

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

A Fundamental Study on Water Purification in Man-made Lakes and Reservoirs
Using Wave Energy

小松利光*・岡田知也**・松永信博***・

樋田 操****・藤田和夫*****・浦上由紀子*****

By Toshimitsu KOMATSU, Tomonari OKADA, Nobuhiro MATSUNAGA,
Misao HASHIDA, Kazuo FUJITA and Yukiko URAGAMI

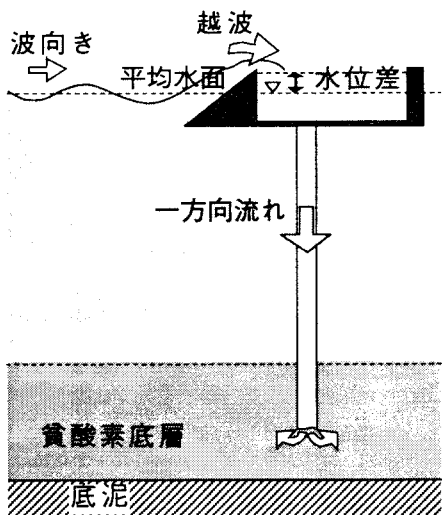
For water purification of man-made lakes and reservoirs, we propose a method to make an one directional flow by making use of natural wave energy. A devised artificial floating structure has a dam with a slope to activate the wave overtopping and to gain effectively the head difference. How much the volume of overtopping is gained has been investigated. The volume obtained and sent to a bottom layer is estimated briefly for the water purification. It is shown that the wave energy in man-made lakes seems to be large enough to be used for the water purification.

Keywords: wave overtopping, water purification system, man-made lake, reservoir, floating structure

1. はじめに

近年ダム湖や貯水池においてアオコの発生による異臭や水質の悪化が大きな問題となっている。これらの多くは停滞水域となっており、急速な水の入れ替わりがそれほど期待できない上、夏期には温度成層化して下層は貧酸素もしくは無酸素状態となり嫌気化するため、水質の悪化に一層拍車をかけている。また貧（無）酸素状態では底層からの窒素やリンなどの栄養塩の溶出が増加することが報告されている。そこでその対策として、ダム湖や貯水池内の流動の促進や、貧酸素底層に溶存酸素を供給する技術の開発が行われてきた。その代表的な技術は人工エネルギーを用いて曝気を行うものであり（例えば、松梨・宮永¹⁾、池田・浅枝ら²⁾、池田³⁾の研究）、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。自然のエネルギーを利用する技術としては、風のエネルギーの利用がスウェーデンで開発・提案されている⁴⁾。風力で風車を回転させてポンプを稼働させ、溶存酸素の豊富な表層水を底層部に送り込むものであるが、風速が小さい（5m/s以下）ときには全く作動しないこと、また機械部分を含むためメンテナンスが厄介であるなどの欠点をもつ。それに対し本研究は、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

*	正会員	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）
**	学生員	工修	九州大学大学院工学研究科博士後期課程水土木学専攻	日本学術振興会特別研究員（同上）
***	正会員	工博	九州大学助教授	総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻（〒816 春日市春日公園6-1）
****	正会員	工修	日本文理大学教授	工学部土木工学科（〒870-03 大分市一木）
*****	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）
*****	学生員		九州大学研究生	工学部建設都市工学科（同上）



図－1 波浪エネルギーを用いたダム・貯水池の底層水の浄化の概念図

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、湖内水の流動を促進しようとするものである。ダム湖や貯水池内の波浪は海洋の波と較べると格段に小さいが、観測例によると風速 4.7 m/s で最大波高 6.87 cm，有義波高約 2.79 cm，有義周期 0.66 s の波が発生することが報告されている⁵⁾。著者の今回の研究はこの数センチ程度の波高の波を有効に利用しようというものである。

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浮体型のシンプルな構造物である（図－1参照）。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。

