

セルローズ性物質の水分がその火移り速度に及ぼす影響

京都大学工学部 正員 岩井重久

日立造船(株)技術研究所 春山 鴻

1. はじめに

量の都市ゴミが種々の焼却炉によって処理されていくにもかかわらず、焼却炉の設計にさいして有効な基礎資料に欠けていくのが現状である。実際の焼却炉に起るトラブルの大半は、結局はこうして基礎資料の不足、すなわちゴミの燃焼特性に対する知識の欠陥によるものであろう。特に水分、あるいは燃焼条件の変動に対する焼却量の變動に關する知識の不足は、各地の焼却炉のトラブルの原因になっている。このような理由で、こゝらの變動を定量的に予測し得るような資料を作成したいという要望はかなり多い。しかしながら、現在このところ発表されている資料は、ある限られた条件で特定の焼却炉の燃焼状況を示したもののほと^{1), 2),}を占め、水分の變動あるいは発熱量等の影響について述べられているものは、二、三の研究例にしか見られない。

ゴミ焼却に關する多くの研究で、このように基礎的かつ一般的に論じられているものの少ないのは、ゴミが本質的に幾何学的、物理学的、化学的な性状を異にする多数の物体の集合物であり、焼却工学的に解析を進めることは不可能であると思われており、むしろ経験的知識を活用する方が賢明かつ得策であると考えられているためであろう。事実、現在での焼却炉の設計は経験のみを基礎として進められているが、経験範囲が限られているために、前述のようなトラブルが絶えないわけである。

わが国は過去数年にわたってゴミ焼却炉の研究を行つてきたが、ゴミの乱雑さや複雑さを重視して、すなわちこゝらの影響がすべてこのゴミについて同一であるとは仮定して、ゴミの燃焼状況がかなり正確に予測でき、一定の關係式が作成できるとする見解に達した。これは、同時代での生活、風習、社会、環境を同じとする人間集団によるゴミの原料(入力)、生成過程(応答)、それからゴミ自体(余剰出力)には、同一性が当然保持されることによると思われる。むしろ既に設計に及んで、ゴミの性質の乱雑さを重視され、すなわち水分と可燃分ヒの量のみが注意が払われているが、従来の経験範囲を越えようとする諸条件における上記の關係式の適用は、今後の焼却炉の設計、運転の合理化に役立てようものと考えらる。

本研究の目的は、ゴミの中の物体の幾何学的形状の差がどの程度ゴミの燃焼に影響を与えるかを調べること、同一水分、同一可燃分のゴミを同一条件で燃焼させ、そのときの焼却量等の變動を求め、次に水分や燃焼条件を変化させて焼却量等の變動を求め、さらに水分等の變動のみを基として燃焼に關する式を作り、この式で生じる誤差を一定条件の場合の燃焼の變動から推定しようとするにある。

こうして研究によつて、水分は種々のセルローズ物質の燃焼速度に対して同一関数形をもつて影響を与えることがわかったが、さらに水分の燃焼量に対する影響についての研究を進めたい。本文の一部はすでに発表済みである。

2. 都市ごみ中の火移り速度

ごみ炉の中へ着火すると、着火面が下方向に進行し始める。着火面の進行速度は火移り速度と呼ばれる。一般にごみ層中の着火面は、複雑かつ不規則な形状をしていく。しかしこの問題を簡単に考えるため、着火面の平均位置について、仮想着火面（平面）を図-1に示すように考える。着火面が下方向の位置で着火は蒸発し、可燃分は分解する。その結果、水蒸気と揮発可燃分とは、上方空間に出ていき、残余の可燃分はごみ層内で固体燃焼を行なう。ごみ層の厚さが L のとき、単位火床面積 1 m^2 の単位時間内の燃却量（燃却率） C は、

$$C = \frac{L \cdot \rho_v}{\tau_v + \tau_c} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}) \quad (1)$$

ここで、 ρ_v は比重、 τ_v : 着火面がグレート面に達するに必要な時間、 τ_c : 着火面がグレート面に達した後、残りの可燃分を燃やすに必要な時間、 τ 表わすこととする。

明らかに τ_v は火移り速度で定められる。以後、火移り速度を表わす平均着火面の進行速度 V として表わすこととすると、

$$\tau_v = L / V \quad (2)$$

ここで、 V : 火移り速度、
であり、ごみのように、燃焼後の残余可燃分が、後述示すような重量率で原可燃分の20%程度に減るような場合には、火移り速度が燃却率を支配する主要な因子となる。以上のより理由から、この火移り速度について述べる。

火移り速度に関する実験とその結果はつぎのようである。

A. 実験に使用した炉を図-2に示すが、この炉への送風は送風機で行なわれ、送風量はピトー管を用いて計測し、ごみ層中には、三つの平面に、先端が炉の中方向に達するように、合計12本の熱電対を挿入した。最高位置の熱電対はごみ層の上面に置き、20 cm間隔で並べた。その下面と最下面との熱電対も、すべて同様に配置した。

ごみは、別に分析用試料を採取した後、このごみを炉に入れ、その上面に乾燥した紙片を約10 cmの

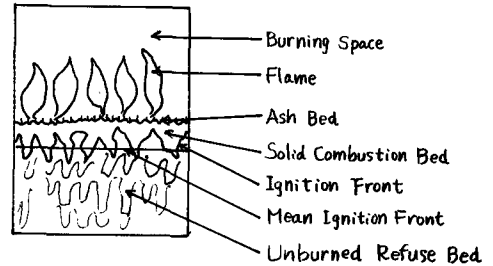


Fig. 1. Scheme of Burning Refuse Bed

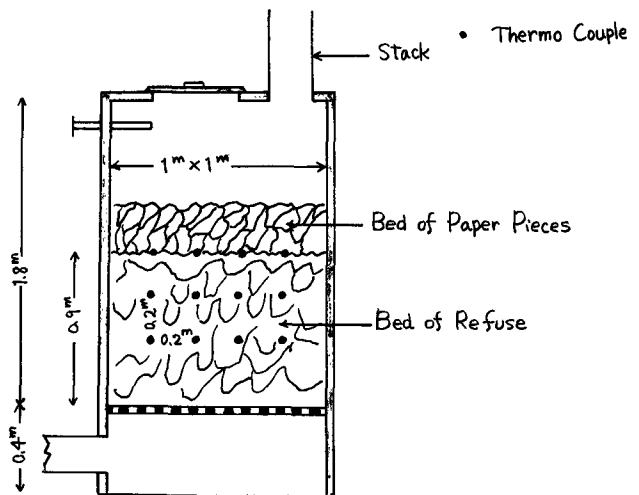


Fig. 2. Experimental Furnace

厚さ δ に於て着火し、同時に送風を開始する。その後、熱電対に示される温度の変化を記録させる。その記録により、次式を用いて火移り速度を定める。

$$V_c = \frac{0.2(\sum x_{zi} - \sum x_{ji}) + 0.2(\sum x_{oi} - \sum x_{zi})}{8} \quad (m/2) \quad (3)$$

こゝに、 x_{ji} は温度が $450^\circ C$ に達した時間、 x_{zi} 、 x_{oi} で、 $j=1$ は最上部の熱電対を、 i は横方向の番号を表わす。

こうして測定の結果を表-1に示す。

表-1から、水分が少なくて、送風量がある程度より少ない場合には、揮発可燃分は完全燃焼をしないことがわかる。これは、揮発成分量は火移り速度によって定まるが、その量が実際の送風量に見合うような量をとり、存在する結果から生じることと思われる。

