

海底鉱物資源開発に関する環境負荷推定手法の研究

山本 譲司*, 中島 康晴*, 正信 聡太郎*, 岡 秀行**
井上 俊司***

A Numerical Model of Environmental Impact for Seafloor Resources Development

by

Joji YAMAMOTO, Yasuharu NAKAJIMA, Sotaro MASANOBU, Hideyuki OKA
and Shunji INOUE

Abstract

The exclusive economic zone (EEZ) of Japan has lots of unconventional mineral resources, e.g., seafloor massive sulfides (SMSs), so that development of technologies for effective exploitation and use of these mineral resources is a key issue for sustainable development in Japanese industry. Prior to the development of marine mineral resources, it is necessary to evaluate an environmental impact on ocean and seafloor. Then, we developed numerical models to analyze the fate of inorganic suspended substance discharged by mining support platforms and seafloor mining tools in ocean space. The fate of suspended substance discharged into waters under some discharging conditions was analyzed by the model, which implied that the discharging condition would affect spatial distribution of sedimentation rate of suspended substance. An ecological model was also developed to estimate an impact of seafloor mining on habitats on seafloor. Using the ecological model, a change in biomass of seafloor habitats caused by excavating of ores and sedimentation of suspended substance was analyzed. Moreover, ore particles dispersed by seafloor mining tools would raise turbidity around the mining tools, which could reduce the sight of monitoring cameras mounted on the mining tools to cause the lowering of efficiency of mining. Then, the trajectory of ore particles dispersed by mining tools in water was analyzed to estimate concentration of particles around the mining tool.

* 海洋開発系, ** 海洋リスク評価系, *** 洋上再生エネルギー開発系

原稿受付 平成27年5月7日

審査日 平成27年7月7日

目 次

1. まえがき	88
2. 排水挙動予測モデルの開発	89
2.1 流動解析と懸濁態粒子の挙動モデル	89
2.2 排水条件の設定と解析範囲	91
2.3 無機懸濁態粒子の挙動解析結果	92
3. 生物影響モデルの開発	93
3.1 生物影響解析モデル	93
3.2 計算結果事例	96
4. 局所領域における粒子挙動解析	97
4.1 解析方法	97
4.2 計算条件と計算結果事例	98
5. まとめ	99
参考文献	100

1. まえがき

我が国は、世界で6番目に広い排他的経済水域 (EEZ) を有しており、海洋基本計画 (平成 25 年 4 月閣議決定) において、EEZ 内の海洋エネルギー・鉱物資源の探査や技術開発を推進する方針が示されている。こうした状況において、海上技術安全研究所 (以下、当所) では、海洋エネルギー・鉱物資源開発のための研究を進めてきた。

海底熱水鉱床をはじめとする海底鉱物資源の多くは、外洋の深海底に存在している。外洋における海底鉱物資源の開発では、洋上から海底に投入された採掘機を用いて鉱石を採取し、その鉱石を海水とともにスラリーとして洋上に浮かぶプラットフォームや採鉱母船などの洋上施設まで揚鉱することが想定されている。洋上施設においてスラリーから鉱石粒子を分離して陸上の選鉱施設へと輸送し、選鉱・精錬により有価金属を得る。一方、鉱石粒子を分離したあとの残水 (廃水) は、海中に圧入して排出することが検討されている。このため、海底鉱物資源開発を推進するためには、海底における採掘や洋上施設からの排水に起因する海洋環境への負荷を推定する手法を開発する必要がある。

本研究では、まず、洋上施設からの廃水に含まれる無機懸濁態粒子 (Inorganic Suspended Substance) に着目し、海中における移流拡散や海底への堆積などの物理的な挙動や、底生生物に及ぼす影響を定量的に推定する数値モデルの開発を実施した。第 2 章及び第 3 章では、数キロメートル程度の長さを有する領域を対象としてこれらの環境負荷の解析を行うため、排水により放出される無機懸濁態粒子の海中における挙動や海底への粒子堆積を予測する挙動予測モデル、並びに海底への粒子堆積や鉱物の採掘に起因する底層域に生息する生物への影響を予測する生物影響解析モデルの開発について報告する。挙動予測モデルの開発では、流れ場解析における計算負荷を緩和する手法を採用した。挙動予測モデルを用いて無機懸濁態粒子の挙動解析を実施し、粒子がもたらす環境負荷の空間的分布の検討を行った。生物影響解析モデルについては、採掘時の直接的な影響と排水における無機懸濁態粒子の堆積による二次的影響を組み込んだモデルを開発し、粒子堆積時における底生生物の生物量の変化を解析した。

また、海底鉱物資源開発における局所的な問題として、海底での採掘によって海中に巻き上げられた掘削粒子によって海水の濁りが生じ、採掘作業監視用カメラの視認性を低下させ、採掘等の作業効率を低下させることが考えられる。第 4 章では、数メートル程度の長さを有する領域を対象として、海底での採掘作業により飛散する粒子挙動の解析について報告する。流れ場中の粒子の挙動計算法として粒子モデル法を用い、粒子の飛散する軌跡と濃度分布を解析した。

2. 排水挙動予測モデルの開発

海底鉱物資源開発では、図2.1に示すように深海底において①採鉱機等を用いて鉱石を破碎し、②海水とともに洋上施設に揚鉱し、③鉱石の分離処理後、無機懸濁態粒子を含む廃水を海中へと排出する方式が検討されている。海中に排出された粒子は、海水の流れ等により移流・拡散し徐々に海底へと堆積する。そこで、廃水に含まれる無機懸濁態粒子の移流・拡散及び海底への堆積分布を解析する数値解析モデルを開発した。

