

波浪エネルギーを利用した閉鎖性水域における水質改善法

小松利光* ・岡田知也**・松永陽一郎***
中島信一****・藤田和夫*****

1. はじめに

内湾や港湾などの閉鎖性の水域において、富栄養化がもたらす水質の悪化が大きな社会問題となっている。この問題の解決のため、著者らは自然エネルギーの一つである波浪エネルギーを効率的に利用することを提案している(例えば、小松ら、1996, 1998)。その水質改善法は、図-1に示すような越波を促進する構造物によって獲得された水位差を用いて、表層水を底層部に供給するというものである。表層水の DO 濃度は、通常、飽和もしくは過飽和状態であるので、表層水を底層部に導入することにより、貧酸素化した底層部に DO を直接供給することが可能となる。また、膨大な人工エネルギーを用いて温度成層を破壊しなくても、表層部から底層部へ栄養塩や植物プランクトン等を直接的に輸送することにより、各物

質の鉛直方向分布の一樣化が促進され、温度成層を破壊した場合と同等の水質改善効果が期待できる。しかしながら、一方では、植物プランクトン等を無光層へ送り込んでしまうため、底層部における DO 収支を考慮するとそれほど大きな DO 供給の効果を期待できないのではないかとする意見もある。

そこで本研究では、(1)越波構造物により実際の水域において獲得される越波量の測定を行い、また(2)表層水を底層部に送り込むことにより得られる水質改善効果について生態系モデルを取り入れた鉛直1次元輸送モデルにより評価を行った。なお実験水域として、閉鎖性であること、ある程度の水面波が発生すること、船舶の障害にならないこと、そして今回はモデルテストであるため強風や大波に対する配慮が必要ないこと等を満足する水域として、遠賀川河口堰の貯水池が選定された。

2. 実際の水域で獲得された越波量

(1) 實驗內容

越波量の測定は、1998年2月18日から3月17日の期間に九州北部を流れる遠賀川の河口堰貯水域で行なわれた(図-2参照)。遠賀川河口堰は河口より2 km上流地点

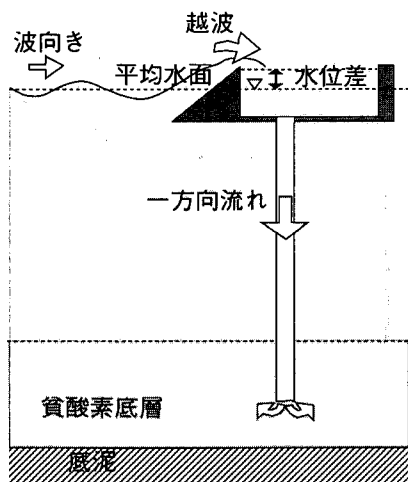
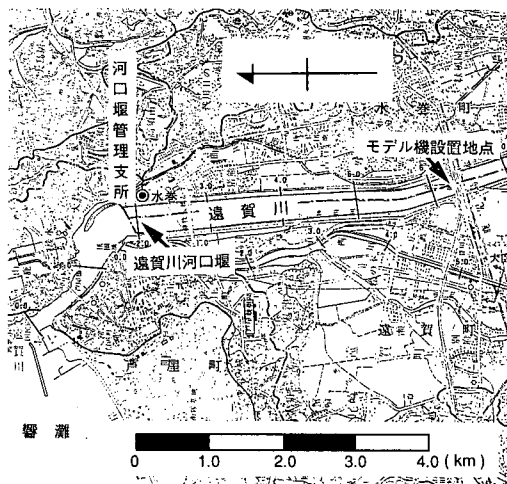


図-1 波浪エネルギーを用いた表層水の底層部への導入の概念図

・フェロー	工博	九州大学大学院教授	工学研究科海洋システム工学専攻
・正会員	工博	九州大学大学院助手	工学研究科海洋システム工学専攻
・・・・	工修	佐世保重工業株式会社	陸上設計部
・・・・	学生会員	九州大学大学院	工学研究科修士課程海洋システム工学専攻
・・・・	正会員	九州大学校官	工学部建設都市工学科



