

有明海における流況制御ブロックの 海水交換促進効果の検討

MODEL AND NUMERICAL EXPERIMENTS ON ACTIVATION OF TIDAL EX-
CHANGE BY BOTTOM ROUGHNESS IN THE ARIAKE SEA

矢野真一郎¹・田井明²・千葉賢³・神山泰⁴・藤田和夫⁵・小松利光⁶

Shinichiro YANO, Akira TAI, Satoshi CHIBA, Yasushi KOUYAMA, Kazuo FUJITA

and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(同上)

³正会員 工博 四日市大学教授 環境情報学部(〒512-8512 四日市市萱生町1200)

⁴正会員 国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所(〒920-8648 金沢市西念4-23-5)

⁵正会員 九州大学大学院技官 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶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(同上)

Recently, reduction of fish catch and poor harvest of cultured laver have been serious social problems in the Ariake sea, which is a typical macrotidal semi-enclosed bay in Japan. Therefore, countermeasures of these problems have been needed. We have proposed a new water-purification method to control a pattern of tidal residual current by using "Bottom Roughness" which has an asymmetric 3-dimensional shape with directional resistance property.

In this study we examined the effect of Bottom Roughness on activation of tidal exchange between the northern part and the southern part of Ariake sea by both model and numerical experiments. As a result of the present study, it becomes clear that i)Bottom Roughness can activate the tidal exchange sufficiently and ii)tidal exchange at the cross-section connecting Ariake with Nagasu plays a very important role for mass transport in the northern Ariake Sea.

key word : Ariake sea, tidal exchange, Bottom Roughness, tidal residual current

1. はじめに

2000 年冬季の大規模な養殖ノリの色落ちにより, 「有明海問題」は大きな社会問題へと発展した. これを機に, 多くの大学や行政機関, ならびに漁民を中心とした市民団体などにより, 有明海における環境悪化の原因究明のための調査や研究が進められ, 有明海の家象や水質・底質, ならびに生態系などに関する基本的な情報が蓄積されてきた. しかしながら, 有明海の自然環境悪化の決定的原因は未だ明らかになってはおらず, 大規模な赤潮や貧酸素水塊の発生が与える水産業への影響が深刻である状況は変わっていない. 2002 年末に施行された「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」(以下, 特措法)においても早急な環境修復策の実施がうたわれており, 「宝の海」で

あった有明海がその本来の姿を取り戻すための環境修復技術の開発が喫緊の課題となっている. なお, 特措法に基づき, 関係 6 省が出した「有明海及び八代海の再生に関する基本方針」によると, 汚濁負荷の総量規制, 汚泥堆積海域における覆砂や浚渫, 干潟域の保全, 修復, ならびに造成などの施策が考えられている.

有明海における, 環境悪化の原因として諫早湾干拓事業が取り沙汰されている. 小松ら¹⁾や矢野ら²⁾が実施した流動構造の現地観測結果によると, 長崎県有明町と熊本県長洲町を結ぶ狭窄部(以下, 有明-長洲ライン)において島原半島沿いに流速が突出する海域が存在することが明らかとなった. また, 西ノ首ら³⁾による現地観測結果よりこの潮流速の突出する海域で諫早干拓締切堤の建設により潮流の流速が著しく減少していることが明らかとなっている. これらのことは, 有

明一長洲ラインにおける海水交換が締切堤の建設により弱められた可能性を示唆するものである。

一方、小松ら⁴⁾は閉鎖性海域の海水交換促進技術として、「流況制御ブロック」を提案している。流況制御ブロックとは、流れの方向により抵抗特性の異なる非対称3次元形状の海底ブロックで、潮流場のような往復流場において設置パターンを調整することにより任意の潮汐残差流パターンを作り出すことができるものである。現在までに、長崎県新長崎漁港における現地実証試験により水質改善効果が確認されている⁵⁾。また、諫早湾内の小長井漁港沖にて流況制御ブロック6基を用いた現地試験も行われており、有明海特有の軟弱地盤上においても特殊な設置技術を用いることなく安定に設置可能であることや、湧昇流の生成効果もあることが確認されている⁶⁾。そこで、本研究では流況制御ブロックを有明海に設置した場合の海水交換促進効果について、模型実験と数値シミュレーションの両方により調べ、その適用可能性について検討を行った。

