

長崎湾の副振動による物質輸送に関する研究

橋口 剛*・富樫宏由**・余 錫平***

1. 緒 言

長崎湾にはアビキと呼ばれる副振動が存在し、波高増幅による異常潮位と強い流速変動を引き起こす。そのために波高の大きなアビキは船舶災害等の原因となる。この大きなアビキの発生は冬期から春先にかけて集中しているが、波高が比較的小さなアビキは常時起こっている。この様に恒常的に発生するアビキによって、長崎湾の流況は複雑に変化していることが予想され、物質の移動にも大きく影響しているものと思われる。従来のアビキの研究では防災的な視点に主眼が置かれ、多くの研究が成されており、災害をもたらす大アビキの物理的機構はほぼ解明されてきているように思われる(例えば富樫ら, 1986)。しかし、アビキによる流動が物質輸送を促すという視点に立った研究は未だ成されていない。従って、本研究は後者の視点に立ち、恒常的に発生している小アビキが長崎湾の流動と物質拡散及び海水交換に与える影響について数値解析を行い、アビキによる湾内水の浄化機能を明らかにすると共に、長崎湾における自然浄化機構をより多角的に解明することを目的としている。

2. 基礎方程式

静水面上に x, y 座標をとり、水深方向に積分して平均化し、平面2次元化した連続方程式とナビエ・ストークスの運動方程式及び拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ (\eta + h) u_j \} = 0, \quad i, j = 1, 2 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + g \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{gn^2 u_i \sqrt{u_j u_j}}{(\eta + h)^{4/3}} - \frac{E}{\eta + h} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\eta + h) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} - \frac{D}{\eta + h} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\eta + h) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right\} - q = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 u_i は x_i 方向の成分流速、 η は水面変動、 h は水深、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数、 E は水

平渦動粘性係数、 C は濃度、 D は水平渦動拡散係数、 q は負荷流入量、 x_i は直交座標、 t は時間である。

基礎方程式の離散化については、空間方向には有限要素法、時間方向には陽的 2 Step Lax-Wendroff 法を用いた(川原ら, 1976)。

3. 流動解析

長波流れの計算条件については、三角形要素分割によるメッシュ間隔は平均 $\Delta l = 200$ m、時間刻みは $\Delta t = 5$ s、マンニングの粗度係数は $n = 0.02$ 、水平渦動粘性係数は $E = 20 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

本番の流動解析に先立ち、本解析法の妥当性を検証するために、長崎県臨海開発局(1986)により図-1に○印で示す観測点で行われた大潮期(振幅 120.5 cm)の15昼夜連続潮流観測に基づく潮流楕円の解析結果と本数値計算結果を比較したものを図-2(a)~(c)に示す。図-2(a), (b)は湾外部故流向及び流速の大きさに少し違いがあつて若干再現性に劣るが、(c)の湾内中央部では流向、流速共に比較的良く再現されている。

アビキによる長崎湾の流動変化を検討するために、2つのケースで比較計算を行った。Case 1は潮汐による場合で、Case 2は潮汐とアビキを重ね合わせた場合であ

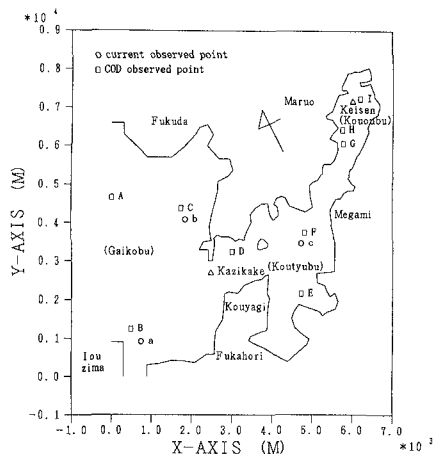


図-1 潮流及び水質観測点

* 正会員 工修 復建調査設計(株)
 ** 正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科
 *** 正会員 工博 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科

