

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00580

研究課題名(和文) 海洋放出された放射性核種の海底堆積過程及び局所的な高濃度状態の形成過程の解明

研究課題名(英文) Elucidation of submarine sedimentation process and formation process of local high-concentration state for radionuclide released to the ocean

研究代表者

浅見 光史 (Mitsufumi, ASAMI)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80446591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：2011年に発生した原子力発電所事故から海洋へ放出された放射性核種は海底へ堆積され、その結果、局所的に放射性核種が高濃度になる場所が存在するほか、海底堆積物内部の鉛直方向に放射性核種の濃度分布が形成されることが明らかにされている。本研究では、福島沿岸の計測結果から海底堆積物内部の放射性核種の濃度分布の主要因を海底堆積物の変動から評価するとともに、堆積物内部における放射性核種の濃度分布を再現できる放射性核種の移行モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射性核種の海底堆積物に沈着した濃度分布を形成する主要因が明らかになることで、放射性核種吸着後の海底堆積物の濃度の経時変化が把握できるようになる。その結果、従来大規模かつコストのかかる海域モニタリングが実施されていたが、本研究で開発した手法を利用することにより、放射性核種放出によってもたらされる漁業等に与える環境影響を評価するために有益な情報を提供することが容易になる。

研究成果の概要(英文)：The Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in 2011 resulted in the release of enormous quantities of radionuclides, especially radioactive cesium, into the ocean. The radionuclides which have accumulated in sea sediment have been formed vertical concentration distribution in seabed sediment. In the present study, movements of suspended particle material and radionuclides transport on the Fukushima coastal area was evaluated for understanding distribution patterns of radionuclides in seabed sediment. Furthermore, a radionuclides dispersion model was constructed to reproduce the concentration distribution of radionuclides inside the sediment.

研究分野：放射性物質大気海洋拡散，放射線遮蔽工学

キーワード：海底堆積物の広域・局所的変動 放射性核種海洋移行 質量保存流速場モデル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う原子力発電所の事故以降、海域の海水及び海底堆積物のモニタリングが実施されてきた。特に、研究代表者らが2013-2018年に実施してきた「海域における放射性物質の分布状況の把握に関する調査研究」では、海流や測定地点における海底堆積物の分布状況及びその経時変化の把握により、局所的に放射性核種が高濃度になる場所であるアノマリの存在が確認された(図1)。海洋放出された放射性核種が漁業や水産資源へ及ぼす影響を評価し必要に応じて対策を講じるには、海洋中での放射性核種の移行過程を把握し、アノマリにおける放射性核種の濃度分布の経時変化を推定することが必要とされた。

### 2. 研究の目的

海域モニタリングで、アノマリの存在することに加えて、海底堆積物内部の鉛直方向に放射性核種の濃度分布が形成されることが明らかにされている。海底の窪地に泥質が分布する測定点では、放射性核種が表層から深度約30cmに分布すること、深度分布の最大値は、表層ではなくある程度の深度で最大となる測定点を確認されている(図2)。さらに、窪地における堆積物の粒径が小さく、濃度が高い箇所の水深は30m程度までとなっている。これは海底の流れ、波浪により、表層との混合が起きているものと考えられているが、未だ主要因は解明されていない。そこで、海底堆積物内部の放射性核種の濃度分布の主要因を明らかにする。

