

水底に設置された幕構造物による閉鎖性水域の 流動促進に関する基礎的実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS FOR HASTENING OF FLUID MOTION IN ENCLOSED SEA BY FLEXIBLE MEMBRANE EQUIPPED ON SEABED

重松孝昌¹・新戸 豊²・小田一紀³・熊谷裕児⁴

Takaaki SHIGEMATSU, Yutaka SHINBASHI, Kazuki ODA and Yuji Kumagai

¹正会員 博士(工学) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科環境水城工学分野 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

²五洋建設(株) 九州支店長崎工事事務所 (〒851-2212 長崎市畠町 1613-10)

³正会員 博士(工学) 大阪市立大学教授 大学院工学研究科環境水城工学分野 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

⁴株式会社ブリヂストン 工業用品事業本部 (〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町一番地)

The aim of this study is to recover water quality in enclosed water. For achievement of this aim, this study proposed a flexible training jetty as a structure hastening water exchange and promoting fluid motion in enclosed sea. Some experiments for investigation of effect of the flexible training jetty are carried out and the results on the effect of the equipment angle and location of the training jetty on fluid motion in enclosed water and on water exchange are presented.

Key Words : flexible training jetty, seawater exchange, hastening of fluid motion, enclosed water

1. 研究の目的

日本におけるウォーターフロントの開発は、護岸工事・埋め立て工事により都市機能や港湾機能を巨大化・高度化し、集積効率を高めることによる情報・工業の生産効率を高めることに主眼がおかれてきた。このことは、周辺地域の人口の集中を生み出し、大量に工業・生活排水を排出することになった。日本の3大都市は、東京湾・伊勢湾・大阪湾という湾を抱えているが、これらの湾の中の比較的浅い海域に多くの港湾を築造し、物資の集積をはかり、工業の発展を図ってきた。

このような港湾の築造にあたっては、その操業性の観点から、静穏性が最も重要視されてきた。従来の港湾設計・計画法では、港湾内の静穏性の確保するということは、直立不透過壁で港湾を囲み込むことになり、必然的に閉鎖性が強くなった。しかし、良好な港湾ほど閉鎖性が強いために自然の浄化能が低下し、背後に抱えた都市域から大量に流入する有機物や窒素・燐などの栄養塩が自然浄化能力をはるかに超えてしまい、過栄養化や貧酸素化を引き起こすこととなった。台風や高潮などの災害から国土・人命・財産を守るために

作られたコンクリート製の海岸構造物によって海岸の表面積が減少し、このことが生物による浄化能力を低下させ、事態をさらに悪化させている。

その一方で、技術上あるいは経済性の観点から、いまでもなお、浅海域の開発は行われており、また、今後行われる予定の開発もある。これまでの浅海域の開発によって、沿岸域の環境はかなり脆弱化しており、今後の開発によっては、生物(少なくとも、人間にとって有益であったり、快適と感じさせるような生物)が生息できない海域となるかもしれない。

本研究は、このような危機に瀕している閉鎖性の強い海域(以後、閉鎖性海域と称す)の環境修復技術を開発することを目的とするものである。一般に底層部は微生物による酸化分解などで酸素が消費されるが、閉鎖性海域では海水の流動が少なく海水交換があまり行われないうちに貧酸素状態になることが多い。貧酸素の状況では、好気性の微生物は活動できないため底質や水質が悪化する。このような状況を改善する方法として、閉鎖性海域外の流れを閉鎖性海域内に導流し、閉鎖性海域内の流動を高めて生物活性を高めるとともに、閉鎖性海域内外の海水交換を促進することによって海水の浄化を図ることが考えられる。

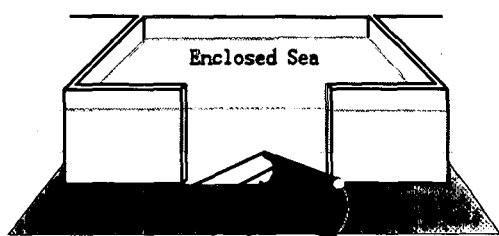


図-1 フレキシブル導流堤設置概念図

本研究では、このような機能を持つ構造物として、幕体構造を有する導流堤「フレキシブル導流堤」を提案する。

フレキシブル導流堤は図-1に示すような構造体である。海底に鋼製のシンカーを設置し、幕体を取り付ける。幕上部には係留索を設け、潮流上流側にアンカリングする。これを図-1に示す様に閉鎖性海域の入口部に設置することで外海水を閉鎖性海域に導入し、閉鎖性水域の流動および海水交換の促進を期待するものである。

