

徳山湾を対象とした停滞性水域の海水交換機構に関する研究

水工学研究室：清田 晃平

指導教官：細山田 得三

1. はじめに

一般的に、閉鎖性海域では、湾口部付近の潮汐流などにより生成される水平循環流と、湾奥部の海水交換性の悪い停滞性水域が存在している。その停滞性水域沿岸は、流れが静穏な水域であるが、人口が集中し、かつ工業地帯が多く存在するために、生活排水や工業排水が多量に流入しており、水質環境を悪化させている。このような停滞性水域の環境保全策には、汚染物質の流入を制御する方法や、湾内の流況を改善させ、海水交換率を向上させる方法などがある。

2. 研究目的

本研究では、これらの環境保全策の中で、海の流れを利用した海水交換による自然浄化作用に着目し、閉鎖性水域の効率的な水質環境改善技術を開発することを目的とする。特に、閉鎖性海域が多く存在する瀬戸内海の中で徳山湾を例に、閉鎖性水域の流動特性を把握し、効率的な海水交換改善条件の把握を試みた。

徳山湾周辺では潮汐流が卓越するので、潮汐流の数値シミュレーションを行った。結果は水理模型実験の結果と比較し、計算の精度を確認した。さらに、地形変換により流況を改変させ、改変前後の流動特性を比較・検討し、効率的な海水交換改善条件の把握を試みた。

3. 数値解析法

流れの平面2次元モデルを用いて、潮流を考慮した流れの基本式は、水深方向に積分した平面二次元の長波方程式によって次のように示される。本研究では、これらの式を陽的に差分化し、平面2次元の流れの計算を行った。

連続式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)v] = 0$$

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{gu \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{gv \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0$$

ここに、 t ：時間

g ：重力加速度

C ：Chezy係数

f ：コリオリ係数

u, v ： x, y 方向の速度

h ：水深

A_h ：水平渦動粘性係数

ζ ：水面の高さ

4. 計算条件

本研究では、山崎らが行った、代表的な閉鎖性矩形湾を対象とした水理実験と同様のモデルを対象とし計算を行った後、徳山湾の実地形を対象として計算を行った。

(1) 閉鎖性矩形湾

閉鎖性矩形湾モデルでの計算条件は、山崎らの水理実験の条件に合わせ、湾口部の地形、潮汐の振幅、周期を8通りに変化させたケース（表-1参照）について計算を行った。表-2に、閉鎖性矩形湾モデルにおける計算条件を示す。また、閉鎖性矩形湾モデルの鳥瞰図を図-1に示す。

表-1 計算ケース

CASE	湾口部地形	湾内水深 (cm)	周期 (秒)	振幅 (cm)
case1	深みあり	7	180	0.5
case2	深みあり	10.5	180	0.5
case3	深みあり	10.5	240	0.5
case4	深みあり	10.5	180	0.7
case5	埋め込み	7	180	0.5
case6	埋め込み	10.5	180	0.5
case7	埋め込み	10.5	240	0.5
case8	埋め込み	10.5	180	0.7

表-2 計算条件

諸元	
格子間隔 (s)	6cm
タイム・ステップ (t)	1.0 ⁻⁶ 秒
コリオリ力 (f)	考慮しない
河川流入	なし
初期条件	水位、流速共に全域で0
粗度係数 (n)	0.015
水平渦動粘性係数	0.15cm ² /s

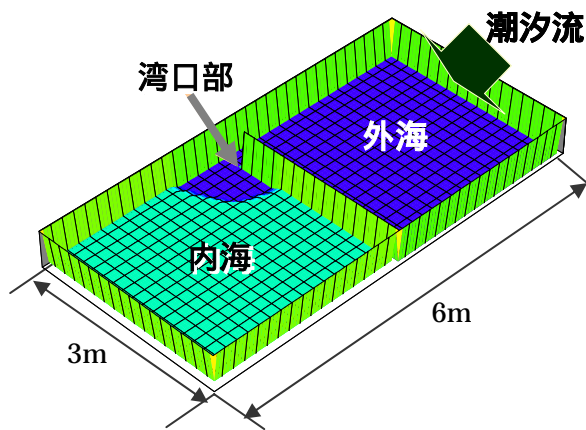


図-1 閉鎖性矩形湾鳥瞰図

(2) 閉鎖性矩形湾

徳山湾の所在地を、図-2 に示す。また、徳山湾の鳥瞰図を図-3 に示す。計算パターンは徳山湾の湾口部の地形が従来の地形(地形1)、20m以深を埋め込んだ地形(地形2)の2つのパターンである。主な計算条件は表-3の通りである。

