

# 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

## CHARACTERISTICS OF SEAWATER EXCHANGEABILITY ABOUT VERTICAL THIN WALLS WITH SLIT

折橋恒春<sup>1</sup>・恩地正憲<sup>2</sup>・角野昇八<sup>3</sup>

Tsuneharu ORIHASHI, Masanori ONCHI, and Shohachi KAKUNO

<sup>1</sup>学生会員 工修 大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

<sup>2</sup> 和歌山県日高振興局建設部 (〒645-0416 和歌山県日高郡龍神村安井65-19)

<sup>3</sup>正会員 工博 大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

Recently many seawater exchangeable breakwater are constructed for improvement of sea water quality in port and inner harbor. However the mechanism of seawater exchanging is not clear, because of their complex configuration. We study the characteristics of flow through a slit by using hydraulic experiments and a numerical simulation using the volume of fluid method(CADMAS-SURF). It is concluded that the characteristics of flow(direction,velocity,etc.) are related to a pair of vortexes induced by the flow through a slit.

**Key Words :** sea-water exchangeable breakwater, vertical thin walls with slit ,CADMAS-SURF

### 1. 緒 言

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。海水交換型防波堤には、種々の形式があり、主として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い出す方式<sup>1)</sup>に大別される。これらの形式は、いずれも多少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い難い現状にある。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、波動場の中の鉛直平板を取り上げ、そこに設けられた一つの水平および鉛直スリットにおいて、ある範囲の波浪条件の下で発生する平均定常流の発生要因に関する検討を実験（水平・鉛直スリットを対象）と数値波動水路（水平スリットを対象）により加えた。

### 2. 水理模型実験

#### (1) 実験条件

実験は、長さ  $L=50.0\text{m}$  × 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、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  $H/L=0.01$  となるようにした。波浪条件を表-1 に示す。

表-1 波浪条件

| 周期<br>$T(\text{s})$ | 波長<br>$L(\text{m})$ | $h/L$ | $D/L$ | $H/L$ |
|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| 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  | 0.007 |
| 3.2                 | 9.36                | 0.11  | 0.21  |       |
| 2.8                 | 8.01                | 0.12  | 0.25  | 0.01  |
| 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  |       |

#### (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あるい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。水平およ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、開口率を変えて実験を行った。模型諸元を表-2 に示す。模型縮尺は、1/10～1/20 程度を想定している。

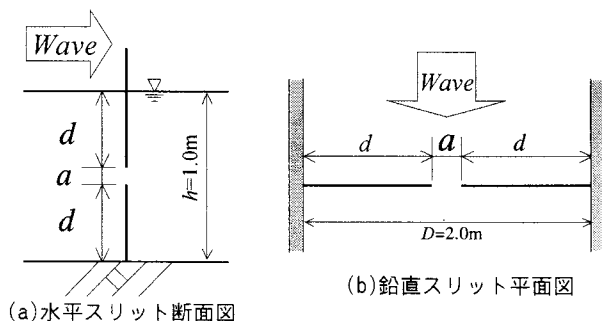


図-1 実験模型

表-2 模型諸元

| モデル名  | スリット方向 | a (m) | d (m) | 開口率<br>a/h or a/D |
|-------|--------|-------|-------|-------------------|
| HC-10 | 水平     | 0.1   | 0.45  | 10%               |
| HC-20 |        | 0.2   | 0.40  | 20%               |
| VC-05 | 鉛直     | 0.1   | 0.95  | 5%                |
| VC-10 |        | 0.2   | 0.90  | 10%               |
| VC-20 |        | 0.4   | 0.80  | 20%               |

### (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（㈱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0.1s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．

## 3. 数値計算

### (1) 計算手法

本研究では，2次元非圧縮性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<sup>2</sup>），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する．

### (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 $\Delta x=0.05\sim 0.10\text{m}$ 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 $\Delta z=0.025\text{m}$ 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．

