廃棄プラスチック樹脂のサーマルリサイクルに関する研究* (急速加熱された単一プラスチック微粒子挙動の画像解析)

山北 龍児^{*1}, 石野 洋二郎^{*1}, 大岩 紀生^{*1}

An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Optical Analysis of Abrupt Heating Characteristics of a Micro Plastic-Resin Particle)

Ryuji YAMAKITA, Yojiro ISHINO and Norio OHIWA^{*2}

^{*2} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

To burn plastic-resin powder as an auxiliary or alternative fuel and to realize the effective thermal recycling of a great deal of recycled plastic-resin, some experimental investigations have been made on the overall combustion characteristics of plastic-powder in the industrial burner and those in the annular burner. According to these results, the basic elucidation of physical properties of an abruptly heated micro plastic-resin particle was found to be necessary and indispensable. In this paper, therefore, evaporating and burning processes of a micro plastic-resin particle, which has a diameter of about 200 μm and is suddenly exposed to a hot oxidizing atmosphere, are observed and analyzed by combining the devised micro direct and schlieren system with a high-speed CCD video camera. The results show that there exist multiple internal micro boiling, micro explosions and micro diffusion flames, and that their existence exerts strong influences on evaporation characteristics of a micro plastic-resin particle. Also calculated is the burning rate constant of the micro plastic-resin particle.

Key Words: Heterogeneous Combustion, Thermal Recycling, Micro Plastic-Resin Particle Micro Boiling, Micro Explosion, Micro Diffusion Flame

1. 緒 言

本研究ではこれまでに、廃棄プラスチック樹脂を代替燃料あるいは補助燃料として再利用(サーマルリサイクル)するために、数百 μm 程度に粉碎されたプラスチック粉末を燃料の利用形態として選定し、二次空気とともにバーナ内に供給したときの燃焼特性を調べてきた。その際、窯業用助燃料として用いたプラスチック粉末の炉内燃焼実験⁽¹⁾⁻⁽³⁾、PIV/PTV法を用いた大気開放燃焼時における燃え残り要因の検討⁽⁴⁾、高温酸化性雰囲気中における粉末燃焼特性の把握⁽⁵⁾といった基礎から応用に至るさまざまな実験を実施してきた。しかし、得られた結果は巨視的な粉末燃焼挙動の解明には有効ではあるが、個々の微視的な粒子挙動に関しては詳細に把握できない。

そこで本論文では、高温雰囲気中に置かれた単一プラスチック微粒子挙動の光学的観察を試みた。観察にあたっては、一方で観察結果の再現性を向上させるために不規則な凹凸を有する微粒子を球状に成形する手

法を考案し、他方では透過・シュリーレン拡大同時撮影が可能な特殊な光学系に高速度 CCD ビデオカメラを組合せた詳細な撮影法を導入した。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置システム 実験装置の系統図を図1に示す。実験装置は、プラスチック微粒子懸架装置、急速加熱用バーナ、プロパン・空気予混合気供給系、透過・シュリーレン拡大同時撮影系、高速度 CCD ビデオカメラ(Photron: FASTCAM-PCI-i, 最大撮影コマ数: 10 000 fps, 最小シャッター露出時間: 1/20 000 s)および PC コントローラ(Photron)からなる。

2・2 透過・シュリーレン拡大同時撮影系 図2に、透過・シュリーレン拡大同時撮影システムの詳細図を示す。光源には市販のクリプトン球を、レンズには4個の五群六枚レンズ(焦点距離 30 mm)を用いた。クリプトン球からの光は第1レンズで集光され、その後、レンズの焦点位置に置かれたピンホール(穴径 0.5 mm)と第2レンズによって平行光線となり観察領域を通過する。そして、微粒子周りの密度変化によって屈折した光を含む平行光線は第3レンズを通過し、図2中の挿入図に示すようなおのの2個のプリズム(Edmund Optics Japan 製, BK 7 直角プリズム, 寸法

* 原稿受付 2005年6月27日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学大学院工学研究科(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。

E-mail: oiwa.norio@nitech.ac.jp

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Fig. 2 The devised simultaneous direct and schlieren system

