

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.349

June 1980

突堤後方の流れに関する実験
— 模型ひずみの影響の検討 —

加	藤	始
木	村	久
寺	川	博
		也

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	1
1. ま え が き	1
2. 実 験 概 要	2
2.1 実 験 装 置	2
2.2 実験方法と実験ケース	3
2.3 測 定 方 法	3
3. 実験結果とその検討	4
3.1 突堤がないときの流れ	4
3.2 流れの可視化による突堤の後流の観察	6
3.3 平均流速の分布	6
3.4 突堤の後流における乱れの特徴	10
3.5 参考データ	15
4. ま と め	17
参 考 文 献	18
付 録	19

Experiments on the Flow Downstream of a Jetty

— Investigation of the effect of the model distortion —

Hajime KATO*

Hisao KIMURA**

Hiroya TERAOKA**

Synopsis

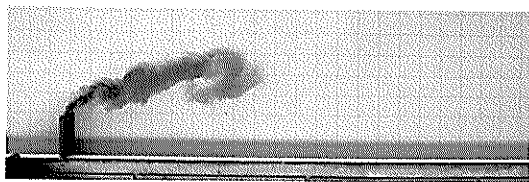
In order to investigate the effect of the model distortion upon the flow downstream of a jetty, some experiments have been made by changing the length of the jetty as $L = 50, 25, 12.5,$ and 5 cm in a 3.25 m \times 10.0 m model basin with 10 cm of water depth and about 9.0 cm/s of steady current. The spatial distribution of mean velocities, U , and turbulence at $z = 2$ cm in the downstream area were measured by using 26 mm and 3.0 mm propeller current meters.

From the contour lines of U/U_0 (U_0 : without the jetty) it is inferred that the blockage effect due to the opposite side wall is influential in the case of $L = 50$ cm where the maximum value of U/U_0 was nearly 1.6 . The relative size of the separation-bubble behind the jetty x_b/L was found to increase from $x_b/L \doteq 12.2$ (for $L = 5$ cm) to $x_b/L \doteq 14.0$ (for $L = 50$ cm) and the latter value is expected to be a little larger without the blockage effect. This suggests that x_b/L is influenced by the model distortion.

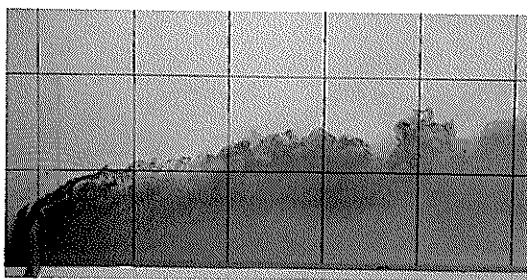
From the results of turbulence measurements it was found that the turbulence intensity in the same position relatively to the jetty changes considerably with L .

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

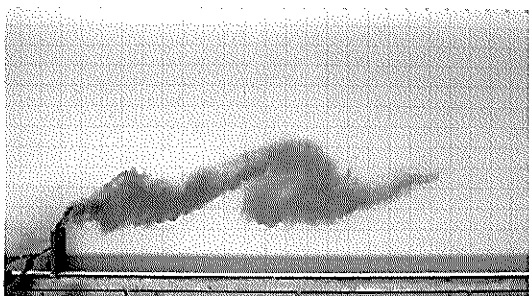
** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division



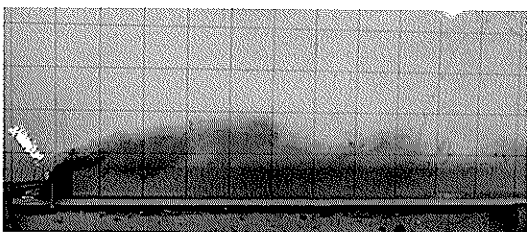
写真一 2(a) Case 4



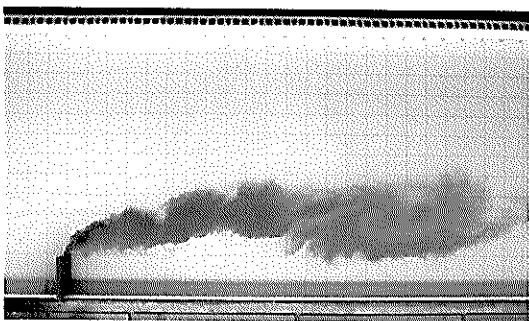
写真一 3(a) Case 2



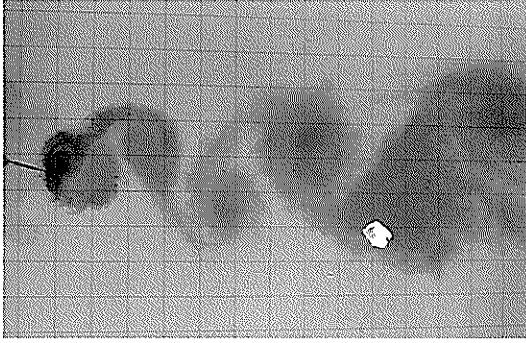
写真一 2(b) Case 4



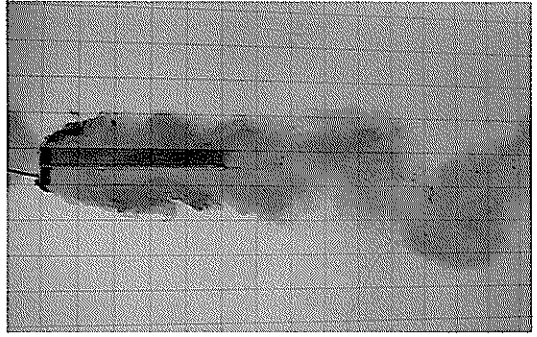
写真一 3(b) Case 2



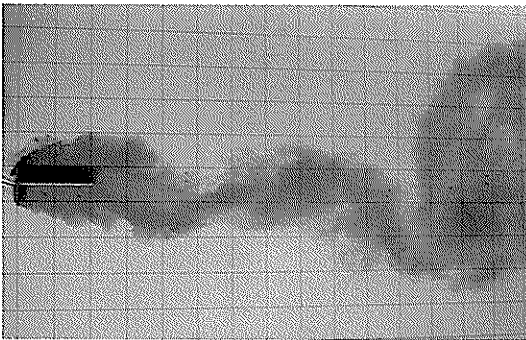
写真一 2(c) Case 4



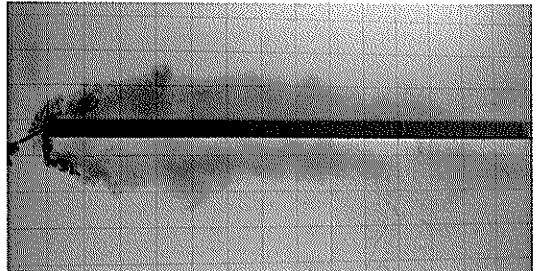
(a) $l = 0$



(c) $l = 5L$



(b) $l = 2L$



(d) $l = 14L$

写真-5 Splitter plate の長さ l による垂直平板後流渦の変化

突堤後方の流れに関する実験 —模型ひずみの影響の検討—

加藤 始*

木村久雄**

寺川博也**

要 旨

本資料では、突堤の潮流制御効果とそれに及ぼす模型ひずみの影響を調べるために行った実験の結果を述べている。実験は3.25 m (幅) × 10.0 m の測定部をもつ回流平面水槽を使い、水深は10.0 cm、流速は約9.0 cm/sに固定し、岸から1本だけ出した突堤の長さを模型ひずみの変化に対応するよう $L = 50, 25, 12.5, 5$ cmと変化させて行った。測定には大・小2つのプロベラ流速計を使い、 $z = 2$ cmの水深で平均流速 U と乱れの平面分布を測定した。

各ケースの U/U_0 (U_0 : 突堤なしの場合) の平面分布の Contour を比較すると、 $L = 50$ cmでの結果は他と少し異っており、これは側壁の影響と考えられる。また突堤後方は離領域の大きさを再付着点までの距離 x_0 と L との比で比較すると、 $L = 5$ cmでは $x_0/L \approx 12.1$ 、 $L = 50$ cmでは $x_0/L \approx 14.0$ となるが、後者の値は側壁の影響がなければもっと大きくなることが予想され、模型ひずみが大きくなるほど x_0/L の値は小さくなる傾向のあることがわかった。

1.0 Hz 程度までほぼ平坦な周波数応答性をもつ3.0 mmφのプロベラ流速計を使った乱れの側定結果からは、模型ひずみの差が、突堤に相対的には等しい位置での乱流強度の大きさにかなり影響を及ぼすことがわかった。

1. まえがき

海岸構造物としての突堤は、海岸の侵食や河口港の埋没を防止するために設置されることが多く、これらの場合には、突堤の沿岸流を阻止する機能が使われている。一方、大きな潮流の生じる海域に面した港では、流れにより船のけい船が困難になる場合があり、その周辺での流れを低減させる目的で突堤の設置が計画されることがある(たとえば文献1)参照)。これは比較的大きな流れの中に突出させた突堤の後流を積極的に利用しようとするものであるが、その計画の実施に当っては、突堤の設置による流況の変化を模型実験により前もって十分に調べておく必要がある。

ところで従来から水理模型実験では、実験に必要な水深の維持と水槽の大きさの制約からひずみ模型が使われることが多く、この場合、模型のひずみが突堤の潮流制御効果に影響を及ぼしはしないかということが、1つの大きな疑問点として残されてきている。

ところで河川維持の目的で使用される各種の水制のうち、不透過非越流型水制のもつ水はねの機能は、突堤の潮流制御効果と類似のものであり、これについては従来いくつかの研究が行われている。²⁾³⁾⁴⁾ ただし、水はね水

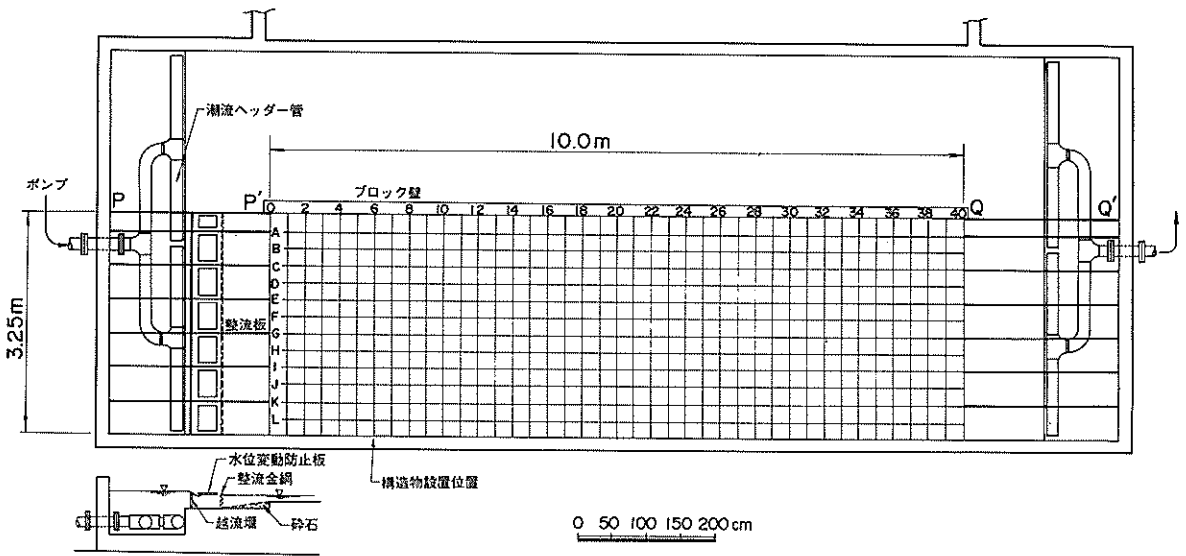
制の研究でもっとも関心がもたれているのは自由流線 (Free streamline) の形状や水制域 (下流側のはく離領域) の長さのようで、1本の水制が下流側の流速分布をどのように変えるかについて実験的にくわしく調べた例はないようである。

一方、地上に設置されたしゃ(遮)風壁の模型実験に相当するような垂直平板の後流に関する風洞実験は、これまでにArie & Rouse,⁵⁾⁶⁾ Good & Joubert⁷⁾などによって行われている。しかしそれらは2次元的な現象を調べたものであり、自由表面をもち水深も有限な3次元要素をもつ突堤の後流の問題に、それらがそのまま適用できるかどうかはわからない。いずれにせよ、水制や2次元しゃ風壁についての従来の研究結果から、突堤の後流の性質についてはある程度知ることができると、突堤の実験における模型ひずみの影響についてはほとんど何も知ることができないであろう。

本研究は、このような背景の下に、突堤の後流の性質と、それに及ぼす模型ひずみの影響を実験的に調べるために行ったものである。結果的には、実験期間や実験施設上の制約から、模型ひずみの影響の検討という当初の目的は十分には達成できなかったが、流れの中におかれ

* 海洋水理部 水理研究室長

** 海洋水理部 水理研究室



図一 実験水槽平面略図

た構造物の後流を含む水理模型実験を計画する上で参考になるようないくつかの知見がえられた。

2. 実験概要

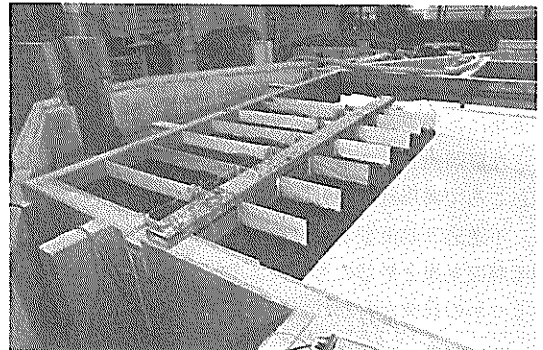
2.1 実験装置

実験は、図一に示す当所流理実験室内の平面水槽（5.5m×14.5m）を使って行った。この水槽には、図一では省略しているが、1台のポンプにより往復流を機械的に発生させる潮せき流発生装置等（参考文献8）参照）がついており、水槽内の左右両端にある吸込みと吐出し兼用の潮流ヘッダー管は水循環用のパイプ（150mmφ）を介してポンプに接続されている。ポンプの最大流量は60 l/sで、周期9～120分の近似正弦波形の往復流および定常流が使用できるが、今回の実験では図一で左から右へ流れる定常流を用いた。流量の調節は、潮流発生装置に取付けてある制御弁の開閉により行い、その概略値は水循環パイプに設置されているフロート式流量計により読取れるようになっている。