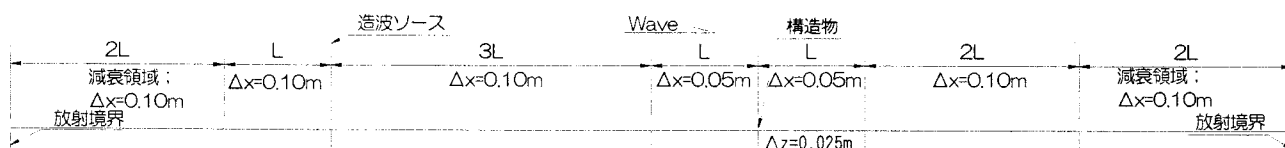


図-2 計算領域図

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で水面付近にスリットを配置したHU-10モデル，水底付近にスリットを配置したHL-10モデルの計算を行った．モデル図は次項に示す．

## 4. 結果および考察

### a) 平均定常流の発生とその流向特性

図-3に開口幅（a）を10cm（水平スリット：開口率10%，鉛直スリット：開口率5%）に統一した水平および鉛直スリットの平均定常流の発生および流向特性の実験値と計算値を示す．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．まず，水平スリットにおいては，実験およびVOFとも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． $h/L<0.2$  ( $T\approx 2.0\text{s}$ )で冲向きの平均定常流が発生していることがわかる．鉛直スリットでは， $D/L<0.5$  ( $T\approx 1.7\text{s}$ )で冲向きの平均定常流が発生している．また，鉛直スリットの方が水平スリット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入射側(冲向き)に平均定常流が発生することがわかる．平均定常流の発生条件は周期に依存し，水平スリットでは  $h/L<0.2$  ( $T\approx 2.0\text{s}$ )，鉛直スリットでは  $D/L<0.5$  ( $T\approx 1.7\text{s}$ )である．

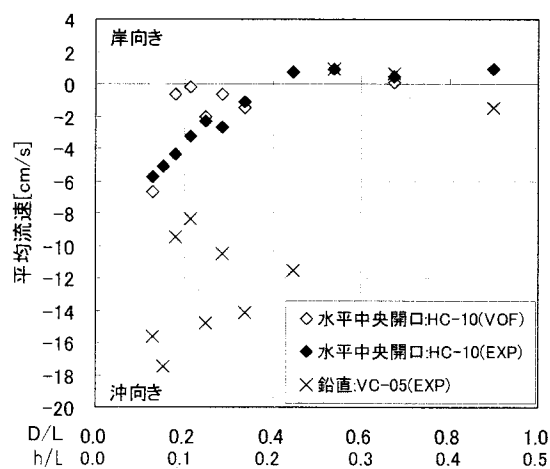


図-3 平均流速（水平方向）

## b) 平均定常流の発生機構

ここでは平均定常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-4,5に $h/L=0.06(T=5.1s)$ と $h/L=0.17(T=2.2s)$ 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。

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

ここで $\Gamma$ ：循環値、 $\vec{v}=(u,w)$ ：速度ベクトル、 $s$ ：積分経路である。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、 $\text{cm}^2/\text{sec}$ である。

図-4は、比較的大きな冲向きの平均定常流を示すケースで、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および循環が発生している。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。また、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 $\pi$ 位相では、スリット部の流速は小さくなり、冲向方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いる。(c)の $3/2\pi$ 位相では、スリット部で大きな冲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

