

放射性廃棄物埋設処分に係る移流分散方程式解析解の導出と解析

樺沢 さつき^{*1} 若杉 圭一郎^{*2} 大江 俊昭^{*3}

Analysis and Derivation of Advection Dispersion Equation for Radioactive Waste Disposal

by

Satsuki KABASAWA¹, Keiichiro WAKASUGI^{*2} and Toshiaki OHE^{*3}

(Received on Sep. 27, 2019 and accepted on Nov. 7, 2017)

Abstract

Numerous evaluations have examined the public impacts resulting from the leakage of radionuclides from disposal facilities. In this study, an analytical solution of the advection dispersion equation was derived. Then, in order to simplify the analytical solution for practical use, approximate solutions were derived and their applicable ranges were examined. In addition, we evaluated the influence of dispersion coefficient based on sensitivity analysis.

Keywords: Radioactive waste, Advection dispersion equation, Burial disposal, C-14, Radioactivity concentration

1. 序言

低レベル放射性廃棄物のうち放射能レベルの比較的低い廃棄物は、深度数 m 程度の浅地中に人工構築物を設け、埋設処分される。この浅地中処分における安全評価では、さまざまなシナリオに基づく公衆への被ばく線量が評価されている。このうち放射性核種が処分施設に浸入してきた地下水によって施設外へ漏えいし、地層中を移流・分散により移行するとともに、この汚染された地下水を公衆が利用することを想定する地下水利用シナリオの安全評価では、これまで分散の影響を無視した移流方程式に基づく解析解が導出されている¹⁾。

一方、浅地中処分の安全評価に関する日本原子力学会標準委員会²⁾でも示されているように、地層中の核種の移行は移流のみならず分散の影響も受けるため、これを考慮することにより、現実に即した核種移行評価を行うことが可能となる。また、既存の評価モデルが移流プロセスのみを考慮していることから、このモデルの保守性の程度を定量的に把握する意味でも、分散の効果を把握することは重要である。

以上のことから、本検討では、移流分散方程式の解析解を導出し、分散効果に注目して汚染地下水中の放射能濃度を評価する。さらに、分散の影響を定量的に把握するための感度解析を行う。なお、得られた解析解の利便性を向上させるために近似式の導出についても検討する。

2. 方法

地下水移行シナリオにおける被ばく線量の評価では、埋設施設から地下水中を経由して河川等の地表水系へ流出する核種濃度を評価する必要がある。核種濃度に、外部被ばくであれば被ばく期間や遮蔽、内部被ばくであれば摂取量や希釈などを考慮して導出した線量換算係数を乗じることで被ばく線量が評価できる。本研究では、埋設施設からの核種の漏えいを想定し、地下水流速による核種の移行、岩盤への核種の吸着など様々なプロセスを伴いながら核種が地下水中を経由して河川へ流入する場合の核種濃度を計算し、これに想定される被ばくの条件に合わせた線量換算係数を乗ずることで人間への影響を評価する。なお解析では、浅地中処分の安全評価における代表的な核種である放射性炭素 14 (以下 C-14) を対象として解析を行う。

2.1 支配方程式と想定モデル

浅地中処分の安全評価における移流方程式は地下水流による物質の移動を表し、それに拡散の概念を加えたものは移流拡散方程式で表される。それに対し移流分散方程式は拡散に機械的散乱の概念を加え、分散という一つの現象にまとめて扱うものである。ここでは、一般的な移流分散方程式に放射性壊変と処分施設からの流入を考慮した次の 1 次元 2 階偏微分方程式で地下水中の放射能濃度[Bq/m³]を表した。

$$\varepsilon \cdot R_f \frac{\partial c}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U_d \frac{\partial c}{\partial x} - \varepsilon \cdot R_f \cdot \lambda \cdot c + (u(x) - u(x-L)) \cdot K \cdot e^{-(\eta+\lambda)t} \quad (1)$$

