

原子力規制庁委託事業

平成 31 年度放射性物質測定調査委託費

(福島県近沿岸海域等における放射性物質等の状況調査)

事 業

報 告 書

令和 2 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁から放射性物質測定調査事業として国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が委託を受け平成 31 年度に実施した調査結果を主にまとめたものである。引用や転載については、原子力規制庁の利用許可が必要です。

目次

1	はじめに	1
2	委託業務の概要	2
2.1	委託業務の目的	2
2.1.1	実施体制	2
2.2	業務内容	2
2.2.1	総合モニタリング計画の見直しの提案	2
2.2.2	1F 前面海域の海底土の放射性物質分布詳細調査	2
2.2.3	曳航式放射線モニタリングデータの再解析	3
2.2.4	海底土放射性物質分析結果の図示	3
2.2.5	検討会の設置及び開催	3
2.3	業務工程	3
3	総合モニタリング計画の見直しの提案	5
3.1	実施内容	5
3.2	これまでのモニタリングデータの評価	5
3.2.1	モニタリングデータの評価方法	5
3.2.2	海水モニタリングの解析結果	6
3.2.3	海底土モニタリングの解析結果	8
3.2.4	分析頻度の最適化検討例	9
3.3	総合モニタリング計画の見直しの提案と留意事項	10
4	1F 前面海域の海底土の放射性物質分布詳細調査	11
4.1	海底地形・海底土分布調査	12
4.1.1	調査目的	12
4.1.2	調査内容	12
4.1.2.1	調査工程	12
4.1.2.2	調査方法	13
4.1.3	調査結果	18
4.1.3.1	海底地形調査	18
4.1.3.2	海底土分布調査	20
4.2	採泥調査	26
4.2.1	調査目的	26
4.2.2	調査内容	27
4.2.2.1	調査工程	27
4.2.2.2	採泥地点	28
4.2.2.3	採泥方法	31
4.2.3	調査結果	33
4.2.3.1	粒度分布	33
4.2.3.2	海底土の放射性セシウムの分布	36
4.2.4	採泥調査のまとめ	42
4.3	海象モニタリング	43

4.3.1	調査目的	43
4.3.2	調査内容	43
4.3.2.1	調査工程	43
4.3.2.2	調査方法	44
4.3.3	調査結果	49
4.3.3.1	セジメントトラップによる沈降粒子の時系列変動	49
4.3.3.2	水質の時系列変動	56
4.3.3.3	流向・流速の時系列変動	61
4.3.3.4	海象モニタリングによる海底土の採取結果	66
4.3.3.5	有機物の測定結果	68
4.3.3.6	鉱物種の測定結果	68
4.3.3.7	調査期間中の波高、降水量及び気象データ	68
4.3.3.8	海象モニタリング結果のまとめ	71
4.4	河口域の放射能分布調査	72
4.4.1	調査目的	72
4.4.2	調査内容	72
4.4.2.1	調査工程	72
4.4.2.2	調査方法	72
4.4.2.3	測定方法	75
4.4.2.4	解析方法	76
4.4.3	調査結果	79
4.4.3.1	測定結果	79
4.4.3.2	変化傾向	80
4.4.4	河口域の放射能分布調査のまとめ	84
5	1F 前面海域の海底土放射性物質分布の考察	85
5.1	海底土中の放射性セシウム分布と海底地形の関連について	85
5.1.1	海底地形と放射性セシウム量の関係	85
5.1.2	放射性セシウム量の試算	88
5.2	河川から供給される放射性セシウムの影響について	92
5.2.1	沈降粒子と放射性セシウムの関係性	92
5.2.2	沈降粒子と降水量との関係性	93
5.2.3	台風及び降水が多い時における放射性セシウムの移動性に関する考察	94
5.2.4	海底土の放射性セシウム濃度の変動傾向	101
5.2.5	放射性セシウムの移動について	102
6	曳航式モニタリングの再解析	103
6.1	調査目的	103
6.2	調査内容	103
6.2.1	過年度までの状況	103
6.2.1.1	曳航モニタリングデータ	103
6.2.1.2	過年度までの解析手法の概要	105

6.2.1.3	海底土サンプルとの比較.....	107
6.2.2	新たな解析手法の検討.....	109
6.2.2.1	MMGC 法.....	109
6.2.2.2	海底土サンプルとの比較による信頼性評価.....	111
6.2.3	再解析結果.....	113
7	まとめ.....	115
	参考文献.....	117

図表目次

Table 2-1 業務工程.....	4
Table 3-1 海水採取ポイントのランク分け結果.....	7
Table 3-2 海底土採取ポイントのランク分け結果.....	9
Table 3-3 海底土の分析頻度を年 2 回に削減した場合のランク分け結果.....	10
Table 4-1 調査工程.....	12
Table 4-2 海底地形調査の主な使用機器.....	13
Table 4-3 品質確保にあたって重要な事項と対応策.....	14
Table 4-4 底質分布調査の主な機器.....	16
Table 4-5 品質確保にあたって重要な事項と対応策.....	16
Table 4-6 調査対象範囲の沿岸からの距離と水深及び地形傾斜.....	19
Table 4-7 海底土分布の特徴.....	25
Table 4-8 調査工程.....	27
Table 4-9 採泥地点一覧.....	29
Table 4-10 Ge 半導体検出器を用いた放射能分析の分析条件.....	33
Table 4-11 粒度試験の条件.....	33
Table 4-12 海底土の分析結果の概要.....	34
Table 4-13 調査工程.....	43
Table 4-14 沈降粒子の採取期間.....	44
Table 4-15 観測機器の諸元.....	46
Table 4-16 検出器一覧.....	48
Table 4-17 調査工程表.....	72
Table 5-1 各エリアの放射性セシウム総量 (^{137}Cs 量).....	91
Table 5-2 本年度の調査結果に基づく福島県沿岸域における放射性セシウム総量 (^{137}Cs 量).....	91
Table 5-3 放射性セシウム総量の他の研究事例との比較.....	91
Fig. 3-1 海底土の Cs-137 濃度の測定結果例 (T-1: 福島県双葉郡、1F 5-6 放水口北側).....	6
Fig. 3-2 現状の Cs-137 濃度と変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値及びランク.....	7
Fig. 3-3 現状の Cs-137 濃度と変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値及びランク.....	9
Fig. 4-1 調査位置図.....	11
Fig. 4-2 マルチビーム測深の概念図 ⁷⁾	13
Fig. 4-3 マルチビーム測深データの解析.....	14
Fig. 4-4 サイドスキャン調査(概略図).....	15
Fig. 4-5 音波探査(概略図).....	15
Fig. 4-6 サイドスキャン(左)及び音波探査(右)のデータ解析フロー.....	17
Fig. 4-7 調査対象範囲の海底地形図.....	18
Fig. 4-8 海底地形統合図.....	19
Fig. 4-9 音響画像図(モザイク図).....	20
Fig. 4-10 反射信号の記録画像(上)及び断面図.....	21
Fig. 4-11 シルト質の海底土分布域の反射信号の記録画像.....	21

Fig. 4-12 海底土の分布推定図	23
Fig. 4-13 海底土分布推定統合図	24
Fig. 4-14 海底土中の ^{137}Cs 濃度の経時変化	26
Fig. 4-15 調査期間中の気象及び海象状況	27
Fig. 4-16 採泥地点(実績)	30
Fig. 4-17 福島第一原子力発電所の事故対応に用いられている主な採泥方法	31
Fig. 4-18 VCS による採泥作業の概念図	32
Fig. 4-19 MC による採泥状況(本調査)	32
Fig. 4-20 粒度分布	35
Fig. 4-21 各採取地点の柱状試料の平均 ^{137}Cs 濃度及び最大値	36
Fig. 4-22 各採取地点の柱状試料の累積 ^{137}Cs 量	37
Fig. 4-23 ^{137}Cs の累積量の 90%深さ	38
Fig. 4-24 ^{137}Cs 濃度(平均)と粒度の関係	39
Fig. 4-25 ^{137}Cs 平均濃度の経時変化	41
Fig. 4-26 ^{137}Cs の累積量の 90%深さ	42
Fig. 4-27 観測機器の設置場所	45
Fig. 4-28 観測機器の設置イメージ	45
Fig. 4-29 沈降粒子の前処理フロー	47
Fig. 4-30 水質計・電磁流速計のデータ処理	47
Fig. 4-31 鉍物種の測定作業	49
Fig. 4-32 沈降粒子の時系列変動	51
Fig. 4-33 放射性セシウム濃度	53
Fig. 4-34 放射性セシウムフラックス	55
Fig. 4-35 調査地点1の水質の時系列変動	57
Fig. 4-36 調査地点2の水質の時系列変動	58
Fig. 4-37 調査地点3の水質の時系列変動	59
Fig. 4-38 調査地点4の水質の時系列変動	60
Fig. 4-39 調査地点1の流向・流速の時系列変動	62
Fig. 4-40 調査地点2の流向・流速の時系列変動	63
Fig. 4-41 調査地点3の流向・流速の時系列変動	64
Fig. 4-42 調査地点4の流向・流速の時系列変動	65
Fig. 4-43 海底土の放射性セシウム濃度	67
Fig. 4-44 波高及び降水量	68
Fig. 4-45 係留1回目の天気図	69
Fig. 4-46 係留2回目の天気図	69
Fig. 4-47 係留3回目の天気図	70
Fig. 4-48 係留4回目の天気図	70
Fig. 4-49 係留5回目の天気図	71
Fig. 4-50 Windy3S の外観	73
Fig. 4-51 放射能観測システムイメージ及び写真	74

Fig. 4-52 検出器の傾きとデータ抽出イメージ	75
Fig. 4-53 測定対象エリア	76
Fig. 4-54 MMGC 法によるスペクトルの分割イメージ	77
Fig. 4-55 換算係数の決定	78
Fig. 4-56 海底土サンプルとの比較	79
Fig. 4-57 USV による海底土表層の ^{137}Cs 濃度マップ	80
Fig. 4-58 真野川沖における USV による海底土表層の ^{137}Cs 濃度マップ	81
Fig. 4-59 請戸川沖における USV による海底土表層の ^{137}Cs 濃度マップ	82
Fig. 4-60 真野川沖及び請戸川沖における USV による海底土表層の ^{137}Cs 濃度の変化傾向	83
Fig. 5-1 海底地形(特に崖地形)と海水の滞留、粒子沈降等に関する概念図	86
Fig. 5-2 地形勾配 1° 以上の地点(赤線群)と距離の抽出方法	87
Fig. 5-3 ^{137}Cs 濃度(平均:上)及び累積量(下)と崖からの距離の相関	87
Fig. 5-4 主な採泥地点と崖の位置関係	88
Fig. 5-5 放射性セシウム総量の試算エリア、濃度、及び累積量の分布図	90
Fig. 5-6 沈降量と放射性セシウム濃度の関係性	92
Fig. 5-7 沈降量と放射性セシウムフラックスの関係	93
Fig. 5-8 沈降粒子と降水量の関係性	94
Fig. 5-9 降水が観測された期間の放射性セシウム濃度	94
Fig. 5-10 放射性セシウムフラックスの変動	97
Fig. 5-11 調査地点1における沈降粒子の中央粒径の変動	97
Fig. 5-12 調査地点1における沈降粒子の反射強度の変動	98
Fig. 5-13 係留2回目における底面せん断応力	98
Fig. 5-14 台風及び降水時における沈降粒子の起源	99
Fig. 5-15 係留2回目における調査地点2の底質の放射性セシウム濃度の深度分布	99
Fig. 5-16 係留2回目における調査地点3の沈降粒子の粒径分布	100
Fig. 5-17 係留2回目における調査地点3の底質の放射性セシウム濃度の深度分布	100
Fig. 5-18 放射性セシウム濃度の変動傾向	101
Fig. 6-1 曳航式モニタリング機器のスペック(報告書 ¹⁾ から作図)	104
Fig. 6-2 平成29年度及び平成30年度の曳航式モニタリングデータの測線及び堆積物コアサンプル の採取位置	104
Fig. 6-3 曳航式モニタリングの従来の解析フロー(報告書 ¹⁾ から抜粋)	105
Fig. 6-4 過年度までに報告されている曳航モニタリングによる ^{137}Cs 濃度マップ((左)平成29年度, (右)平成30年度)	106
Fig. 6-5 平成30年度における曳航式モニタリングと海底土サンプルの比較結果	108
Fig. 6-6 MMGC 法によるスペクトルの分割イメージ(再掲)	110
Fig. 6-7 換算係数の決定	110
Fig. 6-8 海底土サンプルとの比較	111
Fig. 6-9 曳航モニタリングの再解析結果に対する土壌コアサンプル測定結果(0-10cm 平均値)の分布	112
Fig. 6-10 曳航モニタリング再解析結果((左)平成29年度,(右)平成30年度)	114

添付資料

●総合モニタリング計画の見直しの提案

3-1: 海洋における放射性物質濃度モニタリングの在り方について

●採泥調査

4.2-1: 放射性セシウムの鉛直分布(VCS)

4.2-2: 放射性セシウムの鉛直分布(MC)

4.2-3: 放射性セシウム濃度等の既往結果との比較

●海象モニタリング

4.3-1: 放射性セシウムの鉛直分布(アシュラ)

添付データ(DVD)

●海底地形・海底土分布調査

4.1-1: 海底地形データ(XYZ, CSV 形式)

4.1-2: 海底土分布データ(Geotiff 及びポリゴン(shp)データ)

●採泥調査

4.2-1: 柱状試料観察記載シート(MC:PDF 形式)

4.2-2: 柱状試料観察記載シート(VCS:PDF 形式)

4.2-3: 採泥試料の Cs 分析・粒度試験結果(エクセル形式)

4.2-4: 粒度試験の通過重量曲線等(PDF 形式)

4.2-5: 放射能分析の品質保証に関する EN 評価証明

●海象モニタリングデータ

4.3-1: 柱状試料観察記載シート(GS:PDF 形式)

4.3-2: 懸濁物質試料データ(重量、放射能分析結果等)(エクセル形式)

4.3-3: 電磁流速計・水温・塩分・濁度・クロロフィル a データ(CSV 形式)

4.3-4: 沈降粒子の通過重量曲線等(PDF 形式)

4.3-5: 粒度試験の通過重量曲線等(GS)(PDF 形式)

4.3-6: 鉱物種のピークリスト(ワード形式)

●検討会関連資料

第一回

第二回

第三回

1 はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災とこれに伴う津波によって発生した東京電力株式会社(以下、「東電」という。)福島第一原子力発電所(以下、「1F」という。)の事故により、環境中に大量の放射性物質が放出された。この事故により海域に放出された放射性物質の分布を把握するため、国、自治体、事業者等が、事故発生直後から 1F 周辺海域において放射性物質の分布に係る調査を実施してきた。特に原子力規制庁では、「総合モニタリング計画・(別紙)海域モニタリングの進め方」を策定するとともに、同計画に基づき、海域モニタリングに関する関係機関の連携の推進を図ってきた。

これまでの調査結果から、1F 周辺の海底土や海水中の放射性物質の分布状況や経時変化の概況が明らかになってきた。それによると海底土及び海水中の放射性物質は低減してきており、現状では低いレベルであることが確認されている。

一方で、1F の事故により陸域に放出された放射性物質の一部は、今後とも土壤に吸着して河川を通じて海域に流入することから、流入する放射性物質の分布やその規模等を把握することが重要である。海域においては、放射性物質を含む海底土は、気象、海象等の変動により水平移動―堆積―再懸濁を繰り返しながら移動するため、放射性物質の分布状況は時々刻々と変化する。このため、海底土中の放射性物質の経時的な情報の取得と、その評価が、放射性物質の分布状況の理解にあたって重要である。

このような背景のもと原子力規制庁は、1F 近傍沿岸等の海域の今後の放射性物質の蓄積、移動状況、並びに河川を経由した陸域からの流入を評価するために、以下の項目を国立研究開発法人日本原子力研究開発機構に委託した。

- ① 科学的根拠に基づき、より効果的かつ効率的な、適正な調査ポイント及び頻度の提案を通した「総合モニタリング計画・(別紙)海域モニタリングの進め方」の見直しの提案
- ② 1F 前面海域の海底土の放射性物質分布詳細調査の実施
- ③ 海底土放射性物質分析結果の図示

本報告書は、上記①、②及び③の結果をとりまとめたものである。

2 委託業務の概要

2.1 委託業務の目的

原子力規制庁では、東電の1Fの事故以降、「総合モニタリング計画・(別紙)海域モニタリングの進め方」に基づいて1Fに面した海域における放射性物質の状況等を調査し、関係機関の調査結果と合わせて公表してきた。これまでの国、自治体、事業者等の調査結果から、海底土については、徐々に低減していることを確認できているが、海底地形及び陸域からの流入等の要因により、今でも相対的に放射性セシウム濃度の高いポイントが存在することも明らかになってきた。そこで、本年度の調査事業は、1F近傍沿岸等の海域の今後の放射性物質の蓄積・移動状況並びに河川を經由した陸域からの流入を把握・評価するために、科学的根拠に基づきより効果的かつ効率的な実施体制とすべく、適正な調査ポイント及び調査頻度を提案するとともに、今後の中長期的な影響(蓄積・移動・流入)を考察し、解析するために必要な基礎データの取得を目的とした。

2.1.1 実施体制

本業務は国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)の安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター及び福島研究開発部門 福島研究開発拠点 福島環境安全センターが実施した。原子力緊急時支援・研修センターは主に本業務の推進に関わる調整業務や本業務の評価、審議等を行う検討会(「添付データ「検討会関連資料」参照)の推進を、福島環境安全センターは調査の実施、評価、取りまとめを行った。

2.2 業務内容

2.2.1 総合モニタリング計画の見直しの提案

1F近傍の沿岸域における今後の中長期的な放射性物質濃度調査(海水・海底土)の在り方について、科学的根拠に基づき、調査地点、調査頻度等の適正について検討し、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」に必要な考え方について整理を行った。

2.2.2 1F前面海域の海底土の放射性物質分布詳細調査

海域における中長期的な調査方法を定める上で必要な情報として、相対的に放射性セシウム濃度が高いポイントが存在する1F近傍や河川河口前面を含む福島近沿岸域の海底土の放射性物質の濃度分布等を把握するために以下の詳細調査を実施した。

① 海底地形・海底土分布調査

海底土における放射性セシウム分布と関連が高いと考えられる海底土の粒度分布と、それらの海底地形との関連を把握するため、サイドスキャンソナーを用いた海底土分布調査、音波探査による海底面下の堆積相の調査、及びマルチビーム測深による海底地形の調査を実施した。調査範囲は、広野沖の約5~9kmまでの海域(約100km²)とした。

② 採泥調査

放射性セシウムの水平方向の分布及び海底面下の分布を把握するために、福島県近沿岸域及び河川沖合海域の71地点で柱状試料を採取した。採取した柱状試料は、厚さ2cmの間隔で切り分け、乾燥後、ゲルマニウム(Ge)半導体検出器で放射性セシウム濃度を分析した。また、得られた結果を、原子力規制庁及び東電等の既往の調査結果と比較した。

③ 海象モニタリング

河川から流入した懸濁物質に含まれる放射性セシウムの海洋中での動態を把握するため、請戸川河口域を中心とした4地点において、セジメントラップを用いた懸濁物質の捕集、放射性セシウム濃度分析等を実施した。

④ 河口域の放射能分布調査

河川から河口沿岸域への放射性セシウムの流入を評価するため、真野川、請戸川、及び富岡川の河川河口前面において、海底放射能測定用機器を使用し、海底土表層の放射性セシウム濃度を計測した。

2.2.3 曳航式放射線モニタリングデータの再解析

平成25年度から原子力規制庁が実施してきた曳航式モニタリングについて、放射性セシウム分布推定の精緻化を図るため、これまでに取得したデータの再解析を行った。

2.2.4 海底土放射性物質分析結果の図示

定点での採泥調査結果(原子力規制庁、原子力機構、福島県及び環境省)及び曳航調査結果(原子力規制庁及び福島県水産試験場)等の既往の調査結果を統合し、本事業の海底地形・海底土分布調査結果及び採泥調査結果を合わせ、1F前面海域(福島沿岸20km圏内)において海底土中に含まれる放射性セシウム濃度が高い地点を特定できる分布図を作成した。

2.2.5 検討会の設置及び開催

本業務の推進にあたって、有識者等で構成する検討会「福島における環境放射線モニタリングに関する技術検討会」を開催し、得られた情報や解析結果等について評価、審議等を行った。なお、検討会は平成31年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業と合同で開催した。

2.3 業務工程

業務期間は平成31年4月1日から令和2年3月31日である。各業務の工程をTable 2-1に示す。

3 総合モニタリング計画の見直しの提案

3.1 実施内容

総合モニタリング計画は、平成 23 年 8 月 2 日に政府が原子力災害対策本部の下にモニタリング調整会議を設置し策定したもので、この計画に基づき、関係府省、地方公共団体、原子力事業者等が連携してモニタリングを実施することとなっている。海域に関するモニタリングの実施項目については、別紙「海域モニタリングの進め方」にまとめられている。本計画はおよそ 1 年毎に見直されており、最新は平成 31 年 2 月 1 日に改定されている。事故から 8 年目を迎えた現在、海域環境中での放射性物質の分布状況は概ね明らかとなりつつあり、効率的かつ効果的な海域モニタリングの在り方について改めて検討する時期に差し掛かっている。本事業では、「福島における環境放射線モニタリングに関する技術検討会」に海洋部会を設置し、海水及び海底土のモニタリング計画について検討を行った。本章では検討結果の概要を記す。詳細は「添付資料 3-1: 海域における放射性物質濃度モニタリングの在り方について」報告書を参考されたい。

3.2 これまでのモニタリングデータの評価

3.2.1 モニタリングデータの評価方法

今後の海域モニタリングの在り方について検討するにあたり、これまで総合モニタリング計画で取得された全地点のモニタリングデータに関して、以下の 3 項目について解析を実施した。

- ① 事故から 6 年後-7 年後間（平成 29 年 4 月から平成 30 年 3 月まで）の平均放射性物質濃度（以下、現状の濃度）。
- ② 事故から 2 年目以降の放射性物質濃度の変動ファクター（以下、変動ファクター）：事故後 2 年目以降のモニタリングデータについて経過時間に対する対数線形回帰分析を行った。実測値と回帰関数から得られた予測値との相対誤差を求め、得られた誤差の標本標準偏差（標準誤差）の 2 倍を変動ファクター（90-95%信頼限界値）と定義した。
- ③ 事故から 2 年目以降の実効半減期（以下、実効半減期）：上記の対数線形回帰直線の傾きから実効半減期を求めた。

評価例として、T-1 ポイント（添付資料 3-1 の別添図 1（以下、別添図）参照）における海底土の Cs-137 の測定結果と近似直線について Fig. 3-1 に示す。本章では、別紙「海域モニタリングの進め方」に記載されている放射性物質のうち、事故による影響が大きかった Cs-137 についての詳細な解析結果を示す。その他の放射性物質（Sr-90、Pu-238、Pu-239+240 及び H-3）については添付資料を参考されたい。

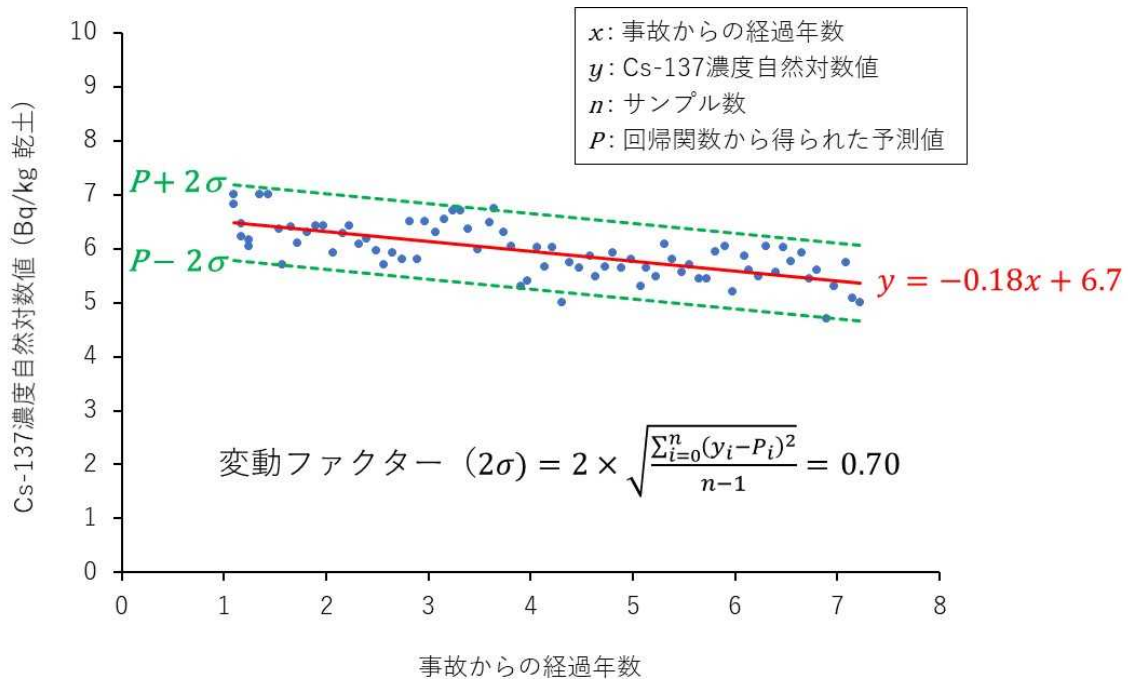


Fig. 3-1 海底土の Cs-137 濃度の測定結果例 (T-1: 福島県双葉郡、1F 5-6 放水口北側)

3.2.2 海水モニタリングの解析結果

総合モニタリング計画に記載のある放射性セシウム (Cs-134 及び Cs-137) 濃度を測定している全 352 地点の Cs-137 のモニタリング結果について 3.2.1 項に示した 3 項目の解析を行った。採取ポイントの重要度について相互比較を行うため、以下の 2 段階の判定基準を設定し、6 段階にランク分けを行った。

・第 1 段階

「現状の濃度」及び「変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値(現状の濃度×変動ファクター、以下、95 パーセンタイル値)」の 2 つの数値を用いて以下のように判定する。

脚注:* 試料数により 95-97.5 パーセンタイル値となるが、本報告書では保守的に 95 パーセンタイル値と標記する。

ランク A: 現状の濃度が 0.5 Bq/L 以上

ランク B: 現状の濃度は 0.5 Bq/L 未満だが、95 パーセンタイル値が 0.5 Bq/L を超過する可能性がある

ランク C: 0.5 Bq/L 超過の可能性は低いが、現状の濃度が 0.01 Bq/L 以上、または 95 パーセンタイル値が 0.01 Bq/L 超過の可能性はある

ランク D: 現状の濃度が平常の変動上限値 0.01 Bq/L を下回り、95 パーセンタイル値も 0.01 Bq/L を超過する可能性が低い

判定基準である 0.5 Bq/L は、濃縮係数を 100¹⁾とした場合の水産物の基準値(100 Bq/kg)に相当する海水濃度値(1Bq/L)に濃度値の誤差やバラつきを考慮した安全係数 2 で除した数値を設定した。もう一つの判定基準となる平常の変動上限値 0.01 Bq/L については、事故前の放射性セシウム濃度レベルの最大値を参考として設定した。

・第 2 段階

第1段階においてランクB及びCに該当した採取ポイントについて、実効半減期がCs-137の物理的半減期相当である30年を超えた場合、新たな流入影響の可能性が考えられるため、それぞれランクB*及びC*として区別した。

Fig. 3-2に「現状の濃度」及び「95パーセンタイル値」を散布図としてプロットした。その結果、ランクB*及びC*となった地点は無かった。Table 3-1に各採取ポイントのランク分け結果について示す。ランク分けの結果については、添付図1に採取ポイントの位置を示す。

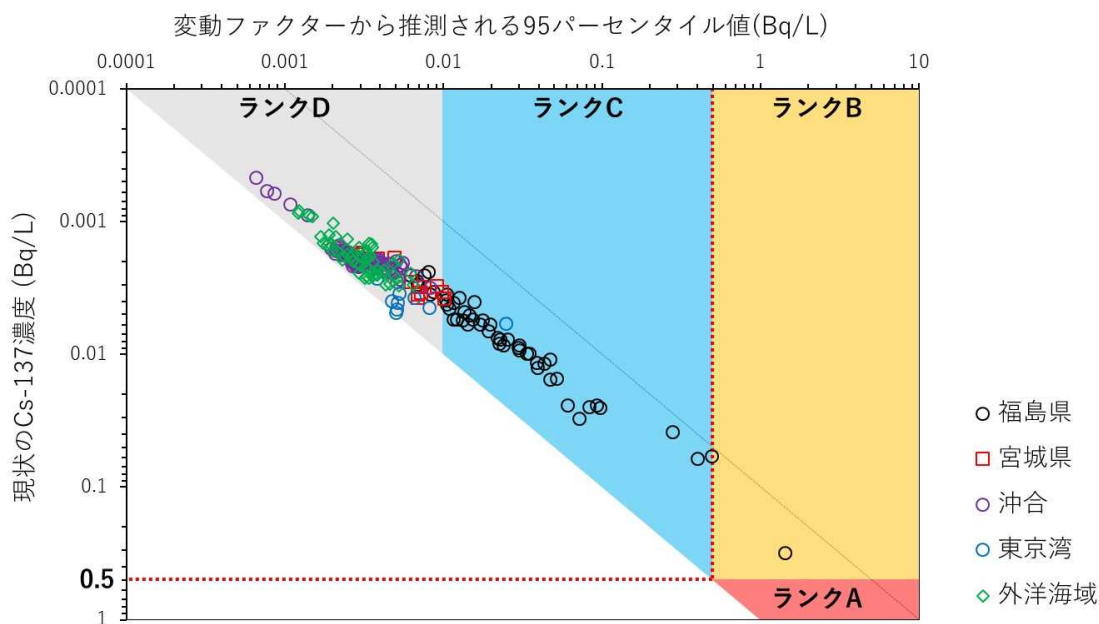


Fig. 3-2 現状のCs-137濃度と変動ファクターから推測される95パーセンタイル値及びランク

Table 3-1 海水採取ポイントのランク分け結果

	A	B*	B	C*	C	D	計
岩手県	0	0	0	0	0	4	4
宮城県	0	0	0	0	1	37	38
福島県	0	0	1	0	42	77	120
茨城県	0	0	0	0	0	22	22
沖合	0	0	0	0	0	84	84
外洋海域	0	0	0	0	0	58	58
東京湾	0	0	0	0	1	25	26
計	0	0	1	0	44	307	352

3.2.3 海底土モニタリングの解析結果

総合モニタリング計画に記載のある放射性セシウム (Cs-134 及び Cs-137) 濃度を測定している全 200 地点の Cs-137 のモニタリング結果について 3.2.1 項に示した 3 項目の解析を行った。海水の場合と同様に、採取ポイントの重要度について相互比較を行うため、以下の 2 段階の判定基準を設定し、6 段階にランク分けを行った。

・第 1 段階

「現状の濃度」及び「変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値(現状の濃度×変動ファクター、以下、95 パーセンタイル値)」の 2 つの数値を用いて以下のように判定する。

ランク A: 現状の濃度が 50 Bq/kg 乾土以上

ランク B: 現状の濃度は 50 Bq/kg 乾土未満だが、95 パーセンタイル値が 50 Bq/kg 乾土を超過する可能性がある

ランク C: 50 Bq/kg 乾土超過の可能性は低いが、現状の濃度が 10 Bq/kg 乾土以上、または 95 パーセンタイル値が 10 Bq/kg 乾土超過の可能性はある

ランク D: 現状の濃度が平常の変動上限値 10 Bq/kg 乾土を下回り、95 パーセンタイル値も 10 Bq/kg 乾土を超過する可能性が低い

判定基準である 50 Bq/kg 乾土は、原子炉等規制法に定められる放射性セシウムのクリアランスレベル(100 Bq/kg)を参考とし、濃度値の誤差やバラつきを考慮した安全係数 2 で除した数値を設定した。もう一つの判定基準となる平常の変動上限値 10 Bq/kg 乾土については、事故前の放射性セシウム濃度レベルの最大値を参考として設定した。

・第 2 段階

第 1 段階においてランク B 及び C に該当した採取ポイントについて、実効半減期が Cs-137 の物理的半減期相当である 30 年を超えた場合、新たな流入影響の可能性が考えられるため、それぞれランク B*及び C*として区別した。

Fig. 3-3 に「現状の濃度」及び「95 パーセンタイル値」を散布図としてプロットした。Table 3-2 に各採取ポイントのランク分け結果について示す。ランク分けの結果については、添付図 1 に採取ポイントの位置を示す。

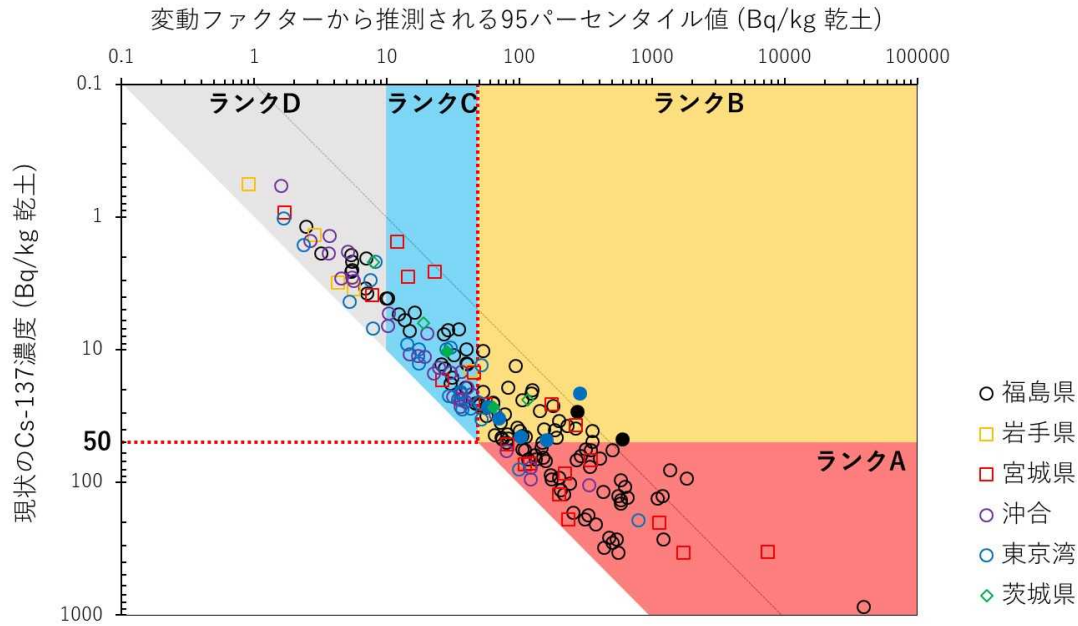


Fig. 3-3 現状の Cs-137 濃度と変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値及びランク
(塗りつぶした採取ポイントは評価した実効半減期が 30 年を超える地点)

Table 3-2 海底土採取ポイントのランク分け結果

	A	B*	B	C*	C	D	計
岩手県	0	0	0	0	1	5	6
宮城県	10	0	3	0	5	2	20
福島県	47	2	32	0	21	9	111
茨城県	0	1	1	1	1	1	5
沖縄	4	0	1	0	19	8	32
東京湾	2	5	2	2	9	6	26
計	63	8	39	3	56	31	200

3.2.4 分析頻度の最適化検討例

これまでのモニタリングデータから、海底土の放射性物質濃度の空間変動は非常に大きく不均一となっていることが明らかとなった。しかし、海底土のモニタリングデータの時間変動は、海底土自体の濃度変動の影響よりも、採取サンプル毎の粒径分布の違い等、空間変動による影響が大きいと考えられる。その変動幅を考慮に入れても十分に濃度が低い地点及び明確な濃度低下傾向が認められる地点については、大幅な分析頻度の削減が可能と考えられる。一方で、分析頻度を削減することにより、前項で評価したランクが下位側に過小評価され、本来継続的なモニタリングが必要であった場所が削減対象となることは避けなければならない。ここでは、分析頻度の最適化の評価例として、年間 6 回以上実施されている 112 地点(年間 12 回: 75 地点、年間 6 回: 37 地点)における海底土の過去のモニタリングデータに対して、データの間引きにより年 2 回のモニタリングを模擬し、ランク分けの結果を評価した。

各地点において年間の全データによるランク分けと間引き後のランク分けの結果について Table 3-3 に示す。全体として、現状との差異は少なく、今回の評価対象とした採取ポイントにおいては年 2 回に分析頻度を削減しても同等の評価が可能で、モニタリングの連続性は確保できると考えられる。17 地点でランクが上位に変更されたが、下位に変更される例はなかった。解析結果から、分析頻度削減により上位側への評価ランクが変更になる採取ポイントについて変動ファクターを確認したところ、比較的モニタリング結果のばらつきが大きい地点であることが分かった。また、ランク D と評価された採取ポイントについては、分析頻度を削減した結果として評価が保守的な方向に上昇した場合でも、ランク C への評価変更には留まっていた。このことから、ランク D と評価された採取ポイントの分析頻度の削減は他のランクに比べて合理的に許容されやすいと考えられる。

Table 3-3 海底土の分析頻度を年 2 回に削減した場合のランク分け結果

	評価結果					
	A	B*	B	C*	C	D
現状	63	8	39	2	54	34
年2回に削減した場合	69	7	40	4	48	32
(増減数)	(+6)	(-1)	(+1)	(+2)	(-6)	(-2)

3.3 総合モニタリング計画の見直し提案と留意事項

海水、海底土とも、放射性物質の濃度は全体としては低い水準であることが確認されている状況から、3.2 節で示した評価方法により分析頻度と採取ポイントの見直しを行うことは有効と考えられる。以上の検討結果を踏まえ、「福島における環境放射線モニタリングに関する技術検討会」海洋部会から、下記のモニタリングの変更方針が提言された。

「今後の海域モニタリングの計画策定に当たっては、ランク D (現状の濃度が事故前の平常時の変動上限値を下回り、測定値の変動を考慮してもその値を超過する可能性が低いランク) の採取ポイントの削減もしくは頻度の見直し、ランク C (現状の濃度は低い水準であるものの、事故前の平常時の変動上限値を超えているか、測定値の変動を考慮した値が変動上限値を超える可能性があるランク) 以上の海水及び海底土の採取ポイントについて年 2 回への段階的な頻度の見直し等を実施することが考えられる。」

今回実施したような評価は、2-3 年おきに継続的に実施すべきであると考えられる。また、近傍に同ランクに分類される採取ポイントについては、3.2 節で示した評価の結果を相互比較し、実施機関間で十分な調整を行った上で、採取ポイントの集約による効率化を検討することが考えられる。一方で、効果的な採取ポイントの選択及び重点化については、現在の供給源(1F 及び近傍河川)からの距離、放射性物質の蓄積状況等を考慮に含め、今後も継続した議論が必要であると考えられる。

4.1 海底地形・海底土分布調査

4.1.1 調査目的

海底地形は、移動限界水深（波浪の影響が水底面に到達する水深）や沿岸流に影響を及ぼすため、海水中に含まれる土壌粒子の挙動に影響を与える要因の一つと考えられる。特に放射性セシウムの吸着の程度が高い細粒の粒子は、窪地等の滞留域に沈降しやすく、その結果、窪地においては局所的に放射性セシウム濃度が高くなる地点が存在することが確認されている^{1) 2) 3)}。また福島県の浅海域（概ね水深 30 m 以深）については、海底土が分布していない岩盤が広く分布していることから³⁾、海底土中の放射性セシウムの分布を的確に把握する上では、海底地形及び底質分布に関する情報を取得することが有効である。

上記に基づき、原子力機構ではこれまでに小高川から富岡川にかけての河口沿岸域（概ね沖合 5 km まで）について^{3) 4)}、原子力規制庁は 1F 沖合約 10 km にかけて海底地形及び底質分布調査を実施してきた⁵⁾。一方で、富岡川から株式会社 JERA 広野火力発電所（以下、「広野火力」という。）にかけて、原子力規制庁による曳航式放射線モニタリングにより放射性セシウム濃度が周辺に比べて有意に高い地点が複数確認されているものの⁶⁾、海底地形及び海底土の分布に関する情報が取得されていないため、放射性セシウムの濃度が高い要因が不明であった。そこで、富岡川から広野火力にかけての沖合 5 km 程度までの範囲について、海底地形及び底質分布の調査を実施した。なお、本調査は三洋テクノマリン株式会社が役務調査として実施した。

4.1.2 調査内容

4.1.2.1 調査工程

調査工程表を Table 4-1 に示す。現地調査は、海底地形調査は令和元年7月 16 日～9 月 5 日、海底土分布調査は同年 7 月 16 日～8 月 8 日に実施した。

Table 4-1 調査工程

調査項目	年・月										R2年		
	H31年	R元年									1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
調査計画	←————→												
海底地形調査				←————→									
海底土分布調査													
サイトスキャナー				←————→									
音波探査				←————→									

4.1.2.2 調査方法

① 海底地形調査

1) 調査方法

海底地形調査は測深機から海底に向けて音波（音響ビーム）を発振し、海底で反射して戻ってくるまでの時間を測り水深値を算出する。今回の調査では、扇状に音響ビームを発振することにより、数百～数千点の面的な水深データを取得する「スワス測深」の一手法である「マルチビーム測深」を採用した（Fig. 4-2）。調査に使用した主な機器を Table 4-2 に示す。

本調査では、音響ビームと海底面の相対的な空間位置の正確性がデータの精度を決定するため、調査船の位置、調査船における発振器の取り付け位置、変動する潮位に対応した吃水確認、水面に対する送受波器の角度のずれの計測は極めて重要である。そこで、調査データの品質を確保するために重要なこれらの事項について、Table 4-3 に示す対応を図った。

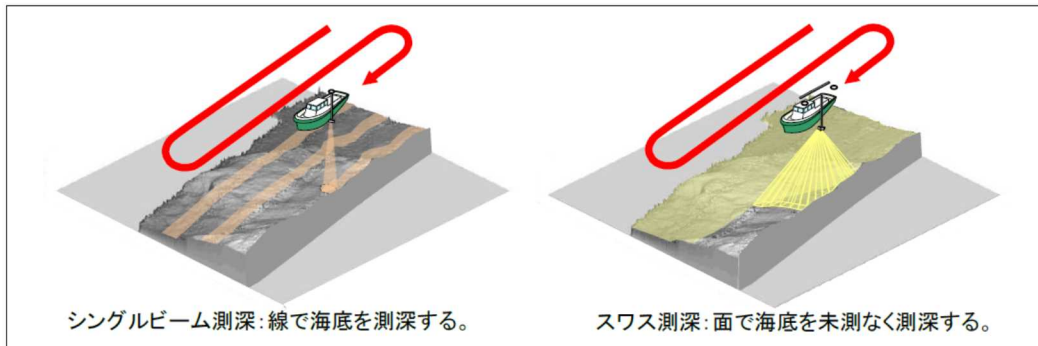


Fig. 4-2 マルチビーム測深の概念図⁷⁾

Table 4-2 海底地形調査の主な使用機器

使用機器	機能
ディファレンシャルGNSS*1 	MT-SAT(運輸多目的衛星)による補正情報の配信方式(SBAS)を使用し、海域で高精度に測位する。
マルチビーム測深ソナー 	調査船の進行方向に発信したビームと進行方向に形成される多数の受信ビームの交点での角度ごとの音波の戻り時間を計測し水深値を求める。
動揺センサー 	測深データへの風や波浪による調査船の揺れの影響を補正するために機器で、リアルタイムに調査船のロール・ピッチ・ヨーの3成分を計測する。
方位センサー 	調査船またはソナーの航行方位をリアルタイムで計測することで、マルチビームがどの向きで送受波しているかを補正する。
水中音速時計 (もしくは水温塩分計) 	水中音速度もしくは水温塩分計で、表層～海底面まで一定深度毎に計測し、測深データを水深毎に音速度補正する。

*1: MT-SAT(運輸多目的衛星)による補正情報(SBAS方式)を受けた全球測位衛星システムの略 (Differential Global Navigation Satellite System)

Table 4-3 品質確保にあたって重要な事項と対応策

品質確保事項	目的	対策
GNSS ^{*1} 精度確認	音響ビームと海底面の相対的な空間位置の正確性を保つため	測量実施前に「平成14年海上保安庁告示第102号」、「水路測量業務準則」、「水路測量業務準則施工細則」に則り精度確認を行い、精度確認結果をGNSS精度管理表に取りまとめる。
計測機器の取付け位置(オフセット)		マルチビーム測深機器本体及び周辺機器の位置関係(オフセット値)を明確にし、測深中も位置関係が変化しないように機器を取付ける。艙装状況に変更があった場合は、必ず再計測を実施する。
吃水確認	音響測深値の機械的誤差及び水中音波速度の変化による改正量を求めるため	吃水の確認はバーチェックにより行い、水面を基準(0m)として反射板を吊下げ数mで固定し、ソナーヘッドから反射板の距離をマルチビーム測深機で計測し確認を行う。
パッチテスト	水面に対する角度の補正を実施するため	マルチビーム測深システムは、水面に対してできるだけ水平、垂直に艙装することを基本とするが、船の形状や固定時のワイヤ等の張り具合により必ず取付け誤差が発生する。この取付け角度の誤差(バリエーション)と各機器の収録遅延(レイテンシー)を求めめるために実施する。パッチテストは、測深中艙装状況に変化がないことが前提であるが、変化があった場合は必ず再計測を行う。

*1:全球測位衛星システムの略 (Global Navigation Satellite System)

2) データ処理・解析

マルチビーム測深により得られた測深データは、Fig. 4-3 に示すように、位置補正、潮位補正、動揺補正（ロール・ピッチ・ヨー：マルチビーム測深）、音速度補正(マルチビーム測深)、バーチェック補正（シングルビーム測深）を行ったのち、海中ノイズデータ（海中浮遊物、多重反射データ等）の除去を実施し、3次元テキストデータを作成した。これらを基に、メッシュデータ化し（約 10 m 間隔）、水深図を作成した。

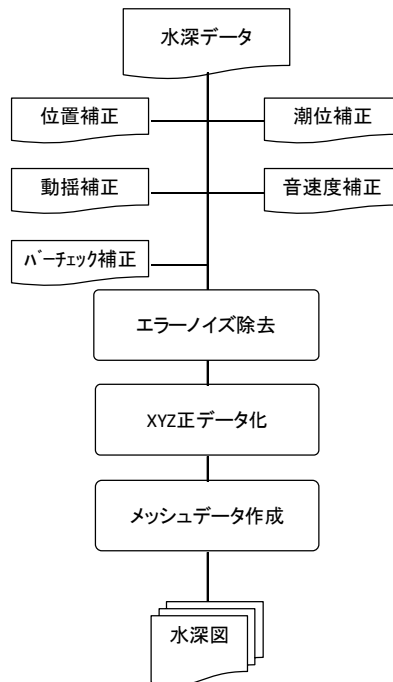


Fig. 4-3 マルチビーム測深データの解析

② 海底土分布調査

1) 調査方法

海底土分布調査は、海底土の面的な分布を計測するサイドスキャンと、海底面下の鉛直的な分布を計測する音波探査からなる。サイドスキャンは、海底面の音響画像を取得して、音響帯（音圧）に基づき、海底面の底質（泥質、砂質、礫質）、岩盤、人工物等を推定する（Fig. 4-4）。音波探査は、発振した音波の海底面下地層境界からの反射信号を連続的に記録し、その記録の解析を行うことで海底面下の底質分布範囲を推定することが可能である（Fig. 4-5）。調査に使用した機器等を Table 4-4 に示す。

調査では、海底地形調査同様、音波と海底面の相対的な空間位置の正確性がデータの精度を決定するため、調査船の位置、曳航体の曳航長補正、測線計画及び観測機器の調整は極めて重要である。調査データの品質を確保するための重要な事項について、Table 4-5 に示す。

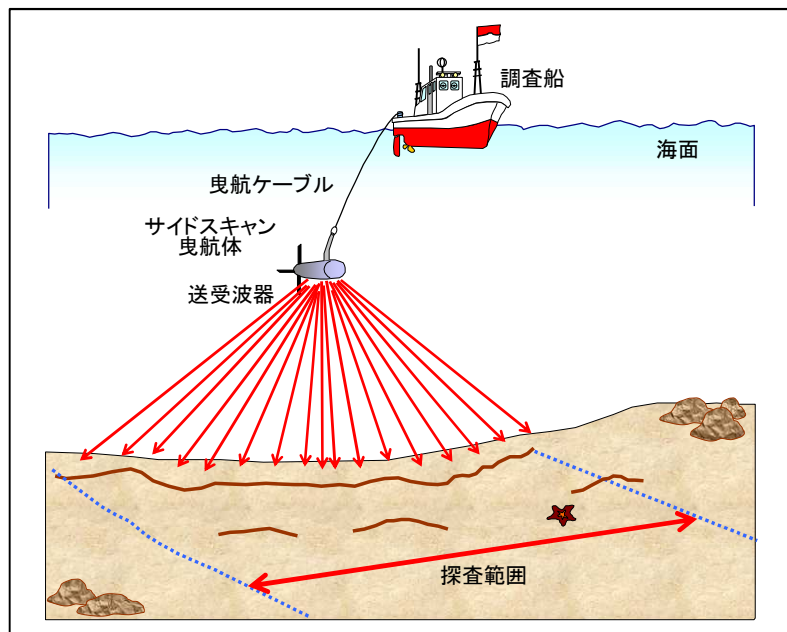


Fig. 4-4 サイドスキャン調査(概略図)

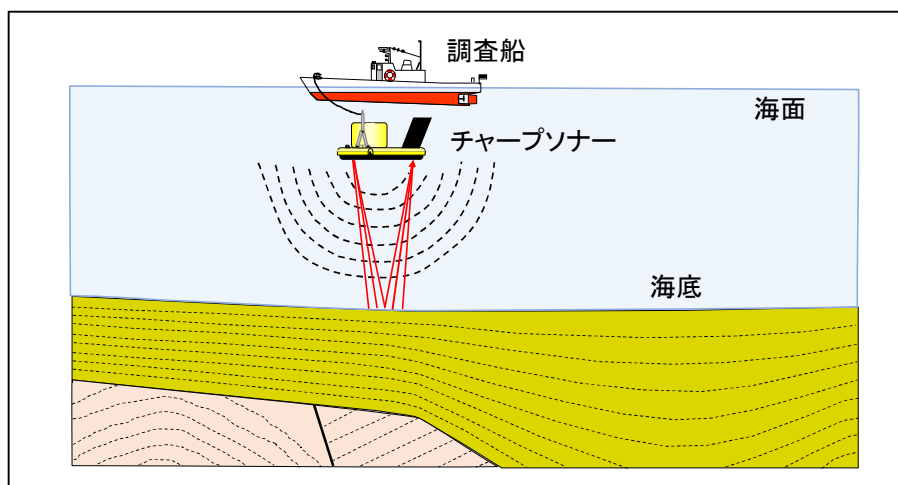


Fig. 4-5 音波探査(概略図)

Table 4-4 底質分布調査の主な機器



使用機材	サイドスキャナー	音波探査
曳航体	 <p>超音波の送受波機で、曳航方向に対し垂直に扇状に超音波を発信し、海底面からの反射強度を受信する機器。</p>	 <p>音波探査機は、一つの音源で高周波～低周波帯までカバーできるものがなく、音源により探査精度(分解能)や探査深度が異なるため、調査目的や調査海域及び探査深度に応じて、機器の選定を行う。</p>
ディファレンシャルGNSS	<p>MT-SAT(運輸多目的衛星)による補正情報の配信方式(SBAS)を使用し、海域で高精度に測位する。</p>	
データ収録システム	<p>曳航体で取得したデータは、プロセッサで処理され、パソコンへ収録される。得られたデータは、パソコン上のソフトウェアで海底面を画像として視認することができ、転石やブロック、沈船なども船上ではっきりと識別できる。また、画面上には曳航高度や位置情報(経緯度)が数値で表示されるため、対象物の規模や概略高さ、位置把握などが即時に確認できる。</p>	 <p>曳航体で収録されたデータは、データ収録装置に保存される。また、得られたデータは、パソコン上のソフトウェアで画像として視認することができる。データの収録・表示方法は、アナログ式とデジタル式がある。</p>

Table 4-5 品質確保にあたって重要な事項と対応策

品質確保事項	目的	対策
サイドスキャナー	GNSS精度確認	音波と海底面の相対的な空間位置の正確性を保つため 測量実施前に「平成14年海上保安庁告示第102号」、「水路測量業務準則」、「水路測量業務準則施工細則」に則り精度確認を行い、精度確認結果をGNSS精度管理表に取りまとめる。
	測線計画	測定精度を保つため ・ 測線は、曲線であると物体が歪んで撮影されるため直線とする。 ・ 測線方向は、横方向の地形の傾斜に起因する位置のズレと、左右の映像を均質にするため平均的な等深線の方向と直行させ設定する。 ・ 測線間隔は、撮影範囲に空白部が生じないようにオーバーラップの部分及び調査結果の精度も考慮して設定する。
	映像の補正	得られる映像データは種々の歪みが含まれているためこれを除く 下記の補正を実施する。 ・ 海底面からの情報が斜距離として計測されるために発生する歪み ・ 船速が一定しないために生じる誤差 ・ 斜距離が長くなることに伴い音波伝搬損失が大きくなることによる歪み ・ 海底面への音波の入射角度による歪み
音波探査	GNSS精度確認	同上
	測定方法に関する事項	測定精度を保つため 音波探査では、機器の構築方法及び調整方法によっても取得される記録の品質に大きな差が生じ、地層の状況によっても調整方法が異なる。このため、テスト走航を行い鮮明に海底下の地質構造が読み取れるようになったら調査を開始する。その際、調査船の船速を一定に保ち、蛇行することなく直線性を保持することが必要である。

2) データ処理・解析

Fig. 4-6 に、サイドスキャン及び音波探査により取得したデータの解析フロー例を示す。

サイドスキャンデータは、計測位置に関わる補正を行ったのち、トラッキング処理、反射強度調整及び画像合成を実施し、海底面における音響帯の平面分布である音響画像図（モザイク図）を作成する。音波探査データは計測位置に関わる補正を行ったのち、海底面下の反射信号の記録画像を出力・解析し、海底面下の鉛直方向の反射層を推定する。これら平面分布及び反射層の推定結果を合わせて、底質分布推定図を作成する。

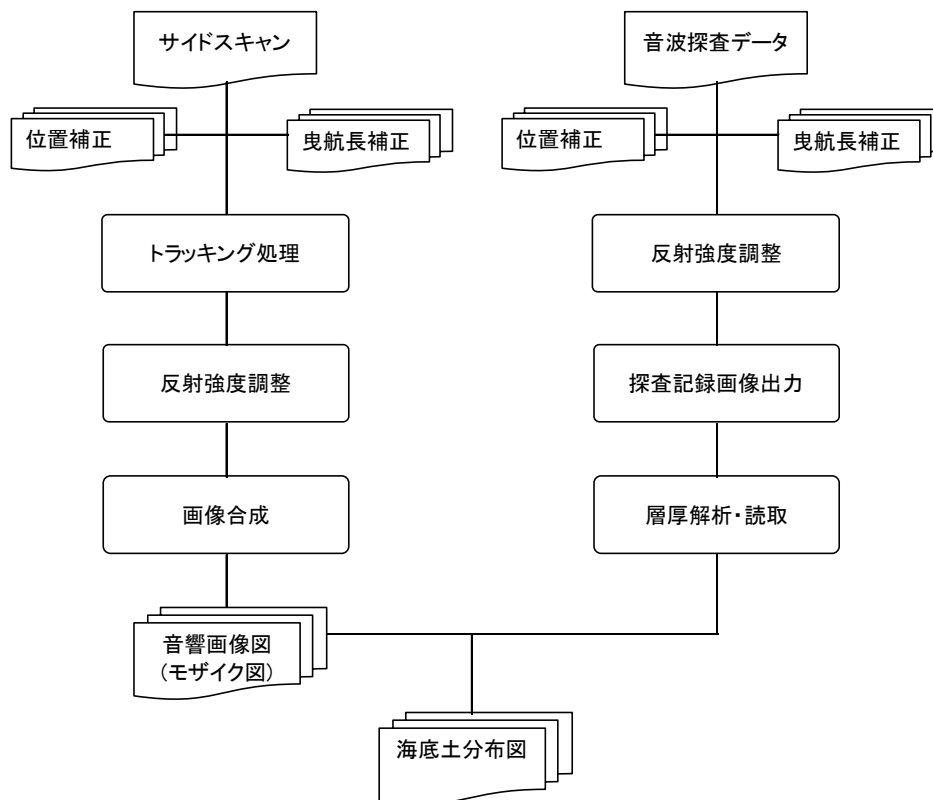


Fig. 4-6 サイドスキャン(左)及び音波探査(右)のデータ解析フロー

4.1.3 調査結果

4.1.3.1 海底地形調査

調査範囲の海底地形図を Fig. 4-7 に示す。本年度の結果を含めた小高川河口域から広野火力南までの海底地形デジタルデータ(UTM-水深データ)は、「添付データ;4.1-1」を参照すること。

沖合 1 km、3 km、及び 5 km での水深は Table 4-6 に示す通りであり、調査対象範囲北の小高川河口域から熊川河口域と比較して、沖合約 5 km までの地形傾斜は同程度を示す。海底土が堆積するような、周囲と比較して相対的に水深の深い低地は、富岡川、井出川、木戸川及び広野火力南の浅見川付近から沖合に向けて直線的に伸びている。

Fig. 4-8 に太田川河口域から富岡川河口域までの海底地形調査結果⁴⁾と、本年度の調査結果を統合した海底地形図を示す。海底地形の統合にあたっては、原子力機構(2019)⁴⁾の南端付近の水深データと本年度の調査に基づく北端付近の水深データの差異(概ね 0.2 m 程度)を解消するため、両水深データ間の平滑化処理を実施した。

本年度の調査結果を加えた小高川河口域から広野火力南にかけては、河川の延長域と、ケスタ地形⁸⁾に関連する崖の基部が主要な低地となっている。河川の延長域については、小高川河口南及び請戸川から前田川河口域の前には、比較的範囲の大きな盆状に広がる低地と、熊川河口域以南の河川から直線的に伸びる低地の 2 つに大別される。ケスタ地形に関連する崖の基部は請戸川河口域の北から富岡川河口域の北まで発達している。さらに、崖の一部が崩壊して形成されたと推定される直径が数百 m 程度で、沿岸側に開口部を有する窪地が請戸川河口域及び熊川河口域に確認される³⁾⁴⁾。

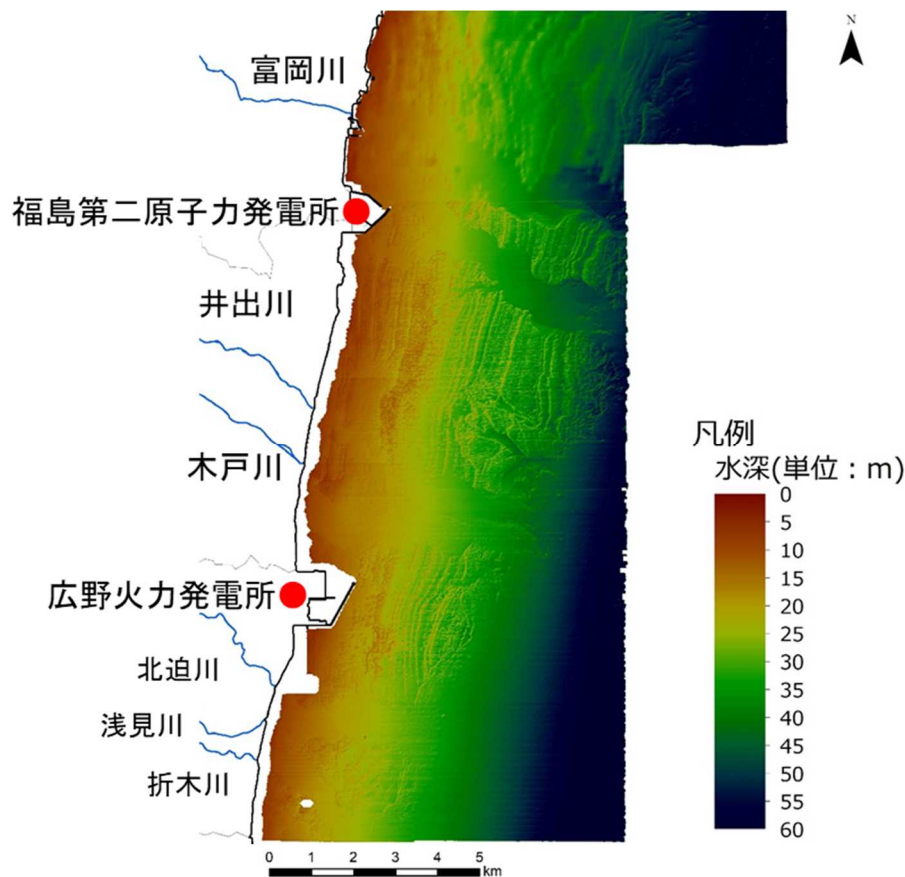


Fig. 4-7 調査対象範囲の海底地形図

Table 4-6 調査対象範囲の沿岸からの距離と水深及び地形傾斜

沿岸からの距離	水深	地形傾斜	小高川河口域～熊川河口域※
1km程度	約10m	約1/100	水深約10m: 地形傾斜約1/100
3km程度	約20m	約1/150	水深約20m: 地形傾斜約1/150
5km程度	約30m	約1/166	水深約30m: 地形傾斜1/166

※原子力機構内部データ

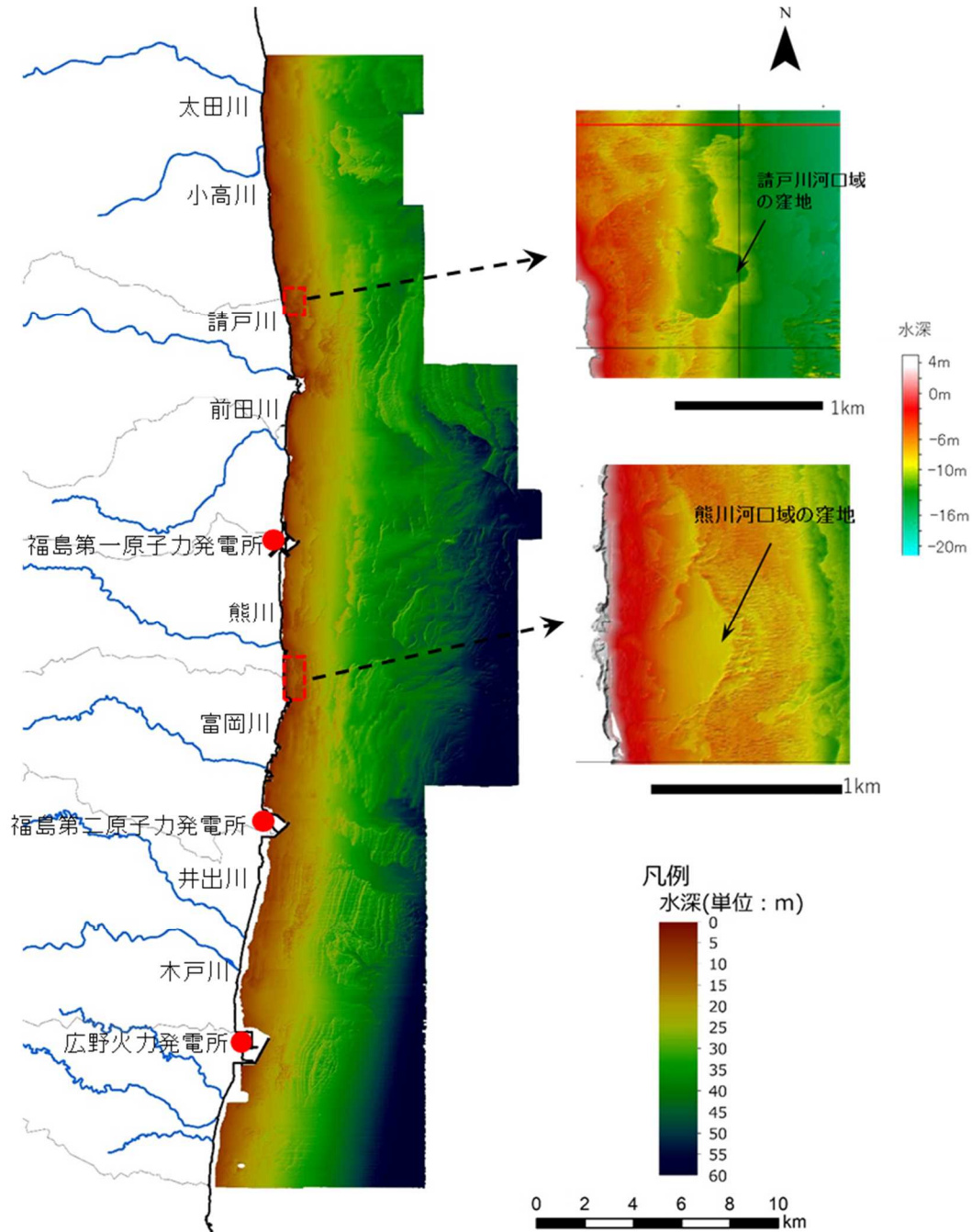


Fig. 4-8 海底地形統合図

4.1.3.2 海底土分布調査

① サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナーにより取得した音響画像図(モザイク図)を Fig. 4-9 に示す。

一般的に硬質で塊状な反射体は反射強度が強く、軟質で分散状な反射体は音響が吸収・散乱するため、反射強度が弱い。そのため岩盤は反射強度が強く、海底土が分布する領域は反射強度が弱い傾向を有する。Fig. 4-9 に示す通り、調査対象領域においては、反射強度が強い領域が沿岸から3~5 km程度まで分布している。一方で反射強度の弱い領域が、富岡川、井出川、木戸川及び浅見川の河口から沖合に向けて直線状に伸びているとともに、反射強度が強い領域の沖合側から調査範囲境界まで認められている。

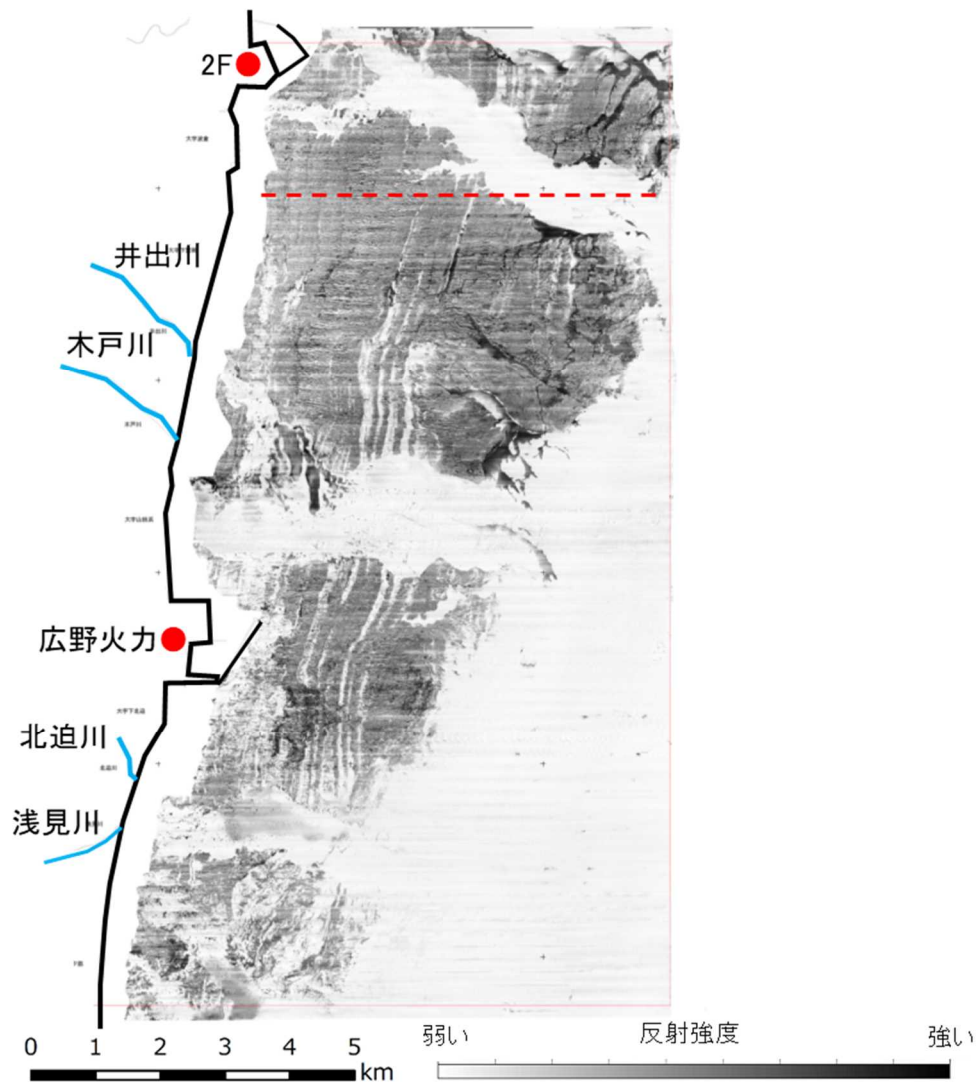


Fig. 4-9 音響画像図(モザイク図)

赤点線は Fig. 4-10 の断面図

② 音波探査

Fig. 4-9 に示す測線の音波探査による海底面下の反射信号の記録画像を Fig. 4-10 に示す。サイドスキャンソナーにより確認された沿岸 3～5 km の反射強度の強い領域は、表面の反射面が凹凸に富み、下位の反射像が弱くて不明瞭であるのに対し、沖側の反射強度の弱い領域は、表面の反射面が平坦で、かつ比較的幅を有する。一般的に硬質な反射体は、音波のほとんどが反射体表面で反射されるため下位からの反射が弱く、また凹凸に富む表面の特徴から、サイドスキャンソナーの結果と合わせて、これらの領域は岩盤分布域であると推定される。一方で、下位の反射面が確認される領域は、音波が浸透しやすい反射体であることから、サイドスキャンソナーの結果とあわせて海底土の分布域であると推定される。なお、本年度の調査では、Fig. 4-11 に示すシルト質の分布域を示唆するような、反射波が顕著に散乱する領域は確認されなかった。域表面の反射波の幅や、その下位の反射面の深さ等により推定した海底土の層厚は、最大 2～3 m 程度である。

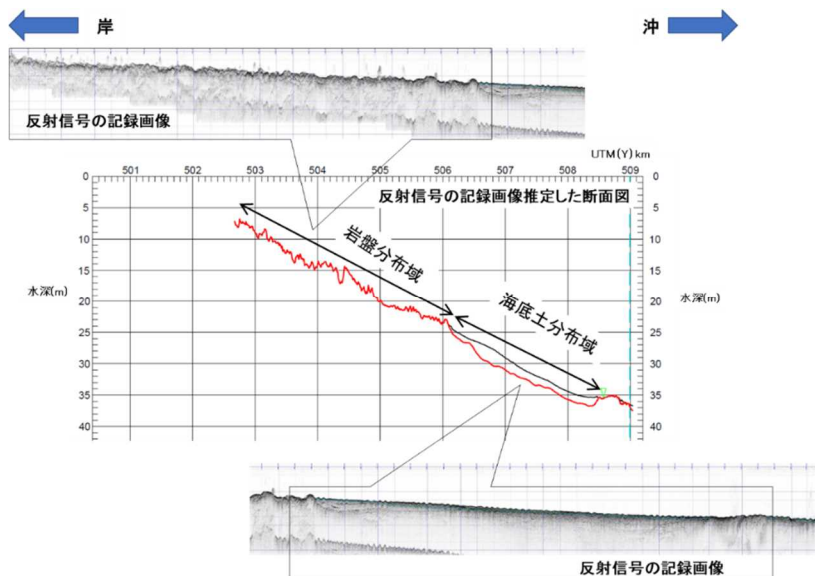


Fig. 4-10 反射信号の記録画像(上)及び断面図

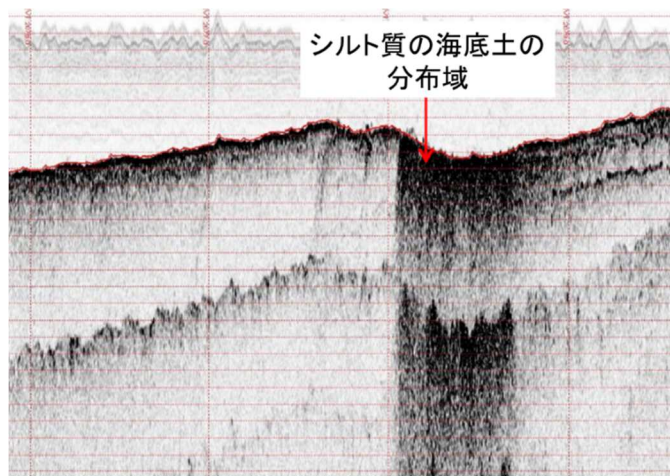


Fig. 4-11 シルト質の海底土分布域の反射信号の記録画像
採泥地点: 請戸川河口域 15 付近(平成 25 年度の原子力機構調査により取得)

③ 海底土の分布

サイドスキャンソナー及び音波探査の結果に基づく海底土の分布推定図を Fig. 4-12 に示す。なお、本年度の結果を含めた太田川河口域から広野火力南までの海底土分布の Geotiff 及び shp ファイルデジタルデータは、「添付データ;4.1-2」を参照すること。

沿岸から沖合 3～5km 程度にかけては、岩盤が広く分布していると考えられる。海底土の分布域は富岡川、井出川、木戸川及び浅見川の河口沖まで伸びる幅数百～千 m 程度の直線的な分布域と、岩盤の沖合側から調査範囲境界までの領域に大別される。海底土の分布域では、細～中粒の海底土が卓越し、粗砂や礫質の海底土分布は限定的と考えられる。また、前述の通りシルト質の分布域は確認されていない。

Fig. 4-13 に太田川河口域から富岡川河口域までの海底土分布の推定(原子力機構, 2019)と、本年度の調査に基づく推定を統合した分布図を示す。統合にあたっては、海底土の移動等の可能性から、データが新しい本年度の推定結果を正しいと仮定し、原子力機構(2019)⁴⁾の南端付近の分布を本年度の推定分布に連結させることにより統合を行った。

太田川河口域から広野火力南にかけては、岩盤が広く分布しており、対象領域での岩盤の分布割合は全海底面の 42%に相当する(海底土の分布割合は 58%)。

海底土の分布域は各河川の延長部である盆状の低地(Table4-7 の「①盆状」と、河川から直線的に伸びる低地(の「②直線状」と一致する傾向を示す。また、請戸川河口域の北及び 1F～熊川河口域の北にかけては、ケスタ地形の崖の基部(Table4-7 の「③崖」)に海底土が分布している⁴⁾。

海底土は細～中粒砂が卓越し、シルト質の分布する領域は、全海底面の約 0.13%と限られている。特に請戸川及び熊川河口域においては、崖の一部が崩壊して形成されたと推定される沿岸側に開口部を有する明瞭な窪地においてシルト質の海底土の分布が確認されている(Fig. 4-13)³⁾⁴⁾。海底土の層厚は、富岡川以北では 1～2 m、富岡川以南では 2～3 m 程度であり、広野火力の南及び沖合にかけて、層厚が増加する傾向にあると推定される。

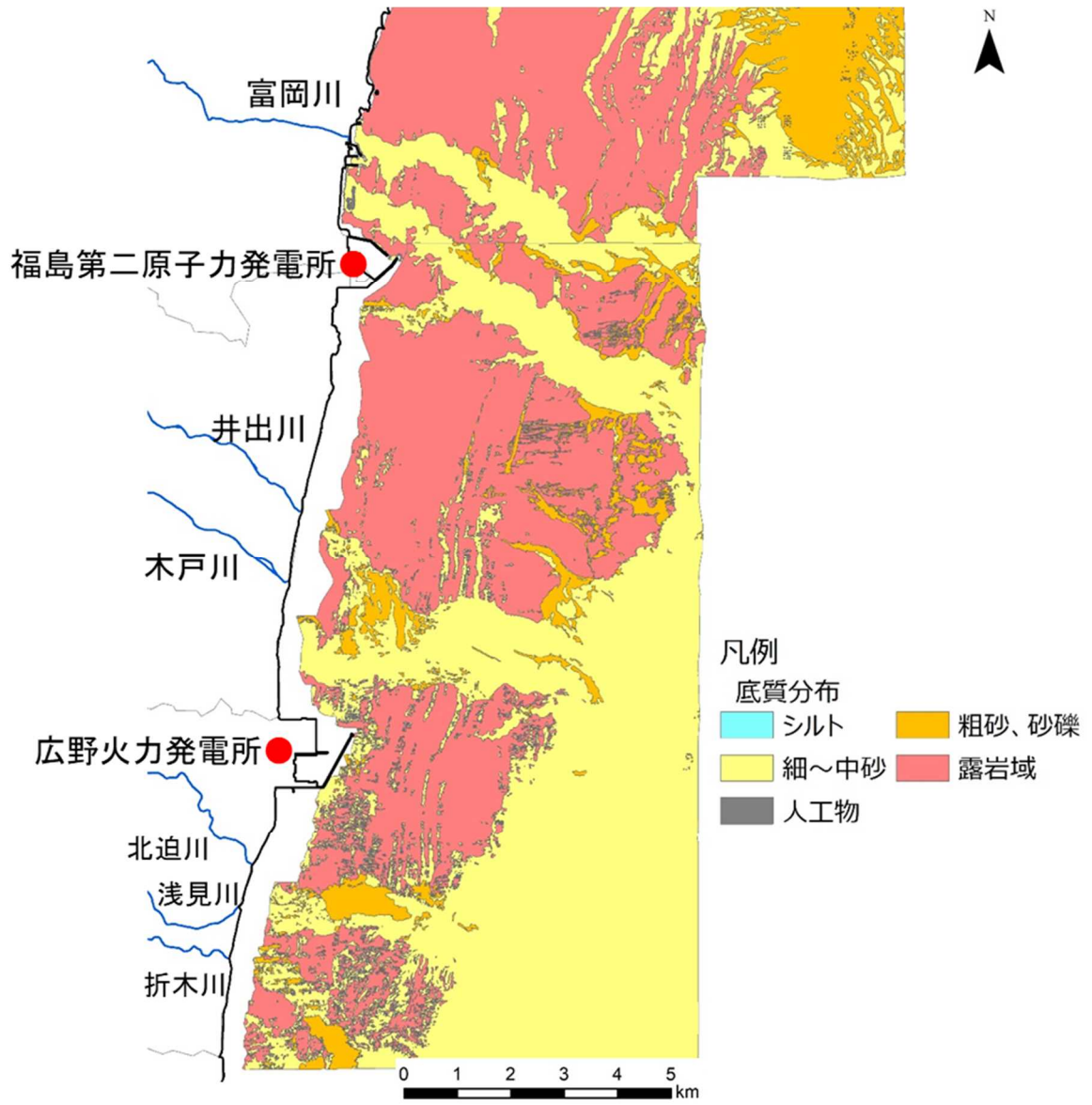


Fig. 4-12 海底土の分布推定図

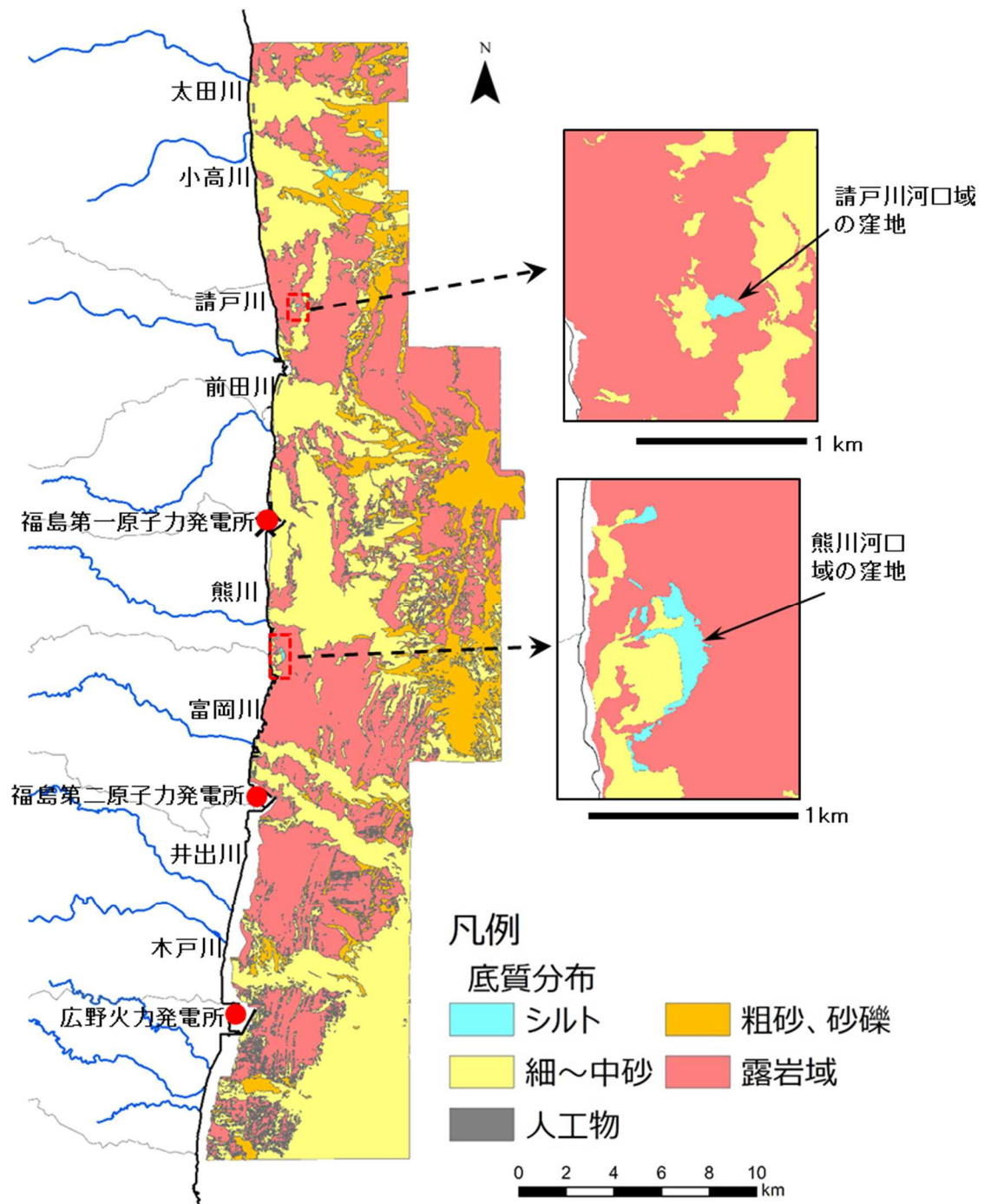
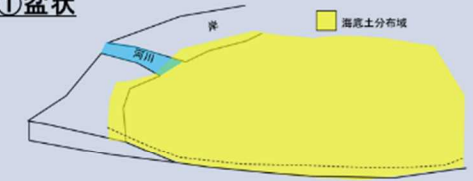
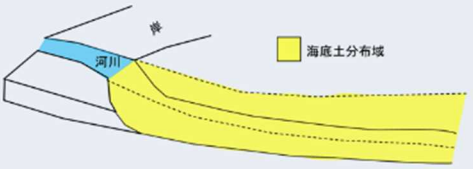
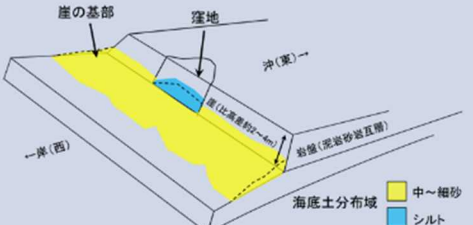


Fig. 4-13 海底土分布推定統合図

Table 4-7 海底土分布の特徴

概念図	特徴	主な河口域
<p>①盆状</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ●河川の前面～南側にかけて比較的広範囲に分布 ●海底地形変化は少なく、沖合に向けて一様に水深増加する傾向 	<ul style="list-style-type: none"> ●小高川南 ●請戸川南～前田川
<p>②直線状</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ●河川の前面から沖合に向けて直線的に分布 ●海底地形変化は少なく、沖合に向けて一様に水深増加する傾向 	<ul style="list-style-type: none"> ●熊川 ●富岡川 ●井出・木戸川
<p>③崖の基部(窪地含む)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ●ケスタ地形の崖の基部に分布 ●窪地ではシルト相当の細粒の粒子が分布 	<ul style="list-style-type: none"> ●請戸川北 ●(1F～)熊川北

4.2 採泥調査

4.2.1 調査目的

3章で報告したように、1F 事故以降、東電や原子力規制庁等の各機関が海底土のモニタリングを実施するとともに、海底土中の放射性セシウム移動挙動に関する調査研究が進められてきた。それらのモニタリングや調査研究を通して、表層付近の海底土の放射性セシウム濃度は全般に低く、かつ低減していることが明らかになっている (Fig. 4-14)。

一方で海底土中の放射性セシウムは、波浪や生物擾乱等による海底土の移動や混交によって、深さ方向へ分布の拡大が生じることが示されている¹⁾。また、実際に海底面から 1 m 程度の深さまで放射性セシウムが分布していることが明らかになっている²⁾。そのため、表層付近の放射性セシウムの分布を把握してきた従来の海域モニタリングでは、海底土中の放射性セシウムの分布や濃度等の特徴の把握に限界がある。そこで、本事業においては、深さ方向の放射性セシウムの分布を把握して、より精度の高い海底土中の放射性セシウムのモニタリングを行うことを目途として調査、評価等を実施した。

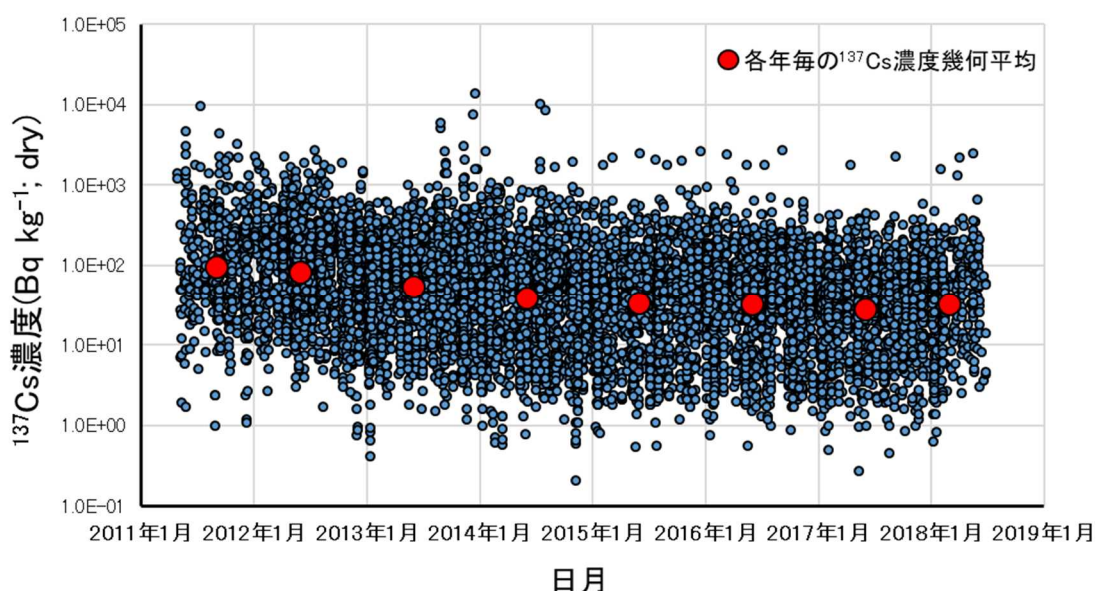


Fig. 4-14 海底土中の ^{137}Cs 濃度の経時変化

東電、原子力規制庁、福島県、環境省、文科省の表層付近のデータに基づく

4.2.2.2 採泥地点

採泥地点一覧を Table 4-9 に示す。本事業の目的であるモニタリングの観点では、海底土中の放射性セシウム濃度の経時変化の把握が重要であると考え、これまでに東電や原子力規制庁、原子力機構等が採泥を行った地点から選定することとした。その上で、

- 原子力規制庁によるこれまでの本事業の調査エリアをできるだけ包含し、かつ地域的な偏りを低減

- 海域への主要な放射性セシウム供給源である河川からの影響の評価

- 海底地形と放射性セシウム分布の関連の評価

- 既往の結果から周辺に比べて放射性セシウム濃度が顕著に高い(例えば地点 15 等)、濃度の経時変化が一様に減少しない(地点 40:東電 T-⑨)、曳航調査によるアノマリ地点、等

を考慮して 78 地点を選定した(Table 4-9 の「計画」)。調査の結果、岩盤により試料が採取できない地点や、隣接する地点のどちらかが採取された場合等により、最終的には柱状試料採取 71 地点、表層のみ 2 地点、合計 73 地点において採泥を実施した(Table 4-9 の「実績」)。採泥地点の実績を Fig. 4-16 に示す。調査地点番号 1～53 及び 101 は水深が 7～32 m、地点 55～76 は水深が 52～145 m である。本報では前者を浅海域、後者を深海域として報告する。

Table 4-9 採泥地点一覧

通番	採泥地点		計画				実績										
	地点番号	最寄河川等	緯度	経度	既往調査地点等		備考	実施日	採取状況等	採泥地点		1Fからの距離 km	沿岸からの距離 km	水深 m	手法	採取長 cm	備考
					地点番号	実施機関				緯度	経度						
1	1	真野川	37.6876	141.0646	St16	規制庁(海技研)		2019/7/18	×(MC)→移動(MC)	37.6862	141.0641	29.5	3.1	28	MC	27	南約150m移動
2	2	真野川	37.6719	141.0505	St14	規制庁(海技研)		2019/8/7	○	37.6719	141.0505	27.8	1.1	24	VCS	82	計画通
3	3	新田川	37.6560	141.0646	St10	規制庁(海技研)		2019/7/18	○	37.6560	141.0646	26.2	2.3	25	MC	29	計画通
4	4	新田川	37.6422	141.0329	福島沿岸30	福島県		2019/8/7	×(VCS)→移動(VCS)	37.6316	141.0282	23.3	0.5	7	VCS	112	南南西約1.25kmに移動
5	5	新田川	37.6113	141.0495	St04	規制庁(海技研)		2019/8/7	移動(VCS)	37.6106	141.0521	21.1	2.1	19	VCS	100	刺網あり、沖へ265m移動
6	6	太田川	37.5847	141.0411	OT05	規制庁(海技研)		2019/8/6	○	37.5847	141.0411	18.1	1.4	12	VCS	100	計画通
7	7	太田川	37.5894	141.0565	OT2	規制庁(海技研)	採取の場合はOTAR-8無	2019/8/6	×(VCS)→OTAR-8移動	37.5894	141.0565	18.8	2.7	19	表層掘い	—	潜水土採取
8	8	太田川	37.5867	141.0627	OTA-N0.4E3.2	JAEA		2019/8/6	○	37.5867	141.0627	18.5	3.2	24	VCS	100	計画通
9	9	小高川	37.5721	141.0309	ODAR-N0.2E0.3	JAEA		2019/8/6	○	37.5721	141.0309	16.7	0.4	8	VCS	82	計画通
10	10	小高川	37.5685	141.0585	ODAR-S0.1E2.7	JAEA		2019/8/8	○	37.5685	141.0585	16.5	2.8	22	VCS	82	計画通
11	11	小高川	37.5702	141.0865	ODAR-N0E5.2	JAEA		2019/7/18	○	37.5702	141.0865	17.2	5.3	27	MC	20	計画通
12	12	小高川	37.5540	141.0940	K5	規制庁(海技研)		2019/7/18	○	37.5540	141.0940	15.7	5.7	30	MC	24	計画通
13	13	小高川	37.5517	141.0417	T-①	東電		2019/8/8	○	37.5517	141.0417	14.5	1.1	11	VCS	92	計画通
14	14	請戸川	37.5157	141.0609	ODAR-S6E2.7	JAEA		2019/8/8	○	37.5157	141.0609	10.7	2.3	18	VCS	38	計画通、28-30cm泥岩礫
15	15	請戸川	37.5050	141.0493	UKER-N2E0.7	JAEA		2019/8/9	○	37.5050	141.0493	9.4	1.0	13	VCS	40	計画通
16	15-2	請戸川						2019/8/9	○	37.5052	141.0485	9.4	0.9	13	VCS	82	UKER-15の約60m西
17	16	請戸川	37.4983	141.0533	UKER-N1.6E1.2	JAEA		2019/8/8	○	37.4983	141.0533	8.7	1.3	14	VCS	78	計画通
18	17	請戸川	37.5000	141.0722	T-D1	東電	採取の場合はUKER-18無	2019/8/9	×(VCS)→UKER-18移動			9.4	2.9				
19	18	請戸川	37.4999	141.0788	UKER-N1.5E3.5	JAEA		2019/8/9	○	37.4999	141.0788	9.6	3.5	27	VCS	78	計画通
20	19	請戸川	37.4905	141.0438	UKER-N0.5E0.4	JAEA	採取の場合はUKER-20無	2019/8/20	○	37.4905	141.0438	7.7	0.4	7	VCS	70	計画通
21	20	請戸川	37.4910	141.0497	UKER-N0.7E0.8	JAEA		実施せず(UKER-19で採取)									
22	21	請戸川	37.4697	141.0473	UKER-S1.7E0.6	JAEA		2019/8/9	○	37.4697	141.0473	5.5	0.9	10	VCS	126	計画通
23	22	請戸川	37.4687	141.0614	UKER-S1.9E2	JAEA	採取の場合はUKER-23無	2019/8/20	○	37.4687	141.0614	5.8	1.9	16	VCS	96	計画通
24	23	請戸川	37.4705	141.0667	UK04	規制庁(海技研)		実施せず(UKER-22で採取)									
25	24	請戸川	37.4670	141.0814	UKER-S2E3.6	JAEA		2019/7/18	○	37.4670	141.0814	6.6	3.6	26	MC	34	計画通
26	25	前田川	37.4562	141.0999	AIN	規制庁(海技研)		2019/7/18	○	37.4562	141.0999	7.0	5.5	31	MC	26	計画通
27	26	前田川	37.4577	141.0454	MAER-N0E0.7	JAEA		2019/8/20	○	37.4577	141.0454	4.2	0.7	10	VCS	100	計画通
28	27	1F	37.4346	141.0813	MAER-S2E5	JAEA		2019/7/21	○	37.4346	141.0813	4.5	3.6	26	MC	16	計画通
29	28	1F	37.4312	141.0385	1F-N0.8E0.4	JAEA		2019/8/21	○	37.4312	141.0385	1.2	0.2	8	VCS	60	計画通
30	29	1F	37.4283	141.0701	1F-N0.5E3.2	JAEA		2019/8/21	○	37.4283	141.0701	3.3	2.5	24	VCS	58	計画通
31	30	1F	37.4254	141.0425	1F-N0.2E0.7	JAEA		2019/8/21	○	37.4254	141.0425	0.9	0.2	10	VCS	70	計画通
32	31	1F	37.4132	141.0491	1F-S1.2E1.4	JAEA		2019/8/23	○	37.4132	141.0491	1.6	1.2	15	VCS	78	計画通
33	32	1F	37.4074	141.0655	1F-S1.8E2.8	JAEA		2019/8/22	○	37.4074	141.0655	3.2	2.7	23	VCS	64	計画通
34	33	1F	37.4036	141.0798	KUMR-N2E4	JAEA		2019/7/18	○	37.4036	141.0798	4.5	3.9	28	MC	20	計画通
35	34	熊川	37.3999	141.0911	K3.H25年度座標	規制庁(海技研)		2019/7/18	○	37.3999	141.0911	5.6	5.0	29	MC	20	計画通
36	35	熊川	37.3856	141.0459	KUMR-N0E1	JAEA	採取の場合はUKER-38無	2019/8/23	○	37.3856	141.0459	4.1	0.8	12	VCS	56	計画通
37	36	熊川	37.3856	141.0685	KUMR-N0E3	JAEA		2019/7/21	×(MC)→移動(MC)	37.3872	141.0686	4.9	2.8	24	MC	23	北約200m移動
38	37	熊川	37.3856	141.0911	KUMR-N0E5	JAEA		2019/7/21	×(MC)→移動(MC)	37.3858	141.0844	6.0	4.2	29	MC	15	西約500m移動
39	38	熊川	37.3833	141.0417	T-⑥	東電		実施せず(KUMR-35で採取)									
40	39	熊川	37.3780	141.0667	KM3	規制庁(海技研)		2019/7/21	○	37.3780	141.0667	5.6	2.6	23	MC	15	計画通
41	40	熊川	37.3833	141.0917	T-⑨	東電		2019/7/21	○	37.3833	141.0917	6.7	4.8	32	MC	28	計画通
42	41	熊川	37.3719	141.0421	KUMR-S1.5E0.7	JAEA		2019/8/23	○	37.3719	141.0421	5.5	0.6	11	VCS	78	計画通
43	42	富岡川	37.3364	141.0357	TOMR-S0.3E0.7	JAEA		2019/8/23	○	37.3364	141.0357	9.4	0.5	9	VCS	86	計画通
44	43	富岡川	37.3302	141.0615	TOMR-S1E3	JAEA		2019/7/20	○	37.3302	141.0615	10.4	2.4	20	MC	18	計画通
45	44	富岡川	37.3333	141.0722	T-D9	東電		2019/7/20	○	37.3333	141.0722	10.3	3.4	25	MC	14	計画通
46	45	富岡川	37.3111	141.0472	T-S7	東電		2019/8/27	○	37.3111	141.0472	12.3	1.1	15	VCS	88	計画通
47	46	富岡川	37.3062	141.0526	H29調査曳航	規制庁(海技研)		2019/7/20(MC)	×(MC)→移動(VCS)	37.3047	141.0697	13.3	3.2	25	VCS	76	再計画地点(堆砂域評価)
48	47	富岡川	37.2995	141.0967	H30調査曳航	規制庁(海技研)		2019/7/20	○	37.2995	141.0967	14.6	5.6	36	MC	18	計画通
49	48	井出・木戸川	37.2833	141.0516	H29調査曳航	規制庁(海技研)		2019/7/20	×(MC)→キャンセル								周辺に岩盤広く分布
50	49	井出・木戸川	37.2650	141.0394	T-S5	東電		2019/8/27	×(VCS)、表層採取、49-2移動	37.2650	141.0394	17.4	2.1	16	表層掘い	—	潜水土採取
51	49-2	井出・木戸川	37.2676	141.0291	T-S5	東電		2019/8/27	○	37.2676	141.0291	17.1	1.2	11	VCS	50	再計画地点
52	50	井出・木戸川	37.2517	141.0276	HR7	規制庁(海技研)		2019/8/27	○	37.2517	141.0276	18.8	1.3	13	VCS	76	計画通
53	51	井出・木戸川	37.2417	141.0472	T-11	東電		2019/7/20(MC)	×(MC)→移動(VCS)	37.2519	141.0572	18.9	3.9	22	VCS	90	再計画地点
54	52	井出・木戸川	37.2383	141.0250	T-⑬	東電		2019/8/29	○	37.2383	141.0250	20.3	0.3	9	VCS	50	計画通
55	53	井出・木戸川	37.2222	141.0405	H29調査曳航	規制庁(海技研)		2019/7/20	○	37.2222	141.0405	22.1	1.8	18	MC	27	計画通
56	54	井出・木戸川	37.2000	141.0196	HR3	規制庁(海技研)		実施せず(岩盤域と判断)									
57	55	1F北部沖合い	37.5780	141.3697	曳航調査H30	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.5780	141.3697	34.4	30.2	124	MC	11	計画通
58	56	1F北部沖合い	37.5593	141.3433	曳航調査H30	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.5593	141.3433	31.4	27.6	120	MC	23	計画通
59	57	1F北部沖合い	37.5426	141.3036	曳航調査H30	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.5426	141.3036	27.4	23.8	104	MC	17	計画通
60	58	1F北部沖合い	37.5330	141.2630	M1	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.5330	141.2630	23.8	20.1	88	MC	28	計画通
61	59	1F北部沖合い	37.4575	141.2472	Q21	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.4575	141.2472	19.3	18.2	90	MC	26	計画通
62	60	1F北部沖合い	37.4367	141.2108	I2	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.4367	141.2108	15.8	14.9	77	MC	26	計画通
63	61	1F南部沖合い	37.4167	141.2000	T-5	東電		2019/7/19	○	37.4167	141.2000	14.7	13.9	71	MC	22	計画通
64	62	1F北部沖合い	37.4843	141.2673	UKER-N0E20	JAEA		2019/7/19	○	37.4843	141.2673	21.8	19.8	99	MC	29	計画通
65	63	1F北部沖合い	37.4367	141.2667	Q3	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.4367	141.2667	20.7	19.9	103	MC	28	計画通
66	64	1F南部沖合い	37.3917	141.1833	J2	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.3917	141.1833	13.7	12.9	67	MC	18	計画通
67	65	1F南部沖合い	37.3833	141.2000	T-⑪	東電		2019/7/19	○	37.3833	141.2000	15.3	14.4	78	MC	20	計画通
68	66	1F南部沖合い	37.3833	141.2500	T-⑫	東電		2019/7/19	○	37.3833	141.2500	19.6	18.8	105	MC	32	計画通
69	67	1F南部沖合い	37.3387	141.1667	Q13	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.3387	141.1667	14.9	11.6	67	MC	20	計画通
70	68	1F南部沖合い	37.3392	141.1406	TOMR-N0E10	JAEA		2019/7/20	○	37.3392	141.1406	13.2	9.4	52	MC	21	計画通
71	69	1F南部沖合い	37.3387	141.2667	Q5	規制庁(海技研)		2019/7/20	○	37.3387	141.2667	22.6	20.3	119	MC	26	計画通
72	70	1F南部沖合い	37.5167	141.2333	T-B2	東電		2019/7/19	○	37.5167	141.2333	20.6	17.2	73	MC	22	計画通
73	71	1F南部沖合い	37.5156	141.4052	曳航調査H30	規制庁(海技研)		2019/7/19	○	37.5156	141.4052	34.5	32.2	132	MC	32	計画通
74	72	1F南部沖合い	37.2830	141.1380	M2												

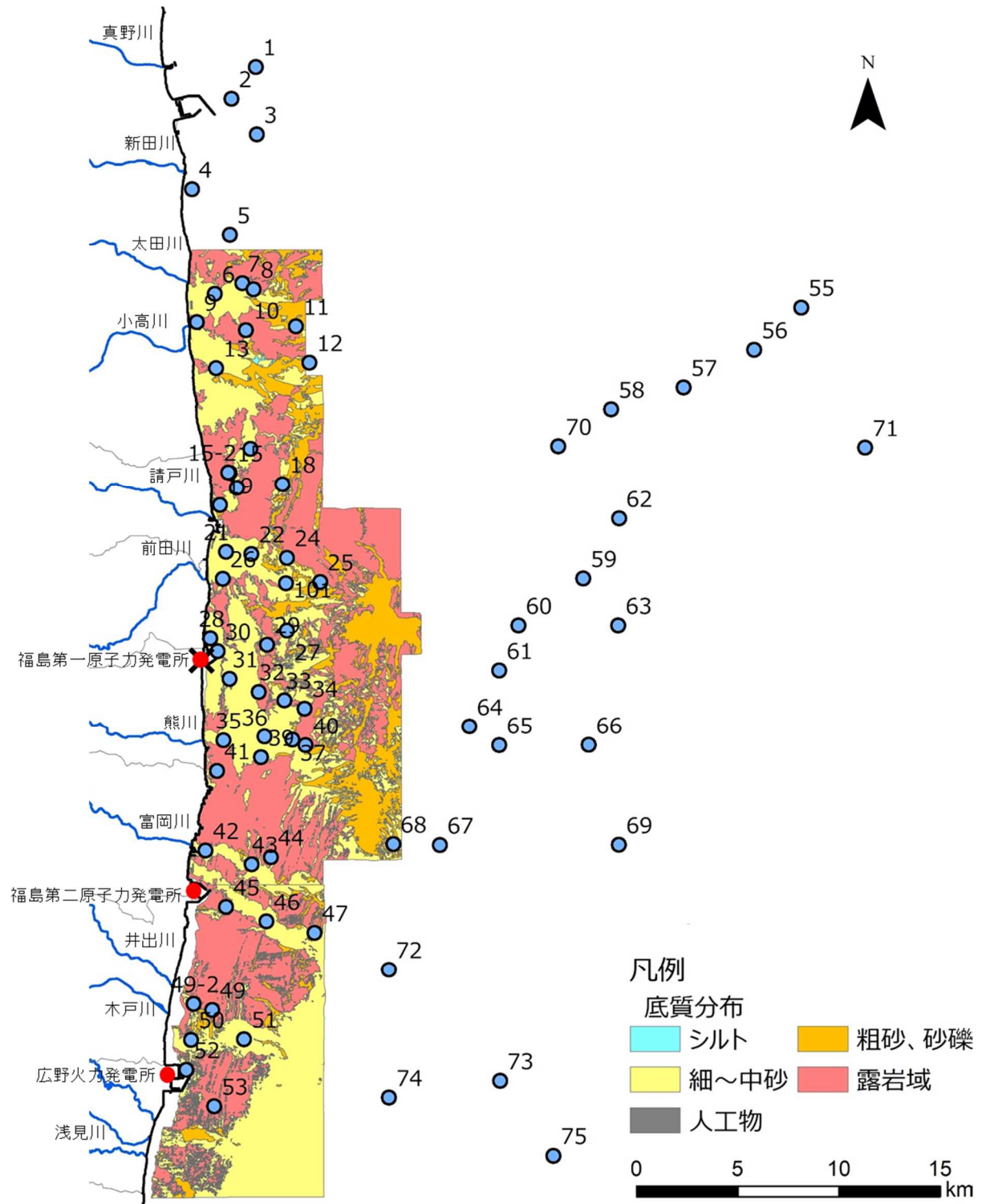


Fig. 4-16 採泥地点(実績)

4.2.2.3 採泥方法

1F 事故に伴う海底土のモニタリング等で用いられている主な採泥手法を Fig. 4-17 に示す。前述のように、本調査では海底土の深さ方向の放射性セシウムを把握するため、柱状採泥のうち、より深い位置の情報を取得することが可能なマルチプルコアラー（以下、「MC」）及びバイブレーション式コアサンプラー（以下、「VCS」）による柱状採泥を実施した。

手法		簡便性	深度情報※1	Cs量把握	利用船等	備考
塊状試料採取		◎	×※2	×※2	小型船可	東電、国等のモニタリング
柱状試料採取	GS	○	△(8cm程度)	○	小型船可(揚昇器必須)	規制庁(一部)
	MC	△	○(25cm程度)	○	大型調査船(浅海域困難)	規制庁(一部)
	VCS	×	◎(70cm程度)	○	小型船+潜水作業	

※1: 原子力機構の調査結果に基づく

※2: 細径パイプを突き立てて試料回収し、深度情報を把握する報告例あり(Otosaka and Kato, 2014等)



Fig. 4-17 福島第一原子力発電所の事故対応に用いられている主な採泥方法

① VCS による採泥

Fig. 4-18 に VCS による採泥作業の概要図を示す。VCS による採泥は、内径 105 mm、長さ約 1.5 m のポリカーボネート管を海底土に貫入させて、柱状の海底土試料を採取する方法である。ポリカーボネート管を上下振動させて海底土に貫入させるため、同管の上部に脱着可能なバイブレーターが装着されている。バイブレターの振動や潜水作業員への酸素の供給を作業船から行うため、作業中に作業船が潮流等で移動しないように、採泥 1 地点毎に、複数個所のアンカーによる係留を確実に行う必要がある。そのため、塊状試料採取や他の船上から採泥器を昇降させる柱状試料採取に比べて作業進捗率が低く、本年度の実績では 1 日(約 6 時間)あたりの採泥地点数は 3~4 地点である。また、潜水作業による健康障害の防止のため潜水深度に制約がある。本調査では、潜水作業に伴う特別の減圧措置等が必要のない、水深約 30 m 以浅の浅海域の 31 地点の採泥に VCS を適用した。本年度の調査で採取した柱状試料の平均採取長は 78 cm である(Table 4-9 参照)。

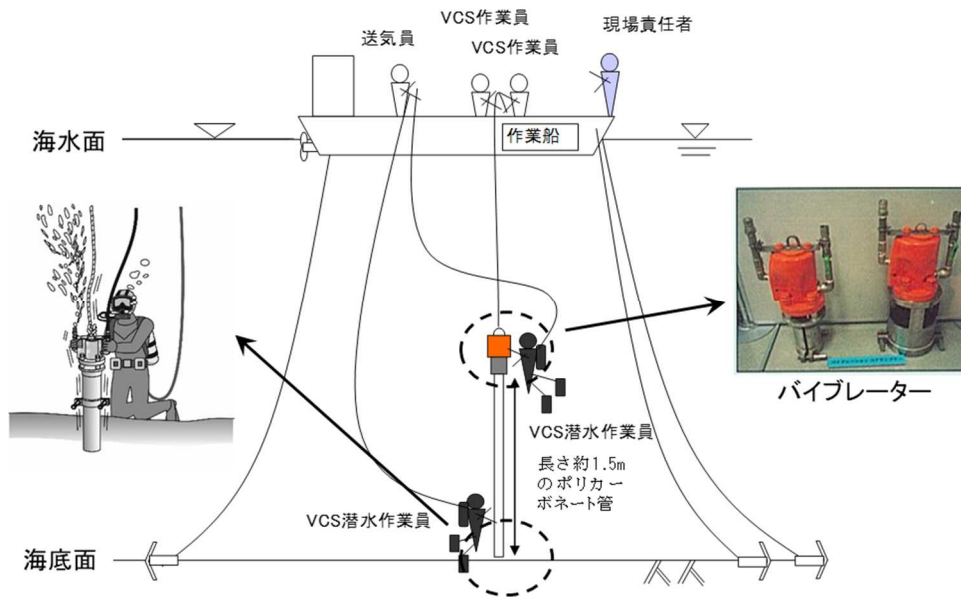


Fig. 4-18 VCSによる採泥作業の概念図

① MCによる採泥

MCによる採泥状況の写真を、Fig. 4-19に示す。MCによる採泥は、コアラー周囲の支持枠が2 m超の大きさを有することから、海底面に対して安定的に着底し、コアラーを貫入させることが可能であることや、コアラーが複数本(通常8本)設置されているため、一定程度の採取長を有する試料が定期的に採取できる。本年度の調査で採取した柱状試料の平均採取長は23 cmである (Table 4-9 参照)。一方で錘を加えた重量が600 kgを超えるため、大型の昇降機を備えた大型船が必要となる。そのため、大型船の侵入が困難な浅海域での採泥には適していないため、本調査では水深約30 m以深の、主に深海域の40地点の採泥にMCを適用した。



Fig. 4-19 MCによる採泥状況(本調査)

③ 柱状試料の処理、分析等

採取した柱状試料は写真撮影及び観察を実施した後、表層から厚さ2 cm 間隔で切り分け、試料容器に採取し、乾燥後、Table 4-10に示す機器等で放射能分析を行った。さらに、約4 cm 間隔で Table 4-11に示す条件で粒度試験を行った。

MC及びVCSにより採取した柱状試料の観察結果は添付データ4.2-1及び4.2-2に、放射能分析

結果及び粒度試験に基づく中央粒径は添付データ 4.2-3 に示す。粒度試験の通過重量曲線等は添付データ 4.2-4 に示す。また、放射能分析の品質保証に関する EN 評価の証明を添付データ 4.2-5 に示す。

Table 4-10 Ge 半導体検出器を用いた放射能分析の分析条件

測定場所	検出器メーカー	検出器型番	標準線源	方法等	条件等	分析数
原子力機構 福島環境安全センター	ORTEC	GMX40P4-76	MX033U8PP	文部科学省 放射能測定法シリーズ7 文部科学省 放射能測定法シリーズ24 原子力規制委員会 放射能測定法シリーズ29	乾土 3,600秒計測	1,472試料

Table 4-11 粒度試験の条件

測定場所	使用機器等	試験方法等	試料数
原子力機構 福島環境安全センター	・ふるい ・レーザー計測器(島津 製作所製SALD-3100)	・ふるい作業により0.5、1、2mmの粒子に分 画し、0.5mm以下の粒子をレーザー計測 ・レーザー計測に供した粒子は等価密度と 仮定し、各粒径分画の比率は重量比に等し いと見なし、ふるいの結果と合わせて、通過 重量直線より中央粒径等を解析	726試料

4.2.3 調査結果

採取した海底土の分析結果について、採取地点毎の概要を Table 4-12 に示す。

4.2.3.1 粒度分布

各試料採取地点の卓越粒径(柱状試料の算術平均値)の分布図を Fig. 4-20 に示す。

浅海域では、沿岸から 3 km 程度までの地点は 0.063~0.25 mm の極細~細粒砂が卓越し、4~5 km 程度の地点は 0.25~0.5 mm の中粒砂が分布する傾向が確認される。また請戸川河口域では、他の河口域と比較して極細粒砂の地点が多い。シルト相当の海底土は地点番号 15、24 及び 41 において卓越しており(地点番号 7 は潜水士が表層付近を掘り取った試料なので参考値として除く)、15 及び 41 は、Fig. 4-8 及び Fig. 4-13 に示す窪地に分布する海底土である。

深海域では、水深 100 m 以深は 0.063 mm 以下のシルト相当、水深 100~50 m では 0.25~0.063 mm の極細~細粒砂が卓越する傾向を示す。南北方向の偏り等の傾向は確認されない。このような特徴は、青柳・五十嵐(1999)⁵⁾による調査結果と整合的である。

Table 4-12 海底土の分析結果の概要

地点番号	最寄河川等	位置		距離		実施日	水深	手法	採取長	¹³⁷ Cs検出下 端深さ	¹³⁷ Cs濃度				¹³⁷ Cs量				卓越粒径		備考			
		緯度	経度	沿岸から	1Fから						平均濃度	最大濃度		鉛直累計	上位10cm		L ₉₀ 深さ	粒度	区分					
												km	Bq kg ⁻¹		cm	cm				全量%		mm	ウェントワース区分	
1	真野川	37.6862	141.0641	3.1	29.5	2019/7/18	28	MC	27	27 以下	76	146	8	-	10	17.9	6.3	35	24 以下	0.0650	極細粒砂			
2	真野川	37.6719	141.0505	1.1	27.8	2019/8/7	24	VCS	82	44	27	86	0	-	2	20.7	7.0	34	28	-	30	0.1743	細粒砂	
3	新田川	37.6560	141.0646	2.3	26.2	2019/7/18	25	MC	29	29 以下	74	146	8	-	10	17.9	6.3	35	26 以下	0.0605	シルト			
4	新田川	37.6316	141.0282	0.5	23.3	2019/8/7	7	VCS	112	30	56	147	0	-	2	25.8	9.6	37	24	-	26	0.0794	極細粒砂	
5	新田川	37.6106	141.0521	2.1	21.1	2019/8/7	19	VCS	100	32	10	26	20	-	22	6.1	0.5	8	26	-	28	0.1635	細粒砂	
6	太田川	37.5847	141.0411	1.4	18.1	2019/8/6	12	VCS	100	44	27	100	40	-	42	17.8	2.0	11	40	-	42	0.1061	極細粒砂	
7	太田川	37.5894	141.0565	2.7	18.8	2019/8/6	19	表層掘り	-	-	N.D.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0269	中粒砂	ダイバーによる表層採取
8	太田川	37.5867	141.0627	3.2	18.5	2019/8/6	24	VCS	100	44	29	112	18	-	20	24.1	2.4	10	28	-	30	0.1599	細粒砂	
9	小高川	37.5721	141.0309	0.4	16.7	2019/8/6	8	VCS	82	70	20	32	0	-	2	20.7	3.6	18	54	-	56	0.2051	細粒砂	
10	小高川	37.5685	141.0585	2.8	16.5	2019/8/8	22	VCS	82	24	8	24	14	-	16	2.9	0.6	21	22	-	24	0.1786	細粒砂	
11	小高川	37.5702	141.0865	5.3	17.2	2019/7/18	27	MC	20	20 以下	5	6	16	-	18	0.4	0.1	27	20 以下	0.3607	中粒砂			
12	小高川	37.5540	141.0940	5.7	15.7	2019/7/18	30	MC	24	24 以下	15	33	22	-	24	5.4	1.1	20	24 以下	0.3221	中粒砂			
13	小高川	37.5517	141.0417	1.1	14.5	2019/8/8	11	VCS	92	92 以下	15	44	10	-	12	19.8	3.0	15	76 以下	0.1758	細粒砂			
14	請戸川	37.5157	141.0609	2.3	10.7	2019/8/8	18	VCS	38	38 以下	13	36	0	-	2	7.0	2.6	37	32 以下	0.1505	細粒砂			
15	請戸川	37.5050	141.0493	1.0	9.4	2019/8/9	13	VCS	40	40 以下	1,169	3,260	38	-	40	197.0	39.3	20	40 以下	0.0171	シルト			
15-2	請戸川	37.5052	141.0485	0.9	9.4	2019/8/9	13	VCS	82	82 以下	157	424	0	-	2	143.3	24.1	17	68 以下	0.1132	極細粒砂			
16	請戸川	37.4983	141.0533	1.3	8.7	2019/8/8	14	VCS	78	78 以下	245	881	40	-	42	231.4	30.6	13	68 以下	0.0938	極細粒砂			
18	請戸川	37.4999	141.0788	3.5	9.6	2019/8/9	27	VCS	78	32	8	18	10	-	12	4.7	1.1	23	24	-	26	0.3242	中粒砂	
19	請戸川	37.4905	141.0438	0.4	7.7	2019/8/20	7	VCS	70	70 以下	529	1,110	62	-	64	321.4	26.7	8	66 以下	0.0734	極細粒砂			
21	請戸川	37.4697	141.0473	0.9	5.5	2019/8/9	10	VCS	126	56	107	265	32	-	34	99.8	14.6	15	44	-	46	0.1040	極細粒砂	
22	請戸川	37.4687	141.0614	1.9	5.8	2019/8/20	16	VCS	96	42	67	146	0	-	2	42.4	11.1	26	32	-	34	0.1040	極細粒砂	
24	請戸川	37.4670	141.0814	3.6	6.6	2019/7/18	26	MC	34	34 以下	357	810	16	-	18	71.9	17.4	24	32 以下	0.0497	シルト			
25	前田川	37.4562	141.0999	5.5	7.0	2019/7/18	31	MC	26	26 以下	25	72	10	-	12	8.5	2.0	23	24 以下	0.2466	細粒砂			
26	前田川	37.4577	141.0454	0.7	4.2	2019/8/20	10	VCS	100	62	55	299	6	-	8	78.6	22.8	29	34	-	36	0.2399	細粒砂	
27	1F	37.4346	141.0813	3.6	4.5	2019/7/21	26	MC	16	16 以下	26	63	12	-	14	6.2	2.6	42	16 以下	0.3275	中粒砂			
28	1F	37.4312	141.0385	0.2	1.2	2019/8/21	8	VCS	60	60 以下	164	238	16	-	18	130.9	21.9	17	54 以下	0.2126	細粒砂			
29	1F	37.4283	141.0701	2.5	3.3	2019/8/21	24	VCS	58	58 以下	191	578	24	-	26	153.1	30.1	20	52 以下	0.1145	極細粒砂			
30	1F	37.4254	141.0425	0.2	0.9	2019/8/21	10	VCS	70	70 以下	347	2,790	40	-	42	701.1	34.3	5	48 以下	0.1971	細粒砂			
31	1F	37.4132	141.0491	1.2	1.6	2019/8/23	15	VCS	78	78 以下	220	304	48	-	50	220.8	17.6	8	70 以下	0.1478	細粒砂			
32	1F	37.4074	141.0655	2.7	3.2	2019/8/22	23	VCS	64	24	27	117	20	-	22	16.5	2.2	13	22	-	24	0.2223	細粒砂	
33	1F	37.4036	141.0798	3.9	4.5	2019/7/18	28	MC	20	20 以下	31	47	12	-	14	6.8	3.0	44	18 以下	0.2477	細粒砂			
34	熊川	37.3999	141.0911	5.0	5.6	2019/7/18	29	MC	20	18	6	7	4	-	6	0.6	0.3	57	16	-	18	0.3660	中粒砂	
35	熊川	37.3856	141.0459	0.8	4.1	2019/8/23	12	VCS	56	44	36	182	6	-	8	22.6	16.5	73	16	-	18	0.1886	細粒砂	
36	熊川	37.3872	141.0686	2.8	4.9	2019/7/21	24	MC	23	23 以下	27	79	20	-	22	11.8	1.5	13	22 以下	0.3480	中粒砂			
37	熊川	37.3858	141.0844	4.2	6.0	2019/7/21	29	MC	15	12	7	10	10	-	12	1.0	0.5	49	12	-	14	0.3267	中粒砂	
39	熊川	37.3780	141.0667	2.6	5.6	2019/7/21	23	MC	15	15 以下	61	195	6	-	8	11.4	8.7	77	14 以下	0.1379	細粒砂			
40	熊川	37.3833	141.0917	4.8	6.7	2019/7/21	32	MC	28	22	55	367	6	-	8	14.7	11.1	76	12	-	14	0.0755	極細粒砂	
41	熊川	37.3719	141.0421	0.6	5.5	2019/8/23	11	VCS	78	78 以下	615	1,860	24	-	26	370.8	26.4	7	76 以下	0.0422	シルト			
42	富岡川	37.3364	141.0357	0.5	9.4	2019/8/23	9	VCS	86	86 以下	216	420	0	-	2	236.1	31.8	13	78 以下	0.1724	細粒砂			
43	富岡川	37.3302	141.0615	2.4	10.4	2019/7/20	20	MC	18	18 以下	39	340	16	-	18	13.8	3.8	27	18 以下	0.1740	細粒砂			
44	富岡川	37.3333	141.0722	3.4	10.3	2019/7/20	25	MC	14	14 以下	32	100	8	-	10	7.3	5.0	68	14 以下	0.2741	中粒砂			
45	富岡川	37.3111	141.0472	1.1	12.3	2019/8/27	15	VCS	88	48	37	111	26	-	28	46.1	3.9	8	46	-	48	0.2997	中粒砂	
46	富岡川	37.3047	141.0697	3.2	13.3	2019/8/27	25	VCS	76	76 以下	166	553	26	-	28	170.5	9.7	6	66 以下	0.1141	極細粒砂			
47	富岡川	37.2995	141.0967	5.6	14.6	2019/7/20	36	MC	18	18 以下	18	68	16	-	18	5.0	1.0	21	18 以下	0.2581	中粒砂			
49	井出・木戸川	37.2650	141.0394	2.1	17.4	2019/8/27	16	表層掘り	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1582	細粒砂	ダイバーによる表層採取
49-2	井出・木戸川	37.2676	141.0291	1.2	17.1	2019/8/27	11	VCS	50	50 以下	62	151	0	-	2	49.2	15.2	31	38 以下	0.3200	中粒砂			
50	井出・木戸川	37.2517	141.0276	1.3	18.8	2019/8/27	13	VCS	76	76 以下	141	286	28	-	30	130.2	20.0	15	62 以下	0.1189	極細粒砂			
51	井出・木戸川	37.2519	141.0572	2.9	18.9	2019/8/27	22	VCS	90	40	43	102	14	-	16	35.2	6.4	18	30	-	32	0.1780	細粒砂	
52	井出・木戸川	37.2383	141.0250	0.3	20.3	2019/8/29	9	VCS	50	32	34	106	0	-	2	18.3	10.2	56	20	-	22	0.2029	細粒砂	
53	井出・木戸川	37.2222	141.0405	1.8	22.1	2019/7/20	18	MC	27	27 以下	28	35	8	-	10	8.1	3.0	37	24 以下	0.1853	細粒砂			
55	1F北部沖合い	37.5780	141.3697	30.2	34.4	2019/7/19	124	MC	11	11 以下	94	383	6	-	8	9.5	8.6	90	11 以下	0.0397	シルト			
56	1F北部沖合い	37.5593	141.3433	27.6	31.4	2019/7/19	120	MC	23	18	43	154	8	-	10	8.2	6.6	81	12	-	14	0.0319	シルト	
57	1F北部沖合い	37.5426	141.3036	23.8	27.4	2019/7/19	104	MC	17	17 以下	17	38	0	-	2	3.3	2.5	77	16 以下	0.1022	極細粒砂			
58	1F北部沖合い	37.5330	141.2630	20.1	23.8	2019/7/19	88	MC	28	14	31	111	6	-	8	6.2	5.6	91	8	-	10	0.1710	細粒砂	
59	1F北部沖合い	37.4575	141.2472	18.2	19.3	2019/7/19	90	MC	26	14	34	146	2	-	4	6.6	6.2	94	8	-	10	0.1388	細粒砂	
60	1F北部沖合い	37.4367	141.2108	14.9	15.8	2019/7/19	77	MC	26	22	26	68	8	-	10	6.6	4.7	71	14	-	16	0.1217	極細粒砂	
61	1F南部沖合い	37.4167	141.2000	13.9	14.7	2019/7/19	71	MC	22	20	22	174	2	-	4	8.1	6.6	81	12	-	14	0.1994	細粒砂	
62	1F北部沖合い	37.4843	141.2673	19.8	21.8	2019/7/20	99	MC	29	22	49	559	4	-	6	14.9	11.8	79	12	-	14	0.0601	シルト	
63	1F北部沖合い	37.4367	141.2667	19.9	20.7	2019/7/19	103	MC	28	14	35	134	4	-	6	6.5	5.9	90	8	-	10	0.1129	極細粒砂	
64	1F南部沖合い	37.3917	141.1833	12.9	13.7	2019/7/19	67	MC	18	16	25	118	4	-	6	6.2	5.2	85	10	-	12	0.1909	細粒砂	
65	1F南部沖合い	37.3833	141.2000	14.4																				

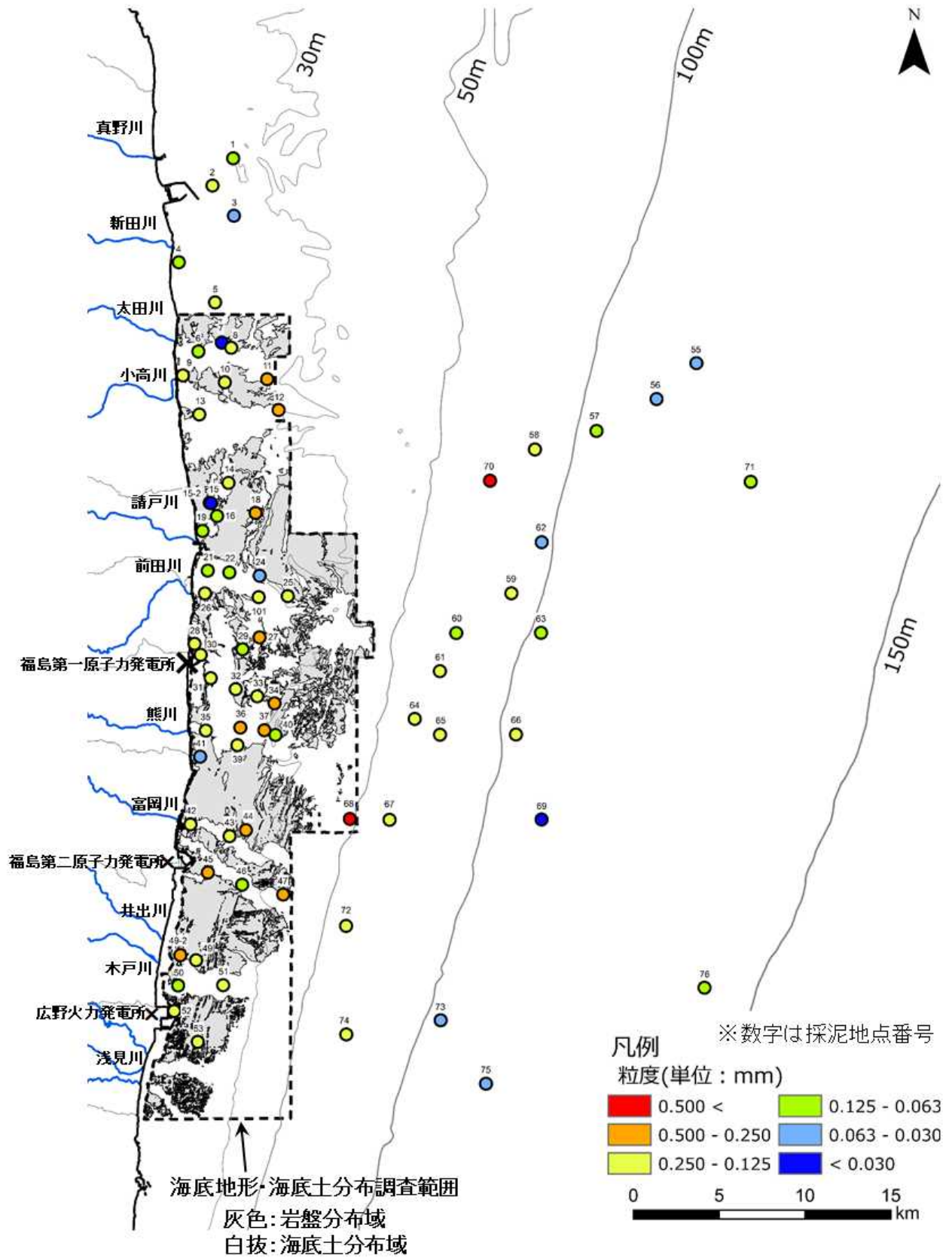


Fig. 4-20 粒度分布

水深は「財団法人水路協会発行「海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ」」

4.2.3.2 海底土の放射性セシウムの分布

各採取地点の放射性セシウムの鉛直分布を VCS 及び MC 毎にそれぞれ添付資料 4.2-1 及び 4.2-2 に示す。

① 放射性セシウム濃度の平面分布

放射性セシウムの各採取地点の平均濃度(柱状試料の幾何平均値)と最大値について、浅海域及び深海域の南北分布を Fig. 4-21 に示す。浅海域では、真野川から小高川河口域にかけて全般に放射性セシウム濃度が低く、請戸川河口域付近から富岡川河口域にかけて顕著に高い地点が分布する傾向を示す。しかし全域を通して放射性セシウム濃度が低い地点も河口域に依らず一定程度確認される。一方で濃度が有意に高い地点は請戸川河口域北の窪地(最大値 3,260 Bq kg⁻¹@地点番号 15)、1F 港湾入口(最大値 2,790 Bq kg⁻¹@地点番号 30)、熊川河口域南の窪地(最大 1,860 Bq kg⁻¹@地点番号 41)である。なお、原子力規制庁の曳航調査等により確認されていた放射性セシウム濃度が高い地点については本調査では濃度も低く、かつ岩盤の凹部の狭い範囲の分布に限定される。しかし木戸川河口域では濃度が最大約 280 Bq kg⁻¹を示し、かつ深さ 80 cm 以下まで放射性セシウムの分布が継続している地点(50)も確認された(Table 4-12; 添付資料 4.2-1 参照)。

深海域は、浅海域と比べて全般に放射性セシウム濃度が低く、1F 以北の地点が比較的高い傾向を示す。放射性セシウム濃度の最大値が 300 Bq kg⁻¹を超える地点はシルト相当の細粒の海底土が卓越する。

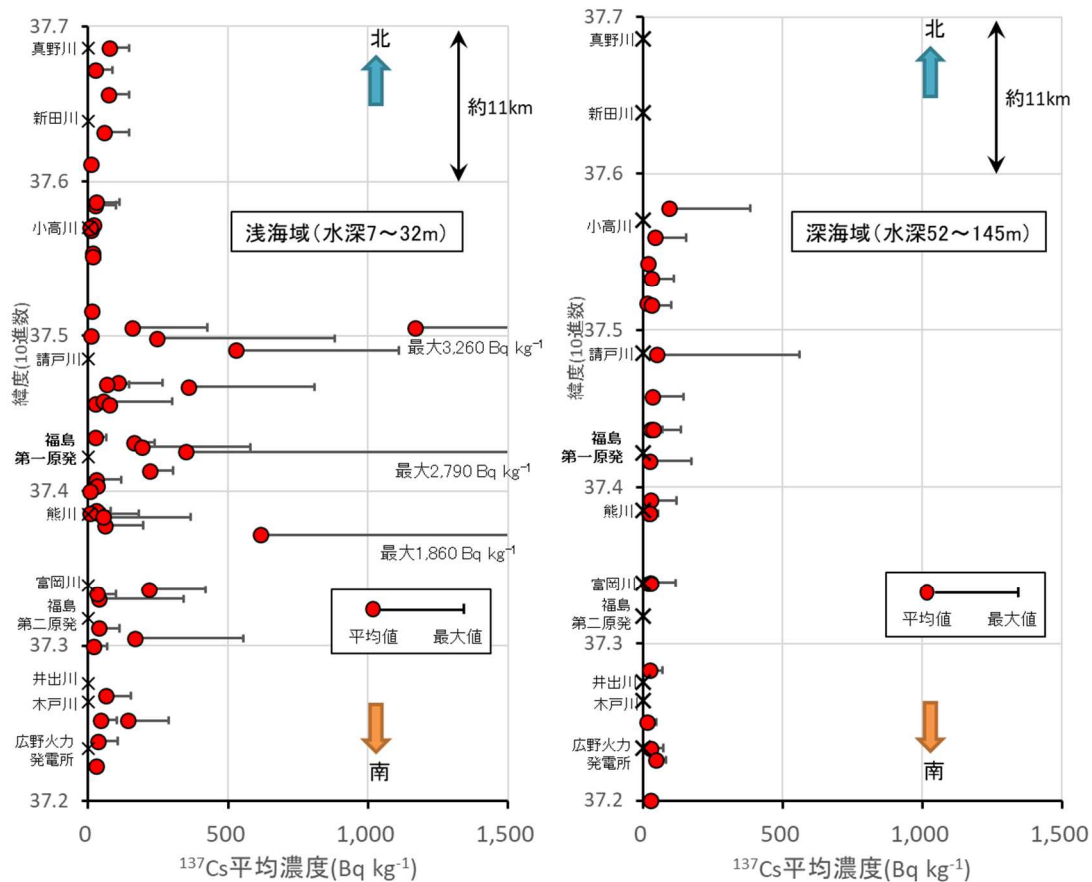


Fig. 4-21 各採取地点の柱状試料の平均¹³⁷Cs濃度及び最大値
「×」は緯度上の各河川河口の位置を示す(Fig.4-22,23 も同じ)

② 放射性セシウム累積量の分布

放射性セシウムの累積量(以下、「累積量」)の南北分布を Fig. 4-22 に示す。累積量は Table 4-12 の「 ^{137}Cs 検出下端深さ」までの合計であり、下端が確認されなかった地点(Table 4-12 では「 ^{137}Cs 検出下端深さ」が「以下」とある地点)は、Fig. 4-22 及び Fig. 4-23 では「Cs 下端未確定」と表している。浅海域では、請戸川河口域以南から累積量が有意に多くなり、放射能濃度と類似の傾向を示すものの、富岡川河口域南域にかけても、累積量が比較的多い地点が確認される。

深海域は、全般に累積量が少なく、浅海域と比較して、約 1/4 程度の累積量となる。最大濃度が 300 Bq kg^{-1} を超える地点(地点 55 及び 62; Table 4-12)は累積量としては 10 kBq m^{-2} 程度であり、同じ程度の最大濃度を有する浅海域(例えば地点 26、42 等; Table 4-12)の累積量と比較して一桁程度少ない場合がある。

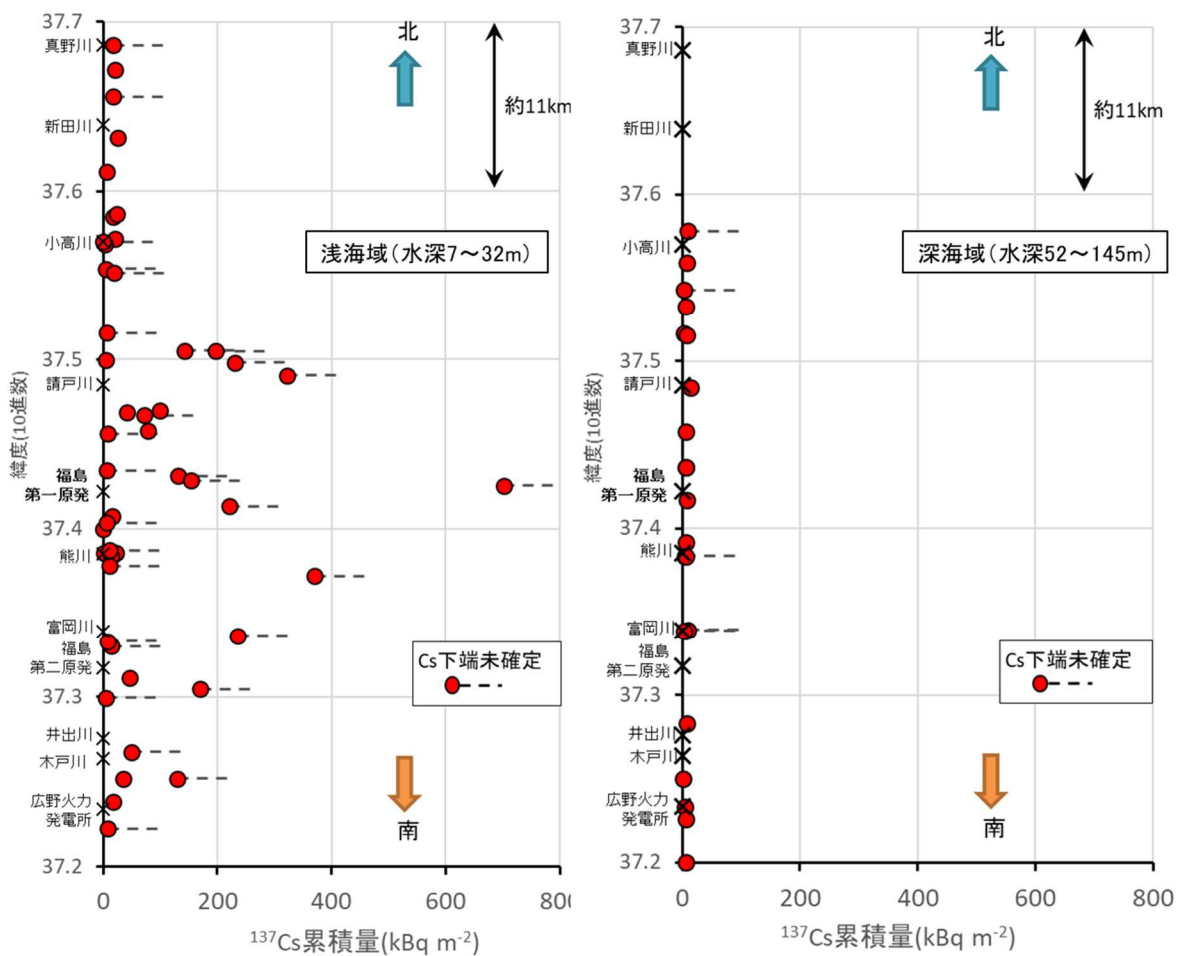


Fig. 4-22 各採取地点の柱状試料の累積 ^{137}Cs 量

③ 放射性セシウム累積量の 90%深さ分布

各採取地点における放射性セシウムの累積量の 90%深さ(以下、「L₉₀」)の南北分布を Fig. 4-23 に示す。浅海域は小高川河口域以南から広野火力付近にかけて、L₉₀ の深さが 50 cm を超える地点が確認されており、小高川河口域以北を除いて、一般的に放射性セシウムが比較的深い海底面下まで分布している。また真野川河口域から井出川河口域の北にかけては、L₉₀ が約 30 cm 以浅の地点が一定程度確認される。

深海域では概ね 20 cm 以浅であり、浅海域と比較して浅い。放射性セシウムの分布の下端が未確認の地点があるものの、全般に L₉₀ のバラつきは小さい。海底土中の放射性セシウムは、浅海域では小高川～請戸川河口域以南で濃度が高く、放射性セシウム累積量も多いことが明らかになった。この特徴は、原子力規制庁がこれまでに実施した曳航調査や、東電等のモニタリングの結果と整合的であることから、概括的には深さ方向の放射性セシウムの分布は、表層付近の分布と同様の傾向を示すことが示唆された。

深海域では、浅海域と比較して、放射性セシウム濃度、累積量ともに低く、また、地点毎のバラつきも小さいことが認められた。また、放射性セシウム濃度が 300 Bq kg⁻¹ を超えるような地点であっても、放射性セシウムを含んだ海底土の層厚が薄いことから、放射性セシウムの累積量としては浅海域に比べて相対的に少ないことが示された。

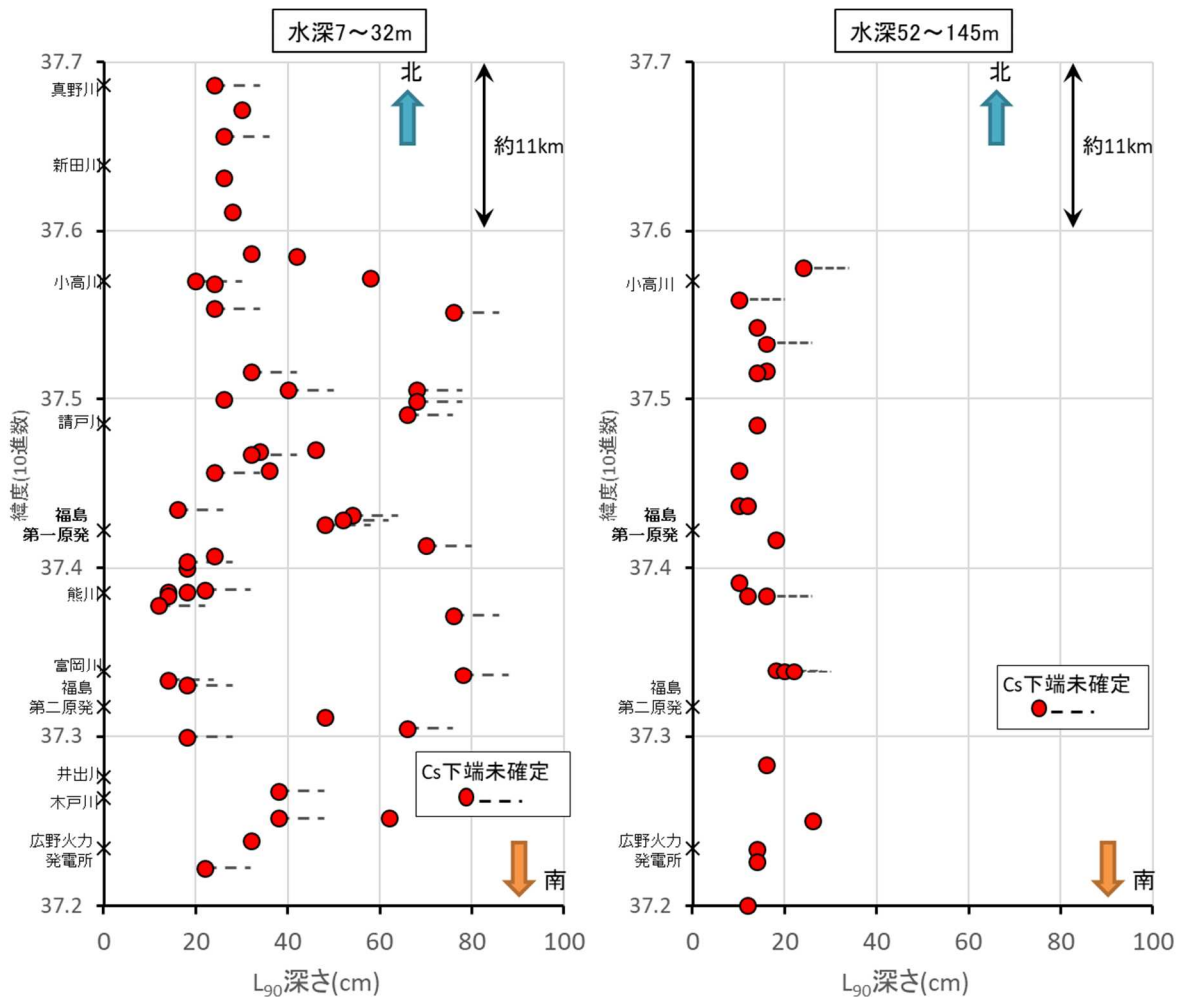


Fig. 4-23 ¹³⁷Cs の累積量の 90%深さ

④ 放射性セシウムと粒度の関係

Fig. 4-24 に放射性セシウム濃度と粒度の相関を示す。多数の既往調査研究例と同様に、粒度が小さいと放射性セシウム濃度は高い傾向を示す。しかし浅海域と深海域を比較した場合、浅海域では粒度と放射性セシウムの相関が強いが、深海域は相関がやや不明瞭である。また、極細粒砂(0.125 mm)より細粒の粒度では、浅海域の放射性セシウム濃度は、深海域の濃度より数倍～1桁程度高い傾向を示す。

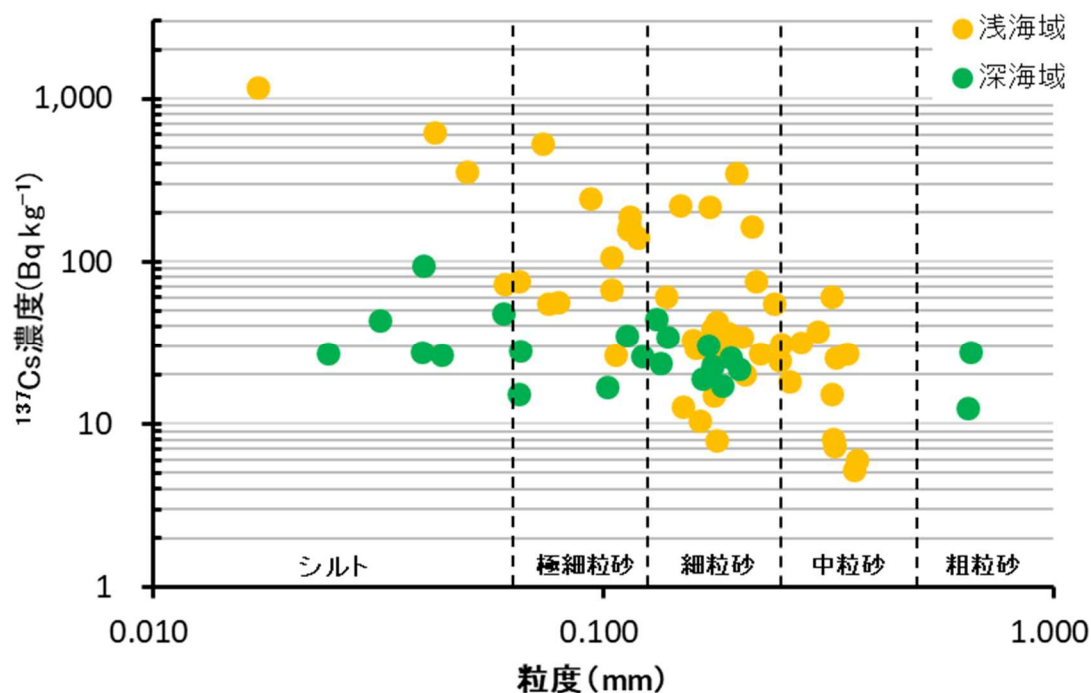


Fig. 4-24 ^{137}Cs 濃度(平均)と粒度の関係

⑤ 放射性セシウム分布の経時変化

Fig. 4-25 に放射性セシウムの平均濃度の経時変化を示す。Fig. 4-25 は、採泥地点毎の平均値を、「全体」、「浅海域」、「請戸・前田川河口域」等毎に平均化したものである。また、採泥点毎の既往調査結果との比較は添付資料 4.2-3 に示す。前述のように、本年度の採泥地点はこれまでに東電や原子力規制庁、原子力機構等が採泥を行った地点から選定しているが、原子力規制庁(海技研)及び原子力機構の採泥地点については、毎年度採泥をコンスタントに実施しているとは限らないことから、原子力機構がVCSを実施した平成25年度及び平成27年度と⁶⁾、原子力規制庁(海技研)の調査のうち、比較的最近の採泥調査(柱状採泥)の結果が得られている平成29年度⁷⁾の過去3か年と、本年度の結果を比較した。

放射性セシウム濃度は、全体としては平成25年度から平成27年度にかけての低減が大きく、その後は緩やかに低減している。具体的には平成25年度は数百 Bq kg^{-1} 程度の濃度が、平成27年度以降は数十 Bq kg^{-1} 程度まで低減し、平成27年度以降は数十 Bq kg^{-1} の範囲で緩やかな低減傾向を示す。

エリア毎では、浅海域は各年度とも濃度の変動幅が大きいが、深海域の濃度幅は小さい。また小高河口域では、平成25年度には確認されていた数百 Bq kg^{-1} 程度の地点が、平成27年度以降は確認さ

れない。請戸川・前田川河口域は平成 27 年度にかけて濃度の変動幅が大きくなったが、その後は濃度の高い地点が限定的になる傾向を示す。1F 前は他のエリアと比較して濃度変化が小さい。熊川・富岡川河口域は濃度の幅が広がる傾向を示す。井出川・木戸川河口域の濃度変化は小さい。

Fig. 4-26 に L_{90} の経時変化を示す。 L_{90} は原子力機構が VCS を実施した平成 25 年度及び 27 年度と比較した。請戸川・前田川河口域は、本年度の L_{90} は平成 25 年度と比較して中央値で約 7 cm 深くなったが、平成 27 年度は平成 25 年度と比較して約 2 cm 浅くなっていることから、現状では L_{90} の一般的な傾向は明瞭ではない。本年度の 1F 前は平成 27 年度と比較して中央値で約 10 cm 浅くなったことから、少なくとも、放射性セシウムの深さ方向への明瞭な移動は認められない。以上より、放射性セシウムの経時変化としては、平成 27 以降から本年度にかけては、濃度の急激な変化や、深部への移行等は確認されない結果となった。

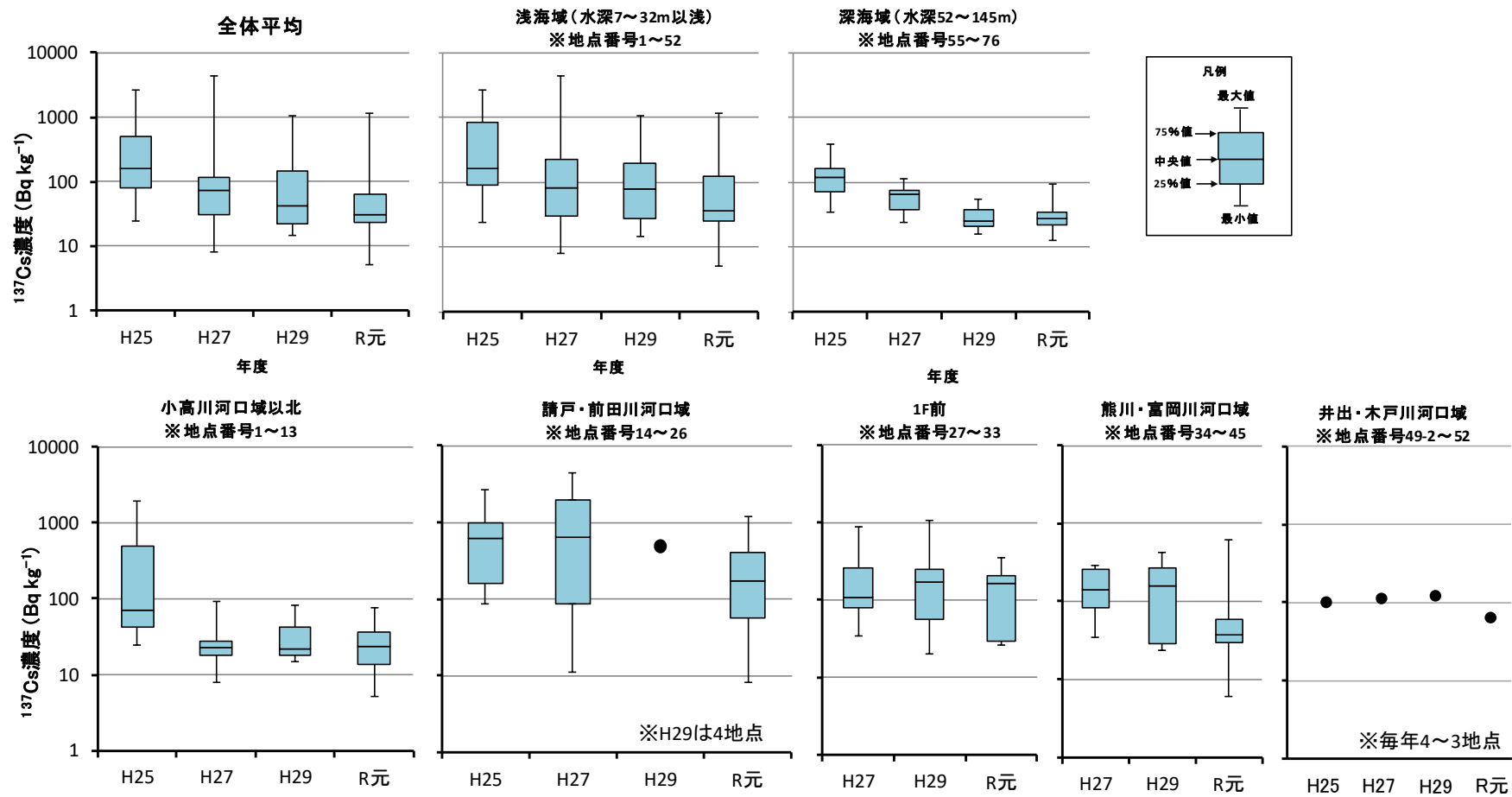


Fig. 4-25 ¹³⁷Cs 平均濃度の経時変化
上段: 全体平均及び水深区分、下段: 河口域

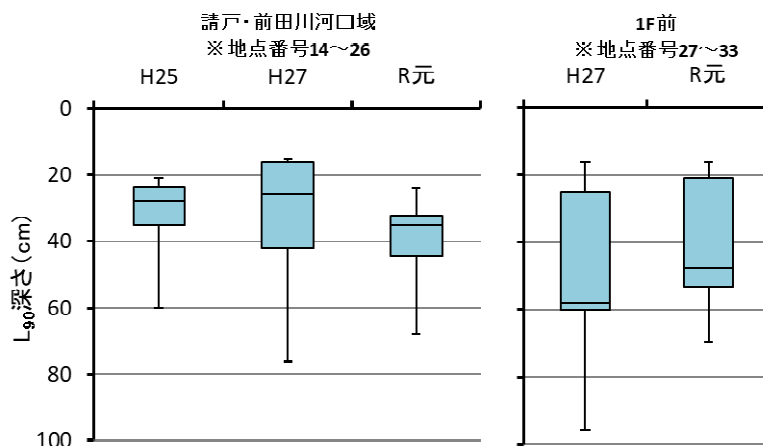


Fig. 4-26 ^{137}Cs の累積量の 90%深さ
凡例は Fig.4-25 と同じ

4.2.4 採泥調査のまとめ

採泥調査により、海底土中の放射性セシウムは、水深 30 m 以浅では小高川～請戸川河口域以南の濃度が高く、放射性セシウム累積量も多いことが明らかになった。また、水深 50 m 以深では、水深 30 m 以浅と比較して、放射性セシウム濃度、累積量ともに顕著に低く、また、地点毎のバラつきも小さいことが認められた。さらに、放射性セシウムの分布は、平成 27 年度から本年度にかけては、濃度の急激な変化や、深部への移行等は確認されないことが示された。

これらの結果を踏まえ、第 5 章では、特に水深約 30 m 以浅のエリアについて、放射性セシウム濃度と累積量が高い地点の要因について考察を行う。

「4.3 海象モニタリング」における報告の通り、台風後に海象モニタリング地点において海底土の顕著な濃度上昇が確認されている。また、東電等が実施するモニタリングにおいても、台風後に 2 オーダー程度の大幅な濃度上昇が確認された地点も点在する(例えば T-⑨(本調査の採泥地点番号は 40); ^{137}Cs N.D.@10/18→1300 Bq kg⁻¹@11/6、T-①(本調査の採泥地点番号は 13); ^{137}Cs 11 Bq kg⁻¹@9/25→730Bq kg⁻¹@10/28)⁸⁾⁹⁾。したがって、海底土中の放射性セシウムの分布については、台風等の短期のイベントによる影響の大きさと影響期間を把握した上で、中～長期の将来的な分布を予測する必要がある。本年度は特に、福島県の浜通り地方北部の河川が軒並み越水するような豪雨を伴う台風が 2 回も通過した極めて特異な年であったことから、その影響の特徴を、東電等の頻度の高いモニタリングとともに、当事業のような深さ方向の分布の調査も含めて、評価を継続する必要があると考える。特に、浅海域における比較的高い L_{90} が、事故に伴う一時的な蓄積によるものか、今後も上下に移動していくのかによって、海底土中の放射性セシウムのモニタリングを検討する重要な指標になると考えられる。

Table 4-14 沈降粒子の採取期間

係留回数	期間	開始	終了	係留回数	期間	開始	終了				
1 回 目	1日目	10/2	0:00	10/2	23:59	4 回 目	1日目	11/23	0:00	11/23	23:59
	2日目	10/3	0:00	10/3	23:59		2日目	11/24	0:00	11/24	23:59
	3日目	10/4	0:00	10/4	23:59		3日目	11/25	0:00	11/25	23:59
	4日目	10/5	0:00	10/5	23:59		4日目	11/26	0:00	11/26	23:59
	5日目	10/6	0:00	10/6	23:59		5日目	11/27	0:00	11/27	23:59
	6日目	10/7	0:00	10/7	23:59		6日目	11/28	0:00	11/28	23:59
	7日目	10/8	0:00	10/8	23:59		7日目	11/29	0:00	11/29	23:59
2 回 目	1日目	10/22	0:00	10/22	23:59	5 回 目	1日目	12/11	0:00	12/11	23:59
	2日目	10/23	0:00	10/23	23:59		2日目	12/12	0:00	12/12	23:59
	3日目	10/24	0:00	10/24	23:59		3日目	12/13	0:00	12/13	23:59
	4日目	10/25	0:00	10/25	23:59		4日目	12/14	0:00	12/14	23:59
	5日目	10/26	0:00	10/26	23:59		5日目	12/15	0:00	12/15	23:59
	6日目	10/27	0:00	10/27	23:59		6日目	12/16	0:00	12/16	23:59
	7日目	10/28	0:00	10/28	23:59		7日目	12/17	0:00	12/17	23:59
3 回 目	1日目	11/8	0:00	11/8	23:59						
	2日目	11/9	0:00	11/9	23:59						
	3日目	11/10	0:00	11/10	23:59						
	4日目	11/11	0:00	11/11	23:59						
	5日目	11/12	0:00	11/12	23:59						
	6日目	11/13	0:00	11/13	23:59						
	7日目	11/14	0:00	11/14	23:59						

4.3.2.2 調査方法

① 観測機器の設置

a) 調査方法

海象モニタリングの観測機器の設置について、Fig. 4-27 に設置位置、Fig. 4-28 に設置方法のイメージ図を示す。調査地点 1、2、4 については、Fig. 4-28 に示す通り観測装置の設置方法等は同様とした。一方、調査地点 3 については、水深が深く、揚収の際に重量が重くなるため、係留系内のセジメントトラップに切り離し装置を設置し、揚収しやすくした。係留系には、沈降粒子を捕捉するためのセジメントトラップを海底面より 1.5 m 上に設置した。次に沈降粒子と濁度等の関連を把握するために、濁度計と塩分水温計を海底面より 1 m 上の位置及び海水面より 2 m 下の位置に設置した。さらに海底からの再懸濁の評価のために電磁流速計を海底面より 1 m 上の位置及び海水面より 2 m 下の位置に設置した。各調査地点において、セジメントトラップは 1 日間隔で沈降粒子を捕集し、濁度計・塩分水温計・電磁流速計に関しては 10 分間隔で測定した。調査に使用した主な機器を Table 4-15 に示す。

本調査では、各種水質計、電磁流速計、セジメントトラップの動作の正確性、及びデータ精度が重要となってくる。そのため、各種水質計及び電磁流速計に関しては、製造元のメンテナンスを受け、精度以内であることを確認した。セジメントトラップに関しても同様に、製造元のメンテナンスを受け、プログラム通りの動きをすることを目視で確認し、品質を確保した。

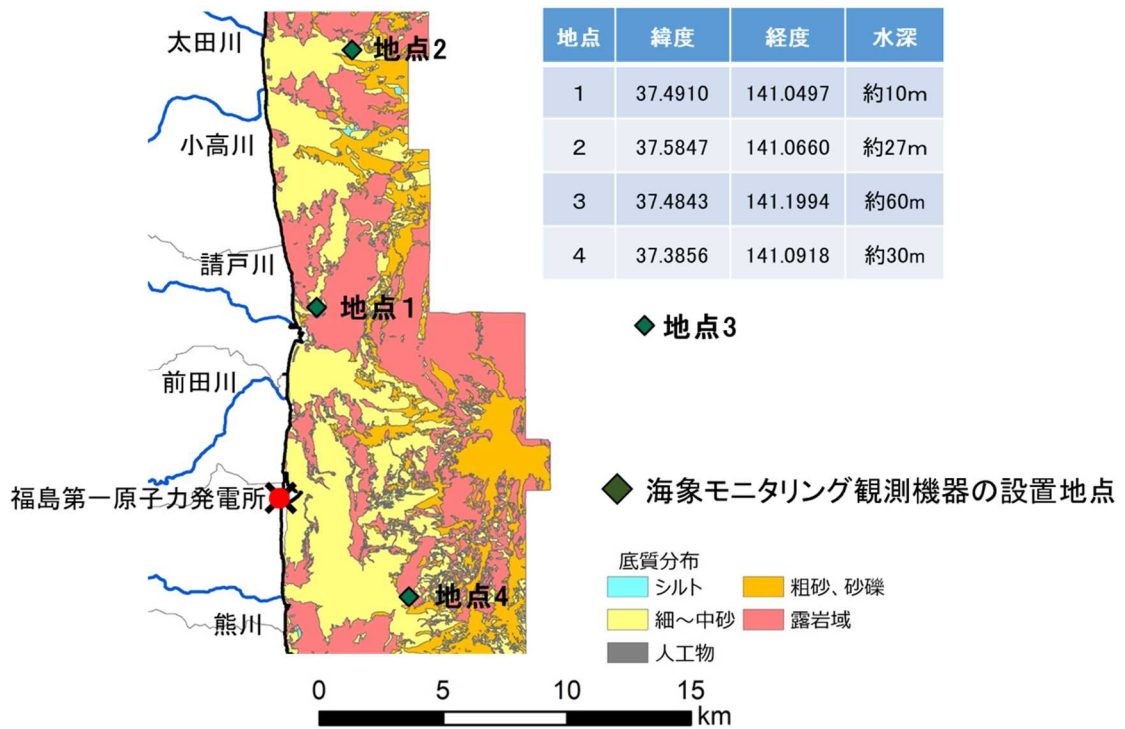


Fig. 4-27 観測機器の設置場所

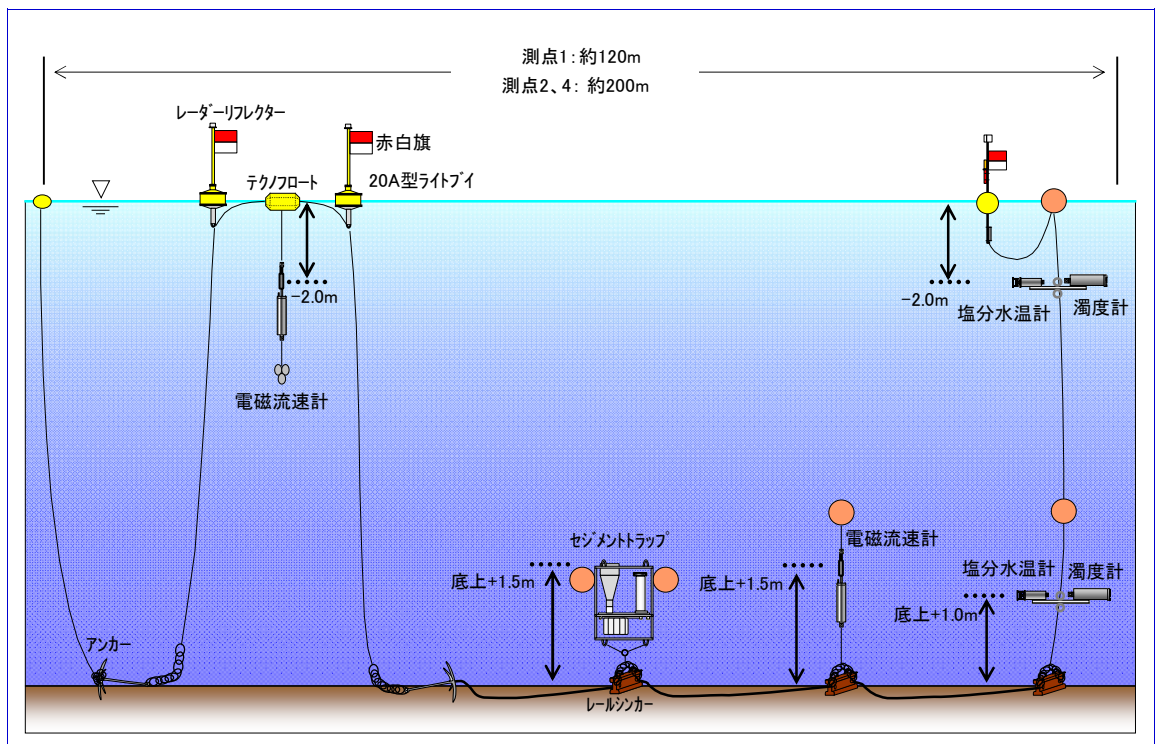


Fig. 4-28 観測機器の設置イメージ

Table 4-15 観測機器の諸元

		セジメントトラップ				
	メーカー名	日油技研工業株式会社				
	型番名	SMC7S-500				
	捕集ボトル数	7本				
	捕集ボトル容量	500mL				
	ロート径	15.4cm				
	寸法	48×48×H76cm				
	質量	25kg				
	水中重量	15kgf(147N)				
	電磁流速計	濁度計	水温塩分計			
		JFEアドバンテック株式会社				
メーカー名	JFEアドバンテック株式会社					
型番名	Infinity-EM		Infinity-CLW		Infinity-CT	
分解能	流速	0.02cm/s	濁度	0.03FTU	水温	0.001°
	流向	0.01°	クロロフィル	0.01ppb	電気伝導度	0.001mS/cm

b) 試料の処理

純水に塩を加え、塩分を 35PSU に調整した溶液で満たした 500 ml のボトルをセジメントトラップに 7 本取り付け、1 日 1 本のペースで 7 日間分の沈降粒子を捕集した。回収したボトルは 3000rpm で 20 分間の遠心分離を行い、海水と沈降粒子を分離した。その後、純水を入れ、同様の条件で遠心分離を行う工程を 3 回繰り返して、沈降粒子に含まれる塩分を除去した。その後、冷凍庫で予備凍結を行い、真空凍結乾燥機を用いて約 2 日間乾燥した。沈降粒子の前処理のフローを Fig. 4-29 に示す。凍結乾燥が終了した試料について、貝殻や植物片等の夾雑物を 2 mm メッシュのふるいで除去し、メノウ乳鉢にて粉碎・均一化した。なお、粒度分析に供する量が分取できる試料量の場合は別途粒度分析用に分取した。均一化後の試料は、放射能を測定する装置により封入状態が異なるため、5 種類 (V-1 容器、U-8 容器、ナイロン製ポリ袋、ウェル型容器、メンブレンフィルター) を使用した。

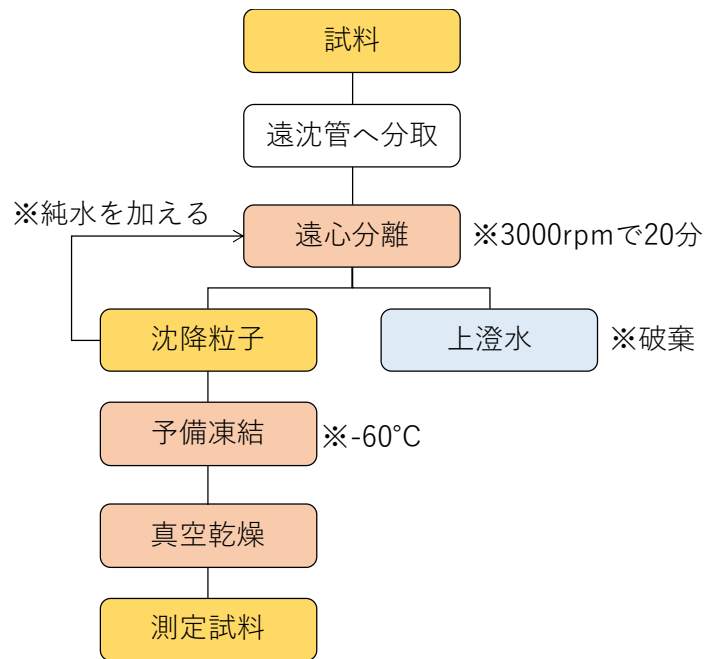


Fig. 4-29 沈降粒子の前処理フロー

c) データ処理・解析

水質計と電磁流速計に関して、各観測期間終了後に機器を回収し、データ欠損の有無、データ品質を確認した。前後のデータと比較して大きく異なる場合はエラー値として除去し、前後のデータから補間した。その際のフローを Fig. 4-30 に示す。

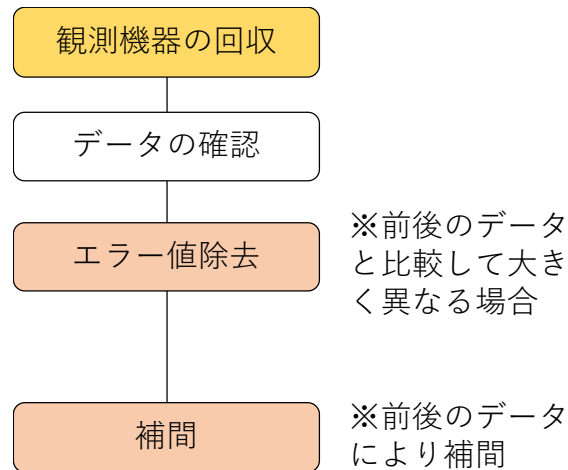


Fig. 4-30 水質計・電磁流速計のデータ処理

② 海底土の採取

a) 調査方法

海底土は船上から離合社製 G.S.型表層採泥器(アシュラ:Fig. 4-17 参照)を下ろし、深度方向

に 5 cm から 20 cm 程度採取した。その後、試料が乱れないように栓をし、土色帖及びスケールとともに並べた状態で写真撮影を行い、柱状試料の写真撮影、観察等を実施した。観察結果の詳細は「添付データ;4.3-1」を参照のこと。なお、各観測期間において、船上からの作業、気象条件の違い等もあり、同一地点での採取は難しいため、係留地点から半径 100 m の範囲内をすべて同一地点とした。

b) 試料処理方法

採泥した柱状試料は、試料押し出し機を使用して 2 cm ごとに切り分けを行った。切り分ける際は、ヘラ等の道具を層ごとに洗浄し、外周部に付着した試料も除去し、各層の混交を防いだ。切り分けた試料は凍結乾燥後、細かく粉碎し U-8 容器に封入した。

③ 放射能濃度の測定

セジメントラップで採取した沈降粒子は、原子力機構福島環境安全センター及び金沢大学環日本海域環境研究センターにて放射性セシウム濃度の測定を実施した。測定に使用した検出器及び標準線源について Table 4-16 に示す。測定時間は、数十から数百 Bq kg⁻¹ の検出下限値となるように、18,000 秒から 415,000 秒とした。なお、海象モニタリングで採取した海底土に関しては 4.2 節の採泥調査の項目と同様の測定を行った。

Table 4-16 検出器一覧

測定場所	検出器メーカー	検出器型番	標準線源
日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター	ORTEC	GMX40P4-76	MX033U8PP
金沢大学 環日本海域環境研究センター	ORTEC	GEM-90210	JSAC0471
	CANBERRA	EGPC250-P21	

④ 粒度の分析

粒度分布の測定には、少量でも測定可能なレーザ回折式粒度分布装置（島津社製 SALD-3100）を使用した。純水で満たした回分セルに乾燥試料を数 mg 程度投入し、攪拌させながら測定を行った。土粒子が固まって見かけの粒径が大きくなることを防ぐため、あらかじめ超音波を当てて、試料を分散させて測定を実施した。

⑤ 有機物の測定

沈降粒子の有機物測定について、以下の方法で実施した。凍結乾燥した試料は、1M 塩酸で貝殻等の無機炭素を除去した後、Milli-Q 水で洗浄後、再度、真空凍結乾燥機で乾燥した後にメノウ乳鉢ですりつぶした試料を元素分析計（サーモフィッシャー社製 Flash EA1112）で全有機炭素（TOC）含有量と全窒素（TN）含有量を測定した。また、炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）と窒素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）は同位体比質量分析計（サーモフィッシャー社製 Flash EA1112-Delta V Plus confFloIII system）で測定した。放射性炭素同位体比は、Beta Analytic Inc.社の加

速器質量分析装置により測定し、同位体分別の効果を補正するために用いられている、 $\delta^{13}\text{C}$ を -25‰ に規格化した $\Delta^{14}\text{C}$ 値で表示した⁵⁾。

⑥ 鉍物種の測定

試料内に含まれる鉍物種を把握するために X 線回折法を使用して測定を行った。凍結乾燥後の試料をタングステン製の乳鉢と乳棒でパウダー状に細かく粉砕し (Fig. 4-31 の(A))、それをサンプルホルダーに均等に擦り付け (Fig. 4-31 の(B))、測定を行った。測定には Rigaku 社 SmartLab を使用した (Fig. 4-31 の(C))。

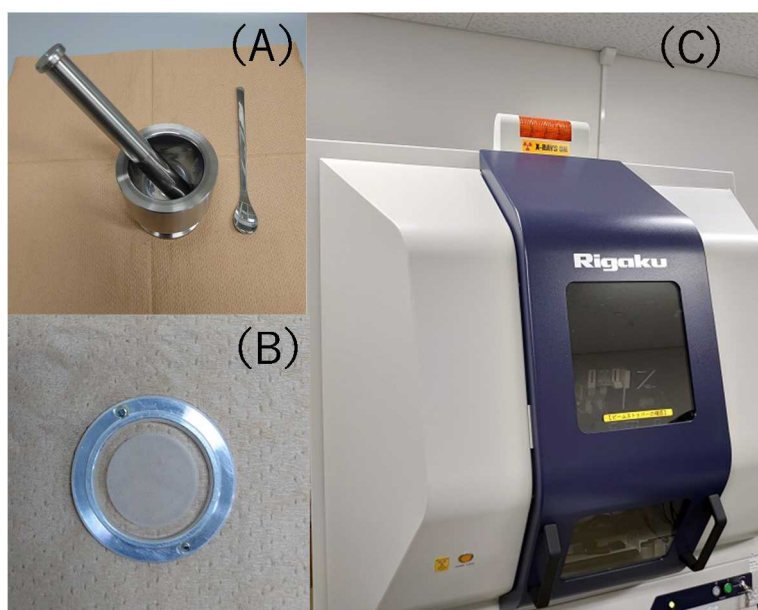


Fig. 4-31 鉍物種の測定作業

4.3.3 調査結果

4.3.3.1 セジメントトラップによる沈降粒子の時系列変動

① 沈降量(全粒子束)の結果

令和元年 10 月 2 日から令和元年 12 月 17 日にかけて、5 回の観測を行った。各地点における単位面積当たりの一日の沈降粒子の捕集量を沈降量として、その時系列変動を Fig. 4-32 に示し、その結果を以下に述べる。なお、詳細な数値は「添付データ;4.3-1」を参照すること。

a) 調査地点 1

沈降量は、10 月 6 日、7 日、23 日、25 日、26 日に $2.97 \times 10^3 - 1.10 \times 10^4 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と他の期間と比較して高い値を示した。その他の期間では、 $0.20 \times 10^2 - 1.22 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。沈降粒子は 10 月の係留期間に突出して多かった。

b) 調査地点 2

沈降量は、10 月 25 日、26 日に $0.44 \times 10^3 - 0.94 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と他の期間より高い値を示し

た。他の期間では、 $0.60 \times 10^1 - 0.15 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。係留 2 回目に突出して沈降粒子が多かったことを除くと、全体的に原子力規制庁が平成 28 年度に同地点で観測した結果と同程度であった。

c) 調査地点3

沈降量は、10 月 26 日に $0.13 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と他の期間より高い値を示した。他の期間では、 $2.00 \times 10^{-1} - 0.75 \times 10^1 \text{ gm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。調査地点 2 と同様に係留 2 回目において沈降粒子が多かった。なお、10 月 25 日は設置機器の不具合により欠測となっている。

d) 調査地点4

沈降量は、10 月 25 日、26 日に $0.92 \times 10^3 - 1.21 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と他の期間と比較して高い値を示した。他の期間では、 $5.00 \times 10^{-1} - 0.13 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。調査地点2及び3と同様に係留 2 回目に突出して沈降粒子が多かった。原子力規制庁が平成 28 年度に同地点で観測した結果と同程度であった。



Fig. 4-32 沈降粒子の時系列変動

② 沈降粒子の放射性セシウム濃度

令和元年 10 月 2 日から令和元年 12 月 17 日にかけて、5 回の観測を行った。各地点における ^{137}Cs 濃度の時系列変動を Fig. 4-33 に示し、その結果を以下に述べる。なお、 ^{134}Cs は定量していない。

a) 調査地点 1

^{137}Cs 濃度は係留 1 回目の 10 月 2 日から 8 日にかけて $0.92 \times 10^2 - 0.64 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と低い値を示した。しかしながら、係留 2 回目では低い値でも $1.63 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ を示し、10 月 26 日には $1.38 \times 10^4 \text{ Bq kg}^{-1}$ を示した。係留 3 回目では、 $2.62 \times 10^3 - 8.72 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、係留 4 回目では $1.22 \times 10^3 - 4.09 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、係留 5 回目では、 $1.67 \times 10^3 - 6.05 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と幅がある傾向を示した。

b) 調査地点 2

係留 1 回目の ^{137}Cs 濃度は、10 月 2 日、3 日、8 日について検出下限値以下となった。また、10 月 4 日から 10 月 7 日にかけては $0.20 \times 10^3 - 0.29 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ の値を示した。係留 2 回目は 1 回目と比較して ^{137}Cs 濃度が上昇し、 $0.54 \times 10^3 - 3.89 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と観測日によって異なる傾向を示した。係留 3 回目は、 $3.25 \times 10^3 - 6.10 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、係留 4 回目は、 $2.32 \times 10^3 - 4.80 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、係留 5 回目は、 $3.12 \times 10^3 - 5.43 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ となり、観測日により ^{137}Cs 濃度が 2 倍程度異なった。

c) 調査地点 3

係留 1 回目では、 ^{137}Cs 濃度が $1.02 \times 10^3 - 6.35 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と観測日により幅がある傾向を示した。特に 10 月 2 日と 5 日が $5.57 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と $6.35 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と高い値を示した。一方、係留 2 回目と 3 回目では $0.11 \times 10^3 - 0.66 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ と低い値で推移する傾向がみられた。また、10 月 25 日については、係留機器のトラブルにより沈降粒子の採取が出来なかった。係留 4 回目でも $0.34 \times 10^3 - 0.67 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ で推移する傾向がみられたが、11 月 26 日には一時的に $5.22 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、11 月 29 日には $2.10 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ の濃度が示された。係留 5 回目に関しては、沈降粒子の試料量が少なく、 ^{137}Cs 濃度の検出下限値が数千 Bq kg^{-1} と高くなってしまったため、12 月 11 日から 13 日、12 月 14 日、12 月 15 日から 17 日という 3 つに区別して ^{137}Cs 濃度を測定した。結果、 $0.62 \times 10^3 - 1.32 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ の範囲であった。

d) 調査地点 4

係留 1 回目において、 ^{137}Cs 濃度は、 $0.26 \times 10^3 - 0.90 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ を示した。10 月 5 日と 10 月 8 日に関しては、検出下限値以下となった。係留 2 回目に関しては、 $0.12 \times 10^3 - 1.49 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ を 10 月 24 日、27 日が 3000 Bq kg^{-1} 程度と他よりも高い値を示した。係留 3 回目では 11 月 12 日から 11 月 14 日にかけて上昇する傾向を捉えた。係留 4 回目と 5 回目は概ね 2000 から 4000 Bq kg^{-1} 程度であった。



Fig. 4-33 放射性セシウム濃度

③ 沈降粒子の放射性セシウムフラックス

令和元年 10 月 2 日から令和元年 12 月 17 日にかけて、5 回の観測を行った。各地点における ^{137}Cs 濃度の時系列変動を Fig. 4-34 に示し、その結果を以下に述べる。なお、各観測期間及び調査地点において、フラックスの変化が大きいため、縦軸(フラックスの値)をログスケールとして表示するとともに、各調査地点で異なるレンジとして示した。

a) 調査地点 1

調査地点 1 は、他の調査地点と比較して全体的に高い ^{137}Cs フラックスを示した。特に係留 2 回目の 10 月 26 日には $8.68 \times 10^4 \text{ Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と他の期間と比較しても高い値を示した。その他の期間は 100 - 1000 $\text{Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 程度を推移した。

b) 調査地点 2

調査地点 2 は、全体的に 10 から数百 $\text{Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を推移し、調査地点 1 と比較すると一桁低い傾向を示した。10 月 26 日及び 11 月 25 日、26 日、28 日に他の期間よりも高い値を示した。なお、係留 1 回目の 10 月 2 日、3 日、8 日は ^{137}Cs 濃度が不検出となっており、フラックスが計算できなかった。

c) 調査地点 3

調査地点 3 は、今回の調査地点で最も請戸川河口よりも東側に位置している測点である。 ^{137}Cs フラックスは 0.1 から数十 $\text{Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 調査地点 2 及び 4 と比較して、一桁低い傾向を示す。10 月 26 日及び 11 月 26 日に他の期間よりも高い ^{137}Cs フラックスを示した。

d) 調査地点 4

調査地点 4 は、調査地点 2 と同様に ^{137}Cs フラックスは 10 から数百 $\text{Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を推移している傾向を示す。10 月 26 日、11 月 26 日、29 日に他の期間よりも高い ^{137}Cs フラックスを示した。なお、係留 1 回目の 10 月 5 日、8 日は ^{137}Cs 濃度が不検出となっており、フラックスが計算できなかった。



Fig. 4-34 放射性セシウムフラックス

4.3.3.2 水質の時系列変動

調査地点 1 から 4 までの水温、塩分、濁度、クロロフィル a の結果を水深 2 m(以下、「表層」とする)及び底上 1.5 m(以下、「底層」とする)に分け、Fig. 4-35 から Fig. 4-38 にそれぞれ示す。なお、詳細な数値は「添付データ;4.3-3」を参照すること

①調査地点1

水温は 10 月 2 日から 4 日にかけて下がる傾向を示すが、全体的には、季節と連動し、全観測期間を通じて下がっていく傾向を示した。塩分に関しては、おおよそ 33 PSU を示すが、係留 2 回目の期間の変動が顕著にみられた。期間中、表層及び底層に関して、乱高下を繰り返す観測結果を示し、特に 10 月 25 日から 26 日にかけては表層が 25 PSU 程度と大きく下降した。濁度に関しては、表層と比較して、底層の濁度が高い傾向を全期間で示した。また、底層では濁度が時間によって変化することも観測された。特に、係留 2 回目では 10 月 22 日から 23 日にかけて最大 601 FTU、10 月 25 日から 26 日にかけて 1096 FTU と他の期間に比較して顕著に高い値を示した。クロロフィル a 濃度に関しては、全観測期間を通して数 ppb 程度であったが、10 月 22 日から 23 日、10 月 25 日から 26 日にかけて 40 から 70-80 ppb と大きく上昇した。

②調査地点2

水温は調査地点 1 と同様の傾向を示し、季節変動と思われる緩やかな水温低下がみられる。塩分濃度は、係留 2 回目において表層で変動が大きい傾向を示す。調査地点1では底層も表層と同様に変動していたが、調査地点 2 では表層の変動のみが大きく表れる傾向を示した。濁度に関しては、10 月 25 日から 26 日にかけて最大で 343 FTU を観測した。一方クロロフィルの変動幅は小さく、最大で 16.4 ppb 程度であった。

③調査地点3

係留 1 回目では表層と底層で水温が 5°Cほど異なったものの、全期間を通じて季節変動による緩やかな低下が観測された。塩分に関しては、調査地点1及び2とは異なり、おおよそ一定(34 PSU 程度)を維持していた。濁度に関しては 10 月 22 日から 23 日及び 10 月 26 日から 27 日にかけて底層で乱れる観測結果が得られ、最大で 65 FTU を示した。クロロフィルに関して、調査地点 1 および 2 のような変動は少なく最大でも 7.2 ppb であった。

④調査地点4

水温は他の地点同様、季節変化と思われる緩やかな低下傾向を示す。塩分は係留 2 回目において、地点2と同様に表層の変動が大きい傾向を示した。濁度とクロロフィルの傾向も調査地点2と同様に変動する傾向を示し、それぞれ最大で 163 FTU 及び 20.7 ppb であった。



Fig. 4-35 調査地点1の水質の時系列変動

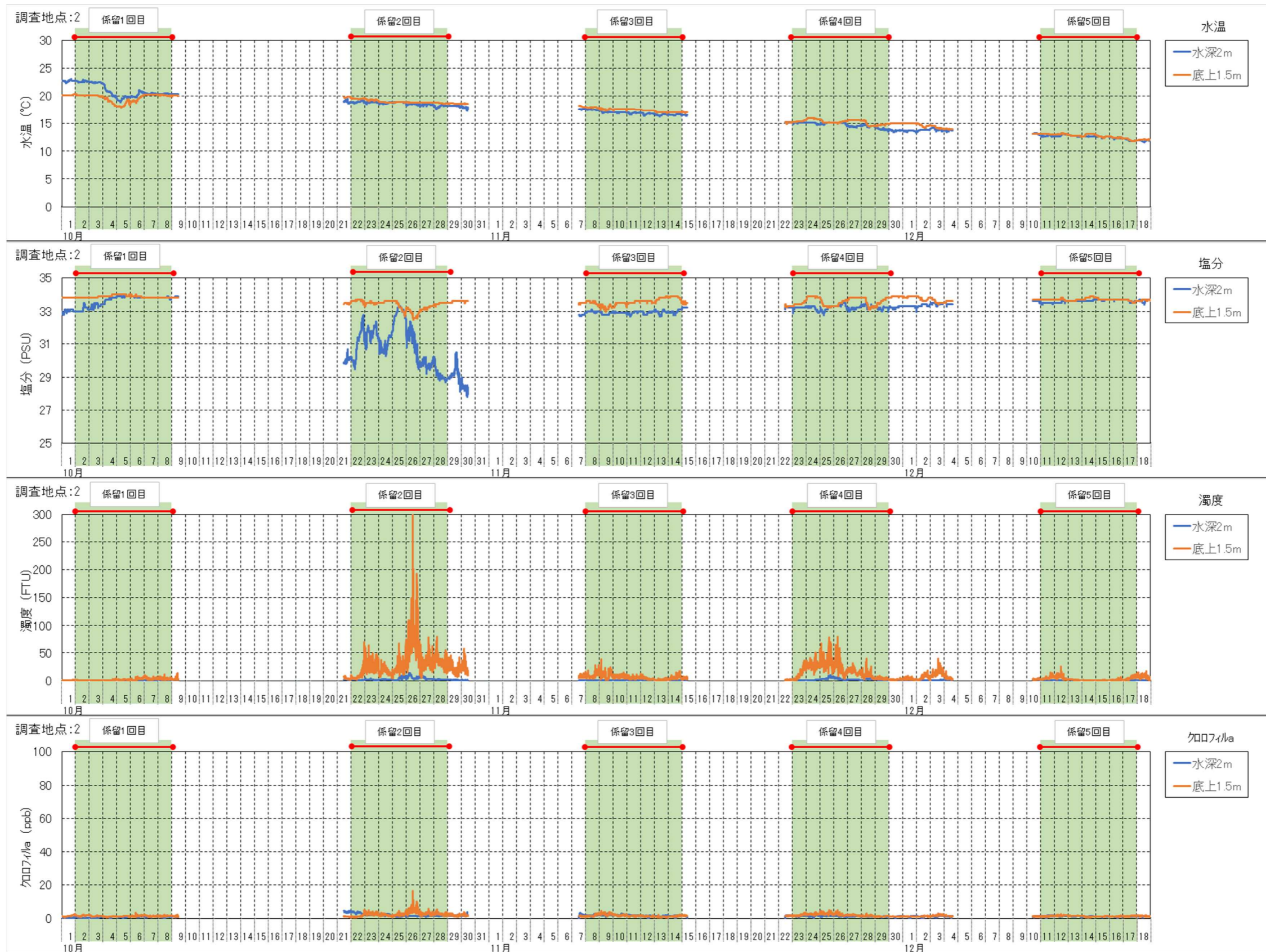


Fig. 4-36 調査地点 2 の水質の時系列変動



Fig. 4-37 調査地点3の水質の時系列変動



Fig. 4-38 調査地点 4 の水質の時系列変動

4.3.3.3 流向・流速の時系列変動

調査地点1から4の流向(北方成分と東方成分に分割した流向)と流速について、水深 2 m(以下、「表層」とする)及び海底面上 1.5 m(以下、「底層」とする)に分けて Fig. 4-39 から Fig. 4-42 にそれぞれの結果を示す。なお、北方成分はグラフの「プラス」を北に向かう流れ、東方成分はグラフの「プラス」を東に向かう流れとして表している。詳細な数値は「添付データ:4.3-3」を参照すること。

① 調査地点1

全体的にみると、東方成分に比べて、北方成分の流速が大きいことが分かる。北方成分は 1 から 2 日程度の周期で南北の流れが変動していることが観測された。また、表層と底層で流向について同じ傾向を示した。表層は 20 cm s^{-1} 程度の流速が卓越しており、底層は 10 cm s^{-1} 程度の流速が支配的であった。しかしながら、係留 1、2、4 回目の低気圧通過時には、表層で 40 cm s^{-1} 程度、底層で 30 cm s^{-1} 程度と通常時の 2 から 3 倍の流速が観測された。一方、東方成分に関して見ると、表層、底層ともに 10 cm s^{-1} 程度の流速が卓越しているが、係留 2 回目の台風時には、表層で 50 cm s^{-1} 程度、底層でも 35 cm s^{-1} 程度の流速が観測されており、台風通過時には 3 から 5 倍ほどの流速が発生していることが分かった。

② 調査地点2

表層の北方流速について、調査地点 1 と同様に1から 2 日間の周期で南北方向の流れが入れ替わることが観測された。また、低気圧通過時の係留 1、2、4 回目で流速が大きくなることが観測された。特に台風通過時の係留 2 回目において、最大で 90 cm s^{-1} 程度の強い南向きの流れが観測されている。一方、底層では、係留 2 回目においても、 25 cm s^{-1} 程度の流速となっており、表層に比べて 3 分の 1 程度の影響であった。東方成分では、係留 2 回目において表層では数時間ほどの周期で東西方向の流れが入れ替わるのに対して、底層では 1 から 2 日ほどの周期での入れ替わりとなっており、表層と底層で違う流速の傾向を示した。

③ 調査地点3

北方成分に関して、表層及び底層の流向は同様の傾向が観測された。流速は表層で大きく、係留2回目では最大で 55 cm s^{-1} 程度の強い南向きの流れが観測された。また、係留 1 回目では北方成分の底層において、数時間で流れが逆転している観測値が得られた。東方成分では、表層底層ともに同様の流向を示す傾向があるが、係留 1 回目及び 2 回目において、数時間で東西方向が入れ変わる傾向が観測された。

④ 調査地点4

北方成分では、特に係留 2 回目において、表層が台風の影響を受け、南向きの強い流れ(最大で 135 cm s^{-1} 程度)が観測された。一方、底層では、最大でも 30 cm s^{-1} 程度の流向であり、調査地点2と同様、3 分の 1 程度の影響であった。東方成分においても、表層の流速が底層よりも大きく、係留 2 回目では 40 cm s^{-1} 程度の西向きの流れが観測された。

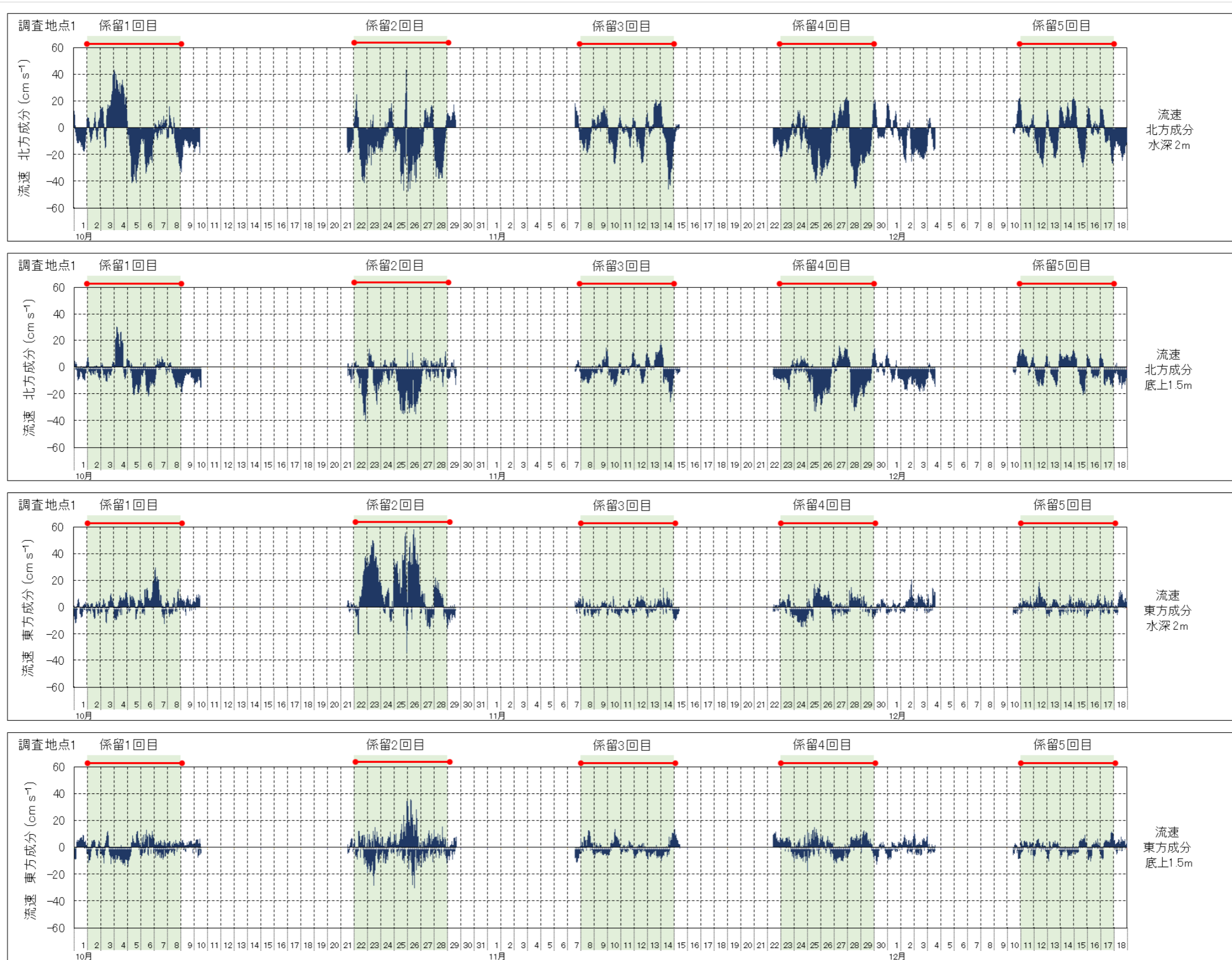


Fig. 4-39 調査地点1の流向・流速の時系列変動

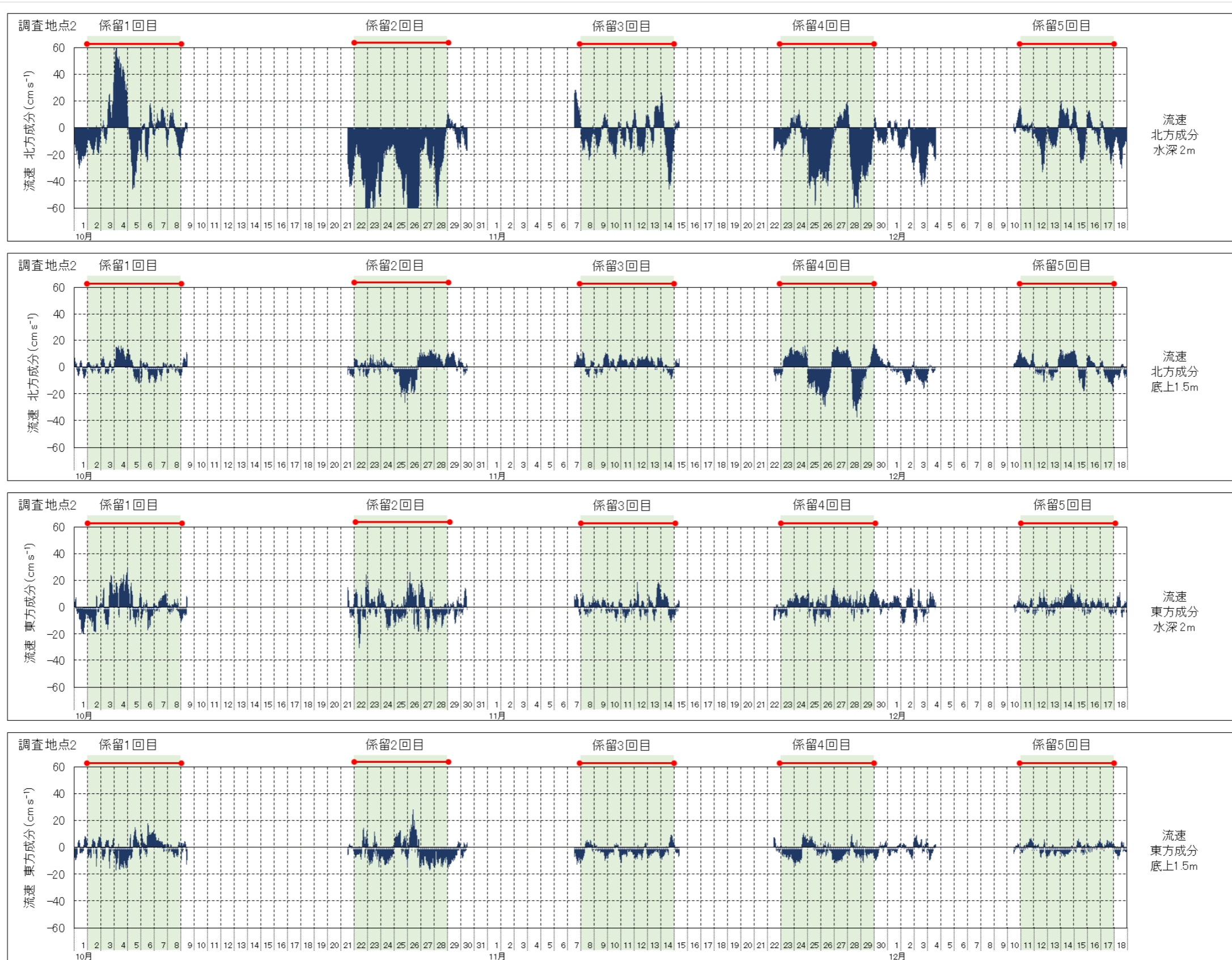


Fig. 4-40 調査地点2の流向・流速の時系列変動

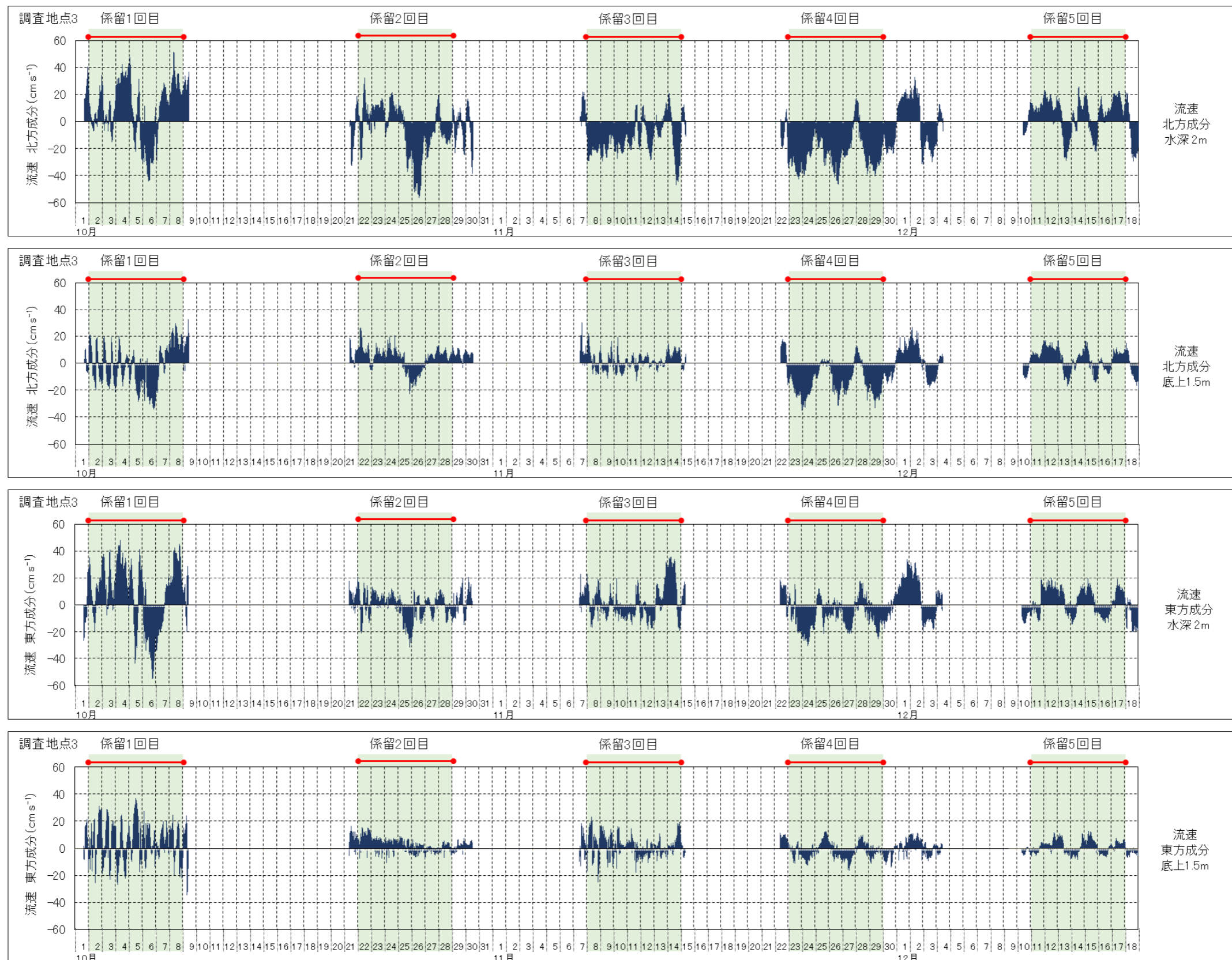


Fig. 4-41 調査地点3の流向・流速の時系列変動

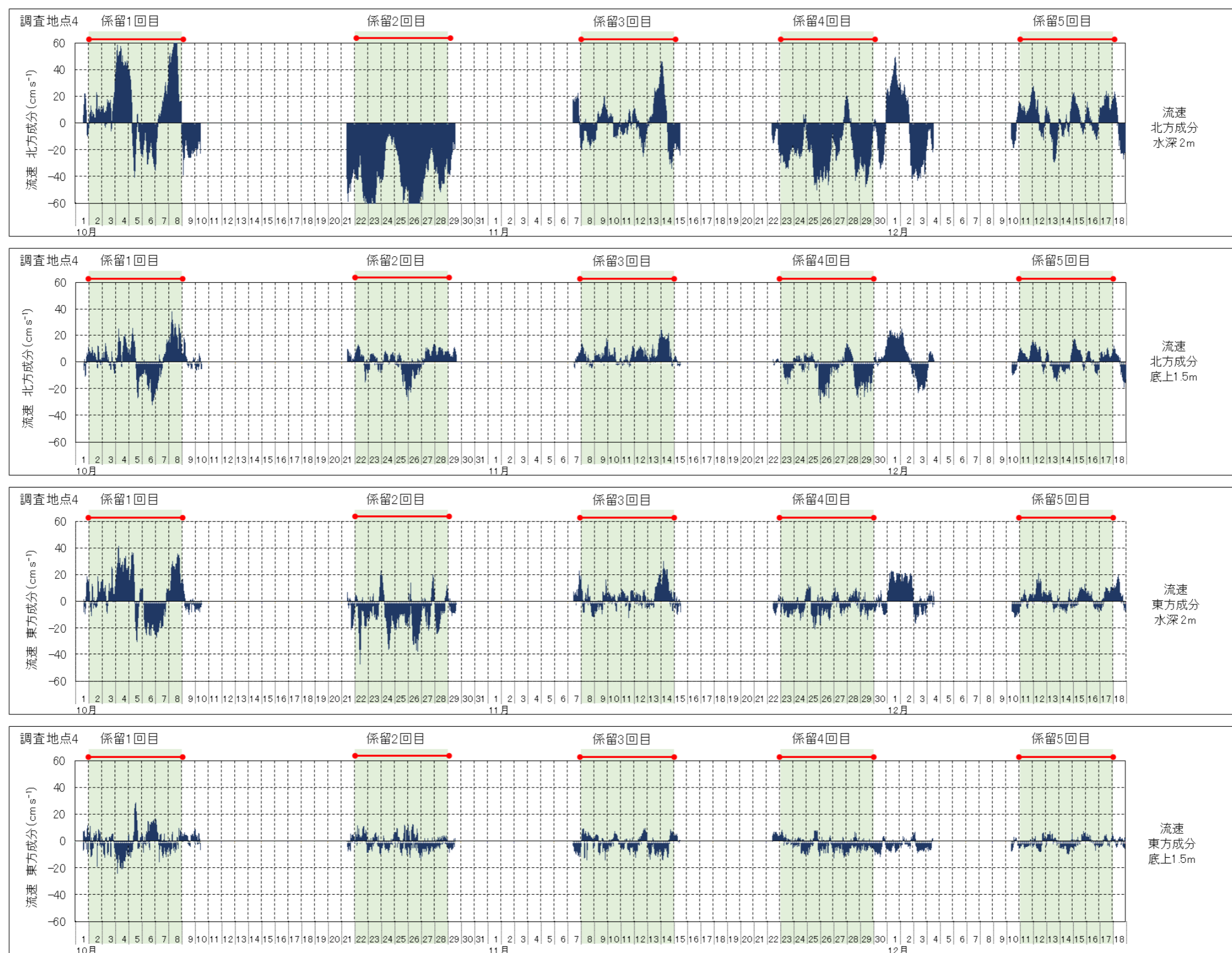


Fig. 4-42 調査地点4の流向・流速の時系列変動

4.3.3.4 海象モニタリングによる海底土の採取結果

観測機器の係留中に全調査地点で、海底土を6 cm から28 cm 程度深度方向へ採取した。その結果について、放射性セシウム濃度の測定結果をFig. 4-43に示す。なお、以下の各調査地点の結果については、放射性セシウム¹³⁷濃度について結果を示す。また、詳細な数値は「添付資料;4.3-1」を参照すること。

①調査地点1

10月9日において100 Bq kg⁻¹程度であった放射性セシウム濃度は10月29日には最大で1000 Bq kg⁻¹程度となるなど、河川の出水の影響を受けていることが示唆される。その後も表層では1000 Bq kg⁻¹程度を維持しており、2か月後の12月19日の結果では500 Bq kg⁻¹まで低下している。他の調査地点と比較して減少速度が小さいのは沿岸に近く、河川の影響を受けている可能性があることも一つとして示唆される。

②調査地点2

調査地点2では、表層では数十 Bq kg⁻¹程度であったが、11月15日に採取した試料のみ3000 Bq kg⁻¹を超える放射性セシウム濃度となった。大きな降水の直後(10月29日)では、濃度の上昇がみられないことから、付近の河川の影響ではなく、他の河川からの影響を受けていることも要因として想定される。

③調査地点3

表層10 cm までは全期間を通じて、10~20 Bq kg⁻¹程度となった。また、10月29日において、12~14cm で259 Bq kg⁻¹、22~24 cm で201 Bq kg⁻¹と他深度よりも大きな値を示した。一方、11月15日以降、高い濃度は検出されなかった。

④調査地点4

10月29日と12月4日において、表層から10 cm 程度の深部にかけて、4000 Bq kg⁻¹を超える値を示した。しかしながら、11月15日、12月19日では数十 Bq kg⁻¹まで下がっており、大きく変動する傾向を示した。

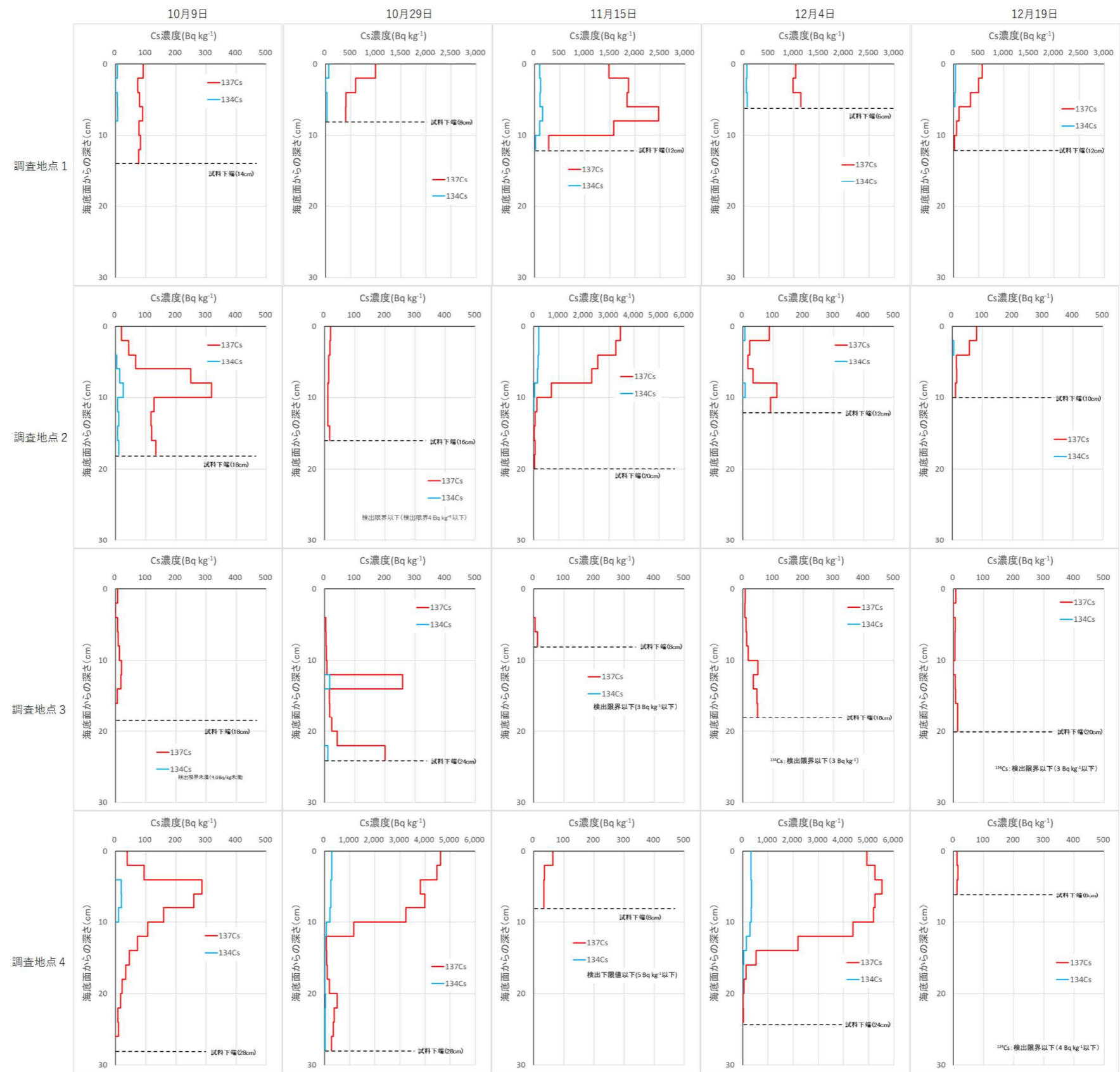


Fig. 4-43 海底土の放射性セシウム濃度

4.3.3.5 有機物の測定結果

有機物の測定は、低気圧通過時に重点を置いて、沈降粒子の試料量が確保できた 71 試料について測定を行った。その結果、特に沿岸に近い調査地点 1 で低気圧通過時に陸域起源の数値を測定できた。詳細な数値は「添付データ;4.3-2」を参照のこと。なお、5 章で他の測定結果と合わせて考察する。

4.3.3.6 鉱物種の測定結果

鉱物種は降水が多かった係留 2 回目において、調査地点 1 を対象として、セジメントトラップで捕集した粒子を測定した。その結果、特徴的なピークが石英、長石、角閃石、粘土鉱物で確認することができた。ピーク値などの詳細な数値は「添付データ;4.3-6」を参照すること。なお、5 章で他の測定結果と合わせて考察する。

4.3.3.7 調査期間中の波高、降水量及び気象データ

Fig. 4-44 に係留系設置期間の降水量及び波高のグラフを示す。降水量は気象庁の「浪江」観測点を使用し⁶⁾、有義波高は国土交通省のナウファスより「福島沖」地点を引用した⁷⁾。それによると降水の影響については、観測期間中に限った場合、局所的に多かったのは 2 回目設置中の 10 月 25 日に日合計降水量が 246 mm を記録したのみであり、限定的であったことが分かる。Fig. 4-45 から Fig. 4-49 に観測期間中の気象庁の天気図を示す⁸⁾。天気図によると観測期間中に低気圧や台風が通過したのは 3 回（係留 1 回目、2 回目、4 回目）であることが分かる。

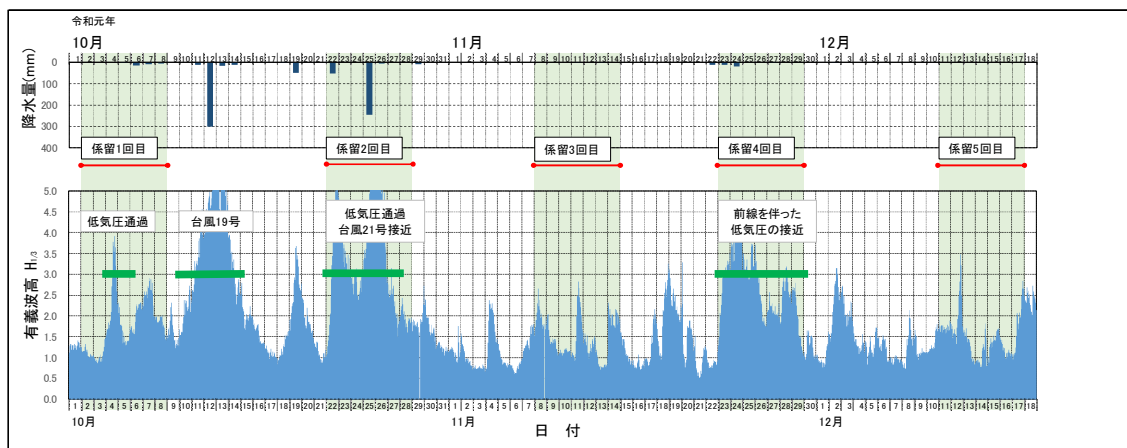
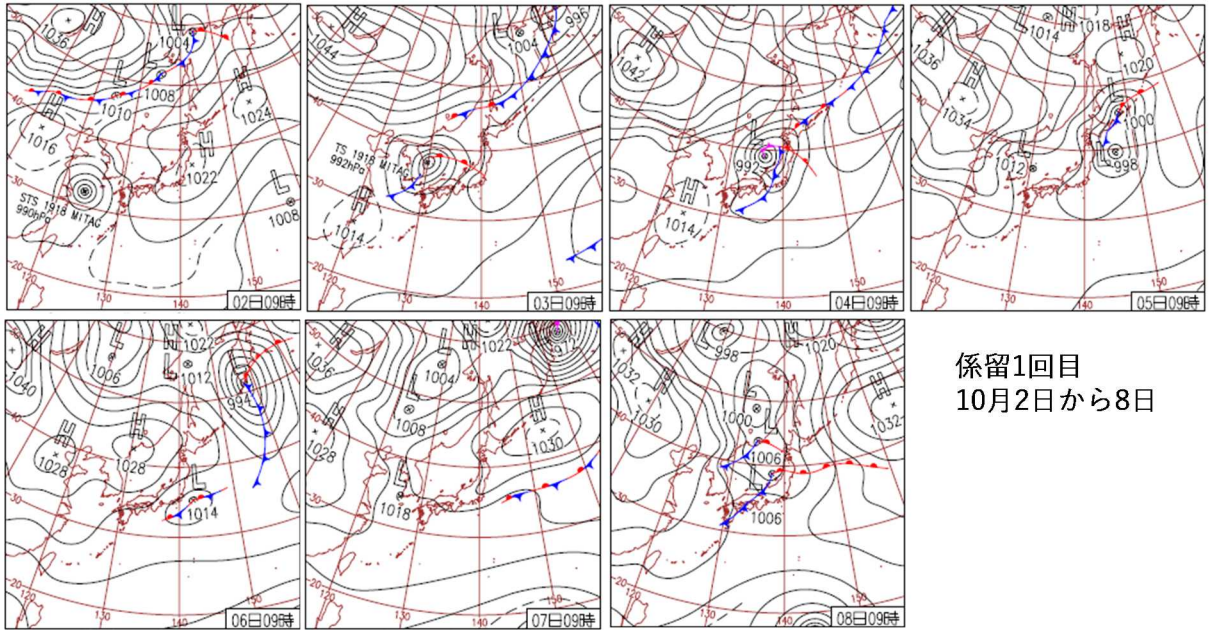
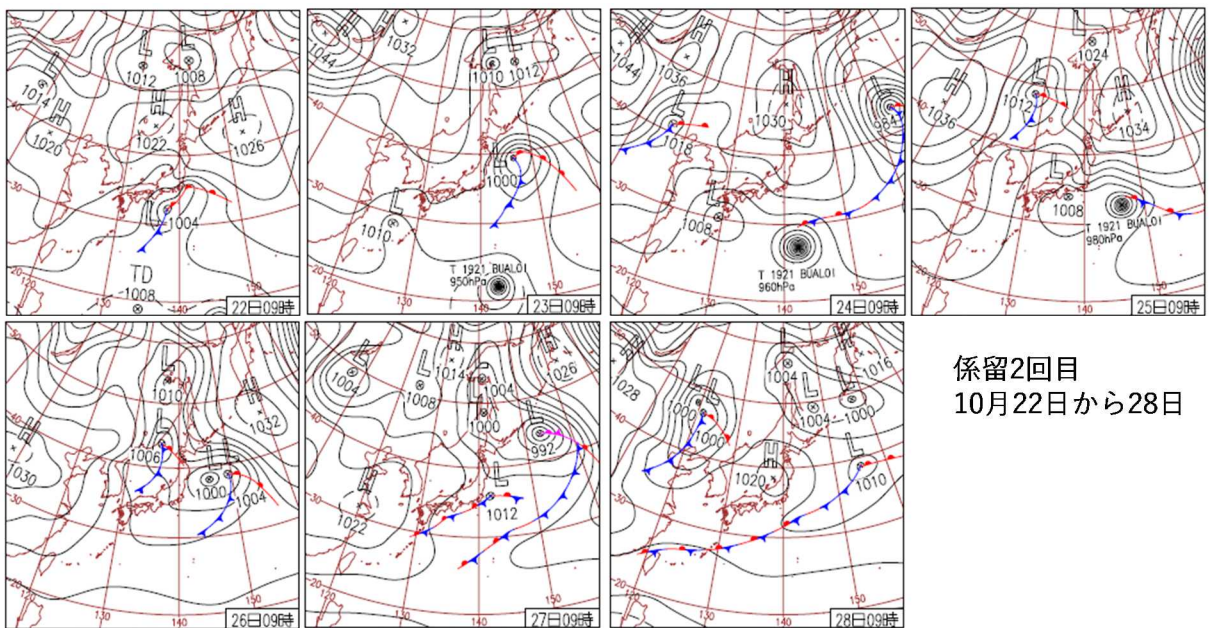


Fig. 4-44 波高及び降水量



係留1回目
10月2日から8日

Fig. 4-45 係留1回目の天気図



係留2回目
10月22日から28日

Fig. 4-46 係留2回目の天気図

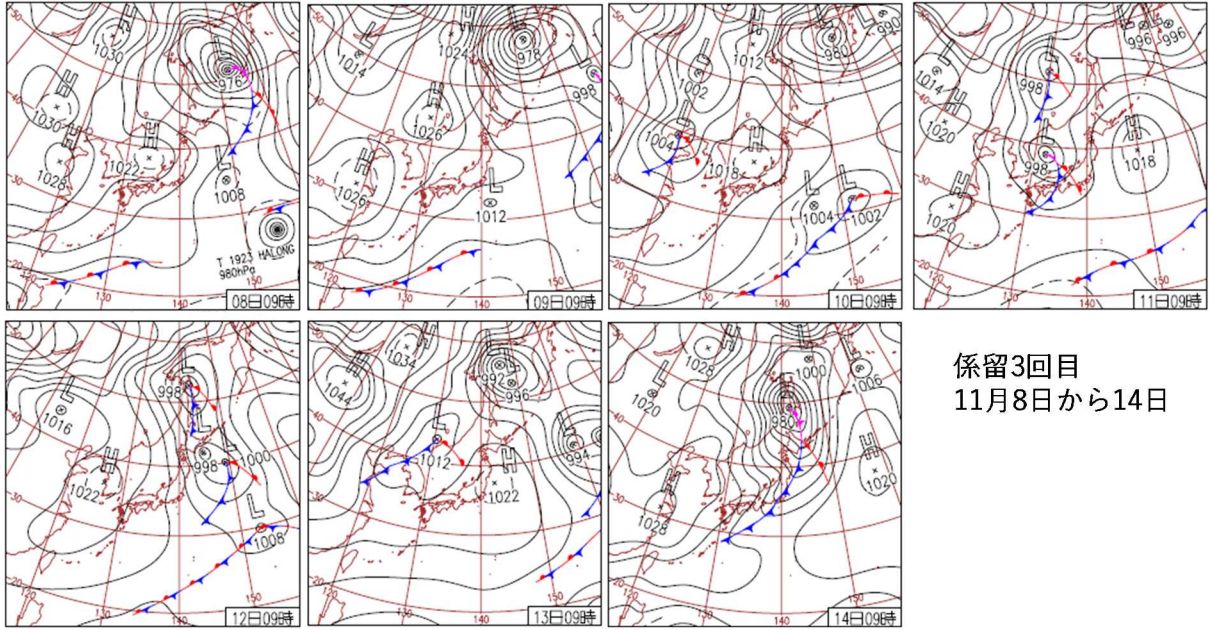


Fig. 4-47 係留3回目の天気図

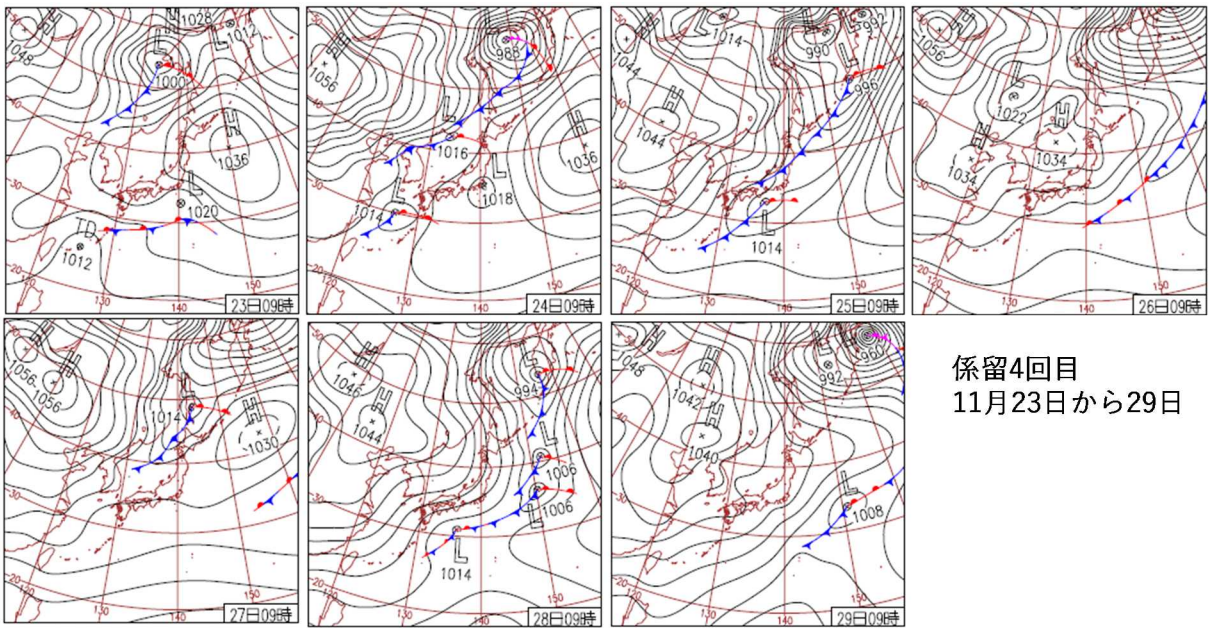


Fig. 4-48 係留4回目の天気図

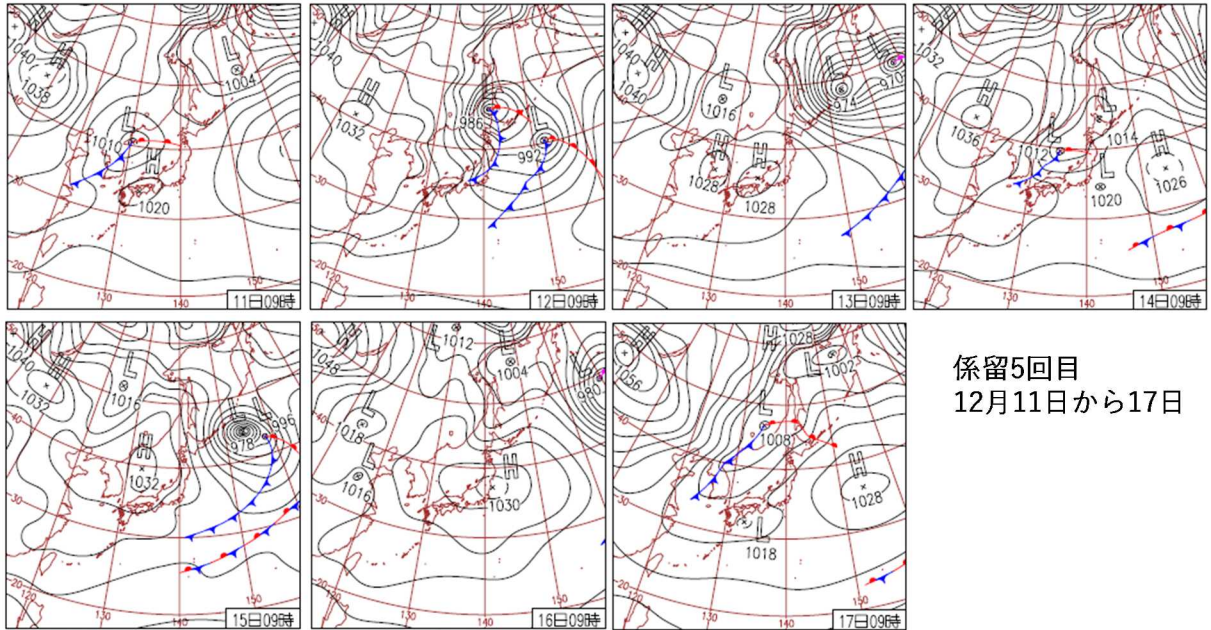


Fig. 4-49 係留 5 回目の天気図

4.3.3.8 海象モニタリング結果のまとめ

海象モニタリングでは、セジメントトラップを設置し、沈降粒子を回収するとともに、表層及び底層で濁度、クロロフィル a、塩分、水温、流向流速を観測した。その結果、沈降粒子フラックスは沿岸に近い調査地点 1 のほうが多く、さらに低気圧通過時において数千 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ と多くなる傾向がみられた。沈降粒子の ^{137}Cs 濃度は、各観測日、調査地点において、2~3 倍程度の差がみられ、一定ではないことが分かった。また、係留 2 回目の台風通過時においては、調査地点 1 で ^{137}Cs 濃度が高くなるなど、低気圧の影響を受けていることが示唆された。 ^{137}Cs フラックスも同様に低気圧時に上昇する傾向を示した。低気圧時は沿岸に近い調査地点 1 では表層から底層にかけて塩分が低下する傾向がみられた。一方、調査地点 2 と 4 では表層の塩分のみ変動がみられた。また、濁度は、低気圧通過時に底層で上昇する傾向がみられたが、台風通過時と比較すると濁度の上昇幅は小さかった。流向は表層、底層ともに 1 から 2 日間程度の周期で東西・南北方向の入れ替わりがみられた。また、一部期間において、数時間で方角が入れ替わる観測結果も得られた。流速に関しては $10\sim 20 \text{ cm s}^{-1}$ が卓越するが、係留 2 回目の台風時において、最大で 135 cm s^{-1} を観測するなど、通常時の数倍程度まで流速が上昇する結果が得られた。4.3 節で得られた結果より、第 5 章において、河川からの放射性セシウムの供給影響等の評価を行う。

4.4 河口域の放射能分布調査

4.4.1 調査目的

河口域の海底土表層における放射性物質濃度は、河川からの流入の状況により変化が大きいと推定される。表層の海底土を計測する方法として耐水性の放射線検出器を水底に沈める in-situ 測定手法が提案されている。眞田ら (2014)¹⁾ は、農業用ため池を対象とし、専用の耐水性 NaI シンチレーション検出器による水底土表層の計測結果とグラブ式サンプリングやコアサンプリングの結果と比較し、よい整合を得ている。そのような技術を基礎とし、原子力機構では無人で操縦可能な船 (USV: Unmanned Surface Vehicle) に検出器を搭載し、海底土表層の放射性物質の計測を平成 27 年から継続的に実施してきた²⁾。ここでは、そのような継続的なデータが取得されている請戸川河口から南側の区域、真野川沖の区域及び過去の原子力規制庁の曳航調査(第6章参照)の結果から比較的放射性セシウムの濃度の高い 1F から南側の富岡川河口域を調査エリアに選定し、測定を行った。測定結果は ¹³⁷Cs 濃度マップに加工するとともに、過去データとの比較を行った。

4.4.2 調査内容

4.4.2.1 調査工程

今年度の調査時期及び過去の調査時期について Table 4-17 調査工程表に示す。

Table 4-17 調査工程表

キャンペーン	請戸川河口域	真野川河口域	富岡川河口域
1st	平成 27 年 10 月 26-29 日	-	-
2nd	平成 27 年 11 月 25-28 日	-	-
3rd	平成 28 年 1 月 21 日	-	-
4th	平成 28 年 9 月 26 日	平成 28 年 9 月 28 日	-
5th	平成 28 年 11 月 7 日	平成 28 年 11 月 8 日	-
6th	平成 29 年 7 月 10-12 日	平成 29 年 7 月 13 日	-
7th	平成 29 年 10 月 16-17 日	平成 29 年 10 月 19-26 日	-
8th	平成 30 年 10 月 4-5 日	平成 30 年 10 月 6 日	-
9th	令和元年 10 月 21 日	令和元年 10 月 31 日	令和元年 10 月 29-30 日

4.4.2.2 調査方法

① Windy3S(USV)

ここでは、Windy3S の性能の概要について記述する。詳細は、千賀ら (2004)³⁾ に詳しい。使用した Windy3S の外観及び性能諸元について Fig. 4-50 に示す。Windy3S は、FRP 製のヨットをベースとしており、ディーゼルエンジン発電機によりバッテリー(12V105Ah 鉛蓄電池 8 個)を充電し、この電力で直流モータに直結したスクリューを駆動する電気推進船である。船首には船の向きを変えるためのサイドスラス

ターを搭載し、定点保持の性能を向上させている。甲板上には風向風速計及び外部監視用の web カメラを搭載し、遠隔で船の周囲の状況をモニターすることができる。船首及び船首に設置した 2 つの Differential Global Positioning System (DGPS) により位置情報及び船首の方向の情報を取得することができる。燃料タンクの容量は 1400 L であり、無保守で 240 時間走行可能である。通信システムは、無線 LAN と衛星回線を装備しており、遠隔で制御信号を送受信することが可能である。無線 LAN での通信距離は約 5 km である。

機体の操縦は専用のソフトウェアで行い、操縦桿式のゲーム用コントローラを用いる手動操縦と、地図上に目的地 (Way-point) を設定する自動操縦の機能を有する。船内には、テンションメータ付の電動ウィンチを備え、Conductivity Temperature Depth profiler (CTD) 付の放射線測定システム (NaI スペクトロメータ, ATOMTEX 社製, ウクライナ) の海中での昇降が可能である。ウィンチの操作は、操縦桿の昇降用ボタンで手動操縦する。ウィンチの作動状況については、船内に設置されている web カメラで視認可能である。ケーブル長は 200 m であり、測定中に船が移動しても検出器の位置を保持するためテンションメータの信号を閾値として自動でケーブルの繰り出し及び巻き取りが可能である。



項目	詳細
寸法	7.99 m (L) × 2.80 m (B)
最大排水量	3.0 ton
構造	FRP
推進力	DCサーボモータ駆動プロペラ (DTME-G96150X,Unitec)
サイドスラスタ	株式会社高澤製作所製サイドスラスタ DC24V,1.5kW発電機 (SD1500,Sawafuji)
発電機	AC100V,3.1kW発電機 (SG7500,Sawafuji) ディーゼルエンジン (D131,1315cc,19PS/1800rpm,YAMAHA)
バッテリー	M27MF (12V105Ah,Voyage) × 8 24V210Ah + 12V315Ah + 12V105Ah
燃料容量	軽油 700L × 2
速力	3 knot (平水時)
航続時間	240 時間 (無保守)
放射線検出器	ATOMTEX社製 AT6104DM, NaI(2.5" φ × 2.5"H)
CTD	TELEDYNE RD INSTRUMENT社製(CITADEL CDT-NV)
双方向通信	無線LAN
位置送信	Iridium衛星通信

Fig. 4-50 Windy3S の外観

② 放射線測定システム

放射線測定システムは、2' x 2' の NaI シンチレータを採用した検出器と傾斜計を耐水性の容器に配置し、これを海底に着底させてデータを光ケーブルで船内に配置した PC に送信する。船内の PC から船体の制御情報とともに地上局に送信される。Fig. 4-51 にシステムの構成について示す。測定データは、検出器の全計数率及び傾斜計の情報を地上局 PC でリアルタイムに確認することができる。また、 γ 線のスペクトル情報 (512 ch, 20-3000 keV) については、船内の PC に保存される。このように、放射性セシウム (^{134}Cs , ^{137}Cs) の放出する γ 線に対応するピークが確認できる。この γ 線スペクトルから放射性セシウムの γ 線ピークの計数率を積算し、濃度換算が可能となる。

実際の海底の測定時には、測定予定地点に Windy3S を誘導し、定点維持操作を行いつつ、検出器を海底に降ろす。傾斜計が横に 0° (下向きを 90° とする) を示した時点で測定器の計測を開始する。

福島沖での測定時間は、計数率データと検出器のバックグラウンド計数率から計算し判断する。測定開始後、海流の影響や船体に引っ張られることにより検出器が移動した場合には、傾斜計の数値を指標として、解析する測定データから除外する。Fig. 4-52 に、実際の海底測定時における検出器の計数率と傾斜計のデータを示す。Fig. 4-52 (a)に示すように、測定時間間に検出器の移動がない場合にはデータを積算し解析できるが、Fig. 4-52 (b)に示すように測定後、検出器が移動してしまった場合でも傾斜計の情報から検出器が横になっている時間のデータを抽出し積算して解析可能となる。

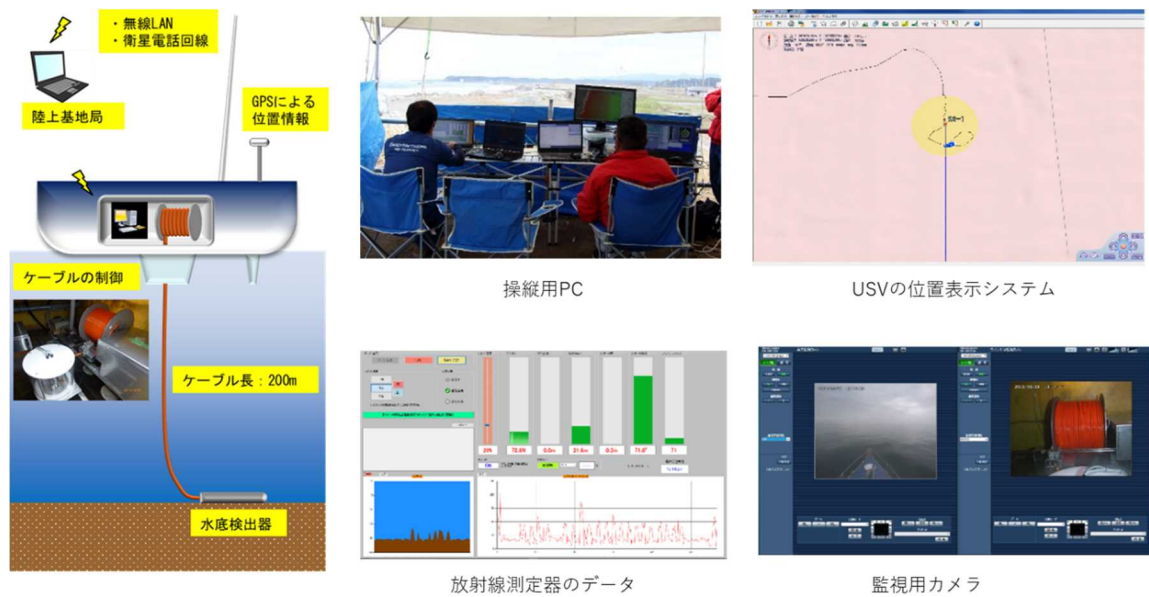


Fig. 4-51 放射能観測システムイメージ及び写真

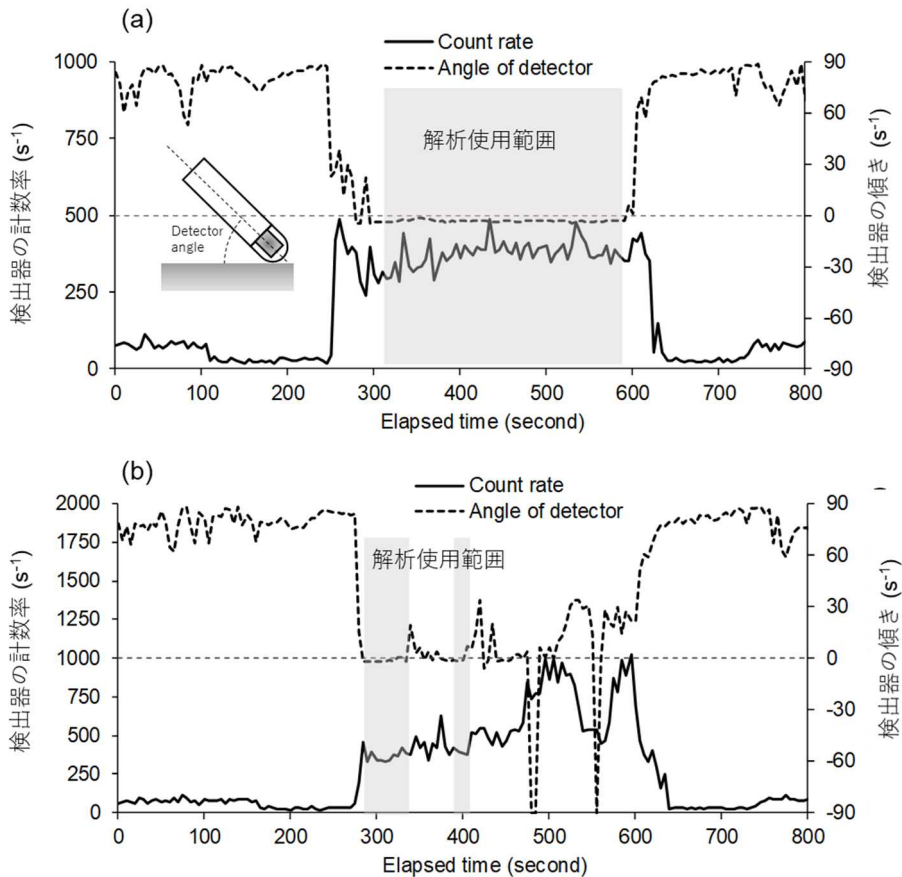


Fig. 4-52 検出器の傾きとデータ抽出イメージ

4.4.2.3 測定方法

放射線測定システムを Windy3S に搭載し、海底放射能分布観測試験を福島県沖の 3 エリアで実施した。測定エリアの位置を Fig. 4-53 に示す。1F から約 5 km に位置する請戸川河口域の測定エリアは、底質の粒径が細かい細砂及びシルト状である請戸川の河口から南に約 1 km、陸地から約 1 km 離れた場所を設定した。観測エリアの水深は 10~20m 程度である。測定地点は、南北方向 1.2 km×東西方向 1.5 km の範囲に設定し、測定地点間の間隔は南北方向 300 m、東西方向 500 m で合計 20 点とした。Windy3S を操作する基地局は請戸漁港付近の陸上に設置し、基地局から観測地点までの距離は最大で約 3 km とした。1F から約 20 km に位置する真野川河口域の測定エリアは、底質の粒径が細かい細砂及びシルト状である真野川の河口から東に約 1 km 離れた場所を設定した。観測エリアの水深は 10~20 m 程度である。測定地点は、南北方向 1.2 km×東西方向 1.5 km の範囲に設定し、測定地点間の間隔は南北方向 300 m、東西方向 500 m で合計 22 点とした。Windy3S を操作する基地局は請戸漁港と真野川漁港付近の陸上に設置し、基地局から観測地点までの距離は最大で約 3 km とした。1F から南方約 15 km に位置する富岡川河口域の測定エリアは、底質の粒径が細かい細砂及びシルト状である真野川の河口付近に設定した。観測エリアの水深は 10~20 m 程度である。測定地点は、南北方向 2.0 km×東西方向 1.5 km の範囲に設定し、測定地点間の間隔は南北方向 300 m、東西方向 500 m で合計 20 点とした。

Windy3S は陸上基地局から手動で操縦し、あらかじめ決められた測定地点で船を定点維持させ検出器を海底に降ろし、検出器のデータ取得を開始した。測定時間は 1 地点につき 180 秒間とした。測定

時間中は基地局の地図上に表示される船の位置を目視で確認しつつ定点維持のための操作を行った。USV の定点維持は海底の放射線測定に影響を与える重要な因子であることから、測定を開始した後の実測時の船の移動状況について GPS による位置情報から評価を行った。また、検出器の傾斜計や計数率のデータを常時監視し、大きな変動が認められた場合は再測定を実施した。

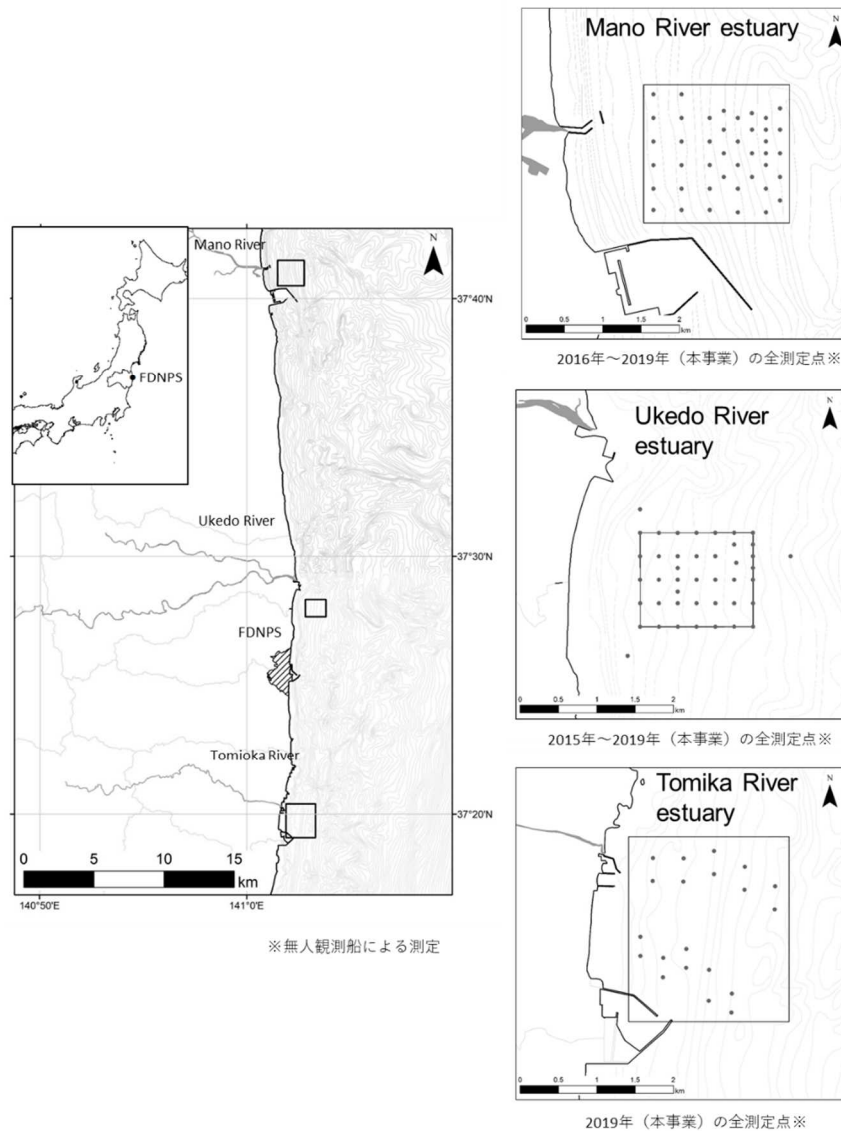


Fig. 4-53 測定対象エリア

4.4.2.4 解析方法

① MMGC 法

得られた γ 線スペクトルの解析には、MMGC (Man Made Gross Count) 方を準用にした⁴⁾。本方法は天然核種のみを含む地域を測定して得られる γ 線スペクトルについて、放射性セシウムが放出する γ 線を含まない 1,300 から 2,800 keV の計数率と全計数率の比 (BG-index: I_{BG}) が一定であることを前提とする。本方法のメリットは、コベル法による放射性セシウム起源のピーク計数率を求める手法に比べて計数率が稼げることにある。

実際には、検出器ごとに、あらかじめ放射性セシウムによる汚染がない地域の水底を測定して得られたデータを基に I_{BG} を設定する。その後、実際に放射性セシウムが存在する地域で取得した γ 線スペクトルの 1,300 から 2,800 keV の計数率を計算し、計数率と BG-index から天然の放射性核種由来の計数率を減算する。 I_{BG} x 算出に用いるスペクトルの ROI (Region of Interest) のイメージを Fig. 4-54 に示す。 I_{BG} については、静岡県三保港において、港湾内の 10 地点で 180 秒のデータを取得し、平均化したスペクトルから決定した。本手法において、場所の違いによる海底土の ^{40}K 、ウラン系列及びトリウム系列の割合の変化が I_{BG} には大きく影響しないことが前提となる。

天然の放射線の影響を除いた計数率から表層の海底土中の ^{137}Cs 濃度に換算するため、2015 年から 2019 年まで請戸川沖及び真野川沖の測定エリアにて、USV による測定データと同地点でエクマンバージ採泥器による表層海底土を取得した。海底土は湿潤状態のまま、U8 容器に封入し、実験室で Ge 半導体検出器により定量した。換算係数は、サンプル採取のばらつきの影響を小さくするため、エリアで 20 点以上取得し、USV の測定データ及びサンプルの測定結果を平均化して換算係数 (CD : cps Bq $^{-1}$ kg $_{wet}$) を求めた。Fig. 4-55 に散布図として示す。このように、ばらつきはあるものの、正の相関関係にあり、その傾きを CD と定義した。

これらのパラメータを用いた放射性セシウムの沈着量の算出手順を以下に示す。また、計算式を式 (1) に示す。

- 1) 測定で得られた γ 線スペクトルから 1,300~2,800 keV の計数率 (C_{BG} : 0.494) を計算する。
- 2) C_{BG} に BG-index (I_{BG} : 27) を乗じて天然放射性核種起源の計数率を算出する。
- 3) C_{net} から 2) で求めた計数率を差し引く。
- 4) 2011 年 3 月 15 日時点の ^{137}Cs : ^{134}Cs =1:1 と仮定し、測定日まで物理的半減期による減衰率 (R_{Cs}) を計算する。
- 5) CD で除することで ^{137}Cs の濃度 (RC) を算出する。

$$RC = \frac{(C_{net} - C_{BG} \cdot I_{BG}) \times R_{Cs}}{CD} \quad (1)$$

本手法による検出下限値は、天然の放射性核種濃度により変化するが、90%信頼区間 ($\sigma = 2$) で平均 40 Bq kg $_{wet}^{-1}$ と評価できる。

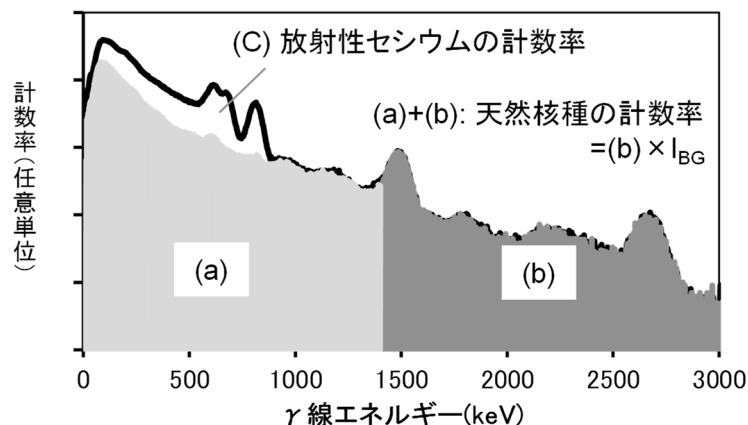


Fig. 4-54 MMGC 法によるスペクトルの分割イメージ

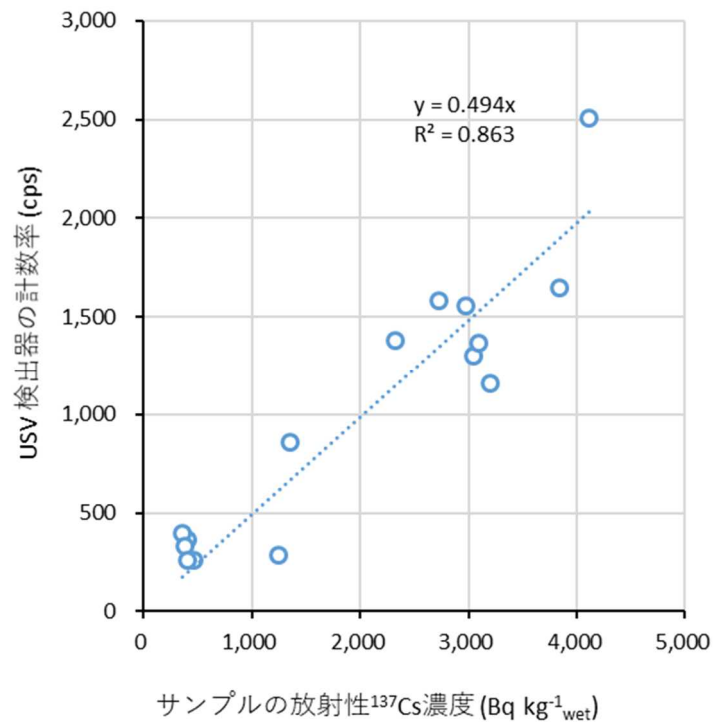


Fig. 4-55 換算係数の決定

② 海底土サンプルとの比較による信頼性評価

本手法による信頼性を評価するため、同地点において取得したエクマンバージ採泥器による表層海底土 (0-10 cm) の ^{137}Cs 湿潤濃度と USV による換算結果を比較した。データセットは Fig. 4-53 に示した海域にて平成 27 年から令和元年までに 242 か所で取得した(本年度の取得した 66 地点の海底土の放射性セシウム湿潤濃度については、添付データ 4.2-3 を参照)。比較結果を Fig. 4-56 に示す。散布図を見るとばらつきはあるものの、相関関係にあることが分かる。定量的にばらつきを評価するために式(2)のように相対偏差 (RD) を定義する。

$$RD = (RC_{USV} - RC_{samp}) / RC_{samp} \quad (2)$$

ここで、 RC_{USV} は USV による評価結果及び RC_{samp} はサンプルの測定結果とする。 RD を区間幅 0.1 のヒストグラムとして Fig. 4-56 に示す。このように分布の中央値は 0.049 となり、正規分布に近い分布形状を示した。25%及び 75%の四分位範囲を計算すると、それぞれ-0.24 及び 0.42 と計算できる。すなわち、USV による測定手法は、50%の確率でGrabサンプリングの結果の-24%から 42%の範囲に入ると評価できる。

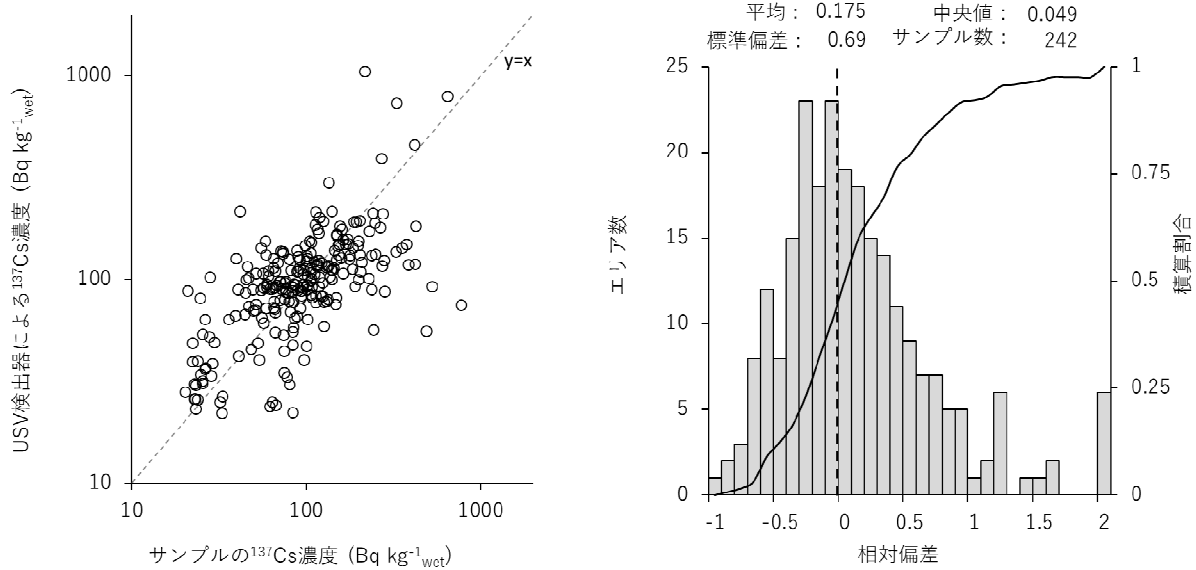


Fig. 4-56 海底土サンプルとの比較

4.4.3 調査結果

4.4.3.1 測定結果

今年度の各対象エリアにおける USV により観測された海底堆積物中の放射能濃度分布を Fig. 4-57 に示す。マップは、市販の GIS ソフトウェア (ArcGIS: ESRI 社) により、測定結果を内挿法の一つである IDW 法により 50 m メッシュで内挿し、コンター図として示している。最大の濃度を示したのは、請戸川河口域のエリアであり、最大で $1,100 \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}_{\text{wet}}$ であった。富岡川河口域と真野川河口域は比較的低く、最大でも $220 \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}_{\text{wet}}$ 及び $61 \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}_{\text{wet}}$ であった。請戸川河口域では、沿岸よりも沖合で濃度が高い傾向にあった。一方、富岡川河口域は沿岸の濃度が高い傾向にあった。

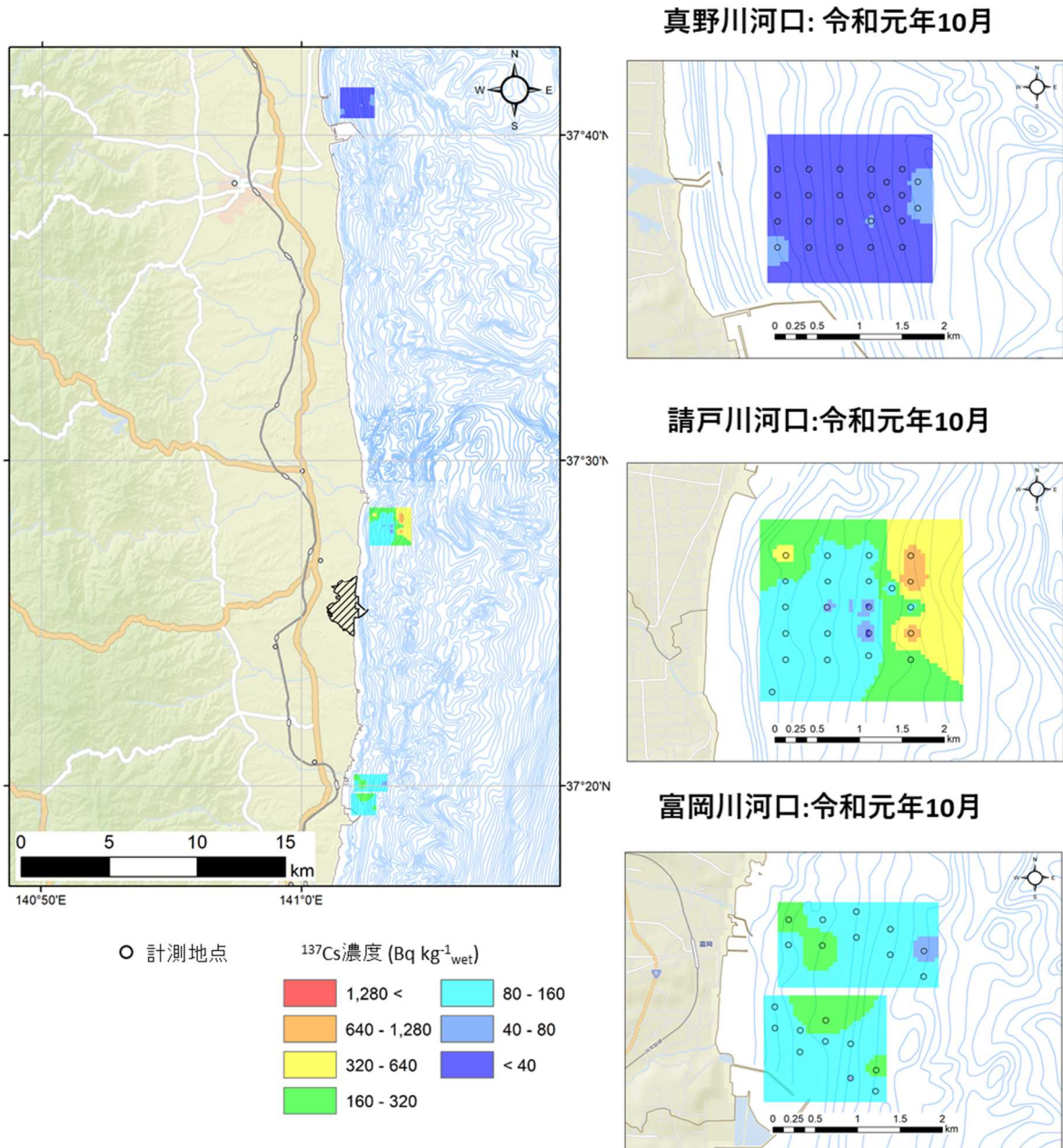


Fig. 4-57 USV による海底土表層の ^{137}Cs 濃度マップ

4.4.3.2 変化傾向

過去に同様な測定データのある、真野川河口域及び請戸川河口域のマップについて Fig. 4-58 及び Fig. 4-59 に示す。真野川河口域は平成 28 年から ^{137}Cs の濃度に大きな変化は見られず、 $100 \text{ Bq kg}^{-1}_{\text{wet}}$ であった。これらの濃度の変化を定量的に評価するため、経時変化を Fig. 4-60(a) に示す。変化傾向については、全データを使って指数近似しその傾きから実効半減期を求めた。また、グラフにはその近似曲線の 95%信頼区間及び予測区間を示している。近似曲線の傾きから評価した実効半減期が 13 年と計算なり、 ^{137}Cs の物理的半減期に比べて早い速度で減少していることが分かる。

一方、請戸川沖の濃度マップを見ると、今年度の濃度は過去と比較して大きいことが分かる。この要因は、測定日の 3 日前に通過した台風の影響と示唆される。真野川河口域と同様に、経時変化を Fig.

4-60 (b)に示す。平成 30 年以前とは濃度の顕著な減少が確認できるが、令和元年には濃度が上昇している。今年度以前のデータを用いて真野川と同様に実効半減期を評価したところ、3.4 年となった。請戸川は、1F 周辺の河川の中で、最も流域面積が大きく、シミュレーションによる評価でも海域への供給量の最も大きい河川であることが知られている。河口域においても、台風等の影響を受けやすいと考えられ、今後も変化傾向を観察することが望ましい。

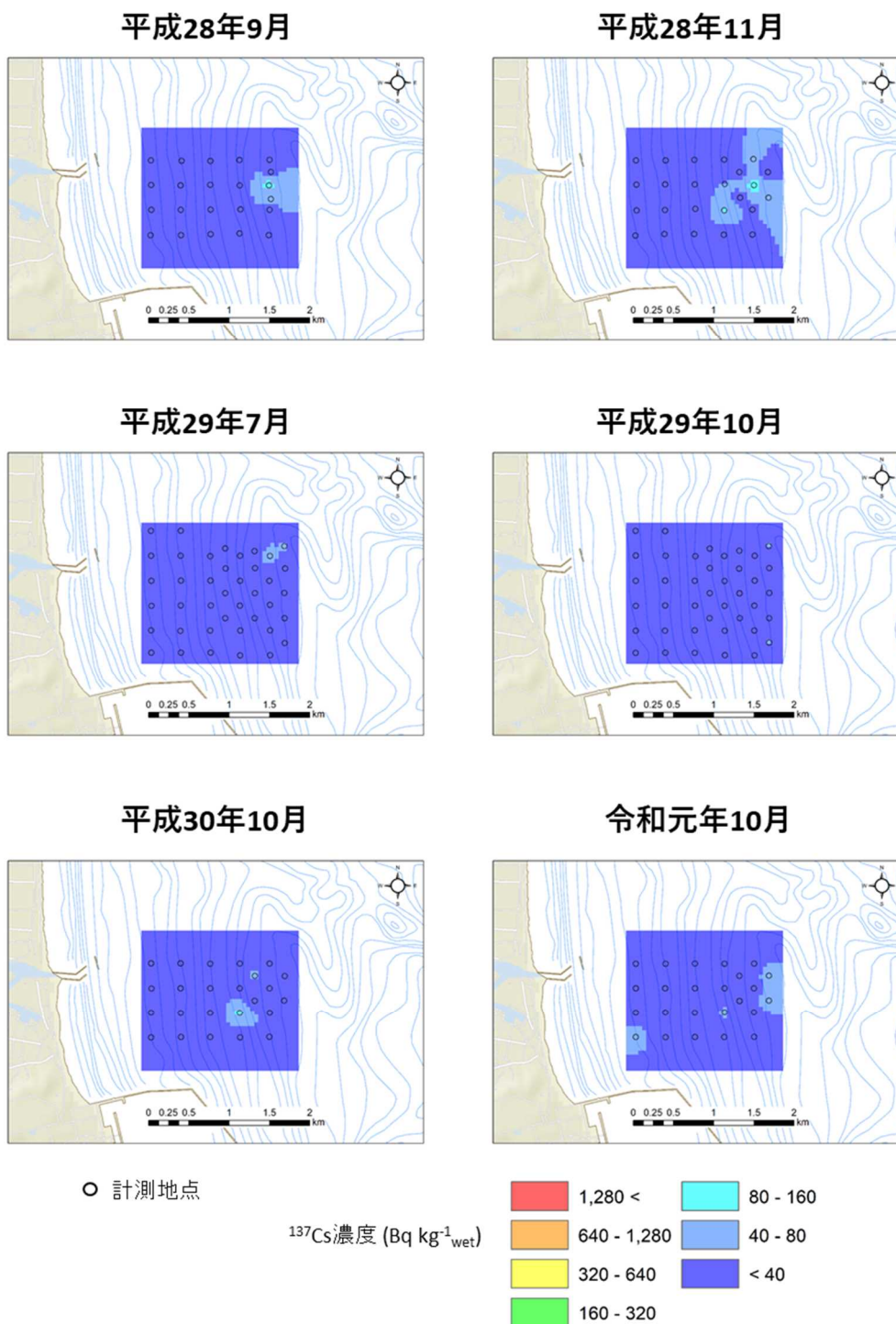


Fig. 4-58 真野川沖における USV による海底土表層の ^{137}Cs 濃度マップ

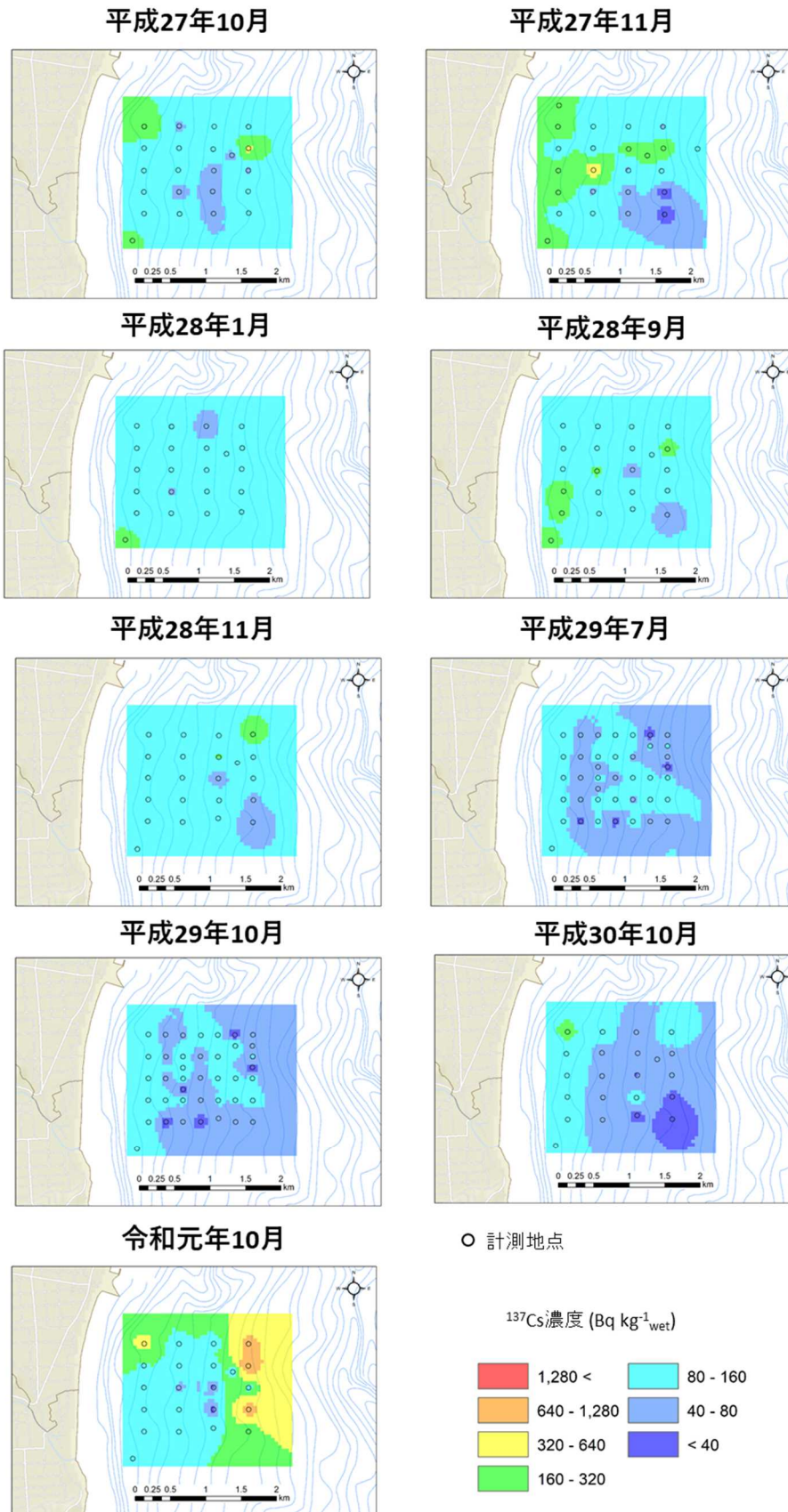
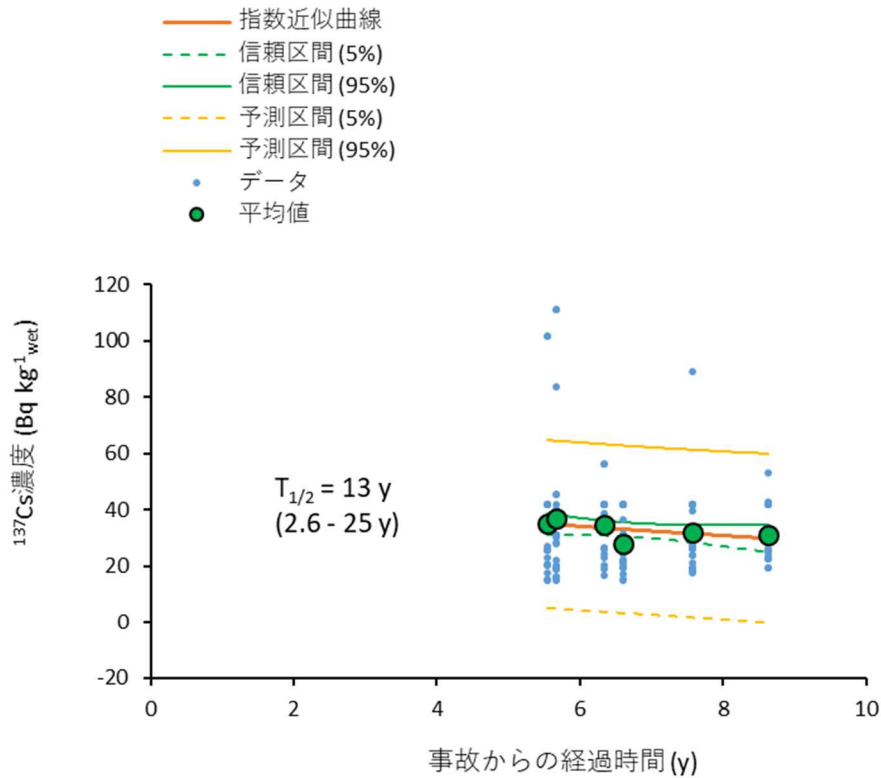


Fig. 4-59 請戸川沖におけるUSVによる海底土表層の ^{137}Cs 濃度マップ

a) 真野川河口域

n=24 (1 campaign)



b) 請戸川河口域

n=22 (1 campaign)

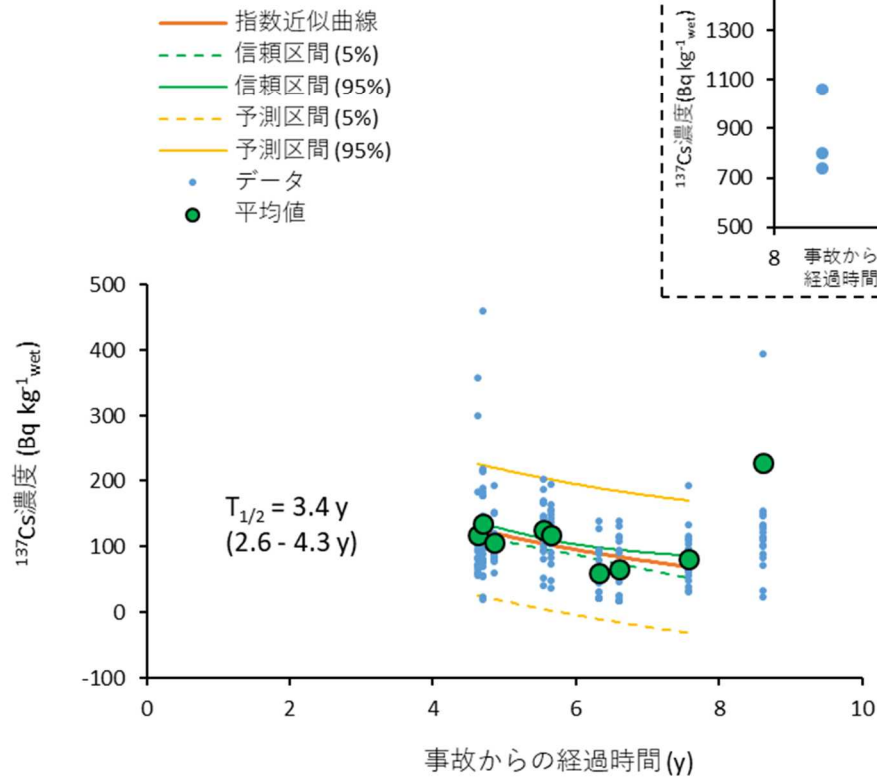


Fig. 4-60 真野川沖及び請戸川沖における USV による海底土表層の ¹³⁷Cs 濃度の変化傾向

4.4.4 河口域の放射能分布調査のまとめ

真野川、請戸川、及び富岡川河口域の海底土表層における放射性物質濃度について、USV による計測を実施し、 ^{137}Cs 濃度マップに加工するとともに、過去データとの比較を行った。その結果、請戸川河口域で最大 $1055 \text{ Bq kg}^{-1}_{\text{wet}}$ 、富岡川河口域で最大 $220 \text{ Bq kg}^{-1}_{\text{wet}}$ 、真野川河口域で最大 $61 \text{ Bq kg}^{-1}_{\text{wet}}$ の放射性セシウム濃度を確認した。真野川河口域は調査を開始した平成 28 年度から物理半減期よりも速い速度で減少していることを確認した。請戸川河口域は濃度変化が比較的大きく、本年度確認した放射性セシウム濃度の分布は、平成 27 年度からこれまでの調査の中も、高い濃度分布が確認された。その要因は、調査の直前に通過した台風の影響と考えられる。この結果は「4.3」の海象モニタリング調査の結果とも整合的であり、今後、台風等のイベントに伴う影響の特徴を継続的に調査する必要があると考える。

5 1F 前面海域の海底土放射性物質分布の考察

4章において 1F 前面海域の海底土中の放射性セシウムの分布に関する調査結果を記載した。本章では、それらの調査結果に基づき、福島沿岸域における海底土中の放射性セシウムの分布に影響を与える要因について考査を行う。

5.1 海底土中の放射性セシウム分布と海底地形の関連について

「4.1.1」に記したように、海底土中の放射性セシウムの分布は、海水の滞留を生じさせる海底地形と関連を有する可能性が指摘されている。そこで、「4.1」の海底地形・海底土分布調査の結果に基づき、放射性セシウムの分布をより定量的に考察した。

5.1.1 海底地形と放射性セシウム量の関係

福島県沿岸域における海底土の分布の特徴のうち、海水の流れが滞留する要因を有する地形としては、「Table 4-7」の「③崖の基部(窪地含む)」があげられる。Fig. 5-1 に概念図を示す。海水の流れに対して、崖や窪地は流速の低下を生じさせる壁として機能すると想定されることから、両地形においては、海水中に含まれる粒子の沈降が促進され、粒子に付着している放射性セシウムが集積することが考えられる。特に周囲を崖に囲まれた窪地では、海水の流速低下が大きく、その結果としてより細粒の粒子の沈降が促進されると推定される。

そこで、「4.2」の採泥調査で取得した海底土の放射性セシウム濃度及び累積量と、崖と窪地からの距離の相関を検討した。具体的には、ESRI 社製 ArcGIS (3D Analyst) を用いて、海底地形データ(添付データ:4.1-1)から、各メッシュ(約 25 m 間隔)の近接地点の勾配を解析し、勾配が 1° 以上(Table 4-6 に示す沖合方向への海底地形傾斜と、海底地形データのメッシュ間隔(約 25 m)を考慮すると、勾配 1° は垂直方向で 0.7 m 程度の比高差に相当)の地点を抽出、それらの側方への連続性及び一定程度の幅(勾配が 1° 以上のグリッドが沖向きに連続することにより、2 m 程度比高差の崖を構成)を有するグリッド群を Fig. 5-1 に示す崖として認定した(Fig. 5-2)。認定した崖から本年度の採泥地点までの最短距離を計測し(各メッシュの中心距離)、その距離と放射性セシウムの濃度(平均値)及び累積量の相関を検討した (Fig. 5-3)。また、主な採泥地点と崖の位置関係を Fig. 5-4 に示す。

Fig. 5-3 によると、請戸・前田川河口域では、崖からの距離が 100 m 以内の地点については、放射性セシウム濃度及び累積量が、以遠の地点に比べて 1 桁程度高い(地点 16,19,15,15-2)。1F 近傍は崖の近接地点にやや高い地点(地点番号 29,31)が存在するが、崖から 500 m 程度離れの距離を有する 1F 港湾入口(地点番号 30)でも高い地点が存在していることから、崖からの距離との相関は判定できない。熊・富岡川河口域は窪地の 1 点(地点番号 41)が高い値を示すものの、その他の地点(地点番号 34,37,39,40)は崖の距離との相関は明瞭ではない。小高川河口域は距離に依らず値の変動幅が小さい。

上記の結果より、請戸・前田川河口域については、崖から 100 m 以内の海底土は、崖の影響により放射性セシウム濃度及び累積量が高いことが確認された。また、熊川河口域の窪地も同様の傾向が示された。そのほかの河口域については、放射性セシウムの分布と崖との相関は明瞭ではない。その要因としては、以下の理由が考えられる。

●Fig. 5-1 に示すように、請戸河口域から主に北の崖地形の領域は、請戸川からの流入に伴う冲向

きの流れに対して、崖が直角に延びることにより、崖の基部に河川から供給される粒子の沈降がより促進されやすい環境を有する。

●その他の河口域は、河川から供給される放射性セシウム量が請戸川と比較して少ない(請戸川からの供給量と比較して 2~20%程度; Sakuma et al(2019)¹⁾に基づく試算)ことに加え、近傍河川から供給された粒子を含む海水の流れは、崖の延長方向と平行な南北方向であるため、崖が粒子の沈降を促進する機能を果たしにくい。

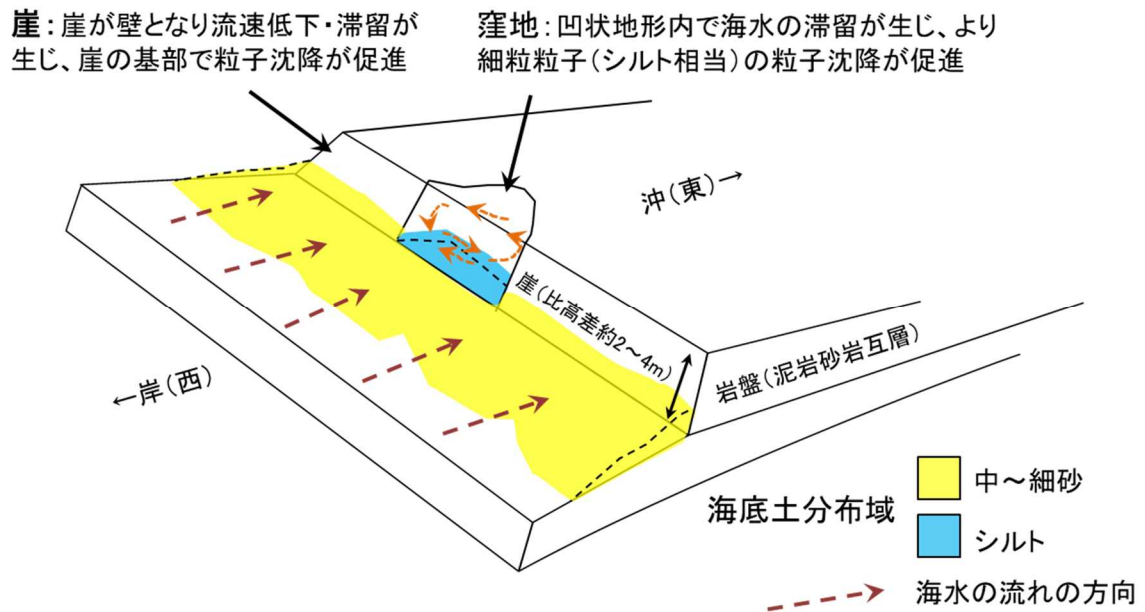


Fig. 5-1 海底地形(特に崖地形)と海水の滞留、粒子沈降等に関する概念図

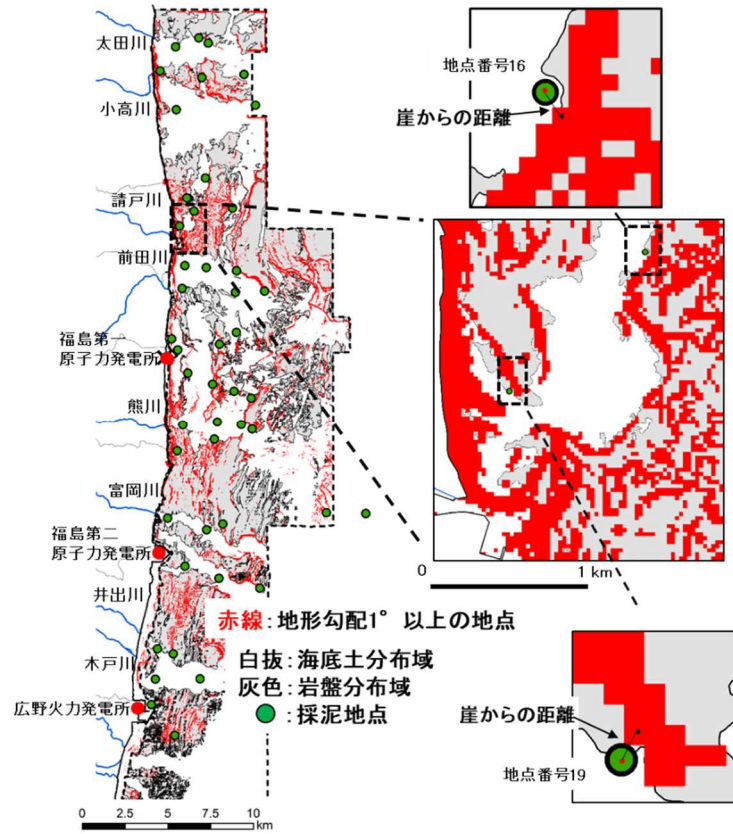


Fig. 5-2 地形勾配1°以上の地点(赤線群)と距離の抽出方法

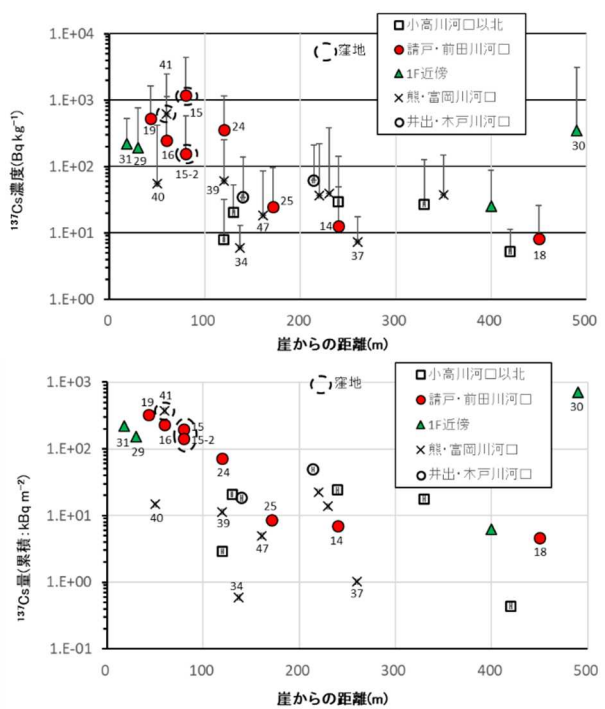


Fig. 5-3 ¹³⁷Cs 濃度(平均:上)及び累積量(下)と崖からの距離の相関
番号は採泥地点番号(Fig. 5-4 参照)

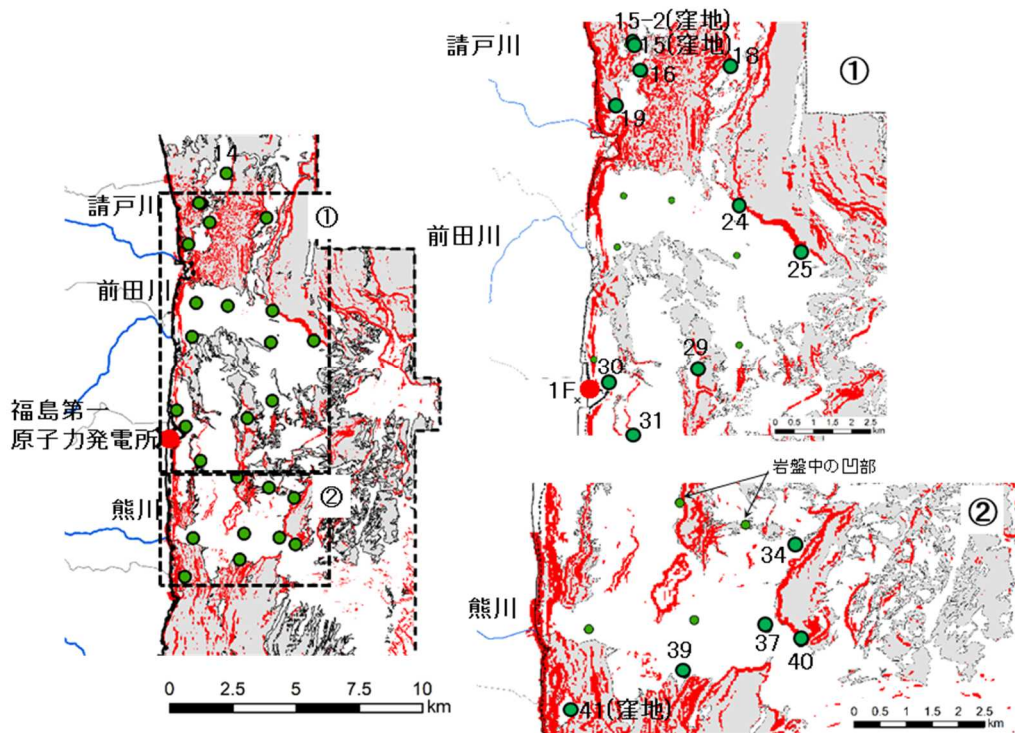


Fig. 5-4 主な採泥地点と崖の位置関係

5.1.2 放射性セシウム量の試算

以上の検討を踏まえ、以下の考え方にに基づき、海底地形及び海底土分布の情報が得られている浅海域の放射性セシウム総量 (^{137}Cs 量) を試算した。

●「4.2.3.2」に示す通り、河口域によって放射性セシウム濃度、累積量等が異なることから、試算するエリアを、太田・小高川河口域(エリア 1)、請戸・前田川河口域(エリア 2)、1F・熊・富岡川河口域(エリア 3)、及び井出・木戸川河口域(エリア 4)に分割。

●エリア毎に Table 4-7 に示した分布の特徴毎に、分布面積と本年度の調査で取得した放射性セシウムの累積量 (kBq m^{-2}) を乗じて、放射性セシウム総量を算定。放射性セシウムの累積区分としては、以下の 4 区分を設定。

- ・海底土が分布しない岩盤
- ・Table 4-7 の「盆状」と「直線状」は放射性セシウムの分布の相違は明瞭でないため同じ区分
- ・請戸・前田川河口域は崖から 100 m の範囲
- ・請戸・前田川河口域及び熊川河口域は窪地の範囲

Fig. 5-5 に放射性セシウムの試算エリア、濃度及び累積量の分布図を示す。また、各エリア及び各エリア合計の放射性セシウム総量を Table 5-1 と Table 5-2 にそれぞれ示す。

本年度の調査結果に基づく福島沿岸域(沖合約 5km まで;水深約 30 m)の放射性セシウム総量は、約 10 TBq と試算された。一定程度の範囲の海底土の放射性セシウム総量に関する既往の調査・研究例は少なく、また対象領域が異なるため^{4) 5) 6) 7)}等、本年度の調査結果との単純な比較は困難であるが、Otosaka and Kato(2014)⁵⁾による水深 200 m 以浅の試算結果、及び Black and Buesseler(2014)⁶⁾による 1F を含む水深 120 m 以浅の推定結果と比較すると、本事業により試算された海底土中の放射性セシウ

ム総量は、Otosaka and Kato(2014)⁵⁾と、概ね整合していることが確認された(Table 5-3)。一方で、評価した放射性セシウム総量は近傍河川からの懸濁態放射性セシウム(¹³⁷Cs)流入量(約 14TBq)¹⁾と同程度であり、沿岸海域での移動・蓄積挙動の定量的な把握には課題が残されている。

いずれにしても、今後、同様の調査・評価をより詳細に実施することにより、海域における放射性物質の蓄積状況や海底土中の放射性セシウムのより定量的な移動挙動の把握が可能になると考える。

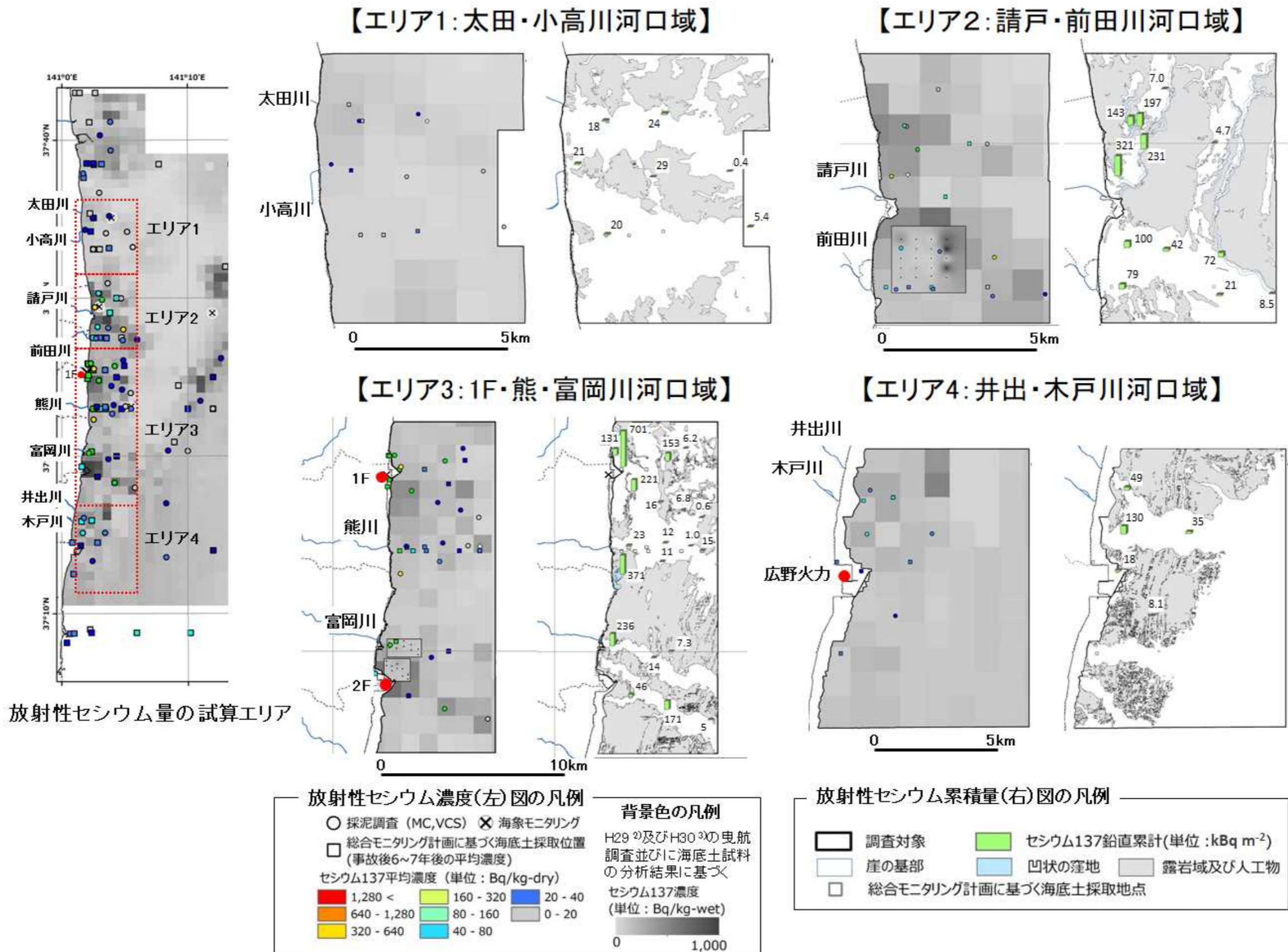


Fig. 5-5 放射性セシウム総量の試算エリア、濃度、及び累積量の分布図

Table 5-1 各エリアの放射性セシウム総量(¹³⁷Cs 量)

エリア1：太田・小高川河口域				エリア2：請戸川・前田川河口域			エリア3：1F・熊・富岡川河口域			エリア4：木戸・井出川河口域		
放射性セシウム累積区分	m ² あたりの放射性Cs量 (kBq)	分布面積: km ² (調査対象面積%)	Cs量 (TBq) (調査対象域Cs量%)	m ² あたりの放射性Cs量 (kBq)	分布面積: km ² (調査対象面積%)	Cs量 (TBq) (調査対象域Cs量%)	m ² あたりの放射性Cs量 (kBq)	分布面積: km ² (調査対象面積%)	Cs量 (TBq) (調査対象域Cs量%)	m ² あたりの放射性Cs量 (kBq)	分布面積: km ² (調査対象面積%)	Cs量 (TBq) (調査対象域Cs量%)
①岩盤	0	18.2 (34%)	-	0	26.4 (54%)	-	0	53.4 (48.7%)	-	0	25.9 (31%)	-
②盆状+直線状	13 (±9) (n=7)	34.8 (66%)	0.45 (100%)	54 (+30) (n=6)	21.1 (43%)	1.13 (77.2%)	93 (+111) (n=19)	55.9 (51.0%)	5.22 (97.2%)	58 (+36) (n=4)	57.1 (69%)	3.32 (100%)
③崖	-(考慮しない)	-(考慮しない)	-(考慮しない)	276 (n=2)	1.2 (2.5%)	0.33 (22.6%)	-(考慮しない)	-(考慮しない)	-(考慮しない)	-(考慮しない)	-(考慮しない)	-(考慮しない)
④窪地	-(無し)	-(無し)	-(無し)	170 (n=2)	0.02 (0.04%)	0.0033 (0.2%)	371 (n=1)	0.4 (0.3%)	0.14 (2.8%)	-(無し)	-(無し)	-(無し)

Table 5-2 本年度の調査結果に基づく福島県沿岸域における放射性セシウム総量(¹³⁷Cs 量)

堆積場	¹³⁷ Cs量 (TBq) (調査対象域%)				
	エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	計
①岩盤	-	-	-	-	-
②盆状+直線状	0.45	1.13	5.22	3.32	10.1 (95.5%)
③崖	影響無	0.33	影響無	影響無	0.33 (3.1%)
④窪地	無	0.0033	0.14	無	0.14 (1.4%)
計	0.45 (4.3%)	1.46 (13.8%)	5.36 (50.6%)	3.32 (31.3%)	10.6

Table 5-3 放射性セシウム総量の他の研究事例との比較

引用等	エリア等	¹³⁷ Cs量 (T Bq)	m ² あたりの ¹³⁷ Cs量※ (kBq m ⁻²)
Otosaka and Kato (2014) ⁵⁾	・水深200m以浅 ・面積: 7,900 km ²	160 (±50) ※2011.3.11補正基準 ※Cs134:137=1:1として転記	20.3
Black and Buessler (2014) ⁶⁾	・1Fから北のエリア ・水深14~120m ・面積: 4,731 km ²	21 (±10) ※2011.4.6補正基準	4.4
本事業	・1F南北約20km ・水深30m以浅 ・面積: 295 km ²	10.6 ※2019.7~8月補正基準	35.9

※¹³⁷Cs量÷面積

5.2 河川から供給される放射性セシウムの影響について

「5.1」では海底土中の放射性セシウムと海底地形の関連を考察した。本項では海象モニタリングの結果に基づき、河川から供給される放射性セシウムの影響について考察を行う。

5.2.1 沈降粒子と放射性セシウムの関係性

Fig. 4-27 に示す 4 地点で採取した沈降粒子について、Fig. 5-6 に沈降量と放射性セシウム濃度との関係性を示す。全体的に沈降量が多くなるほど放射性セシウム濃度が下がる傾向を示す。特に調査地点 2、3、4 にその傾向が強い。そのため、調査地点 1 とそれ以外で沈降粒子の起源が異なる可能性が示唆される。また、調査地点 1 は、概ね 50 から $1000 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、調査地点 2 及び 4 は概ね 5 から $100 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、調査地点 3 では、概ね 0.2 から $10 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と沿岸からの距離に応じて一桁ずつ沈降量が少なくなる傾向を示している。沿岸から沖合に離れるほど水深も深くなり、陸域起源粒子の供給量が少なくなることが一つの要因と考えられる。

次に懸濁態セシウムの移動性を検討するため、沈降量と放射性セシウムフラックスの関係図を示す (Fig. 5-7)。沈降量が増加すると、放射性セシウムフラックスも増加する正の相関が得られた。そのため、粒子の移動性と懸濁態放射性セシウムの移動性に関連があることが示唆される。

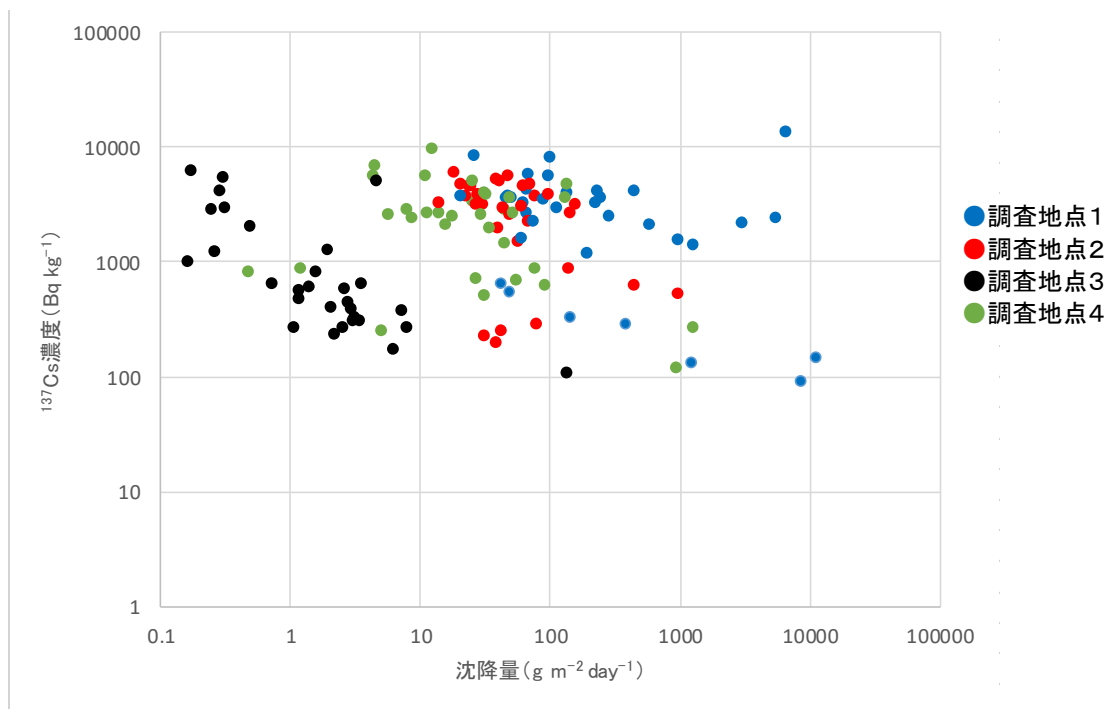


Fig. 5-6 沈降量と放射性セシウム濃度との関係性

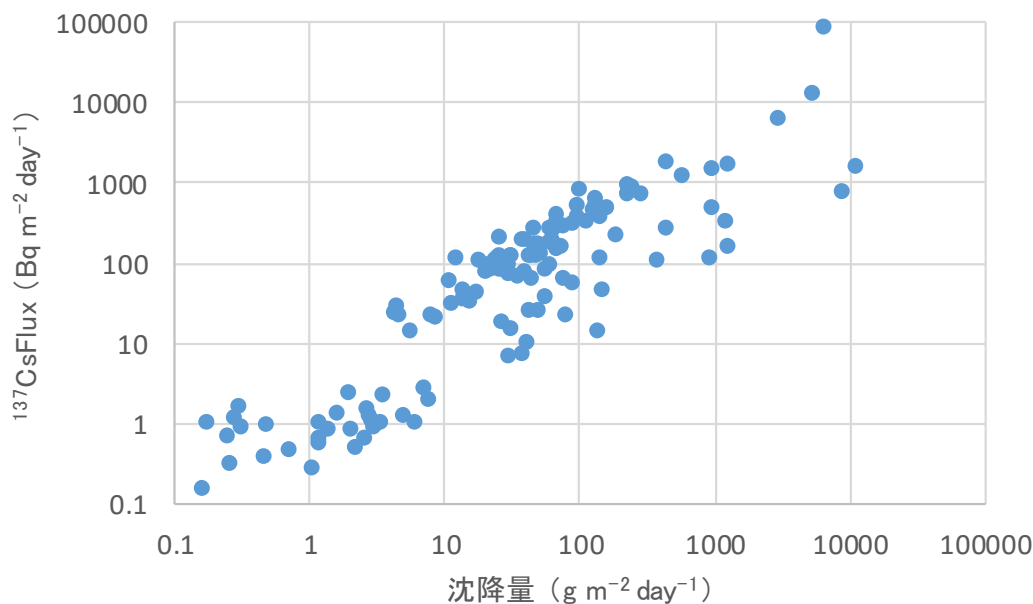


Fig. 5-7 沈降水量と放射性セシウムフラックスの関係

5.2.2 沈降粒子と降水量との関係性

粒子の移動性と懸濁態放射性セシウムの移動性に関係性が見られることより、沿岸域への主要な流入経路である河川の影響に着目し、セジメントトラップで捕集した各期間の沈降水量と降水量(気象庁浪江観測点)を比較する(Fig. 5-8)。沈降水量に着目すると、低気圧が10月3日から10月5日、10月22日から27日、11月23日から29日に福島県沖を通過しており、それと連動するように沈降水量が増える傾向を示す。特に調査地点1において、10月5日(8553.2 g m⁻² day⁻¹)及び10月6日(11042.6 g m⁻² day⁻¹)に沈降水量が多く観測された。また、係留2回目の台風通過時は、セジメントトラップ設置期間中に1から4までの全観測地点で他の観測期間と比較して、沈降水量が多くなる傾向を示した。セジメントトラップ設置期間中に大きな降水が観測されたのは、台風21号が通過した係留2回目の10月25日の246 mm(日合計降水量)であった。その点に着目すると、各調査地点とも降水量が増加後に5.2.1で述べた沈降水量の範囲から外れる傾向がみられる。そこで、Fig. 5-9に降水があった10月25日周辺の沈降粒子の放射性セシウムのグラフを示す。調査地点1に設置したセジメントトラップに10月26日に捕捉された沈降粒子の放射性セシウム濃度が13800 Bq kg⁻¹と係留2回目の他期間よりも高い値を示す。台風による降水により河川から微粒子が選択的に流出することが報告されているため¹⁾、放射性セシウムの移動が多くなり、それが補足されたことを示唆していると考えられる。

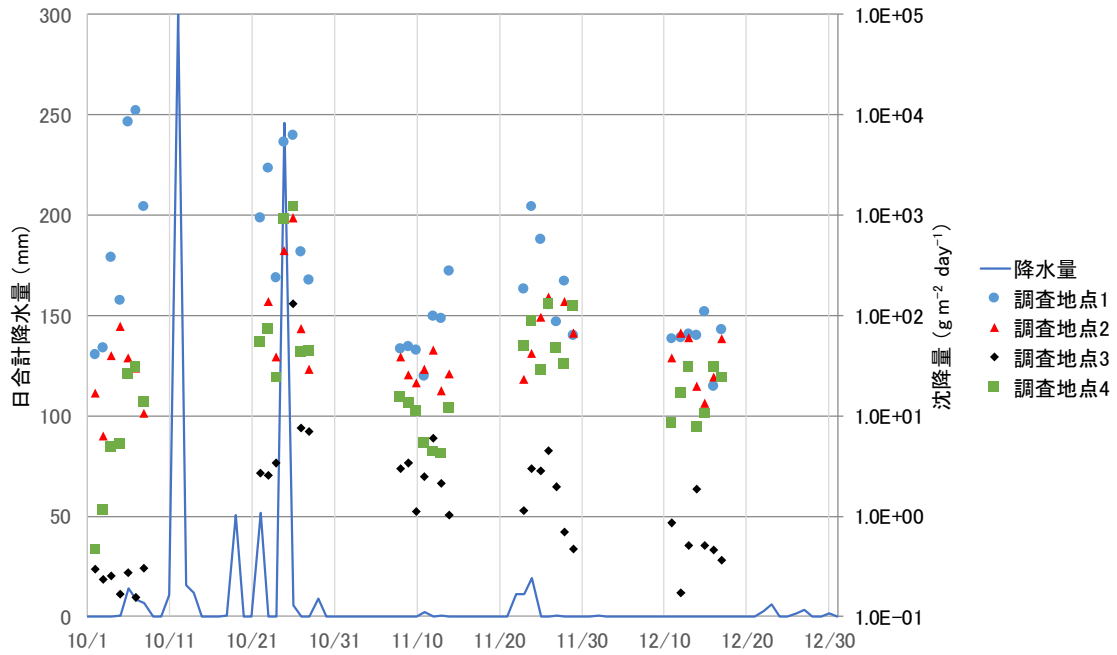


Fig. 5-8 沈降粒子と降水量の関係性

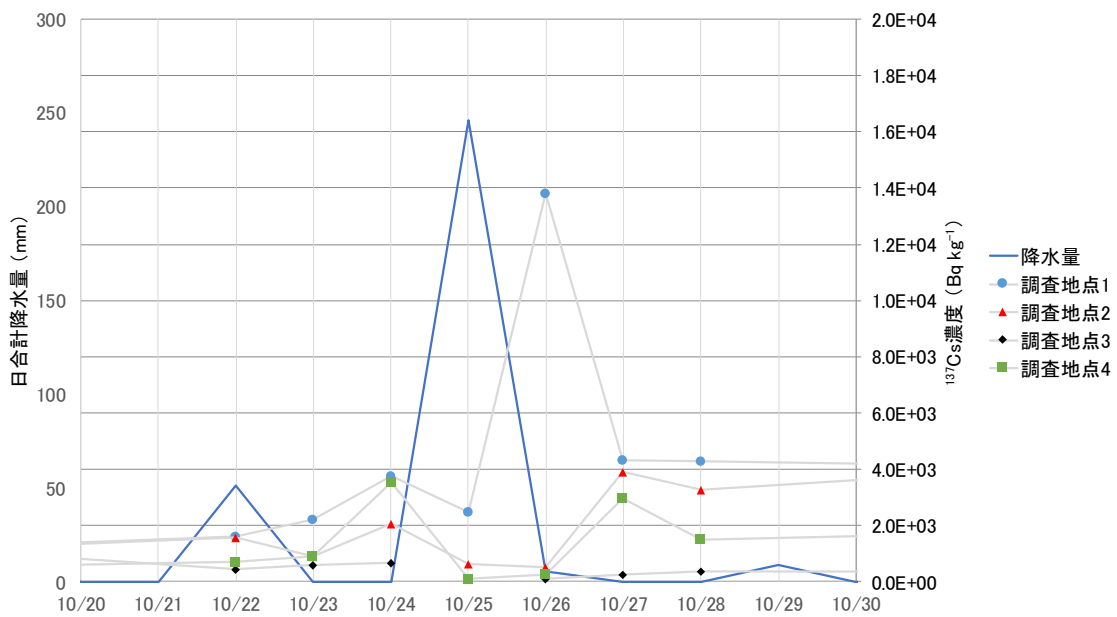


Fig. 5-9 降水が観測された期間の放射性セシウム濃度

5.2.3 台風及び降水が多い時における放射性セシウムの移動性に関する考察

放射性セシウム濃度が降水後に多くなる点に着目し、その時の放射性セシウムの移動性を検討した。Fig. 5-10 に ^{137}Cs フラックスの変動のグラフを示す。調査地点1では、係留2回目の10月25日に $13224 \text{ Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、10月26日に $86782 \text{ Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を示した。調査地点1における通常時の ^{137}Cs フラックスの範囲が、100 から $1000 \text{ Bq m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 程度であることから、出水時は10から80倍程度の影響があることが示唆される。またその時の沈降粒子の中央粒径を比較すると、10月25日を境に $170 \mu\text{m}$ 程度から 86 から $130 \mu\text{m}$ 程度まで小さくなっていることが分かる(Fig. 5-11)。なお、沈降粒子の粒径の詳細は「添

付資料;4.3-4]を参照すること。

粒径が変化していることから捕集された沈降粒子の物性が異なることが示唆されるため、XRD 測定により調査地点1の沈降粒子の鉱物種を比較した (Fig. 5-12)。その結果、石英、長石、角閃石、粘土鉱物が検出され、2016年の結果と整合的であった²⁾。観測期間を通じて、反射強度の強弱はみられるものの、回折角 2θ の値はほぼ同じ傾向を示すことから、降水時に他の鉱物種が新しく沿岸域に供給されたとは考えにくい。また、河川前面の調査地点1において鉱物種の変化がほぼ見られないことから、他の河川より離れた調査地点において、鉱物種の変化があることは少ないと考えられる。

一方、水質の観点から議論すると、同地点の塩分が、通常時では 33 PSU 前後であるのに対して、10月22日から23日にかけては、表層で約 27 PSU、底層で約 30 PSU、10月25日から10月26日にかけては、表層で約 25 PSU、底層で約 29 PSU と低下している。また濁度も通常では数 FTU 程度の数値が、降水時には 300 FTU を超える値となっており、調査地点周辺が濁った状態であることを示唆している。そのため、河川水の流入及び再懸濁について、両方の可能性が示唆される。そこで、再懸濁の指標である底面せん断力を以下に示す式で算出した³⁾。

$$\frac{\tau_c}{\rho} = U_{cb}^2 / \left[\frac{1}{K} \ln \left(\frac{z_b}{z_0} \right) \right]^2$$

τ_c : 流れによる底面せん断力

ρ : 海水の密度

U_{cb} : 海底近傍の流速

z_b : 流速 U_{cb} の海底上の高さ

z_0 : 粗度高さ

K : カルマン定数(0.41)

今回は U_{cb} と z_b に底面の電磁流速計の流速値と、その海底からの高さを与え、流れによるせん断力を計算した。海底の粗度高さ z_0 については、観測海域の底質が砂質であるため、 $z_0=0.3$ mm を与えた⁴⁾。また、海水の密度は底面の塩分水温計の測定値を基に海洋観測ガイドラインに則って算出した⁵⁾。その結果を Fig. 5-13 に示す。前述した期間において、調査地点1では最大で 0.4Pa 程度と通常時よりも大きなせん断力が発生していることが確認できる。

河川水の流入の観点より、 ^{137}Cs 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の数値を比較することで陸域からの沈降粒子の流入寄与を求めた (Fig. 5-14)。それによると、河川前面の調査地点1において、炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ の濃度が -28.5‰ から -29.7‰ となり、炭素/窒素比 (C/N 比) が 14.0 から 23.1 となった。和田の報告⁶⁾によると、陸上高等植物の $\delta^{13}\text{C}$ が概ね -27‰ 、海洋植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ は -20‰ を示すとされている。また、C/N 比が 15 以上であると陸起源有機物であることから⁷⁾、陸起源粒子が支配的である傾向を示した。そのため、調査地点1では、せん断力の増加により底質が再懸濁をする条件は整っているものの河川水流入の影響が大きいと考えられる。

調査地点2では、Fig. 5-14 に示す通り、 $\delta^{13}\text{C}$ は -24.6‰ から -27.4‰ を示す。特に10月25日は -26‰ 、10月26日は -27.4‰ を示しており (添付データ「4.3-2」参照)、陸域の寄与が示唆される。Fig. 4-36 に示す塩分をみると、表層では降水と連動して 29 から 30 PSU と通常時よりも低下する傾向を示す。一方底層では、若干の低下傾向があるものの、ほぼ 33 PSU 前後を推移している。濁度をみると、底層では 10

月 25 日から 10 月 26 日にかけて 50 から 300 FTU の範囲で推移していることが分かる。また、調査地点 1 と同様に底面せん断力をみると (Fig. 5-13)、10 月 25 日から 10 月 26 日にかけて、0.2 Pa 程度と通常時の 2 から 10 倍程度大きな値となった。また、10 月 25 日と 10 月 26 日の沈降粒子の ^{137}Cs 濃度は、 649 Bq kg^{-1} と 539 Bq kg^{-1} であり、降水前後よりも小さい傾向を示す。また、10 月 29 日に採取した調査地点 2 の底質の放射性セシウム濃度の深度分布を Fig. 5-15 に示す。その結果、上端から下端までは、約 20 Bq kg^{-1} 以下となっており、沈降量と比較して放射性セシウム濃度が少ない結果となった。そのため、調査地点 2 では、塩分の低下が少ないこと、及びせん断力が通常時よりも大きくなることから、河川の影響よりも台風により低放射性セシウム濃度の底質が再懸濁し、セジメントトラップに捕集されたことで沈降量が多くなり、放射性セシウム濃度が低く表れたと示唆される。そのため、調査地点 1 に比べて $\delta^{13}\text{C}$ 濃度も海起源に近づいていると考えられる。

請戸川沖合の調査地点 3 では、10 月 22 日から 10 月 28 日にかけて沈降粒子の $\delta^{13}\text{C}$ が -21.4‰ から -24.5‰ を示し、C/N 比も 7.5 から 8.8 を示した。10 月 25 日は観測機器の不具合でデータが未取得であったが、10 月 26 日は -24.5‰ を示した。また、塩分は表層、底層ともに 33PSU 前後を推移しており、特異な変動は見られなかった。そのため、陸域から直接流入した粒子の可能性は低いと考えられる。一方、濁度は降水に合わせて 20 から 50 FTU の範囲を推移する傾向を示した。そこで、調査地点 2 と同様にせん断力を計算すると、Fig. 5-13 に示すように台風時においても 0.1 Pa 程度が卓越しており、通常時よりは大きいものの、その影響は調査地点 2 に比べて少ないと考えられる。調査地点で捕集された沈降粒子について、粒度分析の試料量が確保できた 3 日間について、Fig. 5-16 に示す (詳細な数値は「添付データ; 4.3-4」を参照)。それによると、93 から $97 \mu\text{m}$ と底質の中央粒径 (約 $825 \mu\text{m}$) に比べて顕著に小さいことが分かる (詳細な数値は「添付データ; 4.3-5」を参照)。そのため、調査地点 3 で再懸濁した量よりも調査地点 2 及び 4 の周辺もしくは沖合 (河川の影響が少なくなっている場所) で再懸濁した粒子が運ばれて調査地点 3 で捕集された可能性が示唆される。放射性セシウム濃度も 10 月 26 日は 110 Bq kg^{-1} と他の期間よりも低く、底質の放射性セシウム濃度も Fig. 5-17 に示すように表層では数 Bq kg^{-1} と低いため、河川の影響は少ないと考えられる。

調査地点 4 でも他の地点と同様に沈降粒子の $\delta^{13}\text{C}$ を測定したところ、 -24.3‰ から -28.5‰ の範囲で推移した。特に 10 月 25 日は -28.5‰ 、10 月 26 日は -27.5‰ と調査地点 2 と同様の傾向となり、陸域の寄与を示していると考えられる。塩分の変動についてみると、調査地点 2 と同様に台風通過時では表層のみ塩分が最大で 29PSU 程度まで下がる結果が得られ、降水の影響が大きいと考えられる。また、濁度の変動についてみると、調査地点 2 と同様に底層のみ 10 月 26 日前後に変動が大きくなる傾向を示している。沈降粒子の放射性セシウム濃度は 124 Bq kg^{-1} と 276 Bq kg^{-1} であり、降水前後よりも小さい傾向を示した。また、Fig. 5-13 に示すせん断力も調査地点 2 と同様に最大で 0.2 Pa 程度となっていた。そのため、調査地点 2 と同様に河川の影響よりも再懸濁の影響が支配的であると示唆される。

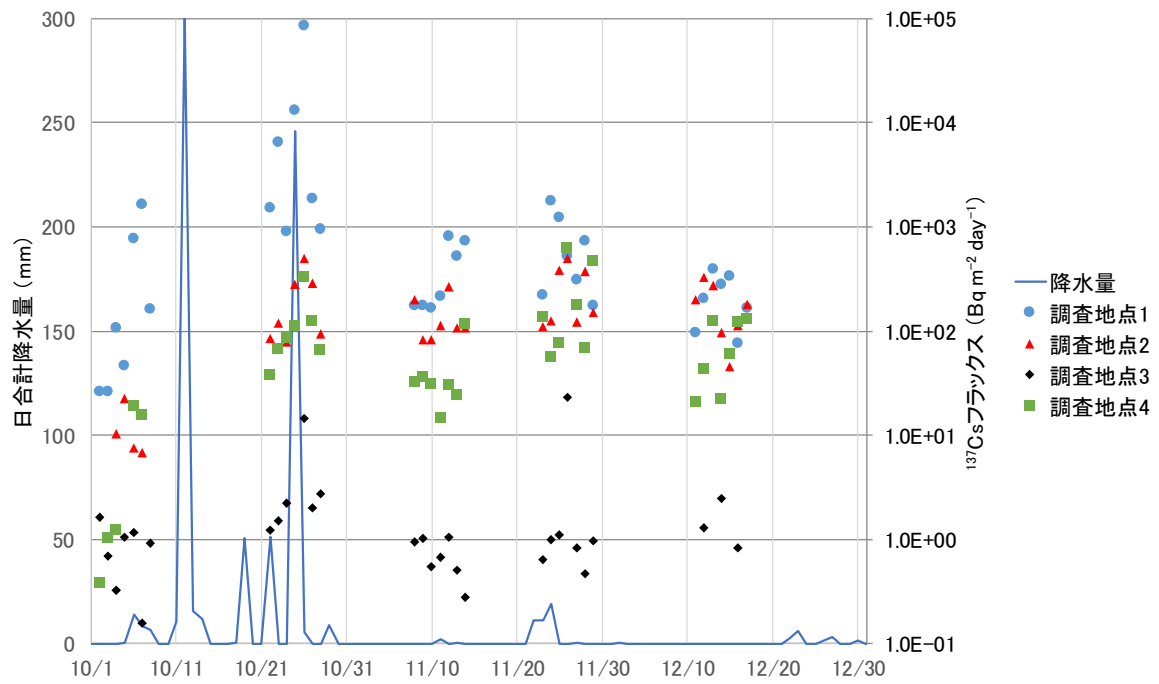


Fig. 5-10 放射性セシウムフラックスの変動

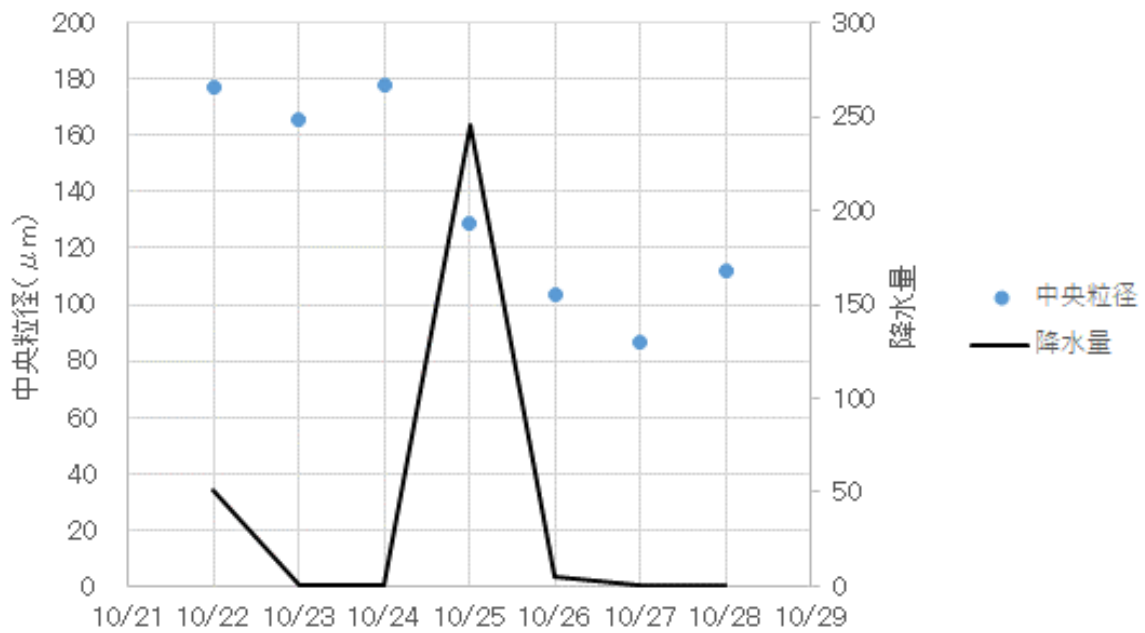


Fig. 5-11 調査地点1における沈降粒子の中央粒径の変動

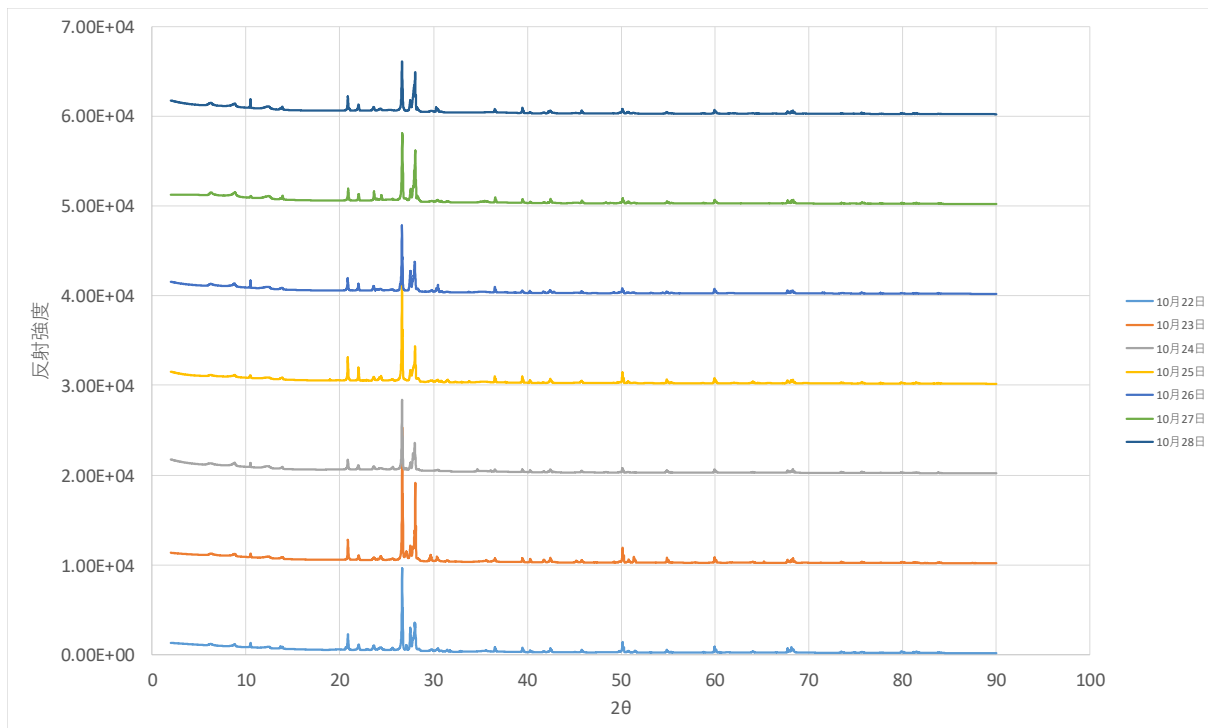


Fig. 5-12 調査地点1における沈降粒子の反射強度の変動

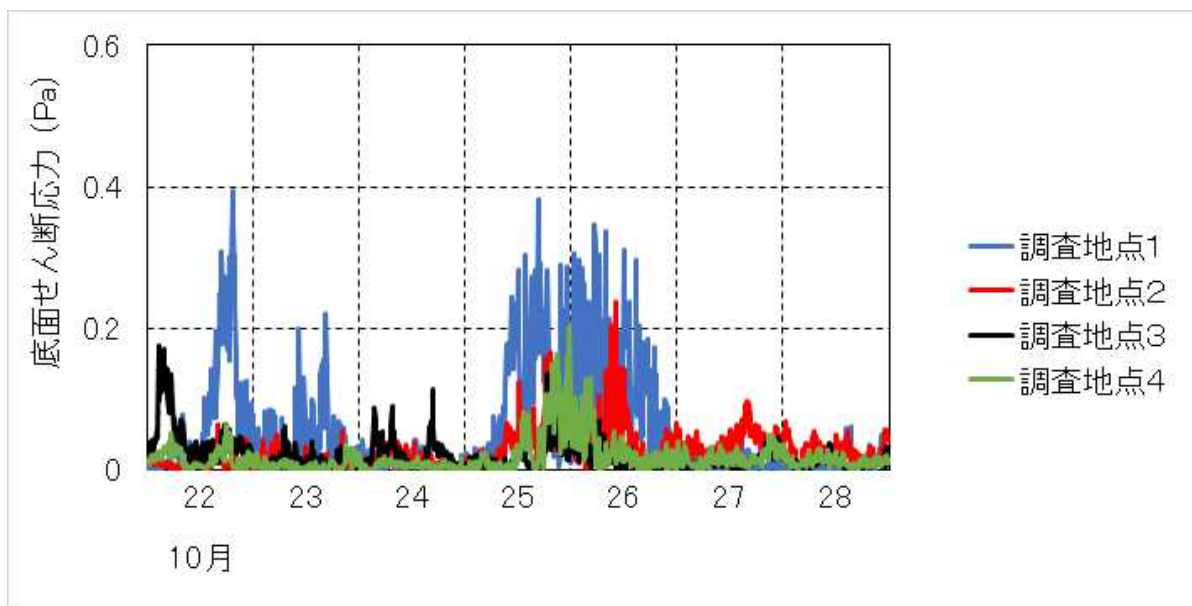


Fig. 5-13 係留2回目における底面せん断応力

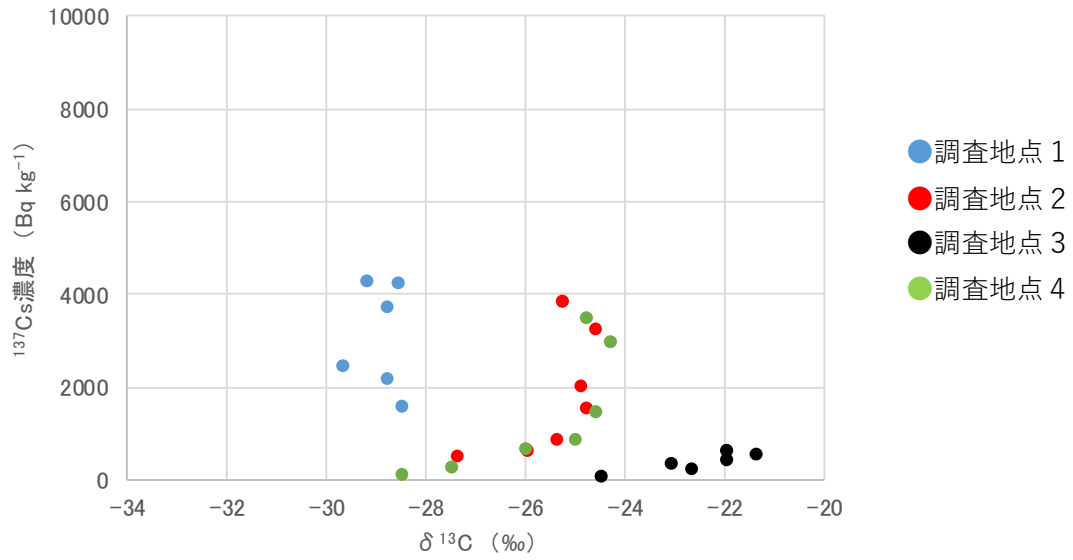


Fig. 5-14 台風及び降水時における沈降粒子の起源

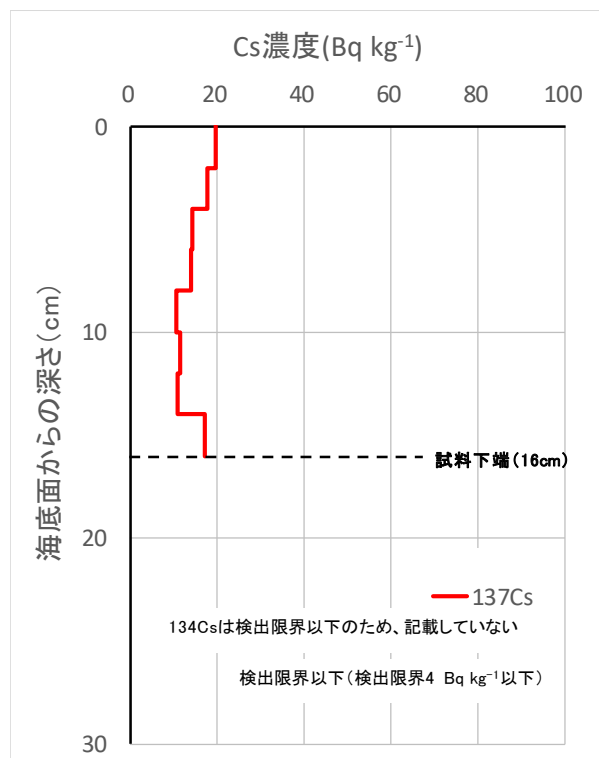


Fig. 5-15 係留 2 回目における調査地点2の底質の放射性セシウム濃度の深度分布

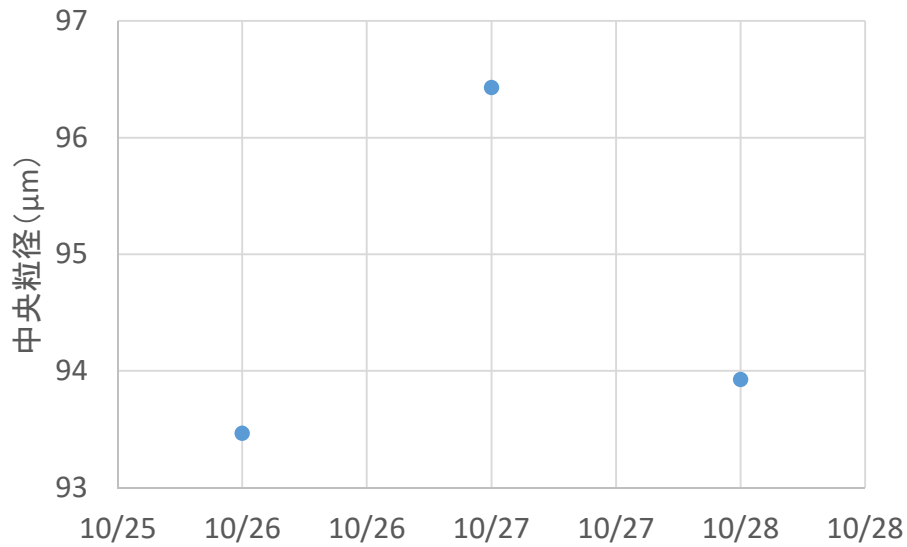


Fig. 5-16 係留 2 回目における調査地点 3 の沈降粒子の粒径分布

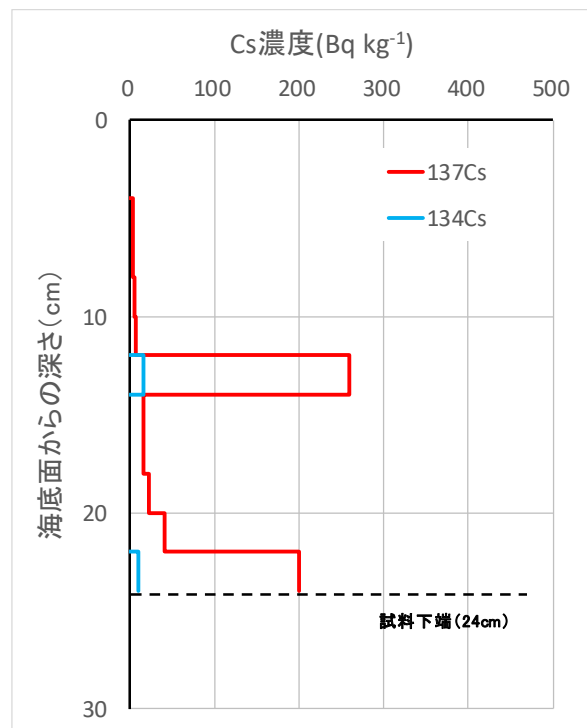


Fig. 5-17 係留 2 回目における調査地点 3 の底質の放射性セシウム濃度の深度分布

5.2.4 海底土の放射性セシウム濃度の変動傾向

放射性セシウムは出水時に多く沿岸域へ流入することが示唆されたが、それらが経時的にどのように変動するのかが重要となる。そこで、各調査地点において、アシユラで採取したコア試料の放射性セシウム濃度について、最大値、最小値、四分位数を求め、それらを箱ひげ図で示した(Fig. 5-18)。なお、図中にはアシユラによる最大採取深度を記している。

各調査地点で放射性セシウム濃度は大きな変動幅を持つことが示唆された。請戸川前面の調査地点1では10月9日から29日を境に、中央値が 80 Bq kg^{-1} から 502 Bq kg^{-1} まで上昇する結果が得られた。その後も上昇する傾向を示し、12月19日には減少する結果となった。大規模な降水による出水時に放射性セシウム濃度が上昇するが、河川に近いこともあり、その減少速度が他の地点より遅く、約2か月経過した後でも10月9日の水準よりも高い傾向を示した。影響がみられた。一方、調査地点2では調査地点1よりも遅れた11月15日の結果において、放射性セシウム濃度のピークがみられた。請戸川の出水時は南東方向の流向が卓越しており、それらが調査地点2に移動した可能性は低い。そのため、調査地点2よりも北の河川からの影響が考えられる。一方、4.4.3で10月31日の真野川のUSV結果が示されているが、それによると湿潤状態であるが、 40 Bq kg^{-1} と低い。そのため、それ以降に北側の河川から移動した放射性セシウムが沈着した可能性が示唆される。しかしながら、12月4日の結果では放射性セシウム濃度が大きく減少しており、その場に留まらないことを示唆している。沖合の調査地点3では、10月29日に上昇したのみで、10から 20 Bq kg^{-1} を推移する傾向を示す。大きな降水イベント時には増加するが、5.2.3でも示した通り、底質の中央粒径が大きく、細かな粒子がその場に留まらないことを示唆している。一方、調査地点4では、10月9日、10月29日、12月4日と低気圧が通過したときに放射性セシウム濃度が上昇する傾向を示す。同時期の調査地点4では南向き、東向きの流向がみられるため、請戸川の出水と関連して上昇していることが示唆される。

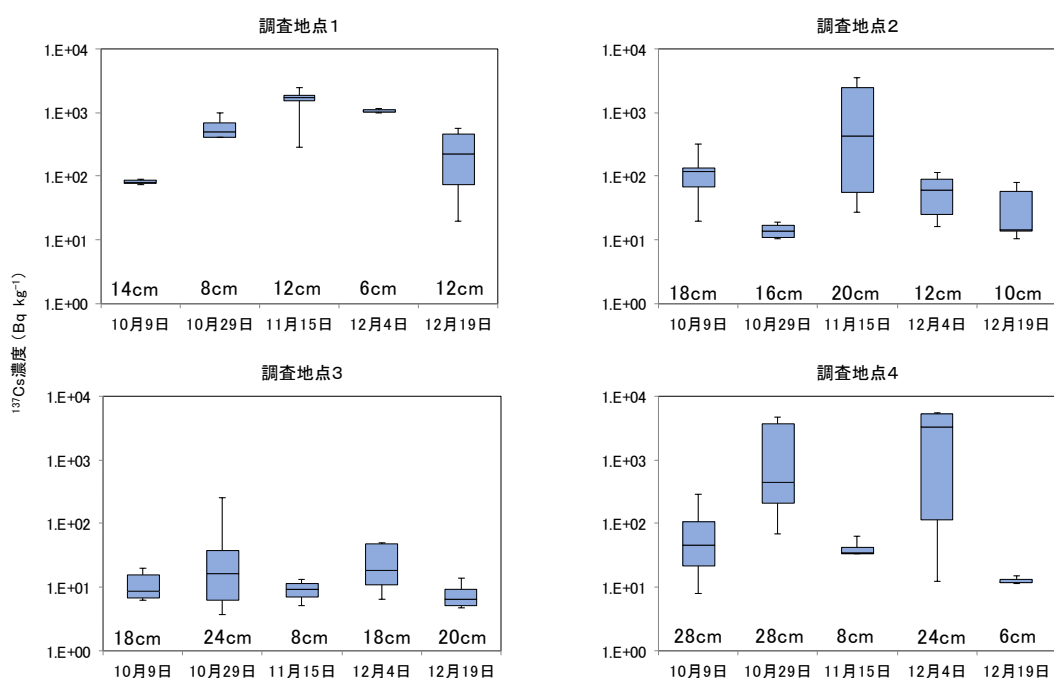


Fig. 5-18 放射性セシウム濃度の変動傾向

5.2.5 放射性セシウムの移動について

台風時には、請戸川河口前面において、沈降粒子の量が通常時の 10 から 80 倍ほどに増大する。特に台風時に陸域の有機物が太田川沖約 4 km、熊川沖合約 5 km 程度まで観測されていることから、少なくともその範囲には陸水の影響があることが示唆される。一方、請戸川沖合 14 km 程度の調査地点では、陸起源の粒子の影響がほとんど見られないこと、及び捕集された沈降粒子と底質の粒径が大きく異なることから、他の地点で再懸濁した細かな粒子が沖合に運ばれている可能性が考えられる。これは、4.2.3.2 で述べた水深 50 m 以深(陸域から概ね 10 km の範囲)を超えると放射性セシウム濃度、累積量ともに顕著に低いことも整合的である。また、底質の放射性セシウム濃度の経時変化より、大規模な出水時には、河川前面で放射性セシウム濃度が高い傾向を示し、2 か月後においてもその影響がみられることが分かった。しかしながら、底質の表層 6 cm までのインベントリーとセジメントトラップで捕集した沈降量の放射性セシウムフラックスを比較し、底質への寄与率を求めると、低気圧時には 0.4% から 10%ほど、通常時は 20 から 30%ほどとなった。そのため、出水時の放射性セシウムが沿岸近傍に留まり続ける可能性は少ないと考えられる。一方、流向の影響で、他の河川からの放射性セシウムの移動も示唆された。これらの結果により、今後のモニタリングについて、出水時の河川の影響に関する理解の促進に資する情報を取得することができた。今後は、潮流解析や粒子の沈降速度、粒径区分ごとの起源推定を行うとともに、放射性セシウムの存在形態について調べることで、各河川の陸域からの放射性セシウムの負荷量の把握について、より精度を高めることが出来ると考えられる。

6 曳航式モニタリングの再解析

6.1 調査目的

原子力規制庁は、平成 25 年度より曳航式 線スペクトロメータによる海底土表層の放射性セシウム濃度の広域測定を実施している。本データは、唯一の水底の広域な測定手法であり、海域の放射性セシウム濃度分布の可視化に重要な情報を提供してきた¹⁾。一方、事故から 8 年目が経過した現在では、海底土の放射性セシウム濃度の減衰が顕著になりつつあり、放射性セシウム濃度の高かった時期には無視できた、天然の放射性核種の影響や精度の検証が必要な時期に来ていると考えられる。また、従来から検討委員会等で、同地点で取得した海底土のサンプルの測定結果との整合が取れないとの報告もあることから、今年度は 500 Bq kg⁻¹_{wet} 以下の比較的低濃度の放射性セシウム測定を視野に、平成 29 年度及び平成 30 年度に取得された曳航式モニタリングで得られたデータを対象として、解析手法の最適化及び同時に取得された海底土サンプルの測定結果と比較した不確かさ評価を実施した。

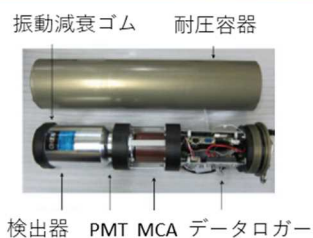
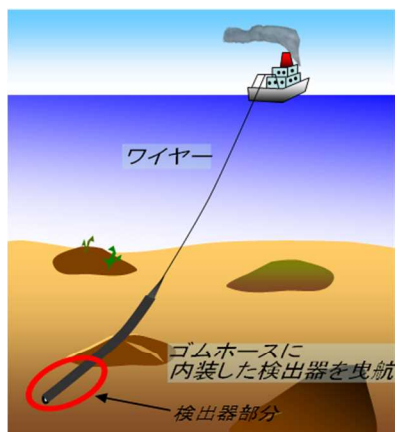
6.2 調査内容

