

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 33      NO. 3      Sept. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第33巻 第3号 (Vol.33, No.3), 1994年9月 (Sept.1994)

## 目次 (CONTENTS)

1. 港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流則分布に関する検討  
..... 古川恵太・室 善一郎・細川恭史 ..... 3  
(Velocity Distribution around Uneven Surface for Promotion of Larvae Settlement  
on Coastal Structures)
2. 浅場の窒素収支を考慮した3次元物質循環モデルの構築と計算事例  
..... 古川恵太・細川恭史 ..... 27  
(A Three Dimensional Physical-Biological Modeling and its  
Application to Evaluation of Nitrogen Uptake at Coast)

# 1. 港湾構造物への生物付着促進のための 凸部周辺の流速分布に関する検討

古川 恵 太\*

室 善一朗\*\*

細川 恭 史\*\*\*

## 要 旨

自然と共存していく港湾の開発が求められている。その方策の一つとして、港湾構造物に生物を付着させる技術が検討され始めている。港湾構造物表面に凸凹を付けることによって、付着性生物の定着を促進させようとする試みである。これは、生物の遊走子や幼生が付着する瞬間に支配的となるであろう水理学的な条件に着目した試みである。

構造物に付けられた凸凹は、流れの滞留域を形成し、幼生の着底を促進するものと予測されている。そこで、滞留域の大きさ・形成の様子に対する基礎的な検討のため、水理模型実験と数値計算を行った。

水理模型実験より、単一角柱の滞留域の大きさは、角柱の大きさに強く支配されていることがわかった。角柱列の実験では、角柱の間隔と流速値により、滞留域の形が変化することがわかった。角柱列が密に配置されているときは、単一の角柱に近い流れとなり減速領域が上方へおよび、粗に配置されているときは、角柱間で干渉が起り、減速領域は流れ方向に引き伸ばされた形となった。

数値計算には、渦の干渉を良好にシミュレートできる離散渦法を用いた。角柱群に対する計算結果より、滞留域の形の変化は、渦の干渉による違いであることが明らかになった。前列から放出される渦の再付着位置と角柱のピッチとの関係で、滞留域の形成が支配されていることが示された。

キーワード：環境創造，生物幼生，局所流，滞留域，数値計算，水理模型実験

---

\* 海洋水理部主任研究官  
\*\* 海洋水理部海水浄化研究室  
\*\*\* 海洋水理部海水浄化研究室長

# 1. Velocity Distribution around Uneven Surface for Promotion of Larvae Settlement on Coastal Structure

K. Furukawa\*, Z. Muro\*\* and Y. Hosokawa\*\*\*

## Synopsis

Maritime or coastal structures can be easily utilized as basement of larvae settlement when they have uneven surface. Settlement ratio may be governed mainly by velocity field near the surface under the same environmental conditions. Appropriate uneven configuration reduces the intensity of surface velocity and makes stagnated area for trapping larvae.

Hydraulic experiments and numerical simulations were conducted to obtain the basic idea of the relationship between the bed configuration and the local flow.

Uneven beds for experiments were constructed by rectangle pipes on a flat plate. The flow structure behind the pipes was found to be governed by Reynolds' Number and pitch between pipes.

After the numerical simulations, difference of the flow structures was explained by the interaction among released vortices from pipes. The relative location between reattachment point of the released vortices and pitch of the following pipes took an important role for this interaction.

**Key Words** : Improvement of Environment, Larvae, Local Flow, Stagnated Area, Numerical Simulation, Hydraulic Experiment

---

\* Senior Researcher, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member, the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\*\* Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	7
2. 水理模型実験による流れの計測 .....	8
2.1 実験水路と計測機器 .....	8
2.2 予備計測 .....	8
2.3 実験ケースと実験結果 .....	9
2.4 単一角柱の実験結果の整理 .....	12
2.5 角柱列の実験結果の整理 .....	13
3. 数値計算による流れの可視化 .....	14
3.1 離散渦法による数値計算 .....	14
3.2 計算結果および考察 .....	15
4. おわりに .....	18
参 考 文 献 .....	18
記 号 表 .....	19
付 録 A .....	19
付 録 B .....	19

## 1. はじめに

“持続可能な開発”が開発の基本理念として広く受け入れられ始めている。港湾の開発においても周辺の生態系との調和と共存とを考慮することが求められている。そのひとつの方策として、港湾構造物への生物付着の促進が検討され始めている。

港湾構造物表面に凸凹を人為的に取り付け、付着藻や固着性の動物を定着させようとする試みも、その一つとして位置づけられる。生物が付着・繁殖するためには、周りの環境条件（水温、日照、濁り、栄養塩濃度……）が重要な制限因子として働くことが予測できる。ただし、付着する瞬間に着目するならば、浮遊幼生が構造物に付くかどうかは、幼生が構造物表面に滞留するかどうかの水理学的な条件により強く支配されていると考えられる。そこで、構造物に付けた凸凹がどのような流れの変化を起こしているかに関する水理模型実験と数値計算による検討を行った。

流れと生物付着との関係に関する研究は海洋生物学の分野でも注目されている。例えば、プランクトン類が様々な地形条件が造る滞留域に集まっているとの報告<sup>1)</sup>や、底面せん断力と付着藻類の関係の検討<sup>2)</sup>、底面流れによる貝類の集積機構の推定<sup>3)</sup>等がある。各種の知見をとりまとめた成書として、川合<sup>4)</sup>等がある。それによれば、アワビの幼生に関しては杜多<sup>5)</sup>の回転水槽を用いた実験により、流速10cm/s以上ではほとんど着生できないこと、それより流速の小さい領域では、ほぼ流速が減少するにしたがって着底率が增大すること等が解ってきている。構造物に凸凹を付けるということは、流れを阻害する粗度効果等による滞留域の創造に他ならない。もし、効率的に滞留域を創造することができれば、ある種の生物幼生の着底率を増加させる技術として使える可能性がある。

しかし、滞留域が生成されても、浮遊幼生がその領域にトラップされなければ着底はできない。トラップされる割合と関連の強い水理指標としては、滞留域内外間の海水交換率や滞留域内滞留時間（滞留域内の流速の小ささ）等が考えられる。

杜多<sup>6)</sup>は直立平板背後の後流中と主流域との海水交換率 $\alpha$ を流速の条件から定式化し、

$$\alpha = 0.027 \left( \frac{2k^2}{1+k} \right) \left( \frac{U}{H} \right) \quad (1)$$

の関係を得た。ここに、 $U$ は主流速の大きさ、 $D$ は水深、 $H$ は平板の高さ、 $k$ は、 $k = D/(D-H)$ で定

義される遮蔽率の逆数である。式(1)から、主流速が大きいほど海水交換率が高くなることがわかる。

つまり、主流速が小さければ滞留域での流速が小さくなるが、トラップ海水交換率が低くなる。一方、主流速が大きくなると海水交換率が大きくなるが、滞留域での流速も大きくなる。上記のように主流速をパラメータとして考えた場合には、滞留域内の流速と海水交換率とは生物付着に対し互いに逆の影響を与えることが推定できる。また、滞留域の大きさや、流れのパターン等も着底の効率に影響を及ぼすはずである。

凸凹周りの流れについて、粗度群としての分類を検討した例としてMorris<sup>7)</sup>による検討例がある。Morrisは底面でのエネルギー損失が粗度の凸凹で形成される後流に起因していると考え、後流のパターンで粗面を3通りに分類した。

- 孤立粗度 においては、粗度前方から放出される渦が次の粗度との間に再付着する。これは、次の粗度に影響を及ぼしていないと考えられ、単独の粗度として扱える状態である。
- 後流干渉粗度 においては、粗度前方から放出される渦が、次の粗度を越えて再付着する。これは、粗度同士が互いに影響を及ぼしている状態であり、粗度群の取扱いを必要とする。
- 疑似滑面粗度 においては、粗度前方から放出される渦が、自分の粗度上で再付着する場合である。このときは、粗度のあいだには後流が入り込まず、あたかも底面が仮想的に上方に移動したかのような状態となる。

これらは、流速や粗度群の分布により変化すると考えられるが定量的には判断基準が示されていない。

さらに粗度群上部の流速分布についての詳細な計測例として、五十嵐<sup>8)</sup>による長方形柱列に関する研究がある。五十嵐らは、平板境界層内に3列の長方形柱を並べ、流れの可視化および乱流計測を行い、第2列柱上部の流れを図-1のように層流・遷移流・乱流の3パターンに分類する指標を式(2)~(4)のように示している。

$$\text{層流} : H/\delta_1 < 1050 [Re_H \cdot (p/c)]^{-1.0} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{遷移流} : 1050 [Re_H \cdot (p/c)]^{-1.0} &\leq H/\delta_1 \\ &\leq 100 [Re_H \cdot (p/c)]^{-0.6} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{乱流} : H/\delta_1 > 100 [Re_H \cdot (p/c)]^{-0.6} \quad (4)$$

ここに、 $H$ は長方形柱の高さ、 $\delta_1$ は境界層高さ、 $Re_H$ は接近流速と長方形柱高さを代表長さとしたレイノルズ数、 $p$ は柱列ピッチ、 $c$ は長方形柱の辺長である。また、

港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流速分布に関する検討

長方形柱のピッチが大きくなると、凹部下方隅において反時計まわりの付着渦が発生することも観測している。

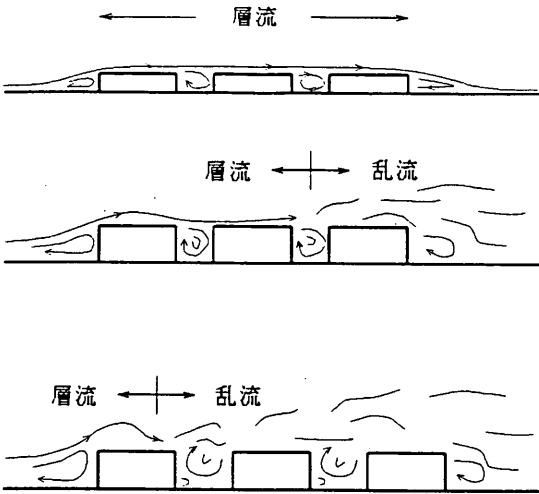


図-1 長方形柱列に形成される流れのパターン  
(上：層流，中央：遷移流，下：乱流)  
(五十嵐<sup>8)</sup>を修正引用)