今回の実験において水槽の測定部はなるべく広いことが望ましかったが、別の目的で造られた実験床をそのまま利用したので、図一のように水槽の幅をブロック壁で仕切った幅3.25m、長さ10mの範囲しか平坦部が取れず、この部分を測定部として使った。実験での色素による流れの可視化や測定位置の決定に便利ように、この測定部の底面には白色ペイントを塗り、黒色ペイントで図一のように一辺25cmの格子を画いた。また底面の高さをすべての格子点についてレベルで測定したとこ

ろ、高低差は主要部で±3mm以下であった。

なお、図一に示したブロック壁の延長P-P'およびQ-Q'にも仕切板が（底面まで）設けてあり、これより外側の部分では潮流ヘッダー管の穴をゴム栓で塞いで流れが生じないようにしてある。また測定部における幅方向の流速分布を均一にするため、図一のように測定部の上流および下流のアプローチ部分では、（ヘッダー管より下方を除いて）50cm間隔の整流板で幅方向を分割してあり、上流側に設けた越流せき（堰）の高さを各区分ごとに調節して流量を配分している。このため流量を変えると幅方向の流速分布も変るおそれがあり、流量を変えた実験はしにくかった。越流せきのすぐ下流には水面変動防止板と整流金網が設けてあり、これによって流れの変動を小さくしている。写真一には、図一に示す構造物設置位置付近から見た流入部の様子を示している。



写真一 実験水槽の流入部

2.2 実験方法と実験ケース

一般に水理模型実験ではフルード相似則が適用されるので、模型の幾何学的縮尺が $1/S$ の場合、模型での流速値は現地での値の $1/\sqrt{S}$ にとられる。いわゆるひずみ模型では鉛直縮尺に比べて水平縮尺が小さくとられるが、模型での流速値の換算には鉛直縮尺だけが考慮される。すなわち、鉛直縮尺が同じであれば、ひずみ模型における流速値はひずみなし模型での流速値と同じにとられる。したがって突堤の後流の実験を模型ひずみを変えて行う場合、2つの方法が考えられる。第1は、水深と流速値を一定にし、突堤の長さ（水平縮尺）だけを変えて行う方法である。第2は水平縮尺を固定し、鉛直縮尺 $1/S$ を変化させるもので、この場合には突堤の長さは一定にし、模型の水深と流速値とをそれぞれ $1/S$ と $1/\sqrt{S}$ に対応して変化させることになる。

このうち第1の方法の方が実際に模型実験を計画する場合の状況に近く、しかも第2の方法に比べて実験がはるかに簡単になるので、今回の実験においては、突堤の長さ（水平縮尺）のみを変える第1の方法に従って実験を行った。

実験における水深は10 cmとし、流量は突堤のない状態において図-1の断面4で測った断面平均流速がほぼ10 cm/sとなるよう調整したが、幅方向の流速分布を一樣に調整し終った後でチェックし直してみると、断面平均流速は約9.0 cm/sであった。今回のすべての実験はこの流量のままとし、潮流発生装置の制御弁を固定しておいた。

実験水は低水槽にくみ置いた水道水を実験水槽にポンプアップして用いた。各実験における測定は、ポンプをスタートさせた後、測定部内の流れが十分定常状態になるよう、約1時間ほど待ってから開始した。ただ、水を流し始めると測定部下流のヘッダー管付近の水面に汚れた水の被膜が生じることが多く、その場合には表面水をくみ取ることにより、まず被膜を十分除去するようにした。

実験ではいろいろな長さの突堤を置いた場合の各点の流速 U を測定し、同じ点の突堤のない場合の流速 U_0 との比 U/U_0 を求めるということをまず第1に考えた。したがって実験ケースとしては突堤を設けない場合をCase 1とした。突堤は側壁（図の下側）から1本だけ出すことにし、その設置位置は、次に述べるCase 4の反流域の大きさを予備的にテストしてみた結果から、断面6の位置に決めた。突堤の長さ L は50, 25, 12.5, 5 cmの4種類の場合について実験を行った。ケース番号と突堤の長さの関係は表-1のとおりである。当初Case 2

表-1 各ケースの突堤の長さ

Case	L (cm)
1	なし
2	12.5
3	25
4	50
5	5

～4の3ケースを予定していたが、それらの結果から後で述べるように側壁の影響が大きかったことがわかったので、それを極力小さくする目的で、 $L=5$ cmのCase 5を後から追加したものである。突堤の模型は木製で、その幅は各ケースとも長さの $1/10$ の寸法にとっている。

なお、今回の実験ケースと模型ひずみについていえば、一応 $L=50$ cmのCase 4がひずみなし模型（ $1/S=1/100$ 程度）に相当し、Case 3, 2, 5がそれぞれ水平縮尺を鉛直縮尺に比べて $1/2$, $1/4$, $1/10$ にひずませたひずみ模型に対応しているといえる。

2.3 測定方法

流速の測定には2種類のプロベラ流速計を使用した。各実験ケースにおける平均流速の測定に使用した流速計は、直径26 mmの4枚羽のアクリル製プロベラの外周に幅5 mm、厚さ0.4 mmのリングがついた形のもの（三光精密製）で、リングに20個の穴があり、支柱に埋込まれた反射型フォートカプセルが、穴でない部分で光を感じて電圧パルスが発生するように作られている。この流速計の特長は2～3 cm/sの低流速から測定でき、その検定曲線は図-2に示すように直線によくのことで、一方、欠点は局所的な測定に不向きであり、流れの変動

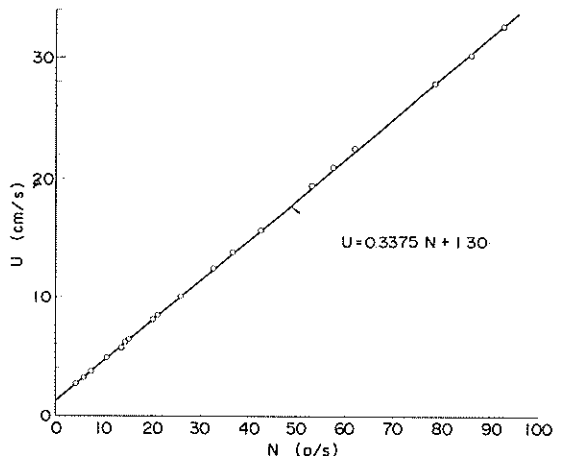


図-2 26 mmφ流速計検定曲線

に対する追従性も悪いということである。この流速計を使った平均流速の測定は、流れの向きを流速計のわくにつけた糸の向きで見出しその方向にプロベラの向きを合せ、通常100秒間の出力パルスを流速表示カウンターで読み取って行っている。

今回の実験においては、水を十分きれいに保つことができず、そのため hot-film 流速計は使えなかった。そこで、突堤の後流域での乱れをある程度測定するためと、壁の近くの境界層での流速分布を測定するために、直径 3.0mm、8 枚羽ステンレス製の超小型プロベラ流速計（篠塚製作所製）を用いた。この流速計の特長は小型であり、流れの変動がかなり検出できるということにある。水路の流れの中で hot-film 流速計と並べて流速変動に対する応答性を調べたところ、 $f = 1.0\text{Hz}$ 程度まではほぼ追従するという結果がえられた。欠点は、ゴミや気泡の付着で出力が低下したり、プロベラの向きのおずかの差が出力に影響することがあったりして、安定性に関しては大きいプロベラ流速計より悪いのと、図-3 に示し

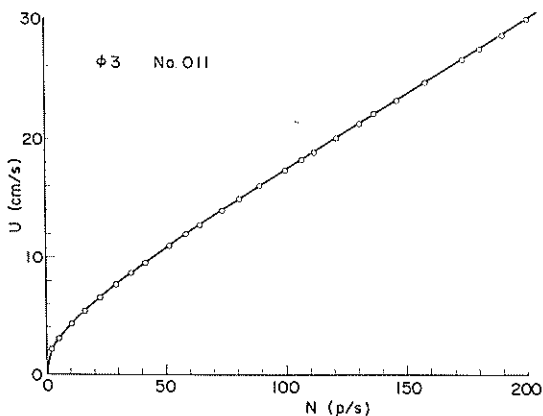


図-3 3mmφ流速計検定曲線

た検定曲線の1例からもわかるように、低流速で検定曲線が曲ることである。図-3 はかなり流速の大きいところまで直線にのらない場合の例であるが、この $N \geq 80$ では

$$U = 0.1239N + 4.88 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(U : cm/s) の直線的関係が成立し、 $N \leq 80$ では滑らかな曲線が当てはまるので、次式の形でその関係を表わした。

$$U = -1.381N^{1/4} + 2.615N^{1/2} + 0.0176N^{3/2} + 0.0937 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この流速計ではパルス数 N に比例した

$$E = aN + b \quad \dots\dots\dots (3)$$

の形のアナログ電圧 E が出るので、このアナログ出力を通常 $\Delta t = 1/10.24$ 秒のサンプリング速度でデジタルデータレコーダ (DATAC-2000B) に記録し、 Δt ごとの電圧値を(1)~(3)式の関係により電算機で流速値に変換し、後のデータ処理を行っている。一般に1点ごとの測定時間は3分20秒(2048データ)としたが、FFTでスペクトルを計算する予定の点については6分40秒間の記録(4096データ)をとった。

突堤をおいた各ケースでは、突堤の後流の様子を可視化するため、色素として少し温めたメチレンブルーの濃い溶液を突堤の上流面の水面付近から流し、実験室の天井に設けてある足場から流れの写真撮影を行った。ただ色素によるステール写真では、目視では明りょうに見られる突堤後方のうずがわかりにくいので、2, 3のフオートを使った流れの写真撮影も試みたが、十分な時間的余裕がなく成功しなかった。

3. 実験結果とその検討

3.1 突堤がないときの流れ

以下に述べる実験結果において、測定点を表わすのに x, y, z の座標を用いるが、 x は突堤の設置位置(図-1の断面6)から側壁に沿って下流側へ測った距離、 y は突堤を取付けた側壁(岸)からの幅方向の距離、 z は水面から下へ測った深さを表わす。

今回の実験では、水槽測定部における幅方向の流速分布を一樣にすることがまず必要であったが、2.1で述べたような越流せきの方法で調整し、どの断面で測った流速分布のずれも平均値の $\pm 5\%$ 以内に入るようにした。

流速の測定は、最初 $z = 2\text{cm}$ と $z = 7\text{cm}$ の2つの深さについて着手したが、それでは時間がかかりすぎるのと、図-7や図-12~15に示す鉛直分布の例からもわかるように、各点の流速は鉛直方向にあまり変化しないので、各ケースごとの流速の平面分布の比較は $z = 2\text{cm}$ についての測定値だけに基いて行った。なお、この $z = 2\text{cm}$ だけの比較では、それが断面全体の流れの特性を表わしていないといけなないので、後で $z = 2\text{cm}$ と $z = 6\text{cm}$ の幅方向の流速分布についても多少の比較を行っている。

図-4にはCase 1における断面6, 18 および 30 (それぞれ $x = 0, 3.0, 6.0\text{m}$)での幅方向の流速分布を示すが、他の断面における流速分布もこれらと同様にほぼ一樣で、各点の流れの方向も側壁にほぼ平行であっ

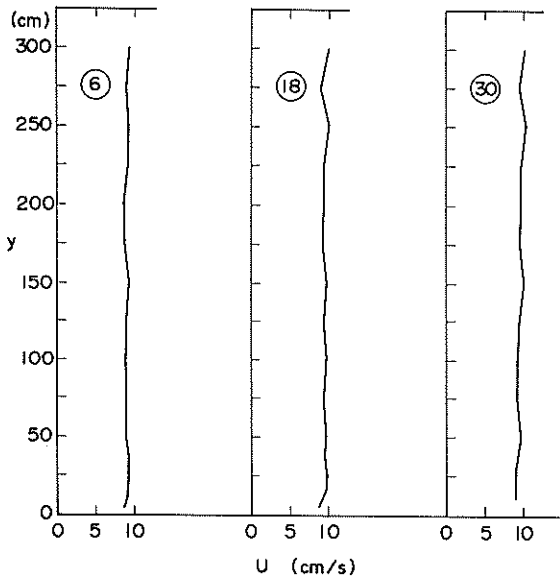


図-4 Case 1の幅方向流速分布 ($z = 2 \text{ cm}$)

た。図-5は後で使う目的のため、 3 mm の流速計を使ってCase 1の3つの断面において $z = 2 \text{ cm}$ および $z = 6 \text{ cm}$ で測定した側壁の近傍での幅方向の流速分布である。側壁上の横方向の境界層の厚さは、 $z = 2 \text{ cm}$ の方が $z = 6 \text{ cm}$ よりやや大きめであるがそれほど差はなく、 $x = 25 \text{ cm}$ の断面における境界層の厚さはほぼ 10 cm 程度である。図-6には図-5の測定で同時に求められた流速の変動成分 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の値を示しているが、 $x = 25 \text{ cm}$ では2つの水深でほとんど差はなく、 x が大きくなると側壁の近くを除いて $z = 6 \text{ cm}$ の方が乱れはやや大きくなることわかる。

図-7には、同じく 3 mm の流速計で測定した、Case 1における $x = y = 50 \text{ cm}$ の点での流速の鉛直分布と、同時に求められた $(\overline{w'^2})^{1/2}$ の分布を示しているが、底面の近くでは底面の影響で流速はやや小さくなり、乱れはやや大きくなっている。

