

I-14 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

Development of Simulation System for Tidal Flow on Double Closed Bay

兵頭 竜二*

Ryuji Hyodo

後藤 恵之輔**

Keinosuke Gotoh

【妙録】 本研究は、二重閉鎖性湾である長崎県の大村湾を例に、湾内で実測された潮位などの情報を利用して、特定日時の過渡的な流動状態を再現するシミュレーション・システムの開発を行うものである。このシステムは、内部に持つ潮位の自動制御機能により、常に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であり、従来の数値シミュレーションとは異なり、潮汐調和定数などが未知の海域でも開境界に選べるなどの特徴を持っている。また、本論では、このシステムの性能評価を実施し、入力した湾内の潮位振幅に対して、シミュレーション結果の潮位振幅の再現性が100%に近いことなどを確認した。

【Abstract】 The authors are now developing a new simulation system for tidal flow on a double closed bay, Omura Bay, which can simulate transitional flow by using actual tide in the bay. The system is able to perform tidal simulation with calculating optimum boundary condition by automatic control system, so it realizes that any sea area without tidal harmonic constant can be treated with the open boundary. In this paper they also tried the performance test resulting in that a tide of outcome from the system is the same as a tide of input.

【キーワード】 二重閉鎖性湾, 流動シミュレーション, P I D制御, 大村湾

【Keywords】 Double Closed Bay , Simulation of Tidal Flow , Three Element Control , Omura Bay

1. はじめに

閉鎖性海域の水質変化の予測や水質浄化策の検討を行うには、数値シミュレーション実験が必要不可欠である。しかし、従来から行われている沿岸域の流動に関する数値シミュレーションは、境界条件に調和分解の結果得られた M_2 潮などの周期的なものを用いており、その多くは夏場や冬場の平均的な状態を扱うことを目的としている。

この場合、海域の至る所で潮汐の調和定数が得られていれば、任意の部分を開境界とする数値シミュレーションが容易に実施できる。しかし、現実には、海域の限られた箇所の潮汐調和定数が分かっているだけで

あり、開境界の設定に制約が生じる。また、実際の沿岸域の海水流動は、周期的な潮汐現象だけでなく、気圧や風などに代表される様々な気象条件や、河川から流入する淡水などの影響を受けている。このため、 M_2 潮などの周期的な境界条件を用いた場合、特定日時の状態を再現するシミュレーションを行うことは難しい。従って本研究では、気象条件や閉鎖性海域内で実測された任意の場所の潮位情報などを利用して、直接に、過渡的な流動状態を再現できるシステムの開発を進めている^{1),2)}。

長崎県の大村湾は、隣接する佐世保湾を通して外海につながる二重閉鎖性湾であり(図-1参照)、その大きさは、東西方向約10km, 南北方向約30km, 平均

* 長崎県工業技術センター 応用技術部 海洋・環境科 (〒856-0026 長崎県大村市池田2-1303-8)

** 長崎大学 工学部 社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

水深³⁾14.8mである。また、大村湾の海水交換は、主に、幅約200m、水深約25mの針尾瀬戸を通して行われるが、この瀬戸の幅は大村湾に比べて極端に狭い。

従って本論では、大村湾を例に、自動制御機能を用いて湾内の潮位変化を再現するシミュレーション・システムの開発を行うものとする。さらに、このシステムの性能評価として、入力した潮位振幅の再現性や針尾瀬戸付近の潮流ベクトルの再現性の確認と、ハウステンボスで実測された潮位との比較も行うこととする。

2. 流動シミュレーション・システム

本研究で開発したシステムは、図-2(a)に示すように、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、このシミュレーションの制御を行う部分とで構成される。この制御を行う部分は、外部から与えられた大村湾内の潮位などに関する情報と、シミュレーションの結果から得られる大村湾内の潮位とを利用して、開境界に与える最適な強制水位の値を自動算出する機能を持っている。

図-2(b)は、このシステムをモデル化したものである。数値シミュレーションを行う部分には、制御のためにモデル近似された数値モデルが含まれている。また、制御を行う部分は、振幅調整機、PID調節器、ローパスフィルタで構成される。

