

東京大学 正員 藤田 賢二

" 学生員 王 鑑生

1. 目的と方法

本研究は下水汚泥をコンポスト化する場合、汚泥の性状と操作条件によって、反応がどのように進行するかを数値シミュレーションで説明することから目的である。

方法としては、まず、回分式発酵槽を想定し、基本方程式を立て、更に実験データに基づいて、各係数を求める。実際のデータでモデルの有効性を証明する。このモデルを使って、通気・含水率・外気温・送気温・菌体量・灰分・酸素濃度による影響と送気制御・酸素濃度制御した場合の発酵過程とを解析することができる。

2. 基本方程式

2.1. 基本式を立てる前に次の仮定をする。

- 1) 槽内は完全均一であること。
- 2) 生物の増殖は Monod の式が適用すること。
- 3) 基質としては汚泥中生物分解可能な部分であること。
- 4) 基質の分解速度は菌体の増殖に比例すること。
- 5) 揮発性物質単位質量当りの酸素消費速度は温度・含水率・空酸素率・酸素濃度の関数として表わされること。
- 6) 槽内の水蒸気圧は温度・含水率の関数であること。
- 7) 死滅した菌体の一部が基質に残り、残りが非揮発性物即ち灰分に転換されること。
- 8) 原料汚泥の pH は 7 前後のものであること。
- 9) 汚泥中基質となる部分の分解は次の量論式に従うこと。



2.2 基本式の収支

菌体: $\frac{dX}{dt} = \mu \left(\frac{X}{X_0} \right) - k_d \left(\frac{X}{X_0} \right)$
 ここに $\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{(S/M)}{K_s + (S/M)}$

基質: $\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{sx}} \cdot \mu \left(\frac{X}{X_0} \right) + \alpha k_d \left(\frac{X}{X_0} \right)$

水分: $\frac{dW}{dt} = \frac{dV}{dt} + Y_{mojs} \cdot \frac{dS}{dt}$

灰分: $\frac{dU}{dt} = \beta k_d \left(\frac{X}{X_0} \right)$

温度: $\frac{dT}{dt} = \frac{f_H - \left[\left(\frac{dW}{dt} - \frac{dU}{dt} \right) C_s + \frac{dW}{dt} C_w \right] T}{(M-W)C_s + W \cdot C_w}$

2.3. 酸素消費速度と修正係数

$$\frac{dO_2}{dt} = k \cdot \frac{dS}{dt}$$

$$R_{O_2}^* = (dO_2/dt) / (\alpha X + S)$$

$$R_{O_2} = R_{O_2}^* \cdot f_w \cdot f_p \cdot f_o$$

R_{O_2} は含水率・自由空酸素率・酸素濃度が制限因子になっていない場

合での単位 VS あたりの最大酸素消費速度、温度の関数である。 R_{O_2} は実際の酸素消費速度、各影響因子を掛けにものである。

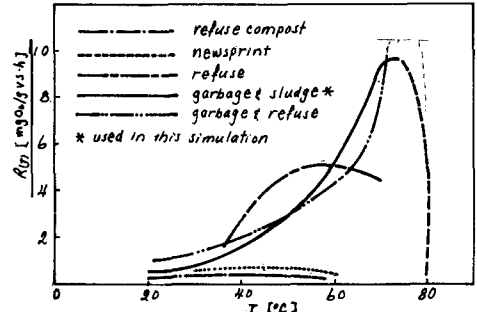


Fig. 1 R_{O_2} の温度依存性

Fig. 1 に示すように R_{O_2} は温度に依存し、55℃～70℃の間にはピークを持つ。しかし微生物の蛋白質酵素はほとんど 80℃に達した前に変性を起こすので 80℃に近づくとき R_{O_2} の急降下が予想される。従って本シミュレーションは次の式を使うことにした。

