

波動により平板スリット周辺に発生する一方向平均流とその誘起機構の解析

折橋 恒春*・恩地 正憲**・山野 貴司***・角野 昇八****

港湾などの閉鎖性海域の水質悪化問題を解消するために種々の海水交換型防波堤が建設されている。それらの断面形状はいくぶん複雑なこともあり、海水交換のメカニズムが十分解明されているとは言えない現状にある。本研究では、高い効率と効果的な交換特性をもつ海水交換型防波堤の開発に向けた基礎研究として、まず単純形状であるスリット付鉛直平板を取り上げ、波動による海水交換のメカニズム解明を目的として次のことを確認した。①平板近傍に定在する渦対によって平均流が誘起される。②平均流の発生は周期に依存し、おもに冲向きに発生する。③循環値に着目して平均流の誘起機構を確認した。

1. はじめに

近年、内湾や港湾などの閉鎖性海域の水質悪化問題を解消するために海水交換型防波堤の建設が多くなっている。波動運動によって海水交換を行おうとする海水交換型防波堤では、堤内に設けた遊水部内外の平均水位差を利用して外海から港内へ海水を導入する方式（例えば、山本ら, 1987）と堤体内水平開口部周辺に波動運動によって誘起させられた渦流を利用して港内から外海へ海水を吸出す方式（例えば、中村ら, 2003）に大別される。これらの形式は、いずれも複雑な断面形状を持ち、そのこともあって海水交換のメカニズムが十分に解明されているとは言えない現状にある。本研究では、高い効率と効果的な交換特性をもつ海水交換型防波堤の開発に向けた基礎研究として、波動場の中の一重および二重の鉛直平板を取り上げ、そこに設けられた水平および鉛直開口部（スリット）において、ある範囲の波浪条件下で発生が確認された一方向平均流（以下、平均流）の発生要因に関する検討を実験および VOF 法を用いた数値波動水路（CADMAS-SURF, 以下 VOF）により加える。

2. 水理模型実験

(1) 実験条件

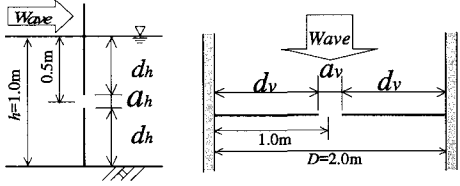
実験は、長さ $LL=50.0\text{ m}$ ×幅 $D=2.0\text{ m}$ ×高さ $HH=1.5\text{ m}$ の循環水路で水深 $h=1.0\text{ m}$ として実施した。波浪条件は、表-1 に示すように周期 $T=1.2\sim 5.1\text{ s}$, 波高 $H=2.6\sim 9.2\text{ cm}$ の規則波とし、波形勾配はほぼ $H/L=0.01$ とした。

(2) 実験模型

実験は、図-1 に示すような実験水路中に一つの水平または鉛直のスリットを設けた 1 枚の鉛直平板について行った。水平及び鉛直スリットともに開口位置を水深または堤体幅の中央に設けて実験を行った。模型諸元を

表-1 波浪条件

周期 T (s)	波長 L (m)	h/L	D/L	H/L
5.1	15.55	0.06	0.13	0.005
4.3	12.97	0.08	0.15	
3.7	11.01	0.09	0.18	
3.2	9.36	0.11	0.21	0.01
2.8	8.01	0.12	0.25	
2.5	6.98	0.14	0.29	
2.2	5.93	0.17	0.34	
1.8	4.48	0.22	0.45	
1.6	3.73	0.27	0.54	
1.4	2.97	0.34	0.67	
1.2	2.23	0.45	0.90	



(a) 水平スリット断面図 (b) 鉛直スリット平面図

図-1 実験模型

表-2 模型諸元

モデル名	スリット方向	a_h, a_v (m)	d_h, d_v (m)	開口率
HC-10	水平	0.1	0.45	10% (a_h/h)
VC-05	鉛直	0.1	0.95	5% (a_v/D)
VC-10		0.2	0.90	10% (a_v/D)

