

水中に設置された構造物背後の流れと乱流構造に関する研究

鶴谷 広一*・松延 嘉國**・惟住 智昭**・柳嶋 慎一***

1. ま え が き

最近では、海域を多角的に利用しようとする動きが活発になっている。沖合人工島や海上空港の建設もその一つであるが、水産の分野では海底に構造的に設置して、これを魚礁として利用するとともに、流れに対する湧昇効果を利用して底質の栄養塩を浮遊させ、プランクトンや魚類の増殖を図るという試みがなされている。港湾の区域においても単に経済活動の場としてだけでなく、親水性の場として空間の多目的利用が期待され、水産との協調や魚つり場等が必要とされる背景にある。そのためにはいろいろな機能を持った構造物が開発される必要がある。たとえば、離岸堤や潜堤は海岸線を侵食から守るためにこれまで数多く建設されてきたが、今後は航路の埋没を低減させるための潜堤を始めとする各種構造物や外海における流れの制御のための構造物が建設される可能性が高い。このような大規模な構造物を設置すると、背後の乱れが著しく増加し、海水の混合が促進されるとともに、底質を浮遊させる力が大きくなる。したがって構造物を設置したことによる流れと乱れ特性の変化を把握しておくことはきわめて重要である。

大野他¹⁾はいろいろな模型を水底に設置して、模型背後に発生する渦の周期、渦の上昇高さについて検討した。杜多²⁾は水底に設置された平板模型背後の主流域と後流域の濃度交換について実験的に検討した。清水他³⁾は超音波流速計を用いて平板背後の流速と乱れ成分を測

り、後流域の流れの基本特性を把握し、その後の一連の実験⁴⁾で湧昇効果の高い構造物の配置方法を開発した。しかし、後流域の乱れの構造についてはまだ十分な検討がなされてはいない。

加藤他⁵⁾は水路側壁から流れに直角に出した突堤背後の流れと乱れの特性を、小型プロベラ流速計と可視化法を併用して検討している。しかし、水路の横から出した突堤背後の渦と、水底に設置された構造物背後の渦とは水面の影響、重力の作用等が異なるために、現象はある程度異なるものと思われる。

こうしたことから、本研究では水底に構造物を設置した場合の流れの変化と、構造物背後の後流域の乱れ特性を詳しく調べる目的で、レーザー・ドップラー流速計を用いた実験を行い、平均流速分布、レイノルズ応力、拡散係数等について検討したものである。

2. 実験装置と実験方法

実験には港湾技術研究所の水循環装置付大型風洞水路を使用した。水路の測定部は長さ 28.5 m、幅 1.5 m、高さ 1.3 m の矩形一様断面で、両側面ガラス張りである。

水深 (d) は 50 cm の一定とした。模型は形が比較的単純で、しかも応用性のあるものという目的からステンレス製のプレート (安定するように逆 T 型になっている) と捨石マウンド型 (石の径は約 3 cm、重さ 26 g 程度) を選定した。また、構造物の高さは乱れのスケールが十分再現できること、実験施設の大きさ等を考慮して決定している。その形状を図-1 に示す。捨石マウンドの空隙率は約 45 % である。また、模型高 (D) と水深 (d) との比 D/d を水深比 (遮へい率) とする。

流れの条件は、断面平均流速 U_m が 12.7 cm/s と 17.7 cm/s のケースについて行ったが、ここでは 17.7 cm/s のケースについてのみ述べる。

便宜上、模型なし、逆 T 型 ($D=10$ cm)、逆 T 型 ($D=20$ cm)、捨石マウンド型をそれぞれケース 1, 2, 3, 4 とする。

本実験で採用した座標系と模型の設置状況を図-2 に

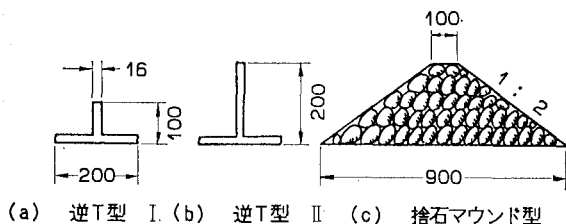


図-1 模型形状・寸法 (単位: mm)

