

I 調査課題名

湧昇マウンド礁の CO₂ 固定効果等把握調査

II 実施機関名、部局名及び担当者名

社団法人 水産土木建設技術センター
調査研究部 川原真 中川良文 岡野崇裕 武田真典
独立行政法人 水産総合研究センター水産工学研究所
水産土木工学部 水産基盤グループ 中山哲厳 足立久美子
水産土木工学部 水産基盤グループ 環境水理研究チーム 八木宏
株式会社 アルファ水工コンサルタンツ
東京本部技術第 3 部 佐藤勝弘
本社技術部技術第 3 課 今津雄吾

III 調査実施年度

平成 19 年度～平成 21 年度

IV 緒言

湧昇マウンド礁の造成では、補償深度以深の栄養塩の豊富な水塊を真光層まで上昇させ、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、広域的な漁場を造成する効果に主眼が置かれている。

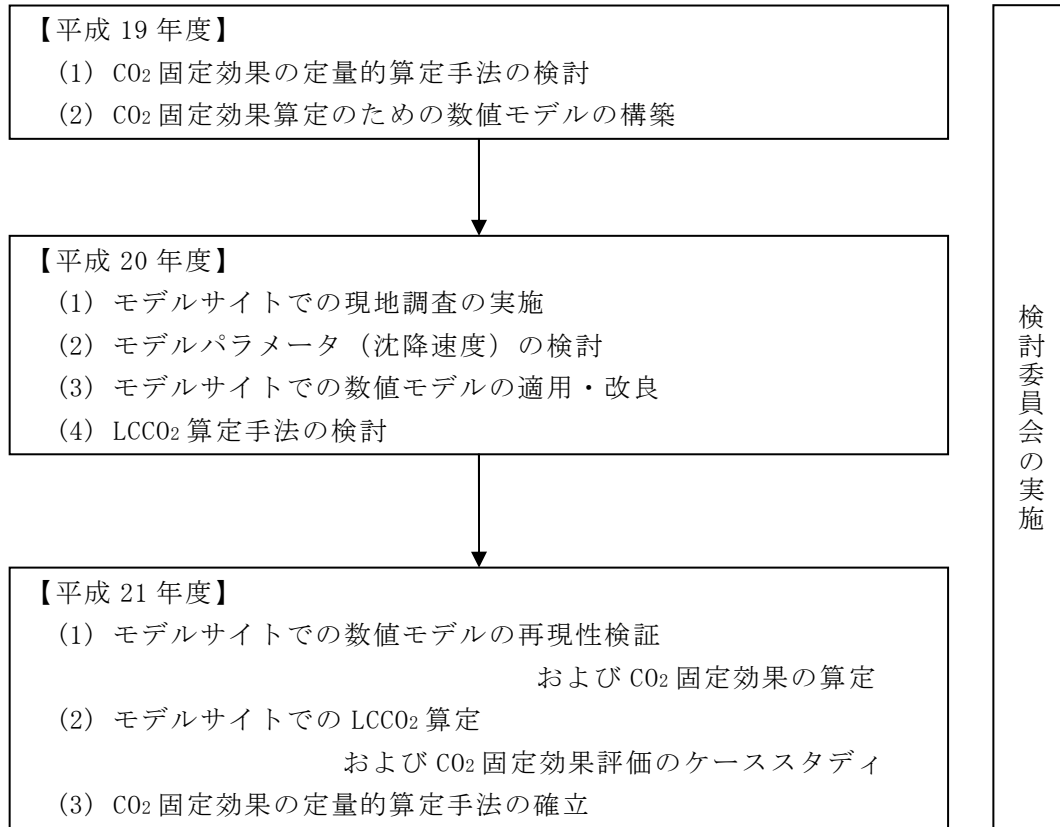
一方、それ以外の効果として、CO₂ 固定効果が期待されている。しかし、その定量的な評価に関し、事業地区の特性を考慮した計画手法は確立されていない。

そこで、本調査では、湧昇マウンド礁による事業効果としての CO₂ 固定効果の定量的算定手法を確立することを目的とした。

V 調査方法

1. 調査フロー

調査フローを図 V-1.1 に示す。



※LCCO₂（ライフサイクル CO₂）

建設物の建設から運用期間を含め、ライフサイクルを通して排出される二酸化炭素の合計を LCCO₂ と呼ぶ。

図 V-1.1 調査フロー

2. 調査内容および方法

(1) 平成 19 年度

既往文献等の収集・整理により、CO₂ 固定の基本的考え方を整理し、湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果を定義した。

また、定義した CO₂ 固定効果の定量的算定にあたっては、流動・低次生態系を考慮した数値モデルを用いることとし、その構築を行なった。

(2) 平成 20 年度

平成 19 年度に CO₂ 固定効果の定量的算定のために構築した数値モデルについて、現地適用性の検討を行なうため、モデルサイト（既存の湧昇マウンド礁設置海域である長崎県五島西地区）を対象とした計算を実施し、数値モデルの改良を行なった。

数値モデルの適用にあたっては、計算条件（境界条件、初期条件など）を設定するため、モデルサイトにおいて現地調査を実施した。現地調査の内容は、流況、成層状況、水質、プランクトン、デトリタス、懸濁態粒子の粒径分布等とした。併せて、数値モデルの適用にあたり特に重要なモデルパラメータである植物プランクトンおよび懸濁態有機物の沈降速度について、現地調査結果および既往知見より評価した。

また、CO₂ 固定効果の定量的算定にあたって、数値モデルで算定される湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果のみでなく、建設過程で排出される CO₂ (LCCO₂) も考慮した CO₂ 固定効果の評価とするため、湧昇マウンド礁の LCCO₂ の算定手法について検討した。

(3) 平成 21 年度

モデルサイトを対象に、平成 20 年度に改良した数値モデルの再現性の検証を行なうとともに、湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果の算定を行なった。

また、平成 20 年度に検討した LCCO₂ の算定手法に基づき、モデルサイトを対象に湧昇マウンド礁の建設過程で発生する LCCO₂ の算定を行なった。

ここで算定した湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果および湧昇マウンド礁の建設過程で発生する LCCO₂ の結果より、CO₂ 固定効果の定量的評価を行なった。また、この結果を踏まえ CO₂ 固定効果の定量的算定手法を確立した。

3. 検討委員会の実施

本調査を進めるにあたっては、学識経験者等により構成される検討委員会を設置し、指導・助言を仰ぎながら実施した。

検討委員会の構成を表V-3.1に示す。

表V-3.1 検討委員会の構成

	氏 名	所属・役職
委員長	高橋 正征	東京大学 名誉教授・高知大学 名誉教授
委員	井関和夫	広島大学大学院生物圏科学研究科 教授
	谷口旭	東京農業大学生物産業学部アクアバイオ学科 教授
	中村充	福井県立大学 名誉教授
	間木道政	財団法人地球環境産業技術研究機構 地球環境産業技術研究所 CO ₂ 貯留研究グループ 主任研究員

※五十音順、敬称略

VI 調査結果

1. CO₂ 固定効果の定量的算定手法

(1) CO₂ 固定効果の基本的考え方

湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果の定量的算定のための構成要素として、表 VI-1.1 に示すように①基本的要素と②課題的要素に分けて考えた。本調査では、基本的要素に着目し、建設に伴う CO₂ 排出量および建設完了後から発現する CO₂ 固定効果(CO₂ 固定量) について定量的算定手法を確立した。

表 VI-1.1 湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果の定量的算定のための構成要素

	①基本的要素	②課題的要素
排出側要素	X ・ 建設に伴う CO ₂ 排出量	$\Sigma X'$ ・ 漁獲に伴う CO ₂ 排出量（海から取り除かれる魚体としての炭素量分、漁獲経費分）
固定側要素	Y ・ 建設完了後から発現する CO ₂ 固定効果として本調査で定義した CO ₂ 固定量	$\Sigma Y'$ ・ 蛸集魚類による CO ₂ 固定量（魚体の現存量） ・ 蛸集ベントスによる CO ₂ 固定量（ベントスの現存量） ・ 付着生物による CO ₂ 固定量（付着生物の現存量）
LCCO ₂	$=X-Y$	$=\Sigma X' - \Sigma Y'$
統合 LCCO ₂	$=(X-Y) + (\Sigma X' - \Sigma Y')$	

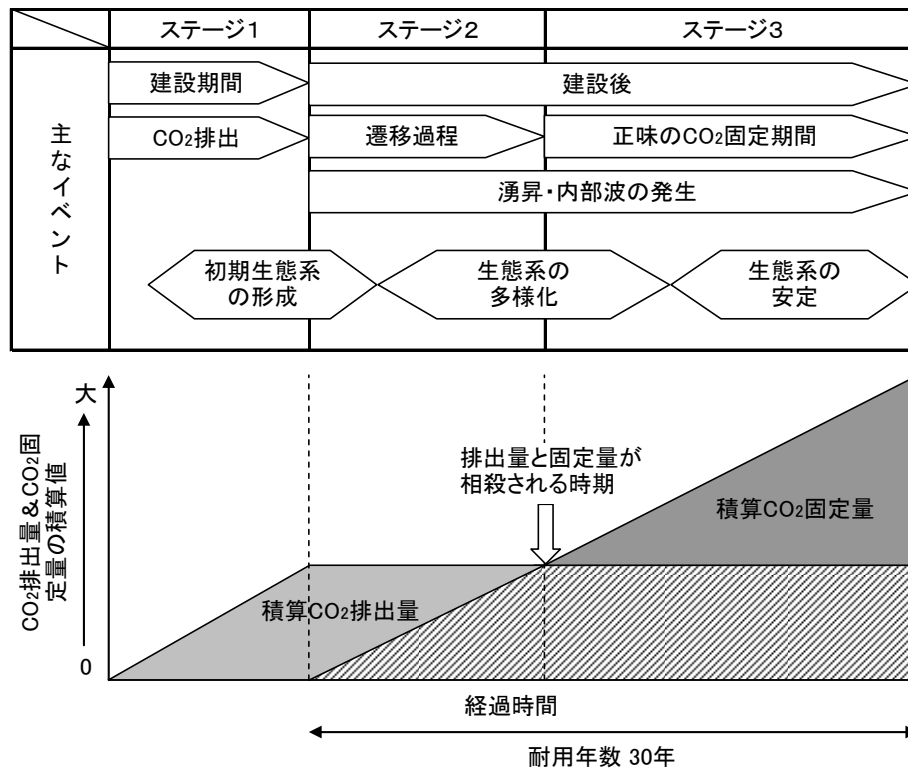


図 VI-1.1 湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果の概念図

(2) CO₂ 排出量の算定方法

建設に伴う CO₂ 排出量は、積算基準等を参考に算出した工事数量に基づき、材料からの CO₂ 排出量および建設機械の使用による CO₂ 排出量について算定する。

1) 工事数量の算出

各建設過程における工事数量は、以下の資料等に基づき算出できる。

- ・平成 21 年度漁港漁場関係工事積算基準、水産庁漁港漁場整備部
- ・平成 16 年度長崎県北部地区広域漁場（特定）整備工事（調査・積算・施工管理業務）歩掛調査報告書、平成 17 年 3 月、長崎県、社団法人水産土木建設技術センター
- ・平成 20 年度長崎県北部地区広域漁場整備工事（壱岐西工区 調査・施工管理業務委託）報告書、平成 21 年 8 月、長崎県、社団法人水産土木建設技術センター

2) 材料からの CO₂ 排出量

材料製造時の CO₂ 排出は、材料の種類別に所要数量と CO₂ 排出量原単位を乗じて算出する。

3) 建設機械の使用による CO₂ 排出量

建設機械からの CO₂ 排出は、材料の運搬・施工等に係る稼動時の燃料消費による CO₂ 排出量がある。このとき排出される CO₂ は、工事に使用される時間と建設機械の時間当たり燃料消費量に各種燃料の CO₂ 排出量原単位を乗じて算出する。

1 日当り燃料消費量＝時間当り燃料消費量×標準運転時間

時間当り燃料消費量＝機関出力×時間当り燃料消費率

機関出力は、「船舶および機械器具等の損料算定基準、平成 20 年 4 月、水産庁漁港漁場整備部」を参照した。

運転時間および時間当り燃料消費率は、「平成 21 年度漁港漁場関係工事積算基準、水産庁漁港漁場整備部」を参照した。

表 VI-1.2 CO₂ 排出量原単位一覧^{1, 2)}

各種エネルギー原単位

分類	排出係数	単位
軽油	2.64	kg-CO ₂ /L
A重油	2.77	kg-CO ₂ /L
購入電力	0.37	kg-CO ₂ /kWh

輸送の原単位

分類	排出係数	単位
船舶500t級	0.1620	kg-CO ₂ /km・t
船舶1000t級	0.0999	kg-CO ₂ /km・t
船舶2000t級	0.0615	kg-CO ₂ /km・t
船舶5000t級	0.0324	kg-CO ₂ /km・t
船舶10000t級	0.0199	kg-CO ₂ /km・t

構成材料の原単位

分類	排出係数	単位
ポルトランドセメント	765.5	kg-CO ₂ /t
天然粗骨材（碎石）	2.8	kg-CO ₂ /t
天然細骨材（砕砂）	3.4	kg-CO ₂ /t
フライアッシュ	17.9	kg-CO ₂ /t
電気炉鋼（鉄筋等）	755.3	kg-CO ₂ /t
高炉鋼（一貫製鉄）形鋼	1246.6	kg-CO ₂ /t

施工の原単位

分類	排出係数	単位
生コンプラント	7.7	kg-CO ₂ /t

構成材料の原単位

分類	排出係数	単位
砂利・採石	5.65	kg-CO ₂ /t

(3) CO₂ 固定効果 (CO₂ 固定量) の算定方法

CO₂ 固定効果は以下のように定義し、数値モデル (流動・低次生態系モデル) により算定するものとした。数値モデルの詳細はVI章 2 節に、数値モデルの適用にあたり特に重要なパラメータである植物プランクトンおよび懸濁態有機物の沈降速度についてはVI章 3 節に示した。

【CO₂ 固定効果の定義】

湧昇マウンド礁により真光層に供給された栄養塩類を吸収し、一次生産による生物過程 (新生産) を経て 200m 以深に沈降する懸濁態有機物 (POM) の時間的・空間的増加。

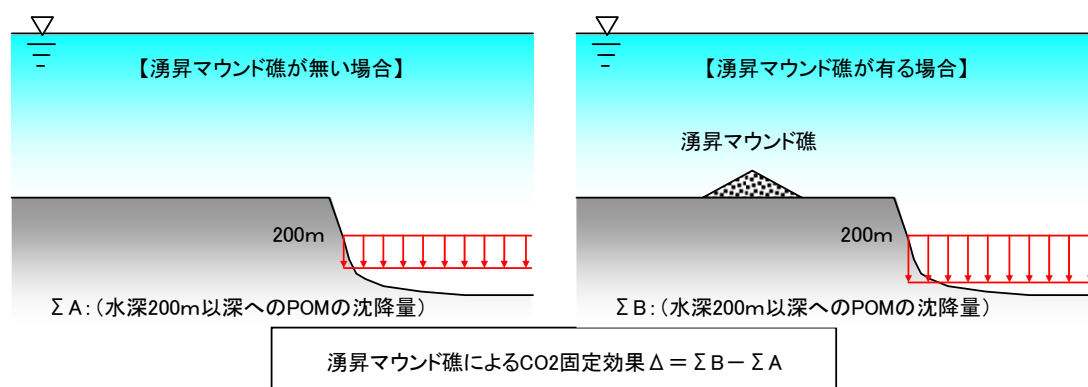


図 VI-1.2 湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果の定義

年間の CO₂ 固定効果を求めるためには、通年にわたる数値計算を実施することが望ましいが、それが困難な場合は表 VI-1.3 に示す手順に従い求めた結果を用いる。

表 VI-1.3 年間の CO₂ 固定効果の算定方法

手順	内 容	想定される設定
手順 1	CO ₂ 固定効果発現期間の設定	春季～秋季 (密度・栄養塩分布等を踏まえて設定する)。
手順 2	CO ₂ 固定効果発現期間の分割	2～3 分割 (密度・栄養塩分布等を踏まえて設定する)。
手順 3	各分割期間に対する計算期間の設定	数週間～1 ヶ月程度
手順 4	数値計算の実施	
手順 5	CO ₂ 固定量 (t-CO ₂ /日) の算出	
手順 6	年間の CO ₂ 固定量 (t-CO ₂ /年) $= \sum_{i=1}^n \text{(分割期間 } i \text{ における CO}_2 \text{ 固定量 (t-CO}_2\text{/日)} \times \text{分割期間 } i \text{ の日数 (日))}$	

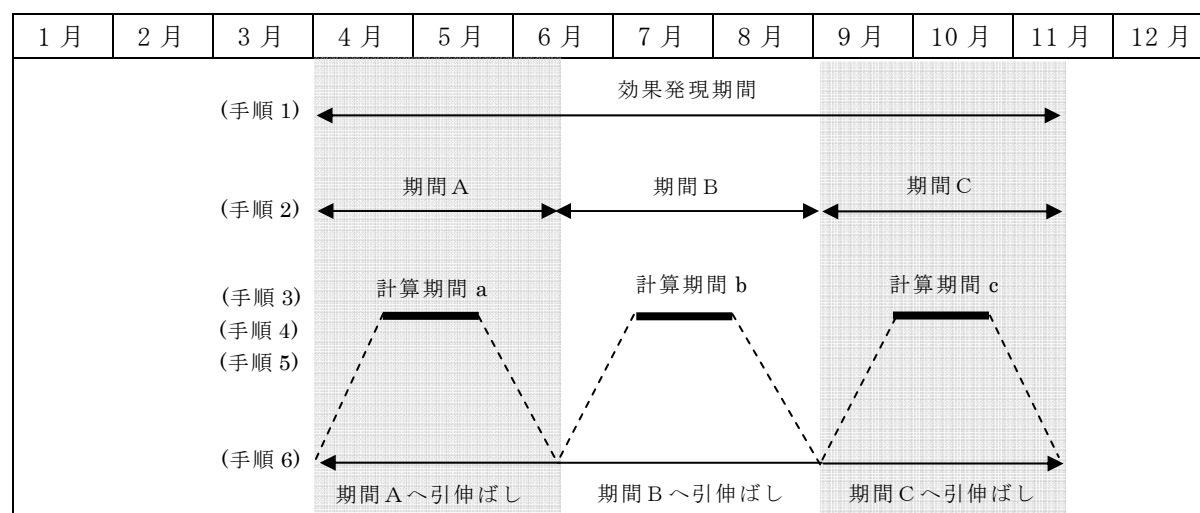


図 VI-1.3 年間の CO₂ 固定効果の算定イメージ

(4) CO₂ 固定効果の定量的評価

求めた CO₂ 排出量および CO₂ 固定量を基に、①建設時の CO₂ 排出量の回収可能年数、②CO₂ 固定効果の便益額の 2 つの視点から評価を行なう。算定方法を以下に示す。

建設時の CO₂ 排出量の回収可能年数（年）

$$= \text{CO}_2 \text{ 排出量 (t-CO}_2\text{)} \div 1 \text{ 年当たりの CO}_2 \text{ 固定量 (t-CO}_2\text{/年)}$$

CO₂ 固定効果の便益額（円）

$$= (\text{耐用年数} - \text{建設時の CO}_2 \text{ 排出量の回収可能年数}) \\ \times 1 \text{ 年当たりの CO}_2 \text{ 固定量 (t-CO}_2\text{/年)} \times \text{CO}_2 \text{ 単価 (円/t-CO}_2\text{)}$$

ここで、CO₂ 単価は、以下の資料を参考に設定する。

○公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）

国土交通省において、平成 16 年 2 月に、「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針」が策定され、その後、「公共事業評価に関する検討部会」「事業評価手法検討部会」において、既往研究の蓄積状況や諸外国の状況等を踏まえ、評価手法における課題についての検討がなされ、その中で、CO₂ 削減効果を貨幣換算するための原単位に関する検討がなされた。その結果、「CO₂ 貨幣価値原単位の計測方法については、いくつか考えられるが、政策動向などの外部環境からの影響を受けにくい点、および既往研究の蓄積が充実しているという点から、当面、わが国の公共事業評価においては、被害費用に基づく方法を用いる」こととして、以下の額を示している。

➤ 10,600 円/t-C（2006 年価格）

○自主参加型国内排出量取引制度

環境省が実施している自主参加型国内排出量取引制度であり、温室効果ガスの費用効率的かつ確実な削減と国内排出量取引制度に関する知見・経験の蓄積を目的として、2005 年度から開始されているものである。公表されている各年次における平均取引単価を、以下に示す。

➤ 1,250 円/t-CO₂（2006 年～2008 年取引平均価格）

2. 流動・低次生態系モデルの概要

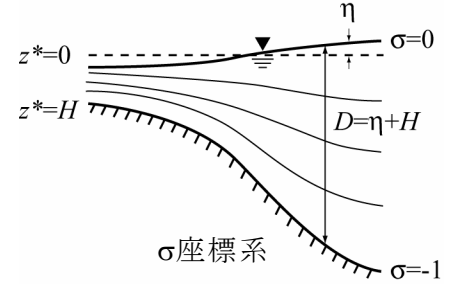
CO₂ 固定量の算定に用いるモデルとして、本調査で開発したモデルの概要を以下に示す。流動場に POM(Princeton Ocean Model)³⁾、低次生態系に KKYS モデル⁴⁾を用いた。