*1 工学研究科応用理化学専攻修士課程

*2 工学部原子力工学科教授

*3 東海大学名誉教授

- c : 地下水中の放射能濃度[Bq/m³]
 t : 経過時刻[y]
 ε : 土壌の間隙率[-]
 R_f : 土壌の吸着に起因する遅延係数[-]
 D_h : 実効分散係数[m²/y]
 U_d : 地下水のダルシー流速[m/y]
 λ : 壊変定数[1/y]
 L : 流れ方向への処分施設長さ[m]
 K : 廃棄物からの核種漏出速度係数[Bq/m³/y]
 η : 地下水への核種放出速度係数[1/y]

$$R_f = 1 + \frac{(1 - \varepsilon)\rho_a}{\varepsilon} K_d \quad (2)$$

$$K = \frac{\eta \cdot Q_{tot}}{L \cdot W \cdot H} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{R_{in}}{D_a} \cdot r_{leach} \quad (4)$$

$$D_h = D \cdot \varepsilon \quad (5)$$

$$D = U \cdot \alpha_L \quad (6)$$

$$U = \frac{U_d}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\alpha_L = \frac{x}{10} \quad (8)$$

- ρ_a : 土壌の真密度[kg/m³]
 K_d : 核種の吸着分配係数[m³/kg]
 Q_{tot} : 核種処分量[Bq]
 W : 処分施設幅[m]
 H : 帯水層厚さ[m]
 R_{in} : 雨水の浸透水量[m/y]
 D_a : 処分施設深さ[m]
 r_{leach} : 核種の放出分率[-]
 D : 分散係数[m²/y]
 U : 実流速[m/y]
 α_L : 分散長[m]
 x : 流れ方向への処分施設始点からの距離[m]

式(1)の右辺第3項は放射性核種の壊変による濃度変化を表す壊変項であり、右辺第4項は処分施設からの核種漏えい速度を表す流入項である。右辺第4項については処分施設直下である($0 \leq x \leq L$)の範囲外ではゼロとなる。なお項に含まれる関数 u はヘヴィサイドの階段関数であり、ここでは次のように定義する。

$$u(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (0 \leq x) \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 1 に本検討で想定する処分施設からの核種の漏えい体系の模式図を表す。

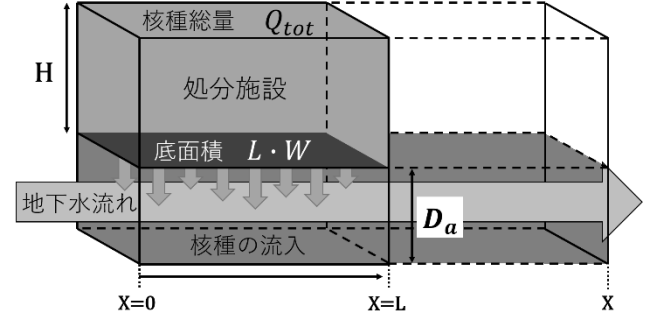


Fig. 1 System diagram.

浸透雨水により核種が処分施設から地下水へ移行することを想定し、流れ方向への距離 x 地点での汚染地下水の放射能濃度を算出する。この図のように、地下水が上流側から処分施設直下に流入し、流入地下水には汚染されていない、つまり核種が含まれていないとする。また地下水を半無限媒体と想定した場合、 $x = \infty$ においての境界濃度 $c(t, \infty)$ もまたゼロとみなすことができる。加えて汚染発生開始時に地下水の汚染はゼロであるため、 $t = 0$ において初期濃度 $c(0, x)$ はゼロである。従って支配方程式である式(1)の束縛条件は Table 1 の通りである。

Table 1 Conditions of governing equations.