2. 水理模型実験による流れの計測

2.1 実験水路と計測機器

実験水路は、長さ35m、幅1m、水深最大1mの鋼製一部ガラス壁の長水路である。ポンプ駆動式の回流装置が付属している。水路上流端から20mの位置に壁面に沿って、長さ2m、幅30cm、水深約35cmの計測部を図-2のように設けた。壁面はガラス板で、計測部はアクリル板で作成した。

流速は、He-Ne 15mW 後方散乱方式の1次元のレーザー流速計を使用して測定した。壁面からのレーザー照

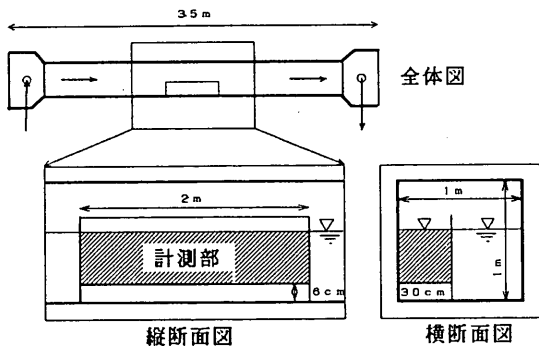


図-2 実験水路の計測部

射で、計測部の中央(壁面から15cm)の位置の長手方向主流速を測定できるようにプローブをセットした。

2.2 予備計測

水路特性を把握するために供試体を入れない状態での流速計測を行い、底面摩擦係数の測定や、境界層厚さの測定を行った。計測ケースは、表-1の通りである。

表-1 予備計測のケース一覧

ケース名	主流速 cm/s	境界層高さ cm	排除高さ cm	摩擦速度 cm/s
NULL1	11.7	27	2.9	0.5
NULL2	20.0	16	1.7	0.9
NULL3	29.1	14	1.5	1.2
NULL4	38.7	13	1.4	1.6
NULL5	47.0	11	1.1	1.9

表には、データ処理後の流れの代表値として、主流速  $U$ 、境界層高さ  $\delta_1$ 、排除高さ  $\delta_0$ 、摩擦速度  $u^*$  が示してある。縦断方向、横断方向に対する比較計測を行った結果、境界層は十分に発達しており、横断方向への片寄りもみられなかった。

摩擦速度は、流速の分布を滑面の対数分布則式(5)に当てはめて求めた。式中の  $z$  は底面からの高さ、 $\nu$  は動粘性係数。図-3には、計測された流速分布と当てはめた対数分布則を示す。

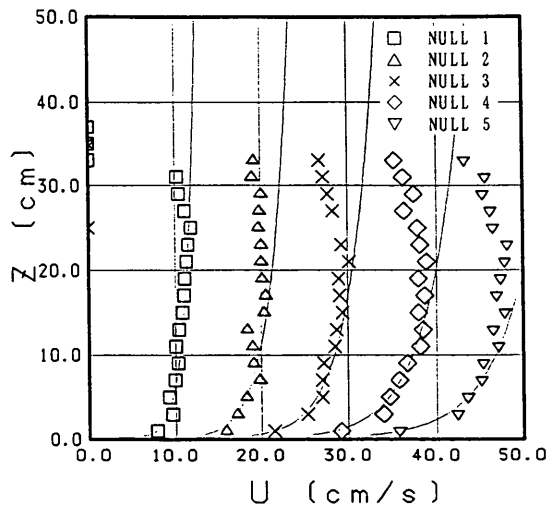


図-3 水路特性

$$\frac{u}{u^*} = 5.5 + 5.75 \log \frac{u^* \cdot z}{\nu} \quad (5)$$

2.3 実験ケースと実験結果

対象とする凸凹は、正方角柱を水路横断方向に設置して作成した。主流速および角柱の本数、ピッチを変化させ、表-2に示す実験ケースに対して計測を行った。

表-2 実験ケース一覧

ケース名	主流速 cm/s	角柱高さ cm	角柱本数	角柱ピッチ cm
B11	20	6	1	—
B12	30	6	1	—
B13	40	6	1	—
B21	20	1.5	1	—
B22	30	1.5	1	—
B23	40	1.5	1	—
B31	20	6	3	9
B32	30	6	3	9
B33	40	6	3	9
B41	20	6	3	12
B42	30	6	3	12
B43	40	6	3	12
B51	20	6	3	24
B52	30	6	3	24
B53	40	6	3	24

各計測ケースに対する流速分布を示す。ただし、流速は流れ方向成分  $u$  のみの計測であったので、以下に示す方法で鉛直流速  $w$  を求めている。

完全に2次元的な流れになっていると仮定して、2次元の流量保存則を適用する。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

この式を鉛直方向  $z$  に積分して整理すると、

$$w(x, z) = - \int_0^z \frac{\partial u}{\partial x} dz \quad (7)$$

となる。さらに、これを計測点で図-4のように離散化し、上流端から  $i$  番目底面から  $j$  番目の測点に関する鉛直流速  $w(i, j)$  は、

$$w(i, j) = \sum_{m=1}^j (u(i, m) - u(i+1, m)) \cdot \frac{dj}{di} \quad (8)$$

で計算される。 $dj, di$  は格子幅。ここに境界条件として、

$$\begin{cases} u(0, j) = u(1, j) \\ w(i, 0) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

とすると、 $i, j$  の増加する方向に式(8)を解くことができる。

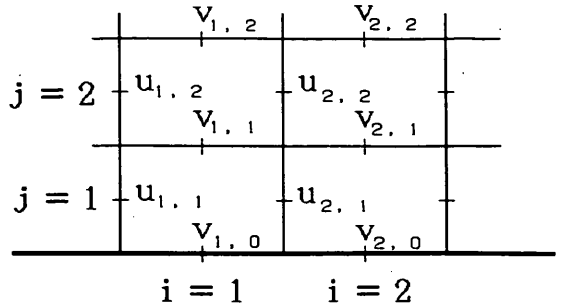


図-4 鉛直流速を求めるための離散化格子

こうして求められた流速ベクトルを図-5~6に示す。ただし、流速を主流速で、空間距離を正方形柱高さでそれぞれ無次元化して表示している。

単一の角柱の流速ベクトルを比較すると、6 cm の角柱を用いたケース B11~B13では、凸部背後に時計回りの循環流が明確に形成されているのに対し、1.5cm の角柱を用いたケース B21~B23では、同じく時計回りの循環流が存在するもののその強さは弱い。流速別に比較すると、流速が小さいほど循環流の高さは高く、流速が大きいほど循環流の長さが長くなっているようである。

角柱列に対する結果を比較すると、各角柱上での流速分布にその違いが現れている。一つは循環流の形成による逆流域の存在であり、もう一つは乱流への遷移である。

逆流域は上流端の角柱上に現れ、流速の遅いほど、ピッチの短いほど顕著である。また、乱流への遷移は流速分布形状が境界から急峻に立ち上がることにより推定できる。ここでは、計測点あまり密でないので、図の中ではあたかも流速分布が境界近傍で一様化したかのように見える。流速の鉛直分布が、接近時の対数分布から急激に一様化した位置を乱流への遷移点とする。乱流への遷移点は、ピッチが長く、流速が大きいケース程、下流端から上流側に移動してくるようである。

逆流域の形成規模は滞留域の規模を表し、乱流への遷移は海水交換率の向上を意味するとするならば、ある凸部の大きさに対し、最適な流速値や配置間隔が存在しそうである。言い換えれば、ある流速に対して最適な凸部の大きさと配置間隔が求められる可能性がありそうである。



