

# 海底土中の放射性物質濃度の広域マッピング

## 第三回「放射線計測フォーラム福島」

平成26年12月3日

小田野直光、大西世紀、鎌田創、浦環(海技研)  
ソントン・ブレア(東大生研)、長尾誠也(金沢大学)

本資料は、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)事業の成果をとりまとめたものである。本事業の実施にあたっては、原子力規制庁、福島県、宮城県、福島県漁業協同組合連合会、宮城県漁業協同組合の方々に多大なご支援をいただきましたことに感謝申し上げます。

## ■ 調査の目的

- 漁業や水産物に影響を与える海洋における放射性物質の分布状況を把握
- 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を取得

## ■ 目次

### □ 測定方法

#### □ 1F近傍の放射性物質分布の把握(海技研・東大生研)

- 海底地形・底質調査
- 1F近傍の放射性物質分布調査
- 流況調査

#### □ 阿武隈川河口沖の放射性物質分布の把握(海技研・東大生研)

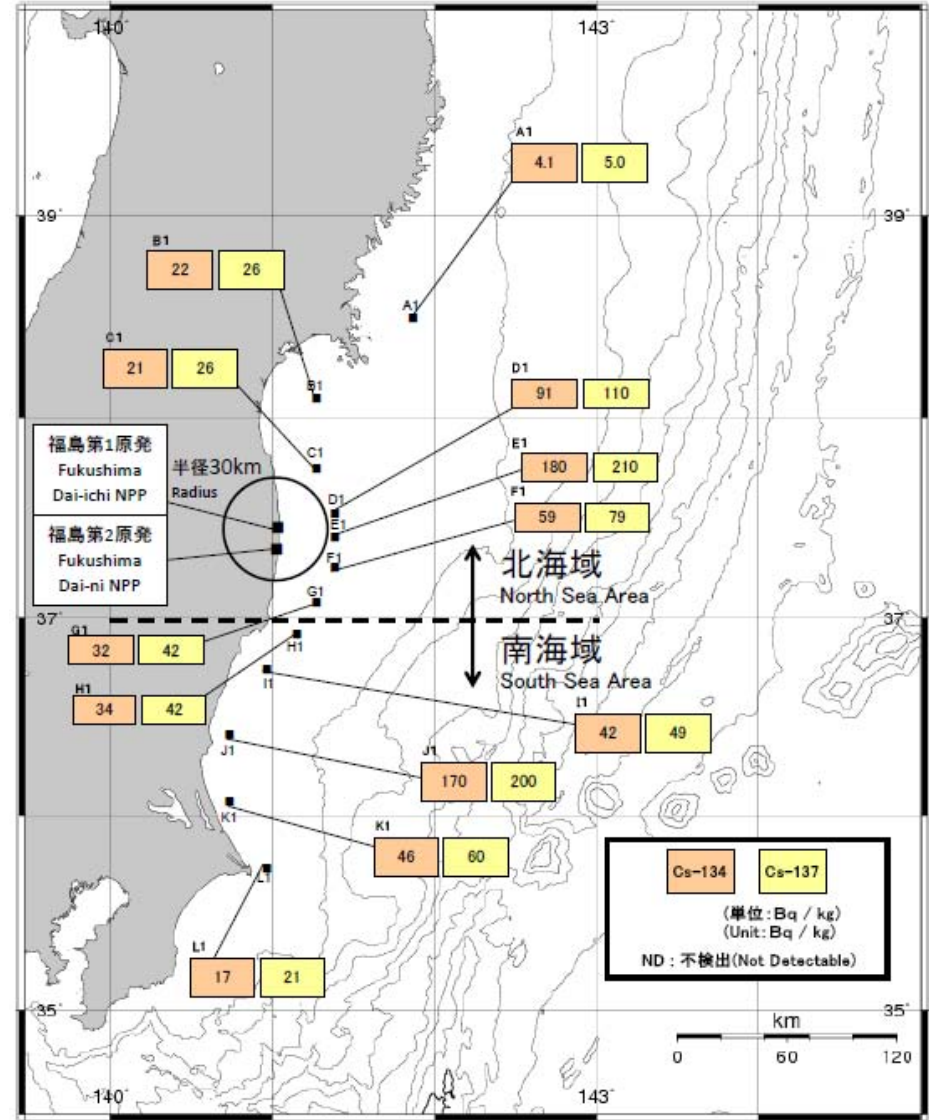
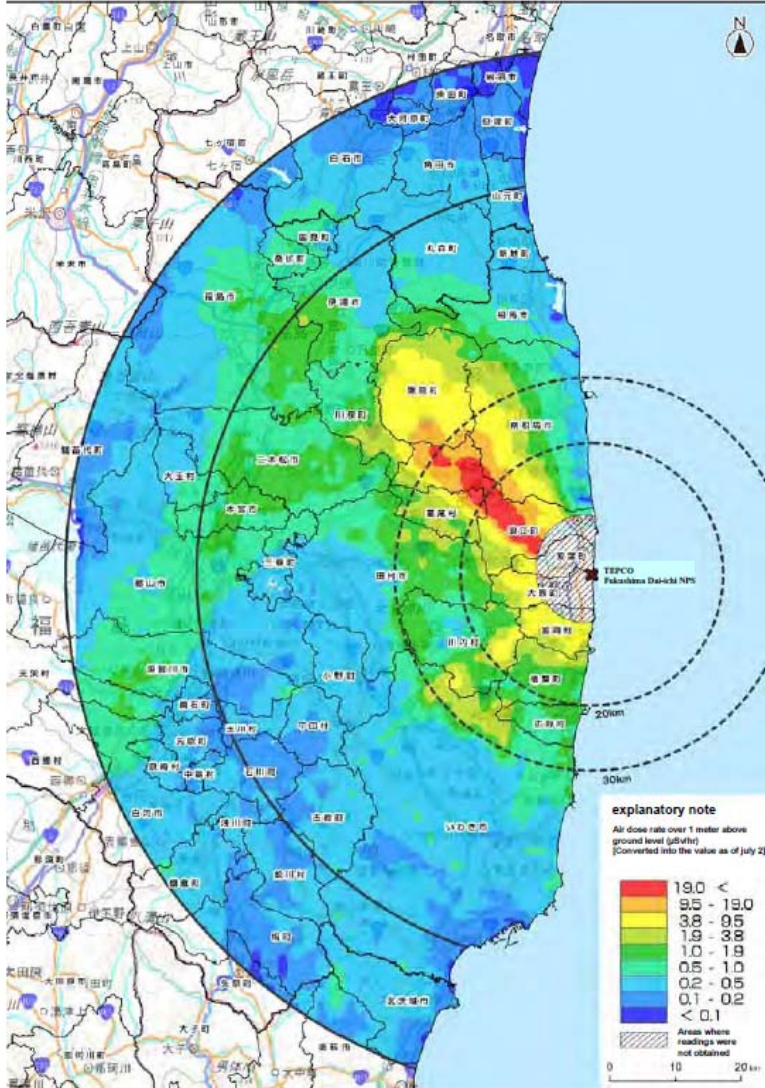
- 海底地形・土質調査
- 阿武隈川河口沖の放射性物質分布調査
- 流況調査

#### □ 海底土からの放射性セシウムの溶出実験(金沢大)

■ 海域は陸域に比べ情報量が大幅に少なく、連続的な変化は把握できない。

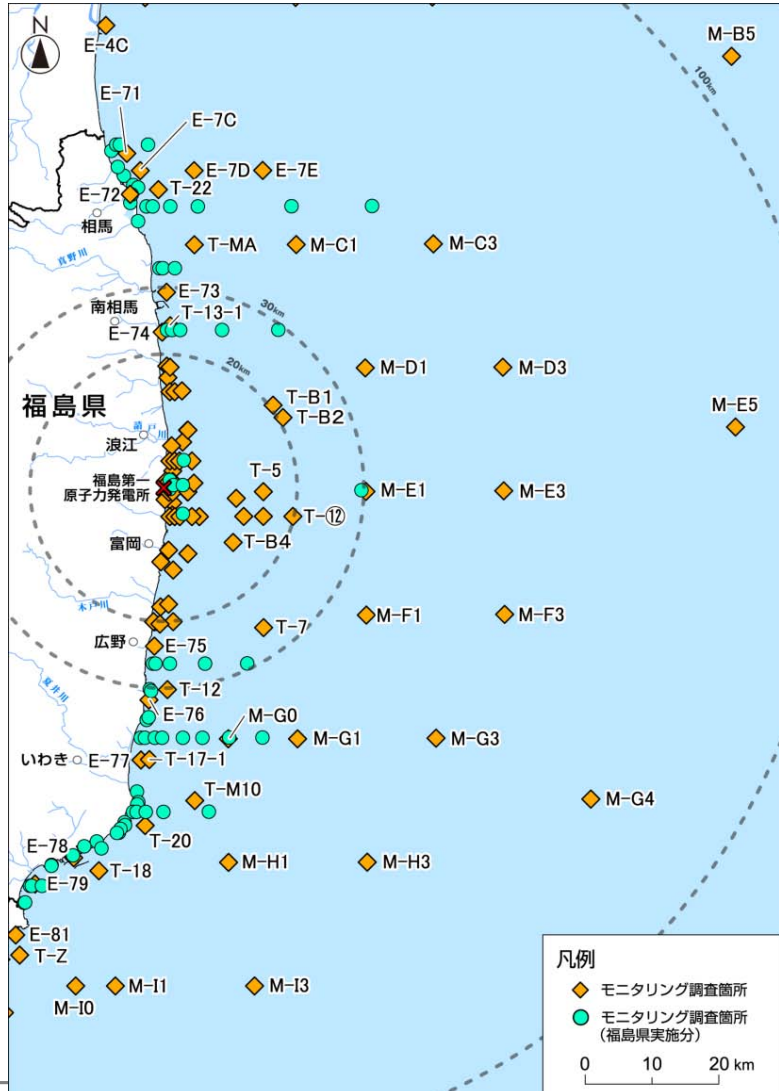
航空機モニタリングによる空間線量率  
(H23.5.31~H23.7.2の結果をH23.7.2に変換)

海底放射能モニタリング結果(平成23年7月5日~9日採取)



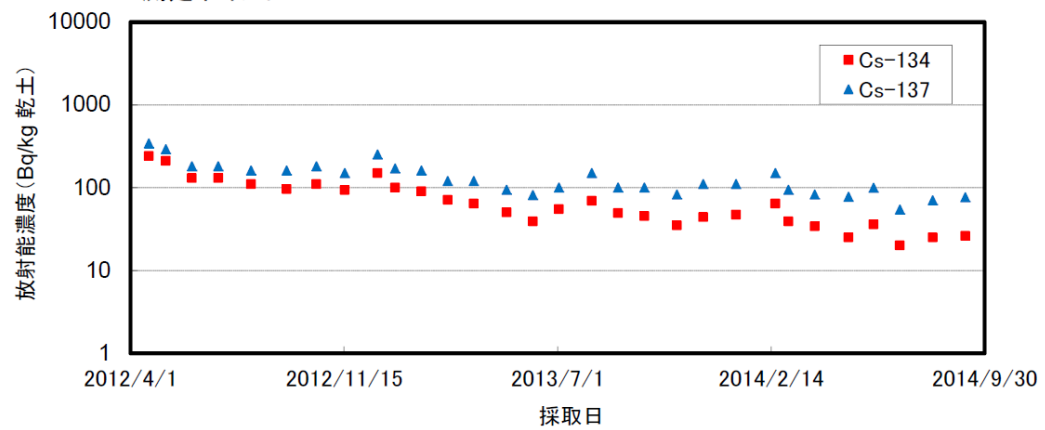
- 調査は継続されているが、採泥地点は限定されている
- 対策を検討するには、陸域と同様に、地形、底質等の状況も考慮しつつ、サンプリング情報を補完する線的・面的な連続データが必要

試料採取日：平成26年9月1日～9月26日



試料ID	採取日時	Sr-90 (Bq/kg)	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	乾土率 (%)
T-S2	2014/9/26 5:48	37	100	64.9	
T-14	2014/9/1 9:05	8.3	25	87.8	
T-22	2014/9/17 5:00	140	460	63.6	
T-②	2014/9/3 9:32	2.6	7.9	84.9	
T-13-1	2014/9/17 6:00	ND(2.1)	ND(1.9)	80.3	
T-S1	2014/9/26 6:14	3.2	12	75.2	
T-①	2014/9/3 9:21	ND(2.1)	3.3	85.0	
T-⑤	2014/9/3 8:23	7.5	19	80.3	
T-④	2014/9/3 8:36	38	100	74.2	
T-③	2014/9/3 8:49	5.0	12	80.7	
T-1	2014/9/8 7:00	ND(0.7)	140	400	*1
T-2-1	2014/9/8 5:30	ND(0.7)	110	320	*1
T-⑥	2014/9/1 9:02	180	530	71.6	
T-⑦	2014/9/1 8:51	55	170	72.5	
T-⑧	2014/9/1 8:41	19	57	73.2	
T-3	2014/9/9 9:50	26	76	76.6	
T-4					
T-⑩					
T-S5					
T-12					
T-11					
T-17-1					
T-20					
T-MA	2014/9/17 5:30	ND(2.1)	4.0	85.1	
T-D1	2014/9/1 9:43	12	29	76.9	
T-S3	2014/9/24 6:14	5.5	8.5	78.0	
T-S4	2014/9/24 5:46	130	400	75.5	
T-D5	2014/9/1 10:24	38	120	76.9	
T-B3	2014/9/6 5:55	2.0	5.6	83.2	
T-B1	2014/9/18 6:47	2.6	5.9	84.5	
T-B2	2014/9/18 6:11	7.6	23	83.2	
T-⑩	2014/9/2 10:02	9.8	32	68.1	
T-5	2014/9/2 9:20	28	79	71.9	
T-⑪	2014/9/2 9:19	32	97	71.2	
T-7	2014/9/12 10:50	22	66	63.8	
T-⑩	2014/9/2 9:06	27	81	74.0	

