高温場に挿入されたポリエチレンフィルムの着火・燃焼特性 (第1報：着火遅れ時間，燃焼時間に及ぼすフィルム寸法の影響)

池田 光優^{*1}

Ignition and combustion characteristics of polyethylene film in high temperature field (1st report : Effects of film size on ignition delay time and combustion time)

Mitsumasa IKEDA^{*1}

^{*1} NIT Tokuyama College. Dept. of Mechanical and Electrical Engineering
Gakuendai, Shunan-shi, Yamaguchi 745-8585, Japan

Received 31 March 2015

Abstract

The objective of this research is to investigate the ignition and the combustion characteristics of polyethylene film in a high temperature field. Polyethylene was inserted in a high temperature chamber. The polyethylene was used as a film-type. 4 mm, 5 mm, 6 mm, and 7 mm square of polyethylene were used. Polyethylene inserted in the chamber was melted and formed the droplet during the ignition delay time, and after ignition, polyethylene was burned along with the puffing by the pyrolysis. For the 4 mm film size, polyethylene has ignition limit at 850 K surrounding temperature. Ignition delay time on various surrounding temperature was based on the Arrhenius law. However, ignition delay time for various surrounding temperature has two tendencies. On the other hand, combustion time of the polyethylene has different tendency from ignition delay time. As the surrounding temperature increases, the burning time became longer. This has influence on the amount of polyethylene remained at the ignition without pyrolysis during the ignition delay time. In a high surrounding temperature, large amount of polyethylene was left during the ignition delay time, and combustion time was longer than when the surrounding temperature was low. The temperature history of polyethylene for various surrounding temperature had approximately the same tendency during ignition delay period.

Key words : Polyethylene film, High temperature field, Ignition delay time, Combustion time, Ignition temperature, Pyrolysis

1. 緒 言

現在，プラスチック製品の廃棄は，埋め立てからリサイクルへと変化している．プラスチック製品のリサイクルを考える場合，プラスチックは高い発熱量を有しているため，サーマルリサイクルを考える事ができる(本田, 1999)．東京都では，埋立て場の確保の問題もあり，平成 20 年度からプラスチックを可燃物扱いとし，サーマルリサイクルを多用している．このため，可燃性プラスチックを熱源とした燃焼解析を行う必要がある．これまでの廃棄物燃焼炉は攪拌等を行わない設置型の燃焼炉が多く採用されていたが，近年ストーカ型燃焼炉(鈴木, 2007)やロータリーキルン炉等(鈴木他, 2008a), (鈴木他, 2008b), (野間他, 2009)が採用されており，廃棄物の燃焼状態も変わってきている．こういった新型の燃焼炉において横置き吹込型燃焼炉を採用した場合，プラスチックは炉内に挿入された後，融解しガス化しながら着火するが，炉内温度に対する着火遅れ時間や燃焼時間などの特性値が重要となってくる．

プラスチックの燃焼については 1970 年代から研究されており，燃焼中の様々なポリマーの熱分解の線形性につ

いての調査(Blazowski, et al., 1973)や、高温場における熱分解特性についての調査(Hedges, et al., 1979)などがある。これらの基礎研究を通じてプラスチック材の熱分解特性が明らかになっている。最近では、様々なプラスチック材の着火特性や燃焼特性の調査が行われている。廃棄物の燃焼を想定したプラスチック材の燃焼特性について、例えば、粉体ゴミの熱分解特性(難波他,1998)、廃棄物低質燃料の燃焼特性(岡島他,2005)、プラスチックに混入された難燃材がプラスチックの燃焼特性に及ぼす影響(山本他,2007)といった項目について調査が行われている。また PET 樹脂粉末によるエネルギーリサイクルの試みなどが報告(Ohiwa, et al., 2009)されている。しかしながらこれらの調査において、高温場に挿入されたプラスチックの着火遅れ時間や燃焼時間等の調査が系統だっで行われている事は少ない。

そこで本研究では、ゴミ袋などで多く利用され、分子構造が比較的簡単な低密度ポリエチレンに着目し、高温場に挿入されたプラスチック材の変形・融解挙動から燃焼特性までを調査し、そのデータベースを作成する事を目標とする。これらのデータベースが新型のキルン炉の設計において、炉の寸法と廃棄物の吹き込み速度との関係を決める際に非常に有用なものとなる。本報では、高温場に挿入されたポリエチレンの融解・燃焼特性について報告する。

