

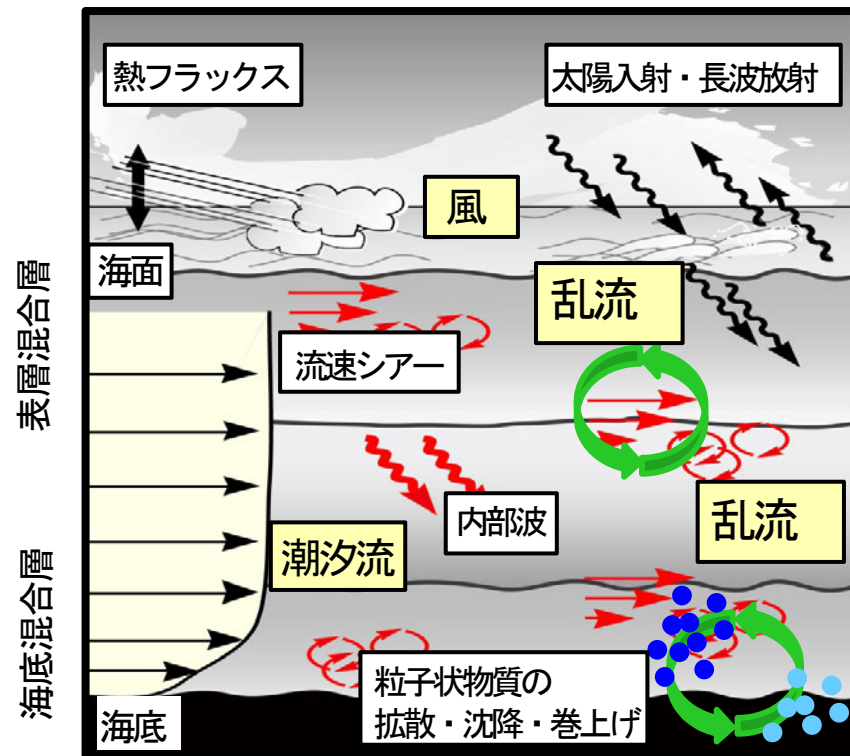
海洋混合層スキームの高度化と流動・ 水質・生態系シミュレーションへの応用

福島第一原子力発電所事故で漏出した 放射性セシウム137の 海底堆積・巻上シミュレーション

独立行政法人国立環境研究所
地域環境研究センター海洋環境研究室
課題代表者:東 博紀
共同研究者:古市 尚基

H26 SC利用状況
122,809 hours

本課題の目的



← 海洋モデル(GCM, RCM)の1格子よりはるかに小さい! →

- **物理場** (水温, 塩分, 流速)
- **環境問題で鍵となる懸濁・溶存態物質**
e.g. 酸素・二酸化炭素等の海面交換
濁質・栄養塩・植物プランクトン動態

「ミクロな」スケールの現象
数 cm ~ 数10 m

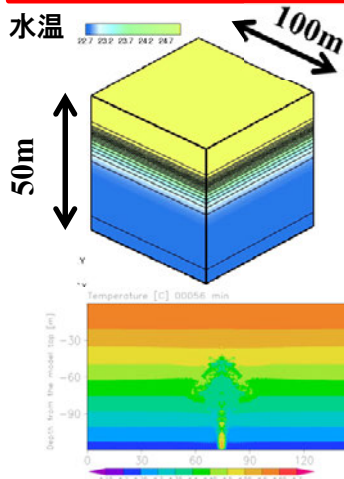
課題:

- エネルギー源・発生過程の把握
- 乱流強度の時空間分布の解明
- 適切なパラメータ化
→ 鉛直渦拡散係数として乱流効果を組み込み
(広域数値モデルでは陽に解像できない)

広域スケールにおける海洋環境・生態系モデルシミュレーションの精度向上

本課題の全体概要

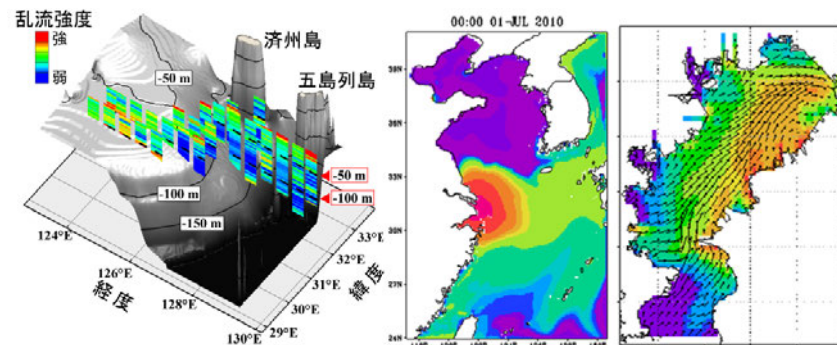
LESに基づく鉛直混合スキームの改良



- LESによる海面・海底混合層の乱流基礎解析
→ 乱流スキームの精度検証・改良
- LESによる粒子状物質の動態基礎解析
→ 粒子状物質の沈降速度・鉛直混合の改良

乱流実験(上:海面冷却、下:熱水噴流) 科研費(代表:古市)

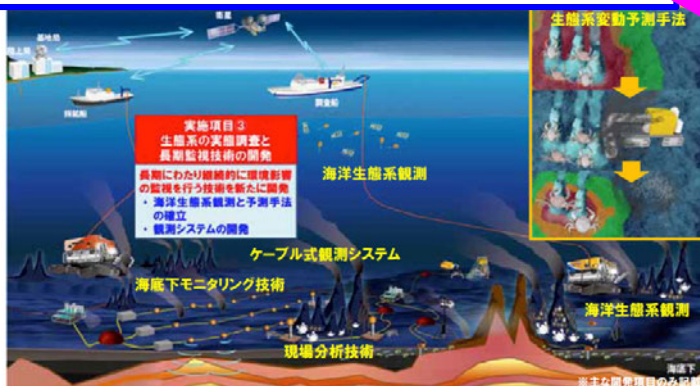
東シナ海・東京湾の海洋環境・生態系



- ← 現場観測データ(乱流、水質等)の蓄積
- 流動・生態系モデル(RCM)の高精度化

NIES東アジア重点PG(PJ2)、所内公募研究

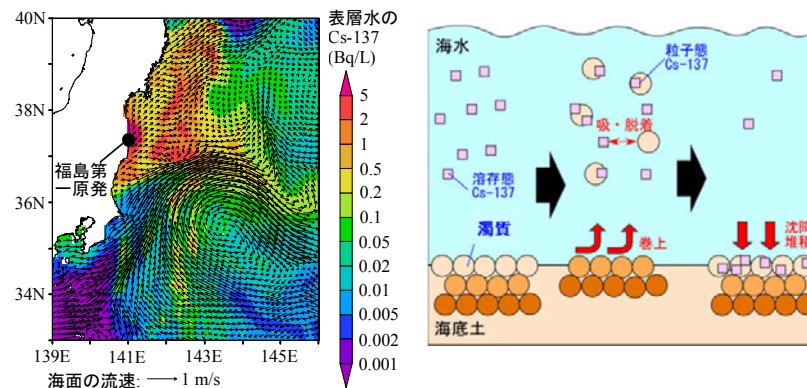
海底資源開発の影響評価(H26～)



- ← 現場深海観測データ(乱流、水質等)の蓄積
- 流動・濁質・生態系モデル(RCM)の高精度化

SIP次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)

