

湧昇マウンド礁による低次生産効果把握のための数値計算

Evaluation of Effect of Artificial Upwelling Producing Structure on Lower-Trophic Production using Simulation

中山哲厳¹・八木 宏²・藤井良昭³・佐野朝昭⁴・武田真典⁵・岡野崇裕⁶

Akiyoshi NAKAYAMA, Hiroshi YAGI, Yoshiaki FUJII, Tomoaki SANO
Masanori TAKEDA and Takahiro OKANO

To evaluate the effect of artificial upwelling producing structure on lower tropic production, hydrodynamics and lower-trophic ecosystem simulations were executed. To verify the reproducibility of the simulation, results of the field observation were used. As a result, the bottom layer flow acting on the structure and fluctuation of temperature induced by internal tide were reproduced. However, the problem was left on the evaluation of mixed layer depth of the temperature. On lower-trophic ecosystem simulation, POC Sinking fluxes were reproduced. Suggested by the simulation, the area that primary production was increased by effect of the structure, extended 30 km north-south direction and 10 km west-east direction. And the value of increase was estimated at 1.3 mgC/m²/day.

1. はじめに

湧昇マウンド礁（以下、マウンド）とは、海底上にコンクリートブロック等を山脈状に積み上げて造成される構造物である。これは、潮流や海流を利用して湧昇流の発生や水塊の鉛直混合を促進し、底層の栄養塩を真光層へ供給することで、一次生産を含む低次生産の増加により水産資源の増大を図るものである。

現在、マウンドは長崎県や鹿児島県等で整備されている。その低次生産効果については、これまでも現地調査、衛星画像や数値計算などの手法により検討されている（例えば、間木, 2007; 熊谷ら, 2007）。しかし、評価にはばらつきがあり、低次生産効果の確定に至っているとは言い難い。その要因として、湧昇・混合効果を得るために適した設置位置や構造が、対象海域により異なることが挙げられる。それゆえ、海域特性を適切に反映した評価手法が必要であり、数値計算が有効な手段であると考えられる。そこで、本研究では長崎県五島列島西方海域に設置されているマウンドを対象に、当該海域における現地調査データを利用して流動・低次生態系モデルを構築し、マウンドによる低次生産効果の把握を試みた。

2. 数値計算条件

(1) 数値モデルの概要

流動・低次生態系モデルは、中山ら（2009）によるモ

デルを用いた。当該モデルは、流動場の計算にPOM（Blumberg・Mellor, 1987）を使用し、低次生態系に窒素循環を解くKKYSモデル（Kawamiyaら, 1995）にリンのコンパートメントを考慮したモデルである。また、マ

表-1 計算条件

項目	内容
計算時間	2008/9/8～2008/10/8 (1ヶ月間)
計算領域	長崎県五島列島周辺海域(南北107.3km,東西97.2km) 東経128度19分から129度22分,北緯32度24分から33度23分
海底地形	JODC J-egg500
計算格子	東西格子数×南北格子数 (1)49×54,(2)62×56,(3)35×32,(4)38×38,(5)47×47
層分割	σ 座標21層
格子間隔	(1)2.025m,(2)675m,(3)225m,(4)75m,(5)25m
時間ステップ	外部モード: (1)16.2秒,(2)5.4秒,(3)1.8秒,(4)0.6秒, (5)0.2秒 内部モード: (1)97.2秒,(2)32.4秒,(3)10.8秒,(4)3.6秒, (5)1.2秒
境界条件	潮汐:日本周辺海洋潮汐(潮流)モデル 水温,塩分および流速:JCOPE2再解析データ
気象条件	気圧,気温,相対湿度,風:GPV (MSM) データ 全天日射量,雲量:長崎海洋気象台データ
物質濃度	現地調査結果(2008/9/10,9/12,10/4,10/6)及びJODCデータ

* 表中の(数値)は計算領域番号を示す。

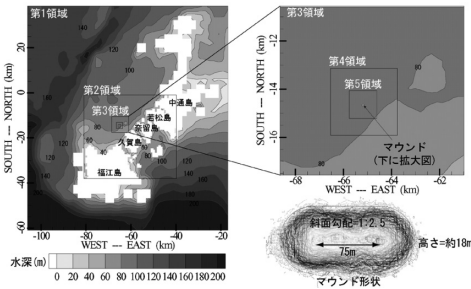


図-1 計算領域及び海底地形

1 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
2 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
3 地環修 (株)アルファ水工コンサルタンツ
4 (株)アルファ水工コンサルタンツ
5 正会員 修(工) (社)水産土木建設技術センター
6 正会員 修(工) (社)水産土木建設技術センター

