

紫外線照射によるプランクトンコントロール

Suppression Algal Bloom by Ultraviolet Radiation

井芹 寧* 川端善一郎**

藤本 健二*** 伊東 通陽****

- * Yasushi Iseri, 西日本技術開発(株)環境部 〒810 福岡市中央区渡辺通り1-1-1, Environmental Section, West Japan Engineering Consultants Inc., 1-1-1 Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka-shi 810 Japan
- ** Zenichiro Kawabata, 愛媛大学農学部生物環境保全学講座 〒790 愛媛県松山市樟味3-5-7, Department of Environmental Conservation, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi 790 Japan
- *** Kenji Fujimoto, 清本鐵工(株)技術開発部 〒889-05 宮崎県延岡市土々呂町6-1633, Department of Engineering Development, Kiyomoto Co. Ltd., 6-1633 Totoro-cho, Nobeoka-shi, Miyazaki-ken 889-05 Japan
- **** Michiharu Itou, 九州電力(株)土木部 〒810 福岡市中央区渡辺通り2-1-82, Department of Civil Engineering, Kyushu Electric Power Co., 2-1-82 Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka-shi 810 Japan

紫外線照射によるプランクトンコントロール

井 芹 寧* 川端善一郎**
藤本 健二*** 伊東 通陽****

1. はじめに

紫外線照射処理は、従来から、医療分野、工業分野、食品製造分野などで、固形物の表面、室内空気および水の殺菌などに利用されてきた。また、近年では、プールや養魚場などで利用水の殺菌を目的としてより大規模な各種の水質浄化装置が実用化されている。これらの装置の研究開発により、各種の菌種やカビなどを殺菌するために必要な紫外線照射量も明らかになってきている¹⁾。

紫外線照射法は他の手法と比較して装置がシンプルなため維持管理が容易であること、二次的汚染を引き起こしにくいことなどの特徴をもっているため、これだけ広い分野で利用されるようになったものと考えられる。今日ではこの特徴をさらに生かすため、障害プランクトンの現存量のコントロールの目的で、公園の池やダム湖などへの直接適用を試みている例も見受けられる²⁾³⁾。しかしながら、現状では各種プランクトンの殺菌に必要な紫外線照射量の明確な値は明らかになっておらず、ダム湖等の大規模な水域においては殺菌効果の定量化も困難な状況である。

本稿は、ダム湖における淡水赤潮を対象に、そのプランクトンコントロールを目的に研究開発された紫外線照

射型赤潮処理船について、その開発の経緯および効果について取りまとめ、今後の紫外線照射法の発展性について検討したものである。

2. 淡水赤潮発生状況⁴⁾

淡水赤潮の発生は、宮崎県の耳川水系塚原ダム湖(表1)において、昭和50年代より認められている。淡水赤潮は春季および秋季を中心に発生し、主としてダム湖上流端に観察される。淡水赤潮の原因は植物プランクトン渦鞭毛藻の *Peridinium* の高密度の集積であり、その多くが *Peridinium bipes* で占められている。

P. bipes の増殖温度特性および制限栄養塩培養実験、

表1 塚原ダム湖諸元

項 目	諸 元
ダム形式	コンクリート重力式
竣工年	昭和13年
ダム堤長×高さ	215.00×87.00m
流域面積	410.6km ²
湛水面積	1.14km ²
総貯水容量	34,326,000m ³
有効貯水容量	19,555,000m ³
平均水深	26.01m
湖水交換回数	約40回/year

* Yasushi Iseri, 西日本技術開発(株)環境部 〒810 福岡市中央区渡辺通り1-1-1, Environmental Section, West Japan Engineering Consultants Inc., 1-1-1 Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka-shi 810 Japan

** Zenichiro Kawabata, 愛媛大学農学部生物環境保全学講座 〒790 愛媛県松山市榊味3-5-7, Department of Environmental Conservation, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi 790 Japan

*** Kenji Fujimoto, 清本鐵工(株)技術開発部 〒889-05 宮崎県延岡市土々呂町6-1633, Department of Engineering Development, Kiyomoto Co. Ltd., 6-1633 Totoro-cho, Nobeoka-shi, Miyazaki-ken 889-05 Japan

**** Michiharu Itou, 九州電力(株)土木部 〒810 福岡市中央区渡辺通り2-1-82, Department of Civil Engineering, Kyushu Electric Power Co., 2-1-82 Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka-shi 810 Japan