放射性物質の動態再現・予測



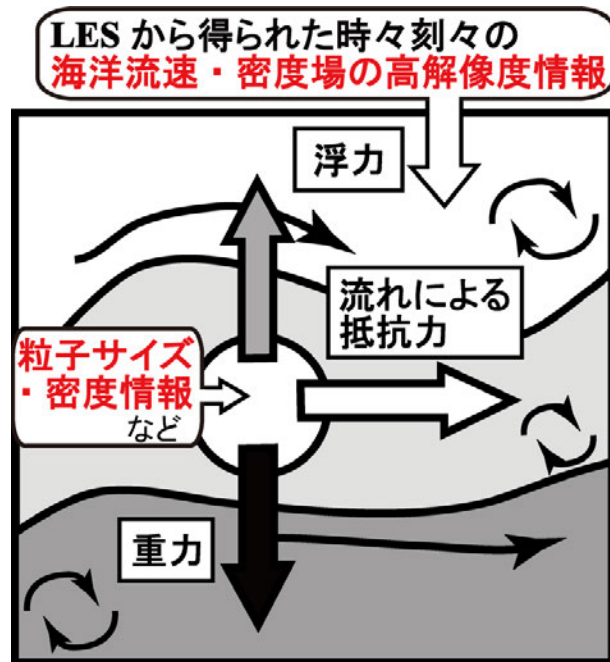
- 流動・¹³⁷Cs動態モデル(RCM)の高精度化

NIES災害環境研究PG1PJ1

LES研究のH25・26成果概要

H25: 鉛直混合スキームの精度は？ H26: 粒子状物質の鉛直渦拡散係数は？

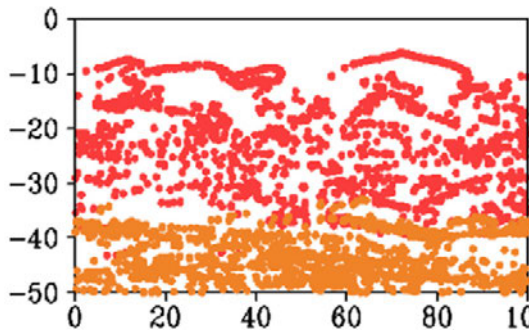
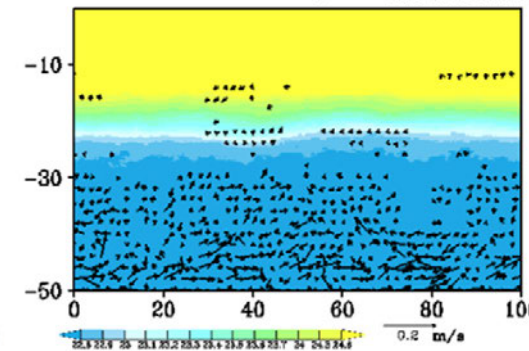
LESによる粒子追跡実験



粒子追跡に関する参考手法:
Eames and Gilbertson (2004, JFM)
Noh and Nakada (2011, JGR)など

LES XZ-field

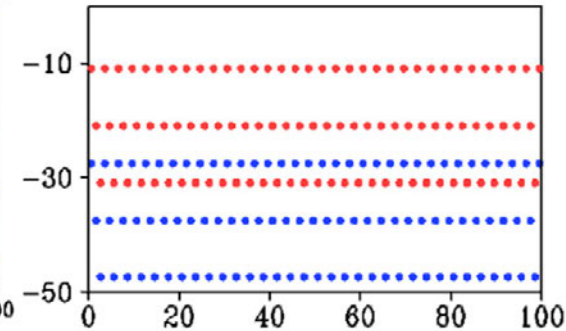
t = 0283min



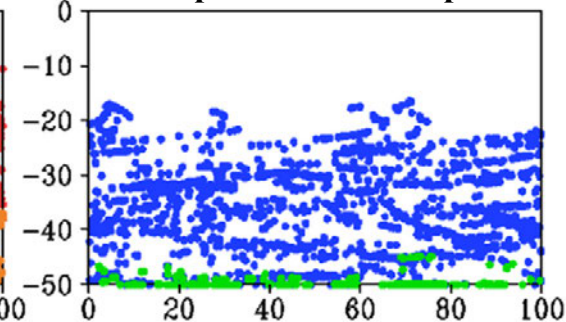
● 20 μm & $1.5 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ (表層から)
● 20 μm & $1.5 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ (底層から)

● 20 μm & $1.5 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ (有機物)
● 50 μm & $2.7 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ (土)

No Flow



4000 particles in each panel



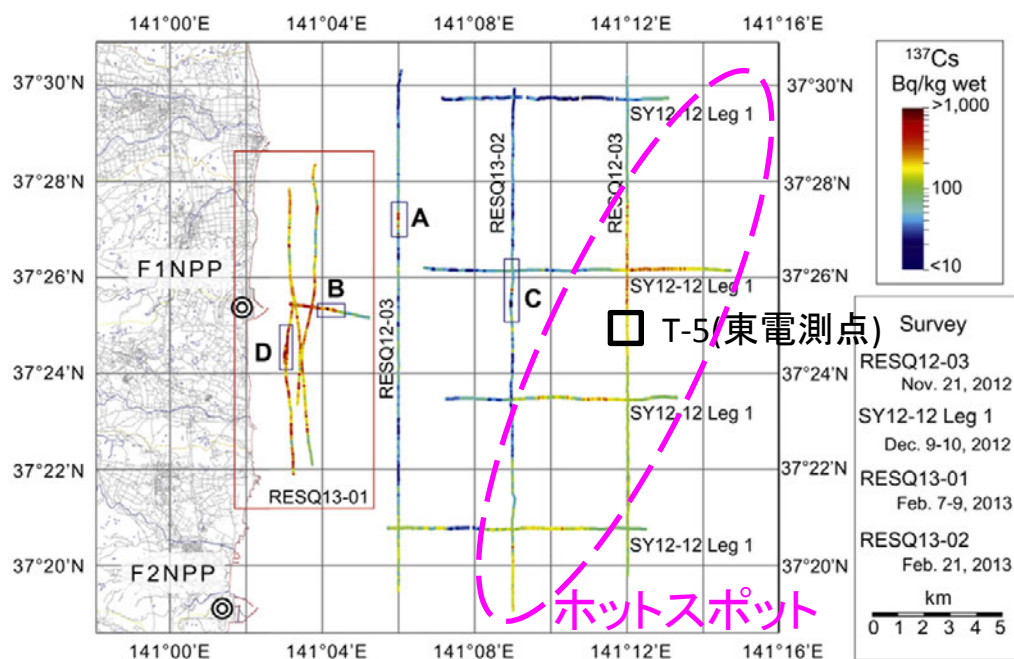
● 50 μm & $2.7 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ (表層から)
● 50 μm & $2.7 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ (底層から)

古市ら(2014) 土木学会論文集B2(海岸工学)

