

閉鎖性内湾における水質改善装置の効果に関する 数値シミュレーション

環境システムコース 海洋環境工学研究室
指導教官

藤野 正隆 教授 ・ 多部田 茂 助教授

96609 豊田 聖史

1. 研究の背景

閉鎖性の強い内湾では、水質の悪化が進行

- 夏期には、上層と下層で大きな密度差(密度成層の形成)
- 密度成層により、上層と下層の間での海水混合が妨げられる
- 下層の方では、酸素が一方向的に減少
- そのため、下層では貧酸素水塊が発生

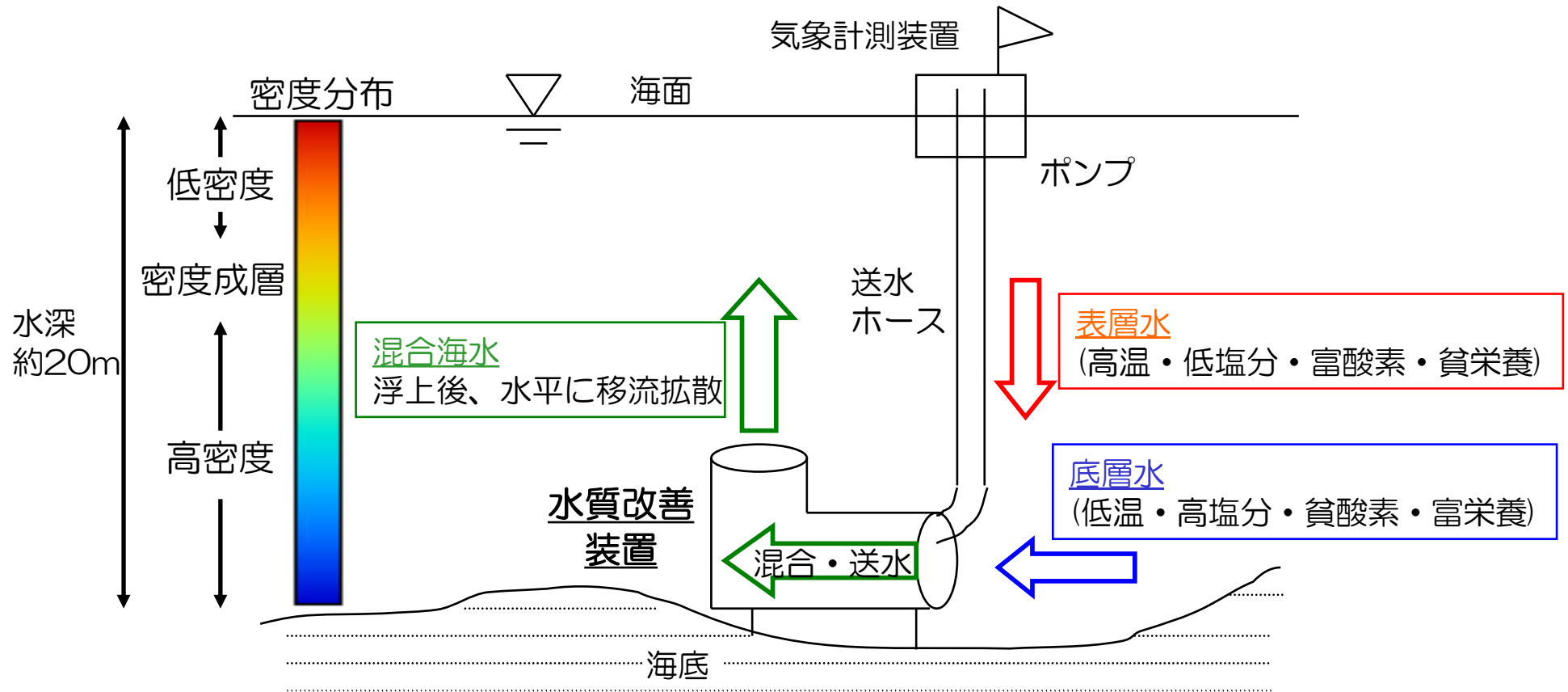
 貧酸素水塊が発生すると...

- 貧酸素水塊により底生生物が減少
- 栄養塩の流出(富栄養化)が進み、赤潮等が発生
- 湾内の生態系が破壊

 密度成層を解消するには...

- 湾内海底に鉛直方向の流れを強制的に発生させる装置(水質改善装置)を設置
- 大村湾、五ヶ所湾等では、水質改善装置の実験的供用

大村湾における水質改善装置の供用概念図

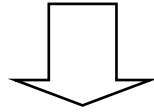


上層から下層への酸素の搬送や下層から上層への栄養塩の搬送を促進することにより、底質の改善及び基礎生産の活性化を目指す計画が進められている。

大村湾において、1999年夏期に一ヶ月程度の水質改善装置の実験的供用が行われ、流速・水温・塩分・密度・クロロフィルa・溶存酸素・透過度・pHなどが計測された。

効果的な水質改善装置を考案するには...

- 実海域で実験を行うには莫大なコストがかかる
- 模型実験では再現性に疑問



数値実験が有効

計算モデルは...

3次元計算モデル

鉛直流も精度良く再現できる
計算時間が非常にかかる

静水圧近似モデル

鉛直流卓越場では不向き
計算時間が少ない

結合

装置近傍では3次元計算
装置遠方の湾内全域では静水圧近似計算

2. 研究の目的

- 計算法の開発

局所的に3次元流れを精度よく考慮し、その湾内全域に与える影響を考慮することができる流速・水温・塩分についての計算法を開発する。

- 計算モデルの有効領域の検討

異なる計算法による相違を定量的かつ定性的に把握し、どの程度の範囲を対象に3次元計算を行うべきかを考慮する。また、異なる計算モデルの有効な計算領域を設定する。

- 装置の効果的使用法の考案

閉鎖性内湾を対象として数値実験を行い、水質改善装置の性能等を検討する事により、効果的な使用法を考案する。

3. 数値モデル

3.1 支配方程式

座標系として、平均水面上に原点をとり水平方向を 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。

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

u, v, w : x, y, z 方向流速
 p : 圧力
 T : 水温
 S : 塩分

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

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

← 3次元計算の場合

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3.2) \quad \leftarrow \text{静水圧近似計算の場合}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ρ : 海水密度
 f : コリオリパラメータ
 g : 重力加速度

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_C \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_C \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

A_M, K_M : 水平及び鉛直方向の
渦動粘性係数

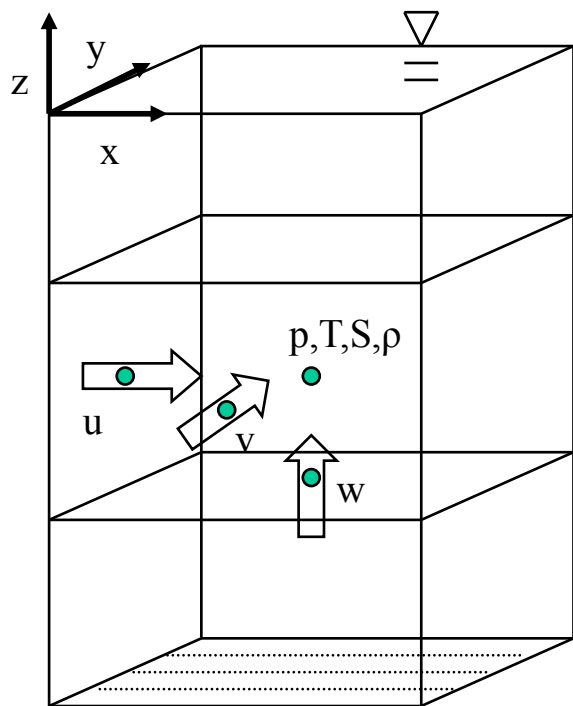
A_C, K_C : 水平及び鉛直方向の
渦動拡散係数

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_C \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_C \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \Delta R \quad (6)$$

