

京都大学工学部 (正員)高松武一郎 (正員)平岡正勝

(正員)高内政彦 (学生員)島津康弘

1. 概説 本研究では Atomized Suspension Technique とよばれる燃焼工学的汚泥処理法に関してその噴霧乾燥機構を考察する。この方法は高温に熱せられた反応塔の上端からノズルによって汚泥を噴霧し、反応塔の上部領域において乾燥させ、引続いて反応塔下部領域において乾燥汚泥を熱分解させて燃焼性ガスと炭素含有量の多い固形物とにする方法である。このガスと固形物は燃焼せしめて反応塔壁の加熱に用いることができる。この方法では噴霧、乾燥、熱分解、熱回収という四つの問題が重要となるが噴霧については前報で述べたので、ここでは汚泥の乾燥という問題を取扱っていく。

2. 静止気流中における液滴の蒸発

ノズルによって高速で噴霧された液滴は、その粒径が微小(100 μ 程度)なため急速に減速し、終末速度となり、ガスとはほとんど同速度で動く。このため Re 数は零に近くなり、静止気流中にあるとみなすことができる。そこで今、単一液滴が静止気流中に置かれている場合について考えていく。この液滴への伝熱機構には対流と壁からの輻射がある。液滴の周囲には蒸気の境界層が生じ、これを通して熱と物質(蒸気)の伝達が行われる。一定壁温 T_w 、一定ガス温 T_g の環境に置かれた温度 T_p の液滴に伝達された熱は、すべて蒸発潜熱として用いられるとすると、定常状態における蒸発速度 $dW/d\theta$ は

$$-dW/d\theta = [h_c A_c (T_g - T_p) + h_r A_r (T_w - T_p)] / \gamma_w \quad (1)$$

$$= k_g A_k (H_p - H) \quad (2)$$

W : 液滴重量, θ : 時間, h_c : 対流伝熱係数, h_r : 輻射伝熱係数, k_g : 物質移動係数, γ_w : 蒸気潜熱, A : 面積 (c, r, k はそれぞれ対流、輻射、物質移動とあらわす。) H : 湿度, H_p : 液滴表面温度に対応する飽和湿度, h_r は式によって定義する。 $A_r = \epsilon_p \sigma (T_w^4 - T_p^4) / (T_w - T_p)$ (3)

ここで ϵ_p は液滴の輻射能, σ は Stefan-Boltzmann の定数である。

境界層理論によれば、 $Re \neq 0$ のときは次式が成立つ。 $Nu = h_c x / \lambda_f = 2$ (4)

ここで Nu は Nusselt 数, x は液滴粒径, λ_f はガス境界の熱伝導度である。又、水-空気系では、Lewis の法則により、湿润比熱と C_H とすれば次式が成立する。 $h_c / k_g = C_H$ (5)

粒子の密度を ρ_p とし、 $A_c = A_r = A_k = \pi x^2$ とすると (1) 式より

$$d^2x/d\theta = -2 [h_c (T_g - T_p) + h_r (T_w - T_p)] / \rho_p r_w \quad (6)$$

粒径 x_1 から x_2 まで積分すると、 $\theta = \int_{x_1}^{x_2} \left(-\frac{\rho_p r_w}{2} \right) \frac{dx}{[h_c (T_g - T_p) + h_r (T_w - T_p)]}$ (7)

積分項は T_p が x によって変化するため解析的には解くことができない。そこで (1) (2) 式による熱と物質のバランスを考慮する。すなわち $h_c (T_g - T_p) + h_r (T_w - T_p) = k_g (H_p - H) \gamma_w$ (8)

ある x に対して T_p を仮定すると、 γ_w , H_p が定まり、(3) 式によって h_r が、(4) 式によって h_c が、さらに (5) 式によって k_g が定まる。そこで (7) 式を用いて trial & error を行つて、各粒径に対する T_p を見出す。これによって (7) 式を数式的に積分すると、粒径 x と時間 θ の関係を知る事ができる。今、 T_g を 50°C 、 H を 0.02 kg-dry air とし、 T_w を 100°C から 500°C まで変化させ、 x が 100μ から 20μ に減少するまで

半径 \$r\$ の値を求めると図-1に示すようにほぼ直線となる。一方、式(1)の右辺の第一項と第二項はそれぞれ対流と輻射による伝熱量であるから、これらの値を \$100\mu\$ の場合について比較してみると図-2のようになる。これとみてわかるように、\$100\mu\$ 程度の粒径に対しては \$T_w\$ が \$300^\circ\text{C}\$ 付近から急激に輻射の効果が増大している。

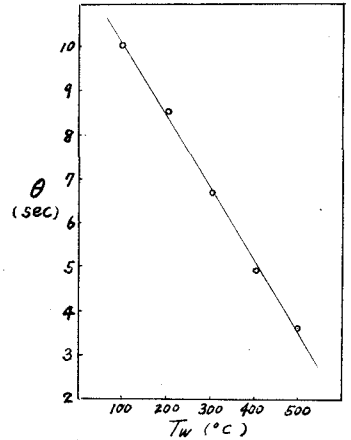


図-1. 壁温と蒸発に要する時間の関係 (\$T_g = 50^\circ\text{C}\$, \$H = 0.02 \text{ kg/kg}\$)

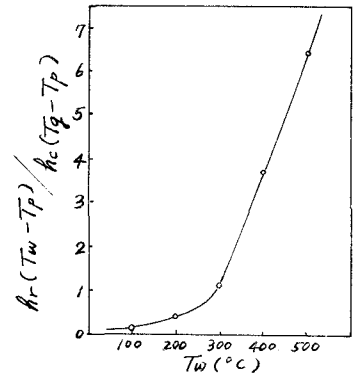


図-2. 輻射の効果 (\$\chi = 100\mu\$)

3. 対流熱伝達に対する物質移動の影響

周囲が高温で壁温が高い場合、蒸発速度が大分ため半径方向に供給していく蒸気によって熱の流入が一部妨げられ、真の伝熱率は減少すると思われる。今、境界層温度を \$T_b\$、境界層の微小厚さを \$dr\$、境界層内拡散蒸気の定圧比熱を \$C_{pf}\$ とすると、

$$+2\pi r dr \lambda_f \left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r} - 4\pi r^2 \lambda_f \left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r} + \left(\frac{dW}{dt} \right) C_{pf} (T_b)_{r=r} - \left(\frac{dW}{dt} \right) C_{pf} (T_b)_{r=r} = 0 \quad (9)$$

上式に(2)の式を代入し、微小項を無視すると(12)式となる。

$$T_b \left(\frac{dr}{dr} \right)_{r=r} = (T_b)_{r=r} + \left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r} dr \quad (10)$$

$$\left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r} = \left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r} + \left(\frac{d^2 T_b}{dr^2} \right)_{r=r} dr \quad (11)$$

$$\frac{d}{dr} \left\{ r^2 \frac{dT_b}{dr} + (r/r) T_b \right\} = 0 \quad (12)$$

$$\phi = C_{pf} \left(\frac{dW}{dt} \right) / 4\pi r \lambda_f \quad (13)$$

(12)式を \$r = r_0\$ (境界層半径) において \$T_b = T_g\$、\$r = r_0\$ (液滴半径) において \$\phi = 0\$ の境界条件によって解くと、

$$T_b = \frac{T_g - T_p}{e^{-\phi/r_0} - e^{-\phi/r_0}} \cdot e^{-\phi/r} + \frac{T_p e^{-\phi/r_0} - T_g e^{-\phi/r_0}}{e^{-\phi/r_0} - e^{-\phi/r_0}} \quad (14)$$

境界層において(14)式が成立するとする。 \$h_c(T_g - T_p) = \lambda_f \left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r_0}\$ (15)

(14)式より \$\left(\frac{dT_b}{dr} \right)_{r=r_0} = \frac{T_g - T_p}{e^{-\phi/r_0} - e^{-\phi/r_0}} \cdot \frac{\phi}{r_0^2} e^{-\phi/r_0}\$ (16)

$$Nu = \frac{2r_0 h_c}{\lambda_f} = \frac{2\phi}{r_0} \left\{ \frac{1}{\exp(\frac{\phi}{r_0} - \frac{\phi}{r_1}) - 1} \right\} \quad (17)$$

$$\text{exponentialの項を展開すると} \quad Nu = \frac{2}{r_0} \cdot \frac{1}{\left\{ \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) + \frac{\phi}{2} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)^2 + \dots \right\}} \quad (18)$$

$$\text{よって} \phi \rightarrow 0 \text{ となれば } \frac{dW}{dt} \rightarrow 0 \text{ のようになる。} \quad (Nu)_{\phi=0} = \frac{2}{r_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)} \quad (19)$$

\$r \gg r_0\$ のときは \$Nu \div 2\$ となり前述したものと一致する。また物質移動速度の \$Nu\$ 数となれば、(17)式より次式であらわされることになる。

$$\frac{Nu}{(Nu)_{\phi=0}} = \frac{\phi \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)}{\exp(\frac{\phi}{r_0} - \frac{\phi}{r_1}) - 1} = \frac{\phi \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)}{\left\{ \phi \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) + \frac{\phi^2}{2!} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)^2 + \dots \right\}} \quad (20)$$