表-2 に示す。模型縮尺は、1/10～1/20 程度を想定した。

(3) 計測方法

スリットの中央部に（水平スリットは水路中央、鉛直スリットは水深中央）3 次元超音波ドップラー流速計（(株) アレック電子：ADV-lab）を設置し、流速の計測を行った。サンプリングタイムは 0.1 s とした。平均流速の測定および算定は、造波後 5 波程度経過後の波動が定常になった 5 波分の平均をとった。

* 学生会員 工修 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻
** 和歌山県日高振興局 建設部道路課
*** 工修 東洋建設(株) 東京支店
**** 正会員 工博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科都市系専攻

3. 数値計算

(1) 計算手法

本研究では、2次元非圧縮粘性流体に対する連続式と Navier-Stokes の方程式を基礎方程式とし、自由表面解析モデルとして VOF 法を採用した数値波動水路 (CADMAS-SURF, 以下 VOF) を用いて計算を行った。VOF は断面 2 次元解析のため、対象は水平スリット構造のみとした。

(2) 計算条件

図-2 に計算領域を示す。計算格子間隔は水平方向 $\Delta x = 0.05 \sim 0.10$ m とし、構造物近傍は格子間隔を密にした。鉛直方向の格子間隔は全て $\Delta z = 0.025$ m とした。造波方法としては、Stokes 波第 5 近似解の造波ソースを用い、解析領域の両端には Sommerfeld の放射境界条件を設け、そこから 2 波長分のエネルギー減衰帯を設けた。差分法に DONOR-0.2, F 値フリー、他の境界条件はスリップとした。データ出力は $T/100$ 間隔とし、実験と同様に 5 波分のスリット通過流速の平均値を計算した。

波浪条件、その他の計算条件は実験と同一の条件とした。なお、水平スリットにおける開口位置の影響を検討するために VOF で水面付近 (水深 0.2 m) にスリットを配置した水平上部開口モデル、水底付近 (水深 0.8 m) にスリットを配置した水平下部開口モデルの計算を行った。また遊水部を有する 2 枚平板モデルの計算も行った。

4. 結果および考察

(1) 1 枚平板における平均流の発生

a) 平均流発生条件とその流向特性

図-3 に 1 枚平板の VOF による計算と実験の水平方向の平均流速を示す。縦軸には波が透過する方向 (岸向き) を正とした平均流速、横軸には水深 (h) または堤体幅 (D) と波長 (L) の比 h/L , D/L を示す。 h/L , D/L が大きくなるほど入射波の波長および周期 (T) が短くなる。図-3 によれば、まず、水平スリットにおいては、実験および VOF ともに同程度の値を示しており、妥当な実験および計算結果を示していると言える。また、水深方向の開口位置の違いに対しては、大きな影響は見られない。注目されることとして、水平スリットで $h/L < 0.2$ (ほぼ $T > 2.0$ s) で沖向きの平均流が発生していることがわかる。鉛直スリットでは $D/L < 0.5$ (ほぼ $T > 1.7$

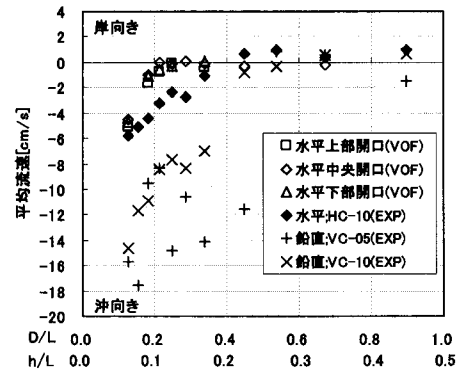


図-3 平均流速 (水平方向)

s) で沖向きの平均流が発生している。また、鉛直スリットと水平スリットを比較すると鉛直の方が水平よりも大きな流速値を示している。

これより、1 枚の鉛直平板に一つの水平あるいは鉛直のスリットを設けた構造物に周期の長い波が入射した時には入射側 (沖向き) に平均流が発生することがわかる。

b) 平均流の誘起機構

ここでは平均流の発生機構について、波動運動に伴い平板前後に発生する渦に着目して考察する。

図-4 に沖向きの平均流が発生する $h/L = 0.06$ の水粒子速度ベクトル図と循環値の計算結果を示す (水平スリット)。循環値は、(1) 式によって算定される。

$$\Gamma = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{s} = \sum (u \Delta x + w \Delta z) \dots \dots \dots (1)$$

