

人工海底山脈の効果発生機構

EVALUATION OF EFFECTS OF AN ARTIFICIAL UPWELLING GENERATION STRUCTURE INSTALLED ON SEABED

本田陽一¹・鈴木達雄²・間木道政³

Yoichi HONDA, Tatsuo SUZUKI and Michimasa MAGI

¹正会員 株式会社ジオスケープ (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-2-5)

²フェロー会員 株式会社間組 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

³財団法人地球環境産業技術研究機構 (〒619-0292 京都府木津川市木津川台9-2)

The artificial sea Mountains is a mound installed in the bottom of the sea bed. It used the energy of the flow, and it bring nutritive salts of the bottom of the sea neighborhood to the upper layer. The outbreak mechanism of the effect was complicated, and the lee wave had been confirmed mainly so far.

We could include the other phenomena for this examination and analyzed it in detail, and the method depended on spot observation and numerical value simulation. We was able to confirm the phenomenon that lee wave broke into.

In addition, We was able to confirm the lee wave and interaction of the shear flow.

Key Words : upwelling, lee wave, numerical simulation

1. はじめに

人工海底山脈は表層の栄養塩類の不足が生物生産の制限因子となっている海域において、真光層以深に比較的豊富に存在する栄養塩類を表層付近に供給することにより一時生産を増大させ、漁業生産の拡大を図ることを目的とする構造物である。また、近年の地球温暖化問題に対する対策として、海洋中の植物プランクトンによる二酸化炭素吸収とその海洋貯留の効果も期待されている。

この構造物は海底にブロック等をマウンド状に積み上げることにより造成されるものであり(図-1参照)、構造物に作用する流れを利用して下層から表層への栄養塩類の供給を行う。

この構造物の効果発現は、いわゆる湧昇流という言葉からイメージされる移流によるものではなく、鉛直混合の促進によるものであることが示されている。ここでは、その混合機構がどのような条件で生じる可能性があるか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実施し、構造物造成に適した海域条件について考察を行った。

2. 検討方法

(1) 現地観測

人工海底山脈はこれまでに複数海域に設置されている。その中で、長崎県生月島北方約5km、水深およそ80mの比較的平坦な海域に設置された構造物は最初に設置されたものであり、これを対象として現地観測を行った。観測は2003年～2005年の成層期に実施した。

主要な観測項目は、構造物長手方向直角(当該海域潮流の主流向)に設けた側線にそった超音波流速

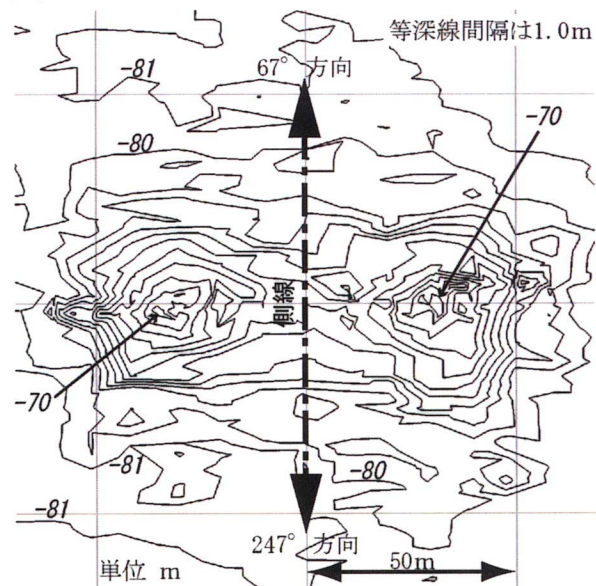


図-1 人工海底山脈構造物と観測側線

計による水平流速および音響反射強度の測定、側線端点におけるCTDによる水温・塩分観測である（図-1参照）。

(2) 数値シミュレーション

観測で得られた構造物周辺の流況の再現による構造物の影響評価、仮想的な条件において生じる現象の確認、構造物に作用する流況の把握などを目的として、数値シミュレーションを実施した。

