

6. RDF堆積層内の燃え拡がり*

八島正明**

6. Fire spread in RDF(Refuse-Derived Fuel) pile *

by Masaaki YASHIMA **

Abstract: The technology of waste handling and resource recycling advances, and RDF or RPF are used as fuel for the incinerator in order to obtain heat energy and electricity energy in Japan. The RDF used in Japan is RDF-5 in ASTM. Fire or explosion is being occurred with the increase in use of the RDF at manufactories or storage facilities. The spreading of combustion zone in the RDF pile is the primary phenomenon in an enlarging fire. The phenomenon is called smoldering. In this study, temperature change in the pile and flame established over the pile were examined in order to explore the fundamental aspect of the spreading fire. In addition, a point to notice in extinguishing the RDF was examined. The RDF sample was piled up to 300 mm using a cylindrical container (inner diameter; 160 mm, height; 350 mm) which consisted of heat insulating material. The cylindrical container was put on a hot plate, and the RDF ignited in the hot surface (bottom). Upward spreading fire is a subject in this study. Considering the effect of the permeability or the natural draft on the spread of fire, the experiment was carried out under next 3 conditions.

- a)Experiment No.1: without permeability of the bottom face / with permeability of the side
- b)Experiment No.2: without permeability of the bottom face / without permeability of the side
- c)Experiment No.3: with permeability of the bottom face / without permeability of the side

The results are summarized as follows:

- (1) In the condition without permeability of the bottom face, mean spread rate of the combustion zone is from 0.24 to 1.8 mm/min. The rate of this range is equivalent to those of general smoldering.
- (2) The temperature distribution in the RDF pile is examined, and it is clarified that the combustion region are wide.
- (3) When the pile would collapse with smoldering, then the clearance between the RDF pile increases, the inflow of the air from the top to the pile became easy and that the flame became easy to establish.
- (4) When the flame establishes in the clearance in the RDF pile, the spread rate increases, since the preheating of RDF of the upper layer is promoted.
- (5) In the final stage that the combustion zone reaches the upper surface in the pile, it is found that large flame can establish suddenly over the pile.
- (6) The RDF consists of the multicomponent, and it has the characteristics of absorbency and large heat capacity. Therefore, if spraying water is not appropriately carried out in the fire extinguishing, otherwise subsidiary reaction of the incomplete combustion generated combustible gas and CO, and it may become a cause of re-ignition or gas explosion.
- (7) It should care about differing on the component of the gas which arises from the RDF in fire and thermal analysis in laboratory, because the rate of temperature rise in smoldering combustion is small.

Keywords: Fire, Flame spread, Smoldering, RDF, RPF, Waste combustion

*平成16年11月26日 第37回安全工学研究発表会において本研究の一部を発表した.

**化学安全研究グループ Chemical Safety Research Group

1. はじめに

RDFとは、家庭などから出される可燃性の一般廃棄物を原料として、数%の消石灰あるいは生石灰などを添加し、圧縮成形、押し出し成形などによって、直径1~4 cm、長さ2~5 cmの円筒形（ペレット）に固形化されたごみ固形化燃料のことである¹⁻²⁾。これに類似するRPF（Refuse Paper & Plastic Fuel）は、事業場のごみとして出される古紙や廃プラスチックなどの産業廃棄物を原料として製造されるものである。

国内では、廃棄物処理・再資源化の技術が進んでおり、熱エネルギー、電気エネルギーを得る目的で、RDFやRPFが焼却設備、ボイラ用の燃料として使われている³⁻⁵⁾。最近では、その使用量の拡大とともに、燃焼の前段階にあたるRDF製造過程や貯蔵過程において火災や爆発が発生している。平成15年8月三重県で発生したRDF貯蔵サイロでの爆発事故災害⁶⁻¹²⁾以前は、RDFの燃焼性に関しては、発火・燃焼危険性よりも、その利用を促進するための基礎データの収集を目的に、固体燃料、腐食性ガスに対する設備保全、ダイオキシン等の環境保全の観点から調べられてきたようである¹³⁻¹⁹⁾。RDFの燃焼性を調べるために使われた試料としては、模擬的に成分を調製されたもの、任意にRDF製造施設からサンプリングしてきたもの、さらにRDFを粉碎したものなどがある。RDFの発熱量、生成ガスの組成、燃焼時間等の燃焼性については、実測のほかにRDFを構成する成分である有機物の燃焼性からおおよそ推測できるようである。しかし、発火性（発火の危険性）については、RDFの詳しい原料の種類、量と組成、製造方法、貯蔵方法の影響もあり、関与する因子が多いため、不明な点が多い。

