

突堤後方の流れに関する基礎実験

—模型歪みの影響の検討—

加藤 始*・木村久雄**・寺川博也**

1. 緒 言

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いが、一方、大きな潮流の生じる海域に面した港では、けい船施設などの周辺での流れを低減させる目的で突堤が設置されることがある。この場合は、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歪み模型が使われることが多く、この場合、模型の歪みが実験結果に影響を及ぼしはしないかということが、一つの大きな疑問点として残されてきている。

突堤による流れの変化と関連した問題としては、河川で使われる不透過非越流型水制の機能についての研究がこれまでいくつか行われている^{1),2)}。ただし、その場合主として研究の対象となっているのは水制先端からの自由流線の形状と下流側のはく離領域の長さで、流速分布の変化について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、これまでに行われている^{3),4)}。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突堤の後流の問題に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次元遮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が、突堤の実験における模型歪みの影響についてはほとんど何も知ることができない。

本研究は、このような背景の下に、突堤の後流の性質をくわしく調べるとともに、この種の模型実験において歪み模型を使った場合、それが実験結果にどう影響するかを明らかにするため行ったものである。

2. 実験概要

(1) 実験装置

実験は、潮汐発生装置のついた幅 5.5 m、長さ 14.5 m の平面水槽をブロック壁とベニヤ板で幅 3.25 m に仕切り、水深が一様な中央部の長さ 10 m の区間を測定部として使い、一方向の定常流によって行った。測定部の底面は白色ペイントを厚く塗って滑らかにしてあり、その高低差は主要部では ± 3 mm 以下であった。

測定部の上・下流のアプローチ部分は2段に分れて深くなり、底部にあるヘッダー管が回流ポンプに接続されている。各アプローチ部分は整流板で仕切り、上流側には越流堰を設けて幅方向の流量配分を行うとともに、水位変動防止板や金網によって流れを整流している。

(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が、模型の鉛直縮尺と水平縮尺とが異なるいわゆる歪み模型においても、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、歪み模型における流速値は歪みなし模型での流速値と同じにとられる。今回の実験は、模型歪みを変えて突堤の潮流制御効果を調べるのが目的であるから、水深と突堤の上流部における流速値を一定にし、突堤の長さ（水平縮尺）だけを変えて行った。すなわち水深は 10 cm とし、流量は突堤のない場合の測定部の断面平均流速が約 9.0 cm/s になるよう固定して全ケースの実験を行った。

実験ケースは表-1に示す通りである。Case 1 は突堤のない場合、Case 2~5 は測定部の上流端から 1.5 m の位置で水路の岸から直角に出した突堤の長さ L を表のように変えた場合であり、一応 Case 4 を歪みなし模型と想定している。突堤の模型は木製で、その幅は長さの 1/10 の寸法にとっている。

(3) 測定方法

流速の測定には2種類のプロペラ流速計を使用した。平均流速測定用の流速計は直径 26 mm、4 枚羽のプロペ

表-1 各ケースの突堤の長さ

ケース	L (cm)
1	なし
2	12.5
3	25
4	50
5	5

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部長

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

ラの外周に厚さ 0.4 mm のリングがついた形のもので、1 回転当り 20 パルスの出力がある。この流速計はその枠につけた糸の向きで流れの方向にほぼ合せておき、その出力は流速直読式カウンターで読み取った。

流速変動の測定には、直径 3 mm, 8 枚羽の小型プロペラ流速型(篠塚製作所製)を用いた。この流速計はパルス数に比例したアナログ電圧を出力するように作られており、別の水路の流れの中でホットフィルム流速計と並べて乱れに対する応答性を調べたところ、 $f=1.0\text{ Hz}$ 程度まではよく追従することが確かめられている。

この流速計のアナログ出力 E は、通常 $\Delta t=1/10.24$ 秒でデジタルレコーダー(DATAC-2000B)に記録し、 Δt ごとの E の値を電算機で流速値に変換して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その 2 倍だけとっている。