ウンド形状を表現し、かつ広領域の計算を効率的にするために、多重の2way ネスティング手法を用いている。

(2) 計算条件

主な計算条件を表-1に示す。計算領域は図-1に示す五島列島全域を含む約100km四方の領域である。海底地形はJODCによるJ-egg500を使用してクリギングにより空間的な補間を行い作成した。なお、マウンド形状は平成19年測量成果をもとに設定した。対象海域は、潮汐および対馬暖流の影響を受ける海域であるため、Matsumotoら(2000)の日本周辺海洋潮汐(潮流)モデルによる潮位・潮流、JCOPE2再解析データ(Miyazawaら, 2003)による

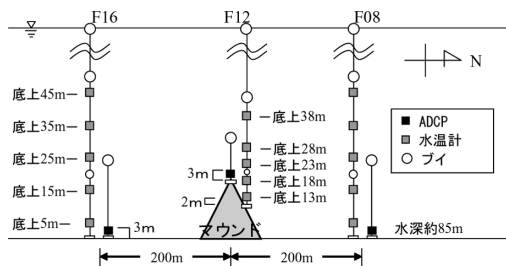


図-2 観測位置及び計測機器設置状況

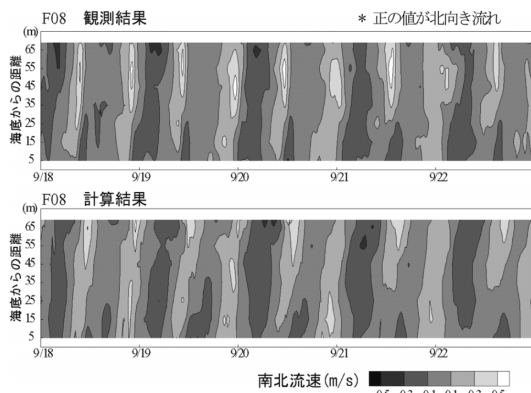


図-3 南北流速の比較図 (F08)

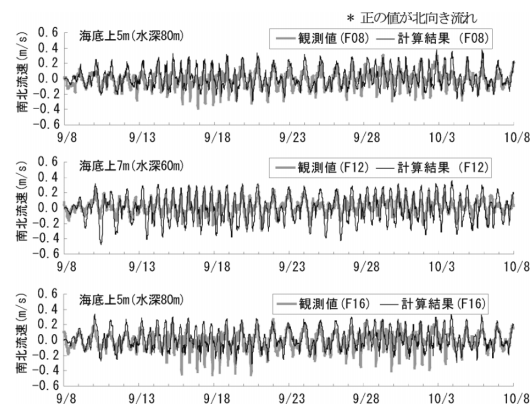


図-4 海底近傍の南北方向流速比較図

流速・水温・塩分を使用した。一方、低次生態系モデルのパラメータ、初期条件や境界条件は、現地観測データや既往文献、JODCデータを利用して設定した。ここで、懸濁態有機窒素 (PON) から懸濁態有機炭素 (POC) への変換には、現地観測による POC/PON 比 (7.21) を使用し、POC の沈降速度は現地観測による 15.6 m/s とした。

3. 計算結果

(1) 流動場の計算結果

流況については、図-2に示す観測位置におけるデータを用いて再現性の検証を行なった。図-3に、マウンドの北側に位置する地点F08における湧昇軸方向(南北)の観測値と計算結果の流速変化を示す。これより、流向が変化するタイミングを概ね再現できており、北向き流れの時は上層側で流速が高く、南向き流れの場合には底層で高い流速が発生する傾向も概ね一致している。さらに、マウンドに作用する海底近傍の流速に着目すると、変動の傾向および流速値を概ね再現できている(図-4)。

図-5に、地点F08における水温の経時変化を示す。観測では、表層~海底上55mまで水温が概ね一様であるが、計算では再現しきれていない。一方、内部潮汐に起因す

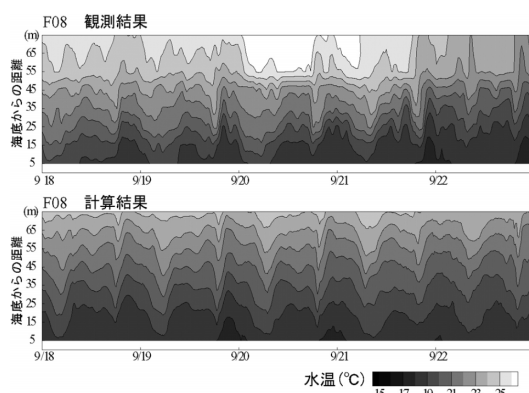


図-5 水温の比較図 (F08)

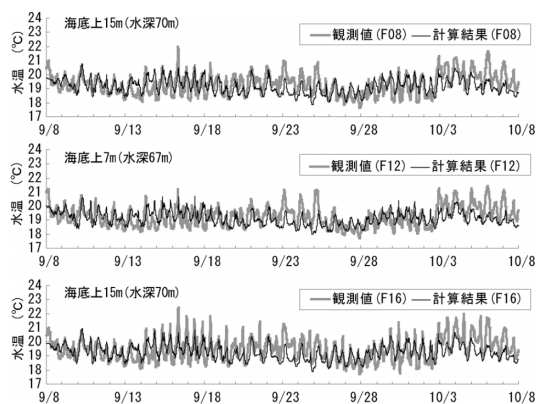


図-6 マウンド頂部近傍の水温比較図

と考えられる約12時間周期の水温変動などの経時的な変化傾向は概ね合致している。また、図には示していないが、JODCデータ及び観測結果を解析した結果、本海域では水温と栄養塩 (NO_3) が負の相関関係にあることが確かめられたため、底層付近の水温変化を再現できれば、 NO_3 変化も概ね再現できるものと考えた。そこで、

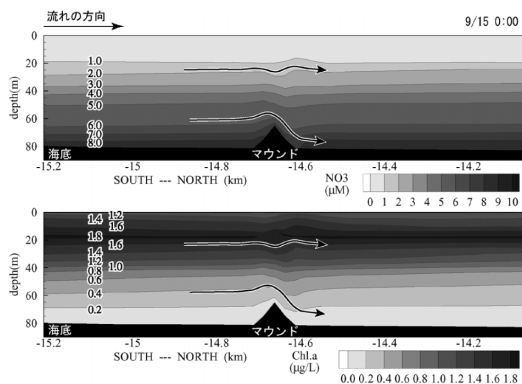


図-7 マウンド周辺における NO_3 , Chl.a の鉛直断面図

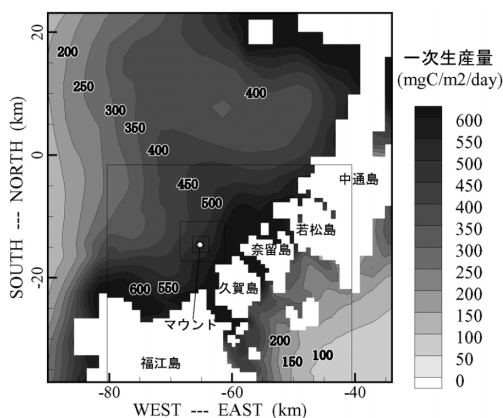


図-8 一次生産量の平面分布図

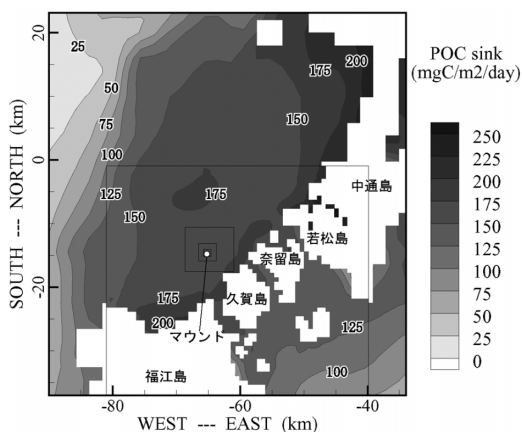


図-9 海底への POC 沈降量分布図

底層における水温の経時変化を比較した結果、全体的な水温の変化傾向は再現できている。ただし、約12時間周期の水温変動に関しては、振幅が小さめの傾向であった。この要因は、JCOPE2再解析データによる日平均水温を境界値として使用しているため、1日以下の周期をもつ水温変動が除去されていることが挙げられる。ただし、これに代わるデータがないため、水温変動の再現性向上に関しては、今後の課題である。

