

湧昇流制御構造物の開発に関する実験的研究

水産庁水産工学研究所	正会員	上北 征男
同 上	同 上	中村 充
五洋建設(株)技術研究所	同 上	渡 義治
同 上	同 上	森井 伸正
同 上	同 上	大竹 臣哉
海洋科学技術センター		続 辰之介

1. 緒 言

世界的に食糧問題が叫ばれている今日、タン白資源としての水産資源が改めて注目を集めている。200海里経済水域の浸透の早さは、領土問題だけでなく海洋鉱物資源の確保と同時にこの水産資源の戦略的位置づけによるものといっても過言ではない。このような情勢の中で、我国は、沿岸域での魚族資源の培養を目的として種づくりと場づくりを中心とした「つくる漁業」を推進してきた。この技術は、主としてタイなどの高級魚を対象として推進されてきたが、水産庁のマリノベーション構想にうたわれているように今後中低級魚を対象を広げようとしている。

このような背景の中で、湧昇流海域における漁獲量の大きさが見直されている。湧昇流海域は、海洋の表面積の0.1%程度であるが、生産量は全生産量の50%であるといわれ、ペルー沖のように大陸西岸に多い。一方、日本近海でも地形に起因した湧昇流が観測されるようになってきた。この場合も湧昇流の規模は小さいが、好漁場となっている。

以上から、本研究は、この地形性湧昇流に着目し、栄養塩の多い底層の海水を基礎生産力が増大する光合成の可能な層まで上昇・混合させる構造物の開発を目的としたものである。

2. 従来の研究

湧昇流は、従来より主として海洋学の分野で研究されてきた。たとえば、JOHES and HALPERRN¹⁾は、西アフリカモーリタリア沖の世界的な湧昇現象について1972年から78年にかけて総合的に調査し、表層の海水流動が風、流れおよび水質から説明できること、風が一日吹くと流れが生じ湧昇流が発生すること、強風の場合には40 m層まで混合層が発達することなどを明らかにした。また、PRELLER and O'BRIEN²⁾は、ペルー沖の湧昇流が、ペルー沖合160 kmにわたっていること、ペルー湧昇循環が南極方向の流れになっていること、また原因が傾圧だけでなく海底地形の影響を受けていることなどを観測および理論解析で示した。これらの湧昇流は、大陸西岸部の沿岸に風が吹き続けると、表層の海水は沿岸から沖合へ連行されるというエクマン輸送の理論より説明され、連行された表層水の補間のために沿岸近くの深層から湧き上る現象と考えられている³⁾。吉田⁴⁾によると、これらの湧昇流の空間的オーダーは 10^2 km、発生時間は 10^8 sec (1週間程度)、また上昇速度は 10^{-3} cm/sec程度としている。

一方、近年の計測技術の発達に併行して沿岸湧昇の研究熱が高まり、湧昇流に関する知見が増大した結果、吉田^{前出4)}は、先述したスケールのオーダーが空間的、時間的に小さくなってきていることを示唆した。最近いわれている地形性湧昇流という時空間的に小規模な現象等は、高度観測技術を必要とし、たとえばリモートセンシング技術によって可視化されるようになった。伊豆大島沖で観測された渦湧昇流⁵⁾は、左施回の40 km程度の規模の渦で冷水塊として出現し、その原因は、東流が大島によって剥離し、後流域に出現した渦が湧昇域として現われたとしている。したがって、湧昇域はパッチ状となり、その出現位置、出現時刻は不安定となっている。また、鹿児島南方の国生曾根は、水深が800 mの海底に高さ約600 m、平面規模数 km^2 の海山である。ここでも現地観測によって湧昇流が確認されている⁶⁾。この湧昇流は、水温分布で明らかにされたが、黒潮等の流れのはい上り現象と考えられる。さらに、山口県日本海側の汐巻礁でも湧昇流が確認されている⁷⁾。この礁は、水深80 mの海底に高さ40~60 mの凸部を2ヶ所有したラクダの背の形状を呈している。その規模は、長さ4 km、幅1 kmで、凸部の間隔は15 km程度である。ここで発生している湧昇は、水理学的に説明され、流れが礁を越える際に流速分布に変化が生じ、これによって圧力分布が変化してその圧力差で生ずる流れのことをいい、この流軸と同方向の軸をもつスパイラル状の渦であると定義した。そして、理論的には湧昇流の上昇速度は、礁の凹凸部における流速の2乗の差の平方根と同スケールとしている。

