

五島・有福湾における「潮通し」の効果に関する研究

大田 元** ・ 古本勝弘* ・ 多田彰秀*
 猶木昌史** ・ 古賀恵美子** ・ 松本武士*

Study on the Effects of “New Tidal Channel ”for Seawater Exchange in the Arifuku Bay , Gotoh Islands in Japan

by

Gen OHTA**,Katsuhiro FURUMOTO*,Akihide TADA*,Masafumi NAOKI**,
 Emiko KOGA** and Takesi MATSUMOTO*

The Arifuku Bay located in the middle part of Gotoh Islands, Japan has been enclosed by two dikes for the roadway since 1984. In recent years, the red tide often occurs in the Arifuku Bay during every summer or autumn season because of increasing fish culture facilities. As a countermeasure against enhancement of seawater exchange in this bay, the construction of a new flow channel through the southwestern dike is projected. This study deals with the results of field observations on tidal currents and numerical simulations on tidal currents in the Arifuku Bay.

Keywords : tidal current, tidal channel, numerical simulation, ADCP

1. はじめに

五島列島の中ほどにある漁生浦島・有福島・日ノ島は堤防道路で連結され(図-1)、これらに囲まれる有福湾は閉鎖性が強く、ここ数年来赤潮が発生し、湾内における養殖・蓄養魚の斃死が問題となっている。その対策の1つとして、南西側堤防道路の一部を開削して「潮通し」を設け、海水交換を促進して湾内の水質を改善しようとする計画がある。本報告では、有福湾周辺の流動特性を把握するために実施した現地観測および「潮通し」の効果を評価するための流況シミュレーションの結果について述べる。

2. 観測概要

有福湾の流動特性等を明らかにするために、以下の観測を行った。I. ADCP (RD Instrument 社製, Workhorse600kHz) 曳航観測による流況調査およびクロロテック (アレック電子社製, AAQ1183) による水質調査 (2003. 8. 25/2004. 5. 5) : 図-1 に示す4測線A~Dを1.5時間間隔で8回観測を行った。水質調査ではクロロテックを用いて各測線中央で水温, DO, クロロフィルaなどの鉛直分布を計測した。II. 測点②(漁生浦瀬戸)における流量観測 (2003. 8. 25/2004. 5. 5) : 1時間毎に橋上から流速計を垂下

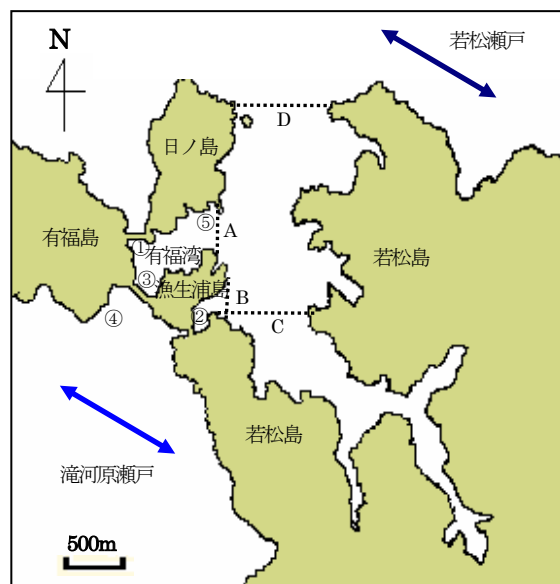


図-1 有福湾の概要と観測点

し流速分布を計測した。III. 測点③と④で自記水位計による潮位観測 (2003. 8/24~9/8 2004. 5/5~5/22)。IV. 測点② (海底から

2005年6月24日受理

**大学院博士前期課程 (Graduate Student, School of Science and Technology)

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

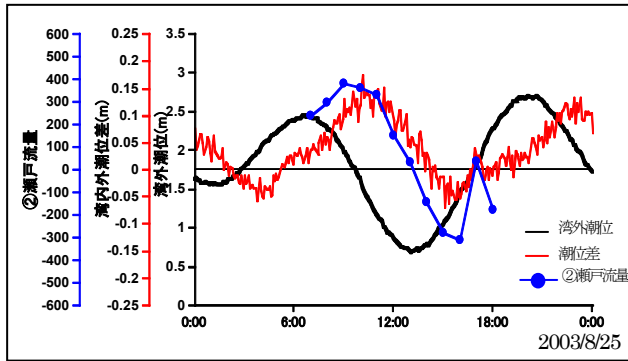


図-2.1 湾外潮位・湾内外潮位差・漁生浦瀬戸流量の時系列
(成層期)