このような場合は、揮発可燃分は未燃で排出されるために炉内温度は低い。送風量を増やせば火移り速度を増え、火移り速度は送風量の増加に対して正比例せず、(送風量) α 、 $0 < \alpha < 1$ の形で比例する α で、徐々に未燃分が少なくなり、炉温も上昇する(表-1参照)。さらに送風量を増加させると、送風量の増加が冷却効果を持つようになり、火移り速度は低下して遂に火が消える。

この実験のように、着火面の進行方向がガスの流れと反対の場合は、25%以上の水分を含む二酸化炭素を実用的に早くで燃焼させることは困難であるが、手だてとして、着火面の進行がガスの流れの方向と同じ場合には、水分が65%程度の二酸化炭素を燃やすことができる。なお、(比重 $\times$ 火移り速度)を質量火移り速度と定め、それを用いての実験結果を図-3に示す。一般に機械炉の場合は、ガス流れと着火面の進行方向が反対であるために、適当な方法で(前述の実験装置以外の方法で)二酸化炭素を供給する工夫を必要とする。

B. 図-4に示すような実験炉で火移り速度を定める。グレーットの進行速度を炉の後方の孔から観察しながら、丁度着火面がグレーット後端でグレーット面に達するようにグレーットの進行速度を調節しながら運転する。

二酸化炭素とよく混ぜ、分析用試料が採取された後に燃焼中の炉に投入し、計測計画に合わせて送風量を調節し、炉空間温度はバーナの重油量によって設定する。二酸化炭素の厚さは、0.3mと0.6mとになるように調節する。

火移り速度は次式によって定めらる。

$$V_c = \frac{0.3 \text{ or } 0.6}{\frac{(図-4 \text{ の } L \text{ の長さ})}{(\text{グレーット進行速度})}} \quad m/s \quad (4)$$

表-1 実験結果-1

送風量 ($Nm^3/m^2 \cdot hr$)	含有率(湿基) (%)		比重 (t/m^3)	火移り速度 (m/hr)	温度 ($^\circ C$)
	可燃分	水分			
604	8.4	66.4	0.092	9.16	340
	12.3	60.0	0.124	5.40	960
	20.2	54.1	0.148	4.03	620
	25.8	51.9	0.178	15.7	370
818	8.2	66.3	0.094	10.90	410
	12.0	61.0	0.120	7.20	980
	20.0	54.2	0.145	4.32	660
	25.2	51.4	0.178	2.02	160
1020	8.2	66.4	0.094	12.40	960
	12.1	60.4	0.122	8.93	940
	20.3	53.8	0.146	5.73	540
	25.4	50.8	0.174	1.06	120

実験結果を表-2に示す。

この形式の火移りは、工場のガスの熱の供給と自己の持つ熱量とによって行なわれるために、火移り面が下オに近づくとともに、工場の灰層の抵抗が少なくなり、火移り速度は減少する。

C. 図-5のような実験炉を用いて火移り速度を求めた。クレームを炉に投入するとき、一部のクレームを分析用試料として採取した。移動ストークは、ストークの一定位置で火移りがななるように速度を調節し、移動ストークは、火移り面がストークに到達したものを求めるから(図-6)、火移り速度は次式によって求めらる。

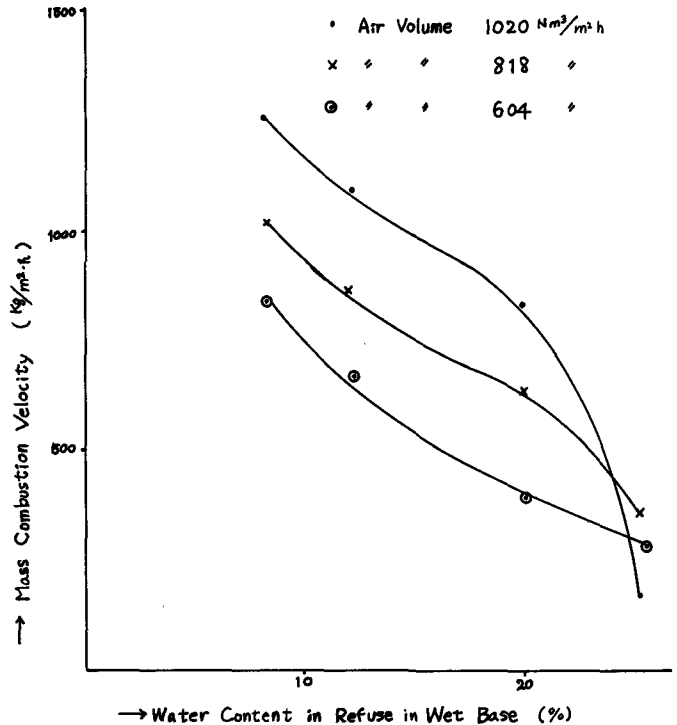
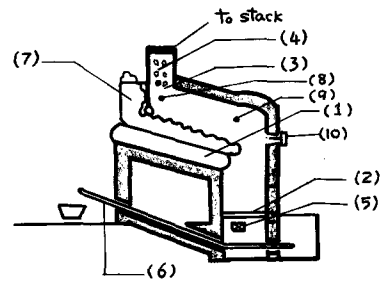


Fig. 3. Mass Combustion Velocity : Water Content

表-2 実験結果-2

灰層の厚さ (m)	含有率 (濃度) (%)		比重 (t/m³)	火移り速度 (m/hr)	炉温 (°C)	工場ガスの流速 (Nm³/m²·h)
	可燃分	水分				
0.3	49.8	31.2	0.252	1.62	450	2.5
	42.0	41.4	0.294	0.772		
	35.7	50.9	0.331	0.282		
	30.4	58.0	0.371	0.192		
	24.6	67.3	0.402	0.128		
	22.0	70.8	0.411	0.086		
0.6	49.8	31.2	0.252	0.332	450	2.5
	42.0	41.4	0.294	0.187		
	35.7	50.9	0.331	0.072		
	30.4	58.0	0.371	0.053		
	24.6	67.3	0.402	0.032		
	22.0	70.8	0.411	0.025		
0.3	36.8	50.6	0.321	0.524	460	2.5
	37.0	50.8	0.327	0.326	660	
	36.8	50.4	0.314	0.280	450	
	36.8	50.6	0.321	0.280		
0.3	37.0	50.8	0.327	0.242	450	1.15
	36.8	50.4	0.314	0.122		0.21



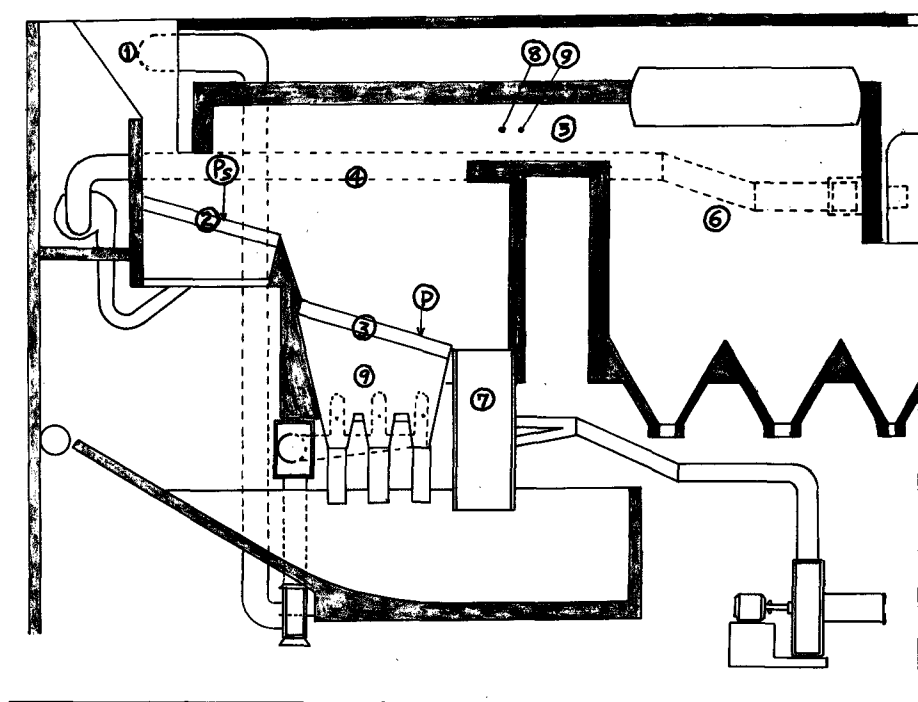
- (1) the travelling grate for drying 2.4 x 1.1 m²
- (2) the fixed grate for stoking 0.9 x 1.1 m²
- (3) the stack
- (4) the heat exchanger; gas to water
- (5) the air duct
- (6) the ash conveyer
- (7) the feeding hopper
- (8) the thermo couple
- (9) the thermo couple
- (10) the oil burner

