

# 海洋における環境影響評価技術に関する研究

浅見 光史\*

## Research on Environmental Impact Assessment Technology for Hazardous Substances Released in the Ocean

by

ASAMI Mitsufumi\*

### Abstract

Incidents such as may cause the release of hazardous substances which can affect the marine environment or impede vessel navigation, making it necessary to clarify the extent of the impact of these substances. In addition to developing environmental impact assessment techniques based on appropriate measurement methods, the relevant measurement results must also be analyzed. Furthermore, simulation techniques for predicting the degree of substance drift or migration to seafloor sediments are required to understand changes in the impacted area. This report focuses on the development of environmental impact assessment techniques for the release of radioactive nuclides into the ocean following a nuclear power plant accident as an evaluation of the distribution of hazardous substances affecting the marine environment. Additionally, this report provides an overview of the prediction results of the oceanic distribution of volcanic pyroclasts released due to volcanic activity at Fukutoku-Oka-no-Ba as an event where substances with the potential to hinder vessel navigation are released into the ocean.

---

\* 環境・動力系

原稿受付 令和 6年 1月 17日

審査日 令和 6年 2月 28日

## 目 次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. はじめに                           | 68 |
| 2. 海洋への放射性核種流出時における環境影響評価技術の開発    | 68 |
| 2.1 緒言                            | 68 |
| 2.2 研究の概要                         | 69 |
| 2.3 海底堆積物中の放射性核種                  | 69 |
| 2.3.1 検出器および測定手法                  | 69 |
| 2.3.2 1F 沿岸海域における曳航測定結果           | 70 |
| 2.3.3 採泥調査                        | 72 |
| 2.4 結言                            | 73 |
| 3. 福徳岡ノ場の火山活動により放出された火山砕屑物の海洋分布予測 | 74 |
| 3.1 緒言                            | 74 |
| 3.2 火山砕屑物分布予測モデル                  | 75 |
| 3.3 予測結果                          | 75 |
| 3.4 海洋における船体周囲の火山砕屑物挙動            | 76 |
| 3.5 結言                            | 77 |
| 4. まとめ                            | 77 |
| 謝辞                                | 77 |
| References                        | 77 |

## 1. はじめに

海洋環境に影響する有害物質，あるいは船舶の運航を阻害する可能性のある物質が海洋へ放出する事象が発生した際には，これら物質の影響範囲を把握すべく，適切な計測手法に基づく環境影響評価技術の開発とともに，適切な計測結果の分析が求められる．これに加えて，影響範囲の変化を把握すべく，物質の漂流あるいは海底堆積物への移行の程度を予測するシミュレーション技術が求められる．これまでに，海上技術安全研究所(以下「海技研」)の重点研究☆8「船舶に起因する海洋汚染防止技術及び生態系影響評価に関する研究」(期間：2016-2022年度)において海洋の環境影響評価技術に関する研究として着目してきた項目は，流出油の回収・処理の高効率化に関する研究，油・放射性物質等が環境放出した際の環境影響評価手法の高度化，モニタリングによる海底堆積物中の放射性物質濃度分布の分析，数値解析による海底堆積物中における放射性物質高濃度領域の形成過程の解明，船舶に起因する大気および海洋汚染物質の環境影響評価技術の高度化，と多岐に亘る．本報文では，これらのうち，海洋環境に影響する有害物質の分布評価として，原子力発電所事故に伴う海洋への放射性核種流出時における環境影響評価技術の開発を紹介する．さらに，船舶の運航を阻害する可能性のある物質が海洋へ放出する事象として，福徳岡ノ場の火山活動により放出された火山砕屑物の海洋分布予測を取り上げ，研究の概要を紹介する．

## 2. 海洋への放射性核種流出時における環境影響評価技術の開発

## 2.1 緒言

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって発生した東京電力株式会社(現東京電力ホールディングス株式会社)福島第一原子力発電所(以下「1F」)の事故により，大量の放射性核種が大気および海洋環境中に放出された．大気および海洋に放出された放射性核種のモニタリングの基本方針は，政府が策定する原子力規制庁「総合モニタリング計画」(平成23年度8月2日決定)<sup>1)</sup>に定められる．陸域では，事故直後から様々な手法を用いた放射線モニタリングが実施され，そのため，比較的短期間に放射性核種の空間分布を示した詳細

な線量マップが作成された。一方、海域におけるモニタリングは、総合モニタリング計画の「別紙 海域モニタリングの進め方」に基づき、原子力規制委員会、水産庁、国土交通省、海上保安庁、環境省、福島県、および原子力事業者が連携して実施することとされ、1F 周辺海域のほか、外洋域や東京湾において、海水、海底堆積物および水産物のモニタリングが実施されてきた。この海域モニタリングは、予め設定された測定点において定期的に採取された海水や海底堆積物を分析する定点調査であり、その調査結果からは離散的な情報が確保されるのみであり、海底に堆積された放射性核種の状況を面的分布として把握することができなかった。そこで、原子力規制庁は海洋における放射性核種の面的な濃度分布図を作成し、それらの水産物への中長期的な影響を考慮するため、「放射性物質測定調査委託費(海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究)事業」(以下「規制庁委託事業」)を開始した。海技研では、当該規制庁委託事業を平成 25 年度から実施し、平成 28 年度以降は重点研究☆8-④における研究項目のひとつとして実施された。

