粉体ごみ燃料単一粒子の着火・燃焼特性*

難波 邦彦^{*1}, 木本 恭司^{*1}
藤田 永治^{*2}, 中島 健^{*3}Behavior of Ignition and Combustion for Single Refuse
Derived Fuel ParticlesKunihiko NAMBA, Kyoji KIMOTO,
Eiji FUJITA and Tsuyoshi NAKAJIMA

This study is an attempt to burn pulverized Refuse Derived Fuel (p-RDF) made from municipal solid waste (MSW) with a view point of recycling of waste resources from daily domestic and industrial processes. In order to obtain fundamental data on p-RDF combustion, the ignition and combustion behavior of the particles of RDF and its component materials such as plastics (polypropylene, polystyrene), fiber (nylon) and paper (newspaper) were observed in an electric furnace. The ignition delay and the burning period of particles both p-RDF and its component materials were investigated under specified furnace temperatures and particle sizes of each material. The results indicated that each component material of p-RDF had different ignition and combustion mechanism in processes such as volatilization, ignition and visible envelope flame. The values of the ignition delay and the burning period of plastics and fiber were larger than those of paper, and RDF showed medium values between them. The estimated activation energies for plastics and fiber were larger than paper, and RDF showed medium values. Each component material of p-RDF showed different activation energies which led to different ignition delay and burning period.

Key Words: Combustion, Refuse Derived Fuel (RDF), Ignition Delay, Burning Period, Flame, Kinetics, Arrhenius Plot, Activation Energy, Frequency Factor

1. 緒 言

地球環境の保全や資源保護の観点より、家庭から排出される一般ごみや工場等から排出される産業廃棄物の資源化・再利用が推進されており⁽¹⁾⁽²⁾、スーパごみ発電⁽³⁾等に代表される一般ごみを焼却処理すると同時に燃焼による熱エネルギーを回収する方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾が実施されつつある。ごみ処理場に収集される都市固形廃棄物(MSW)は約50%程度の水分を含むため、発熱量が低く熱回収率が悪いが、これを粉砕し、乾燥させて燃料資源化することによって固体燃料として燃焼させれば、発熱量は高くなり熱回収率も向上する。現在、これらの廃棄物燃料(RDF)はペレット形状のものを燃焼させる場合⁽⁶⁾がほとんどであるが、さらにミルで微粉砕して粉体 RDF とし、微粉炭燃焼のように粉体バーナで炉内噴射して熱分解、燃焼させようとする試みがある。実炉規模の実験、開発が企業等で進められているが、粉体化した RDF の着火・燃焼性について

の基礎データは少なく、燃料の実用化、バーナを含む燃焼装置の設計に向けて、燃焼挙動・特性の解明が望まれている。

本研究では、ごみエネルギー熱回収システムの粉体バーナでの炉内燃焼における基礎データを得るために、落下式電気炉⁽⁷⁾を用いて、ごみとそれを構成する代表的な物質の粒子を燃焼させ、その燃焼挙動、粒子近傍の温度変化を観察した。また、炉内燃焼させた場合の数値シミュレーションの反応モデルに必要な基礎データを得るために、着火遅れ時間および有炎燃焼時間の実験値を用いて、その活性化エネルギーを算出した。

2. 供試燃料および実験装置・方法

実験に用いた燃料は、一般家庭から排出される可燃ごみに石灰等を加えて乾燥、粉砕、加熱し、ペレット状に固形化したものを再度、ミルで粉砕した粉体ごみ(以下、RDF)である。それに加えて、ごみが含有する物質の影響を調べるために、構成する成分物質としてプラスチック類のポリプロピレン(以下、PP)、ポリスチレン(以下、PS)、繊維類のナイロン(以下、NY)、紙類の新聞紙(以下、NP)も用いた。表1に用いたRDFの工業分析、表2に各成分物質の元素分析を示

* 原稿受付 1998年4月10日。

^{*1} 正員、大阪府立工業高等専門学校(☎572-8572 寝屋川市幸町26-12)。^{*2} 正員、新明和工業(株)(☎663-8001 西宮市田近野町6-107)。^{*3} 正員、神戸大学工学部(☎657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。

