

## 海底面における砂漣を介した放射性核種の浸入・滲出過程について

防衛大学校 学生会員 ○ポーンチャイ  
防衛大学校 正会員 八木 宏

岸側 沖側

### 1. 背景と目的

東京電力福島第一原発事故から5年以上が過ぎ、周辺海域の海水中の放射性核種の濃度は事故前のレベルに近づきつつある。一方、海底堆積物の放射性核種濃度は、比較的高いレベルを維持しており、水産生物への影響が懸念されることから残された課題の一つとなっている。福島周辺海域の海底堆積物中の放射性核種濃度については、Ambeら<sup>1)</sup>などによって、空間分布や経時変化の特徴が明らかになりつつあるが、そもそも海底内部に放射性核種がどのように流入し濃度分布が形成されたか、また時間とともにそれがどのように変化するかについては不明な点が多い。そこで、本研究では、砂漣が発達した海底面を対象に放射性核種の浸入・滲出過程を検討した。



図-1 投入したトレーサーの底質内部への浸入状況

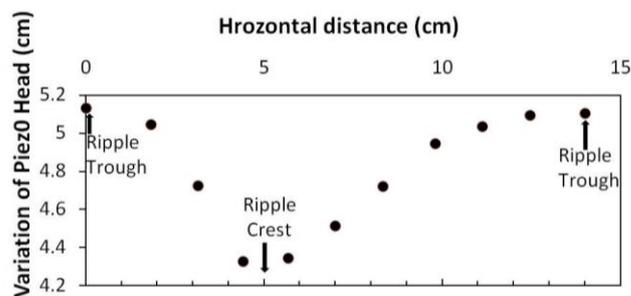


図-2 砂漣上のピエゾ水頭分布

砂漣谷部に向けて圧力が上昇している。砂漣表面上にこのようなピエゾ水頭分布が形成されれば、砂漣斜面部から頂部に向かう浸透流が底質内部に形成されることが推定され、これが直上水と底質内部の水・物質（放射性核種を含む）の交換を引き起こしていると考えられる。

### 2. 室内実験

#### (1) 方法

長さ 20m、幅 0.45m の一次元造波水路に砂（中央粒径 0.3mm）を敷き詰め、波を作用させることで水底に砂漣を発達させた上で、①砂漣表面に染料を投入し染料の底質内部への浸入状況をビデオ撮影、②砂漣表面上のピエゾ水頭の計測（先端部管径 2mm のマノメータと差圧計を使用）を実施した。実験で作用させた波は、周期 1.88s、波高 0.14m の規則波で、計測対象区間の水深は 0.2m であった。

#### (2) 結果と考察

図-1 は、底質内部に浸入した染料の分布を示したものである。当初砂漣表面に薄く分布した染料は、砂漣表面斜面部で底質内部へ浸入（特に、岸側砂面側で深く浸入）、砂漣頂部近傍で水中へ滲出する様子が観察された。このことは海底面に砂漣が発達する場合、水底直上水と底質内部で比較的活発な水や物質の交換が行われることを示唆している。図-2 は、砂漣表面上のピエゾ水頭の分布を示したものである。砂漣の頂部付近でピエゾ水頭が最低値を示し、

### 3. 数値実験

#### (1) 方法

次に、砂漣が発達した海底面を介した放射性核種の浸入、滲出過程を表現する数値モデルを構築した。底質内部の流れは 2次元の飽和浸透流と仮定し、ダルシー則（式(1)）とピエゾ水頭に関するラプラスの式(式(2))で浸透流速を求めた。また、間隙水及び底質の放射性核種濃度の計算には、放射性核種の吸脱着過程を考慮した移流拡散方程式（Kobayashiら<sup>2)</sup>、但し、底質は吸脱着過程のみ考慮）を採用した（式(3)(4)）。式中の変数やパラメータの定義、数値は表-1の通りである。

$$u = K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = K \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1)$$

表-1

変数	定義	単位	数値
$u$	水平流速	m/s	
$v$	鉛直流速	m/s	
$c_w$	間隙水の $^{137}\text{C}$ 濃度	$\text{Bq}/\text{m}^3$	
$c_p$	堆積物に吸着した $^{137}\text{C}$ 濃度	$\text{Bq}/\text{kg}$	
$K$	透水係数	m/s	$1.25 \times 10^{-3}$
$D$	間隙水の拡散係数	$\text{m}^2/\text{s}$	$1.0 \times 10^{-9}$
$k_{1m}$	脱着係数	1/s	$2.44 \times 10^{-2}$
$k_{-1}$	吸着係数	1/s	$1.16 \times 10^{-5}$
$k_d$	分配係数	$\text{m}^3/\text{kg}$	2.0
$B_d$	堆積物のバルク密度 $= \rho_p(1 - \gamma)$	$\text{kg}/\text{m}^3$	1050
$\rho_p$	堆積物の密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	2600
$\gamma$	間隙率		0.62

