

## V字形構造物による上昇流

## RISING CURRENT PRODUCTION BY A V-SHAPED PLATE

浅枝 隆\*・中井正則\*\*・玉井信行\*\*\*・堀川清司\*\*\*\*

By Takashi ASAEDA, Masanori NAKAI, Nobuyuki TAMAI and Kiyoshi HORIKAWA

A strong rising current can be produced by placing a V-shaped plate against a horizontal uniform flow. Vortices are formed from the plate, coalesce with the neighboring region ones in the separation zone, then shed downstream. These vortices have a horse-shoe shape and rise due to a self induced upward motion. As the dihedral angle of plates increases, the vortex shedding Strouhal number decreases due to the frequent coalescence in the separation zone. The vortices are intensified by this coalescence, resulting in the formation of higher self-induced velocity. With too large dihedral angles, however, vortices do not rise so high because of the small self-induced velocity. On the other hand, with too small angles, the vortex forms further downstream in the separation zone, which prevents coalescence with others and increases of the vortex intensity, also resulting in the small rising height. Eventually, the rising height shows optimum with the dihedral angle of around 90°. There, the height can reach more than 10 times the plate height. The Strouhal number was found to decrease with increasing Reynolds number, regardless of the dihedral angle.

Keywords: V-shaped structure, rising current, horse-shoe vortex, dihedral angle, vortex shedding Strouhal number

## 1. ま え が き

近年、水域、大気環境の保全是非常に重要な問題であるといえる。このための技術には場合によってさまざまなものがあるが、密度による成層が環境悪化の原因になっているような場合には、鉛直方向の循環流を発生させ混合を促進させる方法が効果を発揮する場合が多い。たとえば、成層の存在による水質や大気環境の悪化、汚染物質の急速な拡散、海底の栄養塩を水面にまで浮上させる海洋牧場の開発など多くの場合が考えられる。こうした鉛直循環流の作成法には、従来、ポンプによる方法、気泡による方法などさまざまなものが考案されているが、その中で流れを構造物に衝突させる方法は自然のエネルギーをそのまま利用する方法であり、大規模なものにも利用可能である。しかし、その場合にも、単に流れを構造物に衝突させるだけよりもその際に生ずる剥離渦を利用することにより、より効果的なものとする事ができよう。

こうした現象は従来さまざまな場所で自然に観察されてきたものである。そのいくつかの研究を眺めてみよう。

山のまわりの大気の流れは、山を円錐、半球あるいはベル形などの簡単な形状で代表させることによって多くの研究がなされてきている。Hunt<sup>1)</sup>、Hunt and Snyder<sup>2)</sup>は直方体、円錐ならびにベル形の物体を均質流体中および密度成層流体中に置き、物体まわりの流れの構造を調べている。しかし、彼らの研究は、物体の下流側付近の渦構造を扱っているだけであり、下流に流れ下る過程で渦の挙動を扱っているわけではない。これに対して、Tamai, Asaeda and Tanaka<sup>3)</sup>は流れの中に半球を置き、その下流側の流れを渦の三次元構造に注目して半球からかなり離れたところまで調べている。彼らの観察によれば、半球の位置で馬蹄形渦が周期的に形成され、それらが半球のはるか後方で自己誘導速度によって上昇しながら引き伸ばされていくことが報告されている。なお、ここで、渦の2つの足相互の影響でその面に直角な方向に生ずる速度を“自己誘導速度”とよぶことにする。しかし、その上昇速度は非常にゆっくりしたものであり工学的に利用できるようなものではない。しかし、この原理を応用し、より適当な形状の構造物を流れの中に建設し、より効率的に馬蹄形渦を作成することができれば、利用可能な強い上昇流を発生させることができることが

\* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科(〒338 浦和市下大久保255)

\*\* 正会員 工修 東京大学助手 工学部 土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部 土木工学科