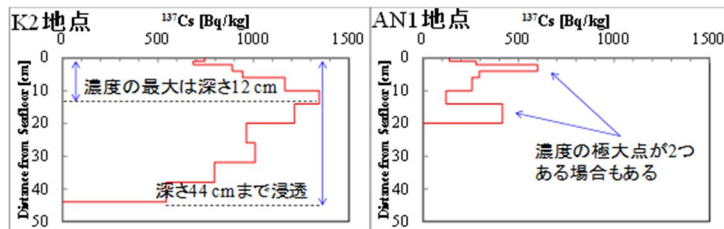


図2 放射性核種の海底堆積物内鉛直濃度分布

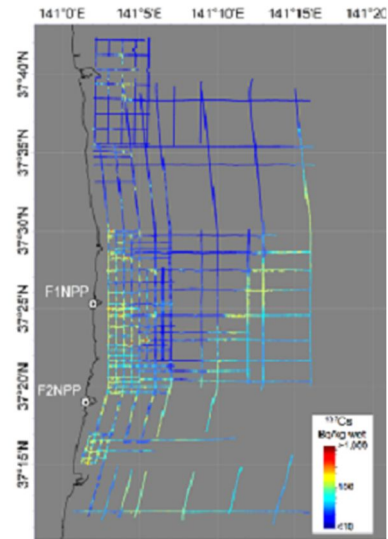


図1 曳航調査結果

また、海洋放出された放射性核種の移行については、従来解析モデルがいくつか提案されているものの、海域モニタリングで明らかになった堆積物内部における水平方向及び鉛直方向濃度分布を再現でき、形成過程の要因を説明できる解析モデルは見当たらない。そこで、海底堆積物内部の放射性核種の濃度分布を再現できる海洋中移行モデルを確立する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 海底堆積物の広域および局所的変動

1F 近傍の海底堆積物表層近傍における懸濁物質の動態を把握するため、図3に示す海域の調査結果を使用した。広域変動を把握するための海底地形変動調査と、局所的変動を把握するための海底近傍における底層流調査および底質動態調査からなる。海底地形変動調査は、図1のABCDで示される約4km四方内の海域において、マルチビーム音響測深機を用いて詳細な海底地形を2回測量したものである。2回の測量の時間間隔は1箇月である。底層流調査および底質動態調査は、図1に示す観測点 St.1 および St.2 で海底近傍の流速を計測するとともに、セジメントトラップを設置して沈降粒子を採集し、その粒子が含有する放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ )量を分析したものである。観測領域 ABCD および St.1 は、これまでの調査研究から、海底地形を要因として海底堆積物の堆積が顕著であり、その結果、海底堆積物に含まれる  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  の濃度が周囲と比較して局所的に高くなる観測点、St.2 は、海底堆積物の粒度組成が砂礫域から極細砂域(シルト)に遷移する観測点である。

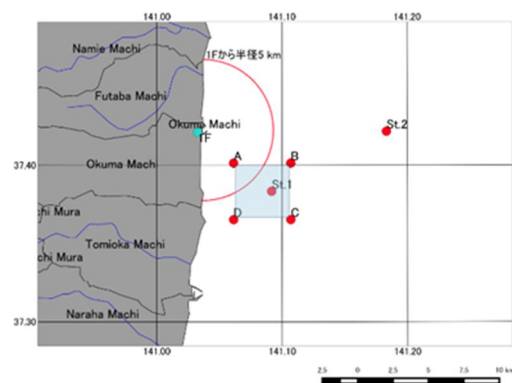


図3 海底地形の変動、底質動態および底層流の調査海域

また、図1に示した St.1 および St.2 においては、3次元超音波式ドップラー流速計(ADCP)、セジメントトラップおよび濁度計を係留設置し、30 昼夜の連続的な海底近傍の流速、海底近傍における沈降粒子の採集と濁度計測が行われている。計測期間は、St.1:平成27年12月25日-平成28年1月27日、St.2:平成27年10月5日-平成27年11月6日である。

#### (2) 海洋中の放射性物質の移行モデルの構築

海洋における放射性核種の移行モデルを導入し、海水中のほか海底堆積物中の放射性核種濃

度の計算が行えるようにする。導入した移行モデルは、海洋中に存在する粒子を、粒径の違いにより三相(溶存相：堆積しない小粒径、懸濁相：堆積し移動する中粒径、堆積相：海流で移動しない大粒径)に分類し、各相間の交換過程(吸脱着、懸濁粒子の沈降及び海底堆積物の再浮遊)を考慮するものである。三相間交換過程を考慮し、堆積相に放射性核種鉛直濃度分布モデルを適用した放射性核種の移行モデルの模式図を図4に示す。