Condition	Assumption in this study	
Medium	Semi-infinite medium	
Initial conditions	$c(0, x) = 0$	
Boundary condition	In	$c(t, 0) = 0$
	Out	$c(t, \infty) = 0$

2.2 解析解の導出

2階偏微分方程式である式(1)を解析的に解くにあたって2度のラプラス変換を利用した。ラプラス変換および逆変換を行う際には変換表を利用した³⁾。

1) ラプラス変換

ラプラス変換を時間 t について行う。媒介変数を s とし、次のように表記する。

$$\int_0^\infty e^{-st} \cdot c(t, x) dt = N \quad (10)$$

初期条件 $c(0, x) = 0$ を用いると、式(1)は次のように書き換えられる。

$$\frac{D_h}{\varepsilon \cdot R_f} \frac{dN}{dx^2} - \frac{U_d}{\varepsilon \cdot R_f} \frac{dN}{dx} - \lambda \cdot N + \frac{[u(x) - u(x - L)]}{\varepsilon \cdot R_f} \cdot \frac{K}{s + (\eta + \lambda)} = s \cdot N \quad (11)$$

ここで、 $\xi \equiv \eta + \lambda$, $D^* \equiv \frac{D_h}{\varepsilon R_f}$, $U^* \equiv \frac{U_d}{\varepsilon R_f}$, $K^* \equiv \frac{K}{\varepsilon R_f}$ とおくと初期条件により 1 回目のラプラス変換の結果は以下の通りになる。

$$D^* \frac{d^2 N}{dx^2} - U^* \frac{dN}{dx} - (s + \lambda)N + [u(x) - u(x - L)] \cdot K^* \frac{1}{s + \xi} = 0 \quad (12)$$

続いて原点からの距離 x について式(12)を再度ラプラス変換する。今度は媒介変数を p とおき、ラプラス変換を次のように表記する。

$$\int_0^\infty e^{-px} \cdot N dx = \tilde{N} \quad (13)$$

ラプラス変換後の式(12)は、

$$\{D^* p^2 - U^* p - (s + \lambda)\} \tilde{N} - \{D^* p - U^*\} N_0 - D^* N'_0 + \frac{1}{p} (1 - e^{-Lp}) \cdot \frac{K^*}{s + \xi} = 0 \quad (14)$$

ここで $\alpha \equiv \frac{U^*}{2D^*}$, $\beta \equiv \sqrt{\frac{U^{*2} + 4D^*(s + \lambda)}{4D^{*2}}}$ とおくと、式(14)は次のように整理される。

$$\tilde{N} = N'_0 \frac{1}{(p - \alpha)^2 - \beta^2} - \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \left\{ \frac{1}{p} - \frac{1}{p} e^{-Lp} \right\} \quad (15)$$

2) ラプラス逆変換

式(15)を逆変換すると、 $(0 < x < L)$ と $(L \leq x)$ それぞれの領域について次の式が得られる。

$(0 < x < L)$:

$$N_1 = N'_0 \frac{e^{\alpha x}}{\beta} \sinh(\beta x) - \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1}{2\beta} \left[\frac{e^{(\alpha + \beta)x} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{(\alpha - \beta)x} - 1}{\alpha - \beta} \right] \quad (16)$$

$(L \leq x)$:

$$N_2 = N'_0 \frac{e^{\alpha x}}{\beta} \sinh(\beta x) - \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1}{2\beta} \left[\frac{e^{(\alpha + \beta)x} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{(\alpha - \beta)x} - 1}{\alpha - \beta} \right] + \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1}{2\beta} \left[\frac{e^{(\alpha + \beta)(x - L)} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{(\alpha - \beta)(x - L)} - 1}{\alpha - \beta} \right] \quad (17)$$

ここで $x = \infty$ の場合、式(17)はこのままでは ∞ となり発散してしまうため、式(17)の合計がゼロとなるような N'_0 を求める。式(17)の式変形により、 N'_0 は次式で表される。

$$N'_0 = \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1 - e^{-(\alpha + \beta)L}}{\alpha + \beta} \quad (18)$$

よって 1 回目の逆変換の結果は以下の式となる。

$(0 < x < L)$:

$$N_1 = \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1 - e^{-(\alpha + \beta)L}}{\alpha + \beta} \frac{e^{\alpha x}}{\beta} \sinh(\beta x) - \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1}{2\beta} \left[\frac{e^{(\alpha + \beta)x} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{(\alpha - \beta)x} - 1}{\alpha - \beta} \right] \quad (19)$$

