

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

本田 陽一*・間木 道政**・鈴木 達雄***

成層した海域の海底に設置された人工マウンド構造物に流れが作用することにより発生する内部波（風下波）が鉛直混合に寄与する可能性について、観測および数値シミュレーションによる検討を行った。観測では構造物下流側に風下波が生じている様子を見ることができ、鉛直混合機構として内部波による水平流速の鉛直方向シアーによる拡散または内部波の碎波による混合の可能性が示された。また上層水へ下層水の連行現象もみることができた。数値シミュレーションによる再現計算を実施し、これらの鉛直混合現象を確認するとともに混合量の試算を行った。

1. はじめに

成層した海域の海底に設置された人工マウンド構造物に流れが作用することで内部波の一種である風下波が発生し、その内部波のエネルギーが上層に伝播されることにより海底付近だけでなく中上層においても鉛直混合効果が期待できると考えられる(本田, 2003)。これにより沖合海域の植物プランクトンの活性化による基礎生産力の増大やCO₂吸収効果に寄与できる可能性がある。

そこで、実海域における内部波の発生と鉛直混合の可能性の確認および期待される鉛直混合効果を把握することを目的とし、観測および数値シミュレーションによる検討を行った。

ただし、ここでは準定常状態の流れが構造物に作用することにより発生する風下波を対象としており、内部潮汐のように人工マウンド構造物以外の要因により発生した内部波が構造物に作用することによる影響については考慮しない。

2. 方 法

(1) 観 測

長崎県生月島北方沖合の水深約 82 m のほぼ水平な海底にブロックの乱積みにより形成された人工マウンドを対象に観測を行った。このマウンドは高さ約 12 m の 2 つのピークを持ち、ピーク間中央部の高さが約 6.5 m、ピーク間距離が約 65 m の形状である(図-1 参照)。風下波発生条件から観測時期を 2003 年 7 月上旬および下旬の小潮期の計 6 日間とし、計 58 回の観測を実施した。

調査船上より ADCP (音響ドップラー流速計) による層別水平流速・音響反射強度観測および STD 計による水温・塩分の鉛直分布観測を実施した。ADCP 観測はマウンド中心を横切る主流向方向 (67°-247°) の側線に沿って行い、水温・塩分は各測線の両端にて観測した。側線の長さはマウンドを中心として上下流 500 m 以上

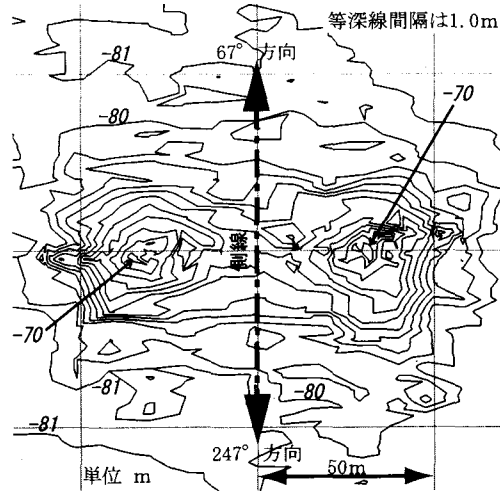


図-1 人工マウンド構造物形状等深線図

とした。そのほかに、マウンド近傍地点にて係留装置による水温、流速、照度等の定点観測を行っている。

(2) 数値シミュレーション

成層効果を考慮した LES 乱流モデル (式 (1)~式 (11)) を用いた流況再現計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - (\bar{\rho} - \rho_0) g_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\rho}}{\partial x_j} = -\frac{\partial h_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} - 2 \nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta m)^2 |\bar{S}| \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$|\bar{S}| = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

* 正会員 水修 (株)ジオスケープ
** 理博 (財)地球環境産業技術研究機構 主任研究員
*** フェロー 工博 (株)アッシュクリート 社長

$$h_j = \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta m = \Delta \left(1 - \frac{Rf}{Rf_c} \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$Rf = -g \frac{\partial \rho}{\partial z} / \langle Pr_{SGS} | S|^2 \rangle \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 ρ は密度、 ρ_0 は基準密度、 Re はレイノルズ数である。また、 $C_s=1.0$ 、 $Pr_{SGS}=10.0$ 、 $Rf_c=0.33$ とした。計算はSMAC法による差分法を用い、移流項にはCIP法を用いた。

