

海底土中に分布する ^{137}Cs 濃度の測定結果 —分布状況とその経時変化—

鎌田 創*, 大西 世紀*, 浅見 光史*

Measurement of concentration of ^{137}Cs in seafloor sediments off Fukushima —Distribution and temporal change of concentration in seafloor sediments—

by

So KAMADA, Seiki OHNISHI, and Mitsufumi ASAMI

Abstract

Radiocesium concentration in seafloor sediments off Fukushima has been monitored over 3 years from FY2013 to FY2015. A towed gamma-ray spectrometer that can measure continuously was utilized to map the distribution of radiocesium concentration in seafloor sediments. A measurement totaling over 2,400 km (about 800 km from October 2013 to December 2013, about 980 km from November 2014 to February 2015, about 600 km from October 2015 to December 2015) was carried out. An average concentration of ^{137}Cs in the survey area in FY2015 was 45 Bq/kg-wet, which was reduced by about 40% compared to the average of 76 Bq/kg-wet over the area in FY2013. ^{137}Cs accumulated with a relatively high concentration was observed close to the Fukushima Daiichi Power Plant. Especially, in the survey conducted in December, 2013 in the survey line of 6 km east from the plant, a point where ^{137}Cs was deposited at a high concentration was found at the bottom of a cliff with a depth of 8 m. In the survey conducted in November in FY2014, the average concentration has decreased to 20% of FY2013. The ^{137}Cs concentration decreases in 10 km east from the nuclear power plant, while the area far than 20 km east of 1F, ^{137}Cs accumulates in relatively high concentration of several hundred Bq/kg-wet or more, because a silt band continuing southwest from Miyagi prefecture exists, and the collected soil sample was silt with a water content of 16% to 31%.

* 海洋リスク評価系

原稿受付 平成30年8月1日

審査日 平成30年12月27日

目 次

1. まえがき	20
2. 調査方法	20
2.1 福島第一原子力発電所近傍海域における放射能調査方法	20
2.2 曳航型ガンマ線スペクトロメータを用いた放射能測定	24
2.3 採泥調査と分析	25
3. 調査実施と測定結果	25
3.1 海底地形調査	25
3.2 採泥調査	26
3.3 曳航調査	29
4. まとめ	32
参考文献	33

1. まえがき

東日本大震災に伴って発生した東京電力福島第一原子力発電所（以下，1F）事故によって大量の放射性物質が大气および海洋へと放出された．東京電力によると，海洋への放出量（推定値）は， ^{137}Cs で $3.6 \times 10^{15} \text{ Bq}^{1)}$ ， ^{134}Cs で $3.5 \times 10^{15} \text{ Bq}^{12)}$ であった．周辺住民への被ばく線量の把握と今後予想される被ばく線量の推定，住民への被ばく線量の低減のための除染計画の立案，中長期的な環境影響評価等を考慮するには，中長期的なモニタリングが重要である．事故以降，総合モニタリング計画が策定され，様々な研究機関が陸域，海域のモニタリングに参加してきた．海域のモニタリングでは，採泥・採水によって採取したサンプルの放射能分析を広範囲にわたって実施してきた^{3,4,5)}．これまでのサンプリングによる分析では地理的に離散的な情報のみ得られることになるため，1F 近傍海域の分布状況の詳細が把握しにくいことが課題であった．そこで，海上技術安全研究所（以下，海技研）は，海域における放射性物質の連続的な分布状況を把握するため，東京大学生産技術研究所（以下，東大生研）が開発した曳航型ガンマ線スペクトロメータ⁶⁾を活用することで，1F 近傍海域における海底土中の放射性セシウムの連続測定調査を実施した．本稿では，平成 25 年度から平成 27 年度までの 1F 近傍海域における放射性セシウムの分布状況ならびにその経時変化について報告する．

2. 調査方法

2.1 福島第一原子力発電所近傍海域における放射能調査方法

1F 近傍南北 50 km，東西 20 km の海域において放射能調査を実施した．本研究では，曳航型ガンマ線スペクトロメータを用いた測定（次節参照，以下，曳航調査）と，コアサンプラーを用いた採泥の二種類の調査を実施した．図 1 は，1F 近傍海域の海図に曳航調査測線と採泥地点を併せて示したものである．平成 25 年度から平成 27 年度の 3 年間で，曳航調査測線はそれぞれ，800 km，980 km，600 km とし，採泥地点数は，42 点，83 点，83 点と設定した．調査海域は沖合と沿岸域に分けられ，沖合調査では，400 トン級の調査船，沿岸域調査では，20 トン未満の漁船を使用した．図 2 は曳航調査の概念を示しており，曳航体を船尾から水中へ投入し，海底と接触させながらワイヤで引きずることで海底土中の放射性物質から発生するガンマ線を測定する．

調査船の航行速度は，放射線検出器の検出効率を考えると遅い方が望ましいが，遅い速度で針路を一定に保ちながら航行させることが海流の影響から難しいこと，また曳航速度を遅くすると 1 日あたりの測定距離が短くなることから，2 ノット（約 1.0 m/s）とした．測定時の曳航体の位置は，船舶に装備してある衛星測位システム（GPS）の緯度・経度，水深，船速，ワイヤ長の情報から導出した．

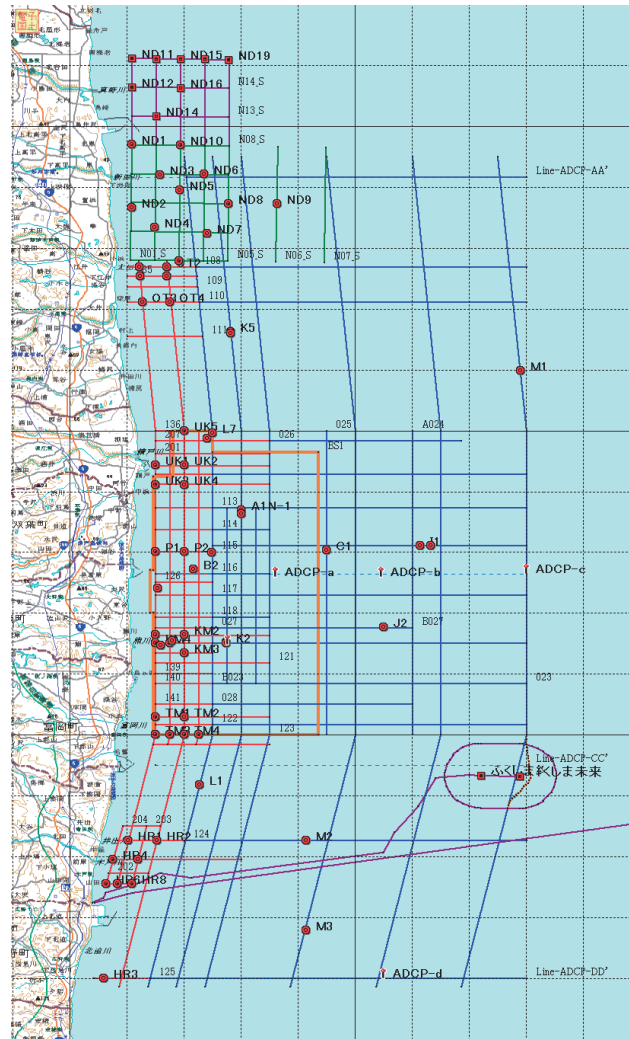


図1 平成26年度における調査海域 赤い線が小型漁船を使用した調査測線、青い線が大型調査船を使用した調査測線を示す。赤い点は採泥点を示す。紫で示した線は、海底ケーブルを示す。