$(L \leq x)$:

$$N_2 = \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1 - e^{-(\alpha + \beta)L}}{\alpha + \beta} \frac{e^{\alpha x}}{\beta} \sinh(\beta x) - \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1}{2\beta} \left[\frac{e^{(\alpha + \beta)x} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{(\alpha - \beta)x} - 1}{\alpha - \beta} \right] + \frac{K^*}{D^*(s + \xi)} \frac{1}{2\beta} \left[\frac{e^{(\alpha + \beta)(x - L)} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{(\alpha - \beta)(x - L)} - 1}{\alpha - \beta} \right] \quad (20)$$

N_2 について 2 回目の逆変換を行う。

$(\alpha^2 - \frac{\lambda - \xi}{D^*}) \equiv \phi$, $\kappa \equiv \frac{K^* e^{\alpha x}}{2D^*}$ とおき、部分分数分解とヘヴィ

ィサイドの展開定理を用いると 4 つの項 $N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}$ にまとめられる。これらの項をそれぞれ逆変換すると解析解が得られる。なお導出した解析解は長く煩雑なため、4 つの項 ($C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}$) にまとめて記述した。したがって、最終的に求める放射能濃度 C_2 は下記のように表すことができる。

$$C_2 = C_{21} + C_{22} + C_{23} + C_{24} \quad (21)$$

また、4 つの項はそれぞれ以下の 4 式で表される。

$$C_{21} = \kappa \cdot e^{-\alpha L} \cdot e^{-(\alpha^2 D^* + \lambda)t} \cdot \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\phi}} \cdot e^{\phi D^* t} \cdot \left[\frac{e^{\sqrt{\phi}(x+L)}}{\alpha - \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x+L}{2\sqrt{D^* t}}\right) - \frac{e^{-\sqrt{\phi}(x+L)}}{\alpha + \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(-\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x+L}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right] - \frac{e^{\alpha^2 D^* t}}{\alpha^2 - \phi} \cdot e^{\alpha(x+L)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\alpha\sqrt{D^* t} + \frac{x+L}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right\} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 C_{22} = & -\kappa \cdot e^{-(\alpha^2 D^* + \lambda)t} \\
 & \cdot \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\phi}} \cdot e^{\phi D^* t} \right. \\
 & \cdot \left[\frac{e^{\sqrt{\phi}x}}{\alpha - \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right. \\
 & \left. - \frac{e^{-\sqrt{\phi}x}}{\alpha + \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(-\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right] \\
 & - \frac{e^{\alpha^2 D^* t}}{\alpha^2 - \phi} \cdot e^{\alpha x} \\
 & \left. \cdot \operatorname{erfc}\left(\alpha\sqrt{D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right\} \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{23} = & -\kappa \cdot e^{-\alpha L} \cdot e^{-(\alpha^2 D^* + \lambda)t} \\
 & \cdot \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\phi}} \cdot e^{\phi D^* t} \right. \\
 & \cdot \left[\frac{e^{-\sqrt{\phi}(x-L)}}{\alpha - \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(-\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right. \\
 & \left. - \frac{e^{\sqrt{\phi}(x-L)}}{\alpha + \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right] \\
 & - \frac{e^{\alpha^2 D^* t}}{\alpha^2 - \phi} \cdot e^{-\alpha(x-L)} \\
 & \left. \cdot \operatorname{erfc}\left(-\alpha\sqrt{D^* t} + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right\} \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{24} = & \kappa \cdot e^{-(\alpha^2 D^* + \lambda)t} \\
 & \cdot \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\phi}} \cdot e^{\phi D^* t} \right. \\
 & \cdot \left[\frac{e^{-\sqrt{\phi}x}}{\alpha - \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(-\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right. \\
 & \left. - \frac{e^{\sqrt{\phi}x}}{\alpha + \sqrt{\phi}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right] \\
 & - \frac{e^{\alpha^2 D^* t}}{\alpha^2 - \phi} \cdot e^{-\alpha x} \\
 & \left. \cdot \operatorname{erfc}\left(-\alpha\sqrt{D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}}\right) \right\} \quad (25)
 \end{aligned}$$