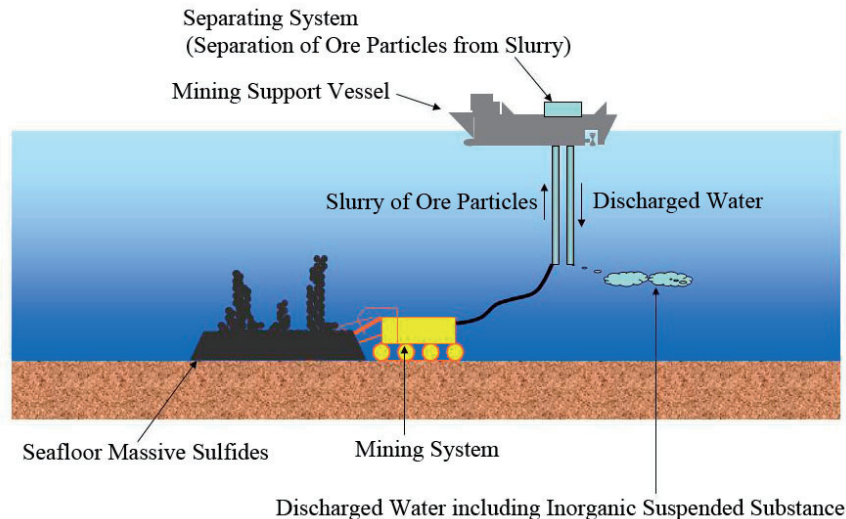


図 2.1 海底資源開発における工程事例

2.1 流動解析と懸濁態粒子の挙動モデル

洋上施設より放出された無機懸濁態粒子の挙動解析を行うにあたり、解析対象となる海域の詳細な流れ場を算定する必要がある。流動解析には、気象・海象データや境界データ等が必要であり、解析には多く時間を要する。また、海底鉱物資源開発が想定される海域は、外洋域であり、観測データも充実していない。そこで、数値海洋モデルを用いず、流れ場データとして（独）海洋研究開発機構が開発した海況予測システムから得られた JCOPE2 再解析データ¹⁾と日本海洋データセンターの海底地形データ（500[m] メッシュデータ²⁾）を使用し簡易的な手法により詳細な流れ場の解析を行った。解析は、JCOPE2 再解析データを参照値として質量保存則を満足させる補間手法である Mass Consistent Flow Model（以下、マスコンモデル^{3,4)}）を採用し、解析格子毎の流れ場を算定した。算定した流れ場をもとに、採掘規模、洋上施設の処理能力等より排水条件（排水深度、排水流量、粒径、排水時間等）を設定し、無機懸濁態粒子の移流・拡散及び堆積量の推算を行った。解析手順を図2.2に示す。

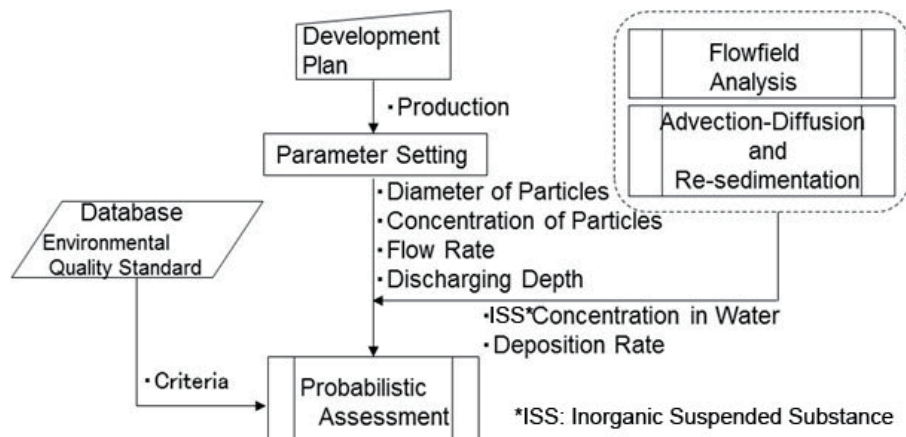


図 2.2 流動解析及び無機懸濁態粒子挙動解析の流れ

一般に数値流体解析では流れ場の支配方程式として連続の式と運動量保存式を連成させ、速度場及び圧力場を求めるが、MASCON モデルでは連続の式、つまり質量保存則のみを満足するように対象とする流れ場の速度を算出する。矩形の計算領域にデカルト座標系 (x, y, z) を導入し、計算格子幅を水平方向 (x 及び y 方向) に約 50m、鉛直方向 (z 方向) に 5m とした。まず 1/12 度 (約 9 km) 間隔で得られている JCOPE2 データを参照値として、より高い解像度の計算格子点上に流速値を内外挿することにより海流場の一次推定値 $\vec{V}_0 = (u_0, v_0, w_0)$ を与える。しかし、このように単純な内外挿で得られた流速値は一般に連続の式を満足しないため、一次推定値が質量保存則を満足するように修正を加え、最終的な解として海水流動場の速度 $\vec{V} = (u, v, w)$ を求める。これには、修正量の総量 H :

$$H(u, v, w) = \iiint \left[\alpha_x^2 (u - u_0)^2 + \alpha_y^2 (v - v_0)^2 + \alpha_z^2 (w - w_0)^2 \right] dx dy dz \quad (2.1)$$

が停留値をとるような (u, v, w) を、連続の式 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ を拘束条件として求めればよい。ここで、 $\alpha_i (i = x, y, z)$ は各速度成分の修正量に対する重みを表している。これは付帯条件付きの変分問題であり、Lagrange の未定乗数を λ として次式で表される F が停留値となる (u, v, w) を求めることと等価である。

$$F(u, v, w, \lambda) = \iiint \left[\alpha_x^2 (u - u_0)^2 + \alpha_y^2 (v - v_0)^2 + \alpha_z^2 (w - w_0)^2 + \lambda \nabla \cdot \vec{V} \right] dx dy dz \quad (2.2)$$

汎関数 F の停留条件、つまり F の変分 δF が 0 となる条件から Euler-Lagrange 方程式、

$$u = u_0 + \frac{1}{2\alpha_x^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial x}, \quad v = v_0 + \frac{1}{2\alpha_y^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial y}, \quad w = w_0 + \frac{1}{2\alpha_z^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial z}. \quad (2.3)$$

と共に、境界条件 $\lambda \delta \vec{V} \cdot \vec{n} = 0$ が導かれる。ここで、 $\vec{n}$ は計算領域の境界面における単位法線ベクトルである。また、式(2.3)と連続の式から λ についての楕円型偏微分方程式、

$$\frac{1}{\alpha_x^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha_y^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{1}{\alpha_z^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2 \nabla \cdot \vec{V}_0 \quad (2.4)$$

が導出される。式(2.4)を解くために必要となる λ についての境界条件は、 $\lambda \delta \vec{V} \cdot \vec{n} = 0$ を満足するように決定する必要がある。本研究では壁面境界に対して $\partial \lambda / \partial \vec{n} = 0$ 、流入出を許す境界面には $\lambda = 0$ を与えた³⁾。最後に、式(2.4)から求めた λ を式(2.3)に代入することによって修正された速度ベクトル $\vec{V}$ が求められる。

