

## 1. 研究の背景及び目的

閉鎖性の強い内湾においては、外海との海水交換が少ないことによる水質の悪化が進行しがちである。近年水質汚濁が環境基準を超える状況が継続し、夏期には貧酸素水塊の発生が恒常化している内湾が、日本国内でも多く見受けられる。通常魚介類が生息するためには $7\text{mg/l}$ 程度の溶存酸素が必要とされているのに対し、九州北西部に位置する閉鎖的内湾である大村湾では、夏期・下層での測定値が $1\text{mg/l}$ 以下となる場合もある。貧酸素水塊の発生は、下層に蓄積した有機物が分解される際に酸素を消費する一方で、夏期には密度成層が発達して上層と下層の海水混合が妨げられるために、上層から下層へ十分な酸素が供給されないことが原因である。貧酸素水塊は、底生生物の死滅・栄養塩の溶出・赤潮等の発生を促すため、湾内の生態系が破壊され水産・観光及び周辺産業に大きな影響を与える。

この問題に対し、湾内の海底に鉛直方向の流れを強制的に発生させる水質改善装置を設置し、上層から下層への酸素の搬送や下層から上層への栄養塩の搬送を促進することにより、底質の改善及び基礎生産の活性化を目指す計画が進められている。大村湾では水質改善装置の実験的供用も始まっている。しかし、より効率的な装置や設置方法を考案するには、水質改善装置の効果を含む数値実験が有効である。

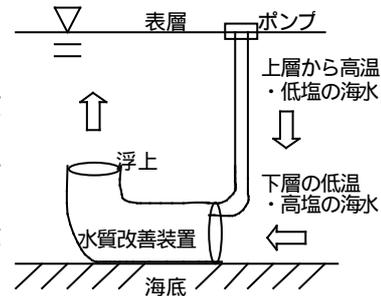


Fig.1 水質改善装置概念図

一方で、従来の内湾における海水流動の数値計算は、流体の圧力は静水圧をもって近似した静水圧近似モデルが主流であり、潮汐流のような鉛直方向の流れが微少である際には十分な精度の再現性が確認されている。しかし、流動攪拌を促すような装置を設置した場合、静水圧だけでなく流水圧をも考慮に含めた3次元計算モデルを用いて計算を行うことが望ましい。しかし、3次元計算を湾内全域で行うと、現在のところ計算時間および計算容量が非現実的なものとなる。よって、鉛直流の発生源付近では3次元計算を行い、装置遠方の湾内全域では静水圧近似計算を行うモデルを用いることが現実的である。

このような背景を踏まえ、以下のことを修士論文の目的とする。

- 局所的に3次元流場を精度よく考慮し、その湾内全域に与える影響を考慮できる流れ・水温・塩分についての計算法を開発し、閉鎖領域を対象として再現性を検証する。
- 異なる計算法による相違を定量的かつ定性的に把握し、それぞれの計算モデルの有効な計算領域について検討する。
- 閉鎖性内湾を対象として、水質改善装置の配置・性能等を検討する事により、効果的な使用法を考案する。

## 2. 数値計算法

## 2.1 支配方程式

座標系として、水平方向を $xy$ 平面とし鉛直上方を $z$ 軸正方向とするデカルト座標系を用いる。 $u, v, w$ 方向の流速をそれぞれ $u, v, w$ 、圧力を $p$ とし、支配方程式を以下のように置く。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + A_M \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_M \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + A_M \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + K_M \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.1) \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3.2)$$

$\rho$ :海水密度、 $g$ :重力加速度、 $A_M, K_M$ :水平および鉛直方向の渦動粘性係数

3次元計算モデルでは鉛直方向の支配方程式として式(1)を用いるが、静水圧近似モデルでは式(3.2)

を用いる[1]。水平方向流速・水温・塩分等についても移流拡散方程式を用いて、計算を行う。また、密度は水温・塩分のみ関数であると近似する。

## 2.2 計算格子

水質改善装置周辺での流況を極力正確に表現するためにFig.2 のような水平方向に局所細分化を施した格子を用いて、装置周辺での計算格子幅を小さくした離散化を行う。また計算コード上は、任意に計算格子間隔・計算時間間隔を設定できるように開発した。計算は差分法を用いた。

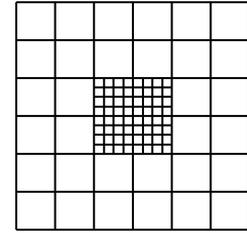


Fig.2 局所細分化格子

## 3. 2つの計算法の有効性について

### 3.1 一端開口矩形領域で潮汐の入射がある場合の計算

水平方向流速が支配的である場合での、計算法による違いを見ることを目的とする。

幅36m×奥行き36m×水深10mで2段階の水平格子間隔を持つ一端開口の矩形領域を用いて、内側領域で3次元計算を行う場合と静水圧近似計算の場合とで、開口部から周期00sec.振幅0.4mの潮汐を入射した場合の計算を行った。なお、水温・塩分は一定とした。