ここで Γ : 循環値, $\vec{v} = (u, w)$: 速度ベクトル, s : 積分経路 (各計算格子周囲) である。循環値は反時計回りを正、時計回りを負としている。単位は, cm^2/s である。

図-4 は、波の 1 周期を 4 分割して示し、位相は平板沖側の水面位置が静水面を切る時 (ゼロアップ時) を 0 とした。(a) の $1/2\pi$ 位相では、沖側から波が入射し、スリット部で大きな流速が発生している。また、平板岸側にスリット部を境にして水面側と底面側にそれぞれ逆方向に回転する渦対が発生し始めている。平板の沖側にもスリット部をほぼ境にして、水面側と底面側にそれぞれ逆方向の渦対が見られる。(b) の π 位相では、スリット部の流速は小さくなり、沖方向に反転し始めている。平板沖側の渦対は、ほぼ同じ位置に定在しているが、 $1/2\pi$ の位相で平板岸側に発生した渦対は平板から剥離し始めて

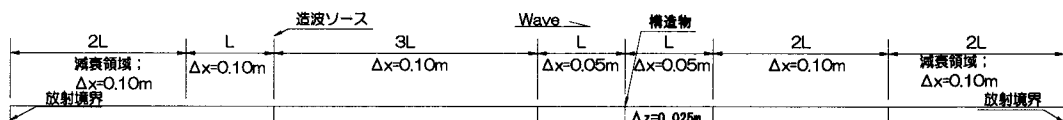


図-2 計算領域

いる。(c)の $3/2\pi$ 位相では、スリット部で大きな沖向きの流速が発生し、平板沖側に新たな渦対が発生し始めている。既に存在していた渦対については、水面側の渦の規模が大きくなり、底面側の渦は押し潰された格好となっているが、渦対は依然として平板近傍に存在している。一方、平板岸側の渦対はほぼ完全に剝離し、平板から遠ざかっている。(d)の 2π 位相では、沖側の渦対が先の $3/2\pi$ 位相で発生した渦対と合成しながら平板付近に留まっている。平板岸側の渦対は、水面側の渦が分裂するなど、減衰し始めている。

一方、図-5は $h/L=0.17$ で平均流が小さいケースの循環値である。(a)~(d)図より波の1周期を通じてスリットを通過する際に発生する渦が比較的小規模であることが分かる。また、 $h/L=0.06$ のケースのように平板を境に沖側と岸側で渦対の定在の様子が異なることはな

く、平板を境にほぼ対称形状である。図-4と図-5に示す2つのケースでは、スリットを通過する流れによって発生する平板周辺の渦対の規模および定在状況が大きく異なっており、これが2つのケースにおける平均流の発生状況の違いに関連しているのではないかと考えられる。

図-6(a)に $h/L=0.06$ のケースにおける特徴的な瞬間を示す。平板の岸側では、スリットを通過する流れによって発生した渦が剝離し、岸側へ移動している。一方、平板の沖側ではスリット部をほぼ境にして水面側と底面側に互いに逆方向に回転する渦対が定在している。一般に渦対が存在する場合、その渦対によって図-6(b)に示すような誘起流が発生することが知られている。それゆえ、この渦対が図-6(a)に示すように沖側への流れを誘起しているものと考えられる。

