

大村湾の海底地形改変が海水交換率に与える影響のシミュレーション評価

TIDAL FLOW SIMULATION FOR THE EFFECT OF SEABED CONFIGURATION ON EXCHANGE RATE OF SEA WATER IN OMURA BAY

兵頭 竜二¹・後藤 恵之輔²
Ryuji HYODO and Keinosuke GOTOH

¹正会員 博(工) 長崎県工業技術センター 応用技術部 (〒856-0026 長崎県大村市池田2丁目1303-8)

²正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

Omura Bay in Nagasaki Prefecture, which is almost isolated from the outer sea, is famous for the very low exchange rate of sea water. In the present paper, the authors carry out the tidal flow simulation using the simulation system improved with the automatic control method, and it is discussed that the effect of seabed configuration on the exchange rate of sea water in Omura Bay. At first, it was estimated that the current rate ranges from 0.2 to 0.4%. Secondly, the authors performed the simulation tests with the modified seabed configuration which is cut the sea mount and buried the deep basin, respectively or simultaneously. It was confirmed that there are little changes of tide, the averaged rates become higher than current one and the water mass pattern nearby the bay mouth stretches into the depths of the bay.

Key Words : exchange rate of sea water , tidal flow , numerical simulation , Omura Bay

1. はじめに

九州西部に位置する長崎県の大村湾(図-1を参照)は、二重閉鎖性湾と言われる地形的な特徴のため、閉鎖性が強い内湾であり、海水交換性も悪いことで知られている^{1),2)}。このため、著者らは、この湾の水質保全に役立てることを目的に、衛星リモートセンシングや数値シミュレーションなどを用いた大村湾の海水交換メカニズムの解明などの研究を進めている。

これまでの研究^{3),4)}では、湾内の任意の場所の潮位変化を入力にして、開境界に与えるべき最適な強制水位を自動的に算出しながら目的のシミュレーションを継続できるシステムの開発を行った。また、人工衛星で観測された大村湾の海水流動と、このシステムで再現された流動状態とを比較することで、このシステムの有効性の確認などを実施している。

閉鎖性湾の海水交換の促進を考える場合、湾口部の海底地形の改変が有効であることが知られている⁵⁾。大村湾の湾口付近の水深を示す海図⁶⁾⁻⁹⁾によれば、その湾口部には、局所的に深い所や浅い所が存在する。

従って、本論では、この様な浅い所を切削、または深い所を埋めて平坦化するなどの軽微な土木工事で、どの

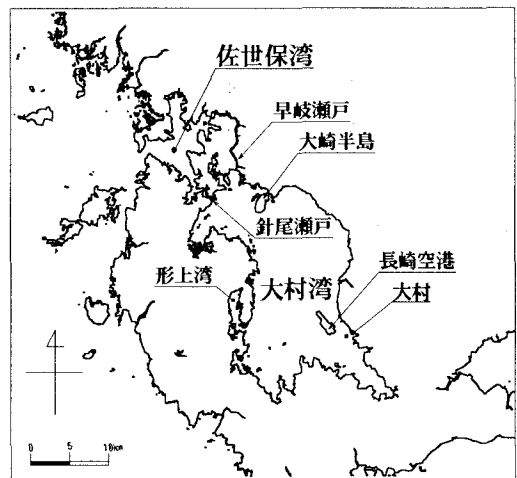


図-1 大村湾の地形

程度、大村湾の海水交換率の改善が望めるかを調べることを目的とする。このため、まず本論では、現状の大村湾についての海水交換率の推定を行う。さらに、海底地形を改変した場合の仮想的な大村湾について、同じ条件下での同様のシミュレーション実験を行い、海水交換率の変化について調査する。

また、大村湾の場合、海水交換の殆どを担う針尾瀬戸

が非常に狭いため、ここを通過して流れ込む海水は噴流となる。本論では、この噴流によって大村湾の湾口付近に形成される水塊パターン(以下、これを単に水塊パターンと呼ぶ)の変化などについても考察を加える。

