

波動場中の底設構造物まわりの流況特性

Flow pattern around bottom structure in waves

小野正順*・出口一郎*・久保田真一**

Masanobu Ono, Ichiro Deguchi, Shin-ichi Kubota

Recently, the shape of fish reef is constructed to create the favorite environment for the nekton. Fish reef has the large influence on the flow around it. In this study, we investigated the flow pattern around vertical walls which are usually used to construct fish reef.

Separated vortex is generated near the top of vertical wall under the condition where K.C. number is in the range of 0.68 to 2.01. In the case where the interval of vertical walls is narrower than the diameter of separated vortex and Strouhal number is less than 1.5, significant interaction of the flow between them took place.

Key word: fish reef, vertical wall, flow pattern, separated vortex

1. はじめに

近年、多くの場所で設置されている魚礁は、例えばヤリイカ礁やヒラメ礁のようにそれぞれ対象とする水産生物により、魚礁の形状が決められている。ヒラメ礁は魚礁を設置することで、ヒラメにとって好環境であるバー・トラフ地形を局所洗掘によって形成する。また、ヤリイカ礁は水平板を有し、それがヤリイカの産卵場所を提供することになっている。このように最近の魚礁は、水産生物に対する生活環境を改善する事を目的に設置されている。これらの魚礁のほとんどは流速を制御することで、生活空間を創造したり、生活環境改善の機能を果たす。従って、これから設置される魚礁は設置目的に合わせて、目的に応じた流況が実現するような形状として設計されることが望ましい。

本研究では、魚礁を設置した場合に水産生物が最も影響を受け、環境が変化する流況に着目し、魚礁の形状を変化させた場合の流況の変化について実験と数値計算により検討を行った。近年、設置される魚礁はかなり複雑な形状であるため、これを単純化して複数枚の板部材で構成されている着底構造物で仮定した。本研究では、1枚板から3枚板の底設構造物の流況特性について検討を行った。

2. 底設構造物まわりの流況実験

実験で用いた構造物は、図-1に示すような1枚板から3枚板の鉛直板で構成される底設構造物である。各鉛直板の高さは9.5cm、幅は20cm、厚さは5mmであり、水路幅70cmの2次元造波水槽の中央部分の固定床上に設置される。複数板の場合の板の設置間隔は、5, 10, 20cmの3種類に変化させた。作用させた波の周期は、0.7, 0.9, 1.2, 1.4, 1.6の5種類に変化させ、波高は5~7cmの非砕波の波を作用させた。水深は40cmと一定とした。流況の測定には、3次元超音波ドップラー流速計 (SonTek 社製) を用いた。鉛直方向に海底から4, 7, 10cm 上方の3地点、水平方向には構造物から5, 10, 15, 30, 45, 90cmの透過波側及び反射波側それぞれ6地点で行った。解析は、それぞれの地点での平均流速、波動成分流速振幅、乱れ強度を測定した。また、全体的な流況特性を見るため、水槽側方から流況をビデオ撮影した。トレーサーは直径1 μ mの白濁の浮遊粒子を用い、注射器により投入される。

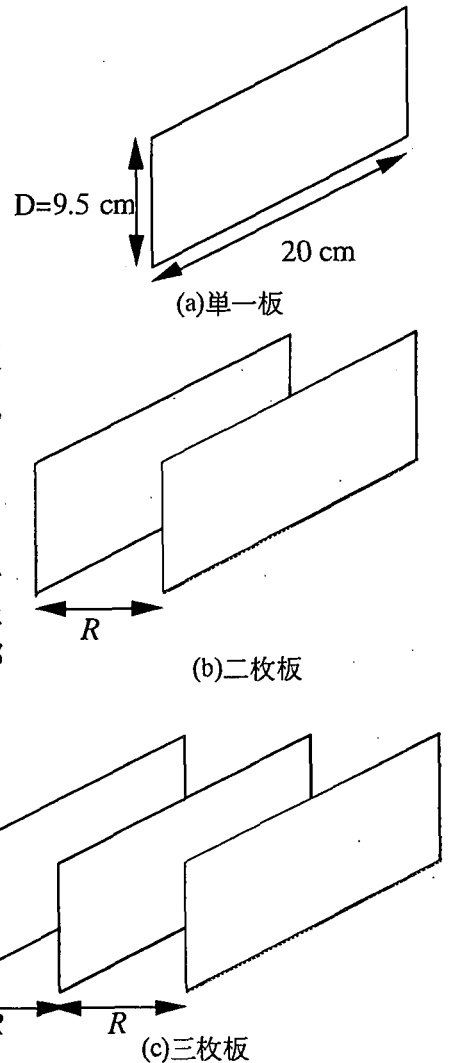


図-1各底設構造物の設置状況

* 正会員 大阪大学工学部土木工学科 (〒565 吹田市 山田丘 2-1)