(2) 低次生態系の計算結果

NO_3 及びクロロフィル a (Chl.a) について、マウンドの湧昇軸方向 (南北) に沿った鉛直断面を図-7に示す。 NO_3 は、マウンド近傍で明確な変動がみられ、マウンド斜面を乗り越える様子が分かる。Chl.a に関しても同様の傾向がみられる。このようなマウンド近傍での変化については、後述するマウンド直上における湧昇流・下降流の影響によると考えられる。

図-8に、水柱積分された計算期間平均の一次生産量 (純基礎生産量) の分布を示す。一次生産量は、沿岸部で高く、沖に向かうにつれて減少する傾向がある。マウンドは、岸から北西方向に一次生産が高くなっている領域に位置し、その一次生産量は約 $540 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ であった。これは、地球環境産業技術研究機構 (2005) による近隣海域の長崎県生島島北部での実験値 ($362 \sim 440 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$) と同程度である。

図-9に、計算期間平均の海底への POC 沈降量分布を示す。五島北側における海底への懸濁態有機炭素 (POC) 沈降量の分布は、一次生産と同様に沿岸部で高い傾向がある。マウンド周辺の POC 沈降量は約 $160 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ であり、観測により得られた $179 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ (海底上約 10 m の値) と同程度であった。

NO_3 , Chl.a などは経時的変化が把握できるデータがなかったため、境界条件として設定するのみで時間的な変動は検証できていない。しかしながら、 NO_3 , Chl.a などの低次生態系の変化過程を反映した POC 沈降量に関して、現地観測データと概ね合致していたこと、基礎生産量が近隣海域と同程度であったことから、本計算結果は当該海域の低次生産を概ね再現できていると考えられる。

4. 考察

(1) マウンド周辺の流れ

図-10にマウンド近傍の流れを示す。図では、コンターが鉛直流速を示し、ベクトルが流向を示している。マウンドの近傍では、流れの上流側で湧昇流、直上から下流側斜面にかけて下降流、下流側では湧昇流が発生している。さらに、内部波の発生や、潮流の流転や吹送流の影響などで表層と中層・下層の流れが異なる場合に、連行による湧昇流の発生がみられた。

本田ら (2004) は、マウンドによる鉛直混合現象は、①内部波による水平流速の鉛直方向シア、②内部波の碎波による大規模な鉛直混合、③下層水の連行が挙げられ、その内、①の現象が最も頻度が高くかつ定常的な現象であるとしている。数値計算では、②の現象は明確に確認できていないが、前述の通り、①、③については発生していることが分かる。②の現象については、本海域における現地観測でも明確な発生状況は捉えていないため、頻度は多くない現象であると推察される。

ただし、本モデルは静水圧近似を仮定しているため、内部波の碎波を精度良く再現することは難しい。それゆえ、②の現象が重要である海域では、非静水圧近似モデルを使用するなど、内部波の碎波現象を精度良く再現する手法を検討する必要があると考える。

(2) マウンドによる低次生産効果

中山ら (2009) によると、マウンドの周囲ではベントスの増加が確認されている。そこで、マウンドの効果については、一次生産量に加えて、ベントスの餌となると考えられるPOC沈降量に着目した。マウンドによる効果

の評価は、マウンドが有る場合と無い場合の数値計算を実施し、両者の差分をとることによる。

a) 一次生産量への効果

マウンド有無による一次生産量の差分を図-12示す。図では、正の値がマウンドによる一次生産量の増加を示している。マウンドによる一次生産の増加領域は、マウンド周辺および北側に広がっている。特に北側への拡がりが大きく、マウンドから20km程度離れた位置まで達している。一方、その他の方位へは4~6kmの拡がりである。この拡がりの傾向は、マウンド周辺における計算期間の平均流が北流傾向であったためと推察される (図-11参照)。湧昇流による影響範囲については、間木 (2007) は1,000km² (約32km四方) としており、渡辺ら (2008) は少なくとも30km四方 (900km²) まで影響はみられ、マウンドに近いほど影響が強い事を示している。本海域では、南北方向の拡がりは30km程度であり、1辺あたりの影響距離と考えると概ね同程度の拡がりである。