2. 流況制御ブロックの適用について

堤ら⁷⁾によると、有明一長洲ラインを境にして北側の海域（以下、北部有明海）と南側の海域（以下、南部有明海）においては成層構造が大きく変化することが現地観測結果より明らかにされている。また、有明海においては、自然環境や生態系、ならびに水産業に対する問題の多くは北部有明海を中心に発生している。特に、養殖ノリの不作、赤潮の大規模化や貧酸素水塊の発生、底質の細粒化、ならびに浮泥の堆積などは北部有明海に顕著な現象である。

そこで、本研究では有明一長洲ラインに集中的に流況制御ブロックを設置し、北部有明海と南部有明海の海水交換を促進させることを目的とした検討を行うことにした。また、諫早締切堤の建設に伴い、明らかに停滞域が増大したと考えられる諫早湾と有明海本体との海水交換を促進させることも重要と考えた。したがって、流況制御ブロックにより生成する潮汐残差流のパターンとしては、諫早湾湾口ライン上と有明一長洲ライン上において大きく反時計回りの環流となるようなブロックの設置パターンを中心に検討を進めていった。

3. 模型実験による検討

(1) 実験方法

まず、既存の潮汐発生装置付き平面水槽（九州大学所有）を用いて、有明海の模型実験を行った。本来な

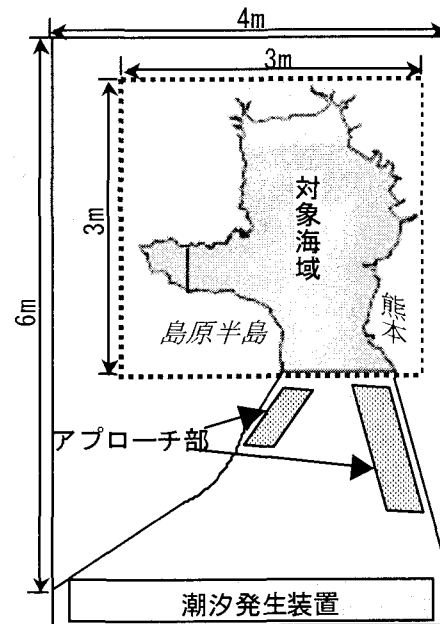


図-1 模型実験装置の概略図

らば、有明海全域を対象とした模型を作製し実験すべきであるが、既存の平面水槽の大きさから生じる制限と流況制御ブロックを設置した場合の効果を検討する必要性から模型にある程度の大きさが要求された。そこで、図-1に示すように熊本と島原を結ぶラインより北側の有明海を対象にした模型を作製し、有明一長洲ラインで北部有明海の海水交換を定性的に調べる実験を行うことにした。平面水槽を用いた潮流の模型実験では、次式で示される相似則⁸⁾が要求される。

$$U_p/U_m = (H_p/H_m)^{1/2}, T_p/T_m = L_p/L_m \cdot (H_m/H_p)^{1/2} \quad \cdots(1)$$

ここで、 U ：水平方向流速、 T ：潮汐の周期、 L, H ：水平方向と鉛直方向の空間スケールである。なお、添字 m, p は模型と原型を意味する。模型の海底地形は、日本海洋データセンター (http://www.jodc.go.jp/index_j.html) の 500m メッシュ水深データを GIS ソフトウェア (ArcView8.2, ESRI 社製) により等水深線図へ変換し厚さ 1mm と 2mm のアクリル板を加工して作製された。対象とする潮汐は、有明海の主要分潮である M_2 潮 ($T_p=44700s$) とした。平面水槽の大きさより、模型の水平縮尺を $H_p/H_m=15000$ 、鉛直縮尺を $L_p/L_m=190$ とした。この時、相似則から模型の潮汐周期は $T_m=41s$ が求められるが、潮汐発生装置の制約から滑らかな正弦波を発生させるためには模型の潮汐周期を $T_m=90s$ とせざるを得なかった。潮汐の振幅は、長洲における M_2 潮の調和定数の振幅 210cm より 1.1cm とした。また、海底摩擦に関しては流況制御ブロックを設置し