計算領域は水深82m、水平方向に1800m×1800mとし、その中心の海底に実測形状の構造物を配置した。また、境界部にて内部波を減衰させるために水平境界から400m幅にスポンジ層を設けた。スポンジ層では水平粘性係数を $1.0\text{ m}^2/\text{s}$ とした。計算格子幅は水平方向に5.0m～50.0m、鉛直方向に1.5m～2.4mの不等間隔とし、格子数は水平方向118×118、鉛直方向46とした。外周境界に強制流速条件を与え、水面および海底はフリースリップ条件とした。

3. 結 果

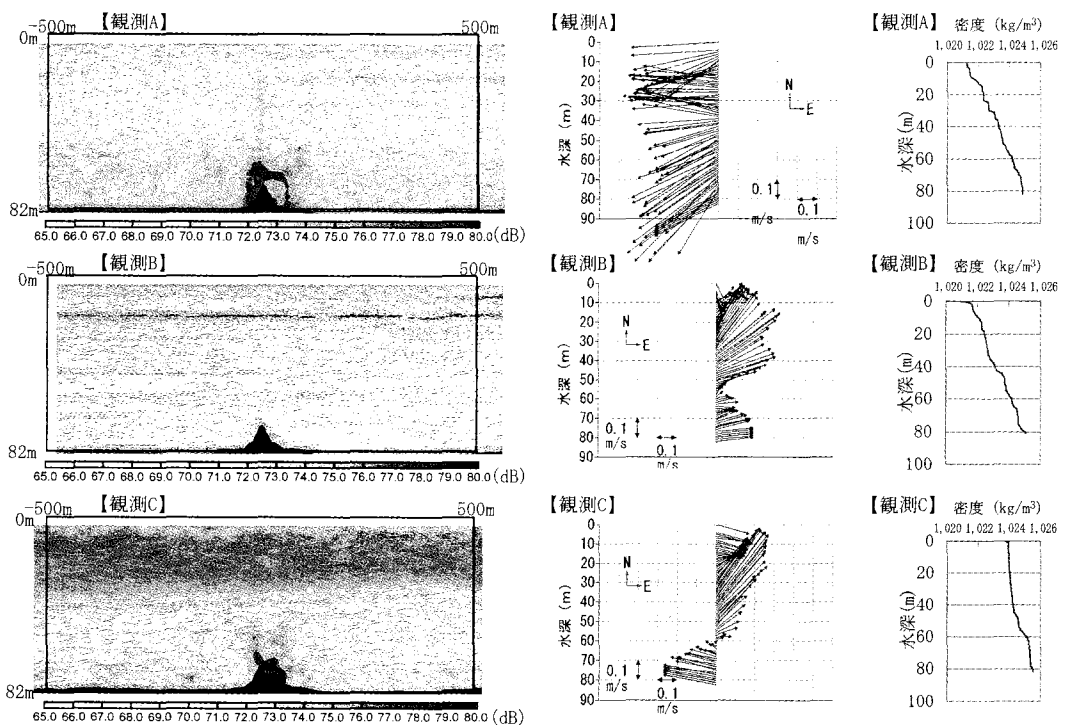
(1) 観 測

波浪による調査船の動揺により ADCP により観測された流速値には不自然なばらつきが見られた。一方、ADCP 観測にともなう音響反射強度は水塊中の懸濁物質分布を反映すると考えられ、水塊の分布構造を可視化することができた。

主に音響反射強度から鉛直混合に寄与する可能性のある以下の3つのパターンを抽出することができた。

- ① 構造物下流側に定常内部波（風下波）が発生する。この内部波により生じる水平流速のシアーにより鉛直混合の生じる可能性が考えられる。
- ② ①と同様に構造物下流側に定常内部波（風下波）が発生する。この内部波が碎波することにより大規模な鉛直混合が生じる可能性がある。
- ③ 上層水と下層水の流向が大きく異なる場合に、上層水へ下層水が連行される可能性がある。

図-2に以上のそれぞれのパターンを示していると考えられた観測結果(A～C)の音響反射強度分布、水平流速分布、上流側の鉛直密度分布を示す。水平流速分布は



(a) 音響反射強度鉛直断面分布
右側が方位 67°方向 中心下部がマウンド構造物

(b) 水平流速の鉛直分布

(c) 密度の鉛直分布

図-2 観測結果

構造物から観測時の主流向上流側 50 m から 550 m までの水平流速値を観測層毎に平均したものである。ただし、計測不能な水深 4 m 以浅およびデータ信頼性の低い海底付近 4.1 m (水深の 5% 相当) には、その直下または直上の流速値を用いた。

(2) 数値シミュレーション

各観測時の鉛直密度分布および層毎に平均した主流向上流側の水平流速分布を境界条件として数値シミュレーションを実施した。計算のタイムステップは 1.0 秒とし、6000 ステップの計算を行った。