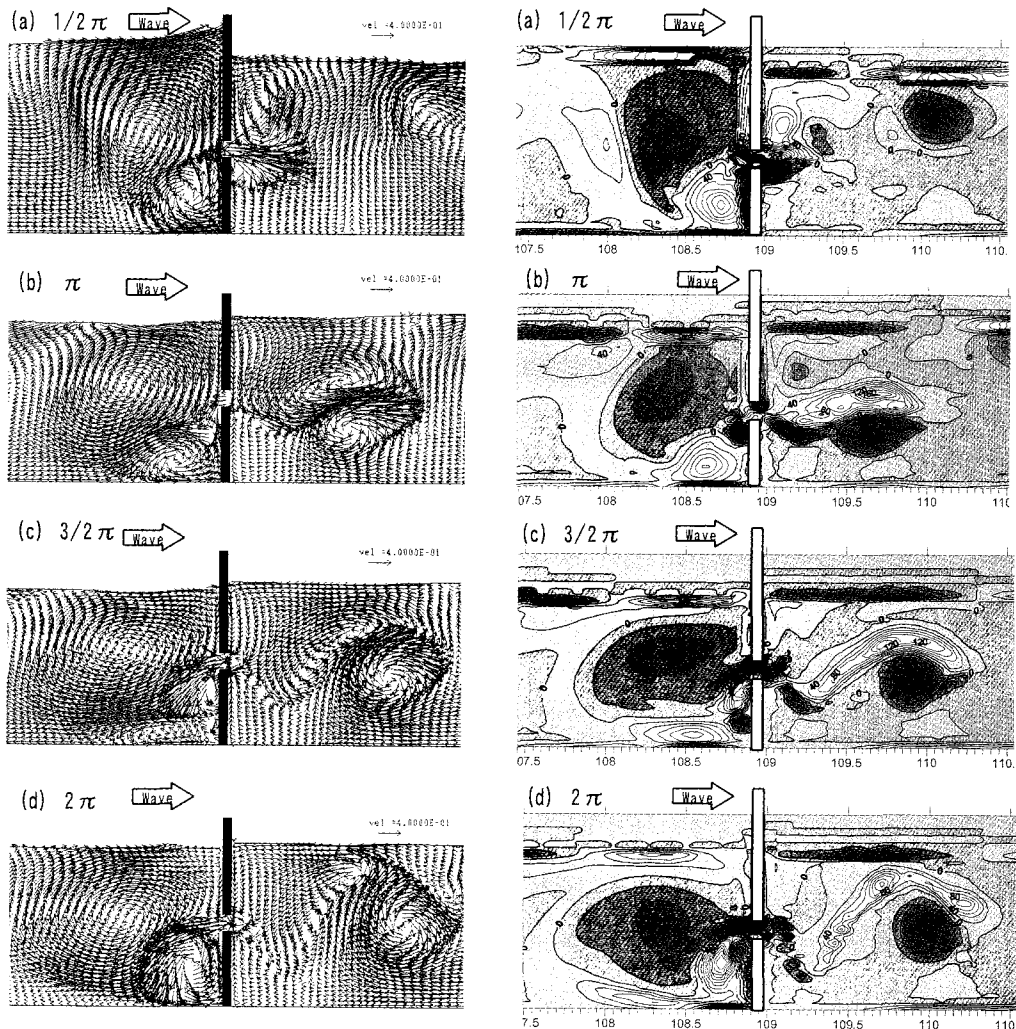


図-4 速度ベクトルと循環値 ($h/L=0.06$, $T=5.1$ s)

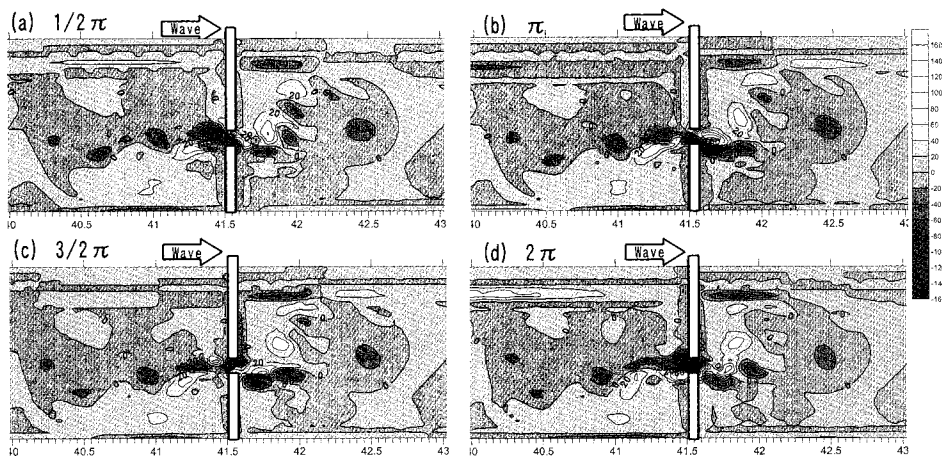
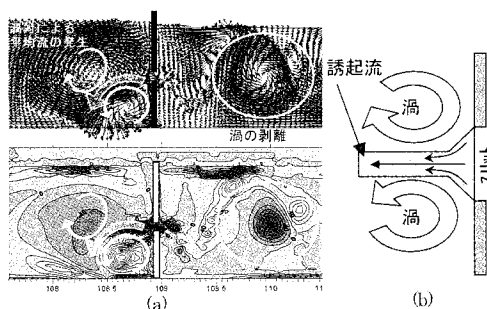
図-5 循環値 ($h/L=0.17$, $T=2.2$ s)