Fig. 4 Outline of the test incinerator.

$$V_c = \frac{W_R}{\rho_v L_s B} \quad (5)$$

ニニル、 W_R 1時間の燃焼量、 L_s 図-6の p_c と p_c の長さ、 B : ストーカーの中。
得られた結果と表-3を示す。

表-3の系列-3のデータは、大塚等質 α ニミが大体同一の条件下燃焼させられたときの火移り速度は、比較的一致し、 $[(1.49 \sim 1.64) = 1.56 (1 \pm 0.07)]$ m/hrの値をえることを示している。
ニからの α のデータは、約 120 m^3 の α を4時間にかかって計測した結果得られたものであるが、ニからは、 α 中の各物体の幾何学的性質、すなわち空隙率、平均粒径、接触面積等が、 α を集



- ① Feeding hopper
- ② Reciprocating Stoker No.1
- ③ Reciprocating Stoker No.2
- ④ Combustion Chamber
- ⑤ Gas Duct
- ⑥ Boiler
- ⑦ Gasification Box.
- ⑧ Front of Furnace
- ⑨ Line on which the ignition front reached the grate surface during this determination
- ⑧ & ⑨ Thermocouple

Fig. 5 Outline of the Incinerator

場合が多い場合には、平均化して、これらの各値をひとつの常数的な値に近づくものとするというこをモテている。

二に及して、表-4の系列2-4による結果は、ごみ質、燃焼条件が変わった場合、火移り速度に大きな変化がみられ、これをモテている。

図-7は、水分の変化に対する火移り速度の変化を示したものである。

いま燃焼条件、ごみ質が一定の場合の燃焼量の変動を、 $M(t)$ として時間 t の関数で表わした場合、ある時間内の真の燃焼量の変動を無視してその平均値 M から求めた燃焼量との比は、

$$\frac{\int_{x_0}^{x_d} M(t) dt}{M(x_d - x_0)} = R \quad (6)$$

で表わされるが、 M の標準偏差は $(x_d - x_0)$ の長さに逆比例すると考えらるるから、 $(x_d - x_0)$ が t とえば24時間と48時間と0のようになり大きい場合には、 R は1に近づき、燃焼量は M と $(x_d - x_0)$ との積で表わしてもよい。ゆえに式(1)、(2)から、火移り速度は、燃焼条件と水分の変動とのみに着目して研究可能なこととわかる。よってこれは、次章で述べるようなモデル実験が可能であることを意味している。

3. 紙試料を用いた火移り速度に関するモデル実験

前章ではごみ集塊を用いて火移り速度を求めたが、表-1、2、3からわかるように、実験条件を同一にして研究を行なうことは非常に困難である。表-3のデー9号は、約30年間におよび300

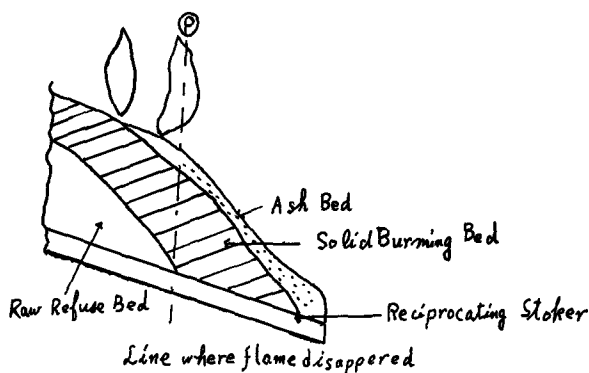


Fig. 6, Scheme at Point P

表-3 実験結果-3

実験 の 順	含水率 (湿基) (%)		比重 (γ_s)	火移り 速度 (cm/hr)	プレートと通過する空気 流量と温度 ($\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$) ($^{\circ}\text{C}$)		炉 温 ($^{\circ}\text{C}$)
	可燃分	灰分			プレートNo.1	プレートNo.2	
1	36.1	45.6	0.311	1.64	390(150)	1710~1840 (222~225)	1010
	35.6	47.2	0.318	1.60			960
	36.4	44.7	0.303	1.59			980
	34.8	44.8	0.306	1.64			1020
	36.1	44.9	0.312	1.51			990
	34.6	45.6	0.323	1.49			950
	35.2	46.2	0.314	1.60			980
	34.8	47.0	0.308	1.56			990
	36.4	45.4	0.304	1.58			970
	35.2	46.2	0.314	1.61			960
	34.7	47.1	0.306	1.54			1010
	35.2	45.6	0.314	1.56			1030
	36.0	46.1	0.316	1.56			
2	35.2	45.8	0.313	1.48	0	1720(221) 1430(220) 1240(220) 890(220)	990
	36.0	45.3	0.307	1.32			960
	36.6	46.3	0.305	1.970			940
	37.1	44.8	0.314	0.850			900
3	36.2	47.1	0.306	1.12	0	1730(229) 1440(120) 1220(120) 820(120)	950
	36.3	46.3	0.314	0.930			960
	35.1	45.2	0.311	0.883			890
	34.3	46.6	0.301	0.735			940
4	34.1	45.5	0.302	0.980	0	1760(35) 1380(38) 1240(30) 820(36)	960
	36.2	44.3	0.303	0.991			940
	35.4	45.4	0.309	0.743			950
	37.1	44.3	0.309	0.641			920
5	34.2	45.8	0.312	0.942	0	1420~1460 (118~128)	900
	36.0	45.3	0.305	0.951			880
	37.1	44.8	0.304	0.933			840
	36.1	45.3	0.304	0.891			820
	34.9	44.2	0.314	0.830			720
	34.6	45.8	0.311	0.571			680
	37.2	44.9	0.308	0.555			610
6	37.0	49.1	0.331	0.854	0	1440(220) 1440(220) 930(221) 940(190) 1060(229) 680(209) 720(199) 580(182)	840
	38.8	49.1	0.332	0.935			890
	24.1	54.6	0.342	0.745			720
	23.3	59.5	0.362	0.501			610
	22.9	60.2	0.374	0.520			570
	21.3	64.1	0.388	0.422			600
	19.2	67.1	0.374	0.284			450
	18.5	71.6	0.413	0.236			330