(1) 流動モデルの基礎式

流動の計算に用いられる POM は、水平面は直交座標(デカルト座標)、鉛直方向に σ 座標を使用したモデルであり、海水の連続式、運動方程式、水温・塩分の輸送方程式、乱流エネルギー・乱流スケールの輸送方程式により構成されている。以下に、座標系の概念図及び各々の方程式を示す。

【 座 標 系 】

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z^* - \eta}{D}$$



【 連 続 式 】

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (\text{式-2.1})$$

【 x 方向の運動方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ &+ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{式-2.2})$$

【 y 方向の運動方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ &+ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{式-2.3})$$

(σ 座標に基準化された鉛直流速 ω とデカルト座標上の実流速 w の関係)

$$w = \omega + u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (\text{式-2.4})$$

【 水温の輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial uTD}{\partial x} + \frac{\partial vTD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} - \frac{\partial R}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{式-2.5})$$

【 塩分の輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial uSD}{\partial x} + \frac{\partial vSD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{式-2.6})$$

【 乱流エネルギーの輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) \right\} \\ &+ \frac{2K_M}{D} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right\} + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} \end{aligned} \quad (\text{式-2.7})$$

【 乱流スケールの輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l \omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) \right\} \\ &+ E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} - \frac{Dq^3}{B_1 l} \tilde{W} \end{aligned} \quad (\text{式-2.8})$$

ここで、

$$(E_1, E_2, E_3) = (1.8, 1.33, 1.0) \quad (\text{式-2. 9})$$

$$\tilde{W} = 1 + E_2 (l / kL) \quad (\text{式-2. 10})$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{\eta - z} + \frac{1}{H - z} \quad (\text{式-2. 11})$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \sigma} \equiv \frac{\partial p}{\partial \sigma} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (\text{式-2. 12})$$

$$K_M = qlS_M \quad (\text{式-2. 13})$$

$$K_H = qlS_H \quad (\text{式-2. 14})$$

$$S_H = \frac{A_2 [1 - 6A_1 / B_1]}{1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H} \quad (\text{式-2. 15})$$

$$S_M = \frac{A_1 [1 - 3C_1 - 6A_1 / B_1]}{[1 - 9A_1 A_2 G_H] - S_H [(18A_1^2 + 9A_1 A_2) G_H]} \quad (\text{式-2. 16})$$

$$G_H = \frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \left[\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right] \quad (\text{式-2. 17})$$

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 16.6, 0.74, 10.1, 0.08) \quad (\text{式-2. 18})$$

表 VI-2.1 変数一覧

変数名	内容	
x^*, y^*, z^*	デカルト座標	
x, y, σ	σ 座標	
η	水位	(m)
H	水深	(m)
D	全水深 [= $\eta + H$]	(m)
u, v, ω	x, y, σ 方向の流速	(m/s)
f	コリオリパラメーター	(1/s)
g	重力加速度	(m/s ²)
ρ	海水の密度	(kg/m ³)
ρ_0	参照密度 [= 1,025]	(kg/m ³)
T	水温	(°C)
S	塩分	(psu)
q^2	乱流エネルギー	(m ² /s ²)
l	乱流エネルギースケール	(m)
$q^2 l$	$q^2 \times l$	(m ³ /s ²)
K_M	鉛直渦動粘性係数	(m ² /s)
A_M	水平渦動粘性係数	(m ² /s)
K_H	T, S の鉛直渦拡散係数	(m ² /s)
A_H	T, S の水平渦拡散係数	(m ² /s)
K_q	$q^2, q^2 l$ の鉛直渦拡散係数	(m ² /s)
A_q	$q^2, q^2 l$ の水平渦拡散係数	(m ² /s)
c_s	音速	(m/s)
S_M, S_H	成層化関数	
G_H	リチャードソン数	
R	短波放射量フラックス	(°Cm/s)

【 海面熱収支 】

海洋表面における熱収支は、太陽から供給される熱量(短波放射)、大気へ放出される熱量(長波放射)、海洋表層の温度変化による顕熱輸送および海水が気化する際に放出される潜熱輸送の収支で表す。

$$Q = Q_s - (Q_b + Q_h + Q_e) \quad (\text{式-2.19})$$

Q : 正味の熱輸送量

Q_s : 短波放射

Q_b : 長波放射

Q_h : 顕熱輸送

Q_e : 潜熱輸送

各項目の算出式は以降に示す。ここで、水温変化への変換は、熱輸送量を海水密度と比熱容量で割ることによる。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Q}{\rho_w c_p \Delta z_s} \quad (\text{式-2.20})$$

ρ_w : 海水密度 [kg/m³]

c_p : 比熱容量 (=3,930 [J/kg/K])

a) 短波放射

$$Q_s = (1 - \alpha) Q_{s0} \quad (\text{式-2.21})$$

Q_{s0} : 全天日射量 [MJ/m²/h]

α : 海表面のアルベド (=0.06)

b) 長波放射

$$Q_b = \varepsilon \sigma \theta_a^4 \left(a - b \sqrt{e_a} \right) (1 - \delta C^2) + 4 \varepsilon \sigma \theta_s^3 (T_s - T_a) \quad (\text{式-2.22})$$

a, b : 係数($a=0.39, b=0.05$)

ε : 海面の射出率 (=0.97)

σ : テファン・ボルツマン係数 (= 5.6705×10^{-8} [Wm⁻²K⁻⁴ = Js⁻¹m⁻²K⁻⁴])

θ_a : 絶対温度での気温 (=273.15 + T_s)

δ : 緯度の関数で表される雲量係数 (=0.65)

C : 雲量 (=0~1)

e_a : 水蒸気圧(=海上の飽和蒸気圧×相対湿度%)

海上の飽和蒸気圧は以下の Tetens の式により算出する。

$$e_s = 6.108 * 10^{7.5 * T_a / (T_a + 237.3)}$$

T_s : 海面水温

T_a : 海上気温

c) 顕熱輸送

$$Q_h = \rho_a c_a c_H (T_s - T_a) W \quad (\text{式-2.23})$$

ρ_a : 空気の密度 ($=1.19 \text{ [kg/m}^3 = 10^3 \text{g/m}^3 = 10^{-3} \text{g/cm}^3 \text{]}$)

c_a : 大気の定圧比熱 ($=1.01 \text{ [J/g/K]}$)

c_H : バルク係数 ($=1.20 \times 10^{-3}$)

W : 風速 [m/s]

d) 潜熱輸送

$$Q_e = \rho_a L c_E (q_s - q_a) W \quad (\text{式-2.24})$$

c_E : バルク係数 (1.20×10^{-3})

L : 水の気化潜熱 ($2.5 \times 10^3 - 2.386 T_s \text{ [J/g]}$)

q_s : 海面水温における飽和比湿 ($= \frac{0.62197 e_s}{P_s - 0.378 e_s}$)

q_a : 比湿 (観測値 高度 10m) [hPa]

P_s : 海面気圧 [hPa]

(2) 低次生態系モデルの基礎式

低次生態系の計算に用いるモデルは、KKYS モデルにリンのコンパートメントを追加したモデルであり、以下に示す7つのコンパートメントから構成される。図VI-2.1に各コンパートメントの関係図を示す。

【 モデルを構成するコンパートメント 】

- 1: 植物プランクトン
- 2: 動物プランクトン
- 3: 硝酸塩(NO_3)
- 4: リン酸塩(PO_4)
- 5: アンモニア(NH_4)
- 6: 溶存態有機物(DOM)
- 7: 懸濁態有機物(POM)

KKYS モデルは、窒素循環をベースにしたモデルである。そのため、モデル上では、

- ・ DOM=DON (溶存態有機窒素)
- ・ POM=PON (懸濁態有機窒素)

として扱う。

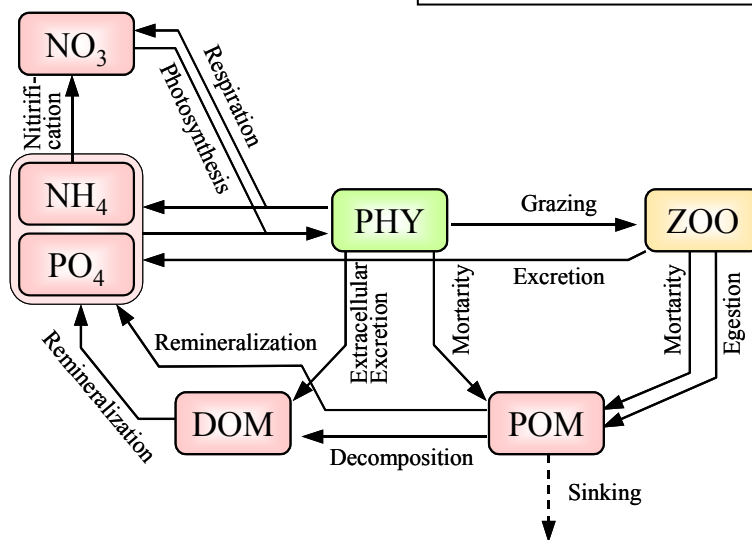


図 VI-2.1 低次生態系モデルの構成コンパートメントの関係図

時々刻々の各コンパートメントの濃度変化は、物理的な移流拡散過程と生物・化学的な過程を考慮した次の輸送方程式により算出される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial uCD}{\partial x} + \frac{\partial vCD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} + F_{\text{bio}} + F_{\text{phys}} \end{aligned} \quad (\text{式}-2.25)$$

C : コンパートメントの濃度

D : 水深

F_{bio} : 生物・化学過程によるソース、シンク項

F_{phys} : 移流拡散以外の物理過程によるソース、シンク項

K_H : 鉛直拡散係数

A_H : 水平拡散係数

【生物・化学過程】

a) 植物プランクトン Chl の時間変化

$$\frac{d(\text{Chl})}{dt} = \text{光合成} - \text{呼吸} - \text{細胞外分泌} - \text{死亡} - \text{捕食} - \text{沈降} \quad (\text{式-2. 26})$$

b) 動物プランクトン ZOO の時間変化

$$\frac{d(\text{ZOO})}{dt} = \text{摂食} - \text{排泄} - \text{排糞} - \text{死亡} \quad (\text{式-2. 27})$$

c) 硝酸塩 NO_3 の時間変化

$$\frac{d(\text{NO}_3)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) \times R_{\text{NO}_3} + \text{硝化} \quad (\text{式-2. 28})$$

d) リン酸塩 PO_4 の時間変化

$$\frac{d(\text{PO}_4)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) + \text{POM無機化} + \text{DOM無機化} \quad (\text{式-2. 29})$$

e) アンモニア NH_4 の時間変化

$$\frac{d(\text{NH}_4)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) \times (1 - R_{\text{NO}_3}) + \text{POM無機化} + \text{DOM無機化} - \text{硝化} \quad (\text{式-2. 30})$$

f) 溶存態有機物 DOM の時間変化

$$\frac{d(\text{DOM})}{dt} = \text{細胞外分泌} + \text{POM分解} - \text{DOM無機化} \quad (\text{式-2. 31})$$

g) 懸濁態有機物 POM の時間変化

$$\frac{d(\text{POM})}{dt} = \text{Chl死亡} + \text{ZOO死亡} + \text{ZOO排糞} - \text{沈降} - \text{POM分解} - \text{POM無機化} \quad (\text{式-2. 32})$$

生物・化学過程に関する基礎式の概要を以下に示す。なお、基礎式中の定数として、あるモデルサイトでの計算に用いた一例を、表VI-2.2示す。

【 植物プランクトン Chl に関する生物・化学過程 】

a) 光合成

光合成は、植物プランクトン濃度(Chl)、水温、栄養塩 (NO_3 , NH_4 , PO_4) および光強度の関数としている。

$$(\text{光合成速度}) = (\text{最大光合成速度}) \times (\text{温度制限}) \times (\text{栄養塩制限}) \times (\text{光制限}) \times (\text{Chl}) \quad (\text{式-2.33})$$

ここで、最大光合成速度は定数として与え、制限項は以下の式で与える。

$$\square \text{ 温度制限} : \exp(kT), \quad k = 0.063 \quad (\text{式-2.34})$$

$$\square \text{ 栄養塩制限} : \quad :$$

$$\text{GPP}_{\text{nuts}} = V_{\text{max}} \times \min(N_{\text{inhib}}, P_{\text{inhib}}) \quad (\text{式-2.35})$$

$$\text{窒素制限} : N_{\text{inhib}} = \frac{\text{NO}_3}{\text{NO}_3 + K_N} \exp(-\psi \text{NH}_4) + \frac{\text{NH}_4}{\text{NH}_4 + K_N}$$

K_N : 光合成の窒素制限に関する半飽和定数

$$\text{リン制限} : P_{\text{inhib}} = \frac{\text{PO}_4}{\text{PO}_4 + K_P}$$

K_P : 光合成のリン制限に関する半飽和定数

$$\square \text{ 光制限} : \frac{I}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}}\right) \quad (\text{式-2.36})$$

$$\text{光量} : I = I_0 \exp(-\Lambda|z|)$$

I_0 : 海面での光強度

z : 水深

Λ : 消散係数 $\Lambda = \alpha_1 + \alpha_2 \text{Chl}$

α_1, α_2 : 係数

b) 細胞外滲出

光合成の一部が細胞外へ滲出するものとし、次式で与える。

$$(\text{細胞外滲出速度}) = (\text{細胞外への滲出率 } \gamma) \times (\text{光合成速度}) \quad (\text{式-2.37})$$

γ : 係数 (= 0.135)

c) 呼吸

温度依存性を加味した植物プランクトン濃度の関数として与える。

$$(\text{呼吸}) = (\text{呼吸速度 } R_0) \times (\text{温度依存}) \times (\text{Chl}) \quad (\text{式-2.38})$$

R_0 : 0°Cにおける呼吸速度 (/day)

温度依存 : $\exp(kT)$, $k=0.0519$

d) 枯死

枯死は、濃度の 2 乗に比例し、温度に依存するものとし次式で与える。

$$(\text{枯死}) = (\text{最大枯死速度}) \times (\text{温度依存}) \times (\text{Chl})^2 \quad (\text{式-2.39})$$

ここで、最大枯死速度は定数とし、温度依存項は次式で与える。

温度依存 : $\exp(k_{MF}T)$, $k=0.069$

【 動物プランクトン Z00 に関する生物・化学過程 】

a) 摂食

摂食は、水温、植物プランクトン濃度(Chl)および動物プランクトン濃度(Z00)の関数とする。

$$(\text{摂食速度}) = (\text{最大摂食速度 } GR_{\max}) \times (\text{温度依存}) \times (\text{Chl 密度効果}) \times (Z00) \quad (\text{式-2.40})$$

ここで、最大摂食速度は定数とし、温度依存及び Chl 密度効果は以下の式で与える。

温度依存 : $\exp(kT)$, $k=0.0693$

Chl 密度効果 : $1 - \exp(\lambda (\text{Chl}^* - \text{Chl}))$

Chl^* : 低濃度側の臨界濃度。Chl がこの濃度以下では摂食速度はゼロとする。

λ : イブレフ定数

b) 死亡

死亡は、濃度の 2 乗に比例し、温度に依存するものとして次式で与える。

$$(\text{死亡}) = (\text{最大死亡速度}) \times (\text{温度依存}) \times (Z00)^2 \quad (\text{式-2.41})$$

ここで、最大枯死速度は定数とし、温度依存項は次式で与える。

温度依存 : $\exp(kT)$, $k=0.0693$

c) 排泄、同化

摂食の一部が排泄、同化されるものとし、同化効率 α と成長効率 β を用いて次式で与える。

$$(\text{排泄}) = (\text{同化効率 } \alpha - \text{成長効率 } \beta) \times (\text{摂食速度}) \quad (\text{式-2.42})$$

$$(\text{排糞}) = (1 - \text{同化効率 } \alpha) \times (\text{摂食速度}) \quad (\text{式-2.43})$$

α : 動物プランクトンの同化効率

β : 動物プランクトンの成長効率

3) 有機物分解・無機化

有機物の分解及び無機化は、温度に依存するものとし、次式で与える。

$$(\text{POM 無機化}) = (\text{最大無機化速度}) \times (\text{温度依存}) \times (\text{POM}) \quad (\text{式-2.44})$$

$$(\text{POM 分解}) = (\text{最大分解速度}) \times (\text{温度依存}) \times (\text{POM}) \quad (\text{式-2.45})$$

$$(\text{DOM 無機化}) = (\text{最大無機化速度}) \times (\text{温度依存}) \times (\text{DOM}) \quad (\text{式-2.46})$$

ここで、最大無機化速度及び最大分解速度はそれぞれ定数で与え、温度依存項は次式で与える。

$$\text{温度依存: } \exp(kT), \quad k=0.0693$$

4) 硝化

アンモニア態窒素(NH_4)の硝化過程については、次式で与える。

$$(\text{硝化}) = \text{硝化速度} \times (\text{温度依存}) \times (\text{NH}_4) \quad (\text{式-2.47})$$

ここで、硝化速度は定数で与え、温度依存項は次式で与える。

$$\text{温度依存: } \exp(kT), \quad k=0.0693$$

3. 現地調査による懸濁態有機物の沈降フラックスの評価および沈降速度の算定方法

(1) 沈降フラックスの評価

懸濁態有機物の沈降フラックスは、流動・生態系モデルの再現性の検証やマウンド礁近傍への有機物供給の観点から重要な要素となる。このフラックスは、対象とする海域にセジメントトラップを一定期間設置することにより取得することができる。以下には、セジメントトラップ設置上の留意点や沈降フラックスの評価にあたっての留意点等を示す。

1) セジメントトラップ調査上の留意点

- ・ トラップの設置層は、海洋における CO₂ 固定効果の把握が目的であるため、検証上海底面付近に設置することが望ましいが、海底面からの再懸濁の影響を受ける可能性があることから、対象とする海域での濁度の鉛直プロファイルを踏まえ、海底高濁層の影響が及ばない水深に設置する必要がある。これまでの知見を踏まえ、概ねの目安としては、海底面上 10～15m 程度での設置が一つの目安となると考えられる。
- ・ トラップの設置期間は、対象とする海域の基礎生産の状況により、同一設置期間にあっても、その採集量は異なるものと考えられる。また、分析内容によっては多くの採集量を確保する必要がある。このため、対象とする時期および採集試料の用途に応じて、適切に設定することが望ましい。ただし、現状では、湧昇マウンド礁が設置される離岸距離を対象とした知見は限られていることから、今後の情報の蓄積が必要である。
- ・ なお、これまでの知見として、図 VI-3.1 および図 VI-3.2 に示すようなセジメントトラップ（2 筒型）を用いて実施した五島西工区および対馬東工区の湧昇マウンド礁付近での調査（9 月上旬）では、5 日前後の設置により、必要最低限の分析量が確保された。

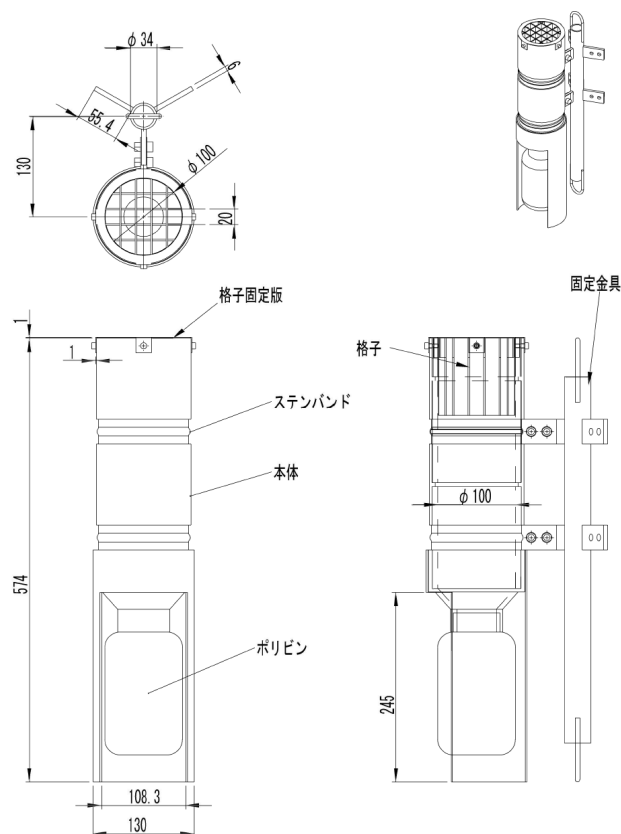


水抜き栓

捕集容器(ホルマリン海水)

