

上五島・有福湾に設置された潮通し水路の海水交換機能

古本勝弘*・有山 淳**・大石祐樹***・冨田彰秀*

Seawater Exchange of Tidal Flume Constructed in Arifuku Bay,
Gotoh Islands

by

Katsuhiro FURUMOTO*, Atsushi ARIYAMA**, Yuhki Oishi***
and Akihide TADA***

The Arifuku Bay located in the middle part of Gotoh Islands in Nagasaki Prefecture has been enclosed by two dikes for the roadway since 1975. In recent years, the red tide often occurs in this bay. Municipality constructed a tidal flume at Feb. 2008 to promote the seawater exchange in this bay as countermeasure against the red tide. This study deals with the field observations on tidal currents in the flume and the tidal levels, the numerical simulations for prediction of flow change and seawater exchange to accompany the construction of a new tidal flume.

Keywords: Tidal current, Tidal flume, Numerical simulation

1. はじめに

長崎県南松浦郡上五島町(旧若松町)の漁生浦島, 有福島, 日ノ島は1975年に堤防道路で連結され(図-1①, ③), 閉鎖性の強い海域・有福湾が形成された。有福湾は静穏であり, 船舶の停泊地としての利用の他に, 養殖漁業も盛んに行われているが, ここ数年, 有福湾で *Noctiluca scintillans* を優占種とする赤潮が度々発生¹⁾している。

地元自治体は赤潮の防止対策として, 有福島と漁生浦島を結ぶ南西側堤防(図-1 ③)の一部を切り欠いて外海との海水交換を促進させ有福湾の水質を改善しようと計画し, その規模と効果を検討してきたが, その潮通し水路がこの度2008年2月竣工した。

これまで, 潮通し水路を設けた場合の海水交換の効果を検討するため, 現状の流況と潮位関係を調査するとともに, これに基づき流況の変化を数値シミュレーションにより予測してきたが, 潮通し水路の規模が確定し, 実際に交換流が実測できる状況となった。潮通し水路建設の本来の目的である赤潮抑制の効果を明らかにするためにはまだまだ時間を要するので, 本報告は, これまで実施してきた数値シミュレーショ

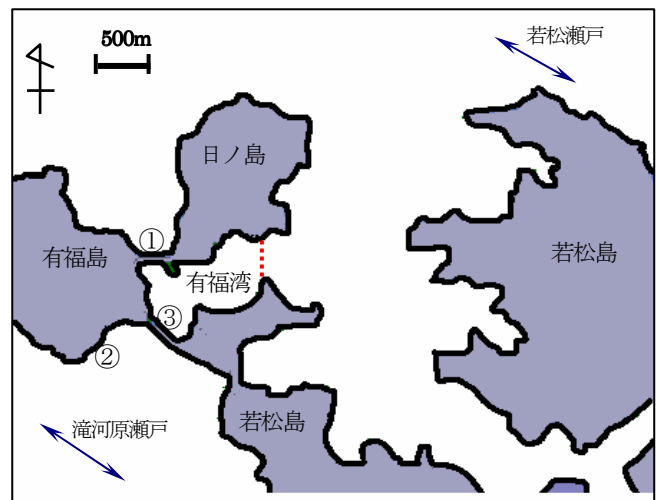


図-1 有福湾とその周辺海域

ン手法の検証とともにその修正や各種パラメータを同定し, 潮通し水路の物理的な海水交換機能について述べるものである。

平成20年6月27日受理

* 環境システム工学講座 (Department of Civil Engineering)

** (株)ヒューマンテクノシステム (HUMAN TECHNOSYSTEM CO. LTD)

*** 大鉄工業(株) (DAITETSU KOUGYO CO. LTD)

2. 現場の潮位特性

有福湾の南西側堤防に潮通し水路を設けた場合、その流量を支配する、堤防を挟む湾内外の潮位特性を明らかにするために、これまでに4回、図-1の②、③地点に潮位計を設置し潮位を詳細に計測・記録した。それぞれの回では、潮位を2分間隔で20日間程度自記記録させた。潮位計は圧力センサー式（日置電機、UIZ3635）で、底を閉じた塩ビパイプ（φ50mm×4m）に径2mmの小孔を底部にあけたものを岸壁に取り付け、この中にセンサー部を入れて、できるだけ短周期の波浪の影響を除去するようにした。潮位は、2地点で同時に測られており、水準測量により相互の標高関係を検出できるようにしている。