2. 実験施設および実験概要

実験は大阪市立大学所有の25m×26m×1mの平面水槽を用いて行った。平面水槽の中央部に、幅10mで導水板を平行に設けて水路を造り、その片側の導水板の中央部に幅1.0mの切り欠き開口部を設け、その奥に5m×5mの閉鎖性水域の模型を製作した(図-2参照)。水

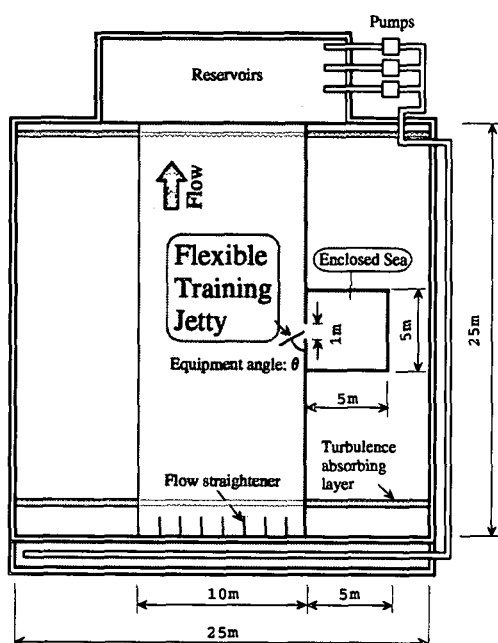


図-2 実験施設

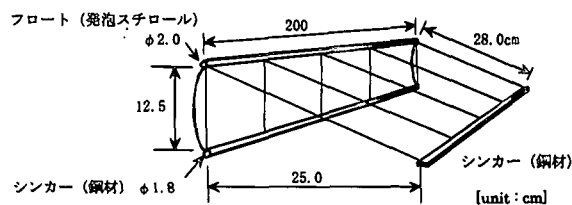


図-3 フレキシブル導流堤の諸元

深は50cm、水路部の流速は $U_0=7.6\text{cm/s}$ と一定にした。設置したフレキシブル導流堤は、不透水性の合成繊維布で製作した幕部と、発泡スチロールを用いたフロート部、及び鋼材によるシンカー部からなっている。今回の実験では、合成繊維布の幅は $B=2\text{m}$ 、その高さは $H=25\text{cm}$ と一定にした。水中では合成繊維布で製作されたフレキシブル導流堤の高さが12.5cmとなるようにアンカーがとられている(図-3参照)。

フレキシブル導流堤の一端を閉鎖性水域の開口部の中央に設置し、これを中心に導流堤と流れとの設置角度が $\theta=90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ となるように導流堤の他端を設置し、導流堤の設置角度による設置効果について検討した。流速の測定には3次元超音波式ドップラー流速計を用い、サンプリング周波数25Hzで60秒間測定し、その平均値を測定値とした。流速の測定は、閉鎖性水域の開口部で詳細に計測し、導流堤の設置角度による外海水の流入出に及ぼす影響について検討した。導流堤による閉鎖性水域内の流動促進効果を調べるために、閉鎖性水域内全域にわたって流速を計測した。

3. 色素による外海水導入効果に関する実験

流速の計測に先立って、色素を用いて、外海水導入効果および閉鎖性水域内の流況を目視観測した。閉鎖性水域開口部に設置されたフレキシブル導流堤の端部($x=0, y=0$; x は流下方向を正、 y は閉鎖性水域の方向を正とする)の水底から5cm($z=-45\text{cm}$)の位置から色素を注入し、この色素がどのように移流・拡散していくかを目視観測した。観察時間は、300秒とした。その結果を図-4に示す。図-4には、色素を注入してから30秒後および300秒後の色素の拡散状況を示している。

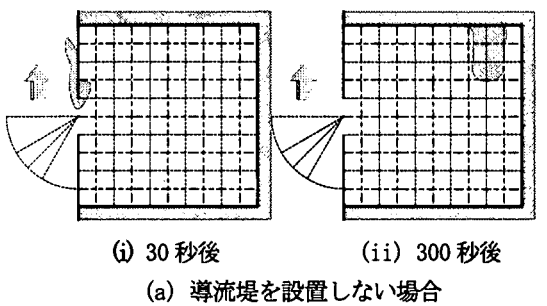
図-4(a)は導流堤を設置しない場合の観察結果を示したものである。この場合、注入した色素のほとんどは閉鎖性水域に入ることなく、閉鎖性水域外へ流出した。わずかに閉鎖性水域内に流入した色素は、ゆっくりと x 軸正方向へと流れ、 $x=-2.5\text{m}$ の模型壁面に達すると、 y 軸正方向へと流向を変えて、閉鎖性水域奥部へと拡散していく様子がうかがえる。