** 正会員 (株) テトラ

3. 底設構造物まわりの流況の数値計算

流況の数値計算はさらに状況を簡単化し、図-2に示すように断面2次元で計算した。計算法は、Navier-Stokesの式を直接計算するSOLA法¹⁾を用いた。計算に用いた方程式は次に示す連続式とNavier-Stokesの運動方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = Di = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

ここに、 u, w はそれぞれ x, z 方向の流速、 ρ は水の密度、 g_x, g_z は x, z 方向の加速度、 ν は動粘性係数、 Di は発散を示し非圧縮性流体では0となる。数値計算は、差分法を用いた。運動方程式の移流項についてはdoner差分を用い、重み定数は0.5(0のとき2次の中央差分、1のとき1次の風上差分)に設定し、 z 粘性項については2次の中央差分を用いた。計算手順は、始めに(2)、(3)式を用いて流速 u, w を時間発展で求め、それぞれの時間で(1)式により発散 Di を計算し、発散 Di が0

に収束するように圧力 p と流速 u, w は補正される。境界条件は、水面(boundary A)と海底(boundary B)ではすべりの条件(u については計算領域の一つ内側の値と等しく、 $w=0$)とし、両側方(boundary D, C)の条件は、流入側(boundary D)で $u=U\sin(\omega t)$ 、 $w=0$ (U ：板頂部での流速振幅、 ω ：波の周波数)を与え、流出側(boundary C)では拘束のない条件(u, w ともに計算領域の一つ内側の流速に等しい)で与えた。構造物は物体表面の不透過条件より、物体表面の法線方向流速を0としている。計算領域は、水平床で左右の境界から同じ静水圧がかかるため、 g_x, g_z は0とした。

本研究で実験あるいは計算を行った条件を表-1に示す。表中の D は板の高さ、 U は板頂部での流速振幅である。

4. 単一板まわりの流況特性

単一板まわりの流況は比較的単純である。その特徴的な流況を図-3に示す²⁾。特徴的な板頂部での剥離渦の大きさは、板の高さ d を代表長さに、板頂部での流速振幅 U を代表流速にとった場合の $K.C.$ 数により規定される。表-1に示す波条件で $K.C.=0.16$ 以下の波条件では、板頂部での剥離渦の形成は認められない。 $K.C.$ 数が0.16以上の波条件では、板頂部での剥離渦の形成が見られ、その渦径は、 $K.C.=0.68$ では1~2cm、 $K.C.=1.23$ では3~4cm、 $K.C.=1.77$ では5~6cm、 $K.C.=2.01$ では6~7cmと $K.C.$ 数が大きくなるに伴っ

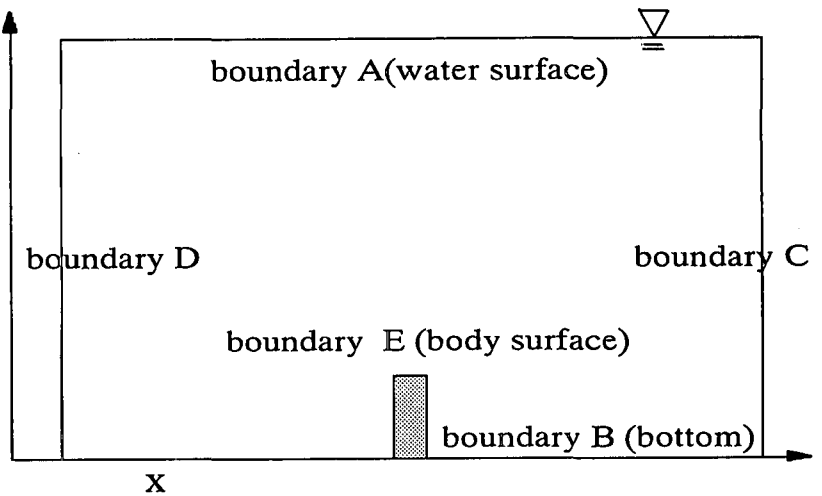


図-2 計算領域と座標系

表-1本研究での実験及び計算条件

周期：T(sec)	波高：H(cm)	K.C.=UT/D
0.7	5.0	0.16
0.9	7.0	0.68
1.2	6.0	1.23
1.4	6.5	1.77
1.6	6.0	2.01

