

湧昇マウンド礁の機能と効果について

BASIC FUNCTION AND BENEFIT
OF ARTIFICIAL UPWELLING PRODUCING STRUCTURE渡邊浩二¹・中川良文²・武田真典³

Koji WATANABE, Yoshifumi NAKAGAWA and Masanori TAKEDA

¹正会員 社団法人水産土木建設技術センター調査研究部 (104-0045 東京都中央区築地 2-14-5)²フェロー 社団法人水産土木建設技術センター研究開発部 (104-0045 東京都中央区築地 2-14-5)³正会員 社団法人水産土木建設技術センター研究開発部 (104-0045 東京都中央区築地 2-14-5)

Artificial upwelling producing structure is recognized to be effective for fertilization of the sea in recent years. In this paper, we describe the basic functions, benefits, and field observation results of artificial upwelling producing structure. The field observation results show that vertical mixing of seawater and propagation of phytoplankton appeared.

Key words : artificial upwelling producing structure, vertical mixing, nutrient-rich water, fishing ground

1. はじめに

近年天然礁にかわる人工漁場として湧昇マウンド礁（人工海底山脈）造成事業が注目されており，これまで長崎県と鹿児島県において6つの湧昇マウンド礁が造成されている他，いくつかの新たな造成計画も展開されている（表-1）。

湧昇マウンド礁の基本的機能は，鉛直混合を発生させることにより底層の栄養塩を真光層に湧昇させ，一次生産量（光合成による植物プランクトンの増殖：新生産）を増加させることにある。

ここでは，湧昇マウンド礁の基本的機能と効果について概説するとともに，平成19年度に実施した湧昇マウンド礁の効果確認調査（モニタリング調査）結果を踏まえ，鉛直混合の発現，蟄集効果等についての検証結果を報告する。

2. 湧昇マウンド礁の機能

湧昇マウンド礁は真光層以深の栄養塩が豊富な水塊を生産層まで上昇させ，光合成による植物プランクトンの増殖を促進し，食物連鎖を通じて有用水産物の増殖を図り，広域的な漁場を形成するものである。さらには，ブロックあるいは石材で形成されるマウンド構造物は，魚礁としての機能も併せ持ち，岩礁性生物の産卵・生育の場ともなる。

一方で栄養塩の上昇により増殖する植物プランクトンの体内に取り込まれたCO₂は植物プランクトンとそれを食する動物プランクトン，さらにはプランクトン食生物等の糞や死骸となって海底に蓄積し，深海に移送・沈降され固定されるというCO₂固定機能もあげられる。

表-1 湧昇マウンド礁造成実績

地区名	長崎県生月島沖 北松海域	長崎県北部地区 宇久北・対馬東	長崎県北部地区 壱岐西	長崎県西部地区 五島西・長崎西	鹿児島県薩摩地区 阿久根沖	静岡県 舞阪沖
造成素材	軽量コンクリートブロック (1.6m角, 6t/個)		計画中	捨石 1 t 内外/個	捨石 500kg 内外/個	計画中
造成水深	82m	85m (宇久北) 89m (対馬東)	94m	85m (五島西) 76m (長崎西)	63m	75m
造成断面	(実績) 高さ：約 11.5m 底面長：約 130m 斜面勾配：1：3	(設計) 高さ：15m 山頂間距離：60m 斜面勾配：1：2	計画中	(設計) 高さ：15m 山頂間距離：75m 斜面勾配：1：2.5	(設計) 高さ：14m 山頂間距離：120m 斜面勾配：1：2.5	計画中
施工年度	H9～12	H15～17	計画中	H17～18 (五島西) H19～ (長崎西)	H16～17	計画中

マウンド礁による湧昇の発生機構について本田ほか¹⁾は、マウンド礁による湧昇に伴う鉛直混合に寄与する次の3パターンの現象を現地観測より抽出している。①マウンド礁下流側に定常内部波（風下波）が発生し、この内部波により生じる水平流速のシアにより鉛直混合が生じる可能性、②内部波の碎波による大規模な鉛直混合の可能性、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。

後述するモニタリング調査結果および湧昇解析結果等より、マウンド礁による湧昇の発生機構としては、上記①のパターンの発生する頻度が高いと推測された。

3. 湧昇マウンド礁による効果

(1) 効果の項目

湧昇マウンド礁による効果の具体的項目としては以下があげられる。

①漁業生産量向上効果（図-1 参照）

- ・栄養塩類の増加（基礎生産力向上）による生産量の増加効果
- ・蛸集（魚礁効果）による生産量の増加効果
- ・着生生物やデトリタスの増加（餌料増加）による生産量の増加効果