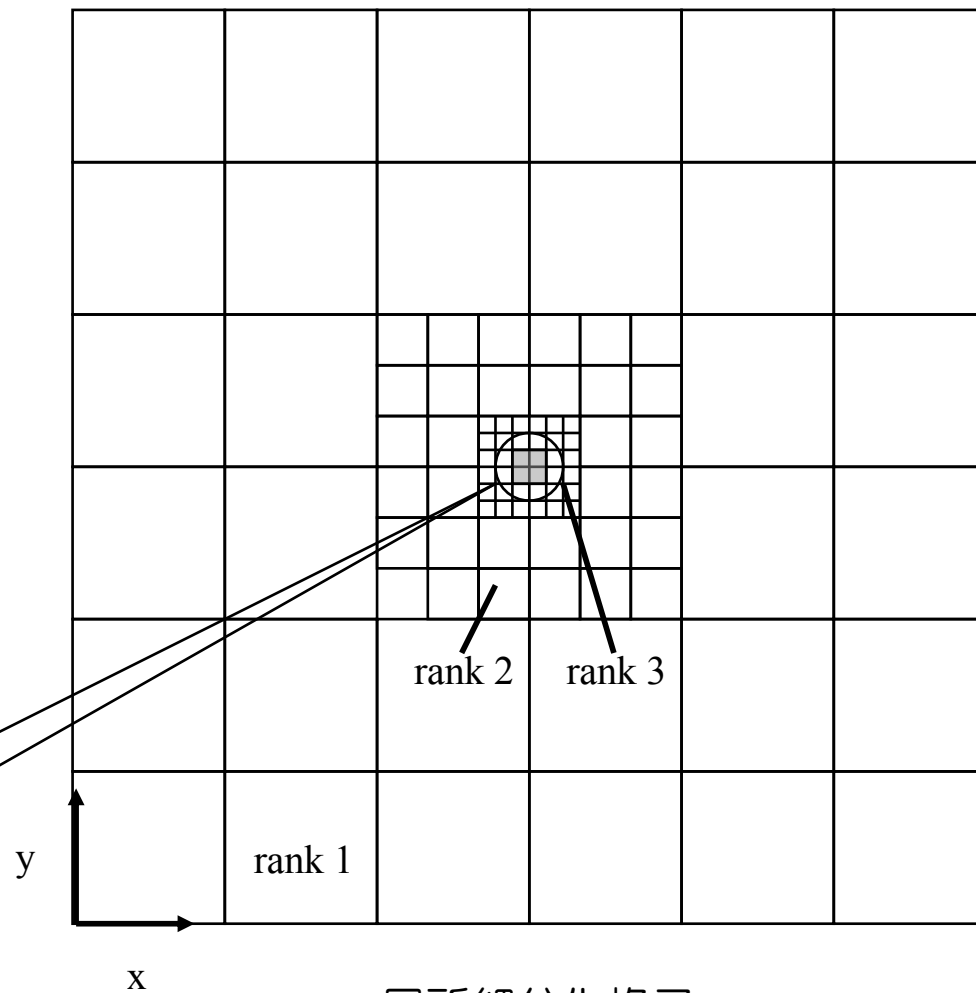
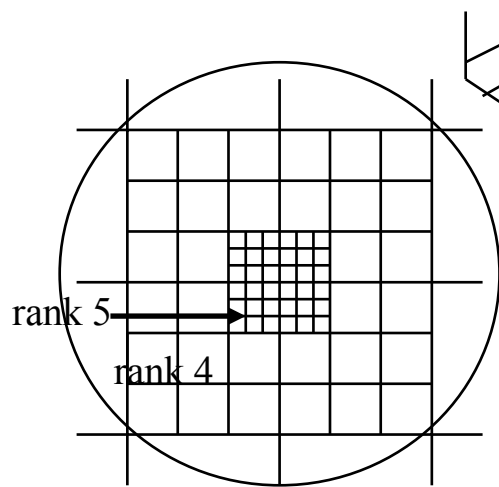
ΔR : 河川からの一格子
あたりの流入量

