

長崎県五島・有福湾における「潮通し」設置による海水交換促進

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

長崎県新上五島町に位置する有福湾は3つの島を堤防道路で連結して形成された閉鎖性の強い湾である。同湾は漁港としての利用のほか養殖漁業が盛んであり、ここ数年来赤潮が発生するとともに、養殖・蓄養魚の斃死が問題となっている。地元自治体では、その対策として、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環境を改善しようと計画している。本論では、有福湾周辺海域の流動特性を把握するための現地調査の結果を述べ、これに基づく「潮通し」規模と海水交換量の関係および新たな湾内流動に関する数値シミュレーションによりその効果を検討する。

1. はじめに

五島列島・新上五島町(旧若松町)にある漁生浦島・有福島・日ノ島は1975年に堤防道路で連結された(図-1)。これら島と堤防道路に囲まれる有福湾は漁船泊地と養殖漁場に利用されているが、ここ数年来赤潮が発生するようになってい。長崎県(2005-05-10参照)によると、その赤潮の原因種は、*Mesodinium rubrum*, *Noctiluca scintillans*, *Gymnodinium sanguineum* 等で、とくに有毒な種ではないものの、時折、養殖・蓄養魚の斃死が発生している。また、地元古老は、堤防道路設置以前に較べて有福湾および周辺海域での魚種・漁獲高は格段に減少しており、湾の閉鎖性を高めた影響の大きさを指摘している。地元町はこれら問題の対策として、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環境を改善しようと計画している。本論では、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」設置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. 有福湾周辺海域の潮位と流動の状況

(1) 現地の地形と観測概要

対象海域の若松島周辺は図-1に示すように沈降海岸特有の入り組んだ複雑な地形で、南西側と北東側にそれぞれ東シナ海と五島灘をつなぐ滝河原瀬戸と若松瀬戸の急潮が流れ、奈留島と中通島を隔てている。有福湾は、若松島に北から南に約8.5 km 切れ込んだ入江のさらに西側に張り出した袋小路状の入江である。図-1の①③地点に島をつなぐ堤防がそれぞれ設置され、①には2 m 四方の潮通し孔が2箇所あけられているが、同湾は閉鎖性が高く海水交換が悪い状況である。図-1の⑤、⑥地

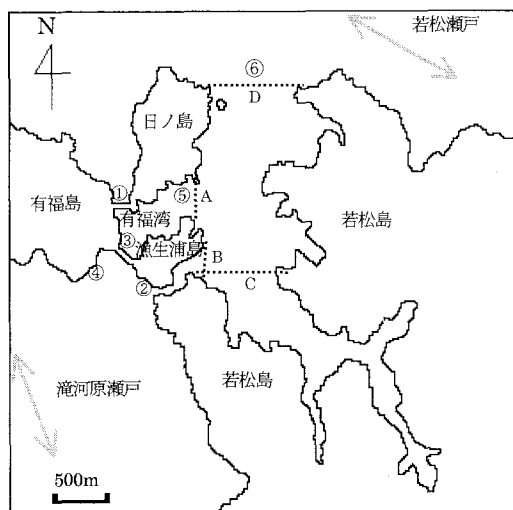


図-1 有福湾の概要と観測地点

点の水深はそれぞれ約40 m, 50 mであり、鉛直方向にもかなり切れ込んだ入江である。

図-1の②地点は水深約11 m, 幅員約40 mの漁生浦瀬戸(橋梁あり)となっており、入江と滝河原瀬戸の間で海水交流がある。有福湾および周辺海域の流動特性等を明らかにするために、2003年8月25日(成層期)および2004年5月5日(非成層期)に以下の観測を行った。Ⅰ. ADCP (RD Instrument 社製, Workhorse600 kHz) 曳航観測による流況調査およびクロロレック(アレック電子社製, AAQ1183)による水質調査: 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。水質調査では各測線中央で水温、塩分、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: 1時間毎に橋上から流速計を垂下し流速分布を計測した。Ⅲ. 潮位観測: 湾内外の測点③と④において観測日を含む2週間、5分間隔で圧力式水位計により潮位を記録した。水位計のセンサー部は小孔をあけた塩ビパイプ中に入れて短周期の波動に感応しないようにした。また、記録潮位は水準測量により標高潮位に換