通常、海水の運動は鉛直方向に比べて水平方向が卓越しているため、海流速度の各方向成分の修正量に対する重み $\alpha_i (i = x, y, z)$ は、 $\alpha_x = \alpha_y \equiv \alpha_1$ 及び $\alpha_z \equiv \alpha_2$ に分類して取り扱われる。また、本研究では海底面の位置を識別するため、次式に示すように Heaviside 関数を導入した。

$$H(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \vec{x} \in \text{seawater} \\ 0 & \text{if } \vec{x} \in \text{seabed} \\ -1 & \text{if } \vec{x} \in \text{underground} \end{cases} \quad (2.5)$$

ここで $\vec{x}$ は計算領域内の座標位置を表す。そこで、式(2.3)及び式(2.4)をそれぞれ次のように修正したものを用いた。

$$u = H \left[u_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right], \quad v = H \left[v_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right], \quad w = H \left[w_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right) + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(H \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right) = -2\alpha_1^2 \left[\frac{\partial (Hu_0)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv_0)}{\partial y} + \frac{\partial (Hw_0)}{\partial z} \right] \quad (2.7)$$

計算格子にはスタガード格子 (Staggered grid) を採用し、速度の各成分 (u, v, w) を計算セル境界の各面の中心で、 λ を計算セルの中心で定義した。また、式(2.6)及び式(2.7)は共に二次精度中心差分スキームによって離散化し、式(2.6)の数値解を SOR 法によって求めた。

上記の JCOPE データを参照値とした解析領域内の流れ場をもとに、廃水中に含まれる無機懸濁態粒子の海中での移流拡散及び堆積挙動を下式により算定した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w + w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_Z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + q \quad (2.8)$$

ここで、 C は海中における無機懸濁態粒子濃度、 w_s は粒子の沈降速度、 q は検査面からの粒子流入量、 D_H 及び D_Z は水平及び鉛直渦拡散係数である。 D_H は Smagorinsky モデル⁵⁾より決定し、 D_Z は海洋における経験値を設定した⁶⁾。また、粒子の沈降速度は Stokes の法則を仮定し下式により算定した。

$$w_s = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \frac{g D^2}{18\nu} \quad (2.9)$$

ここで、 ρ は粒子密度、 ρ_w は海水密度、 D は粒径、 g は重力加速度、 ν は海水の動粘性係数である。海底への堆積量は海底面直上層における無機懸濁態粒子濃度と粒子の沈降速度により算定した。一方、海底に堆積した無機懸濁態粒子の一部は、流れによって巻き上げられ、再び懸濁する（再懸濁）。海底からの粒子の再懸濁量 ER は下式により算定した⁷⁾。

$$ER = f \left(\frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right)^n \quad (2.10)$$

ここで、 f は粒子の再懸濁速度定数、 τ は流れによる堆積層表面におけるせん断応力、 τ_{ce} は限界掃流力（粒子の巻き上げが生じる下限となる力）、 n は無次元定数である。

2.2 排水条件の設定と解析範囲

無機懸濁態粒子の排出条件は、採鉱機の掘削能力、揚鉱能力と洋上施設の貯蔵容量及び分離処理能力等により決まる。（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（Japan Oil, Gas and Metals National Corporation：JOGMEC）を中心に実施されている将来の商業生産に向けた海底熱水鉱床開発の検討において、商業生産時の採鉱・揚鉱量は 5,000[トン/日]と想定されていたため、この条件を基に条件設定を行った。また、排水時における無機懸濁態粒子の粒径は Derrick 社の分離処理機能力（TBSS-450P）を、排水濃度は Nautilus Minerals 社の検討結果⁸⁾を参考に設定した。表 2.1 に排水条件を示す。

表2.1 排水条件

Terms	Properties
Diameter of Particles	15 [μm]
Density of Particles	6,350 [mg/l]
Flow Rate	0.20 [m^3/s]
Drain Period	20 [day]
Discharging Depth	10(surface),800(middle),1573[m](bottom;25m above seabed)

本稿では、海底熱水鉱床が発見されている沖縄海域伊是名海穴周辺を対象に熱水活動の非活動域を開発すると仮定した。解析対象範囲と水深及び排水地点を図 2.3 に示す。

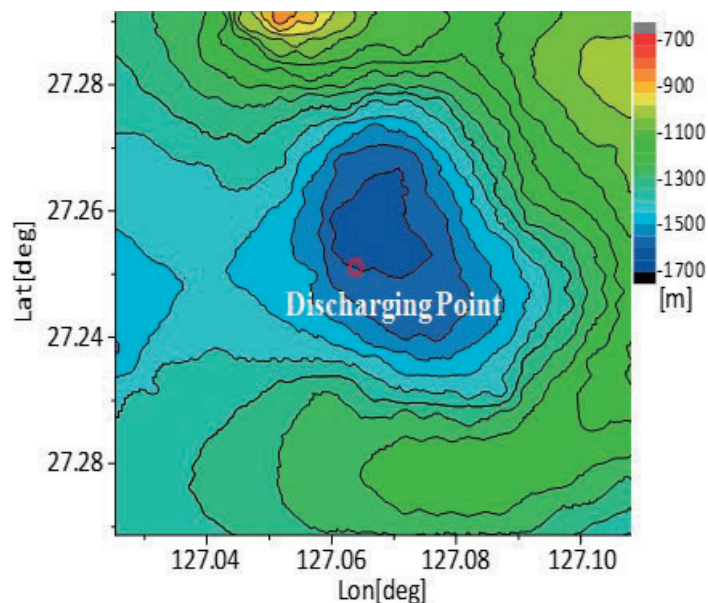


図2.3 解析対象範囲と水深及び排水地点

2.3 無機懸濁態粒子の挙動解析結果

本研究では、廃水に含まれる無機懸濁態粒子の挙動解析を月毎に実施した。海洋の流れ場の変動を考慮し解析結果を統計的に処理した分布で表現した。即ち、海中濃度及び堆積速度の解析結果が、設定した指標値を超える確率論的な空間分布として示した。堆積速度の指標値として、太平洋における一般的な無機懸濁態粒子のフラックス⁹⁾である $100 \text{ [mg/m}^2\text{/day]}$ を、また海中濃度については、豪州・ニュージーランドの水質環境基準における熱帯域の海洋水質指標値¹⁰⁾である $1000 \text{ [mg/m}^3]$ を採用した。本研究で設定した値が、対象海域において規則等で定められているものではないため、注意して取り扱う必要がある。

図 2.4 に排水深度において指標値 $1000 \text{ [mg/m}^3]$ を超える海中濃度の確率分布を、図 2.5 に海底において指標値 $100 \text{ [mg/m}^2\text{/day]}$ を超える堆積速度の確率分布と等深線を示す。海穴内で排水された粒子は、海中及び堆積範囲において概ね海穴内に留まる可能性が高いことが示唆された。