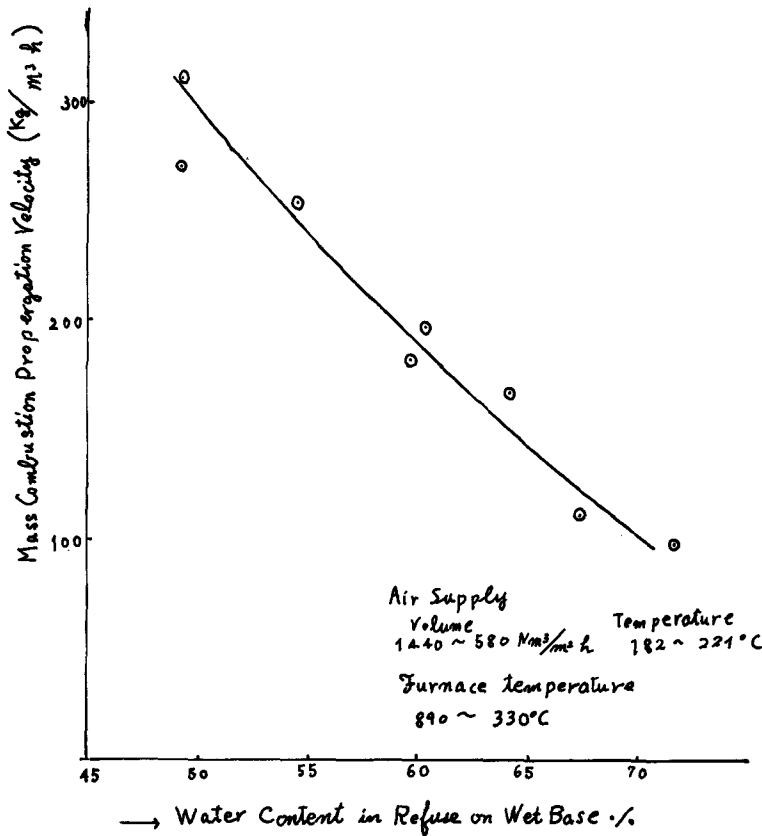


Fig. 7 Mass Combustion Velocity : Water Content

回を二える計測例から、表のように配列可能なものを選び出して示してあるが、これらのデータをもつてして実験式を作成することは困難である。これは、燃焼物質や燃焼条件のほぼ等しい場合には、火移り速度、すなわち燃焼率が同一であるという事実と、燃焼物質、燃焼条件および炉形等が異なる場合には、火移り速度が非常に異なるという事実とが判明した。これは、燃焼物質の化学的性質が類似するような物質を用い、同一形態に整形して燃焼させた物体の集塊、たとえば同一形状の同一寸法の紙片を、水分と燃焼条件とを変えて燃焼実験を行なったとき、燃焼特性がわかるということを意味している。これは、あるモデルを用いて火移り速度 V_M を求めた結果は次式で表わされることである。

$$V_M = f_M \{ \{ w, c, \rho_w \} \cup Z \} \cdot g_M(A, M) \quad (7)$$

すなわち、 w : 水分、 c : 可燃分、 ρ_w : 水分 w の比重、 Z : 燃焼条件を表わす諸因子、すなわち送風速度、炉内温度、予熱空気温度、天井からの射熱等、 A 集合、 $\cup$ 集合の和を表わす記号、 $g_M(A, M)$ 物体の寸法と、それらの寸法で表わされる因子のつく関数、 A はモデル

ル物体の形状、 M は集合の幾何学的特性。

式(7)のよう $g_M(A, M)$ が分離している場合は、 $f_M(\quad)$ は形態等、すなわち幾何学的性状とは関係のない関数であるから、その物体がモデルの物体と同一であるならば、 $f_M(\quad)$ はその $f(\quad)$ と同一であるはずである。前章の実験の結果より、都市ごみの場合の $g(\{A_R\} \cup M)$ は、すべてのごみ集塊について同一であると考えれば、実験によって求める $f_M(\quad)$ を用いて、その火移り速度 V は、

$$V = f_M[\{w, c, \rho_w\} \cup Z] \cdot K \quad (8)$$

と表わすことができる。この場合の K は、前章等を用いて求めることができる。

さて、さらにこのモデル化を進めることにし、単一紙片を用いてモデルをつくる実験をして、その程度は精確な解析ができると思えば、非常に好都合である。すなわち、式(7)中の $f_M(\quad)$ 中の項が $f_1(w, c, \rho_w)$ と $f_2(Z)$ と分離でき、しかも連続体と非連続体との間に定数項だけの差しかないと思えば、単一紙片を用いて実験から、水分の影響を求めることができる。

本章では、まず予備実験として紙片の集合体と単一紙片との間で、水分を変えたいとしようとして火移り速度が変わるかを調べ、これらの間に一定の関係が成立することを確かめ、さらに単一紙片を用いて水分の影響を詳細に調べる。このようにモデル化を進めると、結局紙片等の火移り速度に対する水分の影響がわかり、さらに一般都市ごみをその解析できることになる。

セルローズの燃焼についての研究は、防火関係から以前から行われており、多数の文献がある。そのうちで単一紙片の燃焼に関しては、最近では金原等が研究を行っているが、彼らはわれわれが求める水分の影響については論じていない。しかもその燃焼の問題ととり扱っているわけではない。この水分の影響に関しては、L. Fom⁽¹⁷⁾ 等、H. Emderson⁽¹⁸⁾ 等および L. Albin⁽¹⁹⁾ が組合せを用いて研究しているが、彼等の興味の対象は主として燃焼物の幾何学的形状にあり、その結果をごみ燃焼の場合に直接利用することはやや困難であるが、比較の対象としては興味ある結果を得ている。

3.1 予備実験

A. ホルダに取りつけた紙片の一端をパイロットバーで着火し、着火面が寸法線の間を通る時間を測定した。水分は、着火の直前と寸法線を通り直した直後とにおいて測定した。すなわち、後者の場合は、これをを用い、水分の変化がどのような形で火を吹き消したのか、息を重量を測定し、さらにこれを 95°C の空気で十分乾燥させて重量を測り、そのことによって水分を求める。紙片の水分は外気湿度でかなり早い速度で変化するので、実験条件下の空气中で水分の増加速度と減少速度とを測り、それを基として求めるための水分の修正を行った。

B. 一つの紙片の一端を直角に曲げてその下方をホルダに取り付け、他の紙片の下端を直角、すなわち半径 5mm の円弧に曲げて、この紙片の直角面に合せ、Aと同様に火移り速度を測定した。

C. 直径 5cm 、高さ 30cm の石英ガラス製円筒中へ、紙片を同一寸法 ($2 \times 1 \times 0.063\text{cm}$) に切って入れる。さらにシリカゲルの層を通しての空気、すなわち水を入れた箱の水面とを通過させる

空気を、約1時間上記の内筒内を通し紙片の水分を平衡にさせ、その上方に着火し、内筒の寸法線と火面が通る時刻を測って火移り速度を求めた。この水分は着火直前に上部から紙片の試料を採取して測定した。以上の3種の実験結果から、水分(乾基)5%の場合の火移り速度を1として、各水分に対する火移り速度の比を算出し、これを図示したものが図-8である。

図-8には、W. L. Fons 等、および H. F. Anderson 等による実験結果と、高月が燃焼筒に紙片で作成した小球を入れて、同様の火移り速度を求めた実験結果とを、整理したものを参考として示している。この図-2に示した燃焼炉より小さくさい炉 ($0.75 \times 0.5 \times 1 \text{ m}^2$) にあて、 100°C の空気を数十分ばいし数時間乾燥させた試料用のごみを用いて、同様の火移り速度を測定した結果を、やはり図-8中に示しておく。