図一2 遠賀川の河口堰貯水池におけるモデル機の設置地点

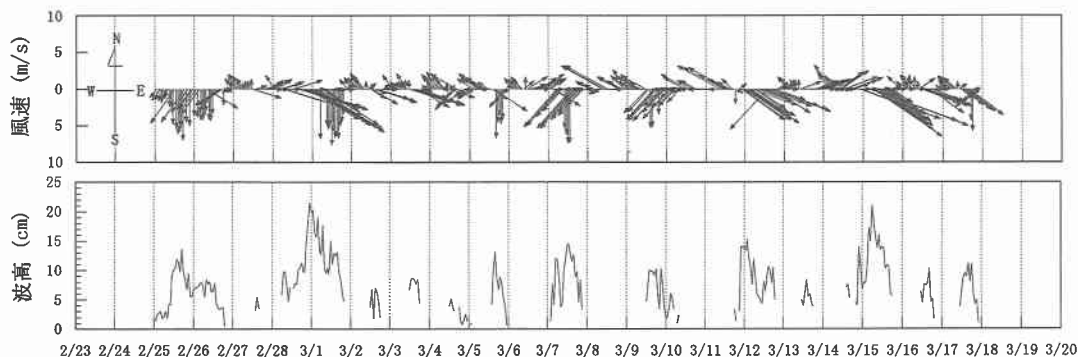


図-3 実験期間中の風速ベクトル(上図)と推算された波高(下図)

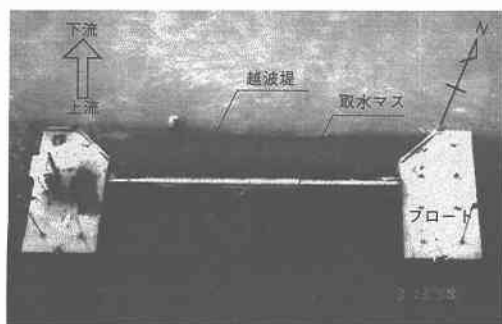


写真-1 上方から見たモデル機(両側の5角形部はフロート, 中央の白い部分が越波堤, その背後が取水マス)

に設置されている。実験に用いたモデル機は、越波堤部分の長さ(越波堤幅)が4.0m、波の進行方向長さ(奥行き)が2.0m、天端高(水位差)が6cmの浮体型の構造物である(写真-1参照)。モデル機の設置地点は河口堰から上流4.2km地点、川幅方向には中央である。設置地点の貯水域の川幅は約250m、水深は5mである。モデル機の前面部(越波堤部)は下流側(北北西)に向けて設定された。

(2) 実験期間中の風と波

風速および風向は遠賀川河口堰管理所の観測データを用いた。図-3上図に実験期間中の風をベクトル表示して示す。北よりの風(下流側から吹く風)と南よりの風(上流側から吹く風)の発生頻度はほぼ同程度であったが、北よりの風の風速は南よりの風の風速よりも大きく、ほとんど6m/s以上であった。また、比較的大きな風速は午後が発生していたことが分かる。

図-3下図は実験期間中の越波構造物設置地点における波高を示したものである。本実験では波浪観測は行われなかったため、図中に示されている波高は風速および風向から求められた推算値である。南よりの風の時には、波は構造物の背後から入射してくることとなるため、波

高は示していない。実験期間中の波の波高は大きい時で20cm程度、平均して10cm程度であったことが分かる。

(3) 獲得された越波量

1日中風がほとんど吹かない日や南よりの風が吹いた日は越波量はほとんど獲得できなかったが、北よりの強い風が吹いた3月1日などは700m³/day以上の越波量を記録した。期間中の越波量を平均すると、1日当りの越波量は211.0m³/dayであった。図-4に1時間当りに獲得された越波量 Q m³/hと波高 H cmの関係を測定時の風向をパラメータとして示す。越波量は風向にそれほど強く依存することなく、波高が大きくなるにつれ増大する。しかしながら、波高6cm以上では越波量はほぼ40m³/hで一定になっていることが分かる。取水マスの大きさや排水管の径ならびに水位差から、理想的な状態での排水能力を計算したところ55m³/hであった。したがって、波高が6cm以上の場合には、取水マスから排水管を通して排水される量よりも越波してくる量の方が大きくなり、越波した水塊の一部は取水マスをオーバーフローしていたものと考えられる。