$\theta = 90^\circ$ で導流堤を設置した場合は、導流堤を設置しない場合と同様に大部分の色素は閉鎖性水域に入ることなく、閉鎖性水域外へ流出した。これは、フレキシブル導流堤の端部で生じる渦の影響を受けるためである。閉鎖性水域に入った色素の移流速度は、フレキシブル導流堤を設置しない場合と比較すると速くなっていることがわかる(図-4 (b)参照)。

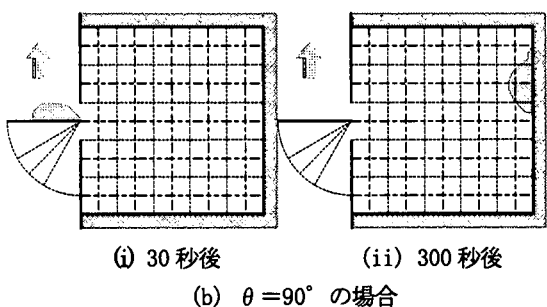
図-4 (c) の $\theta = 60^\circ$ で導流堤を設置した場合には、注入した色素の大部分が閉鎖性水域内に流入した。その移動速度は、導流堤を設置しない場合や $\theta = 90^\circ$ で設置した場合よりも速くなっていることがわかる。 $\theta = 45^\circ$ で設置した場合も、 $\theta = 60^\circ$ で設置した場合と同様に、注入した色素の大部分は閉鎖性水域内に流入し、 $\theta = 60^\circ$ で導流堤を設置した場合よりも多少移流速度は遅いものの閉鎖性水域奥部にまで色素は到達していることが、同図(d)から見て取れる。図-4 (e)には、 $\theta = 30^\circ$ で導流堤を設置した場合の結果を示す。この場合には、注入した色素の大部分は $\theta = 60^\circ$ 、 45° で設置した場合と同様に閉鎖性水域内に流入するが、その移動速度は、両者と比較すると遅くなっている。

図-4 の(b)と(d)、(e)を比較すると、 $\theta = 45^\circ$ や 30° で導流堤を設置した場合には、 $\theta = 90^\circ$ で設置した場合よりも色素の移動速度が遅く、 $\theta = 90^\circ$ で設置した場合よりも導流堤の設置効果が小さいようにも見て取れるが、閉鎖性水域内に流入した色素の量は $\theta = 90^\circ$ で導流堤を設置した場合よりも、 $\theta = 45^\circ$ や 30° で設置した場合の方が多かったことを付記しておく。

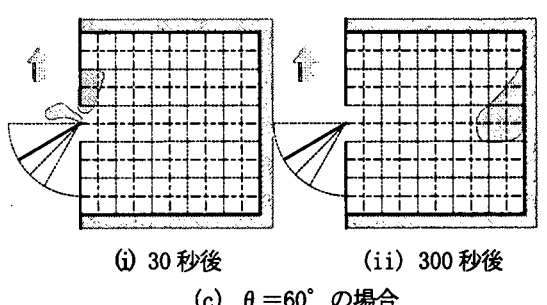
以上の色素を用いた目視実験によって、フレキシブル導流堤を開口部の水底に設置することによって、閉鎖性水域に外海水が導入されることが確認された。また、閉鎖性水域内の流動特性は、フレキシブル導流堤の設置角度に依存していることが確認された。



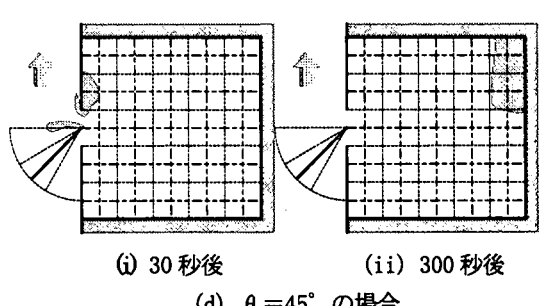
(a) 導流堤を設置しない場合



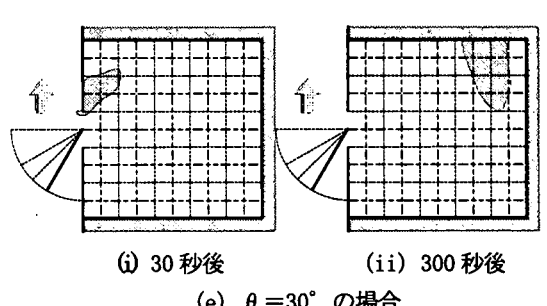
(b) $\theta = 90^\circ$ の場合



(c) $\theta = 60^\circ$ の場合



(d) $\theta = 45^\circ$ の場合



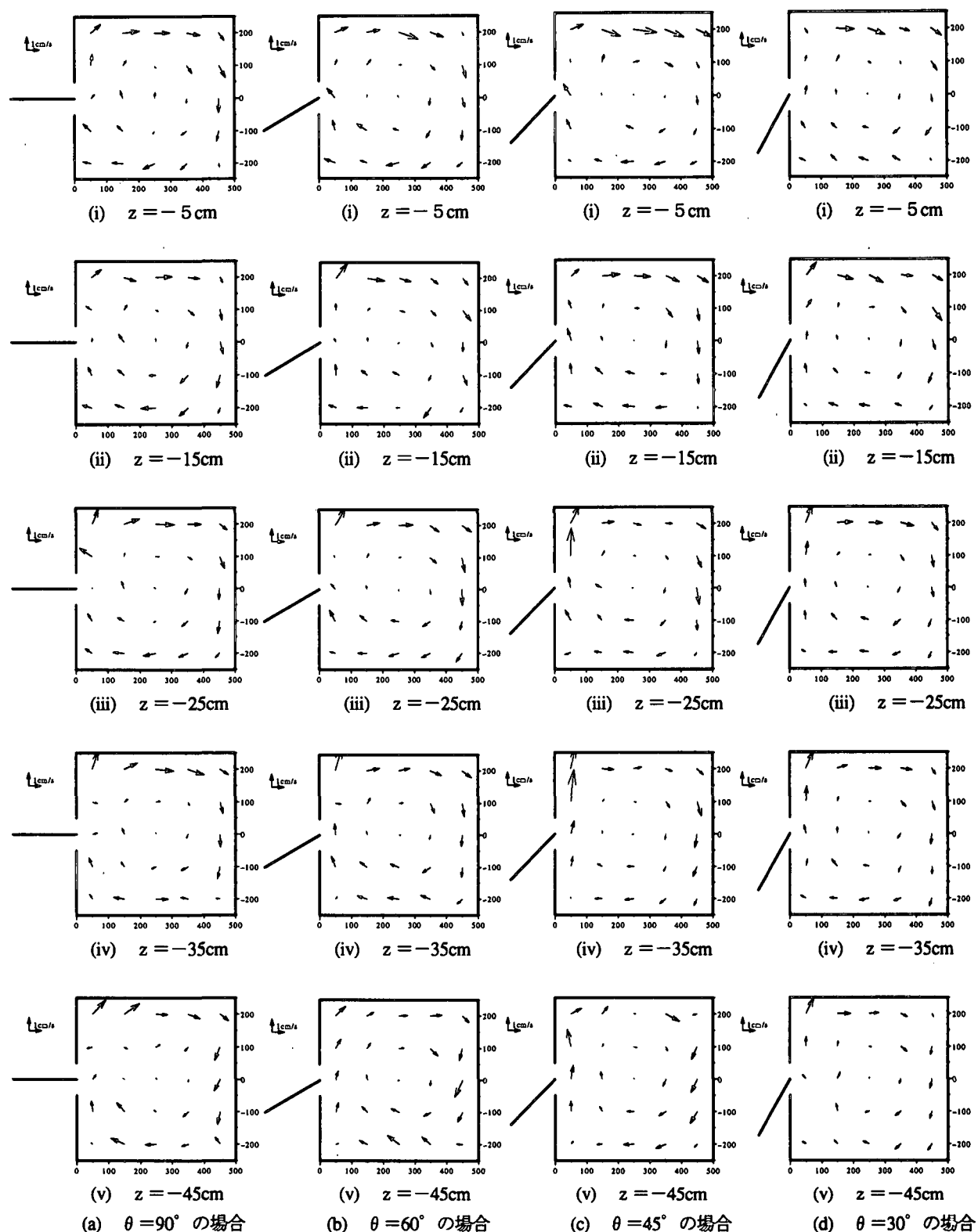
(e) $\theta = 30^\circ$ の場合

図-4 色素拡散実験結果

わかる。このような傾向は、図-5 (c)、(d) の $\theta = 45^\circ$ 、 30° でフレキシブル導流堤を設置した場合にも見られるが、最も閉鎖性水域内の流動促進効果があるのは、 $\theta = 60^\circ$ で設置した場合のように見受けられる。

4. 閉鎖性水域内の流動促進効果

図-5 は、閉鎖性水域で計測された流速ベクトルを、それぞれの水深ごとに示したものである。ここでは、導流堤を設置していない場合の実験結果は示していないが、導流堤を設置していない場合にも、緩やかではあるが、時計回りの循環流が形成されていた。図-5 (a) はフレキシブル導流堤を $\theta = 90^\circ$ で設置した場合の測定結果である。導流堤を設置しない場合よりは速い循環流が形成されているが、大きな差は見られなかった。図-5 (b) のフレキシブル導流堤を $\theta = 60^\circ$ で設置した場合には、底層部 ($z = -45\text{cm}$) での入口近傍の流速が速くなっていることがわかり、導流堤の外海水導入効果が現れていることがわかる。この場合の最大流速は、約 3.0cm/s であった。また、フレキシブル導流堤による閉鎖性水域内の流動促進効果は閉鎖性水域の底層部に限らず、上層部の流動にも及んでいることが



図—5 閉鎖性水域内の流速分布

フレキシブル導流堤によって開口部の底層から流入してくる外海水は、そのまま $y=0$ の壁（図では左の壁）沿いに閉鎖性水域内に流入し、 $x=2.5\text{ m}$ の壁（図では上の壁）に達すると y 軸の正方向に流向が変わる。このとき、フレキシブル導流堤によって底層から流入する流速が速いほど、あるいは、 $x=2.5\text{ m}$ の壁に達す

るときの流速が速いほど閉鎖性水域内の流動促進効果は高くなるようである。

鉛直方向流速は水平方向流速と比較するとそれほど大きくはならず、最も水平循環促進効果が高い $\theta = 60^\circ$ の場合でさえ、 $x=2.0\text{ m}$, $y=0.5\text{ m}$, $z=-15, 25\text{ cm}$ で 0.4 cm/s の鉛直上向き流速が計測されたに留まって

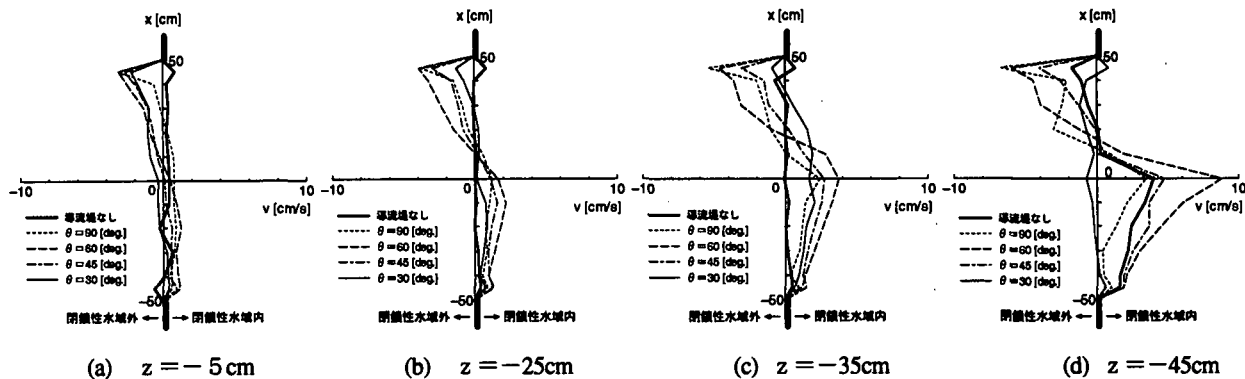


図-6 入口部の流速部分

いる。この地点よりもさらに壁面に近い箇所では、鉛直流速がさらに大きくなっている可能性も指摘できるかもしれない。今回の計測は、閉鎖性水域内の大まかな流況を把握するために行ったので、計測点が少なく壁面近傍では流速の測定を行っていない。したがって、前述の指摘に応えるためには、壁面近傍の流速分布についてさらに詳細な流速の計測が必要である。