可燃性の粉体やペレット状のものが大量に堆積した状態では、堆積層内で発熱する可能性があるが、その後何らかの原因で発火した場合（いわゆる自然発火）には、周囲環境・条件によっては燃焼が継続し、燃え広がりに進展する。これとは別に、層内部の発熱の有無にかかわらず、高温の熱面にそれらが接触あるいは近接した状態で、ある温度以上に置かれた場合にも発火することがある。発火後は、上述と同様に、燃え広がりに進展する。

RDFの爆発・火災などの危険性評価に関しては、シュレッター・ダストなどの廃棄物とともに調べられている²⁰⁾。著者は粗大ごみ処理施設の現地調査²¹⁾とともに、RDF化製造施設を調査し、同種災害の防止のための安全ガイド¹¹⁾を執筆した。

本研究では、RDF堆積層内を上方に燃え広がる特

性を明らかにするために、堆積層内の温度変化、火災の形成状況を調べた。さらに、燃え広がり実験終了の際の消火作業で見られた様子について調べたので報告する。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置及び実験条件

(1)円筒容器

実験に用いた容器は、50 mm厚さの断熱材（セラミックファイバーブランケット）を内径160 mm、高さ350 mmの円筒状に丸めたもので、これをホットプレート上に敷いたステンレス板上に置き、その円筒内にRDF試料を高さ300 mmになるまで堆積させた。RDFを堆積させる際には、ホットプレートを木槌でたたき、層内に局所的に大きな空隙が生じないようにした。層内の温度を測定するため、7本のK型熱電対（被覆管入り、径1.6 mm）を円筒容器の中心軸に沿って高さ方向に設置した。

(2)断熱材の性能

商品名：ISOLITE ISOWOOL 1260
BLANKET（4 P、厚さ50 mm）
常用温度：1,260 °C、融点 1,760 °C
かさ密度：0.064 g/cm³
熱伝導率：0.38 kJ/mh°C(400°C)
1.2 kJ/mh°C(1,000°C)
通気率：7.7×10⁻³ cm²

(3)試料

RDF試料は実際に稼働中のRDF化製造施設から入手したもので、平均直径は15 mm、長さ32 mm、水分割合8.6 %wt、TR（標準情報）の規定²⁾に合うものを用いた。実験毎に用いた試料量は約2.6 kg、堆積層の平均空隙率は0.2である。なお、本実験で用いたRDF試料は前報¹¹⁾とは異なるものである。

(4)実験条件

用いた断熱材は通気性があるが、層内の通風の影響を考慮して次の3条件で実験を行った。

- ①実験1：断熱材のままとした（Photo 1を参照）。底面の通気性なし／側面の通気性あり条件。
- ②実験2：断熱材の外側を厚さ0.05 mmのアルミホイルで3重に覆い、側面の通気を遮断した。底面の通気性なし／側面の通気性なし条件。
- ③実験3：断熱材の外側を厚さ0.05 mmのアルミホイルで3重に覆い、側面の通気を遮断した。ただし、実験②と違い、底面からの通気（自然対流）ありとした。

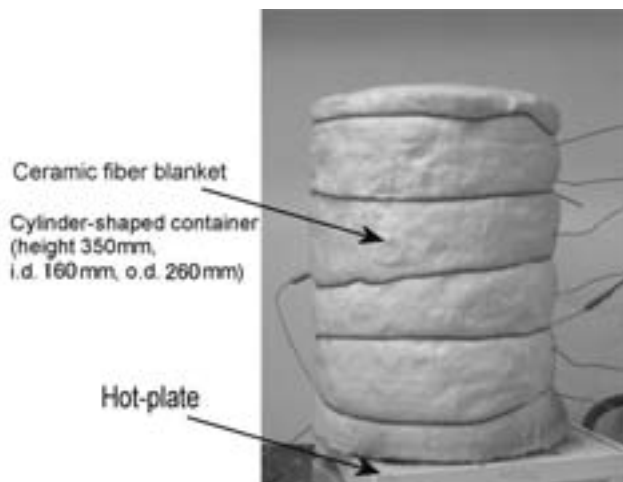


Photo1 Experimental setup for experiment No.1
実験1の実験装置



Photo 2 Experimental setup for experiment No.3
実験3の実験装置

底面の通気性あり／側面の通気性なし条件。

Photo2に実験の様子を示す。底部にRDFが落下しないように金網（目開き5.5 mm）が取り付けられており、着火後、安定に燃え拡がるのを確認してから、円筒容器を持ち上げホットプレートから外し、支持台に載せた。円筒底部の高さは、自然通風を確保するため、実験テーブルから40 cmとした。