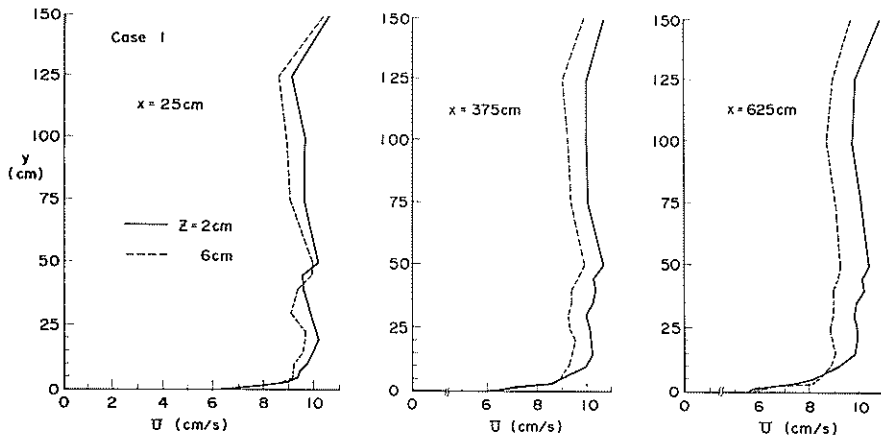


図-5 Case 1のU幅方向分布

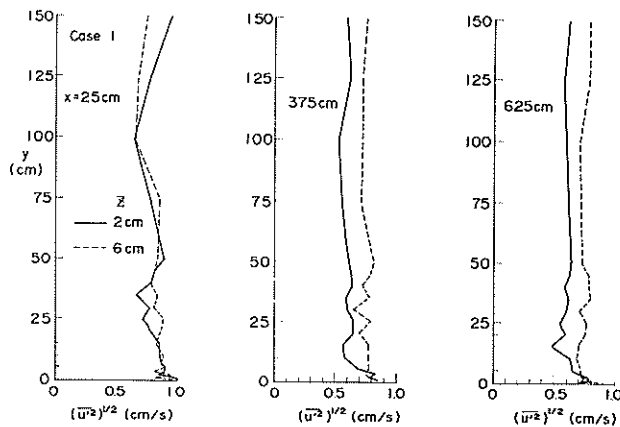
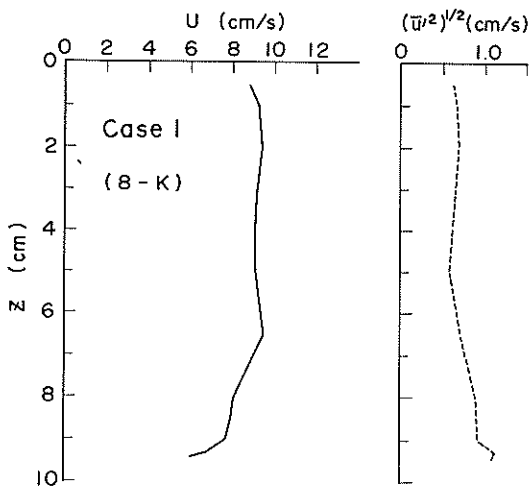


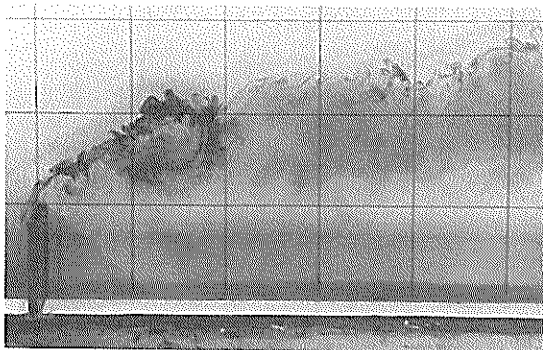
図-6 Case 1の $(\overline{u'^2})^{1/2}$ 幅方向分布



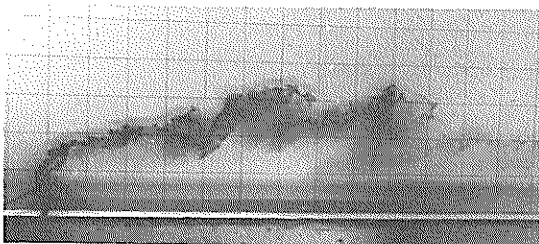
図一七 Case 1 の U および $(\overline{u^2})^{1/2}$ 鉛直分布 (8-K)

3.2 流れの可視化による突堤の後流の観察

Case 2~4 では、色素としてメチレンブルー溶液を突堤の上流側の側面付近の水面にスポイトで静かに注入し、流れの様子を天井から写真にとった。写真一2(a), (b), (c) は Case 4, 写真一3(a), (b) は Case 2, 写真一4(a), (b) は Case 3 における撮影例である。写真一2の3枚の



写真一4(a) Case 3



写真一4(b) Case 3

写真は色素の流れを数秒おきにとったもので、Case 4 における突堤の先端からのはく離うずの形や流れの変化の様子をある程度よく表わしている。ただし色素はいろいろな流れ方をするので、写真一2(b)に見られるような大きなうずがいつも生じるわけではなく、ここに示したのはその1例にすぎない。また写真一2では、突堤の先端から出た色素はかなりの幅をもって流れているが、目視観察によると、この部分には小さなうずがつつぎに形成されて流下していくのがわかる。拡大してとった Case 2 における写真一3(a)や Case 3 の写真一4(a)などにはこの種の小さなうずが少し見られる。これらのうずは、突堤の先端からのはく離流線 (Free streamline) の外側と内側とで横方向に大きなせん断力が働き、その結果生じたものである。なおこれらのうずは、流れの中におかれた垂直平板 (Splitter plate なし) の後方に形成されるカルマンうずとは本質的に異なるが、それについては後の3.5で触れる。

3.3 平均流速の分布

前にも述べたように、今回の実験における平均流速の測定は主として26mmφのプロベラ流速計を使っているが、ここでは、主としてこの流速計を使って測定した平均流速の平面分布について述べる。

図一8~図一11には Case 2~Case 5 の各点の $z=2$ cm における流速の測定結果をベクトル的に示している。前にも述べたように流速計はその枠に付けた糸のふれる平均の方向に向けて設置してあり、その方向は同時に目視でスケッチしておいてこれらの図を作成したものである。図一8~10は測定部の全範囲での流速値を表わしているが、図一11に示した Case 5 においては、突堤から離れたあまり流れが変化しない部分での測定は省略してある。図中の丸い矢印は、そこでの流れが小さいかあるいは正・逆に反転しているかしてプロベラでは測定できなかったことを示している。なお突堤の近くでは、次に示す U/U_0 の計算のため、これらの図に示した以外の点においても測定を行っているが、繁雑になるのでそれらは省略してある。これらの図から、突堤の下流側に生じる反流域の大きさやおおよそその流れの向きなどがわかる。ただ注意すべきことは、図一10に示した Case 4 の場合には $x/L=17$ の断面が図一1に示した測定部の最下流端 (断面40) に相当していることで、このためこの付近の流況には時間的に少し変動が見られた。

ここで参考のため、3mmφのプロベラ流速計で測った Case 2~Case 5 における流速の鉛直分布の例を図一

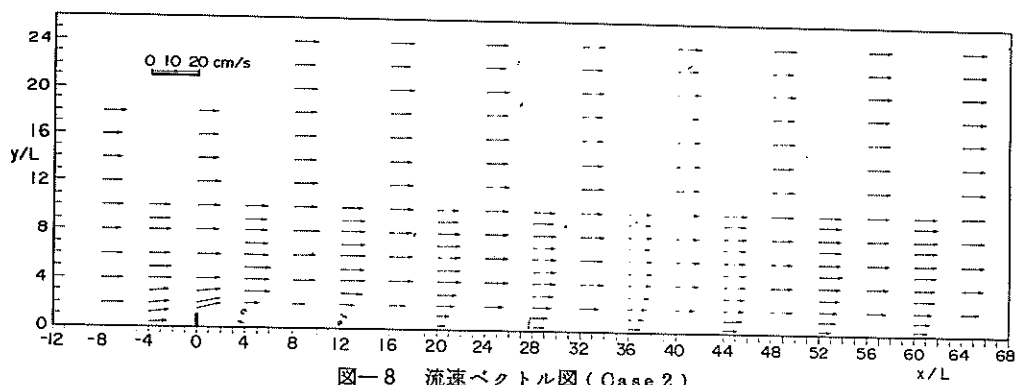


図-8 流速ベクトル図 (Case 2)

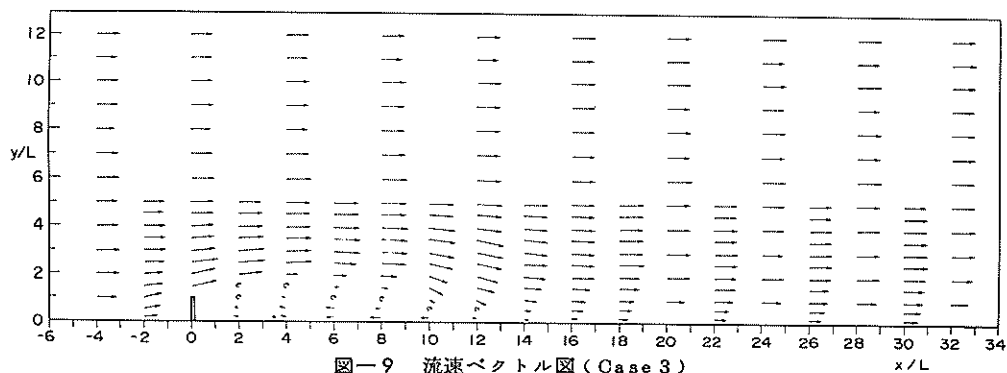


図-9 流速ベクトル図 (Case 3)

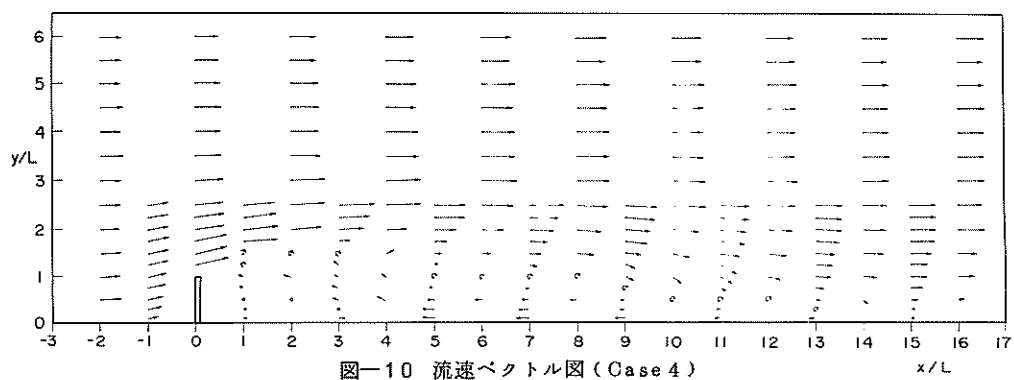


図-10 流速ベクトル図 (Case 4)

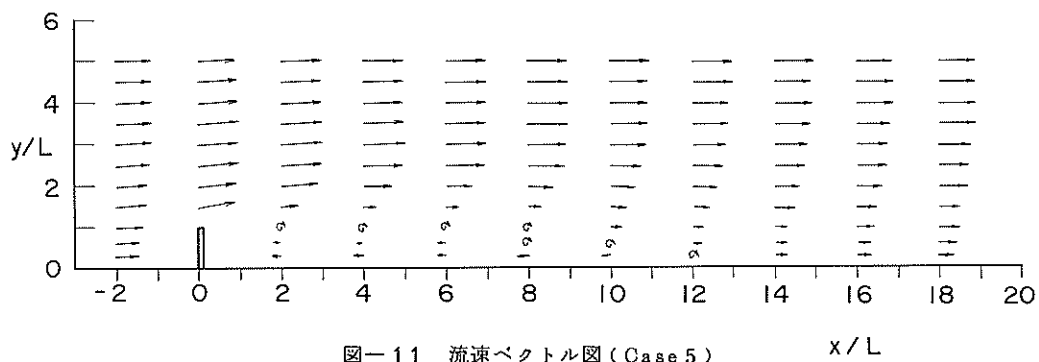
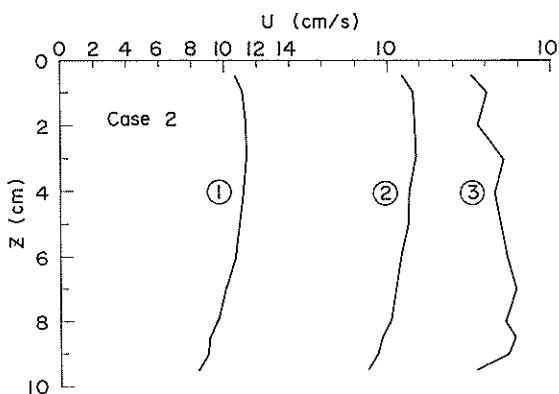
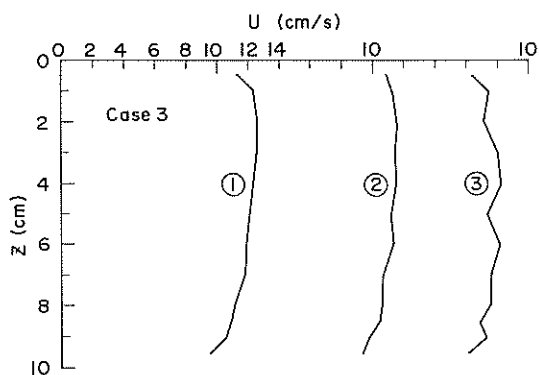


図-11 流速ベクトル図 (Case 5)

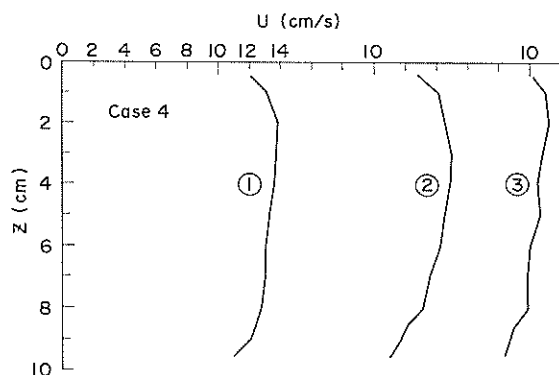
12~15に示す。これらの図にはそれぞれ対応する3点、すなわち①は $x/L=2$, $y/L=2.5$, ②は $x/L=4$, $y/L=3$ (Case 5だけは $y/L=3.5$), ③は $x/L=8$, $y/L=2$ の各点における鉛直分布を示しており、②と③については横座標をそれぞれ10 cm/s づつ右へずらしてかいてある。図一12~15の鉛直分布をみると、各ケースとも①と②の点については流速の値は突異のない



