

既存の塩移動数理モデルと湛水塩収支式を利用した水田からの溶出塩量評価

住化分析技術(上海)有限公司 正会員 ○仇 啓涵
 広島工業大学 正会員 福原輝幸
 福井大学 正会員 寺崎寛章

1. はじめに

溶出除塩法とは土壤中の塩分を水田上の湛水に溶出させ、水尻から排出する除塩対策の1つである。東日本大震災の被害要因の1つとなった津波は人間のみならず多くの田畑を飲み込み、農地塩害を被った農家へ多額の負担と長期の営農障害をもたらした。この除塩対策として東北被害地でも溶出法が広範に採用された。しかしながら、除塩の内容(湛水深、水張り期間)やその効果に関する情報は農家へ十分伝わっておらず、筆者らはこれを契機に除塩性能をより明確にする必要性を感じた。

塩溶出に伴う土壤中の塩分移動は拡散方程式に従う。この拡散方程式の解析解を求める研究例は過去に数多くあり、様々な解析解が導かれているが、解の導出は比較的単純な初期および境界条件の場合に限られる。従って、溶出除塩過程を表現した数理モデル、すなわち塩溶出に伴う湛水塩濃度の増加(塩濃縮)と土壤塩分濃度の減少を導く数理モデルはなく、純粋に解析解を求めることは難しいと思われる。

そこで本研究では実用的な見地から、既存の解析解を利用して塩溶出法の性能指標(溶出塩量)が計算できる手法を提案し、塩溶出実験結果¹⁾との比較を通して、手法の実用性および塩濃縮を考慮すべきか否かを吟味したので、その結果の一部を報告する。

2. 塩移動数理モデル

2.1. 湛水の塩濃縮を考慮しない従来モデル

一様な飽和土壤中の塩移動は式(1)の拡散方程式で与えられる。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_s}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに、 C_s は土壤塩濃度(kg/m^3)、 t は時間(hr)、 D は拡散係数(m^2/h)および z は深さ(mm)である。ここでは鉛直下向きを正とする。

式(1)に以下のような初期条件および境界条件を

与える。

$$\begin{aligned} \text{a) } C_s &= C_{s_init} & z \geq 0, \quad t = 0 & \text{(初期塩濃度)} \\ \text{b) } C_s &= C_{s_init} & z = \infty, \quad t \geq 0 & \text{(半無限)} \\ \text{c) } C_s &= C_{s_surf}(t) & z = 0, \quad t \geq 0 & \text{(地表塩濃度)} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)のa)は初期状態に土壤中の塩濃度($C_{s_init}(\text{kg/m}^3)$)が一樣であること、b)は地表から十分離れた土壤塩濃度が常に C_{s_init} であること、c)は地表の塩濃度が時間の関数であること、をそれぞれ表す。また、地表を横切って湛水へ向かう溶出フラックス $v(\text{kg/m}^2/\text{h})$ は、地表の塩濃度 $C_{s_surf}(\text{kg/m}^3)$ と湛水塩濃度 $C_w(\text{kg/m}^3)$ の差に比例すると仮定した。即ち、 v は以下の式(3)で表される。

$$v = \frac{dM_t}{dt} = - \left(D \frac{\partial C_s}{\partial z} \right)_{z=0} = \alpha (C_w - C_{s_surf}) \quad (3)$$

ここに、 M_t は単位地表面積当たりの累積溶出塩量(kg/m^2)、および α は溶出係数(m/h)を意味する。

式(2)の初期条件および境界条件を満たす式(1)の解析解をもとに、 C_{s_surf} は次式で与えられる。

$$C_{s_surf} = C_{s_init} + (C_w - C_{s_init}) \times \left\{ 1 - \exp\left(\alpha^2 \frac{t}{D}\right) \operatorname{erfc}\left(\alpha \sqrt{\frac{t}{D}}\right) \right\} \quad (4)$$

また、 M_t は式(5)で与えられる。

$$M_t = \frac{D(C_w - C_{s_init})}{\alpha} \times \left\{ \exp\left(\alpha^2 \frac{t}{D}\right) \operatorname{erfc}\left(\alpha \sqrt{\frac{t}{D}}\right) + 2\alpha \sqrt{\frac{t}{\pi D}} - 1 \right\} \quad (5)$$

なお、本論文では湛水期間中、 C_w は時間に無関係に一定とする(溶出に伴う湛水の塩濃縮を無視した)モデルを従来モデルと呼ぶ。

2.2. 湛水の塩濃縮を考慮したモデル本モデル

実際の水田では土壤塩分が湛水中に累積し塩濃縮が進行することによって、 C_w は時間とともに増加する。この塩濃縮が除塩性能(例えば、 M_t)に及ぼす影響は未だ不確かである。湛水の体積変化を無視すると、 C_w の時間的増分は式(6)の塩質量収支式に基

づいて計算される.