E-mail: namba @ ipc.osaka-pct.ac.jp

Table 1 Proximate analysis of RDF

Fixed Moisture	(wt %)	3.69
Ash	(wt %)	17.74
Volatile Matter	(wt %)	70.95
Fixed Carbon	(wt %)	11.31
Low Calorific Value	(kJ/kg)	18800

Table 2 Ultimate analysis of materials

C.M. (%)	RDF	NP	PP	PS	NY
C	39.5	43.8	89.1	84.4	69.4
H	5.9	6.3	7.7	12.2	12.0
N	0.87	0.19	0.10	0.19	10.6
O	34.7	45.8	0.2	1.1	8.0
S	0.18	0.06	0.02	0.04	0.04
Cl	1.25	0.08	0.11	0.14	0.06

Table 3 Experimental condition

Parameter	Condition
Component Material (C.M.)	Refuse Derived Fuel (RDF) Polypropylene (PP) Polystyrene (PS) Newspaper (NP) Nylon (NY)
Particle Size (mm) (P.S.)	1.0 ($1.0 \leq L < 1.4$) 1.4 ($1.4 \leq L < 2.0$) 2.0 ($2.0 \leq L < 2.8$) 2.8 ($2.8 \leq L < 4.0$)
Furnace Temp. (K)	973, 1073, 1173, 1273

内に示す幅をもっている。粒子形状は、同種類においても不均一で、NPについては平面的であるが、その他の4種についてもとがった角をもつ。球体よりはかなり平面的な多角形体に近い。

ビデオによって燃焼状況に写し込まれた時刻の差から燃料粒子の炉内挿入から火炎が発生するまでの時間(着火遅れ時間)、火炎の発生から消滅するまでの時間(有炎燃焼時間)を算出し、メモリーレコーダによって出力される温度変化曲線の傾きが急激に大きくなる点を着火時の粒子表面付近のガス温度(着火温度)として求めた。データを効率よく採取するために、粒子支持台に二つの粒子を互いに干渉しないように間隔を空けて懸垂し、実験を行った。各条件において、20個程度のデータを取り、平均値を用いて整理した。同じ成分物質においても、粒子形状の違い、およびその不均一性からデータのばらつきは大きく、平均値に対して、±30%程度の範囲のばらつきがある。

3. 結果および考察

3・1 燃焼状況 図2に一例として炉内温度1073 K、粒子サイズ2.0 mmのRDF、NP、PPの燃焼状況と粒子近傍の温度変化を示す。粒子は炉内挿入後、周囲から熱を受けて熱分解し、放出した揮発分が粒子表面の一部または全面で着火し、小さな火炎に包まれた後、火炎は大きく成長する。熱電対先端に保持した二つの粒子間距離が狭い場合は火炎は成長時に一つに合体する可能性が強く、NPを除いた他の燃料では多く観察された。PP、PS、NYでは着火前に表面および内部が熱分解(融解)し、燃焼中には内部の熱分解によって生じた揮発分の吹き出しやすさの発生が観察されるが、RDF、NPについてはそれらは観察されず、NPは燃え尽きるのが極めて早い。

3・2 着火遅れ時間 炉内温度1073 Kで粒子サイズを変化させた場合の各物質の着火遅れ時間の平均値を図3に示す。PP、PS、NYは、粒子サイズが大き

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

す。RDFは石炭等に対して、60～65%の発熱量をもち、揮発分が全体の70%以上、酸素分が約35%で、それらの割合が大きいのが特徴である。

図1に落下式電気炉の概略図を示す。一定温度に設定した電気炉①が粒子支持台③の垂直上方より落下し、熱電対接点(先端部)付近に保持した燃料粒子は瞬間的に高温雰囲気中に挿入される。熱電対はコーティングされたφ50 μmのPt/Pt-13%Rhで、粒子付近の温度変化をメモリーレコーダで記録すると同時に、炉端面の内部観察用窓を通して燃焼挙動を1/100 sのラップタイムとともにビデオ装置で撮影した。