3. 現地のモデル化による水理実験

(1) 実験条件

この実験は、先述した山口県汐巻礁を対象としてその現象をモデルで再現させることを目的とした。したがって、実験条件は、現地の水深、流速、礁の規模を基準にした。表-1に実験条件を、図-1に現地をモデル化した2種類の模型を示す。

(2) 実験方法

実験に用いた水槽は、巾150cm、長さ100m、高さ100cm、の二次元開水路である。流速測定には、超音波式3次元流速計を用いた。この流速計は、振動子間隔27mmで、発信周波数10MHz、測定範囲±0.2~20cm/sec、応答周波数5, 20, 100Hzとなっている。今回の流速測定は、5Hzでサンプリングし、2分間計測した。流速測定点を図-2に示す。

(3) 実験結果および考察

実験条件No.2についての流れの状態を図-3(a)に示す。図には、平均流速ベクトルとX方向(図-2参照)の乱れ強度 u の分布を示した。剝離点が上流にあるために、後流域が大きく形成され、乱れ強度も大きい。図-3(b)には、実験条件No.4についての流れの状態を示す。剝離点が模型の頂部を越えているため後流域は小さく、乱れ強度も小さい。さらに、No.4で顕著であるが、下流側の下層部で乱れが大きい。これは、中央部の凸部によって生じた後流域に側面から回り込む乱れが合成されたためと考えられる。そこで、乱れ強度 $q(=\sqrt{u^2+v^2+w^2})$ を断面平均流速 U_m で無次元化し、X, Z方向の分布を図-4(a)(b)に示した。No.2の模型凸部中央($Y/B=0.5$)では、模型上($X/D=0$)で乱れが大きくなり、流下するにつれ深度方向($Z/D<1$)にも乱れが伝達されている。一方、No.4では、模型の下流側で乱れが大きくなり、流下するにつれ下層の乱れが上層の乱れよりも大きくなる。模型側面($Y/B=0.17$)では、No.2において距離の変化が明瞭に現われている。すなわち、 $X/D=1.2$ から下層の乱れが上層のそれより大きくなり、その差は下流まで保たれている。これは、No.4も同様の傾向を示す。

表-1 実験条件

実験No	水深H	流速 U_m	フルード数	レイノルズ数	模型高	縮尺	模型形状
1	80 cm	5 cm/s	0.018	2.5×10^4	50 cm	$\frac{1}{100}$	A
2	80	10	0.036	5.0×10^4	50	$\frac{1}{100}$	A
3	80	5	0.018	2.5×10^4	50	$\frac{1}{100}$	B
4	80	10	0.036	5.0×10^4	50	$\frac{1}{100}$	B
現地	80 m	100 cm/s	0.036	5.0×10^7	50 m	1	ラクダの背状

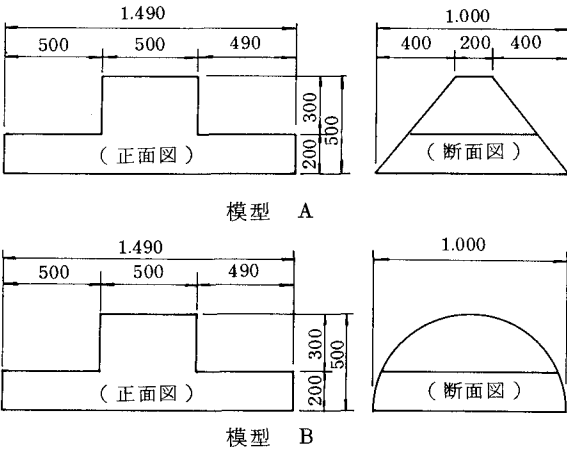


図-1 現地モデル(単位mm)

