

II-209 高含水スラッジの着火と燃焼に関する研究(その1)

京都大学 正 岩井 重久
 日立造船 正 春山 鴻
 京都大学 正 高月 紘
 ○京都大学 学 浦辺 真郎

1. 研究の目的 最近、下水汚泥の焼却処理がかなり行なわれるようになってきているが、加温雰囲気下水汚泥の温度と水分の変化などについて求めた例はほとんど見られない。そのためこれらを求めるための予備実験として簡単な装置で雰囲気温度および含水率の変化に対して、着火に要する時間、あるいは火移り速度・乾燥速度の変化、汚泥層内の温度分布の変化などを求めた。この結果を考察して、詳細な計測を行なう際の参考にしたい。また、西ドイツなどの向流式燃焼炉からの廃ガスを再燃焼室を設けて二次公害を防ごうとしていることなどから、向流式焼却では温度がある程度上昇するまでに、乾留ガス分が未着火で放出される可能性があるものと思われ、この点についても検討を加えたい。

2. 実験方法 実験Ⅰ：図-1に示すような装置を用いて、石英ガラスの容器に入れた汚泥を、電気炉で加温した空気雰囲気の石英ガラス筒にすばやく入れて、その着火必要時間(汚泥の燃焼炎が見られる時間)と燃焼終了時間(炎の消える時間)を測定した。試料汚泥の含水率を3段階(含水率58.6%, 71.5%, 80.5%)に変化させ、雰囲気温度も3段階(600° , 700° , 800°C)に変化させた。

実験Ⅱ： 図-2に示すような装置を用いて、灯油バーナーで加熱した熱風を並流式で通風することにより、汚泥の高温下における挙動を知るものである。試料汚泥の含水率は、70.0%で入口温度を4段階(500° , 600° , 650° , 800°C)、含水率80.9%で入口温度を 650°C 、さらに含水率70.0%で入口温度を 350°C で1時間、 650°C で1時間、 800°C で燃焼終了まで、の各実験を行なった。

なお、今回用いた試料汚泥の性状は、表-1に示した通りであり、実験Ⅰ,Ⅱとともに低温($5\sim 7^{\circ}\text{C}$)にて貯蔵した汚泥をよく混合均一化させたものを使用した。また、試料汚泥の含水率を下げるには低温乾燥($5\sim 7^{\circ}\text{C}$)し、含水率を上げるには適当に加えることによって得られた。

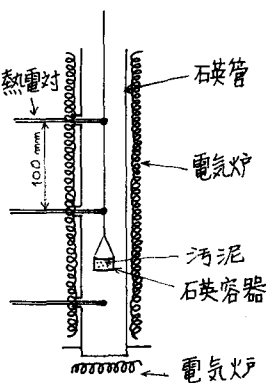


図-1 装置図

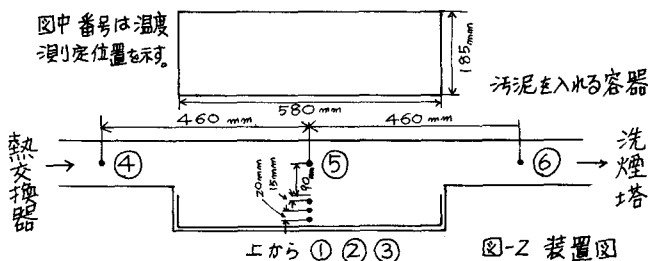


図-2 装置図

表-1 試料スラッジ分析結果表

含水率	75.2%
可燃分	15.1%
揮発分	13.3%
固定炭素	1.8%
灰分	9.7%
可燃分低位発熱量	4,400 Kcal/kg
低位発熱量	200 Kcal/kg

(註) 汚泥採取場所: 京都島羽下水処理場

石灰投入量 : 約 30%
 脱水法 : ベルト・フィルター

3. 実験結果

実験Ⅰ：雰囲気温度と着火必要時間との関係を図-3に、雰囲気温度と平均汚泥重量減少率との関係を図-4に示した。図-4から、含水率80.5%汚泥では、含水率71.5%より重量減少量（燃焼終了までの重量減少）が大きくなっているが、これは含水率の増加に伴う見かけ上の質量減少の増加が考えられ、また実験Ⅱにおける図-5に示すような突発的な水分の蒸発による可能性もあろう。なお、実験Ⅱにおいて、汚泥層の凹凸のはげしい温度変化は水分の突発的な蒸発によるものと筆者らは考えている。

実験Ⅱ：汚泥上部空間と汚泥層内の時間的溫度変化を、図-5(1)(2)(3)(4)、図-6、図-7に示した。なお図中番号は図-3における番号と同一である。これらの図の解釈にはいろいろな議論があるであろうが、一応の傾向が見られる。