2. 実験装置および方法

2・1 ポリエチレン

本研究では、高温炉内にポリエチレンフィルムを挿入することで、高温雰囲気中におけるポリエチレンフィルムの挙動を調査した。ポリエチレンは日本ポリエチレン株式会社製の LDPE (低密度ポリエチレン) LF440B を使用した。厚さは 0.03 mm である。フィルムの融解後に生成される液滴直径が 1 mm 程度になり液滴が保持できるように、一辺の大きさを 4 mm から 7 mm までの正方形に成形した。成形したポリエチレンを図 1 に示す。また本研究で使用したポリエチレンフィルムの物性値を表 1 に示す。

Fig.1 Test films (4-7 mm film size polyethylene)

Table 1 Polyethylene specification

Additive	-(Pure polyethylene)
Density[g/cm ³]	0.925
Number average molecular weight	15800
Weight average molecular weight	79512
Melt flow rate[g/10min]	2.8

2・2 実験装置

本実験で使用した実験装置の概略図を図 2 に示す。高温炉は、炉内が内径 200 mm、全長 440 mm の円筒形となっている。炉の加熱には炉の中心から前後 150 mm の間の内壁に円周上に設置された最高使用温度 1523 K(1250 °C)のセラミックファイバーヒータを用いた。炉の中心部に R 型熱電対を設置し炉内温度を測定した。炉内温度は炉の中心部の温度で定義した。炉の前側の直径 100 mm の穴には、直径 120 mm、厚さ 40 mm の石英ガラスを設置することにより、炉内の様子を観察するとともに、炉内の熱放射に伴う熱損失を防いだ。ポリエチレンフィルムの炉内への挿入は、慣性力によるポリエチレンの落下を防ぐために、高温炉を動かすことによって行った。炉の移動には直径 40 mm のエアシリンダを用いた。高温炉の挿入口には、挿入前の熱放射によるポリエチレンの予熱を防ぐために、ヒートシャッターを設けた。ヒートシャッターの動作は DC モーターによって行う。またエアシリンダへのエアの供給はソレノイドバルブを用いることにより、ヒートシャッターの開閉と高温炉の移動を常に同じ時間間隔で行うことができ、挿入時の時間的なばらつきをなくすることができる。ポリエチレンは一辺 8 mm のステンレス棒の先に取り付けた線径 100 μm の K 型熱電対を懸垂線として保持した。この K 型熱電対のデータからポリ

Fig.2 Schematic of experimental apparatus

エチレンフィルムの挿入後の温度履歴が計測できる。熱電対の温度履歴はサンプリング周波数 100 Hz のデータレコーダで計測した。挿入後のポリエチレンの挙動は、撮影速度 30 fps、有効画素数 1200 万画素の CCD カメラを用いて行った。温度履歴計測用のデータレコーダと挙動観察用の CCD カメラの同期は、LED ライトの点灯・消灯によって行った。

2・3 実験方法

実験は次の手順で行った。まず、高温炉を設定温度まで上昇させる。その後、各種測定機器の記録を開始して、ポリエチレンを挿入する。同期はポリエチレンが炉の中心に到達したときに行うようにしている。

今回の実験では、850 K から 1200 K までの炉内温度における挙動及び温度履歴を 50 K 毎に観察した。炉内温度は定常状態であり、設定温度に対して ± 5 K とし、周囲温度は 298 K-303 K、 1000 ± 10 hPa の大気圧下で実験を行った。

2・4 熱電対の線径

今回の実験において懸垂線となる熱電対の線径はポリエチレンの融解・燃焼挙動に強く影響を及ぼす、冷却損失となる。図 3 に線径 100 μm と 50 μm の場合のポリエチレンの温度履歴を示す。図の縦軸は熱電対の接点温度を、横軸はポリエチレンフィルムが挿入されてからの時刻を示す。プロットのうち赤丸は線径 50 μm の熱電対を使用した場合を、青丸は線径 100 μm の熱電対を使用した場合をそれぞれ示している。この図より線径が小さい方が、ポリエチレンの温度変化に対して敏感に対応している事が分かる。また、線径が小さい方が、熱電対による冷却損失が少ないため、着火遅れ時間も 1 秒弱短くなり、燃焼時のポリエチレン温度も 1 割程度高くなっている。これらの事から、熱電対の線径は小さい方が良いが、線径 50 μm の熱電対の場合、ポリエチレンの熱分解によるパフリングにより線が切れることが多く、またポリエチレン寸法が 5 mm の場合では 1100 K 以上の炉内温度の場合では、着火後表面張力の低下によりすぐにポリエチレンが熱電対から外れてしまい、測定ができなかった。ポリエチレンフィルム寸法が 6 mm や 7 mm の場合では、ほぼすべての炉内温度の場合に対して、ポリエチレンは保持できなかった。今回の調査では、ポリエチレンの寸法が着火遅れ時間に及ぼす影響についても検討する事としていたので、ポリエチレンフィルム寸法が 6 mm や 7 mm の場合も調査したいと考えていた。これらの事から今回は線径が 100 μm の熱電対を使用する事とした。また、熱電対の種類は、大気温度と同じ温度から炉内に挿入されたポリエチレンの温度履歴を測定する事を想定していたので、1000 K 程度の広い温度範囲で線形性の高い K 型熱電対を使用する事とした。

Fig.3 Thermocouple diameters were effected for temperature history of polyethylene. For 50 μm diameter thermocouple, temperature has more vivid history than that for 100 μm diameter thermocouple.
(Chamber temperature $T=950\text{ K}$, polyethylene film size $L=5\text{ mm}$)

3. ポリエチレンフィルムの融解・燃焼挙動

高温炉内に挿入されたポリエチレンフィルムの融解・燃焼挙動を図4に示す。この図は炉内温度 950 K、フィルムの寸法は一辺 5 mm の場合のものである。ポリエチレンフィルムは高温炉内に挿入されると、変形しながら融解し、液滴になる。その後、液滴の下方で着火し、火炎が上方へ燃え広がりポリエチレン液滴の周りで輝炎が形成される。その後熱分解によるガス化で気体が液滴内部から吹き出すパフリング等が時々起こる中で、ポリエチレン液滴は液滴径が減少していく。最後に液滴は消滅し、ガスのみとなり、消炎する。

この時の温度履歴を図5に示す。この図において横軸はポリエチレンが高温炉内に挿入されてからの時間を、縦軸に熱電対のポリエチレンの温度をそれぞれ示している。ポリエチレンが高温炉内に挿入された後、熱電対の接点は常に融解したポリエチレンの中にあることを確かめている。このことから、熱電対の接点はポリエチレンの温度を示していると考えられる。また、図4における(a)~(e)の時刻における温度を赤丸で表している。この履歴より、ポリエチレンフィルムは挿入後、融解がある程度進み、回転楕円形になるまで、温度上昇率は高いものの、液滴形状が安定した後は温度上昇率は最初の頃と比べて少し低くなる。着火が起こると、熱分解が起こる 850 K 程度まで温度が上昇し、液滴が消滅するまで一定の温度で熱分解は進んでいく。液滴がなくなり、ガス化されたポリエチレンのみになったときに、熱電対の接点温度は液体のポリエチレンからガスの温度を示すようになり、周囲の燃焼ガスによって温度は上昇し、消炎したときに最も高い温度を示す。また、ポリエチレンフィル

Fig.4 Melting and combustion behavior of polyethylene film were shown. t is the time after insertion the polyethylene into high temperature chamber. In these figures, polyethylene film after insertion in to high temperature field was formed the droplet and ignited in 950 K chamber temperature. (Chamber temperature $T=950\text{ K}$, film size $L=5\text{ mm}$)

Fig. 5 Temperature history of polyethylene film. Red points agree the time for pictures in fig. 4 (Chamber temperature $T=950$ K, polyethylene film size $L=5$ mm)

Fig.6 Ignition limit polyethylene film size. Investigations examine for five times in all experimental conditions. ● are all, ▲ is stochastically ignited, and × is not ignited.

ムの着火限界寸法に及ぼす炉内温度の影響について調査を行った。得られた結果を図6に示す。図の横軸は炉内温度を、縦軸はポリエチレン寸法を表しており、図中のプロットの●はすべての実験で着火が成功した場合を、▲はすべて着火した訳ではないが、何回かは着火した場合を、×はすべての実験において着火しなかった場合を示している。ここで、今回の実験における着火は、撮影した動画より発光の有無によって確認した。この図より、今回の実験では、炉内温度が800 Kでポリエチレン寸法が一辺4 mmの場合において着火する事ができなかった。この条件ではポリエチレンはフィルムから変形・融解し、液滴になった後すべてが気化し液体のポリエチレンが存在しなくなった事を確認している。同じ炉内温度(800 K)の場合で、ポリエチレンの寸法が5 mmの場合では着火が観測された場合と観測できなかった場合が存在し、この寸法を着火限界寸法とした。以後の調査では、ポリエチレン寸法の影響も調査するため、炉内温度は850 K以上の範囲で実験を行う事とした。