2. 流動シミュレーション・システム

ここでは、これまでの研究^{3),4)}で開発したシミュレーション・システムについて、簡単に整理する。

従来の数値シミュレーション実験では、その開境界に、M₂潮などの周期的な境界条件を与えることが多く、開境界に選ばれる任意の海域の調和定数をどのようにして算出するかなどの問題があった。また、湾内の海水流動は、周期的な潮汐現象だけでなく、様々な気象条件や、河川から流入する淡水などの影響を受けている。

従って本研究では、大村湾内の任意の場所の潮汐などを入力として、自動制御による流動シミュレーションを行うことで、過渡的な大村湾の流動状態を再現できるシステム(図-2を参照)の開発を進めている。

(1) システムの構成と動作

本研究で開発したシステムは、外海と接する佐世保湾口を開境界とする数値シミュレーションを行う部分と、開境界に与える強制水位の値を自動算出する制御器とで構成さる(図-2(a)を参照)。なお、図-2(b)はこのシステムをモデル化したものである。

a) 水深データ

本研究では、数値地図^{10),11)}から取り出した海岸線に関する情報と、計算機処理することで海図^{6)~9)}から抽出した水深に関する情報を整理して、大村湾に関する水深データを作成した。実際のシミュレーション実験では、この水深データを数値モデルの水平方向の格子間隔に合わせて平均処理し、これを使用している。

b) 数値モデルと解法

本研究では、海水交換など、主に湾口付近の流れに着目した解析を行う。湾口付近の海水は、瀬戸から流入する海水によって常に攪拌されているため、この付近に温度躍層などはないものと考えられる。また、針尾瀬戸を出入りする海水量は、河川から流入する淡水量に比べて十分に多い。従って、ここでは、数値モデルに順圧モデル^{12),13)}を採用し、さらに、河川からの流入を省略した。

c) 潮汐データ

湾内の潮位は、風や気圧などの影響を受けている。このため、入力に使う大村湾の潮汐には、湾内で実際に測定された潮位を使用することが必要である。本研究では、最終的には実際に測定された潮汐を使用する予定であるが、本論では潮汐表¹⁴⁾から得られる大村の潮汐を使用した。なお、潮汐表から得られた潮汐の潮時と次の潮時との間は、三角関数で補間して連続的な値としている。

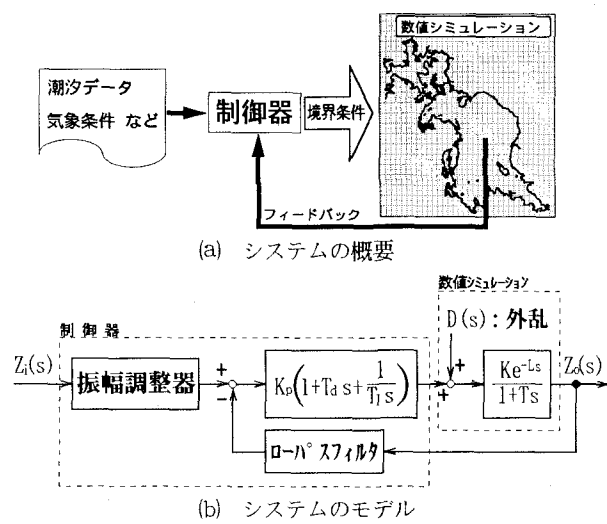


図-2 シミュレーション・システム

表-1 数値シミュレーションの計算条件		
諸	元	値
水平方向の格子間隔		200 m
多層モデルの層厚		5 m
タイム・ステップ		30 s
座標軸の傾き ¹⁵⁾		34°
コリオリの係数		7.92×10^{-5} 1/s
海底の摩擦係数		0.0026
層間の摩擦係数		0.0013
佐世保湾の渦動粘性係数		70 m ² /s
大村湾の渦動粘性係数		50 m ² /s
鉛直方向の乱流拡散係数		0 m ² /s
水平方向の乱流拡散係数		10 m ² /s