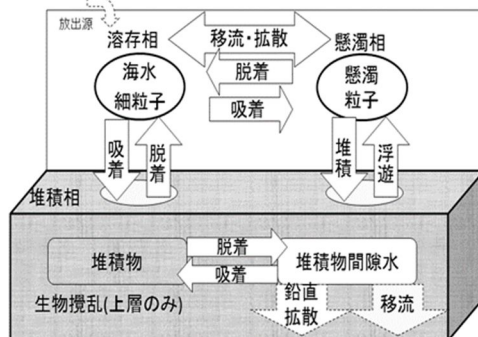


図4 放射性核種海洋移行モデル

#### 4. 研究成果

##### (1) 海底堆積物の広域および局所的変動

###### 海底境界層と濁度の変動

海底近傍の流速に対数分布則が成り立つとして得られた海底面におけるせん断応力の経時変化を、海底面近傍で測定した濁度の経時変化と合わせて図5に示した。流速の東西成分による底面せん断応力と濁度の相関は小さいが、南北成分による相関は大きい。濁度は、図に薄青で示す箇所が生じる、全測定期間において相対的に大きなせん断応力が海底面に与えられた直後に限り顕著に増大する。濁度を上昇させる限界せん断応力の値は、St.1においてはおよそ  $3.9 \times 10^{-1}$  Pa、St.2においてはおよそ 1.8 Pa となる。このことから、ある一定以上のせん断応力を海底面に与えることで、海底面表層に存在する海底堆積物が瞬間的に浮遊し、その結果濁度が著しく増大した状態が継続されることが示唆される。St.1の濁度に存在する第2、第3のピークは、St.1の海底面においてせん断応力が与えられたことによるのではなく、St.1の北部にある、St.1よりも8 m程度浅い海底地形から濁質が流入したことによると考えられる。

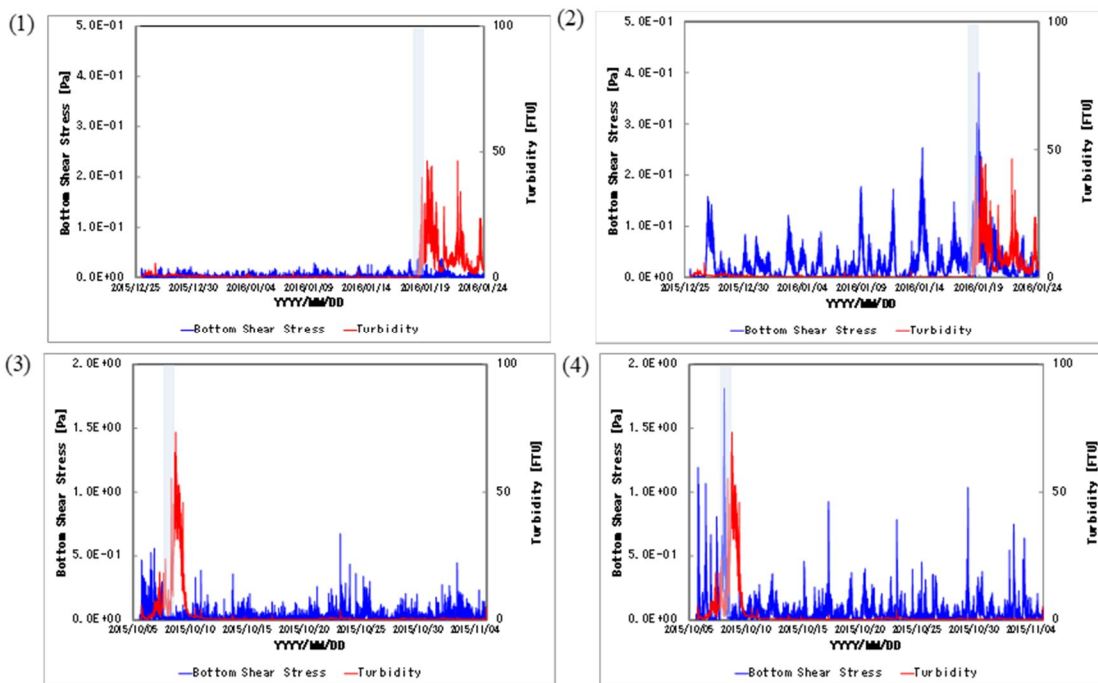


図5 底面せん断応力(青線)と底層濁度(赤線)の経時変化。(1)平成27年度調査 St.1の東西成分、(2)平成27年度調査 St.1の南北成分、(3)平成27年度調査 St.2の東西成分、(4)平成27年度調査 St.2の南北成分。薄青は濁度上昇に寄与する底面せん断応力が生じたときを示す。