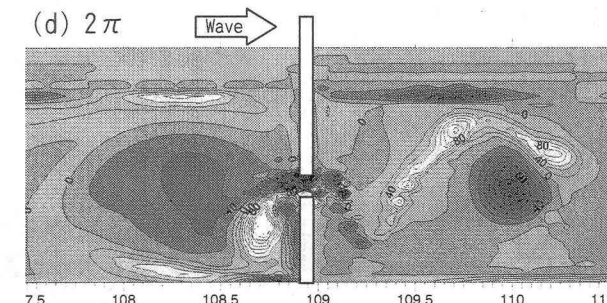
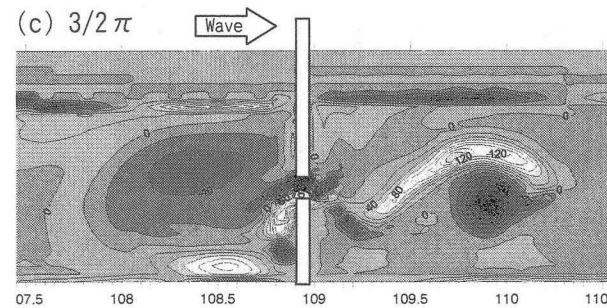
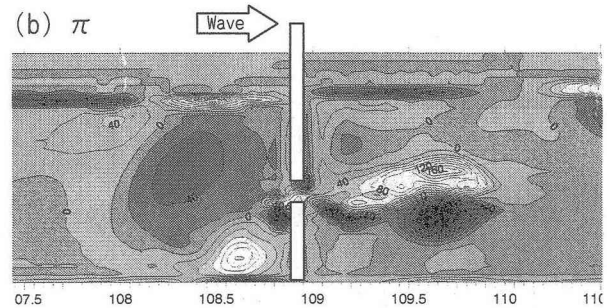
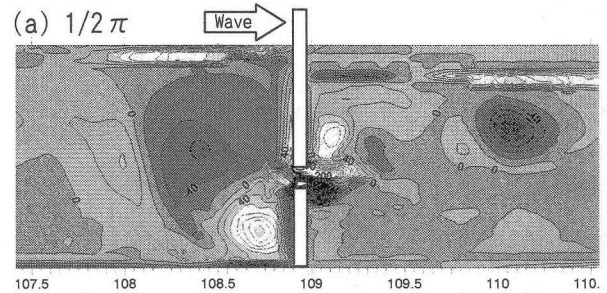
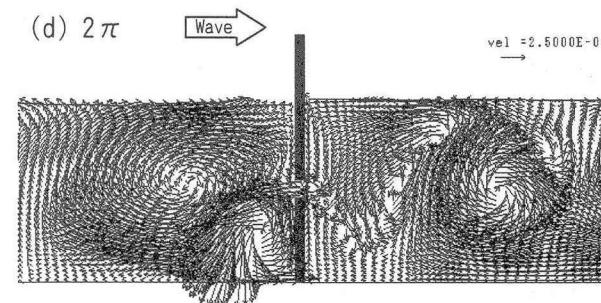
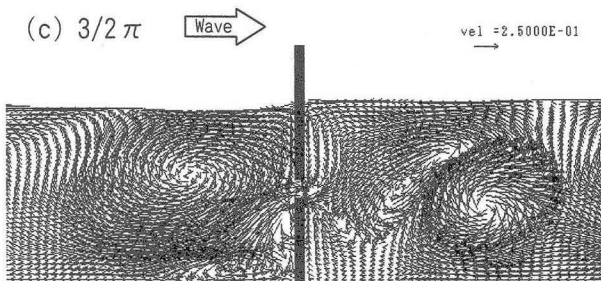
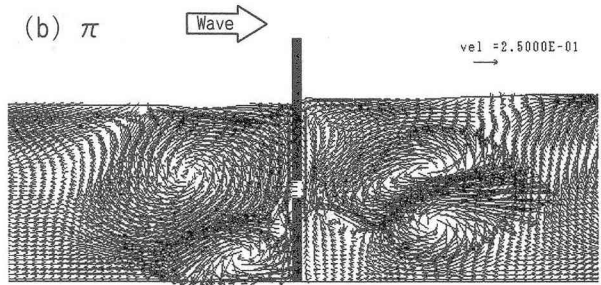
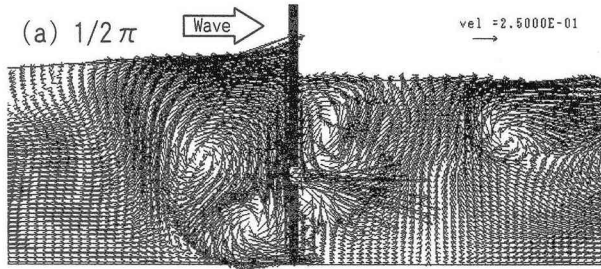


図-4 速度ベクトルと循環値 ( $h/L=0.06, T=5.1s$ )