\*\*\*\* 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部 建設基礎工学科

示唆されているといえよう。

一方、河川においてはボイル、コルクとよばれる強い上昇流が観察されている。このような上昇流は河床より発生し、水面に衝突して水面を局部的に上昇させる。この水面上昇は、上昇流が強い場合には数 cm 程度にまで及ぶこともあるといわれている。このようなボイル、コルクとよばれる上昇流については現在までに多くの研究がなされている。Jackson<sup>9)</sup>は実際の河川でボイルの特徴について調べ、ボイルの発生は河床の形状、なかでも河床波の背後の流れの構造と密接に関連していることを示している。Nakagawa and Nezu<sup>5)</sup>はこのボイルの原因を下流向きにステップを越える流れの剥離、特に剥離域の時間変動と考えて精密な計測を行った。しかし、彼らの実験では強い上昇流は確認されなかった。また、Viets, Bethke and Bougine<sup>6)</sup>は水路床に流れを横切る方向に板を入れ、この板を振動させることにより、水路床付近に形成される渦の軸が波打ちながら変形することを示した。しかし、彼らの実験においても強い上昇流の存在は見出せていない。これら結果は、流れに直角な向きの直状の板は上昇流の発生原因とはならないことを示唆しているといえよう。これに対し、木下<sup>7)</sup>、宇民と上野<sup>8)</sup>らは河床波に見立てた三次元的な粗度な粗度周辺に生ずる流れを刻明に解析し、上昇流の発生を確認している。また、Ikeda and Asaeda<sup>9)</sup>は河床にできる三次元的な砂漣の下流にのびる峰の傾斜に沿う強い上昇流を観察している。それは、砂漣まわりに発生する馬蹄形渦によるものであり、この上昇流の原因は砂漣の三次元的な形状にあることを強調している。

このように、河床波付近に形成される馬蹄形渦は強い上昇流の原因になっており利用の大きな可能性を秘めているといえる。

本研究は、こうした河道内で生じている現象の解明の際に得られた基礎研究の結果を利用し、鉛直循環流を有効に発生させる方法を開発することを最終的な目的としている。以上のような研究を総合すると、これには、下流向きに尖った剥離域を発生させ、馬蹄形の渦を発生させることが効果的であるといえよう。ここでは、自然に形成される河床波上の流れの解明を目的としているわけではないので、多少自然のものとは形が異なっても、そうした中で最も単純な形状である V 字形をした板状構造物（一般には V 字形構造物とよび、実験で用いたものは V 字形板とよぶことにする、Fig. 2 参照）を用いた。この形状では、流れの集中による効果も期待でき、より効果的なものとなることが考えられるからである。こうした構造物を用い、その周辺に生ずる流れの構造を調べ、より効果的な形状を考えるうえでの基礎材料を得た。

## 2. 実 験

実験は、長さ 20 m、幅 40 cm、深さ 40 cm の循環式可変勾配水路を用いて行われた。水路の中央に V 字形に曲げた板を開口部を上流側に向けて左右対称になるように置いた。V 字形板の高さは 3 cm、長さは各辺が 20 cm である (Fig. 2 参照)。なお、V 字形板の長ささをこの程度にした場合に、発生する鉛直循環流は最も強くなったので、本実験では V 字形板の各辺はそのなす角度によらず一定とした。V 字形板のなす角度  $\theta$  は  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $30^\circ$  間隔で変化させた。

水深は上流側および下流側の水槽の水位によって調節し、流れを整流するために水路の上流端に整流板を設けた。水路の勾配は平均流速が 3 ~ 50 cm/s の範囲に対して等流水深が 30 cm 程度になるように設定した。鉛直流速分布は 1.5 ~ 100 cm/s の範囲で計測可能な 3 mm の超小型プロベラ流速計を用いて、水路の幅方向に 5 cm 間隔で計測した。なお、流速分布の計測精度は、それを面積分して求めた流量とマノメーターにより計測された流量の値と比較することによってチェックした。水路の中央付近では、2 次流による弱い上昇流が生じていたが、その強さはここで観察しようとしている強い上昇流に比べて十分弱く無視した。

また、流れは滑面上の流れになっており、V 字形板は境界層中に入ってしまったっており、頂上の高さでもいくらかの流速勾配が存在していたが<sup>10)</sup>、板とその周辺の底板を高くして境界層の発達しない場で行った実験の結果と比較してもほとんど変わらないので、流速勾配の影響は無視した。

流れの可視化は、トレーサーに染料（ウォータールー）、アルミニウム粉末および細かい紙片を用いて行った。ウォータールーは V 字形板の一方あるいは両方の辺の上流側からビニール管により連続的に供給した。しかし、染料によっては瞬間的な流れの様子を知ることができないので、染料による可視化と他の可視化手法とを併用して染料で示される流れの信頼性をチェックした。アルミニウム粉末を用いる方法の手順は、以下のとおりである。水路内に直径約  $10^{-3}$  cm のアルミニウム粉末を混入しておき、鉛直スリット光を照射し、写真撮影することによって瞬間的な流れの様子を観察した。なお、アルミニウム粉末の沈降速度は 1 mm/s 以下であるが、本実験での主流の平均流速の最低値が 3 cm/s 程度であることよりアルミニウム粉末の沈降は無視し得る。また、細かい紙片を用いた可視化については、流れの中に紙片を投入して、紙片の動きを追跡することによって流れの様子を観察した。この場合、紙片の沈降速度は無視できず、また、紙片は流れ中の小さいスケールの乱れには追

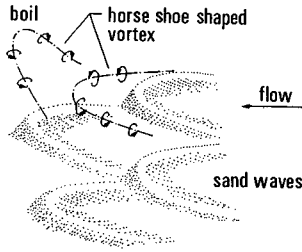


Fig. 1 Flow patterns around three-dimensional ripples.