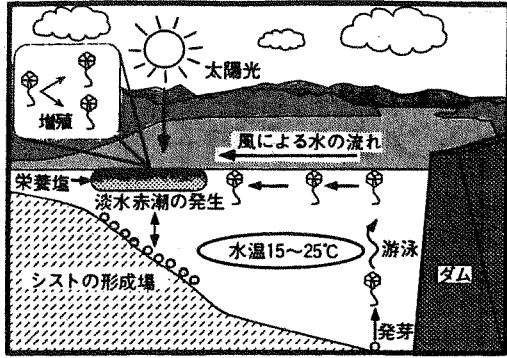


図1 淡水赤潮発生機構

ならびに、ダム湖の湖水流動、シスト発芽量の分布、プランクトンおよび水質分布調査などを行なった結果、当ダム湖における淡水赤潮の発生は高濃度の栄養塩の供給でプランクトンが異常増殖する、いわゆる富栄養化によるものではなく、①淡水赤潮の種場としての安定したシスト集積域が形成されていること、②走光性による赤潮細胞の表層への集積および、吹送流等による湖水流動に伴う、ダム湖上流端域への赤潮細胞の集積機構があること、③これらの作用によるダム湖上流端域における *Peridinium* の連続培養系が成り立っていることなどが淡水赤潮の発生要因になっているものと推定された(図1)。同様な発生機構は愛媛県石手川ダム湖でも確認されている⁵⁾。

3. 淡水赤潮対策法の選定

淡水赤潮発生機構の解析結果に基づき、既存の文献、実例などを参考に、当ダム湖における最適な淡水赤潮除去対策法の選定を行なった。現在の情報も含め、選定結果を表2に示す。

経済性、処理量および新規性などから判断して、紫外線照射法を第一の対策法と決定し、検討を行なった。

紫外線処理装置については、風向き等により、赤潮の集積部が移動すること、当ダム湖ではしばしば大規模な出水があることなどから、移動処理船型に決定した。

4. 現場メソコズムによる実験⁶⁾

4.1 実験方法

淡水赤潮処理方式の検討を目的に、ダムサイト部の水域にメソコズムを2槽設置し、処理実験を行なった。メソコズムは16m²、深さ4.7m、容量約75m³を防水布で隔離したものである。メソコズムには周辺水域の湖水を導入した後、淡水赤潮発生部の湖水を投入した。メソコズムの1つについて処理の効果の観察を行なうため、殺

菌線出力30W(主波長253.7nm)の紫外線ランプを取り付け、曝気循環を行なった。試料は処理前および処理後16日まで、メソコズム内21個所より採取し、水質、プランクトン相、沈降物の変化を調査した。

4.2 実験結果

無処理区では1カ月以上淡水赤潮の形成が観察されたのに対し、紫外線処理区では処理開始1日後には全赤潮細胞の游泳運動が停止し、2日後にはすべての細胞が死亡沈降した(図2)。その後、処理を停止しても赤潮細胞の游泳は認められなかった。オゾン処理併用も検討したが、紫外線処理のみで十分な効果が得られた。

