# 海底堆積物の広域および局所的変動調査

浅見 光史\*

# Topographic Change and associated transport of suspended particulate materials around Fukushima Coast in Japan

by

Mitsufumi ASAMI

# Abstract

Three kinds of field measurements were performed to understand the characteristics of the bottom sediment, movements of suspended particulate material and its related radiocesium transport around the Fukushima coastal area; measurement of bathymetric feature focusing on depth of the sea, monitoring of bottom currents and trapping particles suspended near the seabed, aimed at understanding the details of bottom sediment transport processes. The observation results have shown that the north wind caused by remarkable climate change such as low pressure or typhoon instantaneously raises bottom shear stress, causing the currents to transport suspended matters.

\* 海洋リスク評価系
 原稿受付 平成30年7月30日
 審査日 平成30年12月18日

# 目 次

1.	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
2.	調査の概要と調査位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
3.	海底地形変動調査の方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52
4.	海底地形変動調査の結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
5.	底層流調査および底質動態調査の方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
6.	底層流調査および底質動態調査の結果・・・・・	56
	6.1 底層流の経時変化	56
	6.2 海底境界層と濁度の変動	56
	6.3 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	58
	6.4 海底面近傍における堆積物の移動	61
7.	まとめ ・・・・・	63
謝	'辞·····	64
参	考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	64

# 記号

z <sub>0</sub> :海底粗度高さ	[m]
<b>z<sub>1</sub></b> :海底高さ1	[m]
<b>z<sub>2</sub></b> :海底高さ2	[m]
$R_{12}:$ 異なる海底高さ $z_1, z_2$ における流速の比	[-]
$u_1$ :海底近傍の海流	[m/s]
$ au_{bc}$ :流れによる海底面せん断応力	[Pa]
$oldsymbol{ ho}$ :海水密度	$[kg/m^3]$
<b>κ</b> : karman 定数(=0.41)	[-]
$ar{m{U}}$ :質量輸送速度	[m/s]
<b>k</b> :波数	[m]
$\sigma$ :角振動数	[rad/s]
<b>H</b> :波高	[m]
<b>h</b> :水深	[m]
<b>z</b> :着目する深さ	[m]
$ au_{bw}$ :波浪による海底面せん断応力	[Pa]
<i>f<sub>w</sub></i> : Soulsby による提案式 <sup>4</sup> より得られる係数	[-]
T:波の周期	[s]
$h_e:$ 移動限界水深	[m]
L:波長	[m]
d:海底堆積物の代表直径	[mm]

# 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所(以下1F)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.海上技術安全研究所が中心となり2013年度から実施している原 子力規制庁委託事業「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)」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(アノマリ)の存在が確認された<sup>112)</sup>.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、こうした放射性核種の分布状況の把握のほか、海洋中での放射性 核種の移動過程を把握することで、アノマリの経時変化を推定することが重要である.この目的のため、堆積物 に含有される放射性核種濃度分布やその堆積物の移動については、従来数値モデルによる研究が先行している. 一方で、堆積物の再浮遊や移動の推定に必要な底面せん断応力や、再浮遊した堆積物の移動特性の把握について は必ずしも十分とは言えない.

そこで本報告では,前述の調査研究で行った海底地形変動調査,底層流調査,底質動態調査の結果に基づき, 当該海域における底面せん断応力の特徴,底層流による海底堆積物の再浮遊およびそれに伴う移動の特徴につい て検討した.

# 2. 調査の概要と調査位置

IF 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、表1および図1に示す海域を調査した. 調査項目は、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. 海底地形変動調査では、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. 海底地形の変動量を把握するために、2回の測量の間に1箇月おいた. 底層流調査および底質動態調査では、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(<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs)量を分析した. 観測領域ABCDおよびSt.1は、これまでの調査研究<sup>21</sup>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<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>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<sup>3</sup>、という観点から選定した.

調査項目	観測点	緯度	経度	水深	1F からの
(調査で使用した計測機器)				(m)	距離(km)
海底地形変動調査 (マルチビーム音響測深機)	А	37°24′05″	141°03′41″	20	3.0
	В	37°24′05″	141°06′25″	30	6.2
	С	37°21′55″	141°06′25″	30	8.6
	D	37°21′55″	141°03′41″	20	6.7
底層流調査	St.1	37°22′59″	141°05′31″	30	6.2
(ADCP)	St.2	37°25′18″	141°11′00″	59	12.4
底質動態調査	St.1	37°23′00″	141°05′30″	30	6.2
(セジメントトラップ)	St.2	37°25′18″	141°10′59″	59	12.4

表1 海底堆積物の広域および局所的変動調査の機材設置座標



図1 海底地形の変動, 底質動態および底層流の調査海域.