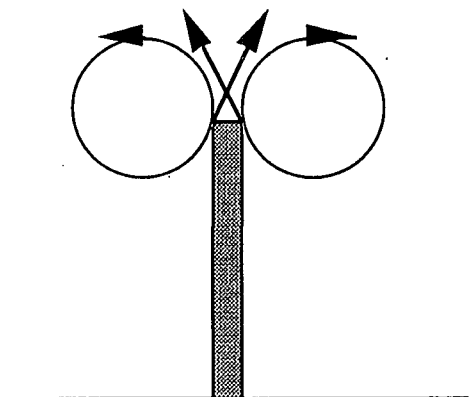


図-3 単一板まわりの流況

て大きくなる。図-4は、剥離渦が明確に認められる $K.C.=2.01$ の場合における板頂部での平均流速と平均水位変動の一周期間の変動を示す。平均流速は板頂部での流速振幅 U で無次元化されているが、 u, w ともかなり大きい流速が測定されている。そして特徴的なのは一周期の間で w が常に正となり、剥離渦が明確に形成される場合、板頂部では常に上方の流速が生じていることがわかる。

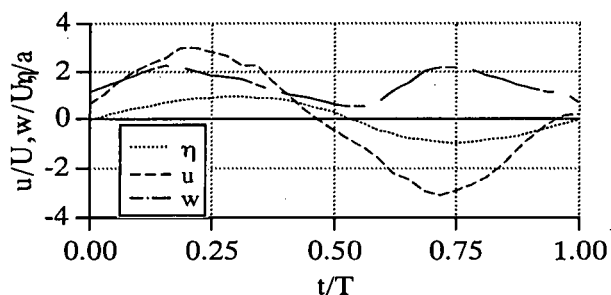


図-4 単一板の板頂上での平均流速の一周期変動

次に、数値計算結果を図-5,6に示す。図-5,6はそれぞれ板頂上で剥離渦が認められない $K.C.=0.16$ 、剥離渦が明確に認められる $K.C.=2.01$ の両ケースである。各図は位相 $\pi/2 \sim \pi$ まで $\pi/4$ 間隔で示している。板頂上で剥離渦が認められない $K.C.=0.16$ の条件である図-5の計算結果を見てみると、渦が形成される π の位相において計算結果では直径2cm程度の小さな渦が確認できる。また、剥離渦が観測された $K.C.=2.01$ の条件である図-6の計算結果を見ると、ほぼ実験結果(目視観測で6~7cm)と同程度の大きさの渦が形成されていることが確認できる。流体運動がほとんど認められない死水領域は、板頂部から三角形状に下方に広がっており、仮想質量が大きいことがわかる。