Photo3に円筒容器上方からRDF堆積層を見た様子を示す。

2.2 着火方法とホットプレート加熱の影響

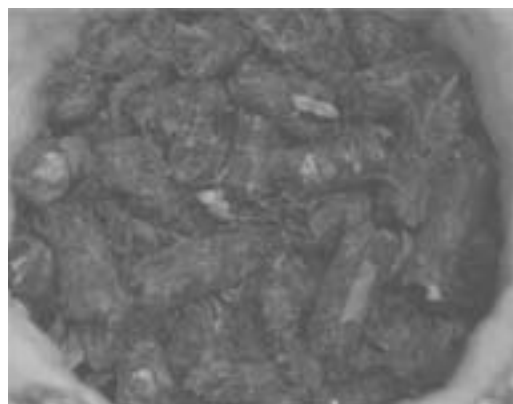


Photo 3 RDFs in the cylindrical container
容器内のRDF

着火は、前報の実験¹¹⁾と同様に、ホットプレートを加熱することで行った。ただし、加熱温度は230から240℃に設定した。ホットプレートは温度制御がなされ、底面のRDFが着火し、設定温度を超えると、加熱スイッチが自動停止する。燃え拡がり期間中は設定温度よりも高い温度が持続されるため、ホットプレートの加熱は停止したままであり、底面加熱（外部加熱）の影響は無視できる。ホットプレート面は、RDF堆積層からの熱の放散側となる。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験1の燃え拡がりの様子

(1)燃え拡がり挙動の概要

燃え拡がり挙動は前報の実験¹¹⁾に示したものと類似しており、燃え拡がりの初めの頃は白煙が間断なく発生し、堆積層内部では炎は小さく、燃え拡がりが堆積層表面に近づいてくると黄赤色の大きな炎（高さ10 cm超）が生じるようになった。円筒容器の外側面は茶色に変化し、内側面の堆積層よりも上の部分は黒色に変化した。さらに、タール状の物質の付着が認められた。赤熱や火炎の形成状況は、燃え拡がりが堆積層表面に近くまで達しないうちは確認できなかった。これは堆積層内でのRDFの燃焼がRDF固体の表面付近でのみ生じており、空隙では火炎が形成しにくいためであると考えられる。すなわち、有炎燃焼ではなく無炎燃焼に近い、スモルダリング（くん焼）の形態で燃え拡がる²²⁻²⁷⁾。

(2)時間経過に対する層内の温度変化

実験1について、加熱開始からの時間経過 t に対する層内の温度変化をFig.1に示す。ただし、燃え拡がりが堆積層上面に達する時間範囲に着目し、終盤部のみを図示した。 y は底面からの距離である。

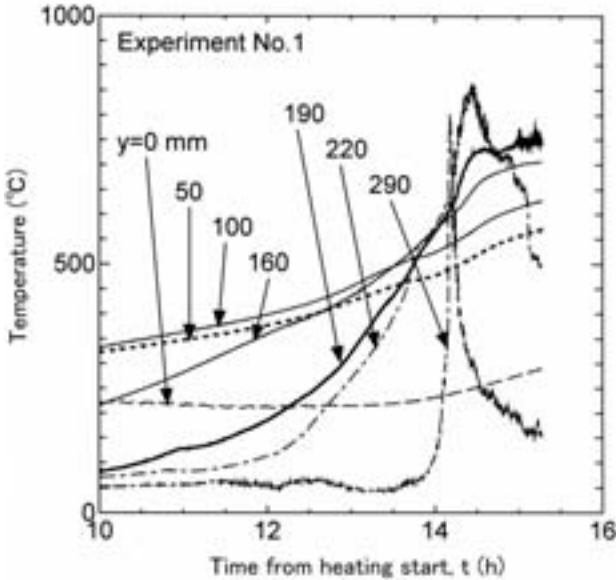


Fig.1 Temperature change from heating start in the RDF pile for experiment No.1
実験1の時間経過に対する層内の温度変化

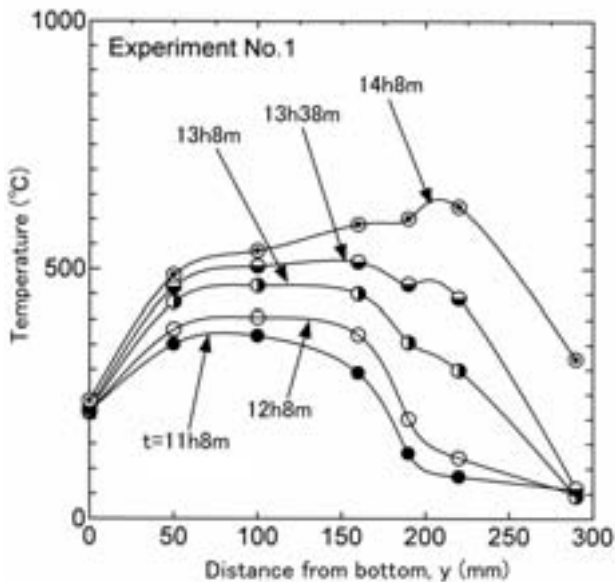


Fig.2 Temperature distribution in the RDF pile for experiment No.1
実験1の層内の温度分布

上方への燃え拡がりとともに、下層のRDFが灰分や残さ分以外燃えつきて形状が変わり、堆積層が少し崩れると、それまでの温度測定位置がずれる可能性がある。そのため、同一時刻に各温度が一緒に変化する場合にはその温度データに注意する必要がある。このようなことを考慮しながら各温度曲線を見ていくと、時間経過に対して変化が減少、あるいは