図-2 に示された観測結果を適用した計算の結果を図-3 に示す。密度分布を観測により得られた音響反射強度と比較すると、観測 A では内部波が下流側に発生している様子を再現できていることがわかる。また、観測 B では構造物上部下流側にて等密度線の勾配が急となっている部分がみられ、内部波の碎波現象があるものと考えられる。観測 C では構造物側面にそって下層水が這い上がり、逆方向に流れる上層水に連行されている様子を見ることが出来る。

4. 鉛直混合量の計算

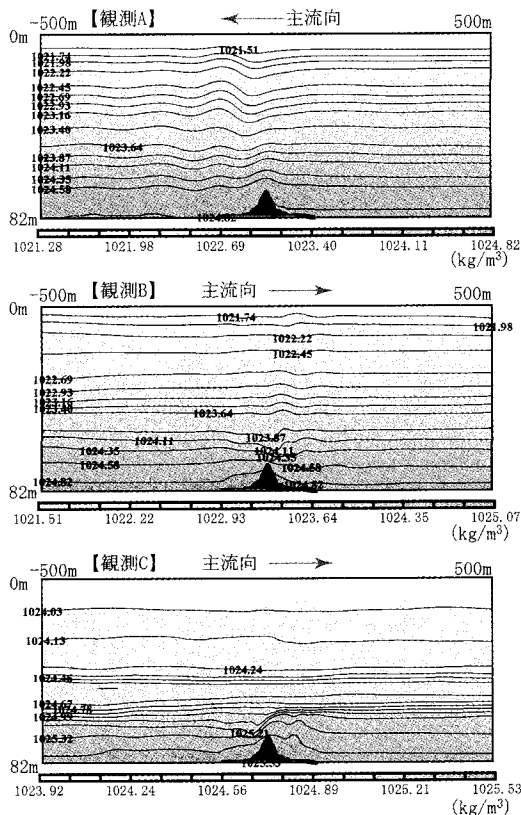
(1) 鉛直混合量の計算方法

人工マウンド構造物により鉛直混合された水塊は水平に移流していくことから、図-4 に示すように構造物下流側に検査断面を設け、設定水深以浅でここを通過する水平フラックス量として鉛直混合量をとらえることができる。たとえば流入側に栄養塩の鉛直濃度分布を想定した無次元マーカー濃度を与えておき、有光層を想定した設定水深以浅を通過するフラックスの増加量を求めることにより有光層への栄養塩供給量を算定することができる。なお、内部波の上下動による影響をできるだけ軽減するために、検査断面はスポンジ層を通過した後の流出側境界部とした。

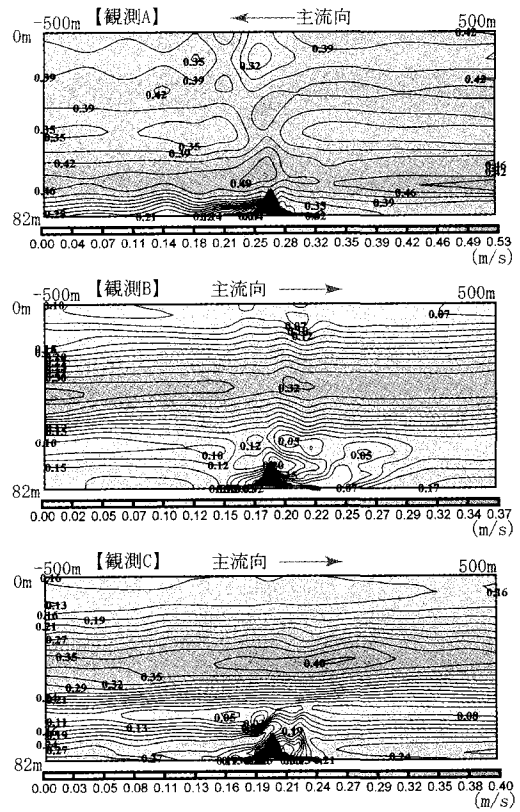
(2) 観測された条件における混合量

今回の検討では、鉛直混合の可能性として考えられた 3 つのパターンのうち、もっとも頻度が高くかつ定期的な現象と考えられる①の水平流速の鉛直方向シアーによる混合を混合量試算の対象とした。

