

II-630

埋立廃棄物層における汚濁物質変換のモデル化に関する研究

九州大学工学部 学生員○朴 祥徹 正 員 楠田 哲也
福岡大学工学部 正 員 島岡 隆行 正 員 花嶋 正孝
東京都 正 員 坂田 幸久

1.はじめに

廃棄物の埋立てに伴って生じる汚濁成分の浄化作用は、微生物に依るところが大きい。近年の研究により準好気性埋立の廃棄物層における物質変換現象が明らかにされつつあり、そのモデル化が試みられている¹⁾。そこでは物質収支式に分散型修正二層モデルを適用し、生物反応の主影響要因としてpHを取り上げている。筆者らは、生物反応モデルに温度の影響を考慮するため熱収支を導入する²⁾一方、集排水管から空気の侵入が認められる準好気性埋立の特徴を反映させるためガス移動モデルを修正する³⁾モデルの改良を行ってきた。本報では従来のモデルに前述の二つの影響を同時に考慮し、埋立廃棄物層における物質変換現象を精度よく表現することも目的としている。

2.物質変換モデル

表-1 対象項目

2.1 物質変換の概念 廃棄物層を固相・液相・気相に分け、固相は溶解域(ϵ_{s1})と非溶解域(ϵ_{s2})、液相は流動域(ϵ_{l1})と非流動域(ϵ_{l2})、気相については単一相とした。本研究における物質変換の対象項目を表-1に、そのモデル式を表-2に示す。

分類	対象項目				
水質	TOC	T-N	Org.-N	NH ₄ ⁺ -N	NO _x -N
細菌	好気性菌	嫌気性菌	770=7化菌	硝化菌	脱窒菌
ガス	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	

細菌の増殖速度は、修正Monod式で表現する。生物反応に影響を及ぼすpHおよび温度の影響を考慮し、pHは文献から引用した補正式式(30)を、温度はArrhenius式に従い実用式式(31)を用いる。pHはアルカリ度を用いて表現し、アルカリ度は式(9)、(10)のように表現し、廃棄物からのアルカリ成分の溶出やCO₂ガスの液相への溶解を考慮する。

2.2 ガス移動モデルの修正 従来のモデルでは、ガスフラックスを廃棄物層下部から上方に一定としていたため、ガス濃度分布の再現性が良くなかった。本モデルでは、移流を全圧勾配による粘性流動域でのフラックス(F)を式(18)で表現する。拡散は同圧条件下で通常拡散のみを考慮し、式(17)のように表現する。各ガス成分の物質収支は、式(15)とする。一方、気相へ発生したCO₂ガスは分圧平行により液相へ溶解するほか、廃棄物への化学的な吸着(CaCO₃の生成など)を考慮し式(13)、(14)、(21)のように表現する。以上のことにより、廃棄物層内のガスはその分圧条件によって上下方向に移動することになり、準好気性埋立の特徴を適切に表現できるものと考えられる。