表3に実験条件を示す。なお、粒子サイズは粒子が通過した標準ふるいの目の大きさを示しており、括弧

(a) NP

(b) RDF

(c) PP

Fig. 2 Combustion appearance
($T=1073$ K, P.S.=2.0 mm)

いほど着火遅れ時間が長くなるが、RDF、NPの粒子サイズによる変化は小さい。PP、PS、NYの3種とRDF、NPの2種は、それぞれ絶対値が比較的近く、粒子サイズによる変化の様子(曲線の形)が類似してい

Fig. 3 The relation of ignition delay to particle size
($T=1073$ K)

Fig. 4 The relation of ignition delay to furnace temperature (P.S.=2.0 mm)

る。また、着火遅れ時間と粒子サイズは正比例の関係ではなく、粒子サイズが大きくなるほど着火遅れ時間の変化は小さくなる。

粒子サイズ2.0 mmで炉内温度を変化させた場合の各物質の着火遅れ時間の平均値を図4に示す。いずれの物質においても、炉内温度が高いほど着火遅れ時間は短くなる。PP、PS、NYは炉内温度に大きく影響されるが、NPは密度、形状の違いを考慮しても変化の割合は極めて小さく、RDFはその間の値を示し、炉内温度による変化の様子はNPに類似している。

3.3 着火温度 炉内温度1073 Kにおける各物質の着火温度の平均値を図5に示す。粒子の形状が不均一であること、着火時の火炎温度を測定している場合があること、および着火点と熱電対接点の位置関係が一樣でないことなどからデータのばらつきが大きい。セイコー電子工業(株)製高温型示差熱重量同時測定装置TG/DTA 320で測定した昇温速度10 K/

Fig. 5 The relation of ignition temperature to particle size

Fig. 6 Thermogravimetric results of materials

min, 空気雰囲気での熱重量分析結果⁽⁸⁾を図6に示す。試料の温度上昇による熱分解, 燃焼によって, 初期重量に対する重量割合(TG 値)が物質によって異なる温度範囲で急激に減少する。物質による着火温度の違いは, おもな熱分解(揮発)反応が, PP, PS, NY では 550~700 K, RDF, NP では 450~550 K の間で開始することに対応しており, 着火は揮発分の放出による気相反応に支配されると考えられる。

3・4 有炎燃焼時間 炉内温度 1 073 K で粒子サイズを変化させた場合の各物質の有炎燃焼時間の平均値を図7に示す。PP, PS, NY, RDF は粒子サイズが大きいほど有炎燃焼時間が長くなるが, NP は粒子サイズによる変化が極めて小さい。PP, PS, NY, RDF の4種は粒子サイズによる変化の様子が類似している。RDF は, 性状の非均質性からデータのばらつきが大きい, 平均値では PP, NP の間で, NY に近い値を示す。

Fig. 7 The relation of burning period to particle size ($T=1\,073\text{ K}$)

Fig. 8 The relation of burning period to furnace temperature (P.S.=2.0 mm)

粒子サイズ 2.0 mm で炉内温度を変化させた場合の各物質の有炎燃焼時間の平均値を図8に示す。PP, PS, NY は炉内温度が高いほど, 有炎燃焼時間が短くなるが, RDF, NP についてはあまり変化しない。これは, PP, PS, NY は着火後も粒子内部で熱分解(融解)を生じながら燃焼するのに対し, NP は短時間で揮発し, 表面反応が生じており, 酸素の拡散によって支配されるためである。

図3と図7の比較より, RDF の着火遅れ時間の特性が NP に類似し, 有炎燃焼時間の特性は PP, PS, NY に類似していることから, 着火は紙類によっておもに支配され, そのため, プラスチック, 繊維類に比べて, かなり早いのに対し, 着火後の有炎燃焼時間については, 燃焼速度が遅いプラスチック, 繊維類におもに支配される様子がわかる。また, 図4と図8の比較からも同様なことが推測され, RDF の測定値は, 炉内温度が高くなるほど, 着火遅れ時間については紙

類に、有炎燃焼時間についてはプラスチック、繊維類に近くなる傾向がある。このことから、RDFに含まれる紙類が着火し、それが他の構成物質の揮発化、着火、燃焼を引き起こし、促進する可能性が高い。