数値シミュレーションには成層効果を考慮したLES乱流モデルを用いた（式(1)～式(11)）。

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

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

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

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

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

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

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

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

$$h_j = \frac{\nu_{\text{SGS}}}{\text{Pr}_{\text{SGS}}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \quad \dots \dots \dots (9)$$

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

$$Rf = -g \frac{\partial \rho}{\partial z} / (\text{Pr}_{\text{SGS}} |\bar{S}|^2) \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここで、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、 $C_s=1.0$ 、 $\text{Pr}_{\text{SGS}}=0.4$ 、 $Rf_c=0.33$ 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。なお、海面および海底の境界はすべてフリースリップとし、側面境界にはバッファ層を設け、その外周に流速条件を与えた。

観測の再現計算においては、それぞれの観測ケースにおける上流側の密度鉛直分布および水平流速を境界条件として設定した。水平流速については、構造物から50m以上上流の側線上で測定された流速観測値を水深別に平均して用いた。計算領域は構造物を中心として水平方向に500m×500m、水深80mとし、格子幅は水平方向5m、鉛直方向2mとした。解析時間ステップ0.5秒の非定常計算としたが、各観

測ケースの状態はそれぞれ準定常であると仮定し、初期条件の影響がほぼ見られないと判断されるまで行った。

なお、観測による音響反射強度分布から流況パターンが読み取られるケースにおいては、それとの比較により計算の再現性の確認を行った。その結果、再現性が十分でないと判断されるケースも一部にみられたが、おおむね良好な再現性を確保することができた。

3. 鉛直混合の発生機構

これまでに、人工海底山脈による鉛直混合の類型として、「湧昇渦」、「風下波（地形性内部波）」によるシアー拡散、「風下波の砕波」「連行」などの可能性が示されている¹⁾。その後の一連の観測とその再現計算からは上記の他に「内部跳水」と考えられるケースが確認された。以下に、それぞれの湧昇機構の概要とその要因を述べる。また、風下波の砕波、内部跳水、風下波と流入流速シアーの相互作用の例については、図-2～図-5に計算により得られた密度の鉛直断面と、その時の水平流速および密度の鉛直分布を示す。なお、断面図は観測側線に沿っており、東西方向から反時計まわりに23°回転した方向となっている。

① 風下波によるシアー拡散

風下波は成層が発達し、鉛直方向に密度勾配がある時に、構造物背後に地形性の内部波（風下波）が生じるものである。この内部波は流速が内部波の伝搬速度よりも遅い場合、すなわち $\text{Fr} < 1$ （ $\text{Fr} = U\pi/(ND)$ ）の条件化で発生する。ここで Fr は内部フルード数、 N は浮力振動数、 D は水深である。風下波は密度勾配があれば鉛直方向にも伝搬する性質を持つ。このことにより、海底に設置された構造物が海面付近の流況にまで影響を及ぼす可能性がある。また、内部波は流速のシアーを生じるために、これが鉛直混合を促進するものと考えられる。ただし、密度勾配の存在が内部波発生の必要条件であり、構造物深さ付近に密度勾配がない場合（たとえば躍層が構造物天端よりも上方にある2成層の場合など）には発生しない。

② 風下波の砕波

風下波は波動現象であり、表面波の砕波に類する現象により急激にエネルギーが逸散する可能性がある。そのような場合、大規模なスケールで混合することが想定される（図-2、図-3参照）。