停滞する温度があることがわかる。その温度は、250℃～270℃、460℃、500℃、540℃であった。温度範囲では大きく二つに分けられ、250～270℃と460～540℃となる。なお、前報の実験¹¹⁾では別のRDFを用いたが、このときは240℃、310℃、400℃、550℃であった。このような温度では、何らかの状態変化(気化、解重合、熱分解など)が生じていると考えられる。温度にばらつきがあるのは、RDFの原料成分に依存するためと考えられる。t=14h以降のy=190, 220, 290mmにおいて、短い時間間隔で温度変動が見られるが、これは気流中の温度(燃焼ガスあるいは火炎の温度)を示している。

昇温速度は堆積層の位置と時間で違いがあるが、大略的にみると、堆積層内の広い範囲(50から220mm)で、t=10hから13h30m(=13.5h)までの時間は、1.0から3.4mm/minであることがわかった。ただし、t=13h30m以降の昇温速度はより大きくなる。

燃え拡がり速度の算出について、y=190と200mmの2点間で、一定温度に到達する時間から求めた結果、局所的な燃え拡がり速度は1.0mm/minであった。燃え拡がり堆積層の上部、表面に向かうに従い加速し、局所的な速度は1.8mm/minに達することがわかった。ここで、堆積層全体の平均燃え拡がり速度を加熱開始からy=290mmの急激に温度が上昇する時間までとすると、その速度は0.34mm/minとなる。

(3)層内の温度分布

Fig.2に堆積層内の中心軸に沿った鉛直方向の温度分布を時間経過に対して示す。堆積層内ではすべての箇所で時間とともに温度が上昇する傾向が見られるが、特に堆積層の上部での温度上昇が大きい。Fig.1によると、燃え拡がり終盤での温度は最高で862℃まで達したが、それまでの堆積層内の温度は低い。t=12h8mから13h8mにかけての温度分布を見ると、堆積層のやや下のほうでT=400℃から470℃まで上昇している。t=13h38m以降は、堆積層の上半分次第に温度が上昇し、t=14h8mでは最高で630℃に達している。しかし、下半分ではそれよりも低く、540℃である。このような後者の温度上昇は堆積層が崩れ、下部で燃えていることのほか、個々のRDFの燃焼時間が長いこと、堆積層の広い範囲で燃え続けていることが理由として挙げられる。RDFが多成分であるため、燃焼後に生成したチャーによる高温下での2次反応(酸化反応)も考えられる²⁶⁾。

温度分布からすると、燃焼領域は広く、燃え拡がりにおける燃焼帯の厚さはRDF1本分の長さをゆうに超えている。

3.2 実験2の燃え拡がりの様子

(1)時間経過に対する層内の温度変化

実験2について、時間経過に対する温度変化をFig.3に示す。温度変化の傾向は実験1と類似している。堆積層表面に達する時間が長くなっていることから、燃え拡がり速度が小さいことがわかる。y=60 mmとy=100 mmについて、t=14 h30 mの頃に両方とも同じ程度で温度が下がっているのは、RDF堆積層が少し崩れ、測定している位置がずれたためと推察される。y=300 mmの温度変化についても同様に、t=15 h30 mから16 h過ぎまでは測定位置が少しずつずれたものと推察される。温度変化を注意深く調べると、280℃付近と500℃付近で温度変化が停滞することがわかった。すなわち、実験1と同じように温度変化を起こす範囲が二つに分けられる。燃え拡がり終盤での最高温度は747℃、加熱開始からy=300 mmまでの平均燃え拡がり速度は0.29 mm/minであった。

(2)層内の温度分布

Fig.4に堆積層内の中心軸に沿った鉛直方向の温度分布を時間経過に対して示す。Fig.3のそれとは違い、堆積層の上半分の温度が下半分よりも低いことがわかる。t=14 hでの最高温度は、y=50 mmから100 mmにかけて550℃で、t=17 hでの最高温度も同じyの範囲で650℃である。層の上半分では時間とともに温度の上昇が見られる。層内での最高温度が650℃程度になるのは実験1と同じである。