5.0 mm)とビームスプリッタ(Edmund Optics Japan製、キューブ形ビームスプリッタ、寸法5.0 mm)からなる複合体に入る。入射した光はビームスプリッタ1によって反射光と透過光の二方向に分配される。反射光はプリズム1で90°反射し、ナイフエッジによって光の一部が遮断された後、ビームスプリッタ2を透過する。一方、透過光はそれぞれプリズム2とビームスプリッタ2で90°反射する。その後、拡大画像調節用第4レンズを経て、高速度ビデオカメラのCCD面上で結像する。これによって、同時刻におけるシュリーレン画像と透過画像の拡大同時撮影が可能となる。ここで、図2のナイフエッジの方向は、後述するシュリーレン像の左右に対応する。

なお、ハレーションの影響を抑えた鮮明な画像を得るために、シュリーレン画像側には透過率50%の光量調整用フィルタ(FUJIFILM製、ND-0.3)を、透過画像側には透過率10%の光量調整用フィルタ(FUJIFILM製、ND-1.0)を挿入した。

2.3 球状微粒子への成形および支持法 画像解析を行う際、個々の微粒子は不規則な凹凸を有する不ぞろいな形状であるため、解析結果のばらつきの原因となる。そこで、まず1個の微粒子を線径5 μm のタングステン線に付着させ、それをしゃく熱したニクロ

(a) Original PET particle (b) Rounded PET particle

Fig. 3 Microscopic photographs of an original and spherically rounded PET particle

(a) Preparation (b) Ignition (c) Steady heating

Fig. 4 A series of the burner heating processes ($\phi = 0.8$)

ム線のふく射熱により加熱・軟化させた後、自然冷却させる。このとき、軟化した樹脂の表面張力によって溶融微粒子が丸く滑らかに凝縮する。その結果、タングステン線に支持された球状プラスチック微粒子が成形される。これによって、微粒子の支持法に関する問題も解決され、さらに解析的に評価する際、球対称一次元熱伝導解析⁽⁶⁾⁽⁷⁾の適用が可能となる。

本実験で用いるプラスチック樹脂として、先行の粉末未燃焼実験⁽⁸⁾⁽⁹⁾で使用したポリエチレンテレフタレート(PET: Polyethylene terephthalate)およびポリエチレン(PE: Polyethylene)樹脂の2種類を選定し、タングステン線に溶着・成形された球状微粒子の中から、初期直径が $d_0 \approx 200 \mu\text{m}$ のものを選別し観察に用いた。一例として、粉末を構成しているPET微粒子とタングステン線に溶着した球状PET微粒子の拡大写真を図3に示す。図3から、原料のPET微粒子形状が不ぞろいで凹凸が激しいこと、それに対して支持された球状PET微粒子が滑らかな球状に成形されていることがわかる。

2.4 粒子の急速加熱方法 本実験では、燃燒流動場における微粒子挙動を模擬するために、急速加熱源として火花点火直後のバーナ火炎の燃燒ガスを採用した。図4(a)~(c)に粒子の加熱手順を示す。

まず、内径7 mm、外径9 mmの石英ガラス製のバーナから平均流速 $U = 0.5 \text{ m/s}$ のプロパン・空気予混合気を垂直向上きに供給し[図4(a)]、バーナ出口付近で火花点火し火炎伝ばさせる[図4(b)]。下流方向へ伝ばした火炎面が通過した後に、粒子は燃燒ガ

Fig. 5 A series of high-speed direct and schlieren images of a micro PET-resin particle under the abrupt heating ($d_0=200\ \mu\text{m}$, $\phi=0.8$, $T_0=1\ 000^\circ\text{C}$, shutter speed; 500 fps, exposure time; 1 ms)

スに覆われ加熱が始まる。そして、点火開始から約 20 ms 後に安定な円すい状の層流火炎が形成され(図 4(c)), 粒子は定常加熱される。このように、定常火炎が形成されるまでの過程では、粒子を通過する燃焼ガスの性状は一定ではなく、非定常性を無視できない。そのため、厳密に加熱開始時間とそのときの燃焼ガス性状を規定することが困難となる。そこで、線径 $5\ \mu\text{m}$ のタングステン線の赤熱開始時刻を撮影画像から選定し、その 1 こま前の時刻を加熱開始時刻($t=0$ ms)とした。