## 2.2 研究の概要

前述の総合モニタリング計画の一環で実施されてきた海域モニタリングの手法では、採泥・採水等の洋上作業が複雑であるのみならず、採取試料を陸上で核種分析する必要があるため、1F から約 20 km 圏内に採水位置 42 箇所、採泥位置 45 箇所に限定されていた。海技研では、本事業を通じて、海域における放射性核種の濃度分布の詳細な把握を目的として、1F 周辺および阿武隈川河口付近の海底地形の詳細計測とともに、海流や潮汐流からなる流れの状況や測定地点の海底堆積物の性状も考慮し、放射線検出器を船舶で曳航することで線状に連続的に計測することを可能にした。のみならず、長期的には河川を通じた陸上の放射性核種が海洋に流入すること、一度海底堆積物に吸着した放射性核種が再溶出することで再度海水を汚染する可能性もあることから、中長期的な観点における 1F 周辺海域における放射性核種の動態予測につながる基礎データの取得を実施した。1F 周辺海域に設定した測線の総延長は約 3400 km であり、その調査期間別内訳は、それぞれ約 800 km(平成 25 年度)、約 980 km(平成 26 年度)、約 600 km(平成 27 年度)、約 1000 km(平成 30 年度)である。これらの測線上を、曳航式放射線検出器を用いて放射性核種濃度を測定し、その結果を分析して海域の海底堆積物に対する放射性核種濃度の面的分布図を作成した。加えて、放射性核種濃度の経時変化についても調査した。放射性核種濃度の変動要因の一つとして泥質の移動による影響を示唆するデータが取得されていることから、海底地形および流況調査の実施とともに、海底堆積物に吸着した放射性核種の海水への溶出形態、堆積物の性状のほか、放射性核種の由来を調べるための有機物濃度および有機物中炭素同位体比に関する分析を行ってきた。

## 2.3 海底堆積物中の放射性核種

1F の事故により海洋環境中に放出された主要な放射性核種は、放射性セシウムである。海水に含有される放射性セシウム濃度は海域で検出限界未満にある一方で、海底堆積物への吸着により、堆積物には現在も放射性セシウムが残存する。そこで、海底堆積物に含有される放射性セシウム濃度に着目し、平成 25-30 年度にかけて、船舶曳航式スペクトロメータを用いて、広域の濃度分布測定、曳航調査の定量化、および海底堆積物性状の調査のための採泥調査を行った。

### 2.3.1 検出器および測定手法

1F 沿岸海域での曳航調査では、曳航式スペクトロメータ RESQ(Radiometric Environment Survey and Quantification)システム<sup>2)</sup>が用いられた。RESQ システムは、図 1 に示すように、タリウム活性化ヨウ化ナトリウム NaI(Tl)検出器、電源、圧力計、温度計、加速度計、およびソナーからなる。同図左側に示すイラストのように、RESQ システムでは検出部を海底に接触させて曳航させるため、海底からの衝撃や摩擦による損傷を防ぐ対策が必要になる。そのため、これらの機器は水密容器に格納されるとともに、全体がゴム製ホースで覆われている。曳航調査中に NaI(Tl)検出器で測定されたガンマ線スペクトルデータは、制御回路内のロガーに保存され、RESQ システム全体を船上に揚収した後にデータを抽出する。

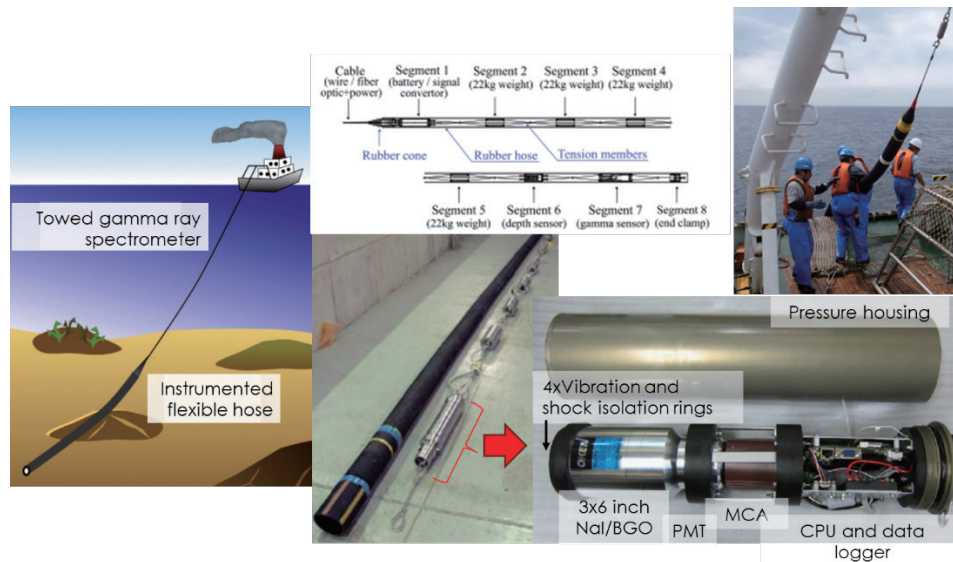


図1 曳航式スペクトロメータ RESQ システム概要<sup>2)</sup>

放射性セシウム濃度の定量には、光電ピーク計数率( $^{134}\text{Cs}$ :796, 802 keV,  $^{137}\text{Cs}$ :662 keV)を用いる。光電ピークは、波高の大きな信号から構成されることから、曳航調査中に海洋環境で生じる衝撃を要因とするノイズに堅牢である。また、海底堆積物は原子番号の小さな元素で構成されるため、 $\sim 100$  keV 光子との相互作用ではコンプトン散乱が支配的となることから、質量減弱係数の物質依存性が小さく、海底堆積物の元素組成の考慮が不要である。RESQ システムの解析では、深さを重量深度(深度 $\cdot$ 密度( $\text{g}/\text{cm}^2$ ))で表すことで、海底堆積物の組成に依存しない検出器応答を用いている。既往の海域モニタリングで実施されてきた採泥調査において、海底堆積物の表層 3 cm 平均の放射性セシウム濃度が測定されている実績から、表層の深さ 3 cm に対応した重量深度を採用している。これらを考慮した光電ピーク計数率-放射性セシウム換算係数を用いることで、光電ピーク計数率から表層平均濃度が求められる。この換算係数を求めるにあたり、放射性セシウムの鉛直分布が必要であることから、曳航調査時に並行して複数点で海底堆積物を採泥する。採泥地点での鉛直分布からその位置での換算係数を求め、採泥されない位置においては補間を用いることで、測線上の任意の点での換算係数が得られる。

