

○ 京都大学 学 浦辺 真郎
京都大学 正 岩井 重久
日立造船 正 春山 江島

1. 研究の目的 下水汚泥の熱分解特性を示差熱天秤を用いて知り、これらのデータを基にして、下水汚泥を平面燃焼させた場合、汚泥の燃焼速度等に影響を与えると思われる汚泥含水率、雰囲気温度、汚泥のかさ比重を変化させた実験を行ない、汚泥層内の相変化を考慮した熱伝導方程式を立て、汚泥の熱伝導率を知ろう。

2. 実験方法 **実験Ⅰ**: 某下水処理場から採取した生汚泥と消化脱水汚泥とを試料とし、示差熱天秤を用いて実験を行なった。Carrier Gasは空気と窒素と。昇温速度は $10^{\circ}\text{C}/\text{分}$ である。試料の性状を表-1に示す。

実験Ⅱ: 図-1に示す実験装置を用い、試料(性状は表-1の右欄)を粒径 5mm 前後に細かく砕いて、あらかじめ所定の位置に差し込んである熱電対(A-C熱電対)で温度測定する。汚泥層上部の雰囲気温度(図-1の熱電対①の温度)が設定温度になり充分に安定したのち、上記の試料を入れた汚泥容器を速く燃焼炉に挿入した。

3. 実験結果及考察 **実験Ⅰ**: 図-2から図-5までに、各々の図のタイトルに表示した試料の示差曲線と重量減少曲線との測定結果を示す。図-2から判断し、生汚泥では 150°C あたりからわずかに可燃分の熱分解が始まり、ゆるやかな発熱反応を示し、つぎに 180°C 付近になると完全な発熱反応となる。この温度を生汚泥の spontaneous ignition temp. とする。その後 200°C 前後から重量減少が始まり、熱分解反応はますます急速となり、 450°C 付近で急激な発熱反応を示し、この温度が着火温度である。 450°C から 570°C 付近までは、示差熱温度の勾配がほとんどなくなり、 570°C 付近から残存可燃分(Char)の燃焼がはじまり、 750°C 付近でほぼ燃焼が終了したものと思われる。図-3に示す消化脱水汚泥についても上述の生汚泥の場合と同様な結果である。窒素雰囲気下で消化脱水汚泥を熱分解したのち窒素を流したまま、温度を室温にまで下げ、今度は空気雰囲気下で再び昇温した結果を各々図-4、5に示す。図-4から、窒素雰囲気下での汚泥の熱分解は吸熱反応である。図-5はかなり低温で発熱反応であることを示し、これは熱分解物質が残っていたためと考えられ、また、この図から試料重量が時間とともに増加することがわかるが、これは汚泥中に、揮散しないで空気中の酸素を取り込んで酸化される物質が存在しているためであろう。

以上のことから、下水汚泥の熱分解反応はセルロース分の熱分解反応¹⁾と類似していると結論づけられる。

実験Ⅱ: 本実験から得られた雰囲気温度と汚泥層内の温度分布との経時間的变化の一例を図-6に示した。この

表-1 汚泥の性状

	生汚泥	消化脱水汚泥	消化脱水汚泥
可燃分(%)	65	55	53
灰分(%)	35	45	47
可燃分低位 発熱量(kcal/g)	5015	3944	4015
低位発熱量 (kcal/g)	3260	2169	2127

XT油バー
熱電対 → 1 → 汚泥層
熱電対 → 2 → 汚泥層
熱電対 → 3 → 汚泥層
熱電対 → 4 → 汚泥層
熱電対 → 5 → 汚泥層

図中番号は 温度測定位置を示す

汚泥容器 $19 \times 32 \times 7.5 \text{ cm}^3$

②-③ 1.6 cm
③-④ 1.7 cm } 熱電対間隔
④-⑤ 1.8 cm

図-1 実験装置図

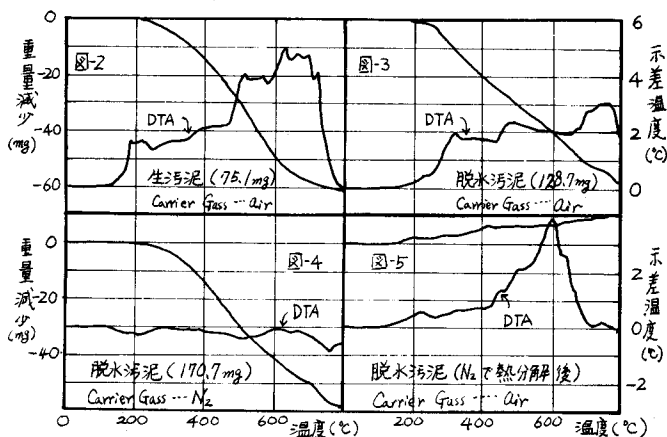


図2 ~ 図5 示差分析曲線

図から判断し、層上部では減率乾燥を、下部では恒率乾燥を示しており、この理由として、上部ではガス温度と水分蒸発温度との差による熱伝達量がかなり大きいので恒率乾燥を経ないと考えられ、層下部では上層部の水分が一部下方に移動し(表-2参照)、しかも焼却灰層の生成による熱伝達量の漸減で恒率乾燥に類似した温度分布曲線が得られたと推察される。

ここで、汚泥層内の熱伝導方程式を下のようにとる。

$$\textcircled{1} \dots \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} \right]_n = \left[\alpha_n \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right]_n$$

