JAEA-Research 2009-040



下北海域における海洋放射能予測コードの整備

Improvement of the Marine Radionuclides Prediction Code in the Off Shimokita Region

> 小林 卓也 外川 織彦 伊藤 集通 乙坂 重嘉 川村 英之 林 圭佐 島 茂樹 中山 智治 印 貞治

Takuya KOBAYASHI, Orihiko TOGAWA, Toshimichi ITO, Shigeyoshi OTOSAKA Hideyuki KAWAMURA, Keisuke HAYASHI, Shigeki SHIMA, Tomoharu NAKAYAMA and Teiji IN

> 原子力基礎工学研究部門 環境・放射線工学ユニット

Division of Environment and Radiation Sciences Nuclear Science and Engineering Directorate ţ

December 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

下北海域における海洋放射能予測コードの整備

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 環境・放射線工学ユニット 小林 卓也、外川 織彦、伊藤 集通、乙坂 重嘉、川村 英之、林 圭佐^{*1}、 島 茂樹^{*1}、中山 智治^{*1}、印 貞治^{*1}

(2009年10月22日 受理)

現在、青森県六ヶ所村において使用済燃料再処理施設が試験運転中であり、近い将来に本格運 転開始の予定である。再処理施設の平常運転時には、施設から少量の放射性核種が海洋へ計画的 に放出される。このため、再処理施設の平常時に海洋へ放出される放射性核種に起因する環境影響 を把握することは、施設に対する周辺住民の理解・安心の醸成に貢献する上で重要なことである。

そこで筆者らは、再処理施設から六ヶ所村沖合の下北海域へ放出される放射性核種の移行を予測 することを目的として、それまでの日本原子力研究開発機構での研究成果を当該海域に適合させるた めに、気候値を使用した海水循環予測コードの整備、及び海水中放射性核種移行予測コードの整備 を行った。これに併せて、下北海域において沈降粒子特性データを実測し、海水中放射性核種移行 予測コードに用いるパラメータを検討した。

本報告書は、平成 15 年度から 20 年度までに実施した下北沖海域を研究対象海域とした研究成果から、特に重要と思われる成果についてまとめたものである。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

- ※1 特定課題推進員(現所属;科学技術振興機構, CREST)
- *1(財)日本海洋科学振興財団

JAEA- Research 2009-040

Improvement of the Marine Radionuclides Prediction Code in the Off Shimokita Region

Takuya KOBAYASHI, Orihiko TOGAWA, Toshimichi ITO, Shigeyoshi OTOSAKA, Hideyuki KAWAMURA, Keisuke HAYASHI^{**1}, Shigeki SHIMA^{*1}, Tomoharu NAKAYAMA^{*1} and Teiji IN^{*1}

> Division of Environment and Radiation Sciences Nuclear Science and Engineering Directorate Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

> > (Received October 22, 2009)

A spent nuclear fuel reprocessing plant in Rokkasho-mura, Aomori prefecture is under test operation. The plant has the possibility of routine releases of liquid radioactive wastes from a discharge pipe to the off Shimokita region during its operations. Thus, for environmental safety, it is important to assess the migration processes of released radionuclides from the plant.

Therefore, an ocean circulation prediction code and an oceanic radionuclides migration prediction code, which were developed by Japan Atomic Energy Agency, has been improved to describe the migration behavior of radionuclides in the off Shimokita region. Parameters on characteristics and dynamics of particulate materials in seawater have also been obtained in the study area for the adjustment and verification of the oceanic radionuclides migration prediction code.

This report summarizes the primary results of the study which was carried out at the off Shimokita region from FY2003 to 2008.

Keywords: Spent Nuclear Fuel Reprocessing Plant, Ocean Circulation Prediction Code, Oceanic Radionuclides Migration Prediction Code, Scavenging Model, Shimokita, Rokkasho, Liquid Radioactive Waste, Numerical Simulation

^{%1} Special Topic Researcher (Present affiliation; CREST, Japan Science and Technology Agency)

^{*1} Japan Marine Science Foundation

目 次

1. はじめに	1
2. 予測コードの整備	3
2.1 海水循環予測コードの整備	3
2.1.1 海水循環予測モデルの概要	3
2.1.2 多重σ座標系の導入	3
2.1.3 ネスティング機能の導入	7
2.1.4 データ処理支援システムの整備	11
2.2 海水中放射性核種移行予測コードの整備	30
2.2.1 海水中放射性核種移行予測モデルの概要	30
2.2.2 海水中放射性核種移行予測モデルの機能確認	34
2.2.3 下北海域への適用と適用性の検討	36
3. 沈降粒子に関する特性データの取得	47
3.1 下北海域における沈降粒子に関する特性データについて	47
3.2 複数の相における相互作用に関するパラメータ	47
3.2.1 熱力学的輸送係数	47
3.2.2 分配係数	47
3.3 大粒子(LPM)相に関するパラメータ	50
3.3.1 LPM 濃度	50
3.3.2 粒子密度	51
3.3.3 沈降速度	52
3.4 堆積物相に関するパラメータ	52
3.4.1 堆積物表層の混合深度	52
3.4.2 粒子密度	53
3.4.3 堆積物の空隙率及び密度	53
4. まとめ	61
謝辞	63

Contents

1.	Introduction	• 1				
2.	Improvement of the prediction codes	3				
4	2.1 Improvement of the ocean circulation prediction code	- 3				
	2.1.1 Outline of the ocean circulation prediction model	- 3				
	2.1.2 Multi-σ coordinate system	3				
	2.1.3 Nesting function	7				
	2.1.4 Improvement of the data handling support system	11				
4	2.2 Improvement of the oceanic radionuclides migration prediction code	30				
	2.2.1 Outline of the oceanic radionuclides migration prediction model	30				
	2.2.2 Model Validation	34				
	2.2.3 Model Application in the Shimokita sea region	36				
3.	Examination of the characteristics of particulate materials	47				
į	3.1 On the characteristics of particulate materials in the off Shimokita region	47				
į	3.2 Parameters about the interaction at the plural phases	47				
	3.2.1 Thermodynamic transfer coefficients	47				
	3.2.2 Distribution coefficients	47				
į	3.3 Parameters about the large particulate matter (LPM)	50				
	3.3.1 The LPM concentration	50				
	3.3.2 Density of particles	51				
	3.3.3 Settling velocity	52				
į	3.4 Parameters about the sediment phase	52				
	3.4.1 Mixing depth at the surface sediment	52				
	3.4.2 Density of particles	53				
	3.4.3 Porosity and density of the sediment	53				
4.	Summary	61				
Ac	Acknowledgements 6					

1. はじめに

現在、青森県六ヶ所村において使用済燃料再処理施設が試験運転中であり、近い将来に本格運 転開始の予定である。再処理施設の平常運転時には、施設から少量の放射性核種が海洋へ計画的 に放出される。このため、再処理施設の平常時に海洋へ放出される放射性核種に起因する環境影響 を把握することは、施設に対する周辺住民の理解・安心の醸成に貢献する上で重要なことである。

そこで筆者らは、再処理施設から六ヶ所村沖合の下北海域へ放出される放射性核種の移行を予測 することを目的として、それまでの日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と称す)での研究成果 を当該海域に適合させるために、気候値(統計値)を使用した海水循環予測コードの整備、及び海水 中放射性核種移行予測コードの整備を行うこととした。また、海水中放射性核種移行予測コードの整 備と検証のため、沈降粒子特性データ取得実験を併せて実施し、沈降過程モデルの入力パラメータを 取得するとともに、モデルの妥当性を検討することとした。本研究は平成 15 年度から 17 年度までを 第 1 期として実施し、予測システムを構成する海水循環予測コード(気候値を使用した版)及び海水 中放射性核種移行予測コードの基本版を完成することを目標とした。第 1 期における年度毎の研究 内容と進捗状況は以下のとおりである。

平成 15 年度は、海水循環予測コードの整備として、プリンストン大学で開発された POM (Princeton Ocean Model) をベースに原子力機構によって改良されたものを、下北海域に適用できるように検討を行い、入力データを整備するとともに計算コードの整備に着手した。また、海水中放射性核 種移行予測コードの整備として、原子力機構で開発した海水中放射性核種移行予測コードを、(財)日本海洋科学振興財団(以下、海洋財団と称す)が整備する京大モデルに基づいた海水循環予測コードに対応させるための検討を行った。さらに、海水中放射性核種移行予測コードの整備と検証に必要となるデータを取得するため、海洋財団が下北海域において実施した海洋調査に参加して海洋試料を採取するとともに、採取した試料について沈降粒子の性状、金属元素濃度等に関する分析を行い、 沈降粒子特性データを取得した。

平成 16 年度は、海水循環予測コードの整備として、15 年度に下北海域に適用できるように整備 を開始した POM を基礎とした計算コードの改良を行った。また、海水中放射性核種移行予測コード の整備として、15 年度に実施した計算コードの検討、及び沈降粒子特性データ取得実験の分析・解 析結果に基づいて、懸濁態放射性核種の海水中移行を推定する計算コードを整備した。さらに、海水 中放射性核種移行予測コードの整備と検証に必要となるデータを取得するため、海洋財団が下北海 域で実施した海洋調査に参加して沈降粒子特性データ取得実験を実施するとともに、15 年度の冬期 に実施した実験結果と併せることにより、特性データの季節変化とその変動因子を検討した。

平成 17 年度は、海水循環予測コードの整備として、15 年度及び 16 年度に下北海域に適用で きるように整備を行った、POM を基礎とした計算コードを検証・改良し、その基本版を完成した。また、 海水中放射性核種移行予測コードの整備として、15 年度及び 16 年度に実施した検討及び沈降粒 子特性データ取得実験の結果に基づいて整備した、計算コードを検証・改良し、その基本版を完成し た。さらに、海水中放射性核種移行予測コードの検証と改良に必要となるデータを取得するため、海洋 財団が下北海域で実施した海洋調査に参加して沈降粒子特性データ取得実験を実施するとともに、 15 年度及び 16 年度に実施した沈降粒子特性データ取得実験及び文献調査で得られたデータを併 せて解析し、予測コードで使用するパラメータを導出した。

以上の第1期の研究成果を踏まえ、引き続き平成18年度から20年度までに第2期の研究を 実施した。この中では、17年度までに完成した海水循環予測コード(気候値を使用した版)及び海水 中放射性核種移行予測コードの基本版を、実用化に向けて高度化することを目標とした。第2期に おける年度毎の研究内容と進捗状況は以下のとおりである。

平成 18 年度は、海水循環予測コードの整備として、15 年度から 17 年度までに下北海域に適用 できるように整備を実施し基本版を完成した、POM を基礎とした計算コードについて、実用化に向け た検証・改良を行った。また、海水中放射性核種移行予測コードの整備として、15 年度から 17 年度 までに沈降粒子特性データ取得実験の結果に基づいて整備し基本版を完成した計算コードについて、 実用化に向けた検証・改良を行った。さらに、海水中放射性核種移行予測コードの実用化に向けた検 証と改良に必要となるデータを取得するため、海洋財団が下北海域で実施した海洋調査に参加して検 証・改良のための基礎データを蓄積するとともに、得られたパラメータ情報をこれまでの結果と併せて解 析することにより、沈降粒子特性に関するパラメータの確度を向上させた。

平成 19 年度は、海水循環予測コードの整備として、18 年度に実用化に向けた検証・改良を開始 した計算コードについて、下北海域へ適用してその適用性を検討するとともに、必要な検証・改良を行 った。また、海水中放射性核種移行予測コードの整備として、18 年度に実用化に向けた検証・改良を 開始した計算コードについて、下北海域へ適用してその適用性を検討するとともに、必要な検証・改良 を行った。さらに、下北海域における海水中放射性核種予測コードの実用化に向けた検証と改良に必 要となるデータを得るため、これまでの観測で得た複数のパラメータから最適な値を抽出・決定しその 妥当性を評価するとともに、当該予測コードの高度化に伴う不足分の情報を取得するため、これまでの 調査航海で採取した予備試料を含む海洋試料を分析し再解析した。

平成 20 年度は、海水循環予測コード及び海水中放射性核種移行予測コードの整備として、18 年度及び 19 年度に実用化に向けて下北海域への適用性を検討した計算コードを検証・改良し、予 測コードの運用版プロトタイプを完成した。さらに、下北海域における海水中放射性核種移行予測コー ドを完成するために必要となるデータを得るため、19 年度に最適な値を抽出・決定したパラメータセッ トを再整理するとともに、これまでの観測や文献で調査したデータ、必要に応じて実施する追分析の結 果などを併せて再評価することにより、予測コードの運用版プロトタイプで使用するパラメータセットを決 定した。

本報告書は、平成 15 年度から平成 20 年度までに実施した下北沖海域を研究対象海域とした研 究成果から、特に重要と思われる成果についてまとめたものである。本報告書は、第 1 章の「はじめ に」及び第 4 章の「おわりに」を含めて、4 つの章から構成されている。第 2 章には「予測コードの整 備」、第 3 章には「沈降粒子に関する特性データの取得」がそれぞれ記述されている。特に第 2 章 では、本研究で整備を進めた海水循環予測コードと海水中放射性核種移行予測コードに関する整備 状況と研究成果が説明されている。

2. 予測コードの整備

2.1 海水循環予測コードの整備

2.1.1 海水循環予測モデルの概要

原子力機構が開発・整備を進めている海水循環予測コードは、Blumberg & Mellor¹⁾ によって開発 された Princeton Ocean Model (POM)を基に改良を加えたものである。POM は、マルチ・レベル・プリミ ティブ方程式をベースにした高精度な鉛直混合及び大気境界条件を取り扱える海流モデルであり、海 底地形変化を滑らかに表現できるの座標系を用いている。海洋の流れ場を構成する基礎方程式群は、 連続の方程式、コリオリカを考慮した非圧縮性流体に対するナビエ・ストークスの運動方程式、密度を 計算する状態方程式、水温・塩分の移流拡散方程式から成る。これらの方程式を差分法によって各時 間ステップで格子点ごとに計算を行うことで流速や拡散係数、水温分布等の時間変化を3次元的に予 測できる。

ここでは、本研究で実施したモデル整備の内容について、特に海水循環予測コードへの多重の座標 の導入及びネスティング機能の導入、それらに伴う入力データ作成プログラム及び水深データ対話的 編集システムの導入についてその概要を述べる。

2.1.2 多重 σ 座標系の導入

(1) 多重 σ 座標系導入の目的

POM が採用する σ 座標系は複雑な海底地形を正確に表現でき、また、境界条件の取り扱いも容易 になるという利点を有している。しかしその一方で海底地形が大きく変化する場所では、物理量の数値 拡散及び鉛直差分における数値誤差が無視できないレベルに達することが問題となっている。

水面の変位を η 、静水深を h、これらをあわせた全水深を H(= η + h) とし、鉛直上向きを正とした時、深度 z にあるグリッドポイントは σ 座標系において以下のように定義される。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H} \tag{2.1.2.1}$$