### 2.3.2 1F 沿岸海域における曳航測定結果

1F 沿岸海域を中心に、年度ごとに総延長 600~1000 km 規模の曳航調査測線を設定し、RESQ システムにより放射性セシウムの濃度分布を測定した。図2に平成27年度  $^{137}\text{Cs}$  測定結果を例示する。図2より、1F からその南側を中心に沿岸近傍で高い値を示す一方、5 km 沖から北東には岩盤の露出した海域が広がるため、放射性セシウム濃度は西で大きく北東で小さくなる。東側では、海底堆積物が粒径の小さなシルト質で構成されるため、微細な粒径においては放射性セシウムの吸着量が大きくなることから、濃度が大きくなる傾向を示す。



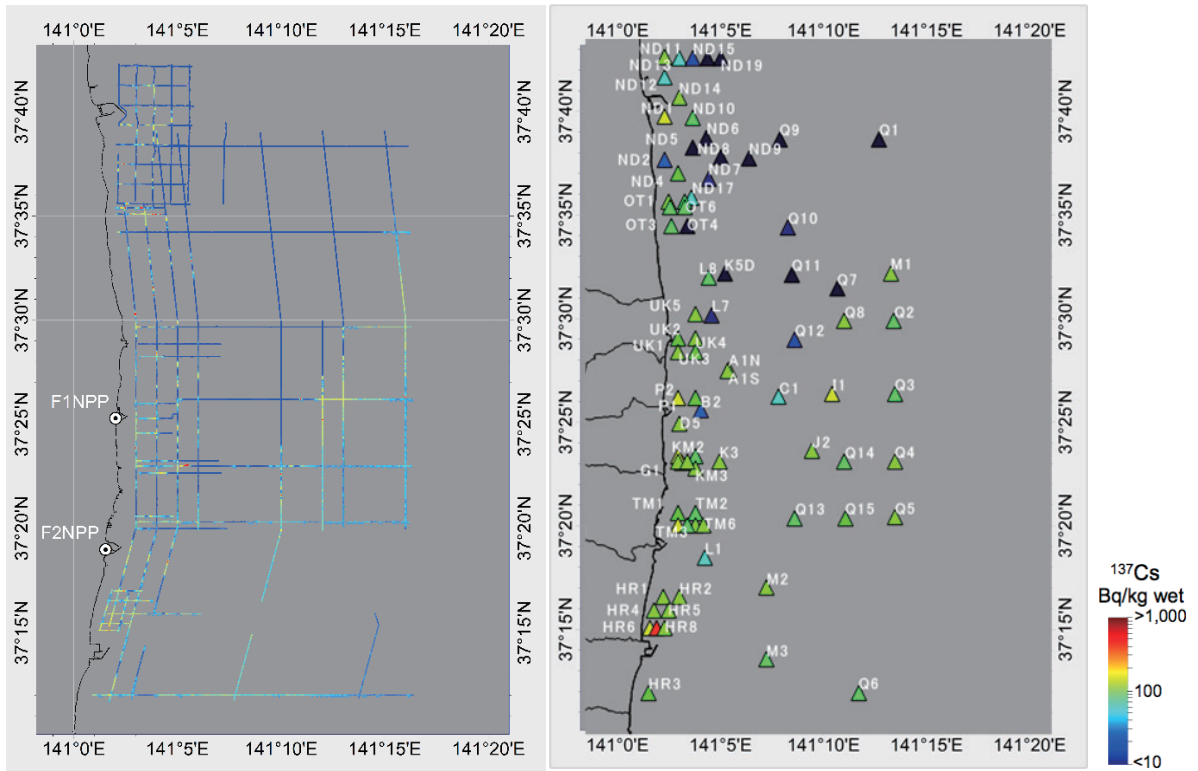


図2 1F近傍の<sup>137</sup>Cs分布と採泥地点<sup>3)</sup>

図3には、平成26-27年度間の差分による海底堆積物中<sup>137</sup>Cs増減の分布を示す。90%以上の測点における変化量が±25 Bq/kg未満であることから、海底堆積物に移行した<sup>137</sup>Csは短期間では大きく変動しないことが示唆された。