	規格
寸法	内径:100mm
	全長:574mm
その他(ポリ容器)	容量:1L

図 VI-3.1 セジメントトラップ（2 筒型）の例



図VI-3.2 セジメントトラップの例

2) 沈降フラックスの評価上の留意点

- ・ 採集容器内には、沈降物の分解防止のためにホルマリンを充填することが一般に行われる。この際、捕集瓶に浸入してきた動物プランクトン（以下、非沈降系成分）がホルマリンの影響により死亡し、瓶内に採集される可能性がある。したがって、本質的な沈降フラックスを把握するためには、これら非沈降成分を除去（動物プランクトンネットや顕微鏡下でピンセット等を用いて取り除く）しなければならない。
- ・ 本調査では、非沈降成分を取り除かない状態でのサンプルも分析することで、動物プランクトン混入の影響を評価した。

(2) 沈降速度

流動・生態系モデルにおける重要なパラメータの一つとして、植物プランクトンの沈降速度およびデトリタス、動物プランクトンの糞粒などの沈降速度が挙げられる。

1) 植物プランクトンの沈降速度

対象とする海域に出現する種や既往知見により把握される沈降速度を踏まえ、適切に設定することが望ましい。表VI-3.1には、既往知見により把握される沈降速度の一覧を示す。ただし、限られた知見を元に整理したものであることに留意が必要である。

表 VI-3.1 既往知見による植物プランクトンの沈降速度

種名	沈降速度(m/日)	原著	文献
珪藻類	<i>Asterionella japonica</i>	0.26-0.75 Smayda (unpubl.)	1)
	<i>Asterionella japonica</i>	0.4 Margalef, 1961	1)
	<i>Actinocyclus</i>	0.6 Muggli, 1996	7)
	<i>Bacteriastrum delicatulum</i>	0.29-0.59 —	2)
	<i>Bacteriastrum hyalinum</i>	0.39-1.27 Smayda et al., 1966	1)
	<i>Cheatoceros didymus</i>	0.53 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Cheatoceros gracilis</i>	0.08-0.2 Smayda, 1970	5)
	<i>Cheatoceros launderi</i>	0.46-1.54 Smayda et al., 1966	1)
	<i>Cheatoceros</i> spp.	0.25 Margalef, 1961	1)
	<i>Cheatoceros</i> spp.	0.12 —	3)
	<i>Cheatoceros</i>	0.5 Bienfang et al., 1982	7)
	<i>Coscinodiscus concinnus</i>	1 Granata, 1991	7)
	<i>Coscinodiscus gigas</i>	0.98 —	2)
	<i>Coscinodiscus wailesii</i>	7.1 Eppley et al., 1967	7)
	<i>Coscinodiscus wailesii</i>	2 Bienfang et al., 1982	7)
	<i>Coscinodiscus</i> sp., clone AD	1.95-6.83 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Cyclotella nana</i> , clone 13-1	0.16-0.76 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Ditylum brightwelli</i>	0.6-3.09 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Ditylum brightwelli</i>	0.13-0.86 Smayda (unpubl.)	1)
	<i>Ditylum brightwelli</i>	<2 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Ditylum</i>	1 Bienfang et al., 1982	7)
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	0.37-0.46 Smayda (unpubl.)	1)
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	0.08-0.42 Margalef, 1961	1)
	<i>Leptocylindrus minimus</i>	0.06-0.12 —	3)
	<i>Nitzschia angularis</i>	0.25-0.9 Smayda, 1970	5)
	<i>Nitzschia seriata</i>	0.35-0.5 Smayda et al., 1965	1)
	<i>Nitzschia closterium</i>	0.52 Margalef, 1961	1)
	<i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>semispina</i>	0.22 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Rhizosolenia setigera</i>	0.16-1.77 Smayda et al., 1966	1)
	<i>Rhizosolenia stolterfothii</i>	1.0-1.9 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Rhizosolenia</i> spp.	0-0.72 Margalef, 1961	1)
	<i>Skeletonema costatum</i>	0.3-1.35 Smayda et al., 1966	1)
	<i>Skeletonema costatum</i>	0.07-0.36 —	3)
	<i>Skeletonema</i>	0.2 Bienfang et al., 1982	7)
	<i>Stephanopyxis turris</i>	~1.1 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Stephanopyxis turris</i>	~2.1 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.35-0.78 Smayda (unpubl.)	1)
	<i>Thalassiosira fluviatilis</i>	0.6-1.1 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Thalassiosira</i> cf. <i>gravidia</i>	0.53-0.7 Smayda (unpubl.)	1)
	<i>Thalassiosira</i> cf. <i>nana</i>	0.1-0.28 Smayda et al., 1965	1)
	<i>Thalassiosira rotula</i>	1.15 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Thalassiosira rotula</i>	0.39-2.1 Smayda et al., 1965	1)
	<i>Thalassiosira weissflogii</i>	0.5-1.5 Smayda, 1970	5)
	<i>Thalassiosira</i> spp.	0-0.16 Margalef, 1961	1)
	<i>Thalassiosira</i> spp.	0.55-1.2 —	3)
	<i>Thalassiosira</i>	1.5 Eppley et al., 1967	7)
	Large centric and pennate diatoms	0.43 Bienfang, P.K., 1984	2)
	Large centric diatoms	0.96 —	4)
	Diatoms	0.91 —	6)
	Diatoms	0.5 Boyd et al., 2000	7)
	Diatoms	1.3 Boyd et al., 2000	7)
渦鞭毛藻	<i>Conyaulax polyedra</i>	~2.8-6 Eppley et al., 1967	1)
鞭毛藻	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	0.18 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Monochrysis lutheri</i>	0.39 Eppley et al., 1967	1)
円石藻	<i>Coccolithus huxleyi</i>	0.28-1.3 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Cricosphaera carterae</i>	1.7 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Cricosphaera elongata</i>	0.25 Eppley et al., 1967	1)
	<i>Emiliana</i>	1 Fritz et al., 1996	7)
	<i>Emiliana</i>	0.3 LeCourt et al., 1996	7)
	<i>Emiliana</i>	0.12 Muggli et al., 1996	7)
【文献】			
1) Smayda, T.J.: The suspension and sinking of phytoplankton in the sea, Mar. Biol. Rev., Vol.8, pp.353-414, 1970			
2) Pitcher, G.C. et al.: Phytoplankton sinking rate dynamics in the southern Benguela upwelling system, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.55, pp.261-269, 1989			
3) Riebesell, U.: Comparison of sinking and sedimentation rate measurements in a diatom winter/spring bloom, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.54, pp.109-119, 1989			
4) Bienfang, P.K. et al.: Sinking-rate response of natural assemblages of temperate and subtropical phytoplankton to nutrient depletion, Marine Biology, Vol.83, No.3, pp.293-300, 1984			
5) Crocker, K.M. et al.: Differential aggregation of diatoms, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.117, pp.249-257, 1995			
6) Johnson, T.O. et al.: Sinking rates of phytoplankton assemblages in the Weddell Sea marginal ice zone, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.33, pp.131-137, 1986			
7) Huisman, J. et al.: Maximal sustainable sinking velocity of phytoplankton, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.244, pp.39-48, 2002			

2) 懸濁態有機物の沈降速度

式(1)の適用にあたっての留意事項を以下に示す。

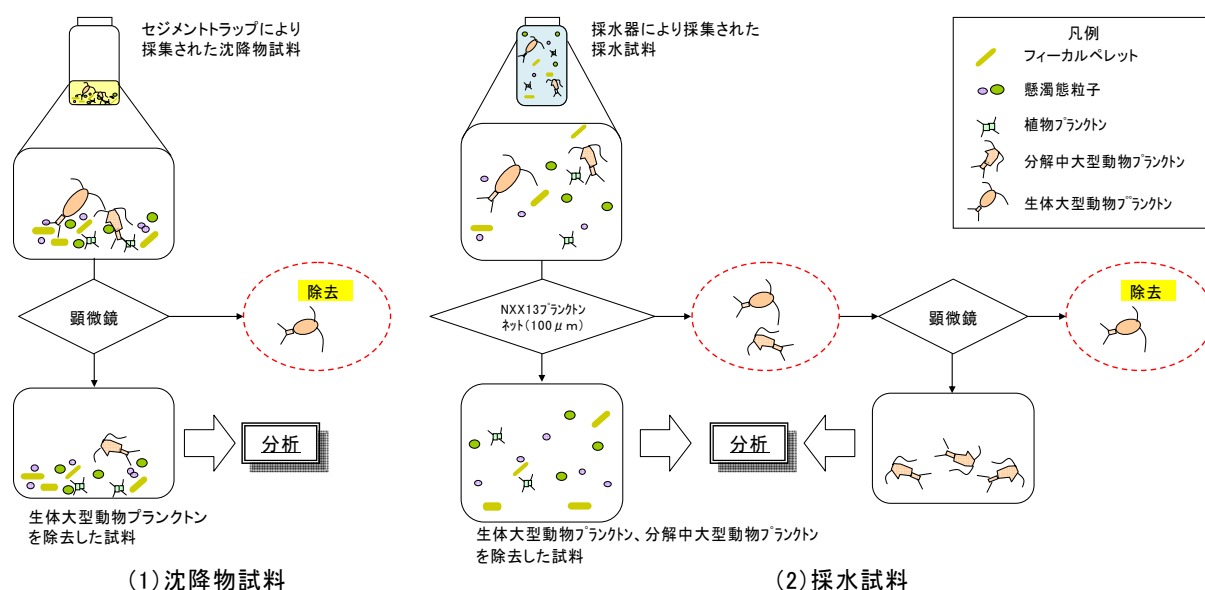
- ・ 沈降フラックス(F)に対しては、前述のとおり、大型動物プランクトンなどの非沈降成分を除去した値を用いる必要がある。
- ・ 一方、採水試料(C)は、セジメントトラップの設置期間中に、その設置層の水塊を採水器を用いて採水するが、セジメントトラップ調査により得られる沈降フラックス(F)がある一定期間中の累積値であるのに対して、採水試料(C)は瞬間値となる。このことから、採水調査は、セジメントトラップ設置期間中に、複数回実施し、値の代表性を確認することが望ましい。
- ・ なお、採水器による採水では、その方法上、本来は沈降しない非沈降成分を含有する可能性がある。このことから、沈降フラックスと同様、非沈降成分を除去した値を用いる必要がある。また、現地調査時の採水量を適切に設定しないと、「定量下限値未満」となる可能性があることから、対象とする時期および分析内容に応じて、適切な量を採水することが望ましい。ただし、現状では、湧昇マウンド礁が設置される離岸距離を対象とした知見は限られていることから、今後の情報の蓄積が必要である。
- ・ なお、これまでの知見として、五島西工区および対馬東工区の湧昇マウンド礁付近での調査（9月上旬）では、4～5L程度の採水により、必要最低限の分析量が確保された。

$$w = \frac{F}{C} \quad \dots \dots \dots (1)$$

〔 w : 沈降速度(m/日), F : 沈降フラックス(mg/m²/日), C : 周囲水の懸濁態有機物濃度(mg/L)〕

(3) 非沈降成分の除去方法

セジメントトラップによる沈降物試料中に含有した非沈降成分や採水試料中に含有した非沈降系成分の除去方法の一例を図VI-3.3に示す。



図VI-3.3 各試料中からの非沈降成分の除去方法の例

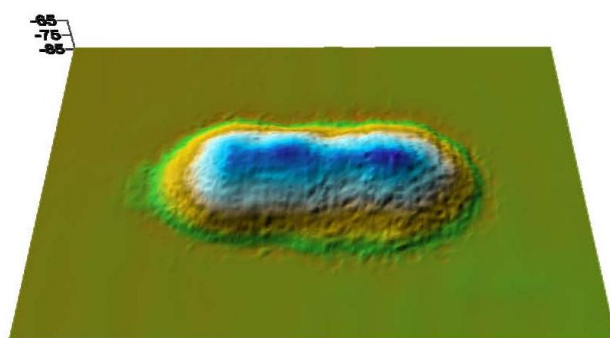
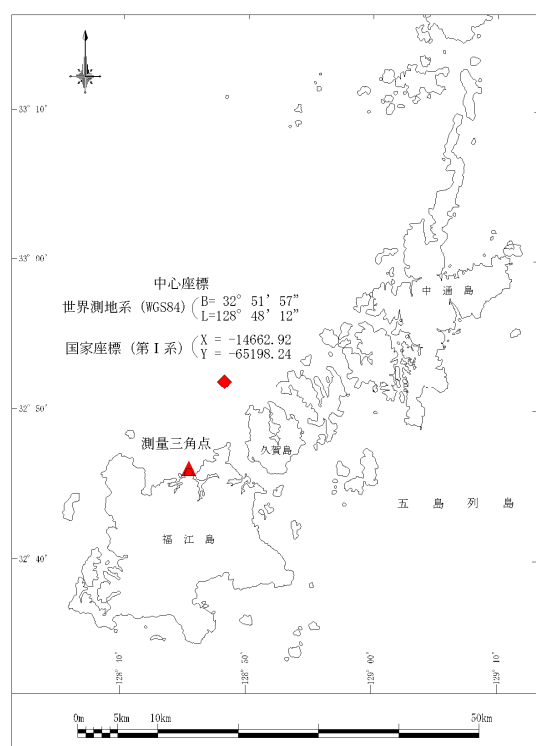
4. LCCO₂ を考慮した CO₂ 固定効果の定量的評価（ケーススタディ）

4.1 モデルサイト

ケーススタディを実施するモデルサイトは「長崎県西部地区五島西部工区」を対象とした。設置場所を図VI-4.1.1に示す。

湧昇マウンド礁の造成素材は、石炭灰コンクリートブロック、コンクリートブロック、石材について検討した。なお、五島西部工区は石材が使用されている。

湧昇マウンド礁の造成体積は、ブロックでは設計斜面勾配が1:2なので41,900m³とし、石材では設計斜面勾配がやや緩く1:2.5なので64,280m³とした。



南側から見た湧昇マウンド礁の俯瞰図

- | |
|---|
| (1) 湧昇マウンド礁の設置位置(中心座標)
・北緯 32 度 51 分 57 秒
・東経 128 度 48 分 12 秒
(2) 設置位置の水深 約 84m
(3) マウンド高さ(峰部) 15m
(4) 山頂間距離 75m
(5) 斜面勾配 1:2.5
(6) 湧昇軸 南北軸
(7) 造成素材 石材 (1t 内外/個) |
|---|

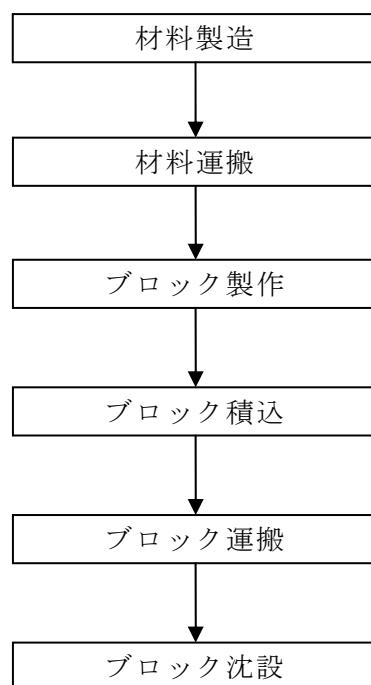
図VI-4.1.1 モデルサイト（長崎県五島西部工区、◆の位置）

4.2 CO₂ 排出量の算定

4.2.1 石炭灰コンクリートブロックの場合

(1) 施工フロー

石炭灰コンクリートブロックにより湧昇マウンド礁を造成する工事の施工フローを図VI-4.2.1に示す。



図VI-4.2.1 施工フロー

(2) ブロック製作に係る主要材料数量

ブロック製作に係る主要材料数量を表VI-4.2.1に示す。

表VI-4.2.1 ブロック製作に係る主要材料数量

材料	単位	数量
ブロック		6,618個
		(空隙率50%)
	3.35m ³ /個	22,170m ³
	1.9t/m ³	42,124t
石炭灰	1.2t/m ³	26,604t
セメント	0.2t/m ³	4,434t
鉄筋	28.2kg/個	187t
型枠		45個
	1.72t/個	77t

(3) 運搬距離

材料の運搬距離は、石炭灰およびセメントについて設定した。鉄筋・型枠については、数量が少ないため考慮しないものとした。

ブロック製作場所は三井楽に設けると仮定し、石炭灰の運搬距離を石炭火力発電所のある松浦から三井楽までの 120km、セメントの運搬距離をセメント工場近隣の門司から三井楽までの 250km に設定した。

なお、材料の運搬の大半は船舶によるもので、陸揚げ運搬分については計上しないこととした。

また、製作したブロックの運搬距離は、三井楽から沈設場所までの 17km とした。

ここで、運搬に係る船舶の回航・曳航は、所属港の場所により既定されるため、CO₂ 排出量の算定には計上しないこととした。

表 VI-4. 2. 2 運搬距離

材料	輸送距離	備考
石炭灰	120km	松浦（発電所）～三井楽（ブロック製作場所）
セメント	250km	門司～三井楽（ブロック製作場所）
ブロック	17km	三井楽（ブロック製作場所）～沈設場所

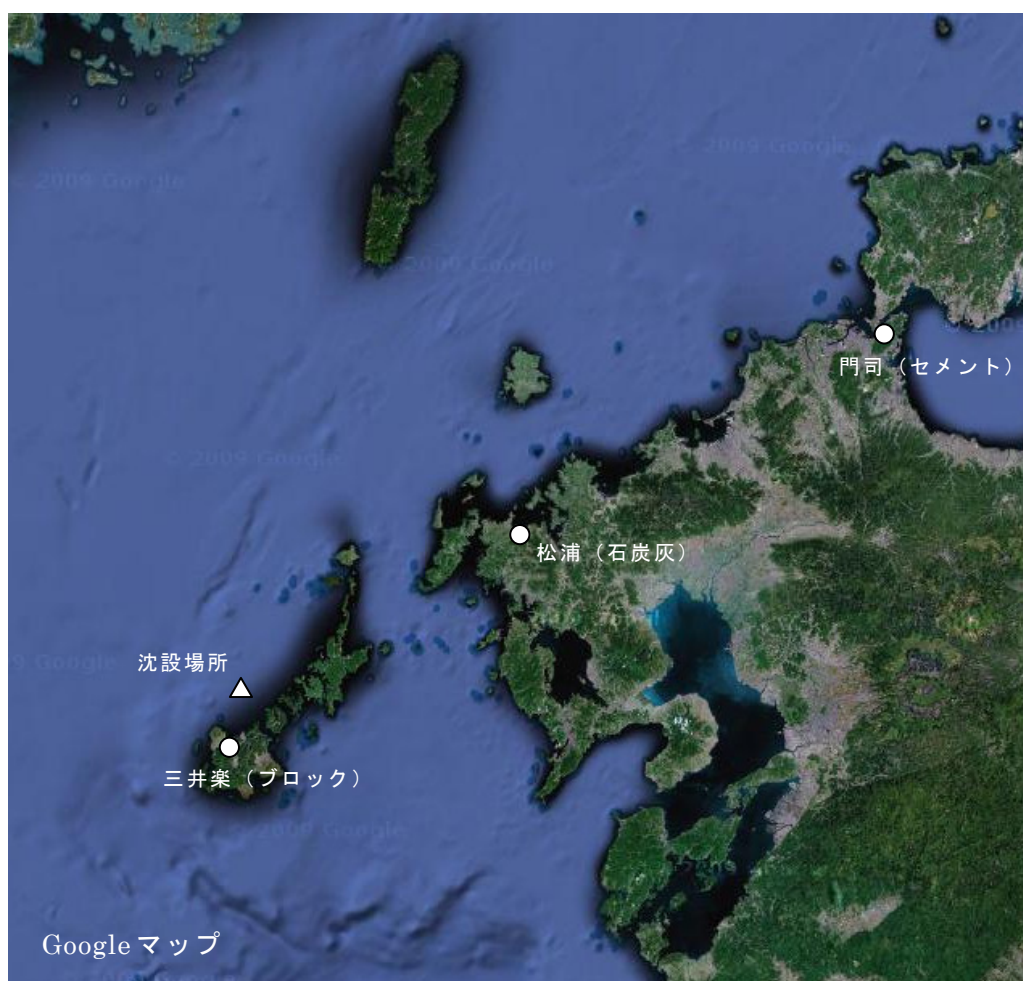
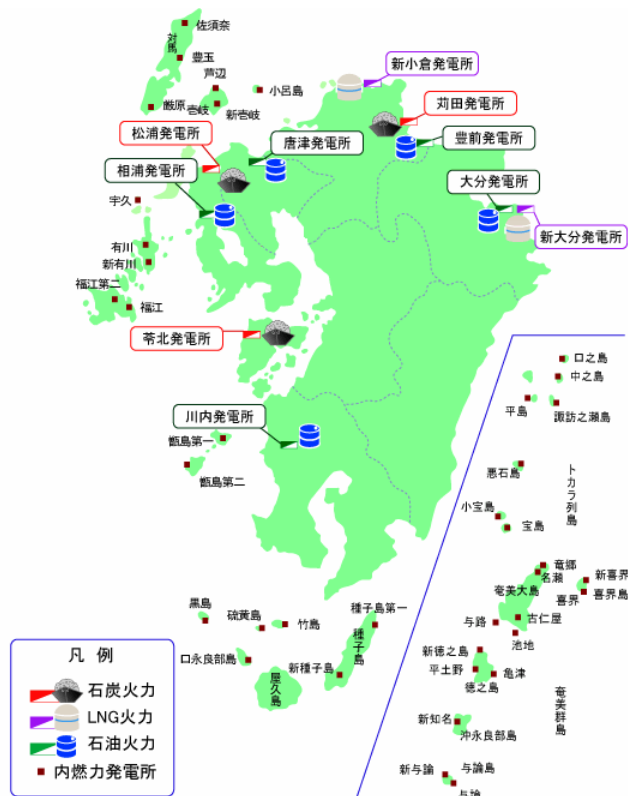