(1) 数値シミュレーション

a) 数値モデル

本研究で用いたモデルは、海表面を含む第1層から海底面を含む第b層までで構成される多層モデル⁴⁾である。

また、本研究では、二重閉鎖性湾の海水交換などの湾口付近の流れに着目した流動シミュレーションを行うことを前提にしている。湾口付近の海水は湾口を通過する海水によって常に攪拌されているため、この付近に密度躍層などはないものと考えられる。従って、ここでは、数値モデルに順圧モデル⁴⁾を使用した。

b) 水深データ

海水流動などの数値シミュレーション実験を行う場合、システム内に対象とする海域の形状を再現するための水深に関する情報が必要になる。

本研究では、数値地図から取り出した海岸線に関する情報と、海図を計算機処理して抽出した水深値とそ

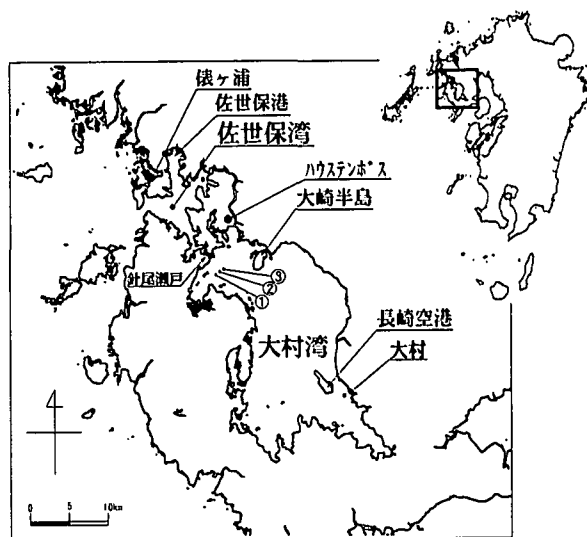
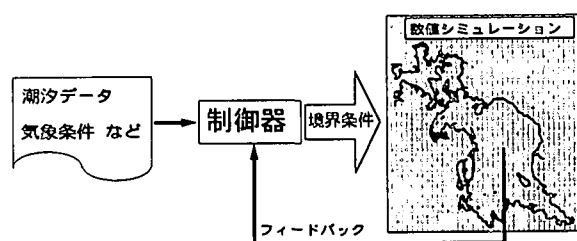
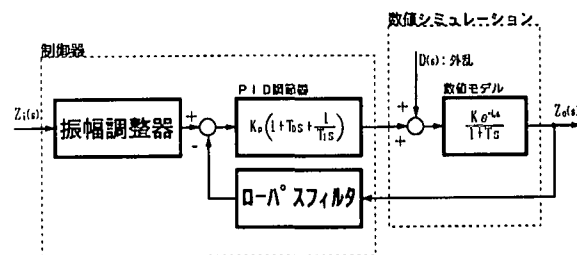


図-1 大村湾の位置と地形



(a) システムの構成



(b) システムのモデル

図-2 シミュレーション・システム

の位置に関する情報とを使用して，水平方向の分解能が緯度・経度方向にそれぞれ1/3秒のメッシュ状の水深データを作成した．実際のシミュレーションでは，このデータを数値モデルの水平方向の離散化の間隔に併せて平均処理し，海域の形状を再現した．

c) 離散化と解法

各層の連続方程式と運動量輸送方程式の離散化には、2次元のADI法^{5),6)}を用いた。この解法は、 $n\Delta t$ から $(n+1)\Delta t$ の時間間隔を2つのタイムステップに分けて計算処理を行う解法である。

本研究では、この2次元のADI法を利用して、多層モデルの数値解法を実現している。

(2) シミュレーションの制御

a) 数値モデルの「一次遅れ+むだ時間」による近似

シミュレーションを制御するため、まず、本研究で用いた数値モデルを、開境界における潮位(強制水位)を入力とし、モデル内の任意の場所の潮位を出力とするプロセスと考える。開境界に強制水位を与えて計算を行う数値モデルでは、開境界にある一定の値を入力し続けられれば、十分に時間が経過した後のモデル内部の潮位は、開境界に与えた強制水位と同じ値に収束する。このため、このプロセスは自己平衡性が有る系、すなわち定位置のプロセスと考えることができる。従って、この数値モデルを「一次遅れ+むだ時間」で近似し、このプロセスの自動制御を考える⁷⁾(図-2(b)参照)。

「一次遅れ+むだ時間」を用いて近似した定位置プロセスの伝達関数 $G(s)$ は、次式で与えられる⁸⁾。

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1+Ts} \quad (1)$$

ここに、 K は比例要素(ゲイン)、 T は一次遅れ要素の時定数、 L はむだ時間要素のむだ時間である。

なお、上に述べた数値モデルの性質から、この比例要素 K が1に等しいことは明白である。

b) 伝達関数の推定

数値モデルを直接この伝達関数に変換することは難しい。従って、数値モデルのステップ応答を観測し、その結果から伝達関数を推定する。

「一時遅れ+むだ時間」への時間領域での入力 $x(t)$ と、同じく出力 $y(t)$ を使い、この伝達関数を時間領域での微分方程式の形式で表現すると、次のようになる。

$$y(t) + T \frac{d}{dt} y(t) = Kx(t-L) \quad (2)$$

入力 $x(t)$ をステップ関数とした場合、この微分方程式の解は、

$$y(t) = \begin{cases} 0 & (t < L) \\ K(1 - e^{-\frac{t-L}{T}}) & (t \geq L) \end{cases} \quad (3)$$