$n=1 \dots$ 燃焼面上部
 $n=2 \dots$ 燃焼面と乾燥面の間
 $n=3 \dots$ 乾燥面下部

相変化を考慮すると、 $\textcircled{1}$ 式の解は一般に Neumann の解となり

$$\textcircled{2} \dots \theta_n = A_n + B_n \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_n t}} \right) = A_n + B_n \frac{z}{\sqrt{\pi}} \left\{ \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_n t}} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_n t}} \right)^3 \right\}$$

(ただし $z/\sqrt{\alpha_n t}$ が小さい場合)

B.C.は、 $\textcircled{3}$ で与えられる。

$\textcircled{3} \quad x=0: \theta=\theta_0$ (雰囲気温度), $x=x_i$ (燃焼面): $\theta_1=\theta_2=450^\circ\text{C}$ (実験Iより)
 $x=\infty: \theta=\theta_0$ (外気温度), $x=x_d$ (乾燥面): $\theta_2=\theta_3=100^\circ\text{C}$

$\textcircled{2}\textcircled{3}$ より $\textcircled{4} \dots x_i = 2K_2\sqrt{\alpha_2 t} \quad x_d = 2K_3\sqrt{\alpha_3 t}$

$\textcircled{4}$ 式を時間で微分するとそれぞれの面の移動速度が得られる。

$$\textcircled{5} \dots \frac{dx_i}{dt} = \frac{K_2}{\sqrt{\alpha_2}} \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad \frac{dx_d}{dt} = \frac{K_3}{\sqrt{\alpha_3}} \frac{1}{\sqrt{t}}$$

また、燃焼面・乾燥面移動速度を実験的に求めた一例が図-7であり、これを図式解析すると次式のようになった。

$$\textcircled{6} \dots \frac{dx_i}{dt} = 0.286 \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad \frac{dx_d}{dt} = 0.328 \frac{1}{\sqrt{t}}$$

$\textcircled{2}$ 式、 $\textcircled{6}$ 式および図-6の結果から

$$\textcircled{7} \dots \alpha_2 = 0.819, \quad \alpha_3 = 1.427 \quad (\text{ただし 平均値})$$

$$\textcircled{8} \dots \theta_2 = 500 - 1394 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{0.819t}}, \quad \theta_3 = 146 - 141 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{1.427t}}$$

$\textcircled{8}$ 式に適当な x, t を代入し、その時の実測値と比較した結果を、図-6中の点 $\bigcirc \bullet$ に示した。これから判断すると、 $\textcircled{8}$ 式は近似解としてある程度満足いくものである。実際の現象では、汚泥の収縮が起こり時間が経過するにつれその影響が強くなり現われ、実測値と計算値のずれが生じてくる。また、上記のような方法で、各実験の α_2, α_3 を求め、その結果を図8, 9, 10 にそれぞれまとめた。最後に、本論文作製にあたり御指導、御協力頂いた京都大学・高月紘、川崎重工・林公隆両氏に感謝する次第です。参考文献 1) 例えば、右田 等: 木材化学下 共立出版 (1968)

記号説明

表-2 汚泥層内の水分分布

熱電対③が100℃に達した時に実験を中止した場合	備考
熱電対③~④の間の汚泥含水率 $\dots 71\%$	設定温度 740°C
" ④以下 $\dots 70\%$	初期の含水率 68%
熱電対④が100℃に達した時に実験を中止した場合	
熱電対④~⑤の間の汚泥含水率 $\dots 65\%$	
" ⑤以下 $\dots 59\%$	

$\theta \dots$ 温度 ($^\circ\text{C}$)

$t \dots$ 時間 (min.)

$\alpha \dots$ 熱伝達率 (cm^2/min)

$x \dots$ 座標軸距離 (cm)

$n \dots$ 相を表す (-)

$K \dots$ 定数

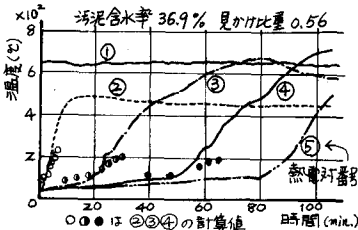


図-6 汚泥層内温度分布の一例

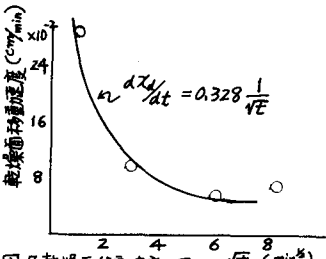


図-7 乾燥面移動速度- $\sqrt{t}$ 図 $\sqrt{t}$ ($\text{min}^{1/2}$)

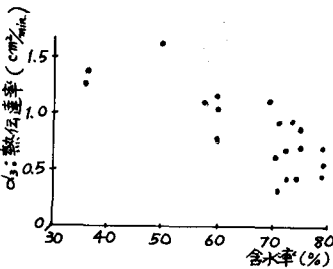


図-8 熱伝達率と含水率の関係

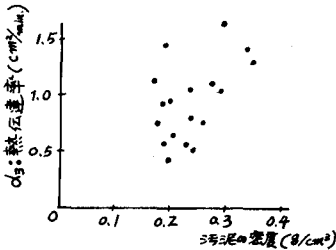


図-9 熱伝達率と汚泥密度との関係

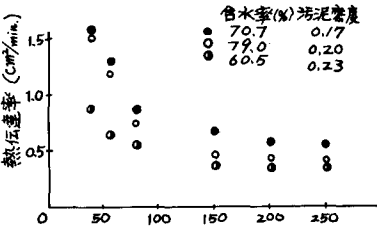


図-10 熱伝達率と温度との関係(例)