に剥離し、平板から遠ざかっている。(d)の $2\pi$ 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 $h/L=0.17(T=2.2s)$ で平均定常流が小さいケースである。(a)~(d)の波の1周期を通じて水粒子の運動規模が小さく、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、図から判断できる。また、 $h/L=0.06(T=5.1s)$ のケースのように平板を境にして沖側と岸側で渦対の定在の様子が異ならず、ほぼ平板を境にして対称形状である。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定常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。

一般に渦対が存在する場合、その渦対によって図-6(a)に示すような誘起流が発生することが知られている。図-6(b)に $h/L=0.06(T=5.1s)$ のケースにおける平均定常流の発生を説明す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剥離し、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おり、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。

以上より、沖向き平均定常流の発生に平板沖側で波の1周期を通じて定在する渦対が関連しているものと考えられる。

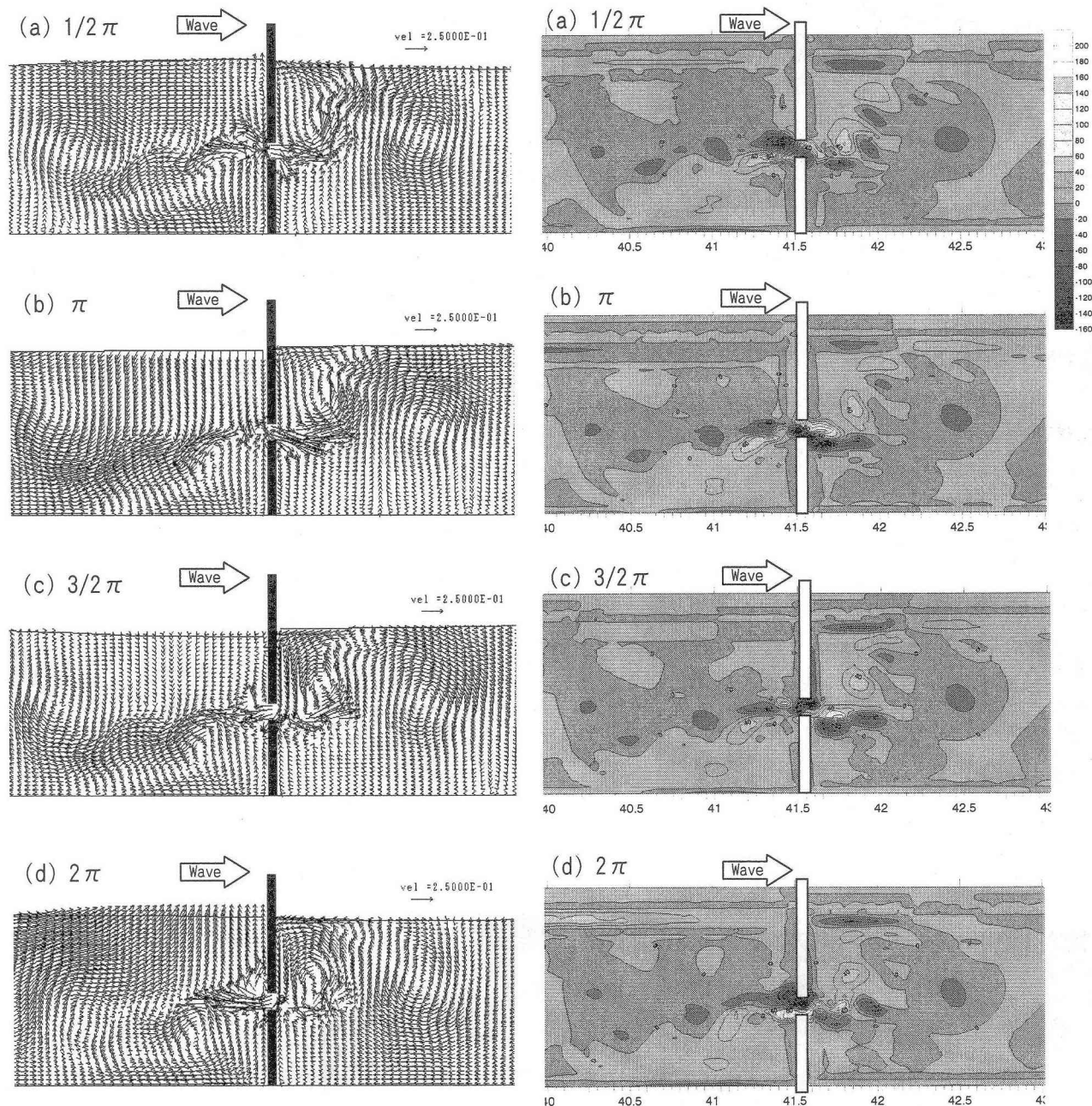


