

原子力規制庁委託事業

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

平成 26 年 3 月

独立行政法人海上技術安全研究所

東京大学生産技術研究所

金沢大学環日本海域環境研究センター

本報告書に記載されているデータの一部は、暫定的な数値であり、今後、数値が変わる可能性がありますので、データをご利用される際は、ご注意ください。

目 次

第1章. はじめに.....	1
第2章. 調査研究の方法.....	2
2.1 曳航型放射線検出器による測定方法.....	2
2.1.1 曳航型測定の方法.....	2
2.1.2 測定方法の妥当性の検証.....	5
第3章. 1F 近傍の放射性物質分布の把握.....	9
3.1 海底地形及び土質調査.....	9
3.1.1 海底地形及び土質調査の方法.....	9
3.1.2 海底地形及び土質調査の結果.....	13
3.2 1F 近傍の放射性物質分布調査.....	16
3.2.1 調査の方法.....	16
3.2.2 調査結果.....	18
3.3 流況調査.....	37
3.3.1 調査の方法.....	37
3.3.2 曳航調査時の流況調査結果.....	40
3.3.3 曳航型 ADCP 等による調査結果.....	42
3.3.4 設置型流向流速計等による調査結果.....	43
3.4 1F 近傍における調査のまとめ.....	45
第4章. 阿武隈川河口沖の放射性物質分布の把握.....	46
4.1 海底地形及び土質調査.....	46
4.1.1 海底地形及び土質調査の方法.....	46
4.1.2 海底地形及び土質調査の結果.....	47
4.2 阿武隈川河口沖の放射性物質分布調査.....	49
4.2.1 調査の方法.....	49
4.2.2 調査結果.....	50
4.3 流況調査.....	66
4.3.1 調査の方法.....	66
4.3.2 曳航調査時の流況調査結果.....	68
4.3.3 曳航型 ADCP 等による調査結果.....	69
4.3.4 設置型流向流速計等による調査結果.....	70
4.4 阿武隈川河口沖における調査のまとめ.....	71
第5章. 海底土からの放射性セシウムの溶出実験.....	72
5.1 1F 周辺の海底土からの放射性セシウムの溶出実験.....	72
5.2 阿武隈川河口周辺の海底土からの放射性セシウムの溶出実験.....	74
5.3 海底土からの放射性セシウムの溶出実験のまとめ.....	77
第6章. 謝辞.....	78
参考資料.....	79

第1章. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所(以下、「1F」という。)の事故以降、政府及び関係機関によって近傍、沿岸、沖合及び外洋等の海域の海水、海底土及び水産物のモニタリングが実施されてきた。これらのモニタリングは「総合モニタリング計画」の一環として実施されてきたところであるが、原子力規制庁は海洋における放射性物質の分布状況を把握し、さらにそれらの水産物への中長期的な影響を考慮するため、平成25年度から「海域における放射性物質の分布状況の把握に関する調査研究」を新たに開始した。

従来の海域のモニタリングでは、海水や海底土を定期的に定点で採取し分析する調査となっており、その測定結果は断片的な情報を与えるのみであったため、本調査研究では、1F周辺や阿武隈川河口付近の海底地形を詳細に把握し、海流や測定地点の海底土の性状等も考慮した線的な曳航計測を行うことで、現状における放射性物質の分布状況の詳細な把握を目的とした。

また、長期的には河川を通じた陸上からの放射性物質の海洋への流入も無視できないこと、さらに、一旦海底土に吸着された放射性物質が再溶出し、海洋を汚染する可能性もあることから、中長期的な1F周辺海域における放射性物質動態の予測に資する基礎データの取得を目指すこととした。

本調査研究は、原子力規制庁からの委託により、海上技術安全研究所、東京大学生産技術研究所、金沢大学環日本海域環境研究センターが共同で実施した。

なお、本調査報告書では、第2章に、海域における放射性物質の分布状況を把握するために東京大学生産技術研究所が開発した曳航式ガンマ線スペクトロメータの使用方法及び妥当性の検証について記載した。第3章及び第4章に、1F近傍及び阿武隈川河口沖合の調査結果として、海底地形及び土質の調査結果、曳航式ガンマ線スペクトロメータによる放射性物質の分布状況の調査及び放射性物質動態の予測に活用するための流況調査等について記載した。第5章に海底土からの放射性セシウムの溶出実験を記載した。

第2章. 調査研究の方法

2.1 曳航式ガンマ線スペクトロメータによる測定方法

2.1.1 曳航型測定の方法

東京大学生産技術研究所では、東日本大震災直後から海域での放射性物質の広域マッピングに資するための曳航式ガンマ線スペクトロメータの開発を三井物産環境基金等の支援により実施してきた。曳航式ガンマ線スペクトロメータの運用方法は、図 2-1 に示すように船舶の船尾からガンマ線スペクトロメータが収納された曳航体を曳航し、検出器部分が海底に常に接触するような状況でガンマ線を計測するものである。表 2-1 はガンマ線検出器の主要目である。曳航体は、直径 15cm、長さ 8m のゴムホースで保護されており、この曳航体の先端部にガンマ線スペクトロメータが収納されている。船舶の船尾部から曳航体を曳航し海底のガンマ線を捉えるには、常に曳航体の先端（検出器部分）が海底に接している必要がある。そのため、ゴムホースには錘 4 個を分散させて収納し、水中重量を 115kg とし、海底からの浮き上がりを防止している。また、ゴムホースは、海底を曳航する際に発生する振動や衝撃を吸収する役割も担っている。海底の放射線を計測する場合は、単に放射線だけを計測するだけではなく、様々な海の情報を取得して分析に活用する必要がある。そのため、曳航体には、深度計、水温計が装備されており、計測された放射線の情報と突き合わせて利用することが可能である。

曳航式ガンマ線スペクトロメータとしては、図 2-2 に示すような、直径 3 インチ、長さ 3 インチの NaI (TI) シンチレータを使用しており、計測システムはアルミニウム合金製の水密・耐圧容器に封入されている。光電子増倍管、マルチチャンネルアナライザ等への給電は内蔵バッテリーによっており、マルチチャンネルアナライザからの信号は 1 秒毎にデータロガーに収録される。曳航速度は約 2 ノット（約 1m/s）の運用を想定しており、約 1m 曳航した際の積分的なスペクトル情報が記録される。なお、水密・耐圧容器内には、曳航体の振動、

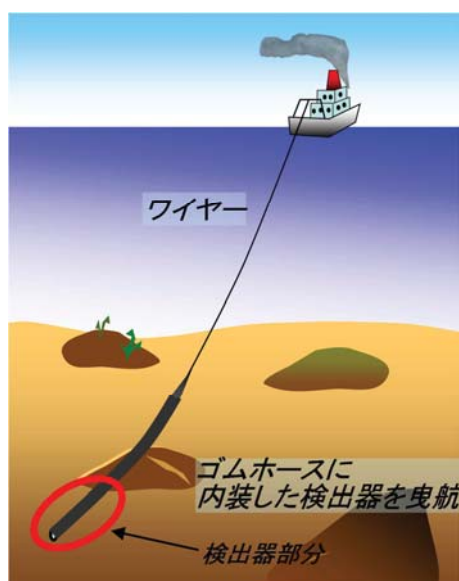


図 2-1 曳航式ガンマ線測定の方法

表 2-1 曳航体の主要目

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

衝撃がスペクトロメータに伝わることを防止するゴム製のリングが装備されている。

曳航速度は、放射線検出器の検出効率を考えると速度は遅い方が有利であるが、船舶を2ノット未満で航行させ、針路を一定に保ち航行することは海流の影響もあり難しいことと、曳航速度が遅いと1日あたりの計測可能な曳航距離が短くなることから、現状は2ノットでの曳航としている。

曳航時に繰り出すワイヤーの長さは水深の約3倍程度を目安にし、深度変化に応じてワイヤーの長さを調整する。船舶には衛星測位システム（GPS）が装備されており、GPSの緯度・経度情報の他、船速、深度、ワイヤー長から、海中での曳航ワイヤーの放物線状の形状を考慮した計算を行うことにより、曳航体の緯度・経度を求めることが可能である。ただし、海流や底質の性状は、曳航体の位置に影響を及ぼすことを考慮する必要がある。水深100m程度までの沿岸域では、海流及び底質の影響は数10m程度と考えられることから、計測データの位置情報の不確かさとして考慮している。

ガンマ線スペクトロメータは移動しながら1秒間データを積算することになり、1秒間だけの計測では十分な統計精度を得ることができず、一定時間の計測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ターの統計誤差が5%以下になるように処理を行っている。このため、2ノット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1,000Bq/kg-wetの場合、約8m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。図2-3に測定されるガンマ線エネルギースペクトルを示すが、このガンマ線スペクトルのうち、 ^{137}Cs (662keV)については ^{134}Cs (605keV)の影響を避けるため、JAEAの尹らの手法¹を参考に、662keVピークの高エネルギー側半分を用いて光電ピーク面積を算出し、その2倍を本来の光電ピーク計数としている。

上記の解析を行いガンマ線スペクトロメータで計測される量は、 ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の光電ピークカウントであり、単位はGPSである。陸上土壌の放射性物質濃度の測定結果と同様に、原子力規制庁等が発表している海底土中の放射性物質濃度は乾土換算のBq/kgで整理されており、GPSからBq/kgへの換算を行うことが必要である。この換算係数は、2.1.2章に後述する

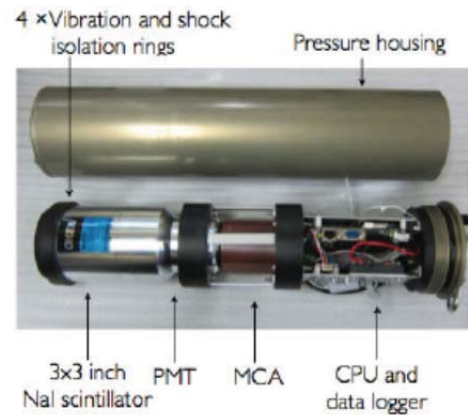


図 2-2 ガンマ線スペクトロメータ

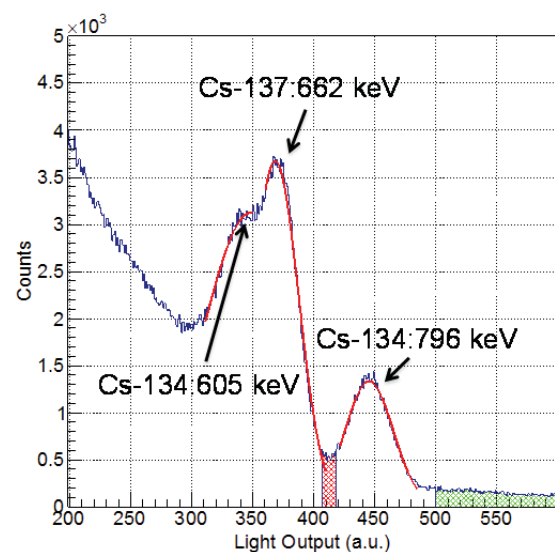


図 2-3 ガンマ線スペクトル

¹ 尹永根、他、日本土壤肥料学雑誌、第83巻、第3号、pp. 296-300 (2012)。

方法で算出した。モンテカルロ計算においては、海底土中の放射性物質の鉛直分布と海底土の密度を設定する必要がある。海底土の密度は含水率及び底質によって変化することが知られており、高含水率土壌（沈泥質粘土）と低含水率土壌（粗砂）について評価した。また、海底土中の放射性物質の鉛直分布は実測に基づき設定した。曳航体は水中重量で 115kg あり、柔らかい底質の場合には海底に沈み込んでいることが分かっている。

2.1.2 測定方法の妥当性の検証

曳航式ガンマ線スペクトロメータを用いた海底土中の放射線物質濃度の測定は、平成 24 年から東京大学生産技術研究所（東大）及び海上技術安全研究所（海技研）が協力して実施してきている。平成 24 年 7 月に実施したいわき市沖の放射性物質濃度の曳航調査結果を図 2-4 に示す²。上図に ^{137}Cs を、下図に ^{134}Cs の濃度を Bq/kg-wet で示している。棒グラフで示しているものは、福島県が実施した定点モニタリング地点における乾土換算の ^{137}Cs 及び ^{134}Cs 濃度並びに含水率データを用いて Bq/kg-wet に換算したものである。これより、F-IY10 を除いて良い一致を示した。

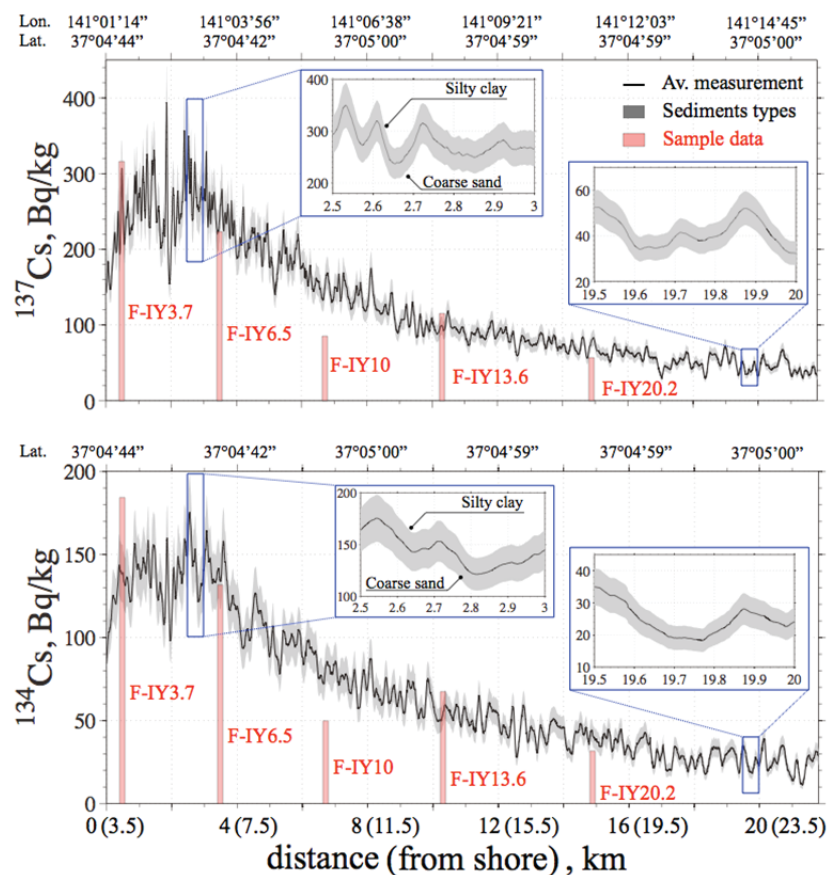


図 2-4 いわき沖曳航調査結果と定点モニタリングとの比較

一方、この曳航式ガンマ線スペクトロメータの光電ピークカウント（GPS）から放射能濃度 Bq/kg への換算は、モンテカルロ法によるシミュレーションに頼っていることから、この換算係数の算出についてベンチマーク実験を実施し、検証した。曳航式ガンマ線スペクトロメータのモンテカルロ計算体系を図 2-5 に示す。計算体系は、海底土領域として、 $300 \times 300 \times 150\text{cm}$ の領域、海水領域として $300 \times 300 \times 150\text{cm}$ の領域を設定している。海水中でのガンマ線の平均自由行程は、 ^{40}K (1461keV) で 17cm、 ^{134}Cs (796keV) で 13cm、 ^{137}Cs (662keV) で 11cm であることから十分大きな領域設定となっている。モンテカルロ計算体系中に設置する検出

² B. Thornton, et al., Deep-Sea Research I 79, pp.10-19 (2013).

器としては、NaI シンチレータ結晶、ケース、水密容器、ホースをモデル化した。ホース内及びホース横から上は海水で満たされ、下は海底土としている。サイズ、密度についてはNaI、ケースはメーカーカタログ値、水密ケースは実測値を採用するとともに、光電子増倍管(PMT)は同密度のアルミニウムとしてモデル化した。

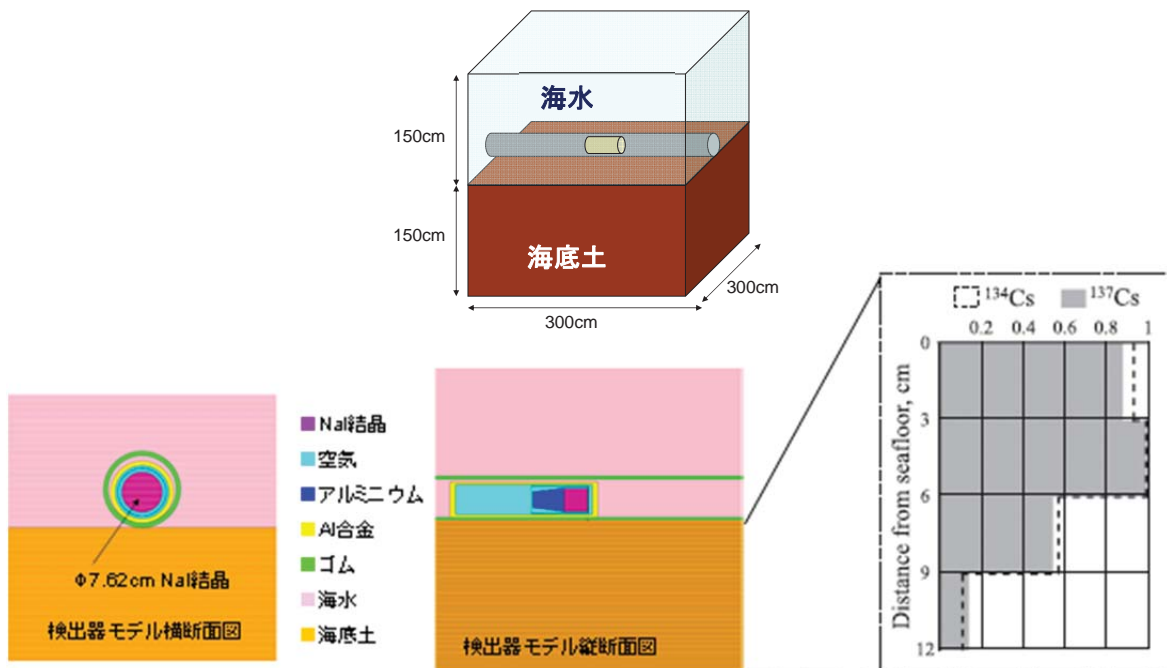


図 2-5 モンテカルロ計算体系

海底土の組成は SiO_2 及び水に単純化してモデル化している。水及び SiO_2 以外の成分（有機物、金属酸化物等）量は海域によって変化するが、光電吸収断面積が極端に大きい重金属等はほぼ含まれないため、堆積物の水分を除く全量を SiO_2 で代表させても計算結果は変わらない。また、0.6~1MeV 領域ではコンプトン散乱が支配的であり、コンプトン散乱断面積は密度が等しければ物質に依らずほぼ等しい。また、モンテカルロシミュレーションでは、放射性物質の鉛直分布が g/cm^2 で表されていれば、海底土の組成・密度は重要ではない。なお、密度・含水率は、鉛直分布の単位を $\text{Bq}/\text{kg}/\text{cm}$ から $\text{Bq}/\text{kg}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ へ換算する時、規格化因子

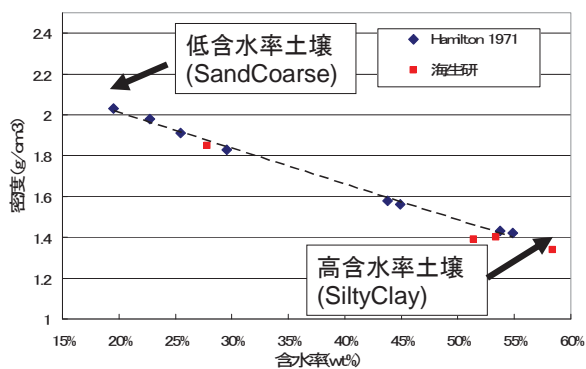


図 2-6 海底土の含水率と密度の関係

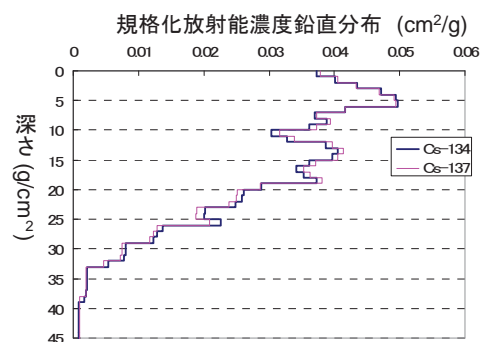


図 2-7 放射能濃度分布

(表層 3cm の平均濃度を求めるので、モンテカルロ計算の結果を 0~3cm 平均濃度で規格化する) を求める時に用いている。海底土の含水率と密度は、北茨城付近の海底における海洋生物環境研究所によるサンプリング結果によると、図 2-6 に示すように直線に乗っており、東北海域でも概ね Hamilton の文献値³の直線に乗っていることが分かっている。このため、換算係数は、高含水率土壌(沈泥質粘土)及び低含水率土壌(粗砂)を代表値とした。また、放射能濃度分布については、過去の阿武隈川河口で得られた試料の平均値を使用した。図 2-7 は、鉛直方向の積分値を 1 に規格化して表示した放射能濃度の鉛直分布である。

このようにして得られた換算係数は、以下の値であった。

^{134}Cs 796keV 光電ピーク計数率: 4.8×10^{-2} [CPS/(Bq/kg-wet)] $\pm 0.2\%$

^{137}Cs 662keV 光電ピーク計数率: 4.6×10^{-2} [CPS/(Bq/kg-wet)] $\pm 0.2\%$

また、換算係数に影響を及ぼす因子として、検出器の海底への沈み込みによる応答関数の変化と海水中放射性セシウムの影響が考えられる。検出器の海底への沈み込みによる応答関数の変化についてはモンテカルロ法で評価した。検出器の土中への沈み込みが 0 の場合の値で規格化した ^{134}Cs の換算係数を図 2-8 に示す。検出器が概ね 1cm 沈降することにより換算係数が約 10%増加するが、数 cm 程度の沈降量では土質の差は出ないと考えられた。海水の影響を把握するため、放射性セシウムは海水中に均一に 1Bq/L で分布することを仮定し、単位放射能濃度当たりの光電ピークカウントを評価した。海底モデル、幾何形状モデルは海底土換算係数の計算と同じである。その結果、

^{134}Cs 796keV 0.12 CPS/(Bq/L) $\pm 3\%$

^{137}Cs 662keV 0.13 CPS/(Bq/L) $\pm 3\%$

となり、現状では海底土中の Cs 濃度が数百 Bq/kg、海水中の Cs 濃度が数 Bq/L~検出下限(1Bq/L)以下なので海水中セシウムの影響はほぼ無視できた。

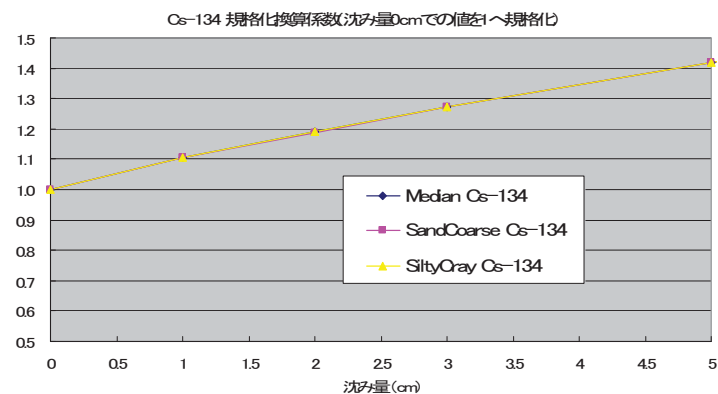


図 2-8 検出器の沈み込みによる換算係数の変化

このように、モンテカルロ法を用いて、放射性セシウム光電ピークカウント (CPS) から放射性セシウム濃度 (Bq/kg) への換算係数を求めているが、この計算の妥当性を検証するために、阿武隈川河口沖合で採取した海底土を用いてベンチマーク実験を実施した。

³ E. L. Hamilton, J. Geophysical Research, Vol. 7 No. 2, pp. 579-604 (1971).

ベンチマーク実験体系を図 2-9 に示す。縦 37.5 cm x 横 64 cm の水槽に、阿武隈川河口沖合で採取した海底土を入れ、その上に水道水を張り、曳航式ガンマ線スペクトロメータを海底土の上に設置した。水面から土までの距離は平均 16 cm であり、また、土の深さは平均 11.5 cm である。また、使用した海底土の放射性セシウム濃度の高純度 Ge 半導体検出器による評価結果は、 ^{137}Cs については $2.7 \times 10^3 \pm 6.6\%$ Bq/kg-dry、 ^{134}Cs については $1.2 \times 10^3 \pm 7.2\%$ Bq/kg-dry であった。モンテカルロ計算体系を図 2-10 に示す。線源項の ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の濃度は、前述の Ge 半導体検出器による評価結果を用いるとともに、鉛直分布については、図 2-7 の阿武隈川河口沖での鉛直分布を設定した。また、海底土については、 SiO_2 と水の組成とした。モンテカルロ計算による換算係数を用いて単位時間当たりの光電ピークカウントを評価し、ベンチマーク実験による光電ピークカウントとの比較を表 2-2 に示す。表 2-2 から明らかなように、モンテカルロ法による計算とベンチマーク実験の結果はよく一致した。



図 2-9 ベンチマーク実験体系

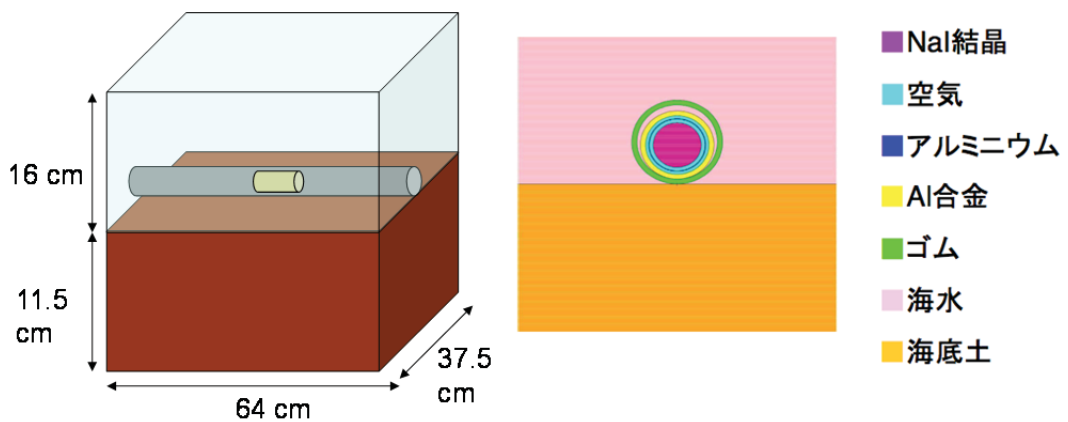


図 2-10 ベンチマーク実験解析用モンテカルロ計算体系

表 2-2 モンテカルロ計算とベンチマーク実験の比較

	光電ピークカウント	
	モンテカルロ計算 (CPS)	ベンチマーク実験 (CPS)
^{137}Cs	49 ± 0.29	49 ± 0.28
^{134}Cs	21 ± 0.13	20 ± 0.11

第3章. 1F 近傍の放射性物質分布の把握

3.1 海底地形及び土質調査

3.1.1 海底地形及び土質調査の方法

これまでの調査により、海底土中の放射性物質の濃度分布は、海底地形及び土質に関係があると考えられる。また、安全な曳航測線の設定、採泥地点の検討にも海底地形及び土質の情報が必要である。1F 近傍の海底地形調査は、400 トンクラスの大型調査船（第八開洋丸）と 20 トン未満の漁船を使用して実施した。

(1) 大型調査船による調査

大型調査船による調査測線は、図 3-1 のとおりである。図中、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 670km であり、測線範囲 A~H では、合計 34km² の面的な海底地形及び土質データを取得した。実施時期は、平成 25 年 9 月から 10 月である。

海底地形については、大型調査船に舷側装備したマルチビーム音響測深機（KONGSBERG 製 EM2040）を用いて海底地形データを取得した。周波数は 400kHz を使用した。最も水深が深くなる測線 26 のみ、300kHz を一部使用した。調査開始前に機器取付け角度のキャリブレーションを行った。また、A~H の範囲では、基本的に範囲の長辺に平行に測線を設定した。測線間隔は水深が浅い部分で未測が少なくなるよう 30m~80m とした。

調査中の船速は 6 ノットを基本とした。スワス角度は片舷 50 度~65 度を基本とした。調査中 1 日に 1 回以上、水温・塩分・深度計（CTD）もしくは投下式水温・水深計（XBT）観測を行ない、そのデータより得た音速プロファイルをマルチビーム音響測深機に入力し、音速度補正を行った。また、マルチビーム音響測深機の送受波器上に取り付けた音速度センサーで計測した送受波器面のリアルタイムの音速度を機器に入力し、表面音速度の補正を実施した。

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ため、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採泥を行った。採泥地点は、マルチビーム音響測深器の反射強度のデータにより決定した。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により底質を判別した。取得したデータについては、気象庁所管の小名浜検潮所のデータを用いて潮位補正を行った。その後、データ処理ソフトウェア Marine Discovery Ver. 3 でフィルター処理・ノイズ除去を行ない、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 1~26 は 2m、範囲 A~H は 1m 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 Geotiff 形式で作成した。

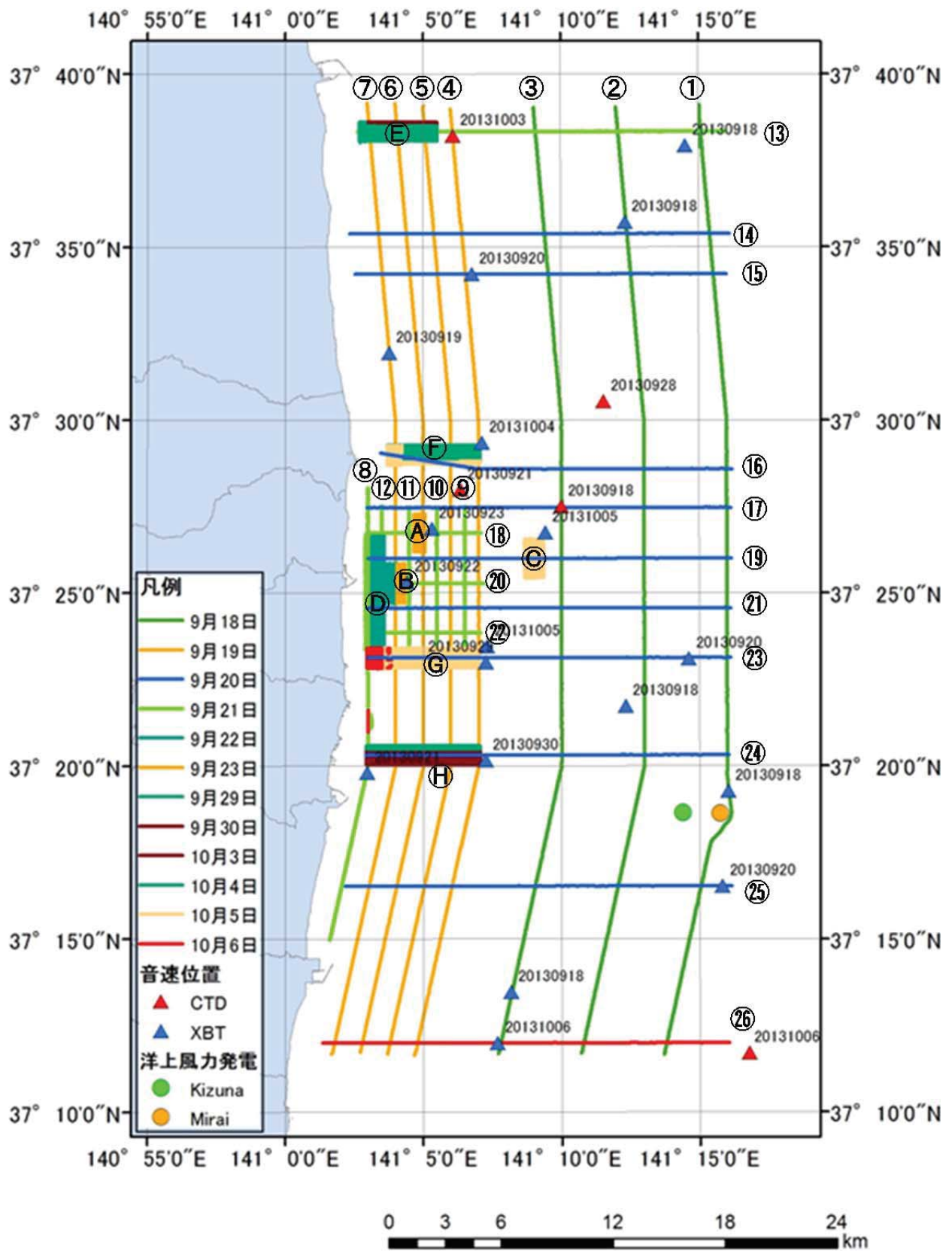


図 3-1 海底地形・土質計測を実施した測線



図 3-2 第八開洋丸



図 3-3 マルチビーム音響測深器艙装用ポール



図 3-4 マルチビーム音響測深器 送受波器

(2) 小型漁船による調査

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による海底面探査及び単素子音響測深機による深淺測量を実施した。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、予定していた曳航測線に沿って実施した。実施方法は、図 3-5 に示すように音響測深機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）の曳航体を船尾より曳航し、測線上を走行してデータを連続的に取得した。調査船への機器の装備（艙装）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、海水の音速度の補正はバーチェック法により補正した。