2つの計算法に関してそれぞれの流速分布からは、計算法による相違点は見受けられなかった。また自由表面変位や流速に関する時系列についても同様の結果が得られた。これらより、水平方向の物理スケールが鉛直方向の物理スケールに比べ大きい場合には、静水圧近似は十分に適用可能であることが言える。また、3次元計算は静水圧近似計算より格段に計算時間を必要とするので、このような場合では、可能な限りの範囲で静水圧近似計算を行うことが望ましい。

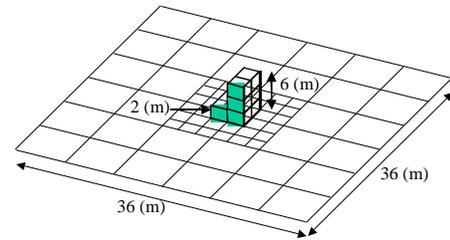


Fig.3 3.2節での海底地形

### 3.2 地形変化が大きい領域における潮汐入射時の計算

海底地形に急峻な起伏がある場合では、起伏に沿っての鉛直流が発生すると予想される。このような鉛直流が存在する場合で、それぞれの計算法による相違を比較検討した。

3.1節と同様の計算条件のもとで、Fig.3で示す海底地形を用いて計算を行った。

Fig.4,5は、内側領域でそれぞれ3次元計算と静水圧近似計算を行った場合の、計算開始4000sec.後の領域中央部xz断面における流速分布である。図中 $i=3\sim 4, k=2\sim 4$ では、静水圧近似計算の方で鉛直流速成分が過大に評価されていることがわかる。3次元計算を行った場合、この部分では壁面の効果として流水圧が高まる。その影響で、 $x$ 方向に流れていた流体が $y, z$ 方向流れへとそれぞれ現実に近い形で変化したと考えることができる。それに対し静水圧近似計算では、壁面の存在による流水圧が考慮されないため、 $x$ 方向に行き場を失った流れが主として $z$ 方向に表現されていると推測できる。想定している水質改善装置のように、鉛直方向に流れを発生させる場合には、浮上する水塊が静止している水塊にぶつかる際の評価が静水圧近似計算では不適當であることがこの結果から容易に想像できる。

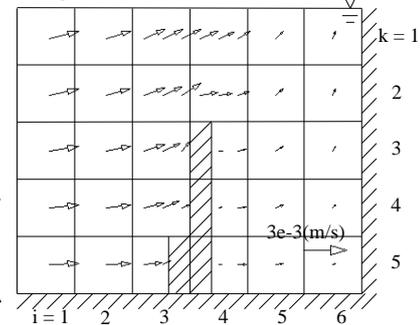


Fig.4 流速分布3次元計算

### 3.3 密度の上下逆転が起こった場合の計算

静水圧近似では、上層では下層より低密度の水塊が存在するという静力学的に安定な条件を仮定している。さらに、密度分布が逆転した場合は、例えば瞬間的に上下の海水が混ざるものとするような近似を用いている。具体例として、海面が冷却される場合を挙げ、これに関して計算法の検証を行った。

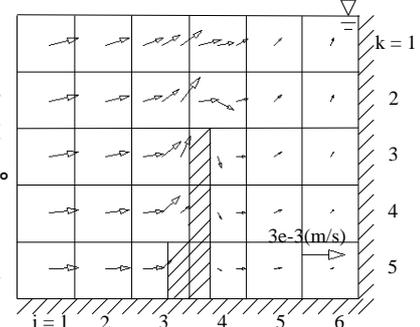


Fig.5 流速分布静水圧近似

3.1節と同様の計算条件ではあるが、領域を完全閉鎖とした。また、水温の初期条件を全領域で25としたが、領域中央部の最上層セルの一部のみ常に5を保つように与えた。

結果の図は省略するが、3次元計算の場合では低温水塊がゆっくり広がりながら下降していくの

に対し、静水圧近似計算では急激に底層まで温度が低下した。鉛直方向流速が静水圧近似のもとでは過大に評価されるために、水温に関する移流拡散方程式の鉛直移流成分が大きくなっているためであろうと推測される。また、3.1節から3.3節の結果から、数値計算によりFig.1のような水質改善装置の影響を評価する場合は、装置近傍で次元計算を行う必要があると言える。