* 正会員 工務 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部水理研究室長

** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部水理研究室

*** 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室

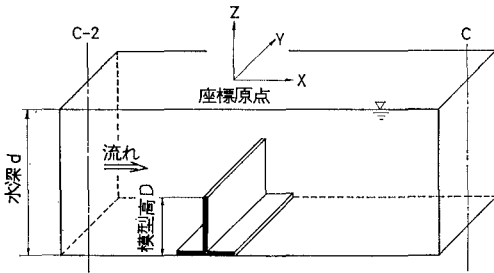


図-2 模型の配置状況と座標系

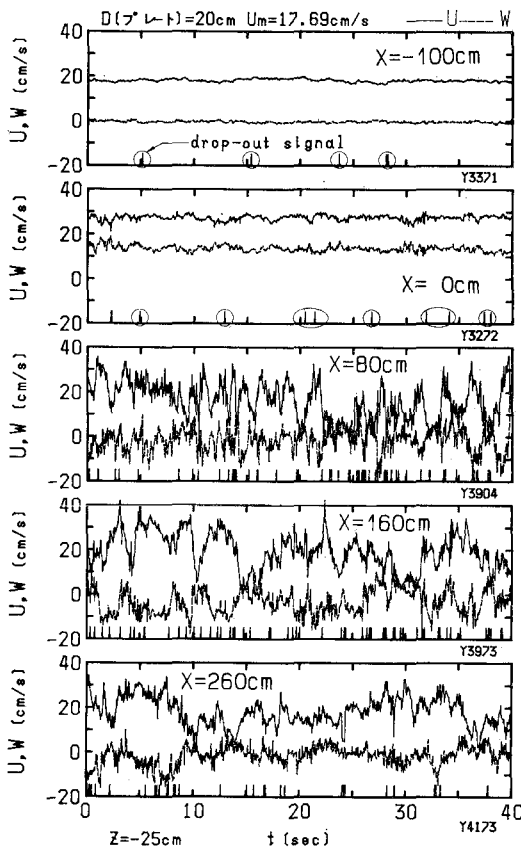


図-3 流速成分の時系列データ (ケース3)

示す。流速成分は x 方向を U , z 方向を W とする。

流速の測定は、すべて水路中央で行っている。また、用いた流速計は2成分のレーザー・ドップラー流速計(LDA)である。システムは、Dantec 社製の2成分偏光方式前方散乱システムで、レーザー光源は 25 mW の He-Ne レーザーである。LDA では、測定体積中に散乱粒子がなくなったり、測定体積より大きな粒子が通過した場合には信号の欠落が生じる。これを drop-out と呼ぶが、ここで用いた信号処理器(周波数トラッカー)は

drop-out で流速値が中断される場合には drop-out 直前の値をホールドして出力するようになっている。このとき、同時に出力されている drop-out 信号が 5 V から 0 V に下がり drop-out 中であることを示す。

3. 実験結果と考察

(1) 流速変動の記録例

流れは模型の設置位置で縮流され、流速が速くなると同時に模型より後方では大きな乱れが発生する。

流れの乱れが流下方向にどのように変化するかを概略知るために、流れの中の一点における水平方向流速 U と、鉛直方向流速の時間変動記録を図-3に示す。この図はケース3に対応している。実線と破線がそれぞれ U と W に対応する。また、図中には流速変動と同時に記録した drop-out 信号も示されている。時間経過を示す横軸から時々上に向かって線分が出ているが、この瞬間のデータが drop-out 中であることを示している。この2枚の図については、drop-out の瞬間を丸で囲って示した。図-3は5枚の図で構成されているが、全て $z = -25$ cm, すなわち水深の半分の高さで測定されたもので、上から順に上流側から下流側へ測点が移動している。なお、 $x=0$ の点が構造物の設置位置であり、 $x=-100$ cm がそれより上流側 100 cm, $x=80$ cm が下流側 80 cm を表す。構造物の後流域で測定した図-3の下側の三つの図ではかなり大きな乱れが生じている。

紙面の都合上他のケースについては示していないが、例えばケース4では、構造物の高さは図-3の逆T型と同じ 20 cm であるが、捨石の中を浸透流が流れるために見かけ上遮蔽率が小さくなり、後流域の乱れは図-3よりかなり小さくなる。