5. 紫外線処理室内実験⁷⁾

紫外線照射量と *P. bipes* 細胞の殺菌率との関係を明らかにするために、紫外線処理室内実験を行なった。

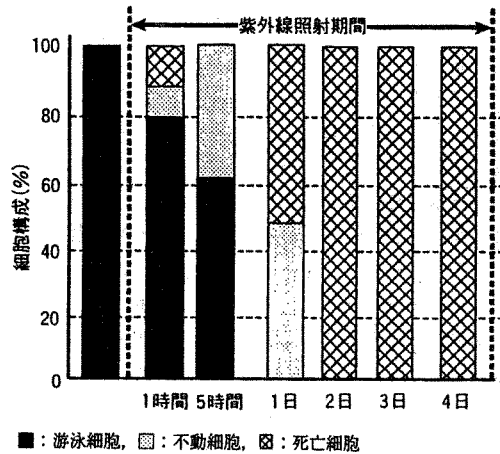


図2 現場メソコズム実験結果

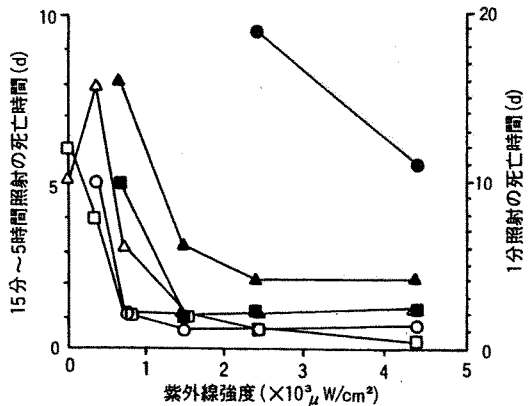


図3 室内実験結果

表2 淡水赤潮対策手法としての効果の評価、塚原ダム湖への適用性の評価

対策法	概要	判定根拠 (淡水赤潮処理としての長所・欠点)	効果	経済性	実績	適用
紫外線	紫外線照射による殺藻。	薬剤による二次的汚染が少ない。ろ過法より処理量が期待できる(実)。夜間は、 <i>Peridinium</i> の走光性を利用した誘因殺藻装置としての効果がある(実)。	○	○	△	○
オゾン	オゾンによる殺藻。	一時、游泳を停止し沈降するが、多くが再生する(実)。	△	△	△	△
沈降分離	紫外線照射、オゾンにより赤潮細胞の游泳運動を停止させ、沈降分離する。	<i>Peridinium</i> の場合、游泳運動を停止させるとすみやかに沈降し、良好な分離が可能である(実)。回収後の処理が問題。	○	○	×	△
超音波、衝撃波	物理的ショックによる殺藻。	渦鞭毛藻は衝撃に弱く、効果が期待できる(実)。従来の超音波法は処理量が少ない。	○	○	×	△
フェンス	淡水赤潮集積機構の妨害(栄養塩供給水域である上流端部への移動防止、上流端部で増殖した赤潮の下流域への拡散防止)。	当ダム湖の淡水赤潮発生機構から判断して最適な方法の1つである。0.3～5m水深の設置型フェンスで、淡水赤潮流動制御効果あり(実)。安価に副ダムの効果が得られる。出水時への対応が必要である。	○	○	△	△
表層放流	プランクトン生産層の湖水交換率のアップ。	効果は高いと予想されるが、当ダム湖の地形上、効果がダムサイト付近に限られる。赤潮細胞の集積するダム湖上流端部に表層取水設備を設置すればより効果的な対策になり得る。ひとまず、ゲート放流で対応する。	○	○	△	△
水位操作	水位操作によるシスト発芽抑制。シスト形成時の水位を上げ、発芽時の水位を下げシストを水上に導く、逆の操作でシストを無光層へ導く。	理論的には効果が期待される。しかし、当ダムの水位運用上、対策としての運用が難しい。	○	○	×	△
バイオマニピュレーション	淡水赤潮の捕食者を、生態的食物連鎖に基づき増加させ、赤潮細胞の増殖を制御する。	一般的には、魚類の除去、投入などが行なわれる。オゾンで動物プランクトンの増殖を大きく促進する作用が確認されたので、オゾンを利用した動物プランクトンの投入法が期待される(実)。	△	○	△	△
水生植物	淡水赤潮が打ち寄せる湖岸帯への植栽。 赤潮発生部への浮島設置。	水生植物による淡水赤潮増殖阻害物質生産。遮光、栄養塩吸収競争による増殖抑制。根圏微生物による増殖阻害などによる効果が期待できる。	△	○	△	△
生物膜浄化	淡水赤潮等を含んだ湖水を、隙間浄化設備等生物膜帯に通水する。	淡水赤潮では実績はないが、アオコでは効果を上げている例があり、淡水赤潮への適用が期待される。	△	△	○	△
汚濁負荷削減	プランクトンの増殖を引き起こす栄養塩負荷量の削減。隙間浄化、水生植物利用、糸状藻類利用など、多くの手法が試みられている。	当ダム湖においては、とくに、大きな汚濁負荷により淡水赤潮が発生しているのではないため効果が期待できない。現状でも、流入水の栄養塩濃度は低く、削減が難しい。	×	×	○	×

表 2 (つづき)