図 VI-4. 2. 2 ブロック製作場所および材料供給場所



図VI-4.2.3 火力発電所の分布（九州電力HPより引用）



図VI-4.2.4 セメント工場の分布（社団法人セメント協会HPより引用）

(4) 各建設過程における CO₂ 排出量の算定

CO₂ 排出量については、材料製造、材料運搬、ブロック製作、ブロック積込、ブロック運搬・沈設に分けて算定した。

①材料の製造に係る CO₂ 排出量

材料の製造に係る CO₂ 排出量を算定した。算定結果を表VI-4. 2. 3 に示す。

表VI-4. 2. 3 材料の製造に係る CO₂ 排出量

項目	数量	原単位	CO ₂ 排出量
セメント	4, 434t	765. 5kg-CO ₂ /t	3, 394t
鉄筋	187t	755. 3kg-CO ₂ /t	141t
型枠	77t	1, 246. 6kg-CO ₂ /t	96t

②材料の運搬に係る CO₂ 排出量

石炭灰およびセメントの運搬に係る CO₂ 排出量を算定した。算定結果を表VI-4. 2. 4 に示す。なお、運搬に使用する船舶は 2000t 級と仮定した。

表VI-4. 2. 4 材料の運搬に係る CO₂ 排出量

材料	数量	運搬距離	原単位	CO ₂ 排出量
石炭灰	26, 604t	120km	0. 0615kg-CO ₂ /km・t	196t
セメント	4, 434t	250km	0. 0615kg-CO ₂ /km・t	68t

③ブロック製作に係る CO₂ 排出量

ブロック製作に係る CO₂ 排出量の算定にあたっては、生コンプラント全体に係る分、打設・型枠組立組外に係る分に分けて算定した。

ここで、石炭灰の製造過程における CO₂ 排出量は、発電所における発電過程で計上されるものとし、ここでは計上しない。

ブロック製作に係る CO₂ 排出量を表VI-4. 2. 5 に示す。

表VI-4. 2. 5(1) ブロック製作に係る CO₂ 排出量（生コンプラント全体に係る分）

項目	数量	原単位	CO ₂ 排出量
生コンプラント	42, 124t	7. 7kg-CO ₂ /t	324t

表 VI-4. 2. 5 (2) ブロック製作に係る CO₂ 排出量（型枠組立組外・打設に係る分）

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
型枠組立組外	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	364日 運転時間 7.0h/日	2,545h	軽油	0.103L/kWh	50,591L
打設	フォーク リフト 11.5t級	115kW	375日 運転時間 7.0h/日	2,623h	軽油	0.037L/kWh	11,160L
	振動台	20kW	0.25h/個	1,655h			33,090kWh

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	原単位	CO ₂ 排出量
型枠組立組外	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	50,591L	2.64kg-CO ₂ /L	134t
打設	フォーク リフト 11.5t級	軽油	11,160L	2.64kg-CO ₂ /L	29t
	振動台		33,090kWh	0.37kg-CO ₂ /kWh	12t

④ブロック積込に係る CO₂ 排出量

ブロック積込では、製作ヤードで陸上クレーンによりトレーラ等にブロックを積込、作業船の積込場所まで運搬し、陸上クレーンで仮置き、仮置きされたブロックを陸上クレーンで作業船（鋼 1300m³ 積）に積込するものとした。

ブロック積込に係る CO₂ 排出量を表VI-4.2.6 に示す。

表VI-4.2.6 ブロック積込に係る CO₂ 排出量

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
運搬仮置 (積込用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	94個/日 運転時間 7.0h/日	493h	軽油	0.103L/kWh	9,797L
運搬仮置 (仮置用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	94個/日 運転時間 7.0h/日	493h	軽油	0.103L/kWh	9,797L
運搬仮置	トレーラ 15t積	235kW	3台/日 運転時間 6.6h/日	1,394h	軽油	0.075L/kWh	24,569L
積込	クローラ クレーン (油)50t吊	132kW	94個/日 運転時間 7.0h/日	493h	軽油	0.089L/kWh	5,790L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	原単位	CO ₂ 排出量
運搬仮置 (積込用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	9,797L	2.64kg-CO ₂ /L	26t
運搬仮置 (仮置用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	9,797L	2.64kg-CO ₂ /L	26t
運搬仮置	トレーラ 15t積	軽油	24,569L	2.64kg-CO ₂ /L	65t
積込	クローラ クレーン (油)50t吊	軽油	5,790L	2.64kg-CO ₂ /L	15t

⑤ブロック運搬・沈設に係る CO₂ 排出量

ブロック運搬・沈設における船団構成は、土運船（鋼 1300m³ 積）、押船（鋼 D2000PS）とした。土運船の最大積載個数は 108 個とし、1 沈設当たりの運転時間は往復平均曳航距離 17km より 6.0h とした。

表VI-4.2.7 にブロック運搬・沈設に係る CO₂ 排出量を示す。

表VI-4.2.7 ブロック運搬・沈設に係る CO₂ 排出量

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
運搬・沈設	押船 (鋼D2000PS)	1,471kW	108個/回 沈設回数61回 運転時間 6.0h/回	368h	重油A	0.220L/kWh	118,984L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	原単位	CO ₂ 排出量
運搬・沈設	押船 (鋼D2000PS)	A重油	118,984L	2.77kg-CO ₂ /L	330t

(6) 各建設過程における CO₂ 排出量の算定結果

各建設過程における CO₂ 排出量の算定結果を表VI-4.2.8 に示す。

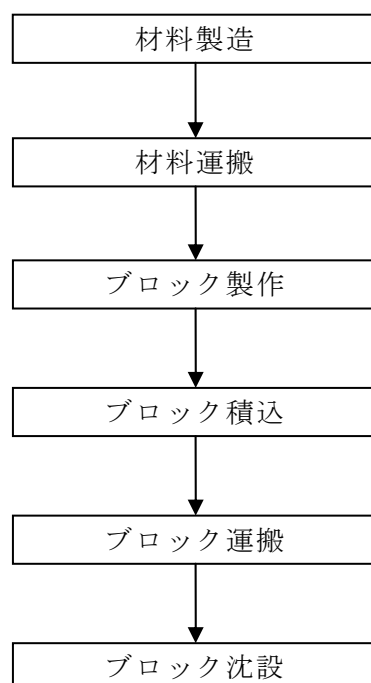
表VI-4.2.8 各建設過程における CO₂ 排出量の算定結果

工程	CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出割合
ブロック材料製造	3,632t	74.8%
ブロック材料運搬	265t	5.4%
ブロック製作	500t	10.3%
ブロック積込	132t	2.7%
ブロック運搬・沈設	330t	6.8%
合計	4,857t	100.0%

4.2.2 コンクリートブロックの場合

(1) 施工フロー

コンクリートブロックにより湧昇マウンド礁を造成する工事の施工フローを図VI-4.2.5に示す。



図VI-4.2.5 施工フロー

(2) ブロック製作に係る主要材料数量

ブロック製作に係る主要材料数量を表VI-4.2.9に示す。型枠については、石炭灰コンクリートブロックと同様のものを使用すると仮定した。

表VI-4.2.9 ブロック製作に係る主要材料数量

材料	単位	数量
ブロック		6,618個
		(空隙率50%)
	3.35m ³ /個	22,170m ³
	2.3t/m ³	50,992t
セメント	0.351t/m ³	7,782t
砂利	0.849t/m ³	18,823t
碎石	0.955t/m ³	21,173t
型枠		45個
	1.72t/個	77t

(3) 運搬距離

材料の運搬距離は、セメントについて設定するものとする。砂利、碎石はブロック製作場所の近隣から供給されると仮定し考慮しない。型枠についても、石炭灰コンクリートブロックの場合と同様に考慮しない。

ブロック製作場所は三井楽に設けると仮定し、セメントの運搬距離をセメント工場近隣の門司から三井楽までの 250km とした。

なお、材料の運搬の大半は船舶によるので、陸揚げ運搬分については計上しない。

また、製作したブロックの運搬距離は、三井楽から沈設場所までの 17km とした。

ここで、運搬に係る船舶の回航・曳航は、所属港の場所で既定されることから、CO₂ 排出量の算定には計上しない。

表 VI-4. 2. 10 運搬距離

材料	輸送距離	備考
セメント	250km	門司～三井楽（ブロック製作場所）
ブロック	17km	三井楽（ブロック製作場所）～沈設場所

(4) 各建設過程における CO₂ 排出量の算定

CO₂ 排出量は、材料製造、材料運搬、ブロック製作、ブロック積込、ブロック運搬・沈設に分けて算定した。

①材料の製造に係る CO₂ 排出量

材料の製造に係る CO₂ 排出量を算定した。算定結果を表 VI-4. 2. 11 に示す。

表 VI-4. 2. 11 材料の製造に係る CO₂ 排出量

項目	数量	原単位	CO ₂ 排出量
セメント	7,782t	765.5kg-CO ₂ /t	5,957t
砂利	18,823t	3.4kg-CO ₂ /t	64t
碎石	21,173t	2.8kg-CO ₂ /t	59t
型枠	77t	1,246.6kg-CO ₂ /t	96t

②材料の運搬に係る CO₂ 排出量

セメントの運搬に係る CO₂ 排出量を算定した。算定結果を表 VI-4. 2. 12 に示す。なお、運搬に使用する船舶は 2000t 級と仮定した。

表 VI-4. 2. 12 材料の運搬に係る CO₂ 排出量

材料	数量	運搬距離	原単位	CO ₂ 排出量
セメント	7,782t	250km	0.0615kg-CO ₂ /km・t	120t

③ブロック製作に係る CO₂ 排出量

ブロック製作に係る CO₂ 排出量の算定にあたっては、生コンプラント全体に係る分、打設・型枠組立組外に係る分に分けて算定した。

表Ⅵ-4. 2. 13 (1) ブロック製作に係る CO₂ 排出量（生コンプラント全体に係る分）

項目	数量	原単位	CO ₂ 排出量
生コンプラント	50,992t	7.7kg-CO ₂ /t	393t

表Ⅵ-4. 2. 13 (2) ブロック製作に係る CO₂ 排出量（型枠組立組外・打設に係る分）

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
型枠組立組外	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	364日 運転時間 7.0h/日	2,545h	軽油	0.103L/kWh	50,591L
打設	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	546日 運転時間 7.0h/日	3,822h	軽油	0.103L/kWh	75,978L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	原単位	CO ₂ 排出量
型枠組立組外	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	50,591L	2.64kg-CO ₂ /L	134t
打設	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	75,978L	2.64kg-CO ₂ /L	201t

④ブロック積込に係る CO₂ 排出量

ブロック積込は、石炭灰コンクリートブロックと同様に、製作ヤードで陸上クレーンによりトレーラ等にブロックを積込、作業船の積込場所まで運搬し、陸上クレーンで仮置き、仮置きされたブロックを陸上クレーンで作業船（鋼 1300m³ 積）に積込するものとした。

ブロック積込に係る CO₂ 排出量を表VI-4. 2. 14 に示す。

表VI-4. 2. 14 ブロック積込に係る CO₂ 排出量

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
運搬仮置 (積込用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	94個/日 運転時間 7.0h/日	493h	軽油	0.103L/kWh	9,797L
運搬仮置 (仮置用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	193kW	94個/日 運転時間 7.0h/日	493h	軽油	0.103L/kWh	9,797L
運搬仮置	トレーラ 15t積	235kW	3台/日 運転時間 6.6h/日	1,394h	軽油	0.075L/kWh	24,569L
積込	クローラ クレーン (油)50t吊	132kW	94個/日 運転時間 7.0h/日	493h	軽油	0.089L/kWh	5,790L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	原単位	CO ₂ 排出量
運搬仮置 (積込用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	9,797L	2.64kg-CO ₂ /L	26t
運搬仮置 (仮置用)	ラフテレーン クレーン (油)25t吊	軽油	9,797L	2.64kg-CO ₂ /L	26t
運搬仮置	トレーラ 15t積	軽油	24,569L	2.64kg-CO ₂ /L	65t
積込	クローラ クレーン (油)50t吊	軽油	5,790L	2.64kg-CO ₂ /L	15t

④ブロック運搬・沈設に係る CO₂ 排出量

ブロック運搬・沈設における船団構成は、石炭灰コンクリートブロックと同様に、土運船（鋼 1300m³ 積）、押船（鋼 D2000PS）とした。土運船の最大積載個数は 108 個とし、1 沈設当たりの運転時間は往復平均曳航距離 17km より 6.0h とした。

ブロック運搬・沈設に係る CO₂ 排出量を表 VI-4. 2. 15 に示す。

表 VI-4. 2. 15 ブロック運搬・沈設に係る CO₂ 排出量

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
運搬・沈設	押船 (鋼D2000PS)	1,471kW	108個/回 沈設回数61回 運転時間 6.0h/回	368h	A重油	0.220L/kWh	118,984L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	原単位	CO ₂ 排出量
運搬・沈設	押船 (鋼D2000PS)	A重油	118,984L	2.77kg-CO ₂ /L	330t

(6) 各建設過程における CO₂ 排出量の算定結果

各建設過程における CO₂ 排出量の算定結果を表 VI-4. 2. 16 に示す。

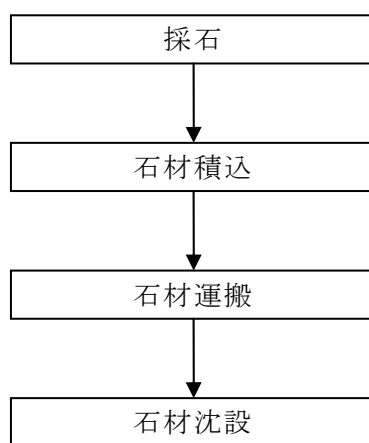
表 VI-4. 2. 16 各建設過程における CO₂ 排出量の算定結果

工程	CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出割合
ブロック材料製造	6,177t	82.5%
ブロック材料輸送	120t	1.6%
ブロック製作	727t	9.7%
ブロック積込	132t	1.8%
ブロック運搬・沈設	330t	4.4%
合計	7,485t	100.0%

4.2.3 石材の場合

(1) 施工フロー

石材により湧昇マウンド礁を造成する工事の施工フローを図VI-4.2.6に示す。



図VI-4.2.6 施工フロー

(2) 石材の数量

石材の必要数量を表VI-4.2.17に示す。

64,280m³の湧昇マウンド礁を造成するために必要な石材量は86,778m³である。その根拠は、マウンド造成作業における石材投入時のロス分が35%として22,498m³とした。必要な石材量は図VI-4.2.10に示したような高さ20m、底辺20m、幅434mの三角柱から採取することを仮定した。

表VI-4.2.17 石材の必要数量

材料	単位	数量
石材(安山岩)		86,778m ³
		(割増率35%)
	2.7t/m ³	234,301t
		(1.0t内外/個)

(3) 運搬距離

石材は五島杵島産の安山岩を使用するものとし、石材の運搬距離は、杵島から沈設場所までの 30km に設定した。

表 VI-4. 2. 18 運搬距離

材料	輸送距離	備考
石材	30km	杵島（採石場所）～沈設場所

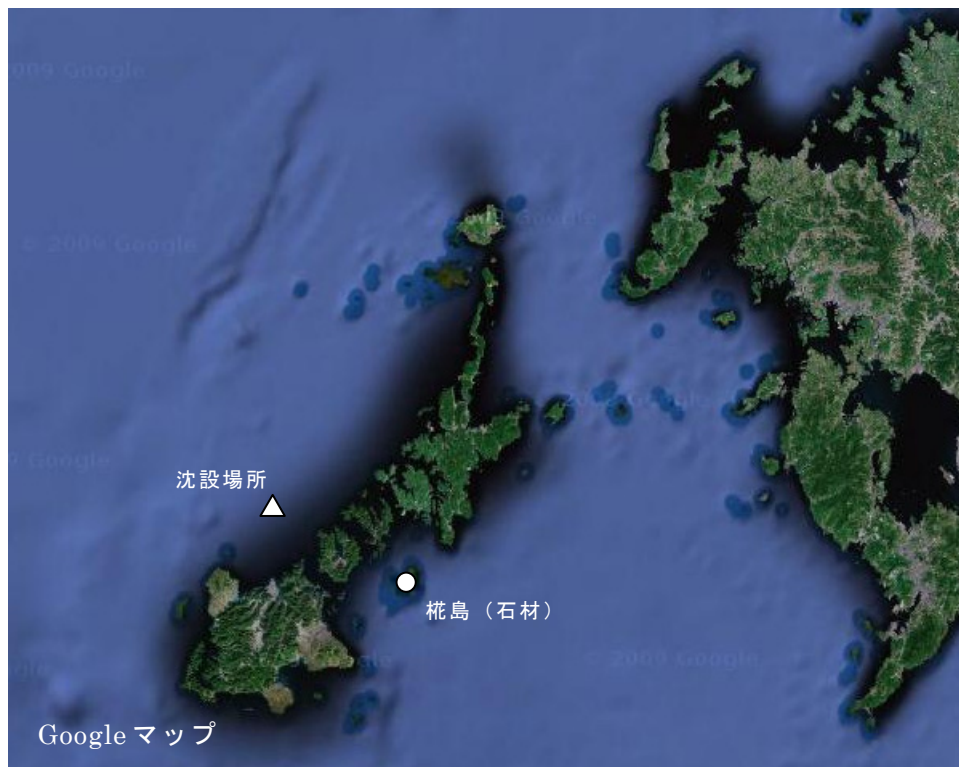


図 VI-4. 2. 7 石材採取場所（杵島）

(4) 各建設過程における CO₂ 排出量の算定

CO₂ 排出量については、採石、石材積込、石材運搬・投入に分けて算定する。

①採石に係る CO₂ 排出量

採石に係る CO₂ 排出量を表VI-4. 2. 19 に示す。

表 VI-4. 2. 19 採石に係る CO₂ 排出量

項目	数量	排出係数	CO ₂ 発生量
石材	234, 301t	5. 65kg-CO ₂ /t	1, 324t

②石材積込に係る CO₂ 排出量

石材積込は、土運船（鋼 1300m³ 積、能力算定用基準積載容積 1100m³）にガット船で行なうこととした。ガット船の積込能力は 320m³/h、積込時間は 3. 5h/回とし、積込回数は 79 回である

石材積込に係る CO₂ 排出量を表VI-4. 2. 20 に示す。

表 VI-4. 2. 20 石材積込に係る CO₂ 排出量

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
積込	ガット船	294kW	320m ³ /h 積込回数79回 3. 5h/回	276h	A重油	0. 277L/kWh	22, 486L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	排出係数	CO ₂ 発生量
積込	ガット船	A重油	22, 486L	2. 77kg-CO ₂ /L	62t

③石材運搬・投入に係る CO₂ 排出量

石材運搬・投入における船団構成は、土運船（鋼 1300m³ 積）、押船（鋼 D2000PS）、引船（補助船）（鋼 D800PS）2 隻とした。投入 1 回当たりの運転時間は、押船 9.5h、引船 2.4h とした。

石材運搬・投入に係る CO₂ 排出量を表 VI-4. 2. 21 に示す。

表 VI-4. 2. 21 石材運搬・投入に係る CO₂ 排出量

作業内容	機械名称	機関出力	作業時間		燃料種類	燃料消費率	燃料消費量
運搬・沈設	押船 (鋼D2000PS)	1,471kW	投入回数79回 運転時間 9.5h/回	749h	A 重油	0.220L/kWh	242,536L
	引船2隻 (鋼D800PS)	588kW	投入回数79回 運転時間 2.4h/回	379h	A 重油	0.220L/kWh	48,984L

作業内容	機械名称	燃料種類	燃料消費量	排出係数	CO ₂ 発生量
運搬・沈設	押船 (鋼D2000PS)	A 重油	242,536L	2.77kg-CO ₂ /L	672t
	引船 (鋼D800PS)	A 重油	48,984L	2.77kg-CO ₂ /L	136t

(5) 森林による CO₂ 固定・吸収量の算定

森林は CO₂ を固定・吸収しているが、採石により森林が失われることにより、CO₂ 固定・吸収機能は失われる。したがって、その失われる CO₂ 固定・吸収量を排出量に加算して LCCO₂ を算定する。森林消失による CO₂ 排出は、森林という財産を失うことでもあり、化石燃料を使用して排出される CO₂ と意味合いが大きく違うことも念頭におく必要がある。

石材の供給場所として仮定した梶島は、図 VI-4.2.8 に示すとおり森林に覆われた島で、その植生は図 VI-4.2.9 より常緑広葉樹林帯である。

採石により消失する森林面積は、石材の必要量 (86,778m³) から図 VI-4.2.10 のとおり仮定して、18,023m² とした。

森林のあった場所は、採石により土壌の形成されていない裸地となる。そこから始まる遷移は一次遷移で、初期の段階は植生にとって条件が厳しく、極相（遷移の最終状態）に達するには数百年の歳月が必要といわれている⁵⁾。そこで本検討では遷移期間をとりあえず 100 年と仮定した。