図-2Aは、潮通し水路完成後の2008.4.20-21における湾外②の潮位（青）と湾内外潮位差（湾内潮位－湾外潮位）を示しており、同図Bは、水路設置前で潮汐条件がAと似通っている2007.7.17-18におけるものである。いずれも引潮時に湾内潮位が高く、上潮時には逆に湾外潮位が高くなる。満潮および干潮時刻に湾内外潮位差はほぼなくなるが、引潮最盛期の水位差が上潮最盛期のそれよりかなり大きいことが分かる。各回の潮位観測は20日前後の期間行っているが、期間中の平均潮位は、有福湾内が南西側外海より1.0～3.5cmほど高いことが分かった。平均潮位は、2008.3.28-4.22の期間で2.38cm、2007.7.10-7.31では1.06cm有福湾内が高かった。

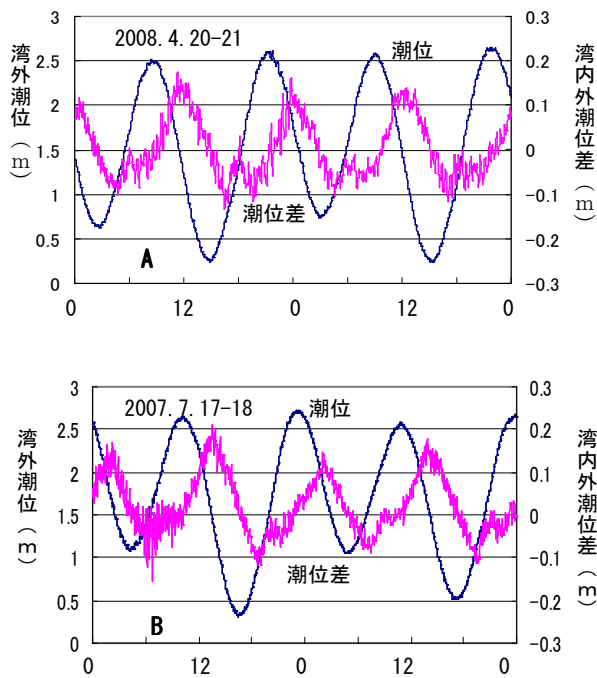


図-2 潮位、潮位差の時系列

有福湾とその南西側海域の平均潮位に差が生まれる理由は明確ではないが、南西側海域は五島灘と東シナ海を結ぶ急潮の滝河原瀬戸に連なっていること、有福湾の東側海域は南に8kmほど深く切れ込んだ入江となっており陸水の流れ込みや風の影響を受けることが考えられる。

湾内外潮位差は図-2を見ても分かるとおおり、変動が激しい。潮位計は、5sec以下の短周期波浪には感応しないように工夫しているが、それぞれの潮位計設置水域にはそれを超える長周期の海面変動が存在し、特に、気圧の擾乱が通過するときには、激しい変動が見られる。潮通し水路の流速計測時、流向の変わり目の時間帯に転流が何度も見られたことから、潮通し水路がつなぐ両水域の中・長周期の海面変動が水路の流量変化に直接影響をあたえることが分かった。

3. 潮通し水路の流量調査

潮通し水路は2008年2月に竣工した。堤防道路を切り欠いてボックスカルバート（幅3.5m×高3.8m×長さ8.0m）2本を設置したもので、水路底は大潮期の干潮位にほぼ一致する。水路導入部前後5mには導流壁と床固めが設置してあるため、水路長としては約18mである。

