

京都大学工学部 正員 岩井重久
 " " 寺島 泰
 " " 浦辺 真郎
 三菱重工業(株) " 土井 亨

はじめに 近年、下水道の普及とともに、下水汚泥の発生量は年々増加の一途をたどり、今や重大な社会問題となりつつある。現在、各種の脱水工程から発生する汚泥ケーキをそのまま埋立処分、海洋投棄などによって処分することは、環境汚染の恐れがあることから、次第に困難になることが予想される。したがって、今後は減量化・安定化が望める焼却処理に依存する比率が、ますます高まるものと考えられる。

しかしながら、水分を多量に含有する汚泥(または汚泥ケーキ)の燃焼は、乾燥、熱分解、着火、表面燃焼など、相変化をも伴った種々の現象が組み合わさった非常に複雑な現象であるため、その燃焼機構については、未だ不明な点が多い。本研究は、その複雑な機構のなかで、主に現象を支配すると考えられる乾燥と熱分解・燃焼現象に着目し、燃焼過程における試料汚泥層内の温度分布や重量変化について解析したものであり、これらの成果が、汚泥焼却炉の運転、設計等に必要となる指針、基礎的データとなれば幸甚である。

また、汚泥焼却に伴う NO_x の発生、重金属飛散問題に関する研究も、焼却処理を考える上で、非常に重要であるが、これらについては、今後検討していきたい。

基礎方程式の導入 試料層を乾燥・熱分解層と湿润層とに分けて、各層において、熱伝導項、蒸気移動に伴う熱移動項、熱分解(燃焼)による発熱項を考慮して、熱収支を1次元的にとらえると、次の基礎方程式群が得られる。(図-1 参照)

$$C_s \rho_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + C_v (\rho_L - \rho_s) \frac{dE}{dt} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \rho \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (0 \leq x < E) \quad (1)$$

$$C_L \rho_L \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_L \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (E < x \leq E) \quad (2)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=E} + \lambda_L \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=E} = \gamma (\rho_L - \rho_s) \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \omega k \exp\left(-\frac{E}{R\theta}\right) \quad (4)$$

$$\text{I.C. } t=0; \quad \theta=\theta_0, \quad \omega=\omega_0, \quad E=0$$

$$\text{B.C. } x=0, t>0; \quad -\lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial x} = h_1 (\theta_{f1} - \theta)$$

$$x=E, t>0; \quad -\lambda_L \frac{\partial \theta}{\partial x} = h_2 (\theta_{f2} - \theta)$$

} (5)

以上の基礎方程式(1)~(4)とI.C., B.C.(5)を離散化するため、移動境界条件については、Variable space method¹⁾法を、また、熱分解項については、Zimm²⁾の方法を各々用いると、次ページに示す離散化した式が得られる。

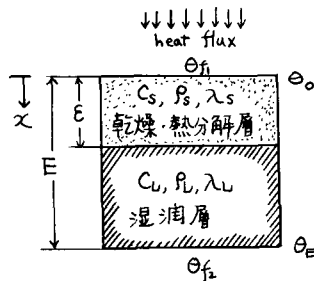


図-1 試料層モデル図

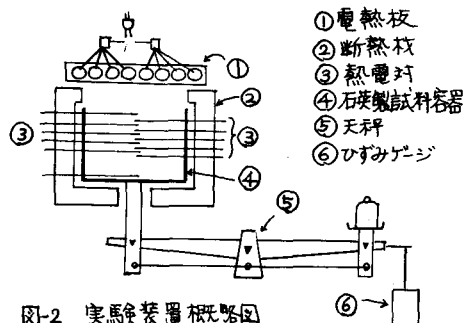


図-2 実験装置概略図

$$\frac{\theta_n^{m+1} - \theta_n^m}{\Delta t} = \frac{\varepsilon^{m+1} - \varepsilon^m}{\Delta t} \cdot \frac{\theta_{n+1}^m - \theta_{n-1}^m}{2\Delta x_s} \left\{ \frac{n\Delta x_s}{\varepsilon^m} + \frac{C_v}{C_s \rho_s} (\rho_L - \rho_s) \right\} + \alpha_s \frac{\theta_{n+1}^m - 2\theta_n^m + \theta_{n-1}^m}{(\Delta x_s)^2} - \frac{g}{C_s \rho_s} \cdot \frac{\omega_n^{m+1} - \omega_n^m}{\Delta t} \quad (6)$$

$$-\lambda_s \frac{3\theta_n^m - 4\theta_{n-1}^m + \theta_{n-2}^m}{2\Delta x_s} + \lambda_L \frac{-3\theta_n^m + 4\theta_{n+1}^m - \theta_{n+2}^m}{2\Delta x_L} = \gamma (\rho_L - \rho_s) \frac{\varepsilon^{m+1} - \varepsilon^m}{\Delta t} \quad (x = \varepsilon) \quad (7)$$

$$\frac{\theta_0^{m+1} - \theta_0^m}{\Delta t} = \frac{\varepsilon^{m+1} - \varepsilon^m}{\Delta t} \cdot \frac{h_1}{\lambda_s} (\theta_0^m - \theta_{f1}) \frac{C_v}{C_s \rho_s} (\rho_L - \rho_s) + \frac{\alpha_s}{\Delta x_s^2} \left\{ 2\theta_0^m - 2 \left(\frac{\Delta x_s h_1}{\lambda_s} + 1 \right) \theta_0^m + \frac{2\Delta x_s h_1}{\lambda_s} \theta_{f1} \right\} - \frac{g}{C_s \rho_s} \cdot \frac{\omega_0^{m+1} - \omega_0^m}{\Delta t}$$