4. ポリエチレンフィルムの燃焼特性

4・1 着火遅れ時間

高温炉内に挿入されたポリエチレンフィルムについて炉内温度に対する着火遅れ時間について調査を行った。得られた結果を図7に示す。この図は一边が5 mm のポリエチレンフィルムについて、炉内温度を850 K から1200 K まで変化させた時の着火遅れ時間を示している。図中のプロットのうち、○は実験結果を、●はその平均値をそれぞれ示している。この図より、炉内温度の変化に対するポリエチレンフィルムの着火遅れ時間は、1000 K 以下の範囲では直線的に変化しているように見えるが、最小二乗法による近似曲線を求めた結果、指数関数近似をした場合相関係数が0.976であったが、線形近似をした場合相関係数が0.902となり、指数関数的に変化していることがわかった。この傾向は以前報告した一边13 mm のポリエチレンフィルムの場合(大石他, 2009)とほぼ同じ傾向を示している。一方で1100 K 以上の範囲では指数関数的に変化しているように見えるが、1000 K 以下の範囲とは不連続な曲線を描き、異なる傾向を示していることが予想される。そこで、これらの関係を Arrhenius プロットしたものを図8に示す。図中のプロットについて、○は実験結果を、●はその平均値をそれぞれ示している。Arrhenius 則は化学反応における反応速度の温度依存性を示すものである。外部加熱によるポリエチレンの着火遅れ時間 τ_i は、Arrhenius 則から拡張させて

$$\tau_i = A \cdot \exp(B/T) \quad (1)$$

で表す事ができる(Warnatz, et.al., 2000)。したがって、図8のように横軸に $1000/T$ を、縦軸に着火遅れ時間 τ_i の自然対数をとると、炉内温度の変化に対して着火遅れ時間の対数はほぼ線形比例している。しかし、炉内温度が1100 K より高い場合は、1000 K より低い場合と着火遅れ時間の傾きが異なっている事が分かる。これは炉内温度が1000 K 以下の場合は、融解したポリエチレンが液滴になってから着火したが、炉内温度が1100 K 以上の場合では、融解したポリエチレンは液滴になる前に着火していたことに起因していると考えられる。それぞれの炉内温度での燃焼挙動を観察した結果、炉内温度が1000 K までの場合では、融解したポリエチレンは液滴となり熱分解によるパフリングが発生した状態で着火していたが、1100 K 以上の炉内温度の場合では、融解したポリエチレンは変形しながら着火しており、熱分解によるパフリングは発生していなかった。このことから、熱分解が活発に起こってから着火する場合と活発になる前に着火する場合で、着火遅れ時間の温度依存性が異なっていると考え

Fig.7 Effects of ignition delay time of polyethylene film to chamber temperature. These effects have exponential tendency. (Polyethylene film size $L=5\text{mm}$)

Fig.8 Influence of ignition delay (logarithm) to chamber temperature (inverse). These effects have two different tendency.

られる。炉内温度が 1050 K の場合は、液滴になってから着火した場合と、液滴になる前に着火した場合と両方の場合が発生しており、両方の遷移状態の温度であるといえる。また、この傾向は今回調査したすべてのポリエチレンフィルムの寸法に対して当てはまっていた。そこで、着火遅れ時間のポリエチレンの寸法に対する影響を示したものを図 9 に示す。この図はいくつかの炉内温度の場合についてポリエチレンの寸法が着火遅れ時間に及ぼす影響について示したものである。図中の縦軸は着火遅れ時間 τ_i の自然対数 ($\ln \tau_i$) を、横軸はポリエチレンフィルムの一辺の寸法をとっており、プロットの○は炉内温度 850 K の場合を、◇は炉内温度 1050 K の場合を、△は炉内温度 1200 K の場合をそれぞれ示している。中空プロットは実験値を、中実プロットはその平均値をそれぞれ示している。この図より、炉内温度が 850 K の場合と 1200 K の場合では、ポリエチレンの寸法の増加に伴って、着火遅れ時間が増大していることが分かる。ポリエチレン寸法が及ぼす影響については、著者らが示したように (Ikeda and Koshiro, 2011)、ポリエチレンの寸法が大きくなると、炉内に挿入されてから変形する時間が長くなるためであるといえる。この傾向は変形しながら着火する温度域である、炉内温度が 1200 K の場合でも成立している。一方炉内温度が 1050 K の場合では、上述した様に、液滴になってから着火した場合と、液滴になる前に着火した場合が混在していた。それぞれの場合のみについて調査した場合、ポリエチレンフィルムの寸法が大きい方が着火遅れ時間が長くなっていることは確かめている。一方でそれぞれの場合を比較すると、液滴になってから着火する場合の方が着火遅れ時間が長くなっていることが確かめられた。また、それぞれの場合の発生回数を調査すると、一辺 4 mm の寸法の場合では液滴になってから着火する場合が 4 回、変形しながら着火する場合が 1 回であった。一辺 5 mm と 6 mm の場合では液滴になってからの着火が 3 回、変形しながらの着火が 2 回であり、一辺 7 mm の場合では液滴になってからの着火が 1 回、変形しながらの着火が 4 回であった。このため今回調査した寸法の範囲では、ポリエチレンの寸法が大きくなると、着火遅れ時間は長くなるものの、着火遅れ時間の短い変形しながら着火する場合の頻度が高くなるため、単純にポリエチレン寸法が大きくなると着火遅れ時間が増加するということにはならなかった。このため、ポリエチレンの寸法の影響が現れなかったと考えられる。