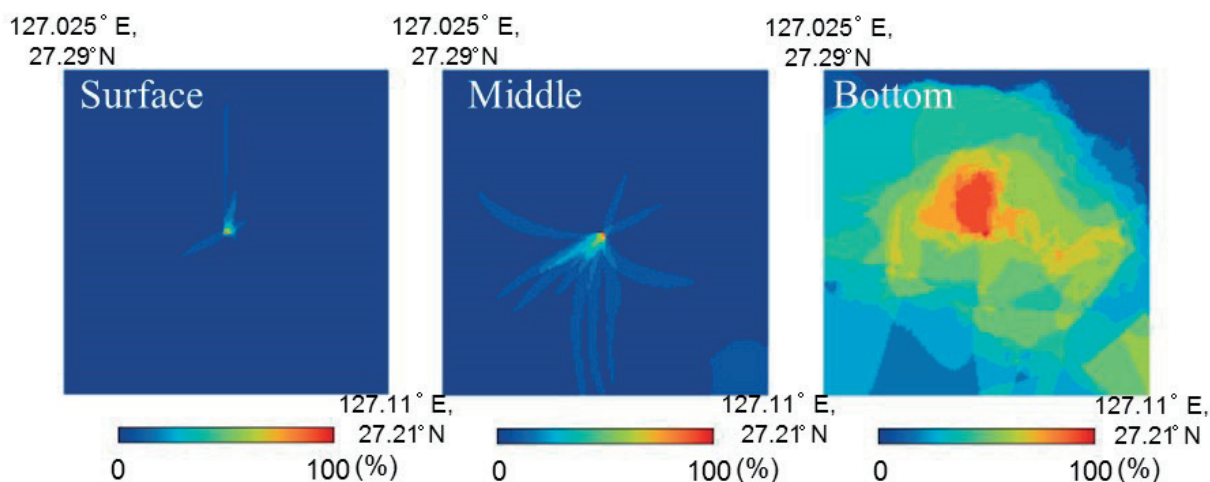


図 2.4 海水中の粒子濃度が指標値を超える確率

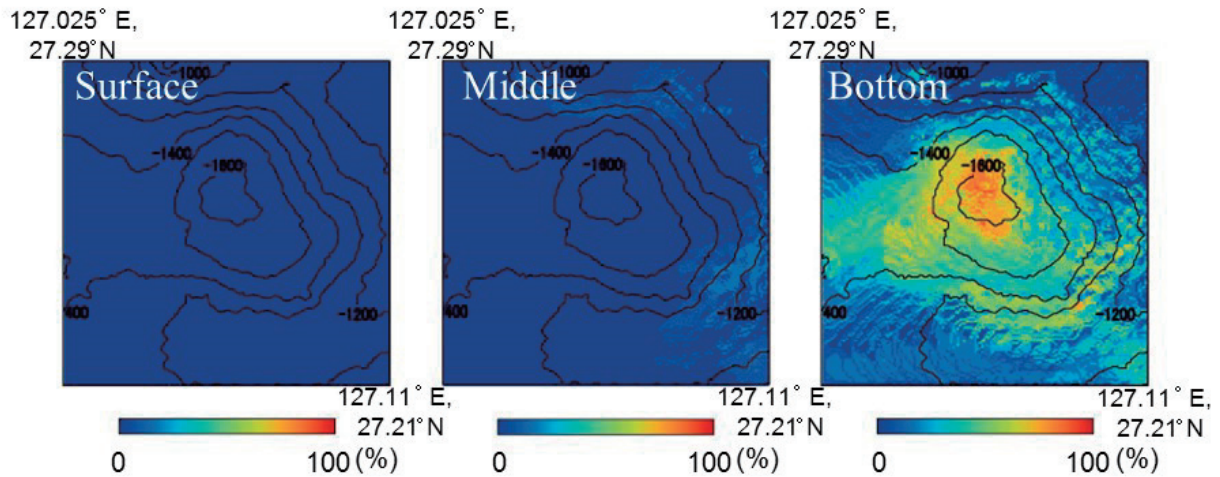


図 2.5 海底に粒子が再堆積する速度が指標値を超える確率

3. 生物影響モデルの開発

海底鉱物資源開発に伴う底生生物への影響として、掘削時に生物の生息域が直接消失する場合（直接的影響）と洋上施設からの廃水に含まれる無機懸濁態粒子や掘削塊の飛散粒子が堆積し生物を減少させる影響（二次的影響）が考えられる。深海底の底生生物を考慮した生態系モデルとして、金属鉱業事業団（現 JOGMEC）が開発した底層域モデルがある。本研究では、底層域モデルを基に無機懸濁態粒子の影響を考慮した生物影響解析モデルの作成を行った。

3.1 生物影響解析モデル

海底資源開発に伴う海底層の生物影響を推定するため、図 3.1 に示す構成要素を考慮した生態影響解析モデルを作成した。本モデルでは、底生生物として海底表面で生息する表在性動物（Epifauna）と堆積層内で生息する埋在性動物（Infauna）を考慮し、バクテリア（近底層、堆積層中）、プランクトン、有機物（堆積物表層、堆積物中）に加え、海底鉱物資源開発に伴う排水に含まれる無機懸濁態粒子を構成要素とした。

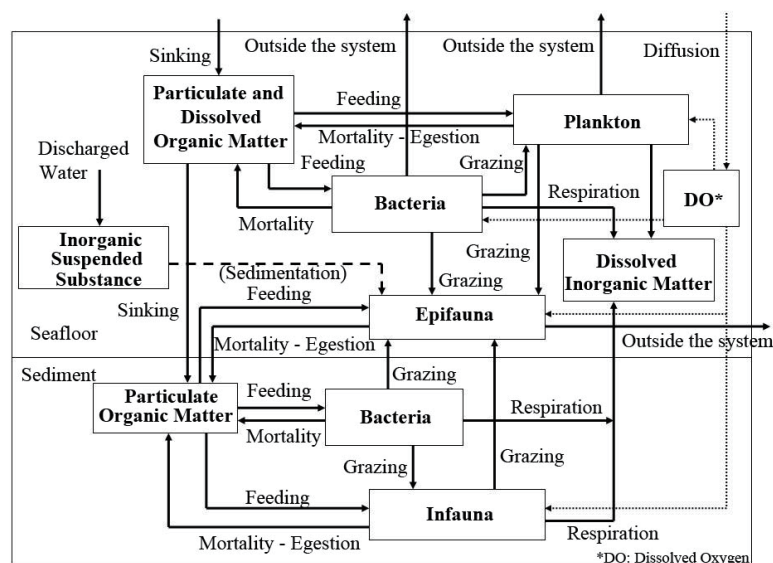


図 3.1 海底資源開発における生物影響解析モデルの構成要素

構成要素間には、生物同士では摂食、生物と無生物の間では摂取、呼吸、排出などの関係があり、構成要素の量の時間的な変化はこれらの生物過程を用いて定式化することができる。生物影響解析モデルにおける生物過程の基礎式は、Kremer *et al.*(1978)¹¹⁾、中田(1993)¹²⁾等で用いられた沿岸域の生態系モデルと同様の考え方を採用した。例えば、表在性動物の生物量 (B) における時間的な変化は下式に示すような表現をした。