上式を用いて基礎方程式系を直交座標系から σ 座標系に変換し、有限差分法で離散化して解く時、 直交座標系における物理量 Φ と、 σ 座標系における物理量 $\hat{\Phi}$ に関する鉛直差分の関係は次式で表さ れる。

$$\frac{1}{\Delta z}(\Phi_{k+1} - \Phi_{k-1}) = \frac{1}{H} \frac{1}{\Delta \sigma} (\widetilde{\Phi}_{k+1} - \widetilde{\Phi}_{k-1})$$
(2.1.2.2)

式 (2.1.2.1) から得られる $\Delta \sigma \cdot H = \Delta z$ の関係式からもわかるように、式 (2.1.2.2) 右辺の σ 座標系の 差分式では、 $\Delta \sigma$ に水平方向に変化を持つ全水深 H が乗じられているので、水深に依存して格子毎に 歪んだ Δz を用いて差分値を求めることになる。例えば、下北海域の沿岸部を念頭においた計算領域と して、水深が最浅(沿岸)部で 3 m、最深(沖合)部で 100 m として σ 座標系で等間隔に鉛直 10 層をと ったとすると、沿岸部と沖合部の Δz はそれぞれ、0.3 m と10 m となる。このような Δz の水深依存性は、 海洋表層においては、気象場との境界である最表層の層厚に空間分布をもたらし、仮に大気側から運

動量(あるいは熱や淡水)が水平方向に均一に与えられたとしても、海洋モデルの内部では期待される ような応答は得られない。これは、海洋モデルの最表層では、受け取った運動量をそのセル内で均一 化するため、モデルにおける応答及びその直接的な影響範囲はそれぞれのセルの *Az* に応じたものに なるためである。また、海洋内部で物理量の水平輸送が行われる場合でも、隣り合うセルの *Az* の違い による数値拡散で水深が深い側の点で擬似的な鉛直輸送が発生する。さらに、式 (2.1.2.2)の差分で は、*Az* が大きい場合あるいは物理量の鉛直変化が大きい場合、数値誤差を与えやすくなり、沿岸部に 比べ沖合部では鉛直差分の精度は極めて悪くなる。そして、沖合部から沿岸部へと大きな数値誤差が 伝播するため沿岸部の計算精度が悪化することになる(村上他²⁾)。ここでは、*Az* の水深依存性の問 題を可能な限り回避し、数値拡散、数値誤差の影響を低減できるように鉛直座標系の改良を目的とし た。なお、現在利用可能な鉛直座標系には単一及び複合座標系でさまざまなものがあるが、海底地形 の再現性能や物質移行予測モデルとの連携性能などを総合的に勘案し、海水循環予測コードに新た に導入する鉛直座標系を多重 σ 座標系と決定した。

(2) 多重 σ 座標系の概要

多重 σ 座標系とは、計算領域を鉛直方向に複数の小領域に分割し、各小領域に対してそれぞれ σ 座標系を適用するものである。村上他²⁾は分割した小領域を海面から順に I、II、III、・・・・・ としてこの多重 σ 座標系を以下のように定義している。

$$\sigma_{I} = \frac{\eta - z}{\eta + h_{I}} = \frac{\eta - z}{H_{I}} \qquad -h_{I} \le z < \eta \qquad (4.12.3)$$

$$\sigma_{II} = \frac{-S_{I} - z}{h_{II}} = \frac{-S_{I} - z}{H_{II}} \qquad -h_{II} \le z < h_{I} \qquad (1.2.4)$$

$$\sigma_{III} = \frac{-S_{II} - z}{h_{III}} = \frac{-S_{II} - z}{H_{III}} - h_{III} \le z < h_{II} \quad (1 \cdot \text{ifi} \neq \text{III}) \quad (2.1.2.5)$$

 $\begin{cases} h_{I} = h & h \leq S_{I} \quad \text{O場合}(小領域 II 以深は考えない) \\ h_{I} = S_{I} & h > S_{I} \quad \text{O場合} \\ \end{cases}$ $\begin{cases} h_{II} = h - S_{I} & h \leq S_{II} \quad \text{O場合}(小領域 III 以深は考えない) \\ h_{II} = S_{II} - S_{I} & h > S_{II} \quad \text{O場合} \\ \end{cases}$ $\begin{cases} h_{III} = h - S_{II} & h \leq S_{III} \quad \text{O場合} \\ h = S_{III} - S_{II} & h \leq S_{III} \quad \text{O場合} \\ \end{pmatrix}$

上記定義では、代表として小領域 I ~ IIIの σ 座標の定義のみを記しているが、小領域IV以深についても同様である。ここで、小領域 I について式 (2.1.2.3) をみれば、海面 $(z = \eta)$ で $\sigma_I = 0$ となり、小領域の境界面 $(z = -h_I)$ で $\sigma_I = 1$ となって、小領域内で1つの σ 座標系が完結していることがわかる。なお、 S_I はz = 0から領域 I とII、 S_{II} はz = 0から領域 IIとII、 S_{II} はz = 0から領域 IIとII、 S_{II} はz = 0から領域 IIとII、 S_{II} はz = 0のようのでの距離であり、これらの S を境界面水深と呼ぶ。

さらに、連続の式の定式は以下のようになる。

JAEA-Research 2009-040

$$\frac{1}{H_{I}}\frac{\partial}{\partial x}(\tilde{u}H_{I}) + \frac{1}{H_{I}}\frac{\partial}{\partial x}(\tilde{v}H_{I}) - \frac{\partial\omega_{I}}{\partial\sigma_{I}} + \frac{1}{H_{I}}\frac{\partial\eta}{\partial t} = 0 \qquad (1) \text{ (I)}$$
(2.1.2.6)

$$\frac{1}{H_{\Pi}}\frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{u}H_{\Pi}\right) + \frac{1}{H_{\Pi}}\frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{v}H_{\Pi}\right) - \frac{\partial\omega_{\Pi}}{\partial\sigma_{\Pi}} = 0 \qquad (\text{/}\text{i}\text{i}\text{i}\text{i}\text{I}) \qquad (2.1.2.7)$$

小領域 III 以深は小領域 II の式と同様である。多重 σ 座標系では、海面直下の小領域 I を狭くするこ とにより領域内の水深変化の影響を排除することができ、沿岸部から沖合部まで Δz に同じ値を与えるこ とができる。このことにより、運動量輸送、熱交換、水収支等の気象場との結合計算において問題とな っている海洋表層部での Δz の水深依存性を解消することができる。同様に、小領域を多数設けること で、海底近傍をのぞく領域でも Δz の水深依存性を解消することが可能となる。さらに、海底地形が急激 に変化する領域においても海底を含まない部分での水平差分は直交座標におけるそれと同じになるた め、水平圧力勾配項や水平拡散項に関する数値拡散及び数値誤差の問題も改善できる。

(3) 性能の評価

本整備では多重 σ 座標系を導入した海水循環予測コードを用いて試計算を行いその性能を評価した。評価の対象としたのは、斜面状の海底地形を持つ内部領域における塩分の移流・拡散である。試計算結果に先立ち、以下の 1) ~ 2) に試計算における諸条件を示す。

1) 海底地形及び鉛直解像度

試計算領域は、矩形海面の東西境界が閉じた仮想領域とした(南北境界については後述)。また、 海底地形は、水深が東向きに単調増加する仮想地形とした。ただし、最小水深を 10 m、最大水深を 4000 m とし、途中に水深変化のない領域を含んだ 2 段の斜面を配した。南北方向にはこの水深形状 を連続して設定し、一様な海底とした。水平格子数は南北に30、東西に66とし、格子間隔をいずれも4 km としたため、水平方向の全長は南北に120 km、東西に264 km である。一様水深部(以降「棚」と 略記する)としては10 m、200 m (陸棚を想定)、4000 m の 3 部分を設けた。この水平格子と距離の関係 を図 2.1.2.1 に示した。

鉛直座標に関しては、従来のσ座標系モデルでは、鉛直 20 層を等間隔に分割した。層厚は 10 m、 200 m、4000 mの各棚部でそれぞれ 0.5 m、10 m、200 m となる。一方、多重σ座標系モデルでは、最 大鉛直層数 20 層は同じとして、小領域区分数を棚に合わせ以下の 3 区分とした。

第1区分	水深 10m まで	層数 4	最大層厚 2.5 m
第2区分	水深 200m まで	層数 10	最大層厚 19 m
第3区分	水深 4000m まで	層数 6	最大層厚 633.3 m

仮想地形に対する従来のσ座標系モデル及び多重σ座標系モデルにおける鉛直座標を図 2.1.2.2 に示した。従来のσ座標系(左列)においては、鉛直グリッドの水深依存性が一目のうちに理解できる。 これに対して多重σ座標系(右列)では、海底地形の棚になる部分に小領域の境界を設定した結果、 表層部において鉛直グリッドの水深依存性の問題が回避できていることがわかる。 2) サイクリック境界条件

本試計算では、計算領域の南北端をサイクリック境界条件で接続した。これは内部領域の南端の2 段を北の境界条件とし、内部領域の北端の2段を南の境界条件として用いる(ただし、南北の境界は1 段ではなく2段とする)ことで無限に長い領域を作り出す手法である。なお、本試計算にあたっては、 POMホームページに掲載されているcontributed code¹を参考にした。この境界条件は、外部モードにおいては、水温、塩分及び流速に関して適用している。

3) 試計算とその結果

この課題では、沿岸から沖合に物質が輸送される場合を想定しており、輸送の過程で物質は水深が急激に深くなる領域を通過する。

試計算における初期条件は、塩分が水平及び鉛直方向に一様(35 psu)、水温が鉛直方向に水深 に依存した関数で与えた分布(表面付近の水温は約 20 ℃、最深部で約 5 ℃)を持ち水平方向には一 様とした。また、境界条件は、水深 10 m部分に接続する陸域から、水温は海域表層の初期値に等しく、 塩分ゼロの淡水を 10000 m³ s⁻¹ 海域に流入させた。淡水供給の方法としては全流量を海岸に接する 30 の格子に等分に配分した。計算期間は 180 日である。

従来の σ 座標系及び多重 σ 座標系で得られた結果を図 2.1.2.3 及び図 2.1.2.4 に、それぞれ示した。 いずれの座標系においても、淡水供給部分から沖合に向け海面付近に低塩分水が分布している様子 が水平及び鉛直断面の各分布図で確認できる。従来の σ 座標系に対する結果(図 2.1.2.3)では、水平 分布において供給源付近に 10 psu 以下の低塩分水がほとんど見られない。鉛直断面では、低塩分水 の厚さが沿岸から沖合にむけ大きな変化を見せず、フロント域においても依然 100 m 程度の「厚み」を 持っている。一方多重 σ 座標系における計算結果(図 2.1.2.4)の水平分布図では、淡水供給部付近に 5 psu 以下の低塩分水が広く分布し、塩分フロントが従来の σ 座標系に比べより沖合に出ていることが 確認できる。また、鉛直断面図では、低塩分水は沖合に向け薄いくさび状となって分布している。

塩分の鉛直分布について、図 2.1.2.5 に沿岸部分を拡大し更に詳細に比較した。多重 σ 座標系では 小領域分割数を 1 とすると従来の σ 座標系と等価な鉛直座標が得られ、小領域内の σ レベル数を 1 と すると小領域分割数と等しいレベルモデルにほぼ等価の鉛直座標が得られる。この図 2.1.2.5 には鉛 直 24 層に分割したレベルモデル設定で行った試計算結果(c 図)も参考のために併記している。従来 の σ 座標系における結果(a 図)では、塩分フロントは水平に 120 km の地点まで到達しているが、多重 σ 座標系(b 図)では、130 km を超えており、フロント到達距離及び付近の分布形態はレベルモデル設 定の結果(c 図)と非常に近い。さらに従来の σ 座標系における分布では、沖合に 65 km の距離から深 層 ~低塩分水が拡散していく様子が見えている。この 65 km の距離は 200 m の棚から 4000 m の棚へ つながる斜面が始まるところである。ここで従来の σ 座標系では等 σ 面に沿う擬似的な鉛直拡散を生じ 34~34.6 psu の低塩分層が沖へ向けて深層 ~広がるような様相を示すものと考えられる。一方、多重 σ 座標系ではこの付近において σ 座標は水平である。このため上記した現象は生じず、淡水層は次第に 薄くなりながら沖に広がっていく。等 σ 面に沿う鉛直拡散の影響は 10 m の棚から 200 m の棚へと続く 斜面部分でも見られ、等 σ 面の傾きが見られる (a) 及び (b) 図において低塩分水は、等 σ 面を水平

¹ http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/contrib-code/bcond_cyc.f

にとった (c) 図に比べより深層へと侵入している。

今回の試計算では、35 psu で塩分一様の仮想海域へ、0 psu の塩分の淡水、すなわち領域内で最 も密度の低い水を供給したため低塩分水が海面付近に分布して、海底斜面直上の現象自体の検証と はならなかった。しかしながら、等 σ 面の傾きが擬似的な鉛直拡散を生む現象を確認し、また、等 σ 面を 水平にとることでそれが抑制可能であることが分かった。これらのことから、実海域における数値シミュレ ーション時においても多重 σ 座標を適切にとることで、擬似的な鉛直拡散の影響を相当程度低減でき るものと期待できる。

2.1.3 ネスティング機能の導入

(1) 導入の目的

本研究では、青森県下北半島沖合での海水循環を数 km 程度の水平分解能で予測可能なモデル を整備することを目的としているため、ネスティング機能を導入した。ネスティング機能は低解像度の格 子で広域の問題を解き、その計算結果を用いて詳細に観察したい領域について段階的に高解像度の 格子で問題を解く。ここでは北太平洋を最外郭とした2段階のネスティングを用いた下北海域の海水循 環の計算を実施するため、前項で説明した多重 σ 座標系を採用した POM にネスティング機能の導入 を行った。そして、導入したコードを用いて北太平洋とその内部領域である日本周辺海域における数ケ ースの試計算を実施し、結果を相互に比較・検証することで、ネスティング機能の効果を確認した。

(2) 計算条件

1) 海底地形及び水平・鉛直解像度

試計算海域を図 2.1.3.1 に示した。大領域における計算対象範囲は南緯約 12°~北緯約 63°、東経約 107°~西経約 82° の北太平洋とし、水平方向のモデル解像度は約 110 km である。また、小領域の計算を、北緯 21°11′~ 48°57′、東経 120°18′~154°54′の日本周辺海域を対象として実施した。小領域の計算では、水平格子間隔を大領域と同じく約 110 km とした場合と、1/3 の約 37 km にした場合の 2 ケースを行った。なお、大小の両領域とも鉛直方向には最大 31 層を設定し、最小及び最大水深はそれぞれ 10 m と 4000 m とした。なお、多重 σ 座標系の段数は 3 段とし、以下のように設定した。

- 第1段 200 m 深まで 16 層 1~5 層で層厚を指数関数的に増大、6 層目以下は等分割
- 第2段 1000 m 深まで 8 層 等分割
- 第3段 4000 m 深まで 6 層 等分割

2) 計算ケース

大領域では以下の a、b に示す 2 ケースの計算を、小領域ではそれらの大領域計算結果を初期 値・境界条件として c ~ e に示す 3 ケースのネスティング計算を行った。なお、各計算における初期 値・境界条件については次項に述べる。

a. ケース1 (大領域計算)