Fig. 9 Effects of ignition delay time of polyethylene film to film size for different chamber temperature.

Ignition delay of polyethylene film depend on the film size.

4・2 燃焼時間

次に着火後の燃焼特性について、燃焼時間の立場から調査を行った。横軸に炉内温度を、縦軸に燃焼時間を取り、燃焼時間をプロットしたものを図 10 に示す。図中の◇は実験値を、◆はその平均値をそれぞれ示す。炉内温度が 1050 K 以上の場合では、着火後ポリエチレンが懸垂線から落下してしまい、燃焼終了までの観察が行えなかった。このため燃焼終了まで観察できた炉内温度が 1000 K 以下の範囲でプロットしている。この図より、炉内温度が高い場合の方が燃焼時間が長くなっている。これは着火遅れ時間中に気化せずに液体として残ったポリエチレンの量に関係している。炉内温度が低い場合は着火遅れ時間中に気化するポリエチレンの量が多いため、着火したときの液滴として残っているポリエチレンの量は少ないが、炉内温度が高くなると着火遅れ時間が短くな

り、着火時に液滴として残っているポリエチレンの量が多くなるので、燃焼時間が長くなったと言える。この事を確かめるために、各炉内温度に対する着火直前のポリエチレンの等価円直径を図 11 に示した。図中のプロットの○は実験値を、●はその平均値をそれぞれ示している。850 K の場合のプロットがないのは、このときはほとんど液体のポリエチレンが残っていない状態で着火したので、懸垂線とポリエチレンの区別の判断が難しかったため、計測できなかったからである。この図において、ばらつきは多いものの炉内温度が高い場合にポリエチレン直径が大きくなっている事が分かる。以上の事からポリエチレンの燃焼時間は着火遅れ時間中に残ったポリエチレンの量に依存する事が分かった。ポリエチレンの寸法が燃焼時間に対する影響についても調査を行い、その

Fig. 10 Effects of combustion time of polyethylene film to chamber temperature. Combustion time increase with chamber temperature. (Polyethylene film size $L=5$ mm)

Fig. 11 Effects of polyethylene size before ignition to chamber temperature. Polyethylene size before ignition increase with chamber temperature rise. (Polyethylene film size $L=5$ mm)

Fig. 12 Effects of combustion time to polyethylene film size. Combustion time with rising the chamber temperature rises. (Chamber temperature $T=900$ K)

Fig. 13 Effects of polyethylene lifetime to chamber temperature. Polyethylene lifetime has exponential tendency.

結果を図 12 に示す. この図は炉内温度 900 K の場合においてポリエチレン寸法に対する燃焼時間を表したものであり, 図中のプロットは, ◇が実験値を◆がその平均値を示している. この図においてもポリエチレンの寸法が大きい場合に燃焼時間が長くなっている. これも, ポリエチレンの初期寸法が大きい方が, 着火遅れ時間中のポリエチレンの量が多くなっているからであると考えられる.

以上の事から, 高温場に挿入された場合のポリエチレンフィルムの燃焼時間は, 着火遅れ時間中にガス化せずに液体として残っているポリエチレンの量に大きく依存することが分かった.

