

ベンゼン汚染土の微生物処理における前培養効果の検討（その2） ーバッチ反応系の数値解析モデル化ー

(株)大林組 正会員 ○三好 悟
(株)大林組 正会員 大島 義徳
(株)大林組 正会員 久保 博

1. はじめに

前培養方式によるベンゼン汚染土の原位置好気微生物処理の数値解析手法について検討する。前培養方式は、現場揚水に含まれるベンゼン資化性微生物を地上設備で選択的に増殖して地盤に再注入するという方式である¹。この方式による浄化を合理的に設計、計画するために、注入する培養液の地盤中での挙動とこれに伴うベンゼンの挙動を定量的に予測評価する必要がある。ここでは、この予測評価手法を得るための準備として、バッチ反応系における挙動をモデル化し、室内実験を模した試解析を実施してモデルの適用性を検討する。

2. 数値モデルの構築

地盤中の微生物の活動は、地下水に含まれる基質や酸素の濃度など複数の条件によって制限を受ける。Multiple Monod 式は、複数条件によって微生物の活動が制約される場合に基質の分解速度を与える数式である²。また、土壌中のベンゼンの固液相間移動は非平衡吸着式によって表すことができる。この2つの数式を用い、バッチ反応系を前提としてモデル化する。式(1)-(4)でモデル化したバッチ反応系を図1に示す。

前培養方式による浄化で、注入された培養液の活動は液相ベンゼン濃度と溶存酸素濃度に制限されると考え、液相ベンゼンの生分解による濃度フラックスを、式(1)の右辺第2項のように表す。この項は、溶存酸素濃度の閾値を設定できるように一般的な Multiple Monod 式を改良している。

また、微生物自体の濃度変化は式(4)によって表される。式(4)の右辺第1項は、消費されるベンゼン質量に対し一定の比率で微生物数が増加することを表し、第2項は一定の速度定数で1次減少することを表している。また、注入された微生物の土粒子への吸着は分配係数モデルによって表されるとする。

$$(1) \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\rho_B}{n} \frac{\partial S}{\partial t} - \mu_m X \left(\frac{C}{K_{Bz} + C} \right) \left\{ \frac{O - O_{min}}{K_{O_2} + (O - O_{min})} \right\}$$

$$(2) \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{n}{\rho_B} \beta \left(C - \frac{S}{Kd} \right)$$

$$(3) \frac{\partial O}{\partial t} = -Y_{O_2/Bz} \mu_m X \left(\frac{C}{K_{Bz} + C} \right) \left\{ \frac{O - O_{min}}{K_{O_2} + (O - O_{min})} \right\}$$

$$(4) R_x \frac{\partial X}{\partial t} = Y_{X/Bz} \mu_m X \left(\frac{C}{K_{Bz} + C} \right) \left\{ \frac{O - O_{min}}{K_{O_2} + (O - O_{min})} \right\} - K_e X$$

C:液相ベンゼン濃度(mg/L)
S:固相ベンゼン濃度(mg/kg)
X:微生物濃度(mg/L)、O:溶存酸素濃度(mg/L)
 μ_m :最大基質利用速度定数(1/sec)
 K_{Bz} :ベンゼンに関する半減定数(mg/L)
 K_{O_2} :酸素に関する半減定数(mg/L)
 O_{min} :最低溶存酸素濃度(mg/L)
 β :ベンゼンの物質移動定数(1/sec)
Kd:ベンゼンの平衡分配係数(L/kg)
 $Y_{O_2/Bz}$:消費ベンゼンと酸素の質量比(-)
 $Y_{X/Bz}$:消費ベンゼンと再生微生物の質量比(-)
 K_e :微生物の死滅速度定数(1/sec)

式(1)-(4)は、4つの未知変数C、S、O、およびXに関する連立常微分方程式であり、諸定数値と初期条件を定めることによって時間に関する解を求めることができる。

3. 試解析

別途実施したバッチ分解実験¹の実験条件を模した試解析を行う。この実験では、ベンゼン溶液、土、空気、および、培養液を添加した閉鎖反応系での濃度変化を計測している。対照のために行ったベンゼン溶液と空気だけを添加して養生したケースの計測結果を図2に示す。

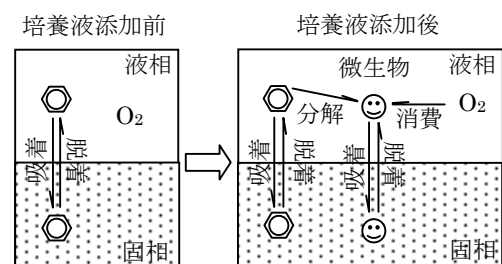


図1 モデル化するバッチ反応系

キーワード ベンゼン 汚染土 微生物処理 数値解析 Monod 式

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目-640 (株)大林組 技術研究所 TEL 0424-95-1060

図2から、酸素の液相への溶解は動的であること、および、ベンゼンが系外に漏洩していることが考えられる。以降の試解析では、気相のベンゼンおよび酸素の濃度もモデル化し、気液相間の物質移動とベンゼンの系外への漏洩が、対照ケースと同等に生じるように諸定数値を設定する。