3.3 実験3の燃え拡がりの様子

実験3では、円筒容器の下方から空気が流入することで下部付近（金網付近）に火炎が形成し続け、かつ上方にも燃え拡がることで、RDFが燃えつき、堆積層が早く崩れることがわかった。そのため、温度測定を行ったものの、実験1と2に示したような温度変化と温度分布を得ることができなかった。本実験での最高温度は1,106℃であった。この温度は、堆積層が崩れ、熱電対が気相中にさらされた状態で測定されたもので、堆積層表面上に形成した火炎の温度である。

3.4 熱画像による堆積表面の様子

実験1について、赤外線熱画像装置（サーモレーサTH5102：NEC三栄）を用い、t=8 h10 m時点で堆積層上方から測定した結果をFig.5に示す。

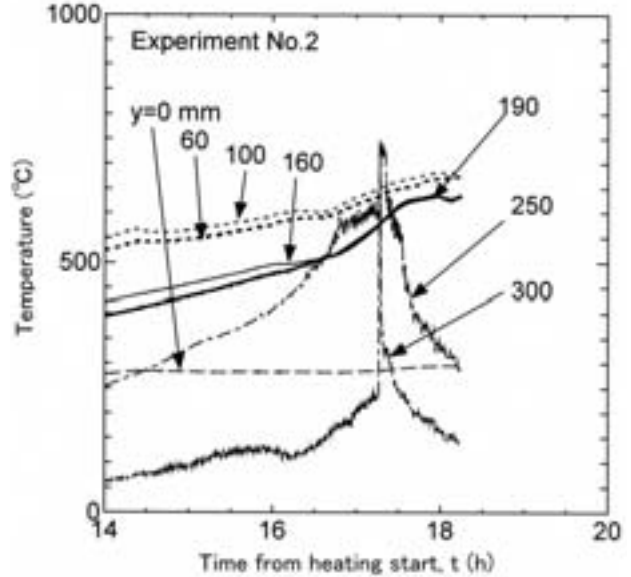


Fig.3 Temperature change from heating start in the RDF pile for experiment No.2
実験2の時間経過に対する層内の温度変化

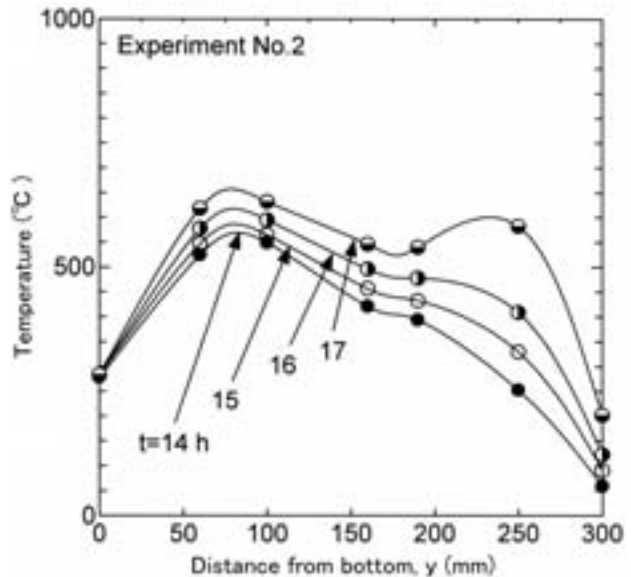


Fig.4 Temperature distribution in the RDF pile for experiment No.2
実験2の層内の温度分布

Fig.1によると、この時、y=50 mmから100 mmにかけて290℃、y=290 mmでは46℃に達している。熱画像からは堆積層内の断面、円周方向については不均一な温度分布となっていることがわかる。燃え拡がりが進行するに従い、層内で熱気流が通りやすい隙間を生じ、そこを通して上方のRDFが対流熱伝達により予熱されるため、堆積層上面では不均一な温

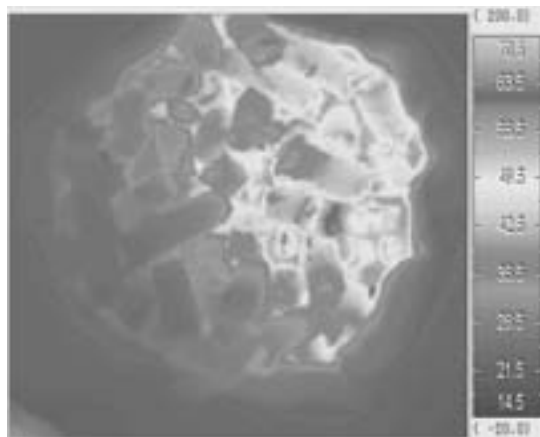
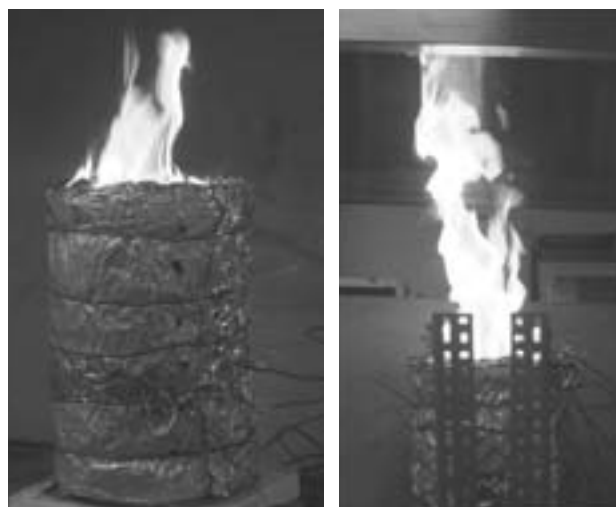