注) 反時計回りを正とする。

d) 自動制御による境界条件の算出

ここで用いた数値モデルは、開境界における強制水位を入力とし、シミュレーション結果の潮位を出力とするプロセスと考えられる。従って、数値モデルを「一次遅れ+むだ時間」で近似¹⁵⁾した上で、大村の潮位を自動制御する。なお、自動制御にはPID制御¹⁶⁾を用いた。

(2) 計算の諸条件

計算の諸条件を、表-1に示す。

この条件には、これまでの研究^{3),4)}で実施した、衛星データの解析結果とこれを再現するシミュレーション結果との比較によって得られたものも含まれており、このシステムにおける最適値と考えられる。

a) 格子間隔とタイムステップ

格子間隔は、大村湾の海水交換の殆どを担う針尾瀬戸の幅と、このシミュレーション実験を行う計算機の処理能力とを考慮に入れて決定した。なお、水平方向の格子間隔は200mに、層厚は5mに設定した。

タイムステップについては、長波の減衰特性や位相特性についての試算¹⁷⁾を考慮して、30sとした。

b) 摩擦係数

摩擦係数については、堀江¹⁷⁾の見解を参考にして、海底の値を0.0026に設定し、さらに、層間の値は海底の値の2分の1とした。

c) 渦動粘性係数と乱流拡散係数

本論では、潮位の高低差が激しい大潮の場合でも計算が発散しない条件の下で、さらに、針尾瀬戸付近に生じる水塊パターンの大きさが、衛星データの解析結果とシミュレーション結果との間でほぼ同じになることを条件として、渦動粘性係数と乱流拡散係数の値を選定した。その結果、佐世保湾内の渦動粘性係数を $70\text{m}^2/\text{s}$ 、大村湾内の渦動粘性係数を $50\text{m}^2/\text{s}$ 、水平乱流拡散係数を $10\text{m}^2/\text{s}$ とした。

d) 水平方向の座標軸の傾き

大村湾が上げ潮の時、佐世保湾の海水は針尾瀬戸の地形的な向きに合わせて大村湾に流れ込んでくる。このため、数値モデルを作成するための水平方向の座標軸は、緯度・経度線の向きに一致させるより、この地形的な向きを考慮して決定の方が望ましい。従って、座標軸の傾きに対して海水の流れ込む方向がどのように変化するかを調べた結果、水平方向の座標軸を反時計回りに 34° 傾けることとした。

3. 海水交換率推定のための実験方法

(1) 現状の大村湾

a) 流動シミュレーション実験の手順

流動シミュレーションは、図-3に示す手順で行った。まず、数値モデル内の流れを安定させるために干潮・満潮の3周期分のシミュレーションを行い、その直後、大村湾全域に一樣に仮想粒子を投下する。その後、仮想粒子の位置をラグランジュ的に追跡しながら流動シミュレーションを継続する。なお、針尾瀬戸を通過して佐世保湾に流れ出た仮想粒子は、その時点で消去する。

また同時に、後の実験のため、ここで得られた強制水位を計算機上のファイルとして保存する。

なお、ここで用いた潮汐の情報は、1991年12月の大潮から次の大潮までの約15日分の潮汐である。

b) 海水交換率の定義と推定の方法

大村湾内に一樣に投下した仮想粒子の内の幾つかは、大村湾が下げ潮になる度に、針尾瀬戸を通過して佐世保湾に流れ出る。ここでは、常に、大村湾内に存在する仮想粒子の数を監視し続ける。