③ 風下波と流入流速シアーの相互作用

一般の海域の流れは必ずしも鉛直方向に一様ではなく、表層から下層にわたり流向流速が変化する。

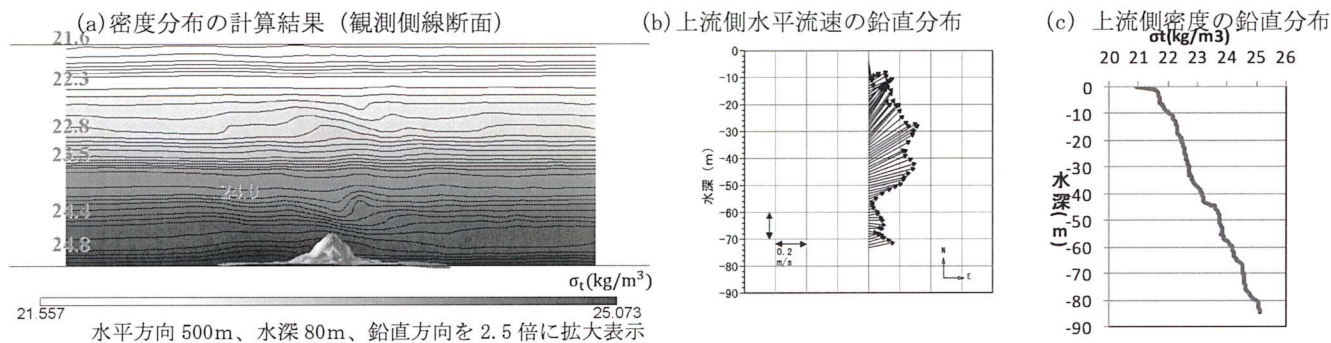


図-2 風下波の碎波事例(1)

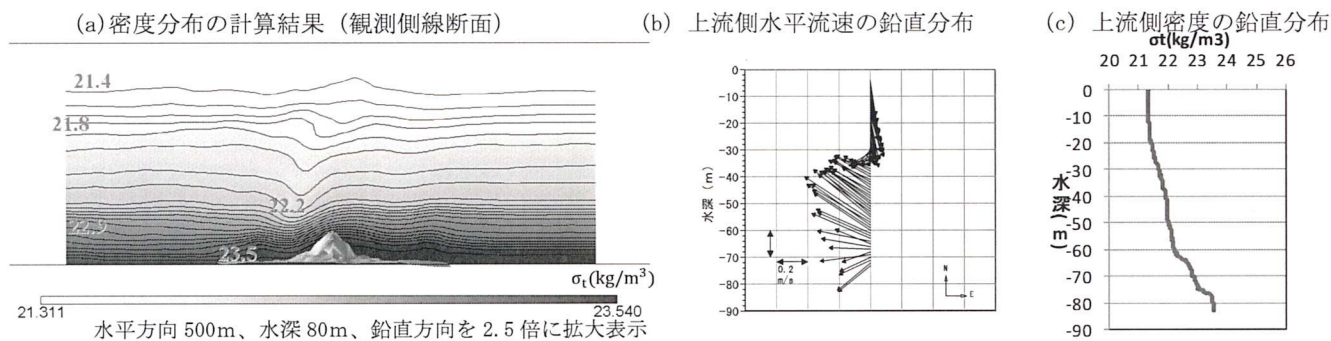
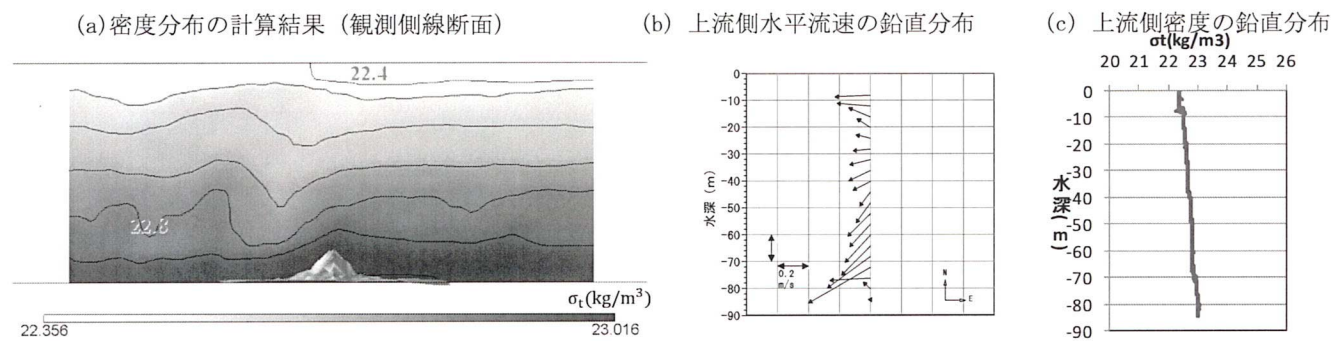