* 正 会 員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

** 学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科環境システム工学専攻

*** 正 会 員 博(工) 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

**** 正 会 員 修(工) 大鉄工業(株)

算可能である。IV. 定点における流向流速観測 (2003.8/26-9/8のみ): 図-1中の測点②(海底から0.5 m), 測点⑤(海底から30 m) および測点⑥(海底から40 m) にアンダー流向流速計を設置して10分間隔で流向流速を記録した。

(2) 調査結果と考察

有福湾の南西側堤防に潮通しを開削した場合の流量予測のために、観測日を含む約2週間、湾内外の潮位を測った。図-2(a), 図-2(b)は2003年(成層期)と2004年(非成層期)の観測日における湾外潮位, 湾内外潮位差及び漁生浦瀬戸(測点②)流量の時間変化である。成層期の2週間の平均潮位は湾外で1.802 m, 湾内で1.833 mであり, 湾内平均潮位が南西側湾外水域のそれより3.1 cm 高い。非成層期の平均潮位は湾外で1.676 m, 湾内で1.687 mであり, 成層期と同様に湾内平均潮位が1.1 cm 高いことが分かった。両観測期間の平均潮位を比較すると, 成層期の方が15 cm ほど高く, 季節により海面高がかなり変化する。このような調査結果から, 一年を通して湾内潮位が南西側湾外潮位よりも高くなっていることが予想される。また, 漁生浦瀬戸における流量は, 湾内外潮位差の変化に応じて変化する。両時期とも湾内水が滝河原瀬戸方向へ流出する量が流入よりかなり多いことが分かった。すなわち, 若松瀬戸口(図-1, D 断面)

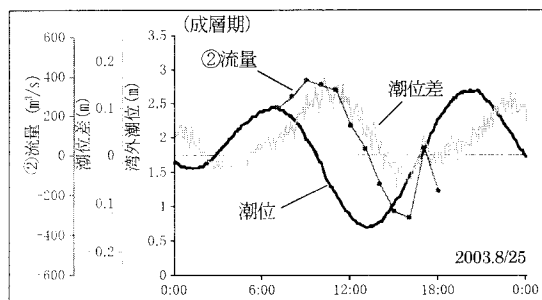


図-2(a) 湾外潮位・湾内外潮位差・漁生浦瀬戸流量 (2003.8/25)

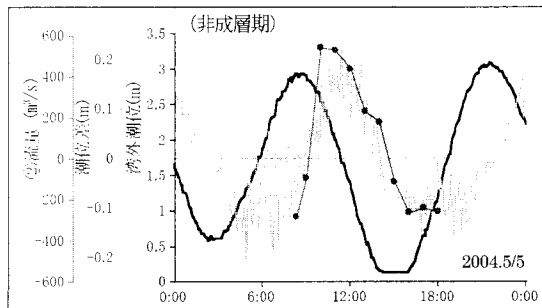


図-2(b) 湾外潮位・湾内外潮位差・漁生浦瀬戸流量 (2004.5/5)

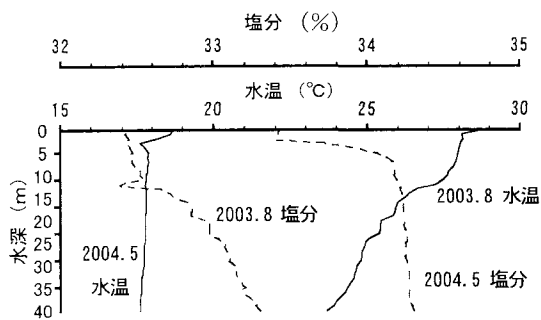


図-3 観測時の成層(塩分・水温)状態

から湾内入江を経て滝河原瀬戸へ流れる潮汐残差流(恒流)が存在することを示している。

これらのことから南西側堤防に「潮通し」を設けた場合, 有福湾からその外海域に, 海水を効率的に排出できることが期待される。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-3に観測時の塩分・水温鉛直分布を示している。成層期においては, 緩い躍層が水深10 mに見られるが, 塩分・水温ともに同程度に影響を与えて密度成層を形成している。非成層期では, 水深5 mまでに塩分の低い層が存在するが, その下部は塩分・水温ともにほぼ一様