###### 底層流の経時変化による周期性と海底堆積物の移動要因

底層流の経時変化による周期性を把握するために、St.1およびSt.2における南北成分にウェーブレット解析を行った。図6に示す解析結果によると、St.1では、周期120時間(5日間)および250時間(10日間)の変動成分が顕著であり、St.2では周期120時間(5日間)の変動成分のみ顕著である。このように、St.1およびSt.2に異なる周期性がみられる。平成26年度と同観測

点における底層流南北成分に同様の解析を行ってみたところ、同様の周期性がみられた。したがって、それぞれの計測地点においてこの周期帯の変動成分が支配的であることが示唆される。一方、潮汐成分である 12 時間、24 時間周期に着目すると、この周期に対する変動成分は小さく、潮汐流に影響されないと考えられる。

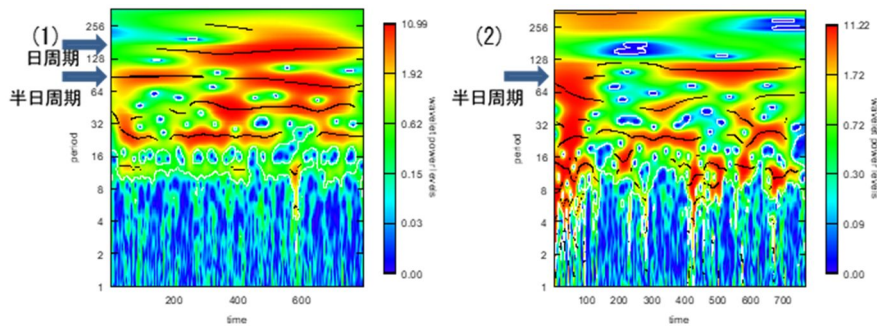


図 6 海底近傍における流速南北成分のウェーブレット解析結果。横軸は時間変化(単位:hour)、縦軸は周期(単位:hour)。パワーレベルが大きいほどその周期の変動成分が顕著であることを示す。黒線は分布のリッジ(稜線)。(1)平成 27 年度調査 St.1、(2)平成 27 年度調査 St.2。

図 6 によると、濁度の上昇する直前に大きなせん断応力が海底面に作用する。この応力が発生したときの気圧配置は、St.1 は 2016 年 1 月 18 日で低気圧の西側に、St.2 は 2015 年 10 月 8 日で台風の西側に位置しており、低気圧あるいは台風が通過する際の強風により、1~2 日間程度の時間スケールの比較的短期間の波浪が生じ、この波浪の影響が底層まで伝播することで海底面に大きなせん断応力が短期間生じた結果、海底堆積物が浮遊して移動する、という海底堆積物の移動過程が推察される。波浪場における濁度上昇時の海底近傍の限界せん断応力は、St.1 においては、流れによるせん断応力を上回る結果となり、St.2 においては、流れによるせん断応力が支配的となった。海底堆積物が移動を開始する移動限界水深は、St.1 では実際的水深よりも深く、St.2 では浅い。海上の気圧変化による波浪により、海底堆積物が移動するためには、水深が移動限界水深よりも浅い必要がある。したがって、移動限界水深と比較して、水深の浅い St.1 のような場所における海底堆積物に影響するせん断応力には波浪による影響が、深い St.2 のような場所においては流れによる影響が相対的に大きくなる。

#### 海底面近傍における堆積物の移動

濁度フラックスの累積量を用いて海底面の堆積物の移動量を考察する。濁度フラックスは、海底から同じ高さで測定した濁度と流速との積(FTU m/s)と定義した。図 7 から、堆積物の輸送は底層流の南北成分に支配的になされること、輸送量は不連続的に変化すること、その輸送は顕著な気象擾乱時に集中的に行われることが示唆される。図には、セジメントトラップで得られた沈降粒子のフラックスの累積経時変化を併記しており、堆積物の輸送としての経時変化の傾向は一致している。また、 $^{137}\text{Cs}$  の沈降粒子のフラックスも図に併記した。 $^{137}\text{Cs}$  に関するフラックスも濁度フラックスと同傾向であり、堆積物に含有される  $^{137}\text{Cs}$  が堆積物とともに移動することが示唆される。