②生産コストの削減効果

- ・新たな漁場形成による航行・作業時間の短縮
- ・航行、作業時間の短縮による燃料費等の削減

③地域振興効果

- ・流通業における生産量の増加効果
- ・水産加工業における生産量の増加効果
- ・上記以外の産業（観光業等）における生産量の増加効果

④自然環境保全（CO₂固定）効果

(2) 漁業生産量向上効果

漁業生産量向上効果としては、以下に示すような植物プランクトンの増殖から始まる食物連鎖を通じた有用水産物の増殖とマウンド構造物の持つ魚礁機能による魚介類の生息・蛸集効果があげられる。

栄養塩増加による魚類増殖過程の算定手順を図-2に、魚礁を利用する魚類の分類を表-2に示す。

①栄養塩類の増加による生産額増加（Ⅲ型魚類）

- ・動植物プランクトンを餌料とする有用生物の増加（イワシ類、シラス類等）
- ・プランクトン食魚類を捕食する有用生物の増加（サバ類、ブリ、ヒラマサ等）

②蛸集（魚礁効果）による生産額増加（Ⅱ，Ⅲ型）

- ・流れの乱れ、滞留ゾーンでの蛸集
- ・魚礁周辺海域への蛸集

③岩礁性生物の増加による生産額増加（Ⅰ，Ⅱ型）

- ・岩礁を生息場とし、着生生物を餌料とする有用生物の増加（メバル、カサゴ、ウマズラハギ、イシダイ等）

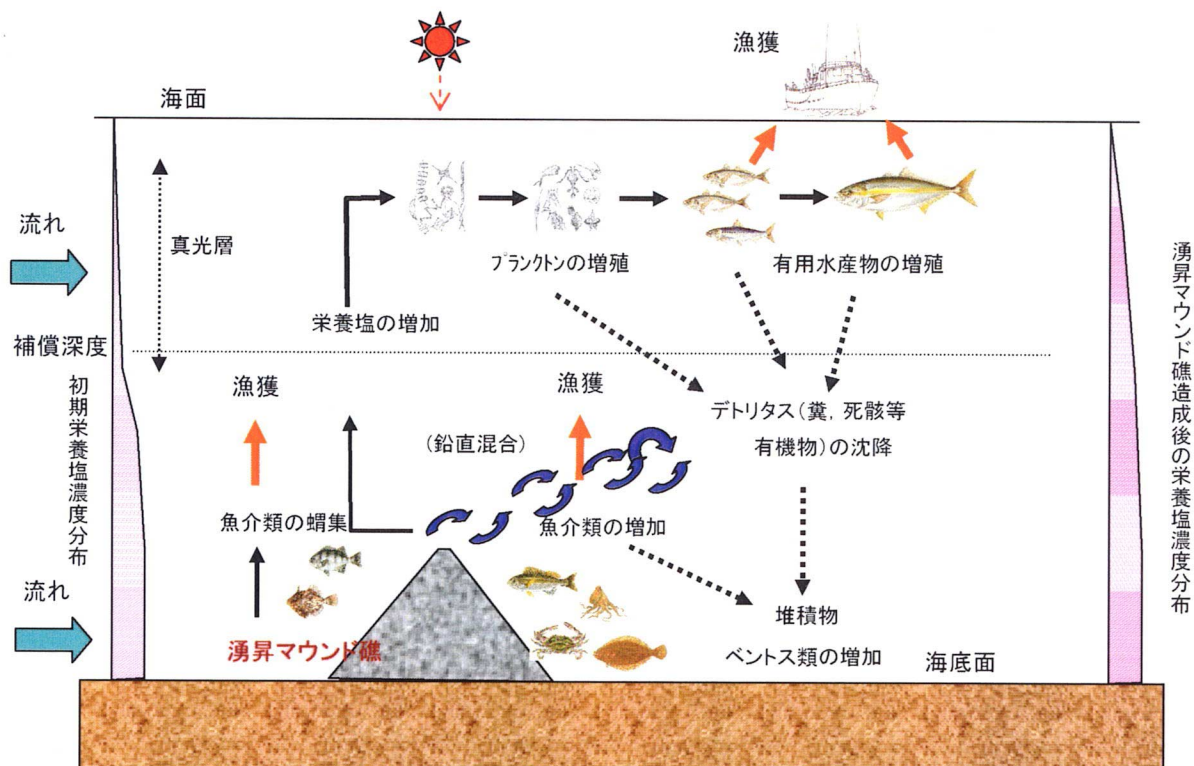


図-1 湧昇マウンド礁による漁業生産量向上の概念図

④デトリタス増加による生産額増加（IV型）

- 増加したデトリタスによるベントス類の増加に伴うベントス食有用生物の増加（ヒラメ、オコゼ、マダコ等）

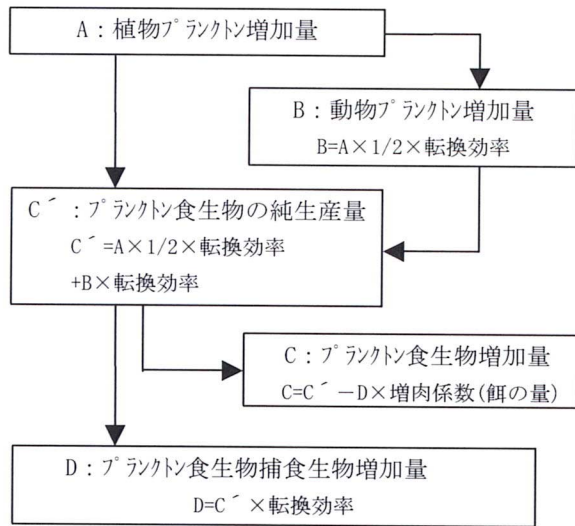


図-2 魚類増殖過程の算定手順