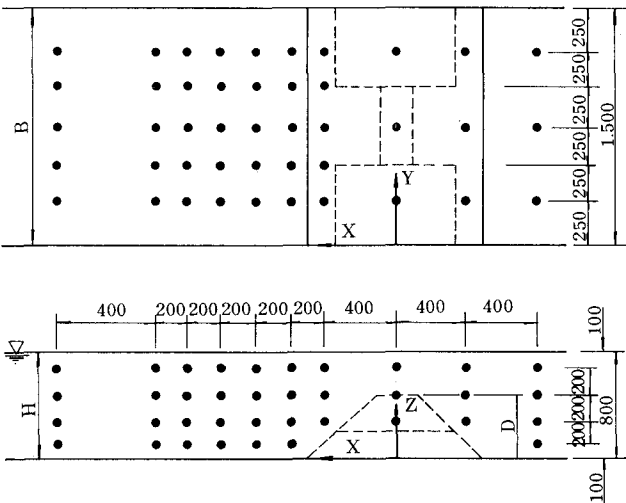


図-2 流速測定点(・測定位置)

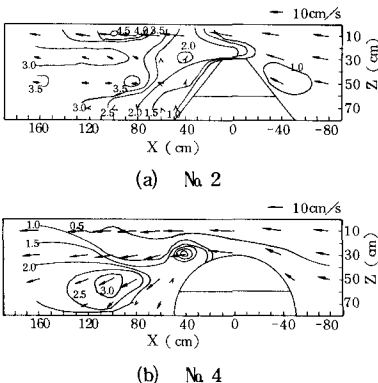


図-3 流速ベクトル分布

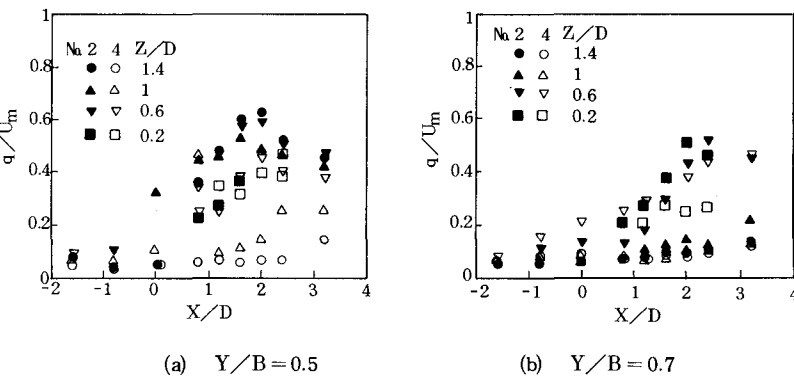


図-4 乱れ強度分布

これらのことは、剥離によって流れが乱され、その乱れが上層から下層に流下するにつれ伝播されていくことを示し、同時に側面からの乱れが加わっていることを示している。一般にレイノルズ数が十分大きければ乱れのエネルギーは大きい渦から小さい渦へ運ばれ、その過程でエネルギーの逸散はないといわれている⁸⁾。すなわち、低周波数から高周波数へエネルギーの連続的な流れとなる。図-5は、図-4で示した乱れ強度が上流、下流で異なる点のスペクトル解析である。上層の(a)では、0.1Hz以上の周波数で乱れが等方性であることを示している。また、下流側の0.06Hzでは高いエネルギーがみられる。これは、側面における周波数特性と一致しており、側面からエネルギーが伝達されていることを示している。一方、下層の(b)では、下流側のエネルギーが上流側より大きい。上述したように、側面からエネルギーが加えられたためと考えられる。なお、下流側ではエネルギーの傾きが高周波数域で変化している。底面摩擦等によるエネルギーの減衰が伺える。