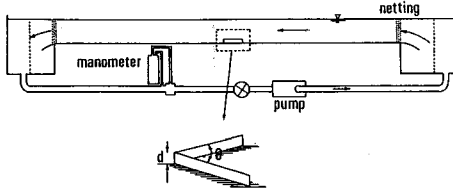


Fig. 2 Experimental apparatus and V-shaped plate.

Table 1 Experimental Conditions.

RUN	AVERAGE VELOCITY U (cm/sec)	DEPTH, H H (cm)	REYNOLDS NUMBER, $R_g$	DIHEDRAL ANGLE OF V-PLATE (degrees)
1	47.1	31.5	14800	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
2	26.1	31.5	8210	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
3	4.96	36.3	1470	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180

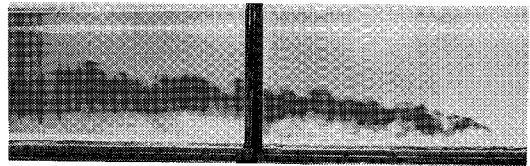
随できないため、紙片の速度からは厳密な流速場は得られない。しかし、紙片の動きは強い上昇流の発生を確認するには十分な情報を与えると考えられる。紙片の上昇高さは染料により観測される上昇高さとはほぼ一致した。

さらに、現象をビデオカメラでいろいろな角度から撮影し、流れの細部の構造を調べた。

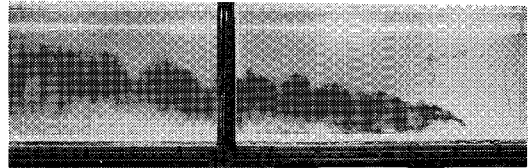
実験は、系統的に行ったもの、それぞれの要素の影響等を調べるために個々に行ったものとあるが、系統的に行ったものの実験条件を Table 1 にまとめてある。

### 3. 可視化された流れ場の様子

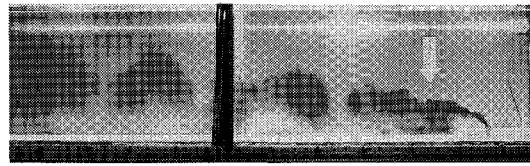
Fig. 3(b)~(e)は水路床にV字形板(角度 $\theta = 30 \sim 150^\circ$ )を置いたときの典型的な流れのパターンを示している。同図はいずれもウォーターブルーで可視化された写真である。なお、ここで染料での可視化は実際にその瞬間の流れを測定しているかどうか疑問が残るので、すべてのケースについて、アルミニウム粉末にスリット光線を照射する方法によって実際にこうした流れが存在することを確かめている。また、板周辺の流れは有田<sup>13)</sup>による、2成分の流速の計測結果とはほぼ同様な形状を示した。また、それと同時に、いくつかの角度からのビデオ撮影を行い(静止写真にしてしまうと全くわからないので、Fig. 4にそのスケッチの一部を示す)、得られた流れの構



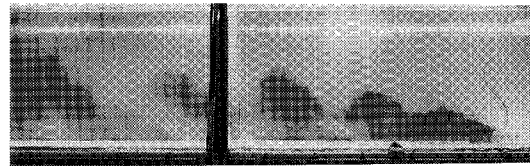
(a) 30°



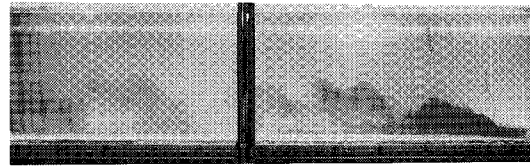
(b) 60°



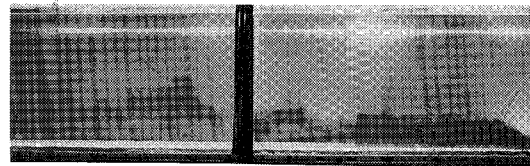
(c) 90°



(d) 120°



(e) 150°



(f) 180°

Fig. 3 Visualized Flow patterns: The case of Run 1.

