

津波堆積物など広範囲の移流拡散解析における EL 法の適用

(株)奥村組 正会員 ○森田修二

JIP テクノサイエンス(株) 正会員 狩野正人

1. まえがき

東日本大震災では自然由来の重金属類を含んだ津波堆積物による土壌汚染が報告されている。今後、降雨などにより津波堆積物から流出する重金属物質が地下水汚染を引き起こすことが予想される。また、震災地で発生したガレキの集積場から人工物の重金属が拡散することも考えられる。このような地下水汚染への対策を考える場合には広範囲の地下水汚染のシミュレーションが必要となる。地下水汚染のシミュレーションには移流拡散解析が行われるが、代表的な解析手法としてはオイラー法やオイリアン・ラグランジュ法（EL 法）が知られている。しかし、広範囲の解析にはオイラー法は不向きであり、現実的にはEL法に限られる。本報告では、EL法による地下水汚染解析に改良を加えた解析手法の精度の検証と現地をモデル化した解析結果について報告する。なお、数値解析には有限要素法による汎用構造・非構造解析コード“FEAST”を用いた。

2. 解析手法の概要

地下水汚染の移流拡散解析では、浸透流方程式(式-1)と移流拡散方程式(式-2)を解く必要がある。ここで、 k は透水係数、 μ は比水分容量、 ϕ は全水頭、 Q_1 は降雨等の流量、 D は分散係数、 v は地下水の実流速、 C は物質濃度、 Q_2 は物質の流量である。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \mu \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q_1 = 0 \quad (\text{式}-1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ & - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial C}{\partial t} + Q_2 = 0 \quad (\text{式}-2) \end{aligned}$$

EL 法は移流拡散方程式に適用される。式-2 の第 1 項～第 3 項までの拡散項にオイラー法、第 4 項～第 6 項までの移流項にラグランジュ法を適用する手法であり、解析プログラムによって解法上の特徴がある。本手法では、移流項の解析を非常に単純化しており、流速による物質移動と濃度の再配分を繰り返すもので、図-1 に示す移流元の濃度の算定にはアイソパラメトリック要素の形状関数を使用する。通常の非定常の移流拡散解析では、式-1 と式-2 を同じステップで解くことになるが、飽和・不飽和領域の浸透流解析を行う場合は非常に非線形性が強い解析を行うことになり、移流拡散解析とは離散化のレベルが異なる。移流拡散解析を EL 手法で解く場合は、メッシュサイズとタイムステップの関係が解析精度に大きく関わる。広範囲の解析を行う場合は解析精度を確保できる限りメッシュサイズを大きくとるため、それに適したタイムステップが求められる。

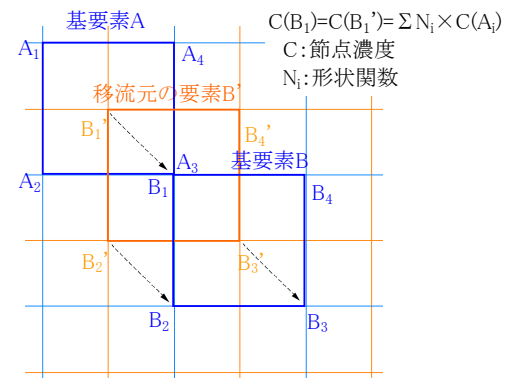


図-1 移流項のモデル化

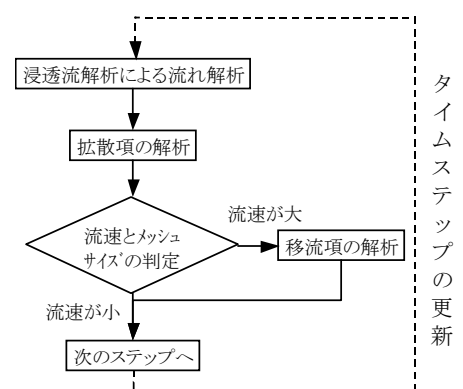


図-2 解析のフロー

さらに、解析領域の中で流速が様々に変化することから、本手法では、要素ごとに移流項のタイムステップを決定することにした。図-2 に解析のフローを示した。非定常に流速が変化することから、要素ごとに流速を累積させて移流項の計算を行う。移流項の取扱いを単純化したことで可能な手法と言える。

キーワード：地下水汚染、移流拡散解析、オイラリアン・ラグランジアン法

連絡先：〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2 (株)奥村組 森田修二 (TEL) 06-6625-3980 (FAX) 06-6621-9315

3. 実験結果との検証

図-3 に示した実験モデル¹⁾は 5 種類の粒径に調整した砂質土(色で区分表示)をメッシュ状にまばらに配置している。不飽和浸透流を対象としており場所によって流速が大きく異なる。実験の詳細については原文を参照されたい。トレーサ水を 25 時間通水した後、原水を通水して流出水の濃度を測定している。図-4 は実験結果との比較を示している。実験と解析に差があるが、非線形性の極めて大きい実験であり、一定の評価はできていると考えられる。

図-5 には過去に Warric が実施した実験概要²⁾を示した。トレーサ水を 2.8 時間かけて浸潤させた後に原水を 17.5 時間かけて浸潤させたものである。図-6 には実験結果との比較を示した。地表面からの浸潤水の濃度を測定したもので鉛直方向の濃度分布の時間変化を示している。実験では 6m×6m にトレーサ水を浸潤させているが、解析では平面問題として取扱った。トレーサ水の濃度と浸潤深さがよく評価できている。