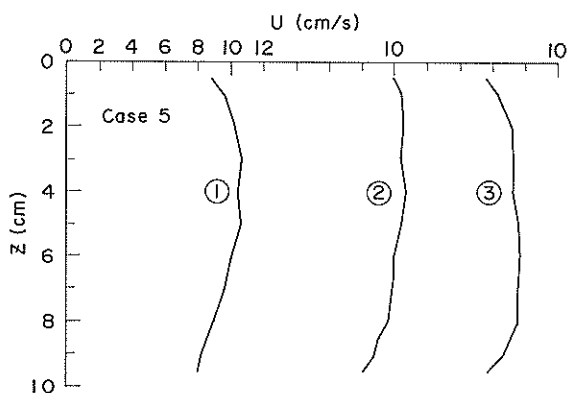
図一12 流速 U の鉛直分布 (Case 2)



図一13 流速 U の鉛直分布 (Case 3)



図一14 流速 U の鉛直分布 (Case 4)



図一15 流速 U の鉛直分布 (Case 5)

Case 1の場合(図一7参照)より大きい, その分布形はあまり変わらない。これに対し③の点では鉛直方向の平均流速は他の2点より小さくなるが, 底面近くでの流速値は相対的にやや増加の傾向を示している。これは突堤から出た乱れの影響, すなわち横方向の混合作用を受けた結果と考えられ, これと似た現象は深い水深をもつ急潮流の海峡での流れの模型実験においても見出されている⁹⁾。なお③での乱れが①や②よりはるかに大きいことは, 後の図一20~23の結果からもよくわかる。

次に突堤の長さ, すなわち模型ひずみを変えた各ケースにおける流れのパターンを比較するため, 各ケースごとに, 各点の流速値 $U(x, y)$ とCase 1の同じ点の流速値 $U_0(x, y)$ との比 U/U_0 を計算した。図一16~19には各ケースにおける U/U_0 の平面分布のContour lineを示している。これらの図からケースごとの流速の平面分布を比較しようとするとき, まず目につくことは, $L=50$ cmのCase 2(図一18)において U/U_0 が部分的に1.6程度まで大きくなることである。一方, 突堤の長さがより短いCase 3やCase 2では高だか $U/U_0 \approx 1.3$ にしかならず, もっとも短いCase 5では最大でも $U/U_0 \approx 1.19$ 程度にすぎない。このように実験ケース間で U/U_0 の最大値にやや違いがでた理由については, 今回の実験データだけでは断定できないが, これは模型ひずみの違いが原因であるというよりも, むしろ風洞実験におけるBlockage effectと同様に側壁の影響によるのではないかと推定される。この推論は, 図一18の $U/U_0 \leq 1.0$ の範囲のContourが図一16や図一17と比べて岸側へ押しつけられたような形をしていることから支持される。Case 4を除いた他の3ケースのContourを比較すると, $U/U_0 > 1.0$ の部分を除いてあまり差は見られない。

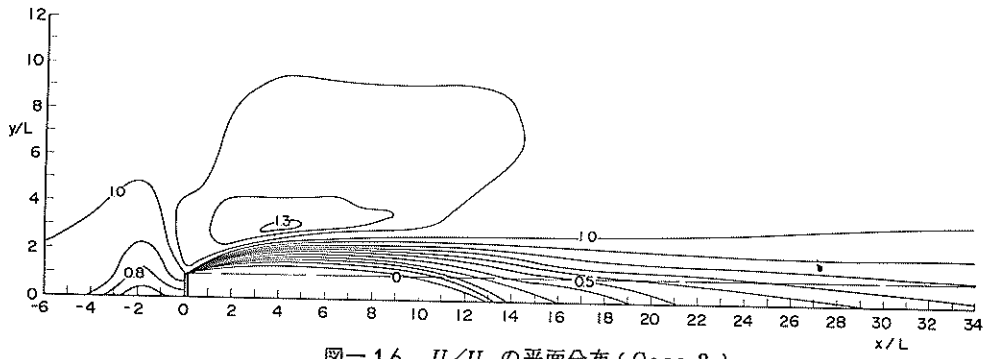


図-16 U/U_0 の平面分布 (Case 2)

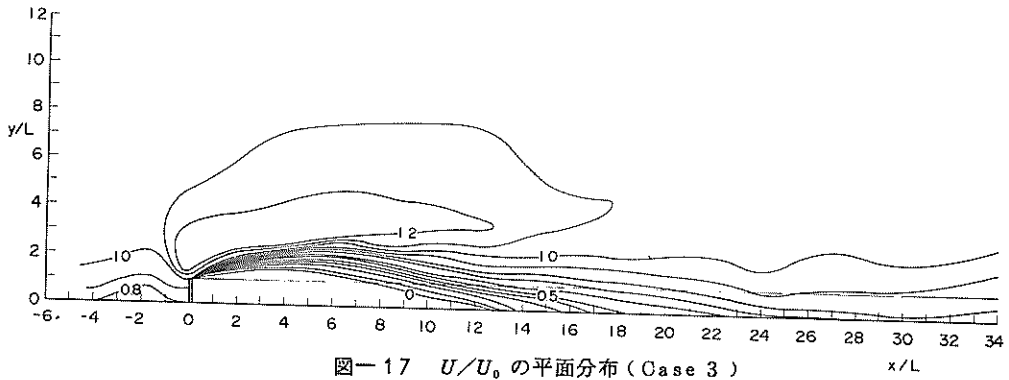


図-17 U/U_0 の平面分布 (Case 3)

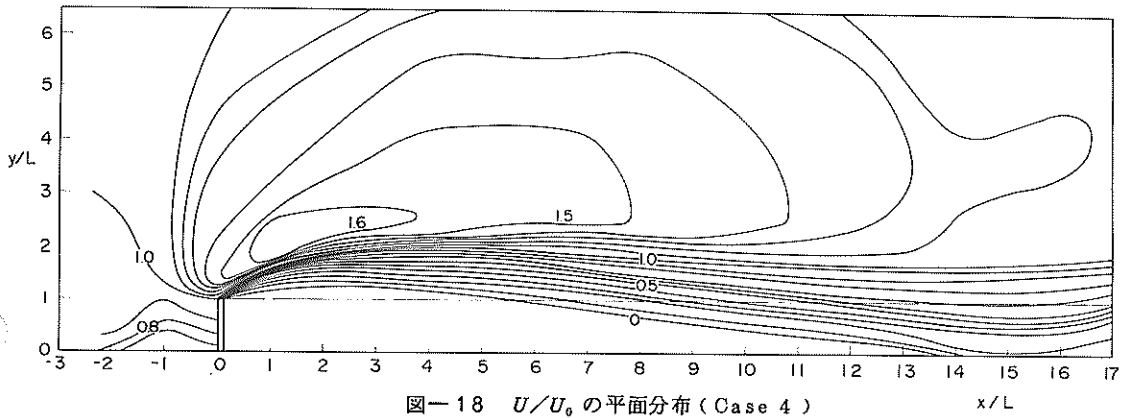


図-18 U/U_0 の平面分布 (Case 4)

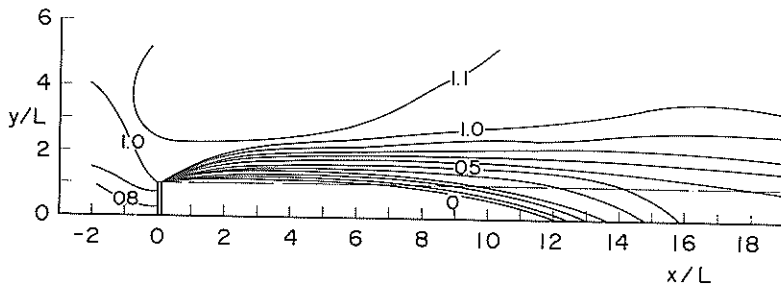


図-19 U/U_0 の平面分布 (Case 5)

表一 2 突堤の後流域の広さを表わす各種の代表長

Case	L (cm)	x_b/L	$x_{0.5}/L$	x_f/L
5	5.0	1.2.2	1.4.3	(7.0)
2	12.5	1.3.4	1.6.0	9.5
3	25	1.3.5	1.2.5	7.6
4	50	1.4.0	1.1.3	5.4

突堤の後方での反流域の大きさを表わすため、岸 ($y = 0$) での再付着点までの距離 x_b を色素を流して調べてみると表一 2 の第 1 欄のようであった。また岸から突堤の長さだけ離れた位置 ($y = L$) で $U/U_0 = 0.5$ および $U/U_0 = 0$ となる突堤からの距離を $x_{0.5}$ および x_f と定義し、これらの値を図一 16~19 から読取ると表一 2 の第 2, 3 欄のようになる。ただし、図一 16~19 における $U/U_0 = 0$ の Contour はあまり正確ではないので、 x_f の値は一応の参考データとしておく。

表一 2 の結果をみると、Case 5 の $x_{0.5}$ および x_f が他のケースでの傾向とやや異なる値を示すが、全体として眺めると、 $x_{0.5}/L$ と x_f/L は突堤の長さ L と共に小さくなる傾向があるのに対し、 x_b/L は逆に L と共にやや大きくなる傾向を示している。

ところで河岸から直角に出した長さ L の非越流型不透過水制について、秋草ほか²⁾ は理論と実験の結果から $x_b/L \doteq 1.4.5$ になるとしている。これに対し細井ほか³⁾ による幅 70 cm の水路で $L = 15, 25$ cm とした実験および理論では、それぞれ $x_b/L \doteq 1.3.5, 1.0.5$ と L と共に x_b/L が減少するという結果がえられており、この傾向は表一 2 の x_b/L とは逆になっている。

一方、従来風洞で行われている高さ h の垂直平板後方の風の実験において見い出されている再付着点までの距離 x_b は、Arie & Rouse⁵⁾ による一様風速分布の場合⁴⁾ には $x_b/h \doteq 1.6.8$ と今回の結果より少し大きい、Good & Joubert⁷⁾ による乱流境界層の中におかれた垂直平板の実験では $x_b/h \doteq 1.3.3$ と今回と近い値がえられている。この 2 つの風洞実験における x_b の値の差が、平板前面での風速分布の違いにもとづいているものと考え、今回の実験で突堤の長さ L と共に x_b/L が増加する傾向にあるのは説明できる。今回の Case 4 の条件は、突堤の長さが 3.1 で述べた側壁上の境界層の厚さよりはるかに大きいので、自由表面と底面の影響を無視すると Arie & Rouse⁵⁾ の実験条件にかなり近いと考えられるが、Case 4 の $x_b/L = 1.4.0$ という結果は Arie

& Rouse の値に比べて 20% も小さい。このことから判断すると、Case 4 の x_b/L の値は側壁の影響のため少し小さくなっているものと考えられ、このことは上に述べた細井ほか³⁾ による水制の実験結果からも支持される。すなわち、側壁の影響が入らないようにもっと幅の大きい水槽で実験を行った場合には、 $L = 50$ cm の Case 4 における x_b/L の値はもっと大きくなることが予測される。一方、その場合でも Case 5 における x_b/L の値は変化しないはずのものであるから、 x_b/L の値は突堤の長さ、すなわち模型歪みの違いにより、表一 2 に見られるよりもっと変化すると考えられる。

突堤後方のはく離うずの大きさは、流れの場の乱れが大きいほど (運動量の拡散が大きいので) 小さくなるはずであり、これが上に述べた 2 つの風洞実験での結果の違いの大きな原因と考えられるが、今回の実験で突堤の長さが短いほど x_b/L の値が小さくて根本的な原因としては、次節に述べるように模型のスケールが小さくなくても、それほど乱流強度は小さくならないことがあげられる。

3.4 突堤の後流における乱れの特性

今回の実験では、2.3 で述べたように流速の変動成分を 3mmφ の超小型プロベラ流速計を使って測定してみた。この流速計はほぼ 1.0 Hz より高い周波数成分に対しては応答性が急に低下するので、えられた乱れの測定値は近似的なものである。しかし後で示す流速変動のスペクトル (図一 29~32 参照) からわかるように、突堤の影響によって生じる乱れは、1.0 Hz よりはるかに低い周波数領域で卓越しており、したがって今回の方法で測定した突堤の後流における流速の乱れ成分 ($\overline{u'^2}$)^{1/2} の値の近似度はかなり良いものと考えられる。

図一 20~23 に、各ケースのそれぞれ対応する $x/L = 2, 6$ および 10 の 3 断面において $x = 2$ cm で測定した流速変動成分 ($\overline{u'^2}$)^{1/2} および同時に計算された平均流速 U の幅方向の分布を示す。これらの図から、一般に突堤の後流において乱れ ($\overline{u'^2}$)^{1/2} が最大になる点は、流速 U が最大になる位置より岸側にずれることがわかる。また突堤に近い断面では突堤の先端より少し沖側のごく狭い範囲で乱れは大きな値をもつが、 x が増大するに伴ってその位置は沖側へずれ、乱れの大きい範囲は広がるのがわかる。ただ $x/L = 1.0$ の断面で乱れが最大になる点は、 $x/L = 6$ の断面に比べて少し岸側に戻っている。

図一 20~23 からケースごとの乱れの分布を比較することができるが、もっとわかりやすいように、 $x/L = 2,$

*) これは風洞の中央部に長さ $2h$ の平板を風に直角におき、その中央の風下側に Splitter plate を固定して、上下対称の条件で実験を行ったものである。