図-7から検討すれば、汚泥をある程度乾燥させて後に、燃焼させる方法は、あまり効率がよくないと考えられる。

これらの図から、汚泥の水分乾燥速度と質量燃焼速度を求め

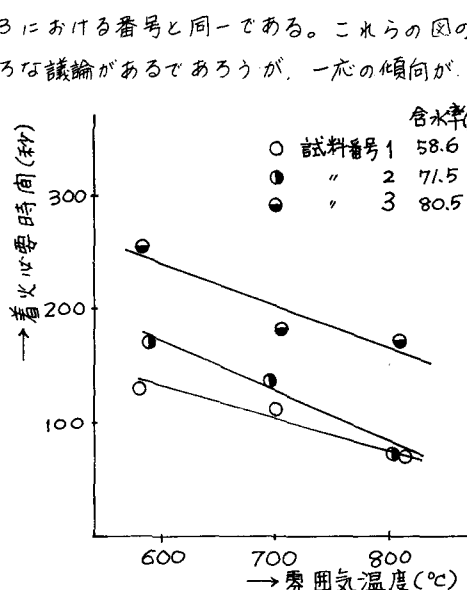


図-3. 着火必要時間-温度関係図

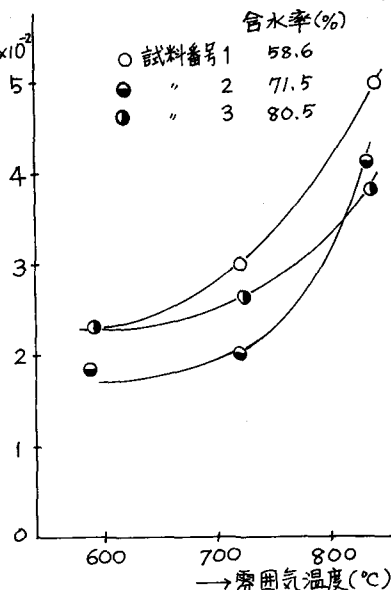


図-4 重量減少率-温度関係図

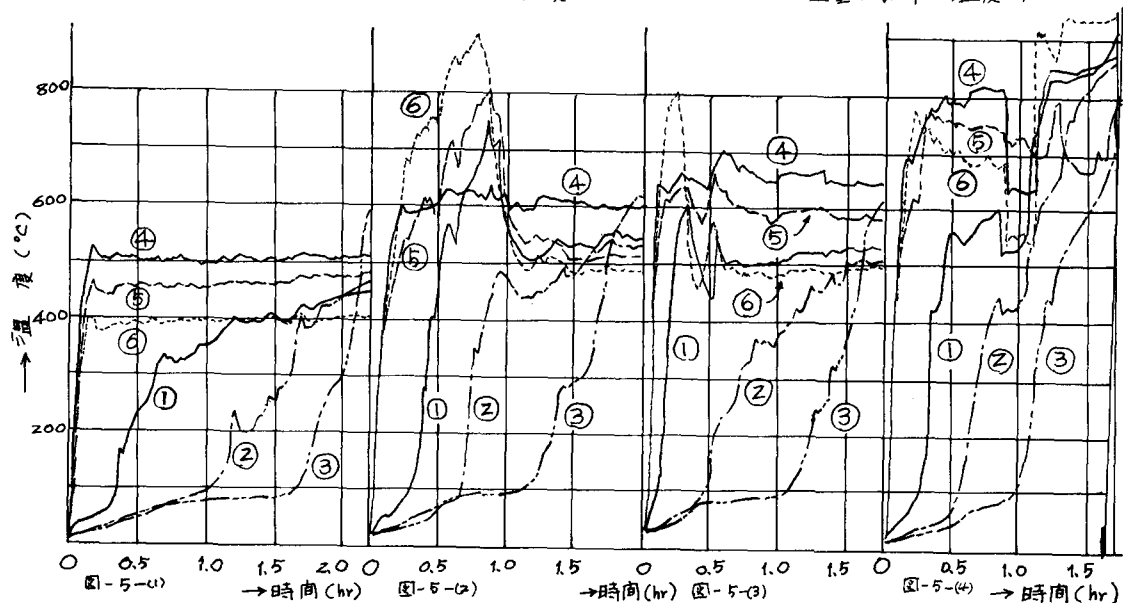


図-5 汚泥上部空間と汚泥層内の時間的溫度変化 (汚泥含水率 70.0%)