Fig.5 Thermal image of RDF pile surface
(Experiment No.1, $t=8h10m$)
堆積層表面の熱画像 (実験1, $t=8h10m$)



(a) in Experiment No.2 (b) in Experiment No.3

Photo4 Large flame appears at the final stage.
燃え拡がり終盤に見られる大きな火炎

度分布となることが考えられる。さらに、層内部へ外部から流入する空気流の影響も考えられる。燃え拡がりにより、浮力に伴う上昇気流が生じ、円筒容器から排出されるが、それに見合うだけの空気が流入する。堆積層内には圧力勾配に比例した気流(Darcy則による)が生じている。Toreroら²³⁾は、ポリウレタンフォームのスモルダリングにおける流れ場のモデルを示している。

赤外線熱画像測定装置による結果によると、6hまでは堆積層内の燃え拡がり挙動が判然としないことがわかった。この時点ですでに $y=100$ mm付近まで燃焼している。すなわち、非接触の赤外線温度測定により燃え拡がり挙動を確認できるのは、堆積表面から20 cm程度である。層内部の発熱挙動あるいは燃焼挙動を赤外線熱画像装置で監視できるのは、層の表面付近に限定され、層深部で生じる発熱の端緒を発見することは困難ではないかと考えられる。

3.5 突発的な火炎の形成

燃え拡がり堆積層上部に近づき、終盤になると、突然大きな火炎が形成する場合があった。Photo4(a)と(b)はそれぞれ実験2と3における様子であるが、図(b)の火炎の高さは最大80 cmまで達した。これは、熱分解、不完全燃焼等により発生した可燃性ガスが堆積層上部に滞留しており、それが周囲空気と混合し、下方からの燃え拡がりの炎が着火源となって着火したためと考えられる。このことは、実際燃え拡がり消費される以上に未燃焼の可燃性ガスが多く発生し、周囲に滞留する危険性があることを示している。

3.6 スモルダリング

(1)スモルダリングにおける層内の変化

堆積したRDF層内の燃え拡がり挙動はくすぶり燃焼であり、スモルダリングの燃焼形態に入る。燃え拡がり速度は 10^{-1} から 10^0 mm/minのオーダーであり、一般的なスモルダリングの範ちゅうにある²²⁻²⁷⁾。RDFの大きさや形状は、粉体状のものとは異なり大きくペレット状であるため、堆積しても隙間が大きく、周囲に十分な空気存在し、隙間が大きければ火炎を形成でき、無炎燃焼と有炎燃焼が共存できる。

Tseら²⁶⁾のポリウレタンフォームを使った下方から強制気流のある環境での上方燃え拡がり実験によると、層内の温度分布は本実験のそれと類似している。ただし、チャーの2次反応による短い時間での温度変動は本実験では見られないが、層内の温度は時間経過とともに増加している。彼らの実験では、超音波画像装置を使い、燃え拡がりとともに層内に局所的に空隙が増加する様子を示している。ポリウレタンフォームの場合には大きな空孔が発生することがわかっている²⁷⁾。

(2)円筒側面の通気の影響

実験1と実験2では、燃え拡がりに及ぼす側面の通気の影響を調べた。実験1と2を比較すると、堆積層全体での平均燃え拡がり速度はそれぞれ、0.34 mm/minと0.29 mm/minであり、側面の通気性を遮断した場合の燃え拡がり速度が小さいことがわかった。しかし、その速度の違いは小さい。断熱材の通気率を考慮すると、燃え拡がり前方(上方)からの

空気の流入量は側面を通して流入する空気量よりも多く、燃え拡がり速度は堆積層上方の通風に依存している。燃え拡がりは空気の流入量、すなわち酸化剤の供給速度、濃度に依存する。実験1と2では層内の温度分布には違いが見られたことから、層内の副次的な反応には側面からの流入も関与していることが考えられる。スモルダリングの現象は複雑であるため、その詳細を解明するためにはさらなる実験研究が必要である。