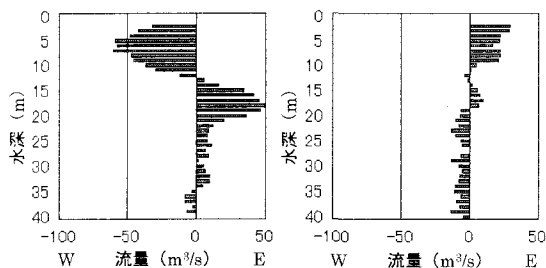


図-4(a) A断面流量配分図(2003.8/25)
(左: 上げ潮(16:10), 右: 下げ潮(10:00))

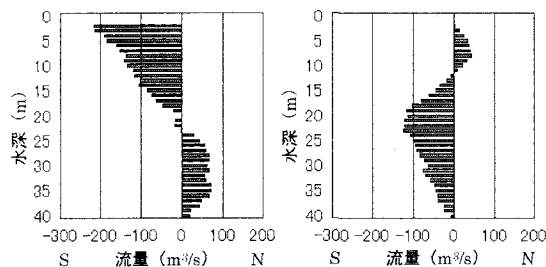


図-4(b) D断面流量配分図(2003.8/25)
(左: 上げ潮(17:00), 右: 下げ潮(10:50))

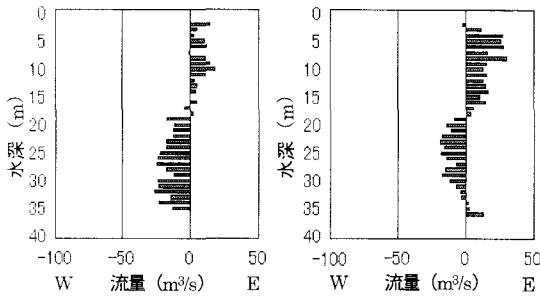


図-5(a) A断面流量配分図(2004.5/5)
(左: 上げ潮(16:00), 右: 下げ潮(11:30))

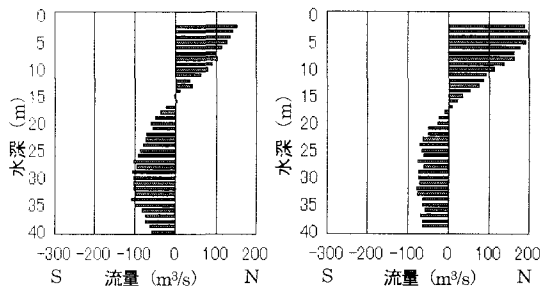


図-5(b) D断面流量配分図(2004.5/5)
(左: 上げ潮(17:00), 右: 下げ潮(12:30))

であり密度成層していない。

図-4, 5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, D断面における上げ潮・下げ潮最強時近く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(測線に直交する成分, 湾からの流出を+)を乗じて水深方向1m毎の流量を求めたものである。成層期(図-4)では, 上下層で流れの逆転があり, また, 上げ潮と下げ潮でそれぞれの層の流向が逆転する。

非成層期(図-5)では, やはり上下層の逆転流れが見られるが, 成層期のように上げ潮と下げ潮で転流が起こることはなく, 一潮汐を通して下層には湾内への流入, 上層には流出の流れのパターンが維持され, 上げ潮では下層の流入量が大きく, 下げ潮では上層の流出量が大きくなる。

成層期における上下層の流向の逆転は, 図-3に示す密度成層の影響で, 内部潮汐のような密度流が潮汐流に加わったと考えていたが, 非成層期においても上下逆転流れが存在することから, 上下層の逆転流れは密度流のみの影響ではなく, かなりの水深を有する水域であることとD測線の北を流れる若松瀬戸の流れの構造に影響された, この水域の特性であろうと考えられる。