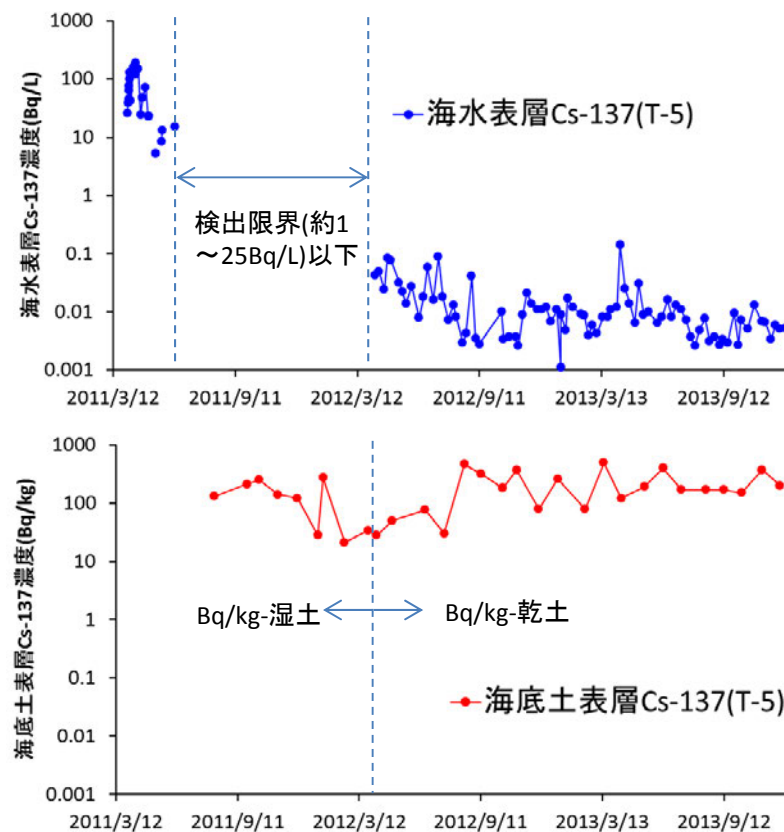
- ◆ 鉛直混合スキームは修正版NNモデル(Furuichi, 2012)が高精度(H25)
- ◆ 球型粒子の渦拡散係数 K_p ...粒径・粒子密度の顕著な依存性は見られない (H26)
- ◆ 球型粒子の渦拡散係数 K_p と水温の渦拡散係数 K_H は同オーダー(H26)

放射性物質の動態再現・予測：研究背景・目的

海水表層における放射性セシウム137(Cs-137)は原発事故後3ヶ月程度で100Bq/Lを超える値はほとんど検出されなくなったが、**海底土表層は依然として100Bq/kg超の値が広範囲の各所で観測されている。**



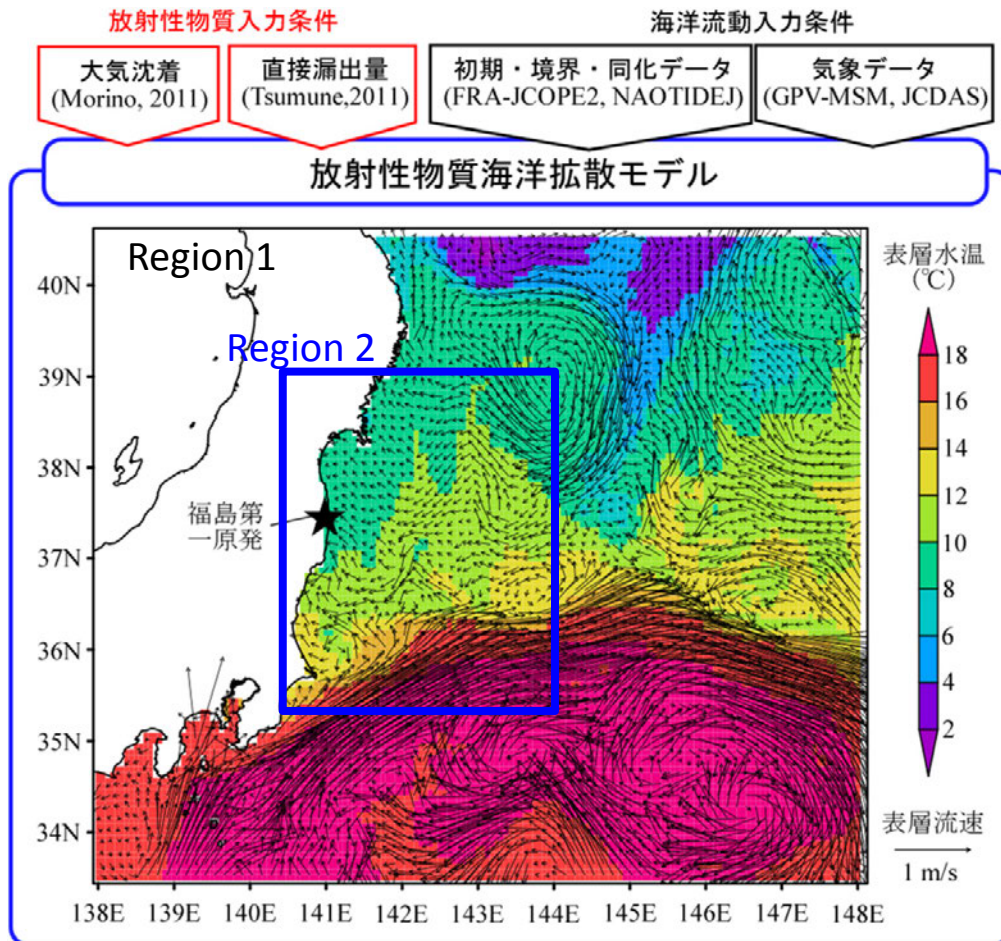
曳航式ガンマ線スペクトロメータによる2012年11月～2013年2月における海底土Cs-137濃度観測値 (Thornton et al., 2013)



東京電力による海水・海底土モニタリング(T-5)

- 海底堆積・巻上を考慮した3次元流動・Cs-137動態予測モデルの構築
- 堆積・巻上と強く関連する海底土表層Cs-137濃度の時空間分布の再現精度を検討
- Cs-137の海底土中の鉛直濃度分布, 堆積・巻上特性に関する考察

Cs-137の海洋拡散モデルの概要



3次元流動モデル

水深 $\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u\phi}{\partial x} + \frac{\partial v\phi}{\partial y} + \frac{\partial w\phi}{\partial z} = S_\phi$

流速 $\frac{\partial \phi u}{\partial t} + \frac{\partial u\phi u}{\partial x} + \frac{\partial v\phi u}{\partial y} + \frac{\partial w\phi u}{\partial z} = -\frac{\phi}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \phi f v + F'_u$

$\frac{\partial \phi v}{\partial t} + \frac{\partial u\phi v}{\partial x} + \frac{\partial v\phi v}{\partial y} + \frac{\partial w\phi v}{\partial z} = -\frac{\phi}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - \phi f u + F'_v$

水温 $\frac{\partial \phi \theta}{\partial t} + \frac{\partial u\phi \theta}{\partial x} + \frac{\partial v\phi \theta}{\partial y} + \frac{\partial w\phi \theta}{\partial z} = S_\theta + F_\theta$

塩分 $\frac{\partial \phi s}{\partial t} + \frac{\partial u\phi s}{\partial x} + \frac{\partial v\phi s}{\partial y} + \frac{\partial w\phi s}{\partial z} = S_s + F_s$

圧力 $\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho(\phi, \theta, s)$ (静水圧近似、UNESCO状態方程式)

コロケート格子・レベル座標系モデル

鉛直混合スキーム: Furuichi (2012)

