

東京湾における放射性物質拡散解析の高度化

日大生産工 ○中村 倫明

1 まえがき

2011 年 3 月に発生した東日本大震災に伴い、東京電力(株)福島第一原子力発電所(以下、福島第一原発)から放出される放射性物質が環境へ与える影響について、今なお懸念が続いている。大気へ排出された放射性物質は 200km 以上離れた東京湾においてもフォールアウトや河川流入により、現在でも海底土表層で 50Bq/kg 程度が検出されている¹⁾。

本研究では、湾に流入した物質が懸濁粒子に吸着し沈降する過程、海底に蓄積した放射性物質が溶解(物理的溶解、生物攪乱)・沈着を繰り返しながら、長期的には海底土に堆積するという特徴を考慮することにより、東京湾全域に対する中・長期的なアセスメントを実施するためのモデルを構築することを目的とする。

2 東京湾流動解析

東京湾における流動の駆動力には密度流、潮汐流、吹送流、河川流入などが考えられるが、全ての流れを把握し考慮することは困難である。赤潮や青潮等の時間スケールの短い非定常現象を対象とした解析を行うための流動モデルでは風による水塊の駆動は寄与が大きい、長期的な物質拡散には風向・風速、河川流入は非定常性、不規則性から寄与は小さく、起因するのは恒流(残差流)によるものが大きいとされる。そこで、東京湾広域調査結果(2002)から東京湾の流速変動のパワースペクトルを算出し、ピークとなり水塊を動かす駆動力であると考えられる M2 分潮により恒流を算出した。

(1) 基礎方程式

流動予測には準 3 次元モデルを用いる。使用した運動方程式、状態方程式、連続式、水温・塩分の拡散方程式及び密度式は以下の式

(1)~(8)に示すとおりである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$p = g \int_{zb}^{zs} \rho dz \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\rho = f(T, S, p) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

ここで、 t : 時間(s), x, y, z : 座標軸(x, y : 水平, z : 鉛直), u, v, w : 各座標軸方向の流速成分(m/s), A_x, A_y, A_z : 各座標軸方向の渦動粘性係数(m²/s), f : コリオリのパラメータ, p : 圧力, ρ : 密度(kg/m³), g : 重力加速度(m/s²), zs : 海面位置(m), zb : 海底位置(m), T : 水温(°C), S : 塩分濃度(psu), K_x, K_y, K_z : 各座標軸方向の渦動拡散係数(m²/s), ζ : 水位(m), $D = \zeta + h$: 全水深(m), h : 水深(m)である。水温は東京、神奈川、千葉の公共用水域データを使用した。また、東京湾湾口では最もこの境界に近い神奈川県公共用水域観測点 128 (剣先沖) の水温・塩分を設定した。また、M₂分潮を再現するために湾口において以下の水位(Z)を設定した。

$$\zeta = 0.373 \sin(2\pi / \text{Tide} - \pi / 2) \quad (9)$$

Constructing a numerical model of cesium concentration
analysis sediment consider mass transport in the TOKYO BAY

Tomoaki NAKAMURA

3 放射性物質の濃度解析

図-1 に示す放射性物質のモデル概念のように、河川などから海域に流入した放射性物質は、溶存態と浮遊物質など粒子への吸着を数日程度の中で繰り返しながら小粒子(図-1のCs), 大粒子(図-1のCl)に吸着した放射性物質は物理現象として海水下層(図-1のW層)へ沈降する。沈降した放射性物質は、粒子として海底表層に堆積し、平均して年間数cm程度の速度で海底下層へ埋没していく。この間、海底表層(図-1のP層)からは海流による海底巻上げ(図-1のK2), B層からは生物攪乱(図-1のλb1,2)によって海水へ再度溶出する。海底下層1m程度まで到達すると、海水への溶出はなく下層へと埋没するのみとなる(図-1)。本研究ではこうした過程をモデル化し既往知見²⁾を参考に、係数値を設定した。