## 3. 海底地形変動調査の方法

海底地形の測量には、大型調査船に舷側装備したマルチビーム音響測深機(KONGSBERG 製 EM2040C)を使用 した.2回の調査は、第1回:平成27年9月25日-10月2日、第2回:平成27年11月4日-11月13日に行っ た.マルチビーム音響測深機の周波数は400 kHz を使用し、スワス角度(全送波機の扇形状の角度)は片舷最大65 度とした.調査中の船速は7~7.5 knotとし、マルチビーム音響測深機の音速補正のため、電気伝導率・温度・ 深度計(CTD: Conductivity Temperature Depth profiler)を用いた計測を1日に1回以上行い、CTD 計測結果から得ら れる音速プロファイルをマルチビーム音響測深機に入力した.計測時には、マルチビーム音響測深機の送受波器 上に設置した音速センサーでリアルタイム音速計測を行い、得られた音速をマルチビーム音響測深機の送受波器 上に設置した音速センサーでリアルタイム音速計測を行い、得られた音速をマルチビーム音響測深機に入力し表 面音速を補正した.海底地形の変動測量のために走査した航跡図を図2に示す.取得したデータは、当該調査海 域に最も近接する気象庁所管の小名浜検潮所のデータを用いて潮位補正した後、音響解析用データ処理ソフト ウェア Marine Discovery Ver.3(株式会社海洋先端技術研究所製)を用いて、音速補正、音響データの減衰吸収の除 去、およびノイズ除去を行い、メッシュサイズ1mのグリッドデータを作成した.グリッドデータより海底地 形図分布図を Geotiff 形式(TIFF フォーマットの画像ファイルに空間参照系に関する情報を埋め込んだ標準規格メ タデータ)で出力した.測量の誤差は、水平測位誤差は±0.5 m、水深値は±0.1 m である.



図2 第1回広域変動要因調査(2015年9月)の航跡図.

#### 4. 海底地形変動調査の結果

第1回および第2回調査で測量した4km四方内の海域における海底地形を,深度色別の等深線を用いて図3 に示す.海域内の水深は10~56mの範囲であり,高低差2~3mの不規則な起伏があった.また,海域北側の 水深10~34m付近(緯度141.06~141.09°: 経度37.39~37.40°)および南側の水深10~30m付近(緯度141.06~ 141.09°: 経度37.36~37.37°)に,近傍の海岸線の崖に露出する地層と同一の砂泥互層の侵食により形成された 波状岩が存在した.図4は,第1回調査および第2回調査で測量した海底地形図の差分を表した図である.第1 回調査の水深を基準として,第2回調査時に水深が深くなる領域を青で,浅くなる領域を赤で示した.差分図か ら,この海域では、1ヵ月で最大50cm程度の水深の変化が生じていることが明らかとなった.この結果は、2 回の調査の1箇月間に海底堆積物の変動により水深が変化すること,海底堆積物の変動は、測量を行った海域全 体ではなく、局所的に生じることを示唆する.



図3 4 km 四方範囲の海底地形の測量結果. (1) 第1回調査 2015 年 9 月, (2) 第2回調査 2015 年 11 月.



図4 第1回調査と第2回調査で得られた海底地形の差分図.第1回調査の水深を基準として,第2回調査時に 深い領域を青で,浅い領域を赤で示す.淡緑線は第1回調査で得られた等深線を示す.