$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (7)$$

3.2 格子構造

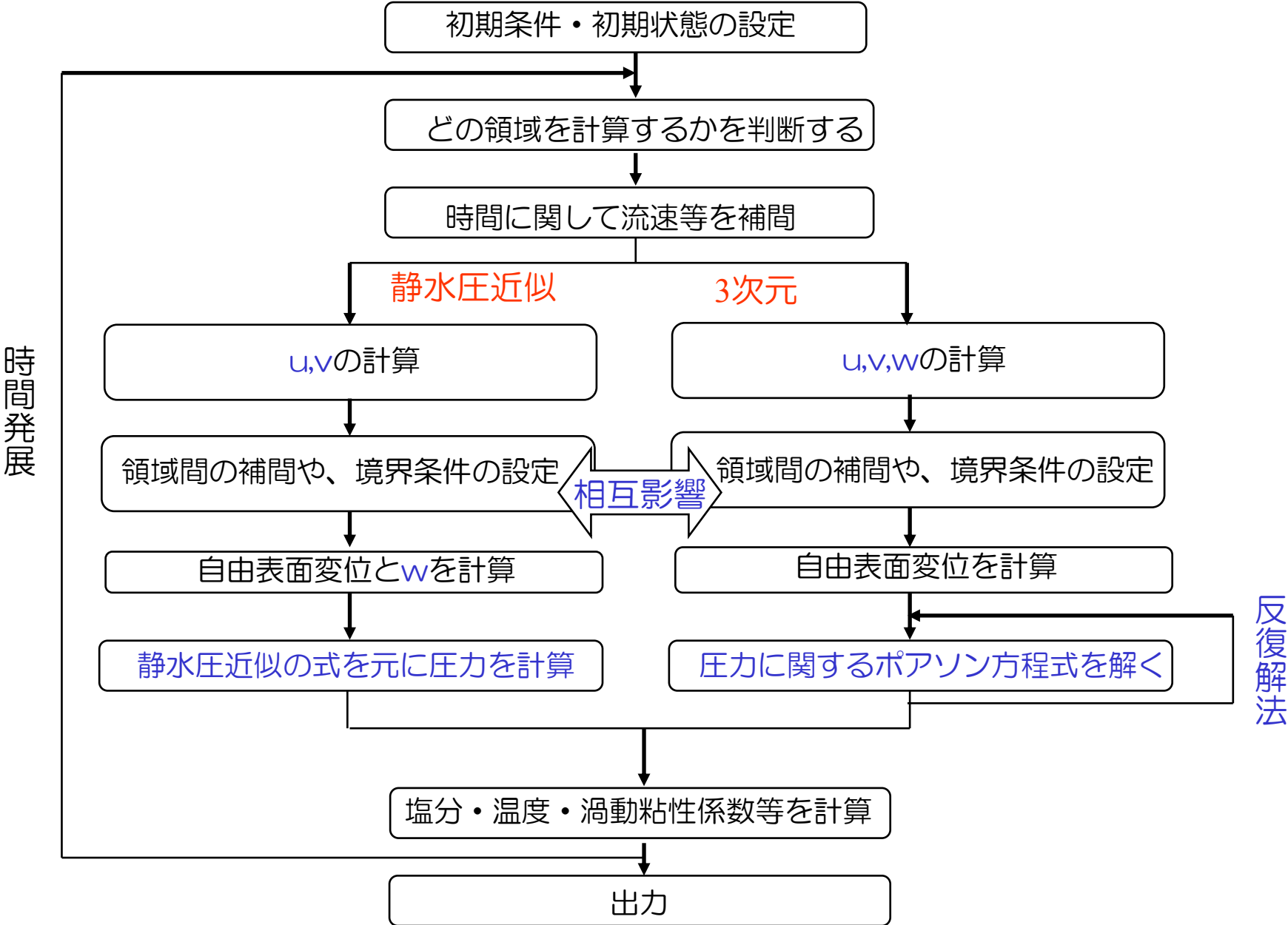


変数配置



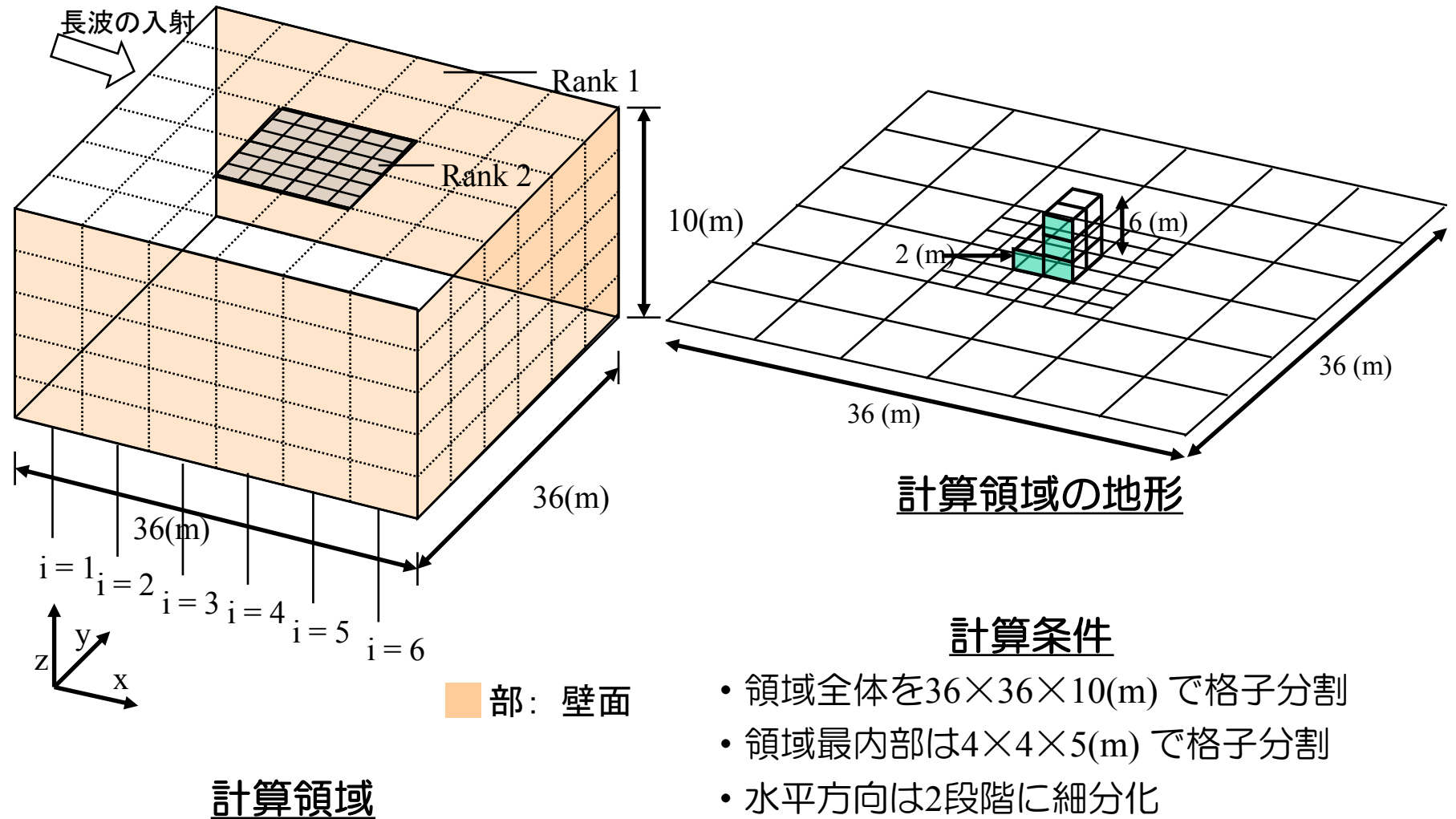
局所細分化格子

3.3 計算の流れ

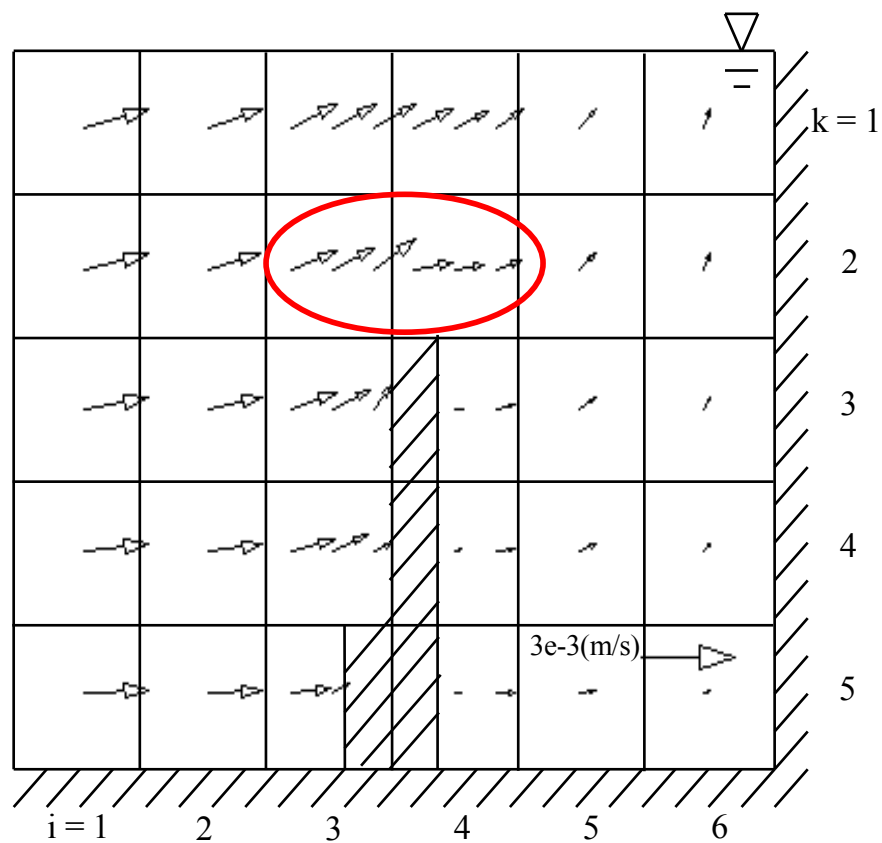


4. 2つの計算法の相違についての検証

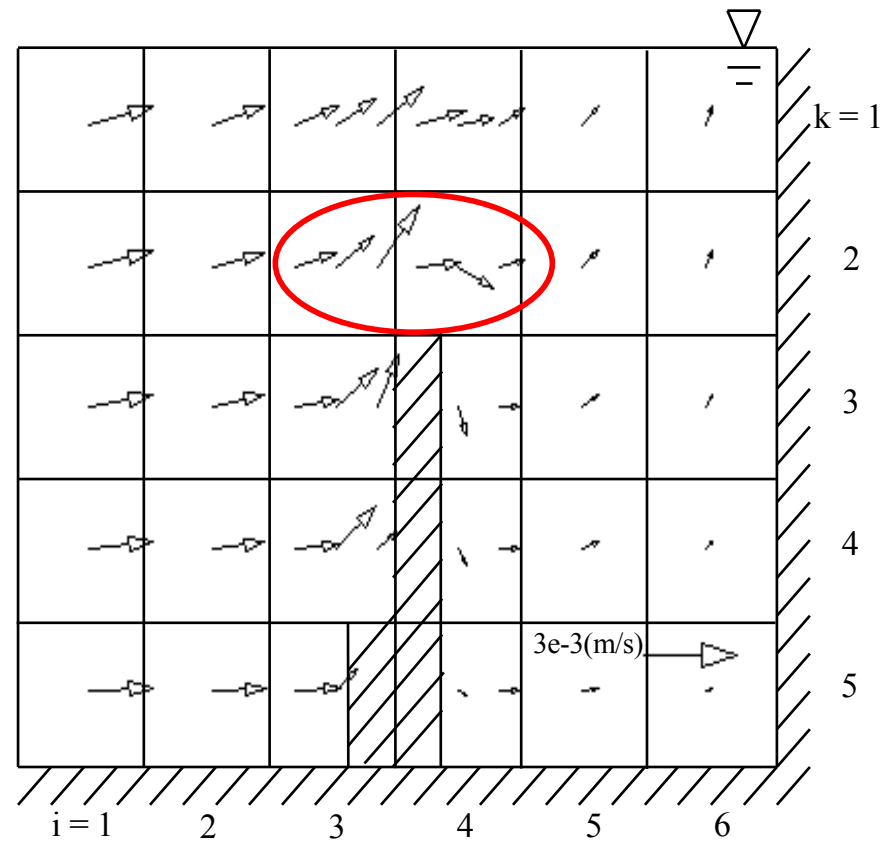
例 地形変化が大きい矩形領域内で長波入射を与えた場合



- 領域全体を $36 \times 36 \times 10$ (m) で格子分割
- 領域最内部は $4 \times 4 \times 5$ (m) で格子分割
- 水平方向は2段階に細分化
- 開境界より周期4000(sec.)の長波を入射



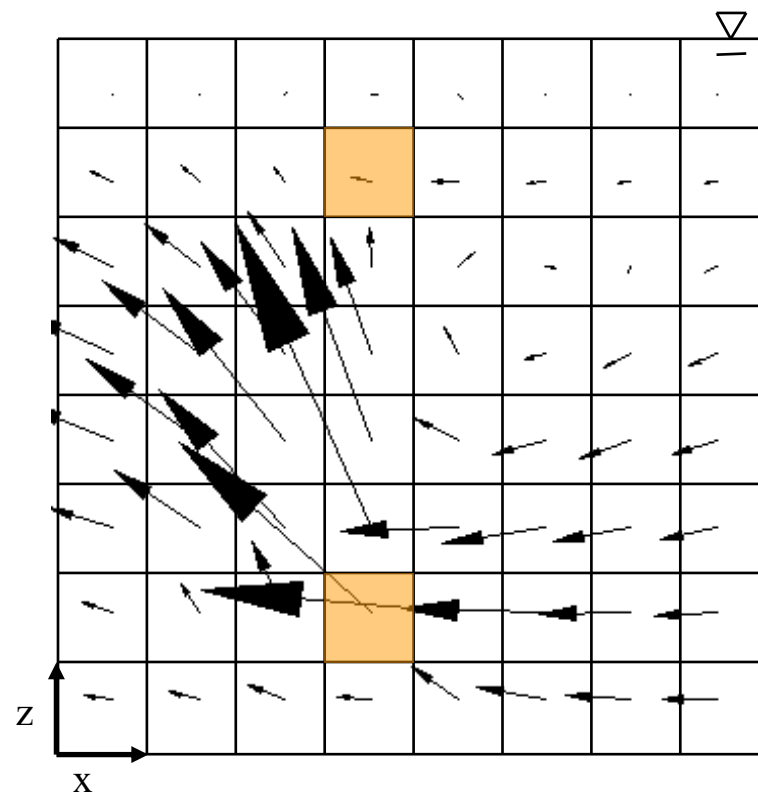
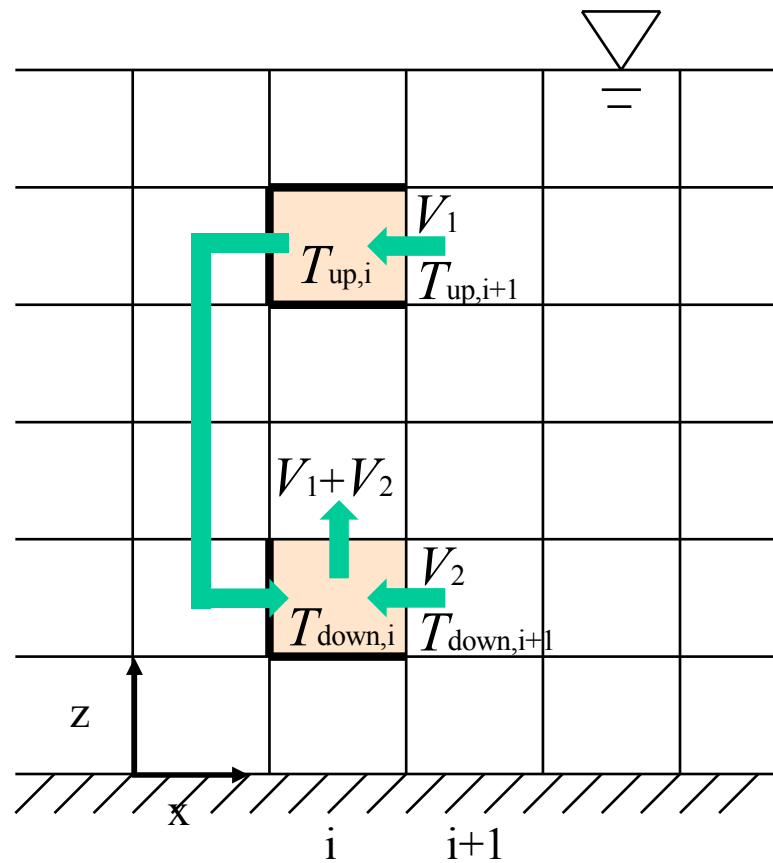
鉛直断面流速分布(内側3次元計算)