流量調査は、水路完成後間もなくの2008年4月21-22日に実施した。流速は、東邦電探製CM-1A型流速計により水深方向2点、横断方向3点で計測した。計測は水深と流速を毎正時に測った。

流速を生みだす水路両側の水位差 Δh を図-1②③で測った潮位記録から読みとり、流速との関係を求めた。流速 V はマンニング式で表されるとして、計測で既知量の $V/R^{2/3}$ と潮位記録から求めた Δh の関係を図-3に示した。ここに、 R は径深である。 V および Δh に符号があるが絶対値で表示している。グラフに散らばりはあるものの、最小自乗法で引いた近似曲線は

$$V = 6.78R^{2/3}\Delta h^{0.54} \quad (1)$$

で表される。したがって、潮位記録から Δh と R を2分間隔で求めることができるので、潮通し水路を流出

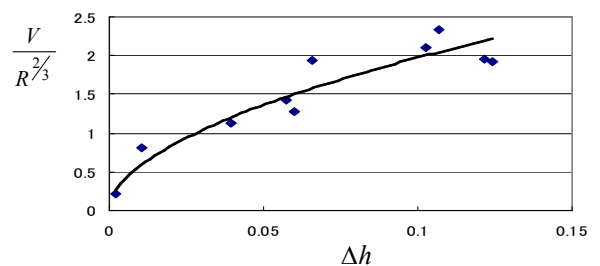


図-3 Δh と $V/R^{2/3}$ の関係

入する流量を計算することができる。

図-4 は 2008. 3/28~4/22 における湾外②の潮位と②③地点の潮位差を示したものである。図-4 に示す潮位差 Δh を式(1)に用いて水路の流出入流量を求め、同期間における有福湾から流出する正味の累積水量を求め図-5 に示した。

有福湾を権現崎-釜崎の線(図-1 赤破線)より西側とすると、その水表面積は $7.0 \times 10^5 \text{m}^2$ である。湾内の中底層水を潮通し水路から流出させることは期待できず、5m以浅の水が流出すると仮定すると、その水量は $V=3.5 \times 10^6 \text{m}^3$ である。図-5 によると、3月末から4月初旬にかけては5日間もあればこの水量が湾から正味排出されることが分かる。ただし、図-4, 5からも分かるように、潮通し水路両側の潮位差は潮時だけでなく時期によってもその大きさは異なるため、排出日数にはかなりの開きが出るようである。

ここに、 μ_{\max} は最大比増殖速度といい、ほぼ 1.0 (1/日) のオーダーである。 C は増殖を律速する物質の濃度で、一般にリンの濃度が用いられる。 K_C は半飽和定数である。琵琶湖生態系モデル²⁾では、 $\mu_{\max} = 0.8$ 、 $K_C = 2(\mu\text{g}/l)$ 、霞ヶ浦では、 $\mu_{\max} = 1.2$ 、 $K_C = 20(\mu\text{g}/l)$ が採用されている。海域での文献資料は少ないが、San Francisco 湾の例では $\mu_{\max} = 1.5$ 、 $K_C = 30(\mu\text{g}/l)$ が採用されている。有福湾の過去の水質分析で得られているリン濃度 $C = 4.0 \mu\text{g}/l$ を上記3箇所で採用された値を用いて比増殖速度を計算すると $\mu = 0.53, 0.20, 0.17$ (1/日) を得る。

植物プランクトンの増殖モデル式(細胞数 X) は、

$$dX / dt = \mu X \tag{3}$$

で表されるので、細胞倍化時間(細胞分裂時間) T は、

$$T = \ln 2.0 / \mu = 0.693 / \mu \tag{4}$$

で計算されるので、上記の μ を用いると、それぞれ、 $T = 1.31, 3.47, 4.08$ 日となる。

前節において、潮通し水路の機能として、条件により異なるが、有福湾の水深 5m までの表層水を排出するに要する日数は5日以上となるので、いずれの細胞倍化時間内にも湾内水をフラッシュできないこととなる。ただ、湾内での移流は確実に大きくなるので、養殖場近辺に赤潮が停留して害をもたらす可能性は軽減できるし、プランクトンが栄養塩の供給場所に滞留して増え続けることはなくなるであろうと期待している。