## 5. 底層流調査および底質動態調査の方法

図1に示した St.1 および St.2 において、3 次元超音波式ドップラー流速計(ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)、セジメントトラップおよび濁度計を図5に示す模式図のように係留設置し、30 昼夜の連続的な海底近傍の流速を測定するとともに、海底近傍における沈降粒子の採集と濁度を計測した。ADCP は、可能な限り海底近傍の流速を計測するために、図5 に示すように、超音波放射方向を海底面とし、計測層の第2 層目以降が海底方向へ0.5m 毎に近づくように係留設置および設定をした。海底から最近傍の計測層高さは、St.1:0.61m、St.2:0.65m である。計測間隔は、ADCP による流速および濁度計による濁度の計測が同期するように設定し、4 分毎にバーストさせて1回計測を行うこととした。セジメントトラップの捕集口高さは海底から約 1.3 m であり、その捕集口と同じ高さに濁度計を設置した。使用したセジメントトラップは、500 mL の捕集ボトル7本をターンテーブルに装着して自動回転させることで、設定期間毎に捕集ボトルを切り替えられる。セジメントトラップには7本の捕集ボトルを装着し、捕集開始から 30 日までは6本のボトルを5 日間隔で切り替え捕集を行い、最後の7本目のボトルの捕集のみ 31 日の1 日間で行った。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.



#### 6. 底層流調査および底質動態調査の結果

# 6.1 底層流の経時変動

ADCP で計測した底層流の東西成分および南北成分を図6に示す.図より, St.1 および St.2 ともに南北成分が 卓越し,東西成分の絶対速度の大きさは10~20 cm/s 程度であるのに対し, 26~35 cm/s である.



図 6 ADCP で得られた海底面上1mにおける流速. 青線は 25 時間移動平均を示す. (1) 平成 27 年度調査 St.1 東 西成分, (2) 南北成分, (3) 平成 27 年度調査 St.2 東西成分, (4) 南北成分.

#### 6.2 海底境界層と濁度の変動

海底近傍の流速分布の特徴を把握するため,海底面からの高さが異なる位置 $z_1, z_2$ における流速 $V_{z1}, V_{z2}$ の相関を 図 7 に示した. 両者の関係は,流速の南北成分に対しては St.1 において傾き 0.86, St.2 においては 0.73 である.



これは、海底面上約0.6m近傍においては、海底面上約1.6mの7~9割程度の流速が生じたことを示す。

図 7 海底面からの高さの異なる 2 つの流速観測結果の相関.(1) 平成 27 年度調査, St.1 東西成分,(2) St.1 南 北成分,(3) St.2 東西成分,(4) St.2 南北成分.(1) (2) は,横軸は海底面から高さ 1.61 m,縦軸は高さ 0.61 m における東西(南北)成分の流速分布を,(3) (4) については,横軸は高さ 1.65 m,縦軸は高さ 0.65 m における東西(南北)成分の流速分布を示す.

海底近傍で流速に対数分布則が成立すると仮定すると、位置 $z_1, z_2$ の流速の比 $R_{12}$ を用いて、海底の粗度高さ $z_0$ は次式で表される<sup>4</sup>:

$$z_0 = \exp\left(\frac{-\ln z_2 + R_{12} \ln z_1}{R_{12} - 1}\right)$$

図7から得られた傾きが観測期間中の流速比の平均値であると考えると<sup>9</sup>, St.1, St.2 における粗度高さはそれ ぞれ表2のようになる.表2にまとめられたSt.1 における海底面の粗度高さは,現在評価の行われている沿岸域, 陸棚海域海底の粗度高さと比較して大きい(例えば文献6)では10<sup>4</sup> m 程度). この主要因は, St.1 が3.章および4. 章に示す測量海域内に含まれており,この測量海域には高低差2~3mの不規則な起伏があるほか,砂泥互層の 浸食により形成された波状岩が存在しており,小さな起伏が多いためである.特に,St.1 はその観測点を中心に 約8m窪んだ地形を呈しており,窪みに海底堆積物が移動して蓄積されやすい場所となっている.

海底近傍の流速 $u_1$ に対数分布則が成り立つ場合,粗度高さ $z_0$ から位置 $z_1$ における海底面のせん断応力 $\tau_{bc}$ は,海水密度 $\epsilon\rho$ ,カルマン定数を $\kappa$ (0.41)として,次式で表される<sup>5)</sup>:

$$\tau_{bc} = \rho u_1^2 / \left[ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z_1}{z_0} \right) \right]^2 \tag{2}$$

(1)

この式を用い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8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で生じる,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3.9×10<sup>-1</sup> 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8m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.



表2 海底面の粗度高さ

図8 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.

# 6.3 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

図8に示される,海底面における瞬間的なせん断応力が発生した要因を考察する.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における底層流変動(南北成分)のパワースペクトルを分析した.図9に示すパワースペクトルの全周波数領域において,St.2と比較して,St.1の周波数領域の変動のエネルギーレベルが低い.これは,St.1の計測を冬期に,St.2の計測を秋期に行ったため,パワースペクトルの大きさに内部潮汐の季節変動<sup>70</sup>の他,風や海流などの季節変化に影響したことが原因であると推察される.



# 図 9 底層流変動(南北成分)のパワースペクトル. 横軸は 1/hour, 縦軸はパワースペクトル(m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> h)である. 日周期は 1/24=0.042 hr<sup>-1</sup>,半日周期は 1/12=0.083 hr<sup>-1</sup>である. 青線は St. 1,赤線は St. 2 を示す.

底層流の経時変化による周期性をより詳細に把握するために,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10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年度の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.このウェーブレット解析の結果を考慮し,潮汐による変動成分をローパス フィルタである48時間タイドキラーフィルタ<sup>80</sup>で除去し,5日間あるいは10日間の周期変動の要因を推定した. 図11に潮汐変動を除去した底層流速をベクトルで示す.流速の南北成分が卓越するとともに,南北方向がおよそ 5日間あるいは10日間周期で変動している.

ここで、5~10日の周期をもち、沿岸域における流動場に影響を与える主要因の一つとして、海表面で海流に 影響すると考えられる海上風を考える.図11中の上段は、浪江で観測された風速を25時間移動平均した経時変 化である.図から、底層における海流の増大と風速の増大が同期していることから、海上風の影響が底層まで伝 播することが示唆される.図8から、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<sup>9</sup>は、図12が示すように、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する.したがって、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.そこで、 国土交通省港湾局による全国港湾波浪情報網(NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HAbourS)波浪データ<sup>10</sup>および質量輸送速度の式:

$$\overline{U} = \frac{1}{8}H^2k\sigma\frac{\cosh 2k(h+\overline{z})}{\sinh^2 kh}$$

を用いて波浪場における質量輸送速度を推定した.ここで、 $\overline{U}$ は質量輸送速度、kは波数、 $\sigma$ は角振動数、Hは波 高、hは水深、 $\overline{z}$ は着目する深さを示す.次に、波浪によって生じる底面せん断応力 $\tau_{bw}$ は、底面における質量輸送 速度の2乗に比例するとして、次式で評価した:

$$\tau_{bw} = \frac{1}{2}\rho f_w \overline{U}^2 \tag{4}$$

fwは係数であり、求めるにあたり次の Soulsby が提案した式<sup>4</sup>を用いた:

(3)

$$f_{w} = 1.39 \cdot \left(\frac{A}{z_{0}}\right)^{-0.52}$$

$$\Xi \equiv \overline{\mathbb{C}}$$

$$A = \frac{\overline{U} \cdot T}{2\pi}$$
(5)
(6)

であり、Tは波の周期である.波浪データを用いて推定した、濁度上昇時の海底近傍の限界せん断応力を表3に示す.波によるせん断応力は、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る結果となった.ここで、St.1およびSt.2について、海底堆積物が移動を開始する水深(移動限界水深)を評価した.移動限界水深heは、次式:

 $h_e = \sinh^{-1} \left[ \sqrt{\frac{2.5}{d} \cdot \frac{\pi H}{2L}} \right] \tag{7}$ 

を用いて求めた<sup>11)</sup>. Hは波高, Lは波長, dは海底堆積物の代表直径である. ここで, 文献 2)より, St.1 において  $dd = 20 \mu m$ , St.2 においては $d = 516 \mu m$ を用いた. 移動限界水深の結果は,表3 に示すように,St.1 において は実際の水深よりも深く,St.2 においては浅い.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.

汇上	日時	最大有義波高	水深	限界せん断応力	移動限界水深				
便示		(m)	(m)	(Pa)	(m)				
St.1	2015/10/08 06:00	4.21	30	0.62	71				
St.2	2016/01/18 16:00	5.27	59	0.03	35				

表3 波浪データを用いて推定した海底近傍のせん断応力



図 10 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.

(252)



図 11 底層における流速経時変化(下より1~5 段目)と浪江における風速経時変化(下より6 段目). 流速には48 時間タイドキラーフィルタ<sup>80</sup>,風速には25 時間移動平均を適用. 横軸は時間変化(単位:月日),縦軸は相対 的な速度ベクトルを表す. (1)平成27 年度調査,St.1,(2)平成27 年度調査,St.2.