対策法	概 要	判 定 根 拠 (淡水赤潮処理としての長所・欠点)	効果	経済性	実績	適用
曝気, 噴水, 循環	鉛直循環作用による, 光制限, 赤潮細胞の分散, 細胞の底質への 送り込み, 酸化による底質の改善。	当ダム湖の容量から考えると, 大規模な設備が必要である。藍藻類には増殖抑制効果が認められるが, 淡水赤潮に対する効果が明確になっていない。	△	△	○	×
副ダム, 湖中ダム	上流端部に副ダムを設け, 栄養塩を含んだ流入水を底層より放流する。	ダム湖上流端部における連続培養系の働きを阻害するので, かなりの効果が期待できる。既存ダムへの設置は技術的に困難な場合が多い。親水性の面からは, 水位の安定した水域が確保できるので好ましい。流入負荷量削減にもつながる。	○	×	△	×
流入水バイパス法	流入水を大規模な管路によりダム下流に導水する。濁水長期化対策にもつながる。	副ダム同様, ダム湖上流端部における栄養塩供給機構を阻害することになるので, かなりの効果が期待できる。	○	×	△	×
殺藻剤	薬剤による殺藻。	薬剤による二次的汚染が問題である。	△	△	○	×
シスト分布域対策	シスト分布域の, 覆砂, 浚渫。	覆砂: 発芽細胞が柔軟で粒子間をすり抜け効果が少ない(実)。 浚渫: 濁水発生の問題。	△	×	×	×
ろ過	ろ過による除去回収。	系外に取り除くことになるので理想的である。しかし, 処理量から考えて, 大きな効果は期待できない。回収後の処理が問題。近年, 高性能ろ過膜が開発されているので, その効果が期待される。回収された淡水赤潮はバイオ分野への利用可能性も検討すべきである。	△	△	○	×
凝集沈殿, 浮上分離	凝集剤, 粘土などによる凝集沈殿。 微細気泡等による浮上分離。	凝集剤の二次的汚染の問題。	×	△	△	×
遮光	寒冷紗等による遮光。	地形上, 設置が難しい, 悪天候時, 出水時の対応が必要。	△	△	×	×
殺藻生物, 抗生物質	細菌, 微生物代謝産物などによる殺藻。	渦鞭毛藻に関して海域で適用が試みられているが, 研究段階である。アオコでは着目されている手法の1つである。	△	△	△	×
その他	熱処理, プロペラ水流, 風による分散, 磁気回収。	検討が行なわれているが, 実用レベルに至っていない。	△	△	△	×

	効 果	経 済 性	実 績	(塚原ダム湖への) 適用
○	効果が期待できる	経済性が高い	適用例が多い	最優先手法として採用
△	やや効果が期待できる	経済性が低い	適用例が少ない	次段階で検討する
×	効果は期待できない	経済性が極めて低い	適用例がほとんどない	不採用

(実): 今回の研究のなかで実験により確認された事項。

5.1 実験方法

実験装置は Nk 式人工気象器の最上部に紫外線ランプを取り付けたものを用いた。処理は紫外線照射時間30秒

～1時間, 紫外線強度は80～6,700 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の範囲の条件で実施した。

赤潮細胞は当ダム湖で採取した試料(20,000～36,000

cells/ml 赤潮細胞を含む) 50ml をシャーレに入れ検体とした。培養は 15℃, 24時間明(3,000lux)の条件で行なった。死亡細胞の確認はエバンスブルー染色後, 検鏡により行なった。

5.2 実験結果

紫外線照射後の全細胞が死亡する, 紫外線強度と死亡までの時間の関係を図3に示した。その結果, 殺藻に必要な最少紫外線照射量は $2,400 \mu W/cm^2$, 45秒の条件であった。

6. 淡水赤潮処理船の開発⁹⁾

6.1 淡水赤潮処理船の構造

淡水赤潮処理船(図4)は長さ約12.3m, 幅3.6mの双胴船状の構造で, 船体の中央部には直径0.6mの円筒状の処理管を2本有する。処理管内には室内実験結果に基づき設計された紫外線ランプ(殺菌線出力30W, 主波長253.7nm)40本を装備する。

処理の過程は, ①移動時に水上に上げていた処理管を水中に浸漬する, ②処理管後部に取り付けた水中モーターを回転する, ③前方に移動しながら, 吸込口(幅3.6m, 水深0.3mまで調節可能)より淡水赤潮を含んだ湖水を吸引導入する, ④自動スクリーンにより小枝等浮遊ゴミを除去する, ⑤処理管内に設置した紫外線ランプにより紫外線照射処理を行なう, ⑥後部の排水口より処理水を排水する。