任意の一点における瞬間流速を時間平均流速 $\bar{U}$ と時間的に不規則に変動する u からなるとすると、 x 方向と u 方向の瞬間流速はそれぞれ

$$U = \bar{U} + u \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$W = \bar{W} + w \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ここに、 $\bar{U}$ はかなり長い時間 T にわたっての時間平均値であり、

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt, \quad \frac{1}{T} \int_0^T u dt = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。式(3)と同様な関係は W 成分についても成り立つ。

さらに、乱れ強度はここでは詳しく述べないが、 u 成分については次式で定義される。

$$u' = \sqrt{u^2} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、レイノルズ応力は次式で表される。

$$\tau = -\rho u w \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ は水の密度である。

(2) 平均流速分布

一般に構造物の後流域は水理特性の違いにより以下のように大きく3つの領域に分類することができる²⁾。

- ①主流域…この領域は、構造物による縮流の影響を受け平均流速が速く、相対的に乱れ強度が小さい。
- ②反流域…平均流速が主流域に比べて小さく、水平方向の平均流速 $\bar{U}$ が負の領域である。
- ③混合域…主流域と半流域の中間的な領域であり、構造物からの離れによって生じる渦の発生、発達する領域。

これらの領域を明確に区分することは困難であるが、後で述べるように乱れの特性は明らかに異なっているのがわかる。また、反流域は水平方向の平均流速が負の領域なので、流速の空間分布を細かくとれば比較的容易に他の領域と区別することができる。反流域の終端と水路底との交点は Reattachment point と呼ばれる。

図-4 は模型タイプ別の平均流速ベクトルの分布を示した一例である。図中には反流域を斜線で囲んで示してある。実験ケースは上からケース2, 3, 4である。Reattachment point の模型からの距離 x_R を模型の高さ D で無次元化した距離 x_R/D は逆T型では10, 捨石マウ

ンド型では7である。これらの値は流速の小さいケースでも同じであった。捨石マウンド型の場合はマウンド内の浸透流の影響で反流域が極端に小さくなっている。加藤他⁵⁾ は平面水槽の側壁から不透過な突堤を出し、その後方の流れと乱れ特性について調べている。その実験によれば、 x_R/D は12.2~14.0で、突堤の長さが長くなるほど x_R/D が大きくなる傾向を示している。また、 $D=50\text{ cm}$ で $x_R/D=14.0$ であったが、側壁の影響がなければこの比はもっと大きくなるはずであると述べている。本研究のように水底に構造物が設置された場合の反流域は、自由水面が存在することによる影響が大きいと考えられ、そのために反流域がやや小さくなっている。また、清水他³⁾ の実験でも、 x_R/D はほぼ10という値が得られている。

(3) レイノルズ応力

レイノルズ応力は式(5)で定義されるが、時間的に平均をとるために乱れによる瞬間の運動量輸送についての情報は得られない。構造物の背後には大規模な渦が形成され、それにとまらう周期が短く変動幅の大きな乱れが観測されるため(図-3参照)、乱れの瞬間瞬間の特性を詳しく調べるために瞬間レイノルズ応力 $-uw$ について述べる。この瞬間レイノルズ応力を解析するための一手法として、ここでは象限別解析を行う⁶⁾。

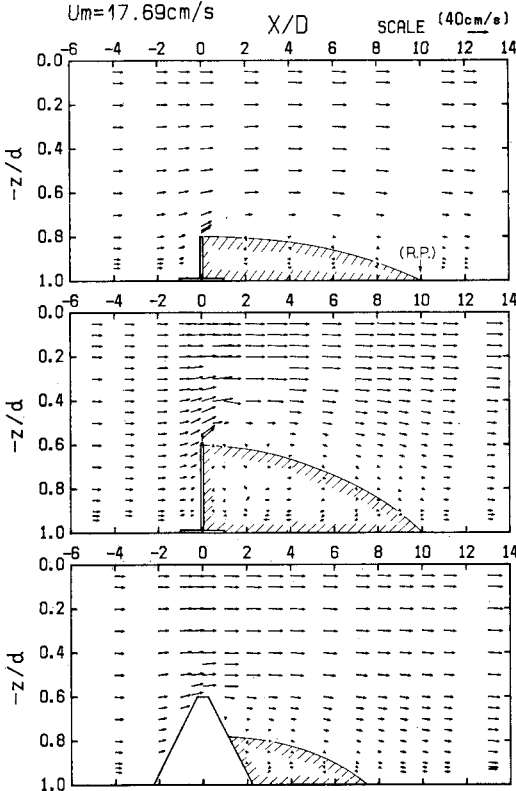


図-4 流速ベクトル図 ($U_m=17.69\text{ cm/s}$)