造の模式図を Fig. 5 に示す。V字形板のすぐ下流側に三角形の剥離領域が形成され、その中で強い逆流が発生する。逆流域内ではV字形板の隅の背後から板の背後に沿ってらせん状の渦が形成され、この渦は反対側から発

生してきた渦と結合しておりU字形をしている。通常こうした渦を馬蹄形渦とよぶのでここではそれに従って馬蹄形渦とよぶことにする。こうしてできた渦は板を乗り越えてくる流れにより一層強められる。したがって、このV字形の板で形成される渦の強さは、板の端でのらせん流の強さとこの板を乗り越えてくる流れによっているといつてよい。こうした渦は剥離域内で次々に発生するし、しかも、渦の回転運動の速度は非常に速いために、発生後短時間の間にいくつかの渦が合体し大規模なより強い渦となる。その後、剥離領域後方に放出されていく。そのため、渦の剥離領域からの放出の周期は剥離領域内での渦の形成周期よりかなり大きくなる。この1つの例を Fig. 6 に示す。これは、流速 3 cm の場合について、渦の発生時と、剥離領域後方で渦の周波数の比  $f_1/f_2$  と循環の強さの比の逆数  $\Gamma_2/\Gamma_1$  を示したものである。渦は剥離域の下流では発生時の約半数に減少しており、循環の強さは大きくなっている。ただし、合体時の粘性散逸のために、合体した渦数倍よりは多少小さくなっているの

がわかる。このようにしてできる馬蹄形の渦の中央の部分を“渦の頭”，それから両側に伸びる部分を“渦の足”とよぶことにする。

下流に放出されていく渦の足は、流れ方向に大きく引き伸ばされ、いくつも絡み合っ強い一對の縦渦となる。また、それぞれの馬蹄形の渦は渦自身のもつ自己誘導速度によりそれぞれの頭を次々に持ち上げ、それぞれの渦が下流に向かって斜めに重なるような渦の並びをつくる (Fig. 5 参照)。しかも、それぞれの渦の頭から伸びる足は断面内に循環をもっているために上方にまで達する大きな鉛直循環流を形成することになる。それぞれの渦の頭の到達高さは比較的一様であり、こうした実験においてもV字形の板の高さの11倍にも達し、Fig. 7 に示されるように水面に衝突するまでになる。なお、この図中で中央付近にみられる波は水面に衝突した流れが周囲に広がり沈む際に生じたものである。このようにして渦の頭の到達高さは大きくなっていき、その高さ下方には、渦の頭から双方に伸びる足のもつ循環によって大きな鉛直循環流を生じさせる。

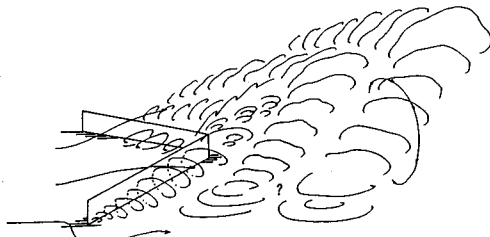


Fig. 4 The sketch of the flow structures around the V-shaped plate.

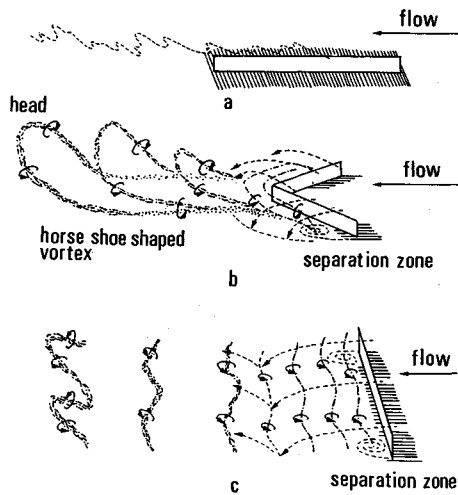


Fig. 5 Diagram of flow patterns: (a) 0°, (b) 30°~150°, (c) 180°.

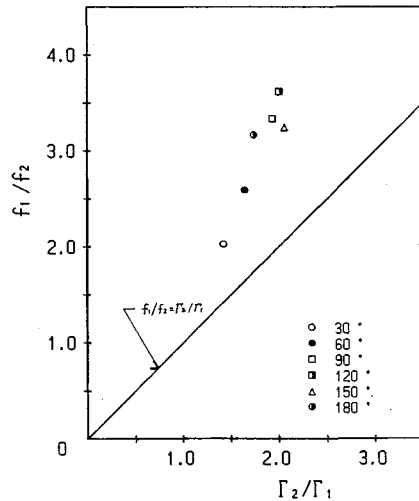


Fig. 6 Vortex frequency ratio and the circulation ratio between the vortex generation and the vortex shedding.



Fig. 7 Disturbed free surface due to the impingement of vortex.