鉛直断面流速分布(内側静水压近似計算)

5. 水質改善装置に関する検証計算

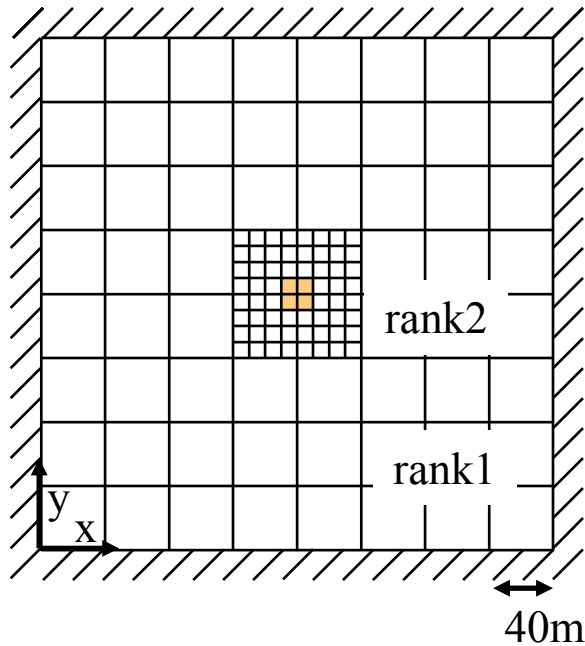
5.1 装置のモデル化



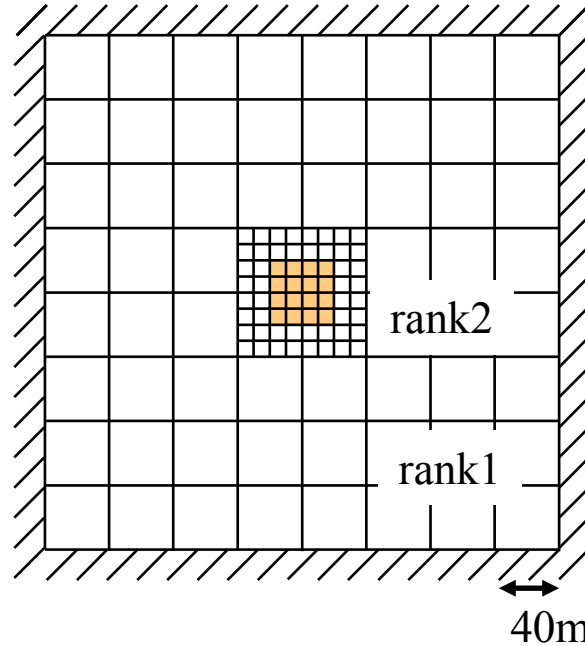
装置近傍流速図(結果例)

