

V字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率

VERTICAL CONVECTION PRODUCED BY A V-SHAPED PLATE STRUCTURE IN THE STRATIFICATION

浅枝 隆* 其阿弥喜嗣** 吉田一男***

By Takashi Asaeda, Yoshitsugu Gomi, Kazuo Yoshida.

Strong convection can be produced by placing a V-shape plate against a horizontal flow. Vortices shed from the plate and coalesce with neighboring ones to form a horse-shoe shaped vortex. The self-induced upward motion produced due to the shape and the flow converging and surmounting the plate raises the Vortex head, resulting the formation of the Vertical convection below. The maximum height can be attained with the dihedral angle of 90° . Although this height decreases in the stratification, the V-shape effect works efficiently.

Keywords: V-shaped structure, horse-shoe shaped vortex, Stratification, Vertical convection.

1. はじめに

貧酸素水塊の発達や青潮の形成は、密度成層と富栄養化が原因と言われている。このような密度による成層が環境悪化の原因になっている場合の対策方法の一つとして、鉛直方向の循環流を発生させ混合を促進させる方法がある。これらの発生方法には、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、その際生ずる剥離渦を利用する方法は、自然のエネルギーを利用する方法であり、大規模なものにも利用できるため、有効な方法である。

こうした現象は自然界でもしばしば観察され、その研究もなされている。たとえば、玉井・浅枝等¹⁾は、山のまわりの大気の流れの研究において、流れの中に半球を置きその下流側の流れを観察している。それによれば、半球の位置で馬蹄型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を報告している。一方、河川においてはボイル、コルクと呼ばれる強い上昇流が観察されている。Jackson²⁾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、中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。池田・浅枝³⁾は河床にできる三次元的な砂運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、砂運まわりに発生する馬蹄型渦によるものであり、この上昇流は砂運の三次元的な形状に起因していることを強調している。

以上のような研究を総合すると、強い上昇流を発生させるには、下流向きに尖った剥離域を発生させ、馬蹄型の渦を作り出すことが効果的であると言えよう。

そうした中でV字型をした板状構造物（一般にはV字形構造物と呼び、実験で用いたものはV字形板と呼ぶことにする。）は、流れの集中による効果も期待でき、より効率的なものとなることが考えられ、単純な形状であるため、人工的に作成が容易である。そこで、こうした構造物を用い、その周辺に生じる流れの構造を調べ、より効果的な形状を考える上での基礎材料を得た。

2. 実験

2. 1. 単層流中の実験

実験は、長さ20m、幅40cm、深さ40cmの循環式可変勾配水路を用いて行なった。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設置した。V字形板の高さは3cm、長さは各辺が20cmであり、そのなす角度 θ は 0° から 180° まで 30° 間隔で変化させた（Fig. 1参照）。なお、V字形板の長さはこの程度の長さで発生する鉛直循環流が最も強くなったので、本実験ではV字形板の各辺の長さを一定とした。

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

** 国土総合建設株式会社 技術開発部

*** 株式会社青木建設 研究所

流れの可視化は、トレーサーに染料（ウォーターブルー）及びアルミ粉末を用いて行なった。ウォーターブルーは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、水路内に直径 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、写真撮影を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速度の最低値が 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。

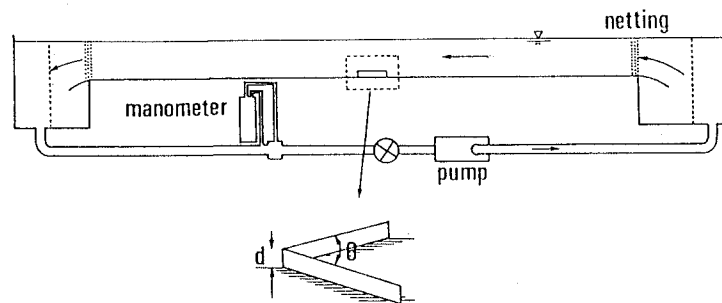


Fig.1 Apparatus for homogeneous water experiments and V-shape plate

2. 2. 成層流中の実験

実験はまず、長さ 10 m 、幅 40 cm 、深さ 50 cm の水槽に塩分により密度が線型に変化する成層を作成した。次に、水面に浮かべた板の下側にV字形板を取り付け、この板を等速度で引っ張る装置を作成し、実験をおこなった（Fig. 2参照）。流れの可視化には、シャドウグラフ法と染料による方法を併用した。