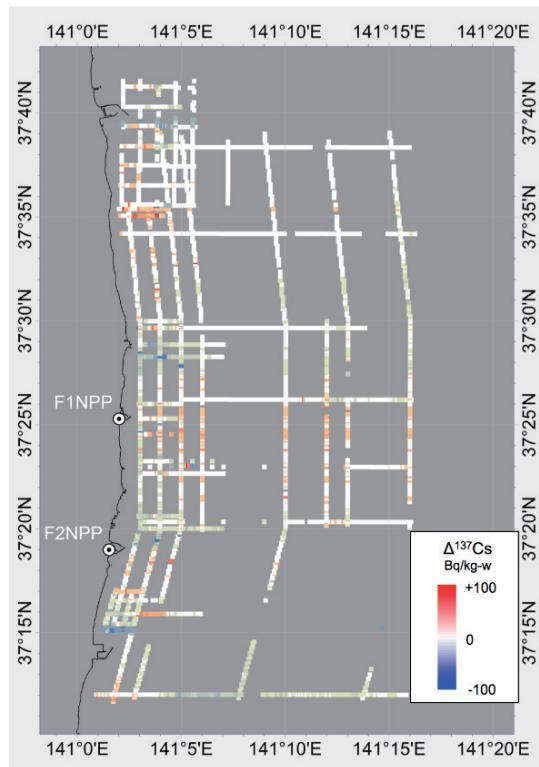


図3 福島第一原子力発電所近傍の平成26-27年度の差分による海底堆積物中<sup>137</sup>Cs濃度分布変化<sup>4)</sup>

図2からは、濃度が必ずしも連続的に変化しないことが示唆され、場所により特異的に放射性セシウム濃度が大きくなる領域(アノマリー)が確認され、それは特に沿岸付近に分布する。沿岸付近は、放射性核種の吸着量が小さい岩礁帯であることから、アノマリーの位置を詳細に把握するため、図4左の測線A005(左から2列目南北線)を抜粋し、深度-濃度の関連を分析した。分析図を図4右上下に例示する。測線の1Fから北へ3 km-4 kmの間で高濃度を示すアノマリーがあり、これは海底地形図と重ね合わせると窪み地形の位置に形成されている。この窪み地形以外の濃度は400 Bq/kgを下回ることから、これら濃度の増加地点の大半は、海底地形に起因するものであることが示唆される。

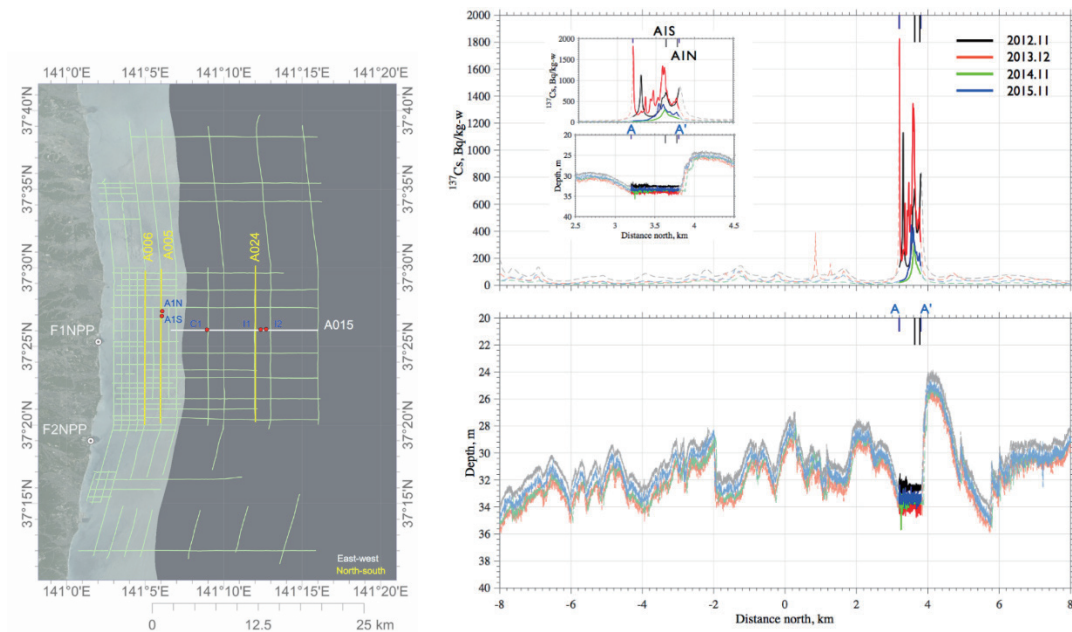


図4 測線A005(左)に沿った深度(右下)および $^{137}\text{Cs}$ 濃度分布(右上)<sup>5)</sup>

### 2.3.3 採泥調査

#### (1) 福島沿岸域採泥調査

RESQシステムでは海底堆積物表層におけるガンマ線スペクトルを測定する。放射性セシウムの鉛直分布を考慮するためには、計数率から濃度へ換算するための採泥調査が必要である。福島沿岸海域では、年度毎に曳航測線上に90点程度の採泥点を設定し、鉛直方向の堆積物の構成を維持した状態で採泥を行い、その柱状採泥試料を高純度ゲルマニウム検出器で測定することで、放射性セシウムの鉛直分布を求めた。採泥点A1N, A1S(図4参照)における $^{137}\text{Cs}$ 鉛直分布を図5に示す。

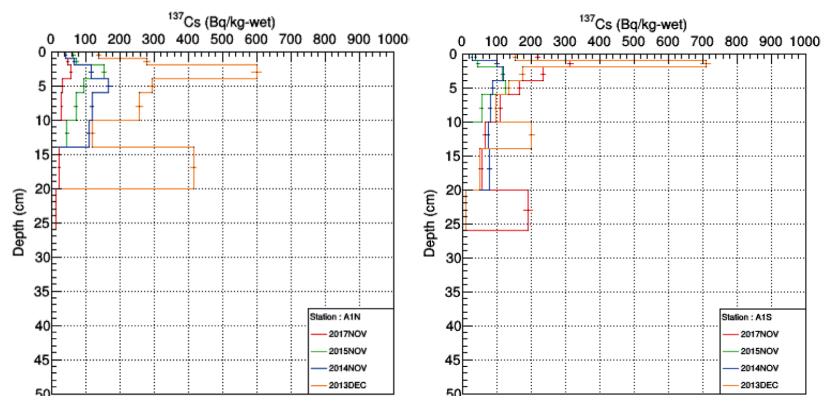


図5 異なる測定年における $^{137}\text{Cs}$ 鉛直分布<sup>3)</sup>

陸上の土壌では、表層土壌の移動が頻繁ではないため、放射性セシウムの中における鉛直分布は指数関数的に分布する。一方、海底堆積物中の鉛直分布は、図5に示されるように、関数で代表できるような分布にはならない。この結果から、海底における表層堆積物は、海底近傍における海流の流速により生じる剪断力により沈降および浮遊することで移動することが示唆される。この採泥調査結果は、前述のように、光電ピーク計数率-放射性セシウム濃度換算係数に考慮され、図2のような曳航調査による放射性セシウム分布の分析に利用される。