3. 実験結果とその検討

(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、 x は突堤の設置位置から水槽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 は水面から下方へ測った深さを表す。

今回の実験では、まず水槽測定部における幅方向の流速分布を一様にするため、上流側のアプローチ部分でいろいろと調整した。後で述べる各ケースごとの流速の平面分布の比較は主として $z=2\text{ cm}$ での測定値について行っており、Case 1 においても $z=2\text{ cm}$ で幅方向の流速分布を多くの断面で測定したが、どの断面においても平均値からのずれは $\pm 5\%$ 以内に入っていた。

図-1 には Case 1 における流速の鉛直分布の例として、 $3\text{ mm}\phi$ の流速計で測定した $x=y=50\text{ cm}$ の点での平均流速 U と変動成分 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の鉛直分布を示している。図-2 は同じ流速計により Case 1 の 2 つの断面において $z=2\text{ cm}$ および 6 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の差はなく、 $x=25\text{ cm}$ の断面における境界層

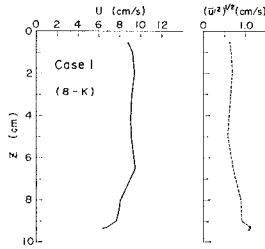


図-1 U および $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の鉛直分布

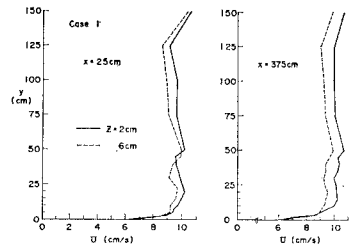


図-2 幅方向流速分布 (Case 1)

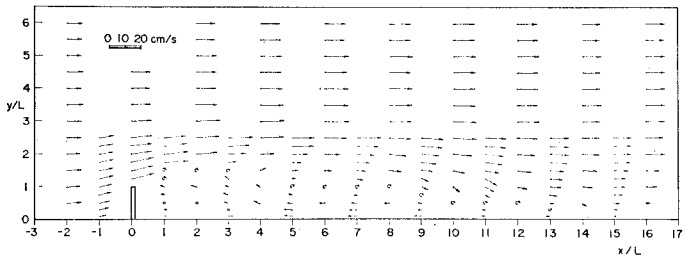


図-3 流速ベクトル図 (Case 4)

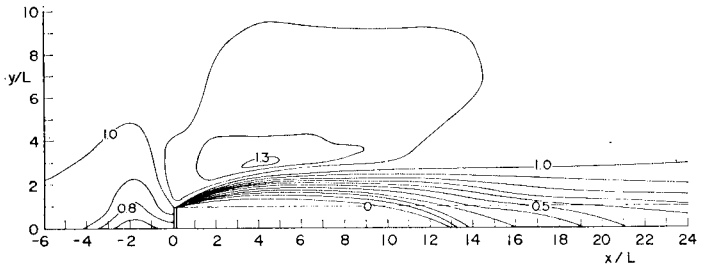


図-4 U/U_0 の平面分布 (Case 2)

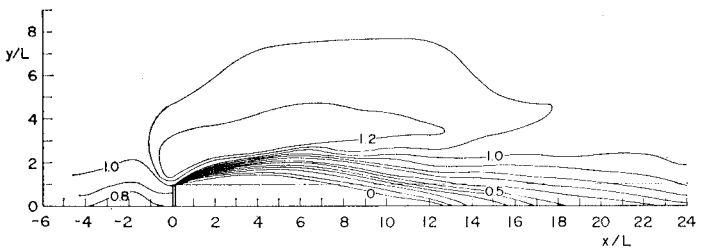


図-5 U/U_0 の平面分布 (Case 3)

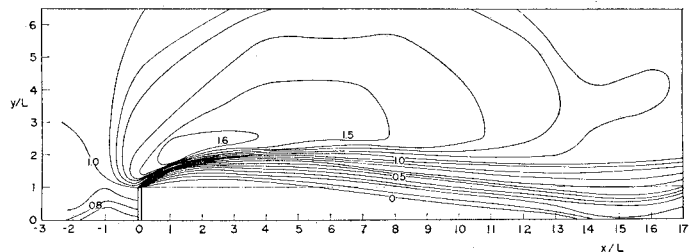


図-6 U/U_0 の平面分布 (Case 4)

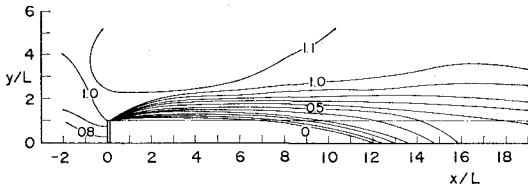


図-7 U/U_0 の平面分布 (Case 5)

の厚さはほぼ 10 cm 程度である。

(2) 突堤による流況の変化

図-3 は突堤後方の流況の例として、Case 4 の $z=2$ cm における流速 U の平面分布をベクトルの的に示したものである。次に各ケースにおける流れのパターンを比較するため、各点の $z=2$ cm での流速 U と Case 1 の同じ点の流速 U_0 との比 U/U_0 の等分布線を求めると図-4～図-7 のようになる。これらの図を比較してまず目につくことは、 $L=50$ cm の Case 4 (図-6) 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、 L のより短い 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 $U/U_0 \approx 1.2$ 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原因は、模型歪みの違いにあるのではなく、むしろ風洞実験における Blockage 効果と同様の側壁の影響によるのではないかと推定される。この推定は、図-6 の $U/U_0 \leq 1.0$ の範囲の等分布線が図-4 や図-5 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 における水槽の幅 B と突堤の長さ L との比は $B/L = 6.5$ であるが、この程度の割合で上に述べたような大きな側壁の影響がでるといことは注目すべきことである。Case 4 を除いた他の 3 ケースの等分布線を比較すると $U/U_0 > 1.0$ の部分を除いてあまり差は見られない。

突堤の後流域の大きさを比較するため、色素を流して調べた岸での再付着点までの距離 x_b と、図-4～7 から読みとった突堤の先端の位置 ($y=L$) で $U/U_0=0.5$ となる x の値 $x_{0.5}$ とを表-2 に示す。この表の結果をみると、Case 5 の $x_{0.5}$ が他のケースでの傾向とやや異なる値を示すが、全体としてみると $x_{0.5}/L$ は突堤の長さ L とともに小さくなる傾向があるのに対し、 x_b/L は逆に L とともに大きくなる傾向を示す。

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の研究で、吉川ほか¹⁾は $x_b/L \approx 14.5$ という結果をえている。これに対し細井ほか²⁾による幅 70 cm の水路での $L=15, 25$ cm の実験および理論では、

それぞれ $x_b/L \approx 13.5$ および 10.5 と、 L の増加とともに x_b/L が減少する結果がえられているが、これは側壁の影響が強くてためと考えられる。

一方、風洞での高さ h の垂直平板後方の風の実験における再付着点までの距離 x_b は、Arie & Rouse³⁾ による一様風速分布の場合には $x_b/h \approx 16.8$ と今回の結果より大きい。Good & Joubert⁴⁾ による乱流境界層の中におかれた垂直平板の実験では $x_b/h \approx 13.3$ と今回に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/h の値の差は、平板前面での風速分布、あるいはその場の乱れの差にもとづいていると考えられるが、今回の実験で L が小さいケースほど x_b/L が小さくなった理由も、後に述べる突堤後方の乱れの性質を考慮に入れると、上に述べた風の場合と同様に説明できる。なお Case 4 における $x_b/L \approx 14.0$ という値は、側壁の影響がなければもう少し大きくなるものと予想される。

(3) 突堤の後流域における乱れの性質

3 mmφ のプロペラ流速計による流速変動の測定は、各ケースとも $x/L=2, 6, 10$ の 3 つの幅方向断面 ($z=2$ cm) で行っているが、流向が変化する場所での測定結果はかなり誤差を含むおそれがある。図-8, 9 には Case 2, 4 における乱れ成分 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ と同時に測定された平均流速 U の幅方向の分布を示す。他のケースもこれとほぼ同様で、乱れが最大になる点は、流速 U が最大になる位置より岸側にずれ、突堤の先端から出る乱れは下流に行くほど広い範囲に拡散している。 $x/L=2, 6, 10$ の各断面ごとに、幅方向の主要部について全ケース

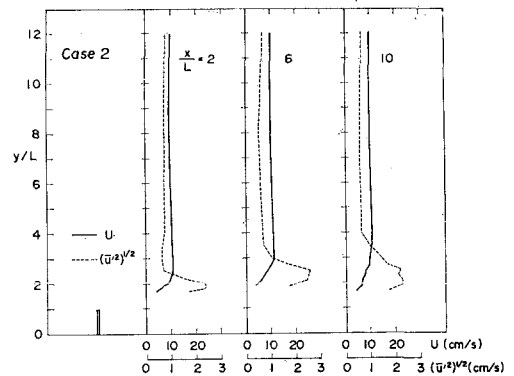


図-8 U と $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 2)

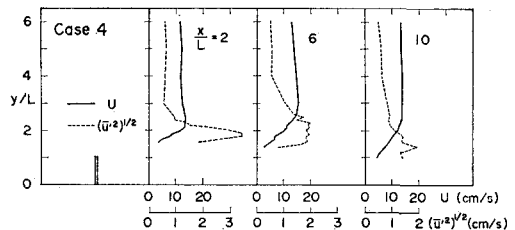


図-9 U と $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の幅方向分布 (Case 4)

の $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の分布をまとめて示すと 図—10~12 のようになる。これらの図から、 $x/L=2$ の断面では L の大きいケースほど乱れの最大値も大きい、 $x/L=6$ や 10 ではその傾向がくずれ、Case 2 が全体的にみてもっとも大きな乱れをもつようになることがわかる。なおこの乱れに関しても Case 5 だけが他と少し違った傾向を示しているが、その理由としては Case 5 では突堤の長さが短いため、側壁上の境界層(図—2 参照)の影響を強く受けているためではないかと考えられる。

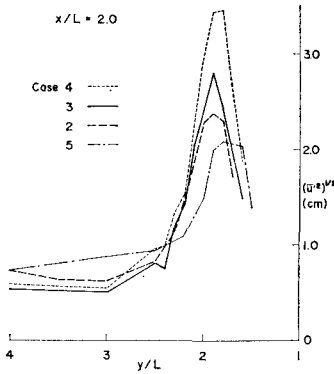
図—13~15 は、各断面ごとにほぼ同じ y/L の値をもつ代表点をえらび、その点での全ケースの u' スペクトルをまとめて示したものである。図—13 は $x/L=y/L=2$ の点についてのスペクトルであるが、この図には参考のため Case 1 の $x=y=50$ cm の点でのスペクトルも示してある。この図では、 $0.2\sim 0.3$ Hz より下のごく低い周波数成分のパワーは突堤の長さ L が長いほど大きく、これは $\overline{u'^2}$ の大きさとも対応している。図—14 は $x/L=6$ 、 $y/L=2.5$ の点について比較したもので、図

中に示してあるように Case 2~4 については L の短いケースほど $\overline{u'^2}$ の値は大きい、低周波数部分のパワーもほぼこれに対応した大きさとなっている。図—15 に示した $x/L=10$ の断面の結果では、上に述べた傾向がさらに強く現われており、 L の短いケースほど低周波数成分のパワーが大きく、それが $\overline{u'^2}$ の大きさに反映されていることがわかる。