図-5 速度ベクトルと循環値 ( $h/L=0.17, T=2.2s$ )

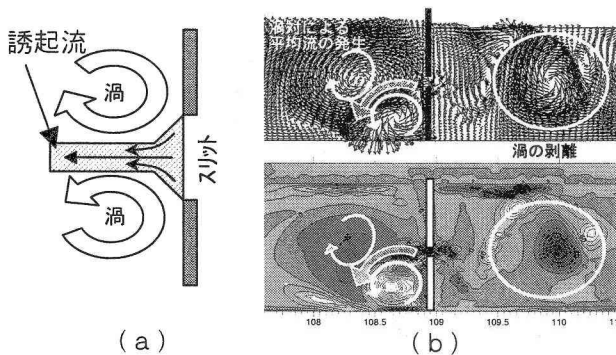


図-6 平均定常流発生機構概念図

c) 開口位置の影響（水平スリット）

水平スリットにおける開口位置の違いによる影響を見るために、図-7 に示す検討モデルと水深中央部にスリットを設けたモデル(HC-10)の比較を VOF にて行った。図-8 に結果を示す。縦軸は岸向きを正とした5波の平均流速、横軸は水深波長比( $h/L$ )とした。図より、水平スリットにおける開口位置の違いによる平均流速の発生に対する影響はほとんど見られないものと判断される。また、スリット位置が水深中央部の実験結果と比較してもほぼ同等の値を示しており、妥当な計算が行われていると判断できる。

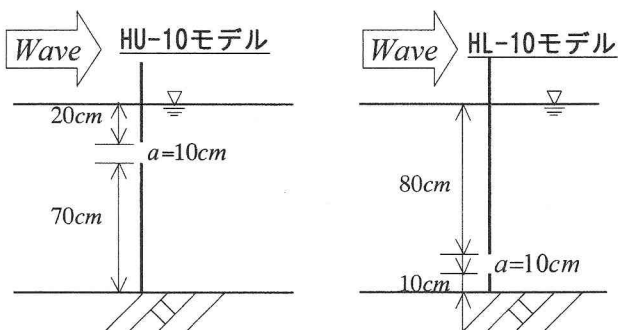


図-7 検討モデル

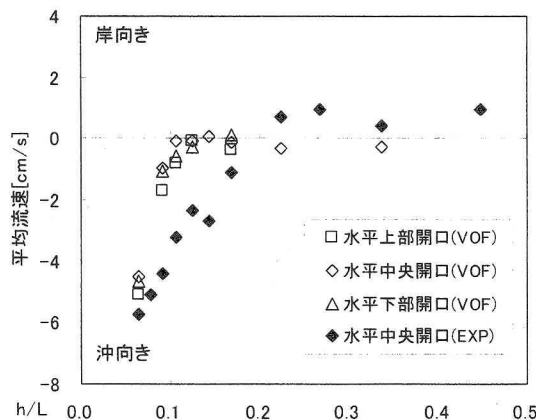


図-8 水深方向開口位置の違いによる平均流速比較

d) 開口率(幅)の影響

開口率の違いによる影響を実験にて確認した。水平スリットでは、スリット位置を水深中央として開

口率を10%( $a=10\text{cm}$ )と20%( $a=20\text{cm}$ )の2モデルを実施し、鉛直スリットでは、スリット位置を堤体中央として開口率を5%( $a=10\text{cm}$ )、10%( $a=20\text{cm}$ )および20%( $a=40\text{cm}$ )の3モデルを実施した。開口率がそれぞれ異なるため、比較は平均定常流量にて行った。