一方、V字形板の角度 $\theta$ が $180^\circ$ のとき、すなわち水路の幅方向に鉛直板が立っている場合には流れの様子は前述の場合とは大きく異なる。 $\theta=180^\circ$ のときの流れの様子がFig. 3(g), Fig. 5(c)に示されている。鉛直板の下流側の剥離領域は変動を除いて全体的には水路の幅方向に一定しており、平均流は鉛直板の上側を越えて流れていく。また、剥離領域においては、水路の幅方向に軸をもつ二次元的な渦が形成される。発生した渦は剥離領域内でいくつか合体し、下流に放出される。発生する渦の渦軸は厳密には発生時にすでに波型に変形しているが、この変形は流下とともに増幅し、馬蹄形の渦に変形していく。しかし、渦度の拡散の方が速く起るために、馬蹄形になった時点ですでにほとんど馬蹄形渦本体の部分に渦度の集中はなくなっており、大部分の渦はほとんど頭を上昇させない。

さらに、 $\theta=0^\circ$ の場合、すなわち、流れに平行に鉛直板を立てた場合についても実験を行ったが、非常に弱い上昇流が生じるのみであった (Fig. 3(a), Fig. 5(a)参照)。この場合の上昇流は、流れの中に鉛直板を置いたために生ずるいわゆる Prandtl の第2種の2次流によるものと考えられるが、工学的にはほとんど利用価値のないものである。

このように、渦の頭の上昇は渦自身の自己誘導速度によるものであり、この渦の自己誘導速度は渦の両方の足の近接度とそれぞれの渦の循環の強度によっている。それぞれの渦は発生時には小さい循環しか有していないが、いくつか合体することにより大きな循環を有するようになる (Fig. 6 参照)。したがって、渦の合体の特性が渦の強度を決める重要なパラメーターとなる。

#### 4. 渦の放出に関する Strouhal 数

Fig. 8 は V字形板の角度 $\theta$ に対する渦の通過周波数 $f$ を、平均流速 $U$ 、板の高さ $d$ を用いた Strouhal 数(= $fd/U$ )で示したものである。このときの渦の通過周波数は以下に述べる2通りの方法で求めた。1つは、考えている位置での渦の通過回数を直接数え、その回数を観測時間で割って求めたものであり、もう1つは隣合う渦の間隔を平均流速で割ったものの逆数をとったものである。しかし、これら2つの方法によって数えた渦の通過周波数はいずれのケースでもほぼ一致していたため以後は適宜より精度よく求まる方法で10回程程度求めその平均をとった。また、渦の合体が生じるのはほとんど剥離領域内であり、その下流での合体はほとんど起こらなかった。

Fig. 6 より、Strouhal 数は $\theta$ の増加に伴って明瞭な減少傾向を示すことがわかる。この理由は、剥離領域内での渦の発生および合体の機構より次のように説明でき

る。まず第1に、 $\theta$ の値が大きく剥離内の循環流れが強い場合には板の上縁からはがれた流れは roll-up により流れ線の揺れをつくりながら剥離域の内側に巻き込まれていく。そのため、いくつかの揺れが巻き込まれて1つになった後になって初めて渦としての形態を整える。それに引きかえ、 $\theta$ の値が小さく板を乗り越えていく流れの場合には1つ1つの揺れが下流に流されていきながらそれぞれが渦としての形態を整えていく。また、 $\theta$ の値が小さいほど、流れは頂角に集中してV字板を乗り越える流れに変わるため、乗り越えていく流れの流速が速くなっている。したがって、roll-up により発生する揺れの Strouhal 数が一定であるとする、発生周波数は大きくなる。さらに、 $\theta$ の値が小さいと逆流域に生じた揺れが成長して渦になるため、渦は剥離域内の下流側で形成されるようになる。そのため、剥離域からの放出以前の合体の回数は少なくなる。また、 $\theta$ の値が小さくなるほど、渦は早い時期に頭をもたげようになり、しかも、いったん上方の乱れの少ない領域に頭を持ち上げるとなかなか合体しなくなる。このような理由により、 $\theta$ の値が小さいほど Strouhal 数が増加することになる。

Fig. 9 は流速、板の高さを用いた Reynolds 数(= $Ud/\nu$ 、ここで $\nu$ は動粘性係数)に対する Strouhal 数の変化を示している。この図より、すべての $\theta$ に対して Reynolds 数の増加に従って Strouhal 数は減少していることがわかる。これは、Reynolds 数が高いほど、剥離領域内での乱れが大きく、剥離領域内での渦の合体が起こりやすくなることによる。この結果を Tamai, Asaeda