## (2) 溶出試験

曳航測定の数値化に加えて、放射性セシウムの移行挙動把握のための海底堆積物の物理化学的特性調査を行った。放射性セシウムの河川からの流入、および海底堆積物からの溶出による影響を評価するために、有機物特性分析、X線回折が行われている<sup>6)</sup>。ここでは、海底堆積物へ一度吸着した放射性セシウムが再び海水側へ移行する量がどの程度かを評価する溶出試験について概要を述べる。溶出試験では、福島第一原子力発電所近傍や河川沖で採取された海底堆積物に対して、25℃ 2日間の連続振盪後における人工海水への放射性セシウム溶出量を測定した。海水の交換回数に伴う海底堆積物中に残存する<sup>137</sup>Cs放射能濃度を図6に示す。図から、海水を交換して溶出試験を繰り返していくと、海水へ移行する溶出率が低下し、飽和する傾向が示唆される。

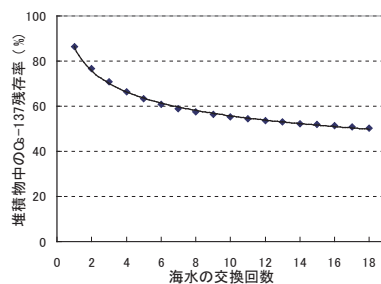


図6 海水の交換回数に伴う海底堆積物中に残存する<sup>137</sup>Cs放射能濃度の変化<sup>6)</sup>

## 2.4 結言

海底堆積物内の放射性セシウム分布の状況把握のために実施してきた、曳航式スペクトロメータ RESQ システムを用いたモニタリング手法の開発およびモニタリング調査について示した。調査の結果、放射性セシウムは、海底堆積物を構成する粒子の粒径および海底地形に応じた分布となることが明らかとなった。また、溶出試験の結果から、放射性セシウムが海底堆積物に吸着した後、容易には脱着せず、海水への溶出量は飽和することが示唆された。以上に加えて、本調査では、海域における当該事業の曳航調査の結果、および関係機関が実施してきた結果を総合的に分析し、今後の中長期的な放射性核種濃度調査結果の在り方について検討した。本検討では、放射性核種の変動要因の解析結果を考慮しつつ、調査地点等の適正化を中心に行い、「総合モニタリング計画(別紙) 海域モニタリングの進め方」の改善を提案した<sup>7)</sup>。具体的には図7に示すように、調査地点における放射性セシウムの変動状況の評価し、場所により採泥の期間を重み付けした。

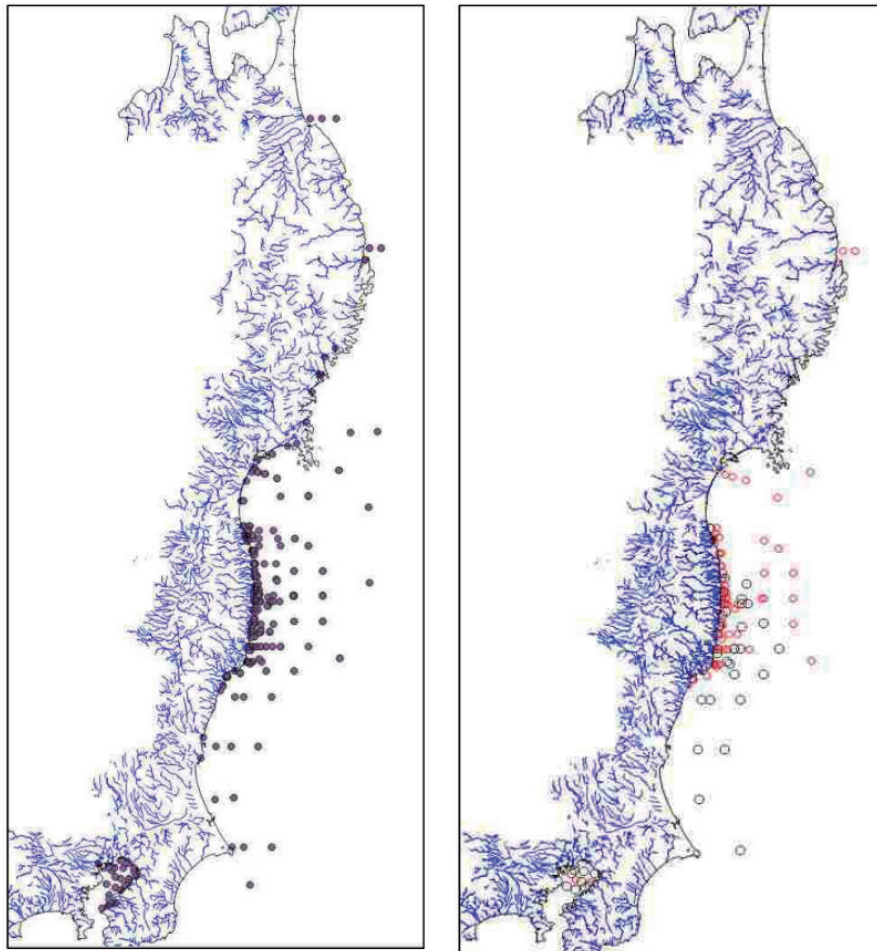


図7 総合モニタリング計画改定への提言<sup>7)</sup>。左図は平成30年度における採泥モニタリング位置。右図が改定提言であり、66地点(現状維持：黒丸)、65地点(採泥間隔1回/3年へ延長：赤丸)を示す。