$$R_{O_2}^* = 0.0257 \left[e^{0.0976(T-20)} - e^{0.0902(T-55)} \right]$$

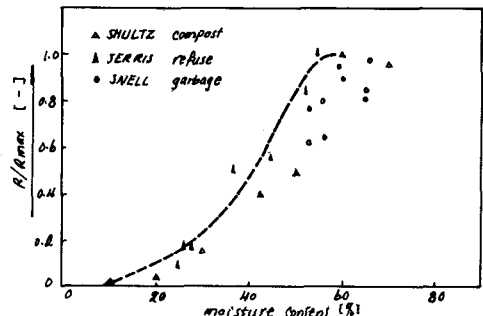


Fig. 2. 含水率と酸素消費速度

含水率が 15% 以下に下がると微生物の活動が停止状態になる。

Fig. 2 に示すように含水率 55～60% まで反応速度は含水率の増加とともに大きくなる。これ以上になると、含水率が制限因子になっていく。反応速度低下の例はしばしば見られる。それは自由空酸素が少くなるためと考えられる。本シミュレーションの含水率修正係数は次のとおりである。

$$f_w = \begin{cases} w\% < 55\% & f_w = 10(w-55)^{2.1} \cdot \exp(1.38 \alpha w) \\ w\% \geq 55\% & f_w = 1 \end{cases}$$

酸素濃度による影響は Fig. 3 に示すように Monod 型の式で近似されている。 K_{O_2} は 1% 前後のものである。

$$f_{O_2} = \frac{[O_2]}{K_{O_2} + [O_2]}$$

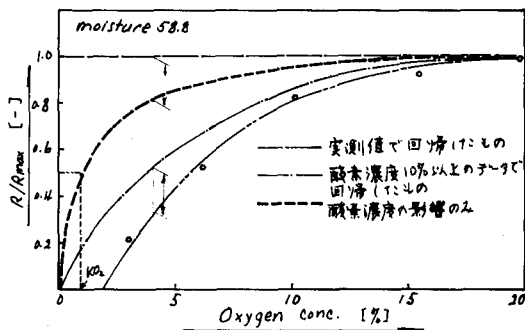


fig. 3. 酸素濃度と酸素消費速度

自由空隙率の違、た原料は酸素消費速度も違、て来る。
自由空隙率による影響は fig. 4 に示してある。

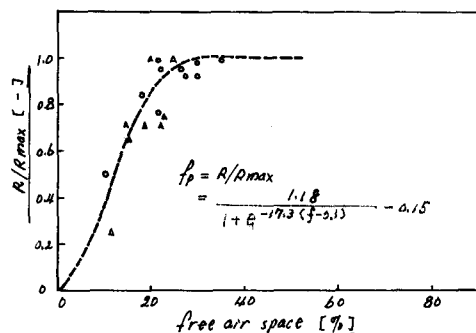


fig. 4. 自由空隙率と酸素消費速度

自由空隙率 > 30% の場合、自由空隙率による影響はない。f の計算は次式のとく。

$$f = 1 - \frac{f_m(1-u)}{G_s f_w} - \frac{f_m u}{f_w}$$

2.4 ガスと水蒸気に関する関係式

出入の水蒸気差 $\frac{dV}{dt} = V_i - V_o$
 Taでの飽和蒸気圧 $P_a = \exp[2.3(94a + b)]$
 Taでの実際 " $P_i = P_a \cdot R_h$
 Tでの飽和蒸気圧 $P_v = \exp[2.3(94 + b)]$
 槽内の実際蒸気圧 $P_o = P_i + (P_i - P_o) \lambda \left(\frac{V_i}{V_o} \right)$
 送気中の乾燥空気流量 $Q_i = \frac{C_i(760-P_i)}{760} Q \cdot C_i / [R_a(273+T_a)]$
 " 水蒸気流量 $V_i = C_i \left(\frac{P_o}{760} \right) Q \cdot C_i / [R_v(273+T_a)]$
 排気中の乾燥ガス流量 $Q_o = Q_i + Y_{s,i} \frac{dV}{dt}$
 " 水蒸気流量 $Y_{s,i} = -Y_{a,i} + Y_{c,i} + Y_{n,i}$
 排気中の水蒸気流量 $V_o = \left(\frac{P_o}{760} \right) Q \cdot C_i / [R_v(273+T)]$

2.5 熱収支に関する関係式

入熱 { 乾燥空気から持ち込む顕熱 $f_{gi} = Q_{gi} T_a$
 " 送気中の水蒸気 " $f_{wi} = V_i C_u T_a$
 有機物の分解熱 $f_{org} = \frac{dL}{dt} \cdot h_s$
 攪拌エネルギー " $f_{mix} = \eta \cdot P \cdot h_r$
 出熱 { 微生物の増殖から放熱 $f_{grow} = \frac{dX}{dt} \cdot h_{grow}$
 排気中水分が持ち出す顕熱 $f_{wo} = \frac{dV}{dt} \cdot C_u T + V_i C_u T$
 " 潜熱 $f_{wl} = \frac{dV}{dt} (597 + 0.887 T)$
 器壁からのヒートロス $f_L = J(T - T_a)$
 正味の熱流 $f_H = f_{gi} + f_{wi} + f_{org} + f_{mix} - f_{grow} - f_{wo} - f_{wl} - f_L$