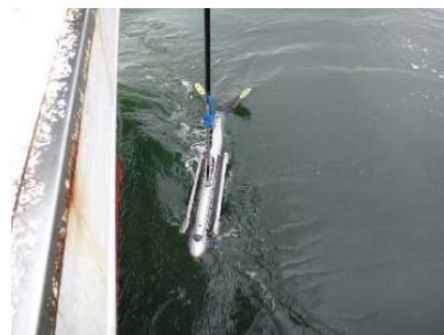
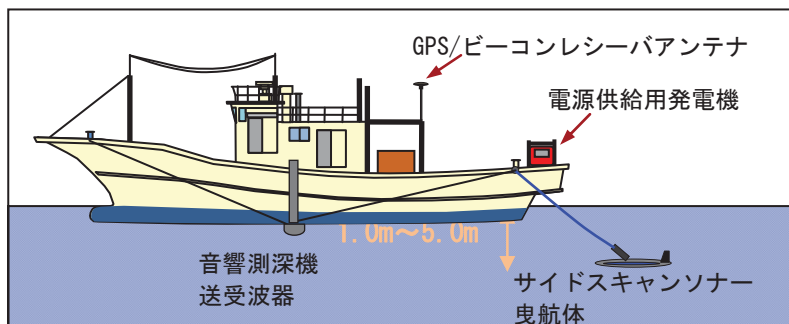


図 3-5 サイドスキャンソナーによる海底地形、土質調査

3.1.2 海底地形及び土質調査の結果

1F 近傍の海底地形調査の結果を図 3-6 に示す。

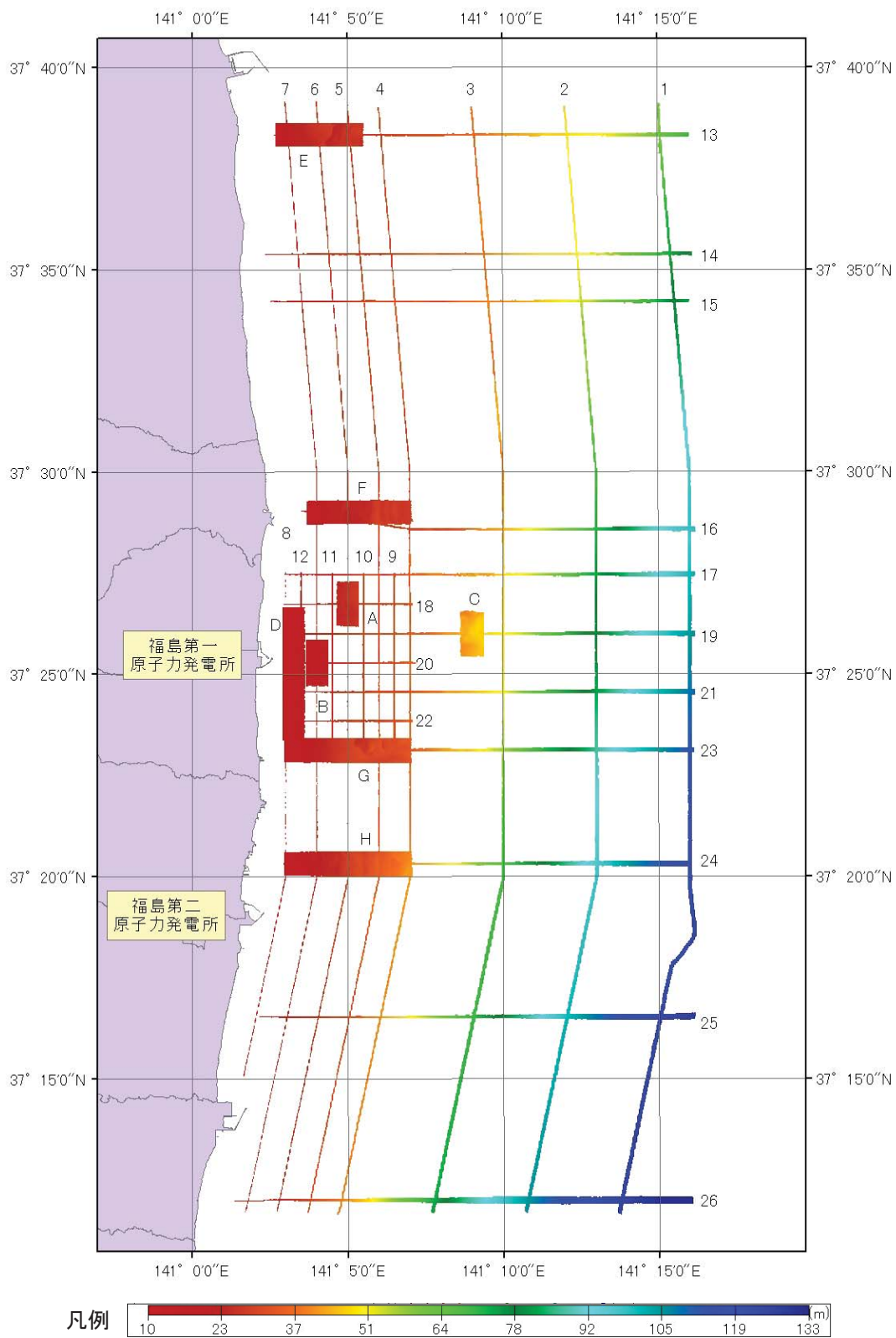


図 3-6 1F 近傍海底地形図

また、1F 近傍のマルチビームの反射強度図を図 3-7 に示す。

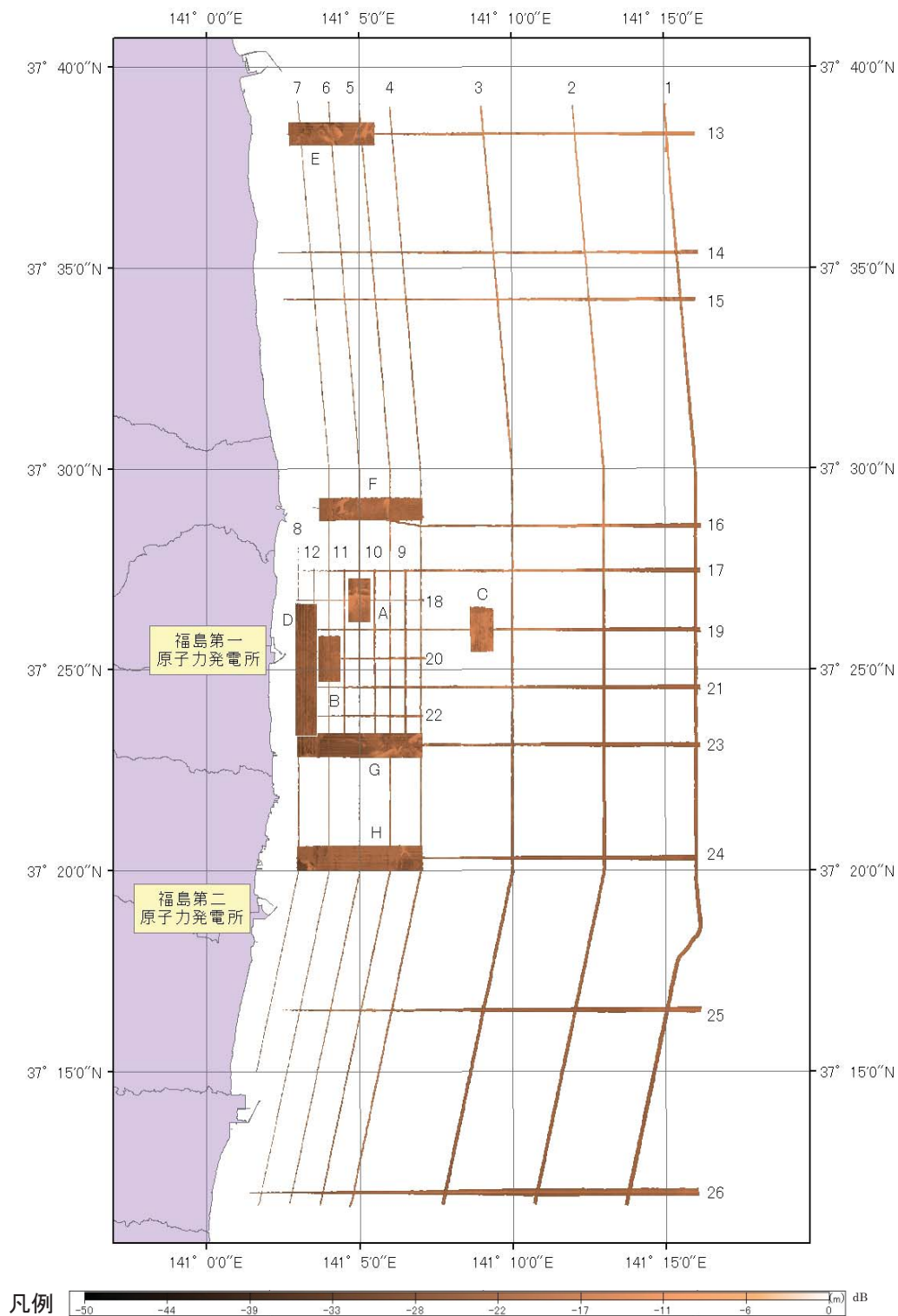


図 3-7 1F 近傍反射強度図

海底地形の情報は、曳航調査を行う船舶が安全に航行するために不可欠である。測線 15 の沿岸域の断面図を図 3-8 に示す。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。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、安全な曳航調査が行えた。



図 3-8 測線 15 断面図

範囲 B の海底地形及び土質調査の結果を図 3-9 に示す。

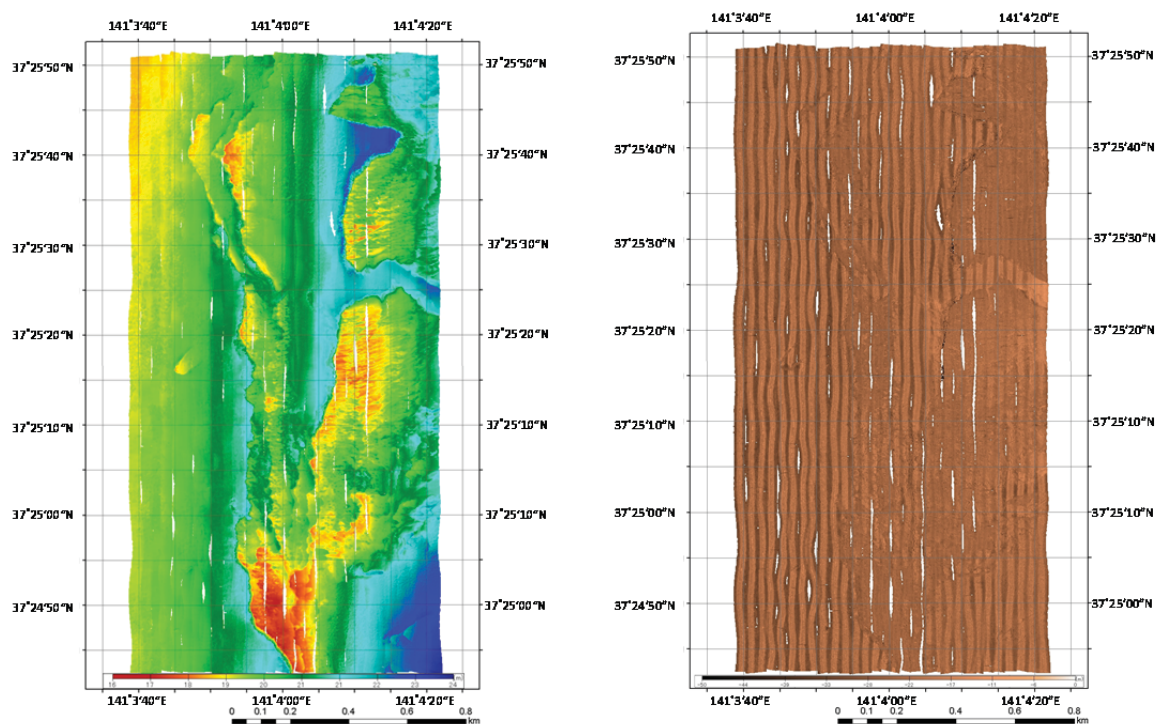


図 3-9 範囲 B の海底地形図及び土質調査の結果
(左：海底地形図、右：反射強度図)

3.2 1F 近傍の放射性物質分布調査

3.2.1 調査の方法

1F 近傍の放射性物質分布調査は、大型調査船及び小型漁船により実施した。曳航調査の方法は第 2 章で述べたとおりである。1F 近傍における曳航測線を図 3-10 に示す。青色で示す測線は、海底地形調査時と同じ大型調査船の第八開洋丸による測線である。第八開洋丸によ

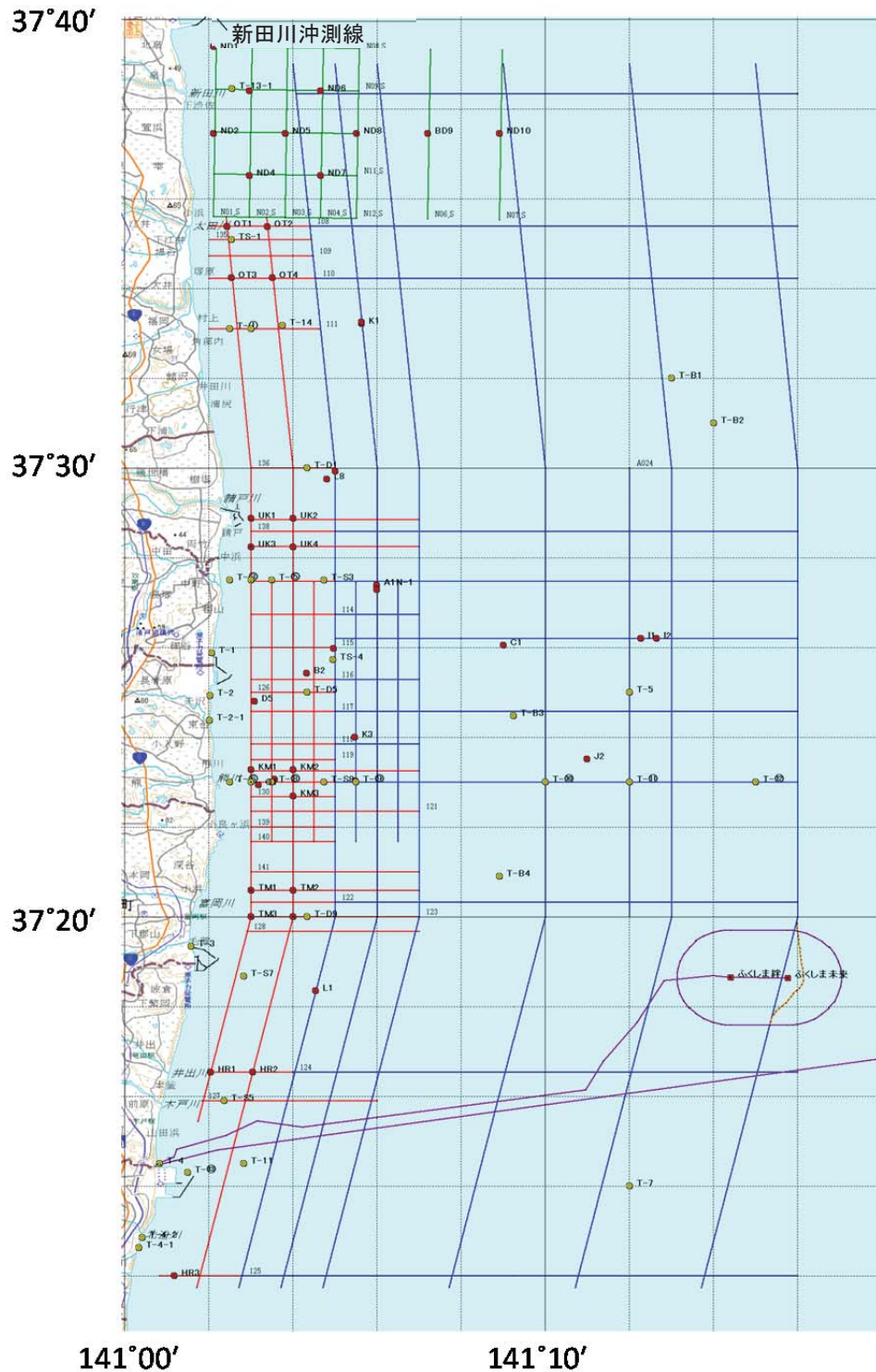


図 3-10 1F 近傍測線

る曳航距離は 555km であるが、そのうち、福島沖洋上風力発電所に係わる施設及び海底ケーブルを回避した距離は約 37km であった。赤色及び緑色で示す測線は、20 トン未満の小型漁船により曳航調査を実施した測線である。赤字の曳航距離の総延長は 216km である。緑色部分は、新田川沖についてグリッド状の詳細調査を実施した測線であり、総延長は、74km である。これらの測線を総合すると、1F 近傍では総延長 808km の曳航調査を実施した。

測線の検討にあたっては、平成 24 年度の水産庁からの委託事業⁴として東大、海技研で実施してきた曳航測線との関係を考慮し、部分的にオーバーラップさせ経時的な変化を観測できるようにするとともに、政府、自治体の定点観測地点（図 3-10 中の黄色丸印）をカバーした。図 3-11 は、平成 24 年度までの測線と本調査の計画測線を重ね合わせたものである。

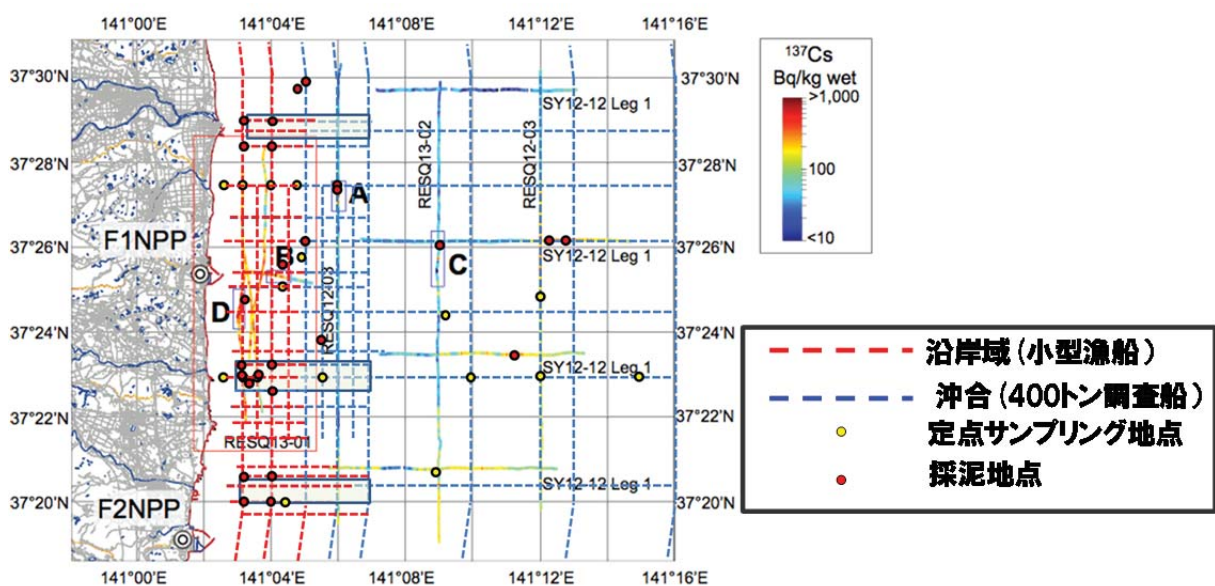


図 3-11 平成 24 年までの測線と本委託調査事業の測線の関係

放射性物質の鉛直分布等の詳細な分析を行うため、1F 近傍において採泥を実施した。本事業で実施した採泥地点は、図 3-10 及び図 3-11 に赤丸印が記載されている地点であり、1F 近傍沖合（大型調査船による調査）で 15 地点、新田川沖合で 10 地点、1F 近傍沿岸域（小型漁船による調査）で 17 地点である。採泥は、マルチプルコアラーを用いて柱状採泥を行った。柱状採泥した試料は、0～2cm まで 1cm ピッチ、2～6cm まで 2cm ピッチ、6～14cm まで 4cm ピッチ、14cm 以深は 6cm 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。

大型調査船により採泥する際は、曳航体を繰り出しているワイヤー長とワイヤーの角度から緯度経度を算出している。また、3.1.2 章で述べた海底地形と土質の情報により船の GPS の位置を採泥器を下ろす場所に合わせ、できる限り船体を静止させて採泥を実施した。

⁴ 水産庁、「高濃度に放射性セシウムで汚染された 魚類の汚染源・汚染経路の解明のための緊急調査研究」（2013）。

3.2.2 調査結果

(1) 曳航調査の結果

1F 近傍の放射性物質調査の平成 24 年度までの曳航調査による観測結果を図 3-12 に示すとともに、本年度の調査による観測結果を図 3-13 に示す。図には ^{137}Cs 濃度を海底土表層 3cm までの平均として示している。

1F の極近傍に放射性物質濃度が高い海域が存在し、沖合 6km の測線においては表層 3cm の平均値で最大 2,000Bq/kg-wet の ^{137}Cs が観測され、沖合 4km の測線においては ^{137}Cs 濃度が 1,000Bq/kg-wet を超える箇所が 20 箇所程度見つかった。

また、1F 東方沖 20km の地点から南西方向に沖合 10km 付近よりも比較的濃度が高い海域が存在し、この海域では ^{137}Cs 濃度が数 100Bq/kg-wet 以上で分布している。この海域については、福島県沖合に宮城県沖から南西方向に連続して泥質帯が存在しており⁵、この海域における海底土の含水率は 16%~31%である。図 3-14 は 1F の 7.5km 沖合までの拡大図である。

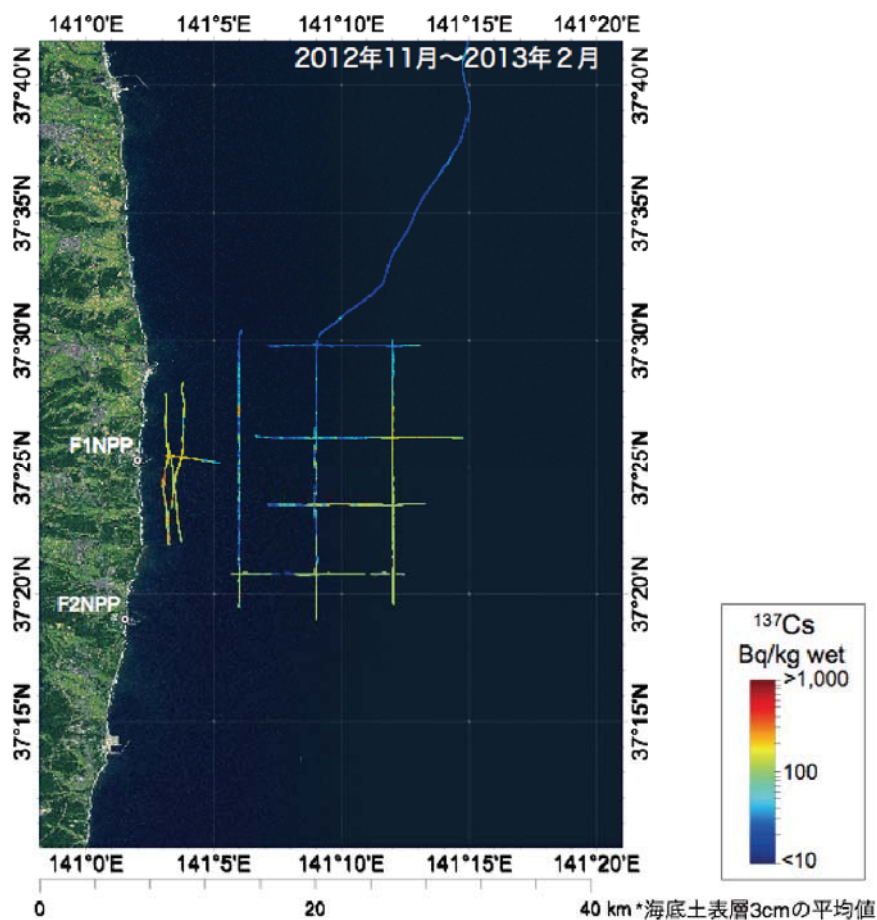


図 3-12 1F 沖合海域の ^{137}Cs 濃度分布の測定結果 (平成 24 年度)

⁵ 早乙女忠弘 他、福島水試研報第 16 号、pp.103-105 (2013).

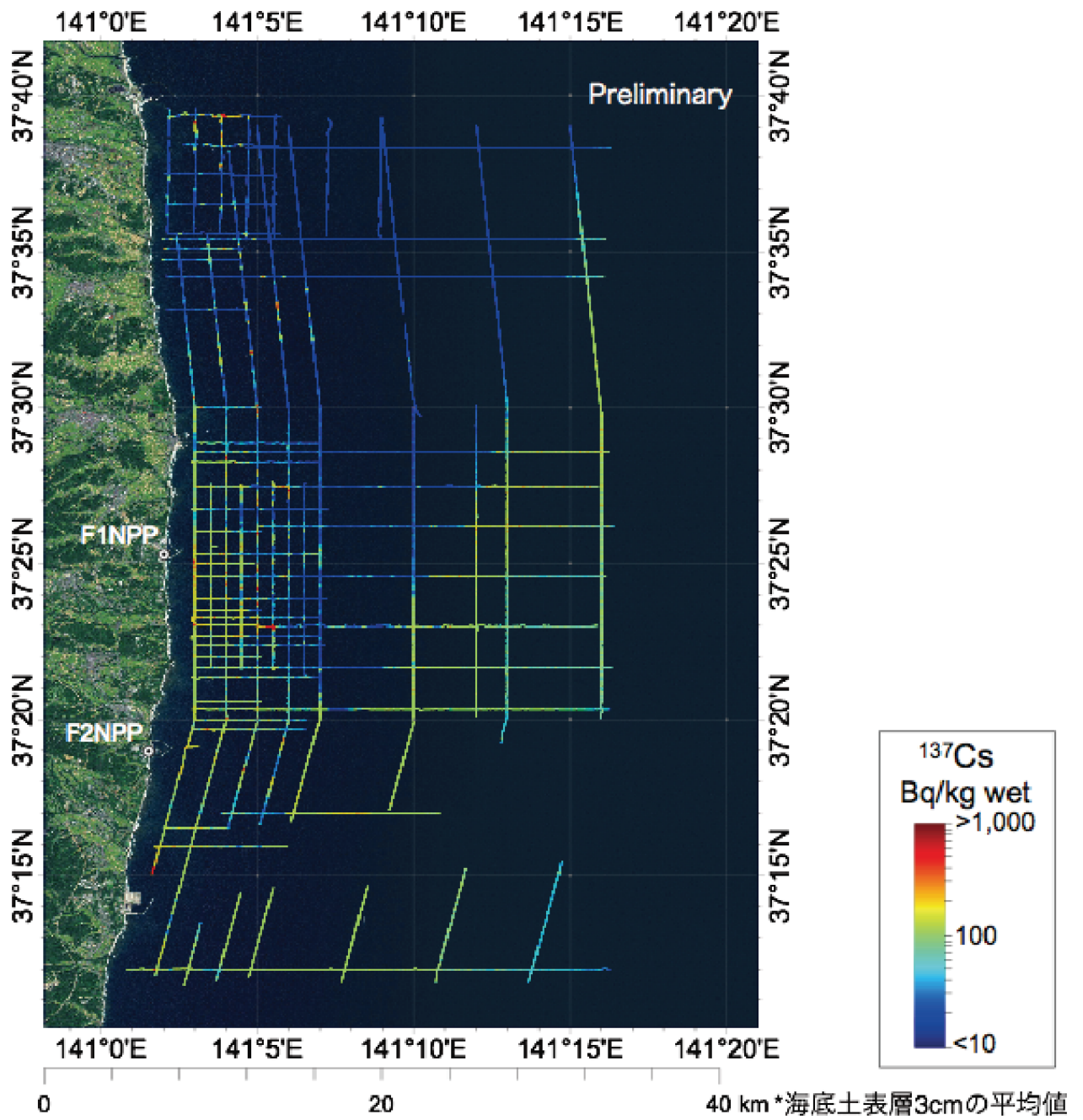


図 3-13 1F 沖合海域の ^{137}Cs 濃度分布の測定結果 (平成 25 年度調査結果)

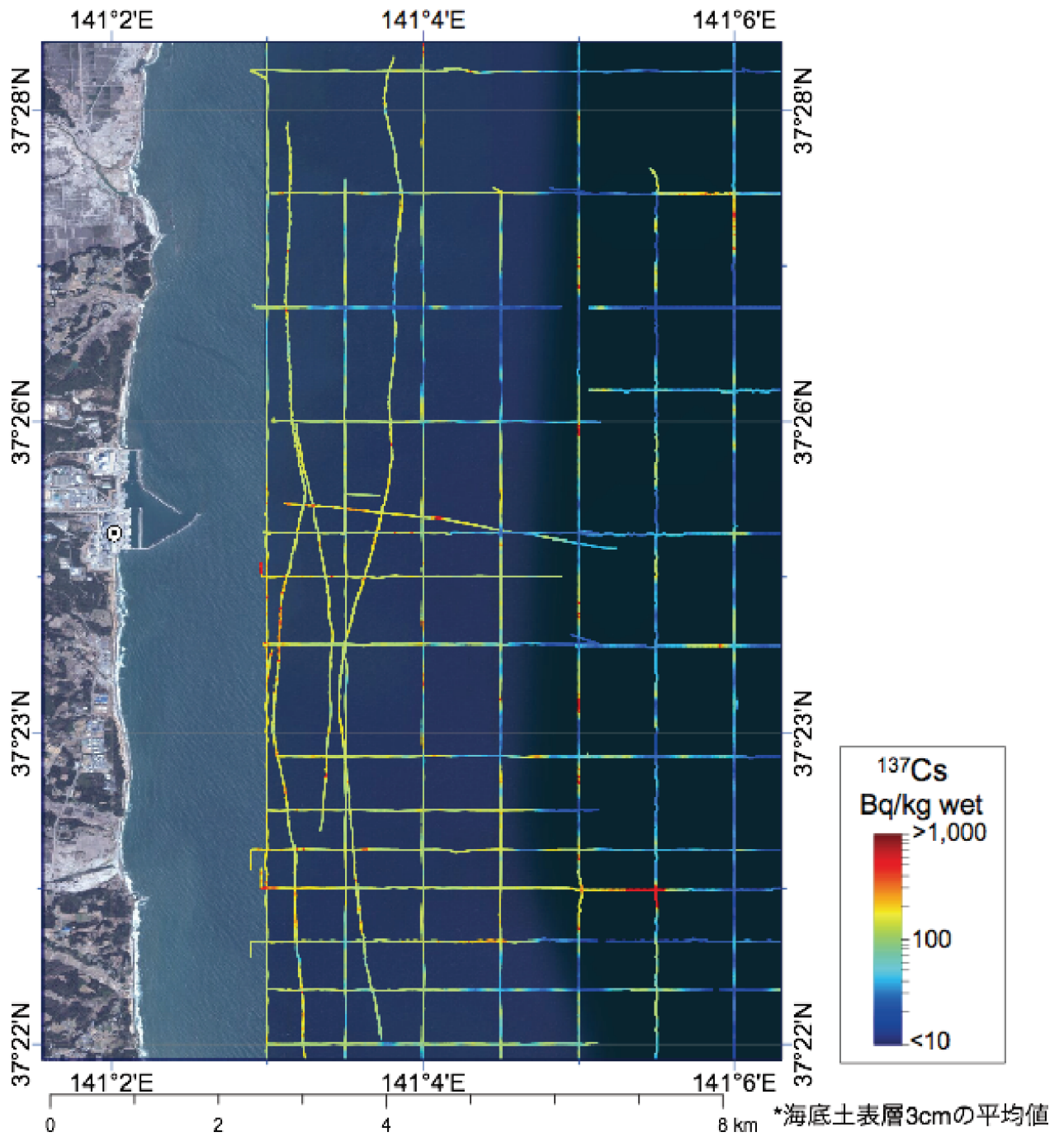


図 3-14 1F 極近傍の ^{137}Cs 濃度分布

1F 近傍海域の放射性セシウム濃度の分布状況の経時変化を検討するため、図 3-15 に 1F 近傍海域の平成 24 年度までの曳航調査と本年度の調査結果を横に並べて比較した。

図 3-15 に示す測線 A、B、C の 3 本の測線について、測線距離に対応した ^{137}Cs 濃度の変化、測線距離及び深度に対する ^{137}Cs 濃度の変化、測線毎の算術平均 (Av.) 及び幾何平均 (GM) 並びにそれらの標準偏差 (STD 及び GD) について、平成 24 年度までの調査と本調査の結果の比較を図 3-16～図 3-18 に示す。また、図 3-19 に 1F 近傍全体での算術平均 (Av.) 及び幾何平均 (GM) 並びにそれらの標準偏差 (STD 及び GD) の比較を示す。今年度の調査と平成 24 年度の調査結果は、全体的な傾向として、 ^{137}Cs の分布にはあまり大きな差はなかった。

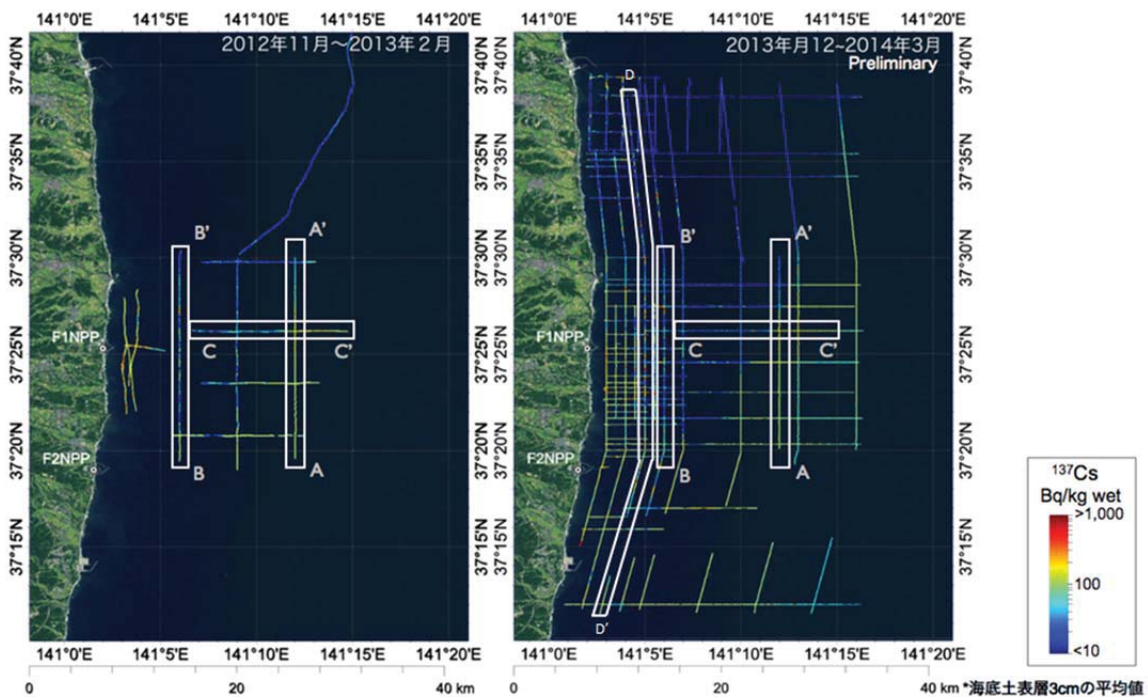


図 3-15 1F 近傍の ^{137}Cs 濃度の経時変化

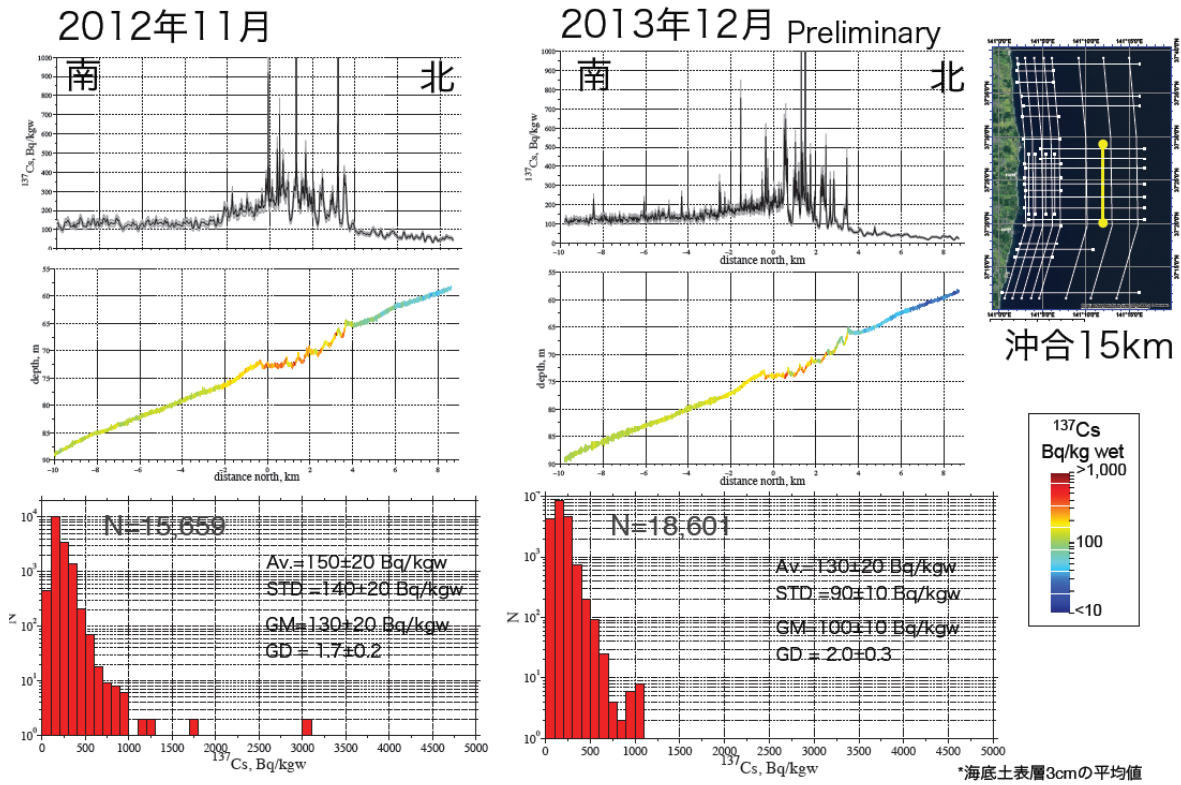


図 3-16 測線 A-A' の比較

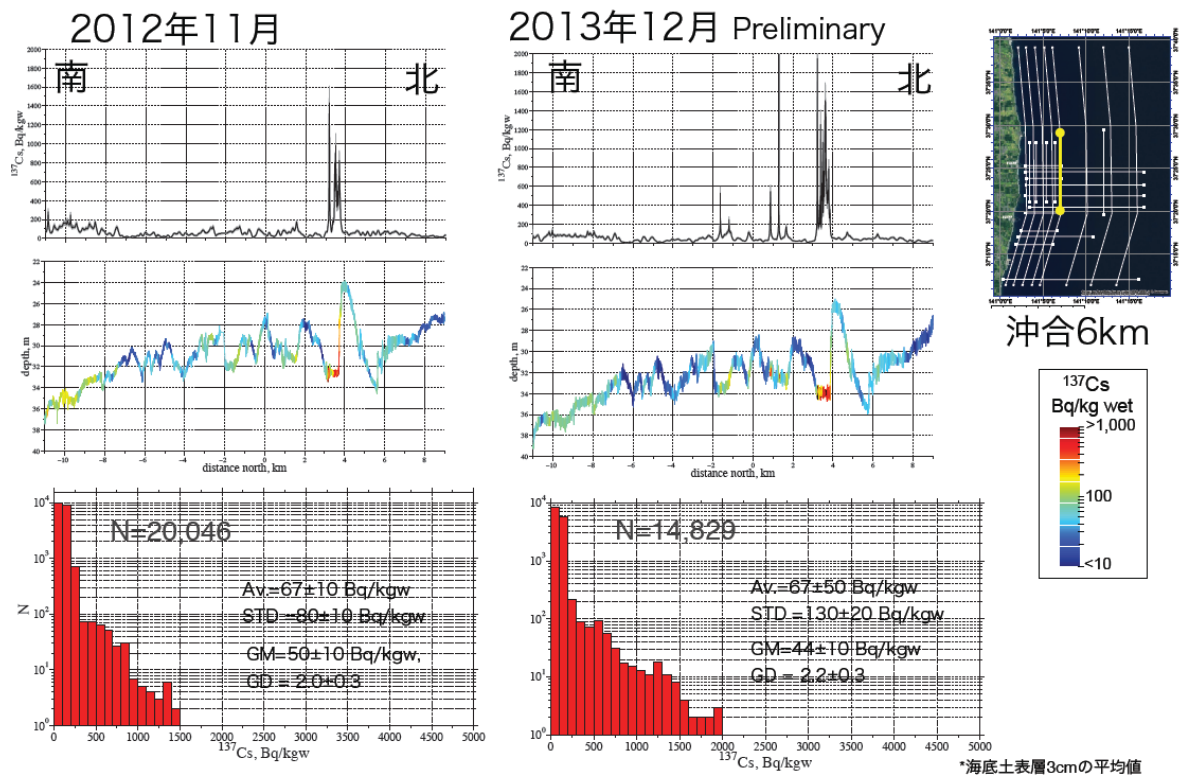


図 3-17 測線 B-B' の比較

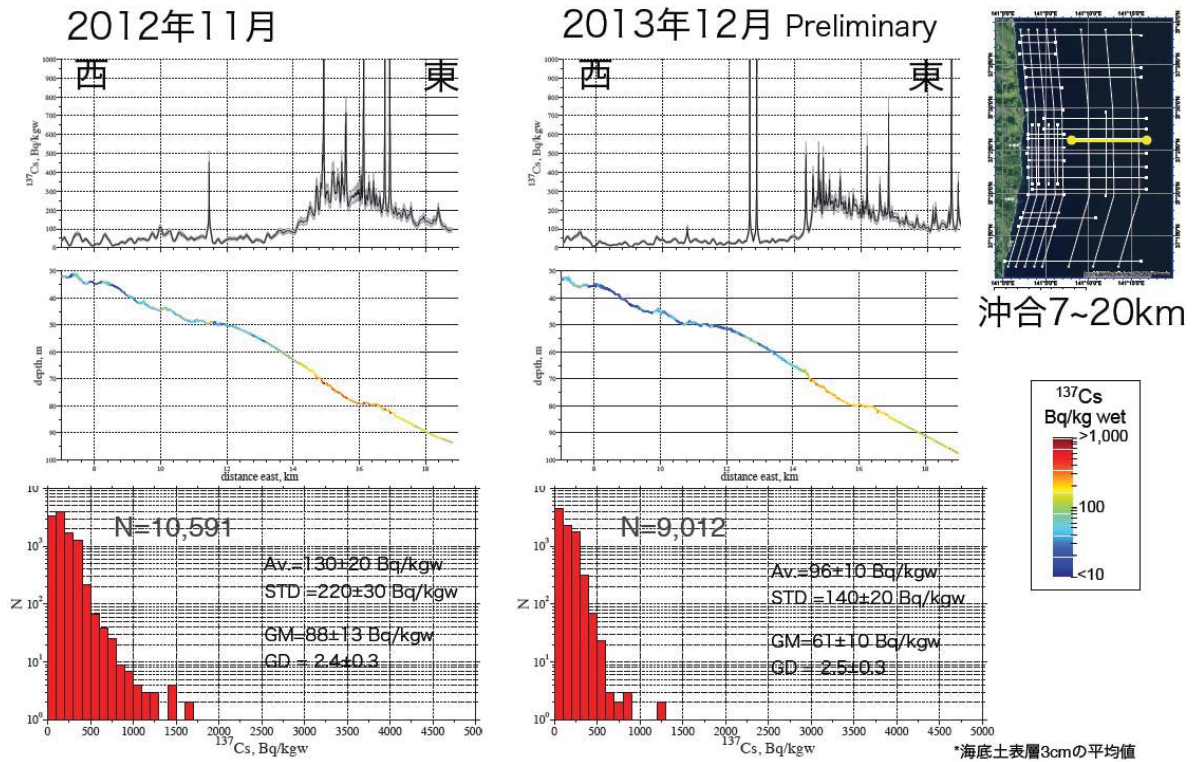


図 3-18 測線 C-C' の比較

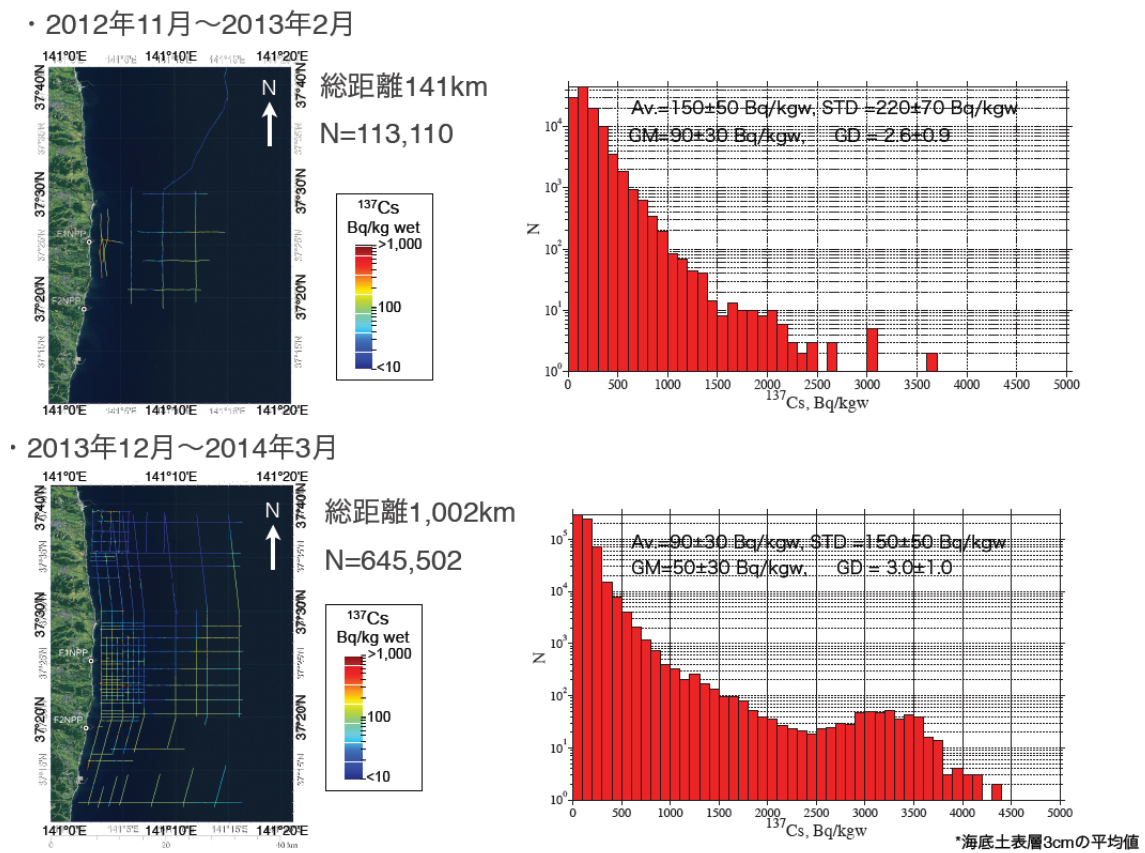


図 3-19 1F 近傍全体の平均値の比較

沖合 15km の測線 AA' では、海底地形は緩やかに変化し、北から南下するに従い水深が深くなる。1F の南側については、 ^{137}Cs 濃度が高い傾向にあるが、平成 24 年 11 月の測定結果と平成 25 年 12 月の結果はほぼ同じであった。また、沖合 6km の南北の測線 BB' については、平成 24 年 11 月の調査において約 8m の段差の底に高濃度の ^{137}Cs が堆積していたが、平成 25 年 12 月の調査にも同様の傾向が確認され、 ^{137}Cs 濃度にも大きな変化はなく、1 年間での変化はあまりなかった。また、沖合 6km の測線について、全体で 40km 以上の連続的な分布を計測することができたが、海底地形に段差がある箇所の底に高濃度の ^{137}Cs が堆積していた。

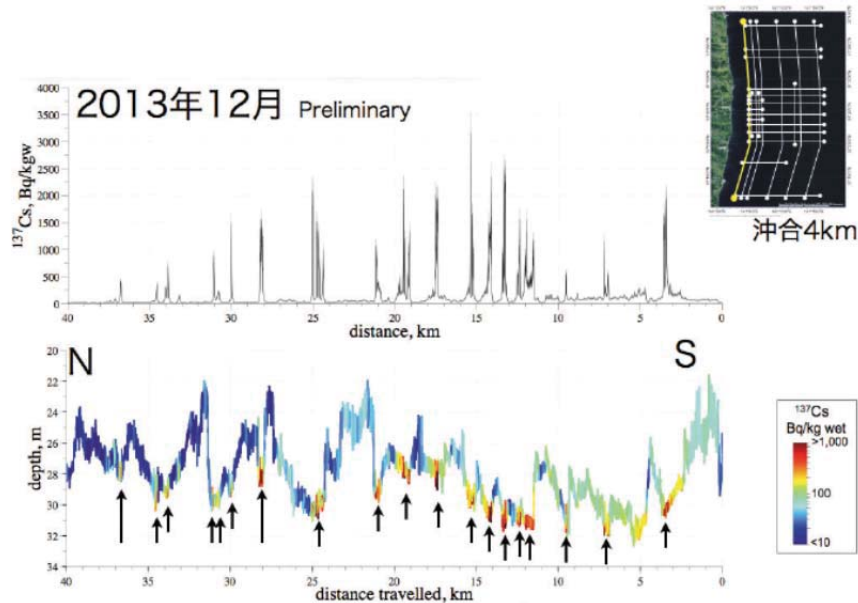


図 3-20 測線 DD' に沿った ^{137}Cs 濃度分布

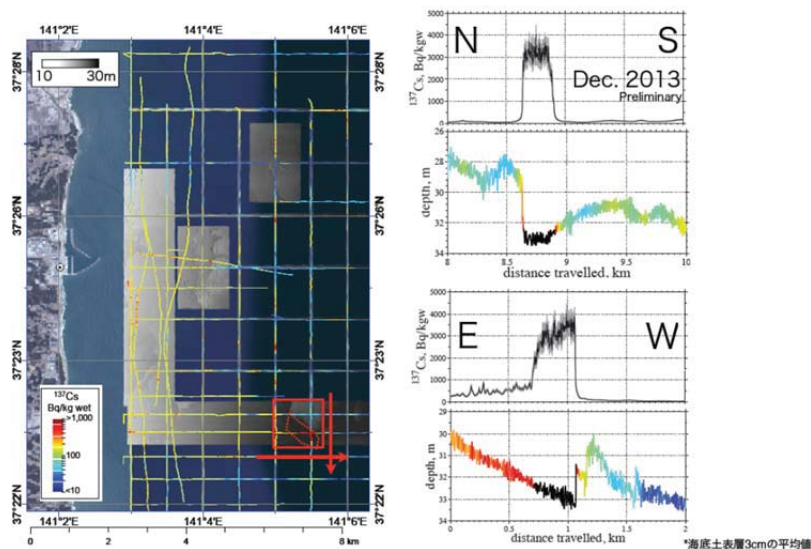


図 3-21 1F 近傍窪み地形における ^{137}Cs 濃度分布

図 3-20 には、沖合 4km の測線 DD' に沿った ^{137}Cs 濃度分布を示す。沖合 4km の地形は、細かく変化し、段差の数は沖合 6km よりも多くなる。図 3-20 から明らかなように、段差の底には高濃度の ^{137}Cs が堆積しており、高濃度で ^{137}Cs が検出される箇所が沖合 6km よりも多くなっている。

図 3-21 には、沖合 4km の測線及びその近傍について、 ^{137}Cs の堆積と地形の関係を示した。図 3-21 から、 ^{137}Cs の堆積は、海底地形と明確な相関があり、段差の底には高濃度の ^{137}Cs が堆積しており、海底土の性状は、泥質であった。図 3-21 の右下部分の赤枠で囲った海域について、海底地形の詳細図に ^{137}Cs の分布状況を重ねあわせた図を図 3-22 に示す。図 3-22 から、海底に存在する 8m の崖下部分に、 ^{137}Cs が高濃度で分布していた。

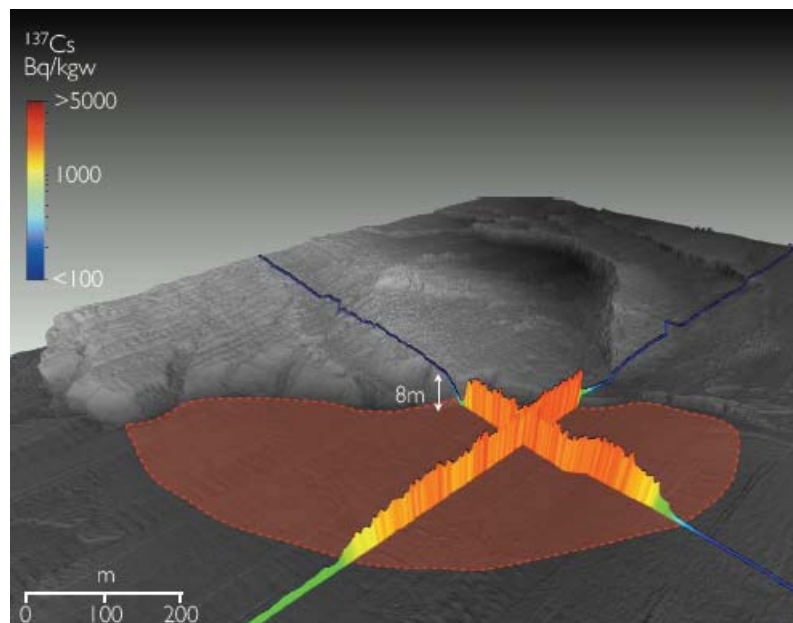


図 3-22 1F 近傍窪み地形における ^{137}Cs 濃度分布の分布状況

図 3-23 に新田川河口沖のグリッド状の調査結果を示す。 ^{137}Cs の濃度は、1F 近傍調査の中でも最も低い傾向となっているが、新田川河口から直ぐに沖合に向かう測線の一部の放射能濃度が約 2,000Bq/kg-wet であった。

^{137}Cs 濃度の分布とともに、海底地形、海底土の性状についても示した。図 3-24 に ^{137}Cs 濃度の分布とともに、海底地形、海底土の性状についても示した。サイドスキャンソナーで測定した底質の性状と ^{137}Cs の濃度分布を比較すると、図中に黒色で示している反射強度が弱い泥質部分に、高濃度の ^{137}Cs が堆積していた。

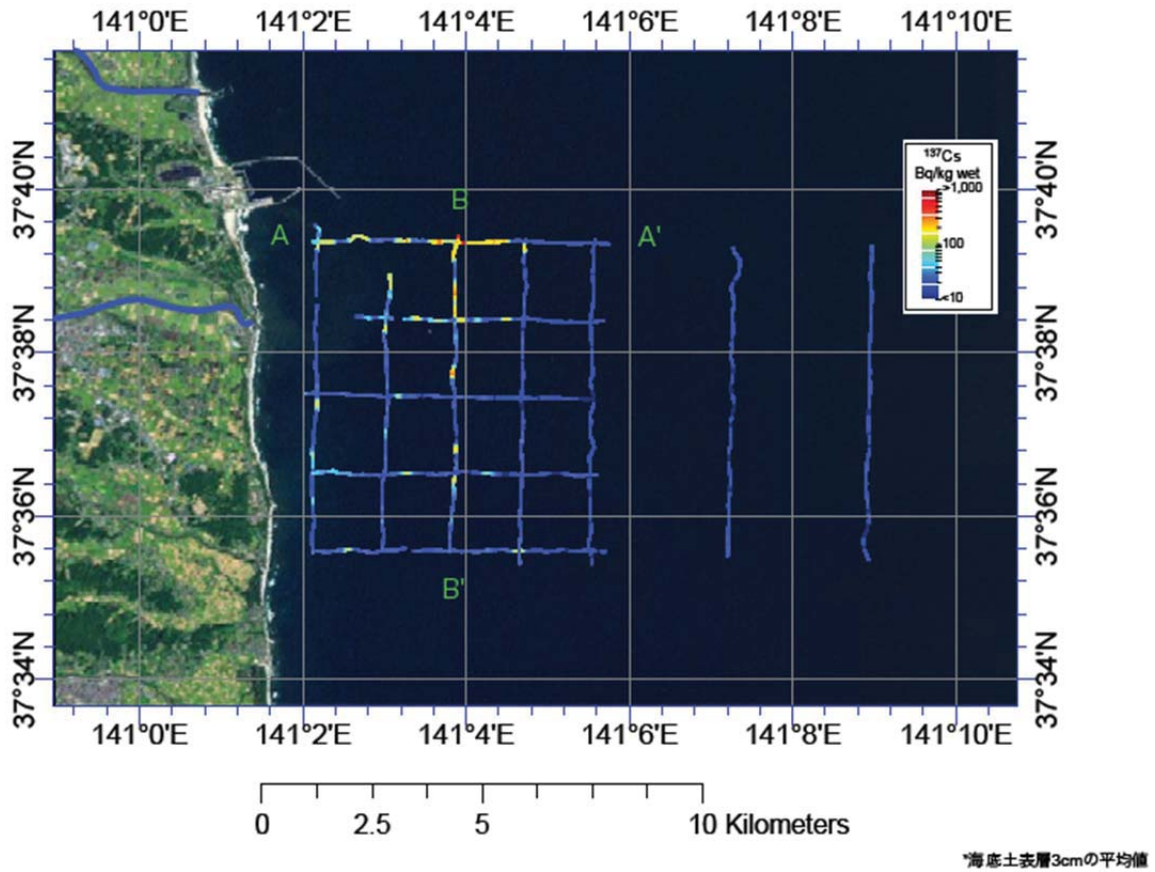


図 3-23 新田川河口沖での ^{137}Cs 濃度分布及び海底土壌の性状

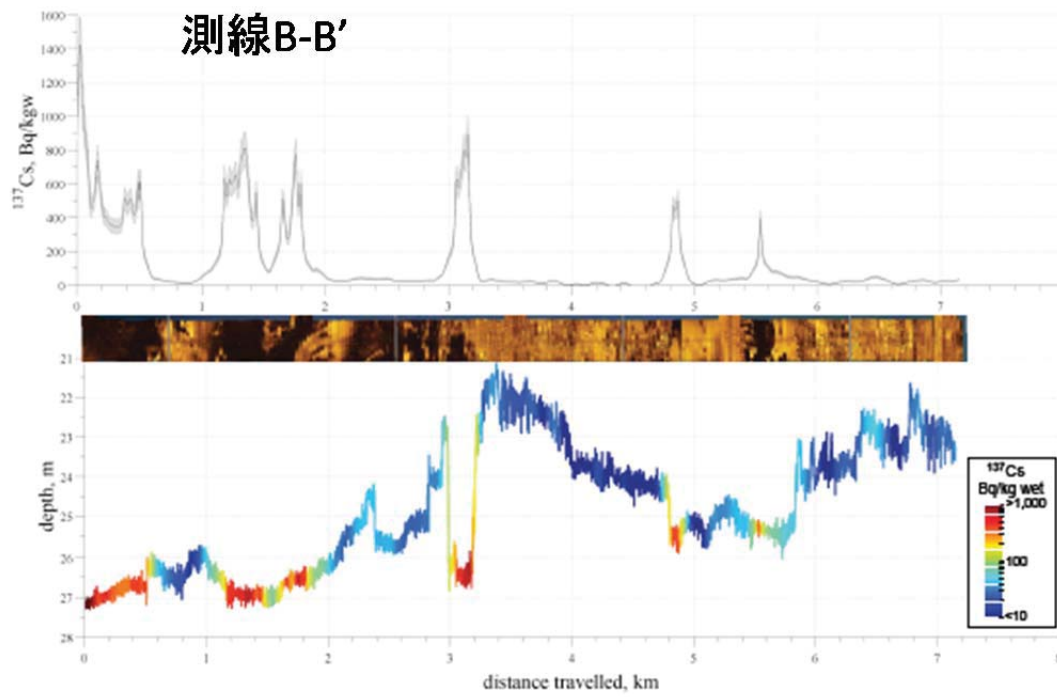
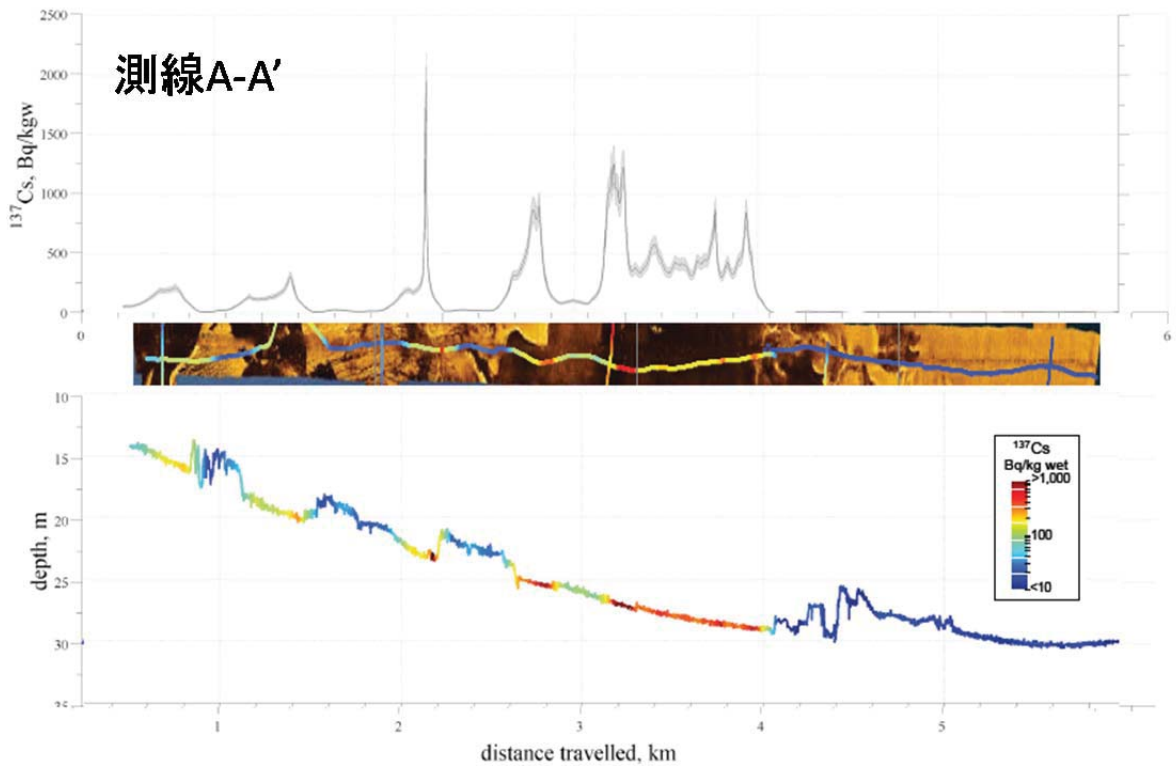


図 3-24 ^{137}Cs 濃度分布と海底地形及び海底土の性状との関係

(2) 海底土中の放射性セシウム濃度の鉛直分布の測定

p. 17 に記載した方法により 1F 近傍海域で採泥した試料については、高純度 Ge 半導体検出器により ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度、含水率の測定を行った。採泥位置と採泥位置における ^{137}Cs 濃度の最大値を図 3-25 にまとめた。また、図 3-26 に ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布を示す。なお、図には本調査以外の事業で採取した試料の分析結果も示した。