最後に, ポリエチレンが高温炉内に挿入されてから消失するまでの総時間に対する炉内温度の影響を示したものを図 13 に示す. 図中のプロットについて, ○は総時間の実験値を, ●は総時間の平均値を, ◇は燃焼時間の実験値を, ◆は燃焼時間の平均値をそれぞれ示している. 燃焼時間が炉内温度 1000 K 以下の範囲までしか計測できていないので, 総時間も炉内温度 1000 K 以下の範囲までしか算出できていない. この炉内温度域は, 炉内挿入されたポリエチレンが液滴になってから着火する温度領域である. この温度域において総時間は炉内温度の変化に対して指数関数的に変化している. また, 総時間に占める燃焼時間の割合は, 炉内温度が高い場合の方が大きくなっていることがこの図よりわかる.

5. ポリエチレンフィルムの融解・着火時の温度履歴図

次にポリエチレンフィルムが着火した時の温度履歴についての調査を行った. 得られた結果を図 14 に示す. この図は, 各炉内温度に対するポリエチレンの温度履歴を示したものである. 炉内温度が 1100K 以上の炉内温度の条件では, 燃焼中にポリエチレンが熱電対から落下してしまい, 燃焼終了までの温度履歴の観察ができなかった. このため, この図は着火時までの温度履歴を示している. 図中の横軸は, ポリエチレンが炉内に挿入されてからの時間を, 縦軸は熱電対の接点温度を示している. 燃焼挙動を撮影した動画から, ポリエチレンは炉内に挿入されるとすぐに融解し熱電対の接点を覆っていたので, 熱電対の接点はポリエチレンの温度を示していると判断した. この図より今回調査したすべての炉内温度に対して, ポリエチレンの挿入直後, すぐにポリエチレン温度は 600 K 程度まで上昇する. その後炉内温度が 1100 K 以下の条件では, ポリエチレンの温度上昇速度が少し遅くなる. これは, フィルム状のポリエチレンが融解・変形し回転楕円体形状になる時刻とほぼ同じである. このため変形していく中で伝熱面積が大きい時間帯でポリエチレンの温度上昇速度は大きいものの, ポリエチレンが回転

Fig.14 Temperature history of polyethylene film for various chamber temperature.
(Polyethylene film size $L=5$ mm)

Fig.15 Ignition temperature of polyethylene film for various chamber temperatures. Temperature at ignition is lower with chamber temperature rises.
(Polyethylene film size $L=5$ mm)

Fig. 16 Polyethylene just before ignition for various chamber temperatures. Shapes of polyethylene are different for every chamber temperatures. (Polyethylene film size $L=5$ mm)

楕円体になると、伝熱面積が小さくなるので、温度上昇速度が小さくなったと考えられる。炉内温度が 1150 K と 1200 K の条件では、ポリエチレンが変形している途中で着火が起こっていたため、温度上昇速度が変化する前に着火したものであると思われる。また、炉内温度が高い場合の方が、ポリエチレン着火時の温度は低くなっているように見える。そこで、それぞれの炉内温度における着火時の温度をプロットしたものを図 15 に示す。図の横軸は炉内温度を、縦軸はポリエチレンの着火時の温度を示している。図中のプロットの○は各実験値を、●はその平均値を、それぞれ示している。この図より、炉内温度が 1000 K 以下の条件では着火時のポリエチレンの温度は 850 K 程度でほぼ一定である。一方炉内温度が 1000 K 以上の場合では、炉内温度の上昇に伴って、ポリエチレン着火温度が低くなっている事が分かる。炉内温度が 900 K 以上で 1000 K 以下の場合、着火遅れ時間中の後半である着火直前の期間において、パフリングが観測されている。これはこの炉内温度の条件では、熱分解が活発に起こっている事であると考えられる。このため着火時の温度もポリエチレンが熱分解を活発に起こし始める 850 K 付近で着火したものであると思われる。一方 1100 K 以上の範囲では、融解したポリエチレンが液滴になる前に着火している様子を確認している。したがって、ポリエチレンが変形途中であり、温度分布が不均一であるため、端部が熱分解し着火する際も、中央部の温度はまだ低いままであったと考えられる。炉内温度が 1050 K の場合では、パフリングが発生してから着火した場合と、変形している途中で着火した場合と両方の場合が観察された。このため炉内温度が 1050 K の場合は熱分解が活発に起こる炉内温度域と活発に起こる前に着火する炉内温度域の遷移温度域に当たると考えられる。図 16 はそれぞれの炉内温度の場合において、着火直前のポリエチレンの様子を示したものである。この図より炉内温度が 1000 K 以下の場合では液滴になり、パフリングが発生している様子が観察できる。一方炉内温度 1100 K 以上の場合ではポリエチレンがまだ長細い状態であったり(1100 K)、変形している途中の状態であったり(1200 K)しているので、熱分解は活発に起こっているとは言えない。こういった要因によって炉内温度が 1000 K 以下の場合と 1100 K 以上の場合で着火遅れ時間の温度依存性を示す曲線が不連続になっていると言える。以上の事から高温炉内に挿入されたポリエチレンフィルムの着火遅れ時間中や着火時の挙動や特性の一部を理解する事ができた。