となる、この解は、むだ時間 L の後、 $1/T$ の接線の傾きで増加を始め、最終値(この場合は、 K)に向かって収束する波形になる。さらに、この解を時間間隔 Δt によって離散値化すれば、その離散値化された出力 $y_{\Delta t}(k)$ は、次のようになる。

$$y_{\Delta t}(k) = \begin{cases} 0 & (k < \ell) \\ K(1 - e^{-\frac{k-\ell}{T} \Delta t}) & (k \geq \ell) \end{cases} \quad (4)$$

なお、 $t = \Delta t \cdot k$ 、 $L = \Delta t \cdot \ell$ である。

従って、ステップ応答について、 N 個($N > \ell$)のサンプルが得られた場合、最小二乗法を用いることで、 T 、 L の最適値を決定することができる。

c) PID調節器

「一次遅れ+むだ時間」のプロセスを制御するPID調節器の伝達関数 $C(s)$ は、次式で与えられる⁷⁾。

$$C(s) = K_P \left(1 + T_D s + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (5)$$

ここに、 K_P は比例ゲイン、 T_D は微分項の微分時間、 T_I は積分項の積分時間である。

比例ゲイン K_P には、外部からの入力と内部で求まるフィードバック量との偏差に比例した値を、制御量として出力する働きがある。このため、仮に、微分項と積分項を省略し、比例ゲインだけでPID調節器を動作させれば、その制御結果は入力に完全に一致することではなく、定常偏差と呼ばれるずれが残る。

積分時間 T_I には、偏差に相当する値を積分し、この結果が0になるまで制御量を出力する働きがある。従って、これには定常偏差を無くす効果がある。

微分時間 T_D には、偏差の時間変化率を算出し、偏差が0に近付く速さが速ければ速いほど、その制御量の出力を抑える働きがあり、ほどよくブレーキをかけながら迅速に目標値に近付ける効果がある。

制御対象の伝達関数に応じたPID調節器のパラメータの決定方法は幾つもあるが⁹⁾、本論ではCHR法⁹⁾を用いた。この方法は、制御対象の伝達関数に含まれる K, L, T のパラメータ値を用いて、PID調節器に必要な K_P, T_I, T_D の値を決定する方法である。例えば、PI動作をするPID調節器のパラメータは、次式で与えられる。

$$K_P = 0.35T/KL, \quad T_I = 1.17T, \quad T_D = 0 \quad (6)$$

d) ローパスフィルタ

数値モデルを用いたシミュレーションなどでは、タイムステップ毎に、計算結果が細かく振動することがある。また、多層モデルの方程式に現れる各種のパラメータに不適切な値などが使われた場合、シミュレーション結果の潮位が振動する可能性がある。このような振動は、自動制御にとって誤動作の原因となる。一方、ローパスフィルタは、入力された信号の高い周波数の成分を出力に透過させない働きを持つ。

従って本研究では、ローパスフィルタを使用して、シミュレーション結果の潮位から高い周波数の成

分（細かい振動の成分）を除去したものを、PID調整器にフィードバック量として与えている。

なお、本論では、特定の区間の観測値を連続的に平均処理することで、ローパスフィルタを実現している。例えば、シミュレーション結果の観測値 $y_{\Delta t}(k)$ の区間 $n-m+1 \leq k \leq n$ の平均値は、次式で与えられる。

$$\overline{y_{\Delta t}(n)} = \frac{1}{m} \sum_{k=n-m+1}^n y_{\Delta t}(k) \tag{7}$$

また、これに続く区間 $n-m+2 \leq k \leq n+1$ の平均値は、

$$\overline{y_{\Delta t}(n+1)} = \overline{y_{\Delta t}(n)} - \frac{1}{m} y_{\Delta t}(n-m+1) + \frac{1}{m} y_{\Delta t}(n+1) \tag{8}$$

となるので、平均値を連続的に算出することができる。

e) 振幅調整器

この振幅調整器は、入力された潮位の再現性を高めるために付加した部分であり、常時、シミュレーション結果の潮位の振幅を監視し、その振幅が充分でない場合、入力を補正する機能を持っている。