### 3. 福徳岡ノ場の火山活動により放出された火山砕屑物の海洋分布予測<sup>8)</sup>

#### 3.1 緒言

日本の小笠原諸島の南硫黄島から北東に約5km離れた海底火山「福徳岡ノ場」が、2021年8月13日に噴火を起こした。この一連の噴火は、明治以降に日本列島において起きた噴火の中では最大規模であり、火山が噴火した直後、海表面が火山砕屑物により埋め尽くされた。この海表面を埋め尽くす砕屑物は、その様相から軽石筏と呼ばれており、この筏状を呈する砕屑物は、海流により形状を変化させながら西へ移動した。海面近傍を漂流しながら海洋を移動する火山砕屑物は、海上を航行する船舶あるいは漁業に大きな影響を与えた：海洋を航行中の船舶は、エンジンを冷却するために海水が用いられている。冷却水としての海水を吸水するポンプあるいは配管が詰まらないようにするために、海水中のゴミを除去する装置であるストレイナが用いられる。このストレイナに大量の火山砕屑物が詰まり、その結果として航行不能に至る事案が複数件発生した。航行不能となることを防ぐために、火山砕屑物が漂流している海域あるいは漂着している港湾周辺を航行する際には、必要に応じて航路の変更や冷却装置の吸水口に設定されたストレイナの健全性の確認作業が行われた。漁業においては、港内で養殖中の魚類が、微細な火山砕屑物を餌と誤認した結果大量死する、という損害が発生した。海洋に放出された火山砕屑物が海上を航行する船舶の冷却装置に及ぼす影響を推定し、航行船舶に具体的な注意を促すことは、安全な航行を確保するために重要である。一方、噴火直後の海底火山より放出された火山砕屑物については、その形成および輸送過程、および砕屑物の吸水による海表面からの沈降過程の何れに関しても、十分な知見が得られていない。したがって、不確定な要素が多い状況下であったとしても火山砕屑物の挙動を予測できるモデルが必要



である。そこで本研究では、福徳岡ノ場における火山活動に伴い海洋放出された火山砕屑物の、十分な性状が情報提供されない状況において、火山砕屑物の海洋中挙動予測を行うとともに、その予測結果に基づき、火山砕屑物の挙動が、船体周りでどのようになるのかを評価した。

### 3.2 火山砕屑物分布予測モデル

本研究で用いる海流場には、日本の本州沿岸海域から海底火山の位置する福徳岡ノ場を含む領域に対する、水平解像度  $1/12\text{deg}$  (約 9 km) の JCOPE2M 海流データ(1日平均値)<sup>9)</sup>を用いた。格子数は  $866 \times 620 \times$  鉛直 47 層である。海上気流場には、気象庁の GPV-MSM(予測データ作成のための初期値)の 6 時間値を用いた。火山砕屑物の移流拡散については、3次元 Lagrange 粒子追跡を用いた。火山砕屑物の挙動を予測する上での基本的な量である砕屑物の体積および密度は、福徳岡ノ場で採取されたサンプルによると<sup>10)</sup>、直径は 5-40 cm の範囲、密度は  $0.3-0.6 \text{ g/cm}^3$  (中央値  $0.45 \text{ g/cm}^3$ ) の範囲と幅があるほか、構成物もサンプルにより異なり、不明な点が非常に多い。本研究では、不確実性を可能な限り除外し、単純な仮定に基づく条件で解析するため、砕屑物の体積および密度に代わるものとして、物質が重力、浮力、および物質が海中を浮かび上がる際に海水から受ける抗力を受け、これらがつりあい一定となったときの速度である終端速度をモデルに用いた。本研究では、砕屑物の終端速度をパラメータとして火山砕屑物の分布予測を行い、観測結果の存在する漂着場所の情報と比較することで、時間変化も含めた評価を行った。その結果、実際の観測結果を再現し得る終端速度は  $0.4 \text{ m/s}$  となった。砕屑物形状を直径 1.75 cm の球と仮定して密度換算すると、 $0.45 \text{ g/cm}^3$  程度となる。前述の福徳岡ノ場近傍で採取された火山砕屑物の密度と比較すると、この終端速度の推定値は妥当なものであることが示唆される。実際の火山砕屑物には、海洋を漂流している間に、吸水により質量が増加して沈降速度を有するようになり沈降する過程、および大型の砕屑物が粉碎されて小粒径となる過程が考えられるが、未解明な部分が多いため、本研究ではこの過程をモデル化しない。火山砕屑物の放出源座標は、海底火山福徳岡ノ場の位置する水平位置および標高とし、放出源の移動はないと仮定した。福徳岡ノ場の主要な噴火は、8月13日から15日にかけて起きていることから、本研究では、この期間において連続且つ一定の放出量で砕屑物が放出されると仮定した。海洋を漂流する火山砕屑物が陸域に接触した際のモデル化については、観測結果から、海岸近傍へ漂着する場合と再び海域へ戻る場合の2つが共存することから、本研究では、計算粒子が陸域へ接触した際、陸域に付着せず全量戻るモデルを用いた。鉛直混合には Random Walk スキームを用いた。Stokes Drift として、海上気流場の 0.5-1.5% をパラメータとして適用した。