5. 流動シミュレーション

これまで潮通し水路を流出入する流れが有福湾内の流れにどのような影響をもたらすかを検討するため、数値シミュレーションを実施してきた。潮通し水路の流量を測ることができる状況となったので、計算と実際のフィッティングにより計算手法の改良や計算に用いた各種係数の同定を行う。

5.1 基礎式と計算方法

本研究では対象とする海域がかなりの深さをもつため準 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と運動方程式は次のように表される。

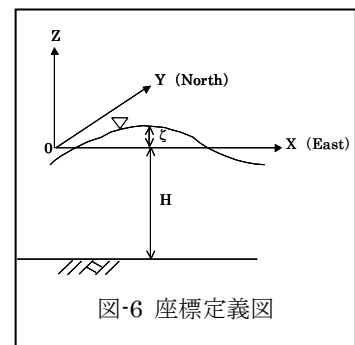


図-6 座標定義図

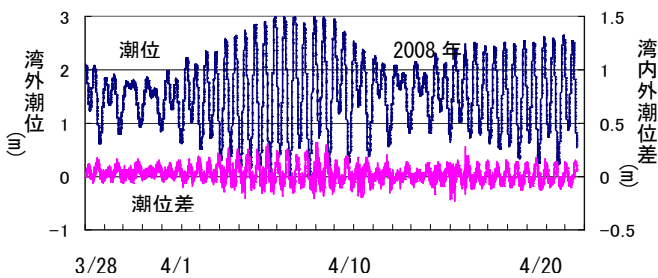


図-4 潮位・潮位差の時系列 (2008. 3/28 - 4/22)

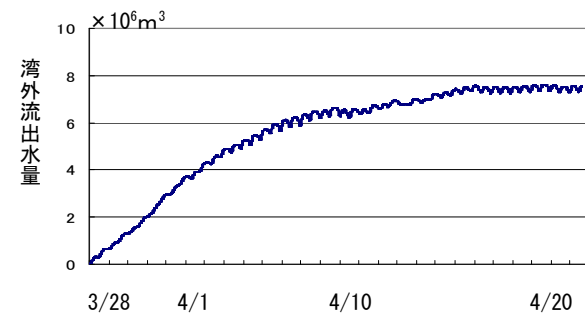


図-5 潮通し水路から流出する累積水量

4. 植物プランクトンの増殖時間と滞留時間の考察

潮通し水路設置の目的は赤潮抑制策としてフラッシュ効果を期待するものである。植物プランクトンの増殖時間との関係で湾内滞留時間を考察しておく。

生態系モデルにおいて、植物プランクトンの比増殖速度 μ は、一般に次の Monod 式(2)で与えられている。

$$\mu = \mu_{\max} \frac{C}{K_C + C} \tag{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f_v \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - f_u \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g \quad (8)$$

ここに、 t : 時間、 u, v, w : 流速の x (東向き)、 y (北向き)、 z (上向き) 方向成分 (図-6)、 p : 圧力、 f : コリオリ係数、 A_h, A_v : 水平、鉛直方向の渦動粘性係数、 ρ_0 : 海水密度、 g : 重力加速度である。

数値計算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。

5.2 解析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の海域とし、水平格子幅 $\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$ 、鉛直格子幅 $\Delta z = 10\text{m}$ 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 18m, 幅 7m, 高 1.6m)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 2008.4.21 の現地観測で得た潮位と潮位差を 8 項のフーリエ級数で近似して与えた。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」を設けた場合とした。水平方向渦動粘性係数 A_h は、 $\alpha V_{\max} H$ (係数 $\alpha = 40$ 、 V_{\max} : 一潮汐間の最大流速、 H : 平均水深) とおいて与える方法³⁾があるが、ここでは $A_h = 10.0$ とおいた。鉛直方向渦動粘性係数は A_v は岩佐らの研究⁴⁾を参考にして水路部以外では全域一定値 $0.001\text{m}^2/\text{s}$ と設定した。底面摩擦は次式で与えた。