境界条件として、 V_1, V_2, V_1+V_2 等を与える。

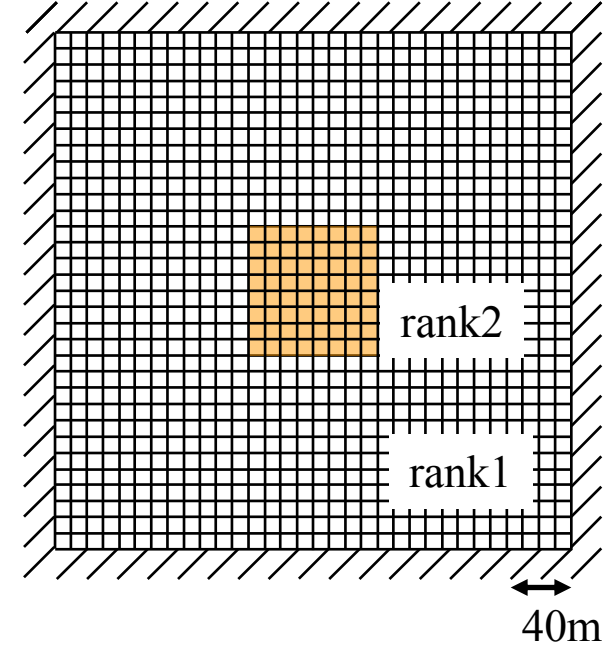
5.2 3次元計算の領域範囲設定に関する検証



試計算1の水平格子



試計算2の水平格子



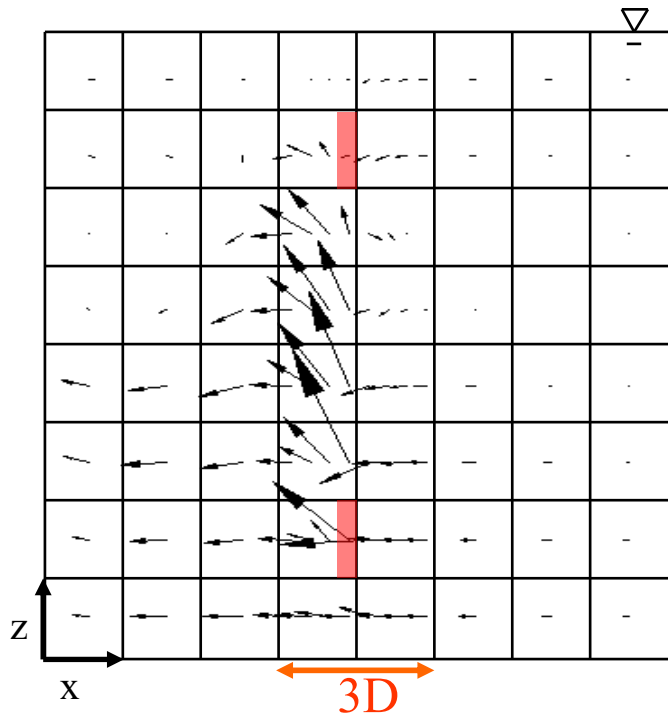
試計算3の水平格子

計算条件

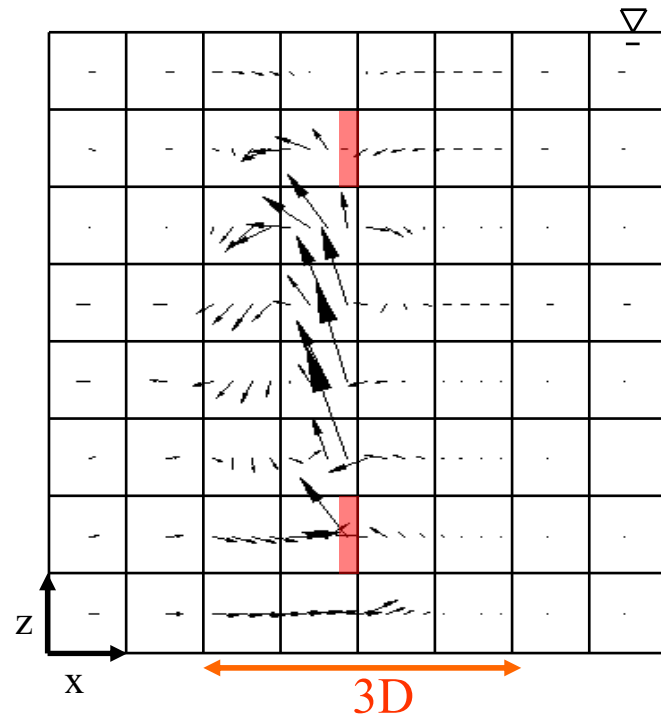
■ : 3次元計算領域

- 3つの試計算とも領域の広さは同じ
(幅320m×奥320m×水深20m)
- 初期状態で水温の成層を想定
- 領域中央部に噴き出し・吸い込みを考慮

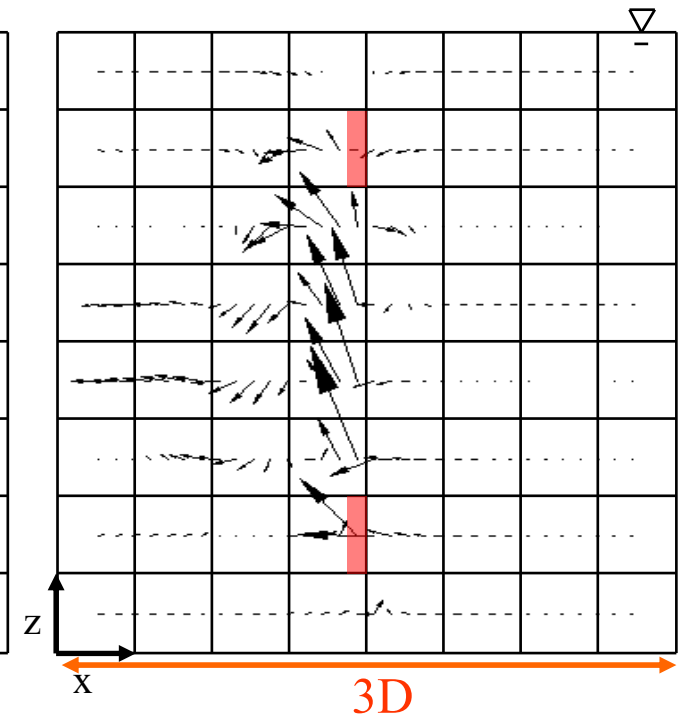
流速についての比較...



鉛直断面分布(試計算1)



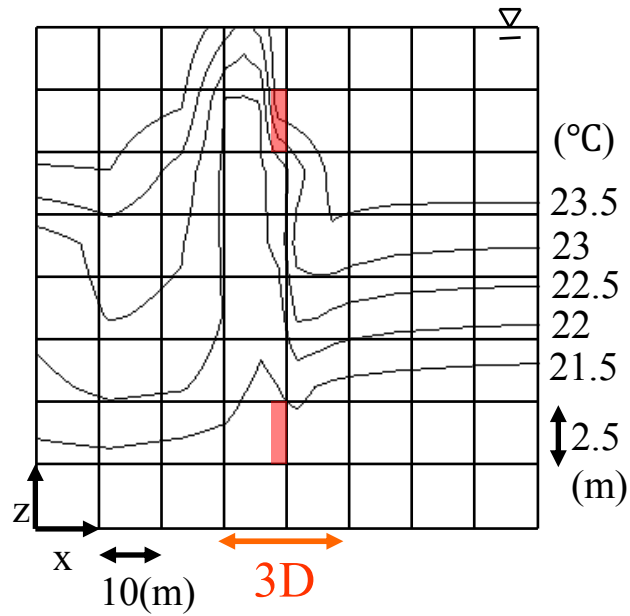
鉛直断面分布(試計算2)



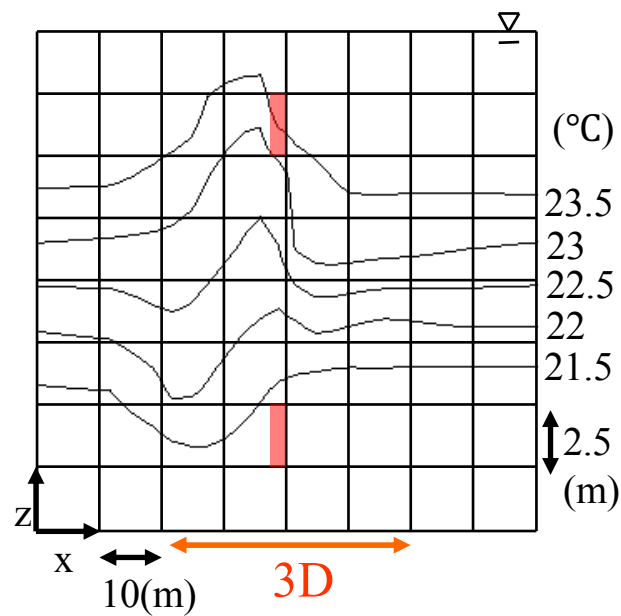
鉛直断面分布(試計算3)

■ : 吸い込み・噴き出しセル

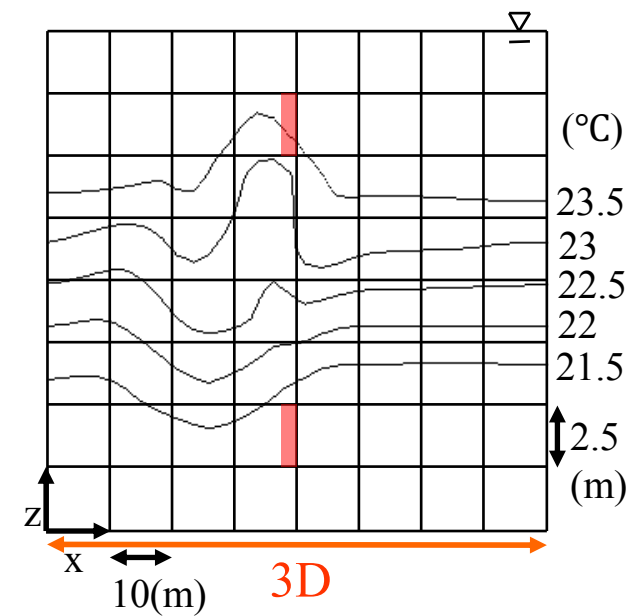
水温についての比較...



鉛直断面分布(試計算1)



鉛直断面分布(試計算2)



鉛直断面分布(試計算3)

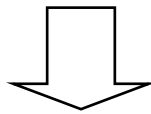
■ : 吸い込み・噴き出しセル

水質改善装置のモデル化と計算結果...

- 現実的な結果を確認

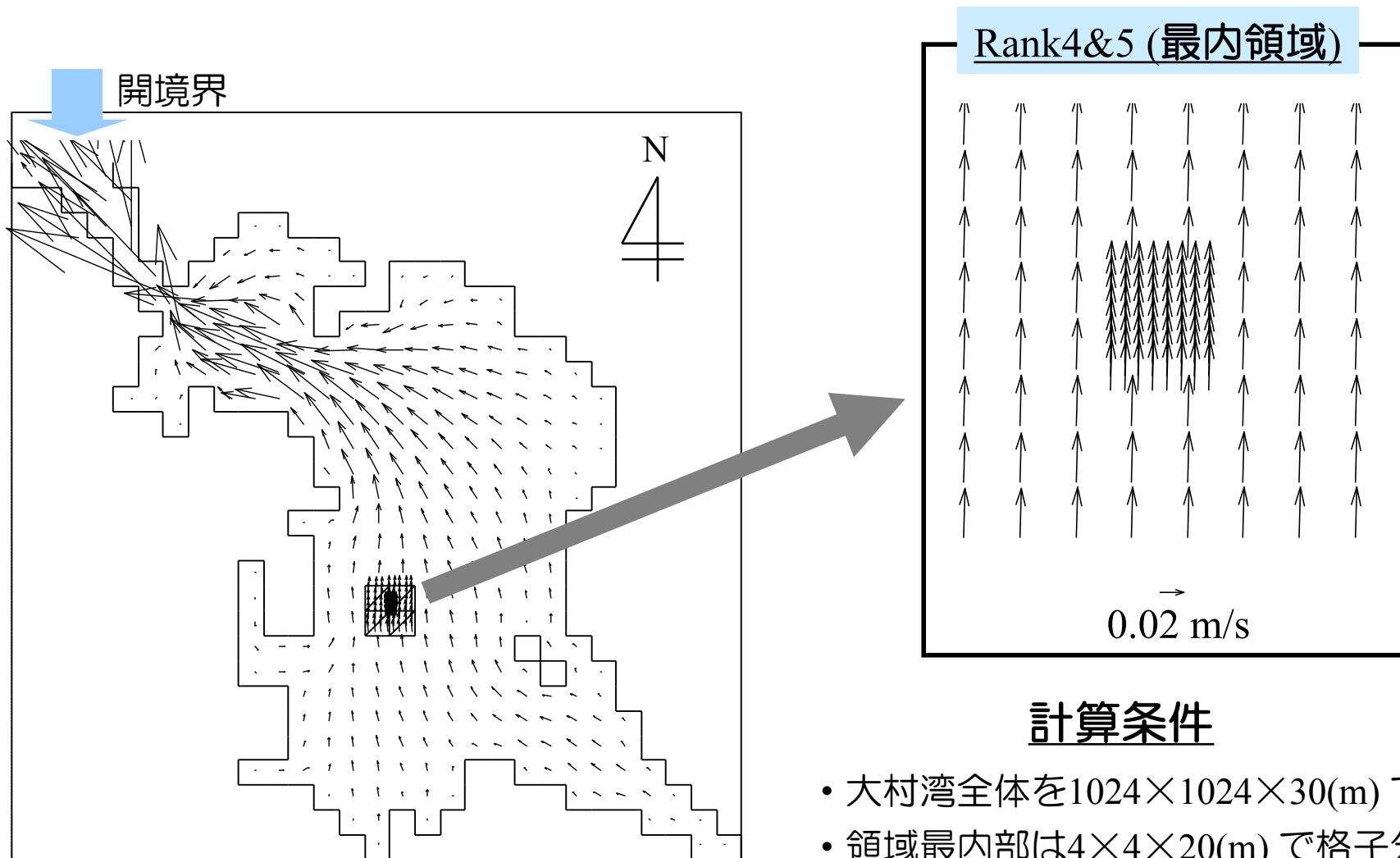
3次元領域設定について...