### 3.3 予測結果

3.2 節で示す海流場および海上気流場の条件、火山砕屑物分布予測の計算条件に基づき、福徳岡ノ場の火山活動により放出された火山砕屑物の海洋分布予測を行った。本研究では、Stokes Drift として海上気流場の 0.5-1.5% が影響するとして評価を行った。放出源から放出された計算粒子 10000 個全ての軌跡および計算を終了させた 12/30 における計算粒子の位置を図 7 上段に、粒子の経度-深度座標における粒子の分布(11/30 時点)を下段にそれぞれ示す。前述のように、Stokes Drift として、海上気流場の 0.5-1.5% をパラメータとして適用したが、図は、実際の観測結果<sup>11)</sup>と比較して実際の分布を最も再現する、0.5% が影響するとして予測分布のみを例示する。終端速度が  $0.4 \text{ m/s}$  の場合、終端速度が大きいことから、噴火直後に海表面まで上昇した後、風による鉛直混合により、海表面から -1 m 未満の間を移動しながら水平移動することが示唆される。実際には、大型の砕屑物が海表面を移動中に粉碎されて小粒径となる過程があり、途中で小粒径化した砕屑物も関東南端に到達すると考えられる。

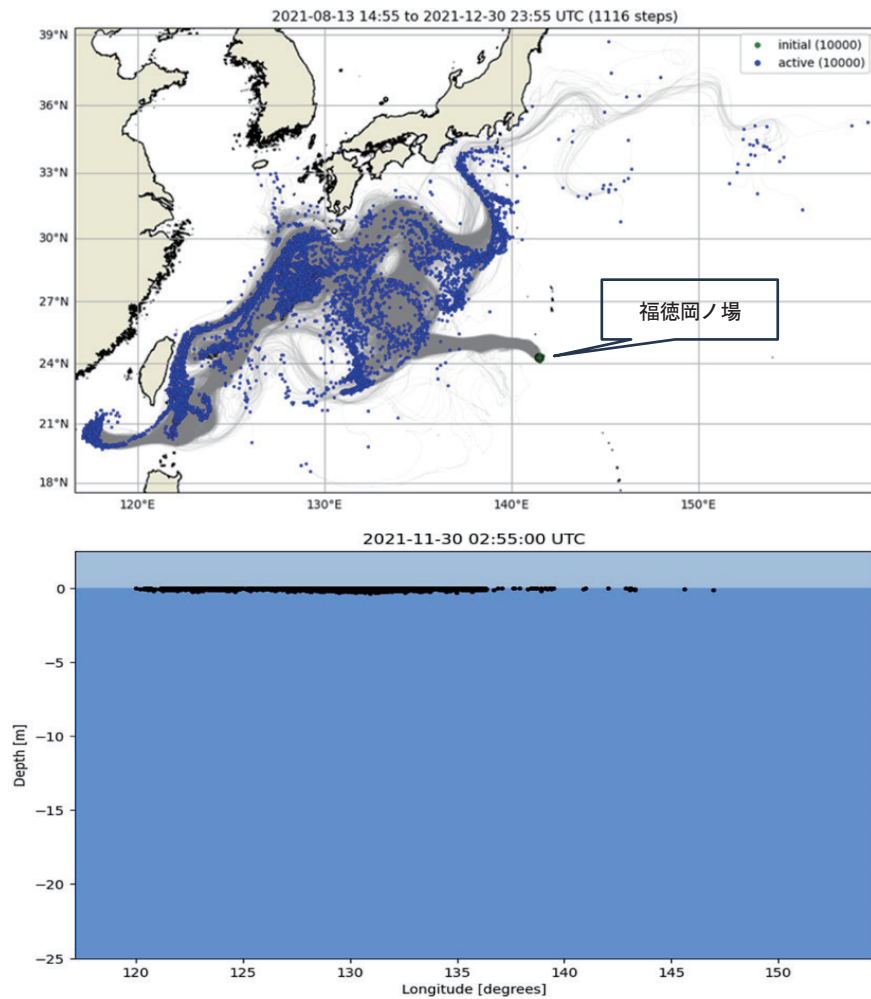


図7 放出源から放出された全計算粒子の軌跡および深度<sup>8)</sup>

(終端速度 0.4 m/s, Stokes Drift として海上気流場の 0.5% が影響すると仮定. 上図では、火山碎屑物の放出源である福徳岡ノ場を緑点、計算粒子の軌跡を灰色、計算終了日における計算粒子の位置を青色で示す。)

### 3.4 海洋における船体周囲の火山碎屑物挙動

船体の周囲に設置されたエンジン冷却用の取水口が火山碎屑物により閉塞することを防止するためには、火山碎屑物が船体の周囲をどのように移動するかを予測する必要がある。この予測には、流体中を運動する微粒子について、流体への追従性を記述するために用いられる無次元量であるストークス数が有効である。ストークス数が低い粒子は流体の流線にしたがい、逆に大きい粒子は慣性にしたがって移動する。ストークス数を用いて得られた火山碎屑物と、船速・全長の関係を図8に示す。結果として、船体周囲の流線に沿って移動する火砕物の最大直径は船の全長に応じて増加するが、速度に応じて減少することが示唆される：船長の短い船が高速で航行する場合、比較的小さな火砕物のみが流線に沿って移動できる。すなわち、図8から、火山碎屑物が流線に沿って移動するのを防ぐには、船速の増加が有効な手段であることが示唆される。