1月の水温・塩分気候値を初期値とし、1月の風応力の気候値を定常風として与えて熱及び淡水フ

ラックスをゼロとした仮想的条件での計算ケースである。この結果から水平格子点間隔の異なる小領域 計算のケース3及び4の境界条件出力を得た。

b. ケース2 (大領域計算)

1月の水温・塩分気候値を初期値とし、1月~12月の月毎の風応力、熱及び淡水フラックスの気候値を与えた。

c. ケース3 (小領域計算)

大領域のケース1をネスティングしたもの。格子間隔は大領域と同じ約110kmである。

d. ケース4 (小領域計算)

大領域のケース1をネスティングしたもの。格子間隔は大領域の1/3の約37kmである。

e. ケース5 (小領域計算)

大領域のケース2をネスティングしたもの。格子間隔は大領域の1/3の約37kmである。

3) 計算期間

本研究における海水循環場の計算期間は、ケースにより異なる。仮想的条件で大領域を計算したケ ース1では、2000年1月1日を起点として3年間積分し、3年目の結果を1月毎に出力した。一方、 現実的条件で大領域の計算を行ったケース2では、11年間積分し最後の1年の結果を10日毎に出 力した。大領域計算に引き続く小領域計算では、すべてのケースに共通で1年間の積分を行った。

4) 境界条件

本研究では、海面境界条件として、Hellerman and Rosenstein³⁾による風応力とComprehensive Ocean-Atmosphere Data Set(COADS)²の熱及び淡水フラックスデータを使用した。両データとも水平2 度、時間1ヶ月の分解能を有しており、地形データ同様、データ作成プログラムにより各格子点位置の 内挿値を得た。また、海洋内部領域の水温及び塩分は、空間1度、時間1ヶ月の分解能を有する World Ocean Atlas 1998(WOA98)³を基として海面境界値と同様の内挿処理で格子点位置データを 得た。なお、大領域では太平洋の南北西の境界を閉境界として計算を行った。

小領域計算では、大領域計算の結果を初期値・境界条件とする。大領域計算のケース1では、大領 域計算でその積分の最終年である3年目の結果を1月ごとに出力している。ケース1を継承する小領 域計算3及び4では、それらの2002年1月1日の値を初期値とし、大領域の計算から得られる計算 結果を1日毎に内挿した値を境界値としている。一方、大領域計算のケース2では、11年目の結果を 10日毎に出力している。これを継承する小領域計算のケース5では、2011年1月1日の値を初期値と して用い、大領域計算の10日毎の出力をそのまま空間内挿して境界値として用いている。

² http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/coads/

³ http://www.nodc.noaa.gov/OC5/pr_woa.html

(3) ネスティング計算とその結果

前述のように、本研究では大領域と小領域であわせて 5 つのケースについての計算を行っているが、 ここでは本研究の主目的であるネスティング機能の整備に関連した結果について示す。

1) 内挿の整合性の確認

ネスティング計算に入る前に、大領域計算の3年積分後の結果から小領域用の初期値を作成し、水 温と流速について大領域と小領域を重ね合わせ、補間が正常に行われているかを確認した。図2.1.3.2 (1) は、第 1 層水温を用いた比較結果を示しており、上図は大領域の計算結果の上に小領域への内 挿結果を重ね描きしたものである。図中の灰色線が大領域の海岸地形を、緑線が小領域における海 岸地形及び開境界位置を、それぞれ示している。小領域と重なる大領域部分は小領域に隠れて見え ないが、小領域の端の位置でのコンターの重なり具合及び別途行った大領域計算結果の図との比較 から、内挿に問題のないことを確認した。内挿処理時に注意すべき点は、ネスティング計算時には、ネ スティング領域により小さい水平格子間隔を用いることが一般的で、海岸地形が大領域と小領域で異 なる場合が多いことである。小領域における海岸線が大領域の海洋領域にある場合は問題にならない が、逆に陸地にかかる場合、空間内挿のための大領域データが見つけられないことから、小領域の初 期値が設定できず、計算に異常が生じる場合がある。例えば、渤海周辺の水温 0 ℃の領域が該当す る。本研究では、このような問題を回避するため、図 2.1.3.2 (1) 下図に示すように、大領域の境界値を 空間的に外挿した。その結果、渤海領域では、周辺と同様の水温が外挿されている。

図 2.1.3.2 (2) は、九州の南方における第1層流速の大領域(ケース1)と小領域(ケース4)の重ね合わせを示す。赤で示したベクトルが大領域のものであり、緑色のベクトルが小領域のものを示す。若干の差異もあるが、可視化時の問題もあり、流速においても内挿に問題がないと判断された。

図 2.1.3.2 (3) は、X=4500kmとY=5500kmの断面(図 2.1.3.1 に赤線で位置を表示)における大領 域と小領域の水温の重ね合わせを示している。X=4500km 断面では小領域と重なる大領域部分は小 領域に隠れて見えないが、小領域端の位置での等値線の重なり具合から内挿に問題がないものと考 えられる。一方 Y=5500km 断面では、赤線で描かれた小領域における等値線が大領域のカラープロッ トとよく一致しており、上述の結果と合わせて、内挿の整合性に問題のないことを確認した。

2) 仮想的条件におけるネスティング計算結果

本項では、仮想的条件で行ったネスティング計算の結果を比較し、結果の妥当性について検討する。

図2.1.3.3 (1) に水位及び順圧流速場を比較する。大領域計算のケース1の水位は、Y=4000 kmの 緯度に沿ってX=1200~4500 kmの範囲で水位が高く、X=3000 km付近に極大がある。Y=5000 kmよ り北の太平洋側は水位の低い海域となっており、Y=5600 kmの緯度に沿って水位の極小がある。小領 域で111 kmの格子間隔のケース3では境界条件を反映して、南側境界付近の高水位、Y=5000 km 以北の太平洋側の低水位等、全体的傾向はケース1と一致しているが、部分的にはかなりの違いが観 られる。Y=4000 km、X=3000 km付近は水位の極大とはなっておらず、むしろその東西と比較して谷に なっている。また、Y=4600 km、X=3600 kmを極小とする水位の低い海域があり、これはケース1には 見られない顕著な特徴である。その他にも、黄海、対馬海峡、日本海の南部分でケース1 に比べて水 位が高く、特に対馬海峡付近での違いが大きい。一方、格子間隔を37 kmとしたケース4の水位分布 は、空間分解能が上がったことから比較的小規模な現象まで表現されているが、全体的にはケース3と かなり近似している。ケース3では対馬海峡付近で水位が高く、それに連続して日本海の南部分の水 位が高いのに対して、ケース4では日本海の本州沿岸に沿って水位が高くなっている。

順圧流速場に関して、大領域計算のケース1における顕著な特徴は、台湾周辺から九州南方に向かう流れが最も強く、Y=5000km付近の水位の南北勾配の大きい緯度に沿って東流が存在することである。小領域計算ケース3における順圧流速場の特徴は全般的にはケース1と同様であるが、台湾周辺から九州南方に向かう流れの流軸がやや東へ移動し、台湾東海域からY=4600km、X=3600kmを極小とする水位の低い海域にむかう流れが見られること、その水位極小の周りの半時計回り循環流などにケース1との違いが見られる。ケース4における順圧流速場の特徴は全般的にはケース3と近似しているが、対馬海峡を日本海に流入する流れが顕著であり、それに関連して日本海本州沿岸に沿って能登半島付近まで北上する流れが見られることなどの差異も見られる。また本州太平洋岸で関東東海、三陸沖、北海道十勝沖を北上する流れもケース1や3には見られなかったものである。

図 2.1.3.3 (2) に表層水温を比較する。ケース1とケース3を比較すると、境界条件の接続を反映し て境界付近の水温は比較的よく一致している。領域内部では、例えば 10℃の等値線は太平洋側では Y=6000 km の緯度付近にあって両者ほぼ一致しているが、日本海側では相当異なっている。ケース1 では 10℃等値線が対馬海峡付近にあるのに対して、ケース3 では Y=5600~6400 km にあって日本海 南部が 10℃以上で占められている。ケース4でも境界付近の水温はケース3と比較的よく一致している。 領域内部では、日本海での高温域の北上という特徴はケース3と類似しているが、ケース4 では、日本 海の高温化が本州沿岸に沿って起こること、太平洋側の X=4000~5000 km 帯での低温域の顕著な南 下等がケース3との違いである。

3) 現実的条件におけるネスティング計算結果

このケースのネスティングにおいては、ケース2の大領域計算から継承し、ケース5の小領域計算を 行っている。図2.1.3.4 (1) では、水位および順圧流速場の大領域と小領域を比較している。水位の境 界値は大領域からの内挿値が与えられているため、両者は比較的同様の値となっている。しかし、領域 内部の水位分布に関しては、かなりの違いが見られる。例えば日本の本州周辺で見ると、大領域(上 段)では、日本海、太平洋沿岸とも水位が低く、特に太平洋沿岸では-0.3m程度の水位が東西2000km、 南北 1000km ほどの範囲を占めている。一方、小領域(下段)では、日本海は水位ゼロ以上が多くの海 域を占めており、太平洋岸でも本州に張り付く部分の水位はゼロ付近である。大領域のように-0.3m の 水位が見られるのは、本州から500kmも離れた海域である。また格子解像度が3倍違うことで、小領域 では比較的小規模の渦構造が多く見られる。順圧流のベクトルを見ると、台湾東方海域から九州南方 海域に向かう北東流が支配的な流れであること、また、関東の南方海域に反時計回りの循環とY=5000 km に沿う南北の水位勾配に沿って見られる東流等、大小の両領域に共通の特徴が見られる。一方、 大領域には見られない水位分布に対応した小規模な渦が小領域には多く見られ、津軽海峡の日本海 側に見られる渦は大領域では時計回り、小領域では半時計回りと全く逆である、などの違いが見られ る。

図 2.1.3.4 (2) 及び (3) は X=4500 km 及び Y=5500 km における水温の鉛直断面分布の比較図を示している。大領域に比べ小領域では高温域が南方に制限されている以外には大領域と小領域の水

温分布に大きな差は見られないが、小領域では境界面の細かな上下変位が現れており、小規模な渦 による影響が表現されているものと考えられる。

このように、整備した POM のネスティング機能が正常に作動することを確認するとともに、本機能を 用いた計算において空間分解能に見合った小規模な渦構造を分解し表現できることが確認できた。

2.1.4 データ処理支援システムの整備

(1) 作業の目的

ネスティング機能を含む海水循環予測コードの計算には、複数の計算領域に対応した入力データ セットを用意する必要がある。そこで原子力機構が開発した、海水循環予測コードの入力データ作成を 目的とした 2 次元または 3 次元の格子状のデータセットを作成するデータ作成プログラムを整備・改良 した。このデータ作成プログラムは、海底地形データベース、気象・海象データベースのデータベース を備えている。

水深データを作成するプログラムでは、最終的な利用までに手作業で細部を編集する必要があった。 そこで、原子力機構が開発した、水深データをワークステーション上で GUI を用いて直接編集できる水 深データ編集システムを整備・改良した。

(2) データ作成プログラム

データ作成プログラムは 2 つの核となるプログラムから構成されている。一つは水深データ作成プロ グラム make_bathy であり、もう一つが気象・海象データ作成プログラム make_clm である。Make_clm は 3 次元の海象データを取り扱うため多重 σ 座標系に対応させる必要がある。そこで鉛直メッシュ生成 機能では、多重 σ 座標系の各小領域でメッシュ生成パターンを指定できるようにした。指定可能なのは、 1: 等間隔生成、2: 対数的生成、3: 深度の直接指定の 3 種類である。メッシュ生成パターンそれぞれ の模式図を図 2.1.4.1 に示す。また、フローチャートを図 2.1.4.2 に示す。

平面上のデータの空間補間に関しては、曲率最小化補間及び逆距離加重法に基づく補間手法を 採用した。曲率最小化補間を実行するプログラムとしては、GMT (Generic Mapping Tools⁴)が実装す る外部ルーチンsurfaceが存在する⁴⁾。これが直接利用できれば非常に効率的であるが、GMTのソフト ウェアライセンスを確認したところGPL (General Public License⁵, GNU 一般公衆利用許諾契約書を参 照)であるため、直接プログラムに組み込むことができない。そこで、水深データ作成プログラム及び、 気象・海象データ作成プログラムに、GMTのsurface機能を現行プログラムのオプション機能として呼び 出す機能を組み込んだ (図 2.1.4.3)。

(3) 水深データ対話的編集システム

本システムでは、クライアントにFlash Playerアプリケーション、サーバにはJavaベースのWebサーバ (Webコンテナ) Tomcat⁶ と OpenLaszlo⁷ を使用した。図 2.1.4.4 に全体構成図を示す。本システムは、

⁴ http://www. soest.hawaii.edu /gmt/

⁵ http:// www.gnu.org/licenses /gpl.ja.html

⁶ http://tomcat.apache.org/

⁷ http://www.openlaszlo.org/

クライアント・サーバ型のシステムで、データをサーバ内に置いたまま複数人で同時に編集できる。加え て、クライアントPCのWebブラウザとFlashプレイヤーを利用することで、クライアントPCのプラットホームや OSに依存しない自由度の高いシステムを構築した。

水深データ編集画面の全体を図 2.1.4.5 に示す。編集画面には、水深値を取得・設定する編集操作 及びグリッド表示の各種設定を行う「メインコントロールウィンドウ」と、水深データをグリッド状に可視化 する「可視化グリッドウィンドウ」と、編集するデータを変更する「編集対象データ変更ウィンドウ」が現れ る。「メインコントロールウィンドウ」は、「可視化グリッドウィンドウ」で選択した地点の水深値の取得・設定 を行い、併せてファイルの操作を行うウィンドウである。「可視化グリッドウィンドウ」は、現在編集中の水 深データの表示を行い、水深値を設定したい地点を選択するために用いる。「編集対象データ変更ウ ィンドウ」は、水深データ作成プログラムで生成された水深データだけではなく、予め設定ファイルに記 述した複数のグリッドデータを同時に編集するために編集対象データを変更するために用いる。このよ うに、本システムを用いることにより対話的に複数のデータを容易に編集することが可能となった。

参考文献(第2章1節)

- A. F. Blumberg and G. L. Mellor: "Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight", J. Geophys. Res., <u>88</u>, p.4579-4592 (1983).
- 村上智一他: "気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重座標モデルの開発", 海岸工学論文集 <u>51</u>, p.366-370 (2004).
- 3) S. Hellerman and M. Rosenstein: "Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates", J. Phys. Oceanogr., <u>13</u>, p.1093-1104 (1983).
- W. H. F. Smith and P. Wessel: "Gridding with continuous curvature splines in tension", Geophysics, <u>55</u>, p.293-305 (1990).