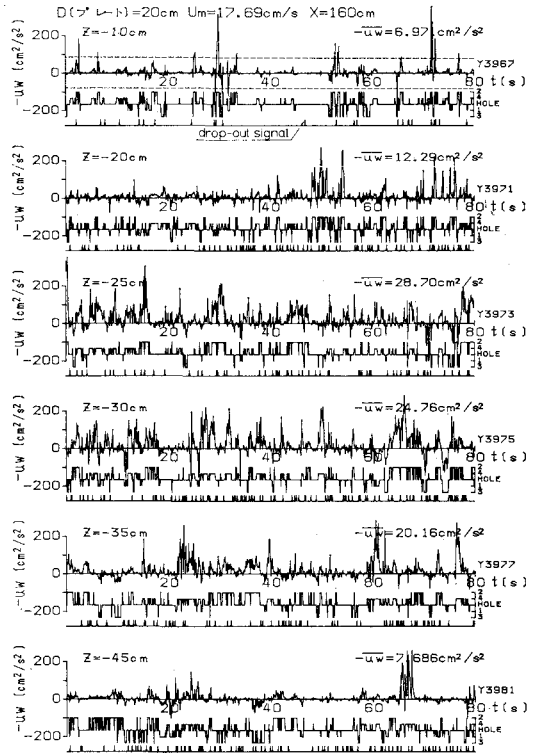


図-5 瞬間レイノルズ応力の領域区分 (ケース3)

流速記録から、平均値を取り除いた乱れ成分 (u, w) を4つの象限に分類する。すなわち、 $u > 0, w > 0$ を第1象限、 $u < 0, w > 0$ を第2象限、 $u < 0, w < 0$ を第3象限、 $u > 0, w < 0$ を第4象限とする。さらに、 $|uw| = \text{const.}$ で表される双曲線で囲まれた領域を Hole と呼ぶ。

ここで、

$$|uw| < H|uw| \dots\dots\dots (6)$$

で定義されるしきい値を採用する。すなわち、式(6)を満足する u と w の組み合わせが Hole に含まれ、それ以外は第1～4象限のどこかに必ず含まれることになる。

図-5はこの定義に従って乱れ成分を各象限に分類した一例で、ケース3に相当する。流速の測定位置は $x = 160 \text{ cm}$ すなわち、 $x/D = 8$ であり、上から $z = -10, -20, -25, -30, -35, -45 \text{ cm}$ と順に測定点が水面から底面に近づいている。図には6つの測定点のデータが同一の形式で表示されているが、それぞれにつき一番上が瞬間レイノルズ応力、その下が乱れ成分がどの象限に含まれるかを示すもの、一番下がドロップ・アウト信号である。なお、式(6)のしきい値 H は、ここでは1として計算した。

図に示されているように、瞬間レイノルズ応力はかなり変動しているのがわかる。例えば、図の一番上の $z = -10 \text{ cm}$ の場合では $-\overline{uw}$ は $6.97 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ であるが、瞬間的には $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ を超えるときがあり、乱れが強い間けつ性を示しているのがわかる。

さらに、図-5の $z = -10 \text{ cm}$ では、瞬間レイノルズ応力が大きいところはほとんど第2象限が占めている。すなわち、ここでの強い乱れはほとんど減速流域 ($u < 0$) が外向き ($w > 0$) に eject される。いわゆる ejec-

tion が支配的であることがわかる。この測点位置は主流域に属すると考えられるが、混合域に属すると考えられる $z = -25 \text{ cm}$ (図-5の上から3つ目) では、第4象限からの寄与が増えている。しかし、 $-\overline{uw}$ が大きい値を示すのは依然第2象限であり、しかも $t = 15, 30, 45 \text{ s}$ で大きな値を示している。これは、構造物から放出された渦の一部が通過したものをとらえていると考えられる。ただし、一点での流速データから渦の実態をとらえることはかなりむずかしいので、流れの可視化による観察を併用する必要がある。

