

水素および酸素を注入する地下水原位置脱窒法の数学モデルに関する研究

早稲田大学創造理工学研究科 学生会員 ○内藤 克貴 早稲田大学創造理工学研究科 学生会員 葉 堅
 早稲田大学創造理工学研究科 学生会員 木我 紅音 早稲田大学理工学術院 正会員 榊原 豊

1. はじめに

現在、世界的な人口増加によって水需要が高まっている一方で、主要な飲料水源である地下水の硝酸性窒素汚染問題が顕在化している。

本研究は汚染地下水を浄化する原位置脱窒法の開発を目的とし、水素および酸素を帯水層に注入する独立栄養脱窒法の連続浄化性能について実験的検討を行った。また、硝酸性窒素濃度等の水質変化を表わす数学モデルの構築を試みた。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す¹⁾。反応槽は内部寸法が25mm×2000mm×800mm、容量40ℓの水槽である。内部にガラスビーズ(直径2mm)を充填して帯水層とし、硝酸濃度15(mg-N/L)の合成地下水を左端より連続供給した。また、帯水層の下部より水素、酸素を供給し、各種イオン濃度、溶存酸素濃度、溶存水素濃度、pH、TOC、IC、ORP等の測定を行った。

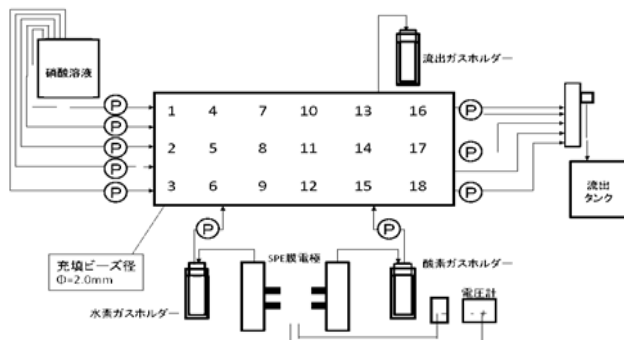


図1 実験装置概略¹⁾

3. 数学モデル

帯水層内の移流拡散過程、水素・酸素の溶解、水素利用脱窒反応等を考慮し、溶存水素濃度 C_{H_2} [mg/ℓ]、溶存酸素濃度 C_{O_2} [mg/ℓ]、硝酸性窒素濃度 C_{NO_3} [mg/ℓ]、亜硝酸性窒素濃度 C_{NO_2} [mg/ℓ]、微生物量 C_x [mg/ℓ]に対して以下の基礎式を立てた。基礎式は移流拡散方程式に基づいて作成し、パラメータは小森および榊原等を参照した²⁾。

キーワード 硝酸性窒素汚染, 脱窒, 地下水

連絡先 早稲田大学創造理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1) Email: sakaki@waseda.jp

【溶存水素濃度】

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_{H_2}}{\partial x^2} + K_{LaH_2}(C_{H_2sat} - C_{H_2}) - \frac{D_{H_2}}{D_{O_2}} \times K_{LaO_2} \times C_{H_2} - r_{H_2} \quad (1)$$

$$r_{H_2} = Y_{H_2NO_3} r_{NO_3} + Y_{H_2NO_2} r_{NO_2} + Y_{H_2O_2} r_{O_2} \quad (2)$$

【溶存酸素濃度】

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial x^2} + K_{LaO_2}(C_{O_2sat} - C_{O_2}) - \frac{D_{O_2}}{D_{H_2}} \times K_{LaH_2} \times C_{O_2} - r_{O_2} \quad (3)$$

$$r_{O_2} = r_{mT,O_2} \times \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \times \frac{C_{H_2}}{K_{H_2} + C_{H_2}} \times C_x \quad (4)$$

【硝酸性窒素濃度】

$$\frac{\partial C_{NO_3}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{NO_3}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_{NO_3}}{\partial x^2} - r_{NO_3} \quad (5)$$

$$r_{NO_3} = r_{mT,pH,NO_3} \times \frac{C_{NO_3}}{K_{NO_3} + C_{NO_3}} \times \frac{C_{H_2}}{K_{H_2} + C_{H_2}} \times \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \times C_x \quad (6)$$