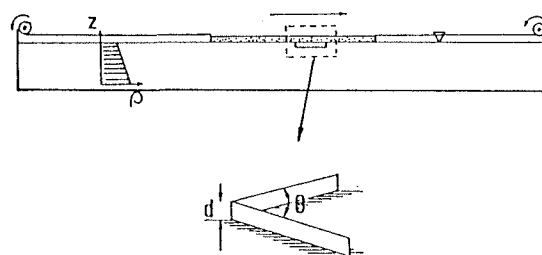


Fig.2 Apparatus for liner stratification experiments

3. 流れの様子。

Fig. 3(a) ~ (c) は流水路床にV字形板を置いた時の典型的な流れのパターンを示している。またこれらから得られた流れの概況をFig. 4.に示す。V字形板の開き角度 θ が $30^\circ \sim 150^\circ$ のときの流れの様子は、次のようなものである。V字形板のすぐ下流側に三角形の剥離域が形成され、その中で強い逆流が発生する。逆流域内では、まず、V字形板の両端の下流側に強い渦が発生し、この渦が逆流域内を板にそって引き伸ばされ、らせん状の渦を形成する。この渦は反対側から発生してきた渦と結合しており、馬蹄形をしている。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、剥離域内でいくつか合体した後、周期的に下流に放出される。しかも、その際には、V字形板の角に向かって集中する流れにのって、下流方向斜め上向きに放出されるため、この渦は放出時点からすでに上昇を開始している。

また、この時に特に渦の頭の部分がより加速され放出されるため、馬蹄形がより細長くなる。ところが、このような形の渦は両方の脚がお互いに上向きの上昇力を持ち、しかも、その力は渦の頭に近づく程大きい。従って、この渦は鉛直方向に引き延ばされながら流下する。こうした渦は次々に形成されるため、流下方向に一列に並んだ渦列が形成される。ところが、それぞれの渦の脚のまわりには内側で上向き、外側で下向きの循環が存在し

ているため、全体として流れ方向に伸びる鉛直の強い循環流を生じさせる。

一方、V字形板の開き角度 θ が 180° のとき、言い換えれば流向と垂直に鉛直板を設置した場合は、前述の流れの様子と大きく異なる。(Fig.3(c)及びFig.4(b)参照。) 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樣で、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、渦度の拡散のほうが速く起こるために、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。

4. V字形板の開き角度 θ

と渦の上昇高さの関係
(単層流中の実験結果)

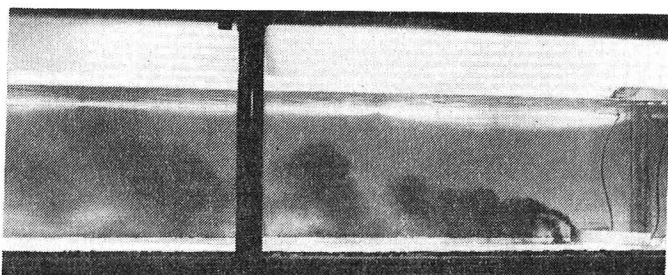
Fig.5 は、単層流中でV形板により生じた渦の頭の上昇高さの流下方向変化を示したものである。上昇高さ h 、流下距離 x は、V字形板の高さ d で無次元化して示してある。また、ここに示した上昇高さは、同様の実験を10回づつ行い得られた結果の平均値である。

これを見ると、上昇流は、板の高さの6倍程度流下する間までは、V字形板の開き角度 θ に関係なく、板の3~4倍程度上昇している。これは、主流がV字形交会部に集中しそこで圧力が上昇し、流れが上向きに向きを変えられるためによる上昇であるからである。