続いて $z = -30, -35 \text{ cm}$ と水底に近づくにつれて、第4象限の瞬間レイノルズ応力が大きくなり、なおかつ発生頻度も第2象限より多くなっている。反流域内の一番下の $z = -45 \text{ cm}$ では平均レイノルズ応力は $7.7 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ と小さくなっていて、瞬間レイノルズ応力は $z = -10 \text{ cm}$ と同様に間けつ的に大きくなっている。しかし、 $z = -10 \text{ cm}$ とは全く逆に第4象限が支配的となっている。ただし、これは反流域内なので、平均流速は負である。

図-5は瞬間レイノルズ応力の大きさと、それがどの象限からの寄与については良くわかるが、各象限が平均的なレイノルズ応力にそれぞれどの程度寄与しているのかを定量的に知ることはできない。そこで、各象限からレイノルズ応力への寄与を定量的に調べるために、Nakagawa and Nezu⁶⁾に従って各象限からレイノルズ応力への寄与率を検討する。

図-5と同じデータ(ケース3)に象限別解析を適用した例を図-6に示す。図中の四角印が各象限からのレイノルズ応力への寄与する割合を示している。四角印から出ている線分の向きが象限を表し、流れの向きを左から右に向かって正と考えているので、例えば線分が四角の右上に出ているのが第1象限 ($u > 0, w > 0$) を表し、左下に出れば第3象限 ($u < 0, w < 0$) を表している。実線の曲線は Nakagawa and Nezu⁶⁾の理論値であり、1～5象限(5象限はHole)の区別は書き込んでいないが、実測の記号と対応がつくので判別は容易である。また、破線の曲線は占有時間率の理論値で、各象限に対応する1から5までの数字を丸で囲って示してある。ただし、占有時間率が実測値と比較できるのは、第5象限(Hole)のみである。

図-6は $z = -30 \text{ cm}$ での測定値であるが、第4象限からの寄与率が第2象限からの寄与より5%程度大きくなっている ($H < 2$ おいて)。この傾向は図-5で既に予想されていたが、図-6では定量的に各象限からの寄与がわかる。また、第2、第4象限と、第1、第3象限の占有時間率はそれぞれほとんど等しくなっている。しきい値 H が4のところで見ると、Holeの占める占有時間率(黒丸)が約90%であるのに、Holeがレイノルズ応

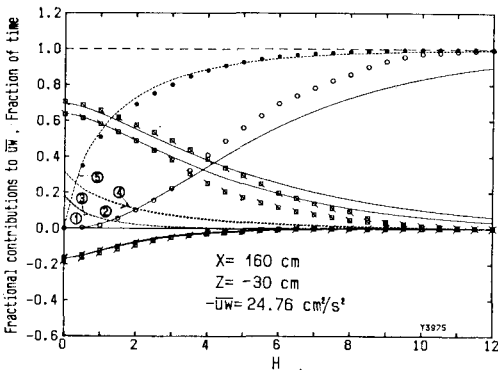


図-6 各象限から $\overline{uw}$ への寄与率、記号は実験値: □; 第1象限からの寄与, ○; 第2象限からの寄与, △; 第3象限からの寄与, ◇; 第4象限からの寄与, ○; Holeからの寄与, ●; Holeの占有時間率: 一, ----; Nakagawa and Nezuの理論値, ①; i象限の占有時間率(理論値)
(ケース3, $x = 160 \text{ cm}$, $z = -30 \text{ cm}$)