表 VI-4.2.22 に森林の CO₂ 固定量（現存量）、表 VI-4.2.23 に CO₂ 吸収量の算定結果を示す。

表 VI-4.2.22 森林の CO₂ 固定量（現存量）

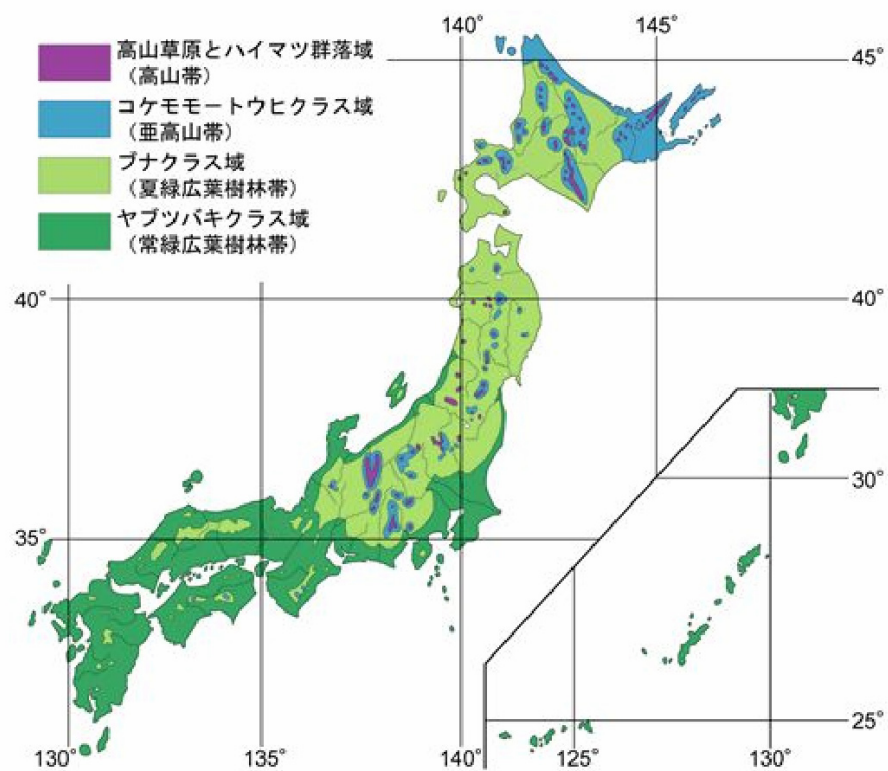
項 目	結 果
植生	常緑広葉樹林帯
消失面積	18,023m ²
単位面積当たりの生物量 ⁶⁾	6～200（平均 35）kg-乾重/m ²
生物量	108,138～3,604,600（平均 630,805）kg-乾重
固定している炭素量 （炭素量＝生物量×1/2）	54～1,802（平均 315）t-C
固定している二酸化炭素量 （二酸化炭素量＝炭素量×44/12）	198～6,607（平均 1155）t-CO ₂

表 VI-4.2.23 森林の CO₂ 吸収量

項 目	結 果
植生	常緑広葉樹林帯
消失面積	18,023m ²
遷移期間	100 年
単位面積当たりの純一次生産 ⁶⁾	600～2500（平均 1300）g-乾重/m ² /年
純一次生産	1,081～4,506（平均 2,343）t-乾重
吸収する炭素量 （炭素量＝純一次生産×1/2）	541～2,253（平均 1,172）t-C
吸収する二酸化炭素量 （二酸化炭素量＝炭素量×44/12）	1,984～8,261（平均 4,297）t-CO ₂



図VI-4.2.8 柵島の採石場（全長 1km、高さ 150m、株式会社真興産業 HP より引用）



図VI-4.2.9 日本の自然植生図（出典：日本の植生、宮脇昭編、昭和 52 年）

4.2.4 CO₂ 排出量の算定結果のまとめ

各造成材料の建設過程における CO₂ 排出量の算定結果のまとめを表VI-4.2.25、図VI-4.2.11に示す。

石炭灰コンクリートブロック（ACブロック）は、材料製造に係る CO₂ 排出量の割合が最も高く、総 CO₂ 排出量に対し 74.8%を占める。

コンクリートブロック（Conブロック）は、材料製造に係る CO₂ 排出量の割合が最も高く、総 CO₂ 排出量に対し 82.5%を占める。

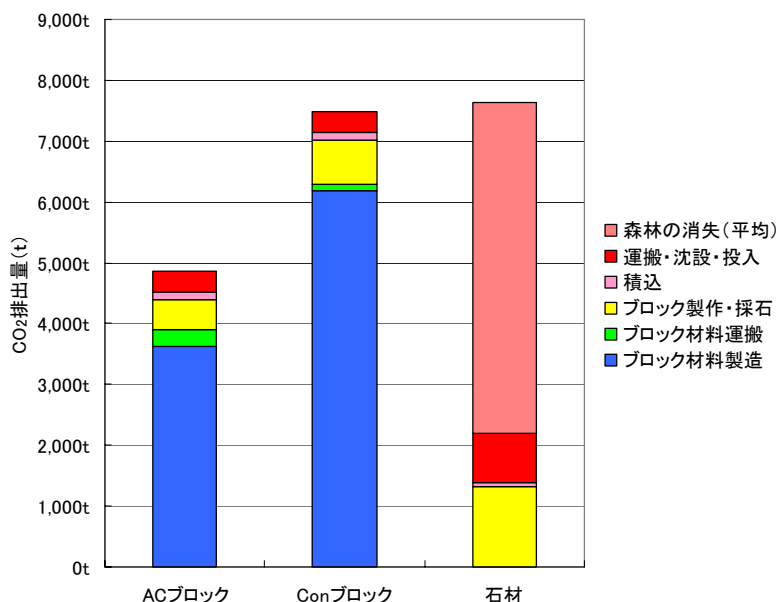
石材は、森林の消失にともなう CO₂ 固定・吸収量の減少を考慮すると、その分が採石等に係る CO₂ 排出量の割合に比べ高く、総 CO₂ 排出量に対し 71.3%を占める。

今回の LCCO₂ 算定は、材料供給場所やブロック製作場所、使用船舶機械など様々な仮定のもとに行なったものであるとともに、考慮していない建設過程もあることから、今後は、より実態に即した条件で LCCO₂ 算定を行なうことが必要である。

なお、ここでは LCCO₂ に着目しているが、実際の事業実施に当たっては湧昇効果、魚礁効果等も含めたトータルでの B/C で使用する造成材料が決まることから、石材使用を排除するものではない。

表VI-4.2.25 各建設過程における CO₂ 排出量

工程	CO ₂ 排出量					
	ACブロック		Conブロック		石材	
ブロック材料製造	3,632t	74.8%	6,177t	82.5%		
ブロック材料運搬	265t	5.4%	120t	1.6%		
ブロック製作・採石	500t	10.3%	727t	9.7%	1,324t	17.3%
積込	132t	2.7%	132t	1.8%	62t	0.8%
運搬・沈設・投入	330t	6.8%	330t	4.4%	808t	10.6%
森林の消失（平均）					5,452t	71.3%
合計	4,857t	100.0%	7,485t	100.0%	7,646t	100.0%



図VI-4.2.11 各建設過程における CO₂ 排出量

4.3 CO₂固定量の算定

本検討では流動場に POM³⁾、一次生産に KKYS モデル⁴⁾を用いた。

4.3.1 計算条件

計算条件を表VI-4.3.1に示し、以降に内容について説明をする。

表VI-4.3.1 計算条件

項 目	内 容
計算時間	2008/9/8～10/8の1ヶ月間
計算領域	長崎県五島西周辺領域 東経128度19分から129度22分、北緯32度24分から33度23分 (南北107.3km、東西97.2km)
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
格子間隔	(1)2,025m, (2)675m, (3)225m, (4)75m, (5)25m
鉛直層分割	σ 座標 21層
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 : Nao99jbによる潮位・潮流 水温、塩分および流速 : JCOPEデータ〈1日平均〉
気象条件	気圧、気温、相対湿度、風 : GPV(RSM)データ〈1時間間隔〉 全天日射量、雲量 : 長崎海洋気象台データ〈1時間間隔〉
物質濃度	平成20年度調査結果およびJODCデータを元に作成

※表中の(数値)は計算領域番号を示す。

(1) 計算期間

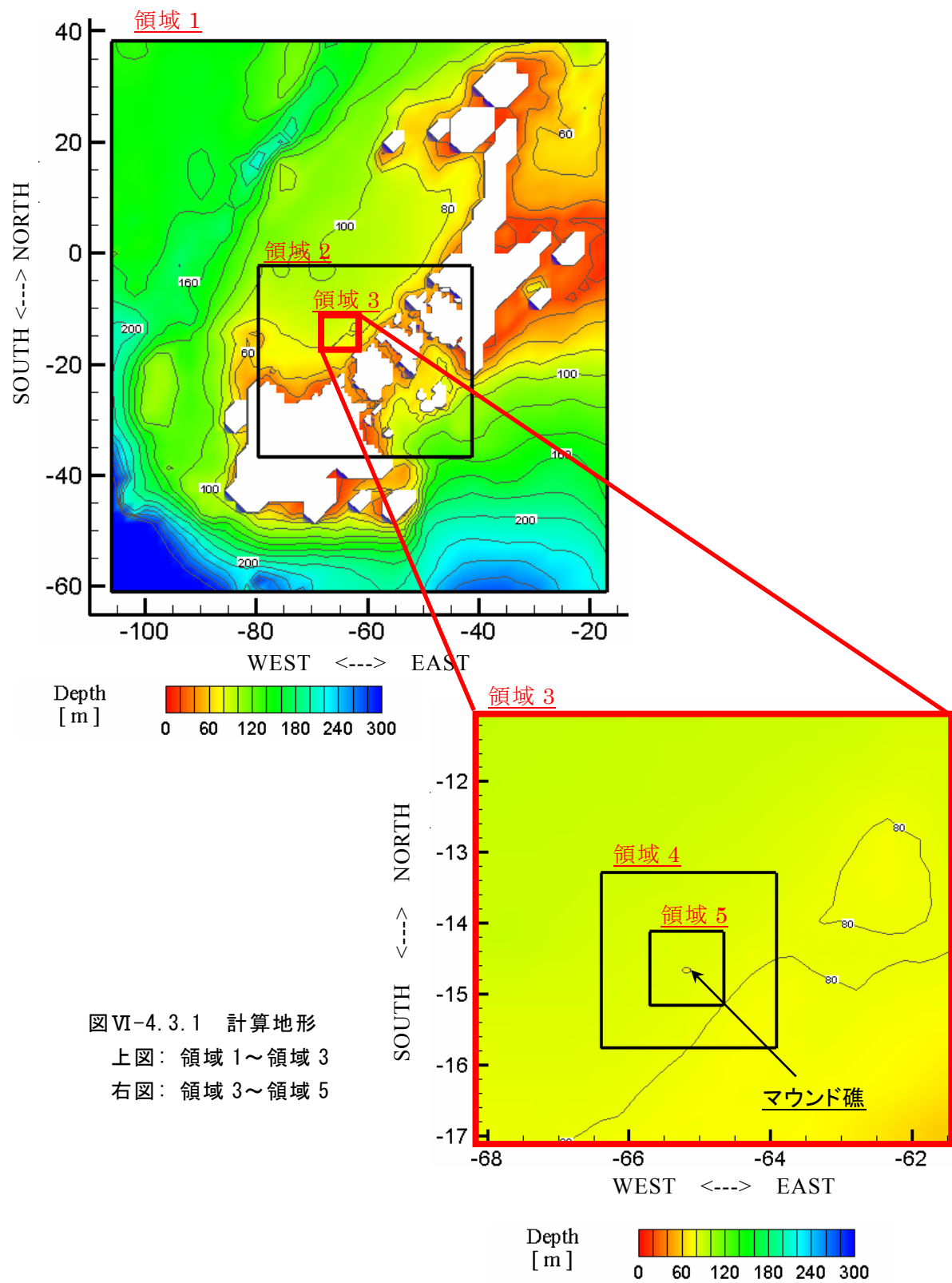
平成 20 年度に現地調査が実施された期間と合わせて、2008 年 9 月 8 日から 2008 年 10 月 8 日までの 1 ヶ月間とした。

(2) 計算領域

湧昇マウンド礁が設置されている長崎県五島西周辺海域を含む、東経 128 度 19 分から 129 度 22 分、北緯 32 度 24 分から 33 度 23 分の範囲とした(南北 107.3km, 東西 97.2km)。数値シミュレーションでは、直角座標系の基礎式のため、上記緯度経度座標を平面直角座標系(1 系)に座標変換したデータを使用した。海底地形は、日本海洋データセンター(以下、JODC)による J-egg500 を使用した。

(3) 計算格子

マウンド礁の形状を再現するためには格子間隔は細かい方が望ましいが、計算領域が広いために細かい格子では計算コスト的に検討が困難である。そのため、本検討では格子間隔の粗い格子と細かい格子を双方向にネスティングさせて計算を行うこととした。領域は全 5 領域とし、格子間隔は第 1 領域を 2,025m、第 2 領域を 675m、第 3 領域を 225m、第 4 領域を 75m、第 5 領域を 25m とした(図 VI-4.3.1)。鉛直層分割は 21 層で、表層の解像度が高くなるように設定した(表 VI-4.3.2)。



図VI-4.3.1 計算地形
 上図：領域 1～領域 3
 右図：領域 3～領域 5

表 VI-4.3.2 鉛直層の設定

層番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ 層高さ	0.000	-0.019	-0.042	-0.070	-0.104	-0.144	-0.192	-0.249	-0.307	-0.365
σ 層高さ (格子中央)	-0.010	-0.031	-0.056	-0.087	-0.124	-0.168	-0.221	-0.278	-0.336	-0.394
σ 層厚	0.019	0.023	0.028	0.033	0.040	0.048	0.058	0.058	0.058	0.058

層番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
σ 層高さ	-0.423	-0.480	-0.538	-0.596	-0.654	-0.711	-0.769	-0.827	-0.885	-0.942	-1.000
σ 層高さ (格子中央)	-0.452	-0.509	-0.567	-0.625	-0.682	-0.740	-0.798	-0.856	-0.913	-0.971	-
σ 層厚	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	-

(4) 時間ステップ

時間ステップは、水位と平均流速を計算する外部モードでは、第 1 領域が 16.2 秒、第 2 領域が 5.4 秒、第 3 領域が 1.8 秒、第 4 領域が 0.6 秒、第 5 領域が 0.2 秒とした。

流速の鉛直分布、水温、塩分を計算する内部モードでは、第 1 領域は 97.2 秒、第 2 領域は 32.4 秒、第 3 領域は 10.8 秒、第 4 領域は 3.6 秒、第 5 領域は 1.2 秒とした。

(5) 境界条件

境界の水位として、日本周辺海洋潮汐モデル及び日本周辺海洋潮汐流速モデル(短周期 16 分潮、解像度 5 分)⁷⁾による潮汐・潮流の調和成分(M2、S2、O1、K1、N2、K2、P1)より、潮位・潮流を推算して与えた(表 VI-4.3.3)。

海流、水温、塩分の境界条件は、1 日平均の JCOPE データ⁸⁾を空間的にはスプライン補間、時間的には線形補間して与えた。

表 VI-4. 3. 3 (1) 潮位の調和成分

		分潮名						
		M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1
北東端	振幅 (cm)	78.49	36.15	15.85	10.33	22.19	18.92	7.45
	遅角 (度)	359.26	24.92	354.06	19.79	98.00	78.42	95.36
北西端	振幅 (cm)	77.59	35.16	15.85	10.08	20.70	16.14	6.96
	遅角 (度)	357.64	23.91	352.09	19.43	80.06	61.81	77.40
南西端	振幅 (cm)	71.77	31.97	14.63	9.10	24.21	19.03	7.94
	遅角 (度)	340.60	6.75	337.33	2.50	78.70	58.66	76.71
南東端	振幅 (cm)	78.20	34.49	15.37	9.73	25.83	20.58	8.37
	遅角 (度)	328.55	354.05	325.02	349.36	77.47	56.87	75.20

表 VI-4. 3. 3 (2) 潮流の調和成分 (東西方向成分)

		分潮名						
		M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1
北東端	振幅 (cm)	9.96	3.82	2.16	1.11	9.75	9.92	3.51
	遅角 (度)	65.70	93.84	62.81	95.87	140.20	104.90	141.70
北西端	振幅 (cm)	7.03	2.60	1.71	0.87	6.89	7.04	2.37
	遅角 (度)	128.60	165.70	127.00	163.20	168.80	133.40	168.20
南西端	振幅 (cm)	15.57	7.08	3.43	2.09	3.08	2.55	1.14
	遅角 (度)	146.80	170.30	137.40	166.20	217.60	180.10	220.80
南東端	振幅 (cm)	3.31	1.35	0.73	0.40	1.06	1.31	0.37
	遅角 (度)	135.00	151.10	129.30	150.70	188.10	155.80	195.00

表 VI-4. 3. 3 (3) 潮流の調和成分 (南北方向成分)

		分潮名						
		M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1
北東端	振幅 (cm)	37.23	16.37	7.93	4.73	25.39	23.71	9.28
	遅角 (度)	5.81	34.69	9.14	33.20	109.90	73.87	113.10
北西端	振幅 (cm)	11.85	4.90	2.17	1.41	7.37	6.65	2.27
	遅角 (度)	357.40	21.54	0.64	17.95	128.60	87.20	124.80
南西端	振幅 (cm)	17.01	7.61	3.41	2.15	5.09	4.94	1.67
	遅角 (度)	344.30	8.13	340.70	4.44	111.20	75.86	111.30
南東端	振幅 (cm)	11.04	5.03	1.87	1.28	3.42	3.62	0.99
	遅角 (度)	296.30	321.10	296.50	317.10	61.80	34.98	66.25

(6) 気象条件

気圧、気温、相対湿度、風については、気象庁の GPV (MSM) データを用いた。GPV (MSM) データの格子間隔は緯度 0.05 度、経度 0.0625 度で、初期時刻は 0 時から 3 時間間隔、予報値は 1 時間間隔である。本検討では、初期値と予報値を用いて 1 時間間隔のデータを作成した。マウンド礁近傍の東経 128 度 48 分、北緯 32 度 52 分における気圧、気温、相対湿度、風データを図 VI-4.3.2～図 VI-4.3.3 に示す。