- 3次元計算領域が狭すぎると妥当な結果にならない
- 領域境界での流水圧や流速に注意



- 定量的把握が今後の課題

6. 大村湾における水質改善装置のシミュレーション



↑ 0.1 m/s

下潮時の表層水平流速図

Rank4&5 (最内領域)

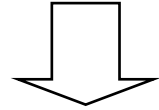
→
0.02 m/s

計算条件

- 大村湾全体を $1024 \times 1024 \times 30(\text{m})$ で格子分割
- 領域最内部は $4 \times 4 \times 20(\text{m})$ で格子分割
- 水平方向は5段階に細分化
- 開境界より周期43200(sec.)の潮汐波を入射
- 計算時間間隔は外側領域で10.24(sec.)、
最内側領域で0.08(sec.)

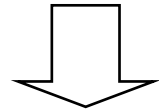
6.1 仮想変数 Fi (トレーサー)の導入

例 $Fi=1$ が初期状態で底層の貧酸素水塊を表し、その他を $Fi=0$ とする。



Fi に関する移流拡散方程式を解くことで、拡散状況を把握。

$$\frac{\partial Fi}{\partial t} + u \frac{\partial Fi}{\partial x} + v \frac{\partial Fi}{\partial y} + w \frac{\partial Fi}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 Fi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Fi}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial Fi}{\partial z} \right)$$

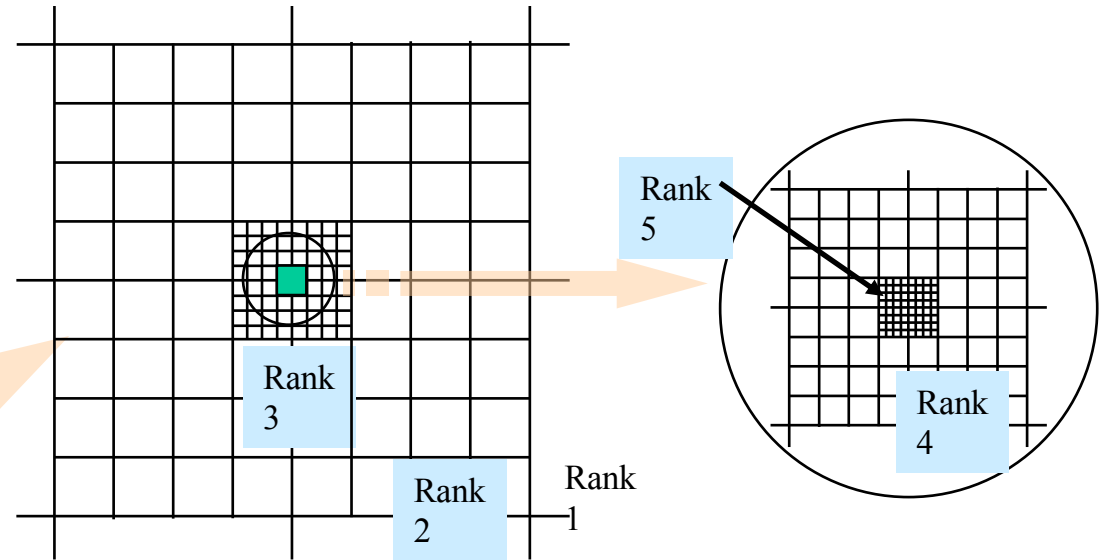
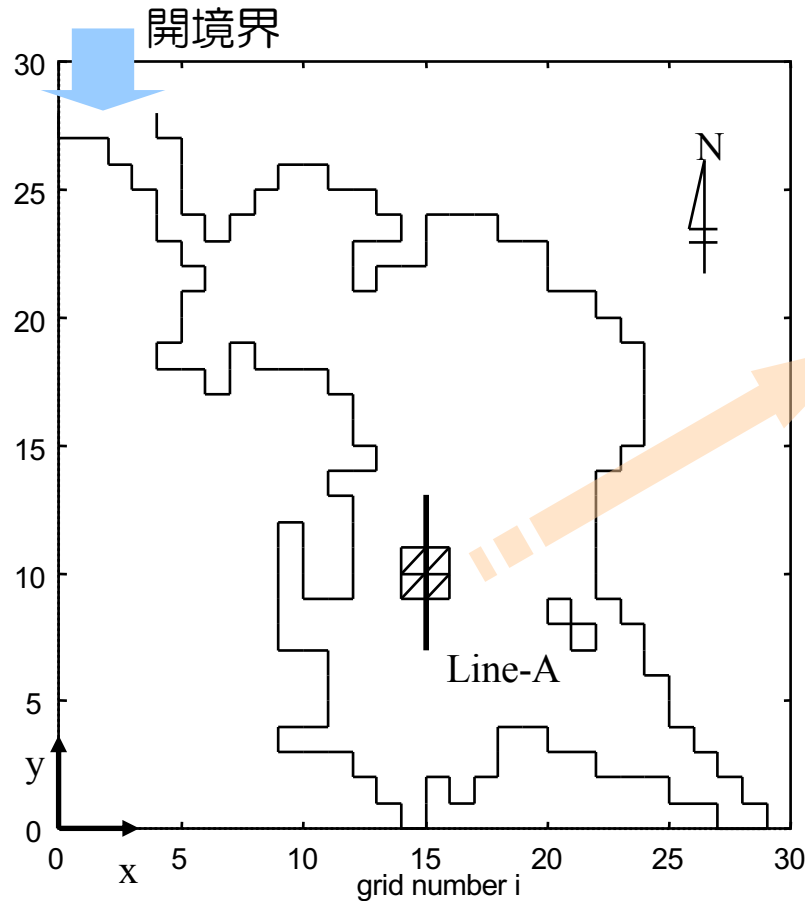


底層付近の Fi が減少し、上方・遠方に輸送されているほど、貧酸素水塊が解消

大村湾のシミュレーションでは、

- 水温,塩分に関する成層を想定
- 湾中央部が水深20m程度なので、15m以深で $Fi=1$ とし、その他で $Fi=0$ とする。

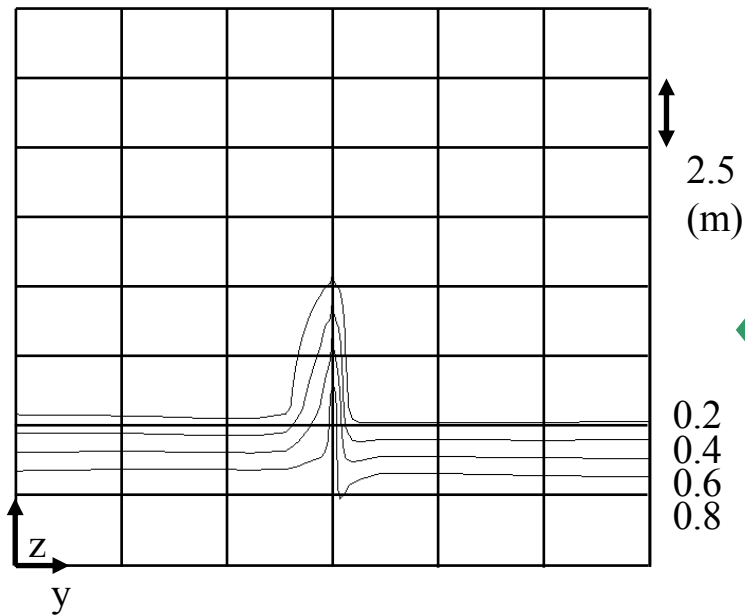
6.2 水質改善装置の噴出流量による相違と 潮汐の拡散効果による影響について



計算条件

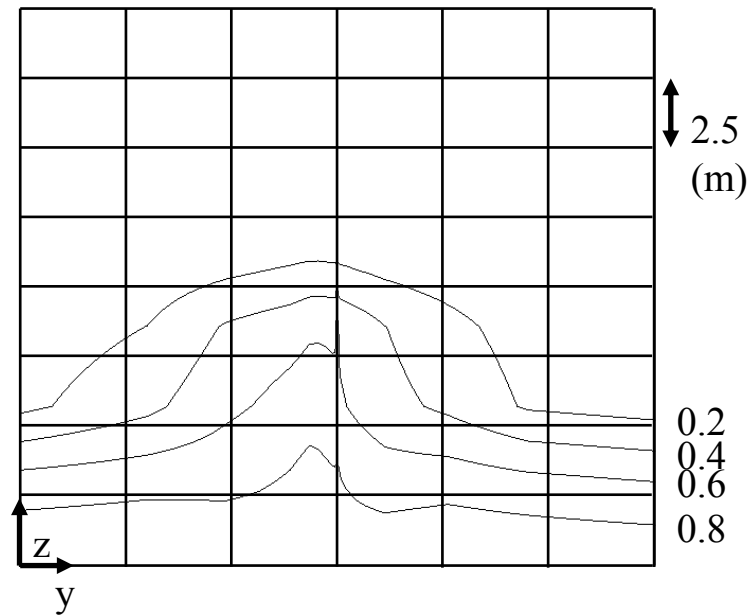
- 湾全体を $1024 \times 1024 \times 30$ (m) で格子分割
- 領域最内部は $4 \times 4 \times 20$ (m) で格子分割
- 開境界より周期43200(sec.)の潮汐を入射
- 水平方向には5段階の格子構造