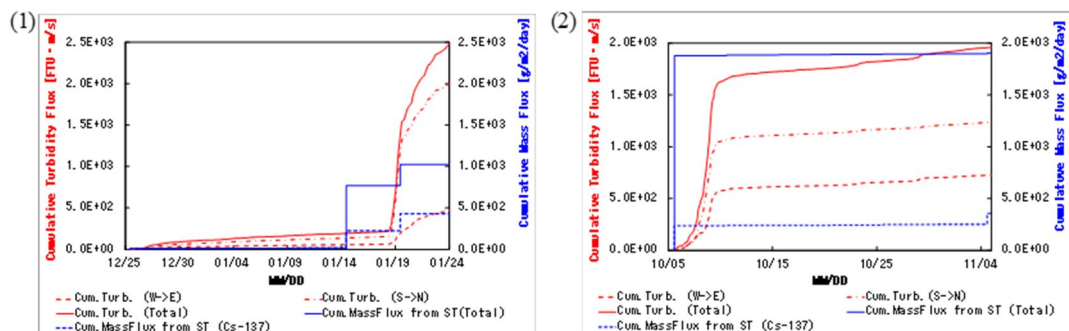


図 7 海底近傍における堆積物の輸送量および沈降粒子の全フラックス。赤実線は全堆積物輸送量、赤破線はそのうち東西成分による輸送量、赤一点鎖線は南北成分による輸送量を示す。青実線はセジメントトラップにより採集された沈降粒子の全フラックス、青破線はそのうちの  $^{137}\text{Cs}$  輸送量を示す。 $^{137}\text{Cs}$  輸送量の単位は、 $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{day}$  である。(1)平成 27 年度調査 St.1、(2)St.2。

海底地形の変化量と、海流分布を重ねあわせた結果を図 8 に示す。図から、1 箇月後に海底地形が深まることを示す青い箇所の周辺にはさらに深い地形が展開されることが示される。St.1 周辺は、移動限界水深の評価から、海上の波による影響が海底に到達し、海底堆積物が実際に移動する領域である。このような移動限界水深より浅い場所では、波による海水の往復運動における前進後退の速度差から、slope sorting(ふるい分け作用)が生じた結果、堆積物の粒径が分布

するとされる。水深が浅くなり、海底に海水の運動が触れると、海水の運動が一様でなくなるとともに、砂漣が海底に発生する。この砂漣の形に基づき堆積物の移動が確定して海底地形が変化していく。一般に、粒径の小さいものは後退し、大きいものは前進するが、同一粒径で比重の小さいものは、大きいものと比較して浮遊しやすく後退し、沖方向に移動するため、水深の深いところには、粒径および比重の小さい物質が存在するようになる。

海底堆積物における  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の分布状況に関する調査研究においては、海底堆積物に含有される  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の面的な分布には、アノマリの存在が確認されているとともに、こうしたアノマリが主に水深の深い場所に存在していることが明らかにされている。海底堆積物の  $^{137}\text{Cs}$  濃度と粒径の相関は、粒径の小さいシルト・粘土質の方が、砂質と比較して高くなる傾向にある。すなわち、粒径が小さく、比表面積が大きい粒子の  $^{137}\text{Cs}$  濃度が高くなる。このことと、前述の水深の深い場所に粒径および比重の小さい物質が存在するようになることを考慮すると、水深の深い場所での  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  濃度が高くなり、その結果アノマリが生じると考えられる。なお、この海域は、流れの南北成分が卓越しており、半日あるいは1日周期で方向が入れ替わるため、その蓄積速度は緩やかであることが予想される。

