

(株)荒谷建設コンサルタント 正会員 ○佐伯 信哉  
愛媛大学大学院 正会員 中村 孝幸

## 1. はじめに

閉鎖性内湾では、夏季には水温成層が発達し、鉛直混合が阻害されることにより底層が貧酸素化しやすい。貧酸素化は、底泥の栄養塩や硫化物の溶出を促進し、時として青潮や赤潮を引き起こす要因と考えられている。そのため、底層への酸素供給を目的として、電気動力による曝気装置やマイクロバブル発生装置、重複波による水面上昇を利用した鉛直循環流誘起型護岸なども提案されるに到っている。

本研究では、やはりこのような内湾域の水質改善を目的として、鉛直混合を促進する海洋施設の開発を目指すもので、原動力として自然エネルギーである波エネルギーを活用する。すでに著者らは(佐伯ら, 2007)、遊水室前面の鉛直版をくさび形構造として、非対称な交番渦を発生させ、結果的に遊水室内に設けた鉛直通水路内に一方平均流の生成が可能であることを実験的に明らかにしている。しかしながら、その一方平均流や垂下版下端より発生する渦流れに伴う水塊の鉛直混合特性については十分明らかであるとはいえない。

そこで本研究では、理論解析により鉛直混合促進型防波堤による鉛直混合特性について明らかにする。その際、消波効果および鉛直通水路に発生する一方平均流の特性について、水理模型実験(佐伯ら, 2007)との比較によりその有効性も併せ検討する。

## 2. 数値計算

### (1) 構造体および波浪条件

図-1 および表-1 は、計算に用いた構造体を示したものである。計算に用いた入射波の緒元は、入射波高  $H=6\text{cm}$  (現地量で  $H=30\text{cm}$ )、周期  $T=0.9\sim 2.3\text{s}$  (現地量で  $T=2.0\sim 5.1\text{s}$ ) の範囲内で7種類の規則波とした。

### (2) 数値計算の方法

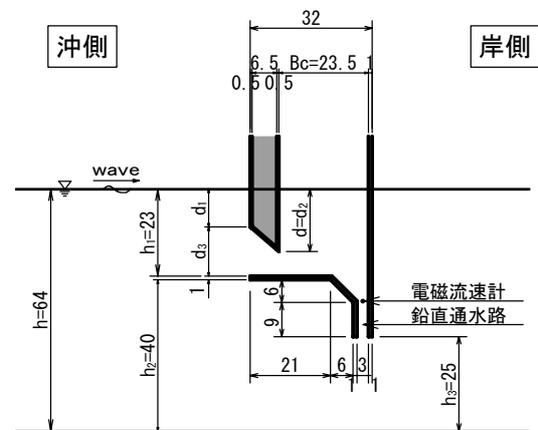
#### (a) 減衰波理論

反射波・透過波の算定には、線形ポテンシャル波動理論に基づく減衰波理論(中村ら, 1997)を用いた。理論算定では、等価線形抵抗係数  $fc$  が必要となるが、

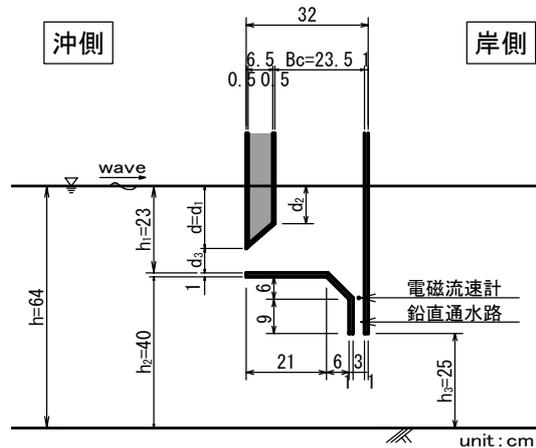
実験結果との整合性を考慮して  $fc=0.15$  を用いた。

#### (b) Volume of Fluid (VOF) 法

波浪制御効果および鉛直混合効果の把握を目的として、VOF法(沿岸開発技術センター, 2001)も併せ検討した。計算に用いた水路を図-2に示し、計算条件を表-2に示した。計算は、静水状態から20s間造波し、疑似定常状態を再現した。反射率の解析は、入・反射波の分離推定法(合田ら, 1976)により算定した。