写真-1は、実験条件No.2の可視化された流れである。右端に見える構造物から近い距離で大きな渦が発生している様子が見られる。この渦の径は、構造物の高さとほぼ同じ大きさ(50cm)である。

4. タイプAによる水理実験

(1) 実験条件

この実験は、前記3の実験で得られた結果をもとに、経済性を考慮して湧昇流を発生する構造物の開発を目的とした。前章で述べたように、凸部によって生じた後流域に凹部より流れが回り込み、結果的に後流域に大きな乱れが生じた。この原理を利用して、y軸に回転軸をもつ後流域とz軸に回転軸をもつ後流域を同時に発生させる施設を検討し、結果的に図-6に示す千鳥状に衝立を設置することで効果的な湧昇域が発生することが判明した。

実験条件は、前章と同様山口県沙巻礁を対象とし、縮尺比を1/300とした。表-2に実験条件を示す。

(2) 実験方法

実験方法は、基本的に前章と同様であるが、水槽側壁の影響を減ずるため、水槽中央に模型を設置した。また、流速測定位置は、現象が中心を軸に対称と考えることより、中心より片側とした。図-7に測定位置を示す。

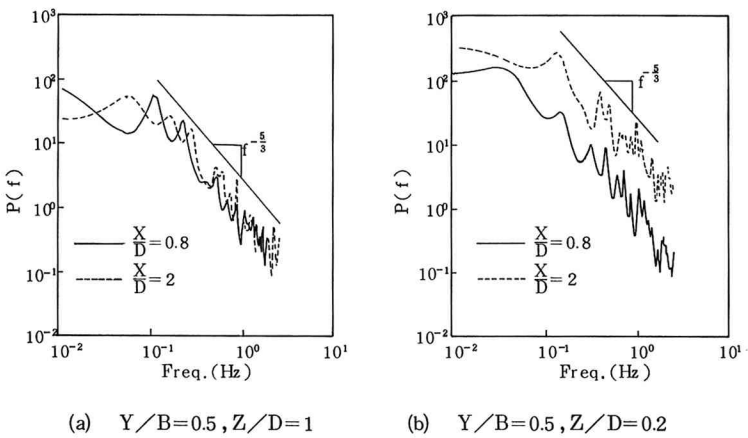


図-5 スペクトル解析 (u成分)

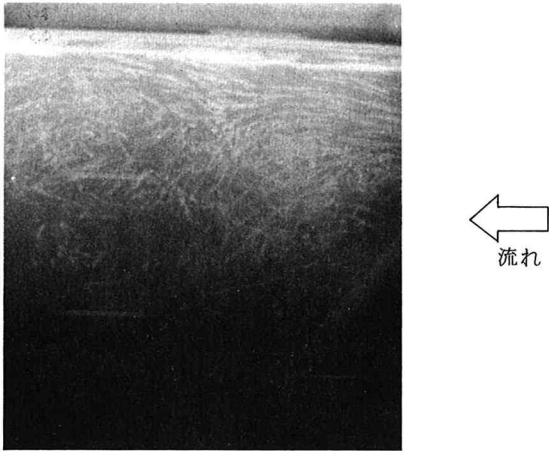


写真-1 後流域の可視化 (No.2)