本研究で提案する供給システムは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。

- (1) 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率が高い。
- (2) 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密度差は初期の表層と底層の密度差より小さくなり、排出水は底層もしくは底層の上部に滞留することが可能である。また、一方向流を生成するために必要な水位差も小さくなる。
- (3) 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。
- (4) 半永久的に効果が期待できる。
- (5) 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。
- (6) 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、浮体型構造物によりどの程度の越波水が獲得できるのか実験的に検討を行う。また、ここでは概算程度に留めているが、本供給システムによる溶存酸素供給量を定量的に評価・検討する。

2. 実験装置及び実験方法

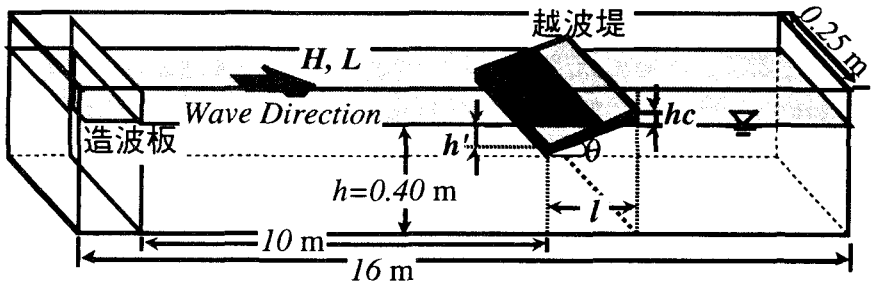
図－2(a)に示すような長さ16 m，高さ0.6 m，幅0.25 m，水深一様の造波水槽を用いて実験は行われた。法面には厚さ2 mmのアルミ板を用い、そのアルミ板を側壁に設けた溝にはめ込んで固定した。構造物の設置位置は造波板から10 mの位置である。入射波には規則波を用いた。越波に関係する諸量は図－2中に示されている水深 h ，法先水深 h' ，越波堤の波の進行方向長さ l ，天端高 h_c ，法面勾配 θ 及び h での波長 L ，波高 H である。越波量は第10波～第15波に対して採取され、その平均値を1入射波当たりの越波量とした。1入射波単位幅当たりの越波量 $Q(\text{cm}^3/\text{波})$ を無次元表示すると無次元越波量 Q/HL は次式で示される。

$$\frac{Q}{HL} = f\left(\frac{H}{L}, \frac{h_c}{H}, \frac{h'}{L}, \frac{h}{L}, \frac{l}{L}\right) \quad (1)$$

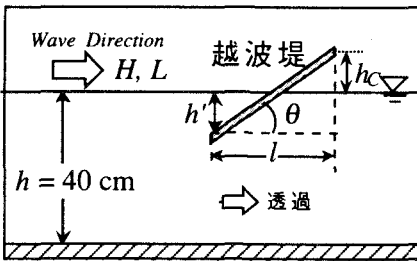
ところで、 h'/L は式(2)の関係を用いると $\tan\theta$ で置換できるため、式(1)は式(3)となる。

表－1 実験条件

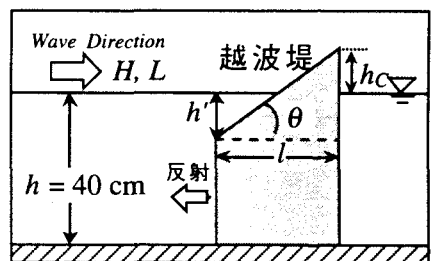
	T (sec)	L (cm)	h (cm)	h/L	H (cm)	H/L	l (cm)	l/L	h_c (cm)	h_c/H	h' (cm)
RUN 1	0.70	76.4	40.0	0.52	0.92	0.012	15.2	0.20	0.25, 0.69, 1.15	0.25, 0.75, 1.00	0 cm から約 20 cm まで適宜変化させた
					2.17	0.028			0.54, 1.63, 2.71	0.25, 0.75, 1.25	
					3.75	0.049			0.94, 2.81, 4.69	0.25, 0.75, 1.25	
	1.02	151	40.0	0.26	1.48	0.010	15.2	0.20	0.38, 1.10, 1.89	0.25, 0.75, 1.00	0 cm から約 20 cm まで適宜変化させた
					4.64	0.031			1.13, 3.40, 5.66	0.25, 0.75, 1.25	
					7.73	0.051			1.89, 5.66, 9.44	0.25, 0.75, 1.25	
RUN 2	0.65	65.9	53.0	0.80	1.96	0.031	6 cm から約 78 cm まで l を適宜変化させた		1.47	0.75	
	0.70	76.4	40.0	0.52	2.29				1.72		
	1.02	151	40.0	0.26	4.53				3.40		