多層モデルの方程式に現れるパラメータの値を変化させて、流動シミュレーション実験を行う場合、その設定する値が不適切な時、入力された潮位の変化を十分に再現できない可能性がある、この場合、設定した値が不適切なために期待した潮位の変化が得られなかったのか、本研究で開発したシミュレーション・システムに問題があったのか、問題点の切り分けが難しくなる。このため、この振幅調整器を用いて、入力された潮位の振幅を強制的に再現するようにした。

(3) 大村湾への適用

表-1は、本論で開発したシミュレーション・システムについて、大村湾に適用する際の諸条件を整理したものである。

a) 数値シミュレーション

針尾瀬戸を出入りする海水量を1日あたりに換算した値 V_{HC} は、大村湾の海表面積 S を 320km^2 、大村湾の平均の干満差 $\Delta\zeta$ を 70cm 、干潮から満潮にかけての時間 Δt を6時間、さらに潮汐による潮位変化が湾内のどこでも一様に生ずると仮定すれば、概算値として、次のようになる。

$$\begin{aligned} V_{HC} &= S \times \Delta\zeta / \Delta t \times 24\text{時/日} \\ &= 320\text{km}^2 \times 70\text{cm} / 6\text{時} \times 24\text{時/日} \\ &= 8.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{日} \end{aligned} \tag{9}$$

表-1 大村湾への適用時の諸条件

諸元	単位	値
水平方向の格子間隔	[m]	200
多層モデルの層厚	[m]	5
タイム・ステップ	[s]	30
コリオリの係数	[1/s]	7.92×10^{-5}
海底の摩擦係数		0.0026
層間の摩擦係数		0.0013
渦動粘性係数	[m ² /s]	40~100

一方、大村湾には51河川が流入しており、河川からの全流入量は、日平均約 $1.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{日}$ と推計されている¹⁰⁾。従って、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ことが確認できる。このため、本論の数値モデルでは河川からの流入を省略する。

また、人工衛星リモートセンシングによって、針尾瀬戸を通して大村湾に流れ込んできた海水が広がる様子は、風の影響を余り受けていないことが分かっている¹¹⁾。従って、本論で用いた数値モデルでは、風による海表面の摩擦の項を省略する。

b) 水深データ

大村湾がある北緯33° 付近での緯度と経度の1秒に対する地球表面の弧の長さは、それぞれ約30.8mと約25.9mである¹²⁾。従って、本研究で作成した水深データの1/3秒の分解能は、約10mの分解能に相当する。

なお、本論で使用した数値地図は文献13)、14)であり、海図は文献15)~18)である。

c) 格子間隔とタイムステップ

佐世保湾と大村湾の間の海水交換は、主に、幅が約200mの針尾瀬戸を通して行われる。従って、この瀬戸を通る海水の動きを調べるには、少なくとも、その幅の2分の1である100mを数値モデルの水平方向の格子間隔に採用する必要がある。しかし、この数値シミュレーションを実施する計算機の計算速度（CPU：Pentium II -400MHz）や主記憶の容量（256MB）などを考慮すれば、100mの格子間隔では、限られた時間内にパラメータを変えた数多くのシミュレーション実験を行うことが出来ないなど、現実的ではない。このため、あえて200mに設定する。

また、層厚については5mとする。

さらに、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⁶⁾を考慮して、30sとする。

d) コリオリの係数

針尾瀬戸にかかる西海橋の中央付近の緯度は、およそ北緯33° 03′ である。また、大村湾の南端から佐世保湾の北端までは、北緯32° 50′ ～33° 10′ である。従って、シミュレーションの全領域で、一律に北緯33° でのコリオリの係数を用いる。

e) 海底・層間の摩擦係数と渦動粘性係数

海底の摩擦係数は、堀江⁶⁾の見解を参考にして0.0026とする。また、層間の摩擦係数については、海底の摩擦係数の2分の1とする。

渦動粘性係数については、全域を40～100m²/sに可変する。

3. 基本的性能の評価

本研究で開発したシミュレーション・システムの基本的動作を見るため、ステップ応答の観測による伝達関数の推定と、シミュレーションによる潮位振幅の再現性の確認を行う。

(1) 実験の方法

a) 伝達関数の推定

多層モデルに含まれるパラメータの値など、シミュレーションの条件が変わる毎に、佐世保湾口に設けた開境界に潮位 $\xi=1.0$ の境界値を時間 $t=0$ から連続して与え続け、シミュレーションによって得られた大村の潮位変化を観測する。さらに、この結果から、最小二乗法を用いて、伝達関数を推定する。

b) 潮位振幅再現性の確認

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、入力には、湾内で実際に測定された潮位や気象条件などを用いることが必要である。しかし、本論では基本的な性能評価を目的とすることから、表-2(a)に示す潮汐表¹⁹⁾から得られる大村(図-1参照)の潮位のみを入力として使用する。

