

現地試験による流況制御ブロックの 湧昇流発生効果の検証

FIELD TEST ON UPWELLING PRODUCED BY BOTTOM ROUGHNESS

矢野真一郎¹・齋田倫範²・大原正寛³・石村忠昭³・西ノ首英之⁴・小松利光⁵

Shinichiro YANO, Tomonori SAITA, Masahiro OHHARA, Tadaaki ISHIMURA,

Hideyuki NISHINOKUBI and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 工博 九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門

(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生会員 工修 九州大学大学院博士後期課程2年 工学府海洋システム工学専攻(同上)

³正会員 芙蓉海洋開発株式会社 (〒111-0051 東京都台東区蔵前3-15-7)

⁴水博 長崎大学教授 水産学部海洋生産システム学講座 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁵フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門

(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

Komatsu *et al.*(1997) have proposed asymmetrical bottom structure, that is “Bottom Roughness,” as a new method to activate tidal exchange between a semi-enclosed bay and an outer sea. On the other hand, it is expected that vertical mixing is enhanced by the upwelling produced by the Bottom Roughness. The Bottom Roughness have been installed in the Isahaya Bay since September, 2002 as a field test to fix on soft ground peculiar to the Ariake Sea. In this research, in situ observations to measure time series of tidal current and water temperature at fixed points near the installed Bottom Roughness were carried out in order to examine degree of vertical current and vertical mixing. As a result of this research, it becomes clear that the Bottom Roughness can produce the downwelling when the current flows in the forward direction, meanwhile the upwelling is produced by the backward flow.

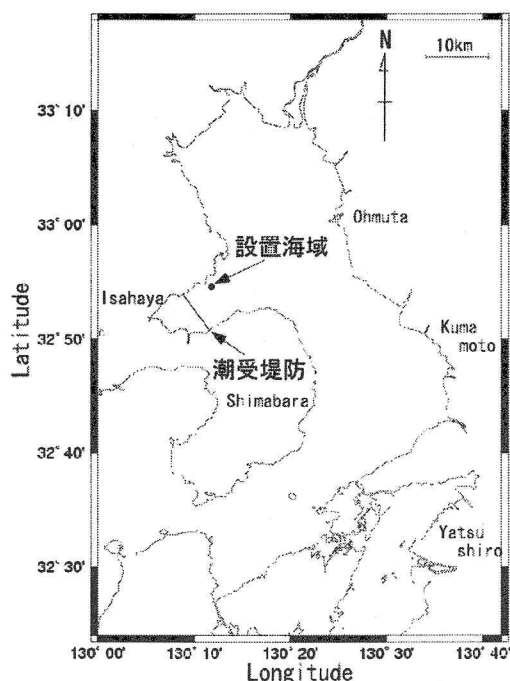
Key Words: Bottom Roughness, Ariake Sea, Isahaya Bay, field test, upwelling, in situ observation

1. はじめに

外海との海水交換が少ない閉鎖性海域では、栄養塩などの流入負荷が停滞しやすく、海域の富栄養化が進行するにつれて赤潮や貧酸素水塊が発生するといった問題が生じやすくなる。このような海域の一つである有明海では、大規模公共事業に起因すると考えられている水環境の悪化に伴う甚大な漁業被害が発生しており、漁場環境を回復させる技術の開発が急がれている。そのような中、小松ら¹⁾は「流況制御ブロック」を用いた海水交換促進技術を提案している。流況制御ブロックとは非対称形状をした3次元構造物のことであり、海底に多数沈設することにより、往復流である潮流の流向に対して抵抗差を発

生させることができ、平均流である潮汐残差流のパターンを制御して水平方向の海水交換を促進するものである。2001年5月より、流況制御ブロックに関する実証実験が長崎市北西部の新長崎漁港で実施された。3年間にわたる試験結果より、潮汐残差流の変化や水質、底質の改善がみられたことから、流況制御ブロックの海水交換促進効果が確認されている^{2), 3)}。

本技術を有明海に適用するには、流況制御ブロックを設置した際に軟弱地盤上で埋没しないようにするための技術開発が必要とされている。そこで、2002年9月より図-1に示す諫早湾内の長崎県小長井漁港の沖合海域(32° 54' 45" N, 130° 11' 37" E(世界測地系))に材質・形状・設置方式などを変えたブロックが計6基設置された。



