

京都大学 工学部 正員 井上頼輝
 正員 青山 勲
 学生員 山本 正史

1. はじめに

本文では、深海に投棄処分された放射性廃棄物のセメント固化体からの放射性核種の浸出に由来する海洋の表面混合層における放射能汚染濃度の予測を行なうにあたり、予測式に含まれるパラメータが濃度変動に与える影響度を評価しようとするものである。そのために、まず、表面混合層濃度の予測モデル式とて、感度解析の手法によって各パラメータの濃度変動に対する寄与を評価する。

2. 研究方法

(1) 放射性廃棄物の発生量. ここでは原子力発電所から発生する放射性固体廃棄物のみを考え、その発生量は発電量に比例するものと考えた。原子力による発電量は「原子力利用長期計画」に従い、昭和65年には、約1億kWが原子力発電に依存し、その増加は、昭和45年をゼロとし、以後直線的に増加するものと仮定した。放射性核種としては、廃棄物中に多く存在し、比較的長い半減期を持つ ^{137}Cs と ^{60}Co を対象とした。それらの核種の発生原単位は次のようである。

$$^{137}\text{Cs} - 10 \text{ Ci} / 100 \text{ MWe} \cdot \text{年}, \quad ^{60}\text{Co} - 200 \text{ Ci} / 100 \text{ MWe} \cdot \text{年}$$

(2) 海洋表面混合層における放射能濃度の予測

太平洋を $15000 \text{ km} \times 8000 \text{ km}$ の長方形とみなし、廃棄物の投棄地点は、沖合へ 200 km 、北端から南の方へ 5000 km 、深さは 4 km の地点とする。また、投棄するセメント固化体の形状は、体積約 200 m^3 の円柱状とし、放射性核種の浸出は固化体側面から起こるものとする。

(i) ^{137}Cs の浸出⁽¹⁾

^{137}Cs はコンクリート固化体内部でもイオン状の形で存在すると考えられ、その浸出は固化体内部での拡散に支配されると考えることができ、コンクリート固化体内の放射能濃度 C_i および、固化体表面からの浸出フラックス N は次式によって表わすことができる。

$$\frac{C_i}{C_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0 \left(\frac{r}{R} \beta_n \right)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{D_c \beta_n^2}{R^2} + \lambda \right) t \right\} \quad (1)$$

$$N = -D_c \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 C_0 D_c}{R} \exp \left\{ - \left(\frac{D_c \beta_n^2}{R^2} + \lambda \right) t \right\} \quad (2)$$

ここで、 C_0 は固化体内の初期濃度、 R は固化体の半径、 D_c は固化体内の拡散係数、 λ は崩壊定数、 J_0 ・ J_1 はそれぞれ第1種0次・1次のBessel関数、 β_n は $J_0(\beta) = 0$ の根である。

時刻 t における投棄速度（発生速度） W を、直線的増加の仮定に従って $W = at$ とすると、 $t=0$ から $t=t_i$ まで連続的に投棄が行なわれたとき、 $t=t_i$ における総浸出速度 $A(t_i)$ は次式となる。

$$A(t_i) = 4\pi a D_c h \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{R^2}{D_c \beta_n^2 + R^2 \lambda} \left(t_i - \frac{R^2}{D_c \beta_n^2 + R^2 \lambda} \right) + \frac{R^4}{(D_c \beta_n^2 + R^2 \lambda)^2} \exp \left\{ - \left(\frac{D_c \beta_n^2}{R^2} + \lambda \right) t_i \right\} \right] \quad (3)$$

(ii) ^{60}Co の浸出⁽¹⁾

^{60}Co はセメント水和物結晶と強固に結合し、その浸出は固化体内の拡散よりも、むしろコンクリートそのものの溶解によると考えられ、その浸出フラックスは次式で与えられる。

$$N = \alpha C \quad (4)$$

ここで、 α は溶出速度 (cm/day)である。

^{137}Cs の場合と同様に、時刻 t における投棄速度を $b \cdot t$ とし、 $t=0$ から連続的に投棄処分が行なわれてきたとすると、 $t=t_1$ における総溶出速度 $A(t_1)$ は次式のようになる。

$$A(t_1) = \frac{2\alpha b}{\lambda} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{h} \right) \left(t_1 + \frac{e^{-\lambda t_1}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (5)$$

(iii) 海底から表面への拡散

放射崩壊項を加えた拡散の基礎式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda C \quad (6)$$

海洋を表面混合層と下部安定層の2層に分けて考え、安定層では初流項を無視し、拡散係数は3軸方向とも一定 ($=D$) とし、さらに底面での反射を考えると、 $t=0$ における瞬間点源に対する(6)式の解は次のようになる。

$$C(x, y, z, t) = \frac{M_0}{4(\pi D t)^{3/2}} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4 D t} - \lambda t \right) \quad (7)$$

ここで、 M_0 は瞬間放出量である。放出(浸出)が前述のごとく連続的であるならば、他の条件は同じとして、(6)式の解は次のようになる。

$$C(x, y, z, t) = \int_0^t \left[\frac{A(t_1)}{4\{\pi D(t-t_1)\}^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4 D(t-t_1)} - \lambda(t-t_1) \right\} \right] dt_1 \quad (8)$$

拡散によって表面混合層内に達した核種は、ここでは比較的短時間のうちに完全混合されると考えると、混合層内での平均濃度 C_m は、混合層内へ初動してきた核種の総量と混合層の体積で除することによって求まる。

混合層境界面での核種の移行フラックス F は、

$$F(x, y, t) = -D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=H} \quad (H: \text{安定層の厚さ}) \quad (9)$$

となるから、 $t=0$ から $t=t_0$ までの単位面積あたりの移行量 T は、

$$T(x, y, t_0) = \int_0^{t_0} F(x, y, t) \exp \{ -\lambda(t_0 - t) \} dt \quad (10)$$

となる。太平洋を格子状に分画し、点 (x, y) を中心とする一区画の面積を $S(x, y)$ 、混合層の容積を V とすると、混合層内平均濃度 C_m は次式で表わせる。

$$C_m(t_0) = \sum_{x, y} T(x, y, t_0) \cdot S(x, y) / V \quad (11)$$

(3) パラメータの感度解析

式に含まれるパラメータの微小変動によって、濃度を表わす解軌道(11)式がどの程度変動するか、その程度を評価するのが感度解析であり、次式で定義される感度を用いる。

$$\eta_{k_i}^{x_i} = \frac{\partial (\ln x_i)}{\partial (\ln k_i)} = \frac{\partial x_i}{\partial k_i} \cdot \frac{k_i}{x_i} \quad (12)$$

ここで、 $\eta_{k_i}^{x_i}$ は x_i に対する k_i の感度、 k_i はパラメータ、 x_i は解軌道、 $\partial x_i / \partial k_i$ は感度係数である。

今回は、(11)式に含まれるパラメータのうち、固化体の半径 R 、固化体中の拡散係数 D_c 、海洋の拡散係数 D 、固化体の高さ h などについて感度を計算する。試算結果については講演時に述べる。

参考文献 (1) 寺島・青山・岩井・井上「セメント固化体中 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{60}Co の溶出機構について」土木学会論文報告集 第201号、1972年5月