

波浪エネルギーを利用したダム湖・貯水池 における水質改善法に関する現地観測

A FIELD OBSERVATION ON WATER PURIFICATION SYSTEM IN MAN-MADE LAKES AND RESERVOIRS USING WAVE ENERGY

小松利光¹・岡田知也²・丸井茂俊³・松永陽一郎⁴・藤田和夫⁵・柴田敏彦⁵

Toshimitsu KOMATSU, Tomonari OKADA, Shigetoshi MARUI, Youichirou MATSUNAGA,
Kazuo FUJITA and Toshihiko SHIBATA

¹フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程 日本学術振興会特別研究員 (同上)

³正会員 建設省九州地方建設局 九州技術事務所 (〒830 久留米市高野町3435-5)

⁴工修 佐世保重工業株式会社 陸上設計部 (〒857 佐世保市立神町1)

⁵正会員 九州大学技官 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

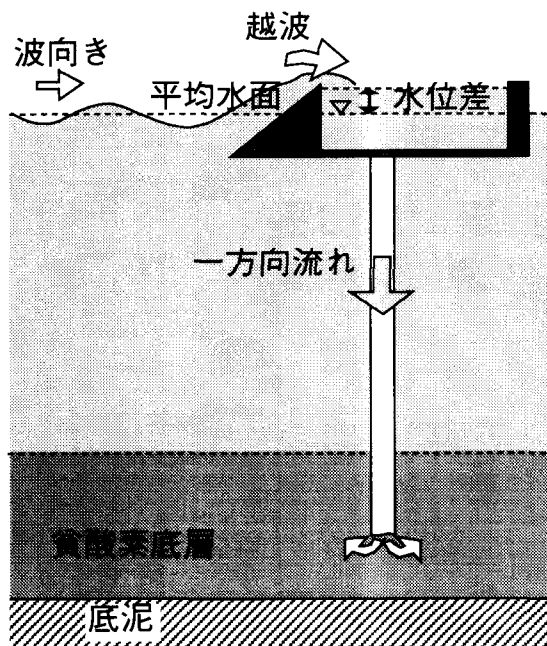
We proposed a method to make an unidirectional flow by making use of the natural wave energy. The unidirectional flow in a dam lake or a reservoir becomes possible to send water of a surface layer including a large amount of dissolved oxygen (DO) into a bottom layer in which DO is not enough. The following important items for applying the method to practical use have been examined. (1) how large are the scale and the occurring frequency of wind waves in man-made lakes or reservoirs? (2) how much is the volume of wave overtopping gained on a floating structure? (3) how much is the concentration of DO at the bottom layer changed when water of the surface layer is sent into the bottom layer?

Key Words : wave energy utilization, wave overtopping, water purification system, reservoir, floating structure

1. はじめに

ダム湖や貯水池のような停滞水域において、富栄養化がもたらす水質の悪化が問題となっている。この問題の解決策として、丹羽¹⁾は、(1)藻類が異常増殖する要因となる栄養塩類を流入河川水から除去すること、(2)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、等を挙げている。中でも比較的制御しやすい(2)に対して、流動促進や貧酸素底層への溶存酸素の供給を目的とした技術の開発が、多くの研究者や技術者によって行われてきた。その代表的なものは人工エネルギーを用いて曝気を行うものであり^{2),3),4)}、実際に現場で適用されている事例も幾つか見られる。しかしながら、人工エネルギーを一切使わずにその水域に内在する自然エネルギーを有効に利用して、これらの対策が実行