本処理船の淡水赤潮に対する殺藻能力は, 湖水 1 ml 中の赤潮細胞数が10,000細胞以上の場合, 50秒以上の処理管内滞留時間(紫外線照射時間)で, 90%前後の殺藻率である。赤潮細胞数が5,000~10,000cells/mlでは, 30秒以上で, 95%以上, 赤潮細胞数が5,000cells/ml未満では, 20秒以上で, ほぼ100%の殺藻率である。処理後の赤潮細胞の多くは運動を停止し, 沈降分解する。

6.2 淡水赤潮処理自動制御システム

本処理船の特徴として, 淡水赤潮の細胞数と処理時間およびその殺藻率のデータに基づき, 濁度を指標に湖水中の淡水赤潮細胞数を推定し, 処理管内の水中モーターの回転数を制御するシステム, つまり赤潮細胞密度に対応し紫外線照射時間を調整し, 安定した殺藻率を得る自動制御システムを装備していることが挙げられる。これにより湖水中の赤潮細胞数の急激な変化があっても, 紫外線量と淡水赤潮の殺藻率のデータに基づき紫外線処理時間を自動的に調節し, ほぼ99%以上の殺藻率を得ることが可能である(図5)。

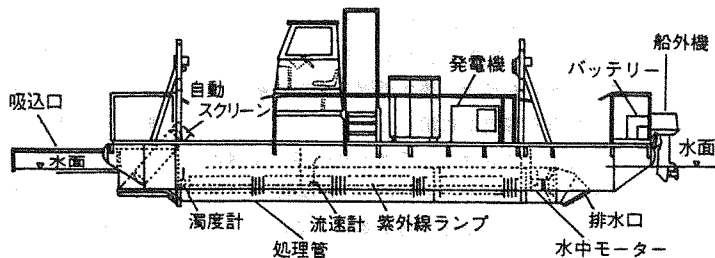


図4 淡水赤潮処理船構造図

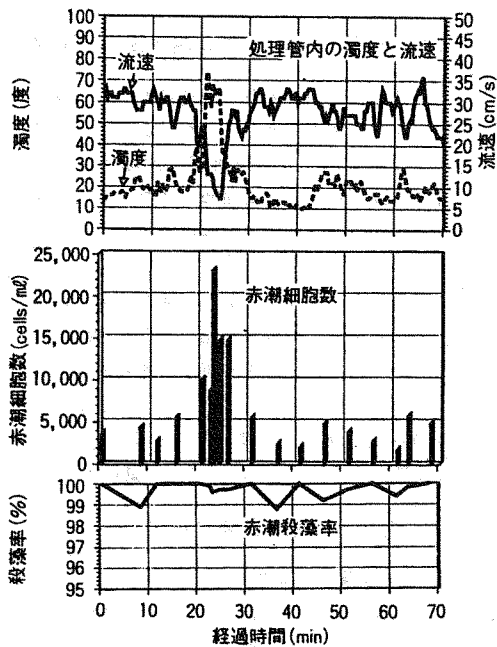


図5 処理制御状況

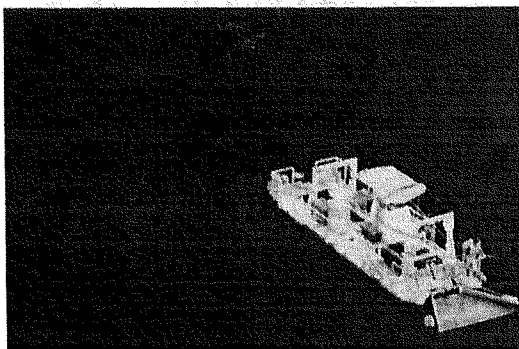


写真1 処理状況

以上のとおり, 本システムにより, 専門的な知識, 操作を伴わなくても, 効率的な安定した処理が可能となっている。

最大処理水量は約800m³/hであり、当ダム湖において20,000m²程度の淡水赤潮発生水域であれば、本処理船による5時間程度の処理で、淡水赤潮の消失が観察された。処理状況写真を写真1に示した。