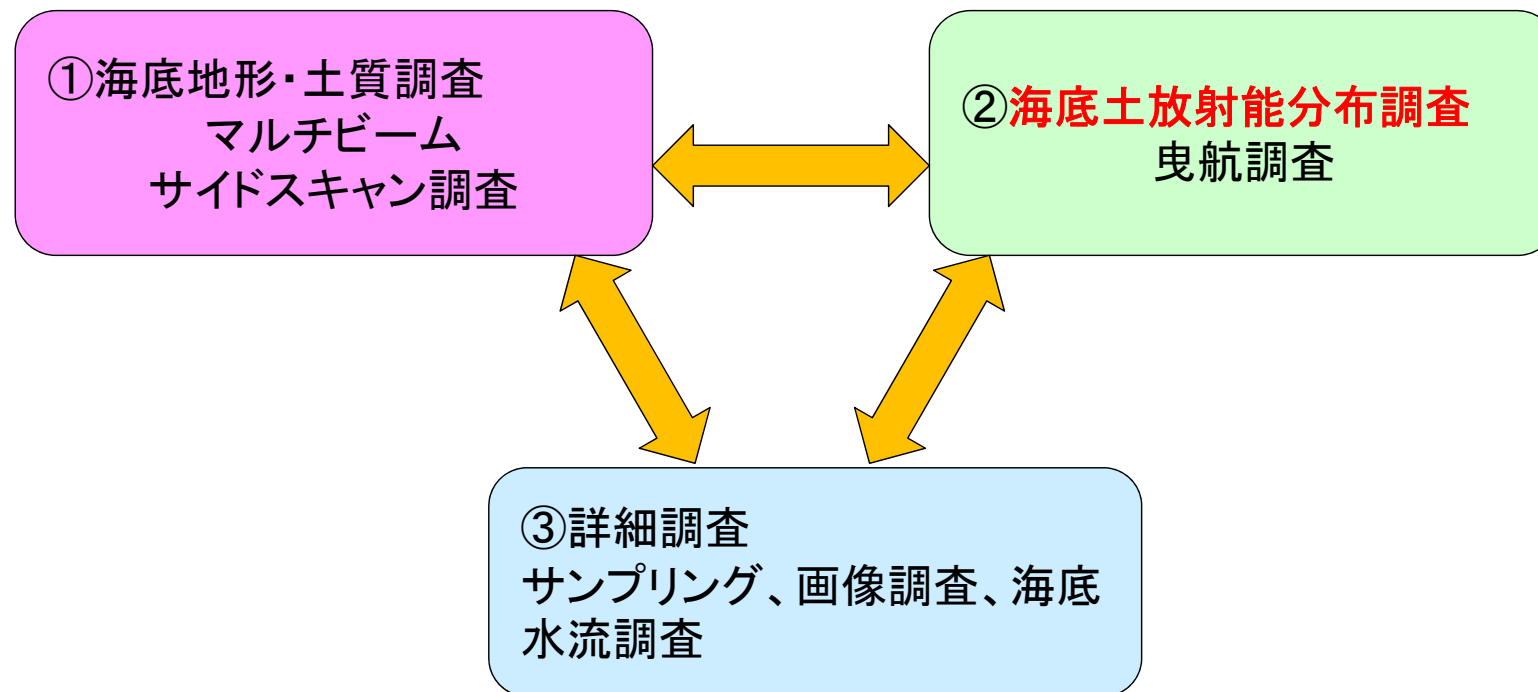
測定ポイント：T-3

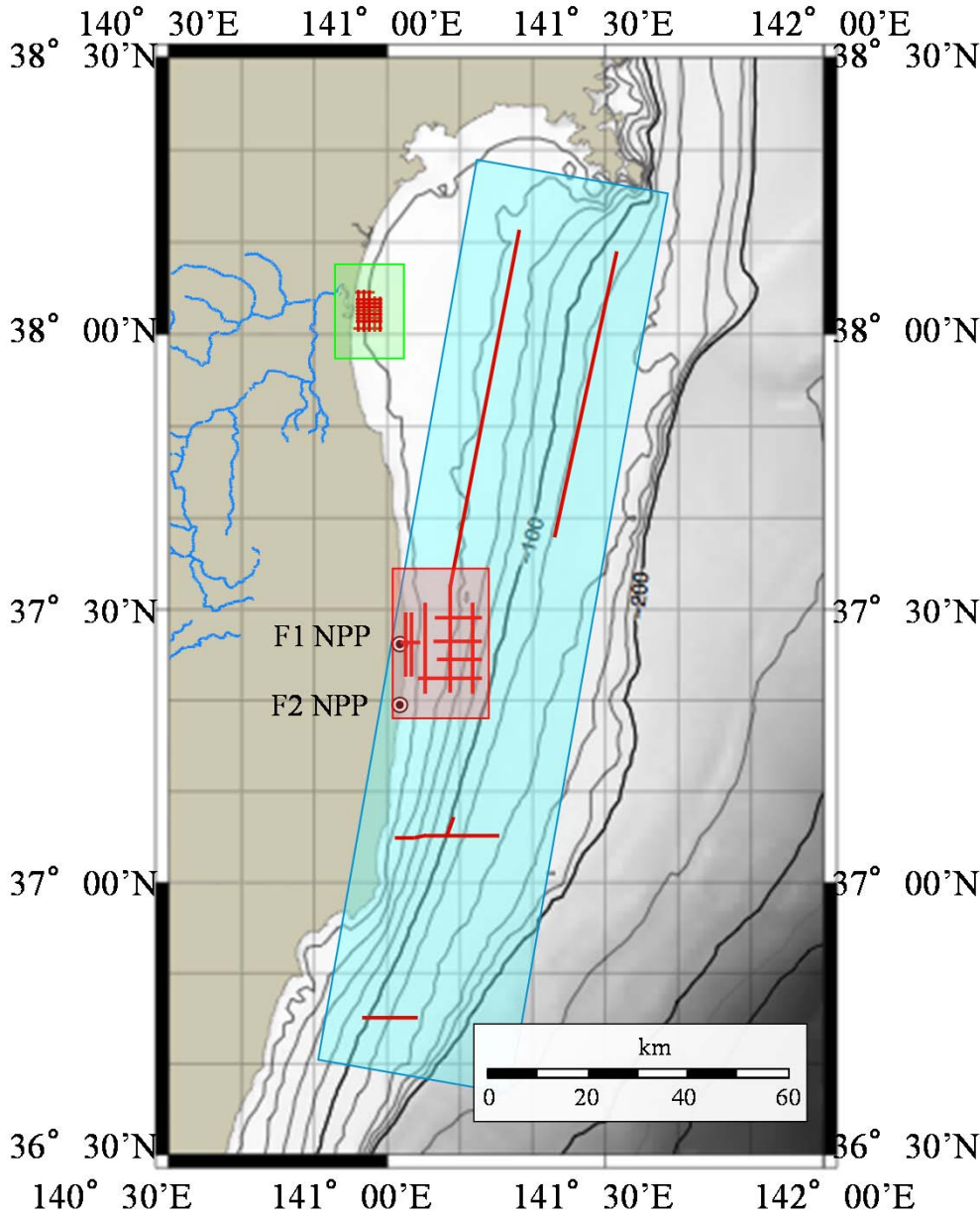


出典：原子力規制庁等「海域モニタリングの進め方」

出典：原子力規制庁 (H26.10.23)

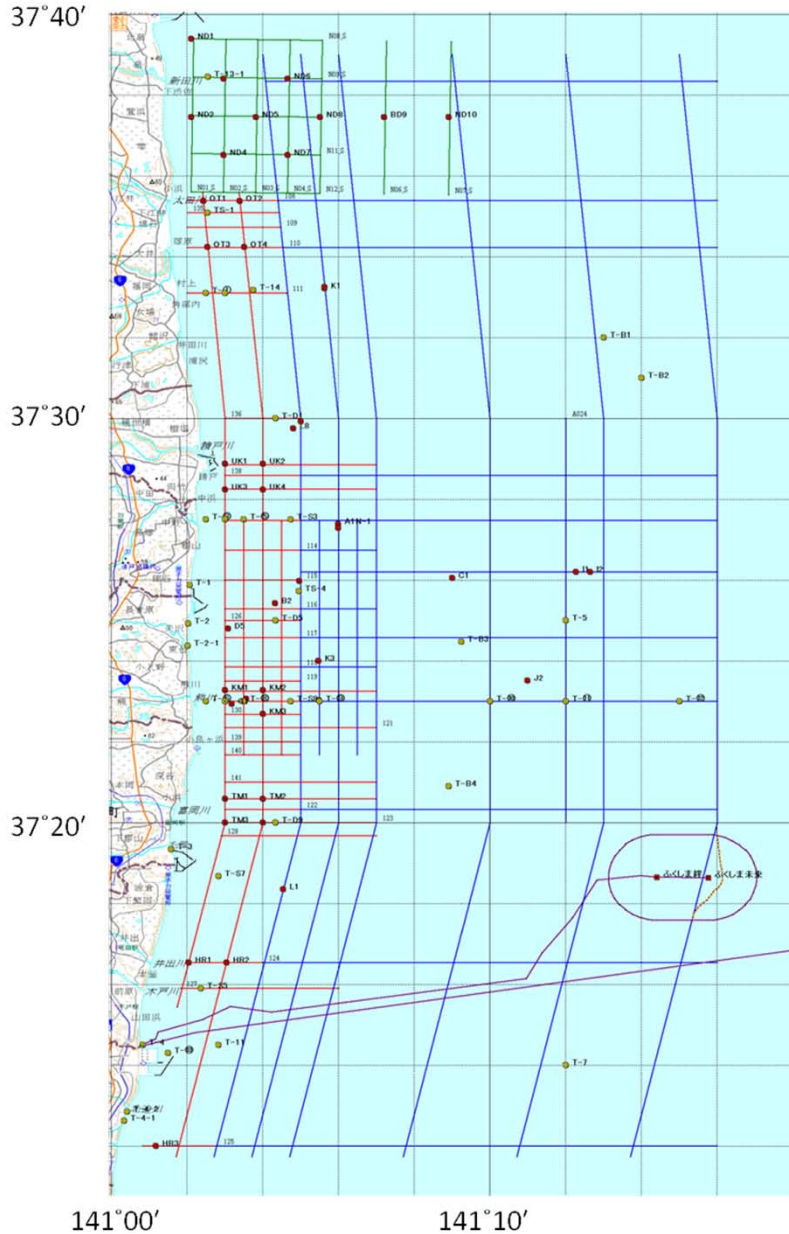
- 海底土の放射性物質分布から放射性物質の動態を把握するための情報を有効かつ効果的に取得することを目標。
- 海底地形・土質調査、海底土放射能分布調査、詳細調査の連携を意識しつつ調査。



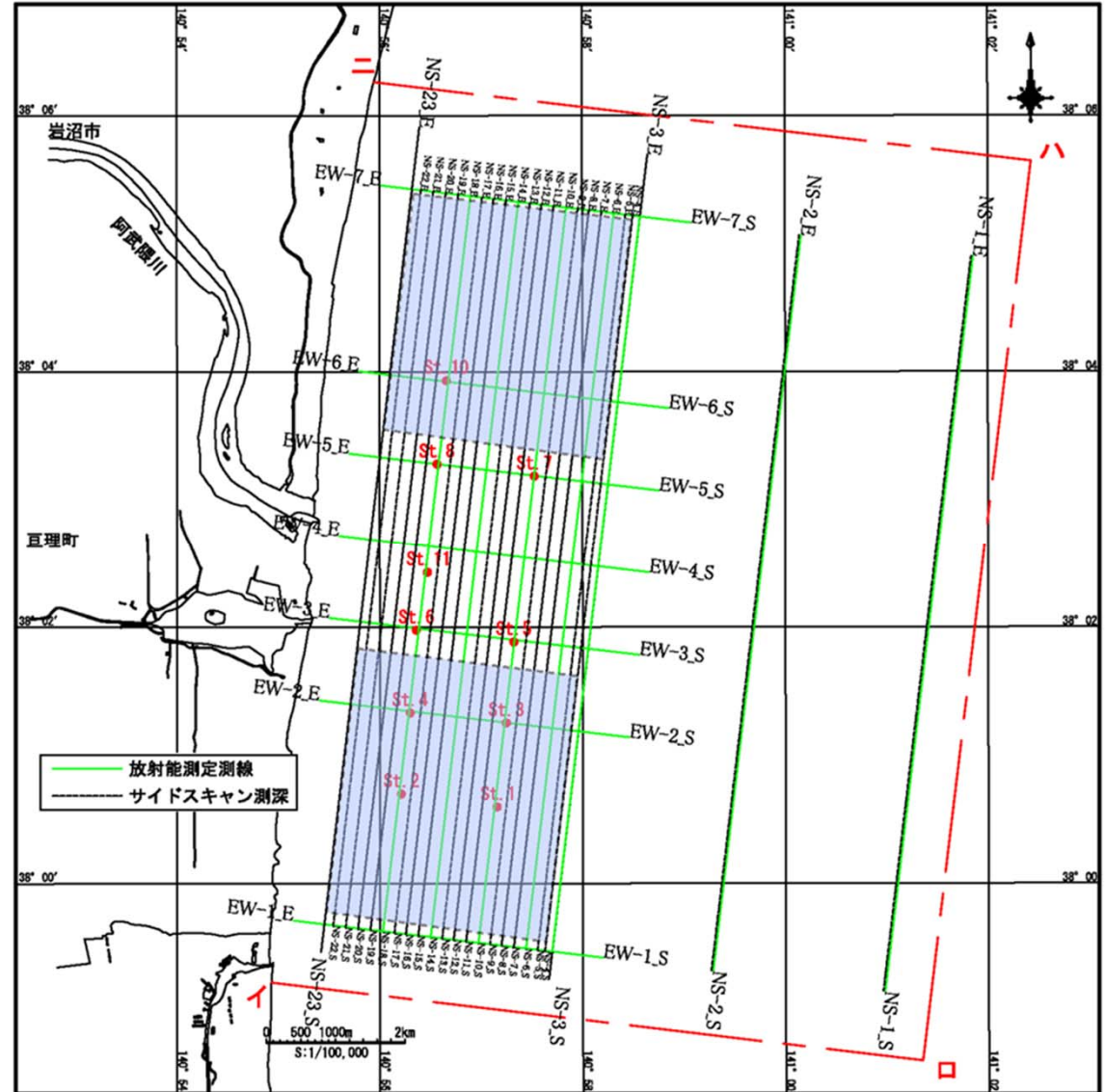


時期	場所	距離
平成24年8月、11月	北茨城沖、いわき沖	37 km
平成24年11月、平成25年2月	福島第一原子力発電所沖	141 km
平成25年2月	仙台湾	144 km
平成25年3月、7月	阿武隈川河口付近	77 km
平成25年5月	伊豆沼	22 km
	総曳航距離	421 km

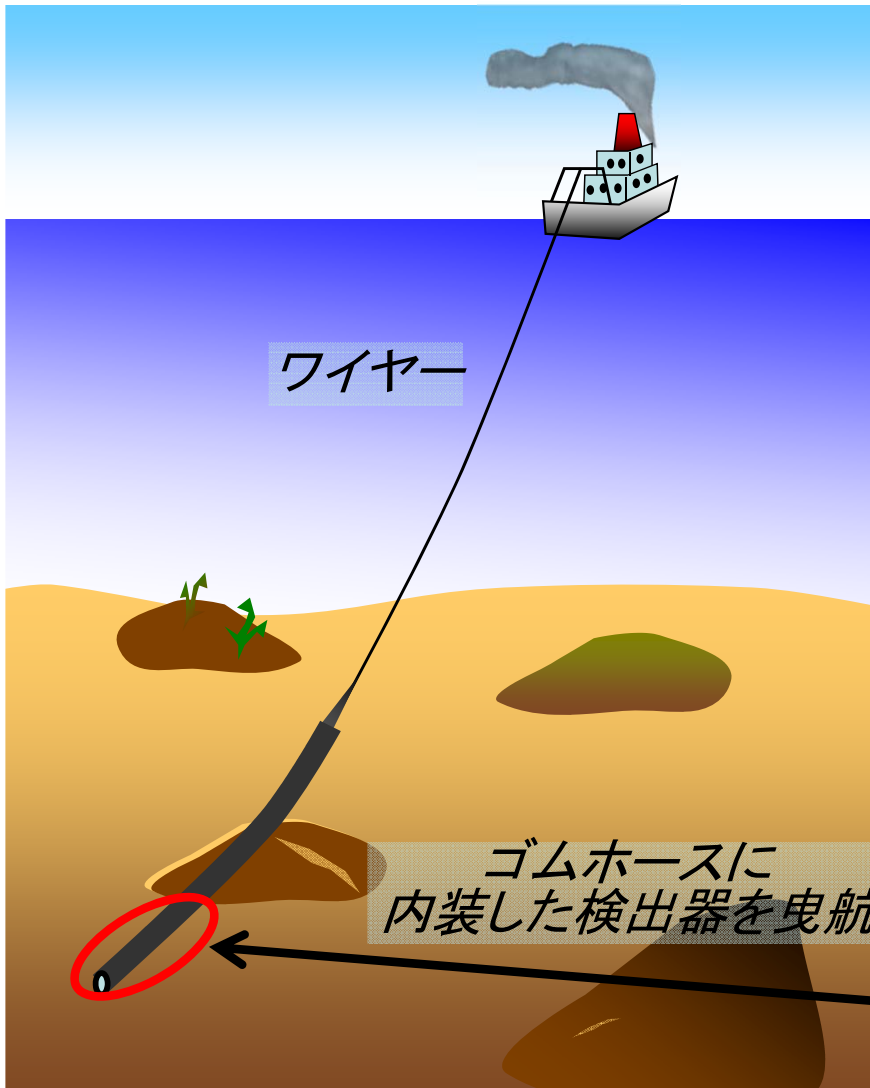




福島県沖総延長800km



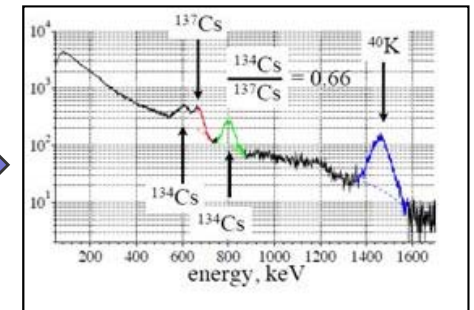
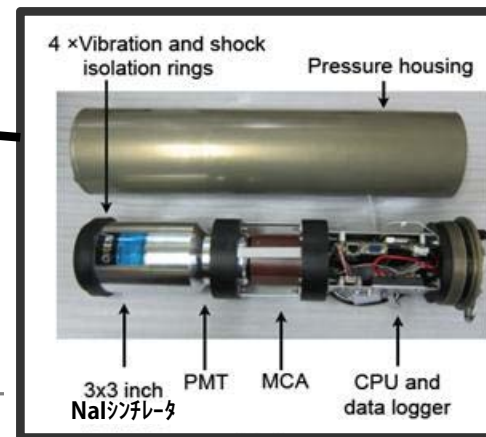
阿武隈川河口沖総延長約80km



曳航測定イメージ

## 計測装置の諸元

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	2knot
計測距離	40km/day
検出器	3 × 3inch NaIシンチレータ
計測	0.1~1.8MeV 1024ch, 1Hz
その他	スタンドアロンモード、リアルタイムデータ転送モード、深度センサ、3軸加速度計、マイク、温度計

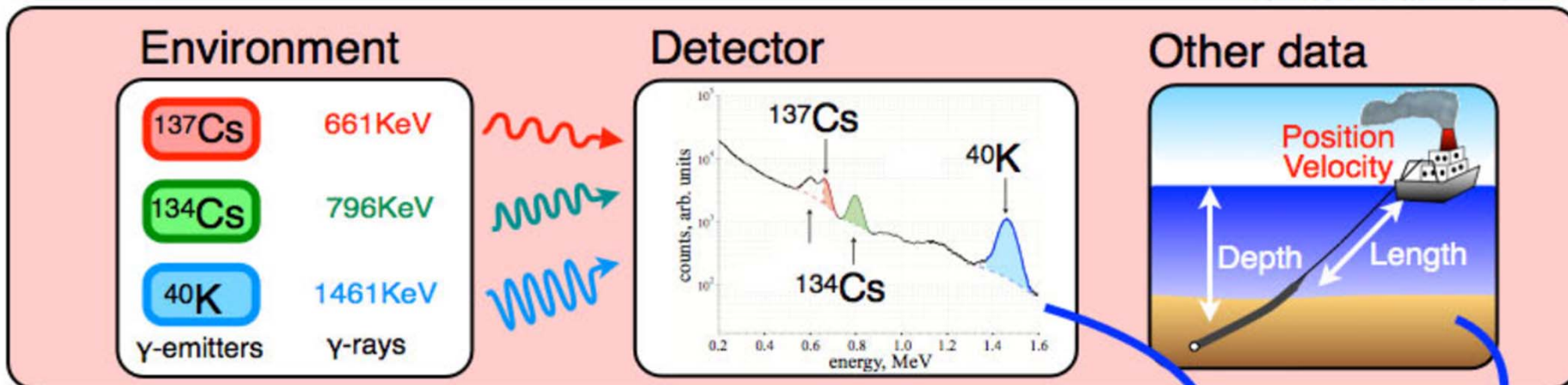


ガンマ線スペクトルを計測

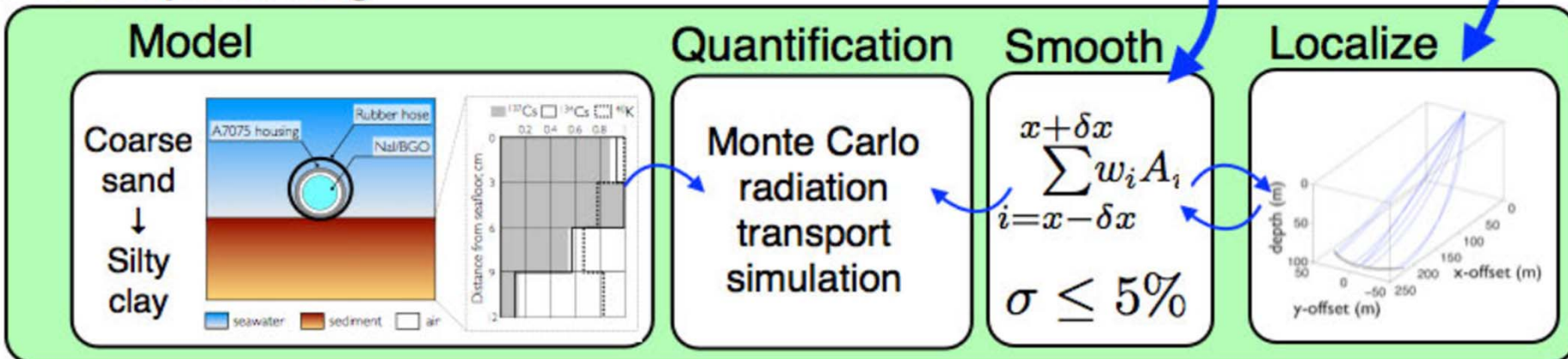


## Step 1: At sea

Thornton et al. 2013



## Step 2: Data processing

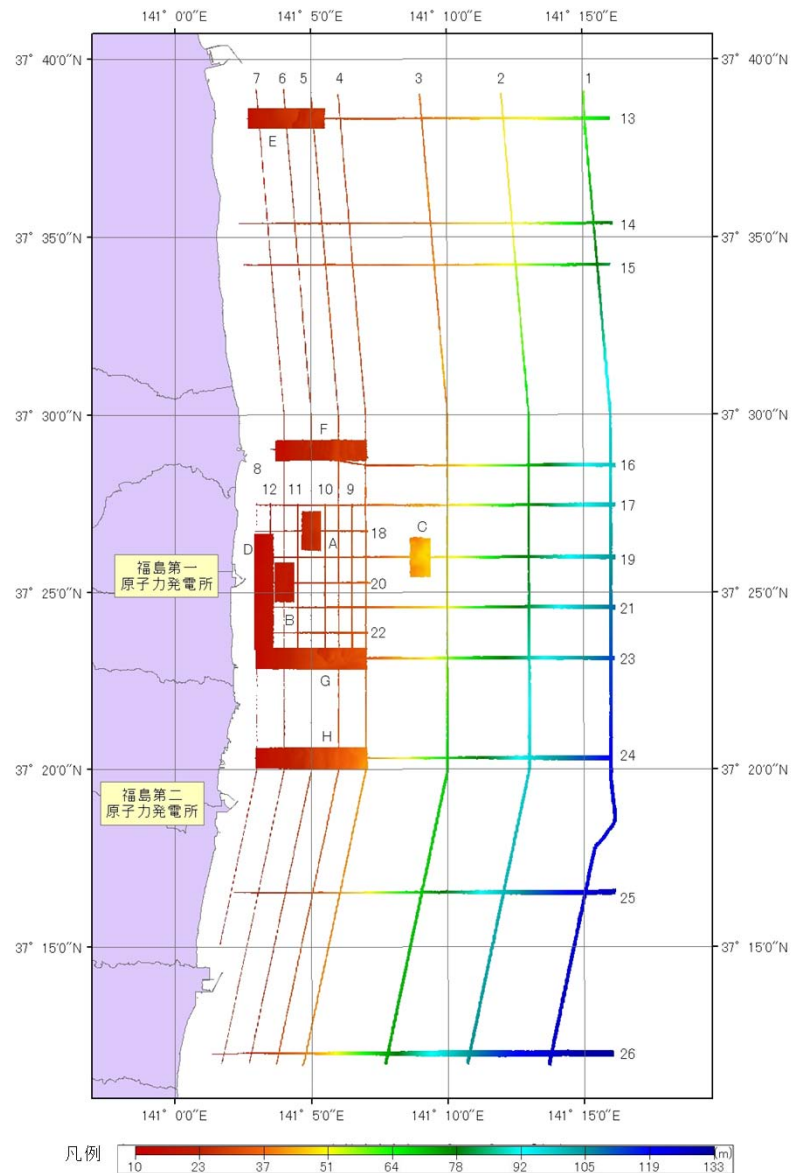


## Step 3: Output

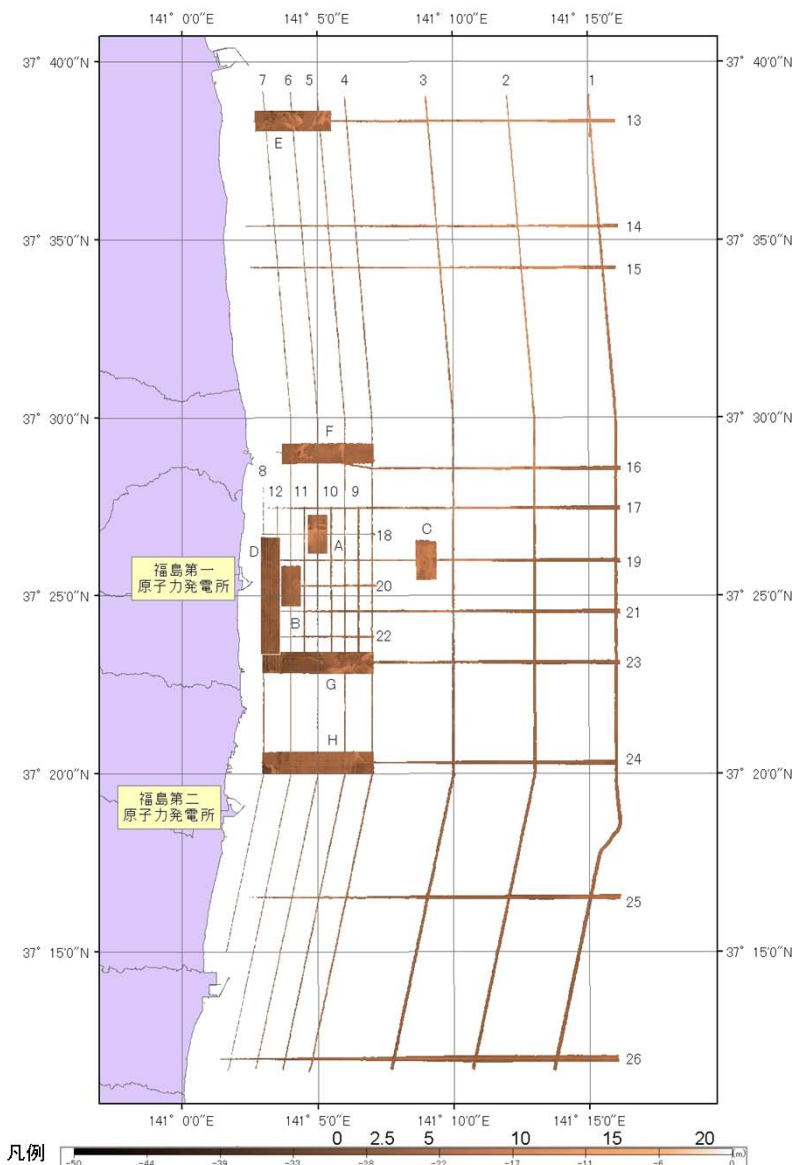
latitude N	longitude E	depth (m)	137Cs			134Cs	40K
			mean (Bq/kg wet)	uncertainty (Bq/kg wet)	resolution (m)	...	...
38.5239	141.1112	31.23	100	±10	80		
38.5240	141.1112	31.42	300	±30	26		
38.5241	141.1112	31.18	1,000	±100	8		

- 検出限界~10Bq/kg
- 137Csの距離分解能 (1m/s)
  - 100 Bq/kg ~80 m
  - 300 Bq/kg ~26 m
  - 1,000 Bq/kg ~ 8 m
- 1日40km程度の連続計測

## ■ 海底地形・底質調査の結果



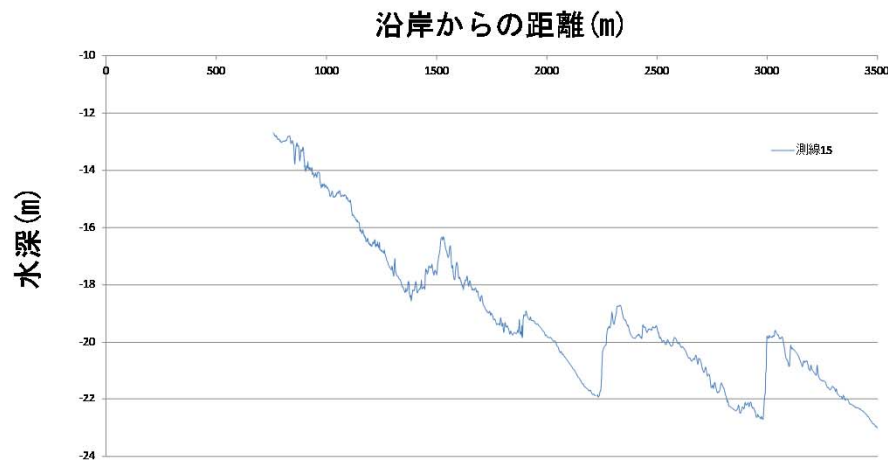
等深コンター図



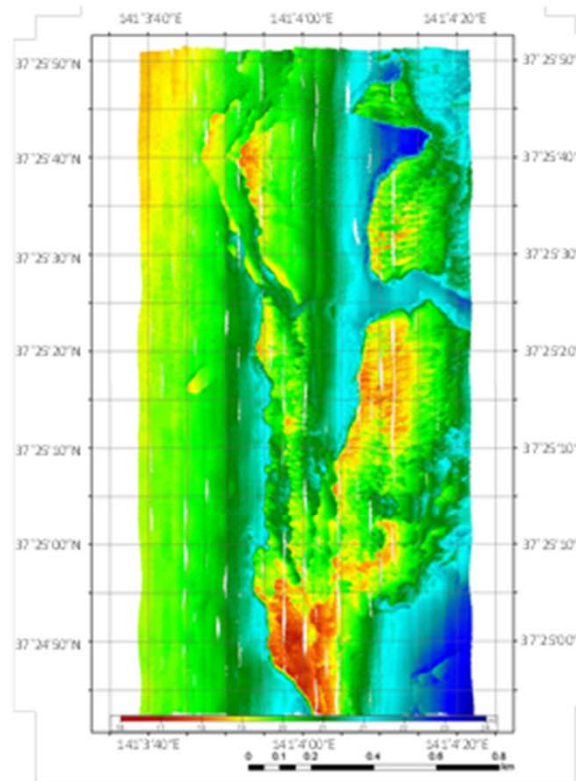
底質分布図

## ■ 海底地形の調査結果

- 海底の起伏を詳細に把握することに成功。
- また、面的にデータを取得した箇所においては、起伏とともに、泥質・岩礁帯の分布の状況についても、把握することに成功。