6. 結 言

本研究では、高分子化合物の中で組成が簡単なポリエチレンに着目し、高温炉内に挿入されたポリエチレンフィルムの融解、および着火特性について調査を行った。高温場に挿入されたポリエチレンフィルムは変形、融解後、熱分解によるパフリングの発生を経て着火する。以下に本研究で得られた知見を示す。

1. 高温炉内に挿入された方形のポリエチレンフィルムは、変形・融解を行った後、ガス化した気体が着火するが、それぞれの炉内温度に対して着火限界となる寸法が存在する。
2. 炉内温度が低い場合は、ポリエチレンは高温炉内に挿入された後、変形・融解し液滴になった後に着火する。しかし、炉内温度が高い場合、ポリエチレンは融解・変形している時に着火する。
3. 炉内温度に対する着火遅れ時間の関係は、一見直線的な変化をするように見えるが、Arrhenius 則に従うことが確かめられた。しかしながら、ポリエチレンが液滴形成後に着火する炉内温度域の場合と、変形しながら着火する炉内温度域の場合では傾き等の傾向が異なる。
4. ポリエチレンフィルムの寸法が大きくなるにつれ、着火遅れ時間は増加する。この傾向はポリエチレンが液

滴になってから着火する炉内温度領域の場合も変形しているときに着火する炉内温度領域の場合も成り立つ。しかし、両方の着火の場合が混在する炉内温度領域ではこの傾向は現れない。

5. 高温炉内に挿入されたポリエチレンフィルムの温度履歴は、ポリエチレンが炉内に挿入されて、変形・融解する時間帯と、変形が進み回転楕円体になり、液滴が形成される時間帯とで、温度上昇割合は異なっている。
6. ポリエチレンの着火時の温度は炉内温度低い場合はほぼ熱分解温度となるが、炉内温度が高い場合では、着火遅れ時間が短いため、炉内温度の上昇に伴い着火温度は低くなる。
7. 高温炉内に挿入されたポリエチレンフィルムの燃焼時間は、着火遅れ時間中にガス化せずに液滴として残っているポリエチレンの量に大きく影響を受けるため、炉内温度が高い場合の方が、燃焼時間が長くなる。また、ポリエチレンの寸法に対する影響も同じである。

以上の事から、高温場に挿入されたポリエチレンの融解・着火およびそれに続く燃焼特性の一部を解明する事ができた。

謝 辞

本研究で使用したポリエチレンフィルムは、日本ポリエチレン株式会社に提供していただいた。ここに謝意を表す。また本研究における実験、及び解析に際し、徳山工業高等専門学校専攻科の水野直也君、本科卒業生の濱崎大樹君に多大なる協力をいただいた。ここに親関なる謝意を表す。