できれば地球環境上最も好ましい。著者らの一連の研究^{5),6)}は、ダム湖・貯水池に発生する表面波(風波)のエネルギーを効率的に利用することを試みたもので、図-1に示すような浮体型越波構造物を設置し、越波により獲得されたポテンシャルエネルギーを用いて、DOを豊富に含む表層越波水を貧(無)酸素底層に供給すると共に、湖水内の流動を促進しようとするものである。構造物の基本形状は波向き方向に一樣法面勾配をもったシンプルな浮体型の構造物である。入射波は一樣勾配をもった法面を遡上・越波して、貯水マスに水位差をもって貯えられる。越波することにより溶存酸素が飽和状態に近付いた越波水は、得られた水位差によってパイプを通じて底層部に送り込まれる。この供給システムは、ダム湖や貯水池では海域と異なり、膨大な量の供給水は望めないが、酸素供給の面では次の幾つかの長所をもつ。



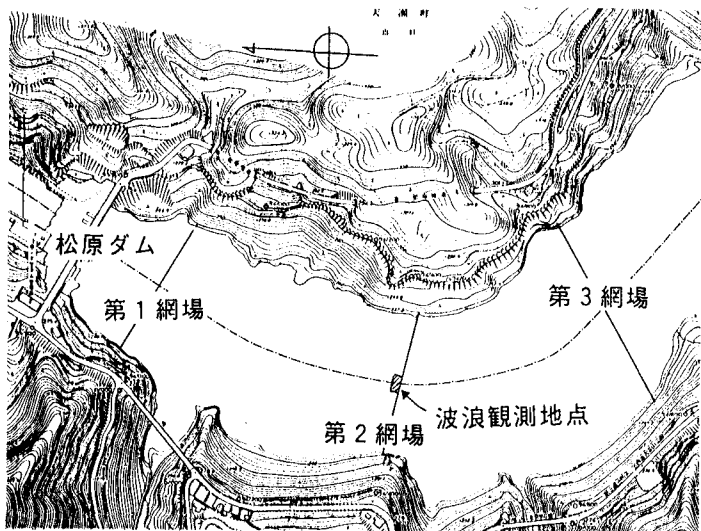
図ー1 浮体型越波構造物による底層水へのDO供給の概念図

- (a) 酸素供給率の低い曝気と較べて、越波水には酸素が既に溶け込んでいるため酸素供給効率が低い。
- (b) 表層から底層への導入過程において周囲水によってパイプの中の水温が冷やされるため、パイプから排出されるときに密度差は初期の表層と底層の密度差より小さくなり、供給された水は底層もしくは底層の上部に停滞することが可能である。
- (c) 微調整が可能である。必要ならば撤去により元の状態にすぐに復元できる。
- (d) 半永久的に効果が期待できる。
- (e) 流動を伴うため成層化する夏期だけでなく、一年を通じて効果が期待できる。
- (f) 風の強い時、弱い時とむらがあっても良い。トータルとしてある程度の風波が起これば、十分効果が期待できる。

本研究では、この水質改善法の実用化に際して問題となると思われる、(1) ダム湖や貯水池での波浪の大きさおよび発生頻度、(2) 実際のダム湖等の水域において浮体型越波構造物で獲得される越波量、(3) 表層水を貧酸素化した底層部に毎秒数リットル送り込むことによる水質の変化、の以上3点に対して検討を行った。

2. ダム湖の波浪特性

冬期(1996年12月28日～1997年2月23日)および夏期(1997年6月6日～1997年9月2日)に、筑後川上流に位置する松原ダムのダム湖において波浪観測を実施した。夏期の波の観測は、豪雨や台風による増水に伴う流木等の浮遊物によってしば