本処理船の平成4年における1日当たりの淡水赤潮処理量は日最大処理量(実績)として11.5×10¹²cellsで、当ダム湖においてダム湖上流端部表層に集積している淡水赤潮量と同程度の処理が可能となっている。平成4年以降、淡水赤潮発生初期に処理を繰り返すことにより、従来より淡水赤潮の発生が小規模、短期間となった。

7. 淡水赤潮処理によるダム湖水質への影響

紫外線処理による淡水赤潮の消失に伴って、表層の水質に大幅な改善が認められた。しかしながら、処理により死亡した赤潮細胞はダム湖底泥に沈降することになり、底質の汚濁につながる可能性が予想される。また、それらの微生物分解に伴い、栄養塩が再度湖水中に回帰し、新たな汚濁負荷源となることが予想される。そこで、口径236cm²の沈降物トラップをダム湖内8個所に設置し当ダム湖の沈降汚濁負荷量を把握し、自然沈降汚濁負荷量と淡水赤潮処理による汚濁負荷量の比較を行なった。その結果、現状の処理条件においては、リン負荷で自然沈降汚濁負荷に対する、処理による負荷は0.1%程度でほとんど影響がないものと推定された(図6)。

8. アオコおよび海域赤潮の処理

8.1 アオコ対策への発展

Peridinium は細胞単独で游泳するため、比較的均一に紫外線を照射することが可能である。一方、アオコの代表種である *Microcystis* は群体を形成するため、外部から紫外線を照射しても群体内部の細胞に十分な紫外線が到達せず、殺菌率が低下することが予想される。そこで、アオコの殺菌効果を向上させるため、*Microcystis* の群体

を分散したうえ、紫外線処理を行なうことが考えられる。筆者らはアオコを含んだ原水を高圧で噴射し衝撃板に衝突させ、物理的衝撃によりアオコの群体を分散させる処理装置を開発した(図7)。本装置を用いて処理されたアオコの群体は、圧力0.7MPaでほぼ分散されており(表3)、紫外線処理の前処理として有効と判断された。

本装置は従来、分散に用いられていた超音波法等と比較すると、装置がシンプルで、大量の原水の処理が可能である。また、衝撃により細胞の破壊、細胞構造の変形が起きるなど、細胞自体がダメージをかなり受けており、紫外線処理併用による殺菌率の向上も期待される。

8.2 海域の赤潮対策への発展

本法は、①他の処理法と比較するとイニシャルコストが少なく処理量が多いこと、②薬品処理等と比較して二次的な環境汚染を引き起こす物質を排出しないこと、③水面近くに集積する植物プランクトンの殺菌能力が高いこと、④双胴船形式をとり、高速で広範囲の水域を移動できることなどが特徴となっている。これらの特徴から、今回ダム湖に適用した淡水赤潮処理船の規模を拡大することで、海域の赤潮への適用も可能と考えられる。

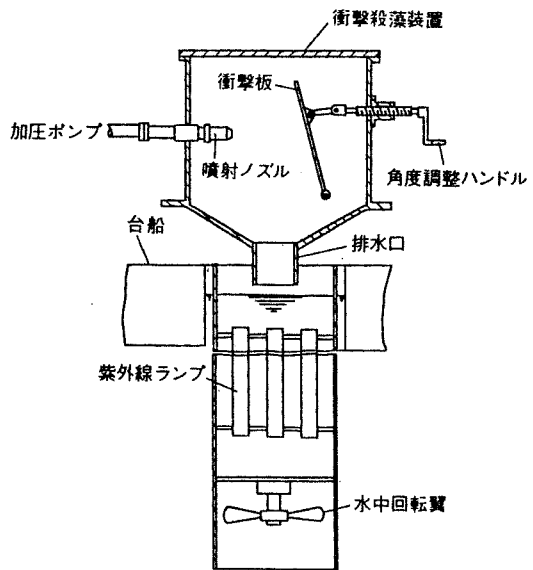
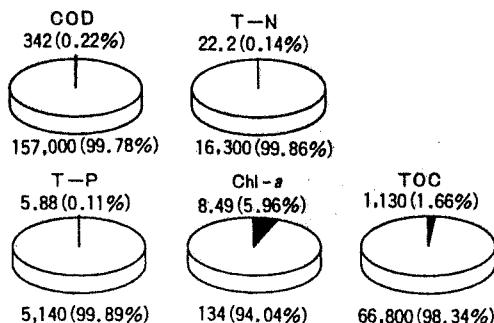