表-2 汚濁物質の変換モデル

1.水収支 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad \theta = \epsilon_{l1} + \epsilon_{l2} \quad (1) \quad U = -k(\epsilon_{l1}) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad \phi = h + z \quad (2)$		7.液相中のCO ₂ の物質収支 $\frac{\partial (\epsilon_{l1} C_{CO2}^{l1})}{\partial t} + \frac{\partial (U C_{CO2}^{l1})}{\partial z} = r_1 (C_{CO2}^{l1} - C_{CO2}^{l2}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{l1} \frac{\partial C_{CO2}^{l1}}{\partial z} \right) + k_{b1} (C_{CO2}^{l1} - \psi C_{CO2}^{l2}) \quad (13)$	
2.細菌の物質収支 $\frac{\partial (\epsilon_{l1} X_1^{l1})}{\partial t} + \frac{\partial (U X_1^{l1})}{\partial z} = r_1 (X_1^{l1} - X_1^{l2}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{l1} \frac{\partial X_1^{l1}}{\partial z} \right) \quad (3)$		8.ガスの物質収支 $\frac{1}{RT} \frac{\partial (p_i)}{\partial t} = -\frac{\partial N_i^T}{\partial z} + R_i' \quad (15) \quad N_i^T = N_i^D + x_i F \quad (16)$	
3.細菌の増殖速度（好気性有機炭素分解） $G_C^C = \mu_{max,C} f(pH, Temp) \frac{C_C^{l2}}{C_C^{l2} + K_C} \frac{C_{DO}^{l2}}{C_{DO}^{l2} + K_{DO}} X_C^{l2} \quad (5)$		$\frac{\partial (\epsilon_{l2} C_{CO2}^{l2})}{\partial t} = r_1 (C_{CO2}^{l1} - C_{CO2}^{l2}) + k_{b2} (C_{CO2}^{l1} - \psi C_{CO2}^{l2}) - \eta_1 \epsilon_{s1} C_{CO2}^{l2} \quad (14)$	
4.基質の物質収支 (TOC) $\frac{\partial (\epsilon_{l1} C_C^{l1})}{\partial t} + \frac{\partial (U C_C^{l1})}{\partial z} = \eta_1 (C_C^{l1} - C_C^{l2}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{l1} \frac{\partial C_C^{l1}}{\partial z} \right) + \alpha_C (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l1})^p (C_{EqC} - C_C^{l1}) \quad (6)$		$\frac{1}{RT} \frac{\partial (p_i)}{\partial t} = -\frac{\partial N_i^T}{\partial z} + R_i' \quad (15) \quad F = -\frac{D_H^2}{32 \mu} \frac{P}{RT} \frac{\partial (P + p_{gz})}{\partial z} \frac{\epsilon_g}{\epsilon} \quad (18)$	
$\frac{\partial (\epsilon_{l2} C_C^{l2})}{\partial t} = \eta_1 (C_C^{l1} - C_C^{l2}) - \epsilon_{l2} \left(\frac{G_C^C}{Y_C} + \frac{G_{NOx}^{l2}}{Y_{NOx}} \right) + \alpha_C (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l2})^p (C_{EqC} - C_C^{l2}) \quad (7)$		$N_i^D = -\frac{D_{ij}}{RT} \frac{\epsilon_g}{\epsilon} \frac{\partial p_i}{\partial z} \quad (17) \quad R_{O2} = \frac{1}{M_{O2}} \{ -k_{b1} (C_{CO2}^{l1} - C_{DO}^{l1}) - k_{b2} (C_{CO2}^{l2} - C_{DO}^{l2}) \} \quad (19)$	
$\frac{\partial (\epsilon_{s1} C_C^{s1})}{\partial t} = -\alpha_C (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l1})^p (C_{EqC} - C_C^{l1}) - \alpha_C (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l2})^p (C_{EqC} - C_C^{l2}) \quad (8)$		$\frac{\partial (\epsilon_{s1} C_{CO2}^{s1})}{\partial t} = \kappa_1 \epsilon_{s1} C_{DO}^{l2} \quad (20)$	
5.アルカリ度の物質収支 $\frac{\partial (\epsilon_{l1} C_{Alk}^{l1})}{\partial t} + \frac{\partial (U C_{Alk}^{l1})}{\partial z} = r_1 (C_{Alk}^{l1} - C_{Alk}^{l2}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{l1} \frac{\partial C_{Alk}^{l1}}{\partial z} \right) + d\alpha_C (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l1})^p (C_{EqC} - C_{Alk}^{l1})$		$R_{CO2} = \epsilon_g R_{CO2} - k_{b1} (C_{CO2}^{l1} - \psi C_{CO2}^{l2}) - k_{b2} (C_{CO2}^{l2} - \psi C_{CO2}^{l1}) \quad (21)$	
$+ \alpha_{Alk} (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l1})^p (C_{EqAlk} - C_{Alk}^{l1}) + \zeta \epsilon_{l2} C_{CO2}^{l2} \quad (9)$		$R_{CO2} = \frac{1 - Y_{CH4}}{Y_C} G_C^{l2} + \frac{Y_{CO2}}{Y_C} G_C^{l2} \quad (22) \quad \frac{\partial (\epsilon_{s1} C_{CO2}^{s1})}{\partial t} = \eta_1 \epsilon_{s1} C_{CO2}^{l2} \quad (23)$	
$+ d\alpha_{l1} (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l2})^p (C_{EqC} - C_C^{l2}) + \alpha_{Alk} (\epsilon_{s1})^m (\epsilon_{l2})^p (C_{EqAlk} - C_{Alk}^{l2}) + \zeta \epsilon_{l2} C_{CO2}^{l2} \quad (10)$		$R_{CH4} = \frac{1}{M_{CH4}} \frac{16}{12} (\epsilon_{l2} R_{CH4}) \quad (24) \quad R_{CH4} = \frac{Y_{CH4}}{Y_C} G_C^{l2} \quad (25)$	
6.DHのpH補正式 $\frac{\partial (\epsilon_{l1} C_{DO}^{l1})}{\partial t} + \frac{\partial (U C_{DO}^{l1})}{\partial z} = r_1 (C_{DO}^{l1} - C_{DO}^{l2}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{l1} \frac{\partial C_{DO}^{l1}}{\partial z} \right) + k_{b1} (C_{CO2}^{l1} - C_{DO}^{l1})$		$R_{N2} = \frac{1}{M_{N2}} (\epsilon_{l2} R_{N2}) \quad (26) \quad R_{N2} = \frac{Y_{N2}}{Y_{NO3}} G_{NO3}^{l2} \quad (27)$	
$+ k_{b2} (C_{CO2}^{l2} - C_{DO}^{l2}) - \kappa_1 \epsilon_{s1} C_{DO}^{l2} \quad (11)$		9.熱収支 $\frac{\partial \{ (C_{O2} \epsilon_g + C_{CO2} \epsilon_l) T \}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (C_{p1} U T) + (\Delta H_{R1}) - \beta \frac{1}{T} (T - T_0) \quad (28)$	
$\frac{\partial (\epsilon_{l2} C_{DO}^{l2})}{\partial t} = r_1 (C_{DO}^{l1} - C_{DO}^{l2}) - \epsilon_{l2} (a G_C^{l2} + b G_{NH4}^{l2}) + k_{b1} (C_{CO2}^{l1} - C_{DO}^{l1}) - \kappa_1 \epsilon_{s1} C_{DO}^{l2} \quad (12)$		10.pHとアルカリ度 pH = 3.0 + 2.05 × 10 ⁻³ × C _{Alk} (C _{Alk} > 1700) との関係 = 6.25 + 7.50 × 10 ⁻³ × C _{Alk} (1700 ≤ C _{Alk} < 1900) = 1.67 + 3.33 × 10 ⁻³ × C _{Alk} (1900 ≤ C _{Alk})	
		11.GiのpH補正式 $G_C^{l2} = 0.3 + 0.1 \times pH \quad (pH < 7.0)$ = 1.0 (7.0 ≤ pH < 8.0) = 5.0 - 0.5 × pH (8.0 ≤ pH)	
		12.Giの温度補正式 $G_{C,T}^{l2} = G_{C,20}^{l2} \cdot 1.085^{(T-20)} \quad (31)$	