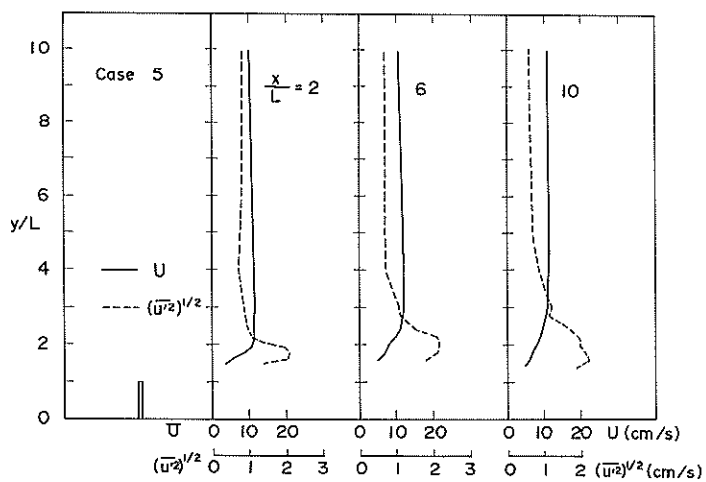


図-20 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ と U の幅方向分布 (Case 5)

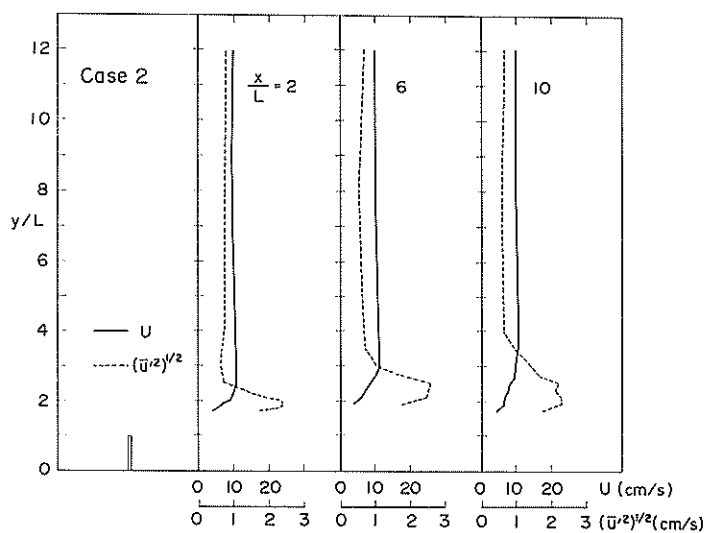


図-21 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ と U の幅方向分布 (Case 2)

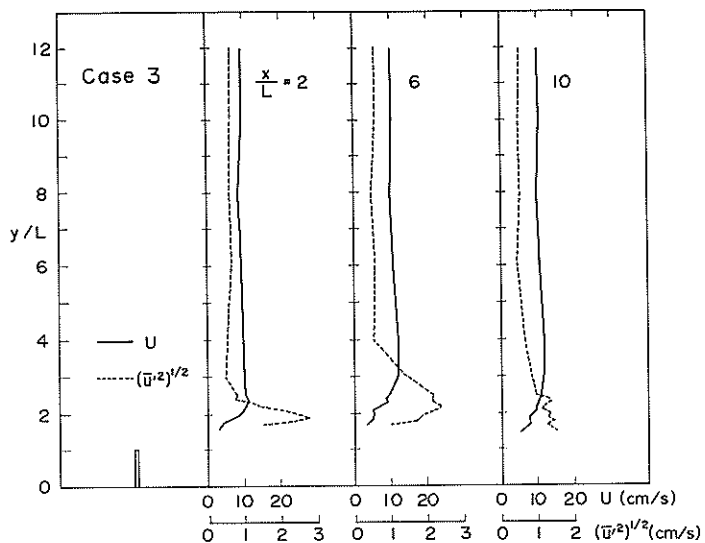


図-22 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ と U の幅方向分布 (Case 3)

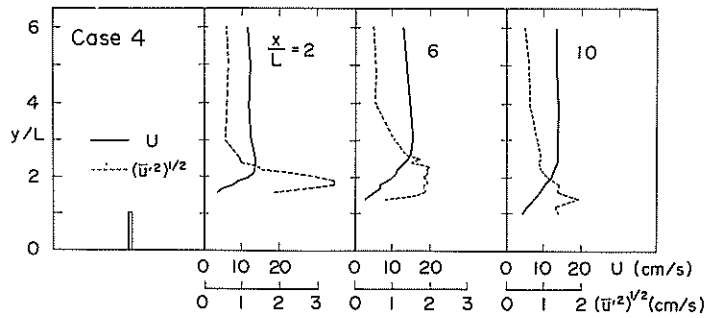


図-23 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ と U の幅方向分布 (Case 4)

6, 10 の各断面ごとに、乱れが大きい $y/L=1\sim4$ の範囲について全ケースの $(\bar{w}^2)^{1/2}$ の分布をまとめて示すと図-24~26 のようになる。これらの図から、 $x/L=2.0$ の断面では L の大きいケースほど $(\bar{w}^2)^{1/2}$ の最大値も大きい、 x の増加と共にその傾向はくずれ、 $x/L=6.0$ および $x/L=10.0$ においては Case 2 が全体的にみて一番大きな乱れを持つようになることがわかる。この乱れについても Case 2~4 が系統的な変化を示すのに対し、Case 5 だけが少し違った傾向を示している。その理由は明らかではないが、1つの可能な説明として、

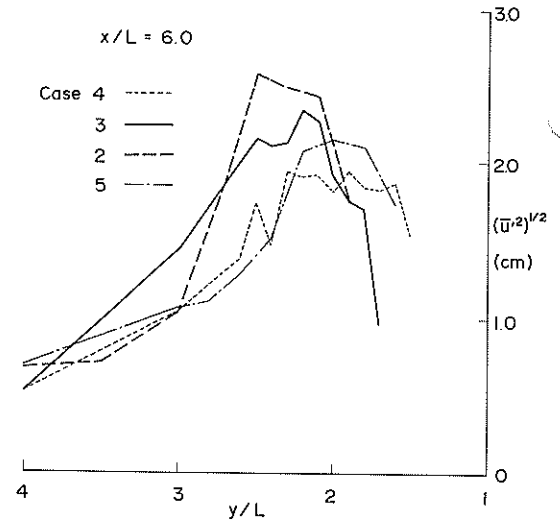


図-25 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ 分布の比較 ($x/L=6.0$)

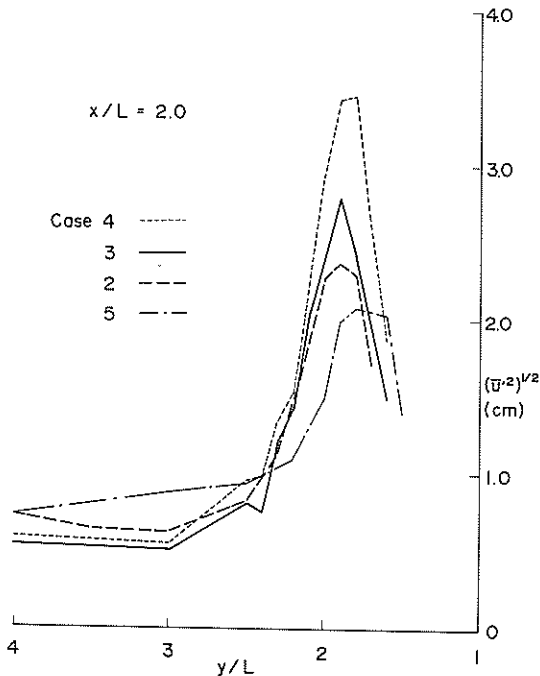


図-24 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ 分布の比較 ($x/L=2.0$)

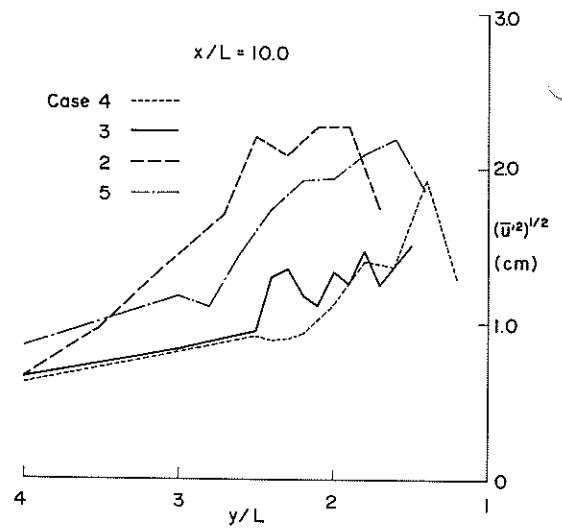
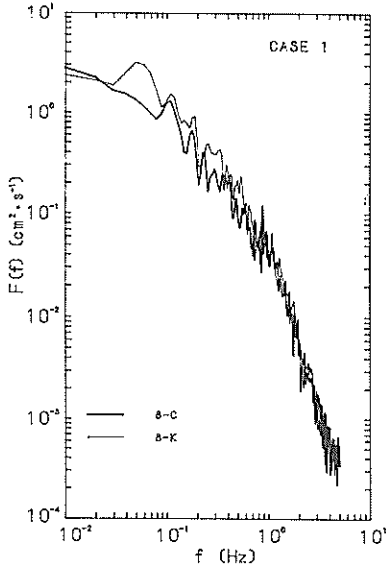
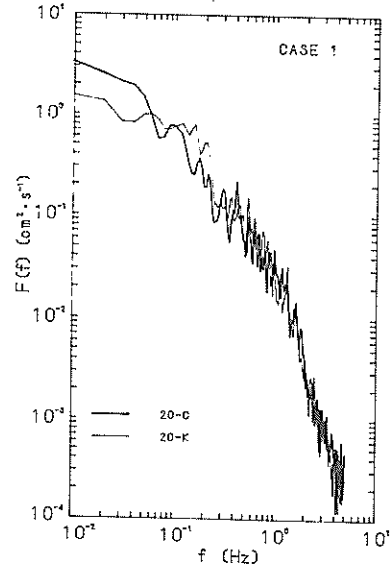


図-26 $(\bar{w}^2)^{1/2}$ 分布の比較 ($x/L=10.0$)



図一27 w' のスペクトル (Case 1, 断面 8)



図一28 w' のスペクトル (Case 1, 断面 20)

L がもっとも短い Case 5 における突堤の後流は、側壁上の境界層の影響を強く受けているのではないかと考えられる。

なお、乱れの測定時には、流速計の出力電圧はペンレコーダーにも同時に書かせ、乱れの場所的な変化とプロペラの回転をモニターした。これにより、各断面ごとに不規則な乱れが一番強いと思われた(各ケースに共通の)代表点を 1 点えらび、そこではデータを通常の 2 倍(6 分 40 秒)だけとって次に示すように乱れのスペクトルを計算したが、実際の $(\overline{w'^2})^{1/2}$ の計算値は、その点より少し岸側で最大値を示した。参考のために、検定曲線を使って計算された Case 4 の主要な点における流速記録を後の付録に示す。ただしこの場合、流速計の特性としてほぼ 3 cm/s 以下の値はあまり正しくはなく、また検定曲線は図一3 のものとは違っていたが、アンプ出力は一定電圧だけかさ上げされていて、流速値がほぼ 1.6 cm/s 以下にはならない構造になっていた。

次に流速のワースペクトルによって乱れの性質を調べてみる。まず最初に Case 1 についての測定例で、図一27 には $x = 0.5\text{m}$ の断面における $y = 0.5\text{m}$ と 2.5m の 2 点(8-K と 8-C)でのスペクトル、図一28 には $x = 3.5\text{m}$ の 2 点(20-K と 20-C)におけるスペクトルを示す。このように Case 1 では、幅方向でスペクトルの相違はほとんどなく、 $x = 3.5\text{m}$ でのスペクトルの方が $x = 0.5\text{m}$ のものよりやや全体的にややスペクトル密度が減少するが、それほどの差は生じない。

図一29~32 には Case 2~5 の各ケースにおいて測定した、 $x/L = 2, 6, 10$ の各断面における代表点、および $x/L = 2$ の断面の 0 点 ($y = 2.5\text{m}$) の合計 4 点でのスペクトルを示す。これらの図で $x/L = 2$ の 0 点におけるスペクトルは Case 1 のものにほとんど近いので比較のために入れたものである。これらの図から、突堤の影響で生じる乱れは 1.0 Hz よりもかなり低い周波数領域で卓越しており、各ケースにおいて x の増加と共に $\overline{w'^2}$ が減少するときは一般に高い周波数成分 ($f < 1.0\text{Hz}$ であるが) ほど早く減衰することがわかる。

次に図一29~32 のスペクトルについて、各断面ごとに全ケースの結果をまとめて示したのが図一33~35 である。図一31 は $x/L = y/L = 2.0$ の点についてのスペクトルであるが、ほぼ 0.2~0.3 Hz より下のごく低い周波数成分のパワーは突堤の長さ L が長いほど大きく、これは $\overline{w'^2}$ の値の大きさとも対応していることがわかる。図一34 は $x/L = 6.0$, $y/L = 2.5$ (Case 5 だけは 2.6) の点について比較したものである。この点については図中にも示してあるように $\overline{w'^2}$ の大きさが Case 2 > Case 3 > Case 4 と突堤の長さとは逆の順になっているが、図一34 からこの $\overline{w'^2}$ の値の違いが低周波数部分のスペクトル密度の差に対応していることがわかる。図一35 は $x/L = 10.0$ の断面についての結果で、 y/L の値は図中に示したように少しケースごとの差があるが、この断面についても前図の $x/L = 6.0$ の場合について述べた傾向がさらに顕著に現われていることは間違いのない。

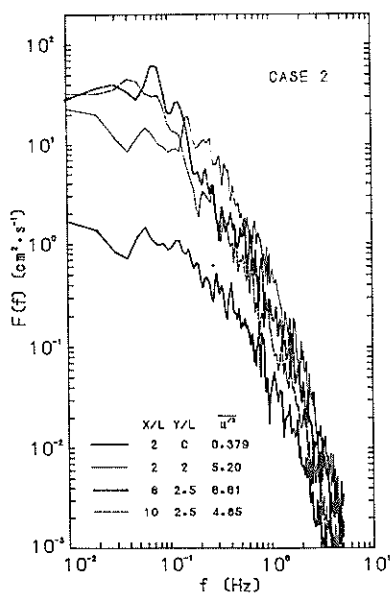


図-29 u' のスペクトル (Case 2)