表-2 魚類の分類型

I 型	魚礁に体の大部分、又は体の一部を接触させている種
II 型	魚礁に体を接触させることは少なく、近くにいる種
III 型	主として魚礁から離れた表中層に位置する種
IV 型	主として魚礁周辺の海底に位置する種

(3) CO₂ 固定効果

湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果についての明確な知見はないが、CO₂ 固定に係わる機構としては、大気から海洋への CO₂ 吸収および中・深層への CO₂ 貯留が挙げられる。

大気から海洋への CO₂ 吸収は、底層栄養塩の湧昇による一次生産の増大を通じた海水中の CO₂ 消費に伴う CO₂ 分圧の低下により行われる可能性がある。

一方、中・深層への CO₂ 貯留は一次生産を起点とした食物連鎖の過程で生成される粒子状有機物（POM）が化学・生物的に分解されながら沈降することにより行なわれる。これは中・深層の水塊が数百年～2,000 年程度かけて大循環し、表層への湧昇速度が 1 年に数 m 程度であるのに対し、POM の沈降速度が 1 日で数十 m～数百 m という速度であることからこのタイムラグの分だけ炭素成分が中・深層に貯留する方向に作用するためである。湧昇作用により一次生産が増大すれば、その沈降量も増大するものと考えられる。

4. 湧昇効果の予測手法

マウンドによる効果の内、栄養塩の湧昇に関わる

効果を算定するためにはマウンドの造成によって湧昇（増加）する年間の栄養塩量を算定、評価する必要がある。算定の方法は図-3 に示す手順に従った湧昇流効果数値解析²⁾ による。以下にフロー図に示した各手順（①～⑪）について概説する。