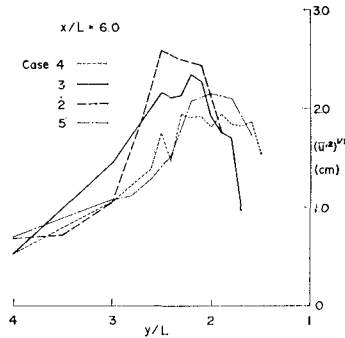
ところで G. I. Taylor の理論による拡散係数 K_x は本来ラグランジュ流の流速変動をもとに表わされるが、オイラー相関とラグランジュ相関の相似の仮定⁵⁾の下に、一様な乱流場で測定されたオイラー流の流速変動 u' をもとに次式のようにも表わされる⁶⁾。

$$K_x = \beta \overline{u'^2} \int_0^\infty R_E(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

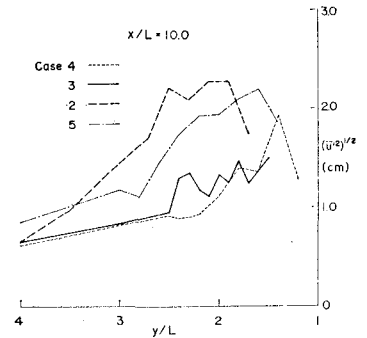
ここに $R_E(\tau)$ はオイラー流の自己相関係数、 β は空間スケールと時間スケールの比を表わす無次元パラメータである。 β の値についてはいろいろな研究があるが(日野⁹⁾参照)、個々の場合にその値を求めるのはむづかしい



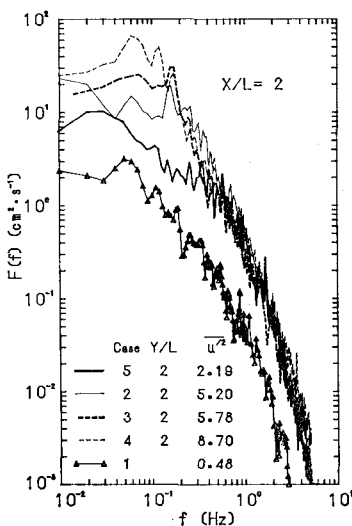
図—10 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ 分布の比較 ($x/L=2$)



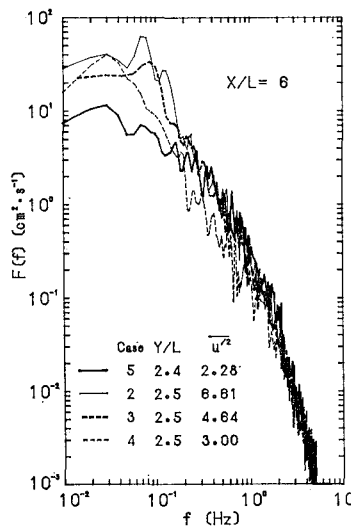
図—11 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ 分布の比較 ($x/L=6$)



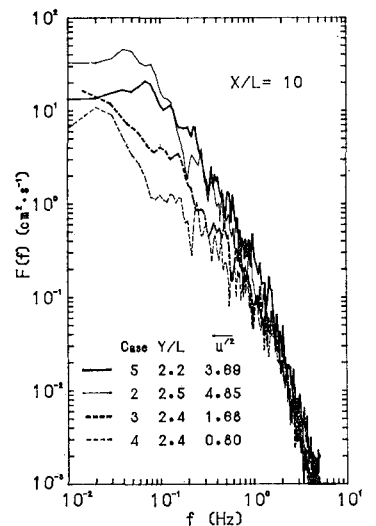
図—12 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ 分布の比較 ($x/L=10$)



図—13 u' スペクトル ($x/L=2$)



図—14 u' スペクトル ($x/L=6$)



図—15 u' スペクトル ($x/L=10$)