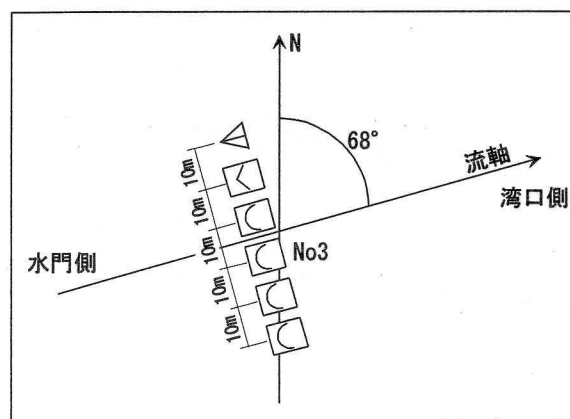
図－1 流況制御ブロックの設置海域

一方、流況制御ブロックは水平方向の海水交換促進効果だけでなく、湧昇流の発生による鉛直混合の促進効果により、成層化や底層における貧酸素化の抑制も期待されている。そこで、本論文では、流況制御ブロックの付帯効果である湧昇流発生効果を小長井沖の現地観測結果をもとに検証した。

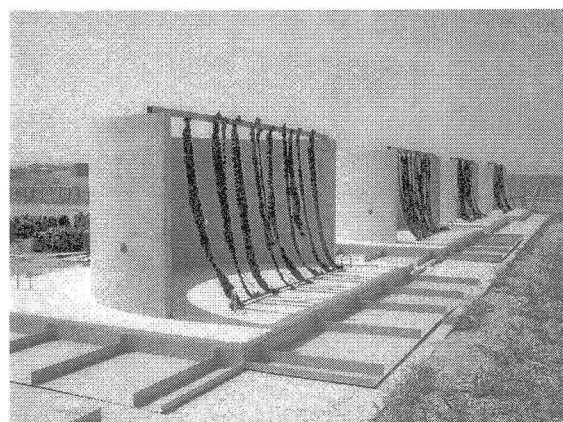
2. 流況制御ブロックの試験施工について

設置した流況制御ブロックは、ローコストで大量生産可能なコンクリート製を基本型としたが、自重の違いによる沈下状況の検討のため、コンクリート製1/2円筒型4基、鋼鉄製V字型1基、プラスチック製三角錐型1基を採用した。設置地点の平均水深は約7.5mで、海底面はほぼ平坦であった。各ブロックの高さは2m、底盤は幅4.8m、長さ4mの長方形である。また、単位面積当たりの荷重を下げる目的で底盤面積を広げるための鋼板や滑動防止目的のシュウ、並びに沈下防止用にネットを敷いたものを設け、各ブロック毎に条件を変えて沈下状況を比較した。

流況制御ブロックを有効に機能させるためには、ブロック形状の対称軸を設置海域の潮流の主流軸に合わせることが必要とされる。そこで、設置前の2002年6月1日から7月4日の期間に、ブロック設置地点において超音波ドップラー流速計（以下、ADCP）1台を海底設置し流況調査を行った。使用したADCPはAquadoppProfiler1000kHz（Nortek社製）であり、海底面上1.5mから0.5m間隔に、平均時間2分間で10分毎に測定を行うよう設定された。なお、観測期間中の6月18日に機器の保守点検のため、引き上げ作業とデータ取得、並びに再設置作業を行った関係上、データは不連続になっている。



図－2 流況制御ブロックの設置状況



写真－1 1/2円筒型流況制御ブロック

観測結果より得られた海底面上2m層における M_2 潮の潮流楕円の長軸方向にあわせて、流況制御ブロックの対称軸方向（以下、流軸方向）を真北から時計回りに 68° になるように決定し、2002年9月11～12日に図－2に示すようにブロック6基を中心間隔が10mとなるように設置した。ブロックは南側から順に、No.1～6の番号を振った。後述する湧昇流の観測は、これらのうちNo.3ブロックを対象に行った。

