

LES 数値シミュレーションを用いた人工海山による湧昇の評価

杉山 裕和 (環境テクノロジー学、指導教員：岡安 章夫)

1. 緒言

近年の我が国の水産物に関しては漁獲量の減少という問題がある。その解決策の一つとして資源量を直接増やすという方法が考えられており、湧昇流発生海域の高い資源量の生産性が注目されている。さらに近年では海底に何らかの構造物を設置して人工的に地形性湧昇流を発生させ、底層の海水を有光層まで上昇させることで資源量の増大をはかる研究が行われている。例えば本田ら (2004) は実際の人工マウンド構造物周辺の現地調査結果の再現計算を行っている。さらに栗原ら (2005) は恒流および潮流を考慮した往復流による 3 次元非定常の流れ場の解析を行っている。

本研究においては本田ら (2004)、栗原ら (2005) の研究を参考に、人工海山により湧昇が発生する過程や発生後の様子を CIP 法を用いた LES 数値シミュレーションを行うことで、その流速分布、密度混合という観点から考察するというを目的とした。

2. 数値計算の方法

1) 支配方程式

本研究では非静水圧近似した 3 次元 LES ナビエーストークスの式、非圧縮の連続式、密度の移流拡散方程式の 3 つを支配方程式として数値計算を行った。三次元 LES のナビエーストークスの式：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + SGS_i \quad (1)$$

連続式：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

密度の拡散方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = k \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

ここで u は流速、 p は圧力、 ρ は密度、 ν は粘性係数、 SGS は乱流応力項、 k は拡散係数である。

2) 人工海山

本研究で用いた人工海底山脈の形状は、栗原ら (2005)、本田ら (2004) が数値計算で用いた人工海山を参考に、また長崎県沖で実際に設置されている人工海山を参考にして (図 2 参照) x 方向には 60m、 y 方向には 120m、 z 方向には 15m とした。

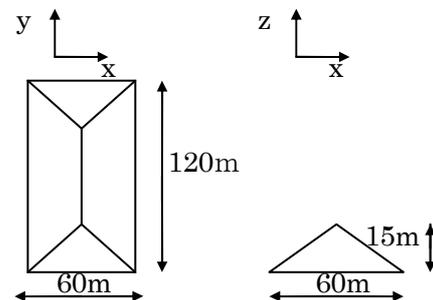


図 1 人工海山概略図

3) 計算領域

計算領域に関しては人工海山が実際に設置されている長崎県沖の海域を参考に、また湧昇栄養塩量に及ぼす側方境界の影響が小さくなる領域幅として、人工海山の 3 倍を設置した。さらには人工海山で発生した内部波の挙動を正確に再現できる領域として x 方向に 1000m、 y 方向に 360m、 z 方向に 50m とした。人工海山の設置位置としては x 方向に 250~310m、 y 方向に 120~240m、 z 方向に 0~15m とした (図 2)。

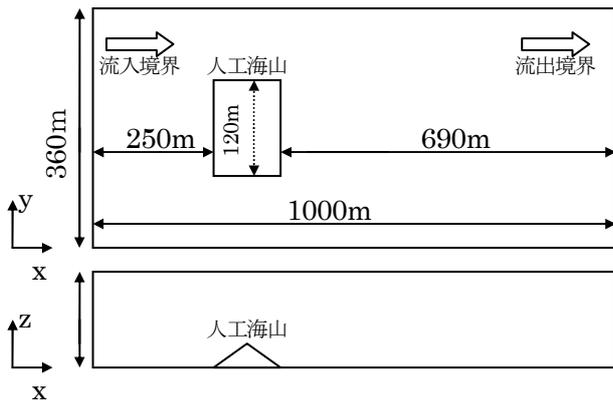


図 2 計算領域概略図

4)境界条件

本計算はスタッカード格子を用いて計算を行った。海底、構造物は non-slip 条件、海面、左右両壁は slip 条件、上流流入境界、下流流出境界は自由流出とした。壁面、構造物に垂直な流速成分はゼロに設定した。平行な成分については、計算領域の外側に仮想セルを設定し non-slip は逆向きに、slip は同じ向きに流速を与えた。