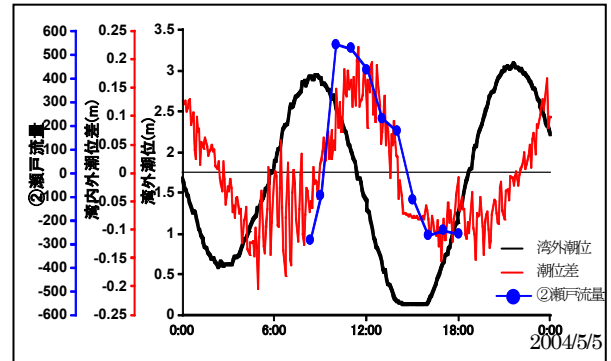


図-2.2 湾外潮位・湾内外潮位差・漁生浦瀬戸流量の時系列
(非成層期)

0.5m), 測点⑤ (海底から 30m) および測点⑥ (海底から 40m) に設置型流向流速計を係留して連続的に流向流速を計測した。(2003. 8/25~9/8)。

3. 調査結果と考察

有福湾の南堤防に潮通しを開削した場合の流量予測のために、半月以上の2回、湾内外の潮位を測った。図-2. 1, 2. 2 は2003 年度 (成層期) と2004 年度 (非成層) おける湾外潮位と湾内外潮位差及び漁生浦瀬戸流量の時間変化である。潮位は測量により標高に換算でき内外潮位差をかなり正確に知ることができる。成層期の潮位記録より、8/25 から9/8 までの平均潮位は湾外で1.8015m、湾内で1.8332mであり、湾内平均潮位が南西側湾外水域のそれより3.17cm 高い。非成層期は5/5 から5/22 までの潮位記録から平均潮位は湾外で1.6757m、湾内で1.6866mであり、成層期と同様に湾内平均潮位が1.09cm 高いことがわかった。両観測期間の平均潮位を比較すると、成層期の方が14cm ほど高く、季節により海面高がかなり変化することもわかった。このような調査結果から、一年を通して湾内潮位が湾外潮位よりも高くなっていることが予想される。また、両時期とも漁生浦瀬戸(測点②)を通して、湾内水が滝河原瀬戸へ流出する量かなり多いことが分かった。つまり図-3 のような湾内から湾外への流れがあることが考えられる。これらのことから南堤防に「潮通し」を設けた場合、有福湾からその南西側海域に、海水を効率的に排出できることが期待される。しかし成層期に比べて非成層期は、排出効率は

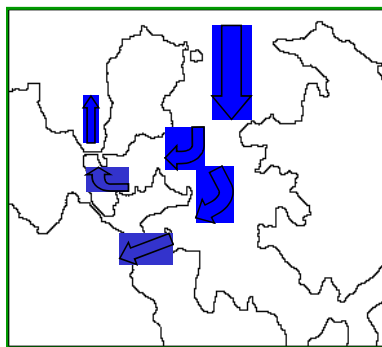


図-3 流量観測による当該水域の流況特性

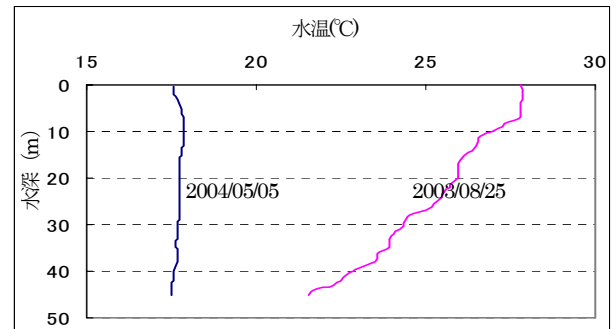


図-4 水温分布(有福湾口)

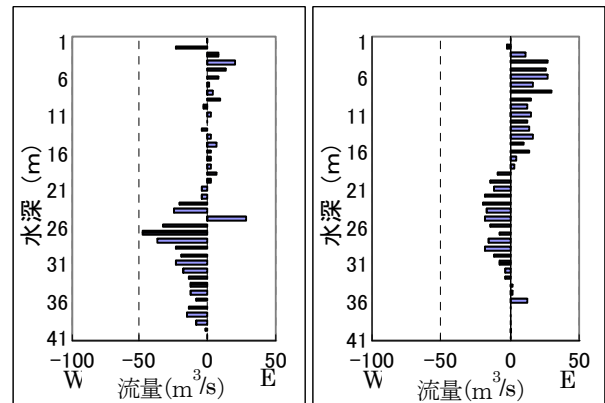


図-5.1 流量配分図 (非成層期2004/5/5 : A断面)
(左; 上げ潮時 (7:15)、右; 下げ潮時 (11:30))