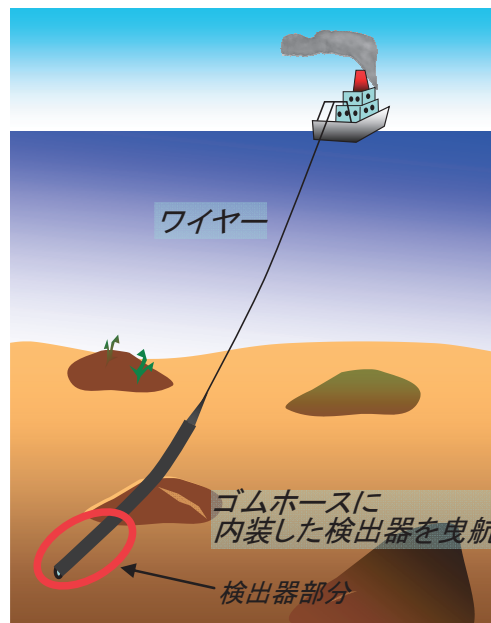


図2 曳航型ガンマ線スペクトロメータを用いた計測概念^{5,8-10)}

調査に先立って、曳航調査を安全に実施するには、海底地形と底質の情報を得ておくことが非常に重要である。1F 近傍海域の海底地形調査には、400 トンクラスの調査船と、20 トン未満の漁船を使用した。調査船による調査を、平成 25 年度、26 年度で 2 回実施した。図 3 は、海底地形・土質調査を実施した測線と採泥点を示したものであり、図中の数字及び英文字を○で囲ったものは測線番号である。測線①～⑥までの総延長は 670 km であり、測線範囲 A～H では、合計 34 km²の面的な海底地形及び土質データを取得した。平成 26 年度は、図 4 に示す範囲（東西約 8.6 km、南北約 17 km）について面的に測定した。海底地形調査には、調査船の舷に装備したマルチビーム音響測深器（KONGSBERG 製 EM2040）を用いて地形データを取得した。周波数は 400 kHz で動作させ、もっとも水深が深くなる測線だけ 300 kHz とした。調査中の船速は 6 ノット（約 3.1 m/s）、スワス角度は片舷 50 度から 60 度とした。調査中 1 日に 1 回以上、水温・塩分・深度計（CTD）、投下式水温・水深計（XBT）観測を行い、得られた音速プロファイルをマルチビーム音響測深器に入力し、音速度を補正した。また、マルチビーム音響測深器の送受波器面のリアルタイムの音速度を機器に入力し、表面音速度を補正した。

土質調査については、大型調査船に舷側装備したマルチビーム音響測深機（EM2040）を用いて、後方散乱強度データを取得した。海底地形調査と同時に実施したので、設定や測線については海底地形調査と同一である。マルチビーム音響測深器のデータを取得した後、測線④上の 6 点においてスミスマッキンタイヤ採泥器を用いて底質試料を採取した。マルチビーム音響測深器の反射強度のデータから採泥地点を決定した。採取した底質を写真撮影し、目視及び手で触り観察することで底質を判別した。取得したデータは、気象庁所管の小名浜検潮所のデータを用いて潮位補正した。その後、フィルター処理・ノイズ除去を施し、グリッドデータを作成した。グリッドデータのメッシュサイズは、測線①～⑥は 2 m、面的な測定範囲 1 m とした。グリッドデータより海底地形図と反射強度の分布図を作成した。

小型漁船による海底地形及び土質の調査は、サイドスキャンソナーと単素子音響測深器を用いて、海底面探査と深淺測量をそれぞれ実施した。海底地形の調査は、大型調査船で実施できなかった箇所を中心に、予定していた放射能曳航調査測線に沿って実施した。実施方法は、音響測深器の送受波器を調査船舷側に取付け、また、サイドスキャンソナー（KLEIN 社製 SYSTEM3000）を船尾より曳航し、測線上を走行して連続的にデータを取得した。調査船への機器の装備（艀装）が完了した後は、テストランを行い機器の動作状況を確認した。測量時の航走速度は 3～6 ノット（約 1.5 m/s から 3.1 m/s）とし、取得データの状況、周囲の航行船舶の状況等に応じて適宜調整した。

取得したデータについては、トラッキングエラーの修正、曳航高度の変化による画像歪みの斜距離補正、調査船の蛇行による画像歪みの幾何補正等を施すとともに、各測線毎の画像のゲイン調整をし、隣接する画像同士の色ムラを無くし、各測線毎の画像を一つの画像に合成しモザイク画像として整理した。なお、深淺測量の潮位改正に使用する潮位データは、気象庁所管の「相馬」検潮所のデータを使用し、海水の音速度をバーチェック法により補正した。

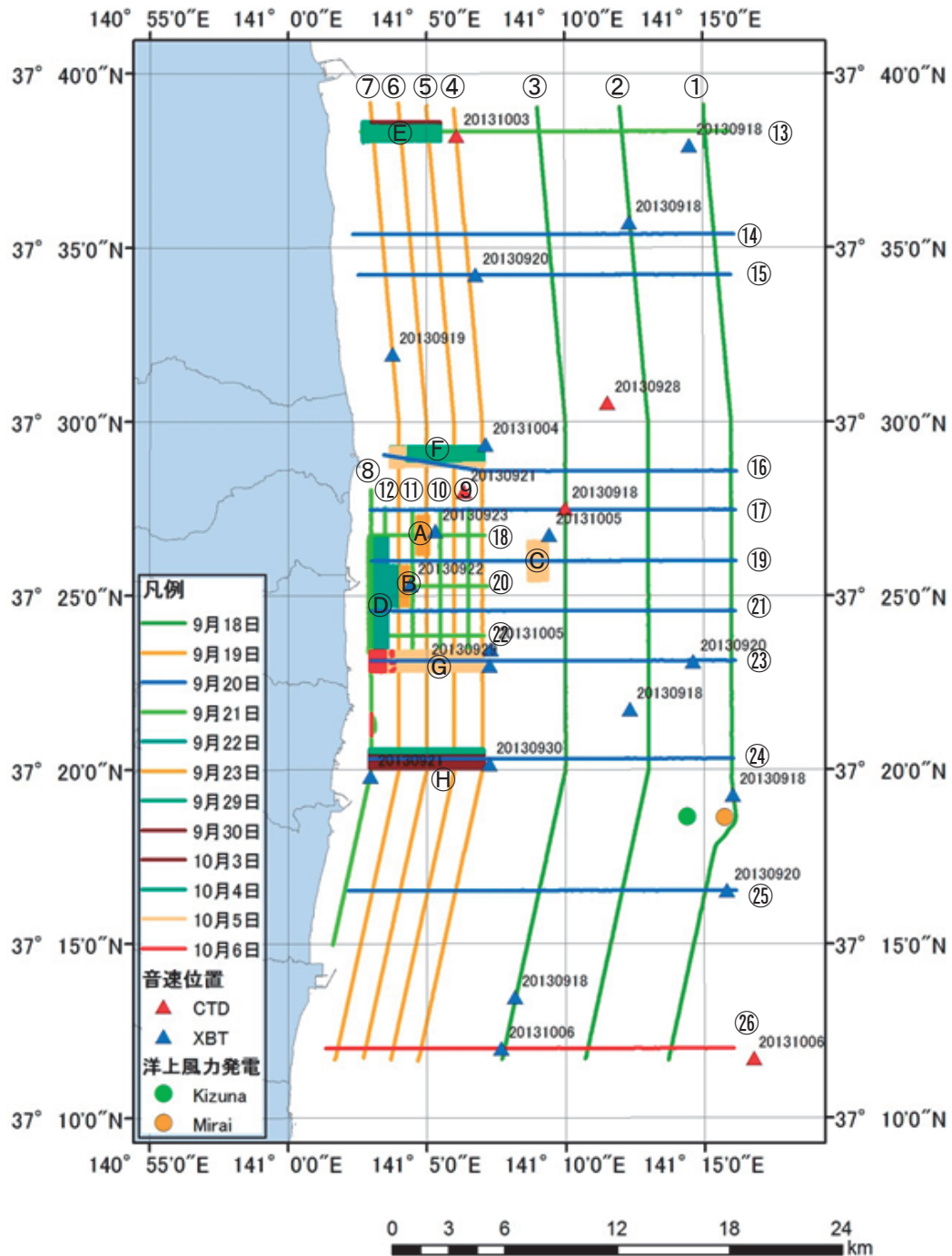


図3 海底地形・土質調査測線（平成25年度）図中の数字及び英文字を○で囲ったものは測線番号である。測線①～②⑥までの総延長は670 kmである。測線の色を調査実施日で分けてある。測線範囲A～Hでは、合計34 km²の面的な海底地形及び土質データを取得した。赤い三角印は水温・塩分・深度計（CTD）実施点を示しており、青い三角印は投下式水温・水深計（XBT）観測を実施した点を示している。

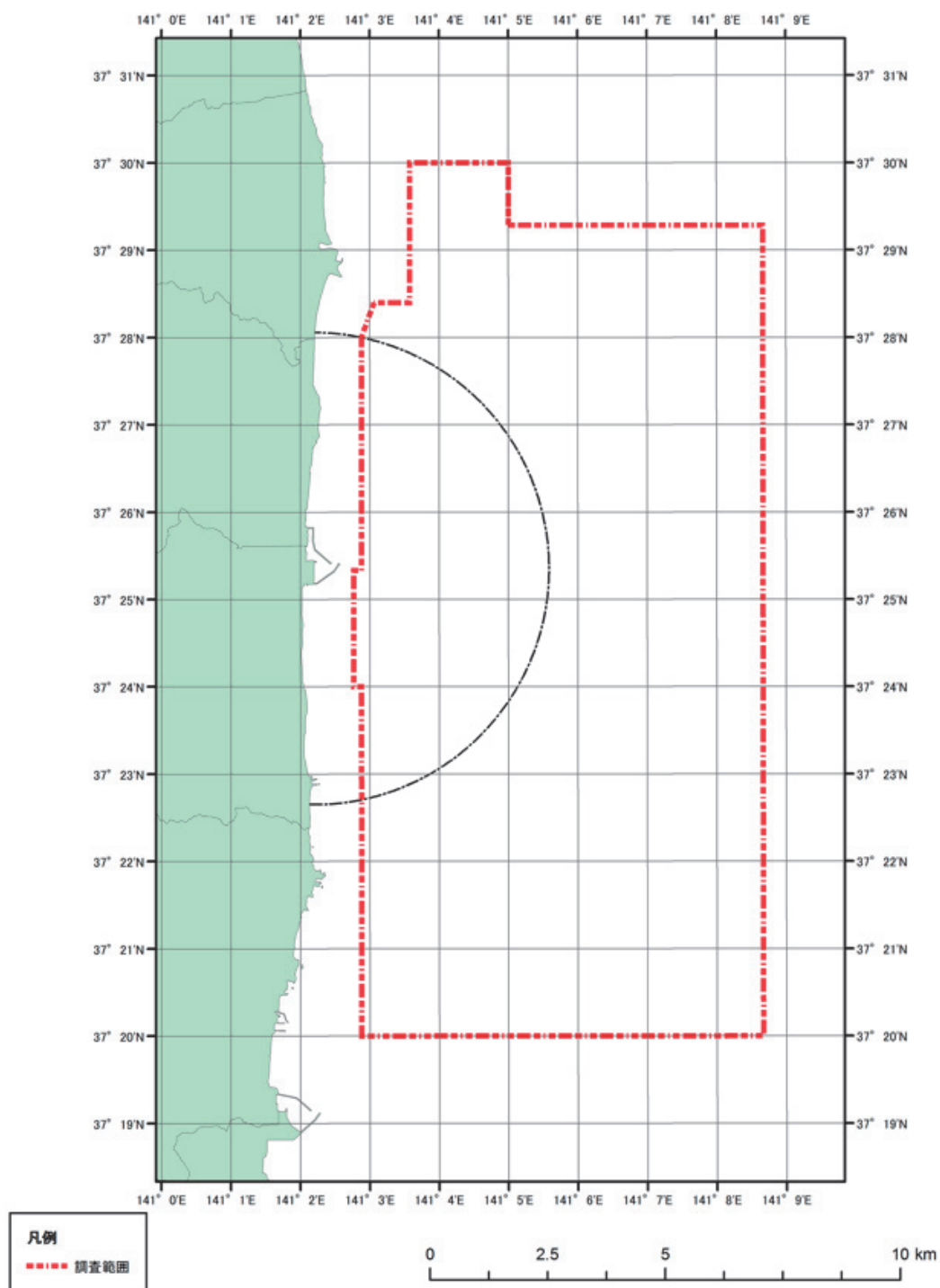


図4 海底地形・土質調査を実施した領域 (平成26年度) 破線で囲った領域全体にわたって、サイドスキャンソナーを実施した。

2.2 曳航型ガンマ線スペクトロメータを用いた放射能測定

曳航型ガンマ線スペクトロメータは、ガンマ線検出器、光電子増倍管 (PMT)、データロガーをアルミニウム合金製の水密・耐圧容器に封入したものであり、直径 15 cm、長さ 8 m のゴムホースで覆ったものである。PMT とデータロガーへの給電には、リチウムイオンバッテリーを用いた。曳航体を覆うゴムホースは、航行時の曳航

体への衝撃から保護する目的で用いており、さらに曳航体全体からガンマ線検出器への振動や衝撃を緩衝するためにゴム製のリングを装備させている。また、確実に曳航体を着底させるために、錘4つをゴムホース内に分散して配置し、乾燥重量135 kg、水中質量115 kgとなるようにした。また、船と曳航体を繋ぐワイヤの長さを、水深の3倍程度とした。ガンマ線検出器は、結晶寸法直径7.6 cm、長さ7.6 cmの円筒形のNaI(Tl)シンチレータにPMTを結合させたものである。放射線がシンチレータ結晶に入射して発生するシンチレーション光をPMTによって増倍し、後段のアナログ・ディジタル変換器(ADC)へ電圧パルスとして入力し、その後マルチチャネルアナライザ(MCA)によってディジタル信号の大小順に並べ替えてガンマ線波高スペクトルを得る。データ収集は1秒に1回波高情報を収集する形式とした。ただし、1秒間だけの測定では十分な統計精度を得ることができないので、一定時間の測定結果を平均化処理する必要がある。平均化処理にあたっては、平均化処理後の ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の光電ピークカウントの統計誤差が5%以下になるように処理を行った。このため、2ノット（約1.0 m/s）で曳航している場合に5%以下の統計精度とするためには、海底土中の ^{137}Cs の濃度が1,000 Bq/kg-wetの場合、約8 m程度の平均化処理が必要となり、これが曳航式ガンマ線スペクトロメータの曳航測線上での空間分解能となる。

この測定から得られるガンマ線波高スペクトルの情報は、放射線検出器に入射する放射線のエネルギー情報と、検出器での計数率情報である。 ^{137}Cs 起因の0.662 MeVに相当するピークが測定されているため、ピーク計数率を求め、計数率情報を放射能に換算した。換算係数は、検出器からの応答関数（放射能あたりの検出器係数率のエネルギー依存性）をあらかじめ評価して、採泥調査から得られた海底土の放射能深度分布と併せることで導出する。なお、計数率・放射能換算係数を求める手法の詳細、シミュレーションとその検証、誤差評価は、本特集号の大西の解説ならびに論文⁷⁾を参照されたい。