2.3 熱収支の導入 廃棄物埋立地では廃棄物中の有機物の分解に伴う発熱により、層内温度が上昇することが知られている。さらに、温度が生物作用に与える影響は大きいことから、熱収支を導入する必要がある。廃棄物層内における熱収支は吉田⁴⁾の研究を参考にし、式(28)のように表現する。廃棄物層内の温度は気液固相間で平行状態にあると考え、熱収支において各相を単一相として取り扱う。廃棄物層の熱容量は、気相の熱容量($C_g \rho_g$)が固相、液相に比べ小さく(約0.6 KJ/m³K)無視する。有効熱伝導率は直列・並列モデル⁴⁾を適用する。水分移動に伴う顕熱輸送は、水の熱容量と不飽和状態における水収支式(1),(2)における流速(U)との積から求められる。生物反応に伴う発熱のみを考慮し、有機物の分解によって消長されるガス消長速度(R_g)と生物反応によるエンタルピー($-\Delta H_g$)の積で求める。つまり、発熱反応は、有機性炭素の好気性分解および硝化反応による分解熱(450-500KJ/mol-O₂)と有機性炭素の嫌気性分解による分解熱(44-130KJ/mol-CH₄)を考慮する。放熱は、ニュートンの冷却則に従うものとする。

3.モデルの検定および考察

3.1 計算条件 物質変換モデルの検定は、調整ごみを充填した深さ4mの準好気性埋立の模型槽から得られたデータ¹⁾を用いて行った。熱収支の境界条件は、日平均気温から近似式を求めて与えた。ガスの初期条件は廃棄物層内は大気圧と等しくO₂とN₂ガスで満たされており、深さ方向に一樣に与えた。境界条件は全圧が大気圧と等しくなるように、酸素分圧を0.21、窒素を0.79とした。なお、散水条件と水質についての計算条件については、文献²⁾と同様である。