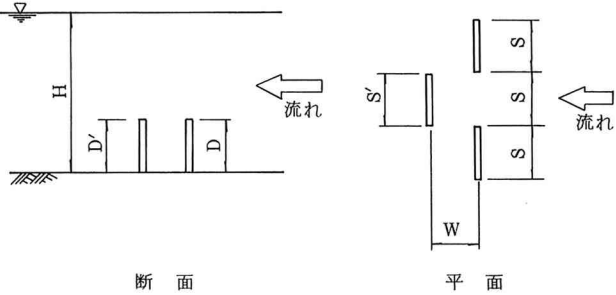


図-6 構造物の配置

表-2 実験条件

№	D	D'	S'	S	W	H	U _m	F _r	Scale
1	5.3 cm	5.3 cm	15.9 cm	15.9 cm	5.3 cm	26.7 cm	5.8 cm/s	0.036	1/300
2	5.3	5.3	23.9	15.9	5.3	26.7	5.8	0.036	1/300
3	5.3	5.3	23.9	15.9	2.7	26.7	5.8	0.036	1/300

注) レイノルズ数は、3074 である。

さらに、可視化技術は、前章と同様であるが、水面の湧昇流による変動をとられるため、図-8に示す手法を採用した。

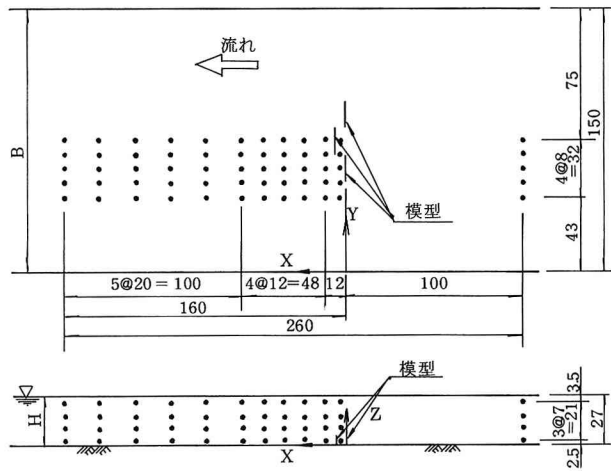


図-7 流速測定点(単位 cm,・;測定位置)

(3) 実験結果および考察
写真-2は、模型に水溶性染料を塗布し、その染料の流出状態を撮影したものである。上昇性の渦がみられるが、本研究では、これを湧昇流と定義する。この渦は、水面にまで達する。写真-3にみられる水面の変動がそれである。この水面変動より、湧昇流の発生位置は、模型の高さで異なるが、模型の位置より80～120cm下流でみられる。

流速測定による乱れ強度分布の一例を図-9に示す。図には、乱れ強度の平面分布、鉛直分布併せて示した。 $Z/D=0.47$ では、乱れが大きくなる位置が $X/D=4$ 、 $Y/B=0.39$ である。 $X/D=10$ までは、 $Y/B=0.45$ と模型の中央寄りで乱れが大きい。下流では乱れは小さくなっていく。一方、 $Z/D=3.1$ では、乱れが大きくなる位置は、 $X/D=8.5$ 、 $Y/B=0.5$ である。下流でも $Y/B=0.5$ の位置で乱れが大きい。すなわち、底層の模型の両端で発生した乱れは、流下するにつれ、上層に向いながら模型中央に伝播されていることになる。

図-10(a)は、 $Z/D=1.8$ におけるスペクトルである。 $X/D=4$ では大きな渦(0.06Hz)が発生し、小さな渦に等方的にエネルギーが伝播されている。この乱れは、(b)の $X/D=26$ のエネルギー分布にみられるように強さは弱くなるが、同じ状態で伝播されている。