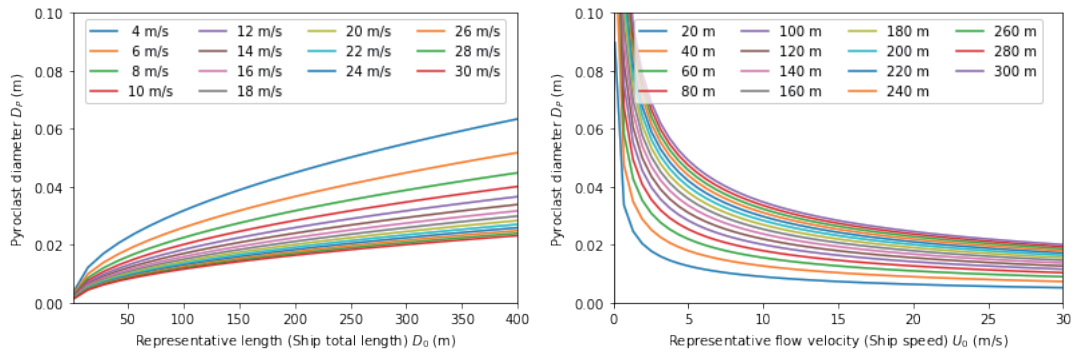


図8 火山碎屑物の大きさと船舶パラメータの関係<sup>8)</sup>  
(船速, 碎屑物直径, および船全長に対する依存性を示す)

### 3.5 結言

海洋環境における火山碎屑物の挙動を推定するには、その生成過程、輸送、吸水による堆積と密接に関係する碎屑物の物理的特徴を考慮する必要がある。しかしながら、緊急時に対策が迫られる場合、これらのプロセスをモデル化する情報は十分に与えられない。本研究の成果は、海底火山から海洋に放出された碎屑物の分布と到達時間を、終端速度に基づく単純なモデルを使用して合理的に予測できることを示唆する。

## 4. まとめ

重点研究☆8「船舶に起因する海洋汚染防止技術及び生態系影響評価に関する研究」(期間：2016-2022 年度)において実施した海洋の環境影響評価技術に関する研究のうち、本報文では2つの研究の概要を紹介した。ひとつが、海洋環境に影響する有害物質を評価するための研究としての「原子力発電所事故に伴う海洋への放射性核種流出時における環境影響評価技術の開発」であり、もうひとつが、船舶運航を阻害する可能性のある物質の海洋流出事象を評価するための研究としての「福徳岡ノ場の火山活動により放出された火山碎屑物の海洋分布の予測」である。今後、当所の中長期計画に標榜される、ゼロエミッション燃料の安全・環境対策策定、および船舶運航時における環境負荷低減技術の開発に関わる、環境影響評価技術の高度化を引き続き推進し、我が国の持続的な発展に役立てていきたい。

## 謝 辞

本報文で紹介した研究の概要のうち、2. 海洋への放射性核種流出時における環境影響評価技術の開発は、原子力規制庁委託事業放射性物質測定調査委託費の成果の一部である。

## References

- 1) 原子力規制庁「総合モニタリング計画」, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/204/list-1.html>.
- 2) Blair Thornton, Seiki Ohnishi, Tamaki Ura, Naoteru Odano, and Tsuneo Fujita: Continuous measurement of radionuclide distribution off Fukushima using a towed sea-bed gamma ray spectrometer, Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers, Volume 79, pp.10-19, DOI10.1016/j.dsr.2013.05.001.

- 3) 海上・港湾・航空技術研究所：原子力規制庁事業平成 29 年度放射性物質測定調査委託費(福島県沿岸海域における放射性核種の蓄積状況等に関する調査)事業成果報告書,  
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>.
- 4) 海上技術安全研究所：原子力規制庁事業平成 27 年度海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究事業報告書, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/13000/12079/view.html>.
- 5) Mitsufumi Asami, So Kamada, Seiki Ohnishi, Blair Thornton, and Tamaki Ura: Temporal Changes in Radioactive Cs Concentration in Sea Sediment off East Japan, after the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Accident, 2019 IEEE International Underwater Technology Symposium, UT 2019 – Proceedings, 10.1109/UT.2019.8734371.
- 6) 海上・港湾・航空技術研究所：原子力規制庁事業平成 26 年度放射性物質調査委託費(海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究)事業成果報告書,  
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10925/view.html>
- 7) 海上・港湾・航空技術研究所：原子力規制庁事業平成 30 年度放射性物質測定調査委託費(福島県沿岸海域における放射性核種の蓄積状況等に関する調査)事業成果報告書,  
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/15000/14752/view.html>.
- 8) Mitsufumi Asami and Chiori Takahashi: Drift prediction of pyroclasts released through the volcanic activity of Fukutoku-Okanoba into the marine environment, Marine Pollution Bulletin, Volume 186, 114402,  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114402>.
- 9) Yasumasa Miyazawa, Akira Kuwano-Yoshida, Takeshi Doi, Hatsumi Nishikawa, Tomoko Narazaki, Takuya Fukuoka, and Katsufumi Sato: Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region, Ocean Dynamics, Volume 69, pages 267–282, <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1238-5> (2019)
- 10) Volcano Monitoring and Warning Center of the Japan Meteorological Agency,  
[https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly\\_v-act\\_doc/tokyo/21m08/331\\_21m08.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/21m08/331_21m08.pdf), accessed on January 2022.
- 11) Japan Coast Guard 3rd Regional Coast Guard Headquarters Pumice rafts drifting around the Izu Islands in Japan,  
<https://www.kaiho.mlit.go.jp/03kanku/08infome-shon/topix/karuishi.html>, accessed on January 2022.