2.3 近似解の導出

導出された解析解は長く複雑なため利用しやすいように簡素化することを考える．まず各項の合算結果 C_2 に与える影響を検討する．Fig.2に3章に示した解析条件を用いて算出した各項の値と C_2 の値を示す．

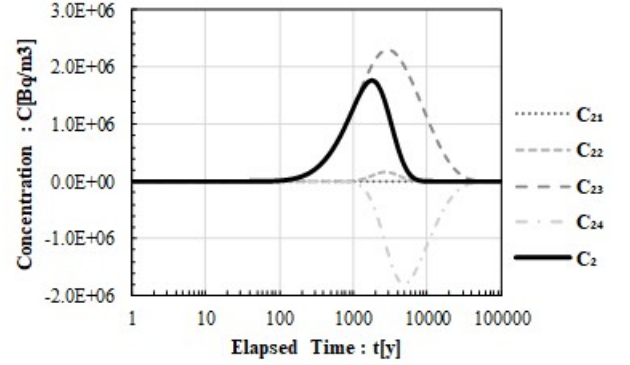


Fig. 2 Calculation result of C_2 and each term.

Fig. 2 から C_2 に支配的に影響を与える項は C_{23} と C_{24} であることがわかる．

次に、補誤差関数の評価結果に与える影響を検討するため Fig.3 に補誤差関数値の図を示す．

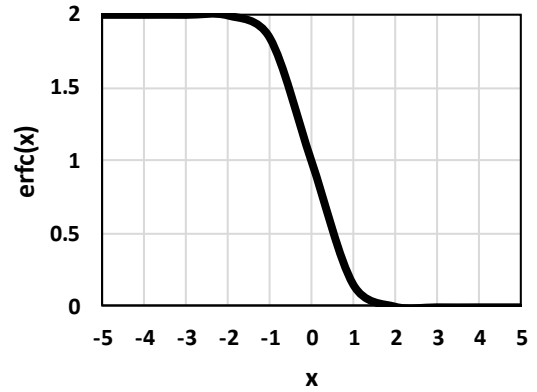


Fig. 3 Calculation result of complementary error function [erfc(x)].

Fig. 3 より、項に含まれる補誤差関数 erfc の因数が正にしかならないものは直ちにゼロに漸近することがわかる．そのため式(24)および式(25)に含まれる項のうち補誤差関数の因数が正になるものを無視することができる．

以上の考え方を適用して構築した近似式を次に示す．

$$\begin{aligned}
 C \approx & \kappa \cdot e^{-(\alpha^2 D^* + \lambda)t} \left[\frac{1}{2\sqrt{\phi}} e^{\phi D^* t} \frac{e^{-\sqrt{\phi}x}}{\alpha - \phi} \left\{ \operatorname{erfc} \left(-\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}} \right) \right. \right. \\
 & - e^{-(\alpha - \sqrt{\phi})L} \operatorname{erfc} \left(-\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}} \right) \Big\} \\
 & - e^{\alpha^2 D^* t} \frac{e^{-\alpha x}}{\alpha^2 - \phi} \left\{ \operatorname{erfc} \left(-\alpha\sqrt{D^* t} + \frac{x}{2\sqrt{D^* t}} \right) \right. \\
 & - \operatorname{erfc} \left(-\alpha\sqrt{D^* t} \right. \\
 & \left. \left. + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}} \right) \right\} \Big] \quad (26)
 \end{aligned}$$

2.4 近似解の適用範囲の検討方法

式(26)は補誤差関数 erfc の因数が正の項に着目し、これがゼロに漸近することを利用したものであるため、利用に際しては予めこの近似が成立する適用範囲について検討しておく必要がある。Fig. 3 より補誤差関数は、正の範囲で因数が小さいほど値が大きくなるため、正の因数を持つ補誤差関数のうち最も小さな因数に注目し、その補誤差関数を含む項が無視できるほど小さいかどうかを確認することで適用性を判定する。