$$\frac{dB}{dt} = \text{Detritus feeding} + \text{Grazing} - \text{Egestion} - \text{Respiration} - \text{Natural mortality} \\ - \text{Mortality with sedimentation of inorganic suspended particle from the platform} - \text{Direct mortality of mining.} \quad (3.1)$$

ここで、右辺の各項はそれぞれ粒子態有機物の摂取、摂食、排出、呼吸、自然死亡、無機懸濁態粒子の堆積による二次的影響による死亡及び採掘時の直接的な影響による死亡を示す。粒子態有機物の摂取は、次式で表現した。

$$\text{Detritus feeding} = R_{\max} \exp(\beta T)(1 - \exp(-\lambda(\Pi - \text{POM}))) \quad (3.2)$$

ここで、 $R_{\max}$ は最大摂取速度、 β は温度係数、 T は水温、 λ はイブレイブ定数、 Π は餌料の閾値、 POM は懸濁態有機物濃度である。

また、採掘時の直接的な影響と排水における無機懸濁態粒子の堆積による二次的影響は以下のように考慮した。

(1) 直接的影響

$$\text{生物初期値} = \text{現存量} \times \text{消失率} \quad (3.3)$$

ここで、消失率 (%) とは生物生息域の対する採掘範囲である。影響を受ける項目は、底層内に存在する全ての生物および物質 (表在性動物、埋在性動物、バクテリア、有機物) を対象とした。

(2) 二次的影響

$$\text{生物量} = \text{現存量} \times \text{影響度合} \quad (3.4)$$

ここで、影響度合とは堆積量に対する生物消失率であり、堆積厚は排水による無機懸濁態粒子の堆積量より推算した。堆積による影響項目は、海底表面に生息する表在性動物とし、堆積層内で生息する埋在性動物には影響を及ぼさないものと仮定した。

海底熱水鉱床の活動域では、局所的に、化学合成細菌を一次生産者とする化学合成生態系が存在しており、海底資源開発の生物影響解析を行う上で、熱水活動域の有無によりモデルの構成要素を変更して使用する必要があると考えられる。そこで、上記のモデルを基に海底熱水鉱床の開発に適用できるように、硫化水素に依存する生物として硫黄細菌を加えたモデルも作成した (図 3.2)。追加した構成要素 (硫化水素及び硫黄細菌) を図中の太枠で示す。硫黄細菌は堆積物中のバクテリアを置き換えることにより追加した。

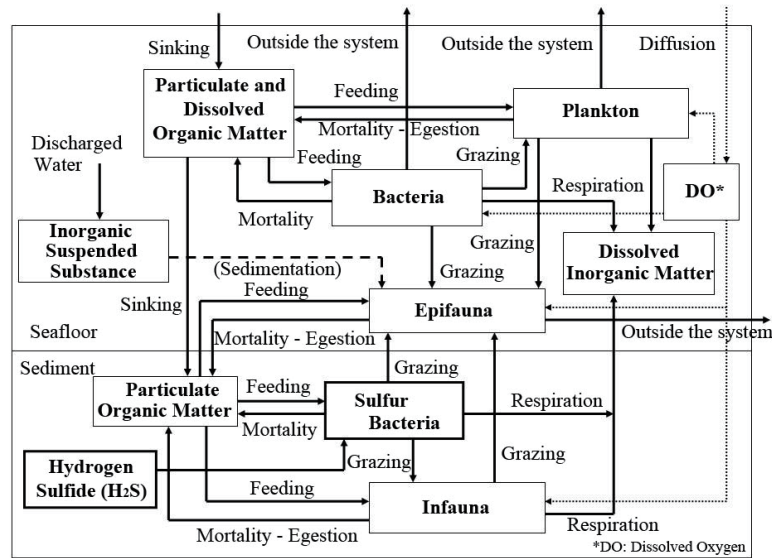


図 3.2 熱水活動域における生物影響解析モデルの構成要素

生物影響解析モデルを用いた解析手順を図 3.3 に示す。図 2.2 に示した流動解析及び無機懸濁態粒子の挙動解析の手順に、生物影響に関するデータの入力及び生物影響解析モデルによる解析（図中赤字で表示）を追加したものである。生物影響解析モデルで使用する洋上施設からの排水及び採掘過程で飛散した粒子の堆積量は、第 2 章で記載した排水挙動モデル及び第 4 章で記載する局所領域における粒子挙動解析により得られた計算結果を使用した。無機懸濁態粒子の海底堆積速度のデータに加えて、構成要素となる生物の生物量（バイオマス）、粒子態有機物の濃度、水温等のデータを生物影響解析モデルに投入し、生物量の時間的変化を解析する。解析結果は 2.3 節の無機懸濁態粒子の挙動解析結果と同様に、空間的な確率分布として表現した。