JAEA-Research 2009-040













図 2.1.2.4 計算開始後 180 日後の塩分分布(多重 σ 座標系) 上段が水面における水平分布、下段が計算領域中央部分における鉛直断面分布

JAEA-Research 2009-040



図 2.1.2.5 計算開始後 180 日後における塩分の鉛直断面分布(沿岸部) (a) 従来のσ座標系、(b) 多重σ座標系、(c) 多重σ座標系(レベルモデル設定)



図 2.1.3.1 太平洋と日本周辺海域の水深分布

上段 北太平洋、中段 日本周辺海域(ネスティング領域、格子間隔:約110km)、 下段 日本周辺海域(ネスティング領域、格子間隔:約37km) 図中の赤線は後の 記述にある各計算結果の断面位置を示す。



図 2.1.3.2 (1) 表層水温の比較(3 年目1月1日)上段 内挿処理のみ、下段 空間外挿処理後

灰色線が大領域の海岸地形を、緑線が海岸地形及び小領域の開境界位置を、それぞれ示す。

JAEA-Research 2009-040





図 2.1.3.3 (1) 水位及び順圧流速場の比較(3 年目 12 月 27 日) 上段 ケース1、中段 ケース3、下段 ケース4







上段 ケース2、下段 ケース5





上段 ケース2、下段 ケース5







図 2.1.4.3 データ処理支援システム





図 2.1.4.4 水深データ対話的編集システムの全体構成図



図 2.1.4.5 水深データ編集画面(全体図)

2.2 海水中放射性核種移行予測コードの整備

2.2.1 海水中放射性核種移行予測モデルの概要

原子力機構が開発・整備を進めている海水中放射性核種移行予測コード(以下、SEA-GEARN)は 多数の粒子群をランダムウォークモデルで追跡することで、放射性核種の移流・拡散を計算するモデル であり、海水循環予測コードによって計算される3次元流速値を指定したタイムステップにおいて入力 し、溶存相・粒子相濃度分布、海底堆積物相濃度分布等を計算する。

海洋中における放射性核種の移行を計算するモデルとしては今まではスキャベンジングモデルが主流であった。スキャベンジングモデルのほとんどは分配係数(K_d)を直接用いて瞬時に粒子化し沈降するモデルであり、溶存相と粒子相が平衡状態にあるという仮定が置かれている。しかしながら、海洋環境中に放射性核種が放出された場合、吸着・脱着過程が平衡状態となるまでには長い時間を要する核種が存在するため放出直後の短期間において相交換を記述することが可能なモデルを採用する必要がある。ここでは以下の式¹⁾を用いて相変化を計算することを試みた。

$$K_d(\infty) = (k_1 / m) / k_{-1}$$
(2.2.1.1)

ここで、 $K_d(\infty)$ は平衡状態における分配係数、 k_1 , k_1 はそれぞれ吸着、脱着の速度定数、mは粒子状物質濃度である。式 (2.2.1.1) より k_1 を固定してmと K_d を実測することにより k_1 が計算できる。現在開発を進めているモデルには以下の仮定を置く。

・粒子状物質は単一の半径と密度を持つ球形粒子の集合体である。

・個々の粒子の運動はその場の流速、乱れ、粒子自身の沈降速度によって決まる。

・海底に沈降した粒子は底層の流速に応じて再浮遊する。

本モデルで採用する3相間の交換過程を図2.2.1.1に示すように定義する。すなわち、溶存物質及び0.8 µmのフィルターを通過する沈降速度を持たない微小粒子を溶存相、沈降速度を持つ大粒子を 大粒子相、海底に堆積した大粒子を堆積物相と定義する。溶存相と大粒子相との間では吸着及び脱 着過程により放射性核種がそれぞれの相へ移行する。海底境界条件としては、溶存相と堆積物相は 吸着・脱着過程を、大粒子相と堆積物相は堆積・再浮遊過程を考慮する。以下に各相における支配方 程式を示す。

(1) 溶存相サブモデル

溶存相サブモデルは、以下の現象を考慮する。

- ・移流、拡散
- ・大粒子相との吸着、脱着
- ・堆積物相との吸着、脱着(海底境界条件)
- ・放射性崩壊による減衰
- ・汚染源からの放射性核種の供給

なお、親核種の崩壊による子孫核種の生成は考慮しないこととする。一般座標における溶存相サブモ
デルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial C_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uC_d) + \frac{\partial}{\partial y} (vC_d) + \frac{\partial}{\partial z} (wC_d)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_d}{\partial z} \right)$$

$$- k_{1m} C_d + k_{-1} m C_s - \lambda C_d + P_d$$
(2.2.1.2)

海表面の境界条件は

$$wC_d - K_z \frac{\partial C_d}{\partial z} = 0 \tag{2.2.1.3}$$

海底面の境界条件は

$$K_{z}\frac{\partial C_{d}}{\partial z} = k_{1s}C_{d} - k_{-1}\frac{A_{s}L\rho_{s}f(1-p)}{\gamma}$$
(2.2.1.4)

となる。ここで、

<i>u</i> , <i>v</i> , <i>w</i>	:水平及び鉛直流速 (m s ⁻¹)
C_d	:溶存放射性核種濃度 (Bq m ⁻³)
C_s	:粒子状物質に吸着した放射性核種濃度 (Bqkg ⁻¹)
K_x, K_y, K_z	:水平及び鉛直拡散係数 (m ² s ⁻¹)
A_s	:堆積物相の放射性核種濃度 (Bqkg ⁻¹)
k_{1m}, k_{1s}, k_{-1}	:輸送係数 (S ⁻¹)
т	:粒子状物質濃度 (kg m ⁻³)
L	:堆積物相中の平均混合深度 (m)
f	:堆積物相中の対象とする小粒子の存在割合 (-)
р	:間隙率 (-)
γ	:堆積物相と作用する海水層の厚さ (m)
$ ho_s$:堆積物相のバルク密度 (kgm ⁻³)
λ	:崩壊定数 (s ⁻¹)
P_d	:溶存放射性核種の外部からの供給 (Bqm ⁻³ s ⁻¹)

輸送係数の算出方法は幾つか提案されている¹⁻³⁾。Periáñez³⁾の算出方法ではモデルキャリブレーションによって調整するパラメータが多く、不確かさも介在する。そこで以下に示すように Nyffeler *et. al.*¹⁾ やOnishi and Trent²⁾で使用されている分配係数を用いた手法を採用する。なお、*k_1*の値は変動が少ないため、固定値を用いる。

$$k_{1m} = k_{-1}K_d m, \quad k_{1s} = k_{-1}K_d \frac{L\rho_s f(1-p)}{\gamma}$$
 (2.2.1.5)

ここで、

$$K_d$$
:分配係数 (m³ kg⁻¹)

である。

(2) 大粒子相サブモデル

粒子状物質に固定された大粒子相サブモデルは、以下の現象を考慮する。

- ·移流、拡散
- ・溶存相との吸着、脱着
- ・沈降
- ・堆積物相への堆積及び再浮遊(海底境界条件)
- ・放射性崩壊による減衰
- ・汚染源からの放射性核種の供給

なお、親核種の崩壊による子孫核種の生成は考慮しないこととする。大粒子相サブモデルの基礎式を 以下に示す。

$$\frac{\partial (mC_s)}{\partial t} + u \frac{\partial (mC_s)}{\partial x} + v \frac{\partial (mC_s)}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial (mC_s)}{\partial z}$$
$$= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_x \frac{\partial (mC_s)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_y \frac{\partial (mC_s)}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z \frac{\partial (mC_s)}{\partial z} \right\}$$
(2.2.1.6)
$$+ k_{1m}C_d - k_{-1}mC_s - \lambda mC_s + P_s$$

海表面の境界条件は

$$(w - w_s)mC_s - K_z \frac{\partial (mC_s)}{\partial z} = 0$$
(2.2.1.7)

海底面の境界条件は

$$\frac{1}{\gamma} \left(w_s m C_s + K_z \frac{\partial (m C_s)}{\partial z} \right) = dep - res$$
(2.2.1.8)

となる。ここで、

w_s :沈降速度 (m s⁻¹)

- *P*_s :粒子状物質に固定された放射性核種の外部からの入力 (Bq kg⁻¹ s⁻¹)
- *dep* :堆積項 (Bqm⁻²s⁻¹)
- res :再浮遊項 (Bqm⁻²s⁻¹)

である。堆積項は

$$dep = \frac{w_s(b)C_s(b)m(b)}{\gamma} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \quad \text{for the } \tau_b < \tau_{cd}$$

$$dep = 0 \qquad \qquad \text{for the } \tau_b > \tau_{cd}$$

$$(2.2.1.9)$$

となる。ここで、

 τ_{cd} :限界堆積シアー応力 (Nm⁻²) τ_b :海底応力 (Nm⁻²)(b):最下層における変数

である。

再浮遊項は

$$res = \frac{MfA_s}{\gamma} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right) \qquad \text{for the } \tau_b > \tau_{cr}$$

$$res = 0 \qquad \qquad \text{for the } \tau_b < \tau_{cr}$$

$$(2.2.1.10)$$

となる。ここで、

- *M* :再懸濁定数 (kg m⁻² s⁻¹)
- τ_{cr}:限界再浮遊シアー応力 (Nm⁻²)

である。*M*は2x10⁻⁴ ~ 2x10⁻⁵、 τ_{cr} は0.2を用いている^{4,5)}。

(3) 堆積物相サブモデル

堆積物相サブモデルは、以下の現象を考慮する。

- ・溶存相との吸着、脱着
- ・大粒子相からの堆積
- ・大粒子相への再浮遊
- ・放射性崩壊による減衰

・汚染源からの放射性核種の供給(海洋を経由しないで堆積物に供給されるもの)

なお、親核種の崩壊による子孫核種の生成は考慮しないこととする。海底堆積物中の放射性核種移 行サブモデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} = k_{1s} \frac{C_d(b)H}{L\rho_s f} - k_{-1}A_s(1-p) + (dep - res) - \lambda A_s + P_A$$
(2.2.1.11)

堆積項と再浮遊項は以下のように表される。

$$dep = \frac{w_s(b)C_s(b)m(b)}{L\rho_s f} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right)$$
(2.2.1.12)

$$res = \frac{MA_s}{L\rho_s} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1\right) \tag{2.2.1.13}$$

(4) 溶存相、大粒子相、堆積物相間の核種濃度交換過程

各相における基礎方程式に付加された外力項の解法について説明する。

簡単のため、2つの相の交換過程を考える。2相間の核種濃度の交換に関し、輸送係数をそれぞれ k_1, k_2 とすると、2つの相における核種濃度を表す方程式は以下のようになる⁶。

$$\frac{\partial A_1}{\partial t} = -k_1 A_1 + k_2 A_2$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial t} = -k_2 A_2 + k_1 A_1$$
(2.2.1.14)

上記方程式は差分法を用いれば簡単に解くことができる。粒子法では各粒子の存在するフェーズを明らかにするためにそれぞれの粒子にラベルを貼る。各タイムステップムtにおいてフェーズ 1 に存在する 粒子がフェーズ 2 へ移動する確率p」は、放射性崩壊と同様に考えることが可能であり、以下のように記述できる。

$$p_1 = 1 - e^{-k_1 \Delta t} \tag{2.2.1.15}$$

同様に、フェーズ2に存在する粒子がフェーズ1へ移動する確率p2は、以下のように記述できる。

$$p_2 = 1 - e^{-k_2 \Delta t} \tag{2.2.1.16}$$

ここで、各粒子に一様乱数(0,1)を発生させ、RAN<pの時に相変化が行われる。このように粒子法では2相間の交換過程は2つの減衰プロセスp1とp2でモデル化することができる。

2.2.2 海水中放射性核種移行予測モデルの機能確認

実海域においてモデルの妥当性検証を実施した。本モデルは青森県六ヶ所村における使用済燃料 再処理施設からの定常時または異常時の放出に対して環境への影響を把握・推定することを目的とし て開発されている。そこで英国セラフィールドにあるBritish Nuclear Fuels (BNFL)の使用済燃料再処 理施設からの¹³⁷Cs 放出再現計算を行い、観測結果と比較することでモデルの妥当性を検証した。

(1) 計算条件

BNFLの使用済燃料再処理施設はアイリッシュ海の北東に位置している(図 2.2.2.2)。アイリッシュ海は南のセント・ジョージ海峡と北のノース海峡によって外海と海水の交換がある。今回の計算では二つの海峡で潮汐を与え潮流場を計算した。

表 2.2.2.1 に POM の計算条件を示す。入力データで用いる WOA98(水温、塩分)の解像度は1度 間隔、COADS(風、熱)の解像度は2度間隔であり、両データの時間分解能は1ヶ月である。これらは 今回の計算で採用した 5 km の空間解像度に対して粗いため、吹送流の再現性の効果は期待できないと考えられる。また、密度流に関しても同様に再現性が得られないと予想されるため POM では月毎に水温・塩分を固定して計算した。

次にSEA-GEARNの計算条件を表 2.2.2.2 に示す。BNFL使用済燃料再処理施設から海洋への ¹³⁷Cs放出量⁷⁾を図 2.2.2.3 に示す。溶存相と粒子相との相互作用を考慮したモデルの効果を検証する ため、CASE-I:溶存相のみを考慮したケース、CASE-II:溶存相と粒子相の相互作用を考慮したケース、 の 2 ケースを実施した。

(2) 計算結果

計算結果との比較のため、1968 年、1973 年、1983 年にMinistry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF) によって観測されたアイリッシュ海における海洋表層 (0-5 m) の溶存¹³⁷Cs 濃度分布を図 2.2.2.4 に示す²。図 2.2.2.3 に示したように、使用済燃料再処理施設からの放出量は 1968 年から増加し、 1975 年にピークとなり、その後減少し 1986 年以降は極少量の放出となっている。

溶存相のみを考慮したモデル (CASE-I) で計算した海洋表層 (0-5 m) の溶存¹³⁷Cs濃度分布を図 2.2.2.5 に示す。濃度の分布傾向は放出点で高く、放出点から離れるにしたがって低くなっており、観測 値と同様の傾向であった。しかし、ほとんどの海域で過大評価となっている。また、南部では 100 Bq m⁻³ 以下の過小評価の海域がある。

溶存相と粒子相の相互作用を考慮したモデル (CASE-II) で計算した海洋表層 (0-5 m) の溶存相¹³⁷Cs濃度分布を図 2.2.2.6 に示す。粒子状物質に吸着した¹³⁷Csが沈降により表層から除去されたため に、CASE-Iと比較して全体的に濃度が低くなった。CASE-Iと同様に南部では 100 Bq m⁻³以下の過小 評価海域があるが、これには幾つかの原因が考えられる。一つは南境界からの北上流が¹³⁷Csの南下 を妨げ、低濃度となったことである。その他の原因は、計算に使用した粒子数が不足していたことである。 今回の計算では放出する最大粒子数を3万個あるいは4万個とした。各タイムステップで放出する粒子 数はそれぞれ 3 個及び 4 個である。SEA-GEARNでは放出する各粒子に濃度を分配して与え、放出す る粒子数の総数が最大粒子数を超えた場合は、既に計算領域中に放出した粒子をランダムに間引き、放出する粒子の濃度と粒子数を調整した後に再度放出する手法を用いている。したがって、間引き回 数が増加すると、本来粒子数が少ない領域では粒子数がさらに少なくなり現実的ではない低濃度領域 が計算される。この問題を解決するためには粒子の間引きが発生しない程度の最大粒子数を設定しな ければならない。