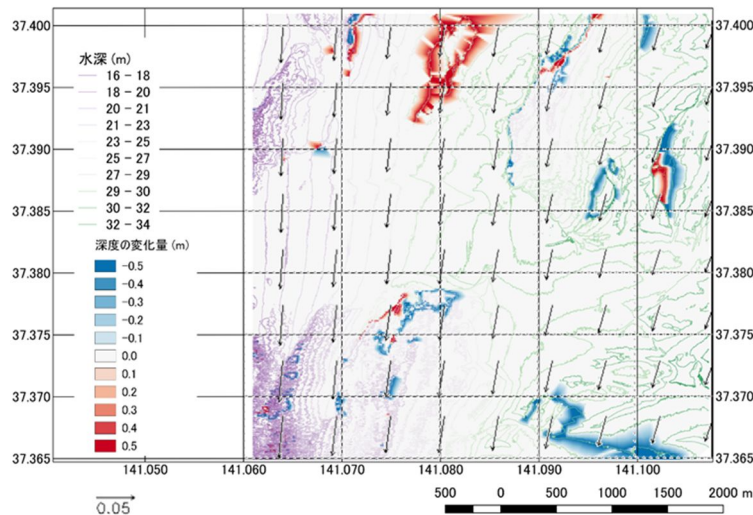


図8 海底地形の変化量と海底面より0.5 m高さの海流の流向流速分布図。(海流の単位：m/s)

## (2) 海洋中の放射性物質の移行モデルの構築

図4に示す堆積相に放射性核種鉛直濃度分布モデルを適用した放射性核種移行モデルを使用して、海底堆積物における放射性核種濃度の鉛直分布を求めた。放射性核種の海洋放出から2年経過した後の、沿岸の堆積相における  $^{137}\text{Cs}$  濃度鉛直分布の計算結果を図9に示す。比較した実測値は、特徴的な放射性核種の濃度分布形状を示す地点に対するものである。左は海底堆積物表層で高い核種濃度分布を示す場合、中央は海底堆積物表層から深く浸透(40 cm)する場合、右は濃度の極大点が2つ生じる場合にそれぞれ対応する。図には、従来の三相間移行モデル、底堆積物内部での鉛直方向一次元放射性核種移行解析手法(拡散のみ)、放射性核種鉛直濃度分布モデル(浸透流の移流成分考慮)の結果も示した。結果を比較すると、従来の三相間移行モデルあるいは三相間の相互作用を考慮しない鉛直分布モデルのみでは、実測値の最大値を評価できない。しかしながら、海底堆積物への放射性核種の供給源として、三相からの寄与全てを考慮することで、最大値及び総量の再現性に改善がみられた。

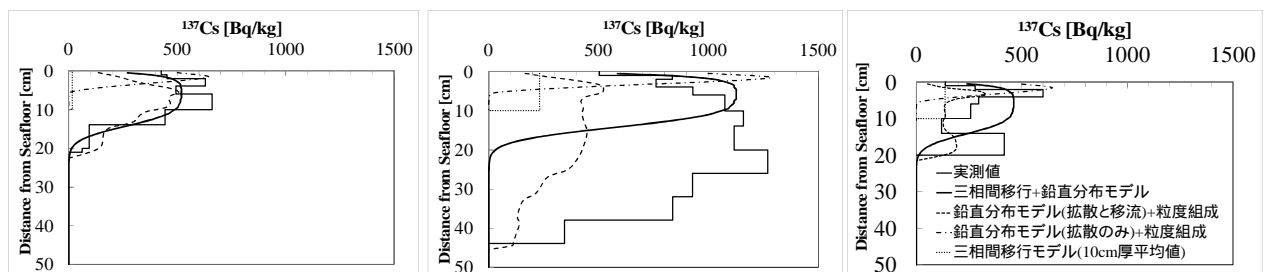


図9 堆積相における  $^{137}\text{Cs}$  濃度鉛直分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 浅見光史	4. 巻 18(2)
2. 論文標題 海底堆積物の広域および局所的変動調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 海上技術安全研究所報告	6. 最初と最後の頁 49-65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Mitsufumi ASAMI, So KAMADA, Seiki OHNISHI, Blair THORNTON, Tamaki URA
2. 発表標題 Temporal Changes in Radioactive Cs Concentration in Sea Sediment off East Japan, after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident
3. 学会等名 Underwater Technology 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅見光史、岡秀行、小田野直光
2. 発表標題 Modelling Dispersion Processes of Radioactive Materials between Dissolved Phase, Suspended Matter Phase, and Bottom Sediment Phase including Model of Spatially Distribution of Radioactive Materials in Sediments on the Seafloor
3. 学会等名 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials（国際学会）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	岡 秀行  (Hideyuki OKA)  (80399518)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員    (82627)	