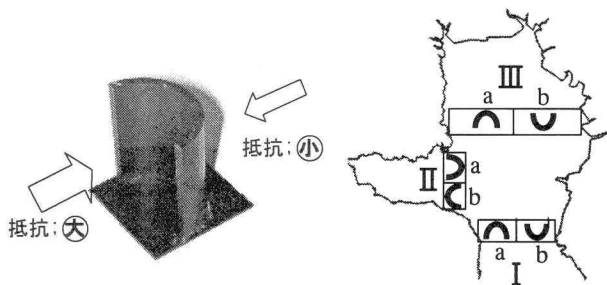


図-2 1/2円筒型ブロック

図-3 ブロック設置領域

た場合には、何も置かない場合と較べて大きな摩擦抵抗が加わるため、何も置かない場合には海底摩擦無しを仮定した。すなわち、通常このような潮流実験で設置される人工粗度を設置しないことで流況制御ブロックを設置した場合の効果を抽出しやすくした。

今回の模型では北部有明海のみを対象としたことから、南部有明海の影響を模型の境界条件に含ませる工夫が必要となる。そこで、潮汐発生装置から模型までの間に非対称なアプローチ部を設け、有明一長洲ライン上の現地観測で確認されている島原半島沿いの強い流れを含む流速分布特性を再現できるように流況調整用の粗度をアプローチ部に設置した。水面に浮かべたトレーサー粒子を用いたPTV(Particle Tracking Velocimetry)により上げ潮と下げ潮の最強時における流速分布の再現性を確認した。以上のように、定量的評価には若干問題はあるが、流況制御ブロックの効果を定性的に判断することを優先させて模型実験を行った。

模型実験に用いた流況制御ブロックは、図-2に示す塩化ビニール製の1/2円筒型を採用した。円筒の直径を $d=4\text{cm}$ 、ブロック高さは水深の1/4となるように設置地点毎に調整した。締切堤のない場合のCase0と締切堤建設後の現況において流況制御ブロックの設置位置や設置個数を変化させた8ケースの計9ケースについて実験を行い比較した。各実験ケースと対応するブロック設置領域は、それぞれ表-1と図-3に示すとおりである。なお、図-3中のブロック設置領域中の記号はブロックの設置された方向を示しており、凸側から凹側へ向かう流れが抵抗の小さい順流方向を、逆向きの流れが逆流方向を意味しており、順流方向に潮汐残差流が強化されることになる。

(2) 海水交換促進効果の比較

流況制御ブロック設置による海水交換促進効果を評価するために、トレーサーを投入後30潮汐間に渡って、北部有明海における残留率の時間変化を調べた。実験は、潮汐発生装置を起動し潮汐が安定した後、憩

表-1 実験ケースとブロックの設置個数

領域		Case								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
I	a	0	0	25	25	25	25	11	7	4
	b	0	0	25	25	25	25	14	9	5
II	a	0	0	0	5	0	5	0	0	0
	b	0	0	0	7	0	7	0	0	0
III	a	0	0	0	0	6	6	0	0	0
	b	0	0	0	0	4	4	0	0	0

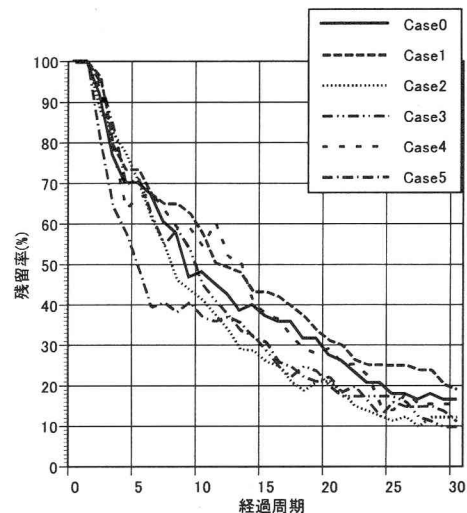


図-4 残留率の時系列図(北部有明海に投入した場合)

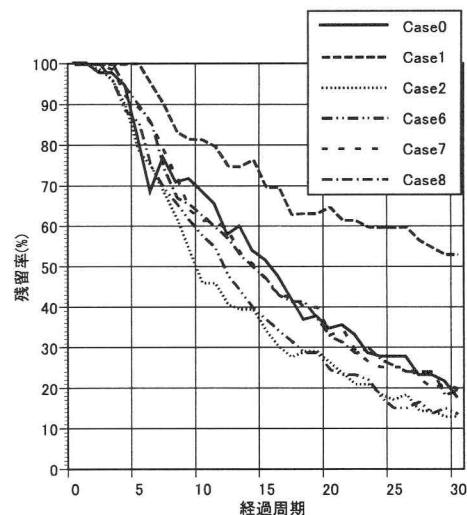


図-5 残留率の時系列図(諫早湾に投入した場合)

