

II-339 埋立廃棄物層における物質代謝のモデル化に関する基礎的研究

九州大学工学部〇学 坂田 幸久 学 李 南勲
同 上 正 楠田 哲也
福岡大学工学部 正 花嶋 正孝 正 島岡 隆行

1. はじめに

埋立地の安定化は廃棄物中の汚濁物質が廃棄物層が持っている物理・化学的及び生物学的浄化作用を受けることによって促進されると予想され、廃棄物層内の空間的な浄化現象を把握することは安定化促進のための重要な情報となり得る。前報^{1,2)}では、埋立層内鉛直方向における非保存性物質の濃度分布が、C1等の保存性物質の傾向と大きく異なり、また層厚さに応じていくつかの濃度ピークが現れることを報告した。

本研究は、実スケールの埋立廃棄物層厚を有する準好気性埋立模型槽を用いて行った実験結果を基に、廃棄物層内での非保存性物質の濃度分布形成に影響を与える要因について考察を行い、更に、非保存性物質の濃度が比較的高い埋立初期を対象に、生物反応によるアルカリ度の生成と消費を考慮した埋立層内での物質変換モデルを構築し、数値計算によって非保存性物質の濃度分布形成メカニズムについて検討を行ったものである。

2. 埋立廃棄物層内における非保存性物質の質変換特性

図-1に充填後31日目の鉛直方向における埋立模型槽の浸透水のpH、DOC、 NH_4^+-N と NO_3^--N の濃度分布及び廃棄物間隙中の酸素、温度の分布を示す。廃棄物層の上層部（深さ0~125cm）では、深さ約25cmまでの部位でアルカリ度成分が溶出する結果pHが高くなり、深さ約25cmからは加水分解により有機酸が生成されてpHが低下したと思われる。更に、中層部（深さ125~325cm）では、pHの低下に伴い、微生物の活性が高くなるため、DOCの分解が著しくなる。また下層部（深さ約325~400cm）では、有機酸が生物分解を受けてpHの上昇が著しくなる傾向が見られたが、下層部において硝化、脱窒作用が活性化されて、pHの上昇と降下が交互に繰り返されていることが確認された。また、下層部では上層部に比べて基質が供給され易いため、上・中層部に比べて微生物除去が優越しており生物反応によって高温となっていることも確認された。以上のことから、廃棄物層内では微生物の活性と溶出によって鉛直方向にpHと温度の分布が形成され、またそれらの影響を受け非保存性物質は微生物の活性と溶出によって濃度分布が形成されると考えられる。

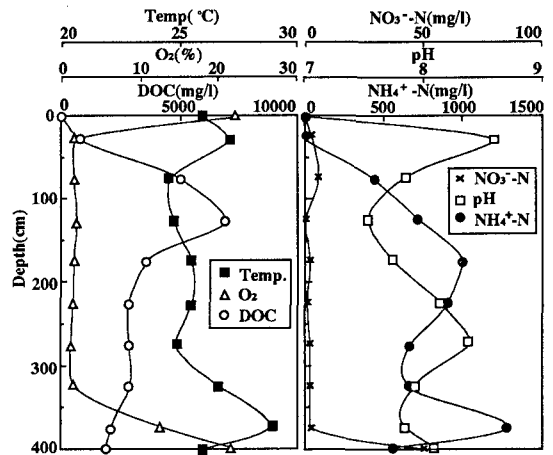


図-1 温度、pH分布及び非保存性物質の濃度分布（充填後31日目）

3. 質変換現象のモデル構成及び数値解析

3-1. モデル化及び計算方法

廃棄物層内の空間構造を固相、液相と気相に大別して、固相（ ϵ_s ）の廃棄物を溶解性物質からなる「溶解域（ ϵ_{s1} ）」と非溶解性物質からなる「非溶解域（ ϵ_{s2} ）」に、液相（ ϵ_L ）を水分が移動している「流動域（ ϵ_{L1} ）」と淀んでいる「非流動域（ ϵ_{L2} ）」に、更に、気相（ ϵ_g ）を「流動域（ ϵ_{g1} ）」と「非流動域（ ϵ_{g2} ）」に分けた。そして物質変換モデルを、生物分解により、有機性炭素は CO_2 または CH_4 に、窒素は有機態窒素（アミノ酸とする） $\rightarrow \text{NH}_4^+-\text{N} \rightarrow \text{NO}_3^--\text{N} \rightarrow \text{N}_2$ に変化すると仮定した。表-1に廃棄物層内における細菌の増殖速度及び物質収支モデル式を示す。有機性炭素を分解する微生物として有機物分解細菌（嫌気性・好気性）、窒素を変換する微生物としてアンモニア生成細菌、