港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流速分布に関する検討

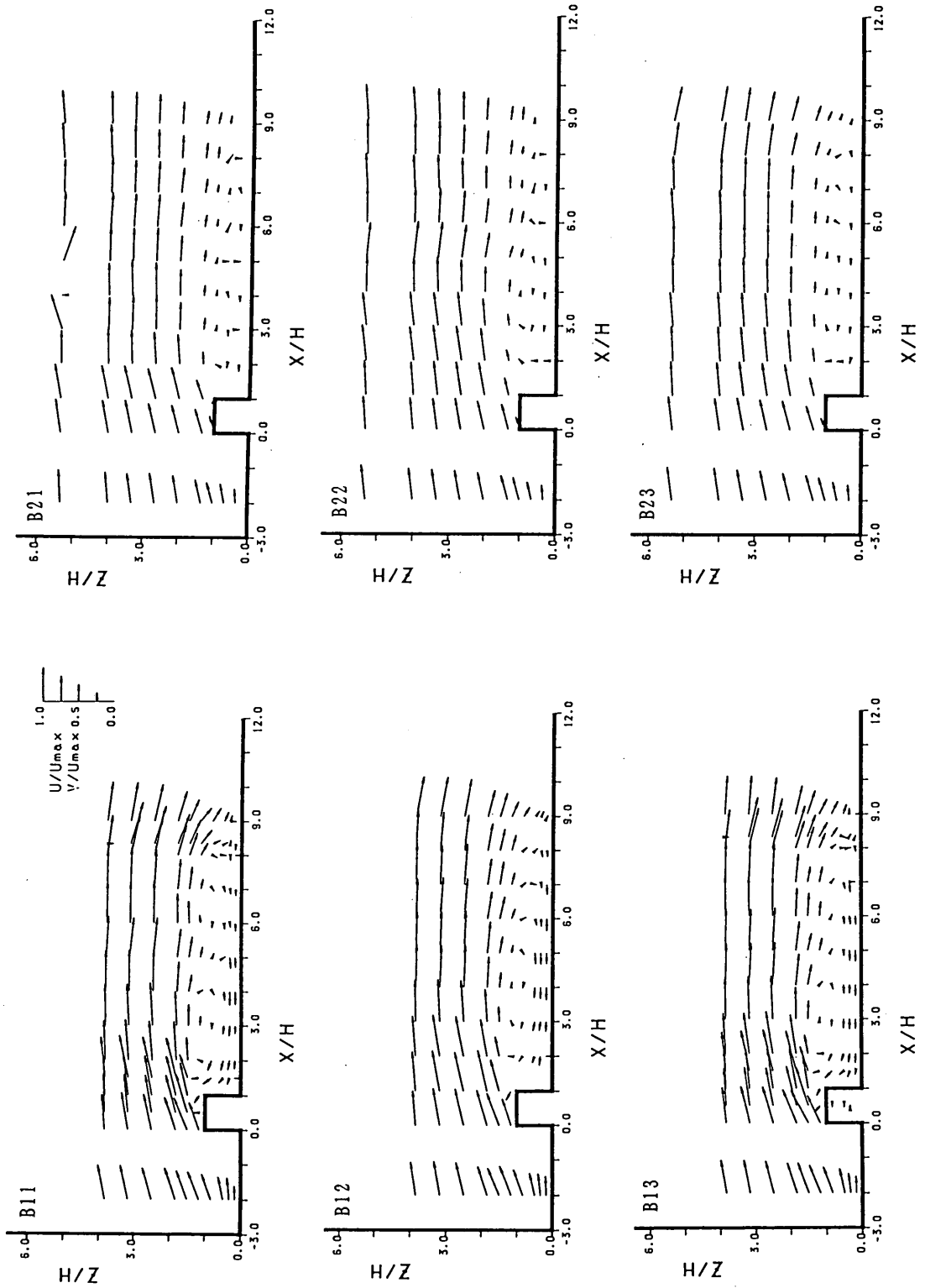


図-5 単一角柱の流速分布ベクトル

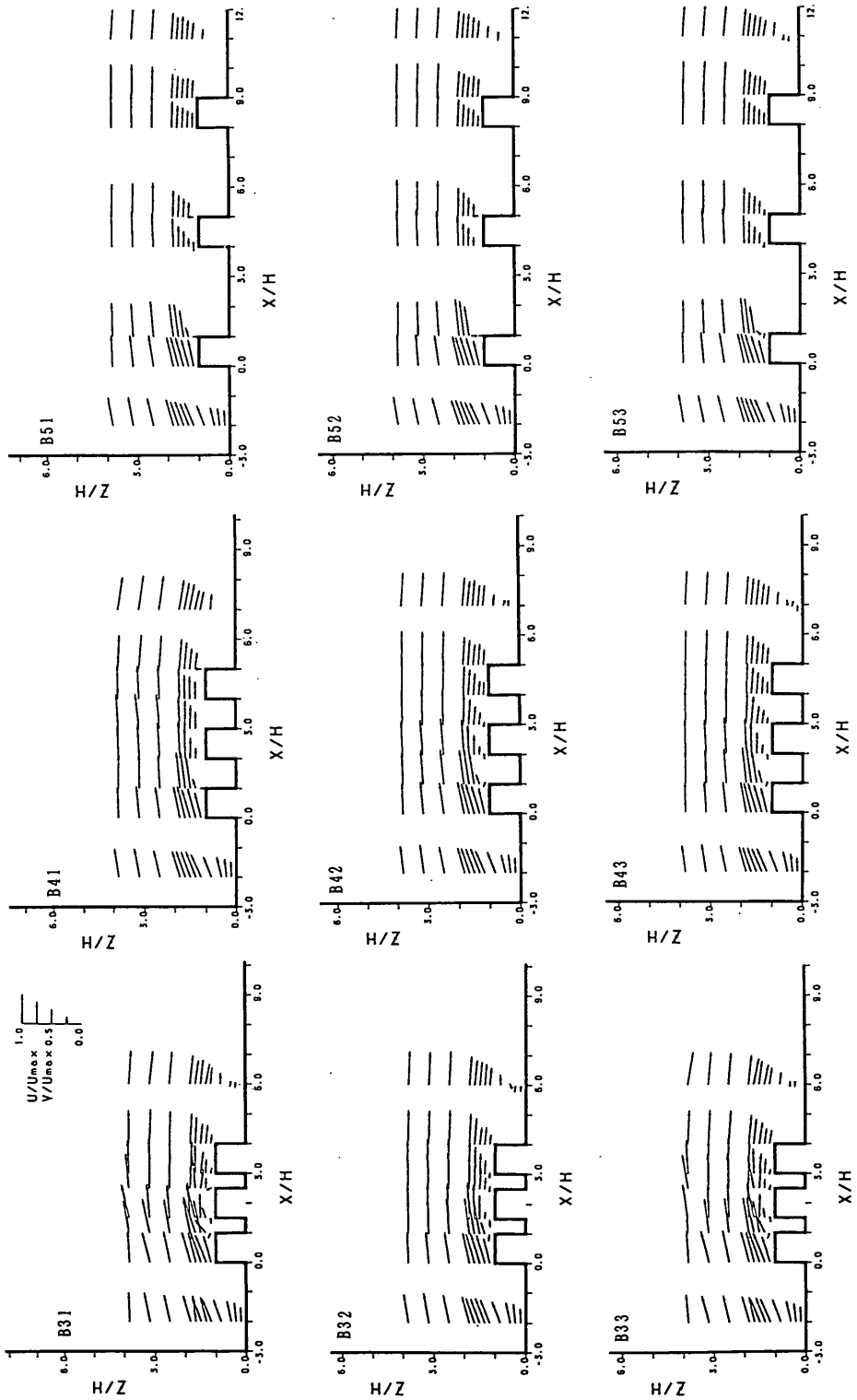


図-6 角柱列の流速ベクトル

2.4 単一角柱の実験結果の整理

単一の角柱の実験結果に対して、滞留域の大きさを同定した。

滞留域は、杜多<sup>6)</sup>の用いた判定基準  $u = 0$ 、や  $u_{rms}/u = 1$  等に準ずる形で判定した。ここに、 $u_{rms}$  は  $u$  の乱れ強度である。

図-7~9にはケース B11における  $u/U$ 、 $u_{rms}/u$ 、 $u_{rms}/U$  の分布を示している。

それぞれの意味は、主流速に対する流速の比、局所的な流速に対する乱れ強度の比、主流速に対する乱れ強度の比である。単一角柱の実験ケース B11~B23については付録 A にとりまとめて示す。

以下の説明では、局所的な流速に対する乱れ強度の比を相対乱れ強度、主流速に対する乱れ強度の比を乱れ強度と称する。

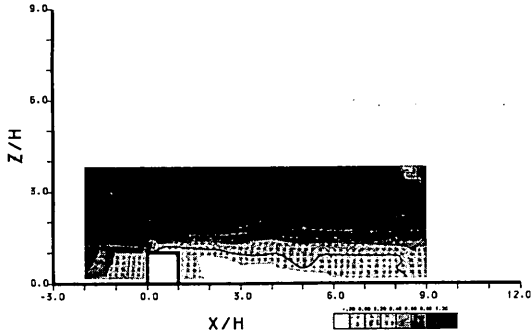


図-7 ケース B11の  $u/U$  分布

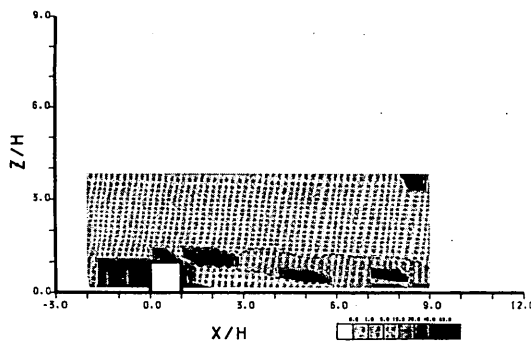


図-8 ケース B11の  $u_{rms}/u$  分布

図-7で白抜きおよび一番淡い色に塗りつぶされている部分が  $u/U < 0$  の逆流域である。白抜きの領域ではやや強い逆流がみられ、一番淡い色の領域では弱い逆流がみられている。濃く塗りつぶされた領域は順流域で、

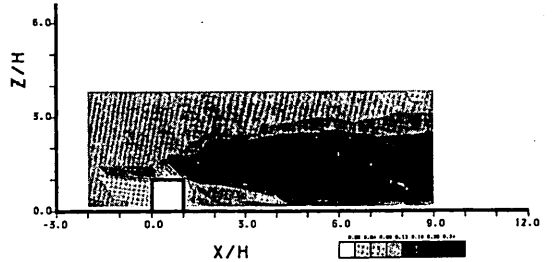


図-9 ケース B11の  $u_{rms}/U$  分布

色の濃いほど主流速に近い速い流速域である。一番淡い色と二番目に淡い色との境目が順流と逆流との境界になる。図中では、この境界線 ( $u/U = 0$  の位置) を細い実線で示してある。この境界線は、時間的に絶えず変動しているのであるが、図からは、凸部上下流端から下流底面に波打ちながら向かっており、 $x/H = 9.0$  付近で底面に届ていることがわかる。実線の下部は  $u/U < 0$  の逆流域を示しており、循環流によって造られる滞留域を見つけ出す重要な手がかりである。図からは、a) 凸部上下流端から下流底面に波打ちながら向かう曲線と、b) 底面、および、c) 凸部下流端境界、とで囲まれるくさび型の滞留域が存在するように見える。

図-8は、相対乱れ強度の分布を示している。色の濃いほど相対乱れ強度が大きくなる。図から、凸部上流側領域と、 $u/U = 0$  の線(前図の実線の位置)をはさむ領域とに相対乱れの大きい部分が見て取れる。凸部背後の后者の領域部分は、局所流速がゼロに近いことに起因して相対乱れ強度が大きくなっており、滞留域の境界にあたりと考えられる。この部分が幅をもっているのは滞留域の境界が時間的に変動していることに対応していると考えられる。この図-8では、二番目以降の濃い部分すなわち ( $u_{rms}/u > 1$ ) の部分を、2本の破線ではさんで示してある。

図-9は、乱れ強度  $u_{rms}/U$  の分布を示しており、色の濃い領域ほど乱れが大きい。図において、乱れ強度の大きい部分 ( $u_{rms}/U > 0.2$ ) は、主流速の減速域と滞留域の境界にはさまれる領域に存在し、主流域と滞留域との運動量や水塊などの交換が活発に行われている領域であると推定される。この領域が大きいほど浮遊幼生がトラップされ易いと考えられる。

これらの図を参考に、滞留域を図化したのが図-10である。図中の実線は図-7の  $u/U = 0$  を示し、破線が図-8の  $u_{rms}/u = 1$  を示している。他のケースも同様の処理を行った結果、滞留域の形はほぼ相似となったので、凸部下端下流端から、滞留域の境界が底面と交わるまでの距離  $L$  をもって滞留域の大きさを代表させる

こととした。滞留域の大きさを凸部高さ  $H$  無次元化し、凸部高さを代表長さとして求めたレイノルズ数  $Re_H$  で整理すると図-11のようになる。すなわち、滞留域の長さはほぼ凸部高さの6~8倍であり、 $Re_H$  が小さくなると滞留域の長さが短くなる傾向がうかがえた。