流となる満潮時にプラスチック製の球形浮子30個を北部有明海中央部と諫早湾内に投入した場合についてそれぞれ行った。残留率は満潮時に北部有明海内に残留している浮子数の全有効浮子数(全浮子から粗度や海岸線などにトラップされた浮子を除いた数)に対する割合と定義した。実験は3回行い、再現性が悪い場合には追加実験を行い3回の平均値を最終的な残留率としている。

図-4にCase0～5について北部有明海に浮子を投入した場合の残留率の時間変化を示す。また、

Case0～2, 6～8について諫早湾に浮子を投入した場合を図-5に示す。Case0と1の比較から、締切堤がある場合には、無い場合に比べ明らかに海水交換能力が低下していることが分かる。ブロックを設置した場合は、現況のCase1に比べ全てのケースで海水交換が促進されていることも分かる。海水交換促進効果の目標としては、締切堤建設前の状況（Case0）に戻すことが考えられるが、Case2, 6～8の比較より有明－長洲ラインのみにブロックを設置する場合には設置個数が少ないCase7, 8でも十分に効果を発揮していることが分かる。したがって、このラインは北部有明海の海水交換にとって重要な位置付けになっていることが改めて模型実験からも示唆された。

4. 数値シミュレーションによる検討

(1) 計算モデル

次に、数値シミュレーションにより流況制御ブロックの効果について検討を試みた。使用したモデルは、千葉⁹⁾により開発された有明海の潮流解析のための平面2次元モデルである。本モデルの主な特徴は、1) 一般曲線座標系の利用、2) 計算領域が有明海湾口（早崎瀬戸）から150km離れた外海域と八代海を含むこと、3) 干潟の干出モデルの組み込みなどである。計算格子数は200×104で、最小格子幅が約300mである。流況制御ブロックは1/4球型を採用した。ブロック設置による効果は、次式で示される海底摩擦係数 c_f により海底摩擦の変化として与えた。

$$c_f = \frac{1}{2} n A_s C_d \quad \dots(1)$$

ここで、 n : 単位面積当たりのブロック設置個数、 A_s : ブロックの対称軸に直交する面への投影面積（ $= \pi k^2/2$ 、 k : ブロックの高さ）、 C_d : 抗力係数である。1/4球型ブロックの C_d は、順流に対して0.7、逆流に対して1.7となることが既往の研究¹⁰⁾により分かっている。シミュレーションは、図-6に示すとおり有明－長洲ラインと諫早湾湾口ラインにおいて反時計回りの潮汐残差流を生成するように、表-2に示す設置条件で6ケースについて行った。ブロックの高さ k は、それぞれのラインの水深を考慮して有明－長洲ライン上では4m、諫早湾湾口ライン上では2mとした。

(2) 計算結果について

a) 潮汐残差流

ブロック設置無しのCaseA、有明－長洲ラインにブ

表-2 各計算ケースにおけるブロック設置状況
(100m四方当たりの設置個数)

設置領域	Case					
	A	B	C	D	E	F
①	0	10	0	10	50	1
②	0	10	0	10	100	1
③	0	0	10	10	0	0
④	0	0	10	10	0	0
ブロック設置総数	0	4000	7200	11200	30000	400

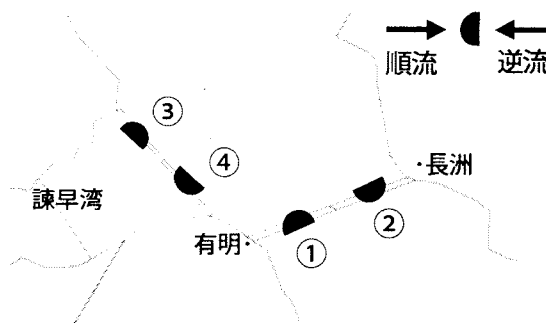


図-6 ブロック設置領域

表-3 主な解析条件

項目	設定値
開境界の潮汐周期	12.42hr (M_2 潮)
開境界の潮汐振幅	1.4m (大潮)
渦動粘性係数	1.0m ² /s
ブロックの無い海域の マンニングの粗度係数	0.025
干潟が干出したとみなす水深	0.01m