ここで、第 n 回目の干潮の時の仮想粒子の数を N_n 、次の第 $n+1$ 回目の干潮の時の仮想粒子の数を N_{n+1} として、仮想粒子の数の減衰率 r_n を、

$$r_n = \frac{N_n - N_{n+1}}{N_{n+1}}$$

と定義した。また、ここでは、この減衰率を大村湾の海水交換率と見なした。

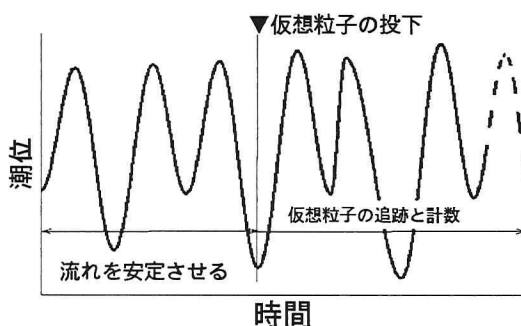


図-3 仮想粒子投下のタイミング

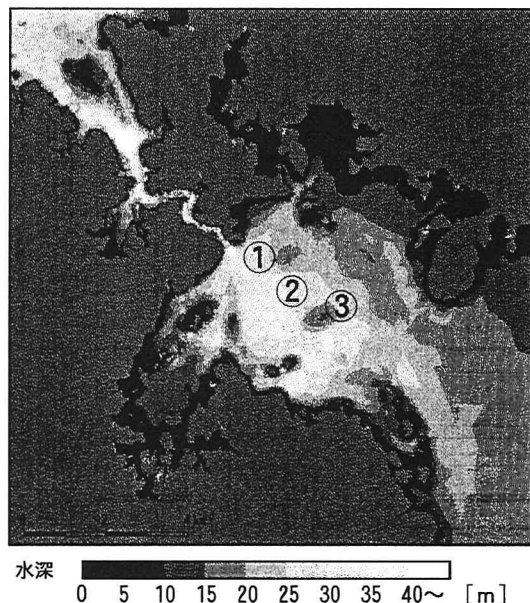


図-4 針尾瀬戸付近の水深

(2) 海底地形改変を想定した大村湾

a) 海底地形の改変

図-4は、本研究で準備した水深データの針尾瀬戸付近を画像化したもので、1色あたり5mの幅をもたせて表示している。この図から、針尾瀬戸の正面付近(図中の①)に40mを越す深い部分があり、その延長線上(図中の②)には30mを超える領域(以下、これを海盆と呼ぶ)があることも分かる。また、この領域の右側(図中の③)には、瘤状に盛り上がった所(以下、これを海台と呼ぶ)があり、周りに比べ5~10m浅くなっている。

本論における海底地形の改変は、単純な水深値の変更でシミュレーション実験できるもの限定して考えた。このため、海台の削除と海盆への盛土を組み合わせた、3通りとした。

まず一つ目は、海台を削除したものであり(以下、これをケース(b)と呼ぶ)、削除する海台部分の水深を周りに揃えるため、海台部分に周りと同じ25mの水深値を設定する。なお、この改変による水深値の変化を実際の土量に換算すれば、 $4.2 \times 10^6 \text{m}^3$ の海底地盤を取り除くことに相当する。

次に2つ目は、海盆に盛土したものであり(以下、こ

れをケース(c)と呼ぶ), 海盆を回りの深さに揃えるため, 海盆部分に34mの水深値を設定する. なお, この水深値の変更は, $0.4 \times 10^6 \text{m}^3$ の土を盛ることに相当する.

さらに3つ目は, 海台の削除と海盆への盛土の両方を行ったものである (以下, これをケース(d)と呼ぶ).

なお, 以下, 前節(1)で示した現状の大村湾についての実験をケース(a)と呼ぶ.

b) 流動シミュレーション実験の手順

流動シミュレーションは, ケース(b)~(d)毎に, 前項a)で準備した水深情報を用いて行った.

また, ここでは, 図-2に示した制御器を取り去り, 前節(1)のa)で保存した強制水位を利用して, シミュレーション実験を行った. このことは, 大村湾内の海底地形改変を想定する場合でも, 外海の潮汐や潮流は, その改変の影響を受けないことに相当する.