図-3 に示した計算結果は、観測された水平流速を水



(a) 中心断面密度分布



(b) 中心断面水平流速分布

図-3 観測再現シミュレーションの結果

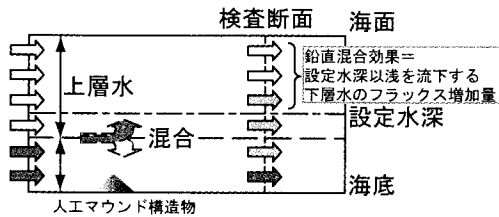


図-4 鉛直混合効果の算定方法

平方方向への空間的に平均した流速をそのまま計算条件として適用したものである。しかし、この条件では仮に構造物が存在しない場合であっても計算上の応力バランスが保てないためになんらかの混合が生じてしまう。そこで、あらかじめ構造物の無い条件にて、観測された流速条件による事前計算を行い、その結果得られた計算領域中心の水平流速分布を混合量計算の境界流速条件として改めて設定した。ただし、密度分布については観測値をそのまま適用している。

計算のタイムステップは $\Delta t = 1.0$ 秒とし、事前計算では 6600 ステップまで計算し、最終 600 ステップの平均をとった。また、混合量の計算は同じタイムステップにて 6000 ステップまで行い、最終 2000 ステップの時間平均をとった。

ここでは①の混合パターンを示すと考えられる 2 つのケース（観測 A、観測 D）の結果を示す。設定したマーカー濃度の分布および密度の鉛直分布を図-5、図-6 に示す。(a) の分布は海面で 0.0、海底で 1.0 とした一様勾配条件、(b) はロジスティック曲線 ($c = 1 - 1 / (1 + e^{(41-z)})$, z は水面からの深さ) としたものである。また、図-7 に

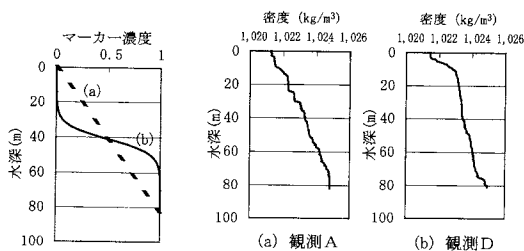


図-5 マーカー濃度

図-6 密度分布

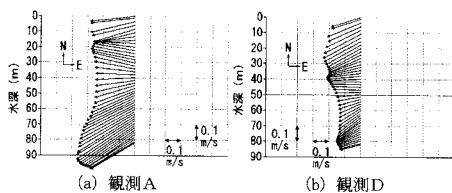
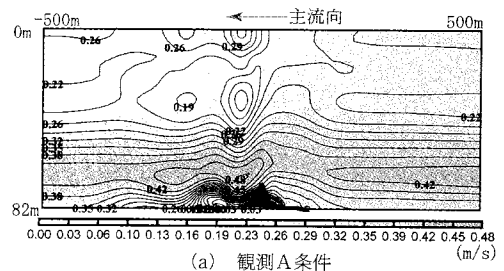


図-7 事前計算後の水平流速分布

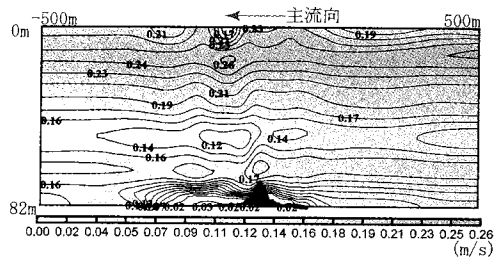
事前計算により得られた水平流速の鉛直分布を示す。これを流速境界条件に再設定して計算を行った。

計算結果としてマウンド中心鉛直断面における水平流速の分布を図-8 に、マーカー濃度 (b) の分布を図-9 に示す。観測 A は図-3 と同じであるが流速条件が異なるため、計算された内部波の発生状況が異なっている。

計算された海面からの累積フラックス増加量を図-10 および図-11 に示す。正の値はその水深で浅く通過するマーカー濃度フラックス量の増加を示す。マーカー濃度

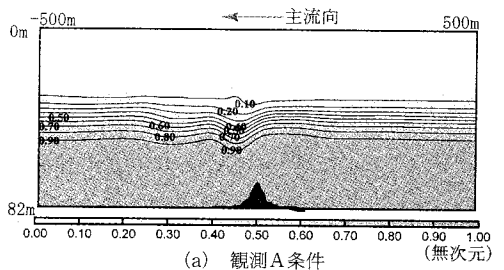


(a) 観測 A 条件

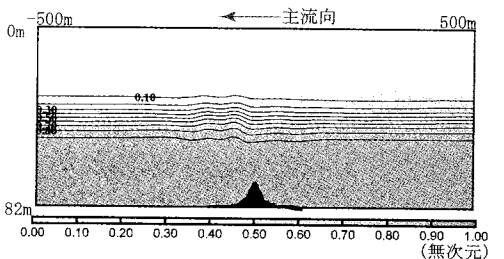


(b) 観測 D 条件

図-8 中心断面水平流速分布 (計算)