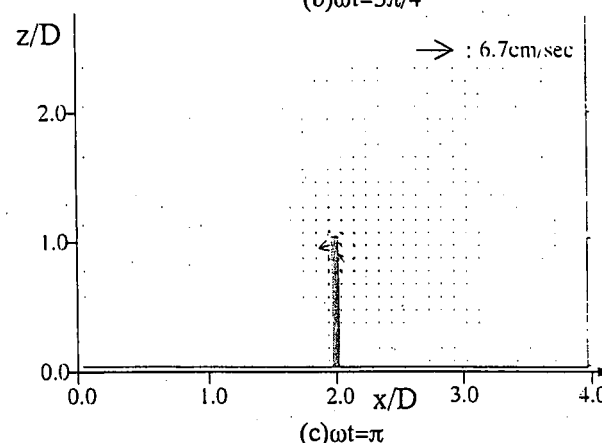
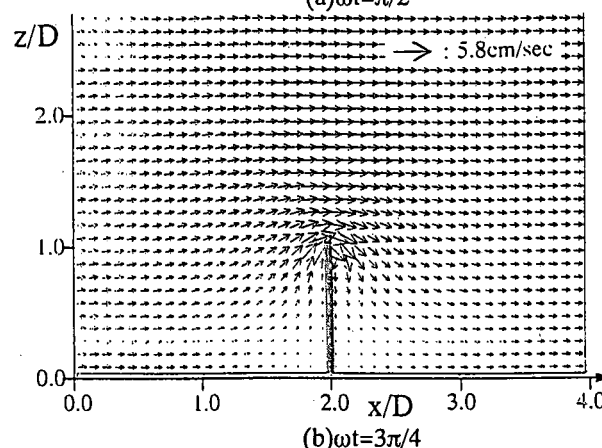
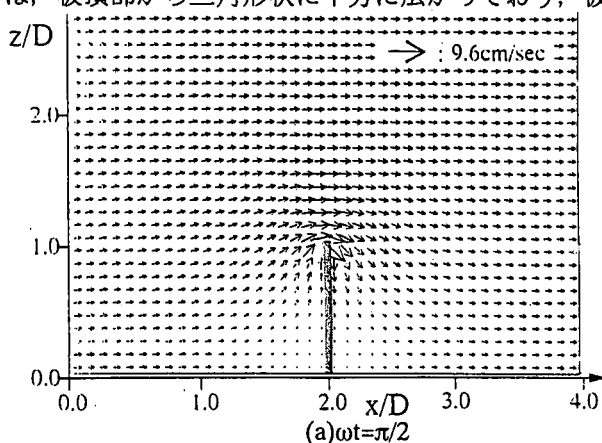


図-5 単一板まわりの流況($K.C.=0.16$)

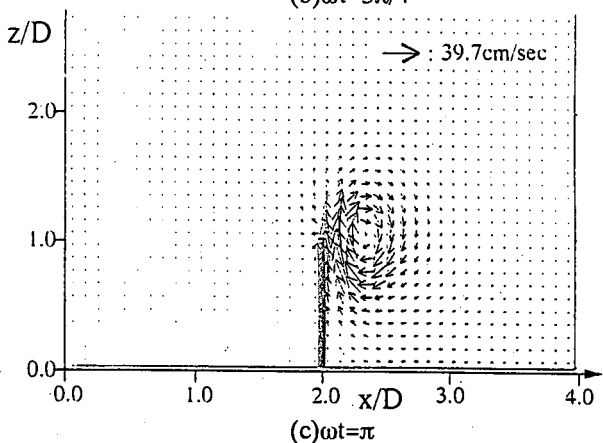
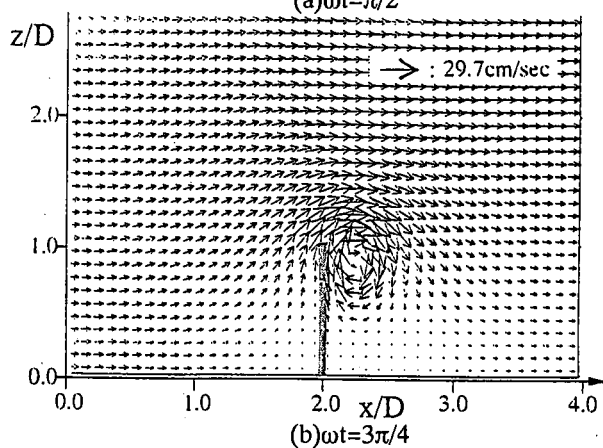
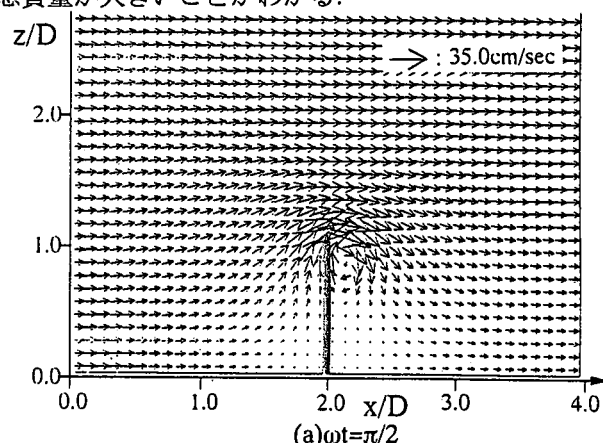