実際には、大村の潮時 t_n とその時の潮高 ζ_n を用いて、隣り合う潮時の間($t_n \leq t < t_{n+1}$)を次のような三角関数で補間し、得られた連続した潮汐データを使用する。

$$\zeta(t) = \frac{\zeta_{n+1}-\zeta_n}{2} \sin\left(\frac{t-t_n}{t_{n+1}-t_n} \pi - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\zeta_{n+1}+\zeta_n}{2} \quad (10)$$

(2) 実験結果

PID調節器の動作モードについては、P動作、PI動

表-2 潮汐表から得られる大村の潮汐

(a) 1991年12月4日前後			(b) 1997年4月24日前後		
日付	潮時	潮高 [cm]	日付	潮時	潮高 [cm]
1991.12/2	02:20	23	1997.4/22	17:16	11
1991.12/2	08:53	68	1997.4/22	23:36	79
1991.12/2	14:33	35	1997.4/23	05:36	18
1991.12/2	20:30	70	1997.4/23	11:29	78
1991.12/3	03:06	18	1997.4/23	17:46	8
1991.12/3	09:48	71	1997.4/24	00:10	80
1991.12/3	15:27	34	1997.4/24	06:10	19
1991.12/3	21:11	72	1997.4/24	11:58	79
1991.12/4	03:47	13	1997.4/24	18:17	6
1991.12/4	10:33	75	1997.4/25	00:40	80
1991.12/4	16:14	34			

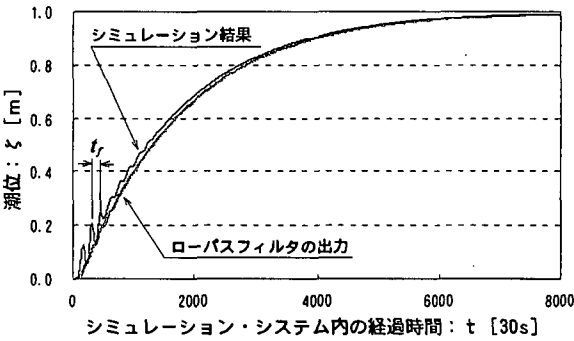


図-3 ステップ応答の観測例

作、PID動作の3種類を試しているが、ここでは結果として、PI動作による制御例を示す。

a) 伝達関数の推定

図-3は、渦動粘性係数が50m²/sの時のステップ応答の観測例を示している。なお、シミュレーション結果と示された波形は、シミュレーションの出力として得られた大村の潮位を示している。また、ローパスフィルタの出力と示された波形は、この結果をローパスフィルタに通し、高い周波数の成分を取り除いたものを示している。

図-3中のシミュレーション結果をみれば、その値が振動しながら $\xi=1.0$ に収束している様子が分かる。この振動は、自動制御にとって誤動作の原因となるので、ローパスフィルタを使用してこの振動の成分を除去したものを、PID調節器にフィードバック量として与えている。このため、ステップ応答による伝達関数の推定も、このローパスフィルタの出力について実施している。

なお、この振動の周期(図-3中の τ)は、シミュレーションの137タイムステップであり、実時間の約1.14時間に相当する。従って、ローパスフィルタは、実時

間の1.5時間に相当する180タイムステップの区間を平均処理することで実現した。

また、このステップ応答の観測結果からは、最小二乗法による計算の結果、次の値が得られている。

$$\begin{cases} T = 4.9313 \times 10^4 \text{ [s]} \\ L = 4.2900 \times 10^3 \text{ [s]} \end{cases}$$

b) 潮位振幅の再現性

図-4は、表-2(a)に示した1991年12月4日の潮位を再現するシミュレーションを行い、その結果例として、渦動粘性係数が $50\text{m}^2/\text{s}$ の時を示したものである。

図-4(a)は、入力された大村の潮位（指示値）、制御器の出力（開境界に与える強制水位）、それとシミュレーション結果の大村の潮位を示している。また、同図(b)は、潮位振幅の再現性を確認しやすくするために示したものであり、同図(a)の指示値とシミュレーション結果のみを表示したものである。