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + u \frac{\partial c_w}{\partial x} + v \frac{\partial c_w}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c_w}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 c_w}{\partial y^2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial c_p}{\partial t} = \frac{\gamma}{B_d} k_{1m} c_w - k_{1m} c_w + k_{-1} \frac{B_d}{\gamma} c_p \tag{4}$$

本研究では、室内実験で得られたピエゾ水頭(図-2)を砂漣表面の境界条件として与え、式(2)で浸透流速を求めた上で、それを式(3)に代入することで底質内部の染料や放射性核種濃度を算出した。

(2) 結果

はじめに、式(3)を染料濃度の移流拡散方程式と捉え(吸脱着過程なし、但し、砂漣の移動速度は実験と同等に与えた)計算を行ったところ、透水係数0.00125m/sの場合に室内実験の染料濃度パターンと比較的良好な一致が見られた。

そこで、本実験で対象とした波浪条件及び砂漣に対して、砂漣頂部から0.06mの深さまで300Bg/kgの放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ , 単位乾泥あたり)が吸着している状態を想定し、底質に吸着した $^{137}\text{Cs}$ の溶出過程を数値実験によって調べた(但し、砂漣の移動速度は考慮せず)。計算結果から、砂漣斜面部から内部へ向かう浸透流により、砂漣斜面部分の底質に吸着した $^{137}\text{Cs}$ 濃度が低下し、間隙水に溶出した $^{137}\text{Cs}$ が砂漣頂部で水中に流出する様子が再現された(図-2)。

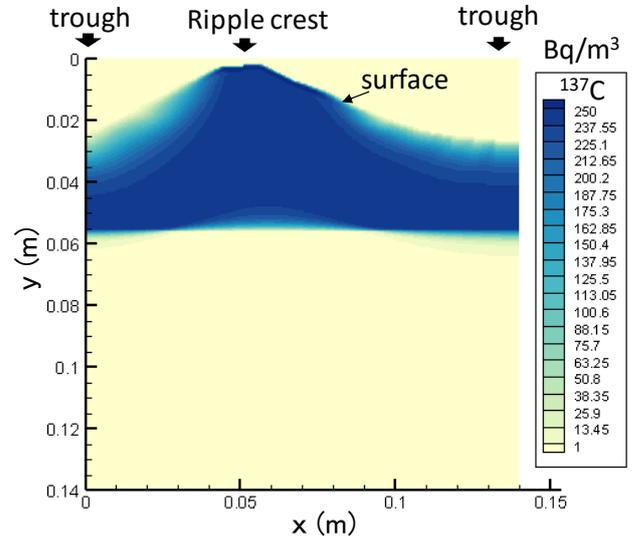


図-3 底質に吸着した放射性セシウム $^{137}\text{Cs}$ の溶出過程の計算結果(溶出開始から1時間後)

4. 結論

砂漣の発達した海底面を対象に放射性核種を含む水・物質の浸入・滲出プロセスを室内実験と数値実験で検討し以下の知見を得た。

- (1) 波浪により海底面に形成された砂漣では、砂漣斜面部から直上水が浸入、砂漣頂部から底質内部の間隙水が滲出することで水・物質が直上水と交換されることが、それが砂漣表面に形成されるピエゾ水頭の空間分布に起因することを室内実験結果から示した。
- (2) 放射性核種を含む水・物質の底質内部への浸入、直上水への滲出を表現可能な数値モデルを作成し、底質に吸着した放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ )の溶出プロセスを表現できることを確認した。

参考文献

- 1) Ambe, D., Kaeriyama, H., Shigenobu, Y., Fujimoto, K., Ono, T., Sawada, H., Saito, H., Miki, S., Setou, T., Morita, T., and Watanabe, T.: Five-minute resolved spatial distribution of ra-diocesium in sea sediment derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, J. Environ. Radioactiv., 138, 264–275, 2014.
- 2) Kobayashi, T., Otosaka, S., Togawa, O., and Hayashi, K.: Development of a non-conservative radionuclides dispersion model in the ocean and its application to surface cesium-137 dis-persion in the Irish Sea, J. Nucl. Sci. Technol., 44, 238–247, 2007.