ロックを設置した場合のCaseBについて潮汐残差流のベクトル図をそれぞれ図-7a), b)に示す。また、ブロック設置の効果を抽出するために残差流ベクトルの差（CaseB－CaseA）を図-7c)に示す。長洲（熊本）側で流入が、有明（長崎）側で流出が強化されており、反時計回りの潮汐残差環流が強化されていることが確認できる。したがって、流況制御ブロックにより想定したとおりに潮汐残差流が生成できた。

b) 粒子追跡計算による海水交換能の比較

北部有明海の海水交換能を評価するために、粒子追跡計算を行った。図-8a), 図-9a)に示すように、初期時刻（下げ潮最強時）に52000個の仮想粒子を有明－長洲ライン以北の海域に一様に投入し、60潮汐間の計算を行った。なお、本計算では乱れによる拡散の効果は取り入れていない。

CaseA, Bについて仮想粒子の移動状況をそれぞれ図-8a)～d), 図-9a)～d)に示す。10潮汐後の満潮時

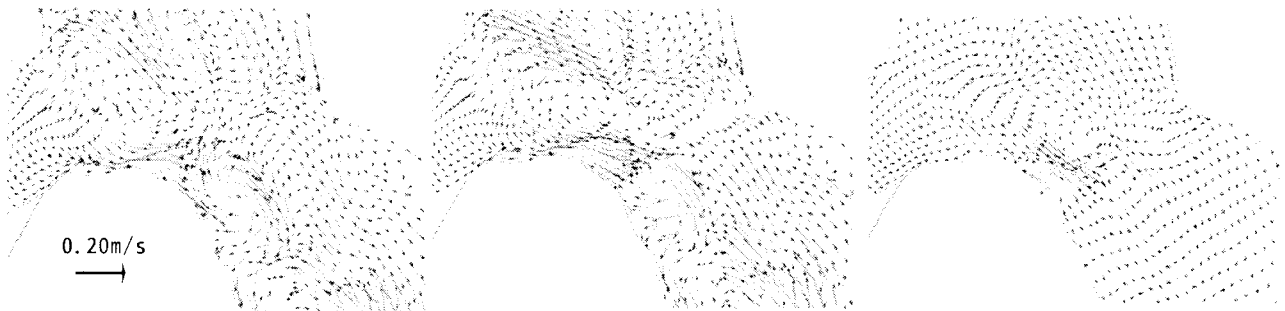
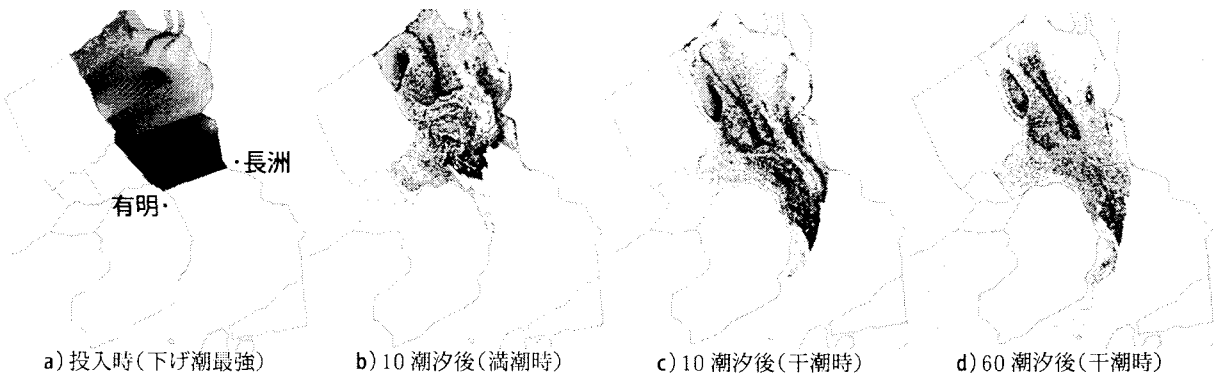