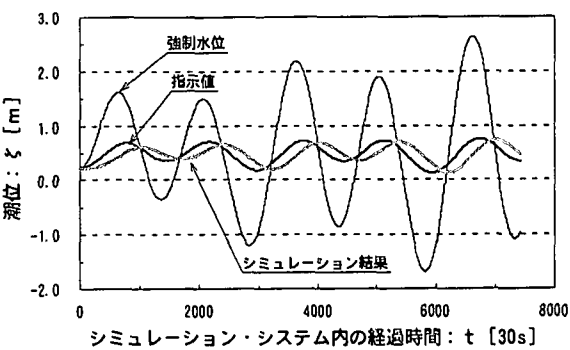
図-4(b)によれば、入力の振幅（図中のaを参照）は62.0cmである。同じくシミュレーション結果の振幅（図中のbを参照）は60.8cmである。従って、この例における振幅の再現性は約98.1%である。さらに、図-4中のbに相当する区間の、強制水位とシミュレーション結果との位相差は397タイムステップであり、実時間の3時間18分30秒に相当する。

また、図-5は、渦動粘性係数を変化させて行った同様の実験結果について、潮位振幅の再現性を示したものである。この図から、条件を変化させても95~100%の潮位振幅の再現性が得られていることが分かる。

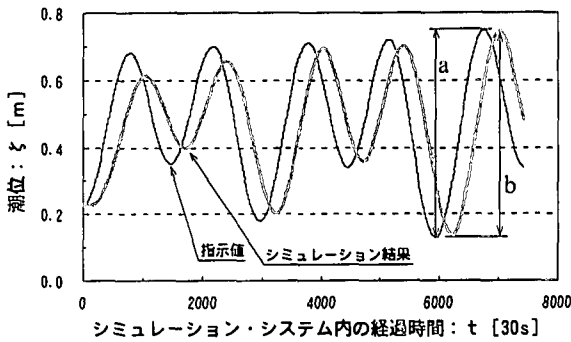
(3) 考察

ここでは、PI動作で働くPID調節器によって制御された場合の結果を例示しているが、本研究で開発したシステムを用いれば、指示値の振幅に近い良好な制御結果が得られることが分かった。

なお、潮汐表¹⁹⁾によれば、大村の潮時は、今回の数値モデルの開境界の近くである俵ヶ浦（図-1参照）の潮時に対して3時間5分遅れており、大村の潮位振幅は、俵ヶ浦の振幅に対して0.27倍である。図-6は、同様の潮時差と振幅比について、渦動粘性係数に対する変化を示したものである。この図によれば、少なくとも振幅比を0.27にするには、渦動粘性係数におよそ $10\text{m}^2/\text{s}$ を設定する必要があることが分かる。しかし、位相差を3時間5分にするには、渦動粘性係数を



(a) 制御の実施例



(b) 潮位振幅の再現性

図-4 PI動作による制御の実施例と潮位振幅の再現性

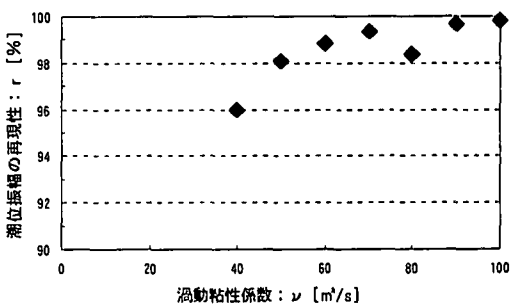


図-5 渦動粘性係数と潮位振幅の再現性

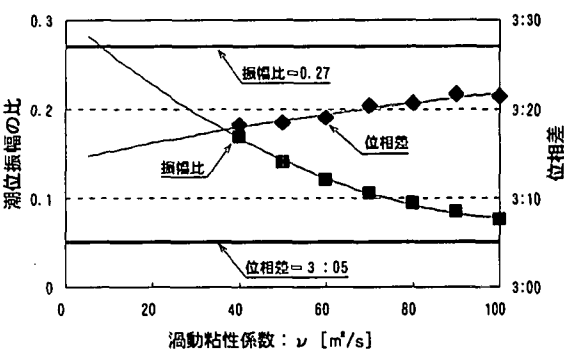


図-6 渦動粘性係数と振幅比・位相差の関係

変化させても実現できない可能性が高い。これは、針尾瀬戸の複雑な形状が、水平分解能200mの水深データでは十分に再現されていないためと考えられる。

4. 実測データとの比較

ここでは、潮汐と潮流ベクトルについて、大村湾内で実際に計測したものととの比較を行う。

(1) 比較のためのシミュレーション実験

このシミュレーションでは、渦動粘性係数の値を $60\text{m}^2/\text{s}$ とする。また、入力する情報については、3.と同様に、潮汐表から得られた大村の潮汐に関する情報を用いる。なお、その情報は、表-2(b)に示す1997年4月24日前後の潮汐である。