表1に示す実験ケースを模して行った試解析の結果を図3および図4に、また、それぞれに用いた諸定数値を表3に示す。これらの図表から、諸定数値を適切に設定してシミュレートすることによって、この実験における諸計測値の変化をよく再現できることがわかる。

これらの解析では、実験結果にフィットするようにケースごとに μ_m を変化させた。ケース1,2ともChenらの値と異なることから、 μ_m が環境条件等によって異なることが示唆される。地盤間隙では、閉鎖反応系での室内実験よりも微生物と基質や酸素との接触頻度が少ないと考えられる。前培養方式による地盤での浄化効果を評価するためには、移流分散による物質移行を考慮したモデルを構築し、カラム実験などによって通水環境下におけるベンゼン分解反応の諸定数値を定める必要がある。

4. まとめ

本研究の成果は次のようにまとめることができる。

- (1) Multiple Monod 式と非平衡吸着式を組合せた連立方程式によって、前培養液によるバッチ培養系でのベンゼン分解をよく表すことができる。
- (2) 最大基質利用速度定数等の諸定数値は、環境条件によって変化すると考えられる。
- (3) 今後の課題は、地盤での効果をシミュレートするために移流分散を考慮したモデルを構築することと、カラム実験等の結果を用いて通水環境下でのベンゼン分解反応における諸定数値を定めることである。

参考文献

- 1.大島ら、ベンゼン汚染土の微生物処理における前培養効果の検討(その1)―室内バッチ試験―、第60回土木学会年次学術講演会講演概要集、2005年
- 2.Clement, T. P. et. al., Modeling multi-species reactive transport in groundwater, Groundwater Monitoring & Remediation J., 18(2), pp79-92, 1998
- 3.Yung-Ming Chen, et. al., Modeling transport and biodegradation of benzene and toluene in sandy aquifer material: comparisons with experimental measurements, Water Resour. Res., Vol.28, No.7, pp1833-1847, July 1992
- 4.Reardon, K. F., et. al., Biodegradation kinetics of aromatic hydrocarbon mixtures by pure and mixed bacterial cultures, Env. Health Perspectives, Vol. 110, pp1005-1011, 2002

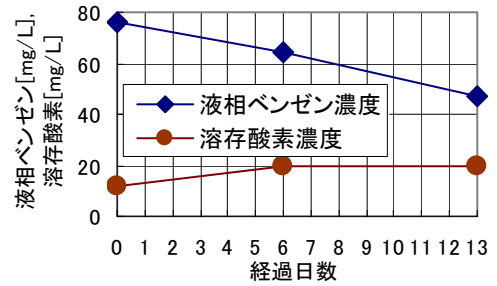


図2 対照ケースの液相ベンゼン濃度および溶存酸素濃度の変化（実験）

表1 試解析した実験ケースの条件

記号	水/乾土	気相：固液相	培養液
	質量比	体積比	
1	9.1	9:7	あり
2	4.5	9:7	あり

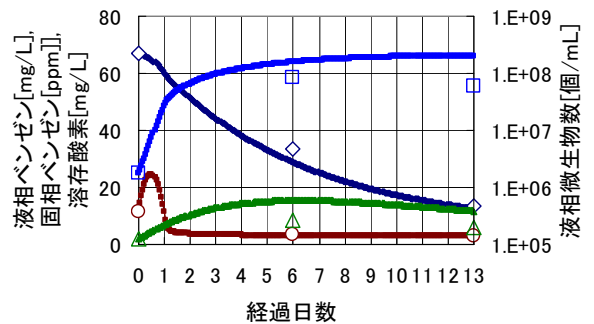


図3 ケース1の実験および解析の結果

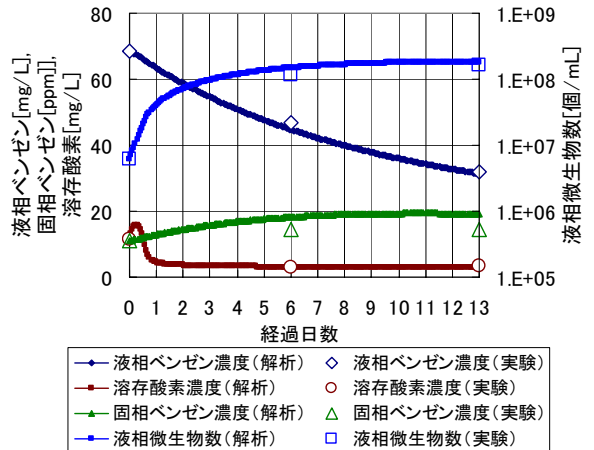


図4 ケース2の実験および解析結果と凡例

表2 試解析に用いた諸定数の設定値と文献での設定値

記号	単位	設定値		文献での設定値
		ケース1	ケース2	
μ_m	1/sec	7.5×10^{-5}	3.0×10^{-5}	1.8×10^{-4} ³
K_{Bz}	mg/L	0.12		0.12 ⁴
K_{O_2}	mg/L	0.77		0.77 ³
K_e	1/sec	2.3×10^{-7}		2.3×10^{-7} ³
$Y_{x/Bz}$	kg/kg	0.28		0.28 ³
β	1/sec	6.5×10^{-7}	8.0×10^{-7}	—
K_d	L/kg	0.56		—