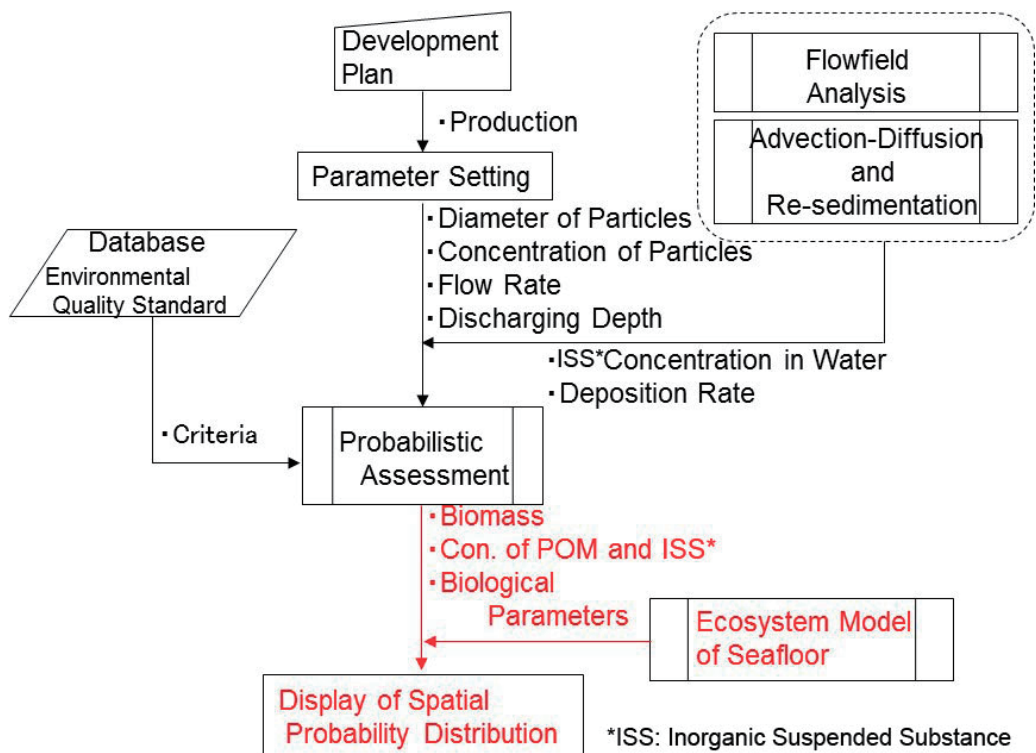


図 3.3 生物影響解析モデルの解析手順

3.2 計算結果事例

洋上施設からの廃水に含まれる無機懸濁態粒子の堆積影響による、深海底層に生息する生物量変動について、懸濁態粒子挙動解析と同様、沖縄海域伊是名海穴周辺を対象に試計算を行った。生物への影響を定量的に表現する手法として、生物量の回復期間を指標とする方法を用いた。ここで、回復期間とは開発行為等により減少した生物量が、開発前のレベルまで戻る期間である。

モデルの運用にあたり、生物の捕食速度や死亡速度などの生物パラメータ及び生物量の初期値の設定には、計算対象海域に対応した値を使用しなければならない。しかし、計算対象とした沖縄海域伊是名海穴周辺の生物データが得られなかったため、南鳥島南東の水深 2000～2250 [m] 付近の底泥調査結果¹³⁾を代用した。従って、本報告では、計算に使用したデータが対象海域と異なるため、数量的な議論は避け計算結果の事例のみを示す。

また、洋上施設からの排水に含まれる無機懸濁態粒子の堆積条件は、図 2.5 右図に示す最も堆積影響が認められる海底付近からの排水結果を使用した。本モデルの解析結果により、排水に伴う無機懸濁態粒子の堆積速度と底生生物の回復期間の関係をj得ることができる (図 3.4)。

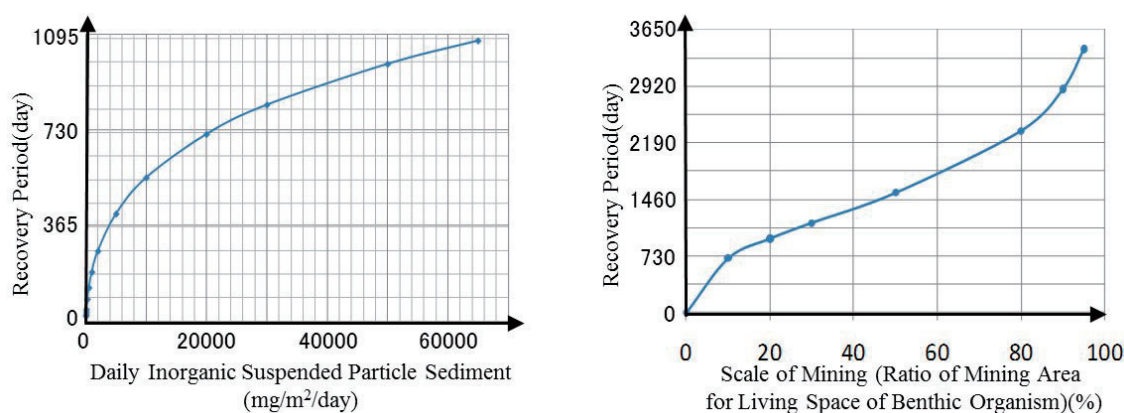


図 3.4 排水に伴う無機懸濁態粒子の堆積速度 (左図) 及び底生生物 (表在性動物) の回復期間 (右図)

図 3.4 の関係を基に、堆積物の生物への影響を表在性動物の回復に要する期間の分布図として示すことにより、生物の回復期間と影響範囲を明らかにすることができる (図 3.5)。図 3.5 の事例では、海穴内の排水地点周辺では排水を停止してから 3 年以上経過しても表在性動物が回復しない可能性のある地域が存在することが示唆された。前述したとおり、計算に使用した生物パラメータ及び初期値が、対象海域でのものとは異なるため、本結果は、本モデルで表現できる事例を示していることに留意されたい。