図-8からわかるように、すべてのデータが同一線に非常によく乗っている。これから判断すると、紙片のみならず、木片、さらにはほとんどのセルロース性物質は、水分の変化に対して図示の曲線とアタロガスな関係を持つものとして推定される。石炭等では、水分によるより、揮発分の多少で火移り速度が定められる。

これらの結果から、ごみ燃焼炉の火床面積の決定に最大熱負荷法のみを用いるのは誤りであるといふことが推察できる。ここに最大熱負荷法とは、単位火床面積に $M \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ という最大の熱負荷を定め、 1 Kg あたり $E \text{ Kcal/Kg}$ の発熱量を持つ燃料に対しては、最大で $E \cdot C = M$ となるを、すなわち最大燃焼率 $C \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ を燃やそうと考える設計する方法であって、石炭燃焼炉の設計に慣用されている。ごみ燃焼炉では、この方法で設計が行われている例は少ない。

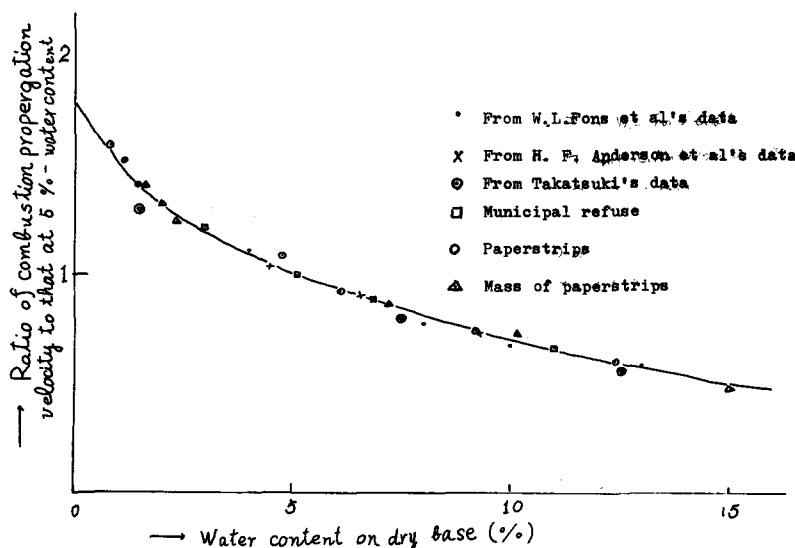


Figure 8 Variation of propagation velocity
versus variation of water content

くびい。

3.2 単一紙片を用いた火移り速度に関する実験-Aと実験-B

(a) 紙片を作成する(紙をすく)として、直径0.1mmのアルメルクロメル熱電対を埋込んであり、その熱電対からの配線を増幅器を通してオシシログラフにつなぐ、燃焼の進行中に起こる紙片中の温度変化を自動記録させる。紙片の火移り速度は、寸法線筒を通る途中、 $1/6$ secのシャッタ速度で撮影してそのコマ数と横に切りつけたストッパウオッチで測定するにせよ(図-9参照)。

水分の変化に対する火移り速度の変化を図-10に示す。なお、図-10中のHold(A)とは単一紙片を用いた実験-Aの場合の保持法であり、Hold(B)、Hold(C)とは、前節で述べた実験-Bにおいて、下方の紙片の直角に曲げられた工面の上で、それぞれ上方の紙片の下端を直角に曲げた紙片を乗せる場合と、下方を直径5mmの円筒状として曲げたものを乗せる場合との保持法である。

またこの実験から得られた紙片内の温度分布は図-11aのようになる。またこの図には、後節で述べる紙片の熱分解の実験結果を参照して、重量の分布を示してある。図-10で、Holding(B)の場合と同(A)の場合よりも火移り速度が大きいのは、二つの紙片の直角接触面の間の電気層の抵抗が、下方の紙片への熱伝導を妨害するからで、またHolding(C)の場合に同様の現象が起こるのは、円筒状折り曲げた面から直接下方にふく射伝熱を行ない、飛火するからである。しかしHolding(A)、(B)、(C)のいずれの場合でも、水分の変化に対しては同一形で火移り速度が変化すると考えよと、これらは前節に述べた結果と一致していることがわかる。

また前節で述べたように、集塊(実験-C、不連続体)の場合に単一紙片(実験-A、B、連続体)の場合と、火移り速度が水分に関して同一に定まるといふことは、この実験のHolding(A)、(B)、(C)の場合を比較して明らかになる。集塊の中の個々の物体の接触面では火移り速度が変化するか、集塊内部で着火面が通る時間が長いから、単一紙片の場合と同一の値になるものと考えられる。

また、図-11からわかるように、燃え切った位置での温度は紙片内の最高温に達し、その時の温度勾配は0であり、炎中でやや温度が下つて、やがて炎の最高温度に達する。また、温度勾配はいくらでも微分可能と考えよといふであろう。

(b) 紙片を粉状にして水分を含ませ、空気中で示差熱の変化と重量の変化を求めた。このときの標準試料は酸化アルミ粉である。この結果を図-12に示す。

図-12から、水分の減少は約70°C程度から始まり、E.が100°Cあたりで急速に半分が失われ

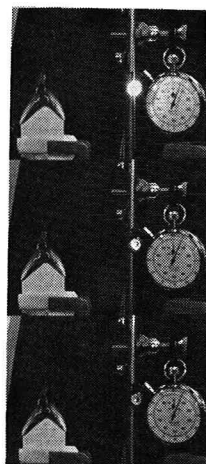


Fig. 9 Picture of signal lamp indication ignition front passing by a certain point