力に寄与する割合(白丸)は40%程度しかないことがわかる。すなわち、乱れは強い間けつ性を示している。

(4) 拡散係数

乱れの自己相関関数からオイラーの拡散係数を求めたが、その結果の一例を図-7に示す。これは、流れ方向の拡散係数 K_x の水深方向の分布である。図で $D=10$ cm のプレートと捨石のケースでは $-z/d=0.4$ より水面に近いところでは拡散係数は模型なしと比べて増加していない。したがって、このあたりまでが主流域と考えられる。しかし、それより深いところでは拡散係数は急激に大きくなり、底面に近い $-z/d \approx 0.9$ で最大値を示している。その値は模型なしと比べると1桁以上も大きくなっている。また、 $D=20$ cm のプレートの場合には $-z/d=0.6$ (模型の天端に等しい) で最大値を示している。その値は模型なしの場合より約2桁も大きく、拡散能力が著しく向上している。他のケースについてはここに示すことができないが、 z 方向の拡散係数 (K_z) も含めて総括的に見ると、乱れの大きい混合域では $D=20$ cm のプレートは、他の2つの模型に比べて K_x , K_z とも数十倍程度大きい。反流域ではその差があまり大きくないと言える。

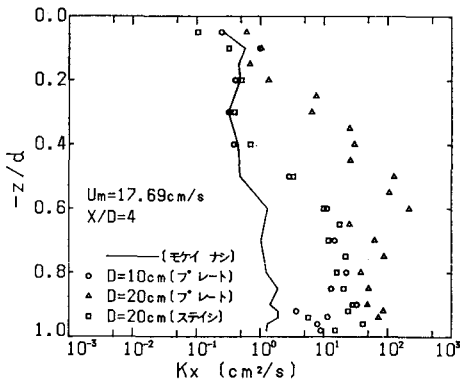


図-7 水平方向の拡散係数 K_x ($U_m=17.69$ cm/s, $x/D=4$)

4. あとがき

本文で十分に述べられなかったところもあるが、今回の研究で明らかになった主要な点をまとめると、以下のようになる。

(1) 模型の設置点から反流域の終端の Reattachment

point までの距離 x_R は、逆T型模型で模型高さ D の約10倍 ($x_R/D=10$) であり、これは本実験条件の範囲内で模型高さ、流速条件の違いによってほとんど変わらなかった。また、捨石マウンド型では浸透流の影響で反流域はかなり狭くなり、 $x_R/D=7$ であった。

(2) レイノルズ応力の象限別解析を行い、主流域では第2象限からの寄与が卓越し、レイノルズ応力が最大となると第2と第4象限からの寄与がほぼ等しくなり、反流域では第4象限からの寄与が卓越することがわかった。

(3) 構造物を設置した背後の後流域では、構造物を設置しなかった場合と比べて流れ方向の拡散係数 (K_x) は約100倍大きくなり、鉛直方向の拡散係数 (K_z) は最大で約1,000倍大きくなった。

後流域で発生する大規模渦を正確にとらえるためには、適切な方法による可視化が有効な手段となると考えられるが、ここでは十分検討できなかった。さらに、今回のような二次元実験でも、発生する渦は本質的には三次元的性質を強く持っていると考えられるので、今後はその方面からのアプローチも必要であろう。

なお、乱れ強度とレイノルズ応力等の分布その他についてはここでは省略しているが、それらについては参考文献7を参照されたい。

参 考 文 献

- 1) 大野健一・益田善雄・宮崎武晃・高橋賢一・浮田基信・続辰之介: 湧昇流に関する水槽試験, 海洋科学技術センター試験研究報告, Vol. 3, pp. 50~57, 1967.
- 2) 杜多 哲: 魚礁後流の海水交換に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 623~627, 1983.
- 3) 清水虎重・有富範伊・森井伸正・木内 巧・大竹臣哉・今村均・中瀬浩太: 大規模渦発生礁の研究(その1)―相似則の確認と渦流の物理特性―, 五洋建設技術研究所年報, Vol. 12, pp. 11~21, 1983.
- 4) 有富範伊・森井伸正・葛原 徹・大竹臣哉: 大規模渦発生礁の研究(その3), 五洋建設技術研究所年報, Vol. 14, pp. 39~46, 1985.
- 5) 加藤 始・木村久雄・寺川博也: 突堤後方の流れに関する実験―模型ひずみの影響の検討―, 港湾技研資料, No. 349, 24 p., 1980.
- 6) Nakagawa, H. and I. Nezu: Prediction of the contributions to the Reynolds stress from bursting events in open-channel flows, J.F.M., Vol. 80, pp. 99~128, 1977.
- 7) 鶴谷広一・松延嘉國・惟住智昭・柳嶋慎一: 湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 127~169, 1987.