図-3 風下波の碎波事例(2)



水平方向 500m、水深 80m、鉛直方向を 2.5 倍に拡大表示

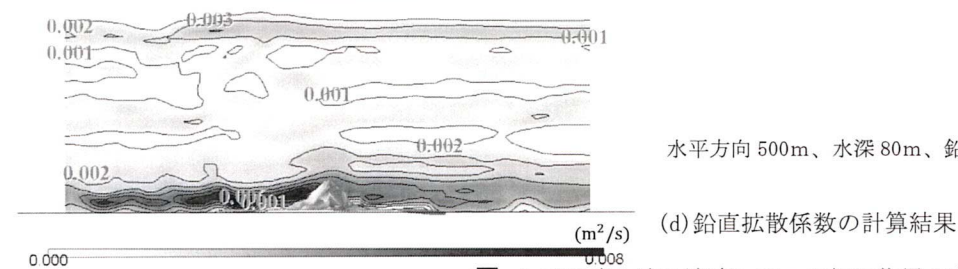


図-4 風下波と流入流速シアの相互作用の事例

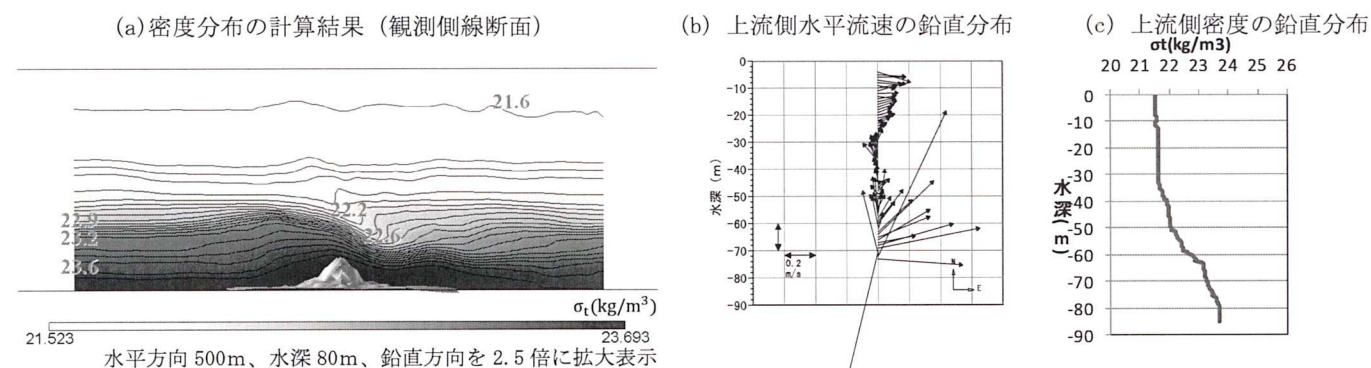


図-5 内部跳水の事例

鉛直方向の流向流速の勾配はシアを生じ、鉛直方向の不安定さを高める。そのような部分に風下波が作用することで、不安定さが増大し、比較的大きなスケールの混合が生じるものと考えられる（図-4参照）。