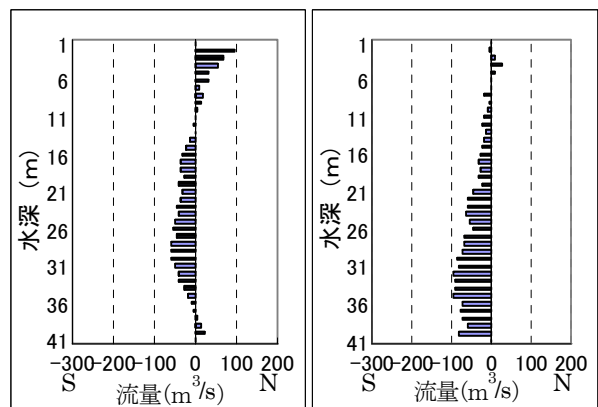


図-5.2 流量配分図 (非成層期2004/5/5 : D断面)
(左; 上げ潮時 (8:00)、右; 下げ潮時 (11:30))

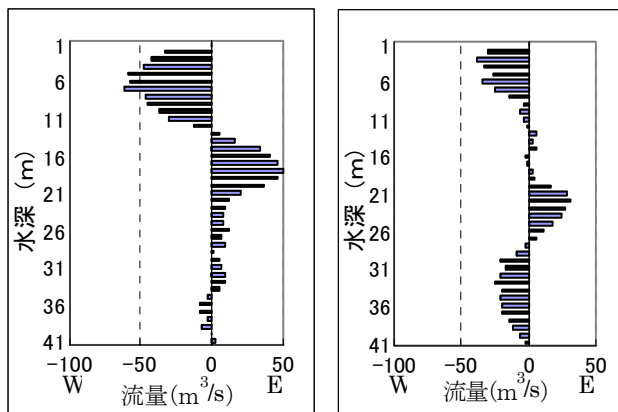


図-6.1 流量配分図 (成層期 2003/8/25 : A断面)

(左 ; 上げ潮時 (16:00)、右 ; 下げ潮時 (8:30))

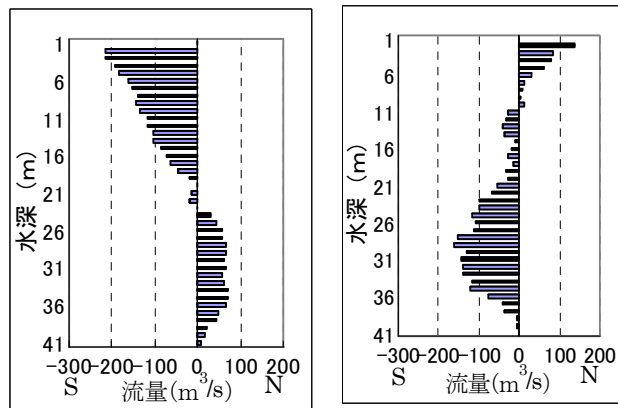


図-6.2 流量配分図 (成層期 2003/8/25 : D断面)

(左 ; 上げ潮時 (17:00)、右 ; 下げ潮時 (9:00))

落ちると考えられる。また、非成層期の潮位データでは内外潮位差に激しい振動があり、湾水振動があったことを示唆している。当該水域の南北には東シナ海と五島灘を結ぶ流れの速い瀬戸が流れ、長周期の海面変動の存在で、流れが不安定であったことが考えられる。

図-5, 6 は、ADCP によって観測された断面内流速分布のデータから求めた A 断面と D 断面の鉛直方向の流量配分図である。これは、各水深の測線長にその水深の平均流速を乗じて 1m 毎の流量を求めたものである。成層期のデータでは、上下層で流れの逆転が確認でき内部潮汐のような密度流が潮汐流に加わって複雑な流れになっていたことが考えられる。非成層期のデータでは、上下層での流れは、はっきりと逆になってはいない。これは図-4 の水温鉛直分布からもわかるように、当該水域は水温成層しておらず、密度流の影響が無く流れが安定しないためと考えられる。また非成層期の A 測線の上げ潮時において複雑な流れが確認できるが、これは当該水域が流れの速い若松瀬戸に接して不安定であり、複雑な流れになっていることが考えられる。

図-7 は、ADCP で観測された流速を水深ごとにベクトルで表したものである。図-7 の A 測線は主な流れの成分が東西方向であ

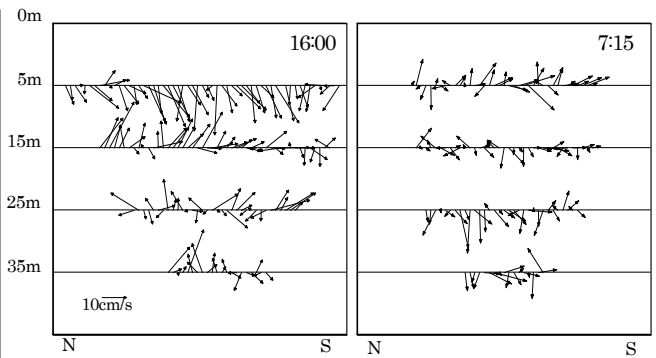


図-7.1 A断面流速ベクトル図 (上げ潮最強時)