C_{21} から C_{24} のうち、正の因数を持つ補誤差関数は6つ存在する。 t が十分に大きいとき、補誤差関数に乘じられる係数のうち指数関数 $\exp$ 以外は定数であり増大する t と比較して十分に小さなものになるため、正の因数を持つ補誤差関数は無視できる。

また $\sqrt{\phi}$ の代わりに α を因数にもつ補誤差関数は ϕ の定義より $\sqrt{\phi} < \alpha$ であるため、最も小さな正の因数にはならない。このためこの補誤差関数は除外できる。また $0 < x$, $0 < L$ であるため、最も小さな正の因数を持つ補誤差関数は $e^{\phi D^* t} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}} \right)$ である。

以上のことから、時間 t と距離 $x-L$ に注目し、因数を以下の式で置き換える。

$$\theta \equiv \sqrt{\phi D^* t}, \quad \omega \equiv \frac{(x-L)\sqrt{\phi}}{2} \quad (27)$$

式(27)で置き換えた記号を用いて式(26)の補誤差関数に係る一部分を書き換えると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}
 e^{\phi D^* t} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\phi D^* t} + \frac{x-L}{2\sqrt{D^* t}} \right) \\
 = e^{\theta^2} \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \theta \left(1 + \frac{\omega}{\theta} \right) \right\} \quad (28)
 \end{aligned}$$

ω/θ をパラメータとして θ と $e^{\theta^2} \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \theta \left(1 + \frac{\omega}{\theta} \right) \right\}$ の関係を図示したものを Fig. 4 に示す。

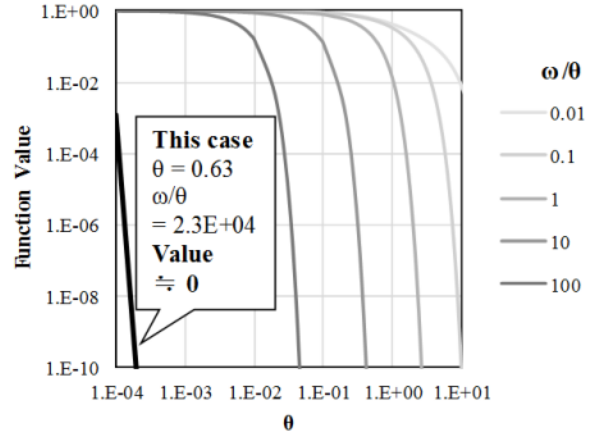


Fig. 4 Relationship between θ and Function value

$$\left(e^{\theta^2} \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \theta \left(1 + \frac{\omega}{\theta} \right) \right\} \right).$$

Fig. 4 から ω/θ が高いほど補誤差関数の項は速やかに0に漸近する。すなわち近似式の適用性が高くなる。なお、 θ は定義より ϕ , D^* , t に影響されるため、実際の解析においてこの関係を適用するためには t に各経過年数を代入し、これにより ω/θ を求める必要がある。また ω/θ の曲線は ω/θ の値によって形を変えるが、全体の傾向として θ が小さく ω が大きいほど精度が良くなると言える。また、Fig. 4 に後述の解析ケースの ω/θ も示したが、ピーク付近の時刻を用いて描いた曲線は速やかに0に漸近していることから、本近似解の適用範囲に収まっていると判断した。なお、近似解の妥当性についてはシミュレーションソフト GoldSim12[®]の数値解による計算結果と整合していることも確認している。

3. 分散効果の影響評価

移流方程式の解析解を用いた感度解析は地下水流速や分配係数について既往論文²⁾で行われている。本検討では移流分散方程式の解析解を導出したことから、分散係数が最大放射能濃度に与える影響に注目した。

式(1)中で用いられる実効分散係数 D_h はそれ自体に流速や間隙率の概念を含んでおり、このようなパラメータを操作すると D_h 以外のパラメータを動かすことになり同条件下でなくなってしまう。そこで D_h のみに含まれるパラメータとして分散長 α_L を操作することで実効分散係数に対する放射能濃度の応答を検討した。

Table 2 に今回の感度解析で用いた各パラメータの条件を示す。

Table 2 Parameters used for the analysis.