2.3 採泥調査と分析

曳航調査では、検出器の計数率のみ得られるので、前節でも述べたとおり放射能濃度へ換算するためには、海底土を直接採泥、放射能分析によって放射能濃度鉛直分布を導出し、あらかじめモンテカルロシミュレーションで求めておいた検出器の応答関数とのたたみ込みによって換算係数を求める必要がある。従って、2.1節に示したように1F近傍において調査点を設定し採泥を実施した。本研究で実施した採泥調査地点は、図1に赤丸印が記載されている地点である。本研究では、マルチプルコアラーを用いた柱状採泥を実施し、柱状採泥した試料は、海底面表層からの深さの0～2 cmまで1 cmピッチ、2～6 cmまで2 cmピッチ、6～14 cmまで4 cmピッチ、14 cm以深は6 cmピッチでカットし分取した。分取する際に、目視等により、泥色、臭気、底質、性状及び混入物の有無を記録した。また、採泥器を下ろす場所に船のGPSの位置を合わせ、できる限り船体を静止させて採泥した。

採泥した底質試料について、放射能濃度分析、含水率分析に加え、粒径分布分析を実施した。粒度分布の測定には、試料量の制限のため、レーザー回折法を適用し、分析器にはHORIBA LA-950を用いた。本調査では、分析値の代表値として、海底面から深さ3 cmまでの平均値を採用した。採泥調査では得られた底質試料を2～4 cmの層で切っているが、2～3 cm、3～4 cmの層に分けた場合均一化されていると仮定して平均値を算出した。

3. 調査実施と測定結果

3.1 海底地形調査

1F近傍の平成25年度（2013年12月）、26年度（2014年8～9月）の海底地形調査の結果を図5、6に示す。それぞれの図では水深を色で表した。深くなるに連れて青くなるように示してあり、各図の凡例に深度と色の対応を示してある。図5の測線については、図3で示しており、図6の測定領域を図4で示してある。図6については、1F前面東西10 kmの範囲まではおよそ水深30 mであり、南東方向に深くなっている。また、平成25年度、26年度の反射強度データを図7、8に示した。反射強度と採泥底質試料の目視確認を併せることによって、反射強度の強い箇所は、礫、粗砂であり、弱い箇所は細砂から泥であり、最弱の箇所が泥質であることがわかった。また、図9に図6における領域②の詳細な調査結果を示すが、1F近傍においては、数mの崖が存在していることがわかる。また、図3で示した測線15の沿岸域の断面図を図10に示す。このデータから沿岸域は海底の起伏が激しく、高度差数mの谷間が連続しているのがわかる。また、その他の測線においても概ね沿岸域の地形は同

様の特徴がある。このような地形において、沖合から岸に向かって曳航体を曳航することにより、曳航体の岩礁への引っ掛かりを防止し、安全な曳航調査を行うことができた。

3.2 採泥調査

採泥調査で得られた底質試料を 2.3 節で説明した分析を実施した結果を図 11 に示す。1F 近傍に比較的高い濃度で ^{137}Cs が堆積している点が多い傾向にある。この海域では、含水率と海底表層堆積物中の放射性セシウム濃度は正の相関があることがわかっている⁸⁻¹⁰⁾。また図 12 に、海域毎の表層 3 cm までの平均中央粒径と ^{137}Cs 平均濃度の相関を示す。縦軸が ^{137}Cs 濃度 Bq/kg-wet、横軸が試料の中央粒径 μm で示してある。赤いプロットが沖合の底質試料、青いプロットが新田川河口沖の底質試料、緑のプロットが沿岸域の試料を示している。粒径が小さい泥質状の海底土に高濃度の ^{137}Cs が検出される傾向にあることがわかった。

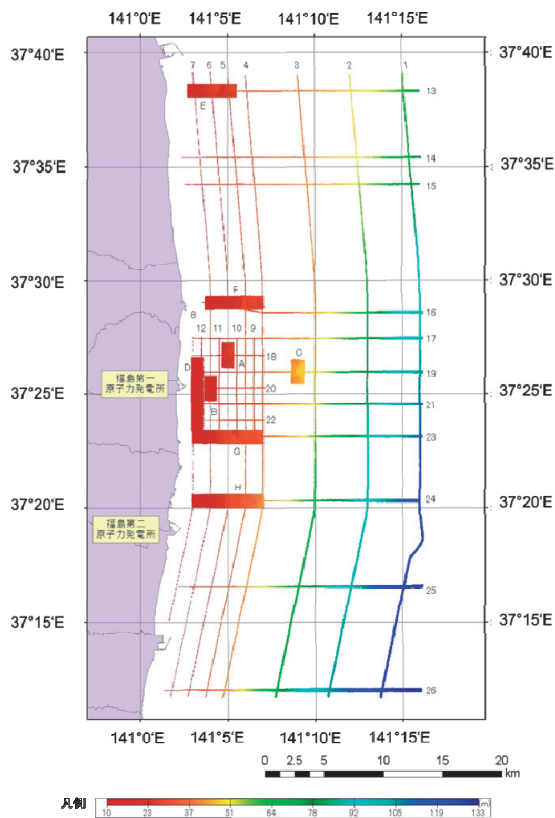


図 5 図 3 で示した海底地形調査の結果（線の計測）
図下側の色スケールは水深を示す。

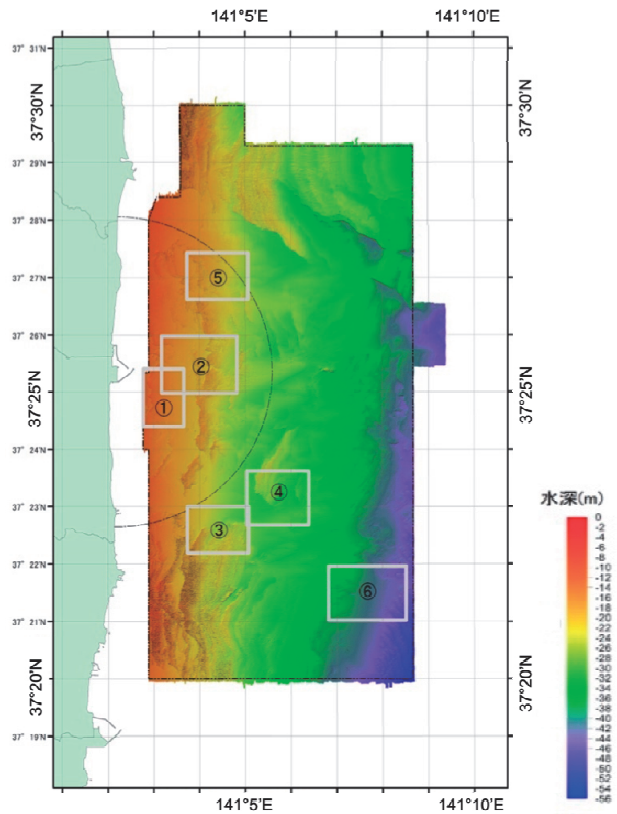


図 6 図 4 で示した海底地形調査の結果（面的測定）
丸で囲った領域は詳細測定を実施した箇所。図右の色スケールは水深を示す。

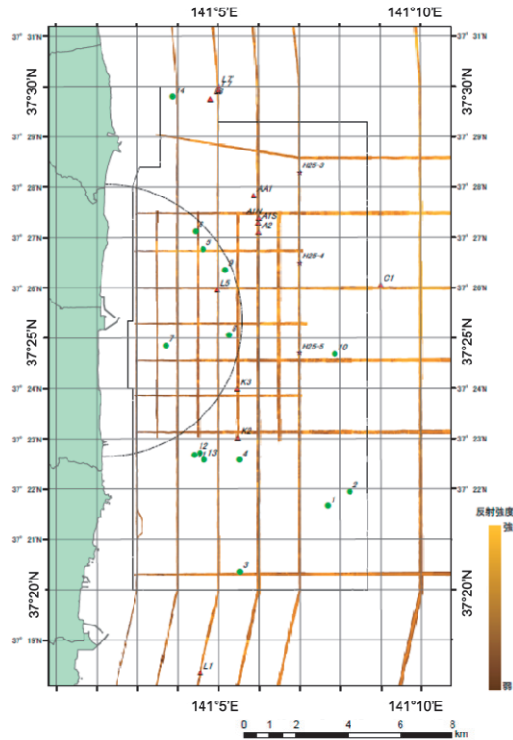


図7 図3で示した1F近傍海域での反射強度，三角印は採泥箇所で放射能分析を実施，丸印は泥質分析を実施

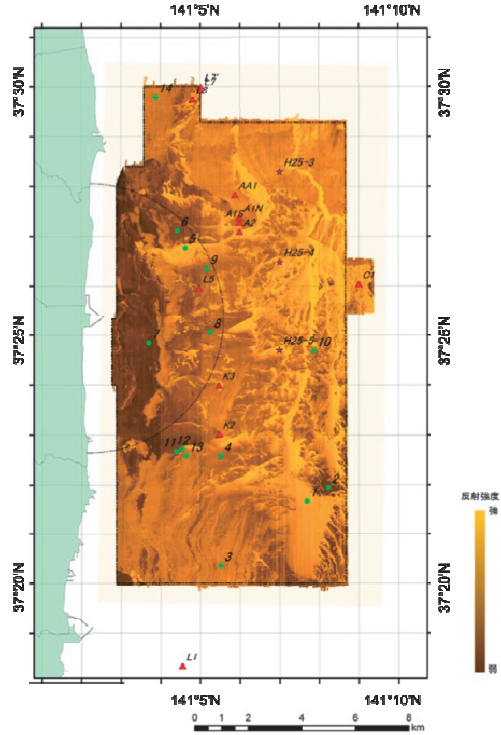


図8 図4で示した1F近傍反射強度図，三角印は採泥箇所で放射能分析を実施，丸印は採泥資料で目視確認を実施。

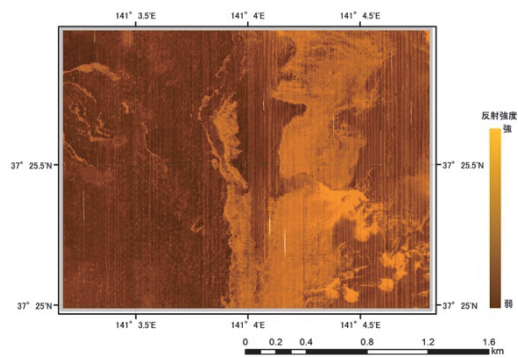
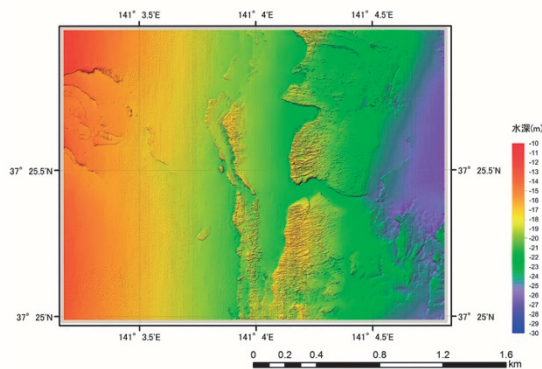


図9 図6における詳細範囲②の海底地形(左)および左の図に底質調査結果を重畳させた結果(右) 窪地に泥質の土が分布しやすいことがわかる。左の図の色スケールが水深を示し、右の図の色の濃淡スケールが反射強度を示している。本文に説明の通り、反射強度が弱い箇所が泥質、反射強度が強い箇所が砂礫となる傾向にある。

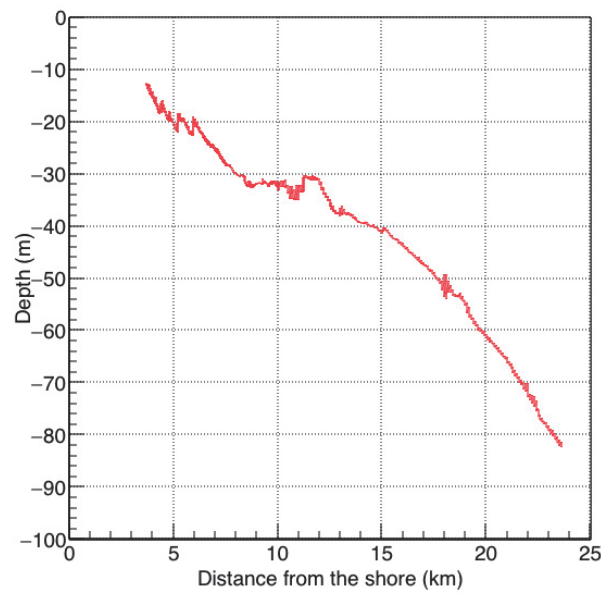


図 10 図 3 における測線 15 の水深断面図、縦軸：水深(m)、横軸：海岸からの距離 (km)

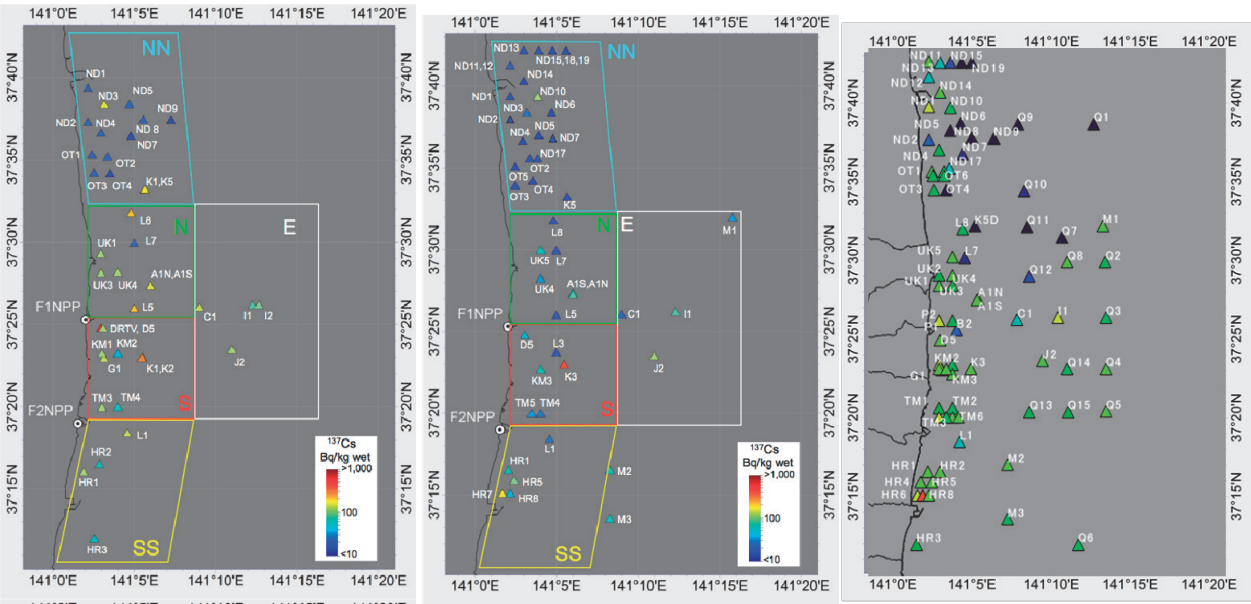


図 11 採泥調査による分析結果，色は海底面表層から深さ 3 cm までの¹³⁷Csの放射能濃度 (Bq/kg-wet)
左から平成 25 年度 (2013 年 10-12 月)、平成 26 年度 (2014 年 11 月-2015 年 2 月)、平成 27 年度 (2015 年 10—12 月) の結果

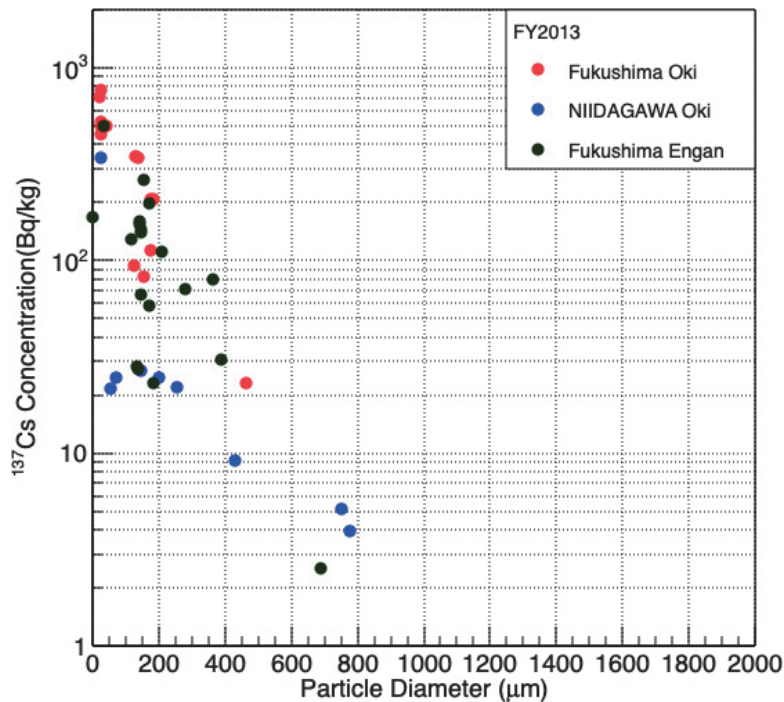


図 12 2013 年 10—12 月に採泥した底質の 0-3 cm までの平均中央粒径と ^{137}Cs 平均濃度の相関

3.3 曳航調査

平成 25 年度から平成 27 年度の調査結果⁸⁻¹⁰⁾を図 13 に示す。図には、 ^{137}Cs 濃度 (Bq/kg-wet : 湿土重量あたりの Bq) を海底表層から深さ 3 cm までの平均値で示してある。分布の特徴として、1F 近傍に比較的高い放射能濃度で分布する傾向にあり、1F から東方 10 km 程度まで離れると濃度が低くなる傾向にある。さらに 1F から東方 20 km 以遠からは、濃度が高く (平成 25 年度調査で数 100 Bq/kg-wet 程度) 分布する傾向にある。これは、宮城県沖から南茨城県沖に分布する泥質帯が、福島県沖の北東から南西にかけて存在する¹¹⁾ことと関係があると推察される。今回実施した採泥調査の分析結果を見ても、16%から 31%の含水率を持つ泥質であることがわかる。一方、堆積物中に含まれる放射性セシウムの濃度は、砂質、岩が分布する海域において低い傾向にあることも、曳航調査およびそれと並行して実施した採泥調査の分析結果からわかった⁸⁻¹⁰⁾。

1F 近傍の沖合 4 km, 6 km の南北に走る測線の測定結果を図 14, 15 に示す。沖合 4 km の測線では、相対的に高濃度で ^{137}Cs が狭い範囲で分布する箇所が 20 箇所程度 (平成 25 年度の調査では 1,000 Bq/kg-wet 程度) 観測され、沖合 6 km の測線では、段差 8 m の窪地に比較的高濃度 (平成 25 年度の調査で最大 2,000 Bq/kg-wet) で ^{137}Cs が堆積していることがわかった。これらから、 ^{137}Cs の濃度は海底地形と明確な相関があり、段差の底には ^{137}Cs が比較的高い濃度で分布することがわかった。堆積状況を重ね合わせた様子を図 16 に示す。海底の高低差 8 m の崖下部分に ^{137}Cs が堆積する様子を明確に捉えたことを示している。また、平成 25 年度と比較して、平成 26 年度の濃度は 20%程度に減少したが、全体と比較して、相対的に高濃度で堆積している傾向は変化しなかった。また、沖合 4 km の南北の測線についても図 18 に示すように相対的に ^{137}Cs が高濃度で堆積している傾向は変化せず、全体の濃度は低下している様子が観察できた。

また、全体の測線について平均を取ったところ、平成 25 年度: 76 ± 21 Bq/kg-wet, 平成 26 年度: 43 ± 12 Bq/kg-wet, 平成 27 年度: 45 ± 12 Bq/kg-wet であった。このことから、全体として、3 年間で 41%減少していることがわかった。

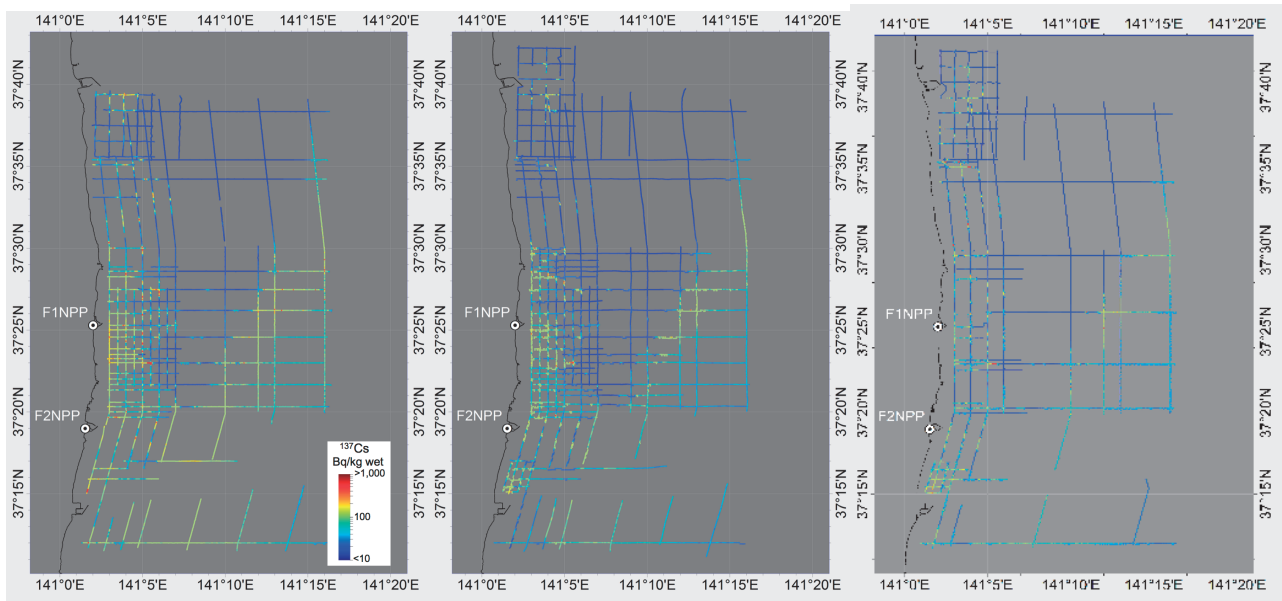


図 13 1F 近傍海域の調査結果，左：平成 25 年度，中：平成 26 年度，右：平成 27 年度

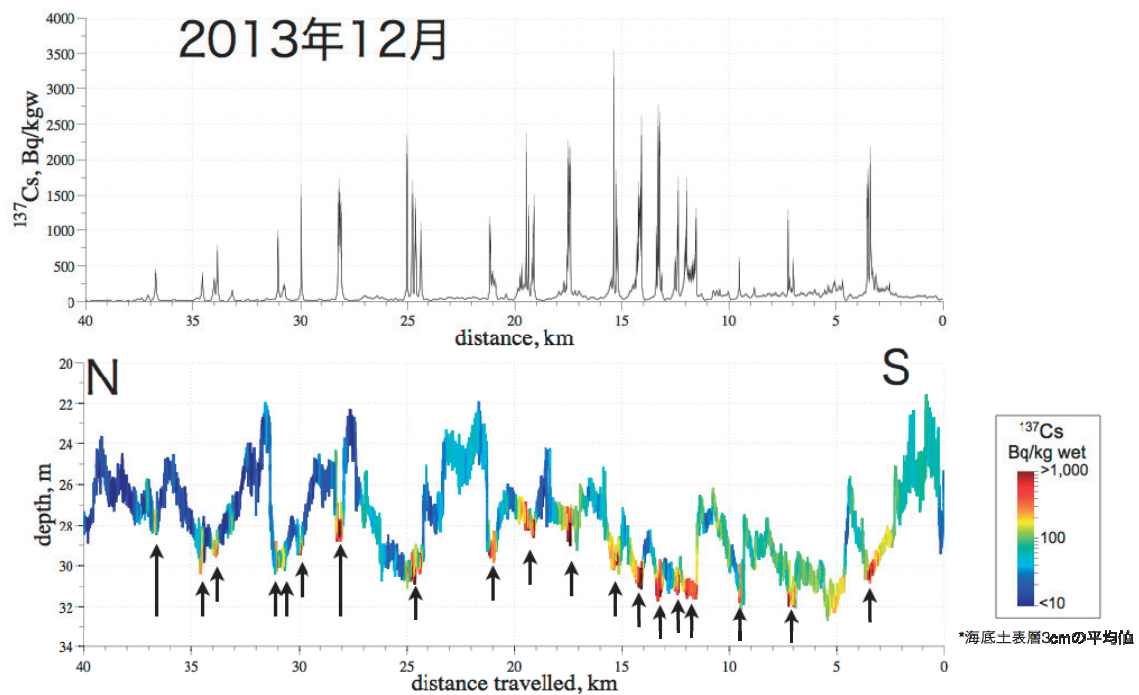


図 14 沖合 4 km の南北に沿った曳航調査測線上の測定結果。上下両方の横軸：1F 緯度を基準に南北への移動距離 (km)，上図縦軸： ^{137}Cs 濃度 (Bq/kg-wet)，下図縦軸：水深 (m)，矢印は ^{137}Cs が比較的高濃度で堆積している箇所を示している。下図は ^{137}Cs 濃度を色で示しており，青から赤くなるにつれて濃度が高くなるように定義している。

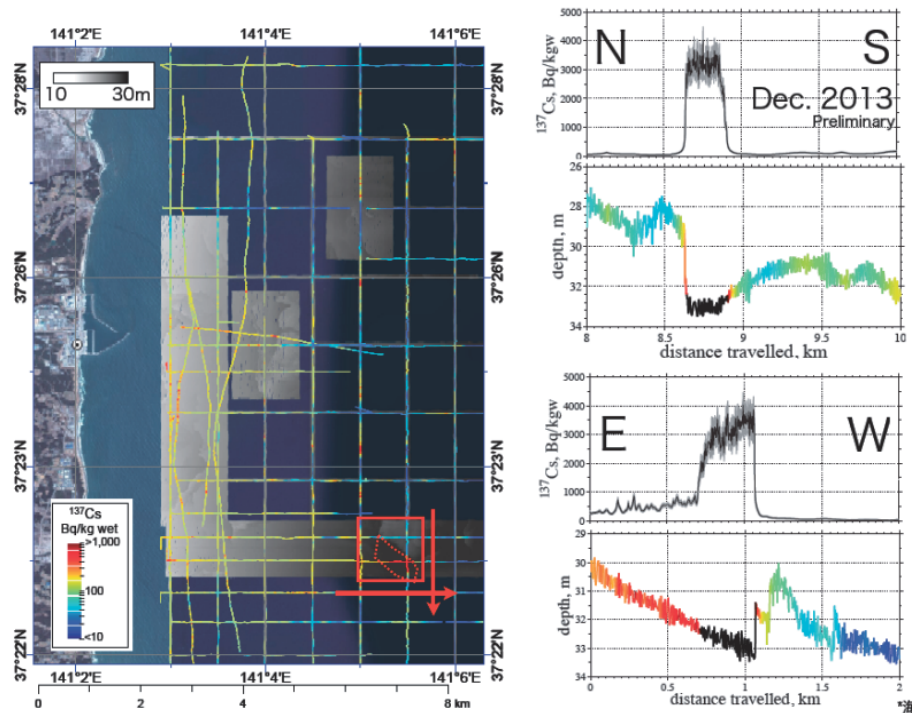


図15 沖合6kmの南北に沿った曳航調査測線上の測定結果。左図：1F近傍の海域で沖合7.5kmまでの範囲で ^{137}Cs 濃度を測線上に示したもの。赤線で囲ったところが高低差8mの段差部分。右上図は1Fの緯度を基準とした南北の移動距離(km)と ^{137}Cs 濃度(Bq/kg-wet)および水深(m)の相関、右下図:1Fの経度を基準とした東西の移動距離(km)と ^{137}Cs 濃度(Bq/kg-wet)および水深(m)の相関。堆積物中の ^{137}Cs 濃度を色で示しており、青から赤くなるほど濃度が高くなる、黒くなっている箇所は、1,000 Bq/kg-wet以上を示している。

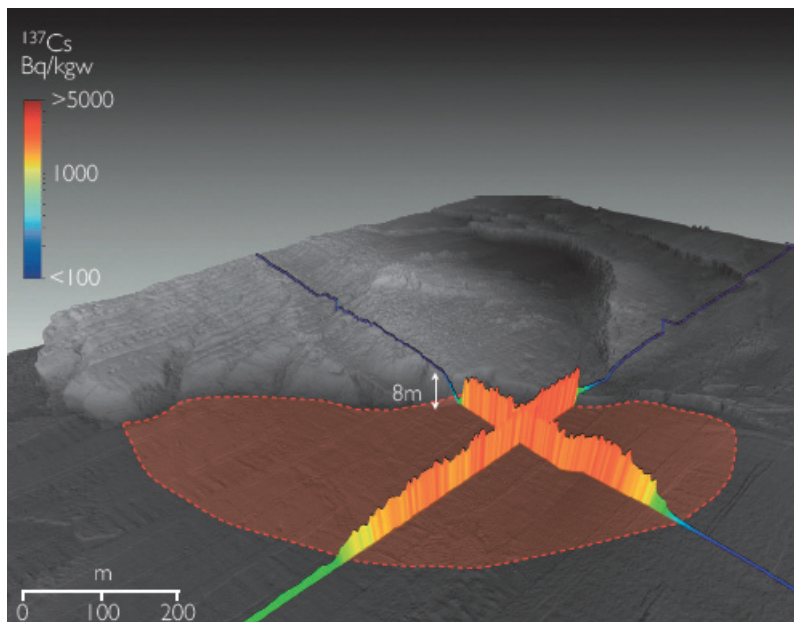


図16 図15の赤で囲った領域を3D画像化したもの。

また、図17に、平成25年度から平成27年度の沖合4kmの測線における測定結果を示す。窪地の部分に比較的高い濃度で堆積しやすいことは、平成26年度、平成27年度についても同様であることがわかった。