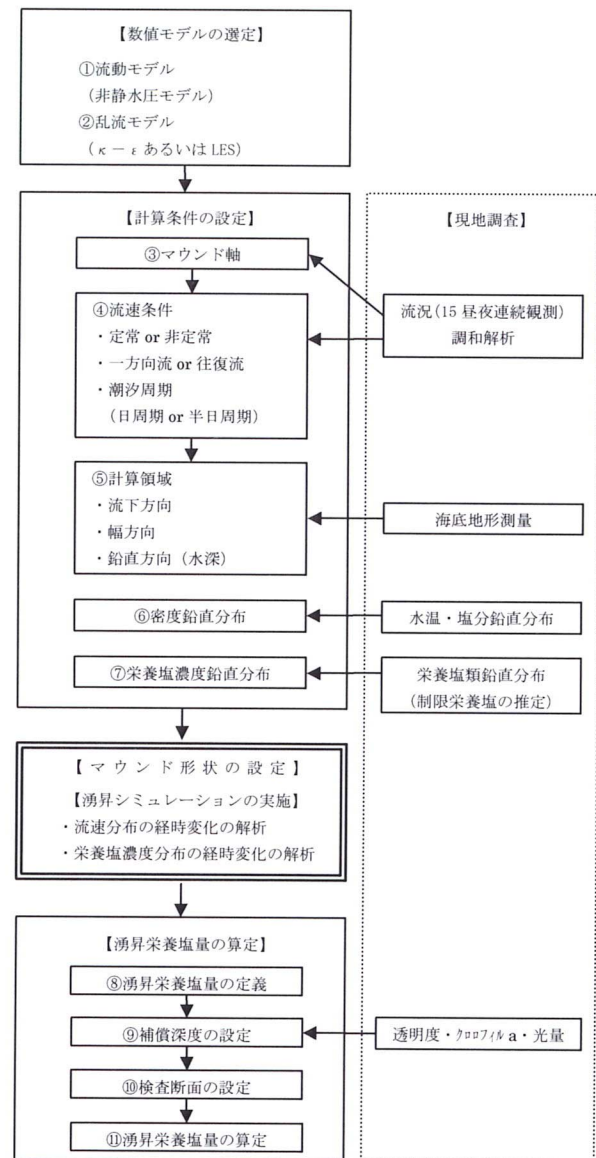


図-3 湧昇流効果数値解析フロー

①流動モデル

湧昇に伴う流れの鉛直成分の再現が重要となるが、静水圧モデルではその再現が不十分と考えられるため非静水圧モデルを採用している。

②乱流モデル

LES モデルに比べ計算負荷が少なく、計算結果の差異は小さいと判断されることより κ-ε モデルを採用している。

③マウンド軸

現地調査の解析結果を基に主流向を特定し、流れの主流向に直交する方向にマウンド軸を設定する。

④流速条件（境界値）

一方向流（定常）とする場合、実海域の流況を反映しているとは言えないことより往復流（非定常）の流速を与える。

流速値の与え方は現地調査結果に基づき、以下の2つの何れかを選択する。

- ・潮流成分（半日周期）＋平均流
- ・潮流成分（半日周期＋日周期）＋平均流

⑤計算領域

以下を基本とする。

- ・流下方向：-1500m～1500m
(0m位置にマウンド設置)
- ・幅方向：マウンド底面幅の3倍
- ・鉛直方向：現地水深

⑥密度鉛直分布（境界値）

現地調査結果を基に、測点平均値を与える。

⑦栄養塩濃度鉛直分布（境界値）

- ・指標とする栄養塩：
硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）のうち、植物プランクトン増殖の制限因子を選択。
- ・鉛直分布：
現地調査結果を基に、測点平均値を与える。

⑧湧昇栄養塩量の定義

湧昇栄養塩量は、計算領域内に設定した検査断面を通過する栄養塩濃度のフラックス量として算定する。

⑨真光層（補償深度の水深）の設定

以下の調査結果を基に決定する。

- ・透明度の2～3倍の水深
- ・クロロフィルaが急激に減少する水深
- ・海面光量が1%になる水深

⑩検査断面の設定

検査断面の層高は、水面から補償深度までとし、幅方向は計算領域幅と同じとする。

⑪湧昇栄養塩量の算定

- ・空間設定：上潮時と下潮時に応じて、それぞれの時間帯に計算領域の下流側端部となる検査断面の平均値で評価。
- ・時間設定：計算が安定する周期で評価。

5. モニタリングによる効果の確認と検証

モニタリング調査によりマウンド造成による湧昇効果（湧昇流の発生と栄養塩の増加）や最終的な便益である水産資源の増殖量の実態を把握・評価することが新規事業をより適切に計画するために重要となる。以下に平成19年度に鹿児島県阿久根沖湧昇マウンド礁を対象として実施したモニタリング調査の内容と結果をまとめる。

(1) 調査の目的と内容

表-3に調査の目的と項目、表-4に調査の内容を示す。

表-3 調査の目的と項目

調査の目的	調査項目
湧昇効果の把握	①流況・成層・水質・プランクトン ②衛星画像解析によるChl-a濃度分布 ③湧昇解析と現地調査結果の分析
魚礁（蟳集）効果の把握	①底生生物 ②底質 ③ROVによる蟳集状況 ④計量魚探による蟳集状況
漁業実態の把握	①アンケート・ヒアリング