(左 ; 2003/8/25、右 ; 2004/5/5)

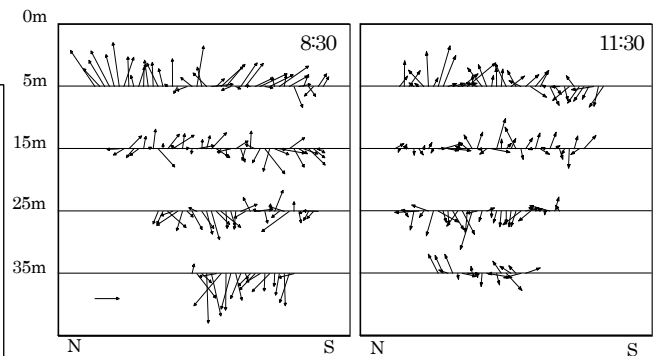


図-7.2 A断面流速ベクトル図 (下げ潮最強時)

(左 ; 2003/8/25、右 ; 2004/5/5)

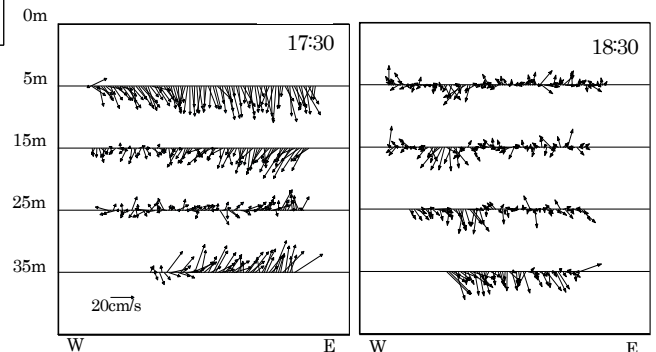


図-8.1 D断面流速ベクトル図 (上げ潮最強時)

(左 ; 2003/8/25、右 ; 2004/5/5)

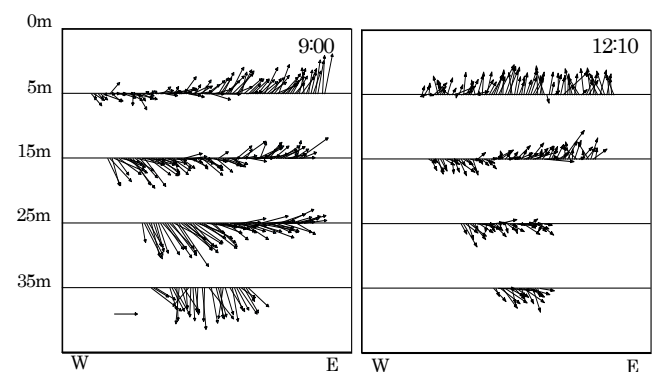


図-8.2 D断面流速ベクトル図 (下げ潮最強時)

(左 ; 2003/8/25、右 ; 2004/5/5)

るので、西方向成分（有福湾に流入する成分）を下向きにとり、東方向成分（有福湾から流出する成分）を上向きにとっている。また、図-8のD測線は主流成分が南北方向にあるので、北方向成分を上向きに、南方向成分を下向きにとっている。A側線では上げ潮時、下げ潮時の両方において、一年を通して流れは、若干西向き成分が多く、有福湾の方に流入していることがわかる。また、D側線では、上げ潮時は湾内に流入し、下げ潮時は、D側線の浅い水深では周辺海域に流出し、深い水深では北西方向より有福湾周辺海域に流入する傾向が見られた。また全体的に潮汐の小さい成層期の方が、上下層の流れの逆転が明瞭にできることがわかる。また下げ潮時にもかかわらず、D断面では若松瀬戸からの流入が見られることがあり、当該水域側は若松瀬戸や東シナ海の長周期波動の影響を大きく受けるということが考えられる。

4. 数値シミュレーションの概要

基礎式

本研究で対象とする海域の流れを準3次元解析する場合の基礎式は、均一密度とすると次の通りである。

連続式；

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

運動方程式；

(x-方向)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f_v$$

(y-方向)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - f_u$$

(z-方向)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g$$

ここで、 t ；時間、 x 、 y 、 z ；図-9のように定められた座標である。 x 軸は東向きを、 y 軸は北向きを、 z 軸は鉛直上向きを正とするとともに、基準面を $z=0$ （静水面）としている。流れの鉛直方向の加速度は、重力のそれと比較して小さいとして省略すると、鉛直方向の運動方程式は静水圧分布式で置き換えられ

$$p = \rho_0 g (\zeta - z) \quad \text{が得られる。}$$

基礎式の積分表示

図-10に示すように上記の運動方程式をcontrol volumeに関して、(1) 水表面も海底面も含まない中間のcontrol volume、(2) 水表面を含むcontrol volume、(3) 海底に接するcontrol volumeについて積分を行い数値計算に用いる基礎式を得る。