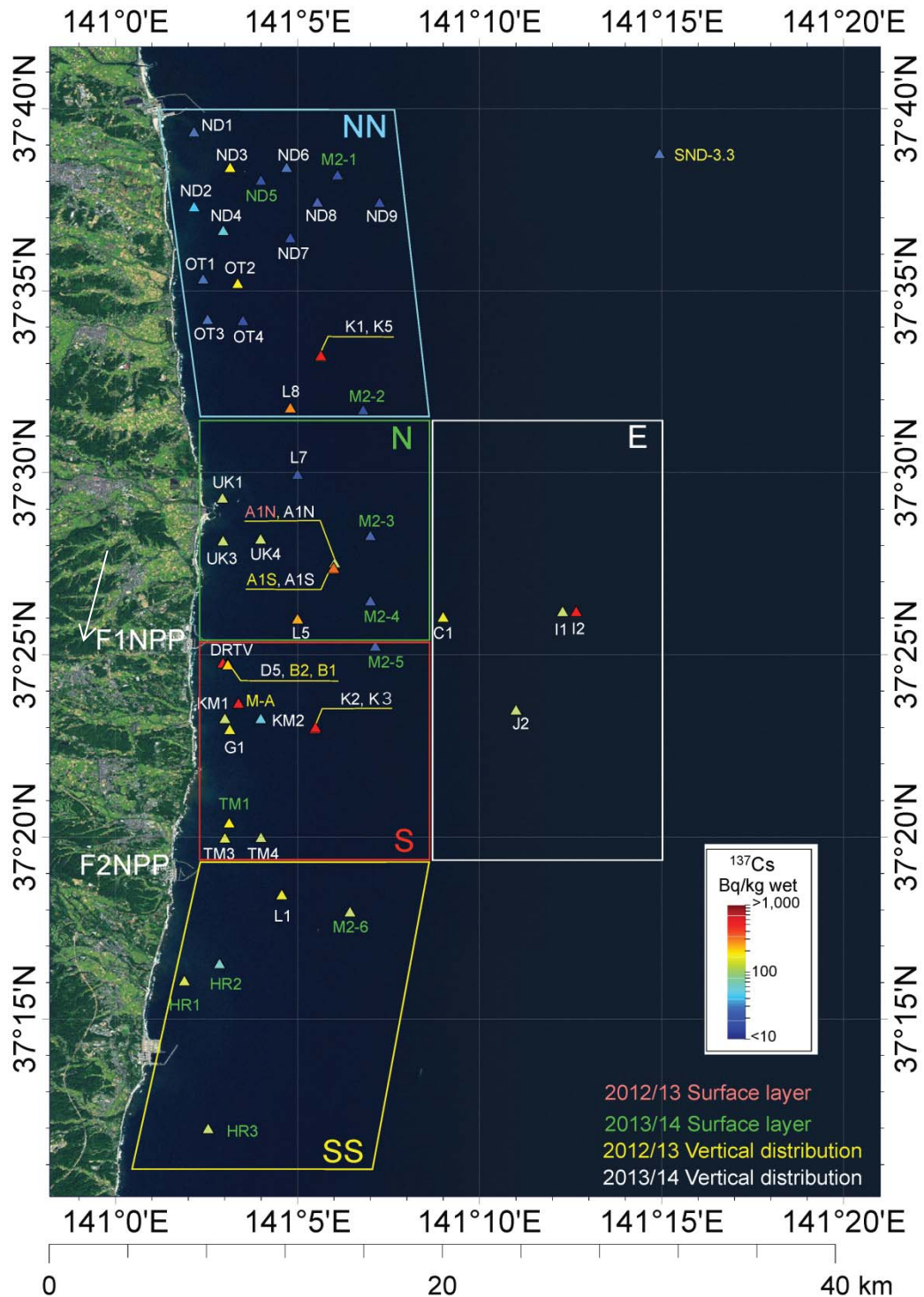
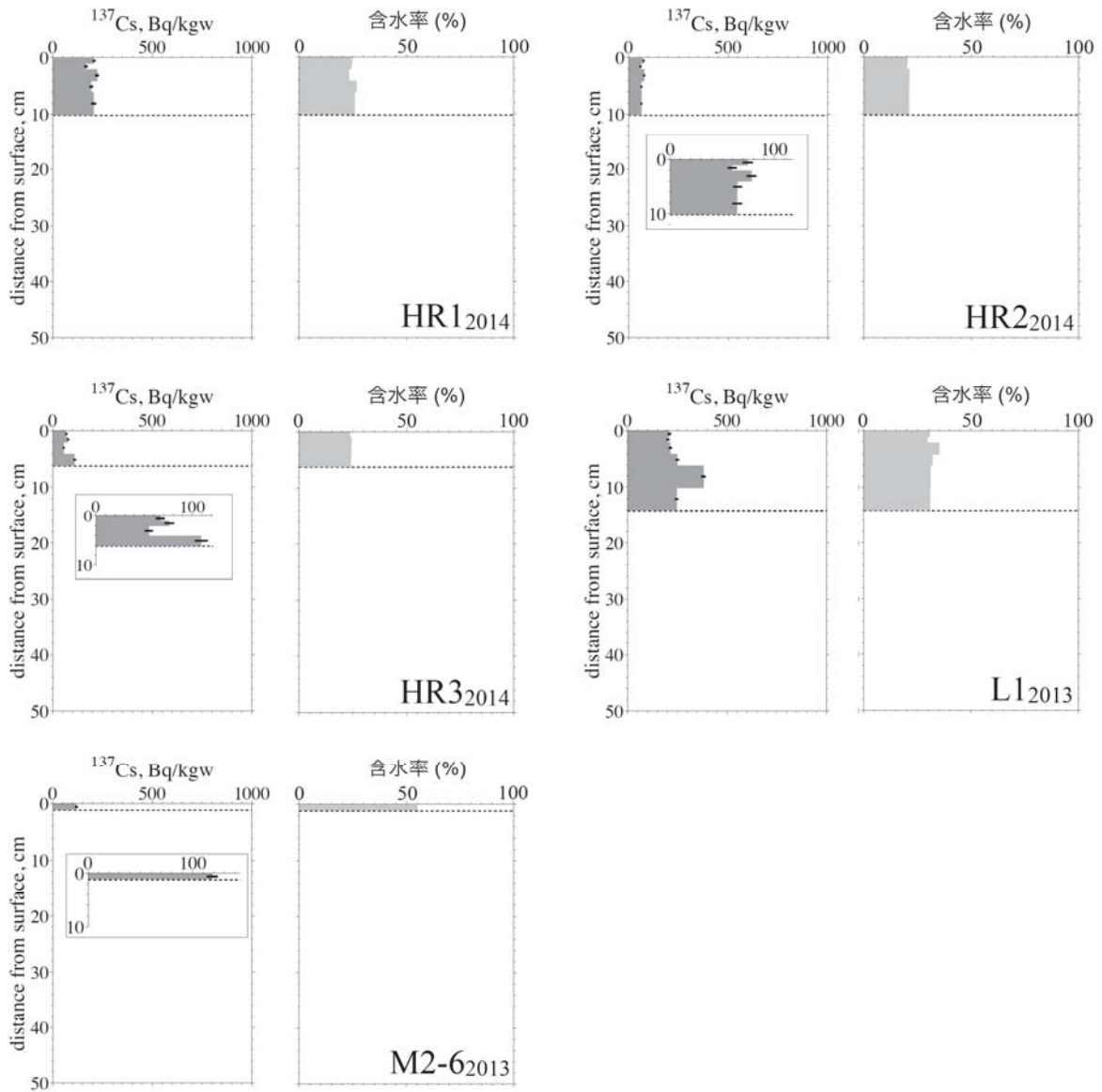
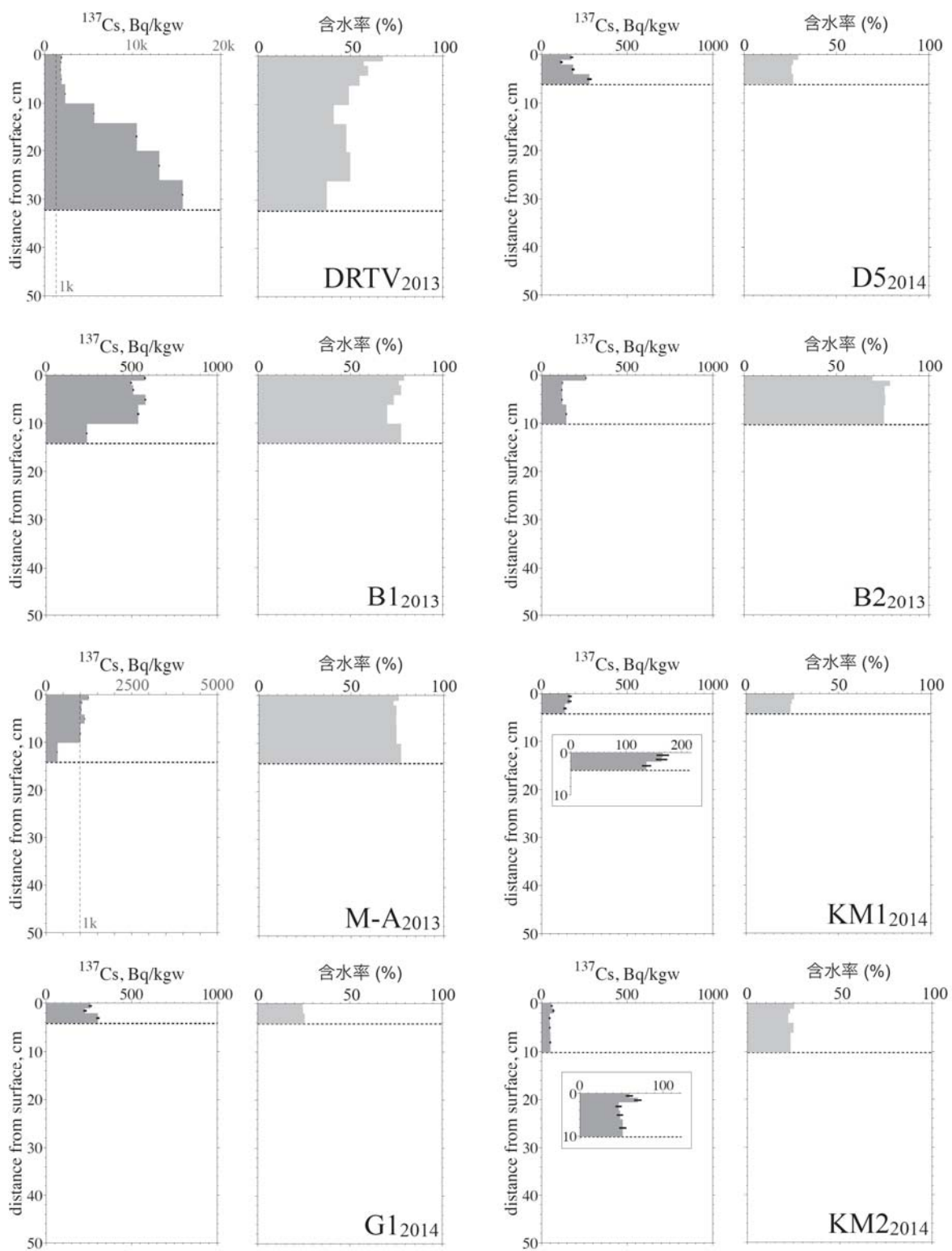


図 3-25 採泥位置と採泥位置における ^{137}Cs 濃度の最大値



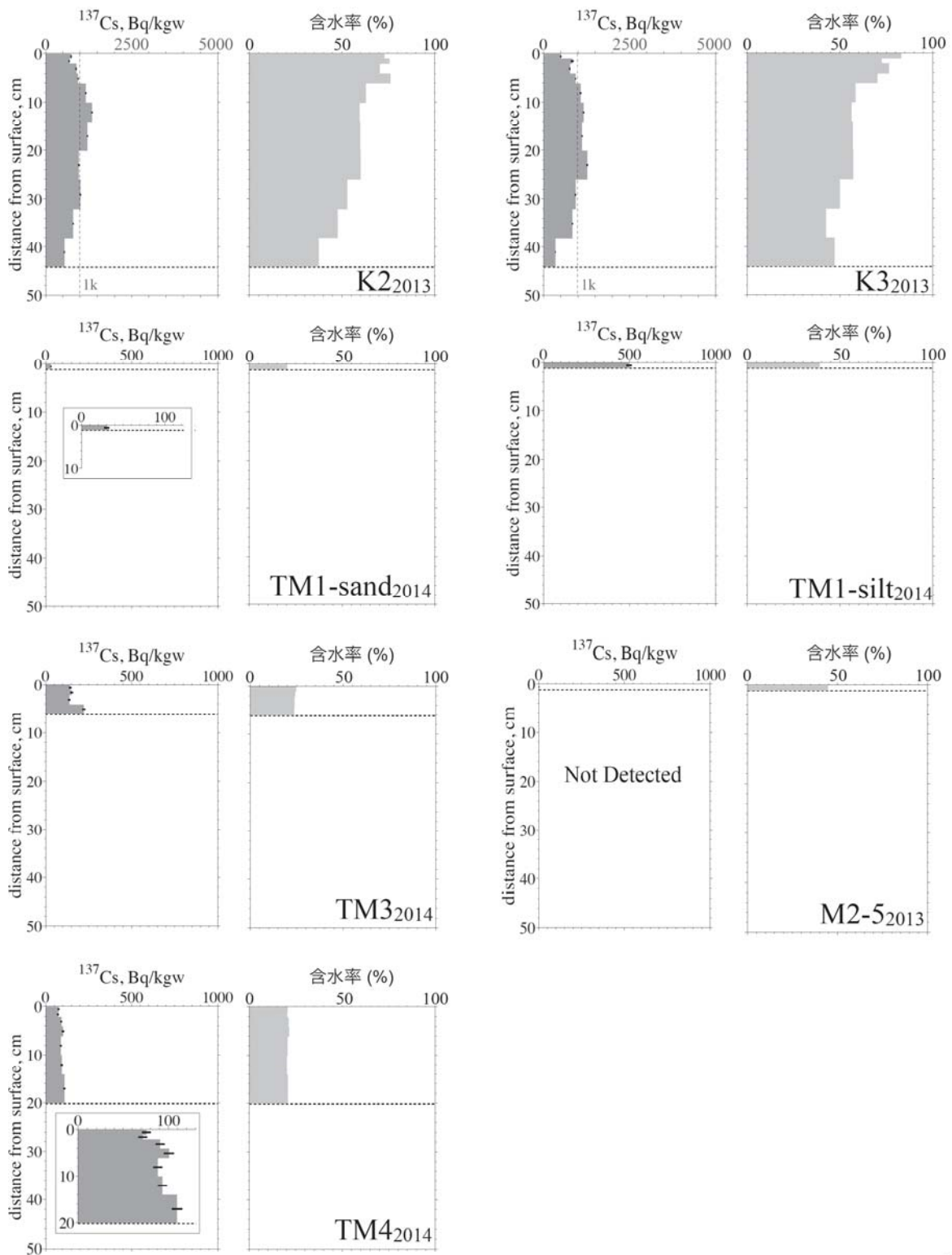
SS

図 3-26(1) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 SS 海域)



S

図 3-26(2) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 S 海域)



S

図 3-26 (3) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 S 海域)

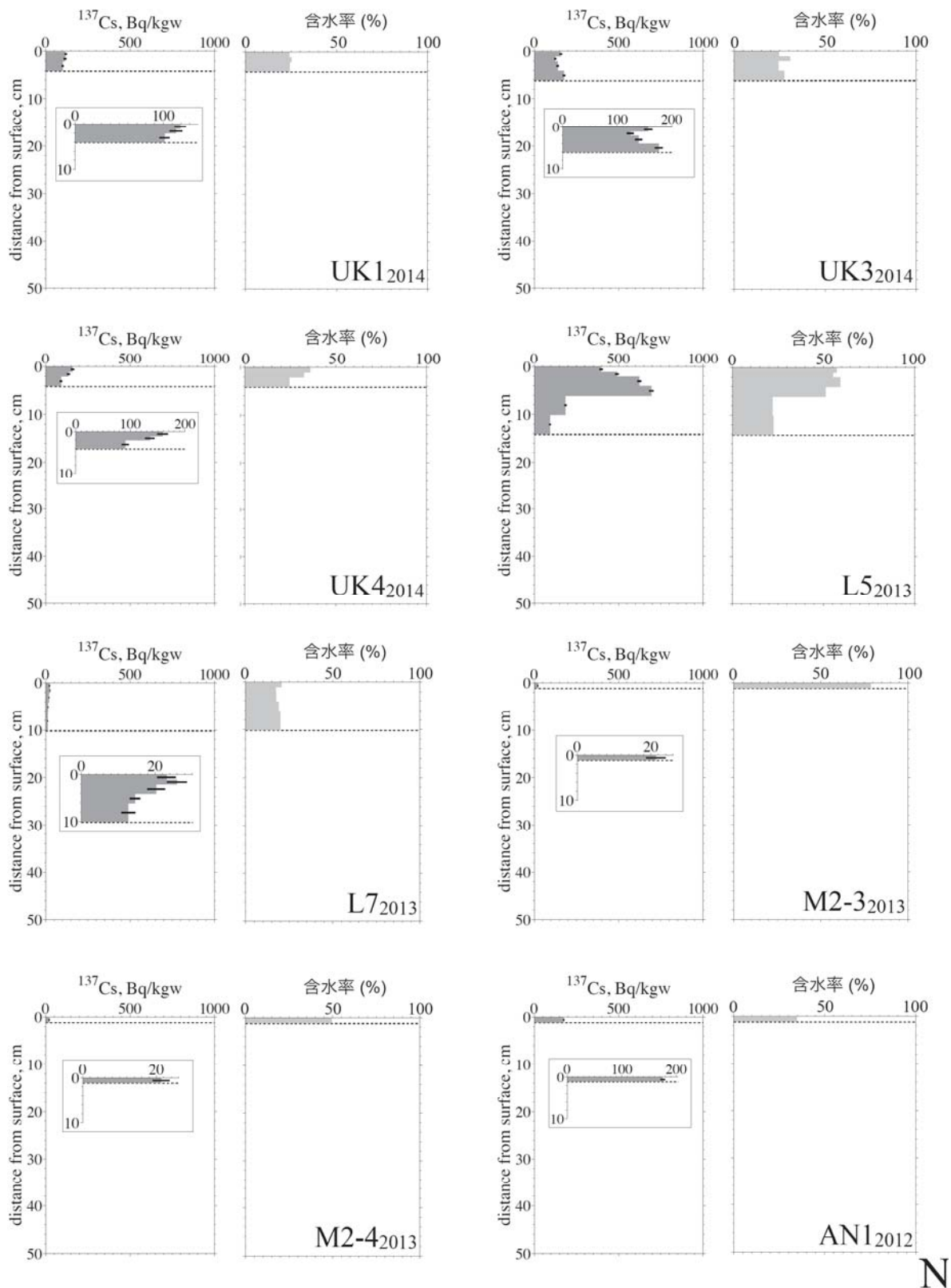
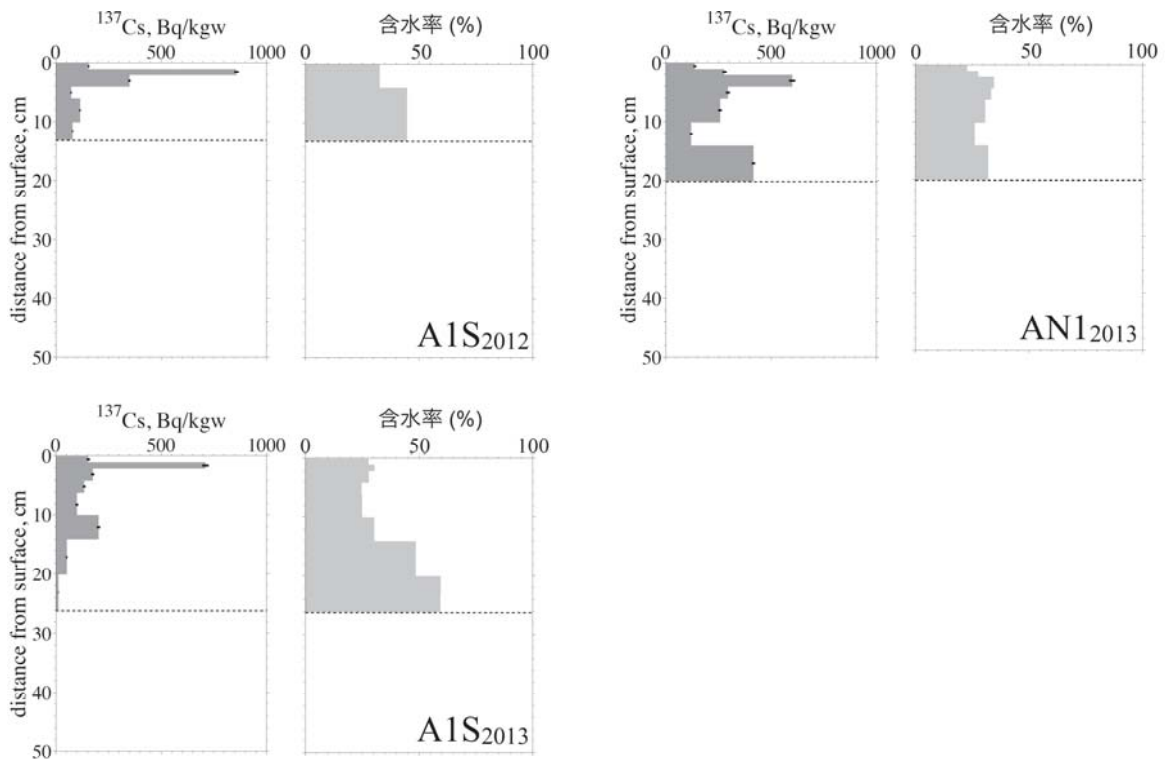
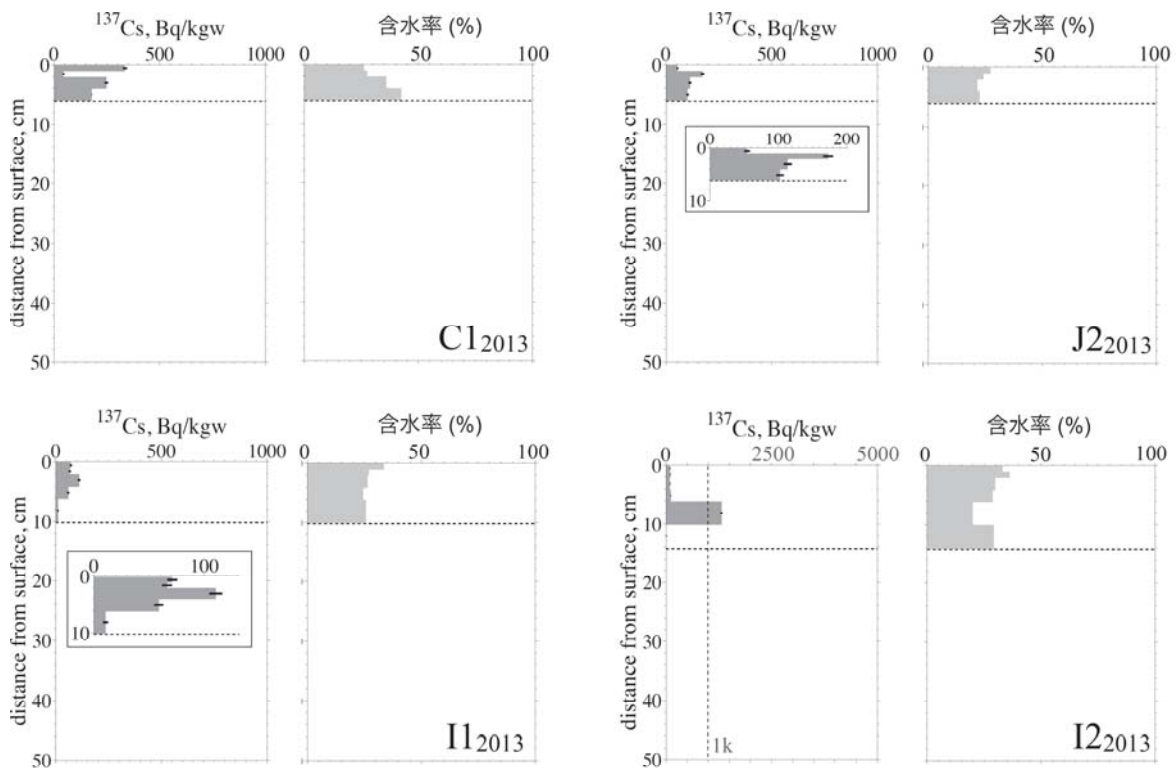


図 3-26(4) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 N 海域)



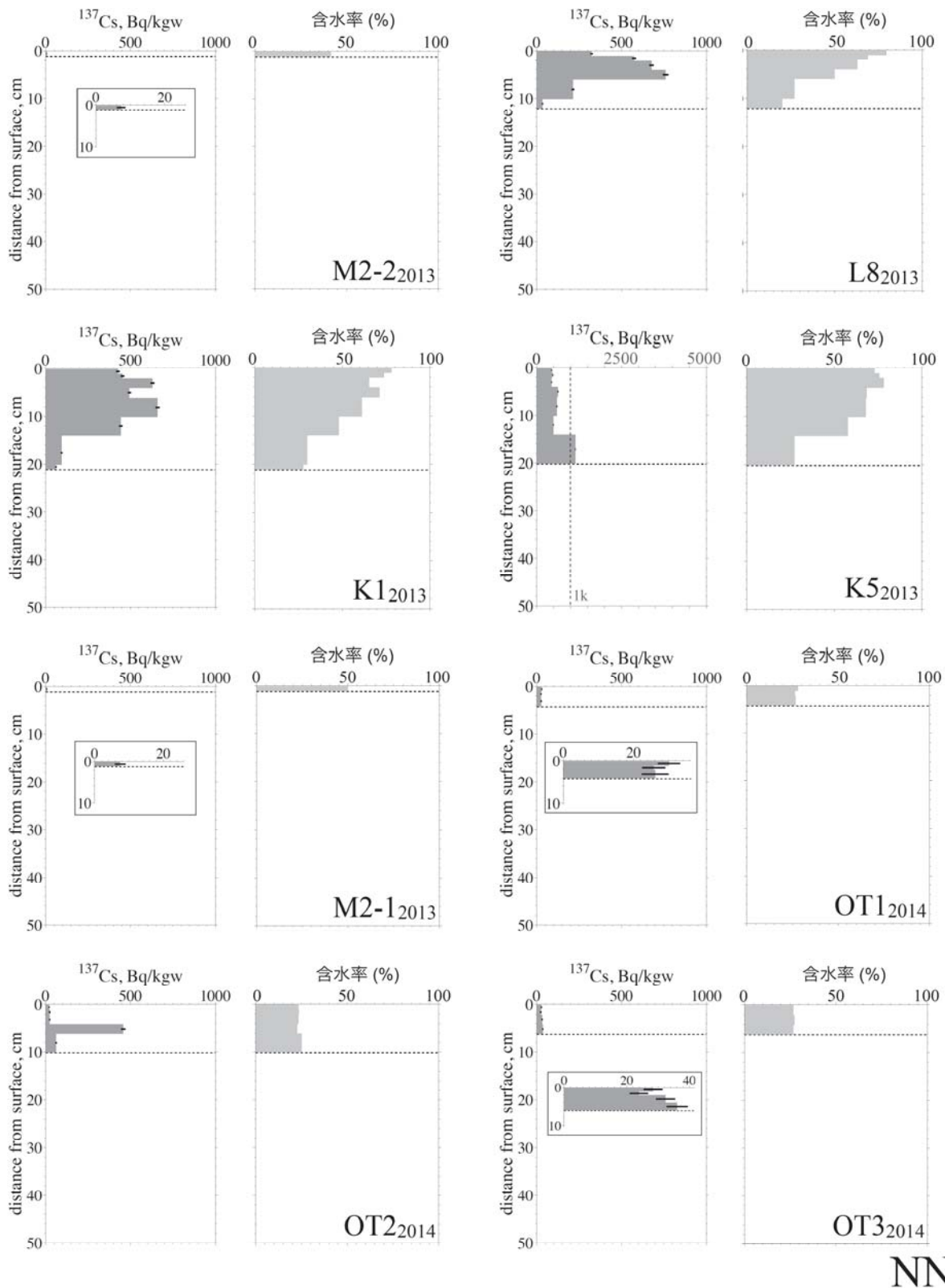
N

図 3-26 (5) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 N 海域)



E

図 3-26 (6) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 E 海域)



NN

図 3-26 (7) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 NN 海域)

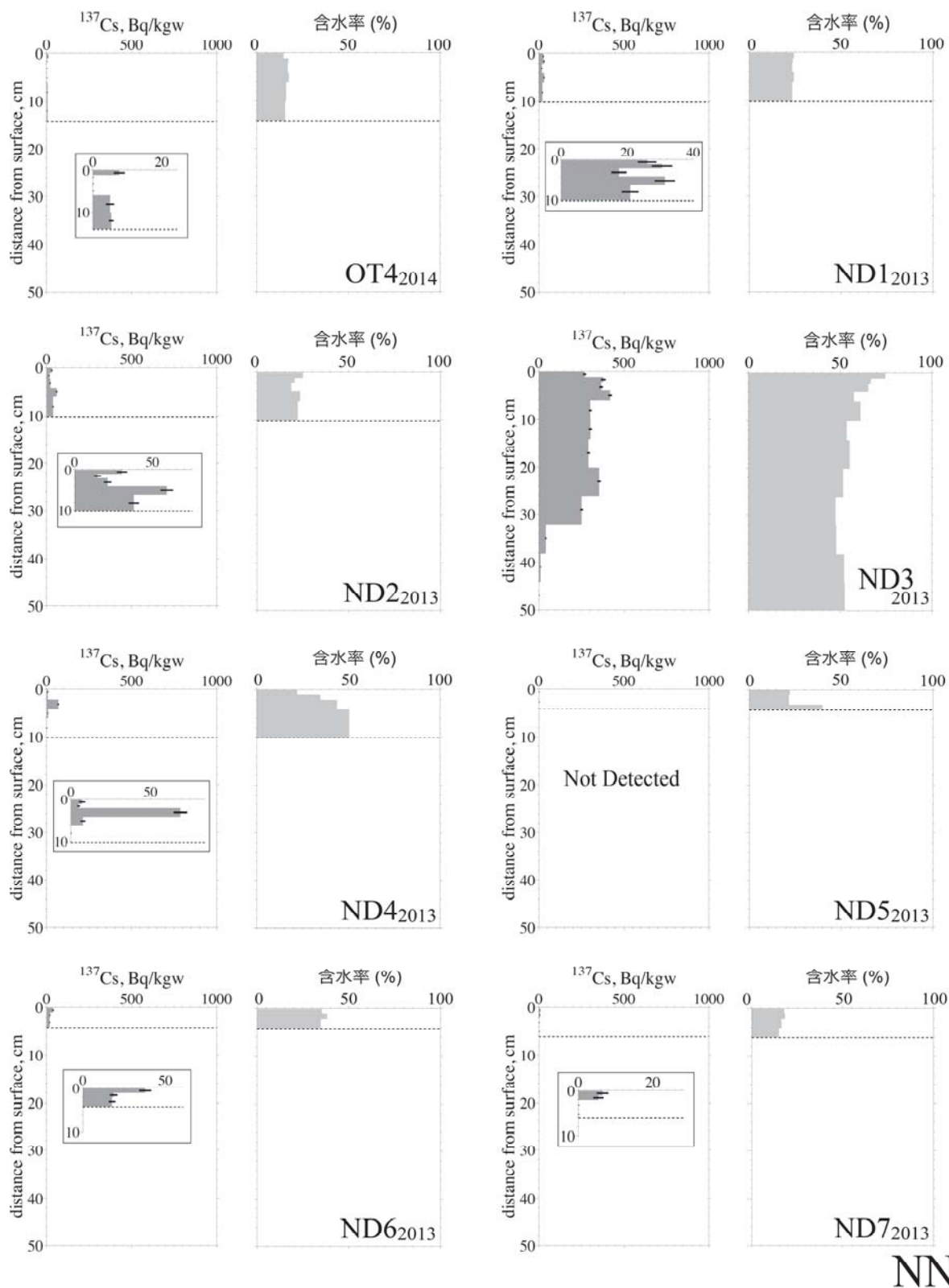
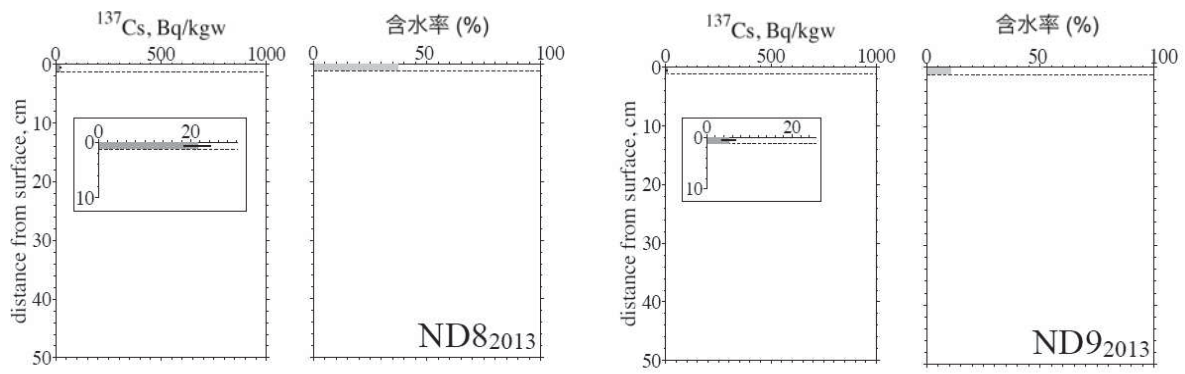


図 3-26 (8) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 NN 海域)



NN

図 3-26 (9) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 3-25 中 NN 海域)

3.3 流況調査

3.3.1 調査の方法

①放射能曳航測定時の潮流計による同時測定、②潮時を考慮した東西の測線上での測定、③設置型の超音波ドップラー式多層流向流速計（ADCP）による連続測定の3つの方法により流況調査を実施した。

上記①の測線を図3-27に示す。測定時には、船底装備型の潮流計（古野電機製：CI-35、周波数：130kHz）を使用しての流向流速の測定その他、水温塩分計（Onset社製U24-002-C）を曳航しての水温及び塩分を連続計測した。潮流計の測定層は3層として、流向・流速データを取得した。水温、塩分の測定層は、海面下1m、1.5m、2m、3mの4層とした（調査開始当初の測線1及び測線2は海面下0.5m層に設置したが、波浪の影響によるノイズが非常に大きいため測線2途中から最表層を1mとした）。水温・塩分計は、船側に設置したセンサーバーに取り付け、連続計測データを取得した。

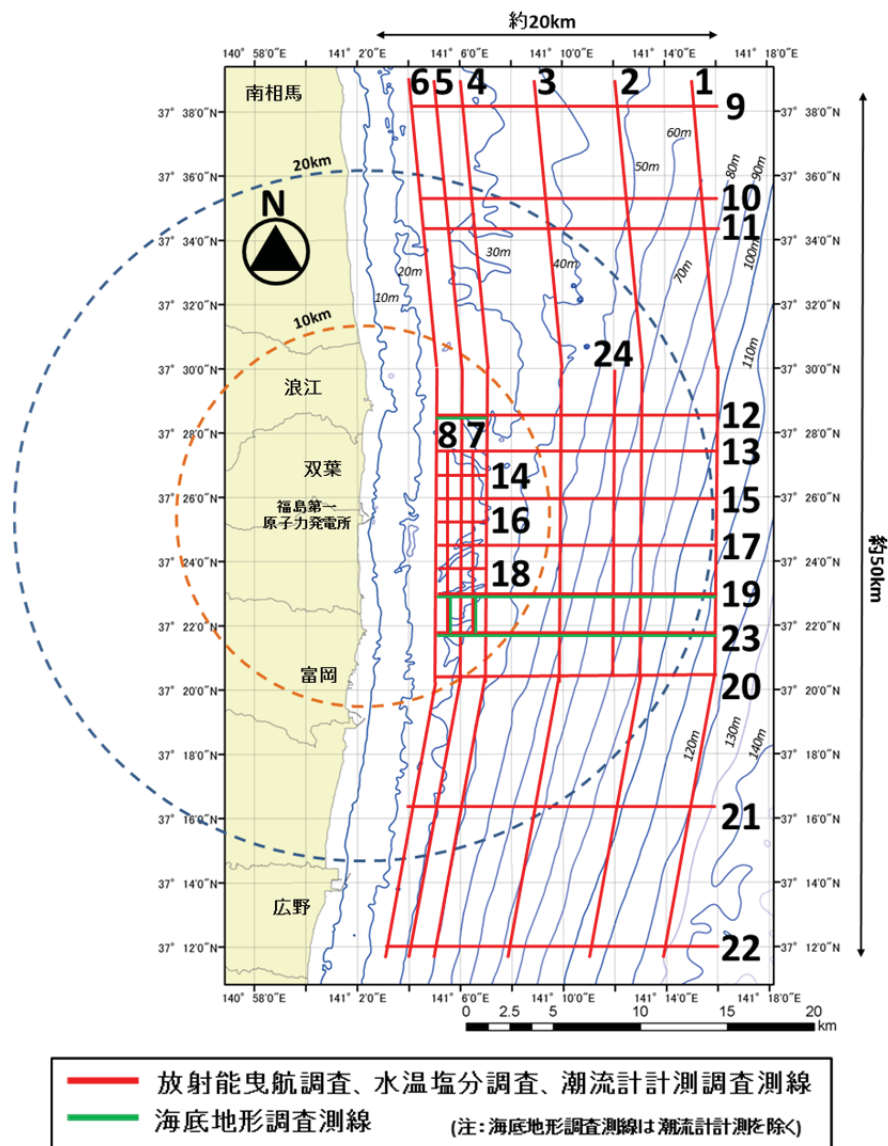


図3-27 流況調査測線（図中、赤線）

1F 近傍海域で、②潮時を考慮した東西の測線上での測定、③設置型 ADCP による連続測定を実施した場所を図 3-28 に示す。

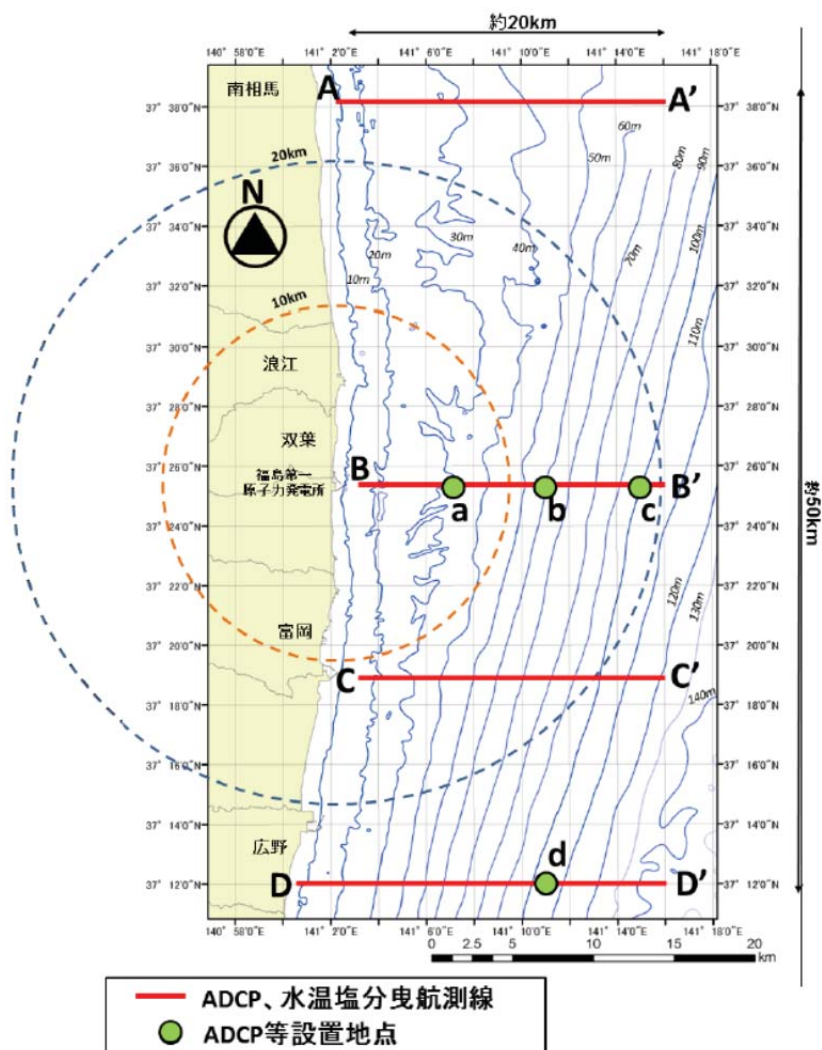


図 3-28 流況調査位置

4 測線 (A~D) において、調査船に艤装された流速計を用いて層別の流向流速分布データを連続的に取得した。各調査測線にそれぞれ船を配備し、上げ潮、下げ潮の 2 潮時に同時に測定を行った。また、流況調査に合わせて、水温、塩分の連続観測も同時に実施した。水温塩分の連続データの取得は、0.5m、1m、2m、3m、4m、5m の 6 層で行い、各測線上の 4 点で、水温の鉛直分布測定を実施して、5m 以深の水温分布についての補完を行った。水温の鉛直分布は、水温・塩分・深度計 (CTD) を用いて各測線上の 4 点において船上から海底まで垂下し、鉛直分布データを取得した。

4 地点 (a~d) に設置型 ADCP (RD Instruments 社製ワークホース ADCP)、電磁流速計 (JFE アドバンテック社製 COMPACT EM) 及び濁度計 (JFE アドバンテック社製 COMPACT CLW) を設置し、15 昼夜の連続観測を実施した。設置方法については、特に試験操業の障害になるような場所については網掛りを回避できる海底設置型耐トロール式治具 (TRBM) 等の器具を使用して設置した。設置後、連続観測を行い、表層から海底までを 10 層程度に分割し、層中の流

向流速分布のデータを取得した。また、底層付近の流況については、電磁流速計及び濁度計により測定した。これらの定点観測の結果から、時系列データ、流向・流速分布図、統計計算（最大流速、スカラー平均流速、ベクトル平均流速）、潮流調和解析（地潮流調和定数の算出）、残差流成分の算出を行った。これらの調査の時期は、表 3-1 のとおりである。

表 3-1 流況調査実施時期

	測点・測線	調査日
②潮時を考慮した東西の測線上での測定	A	平成 26 年 1 月 20 日
	B	
	C	
	D	
③設置型の ADCP による連続測定	a	平成 26 年 1 月 14 日～平成 26 年 2 月 1 日
	b	平成 26 年 1 月 15 日～平成 26 年 2 月 1 日
	c	平成 26 年 2 月 20 日～平成 26 年 3 月 11 日
	d	平成 25 年 12 月 14 日～平成 26 年 1 月 11 日

3.3.2 曳航調査時の流況調査結果

①放射能曳航測定時の潮流計による同時測定の結果から南北調査測線及び東西調査測線の結果を抽出し、主に表層と底層における流向流速図を図3-29及び図3-30にそれぞれ示した。南北測線の沖側では南南西から西方向の一様な流れが見られ、より陸側の測線では南方向の流れが主ではあるが、東西に振れる流れが見られた。

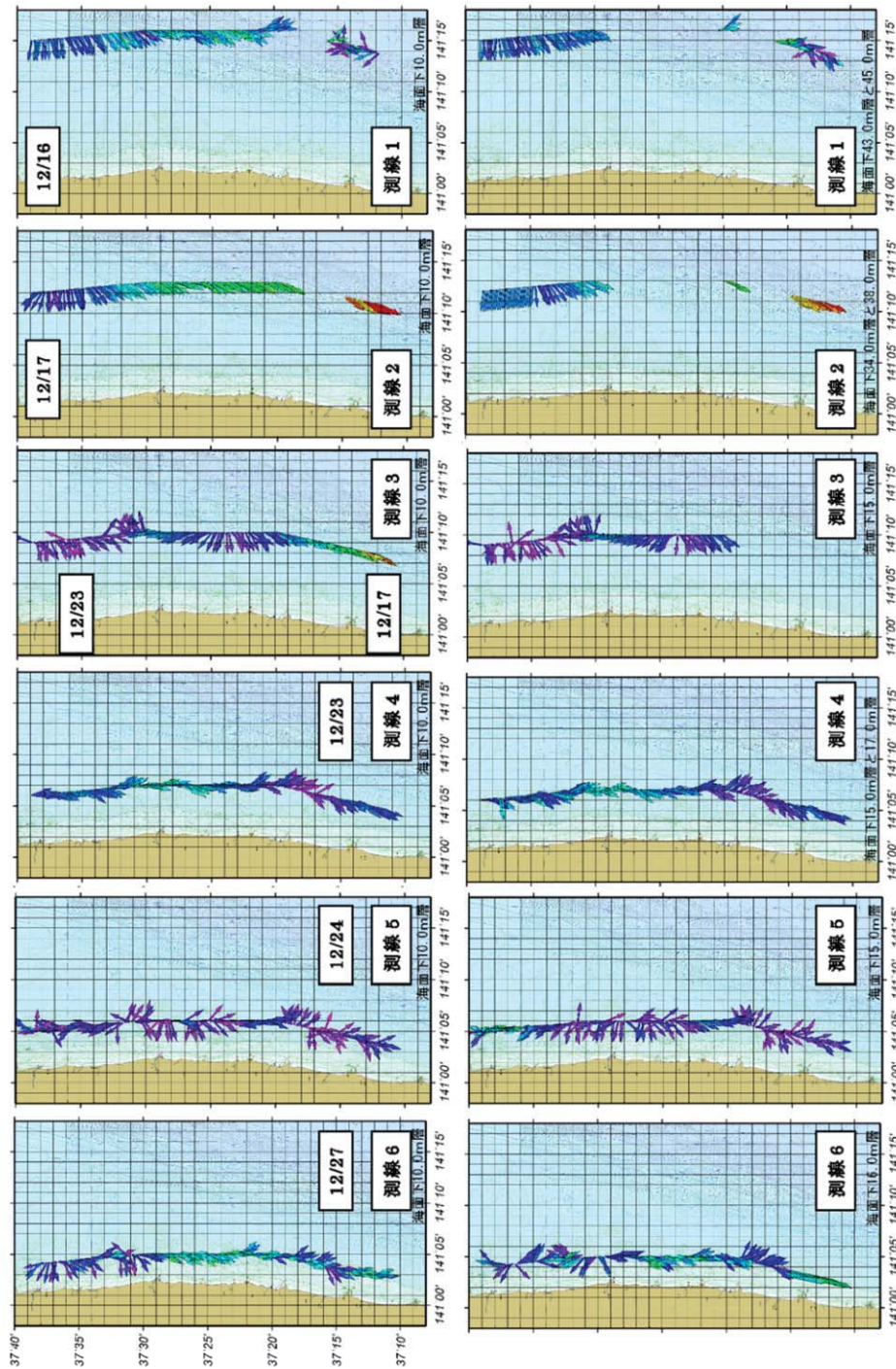


図3-29 流向流速観測結果（南北測線：測線1～測線6）

一方、東西測線では、全体的に南～南南西方向の流れが多く見られるが、明確な傾向は見られなかった。東西測線 11～測線 17 の沖側では南北方向の複雑な流れとなっている。

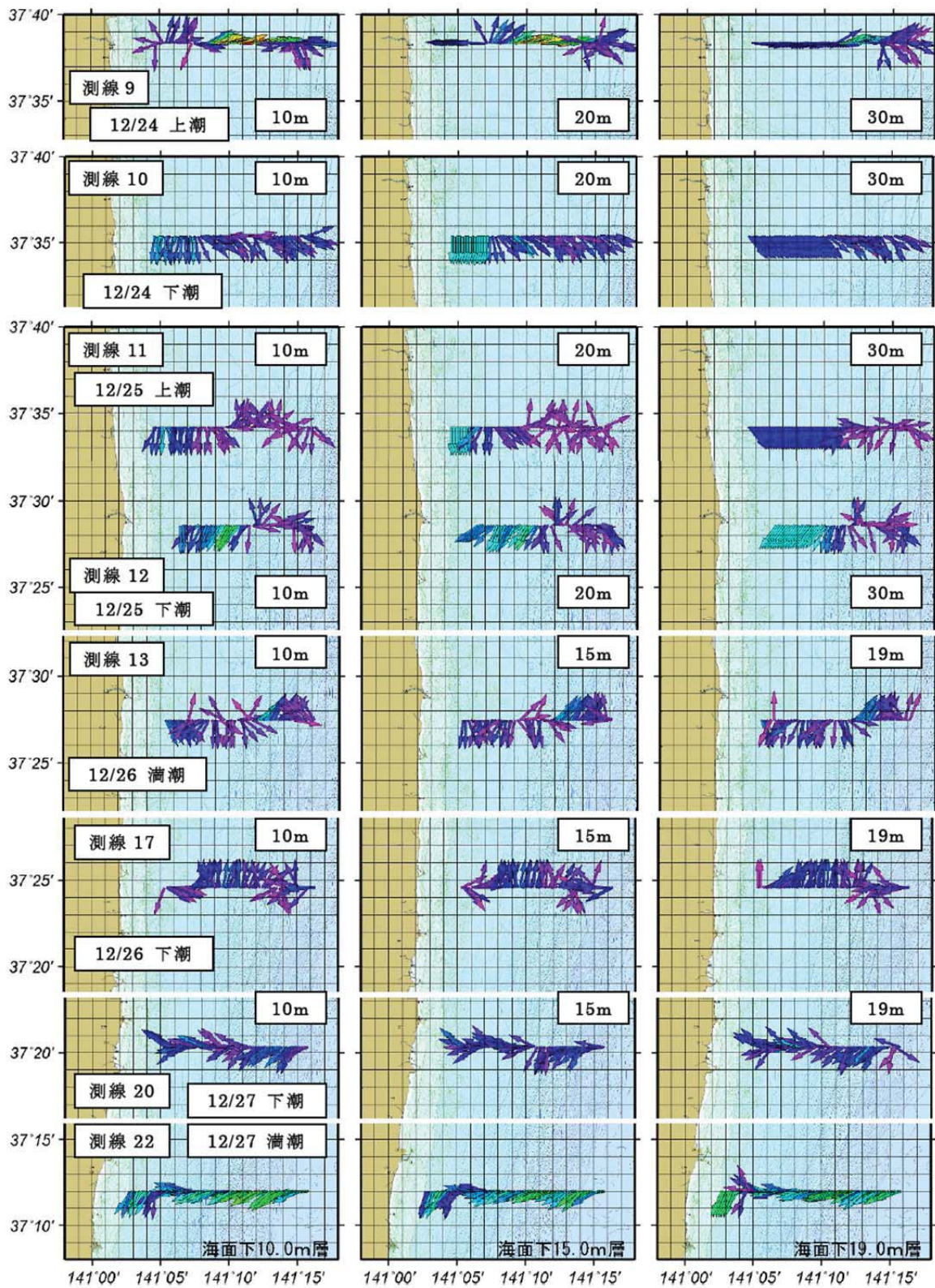


図 3-30 流向流速観測結果（東西測線：測線 9～測線 13、測線 17、測線 20、測線 22）

3.3.3 曳航型 ADCP 等による調査結果

②潮時を考慮した東西の測線上での測定における下げ潮時の流況平面分布図を図 3-31 に示す。図に示すように、下げ潮時において岸寄りでは南寄りの流れとなっており、全層で概ね同じ流向である様子が見られた。一方、沖寄りでは、測線毎に流向が異なり、複雑な流れの場となっている。全測線中で測線 A の流れが最も速く、東経 141° 12' 及び東経 141° 17' 付近に 20cm/s を超える比較的速い流れの軸が確認できる。また、測線 B では東経 141° 10' ~13' の海域において、33m 層と 53m 層の間で流向が北東から南東と急激に変化している点が注目される。上げ潮時における流向は、岸寄りで概して南西から西方向、測線 D の岸の近傍で北方向となっており、沖側は、下げ潮時と同様に測線毎に流向が異なっている。

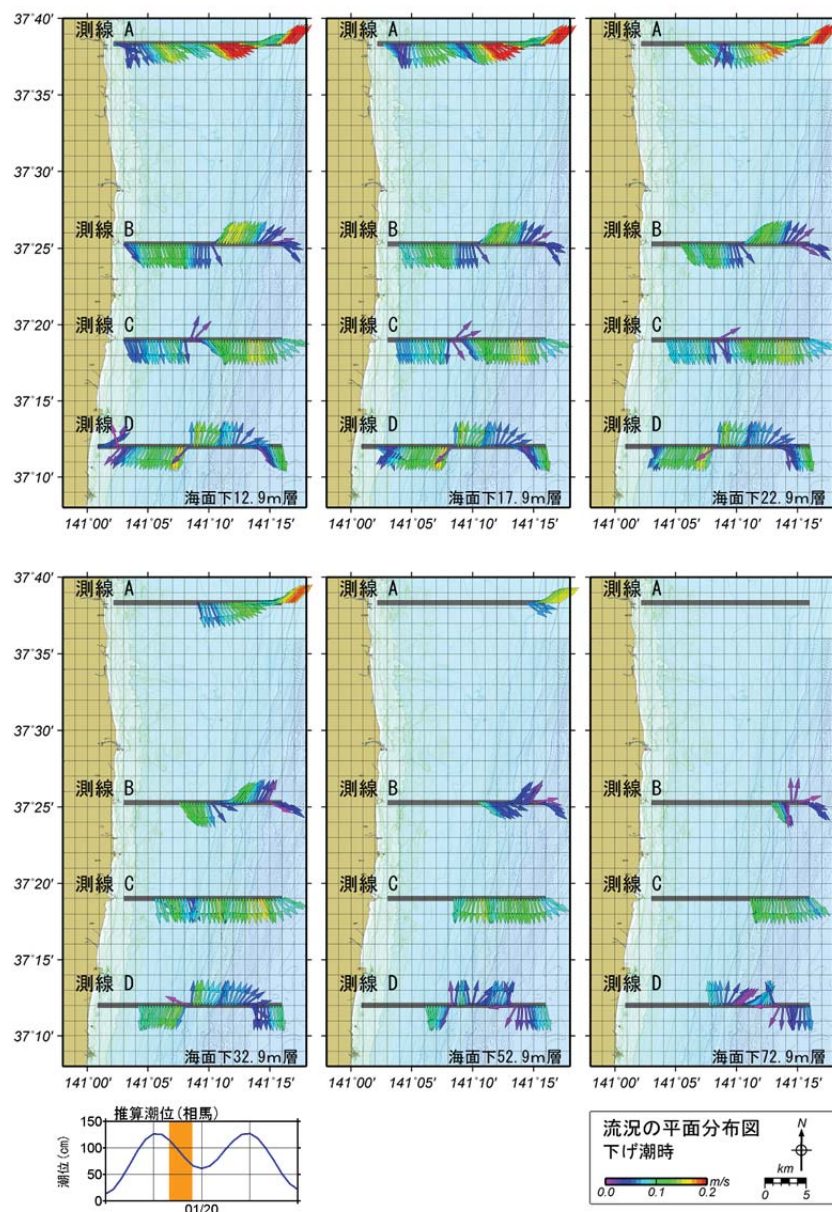


図 3-31 流況の平面分布図（下げ潮時）

3.3.4 設置型流向流速計等による調査結果

③設置型の ADCP による連続測定の結果のうち、測点 a 及び b における流向別流速出現頻度を見ると、全層において南、もしくは南南東方向の出現が多発し、これに次いで北方向の流れが多かった。測点 c においては、北から北北東の出現が多発したが、下層付近では南方向の出現も多かった。測点 d においては、表層から中層で南南東から南及び反対方位に当たる北北東の出現が多く見られた。ごく下層では南から南南東の出現が多く、北側の出現は減少した。

各測点における恒流図（期間平均流）を図 3-32 に示す。恒流図は、表 3-2 に示す各測点及び観測層における観測期間中の平均流を示すものであり、各測点から代表的な 3 層（上、中、下層）を抽出し、恒流成分（東方・北方成分のそれぞれの平均値の合成成分）の流速及び流向をベクトル表示で示した。まず、測点 a、b 及び d について見ると、恒流は下層程速くなる傾向であり、流向は測点 d の表層を除けば概ね南南東の流れであった。一方、測点 c では他の 3 地点と傾向が異なり、流速は上層ほど速く、流向は北北西から北北東の範囲に分布した。

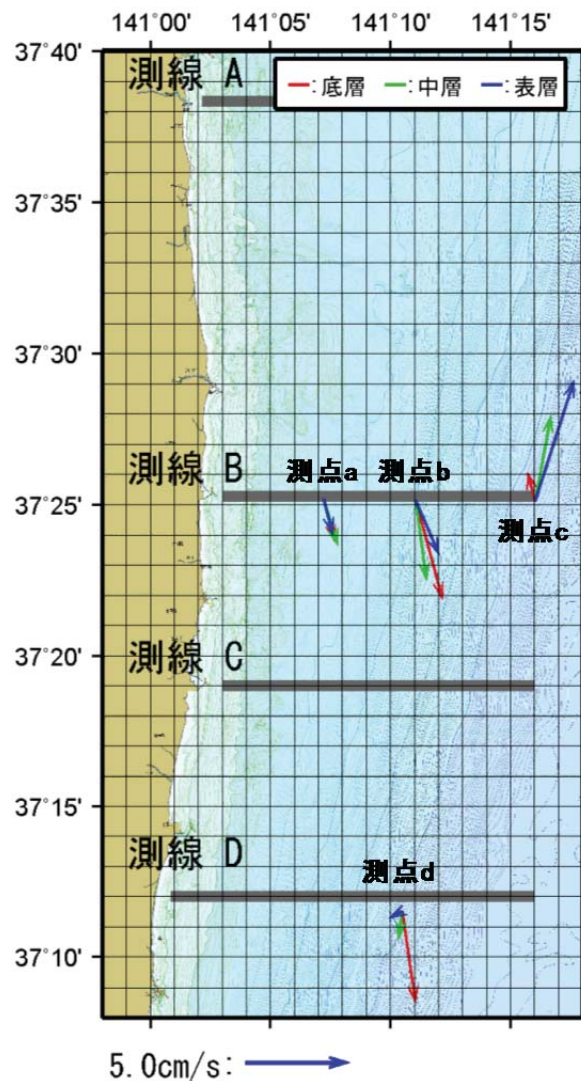


図 3-32 恒流図

表 3-2 恒流成分一覽

測点 a			測点 b			測点 c			測点 d		
観測層 (m)	流速 (cm/s)	流向 (°)	観測層 (m)	流速 (cm/s)	流向 (°)	観測層 (m)	流速 (cm/s)	流向 (°)	観測層 (m)	流速 (cm/s)	流向 (°)
			52.5	2.9	157.0	97.5	6.3	17.8			
			47.5	2.9	156.6	87.5	6.5	12.0	87.5	0.7	241.8
			42.5	3.1	161.1	77.5	5.8	12.6	77.5	0.7	213.1
			37.5	3.3	166.4	67.5	4.8	11.6	67.5	1.0	177.3
			32.5	3.6	169.8	57.5	4.8	9.7	57.5	0.9	181.0
27.5	1.7	162.0	27.5	4.0	172.4	47.5	4.3	10.4	47.5	1.4	188.1
22.5	1.8	165.2	22.5	4.4	175.5	37.5	3.9	13.2	37.5	2.2	183.7
17.5	2.1	167.9	17.5	5.0	175.8	27.5	3.5	15.0	27.5	3.0	177.9
12.5	2.4	162.8	12.5	5.5	173.8	17.5	2.6	12.6	17.5	4.1	172.9
7.5	2.6	158.9	7.5	5.7	171.0	7.5	1.8	7.0	7.5	5.4	165.8
1.2	2.2	164.9	1.2	5.1	164.8	1.2	1.5	344.3	1.2	4.6	171.8

※(1) 観測層：海底面からの距離(m)

※(2) 彩色セル：恒流図に図化した値

3.4 1F 近傍における調査のまとめ

1F 近傍における総延長約 800km の測線にわたって、曳航式ガンマ線スペクトロメータを用いて海域の放射性物質分布の計測を行なった。

1F の極近傍に放射性物質濃度が高い海域が存在し、沖合 6km の測線においては表層 3cm の平均値で最大 2,000Bq/kg-wet の ^{137}Cs が観測され、沖合 4km の測線においては ^{137}Cs 濃度が 1,000Bq/kg-wet を超える箇所が 20 箇所程度見つかった。

また、1F 東方沖 20km の地点から南西方向に沖合 10km 付近よりも比較的濃度が高い海域が存在し、この海域では ^{137}Cs 濃度が数 100Bq/kg-wet 以上で分布していた。この海域については、福島県沖合に宮城県沖から南西方向に連続して泥質帯が存在しており、この海域における海底土の含水率は 16%~31%であった。

平成 24 年 11 月の調査においては、約 8m の段差の底に高濃度の ^{137}Cs が堆積していたが、平成 25 年 12 月の調査においても同様の傾向が確認され、 ^{137}Cs 濃度にも大きな変化はなく、1 年間での変化はあまりなかった。また、沖合 6km の測線についても、全体で 40km 以上の連続的な分布を計測することができたが、海底地形に段差がある箇所の底に ^{137}Cs が堆積していた。

第4章 阿武隈川河口沖の放射性物質分布の把握

4.1 海底地形及び土質調査

4.1.1 海底地形及び土質調査の方法

阿武隈川河口域の海底地形及び土質の調査は小型漁船により、サイドスキャンソナーによる海底面探査及び単素子音響測深機による深淺測量を実施した。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、予定していた曳航測線に沿って実施した。実施方法は、p. 12 の図 3-5 に示す小型漁船による調査方法と同一である。

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「鮎川」検潮所のデータを使用した。

4.1.2 海底地形及び土質調査の結果

海底面探査の範囲とモザイク図及び等深線図を図 4-1 に示す。なお、モザイク図は平成 25 年 3 月、平成 25 年 7 月及び平成 26 年 1 月調査時の 3 回分の調査結果を合わせて示した。反射強度が弱い箇所を濃い茶色、反射強度が強い箇所を淡い色で示している。図 4-2 中の採泥地点 St. 4 は濃い茶色となっており反射強度が弱いことから、海底土は泥質状であると考えられるが、これについては採泥試料の肉眼での観察、表層から 10cm までの平均粒径が 14~16 μm であること、及び含水率が 52~58% であることから言える。また、採泥地点 St. 10 はやや淡い茶色となっており反射強度は中間的であることから、海底土は砂質を含むものと考えられるが、これについても採泥試料の肉眼での観察、表層から 10cm までの平均粒径が 33~65 μm であること、及び含水率が 33~40% であることから、砂質を含む泥質状の海底土と考えられ、反射強度測定の結果と整合がとれている。

また、10 月の調査では、区域西側に予定していた測線付近に定置網が設置してあったことにより測量できない区域があった。定置網が入っていた場所は図 4-2 に示したとおりである。

なお、区域西側の予定測線で阿武隈川河口付近は定置網が入っていないが、海象状況がよくなかったことと、定置網を示すブイを発見できなかったことから危険と判断し、調査区域から除外した。

海底面探査により海底の障害物の存在が明らかとなり、魚礁は調査範囲の北側でみられ、震災によるガレキと思われる障害物は阿武隈川河口域の水深 17m~18m 付近で確認された。曳航調査時にはこれらの障害物との接触を避けるよう、曳航測線を設定した。

7 月との地形変化を見るため、水深データの検証（7 月と 10 月の等深線比較及び 3 月、7 月、10 月の断面の比較）を行った。その結果、7 月とほとんど差異がみられず、地形の変化は認められなかった。

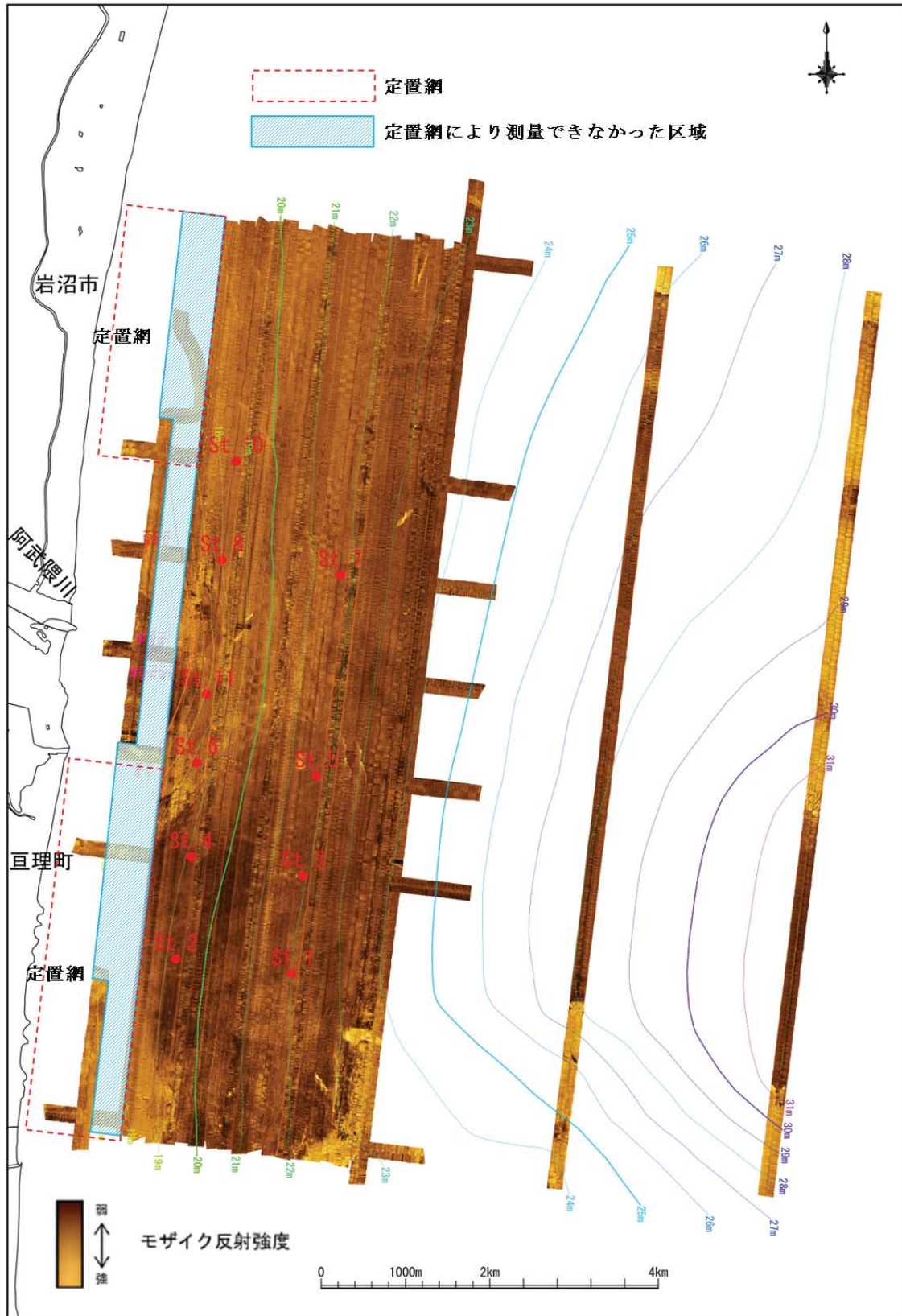


図 4-1 サイドスキャンによる海底面探査範囲とモザイク図及び等深線図

4.2 阿武隈川河口沖の放射性物質分布調査

4.2.1 調査の方法

阿武隈川河口沖の放射性物質分布の調査においては小型漁船を使用した。計測方法については、3.2 章で述べた方法と同じであり省略する。阿武隈川河口沖で設定した測線は図 4-2 に示すとおりで、総延長 97km である。

放射性分布調査は、平成 25 年 10 月及び平成 26 年 1 月に実施した。平成 26 年 1 月には海苔養殖の網が設置されていたため、図 4-2 の水色の網掛け範囲を避けて調査を実施した。

採泥は 10 月調査時には、St. 1~St. 10 の 10 箇所、1 月調査時には、St. 5~St. 8 及び St. 11 の 5 箇所で行った。また、St. 5、6、11 の 3 箇所については、11 月及び 12 月にも採泥を実施した。

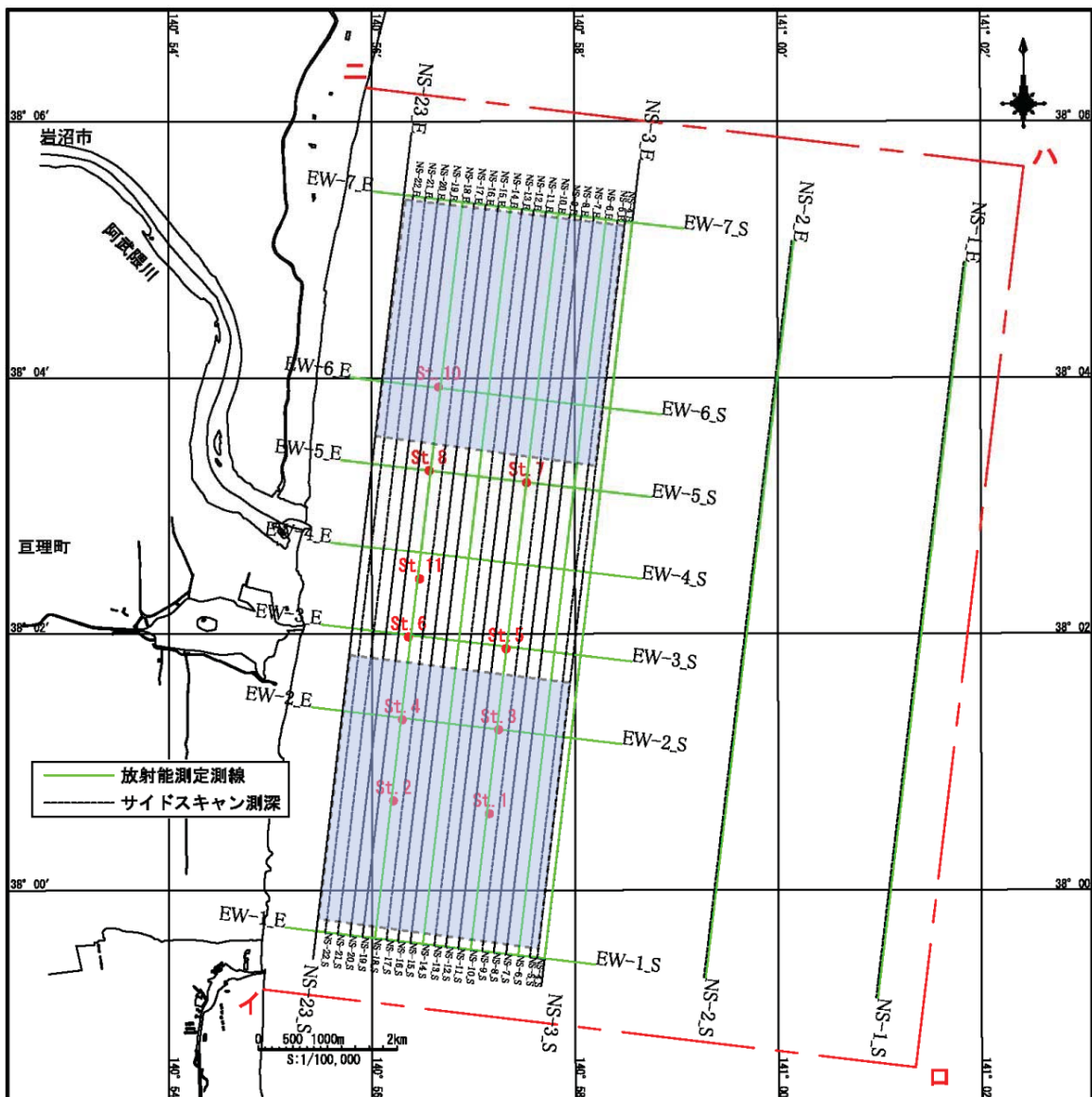


図 4-2 調査測線及び採泥地点

4.2.2 調査結果

(1) 曳航調査結果

本調査研究開始前に平成25年3月及び7月に実施した曳航調査のまとめを図4-3に示す。阿武隈川河口沖においては、海底土の反射強度が弱い箇所以外の海域の平均に比べて放射能物質濃度が高い海域が存在し、その鉛直分布は表層よりも10cm以上深いところにピークが存在した。

本調査における阿武隈川河口沖合の調査は、平成25年10月及び平成26年1月に実施したが、本調査研究開始以前のデータも含め、経時変化として図4-4に示した。

また、本調査研究では、平成25年9月18日に台風18号（気圧960hPa、最大風速35m）が通過した後の平成25年10月5日～16日に曳航調査を実施した。そのため、10月の調査結果をこれまでの調査結果と比較すると、台風等の出水イベントによる影響を把握することができる。図4-5に台風前と台風後の ^{137}Cs 濃度の分布の変化を示す。若干の変化は見られたものの、 ^{137}Cs の分布状況に大きな差はなかった。

また、図4-6～図4-9に平成25年3月、7月、10月及び平成26年1月の4回の調査における経時変化についての詳細な分析を示す。阿武隈川河口から南に1.3kmの東西の測線A-A'については4回の調査の測定結果が存在するが、平均値と最大値ともに大きな変化はなかった。

阿武隈川河口前面の東西の測線B-B'については、平成25年3月、10月及び平成26年1月の3回の調査の測定結果が存在する。最大値は3月の調査に比べ、10月及び1月の調査では約1/3になる一方、平均値がやや増加し、沖合3～3.5km付近に ^{137}Cs が移行していた。

阿武隈川河口から北へ1.3kmの東西の測線C-C'については、平成25年3月、10月及び平成26年1月の3回の調査の測定結果が存在する。3月の調査と比較して、10月及び1月の調査では最大値、平均値ともに上昇しており、沖合2～3.5km付近で濃度が上昇していた。

南北の測線のうち最も阿武隈川河口に近い測線D-D'については、平成25年7月及び10月の2回調査を実施した。両者の平均値は大きな変化はないが、10月の調査では最大値が小さくなっており、 ^{137}Cs 濃度の分布状況を見ると、7月に測線の南から6km付近に存在したピークがならされて南側に拡散している様子が見られた。このように、阿武隈川河口沖合の ^{137}Cs 濃度分布は、 ^{137}Cs の比較的高い濃度を示した場所の状況に大きな差はないものの、個別の測線毎に分析すると、若干の拡散が観測された。

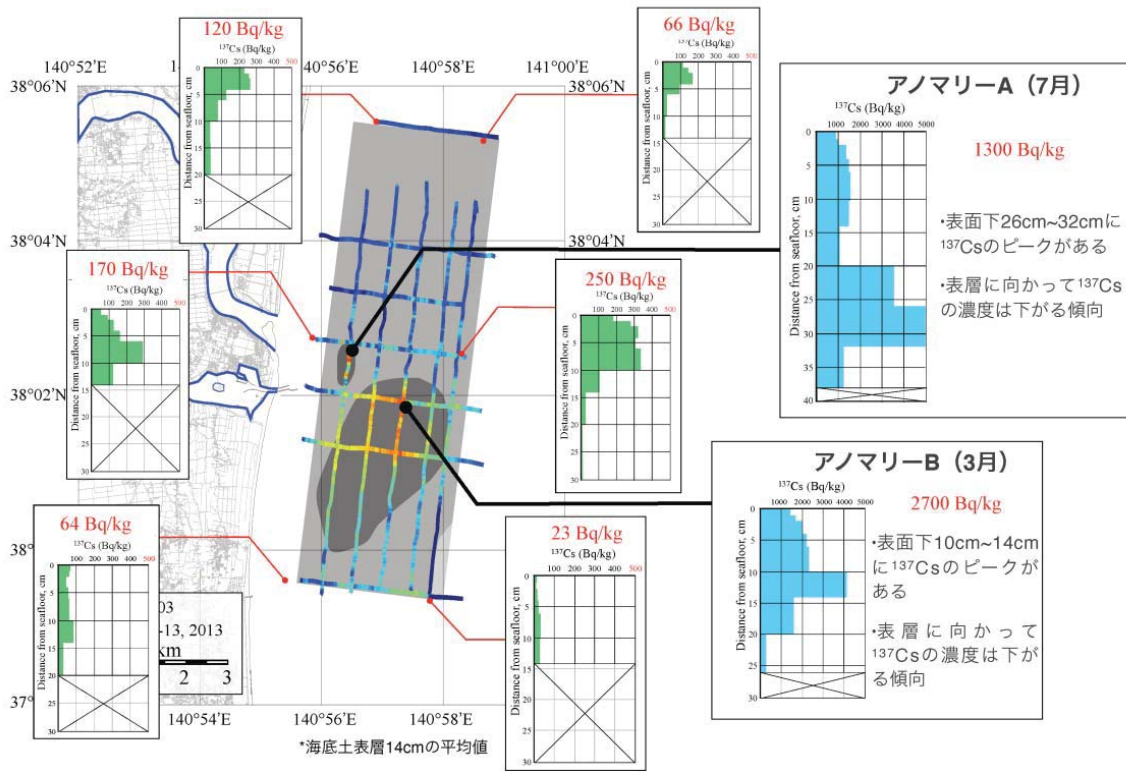


図 4-3 平成 25 年 3 月及び 7 月の調査のまとめ

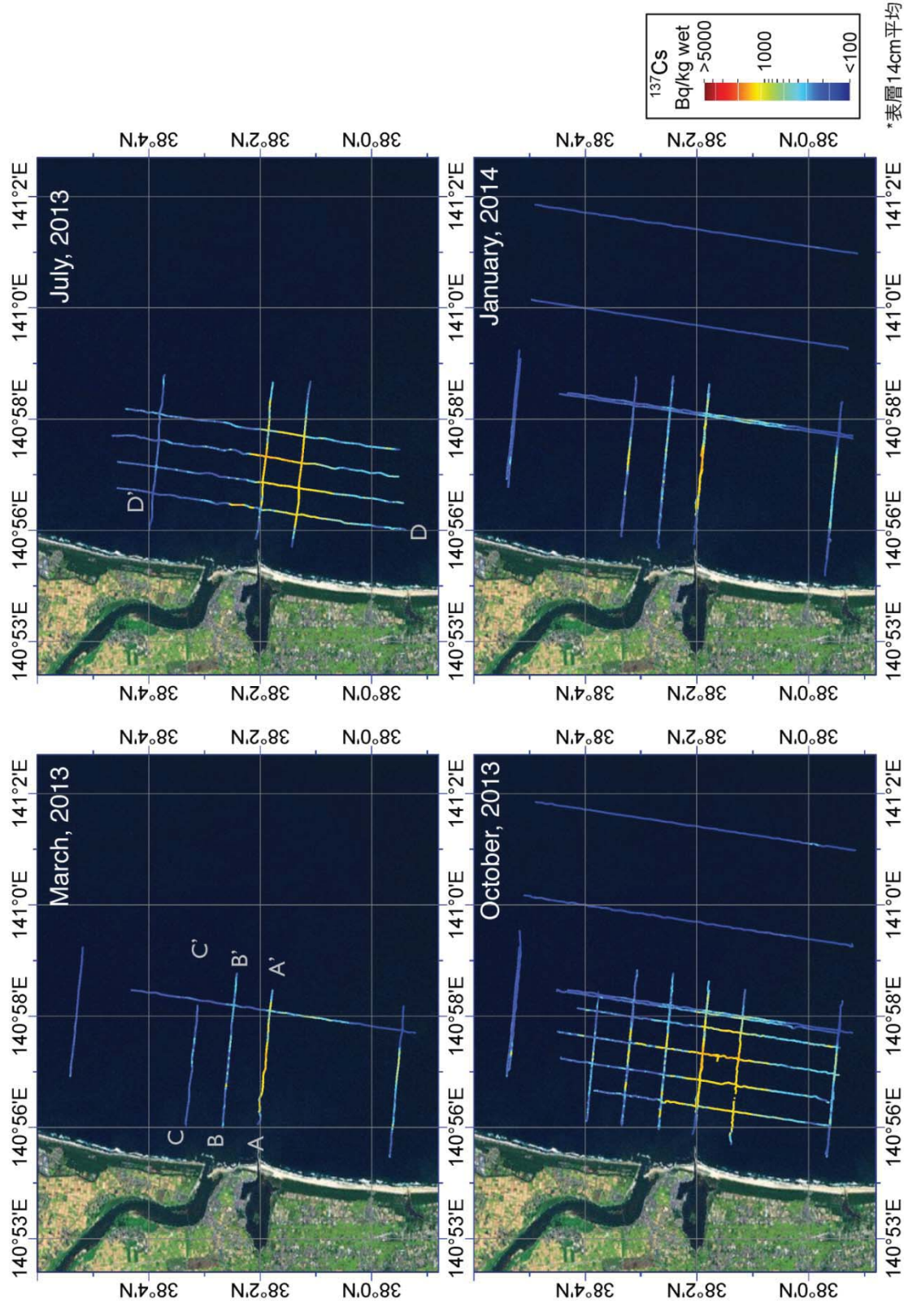


図 4-4 阿武隈川河口沖の ^{137}Cs 濃度分布の経時変化

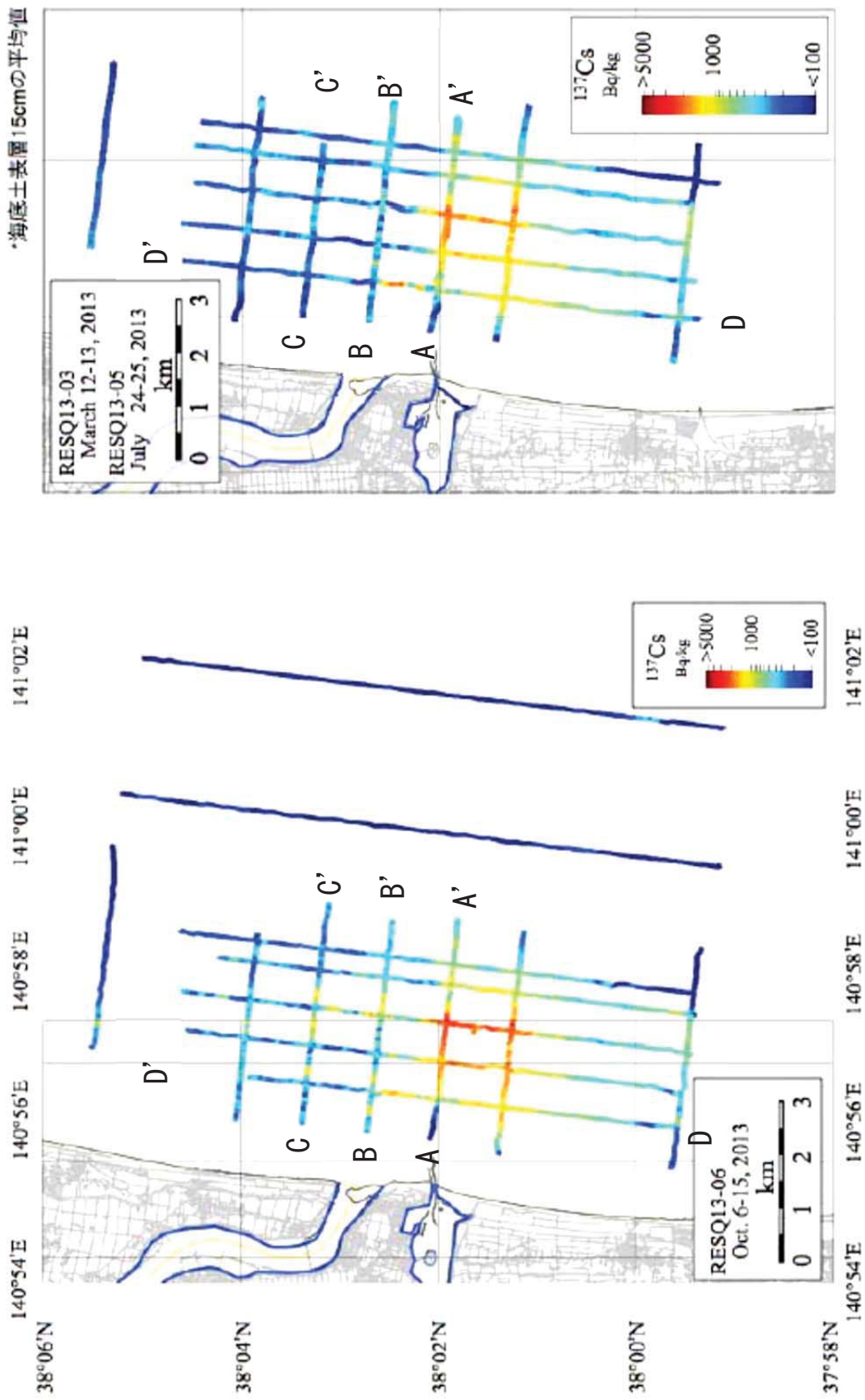


図 4-5 台風通過による ^{137}Cs 濃度分布の変化 (左図:台風通過後、右図:通過前)

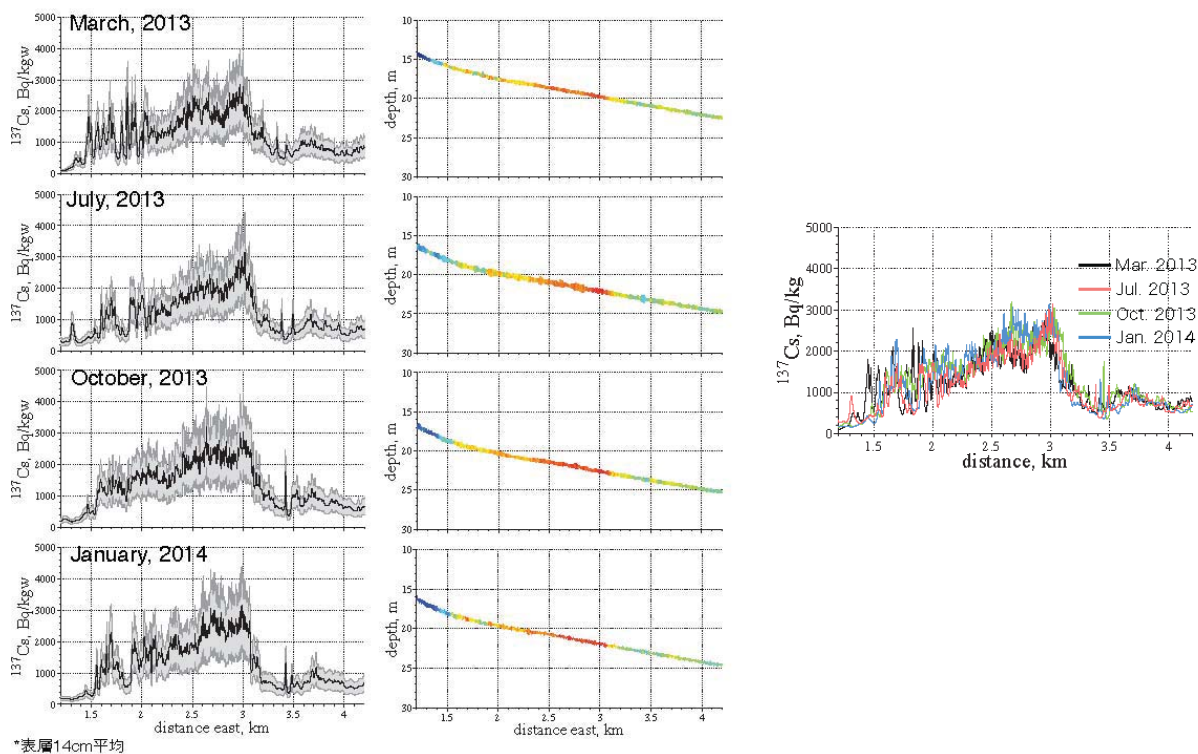


図 4-6 測線 A-A' の経時変化

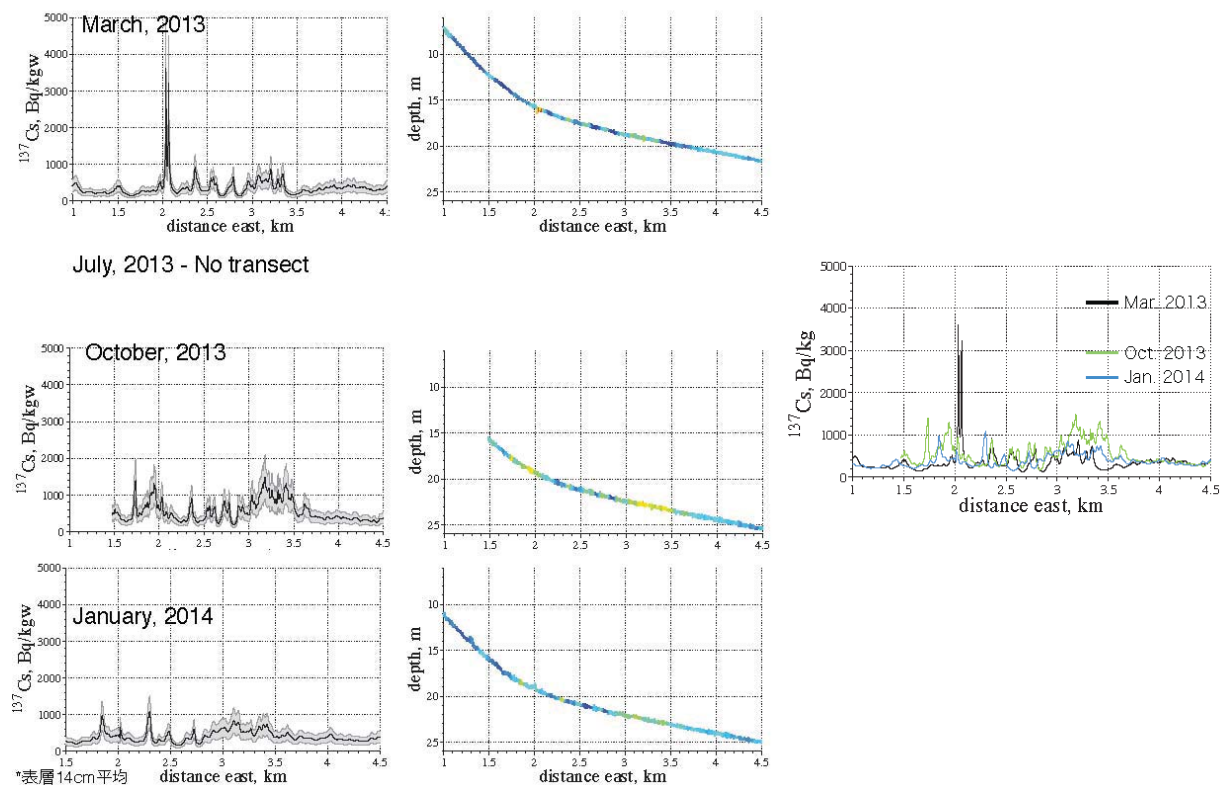


図 4-7 測線 B-B' の経時変化

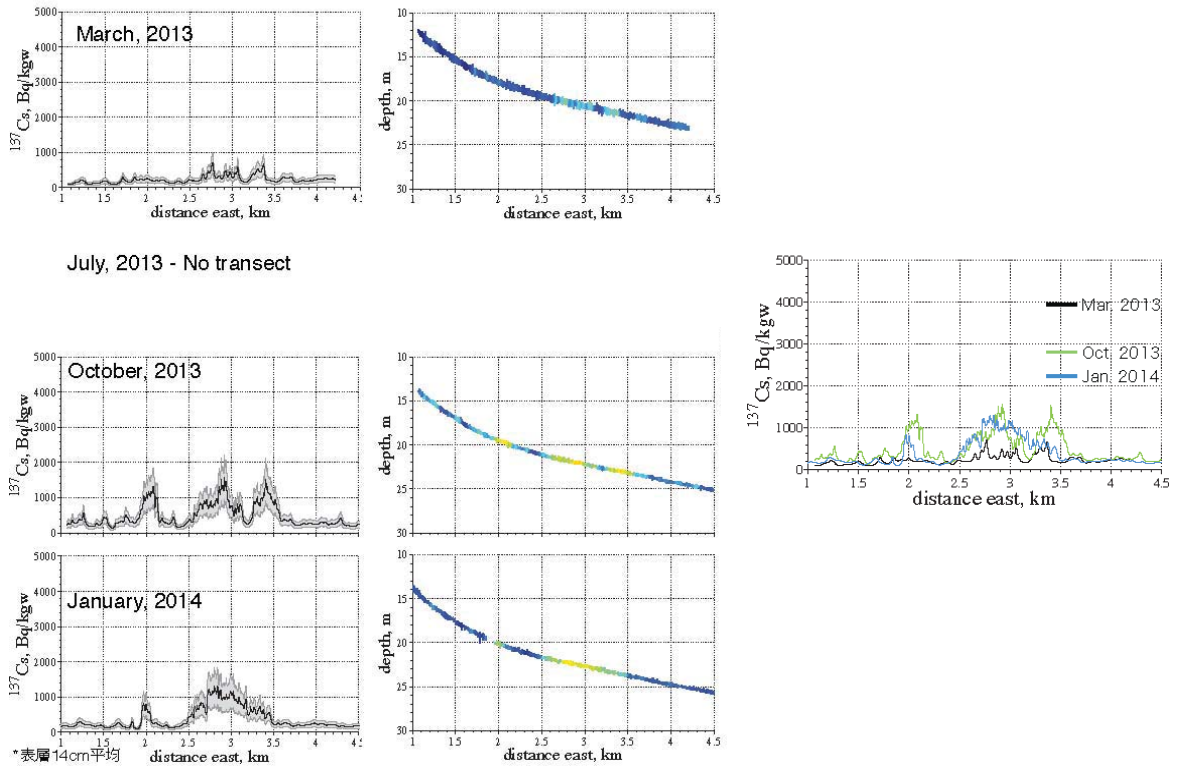


図 4-8 測線 C-C' の経時変化

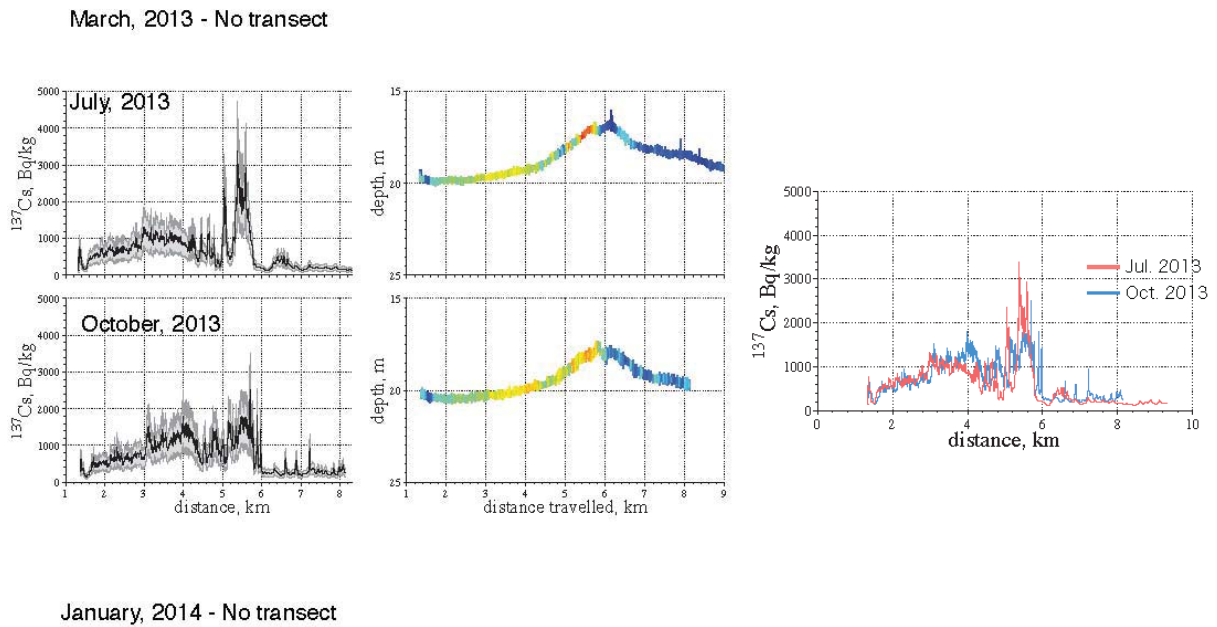


図 4-9 測線 D-D' の経時変化

(2) 海底土中の放射性セシウム濃度の鉛直分布の測定

阿武隈川河口沖で採泥した試料については、高純度 Ge 半導体検出器により ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度を測定し、含水率を測定した。採泥位置と採泥位置における ^{137}Cs 濃度の最大値を図 4-10 にまとめた。また、図 4-11 に ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布を示す。なお、図には本調査以外の事業で採取した試料の分析結果も示した。

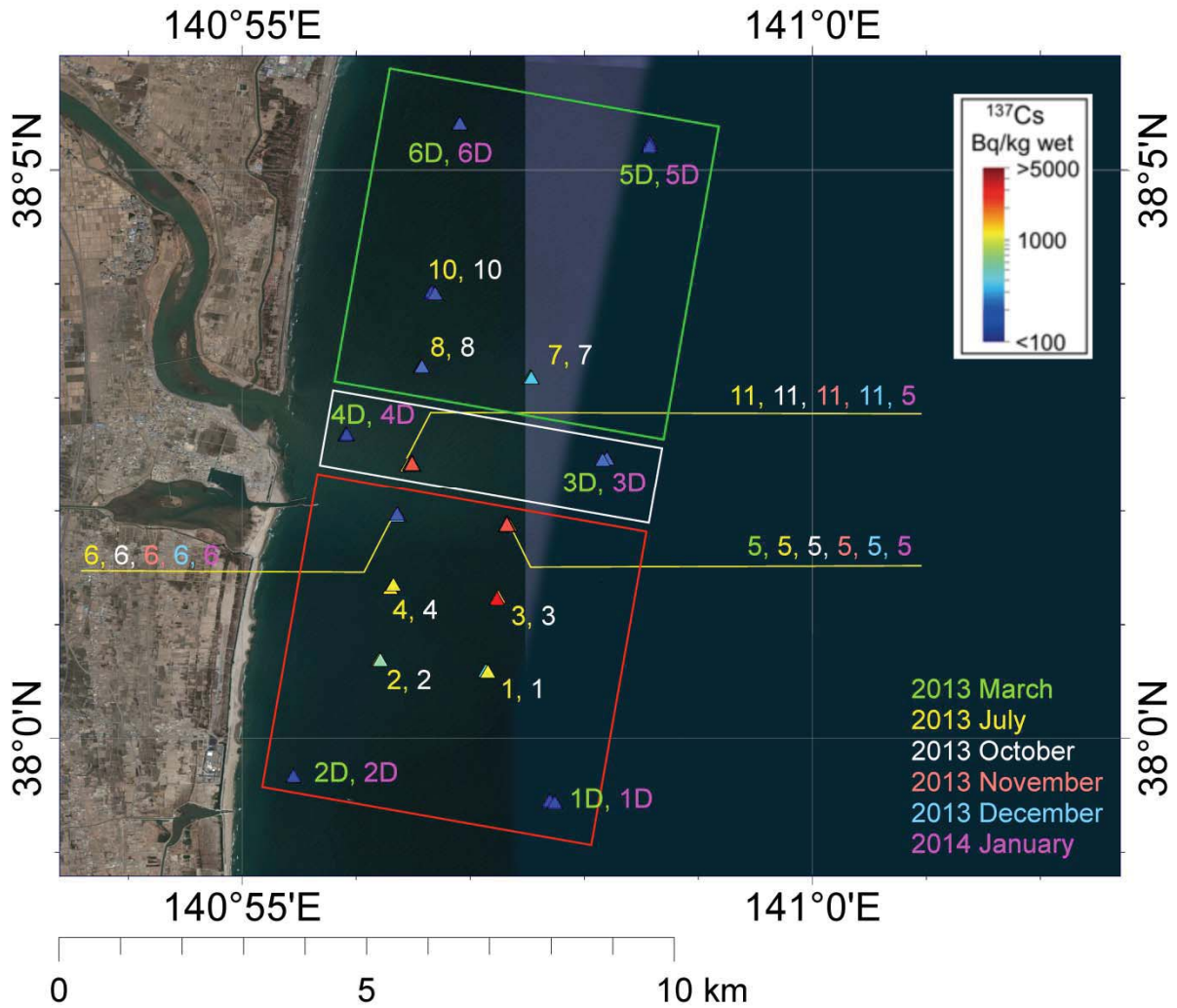


図 4-10 採泥位置と採泥位置における ^{137}Cs 濃度の最大値

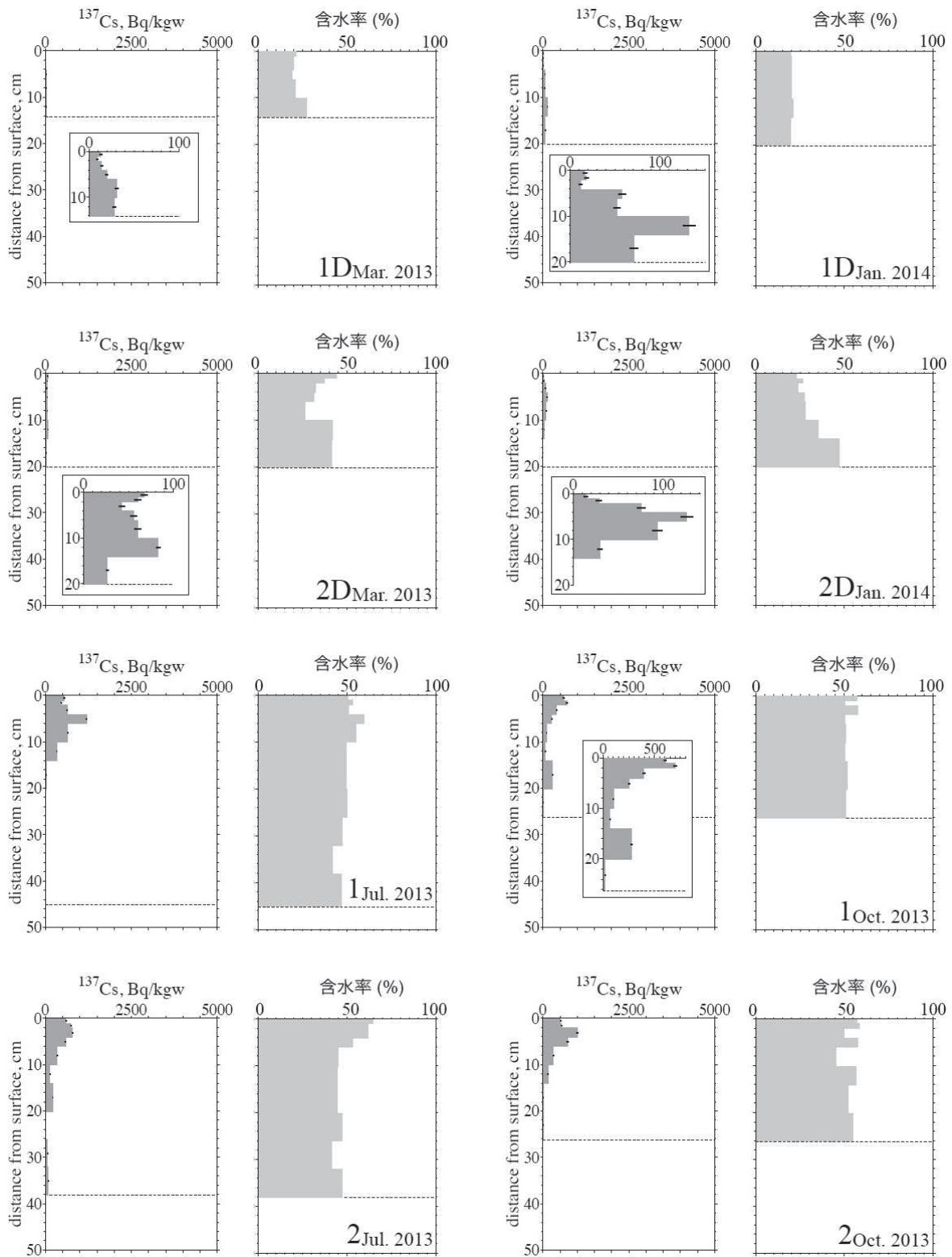


図 4-11 (1) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 4-10 中 1、1D、2、2D)

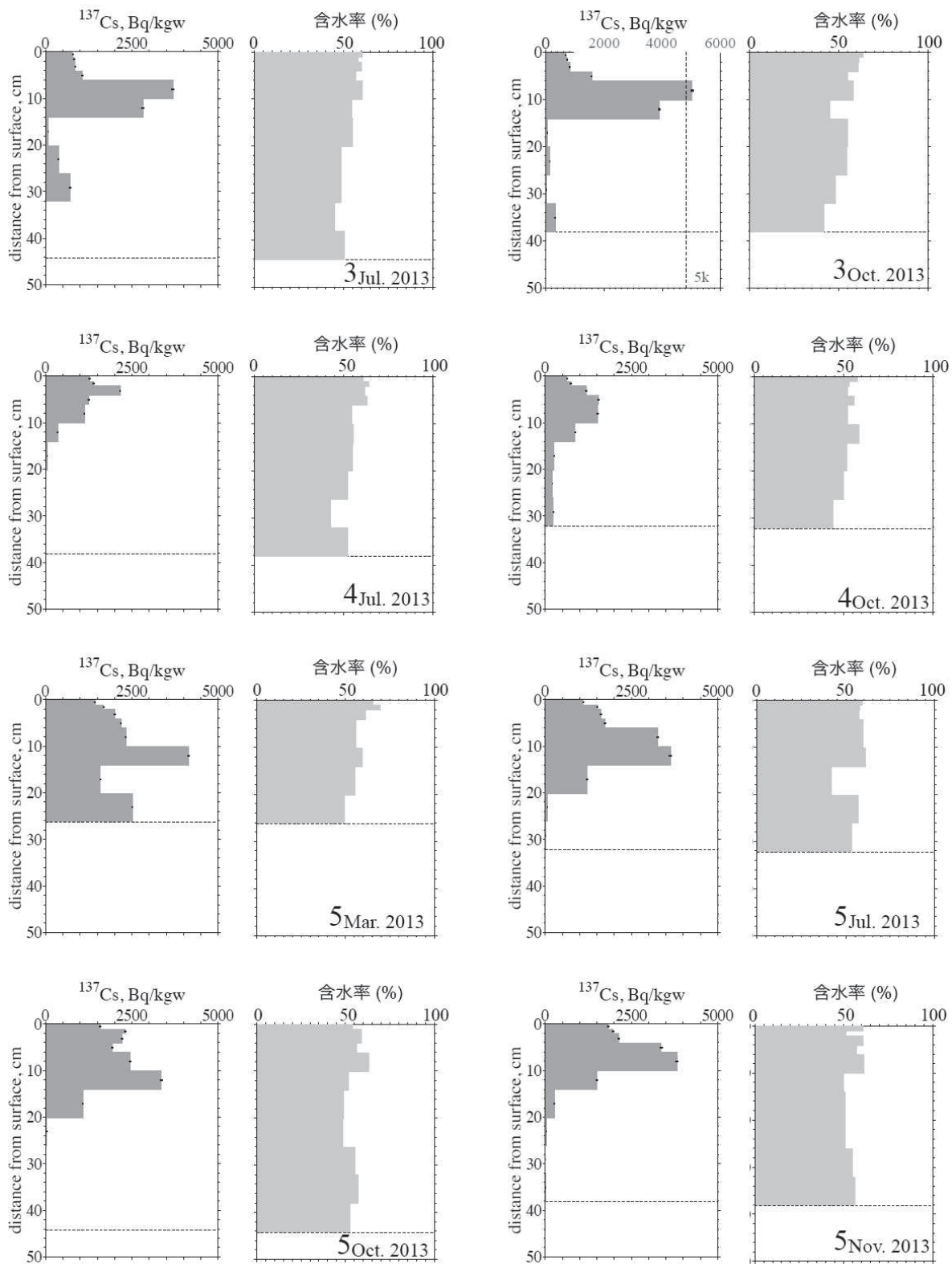


図 4-11 (2) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 4-10 中 3、4、5)

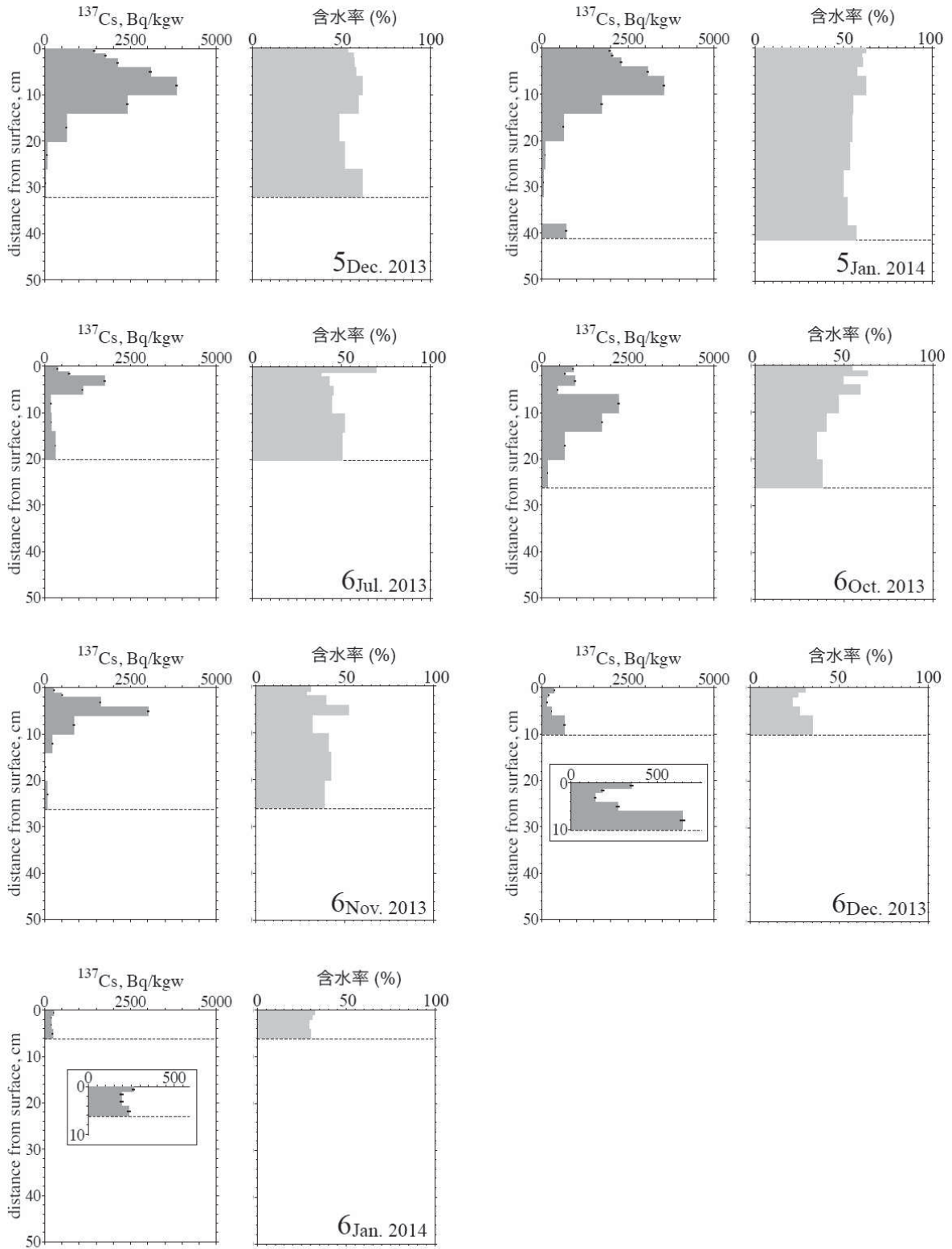


図 4-11 (3) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 4-10 中 5、6)

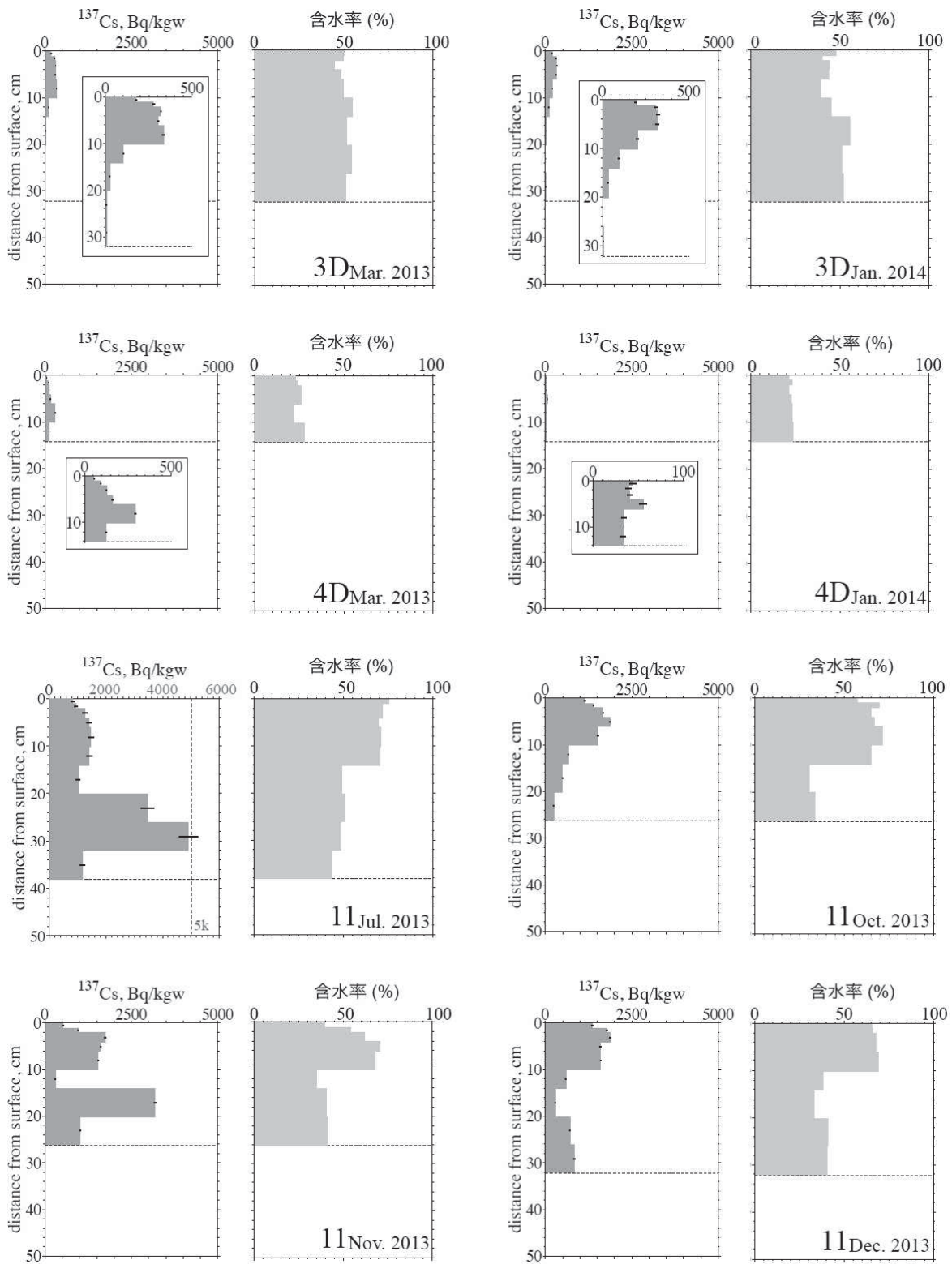


図 4-11 (4) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 4-10 中 3D、4D、11)

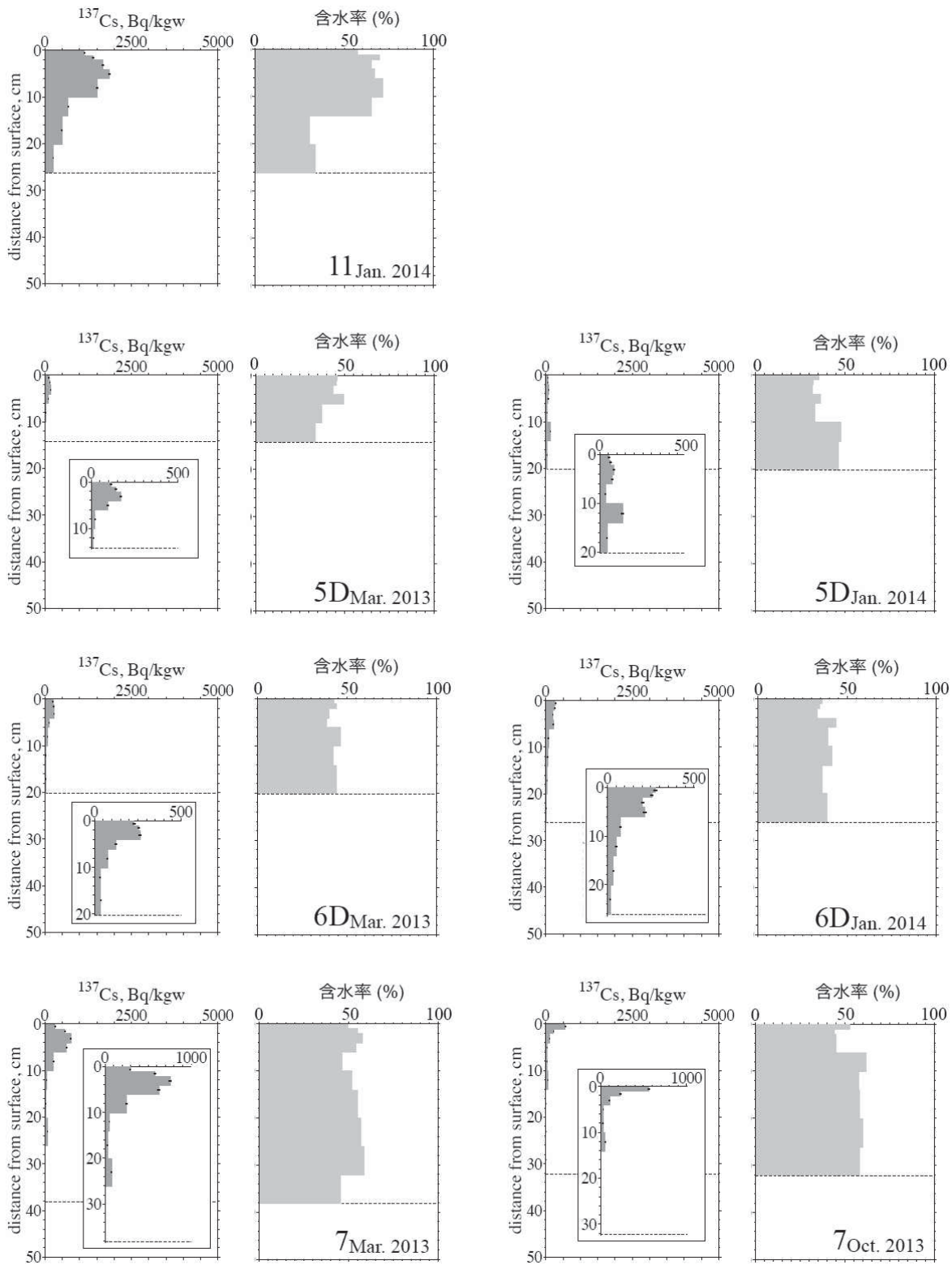


図 4-11 (5) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 4-10 中 11、5D、6D、7)

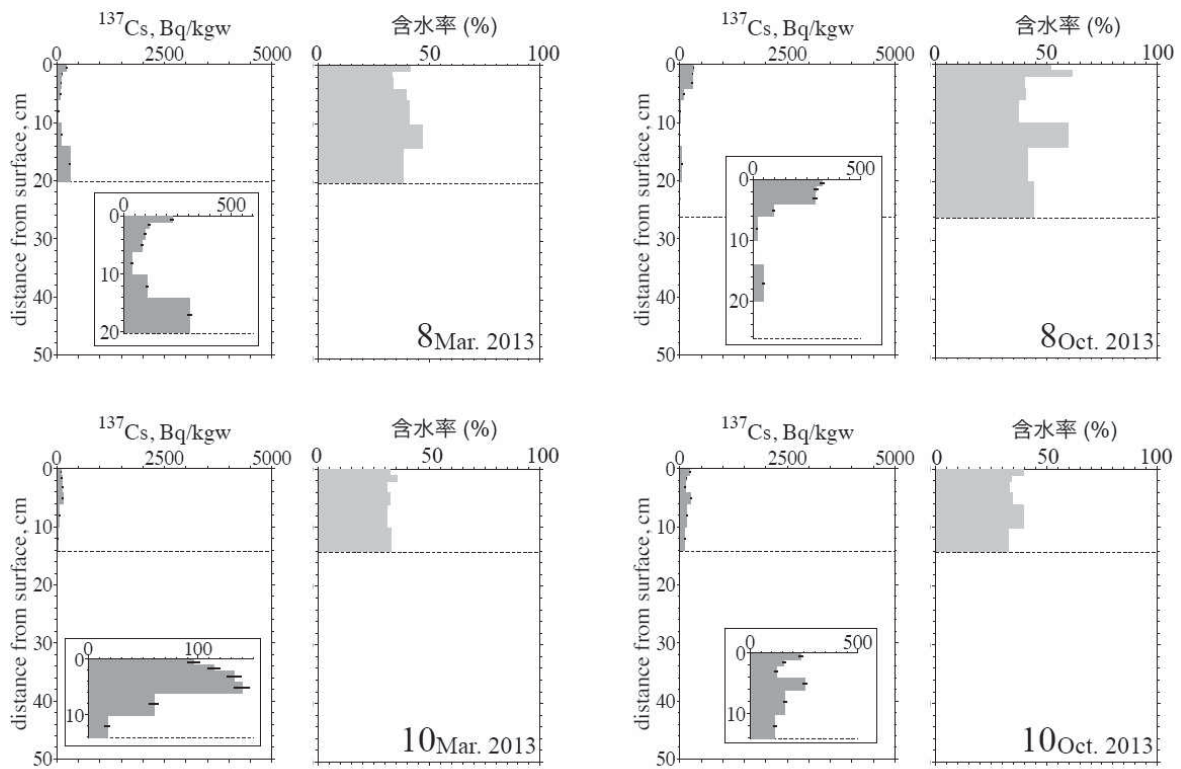


図 4-11 (6) ^{137}Cs 濃度及び含水率の鉛直分布 (図 4-10 中 8、10)

(3) 粒径分布、炭素安定同位体比等の分析

平成 26 年 1 月の調査で採泥した阿武隈川河口沖合の海底土のうち、図 4-2 に示す St. 5、St. 6 及び St. 11 について、 ^{137}Cs 濃度、粒径分布、強熱減量及び炭素安定同位体比を表層 0~4cm の平均で比較したデータを表 4-1 に示す。また、平成 25 年 7 月に St. 11 で採取した試料の炭素・窒素安定同位体比の分析結果を図 4-13 に示す。安定同位体比の測定は、安定同位体比質量分析計 (Sercon 社 ANCA-SL) を使用し、 ^{12}C に対する ^{13}C のモル比及び ^{14}N に対する ^{15}N のモル比を測定し、それら安定同位体比の標準試料の安定同位体比に対する千分率偏差を $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{15}\text{N}$ として表記している。

阿武隈川の河床堆積物中の有機物の炭素安定同位体比は-27~-26‰であり、阿武隈川河口沖合の海底土中の有機物の炭素安定同位体比も同様に-27~-26‰の範囲であることから、阿武隈川河口沖合の有機物は、陸起源が支配的であると考えられる。

表 4-1 粒径分布等の比較

試料	含水率 (%)	^{137}Cs (Bq/kg-dry)	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)	安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ (‰)
St. 5	61	2200	23	11	-25.9
St. 6	30	210	100	3.1	-25.9
St. 11	59	1300	44	10	-26.1

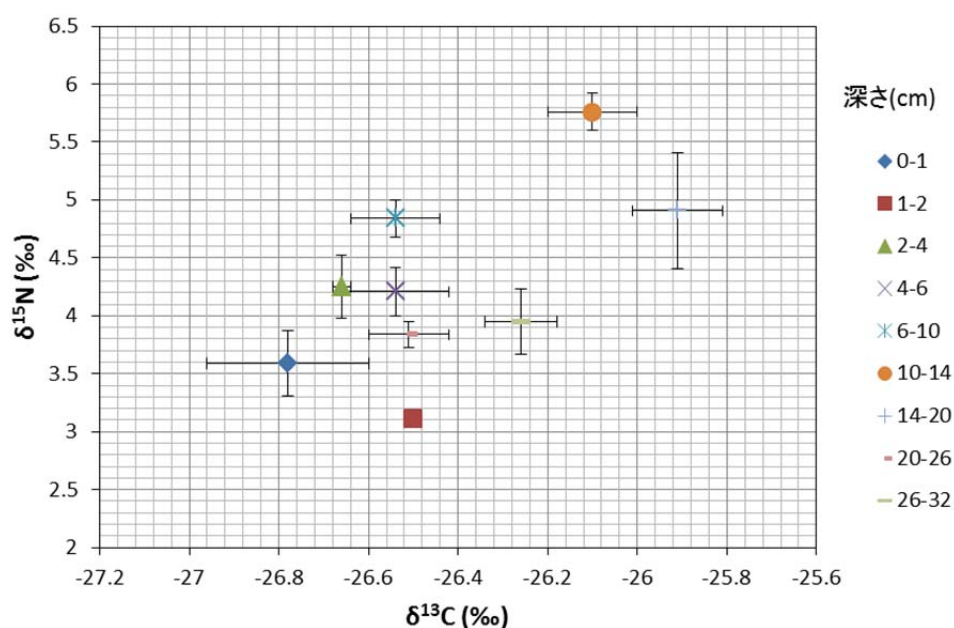


図 4-13 安定同位体比分析結果

(4) ^{90}Sr 分析

阿武隈川河口沖の St. 11 で平成 25 年 7 月に採取した試料について ^{90}Sr 濃度の分析を実施した。分析は文部科学省測定法シリーズ⁶により、検出下限値は乾土 100g で 0.2Bq/kg として実施した。その結果を表 4-2 に示す。 ^{137}Cs 濃度との比較も併せて示す。 ^{137}Cs と ^{90}Sr の比はほぼ一定であった。

表 4-2 阿武隈川河口沖合の海底土中の ^{90}Sr 濃度

試料	^{137}Cs (平均) (Bq/kg-dry)	^{90}Sr (Bq/kg-dry)	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
0 - 1 cm	4700 ± 310	0.77 ± 0.15	1.6×10^{-4}
1 - 2 cm			
2 - 4 cm			
4 - 6 cm	5500 ± 370	0.97 ± 0.16	1.8×10^{-4}
6 - 10 cm			
10 - 14 cm			
14 - 20 cm	1900 ± 120	0.21 ± 0.10	1.1×10^{-4}
20 - 26 cm	7000 ± 460	0.71 ± 0.16	1.1×10^{-4}
26 - 32 cm	9600 ± 640	1.0 ± 0.17	1.1×10^{-4}
32 - 38 cm	2000 ± 130	0.27 ± 0.11	1.3×10^{-4}

原子力規制庁「環境放射線データベース」による 1971 年から 1F 事故発生以前の 2010 年までの宮城県周辺海域の海底土中の ^{90}Sr の濃度は、検出下限値以下～0.73 Bq/kg の範囲である。

ただし、 ^{90}Sr の起源は過去の大気圏内核実験によるものもあり、上記の濃度からは、これらの ^{90}Sr が 1F 事故により放出されたものだけが沈着しているとは言えないと考えられる。

⁶ 文部科学省放射能測定法シリーズ No. 2 「放射性ストロンチウム分析法」、4 訂 (2003).

(5) 海底直上水中の放射性セシウム濃度分析

阿武隈川河口域において、平成 25 年 10 月に St. 11 で海底土を採泥する際に海底直上水を採取し、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度を分析した結果は以下のとおりである。

$$^{134}\text{Cs} : 2.8 \times 10^{-2} \pm 1.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$$

$$^{137}\text{Cs} : 6.8 \times 10^{-2} \pm 1.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$$

図 4-14 に単位体積当たりの放射性セシウム濃度の比で比較した結果を示す。海底直上水中の放射性 Cs 濃度の表層の放射能濃度に対する割合は 1/1000 以下であり、曳航式ガンマ線スペクトロメータの計測結果に対して、海底直上水の影響は無視できると考えられる。

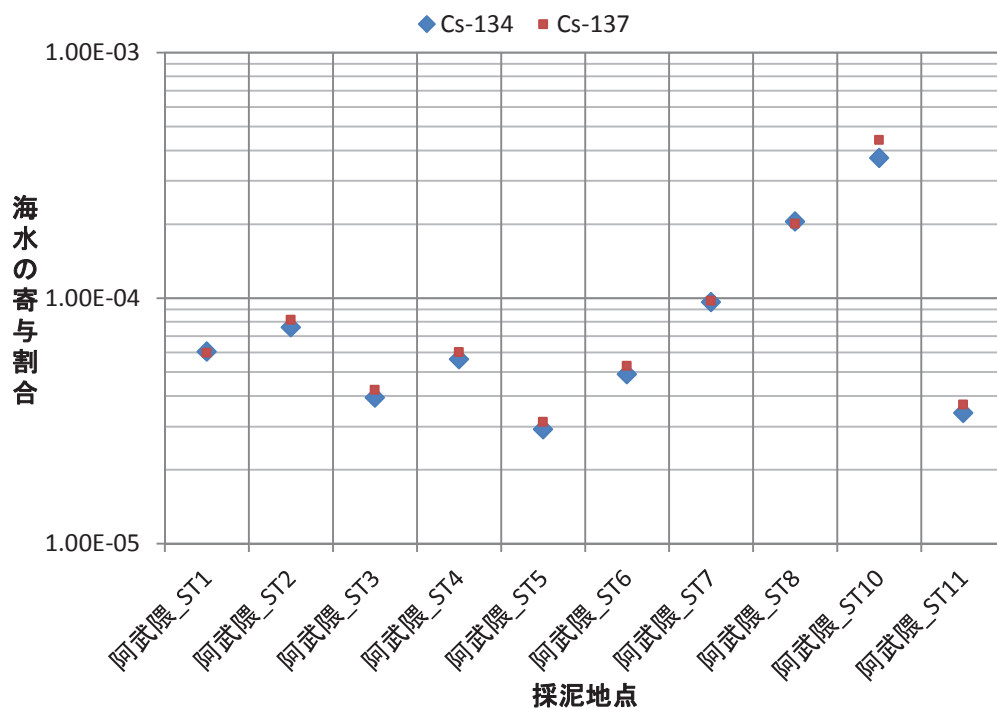


図 4-14 単位体積当たりの放射性 Cs 濃度の比

4.3 流況調査

4.3.1 調査の方法

放射能曳航測定時の曳航型の超音波ドップラー式多層流向流速計（ADCP）による同時測定（①）、潮時を考慮した測線上での測定（②）、設置型 ADCP による連続測定（③）の3つの方法により流況調査を実施した。

このうち、①では、ACDP 及び自動データロガー（ADL）を曳航し、流向・流速・反射強度及び塩分・水温を計測した。ADCP の測定層は、海面下 2m から 1m 層毎に海底付近の取得できるところまでとし、各層の流向・流速・反射強度を取得した。ADL の測定層は、海面下 0.5m、1m、2m、3m の4層とし、各層の水温・塩分を取得した。阿武隈川河口域における上記①、②、③を実施した場所を図 4-15 に示す。①の曳航測線は、図 4-15 に緑色の直線で示した海底土放射能計測時の曳航測線と同一である。②の測線は、図 4-15 に赤線で示すように、阿武隈川河口の前面に設定した。③の設置型 ADCP は、図 4-15 に示すように2地点で実施し、その緯

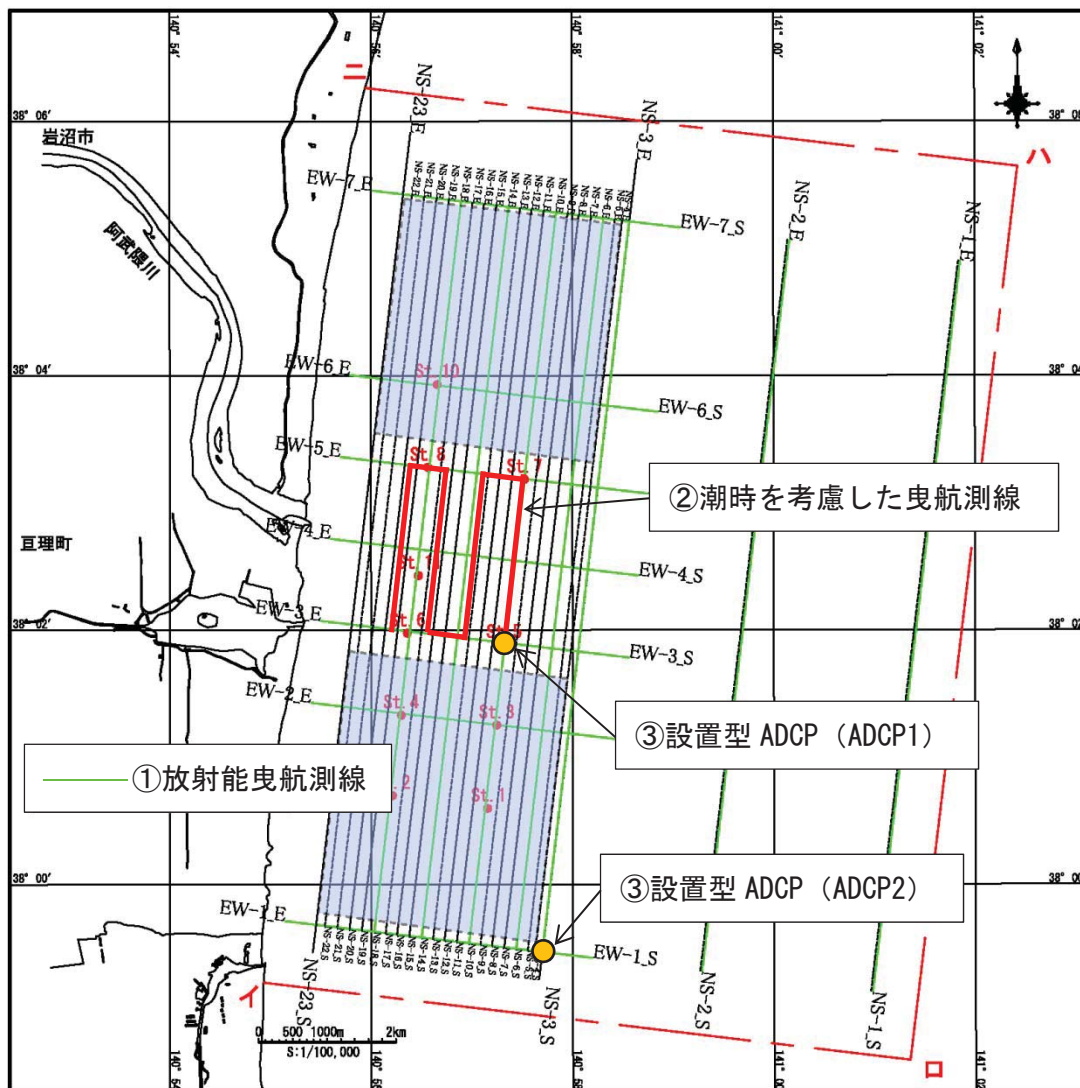


図 4-15 曳航型 ADCP による曳航測線及び設置型 ADCP の設置海域

度・経度等は、表 4-3 に示すとおりである。また、これらの調査の時期は、表 4-4 のとおりである。

表 4-3 設置型 ADCP の設置位置

調査地点	緯度	経度	水深 (m)
ADCP1	北緯 38° 0.189′	東経 140° 57.396′	22
ADCP2	北緯 37° 59.225′	東経 140° 57.665′	22