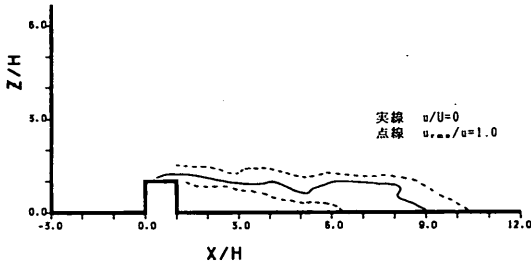


図-10 ケースB11の滞留域  
(実線： $u/U = 0$ ，破線： $u_{rms}/u = 1$ )

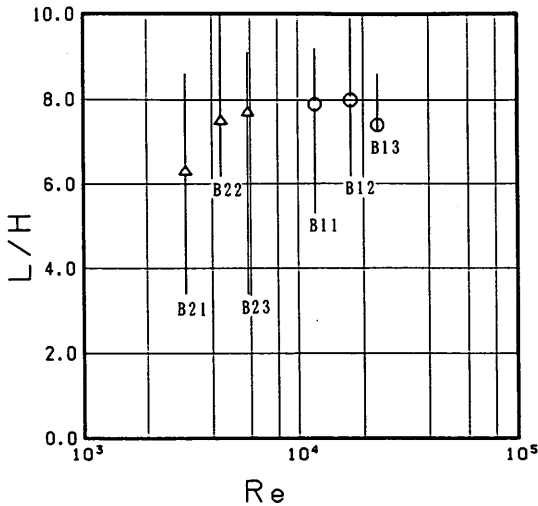


図-11 滞留域の長さの整理  
(○： $u/U = 0$ ，誤差棒： $u_{rms}/u = 1$ )

### 2.5 角柱列の実験結果の整理

ケースB31~B53の角柱列は、ピッチが角柱高さの1.5~4倍であるので、前列の角柱の造る滞留域内に後列の角柱が存在することになる。Morris<sup>7)</sup>による分類によれば、後流干渉粗度または疑似滑面粗度の状態であるといえる。また、五十嵐<sup>8)</sup>の判定基準により整理すると、図-12のように乱流域に含まれる実験条件であるということになる。図中には、ピッチ毎に○(ピッチ9

cm),  $\Delta$  (12cm),  $\square$  (24cm)のプロットをしている。流速が速くなるにしたがい○,  $\Delta$ ,  $\square$ とも右上がりの直線上に整理された。いずれも乱流領域にあるが、B31のケースなどは、遷移流の領域に近いことがわかる。

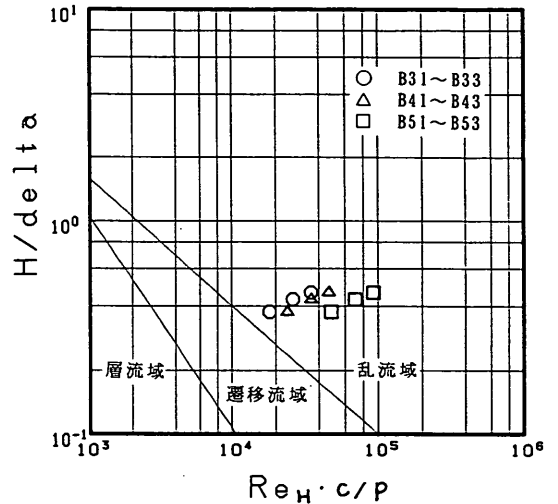


図-12 角柱列実験ケースの流れ分類

前節での整理にならい、 $u/U$ ,  $u_{rms}/u$  および  $u_{rms}/U$  の分布をケースB42に対して示したものが図-13~15である。

図-13からは、ベクトル図(図-6)にも現れていたように、上流側から第1列と第2列の角柱上に循環流による滞留域が形成されている。しかし、角柱列最後尾下流の滞留域での逆流は、単一角柱のそれより小さいことがわかる。図-14からは、角柱列上部に付着する相対乱れの強い領域のあることが観察される。図-15からは、循環流が形成されている部分の上方に乱れ強さの大きい領域があることがわかる。



図-13 ケースB42の  $u/U$  分布

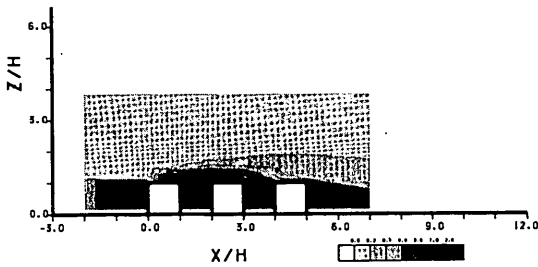


図-14 ケース B42の  $u_{max}/u$  分布

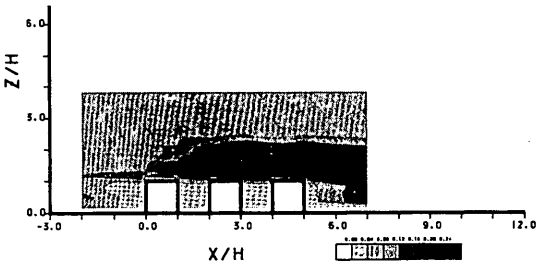


図-15 ケース B42の  $u_{max}/u$  分布

角柱列のケース B31～B53それぞれについての結果は付録 B にまとめて示す。

明確な循環流が形成されているのは、ケース B31, B32, B33, B42, B43, B53であった。これらのケースでは、角柱上部上流端での相対乱れの強い部分 ( $u_{max}/u > 2.0$ ) が第2, 3列の角柱上にあり、そこから上流に伸びる極大値の分布 (色の濃い領域) が第1角柱の上辺から上方に離れたところにあることが特徴である。

また、角柱列上での乱れ強さの大きい部分 ( $u_{max}/U > 0.24$ ) の大きさと位置を各ケース間で比較すると以下のような特徴が観察された。

- 前縁は第1列角柱上部近傍にある
- 後端は、流速が速くなるほど下流側に伸びる
- 角柱列のピッチが長く、流速が遅い場合 (B41, B51, B52) 後端が第2角柱上辺で途切れ、新たな極大値の分布が第2角柱から発生する

以上の特徴から角柱列上方での流れの様相を分類すると、表-3のようになる。

すなわち、

- ピッチが長く流れが速い場合、乱れ強さは強くなる
- ピッチが短く流れが遅い場合、明確な逆流域が発生する
- ピッチが長く流れが遅い場合、角柱間の乱れが分離して孤立粗度に近い状況となる

表-3 角柱列上での流れの様相の分類

		ピッチ	
		短い	長い
流速	遅い	乱れ減少 逆流発生	乱れ増加 乱れの分離化
	速い	乱れ増加 乱れの一体化 逆流発生	乱れ増加 逆流発生

● ピッチが短く流れが速い場合、角柱間の乱れが一体化して疑似滑面粗度に近い状況となる

といった特徴がある。

現在のケースのみでは、これらの分類を定式化する事はできない。おおよその目安として、ピッチが角柱高さの2倍で境界層高さが角柱高さの2.3倍程度となる流速のケース B42, B43が乱れも強く、循環流による逆流も明確に発生している。従って、浮遊幼生のトラップ効率が高くと期待される。

トラップ効率には、滞留域の形成の他、浮遊幼生の沈降速度や大きさ等も関係していると考えられる。別途トレーサ実験等により、トラップ効率の実測・検討が必要であろう。

### 3. 数値計算による流れの可視化

水理実験での計測では、流れの細部構造や、時間的な変化を詳しく追跡することは困難である。

そこで、水理実験結果の解釈の助けとする事を目的として、数値計算により流れ場を可視化する試みを行った。

#### 3.1 離散渦法による数値計算

数値計算手法としては、離散渦法<sup>9)</sup>を採用した。著者らは、任意境界を1列の渦点で近似し、渦の剥離を固定点への渦点の導入によりモデル化した方法<sup>10)</sup>を開発している。

##### (1) 基礎方程式

離散渦法の基礎方程式は、Navier-Stokes 方程式を rotational form で書き換えて体積積分した。

$$\frac{D\Gamma}{Dt} = \nu \nabla^2 \Gamma \quad (10)$$

である。ここに、 $D/Dt$ は全微分オペレータ、 $\Gamma$ は $\Gamma \equiv \omega \delta v$ である。 $\omega$ は、 $\omega \equiv \text{rot}(u)$ で定義される渦度

であるので、 $\Gamma$  は渦強度を表す。式(10)は、渦強度の移送・拡散を流れ場と共に移動する座標系で記述したものである。つまり、粘性の影響による渦強度の拡散と場の流速による渦強度の移流を考慮することにより流れ場が解析できることとなる。

(2) 計算条件

単一の角柱を近似する離散渦の与え方と計算条件を図-16に示す。底面を含む角柱の境界を、離散的に配置された渦点で表現し、制御点で法線方向の流速が0となる境界条件を与えた。

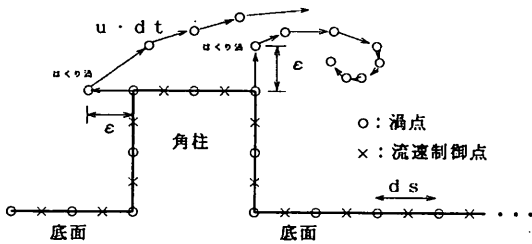


図-16 離散渦による単一角柱の近似

また、渦の誘起する速度  $u_r$  を

$$u_r = \frac{\Gamma}{2\pi r} (1 - \exp(-\frac{r^2}{2\nu t})) \quad (11)$$

と仮定した。 $r$  は渦からの距離。したがって計算時のパラメータ条件としては、渦点間隔  $ds$ 、渦放出高さ  $\epsilon$ 、粘性拡散係数  $\nu$ 、計算ステップ  $dt$  等がある。

流速値が20.0cm/sであるケース B11～B51の5ケースと、ピッチが角柱の4倍のケース B52, B53の2ケース、合計7ケースの計算を行った。計算条件を表-4に示す。

表-4 計算条件

ケース番号	境界の渦点数	$ds$ s	$\epsilon$ cm	$\nu_t$ $cm^2/s$	$dt$ s
B11	281	0.3	0.03	0.24	0.05
B21	71	0.3	0.01	0.06	0.05
B31	361	0.3	0.03	0.24	0.05
B41	361	0.3	0.03	0.24	0.05
B51	361	0.3	0.03	0.24	0.05
B52	361	0.3	0.03	0.35	0.05
B53	361	0.3	0.02	0.46	0.05