5. 開口部の流速測定結果

図-6は、開口部における流入出速度、すなわち、 v の鉛直分布を示したものである。図中の太い実線はフレキシブル導流堤を設置しない場合の測定結果を示したものである。導流堤を設置しない場合にはいずれの水深においても v は 2cm/s 以下と小さく、またその変動も小さいことがわかる。しかし、フレキシブル導流堤を設置した場合には、流入出速度 v は大きくなり、また、測定位置によって大きく変化していることがわかる。この流入出速度の分布特性を要約すれば、フレキシブル導流堤の上流側(図では $x < 0$)で外海水が閉鎖性水域内に流入し、フレキシブル導流堤の下流側(図では $x > 0$)で閉鎖性水域外へ流出する傾向が見られる。このような傾向は、導流堤の設置角度 θ が 60° の場合に最も顕著に現れている。また、当然のことではあるが、いずれの設置角度の場合も、水底近傍では流入出速度の変化が大きく、水深が浅くなるとともにこの変化は小さくなっている。

このように、開口部の流速の測定結果より、フレキシブル導流堤の設置によって少なくとも開口部における流入出フラックスが増加すること、そして、その増加は設置角度が 60° の場合に最も顕著であることがわかった。

表-1は、閉鎖性水域の開口部において計測された流速データより、流入フラックス Q_{in} および流出フラックス Q_{out} を求めた結果を示している。本来ならば、開

口部断面で積分した流入量と流出量とは等しくならなければならない(すなわち $\bar{Q} = Q_{in} - Q_{out} = 0$)だが、計測点が開口部断面に対して十分に密でないこと、および、流速計の計測精度などのため、実際には $\bar{Q} = 0$ となっていない。表-1より、フレキシブル導流堤の設置角度が $\theta = 60^\circ$ の場合には、流入フラックス・流出フラックスともに最も大きな値を示すことがわかる。

さらに、流入出フラックスの絶対値の平均値を海水交換量 Q_E (すなわち、 $Q_E = 0.5 \times (|Q_{in}| + |Q_{out}|)$)とし、フレキシブル導流堤を設置しない場合の海水交換量(Q_0)に対する導流堤を設置した場合の海水交換量の比(海水交換量比: Q_E / Q_0)を求めた。表-2にその結果を記す。表-2によれば、設置角度 $\theta = 60^\circ$ の場合に最も海水交換量比が大きくなることがわかる。ここで、求めた海水交換量 Q_E は、実際に閉鎖性水域の内外で交換された流量量ということとはできないが、上述の色素による流況実験および流速の測定実験の結果を併せて考えれば、フレキシブル導流堤の設置効果

表-1 開口部の流入出フラックス

θ	$Q_{in} [\text{cm}^3/\text{s}]$	$Q_{out} [\text{cm}^3/\text{s}]$	$\bar{Q} [\text{cm}^3/\text{s}]$
—	1323.5	394.0	929.5
90	2953.5	3351.0	-397.5
60	5743.0	4962.0	781.0
45	3942.0	3052.5	889.5
30	2867.5	1783.5	1084.0

表-2 海水交換量比

θ	$Q_E [\text{cm}^3/\text{s}]$	Q_E / Q_0
—	858.8(= Q_0)	1.0
90	3152.5	3.7
60	5352.5	6.2
45	3497.3	4.4
30	2325.5	2.7

に関する一つの指標として捉えることができると考える。

6. 導流堤設置位置による効果に関する検討

以上の検討によって最も設置効果が高いと推定された設置角度 $\theta = 60^\circ$ の場合について、フレキシブル導流堤の設置位置を変えて実験を行った。図-7 (a)は、開口部の中央から下流側に 20cm ずらして導流堤を設置した場合の、また、同図(b)は上流側に 20cm ずらして設置した場合の流速ベクトル図を示したものである。図-5 (b)と比較すると、導流堤を開口部の中央ではなく、上流側あるいは下流側にずらして設置した場合の方が、閉鎖性水域内に形成される循環流の速度が速くなっていることがわかる。このような速度の増加傾向は、フレキシブル導流堤が設置されている底層部だけでなく、表層部にも及んでおり、フレキシブル導流堤の設置によって閉鎖性水域内の流動が促進される可能性があることを示していると考えられる。