図-5は無次元越波量 Q/HL と相対天端高 h_c/H の関係を示したものである。図中の曲線は小松ら(1996)の室内実験で得られた不規則波に対する両者の関係である。 h_c/H が小さくなる程、すなわち天端高 h_c が一定の下では波高 H が大きくなる程、曲線は増加傾向を示しているのに対し、実測データは逆に減少傾向を示している。これは、 $h_c/H < 1$ では、図-4で示されたようにオーバーフローのため実測データの Q は一定となるので、 h_c/H が小さい程、すなわち H が大きいく程、 Q/HL は小さくなるためである。よって、オーバーフローの起こっていない $h_c/H > 1$ の場合についてのみ両者を比較してみると、実測データのばらつきは比較的大きいもののデータは曲線を中心としてばらついており、実水域での結果は室内実験結果と平均的には一致すると言える。

そこで、波高が6cm以上、すなわち $h_c/H < 1$ の場合で

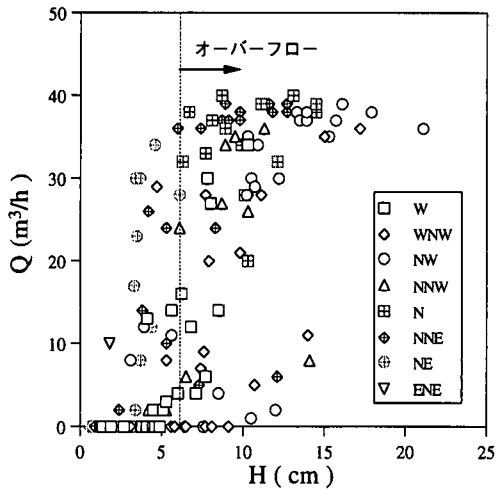


図-4 Q と H の関係

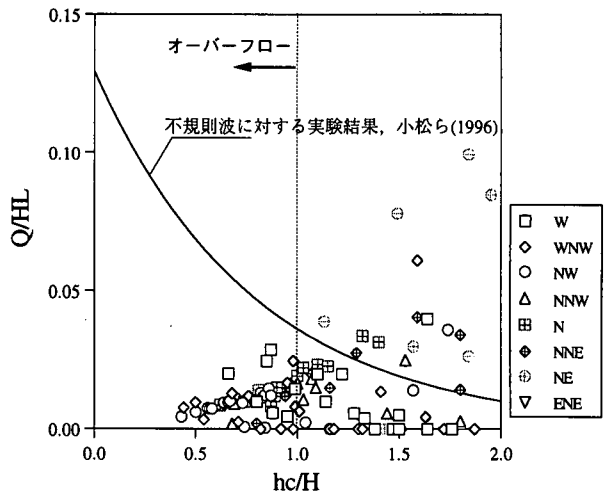


図-5 Q/HL と hc/H の関係

もオーバーフローが発生しなかったものと仮定して図中の曲線を基に1日当たりの越波量の平均値を求めたところ、 $330 \text{ m}^3/\text{day}$ であった。

3. 表層水の底層部への供給による水質改善効果の評価

(1) 基礎方程式

水温に対する鉛直一次元方程式は次式で表される。

$$A \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial AwT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z(z, t) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{(\partial/\partial z)Aq}{\rho C_p} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 z ：鉛直方向座標(水表面を原点にして下向きに正) (m)、 w ：鉛直方向の流速 (m/s)、 A ：水域の面積

(m^2)、 T ：水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 K_z ：鉛直方向渦動拡散係数 (m^2/s) (Henderson-Sellers, 1985)、 q ：水の放射吸収による熱源の内部分布 ($\text{cal}/\text{m}^3/\text{s}$)、 ρ ：水の密度 (kg/m^3)、 C_p ：水の比熱 ($\text{cal}/\text{g}/^{\circ}\text{C}$) である。気象条件は福岡管区気象台福岡観測所の1997年のデータを用いた。