(a)



(b) 透過型越波堤



(c) 反射型越波堤

図－2 実験装置の概略及び代表諸量の定義

$$\tan\theta = \frac{h_c + h'}{l} = \frac{(h_c/H) \cdot (H/L) + (h'/L)}{(l/L)} \quad (2)$$

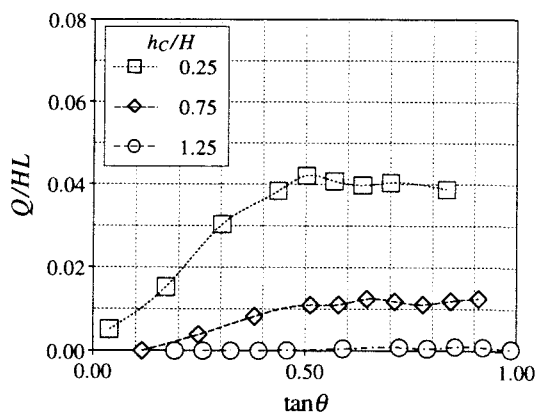
$$\frac{Q}{HL} = f\left(\frac{H}{L}, \frac{h_c}{H}, \tan\theta, \frac{h}{L}, \frac{l}{L}\right) \quad (3)$$

実験条件を表－1に示す。RUN 1では主に法面勾配 $\tan\theta$ を変化させ、RUN 2では主に l/L を変化させた。 $h/L = 0.56, 0.80$ の実験条件の場合には、実験に用いた水槽の制約上波高をかなり小さくせざるを得なかったが、そのため越波に対し表面張力の影響が確認された。そこで表面活性剤（メタノール）を100 ml（濃度にして0.06 %）注入して実験を行った。この場合の表面張力は4.31 dyne/cmであった⁶⁾。

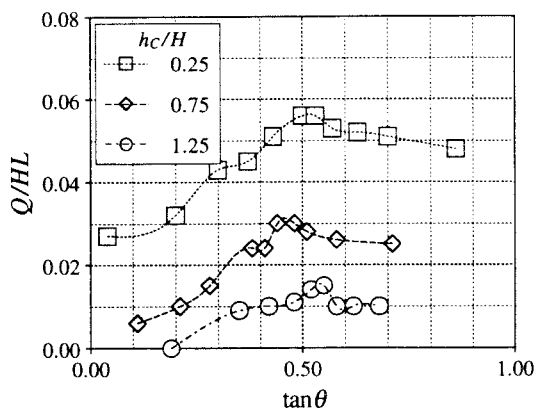
なお、本研究で検討される浮体越波構造物は波のエネルギーの一部が構造物の下側を通過することが特徴的な点であることから、以下、透過型越波堤（図－2(b)参照）と呼ぶことにする。また、実験結果をまとめるに当たり、以前行われた反射型越波堤（図－2(c)参照）の実験結果⁷⁾を比較対象として整理・考察を行った。