④連行

連行は下層水と上層で流向が大きく異なる場合に、下層の海水が構造物斜面にそって上昇した後に上層に連行されていく現象である。これは、海底付近とその上層で流れの向きが大きく異なる場合のみみられた。

⑤内部跳水

下層の密度の高い海水が構造物に乗り上げた後に下流側を下り落ちることにより内部跳水が生じる。これは、構造物の高さスケールまでの海底付近に高密度の海水が存在するときにだけみられた（図-5参照）。

⑥湧昇渦

湧昇渦は密度成層が形成されていない場合に発生する可能性があるもので、構造物に流れが作用したとき、下流側に間欠的な大規模渦が生じ、これが自己誘導速度により上昇することにより大規模な鉛直混合が生じる。

観測は成層期に実施したことから、上記のうち、湧昇渦（⑥）を除く現象を確認することができた。ただし、連行（④）および内部跳水（⑤）は限られた条件でのみ発生することから、観測で確認されたケースはわずかである。

一方、風下波の発生頻度は比較的高く、観測においても多数の事例を確認することができた。風下波による鉛直混合効果としては、先に示したように、内部波で形成される流速シアによる混合拡散（①）と内部波そのものが砕波すること（②、およびもともとその海域に存在したシアによる鉛直不安定性が内部波により高められること（③）による混合が考えられる。①および②は内部波スケールよりも小さな拡散混合であり、③は内部波の波高スケールの大規模な混合である。

4. 風下波による大規模な混合の可能性

(1) 風下波の砕波

風下波の伝搬にともなう流速シアにより生じるミクロスケールの鉛直混合に対し、風下波が砕波する場合には大規模な混合を期待することができる。また、内部跳水や連行現象も大規模な混合をともなう可能性があるが、それらは海底近くの底層で発生する現象であることから、表層への影響は限定的であると考えられる。このようなことから、風下波の

砕波は人工海底山脈による鉛直混合効果に重要な役割を果たしている。

内部波が砕波する場合には混合により流速が平滑化するため、観測または一時刻の計算結果だけからその発生を判断することは困難である。そこで、計算過程において密度勾配の逆転またはそれに近い状態がみられたケースについて砕波の可能性のあるものと判断した。

今回の検討では、数例の風下波の砕波現象と考えられるケースを確認することができた。図-2および図-3は風下波が砕波している可能性のある観測例とその再現計算結果を示したものである。図-2のケースでは、構造物の直上付近で砕波状態となっている。このときの流速は、砕波水深付近で著しく小さくなっている。

また、図-3のケースでは表層付近で密度勾配の逆転がみられたものである。このケースでは比較的表層付近で内部波の砕波にともなう混合が生じている可能性がある。この例では、底層の流速が大きく、中層の流速が一端小さくなりさらにその上層では流向が変化している。このような場合、構造物により発生した内部波が上方へ伝搬する過程で、流速が小さな領域に達した際に内部波の波長が短くなり砕波に至るものと考えられる。

図-6は流速の変化による砕波の様子をモデル計算により示したものである。この計算は水深160mの海底に高さ20mの構造物を設置した場合を想定した鉛直2次元計算である。図の右向きを正とし、海底部で-0.4m/s、表層で+0.4m/sの一定勾配で変化する水平流速を与えた。また、密度分布は表層と海底の差が 4kg/m^3 の一定勾配とした。図からは、構造物により生じた内部波が流速逆転部付近で崩れ、上層に伝搬していないことがわかる。

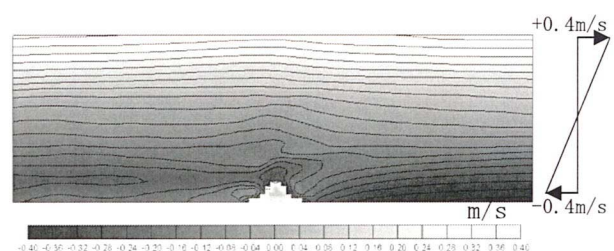


図-6 流速の逆転による内部波の砕波
(水平流速分布)