$$\frac{\theta_n^{m+1} - \theta_n^m}{\Delta t} = \frac{\varepsilon^{m+1} - \varepsilon^m}{\Delta t} \cdot \frac{\theta_{n+1}^m - \theta_{n-1}^m}{2\Delta x_L} \cdot \frac{(N-n)\Delta x_L}{E - \varepsilon^m} + \alpha_L \frac{\theta_{n+1}^m - 2\theta_n^m + \theta_{n-1}^m}{(\Delta x_L)^2} \quad (E < x < E) \quad (9) \quad (x=0) \quad (8)$$

$$\frac{\theta_E^{m+1} - \theta_E^m}{\Delta t} = \frac{\alpha_L}{(\Delta x_L)^2} \left\{ 2\theta_{E-1}^m - 2 \left(\frac{\Delta x_L h_2}{\lambda_L} + 1 \right) \theta_E^m + \frac{2h_2 \Delta x_L}{\lambda_L} \theta_{fL} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\omega_n^{m+1}}{\omega_n^m} = \exp \left\{ -k \Delta t \exp \left(-2E / R(\theta_n^{m+1} + \theta_n^m) \right) \right\} \quad (11)$$

実験装置および実験方法

実験に用いた污泥ケーキは、下水道処理場から採取した真空脱水ケーキである。污泥ケーキは実験条件をできるだけ同一にするため、一度乾燥させた後に、粉砕し、再び水を加えて所定の水分に調整したものをを用いた。実験は、図-2(前ページ参照)に示すような装置を用い、石英製容器に入れた試料污泥を、電熱板で試料上からの加熱して行った。また、試料層各位置の温度および試料層全体の重量変化を連続的に測定した。なお、温度変化の測定には、各測定位置に固定された $\phi 3 \text{ mm}$ C-A 熱電対、重量変化の測定には、天秤とストレンゲージを接続させて行った。

結果ならびに考察

図-3は、試料污泥水分57%についての実験結果と数値計算結果とを比較した1例である。なお、数値計算に用いた試料污泥の物性値等は表-1に示す通りで、これらの値は、他の実験結果³⁾あるいは文献値⁴⁾である。実験結果と数値計算結果を比較すると、温度分布曲線は実験初期においてはよい一致を示しており、また、重量減少曲線(数値計算では水分蒸発量と可燃分焼却量の合計)は、非常によく一致している。とくに、温度分布曲線が、実験時間の経過とともに実験値より低く計算されたのは、試料層の収縮による熱流入量の増大、ならびに污泥の中層部付近における熱分解残渣固形分の燃焼などが、実験では起っていたことに対する考慮を無視したことも考えられる。同様の数値計算を、水分16.17%の試料実験について行った結果、前述の場合より、温度分布、重量減少ともにきわめてよい一致がみられた。このことから、試料の水分が増加すると、水分移動に伴う熱移動、および収縮量増大による熱流入量などの影響によって、現象解析がより複雑になる。

最後に、本研究においては、若干の改良余地を残しており、(たとえば熱分解反応に関する物性値の決定など)今後の検討課題があるが、污泥燃焼という複雑な現象の解析、とくに熱移動、物質移動に関しては、基礎的知見が得られた。

(記号説明) C_s : 比熱 ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$), ρ : 密度 (g/cm^3), λ : 熱伝導率 ($\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$), g : 発熱量 (cal/g)
 θ : 温度 ($^\circ\text{C}$), t : 時間 (sec), x : 距離 (cm), γ : 水の蒸発潜熱 (cal/g), C_v : 水蒸気比熱 ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$)
 ε : 蒸発面位置, k : 熱分解反応定数
 E : 活性化定数, R : ガス定数
 h : 表面熱伝達率 ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$)
 α : 熱拡散率 ($= \lambda / \rho c_p$), (cm^2/sec)

(添字) S: 乾燥・熱分解層, L: 湿潤層, m, n: 数値計算に用いる時間, 表-1 計算に用いた物性値
 距離を示す。

(参考文献) 1) William, D.M.

Trans. ASME (1956), 2) Zimm, J.

J. Appl. Phys. (1960), 3) 工井: 炭

体論 (1977), 4) 大宮: 下水道施設

記号	用いた値	記号	用いた値
ρ_L	0.772	ρ_s	0.345
C_L	0.71	C_s	0.25
α_L	0.00225	α_s	0.00239
ω	0.22	g	860

① $x=0.54$ ② $x=1.01$ ③ $x=1.58$ ④ $x=2.54$ cm での温度,
 ⑤は重量減少の実験値, ○は①-⑤の計算値を示す

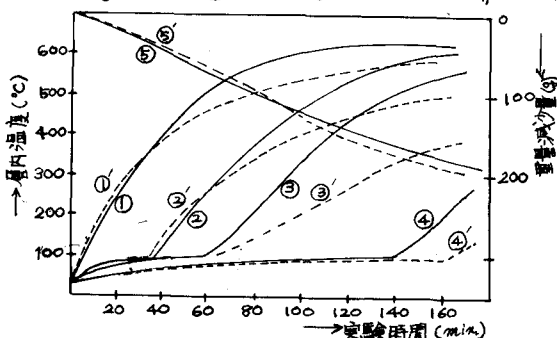


図-3 温度分布、重量減少量の経時変化と計算値