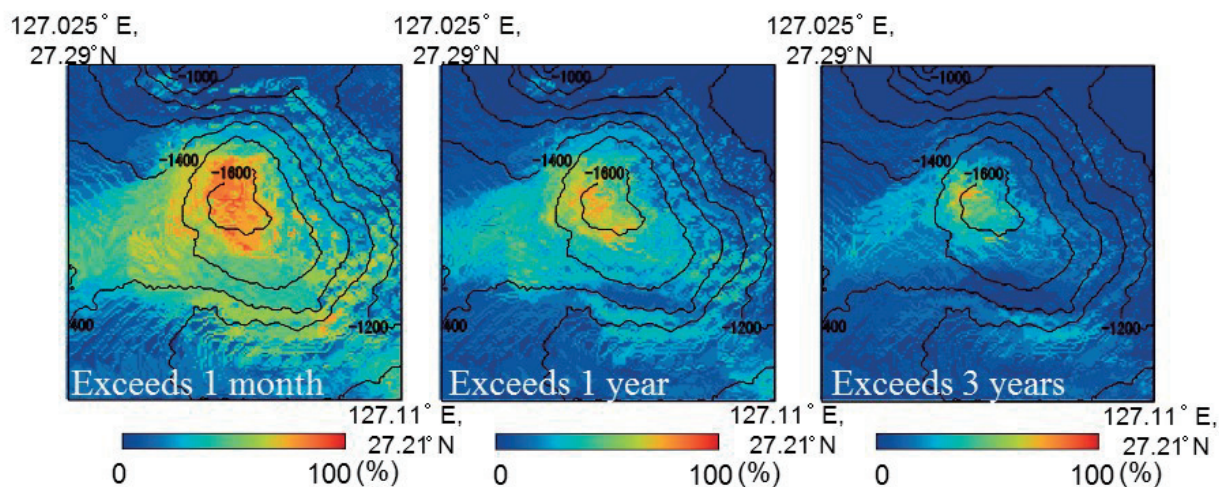


図 3.5 底生生物 (表在性動物) の回復期間分布図

4. 局所領域における粒子挙動解析

海底で鉱物の採掘を行う採掘機の周辺では、採掘により海中に巻き上げられた掘削粒子が海中を移流・拡散し、海底へと堆積する（図4.1参照）。採掘作業は水中カメラやソナーによる監視のもとで実施されるが、飛散した粒子が採掘機の周囲の濁りを増大させるため、監視カメラの視認性が著しく低下し、採掘作業全体の効率が低下する恐れがある。また堆積物は底生生物、特に海底表面で生息する表在性生物に影響を及ぼす可能性が考えられる。

そこで、局所領域における飛散粒子の挙動解析手法について検討し、試計算を行った。本研究では、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)ソフトウェア ANSYS Fluent を用いて試計算を実施した。試計算のシチュエーションとして切削ドラムによる掘削を想定し、ドラムの旋回流と周辺海域の流れによる乱流場における飛散粒子の挙動解析を行った。

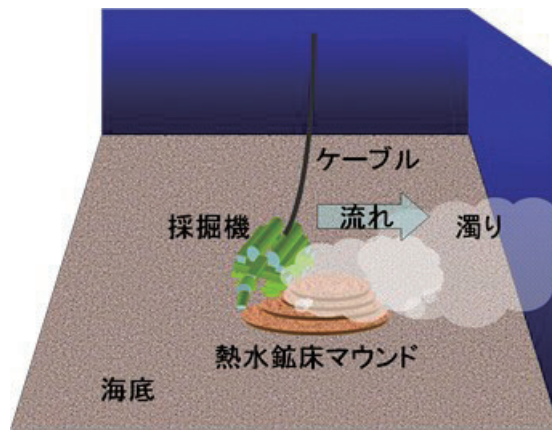


図4.1 採掘機周辺における掘削粒子の挙動イメージ図

4.1 解析方法

解析手法として、飛散粒子量と計算時間を考慮し、乱流場における粒子モデル法を用いた。初めに、質量保存方程式、運動方程式及び、切削ドラムの回転による旋回流を考慮し、解析領域内の流れ場を定常流として解析した。流れ場の解析後、粒子毎に挙動解析を行った。

粒子の挙動解析は、ラグランジュ基準座標系（流体の動きに付随する動的な座標系）で表現される分散相の粒子（本解析では海水中を飛散する掘削粒子）の速度を積分し、粒子の飛跡を求めることにより実施した。粒子の速度は、粒子に作用する抵抗力、重力及び浮力を用いて次の運動方程式から計算される。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{grav} \quad (4.1)$$

ここで、 $\vec{u}_p$ は粒子の速度、 $\vec{F}_{drag}$ は流体による抵抗力（粒子の単位質量あたり）、 $\vec{F}_{grav}$ は粒子に作用する重力及び浮力（粒子の単位質量あたり）である。抵抗力は抵抗係数 C_D を用いて次式のように表される。

$$\vec{F}_{drag} = \frac{18}{24} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{C_D}{d_p} |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (4.2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 ρ_p は粒子の密度、 d_p は粒子の粒径、 $\vec{u}$ は流体の速度を示す。式はさらに次式のように書き換えられる。

$$\vec{F}_{drag} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} \text{Re}(\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (4.3)$$

ここで、 μ は流体の粘度、 Re は次式に示す粒子のレイノルズ数である.

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{u} - \vec{u}_p|}{\mu} \quad (4.4)$$

粒子に作用する重力及び浮力は次式のように表される.

$$\vec{F}_{grav} = \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (4.5)$$

ここで、 $\vec{g}$ は重力加速度である.

上記の式(4.3)～式(4.5)に物性値、粒径等のデータを与えて計算を実施した. 抵抗係数は Morsi-Alexander のモデル¹⁴⁾を用いてレイノルズ数の関数として与えた. 流れ場の乱流による粒子の分散は、確率論的トラッキングモデルを使用して解析した. この方法は、粒子経路に沿った瞬間的な流速を使用して、個別の粒子について飛跡方程式を積分することにより、粒子の乱流分散を解析する方法である. 十分な個数の粒子について飛跡を計算した場合、乱流が粒子分散に及ぼすランダムな効果を考慮することができる.

4.2 計算条件と計算結果事例

図 4.2 に計算領域と格子分割を示す. 計算領域の一端に熱水鉱床を配置し、矩形の形状で表現した採掘機本体から伸びた円筒形シャフトの先端に切削ドラムを配置した. 回転する切削ドラムから掘削粒子が放出される. 計算領域を 85,000 格子に分割し、切削ドラム周辺を密にした可変格子とした. 実海域におけるデータが不足しているため、採掘に伴う飛散粒子の条件は、陸上で使用される採掘機的能力をもとに、発生する粒子量 $1.7 \times 10^4 [\text{mm}^3/\text{s}]$, 切削ドラムの回転数 45 [rpm], 飛散粒子の粒径 15 [μm]と仮定して計算を行った.

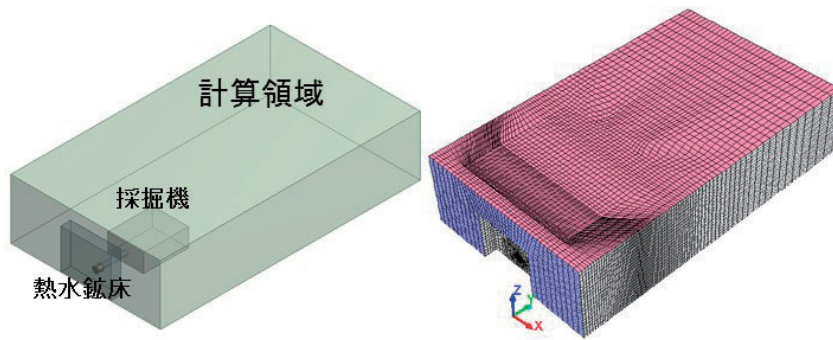


図 4.2 計算領域と計算格子分割図

計算結果例を図 4.3 に示す. 左図は流れ場中を飛散する粒子の飛跡を、右図は粒子の濃度分布をそれぞれ示す. 採掘機先端の切削ドラムから放出された掘削粒子は、図中左から右に向かう流れ場によって領域内を飛散する. 飛跡図から、粒子飛散範囲が初めは採掘機の片側であったが、やがてもう片側にも広がっていく様子がわかる. また、濃度分布図から、粒子濃度が非常に高い領域が熱水鉱床と採掘機本体の間にあり、そこから採掘機の後方