これらのことより、ここで発生している渦は、大規模渦のひとつである馬てい形渦と考えられる。その模様を図-11に示す。

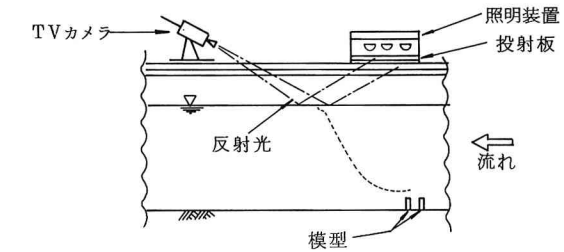


図-8 水面変動可視化システム

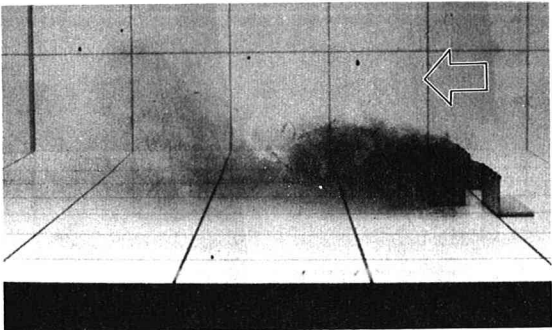


写真-2 染料による流れの可視化

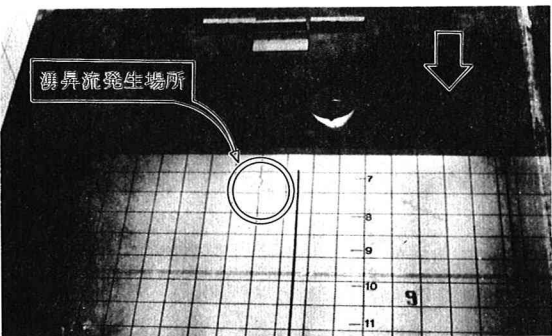


写真-3 水面変動の可視化

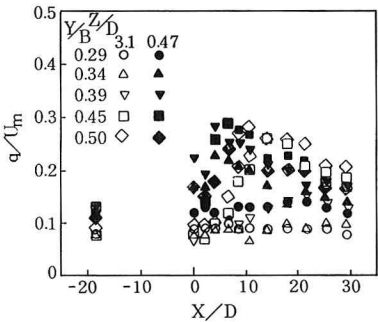


図-9 乱れ強度分布

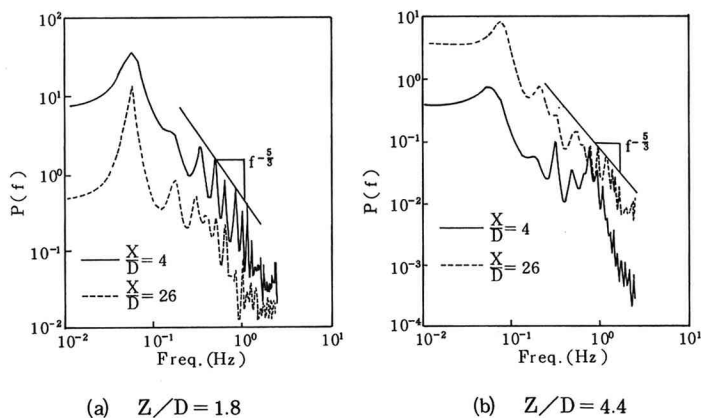


図-10 スペクトル解析 (u 成分)

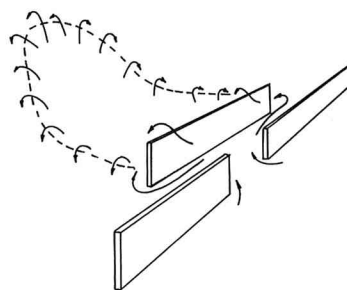


図-11 湧昇流発生状況

5. タイプBによる水理実験

(1) 実験条件

前記4において、単純な構造物を組み合わせることによって湧昇流の発生することがわかったので、さらに小型化して効率のよい湧昇流を発生する構造物を検討した。

基本的には、流れが障害物にあたった場合、Y軸およびZ軸を各々回転軸とする渦が同時に発生することに注目して、渦流の3次元的な合成と、その増幅を検討した。

模型の配置を図-12に、実験条件を表-3に示す。なお、縮尺は、水深50m、流速1.0m/sを想定して1/100とした。

(2) 実験方法

実験は、幅60cm、長さ50m、高さ120cmの循環式水槽で行った。流速測定、可視化方法は前章と同様である。

(3) 実験結果および考察

写真-4は、染料による湧昇流発生状況を示したものである。周期的な上昇流が発生していることがわかる。実験の結果、短い衝立の再付着点に長い衝立を設置すると、最も効率よく上昇流の発生することがわかった。