6.2.1 過年度までの状況

6.2.1.1 曳航モニタリングデータ

曳航式モニタリングの手法や解析方法については、過去の事業報告書に詳しい¹⁾。ここでは、概要と再評価の対象とした平成 29 年度及び平成 30 年度に取得されたデータについて示す。計測システムは、東京大学生産技術研究所が開発した、耐圧容器に封入された 3'φ×3'もしくは 3'φ×6'の結晶サイズの NaI (TI) シンチレータ検出器が直径 0.15 m 及び長さ 8 m のゴムホースに内装された専用の測定器を用いる。Fig. 6-1 に機器の基本スペックを示す。この検出器を漁船もしくは大型の調査船でワイヤーやロープで海底を引きずりながら約 1 m s⁻¹ の速度で計測する。ゴムホース内には錘が分散されて内蔵されており、水底になるべく密着できるように設計されている。また、検出器内には深度計、温度計、3 軸加速度計及び集音マイクが内挿されており、放射線情報と同時にデータ収集が可能である。

今年度解析の対象としたデータは、平成 29 年度及び平成 30 年度に取得された曳航モニタリングデータとした。また、比較した海底土サンプルのデータは、平成 29 年度は測線上で得られた 62 地点、平成 30 年度は 69 点の堆積物コアサンプルの測定結果とした。曳航モニタリングの測線とサンプルの採取位置について Fig. 6-2 に示す。



項目	スペック
寸法	直径0.15 m、長さ8 m
重量	空中：135 kg、水中：115 kg
耐圧深度	500 m
曳航速度	2ノット(約1 m/s)
検出器	NaI(Tl)シンチレータ (3"Φ×3" or 3"Φ×6")
データ収集	ガンマ線スペクトル[1024チャンネル(0.1~1.8 MeV)] 1回/秒
その他	深度計、温度計、 3軸加速度計、集音マイク

Fig. 6-1 曳航式モニタリング機器のスペック (報告書¹⁾ から作図)

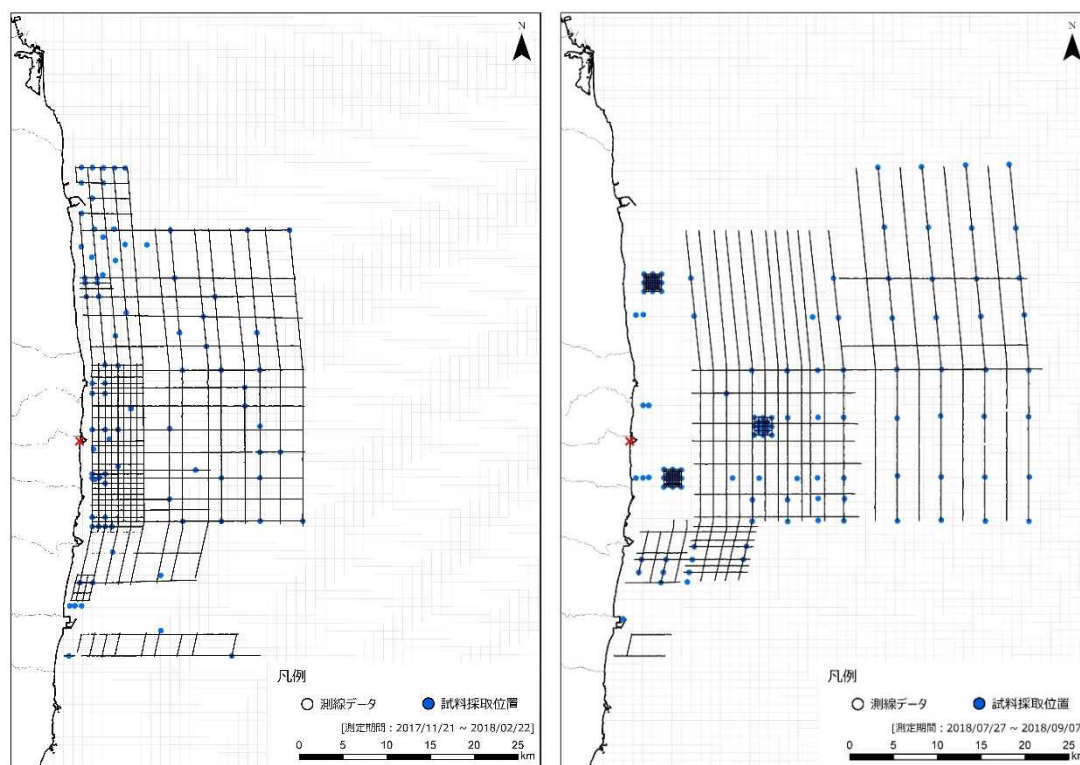


Fig. 6-2 平成 29 年度及び平成 30 年度の曳航式モニタリングデータの測線及び堆積物コアサンプルの採取位置

6.2.1.2 過年度までの解析手法の概要

過年度までの解析手法は、海水と海底土のジオメトリをモンテカルロ計算コードで再現し、換算係数を求めるとともに、検出器の沈み量や近傍で取得された鉛直分布の形状から補正を行い、表層の 3 cm の平均濃度に換算を行っていた²⁾。Fig. 6-3 に換算のフローを示す。解析に使うスペクトル解析はコベル法により、¹³⁷Cs の放出する 661 keV のピーク面積を算出しており、バックグラウンドを差し引いた正味のピーク面積の統計誤差が 8 %以下となるまでスペクトルを積算している。積算時間は、場所によって異なっており、位置分解能よりもスペクトルの統計誤差を優先した解析手法となっている。

過年度までに報告されている平成 29 年度及び平成 30 年度の曳航調査結果について Fig. 6-4 に示す。

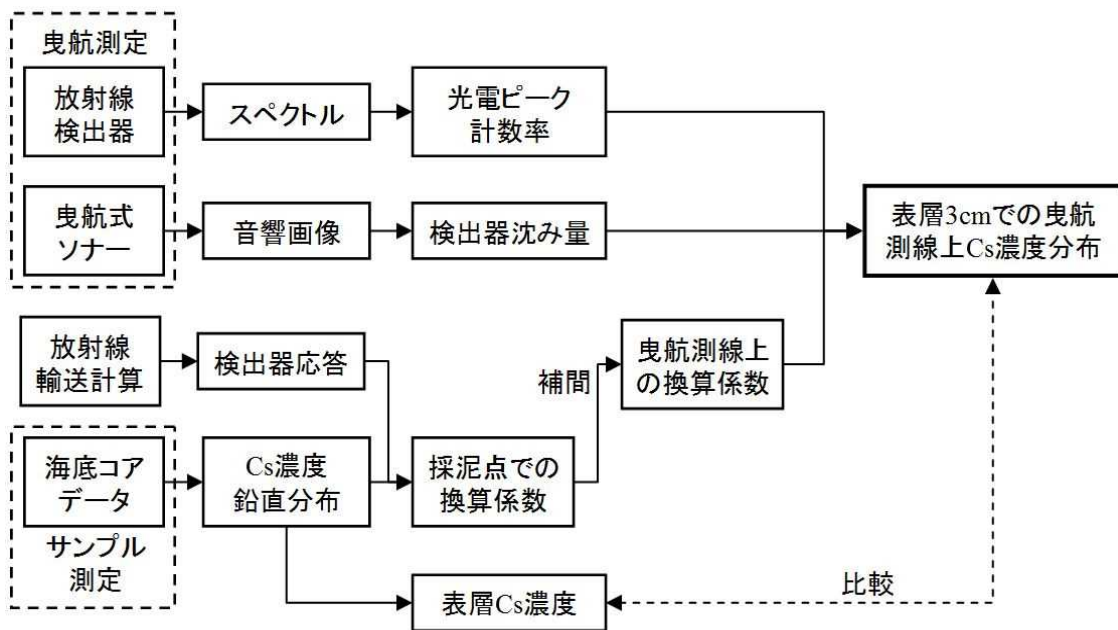


Fig. 6-3 曳航式モニタリングの従来の解析フロー（報告書¹⁾から抜粋）

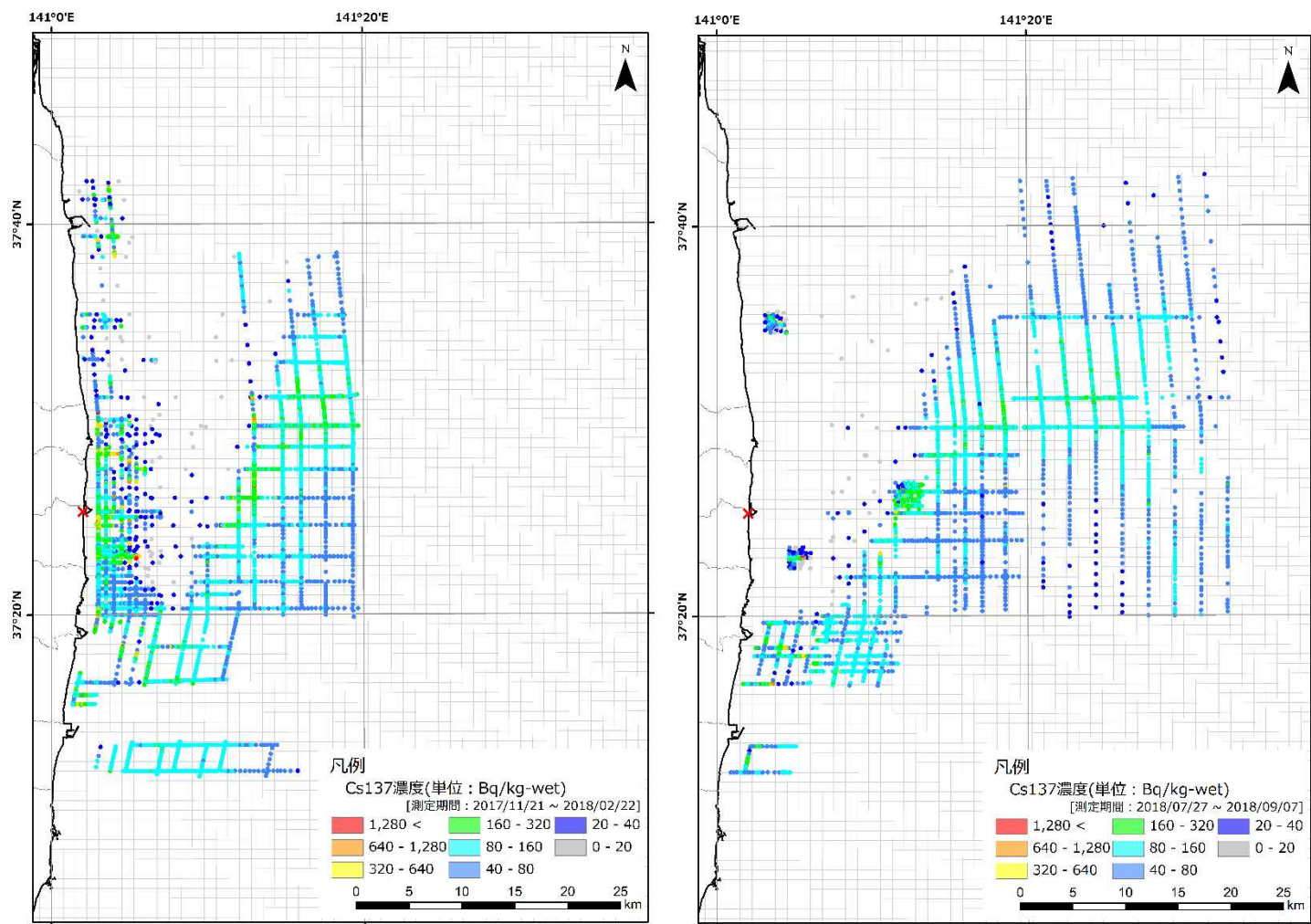


Fig. 6-4 過年度までに報告されている曳航モニタリングによる ^{137}Cs 濃度マップ ((左) 平成 29 年度, (右) 平成 30 年度)

6.2.1.3 海底土サンプルとの比較

本手法の妥当性を評価するために、平成 30 年度に実施された曳航式モニタリングの測線上 101 地点で採取した堆積物コアサンプルとの比較を行った。比較には、対象海域を 1 km メッシュに区切り、同一メッシュ内に入る堆積物コアサンプルの表層 1 cm までの平均値、6 cm までの平均値及び表層 10 cm までの平均値と曳航式モニタリングの換算値の平均値を用いた。散布図と式(2)のように定義した相対偏差 (RD) のヒストグラムを Fig. 6-5 に示す。

$$RD = (RC_{toe} - RC_{samp}) / RC_{samp} \quad (2)$$

ここで、 RC_{toe} は USV による評価結果及び RC_{samp} はコアサンプルの測定結果とする。3 種の結果すべてについて、曳航調査は高い傾向にあり、放射性セシウムの海底土中の鉛直分布の違いによる影響は小さいことが示唆される。例えば、10cm 深さまでの平均値について、分布の中央値は 2.5 となり、曳航式モニタリングの換算結果の方が高い傾向にあることが分かる。25 % 及び 75 % の四分位範囲を計算すると、それぞれ 1.3 及び 5.2 と計算できる。すなわち、曳航式モニタリングによる換算手法は、50 % の確率でコアサンプリングの結果の 130 % から 520 % の範囲に入るとの評価となる。この要因は様々なものが考えられる。主な要因を以下に列挙する。

- ・ 検出器と海底土の密着性：本手法では、解析の際に計数率のトレンドから検出器が海底土から離れたデータについては、人の目で除外しており、影響は小さいと考えられる。
- ・ 検出器の海底土への沈み込み：沈み込みについては、解析フローでも示したように、音響画像データから一定の補正を行っており、影響は小さいと感られる。
- ・ 検出器の計数誤差：本手法では、スペクトルの統計誤差が一定になるようにスペクトルを積算しており、影響は小さいと考えられる。
- ・ サンプル取得時の代表性：海底土サンプルの代表性は海底土の放射性セシウムの濃度勾配に依存する。この影響があるとする数値のばらつきに影響があると思われるが、今回の比較結果は曳航モニタリングの結果が大きい傾向にあるため主要因ではないと思われる。
- ・ 取得したサンプルの信頼性：コアサンプル取得時の不良が可能性としてはあるが、100 点以上のサンプルデータの多数が不良とは考えにくい。
- ・ 位置の誤差：前述したように、スペクトルを積算している関係から、位置分解能が犠牲となっている。一定の時間での積算に変更する等の改善の余地があると思われる。
- ・ 含水率・密度：含水率・密度は土質によって異なり、相当な影響が考えられる。想定する含水率や密度から外れる場合には、上下に数値がばらつく予想される。
- ・ 海底土中の放射性セシウムの鉛直分布：本手法において、鉛直分布については、取得したサンプルの測定結果を元に地域ごとに換算係数を設定しており、地域ごとの放射性セシウムの分布に関する一定の考慮がされていると考えられる。

上記のように最も改善が見込まれるのは、位置の誤差であり、位置誤差を小さくすることのできる手法について検討を行った。

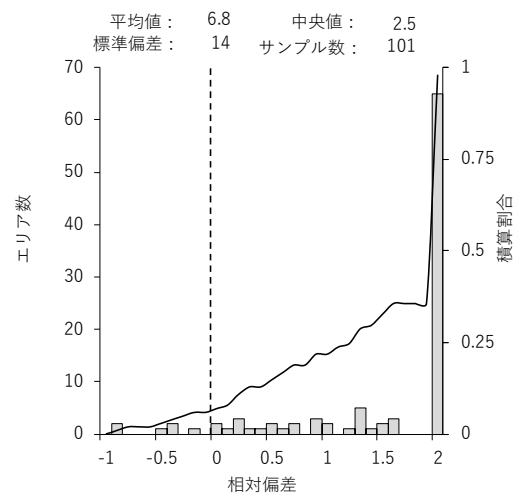
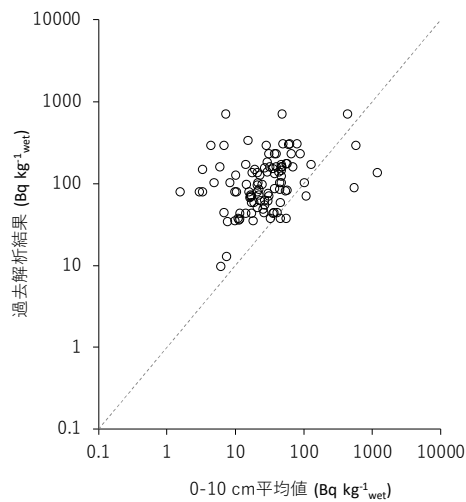
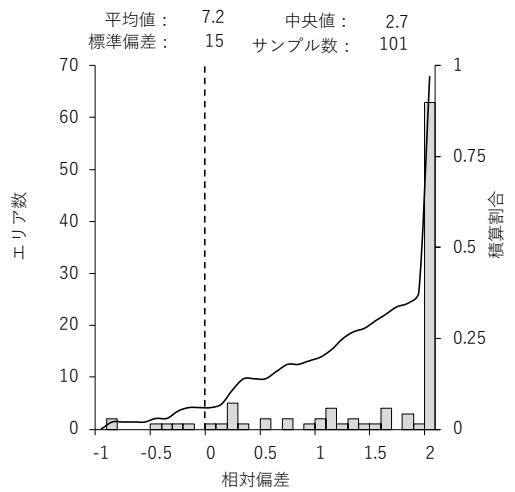
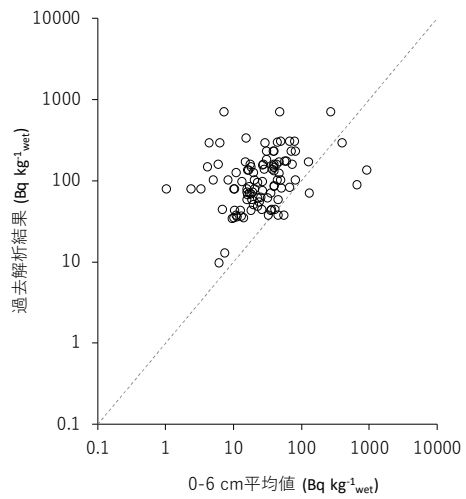
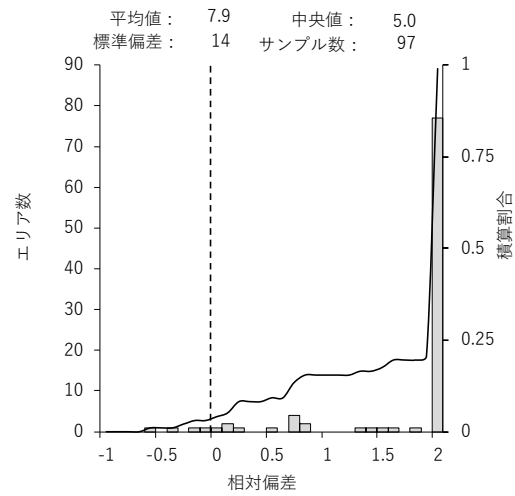
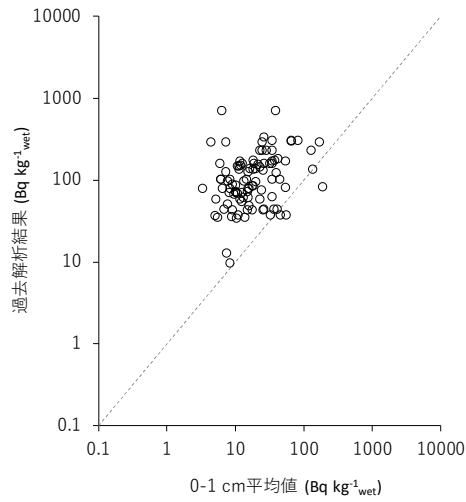


Fig. 6-5 平成 30 年度における曳航式モニタリングと海底土サンプルの比較結果
(報告書¹⁾ から作図)

6.2.2 新たな解析手法の検討

6.2.2.1 MMGC 法

得られた γ 線スペクトルの解析には、USV にも適用した MMGC (Man Made Gross Count) 法を準用した。本方法は天然核種のみを含む地域を測定して得られる γ 線スペクトルについて、放射性セシウムが放出する γ 線を含まない 1,300 から 2,800 keV の計数率と全計数率の比 (BG-index: I_{BG}) が一定であることを前提とする。本方法のメリットは、コベル法による放射性セシウム起源のピーク計数率を求める手法に比べて計数率が稼げることにある。

実際には、検出器ごとに、あらかじめ放射性セシウムによる汚染がない地域の水底を測定して得られたデータを基に I_{BG} を設定する。その後、実際に放射性セシウムが存在する地域で取得した γ 線スペクトルの 1,300 から 2,800 keV の計数率を計算し、計数率と BG-index から天然の放射性核種由来の計数率を減算する。 I_{BG} 算出に用いるスペクトルの ROI (Region of Interest) のイメージを Fig. 6-6 に示す。 I_{BG} については、適当なデータが取得されていなかったため、解析の経験値として 20 を設定した。この数値については、本来、天然の放射性核種しか存在しない場所でのスペクトルを取得する必要がある。今後、さらなる最適化にはデータの取得が望まれる。

天然の放射線の影響を除いた計数率から表層の海底土中の ^{137}Cs 濃度に換算するため、平成 28 年と平成 30 年に 3 箇所福島の福島沖のキャリブレーションエリアにて取得された、曳航式モニタリングデータと同地点で柱状コア採泥器による表層海底土のデータを用いた。海底土は湿潤状態のまま、U8 容器に封入し、実験室で Ge 半導体検出器により定量した。換算係数は、サンプル採取のばらつきの影響を小さくするため、約 1 km エリアで 15 点以上取得し、曳航式モニタリングの測定データ及びサンプルの測定結果を平均化して換算係数 (CD : cps Bq⁻¹ kg_{wet}) を求めた。Fig. 6-7 に散布図として示す。このように、ばらつきが大きいのと、設定されたキャリブレーションエリアの濃度の変動が小さかったため、適当な正相関関係が得られなかった。本来、適切なキャリブレーションデータをもとに CD を定義すべきであるが、ここでは、暫定的な経験値として 2.6 を設定した。本数値についても、今後、精度の良い測定を行い、更新すべきと考える。

これらのパラメータを用いた放射性セシウムの沈着量の算出手順を以下に示す。また、計算式を下に示す。

- 1) 測定で得られた γ 線スペクトルから 1,300~2,800 keV の計数率を計算する。
- 2) C_{BG} に BG-index (I_{BG} : 20) を乗じて天然放射性核種起源の計数率を算出する。
- 3) C_{net} から 2) で求めた計数率を差し引く。
- 4) 2011 年 3 月 15 日時点の ^{137}Cs : ^{134}Cs =1:1 と仮定し、測定日まで物理的半減期による減衰率 (R_{Cs}) を計算する。
- 5) CD (2.6) で除することで ^{137}Cs の濃度 (RC) を算出する。

$$RC = \frac{(C_{net} - C_{BG} \cdot I_{BG}) \times R_{Cs}}{CD}$$

本手法による検出下限値は、天然の放射性核種濃度により変化するが、90%信頼区間 ($\sigma = 2$) で平均 20 Bq kg⁻¹_{wet} と評価できる。

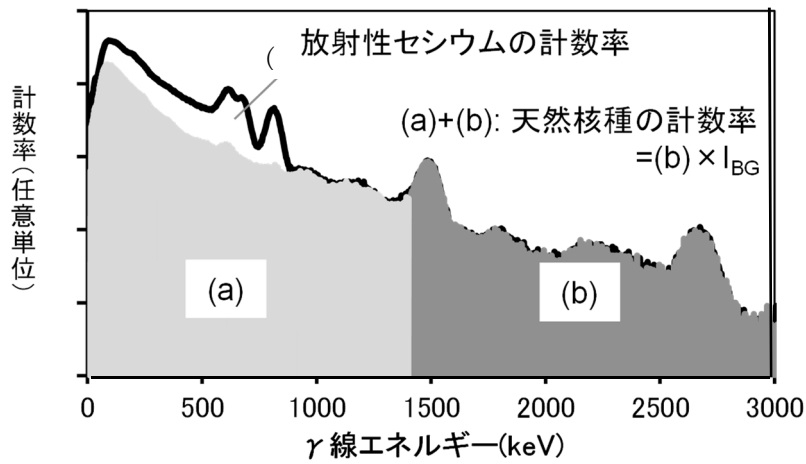


Fig. 6-6 MMGC 法によるスペクトルの分割イメージ (再掲)

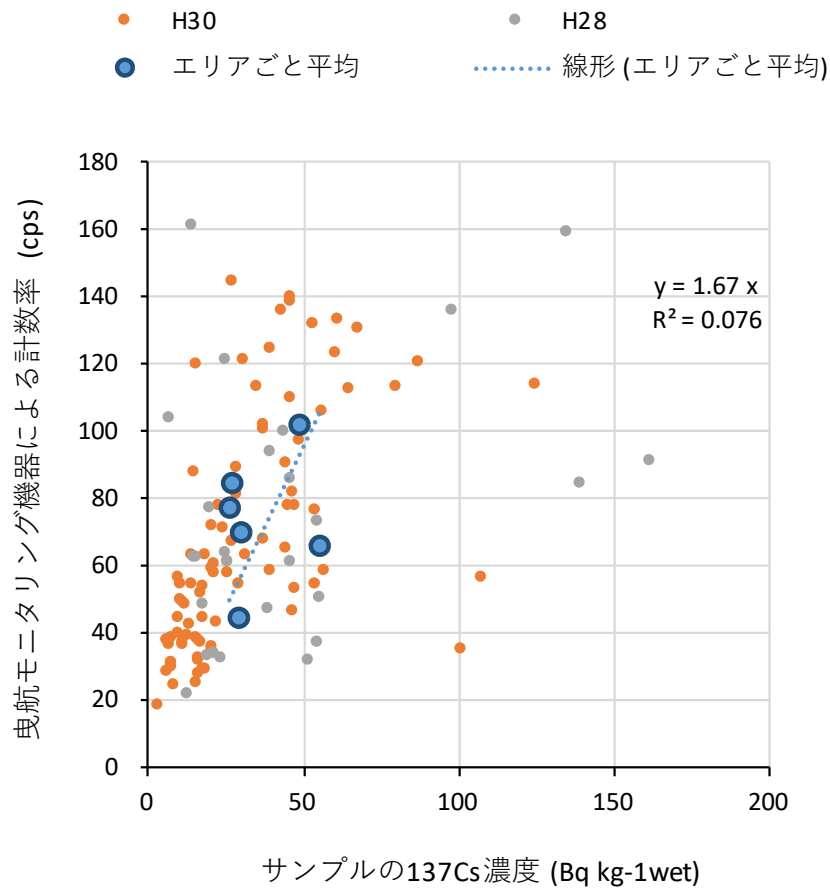


Fig. 6-7 換算係数の決定

6.2.2.2 海底土サンプルとの比較による信頼性評価

MMGC 法による信頼性を評価するため、平成 29 年度と平成 30 年度に曳航調査の測線上で取得した堆積物コア採泥器による表層海底土 10 cm までの平均 ^{137}Cs 湿潤濃度と曳航モニタリングによる換算結果を比較した。データセットは Fig. 6-2 に示したデータである。比較結果を Fig. 6-8 に示す。散布図を見るとばらつきは大きいものの、相関関係にあることが分かる。相対偏差のヒストグラムを見ると、分布の中央値は -0.0153 となり、正規分布に近い分布形状を示した。25 % 及び 75 % の四分位範囲を計算すると、それぞれ -0.39 及び 0.21 と計算できる。すなわち、あらたな曳航モニタリングの解析手法は、50 % の確率でコアサンプリングの結果の -39% から 21% の範囲に入ると評価できる。本評価値は USV の数値と比較して同等である。

全体傾向としては従来の解析結果と比較して曳航モニタリングの結果が海底土サンプルの結果をよく再現できている傾向にあるものの、4 分位範囲を見てもばらつきは大きい。そこで、サンプリング場所による依存性を確認するために、相対偏差値を Fig. 6-9 のようにマップ上にプロットした。マップの背景には露岩域の場所を示している。図のように、傾向的に陸から 15 km 以遠のデータの整合性は比較的よい。一方、陸から 15 km 以内のデータについては、相対偏差 2.0 を超えるデータがあるなど比較的バラツキが大きいことが分かる。特に相対偏差値が 0 より外れる地点については、岩礁と砂質土壌の境界付近のデータが多いように見受けられる。今後、地点ごとにその理由を検証する必要があると考えられるが、地形の凹凸による放射性セシウムの分布のばらつきが曳航モニタリングと海底土サンプルとの不整合に大きく影響していることが示唆される。

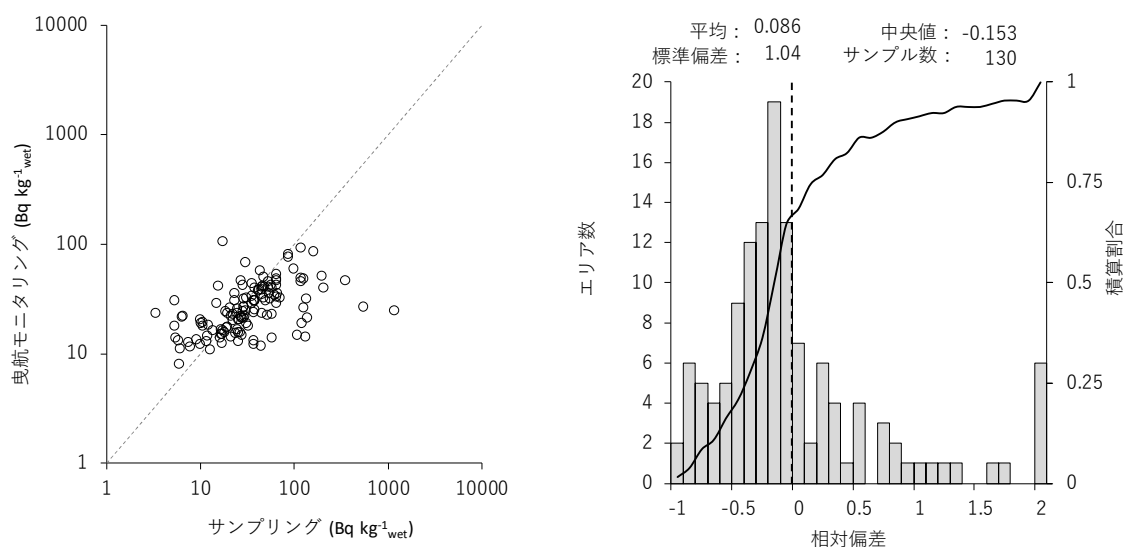


Fig. 6-8 海底土サンプルとの比較

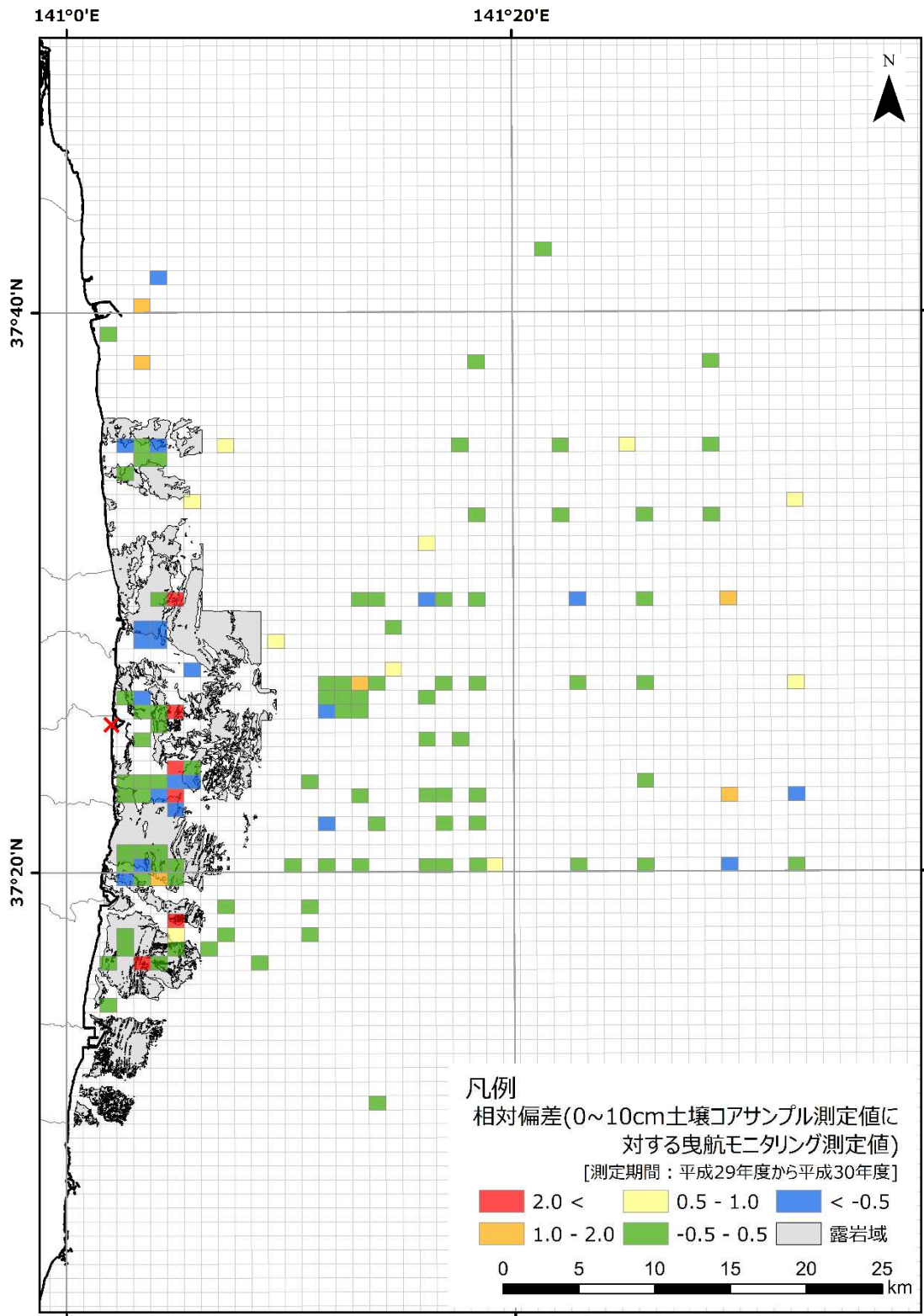


Fig. 6-9 曳航モニタリングの再解析結果に対する土壌コアサンプル測定結果 (0-10cm 平均値) の分布

6.2.3 再解析結果

今年度の各対象エリアにおける曳航モニタリングにより観測された海底堆積物中の放射能濃度分布を Fig. 6-10 に示す。マップは、市販の GIS ソフトウェア (ArcGIS: ESRI 社) により、測定結果を 1 km メッシュで平均化し、コンター図として示した。従来の解析手法は、スペクトルを濃度に応じて積算していたため、濃度が低いところのデータがまばらになっている。MMGC 法によると、データを多く使用できるので、データの欠損箇所が少なくなる。今後、本手法を過去にさかのぼって適用していくことが望ましいと考える。

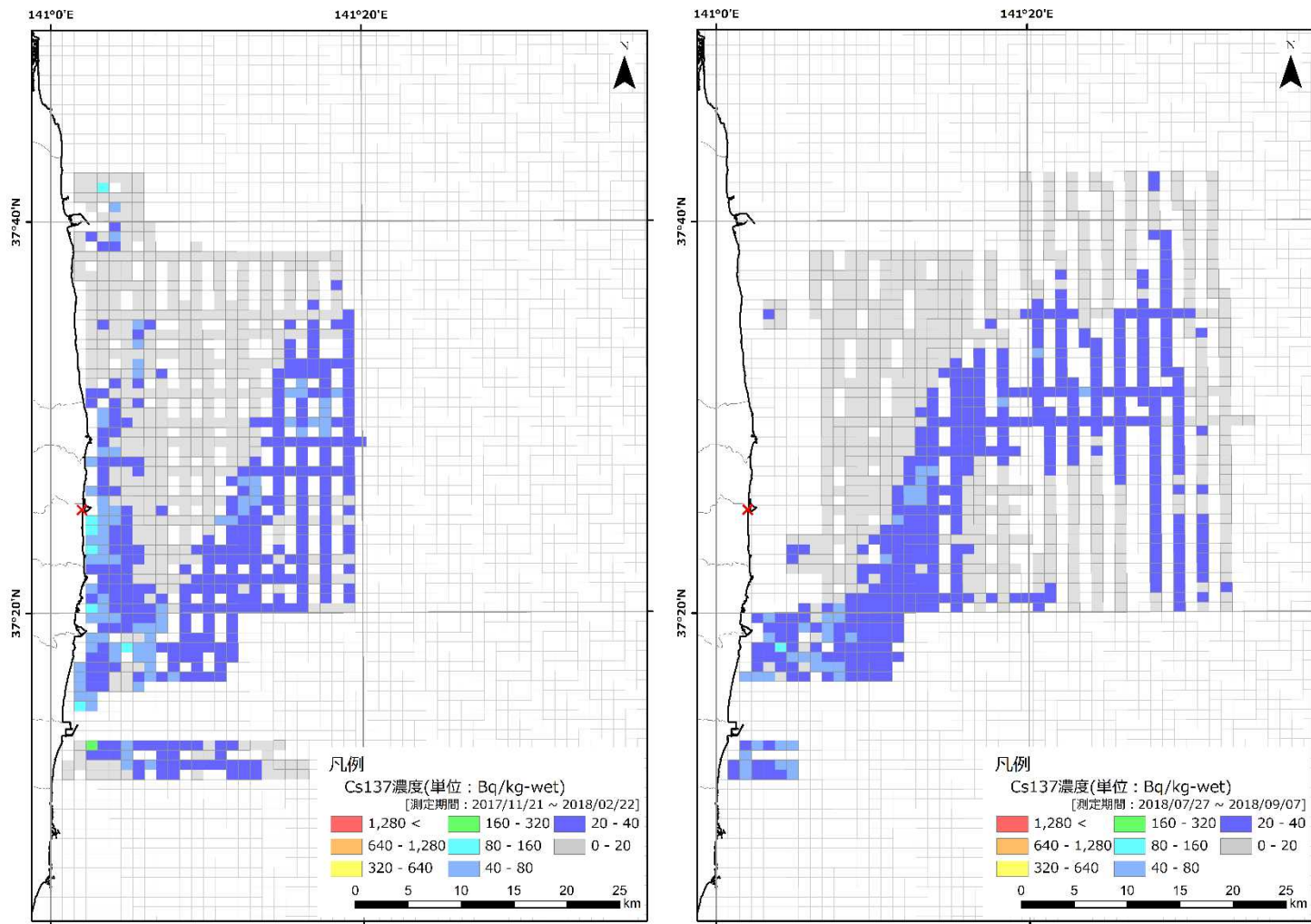


Fig. 6-10 曳航モニタリング再解析結果 ((左) 平成 29 年度, (右) 平成 30 年度)

7 まとめ

今年度の事業の成果について主なものを以下にまとめる。

① 総合モニタリング計画の見直しの提案

- ・ 過去の総合モニタリング計画で定められた海水及び海底土のサンプリング地点で得られた放射性物質の濃度測定結果をとりまとめデータベース化した。
- ・ データベースを元に、各モニタリング地点の濃度やその経年変化を地点ごとに評価した。
- ・ 評価結果を元に、重要度分類を行うための考え方を示した。
- ・ 本内容について年度内に3回の検討会を開催し、専門家の意見を集約し、提言をまとめた。

② 1F 前面海域の海底土の放射性物質分布調査

(1) 海底の地形・海底土分布調査

- ・ 過去の調査において、海底土の放射性セシウム濃度が比較的高いとされていた広野沖の地形及び海底土分布を調査し、可視化した。岸側は岩盤が卓越し、沖側には広い砂質域が分布していることが明らかになった。
- ・ これまでの調査で放射性セシウム濃度が高いとされた地点は岩盤の凹部に認められ、今年度の調査で放射性セシウム濃度が高い地点は、河川前面の地点であることが明らかになった。

(2) 採泥調査

- ・ 過去の調査を参照して設定した代表的な地点において、海底土のコア試料を73地点で採取し、放射性セシウムの濃度の鉛直分布を明らかにした。
- ・ 結果として、濃度や鉛直方向の分布深さは、水深30m以浅の地点において濃度が顕著に高く、深さも深いことが分かった。
- ・ 水深30m以深の地点では、濃度は概ね 50 Bq kg^{-1} 以下で L_{90} は30cm以下であることが分かった。
- ・ これらの測定結果と海底地形の関係を元に、福島沖の海域を4分割し、海域毎に蓄積する放射性セシウムの蓄積量を評価した。
- ・ 評価の結果、窪地や崖地形の濃度は比較的高いものの、インベントリーとしては影響が小さく、面積の広い盆状もしくは直線状の地形部分に多くの放射性セシウムが広く分布していることが明らかとなった。

(3) 海象モニタリング

- ・ 福島沖に流入する河川の中で、最も集水域が広く放射性セシウムの流出量も多いとされている請戸川水系を中心に4地点においてセジメントトラップによる沈降粒子の連続的なサンプリングを実施した。
- ・ サンプルの放射性セシウムの分析結果から、沈降量と放射性セシウムのフラックスに相関関係を見出し、その理由が降水量と関係することを明らかにした。
- ・ 台風前後のサンプル中の放射性セシウム濃度の経時変化から、台風等のイベント時には、比較的短時間(1日程度)に海洋への放射性セシウムの流出が起きていることを明らかにした。
- ・ 鉱物組成、同位体分析、水質の変化及び底面せん断力の評価から、地点ごとに沈降粒子の起源(河川からの供給もしくは再懸濁)について評価した。

(4) 河口域の放射能分布調査

- ・ 無人船を用いた海底土の直接測定により、請戸川、富岡川及び真野川沖の砂質エリアにおける詳細な表層の放射性セシウムの分布状況を可視化した。

- ・ 過去の同様な測定結果と比較し、請戸川及び真野川沖の変化量（実効半減期）を明らかにした。
- ③ 曳航式放射線モニタリングデータの再解析
- ・ 過去に実施された曳航モニタリングデータ（平成 29 年度及び平成 30 年度のデータ）について、MMGC 法を適用し、再解析を行った。
 - ・ 再解析した結果は、同地点で取得した海底土のコアサンプリングの測定結果とよく一致した。
 - ・ 再解析結果については、1 km メッシュの平均放射性セシウムの濃度マップとして可視化した。

参考文献

3 総合モニタリング計画の見直しの提案

1) IAEA (2004) Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, IAEA-TECDOC 422.

4.1 海底地形・海底土分布調査

- 1) Thornton B, Ohnishi S, Ura T, Odano N, Sasaki S, Fujita T, Watanabe T, Nakata K, Ono T, Ambe D (2013) Distribution of local ¹³⁷Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. Mar Poll Bull 74: 344-350.
- 2) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2016) 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)事業成果報告書, 平成 28 年 3 月.
- 3) Tsuruta T, Harada H, Misonou T, Matsuoka T, and Hodotsuka Y (2017) Horizontal and vertical distributions of ¹³⁷Cs in seabed sediments around the river mouth near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Journal of Oceanography, 73, 547-558.
- 4) 長尾郁弥ほか (2019) 福島における放射性セシウムの環境動態研究の現状(平成 30 年度版), 原子力機構研究開発報告書, JAEA-Research 2019-002.
- 5) 独立行政法人海上・港湾・航空技術研究所 (2015) 平成 26 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)事業成果報告書, 平成 27 年 3 月.
- 6) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 30 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>
- 7) (社)海洋調査協会 (2015) 海洋調査技術マニュアル 深淺測量, 平成 27 年 10 月.
- 8) Mii H (1962) Coastal geology of Tanabe Bay. Tohoku Univ. Sci Rep (Geol) 34: 1-93

4.2 採泥調査

- 1) Ootosaka S (2017) Processes affecting long-term changes in ¹³⁷Cs concentration in surface sediments off Fukushima, Journal of Oceanography, 73, 559-570.
- 2) Tsuruta T, Harada H, Misonou T, Matsuoka T, and Hodotsuka Y (2017) Horizontal and vertical distributions of ¹³⁷Cs in seabed sediments around the river mouth near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Journal of Oceanography, 73, 547-558.
- 3) 国土交通省 気象庁 HP,
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=36&block_no=0295&year=2012&month=8&day=&view=p1
- 4) リアルタイムナウファス, 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網,
<https://www.mlitt.go.jp/kowan/nowphas/>
- 5) 青柳和義, 五十嵐敏 (1999) 福島県沿岸域の粒度組成について, 福島水試研究報第 8 号, 69-81.
- 6) 長尾郁弥ほか (2019) 福島における放射性セシウムの環境動態研究の現状(平成 30 年度版),原

子力機構研究開発報告書, JAEA-Research 2019-002.

- 7) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 30 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>
- 8) 原子力規制庁 HP, 東京電力による海底土のモニタリング結果,
https://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/14000/13907/24/280_3_20200107.pdf
- 9) 原子力規制庁 HP, 東京電力による海底土のモニタリング結果,
https://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/14000/13824/24/280_20191119.pdf

4.3 海象モニタリング

- 1) Sakaguchi A, Tanaka K, Iwatani H, Chiga H, Qiaohui fan, Onda Y, Takahashi Y (2015) Size distribution studies of ¹³⁷Cs in river water in the Abukuma Riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity, 139, 379-389.
- 2) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2018) 平成 28 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, 平成 29 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13221/view.html>
- 3) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 30 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>
- 4) 御園生敏治, 鶴田忠彦, 中西貴宏 (2019) 台風時における河川前面の放射性セシウムの挙動把握、日本海洋学会 2019 年度秋季大会講演要旨集, 229.
- 5) Minze Stuiver and Henry A Polach (1977) Reporting of ¹⁴C data, Radiocarbon, 19, 3, 355-363.
- 6) 国土交通省 気象庁 HP,
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=36&block_no=0295&year=2012&month=8&day=&view=p1
- 7) リアルタイムナウファス, 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網,
<https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 8) 国土交通省 気象庁 HP, <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>

4.4 河口域の放射能分布調査

- 1) 眞田幸尚, 高村善英, 卜部嘉, 土田清文, 西澤幸康, 山田勉, 佐藤義治, 平山弘克, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 石橋聖, 佐瀬隆聡, 鈴木元和, 森英治, 米澤重晃, 鳥居建男 (2014) 水底の in-situ 放射線分布測定手法の開発, JAEA-Research 2014-005.
- 2) 眞田幸尚, 宮本堅治, 越智康太郎, 松崎康治, 小川年弘, 千賀康弘 (2018) USV を用いた海底の放射能分布測定システムの開発-福島沿岸域での海底放射性物質濃度の経年変化傾向の測定例-, 海洋理工学会誌, 2, 9-18.
- 3) 千賀康弘, 鈴木隆生, 植松光夫 (2003) 無人海洋大気観測艇「かんちゃん」の開発と海洋観測, 月刊海洋, 36, 129-137.
- 4) IAEA (2003) Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-

5.1 海底土中の放射性セシウム分布と海底地形の関連について

- 1) Sakuma K, Nakanishi T, Yoshimura K, Kurikami H, Nanba K, Zheleznyak M (2019) A modeling approach to estimate the ¹³⁷Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017., J. Environ. Radioact., 208-209, 106041.
- 2) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 30 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>
- 3) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 30 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>
- 4) Kusakabe M, Oikawa S, Takata H, Misonoo J (2013) Spatiotemporal distributions of Fukushima-derived radionuclides in nearby marine surface sediments. Biogeosci 10, 5019-5030.
- 5) Otsuka S, Kato Y (2014) Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories. Environ Sci Process 16, 978-990.
- 6) Black EE, Buesseler KO (2014) Spatial variability and the fate of cesium in coastal sediments near Fukushima, Japan. Biogeosci 11, 5123-5137.
- 7) Kusakabe M, Inatomi N, Takata H, Ikenoue T (2017) Decline in radiocesium in seafloor sediments off Fukushima and nearby prefectures, Journal of Oceanography, 73, 529-545.

5.2 河川から供給される放射性セシウムの影響について

- 1) Olivier Evrard O, Caroline Chartin, Yuichi Onda, Jeremy Patin, Hugo Lepage, Irène Lefeuvre, Sophie Ayrault Catherine Otle and Philippe Bonte (2013) Evolution of radioactive dose rates in fresh sediment deposits along coastal rivers draining Fukushima contamination plume, Scientific Reports, 1-6.
- 2) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 30 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14548/view.html>
- 3) 八木宏, 杉松宏一, 小口哲史, 川俣茂, 中山哲巖, 磯崎由行 (2015) 常磐いわき沖海域における底面せん断力の特徴と底質濁質輸送について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71, 2, I_391-I_396.
- 4) Richard Soulsby, Dynamics of Marine Sands (1997) A Manual for Practical Applications, Thomas Telford Publications London, 249.
- 5) 日本海洋学会, 海洋観測ガイドライン全十巻-第4版-(2018) G301-JP25, http://kaiyogakkai.jp/jos/guide_line/jp/Vol1_10JP20180801protected.pdf
- 6) 和田英太郎 (1986) 生物関連分野における同位体効果-生物界における安定同位体分布の変動-, Radioisotopes, 35, 136-146.
- 7) John R Ertel and John I Hedges (1984) The lignin component of humic substances: Distribution among soil and sedimentary humic, fulvic, and base-insoluble fractions, Geochimica et

Cosmochimica Acta, 48, 10, 2065–2074.

6 曳航式モニタリングの再解析

- 1) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 (2019) 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, 平成 31 年 3 月, <https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14752/view.html>