次に図 2.2.2.2 に示した測点 (a)-(d) における表層 (0-5 m) の溶存¹³⁷Cs濃度の時系列変化を図 2.2.2.7 に示す。CASE-I、CASE-IIの計算結果とも観測値を良く再現している。CASE-IIでは粒子状物 質に吸着した¹³⁷Csが沈降により表層から除去されたためにCASE-Iよりも低濃度となり、アイリッシュ海東 海域では再現性が向上した。アイリッシュ海西海域にある測点 (a) ではCASE-IIの結果は他の測点と は異なり過小評価となっている。この原因が何に起因するのかを判断するには、今回用いた少ない観 測結果では議論することが困難である。

² データはhttp://maris.iaea.org/より抽出。

以上の結果より、SEA-GEARN は海洋中に放出された放射性核種の移行挙動を再現することが可能であり、コードの有効性が確認された。

2.2.3 下北海域への適用と適用性の検討

SEA-GEARNのケーススタディとして、2006 年秋季の下北海域における流動場の再解析データを用い、平常時の放出を想定して、再処理施設の海洋放出口から仮想的に³Hを放出し、³Hの移行パターンを検証した。また、¹³⁷Csを仮想的に放出し、吸脱着モデルの応答を検証した。

(1) 計算条件

下北海域における流動場の再解析データには、京都大学が開発した海洋大循環モデル(以下、京 大海洋モデル)をベースとし、当海域に適応させたモデルによって計算された結果を使用した。京大海 洋モデルの特徴は、4次元変分法によるデータ同化手法を用いて観測データを同化し、観測結果と整 合した再解析データを作成するものである。下北海域の循環場を作成するために、初めに北太平洋全 域と南太平洋の一部を対象海域とする水平解像度東西1/6°、南北1/8°の北太平洋モデル(105°E-75° W、10°S-65°N)を計算する。二番目に、日本海、オホーツク海、東シナ海の一部を含む北西部北太平 洋海域(122.7°E-166°E、25.5°N-52.75°N)を対象としてデータ同化を行う。北西部北太平洋モデルの解 像度は北太平洋モデルと同様である。水平方向の境界条件には北太平洋モデルの結果を用いた。三 番目に、ネスティング手法を用いて北西部北太平洋モデルから日本周辺海域(北海道から九州まで) を包囲する水平解像度東西1/18°、南北1/24°の日本近海モデル(127.3°E-155.4°E、30.6°N-47.7°N)を計 算する。最後に、ネスティング手法を用いて日本近海モデルから下北海域を包囲する水平解像度東西 1/54°、南北1/72°の下北近海モデル(138.5°E-145.6°E、38.5°N-43.3°N、図2.2.2.8)を計算する。下北近 海モデルの水平解像度は北緯41度付近で東西約1.55 km、南北約1.54 kmである。鉛直方向の分解 能は全ての計算領域で同一とし、海面付近の厚さは 4m、鉛直 78 レベルである。下北近海モデルの 計算領域がSEA-GEARNの計算海域に該当する。計算された再解析結果は、3時間毎に出力させ、 SEA-GEARNの入力データとした。データ同化計算の詳細に関してはIshikawa et al.⁸⁾を参照された W.

ケーススタディでは再処理施設からの放出量が最も多い³Hと、SEA-GEARNの吸脱着モデルの性能 を評価するために¹³⁷Csを用いた。放出点は再処理施設の放出口の位置とし、海表面に放射性核種を 投入した。放出濃度は、再処理事業変更許可申請書⁹⁾に記載されている放出管理目標値を参考にし た。なお、¹³⁷Csについては申請書に記載されている「その他のα線を放出しない核種」の放出管理目標 値の全量を¹³⁷Csの放出濃度と仮定した。³Hの仮想放出条件は、一定濃度で6時間継続する放出を毎 日繰り返す間欠放出とした。放出量は、間欠放出を毎日継続した場合の年間積算放出量が放出管理 目標値に一致するように、8.2×10¹² Bq h⁻¹とした。SEA-GEARNの計算に使用したパラメータの詳細に ついては、小林ら¹⁰⁾を参照されたい。なお、本研究では京大海洋モデルが計算した流速データ等を直 接入力するために、原子力機構が開発したSEA-GEARNの水平及び鉛直座標の定義(Arakawa-Cグリ ッド、多重σ座標系)を改良し、京大海洋モデルとの整合性を高めた定義(Arakawa-Bグリッド、z座標 系)に変更した。 (2) 結果と考察

図 2.2.2.9 にSEA-GEARNによって計算された 2006 年 11 月 7 日 16 時における表層³H濃度分布を 示す。³Hは溶存態として海水と同様の移行挙動を示すため、海流によって輸送される。放出された³H の多くは海岸に沿って南下するが、北上して尻屋崎で離岸し、夏から秋に卓越する渦モードに取り込ま れる³Hも存在する。次に図 2.2.2.8 に示す尻屋沖、小田野沢沖、平沼沖、三沢沖に対応するグリッドに おける表層³H濃度の経時変化を図 2.2.2.10 に示す。10月1日から16日及び11月5日から7日まで の期間(ハッチ部分)は放出口よりも北で高濃度域が分布し、それ以外の期間では放出口よりも南で高 濃度域が分布する。特に放出口に最も近い平沼沖では高濃度のピークが出現し、最大濃度は平沼沖 で11月11日に82.6 Bg Г¹であった。再処理施設の運転開始前の下北沖海域の表層³H濃度は100-240 mBg l⁻¹であり¹¹⁾、放出管理目標値を用いた平常運転時の沿岸域における³Hの最大濃度はバック グラウンド値と比較すると高くなる。ただし、青森県¹²⁾は安全審査に準拠して計算した放射性核種の年 間平均値から、海水中³Hの施設寄与による増分として300 Bq l⁻¹を予測しており、平沼沖における最大 濃度は青森県が予測した値の約28%である。また、計算で得られた平沼沖の最大濃度(82.6 Bq l⁻¹)を 用いて海産物摂取に伴う最大個人線量を推定した。本計算では、対象者が摂取する海産物は、 漁獲時に常に平沼沖の最大濃度に等しい海水に存在し、対象者は、352gの海産物(再処理事業 変更許可申請書に記載された海産物の摂取量[魚類:230、海藻類:40、貝類:11、頭足類: 65、甲殻類:6、単位は全てg d⁻¹]の合計)を毎日欠かさず摂取する、というシナリオを設定 した。その結果、個人に対する内部被曝線量は 0.45 μSv yr⁻¹であり、放射線障害防止法による 一般公衆の線量限度である1mSv yr⁻¹よりも十分低い値である。

¹³⁷Csの仮想放出計算に関しては、¹³⁷Cs溶存相のみに存在する場合、吸脱着モデルを考慮した場合、 の2つの計算結果にほとんど差は認められなかった。すなわち、¹³⁷Csは大粒子相に吸着して海底に堆 積することはほとんど無く、溶存相として移行する結果となった。計算期間中にランダムウォークモデル で用いた粒子数の形態別経時変化を図2.2.2.11に示す。計算の終了時に大粒子相及び堆積物相とし て存在する粒子の割合は、それぞれ全体の約1%(大粒子相)及び4%(堆積物相)であった。本計算で ¹³⁷Csの海底堆積量が少ない主な理由は短い評価期間にある。評価期間が数十年に及べば、徐々に 堆積濃度は増加することが考えられるため、堆積物相が果たす長期的影響を詳細に評価する必要が ある。吸脱着モデルを考慮した計算で得られた沿岸域での最大濃度は平沼沖で0.96 mBq *l*⁻¹であった。 再処理施設運転開始前の2001年における下北海域の表層¹³⁷Cs濃度は1.1-2.6 mBq *l*⁻¹であった¹¹⁾。 したがって、申請書に記載されている「その他のα線を放出しない核種」の放出管理目標値の全量を

以上のケーススタディより、再処理施設の海洋放出口から放出される放射性廃液の沿岸域における 拡散予測は、データ同化手法とネスティング手法を用いた海洋大循環モデルに、本研究で整備した海 水中放射性核種移行予測コード SEA-GEARN を組み合わせることにより、実用化レベルに近づきつつ あることを明らかにした。

参考文献(第2章2節)

- U. P. Nyffeler, et al.: "A kinetic approach to describe trace-element distribution between particles and solution in natural aquatic systems", Geochim. Cosmochim. Acta, <u>48</u>, p.1513-1522 (1984).
- 2) Y. Onishi and D. S. Trent: "Mathematical simulation of sediment and radionuclide transport in estuaries", NUREG/CR-2423, Richland, Washington, Pacific Northwest Lab. (1982).
- R. Periáñez: "Redissolution and long-term transport of radionuclides released from a contaminated sediment: a numerical modelling study", Estuarine, Coastal and Shelf Sci., <u>56</u>, p.5-14 (2003).
- S. Clarke and A. J. Elliott: "Modelling suspended sediment concentrations in the Firth of Forth", Estuarine, Coastal and Shelf Sci., <u>47</u>, p.235-250 (1998).
- W. Roberts, et al.: "Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats", Continental Shelf Res., <u>20</u>, p.1079-1097 (2000).
- R. Periáñez and A. J. Elliott: "A particle-tracking method for simulating the dispersion of non-conservative radionuclides in coastal waters", J. Environ. Radioactivity, <u>58</u>, p.13-33 (2002).
- C. N. Smith, et al.: "MEAD (part II) Predictions of radioactivity concentrations in the Irish Sea", J. Environ. Radioactivity, <u>68</u>, p.193-214 (2003).
- 8) Y. Ishikawa, et al.: "High-resolution synthetic monitoring by a 4-dimensional variational data assimilation system in the northwestern North Pacific", J. Marine Sys., (2007) (in press).
- 9) 日本原燃株式会社: "再処理事業変更許可申請書", 日本原燃株式会社, (1996).
- 10) 小林卓也 他: "下北沖海域における海洋中放射性核種移行予測システムの構築とケースス タディ",日本原子力学会和文論文誌, 7, p.112-126 (2008).
- J. Misonoh and N. Inatomi: "The level of radioactivities in marine environment off the pacific coast of Aomori Prefecture, Japan", International Symposium on Radioecology and Environmental Dosimetry. Aomori, Japan, p.372-376 (2004).
- 12) 青森県: "原子力施設環境放射線調査報告書(平成 17 年度報)", 青森県原子力センター,
 (2006).
- 13) 小林卓也: "海洋における放射性核種の移行モデルについて", 放射線科学, <u>51</u>, p.53-57 (2009).

表 2.2.2.1 POM の計算条件

領域	北緯 52.8 度-北緯 55.2 度, 西経 2.8 度-西経 6.4 度
解像度 / 格子数	5 km x 5 km / 80 x 90 x 15
入力データ	ETOPO2 (水深)
	WOA98(水温・塩分)
	COADS(風・熱)
開境界	北・南境界から潮位を与える (NAOTIDE-global)

表 2.2.2.2 SEA-GEARN の計算条件

放出点	北緯 54.4 度, 西経 3.6 度 (水深: 0 m)
放出期間	1/Jan./1965 – 1/Jan./1985(2 年間の流速データの繰り返し)
放出核種	137Cs (K _d = 2.0e3)
粒子状物質濃度	$1.0e-4 (kg/m^3)$
入力データ間隔	2 時間
計算ケース / 最大粒子数	(I) 溶存相のみ/30,000
	(II) 溶存相と粒子相の相互作用を考慮 / 40,000



図 2.2.1.1 3 相間交換過程の模式図



水深分布をカラーコンターで、使用済燃料再処理施設からの¹³⁷Cs放出地点を星印で示す。



図 2.2.2.3 BNFL使用済燃料再処理施設から海洋への¹³⁷Cs放出量



図 2.2.2.4 表層¹³⁷Cs濃度分布(観測値)



図 2.2.2.5 表層¹³⁷Cs濃度分布(計算値:溶存相のみを考慮)



図 2.2.2.6 表層¹³⁷Cs濃度分布(計算値:溶存相と粒子相の相互作用を考慮)



(a) 4.2N, 5.1W, (b) 54.2N, 4.1W, (c) 53.3N, 3.4W, (d) 54.4N, 3.5W



図 2.2.2.8 SEA-GEARN の計算領域



図 2.2.2.9 表層³H濃度分布(2006/11/7 16:00)¹³⁾



図 2.2.2.10 表層における³H濃度の経時変化¹³⁾



図 2.2.2.11 吸脱着モデルを考慮したケースによる粒子数の形態別経時変化 実線が溶存相、破線が大粒子相、一点鎖線が堆積物相を示す

3. 沈降粒子に関する特性データの取得

3.1 下北海域における沈降粒子に関する特性データについて

第2章で述べた海水中放射性核種移行予測コード SEA-GEARN は、溶存相、大粒子(LPM: Large Particulate Matter)相、堆積物相の3つのサブモデルで構成されており、海水中での溶存相--大粒子相間の放射性核種の吸脱着量や、これらの核種の海底への移行量を予測することが可能である。

しかしながら、海洋環境における粒子状物質の特性パラメータ(表 3.1.1)は、対象海域の地理的特徴 や、現場周辺の流向・流速、生物相・生産量といった様々な要因によって大きく変化する。このため、 粒子状物質の輸送を考慮した物質移行予測を精度よく行うためには、対象海域において実測した粒子の 特性をより詳細に反映させる必要がある。その一方で、モデルの時空間的な解像度や計算処理量には限 度があるため、導入すべき粒子特性パラメータをある程度簡略化する必要がある。

本章では、下北海域における沈降粒子特性パラメータについて検討するとともに、当該予測コードの 運用版プロトタイプで用いるべき最適値をまとめる。

3.2 複数の相における相互作用に関するパラメータ

3.2.1 熱力学的輸送係数

本予測コードでは、Nyffeler *et al.*¹⁾ が提唱するモデルを適用し、LPMが溶解・分解する際の熱力学的 輸送係数 (k_I : 単位s⁻¹) は、時間的な変化が十分に小さく、対象とする元素ごとの固有値として表すこと ができるものとしている。この仮定に基づけば、溶存物質がLPM相に移行する際の熱力学的輸送係数 (k_{Im} : 単位s⁻¹) は、分配係数 (K_{i} : 単位m³ kg⁻¹)、海水中のLPM濃度 (m: 単位kg m⁻³) 及び k_I を用いて、式 (3.2.1.1) で表すことができる。

$$k_{1m} = k_{-1} K_d m. \tag{3.2.1.1}$$

また、溶存相から堆積物相に移行する際の熱力学的輸送係数 (kls) は、式 (3.2.1.2) で表される。

$$k_{Is} = k_{-1}K_d \frac{L\rho_s f(1-p)}{\gamma}$$
(3.2.1.2)

式 (3.2.1.2) において、*L*は堆積物表層の混合深度 (単位 m)、 ρ_s は堆積物の現場密度 (単位 kg m⁻³)、 f は堆積物中の小粒子の(移動可能な成分の)割合 (無単位)、 γ は堆積層と作用する海水の厚さ (単位 m)、pは堆積物中の空隙率 (無単位) であり、詳細については後述する。式 (3.2.1.2) には、これらの 堆積物の特性に関するパラメータが考慮されるものの、基本的な概念は式 (3.2.1.1) と共通である。