表-1 細菌の増殖速度および収支モデル

$G_C^{1,2} = \mu_{\max C} \frac{C_C^{1,2}}{C_C^{1,2} + K_C} \frac{C_{DO}^{1,2}}{C_{DO}^{1,2} + K_{DO}} X_C^{1,2}$	(1)
$G_C^{1,2} = \mu_{\max C} \frac{C_C^{1,2}}{C_C^{1,2} + K_C} \frac{K'_{DOC}}{C_{DO}^{1,2} + K'_{DOC}} X_C^{1,2}$	(2)
$G_{AM}^{1,2} = \mu_{\max AM} \left(1 - \frac{C_{DO}^{1,2}}{C_{DO}^{1,2} + K_{DOAM}}\right) \frac{C_{AM}^{1,2}}{C_{AM}^{1,2} + K_{AM}} X_{AM}^{1,2}$	(3)
$G_{NH4}^{1,2} = \mu_{\max NH4} \frac{C_{NH4}^{1,2}}{C_{NH4}^{1,2} + K_{NH4}} \frac{C_{DO}^{1,2}}{C_{DO}^{1,2} + K_{DONH4}} X_{NH4}^{1,2}$	(4)
$G_{NO3}^{1,2} = \mu_{\max NO3} \frac{C_{NO3}^{1,2}}{C_{NO3}^{1,2} + K_{NO3}} \frac{C_C^{1,2}}{C_C^{1,2} + K_C} \frac{K_{DONO3}}{C_{DO}^{1,2} + K_{DONO3}} X_{NO3}^{1,2}$	(5)
$\frac{\partial(\epsilon_{L1} X_C^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(\epsilon_L X_C^{1,2})}{\partial Z} = r_C(X_C^{1,2} - X_C^{1,1}) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_C \frac{\partial X_C^{1,1}}{\partial Z} \right)$	(6)
$\frac{\partial(\epsilon_{L2} X_C^{1,2})}{\partial t} = \epsilon_{L2} G_C^{1,2} - \epsilon_{L2} K_{dC} X_C^{1,2} + r_C(X_C^{1,1} - X_C^{1,2})$	(7)

硝化菌、脱窒菌を仮定し、また細菌の増殖は液相の非流動域のみで起こるとし、各細菌の増殖速度を式(1)～式(5)の様に表した。更に液相での細菌の移流分散及び液相間での交換を考慮した菌体収支式を式(6)、式(7)の様に表した。なお、各々の細菌の増殖速度はpHと温度の関数として扱った。次に、非保存性物質の質交換モデル式を表-2に示す。埋立層内への酸素の侵入は底部集水管より起こるものとし、またそのフラックスは比較的小さいと考えられ深さ方向に一定であると仮定し、各相の酸素収支式を式(8)～式(12)の様に表した。アルカリ度の生成と消費は微生物活動によってのみ起こるとし、その収支式を式(13)～式(14)の様に表し、アルカリ度によってpHを決定した。そして、各非保存性物質の物質収支式を移流分散、交換、溶出、微生物の代謝を考慮し式(15)～式(21)の様に表した。