3.2 計算結果および考察

(1) 流れ場の再現

計算はそれぞれ流れをスタートさせてから10秒間の計算を行った。この内、5～10秒間の平均流速ベクトルを図示すると、図-17, 18のようになる。ただし、水理実験と同様に流速は主流速で、空間距離は正方形柱高さでそれぞれ無次元化して表示している。

単一角柱のケース B11, B21の計算結果と水理実験結果を比較すると、境界近傍での流速の絶対値、 $z$  方向の流速値に違いがあるものの、全体の流れ場の様相、角柱背後の滞留域での循環流の大きさなどが良好に再現できていることがわかる。

角柱列のケース B31, B41, B51～B53の計算結果と水理実験結果を比較すると、角柱列上方での循環流の高さが計算の方が大きくなっている。これは、角柱列を計算する際に与えるパラメータ条件を、単一角柱の計算により求めた最適条件を流用しているために起こっていると考えられる。しかし、流れ場の様相は良く再現されており、これらのケースについて渦点分布から検討を加えてみた。

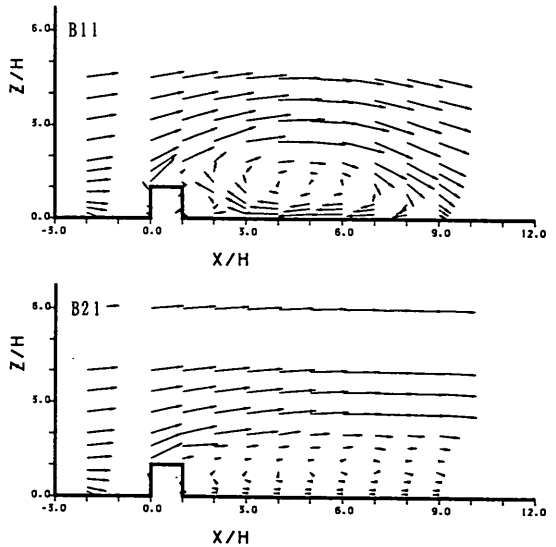


図-17 単一角柱の流速ベクトル (計算値)

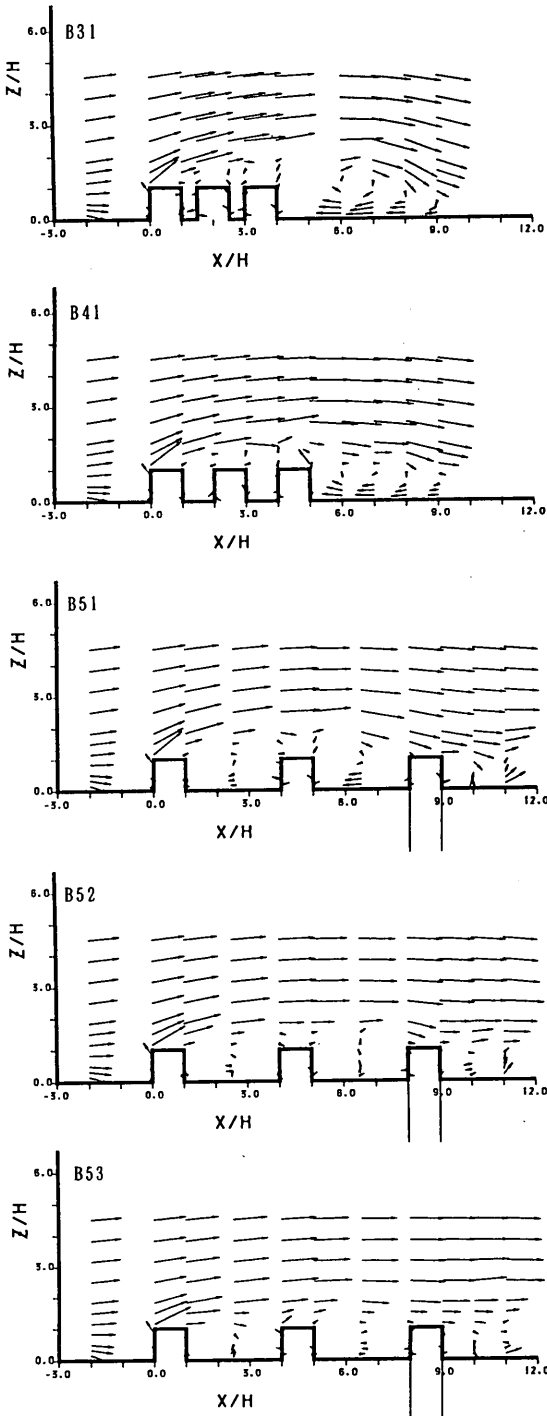


図-18 角柱列の流速ベクトル (計算値)

(2) 角柱列ピッチの変化による流れ場の応答

角柱列のピッチの変化するケース B31～B51 について、図-19 に計算開始 2 秒後の渦点配置を示す。渦点は、角柱隅から放出されており、×記号が時計周りの渦点、四角が反時計周りの渦点を表している。計算では、上下全ての角柱隅から渦点を放出しているが、底面より上部のみの計算結果を示すために底面より下部に放出された渦点は取り除いている。

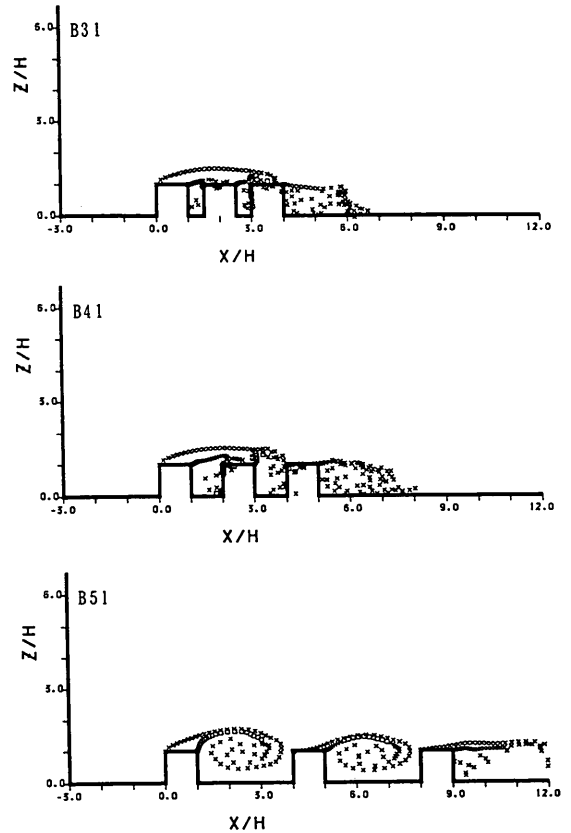


図-19 ピッチの違いによる渦点の配置の変化 (2秒後)

まず、B31 の場合、第 1 列角柱上部上流端から放出された渦が、第 3 列角柱まで到達している。これは、B31 のようにピッチが短い場合に、乱れが一体化することに対応している。つまり、角柱列があたかも 1 つの扁平した角柱であるかのような流れとなっていることを表している。

B31 → B41 → B51 とピッチが長くなるにしたがい、第 1 列角柱上部上流端から放出された渦が到達する距離がピッチ間隔と比べて短くなり、B51 では第 2 列角柱ま

で到達せず、孤立した渦を形成している。これは、水理実験で示された乱れの分離化に対応している。

乱れの大きさは、放出された渦の分散の度合いを比較することによって推定できる。すなわち、渦が列をなしている領域は乱れが少なく、渦が混合して分散している領域は乱れが大きいと推定できる。図-20 に計算開始10秒後の渦点配置を示す。

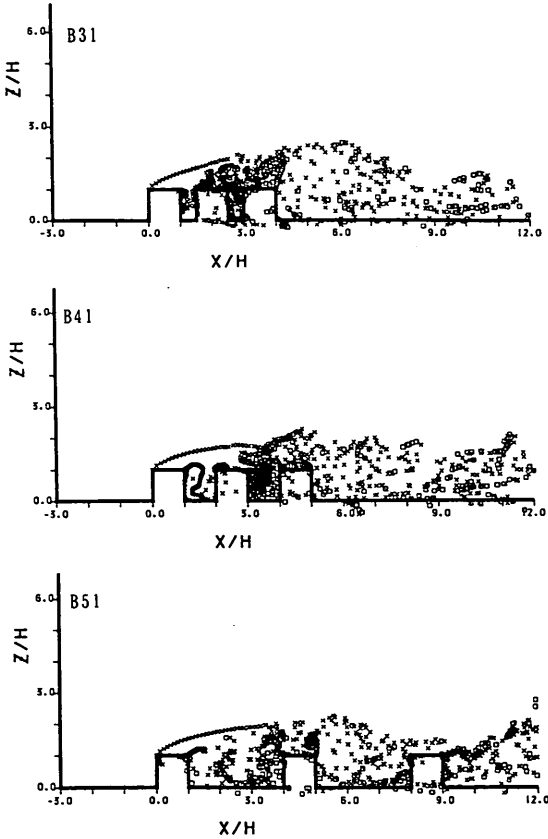


図-20 ピッチの違いによる渦点の配置の変化(10秒後)

どのケースも、第2角柱上部では乱れが大きくなっており、図-12で示された通り、乱流への遷移が完了していることを裏付けている。ピッチが長くなるにしたがい、乱流に遷移する位置が第2角柱の位置と比較して上流側に移動しており、ピッチが長い場合に乱流への遷移が起こり易いとした式(4)と矛盾しない。

(3) 主流速の変化による流れ場の応答

主流速の変化するB51~B53のケースについて、図-21に計算開始2秒後の渦点配置を示す。

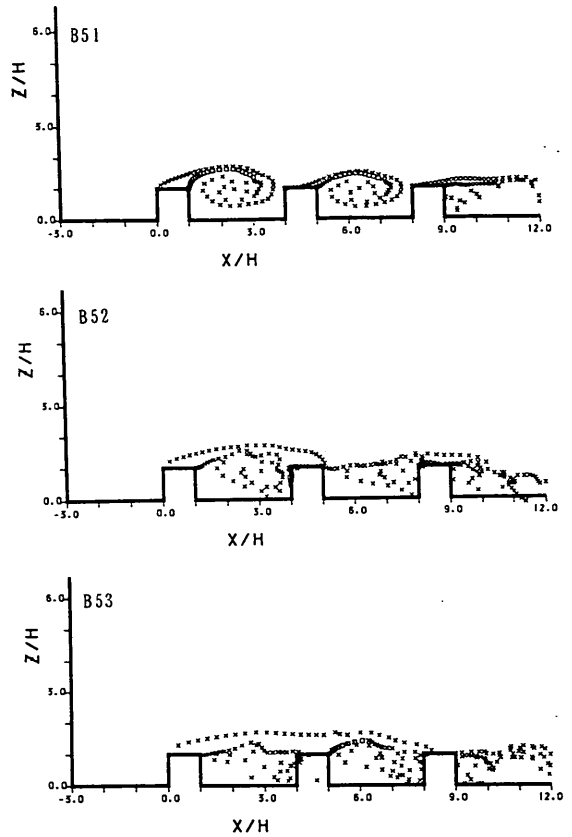


図-21 流速の違いによる渦点の配置の変化(2秒後)