(a) 右下がりくさび形 (TYPE 1,3,4)



(b) 右上がりくさび形 (TYPE 2)

図-1 模型堤体構造図 (Scale=1/5 程度)

表-1 模型堤体の構造緒元

形状	$d_1(\text{cm})$	$d_2(\text{cm})$	$d_3(\text{cm})$	$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$h_3(\text{cm})$	$d_1/h_1$	$d_2/h_1$	$h_1/h$
TYPE 1	10.0	16.5	13.0	23.0	40.0	25.0	0.43	0.72	0.36
TYPE 2	16.5	10.0	6.5				0.72	0.43	
TYPE 3	5.0	11.5	18.0				0.22	0.50	
TYPE 4	13.2	19.7	9.8				0.57	0.86	

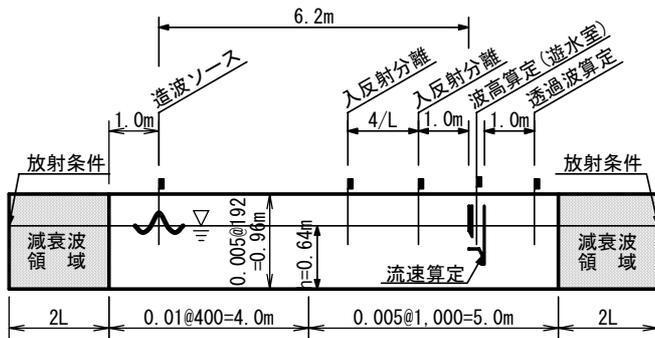


図-2 計算に用いた水路の概要

表-2 VOF 法の計算条件

計算領域	長さ: $x=9.0+4L(m)$ 高さ: $z=0.96(m)$	
格子間隔	$x < 2L+4.0(m)$	$\Delta x=1.0cm$
	$2L+4.0(m) \leq x \leq 2L+9.0(m)$	$\Delta x=0.5cm$
	$x > 2L+9.0(m)$	$\Delta x=1.0cm$
	$0.0 \leq z \leq 0.96(m)$	$\Delta z=0.5cm$
入射波条件 (規則波)	$H=6(cm)$ $T=0.90, 1.10, 1.35, 1.55, 1.70, 2.00, 2.30(s)$	
水深	0.64(m)	
造波ソース	$x=2L+1.0(m)$	
境界条件	sommerfeldの放射条件(数値水路両端) エネルギー減衰帯(数値水路両端より2L)	
構造体設置位置	造波ソースより6.20(m)	
移流項	中央差分と風上差分の割合→8:2	
VOF関数F	フリー	
その他境界	スリップ	
気泡上昇速度	0.2(m/s)	
水滴落下速度	フリー	
造波時間	静止状態から20(sec)	
時間差分間隔	CFL条件および粘性項の安定条件から決まる時間刻み幅に0.2を乗じた時間	
サンプリング間隔	T/100	

### 3. 結果および考察

#### (1) 波浪制御効果

図-3は、各模型堤体による反射率  $Cr$ 、透過率  $Ct$ 、遊水室内波高増幅率  $Hc/H$  ( $Hc$ ; 遊水室内波高) の周期による変化を示したものである。図中には、周期を表すパラメータとして、 $L/Bc$  (波長遊水室幅比) を用い、 $Cr$ 、 $Ct$  については、減衰波理論およびVOF法に基づく算定結果、 $Hc/H$  についてはVOF法による算定結果および著者らによる水理模型実験結果も併せ示してある。