2002年6月1日に海底に堆積している軟弱地盤層の厚さをダイバーによる鉄筋棒（直径 $\phi 13\text{mm}$ ）の差し込みにより調べたところ、2.6m以上の厚さで堆積していた。本論文では、ブロックの沈下状況については詳述しないが、設置直後から2004年1月9日までの期間に計6回の調査を行った結果によると、鋼板の有無と形状や材質の違いによる単位設置面積当たり重量の違いやネットの有無に関わらず、同程度の初期沈下状態（20～30cm）を維持していた。したがって、予想外であったが諫早湾内の軟弱地盤に対しては、特別な施工法を採用しなくても流況制御ブロックを安定して沈設することが可能であると考えられる。

なお、今回の試験施工においては、流況制御ブロックのもう1つの付帯機能である魚礁機能を強化し、その効果を検証する目的で、西ノ首ら⁴⁾により提案されている発泡ゴム製人工コンブを10本取り付け、ブロック背面に魚の通れる程度の小さな穴（ $\phi 100\text{mm}$ ）を数カ所開けている（写真－1参照）。

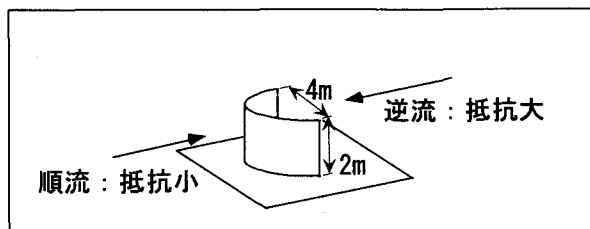


図-3 1/2円筒型流況制御ブロック

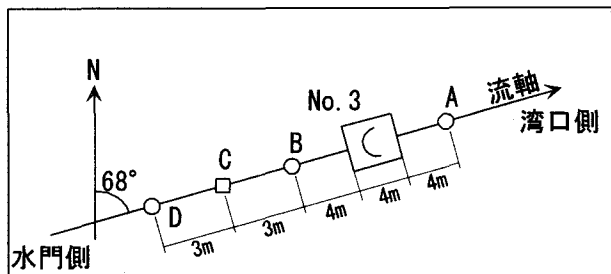


図-4 観測機器の設置状況

3. 現地観測の概要

流況制御ブロック設置による湧昇流発生効果を検証するために、図-3に概略を示す1/2円筒型のNo. 3ブロックを対象として、比較的混合していると考えられる秋季の2002年9月25日～10月16日に流動のみの、成層していると考えられる夏季の2003年7月4日～7月23日には流動と水温分布の連続観測を行った。

2002年の観測では、図-4に示すようにNo. 3ブロックの底盤端から流軸上に4m離れた諫早湾湾口側（東側）A地点と諫早干拓潮受堤防水門側（西側）B地点にそれぞれADCPを海底設置した。ADCPの設定はブロック設置前の流況観測と同じである。なお、流況制御ブロックに対して抵抗が大きくなる方向の流れを逆流、小さくなる方を順流と定義する。したがって、今回の設置条件では、上げ潮流が逆流に、下げ潮流が順流に相当している（図-3参照）。

後述するように逆流である上げ潮時に顕著な湧昇流が水門側B地点で確認されたので、2003年の観測では、逆流時の湧昇流による水温成層の応答を見る目的で、No. 3ブロックの水門側B地点と10m離れたD地点にそれぞれADCPを海底設置した。さらに、2台のADCPの中央地点となるブロックから7m離れたC地点に、メモリー式水温計（HOB0 Water Temp Pro, 米国Onset Computer社製）計20個を鉛直方向に50cm間隔でロープに繋ぎ係留した。係留系には水温計の深度を補正するために、メモリー式水深計（Compact-TD, アレック電子社製）2基を海底面から4.5m, 7.5m位置に取り付けた。ただし、7.5m位置の水深計は不具合のためデータが取得できなかった。したがって、本論文では4.5m層以深の水温データのみ使用した。なお、全ての観測において潮位変動はADCPに付属の水深計に記録されている。

