

飽和 - 不飽和領域における二価鉄の酸化沈殿を考慮した鉛直一次元輸送解析モデル

九州産業大学工学部 正会員 ○細川 土佐男
九州大学工学研究院 正会員 神野 健二
九州産業大学工学部 正会員 岩満 公正

1. まえがき

降雨後の擁壁の排水孔や水田の排水路を注意深く観察すると、赤褐色の沈殿物が見られる。これは還元状態の土壤水に溶解した2価鉄イオン Fe^{2+} が曝気されて沈殿した鉄の水和酸化物である。また、有機物が含まれている海底地盤を滞留している海水は、還元状態になっている。この還元状態にある海水を井戸から取水し海水淡水化プラントの水源とする場合には、還元状態の海水が酸化され処理膜で目詰まりや金気臭等が発生する。本研究では、このような還元状態の飽和領域から間隙水中に酸素が溶解する不飽和領域へ2価鉄イオン Fe^{2+} が輸送され酸化される過程が気相・固層・液層の3相が関わる系の1つであると考え、現象を記述する数値解析モデルを構築し、その妥当性を円筒カラムによる還元海水の酸化実験により検証した。

2. 実験装置の概略

図-1に実験装置の略図を示す。還元性環境から酸化性環境への変化を人工的に作り上げるため、内径10cmのカラムに、粒径0.02cmの小さいガラスビーズと粒径0.12cmの大きいガラスビーズをそれぞれ上層と下層に分けて敷き詰め、水田土壌を浸透させて還元状態にした海水を1週間流下させた。

3. 基礎式

○浸透流の式

$$(c_w + \alpha_0 S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial y} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

$$v' = k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial y} - 1 \right) \quad (2)$$

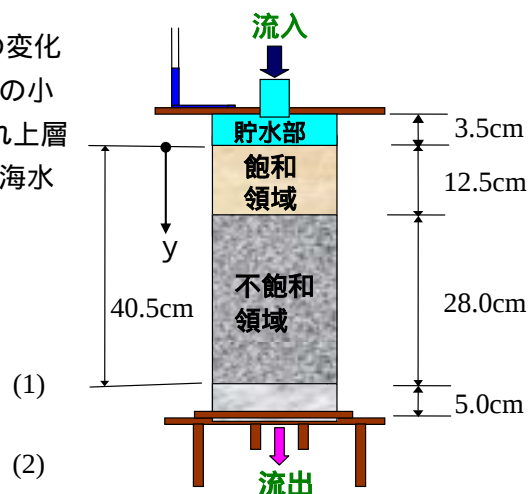


図-1 実験装置の概略

溶存2価鉄から水和酸化鉄への酸化反応は、次式のようになる。



上式は、仮に溶存2価鉄が1mol/l消費されると、水和酸化鉄が1mol/l発生することを示す。式(3)に基づいてAppelo & Postmaは、ある瞬間における溶存2価鉄が酸化する濃度の割合を次式で示している¹⁾。

$$S_{Fe} = K_{Fe} Fe^{2+} (OH^-)^2 P_{O_2} \quad (4)$$

上式で表される S_{Fe} を式(3)の化学式に照らし合わせて溶存酸素、溶存2価鉄の輸送式では減少する割合、水和酸化鉄では増加する割合として与えた。以下に輸送式と水和酸化鉄の沈殿式を示す。

○溶存酸素(DO)の輸送式

$$\frac{dDO}{dt} = \frac{\partial DO}{\partial t} + v' \frac{\partial DO}{\partial y} = \frac{1}{\theta_w} \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta_w D_L \frac{\partial DO}{\partial y} \right) + \frac{T_g(1-n)}{a} \frac{\theta_g \sqrt{D_L} \sqrt{D_{atm}}}{\theta_w \sqrt{D_L} + H \theta_g \sqrt{D_{atm}}} (O_{2(g)} - H \cdot DO) - \frac{1}{4} S_{Fe} \quad (5)$$

○溶存2価鉄(Fe^{2+})の輸送式

$$\frac{dFe^{2+}}{dt} = \frac{\partial Fe^{2+}}{\partial t} + v' \frac{\partial Fe^{2+}}{\partial y} = \frac{1}{\theta_w} \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta_w D_L \frac{\partial Fe^{2+}}{\partial y} \right) - S_{Fe} \quad (6)$$

○気相中酸素($O_{2(g)}$)の輸送式

キ-ワ-ド 飽和 - 不飽和浸透流，酸化反応，物質輸送，室内実験，数値解析

連絡先 〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1 九州産業大学工学部都市基盤デザイン工学科 TEL 092-673-5683

$$\frac{\partial O_{2(g)}}{\partial t} = \frac{1}{\theta_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta_g D_{atm} \frac{\partial O_{2(g)}}{\partial y} \right) - \frac{T_g(1-n)}{a} \frac{\theta_w \sqrt{D_L} \sqrt{D_{atm}}}{\theta_w \sqrt{D_L} + H \theta_g \sqrt{D_{atm}}} (O_{2(g)} - H \cdot DO) \quad (7)$$

○水和酸化鉄($Fe(OH)_3$)の式

$$\frac{\partial Fe(OH)_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_w} \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta_w D_L \frac{\partial Fe(OH)_3}{\partial y} \right) + S_{Fe} - \lambda \cdot Fe(OH)_3 \quad (8)$$

○水和酸化鉄($Fe(OH)_3 \downarrow$)の沈殿式²⁾

$$\frac{\partial Fe(OH)_3 \downarrow}{\partial t} = \frac{n}{\rho_w(1-n)} \lambda \cdot Fe(OH)_3 \quad (9)$$