3.2.2 分配係数

分配係数 (*K_d*) は、粒子中の元素(または核種)濃度を水中の濃度で除すことにより得られる。一般 に*K_d*は、対象とする元素の海水中での存在状態を反映するため、理論上は元素ごとの定数を取る。しか しながら、Abril and Fraga²⁾ は、特に吸着性元素の分配係数が、粒径、溶媒のイオン強度、及び粒子濃度 に伴って変化することを指摘している。例えばプルトニウム (Pu) のように、天然における存在度が極 めて低い一方で、粒子への親和性が高い元素が海水中に放出された場合、粒子の「核」となる鉱物結晶

に含まれる元素の量ではなく、粒子表面の吸着部分の量が*K*_dを決定する。このため、特に吸着性元素に ついては、対象海域における*K*_dの変動要因を理解しておく必要がある。そこで本項では、天然に存在す る吸着性元素のうち、マンガン (Mn)、コバルト (Co) 及びセリウム (Ce) を指標として、粒子表面に吸 着していると考えられる「過剰な」成分の濃度(対象元素の粒子中全濃度と鉱物起源と考えられる濃度 の差)を求め、これらの*K*_d値について考察する。なお、Puなどのイオン交換性吸着元素と、本実験で用 いる酸化還元性吸着元素では、粒子への吸着機構が異なるが、対象海域での海水の化学特性(イオン強 度等)の変化が小さく、吸着度の変化が主に粒子物性の変化に起因すると考えられたため、粒子中の存 在度が高い後者を指標元素として用いた。

*K_d*の検討には、表 3.2.1 及び 3.2.2 に示す 4 観測点で得られた海水とLPMの分析データを用いた。海 水試料はニスキン採水器を用いて採取し、pHを適宜調整しながらイミノ二酢酸キレート樹脂(3M社製, Empore[®] 抽出ディスク 2271)を用いて目的元素を濃縮・精製した³⁾。LPM試料の採取は、海水採取時と 同地点、同水深に現場濾過装置(McLane Oceanographic Laboratory社製, WTS-6-1-142LV)を設置して得た。

LPM試料は孔径 0.8 μ m、直径 142 mmのメンブラン製フィルター(Millipore[®] ATTP 142)上に捕集され、 フィルターごとテフロン製の密閉容器に入れた後、マイクロウェーブ分解装置(Milestone-General社製; ETHOS-D型)で分解を行った。フィルター試料の分解には、硝酸、フッ化水素酸、及び過酸化水素水を 用いた。分解液をホットプレート上で一旦蒸発乾固した後、5% 硝酸溶液となるように再希釈し、元素 分析に供した。上記で得た試料中のAl、Mn、Co、La及びCe濃度は、ICP発光分析装置(セイコーSII社製, SPS-7700型)またはICP質量分析装置(セイコーSII社製, SPQ-9000S型)を用いて測定した。海水の分析 によって得られる元素濃度は、溶存態と懸濁態の合計量を示すため、 K_d の計算に用いる「溶存態」の元 素濃度は、海水の分析値からLPM態の元素濃度を減じた値とした。

なお本項では、LPM 濃度が局所的に変化する恐れのある表層(100 m 以浅)については、評価の対象 外とした。

Mn、Co及びCeの過剰成分の見積もりには、下記の式を用いた。

C _{Mnxs}	$= C_{Mn} - 115 \times C_{Al},$	(3.2.2.1)
C _{Coxs}	$= C_{Co} - 3.03 \times C_{Al},$	(3.2.2.2)
C_{Cexs}	$= C_{Ce} - 2.0 \times C_{La}.$	(3.2.2.3)

式 (3.2.2.1) ~ (3.2.2.3) において、 C_{Mnxs} 、 C_{Cass} 及び C_{Cass} は、それぞれ過剰分のMn、Co及びCe濃度(単 位 ppm) を、 C_{Mn} 、 C_{Co} 、 C_{Ce} 、 C_{Al} 及び C_{La} は、粒子中のMn、Co、Ce、Al及びLa濃度(単位ppm, C_{Al} のみ単 位 %)を意味する。係数115、3.03及び2.0は、それぞれ、平均地殻中のMn/Al比 (ppm/%)、Co/Al比 (ppm/%)、 Ce/La比 (ppm/ppm) である⁴⁾。地殻中のMn/Al比、Co/Al比及びCe/La比は最大で2割程度の偏差を持つと 考えられるが、これらによって生じる C_{Mnxs} 、 C_{Cass} 及び C_{Cexs} の変動幅は、Kdのそれに比べて十分に小さい ことから、定数として用いた。

図 3.2.1 (a) に、下北海域で 2004 年に得たMn、Co及びLaの K_d と粒子濃度の関係を示した (K_d は対数で 表示)。同図において、保存性成分であるAlとLaの K_d についても併せてプロットした。いずれの元素も、 K_d 値は一桁程度の変動幅を持つが、 K_d 値と粒子濃度との間に有意な連動性は認められなかった。

一方、過剰成分のKa値は、Mnで粒子濃度の増加とともに増大する傾向が見られた(図 3.2.1 (b))。本

項で指標とした吸着性元素の中でも特に酸化・還元環境の変化の影響を受けやすいMnについては、粒子 に吸着する部分のKaが粒子特性とともに変化したと考えられる。

ある吸着性元素について、海水中の溶存濃度を C_w 、対象元素の粒子中の濃度を C_t 、粒子表面に吸着している元素の粒子中の濃度を C_s 、鉱物の結晶を構成するなど、吸脱着に関与しない部分に存在する元素の粒子中の濃度を C_c (単位は全てmol kg⁻¹またはBq kg⁻¹)とすると、以下の式が成り立つ。

 $K_d = C_t / C_w = (C_s + C_o) / C_w \qquad (3.2.2.4)$

粒子の濃度(単位体積の海水に含まれるLPMの乾燥質量)を $m (\text{kg m}^{-3})$ 、粒子1個当たりの体積を $v (\text{m}^{-3})$ 、 粒子の密度(乾燥密度)を $\rho (\text{kg m}^{-3})$ 、単位体積当たりに存在するLPMの個数を $n (\text{ll m}^{-3})$ とすると、

 $m = n \nu \rho, \tag{3.2.2.5}$

が成り立つ。粒子 1 個当たりの表面積を $s(m^2)$ とし、単位体積の海水中で粒子化する吸着性元素の量 (Q_s : mol m⁻³またはBq m⁻³) が、そこに存在する粒子の表面積に比例すると仮定すると、

 $Q_s = \alpha s n,$ (αは定数) (3.2.2.6)

が成り立つ。さらに、平均粒径をd(m)とすると、式 (3.2.2.5)と (3.2.2.6)により、

$$Q_s = \alpha s m / (v \rho) = 6 \alpha m / (d \rho),$$
 (3.2.2.7)

が成り立つ。 C_s は、 Q_s を粒子濃度mで除した平均値なので、

$$C_s = 6 \alpha / (d\rho), \tag{3.2.2.8}$$

と表せる。過剰Mnの場合、式 (3.2.2.4) において $C_c = 0$ となるので、式 (3.2.2.4) と (3.2.2.8) より、

(3.2.2.9)

$$K_d = 6 \alpha / (d\rho C_w),$$

となり、 K_d はd、 ρ 及び C_w の関数となる。このため、理論上は、mは K_d に影響を与えないことになる。詳細は後述するが、 ρ の季節変動による相対誤差は 2% 程度と小さく、 C_w の時間変化も十分に小さいと考えられるので、 K_d を変化させる因子は実質的にdのみとなる。この結果から、図 3.2.1 (b) で見られた K_d の変化は、LPM濃度の変化が直接起因したものではなく、海水中の粒子径が変化したためであると結論付けられた。さらに、LPM濃度の増加とともに K_d 値が増加傾向を示すという特徴から、粒径の小さな粒子が、高濁度層を形成していることが示唆された。

図 3.2.1(b) における K_d の変動範囲から、dの変動幅を知ることができる。同一の元素について得られる任意の2つの分配係数を K_{dl} 及び K_{d2} とし、それぞれに対応する粒径と密度を、 d_l 及び d_2 、 ρ_l 及び ρ_2 とすると、式(3.2.2.9)から、

$$\frac{K_{d_1}}{K_{d_2}} = \frac{d_2 \rho_2}{d_1 \rho_1},$$
(3.2.2.10)

が成り立つ。図 3.2.1(b) において、過剰 $Mn \circ K_d$ が最大となる場合を K_{dl} 、最小となる場合を K_{d2} とし、便 宜上 $\rho_l = \rho_2$ とすると、 $K_{dl}/K_{d2} = d_2/d_l$ の値として 5.5 が得られた。この結果から、dがとり得る値の最大値 は、最小値の5.5倍程度であると見積もられた。

3.3 大粒子 (LPM) 相に関するパラメータ

3.3.1 LPM 濃度

図 3.3.1 に、2006 年 5 月から 6 月にかけて下北沖(北緯 41 度 00 分)で 3 度にわたって観測したLPM 濃度 m (kg m⁻³, 図中ではmg m⁻³)の東西断面を示した。この時期は、表層の生物活動が活発な「春季ブ ルーム」の終息期で、さらに、表層の海流が「沿岸モード」から「渦モード」へと移行する時期である ことから、対象海域のLPM濃度の変動幅が最も大きい時期と考えられる。そこで、この時期のLPM濃度 分布を、当該海域におけるLPM濃度の季節変化を概ね網羅する代表値として扱うこととした。

LPM濃度は、超低濃度濁度計(アレック電子社製,ATU6-CMP型)で測定した濁度から求めた。濁度からLPM濃度への換算は、上述の現場濾過実験によるLPM捕集量と、同じ条件で観測した濁度から関係式を作成して行った。LPM濃度測定時の海水の特性を示すため、図 3.3.1 には、LPM濃度と同時に観測した海水のポテンシャル密度 (*o*) の分布を併せて記した。

下北海域における LPM 濃度分布の特徴は、下記 (1) ~ (4) のとおりであり、図 3.3.2 のように簡略化 することができる。

- (1) 表層(水深0~50m)では、生物生産や陸域からの物質供給の影響により局所的に高い LPM 濃度が観測された。表層での LPM 濃度は、表層に流入する海水の特徴(親潮系水または暖流系水) によって異なっていた。
- (2) 亜表層(水深 50m から北太平洋中層水の上部)では、生物起源粒子の分解や下層からの LPM 濃度の低い海水の供給により、LPM 濃度は深さとともに減少した。
- (3) σ_{θ} = 26.7 前後の密度を持つ海水中では、LPM濃度は 2.89×10⁵ kg m³程度に収束した。なお、この水 塊は北太平洋中層水 (NPIW: North Pacific Intermediate Water) と定義される (例えばReid⁵⁾)。
- (4) 底層では、上層の海水の特徴とは無関係に LPM 濃度が深さと共に増加した。この濃度増加は、海 底堆積物の再懸濁によって生じたと考えられる。

上記 (1) について、表層(水深 50 m以浅)における*m*を評価する第一段階として、そこに流入する海水が親潮系水(塩分 \leq 33.7 として定義, Yasuda⁶⁾による)と暖流系水(同 > 33.7 として定義)のいずれかを判断する必要があり、各条件において、*m*と水深z(m)との関係は、

(表層,暖流系水流入時)

 $m = (-9.62 \times 10^{-7}) \times z + (1.53 \times 10^{-4}) \qquad 0 < z < 50, \qquad (3.3.1.1)$

 $m = (-1.74 \times 10^{-7}) \times z + (1.13 \times 10^{-4}) \qquad 50 < z < z^*, \qquad (3.3.1.2)$

(表層,親潮系水時)

$m = (-6.03 \times 10^{-7}) \times z + (7.75 \times 10^{-5})$	0 < z < 50,	(3.3.1.3)
$m = (-1.09 \times 10^{-7}) \times z + (5.28 \times 10^{-5})$	$50 < z < z^*$,	(3.3.1.4)

と表すことができる。水深z*は、式(3.3.1.2)において485m、式(3.3.1.4)において218mである。 また、上記(4)のとおり、底層では、堆積物の再懸濁に起因すると思われる高濁度層が発達しており、 海底の水深をz_Bとすると、mの分布は下記の式で表される。

(中深層)

$m = 2.89 \times 10^{-5}$	$z^* < z < (z_B-55),$	(3.3.1.5)
$m = (3.12 \times 10^{-6}) \times (z - z_B) + (1.98 \times 10^{-4})$	$(z_B-55) < z < z_B.$	(3.3.1.6)

下北沖沿岸域において、この層は55m程度の厚さを持っており、この値は、式(3.2.1.2)の γ(堆積 層と作用する海水の厚さ)に相当する。上記のmの鉛直分布の簡略式は、下北海域における生物地球化 学的な条件とも矛盾がなく、現段階では最適なパラメータであると考えられる。

3.3.2 粒子密度

沈降粒子を構成する生物起源成分の中には、低密度な有機物の他に、陸起源成分と同様に高い密度を もつ生物起源ケイ酸塩や炭酸塩が存在し、特に生物起源ケイ酸塩は、北西部北太平洋における沈降粒子 の主成分であることが知られている。これらの成分の密度と組成比を考慮して、LPMの乾燥密度(水分 を考慮しない乾燥密度: ρ_{mdv})を式 (3.3.1.7)のとおりに表すことができる。

$$\rho_{m-dry} = \frac{100}{(C_{lith} / \rho_{liih}) + (C_{carb} / \rho_{carb}) + (C_{opal} / \rho_{opal}) + (C_{OM} / \rho_{OM})} (3.3.2.1)$$

上記において、*C、*ρはそれぞれ濃度 (%) と乾燥密度 (kg m⁻³) を、下付き文字の*opal、lith、carb*及び *OM*は、それぞれ生物起源ケイ酸塩、陸起源ケイ酸塩、生物起源炭酸塩及び有機物を意味する。下北海域 におけるLPMの ρ_{m-dry} の季節変化を見積もるため、*C*の各値として、Otosaka and Noriki⁷⁾ が下北海域の水 深 600 m層で得た時系列データを、また、 ρ_{OM} として 1.06 kg $\Gamma^{1.8)}$ を、 ρ_{opal} 、 ρ_{carb} 及び ρ_{lith} の各値として、 それぞれ、2.10、2.71 及び 2.71 kg $\Gamma^{1.9}$ を式 (3.3.2.1) に代入した。下北海域における ρ_{m-dry} は、粒子束の 変化に関わらず変動幅が小さいため(図 3.3.3)、同図の ρ_{m-dry} の平均値と標準偏差、

$$\rho_{m-dry} = 2.18 \pm 0.06, \tag{3.3.2.2}$$

を、 ρ_{m-dry} の最適値とした。前述のとおり、 ρ_{m-dry} は乾燥状態での粒子密度であり、「ストークスの式」で 沈降速度を算出するには、海水柱内での沈降粒子の空隙率 (p_m)を考慮した湿密度 ρ_m を求める必要があ る。沈降時の p_m に最も近い値は、粒子捕集時の湿容積 V_{coll} (試料捕集容器内の試料の高さから算出)、捕 集した粒子の乾燥重量 M_{coll} 、及び粒子の乾燥密度 ρ_{m-dry} を用いて、次式で求めることができる。

$$p_m = 1 - \frac{M_{coll}}{V_{coll}\rho_{m-dry}},$$
 (3.3.2.3)

$$\rho_m = p_m \rho_w + \rho_{m-dry} (1 - p_m). \tag{3.3.2.4}$$

式 (3.3.2.4) において、 ρ_w は海水の密度 (1.025 kg Γ^1) である。Otosaka and Noriki⁷⁾ では、 M_{coll} 及び V_{coll} 値について報告されていないため、同じ方法で 2003 年 6 月から同年 10 月にかけて表 3.2.1 の観測点 201 でセジメントトラップ実験を行い、

$$p_m = 0.967 \pm 0.016, \quad \rho_m = 1.06 \pm 0.02,$$
 (3.3.2.5)