生態系モデルの概要(中田, 1993)を図-6に示す。それぞれのコンパートメントの物質濃度の現存量 C に関する方程式は次式で表される。

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial AwC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z(z, t) \frac{\partial C}{\partial z} \right) + A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)^* \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、右辺第2項：生物・化学的変化項である。生物・化学的変化を表す各モデルは松梨(1993)に示され

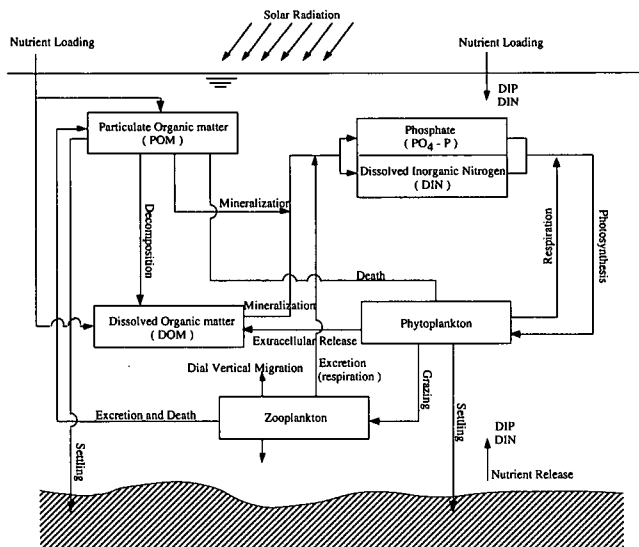


図-6 生態系モデルの概念図

表-1 各速度値

Definition	Unit	Value	Definition	Unit	Value
植物プランクトン $P(\text{mgC}/\text{m}^3)$			リン酸塩 DIP (mmol/m^3)		
0°Cにおける最大成長速度	1/day	1.05	0°Cにおける溶出速度	1/day	1.0
温度係数	1/°C	0.0633	温度係数	1/°C	0.0
半飽和定数 リン	mmol/m^3	0.1	DO 濃度による溶出抑制	1/(mgO_2/l)	0.4
窒素	mmol/m^3	3.0	全無機態窒素 DIN (mmol/m^3)		
消散係数 $\kappa=0.1+0.05[\text{Chl-a} : C_p]P$			0°Cにおける溶出速度	1/day	10.0
光合成の最適光量	ly/day	200	温度係数	1/°C	0.0
0°Cにおける死亡速度	1/day	0.01	DO 濃度による溶出抑制	1/(mgO_2/l)	0.4
温度係数	1/°C	0.0693	溶存酸素 DO (mg/l)		
沈降速度	m/day	0.01	20°Cにおける底泥の		
動物プランクトン $Z(\text{mgC}/\text{m}^3)$			酸素消費速度	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$	1.2
0°Cにおける摂食速度	1/day	0.18	温度係数		1.082
温度係数	1/°C	0.0693	再曝気定数	1/day	0.15
Ivlev 定数	1/(mgC/m^3)	0.0063	植物プランクトンの P/C		4.70×10^{-4}
餌の閾値濃度	mgC/m^3	0.0	Z/C		4.50×10^{-3}
同化効率		0.7	TOD/C		3.70×10^{-3}
総成長効率		0.3	Chl-a/C		0.02
0°Cにおける自然死亡速度	1/day	0.0535	動物プランクトンの P/C		3.23×10^{-4}
温度係数	1/°C	0.0693	Z/C		1.10×10^{-2}
懸濁態有機物 POM (mgC/m^3)			TOD/C		3.31×10^{-3}
0°Cにおける分解速度	1/day	0.0124	懸濁態有機物の P/C		8.14×10^{-4}
温度係数	1/°C	0.070	Z/C		5.63×10^{-3}
酸素制限の半飽和値	mg/l	1.0	TOD/C		3.01×10^{-3}
分解余剰物生成		0.25	溶存態有機物の P/C		2.61×10^{-4}
沈降速度	m/day	0.001	Z/C		2.48×10^{-3}
溶存態有機物 DOM (mg/Cm^3)			TOD/C		2.81×10^{-3}
0°Cにおける分解速度	1/day	0.0434			
温度係数	1/°C	0.0693			
酸素制限の半飽和値	mg/l	0.5			