3.2 数値計算結果および考察

図-1に、埋立経過31日後の廃棄物層内の実測値と本モデルによる計算結果を示す。実測値と計算値を比較してみると、まず、TOCの濃度分布は実測値とよく一致し、深さ方向の濃度変化を良く再現している。NH₄⁺-Nの濃度は下層部における硝化反応の再現が悪く、準好気性埋立の廃棄物層下層部で盛んな脱窒現象の再現ができなかった。この理由として、溶存酸素がTOCの好気性分解に優先的に消費され、硝化反応に必要なDOが残存しなかったためである。次に、廃棄物層内へ侵入したO₂ガスを見てみると、廃棄物層の上下から約1mまでO₂ガスが残存し、その領域では主として好気性分解が盛んとなることが伺える。埋立初期にはまだ嫌気性分解が活発ではないためCH₄ガスの濃度が低く、その再現は良い。CO₂ガス濃度の分布は比較的再現性が良い。つまり、発生CO₂ガスは分圧平衡に応じて液相中に溶解するため、モデルの改良により上層部での再現ができた。しかし、下層部におけるCO₂ガスの表現が不十分である。CO₂ガスの溶解度に及ぼすpHの影響を考慮する必要があると考えられる。最後に、温度について見てみると、本モデルは、模型槽の壁面からの放熱を考慮することによって、温度の再現性が前報²⁾より良くなっている。つまり、廃棄物層の上下層部で好気性分解による温度の上昇が表現できている。しかし、中層部での現象は表現できていない。今後、水の相変化に伴う潜熱や無機化学的反応の影響を考慮する必要がある。

以上のことから、モデルを改良することにより、埋立廃棄物層における有機汚濁成分を中心とした物質変換現象がかなり明らかにできたと考えられる。今後、モデルの簡略化のために感度解析を行い、さらに重要なパラメータの実験的検討を行う予定である。

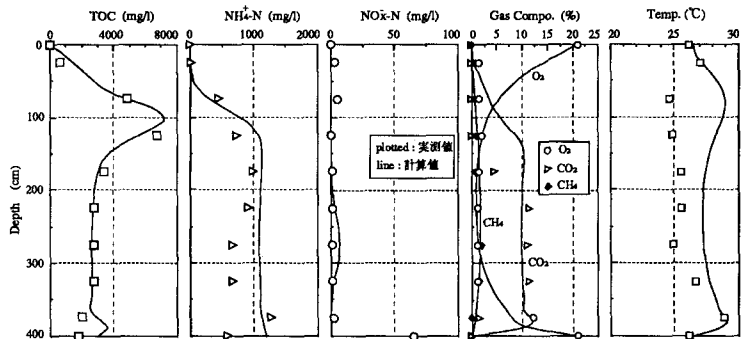


図-1 廃棄物層内の各種項目の実測値およびシミュレーション結果

【記号説明】 C_g : 濃度(mg/l), C_p : 比熱(KJ/kgK), $C_{p,0}$: 平行濃度(mg/l), D_p : 間隙径(m), $D_{p,0}$: 分散・拡散係数(m²/s), F : 流動フラックス(mol/m²s), G_p : 細菌の増殖速度(mg/l s), g : 重力加速度(=9.8m/s²), k : 透水係数(m/s), K_i : 飽和・半飽和定数(mg/l), k_{lt} : 総括移動係数(1/s), h : マトリックス・テンソル(m), ΔH_g : 生物分解熱(KJ/mol), M_i : 分子量(g/mol), N_g : 拡散フラックス(mol/m²s), P : 静圧(mol/m²s), p : 分圧(Pa), R : 気体定数(8.314mPa/molK), R_b : ガス消長速度(mol/m²s), r : 槽の半径(m), r_i : 交換速度(1/s), R_i : 反応速度(mol/m²s), T : 温度(K), T_o : 槽外温度(K), t : 時間(s), U : 流速(m/s), x_i : モル分率(-), Y_i : 菌体収率(g sub/g cell), z : 埋立層の深さ(m), α_{TC} : TOC溶出係数(1/s), ϵ : 体積分率(-), ρ : 密度(kg/m³), λ : 有効熱伝導度(KJ/m²K), β : 総括伝熱係数(KJ/m²K), γ : ϕ : 気体の溶解度(v/v), κ : η : 吸収係数(1/s), ξ : 屈曲係数(-), μ : 粘性係数(Pa s), μ_{max} : 最大増殖速度(1/s), a,b,c,d,d0,d1,d2,d3, ζ : 係数 添字 s: 固相, l: 液相, g: 気相, 1: 溶解域・流動域, 2: 非溶解域・非流動域, m,n: 係数

【参考文献】 1) 李南勲: 埋立廃棄物層における汚濁物質の挙動予測に関する基礎的研究, 九州大学学位論文(1993) 2) 朴祥徹ら: 埋立廃棄物層内温度が廃棄物の分解に及ぼす影響, H5土木西部支部研究発表会講演概要集, pp.274-275 3) 坂田幸久ら: 廃棄物層内における物質変換機構の数値解析(その2), 同上, pp.258-279(1994) 4) 吉田英樹ら: 廃棄物埋立層内の温度分布に関する理論的研究, 衛生工学研究論文集, Vol.25, pp.29-38(1998) 5) 田中信寿ら: 廃棄物埋立処分地におけるガスおよびガス成分の移動について, 廃棄物学会誌, Vol.2, No.1, 46-58(1991)