【亜硝酸性窒素濃度】

$$\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{NO_2}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_{NO_2}}{\partial x^2} - (r_{NO_2} - \alpha r_{NO_3}) \quad (7)$$

$$r_{NO_2} = r_{mT,pH,NO_2} \times \frac{C_{NO_2}}{K_{NO_2} + C_{NO_2}} \times \frac{C_{H_2}}{K_{H_2} + C_{H_2}} \times \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \times C_x \quad (8)$$

【微生物濃度】

$$\frac{dC_x}{dt} = -K_d C_x + r_x - b C_x \quad (9)$$

$$r_x = Y_{XO_2} \times r_{O_2} + Y_{XNO_3} \times r_{NO_3} + Y_{XNO_2} \times r_{NO_2} \quad (10)$$

以上の基礎式において、 r_{H_2} 、 r_{O_2} 、 r_{NO_3} 、 r_{NO_2} は微生物による、水素、酸素、硝酸性窒素、亜硝酸性窒素の消費速度[mg/d]、 r_x は微生物の増殖速度[mg/d]、 $C_{H_2,sat}$ 、 $C_{O_2,sat}$ は水素、酸素の飽和溶存濃度[mg/ℓ]、 K_{LaH_2} 、 K_{LaO_2}

は水素酸素の総括移動容量係数[1/d]、 D_{H_2} 、 D_{O_2} は水中の水素、酸素の分子拡散係数[cm^2/s]、 r_{m,O_2} は微生物の最大比水素利用速度[mg/d]、 r_{m,NO_3} 、 r_{m,NO_2} は硝酸性窒素、亜硝酸性窒素の最大比脱窒速度[mg/d]、 α は硝酸性窒素の同化代謝による消費を考慮した係数[-]、 Y_{H_2,O_2} 、 Y_{H_2,NO_3} 、 Y_{H_2,NO_2} は溶存酸素利用量、硝酸性窒素利用量、亜硝酸性窒素利用量に対する水素利用量の化学量論比[-]、 Y_{X,O_2} 、 Y_{X,NO_3} 、 Y_{X,NO_2} は溶存酸素、硝酸性窒素、亜硝酸性窒素に対する微生物収率[-]である。

4. 実験結果および考察

連続実験において定常状態に達した時点の濃度分布を求め、その結果を図2に示した。図より、水素注入付近でDO濃度が低下しDH濃度が上昇している。これは微生物による酸素消費と、溶存水素のストリップングによるものである。そして硝酸性窒素濃度が低下していることから、微生物が増殖し脱窒反応が進行していることが確認できる。一方、酸素注入付近およびその下流側ではDO濃度が上昇した。

図3には数値計算から定常状態に達した時点の濃度分布を求めた結果を示した。これらの計算結果は実験データの傾向とほぼ一致した。しかし、硝酸性窒素濃度の減少速度が再現されておらず、反応速度等パラメータを再考する必要がある。

図4に流出端におけるpHの経時変化の計算結果と実測値を比較して示した。図より6日目付近でpHは一定となり、定常状態に達していることが確認できる。また計算結果は実測値とおおむね一致した。

図5には流出端における硝酸性窒素濃度および溶存酸素濃度の経時変化を同様に示した。硝酸性窒素濃度に関しては、計算結果と実測値はほぼ同様な傾向にあった。一方、DO上昇の傾向は再現されたが、上昇速度とその後の挙動に相違があった。