- 実海域実験の際の噴き出し流量を想定した場合
 - 装置の噴き出し流量を5倍にした場合
- } **比較計算**



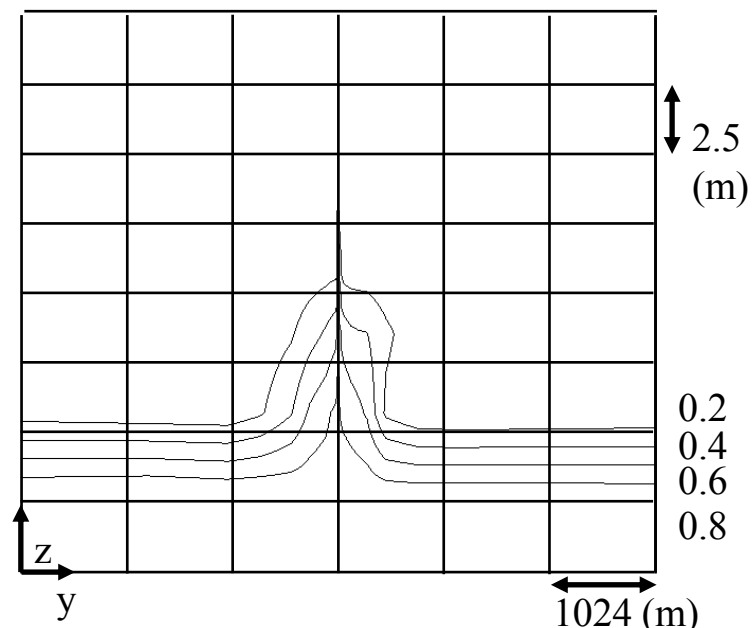
1/2周期(6時間)後：標準流量時

潮汐の
拡散効果



3/2周期(18時間)後：標準流量時

噴出流量の相違

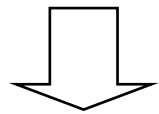


1/2周期(6時間)後：流量5倍

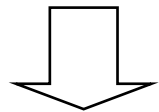
yz断面仮想変数分布

流量による相違と潮汐の拡散効果について...

- 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。
- 底層水が混合されながら持ち上げられており、さらに潮汐によって移流拡散。



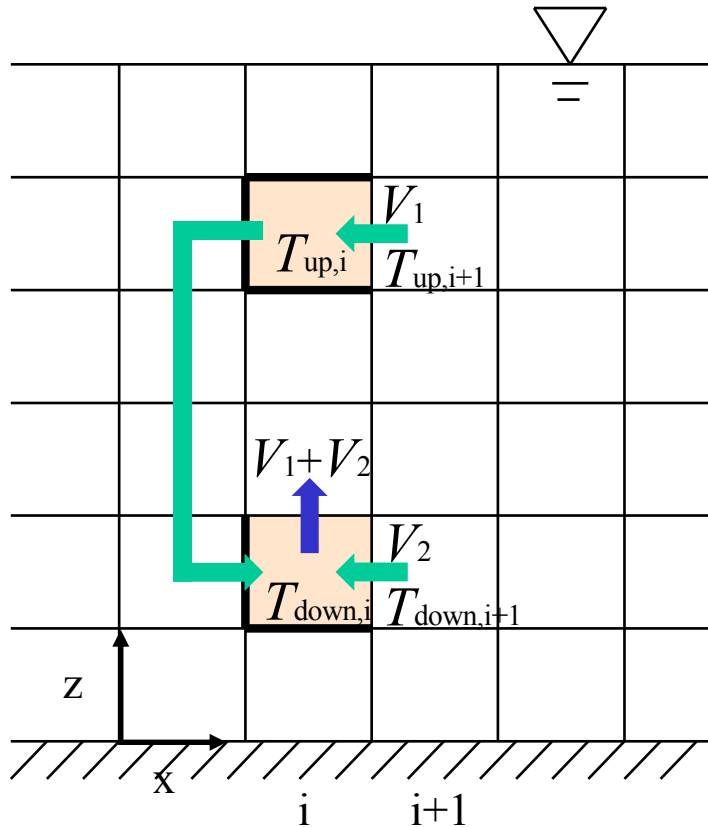
- ただし、局所的に底層水を持ち上げる効果はあるが、浮上した水塊の水平方向移流が弱い。
- 遠方領域で底層水は移動していないため、広域に渡る貧酸素水塊改善には長時間を要する。



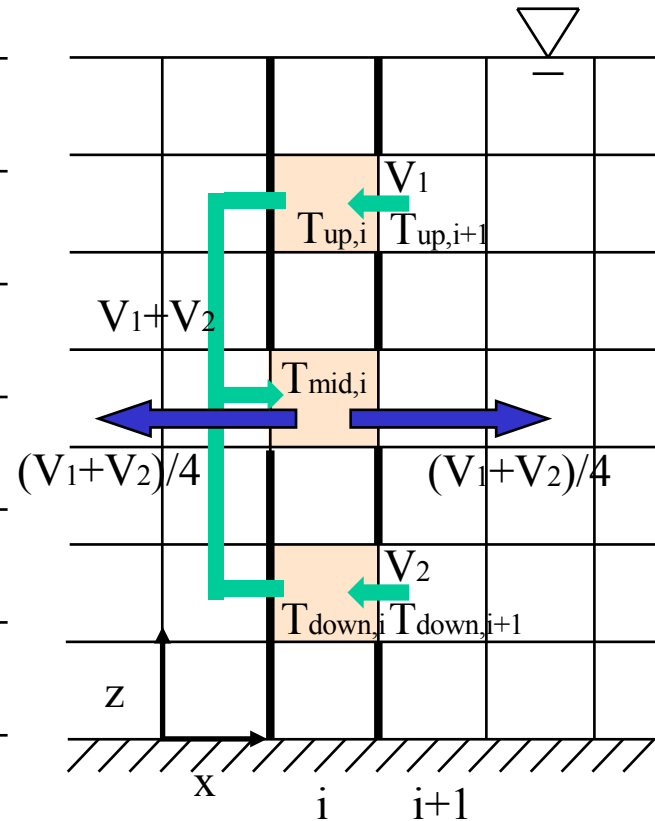
改善策は...

広域の貧酸素領域の改善には、下層から吸い込んだ海水を上層または中層から水平に噴き出す等により、広域の循環流の発生誘起を狙うことが効果的か???

6.4 水質改善装置の性能の検討



モデル1およびモデル2



モデル3

計算条件

- 8km四方、水深20mの矩形領域
- 左方より43200sec.の潮汐を入射
- 領域中央部にそれぞれのモデルを設置

モデル1

$V_1=0.05 \text{ (m}^3\text{/s)}$
 $V_2=0.50 \text{ (m}^3\text{/s)}$

↔
 混合比率の
 比較

モデル2

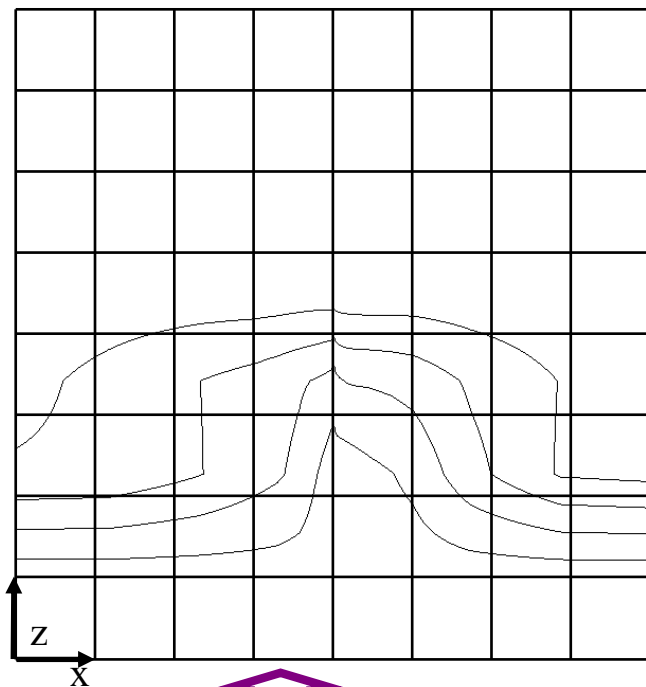
$V_1=0.25 \text{ (m}^3\text{/s)}$
 $V_2=0.25 \text{ (m}^3\text{/s)}$