TYPE 1~3の模型堤体の反射率  $Cr$  に着目すると、現地波周期  $T=3.0 \sim 3.5s$  程度 ( $L/Bc=11.0 \sim 13.5$  程度) で  $Cr < 0.4$  であるなど反射波の低減効果が確認できる。実験結果と算定結果の定性的な対応は、 $L/Bc=11.0 \sim 13.5$  程度で極小値を示し、長周期側に移行するに従いやや反射率  $Cr$  が増大するなど、減衰波理論およびVOF

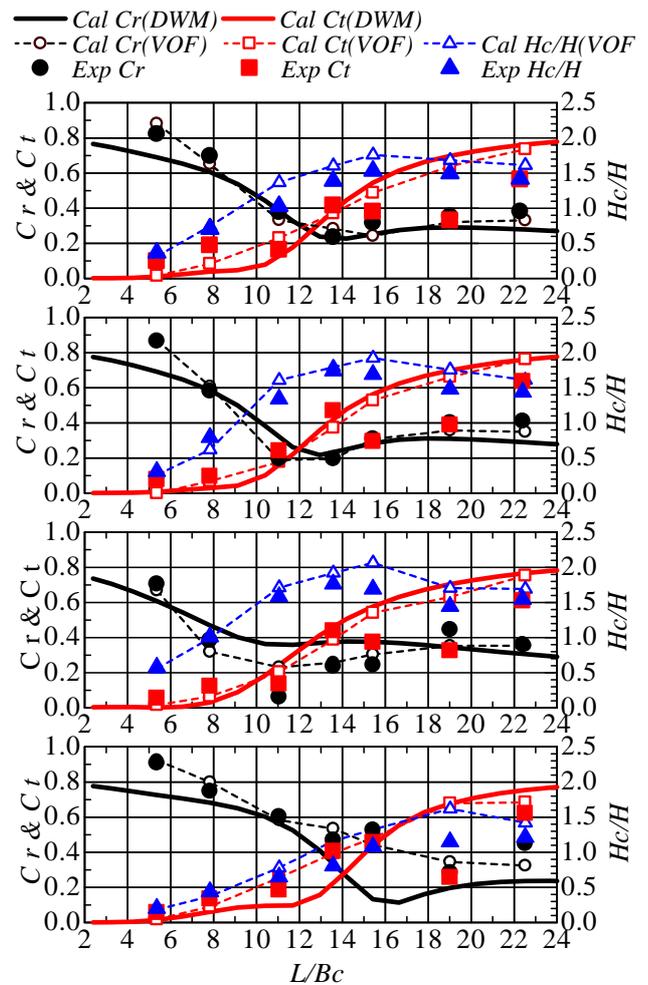


図-3  $Cr$ 、 $Ct$ 、 $Hc/H$  の実験結果と計算結果

法とも良好である。定量的には、VOF法の対応は概ね良好であるものの、短周期側で減衰波理論はやや反射率を過小評価する傾向にある。これは、等価線形抵抗係数  $fc$  を過大評価していることが原因と考えられる。一方、TYPE 4の模型堤体の反射率  $Cr$  の実験結果および算定結果は、対象波に対して  $Cr > 0.4$  となるなど、反射波の低減効果が不十分である。

透過率  $Ct$  に着目すると、実験結果と算定結果の対応は概ね良好であり、目標周期に対しては  $Ct=0.2 \sim 0.4$  程度である。

遊水室内の波高増幅率  $Hc/H$  に着目すると、反射率  $Cr$  が顕著に低減される周期付近から長周期側の広い範囲において  $Hc/H > 1$  となり、遊水室内のピストンモード波浪共振は、没水平板に開口部を設けても発生することが確認できる。実験結果とVOF法による算定結果の対応は、概ね良好である。