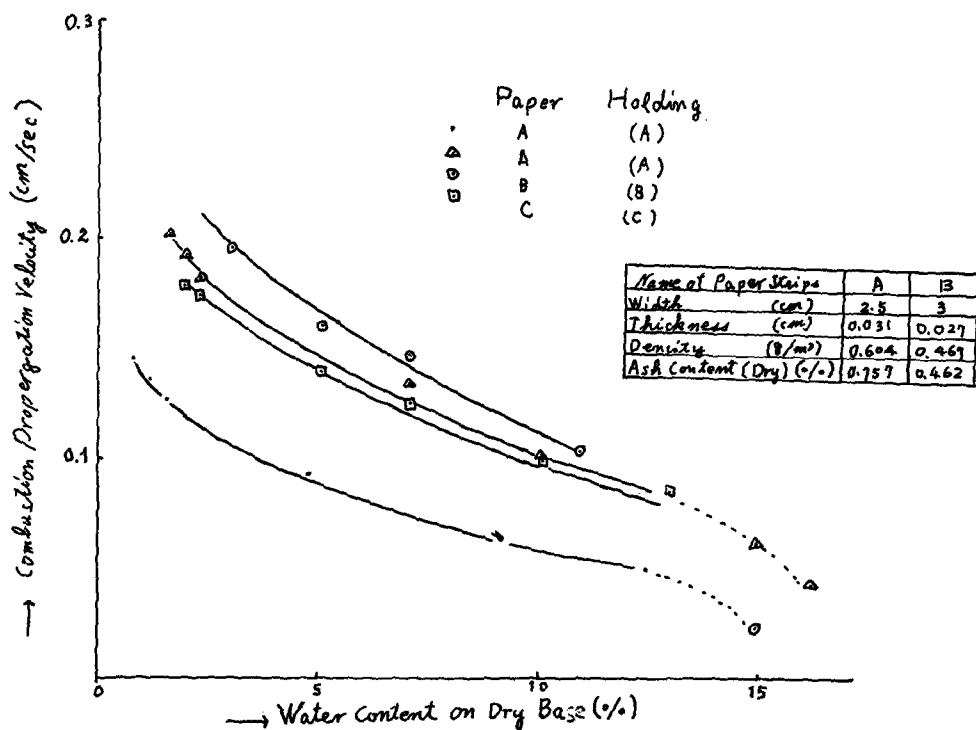


Fig. 10 Combustion Propagation Velocities of Paper Strips

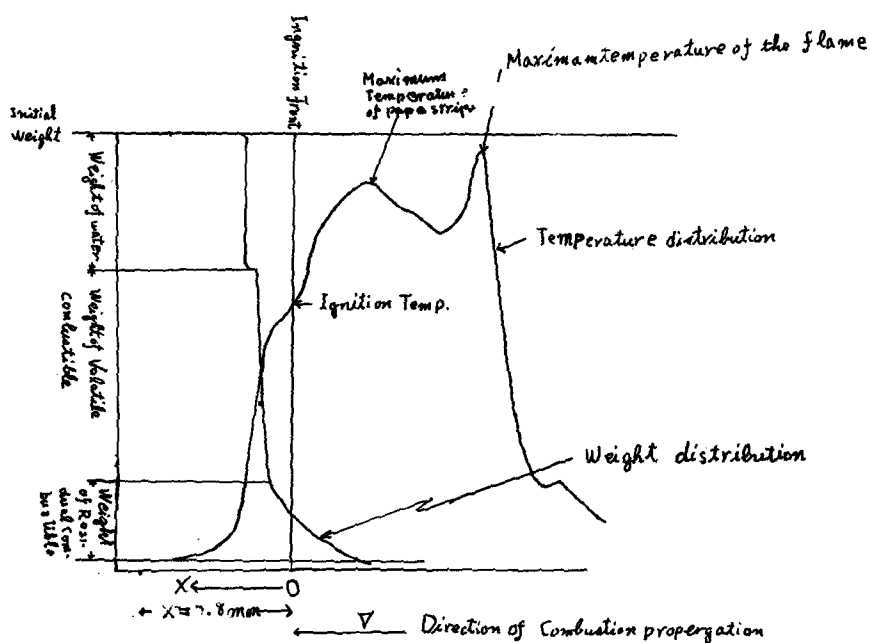


Fig. 11 Histories of Temperature Rise and Weight Reduction

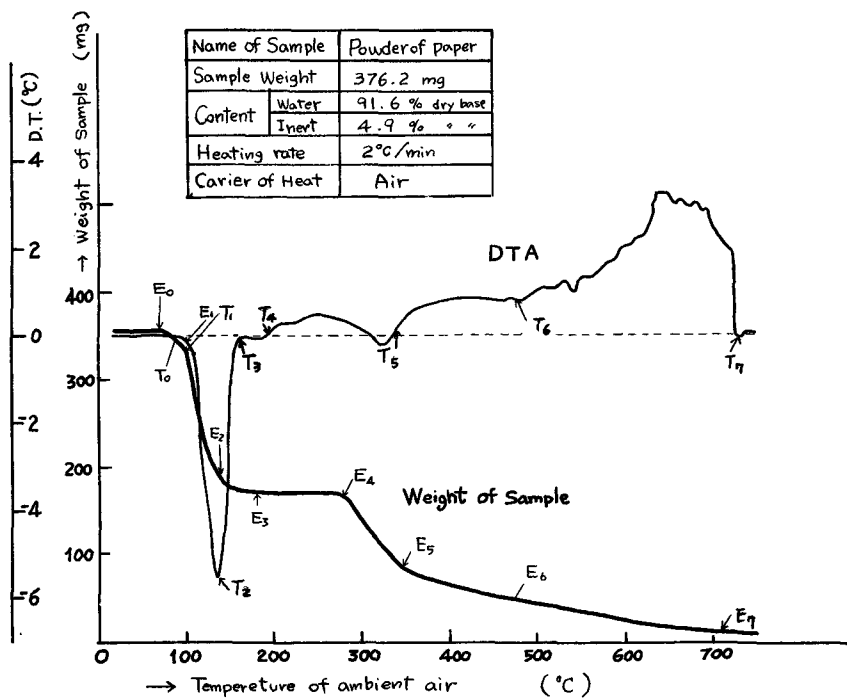


Fig. 12 TGA & DTA of Wet Sample

れ (E₁)よりはその前後から吸熱反応が起こり、示差熱が負の方向に大きくなり (T₁)、140°C 程度で水分のほとんどが蒸発し (E₂, T₃)、160°C 程度で水分は全くなり (T₃)、おそれながら可燃分の熱分解が始まる (E₃)。はじめの間はわずかに吸熱反応を示し (T₃~T₄)、次に吸熱反応を示す。280°C (E₄) で熱分解は急速になり、おそれの吸熱 (T₅) を示して吸熱反応へと変わる。475°C 程度で残存可燃分 (char) の燃焼が始まり (E₆, T₆)、そのうち燃焼が終了する (E₇, T₇)。

この熱分解の傾向は、S. Martin 等が²⁴⁾ 求めたものとほぼ異なり、そのほとんどの吸熱反応は見られず、紙片の熱分解は約 500 cal/g の速い吸熱を示し、その結果と一致している。これは、熱分解中に²⁵⁾ おそれの燃焼が始まっていることを意味し、T₄E₄ は紙の spontaneous ignition 温度と考えれば、約 190°C²³⁾ となり、従来のデータとよく一致する。また、T₆E₆ は 470°C となり、金原等の得た着火温度 460°C とよく一致している。

2. 3 紙片モデルの燃焼速度に関する解析

実際の着火面の形状は、前節の図-9 に見られるとおりであるが、問題を簡単にするために、着火

面と水平面とを考えた考察を進める。

より前節の実験の Holding (B) の場合から判断すれば、接触面の抵抗がかなりあるという二つは、着火面が垂直に移動する場合、着火面からの熱伝導が延焼に対して支配的であると考えこよいである。

こめはより、熱源が移動する問題であるから、熱伝導方程式、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) \quad (9)$$

は熱源とともに移動する。

座標系を考えると、

$$x = X - V\tau \quad (10)$$

ここに、 τ : 時間、 V : 火移り速度、

を導入すると、速度が一定のときは、温度分布は時間によらずに定常過程と考えるこよい。 かわら、 $(\partial T, \partial \tau) = 0$ から、式(9)は次のように簡単な常微分方程式とよす。 かわら、

$$\alpha \left(\frac{d^2 T}{dx^2}\right) + V \left(\frac{dT}{dx}\right) = 0 \quad (11)$$

こらに、紙片を二つの領域にわけ、一方を予熱域、他方を反応域と呼ぶこよす。

予熱域においては、一さの相の变化は見らる、単に温度のみが上昇していると仮定し、こ反応域においては、水分の蒸発、可燃分の分解および燃焼が同時に起こるこいさある。 こうに仮定の妥当性は前節の図-11に示さるこいさある重量分布の推定線から見ると矛盾するが、一方温度分布線から見ると、着火温度近辺では反応熱の影響があまり出こるこいさあるこいさあるこいさある。

こめは、燃焼の進行中には、着火面近辺のこいさあるこいさある紙片が、短かい時間ど急激に加熱さるこいさあるこいさあるの延焼は行わらるこいさあるこいさあると、未燃熱さる分解は、1分間に 2°C といさある温度上昇を行わさるこいさあるこいさある、水分の蒸発反応、可燃分の熱分解および残存可燃分の燃焼反応が分離して固さるこいさあるこいさあるこいさあるこいさある、紙の延焼中、図-11に示さる温度分布曲線の着火面の前後の変曲点の存在から推察さるこいさあるこいさある、水分の蒸発と可燃分の分解とはほぼ同時に起こるこいさあるこいさあるこいさある、こいさあるこいさある可燃分の燃焼反応がこいさあるこいさあると考えるこいさある。 こいさあるこいさある、反応域でこいさあるこいさある反応が同時に起こるこいさあると仮定しこいさあるこいさあるこいさある。