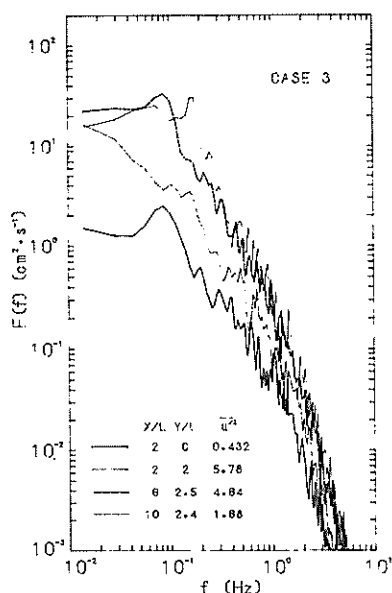


図-30 u' のスペクトル (Case 3)

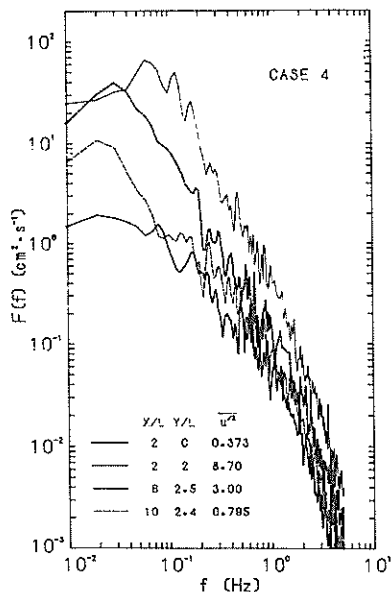


図-31 u' のスペクトル (Case 4)

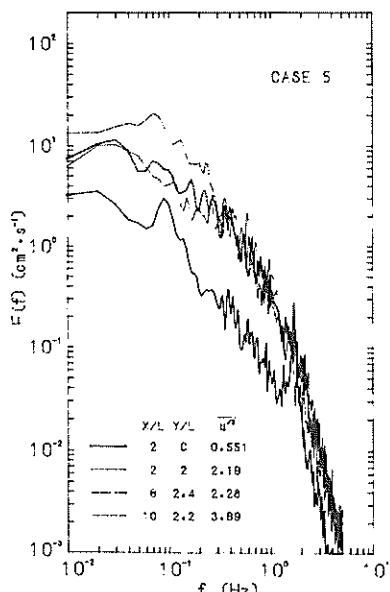


図-32 u' のスペクトル (Case 5)

今回の突堤下流の乱れの場合に、通常の一様な乱流場に対する理論が適用できるかどうか疑問ではあるが、上に述べた乱れのスペクトルの測定点について計算したオイラー流の時間スケール T_E 、オイラー流の拡散係数 K_{Ez} などを参考のために表-3に示す。 T_E と K_{Ez} は次式により求めている。

$$T_E = \int_0^\infty R_{u_E}(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K_{Ez} = \overline{w^2} \int_0^\infty R_{u_E}(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし $R_{u_E}(\tau)$ は1点における流速変動の自己相関係数であり、その積分値は $R_{u_E} = 0$ になるところまでで求めている。G.I. Taylor による本来の拡散係数 K_z は

$$K_z = \overline{w^2} \int_0^\infty R_{u_L}(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (6)$$

で定義され、ここに w_L 、 R_{u_L} は1つの粒子の運動に伴ったラグランジュ流の流速変動値とその自己相関係数である(たとえば日野¹⁰⁾参照)。一様な乱れの場合に関しては $R_{u_E}(\tau)$ と $R_{u_L}(\tau)$ の間には相似の関係が見い出されている。¹¹⁾この場合の空間スケールと時間スケールの比

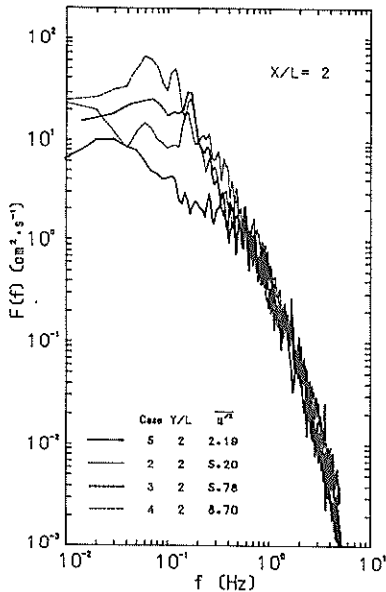


図-33 w' のスペクトル ($x/L=2.0$)

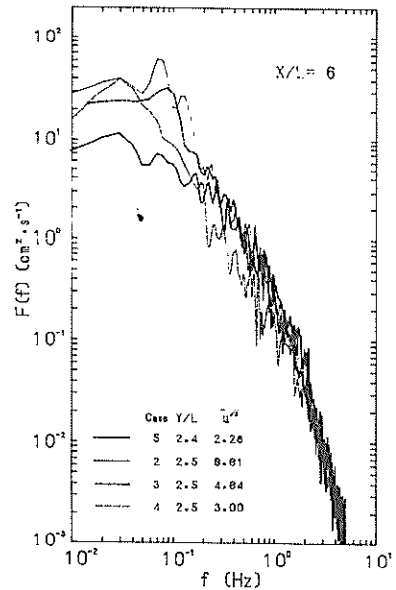


図-34 w' のスペクトル ($x/L=6.0$)

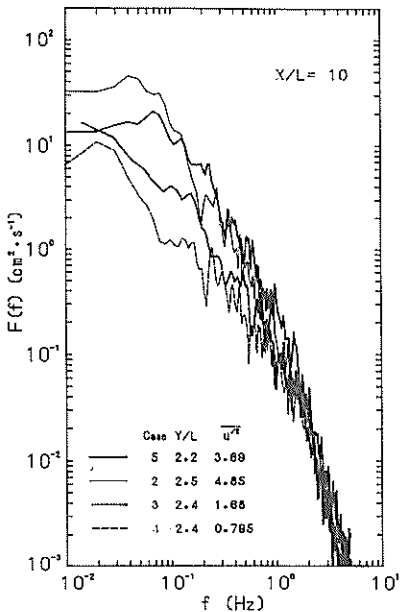


図-35 w' のスペクトル ($x/L=10.0$)

β がわかれば、本来の拡散係数 K_x はオイラー流の拡散係数 K_{Ez} から

$$K_x = \beta K_{Ez} \quad \dots\dots\dots (7)$$

によって求められる。 β についてもいろいろな研究があるが(村上・亀山¹²⁾参照)、今回の実験の場合における β の値の推定はむづかしいので、本資料においては K_{Ez} の値を示すにとどめる。

表-3 に示した L_E は

$$L_E = U \cdot T_E \quad \dots\dots\dots (8)$$

の関係を使って求めた長さのスケールであり、右端の欄に突堤の長さで無次元化した相対的な長さのスケールを示している。ラグランジエ的な長さのスケール L_L は

$$L_L = \beta L_E \quad \dots\dots\dots (9)$$

であるから、 β の値が明らかでない限り各ケースでの乱れのスケールや拡散係数の厳密な比較はできない。しかし各ケースで β の値があまり変わらないものと仮定すると、Case 5 や Case 2 での相対的な拡散係数 K_{Ez}/L や相対的な長さのスケール L_E/L は Case 3, 4 に比べてかなり大きいことがわかる。

以上述べてきた乱れの特性についての結果をまとめると、突堤の後流域の乱れの性質は模型をひずませるとかなり変化し、ひずみが多いほど突堤後方の乱れは強調された形で現われる傾向があるといえる。この模型ひずみの影響は、後流域での乱流拡散の実験などの場合、さらに大きな問題となることが予想される。

3.5 参考データ

これまでは $z = 2$ cm の深さについての測定結果だけについて述べてきたが、実験結果に及ぼす測定水深の影響を調べるために、ここでは 3mm ϕ の流速計による $z = 2$ cm と $z = 6$ cm の水深での若干の測定結果を比較してみる。図-36~40 には Case 2 における $x/L = 2, 6, 10, 30, 50$ の各断面における壁の近くでの幅方向の流速および乱れの分布を示している。大まかに見て $z =$

表-3 各ケースの乱れの特徴値

Case	Run No.	x/L	y/L	U (cm/s)	$\overline{w^2}$ (cm ² /s ²)	T_E (s)	K_{Ex} (cm ² /s)	L_E (cm)	L_E/L
5	Y0221	2	(C)	10.43	0.551	1.26	0.699	13.2	2.64
	Y0232	2	2	10.65	2.19	0.975	2.13	10.4	2.07
	Y0251	6	2.4	10.63	2.28	0.993	2.26	10.6	2.11
	Y0268	10	2.2	8.62	3.69	1.07	3.97	9.28	1.85
2	Y0074	2	(C)	9.30	0.379	0.893	0.339	8.31	0.66
	Y0082	2	2	8.70	5.20	0.690	3.58	6.00	0.48
	Y0099	6	2.5	8.65	6.61	1.58	10.5	13.7	1.09
	Y0115	10	2.5	8.25	4.85	2.07	10.1	17.1	1.37
3	Y0023	2	(C)	9.53	0.432	1.05	0.455	10.0	0.40
	Y0033	2	2	8.69	5.78	0.959	5.54	8.33	0.33
	Y0043	6	2.5	9.73	4.64	1.53	7.12	14.9	0.59
	Y0063	10	2.4	10.59	1.68	2.55	4.28	27.0	1.08
4	Y0125	2	(C)	11.98	0.373	1.17	0.439	14.1	0.28
	Y0134	2	2	11.71	8.70	1.29	1.13	15.2	0.30
	Y0148	6	2.5	14.11	3.00	2.32	6.99	32.8	0.65
	Y0168	10	2.4	13.52	0.795	2.82	2.24	38.1	0.76
1	Y0179	(8-C)		9.20	0.351	2.03	0.714		
	Y0184	(8-K)		9.00	0.478	1.34	0.645		

註) ()の中は図-1の格子点表示による。

2 cmと $z=6$ cm の測定結果に大差はないといえるが、 $x/L=2, 6, 10$ の各断面の幅方向に流速が急激に変化しているうず領域において、ならびに $x/L=30, 50$ の断面の岸の近くにおいては、 $z=6$ cmでの流速の方が $z=2$ cmよりやや大きくなっている。これは図-12のCase 2の鉛直分布の③に見られた傾向とも似ており、横方向に大きなせん断力が働いている場合の流れの特徴のようである。

図-41は、Case 2における $x/L=2.0, 30, 50$ の3断面の側壁の近くについて、Case 1との流速の比 U/U_0 を $z=2$ cmと $z=6$ cmについて求めて比較したものであるが、それぞれの断面について、 U だけを比較した場合と大差のない結果となっている。この図の結果で興味深いのは、 $x/L=30$ および 50 の断面で、幅方向の距離と共にいったん U/U_0 の値が減少し、やがてまた増加して1.0に近づく傾向を示すことである。これは、再附着後の側壁上の横方向の境界層の性質が、通常の2次元境界層の場合と同様にはじめは側壁に接したごく狭い範囲から、 x の増加と共に y 方向にその範囲を広げながら、突堤がないときの境界層の性質に戻って行き、一方側壁から離れたところの流れは突堤の影響をあまり受

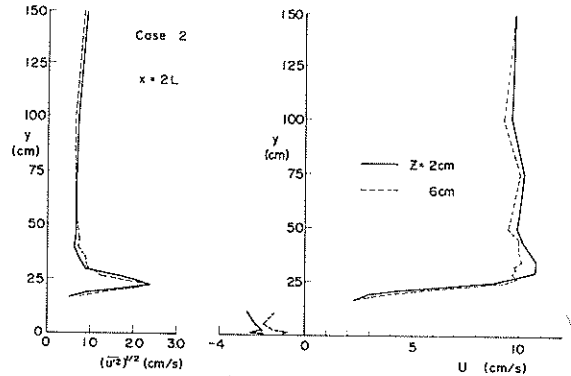


図-36 U と $(\overline{w^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 2, $x/L=2$)

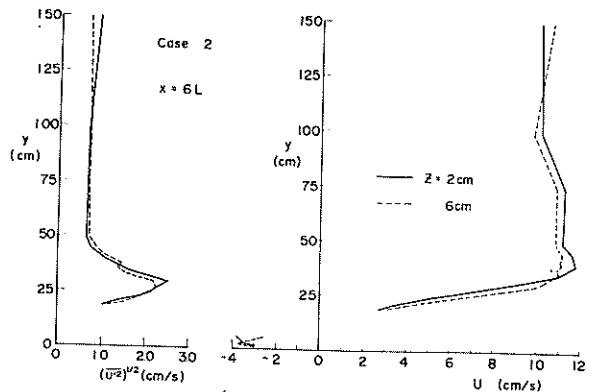


図-37 U と $(\overline{w^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 2, $x/L=6$)

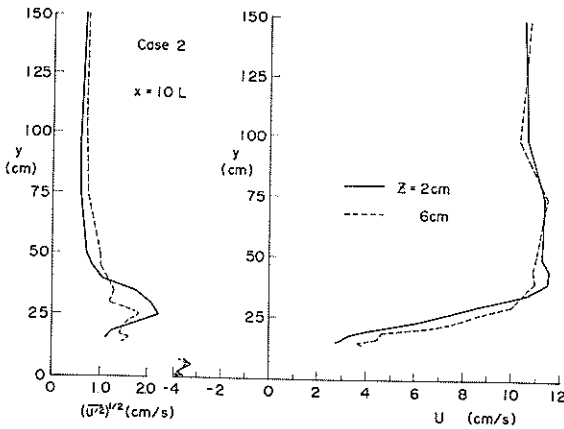


図-38 U と $(\overline{w^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 2, $x/L=10$)

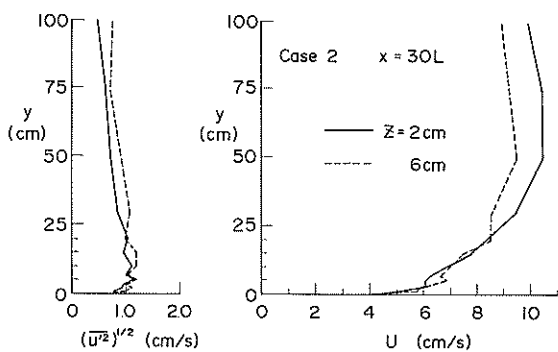


図-39 U と $(\overline{w^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 2, $x/L=30$)