めたグラフが次ページの図-8 と図-9
である。ここに、水分乾燥速度・質量火
移り速度は、温度測定点③（汚泥層内）
の温度が100℃・450℃になるに要した
時間から、入口④の温度が設定温度にな
るに要した時間の半分を差し引いた時間
と、③の層の上部にある汚泥の質量から
求めたものである。

また、燃焼後の汚泥の可燃分を測定し
たところ、14~15%であったが、これは③
の層の燃焼が終ったと思われる時間、す
なわち①②③の温度が一致した時間で燃
焼を停止したため③の層以下の可燃分が
残っていたためで、事実③より上の可燃
分は1~2%あるいはそれ以下であった。なお、汚
泥層上部の風速は $2.3 \text{ N/m}^2/\text{m}^2\text{sec}$ であった。

4. 考察 通水性の良好な物質を燃焼させる
と、水蒸気の蒸発面から、蒸気の放散方向と反対方
向にも、ある割合の蒸気が移動し、燃焼の進行への
熱伝導を補助する代償として水分が増加していくこ
とがある。従来のわが国のごみのように水分の多い
場合は、特にその傾向が顕著であった。

下水汚泥の燃焼においても、その傾向がうかがわれ
、図-5(1)~(4)、図-6 などにおける温度変化の②③
に見られるように、水分の移動による熱移動のため
に、温度勾配のほとんどない部分がある。

さて、汚泥層内の熱伝導方程式について考える。
汚泥の燃焼面の進行速度、すなわち火移り速度が、

$U \text{ m/hr.}$ という一定値に達し、そのまま等速で進行したとすると、時間的に温度変化のない面、すなわ
ち火移り速度と等速で進行する面を考え、座標 X とすると、面 $(X - \delta X)$ と面 (X) の温度が、それぞ
れ $(\theta - \frac{\partial \theta}{\partial X} \delta X)$ 、 (θ) であるとき、 $(X - \delta X)$ の面に $U P Y_s (\theta - \frac{\partial \theta}{\partial X} \delta X) \dots$ (固体の) および $G Y_g (\theta - \frac{\partial \theta}{\partial X} \delta X) \dots$ (気体の) 熱量が流入し、面 (X) から、 $U P Y_s \theta$ 、 $G Y_g \theta$ という熱量を持ち出すと考えると、
伝熱方程式は、

$$0 = \frac{\lambda}{P Y_s} \frac{d^2 \theta}{dX^2} - (U + G \frac{Y_g}{P Y_s}) \frac{d\theta}{dX} \quad \text{を得る。}$$

ここに、 P : 汚泥密度 (kg/m^3) Y_s : 汚泥熱容量 ($\text{Kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) λ : 熱伝導係数
 G : 面を通るガス質量 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$)、 Y_g : ガス熱容量 ($\text{Kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) ($\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)

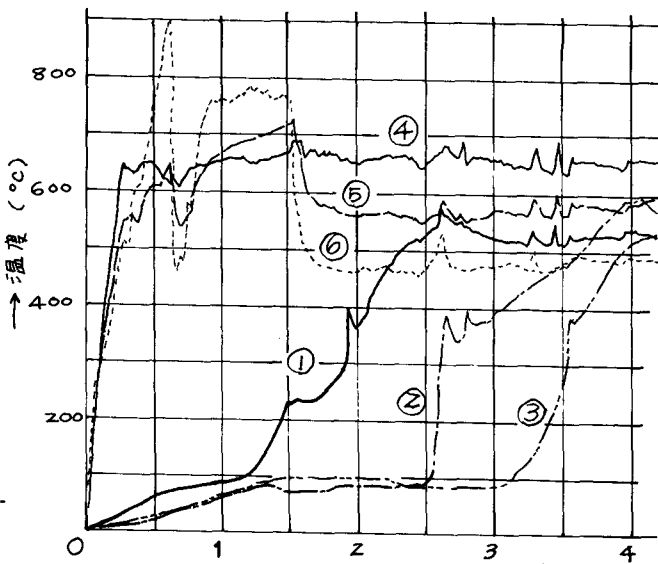


図-6 時間的溫度変化図 (含水率 80.9%)

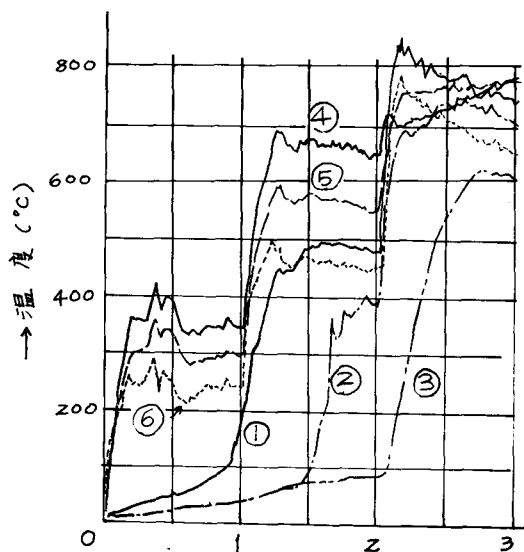


図-7 時間的溫度変化図 (含水率 70.0%)