図 12 濁度の著しい変化のあった日時における海上での気圧配置<sup>90</sup>. (1) 2016 年 1 月 19 日における低気圧の配置, (2) 2015 年 10 月 8 日における台風の配置を示す.

### 6.4 海底面近傍における堆積物の移動

海底表面の堆積物が,底層における海流によってどの程度移動するのかについて,濁度フラックス<sup>12</sup>の累積 量を用いて考察する.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.濁度フラックスの経時変化示す図 13 から,堆積物の輸送は底層流の南北成分により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,6.3節で考察したように,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 ている.海底面のせん断応力による濁度フラックスは水平方向の流量,セジメントトラップによる沈降粒子フ ラックスは鉛直方向の流量により,流速の方向成分が異なるため両者は単純に比較できないものの,堆積物の輸 送としての経時変化の傾向は一致している.セジメントトラップで捕集された沈降粒子については,沈降粒子に 含有される<sup>137</sup>Cs量の分析を行っており,この結果を用いて<sup>137</sup>Csの沈降粒子のフラックスも図に併記した.



図 13 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,赤ー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<sup>137</sup>Cs輸送量を示す.<sup>137</sup>Cs輸送量の単位 は,Bq/m<sup>2</sup>/dayである.(1)平成 27 年度調査 St. 1, (2) St. 2.

図4で示した海底地形の変化量と、海流分布を重ねあわせた結果を図14に示す。海流分布は、海洋研究開発 機構(JAMSTEC)の数値海洋変動予測実験(JCOPE: Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)により、日本沿岸 域での流況の数値予測(JCOPE:海洋力学モデルに基づく数値計算と観測データを同化)海流データ<sup>13</sup>(JCOPE2 再 解析データ)である. 図示した流速ベクトルは、2回の海底地形調査で挟まれる 2015 年 10 月の水深 0.5 m 海底面 より 0.5 m 高さにおける 1 箇月平均値である. 流速は, 質量保存流速場モデル 14に従い, 連続の式が成立するよ うに空間補間した. 図から, 流速の南北成分の卓越が再確認できるほか, 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, 6.3 節の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、その結果として、海底堆積物の粒径が分布すると考えられている<sup>15)</sup>:海水の運動は、水深が深いと、その 軌道に沿って一様であり、波の山が通過の際には波の進行方向に、谷が通過の際には反対方向に進むが、水深が 浅くなり、海底に海水の運動が触れるようになると、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が、実際の砂漣の形成には、波と 堆積物が複雑に関連する.一般には、粒径に着目した場合、小さいものは後退し、大きいものは前進するが、比 重に着目すると、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.

文献 2)では、海底堆積物における<sup>134</sup>Cs,<sup>137</sup>Csの分布状況に関する調査研究が行われており、調査の結果、海底堆積物に含有される<sup>134</sup>Cs,<sup>137</sup>Csの面的な分布には、アノマリ(周囲と比較して<sup>134</sup>Cs,<sup>137</sup>Cs濃度が局所的に高くなる場所)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<sup>137</sup>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<sup>137</sup>Cs濃度が高くなる<sup>16)</sup>.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<sup>134</sup>Cs,<sup>137</sup>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、6.1、6.2節に示したように、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 14 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, 海流: JCOPE2 再解析値の 2015 年 10 月の日平均値を月平均値に換算, 流速の空間補間: 質量保存流速場モデル<sup>14</sup>による.

## 7. まとめ

本報告では、「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」で行った海底地形変動調査、底 層流調査、底質動態調査の結果に基づき、底面せん断応力の特徴と底層流による海底堆積物の再浮遊とそれに伴 う移動の特徴について検討した.

海底地形調査の結果,調査海域全体においては1ヵ月で最大 50 cm 程度の水深の変化が生じたことから,海底 堆積物の再浮遊とそれに伴う移動で水深が変動すること,またその水深変動の空間的分布から,海底堆積物の変 動は,測量を実施した海域全体ではなく,局所的に生じることが示唆された.

底層流調査および底質動態調査から,ある一定値以上のせん断応力が海底面に与えられた場合に限り,濁度が 顕著に増大したことから,海流のうち卓越した南北成分により,ある一定以上のせん断応力が海底面に与えら れ,その結果海底面表層に存在する海底堆積物が瞬間的に浮遊し移動することが示唆された.