けないという2つの事実を反映しているものと考えられる。

流れの中におかれた円柱や垂直平板の後方には、いわゆるカルマンうず(渦)と呼ばれる周期的なうずが生じることがよく知られている(たとえば日野¹⁰⁾参照)。今回の突堤の後流の実験は、流れの中におかれた垂直平板の下流側に Splitter plate をつけた場合にほぼ相当することが予想されたので、本実験終了後、それを確認するための簡単な実験を行った。すなわち、水深と流量は本実験と同じに保ち、測定部の $x=0$ の断面の幅方向の中央に、長さ $D=25$ cm の平板を流れに直角におき、その下流側にいろいろな長さ l の Splitter plate をつけて後流の様子を観察したが、写真-5(a)~(d)にそのときの写真を示す。Splitter plate をつけない場合には、写真-5(a)に見られるように平板の両側から交互にうずが放出され、下流にきれいなカルマンうずが形成される。Splitter plate の長さ l をしだいに長くして行くと、

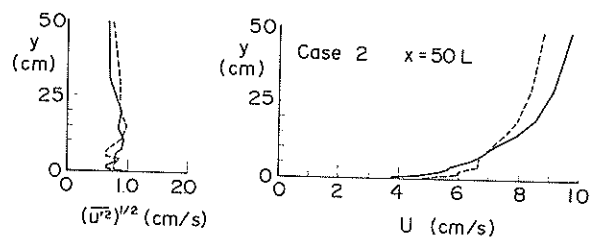


図-40 U と $(\overline{w^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 2, $x/L=50$)

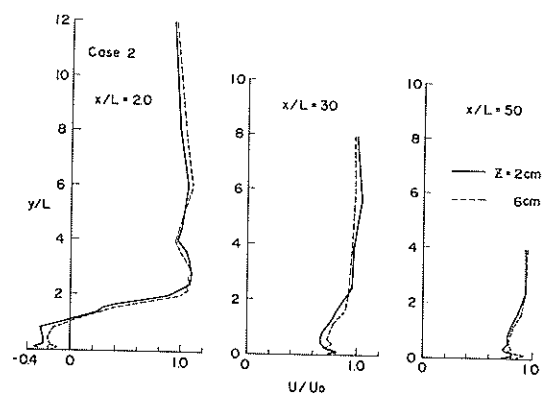


図-41 U/U_0 の幅方向分布

写真-5(b), (c), (d)からわかるように、うず相互の干渉がしだいに妨げられて(a)のようなカルマンうずは生じなくなる。写真-5(d)に見られる $l=14D$ の場合の平板の後流は、写真-3(b)に示した Case 2 の場合の後流とあまり差は見られない。なお、 $l=14D$ の場合の再付着点までの距離 x_0 を測定してみると $x_0/(D/2) \approx 1.32$ であったが、この値も表-2に示した Case 2 の結果によく一致している。

4. まとめ

突堤の潮流制御効果とそれに及ぼす模型ひずみの影響を調べるために、3.25m(幅)×10mの測定部をもつ小型回流平面水槽を使い、岸から1本だけ出した突堤の長さを、模型ひずみの変化に対応するよう $L=50, 25, 12.5, 5$ cm と変化させた実験を行い、その後流域での平均流速と乱れの平面分布を、大・小2つのプロベラ流速計を使って測定した。今回の実験結果から明らかになった主要な点をまとめるとほぼ次のとおりである。

- (1) 各ケースごとに $z=2$ cm で U/U_0 (U_0 : 突堤なしでの流速) の平面分布を比較したところ、 $L=50$ cm のケースでの U/U_0 の Contour は他の L の短い

ケースとは少し違っており、突堤の下流・沖側に U/U_0 が 1.6 以上にもなる領域が生じた。これは、この場合、側壁による Blockage 効果がかかなりあるためではないかと推測されるが、この点については今後さらに確認する必要がある。

- (2) $L = 2.5, 12.5, 5.0$ cm の 3 ケースでの流れのパターンはかなり類似しており、この範囲では模型ひずみの影響はあまり認められなかった。
- (3) 突堤後方のはく離領域（反流域）の大きさを再付着点までの距離 x_b で表わすと、 x_b/L の値は $L = 5.0$ cm のケースでの $x_b/L \approx 1.22$ から、 $L = 5.0$ cm のケースでの $x_b/L \approx 1.40$ まで L と共に増加の傾向を示した。側壁の影響の入らないもっと理想的な条件の下ではこの差はさらに大きくなるものと推定される。すなわち模型ひずみが大きいほど x_b/L の値は小さくする傾向のあることがわかる。
- (4) 突堤の後流域において乱れが最大になる点は、流速 U が最大になる点より岸側にずれる。また突堤の先端部のすぐ下流では自由流線付近の比較的狭い範囲に乱れが集中するが、下流に行くほどその範囲は拡がり、かつ乱流強度は減少する。
- (5) $x/L = 2, 6, 10$ の 3 断面で各ケースの乱流強度、乱れのスペクトルやオイラー流の乱れのスケールなどを調べた結果、突堤の後流域における相対的には等しい点での乱れの性質は、模型をひずませるとかなり変化し、ひずみが大きいほど $x/L = 6$ および 10 の断面での乱れは強調されて現われる傾向が認められた。

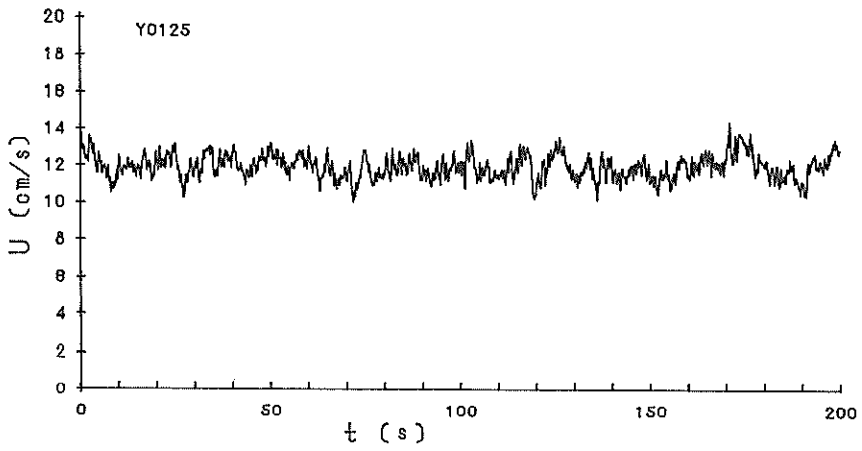
今回の実験は限られた時間の範囲でしかできなかったもので、実験の途中で気がついた側壁の Blockage 効果についても十分に調べることができなかった。また今回の乱れの測定結果も、時間的な余裕と流速計の精度の面から必ずしも十分なものではなく、乱れの方向性についての性質はまったくは握できず、また模型ひずみと乱れの特性値との関係も十分には解明できなかった。これらの点については、今後さらに調べる必要がある。

最後に、実験データの整理に協力して頂いた池田高則、一戸秀久の両技官に深謝の意を表します。

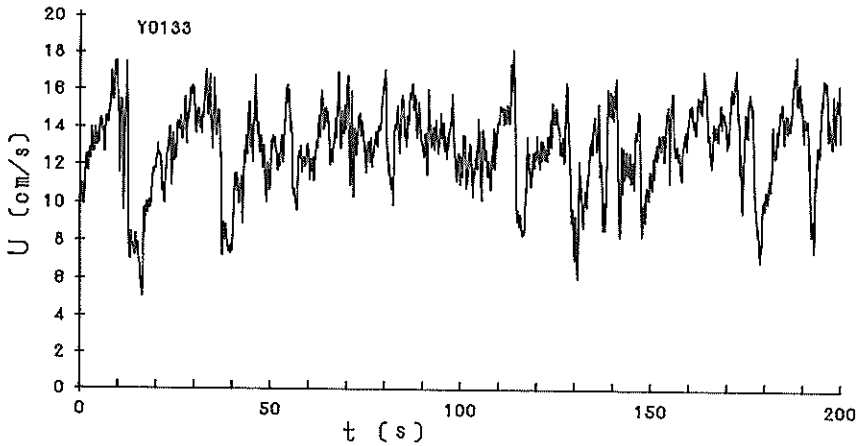
参 考 文 献

- 1) 金子安雄, 木村久雄: 松山港(高浜地区)潮流模型実験, 港湾技研資料, No. 83, 29 p., 1969.
- 2) 秋草 勲, 吉川秀夫, 坂上義次郎, 芦田和男, 土屋和彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告, 107号, 1961.
- 3) 細井正延, 杉山錦雄, 小沢克之: 水制の水理に関する研究(II), 土木学会第23回年次学術講演会講演概要, II, p. 301-304, 1968.
- 4) 土屋昭彦, 石崎勝義, 丸山幾男: 水制の水はね機能について, 土木学会第23回年次学術講演会講演概要, II, p. 309-310, 1968.
- 5) Arie, M. & Rouse, H.: Experiments on two-dimensional flow over a normal wall, J. Fluid Mech., Vol. 1, p. 129-141, 1956.
- 6) 谷 信輝: 模型防風垣の風洞実験, 農業技術研究所報告, A-6, 80 p., 1958.
- 7) Good, M. C. & Joubert, P. N.: The form drag of two-dimensional bluff-plates immersed in turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., Vol. 31, p. 547-582, 1968.
- 8) 佐藤昭二, 加藤 始, 木村久雄, 池田高則: 伊東海岸のレクリエーション海浜造成に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 318, 27 p., 1979.
- 9) 木村久雄, 宮原英治, 須藤 茂, 柴山輝彦, 浜田徳一: 来島海峡潮流模型実験(第1報), 港湾技術研究所報告, 第10巻, 第3号, p. 3-66, 1971.
- 10) 日野幹雄: 流体力学, 理工学基礎講座16, 朝倉書店, 1974.
- 11) Hay, J. S. & Pasquill, F.: Diffusion from a continuous source in relation to the spectrum and scale of turbulence, Adv. in Geophys., Vol. 6, 1959.
- 12) 村上和男, 亀山 豊: ホットフィルム流速計と超音波流速計による乱れ測定および拡散係数の算定, 港湾技研資料, No. 322, 1979.