図-7a) CaseA(設置無し)の潮汐残差流

図-7b) CaseB(設置有り)の潮汐残差流

図-7c) CaseA と CaseB のベクトル差



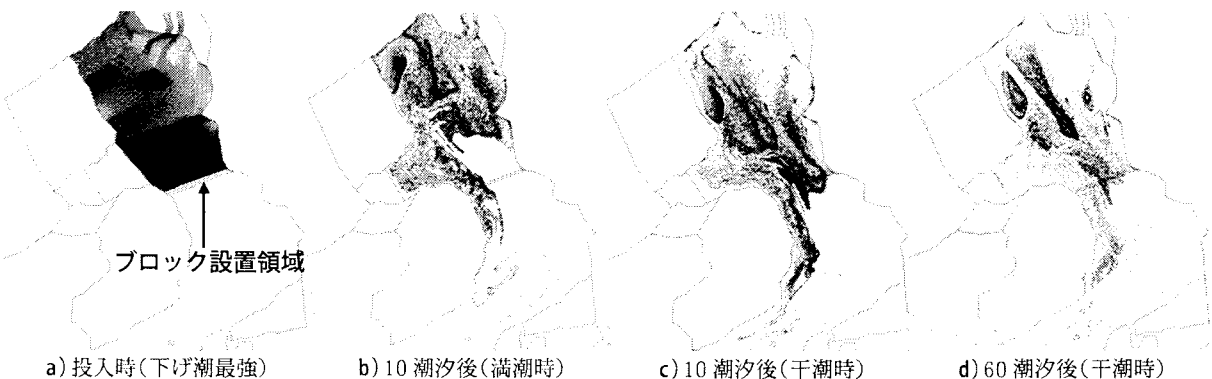
a) 投入時(下げ潮最強)

b) 10 潮汐後(満潮時)

c) 10 潮汐後(干潮時)

d) 60 潮汐後(干潮時)

図-8 粒子追跡計算の結果(CaseA)



a) 投入時(下げ潮最強)

b) 10 潮汐後(満潮時)

c) 10 潮汐後(干潮時)

d) 60 潮汐後(干潮時)

図-9 粒子追跡計算の結果(CaseB)

(図-8b)と図-9b))において、南部有明海の海水がブロック設置により上げ潮時に順流となる長洲側を通過して北部有明海へ流入し、逆流となる有明側では下げ潮時に有明ー長洲ライン以南に排出された仮想粒子が上げ潮で戻りきれずに島原半島に沿って残留していることが分かる。干潮時(図-8c)と図-9c))においては、ブロック設置により下げ潮時に順流となる有明側から仮想粒子の南部への排出量が増加し、逆流となる長洲側では仮想粒子が滞留していることが分かる。また長洲側に存在していた仮想粒子は、反時計回りの潮汐残差流によって移動し有明側から南部有明海へ排出される。60 潮汐後の干潮時(図-8d)と図-9d))では、CaseAに比べCaseBの方が北部有明海内に残留した粒子が少なくなっており、南部有明海や外海である橘湾まで移

動した仮想粒子が多いのが分かる。

最後に、北部有明海内における仮想粒子の残留率によって海水交換能を比較する。図-10にブロック設置領域の異なるCaseA, B, C, Dについて残留率の時系列を示す。ここで、残留率は一潮汐間で平均したものをを用いている。ブロックを設置していないCaseAに比べて、大幅に残留率が低下したのは有明ー長洲ラインにブロックを設置したCaseB, Dであった。諫早湾口のみに設置したCaseCはCaseAと同程度であった。CaseCとCaseBを組み合わせたCaseDが、CaseBより改善されているのは両海域においてブロックにより生成された潮汐残差環流による物質輸送がうまく連結されたためと考えられる。

最も効果の大きかった有明ー長洲ライン設置について、ブロックの設置個数を変化させたCaseB,

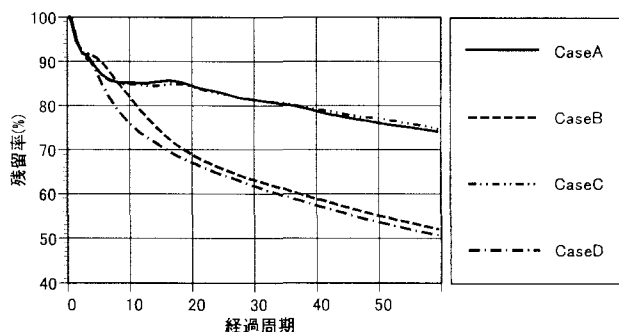


図-10 残留率の時系列図(caseA, B, C, Dの比較)