表-2 酸素および基質の物質収支モデル

$\frac{\partial(e_{11}C_{DO}^{1,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{DO}^{1,1})}{\partial z} = r_1(C_{DO}^{1,1} - C_{DO}^{1,2}) + \frac{\partial(D_L \frac{\partial C_{DO}^{1,1}}{\partial z})}{\partial z} - \alpha_1 e_{11} C_{DO}^{1,1} + A_{g1,1} + A_{g2,1}$ (8)	
$\frac{\partial(e_{12}C_{DO}^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{DO}^{1,2})}{\partial z} = r_1(C_{DO}^{1,1} - C_{DO}^{1,2}) - e_{12} \cdot G_C^{1,2} - b \cdot G_{NH4}^{1,2} - \alpha_2 e_{12} C_{DO}^{1,2} + A_{g1,2} + A_{g2,2}$ (9)	
$\frac{\partial(e_{21}C_{O_2}^{2,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{O_2}^{2,1})}{\partial z} = r_2(C_{O_2}^{2,1} - C_{O_2}^{2,2}) + \frac{\partial(D_L \frac{\partial C_{O_2}^{2,1}}{\partial z})}{\partial z} - \alpha_3 e_{21} C_{O_2}^{2,1} - A_{g1,1} - A_{g2,2}$ (10)	
$\frac{\partial(e_{22}C_{O_2}^{2,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{O_2}^{2,2})}{\partial z} = r_2(C_{O_2}^{2,1} - C_{O_2}^{2,2}) - \alpha_4 e_{22} C_{O_2}^{2,2} - A_{g2,1} - A_{g2,2}$ (11)	
$\frac{\partial(e_{31}C_{O_2}^{3,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{O_2}^{3,1})}{\partial z} = \alpha_1 e_{31} C_{DO}^{1,1} - \alpha_2 e_{31} C_{DO}^{1,2} - \alpha_3 e_{31} C_{O_2}^{2,1} - \alpha_4 e_{31} C_{O_2}^{2,2}$ (12)	
$\frac{\partial(e_{11}C_{alk}^{1,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{alk}^{1,1})}{\partial z} = r(C_{alk}^{1,1} - C_{alk}^{1,2}) + \frac{\partial(D_L \frac{\partial C_{alk}^{1,1}}{\partial z})}{\partial z}$ (13)	
$\frac{\partial(e_{12}C_{alk}^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{alk}^{1,2})}{\partial z} = r(C_{alk}^{1,1} - C_{alk}^{1,2}) + d_0 P_N(G_C^{1,2} + G_{AM}^{1,2} + G_{NH4}^{1,2} + G_{NO3}^{1,2}) + e_{12}(d_1 G_{AM}^{1,2} - d_2 G_{NH4}^{1,2} + d_3 G_{NO3}^{1,2})$ (14)	
$\frac{\partial(e_{11}C_{alk}^{1,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{alk}^{1,1})}{\partial z} = r_1(C_{alk}^{1,1} - C_{alk}^{1,2}) + \frac{\partial(D_L \frac{\partial C_{alk}^{1,1}}{\partial z})}{\partial z} + B_{11}$ (15)	
$\frac{\partial(e_{12}C_{alk}^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{alk}^{1,2})}{\partial z} = -e_{12}(\frac{G_C^{1,2}}{Y_C} + \frac{G_{AM}^{1,2}}{Y_{AM}} + \frac{G_{NH4}^{1,2}}{Y_{NH4}} + \frac{G_{NO3}^{1,2}}{Y_{NO3}}) + r_1(C_{alk}^{1,1} - C_{alk}^{1,2}) + B_{2c}$ (16)	
$\frac{\partial(e_{12}C_{AM}^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{AM}^{1,2})}{\partial z} = -e_{12}(\frac{G_{AM}^{1,2}}{Y_{AM}} + r_1(C_{AM}^{1,1} - C_{AM}^{1,2}) + B_{2AM}$ (17)	(溶解項) (j:1,2)
$\frac{\partial(e_{12}C_{NH4}^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{NH4}^{1,2})}{\partial z} = -e_{12}(\frac{G_{NH4}^{1,2}}{Y_{NH4}} + r_1(C_{NH4}^{1,1} - C_{NH4}^{1,2}) + B_{2NH4}$ (18)	$A_{g1,j} = k_{1,j} C_{DO}^{1,j} (e_{1,j})^F (C_{aDO} - C_{DO}^{1,j})$ $A_{g2,j} = k_{2,j} C_{DO}^{1,j} (e_{2,j})^F (C_{aDO} - C_{DO}^{1,j})$
$\frac{\partial(e_{12}C_{NO3}^{1,2})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{NO3}^{1,2})}{\partial z} = -e_{12}(\frac{G_{NO3}^{1,2}}{Y_{NO3}} + r_1(C_{NO3}^{1,1} - C_{NO3}^{1,2}) + B_{2NO3}$ (19)	(溶出項) (i:CAMO), (j:1,2) $B_{1j} = \beta_j (\delta_1 e_{31})^m (e_{1,j})^F (C_{eq} - C_{alk}^{1,j})$
$\frac{\partial(e_{31}C_{alk}^{3,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{alk}^{3,1})}{\partial z} = -B_{1c} - B_{2c}$ (20)	
$\frac{\partial(e_{31}C_{AM}^{3,1})}{\partial t} + \frac{\partial(UC_{AM}^{3,1})}{\partial z} = -B_{1AM} - B_{2AM}$ (21)	

なお、本数値計算に必要な各パラメータ値には、実験値または文献から引用した値を用いた。計算は単純差分（水分フラックスの計算はRunge-Kutta法）で行い、差分近似時間ステップ Δt を40秒、空間ステップ Δz を10cmとした。