差分化

基礎式の差分化にはleap-frog法を適用し、特に、移流項の差分化については、上流差分スキームを導入する。

計算対象領域と格子分割

解析対象領域は有福湾およびその周辺海域を含めた広域モデルでは、水平格子幅 $\Delta x = \Delta y = 150\text{m}$ 、鉛直方向に $\Delta z = 10\text{m}$ で分割した。（カラム数672・セル数2233）また、「潮通し」の効果の詳細な検討をするため、有福湾のみの小領域モデルでは、水平格子幅 $\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$ 、鉛直方向に $\Delta z = 10\text{m}$ で分割して計算した。（カラム数2562・セル数7867）「潮通し」を置く場合は開水路として1つのセル（長さ20m、幅10m、深さ可変）を設置した。

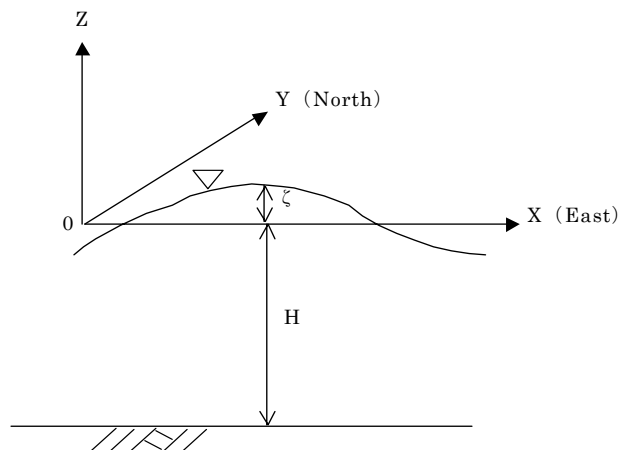


図-9 座標定義図

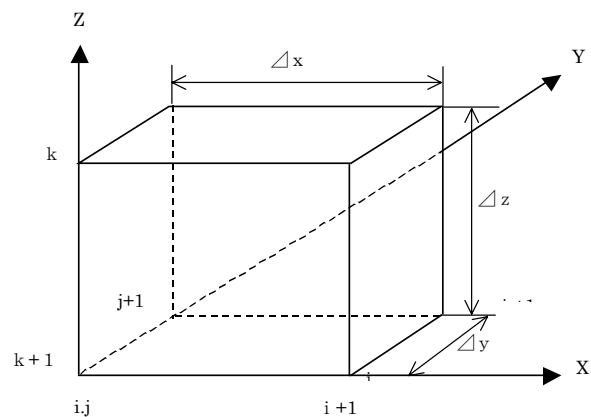


図-10 control volume

初期条件及び境界条件

初期条件としては、無風でかつ静水状態とした。境界条件は湾口と南西側水域に2004/5/5（非成層期）の現地観測で得た潮位・潮位差のM2潮をSin関数近似して与えた。計算ケースは、有福湾周辺海域（大領域）、有福湾のみを対象にした小領域で「潮通し」を設けない場合（現況の再現計算）と「潮通し」の規模を変えて設けた場合の全6ケースとした。水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数 A_h, A_v をそれぞれ1.0、0.001 m^2/s と設定した。底面摩擦係数 γ_b^2 は 2.6×10^{-3} とした。

計算時間間隔

計算時間間隔 Δt は大領域計算では2sec、小領域では0.2secと

して、計算は4周期で定常状態が確認できたため5周期目の計算結果を解とした。

5. 数値シミュレーションの結果と考察

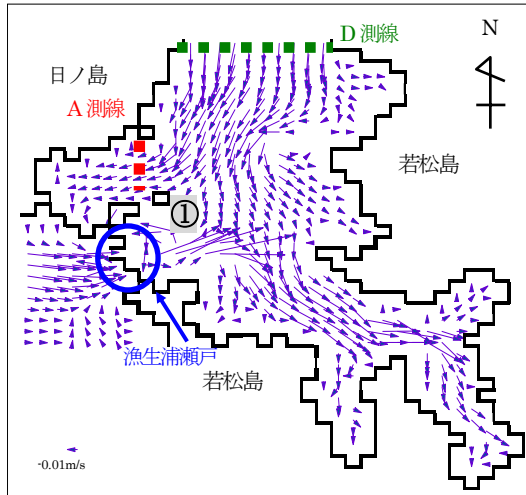


図-11 有福湾周辺海域の流速ベクトル分布(表層)
(上げ潮最強時)