流速のいちばん遅いケースB51では、それぞれの角柱から放出された渦列が孤立した循環流を形成している。その後この循環流は、時間と共に下流側に運ばれ、次列の角柱前面側に集積し、乱れを発生させる。流速が速いケースB52、B53では、第1列角柱上流端から放出された渦列が第2列角柱に到達している。これらの結果から、流速が速くなると乱れが増加し、一体化することが説明できる。

ケースB53の渦列の時間変化を、図-22に計算開始2、4、10秒後の渦点配置として示す。

第1列下流端から放出される渦列が、第1列角柱下流側に集積されていく過程が示されている。流速の小さいケースでは、この渦列は第2列角柱の上流側に集積されている(図-20参照)。この違いが、角柱上部での逆流発生機構に関係していると思われるが、これまでの結果だけでは十分な検討ができない。

今後の課題である。



港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流速分布に関する検討

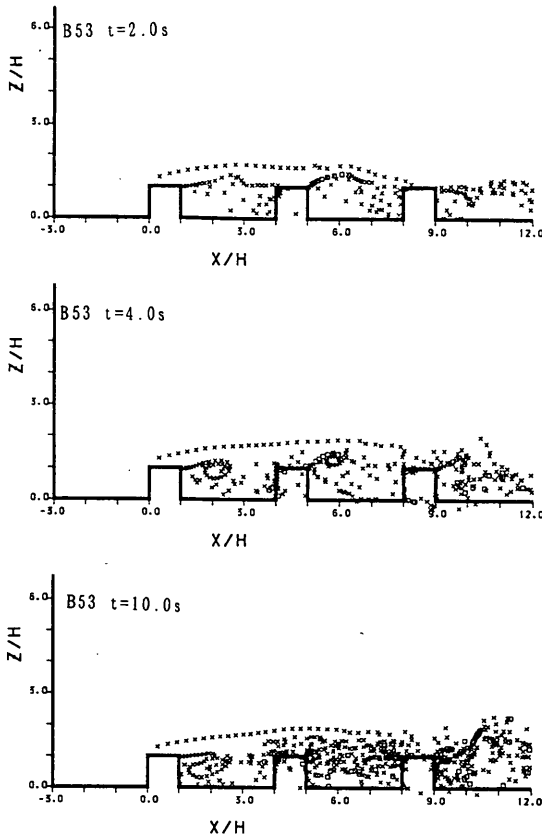


図-22 ケース B53 の渦点の配置の時間変化

以上のように、水理実験から作成した表-3の流れの様相の変化と流速、角柱ピッチとの関係が計算結果からも確かめられた。また、より詳細な機構の解明のためには数値計算による検討も有効であることが示された。

4. おわりに

遊泳力をほとんどもたない遊走子や浮遊幼生は、水理的な滞留域に捕捉されやすいと思われる。適切なスケールの滞留域を人為的に造ることで、生物生息を促進する可能性がある。そこで、構造物表面の凹凸により表面への生物付着を促進させようとする際の、凹凸のもつ水理的な意味について水理実験と数値計算とから検討した。本論文で得られた主な結論は

- 浮遊幼生のトラップ効率を考える上で、乱れと滞留域の大きさを整理することが水理条件上の指標となりそうである
- 単一角柱の場合、滞留域の大きさは  $H$  の 6 ~ 8 倍程度であり  $Re_H$  が小さいほど、小さくなる

- 角柱列の場合、乱流への遷移は五十嵐の示した判定指標  $Re_H (p/c)$  が有効である
  - 角柱列の上方面の流れは、 $U, p$  により表-3のように分類できる
  - 今回の水理実験の範囲内では、 $p \approx 2 \cdot H, \delta_1 \approx 2.3 \cdot H$  程度の条件において乱れ、滞留域とも大きくなった
  - 数値計算の結果により、水理実験の結果を良好に説明することができた
- 等であった。

浮遊幼生や遊走子のトラップの機構と結び付けるためには、今後以下の課題についてさらに検討が必要である。

- 乱れ、滞留域の大きさの説明指標の定量化
- トレーサによるトラップ実験によるトラップ率の計測
- 数値計算手法の精度向上

著者らは、今後とも継続して水理実験による検討を進めるほか、生物幼生の沈降速度、定着条件等の生物パラメータの検討、現地での観測等を進めていくつもりである。現場での流速は常に変動している。変動流速場の中の適切なスケールの滞留域の作り方として、凹凸の高さやピッチの付け方・組み合わせ方についても検討が必要となる。

参考文献

- 1) Katsunori KIMOTO, Junko NAKASHIMA, and Yasuhiro MORIOKA: Direct Observations of Copepod Swarm in a Small Inlet of Kyushu, Japan, 西海区水産研究所研究報告, 66巻, 1988
- 2) 細井由彦, 村上仁士, 玉川康弘: 流れおよび潮汐場における付着藻類の増殖と水産量との関係, 海岸工学論文集, 37巻, 1990
- 3) 桑原久実, 日向野純也: 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発, 海岸工学論文集, 40巻, 1993
- 4) 川合英夫編: 流れと生物と, 京都大学学術出版会, 1991
- 5) 杜多 哲: 浮遊幼生の分散におよぼす流動環境の影響とその制御, 養殖研研報, 16巻, 1989
- 6) 杜多哲: 後流中の物質分散に関する研究II, 水工研報告, 4巻, 1983
- 7) Henry M. Morris, Jr.: A new concept of flow in rough conduits, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 120, 1955
- 8) 五十嵐保, 高橋博美: 平板層流境界層におかれた長方形柱まわりの流れ, 日本機械学会論文集 (B編), 55巻, 519号, 1989
- 9) 細川恭史, 古川恵太: 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション, 港湾技術研究所報告, 30巻, 2号, 1991

- 10) 古川恵太, 平野隆幸, 細川恭史: グチ式造流堤による流れの解析, 港湾技術研究所報告, 33巻, 1号, 1994

記 号 表

$c$	長方形柱の辺長
$ds$	境界渦点間隔
$dt$	計算ステップ
$D$	水 深
$D/Dt$	全微分オペレータ
$H$	構造物の高さ
$k$	遮蔽率の逆数 ( $k = D / (D - H)$ )
$p$	角柱列のピッチ
$Re_H$	レイノルズ数 ( $U \cdot H / \nu$ )
$u$	水平流速 ( $x$ 方向)
$U$	主 流 速
$u_{rms}$	乱れ強さ
$u^*$	摩擦速度
$w$	鉛直流速 ( $z$ 方向)
$\delta_1$	境界層高さ
$\delta_\theta$	排 除 高 さ
$\varepsilon$	渦放出高さ
$\Gamma$	渦強度 ( $\Gamma \equiv \omega \delta \nu$ )
$\nu_t$	乱流拡散係数
$\omega$	渦度 ( $\omega \equiv rot u$ )