2.5 実験手順および方法 本実験では、雰囲気温度が $1\ 000^\circ\text{C}$ 以上かつ酸素濃度が 10% 以下の高温酸化性雰囲気が効率的な粉末燃焼に対して有効であるという結果⁽⁵⁾を踏まえ、予混合気の当量比を $\phi=0.8$ に、加熱温度を $T_0=1\ 000^\circ\text{C}$ に設定した。

はじめに、形成された $\phi=0.8$ のプロパン・空気予混合気火炎の中心軸上温度分布の測定結果に基づいて、加熱温度を与える燃焼ガス流中の位置を決定する。本論文では、バーナ出口からの中心軸上の位置を 35 mm とした。続いて、予混合気流中のその位置にタングステン線で支持された球状微粒子を設置する。そして、火花点火を行い火炎伝ばさせる。これにより、球

状微粒子は燃焼ガスによって急速加熱される。そのときの粒子挙動を高速度透過・シュリーレン拡大同時撮影装置を用いて詳細に観察する。さらに、得られた任意の時刻における透過画像を用いて、粒子の長径と短径の測定を行い、その単純平均値を代表粒子径として粒子径の時間変化を調べることで、燃焼速度定数についての検討も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 高速度透過・シュリーレン拡大同時撮影画像 球状 PET および PE 微粒子の加熱開始から消滅に至るまでの一連の高速度透過・シュリーレン拡大同時撮影画像を、それぞれ図 5 および図 6 に示す。それぞれの初期粒子径は $d_0=200\ \mu\text{m}$ および $202\ \mu\text{m}$ であり、火炎当量比と加熱温度はそれぞれ $\phi=0.8$ および $T_0=1\ 000^\circ\text{C}$ である。撮影速度は 500 fps に、露光時間は 1 ms に設定されている。上側にシュリーレン画像を、下側に透過画像を示す。なお、透過画像の下側には加熱開始からの経過時間が、最初の両画像にはスケールバーおよびナイフエッジの方向を示す白矢印が記入されている。また図 7(a), (b) に、それぞれの粒子径の時間変化を示す。横軸は加熱開始からの経過時間 t

Fig. 6 A series of high-speed direct and schlieren images of a micro PE-resin particle under the abrupt heating ($d_0=202\ \mu\text{m}$, $\phi=0.8$, $T_g=1\ 000^\circ\text{C}$, shutter speed; 500 fps, exposure time; 1 ms)

(a) PET-resin particle ($d_0=200\ \mu\text{m}$)

(b) PE-resin particle ($d_0=202\ \mu\text{m}$)

Fig. 7 Temporal variations of a plastic-resin particle diameter d ($\phi=0.8$, $T_g=1\ 000^\circ\text{C}$)

[s] を、縦軸は粒子径 d [mm] およびその二乗値 d^2 [mm²] を意味する。なお図 7 中には、特徴的なシュリーレン画像が挿入されている。

図 5～7 を見ると、全体の加熱過程は大まかに、

過程①：加熱・融解に伴う体積膨張

過程②：穏やかな蒸発

過程③：微小爆発・微小噴流による激しい蒸発

過程④：残留炭素の消滅

の四つの過程に分割できる。図 5, 6 および図 7 には、これらの過程番号が併記されている。以下、各過程におけるそれぞれの粒子挙動の考察・検討を行う。

3・1・1 過程①：加熱・融解に伴う体積膨張 図

Fig. 8 Appearances of multiple micro explosions, micro jets and micro diffusion flames ($\phi=0.8$, $T_g=1\,000^\circ\text{C}$, PET-resin particle, $d_0=200\,\mu\text{m}$)

Fig. 9 Appearances of multiple micro explosions and micro jets ($\phi=0.8$, $T_g=1\,000^\circ\text{C}$, PE-resin particle, $d_0=202\,\mu\text{m}$)