図-9に水平スリットの平均定常流量を示す。 $h/L=0.1$ 付近の長周期側では開口率による流量の差は、大きくはない。開口率が20%(HC-20)のモデルは $h/L=0.2$ 付近で岸向きの流速を示し、それ以降( $h/L>0.25$ )では、沖向きの流速を示す。開口率が10%(HC-10)のモデルは、 $h/L=0.2$ 以降はほとんど平均流速が発生しない。図-10にスリットを通過する水平方向の流速振幅を示す。開口率20%では、開口幅が広がった分、スリット部での断面縮小による縮流効果が小さいため、流速振幅も小さくなっている。その分、スリット開口面積が大きくなるため、流量としては大きな差が生じていないものと考えられる。

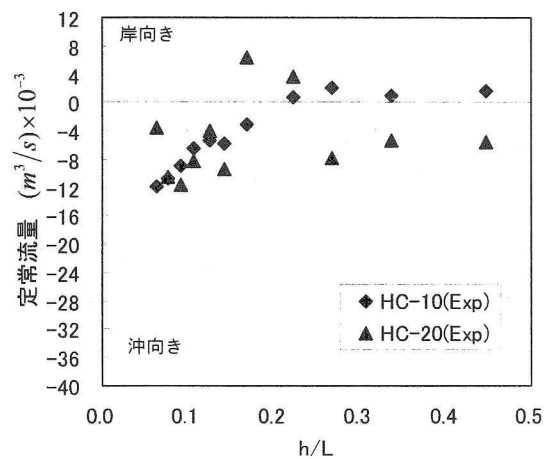


図-9 平均定常流量（水平スリット）

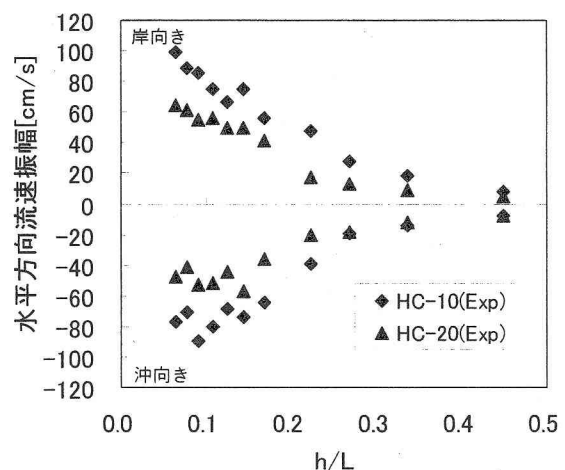


図-10 水平方向流速振幅（水平スリット）

図-11～13に鉛直スリットにおける実験結果を示す。鉛直スリットにおける流速は水深方向に上、中、下部の3点で計測し比較した結果、各水深での計測値に大きな違いが見られなかったため、水深中央部における計測値を代表値として採用した。