図ー2 松原ダム湖の形状と波浪観測地点

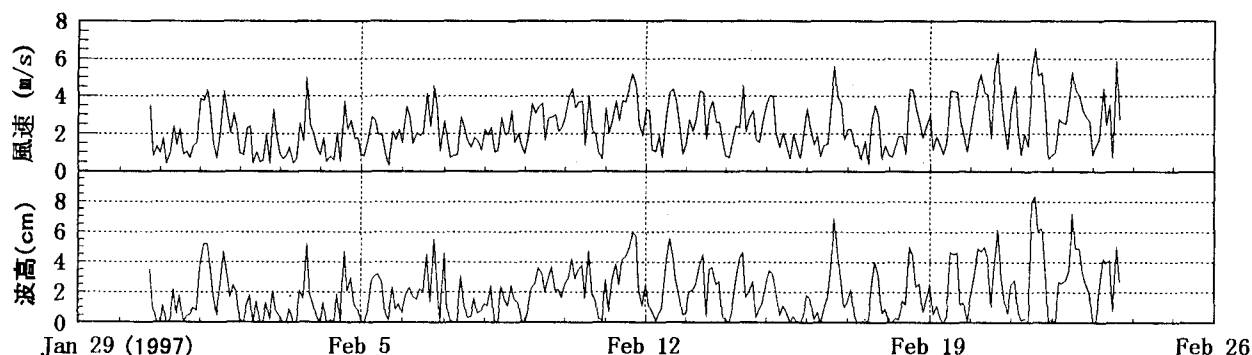
しば中断させられたため、満足できる十分なデータは得られなかった。そのため、夏期の波の諸量は風のデータに基づいて推算されている。

(1) 波浪観測装置及び観測方法

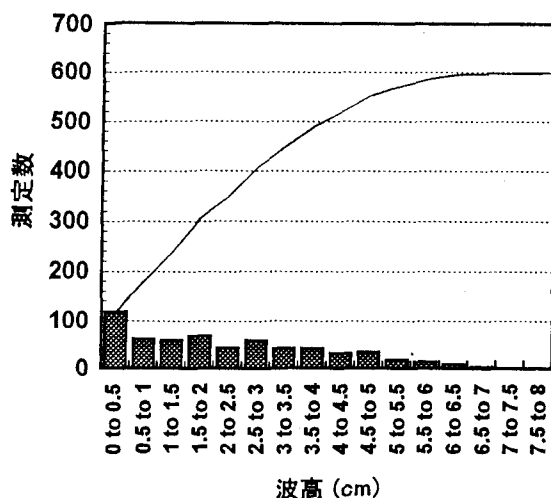
松原ダム湖は、流下方向(南北)に長く、両側を山に挟まれた「く」の字型の形状をしている(図ー2参照)。ダムサイトからおよそ100, 300, 600 mのところにそれぞれ流木防止ネット(網場)が施されており、ダムサイトから300 m上流の第二網場に設置されている作業台上で観測を行った。観測地点でのダム湖の横幅は約300 mであり、作業台はそのほぼ中央に設置されている。波浪測定には長さ30 cmの容量式波高計(横河ウェザック社製)を、また風速は微風向風速発信器(0.4～20 m/s)(横河ウェザック社製)を用いて水面上4 mの高さで測定した。サンプリング間隔0.01 s、測定時間10分間、測定間隔2時間でデータは採取された。

(2) ダム湖の波の発生頻度

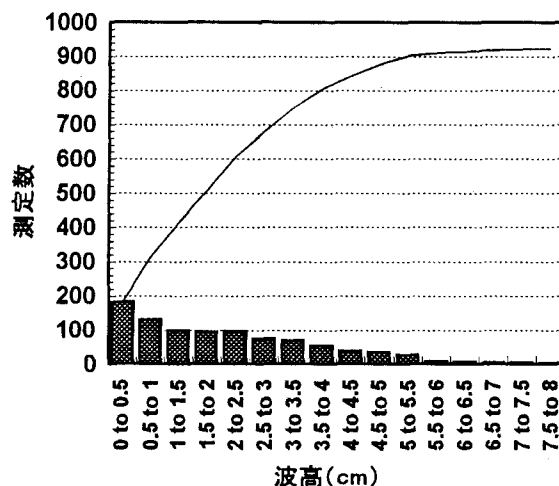
図ー3に風速と波高の観測結果の一例を示す。風速と波高の変動は非常に良く一致しており、風速が大きい時には波高も大きくなっている。観測期間中、波高の値は最大9.2 cmを記録した。図ー4、5は冬期及び夏期の波高の頻度分布を示したものである。図中の実線はその累積線である。波高が2.0, 3.0, 4.0 cm以上になる頻度は、冬期では49.1, 32.3, 18.6%, 夏期では44.9, 26.3, 12.9%である。冬期の方が季節風が強く波浪は大きいと一般に思われがちであるが、夏期も冬期とほとんど同程度の波浪が発