表-3 徳山湾の計算条件

諸元	
格子間隔 (S)	200m
タイム・ステップ (t)	6.0秒
コリオリ係数 (f)	$f = 2 \sin \phi = 8 \times 10^{-5}$
粗度係数 (n)	0.050
初期条件	水位、流速ともに全域で0
水平渦動粘性係数	$2.0 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$

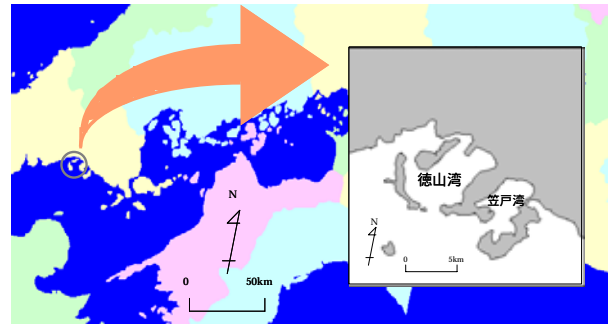


図-2 徳山湾の所在

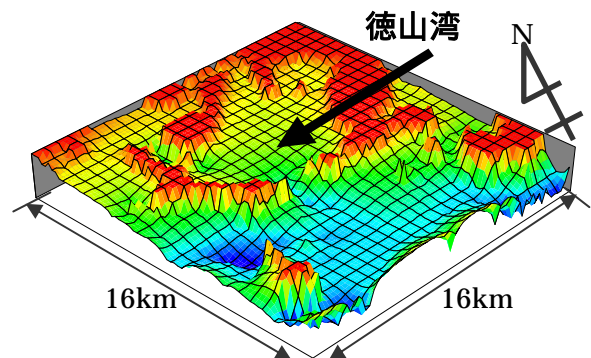


図-3 徳山湾鳥瞰図

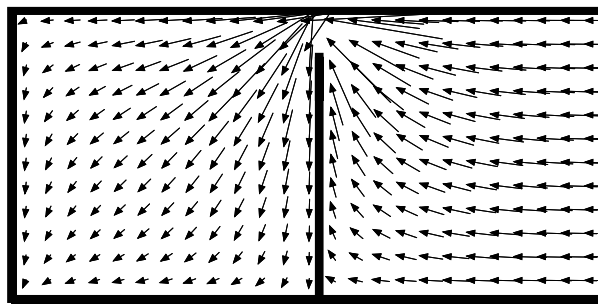
5. 計算結果

(1) 閉鎖性矩形湾

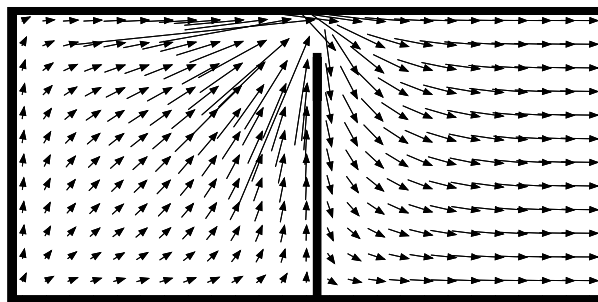
(a) 流速

図-4 に、CASE8 での上げ潮最大時、下げ潮最大時の流速ベクトル図を示す。上げ潮、下げ潮時最強時共に湾内中央から湾口部に向け、流速が増加する。また、湾奥部では双方共に流速が小さく、停滞水域となっていることが確認できる。