図-6 平均流の発生機構概念図

以上より、波の1周期を通じて平板沖側に定在する渦対が、冲向き平均流の発生に密接に関連しているものと考えられる。

c) 平均循環値による考察

図-7に図-4と同条件 ($h/L=0.06$) での波の1周期間における循環値の平均を示す。縦軸には平均循環値、横軸には1周期を10分割した時間を示す。平均値を算定する範囲は、水深方向は開口部を境として上部 (水深0~0.5 m) および下部 (水深0.5 m~1.0 m) の0.5 mとし、沖-岸方向は平板から0.5 mと設定した (0.5 m×0.5 mの範囲)。図-7の平均循環値の推移からも平板の沖側には開口部を境に入射波1周期間を通じてそれぞれ逆方向の渦対が存在していることが分かるのに対して、平板の岸側では0.6 T を境に上部と下部の循環値の正負が逆転し、渦対が定在していないことがわかる。図-8(a)には、図-7で示した平均循環値の1周期平均を模式的に示す。 $h/L=0.06$ の場合には、平板の沖側に入射波の1周期を通じて強い強度を持つ渦対が定在し、平均流を発生させる要因となっていることが、この図からも説明できる。

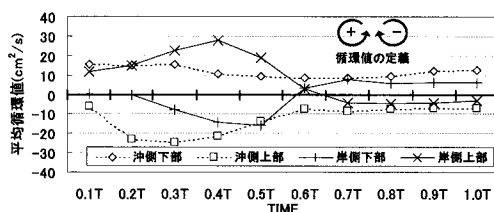
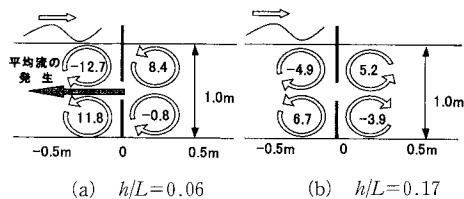
図-7 平均循環値 ($h/L=0.06$)

図-8 循環値の1周期平均

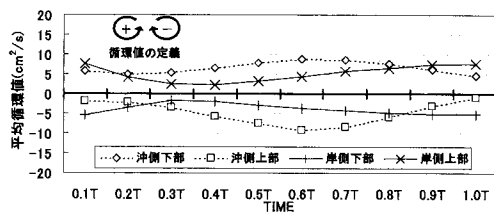
図-9 平均循環値 ($h/L=0.17$)

図-9, 8(b)には、図-5で示した条件 ($h/L=0.17$) での波の1周期間における平均循環値およびその1周期平均を示す。平板を境に1周期を通じてほぼ対称的に渦対が存在する傾向を示していることから、本ケースで平均流がほとんど発生していないことが理解できる。

(2) 2重平板列の平均流特性

遊水部を有した形状は波浪低減機能が強く、海水交換

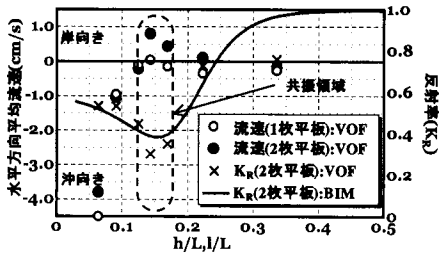
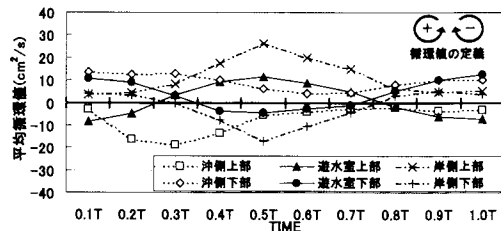