水平解像度 Region 1 : 約4.5 × 4.5 km

Region 2 : 約1.5 × 1.5 km

格子数 Region 1 : 203 × 228 × 鉛直47層

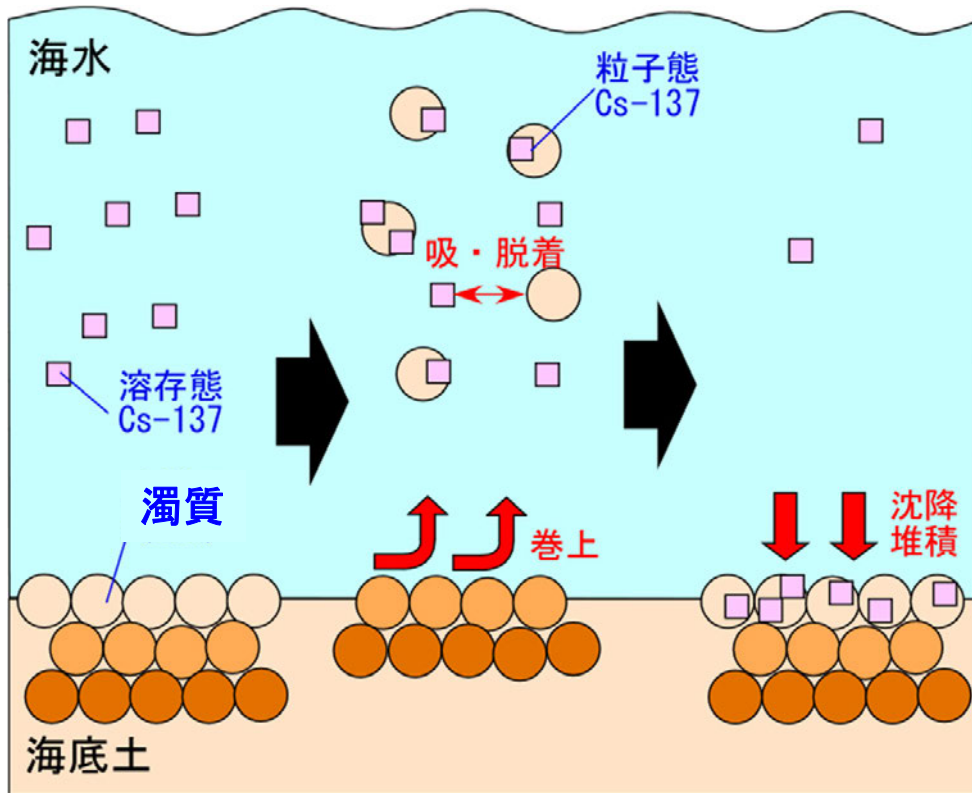
Region 2 : 216 × 286 × 鉛直47層

潮汐条件: 有

対象期間: 2011/3/12 ~ 12/31

→ SX-9/A(ECO)のv_16cpuで約6日間の計算
(Region 1: 2日、Region 2: 4日、後述のCs-137モデル込)

Cs-137の海洋拡散モデルの概要



Cs-137動態モデルの構造

仮定・モデル化手法

- Cs-137を**粒子態**(沈降・堆積・巻上あり)と**溶存態**(沈降・堆積・巻上なし)に分画
- Cs-137を吸着する濁質を**単一の粒径, 比重**および**沈降速度**とする(Kobayashi et al., 2007).

海水Cs-137動態モデル(3次元)

濁質 (m : kg/m³)

$$\frac{Dm}{Dt} = \text{dif}(m) + \frac{\partial w_p m}{\partial z} \quad \text{沈降}$$

移流拡散

粒子態Cs-137 (C_p : Bq/kg-LPM)

$$\frac{DmC_p}{Dt} = \text{dif}(mC_p) + \frac{\partial w_p mC_p}{\partial z} + Ads - Des - \lambda mC_p$$

吸着 脱着 崩壊

溶存態Cs-137 (C_d : Bq/m³)

$$\frac{DC_d}{Dt} = \text{dif}(C_d) - Ads + Des - \lambda C_d$$

吸・脱着速度 (Bq/m³/s)

$$Ads = k_{1m} mC_d \quad Des = k_{-1} mC_p$$

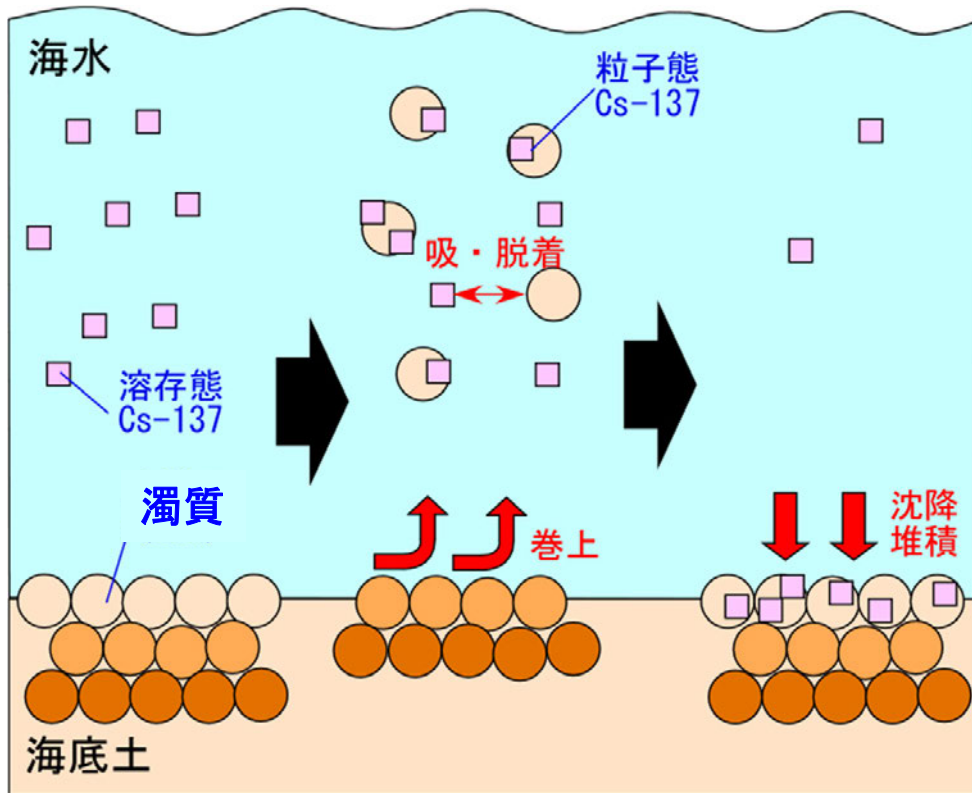
モデル定数名	変数	値	単位
濁質粒子比重	G_s	2.76	kg kg ⁻¹
沈降速度	w_p	5.0	m day ⁻¹
崩壊速度	λ	7.32×10^{-10}	s ⁻¹
吸着平衡定数	k_{1m}	2.32×10^{-5}	m ³ kg ⁻¹ s ⁻¹
吸着平衡定数	k_{-1}	1.16×10^{-5}	s ⁻¹

参考: Kobayashi et al. (2007)など

堆積・巻上モデル

海底土Cs-137動態モデル(鉛直1次元)

Cs-137の海洋拡散モデルの概要



Cs-137動態モデルの構造

仮定・モデル化手法

- 海底土をすべて単一の間隙率0.65である濁質とし、十分存在するものとする(単純化).
- 海底土表面の位置を固定化した鉛直1次元モデル(31層)を適用 ← 堆積・巻上による海底土表面からの距離の変化に対応させて、Cs-137の鉛直分布を全体的に平行移動.

