	26	1993. 12
藻をもって藻を制す		朝日新聞	朝日新聞	1月24日 夕刊		1994. 1

環境計画研究室名簿 (平成6年12月現在)
(現メンバー)

氏 名	役 職
丹 羽 薫	室 長
久 納 誠	主任 研究員
並 河 良 治	主任 研究員
天 野 邦 彦	主任 研究員
小 栗 ひ と み	研 究 員
長 野 幸 司	研 究 員
久 保 徳 彦	研 究 員
真 田 誠 至	技 官
森 本 浩 之	部 外 研 究 員
高 橋 健 夫	部 外 研 究 員
古 永 充	部 外 研 究 員

(前メンバー)

氏 名	役 職	転 出 年 月 日
安 田 吾 郎	主任 研究員	平成 6. 11. 1
山 下 芳 裕	部 外 研 究 員	平成 5. 9. 30
古 里 栄 一	部 外 研 究 員	平成 6. 4. 30

丹羽 蕉, 久納 誠, 天野 邦彦
小栗ひとみ, 長野 幸司, 久保 徳彦
真田 誠至, 安田 吾郎

要旨 平成5年度に環境計画研究室が建設事業に関連した環境計画の充
実のための環境評価技術, 環境データベース, 景観設計支援システムや
湖沼の水質浄化に関する研究を行った成果の概要の報告である。

キーワード: 環境アセスメント, 環境データベース, 環境経済評価, 景
観シミュレータ, 景観データベース, 地球温暖化, 鳥類生
息環境, ヒートポンプ, 富栄養化対策, 密度流, 糸状藻類

郵便はがき

郵便切手
は
い
っ
て
下
さ

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
環境部環境計画研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3317号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印