を実測した。図 3.3.3 で示した ρ_{m-dry} と同様に、 ρ_m の変動幅も 2%程度と、粒子束の変化に比べて小さかった。

3.3.3 沈降速度

海水中から除去される粒子の沈降速度 (w_s) をより正確にパラメータ化することは、本予測コードにおいて物質の鉛直輸送量を精度よく見積もる上で重要である。w_sの平均値は、海水柱内のLPM濃度とセジメントトラップ実験で得た沈降粒子束の商として表すことも可能であるが、実際の計算では、ストークス則(式 (3.3.1))で沈降速度を与えている。

$$w_s = \frac{d^2(\rho_m - \rho_w)g}{18\eta},$$
 (3.3.3.1)

 η は海水の粘度 (1.25×10³ Ns m²)、gは重力加速度 (9.81 m s²) である。本項では、式 (3.3.3.1) に導入す べき粒径範囲を検討するとともに、粒子束実測法とストークス則法の 2 つの異なる計算法で得られた w_s 値を比較する。

図 3.3.4 に、観測点 201 の水深 1000 mと 1400 mの 2 層で得られた沈降粒子について、粒度分布計測装置(島津製作所社製, SALD-2000A型)を用いて測定した粒度分布を示す。水深 1000 m層における平均粒径(メディアン径)は、51 μ mであった。第 3.2.2 項で示したとおり、粒径(d値)はこのメディアン径を中心に 5 倍程度の変動幅で分布することと、図 3.3.4 の粒径分布を併せて考慮すると、d値の変動幅は 23 ~115 μ mと見積もることができる。さらに、これらのd値と、式(3.3.2.4)の ρ_m 値を式(3.3.3.1)に代入すると、 w_s の平均値と変動範囲を見積もることができる。

下北沖の水深 1000 m層におけるdの平均値を用いて式 (3.3.3.1) によって算出した w_s 値は 5.12×10⁻⁵ m s⁻¹ で、粒子東実測法で見積もった範囲 (5.49×10⁻⁶~2.48×10⁻⁴ m s⁻¹) とよく一致した (表 3.3.1)。d値を最小、 最大としたときの w_s 値は、それぞれ 7.85×10⁻⁵及び 1.94×10⁻³ m s⁻¹と見積もられ、粒子東実測法で得た範囲 と概ね一致した。セジメントトラップによる粒子束の見積もりは、捕集効率の過不足により、実際の粒 子束と不整合が生じる場合がある(例えば、Gardner *et al.*¹⁰⁾)が、少なくとも下北沖においては、いず れの方法でも「現実的な」沈降速度が得られることがわかった。

3.4 堆積物相に関するパラメータ

3.4.1 堆積物表層の混合深度

堆積物表層の混合深度 (L:単位 m) は、放射能を含む海水が表層堆積物への移行に影響を及ぼす深さ を知る上で重要である。堆積物表層における混合は、化学的な変質などによる鉛直混合に加えて、底棲 生物によるかく乱 (bioturbation)の影響を受けるため、鉛直拡散係数等による理論的な見積もりは困難 である。しかしながら、このかく乱の深度は、堆積物表層における過剰鉛-210 (²¹⁰Pb_{xs}; 堆積物中の鉛-210 濃度とラジウム-226 濃度との差として定義)の成層深度として現れる (例えば Sharma *et al.*¹¹⁾)。そこ で、表 3.4.1 に示す下北沖の3 観測点で採取した海底堆積物を1 cm毎に裁断し、各層の²¹⁰Pb_{xx}濃度を γ 線 スペクトロメトリーによって実測した結果、

$$L = 0.045 \pm 0.013$$
,

(3.4.1.1)

を得た。間隙水を通じた²¹⁰Pbの鉛直輸送(例えばSantschi and Rowe¹²⁾)も指摘されているが、この効果 は生物かく乱によるそれに比べて十分に小さく、上記は現段階におけるLの最適値と考えられる。

3.4.2 粒子密度

堆積物の乾燥密度 ρ_{s-dry} は、LPMの乾燥密度 (ρ_{m-dry}) と同様に、堆積物の主要成分の組成を考慮して検 討した。ここでは、観測点 201 で 2003 年に採取した堆積物試料中のアルミニウム濃度 (C_{Al} : 単位%)及 びカルシウム濃度 (C_{Ca} : 単位%)を、式 (3.4.2.1)及び式 (3.4.2.2)に適用し、陸起源鉱物濃度 (C_{luh} : 単 位%)と生物起源炭酸塩の濃度 (C_{carb} : 単位%)をそれぞれ求めた (表 3.4.1)。

$$C_{lith} = C_{Al} / 8.04 \times 100, \tag{3.4.2.1}$$

$$C_{carb} = (C_{Ca} - C_{Al} / 8.04 \times 3.00) \times 1.67.$$
(3.4.2.2)

係数 8.04 及び 3.00 は、それぞれ平均地殻中の C_{Al} 及び C_{Ca} (%) で、McLennan⁴⁾の値を用いた。

堆積物中の有機物濃度 (*C*_{OM}: 単位 %) は、堆積物試料を 500 ℃で 24 時間燃焼した際の減量から求めた。生物起源ケイ酸塩の濃度は、上記の主要 4 成分の濃度の合計が 100%であると仮定して、次式によって求めた。

$$C_{opal} = 100 - C_{lith} - C_{carb} - C_{OM}.$$
 (3.4.2.3)

表 3.4.1 に示す主要成分の組成と、式(3.3.2.1)より、以下の最適値を得た。

$$\rho_{s-drv} = 2.25 \pm 0.08, \tag{3.4.2.4}$$

3.4.3 堆積物の空隙率及び密度

下北海域における堆積物表層(0~4.5 cm層)中の空隙率 (p)は、採泥時の含水率、式(3.4.2.4)で得た粒子の乾燥密度 (ρ_{rdv} : 2.25 kg l⁻¹)と、海水の密度 (1.025 kg l⁻¹)を考慮し、以下の最適値を得た。

$$p = 0.80 \pm 0.07.$$
 (3.4.3.1)

このpに基づいて求めた堆積物のかさ密度(単位体積に含まれる現場堆積物中の固相の乾燥質量)は、 0.45 ± 0.04 kg Γ^1 と見積もられた。固相と間隙水(海水)相の両方の密度を考慮した現場密度 (ρ_s :単位kg Γ^1) は、

 $\rho_s = 1.27 \pm 0.07, \tag{3.4.3.2}$

と見積もられた。

参考文献(第3章)

- Nyffeler, U. R, Y.H. Li. and P.H. Santschi: "A kinetic approach to describe trace-element distribution between particles and solution in natural aquatic systems", Geochim. Cosmochim. Acta, <u>48</u>, p.1513-1522 (1984).
- Abril, J.M. and E. Fraga: "Some physical and chemical features of the variability of kd distribution coefficients for radionuclides", J. Environ. Radioactivity, <u>30</u>, p.253-270 (1996).
- 3) 高久雄一,工藤友華,木村盛児,林匠馬,太田郁子,長谷川英尚,植田真司:"環境水中の希土類元素のイミノ二酢酸キレート樹脂ディスク予備濃縮/誘導結合プラズマ質量分析法による定量",分析化学,51, p.539-544 (2002).
- 4) McLennan, S.M.: "Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust", Geochem. Geophys. Geosyst., <u>2</u>, paper number 2000GC000109 (2001).
- 5) Reid, J.L.: "Intermediate waters of the Pacific Ocean", Johns Hopkins Oceanogr. Suppl., <u>5</u>, p.96 (1965).
- 6) Yasuda, I.: "The origin of the North Pacific Intermediate Water", J. Geophys. Res., <u>102</u>, p.893-909 (1997).
- Otosaka, S. and S. Noriki: "Relationship between composition of settling particles and organic carbon flux in the western North Pacific and the Japan Sea", J. Oceanogr., <u>61</u>, p.25-40 (2005).
- Logan, B.E. and J.R. Hunt: "Advantages to microbes of growth in permeable aggregates in marine systems", Limnol. Oceanogr., <u>32</u>, p.1034-1048 (1987).
- Klaas, C. and D.E. Archer: "Association of sinking organic matter with various types of mineral ballast in the deep sea: Implications for the rain ratio", Global Biogeochem. Cycles, <u>16</u>, p.1116 (2002).
- Gardner, W.D., P.E. Biscaye and M.J. Richardson: "A sediment trap experiment in the Vema Channel to evaluate the effect of horizontal particle fluxes on measures vertical fluxes", J. Mar. Res., <u>55</u>, p.995-1028 (1997).
- Sharma, P., L.R. Gardner, W.S. Moore and M.S. Bollinger: "Sedimentation and bioturbation in a salt marsh as revealed by ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs, and ⁷Be studies", Limnol. Oceanogr., <u>32</u>, p.313-326 (1987).
- Santschi, P.H. and GT. Rowe: "Radiocarbon-derived sedimentation rates in the Gulf of Mexico", Deep-Sea Res. II, <u>55</u>, p.2572-2576 (2008).

12	5.1.1		
項目	記号	単位	備考
複数の相における相互作用に関するパラメ	ータ		
熱力学的輸送係数	k, k_1	s ⁻¹	第3.2.1節
分配係数	K_d	$m^3 kg^{-1}$	第3.2.2節
溶存(微小粒子を含む)相に関するパラ	メータ		
海水中の元素または核種濃度	C_w	mol kg ⁻¹ , Bq kg ⁻¹	(*1)
LPM 相に関するパラメータ			
LPM 濃度	т	kg m ⁻³	第3.3.1節
粒子の密度(乾燥密度)	$ ho_{m-dry}$	kg l ⁻¹	2.18±0.06(第3.3.2節)
粒子の密度(水中密度)	$ ho_m$	kg l ⁻¹	1.06±0.02(第3.3.2節)
沈降速度	W_S	m s ⁻¹	第3.3.3節
粒子中の元素または核種濃度	C_s	mol kg ⁻¹ , Bq kg ⁻¹	(*1)
堆積物相に関するパラメータ			
堆積物表層の混合深度	γ	m	0.045±0.013(第3.4.1節)
粒子の密度	$ ho_{s\text{-}dry}$	kg Γ^1	2.25±0.08(第3.4.2節)
堆積物の空隙率	р	無単位	0.80±0.07(第 3.4.3 節)
堆積物の現場密度	$ ho_{s}$	kg l ⁻¹	1.27±0.07(第 3.4.3 節)
堆積物中の元素または核種濃度	A_s	mol kg ⁻¹ , Bq kg ⁻¹	(*1)

表 3.1.1 パラメーター覧

*1: 元素または核種によって異なることと、実際の計算時は境界条件に依存することから、本章では扱わない。

JAEA-Research 2009-040

		1	5.2.1 JJ			iiiji/1 、 •> ∫(
観測点	北緯	東経	海底水深	採取水深	Al	Mn	Co	La	Ce
	(度)	(度)	(m)	(m)	(nmol kg	g ⁻¹)	(pmol kg	⁻¹)	
201	41.22	142.60	1606	200	10.1	9.60	0.17	0.095	0.050
				500	5.00	13.3	0.12	ND	ND
				800	13.0	ND	ND	0.024	0.004
				1000	4.41	ND	0.20	0.044	0.024
				1550	9.65	13.0	0.12	0.078	0.049
203	41.22	142.17	1160	1000	23.4	2.63	0.09	0.089	0.040
				800	ND	ND	0.02	0.007	0.022
205	41.22	141.73	730	200	34.8	10.8	0.12	0.049	0.024
				650	ND	13.0	0.14	0.054	0.020
208	40.92	141.95	560	200	ND	5.58	0.14	0.059	0.031
				510	37.21	9.58	0.10	0.053	0.018

表 3.2.1 分配係数の検討に用いた海水中の元素濃度

ND: No data

		表 3.2.2	分配係数	次の検討に	ニ用いた L	PM 中の _フ	云素濃度		
観測点	採取水深	Al	Mn	Co	La	Ce	Mn _{xs}	Co _{xs}	Ce _{xs}
	(m)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
201	200	0.8	1674	8.4	5.1	14.6	1582	6.0	4.7
	500	1.5	1115	25.0	ND	ND	944	20.5	ND
	800	ND	ND	ND	3.0	6.8	ND	ND	0.7
	1000	ND	ND	ND	5.5	12.6	ND	ND	1.8
	1550	1.3	677	14.1	5.2	12.0	525	10.1	1.9
203	1000	ND	ND	ND	6.1	14.1	ND	ND	2.2
	800	ND	ND	ND	5.3	12.4	ND	ND	2.2
205	200	0.5	2081	3.2	5.7	18.5	2023	1.6	7.6
	650	ND	ND	ND	10.7	23.3	ND	ND	2.5
208	200	ND	ND	ND	5.7	19.6	ND	ND	8.3
	510	1.4	449	7.6	7.3	18.0	294	3.5	3.6

表 3.2.2 分配係数の検討に用いた LPM 中の元素濃度

ND: No data

A J.J.1 天なる丁ム C 加賀 6 フルル中述及の元報						
条件		LPM濃度 ^{*1}	粒子束*2	粒径	沈降速度*3	
		$(g m^{-3})$	$(g m^{-2} s^{-1})$	(m)	$(m s^{-1})$	$(m d^{-1})$
粒子束実涯	則法					
	粒子束最大時	2.9×10 ⁻²	7.2×10 ⁻⁶	-	2.5×10 ⁻⁴	2.1×10^{1}
	粒子束最小時	2.9×10 ⁻²	1.6×10 ⁻⁷	-	5.5×10 ⁻⁶	4.7×10 ⁻¹
ストークス	ス則法					
	粒径平均時	-	-	5.1×10 ⁻⁵	3.9×10 ⁻⁴	3.4×10^{1}
	粒径最小時	-	-	2.3×10 ⁻⁶	7.8×10 ⁻⁵	6.8×10 ⁰
	粒径最大時	-	-	1.1×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁻³	1.7×10^{2}