海水Cs-137動態モデル(3次元)

堆積・巻上モデル

濁質堆積・巻上
フラックス(kg/m²/s)

$$sed = w_p m_{btm}$$

沈降 海底直上水
速度 のLPM濃度

$$res = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right)$$

摩擦 限界摩
応力 擦応力

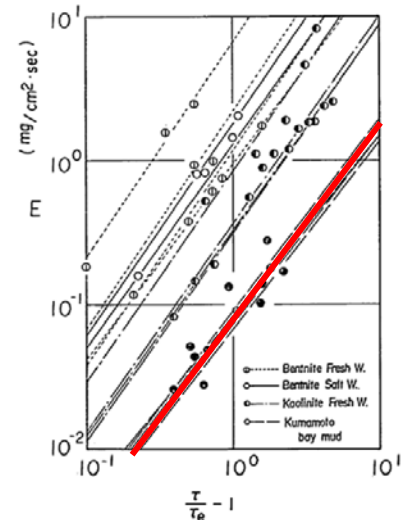


図-24 無次元化した有効底面せん断応力と巻き上がり速度の関係

M, τ_{cr} : 村上ら(1989)の熊本港泥を適用(上図)

海底土Cs-137動態モデル(鉛直1次元)

粒子態Cs-137 $(C_p: \text{Bq/kg-LPM})$

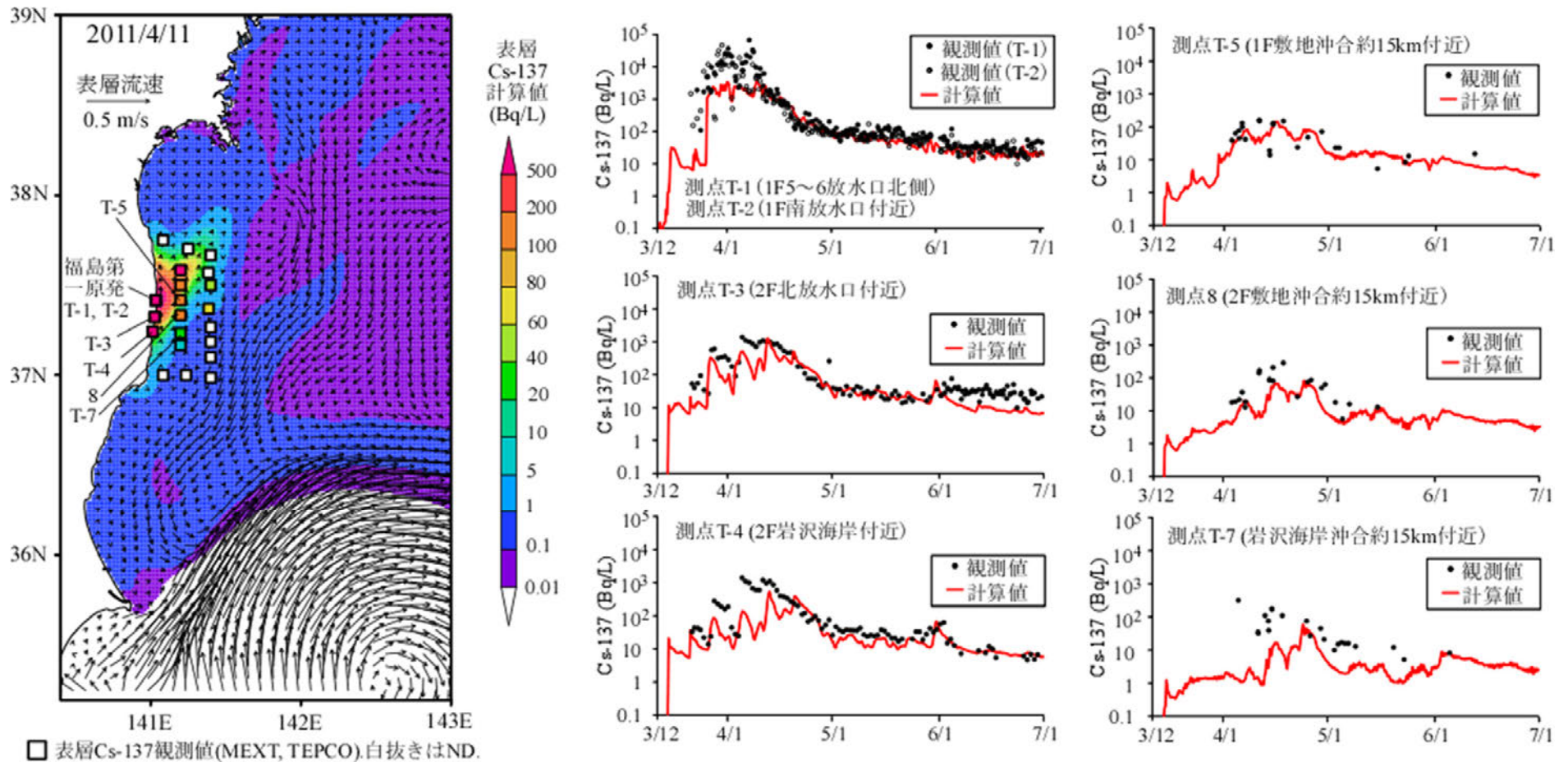
$$\frac{\partial m_s C_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(w_m m_s C_p + D_z \frac{\partial m_s C_p}{\partial z} \right) + Ads - Des - \lambda m C_p$$

LPM堆積速度(m/s)

溶存態Cs-137 $(C_d: \text{Bq/m}^3)$

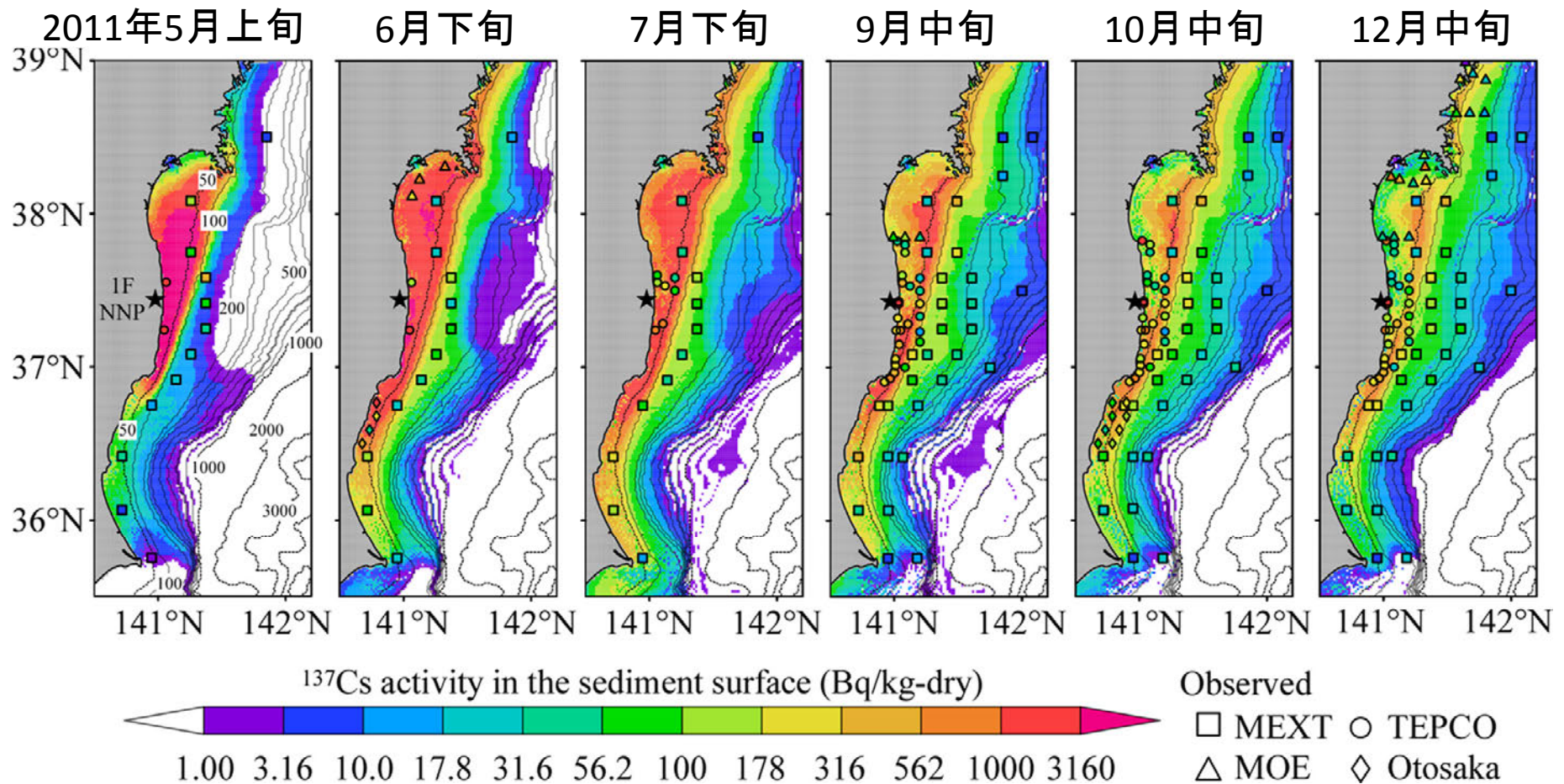
$$\frac{\partial C_d}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(w_m C_d + D_z \frac{\partial C_d}{\partial z} \right) - Ads + Des - \lambda C_d$$