↔
 噴出方法の
 比較

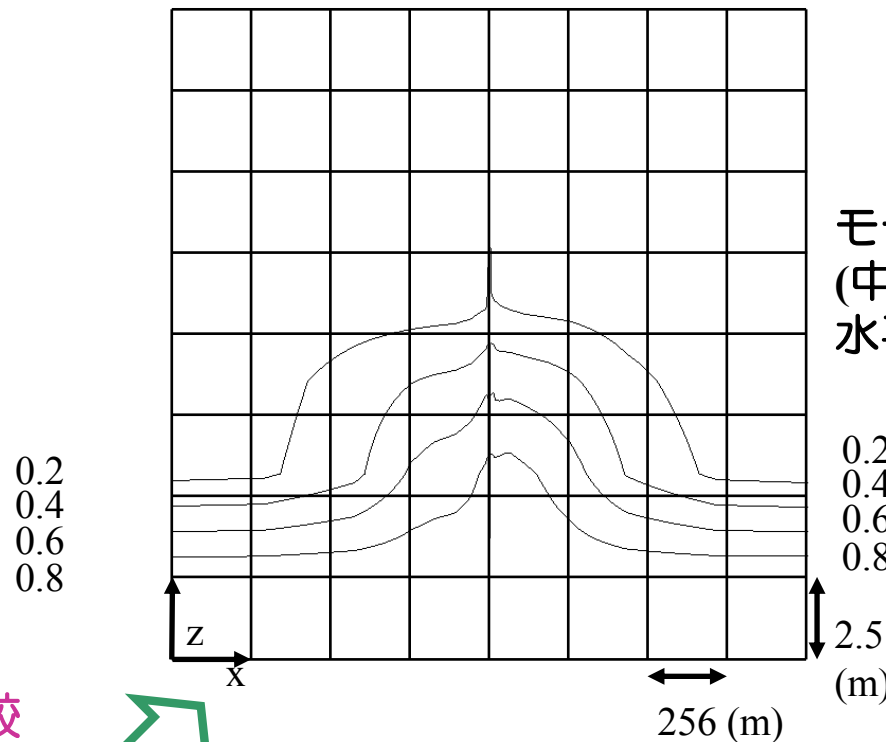
モデル3

$V_1=0.25 \text{ (m}^3\text{/s)}$
 $V_2=0.25 \text{ (m}^3\text{/s)}$

モデル1
(底層水多め)



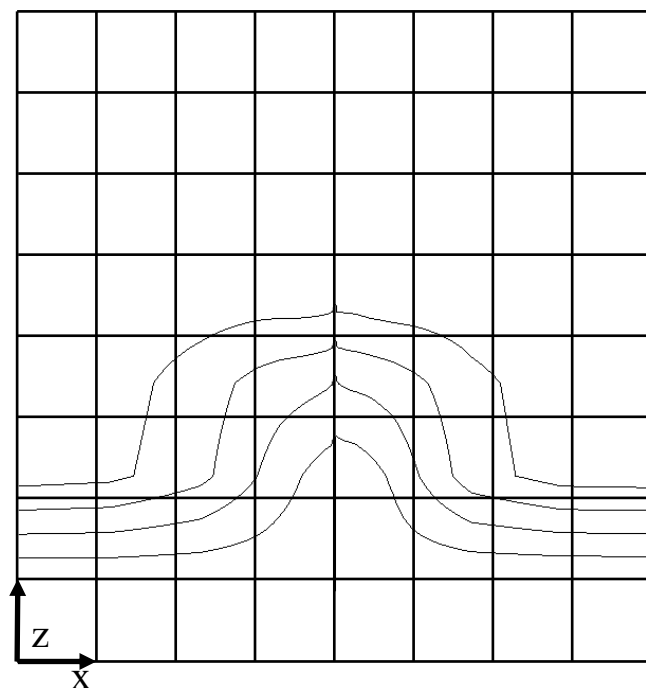
モデル3
(中層から水平に噴出)



混合比率の比較

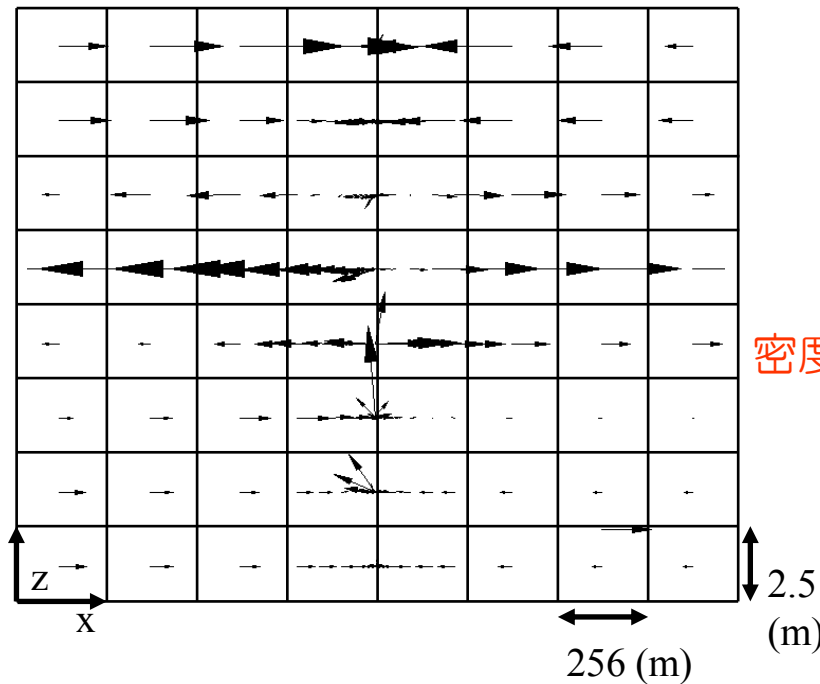
噴出方法の比較

モデル2



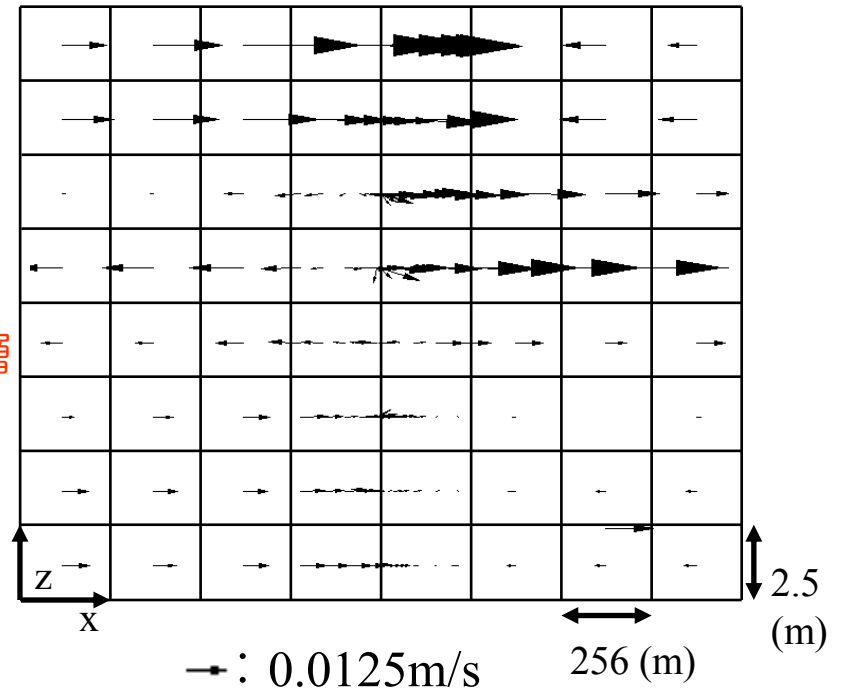
12時間経過後のxz断面における
仮想変数分布
(潮汐なし)

- 底層水の混合比率を多くした方が効果的
- 噴出方法にはあまり依存しない???



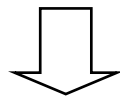
モデル2
(底層から
上方に噴出)

12時間経過後の
xz断面における流速分布



モデル3
(中層から
水平に噴出)

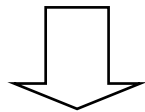
水平に運動量を与えることはあまり効果的でなく、
密度が異なることによる圧力勾配による流れが重要



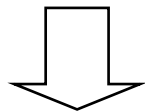
密度流

7. 結言

- 〈1〉 局所的に3次元流れを精度良く考慮することができ、かつ湾内全域に与える影響を考慮できる計算モデルを開発した。
- 〈2〉 水平方向の現象スケールが水深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3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、領域設定の際には領域境界での流水圧値や流速値などに留意すべきであると指摘した。
- 〈3〉 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、早急な改善効果が得られる。



- より多くの底層水を吸い込む。
- より効果的な密度流を発生させる。



今後の課題として...

- 密度流の性質の把握
- 水質改善装置のスペックについて、様々に改良を加えた計算
- 生物、化学過程の計算コードへの導入