#### (2) 鉛直通路内に発生する平均流の特性

図-4は、各模型堤体による鉛直通路における平均

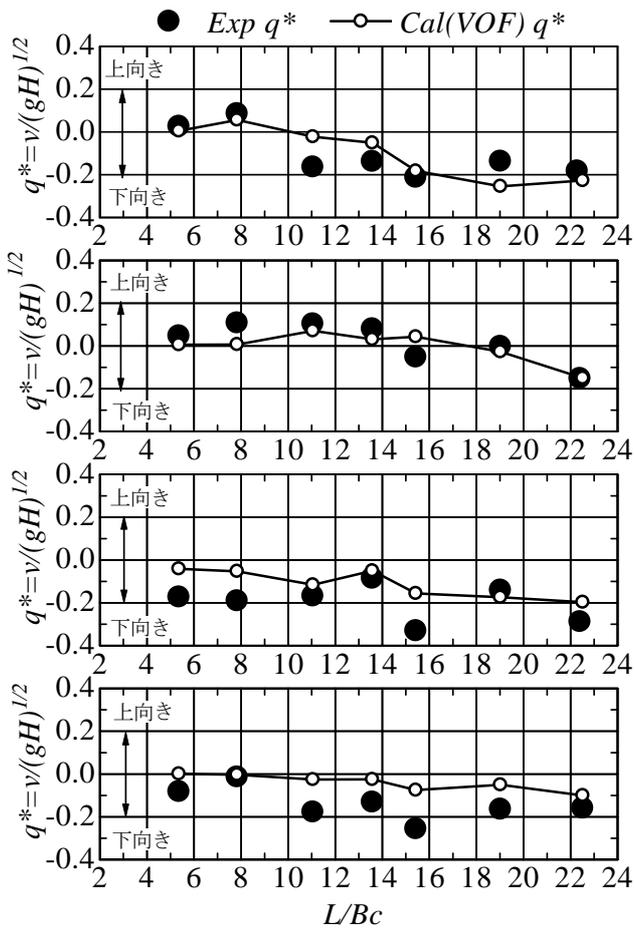


図-4  $q^*$ の実験結果と計算結果

流速  $v$  を重力加速度  $g$  と入射波高  $H$  の積の平方根で除した無次元平均流速  $q^*$  ( $q^* = v/(gH)^{1/2}$ ) を  $L/Bc$  による変化で示したものである。

垂下版のくさび形状の違いによる無次元平均流速に着目すると、右下がりくさび形垂下版 (TYPE 1) では、概ねどの周期帯に対しても下向き平均流速が発生する。しかしながら、右上がりくさび形 (TYPE 2) では、短周期側では上向き平均流速が発生しているものの、長周期側に移行するに伴い、下向き平均流速に転じており特定方向への流速生成がなされない。

右下がりくさび形状の垂下版 (TYPE 1, 3, 4) における吃水深の影響に着目すると、垂下版吃水深に関係なく安定的に下向き平均流速が発生している。特に、垂下版吃水深を浅くした TYPE 3 の場合では、短周期側より安定した下向き平均流速が生成される。

実験結果と VOF 法による計算結果の対応は、定性的には平均流速の方向の再現性を含め非常に良好である。しかしながら、定量的には実験結果をやや過小評価する傾向にある。

### (3) 堤体まわりの流況

VOF 法による計算結果の一例として、波高  $H=6\text{cm}$ 、周期  $T=1.55\text{s}$  の波条件における堤体 (TYPE 3) まわりの流況を示したのが、図-5 である。これらの図では、造波開始後 15.5s から代表的な水面状態における水面および無次元流速ベクトル  $w^*$  を示してあり、 $w^*$  は式 (1) により定義した。

$$w^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}}, \quad u^* = \sqrt{u/gH}, \quad v^* = \sqrt{v/gH} \quad (1)$$