ここに、 $k(h)$:不飽和透水係数、 t :時間、 v' :実流速、 S_s :比貯留係数、 θ_w :水分率、 θ_g :気相率、 n :間隙率、 a :粒子半径、 T_g :係数、 H :Henry定数、 λ :水和酸化鉄の沈殿率、 $D_L(= \alpha_L v' + D_M)$:分散係数、 α_L :分散長、 D_M :分子拡散係数、 D_{atm} :気体拡散係数、 DO :溶存酸素濃度、 $O_{2(g)}$:気相酸素濃度、 Fe^{2+} :溶存2価鉄濃度、 K_{Fe} :溶存2価鉄の反応速度係数、 $Fe(OH)_3$:水和酸化鉄濃度、 $Fe(OH)_3 \downarrow$:水和酸化鉄の沈殿量、 OH^- :水酸化物イオン、 P_{O_2} :酸素分圧、 ρ_w :ガラスビーズの密度である。なお、数値計算は、式(1)に数値積分法、式(5)～(8)に特性曲線法、式(9)に差分法を用いて、格子間隔を0.25cmで行なった。

4. 結果および考察

図-2には、1週間経過後の Fe^{2+} 、 DO 、 $Fe(OH)_3$ 、 $Fe(OH)_3 \downarrow$ の数値解を実線で、 $Fe(OH)_3 \downarrow$ の実測値を■印で示している。 Fe^{2+} は、地層境界直上で酸化のため多く消費された後、さらに少しずつ消費されながら下部に向かって輸送されている。 DO は、下端から上部に向かって輸送される $O_{2(g)}$ が還元海水中に溶解し濃度が上昇しているが、上部ほど酸化のため多く消費されるので減少している。特に、境界層の直上ではより多く消費されている。

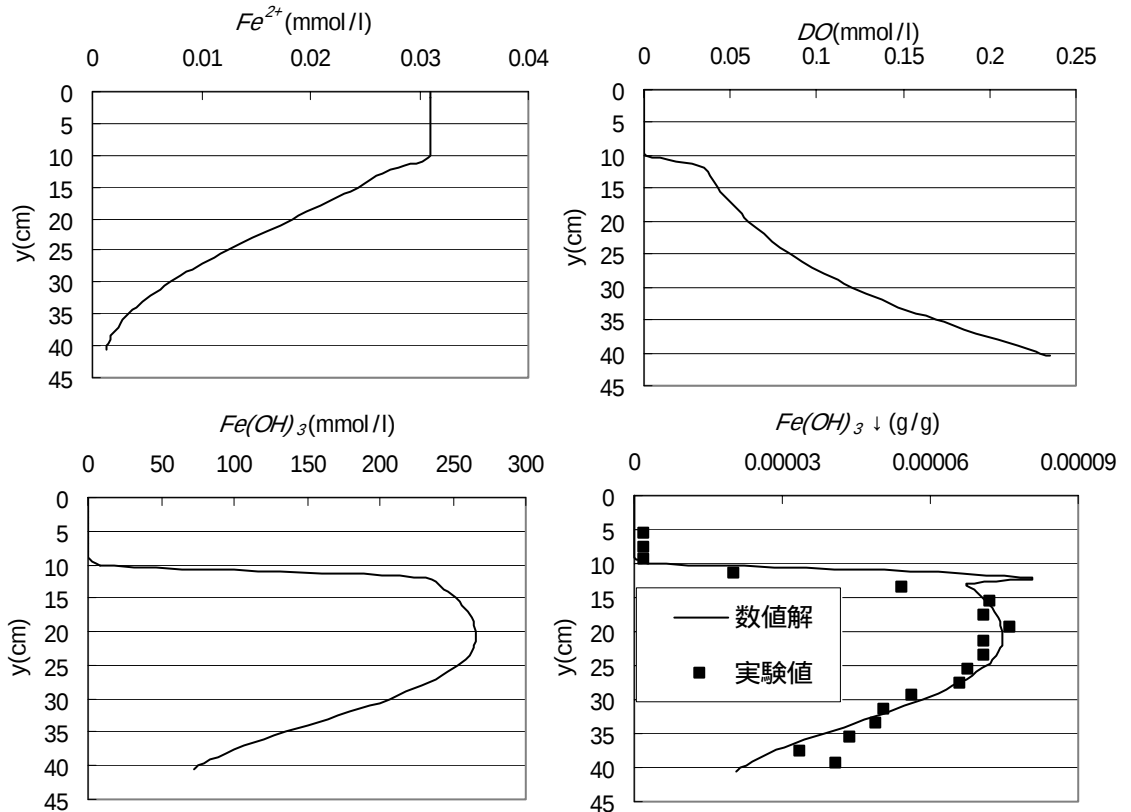


図-2 計算および実験結果

$Fe(OH)_3$ は、約 $y=10 \sim 20$ cmまでは上昇し、その後下部に向かって低下している。 $Fe(OH)_3 \downarrow$ の数値解による濃度分布は $Fe(OH)_3$ と境界層の部分以外は同じ形状を示し、実験値もこの分布形状を概ね再現している。数値解は境界層の部分でより多く沈殿している。実験値は、境界層付近のカラムの高さが2cmであるためこのような変化を再現していないと考える。

[参考文献]

- 1) C.A.J.Appelo, D.Postma: Geochemistry, Groundwater and Pollution, pp.247-255, 1996.
- 2) 平野文昭, 神野健二, 船岡基, 百田博宣: 浸透層内における目詰まり原因物質の抑留量の推定方法の検討, 土木学会論文集, No.610/ -45, 125-134, 1988.12.