図-6 単一板まわりの流況($K.C.=2.01$)

4. 複列板まわりの流況特性

複列板まわりの流況は、各板が十分離れているとそれぞれの板のまわりの流況は単一板の場合と同じになる。従って複列板まわりの流況特性として各板同志の相互干渉の影響について検討する。表-2に単一板の場合の目視観測により板頂付近で形成された剥離渦の直径と、隣り合う板の間隔 R と板頂部の水粒子の軌道長 s との比、すなわち Strouhal 数に対応する無次元鉛直板間隔 St を示す。当然、目視観測では、隣り合う板の間隔 R が剥離渦の直径よりも大きくなる $R/s=1.35$ 以上の条件下では、図-7に示す様な流況となり板頂付近の渦流れは単一板の時とほぼ同様の流況が認められた。それに対して隣り合う板の間隔 R が剥離渦の直径よりも小さくなる $R/s=0.93$ 以下の条件下では、各板の間で形成される剥離渦は互いの板の影響を受け図-8に示すように、あたかも二枚板あるいは三枚板が一つの直方体の構造物であるかのような流況を示す。

さらに、図-9は二枚板で板間隔が小さい場合 ($R/s=0.82$) の各板頂部上の流速の一周期変動を示す。単一板の場合である前述した図-4と比較すると、対称な剥離渦の形成による鉛直流速 w の上方(正方向)への1周期間で2回のピークは、図-9の二枚板の場合には明確に現れず、1周期間に1回のピークあるいは2回のピークが生じても片方のピークは明確には現れてはいない。この実験結果はまさに、図-8に示すような流況が再現されていることが示されている。

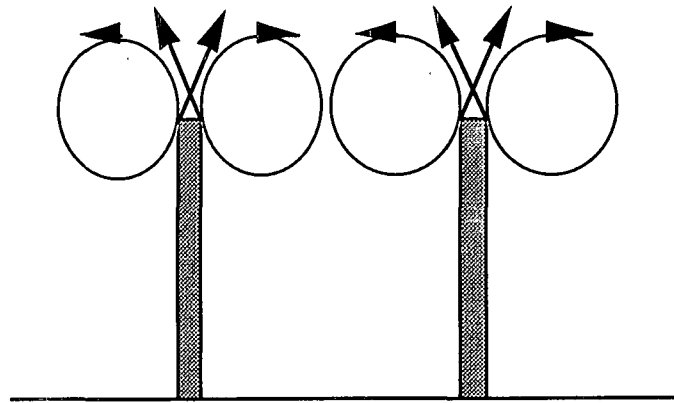


図-7 鉛直板間隔が十分大きい場合の流況

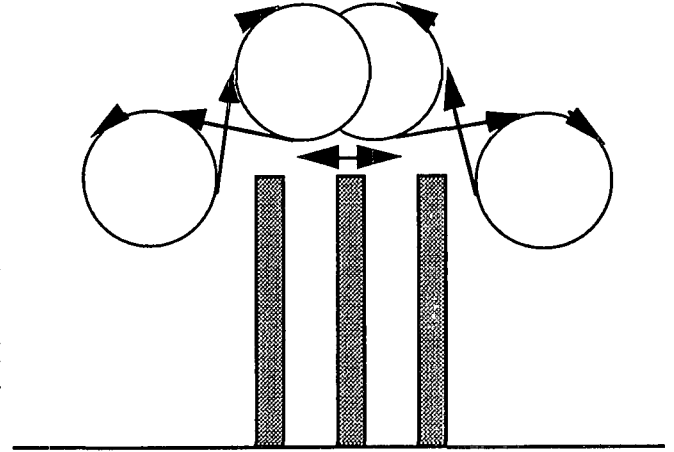
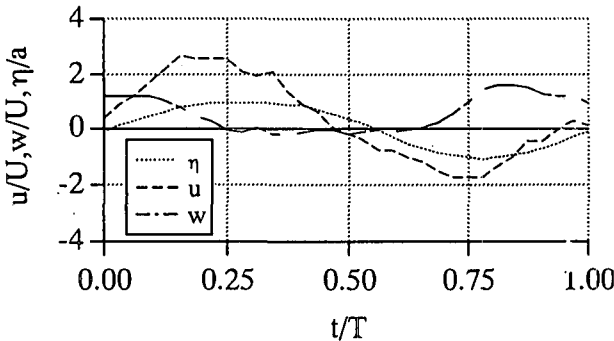