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \gamma_b^2 \rho_0 (u_b, v_b) \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (9)$$

ここに、 u_b, v_b : 最下層セルの流速、 γ_b^2 : 底面摩擦係数 ($= 2.6 \times 10^{-3}$) である。

計算時間間隔 Δt は 0.2sec として、10 潮汐周期で計算の収束が確認できたので 11 週期目の結果を解とした。

5.3 潮通し水路部に対する特別な配慮

計算では潮通し水路として設置された寸法の幅 7m, 長さ 18m, 平均潮時に高さ 1.6m 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 20m, 高さ 10m 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時、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

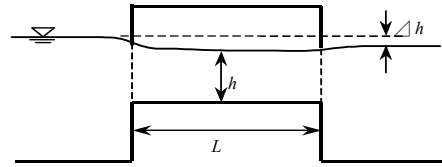


図-7 潮通し水路部モデル

式(9)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おく計算では、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てしまう。平野ら⁵⁾によると図-7のような水道部の流速 V は次式で表されている。

$$V = \frac{Q}{Bh} = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{(1.4 + \frac{2gn^2L}{R^{4/3}})}} \quad (10)$$

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。 $n = 0.02$ 、 $R = 1\text{m}$ と仮定すると、第 1 項 1.4 は第 2 項目の 14 倍以上の大きさとなり、潮通し水路では壁面摩擦より渦損失が大部分を占めることが分かる。設置された潮通し水路は前後の導入部にコンクリートブロックの床固めや両サイドには自然石の石張りが施され、流入抵抗がかなり大きく、流入部の渦損失も大きいことが予想されるので、(10)式の 1.4 を 2.0 とし、式(10)を用いて式(9)の抵抗応力に換算すると、

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gR\Delta h/L = \frac{1}{2} \frac{R}{L} \left(2.0 + \frac{2gn^2L}{R^{4/3}} \right) V^2 \quad (11)$$

ここで、 $R = 1\text{m}$ とし、上記の諸量を用いると、 $\gamma_b^2 = 0.0595$ 、海域の底面抵抗係数の 23 倍の大きさとなる。このため、水路部のみは(11)式で底面抵抗係数を与えることとした。

5.4 水粒子の移流シミュレーション

湾内で発生する赤潮が潮通しを設置することでどの程度の時間で湾外に排出されるかを見るために、水粒子の移動軌跡を流動シミュレーションから得られる流速を用いて計算した。

時刻 $t = t_i$ に $X_i = (x_i, y_i)$ に位置する水粒子

が、時刻 $t = t_i + \Delta t$ に $X_{i+1} (= (x_{i+1}, y_{i+1}))$ へ移動したとする。 (X_i, t) における場の流速を $U_i(X_i, t)$ とすると 1 計算ステップの移流による水粒子の移動距離は次式により求まる。

$$X_{i+1} = X_i + U_i(X_i, t) \cdot \Delta t \quad (12)$$

ここで、 $U_i(X_i, t)$ は、その粒子の存在するセルの場の流速に、 x 方向、 y 方向ともに隣り合うセルの流速を按分して加えたものを採用する。

水粒子の乱れによる移動も加味するために、ランダムウォークで与えることによって、モデル化した。ここで、 $\Delta\gamma(\eta_x, \eta_y)$ を x 方向に η_x 、 y 方向に η_y のそれぞれのランダムウォークを成分とする微小距離とすると、乱れを考慮した 1 計算ステップごとの移動距離は、次式のように表される。

$$X_{i+1} = X_i + U_i(X_i, t) \cdot \Delta t + \Delta\gamma(\eta_x, \eta_y) \quad (13)$$