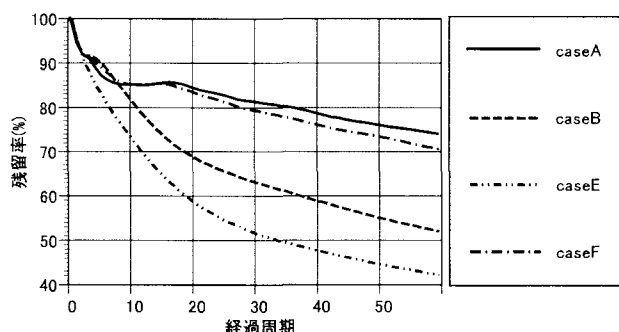


図-11 残留率の時系列図(CaseA, B, E, Fの比較)

E, Fの比較を図-11に示す。設置個数が増えるにつれて、海水交換が促進される傾向があることが分かる。これまでの現地実証試験の経験によりブロック1基あたりのコストから概算すると、CaseBで十億から十数億程度の予算規模で事業化が可能であるので、現実的で最も費用対効果が期待できるケースとしてCaseBが提案できると考えられる。今後は、CaseBによる海水交換促進が水質や生態系、ならびに水産資源へ与える効果を検証することで、費用対効果を精緻に見積った上で提案を行うことが望まれる。

5. まとめ

北部有明海の海水交換を促進させることを目的に、流況制御ブロックを適用した場合について模型実験と数値シミュレーションによりその効果を検証した。模型実験においては定性的効果の検討に留まったが、流況制御ブロック設置による海水交換促進効果を確認できた。また、数値シミュレーションにおいても、模型実験と同様に海水交換促進効果が確認され、必要とされるブロックの個数についても概略で見積もることができ、現実的に事業化が可能な予算規模で十分な効果が得られるものと推定された。さらに、有明一長洲ラインが北部有明海の物質輸送構造にとって極めて重要な海域となっており、同海域に集中的にブロックを配

置することがコスト的にも有利であることも分かった。

謝辞：本研究は、(社)マリノフォーラム21の平成13年提案公募型有明海地域等緊急振興対策研究開発事業の一環として実施された。また、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。模型実験では、九州大学工学部4年生(当時)の伊東和彦君と橋山雄一君に多大な協力をいただいた。また芙蓉海洋開発株式会社の石村忠昭氏と大原正寛氏には研究全般に関してご支援をいただいた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小松利光, 矢野真一郎, 齋田倫範, 松永信博, 鶴崎賢一, 徳永貴久, 押川英夫, 濱田孝治, 橋本彰博, 武田誠, 朝位孝二, 大串浩一郎, 多田彰秀, 西田修三, 千葉賢, 中村武弘, 堤裕昭, 西ノ首英之: 北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.341-345, 2004.
- 2) 矢野真一郎, 齋田倫範, 橋本泰尚, 神山泰, 藤田和夫, 小松利光: 有明海における潮汐条件に対する流動・成層構造の変化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.331-335, 2004.
- 3) 西ノ首英之, 小松利光, 矢野真一郎, 齋田倫範: 諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.336-340, 2004.
- 4) 小松利光, 矢野真一郎, 鞠承淇, 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.
- 5) 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.
- 6) 矢野真一郎, 齋田倫範, 大原正寛, 石村忠昭, 西ノ首英之, 小松利光: 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, 海洋開発論文集, 第29巻, pp.881-886, 2004.
- 7) 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達貴浩, 小松利光: 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係, 海の研究, 第12巻, 第3号, pp.291-305, 2003.
- 8) 須賀堯三: 水理模型実験, 山海堂, 339p, 1990.
- 9) 千葉賢, 武本行正: 諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流況変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.376-380, 2003.
- 10) 小松利光, 矢野真一郎, 小橋乃子, 鞠承淇, 藤田和夫: 流れの方向により抵抗特性の異なる人工粗度の開発, 水工学論文集, 第41巻, pp.705-710, 1997.

(2004.9.30 受付)