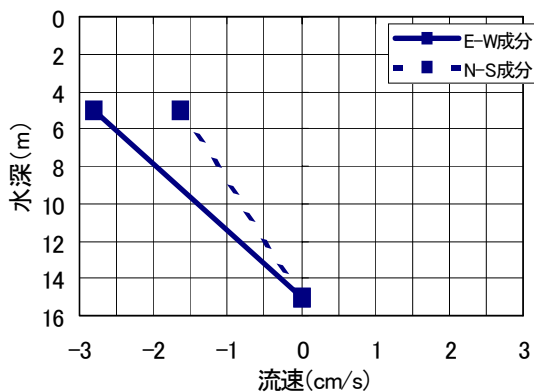


図-12 St.①における1潮汐平均流の鉛直分布

図-11は、大領域対象計算の上げ潮最強時、表層における流速ベクトル分布である。図-12は漁生浦瀬戸付近のSt.①(図-11参照)における1潮汐間の平均流速の鉛直分布である。1潮汐間ではSt.①において西向き、南向きの流れがあり漁生浦瀬戸へ向かう恒流流れの存在が確認できた。これは現地観測でもみられた湾内から漁生浦瀬戸を通り湾外へ出るという流れの存在をうまく再現できたと考えられる。図-13ではD測線を対象にADCPデータ(2004年度)から求めた流量(▲点)と、計算流量(太実線)とを比較している。計算流量は潮位の変化に伴いなめらかな曲線を描くのに対し、ADCPによる流量は当該水域への流入傾向が強くみられる。しかし、定量的には一致しているとは言いがたいが定性的にはほぼ一致しているといえ計算結果の妥当性が確認できる。図-14は大領域(細実線)と小領域(赤実線)のそれぞれの計算で求めたA断面流量とADCPによる観測流量(▲点)の比較図である。