に向かって高濃度領域が伸びていることがわかる。このため、採掘機本体の前面にカメラを設置した場合、視認性が大きく低下すると予想される。

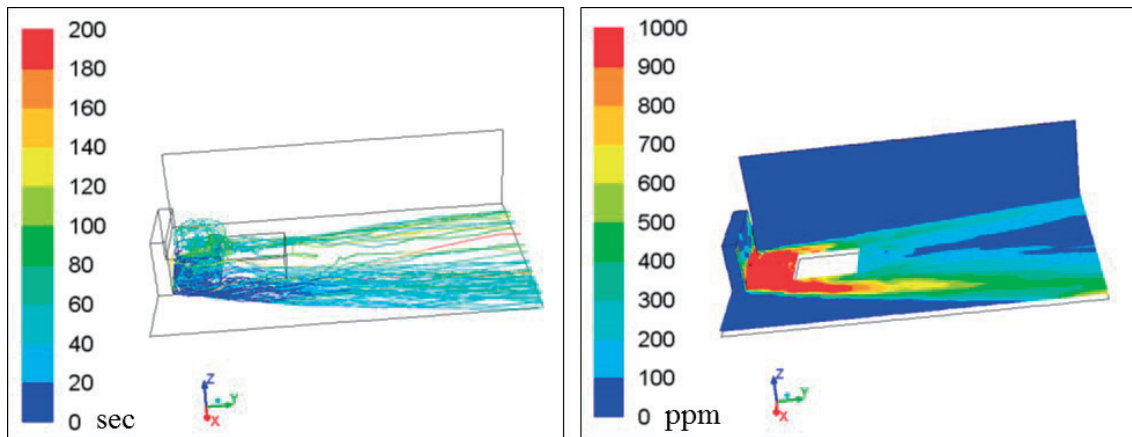


図 4.3 計算結果事例（左図：粒子飛跡図，右図：濃度分布図）

本計算手法を用いることにより、飛散粒子の軌跡と濃度分布を解析することができた。実海域における地形、流れ場、飛散粒子情報等のデータを取得できれば、海底作業環境の再現が可能となる。また、粒子の飛散状況及び濃度分布を把握できるため、採掘時における作業監視用カメラの配置等を工夫することにより、視認性向上などに活用できると考えられる。さらに、採掘作業全体の効率化にも資すると期待される。

5. まとめ

海洋エネルギー・鉱物資源開発の推進において、開発に伴う環境影響評価は重要な課題である。海底熱水鉱床などの海底鉱物資源の開発では、海底における採掘や、洋上施設からの排水により海中に放出される無機懸濁態粒子の海底への堆積等による影響が懸念されるため、これらの環境負荷を推定する手法の開発が必要である。

本研究では、まず、海底鉱物資源開発のための洋上施設からの排水により海中に放出される無機懸濁態粒子の挙動解析のための挙動予測モデルと、底生生物への影響を推定のための生物影響解析モデルの開発を実施した。挙動予測モデルの開発では、流れ場解析における計算負荷を緩和する手法を採用し、無機懸濁態粒子の移流拡散や海底への堆積などの物理的な挙動を解析するモデルを開発した。挙動予測モデルを用いて無機懸濁態粒子の挙動解析を実施し、環境負荷の空間的分布の検討を行った。なお、解析結果の評価に用いた指標値は海外の基準等であり、対象海域において規則等で定められているものではないことに注意されたい。生物影響解析モデルについては、採掘時の直接的な影響と排水における無機懸濁態粒子の堆積による二次的影響を組み込んだ。生物影響解析モデルを用いて粒子堆積時における底生生物の生物量の変化を解析し、さらに生物量の回復期間を評価指標として環境負荷の検討を行った。

また、海底採掘において海中に巻き上げられる掘削粒子による局所的な影響を推定するため、採掘機の周囲の流れ場中を飛散する粒子の挙動解析を実施した。流れ場中の粒子の挙動計算法として粒子モデル法を用い、粒子の飛散する軌跡と濃度分布を解析した。解析結果を用いて採掘作業監視用カメラの配置等を工夫することにより、視認性向上などに活用できると考えられ、採掘作業全体の効率化にも資すると期待される。

今後、資源開発海域における環境データや生物データ等を把握することにより、これらの影響予測モデルの精度向上等が期待される。本研究の成果が、本邦における海洋エネルギー・鉱物資源開発のための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 宮澤泰正他:数値海況予測システム JCOPE2 による黒潮・親潮混合域の再現性, 海と空, Vol.84 (2008), pp.85-91.
- 2) 日本海洋データセンター : http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/depth500_file.jp
- 3) C. A. Sherman: A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, J. Applied Meteorology, Vol.17 (1978), pp.312-319.
- 4) 岡秀行: 変分法による風速場推定モデルの区画内気流性状解析への応用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 49 (2014), pp.142-150.
- 5) J. Smagorinsky: General Circulation Experiments with the Primitive Equations, Mon. Weath. Rev., Vol.91, No.3, (1963), pp.99-164.
- 6) R. Perianez: Modelling the Dispersion of Radionuclides in the Marine Environment, Springer-Verlag (Berlin), (2005).
- 7) 佐藤敦久編著, 水環境工学－浮遊物質から見た環境保全－, 技報堂出版, (1987).
- 8) Nautilus Minerals Inc.: ENVIRONMENTAL IMPACT STATEMENT – Solwara 1 Project –, (2008), p.226.
- 9) R. Chester: Marine Geochemistry, Blackwell Publishing, (2000), pp.314.
- 10) Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC) & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMCANZ), Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality, (2000).
- 11) J. N. Kremer & S. W. Nixon : A Coastal Marine Ecosystem Simulation and Analysis, 生物研究社, (1978), p. 227.
- 12) 中田喜三郎: 生態系モデルー定式化と未知のパラメータの推定法ー, J. AMSTEC, Vol.7/8 (1993), pp.99-131.
- 13) J. Yamamoto, et al., 2011, Analysis Tool for Environmental Impact of Seafloor Resources Development, Proc. The ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, the Netherlands, OMAE2011-50096.
- 14) S. A. Morsi & A. J. Alexander: An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, J. Fluid Mechanics, Vol.55, No.2 (1972), pp.193-208.