境界条件を $X=-\infty \theta=\theta_0$, $X=0 \theta=\theta_f$ とすると、上式の解は $\theta = \theta_0 + (\theta_f - \theta_0) \exp \left[\frac{1}{\lambda} (p\gamma_s U + G\gamma_g) X \right]$ となる。 $p, \gamma_s, U, G, \gamma_g, \theta$ などは、本実験から求められるものを利用して、污泥の熱伝導係数 λ を求めることが出来る。

なお、污泥層表面上のガス温度が比較的低温で層内の相変化、火移り面の進行が無視できる場合は、熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad \text{となる。ここに}$$

α は 温度伝導度 (m^2/hr) である。S.B.Martin⁽¹⁾ は上式に適切な境界条件を与えて、温度伝導度 α を

$$\alpha = \left[(L-X_1)^2 - (L-X_2)^2 \right] / 2(\theta_2 - \theta_1)$$

という形で求めている。ここに、 L は層の深さ (m) であり、この場合の X の向きが、前式と反対であるが、原文献に従った。

これらの式から、 λ を求めることが出来る。

ここで、水蒸気が水となる場合、その潜熱が、顕熱化する事を考えて、熱伝導方程式を考える。ガスの移動がない場合、 $W(\gamma_w \theta + L_a)$ の熱量を持った水蒸気が、面 (X') から負方向に入り、質量が $(W - \frac{\partial W}{\partial X} \delta X')$ となって、面 ($X' - \delta X$) から出て行くとすると、熱伝導方程式は、

$$0 = \frac{\lambda}{\rho_s \gamma_s} \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} - (U - W \frac{\gamma_w}{\rho_s}) \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial W}{\partial X} (\gamma_w \theta + L_a)$$

となる。ここに W : 面を通る水蒸気質量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

γ_w : 水蒸気熱容量 ($\text{Kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

L_a : 蒸発潜熱 (Kcal/kg)

これは発熱項を含む方程式に等しいから、低温領域で温度勾配が、非常に小さいことが理解出来る。最後に、これからの研究の方向として、通風空気と廃ガスの CO_2 濃度、温度上昇に伴う廃ガスへのガス分析、さらに、污泥層の水分の移動などが挙げられ、そのためには、装置の改良の点をも考慮して、検討していきたい。また、 500°C 以下の温度では、未燃ガスは、かなりの悪臭を伴う。これが向流式焼却炉の欠点であると考えられるが、この点についても、研究していくつもりである。

参考文献: (1) S.B.Martin: SIMPLE RADIANT HEATING METHOD FOR DETERMINING THE THERMAL DIFFUSIVITY OF CELLULOSIC MATERIALS, *Journal of Applied Physics*, Vol 31, No 6 (June, 1960)

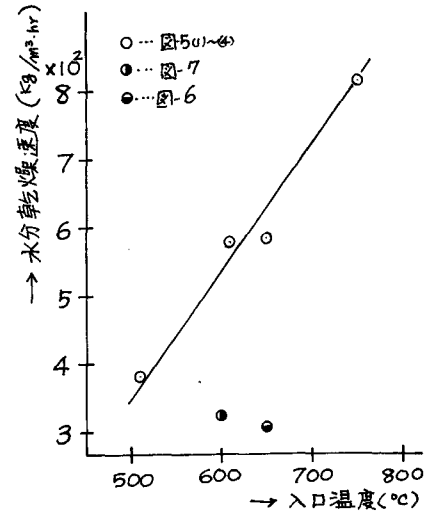


図-8 污泥水分乾燥速度

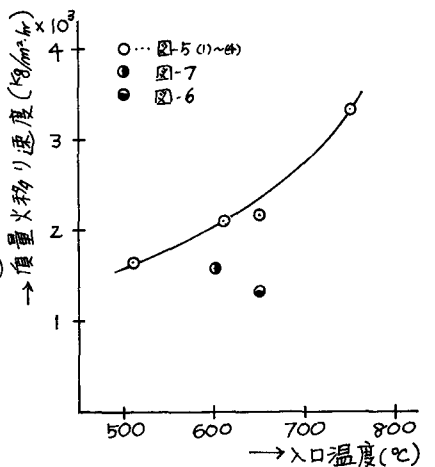


図-9 質量火移り速度