(2) 上流側のシアに対する風下波の作用

海域の流速分布は一定でないことから、構造物に作用する上流側の流れも一定のシアを持っている。そのような上流側のシアと風下波の相互作用により大きな混合が生じる可能性が考えられる。

図-4は数値解析による鉛直拡散係数を示したものである。上流側には流れのシアにより、鉛直拡散

係数の大きな領域が数層にわたって存在している。この流れが構造物に作用することで内部波が生じ、これが表層付近に伝搬している。拡散係数が上流側よりも下流側で小さくなっていることがわかる。これは、構造物の作用によりもともとあった流れのシアが拡大されて鉛直混合が促進され、その結果として流速が平滑化されたためと考えられる。

風下波が発生すると流速シアが生じ、その結果として鉛直混合が促進されると考えられてきたが、上流側に存在するシアが風下波の影響を受けて解消される効果についても考慮していく必要がある。

5. 鉛直混合効果発生機構の類型

以上の検討により、流速の分布と成層状態が鉛直混合効果に密接に関連し、それら条件により風下波の発生とその砕波やシア流との相互作用、内部跳水や連行現象、湧昇渦などの現象が生じることが明らかとなった。

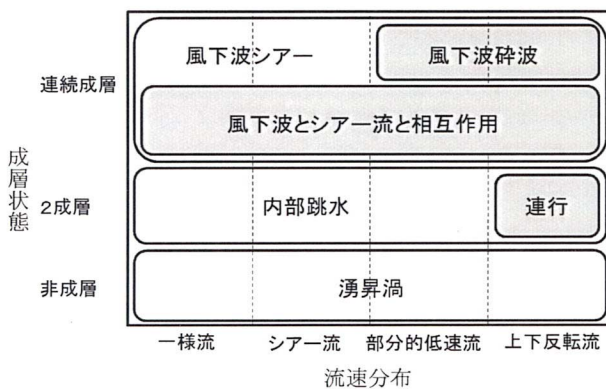


図-7 鉛直混合効果発生機構と流速分布と成層状態の関係模式図

それぞれの現象がどのような条件で発生するのか、またその鉛直混合効果はどれほど見込むことができるのかについてはまだ十分に検討が進んでいない。しかし、定性的な範囲では現象の類型分けが可能であると考えられる。図-7はその類型化を試みたものである。

人工海底山脈の効果を見極めるためには、これら多様な条件のもとで多様な現象が生じることを踏まえていく必要があると考える。

6. 周辺海域の流況

上記のように、構造物に作用する流速分布の複雑さは、構造物に働く流れのエネルギーの大きさなら

びに構造物により生じた内部波等の伝搬や変形、砕波など大きな影響を及ぼす。したがって、人工海底山脈はその設置地点により効果が大きく異なることが予想される。

今回調査対象とした構造物の設置された海域は東シナ海の沿岸部に位置し、周辺には生月島をはじめいくつかの島や半島が存在し、比較的流況の複雑な海域である。図-8は海底設置の超音波流速計により得られた潮流流速の一例（2005年9月12日から13日）である。このように、表層付近下層の流