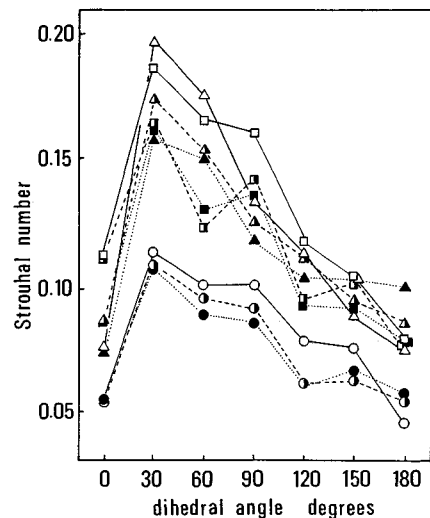


Fig. 8 Vortex shedding Strouhal number vs.  $\theta$ . (Circles: Run 1, squares: Run 2, triangles: Run 3, filled marks: 50 cm downstream, half-filled: 1 m downstream, hollow marks: 1.5 m downstream)

and Tanaka<sup>9)</sup>による半球後方の剥離渦に対する Strouhal 数と比較すると、本実験の V 字形板の角度が小さい場合の方が彼らの結果とよく一致している。これは半球の場合には、 $\theta$  の値が小さい場合と同様に渦の合体が生じにくいためである。

一方、田中<sup>12)</sup>による二次元の ripple の場合に対して計測された結果は V 字形板の  $\theta=180^\circ$  (流れを横切る方向に置かれた鉛直板) の場合の Strouhal 数よりわずかに大きめの値を示している。これは、底面積の広い二次元物体の場合には、剥離領域が小さくなっており、発生した渦が合体を繰り返す以前に下流に放出されてしまうため、放出周波数が直状の場合に比較して大きくなるためである。

### 5. 渦の頭の上昇高さに及ぼす V 字形板の角度 $\theta$ の影響

Fig. 10 は V 字形板により生じる渦の頭の上昇高さの流下方向変化を示している。同図に示されている上昇高さはいずれも 10 個のサンプルの平均値である。 $\theta=0^\circ$  の場合を除き、いずれの場合にも上昇流は V 字形板から V 字形板高さの 6 倍程度流下する間に V 字形板の約 3 ~ 4 倍程度上昇している。これは、主流が V 字形板交会部に集中しそこで圧力が上昇すること、および、流れが上向きに向きを変えられるためによる上昇であり、これは、Fig. 3(c) でいえば、矢印までの間に相当している。しかし、これより下流での上昇は、渦の自己誘導速度によるものであり、V 字形板の上流側を緩やかなスロープをつけて板の交会部上端まで埋めた場合でもほとんど影響を受けなかった。逆に、この部分の上昇は渦の強度に支配されるため、 $\theta$  の影響を強く受けている。しかし、 $\theta=180^\circ$  の場合を除いて、上昇高さは V 字形板の約 8 倍程度以上にまで達している。 $\theta=180^\circ$  の場合に上昇高さが低

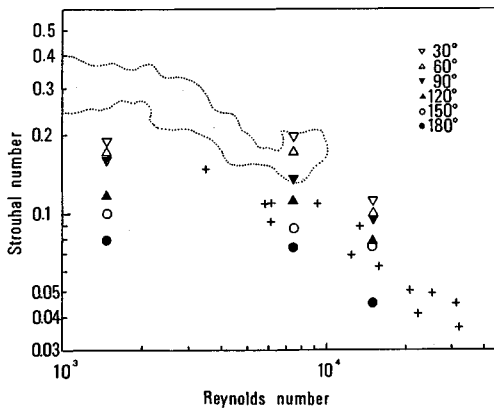


Fig. 9 Reynolds number effect on the vortex shedding Strouhal number. ....: T, AT<sup>3)</sup>, +: ripple model<sup>12)</sup>.

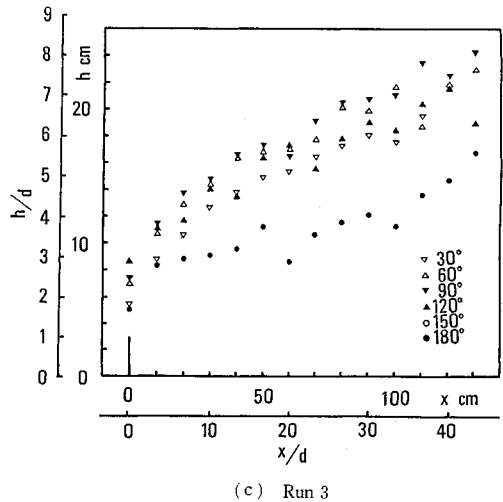
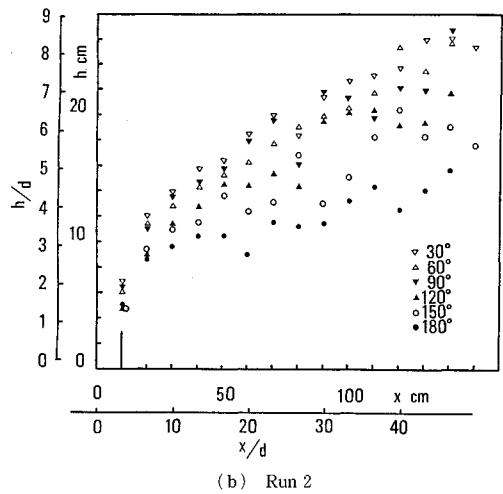
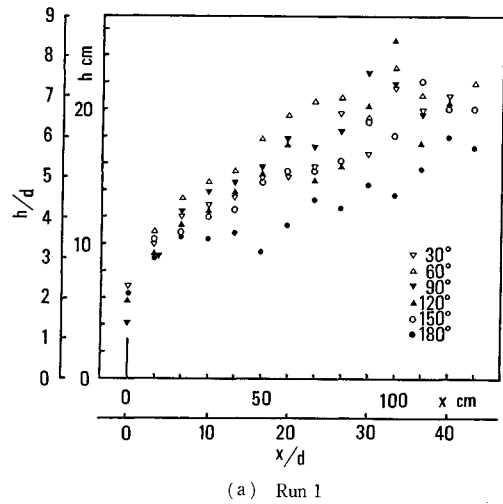