図-10 平均流と反射率 (2枚平板)

図-11 平均循環値 ($h/L=0.06$; 2枚平板)

型防波堤としても適しているため、本研究では2枚のスリット付き鉛直平板を波向き直角方向に配した構造を取り上げ、同様の検討をVOFで行った。遊水室長 $l=1.0$ m, スリット位置は水深中央 (底面から0.5 m), 開口幅 (a_h) はいずれも0.1 m ($a_h/h=0.1$) とした。(図-12)

図-10に2枚平板における平均流と反射率を示す。比較のために1枚平板における平均流も示した。反射率については、VOFによる計算結果と共にポテンシャル理論に基づくエネルギー損失を考慮した境界積分法(BIM)(折橋ら, 2004)で算定した値も示した。

2枚平板における平均流は、 $l/L < 0.12$ では1枚平板と同様に沖向きに平均流が発生しているが、 $0.12 < l/L < 0.2$ では1枚平板では見られなかった岸向きの平均流が発生している。2枚平板における $0.12 < l/L < 0.2$ の範囲は反射率から判断すると共振領域にほぼ一致する。これより、岸向きの平均流の発生と遊水室内の流体運動 (渦の定在状況) に関連があるのではないかと考えられる。そこで、平均流の発生状況を遊水室内の循環値に着目して整理する。図-11, 12(a)に $l/L=0.06$, 図-13, 12(b)に $l/L=0.14$ の循環値の平均を示す。 $l/L=0.06$ の図-11, 12(a)では、遊水室内における循環の平均値が入射波1周期の間に正負が逆転しており、渦が定在していないことが分かる。このため、1枚平板の場合と同様に沖側の渦対によって、沖向きの平均流が誘起されているものと考えられる。

一方、 $l/L=0.14$ では平板の沖・岸側および遊水室内で1周期を通じて循環の平均値の正負が逆転するような現象は生じていない。すなわちスリットを境とした上部と

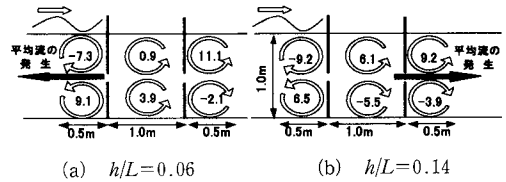
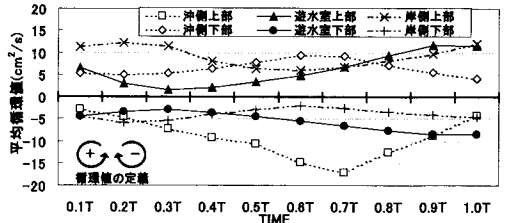


図-12 循環値の1周期平均 (2枚平板)

図-13 平均循環値 ($h/L=0.14$; 2枚平板)

下部で1周期を通じて循環の方向が変わらないということになる。以上より、2枚平板においても各部 (特に遊部) の渦対の定在状況および循環の方向が平均流の発生状況に関連しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究において確認された結果を以下に示す。

- ①スリット付き一重および二重の鉛直平板で、波動で誘起された沖向き平均流を確認した。
- ②その発生は平板沖側近傍に定在する渦対が要因であることを循環値に着目することで確認できた。
- ③遊水部を有する2枚平板では共振周期帯において堤内および岸側に発生する渦対により、岸向きに平均流が発生する。
- ④鉛直スリットの方が水平スリットに比べて、大きな平均流を発生させる。

参考文献

- 折橋恒春・恩地正憲・角野昇八 (2004): 鉛直平板のスリットで観察される定常流とその流向特性について, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 215-220.
- 折橋恒春・山野貴司・岡崎拓人・角野昇八 (2004): スリットを有する多重鉛直平板構造体の周辺波動場解析, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 731-736.
- (財) 沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF), 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12.
- 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭 (2003): 渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 806-810.
- 山本正昭・中泉昌光・間辺本文 (1987): 港堤付防波堤による海水交流工法の開発, 第34回海講論文集, pp. 675-679.