こいさある、外気への放散熱がこいさあるこいさあるこいさある、予熱域での熱伝導の方程式は、移動座標系に關して、

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{\rho_w \gamma_w}{\lambda_w}\right) V \frac{dT}{dx} = 0 \quad (12)$$

ここに、 ρ_w , γ_w および λ_w 等は、こいさあるこいさある水分 w (乾基) のこいさある比熱、比重、熱伝導係数、とよさるこいさある。

こいさある反応域では、熱伝導方程式は、発熱と吸熱の両反応が温度に比例して起こるこいさあるこいさあるこいさある、

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{\rho_w \gamma_w}{\lambda_w}\right) V \frac{dT}{dx} + \frac{k_s H(T - T_c) A}{(T_{11} - T_c) \lambda_w S} = 0 \quad (13)$$

α : k_s : 反応熱のうち燃焼面に残る熱の割合, H : 単位面積, 単位時間あたりの燃焼面の発熱量, T_c : 着火面の温度, T_M : 着火の終了面の温度, $A/S = z(a+b)/ab$, a は紙片の幅, b は厚さ, z を表わす。

式(12)に対する境界条件は, 着火面を原点として,

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0, \quad \text{at } x = \infty \\ T &= T_c, \quad \text{at } x = 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

α : T_0 は紙片の初期温度である。この初期条件より, 式(12)の解は,

$$T - T_0 = (T_c - T_0) \exp\left(-\frac{\rho_w \Gamma_w}{\lambda_w} V x\right) \quad (15)$$

一方, 式(13)に対する境界条件は, T_c での温度曲線が微分可能であるから,

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=+0} &= \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} \\ T &= T_c, \quad \text{at } x = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

である。この反応の終了面では, 温度分布曲線が水平になるから, 次式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=x_M} &= 0 \\ T &= T_M, \quad \text{at } x = x_M \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式(13)の一般解は,

$$T - T_c = D_1 \exp\{-(\alpha + \beta)x\} + D_2 \exp\{(\alpha - \beta)x\} \quad (18)$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{\rho_w \Gamma_w}{2 \lambda_w} V\right)^2 - \frac{k_s H A}{(T_M - T_c) \lambda_w S}}$$

$$\beta = \frac{\rho_w \Gamma_w}{2 \lambda_w} V$$

α : D_1, D_2 積分定数である。この境界条件式(16)から

$$\left. \begin{aligned} -(T_c - T_0) z \beta &= -(\alpha + \beta) D_1 + (\alpha - \beta) D_2 \\ 0 &= D_1 + D_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

となり, 式(13)の解は,

$$T - T_c = (T_c - T_0) \frac{\beta}{\alpha} \{ \exp\{-(\alpha + \beta)x\} - \exp\{(\alpha - \beta)x\} \} \quad (20)$$

となる。この式を境界条件式(17)を用いると,

$$0 = \frac{\beta}{\alpha} \{ -(\alpha + \beta) \exp\{-(\alpha + \beta)x_M\} - (\alpha - \beta) \exp\{(\alpha - \beta)x_M\} \} \quad (21)$$

$$T_M - T_c = (T_c - T_0) \frac{\beta}{\alpha} \{ \exp\{-(\alpha + \beta)x_M\} - \exp\{(\alpha - \beta)x_M\} \} \quad (22)$$

$\therefore = Z'$, 二式の両式に於ける x_M を微少とすると, (21) 式から, $x_M = \frac{1}{2\beta}$ 。これを (22) 式に代入,

$$\left(\frac{\rho_w \delta_w}{2 \lambda_w} V \right)^2 = \frac{k_s H A}{(T_M - T_c) \lambda_w S} \left(\theta + \frac{1}{\theta} \right) \quad (23)$$

$\therefore = \nu$, $\theta = \frac{T_M - T_c}{T_c - T_0}$ 。式 (23) を整理すると,

$$V = \sqrt{\frac{4 \lambda_w k_s H A}{\rho_w^2 \delta_w^2 (T_c - T_0) S} \left[1 + \frac{(T_c - T_0)^2}{(T_M - T_c)^2} \right]} \quad (24)$$

を得る。実験に於いて, T_M, T_c, T_0 等は水分の变化に關係なく, むしろ風速等の影響を受けることがわかってゐる。ゆゑに紙片の形状を問題にしなけば, 水分の火移り速度に対する影響は次式で表わされる。

$$V \propto \frac{\sqrt{\lambda_w k_s H}}{\rho_w \delta_w} \quad (25)$$

$\therefore = Z'$, H が水分によるどのような変化を考へなければならぬ。簡単に考えるに, 燃焼速度は一般に酸素の濃度と可燃物の濃度との積に比例すると考へる。図-11 からわかるように, 燃焼表面を出入るガスの温度は, 一度下つて上昇する。これから判断すると, 燃焼表面では固体燃焼を行つてゐるが, 揮発性ガスは分解を続け温度が低下し, ある温度になつて産出されたガスが着火し, ガスの可燃分がなくなるまで燃焼を続けることを示される。すなわち, 単位燃焼表面積上の火炎に存在するガスの質量は, $\rho(1+w)$ に比例し, 酸素の拡散はそのみに比例するとすれば, 酸素濃度は,

$$M(O_2) \propto \frac{1}{\rho^2(1+w)^2} \quad (26)$$

次に, 揮発性可燃物は固体表面では燃え尽くとすると, 可燃分の表面に於ける可燃分の濃度は,

$$M(C_M) \propto \frac{c'}{a + c' + c'' + w} \quad (27)$$

$\therefore = \nu$, c' : 残存可燃分, c'' : 揮発可燃分である。

また, $\rho c'$ の可燃分が燃え尽すと, L は水分の蒸発熱とすると, $\rho w L$ の熱が吸収される。これを $\rho(1+w)$ の質量の物質の温度を昇らせ, この温度に比例して反応するとき, 発熱量 H は次式になることを推察される。

$$H \propto \frac{\rho(k_c c' E - w L)}{\rho^2(1+w)^4(a + c' + c'' + w)} \quad (28)$$

また, $\rho_w \delta_w = \rho(\delta + w)$, $\lambda_w = \lambda(1 + k_\lambda w)$, $\therefore = \nu$, δ と λ とは, 水分 0 のときの紙片の比熱と熱伝導係数, k_c, k_λ は常数である。さらに, c , 乾燥紙片を基準にとると,

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1+w)(1+w)^2} \sqrt{\frac{(k_c c' E - w L)(1 + k_\lambda w)}{(a + c' + c'' + w)}} \cdot \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{k_c c' E}{a + c' + c''}} \quad (29)$$