(a) 観測 A 条件



(b) 観測 D 条件

図-9 中心断面マーカー濃度 (b) 分布 (計算)

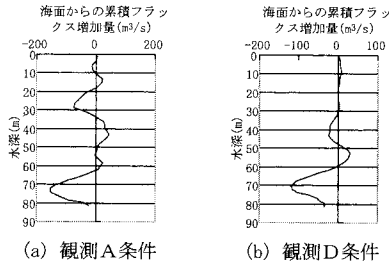


図-10 累積フラックス増加量（濃度分布(a)）

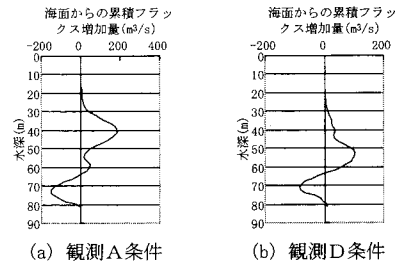


図-11 累積フラックス増加量（濃度分布(b)）

の分布が海域の栄養塩濃度と同じであり、その海域の補償深度を設定深度とすればそれ以下の累積フラックス量が正の値であるとき有光層下層水から栄養塩等が供給される効果があると判断することができる。効果は栄養塩分布状態や設定深度により異なる。

また、海底までの累積フラックス量は本来であれば0となるべきであるが、この結果では必ずしもそのようになっていない。これは流れ場の時間変動を打ち消すために平均する時間の不足、内部波が十分にスポンジ層で減衰していない、移流項を非保存形式で解いていることなどの影響が考えられる。

(3) 一様流一様密度勾配条件における混合量

流速条件の違いによる鉛直混合可能性の変化をみるために、鉛直密度勾配が一定(海面と海底で 3.0 kg/m^3 の密度差)で一様の流速条件における鉛直混合量を計算した。流れは構造物長手方向直角に流入する条件とし、流入流出側は速度規定、その他の境界はフリースリップ条件とした。ただし、ほぼ左右対称の条件であることから計算領域はハーフモデルとした。また、スポンジ層の粘性係数は鉛直方向にも $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

流入水のマーカー濃度分布は図-5の(b)とした。タイムステップは $\Delta t = 0.15/u$ (u : 流入流速) とした。計算されたフラックス量は時間的に変動するため、12000ステップの計算を行い、その後流入流出フラックスがバランスする前後500ステップの平均をとった。

図-12に計算結果を示す。縦軸の値は一定の水深以下を流下するマーカー濃度のフラックス増加量およびその全流入量に対する割合である。この条件では流速 $u = 0.49 \text{ m/s}$ でほぼ内部フルード数が1.0となり、これ以下の流速で定常内部波が発生する。フラックスの増加割合は今回の計算範囲では $u = 0.40 \text{ m/s}$ を超えるとほぼ横ばいとなっている。鉛直混合効果は流速だけではなく、内部波のモードとの関係により変化していることが推察される。

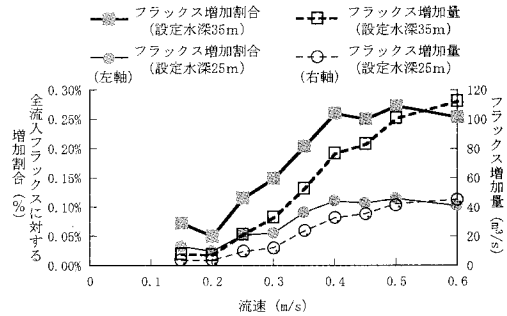


図-12 海面からの累積フラックス増加量と流速の関係

5. ま と め

人工マウンド構造物による成層海域の鉛直混合現象について、観測により鉛直混合に寄与すると考えられる現象として①内部波による水平流速の鉛直方向シアーおよび②内部波の砕波、③下層水の上層水による連行の3つのパターンを見出すことができた。また、数値シミュレーションによる再現計算を実施し、①のパターンにおける鉛直混合効果量の算定を試みた。その結果、栄養塩濃度分布、補償深度、流速条件による効果の違いを確認することができた。

しかし、観測においては十分な精度を持った流速値が得られなかったこと、数値シミュレーションでは保存性を十分に得ることができなかったなどの課題が残った。また、鉛直混合を計算する上で重要な要素となる乱流拡散の計算についても十分な検証を行っていく必要がある。今後は以上の課題を解決すべく、さらに検討を続けていく予定である。

参 考 文 献

- 本田 (2003): マウンドによる鉛直混合現象に関する数値シミュレーション, 平成15年度水産工学会講演会論文集, pp. 61-62.