5)計算条件

本研究においては様々な海域に対応するために密度、流速を変化させて計算を行った。密度に関しては、人工海山を設置する様々な海域に対応するため“密度一様”、“密度 2 層”、“密度連続変化”の 3 種類の状態で計算を行った。流速は人工海山が設置されている長崎県沖の値を参考に 0.1m/s、0.3m/s の一様流を与えた。表 1 参照、また計算格子のサイズは x 方向に 2.5m、 y 方向に 2.5m、 z 方向に 1.25m とした。タイムステップは 1.0s として 10000 ステップ計算させた。

(1)密度一様

実験条件“密度一様”に関しては計算開始状態の計算領域の中の密度を一定 $\rho = 1030.0 \text{ kg/m}^3$ で計算を行った。

(2)密度 2 層

実験条件“密度 2 層”に関しては計算開始状態の計算領域の中の密度を $z = 25 \text{ m}$ より上を上層密

度 $\rho = 1030.0 \text{ kg/m}^3$ とし、 $z = 25 \text{ m}$ より下の密度を下層密度 $\rho = 1032.0 \text{ kg/m}^3$ と定義し、 $\Delta \rho = 2.0 \text{ kg/m}^3$ の状態で計算を行った。

(3)密度連続変化

まず初めに z' を海面から海底への鉛直方向への距離と定義する。そして実験条件“密度連続変化”に関しては計算開始状態の計算領域の中の密度を $z' = 0 \text{ m}$ (表層) から $z' = 21.25 \text{ m}$ までを一様密度 $\rho = 1030.0 \text{ kg/m}^3$ とし、 $z' = 21.25 \text{ m}$ から $z' = 32.5 \text{ m}$ までを 1.25m (1 セル) 当たり $\Delta \rho = 0.2 \text{ kg/m}^3$ で増加させた。そして $z' = 32.5 \text{ m}$ から $z' = 50 \text{ m}$ (海底) までを一定密度 $\rho = 1032.0 \text{ kg/m}^3$ として計算を行った。

表 1 計算条件

流速(m/s)	密度差 $\Delta \rho$ (kg/m ³)	密度状態
0.1	0	一様
0.1	2	2 層
0.1	2.0(連続変化)	多層
0.3	0	一様
0.3	2	2 層
0.3	2.0(連続変化)	多層

6)予備計算

数値計算を行うと計算の誤差により密度の数値拡散が生じてしまい、流動によって生じる拡散と区別がつかなくなってしまう場合がある。よって計算を行う前に予備計算を行い、この計算モデルが時間の経過による密度の数値拡散が小さいことを確かめるため“密度連続変化”、また“密度 2 層”条件において構造物を取り除いて 2000s 間計算を行った。また予備計算時の流速は 0.3m/s とした。例として計算開始 0 s の‘密度 2 層’条件における計算領域 $y = 177.5 \text{ m}$ の断面で切断した $x-z$ 平面における密度図と計算終了時 2000s の同様の密度図をそれぞれ図 3~4 に示す。両図から分かるように実験条件“密度 2 層”では人工海山が無い状態では 2000 秒間の計算でも密度ライン大きく変化しない。よって本計算

モデルでは密度の数値拡散が十分小さく適切な計算が行えると言えるものとする。

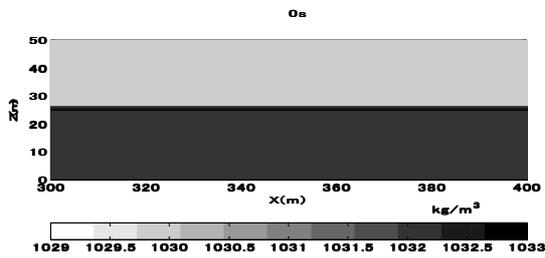


図3 密度コンター図 計算開始時

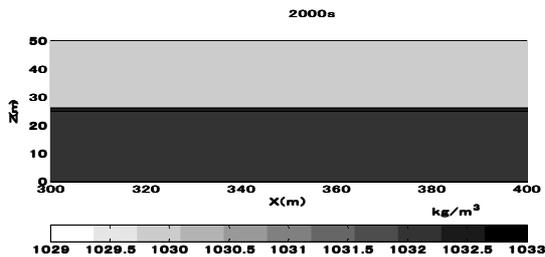


図4 密度コンター図 計算開始 2000s 後

3.解析方法

1)解析概要

本計算によって得られたデータを計算領域 $y = 177.5\text{m}$ の断面で切断した $x-z$ 平面における密度コンターライン、流速ベクトル図を作成し検討を行った。データは計算開始後 2000s から 6000s までのものを用いた。