#### 4. 水質改善装置に関する検証計算

##### 4.1 装置のモデル化

モデル化に際し、Fig.6のようなシステムを想定した。図中の灰色部が表層浮体直下の吸い込み用ポンプならびに底層装置本体での計算中特殊処理を行っている部分である。表層から吸い込んだ海水は、直後に底層に輸送されるものと考え、 $\Delta t_{\text{mestep}}$ で装置本体内の海水に反映されるものとする。ある時刻での水温 $T$ が既知であるとし次stepの水温 $T$ を求める際には、この2つ以外のセルでは従来通り移流拡散方程式を解いているが、これらの特殊セルでは単純に混合させる処理のみを行う。またこれらの特殊セルでは、吸い込み・噴き出し面では流量に応じた流速境界を設定し、その他の面(Fig.6中の太線部)では流速境界として0を与えている。

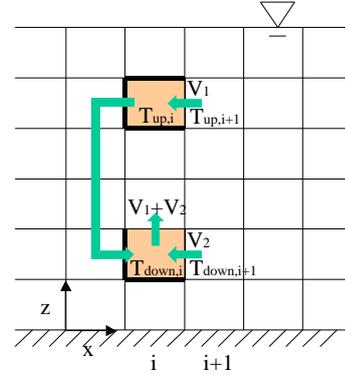


Fig.6 装置モデル化概念図

##### 4.2 閉鎖矩形領域における水質改善装置に関する試算計算

水質改善装置のモデル化が現実的か否かの検証を行った。

幅128m×奥行き128m×水深8mで3段階の水平格子間隔を持つ閉鎖矩形領域を用いて、領域中央部付近で水質改善装置を稼働させた計算を行った。最内領域では次元計算を行った。初期条件として21から24の温度成層を与えた。また、噴き出し・吸い込みの流量は、大村湾で実際に供用されていた装置のスペックに合わせた2。

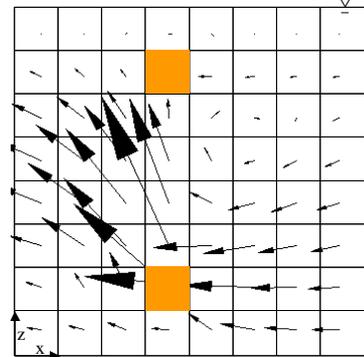


Fig.7 中央部xz断面速度分布

Fig.7は計算開始24時間後の領域中央部xz断面における最内領域のみの速度分布である。また水温分布の結果からは、時間が経過するに連れ徐々に成層が破壊される様子が見られた。よって、モデル化および計算コードとして、定性的に矛盾点が見られないものであるということが確認できた。

##### 4.3 次元計算の領域範囲設定に関する検証計算

それぞれ計算法の有効な計算領域を特定することを目的とする。

320m四方で水深20m(8層)の閉鎖領域を設定し、水質改善装置が大村湾での0倍の流量で稼働している場合の計算を3通り行った。ただしそれぞれの計算では、最内領域の3次元計算部分を20m四方(試算1),40m四方(試算2),80m四方(試算3)とする。初期条件として温度成層を与えた。

Fig.8,9,10に計算開始15分後のそれぞれ試算1~3の装置近傍におけるxz平面の温度分布を示す。これらの結果では、試算1と3は大きな相違は見られないが、試算2とは様子が異なる。流速分布についても同様の結果となった。試算1が十分な3次元領域を設定していると仮定すると、この計算条件では試算1の領域設定でも妥当であると判断できるため、実海域でのシミュレ

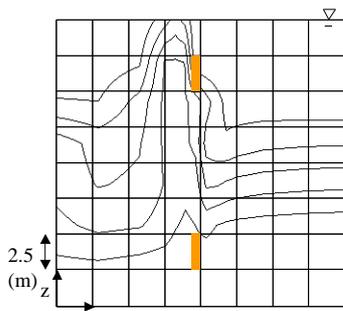


Fig.8 試算1の水温分布

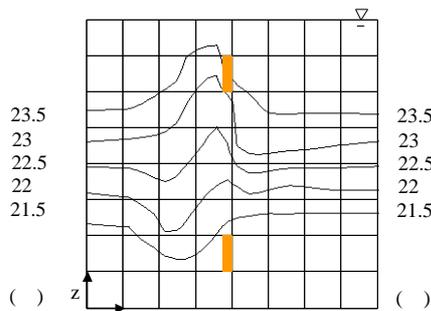


Fig.9 試算2の水温分布

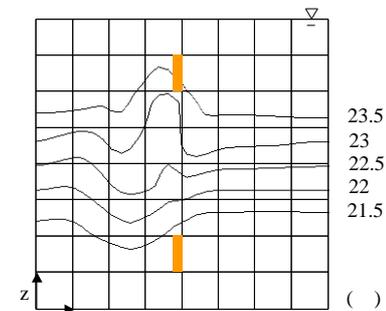


Fig.10 試算3の水温分布

ーションでは試計算2のような格子設定を用いる。また、この計算例での鉛直噴出流速は最大で0.1m/sec.程度であったが、この条件では水平40m 四方以上の3次元領域範囲が望ましいと言える。