Fig. 10 Rising height of the vortex head.

いのは、流れは板を乗り越える際にいったん上昇しても、V字形板高さの10倍程度下流の位置で底に再付着するために下降する。しかも、この場合に生じている渦の形態は流れに直角な直線状の渦に近く、上向きの運動量を発生させる機構はほとんどが存在しないため、渦は再び大きく上昇することはない。それゆえに、この場合には上昇高さはV字形板の約3~4倍程度にとどまってしまう。しかし、下流に行くに従って、直線状の渦に変形が生じ、馬蹄形の渦を生じて上昇することもあるが、この頻度は少なく不規則である。しかも、実際の規模を念頭においた小Reynolds数の領域では(渦動粘性係数を用いたReynolds数はむしろ小さくなる)、頻度はより少なくなる。したがって、こうした場合には小規模な乱流によって引き起こされる乱流拡散による染料の広がりは存在するが、強い上昇流が生ずることはない。

Reynolds数  $Re$  が  $Re=14\,800, 8\,210$  というように十分大きい場合は、渦の頭の上昇高さは  $Re$  には依存せずほとんど一定となる。それに対して、 $Re=1\,470$  と小さくなると渦の頭の上昇高さは多少小さくなる。このように、Reynolds数が小さくなると、上昇高さが小さくなるのは、渦の部分に集中している渦度が相対的に速く減衰もしくは拡散するために上昇する力が弱められるためである。

しかし、このように、発生時点ですでに馬蹄形をしており上向きの自己誘導速度を有している場合には、早い時期から上昇を始めるために、渦度の拡散の影響を最小限に抑えることができる。このことが、V字形板を用いる利点といえよう。

Fig. 11はV字形板から1m下流の点における渦の頭の上昇高さをV字形板の角度  $\theta$  との関係で示したものである。これらのケース以外の結果も総合すると  $\theta$  の増

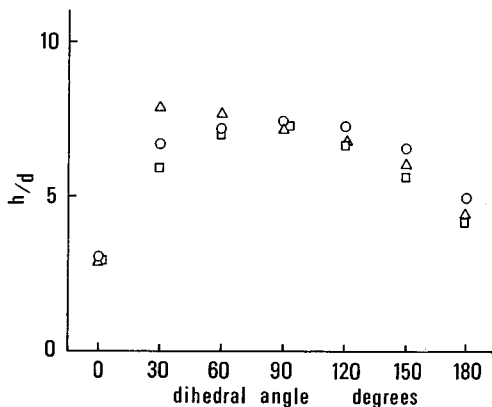


Fig. 11 Rising height at 1 m downstream from the plate (Circles: Run 1, triangles: Run 2, squares: Run 3).

加に伴って、上昇高さは  $\theta=90^\circ$  までは増加傾向を示し、 $\theta=90^\circ, 120^\circ$  あたりで最大値をとり、そのち減少する。これは、 $\theta$  が小さい場合には馬蹄形渦はほとんど形成されず上昇流は弱いままであり上昇高さは小さいのに対して、 $\theta$  が大きい場合には渦の合体が少なく、強い自己誘導速度を作り出せないためである。

## 6. む す び

本研究では、V字形構造物によって発生する馬蹄形渦の上昇高さについて実験的に調べた。本研究より得られた主要な結論を以下に列挙する。

(1) 流れの中にV字形構造物を置くことによって人工的に馬蹄形の渦を発生させることにより効率的に鉛直循環流を作り出せることがわかった。

(2) V字形構造物によって発生させられる馬蹄形渦の頭は渦のもつ自己誘導速度によって構造物の高さの10倍程度まで上昇させることができる。

(3) V字形構造物後方に発生する渦は剝離領域内でいくつか合体した後に後方に放出される。合体の頻度はV字の角度が小さいほど少なくなるためそれぞれの渦自体の強度は小さくなり、下流でのStrouhal数は大きくなる。