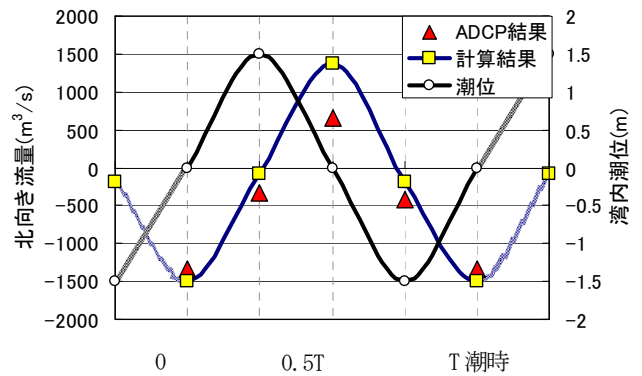


図-13 D断面流量の経時変化

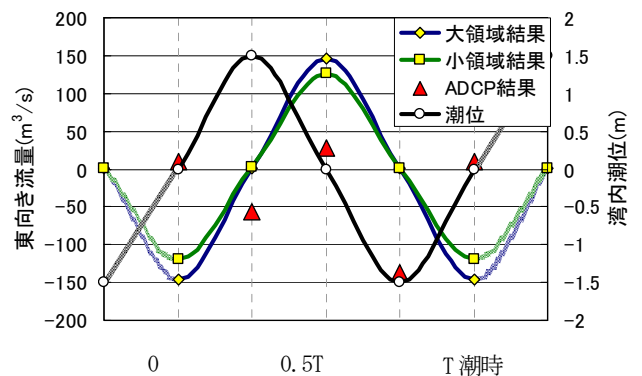


図-14 A断面流量の経時変化

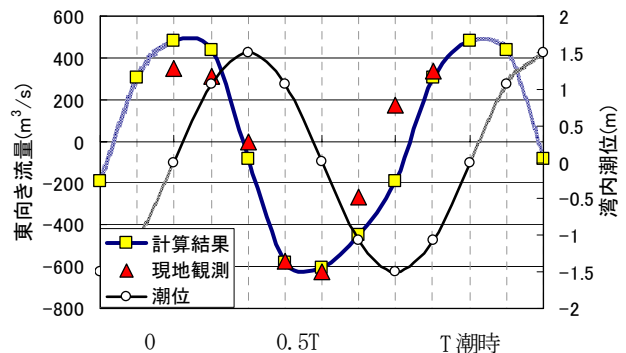


図-15 漁生浦瀬戸流量の経時変化

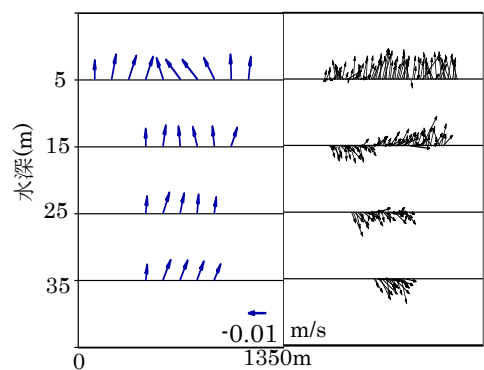


図-16 D断面各層における流速ベクトル

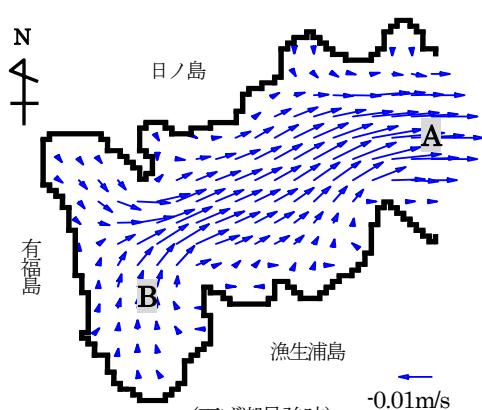


図-17 有福湾内の流速ベクトル分布(現況)

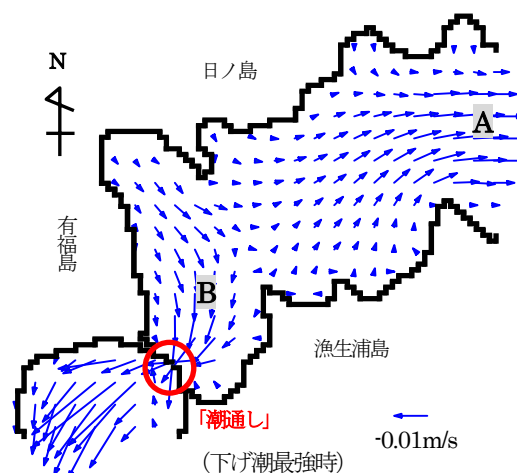


図-18 有福湾内の流速ベクトル分布(潮通し有)

計算結果はほぼ一致したなめらかな曲線を描いたのに対し、ADCP による流量は大きなばらつきがみられ、連続式を満たしていない。これは短時間で計測する ADCP は湾水振動などの不安定な流れをそのまま拾ってしまったためと考えられる。図-15 は大領域で計算した漁生浦瀬戸(△ $k=150\text{m}$ 、△ $y=35\text{m}$ 、△ $z=10\text{m}$ の1つのセルを設定した)の流量経時変化である。計算結果(太実線)は現地観測結果(▲点)とほぼよい一致を示し、計算は比較的良好に現況を再現していると考えられる。図-16 は、大領域計算のD断面各層における下げ潮時での流速ベクトル分布である。計算(左図)と ADCP 流量(右図)の両者とも上層部で湾外への流出傾向であるが、ADCP 流量では下層で湾への流入が見られ、計算結果とはかなり異なっている。この理由としては粗い差分計算の限界とD測線北側を流れる若松瀬戸の影響で現地はかなり複雑な流れが原因であると考えられる。

図-17 は現況を再現計算した場合の下げ潮最強時、表層における流速ベクトル分布である。「潮通し」の効果に着目するため有福湾内の格子分割を大領域計算より小さくして計算したため、より詳細な流況の変化が確認できた。図-18 は「潮通し」(長さ 20m、幅 10m、平均水深 2m)を設けた場合の下げ潮最強時、表層における流速ベクトル分布である。「潮通し」で最大 2.4m/s の流速が出現し、フラッシュされる最大流量は $45\text{m}^3/\text{s}$ となった。ただし、「潮通し」の入口、出口の損失(抵抗)をどのように計算に取り込むかの問題がある。図-19 は St. A 及び B(図-16. 17 参照)における一潮汐間の平均流速(恒流)の鉛直分布である。平均流速は「潮通し」を設けることにより St. A において西向きに流れる傾向がみられ St. B では西向き、南向きに流れる傾向が強くなるのが確認でき、「潮通し」に向かう流れが生まれることが確認できる。図-20 は、「潮通し」の規模を変化させた場合の流量の経時変化(1 潮汐)である。「潮通し」を通過する流量は、1 潮汐間で大半が負の値(湾からの流出)であり、計画されている「潮通し」が有福湾の海水交換促進に寄与するものと考えられる。「潮通し」水深を 2m(幅 10m)とする場合、1 潮汐間の正味流出量は $6.78 \times 10^5 \text{m}^3$ となり A 測線