マウンドによる一次生産の増加量は、上記に示した範囲 (図-12の上図鎖線の領域A) における領域の平均では、1.3mgC/m²/dayであった。ただし、約35km四方の領域 (図-12上図の領域B) では0.1mgC/m²/day程度であり、増加と減少がほぼバランスしていた。間木 (2007) は、マウンド近傍の地点とマウンドの影響が及ばない参照地点で一次生産量を測定し、その差から、マウンドによる一次生産効果を32~184 mgC/m²/dayとしている。それに比較すると今回算出した値は1オーダー以上小さい。これほどの差が生じた要因は、評価手法の違いと考えているが、どちらが妥当であるかは現状では判断できない。今後、同じ海域で両手法

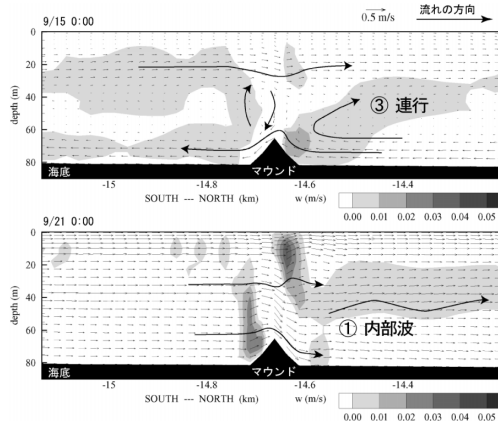


図-10 マウンド近傍の流れ (瞬間値)

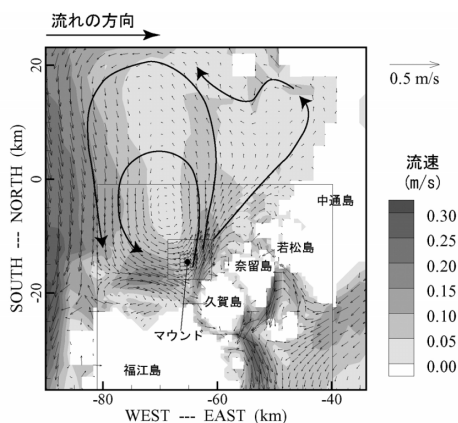


図-11 五島周辺海域の流れ (計算期間平均)

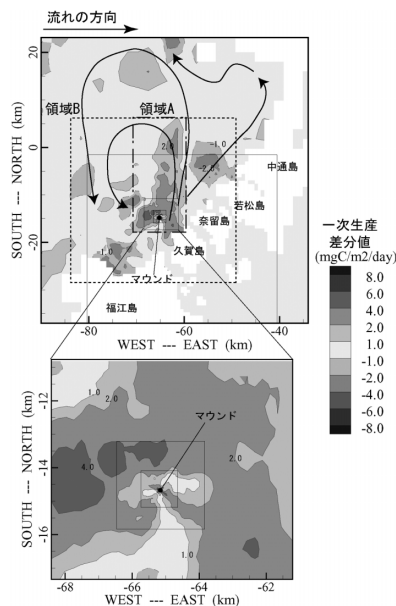


図-12 マウンド有無による一次生産量差分値

により評価するなどの検討を実施することで、一次生産効果をより精度良く評価することが可能になると考える。

b) マウンドによる海底へのPOCフラックス

マウンド有無による海底へのPOC沈降量の差分を図13に示す。前述の一次生産の図と同様に、正の値がマウンドによりPOC沈降量が増加した領域を示している。

POC沈降量は、マウンド周辺の1~2kmの範囲で増加しており、マウンドに近いほど増加が大きい。その理由としては、マウンド直上で発生する下降流による物理的な影響が考えられる。ただし、2km程度離れた領域まで影響が及んでいるため、物理的な影響だけではなく生物的な効果も含まれた結果であると考えられる。また、マウンドによるPOC沈降量の増加は、マウンドを中心とした約3km四方の範囲の平均で0.17mgC/m²/dayの増加であり、マウンド無しの同領域におけるPOC沈降量166mgC/m²/dayの約0.1%に相当する。