ここに、 $u, v$ ;  $x, z$  方向流速、 $g$ ; 重力加速度、 $H$ ; 入射波高である。

VOF 法による計算結果は、水理模型実験にて確認さ

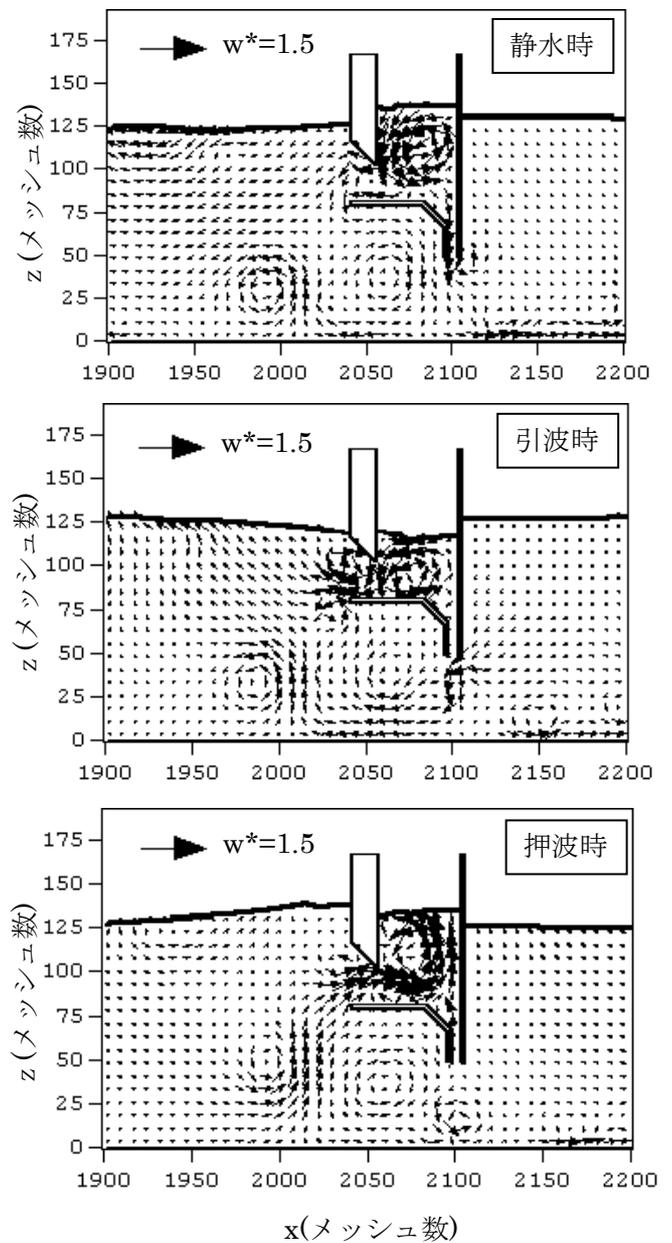


図-5 堤体まわりの流況の計算結果の一例  
( $T=1.55\text{s}$ , VOF 法)