全天日射量と雲量については、長崎海洋気象台のデータを用いた (図 VI-4.3.4 参照)。

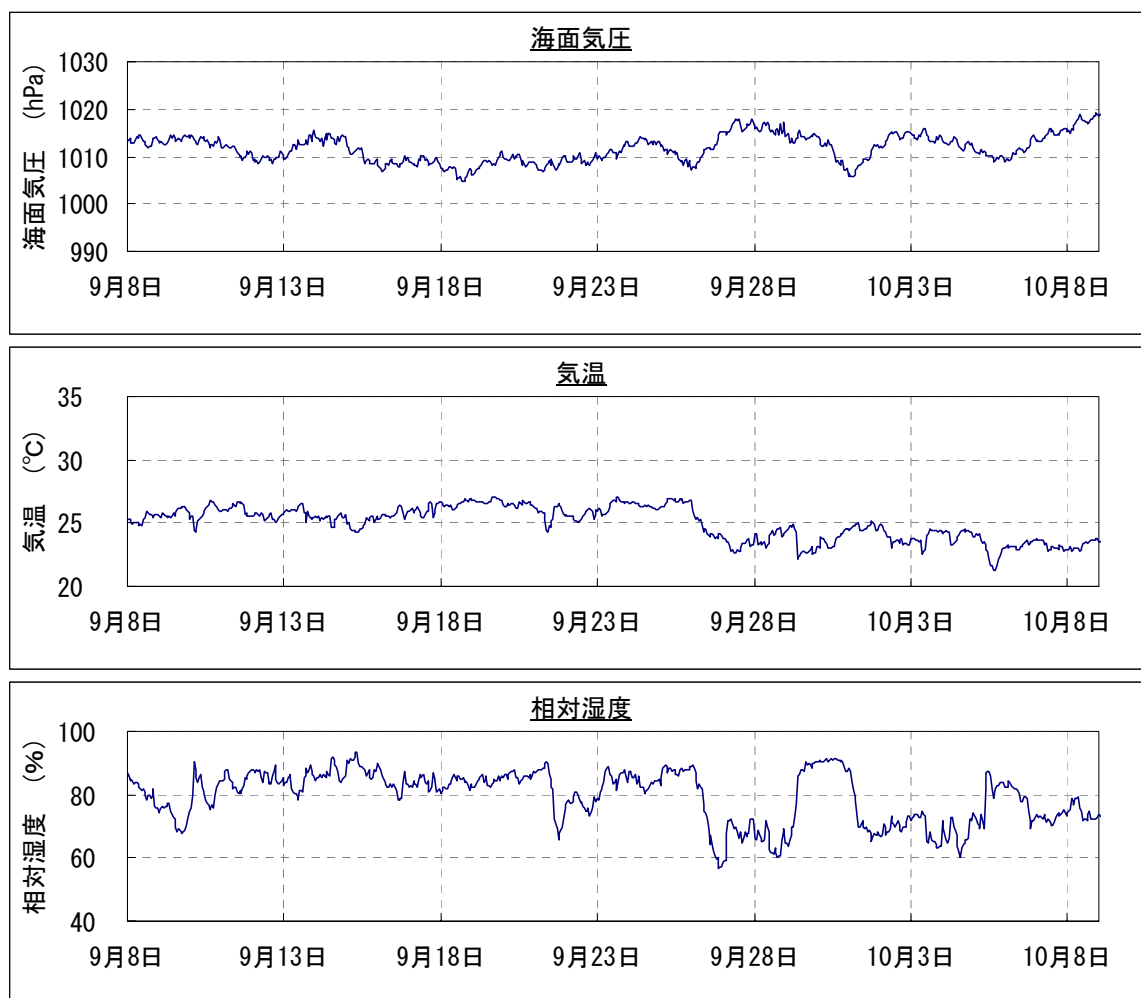
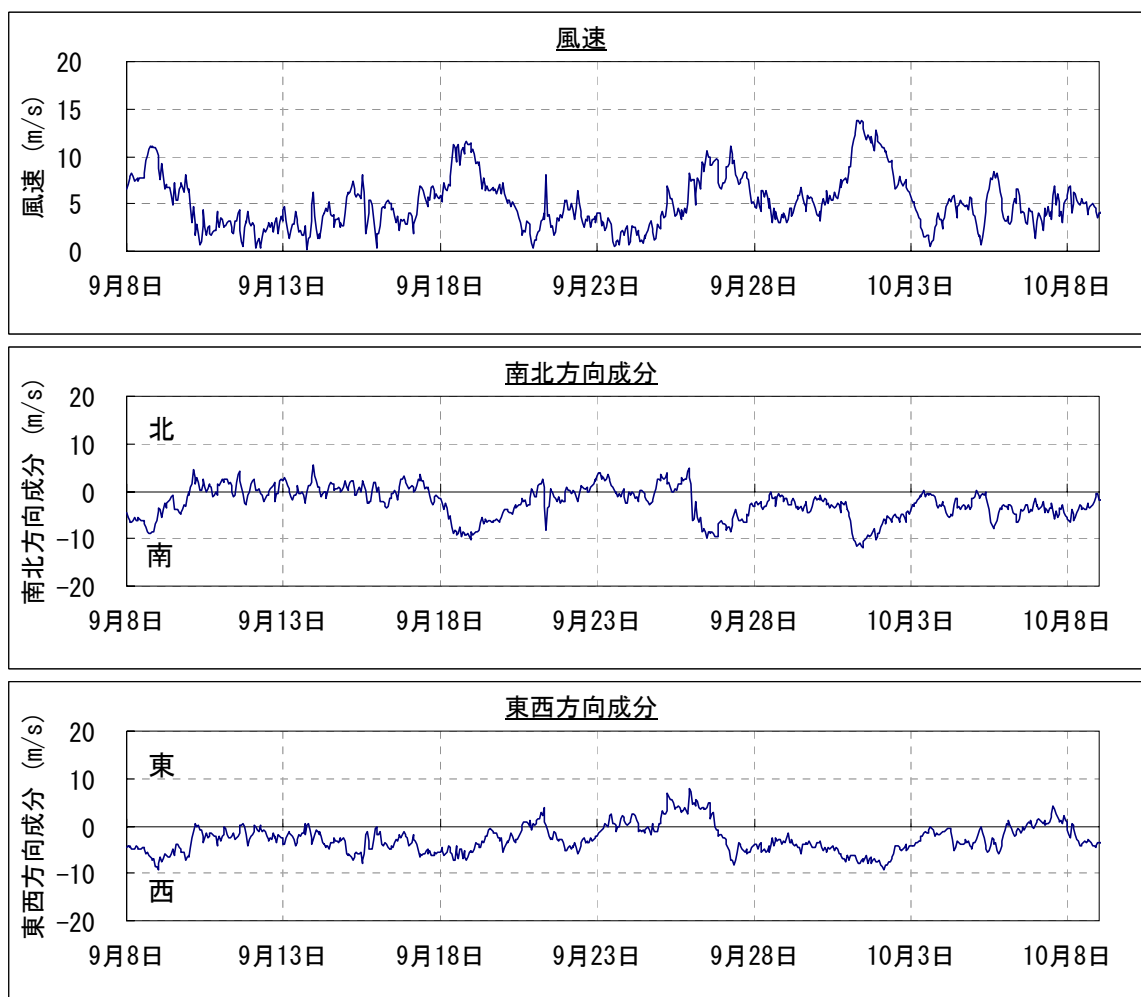
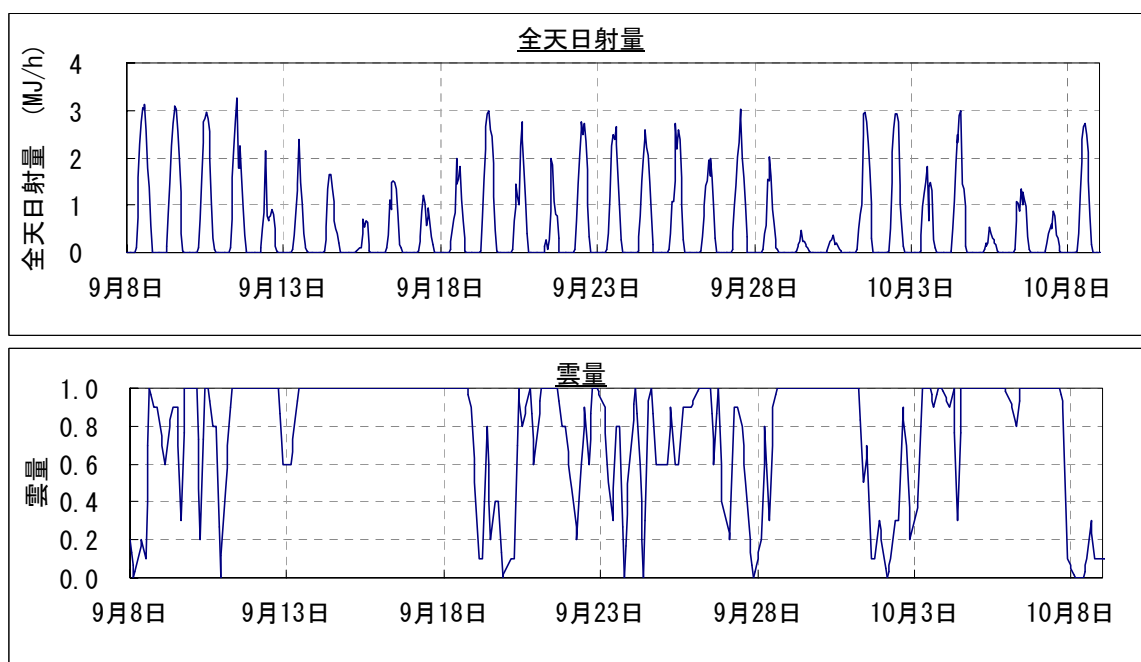


図 VI-4.3.2 マウンド礁近傍の海面気圧、気温、相対湿度



図VI-4.3.3 マウンド礁近傍の風速および風速の南北・東西方向成分



図VI-4.3.4 全天日日射量および雲量(長崎海洋気象台)

(7) 物質濃度

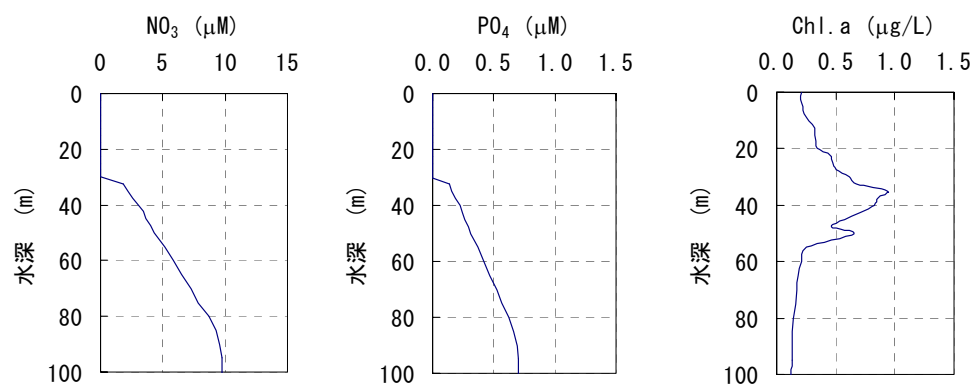
平成 20 年度調査結果(以下、H20 調査)および日本海洋データセンター(JODC)のデータを元に、物質濃度の初期値及び境界値を設定した。

a) 初期値

物質濃度の初期値は、H20 調査(2008/9/10, 9/12, 10/4, 10/6 の計 4 日)を参考に設定した(表VI-4.3.4、図VI-4.3.5 参照)。

表VI-4.3.4 一次生産モデル関連物質量の境界値および初期値

水深 m	NO ₃ μM	PO ₄ μM	NH ₄ μM	Chl.a μg/L	ZOO μM-N	PON μM	DON μM
0.0	0.00	0.00	0.00	0.21	0.013	0.00	0.00
5.0	0.00	0.00	0.00	0.23	0.014	0.00	0.00
10.0	0.00	0.00	0.00	0.27	0.017	0.00	0.00
15.0	0.00	0.00	0.00	0.32	0.020	0.00	0.00
20.0	0.00	0.00	0.00	0.34	0.022	0.00	0.00
25.0	0.00	0.00	0.00	0.47	0.030	0.00	0.00
30.0	0.00	0.00	0.00	0.62	0.039	0.00	0.00
35.0	2.18	0.16	0.00	0.93	0.059	0.00	0.00
40.0	3.05	0.22	0.00	0.83	0.052	0.00	0.00
45.0	3.68	0.26	0.00	0.58	0.036	0.00	0.00
50.0	4.34	0.31	0.00	0.66	0.041	0.00	0.00
55.0	5.19	0.37	0.00	0.25	0.016	0.00	0.00
60.0	5.85	0.42	0.00	0.21	0.013	0.00	0.00
65.0	6.47	0.47	0.00	0.18	0.012	0.00	0.00
70.0	7.30	0.53	0.00	0.17	0.011	0.00	0.00
75.0	7.85	0.56	0.00	0.16	0.010	0.00	0.00
80.0	8.72	0.63	0.00	0.14	0.009	0.00	0.00
85.0	9.23	0.66	0.00	0.13	0.008	0.00	0.00
90.0	9.58	0.69	0.00	0.14	0.009	0.00	0.00
95.0	9.75	0.70	0.00	0.13	0.008	0.00	0.00
100.0	9.75	0.70	0.00	0.12	0.007	0.00	0.00
110.0	9.75	0.70	0.00	0.09	0.006	0.00	0.00
120.0	10.13	0.73	0.00	0.07	0.005	0.00	0.00
130.0	11.32	0.81	0.00	0.05	0.003	0.00	0.00
140.0	12.21	0.88	0.00	0.02	0.002	0.00	0.00
150.0	13.02	0.94	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
200.0	18.67	1.34	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
300.0	25.88	1.86	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
400.0	29.46	2.12	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00



図VI-4.3.5 NO₃, PO₄, Chl. a の初期濃度分布

b) 境界値

【 硝酸態窒素 NO_3 及びリン酸態リン PO_4 】

NO_3 は水温との相関性の高いことが知られている。そこで、H20 調査および JODC データを用いて回帰式を導き、水温から NO_3 を算出することとした(式VI-4.3.1 および図VI-4.3.6 左図)。これにより、計算領域の境界水温変動に伴う NO_3 の時空間変化を表すことができる。ここで、JODC データについては夏季(8月~10月)のデータを用いることとし、河川の影響が比較的強いデータ(季節的な塩分の鉛直分布から 34.2PSU と推定)を除いたデータを用いた。また、表層 30m では NO_3 は枯渇している場合が多いため $0 \cdot \text{M}$ とし、最大の濃度は $45 \cdot \text{M}$ とした。

PO_4 の境界値は、前述の方法で算出した NO_3 と、H20 調査および JODC データから得られた NO_3 と PO_4 の比(13.89:1)から算出することとして、 PO_4 の時空間変化も考慮した(式VI-4.3.2 および図VI-4.3.6 右図)。

式VI-4.3.1 および式VI-4.3.2 による算出結果の妥当性を検証するために、H20 調査による NO_3 と PO_4 の結果と、水温の調査結果から両式により算出した値との比較を行った(図VI-4.3.7)。それにより、算出結果は NO_3 と PO_4 の調査結果の分布を良く再現できることが示された。

【 植物プランクトン及び動物プランクトン 】

植物プランクトン (PHY) は Chl. a で示し、Chl. a の境界条件は、H20 調査の 9/10 および 9/12 の平均値を初期値、10/4 および 10/6 の平均値を計算終了日の濃度として、間の期間は線形的に変化することとした(図VI-4.3.8 左図)。

動物プランクトン(ZOO)濃度は、植物プランクトンの 1/10 とした(図VI-4.3.8 右図)。

【その他】

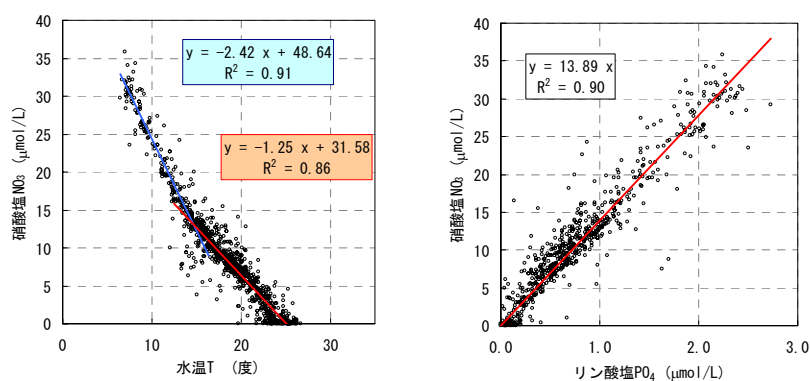
その他の項目は、平成 20 年度の検討と同様に境界では 0 とした。

【 NO_3 の算出式 】

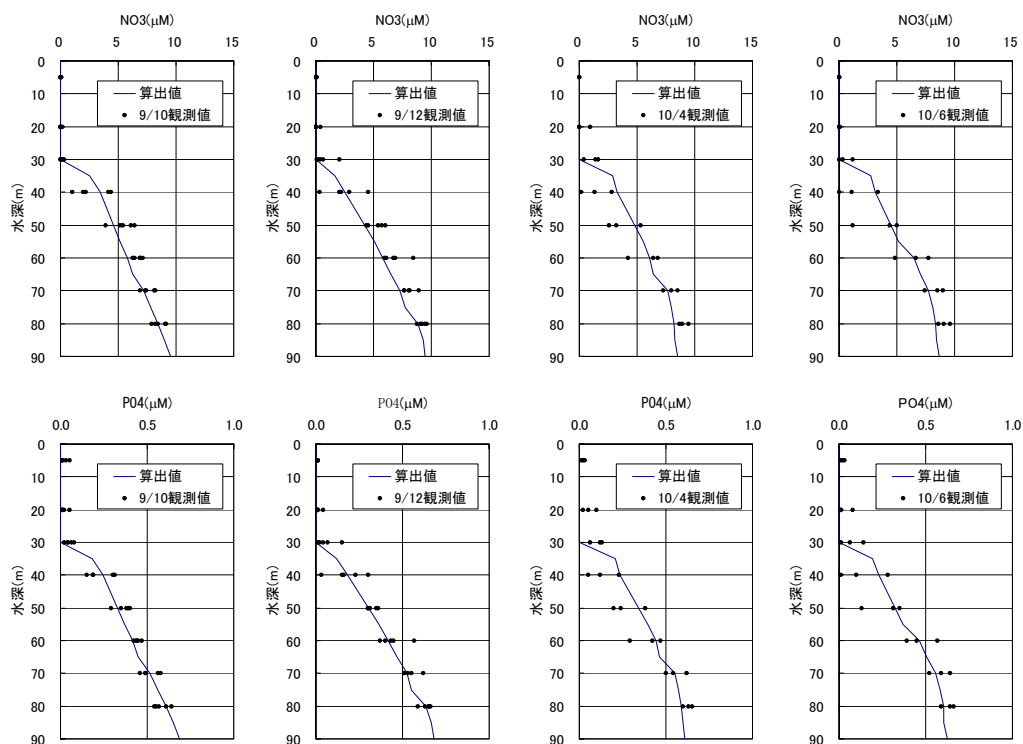
$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{NO}_3 = 0.0 & : \text{DEPTH} < 30.0 \text{ or } \text{TEMP} \geq 25.2 \\ \text{NO}_3 = -1.254 \times \text{TEMP} + 31.58 & : 14.6 \leq \text{TEMP} < 25.2 \\ \text{NO}_3 = -2.420 \times \text{TEMP} + 48.64 & : 1.5 \leq \text{TEMP} < 14.6 \\ \text{NO}_3 = 45.0 & : \text{TEMP} < 1.5 \end{array} \right. \quad (\text{式VI-4.3.1})$$

【 NO_3 と PO_4 の比 】

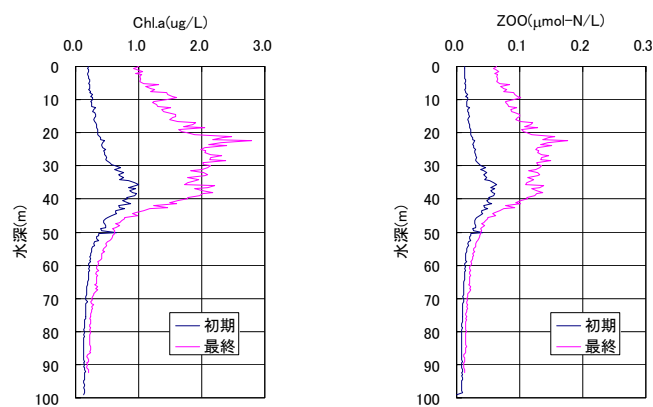
$$\text{NO}_3 : \text{PO}_4 = 13.89 : 1 \quad (\text{式VI-4.3.2})$$



図VI-4.3.6 水温- NO_3 相関図(左図)および NO_3 - PO_4 相関図(右図)



図VI-4.3.7 調査結果と水温からの栄養塩(NO_3 , PO_4)算出結果の比較図



図VI-4.3.8 境界濃度(左から、Chl. a, ZOO)

(8)生態系モデルのパラメータについて

H2O 調査から、懸濁態有機物 POM の沈降速度および光の消散係数を設定した。その他のパラメータについては、Kawamiya ら(1995)、松梨(1993)等の文献を参考にした(表 VI-4.3.5)。

【 沈降速度 】

POM の沈降速度は、H2O 調査から算出された 15.6m/s とした。植物プランクトンの沈降速度は 0.9m/s とした。

【 消散係数 】

消散係数は、次式で与える(Kawamiya ら, 1995)。

$$I = I_0 \exp(-k|DEPTH|) \quad (\text{式VI-4.3.3})$$

$$k = \alpha_1 + \alpha_2[Chl.a] \quad (\text{式VI-4.3.4})$$

I : 水深 DEPTH における光量

I_0 : 水面における光量

k : 消散係数

α_1, α_2 : 係数

光量子量の観測結果により k の値が得られ、Chl. a 濃度の観測結果から水柱の Chl. a 濃度が得られる。それらより、最小 2 乗法で α_1 と α_2 の値を下の通り求めた。

$$\alpha_1 = 0.077, \alpha_2 = 0.043 \quad (\text{式VI-4.3.5})$$

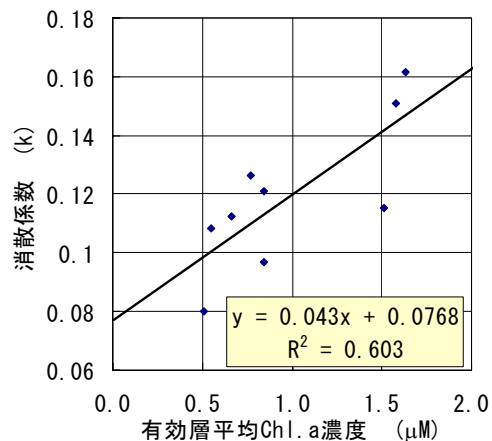


図 VI-4.3.9 消散係数と Chl. a 濃度の相関図

【 懸濁態有機物の分解速度 】

本年度に実施された易分解懸濁態有機窒素の分解速度は 0.03/day である。また、Matsunaga(1981)⁹⁾によると 0.005~0.074/day 程度である。本検討では、これらの値を参考に、現地の懸濁態有機物には易分解に加えて難分解生有機物も含まれていることを考慮して、試行計算により 0.01/day とした。