3.7 昇温速度と熱分解ガス

RDFの燃焼実験に付随する熱重量測定では、昇温速度を $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 程度で行うことが多い¹³⁻¹⁹。劉らの実験では、昇温速度 10 から $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の場合を低速昇温、 800°C の雰囲気中に瞬時にRDFを投入する場合を高速昇温としている¹⁷。本実験の燃え拡がり速度によると、昇温速度は、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ のオーダ ($10^0^{\circ}\text{C}/\text{min}$)であり、熱分析測定で設定される昇温速度よりも一桁小さいオーダであることがわかる。ただし、本実験でも上層での燃え拡がりではごく短時間に昇温する様子が見られるが、これは、未燃の熱分解ガスと空気が混合した予混合気に火炎が伝ばするためである。この場合の昇温速度のオーダは $10^7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 程度である。これまでのRDFに関する有毒生成物を含む燃焼研究では燃焼炉へのRDFへの投入を想定したものであり、昇温速度を大きくとって調べられている。しかし、火災では小さい昇温速度で熱分解が進んでいるため、燃焼する生成物の組成が異なる可能性があり、かつ、堆積層という周囲からの酸化剤の流入が阻害されているため、副次的な反応とともに不完全燃焼を生じやすい環境にあるということに注意が必要である。

前報の燃焼実験¹¹⁾では、発生する可燃性気体の成分をC2までの炭化水素まで測定し、RDFの粉碎によっても、堆積層の厚さによっても発生する成分が異なるが、 CH_4 の発生よりもむしろ CO の発生が顕著であることを明らかにした。このことから、燃え拡がりでは、熱分析により測定される熱分解ガスとは異なる成分のガスが発生することがわかる。占部ら¹⁹⁾のRDF化の燃焼実験では、RDFの原料をそのまま燃やすよりもRDF化することで CO の最大ピーク濃度、発生総量とも著しく減少し、消石灰の添加でさらに減少させる結果を示している。併せて、消火したあとくすぶり続けることで CO 濃度が増加することを認めている。

3.8 消火実験

前報の簡単な消火実験¹¹⁾では、窒素と二酸化炭素を消火ガスとして用い、二酸化炭素のほうが窒素よりも消火効果が高いが、一部の開放空間から新鮮な酸素が供給されると消えにくくなるという結果を得た。RDFの場合は、ガス系よりも水系の消火剤が消火は確実である。本実験では水を消火剤とし、初め霧状で消火を試みたが、消えにくく、霧状ではなく棒状で十分量を大量に注水したほうが効果的に消火できることがわかった。RDFは、堆積状態では長時間燃え続ける傾向があるが、熱容量が大きいことと吸水性から、注水しても水を吸いながらも高温状態を維持するので、可燃性ガスが発生し続け、それが火炎の形成につながる。特にRDFは単一成分からなるものではなく、原料成分が多岐にわたり、その成分ごとの熱分解温度が異なるため、発火温度より低い温度でも熱分解が継続、可燃性ガスを生じ、一度消えても再燃する危険性がある。あるいは、可燃性ガスの滞留により爆発する危険性もある。

4. まとめ

ホットプレート上に載せた断熱材円筒容器内（内径 160 mm 、高さ 350 mm ）に、RDFを 300 mm 高さで堆積させ、底面（熱面）で着火し、上方に燃え拡がる様子を実験的に調べた。実験は、円筒側面と底面からの空気の流入の影響を考慮し、底面の通気性なし/側面の通気性あり、底面の通気性あり/側面の通気性なし、の3条件で実施した。実験により、次の結果を得た。

- ①底面からの通気がない条件において、上方への平均燃え拡がり速度は 0.24 から $1.8\text{ mm}/\text{min}$ であることがわかった。この速度は、一般的なスモルダリングのそれ程度である。
- ②RDF堆積層内の温度分布を調べ、層の下半分と上半分での温度の変化、燃焼領域が広いことを明らかにした。
- ③燃え拡がりとともにRDFが燃えて堆積層が崩れると、それまでのRDF間の隙間が大きくなり層内への上方からの空気の流入が容易になり、火炎が形成しやすくなることがわかった。
- ④堆積層の隙間に火炎が一度形成すると、上層にあるRDFの予熱が促進されるため、燃え拡がりが加速することがわかった。
- ⑤燃え拡がりが堆積層の上面に達する終盤では、突発的に大きな火炎が形成する可能性があることがわ

かった。

- ⑥RDFは多成分からなり、吸水性があり、熱容量が大きいという特徴がある。そのため、消火作業で適切かつ徹底して注水を行わなければ、不完全燃焼のほか、副次的な反応も相まって可燃性の熱分解ガス、COを発生し、それが火災の再燃あるいはガス爆発の危険性につながる事がわかった。
- ⑦RDFの燃え拡がりでは、昇温速度が小さく、通常熱分析により示されるガス成分とは異なる可能性があることに注意すべきである。