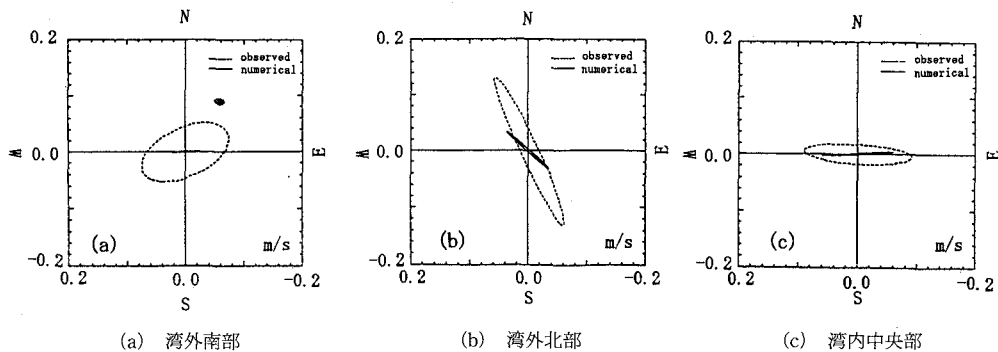


図-2 湾外南部・北部及び湾内中央部における潮流橋円

る。アビキは本来不規則波であるが、本計算では正弦波として取扱うことにした。その波高は増幅効果により湾奥部で約 30 cm となるように入射波振幅を 5 cm に設定した。この場合の潮汐振幅は中潮期平均で 83.4 cm である。Case 2 で残差流成分を求めるためには、アビキの周期が潮汐周期の約数となる必要がある。そこで、潮汐周

期を 12 時間 25 分 30 秒とした時の、アビキの周期は 35 分 30 秒と設定した。この値は、統計的に出現頻度が最多で、ほぼ長崎湾の固有周期に等しい。

図-3 は Case 2 の湾中央部における計算開始から 3 周期目の 1 潮汐分の波高と流速の経時変化である。小刻みな振動はアビキによる振動であり、大きな振動は潮汐