$$h_w \frac{dC_w}{dt} = \alpha(C_{s_surf} - C_w) \quad (6)$$

この C_w の増加と M_t との関係を示すために、**図1**のような計算手法を試みた。(1)現在(時間ステップ k)の C_w^k および C_{s_init} を用いて、微小時間 (Δt) 後 $t = (k+1)\Delta t$ の $C_{s_surf}^{k+1}$ および C_w^{k+1} を計算し、次に $M_t(t)$ を求める。(2)最新の C_w^{k+1} は C_{s_init} と共に新しい初期・境界条件に更新される。時間ステップは逐時計算のために $k+1$ を k に置き換える。上記(1)と(2)の計算過程を繰り返し、 $M_t(t)$ を所定の時間まで求める。なお、本計算では $\Delta t = 1\text{min}$ とした。

3. 溶出塩量の測定方法

湛水塩溶出実験(**図2**を参照)では、土壌カラムを塩水で飽和させた後、湛水カラムを上部に接続するとともに、4極センサーを土壌表面および、土壌表面より上方の高さ $z_w = z_{w1} \sim z_{w4}$ に設置する。その後、データロガーを用いて、湛水中の温度、塩濃度 $C(=C_w)$ を1分間毎に168時間(実験終了)まで記録する。この各深度での C_w を積分することにより、累積溶出塩量 ($M_t(t)$) を求める。

4. 本手法の評価

図3は $h_w = 100\text{mm}$ における M_t の経時変化の実験値(プロット)、従来モデル($C_w=0$:一定)による計算値(点線)および本モデルによる計算値(実線)をそれぞれ示す。従来モデルでは、湛水の塩濃縮を考慮しないために溶出が促進されて M_t は時間とともに過大評価が明確となり、168時間後には実験結果の約2.5倍に達した。これに対して本モデルによる計算値は実験の $M_t(t)$ と概ね一致した。

5. おわりに

本研究では、土壌からの塩溶出に伴う湛水の塩濃縮が溶出法の除塩性能に影響を及ぼすかどうかを明らかにするために、常に真水湛水とする境界条件で導かれる既存の拡散方程式の解析解(土壌表面塩濃度)と湛水塩収支式を組み合わせた手法により、累積溶出塩量 $M_t(t)$ の計算を試みた。その結果、溶出法の除塩性能に及ぼす湛水塩濃縮の影響は無視できないこと、および本手法は溶出開始から1週間までの $M_t(t)$ を良好に再現することが分かった。

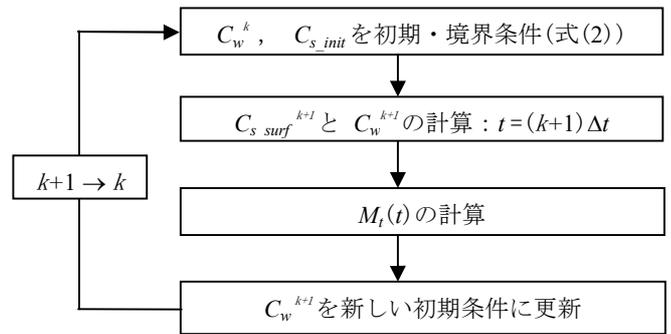


図1 本モデルによる計算フロー

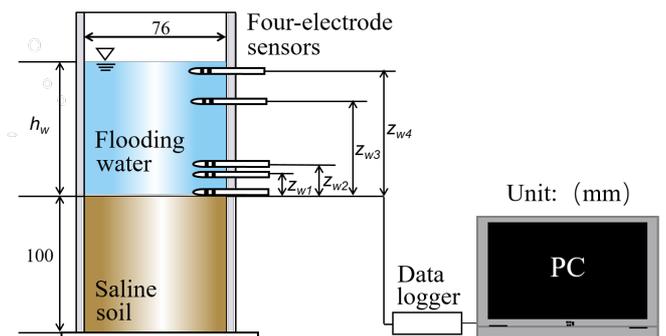


図2 溶出塩量の測定実験

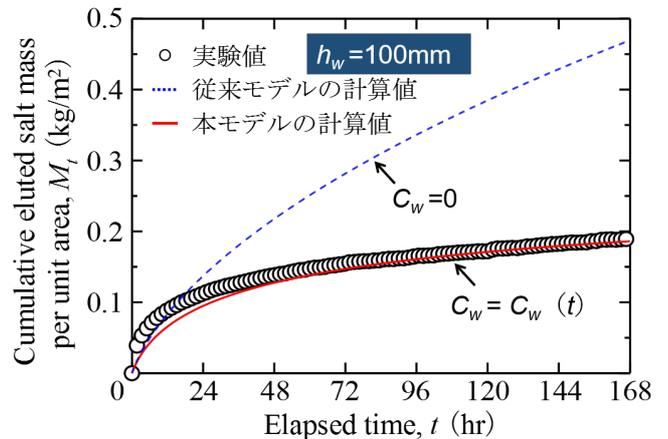


図3 累積溶出塩量の計算結果と実験結果との比較

今後は土壌塩濃度分布や異なる湛水深を対象として、本手法の適用性を検討する。

参考文献

- 1) 仇啓涵, 寺崎寛章, 福原輝幸: 水田土壌における湛水土壌表面からの塩溶出実験, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, VII-037, pp. 73-74, 2016.

謝辞

本研究の一部は科学研究費(基盤研究C26420530)の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。