海水表層Cs-137濃度の再現精度(Region 2)



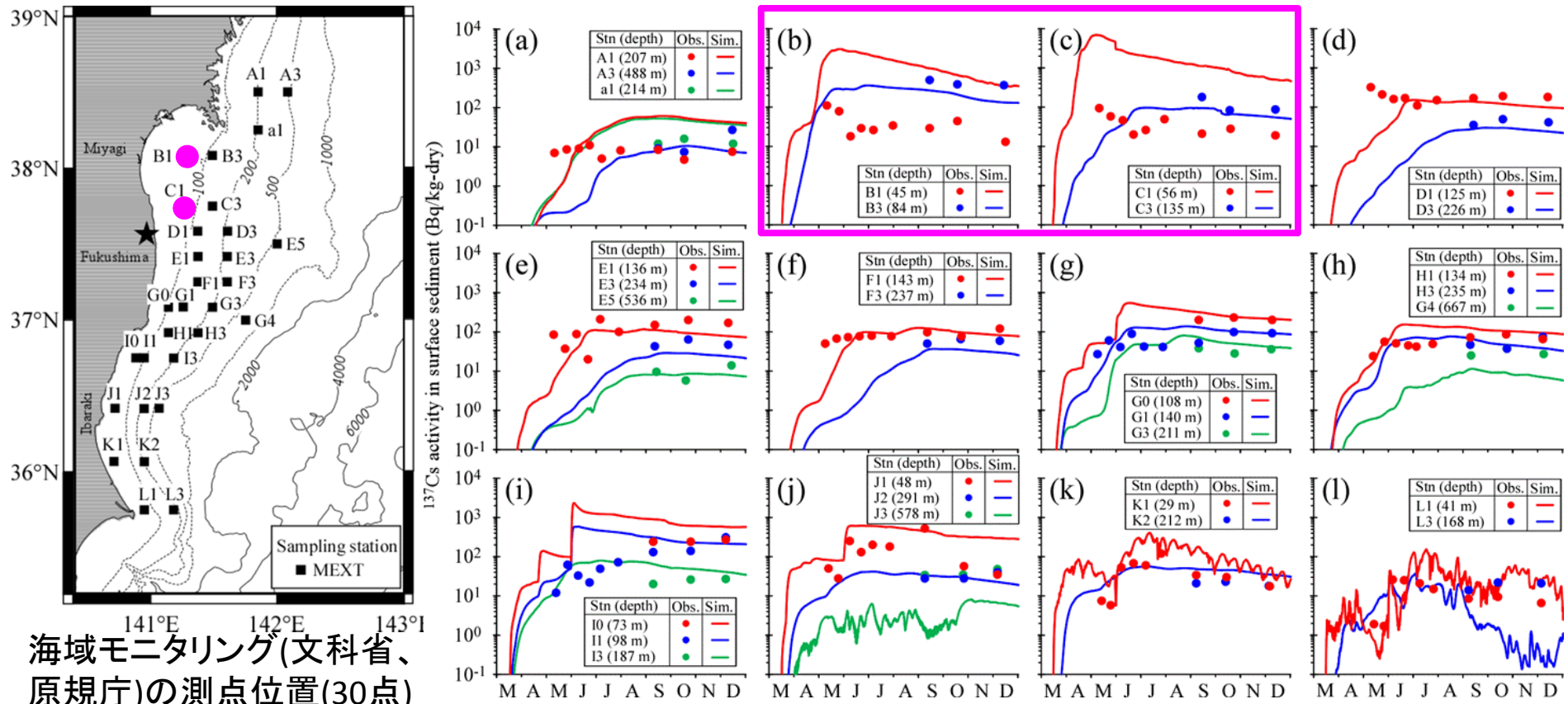
- 福島沖における海水表層Cs-137濃度の再現精度は概ね良好
- 福島第一原発より南側の海域ではやや過小評価の傾向

海底土表層Cs-137濃度の再現精度(Region 2)



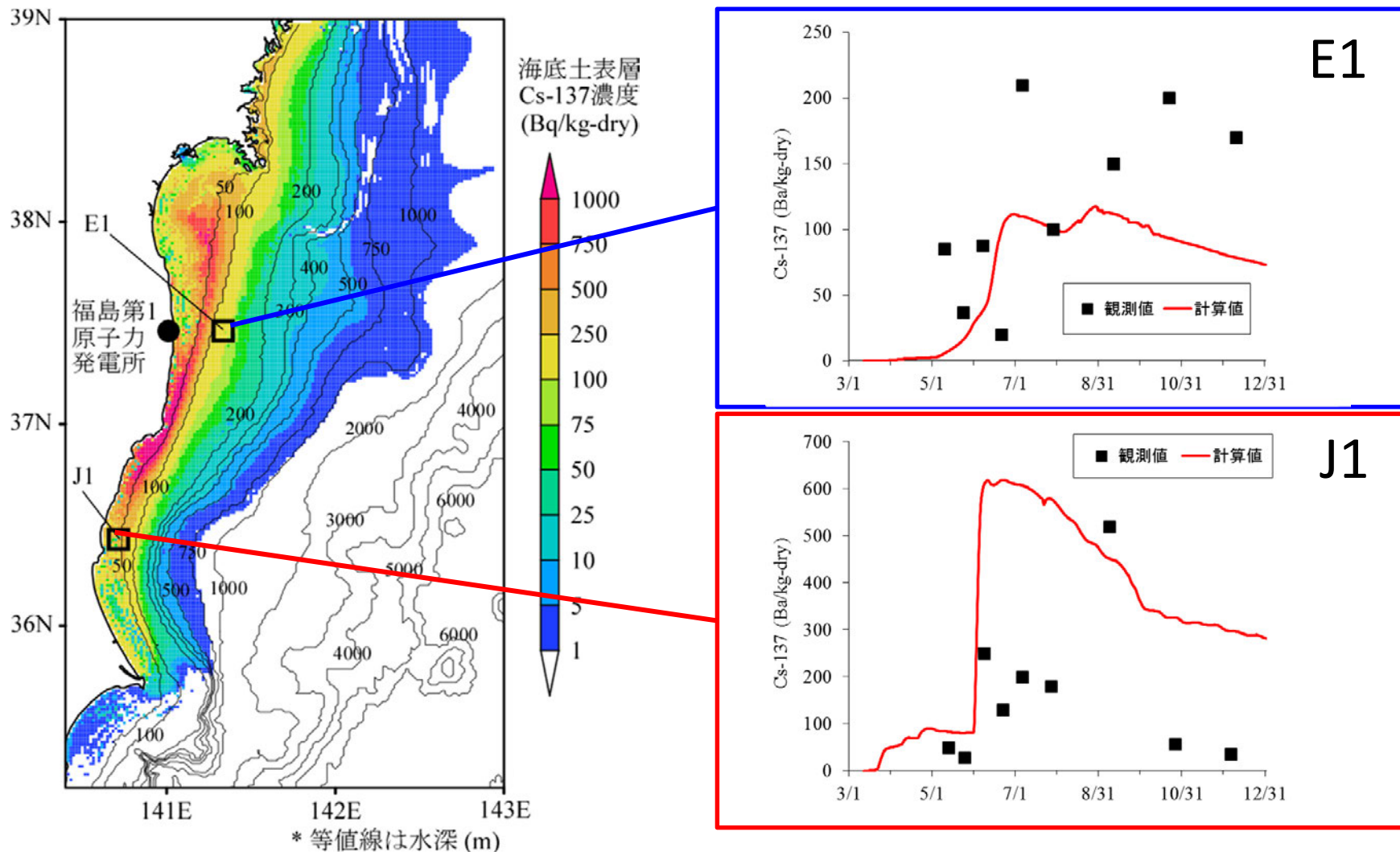
- 観測に見られる福島県沖合の帯状のホットスポットを再現！
- 海底土表層Cs-137濃度は4月中旬～6月初旬にかけて急増.
- 福島第一原発北東沖の再現精度が特に悪い.