参考文献

- 1)鍵谷司, ごみ固形燃料 (RDF)の特性と今後の動向, 月刊地球環境, 5月号, pp.8-11, (1997)
- 2)標準仕様書 TS Z 0011:2005, 廃棄物固形化燃料, 日本規格協会 (標準情報書, TR Z 0011:1999)
- 3)西垣博志, 廃棄物発電システム, 電気設備学会誌, Vol.16, pp.124-127, (1996)
- 4)茂松信幸, 戸井田保夫, 佐々木英雄, 三重県RDF焼却・発電施設の紹介, 電気学会公共施設研究会資料, Vol. PPE-03, No.1-7, pp.11-16, (2003)
- 5)廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック編集委員会, 廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック, (株)産業技術サービスセンター, pp.215-229, (2000)
- 6)鈴木健, RDF火災について, 安全工学, Vol.43, pp.245-261, (2004)
- 7)鈴木健, 鶴田俊, 燃焼時におけるRDFの内部構造変化の観察, 平成16年火災学会研究発表会概要集, pp.294-297, (2004)
- 8)鈴木健, 鶴田俊, RDFの火災性状に関する研究-不活性気体の注入の効果について-, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.424-425, (2006)
- 9)高黎静, 鶴田俊, RDFの性状が自然発火に及ぼす影響, 平成16年火災学会研究発表会概要集, pp.90-93, (2004)
- 10)安原昭夫, ごみ固形燃料 (RDF)の火災危険性と事故原因について, 安全工学, Vol.43, pp.392-399, (2004)
- 11)ごみ固形化燃料 (RDF)の爆発・火災の危険性と安全が取扱いについて, 産業安全研究所安全ガイド, NIIS-SG-NO.3 (2004), (独)産業安全研究所, (2004)
- 12)Gao, L. and Hirano.,T., Process of accidental explosions at a refuse derived fuel strage, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol.19, pp.288-291, (2006)
- 13)森滋勝, 連載講座/RDFの燃焼, 燃焼研究, Vol.105, pp.17-28, (1996)
- 14)中島健, 連載講座/RDFの燃焼, 燃焼研究, Vol.106, pp.27-37, (1996)
- 15)池田英人, 連載講座/RDFの燃焼, 燃焼研究, Vol.107, pp.23-29, (1997)
- 16)灘波邦彦, 木本恭司, 藤田永治, 中島健, 粉体ごみ燃料の熱分解, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.64, No.621, pp.1499-1505, (1998)
- 17)劉貴慶, 山崎量平, 波多野重信, 藤間幸久, 森滋勝, 円筒形RDF単一粒子の燃焼に関する研究化学工学論文集, Vol.25, pp.79-84, (1999)
- 18)劉貴慶, 板谷義紀, 山崎量平, 山口正隆, 近藤元博, 森滋勝, 単一RDF粒子の燃焼における塩素挙動, 化学工学論文集, Vol.27, pp.100-105, (2001)
- 19)占部武生, 相原利雄, 小林重夫, 森美由紀, RDFの燃焼特性に関する調査, 平成7年度東京都清掃研究所研究報告, pp.142-148, (1997)
- 20)清水芳忠, 若倉正英, 内田剛史, 古積博, 堆積廃棄物の蓄熱発火危険性評価, 第36回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.171-172, (2003)
- 21)八島正明, 粗大ごみ破碎処理施設における爆発防護に関する現地調査, 産業安全研究所特別報告, NIIS-SRR-NO.29, pp.31-40, (2004)
- 22)Drysedale,D., *An introduction to fire dynamics*, Jhon Wiley and Sons, (1985), Chap.8
- 23)Torero, J. L., Fernandez-Pello, A. C., and Kitano. M., Opposed forced flow smoldering of polyurethane foam, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.91, pp. 95-117, (1993)
- 24)Ortiz-Molina, M. G., Toong, T. Y., Moussa, N.A., and Tesoro, G. C., Smoldering combustion of flexible polyurethane foams and its transition to flaming or extinguishment, *Seventeenth Symp.(Int.) on Combust.*, pp.1191-1200, (1979).
- 25)Ohlemiller, T. J., Modeling of smoldering combustion propagation, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.11, pp.277-310, (1985)
- 26)Tse, S. D., Fernandez-Pello, A. C.,and Miyasaka, K.,Controlling mechanisms in the transituin from smoldering to flaming of flexible polyurethane foam, *Twenty-sixth Symp. (Int.) on Combust.*, pp.1505-1513, (1996)
- 27)Suzuki,T, Suchahyo,B.,Kawamata, M.,and Hirano. T., Polyurethane foam smoldering supported by external heating, *Fire Safety Science - Proc. Fourth (Int.) Symp.*, pp.397 -408, (1994)

(平成19年2月5日受理)