3. 実験結果及びその考察

図－3(a), (b)はそれぞれ透過型および反射型越波堤に対する Q/HL と $\tan\theta$ の関係を h_c/H をパラメータ



(a) 透過型



(b) 反射型

図-3 Q/HL と $\tan\theta$ の関係

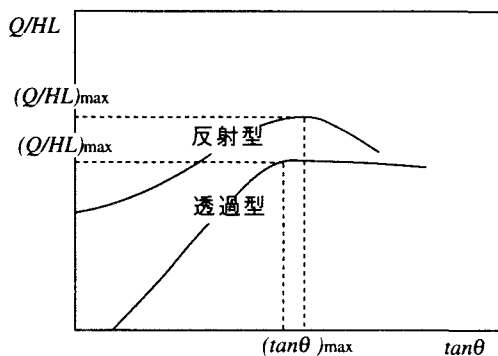


図-4 代表諸量の定義

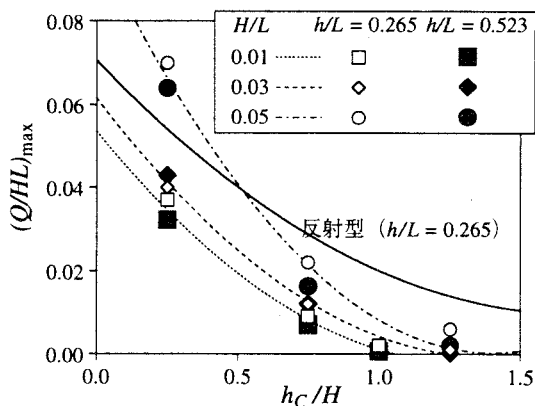


図-5 $(Q/HL)_{\max}$ と h_c/H の関係

として示したものの一例である。同じ実験条件下での両者を比較すると、反射型越波堤の場合の Q/HL の方が透過型越波堤の場合よりも大きな値をとることが分かる。また、 $\tan\theta$ の増加に伴い、反射型越波堤の Q/HL は一旦増加し、最大値をとった後に減少するのに対し、透過型越波堤の Q/HL は最大値に達した後はほぼ一定値を保っている。

透過型越波堤の越波量特性をより一層と明らかにするため、図-4で定義される代表量を導入する。 $(Q/HL)_{\max}$ は最大無次元越波量であり、最適法面勾配 $(\tan\theta)_{\max}$ はそのときの $\tan\theta$ の値である。

図-5は H/L と h/L をパラメータとして $(Q/HL)_{\max}$ を h_c/H に対して示したものである。図中の実線は反射型越波堤の場合の $(Q/HL)_{\max}$ を示している。反射型越波堤の場合は $(Q/HL)_{\max}$ は H/L へはそれほど依存しないという結果が得られているが、透過型越波堤の場合には $(Q/HL)_{\max}$ は h/L にそれほど強くは依存せず、 H/L をパ

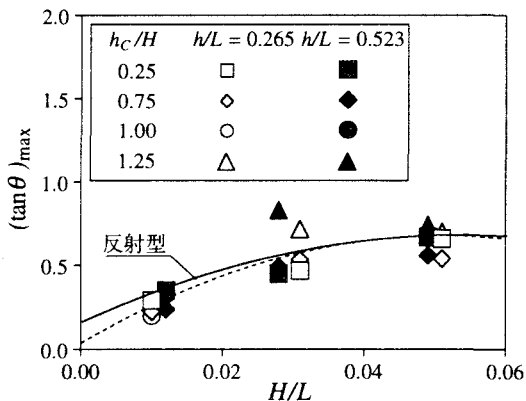


図-6 $(\tan\theta)_{\max}$ と H/L の関係

ラメータとして図中の近似曲線のように示されることが分かる。また反射型に比べ透過型の場合は、 h_c/H の増加に対し越波量は急激に減少し、 $h_c/H \geq 1$ ではほぼ零となることが分かる。このことから透過型越波堤を用いる際には天端高は波高よりも小さく ($h_c/H < 1$) 設定する必要がある。

図-6は $(\tan\theta)_{\max}$ を h_c/H と h/L をパラメータとして H/L に対して示したものである。 $(\tan\theta)_{\max}$ は h_c/H 及び h/L にはほとんど依存しない。図中の破線は透過型の全てのプロットに対する近似曲線であり、実線は反射型越波堤の結果である。両者はほぼ一致している。図中の破線により波形勾配に対して最も効率的な透過型越波堤の法面勾配が一義的に決定されることになる。ダム湖や貯水池における波浪特性は今後の観測結果が待たれるところではあるが、一般に海洋で発達した風波の波形勾配は0.03～0.05、一方短い吹送距離で強風によって発達した風波の波形勾配は0.05～0.08と言われている。このことからダム湖等における風波を対象とする場合には、最も効率的な法面勾配は $\theta = \tan^{-1}(0.6) \cong 30^\circ$ であることが分かる。