表-4 調査の内容

項目	調査方法	調査内容	調査頻度
流況	定点連続	流向、流速 (設置型 ADCP)	2点×15日
	測線航走	流向、流速 (航走型 ADCP)	2測線×2潮×2回
成層	定点移動	水温、塩分、クロロフィルa	25点×2潮×2回
	定点連続	水温、塩分、水深	2点×5層×15日 2点×5層×15日
	測線航走	水温、塩分、水深	1測線×2潮×2回 水温・塩分計：10層 深度計：5層
水質	採水	栄養塩類： T-N, DTN, NH4-N, NO2-N, NO3-N, T-P, PO4-P, DOC, TOC, TIC, SI	5点×7層×1回
		クロロフィルa	5点×4層×1回
プランクトン	採水 鉛直曳	植物プランクトン 動物プランクトン	P-P：5点4層×1回 Z-P：5点3層×1回
生物	採泥	底生生物	調査期間中1回×3点
底質	採泥	粒度組成、強熱減量	調査期間中1回×3点

(2) 調査結果

1) 湧昇（鉛直混合）の発生について

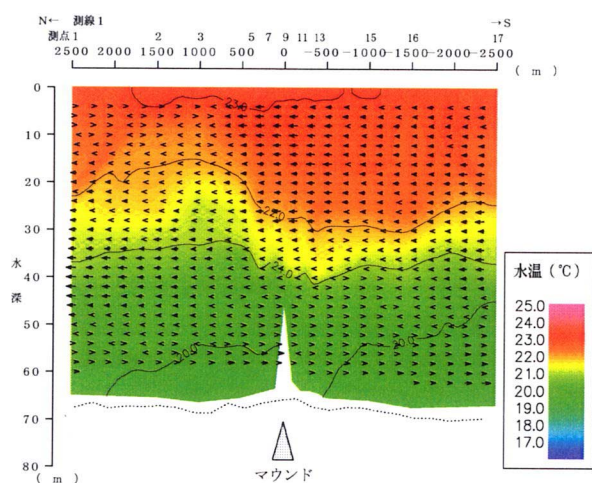
現地調査の結果、図-4に示すように、マウンドの下流側の水温および密度は上流側の値と異なっていると同時に、マウンド直上付近（海底上15m）で低水温・高密度水の上昇や躍層の変動が観測され下流側では上層、下層の混合が生じていることが確認された。

また、図-5に示すように現地調査結果、湧昇解析結果とともにマウンド背後では中層で密度が増加し、底層で密度が低下する傾向が見られることより湧昇解析では概ね現地の状況を再現出来ていると判断された。

2) プランクトンの増殖について

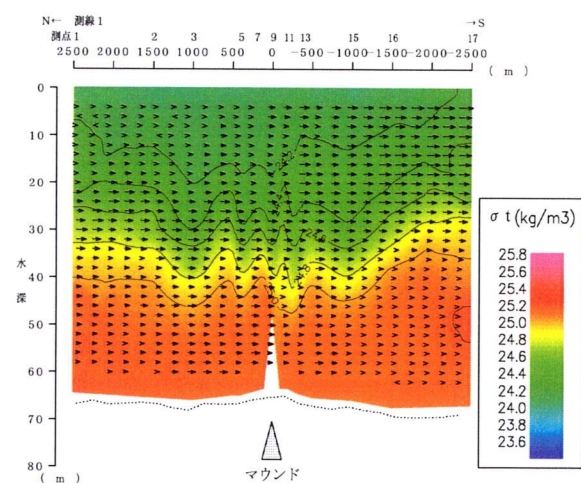
図-6 に示すように植物プランクトンは事前調査結果 (H16 年度実施) に比して増加しており、マウンド礁による一次生産の増加効果が確認された。また、動物プランクトンも事前調査結果に比して増加している。その主要群はアジなどの小型浮魚の重要な餌となっているカイアシ類であり、小型浮魚の増加に結びつくものと判断される。さらに、小型浮魚を捕食するブリ、カツオ等の中型魚が蟄集する可能性も大きいといえる。

また、衛星画像より植物プランクトン量の指標となるクロフィル a の濃度分布を解析した結果、春季、夏季、秋季のいずれにおいても造成前に比べて造成後の平均濃度は大きくなっていた (図-7)。さらに、「14km 四方内」の濃度増加率は「14km 四方外、30km 四方以内」の濃度増加率を上回っており、マウンド礁による効果がマウンド近辺においてより大きく現れていることが確認された (表-5)。