実際の比較では、表-2(b)に含まれる4月23日17:46の干潮から24日18:17の干潮までの、2潮汐分の結果を比較する。なお、図-4に示したように、入力とシミュレーション結果との間には、位相のずれが生じる。このため、比較する区間の入力と、シミュレーションで得られたこの区間に相当する大村の潮位との位相差を算出し、この位相差を用いてシミュレーション結果全体の位相を補正し、比較を試みる。

(2) 実測データ

a) 潮汐

この実測値は、大村湾に面するハウステンボス(図-1参照)付近の潮位であり、1時間間隔のものである。

b) 潮流ベクトル

これは、図-1に示す①～③の3箇所の海底に設置したドップラー式流速計を用いて、10分間隔の流向と流速を測定したものである。なお、この測定では、各測定点の水深に応じて海面から海底までを複数の層に分けて流れを記録しているが、ここでは、測定点①～③について、それぞれ、水深6.2～18.7m、5.6～16.7m、5.4～16.2mの範囲の測定結果を使用する。

(3) 比較結果と考察

a) 潮汐の比較

図-7は入力とシミュレーション結果に関する大村の潮汐の関係と、ハウステンボス付近の潮汐の実測値と対応するシミュレーション結果との関係を示したものである。

図-7によれば、振幅や位相の微妙なずれはあるものの、ハウステンボス付近の潮汐の実測値とシミュレーション結果とが比較的良く一致していることが分かる。

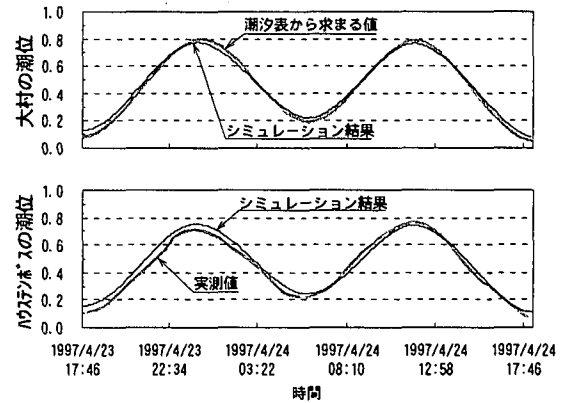


図-7 潮汐の比較

b) 潮流ベクトルの比較

図-8(a)は、先に述べた潮流ベクトルの実測値を表示したものであり、同図(b)は、それぞれの測定点の場所に対応するシミュレーション結果から水深10～15mの範囲の流れを表示したものである。

図-8(a)や衛星データによる調査結果¹¹⁾によれば、針尾瀬戸前を南西方向に横切る潮汐残差流の影響で、上げ潮時の測定点②の流向が、針尾瀬戸から測定点②を見た方向よりも右回りにずれることが明らかである。しかし、図-8(b)では、この特徴が見られない。このことから、本論で実施したシミュレーションが、潮汐残差流を十分に再現していないことが推察される。

また、図-8によれば、(a)と(b)の両者とも、測定点②で他よりも強い流れが観測されている。なお、図-8(a)ではこの流れの強さの違いが顕著であることから、針尾瀬戸から流れ込む海水は、幅が狭く鋭いプリュームとなっていることが分かる。しかし、図-8(b)では、各測定点の流れの強さにさほど違いがないことから、幅の広いプリュームになっていることが予測される。

なお、これらの潮汐残差流やプリュームの再現性の問題は、制御方式の問題ではなく、本論で用いた数値モデルの問題と考えられる。

5. 結論

本論では、大村湾を例に、自動制御機能の働きによって、入力された潮位の変化を再現するシミュレーション・システムの開発を行った。また、このシステムの潮位振幅の再現性などを評価した結果、95～100%の良好な値を得ており、潮位変化を再現するという目的は十分に達成できていると考えられる。