付 録 A

単一角柱の実験ケース B11~B23 について,  $u/U$ ,  $u_{rms}/u$  および  $u_{rms}/U$  分布を示す。

付 録 B

角柱列のケース B31~B53 について,  $u/U$ ,  $u_{rms}/u$  および  $u_{rms}/U$  の分布を示す。

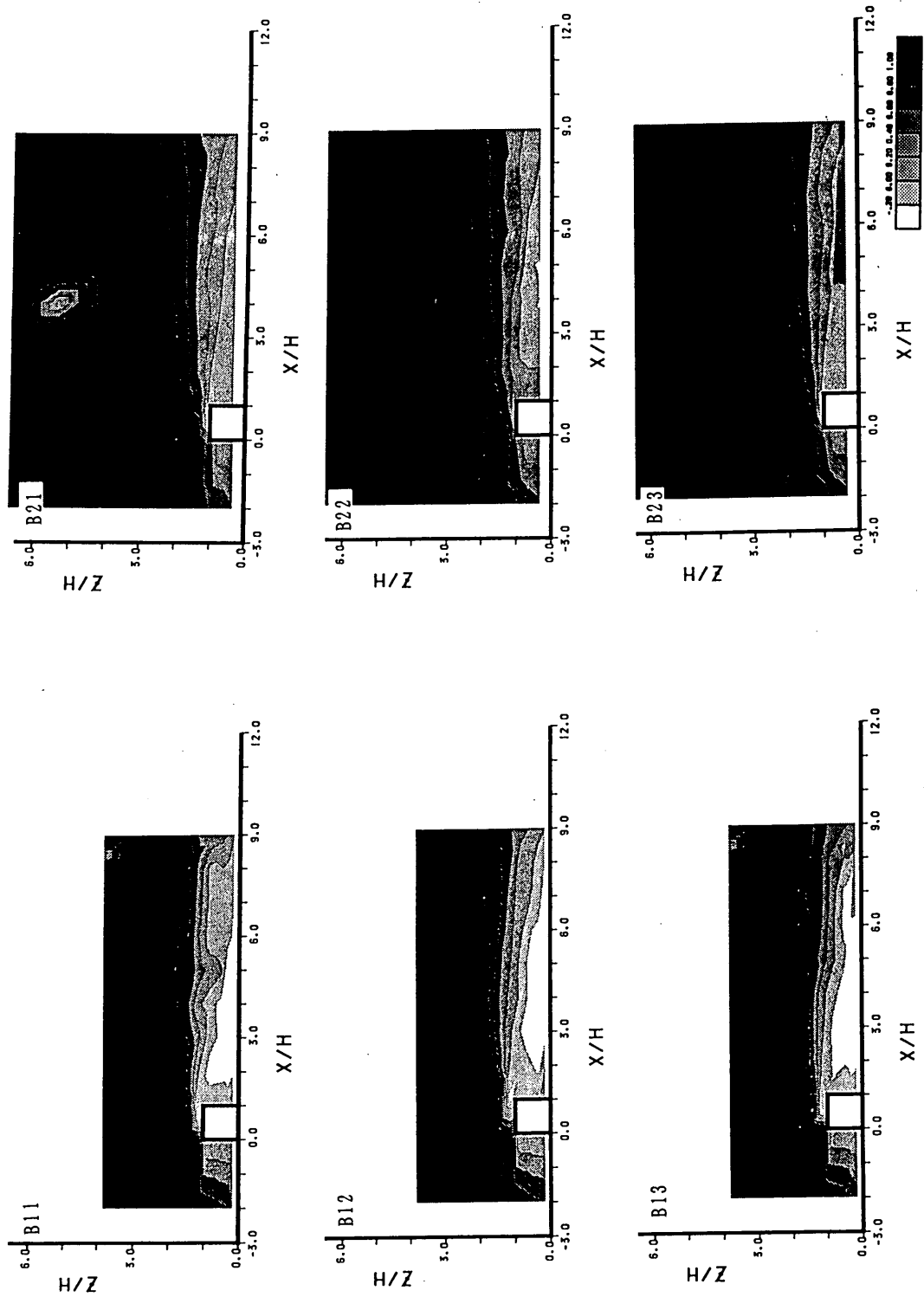


図-A1 単一角柱の  $u/U$  分布図

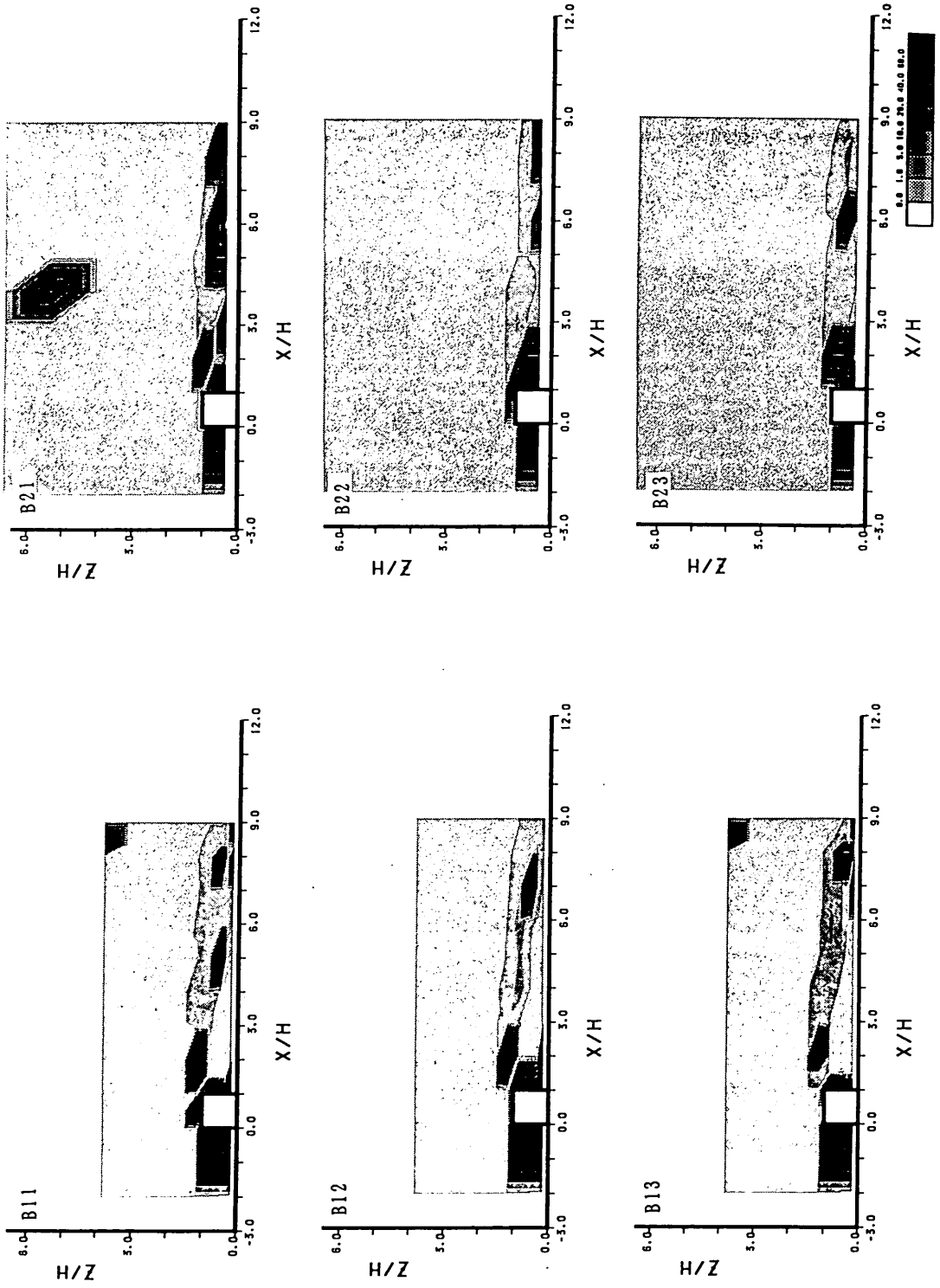


図-A2 単一角柱の  $u_{rms}/U$  分布図

港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流速分布に関する検討