3. 計算に用いた諸係数:

係数	値	備考

k_s Michaelis-Menten 係数	0.2	[-]	各都市の実験データより推定した値
Y_{gs} 菌体収率	0.5	[-]	理論値より計算
K_d 死滅係数	0	[-]	データに欠く
λ 水分蒸発に関する比例係数	1	[-]	槽内空気と容器の水との蒸気圧差による
h_s 乾燥有機物重量当りの熱熱量	$(3.4 \times 10^4) / (201)$	[kcal/kg]	COD消費量より計算
h_{grow} 微生物の増殖に使う熱量	土項と合計		
α 死滅1:菌体の有機部分の割合	0.8	[-]	菌体組成 (Bach)
β " 灰分部分 "	0.2	[-]	"
k_{oys} 酸素消費速度と基質消費速度の比	$12.5 \times 10^3 / 201$	[-]	理論値より計算
$Y_{hgs}, Y_{cgs}, Y_{mgs}, Y_{nys}$ 収率係数	$\frac{dX/dt}{dS/dt}, \frac{dO_2/dt}{dS/dt}, \frac{dV/dt}{dS/dt}, \frac{dN/dt}{dS/dt}$		"
G_v, G_p, G_w 揮発性物質、灰分、水の比重	1, 2.15, 1	[-]	sludgeの組成
C_s, C_g, C_v, C_w 乾燥有機物、ガス、水、蒸気-水 の比熱	0.25, 0.24, 0.46, 1	[kcal/kg°C]	
R_h 相対湿度	0.5	[-]	
T_a, T_s 外気温、原料温度	20, 20	[°C]	

4. モデルの有効性について

モデルの有効性を検証するために、次に示しているN市の実験データを本シミュレーションのinput条件として検証を行った。微生物量は測定していないから揮発性物質量の0.001, 0.01, 0.05 三つ通りで試算した。その結果は fig. 5 に示している。

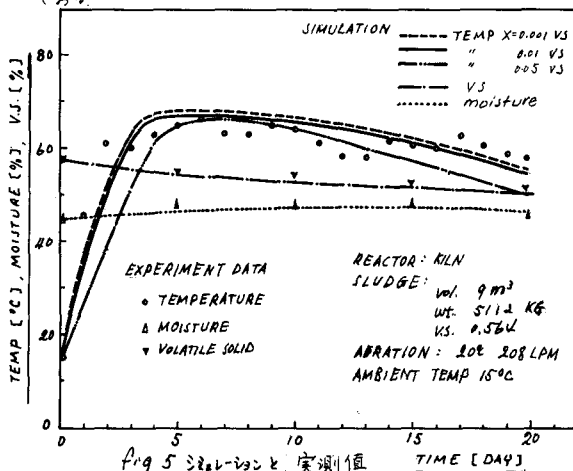


fig. 5 シミュレーションと実測値

シミュレーションと実測値はある程度までよく合致している。モデルの有効性が認められる。なお、本モデルを使って前記の各因子による影響・操作条件による発酵過程の解析は紙面の都合で次報に譲ずる。

5. 記号:

X: 微生物量[kg]	Ra: gas const. 287 [J/kg·K]	$[O_2]$: 酸素濃度 [%]
S: 基質重量[kg]	for air	$K_{0.5}$: 係数 1 [-]
W: 水分重量[kg]	Rv: gas const. 461 [J/kg·K]	a: 定数 2240
U: 灰分[kg]	for vapor	b: " 8.9
M: 全質量[kg]	f_0 : 酸素濃度に対する修正係数 [-]	
μ : 比増殖速度係数 [1/day]	f_p : 自由空隙率 [-]	
μ_{max} : 最大 "	f_w : 含水率に対する修正係数 [-]	
C_i : 換算, 101000		
C_u : " 2.4		

6. 参考文献: 藤田賢二: コスト削減プロセスの解析: 公害と対策 vol.16 No.2 (1980)