図－3 波浪観測結果の一例



図－4 冬期の波高の頻度分布



図－5 夏期の波高の頻度分布

生していることが分かる。本研究が提案する越波構造物が必要とする波高は数cm程度である。従って、松原ダム湖では年間を通じて約3割の時間帯で本送水システムの十分な稼動が期待できることになる。

3. 実際の水域において浮体型越波構造物で獲得される越波量

(1) 現地観測用モデル機の形状

モデル機は2種類製作された。実際は横幅が10m程の構造物を複数個設置することを考えているが、今回製作されたモデル機は実機よりも一回り小さい横幅4mの構造物である。ダム湖上を吹く風はダム湖の長軸方向に卓越するという特性を踏まえ、構造物の方向が長軸方向に固定されるように網場に係留されるタイプが1号機である(写真－1参照)。従って、1号機の越波機能は上流側と下流側の2つの方向を持っている。1号機には、波が入射して越波堤後部の取水マスに水が溜ると、その重みで沈降して天端高が低下するという現象が見られた。よって、1号機改良型ではフロートを追加した。一方、構造物の方向が常に固定されている1号機に対し、

2号機は風の力を利用して風の吹く方向に応じて構造物の方向が変化するタイプである(写真－2参照)。取水マスが満水になっても構造物の沈降が極力抑えられるようにフロート面積は大きく設計されている。

獲得された流量は取水マス底部の排水口に設置された電磁流量計によって測定された。排水口の先には本来ならば導水用のパイプが取り付けられるが、今回の試験では2号機にのみ長さ15mのビニルホースが取り付けられた。

(2) 測定結果

表－1は試験結果をまとめたものである。モデル機のタイプ、天端高および波浪条件によって当然異なるが、構造物幅4m当り、単位時間当りに獲得される越波量は平均しておおよそ0.63 l/sである。ただし、6月26日～7月3日は豪雨の影響により他の期間と較べると極めて大きな値をとっているため平均からは除外している。実機の構造物の横幅を10mとして換算すれば獲得される量はおおよそ1.6 l/sである。これは以前著者らが実験データを基にして推定した値2.0 l/s⁶⁾と良く一致する。また、2号機にお

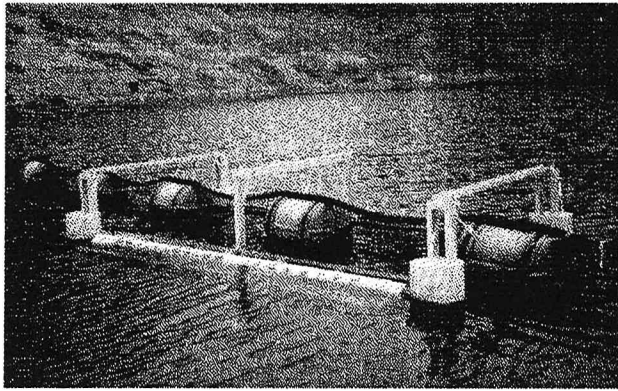


写真-1 1号機の試験状況

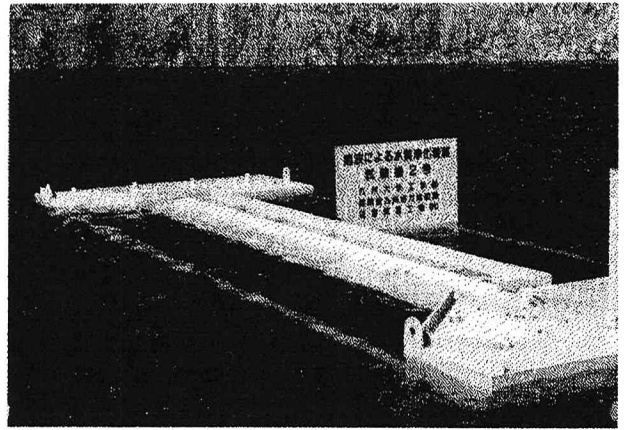


写真-2 2号機の試験状況

表-1 モデル機による越波量の測定結果

試験機 タイプ	試験期間	試験日数	天端高 (cm)	測定方向	期間全流量 (m^3)	上・下流側 の合計 (m^3)	一日当りの 平均流量 (m^3/day)	一秒当りの 平均流量 (l/s)	横幅 10 m の構造物 の場合に換算 (l/s)	期間平均風速 (m/s)
1号機	5月21日～5月28日	7	4	上流側	128	154	21.7	0.25	0.63	----
				下流側	26					
	5月29日～6月3日	5	6	上流側	107	115	22.6	0.26	0.65	----
				下流側	8					
	6月3日～6月17日	14	2	上流側	485	639	46.1	0.53	1.33	2.46
				下流側	154					
1号機 改良型	6月20日～6月26日	6	4	上流側	99	124	20.5	0.24	0.59	1.11
				下流側	25					
	6月26日～7月3日	7	2	上流側	3171	3837	520.3	6.02	15.05	1.31
				下流側	666					
	7月4日～7月9日	5	3	上流側	834	973	199.6	2.31	5.78	1.11
				下流側	139					
2号機	8月7日～8月21日	14	3		551		39.6	0.46	1.15	1.00
	8月27日～9月4日	8	2		244		30.3	0.35	0.88	0.91

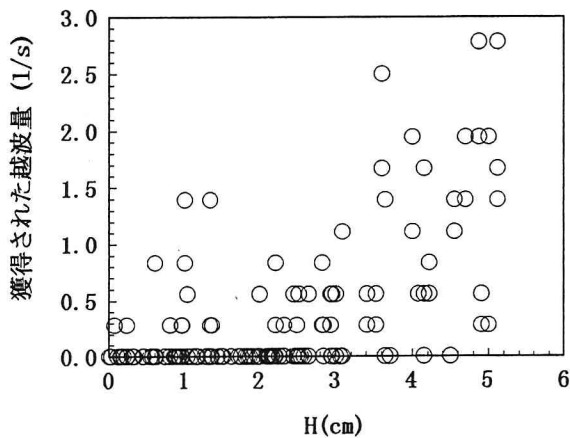


図-6 獲得された越波量と波高 H の関係
(2号機, 天端高 3 cm)

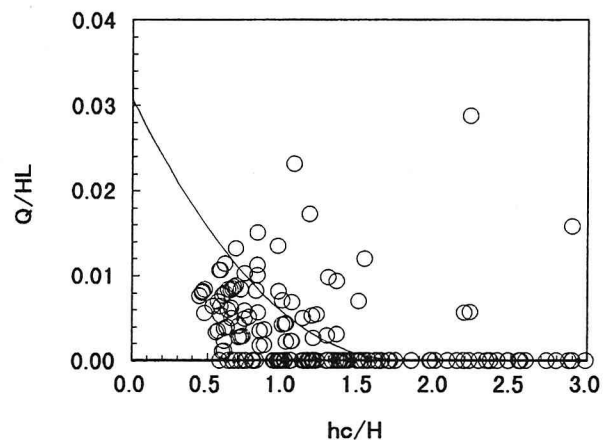


図-7 越波量と天端高の関係 (2号機)

いて、水位差（天端高） $hc=2\text{ cm}$ のときの試験結果から、密度の比較的小さい表層水を密度の比較的大きい水深 15 m の地点に送り込むのに、 2 cm の水位差で十分であったことが分かる。

図-6 は2号機、 $hc=3\text{ cm}$ の試験に対して、獲得された越波量 (l/s) と波高 H (cm) の関係を示したものである。波高が大きい方が越波量が必ずしも常に大きいとは限らない。また、表-1 の2号機の横幅 10 m の構造物に換算した越波量は約 1.0 l/s であり、推定した値 2.0 l/s の半分である。これらは入射

波（風）の方向の変化に構造物が完全には追従できなかった為と考えられる。

図-7 は2号機に対して Q/HL と hc/H の関係を示したものである。ここで、 Q ($cm^3/\text{波}$) は単位幅当り、1波当りの越波量である。図中の実線は底面に固定された越波構造物に不規則波を入射させて行った実験で得られたものである⁵⁾。 hc/H が大きなところで非常に大きな値がいくつか得られているが、それらを除けば試験結果と実験結果は比較的良く一致している。同様な関係を1号機に対してもブ

ロットしてみたが、 hc/H の増加に伴う Q/HL の単調減少の傾向は見られず、試験結果と実験結果はそれほど一致しなかった。これから、2号機のように取水マスが満水になっても構造物の沈降が極力抑えられ、常に初期に設定させられた天端高を維持する浮体型の越波構造物に対しては、従来までの室内実験の結果が十分適用可能であると言える。

4. 表層水を貧酸素化した底層部に送り込んだ場合のDO濃度の変化

(1) 実験方法

1997年9月8日～9月14日の期間に、福岡県粕屋郡久山町に位置する井牟田池で実験を行った。井牟田池の大きさはおよそ東西方向に100m、南北方向に100mであり、水深は岸付近で3m、池中央で4.8mであった(図-8参照)。実験の目的は、表層水を貧酸素化した底層部に毎秒数リットル送り込むことによる水質の変化および影響の及ぶ範囲を調べることである。その為、本来越波エネルギーを用いて送水すべきところであるが、一定流量を保証する為に本実験ではポンプを用いて送水した。また、放流、取水および洪水等によって生じる流れによる移流が水質の変化に影響を及ぼすようなダム湖ではなく、閉鎖性が強く流れが殆ど生じない池を選んで実験を行った。井牟田池は、晴天時には流入・流出は殆ど無く極めて閉鎖性の強い水域であった。

実験は2種類行われた。Case-1では表層水(水深50cm)をポンプで汲み上げ、ホース(直径15cm、長さ100m、塩化ビニル製)を通じて底層部に導入し、送水して底泥から1m上の地点から排出した。Case-2では水深2m地点の水塊をポンプで汲み上げ、底泥から50cm上の地点から排出した。両Case共にホースに送り込まれる水は、送り込む前に再曝気させて飽和状態にしている。Case-2で表層水ではなく水深2mの水塊を用いた理由は、水温が比較的低い水塊を送り込むことによって、導水パイプに熱伝導率の高いパイプを用いた場合と同じ状況を作り出す為である。パイプから排出される流量は両Case共に2l/sに設定した。前節の結果によれば、この流量は10m幅の越波構造物1台で供給される流量に相当する。

図-8に示されているように、排出口を中心(C)として東西南北それぞれの方向に2m、5m、10mの地点を測点とし、更にリファレンスとして図中に示すR1、R2地点でも測定を行った。また、排出口にもDOメータを取り付け、排出される水塊のDO濃度と水温の測定も随時行った。