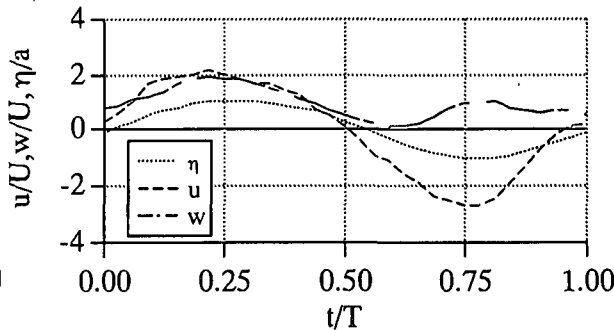
図-8 鉛直板間隔が小さい場合の流況

表-2 単一板の場合に観測された剥離渦の直径と複列板の場合のStrouhal数

周期: $T(\text{sec})$	波高: $H(\text{cm})$	剥離渦の直径	板の間隔: $R=5\text{cm}$	$R=10\text{cm}$	$R=20\text{cm}$
0.7	5.0	確認できない	$R/s=10.06$	$R/s=20.12$	$R/s=40.24$
0.9	7.0	1-2cm	$R/s=2.44$	$R/s=4.88$	$R/s=9.76$
1.2	6.0	3-4cm	$R/s=0.93$	$R/s=1.86$	$R/s=3.72$
1.4	6.5	5-6cm	$R/s=1.35$	$R/s=2.69$	$R/s=5.38$
1.6	6.0	6-7cm	$R/s=0.82$	$R/s=1.65$	$R/s=3.30$