また、図-13は、ピーズトレーサの1秒間の軌跡を撮影し、写真から画像解析して流速分布を求めたものである。

下流側の衝立上で流れが急激に上昇していることがわかる。

一方、図-14は、流速計によって測定した2分間の平均流速分布である。(a)では、流速ベクトルが水路中央へ、(b)では、底層のベクトルが急激に上向していることがわかる。

つぎに、図-15は、乱れ強度の分布を流速毎に示したものである。乱れ強度の分布形状は、流速が変わっても相似形を示している。これは、レイノルズ数が

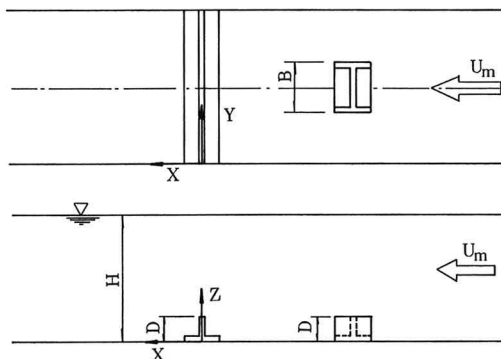


図-12 模型の配置

表-6 実験条件

実験No	H	D	U_m	B	F_r	Re	Scale
1	50cm	10cm	3.3cm/s	10	0.015	3.300	$\frac{1}{100}$
2	50	10	7.1	10	0.032	7.100	$\frac{1}{100}$
3	50	10	25	10	0.113	25.000	$\frac{1}{100}$

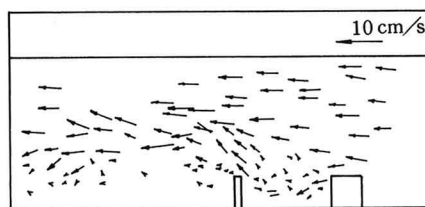


図-13 トレーサーによる瞬間流速分布

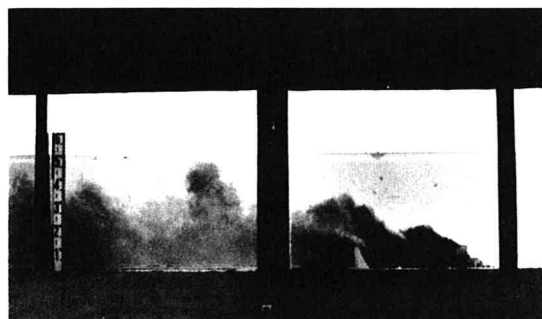


写真-4 湧昇流発生状況

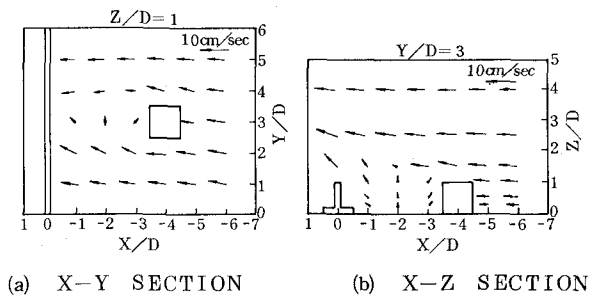


図-14 平均流速ベクトル

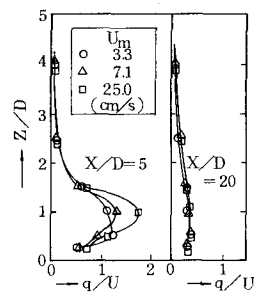


図-15 乱れ強度分布

3300～25000 の範囲で変化しても、後流域の乱れ特性は変わらないことを示している。

一方、湧昇流の発生頻度は、レイノルズ応力に着目することによって検討することができる⁹⁾。図-16は、上昇流が顕著な長衝立上 $Z/D=2.5$ におけるレイノルズ応力 $-uw$ の時系列変化である。図で明らかなように、 $-uw$ がたとえば10をこえる頻度は、10秒に1回の割合である。いいかえると約10秒周期で Z 軸上向きに水粒子の運動が起きていることが伺える。