図7 衝撃と紫外線処理の併用



■: 淡水赤潮処理による汚濁負荷 (kg/year), □: 自然沈降汚濁負荷 (kg/year)

図6 処理による汚濁負荷の影響

表3 加圧処理と群体分散率の関係

項目	実験結果		
圧力条件 (MPa)	0.4	0.55	0.7
群体分散率 (%)	56	74	98

噴射ノズル口から衝撃板までの距離: 30cm

とくに表層に筋状に発生する赤潮に対しては良好な処理が期待される。

9. おわりに

ダム湖におけるプランクトンコントロールの手法として、紫外線照射法が有効であることが明らかとなった。自然湖沼、海域など、他の水域においても、紫外線照射法は適切な照射条件を設定できる設備を設ければ、良好なプランクトンコントロールシステムになり得るものと考えられる。装置としては、今回のような移動処理船型と固定型(陸上設備、噴水組込みなど)が考えられる。また、発生範囲が広い場合、プランクトンの発生量と範囲を制御するフェンス¹⁰⁾等との併用が効率的な処理につながるものと考えられる。

また、紫外線照射法は農薬や、有機物の分解促進作用を有することが報告されており¹¹⁾¹²⁾、プランクトンコントロールと同時に水質浄化にも有効である。

しかしながら、紫外線は直接細胞内のDNAの変性を引き起こす等、長期的な細胞生理に対する影響および生物遺伝的な影響に関して、未知な部分も多い。また、海域においては、紫外線の水生生物に対する悪影響について調査研究が近年行なわれている¹³⁾。これらのことを考慮すると、紫外線照射法の自然生態系への直接適用に当たっては、その効果のみでなく、周辺生態系に与える影響評価も含めた十分な検討が必要であろう。

—引用文献—

- 1) 加藤益雄：紫外線消毒技術の適用分野，造水技術，15(1)33～39(1989)。
- 2) 荒井克憲：光酸化分解法による修景池水浄化システム，資源環境対策(臨時増刊/緑の読本)，28(10)944～950(1992)。
- 3) 藤田淑郎：滝畑ダム水質保全対策施設について，農業土木技術連盟近畿支部会誌，38，3～10(1988)。
- 4) 田野襄一郎，佐々木正彦，井芹 寧：紫外線照射によるダム湖の淡水赤潮処理，電力土木，(239)72～81(1992)。
- 5) 香川尚徳，井芹 寧，伊藤猛夫：Peridinium 赤潮が発生するダム湖上流端の環境—石手川ダム湖の場合—，水質汚濁研究，7(6)375～383(1984)。
- 6) Z. Kawabata, Y. Iseri, M. Sasaki : Suppression of dinoflagellate *Peridinium bipes* bloom in a mesocosm by ultraviolet radiation, *Jap. J. Water Treat. Boil.*, 27(2) 7～10(1991)。
- 7) Z. Kawabata, K. Sasaki, Y. Iseri, M. Ochiai : Effect of ultraviolet radiation on the survival of the dinoflagellate *Peridinium bipes* causing freshwater red tide in reservoirs, *Jap. J. Water Treat. Boil.*, 26(2) 17～22(1990)。
- 8) 田野襄一郎，佐々木正彦，落合正治，井芹 寧：紫外線照射によるダム湖の淡水赤潮処理船，土木学会誌，78(7)18～20(1993)。
- 9) Y. Iseri, J. Tano, Z. Kawabata, M. Sasaki : Suppression of dinoflagellate *Peridinium bipes* bloom in a reservoir by ultraviolet radiation, *Proc. Intern. Confer. Hydropower*, 2, 1265～1273(1995)。
- 10) 荒川 詔，田嶋良一，井芹 寧：寺内ダム貯水池におけるフェンスのプランクトン制御効果，九州技報，(17)57～62(1995)。
- 11) 草壁克己，林潤一郎，磯村計明，諸岡成治：オゾン・紫外線による高度水処理，水処理技術，32(1) 3～13(1991)。
- 12) 錦織宏介：波長特性効果によるアオコ・農薬の分解浄化について，電熱，(62)35～42(1992)。
- 13) Haeder D. P., Worrest R. C., Kumar H. D., Smith R. C. : Effects of increased solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystems, *AMBIO*, 24(3)174～180(1995)。

(原稿受理日；1996年1月25日)