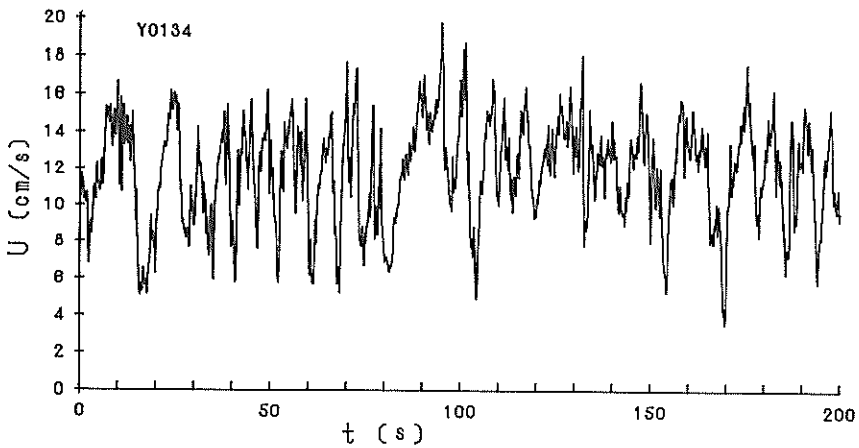
付録 Case 4 における流速計 (3.0 mm ϕ) の記録



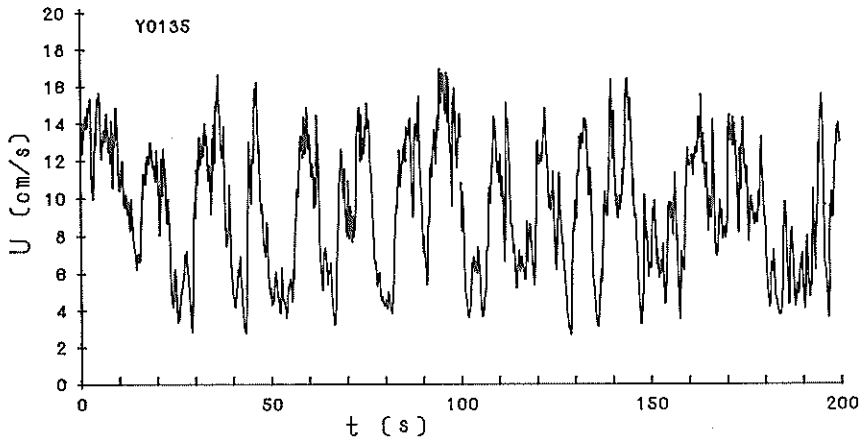
付図-1 $x/L=2.0, y/L=5.0$



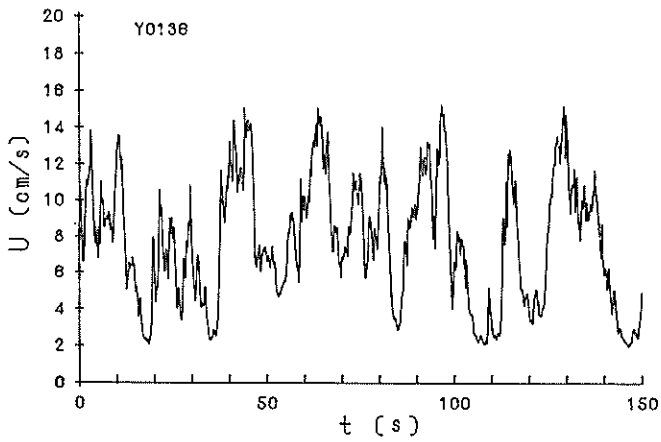
付図-2 $x/L=2.0, y/L=2.1$



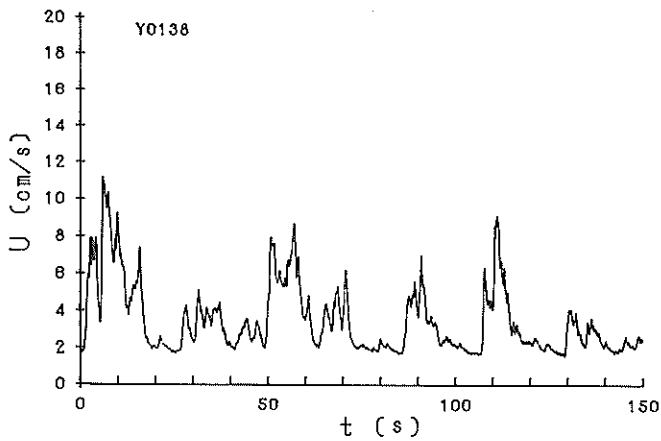
付図-3 $x/L=2.0, y/L=2.0$



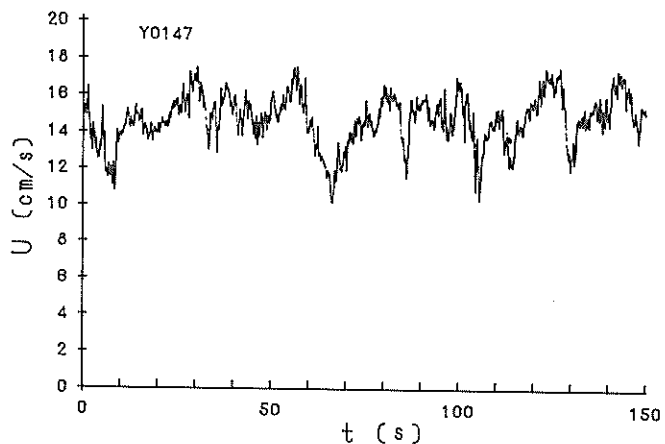
付図-4 $x/L=2.0$, $x/L=1.9$



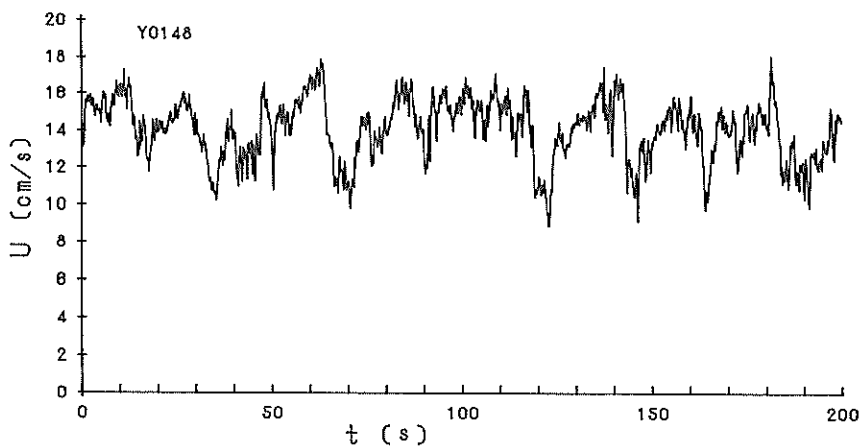
付図-5 $x/L=2.0$, $x/L=1.8$



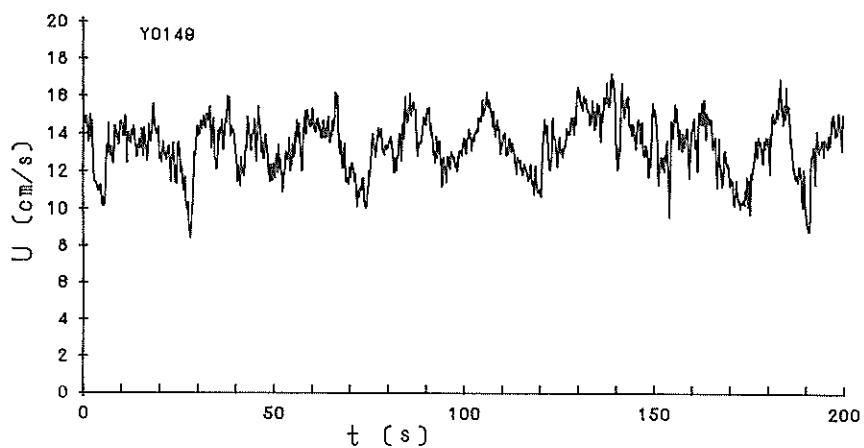
付図-6 $x/L=2.0$, $x/L=1.6$



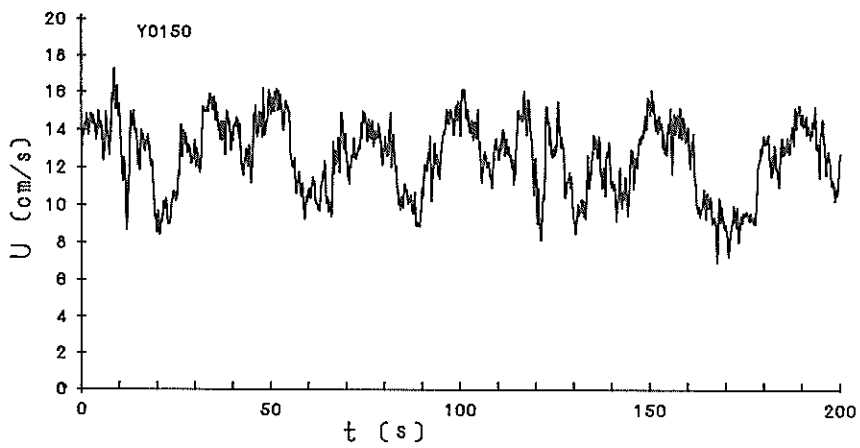
付図-7 $x/L=6.0, y/L=2.6$



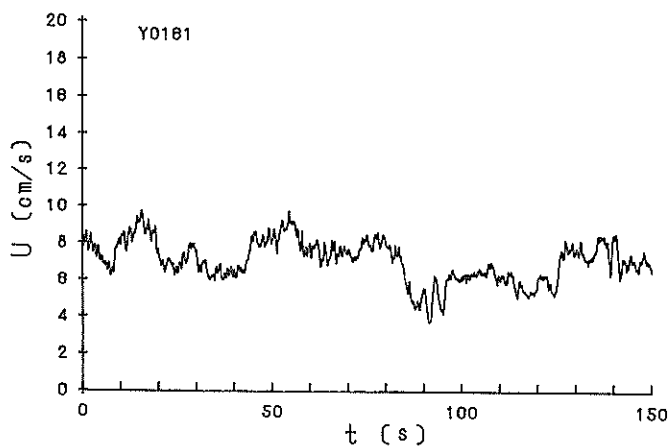
付図-8 $x/L=6.0, y/L=2.5$



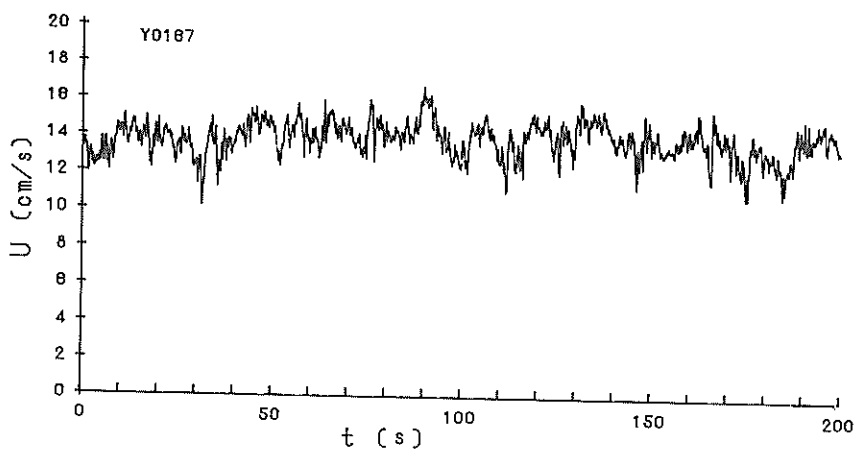
付図-9 $x/L=6.0, y/L=2.4$



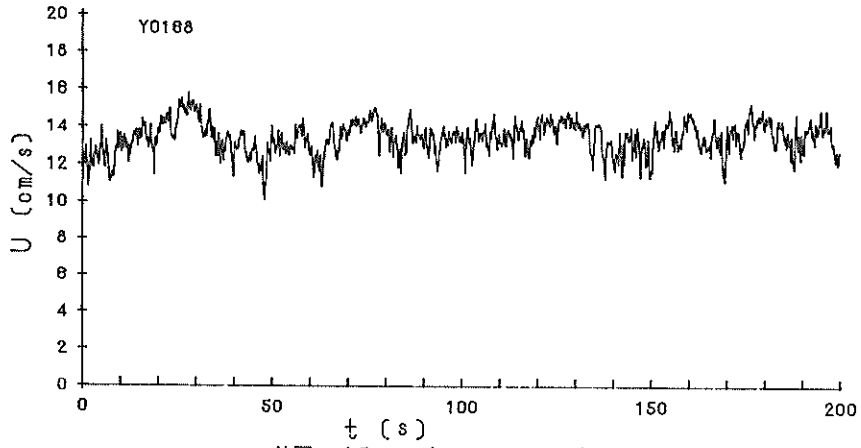
付圖-10 $x/L=6.0, y/L=2.3$



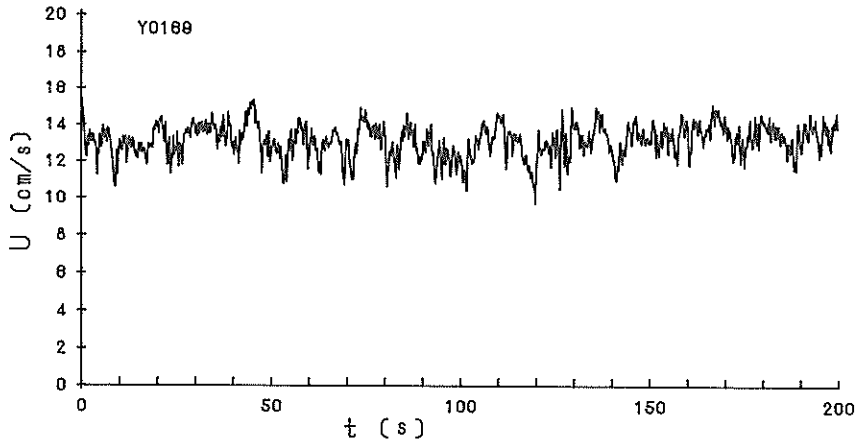
付圖-11 $x/L=6.0, y/L=0.1$ (反流域)



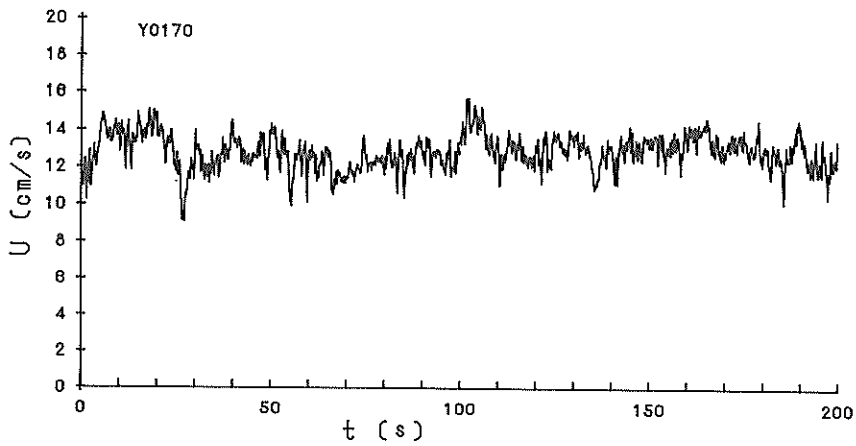
付圖-12 $x/L=10.0, y/L=2.5$



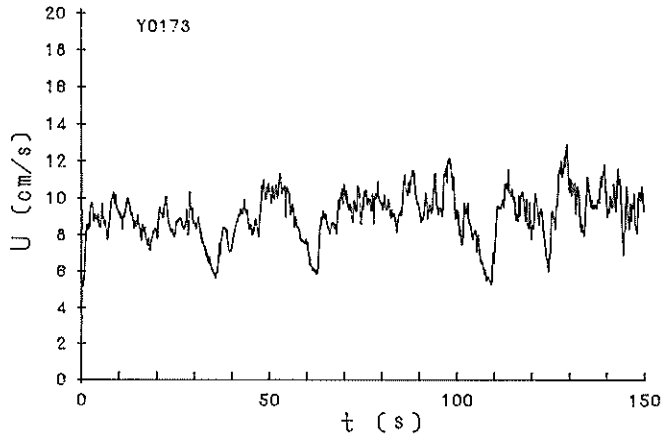
付図-13 $x/L=10.0, y/L=2.4$



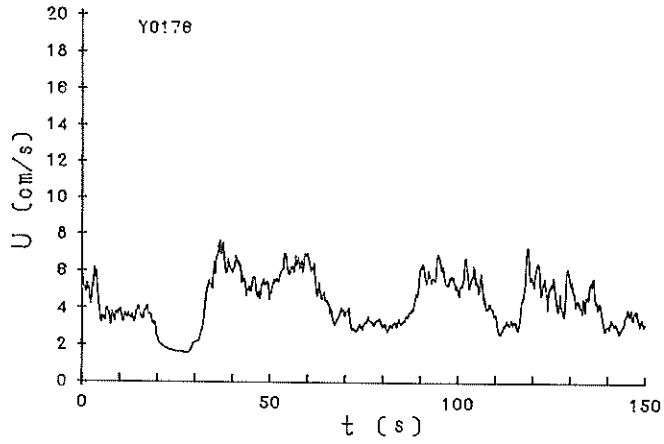
付図-14 $x/L=10.0, y/L=2.3$



付図-15 $x/L=10.0, y/L=2.2$



付図-16 $x/L=10.0$, $y/L=1.6$



付図-17 $x/L=10.0$, $y/L=1.0$

港湾技研資料 No. 349

1980・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横浜市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント