

海底土放射能の連続計測技術

2012年8月から2013年8月のモニタリング結果

水産庁
三井物産環境助成金
福島県漁業協同組合連合会
福島県水産試験場
宮城県漁業協同組合
宮城県水産技術総合センター
公益財団法人海洋生物環境研究所
独立行政法人水産総合研究センター
芙蓉海洋開発株式会社

ソーントンブレア¹、大西 世紀²
浦 環²、小田野 直光²

¹東京大学生産技術研究所

²海上技術安全研究所

福島第一原子力発電所の事故

FINPP accident



- 2011年3月から10月に渡ってF1NPPから放出された放射性物質

Isotope	Half-life	Released into atmosphere (PBq) ^a	Release into ocean (PBq) ^b
^{131}I	~8 days	160	11
^{134}Cs	~2 years	18	3.5
^{137}Cs	~30 years	15	3.6

^a原子力安全・保安員2011/6/6

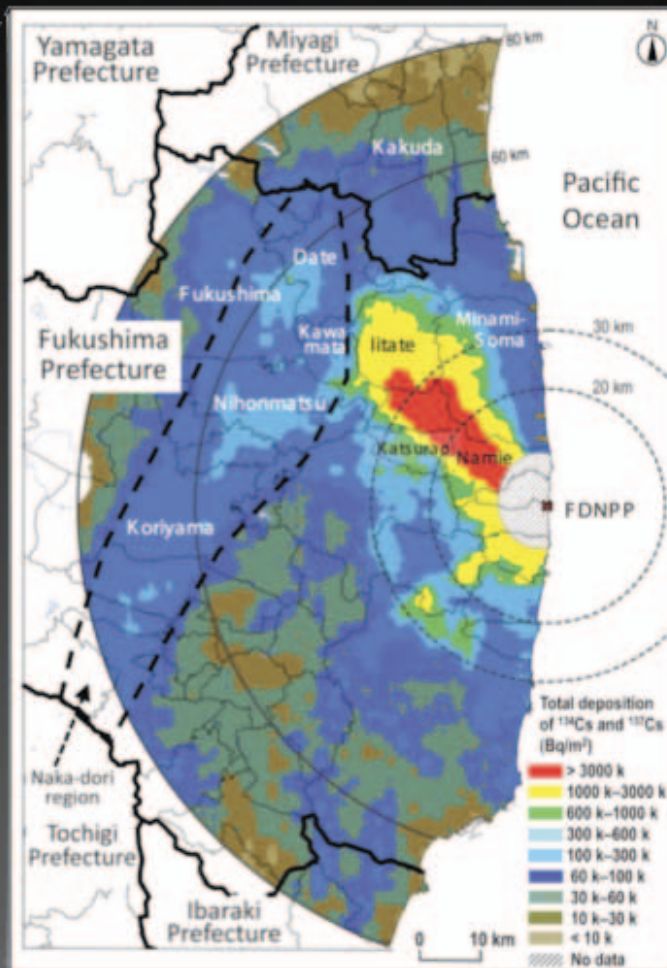
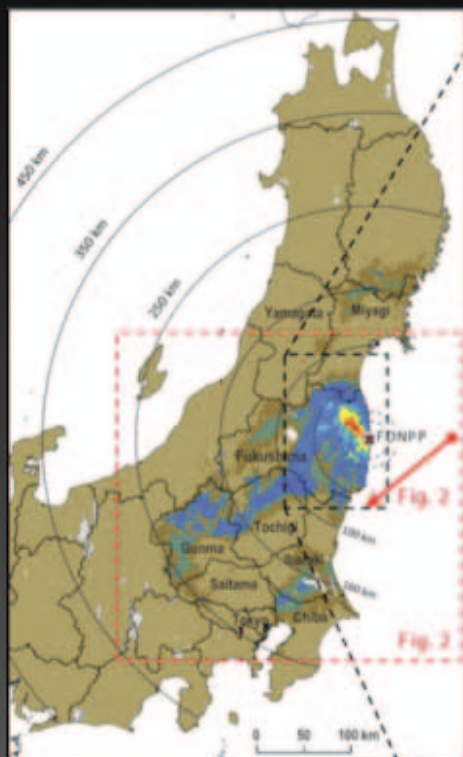
^b東京電力株式会社2012/6/20

- どのように環境中に分布しているのかを把握する必要がある

福島第一原子力発電所の事故

FNPP accident

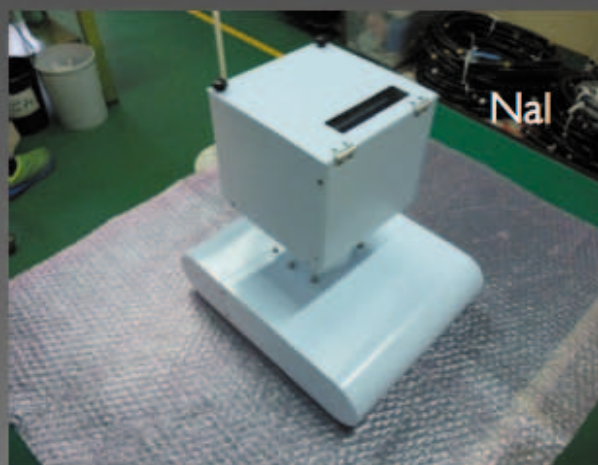
ELEMENTS June 2012 vol. 8 no. 3 201-206 (MEXT and DOE)



Bell 412



C-12



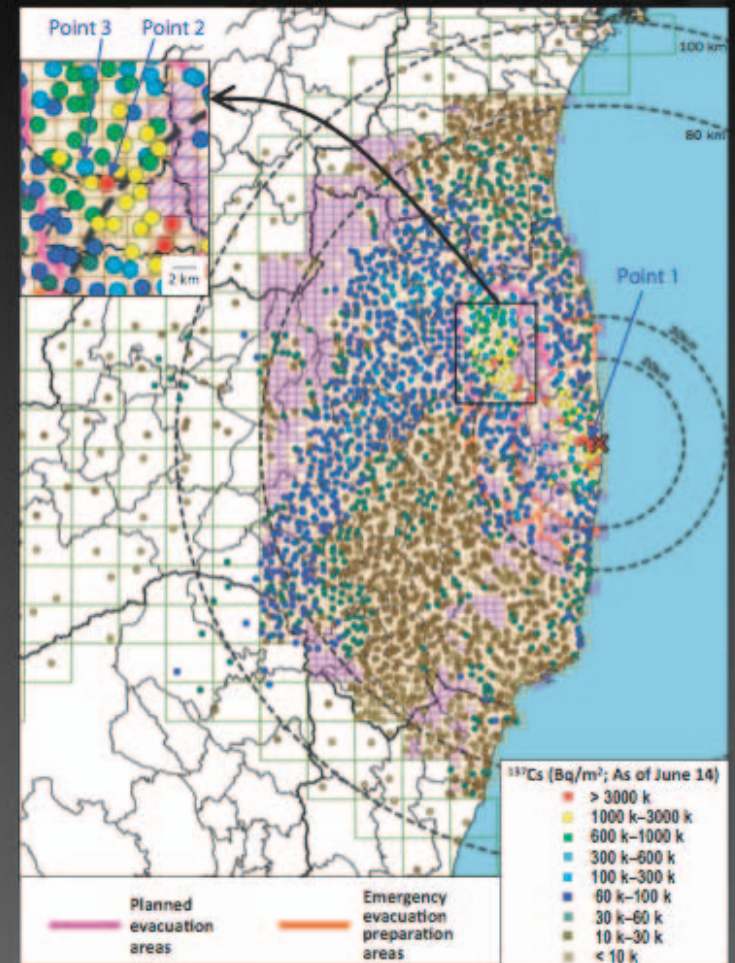
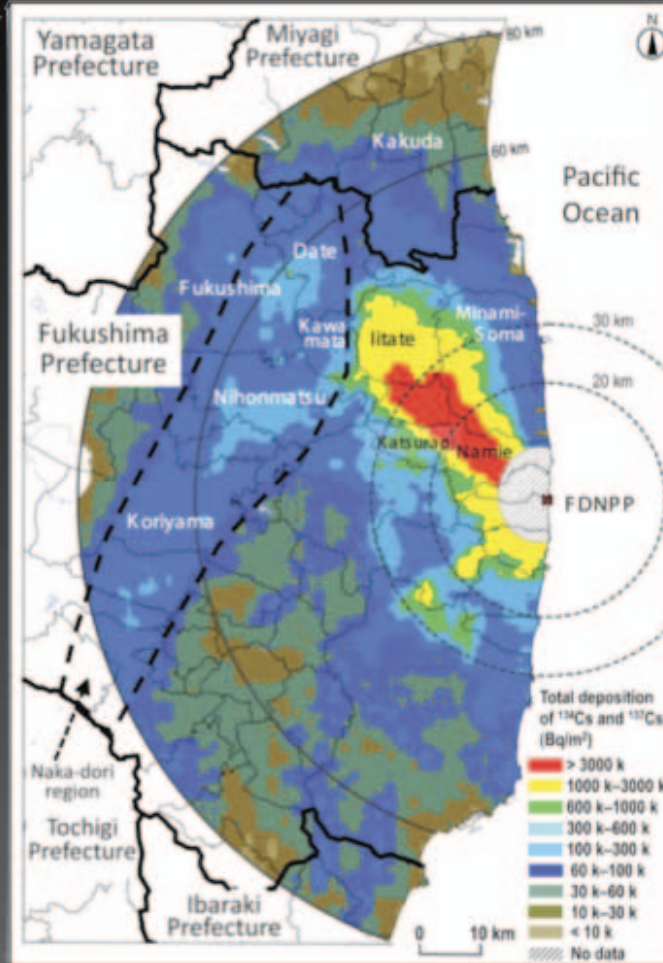
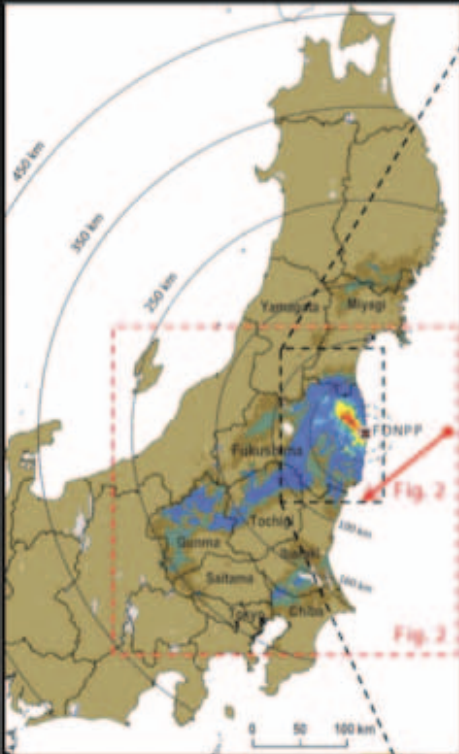
NaI

・4月に航空機で高度150~700mからマッピング調査

福島第一原子力発電所の事故

FINPP accident

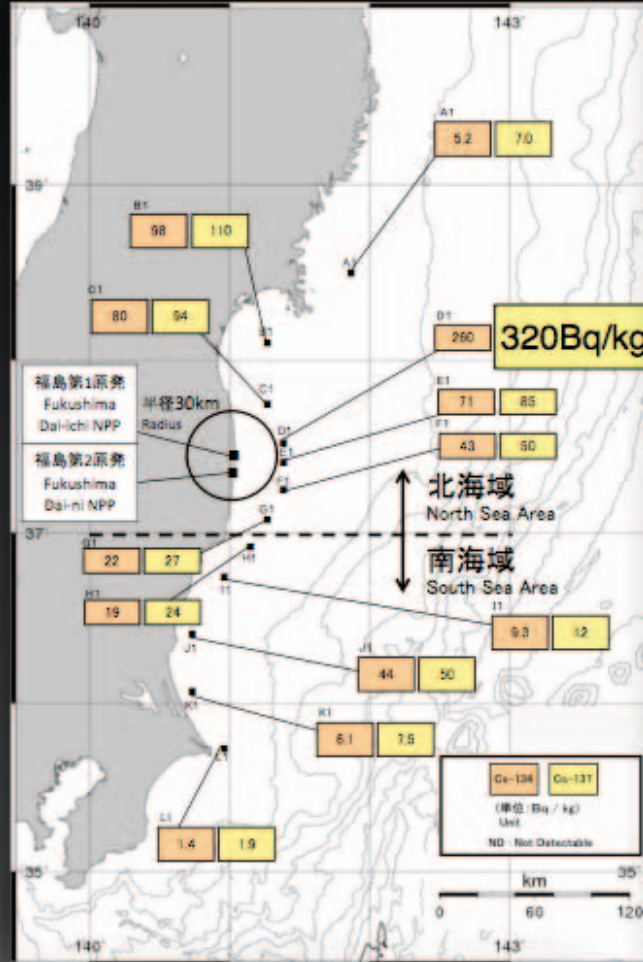
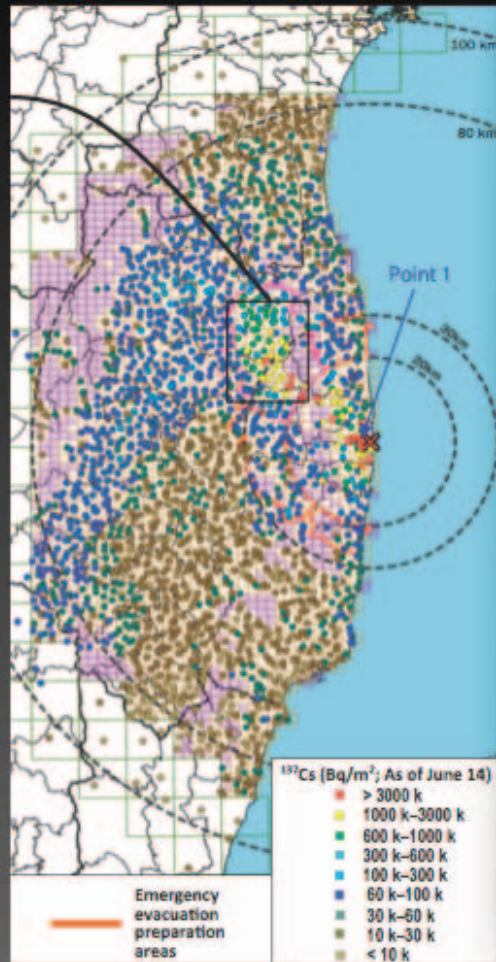
ELEMENTS June 2012 vol. 8 no. 3 201-206 (MEXT and DOE)



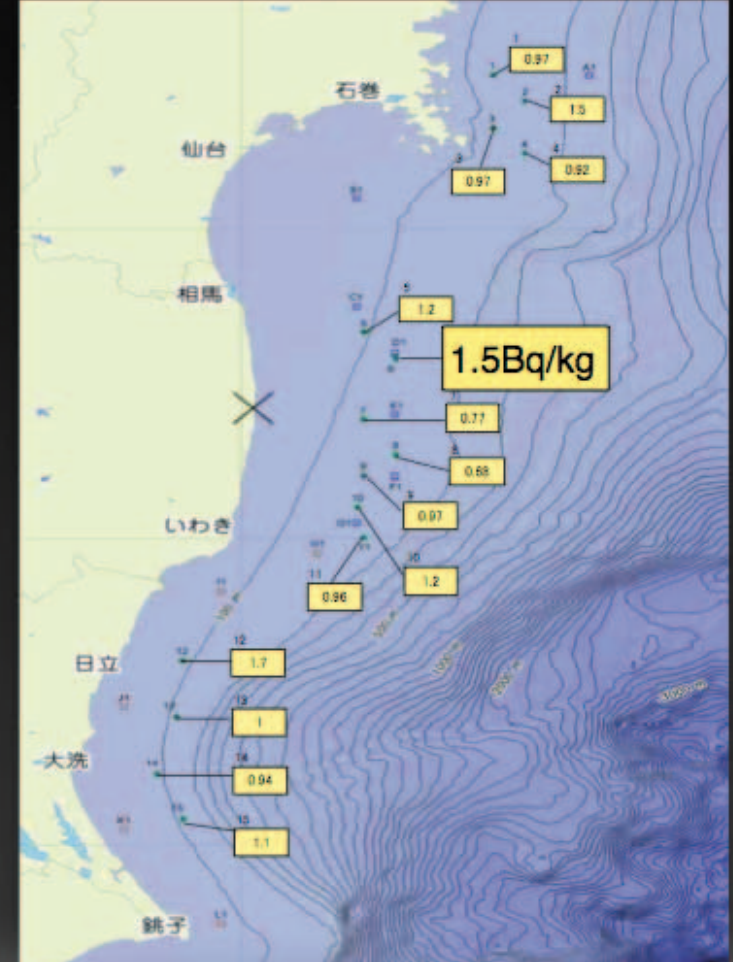
- ・ 4月に航空機で高度150~700mからマッピング調査
- ・ 6月には2km間隔のサンプリングによる調査が終了

福島第一原子力発電所の事故

FINPP accident



2011年5月の海底土¹³⁷Cs濃度



2009年の海底土¹³⁷Cs濃度

MEXT Seafloor monitoring report May 2011. http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3857/24/1305744_0527.pdf

- ・ 海底は陸上と比べ情報が大幅に少ない、連続的な変化が分からない
- ・ どのような対策が必要か検討するにはデータが不足している

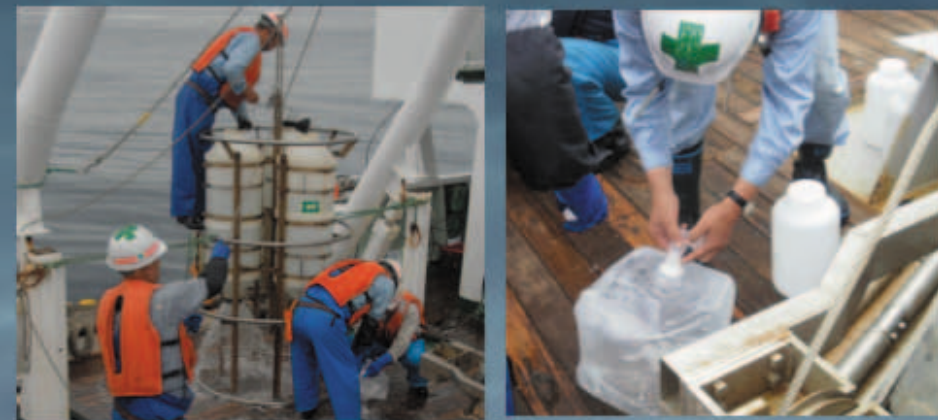
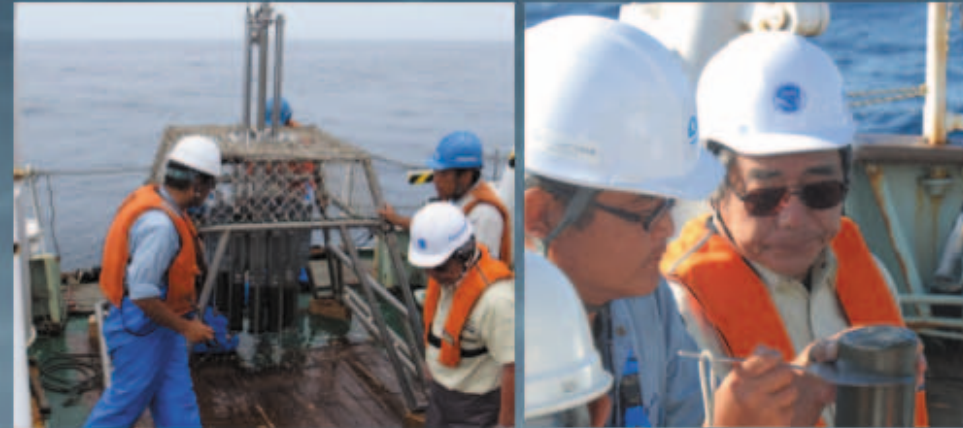
海の調査

Marine survey



海底土サンプリング

海水サンプリング

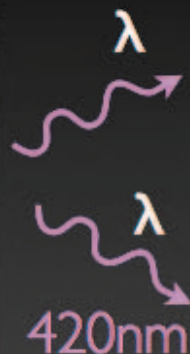
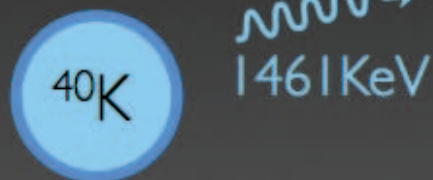


- ・ コアサンプリングを船から降ろす
- ・ 泥の表層3cmを採泥
- ・ サンプル量2kg wet
- ・ 船体のGPS位置を基準とする

- ・ 採水器を船から降ろす
- ・ 上層（表層~2m）
- ・ 下層（海底から2~3m）
- ・ サンプル量20Lx3
- ・ 船体のGPS位置を基準とする

ガンマ線の現場計測

Gamma-ray spectroscopy



検出器

ガンマ線

1 KeV → ~40,000 photons
シンチレータ

• シンチレーションの特徴

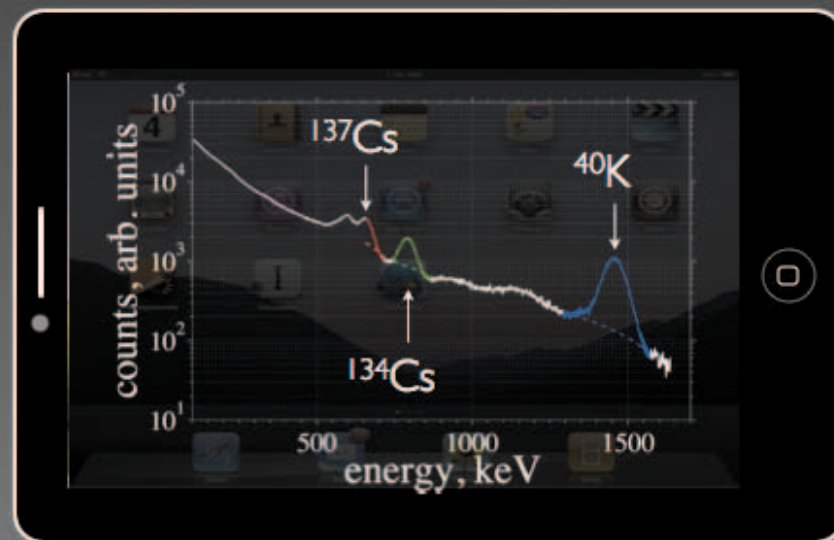
低コスト、省エネ

スペクトル計測

リアルタイム

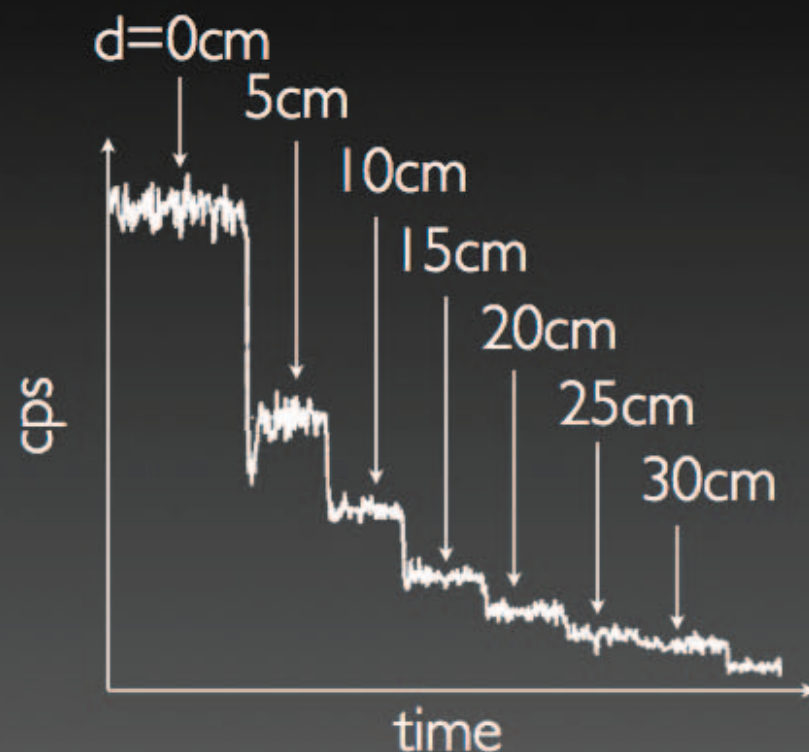
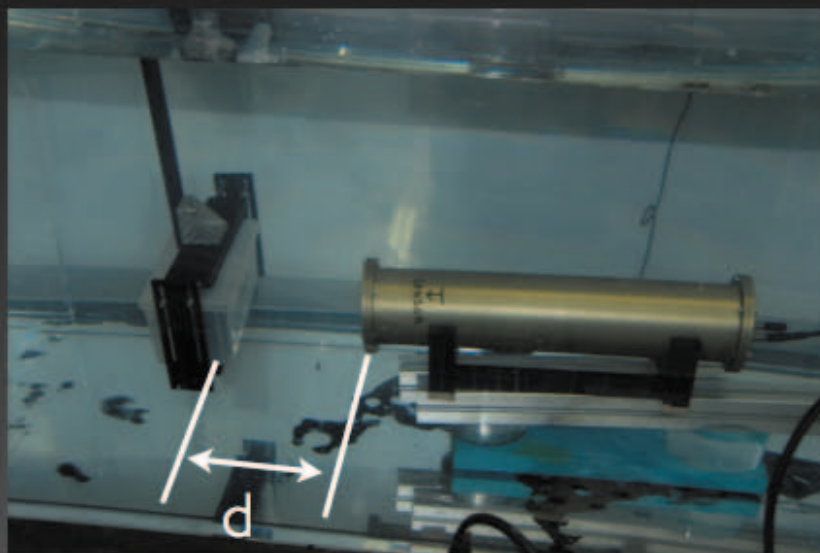
高感度

• 陸上では確立した技術



ガンマ線の現場計測

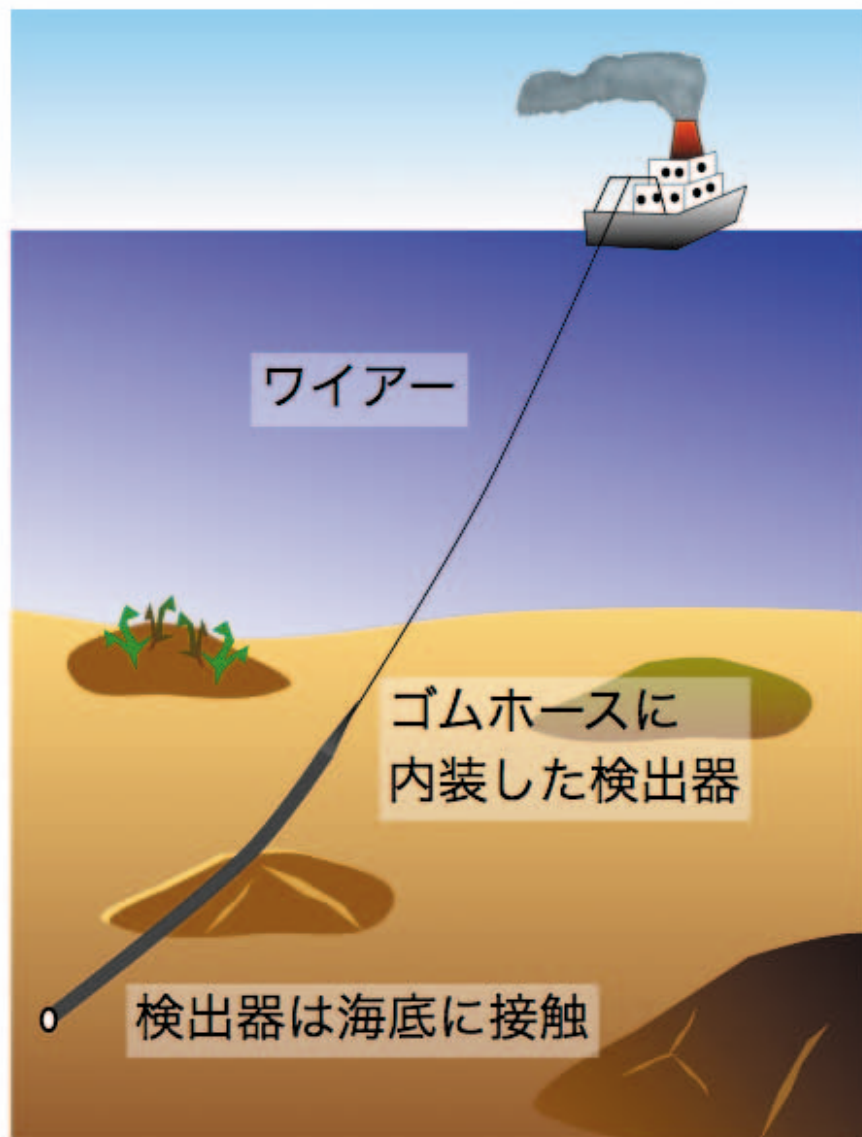
Gamma-ray spectroscopy



- 水での減衰が激しい
- 海底を計測するには、接触する必要がある ← ボトルネック

曳航式ガンマ線計測装置

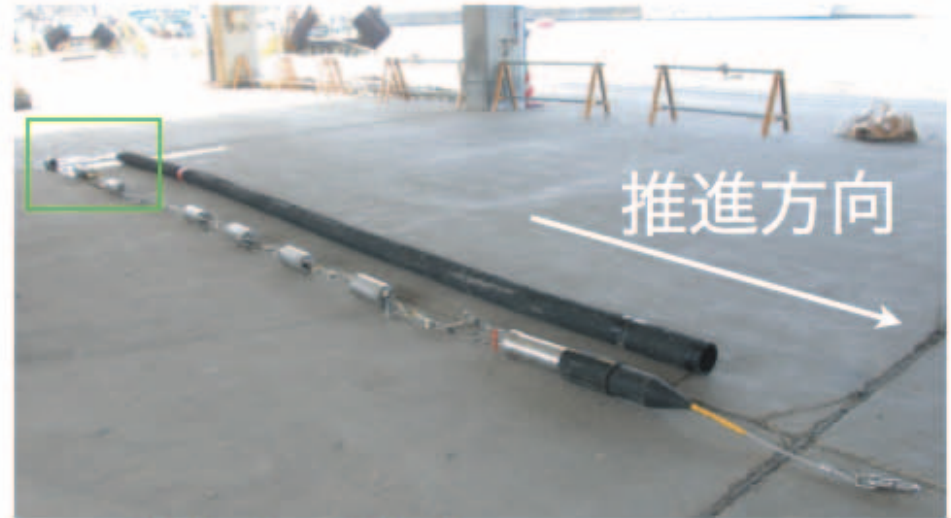
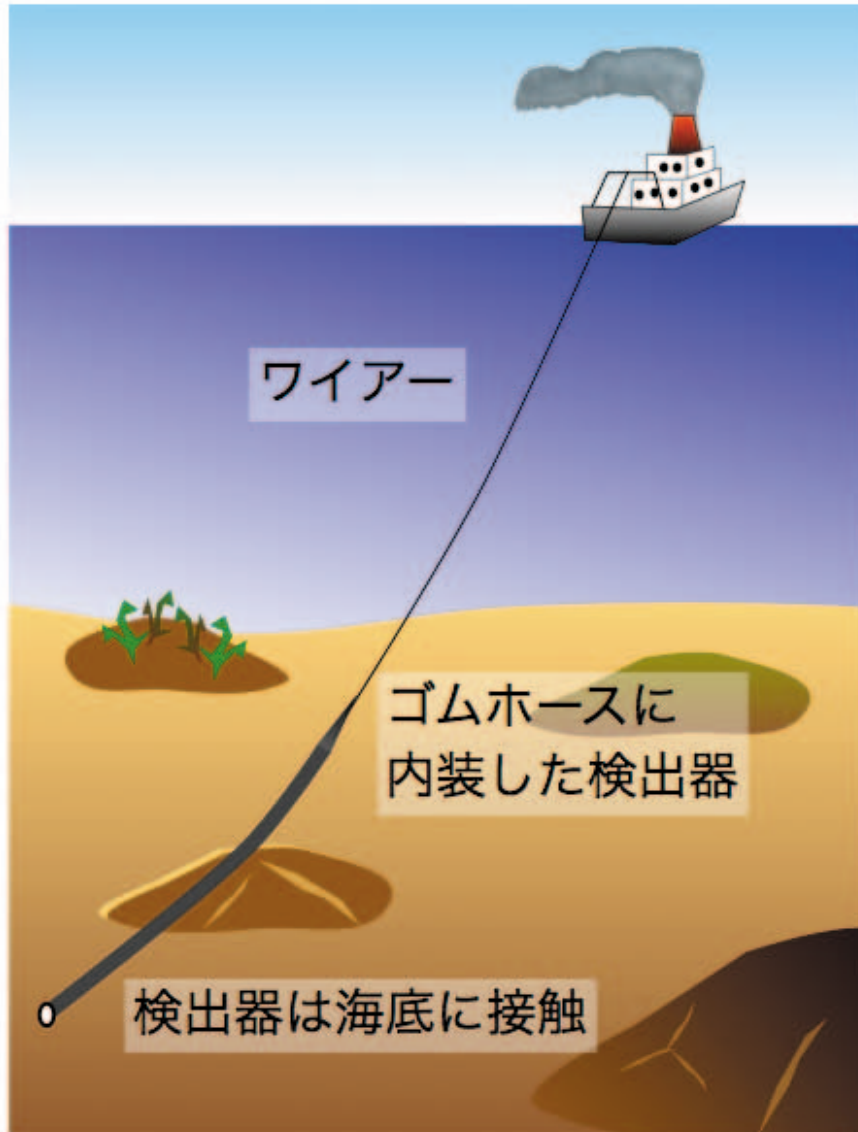
Towed gamma-ray spectrometer



	RESQ hose
Dimensions	$\phi 0.15 \times 8\text{m}$
Mass	135kg (115kg in water)
Max. Depth	500m
Velocity	2knot
Survey distance	40km/day
Scintillator	3×3inch NaI
Data	0.1~1.8MeV 1024ch, 1Hz
Resolution	6.9 % (at 0.662 MeV)
Detection limit	~10Bq/kg
Others	Stand alone, depth, accelerometer, hydrophone, temperature

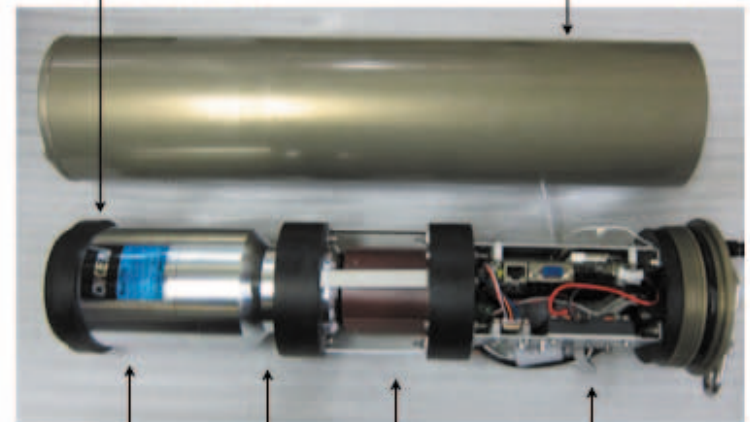
曳航式ガンマ線計測装置

Towed gamma-ray spectrometer



4 × Vibration and shock isolation rings

Pressure housing



3x3 inch NaI scintillator

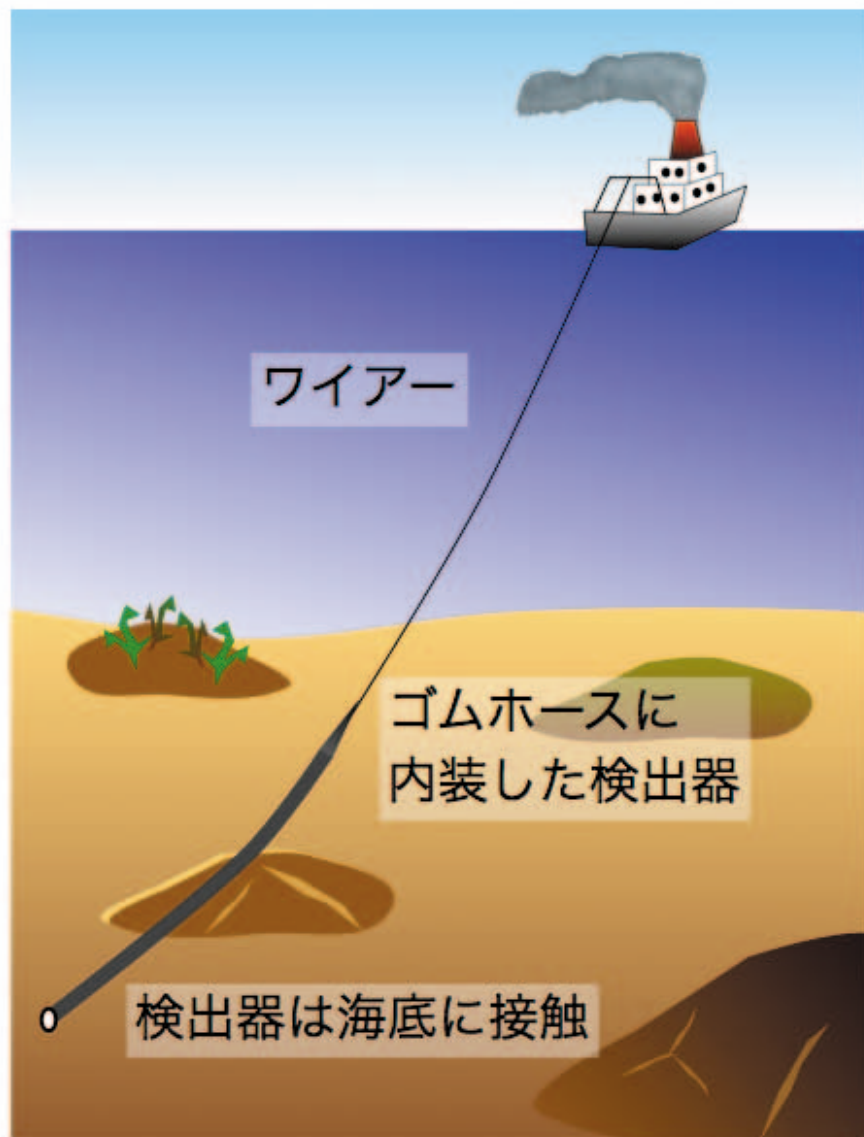
PMT

MCA

CPU and data logger

曳航式ガンマ線計測装置

Towed gamma-ray spectrometer



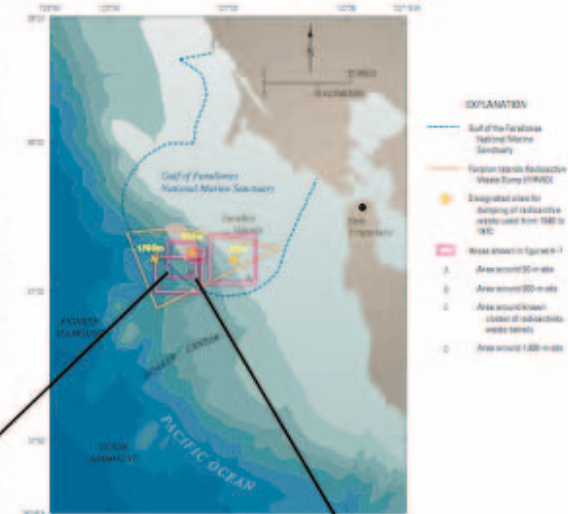
- 1970代から研究され10カ国で開発されている
- 調査の例
 - ➔ 海底底質モニタリング(BGS)
D.G. Jones / J. Environ. Radioactivity 53 (2001) 313-333
 - ➔ Sellafield再処理工場周辺海域
(IAEA Marine Environmental Lab.)
I. Osvath, P.P. Povinec / J. Environ. Radioactivity 53 (2001) 335-349
 - ➔ San Fransiscoの海底の放射性廃棄物処分サイト (USGS, BGS)
D. G. Jones / Ocean. Geo. Bio. Env. Gulf. Farallones (2001)
- 広い範囲の海底放射能分布が効率的に調査できることが特徴

曳航式ガンマ線計測装置

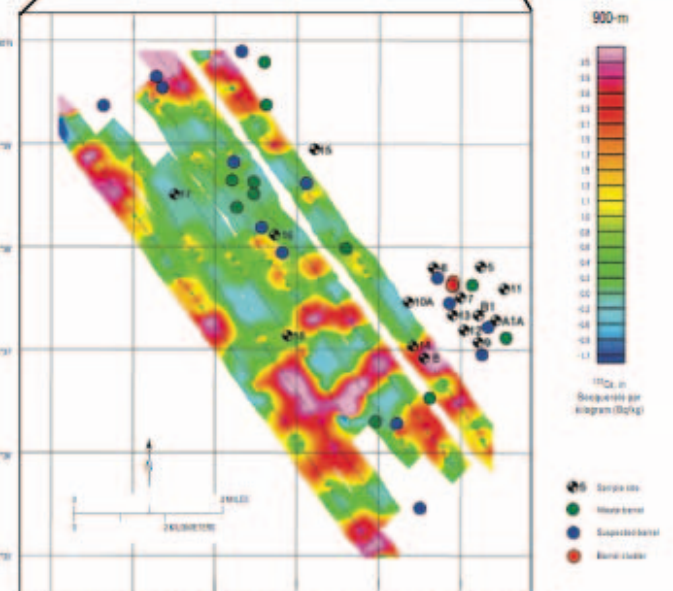
Towed gamma-ray spectrometer



- San Franciscoの海底の放射性廃棄物処分サイト (USGS, BGS)



IAEA BULLETIN, 4/1989



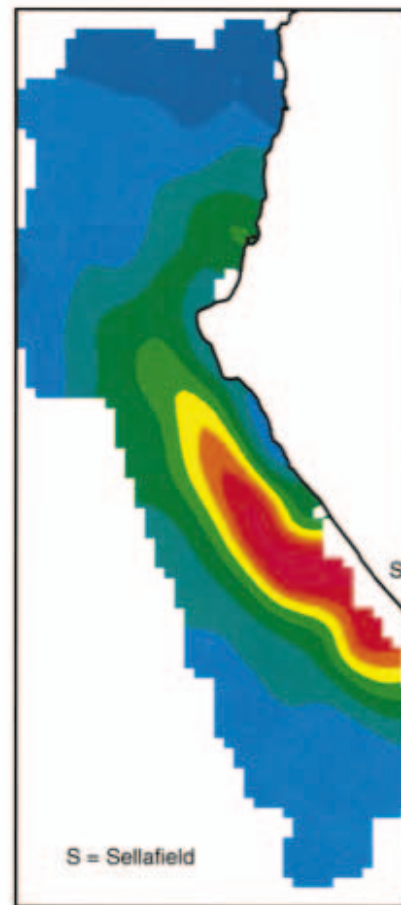
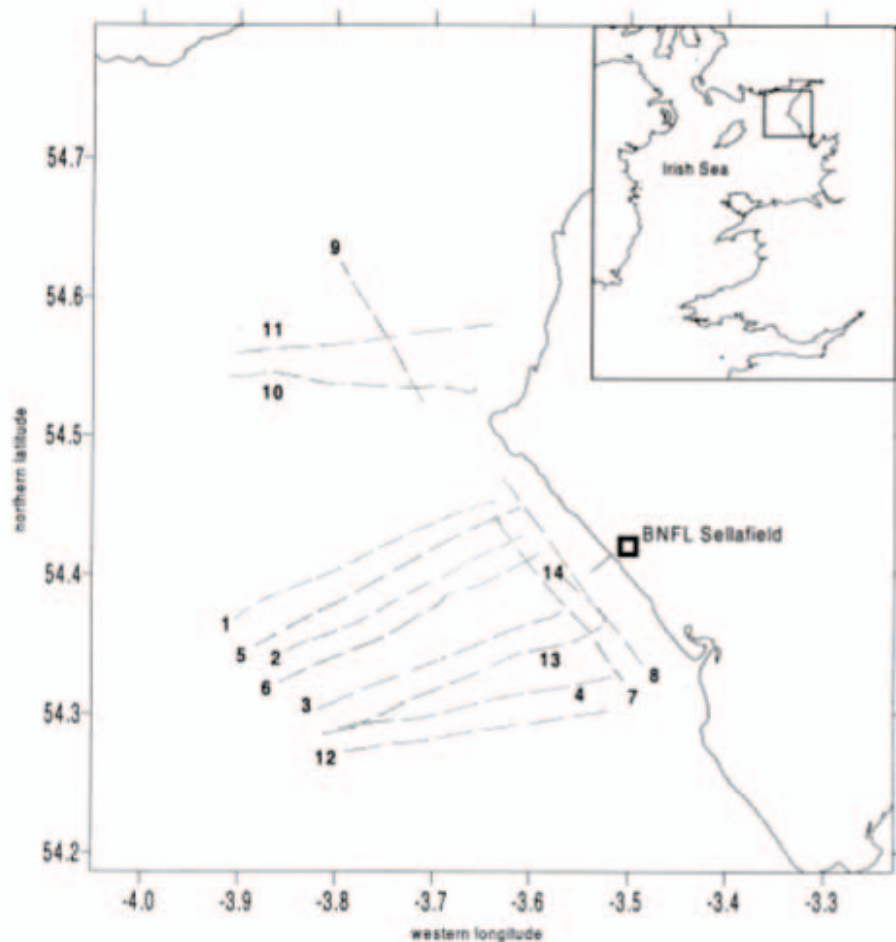
D. G. Jones / Ocean. Geo. Bio. Env. Gulf. Farallones (2001)

曳航式ガンマ線計測装置

Towed gamma-ray spectrometer



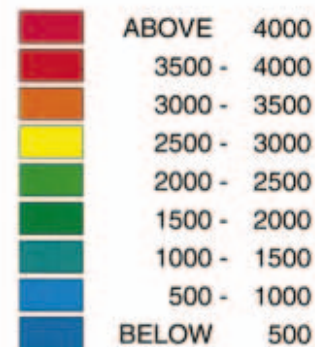
- Sellafield再処理工場周辺海域 (IAEA Marine Environmental Lab., BGS)



NE IRISH SEA

Sea bed
sediments

Cs-137 (Bq/kg)



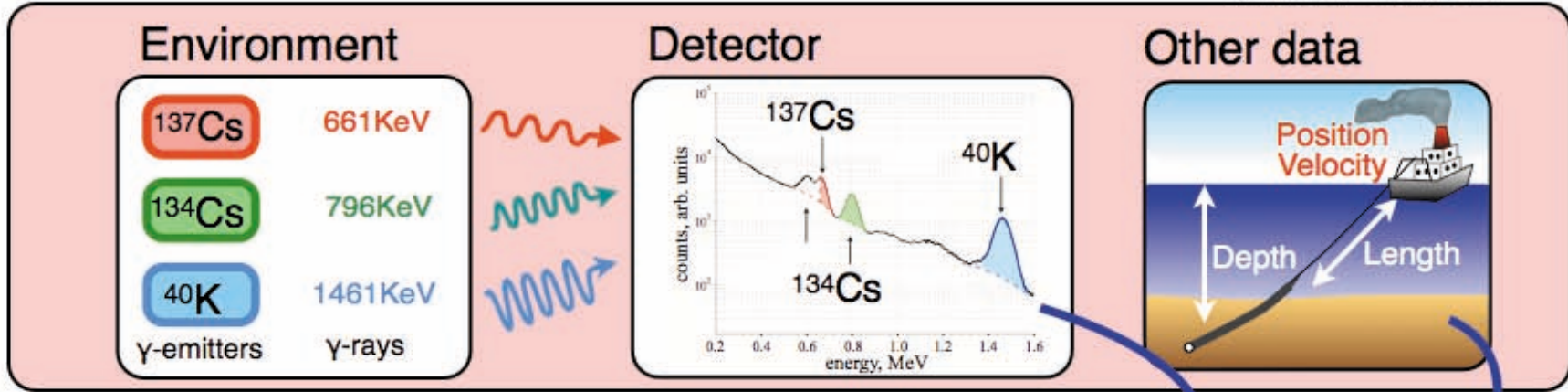
データ解析の流れ

Data processing pipeline

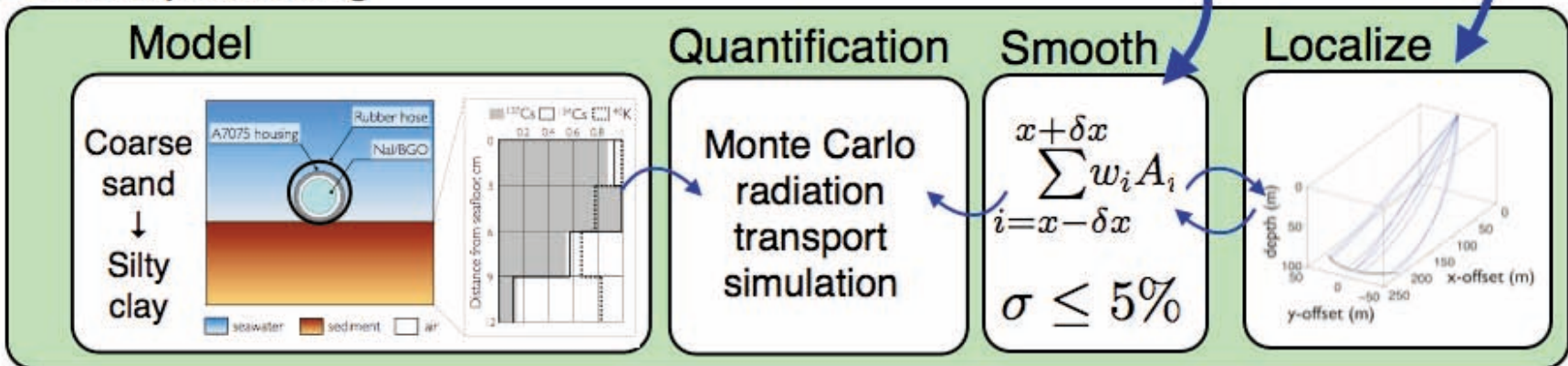


Step 1: At sea

Thornton et al. 2013



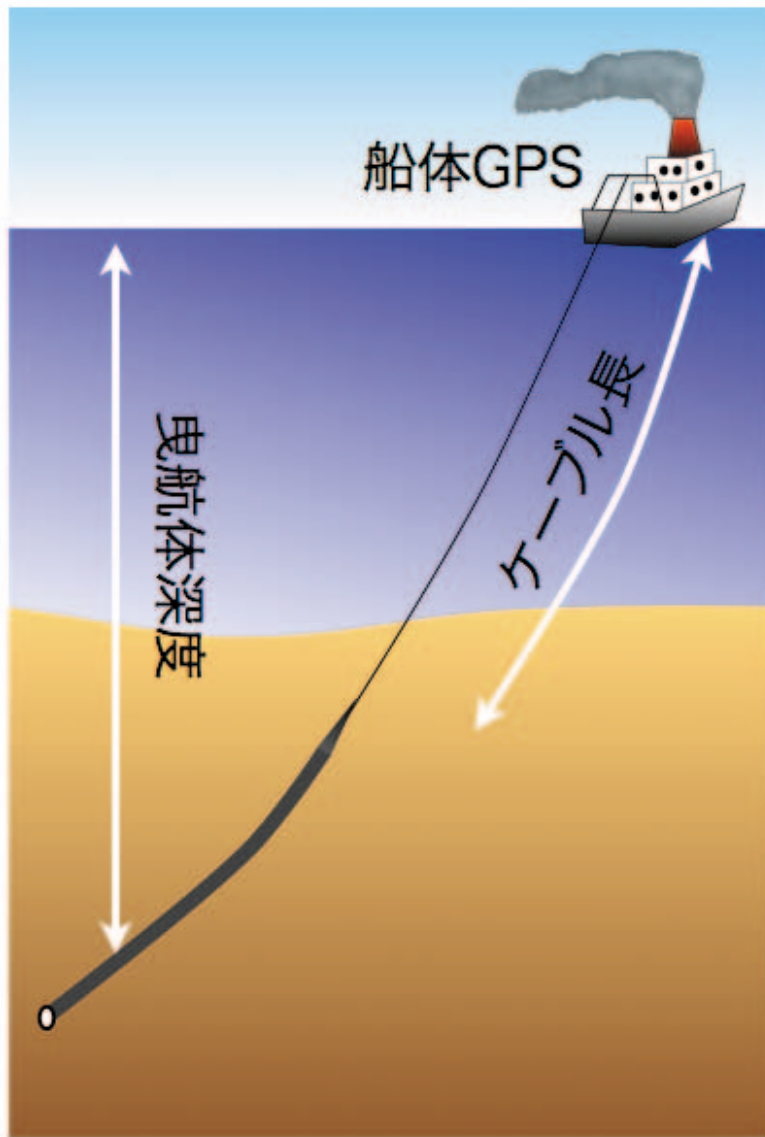
Step 2: Data processing



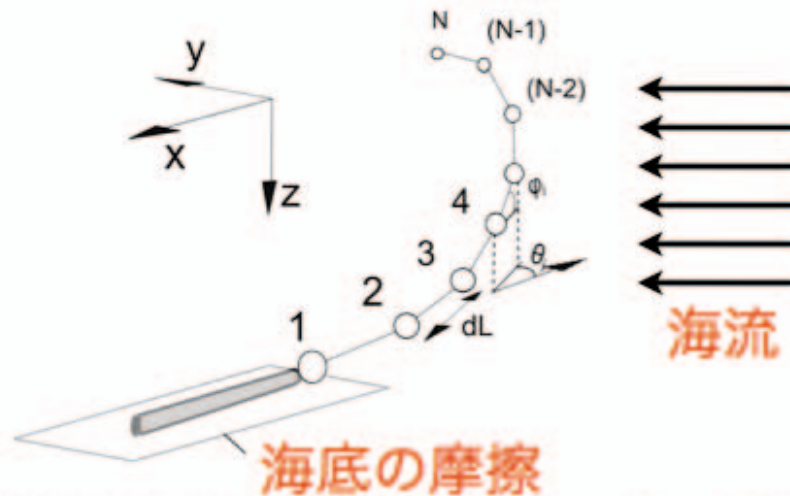
Step 3: Output

latitude N	longitude E	depth (m)	^{137}Cs			^{134}Cs		^{40}K		
			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					

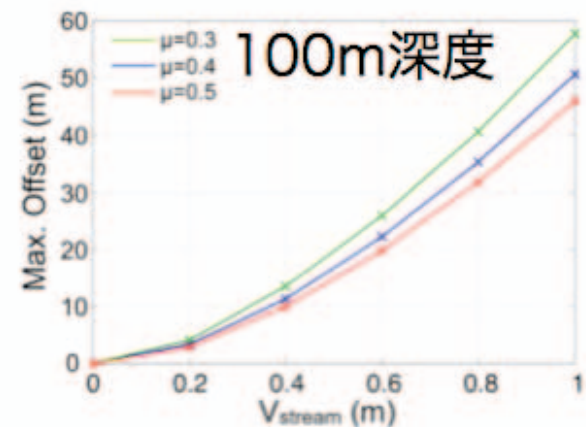
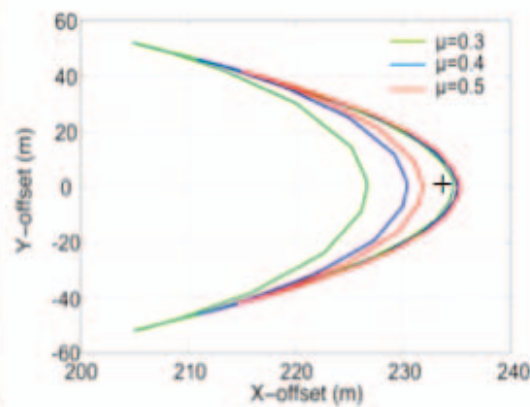
- 検出限界~10Bq/kg
- ^{137}Cs の距離分解能 (1m/s)
 - 100 Bq/kg ~80 m
 - 300 Bq/kg ~26 m
 - 1,000 Bq/kg ~8 m



- ・ カテナリ計算で曳航体の位置を推定

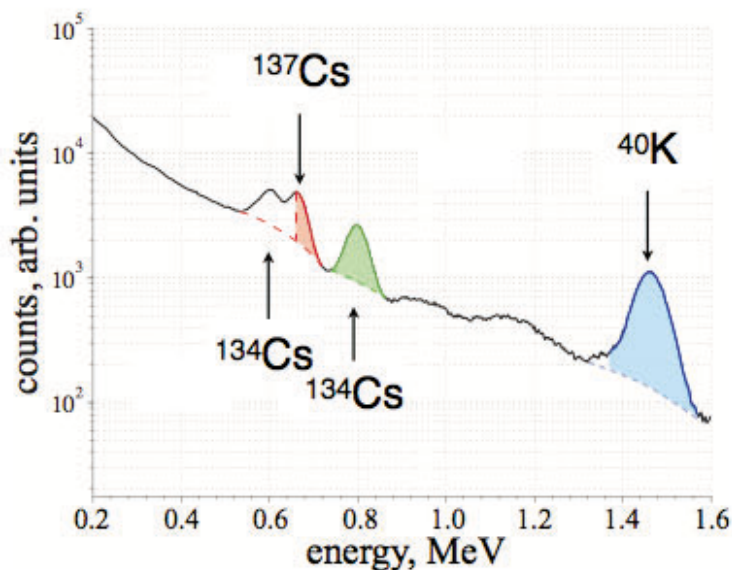


- ・ 海流と海底の摩擦に関しては、不確定要素の影響はシミュレーションで評価

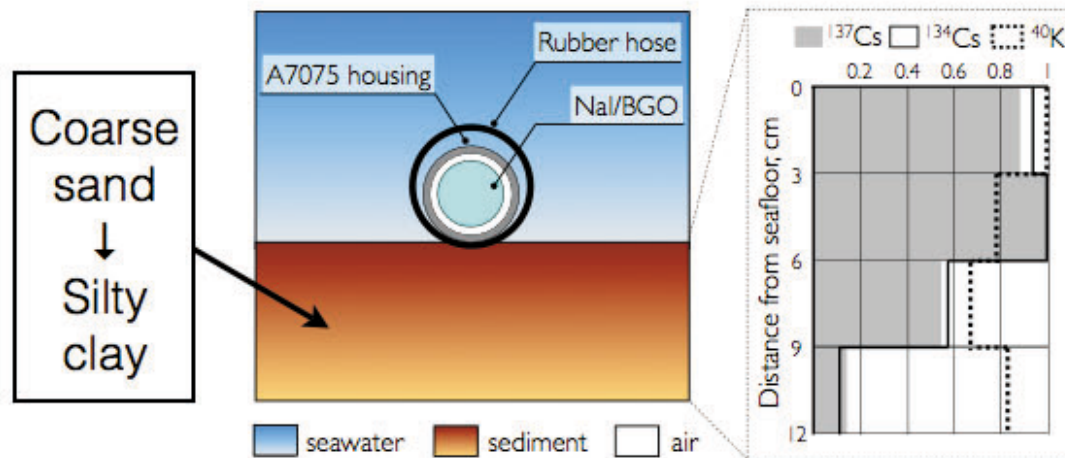
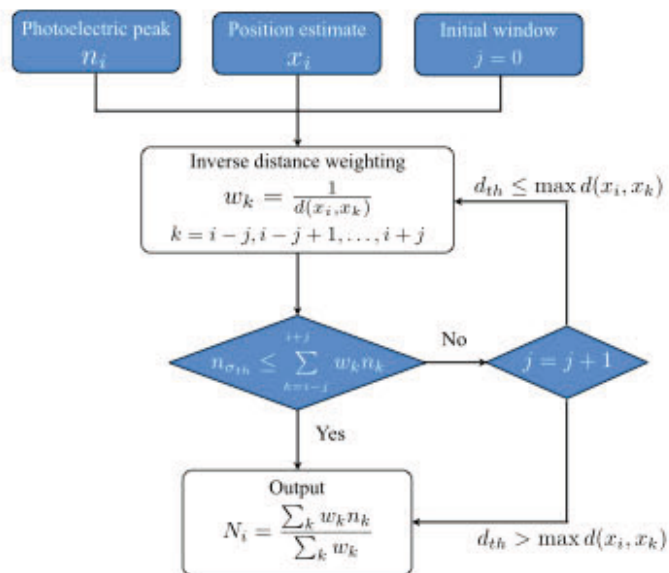


放射性セシウムの定量化

Quantification



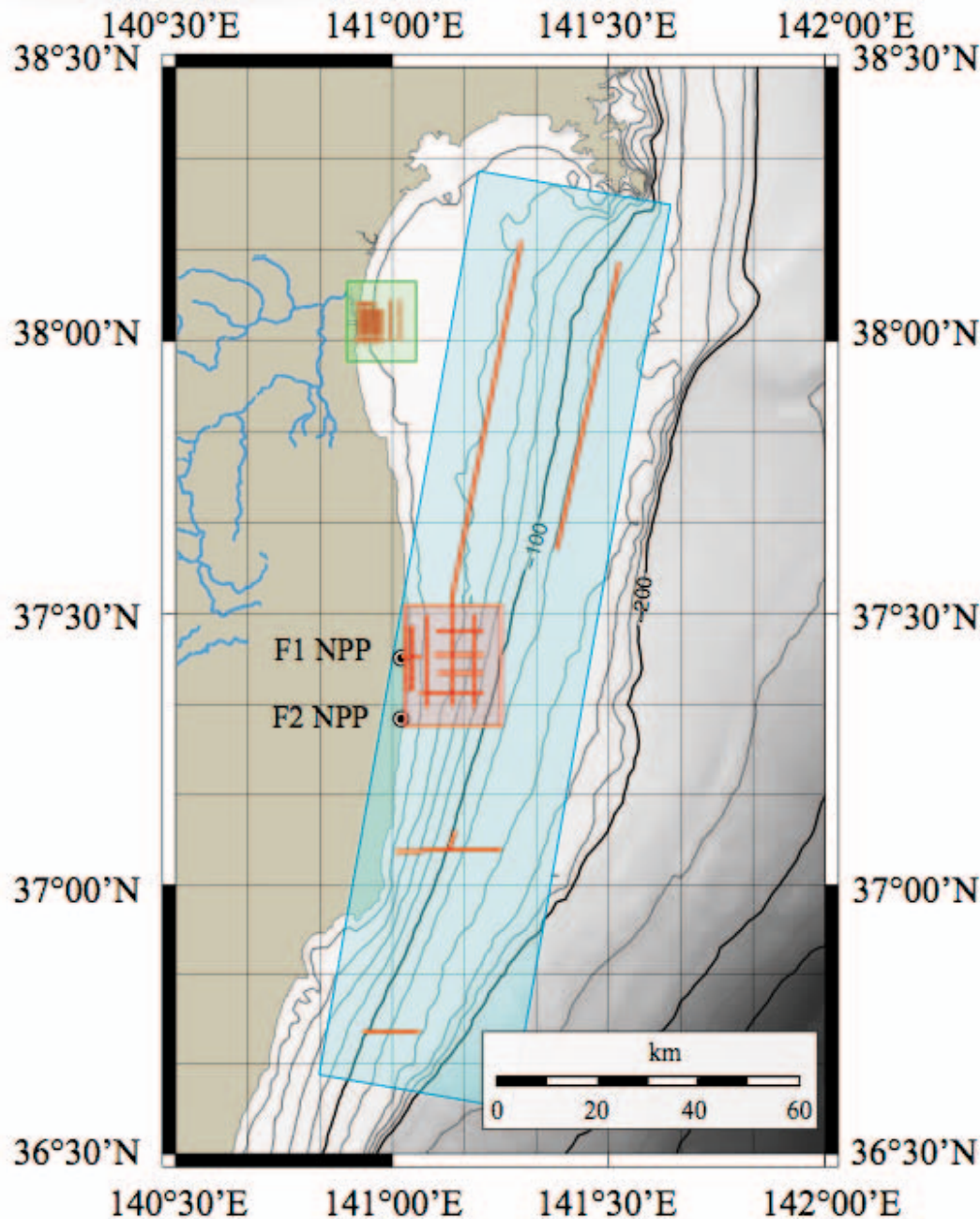
- $\sigma=5\%$ を満たすよう、核種毎IDWで平均化処理
- Monte Carlo Radiation Transport シミュレーションを用いて算出する変換係数
- 3x3x3mの検出器ジオメトリモデル



- 土質組成は文献値を用いてモデリング
- 放射性セシウムの鉛直分布は、海域サンプルの平均分布を用いる

計測結果

Survey results



Date	Location	Distance (km)
8/2012 - 11/2012	北茨城・いわき四倉沖	37
11/2012 - 2/2013	FINPP 20km圏内	141
2/2013	仙台湾	144
3/2013 - 7/2013	阿武隈川河口	77
5/2013	伊豆沼	22
10/2013	阿武隈川河口	112
Total		533

第八開洋丸 (404tonnes) 蒼鷹丸 (892tonnes)



第七開洋丸 (499tonnes) こたか丸 (59tonnes)



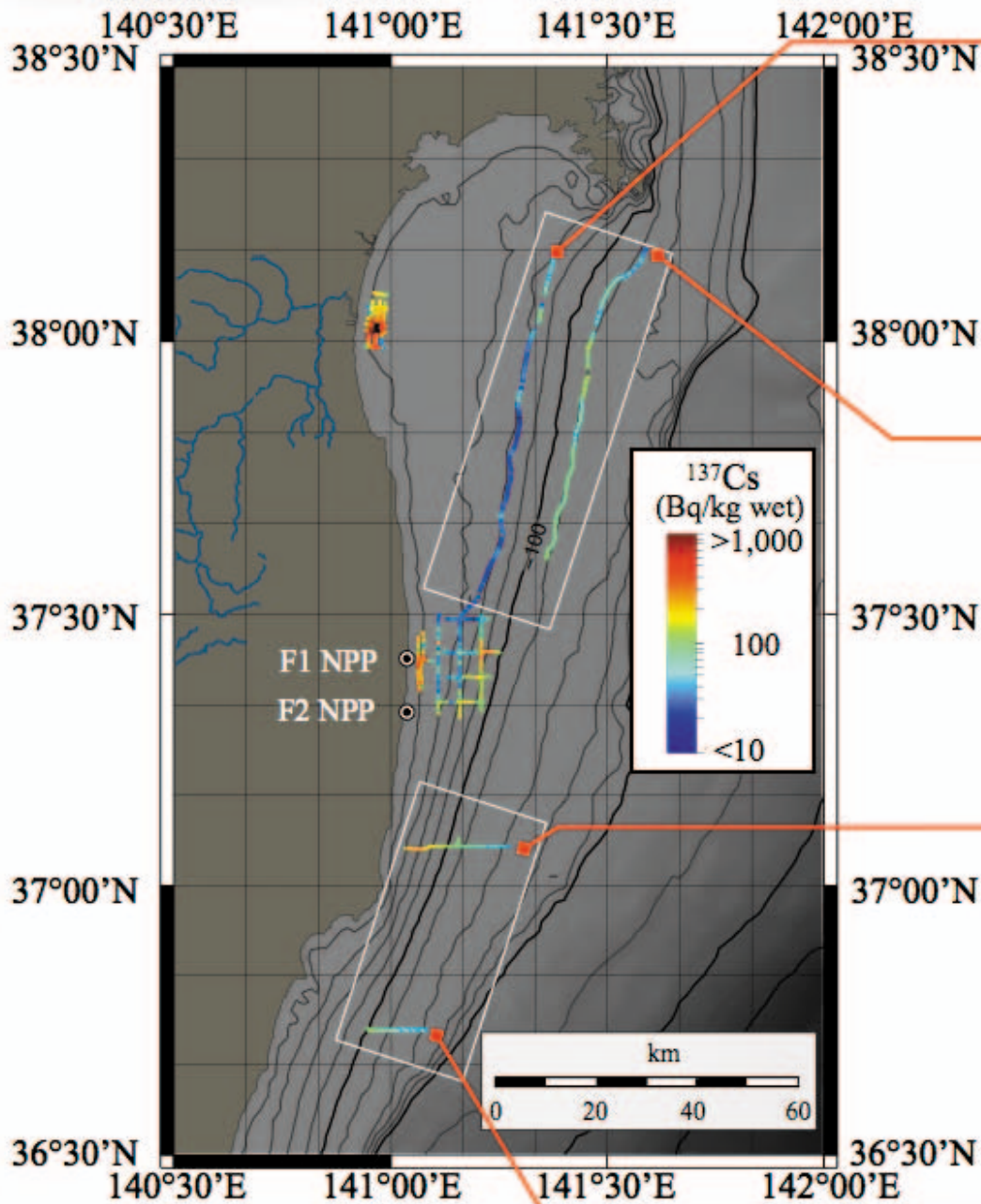
静丸 (17tonnes)

亘理丸 (9tonnes)

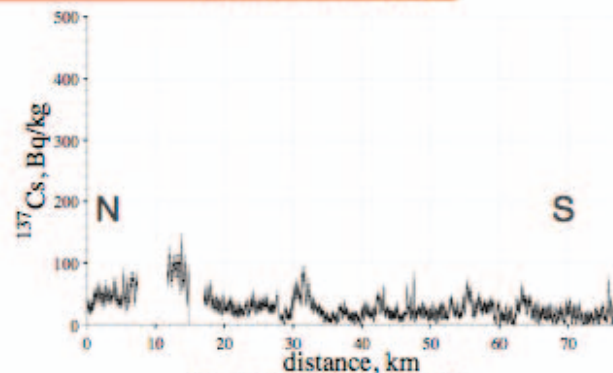


計測結果

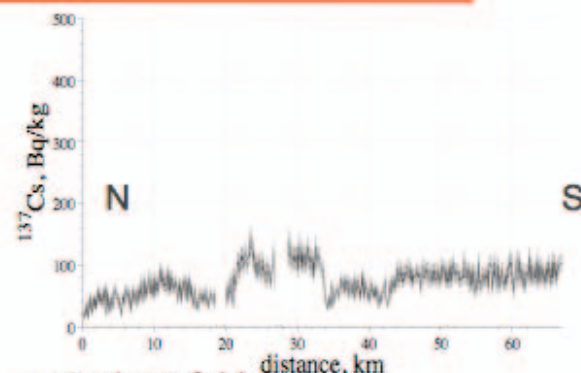
Survey results



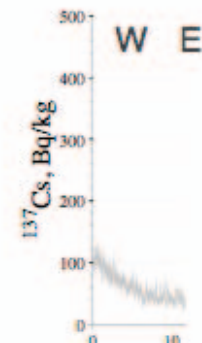
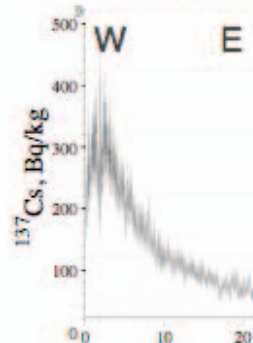
仙台湾60m深度



仙台湾120m深度



いわき四倉沖



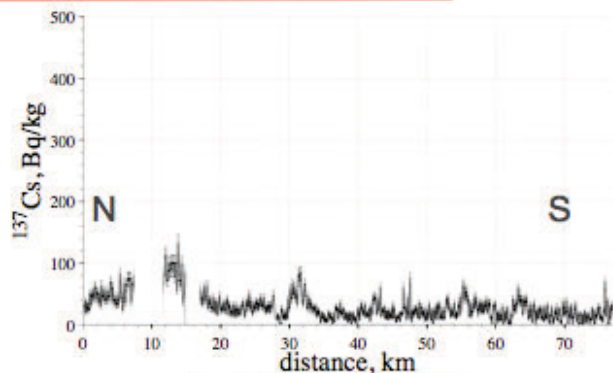
北茨城沖

計測結果

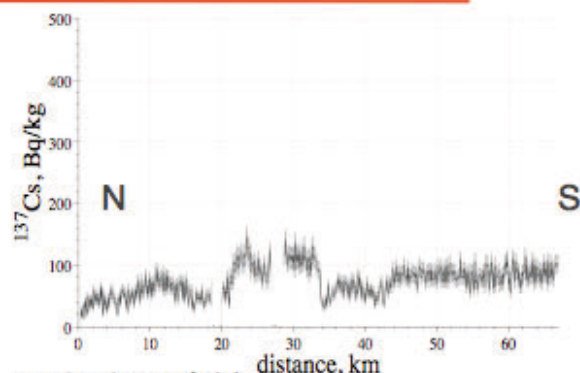
Survey results



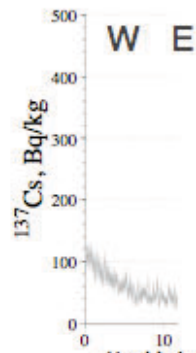
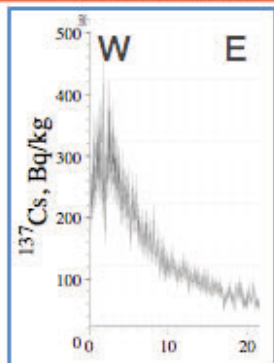
仙台湾60m深度



仙台湾120m深度

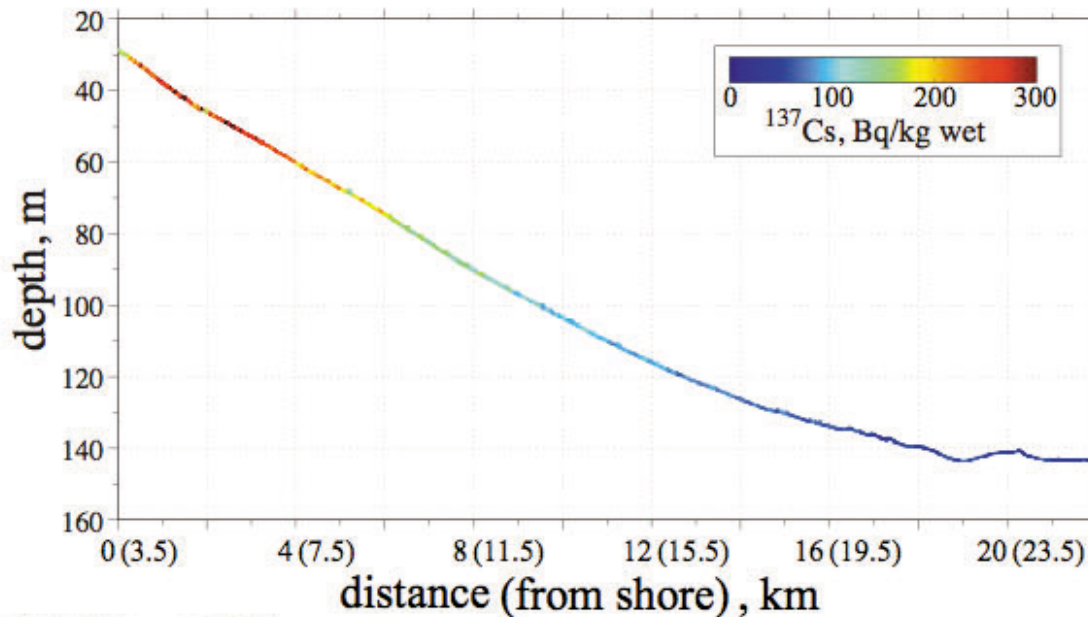
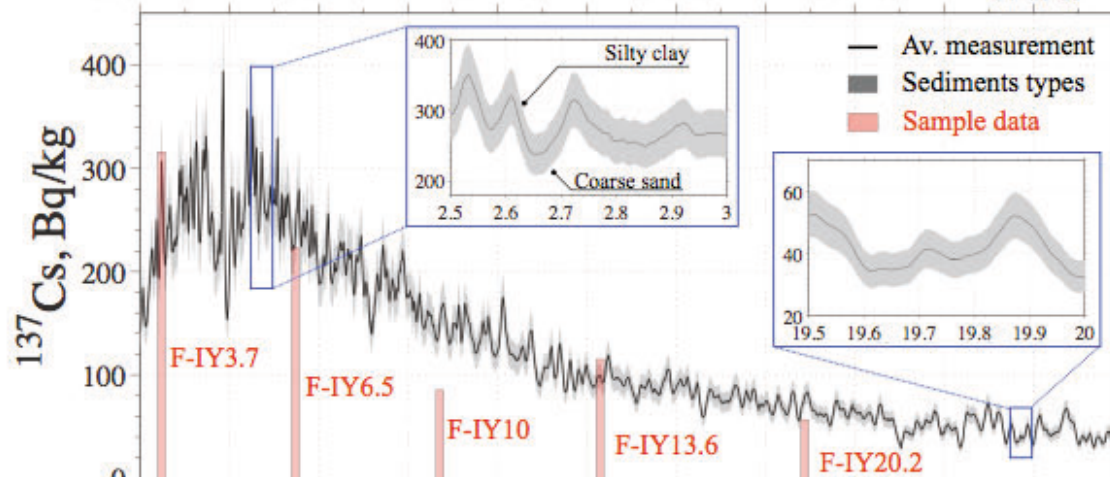


いわき四倉沖



北茨城沖

Lon. 141°01'14" 141°03'56" 141°06'38" 141°09'21" 141°12'03" 141°14'45"
 Lat. 37°04'44" 37°04'42" 37°05'00" 37°04'59" 37°04'59" 37°05'00"



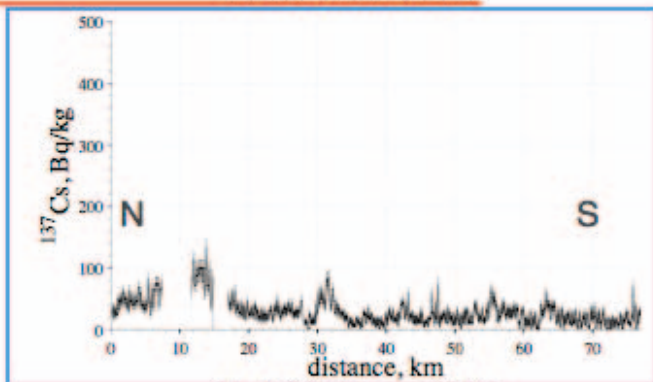
*海底土表層3cmの平均値

計測結果

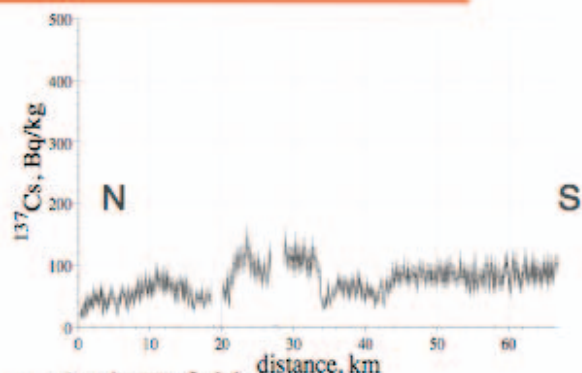
Survey results



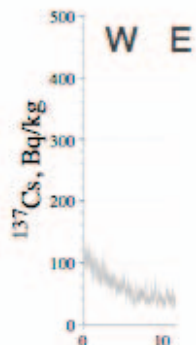
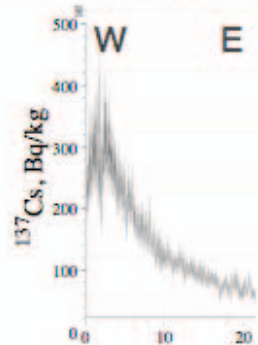
仙台湾60m深度



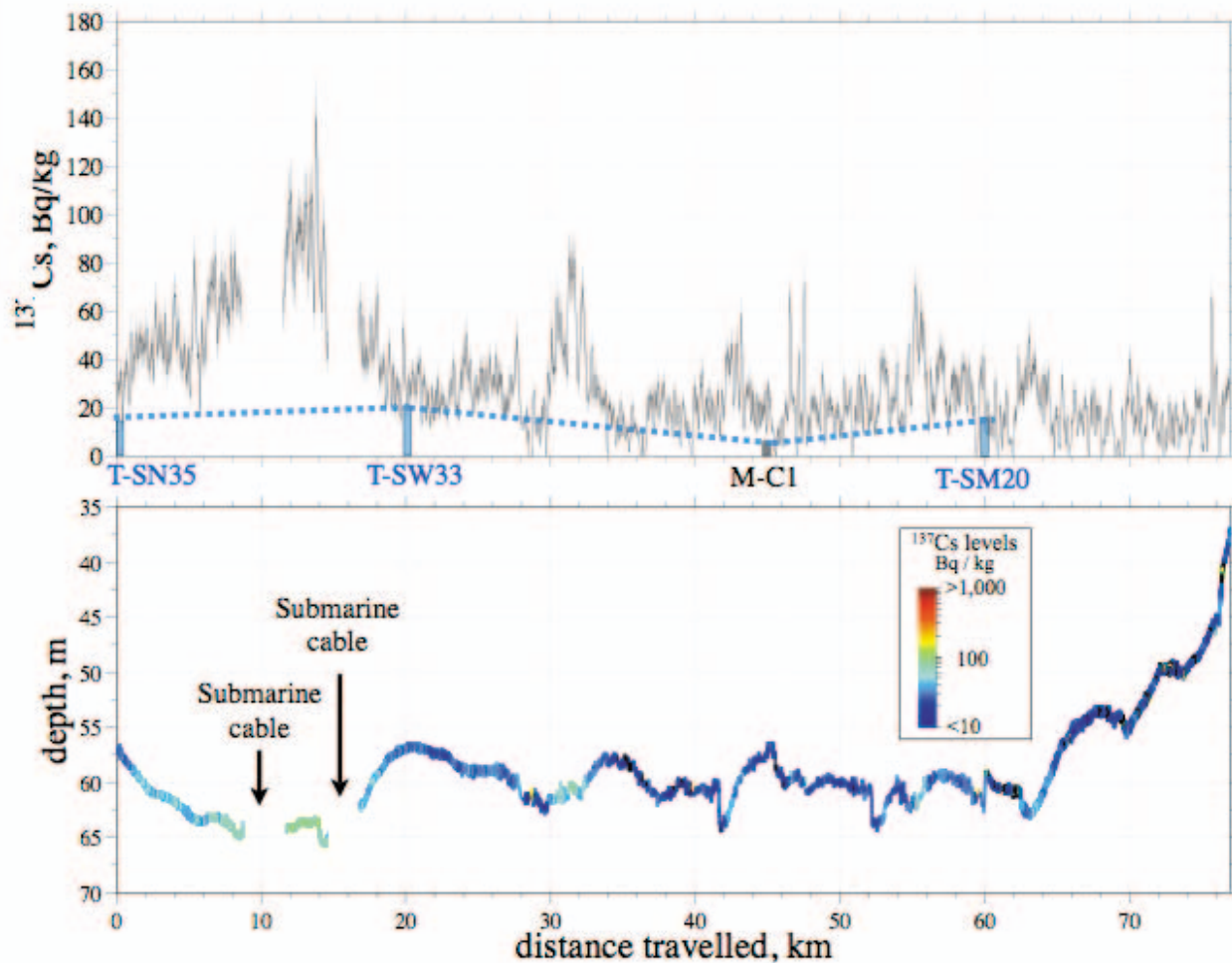
仙台湾120m深度



いわき四倉沖



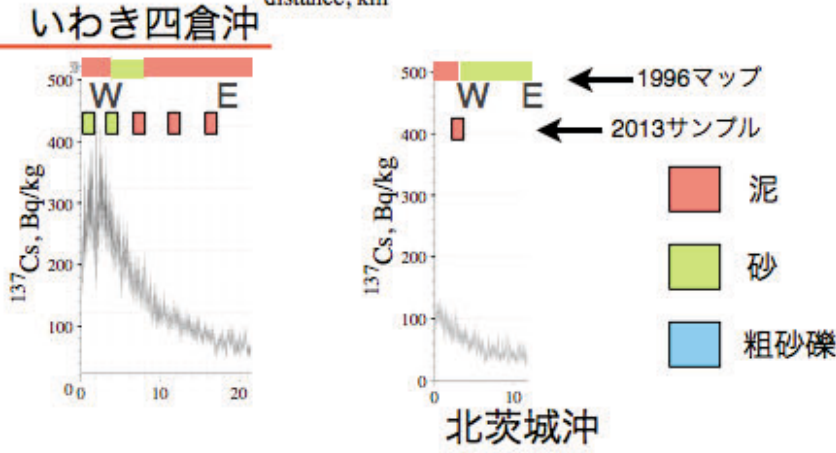
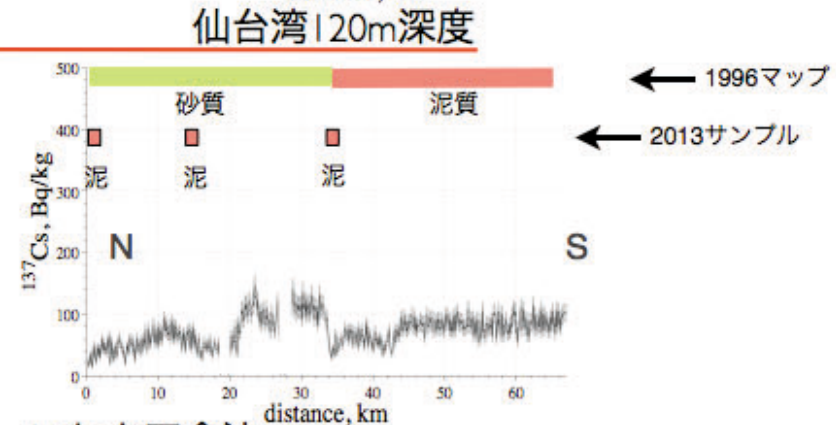
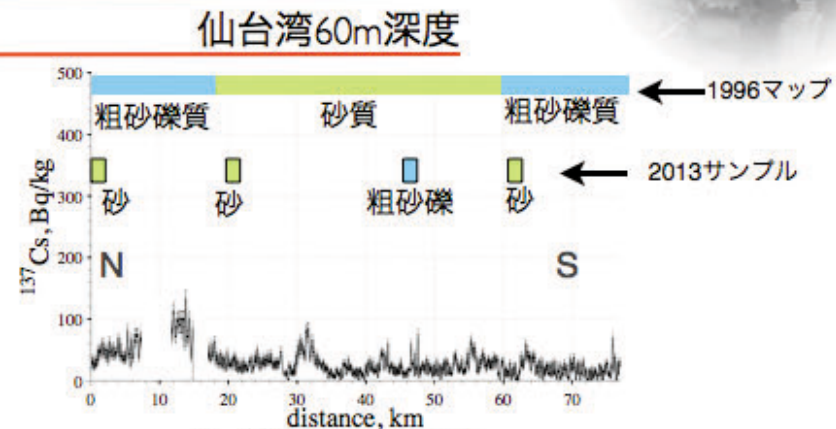
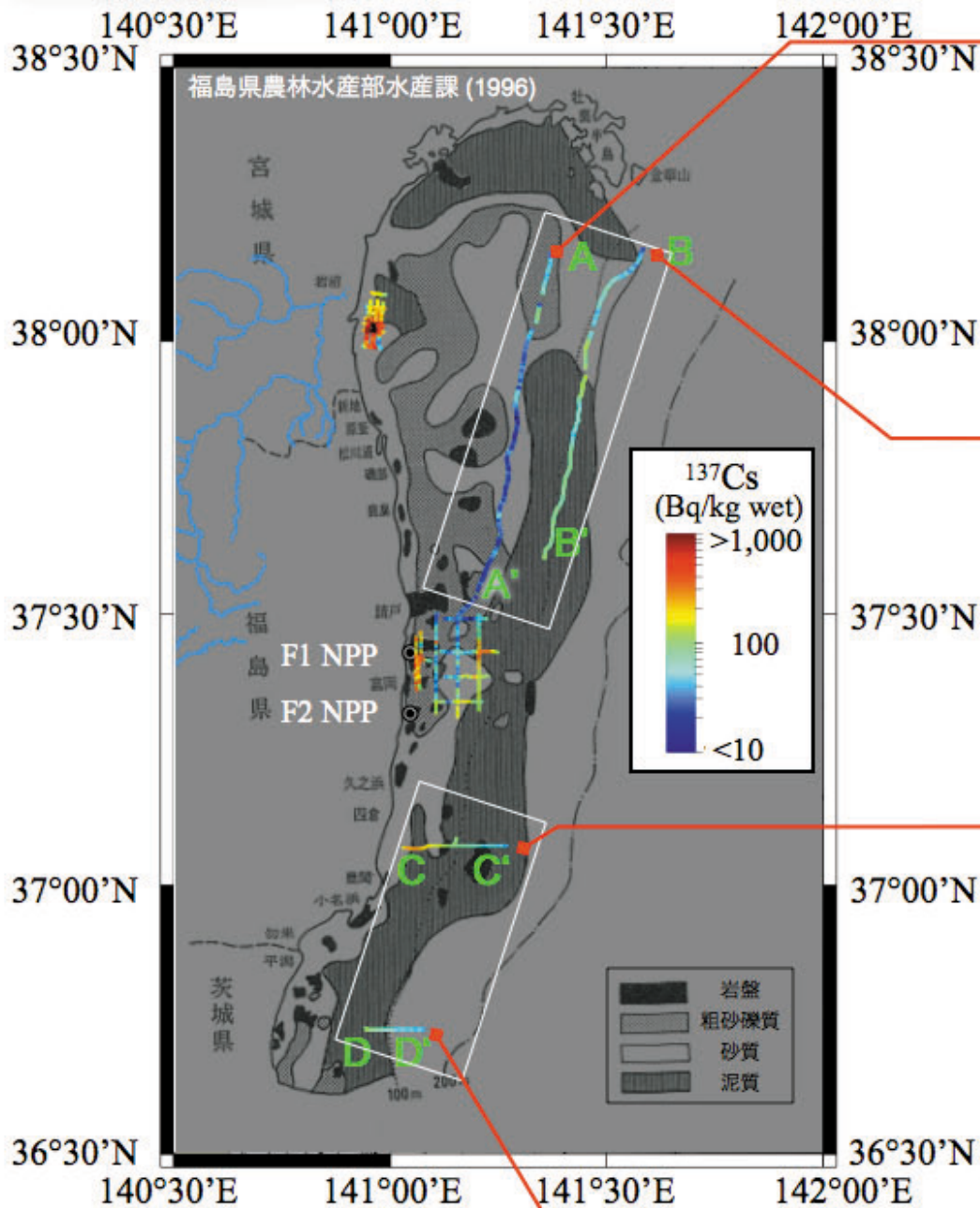
北茨城沖



*海底土表層3cmの平均値

計測結果

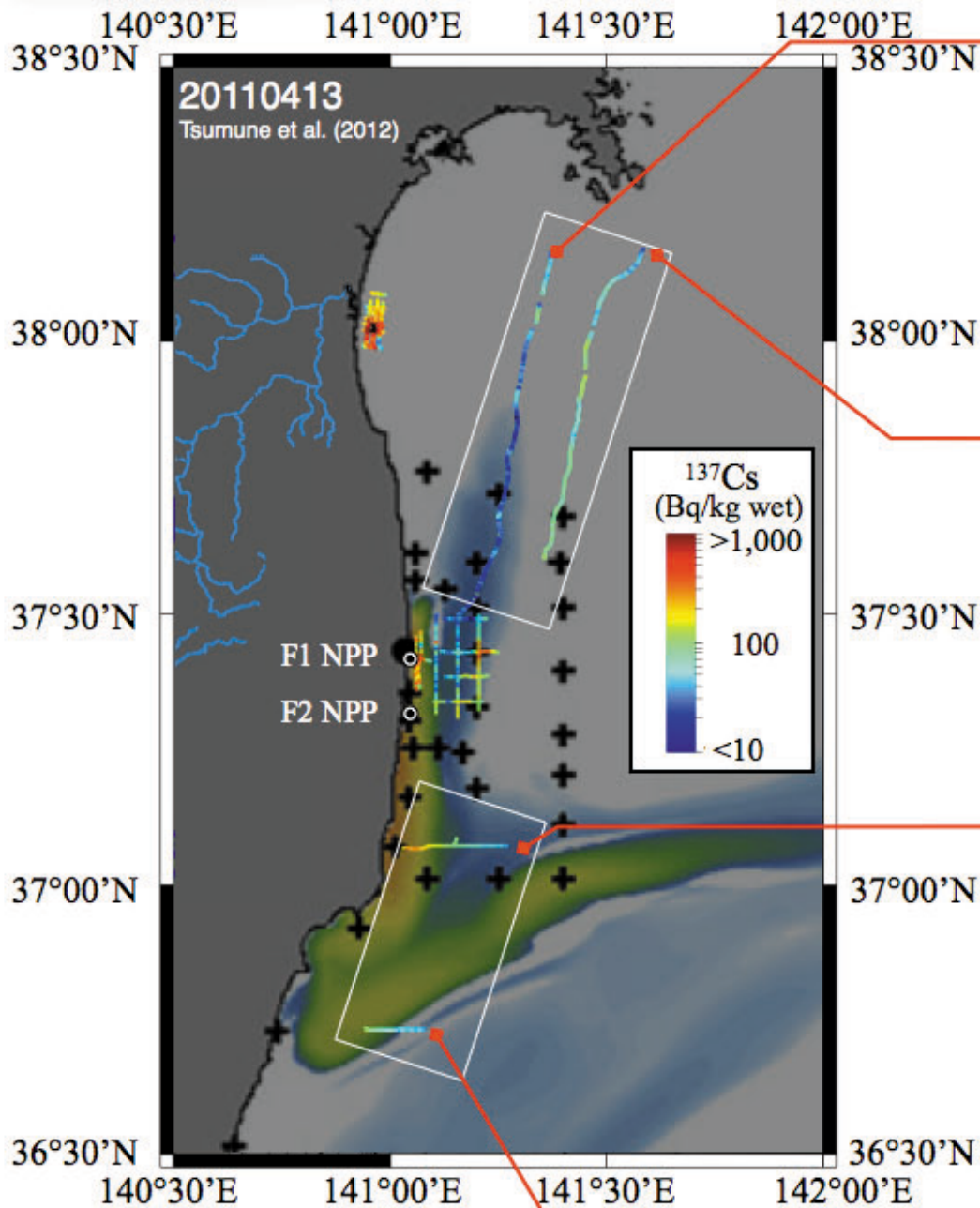
Survey results



北茨城沖

計測結果

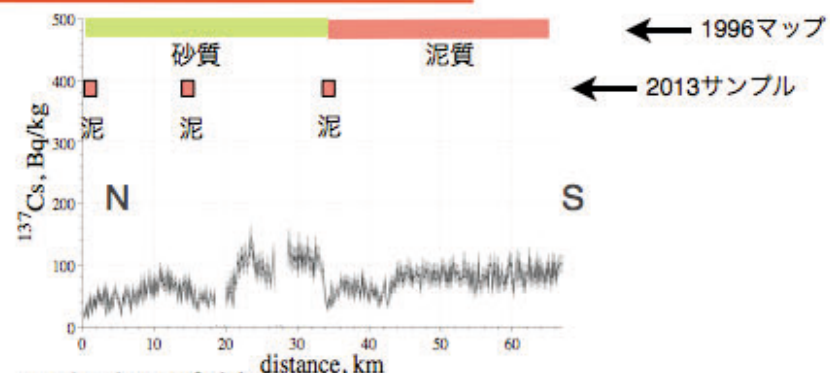
Survey results



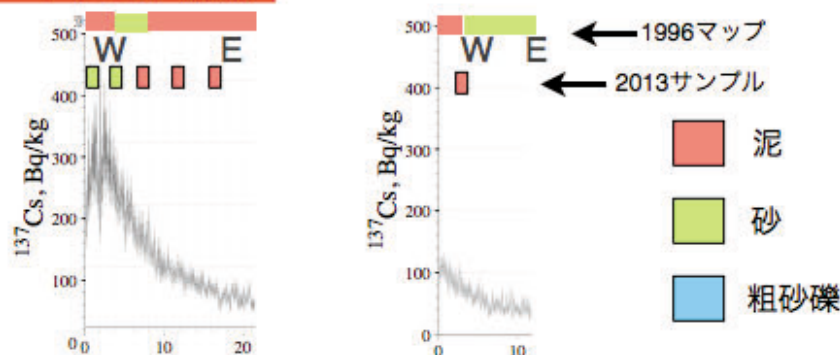
仙台湾60m深度



仙台湾120m深度



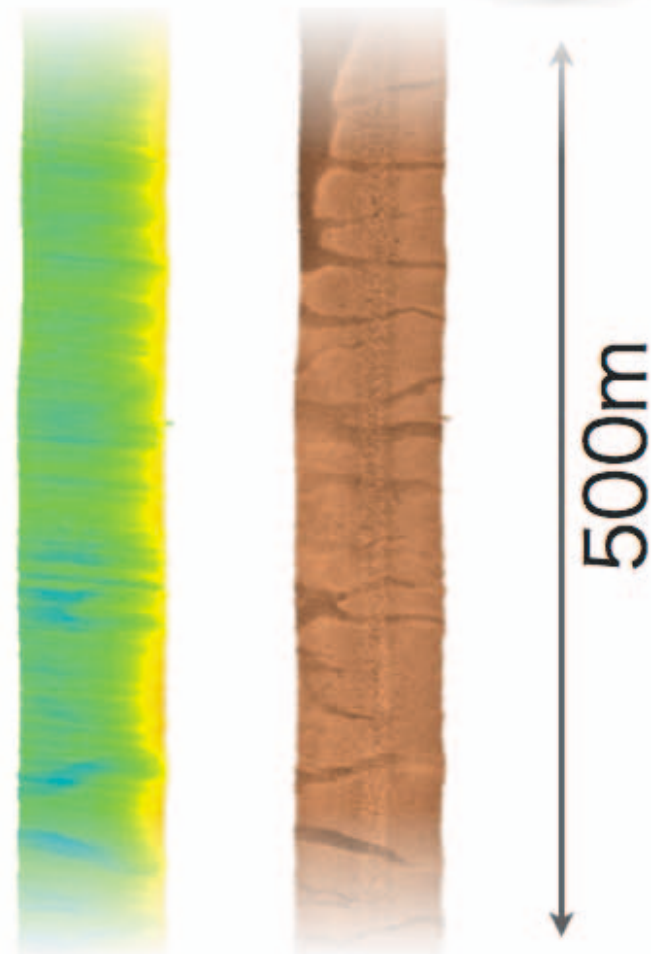
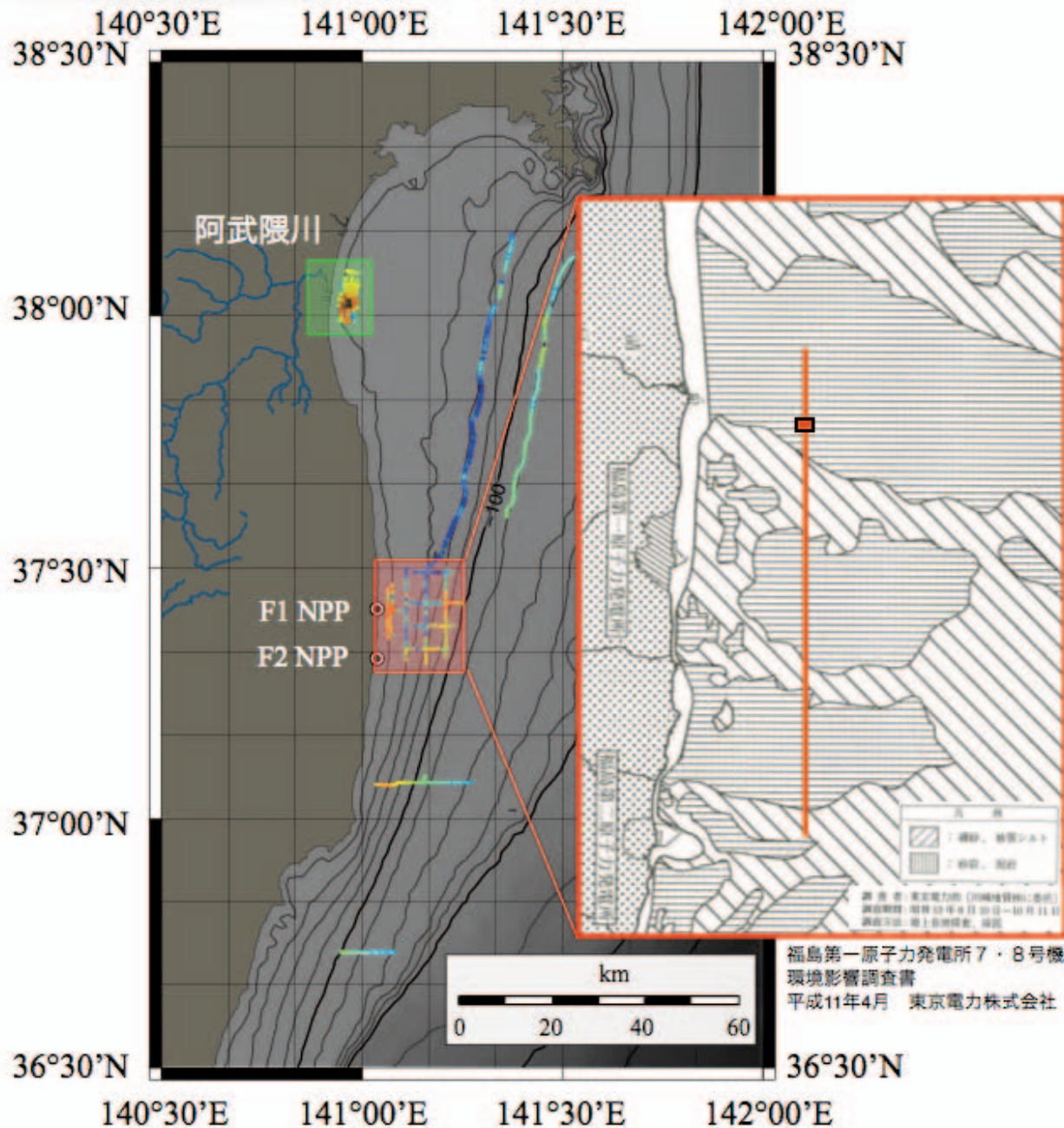
いわき四倉沖



北茨城沖

計測結果

Survey results



24 36 深度 (m)

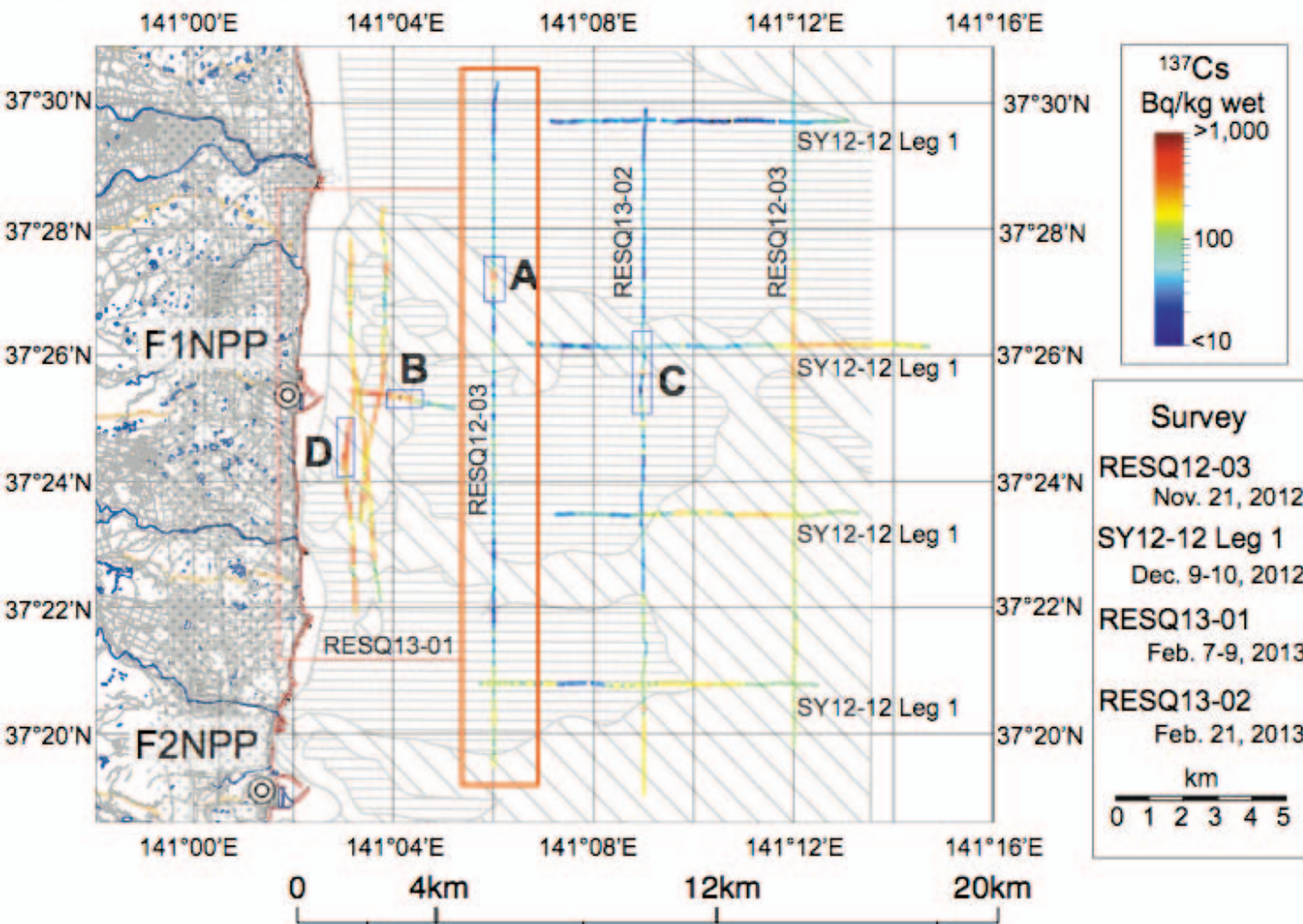
0 -40 反射強度 (dB)

福島第一原子力発電所20km圏内

FINPP 20km



Thornton et al. Marine Pollution Bulletin 74 (2013) 344-350



- ・ 2012年11月21~2013年2月21日に調査実施
- ・ グリッド状に総距離141kmを連続計測

Survey

RESQ12-03
Nov. 21, 2012

SY12-12 Leg 1
Dec. 9-10, 2012

RESQ13-01
Feb. 7-9, 2013

RESQ13-02
Feb. 21, 2013

km
0 1 2 3 4 5

^{137}Cs (Bq/kg wet)*	
平均	標準偏差
$2.9 \pm 0.3 \times 10^2$	$3.5 \pm 0.4 \times 10^2$

^{137}Cs (Bq/kg wet)*	
平均	標準偏差
$6.9 \pm 0.8 \times 10^1$	$7.3 \pm 0.9 \times 10^1$

^{137}Cs (Bq/kg wet)*	
平均	標準偏差
$1.4 \pm 0.2 \times 10^2$	$1.6 \pm 0.2 \times 10^2$

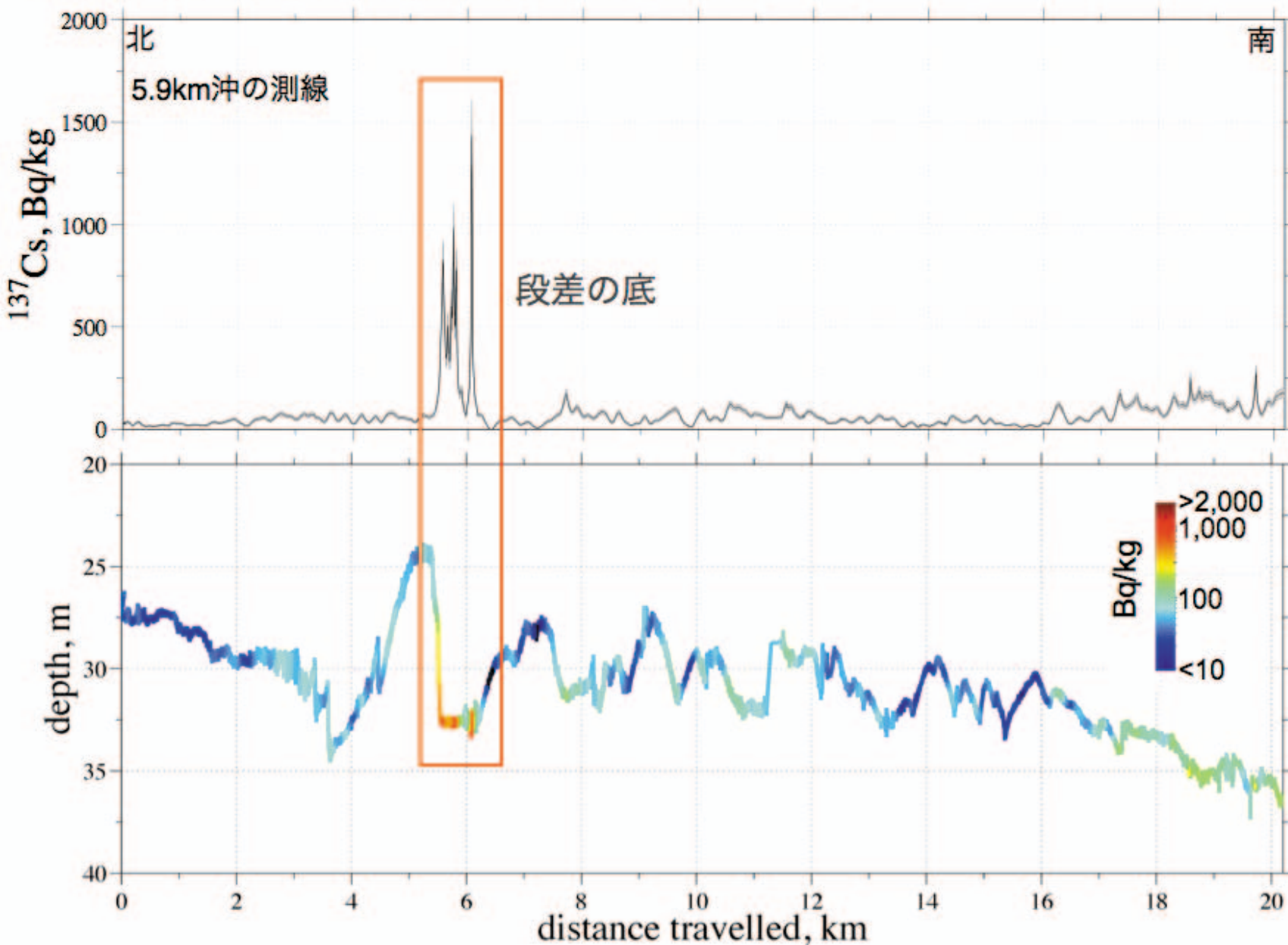
*海底土表層3cmの平均値

福島第一原子力発電所20km圏内

FINPP 20km



Thornton et al. *Marine Pollution Bulletin* 74 (2013) 344-350

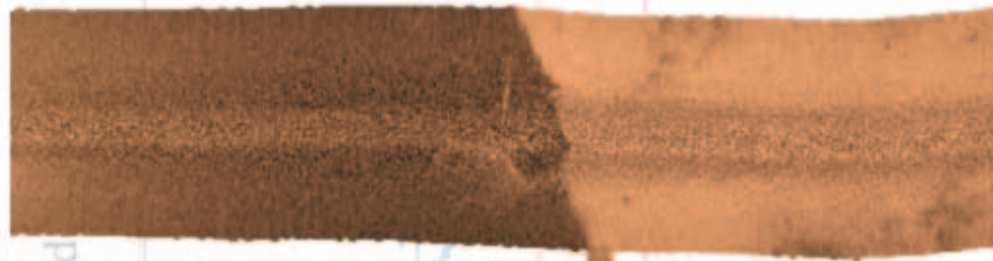
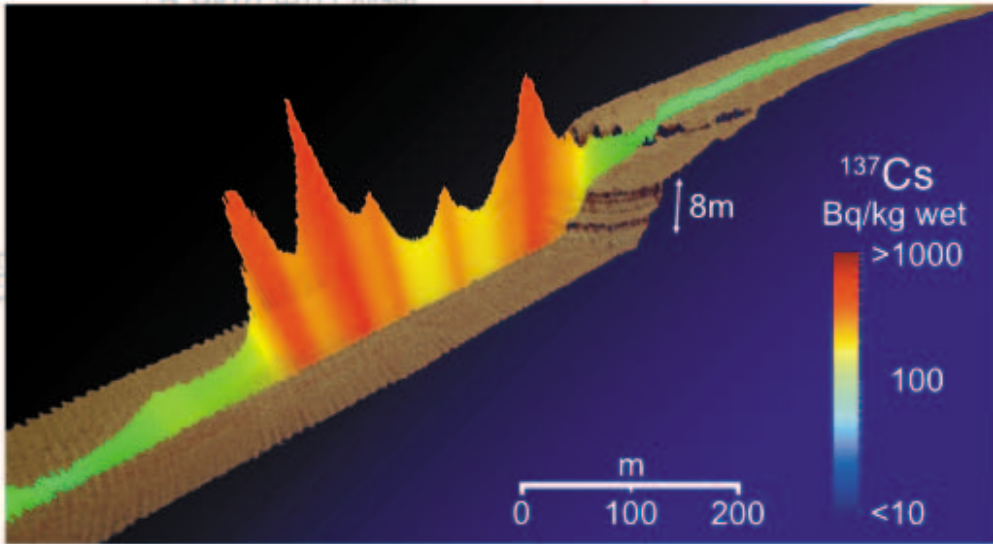


福島第一原子力発電所20km圏内

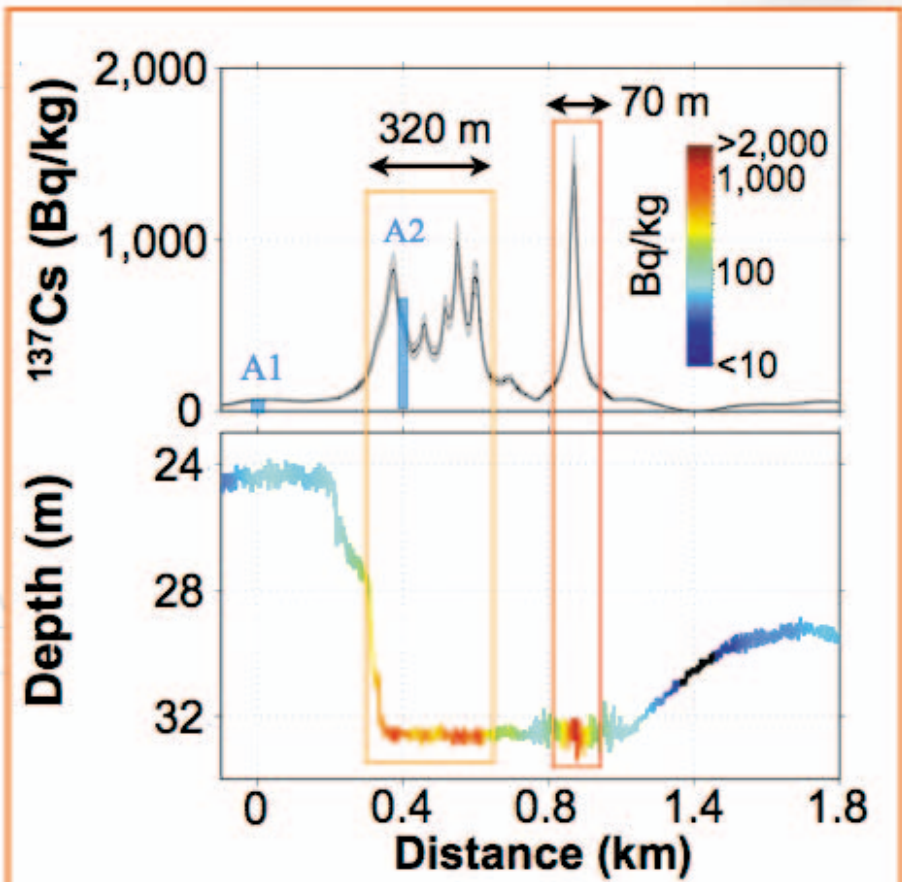
FINPP 20km

Thornton et al. Marine Pollution Bulletin 74 (2013) 344-350

2000 北
5.0km沖の測線



0 反射強度 (dB) -40



	137Cs (Bq/kg wet)*		137Cs (Bq/kg wet)
	平均	最大値	Sampling
段差の上	$6.5 \pm 0.9 \times 10^1$		76
底 (320m)	$5.2 \pm 0.6 \times 10^2$	$9.8 \pm 1.2 \times 10^2$	635
底 (70m)	$6.5 \pm 0.8 \times 10^2$	$1.4 \pm 0.2 \times 10^3$	

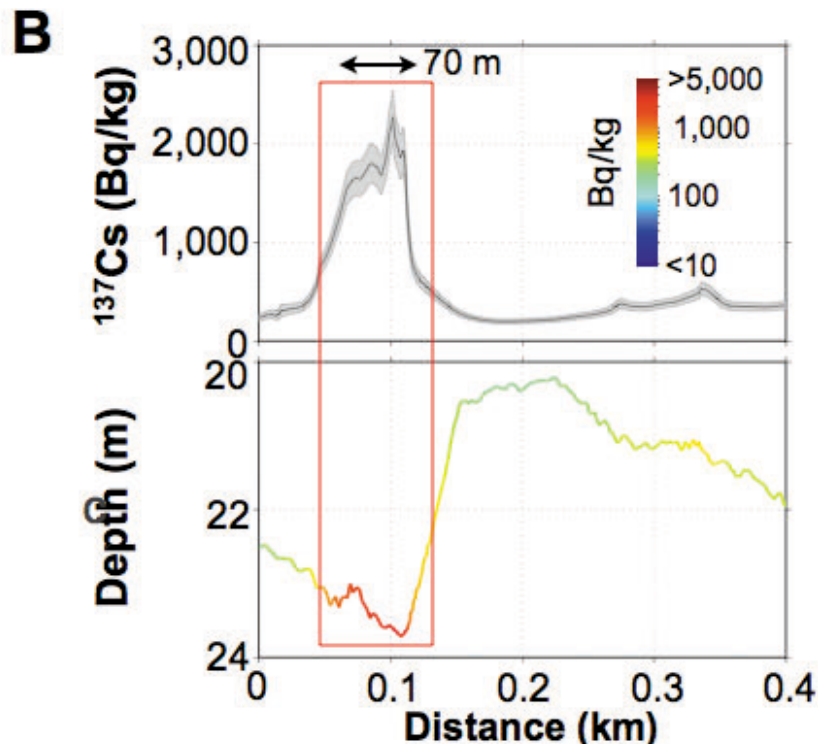
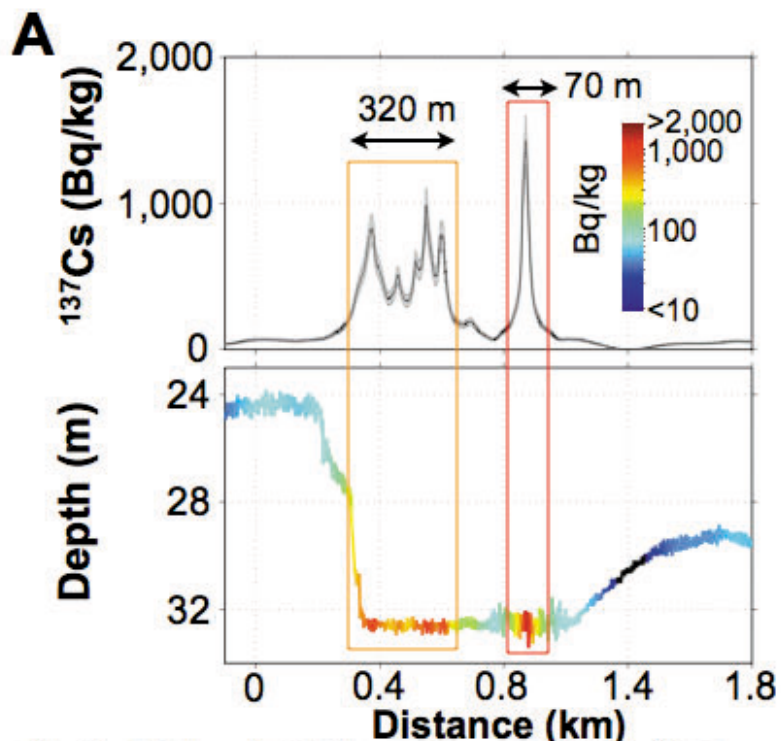
distance travelled, km

福島第一原子力発電所20km圏内

FINPP 20km



Thornton et al. Marine Pollution Bulletin 74 (2013) 344-350



・ 沖合5.9kmにおいて8mの南向きの段差の底で¹³⁷Csの濃度が数100mにおいて高くなっている

	¹³⁷ Cs (Bq/kg wet)*	
	平均	最大値
段差の上	$6.5 \pm 0.9 \times 10^1$	
底 (320m)	$5.2 \pm 0.6 \times 10^2$	$9.8 \pm 1.2 \times 10^2$
底 (70m)	$6.5 \pm 0.8 \times 10^2$	$1.4 \pm 0.2 \times 10^3$

・ 沖合3.2kmにおいて3.5mの西向きの段差の底で¹³⁷Csの濃度が数10mにおいて高くなっている

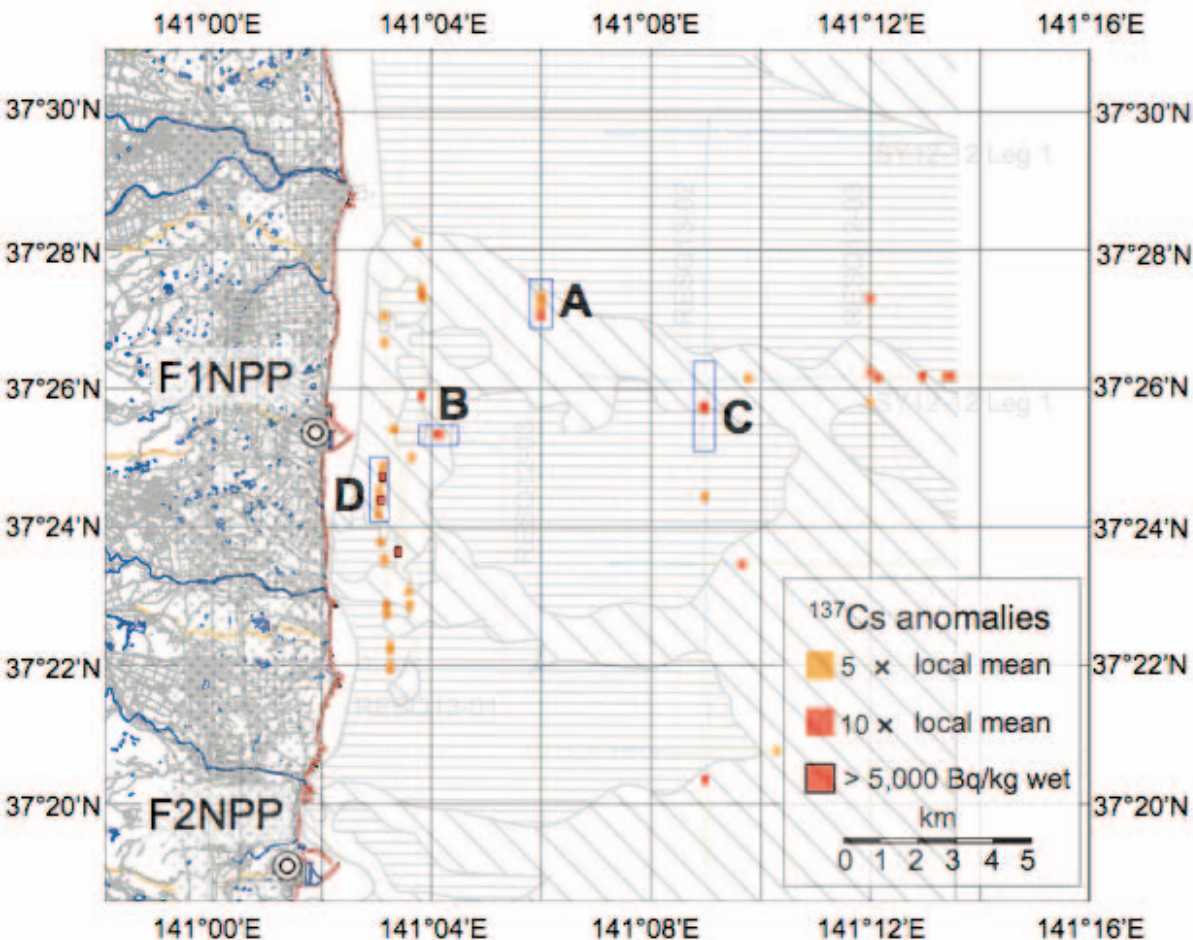
	¹³⁷ Cs (Bq/kg wet)*	
	平均	最大値
段差の上	$1.3 \pm 0.2 \times 10^2$	
底 (70m)	$1.5 \pm 0.2 \times 10^3$	$2.3 \pm 0.3 \times 10^3$

福島第一原子力発電所20km圏内

FINPP 20km



Thornton et al. *Marine Pollution Bulletin* 74 (2013) 344-350



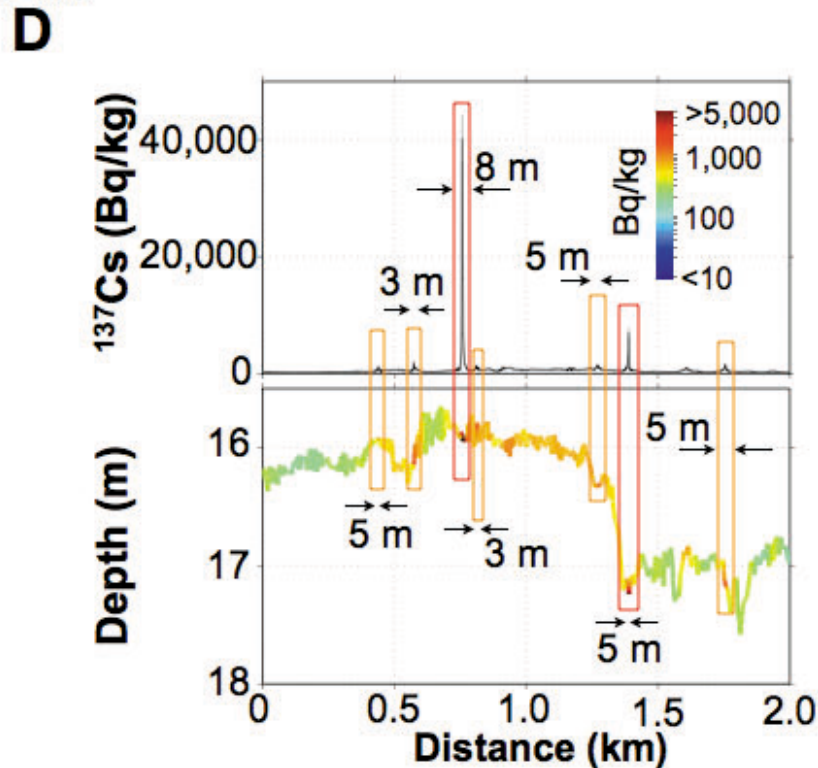
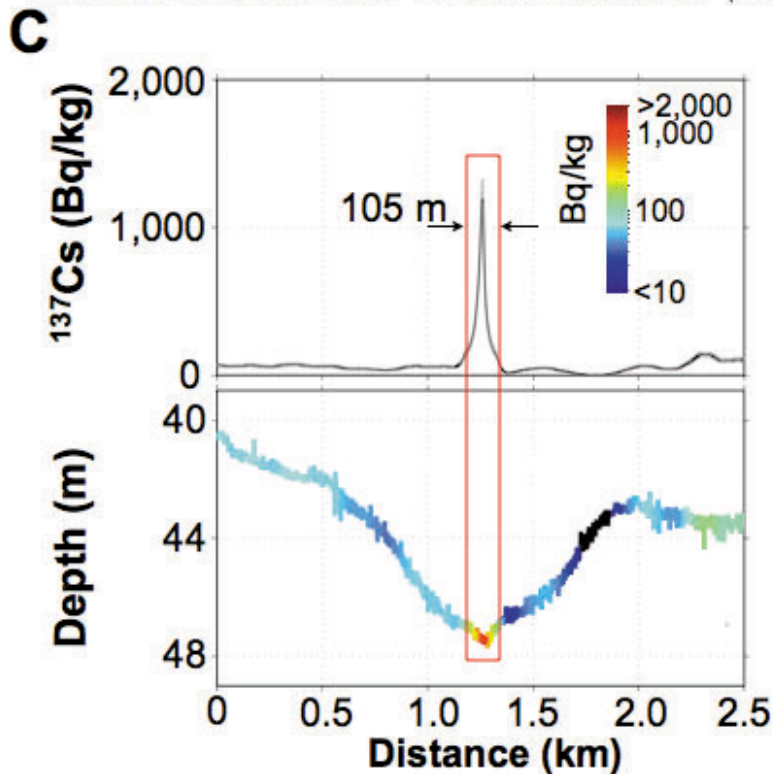
- ・ 周辺海域と比べて ^{137}Cs 濃度が局所的に高くなっているアノマリーが複数計測された
- ・ アノマリーの多くは、海底の凹み地形に一致している
- ・ 凹み地形のアノマリーの大きさは、狭い場所では数10m、広い場所では数100m程である