図-7は $H/L=0.03$, $h_c/H=0.75$, $\tan\theta = (\tan\theta)_{\max}$ に固定した条件の下での $(Q/HL)_{\max}$ と l/L の関係を h/L をパラメータとして示したものである。ところで、式(3)中で H/L , h_c/H , $\tan\theta$, h/L を固定して l/L を変えるということは、見かけ上は θ を固定して h' を変えることと等価である。なお、図-5の $(Q/HL)_{\max}$ は $l/L=0.20$ に固定して得られた関係であった。そこで、図-8では横軸を h'/L に変換し、縦軸を $(Q/HL)_{\max}$ を $l/L=0.20$ の場合の $(Q/HL)_{\max}$ で割った値で示す。これから法面勾配が最適勾配である場合には、 h' が大きいほど越波量は増大するが、 $h'/L=0.20$ が限界値となりそれ以上は h' を大きくしても越波量は増大しないということが分かる。

4. 供給量に対する検討

ダム湖の卓越波の条件を波高 $H=3.0$ cm, 周期 $T=0.7$ s (波長 $L=76.4$ cm, $H/L=0.04$) , 構造物の条件を天端高 (水位差) $h_c=2$ cm, 横幅10 m, 法面勾配 $\theta=30^\circ$ とする。波と構造物の条件より、相対天端高 $h_c/H=0.67$ となり、図-5から最大無次元越波量 $[(Q/HL)_{\max}]_{l/L=0.20}$ は0.023を得る。また、 h'/L を0.20以上すなわち h' を15.3 cm以上とすれば、図-8より $(Q/HL)_{\max} / [(Q/HL)_{\max}]_{l/L=0.20} = 2.0$ となり、 $(Q/HL)_{\max}$ は 0.046 となる。従って、1波当り、単位幅当りの越波量は無次元越波量に波高 H と波長 L を掛けて $0.046 \times 0.03 \times 0.76 = 1.05 \times 10^{-3}$ (m³/波) となる。越波堤の横幅は10 mであるから、この構造物によって獲得される1波当りの越波量は $1.05 \times 10^{-3} \times 10 = 1.05 \times 10^{-2}$ (m³/波) である。1波当りを1周期当り、すなわち0.7 s 当りと考えると、単位時間当りに獲得される越波量は0.015 (m³/s), 1日当り1296 (m³/day), また1ヶ月当り 38.9×10^3 (m³/month) となる。この越波量はおおよそ100 m×100 m×4 mの水塊に相当する。しかしながら、実際の波は不規則波であること、波の発生頻度はそれほど高くないことを考慮しなければならない。不規則波

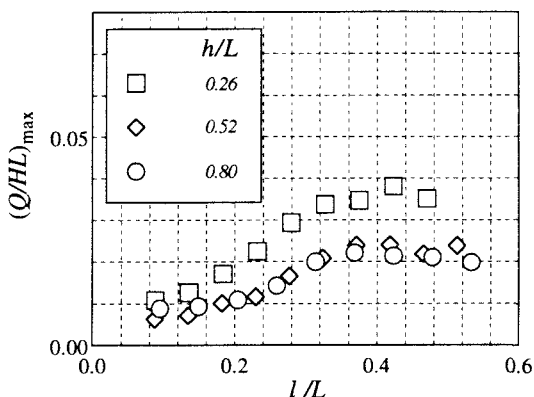


図-7 $(Q/HL)_{\max}$ と l/L の関係
($H/L=0.03$, $h_c/H=0.75$, $\tan\theta = (\tan\theta)_{\max}$)