2) 混合量の指標

時刻 t において、座標 (x, y, z) における格子の初期密度変化量 D^t は

$$D^t = |\rho_0 - \rho'_{x,y,z}| \Delta V (\text{kg}) \quad (4)$$

で与えられる。ただし ρ_0 は初期密度、 ΔV は格子の体積である。したがって D^t の全 $y-z$ 平面 (y 方向: $y=0 \sim 360\text{m}$ 、 z 方向: $z=0 \sim 50\text{m}$) の合計は

$$D'_p = \sum_{y=y_{\min}}^{y_{\max}} \sum_{z=z_{\min}}^{z_{\max}} D^t (\text{kg}) \quad (5)$$

である。したがって $y-z$ 平面全体の平均混合量 \overline{D}'_p は、

$$\overline{D}'_p = \frac{D'_p}{V} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (6)$$

となる。さらに \overline{D}'_p に関しては、それぞれの実験条件で、図5の計測断面 $x_1=25\text{m}$, $x_2=75\text{m}$, $x_3=200\text{m}$, $x_4=375\text{m}$, $x_5=500\text{m}$, $x_6=600\text{m}$ の断面で切断した $y-z$ 平面で求めた

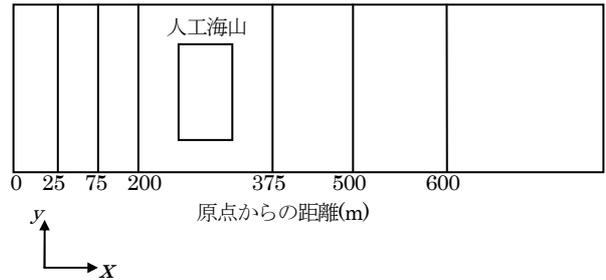


図5 平均混合量計測断面図

4. 計算結果 及び混合量の評価

計算結果の例として“密度連続変化 (流速 0.3m/s)” の条件での数値計算の結果について述べる。この条件では人工海山の背後に周期的に渦ができ、内部波が発生していることが分かる (図6)、さらにその後流域 (図7) から内部波の存在が確認でき、流れの場が乱れていることが分かる。

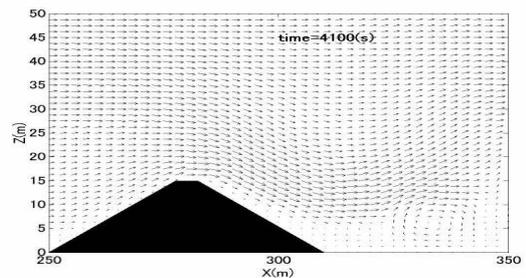


図6 流速ベクトル図 ($x=250 \sim 350\text{m}$, $t=4100\text{s}$)

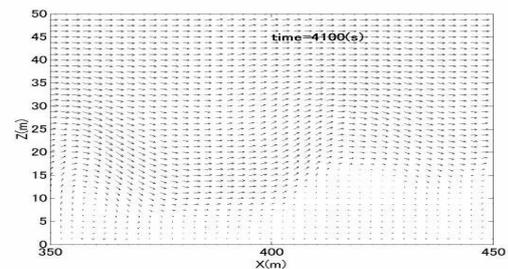


図7 流速ベクトル図 ($x=350 \sim 450\text{m}$, $t=4100\text{s}$)

次に密度コンター図を見てみる。 $x = 300 \sim 400\text{m}$ の範囲を掲載した図 8、図 9 より内部波の発生の様子は定常波の波形に近いことが分かる。そしてその後流域 $x = 400 \sim 500\text{m}$ では内部波が碎波している(図 10、11)。また、その形状は巻き波型碎波に近いということがわかる。

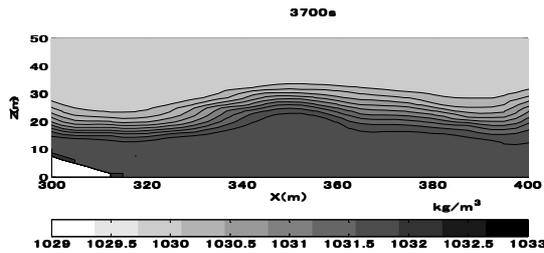


図 8 密度コンター図 ($x=300 \sim 400\text{m}$, $t=3700\text{s}$)