表 4-4 流況調査実施時期

	設置場所等	調査日
① 放射能曳航測定時の ADCP による同時測定	図 4-15 参照	平成 25 年 7 月 24 日、平成 25 年 7 月 25 日 平成 25 年 10 月 6 日～平成 25 年 10 月 8 日 平成 25 年 10 月 14 日、平成 25 年 10 月 15 日 平成 25 年 12 月 20 日～平成 25 年 12 月 23 日
② 潮時を考慮した曳航測線	図 4-15 参照	平成 26 年 1 月 8 日、平成 26 年 1 月 16 日
③ 設置型 ADCP	ADCP1	平成 26 年 1 月 8 日～平成 26 年 1 月 25 日
	ADCP2	平成 25 年 12 月 26 日～平成 26 年 1 月 16 日

4.3.2 曳航調査時の流況調査結果

阿武隈川河口沖の放射性物質の曳航調査時に同時に実施した塩分、流速データを図 4-16 に示す。図 4-16 の上図は平成 25 年 10 月 8 日の阿武隈川河口から 2km 沖合の南北の測線、下図は平成 26 年 1 月 21 日の阿武隈川河口南の東西の測線である。平成 25 年 10 月においては、河口から海に流入した淡水は北側にも広がりを見せるものの、全体としての傾向は、淡水が南下する傾向にあった。

一方、平成 26 年 1 月の調査においては、淡水は南下しているものの、流向は北方成分のほうが卓越している。これらのデータより、季節による変動があることが示唆された。

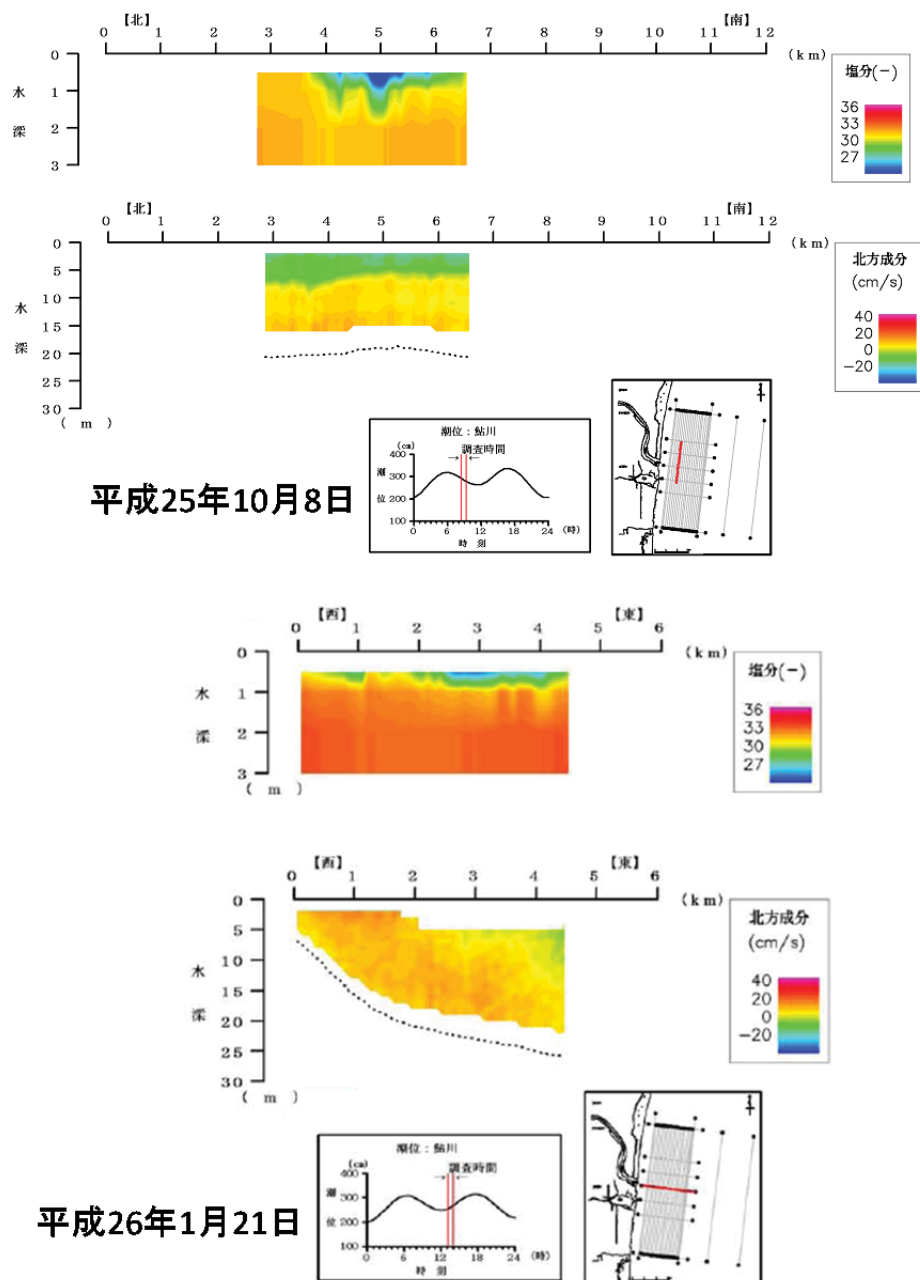


図 4-16 阿武隈川河口沖合の塩分、流速測定結果

4.3.3 曳航型 ADCP 等による調査結果

図 4-15 に示す曳航測線に沿って、平成 26 年 1 月 8 日及び 16 日の上げ潮及び下げ潮時に、1 日あたり 2 回の流況調査を実施した。図 4-17 に下げ潮時の阿武隈川河口沖合 2km の南北の測線の水温、塩分及び流速の測定結果を示す。水温及び塩分の分布は、冷たい淡水が南側よりも北側に拡散することを示しており、また、流向も北方成分がやや強い傾向となっている。流向については、同日の 1 時間程度前には全体的により強い北方成分が出ており、1 月の阿武隈川河口沖合では、北向きの流れが強いことが示唆された。

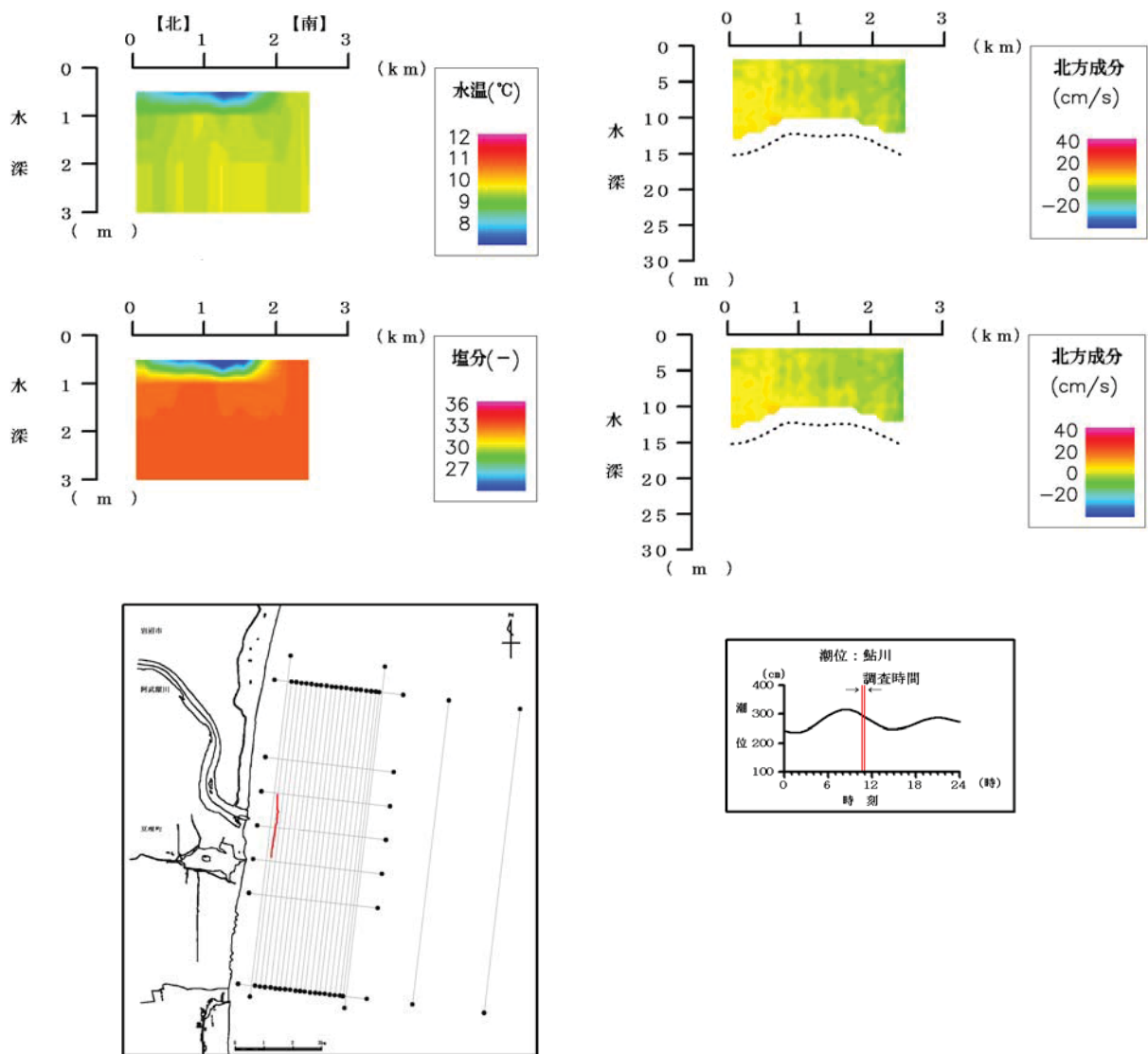


図 4-17 阿武隈川河口沖合の水温、塩分、流速測定結果

4.3.4 設置型流向流速計等による調査結果

阿武隈川河口沖合の2地点に設置型流向流速計等を設置し、15昼夜の流向及び流速の頻度分布を測定した結果を図4-18に示す。阿武隈川河口に近い測点においては、表層、中層、底層の流向は北西から北向きが支配的であった。また、阿武隈川河口から離れた測点においては、いずれの層もほぼ全方位の流向が出現するが、表層は南南西から南向きの流向が支配的であり、中層及び底層は西から北向きの流向が支配的であった。

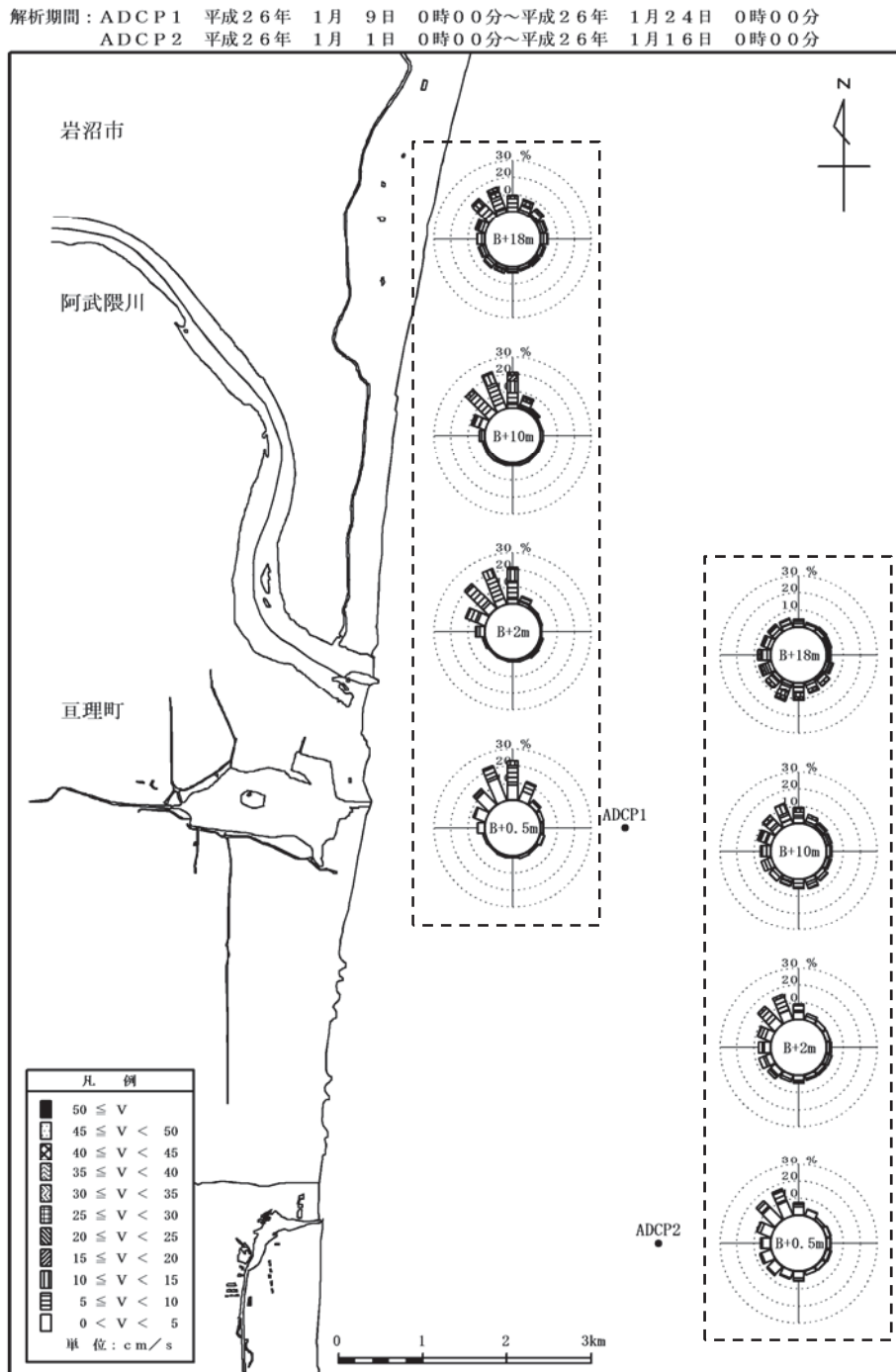


図4-18 流向・流速頻度分布

4.4 阿武隈川河口沖における調査のまとめ

阿武隈川河口沖については、平成 25 年 10 月及び平成 26 年 1 月の 2 回にわたって調査を実施した。阿武隈川河口域では、河口から東に 1.6km、南に 0.5km の地点を中心に 900×350m の範囲、河口から東に 2.5km、南に 2.3km の地点を中心に 2.4×1.9km の範囲において ^{137}Cs の濃度が他の海域より高く、表層 14cm の平均値は、前者で 1,300Bq/kg-wet、後者で 2,700Bq/kg-wet となっていたが、この 1 年間のデータを見る限り、 ^{137}Cs 濃度が他の海域より高い場所には大きな変化はなかった。

また、平成 25 年 10 月の調査は大型の台風通過後の調査となったが、そのような出水イベントの後でも、その高濃度海域の分布状況には大きな差はなかった。これらの ^{137}Cs 濃度が高い海域の底質は、サイドスキャンソナーによる底質調査により泥質であると考えられる。

阿武隈川河口沖合の ^{137}Cs 濃度分布は、 ^{137}Cs の比較的高い濃度を示した場所の状況に大きな差はないものの、個別の測線毎に分析すると、若干拡散している様子が観測された。

また、阿武隈川河口沖合の海底土と阿武隈川の河床堆積物の有機物の炭素安定同位体比は同様の数値を示したことから、阿武隈川河口沖合の有機物は陸起源が支配的であると考えられる。

第5章. 海底土からの放射性セシウム溶出実験

5.1 1F 周辺の海底土からの放射性セシウム溶出実験

平成25年12月に図5-1に示す1F近傍海域の4地点（測点A1N、I1、K3、L1）で採取した海底土の表層0~2 cmの試料を用いて、放射性セシウムの溶出実験を実施した。採取した湿潤状態の海底土を小分けし、3.4~4.8g程度の湿潤海底土を30mlのテフロン製遠心沈殿管に入れ、その後、人工海水を20 ml 加え、25°C、760 rpmで2時間振とうした。

振とう実験後、試料を遠心分離（3000 rpm、30分）にかけて上澄みをマイクロピペットで回収した。残渣についてはmilliQ水5 mlを加え、攪拌後、遠心分離（3000rpm、30分）を行い、同様に上澄みをマイクロピペットで回収した。これを先に回収した溶液試料と合わせた試料についてGe検出器により1~2日間計測し、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度を定量した。残渣については真空凍結乾燥機で乾燥後、Ge半導体検出器を用いて ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度を定量した。

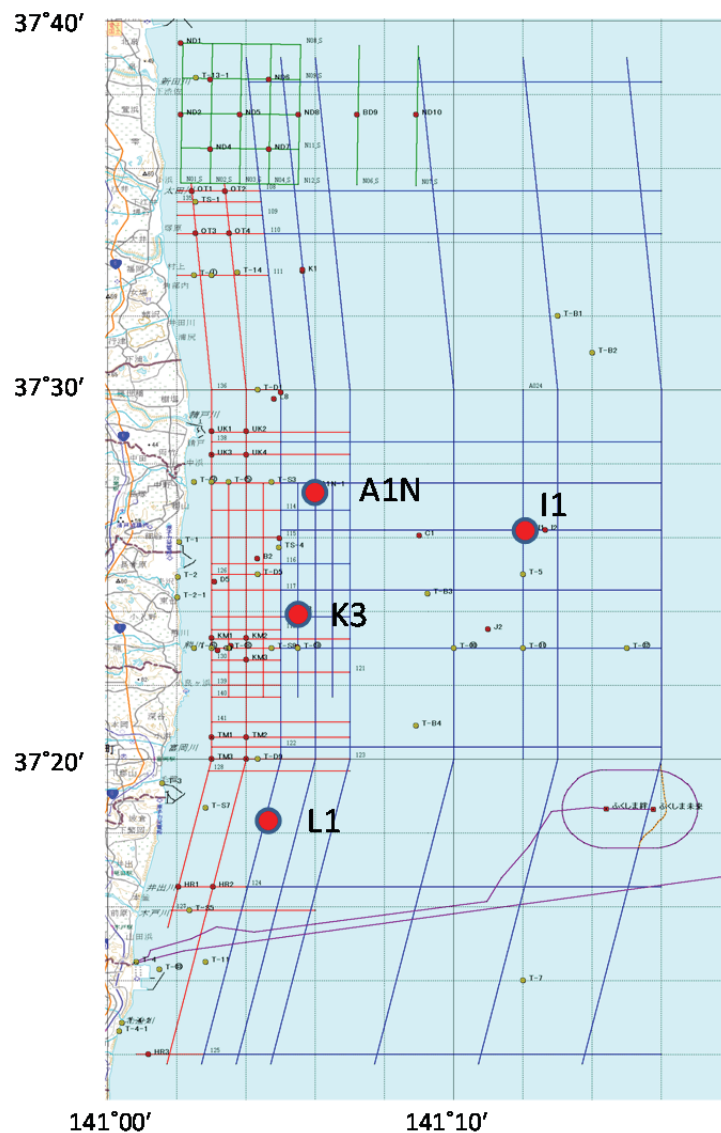


図5-1 溶出実験用海底土採泥地点

海底土試料の測定に用いた標準試料は NBS42-2U あるいは日本分析化学会頒布土壌標準試料 JSAC0471 を、溶液試料については IAEA 443 を用いた。ここでは、既存の研究データとの対比のために ^{137}Cs を対象として溶出率を計算した。溶出率は、溶液中の ^{137}Cs の放射能を使用した海底土の放射能で割った値を百分率で表示した。表層海底土 (0~2 cm) の放射性セシウム濃度は表 5-1 に示すとおりである。人工海水溶出実験の結果を表 5-2 に示す。表 5-2 を見て分かるように、2 時間の振とうによる 1F 近傍海域の海底土からの ^{137}Cs の人工海水への溶出率は、海底土の ^{137}Cs 濃度に依存せず 1~2%程度であった。

この値は 1F 事故直後に採取された海底土からの再溶出率は約 10%であるとの報告⁷と比較すると低い値となっているが、今回の調査で採取した試料は事故後 2 年 9 ヶ月が経過した海底土であったため、溶出率の値の差は試料の採取時期と関係があると考えられる。

表 5-1 表層海底土の放射性物質濃度

試料	含水率 (%)	^{137}Cs (Bq/kg-dry)	$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ (2011. 3. 11 に壊変補正)
A1N	34	220 ± 8	0.90
K3	76	2900 ± 50	0.94
I1	32	170 ± 5	0.94
L1	34	310 ± 8	0.94

表 5-2 2 時間の振とうによる 1F 近傍海域海底土から人工海水への溶出率

試料	深さ (cm)	海底土の ^{137}Cs 放射能 (Bq/供試料)*	溶出液の ^{137}Cs 放射能濃度 (Bq/溶出液)**	^{137}Cs 溶出率 (%)
A1N	0 - 2	0.70 ± 0.03	0.015 ± 0.001	2.1
K3	0 - 2	2.31 ± 0.04	0.030 ± 0.003	1.3
I1	0 - 2	0.55 ± 0.02	0.010 ± 0.001	1.8
L1	0 - 2	1.09 ± 0.03	0.020 ± 0.003	1.8

*溶出実験に用いた海底土の供試料に対する放射能濃度

**溶出実験に用いた溶出液量に対する放射能濃度

⁷ S. Otosaka and T. Kobayashi, Environ. Monit. Assess., 185, pp. 5419-5433 (2013).

5.2 阿武隈川河口周辺の海底土からの放射性セシウムの溶出実験

阿武隈川河口沖の沿岸域海底土について、海底土からの放射性セシウムの溶出性を調査した。平成 25 年 10 月に採取した阿武隈川沖の St. 11 については、真空凍結乾燥し粉末化した海底土を実験前に Ge 半導体検出器を用いて ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 濃度の定量を行った後、2 g につき人工海水 20 ml を加え、25 °C で 2 時間振とう (760 rpm) を行った。遠心分離 (3000rpm、30 分) 後、マイクロピペットで上澄みを回収した。残渣については milliQ 水 5ml を加え、攪拌後、遠心分離 (3000rpm、30 分) を行い、マイクロピペットで上澄みを回収した。先に回収した溶液試料と合わせて Ge 半導体検出器を用いて ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 濃度を定量した。

また、平成 26 年 1 月に採取した St. 1'、3'、5、5' の試料は、含水率から湿潤状態で乾燥重量が 2 g 程度になるように秤量し、上記の実験を実施した。残渣については真空凍結乾燥機で乾燥後、Ge 半導体検出器を用いて ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 濃度を定量した。ここでは、既存の研究データとの対比のために、 ^{137}Cs を対象に溶出率を計算した。溶出率は、溶液中の ^{137}Cs の放射能を使用した海底土の放射能で割った値を百分率で表示した。海底土の採取箇所を図 5-2 に示す。

表層海底土 (0~1 cm) の放射性物質濃度は表 5-3 に示すとおりで、人工海水溶出実験の結果は表 5-4 に示す。阿武隈川河口沖の海底土の人工海水への ^{137}Cs の溶出率は 0.03~1.4% 程度であり、溶出率が低かった。

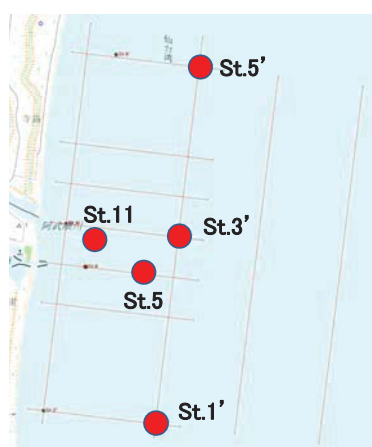


図 5-2 溶出実験用試料採泥箇所

表 5-3 表層海底土の放射性物質濃度

試料	含水率 (%)	^{137}Cs (Bq/kg-dry)	$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ (2011. 3. 11 に壊変補正)
St. 5'	35	63 ± 4	0.90
St. 3'	48	350 ± 20	1.10
St. 11	60	6500 ± 130	0.93
St. 5	65	6100 ± 150	0.90
St. 1'	19	18 ± 1	0.94

表 5-4 阿武隈川河口沖海底土の人工海水溶出率

試料	深さ (cm)	海底土の ^{137}Cs 放射能 (Bq/供試料)*	溶出液の ^{137}Cs 放射能 濃度 (Bq/溶出液)**	^{137}Cs 溶出率 (%)
St. 5'	0 - 1	0.17 ± 0.01	ND (<0.0034)	—
	1 - 2	0.43 ± 0.01	ND (<0.0025)	—
St. 3'	0 - 1	0.73 ± 0.03	0.010 ± 0.001	1.4
	1 - 2	1.16 ± 0.03	0.015 ± 0.003	1.3
St. 11	0 - 3	13.1 ± 0.3	0.004 ± 0.001	0.03
St. 5	0 - 1	10.7 ± 0.3	0.028 ± 0.003	0.26
	1 - 2	11.5 ± 0.1	0.028 ± 0.003	0.24
St. 1'	0 - 1	0.043 ± 0.003	ND (<0.0025)	—
	1 - 2	0.41 ± 0.01	ND (<0.0025)	—

ND は検出限界以下を表わし、() 内の数字は検出器の検出限界値を表示

*溶出実験に用いた海底土の供試料に対する放射能濃度

**溶出実験に用いた溶出液量に対する放射能濃度

また、平成 25 年 10 月に採取した St. 11 の海底土については、約 60 日間にわたり人工海水への連続的な溶出実験を実施し、 ^{137}Cs 溶出率の経時変化を調べた。真空凍結乾燥し粉末化した海底土を実験前に Ge 半導体検出器を用いて ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 濃度の定量を行った。海底土 3g を秤量し、100 ml の三角フラスコに入れ、人工海水 30ml を加えた後に、 25°C で振とした。この実験は長期間の溶出実験のため、既存の研究⁸に従い、振とう数 150 rpm で実施した。1 日間、3 日間、5 日間、7 日間、その後は 7 日間毎に振とう器から 2 個ずつ三角フラスコを採取し、懸濁させた後に 30 ml のテフロン製遠心沈殿管に懸濁液を入れ、遠心分離 (3000 rpm、30 分) を行った。その後、上澄み 20ml をマイクロピペットで回収した溶液を測定試料とし、Ge 半導体検出器を用いて溶液中の ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 濃度を定量した。海底土試料の測定に用いた標準試料は NBS42-2U あるいは日本分析化学会頒布土壌標準試料 JSAC0471 を、溶液試料については IAEA 443 を用いた。ここでは、既存の研究データとの対比のために、 ^{137}Cs を対象に溶出率を計算した。溶出率は、溶液中の ^{137}Cs の放射能を使用した海底土の放射能で割った値を百分率で表示した。

約 60 日間の連続溶出実験の結果を図 5-3 に示す。横軸は振とう時間、縦軸は海底土から溶出する ^{137}Cs の溶出率をプロットした。図 5-3 を見ると、溶出率は 0.03%~0.05% の範囲を推移しており、時間が経過しても海底土からの ^{137}Cs の溶出率に顕著な変化は認められなかった。

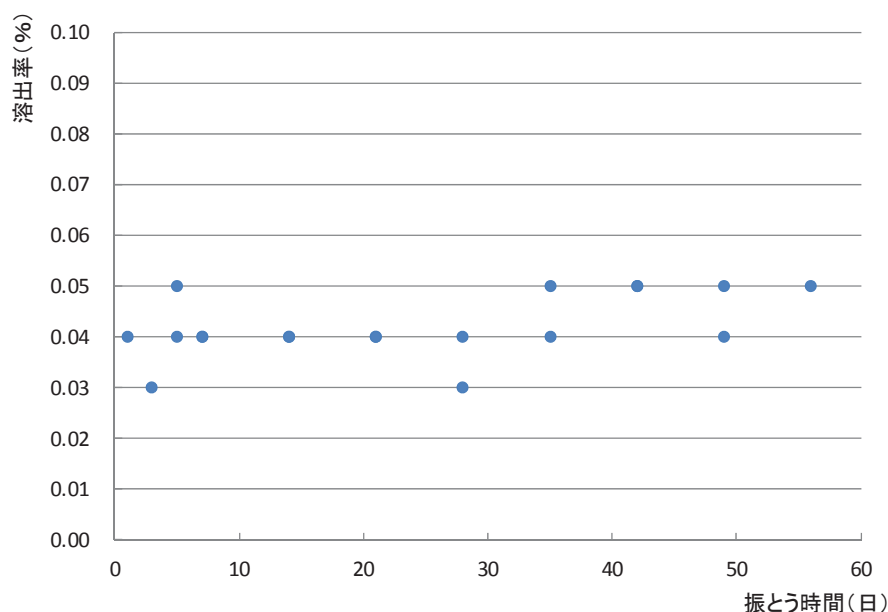


図 5-3 60 日間の連続溶出実験における溶出率の推移

⁸ J. M. Zachara, et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 193-211 (2002).

5.3 海底土からの放射性セシウムの溶出実験のまとめ

2時間の振とうを行った1F周辺の表層の海底土から人工海水への ^{137}Cs の人工海水への溶出率は、海底土の ^{137}Cs 濃度に依存せず1~2%程度であった。この値は1F事故直後に採取された海底土からの再溶出率は約10%であるとの報告と比較すると低い値となっているが、今回の調査で採取した試料は事故後2年9ヶ月が経過した海底土であったため、溶出率の値の差は試料の採取時期と関係があると考えられる。

一方、2時間の振とうを行った阿武隈川河口沖の海底土から人工海水への ^{137}Cs の溶出率は0.03~1.4%程度であり、1F周辺の海底土よりも溶出率が低かった。

また、阿武隈川河口周辺の海底土からの60日間に渡る連続溶出実験からは、海底土からの溶出率が0.03%~0.05%の範囲を推移しており、時間が経過しても溶出率に顕著な変化は認められなかった。

第6章. 謝辞

本調査研究を実施するにあたり、宮城県漁業協同組合、福島県漁業協同組合連合会（相馬双葉漁業協同組合、いわき市漁業協同組合）、福島県水産試験場の方々に、調査の計画段階から調査の実施にわたり、多大なご協力をいただきましたことに感謝申し上げます。また、海上保安庁海洋情報部、宮城県農林水産部、福島県農林水産部からは、調査海域のガレキ調査や海底地形、土質に関する情報を提供していただきました。これらの方々に感謝申し上げます。

また、本調査研究を実施するにあたり、以下の方々に技術検討会に参加頂き、評価いただきました。

外部有識者名

名前	所属
井口 哲夫	名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻教授
日下部 正志	(公財) 海洋生物環境研究所研究調査グループ研究参与
斎藤 公明	(独) 日本原子力研究開発機構福島技術本部特別研究員
東 博紀	(独) 国立環境研究所地域環境研究センター海洋環境研究室主任研究員
森田 貴己	(独) 水産総合研究センター研究推進部研究開発コーディネーター

福島県及び宮城県における水産物の放射性物質の状況について

水産庁が平成26年3月に「水産物の放射性物質調査について」を発表しているが、その結果は以下のとおりである (<http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html> 参照)。

福島県においては、平成23年4～6月期には100 Bq/kgを超える割合が53%となっていたが、事故後1年間でその割合は半減している。平成24年4月以降は、事故後に50 Bq/kg以上が検出された魚種に調査の重点を移して継続したが、それでも基準値を超える割合は低下を続け、平成26年1-2月期は1.7%まで低下している。



図-1 福島県の水産物の放射性物質調査の結果

また、福島県以外においても、100 Bq/kgを超える割合は徐々に低下し、平成24年10-12月期以降は1%を切るレベルとなっており、平成26年1月期は0.2%まで低下している。

なお、福島県においては、試験操業を除き、沿岸漁業・底びき網漁業を自粛中である。



図-2 福島県以外の水産物の放射性物質調査の結果

宮城県においては、基準値を超えている魚種は国からの出荷制限指示等が出されているため、いずれも市場に流通しないような措置が講じられている。現在、宮城県において基準値を超える放射性物質（放射性セシウムで 100Bq/kg）が検出され、水揚自粛、出荷制限等の措置が実施されている海面魚種は、スズキとクロダイのみである。50Bq/kg を超えたことのある水産物について、毎週概ね 100 検体の検査（ゲルマニウム半導体検出器による精密検査）を実施している。

このように、いずれの県でも 100Bq/kg を超える水産物が流通しないような措置が講じられているのが現状である。