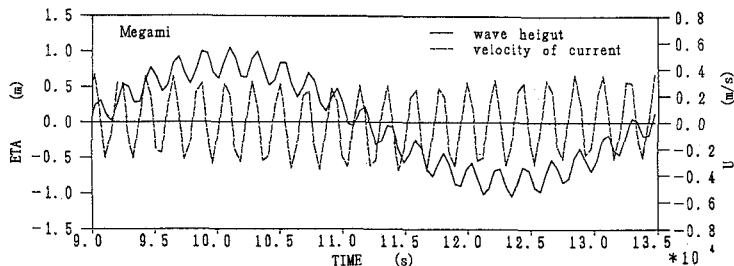


図-3 女神沖における波高と流速の経時変化

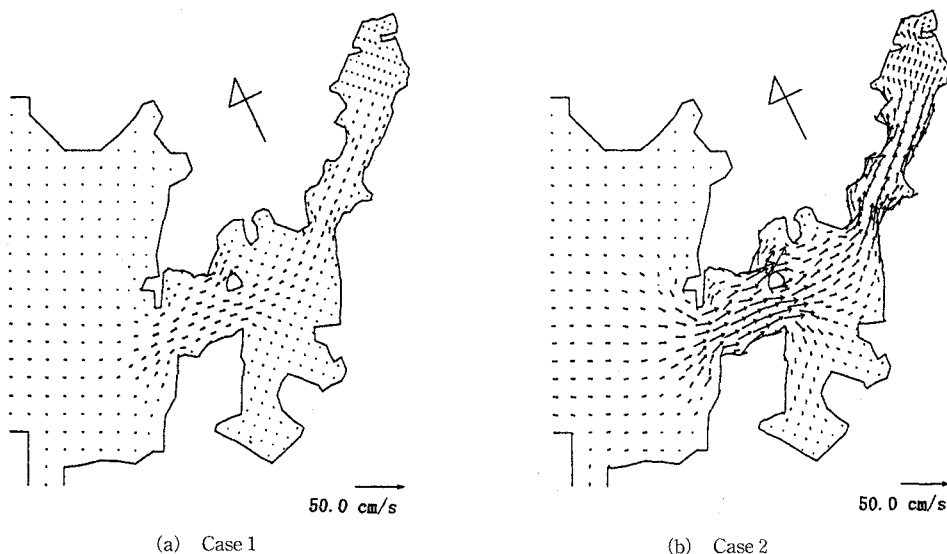


図-4 Case 1, 2 における上げ潮最大流速時の流況

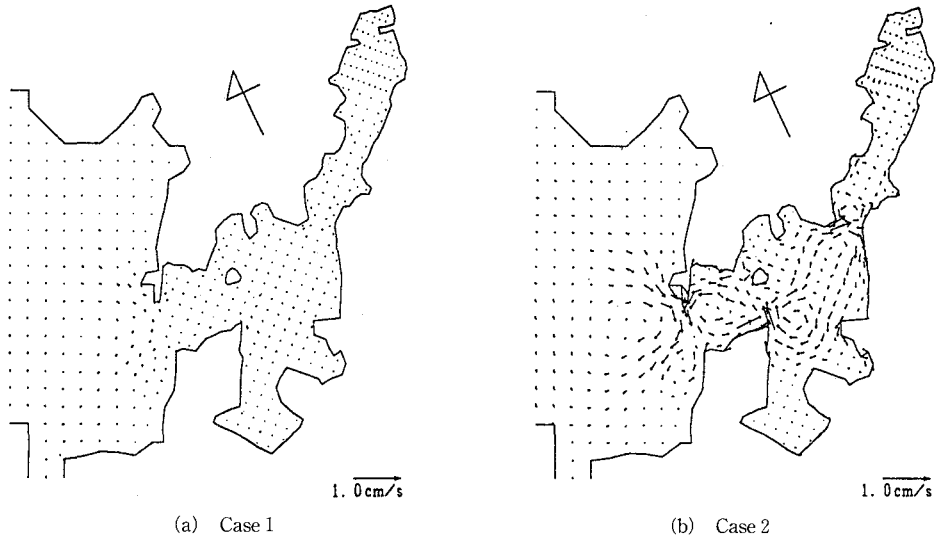


図-5 Case 1, 2における残差流

振動である。この図では特に流速振動が目立っている。これはアビキの流速が最大 12 cm/s であるのに対して、潮流は最大 8 cm/s でアビキの 2/3 程度しかないために、潮流の最大振幅時でもその流向が逆転するためである。

Case 1, 2 における上げ潮最大流速時の流況を図-4 (a), (b) に示す。流速の最大値は図-4(a) から Case 1 の場合には神之島～香焼間の海峡部で最大 8 cm/s であるのに比べ、図-4(b) から Case 2 では神之島～高鉾島間と女神の海峡部で 35 cm/s 程もあり、Case 2 の場合が非常に大きいことがわかる。従って、小アビキでも長崎湾の流況には大きく影響していることがわかる。

この場合の Case 1, 2 における残差流成分を図-5(a), (b) に示す。図-5(a) から Case 1 の残差流成分は 0.01 cm/s 程度のオーダーで、潮流による残差流は殆ど無いに等しいことがわかる。一方、図-5(b) から Case 2 の残差流成分は 0.1 cm/s 程度のオーダーであり、振動成分に比べて数値計算の誤差と同程度に小さいものの、Case 1 のそれよりはるかに大きく、アビキが残差流の生成にも大きく寄与していることがわかる。

4. 物質拡散解析

長崎湾における水質観測は長崎県臨海開発局 (1986) によって行われており、汚濁指標には COD 濃度を用いて、沿岸 40 点における汚濁負荷流入量が算定され、また湾内濃度分布も観測されている。

そこでこれを参考として、上述の Case 1, 2 の残差流を移流項とする湾内拡散計算を行った。計算条件としては、時間刻み $\Delta t = 50$ s, 水平渦動拡散係数 $D = 6 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。初期条件と境界条件については、長崎県の実測によ

る濃度分布を勘案して、初期値は全節点で 1.0 ppm, 湾外部の開境界でも常に 1.0 ppm の濃度となるように設定し、汚濁負荷流入量は長崎湾内沿岸に 40 点ある投入点から定常的に一定値を与えた。

図-6 は、図-1 に□印 (A~I) で示す観測点の COD 観測値と Case 1 による計算結果を比較したものである。図中の棒線は観測値の最大値と最小値を表している。観測値と計算値は非常に良く一致しており、本シミュレーション・モデル解析法の妥当性が検証された。