ているモデルを用いたが、底泥の酸素消費に関してのみ Stefan and Fang (1994) に示されているモデルを用いた。各速度値として採用した値を表-1 に示す。これらの値はその都度測定によって本来求められるべきものであるが、ここでは幾つかの既存の研究(例えば、中田, 1993)を参考にして値を決定した。

計算条件および計算ケースを表-2 および表-3 に示す。Case-1 は自然の状態、Case-2 は水質改善装置を稼働させた状態に相当する。Case-2 では底層部から排出される水塊の水温は送水の途中で冷却されて底層部の水温と同じになっていると仮定した。

(2) 計算結果

図-7, 8, 9 に $Q/A=0.17 \text{ m}/\text{day}$ の場合の計算結果を示す。図-7(a), (b) はそれぞれ Case-1, 2 に対する水温の鉛直分布の時系列である。Case-2 の夏期に生成される躍層の位置は Case-1 と比較すると高くなっているが、これは表層水の底層部への供給に伴う補償流が鉛直上向き流速を引き起こしている為と考えられる。

図-8(a), (b) はそれぞれ Case-1, 2 に対する DO 濃度の鉛直分布の時系列を示す。Case-1 では、夏期における底層部の DO 濃度は $2.0 \text{ mg}/\text{l}$ 以下であり、底層部は貧酸素状態になっているのに対し、Case-2 では $6.0 \text{ mg}/\text{l}$ 以上を示し貧酸素状態が改善されていることが分かる。

図-9(a), (b) は植物プランクトン P の鉛直分布の時系列である。2 年目の夏期の表層部における P 濃度は Case-1 では非常に高い値であるのに対し、Case-2 ではかなり抑えられている。これは1年目の夏期における底層

表-2 計算条件

水深	5.0 m	鉛直層数	10 層
層厚	$\Delta z=0.5 \text{ m}$	時間刻み	$\Delta t=60 \text{ s}$
計算期間	730 日		

表-3 計算ケース

Case-1	表層水を底層部に供給しない場合
Case-2	$Q \text{ m}^3/\text{day}$ の表層水 (第1層) を底層部 (第9, 第10 層) に供給した場合

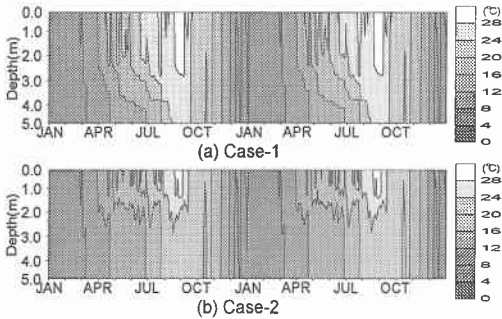


図-7 水温の計算結果

部の貧酸素化が改善されたことにより、底泥からの栄養塩の溶出が抑制された為と考えられる。

図-10 は Case-2 に対する単位面積当りの供給量 Q/A と1年目の夏期における底層(第9層)の DO 濃度および2年目の夏期における表層(第1層)の P 濃度の関係を示したものである。 Q/A の増加に伴い DO 濃度は増大し