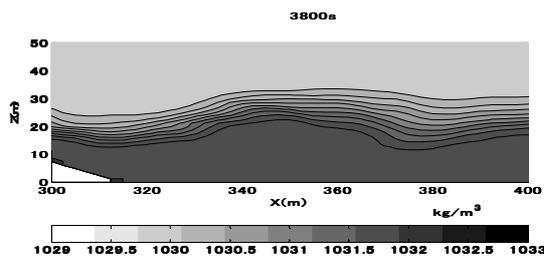


図 9 密度コンター図 ($x=300 \sim 400\text{m}$, $t=3800\text{s}$)

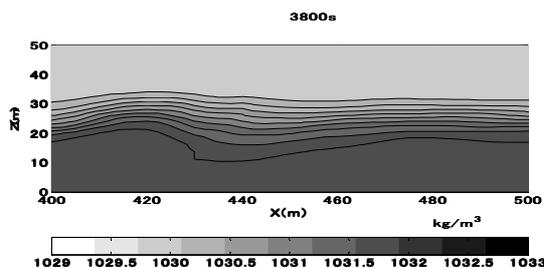


図 10 密度コンター図 ($x=400 \sim 500\text{m}$, $t=3800\text{s}$)

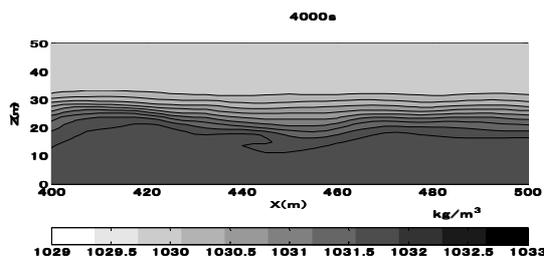


図 11 密度コンター図 ($x=400 \sim 500\text{m}$, $t=4000\text{s}$)

最後に流速 0.3m/s での“密度 2 層状態”(図 12)と“密度連続変化”(図 13)の \bar{D}'_p を比較してみる。どちらも密度の増加曲線の形状にそれほど差はない、しかし密度の混合量には明らかな差があり、同じ流速なら“密度 2 層状態”の方がより鉛直混合が起りやすいと言えるということが分かった。

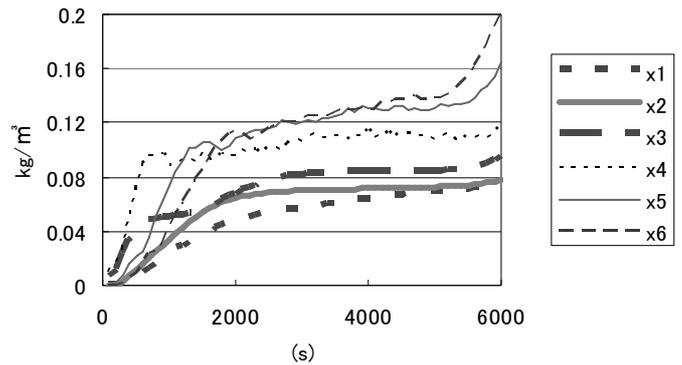


図 12 密度 2 層時の密度量変化

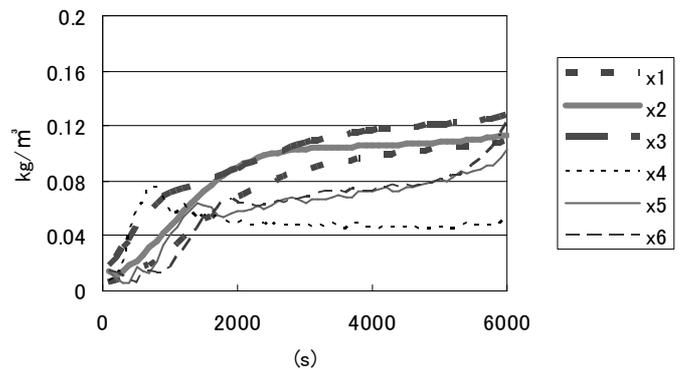


図 13 密度連続変化時の密度量変化

参考文献

- 栗原明夫・佐々木洋之・中川良文・青野利夫・岡安章夫 (2006) : 人工海底山脈による湧昇栄養塩量の非定常数値解析、海岸工学論文集、第 53 巻、pp. 1306-1310.
- 本田陽一・間木道政・鈴木達雄 (2005) : 人工マウンド構造物による鉛直混合現象の観測と混合量の試算、海岸工学論文集、第 51 巻、pp. 1151-1155.