図-7 に示す 2 本の実線の内、○印と△印はそれぞれ

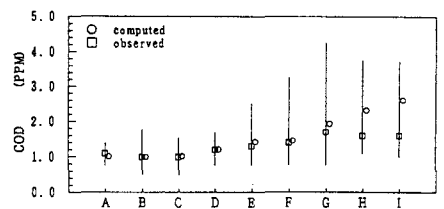


図-6 COD の観測値と計算値の比較

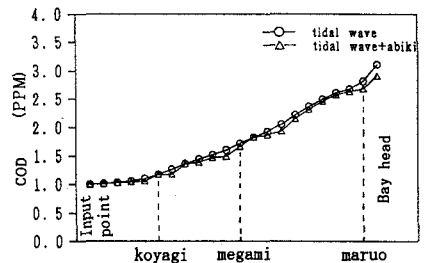


図-7 湾軸方向の濃度分布図

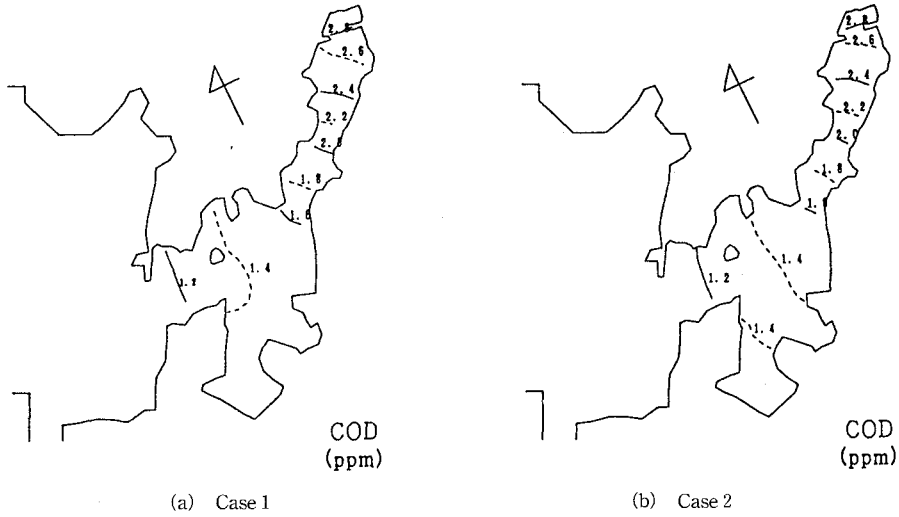


図-8 Case 1, 2 による COD 等濃度線分布図

Case 1, 2 における 100 潮汐周期目の湾軸方向の濃度分布図である。これによると Case 1 より Case 2 の方が濃度勾配がやや小さいことがわかる。これを平面的に見た等濃度線分布図が図-8(a), (b)である。Case 1, 2 を比較しても一見して識別出来るような大きな変化は見られないが、湾中央部の低濃度域付近では Case 2 の方がやや希釈されていることがわかる。これらの結果は Case 2 の方が拡散をより促進したものと解釈される。

5. 海水交換解析

オイラー的に計算された平面 2 次元流れ場において、水粒子に標識を付けてラグランジュ的に追跡するオイラー・ラグランジュの方法 (今里, 1993) によって海水交換を計算する。図-9 に示すように、ここでは長崎湾内の海峡部と見做される 3 箇所に境界 1~3 (B1~3) を設定し、各境界毎に潮汐の憩流時から計算を開始して、1 周期間にこの境界を通して流入・出または流出・入する水粒子を追跡して海水交換の解析を行った。

図-10(a), (b) は Case 1, 図-11(a), (b) は Case 2 によって境界 B2 を通して湾内に流入する水塊の最大流入時と 1 周期後の最大流出時の水粒子分布を示す。図-10(a), 図-11(a) に示されるように、境界を通して湾内に流入する水粒子の分布は Case 1 に比べて Case 2 の方が広範囲に及んでおり、Case 2 の方が流入する水塊が多いことを示している。また、図-10(b), 図-11(b) に示される 1 周期後の湾内に残存する水粒子の量も Case 1 に比べて Case 2 の方が多い。しかし、Case 1, 2 の水粒子の分布は全体的には同様の分布形状を示しており、この程度の時間スケールにおける物質の輸送には、周期の長い潮汐の方が周期の短いアピキに比べて影響が大きいこ

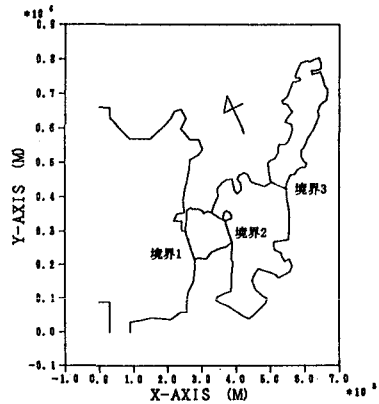


図-9 海水交換の計算に用いた境界

とを示している。従って、この場合のアピキの動きは潮流によって運ばれた水粒子をその小刻みな振動によってより広範囲に輸送するということである。

海水交換率は、境界を通して 1 潮汐間に流入・流出する水塊の流量 Q_f と Q_e が等しいと仮定した今本・大年 (1991) の定義による次式を用いた。

$$r_f = \frac{Q_s(\text{新流入水塊の流量})}{Q_f(\text{全流入水塊の流量})} = \frac{Q_{er}}{Q_e} \dots\dots\dots (4)$$

$$r_e = \frac{Q_b(\text{新流出水塊の流量})}{Q_e(\text{全流出水塊の流量})} = \frac{Q_{fr}}{Q_f} \dots\dots\dots (5)$$