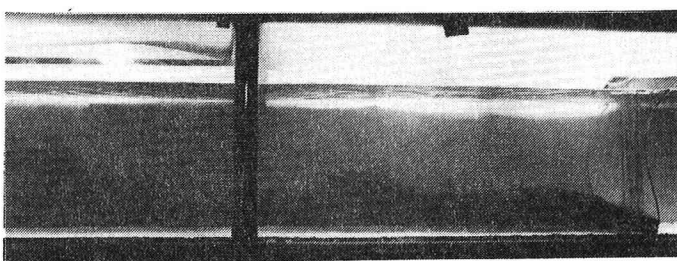
しかし、これより下流での上昇は、渦の強度に支配されるため、V字形板の開き角度 θ の影響を強く受けている。角度に対する上昇高さを見ると、 $\theta = 90^\circ$ までは、 θ の増加に伴って、上昇高さは増加する。 $\theta = 90^\circ, 120^\circ$ あたりで最大値を示し、そののち減少



(a) 30°



(b) 90°



(c) 180°

Fig.3 Visualized flow patterns

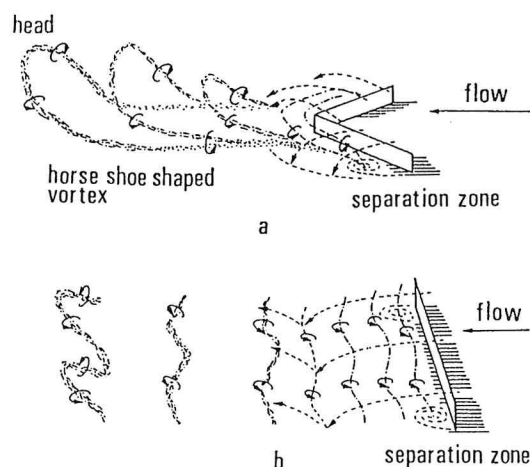


Fig.4 Diagram of flow patterns: (a) $30 \sim 150^\circ$, (b) 180°

する。この時、上昇高さの最大値は、板の高さの8倍以上に達する。

一方、 $\theta = 180^\circ$ の場合には、板を乗り越えることにより上昇した流れも、板の高さの10倍程度流下した位置で下降する。しかも上述のように、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がほとんど存在しない。下流にいくに従って、直線状の渦に変形が生じて上昇しても板の高さの3~4倍程度にとどまってしまう。しかも、実際の規模を念頭においた小さなReynolds数 ($= U d / \epsilon$, ここで ϵ は渦動粘性係数) の領域では、馬蹄形渦を生ずる頻度はより少なくなると考えられる。

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には存在するが強い上昇流が生ずることはない。

5. 成層流中での上昇高さ

Fig.6 は、成層流中での渦の頭の上昇高さの流下方向変化を示したものである。この結果は成層の強さを表す量 $Ri = d \rho / \rho_0 \cdot d z \cdot g d^2 / U^2$ (Richardson数) が0.124 及び0.280の場合を示しており、それぞれのV字形板の開き角度での結果である。ここで、 ρ は水の密度を、 ρ_0 はその代表量を、 g は重力加速度を、 U は流速を示している。通常の海域に高さ30m程度の構造物を作るとすれば、 Ri は0.1~0.3程度の値となる。

まず、 $Ri = 0.124$ の場合を見るとV字形の開き角度 θ が 90° のとき、渦の頭の上昇高さが板の高さの3倍以上に達し、しかもその高さが長い間保たれることを示している。但し、V字形板の開き角度をそれより大きくしても小さくしても上昇高さは小さくなる。初期に急激に上昇するのは、V字の頂角にそって発生した馬蹄形渦の上昇力と頂角に集中し上向きに向きを変えた流れの両方によるものである。馬蹄形渦の上昇力は存続するため、渦の上昇した高さは長い間保たれる。

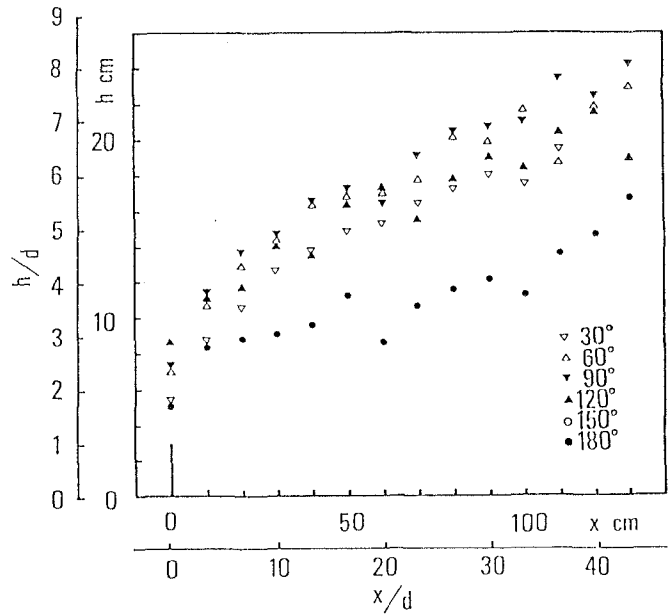


Fig.5 Rising height of the vortex head

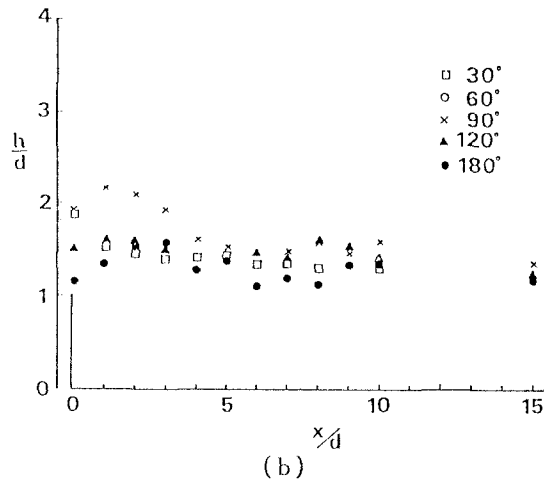
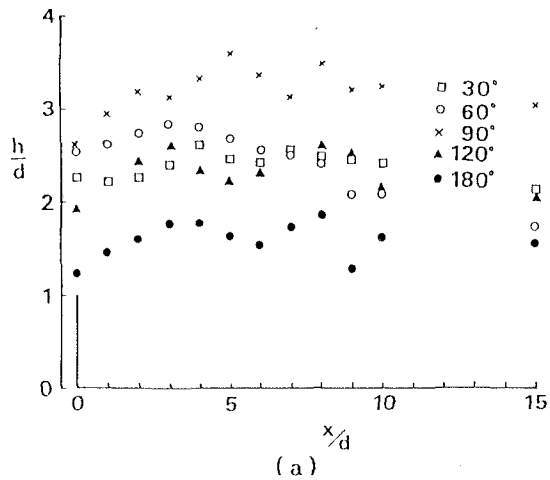


Fig.6 Rising heights of the Vortex Head in the linear stratification (a) $Ri=0.124$, (b) $Ri=0.280$.

一方、 $Ri = 0.280$ になると成層の強度が極めて大きくなり、もはや馬蹄形渦の上昇力だけでは上昇出来なくなる。しかし、V字形の頂角に集中し、上向きになる流れが存在するため、開き角 90° の時には上昇高さは、やはり2倍以上の高さにまで達している。ところがその後は馬蹄形渦の上昇力だけでは維持出来ないため徐々に降下しているのがわかる。

尚、実際の海域では強い乱流のために上昇した水と周囲水との間の高い混合が期待出来るために、下降する度合いはこの結果より遥かに小さいものと考えられる。

このようにV字形構造物の場合には強い成層流中でも馬蹄形渦の上昇力、流れの集中による上昇の二つが期待でき、極めて効率的に渦の上昇を促すことが出来る。

最後に、最大上昇高さを表すパラメー

タについて考えてみる。密度の大きい渦が、上昇することによる重力効果は、成層の密度勾配で代表され、馬蹄形渦の強さ、頂角に集中した流れの上昇力は、平均流速 U で代表される。従って最大上昇高さは、これら二つの量の比であるRichardson数の関数として表されると考えてよいだろう。

fig. 7は、Richardson 数と最大上昇高さを示したものである。これにより成層した水中での鉛直循環流の上端の上がり高さは、Richardson 数の関数として与えられることがわかった。