透過波側の板上での平均流速



入射波側の板上での平均流速

図-9 二枚板で板間隔が小さい場合 ($R/s=0.82$) の各板頂上での平均流速の一周期変動

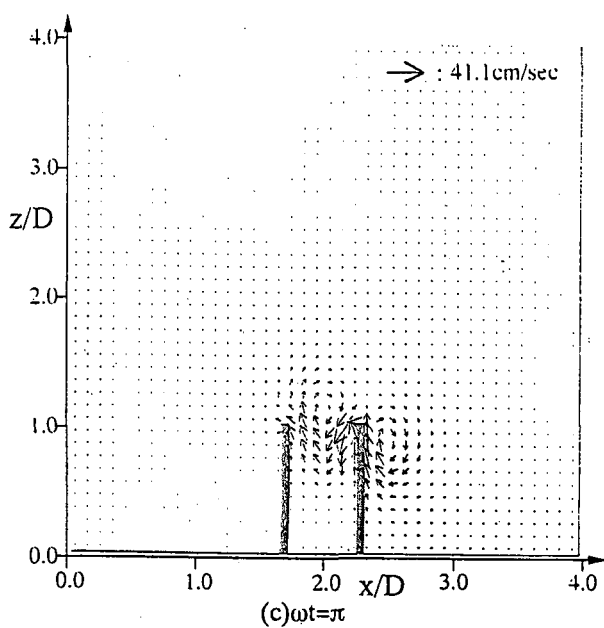
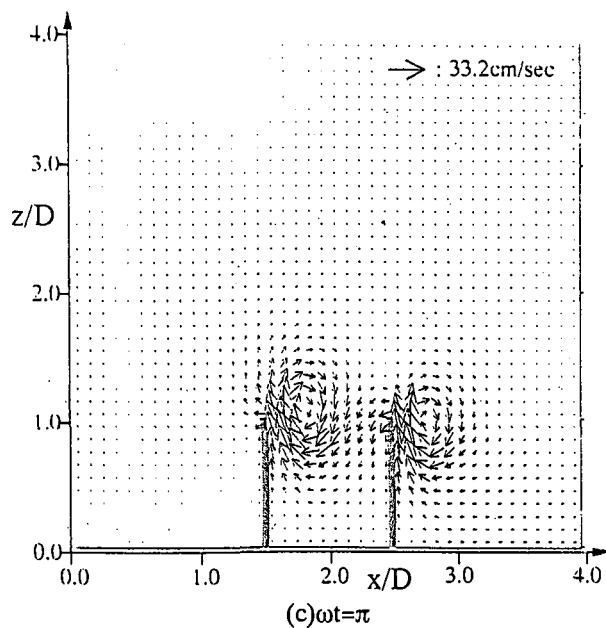
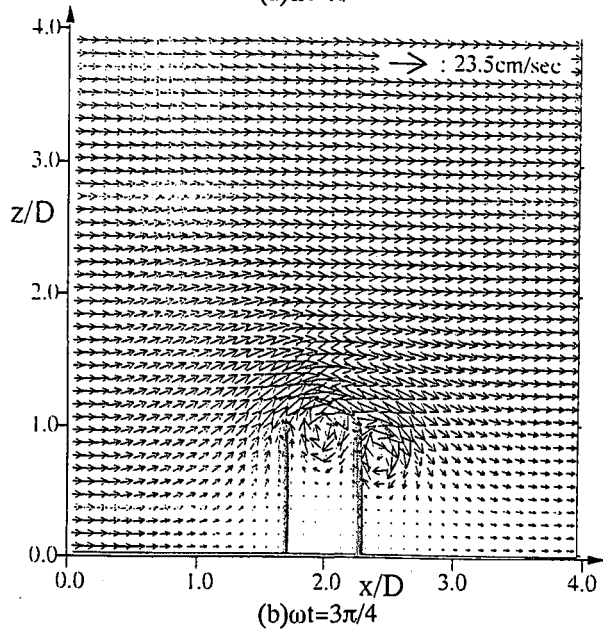
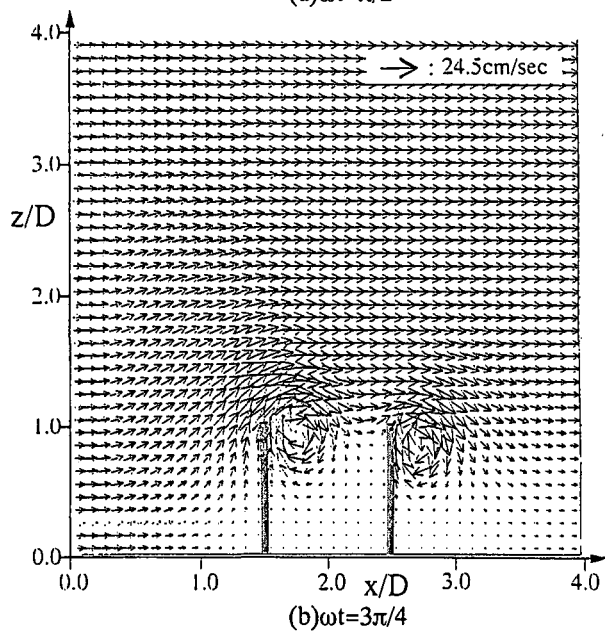
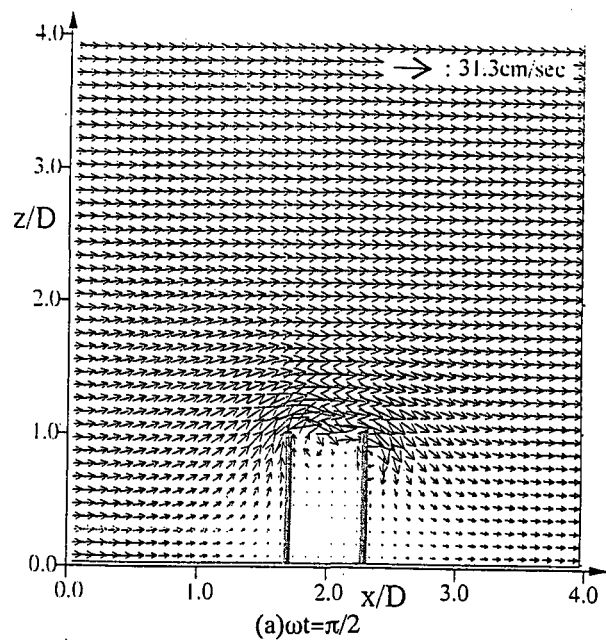
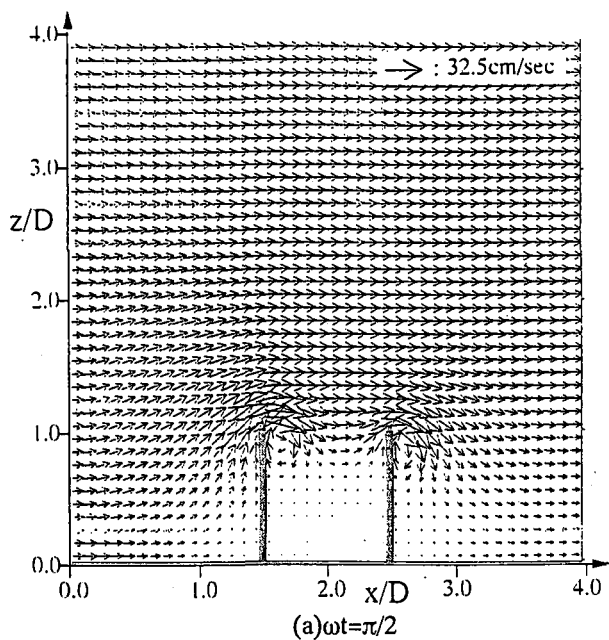