表 3.3.1 異なる手法で見積もった沈降速度の比較

*1: LPM 濃度は式 (3.3.1.5) によって求めた。

*2: 沈降粒子束データはOtosaka and Noriki⁷⁾ による。

*3: 粒子束実測法による沈降速度は、実測した沈降粒子束を、LPM濃度で除して求めた。ストークス 則法による沈降速度は、重力加速度を 9.81 m s⁻²、海水粘度を 1.25×10⁻³ Ns m⁻²、海水の密度を 1.025×10⁶ g m⁻³、粒子密度(湿密度)を 1.06×10⁶ g m⁻³として式(3.3.3.1)によって求めた。

観測点	201		203		205	
北緯 (度)	41.23		41.53		41.83	
東経 (度)	142.64		142.15		141.67	
海底水深 (m)	1658		1200		835	
堆積物深度 (cm)	0-1	1-2	0-1	1-2	0-1	1-2
陸起源ケイ酸塩 (%)	51.4	56.1	49.5	56.3	70.0	70.1
生物起源炭酸塩(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	2.0
生物起源ケイ酸塩*(%)	44.0	37.7	41.6	34.2	21.7	22.4
有機物 (%)	4.6	6.3	8.9	9.5	6.2	5.5
乾燥密度 (odm: kg l ⁻¹)	2.25	2.24	2.15	2.17	2.33	2.35

表 3.4.1 下北海域の3観測点における、堆積物(0-2 cm 層)中の主要成分組成

* 主要 4 成分(陸起源ケイ酸塩、生物起源ケイ酸塩、生物起源炭酸塩及び有機物)の合計が 100%と仮 定した場合の計算値。



図 3.2.1 下北海域におけるAl、Mn、Co、La及びCeの分配係数(K_d)とLPM濃度の関係. (a) 図は全濃度、 (b) 図は粒子表面に吸着していると考えられる成分(過剰成分、図中には"xs"として表記)についての結果を示す。過剰成分の詳細については、本文を参照のこと。



図 3.3.1 北緯 41 度 00 分(地図中の赤点線)におけるポテンシャル密度(左)と LPM 濃度(右)の東 西断面。上段は 2006 年 5 月 16 日~17 日、中段は同 5 月 25 日~26 日、下段は同 6 月 1 日~2 日の 観測結果。



図 3.3.2 下北海域沿岸における LPM 鉛直分布の概念図。

JAEA-Research 2009-040



 図 3.3.3 下北沖における、粒子の密度 (ρ_{m-dy}) と沈降粒子束の季節変化。粒子束データはOtosaka and Noriki⁷⁾のものを用いた。左縦軸の矢印は、式 3.3.7 による計算に用いた陸起源鉱物 (lith)、生物起源 炭酸塩 (carb)、生物起源ケイ酸塩 (opal) 及び有機物 (OM)の密度の文献値を示す。



図 3.3.4 2003 年 7 月に得られた沈降粒子の粒径分布。実線は浅層(1000 m)、破線は深層(1400 m)で 得られた粒子を示す。

4. まとめ

本報告書は、平成 15 年度から 20 年度までに実施した下北海域における海洋放射能予測コードの整備に関する研究成果から、特に重要と思われる成果についてまとめたものである。

本研究の目的は、再処理施設から下北海域へ放出される放射性核種の移行・拡散を予測する計算 コードシステムを整備することである。ここでは、平常時における放射性核種の放出に対応する予測シ ステムを構築することを目標としている。本研究の中で筆者らは、それまでの原子力機構での研究成果 を当該海域に適合させるために、気候値(統計値)を使用した海水循環予測コードの整備、及び海水 中放射性核種移行予測コードの整備を行うこととした。また、海水中放射性核種移行予測コードの整 備と検証のため、沈降粒子特性データ取得実験を併せて実施し、沈降過程モデルの入力パラメータを 取得するとともに、モデルの妥当性を検討することとした。本研究は平成 15 年度から 17 年度までを 第 1 期として実施し、予測システムを構成する海水循環予測コード(気候値を使用した版)及び海水 中放射性核種移行予測コードの基本版を完成した。第 1 期の研究成果を踏まえ、平成 18 年度から 20 年度まで第 2 期として 17 年度までに完成した海水循環予測コード及び海水中放射性核種移行 予測コードの基本版を、実用化に向けて高度化した。

本報告書は、第1章の「はじめに」及び第4章の「おわりに」を含めて、4つの章から構成されている。第2章には「予測コードの整備」、第3章には「沈降粒子に関する特性データの取得」がそれ ぞれ記述されている。

第2章の「予測コードの整備」では、本研究で整備を進める2つの予測コード、すなわち海水循 環予測コードと海水中放射性核種移行予測コードに関する整備状況と研究成果を記述した。海水循 環予測コードの整備では、原子力機構が整備した水温、塩分等の気候値(統計値)を使用した POM (Princeton Ocean Model)を基礎とした海水循環予測コードを検証・改良し、その基本版を完成した。こ こでは、特に海水循環予測コードの鉛直座標系への多重σ座標の導入及びネスティング機能の導入、 それらに伴う入力データ作成プログラム及び水深データ対話型編集システムの導入を行った。

海水循環予測コードについては、POM が採用する σ 座標系は複雑な海底地形を正確に表現でき、 また、境界条件の取り扱いも容易になるという利点を有している。しかしその一方で海底地形が大きく 変化する場所では、物理量の数値拡散及び鉛直差分における数値誤差が無視できないレベルに達 することが問題となっていた。そこで、これらの問題点の解消を目指して、鉛直座標系の改良を行った。 本作業においては、現行の σ 座標を多段積み重ねた形の多重 σ 座標を POM に導入した。そして、 上述の問題が発生しやすい海底地形を有する仮想海域に対して、従来使用している σ 座標系と多重 σ 座標系の両方を用いた試計算を行い、その性能を評価した。多重 σ 座標系を海水循環予測コードに 導入することにより、急峻な海底地形上のある領域での物理量の数値拡散及び海面における境界条 件に対するモデル表層が正しく応答しないといった問題を解決あるいは相当程度軽減できる見込みが できた。

また、本研究では下北半島沖合での海水循環を数km程度の水平分解能で予測可能なモデルを整備することを目的としているため、ネスティング機能を導入した。ここでは北太平洋を最外郭とした2段階のネスティングを用いた下北海域の海水循環の計算を実施するため、多重σ座標系を採用したPOMにネスティング機能の導入を行った。そして、導入したコードを用いて北太平洋とその内部領域で

ある日本周辺海域における数ケースの試計算を実施した。その結果、多重 σ 座標系を導入した POM のネスティング機能が正常に作動することを確認するとともに、本機能を用いた計算において空間分解 能に見合った小規模な渦構造を分解し表現できることが確認できた。

ネスティング機能を含む海水循環予測コードの計算には、複数の計算領域に対応した入力データ セットを用意する必要がある。そこで海水循環予測コードの入力データ作成を目的とした 2 次元又は 3 次元の格子状のデータセットを作成するデータ作成プログラムを整備した。このデータ作成プログラム は、海底地形データベース、気象・海象データベースという 2 種類のデータベースを備えている。水深 データを作成するプログラムでは、最終的な利用までに手作業で細部を編集する必要があった。そこ で、水深データをワークステーション上で GUIを用いて直接編集できる水深データ編集システムを整備 した。その結果、本システムを用いることにより対話的に複数のデータを容易に編集することが可能とな った。

一方、海水中放射性核種移行予測コードの整備では、今までに原子力機構が整備した、溶存相と 大粒子相の相互作用及び海底堆積物相への沈降過程を考慮した海水中放射性核種移行予測コード を検証・改良し、その基本版を完成した。ここでは特に、これまでに開発したモデルに対して、実海域に おける妥当性検証を実施した。本モデルは青森県六ヶ所村における使用済核燃料再処理施設からの 定常時または異常時の放出に対して環境への影響を把握・推定することを目的として開発されている。 しかし下北海域を含め日本近海では、原子力施設等から海洋へ放出された放射性核種が海水あるい は海底土において有意に検出され、それらの測定データがモデルの妥当性検証に使用できるような海 域は存在しない。そこで英国セラフィールドにあるBritish Nuclear Fuels (BNFL)の使用済核燃料再処 理施設からの¹³⁷Cs 放出再現計算を行い、観測結果と比較することでモデルの妥当性を検証した。こ こでは、溶存相のみのモデルと、溶存相と大粒子相の相互作用を考慮したモデルによる計算結果を比 較した。

溶存相のみのモデルで計算した海洋表層の溶存態¹³⁷Cs 濃度分布では、濃度の分布傾向は放出 点で高く、放出点から離れるに従って低くなっており、観測値と同様の傾向であった。しかし、殆どの海 域で過大評価となっていた。溶存相と大粒子相の相互作用を考慮したモデルで計算した海洋表層の 溶存¹³⁷Cs 濃度分布では、溶存相のみのモデルと比較して全体的に濃度が低くなり、概ね観測結果 と一致した結果が得られた。溶存相と大粒子相の相互作用を考慮したモデルを導入することにより、粒 子状物質に吸着した¹³⁷Cs が沈降により表層から除去されたために溶存相のみのモデルよりも低濃度 となり、特にアイリッシュ海東海域では再現性が飛躍的に向上する傾向が見られた。

また、海水中放射性核種移行予測コードについて、下北海域へ適用してその適用性を検討するとと もに、必要な検証・改良を行った。ここでは特に、これまで整備した海水中放射性核種移行予測コード を下北海域へ適用して、放射性核種の仮想放出に関するケーススタディを実施し、当該核種の移行パ ターンや吸脱着モデルの応答を検証した。

ケーススタディでは、使用済燃料再処理施設の平常運転時を想定し、下北海域へ放出される³Hと ¹³⁷Csの移行計算を実施した。下北海域における海流場の再解析データには、京大モデルに基づいた 海洋大循環予測コードによる計算結果を用いた。ケーススタディの結果、a)³Hを 60 日間の間欠放出さ せた計算では、施設起因の³H濃度は平沼沖においてバックグラウンド値と比較して高くなるが、平沼沖 における最大濃度は、安全審査に準拠して計算した放射性核種の年間平均値の約 28%である、b)吸 脱着モデルを用いた¹³⁷Csの計算では、施設起因の¹³⁷Cs濃度は当該海域で観測されたバックグラウンド値と同程度以下である、という結論が得られた。この結果、京大海洋大循環予測コードと海水中放射性核種移行予測コードを組み合わせた海況予報システムは、実用化レベルに近づきつつあることが確認された。

次に、第3章の「沈降粒子に関する特性データの取得」では、海水中放射性核種移行予測コード で用いる現場依存性の高いパラメータについて、現場海域で得た実測値に基づいて検討・決定 した。

溶存相-大粒子相間の分配係数(Kd)については、特に吸着性の高い元素のそれがLPMの粒 径とともに変化すると推定した。また、下北海域の深層では、粒径の比較的小さいLPMが高濁 度層を形成していると考えられ、海底付近での堆積物の再浮遊などのような、粒径の小さな粒 子の深層循環が、特に吸着性元素の挙動に影響を与えうることを示唆した。

海水中の LPM 濃度は特に現場依存性の高いパラメータであるが、濁度の連続データを利用 することにより、現場海域の LPM 濃度分布の概要を把握した。濁度観測は、粒子を直接捕集 することができないものの、他の方法による LPM 濃度測定法に比べて簡便で、空間的に極め て密なデータセットを得ることが可能であることから、緊急時のパラメータ取得方法としても 役立つことが期待される。

浅層から深層への粒子輸送量を決定する上で主要なパラメータである粒子沈降速度は、粒子の密度や粒径といった特性の変化に伴って±100%程度の大きな変動幅を持ちうる。しかしながら、これらの特性パラメータの変動機構を正しく理解し、値を吟味することにより、「ストークス則」を用いた沈降速度と、セジメントトラップ実験で得たそれが概ね一致することを確認した。この結果から、粒子の鉛直輸送量は十分に予測可能であることが確認された。

LPM と堆積物の密度については、乾燥密度と水中密度を分別して定義するとともに、複数の生物起源成分の情報を考慮することにより、最適値を決定した。

本研究で得られたパラメータセットは、下北海域でこれまでに得られている海洋学的知見と も矛盾がなく、現段階では最適なものであるといえる。しかしながら、より高精度な予測のた めには、生物生産や、大気・陸域からの物質供給など、海洋における LPM の主要な供給源で ある表層において、LPM の生成過程をモデル化し、その結果を本予測コードに組み込むこと が望まれる。

謝 辞

本研究の成果の一部は、青森県の大型再処理施設等放射能影響調査交付金による「六ヶ所村沖合海洋放射能等調査」によって行われたものである。ここに記して謝意を表す。

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位				
甘木旦	SI 基本ì	単位		
盔半里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

表2.	基本単位る	を用いて表されるSI組立単	立の例	
和子	· 昰	SI 基本単位		
//H_1	- #4	名称	記号	
面	積	平方メートル	m ²	
体	積	立法メートル	m^3	
速 さ ,	速 度	メートル毎秒	m/s	
加速	度	メートル毎秒毎秒	m/s^2	
波	数	毎メートル	m ⁻¹	
密度,質	量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	
面 積	密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²	
比 俳	: 積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg	
電流	密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2	
磁界の	・ 強 さ	アンペア毎メートル	A/m	
量 濃 度 ^{(a}	,濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	
質量	濃 度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³	
輝	度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	
屈 折	率 ^(b)	(数字の) 1	1	
比透磁	[率 ^(b)	(数字の) 1	1	

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位				
組立量	反折	記号	他のSI単位による	SI基本単位による	
	泊怀	記与	表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^{2}$	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光束	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gy	J/kg	m ² a ⁻²	
カーマ	/ • ·	Су	OINg	in s	
線量当量,周辺線量当量,方向	Sum of the h (g)	Sw	J/kg	m ² a ⁻²	
性線量当量, 個人線量当量		50	57Kg	ш 5	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じてある。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

主 /	単位の由に田右の	肉 新し 記 早 む 合 t o CI 知 立 畄 齿 の 個	
AX 4 .	– 単11.07年に回伯の		

	SI 組立単位				
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方		
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹		
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$		
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²		
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$		
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$		
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³		
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$		
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{2} K^{1}$		
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$		
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹		
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²		
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹		
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA		
表 面 電 荷	f クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA		
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA		
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$		
透磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²		
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$		
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA		
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$		
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$		
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$		
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m^{-3} s ⁻¹ mol		

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	iin i	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ш	タ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼ	タ	Ζ	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エク	サ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	\sim	タ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テ	ラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギ	ガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メ	ガ	Μ	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キ		k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘク	\mathbb{P}	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^1	デ	力	da	10^{-24}	ヨクト	у

表 6. SIに	属さない	いが、SIと併用される単位
名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	٥	1°=(п/180) rad
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7.SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原子質量単位	u	1u=1 Da			
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

_	21 - 1 1011	- /1- 4 - 5	2 01	
名称			記号	SI 単位で表される数値
バ	_	イ	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- J	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	Μ	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の逆伝しの粉ば的な胆核け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	dB -	

表9.固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアス	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルフ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx				
ガ ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe \triangleq (10 ³ /4π)A m ⁻¹				

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 🌢 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\boldsymbol{\nu}$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	~系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています