

各種構造物による湧昇流の発生に関する実験的研究

池田 駿介^{*}・武 若 聡^{**}・二 瓶 泰 雄^{***}・秋 山 信 義^{****}

1. 緒 言

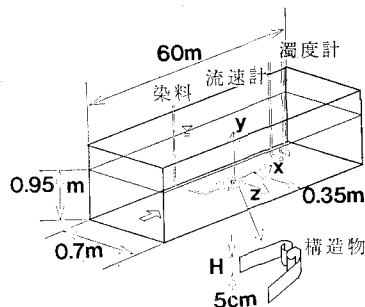
海底に構造物を設置し、潮汐流を利用して人工湧昇流を発生させる試みがある(上北ら, 1986; 今村ら, 1991). 湧昇流は海底の栄養塩を有光層に輸送し, ここに植物性プランクトンが発生し, 漁場が育成される. 人工湧昇流の強度は構造物の形状に依存し, これを効率よく発生させる形状設計が肝心となる.

これまでに提案された構造物の形状の効果とそこから生じる湧昇流については, 主に中立流れで行なわれた実験から確認されてきた(例えば, 上北ら, 1986; 浅枝ら, 1990). さらに実際の海域の成層化した潮流中での湧昇流発生を対象にした研究(例えば, 明田ら, 1989; 浅枝ら, 1991; 今村ら, 1991)も行なわれている. しかしながら, 人工湧昇流の発生機構に対する理解を深め, 構造物形状の合理的な設計に対する指針を得るという観点からは, 中立流れ中の湧昇流のメカニズムに関する詳細な研究を行なう必要があると思われる.

本研究では構造物の後流域に収束上昇流及び馬蹄形状の組織渦を発生させ, これらによる湧昇効果を利用して物質を上方へ輸送する湧昇流を効果的に発生させる構造物形状を考案する. さらに各構造物を中立流れ中に設置し発生する湧昇流の全容とその上昇機構の詳細を可視化, 速度・濃度測定により捉え, 流れの上昇メカニズムを解明する.

2. 実験方法

実験は鹿島建設技術研究所の長さ 60 m, 幅 0.7 m の循環式閉水路で行なった. 構造物は上流端及び下流端の影響が少ない水路中央の床上に設置した. 実験は水深を 0.95 m に設定し, 断面平均流速が 0.1 m/s (Run-1) 及び 0.2 m/s (Run-2) の条件の下で行なった. 構造物の高さは後述するように 0.05 m に統一した. また, この本実験に先立ち東京工業大学水工研究室の長さ 6 m, 幅 0.4 m の小型水路で構造物形状の詳細を定める予備



図一 構造物の設置状況及び実験装置

実験を行なった. ここでは水深を 0.2 m, 断面平均流速を 0.04 m/s に設定し, 構造物の高さは 0.03 m とした.

構造物背後の流れ場, 湧昇流の到達高さを可視化するために染料を構造物の上流側から連続的に供給し, この状況を VTR 及びカメラにより撮影した. 水平及び鉛直方向の速度成分の測定には電磁流速計(東京計測機製), 染料の濃度測定には光電式濁度計(計測技術研製)を用い, 各々の鉛直分布を水路中心に沿って構造物の背後 2 m まで計測した(図一). 測定される鉛直方向速度成分には, 電磁流速計プローブの取り付け角度が僅かに傾斜するだけで, 大きな誤差が生じる. ここではこれを防ぐために, 各測定位置でプローブの取り付け角度をレベルを用いて確認した. 図中に示すように x 軸を流下方向, y 軸を鉛直方向, z 軸を横断方向座標とする.

本研究で用いた染料は粉状のウォータブルー原材料($C_{37}H_{27}O_9N_3S_9Na_2$, 第一化成工業(株)製)を水に溶解させて作成した. この溶液の光学的濃度は溶解直後から時間経過と共に減少し, 濃度変化は約 24 時間程度経過した段階で殆ど認められなくなる. 濁度計を用いて定量的に染料濃度の測定を行なう際には, この点に注意を払う必要がある. なお, 染料濃度と濁度計出力は線形関係にあった.

3. 構造物の形状

構造物は効果的に湧昇流を発生させることを意図して試行錯誤的に多数作成した. 試作された構造物から発生

^{*} 正 会 員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

^{**} 正 会 員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科

^{***} 学生会員 東京工業大学大学院

^{****} 正 会 員 工修 鹿島建設(株)技術研究所

する湧昇流の流況及び到達高さを確認する可視化実験は小型水路内で行なった。この後、これらの中で上昇性能の良かった 図-2 に示す A, B, C 及び浅枝ら (1990, 1991) により提案されている V 字形の構造物についてより詳細な可視化実験及び速度・濃度測定を循環式開水路内で行なった。

図-2 に示す各々の構造物は 1) 後流域の剝離領域内に発生する収束上昇流、及び 2) 剝離領域から放出され

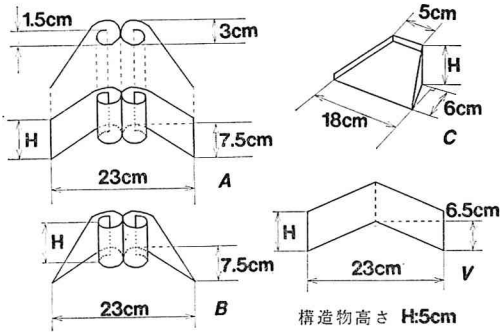


図-2 構造物の形状

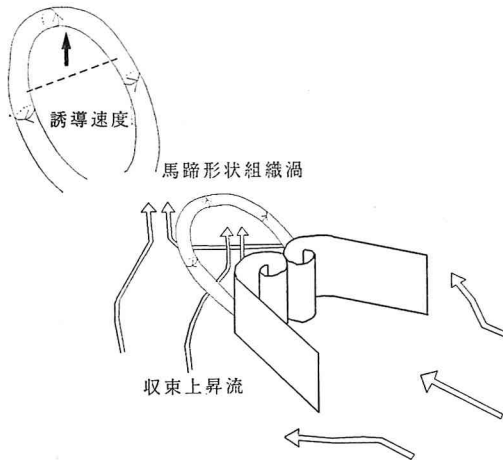


図-3 収束流と馬蹄形組織渦による湧昇効果

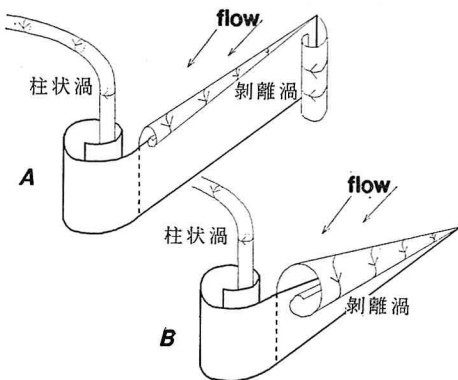


図-4 柱状渦と剝離渦

る馬蹄形状の組織渦の自己誘導速度、の両者の効果を利用して流れを上昇させることを意図して形状が定められている。図-3 は 1) 及び 2) の効果で得られる上昇流のイメージを描いたものである。自己誘導速度とは図中に示す組織渦の脚間に生じるの渦相互干渉効果により誘起されるものである。

次に各構造物形状が狙いとした効果について述べる。

構造物 A 及び B の円筒は流下方向に軸を持つ柱状渦を発生させ、馬蹄形渦の循環を増加させる効果がある。また、側面部の形状の違いは剝離領域への渦度供給に係わり、これもまた馬蹄形渦の形成に寄与する。すなわち、構造物 B の斜状の側面にはデルタ翼から発生する翼端渦と同質の流下方向に軸を持つ渦が連続的に剝離する。これに対して構造物 A の側面部は切り立っており、不規則な剝離に伴う渦が後方の剝離領域に向けて放出される。以上に述べた構造物 A 及び B が作る渦の特徴について図-4 に示す。

構造物 C は実河川でボイルを引き起こす河床波 (例えば Ikeda and Asaeda, 1983) を参考に考案した。構造物の高さを統一しつつ、上述の 1) 及び 2) の効果が最も効果的に現れる各辺の長さを試行錯誤的に求めたところ、図-2 に示す他の構造物よりも若干小さい寸法が得られた。

構造物 V の形状に関する考察は浅枝ら (1990, 1991) に詳しいのでここでは省略する。

4. 可視化実験

4.1 構造物背後の流況

可視化実験は各構造物を循環式開水路に設置し、断面平均流速を 0.1 m/s (Run-1) 及び 0.2 m/s (Run-2) に設定して行なった。構造物高さ H を代表長としたレイノルズ数は各々 5.0×10^3 (Run-1), 1.0×10^4 (Run-2) となる。

各構造物背後に生じた流れのマクロなパターンは全ての構造物に共通し、流速条件の違いによる差は見られなかった。しかしながら、湧昇流到達高さには明確な差が現れ、これは各構造物背後に生じていた流況の微妙な差異に依存していたと考えられる。この点に関しては後節

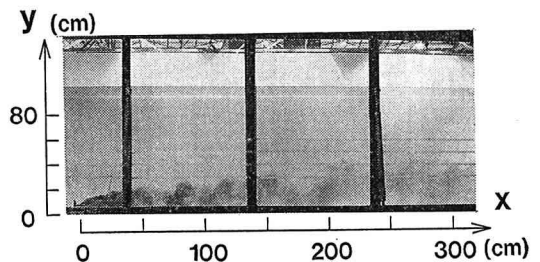


写真-1 可視化された湧昇流 (構造物 A, Run-2)

で詳しく議論することとし、ここでは構造物Aを例に流況の詳細を説明する。

写真-1 は構造物Aの上流側に注入された染料が下流側で上昇している様子 (Run-2) を水路側面から写したものである。染料は構造物の下流 $x=60H$ の地点で $y=10\sim12H$ 程度まで上昇している。染料は構造物を越える流れが再付着するまでの剝離領域及びその近傍 ($x<20H$) に連続的に分布している。これに対して、これより下流側では染料は間欠的に発生する馬蹄形状の組織渦に取り込まれて移流するので不連続的に分布している。また、染料塊は下流に進むにつれて鉛直方向に起き上がった分布形になり、これは次に述べる馬蹄形状の組織渦の自己誘導速度の効果が現れたことを示している。

構造物A近傍の流況を示したものが図-5である。構造物背後の剝離領域には構造物縁端から供給される渦度が集積する。馬蹄形状の組織渦はこの領域を囲む上面に形成され、その足は剝離領域内部に延びている。渦度がある程度供給された段階で馬蹄形状の組織渦は間欠的にこの領域から放出され、自己誘導速度と構造物背後への収束上昇流により上昇する。浅枝ら (1990, 1991) は上昇する馬蹄形状の組織渦の脚部は剝離領域に伸びたまま下流へ移流・上昇するという結論を可視化実験から得ている。しかしながら、著者らの観察ではこの馬蹄形状の組織渦は剝離領域から放出された後に、図-5に示すような渦輪状の形に移行するように見受けられた。ただし、渦が剝離領域から放出された後に、図示したような形状の組織的渦塊が形成される過程を詳細に捉えることは出来なかった。

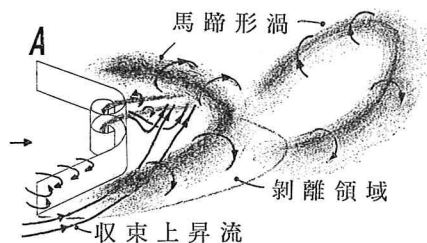


図-5 構造物近傍の流況 (構造物 A)

4.2 湧昇流の到達高さ

図-6 に VTR 撮影から読み取った各構造物背後の染料の平均到達高さおよび最大到達高さを示す (Run-2)。到達高さは VTR に撮影された各地点の染料塊の上端位置で定義した。各構造物の最大到達高さはほぼ同値である。これに対して平均到達高さは構造物 A, V, B, C の順に高く、これは収束上昇流と放出される馬蹄形状の組織渦の強さに依存していたと考えられる。

各構造物の寸法はほぼ同一であったが、構造物背後の剝離領域の大きさには若干の差が認められた。可視化に

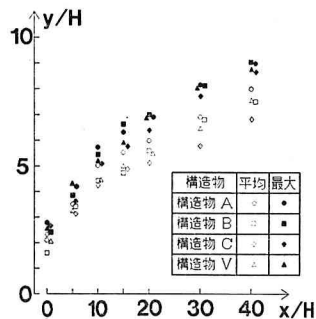


図-6 湧昇流の到達高さ (Run-2)

より判断された剝離領域の大きさは構造物Aが最も大きく、水路中心での流れの再付着点位置は $x=5\sim6H$ であった。これに対して構造物Cの再付着点位置は $x=3\sim4H$ であり、剝離領域の大きさも小さかった。一般に剝離領域の大きさとそこに生じる収束流の強度を関連付けることはできないが、ここでは発生していた収束上昇流の強さと規模は剝離領域の大きさに比例していたように観察された。

剝離領域よりも下流側での染料の上昇量は主に組織渦の強度に依存すると考えられる。写真-2 は構造物Cの場合の染料の上昇状況を捉えたものである。構造物Aの場合に比べて組織渦が規則的にかつ短い周期で放出されていたことが伺える。各構造物で剝離領域に供給される渦度の総量がほぼ同一であったと仮定すると、構造物Aは相対的に強い循環の渦を長い周期で、構造物Cは弱い循環の渦を短い周期の間隔で下流側に放出していたことになり、これが上昇高さの差に反映されたと考えられる。

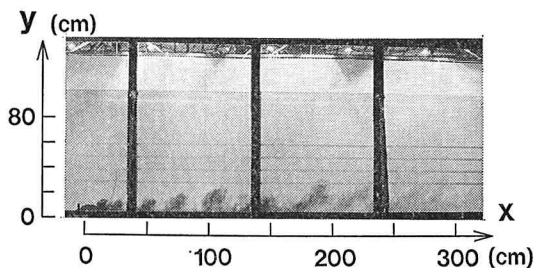


写真-2 可視化された湧昇流 (構造物 C, Run-2)

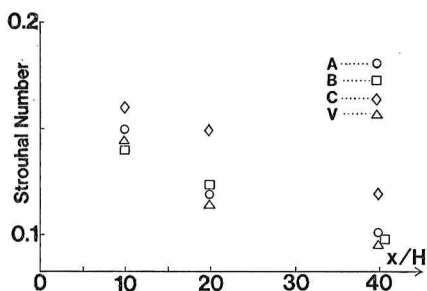


図-7 ストローハル数の変化 (Run-2)

さらに各地点での渦塊の通過周期を VTR 画像から読み取り、これをストローハル数 ($=H/U_0T: U_0$: 平均流速, T : 通過周期) を用いて整理した結果が図-7 である。構造物 A, B, V のストローハル数は流下方向に徐々に低下し、渦塊の合体が移流する過程で生じていたと考えられる。これに対して構造物 C のストローハル数の低下量は相対的に小さく、他に比較して渦塊の合体が少なかったと推測される。一般に渦塊の循環は流下する間に乱流拡散により減少するが、合体することにより循環を維持することが可能と考えられる。従って、ストローハル数の低下 (= 渦塊の合体) が構造物背後での染料の到達高さを支配する要因の一つに挙げられ、このことは図-6 及び図-7 に示した測定結果にも反映されている。

5. 速度場及び濃度場の測定

5.1 速度・濃度場

速度及び濃度の測定は同時に行なわれ、平均流速、平均濃度、速度・濃度の乱れ強度、鉛直方向運動量・染料輸送量等の分布を各構造物について求めた。ただし $x=0$ の位置ではプローブ設置の都合上から濃度測定は行なわれなかった。水平方向速度成分、鉛直方向速度成分、濃度の平均値を U, V, C とし、各々の乱れ成分を u, v, c とする。

各構造物毎の測定結果には先の可視化実験と同様、発生する湧昇流の到達高さに対応する測定値の分布が得ら

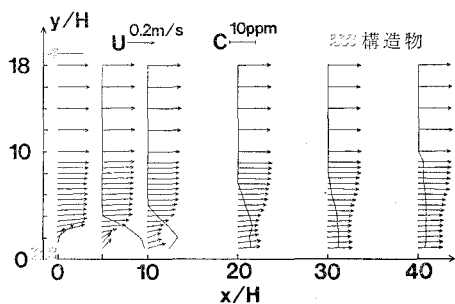


図-8 平均流速及び濃度 (構造物 A, Run-1)

れた。例えば、レイノルズ応力 ($-\overline{uv}$) の鉛直分布の最大値を示す位置を各構造物の背後で比較すると A, V, B, C の順に高くなった。ここでは構造物 A の測定結果を用いて湧昇流の構造について詳しく記述する。

平均の流速場 (U, V) 及び濃度場 C を図-8 に示す。構造物背後 ($x=5H$) には強い上昇流が見られ、これは剝離領域に収束する流れを捉えたものである。 $x=20H$ 以降では水平方向速度分布に欠損が生じており、この欠損が生じる

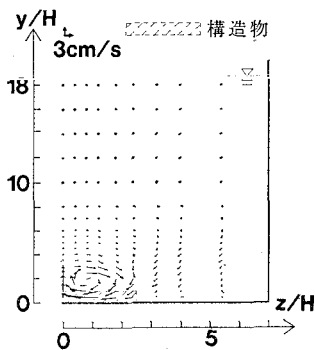


図-9 推定された水路横断面内循環流 (構造物 A, Run-2, $x=10H$)

位置は馬蹄形状の組織渦が平均的に通過した高さに対応する。水路横断面内には水路中心に生じる上昇流を補償する一対の鉛直循環流が形成され、これを $x=10H$ の地点で隣接した横断面内の速度測定結果と連続式を用いて推定したものが図-9 である。推定された構造物背後への収束流れの規模は、可視化実験の観察結果から判断してほぼ妥当なものである。平均濃度は上流から下流に向けて徐々に低下し、 $x=20H$ 以降では渦塊が通過し得る高さの範囲内に値が分布している。

図-10 には平均流 (UV) 及び乱れ (レイノルズ応力, $-\overline{uv}$) による運動量の鉛直方向輸送量の分布を示す。剝離領域近傍では平均流、つまり構造物背後の収束上昇流が運動量輸送に関して支配的であるが、 $x=20H$ 以降では乱れによる運動量輸送の寄与が大きくなる。レイノルズ応力鉛直分布の最大値を示す高さは組織渦の平均的な通過高さに相当すると考えられる。図-11 は平均流及び乱れによる染料の鉛直方向輸送量の分布を示す。図-10 と同様に染料は剝離領域近傍で主に構造物背後の収束上昇流により輸送されるのに対して、構造物の背後 $x=20H \sim 40H$ の領域では組織渦の通過に伴う輸送が支配的になる。

5.2 馬蹄形状の組織渦の構造

ここでは可視化状況の VTR 撮影及び流速測定を同時に行なった結果から、馬蹄形状の組織渦の構造につい

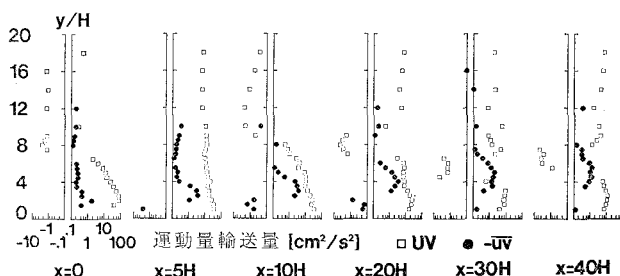
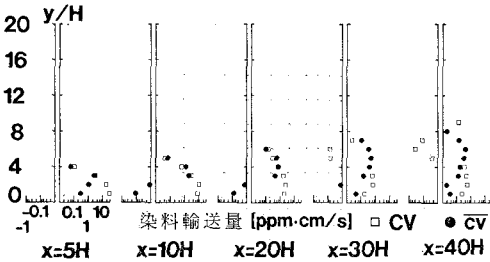
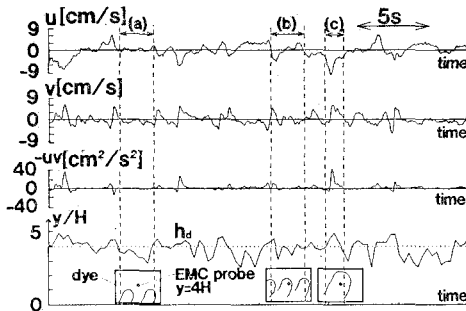


図-10 運動量輸送量の分布 (構造物 A, Run-2)
(□ 平均流 UV ; ● 乱れ $-\overline{uv}$)



図—11 染料輸送量の分布 (構造物 A, Run-2)
(□ 平均流 CV; ● 乱れ $\overline{cv}$)



図—12 流速変動と染料到達高さ ($x=10H$, $y=4H$)

て述べる。図—12に $x=10H$, $y=4H$ の位置で撮影と測定を同時に行った結果を示す。図中の h_d は $X=10H$ での染料の到達していた高さを VTR から読み取り、その時間変化を示したものである。 h_d が $4H$ よりも大きくなった時に、流速計プローブは染料塊の中にある。図より組織渦が通しない時間帯 (a) の流速変動は小さい。これに対してレイノルズ応力は染料により可視化されている馬蹄形状の組織渦の通過 (b, c) に伴い形成されることが読み取れる。馬蹄形状の組織渦の内側には低速上昇流が生じており、特に組織渦が流速測定プローブを包み込むように通過した時に大きな運動量輸送が生じ

る。また、上昇流が生じる直前には下降流が伴発生しており、これは馬蹄形状の組織渦の前面の通過を捉えたものである。このように染料塊の通過とレイノルズ応力形成には高い相関が認められ、本研究の測定範囲内では染料は渦度の集中している部分を可視化したものであると判断される。

6. 結 語

本研究では各種構造物から発生する湧昇流に関する可視化実験及び流速測定を行ない、以下の結論を得た。

- (1) 効果的に人工湧昇流を発生させる構造物の形状を定めた。その結果、最も効率のよい形状では構造物高さの12倍程度まで流れを上昇させることができた。
- (2) 構造物背後の流れは馬蹄形渦の自己誘導速度と構造物背後の収束上昇流により上昇する。運動量及び染料は構造物近傍では主に収束上昇流により、遠方では馬蹄形渦の自己誘導速度により上方に輸送される。

参 考 文 献

- 明田定満・今村 均・大竹巨哉・有富範伊 (1989): 海底構造物による密度海面の上昇・混合過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol. 36, pp. 849-853.
- 浅枝 隆・中井正則・玉井信行・堀川清司 (1990): V字形構造物による上昇流, 土木学会論文集, Vol. 423, pp. 83-90.
- 浅枝 隆・其弥喜嗣・吉田一男 (1991): V字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 387-392.
- 今村 均・藤原正幸・大竹巨哉・明田定満 (1991): 海底構造物による密度海面の上昇・混合過程に関する研究 (1), 海岸工学論文集, Vol. 38, pp. 841-845.
- 上北征男・浅岡邦一・森井伸正・大竹巨哉 (1986): 湧昇流発生構造物の開発に係わる実験的研究, 海岸工学講演会論文集, Vol. 33, pp. 342-346.
- Ikeda, S. and T. Asaeda (1983): Sediment suspension with rippled bed, J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 409-423.