4 放射性物質の解析結果

図-2に福島第一原発事故から1年目の海底土表層計算結果と放射性物質実測地点を示す。

これらの図から、湾奥河口でのセシウムの濃度は100Bq/kg オーダーで、流入後直ぐに海水中の沈降により海底土へ堆積している。河口から湾中央にかけては5~10Bq/kg オーダーとなり、湾口に向かうに連れて濃度は低下し横須賀沖では1Bq/kg程度で、河口から湾口では1/100程度の希釈効果がみられる。分布形状では、湾口から湾奥の千葉県側に向かう様子が見られ、東京湾の水深構造、下層の流れが大きな時間スケールとして湾口から湾奥へ向かうことが要因と考えられる。また、フォールアウトは東京湾上一様として負荷したが、分布形状は類似していることから、中長期的な分布形状には継続的に負荷されていると考えられる河川からの負荷の影響が寄与していると推察される。図-3に実測地点における海底土表層のセシウム濃度と1年後の計算結果との比較を示す。実測は場所ごとに採取日が異なっていること、沿岸域に近いスポットで採取されていることから、時間・空間として限定的な流れや負荷量による影響を受けていると推察され、計算値との直接的な比較は難しい。これを踏まえて大局的に見ると、東京湾全体を通じての分布形状、濃度のオーダーは概ね類似しており、海底土を含む移行過程のモデル化に一定の精度があると考えられる。

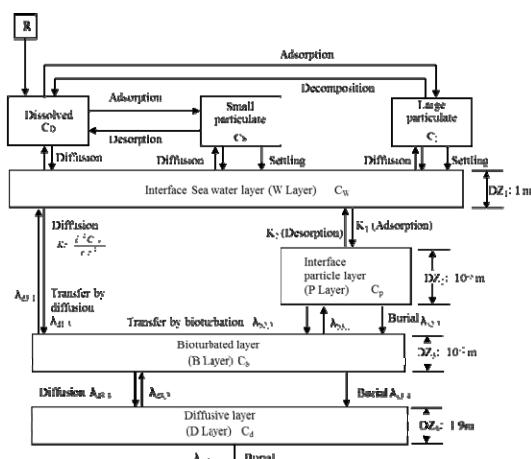


図-1 モデル概念

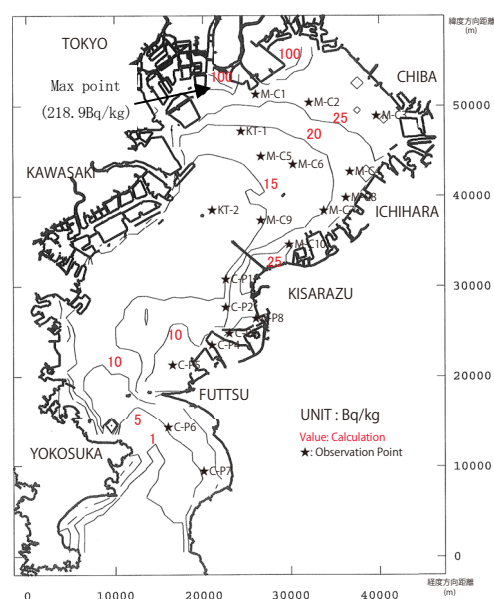


図-2 海底表層における放射性物質濃度分布

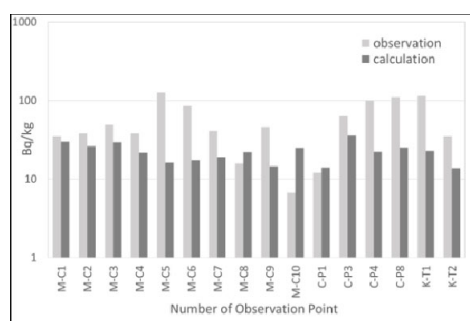


図-3 実測値と計算値の比較

「参考文献」

- 1) 子力規制庁：東京電力株式会社福島第一原子力発電所周辺の海域モニタリング結果(海水), 2016.
- 2) 中村 倫明ほか:東京湾における海底土での放射性物質の移行過程を考慮した濃度解析モデルの構築, 土木学会論文集B3, Vol.73, No.2 p. I_911- I_916, 2017.