図-4, 5の鉛直方向流量配分図を積分して求める断面流量は, その時刻前後の潮位変化量に湾表面積を乗じて

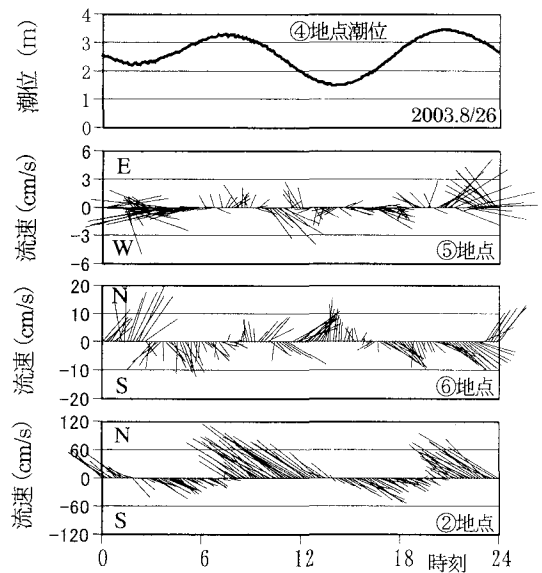


図-6 3地点(⑤⑥②)の流速ベクトル(2003.8/26)

連続式から求める流量とは時刻によってはかなりの差異がでた。このことから, 当該水域には潮汐に比較すると短周期の湾水振動や内部セイシュなどの擾乱が存在するため, ADCPにより短時間(A測線で曳航時間5分, D測線で10分)に計測した流れと潮位変化に基づく連続式から求める流れとは一致しなかったものと考えられる。

図-6は, 図-1中の測点⑤(A測線中央の海底から30m), 測点⑥(D測線中央の海底から40m)および測点②(漁生浦瀬戸の海底から0.5m)にアンダー流向流速計を水底から立ち上げて設置し, 10分間隔で記録した2003.8/26における流速ベクトルである。それぞれの地点で主流の流向と流速の大きさが異なるので, 地点により縦軸の目盛りと方向を違えて表示している。

⑤地点の流速計は水深10m付近に置かれていたこともあり(前日のADCPのデータ図-4(a)参照), 流速は微弱であり, 時間帯によっては流向, 流速を正しく計測出来ていない可能性はあるが, 流向・流速の変化は潮位変化より周期は短く, 潮汐以外の流れの要素が存在することを示唆している。

⑥地点の流速は20 cm/s以下であり, ⑤地点に比較するとかなり大きな流速がでるが, その流向・流速の変化はやはり⑤地点と同じく潮汐変化に対応しない流れが見られる。11, 22時付近のように下げ潮時間帯にもかかわらず流入成分(S方向成分)が現れることがあり, D断面は若松瀬戸の東シナ海側の開口部にあたり, 東シナ海の潮汐以外の長周期海面変動の影響を大きく受けていることが考えられる。

②地点は幅員の狭い瀬戸であるため, 最盛時の流速は

150 cm/s を超え、流向は瀬戸の方向に支配されて入退潮に応じて転流する。注目すべきは、引き潮時の湾からの流出速度(N 方向成分)が満ち潮時の流入速度(S 方向成分)よりかなり大きく、一潮汐間において湾から瀬戸原瀬戸方向への潮汐残差流が存在することである。すなわち、湾内潮位が南西側湾外潮位よりも高いという図-2(a)の湾内外潮位差を②地点の流速データも裏付けており、有福湾南西側堤防に「潮通し」を設けた場合にも、湾内水が流出する潮汐残差流を期待することができる。

3. 数値シミュレーションの概要

(1) 基礎式と数値シミュレーションの方法

本研究では対象とする海域がかなりの深さを持つため準3次元計算モデルを用いた。密度は均一とし、静水圧近似およびブシネスク近似を適用すると連続の式、運動方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f_v \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - f_u \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (4)$$