なお, 仮想粒子の投下など, 他の条件や手順は, 前節(1)の場合と同じである.

4. 実験結果と考察

(1) 実験結果

a) 現状の大村湾における結果

図-5は, 海水交換率の推定結果を示したものである. 同図(a)は, シミュレーション結果の大村の潮位変化と, この時の仮想粒子の計数結果を示したものである. また, 同図(b)は, 仮想粒子の数の減衰率を示したものである.

図-5から, 仮想粒子の数の減衰率は, おおよそ0.1%~1%であることが分かる. また, 大潮の時, その減衰率が比較的大きく, 小潮の時, 同じく減衰率が比較的小さくなることも読み取れる.

b) 海底地形改変時における結果

図-6は, 海底地形の改変に伴って海水交換率がどのように変化するかを示したものであり, ケース(a)~(d)の結果をまとめて示している.

図-6から, 4 ケースとも, 各潮汐毎の海水交換率の変化の傾向が類似していることが分かる. しかし, どのケースの海水交換率が高い値を示すかが, 各干潮・満潮毎に異なっていることも読み取れる.

また, 図-6中に示された区間の海水交換率の平均値は, ケース(a)~(d)について, それぞれ, 0.354%, 0.357%, 0.362%, 0.356%である. このことから, 海底地形を改変した場合, 若干ではあるが, 改変前に比べて海水交換率の値が向上していることが明らかである.

(2) 考察

a) 仮想粒子の初期状態の影響

本論で用いた大村の潮汐区間は, 大潮から始まり, 間に小潮があり, さらに大潮で終わっている. 図-5に示した結果を見れば, 始め, 減衰率が比較的高い値 (約1%) を示しており, さらに時間の経過とともに, この減衰率

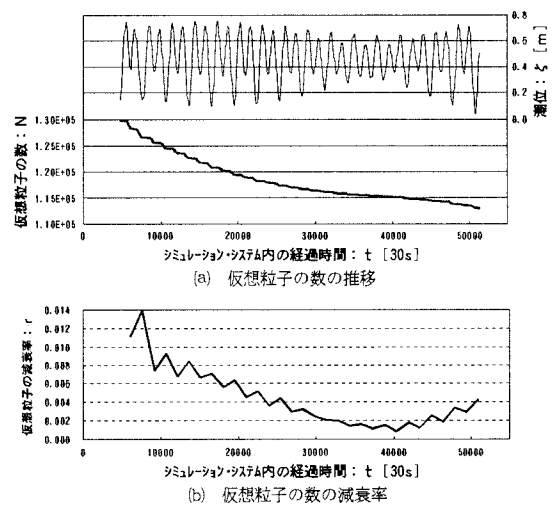


図-5 現状の大村湾におけるシミュレーション結果

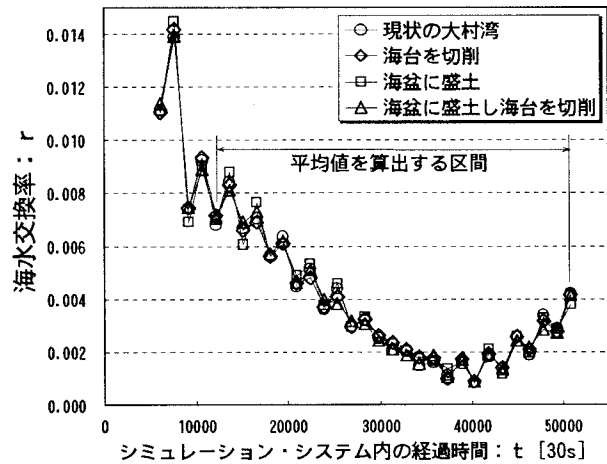


図-6 海水交換率の比較

が徐々に減少し, また大潮の頃, 再び増加していることが分かる. このことから, この減衰率の高低は, 潮が大潮であるか, または小潮であるかに強く関係していることが確認できる.