表VI-4.3.5 一次生産モデルのパラメーター一覧

分類	項目	値
植物プランクトン	最大光合成速度	1.0 / day
	光合成の温度係数	0.063 / °C
	半飽和定数(NO ₃ 、NH ₄)	1.0 μmol / L
	NH ₄ 選択係数	1.5 L / μmol
	半飽和定数(PO ₄)	0.1 μmol / L
	最適光強度	0.142 cal / cm ² / min
	呼吸速度	0.03 / day
	呼吸の温度依存係数	0.0519 / °C
	細胞外分泌速度	0.135
	植物プランクトン枯死速度	0.0281 L / μmol-N / day
	植物プランクトン枯死の温度係数	0.069 / °C
動物プランクトン	最大捕食速度	0.18 / day
	捕食の温度係数	0.0693 / °C
	捕食の閾値	0.043 μmol-N / L
	イヴレフ定数	1.4 L / μmol-N
	動物プランクトン同化効率	0.7
	動物プランクトン成長効率	0.3
	動物プランクトン死亡速度	0.0585 L / μmol-N / day
	動物プランクトン死亡の温度係数	0.0693 / °C
分解過程	PONからNH ₄ への分解速度	0.010 / day
	PONからNH ₄ への分解速度の温度係数	0.0693 / °C
	PONからDONへの分解速度	0.010 / day
	PONからDONへの分解速度の温度係数	0.0693 / °C
	DONからNH ₄ への分解速度	0.010 / day
	DONからNH ₄ への分解速度の温度係数	0.0693 / °C
	硝化速度	0.010 / day
	硝化速度の温度係数	0.0693 / °C
光の減衰過程	光の消散係数	0.077 / m
	植物プランクトンによる消散係数	0.043 / μmol-N / m
沈降過程	植物プランクトンの沈降速度	0.9 m / day
	懸濁態粒子の沈降速度	15.6 m / day

4.3.2 計算結果

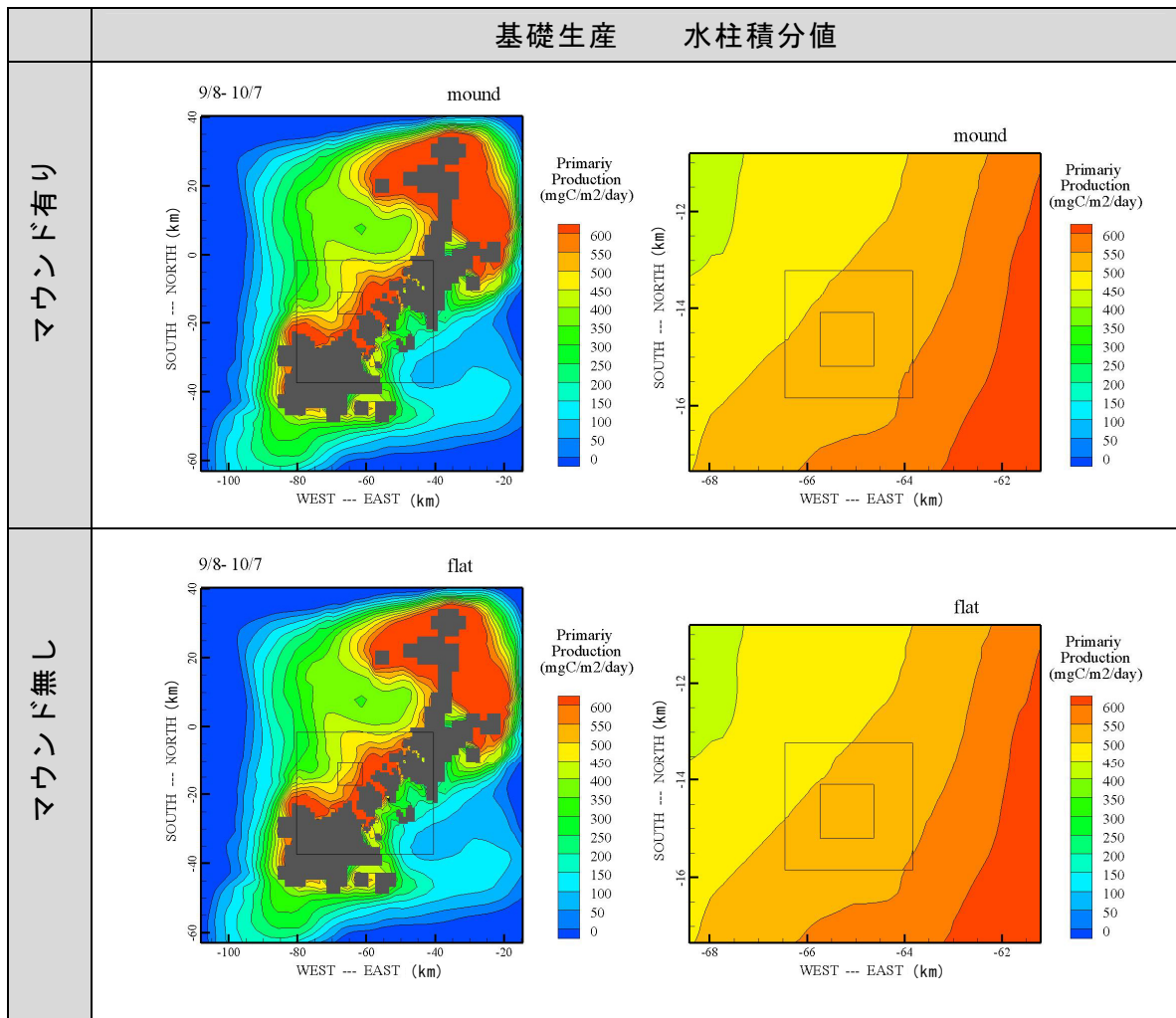
(1) 基礎生産量

計算期間平均の基礎生産量を図VI-4.3.10に示し、マウンド礁有りの値から無しの値を差し引いた差分値を図VI-4.3.11に示す。図では、左側に第1領域から第3領域までの結果を、右側には第3領域から第5領域の結果を示している(以降の海底へのPOC沈降量も同じ)。差分値の図VI-4.3.11では、正の値(赤色系)がマウンド有りの場合の方が多く、負の値(青色系)がマウンド有りの場合の方が少ないことを意味する。

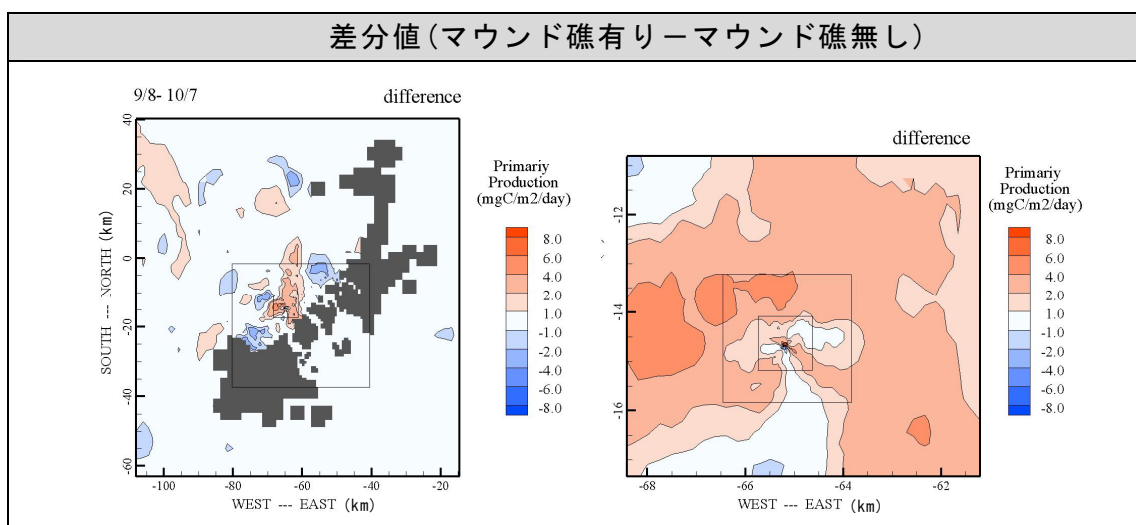
なお、基礎生産とは、植物プランクトンによる光合成量から呼吸量を差し引いた純基礎生産量であり、水柱全体の積分値である。

結果の要点を以下に整理する。

- 基礎生産量は、五島の北側で多い傾向がある。
- マウンド礁の周辺では、北西方向に基礎生産量が $500\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度である。この値は、長崎県生月島北部での $362\sim 440\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}^{10)}$ 、津田ら¹¹⁾による東シナ海の年間の基礎生産量 $339\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ (夏季8月の最大値は $1,500\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ を越える)と同程度である。
- マウンド礁が有る場合の基礎生産量から無い場合の値を差し引いた差分値をみると、マウンド周辺から北側にかけて正(マウンド有りの場合の方が多い)の領域が広がっている。一方、マウンド礁の南西部や北東部では負(マウンド礁有りの場合の方が少ない)の領域が見られる。
- ただし、差分値は、マウンド周辺の差が比較的大きいところでも $5\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度であり、絶対量($>500\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$)に対して0.1%程度の値である。
- 北西の境界付近で正の領域が広く分布している。これについては、後述の通り、マウンド礁の効果を含む可能性は考えられるが、数値計算上の影響も含まれると考えられる。



図VI-4.3.10 基礎生産量分布図(計算期間平均)



図VI-4.3.11 基礎生産量差分値(マウンド礁有リーマウンド礁無し)

基礎生産量に関してマウンド礁有無による増加効果を検討するために、領域別に基礎生産量の平均値を算定した結果を下表に示す。

以下に、結果の要点を整理する。

- ・ 第3領域～第5領域では、基礎生産の増加効果がみられる。増加率(マウンド礁有り/マウンド礁無し)は+0.29%～+0.47%であり、マウンド礁が位置する第5領域よりも第3領域、第4領域の方が高い。
- ・ 第1領域では僅かに減少、第2領域では僅かに増加傾向であるが、増加率は-0.01%～+0.02%程度であり、局所的な分布に影響はあるものの、領域全体での収支としてはマウンド礁有無による影響は僅かであると考ええる。

以上より、マウンド礁の有無による基礎生産の増加効果は、マウンド周辺(マウンドから3km程度)では最大で+0.5%程度期待できると算定された。一方で、広域的な収支としては、影響は僅かであると推察された。

表 VI-4.3.6(1) 基礎生産量(計算期間平均値)

	第1領域の平均 POC(PON) mgC/m ² /day	第2領域の平均 全POC mgC/m ² /day	第3領域の平均 全POC mgC/m ² /day	第4領域の平均 POC(PON) mgC/m ² /day	第5領域の平均 全POC mgC/m ² /day
マウンド礁有り	245.1954	452.1796	541.0722	538.8072	540.5274
マウンド礁無し	245.2116	452.0832	538.5221	536.5139	538.9418
差分	-0.0162	0.0965	2.5501	2.2933	1.5856
比率	0.9999	1.0002	1.0047	1.0043	1.0029

表 VI-4.3.6(2) 基礎生産量(計算期間総量)

	第1領域の総量 POC(PON) tC/30day	第2領域の総量 全POC tC/30day	第3領域の総量 全POC tC/30day	第4領域の総量 POC(PON) tC/30day	第5領域の総量 全POC tC/30day
領域面積 (m ²)	9,150,316,875	842,450,625	32,805,000	5,062,500	950,625
マウンド礁有り	67,308.4686	11,428.1708	532.4962	81.8313	15.4152
マウンド礁無し	67,312.9220	11,425.7322	529.9866	81.4830	15.3699
差分	-4.4534	2.4387	2.5096	0.3483	0.0452
比率	0.9999	1.0002	1.0047	1.0043	1.0029

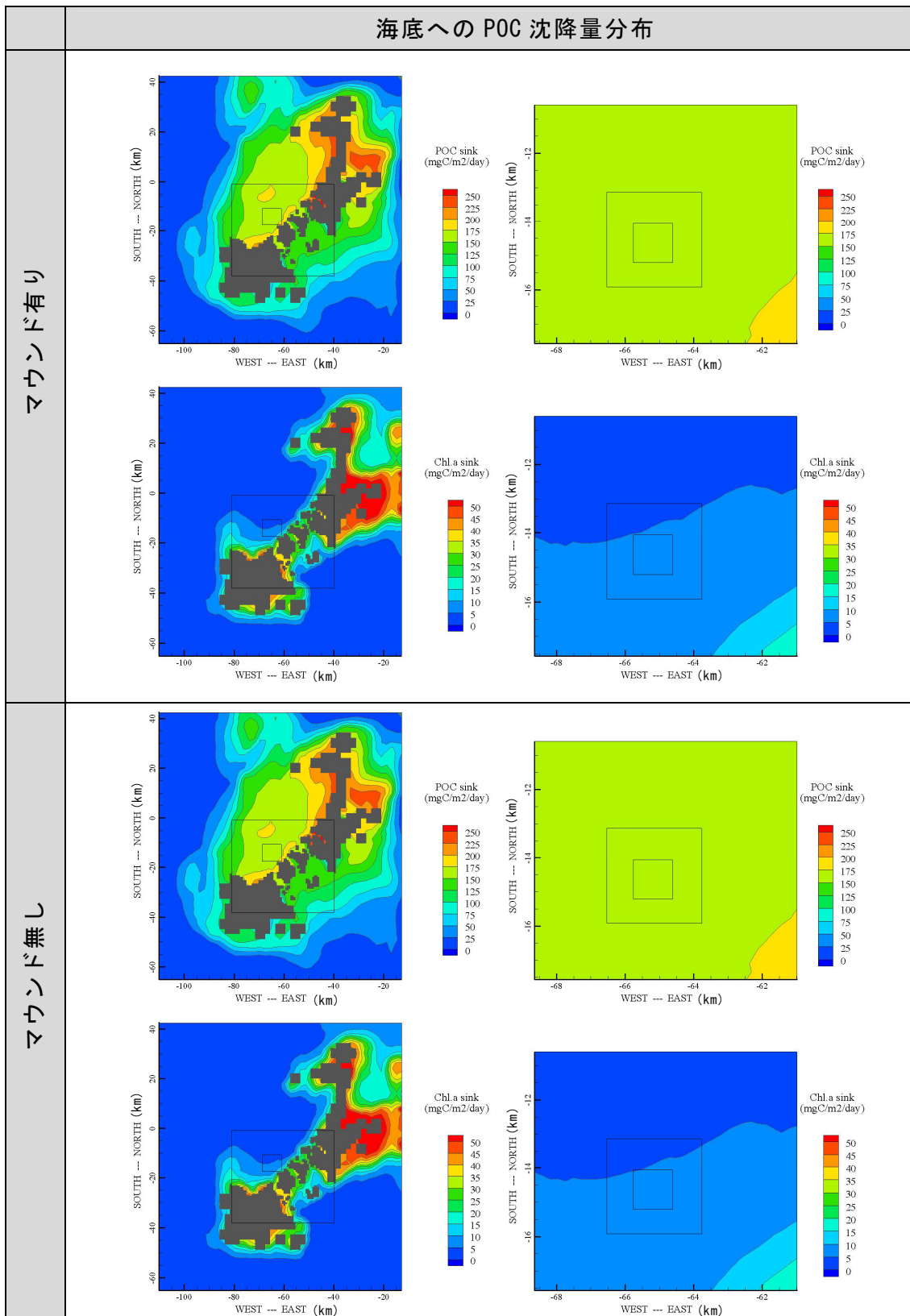
(2) POC 沈降量

計算期間平均の海底への POC 沈降量を図 VI-4.3.12～図 VI-4.3.13 に示す。図 VI-4.3.12 では、マウンド礁有りと無しのそれぞれに関して、上側に懸濁態粒子由来の POC 沈降量(以下、POC[PON])、下側に Ch1. a 由来の POC 沈降量(POC[Ch1. a])を示している。図 VI-4.3.13 では、懸濁態粒子由来及び Ch1. a 由来の POC 沈降量の合計値(以下、全 POC)を示している。更に、マウンド礁有りの場合の POC 沈降量から無しの場合の値を差し引いた差分値を図 VI-4.3.14(懸濁態粒子由来及び Ch1. a 由来)及び図 VI-4.3.15(全 POC)に示す。

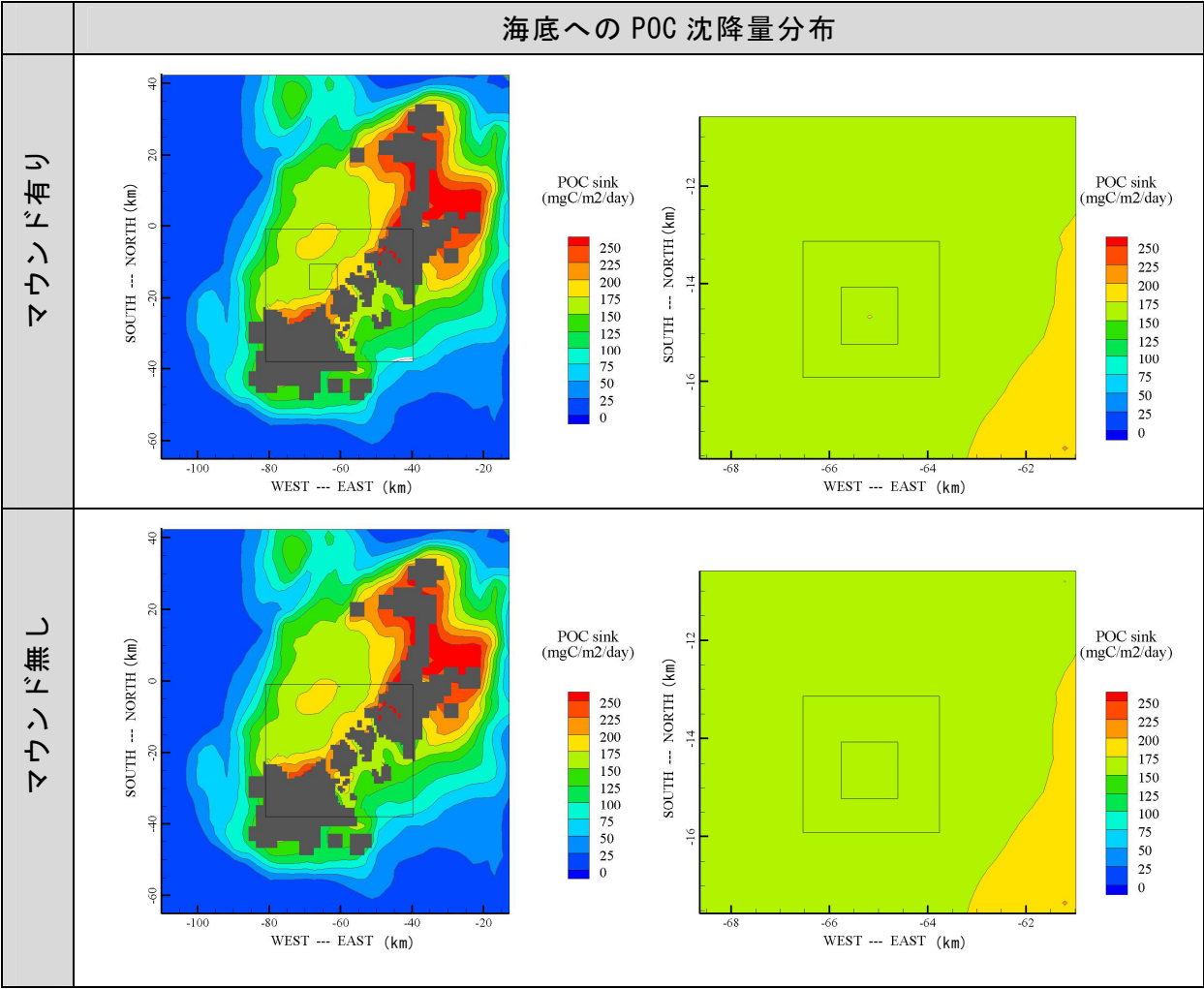
なお、低次生産モデルでは窒素循環を基本とするため、懸濁態有機物は懸濁態有機窒素(PON)として計算している。それゆえ、懸濁態有機炭素(POC)濃度への変換には、H20 年調査結果より算定された POC/PON 比=7.21 を用いた。