ライン状測線の断面図

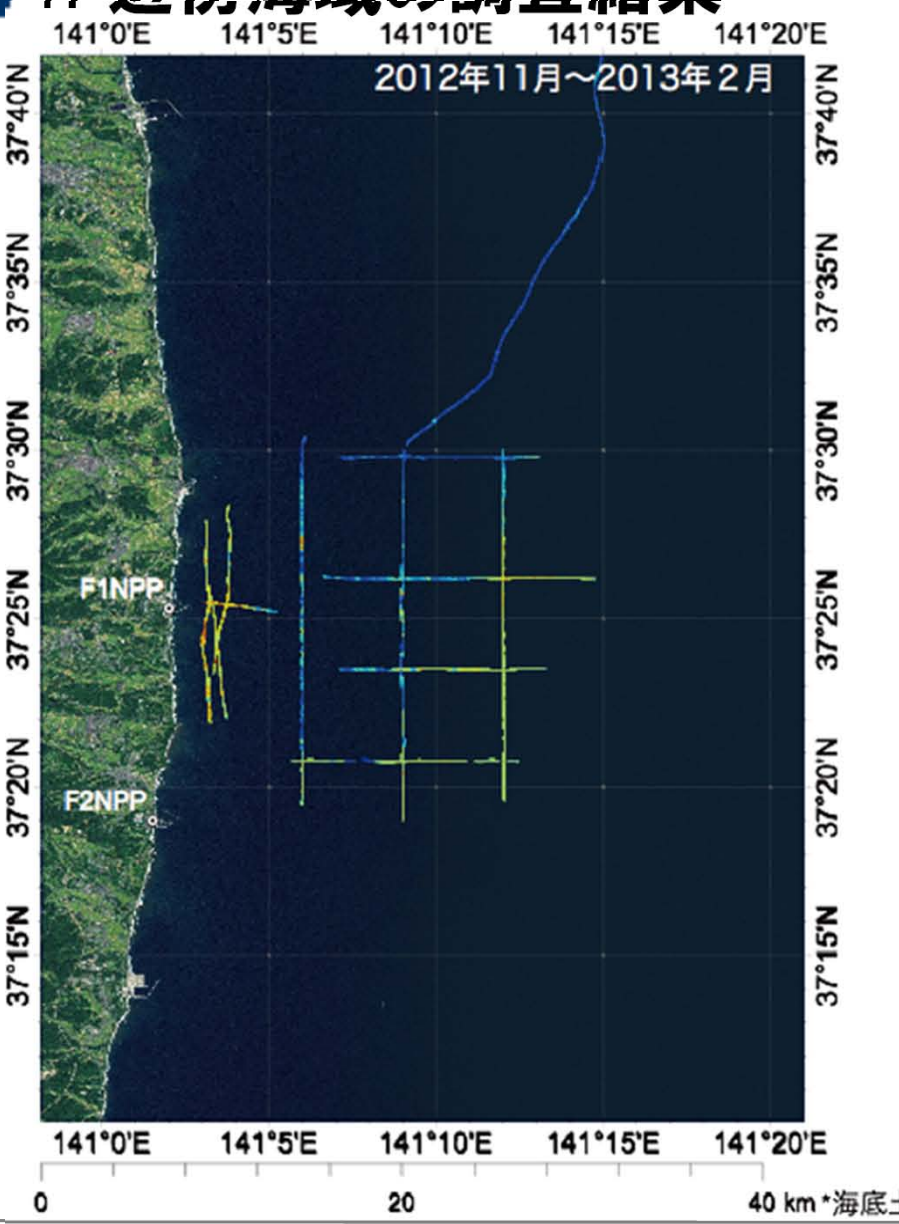


等深コンター図

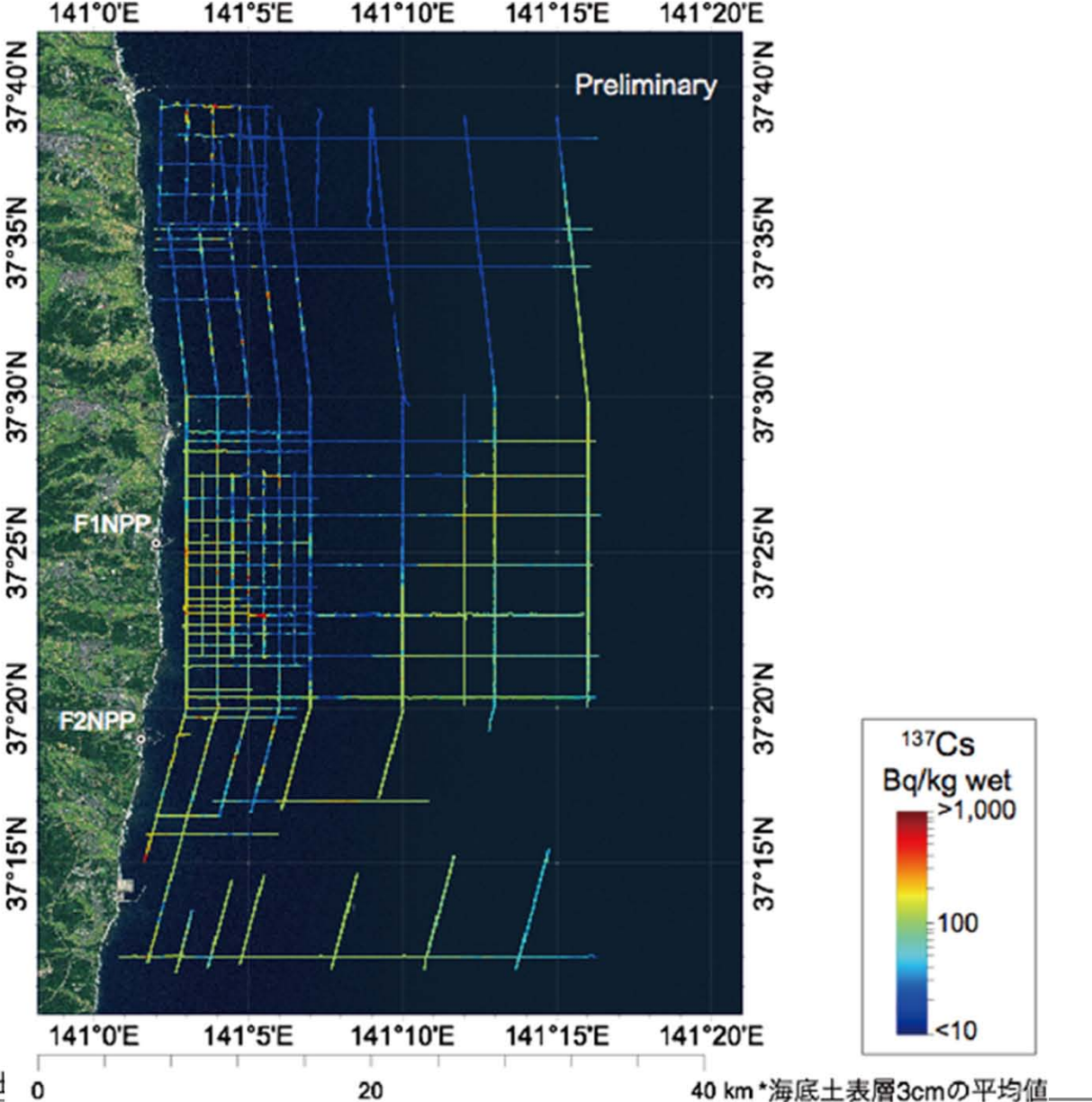


底質分布図

## 1F近傍海域の調査結果

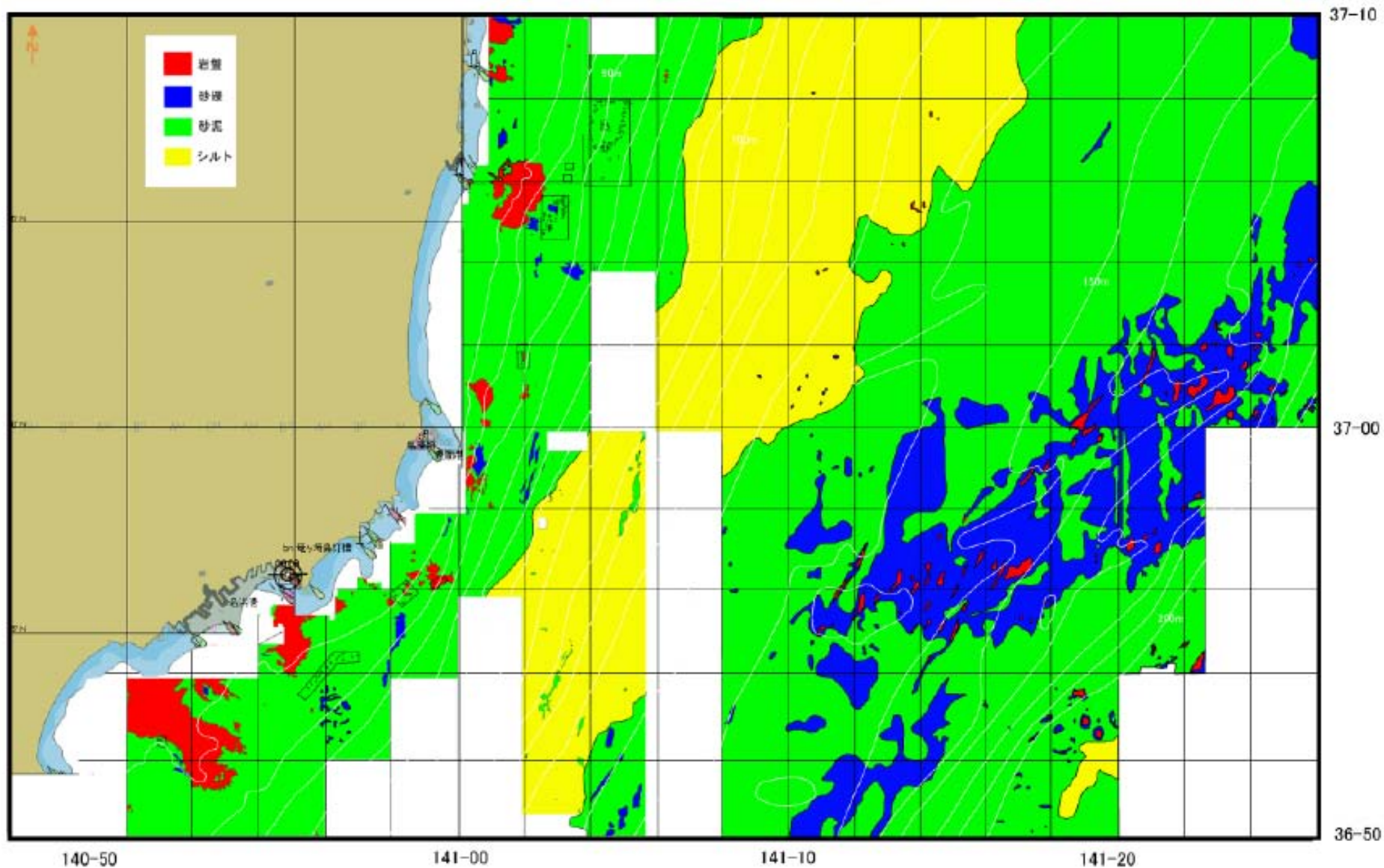


平成24年度までの調査結果



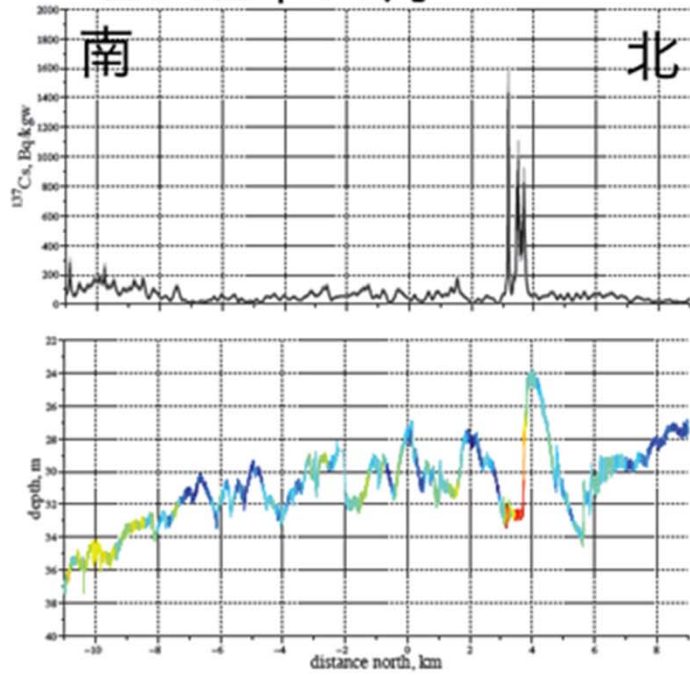
平成25年度調査結果 行政法人海上技術安全研究所

## ■ いわき海域底質模式図

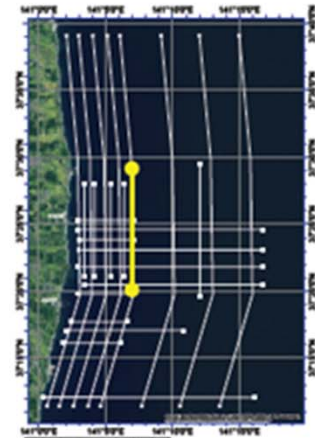
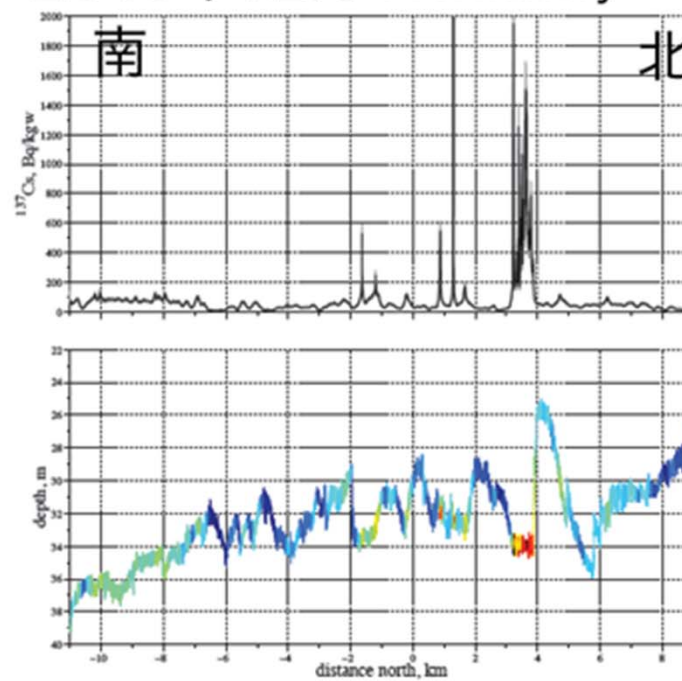


出典:早乙女他、福島水試研報第16号 平成25年3月

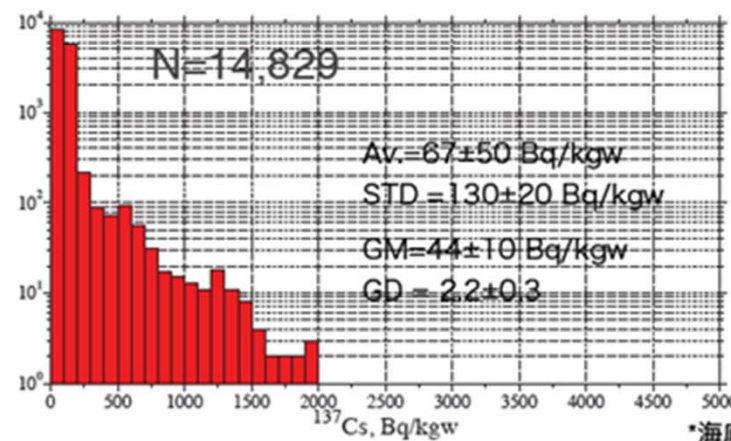
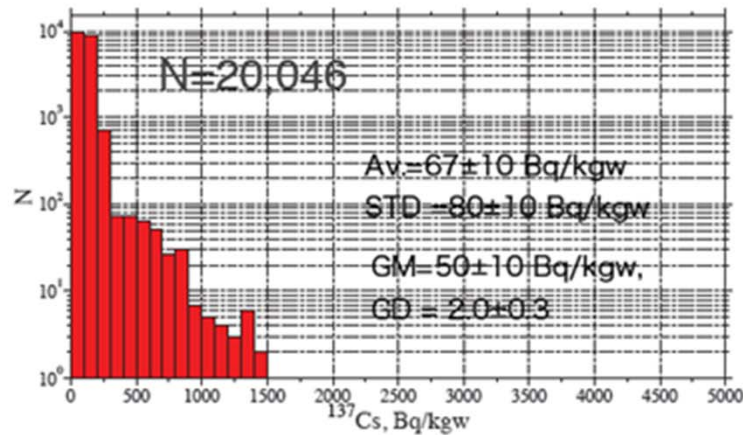
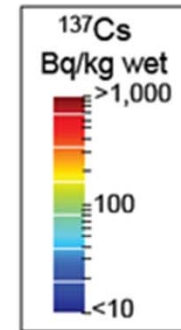
2012年11月



2013年12月 Preliminary

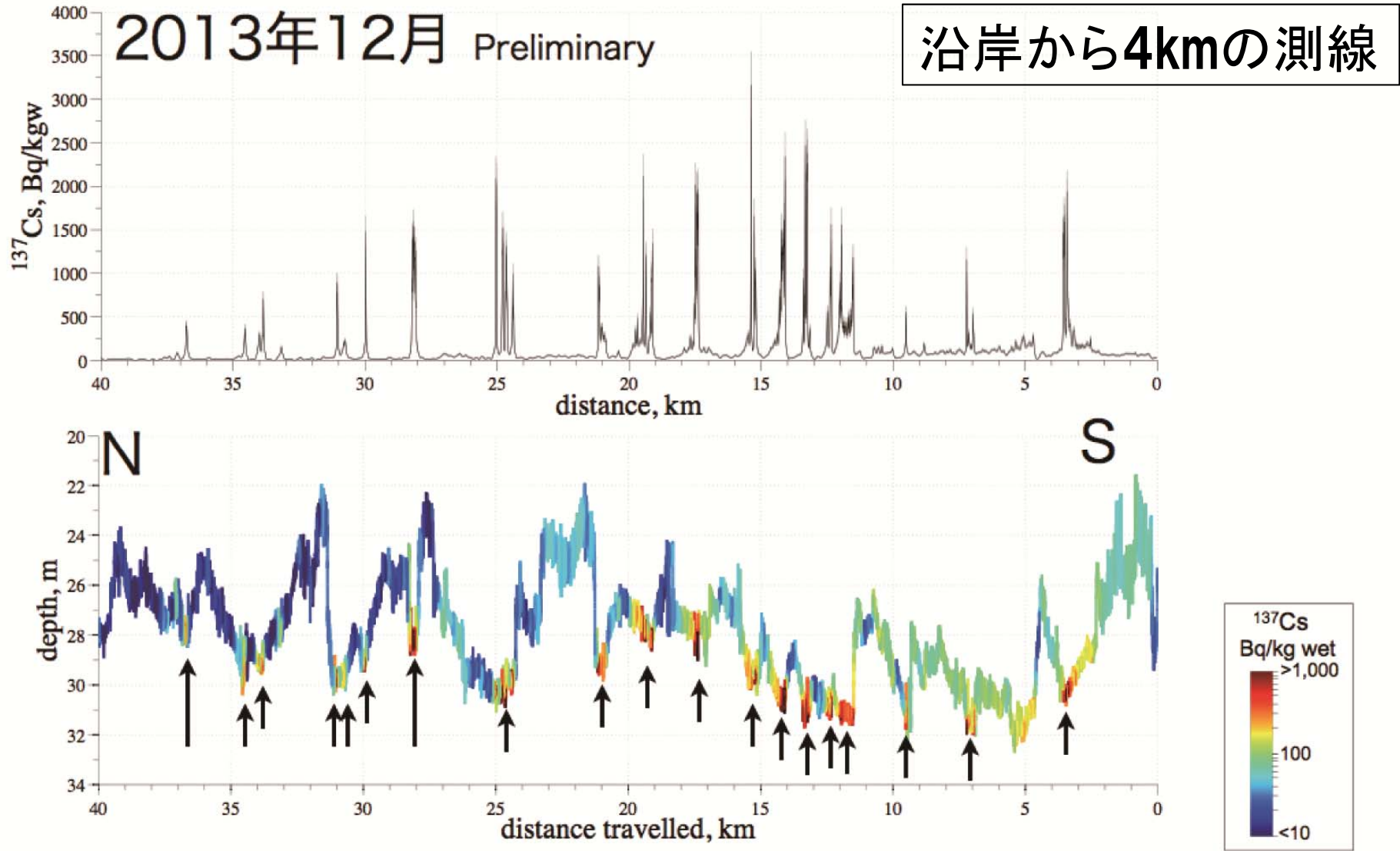


沖合6km



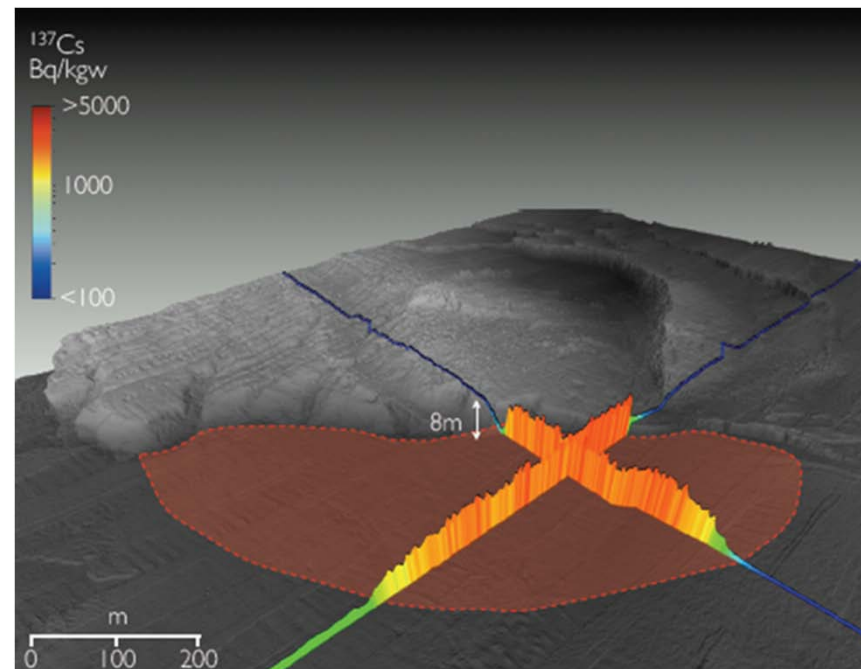
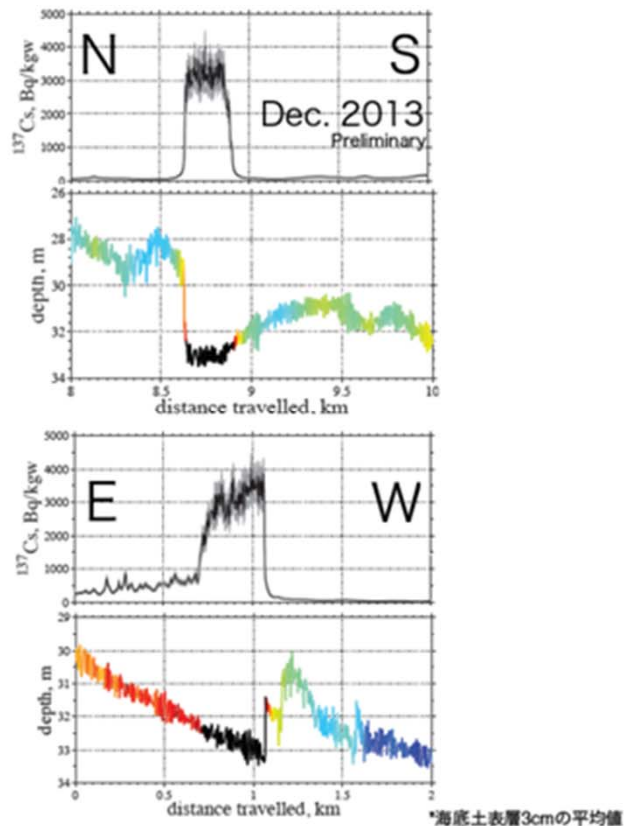
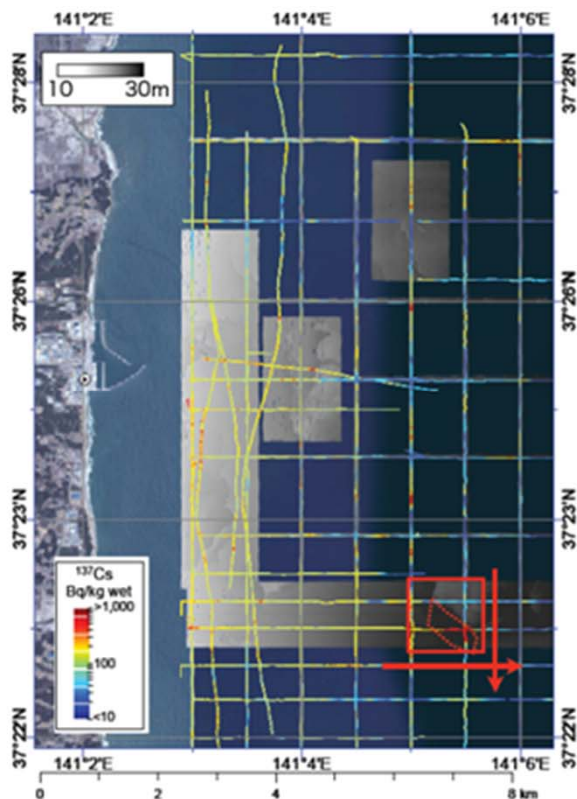
\*海底土表層3cmの平均値

## ■ 窪み地形に高濃度の放射性物質が堆積。



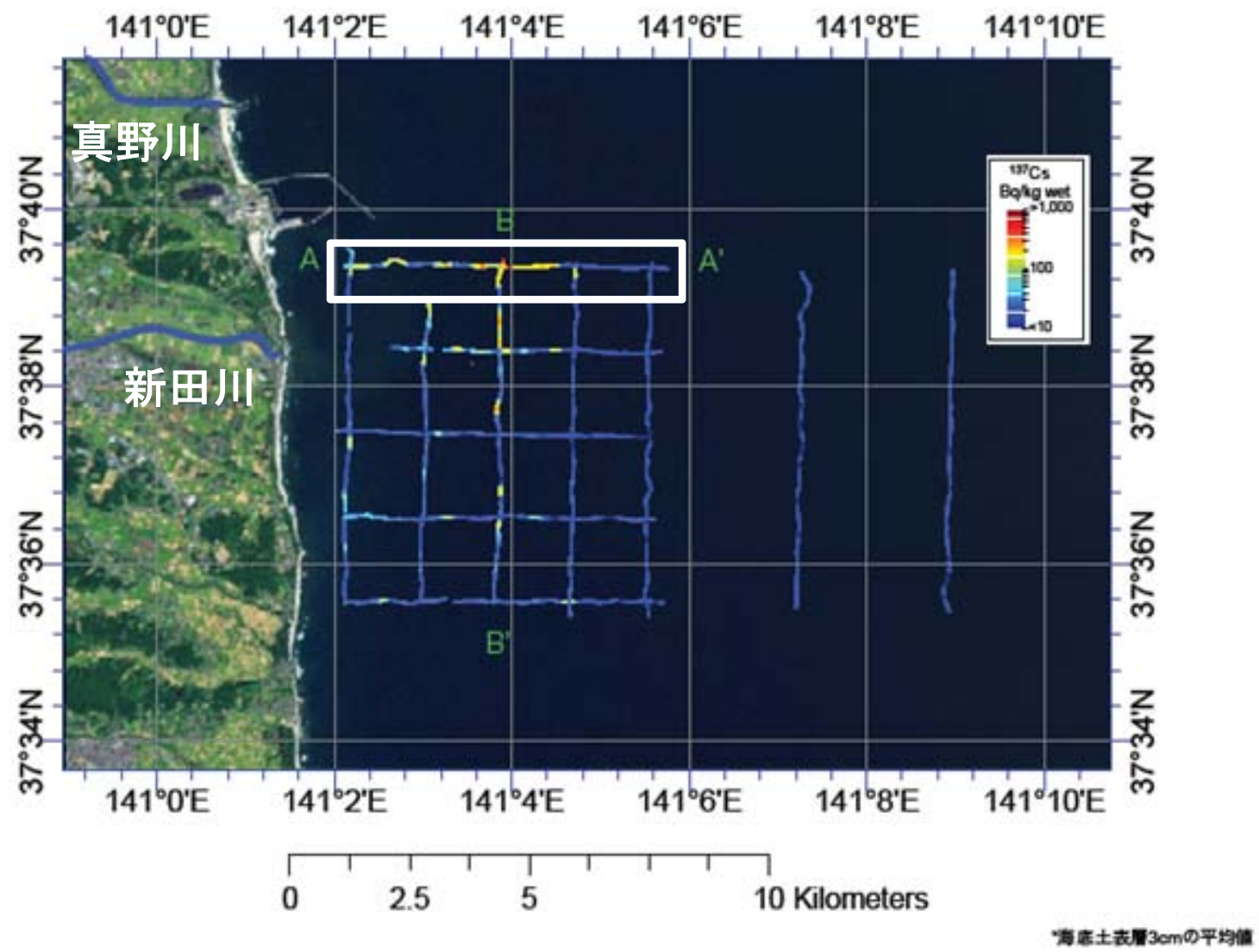
\*海底土表層3cmの平均値

- 窪み地形に高濃度の放射性物質が堆積する様子が詳細な海底地形の調査から明らかとなった。

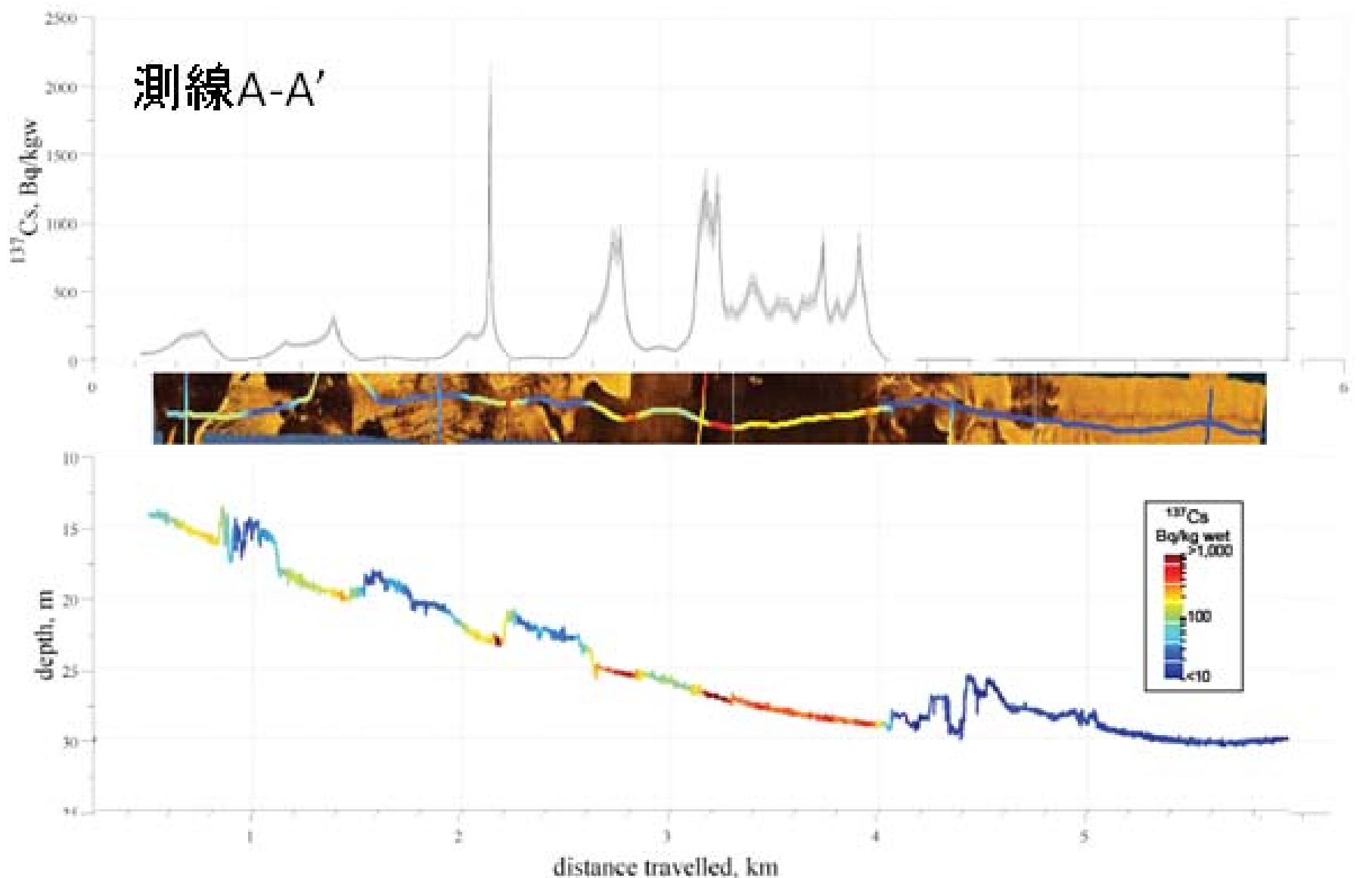




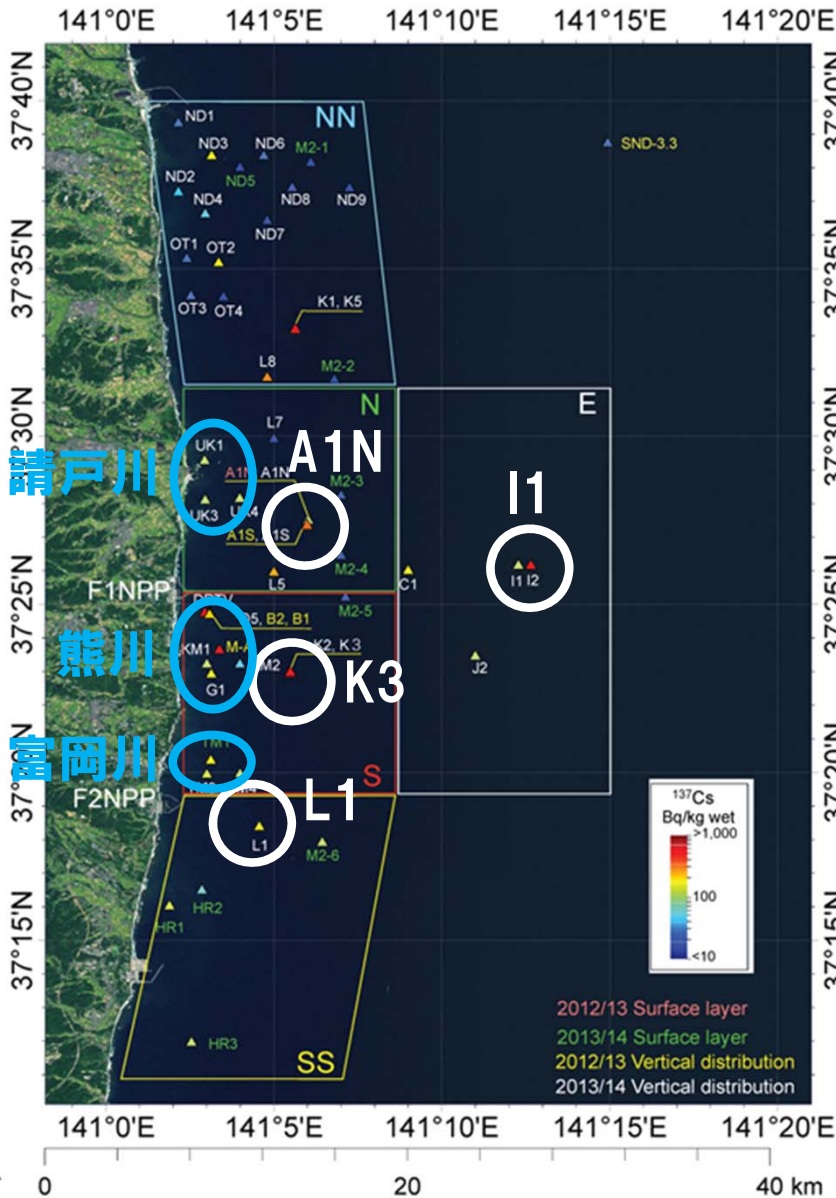
## ■ 新田川河口沖での<sup>137</sup>Cs濃度分布



## ■ 新田川河口沖における<sup>137</sup>Cs濃度分布と海底土の性状との関係



## ■ 1F近傍の<sup>90</sup>Sr分析及び炭素安定同位体比分析



### ■ <sup>90</sup>Sr分析

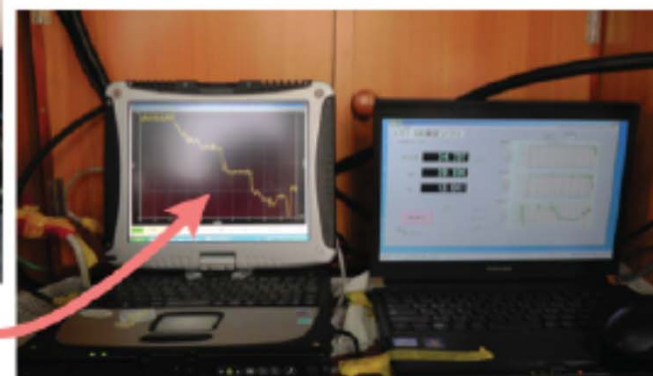
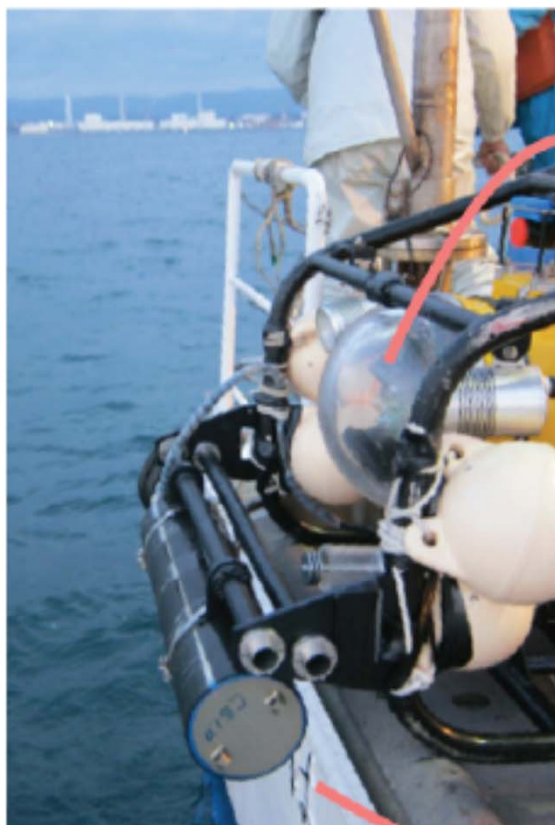
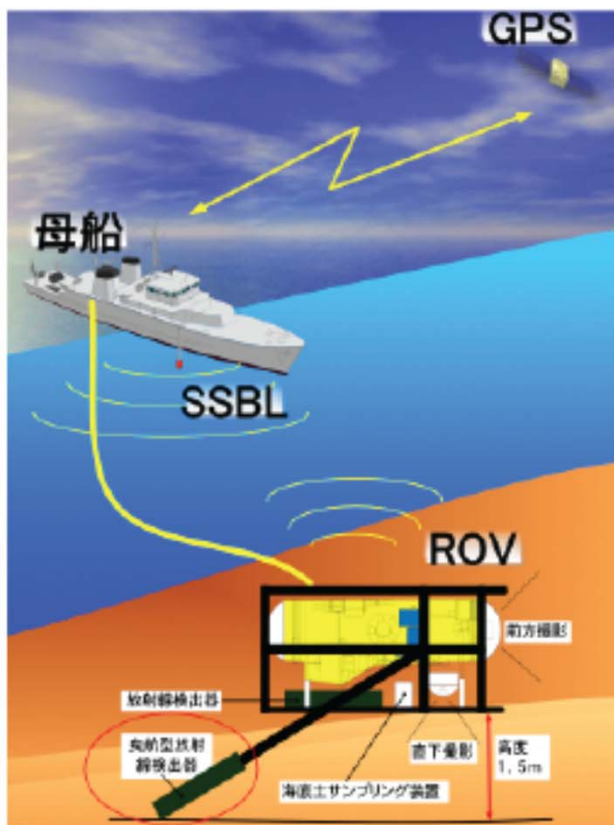
- A1N 0-6cm: ND (<0.17Bq/Kg-dry)
- A1N 6-20cm: 0.21±0.11 Bq/kg-dry
- K3 0-20cm: 1.6±0.19 Bq/kg-dry
- K3 20-40cm: 1.2±0.16 Bq/kg-dry
- L1 0-6cm: ND (<0.20 Bq/kg-dry)
- I1 0-6cm: ND (<0.16 Bq/kg-dry)

### ■ 炭素安定同位体比(δ<sup>13</sup>C(‰))

- A1N: -23.2
- K3: -23.2
- L1: -20.1
- I1: -18.8
- 熊川河口沖: KM1: -22.5, KM2: -19.8
- 請戸川河口沖: Uk1: -22.8, UK3: -21.8, UK4: -22.6
- 富岡川河口沖: TM1: -21.6, TM2: -21.5

■ 既存ROVを改造し、海底の放射性物質分布の状況を詳細に調査  
 □ 平成25年12月(JST事業)及び平成26年2月(原子力規制庁事業)に実施

→リアルタイムの放射線計測・カメラ映像  
 水温・塩分・位置計測(~1m精度)



## ■ 曳航式流況調査

- ドップラー流向流速計(ADCP)を、漁船で曳航。
- 同時に4測線において、流向・流速、塩分、水温を測定。
- 平成26年1月20日に実施。

## ■ 海底設置式流況調査

- 設置型ADCPを4点に設置。15昼夜にわたり、10層で流向・流速データを取得。
- 底層を観測するため、電磁流速計及び濁度計を設置。
- 実施時期は以下のとおり。
  - a:平成26年1月14日～2月1日
  - b:平成26年1月15日～2月1日
  - c:平成26年2月20日～3月11日
  - d:平成25年12月14日～平成26年1月11日

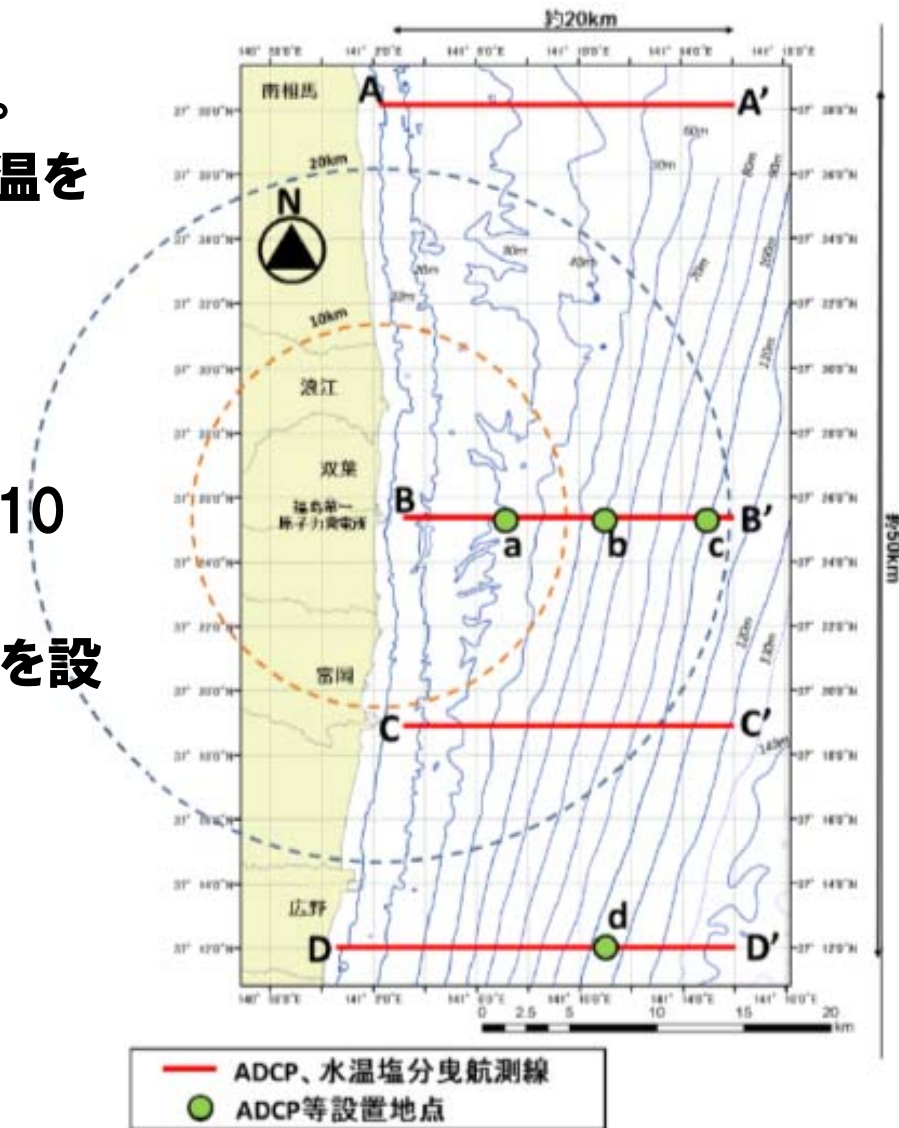


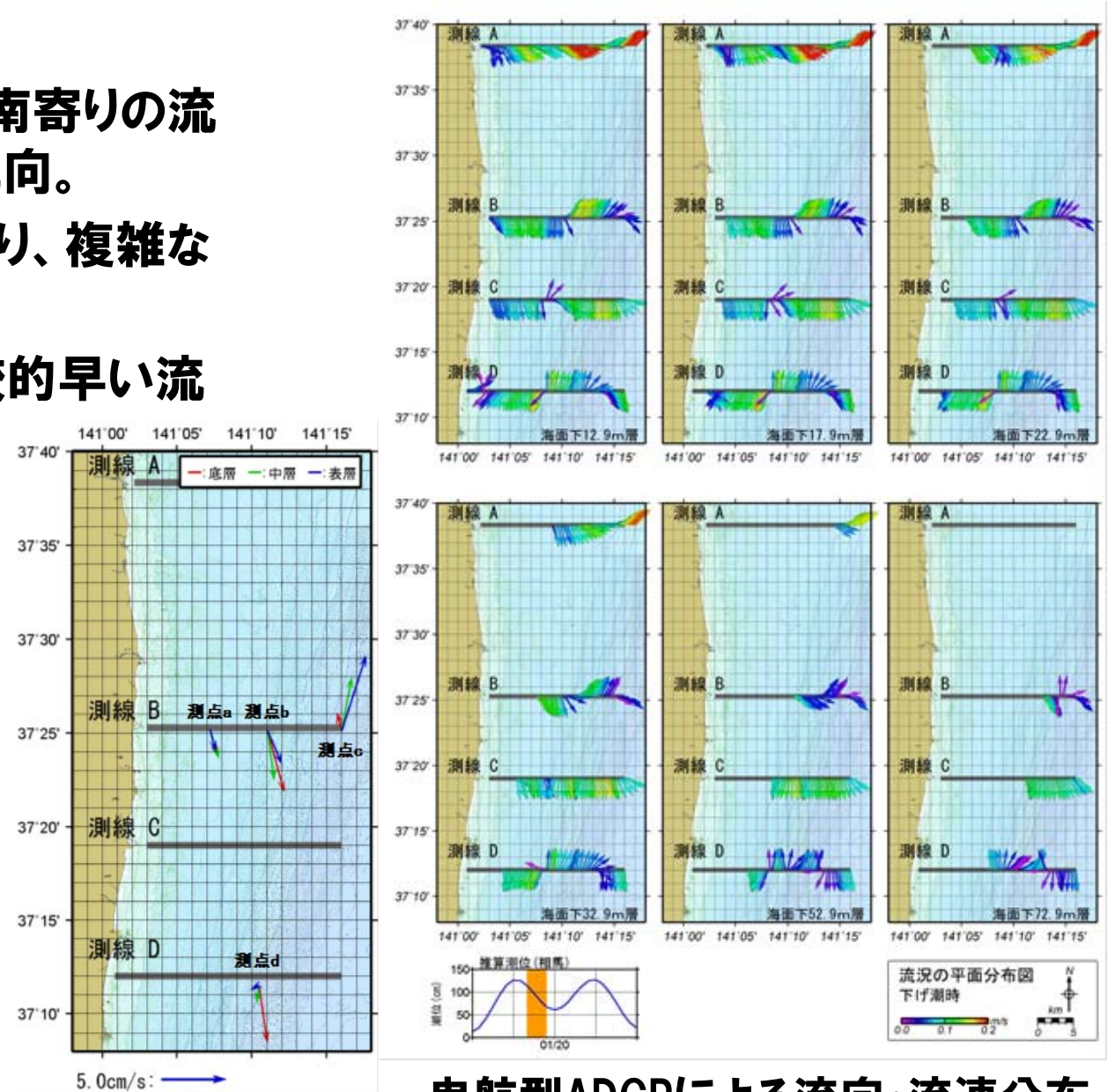
図3-28 流況調査位置

## ■ 曳航型ADCPによる調査結果

- 下げ潮時においては、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。
- 沖寄りでは、測線毎に流向が異なり、複雑な流れ場。
- 測線Aでは、20cm/sを超える比較的早い流れを観測。

## ■ 設置型ADCPによる調査結果

- 測点a、b、dでは、恒流は下層程早くなる傾向であり、流向は測点cの表層を除けば、概ね南南東の流れ。
- 測点cでは、流速は上層程早く、流向は北北西から北北東の範囲に分布。

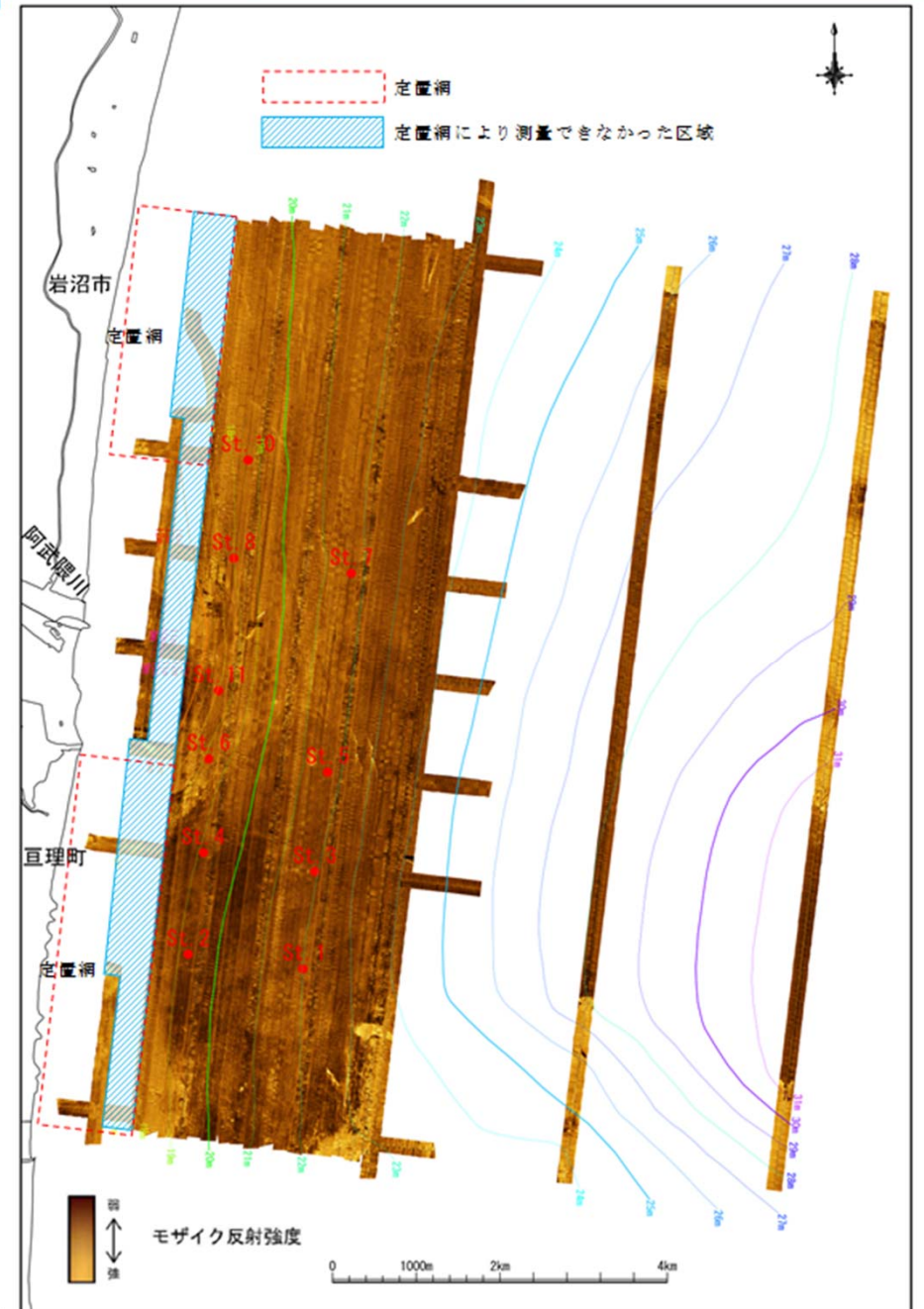


恒流の流向・流速

曳航型ADCPによる流向・流速分布

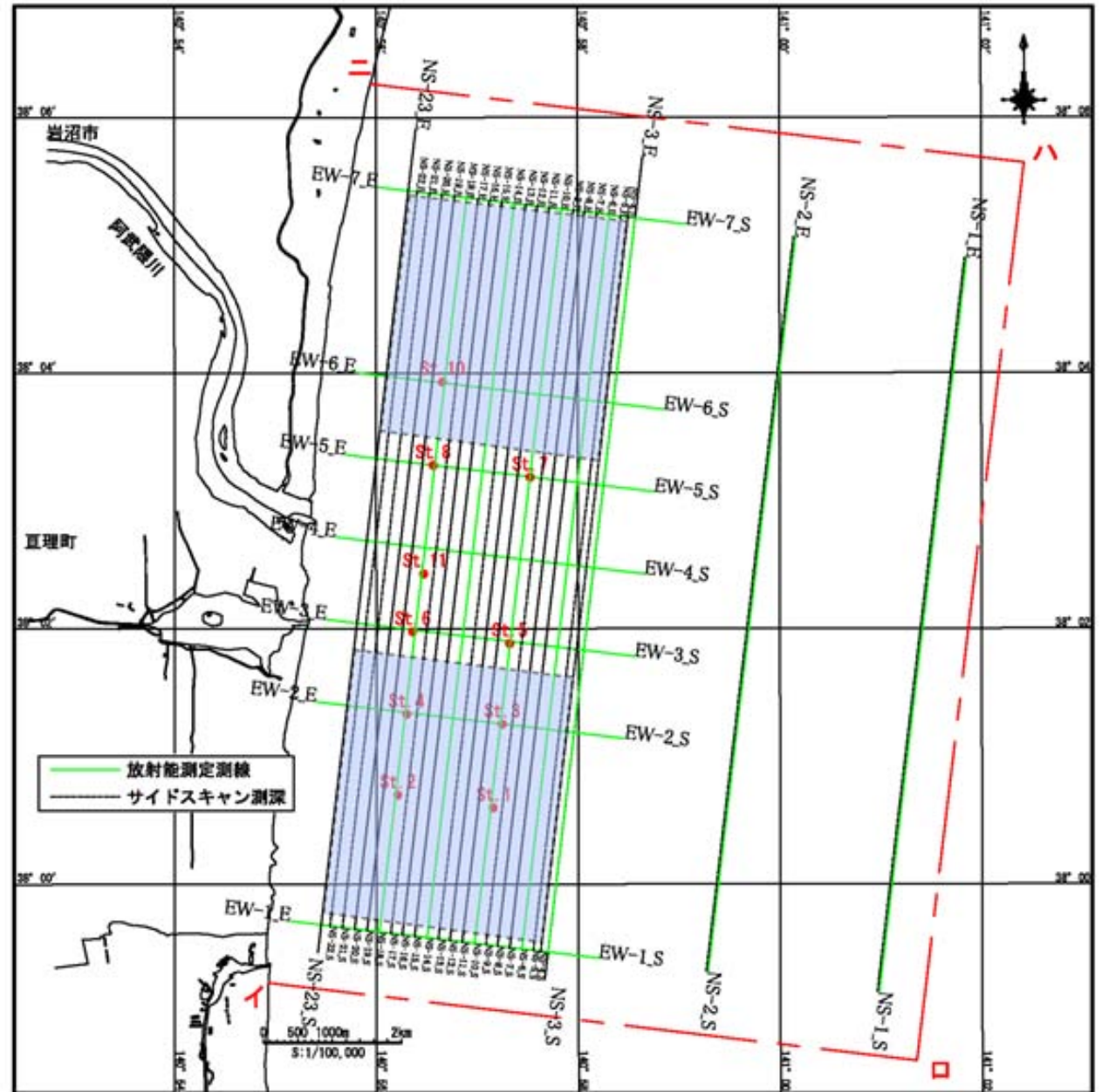
## ■ 海底地形・土質調査

- 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。
- 7月と10月の等深線比較及び3月、7月、10月の断面の比較の結果、地形の変化は認められなかった。



モザイク図及び等深線図 独立行政法人海上技術安全研究所

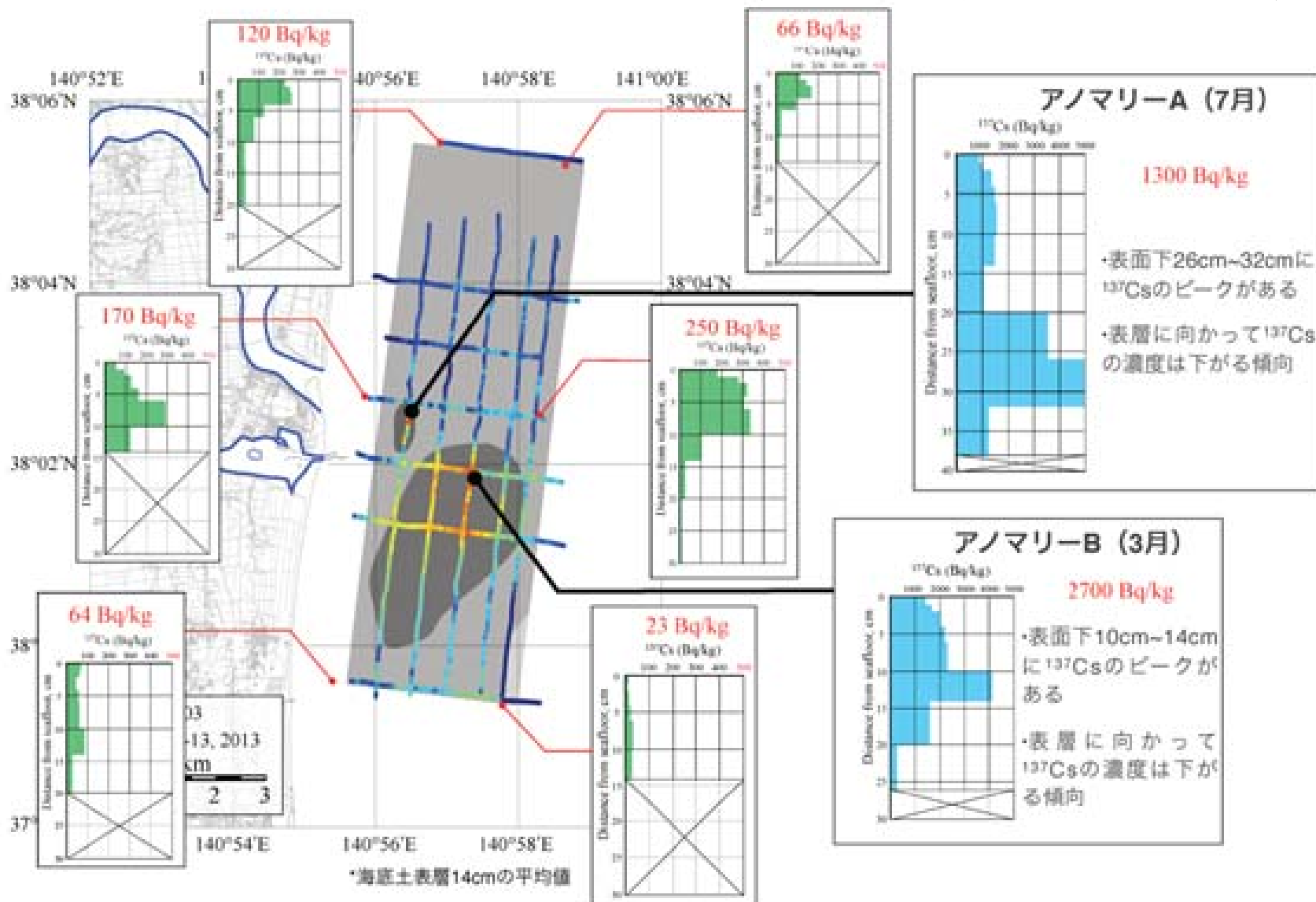
- 阿武隈川河口沖で設定した測線は、総延長97km。
- 調査は、平成25年10月及び平成26年1月に実施した。平成26年1月には海苔養殖の網が設置されていたため、図の水色の網掛け範囲を避けて調査を実施。
- 採泥は10月調査時には、St.1～St.10の10箇所、1月調査時には、St.5～St.8及びSt.11の5箇所を実施。また、St.5、6、11の3箇所については、11月及び12月にも採泥を実施。



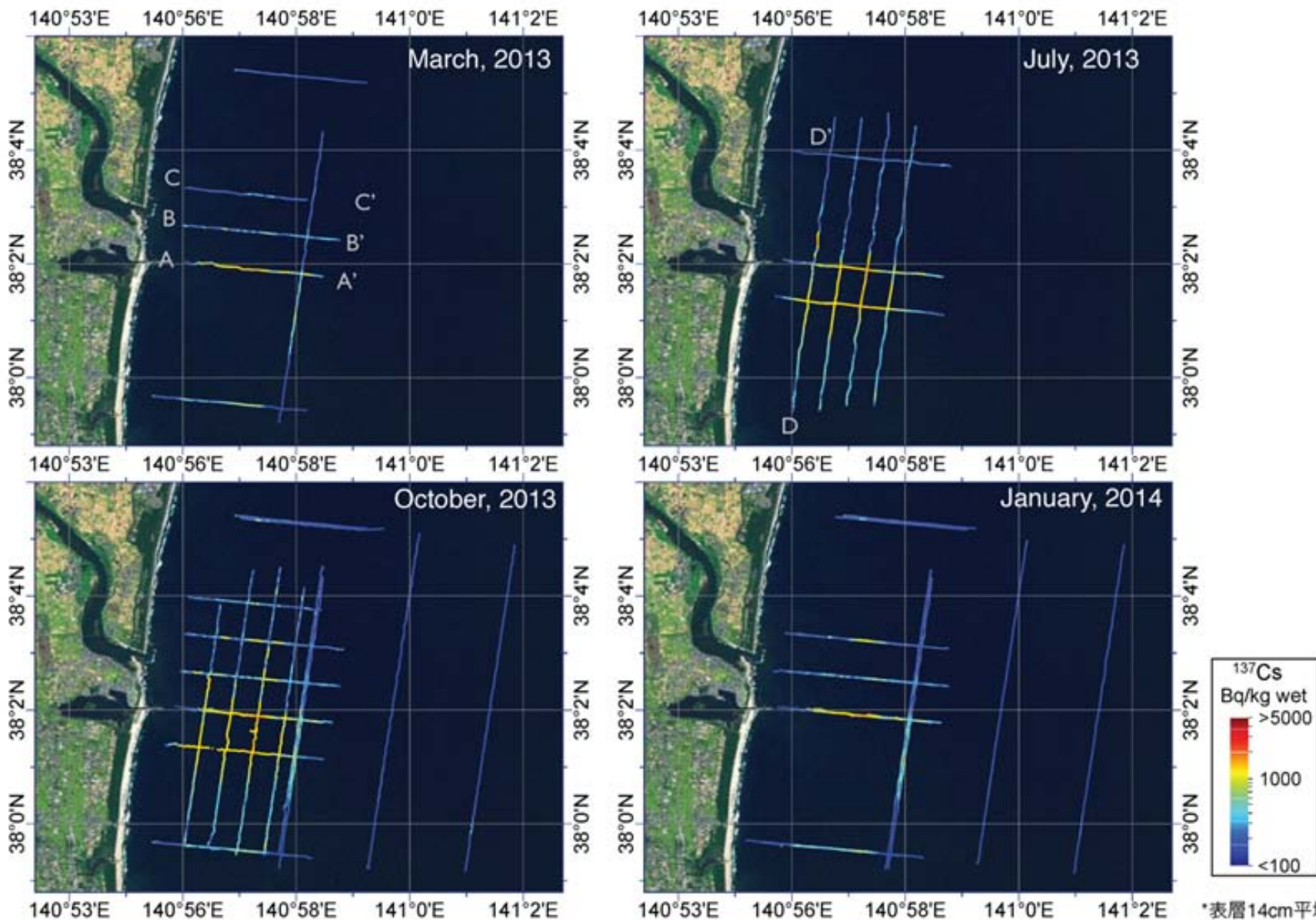


## ■これまでの調査概要

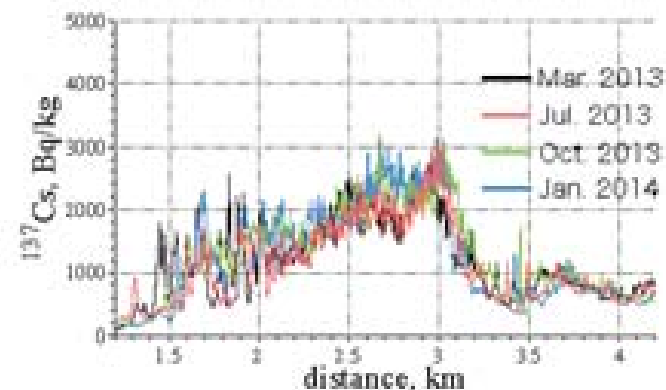
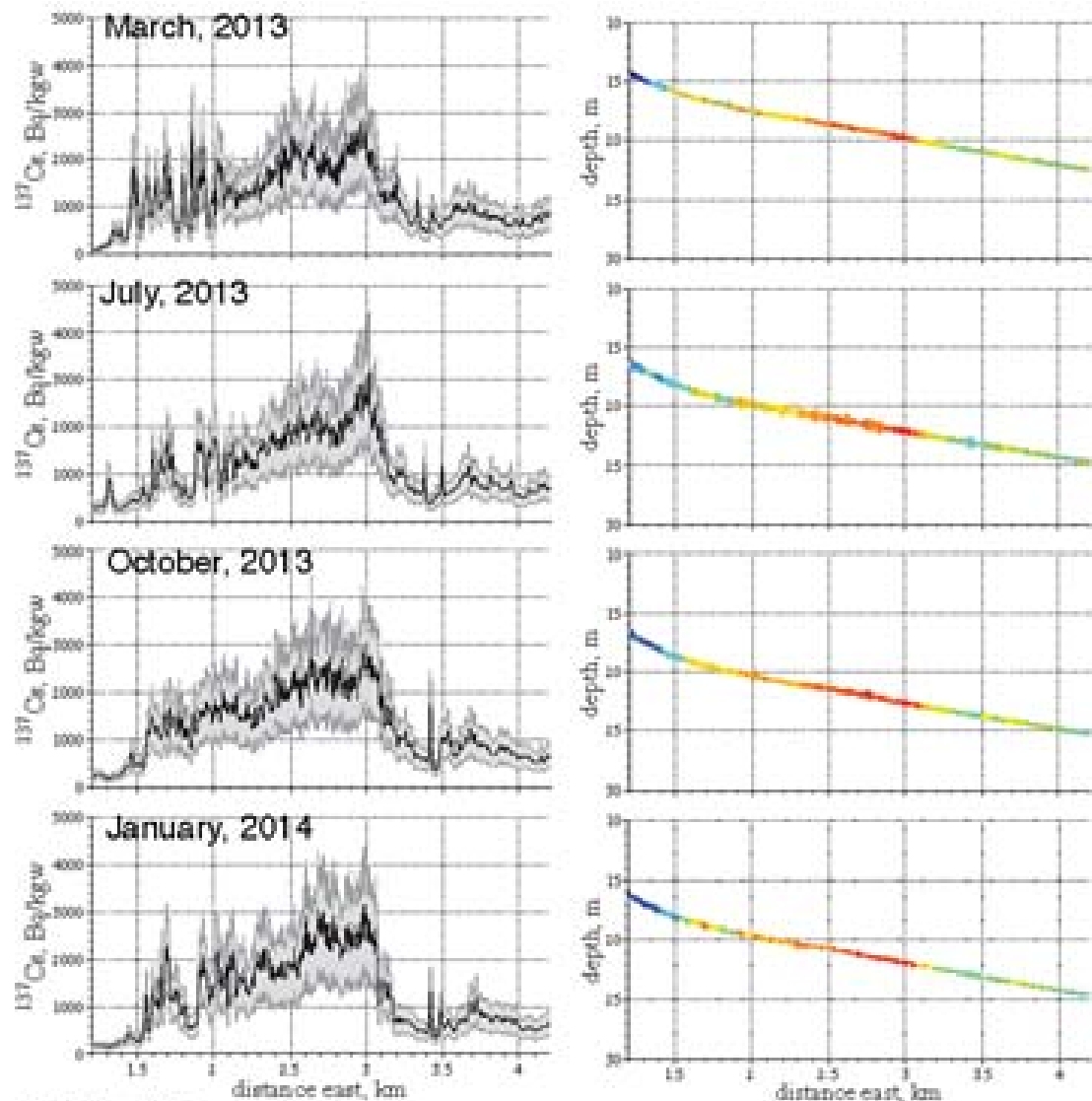
□平成25年3月(水産庁事業)、平成25年7月(海技研運営費交付金による研究)



## ■ 平成25年に実施した調査結果の比較



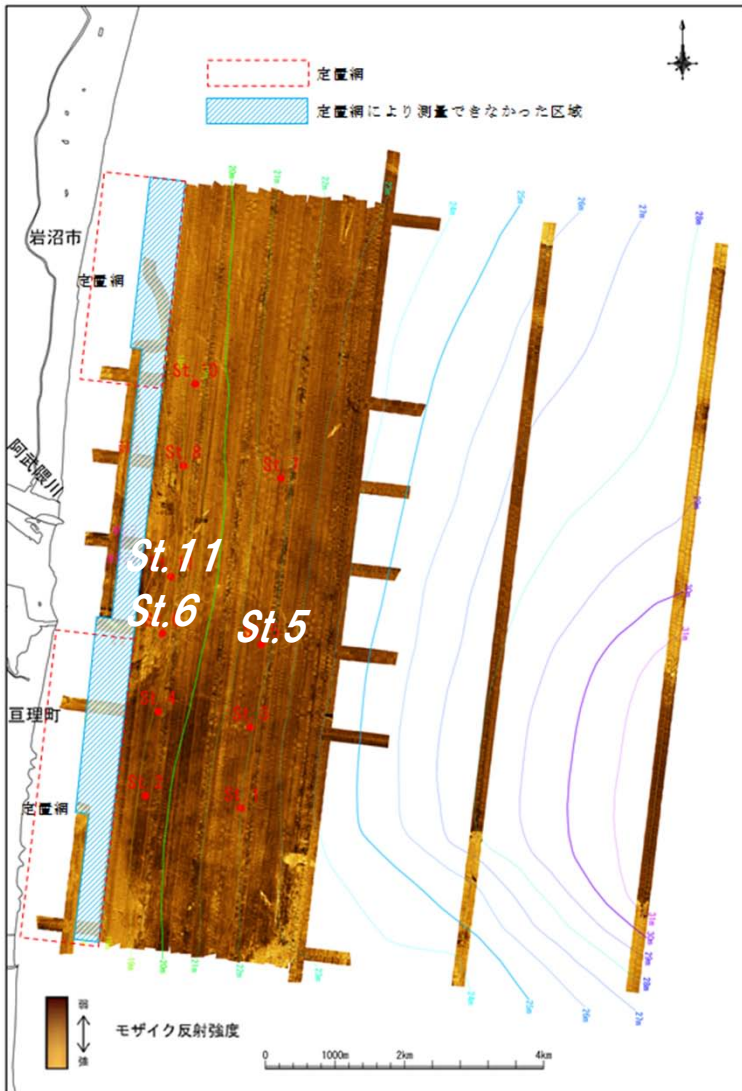
## ■ 測線A-A'の経時変化



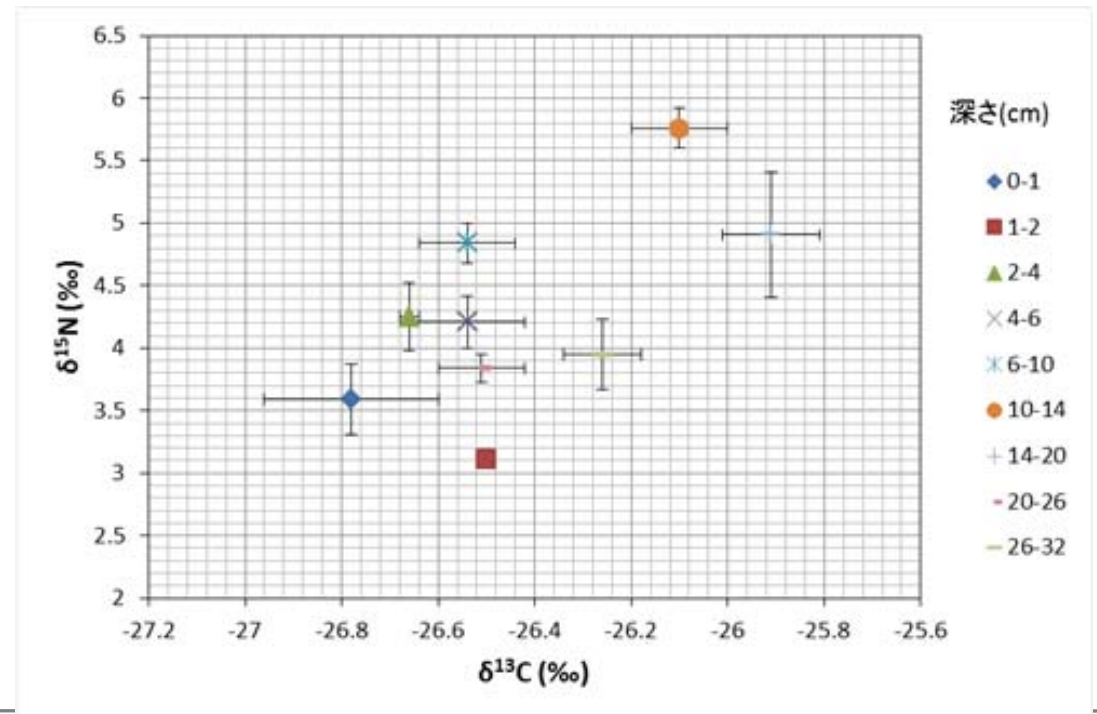
\*観測14cm平均

## ■ 粒径分布、安定同位体比の分析

□ 阿武隈川河口域の海底土に含まれる有機物は、陸起源が支配的



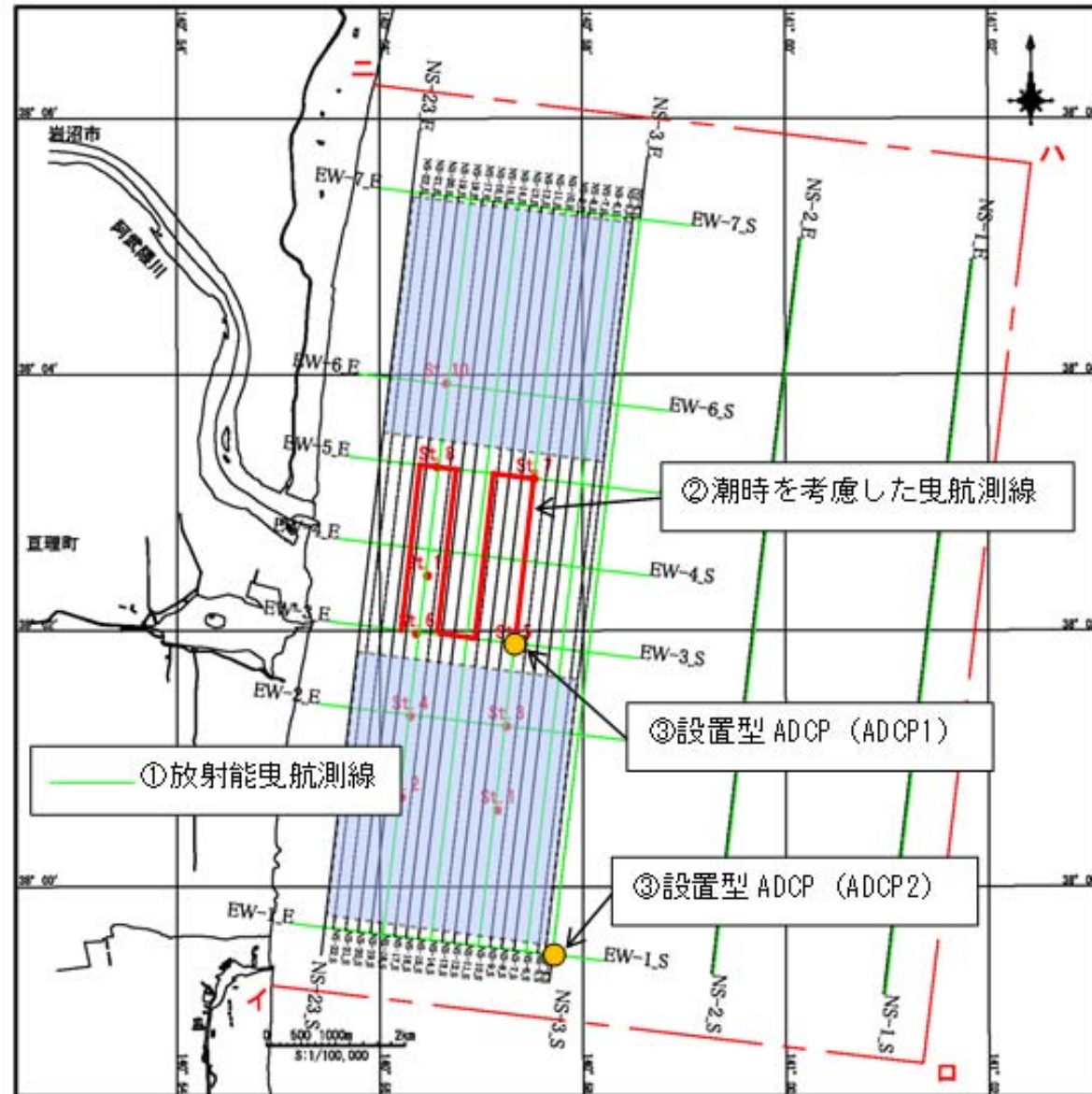
試料	含水率 (%)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg-dry)	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	強熱減量 (%)	安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ (‰)
St. 5	61	2200	23	11	-25.9
St. 6	30	210	100	3.1	-25.9
St. 11	59	1300	44	10	-26.1