各物質、粒子サイズについて、着火遅れ時間、有炎燃焼時間と炉内温度の逆数の関係をアーレニウスプロットした。一例として、RDFについての着火遅れ時間の場合を図9、有炎燃焼時間の場合を図10に示す。粒子サイズにかかわらず、図9、10中の各近似直線の傾きがほぼ等しいことから、活性化エネルギーは粒子サイズにあまり影響されないと考えられる。

3・5 等価直径 実験で用いた各物質の粒子形状の不均一性を標準化するために、各サイズの粒子をそれに等しい体積をもつ球体と考え、その直径を等価直径として定義した。各物質、各粒子サイズについて算出した等価直径を密度とともに表4に示す。PP, PS,

NYに比べて平面的な形状であるNP, RDFの等価直径は小さい。炉内温度1073 Kでの等価直径と各物質の着火遅れ時間の平均値の関係を図11、有炎燃焼時間の平均値との関係を図12に示す。本研究のように、粒子サイズが大きく、かつ放射熱が大きい場合、着火遅れ時間と有炎燃焼時間は、粒子の熱容量(体積)にほぼ比例し、放射と対流による入熱量(面積)にほぼ反比例するため、粒子を球と考えた場合、直径にほぼ比例

Table 4 Equivalent diameter

C.M.	Density (kg/m ³)	Particle size (mm)			
		1.0	1.4	2.0	2.8
NP	900	0.38	0.41	0.50	0.54
RDF	926	0.53	0.75	0.90	1.21
NY	1140	0.67	0.93	1.12	1.52
PP	910	0.72	0.88	1.12	1.53
PS	1060	0.71	0.92	1.35	1.71

(mm)

Fig. 9 Arrhenius plot (RDF)
(Ignition delay versus $1/T$) Fig. 10 Arrhenius plot (RDF)
(Burning period versus $1/T$) Fig. 11 The relation of ignition delay to equivalent diameter ($T=1073\text{ K}$) Fig. 12 The relation of burning period to equivalent diameter ($T=1073\text{ K}$)

Fig. 13 Arrhenius plot (RDF)
[$a_i (= \tau_i / De)$ versus $1/T$]

Fig. 14 Arrhenius plot (RDF)
[$a_b (= \tau_b / De)$ versus $1/T$]

すると考えられる。図12の平均値に多少のばらつきはあるが、実験データ数を考慮すると実験条件の範囲では、おおよその時間は等価直径にほぼ比例する。

3・6 活性化エネルギー 着火遅れ時間 τ_i と有炎燃焼時間 τ_b は、それぞれの反応速度と反比例の関係であり、本研究での実験範囲では等価直径にほぼ比例することから、それらの反応をアーレニウスの一次反応で仮定すると次式で表すことができる。

$$\tau_i = \left(\frac{1}{A_i} \right) \cdot \exp \left(\frac{E_i}{RT} \right) \cdot De$$

$$\tau_b = \left(\frac{1}{A_b} \right) \cdot \exp \left(\frac{E_b}{RT} \right) \cdot De$$

ここで、 A は頻度因子、 E は活性化エネルギー、 R は一般ガス定数、 T は炉内温度、 De は等価直径を示し、添字 i, b は着火遅れ時間、有炎燃焼時間に対するそれぞれの値を表す。各物質について、着火遅れ時間 τ_i 、

Table 5 Activation energy and frequency factor
(Ignition delay)

C.M.	Activation energy E_i (kJ/mol)	Frequency factor A_i (mm/s)
P P	50.05	1.54×10^2
P S	58.12	4.33×10^2
N Y	61.36	6.44×10^2
R D F	44.89	1.88×10^2
N P	42.99	2.45×10^2

Table 6 Activation energy and frequency factor
(Burning period)

C.M.	Activation energy E_b (kJ/mol)	Frequency factor A_b (mm/s)
P P	58.21	8.85×10^1
P S	48.13	4.50×10^1
N Y	18.11	1.74×10^0
R D F	2.412	2.56×10^{-1}
N P	0.184	6.68×10^{-1}