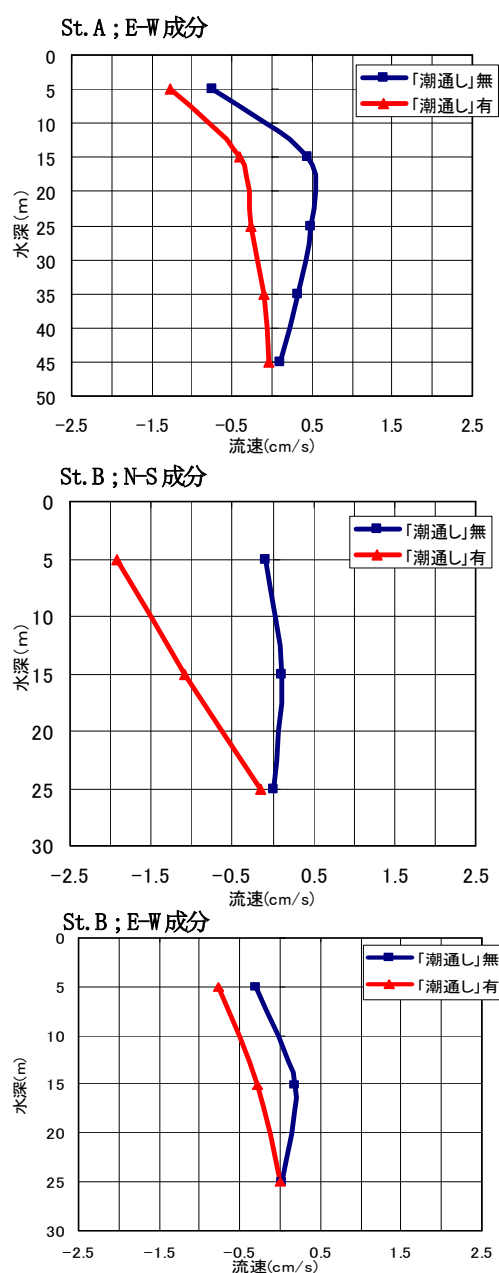


図-19 St. A, Bにおける一潮汐平均流速の鉛直分布

より奥の湾総水量 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の $1/17.7$ に相当し、約 18 潮汐で湾水が入れ替わるほどの量である。

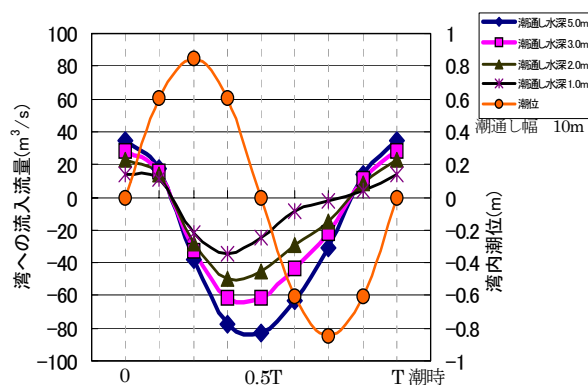


図-20 「潮通し」の規模による流量経時変化

6. 結論

有福湾及び周辺海域の成層期、非成層期の現地観測で得た潮位データから、成層期と非成層期で湾内潮位が湾外潮位よりも高くなっていることが確認でき、また両時期において漁生浦瀬戸からは湾外への流出が多いことが分かった。ADCP の流量データでは成層期で上下層での流れの逆転が見られ、非成層期では複雑な流れが見られた。当該海域は流れの速い若松瀬戸に接してその影響を大きく受けて湾水振動を含む複雑な流れが存在するが、恒流成分として若松瀬戸から湾に流れ込んだ流量は、日ノ島北部堤防や漁生浦瀬戸を通して、湾から流出されるという流れがあることが確認された。これらに基づいて準3次元モデルを用いた数値シミュレーションによる「潮通し」建設に伴う流況変化の予測を行った。その結果、海水交換を促進するために計画されている「潮

通し」の効果が確認できた。今後は、密度成層下での準3次元モデルを用いた流れのシミュレーションを実施するとともに、「潮通し」の海水交換促進が水質や植物プランクトンの生態への影響について詳細に検討する必要がある。

謝辞：本研究には多くの方々のご協力をいただきました。特に、研究室の院生、卒研学生の方々には、現地調査、数値解析、その他あらゆる面で多大なるご協力を頂きました。また、現地観測にご協力を頂いた若松町漁港建設課の皆様、長崎県食品環境検査センターの蒔田弘明氏をはじめとする皆様方に衷心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会編：水理公式集(平成11年度版)，p. 599.
- 2) 気象庁ホームページ：電子閲覧室(気象分布図).
- 3) 古賀恵美子，猶木昌史：五島若松町日ノ島漁港の海域調査と環境改善に関する研究，長崎大学工学部卒業論文，1-17，2003.
- 4) 長崎県総合水産試験場：赤潮発生状況速報.
- 5) 岩佐義朗，多田彰秀：数値解析を用いた湖沼の吹送流解析モデルに関する2,3の考察，京都大学防災研究所年報，第30号，pp. 2-8，1987.
- 6) 岩佐義朗：湖沼工学，p121.
- 7) 平野敏行：沿岸の環境圏，p. 679，pp. 1422-1428.
- 8) 湊康裕：洪水流出時における大阪湾河口沿岸域の流況予測に関する研究，京都大学工学部修士論文，1987.