安定同位体比の分析結果 独立行政法人 海洋技術安全研究所

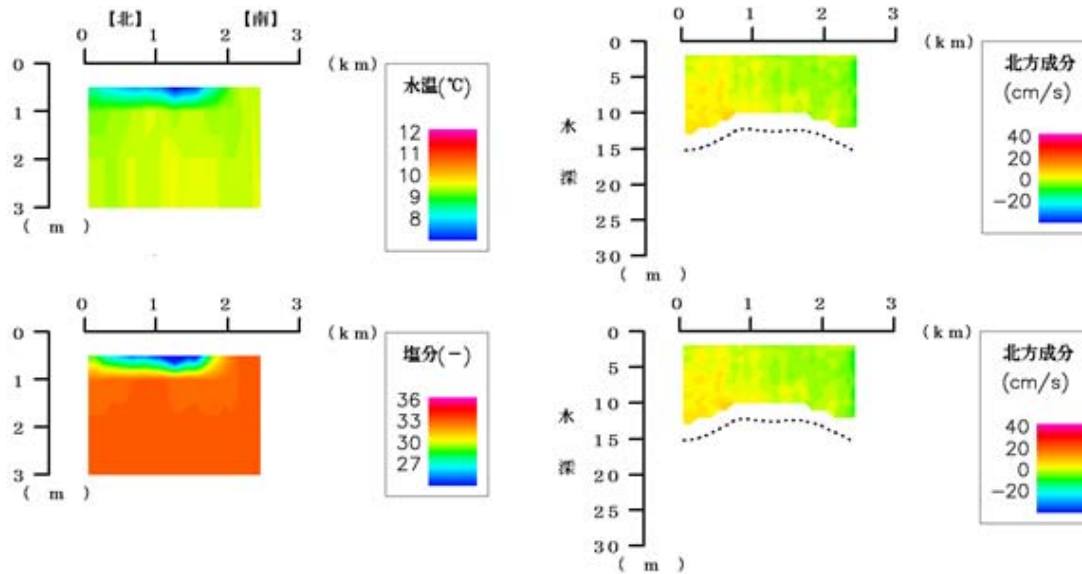
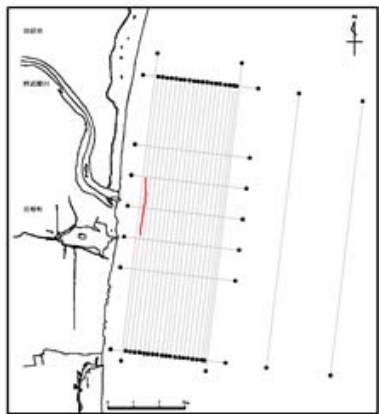
## ■ 流況調査

- ①: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
  - 7月、10月、12月の曳航調査時に実施
- ②:潮時を考慮した測線上での測定
  - 平成26年1月に実施
- ③設置型ADCPによる連続測定
  - ADCP1:平成26年1月8日～1月25日
  - ADCP2:平成25年12月26日～平成26年1月16日

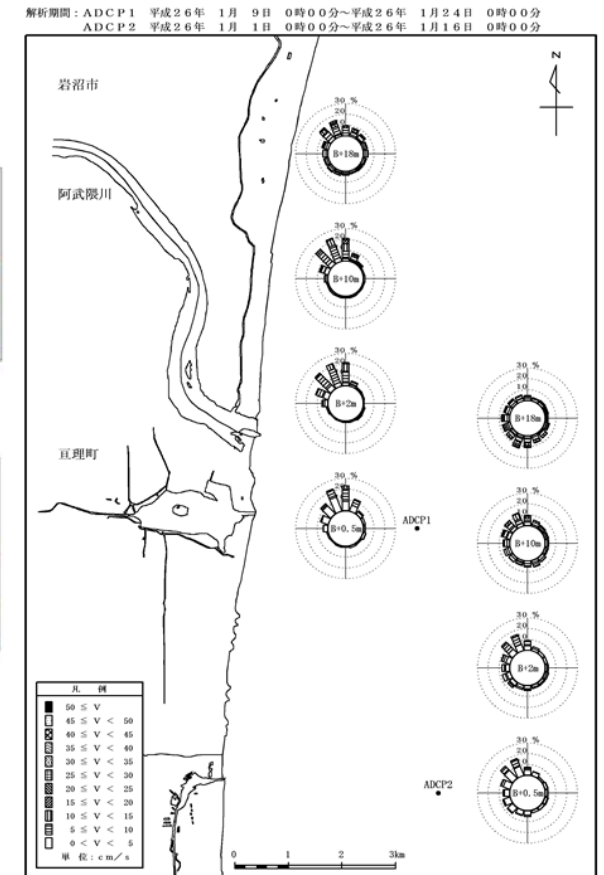


## ■ 流況調査結果

- 曳航型ADCPによる調査では、1月の阿武隈川河口沖合では北向きの流れが強い。
- 設置型ADCPによる調査でも、沿岸に近い海域では、北西から北向きの流れが支配的。河口から遠い地点では、表層では南向きの流れが支配的であるが、中層・底層では西から北向きが支配的。



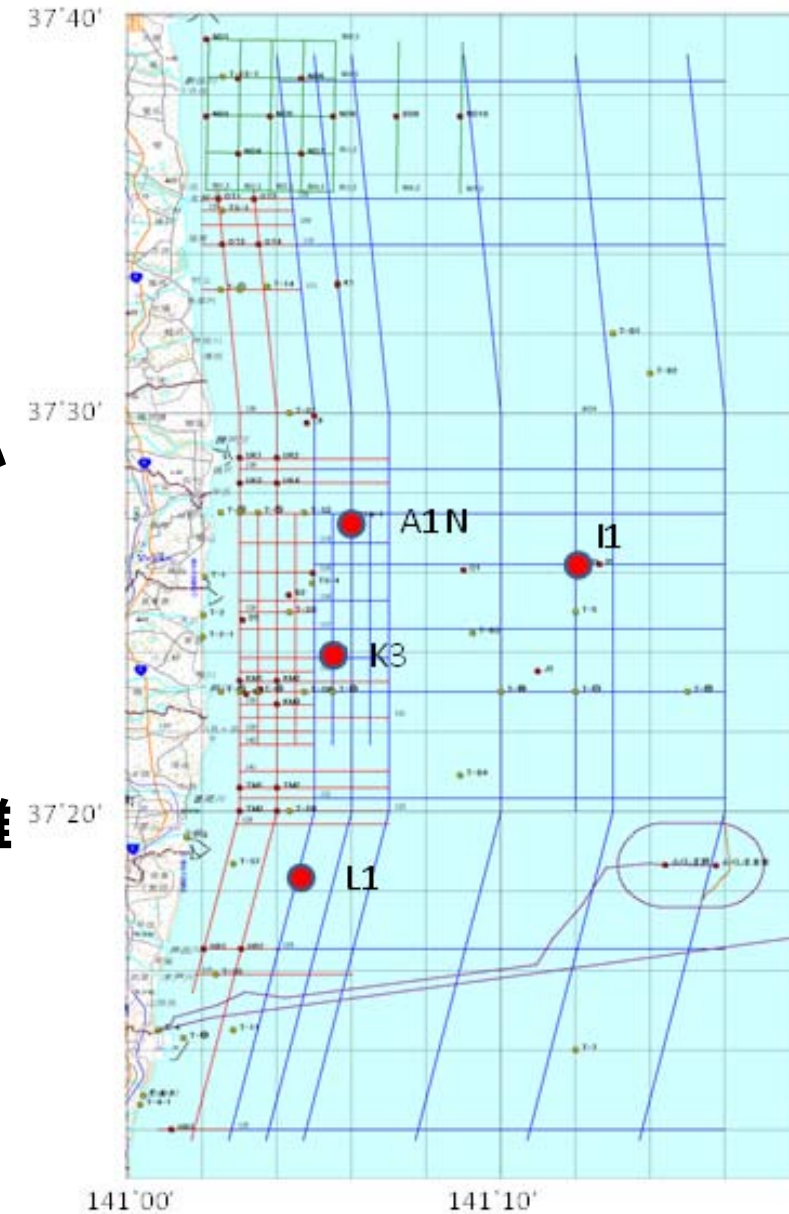
曳航型ADCPによる調査結果



設置型ADCPによる調査結果

## ■ 1F周辺の海底土からの放射性セシウムの溶出実験

- 平成25年12月に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。
- 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。
- 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。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、 $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 濃度を定量。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 $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 濃度を定量。



## ■ 1F周辺の海底土からの放射性セシウムの溶出実験の結果

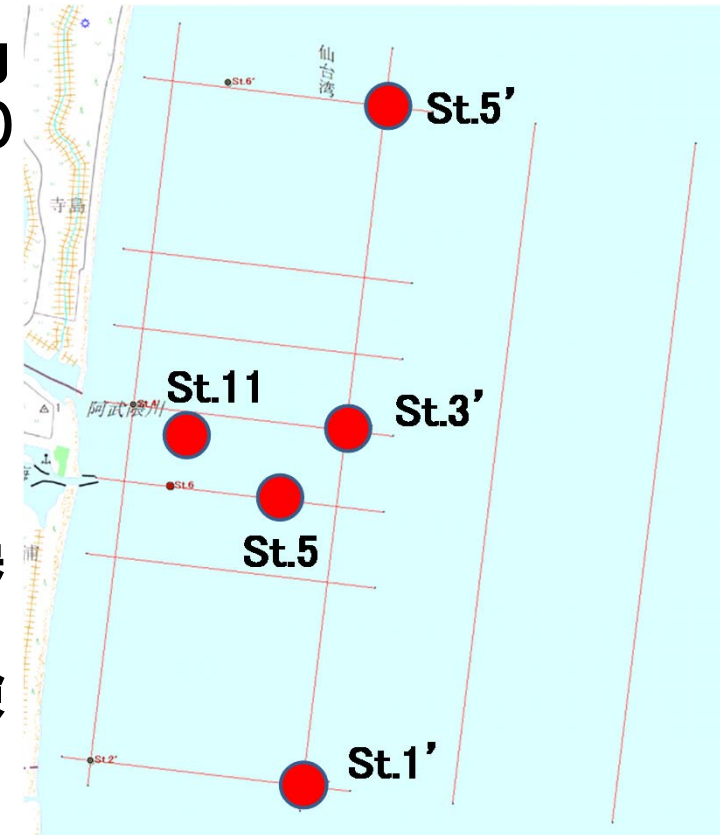
- 2時間の振とうによる1F近傍海域の海底土からの<sup>137</sup>Csの人工海水への溶出率は、海底土の<sup>137</sup>Cs濃度に依存せず1~2%程度。
- この値は1F事故直後に採取された海底土からの再溶出率は約10%であるとの報告と比較すると低い値となっているが、今回の調査で採取した試料は事故後2年9ヶ月が経過した海底土であったため、溶出率の値の差は試料の採取時期と関係があると考えられる。

試料	深さ (cm)	海底土の <sup>137</sup> Cs 放射能 (Bq/供試料)*	溶出液の <sup>137</sup> Cs 放射能濃度 (Bq/溶出液)**	<sup>137</sup> 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



## ■ 阿武隈川河口沖の海底土からの放射性セシウムの溶出実験

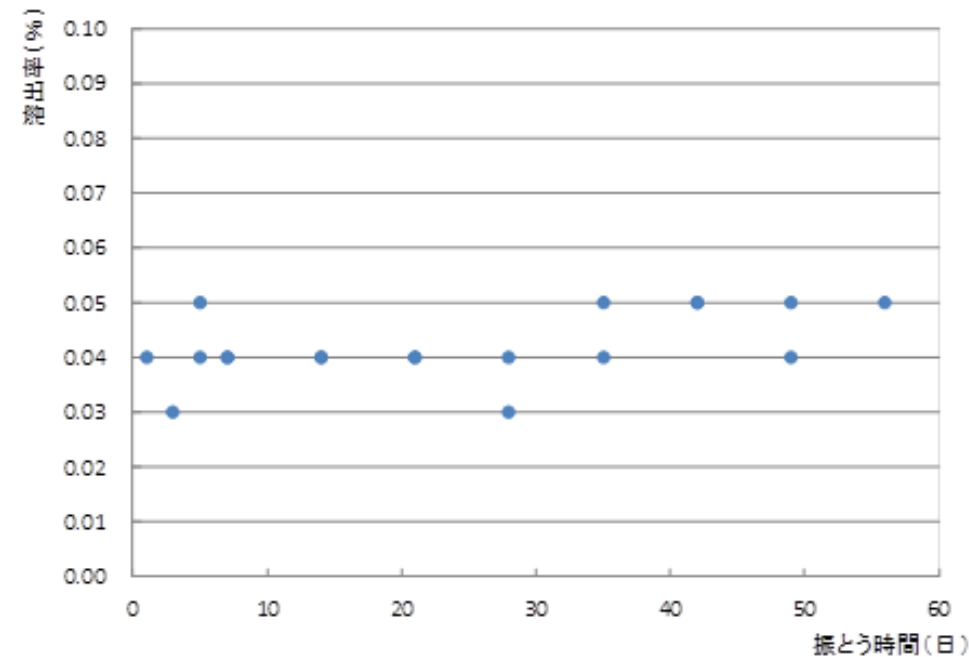
- St.11については、真空凍結乾燥し粉末化した海底土2gにつき人工海水20 mlを加え、25°Cで2時間振とう(760 rpm)。遠心分離(3000rpm、30分)後、マイクロピペットで上澄みを回収。残渣についてはmilliQ水5mlを加え、攪拌後、遠心分離(3000rpm、30分)を行い、マイクロピペットで上澄みを回収。先に回収した溶液試料と合わせてGe半導体検出器を用いて $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 濃度を定量した。
- St.1'、3'、5、5'の試料は、含水率から湿潤状態で乾燥重量が2g程度になるように秤量し、上記の実験を実施。残渣に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 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 濃度を定量した。



## ■ 阿武隈川河口沖の海底土からの放射性セシウムの溶出実験の結果

- 阿武隈川河口沖の海底土の人工海水への<sup>137</sup>Csの溶出率は0.03~1.4%程度であり、溶出率が低かった。
- 約60日間の連続溶出実験の結果、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<sup>137</sup>Csの溶出率に顕著な変化は認められなかった。

試料	深さ (cm)	海底土の <sup>137</sup> Cs 放射能 (Bq/供試料)*	溶出液の <sup>137</sup> Cs 放射能 濃度 (Bq/溶出液)**	<sup>137</sup> 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

## □ 1F近傍の放射能分布調査結果

- 海底地形に段差がある箇所で<sup>137</sup>Csが高濃度で検出され、また、シルト質の海域でも<sup>137</sup>Cs濃度が高くなっている。
- 沿岸から約3kmの範囲では、地形的な特徴がなくても、<sup>137</sup>Cs濃度が高く検出される箇所がある。

## □ 阿武隈川河口沖の放射能分布調査結果

- シルト質の海域で放射性セシウム濃度が高く検出される。
- 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。
- 阿武隈川河口沖合の<sup>137</sup>Cs濃度分布は、<sup>137</sup>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(移動)している様子が観測された。
- 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。

## □ 海底土からの再溶出

- 1F周辺の表層の海底土から人工海水への<sup>137</sup>Csの人工海水への溶出率は、海底土の<sup>137</sup>Cs濃度に依存せず1~2%程度。
- 阿武隈川河口沖の海底土から人工海水への<sup>137</sup>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い。
- 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では、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い。



出典: 水産庁、水産物の放射性物質調査の結果について、平成26年11月28日更新



出典: 水産庁、水産物の放射性物質調査の結果について、平成26年11月28日更新

## ■ 広域及び集中的調査の実施(原子力規制庁事業)

- 1F近傍及び河川河口域の調査を継続し、経時変化を把握。より定量的な評価を目指す。
- 分布形成の要因(環境動態)の把握

## ■ 狭い範囲を詳細に調査するための手法の開発(JST先端計測PJT)

- カメラ付放射能分布計測・サンプリングロボットを開発し、漁礁付近や高濃度で放射性物質が計測された箇所の調査を実施

## ■ 線から面へ

- 地形・底質の情報に基づき、線状の分布データを面に展開
- 流況を長期計測し、分布変動を予測



## ■ 具体的な対策の検討

- 高濃度の放射性物質の分布・範囲・変動を知ったうえで、それぞれの場所の利用ニーズに合致した対策を検討していくことが重要。
- そのためにも海域の広域分布とその成因解明は重要な課題。