また, 図-5からは, 当初の減衰率が約1%あり, 後の大潮の時の減衰率 (約0.3%) と比べて極端に違うことも読み取れる.

減衰率算定の開始直後は, 大村湾内に仮想粒子が一樣に分布しているため, 下げ潮に伴って, 湾口付近の仮想粒子が数多く湾外に排出される. しかし, 佐世保湾と大村湾との海水交流のため, 時間の経過とともに湾口付近の仮想粒子の密度が低下し, 下げ潮によって排出される仮想粒子の数は始めに比べて減少する.

従って, 始めの大潮と後の大潮の時の減衰率の大きな違いは, このような仮想粒子の初期状態の影響であると理解できる.

b) 定常的な海水交換率

大村湾の海水交換は佐世保湾との間で行われるが, 両湾を行き来する海水が, どの時点まで佐世保湾の海水であり, どの時点から大村湾の海水であるかを規定するの

は難しい。従って、図-5において、後半の大潮時の仮想粒子数の減衰率を、大村湾の定常的な海水交換率と考えれば、その値はおおよそ0.2%~0.4%である。

大村湾の大潮時の干満差を利用した算出によれば、大村湾の海水交換量は満潮時の海水量の約6%と報告されている¹⁾。さらに、大村湾の場合、海水交換量の約1割が海水交換に寄与していると報告されている²⁾。これらのことは、大村湾の海水交換率が0.6%程度であることを意味している。

従って、本論で推定した海水交換率(約0.2%~0.4%)は、既往の研究例^{1),2)}から導き出される結果(約0.6%)とほぼ一致する値であると考えられる。

c) 潮汐

大村におけるシミュレーション結果の潮汐について考える。まず、位相については、4つのケース全てにおいて、全体を通して変化がないことを確認している。

次に、潮位振幅について、仮想粒子を投下した直後の干潮から満潮までの潮汐(図-3を参照)に着目して、比較する。この区間の潮位は、ケース(a)~(d)について、それぞれ、0.14806~0.74695m, 0.14803~0.74693m, 0.14806~0.74696m, 0.14803~0.74693mであり、海底地形改変の影響はほとんど無いと言える。

d) 水塊パターン

図-7は、仮想粒子を投下した時の干潮から始めの満潮までの上げ潮の間(図-3を参照)、針尾瀬戸に連続的に投下した仮想粒子をラグランジュ的に追跡し、その結果を画像として示したものである。

図-7(a), (c)をみれば、ケース(a), (c)において、海台を迂回するような反時計回りの大きな渦が形成されていることが分かる。これに対し、ケース(b), (d)の結果を示した図-7(b), (d)では、この大きな渦の中心部がぼやけており、海台を切削した影響が水塊パターンに出ていることが確認できる。

また、図-7からははっきりしないが、海盆への盛土のみを行ったケース(c)では、ケース(a)に比べ、その水塊パターンの大きな渦の直径が若干大きくなっており、湾奥に向う流れが強くなっていることが分かる。また、海台を切削したケース(b), (d)では、水塊パターンの大きな渦の直径が小さくなっていることも分かる。

これらのことから、海水交換率が向上したのは、海台を切削したことによって、針尾瀬戸からの噴流が連行加入で巻き込む海水の量が増加したことや、海盆に盛土したことによって、噴流の勢いが増し、湾奥の海水を攪拌したことなどが理由であると考えられる。

e) 潮流ベクトル

湾内の流向や流速の変化については、海盆の中心部分の水深10~15mの層の潮流ベクトルを比較した。

その結果、ケース(a)~(d)における最大流速は、それぞれ、0.6516m/s, 0.6559m/s, 0.6517m/s, 0.6561m/sであり、海底地形を改変することで、最大流速に微妙な