Parameter	Value	Symbol	Unit	Source
Porosity	0.47	ε	-	3)
Darcy Velocity	1	U_d	m/y	3)
Density	2800	ρ_a	kg/m ³	3)
Partition Coefficient	0.002	K_d	m ³ /kg	4)
Repository Length	500	L	m	5)
Nuclide Quantity	1.6×10^{13}	Q_{tot}	Bq	5)
Repository Width	500	W	m	5)
Repository Depth	5	H	m	5)
Precipitation Rate	0.01	R_{in}	m/y	a
Thickness of Aquifer Layer	5	D_a	m	a
Leach Coefficient	0.5	r_{leach}	-	4)
Distance	600	x	m	1)

a : Set in consideration of mass balance of groundwater in order to be consistent with Reference ³⁾.

また Fig. 5 に同条件下で実効分散係数を操作したときの放射能濃度の時間経過を、各実効分散係数別の最大放射能濃度を抜き出したものを Fig. 6 に示す。実効分散係数を操作するにあたっては、分散長の基準を処分施設の x 軸方向 0 [m] 地点から計測地点 x までの距離 600 [m] の 10 分の 1 の 60 [m] とし、10 [m] 刻みに増減させた。なお実効分散係数を 0 [m] とした場合の結果は、既往研究 ²⁾ の解析解を用いて示した (Fig. 6 の白抜きの点)。

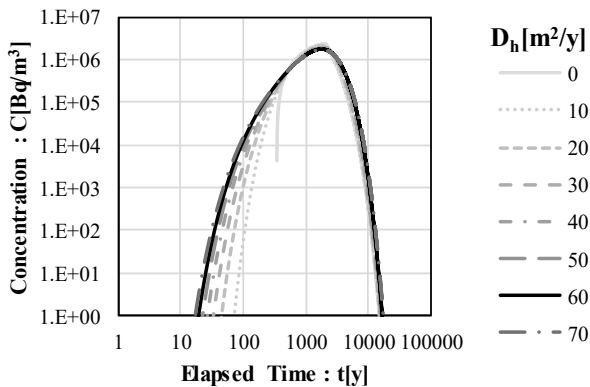


Fig. 5 Relationship between dispersion coefficient and concentration.

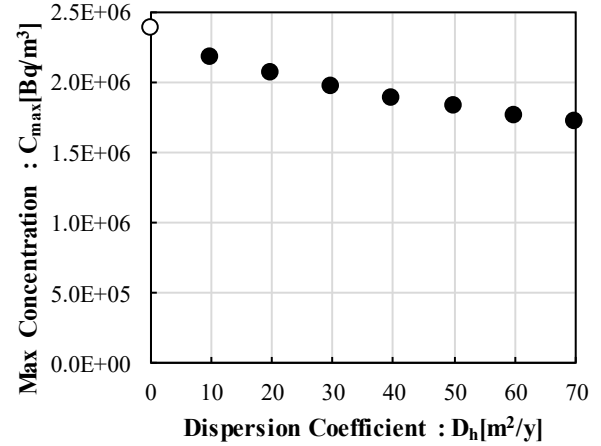


Fig. 6 Relation between dispersion coefficient and maximum concentration.

Fig. 5 より、実効分散係数の増大により初期の濃度の立ち上がりに大きな変化が見られる。これは、分散による効果が増大することにより核種の地下水移行が大きくなり、評価地点 x への到達が早くなることに起因するためである。また、実効分散係数の増加に伴って最大放射能濃度が減少するという結果が Fig. 6 より確認された。これは、地下水の流れによって移行した核種が分散効果により空間的に広がった結果、プルームの濃度が薄まったためであると考えられる。反対に分散が小さければ核種の広がり小さくなり、プルームの濃度の低減は抑えられることから、最大放射能濃度の観点からは分散は濃度を低下させる効果があると考えられる。