表-3 各ケースの乱れの特性値

ケース	x/L	y/L	U (cm/s)	$\overline{u'^2}$ (cm ² /s ²)	K_{Ex} (cm ² /s)	L_E (cm)	L_E/L
5	2	2	10.7	2.19	2.13	10.4	2.07
	6	2.4	10.6	2.28	2.26	10.6	2.11
	10	2.2	8.6	3.69	3.97	9.28	1.85
2	2	2	8.7	5.20	3.58	6.00	0.48
	6	2.5	8.7	6.61	10.5	13.7	1.09
	10	2.5	8.3	4.85	10.1	17.1	1.37
3	2	2	8.7	5.78	5.54	8.33	0.33
	6	2.5	9.7	4.64	7.12	14.9	0.59
	10	2.4	10.6	1.68	4.28	27.0	1.08
4	2	2	11.7	8.70	11.3	15.2	0.30
	6	2.5	14.1	3.00	6.99	32.8	0.65
	10	2.4	13.5	0.80	2.24	38.1	0.76

ので、従来、次式で定義される K_{Ex} をオイラー流の拡散係数とよび、これを計算することが多い^{6),7)}。

$$K_{Ex} = \overline{u'^2} \int_0^\infty R_E(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (2)$$

今回の突堤の下流の乱れの場に、上に述べたような乱流場に対する理論が適用できるかどうか疑問があるが、前述のスペクトルの測定点について求めてみたオイラー流の長さのスケール L_E 、すなわち

$$L_E = U \int_0^\infty R_E(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (3)$$

や式(2)の K_{Ex} などの値を参考のため表-3に示す。ラグランジュ流の長さのスケール L_L は

$$L_L = \beta L_E \quad \dots\dots\dots (4)$$

であるから、 β の値が明らかでない限り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 の値があまり変らないと仮定すると、表-3で Case 5 や Case 2 の K_{Ex}/L や L_E/L の値が Case 3, 4 に比べてかなり大きいことから、歪み模型では突堤後方の乱れが強くなる傾向があるといえるであろう。

4. 結 語

模型歪みに対応するよう、突堤の長さを変えてその後流域での流速 $U(z=2\text{ cm})$ の平面分布と乱れの性質を調べたが、主な結果をまとめると次の通りである。

(1) 各ケースの U/U_0 (U_0 : 突堤なしの場合) の等分布線を比較すると、 $L=50\text{ cm}$ のケースでは側壁の影響が顕著に現われ他との違いが目立つが、 $L=25\sim 5\text{ cm}$ の3ケースの分布はかなり相似で、この範囲では流速の平面分布に対する模型歪みの影響はあまりない。

(2) 突堤後方の反流域の大きさ x_b/L は表-2のように模型歪みによって多少小さくなる傾向があり、これは次に述べる乱れの変化とも関係があると考えられる。

(3) $x/L=2, 6, 10$ の3断面で乱流強度、乱れのスペクトル、オイラー流の乱れのスケールなどを比較した結果、突堤の後流域における乱れの性質は模型を歪ませるとかなり変化し、 $x/L \geq 6$ の範囲では模型歪みが大きいほど乱れが強くなる傾向が認められる。

今回の実験では、側壁の Blockage 効果や模型歪みと乱れの特性値との関係などが十分には解明できなかったが、これらの点については、今後さらに研究が必要である。

参 考 文 献

- 1) 吉川秀夫・杉本昭典・芦田和男: 水制に関する研究(1), 土木研究所報告, 第90号, pp. 11~26, 1955.
- 2) 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回年次講演会概要集, II, pp. 301~304, 1968.
- 3) Arie, M. & H. Rouse: Experiments on two-dimensional flow over a normal wall, J. Fluid Mech., Vol. 1, pp. 129~141, 1956.
- 4) Good, M. C. & P. N. Joubert: The form drag of two-dimensional bluff-plates immersed in turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., Vol. 31, pp. 547~582, 1968.
- 5) 日野幹雄: 乱流拡散における Lagrange 相関と Euler 相関の関係, 土木学会誌, Vol. 60, No. 11, pp. 65~71, 1975.
- 6) 和田 明・角湯正剛: 瀬戸内海における流況と分散特性, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 297~302, 1974.
- 7) 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, 36 p., 1979.