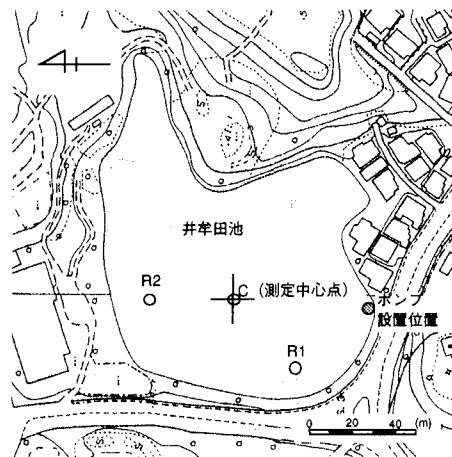


図-8 井牟田池の形状と測定位置

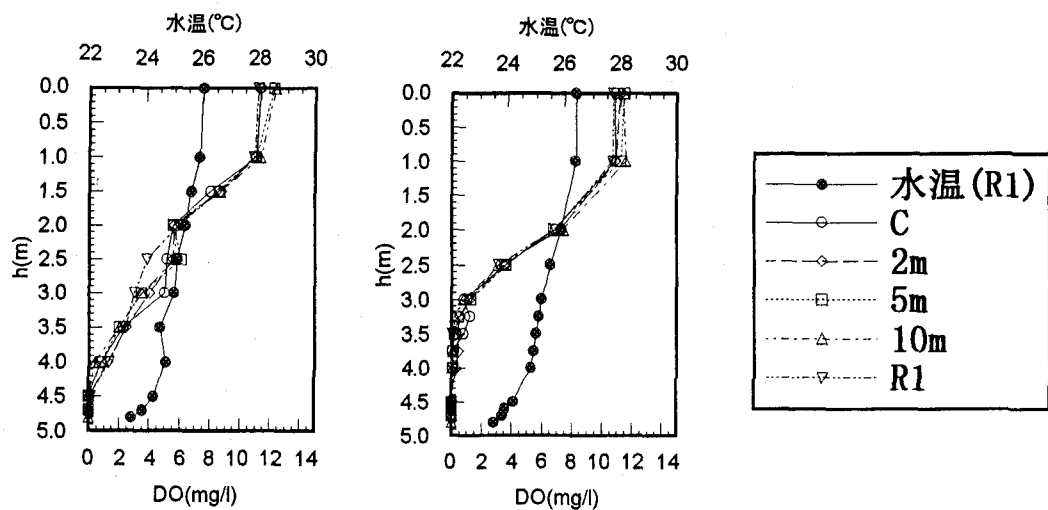
(2) 実験結果及びその考察

図-9(a)、(b)はそれぞれCase-1、-2の条件下での供給開始後第3日目のDO濃度の鉛直分布を示したものである。2m、5m、10mのDO濃度の値はそれぞれ東西南北の4方向の値の平均値である。なお、測定期間中は晴天が続いたが、開始前日の9月6日が雨だったため、Case-1のDO濃度の躍層はCase-2と較べると弱いものとなっている。

Case-1ではDO濃度の変化は水深2.5～3.0mの位置に主に現れていることが分かる。Case-1での排出水塊の水温は表層の水温に依存するため測定時刻によって異なり25.4℃～26.9℃、DO濃度は再曝気しているため表層水のDO濃度変化に依存せずほぼ一定値で6.7mg/lであった。よって排出された水塊は周囲水と混合して温度を低減させながら上昇し、水深2.5～3.0mの層に滞留・侵入したと考えられる。

Case-2ではDO濃度の変化は3.0～4.5mの層に若干ではあるが現れている。排出水の水温およびDO濃度はほぼ一定値で25.5℃、6.5mg/lであった。図-10はCase-2の水深3.5m地点のDO濃度の時間変化を示したものである。開始前日の雨により一旦壊れかけた貧酸素底層が、その後貧(無)酸素化へ向かっている為、DO濃度は全体的に減少傾向である。それにもかかわらず、R1と較べるとr=10m地点まで常に大きな値になっていることから、少なくとも半径10mの領域まで影響は及んでいることが分かる。

今回の実験は非常に短い期間で行われたため水質の改善効果を確認するには至らなかったが、排出された後の水塊の挙動はある程度掴むことができた。Case-1、Case-2共に影響の及ぶ層の厚さは50cm程度と比較的薄く、かつ、第1日目からr=10mの範囲まで影響が及んでいた。このことは排出した水塊は、ある薄い層内で広く拡散してしまっているこ