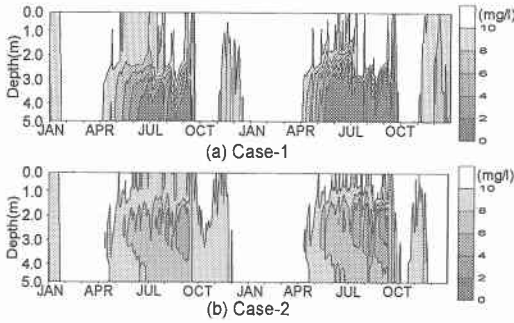


図-8 DOの計算結果

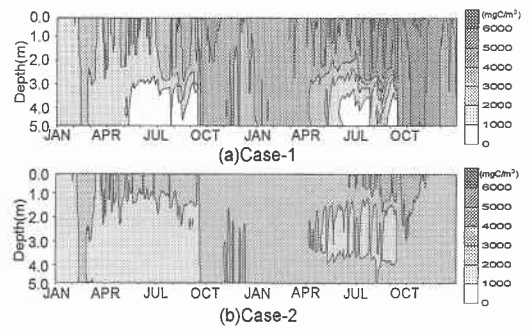


図-9 Pの計算結果

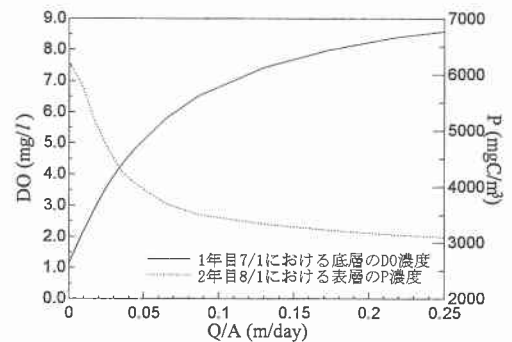
P 濃度は低減する。図中の曲線から、底層部の貧酸素化を改善する、すなわち底層のDO濃度を 3 mg/l 以上に行うことができる Q/A は $Q/A > 0.02 \text{ m/day}$ である。

ところで、本水質改善装置を水深が 5 m 程度の実水域に適用する際には、天端高 h_c が 3 cm 、幅が 10 m 程度の越波構造物を数機設置することを考えている。前節で、 $h_c = 6 \text{ cm}$ 、 4 m 幅のモデル機で平均して $330 \text{ m}^3/\text{day}$ の越波量が獲得できることが示された。その結果を $h_c = 3 \text{ cm}$ 、 10 m 幅の越波構造物で1日当りに獲得できる越波量に換算すると 1250 m^3 であった。従って、 $Q/A > 0.02 \text{ m/day}$ の条件から、 $h_c = 3 \text{ cm}$ 、 10 m 幅の越波構造物1機で $6.25 \times 10^4 \text{ m}^2 (= 250 \text{ m} \times 250 \text{ m})$ の水域の水質改善能力があることになる。

4. ま と め

高々数 10 cm 程度の波しか発生しない水域での越波量の実測ではあったが、天端高 $h_c = 6 \text{ cm}$ 、 4 m 幅の越波堤で、1日当りに平均で 330 m^3 の越波量を獲得できることが示された。また、生態系モデルを用いた鉛直1次元数値計算により、表層水を底層部に供給することは水質改善に対し十分効果があることが示された。更に、実機レベルに換算された越波流量 $1250 \text{ m}^3/\text{day}$ で $6.25 \times 10^4 \text{ m}^2 (= 250 \text{ m} \times 250 \text{ m})$ の水域の水質改善が可能であることが示された。従って、越波構造物を複数個設置したり、越波堤幅を長くしたりすれば、広範囲の閉鎖性水域の水質改善が十分期待できることになる。

謝辞：最後に、本研究を行うに当たり、有益な御助言を頂いた九州大学大学院工学研究科海洋システム工学専攻の中村由行助教授に、また実測において多大な協力をお願いした佐世保重工業(株)の木下恵嗣氏、建設省九州地


 図-10 Q/A と DO および P の関係

方建設局九州技術事務所の丸井茂俊氏および建設省遠賀川河口堰管理所の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 小松利光・岡田知也・松永信博・榎田操・藤田和夫 (1996): 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基礎的研究, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 89-99.
- 小松利光・岡田知也・丸井茂俊・松永陽一郎・藤田和夫・柴田敏彦 (1998): 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, 水工学論文集, 第42巻, pp. 727-732.
- 中田喜三郎 (1993): 生態系モデルー定式化と未知のパラメータの推定法一, 海洋工学コンファレンス論文集, Vol. 8, pp. 99-138.
- 松梨順三郎 (1983): 環境流体汚染, 森北出版, 407 p.
- B. Henderson-Sellers (1985): New Formulation of Eddy Diffusion Thermocline Models, Appl. Math. Modelling, Vol. 9, pp. 441-446.
- Stefan, H. G. and Fang, X. (1994): Dissolved Oxygen Model for Regional Lake Analysis, Ecological Modelling, 71, pp. 37-68.