(4) 渦の頭の上昇高さはV字の角度が  $90\sim 120^\circ$  付近で最大となる。この理由は、角度が大きくなりすぎると渦の両足が離れすぎて自己誘導速度が小さくなり、また、小さくなりすぎると渦の循環が弱くなるためである。

海洋中の流れを構造物に衝突させ、海底の栄養塩を海面にまで浮上させてプランクトンの増殖を促し、漁場を開拓しようという構想がある<sup>13)</sup>。このため、いくつもの構造物の形が考えられてきているが、その中のいくつかは明らかに馬蹄形渦が大きく関与した仕組みである。一方、河道内でみられる河床波付近に発生する上昇流も、馬蹄形渦によるものが多く、その研究は細部にわたっている。それでは、こうした従来の研究成果を上昇流を発生させることに役立てることができないかというのがこの研究のそもそもの始まりである。したがって、流れそのものの細部の探求に目的があるわけではないので、確認された細部の現象で従来の研究ですでに明らかになっているものと同じであると判断した部分の記述はできるだけ少なくした。さらに、適用すべき現象は、ここで明らかになったものより桁違いに大きなものであり、ここで細部について明らかにしてもそれがそのままあてはまるものではない。もちろん、ここで得られた鉛直循環流そのものも全く違ったものになる可能性もないわけではない。しかし、少なくとも、水平な流れを構造物を用いて上昇流に変える際に用いる構造物として、ここに提案した構造はきわめて効率の良いものといってい

う。

本研究で提案した V 字形構造物を利用して鉛直循環流を発生させる方法は、成層の破壊や物質混合の促進だけでなく、河川における河床形態の制御、海岸における漂砂の制御などへの幅広い利用の可能性も考えられ、基礎技術としての工学的な利用価値は高いといえよう。

なお、研究を進めるにあたって湧昇流開発・利用研究会（会長：小松利光九州大学助教授）の諸氏からさまざまな形での援助を受けた。また、埼玉大学 池田駿介先生（現・東京工業大学）から貴重な意見を賜わった。さらに、査読者の意見はどれも本論文を構成するうえできわめて有益であった。最後に、本研究は中川博次、瀬津家久両先生をはじめとする多くの研究のもとに成り立っている。ここに、記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Hunt, J.C.R.: The effect of single building and structures, *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*-269, pp.457~467, 1971.
- 2) Hunt, J.C.R. and Snyder, W.H.: Experiments on stably and neutrally stratified flows over a model three-dimensional hill, *J. Fluid Mech.*, Vol. 96, pp.671~704, 1980.
- 3) Tamai, N., Asaeda, T. and Tanaka, N.: Vortex structures around a hemispheric hump, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 39, pp.301~314, 1987.
- 4) Jackson, J.G.: Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomena in geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 77, pp.532~560, 1976.
- 5) Nakagawa, H. and Nezu, I.: Experimental investigation on turbulent structure of backfacing step flow in an open channel, *J. Hydraulic Res.*, Vol. 25, pp.67~88, 1987.
- 6) Viets, H., Bethke, R.J. and Bougine, D.: Three-dimensional vortex dynamics near a wall, *Turbulent Shear Flows*, 4, Springer-Verlag Berlin, Edited by L. J.S. Bradbury, F. Durst, B.E. Launder, F.W. Schmit and J.H. Whitelaw, pp.34~45.
- 7) Ikeda, S. and Asaeda, T.: Sediment suspension with rippled bed, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp.409~423, 1983.
- 8) 木下良作：並列らせん流れに関する実験的研究，河道形状と洪水流に関する検討業務報告書，石狩川開発建設部，35 p., 1977.
- 9) 宇民 正・上野鉄男：河床波上の流れの三次元構造，京都大学防災研究所年報，第 24 号，B-2，pp.297~313，1981.
- 10) Asaeda, T.: Rising Current Produced by a V-Shaped Obstruction, *Res. Rept. Dept. Found. Eng. & Const. Saitama Univ.*, Vol. 19, pp.47~58, 1989.
- 11) 有田正光：有田レポート，p.10，1989.
- 12) 田中博通：砂漣モデル上の流れの構造について，第 30 回水理講演会論文集，pp.595~600，1986.
- 13) 大竹臣哉：湧昇流発生構造物の開発を例とした水産土木技術システム化の提言，*海洋科学*，Vol. 20, pp.395~401，1988.

(1990.4.26・受付)