図-11に鉛直スリットの平均定常流量を示す。鉛

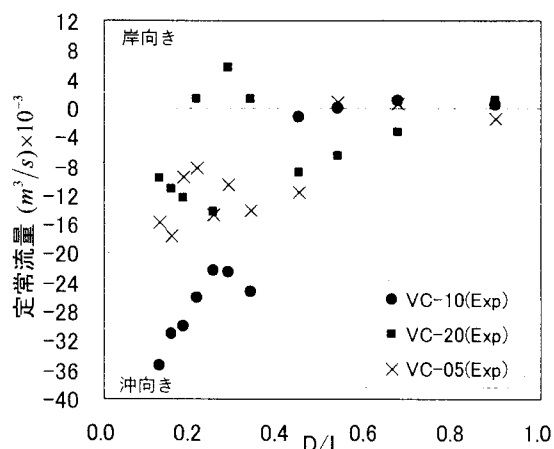


図-11 平均定常流量（鉛直スリット）

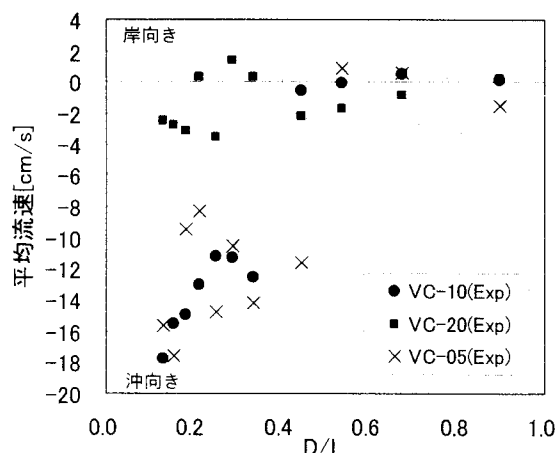


図-13 平均流速（鉛直スリット）

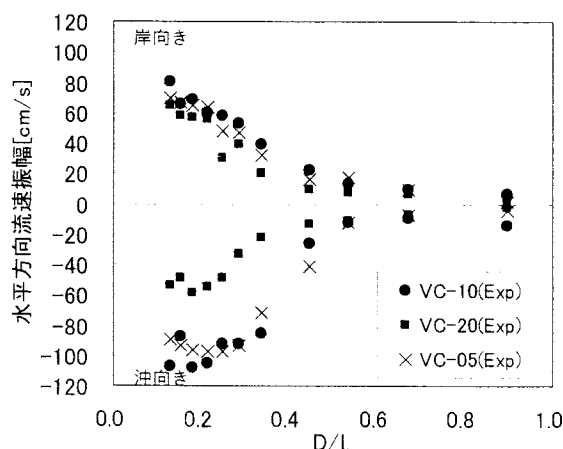


図-12 水平方向流速振幅（鉛直スリット）

直スリットでは、水平スリットと異なり3モデルで平均定常流量の差が生じた。開口率10%(VC-10)が最も多くの沖向き平均定常流量を発生させており、次いで5%(VC-05)、20%(VC-20)の順である。開口率20%では、水平スリットのHC-20モデルと同様の流向特性を示し、 $D/L=0.3$ 付近で流向が岸向きに転じ、 $D/L>0.4$ で再び沖向きに流向が変化する。

図-12に流速振幅、図-13に平均流速を示す。流速振幅および平均流速ともにVC-20が小さい値を示す。VC-05およびVC-10では、流速振幅の沖向きの値が卓越しており、VC-20および水平スリットと異なる傾向を示す。また、VC-05、VC-10は開口幅が異なるにも関わらず流速振幅および平均流速ともほぼ同程度の値を示しているため、定常流量ではVC-10が最も大きな値を示している。

鉛直スリットでは、水平スリットとは異なり、開口率によって平均定常流の発生度合いに差が生じた。この要因についての考察は、現状では明確に論じられないが、鉛直スリットでは水平スリットとは異なる

る機構が働いている可能性が考えられる。今後の研究課題とする。

## 5. 結 言

本研究において、確認された結果を以下に示す。

- ① 水平および鉛直スリット共に長周期側( $h/L<0.2$ ,  $D/L<0.5$ )で沖向きの平均定常流の発生を確認した。
- ② 沖向き平均定常流の発生に平板沖側に定在する渦対が関連していると考えられる。
- ③ 鉛直スリットの方が水平スリットよりも大きな平均定常流を発生させる。
- ④ 水平スリットにおける水深方向の開口位置の違いによる影響は少ない。
- ⑤ 定常流量の発生度合いにおける開口率(幅)の違いによる影響は、水平スリットでは少ないが鉛直スリットでは、開口率10%が最も大きな定常流量を発生させた。

今後、平均定常流の発生に対する渦対の効果を定量的に解析することと、鉛直スリットモデルと水平スリットモデルの渦発生機構の違いを確認することで海水交換型防波堤の流向および流量制御手法の確立に繋げていく。

## 参考文献

- 1) 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭：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.806-810，2003。
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：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.12，2001。