7. 結 論

本研究によって得られた結論を要約すると以下のようである。

- [1] 開口部における流入・流出速度はフレキシブル導流堤の設置角度に大きく依存し、設置角度が 60° の場合に最も速度が速くなることが明らかになった。
- [2] 導流堤によって流体塊は底層部から閉鎖性水域内に流入して循環流を形成するが、この循環流は底層部に留まらず、上層部にも及ぶことが判った。
- [3] 開口部を流入出する流量の絶対値の平均値を海水交換量と定義し、さらに、導流堤を設置しない場合のそれとの比を海水交換量比と定義すると、いずれの角度で設置した場合も海水交換量比は大きくなり、 $\theta = 60^\circ$ の場合に最も大きくなることが明らかになった。
- [4] 閉鎖性水域全域の流速を測定した結果、いずれの設置角度の場合も、導流堤を設置しない場合と比較すると、閉鎖性水域内に形成される循環流の速度は速くなっていることが明らかになった。また、閉鎖性水域の流動促進効果は底層部に留まらず、水面付近でも流動が促進されていることが明らかになった。
- [5] 設置角度を 60° に保ち、その設置位置を変化させたとき、閉鎖性水域内に形成される流動形態に変化が見られ、導流堤の設置位置によって流動促進効果

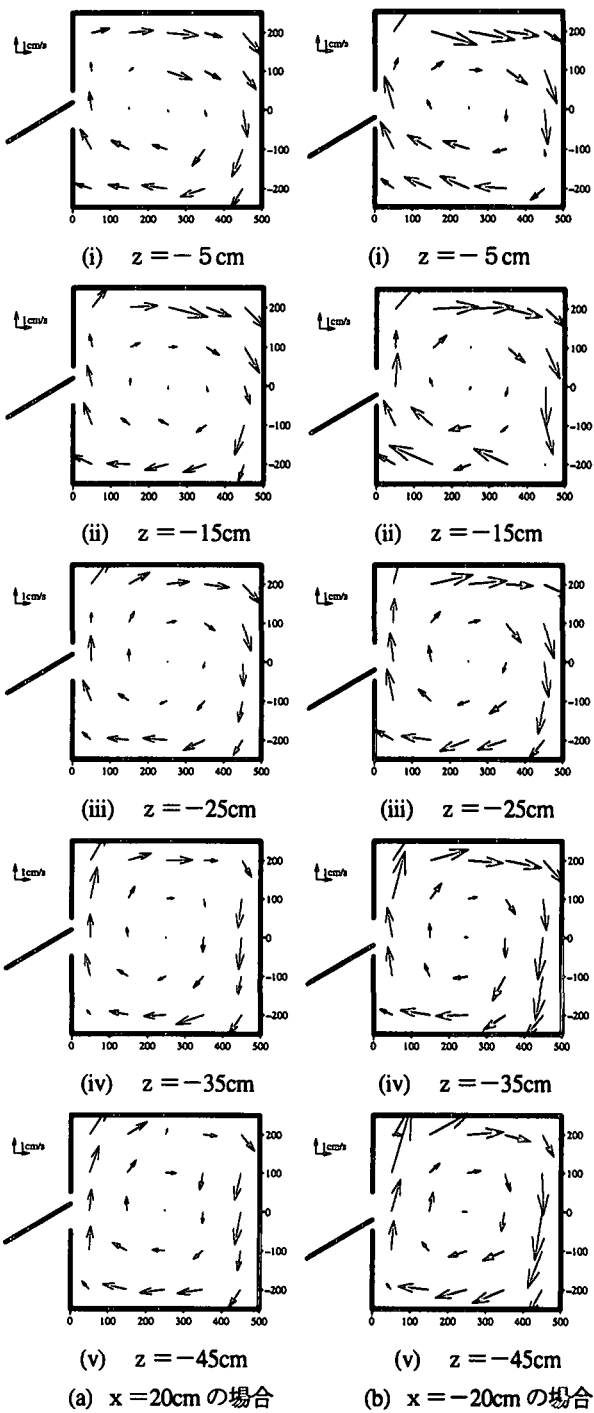


図-7 閉鎖性水域内の流速分布
が異なることが確認された。

謝辞：この研究の一部は、通産省重要技術の競争的研究開発「閉鎖性海域の環境修復・創造技術の開発と効果検証に関する研究」の援助を受けて行われた。ここに記して、謝意を表する。