観測日：平成 19 年 6 月 4 日

図-4(1) 定点移動調査による水温の断面分布



観測日：平成 19 年 5 月 27 日

図-4(2) 定点移動調査による密度の断面分布

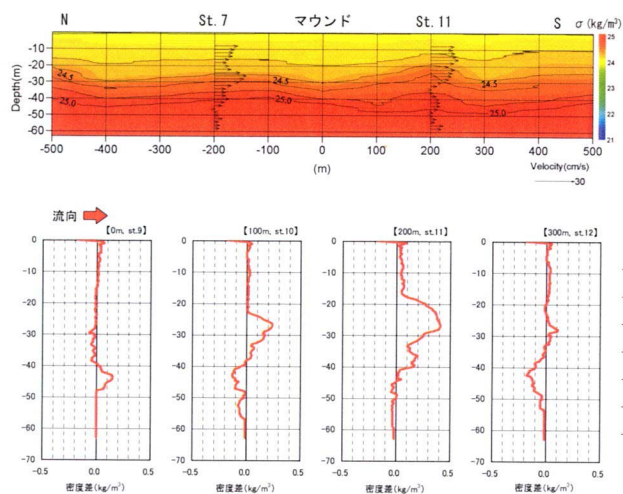


図-5(1) 上流側 (-500m) に対する下流側の密度変化 (現地調査結果)

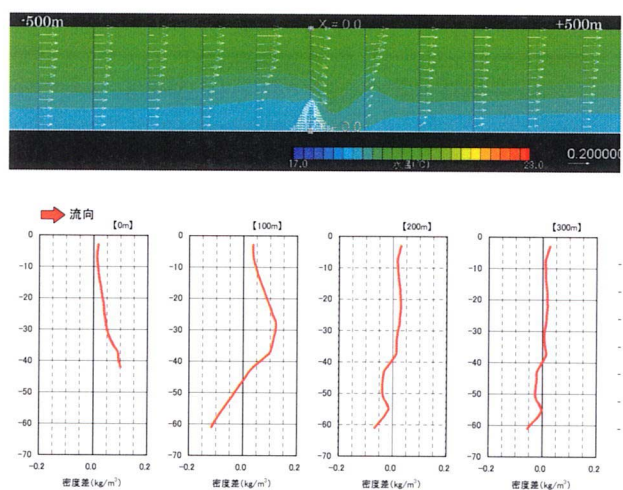


図-5(2) 上流側 (境界値) に対する下流側の密度変化 (湧昇解析結果)

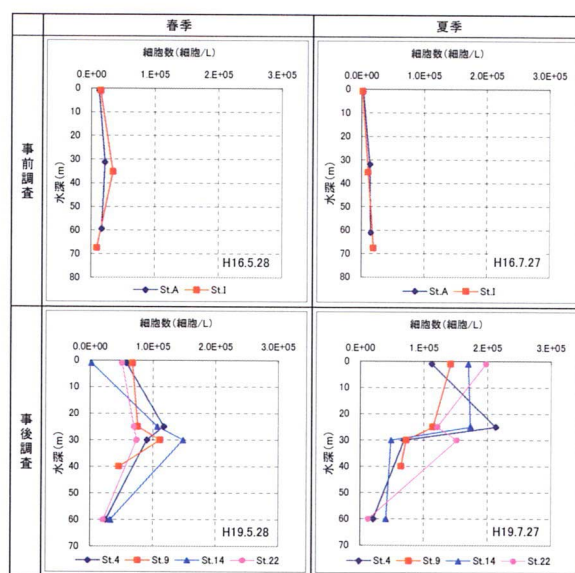
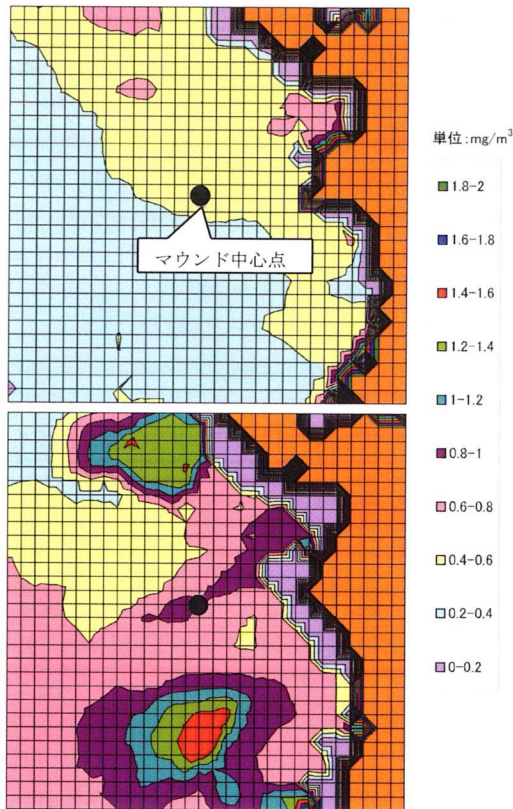