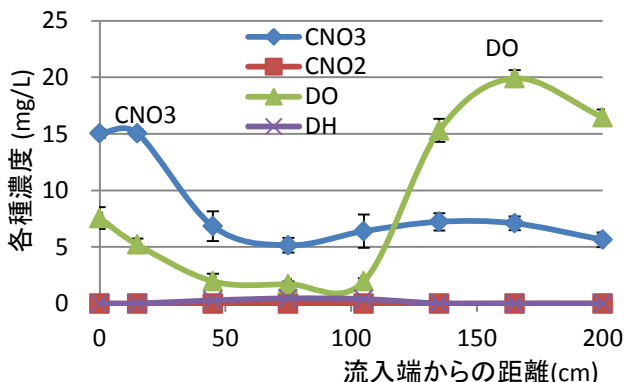


図2 定常状態での濃度分布(実測値)

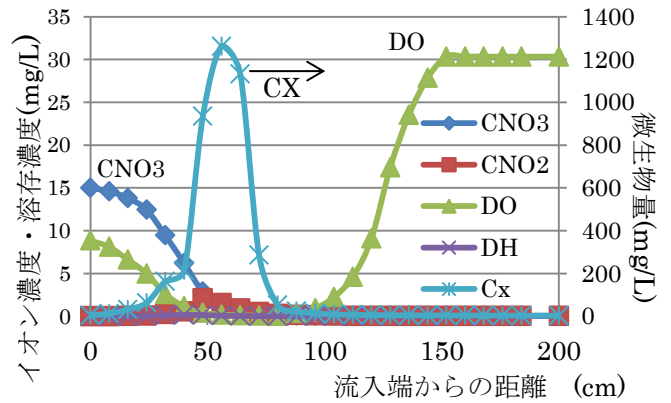


図3 定常状態での濃度分布(計算値)

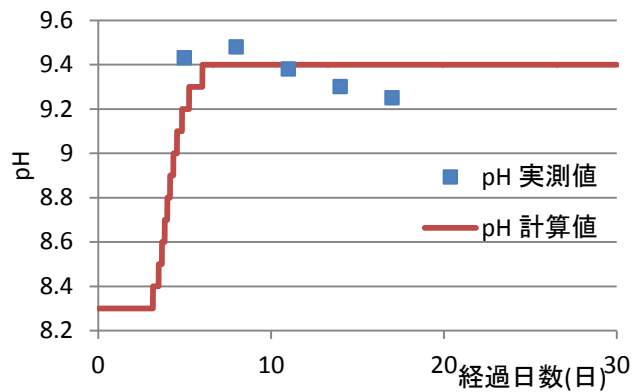


図4 pHの経時変化

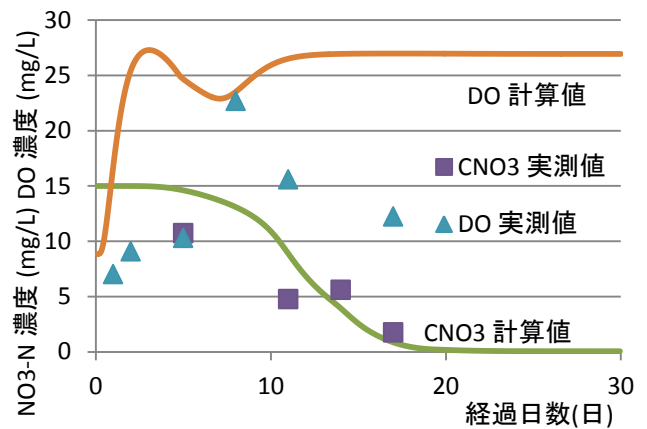


図5 各種濃度の経時変化

5. まとめ

本研究で構築した数学モデルは実験値の傾向を再現することができた。しかし実際に脱窒性能を予測するモデルとしては精度が不足しているため、今後はさらにモデルの精緻化を図る予定である。

参考文献

- 1) 葉、榊原：Continuous Treatment of Groundwater by In-Situ Denitrification and Oxidation Process with Injection of Electrolytic Hydrogen and Oxygen 土木学会論文集 G,69(7),III.99-III.104.(2013)
- 2) 小森、榊原：固体高分子電解質(SPE)膜電極を用いた硝酸性窒素汚染水の高速脱窒処理に関する研究 土木学会論文 G,65(3),153-163.(2009)