この点については、染料による可視化観察によっても同様の現象を確認した。

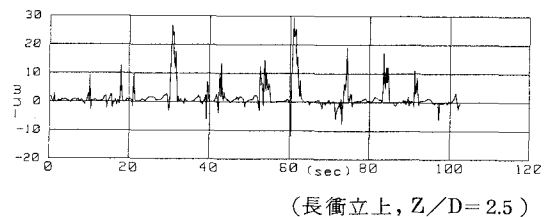


図-16 レイノルズ応力時系列変化

6. 結 言

海洋学で取扱われてきた湧昇流が、最近の技術の進歩で地形性湧昇流として注目されてきた。このことは、土木工学的にその発生が可能なスケールとなり、かつ水産資源の立場からも開発が急がれていることを示唆している。

本研究は、地形性湧昇流の発生している現地を参考に、上昇性の渦を湧昇流と定義し、湧昇流の効果的な発生の可能性、構造物としての経済性を考慮して行ったものである。その結果、現地のモデル化実験から、 Y 軸を回転する渦と Z 軸を回転する渦の合成された渦によって、後流域が複雑化していることがわかった。その結果を基にタイプ A によって、各々の回転軸の渦を強めることで馬蹄形渦が発生し、効果的な湧昇流を発生することが判明した。また、この形状は、構造物の高さが水深の20%と低く、単純な構造である。さらにこの形状を小型化するため、上流側の衝立で水平渦と鉛直渦を同時に発生させ、その再付着点に障害物をおく方法を考案した。この中で、上流側の短い衝立に側板を設けることで、水平渦が強化され、さらに効率のよい湧昇流が発生するタイプ B が見出された。

以上のように、湧昇流制御構造物は、実験室の段階で開発が可能となった。今後は、現地実験および湧昇流の定量的把握が必要とされるが、同時に生物学的に湧昇流の定量的位置づけが必要と考える。

7. 参考文献

- 1) Jones B. H. and Halpern D. ; Biological and physical aspects of a coastal upwelling event observed during March-April 1974 off northwest Africa, Deep Sea Research Vol. 28 A, pp. 71～81, 1981.
- 2) Preller R. and O'Brien J. J. ; The influence of bottom Topography on Upwelling off Peru, Journal of Physical Oceanography Vol. 10, pp. 1377～1398, 1980. 9.
- 3) たとえば、寺本俊彦編；海洋物理学 I，p. 133, 東大出版会，1974. 6.
- 4) 吉田耕造；沿岸湧昇，沿岸海洋研究ノート Vol. 11, № 2，pp. 127～142, 1974. 2.
- 5) 高橋正征，市村俊英，中村善生，松生治，安岡善文，宮崎忠国；遠隔計測による伊豆大島沖の渦湧昇流の計測 II，冬季の性状，日本国土海洋総合学術診断技術報告集，pp. 34～47, 1981.
- 6) 永田豊，深沢理郎；浅瀬付近の微細海況と漁場，水産土木 Vol. 16, № 2, pp. 1～6, 1980. 4.
- 7) 中村充，上北征男，木村晴保，藤井泰司，大竹臣哉；礁による流動環境に関する研究，第27回海岸工学講演論文集，pp. 522～526, 1980.
- 8) たとえば，ランダウ＝リフシッツ；流体力学 I 竹内均訳，p. 129, 東京図書 1970. 10.
- 9) たとえば，瀬津家久，中川博次；開水路乱流の組織立った構造の検出基準について，第25回水理講演会論文集 pp. 439～445, 1981. 2.