図-6 植物プランクトン量の比較 (マウンド造成前後)



上段：造成前（2005/7/26），下段：造成後（2007/7/25）

図-7 クロロフィル a 濃度分布

表-5 クロロフィル a 濃度 (mg/m³) 分布比較

解析対象季	造成前	造成後	増加率
春季	0.800 (0.786)	1.043 (0.979)	1.30 (1.25)
夏季	0.470 (0.439)	0.686 (0.564)	1.46 (1.28)
秋季	0.818 (0.766)	0.966 (0.965)	1.18 (1.26)
3季平均	0.658 (0.629)	0.887 (0.800)	1.35 (1.27)

上段：14km 四方内，下段：14km 四方外 30km 四方内

3) 有用水産種の蛸集・増殖について

ROVおよび計量魚探調査の結果，各調査時に観察した魚種数は，平成 18 年 6 月から順次増加しており，マウンド礁は設置後の時間経過に伴い岩礁性魚類の生息領域として機能性を発揮し，蛸集魚類相の多様性を高めていることが確認された．ROVによる映像例を図-8 に示す．また漁業従事者に対する操業日誌調査の結果，表-6 に示すようにマウンド礁近辺における操業 1 回当たりの漁獲量は他水域における漁獲量と比してやや高い値を示していた．継続的な調査による検証が必要ではあるが，マウンド礁周辺海域においては良好な漁場が造成されつつあるといえる．

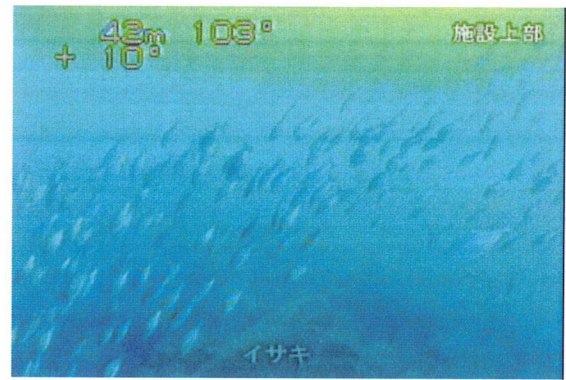


図-8 マウンド頂部における蛸集状況（ROV調査）

表-6 操業海域別の操業比較

利用海域	漁獲比率 (%)	操業比率 (%)	操業 1 回当たり漁獲量 (kg)
近辺 (7.4km 四方内)	15.8	12.5	9.8
周辺 (7.4~14.8km 四方)	30.5	33.1	7.1
近辺+周辺	(46.3)	(45.6)	(7.8)
他 (近辺・周辺以外)	53.7	54.4	7.6
計	100.0	100.0	7.7

6. おわりに

以上，湧昇マウンド礁の機能と効果及びモニタリング調査による効果の検証結果をとりまとめた．効果の検証については，調査実施時の海象・気象にも影響され，さらに年度・季節による差異もあることより，今後とも各季節における継続的な調査が必要と考える．また，効果範囲の把握のためのモニタリング手法の開発や効果の予測手法（湧昇効果数値解析）についても，実海域における現象の再現性をより高めるための検討が今後の課題としてあげられる．

謝辞：モニタリング調査は，鹿児島県による「平成 19 年度薩摩地区広域漁場整備事業（調査委託）」により実施されたものである．ここに，鹿児島県関係者およびアンケート調査にご協力戴いた関係漁業協同組合の方々に謝意を表す．

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, 2004.
- 2) 栗原明夫・佐々木洋之・中川良文・青野利夫・岡安章夫：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, 2006.
- 3) 武田真典・佐々木洋之：人工海底山脈による漁場造成の現状と課題について，第 5 回全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集，pp. 105-120, 2006.