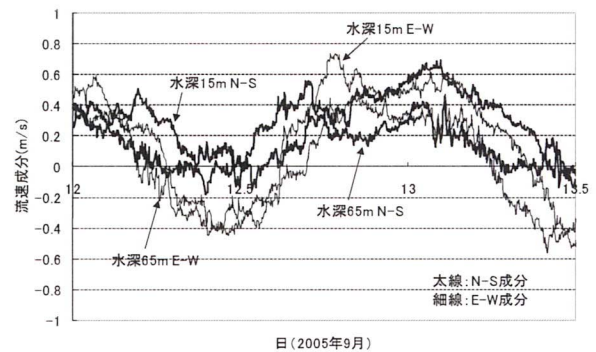


図-8 観測された構造物設置地点付近の上層と下層の潮流流速成分

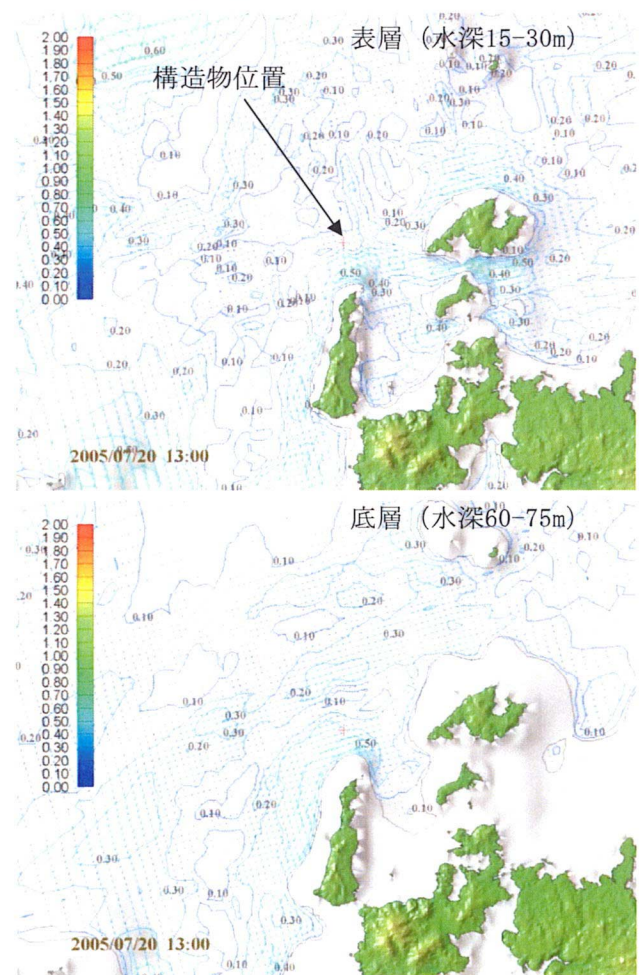


図-9 調査対象地点周辺の流況計算（転流時）

向・流速はそれぞれ異なっている。図-9 は調査対象構造物の周辺海域の非静水圧近似による潮流シミュレーションの結果である。解析の格子幅は水平方向 500m, 鉛直方向 15m としている。ここに示した結果は、上潮時から下潮に転流する時刻のものであり、表層と下層では流れの様子が大きく異なっている。これは地形による影響を大きく受けた流れとなっているためと考えられる。

7. まとめ

これまでに、人工海底山脈のいわゆる湧昇効果は、密度成層が形成されている海域においては構造物による地形性の内部波や内部兆水、連行などによる鉛直混合効果であることが示されてきた。今回の検討では、観測事例を追加し、効果発現機構を見直した結果、内部跳水、風下波とシア一流の相互作用の可能性、流速分布に依存した風下波の碎波の可能性を示した。また、流速と密度の分布パターンと対比す

ることにより、流速や密度構造と効果発現機構の発生との関係性をある程度示すことができた。さらに、流速や密度といった海域の流況構造により効果の発現状況が大きく異なる可能性のあることから、対象構造物周辺海域の流況予測計算を実施した。

今後は、現状では定性的にとどまっている評価を定量的な評価へと進め、効果量を定量的に評価するとともに、最適な造成海域の選定方法、海域特性別の最適な構造物形状の検討などを進めていきたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、貴重なご助言をいただきました東京海洋大学岡安章夫教授に感謝いたします。

参考文献

1) 本田陽一，間木道政，鈴木達雄：人工マウンド構造物による鉛直今後現象の観測と混合量の試算，海岸工学論文集，Vol. 51，pp. 1151-1155，2004