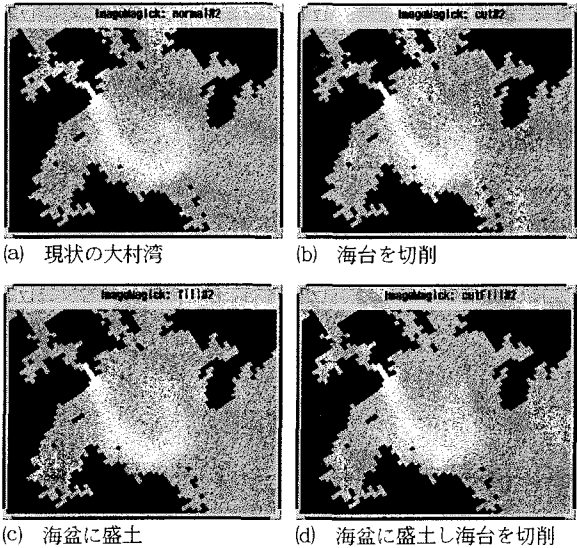


図-7 一度の上げ潮で生じる水塊パターン
注) 各図は、それぞれケース(a)~(d)に対応する

変化はあるものの、ほとんど影響が無いことが分かった。

しかし、海底地形の改変によって、前述のd)に示したように水塊パターンが変化することや、最大流速に微妙な違いが表れることから、湾口付近に存在する反時計回りの潮汐残差流も影響を受けていることが推察される。

f) 使用した数値モデルの妥当性

本論では、湾口付近が常に混合状態にあることと、河川からの流入量が針尾瀬戸での海水交換量に比べて極めて少ないことを理由に、順圧モデルを使用したシミュレーション実験を行っている。また、ここでは、実験に用いる潮汐データにも、温度躍層などが生じにくい、冬場の潮汐を使用している。さらに、図-7から分かるように、大村湾に流入した海水のほとんどは、湾口付近に反時計回りの大きな渦を形成し、直接に湾奥に達することは無い。従って、冬場に限定した実験であれば、現状の順圧モデルを用いたシミュレーション実験でも問題はないと考えられる。

しかし、今後、夏場などを含む年間を通したシミュレーション実験や、温度躍層が生じることが多い湾奥部の流れも含めての海水交換率向上に向けたシミュレーション実験も行う予定である。このため、引き続き、傾圧モデルを使用した実験なども計画している。

g) 海底地形改変による海水交換率の変化

前節(1)のb)で示したように、海底構造を改変した場合、平均の海水交換率は、極めて僅かではあるが、改変前の同様の値に比べて向上している。例えば、ケース(c)では、変更前の0.354%から0.362%に、約0.01ポイント向上している。

また、前述のd)に示したように、ケース(c)では、水塊パターンが湾奥に向かって伸びている。このことから、この海水交換率の向上は、これまで直接に交換されていなかった湾奥に近い海水が攪拌された結果と考えられる。

従って、海水交換率の向上は少ないが、この様な海底地形の改変による流れの制御は、大村湾の海水交換率向上に有効と考えられる。

5. おわりに

本論は、海底地形の軽微な改変によって、大村湾の海水交換率がどのように変化するかを明らかにすることを目的として、シミュレーション実験を行った。このため、まず、現状の大村湾の海水交換率を調べるシミュレーション実験を行い、大潮時の1潮汐当たりの海水交換率を約0.2%~0.4%と推定した。また、この推定結果が、他の研究結果^{1),2)}と比較して、大きく異ならない値であることも確認した。

次に、湾口部に局所的に存在する浅い所や深い所を平坦化する改変を加えた場合を想定し、同様の海水交換率の推定実験を行った。この結果、連行加入などの影響により、若干ではあるが海水交換率が向上することが確認できた。さらに、この時、湾内の潮位変化などには、ほとんど影響が無いことも明らかとなった。