マウンドから離れた北西海域でPOC沈降量が比較的多く増加している箇所がある(>1.0mgC/m²/day)。これは、マウンドを通過する循環流の流路と重なっており、マウンドによる影響を受けていると推察される。ただし、計算領域全体の平均値は0.003mgC/m²/day程度であり、全体の増加量としては僅かであった。これより、マウンドから離れた場所でも増加領域と減少領域が分布するものの、全体としての収支は概ねバランスしているものと推察される。

5. まとめ

本研究では、長崎県五島西に造成されたマウンドを対象に、数値計算により低次生産効果の検討を行った。構築

したモデルにより、流速や水温変化を概ね再現できたが、表層の混合状況の再現性に課題を残す結果となった。低次生態系モデルでは、POC沈降フラックスを概ね再現できた。このモデルにより、マウンドによる一次生産効果の影響範囲は南北30km程度であり、平均で1.3mgC/m²/dayの増加と見積もられた。ただし、この値はマウンドの物理的な湧昇効果のみに着目した結果である。実海域においては、魚礁効果も定性的に観察されつつあり、蛸集効果や幼稚仔保護効果が期待されている。実際にROV等の観測によって大型魚類・小型魚類が大量に蛸集している状況が報告されている。それゆえ、マウンドの効果を適切に評価するためには、湧昇による効果と魚礁効果を総合的に捉えることが必要と考える。

謝辞：本研究は、水産庁「水産基盤整備調査委託事業（湧昇マウンド礁のCO₂固定効果等把握調査）」により行なわれた。なお、本調査は有識者検討委員会の下に進められ、高橋正征委員長（東京大学名誉教授、高知大学名誉教授）をはじめ、各委員並びに関係者の方々には貴重なご指導を頂いたことに感謝します。また、利用した現地データは、長崎県「五島西部工区湧昇効果確認調査業務委託」による成果の一部を使用させて頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 熊谷幸典, 鈴木達雄, 橋本 牧, 本田陽一, 今井康貴, 高橋正征 (2007): 衛星を用いたマウンド魚礁の湧昇効果評価の可能性, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 357-361.
- 地球環境産業技術研究機構 (2005): 人工湧昇流海域におけるCO₂吸収量の評価技術の開発 平成16年度報告書.
- 中山哲蔵, 八木 宏, 藤井良昭, 渡邊浩二, 岡野崇裕, 武田真典, 渡辺秀俊, 高城隆昌, 小川浩史 (2009): 湧昇マウンド礁による低次生産効果把握のための現地調査および数値計算手法の開発, 海岸工学論文集, Vol. B2-65, No. 1, pp. 801-805.
- 本田陽一, 間木道政, 鈴木達夫 (2004): 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, 海洋工学論文集, 第51巻, pp. 1151-1155.
- 間木道政 (2007): 人工湧昇海域における二酸化炭素吸収量の評価技術の開発, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 17-22.
- 宮澤泰正, 山形俊男 (2003): JCOPE 海洋変動予測システム, 月刊海洋, 12, pp. 881-886.
- 渡邊浩二, 中川良文, 武田真典 (2008): 湧昇マウンド礁の機能と効果について, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 31-36.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, three-Dimensional Coastal ocean Models, edited by N. Heaps, American Geophysical Union, pp. 1-16.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Sugimoto (1995): An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, *Journal of Oceanography*, Vol. 51, pp. 635-664.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, pp. 567 - 581.

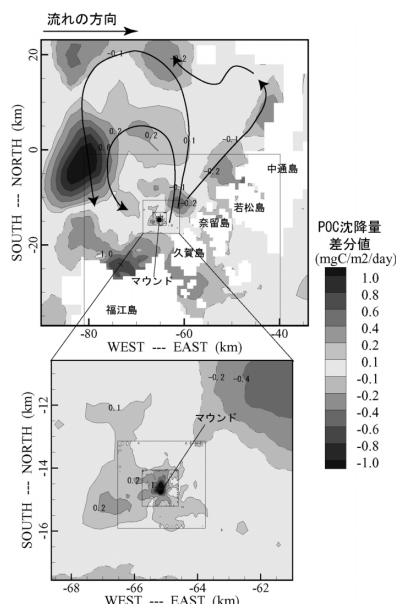


図-13 マウンド有無によるPOC沈降量差分値