福島第一原子力発電所20km圏内

FINPP 20km



Thornton et al. Marine Pollution Bulletin 74 (2013) 344-350



・ 沖合10.3kmにおいて緩やかな凹み地形で105mにおいて¹³⁷Cs濃度が高い

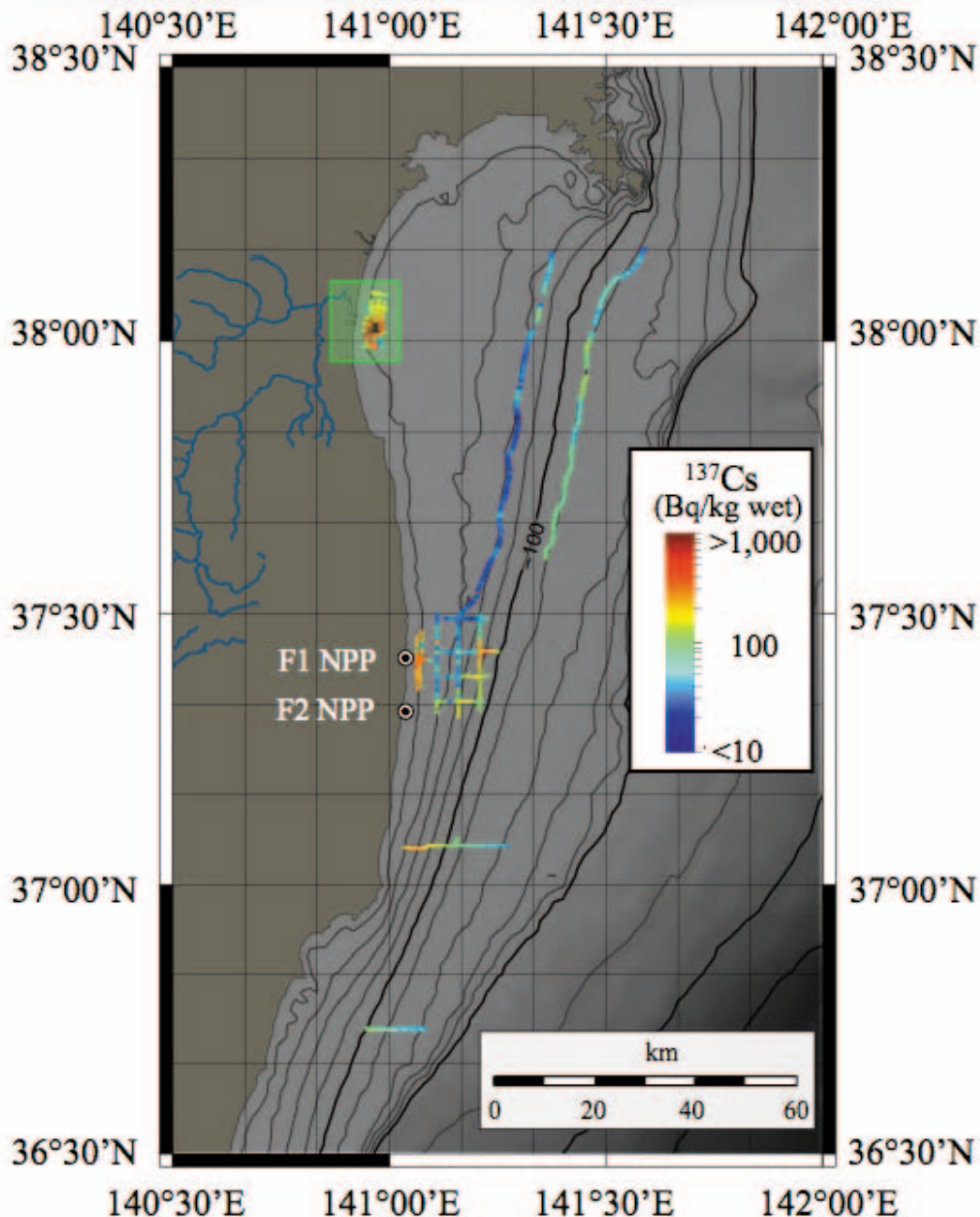
・ 沖合1.6kmにおいては、地形には特徴は見られないが、数mの狭い範囲で¹³⁷Csの濃度が局所的に高くなっている

	¹³⁷ Cs (Bq/kg wet)*	
	平均	最大値
周囲の平均	$6.0 \pm 0.8 \times 10^1$	
底 (105m)	$5.1 \pm 0.6 \times 10^2$	$1.2 \pm 0.1 \times 10^2$

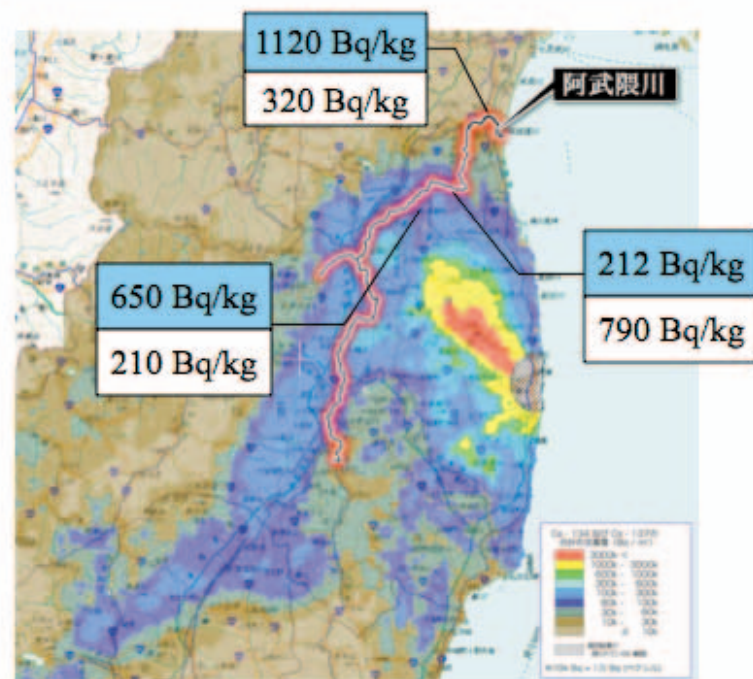
	¹³⁷ Cs (Bq/kg wet)*	
	平均	最大値
表示される 2kmの範囲	$5.3 \pm 0.7 \times 10^2$	$4.0 \pm 0.4 \times 10^4$

阿武隈川河口付調査結果

Abukuma river



阿武隈川	
全長	239km
表面積	5,590 km ²
流量	67.3 m ³ /s



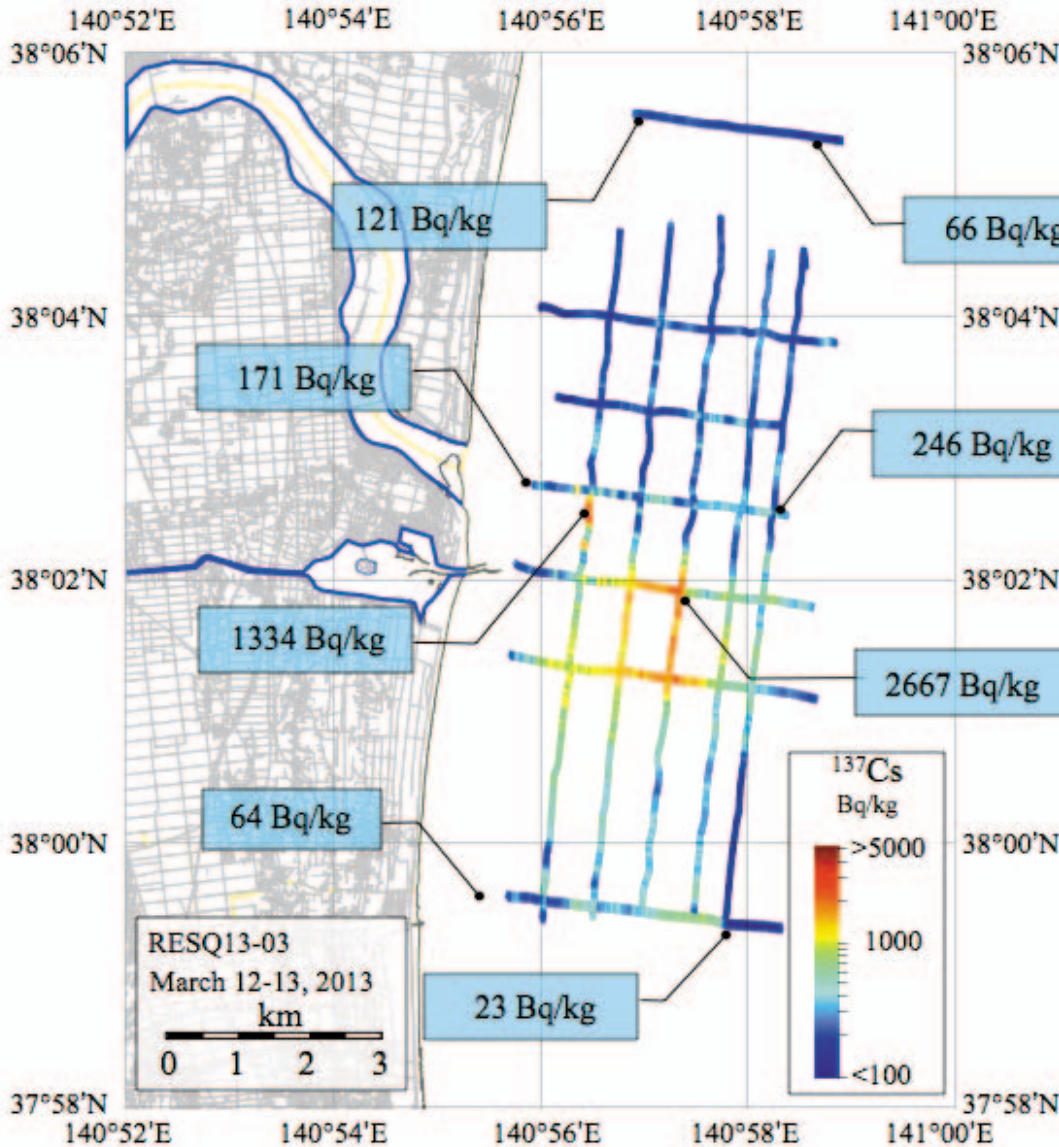
・ 2013年2月の調査結果（環境省）

- 川岸の¹³⁷Csの左岸・右岸の平均 (dry)
- 川底の¹³⁷Cs (dry)

http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/result_pw130419-1.pdf

阿武隈川河口付調査結果

Abukuma river mouth survey results

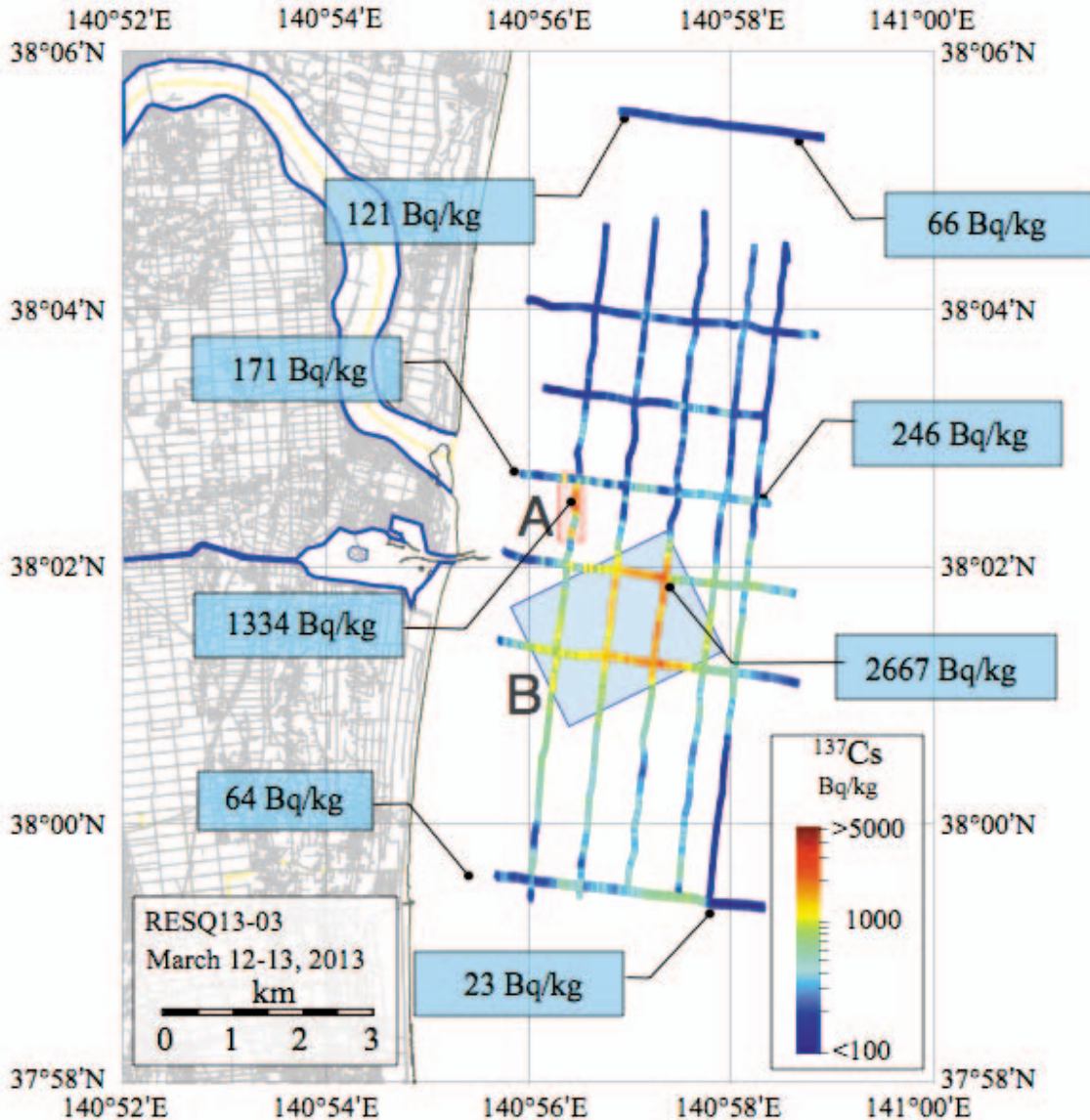


*海底土表層14cmの平均値

- 2013年3月12~13日及び7月24~25日に曳航調査を実施
- 総距離77kmの曳航調査を行った
 - ➔ 3月の調査では総距離26kmを計測
 - ➔ 7月の調査では総距離51kmを計測
- 調査した12×5kmの範囲で表層14cmの平均 $4.3 \pm 0.4 \times 10^2$ Bq/kg
 - ➔ 北の平均は $2.0 \pm 0.2 \times 10^2$ Bq/kg
 - ➔ 南の平均は $5.7 \pm 0.6 \times 10^2$ Bq/kg
- 河口の南で、2ヶ所において ^{137}Cs 濃度が局所的に周辺海域と比べて異なる場所が計測された

阿武隈川河口付調査結果

Abukuma river mouth survey results



*海底土表層14cmの平均値

アノマリーA

・河口から東1.6km、南0.5kmを中心
に900x350m以内

^{137}Cs (Bq/kg wet)*		
平均	標準偏差	最大値
$1.0 \pm 0.1 \times 10^3$	$7.6 \pm 0.7 \times 10^2$	$3.4 \pm 0.3 \times 10^3$

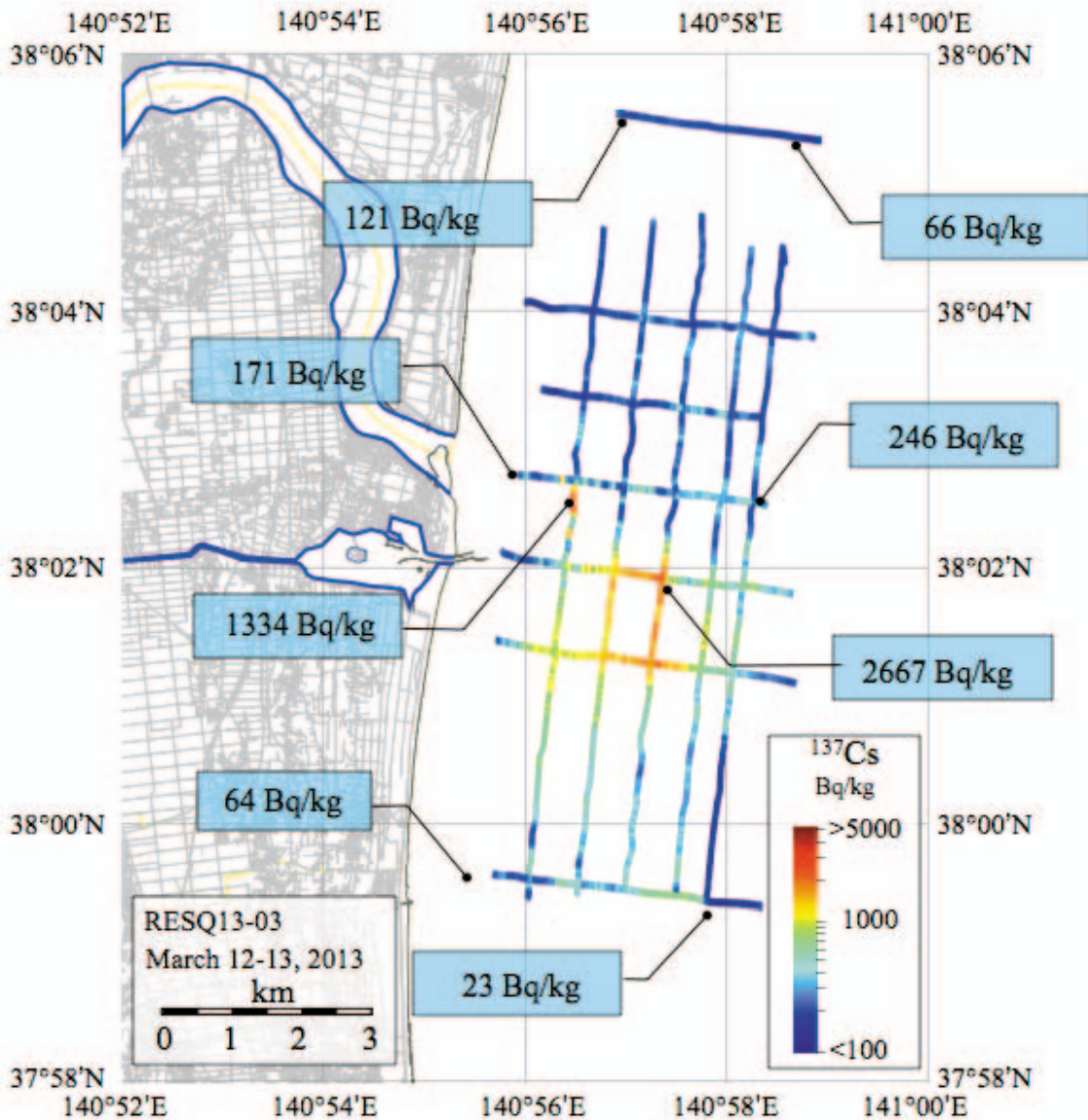
アノマリーB

・河口から東2.5km、南2.3kmに
2.4x1.9km程度の範囲

^{137}Cs (Bq/kg wet)*		
平均	標準偏差	最大値
$1.3 \pm 0.1 \times 10^3$	$4.0 \pm 0.4 \times 10^2$	$2.8 \pm 0.3 \times 10^3$

阿武隈川河口付調査結果

Abukuma river mouth survey results



*海底土表層14cmの平均値



まとめ

- ・ mオーダーの地形・底質が ^{137}Cs の分布を大きく影響している
- ・ F1NPP20圏内では、くぼ地などが ^{137}Cs の分布に数m～数100mの範囲で局所的な影響がある場所が複数箇所で見測された。多くは千から数千Bq/kg-wetであるが、数万Bq/kg-wetの場所も見測された
- ・ 阿武隈川の河口では、kmオーダーの範囲で河川から流れたと思われる ^{137}Cs 濃度が数千Bq/kg-wetの場所が見測された
- ・ 台風による浅い海域の ^{137}Cs 分布への影響を調べる必要がある

今後の展開

Future plans

線から面

- ➡地形・底質を元に線状データを面に展開
- ➡白線で示す広域線的調査を実施

線から点

- ➡γセンサ搭載型カメラロボットによるアノマリー調査
- ➡計測と画像の同期
- ➡リアルタイム計測とサンプリング

継続

- ➡変化を把握
- ➡除染問題の検討
- ➡国として長期計画を立てる