図-5 に湾口部を埋め立てた場合 (CASE8) と、埋め立てない場合 (CASE4) の湾口部の流速変化図を示す。満潮時、干潮時を除くほぼ全ての時間において、CASE8 での流速が大きくなっている。これは、湾口部の地形の埋め込みによる、流速の増加を示しているものである。また、図-6 の湾内全域の流速コンター図より、湾奥部においても、流速が増大していることがわかる。



上げ潮最大時



下げ潮最大時

図-4 流速ベクトル図

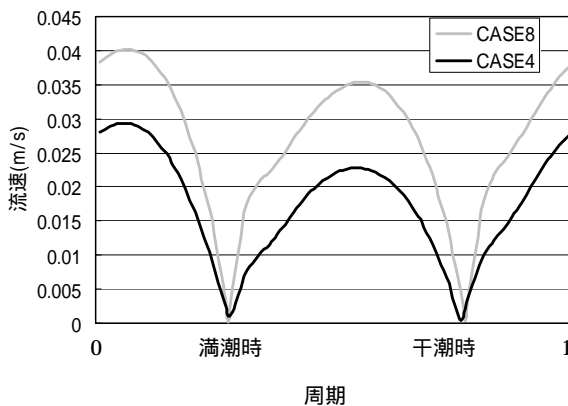


図-5 流速変化図

(b)水位変動

水位変動については、湾奥部、湾口部、外海の3点について検証を行った。検証の結果、3点すべてにおいて、ほぼ位相差がないことが確認できた。

(c)他の流況変化

図-7 に、湾口部を埋め立てた場合 (flat) と深みがある場合 (deep) の湾内全域の平均(絶対値)

対値)である、発散、伸縮、せん断、回転の変化を示す。この図が示す通り、湾内全域の流況変化は、せん断の影響が大きいことがわかる。また、この4つの影響は、湾口部の地形に関係なく、上げ潮最大時に大きくなる傾向がある。さらに、湾口部を埋め立てた場合 (flat) では埋め込まない場合 (deep) に比べ、流況変化が大きくなることが確認できた。特にせん断の影響が大きく、せん断は湾口部、湾奥部のすべての湾内に影響をもたらしていることを考えると、湾奥部においても流況の変化は大きいものであることがわかる。

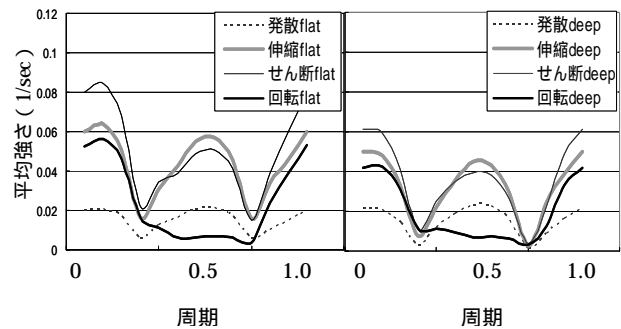


図-7 流況変化

(d) 海水交換率

最終的な海水交換率の評価は、拡散計算による湾内全域の濃度変化で行った。流れが安定する3周期目の満潮時に、湾内全域の格子に濃度1.0を与え、湾内全域の濃度が半減する半減期、1/4になる1/4期における周期を調べた。図-8に、湾口部の地形を変化させた場合(CASE4とCASE8の比較)における、濃度半減期、1/4減期を示す。

これによると、湾内の濃度が半減する周期はCASE4(深みあり)で5.18周期、CASE8(深みなし)で4.24周期となり、約1周期の差があることが確認できる。さらに1/4期においては、CASE4(深みあり)で11.07周期、CASE8(深みなし)で8.4周期となり、約3周期の差があることがわかる。つまり、湾内の濃度が小