ここで η_x および η_y は、 $N(0, \sigma_0)$ の正規乱数 (平均値 0、標準偏差 σ_0 のガウス分布乱数) で、 σ_0 は平均の乱れ速度に相当する。対象海域の乱れ強さは明らかではないため、最大流速の約 1/100 程度の値 $\sigma_0 = 10^{-4}$ として計算した。流動シミュレーション同様、時間ステップは $\Delta t = 0.2 \text{ sec}$ である。

5.5 数値シミュレーション結果と考察

図-8 (a) は、観測で得られた潮汐変化を Fourier 級数近似して湾口に与えて計算した、下げ潮最強時、「潮通し」無しの場合の表層における流速ベクトルである。

(b) は、「潮通し」を南西側堤防に設けた場合で、湾口の潮汐条件は (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 (a) の流れが湾口に向かう一方であるのに対し、(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。

図-9 は同じく上げ潮最強時の表層流速ベクトル図である。湾口と水路の両方から湾内に流入する様子が分かる。

潮通しにおける流速は、下げ潮最強時に 1.80m/s の流速が西向きに出現した (南西側水域への流出)。

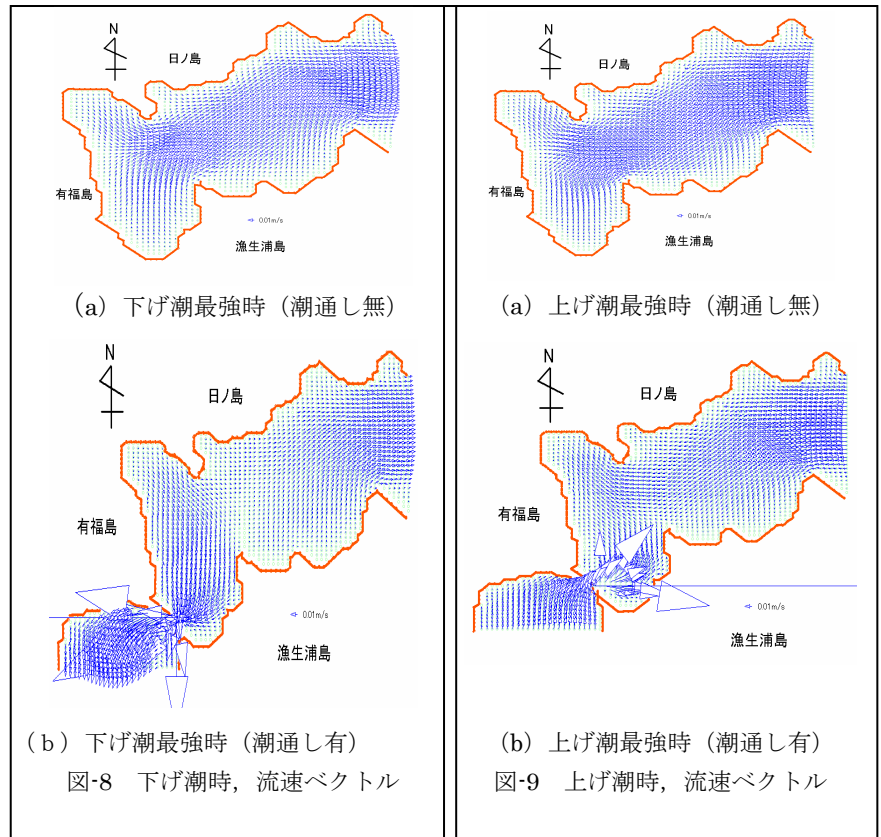


図-8 下げ潮時、流速ベクトル

図-9 上げ潮時、流速ベクトル



図-10 粒子移流シミュレーション (水路なし)

また、上げ潮最強時には 1.38m/s の流速が東向きに出現した（有福湾内への流入）。これらの流速は、水路で実測の流速とほぼ一致した。逆に言うと、水路抵抗の与え方を、実測流速と一致するように探索した結果でもある。

現在、有福湾には、湾の北側海岸線に沿って養殖筏が多数並べられている。赤潮は養殖の残餌から供給される栄養塩に起因して発生するといわれているので、養殖筏付近の水粒子が時間経過とともにどのような軌跡をたどるかを計算した。