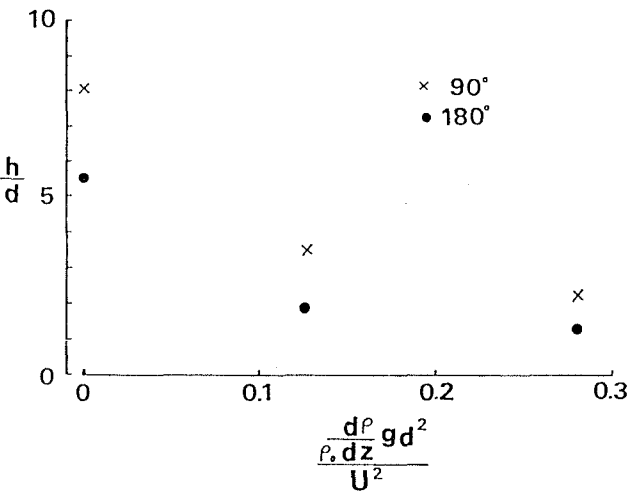


Fig.7 Maximum rising heights of the Vortex head vs. the Richardson Number.

6. むすび

海洋中の自然の流れを利用して、海中の鉛直循環を活発にすることは、富栄養化などの水質浄化だけでなく、海底の栄養塩に富んだ新鮮な水を水面付近に持ち上げて、生物生産を活発にするなど極めて応用範囲は広い技術とってよからう。このため、いくつかの形状をした構造物が考えられているが、その中のいくつかは明らかに馬蹄形渦の上昇力を利用したものである。それでは、その馬蹄形渦を最も効率よく生じさせるにはどうすればよいかは本研究の当初の課題であった。従ってそれに最も合致する構造物がV字形構造物とってよい。さらにこの構造物では、馬蹄形渦の上昇力だけではなく流れの集中による上昇も期待でき、流れの制御などにも利用出来る。V字形の構造物をFig.8 のように平行に並べて設置すれば、流れは外側で上昇、内側で下降するようになる。そのため、外側の流速が下がりその分内側に押し

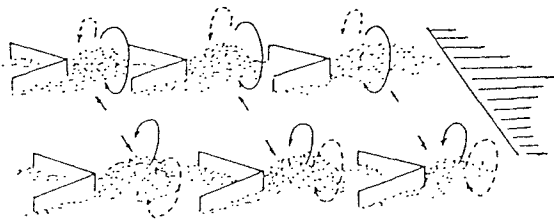


Fig.8 流れの制御と流路の安定

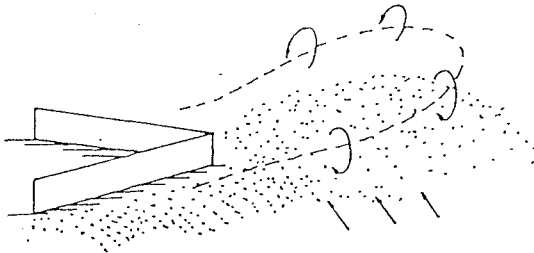


Fig.9 V字形構造物周辺の洗掘、堆積

寄せられて流れる。従って側岸付近で低流速、中心軸に沿って高流速になるため側岸の保護には有効と考えられる。さらにV字形構造物周辺の砂はFig.9 に示されるように、下流に生ずる渦のために底付近で中心軸向きの流れが存在するため、V字形板のすぐ下流に中心軸に沿って体積し、周辺で洗掘が起こる。そのため、Fig.8 のように平行に並べて設置するれば、V字列に沿って体積が盛んになり、その間の部分では掘削が進む。これにより、流路、航路の埋設防止に利用可能と考えられる。

この様にV字形構造物による鉛直循環流は、多目的に利用が出来ると思われる。最後に研究を進めるにあたって湧昇流開発利用研究会の諸氏から様々な形での援助を受けたことを、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Tamai, N., Asaeda, T. and Tanaka, N.: Vortex structures around a hemispheric hump, Boundary Layer Meteorol., Vol. 39, pp. 30~314, 1987.
- 2) 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.
- 3) Ikeda, S. and Asaeda, T.: Sediment suspension with rippled bed, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 409~423, 1983.
- 4) Asaeda, T.: Rising Current Produced by a V-Shaped Obstruction, Res. Rept. Dept. Found. Eng. & Const. Saitama Univ., Vol. 19, pp. 47 ~ 58, 1989.
- 5) 浅枝 隆・中井 正則・玉井 信行・堀川 清司: V字形構造物による上昇流, 土木学会論文集 第423号/II-14 pp. 83~90, 1990.