さくなるほど、海水交換時間差が大きくなることになる。この結果より、海水交換速度に関しても、湾口部の地形を埋め込むことにより交換率が良いということになる。

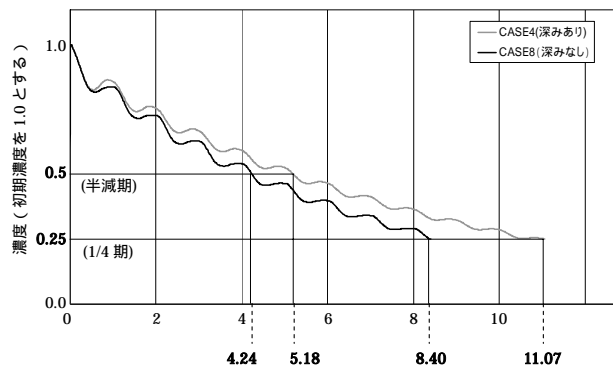


図-7 湾内の濃度変化

(2) 徳山湾

徳山湾の湾口部地形の違いによる、湾口部の流速変化図を図-8 示す。また、地形別による湾全域の流速を図-9 に示す。これによると、湾口部における流速の時間的変化については、地形 2 での流速が終始大きいことが確認できる。湾内全域の流速は、湾口部から湾中央部にかけて地形 2 の流速が大きい。これは、閉鎖性矩形湾と同様である。しかし、湾奥部に関して、閉鎖性矩形湾では湾口部の埋め込みによる流速の増大は確認できたが、徳山湾では、顕著な流速の変化は見られない。これは、実地形(徳山湾)では、本研究で対象とした閉鎖性矩形湾と比較すると、地形が複雑化しているためだと思われる。また、スケール効果の影響もあると考えられる。流れ成分方向に関しては、地形 1、地形 2 共に閉鎖性矩形湾と同様、顕著な変化は見られない。

位相差に関しては、地形の違いによる変化はほぼ見られない。場所別で比較すると、湾外に比べ、湾口部、湾奥部へと移動するに従い、若干ではあるが位相差が大きくなることが確認できた。

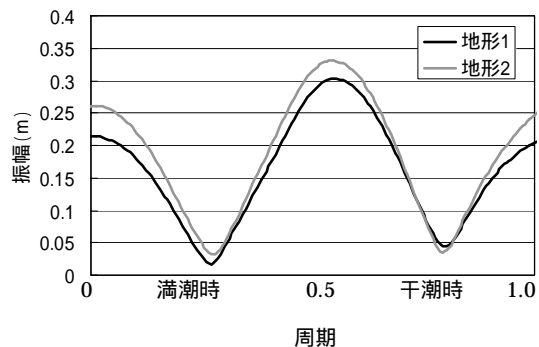


図-8 流速変化図

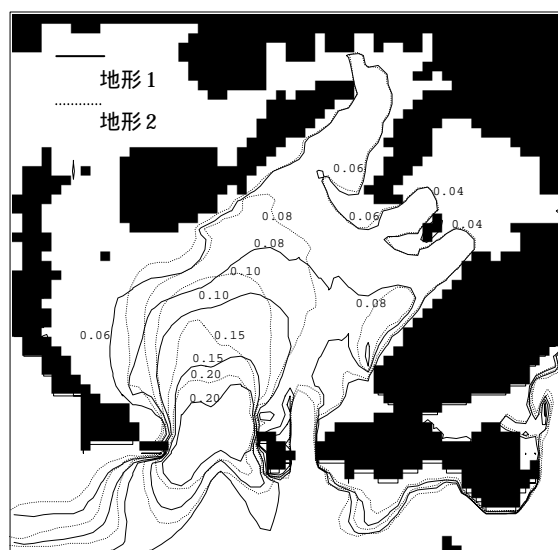


図-9 湾内の流速コンター図

6. 結論

本計算では、山崎らの水理実験と類似した結果が得られたことから、閉鎖性矩形湾モデルの流況を十分に表現しているものである。つまり、湾口部に深みがある湾においては、その箇所を埋め込むことにより、流速の増大に伴い海水交換が増加する傾向がある。さらに、山崎らの結果に付け加え、対象とした閉鎖性矩形湾では、せん断の影響が非常に大きく、これが流れに最も依存していることが確認できた。また、徳山湾奥部の流況の変化についても、閉鎖性矩形湾と似た傾向が確認できた。今後は、停滞性水域の更なる流況増大のための検討が望まれる。