文 献

- Blazowski, W. S., Cole, R. B. and McAlevy, R. F., Linear Pyrolysis of Various polymers under combustion conditions, Symposium (International) on Combustion, Vol. 14 (1973), pp.1177-1186.
- Hedges, J. H., Baer, A. D. and Ryan, N. W., Pyrolysis and ignition of polymers under approximated fire conditions, Symposium (International) on Combustion, Vol. 17 (1979), pp.1173-1181.
- 本田尚士監修, 環境圏の新しい熱工学 (1999), pp.914-916, フジテクノシステム.
- Ikeda, M. and Koshiro, Y., Combustion characteristics of polyethylene in microgravity, Proceedings of the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Trans Disciplinary Fluid Integration (2011), pp.26-27.
- 難波邦彦, 木本恭司, 藤田末治, 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 (1998), pp.1499-1505.
- 野間毅, 井出勝記, 今井正, 小城和高, 今井潔, 雨宮隆, 熱分解プロセスを用いた先進型廃棄物発電システムの開発, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.75, No.753(2009), pp.1151-1156.
- Ohiwa, N., Ishino, Y. and Yamamoto, A., Important roles of multiphase process in enhancement mechanism of micro plastic combustion, Proceedings of the Combustion Institute 32(2009), pp.1997-2004.
- 大石祐介, 池田光優, 三上真人, 小嶋直哉, ポリエチレンフィルムの蒸発・燃焼挙動に及ぼす温度場の影響, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会講演論文集, No.095-1(2009), pp.277-278.
- 岡島明子, 棚網祐介, 岡島敏, 高温空気場での廃棄物低質燃料の燃焼特製の解明に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.71, No.702(2005), pp.696-701.
- 鈴木朋子, 岡崎輝幸, 山本研二, 仲田博幸, 藤田修, 外熱式キルン炉におけるごみ熱分解の促進 (第 1 報, 炉壁からごみへの総括伝熱係数の測定), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.74, No.743(2008a), pp.1579-1585.
- 鈴木朋子, 岡崎輝幸, 山本研二, 仲田博幸, 藤田修, 外熱式キルン炉におけるごみ熱分解の促進 (第 2 報, 伝熱促進に関する研究), 日本機械学会 B 編, Vol.74, No.743(2008b), pp.1586-1592.
- 鈴木実, ストーカ型廃棄物焼却プロセスにおける高温空気燃焼制御技術の開発, 日本燃焼学会誌, Vol. 49, No. 147 (2007), pp.29-37.
- Warnatz, J., Maas, U. and Dibble, R.W., Combustion 3rd Edition (2000), p.145, Springer.
- 山本恭央, 石井瑛, 天谷賢児, 古畑朋彦, 新井雅隆, プラスチックの熱分解・燃焼特性に及ぼす難燃剤の影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 73, No.734(2007), pp.2160-2168.

References

- Blazowski, W. S., Cole, R. B. and McAlevy, R. F., Linear Pyrolysis of Various polymers under combustion conditions, Symposium (International) on Combustion, Vol. 14 (1973), pp.1177-1186.
- Hedges, J.H., Baer, A. D. and Ryan, N. W., Pyrolysis and ignition of polymers under approximated fire conditions, Symposium (International) on Combustion, Vol. 17 (1979), pp.1173-1181.
- Honda, N., New combustion engineering in global environment (1999), pp. 914-916, Fujitecnosystem (in Japanese).
- Ikeda, M. and Koshiro, Y., Combustion characteristics of polyethylene in microgravity, Proceedings of the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Trans Disciplinary Fluid Integration (2011), pp.26-27.
- Nanba, K., Kimoto, K., Fujita, E. and Nakajima, T., Devolatilization of pulverized refuse-derived fuel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 64, No. 621 (1998), pp.1499-1505 (in Japanese).
- Noma, T., Ide, K., Imai, T., Kojo, K., Imai, K. and Amemiya, T., The development of advanced waste power generation using the pyrolysis and gas reformation method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.75, No.753(2009), pp.1151-1156 (in Japanese).
- Ohiwa, N., Ishino, Y. and Yamamoto, A., Important roles of multiphase process in enhancement mechanism of micro plastic combustion, Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009), pp.1997-2004.
- Oishi, Y., Ikeda, M., Mikami, M. and Kojima, N., Effects of ambient temperature on evaporateon and burning behavior of polyethylene film, Proceedings of Japan Society of Mechanical Engineers, No.095-1 (2009), pp.277-278 (in Japanese).
- Okajima, A., Tanaami, Y. and Okajima, S., Experimental investigation on combustion characteristics of solid waste fuels in high temperature atmosphere, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.71, No.702 (2005), pp.696-701 (in Japanese).
- Suzuki, T., Okazaki, T., Yamamoto, K., Nakata, H. and Fujita, O., Improvement of pyrolysis of wastes in an externally heated rotary kiln (1st report, Measurement of the overall transfer coefficient from the wall to the wastes), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.74, No.743(2008a), pp.1579-1585 (in Japanese).
- Suzuki, T., Okazaki, T., Yamamoto, K., Nakata, H. and Fujita, O., Improvement of pyrolysis of wastes in an externally heated rotary kiln (2nd report, experimental study on the heat transfer enhancement), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.74, No.743(2008b), pp.1586-1592 (in Japanese).
- Suzuki, M., Development of high-temperature air combustion technology for stoker-type waste incineration process, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 49, No. 147 (2007), pp.29-37 (in Japanese).
- Warnatz, J., Maas, U. and Dibble, R.W., Combustion 3rd Edition (2000), p.145, Springer.
- Yamamoto, Y., Ishii, A., Amagai, K., Furuhashi, T. and Arai, M., Thermal decomposition and combustion behavior of plastics with flame retardant, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 73, No.734(2007), pp.2160-2168 (in Japanese).