このような最大放射能濃度の変化は処分施設からの核種の流入量に依存すると考えられることから、核種流入濃度の変化によって分散効果の最大濃度に与える影響がどう変化するかを検討した。具体的には、流入濃度に係るパラメータのうち放出係数 r_{leach} を変化させ、各 r_{leach} において再度実効分散係数を変化させて最大濃度を求めた。

結果を次ページ Fig. 7 に示す。

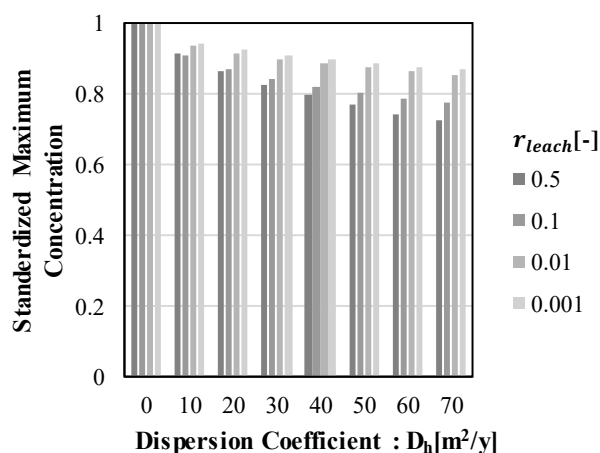


Fig. 7 Relationship between maximum concentration and dispersion coefficient (By r_{leach}).

Fig. 7 より、 r_{leach} が 0.5 の場合から 0.001 になるにつれて実効分散係数 D_h の増加、すなわち分散効果の影響による最大濃度の低下は小さくなっていることがわかる。したがって r_{leach} が小さくなる、つまり処分場からの核種の流出速度が遅くなるに伴って分散効果の影響も小さくなることがわかる。これは、処分場からの核種の放出期間が短いほど核種の移行が非定常状態となり分散の効果が顕在化するが、放出期間が長くなるほど核種の移行が定常状態に近づき最大濃度への分散の影響が小さくなるためであると考えられる。なお、ここでの r_{leach} は核種ごとに定義されており、最大で H-3 と C-14 の 0.5、最小ではほとんどの核種の 10^{-3} とされている。学会標準¹⁾では核種は廃棄体から瞬時放出されるとして評価されているため、放出分率 1 に相当すると考えられる。これらの放出期間の設定と分散の感度解析結果を合わせて考察すると、廃棄体からの放出期間が長くなるにしたがって、分散の効果は小さくなり、一方保守的に核種の廃棄体からの瞬時放出を想定する場合には分散の影響が大きくなると考えられる。

以上のことから、保守的な安全評価を行う際は、廃棄体からの核種の放出モデルと分散効果の関係を考慮することが重要であることがわかった。

4. まとめ

放射性廃棄物の埋設処分後の公衆に与える影響として評価される被ばく線量を求めるため、地下水の放射能濃度を算定するのに用いられている移流分散方程式の解析解を導出および近似解を導出する事により以下の結果を得た。

- 分散係数の増大は、初期の濃度の立ち上がりを早め、最大濃度については低下させる効果をもつ。
- 分散の最大濃度に係る影響は小さなものであるが、流入条件を変更した場合にはこの限りではなく、安全評価の考え方に応じた適切な流入条件の設定が重要となる。
- 分散効果の影響は常に濃度の減少に寄与することから、移流プロセスのみを考慮した既往の評価モデルは保守側に評価されることを確認した。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本原子力学会、「浅地中処分の安全評価手法：2016」(2013).
- 2) 田中由弥ほか、「放射能汚染土壌等の中間貯蔵施設からの被ばく線量に与えるパラメータ値変動の影響」(2015).
- 3) 日本原燃産業株式会社、「六ヶ所村低レベル放射性廃棄物貯蔵センター廃棄物埋設事業許可申請書」(1990).
- 4) International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-401, Vienna (1987).
- 5) 原子力安全委員会、「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」(2007).
- 6) GoldSim Technology Group : GoldSim contaminant transport module. Version 12.1.3 (2019).