底層流の周期に着目すると、ウェーブレット解析の結果、5日あるいは10日周期が支配的であるため、潮汐の影響は無視できることが明らかとなった.底層における流速の変化および海上の風速の変化がこの周期で同期 するため、主に海上風の影響が底層まで伝播することが示唆された.これらから、低気圧あるいは台風が通過す る際の強風により生じた波浪の影響が底層に伝播し、これに伴い海底面に大きなせん断応力が短期間作用するこ とを示すとともに、波浪の影響は深度により異なることを示した.

海底近傍の堆積物フラックスの経時変化から、堆積物の移動は底層流の南北成分により支配的になされること、移動量は不連続的に変化し、顕著な気象擾乱時に集中的に行われることが示唆された. セジメントトラップ

で得られた沈降粒子のフラックスは,移動方向が堆積物の輸送とは異なるものの,経時変化の傾向が一致した. また,セジメントトラップにより採集された沈降粒子に含有される<sup>137</sup>Cs に関するフラックスが堆積物フラック スと同傾向であったことから,堆積物に含有される<sup>137</sup>Cs は堆積物とともに移動することが示唆された.

海底地形の変化量と海流の流向流速分布から,海底堆積物の移動は,海底地形と大きく関連することを明らかにした.一般に,水深の深いところ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,および粒径が小さく,比表面積が大きい粒子の<sup>137</sup>Cs 濃度が高くなることから,水深の深い場所で<sup>137</sup>Cs の濃度が高くなってゆき,その結果アノマリが生じると考えられる.比較的平坦な海底地形では,堆積物は移動しつつ海底地形に抑制されず広がるため,<sup>137</sup>Cs 濃度がその移動とともに希釈されると考えられる.

#### 謝辞

海上技術安全研究所の岡秀行博士からは、本報告に対する貴重な助言を賜った.ここに記して深甚なる謝意を 表する.本報告の一部は、原子力規制庁委託事業平成27年度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)事業により行われたものである.

#### 参考文献

- B. Thornton, et al., Distribution of local <sup>137</sup>Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. Marine Pollution Bulletin, 74(1), 344-350, (2013).
- 2) 原子力規制庁 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) 成果報告書 (2013-2015).
- K. Aoyagi, et al., On the size distribution of sediments in the coastal sea of Fukushima prefecture, Bulletin of Fukushima Prefectural Fisheries Experimental Station, 8, 69-81, (1999).
- 4) R. Soulsby, Dynamics of marine sands, ICE Publishing, London, p 249, (1997).
- H. Yagi, et al., Bottom turbidity, boundary layer dynamics, and associated transport of suspended particulate materials off the Fukushima coast, Impacts of the Fukushima nuclear accident on fish and fishing grounds, Springer Open, 77-89, (2015).
- E. Schaaff, et al., Field and laboratory measurements of sediment erodibility: a comparison, Journal of Sea Research, 55, 30-42, (2006).
- 杉松他,常磐沿岸域における流動構造と季節変動要因,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, pp.I\_411-I\_415, (2014).
- 8) 花輪他,海洋資料における日平均値の作成について,沿岸海洋研究ノート, Vol.23, No1, p79-87, (1985).
- 9) 日本気象協会, https://www.tenki.jp
- 10) 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網, https://nowphas.mlit.go.jp
- 11) 佐藤他, 漂砂に関する研究(7) 波動による海底剪断力と底質の移動, 建設省土木研究所報告, 第85号-6, (1952).
- 12) 八木他,常磐いわき沖海域における底面せん断力の特徴と底層濁質移動について,土木学会論文集 B2(海岸 工学), Vol.71, No.2, I\_391-I\_396, (2015).
- T. Kagimoto, et. al.: High resolution Kuroshio forecast system -Description and its applications-, in High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean, Springer, New York, p.209-234, (2008).
- M. H. Dickerson: MASCON A mass consistent atmospheric flux model for regions with complex terrain, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 17, p241-253, (1978).

- 15) 井島武士, 海岸・港湾測量, 森北出版, p145-147, (1960).
- 16) 公益財団法人原子力環境整備センター編,環境パラメータ・シリーズ7「海洋における放射性核種の移行パ ラメータ」, RWMC-96-P-19, p59, (1996).