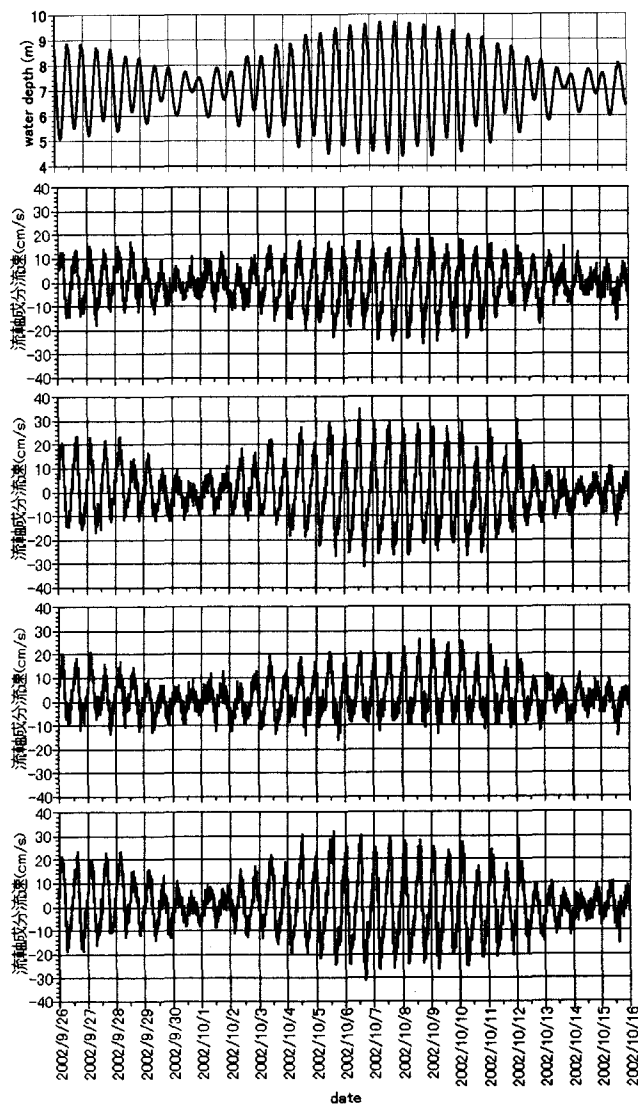


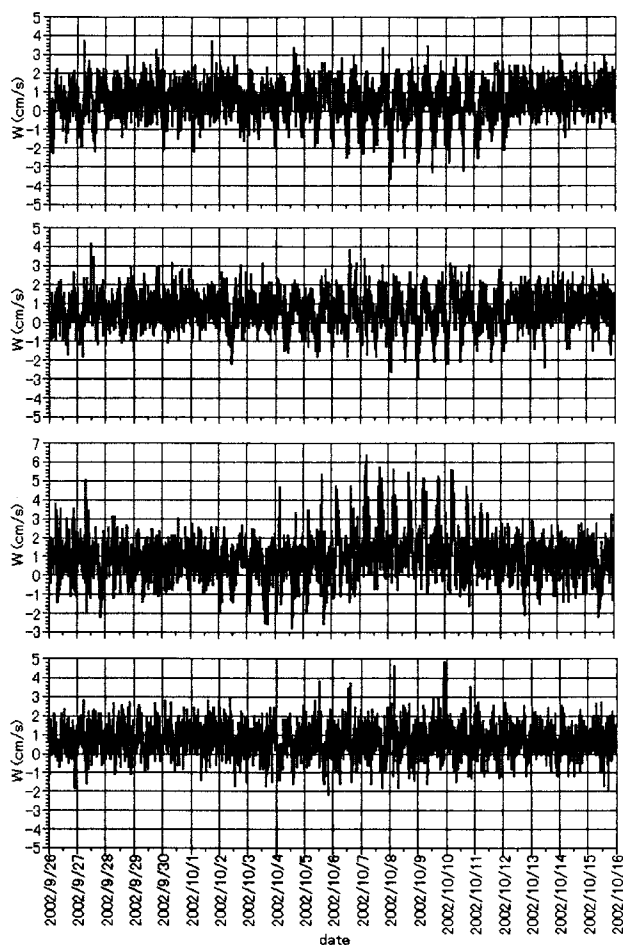
図-5 潮位変動と潮流の流軸方向成分の時系列（上図より、潮位、A地点2m, 4m層流速、B地点2m, 4m層流速）