海底土表層Cs-137濃度の再現精度(Region 2)



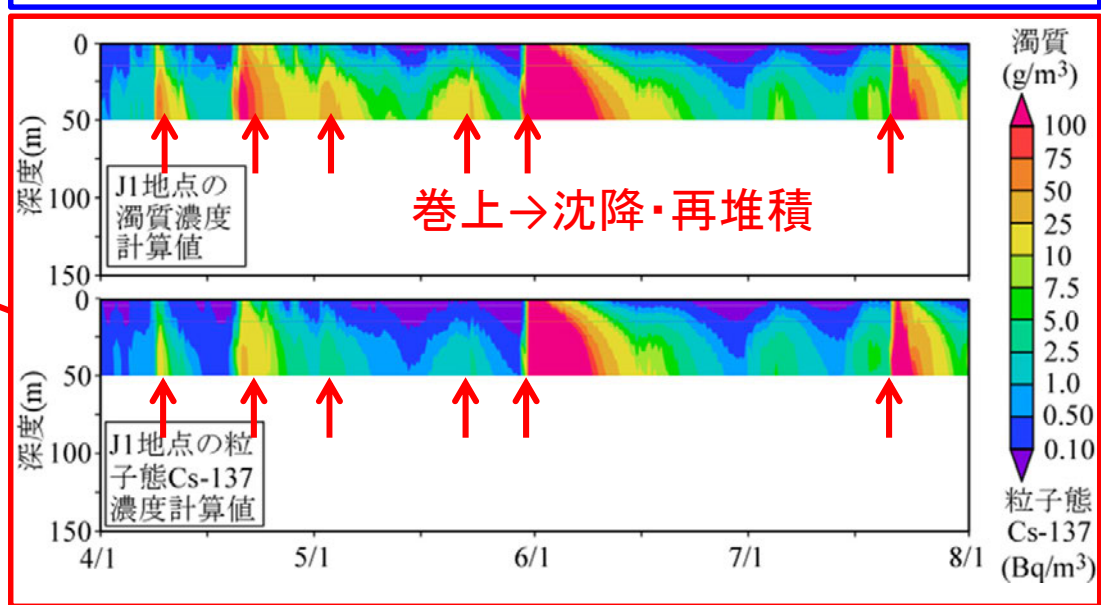
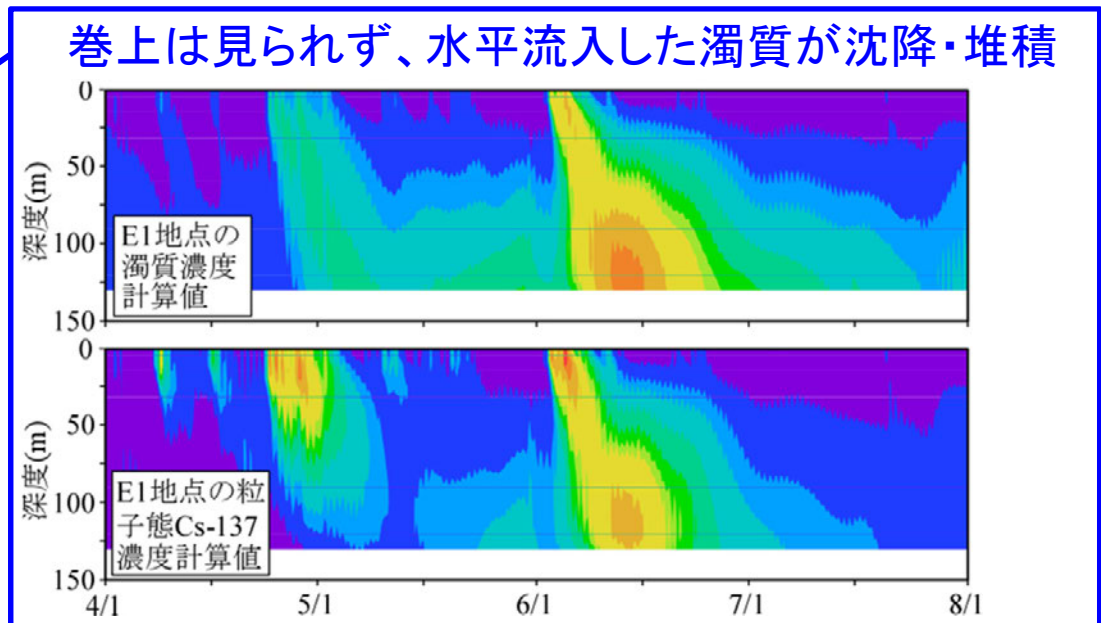
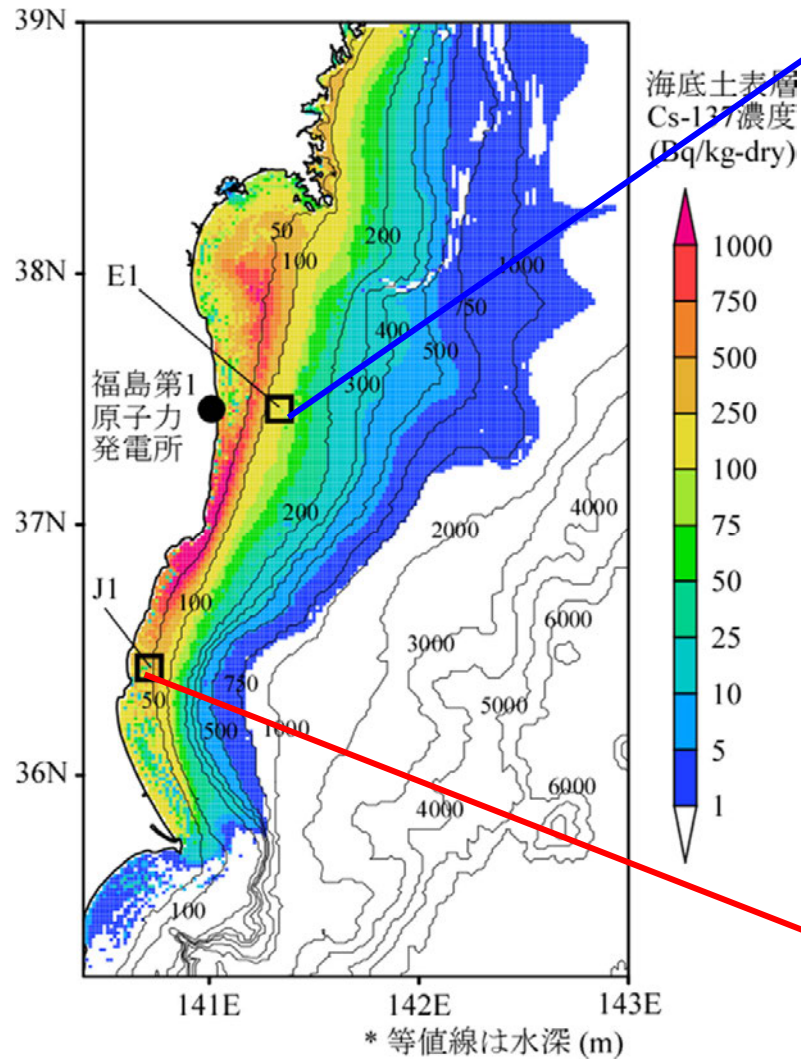
- モデルは観測値(55地点N=296)の84%を同一オーダーで再現
- 沿岸域の多くの測点で4月中旬～6月初旬に急増、7月以降は横ばい・漸減傾向 ← 再現精度は初期沈降・堆積に左右される！
- 漸減傾向は浅海域(概ね水深40m以浅)の測点に多く見られる ← 大潮時に海底攪乱が生じるため。