ここで、 u, v, w : 流速の x (東向き), y (北向き), z (上向き) 方向成分, p : 圧力, A_h, A_v : 水平、鉛直方向の渦動粘性係数, ρ : 海水密度, g : 重力加速度, f : コリオリ係数である。

数値シミュレーションには陽形式の差分法を採用し、時間方向には leap-frog 法を、移流項には上流差分スキームを用いた。

(2) 計算対象領域と境界条件

シミュレーションは「潮通し」を設置した場合の水路部流量と湾内流動を把握するため、解析対象領域は有福湾と南西側堤防外海域とし、水平格子幅 $\Delta x = \Delta y = 20$ m、鉛直格子幅 $\Delta z = 10$ m で分割した(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20 m, 幅10 m, 深さ可変)を設置した。

初期条件は、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と潮位差の sin 関数近似を与えた。計算は、有福湾のみを対象にした領域で「潮通し」を設けない場合と

「潮通し」の規模を変えて設けた場合とした。水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数 A_h, A_v は、岩佐ら(1987)の研究を参考にしてそれぞれ全域一定値1.0, 0.001 m²/s と設定した。底面摩擦は次式で与えた。

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \gamma_b^2 \rho (u_b, v_b) \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (5)$$

ここに、 u_b, v_b : 最下層セルの流速, γ_b^2 : 底面摩擦係数(=2.6×10⁻³)である。

計算時間間隔 Δt は0.2 sec として、8 潮汐周期で計算の収束が確認できたので9 週期目の結果を解とした。

(3) 「潮通し」水路部に対する特別な配慮

堤防を開削して設ける「潮通し」水路として、計算では幅10 m, 長さ20 m, 厚さ可変の1個のセルを配置して湾内外を繋ぐが、水路の両端は幅20 m, 厚さ10 mのセルであり、図-7の状態である。隣接するセルの幅と厚さが異なるとき、鉛直の壁に対する抵抗を考慮することが必要になる。また、水路部の底面と側壁の抵抗を式(5)で評価するだけでは不足する。すなわち、渦動粘性係数や底面摩擦係数を一定と置く計算では、水路入口と出口における局部渦による抵抗を評価できず、水路の流速が非常に大きく出してしまう。平野ら(1998)によると図-7の水道部の流速 V は次式で表されている。

$$V = \frac{Q}{Bh} = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left(1.4 + \frac{2gn^2L}{R^{4/3}}\right)}} \quad (6)$$

ここに、 B, L : 水路幅, 水路長, n : Manning 粗度係数, R : 径深, 分母の1.4は入口と出口におけるエネルギー損失係数の和である。分母第1項目は、 $n=0.02$, $R=2$ m と仮定して計算した第2項目の20倍以上の大きさである。このため、式(6)を用いて式(5)の抵抗力に換算すると、

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gR \Delta h / L = \frac{1}{2} \frac{R}{L} \left(1.4 + \frac{2gn^2L}{R^{4/3}}\right) V^2 \quad (7)$$

ここで、 $h=R=2$ m とし、上記の諸量を用いると、 $\gamma_b^2=0.073$ 、海域の底面抵抗係数の28倍の大きさとなる。このため、水路部のみはこの底面抵抗係数を用いることとした。

(4) 数値シミュレーションの結果と考察

図-8(a)は、非成層期の観測で得られた潮汐変化を sin 関数近似して湾口に与えて計算した、下げ潮最強時、

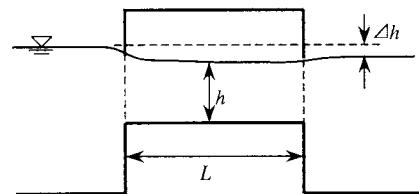


図-7 「潮通し」水路部のモデル

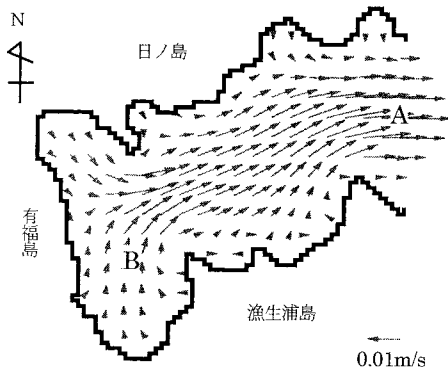


図-8(a) 有福湾内の下げ潮最強時流速ベクトル (表層)