図-10 二枚板まわりの流況($R/s=0.82$)

図-11 二枚板まわりの流況($R/s=1.65$)

図-10と図-11は、鉛直板間隔が小さいときと大きいときの二枚板まわりの流況の計算結果を位相 $\pi/2 \sim \pi$ まで $\pi/4$ 間隔で示す。図-10は板間隔が小さい場合 ($R/s=0.82$) を示し、図-9の実験条件と同じ条件の計算結果である。図-10(c)に示されるように、それぞれの鉛直板の下流域で剥離渦が形成されるが、それぞれの板の影響を受け、図-6の単一板あるいは図-11の板間隔が離れている場合の剥離渦と比較すると渦の大きさは小さい。全体の流況は、実験で観測された図-8の流況と同じパターンを示している。図-11は $R/s=1.65$ の実験条件で、目視観測では図-7に示すように二枚板のそれぞれの流況はお互い干渉していない条件である。計算結果では(b),(c)図に見られるように、流れの下流側の板の剥離渦の方が多少小さく形成され、上流側の鉛直板の影響を受けているが、流況としては図-6の単一板の流況とそれぞれ同じような流況になっている。

複数板の場合の死水領域は、図-10,11の(a)図に示すように鉛直板に挟まれた領域で大きくなる。複数板の場合の板と板との中央点での流速の実験結果から、完全に板の影響がなくなる条件は $R/s=40.24$ の条件であった。従って、 $R/s=40$ 以上に鉛直板の間隔をとることで、それぞれの鉛直板周辺の流況が単一板周辺の流況と一致すると考えられる。

5. 結語

- 1) 単一鉛直板周辺の流況は、K.C.数 ($K.C.=UT/d$, U : 板頂部での水平流速振幅, T : 周期, d : 板の高さ) により規定され、K.C.数が0.2以下の条件では板頂部付近で剥離渦の形成は認められないが、K.C.数が0.7以上の条件では板頂部付近において明確な剥離渦が形成される流況となる。そして、K.C.数が2.0までの範囲においては、K.C.数が大きくなるに伴って剥離渦の径も大きくなる。
- 2) 複数板周辺の流況は、鉛直板の間隔 R と板頂部での水粒子の軌道長 s との比によって規定される。無次元鉛直板間隔 R/s が1.5以下の場合、上流側の鉛直板の影響により、下流側の鉛直板の流況に影響を与えるが、 R/s を1.5以上離すことにより、それぞれの鉛直板頂部の流況の干渉はほとんどなくなる。また、無次元鉛直板間隔 R/s を40程度はなす事で、それぞれの鉛直板周辺の流況は、ほぼ単一鉛直板周辺での流況に一致することがわかった。
- 3) 単一鉛直板及び複数板まわりの流況は、Navier-Stokesの式を直接差分化した数値計算法でほぼ予測できる。この計算法で、単一板の板頂部での渦流れや複数板まわりの流況特性がほぼ再現できた。

<参考文献>

- 1) 高橋亮一 編著：コンピューターによる流体力学<演習>，(株)構造計画研究所,1982,275p.
- 2) 池田駿介・浅枝隆・杉本光由・玉川雅文：波動場に置かれた鉛直板付近の流れと砂移動に関する研究，第30回海岸工学講演会論文集，pp.284-287，1983.