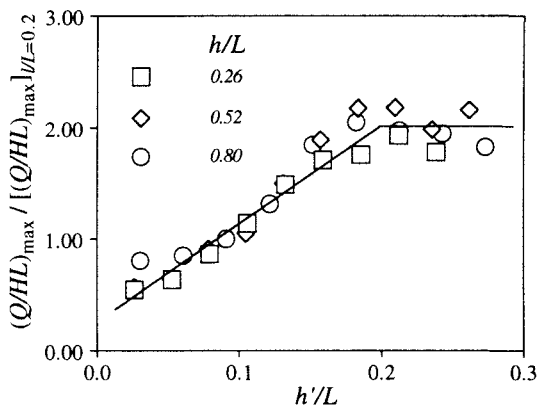


図-8 $(Q/HL)_{\max} / [(Q/HL)_{\max}]_{l/L=0.20}$ と h'/L の関係

に対する越波量獲得に関する実験⁶⁾から、有義波高が規則波の波高と同じ場合に獲得される越波量は規則波の場合に獲得される越波量のほぼ 1/3 であることが分かっている。また、試験設置を予定しているダム湖のダム管理所の風の観測データによると、夏期の午前 8 時から午後 6 時までの時間帯はほぼ毎日風が吹く。その時間帯全てに於て有効な波が期待できないとしても一日の内の 3 分の 1 程度は有効な波が期待できるとすれば、期待される現実的な供給量は実験結果から得られた値の 1/10 程度と考えるのが妥当なところであろう。

この供給量が水質改善に対して有意な量であるかどうか簡単な計算を行ってみる。越波水の DO 濃度はほぼ飽和状態であるとして 10 (mg/l) とすれば、先程の計算結果より表層から底層に送り込まれる 1 日当りの DO は $10 \text{ (mg/l)} \times 1296 \times 10^3 \text{ (l/day)} \times 1/10 = 1296 \text{ (g/day)}$ である。底層における酸素消費は底泥の酸素消費のみとし、また底泥の酸素消費速度は幾つもの諸条件に依存する量ではあるがここでは $2.0 \text{ (g/m}^2\text{/day)}$ とすれば、それでも 648 m^2 の範囲の酸素消費を補うことができることになる。

5. まとめ

ダム湖や貯水池の水質改善に対して波浪エネルギーを効率的に利用するという立場から、波浪エネルギー変換のための構造物及び獲得される供給水量の検討を行った。得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 透過型越波堤を用いる場合には天端高は波高よりも小さくすること ($h_c/H < 1$) が必要である。なお、風が弱くて発生する風波の波高が所要天端高より小さい ($h_c/H > 1$) 場合は、越波堤に V 字型の集波堤を取り付けることになる。
- (2) ダム湖等における越波堤の最適な法面勾配は 30° である。
- (3) 最適な法面勾配をもつ透過型越波堤の場合、 h' が大きいほど越波量は増大するが、 $h'/L = 0.20$ 以上に h' を大きくしても越波量はそれ以上は増えない。
- (4) ダム湖・貯水池の卓越波の H 、 L と表層水を底層部に送り込む為に必要な水位差 h_c が与えられれば、その水域において最も効率的に獲得される場合の越波量の算定が可能となった。
- (5) 概算ではあるが、ダム湖で発生する小さな波浪でも水質改善に対して有意なエネルギーを有していることが分かった。

謝辞：最後に、本研究を行うに当り有益な御助言を頂いた通産省中国工業技術研究所の朝位孝二特別研究員（前九州大学建設都市工学科助手）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）の助成を受けたことを付記します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) (株)丸島アクアシステム：Create the waterfront No.1.
- 5) 高村浩彰，多田彰秀，安川武志，市川 衛：ダム貯水池内での波浪観測について，土木学会年次講演会講演概要集，第 50 回，pp.758-759, 1995.
- 6) 西 一郎，今井怡知郎，笠井正威：界面活性剤便覧，産業図書株式会社版，1960.
- 7) 油谷進介，岡田知也，小松利光，松永信博，櫛田 操，常住義雄：前面に直立壁をもつ越波構造物による効率的な越波量・水位差の獲得，海岸工学論文集，vol.42，pp. 1001-1005, 1995.
- 8) 小松利光，岡田知也，松永信博，櫛田 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.