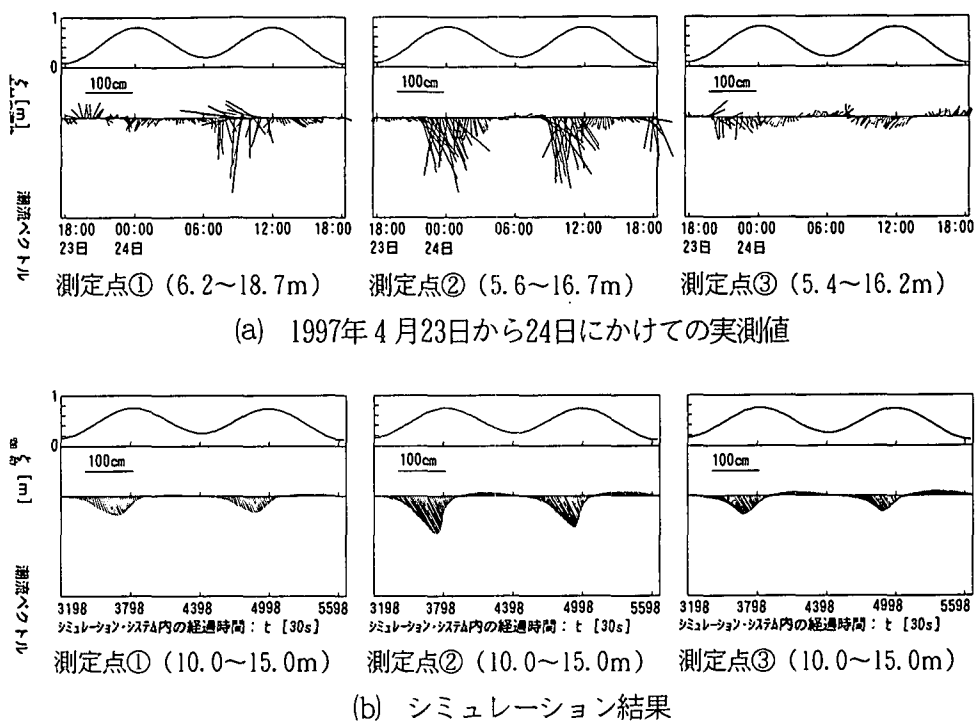


図-8 潮流ベクトル図の比較

従って、このシステムは、湾内の潮位を用いて開境界に与えるべき強制水位を自動算出することができるため、任意に選択された海域を開境界に選べるなどの特徴を備えたシステムであると結論付けられる。

一方、性能評価や実測値との比較の結果から、湾内潮位と強制水位との位相差や振幅比が、潮汐表に掲載されている値と異なることや、潮汐残差流などの再現性などに問題があることが明らかとなった。今後、このような問題点の解決を含め、潮位変化だけでなく流れ場を含む全てを正確に再現できるシステムに改良する予定である。

また、本論では、流動シミュレーションのために外部から与える条件として、潮汐表から得られる潮位の予測値のみを使用している。今後、潮位の実測値や気象条件などを入力として使用することで、実状に合ったシミュレーションを行う予定である。

謝辞：本論で用いたハウステンボス付近の潮汐は、ハウステンボス・技術センター(株)で計測されたものを使用させて頂いた。ここに記して、深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

1) 兵頭 竜二, 後藤 恵之輔, 全 炳徳: 衛星リモートセンシングによる閉鎖性湾の海水流動に関する調査とその有用性, 環境工学論文集, 土木学会, Vol. 34, pp. 143-154, 1997.
2) 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, 土木学会, Vol. 43, pp. 581-586, 1999. 2.

3) 飯塚 昭二: 大村湾 (I 地質, II 物理, III 化学), 日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 東海大学出版会, pp. 879-893, 1985.
4) 松梨 順三郎: 環境流体汚染, 森北出版, pp. 132-138, 1993.
5) 同上, pp. 112-122.
6) 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, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No. 360, 1980.
7) 相良 節夫: 基礎自動制御, 森北出版, pp. 125-126, 1983.
8) 同上, pp. 39-41.
9) 須田 信英: P I D制御, 朝倉書店, pp. 9-28, 1993.
10) 長崎県: 大村湾水質汚濁対策基本計画, p. 7, 1981.
11) 兵頭 竜二, 後藤 恵之輔, 全 炳徳: 衛星データによる針尾瀬戸から大村湾に流れ込む海水の動きの解析, 写真測量とリモートセンシング, 写真測量学会, Vol. 37, No. 5, pp. 23-34, 1998.
12) 国立天文台: 理科年表, 第71冊, pp. 636-637, 1998.
13) 日本地図センター: 長崎, 数値地図25000海岸線・行政界.
14) 日本地図センター: 熊本, 数値地図25000海岸線・行政界.
15) 海上保安庁: 大村湾, 海図, #1231, 1996.
16) 海上保安庁: 大村湾北西部, 海図, #1226, 1996.
17) 海上保安庁: 佐世保港及付近, 海図, #1232, 1996.
18) 海上保安庁: 佐世保港, 海図, #1233, 1988.
19) 海上保安庁: 潮汐表 第1巻 日本及び付近, 1990~1997.