4. 観測結果について

(1) 2002年の観測結果

図-5に2002年秋季観測より得られた潮位変動と湾口側A地点と水門側B地点における海底面上2m, 4m層流速の流軸成分の時系列を示す。なお、流軸成分は湾口向き、すなわち下げ潮流を正と定義した。期間中に2回の小潮（9月28日～30日、10月12日～14日）と1回の大潮（10月5日～7日）が記録された。2m層の流速は、順流である下げ潮時に水門側のB地点の方が大きく、逆流である上げ潮時には湾口側のA地点が大きくなっており、流況制御ブロックの存在により下流側の運動量が減少していることが分かる。4m層の流速は、ほぼ同程度になっており運動量の低減は見られなかった。

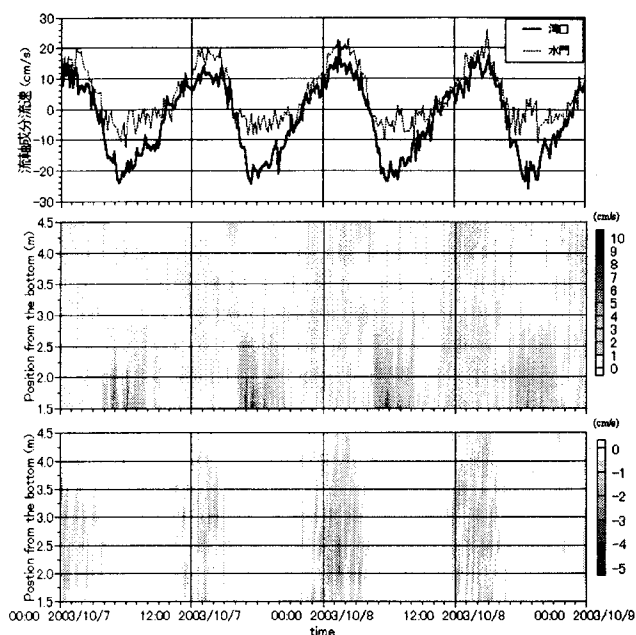
次に、湧昇流の発生状況を確認するために、流速の鉛直方向成分 w について時系列を図-6に示す。図-5との比較により、流軸成分流速が大きい時期に



図－6 潮流の鉛直方向成分 w の時系列（上図より，A 地点 2m，4m 層流速，B 地点 2m，4m 層流速）

対応して鉛直流が強く発生していることが分かる。順流時の下流側である湾口側A地点では下降流が，逆流時の下流側である水門側B地点では顕著な湧昇流の発生が確認された。これらの発生状況を詳細に比較するために，鉛直流の発生が顕著であった大潮期の10月7日と8日の2日間について湾口側A地点と水門側B地点における2m層の流軸成分流速と，B地点とA地点における鉛直方向成分 w のコンター図を図－7に示す。なお，コンター図は，それぞれ上昇流と下降流のみを示している。これより，A地点において順流である下げ潮時で全体的に下降流が，B地点では逆流の上げ潮時で海底面上3mより下の層で湧昇流の発生が確認できる。また，A，B両地点の流軸成分流速の違いからブロックにより水平方向流速の運動量が鉛直方向の運動量に変換されていることと，流況制御ブロックの非対称形状によって順流に較べて逆流の方が上流側に対する下流側の運動量の減少量が大きくなっていることが分かる。

流況制御ブロックの有無による湧昇流発生効果の違いを明確にするために，ブロック設置前の2002年6月2日～17日と設置後の9月26日～10月16日の観測結果について2m層の流軸成分流速と鉛直成分流速 w の相関を図－8に示す。設置後の結果については，順流と逆流時における上流側流軸成分流速と



図－7 潮流の流軸成分と鉛直成分の時系列（上図より，2m層の流軸成分，B地点の w （湧昇流のみ），A地点の w （下降流のみ））

表－1 潮汐の調和定数（振幅のみ）[単位 m]

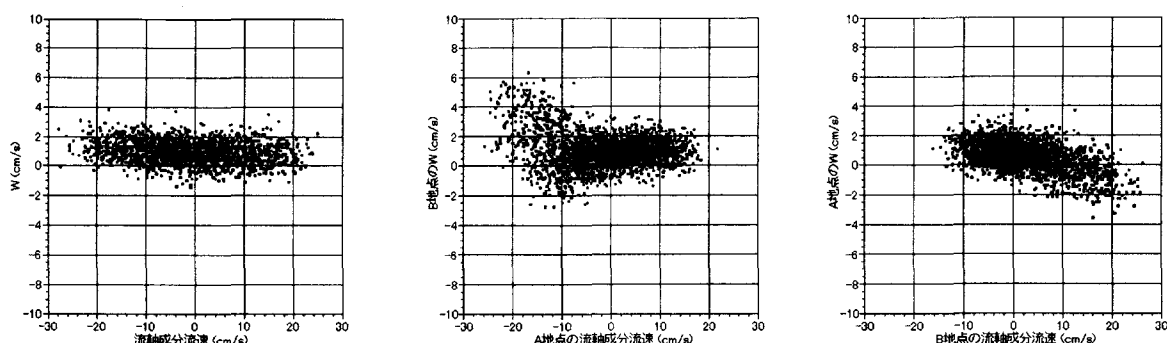
期間／潮汐	M_2	S_2	K_1	O_1
2002/6/2-6/16	1.46	0.53	0.37	0.24
2002/6/19-7/4	1.53	0.47	0.38	0.24
2002/9/26-10/11	1.49	0.94	0.22	0.24
2003/7/6-7/21	1.59	0.45	0.40	0.28

下流側 w との相関性を明確にするために，A地点流軸成分に対するB地点 w の相関とB地点流軸成分に対するA地点 w の相関を示した。これらより，ブロック設置により10cm/s以上の逆流時には湧昇流が，10cm/s以上の順流に対しては下降流がそれぞれ発生していることが分かる。

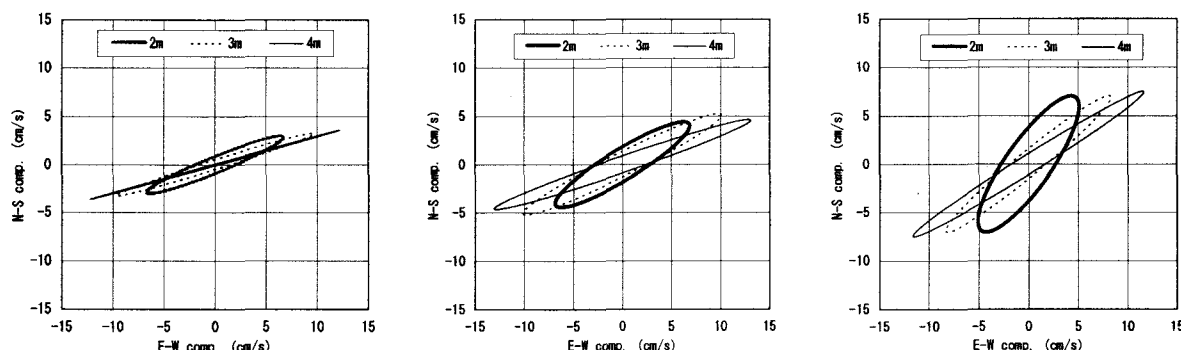
各観測期間の潮汐条件を比較するために，ADCPの水深データから15昼夜分を調和分析して求めた主要4分潮の振幅を表－1に示す。有明海は固有周期が半日周潮に近いことから， M_2 潮が卓越していることが分かる。2002年ブロック設置後の観測期間は秋分に近いことから他の期間と比較すると， S_2 潮も大きかったので，大潮期には有利な条件であったと考えられる。しかし，図－8から明らかなように実際に発生している流軸方向流速は設置前後で同程度であったため比較は可能であると判断した。

(2) 2003年の観測結果

まず，図－9に2002年のブロック設置後のB地点，2003年のB地点，ならびにD地点における M_2 潮潮流楕円を2m，3m，4m層について示す。ブロック設置前の図は省略したが，2002年設置後と長軸方向は



図－8 潮流の流軸成分と鉛直成分の相関（左図より，2002年ブロック設置前，設置後のA地点流軸成分に対するB地点の w ，設置後のB地点流軸成分に対するA地点の w ）



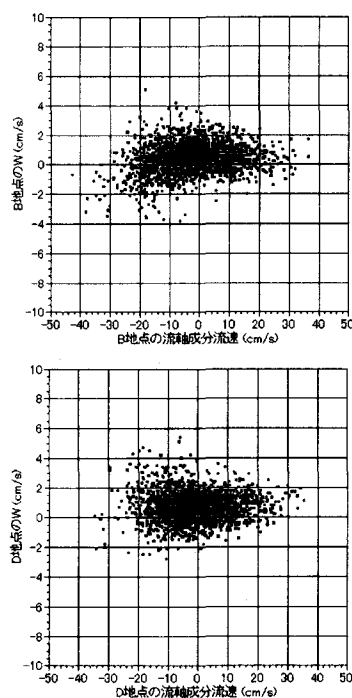
図－9 2m, 3m, 4m層の M_2 潮の潮流楕円（左図より，2002年ブロック設置後のB地点，2003年のB地点，D地点）

一致していた。海底摩擦とブロックの存在により，海底に近いほど長軸の長さが短くなっている。特に，ブロックから離れたD地点においては，水深による長軸方向の変化が激しく，成層の影響を受けて海域の流動構造が大きく変化している可能性を示唆している。

次に，鉛直流の発生状況について，図－10に2003年のB，D地点2m層における流軸成分流速と鉛直成分流速 w の相関を示す。図－8との比較によりブロック設置により鉛直流が誘起されていることと，混合期には湧昇流が卓越していた同じB地点において，下降流が発生していること，ならびにD地点においては湧昇流が発生していることが分かる。しかし，2002年のような強い湧昇流は発生しておらず，成層により抑制傾向にあったようである。

最後に，流況制御ブロックにより発生した鉛直流が水温分布に与える影響を詳細に見るために，図－11に，大潮期であり水温成層が発達していた2003年7月13日の潮位，B地点2m，4m層の流軸成分流速の時系列，B地点，D地点の鉛直成分流速 w ，ならびに水温のイソプレットを示す。上げ潮で2m層に10cm/s以上の流速を記録している15時から20時の時間帯において，B地点では下降流が，D地点では湧昇流が間欠的に発生し，それに応じて水温躍層の位置が振動している様子が見て取れる。

本試験施工ではブロック設置個数が6個と非常に少なかったため，成層抑制効果までは期待できないと考えられる。しかしながら，成層期においても強い潮流に対しては鉛直流が発生しているので，ブロックを多数設置した場合や潮流が強い海域に設置した



図－10 2003年の流軸成分流速と鉛直成分の相関（上図より，B地点，D地点）

場合には成層期においても鉛直混合の促進が十分期待できものと推測される。

5. 結論

本研究では，流況制御ブロックによる湧昇流発生

効果を現地観測により検証した。その結果、(1)混合期において逆流時には強い湧昇流が、順流時には下降流が発生すること、(2)成層期においても鉛直流の発生が見られることが分かった。ただし、成層期における鉛直混合促進効果の評価は、水温分布のみの測定からでは困難であるので、塩分と水温の同時観測を行う必要がある。また、サンプリング間隔を短くした測定や空間的な流動構造の測定を行うことで、ブロックにより誘起された渦構造なども明らかにする必要があると考えられる。

これまでも、人工構造物による湧昇流発生に関する研究事例^{5), 6), 7)}は多数あるが、これらは栄養分の豊富な底層水を有光層へ送り込み漁業生産性を向上させるねらいの技術開発であった。しかしながら、流況制御ブロックのように水平方向の海水交換と鉛直混合を同時に促進できる技術開発は著者らの知る限りではない。したがって、本技術の実用化は、多くの閉鎖性海域において水環境の改善に寄与できるものと期待される。

謝辞：本研究は、(社)マリノフォーラム21による平成13年度提案公募型有明地域等緊急振興対策研究開発事業「有明海潮流制御ブロックによる漁場回復技術の研究開発」の一環として実施された。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究A「有明海の流れ構造の解明と蘇生・再生のための調査研究」(研究代表者小松利光、課題番号14205075)の援助を受けた。

また、流況制御ブロックの現地試験施工においては、小長井漁業協同組合(新宮隆喜組合長)、東栄商興(株)、粕谷製網(株)、長崎大学工学部社会開発工学科多田彰秀助教授、九州大学大学院藤田和夫技官、(株)産学連携機構九州高野浩氏、九州大学先端科学技術共同研究センター中武貞文氏に多大なるご協力を頂いた。

ここに記し深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 小松利光, 矢野真一郎, 鞠承洪, 小橋乃子: 方向性を持つ底面粗度を用いた潮汐残差流の創造と制御, 水工学論文集, 第41巻, pp. 323-328, 1997.
- 2) 多田彰秀, 矢野真一郎, 中村武弘, 野中寛之, 小橋乃子, 西ノ首英之, 藤田和夫, 小松利光: 新長崎漁港における流況制御ブロック沈設に伴う水質動態について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1266-1270, 2002.
- 3) 多田彰秀, 野中寛之, 矢野真一郎, 中村武弘, 神山泰, 小橋乃子, 西ノ首英之, 小松利光: 新長崎漁港

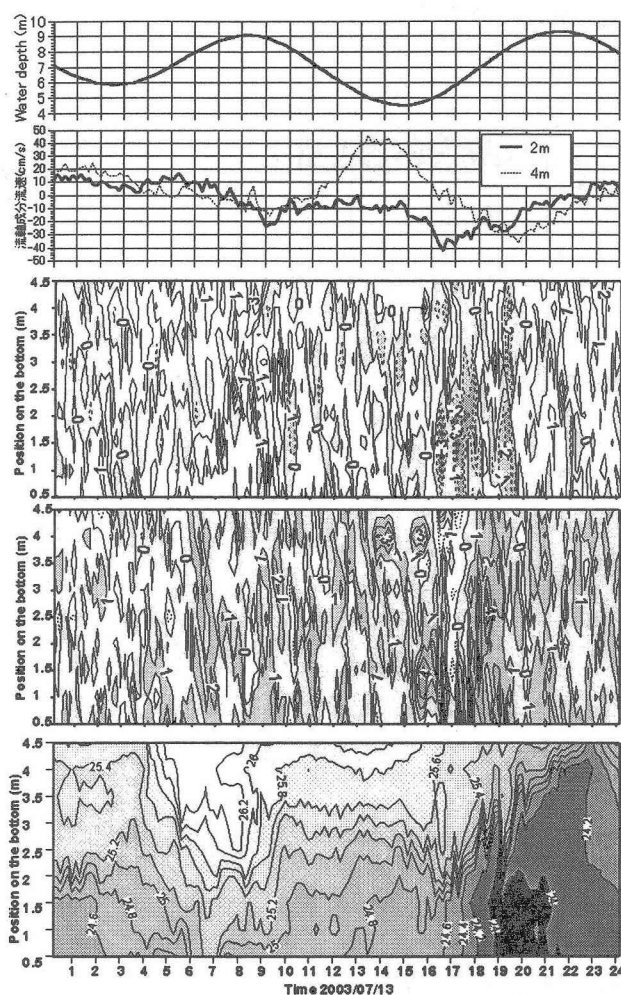


図-11 2003年7月13日の流況と水温変動(上図より、潮位、B地点の流軸成分流速の時系列、B、D地点の鉛直方向成分 w 、C地点の水温)

の流動構造に及ぼす流況制御ブロックの影響について、海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1201-1205, 2003.

- 4) 西ノ首英之, 諏訪部真帆: リサイクルPP魚礁の開発について, 平成12年日本水産工学会講演要旨集, pp. 43-44, 2000.
- 5) Asaeda, T., Son, P.H. and Armfield S.: Vortex convention produced by V-shaped dihedral obstruction, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol.120, No.11, pp.1274-1291, 1994.
- 6) 上北征男, 浅岡邦一, 森井伸正, 大竹臣哉: 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, 第33巻, pp. 342-346, 1986.
- 7) 今村均, 藤原正幸, 大竹臣哉, 明田定満: 海底構造物による密度界面の上昇・混合過程に関する研究(2) - 3次元場での湧昇特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 841-845, 1991.