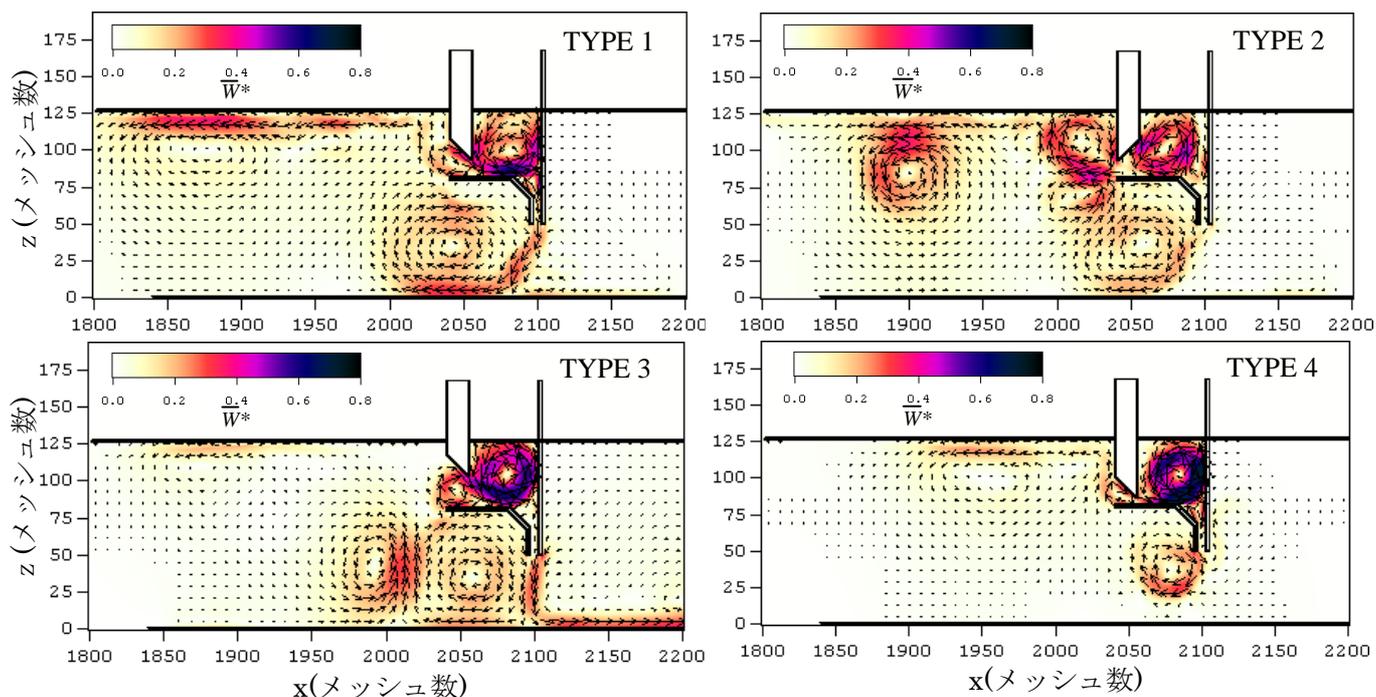


図-6 堤体まわりの無次元平均流速強度  $\overline{w^*}$  の計算結果 ( $T=1.55s$ , VOF 法)

れた遊水室内におけるピストンモード波浪共振や没水平版下面における時計回りの循環流が再現されている。水理模型実験および VOF 法による計算結果より、垂下版を右下がりくさび形構造にすることにより、遊水室内への水塊流入を容易にすると共に、垂下版下端からの水塊流出を抑制することにより、非対称な交番渦が発生する。結果的に、鉛直通路に下向きの流速が発生し、没水平版下側に時計回りの循環流が生じる。そして、その外縁端で底層よりの上昇流が発生することにより、鉛直混合が促進されることが確認された。

図-6 は、各構造体における堤体まわりの無次元平均流速強度  $\overline{w^*}$  (式(1)において、1 周期間における平均流速  $\overline{u}$ ,  $\overline{v}$  を用いる) の計算結果を示したものである。

まず、垂下版のくさび形状の違いに着目する。右下がりくさび形垂下版 (TYPE 1) は、遊水室内への水塊流入を容易にすることにより、鉛直通路に下向き平均流を発生させ、結果的に没水平版下面における循環流の流速強度が大きくなる。右上がりくさび形 (TYPE 2) では、遊水室内からの水塊流出を容易にすることにより、構造体沖側での渦流れの形成に伴い、それに起因する鉛直循環流の発生が見られる。

次に、右下がりくさび形状の垂下版 (TYPE 1, 3, 4) による吃水深の影響に着目すると、鉛直通路における平均流速の絶対値に加え、図には示していないがその

流速振幅の絶対値も、鉛直循環流の規模や強度を支配する要因であることが示唆された。

#### 4. 結語

- 1) 鉛直混合促進型防波堤の波浪変形特性は、概ね減衰波理論および VOF 法により推定することができ、有効な反射および透過波の低減効果が期待できる。
- 2) 水理模型実験との比較により、VOF 法は堤体回りの流況を概ね再現可能であり、垂下版形状の違いや吃水深の違いによる鉛直混合効果が異なることが再確認できた。

#### 参考文献

- 佐伯信哉・中村孝幸(2007) : 遊水室内の波浪共振を利用した鉛直混合促進型防波堤の開発, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 1241-1245.
- 中村孝幸・井手善彦 (1997) : 波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第 13 巻, pp. 177-182.
- 沿岸開発技術研究センター(2001) : 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12.
- 合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池治(1976) : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 278, pp. 3-24.