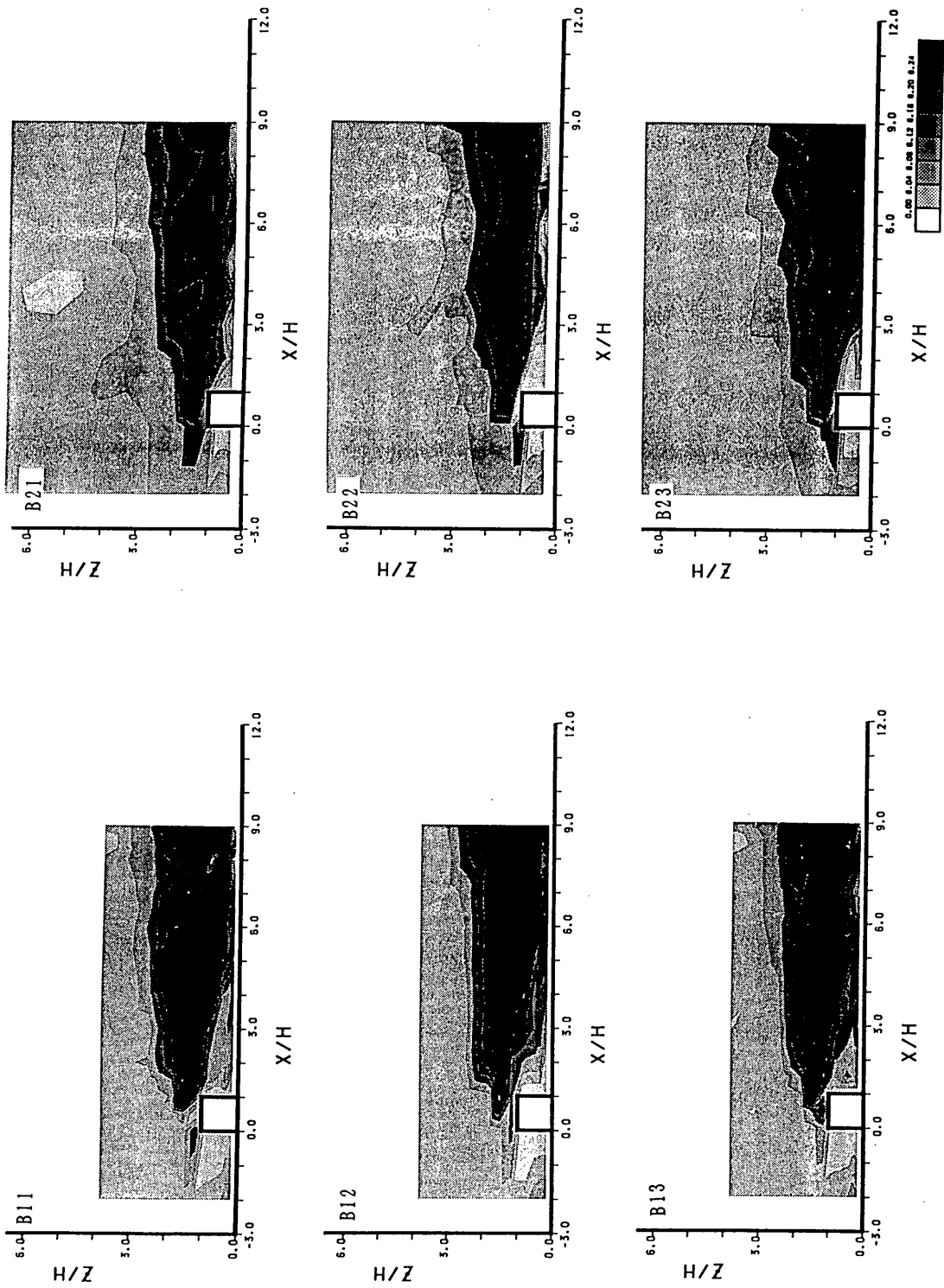


図-A 3 単一角柱の  $u_{r,m}/U$  分布図

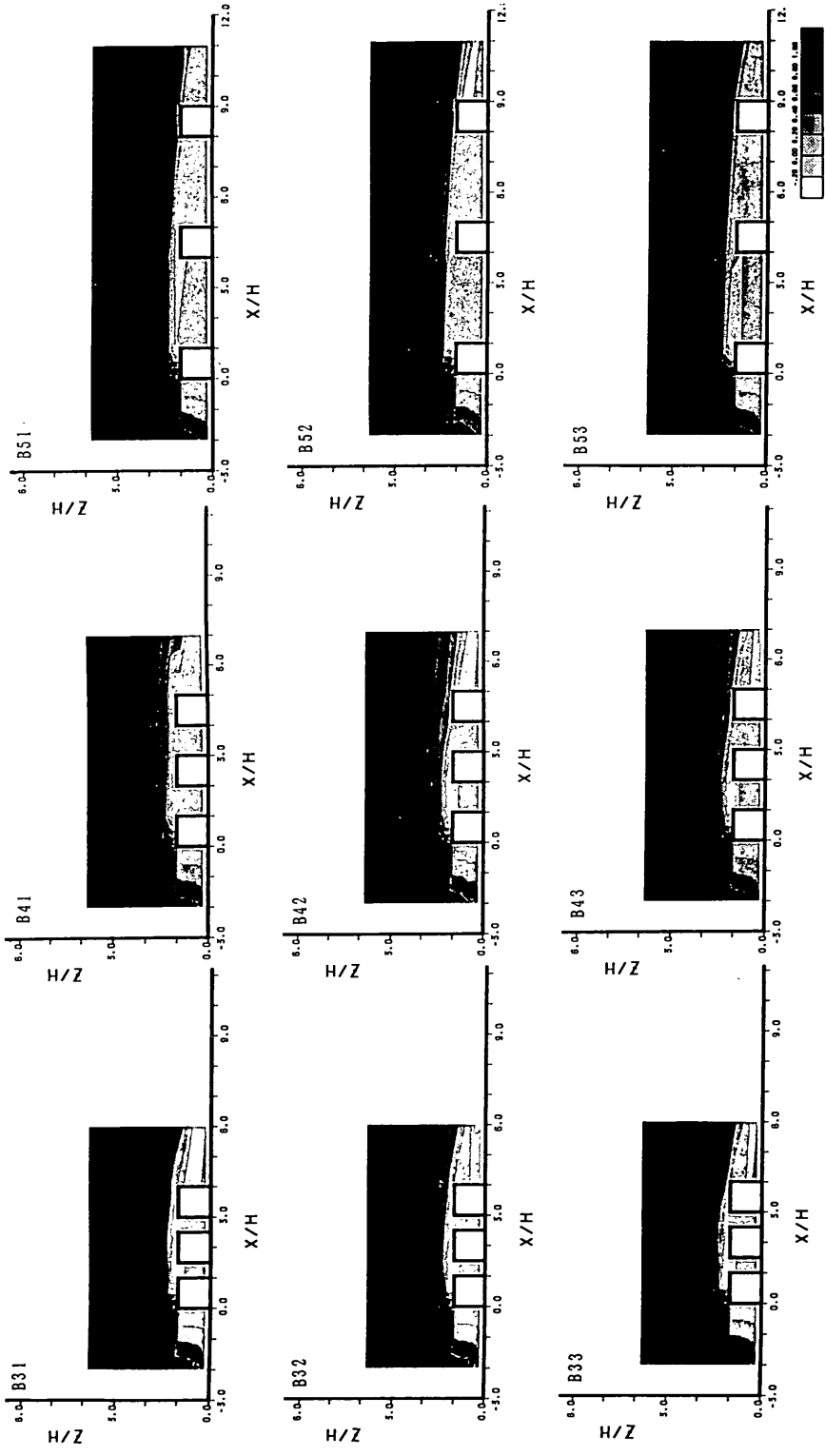


図-B 1 角柱列の  $u/U$  分布図

港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流速分布に関する検討

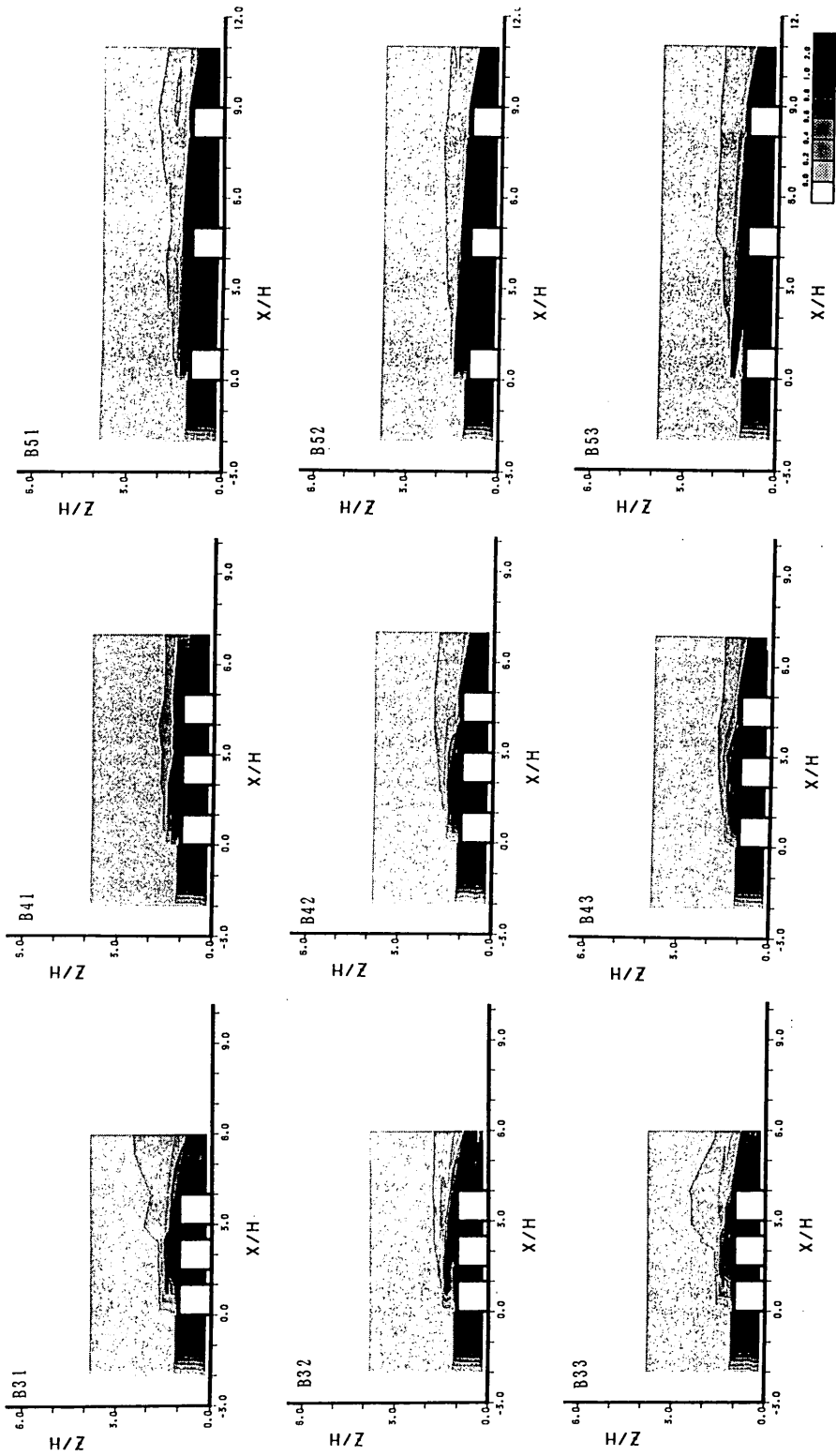


図-B 2 角柱列の  $u_{rms}/U$  分布図

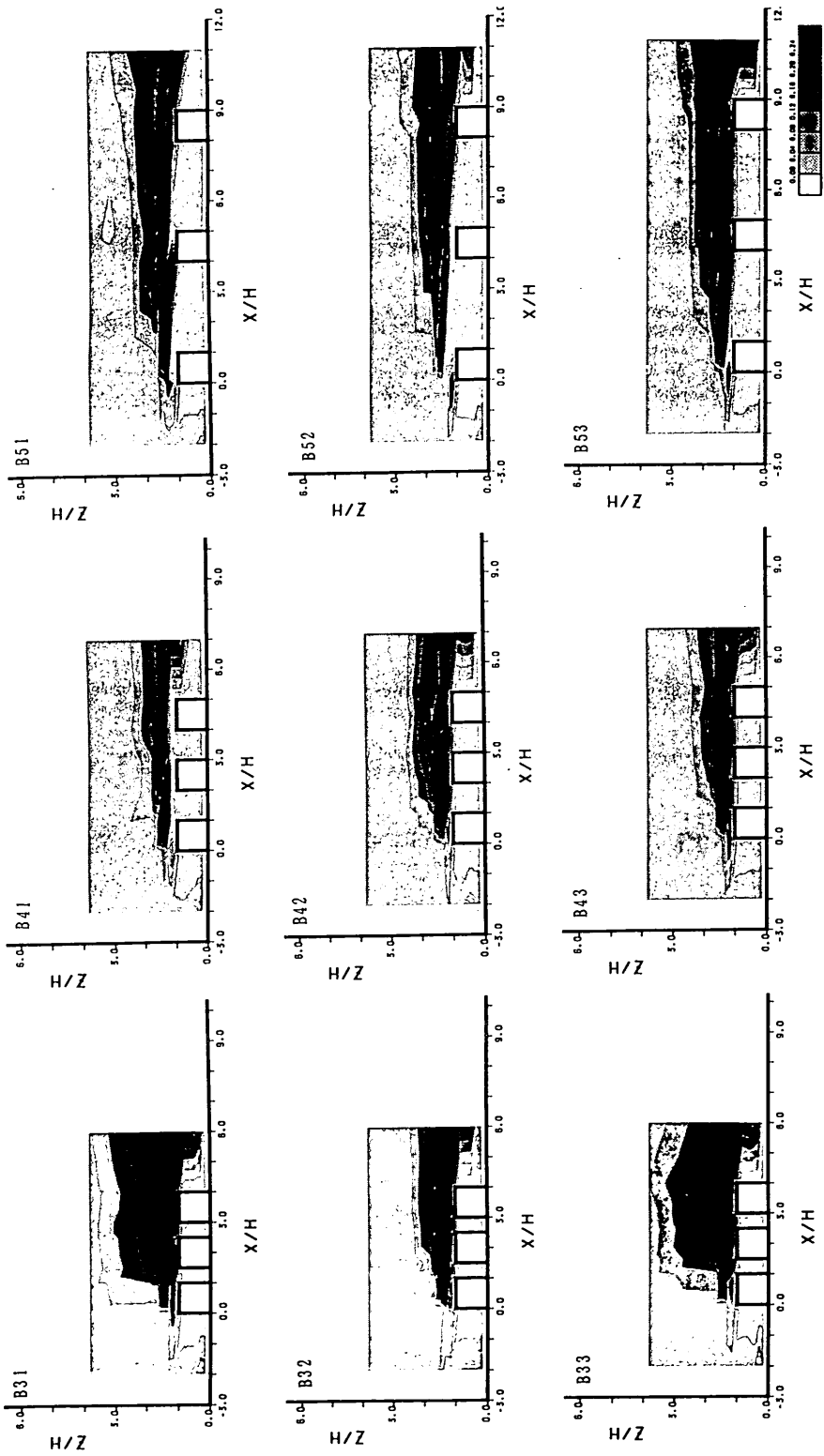


図-B 3 角柱列の  $u_{rms}/U$  分布図