$\therefore = \nu$, V_0 は水分 0 の時の移り速度である。

W. D. Weatherford²⁴⁾ のよるところの $\delta = 0.42 \text{ (cal/g}^\circ\text{C)}$ の測定結果を採用し、前述実験結果から得た $C' = 0.19 \text{ C}$, $C'' = 0.31 \text{ C}$, 灰分の存在を無視するところの $C = 1$, $a = 0$ を用いると、 $L = 600 \text{ cal/g}$ のよる、 $1 + k_{\infty} = 1 + W$ の近似的に成立つから、

$$V \propto \frac{\sqrt{k_c C' E - 600 W}}{(1 + 2.4 W)(1 + W)^2} \quad (30)$$

本式の k_c は、燃焼の状態、すなわち炉内であるか、外気中であるか等によって定まる数値であり、いづれ外気中の場合の実験結果から $k_c = 0.1$ とし、 $C' = 0.19$, $E = 8000 \text{ cal/g}$ とすると、式(30)を式(31)に書きなおすことができる。

$$V \propto \frac{\sqrt{1 - 4 W}}{(1 + 2.4 W)(1 + W)^2} \quad (31)$$

本式のよる計算結果を図-13中の曲線を示し、これを図-8に示した実験結果を図-13に点としてプロットしたものが、こゝからはよめてよく一致するといわれる。なお水分が約2%以下になると、下から飛火するやうな現象がみられ、式(31)のよる結果よりむしろ火移り速度が生じる。この火移り速度がある程度以下になると、図-10に示すやうに、式(31)のよる結果よりむしろ火移り速度は小さくなり、最終的には燃焼が継続しなくなる。

4. お そ び

二つの燃焼する場合については、炉内での送風速度が変化され、バスターカンの揺動によって火種が下方に落ちる等の現象が伴うので、これらの影響に対して式(31)は修正されるものではないか、この式の方の項は本質的には保存されて考えようといふことになる。実際の燃焼炉内での二つの火移り速度に対する式(31)の応用については、紙数の関係で次報にゆずることにせよとわかれ、この式を多少修正するに付て、実際の炉における火移り速度の観測値とよめてよく一致するやうな計算結果が得られ、

そこで上述のやうに、二つの集塊となった場合には、その中に含まれる個々の物体の影響が干渉しあって同一性を示すやうになると考えようといふことから、いづれは敬遠されるこの二つの関する理論的研究も、その可能性が大いにあるといわれる。しかしながら、今後はいずれもこの現象を理論的に考え、これをモデル実験と行なうべきであり、二つの燃焼等に関し、実用的に差支えない程度の誤差しか持たない関数関係が、もっと求められたいといふのと信じたい。わかれれば、上記以外に示すところは、三つの新しい関数関係を求めることであるといふこと、これらに近く発表する予定である。

参 考 文 献

- 1) R. Gerhardt and H. Ermar: Modelluntersuchung der optimalen Auslegung von Müllverbrennungsanlagen unter mitter Städte am Beispiel der Müllverbrennungsanlage Neuestadt in Holstein, Aufbereitungs-Technik, 3, 1964, pp.110
- 2) R. H. Essenhigh: Burning Rates in Incinerator (I), (II), Proc. of 1968 National Incinerator Conference, A. S. M. E., pp.87, pp.94

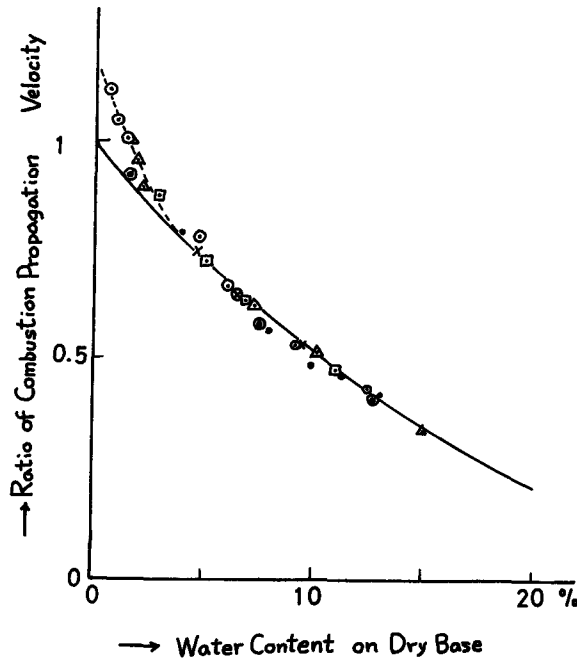


Fig.13. Experimental Results and The Curve of Analytical Result. by Eq. (31)

- 3) 岩井重久, 春山 鴻 : ゼミ焼却炉について(Ⅰ), 資源, 6, 1961, pp. 33
- 4) 岩井重久, 春山 鴻 : ゼミの燃焼過程における水分の影響, 工学会第20回年次学術講演会講演概要, 1965, Ⅱ, p. 131
- 5) 岩井重久, 春山 鴻 : 放射性固体廃棄物焼却炉の燃焼工学の考察, 京大工研彙報, 30, 1966, p. 35
- 6) 岩井重久, 春山 鴻 : ゼミの焼却に関する研究, 京大工研彙報, 28, 1965, p. 57
- 7) 岩井重久, 春山 鴻, 高月 純, 和田 彰 : 焼却対象物とゼミの境界の基礎的調査研究, 工学会第22回年次学術講演会講演概要, 1967, Ⅱ, pp. 171-1
- 8) 岩井重久, 春山 鴻 : ゼミ焼却炉の最近の進歩, 資源, 6, 1965, pp. 40
- 9) 岩井重久, 春山 鴻 : ゼミ集塊の同一性, 工学会第21回年次学術講演会講演概要, 1966, Ⅱ, p. 161
- 10) 岩井重久, 春山 鴻 : 微細化ゼミ焼却炉の設計に関する研究, 昭和33年工学会関西支部講演会概要集, Ⅱ-17, pp. 112
- 11) 岩井重久, 春山 鴻 : ゼミ焼却炉について(Ⅱ), 資源, 9, 1961, pp. 33

- 12) 若井重久, 春山 鴻, 高月 紘, 和田 彰: じん界の燃却処理の燃焼工学的考察, 工本学会第23回
年次学術講演会講演概要, 1968, II, p. 172-1
- 13) 若井重久, 春山 鴻, 高月 紘, 長谷部 泰三: じん界の燃却処理の燃焼工学的考察, 同工概要, 1968, II, pp. 551
- 14) 若井重久, 春山 鴻, 高月 紘: セルロース質固体廃棄物の燃焼に関する研究, 同工概要, 1968,
II, pp. 561
- 15) 若井重久, 春山 鴻: セルロース類物質燃焼の移動速度, 京大工研彙報, 32, 1967, p. 44
- 16) T. Kimbara, H. Endo and S. Segal: Downward Propagation of Smoldering combustion through Solid Materials, Proc. 11th Symposium (International) on Combustion, 1966, pp. 525
- 17) W. L. Fons, H. B. Clements and D. M. Gerge: Scale Effects on Propagation Rate of Laboratory Crib Fires, Proc. 9th Symposium (International) on Combustion, 1964, pp. 860
- 18) H. E. Anderson: Influence of Moisture and Wind upon the Characteristics of Free Burning Fire, Proc. 10th Symposium (International) on Combustion, 1965, pp. 1009
- 19) L. A. Albini: A Physical Model for Firespread in Brush, Proc. 11th Symposium (International) on Combustion, 1966, pp. 533
- 20) 高月 紘: 京都大学修士論文, (工・衛生工) 昭和42年
- 21) S. Martin: Diffusion-Controlled Ignition of Cellulosic Materials by Intense Radiant Energy, Proc. 10th Symposium (International) on Combustion, 1965, pp. 897
- 22) P. L. Blackshear, JR. and K. A. Murty: Heat and Mass transfer to, from, and within Cellulosic Solid Burning in Air, Proc. 10th Symposium (International) on Combustion, 1965, pp. 911
- 23) University of California: Municipal Incineration, Sanitary Engineering Research Project, No. 6, Nov., 1951
- 24) W. D. Weatherford, Jr. and D. M. Shepherd: Basic Studies of The Mechanism of Ignition of Cellulosic Materials, Proc. 10th Symposium (International) on Combustion, 1965, pp. 897