表層における流速ベクトルである。図-8(b)は、「潮通し」(長さ20 m, 幅10 m, 平均水深2 m)を南西側堤防に設けた場合で、湾口の潮汐条件は図-8(a)と同じくし、南側海域端にこれも観測で得られた潮位変化を与えて計算した、下げ潮最強時、表層における流速ベクトルである。「潮通し」のない図-8(a)の流れが湾口に向かう一方方向であるのに対し、図-8(b)では、湾口と「潮通し」の2方向に向かう流れが生まれている。「潮通し」でフラッシュされる最大流量は $45 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。図-9は、「潮通し」の規模(水路水深)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潮汐間でその多くが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2 m(幅10 m)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測線より西側の湾総水量 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 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。計算による湾内の潮汐残差流は、主として表層に「潮通し」に向かう流れを作ることが分かり、表層の5 m以内に発生することが多い植物プランクトンを湾内に長く留めない効果があると考えられる。

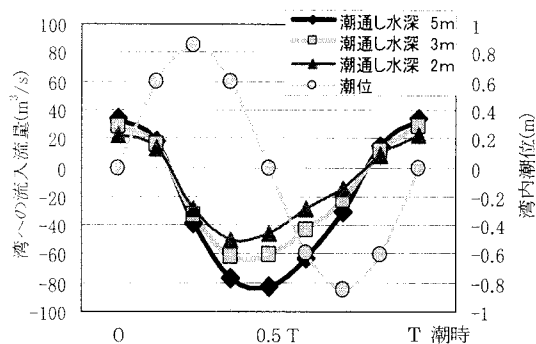


図-9 「潮通し」の流量経時変化

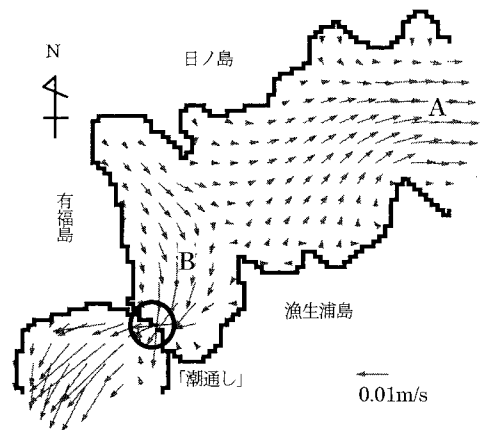


図-8(b) 有福湾内の下げ潮最強時流速 (潮通し水深2 m, 表層)

4. む す び

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、湾内潮位が南西側湾外潮位よりも高いこと、また、漁生浦瀬戸における流量観測によっても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のみならず非成層期においても上下層で流れが逆転する流れが見られた。当該海域は東シナ海に口を開く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、一潮汐を平均した潮汐残差流として若松瀬戸口から湾を経て漁生浦瀬戸を通して、滝河原瀬戸に流出する流れがあることが分かった。

観測潮位に基づいて準3次元モデルを用いた数値シミュレーションにより「潮通し」設置に伴う流況変化の予測を行った。その結果、「潮通し」の規模に応じて海水交換に効果をもつことが確認できた。今後は、「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。

最後に、現地観測にご協力を頂いた旧若松町漁港建設課および長崎県食品環境検査センターをはじめとする皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- 岩佐義朗, 多田彰秀, 福本育央(1987): 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.
- 長崎県水産部: 水産のひろば, http://www.n-suisan.jp/yumetobi/suisanhiroba/gyo_index.html, 参照2005-05-10.
- 平野敏行監修(1998): 沿岸の環境図, フジ・テクニクス出版, 1137p.