3-2. 計算結果及び考察 充填後31日目における廃棄物層鉛直方向のDOC、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 濃度及び層内酸素濃度、pH分布の計算結果を図-2に示す。実測値と計算値を比較すると、埋立深さ約300cmで実測値と異なるDOC分布の濃度ピークが現れているが、その他の濃度分布については全体的に実測値の分布と妥当と思われる程度に一致していると言える。計算結果によると、層全体にわたって温度の影響がDOC濃度分布形成に大きく寄与していることが分かる。下端でDOCの分解が多少進まなくなるのはDOCの分解が主に嫌気性細菌によるもので底部からの酸素の侵入の影響を微妙に受けていると考えられる。また、下層部での細菌の増殖が進んでいるため、細菌の合成にアルカリ度が使われ、pHが急に低下していることが伺える。そしてアルカリ度生成の主要因である NH_4^+-N の層内分布は、脱アミノ反応速度が増加してアルカリ度が生成しpHが高くなることで細菌の増殖が制御され、微妙に均衡を保つことを反映していると推測される。下端部の NH_4^+-N 濃度が減少しないのは、脱アミノ反応温度の影響がDOC濃度に対する影響よりも大きいことに起因すると判断される。また、上層部での NO_3^--N の存在が認められるのは、 NH_4^+-N が降雨中に含まれているDOCによって硝化されたことが原因と思われる。ゆえに温度及び層内で生成・消費されるアルカリ度の履歴が層内の非保存性物質の濃度分布形成を決定付けていることが明らかになったと考えられる。以上のことより、細菌の増殖に伴うアルカリ度の生成・消費によって微生物活動が相互に影響を及ぼすことが予想され、廃棄物層内の物質交換現象は本モデルによって十分表現出来る。

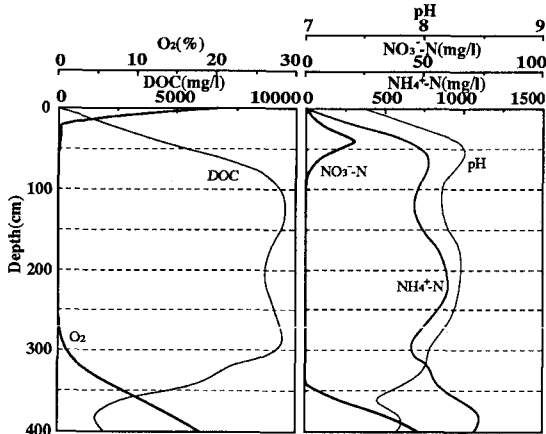


図-2 pH分布及び非保存性物質の濃度分布の計算結果（充填後31日目）

【参考文献】1)李ら：第46回土木学会年次講演会講演集，pp.978-979(1990)、2)李ら：第2回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.361-364(1990)

【記号説明】 $a=7.44, b=3.57, c=0.926, d_0, d_1, d_2, d_3$: 反応時のアルカリ度消費量 [mgCaCO₃・mgN⁻¹]、 i : 成分 (C:有機性炭素, AM:アミノ酸, NH₄:アンモニウム性窒素, NO₃:硝酸性窒素, DO:溶解酸素)、 j : 細菌 (C,C':好気性,嫌気性の有機物分解菌, AM:脱アミノ菌, NH₄:硝化菌, NO₃:脱窒菌)、 $k_{1,j}$: DO溶解速度定数 [l・mg⁻¹・day⁻¹]、 r_1, r_2 : 水分、酸素の交換係数 [day⁻¹]、 t : 時間 [sec]、 $C_{eq,i}$: 平衡濃度 [mg・l⁻¹]、 C_{sado} : 酸素の飽和濃度 [mg・l⁻¹]、 C_i : i 成分の濃度 [mg・l⁻¹]、 D_L, D_g : 水、酸素の拡散係数 [cm²・day⁻¹]、 G_j : 細菌の増殖速度 [mg・l⁻¹・day⁻¹]、 K_i : 飽和定数 [mg・l⁻¹]、 K_{DO} : DO飽和定数 [mg・l⁻¹]、 K_{dj} : 細菌の死滅係数 [day⁻¹]、 U, V : 水分、ガスflux [cm・day⁻¹]、 X_j : 細菌濃度 [mg・l⁻¹]、 Y_j : 菌体収率 [-]、 α : 吸収係数 [day⁻¹]、 β : 溶出速度係数 [day⁻¹]、 δ : 固相での i 成分の含有率 [-]、 λ : 屈曲係数 [-]、 $\mu_{max,j}$: 最大比増殖速度 [day⁻¹]