有炎燃焼時間 τ_b を等価直径で除した値 a_i, a_b と炉内温度の逆数の関係をアーレニウスプロットした。一例として、RDF についての着火遅れ時間の場合を図13、有炎燃焼時間の場合を図14に示す。各図より各物質の直線の傾きと切片の逆数から求めた活性化エネルギーと頻度因子を表5、6に示す。一般には、活性化エネルギー E が小さいほど活性化温度 E/R が低くなり、より低い温度で着火が起こる。そのため、急速加熱後の着火遅れ時間が短くなると考えられる。着火遅れ時間の活性化エネルギー E_i については、PP, PS, NY の3種は大きな値を示すのに対して、RDF, NP の2種はそれぞれ近い値を示し、PP, PS, NY に比べて小さい。また、有炎燃焼時間の活性化エネルギー E_b については、PP, PS の2種の値が大きい、NP は極めて小さな値を示し、RDF はNP とNY の間の値をとる。その理由は紙類や紙類を50%程度含有するRDFについては、酸素の拡散による表面での反応による活性化エネルギーを示し、プラスチック・化学繊維類については分解反応の活性化エネルギーを示すからであると考えられる。また、それぞれの値の大小関係は、図3、7において前述した燃料の違いや傾向を示しており、着火遅れ時間や有炎燃焼時間についての実験結果を定量的に説明する。

4. 結 言

(1) ポリプロピレン、ポリスチレン、ナイロンの

3種と粉体 RDF, 新聞紙の2種はそれぞれ類似した燃焼状況を示す。

(2) 着火遅れ時間と有炎燃焼時間は, 炉内温度が高く, 粒子サイズが小さいほど短くなり, 構成する物質では, 新聞紙が最も短く, ポリプロピレン, ポリスチレンが長い, ごみ粉体はその間の値を示す。

(3) 着火温度は, 炉内温度が高く粒子サイズが大きいほど低くなり, 構成する物質では, ポリプロピレン, ポリスチレン, ナイロン, 粉体 RDF, 新聞紙の順に低い。

(4) 粉体 RDF の着火は, 含有する紙類によっておもに支配され, 有炎燃焼時間は, プラスチック, 繊維類におもに支配される。

(5) 着火遅れ時間, 有炎燃焼時間は粒子形状の違いを標準化するために定義した等価直径とほぼ比例関係を示す。

(6) ごみ燃料に加えてそれを構成する物質において, 算出した着火遅れ時間, 有炎燃焼時間に対する活性化エネルギーは, 実験結果の構成物質の違いや傾向をよく表している。

(7) 算出した活性化エネルギーと頻度因子を用い

ることにより, 着火遅れ時間と有炎燃焼時間の定式化が可能になった。

最後に, 本研究の実験に協力いただいた卒業研究生に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 金羸載・松藤敏彦・田中信寿, 家庭系ごみから生産されたごみ燃料の性状に関する研究, 廃棄物学会論文誌, **6**-1 (1995), 7-15.
- (2) 北見誠一, サーマルリサイクルのための要素技術, 省エネルギー, **46**-4 (1994), 15-21.
- (3) 千葉紘一・藤森一三・岩元紀昭・鬼崎 操・永島 彰, スーパーゴミ発電プラントの開発, 第8回熱工学シンポジウム講演論文集, (1995), 52-53.
- (4) 本多淳裕, ゴミ処理とエネルギー利用, 電熱, **53** (1990), 7-17.
- (5) 梶光雄, 廃棄物処理技術と有効利用: 廃プラスチックの粉体燃料化の研究開発, 燃料および燃焼, **61**-3 (1994), 182-188.
- (6) 古林和夫・守岡修一, RDF 燃焼速度解析について, 第8回熱工学シンポジウム講演論文集, (1995), 103-104.
- (7) 難波邦彦・木本恭司・越智敏明, CWM(石炭・ホスラリ)燃料の燃焼機構と燃焼性促進, 機論, **58**-548, B (1992), 1221-1227.
- (8) 難波邦彦・木本恭司・藤田永治・中島 健, 粉体ごみ燃料の熱分解, 機論, **64**-621, B (1998), 1499-1505.