図-10 は潮通し水路がない場合の粒子移流シミュレーションの結果である。流動シミュレーションにより得

られた 11 周期目の流速データを採用し、養殖の行われている付近の表層に x 軸方向に 4 個、y 軸方向に 5 個の計 20 個のセルに 5 ずつ、計 100 個の追跡粒子を等間隔に上げ潮時に投入した。入退潮に伴い東西方向への動きは見られるが、有福湾湾口から流出はせず、110 時間後に約 20m ほど北へ移動するだけである。

図-11 に潮通し水路を設置した場合の粒子移流シミュレーションの結果を示した。追跡粒子の初期投入位置は図-10(a)と同じ位置である。72 時間後には湾外に流出し始め、110 時間後にはほぼ 90%以上の粒子が湾外に流出することを確認できた。

平均潮位として湾内が南西側水域よりも高いため、潮通し水路の設置により、若松瀬戸から有福湾を経て滝原瀬戸に向かう恒流が作り出されることが分かった。

6. まとめ

有福湾に潮通し水路の設置が計画され、5 年目にして漸く完成した。その効果を検証しなければならないが、赤潮抑制についてはその発生メカニズムが明らかではない現在、今後の様子を見守り調査資料を蓄積することが必要である。物理的な海水交換については、規模は小さいなりに湾から排出する流れを作り出せているので、当初の目的は達せられていると言えよう。

謝辞：過去の現地観測は環境科学試験所と共同で実施され、蒔田弘明課長ほか所員の方々には大変お世話になった。また、旧若松町および日ノ島漁協には現地調査で便宜を図って頂いた。さらに、現地調査には多くの院生、卒研学生、とくに猶木昌史、古賀美恵子、染矢真作、竹之内健太、宮崎康平、松本武士、中村仁勇、田添慎吾らの諸君には熱心にご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 長崎県水産部：水産のひろば、
http://www.n-suisan.jp/yumetobi/suisanhiroba/gyo_index.html, 2003, 2004 赤潮情報参照
- 2) 土木学会：水理公式集（平成 11 年版），p. 599
- 3) 矢野真一郎 ほか：博多湾の渦動粘性係数・渦動拡散係数の評価法、平成 2 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp. 176-177（1991）
- 4) 岩佐義朗、冨田彰秀、福本育夫：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）
- 5) 平野敏行監修：沿岸の環境圏、フジ・テクノシステム出版、p. 1137（1998）

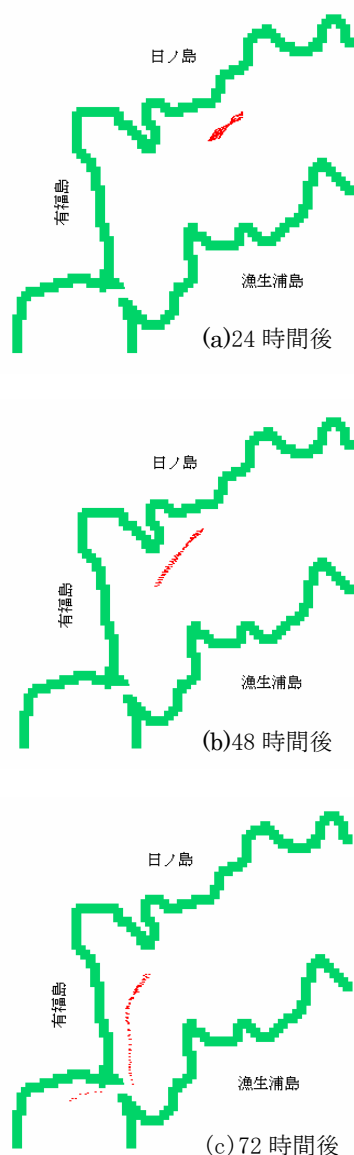


図-11 粒子移流シミュレーション（水路あり）