

数値解析による湧昇マウンド礁の鉛直混合効果に関する研究

Numerical Analysis of Vertical Mixing by an Artificial Upwelling Mound



本田陽一 Yoichi HONDA*

要 旨

湧昇マウンド礁は人工海底山脈とも呼ばれ、海底にマウンド構造物を設置することにより人工的に地形性湧昇効果を得ようとするものである。この構造物には、底層に比較的豊富な栄養塩類をそれが不足する表層付近にもたらす湧昇効果のほか、漁礁効果、岩礁性生態系の創造効果など、水産業に有用な効果があり、すでに全国 10 か所において事業が整備済みまたは整備中である。しかし、湧昇マウンド礁が持ついくつかの効果のなかで、湧昇効果についてはその効果の発現機構の解明および定量的評価が十分になされていなかった。そこで本研究では、湧昇マウンド礁による湧昇・混合効果について数値解析を主とした検討を行った。

湧昇マウンド礁は流れのエネルギーの一部を鉛直混合に利用しようとするものであるが、利用されるエネルギーは全体のごく一部にすぎず、数値解析においては系全体の持つ大きなエネルギーと鉛直混合に関わる小スケールの現象の両者を精度よく解析できる手法を用いる必要がある。そこで、流体解析において最も数値的誤差の影響を受けやすい移流項の計算について、空間 3 次精度を持ち、物理量のプロファイルの維持性能の高い B 型 CIP (Cubic Interpolated Pseudo-particle) 法を採用した。しかし、通常の B 型 CIP 法は非保存系の手法であることから、連続性(体積保存性)の破れが問題となることが明らかとなった。また、CIP 法系の手法の中で CIP-CSL 法などの保存型手法がいくつか提案されているが、解の安定性に課題がある。

そのため、B 型 CIP 法を基礎として、有限体積法の定式化手法を当てはめることにより保存性を満足する保存型 B 型 CIP 法を新たに開発し、適用した。CIP 法は物理量とその勾配を変数として持つが、その両者を有限体積法の構成に適用することにより、空間 3 次精度を保ったまま体積保存性を満足したことにこの手法の特徴がある。また、有限体積法で必要となる流束計算は CIP 法補間式を直接積分することにより、近似的手法によらずに得ることができ、高い精度を維持できる。さらに、他の保存型 CIP 法では安定した解析を行うために時間方向にも 3 次精度以上の精度が必要とされるが、本手法は時間方向に 1 次精度であっても安定した解を得ることができる。また、混合現象を扱う上で重要となる乱流モデルには浮力効果を考慮した LES (Large Eddy Simulation) を用いた。

以上の手法により成層流中における湧昇マウンド礁周辺の流況解析、混合評価を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 湧昇マウンド礁に成層流が作用すると内部波が励起され、風下波として下流および上方に伝搬する。この現象は、2 層流ではみられず、連続成層であることが必要である。また、内部波の波速が一般流の流速を越える範囲でのみ定在波が形成され、この定在波によるエネルギー伝搬と内部波の不安定化が鉛直混合に大きな役割を果たすことが明らかとなった。
- ② 励起された内部波は海域の密度分布から決まるブラントバイサラ振動数および流速に規定される基本波として発生するが、一方で水深条件とブラントバイサラ振動数により決定されるモード波としての特性を持つ。この二つの内部波特性の違いにより湧昇マウンド礁に作用する抗力は内部フルード数により大きく変化する。このことはインピーダンスにより説明することができる。
- ③ この湧昇マウンド礁により生じた内部波は大きなエネルギーを持ち、条件により海底付近から表層にまでそのエネルギーが伝搬する。しかし、何らかの不安定現象が発生しないかぎり、内部波による鉛直混合効果は小さい。
- ④ 不安定現象は、定在内部波の逆流域または逆流にいたらずとも十分に流れのシアーが大きくなる領域で発生しうる。逆流域の発生は、内部波の水平流速の振幅が一般流の流速を越えるときに生じるが、海面と海底で内部波の反射による重ね合わせがある場合に特に現れやすい。この現象を生じさせるためには、湧昇マウンド礁の高さおよび長さを十分に大きくする必要がある。

* 技術第二部

- ⑤ 密度躍層や流速の急変といった内部波が伝搬する上で臨界層となる条件が存在するとき、内部波の不安定現象にともなう混合を引き起こしやすい。一般流中のシアーや密度急変部などの不安定要因により、内部波の不安定化が促進される可能性がある。実海域では表層混合層の発達にともなう密度躍層の形成や異なる水塊が重なる二枚潮などの現象もあり、密度、流速とも、複雑な分布形を持つ。このようなことから、密度や流速の急変部など、特定の水深で不安定現象が発生する可能性がある。
- ⑥ 不安定現象が生じる領域では計算格子スケールの歪テンソルの大きさが大きくなり、それにともない乱流エネルギーの逸散率が上昇し、鉛直混合が促進される。混合の効果評価、つまり栄養塩類の鉛直輸送評価は、この鉛直混合によるフラックスを算定することにより行うことができた。混合フラックスによる評価を行った結果、湧昇マウンド礁による鉛直混合の多くは海底付近で生じるが、中層以浅であっても躍層や流速変化部など不安定現象の生じる層で一定のフラックスが発生することが明らかとなった。

キーワード：湧昇マウンド礁，内部波，混合，CIP法，有限体積法