考察: Cs-137の初期堆積

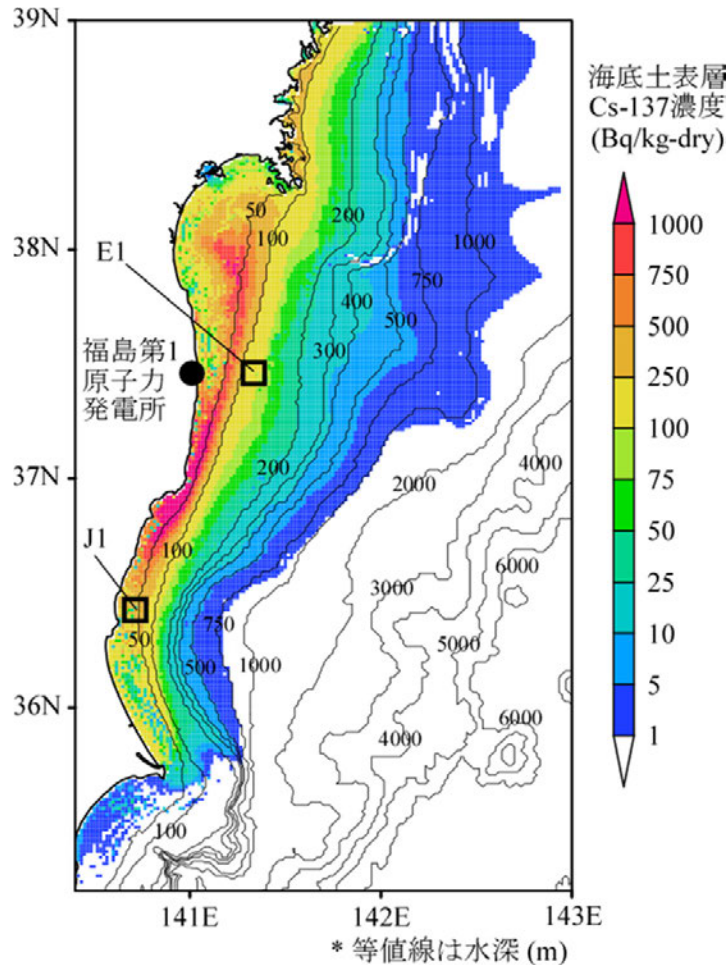


- 沖合の海底土Cs-137の多くは5月末の温帯低気圧で沈降・堆積
- 逆に、浅い沿岸域では堆積していたCs-137の多くが再懸濁

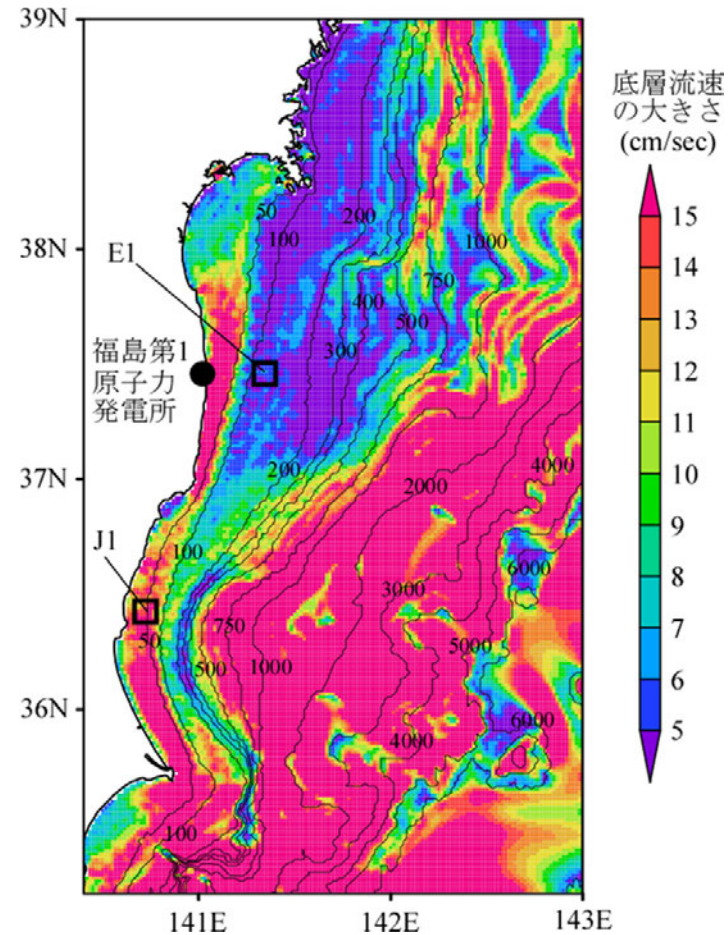
考察:ホットスポットの形成要因



考察:ホットスポットの形成要因



2011年12月の海底土表層Cs-137濃度



温帯低気圧通過時の底層流速の大きさ(2011年5月29~31日平均値)

- 強い底層流が発生しにくい海域に堆積したCs-137は動きにくいいため、現在でもホットスポットになっていると考えられる

結論と今後の課題

- 吸着および海底堆積・巻上を考慮した3次元流動・Cs-137動態予測モデルを構築し、福島第一原発事故に適用した。
- 本モデルの海水表層のCs-137濃度の再現精度は概ね良好であった。
- 海底土表層Cs-137濃度の計算値は、全体的には観測値の時空間分布の傾向を概ね表したものの、福島第一原発の北東沖合約40km圏内では観測値と2オーダー異なるほど大きな差が見られた。
- 本モデルの福島沖における海底土表層のCs-137濃度の再現性は、4～6月、とくに5月末の温帯低気圧通過による強風イベント時の巻上・堆積の解析精度に大きく左右された。
- 茨城県北部～福島県南部は粒子状物質が集積しやすい海域であり、海底土の下層のCs-137濃度が表層より高くなること、高濃度のCs-137がより下層に潜っている可能性があることが示唆された。
- 福島沖の帯状のホットスポットは、水平輸送されたCs-137が強い底層流が発生しにくい海域に沈降・堆積して形成されたと考えられた。
- 海底土Cs-137の再現精度をより高めるためには、河川からの流入や底質状況による濁質の供給源の適切な設定などを検討する必要がある。