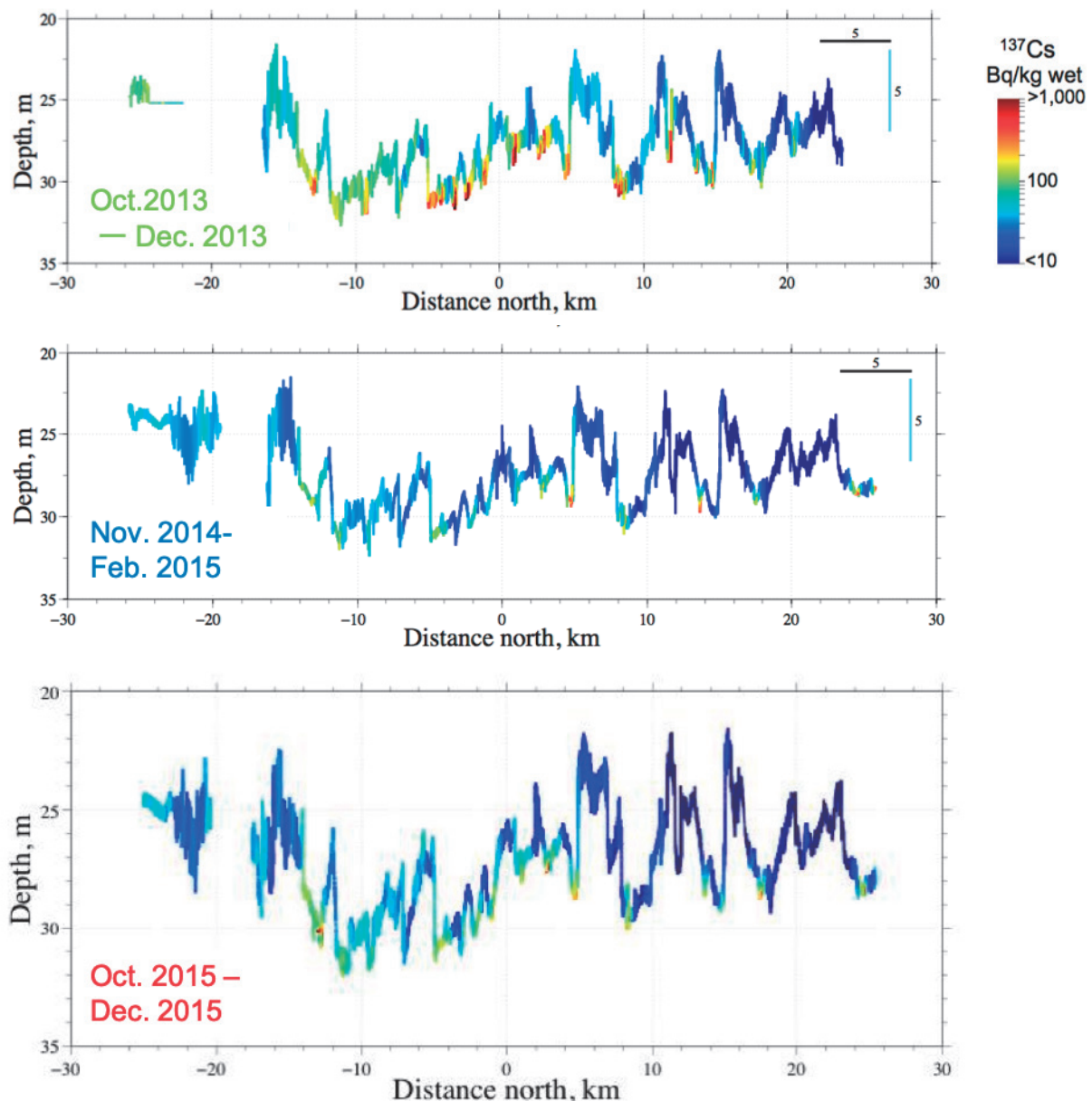


図 17 沖合 4 km の南北に沿った曳航調査測線上の測定結果. 上から平成 25 年度 (2013 年 10-12 月), 中が平成 26 年度 (2014 年 11 月—2015 年 2 月), 下が平成 27 年度 (2015 年 10—12 月) の測定結果を示す. 横軸は全て 1F の緯度を基準に南北へ移動した距離(km)で示してあり, 横軸は水深 (m) で示されている. 色軸は ^{137}Cs 濃度で示してあり全て同じスケールである.

4 まとめ

平成 25 年度から平成 27 年度までの 3 年間に, 放射性物質濃度の連続的な定量測定が可能となった曳航型ガンマ線スペクトロメータを用いて, 総延長 2,400 km の測定調査(平成 25 年度は約 800 km, 平成 26 年度は約 980 km, 平成 27 年度は約 600 km)を実施できた. 平成 27 年度の海域全体の ^{137}Cs 平均濃度は 45 Bq/kg-wet であり, 平成 25 年度の海域全体平均 76 Bq/kg-wet と比較して約 40%減少した. 1F 極近傍海域で ^{137}Cs が比較的高濃度で堆積する箇所が観測される傾向にあり, 特に沖合 4 km 及び 6 km の測線上で, 平成 25 年度に 1,000 Bq/kg-wet を超える箇所が 20 箇所見つかった. 平成 26 年, 平成 27 年度においても同様の傾向を示したが, ^{137}Cs 濃度は減少傾向にあることを明らかにした. 一方, ^{137}Cs 濃度は沖合 10 km 付近で減少するが, 1F 東方沖 20 km の地点から南西方向には, 数 100 Bq/kg-wet 以上の比較的高濃度が高い海域が存在し, この傾向は平成 26 年度, 平成 27 年度でも同様

であった。この海域には、宮城県沖から南西方向に連続する泥質帯が存在しており、採取した海底土は16%から31%の含水率を持つ泥質であった。

平成25年12月に行われた1F近傍の調査においては、高低差8mの段差の底に ^{137}Cs が高濃度で堆積している地点が見つかり、平成26年度及び平成27年度の調査においても同地点で同様の堆積が確認された。平成26年11月の調査において、平均濃度が平成25年度の20%まで減少していることを明らかにした。

調査海域全般に亘って、放射性セシウムの濃度は砂質及び岩が分布する海域において低い傾向にあり、1Fの近傍であっても、 ^{137}Cs 濃度は100 Bq/kg-wetを超えなかった。一方、泥質が分布する海域の放射性セシウム濃度は比較的高く、1F近傍海域での平均 ^{137}Cs 濃度は200 Bq/kg-wetであった。また、前述のように、窪地に泥質が堆積している箇所においては、放射性セシウムの濃度が周囲より1桁ほど高くなっており、調査海域全体に渡って複数の同様の箇所が確認された。そのような場所内の ^{137}Cs 濃度は500 Bq/kg-wet程度であり、高い場所では2,000 Bq/kg-wet程度の濃度であった。

謝 辞

本研究は原子力規制庁放射性物質測定調査委託事業「海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する研究調査」により実施した。研究参画者である、金沢大学の長尾誠也教授、東京大学生産技術研究所のソーントン准教授には有益なコメントをいただいた。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京電力株式会社, 福島原子力事故調査報告書 (2012).
- 2) D. Tsumune et al., "Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model," *J. Environ. Radioactive* **111**, pp. 100—108 (2012).
- 3) M. Aoyama, et al., "Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ^{134}Cs and ^{137}Cs ," *Bio geosciences*, **10**, pp.3067—3078 (2013).
- 4) M. Kusakabe et al., "Spatiotemporal distributions of Fukushima-derived radio nuclides in nearby marine surface sediments," *Biogeosciences...* **10**, pp.5019—5030 (2013).
- 5) M. Kusakabe et al., "Decline in radiocesium in seafloor sediments off Fukushima and nearby prefectures," *J. Ocean.*, (2017) **73**: 529--545
- 6) B. Thornton, et al., "Continuous measurement of radionuclide distribution off Fukushima using a towed sea-bed gamma ray spectrometer," *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Rea. Pap.*, **79**, pp. 10—19 (2013).
- 7) S. Ohnishi, et al., "Conversion factor and uncertainty estimation for quantification of towed gamma-ray detector measurements in Tohoku coastal waters," *Nucl. Instrum. Meth.*, **A819**, pp.111—121 (2016).
- 8) 原子力規制庁 平成25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 (2014).
- 9) 原子力規制庁 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 (2015).
- 10) 原子力規制庁 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 (2016).
- 11) 早乙女忠弘, 他, 福島水試研報第16号, pp.103—105 (2013).