環境に与える影響などを考えれば、たとえ水質保全や水質浄化のためとは言え、大掛かりな土木工事は避けるべきである。これに対し、本論で想定した海底地形の改変は、海台の切削や海盆への盛土などであり、大きな構造物の設置や外海に繋がる新たな水路の掘削などの大掛かりな工事に比べ比較的容易な内容である。この場合、改善される海水交換率は大きくはないが、長期的に見れば着実に大村湾の水質を改善するものと期待できる。

また、ここで用いたシミュレーション・システムは、湾内の潮汐さえ分かっているならば、 M_2 潮などの調和分解の結果が分かっている任意の海域でも開境界に選ぶことができる特徴を持っている。さらに、算出された適正な境界条件を保存しておくことで、保存された境界条件を用いた複数のシミュレーション実験の実施が可能である。本論で実施したシミュレーション実験により、軽微な海底地形改変などを想定した実験には、当システムの機能が有効に活用できることも確認できた。

なお、最近では、湾口部の海底地形を改変するだけでなく、方向性を持たせた粗度を実現する装置を設置することで、潮汐残差流に影響を与える研究例¹⁸⁾などがある。本論で示した海底地形改変の内容を、平坦化することだけではなく、同時に適切な粗度を形成することなども考慮したものになれば、海水交換率のさらなる向上が望め

ると考えられる。

また、本論では、数値モデルに順圧モデルを用いている。本来、海水交換は、湾口部だけの問題ではなく、湾奥の流れも含めた検討が必要である。特に夏場においては、湾奥には温度躍層や貧酸素水塊が生じることが報告されており、このような問題も考慮に入れた海水交換率のシミュレーション実験が必要である。

今後は、以上の問題点なども考慮に入れた上で、さらに多くの種類の海底地形改変を想定したシミュレーション実験を行い、大村湾にとって最適な海水交換率向上の方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 長崎県企画部：大村湾海水交換に関する調査報告，長崎県委託調査，ワールドオーシャンシステム，p. 11，1982.
- 2) 長崎県企画部：豊かな大村湾海域利用シンポジウム，1993.
- 3) 兵頭 竜二，後藤 恵之輔：衛星リモートセンシングによる閉鎖性湾の流動シミュレーションの検証，水工学論文集，Vol. 43，pp. 851-856，1999.
- 4) 兵頭 竜二，後藤 恵之輔：二重閉鎖性湾を対象とした流動シミュレーション・システムの開発，土木情報システム論文集，Vol. 8，pp. 103-110，1999.
- 5) 山崎 宗広，宝田 盛康，上嶋 英機：湾内停 滞性海域の海水交換促進に関する実験的研究—湾口部の地形改変操作—，中国工業技術研究所報告，No. 49，1997. 10.
- 6) 海上保安庁：大村湾北西部，海図，#1226，1996.
- 7) 海上保安庁：佐世保港，海図，#1233，1988.
- 8) 海上保安庁：大村湾，海図，#1231，1996.
- 9) 海上保安庁：佐世保港及付近，海図，#1232，1996.
- 10) 日本地図センター：長崎，数値地図25000海岸線・行政界.
- 11) 日本地図センター：熊本，数値地図25000海岸線・行政界.
- 12) 松梨 順三郎：環境流体汚染，森北出版，pp. 132-138，1993.
- 13) 前出12)，pp. 112-122.
- 14) 海上保安庁：潮汐表，1991.
- 15) 相良 節夫：基礎自動制御，森北出版，pp. 125-126，1983.
- 16) 須田 信英：P I D制御，朝倉書店，pp. 9-28，1993.
- 17) 堀江 毅：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技術資料，運輸省港湾技術研究所，No. 360，1980.
- 18) 小松 利光，小橋 乃子，和田 真人，藤田 和夫，矢野 真一郎，安達 貴浩：任意の方向に潮汐残差流を創造するための偏流型粗度の開発，水工学論文集，Vol. 43，pp. 833-838，1999.

(1999. 9. 30受付)