結果の要点を以下に整理する。文中で単に POC 沈降量と表記する場合は、POC[PON] 及び POC[Ch1. a]の両者を意味する。

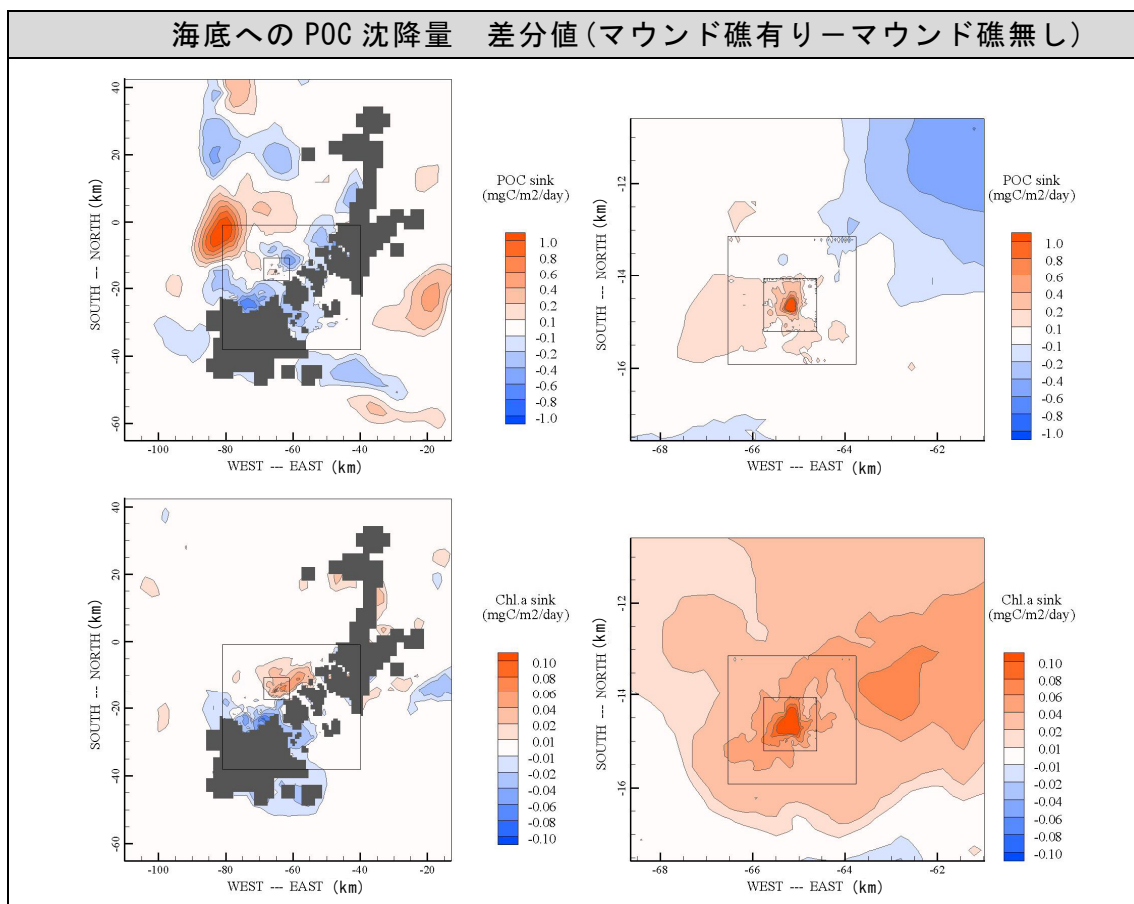
- マウンド礁近傍の全 POC 沈降量は約 $160\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ で、H20 調査による POC 沈降フラックス $178.9\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ (沈降系)と同程度である。
- 海底への POC 沈降量は、五島の北側で多い傾向がある。
- 五島の北東部周辺では、基礎生産が高いことに加え、水深が比較的浅いために POC 沈降量が多い結果となっている(水深は、図 VI-4.3.1 参照)。
- マウンド礁が有る場合の POC 沈降量から無い場合の結果を差し引いた差分値をみると、POC 沈降量はマウンド礁周辺で多くなっている。このマウンド礁近傍における正の領域の範囲は、POC[Ch1. a]の方が POC[PON]より広い傾向がみられる。
- ただし、差分値は、マウンド周辺の比較的差が大きいところでも $1\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度であり、絶対量(約 $160\sim 170\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$)と比較すると 0.1%程度の値である。
- 差分値から、湧昇マウンドが位置する側と反対の五島南側でも正・負の領域が拮抗していることが分かる。これについては、後述の通り、マウンド礁の効果も含む可能性は考えられるが、計算上の誤差の影響を受けていると考えられる。



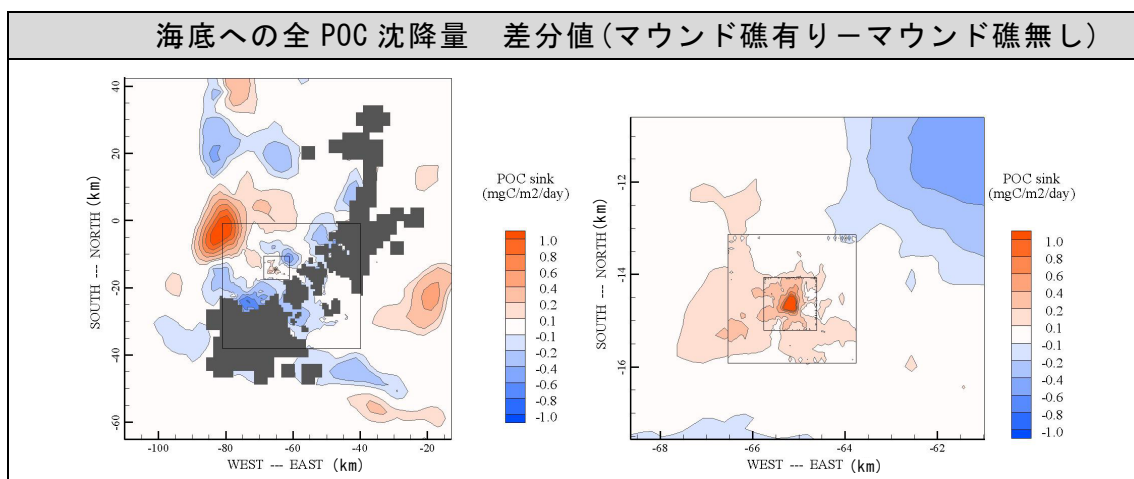
図VI-4.3.12 海底への POC 沈降量分布図 (計算期間平均)



図VI-4.3.13 海底への全 POC 沈降量分布図(計算期間平均)



図VI-4. 3. 14 海底への POC 沈降量差分値 (マウンド礁有リーマウンド礁無し)



図VI-4. 3. 15 海底への全 POC 沈降量差分値 (マウンド礁有リーマウンド礁無し)

海底への POC 沈降量からマウンド礁の有無による CO₂ 固定効果を検討するために、領域別に POC 沈降量の平均値を算定した(表VI-4. 3. 7)。

以下に、結果の要点を整理する。

- 植物プランクトン由来の POC 沈降量は、第 3 領域～第 5 領域で増加している。増加率(マウンド礁有り/マウンド礁無し)は+0.6%～+2.32%で、マウンド礁に近いほど効果が高い。マウンド礁近傍で沈降量が最も高くなっているのは、物理的な影響(マウンド直上の下降流)が強いと考えられる。マウンド礁から離れた範囲における沈降量の増加は、物理的な影響と植物プランクトンの増加効果(前述の基礎生産量の増加)の影響が混在していると考えられる(現状では両者の影響を分離して評価することは難しい)。
- 懸濁態有機物由来の POC 沈降量は、第 4 領域～第 5 領域では増加傾向、第 2 領域～第 3 領域では減少傾向、第 1 領域(計算領域全体)では僅かに増加傾向である。平面分布(図VI-4. 3. 15)から、第 3 領域の一部まではマウンド礁の影響と考えられる増加傾向の領域がみられるが、それより広域になると、増加と減少の両領域が混在分布している。全域的には僅かな差しか生じていないことを考慮すると、海水中 POC の全体量には大きな差は生じていないが、分布に違いが生じたものと考えられる。
- 全 POC 沈降量については、9 割程度が懸濁態有機物由来の POC であるため、懸濁態有機物由来の POC 沈降量と同様の傾向である。

以上より、マウンド礁の有無による CO₂ 固定効果はマウンド礁周辺の 2km 程度の範囲では+0.1%～+0.3 程度の増加が期待できると算定された。一方で、広域にはその効果は僅かであり、前述した計算の誤差を考慮すると、影響はほぼ見られないと判断すべきと考える。

表VI-4. 3. 7(1) POC 沈降量 (計算期間平均値)

	第1領域内の平均			第2領域内の平均			第3領域内の平均		
	POC (PON) mgC/m ² /day	POC (CHL. a) mgC/m ² /day	全POC mgC/m ² /day	POC (PON) mgC/m ² /day	POC (CHL. a) mgC/m ² /day	全POC mgC/m ² /day	POC (PON) mgC/m ² /day	POC (CHL. a) mgC/m ² /day	全POC mgC/m ² /day
マウンド礁有り	81.6441	9.1337	90.7778	154.7614	14.2630	169.0244	163.0268	5.5322	168.5590
マウンド礁無し	81.6412	9.1336	90.7748	154.8549	14.2643	169.1192	163.0296	5.4990	168.5285
差分	0.0029	0.0001	0.0030	-0.0935	-0.0012	-0.0947	-0.0027	0.0333	0.0305
比率	1.0000	1.0000	1.0000	0.9994	0.9999	0.9994	1.0000	1.0060	1.0002

	第4領域内の平均			第5領域内の平均		
	POC (PON) mgC/m ² /day	POC (CHL. a) mgC/m ² /day	全POC mgC/m ² /day	POC (PON) mgC/m ² /day	POC (CHL. a) mgC/m ² /day	全POC mgC/m ² /day
マウンド礁有り	160.8672	5.4524	166.3196	160.6861	5.5097	166.1958
マウンド礁無し	160.7549	5.3976	166.1526	160.3529	5.3846	165.7375
差分	0.1122	0.0548	0.1670	0.3332	0.1251	0.4584
比率	1.0007	1.0102	1.0010	1.0021	1.0232	1.0028

表VI-4.3.7(2) POC 沈降量 (計算期間総量)

	第1領域内の総量			第2領域内の総量			第3領域内の総量		
	POC (PON) tC/30day	POC (CHl. a) tC/30day	全POC tC/30day	POC (PON) tC/30day	POC (CHl. a) tC/30day	全POC tC/30day	POC (PON) tC/30day	POC (CHl. a) tC/30day	全POC tC/30day
領域面積 (m ²)	9,150,316,875			842,450,625			32,805,000		
マウンド礁有り	22,412.07	2,507.29	24,919.36	3,911.37	360.48	4,271.84	160.44	5.44	165.89
マウンド礁無し	22,411.28	2,507.26	24,918.54	3,913.73	360.51	4,274.24	160.45	5.41	165.86
差分	0.79	0.03	0.82	-2.36	-0.03	-2.39	0.00	0.03	0.03
比率	1.0000	1.0000	1.0000	0.9994	0.9999	0.9994	1.0000	1.0060	1.0002

	第4領域内の総量			第5領域内の総量		
	POC (PON) tC/30day	POC (CHl. a) tC/30day	全POC tC/30day	POC (PON) tC/30day	POC (CHl. a) tC/30day	全POC tC/30day
領域面積 (m ²)	5,062,500.00			950,625.00		
マウンド礁有り	24.43	0.83	25.26	4.58	0.16	4.74
マウンド礁無し	24.41	0.82	25.23	4.57	0.15	4.73
差分	0.02	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01
比率	1.0007	1.0102	1.0010	1.0021	1.0232	1.0028

表VI-4.3.7(2)の第1領域内の総量をもとに、年間のPOC沈降量を算定した。効果発現期間を密度分布の経時変化を参考に、混合期を除く5月から11月の7ヶ月間とし、また、成層期の計算結果がその他の期間にも同様に適用できると仮定した場合、POC沈降量は5.74t-C/年(21t-CO₂/年)となった。

ここで算定されたPOC沈降量の値は、既往知見¹²⁾(長崎県生月島沖合に設置されたマウンドを対象にしたCO₂固定量の試算結果:1000~5000t-CO₂/年)と比較し、2オーダー小さい結果となった。

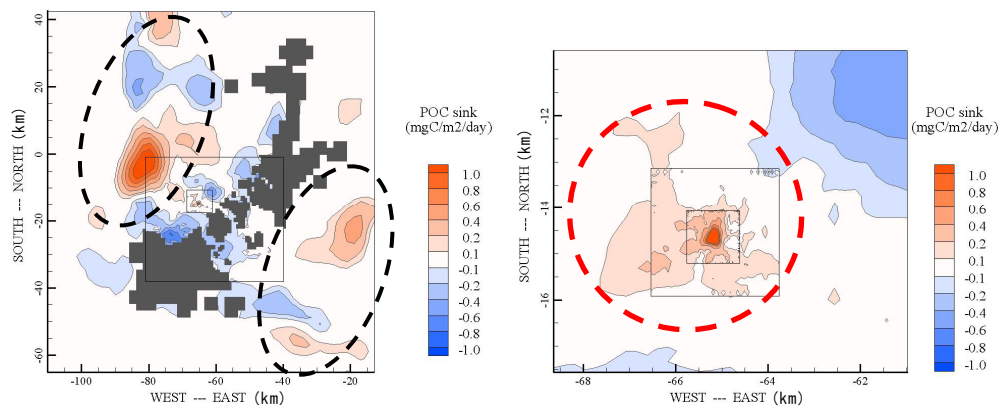
その理由としては、年間を通じた計算を行っていないこと、数値計算上の問題(流動場を静水圧近似モデルで計算したことによる鉛直混合の過小評価の可能性、生態系パラメータの妥当性など)、海域の違いによる差などが考えられる。

(3) マウンド礁の効果範囲

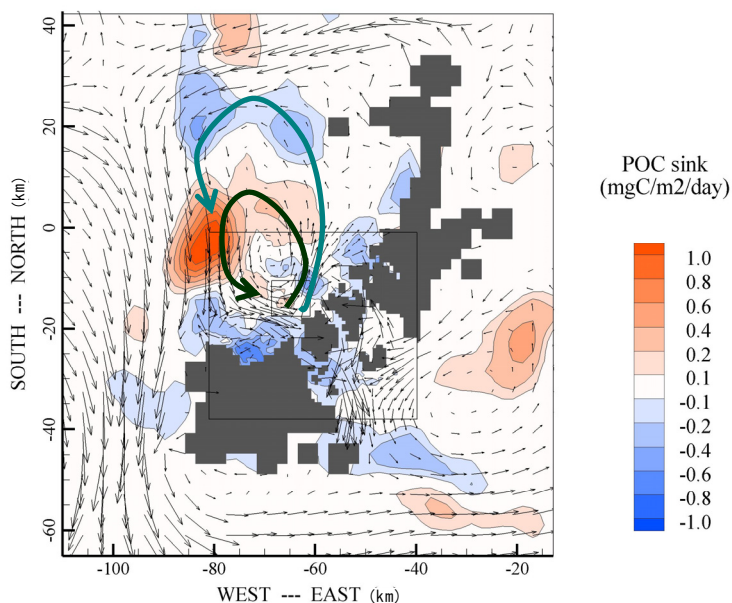
基礎生産、海底への POC 沈降量の差分結果より、本解析結果ではマウンド礁周辺だけではなく、計算領域全体にマウンド礁の影響の及ぶ結果が得られた。更に、マウンド礁周辺よりも影響の大きい範囲が境界付近などでみられた。

これについては、マウンド礁の有無による境界での濃度の違いが一つの要因であると考えられる。数値計算上、計算領域内部の物質濃度の影響が境界濃度に反映する条件となっている。そのため、マウンド礁の有無による濃度差が境界に伝わるとその影響が増幅され、計算上の誤差の生じる可能性がある。一方で、計算期間の平均流から、五島北西側の領域はマウンド礁を通過する循環流の流路と重なる場所に位置するため、マウンド礁による効果も含まれていると推察できる。それゆえ、マウンド礁から離れた領域で差分値が大きくなっている箇所は(図の黒囲いの範囲)、マウンド礁による影響と計算上の誤差の影響が混ざりあっているものと考えられる。

マウンド礁近傍ではマウンド礁の有無による明確な差異がみられ、その領域ではマウンド礁の影響が卓越していると考えられる(図の赤囲いの範囲)。それゆえ現状の結果では、マウンド礁の効果は、第3領域程度(マウンドから3km程度)の範囲にとどめ、広域的な範囲については参考値として取り扱うことが妥当と考える。



図VI-4.3.16 海底への全 POC 沈降量の分布



図VI-4.3.17

平均流速ベクトル
及び海底への POC 沈降量

平均流について

- ・ 計算期間(30日)平均
- ・ POC 濃度が高くなる水深 40m の値を表示

4.4 LCCO₂ を考慮した CO₂ 固定効果の評価

4.2 節、4.3 節で求めた CO₂ 排出量および CO₂ 固定量を踏まえ、①建設発生時の CO₂ 排出量の回収可能年数、②CO₂ 固定効果の便益額の 2 つの視点から評価を行なったが、耐用年数 30 年以内の回収は不可能という結果となった。

建設発生時の CO₂ 排出量の回収可能年数（年）

$$= \text{CO}_2 \text{ 排出量 (t-CO}_2\text{)} \div 1 \text{ 年当たりの CO}_2 \text{ 固定量 (t-CO}_2\text{/年)}$$

CO₂ 固定効果の便益額（円）

$$= (\text{耐用年数} - \text{建設発生時の CO}_2 \text{ 排出量の回収可能年数})$$

$$\times 1 \text{ 年当たりの CO}_2 \text{ 固定量 (t-CO}_2\text{/年)} \times \text{CO}_2 \text{ 単価 (円/t-CO}_2\text{)}$$

VII 考察

本調査では、湧昇マウンド礁による CO₂ 固定効果を定量的に算定する手法を開発した。本手法の活用により、今後湧昇マウンド礁造成事業を計画するにあたり、従来の事業効果である湧昇効果、魚礁効果に加え、CO₂ 固定効果も新たな効果として算定する方法について示唆された。

また、CO₂ 固定効果の算定のため開発された数値モデルは、基礎生産量の分布など漁場形成の条件、湧昇マウンド礁の効果範囲を詳細に解析できるので、水産増殖および漁場造成の計画手法として活用できる。

これらをもとに、下記を踏まえ、より精査されることが期待される。

VIII 摘要

まとめと今後の課題・問題点等を以下に示す。

(1) 効果予測結果の検証用データの取得

本事業で開発した効果予測モデルの構成要素の 1 つである低次生態系モデルの再現性について、特に重要な再現項目となる POC 沈降量の分布は概ね再現され、モデルの妥当性を確認した。ただし、海水中の各物質濃度および基礎生産量等についての検証には課題が残った。計算精度を向上させるためには、これらの時間変化、空間（水平・鉛直）分布の観測を実施し、定性的な検証に加え定量的な再現性の検証を行なうことが重要である。

その具体的な観測項目は、水温、塩分、Chl. a、NO₃-N、POC、PON が最低限必要な項目として挙げられる。さらに、基礎生産量、沈降粒子量の観測も併せて実施することが望ましい。また、強風などのイベント時の観測データが取得できれば、モデルの再現性の検証に役立つことから、長期的（春～秋）な連続データの取得が望ましい。

(2) 効果予測に必要な各種パラメータの取得

低次生態系モデルを動かすには多くのパラメータが必要であり、そのパラメータ値の与え方が計算結果に影響する。本調査では、特に重要となる懸濁態有機物の沈降フラックスや沈降速度等は現地調査結果を利用し、その他のパラメータについては、既往文献を参考にした。今後は、対象海域における直接観測や採集試料を使った実験により、できるだけ多くのパラメータを取得することが望ましい。

(3) 海洋中深層への CO₂ 輸送

本調査では効果予測モデルの開発にあたり、再現性の検証の観点より、既存の湧昇マウンド礁を対象に開発を進めた。そのため「湧昇マウンド礁により真光層に供給された栄養塩類を吸収し、一次生産による生物過程（新生産）を経て 200m 以深に沈降する懸濁態有機物(POM)の時間的・空間的增加」と定義した CO₂ 固定効果については、周辺海域に 200m 以深の場所がなかったことから評価できていない。フロンティア漁場整備事業における湧昇流発生構造物は、大水深への造成も検討されており、200m 以深への沈降が期待されることから、200m 以深の中深層への CO₂ 輸送についても今後検討する必要がある。

Ⅸ 引用文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会 コンクリートの環境負荷評価研究小委員会 (2004) : コンクリート技術シリーズ No.62 コンクリートの環境負荷評価 (その2)、社団法人土木学会、pp.39-40.
- 2) 土木学会 (1996) : 土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 検討部会 平成7年度調査報告書、社団法人土木学会、p.14.
- 3) 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.
- 4) M. Kawamiya, M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Suginoara (1995) : An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, Journal of Oceanography, Vol.51, pp.635-664.
- 5) 有田正光 (2007) : 生物圏の環境、東京電気大学出版局、p.41.
- 6) 宝月欣二 (1979) : ホイタッカー生態学概説ー生物群集と生態系ー、培風館、p.205.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Matsunaga, K. (1981) : Studies on the decompositive process of phytoplanktonic organic matter, *Jap. J. Limnol.*, 42, pp.220-229.
- 10) (財)地球環境産業技術研究機構 (2004) : プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発「人工湧昇流海域におけるCO₂吸収量の評価技術の開発」成果報告書.
- 11) 津田敦・横内克己・桑田晃・浅沼市男・足立久美子・市川忠史・廣田裕一・葛西広海・石田洋 (2004) : 衛星データを用いた海洋一次生産見積もりのための日本近海 Sea-Truth データの集積、地球環境、Vol.9、No.2、pp.145-152.
- 12) 間木道政 (2007) : 人工湧昇流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.