(a) (Case - 1)

(b) (Case - 2)

図-9 供給開始後第3日目のDO濃度と水温の鉛直分布

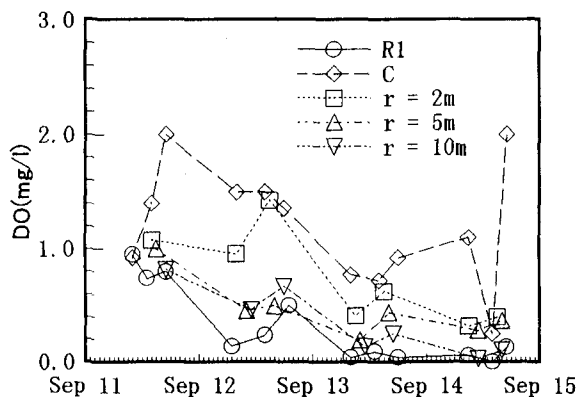


図-10 水深3.5m地点でのDOの時間変化 (Case - 2)

とを意味している。しかしながら、少ない流量で底層部の貧酸素状態を改善する為には、むしろ最初は排水口付近の狭い範囲でもよいからある程度高いDO濃度をもった水塊として滞留し徐々にその領域を広げていく方が好ましい。従って、排出水の水温を底層部の水温に極力近付けること、そしてその排水と周囲水を排水口付近でできるだけ強く混合することが重要で、今後の技術的な課題として残されている。

5. まとめ

波浪エネルギーを利用したダム湖や貯水池の水質改善法の実用化に際して問題となる3つの点に対して検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。松原ダム湖の波浪の大きさ・発生頻度に対して

- 1) 夏期でも冬期と同程度の波浪が発生する。
- 2) 波高3cm以上の波の発生頻度は約30%である。実際の水域で獲得される越波量に対して
- 3) 横幅10mの構造物ならばおおよそ2l/sの越波量が獲得できる。
- 4) 従来までの室内実験結果は十分適用可能である。

表層水を貧酸素化した底層部に毎秒数リットル送り込むことによる水質の変化に対して

- 5) 底層に効果が及ぶようにするには排出される水塊の水温を底層水温に極力近付けた方がよい。
- 6) 効果が薄く広く拡がらないように、出口付近での混合を強める必要がある。

謝辞：最後に、本研究を行うに当たり熱心な協力を頂いた佐世保重工業（株）の木下恵嗣氏、建設省九州地方建設局九州技術事務所の荒木和幸氏、建設省松原ダム管理事務所の方々および九州大学建設都市工学科4年生の中島信一君に、また有益な助言を頂いた九州大学大学院総合理工学研究科の松永信博助教授、日本文理大学工学部土木工学科の樋田操教授に深く感謝致します。なお、本研究に対し文部省科学研究費（特別研究員奨励費）の補助を受けたことを付記します。

参考文献

- 1) 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, pp. 27-32, 1993.
- 2) 松梨史郎, 宮永洋一：気泡噴流に関する現地実験, 水工学論文集, 第34巻, pp. 145-150, 1994.
- 3) 池田裕一, 浅枝 隆：気泡弾を用いた深層水揚水施設による密度成層の混合効率, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp. 85-93, 1994.2.
- 4) 池田裕一：貯水池内温度成層における曝気循環流の特性と環境制御への適用に関する研究, 学位論文, 1995.
- 5) 小松利光, 岡田知也, 松永信博, 樋田 操, 藤田和夫：波浪エネルギーから位置エネルギーへの効率的な変換に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.551/II-37, pp. 89-99, 1996, 11.
- 6) 小松利光, 岡田知也, 松永信博, 樋田 操, 藤田和夫：波浪エネルギーを利用したダム湖・貯水池の水質改善に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp. 391-396, 1997.

(1997. 9. 30 受付)