1 周期後に湾外に残存している水塊の体積 / 湾外に湾内水が最も多く存在する時の水塊の体積

表-1 に各境界において算出された流入係数 r_f と流

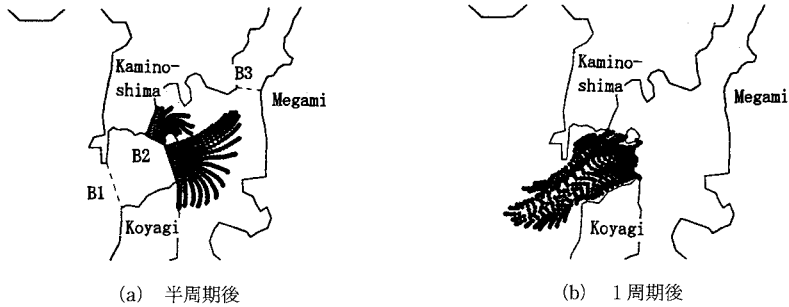


図-10 Case 1 による水粒子の分布

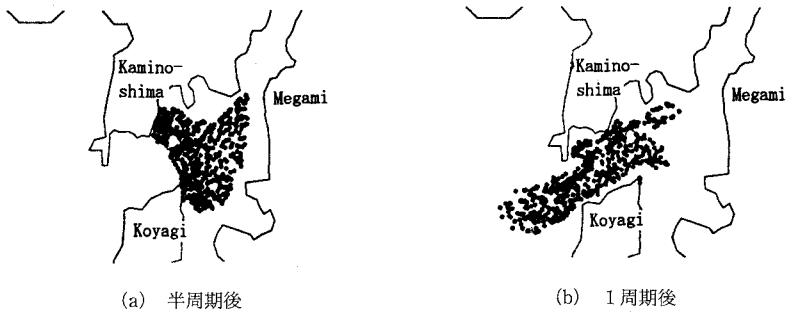


図-11 Case 2 による水粒子の分布

出係数 r_e を示す. Case 1 における海水交換率はどの海域においても約 0.1 以下となっていて非常に小さい. これに対して Case 2 における海水交換率は 0.3 程度で, Case 1 に比べると非常に大きい. 従って, 長崎湾の海水交換を論じる際にはアビキの評価が重要であることが示された.

6. 結 論

1) 流動計算の結果から, 潮汐とアビキを重ね合わせた場合は, 潮汐のみの場合に比べて全体的に流速を大きくすると共に, 流況への影響もより湾奥側で大きいことが分かった. また, 潮汐のみの場合には残差流は殆ど発生しないが, 潮汐にアビキを重ね合わせた残差流は数値計算の誤差を考慮しても尚かつはるかに大きくなることが分かった. 従って, アビキが湾内の流動に大きく影響することが明らかとなった.

2) 湾内拡散計算の結果から, 潮汐とアビキを重ね合わせた場合の方が, 潮汐のみの場合に比べて湾内濃度分布・濃度勾配は共に小さくなった. 従って, アビキが湾

内拡散を促進することを明らかにした.

3) 海水交換計算の結果から, アビキと潮汐を重ね合わせた場合と潮汐のみの場合の水粒子の分布は, その傾向には大きな違いはなかったが, アビキと潮汐を重ね合わせた場合の方が水粒子はより広域に分布することが分かった. 従って, 水粒子は主に周期の長い潮流によって輸送され, 更にアビキ振動によってより広域に輸送されることになる. また, 海水交換率は潮汐のみの場合には約 0.1 以下であり, 長崎湾では潮流のみによっては海水交換が起こりにくいことが分かり, 潮汐とアビキを重ね合わせた場合の海水交換率は 0.3 程度であり, 正しくアビキによって海水交換が促進されることが解明された.

表-1 海水交換率

境界	Case	r_f or r_e
1	1	$r_e=0.078$
	2	$r_e=0.306$
2	1	$r_f=0.105$ $r_e=0.040$
	2	$r_f=0.152$ $r_e=0.304$
3	1	$r_f=0.072$ $r_e=0.004$
	2	$r_f=0.295$ $r_e=0.356$

参 考 文 献

今里哲久 (1993): 海水交換の概念と交換率; 沿岸海洋研究ノート, 30 周年記念特別号, pp. 111-123.
 今本博健・大年邦雄 (1991): 閉鎖性海域の海水交換に関する研究; 京都大学防災研究所年報, 第 34 号 B-2, pp. 401-409.
 川原睦人・竹内則雄・首藤伸夫 (1976): 2 段階ラックス・ウェンドロフ有限要素法による潮汐流解析; 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 498-501.
 富樫宏由・中村武弘・新田喜浩 (1986): 長崎湾のアビキの有限要素法による解析と河川遡上の現地観測; 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 80-84.