4. 現地を想定した解析モデル

図-7 に現地を想定した地形を示した。沿岸部に重金属類を含有するガレキ置場があり、降雨によって重金属類が地下水に浸透・拡散するという状況を想定した。解析領域は 500m×400m、滞水層厚は 20m と設定した。境界条件は降雨量(5mm/day)と海水位(潮位変動±1m 考慮)とし、透水係数は 1×10^{-3} (cm/s)、不飽和特性は VanGenuchten モデル($n=2.0$, $\alpha=10$, $\theta_s=0.01$, $\theta_r=0.35$)とした。なお、今回は塩水の密度流は考慮していない。図-8 には 6 ヶ月後のガレキ置場中心断面の濃度比コンター、図-9 にはガレキ置場から 100m 海側地点の濃度比の深度分布を示した。あくまで想定モデルであるが、海から 200m 離れたガレキ置場から 6 ヶ月後には海側に 1%相当の濃度が流出するという結果であった。

5. あとがき

本報告では、広範囲に広がる地下水汚染の飽和・不飽和領域の非線形性の強い移流拡散解析を想定して EL 法に工夫を加えた手法を報告した。現地のシミュレーションでは、今後の調査結果を基に詳細な条件を考慮して、さらに解析領域を広げて対策工事の検討を行う予定である。

[参考文献]

- 1) 齋藤雅彦, 中川啓, 「不飽和・不均一鉛直浸透場の物質移動現象に関する室内実験と数値シミュレーション」, 土木学会論文集 B, Vol. 66, No. 3, pp. 248-257, 2010. 7
- 2) 菱谷智幸, 西垣誠, 橋本学, 「物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関する研究」, 土木学会論文集 No. 638/III-49, pp. 59-69, 1999. 12

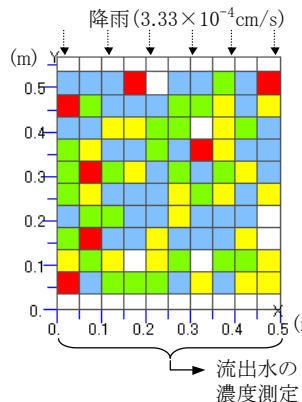


図-3 実験のモデル

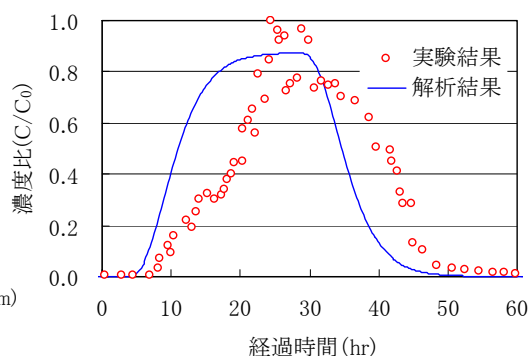


図-4 流出水の濃度変化

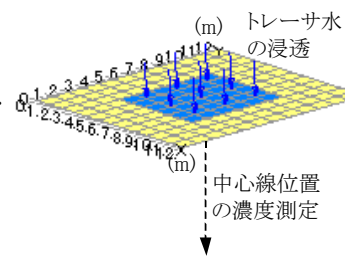


図-5 Warric の実験概要

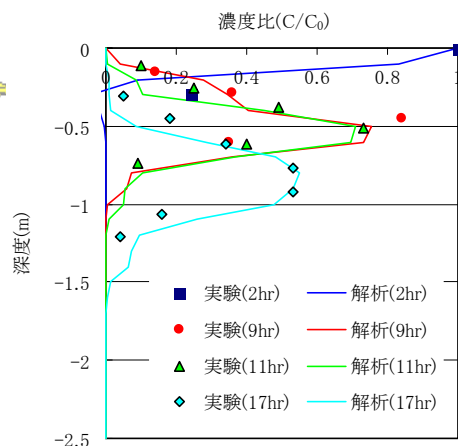


図-6 濃度比の深度分布

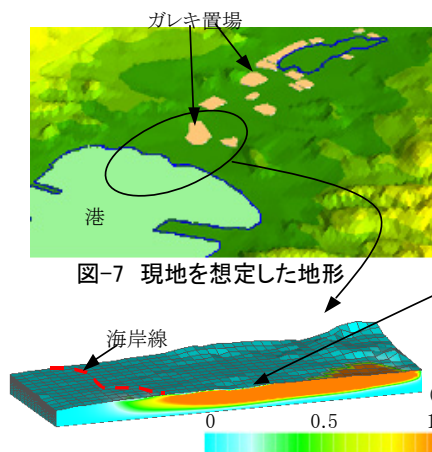


図-7 現地を想定した地形

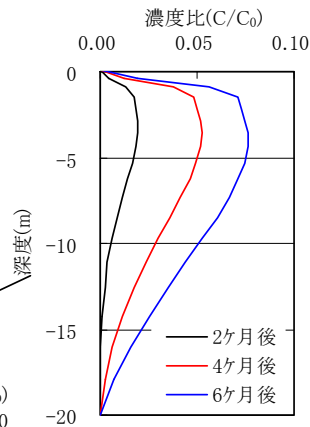


図-8 中心断面の濃度比コンター(6ヶ月後)

図-9 濃度比の深度分布

(ガレキ置場から 100m 海側)