### 5. 大村湾における水質改善装置のシミュレーション

大村湾において、水質改善装置稼働時の計算を行ったFig.11は計算に用いた大村湾の格子分割図であり、水平方向は0.24m間隔の格子である。図中斜線部は格子分割を細分化した領域であり、中央部に水質改善装置を設置した。

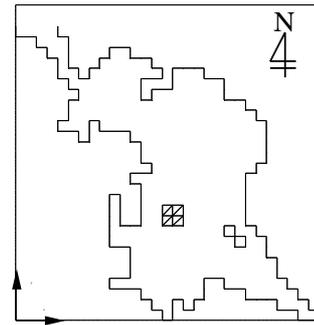


Fig.11 大村湾の格子分割

#### 5.1 仮想変数の導入

水質改善装置による環境改善を定量的に把握するために、仮想変数  $F_i$  を導入する。これは、初期状態である場所での仮想変数  $F_i$  を1とし、その他の場所では  $F_i=0$  とした上で、移流拡散方程式を解くことにより、水質改善装置による海水の拡散状況の把握を目的としている。例えば、 $F_i=1$  が初期状態で貧酸素水域にある海水を表すとすると、それが広範囲かつ大量に拡散しているほど、貧酸素水塊が解消されていると判断できる。

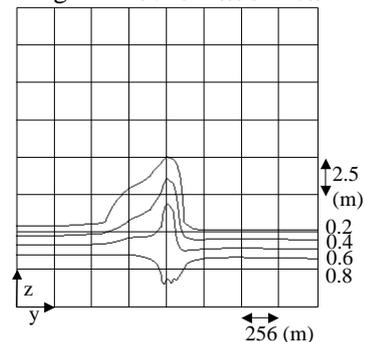


Fig.12 仮想変数分布試計算b)

#### 5.2 計算条件

大村湾が湾中央部で水深が20m程度であることを考慮し、15m以深で  $F_i=1$  としその他で  $F_i=0$  とした。また、夏期の密度分布を想定して、水温成層・塩分成層を与えた。湾北端の開境界より半日

周期の潮汐を入射し、装置が稼働していない場合(試計算 a)と、実際の装置流量に合わせて稼働させた場合(試計算 b)、噴出流量を10倍にした場合(試計算c)の3通りの計算を行った。

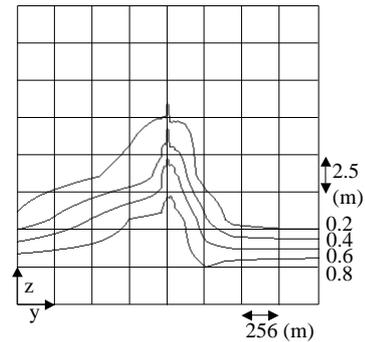


Fig.13 仮想変数分布試計算c)

#### 5.3 計算結果および考察

試計算bおよび試計算cに関して、6時間後の斜線部南北断面における  $F_i$  分布をFig.12,13に示す。一方、試計算aの  $F_i$  の分布は初期状態とほとんど変化がなかった。Fig.12,13より底層水が混合されながら持ち上げられている様子が確認でき、さらに潮汐によって南方へ移流されていることがわかる。流量による相違は顕著に見られ、拡散を早める効果

があるかと推測できる。ただし、局所的に底層水を持ち上げる効果はあるが、浮上した水塊の水平方向移流が弱い。図の左右両端では底層水は移動していないため、広域に渡る貧酸素改善には長時間を要すると思われる。

### 6. 結論

局所的に鉛直流を精度良く考慮することができる計算モデルを開発し、水平方向の物理スケールが鉛直方向に比べ大きい場合には静水圧近似が適用可能であるが、急激な変化が存在する際には次元計算が必要であることを示した。また、3次元計算の領域設定の違いがもたらす計算結果例を取り上げ、領域設定の目安を提案することができた。実海域における水質改善装置は、底層水の上方への噴き出しが潮汐とともに拡散し、局所的には改善効果がある。さらに、噴出流量を増すことで、早急な改善効果が見られる。しかし広域の環境改善のためには、装置の複数個設置や、下層から吸い込んだ海水を上層または中層から水平方向に噴き出すことにより、広域の循環流の発生誘起を狙うことが効果的であろう。今後は、水質改善装置のスペックを様々に変化させた計算例を行い、更なる海洋環境改善効果が期待できる装置使用方法についての検証が必要である。また、より定量的な改善効果を予測するためには、生物・化学過程の計算コードへの導入が必要であろう。

### 7. 参考文献

- [1] 藤井 孝蔵：流体力学の数値計算法、東京大学出版会(1995)
- [2] 工藤 君明：流動攪拌システムの流力性能、海洋科学技術センター試験研究報告(42, pp.139-153, 2000)