5 および図7(a)を見ると、 $t=0\sim 56\text{ ms}$ の間、加熱・融解に伴う PET 粒子の形状変化が観察され、徐々に体積膨張していくことが知れる。一方、PE [図6および図7(b)] の場合には、 $t=0\sim 50\text{ ms}$ の期間に、PET 樹脂に比べて体積膨張による変動が大きいことがわかる。この要因として、PE 樹脂の融点および線膨張係数が、それぞれ PET 樹脂の $1/2$ および 2 倍程度であることが挙げられる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。またこの間、両シュリーレン像には蒸気発生を示す明暗の影は明確に現れていない。

3・1・2 過程②：穏やかな蒸発 続いて、PET 粒子の場合は $t\approx 56\text{ ms}$ 、PE 粒子の場合は $t\approx 50\text{ ms}$ から、シュリーレン写真の粒子周りにかすかに明暗の影が現れ始めていることから、蒸発が開始していると考えられる。それに伴い、PET 樹脂の場合には粒子後流部近傍に、PE 樹脂の場合には下流域(撮影範囲外)に輝炎が観察される。この後流形の火炎形態は、周囲の燃焼ガス流速と樹脂の蒸発速度との相対速度が比較的大きいことを意味し、輝炎の挙動に関しては、両者の熱分解生成物の相違⁽¹²⁾が起因していると考えられる。

その後、PET 樹脂の場合には最大粒子径となる $t\approx 78\text{ ms}$ 、PE 樹脂の場合には $t\approx 82\text{ ms}$ に至るまで、シュリーレン写真像において粒子を覆う明暗の模様はほとんど変化が認められないことから、ほぼ一定の蒸発速度を保ちながら穏やかに蒸発していると推察される。

なお、過程②における粒子径挙動を見ると、PET 粒子の場合には過程①に比べて急激に粒子径が増加しているのに対して、PE 粒子の場合にはすでに緩やかに減少しているという顕著な変化が現れている。この点については、過程③の観察結果を考慮に入れて 3・1・3

項で検討する。

3・1・3 過程③：微小爆発・微小噴流による激しい蒸発 図7(a)から、PET 粒子の場合には $t=78\sim 96\text{ ms}$ の間で急激な粒子径の減少が観察される。一方図7(b)から、PE 粒子の場合には $t=84\sim 112\text{ ms}$ の間で粒子径の減少速度がいくぶん大きくなっているのがわかる。

ここで、この過程における粒子挙動を詳細に観察するために、図5と図6に示したシュリーレン写真の明るさとコントラストを調節し、明暗の影を際立たせた拡大画像をそれぞれ図8および図9に示す。図8、9によれば、両者ともに $200\,\mu\text{m}$ 程度という非常に小さな粒子であるにもかかわらず、表面から不規則に噴出している多重の微小噴流の存在が明確に認められる。この要因としては、多重内部沸騰および粒子表面での多重微小爆発の存在が挙げられる。多重内部沸騰の存在に関しては、両者の過程②で観察されたタングステン線周りの不規則な粒子挙動からもうかがえる。さらに図8を詳細に見ると、この微小噴流によって輝炎の形成領域の形状が変化していること、 $t=92\sim 96\text{ ms}$ の期間では微小噴流によって微小輝炎が吹き消えていく興味深いようすが観察されている。一方、図9の $t=90, 94\text{ ms}$ および 102 ms の像において、微小噴流の存在を比較的明確に観察することができる。このような微小噴流の発生が粒子表面近傍において局所的に温度・濃度境界層を破り、その結果、蒸発・燃焼の促進につながっていると考えられる。

ここで、このような多重内部沸騰および多重微細噴流の発生要因として、“廃棄プラスチック樹脂回収・選別・粉碎時における飽和温度の異なる成分の混入”、“単一球形樹脂微粒子加熱・成形時の微細不純物や気泡の混入”および“微粒子に特有の大きな表面積・体

積比と大きな温度差の重畳作用による極限の加熱効果”などが考えられるが、これらの詳細に関しては今後の課題としたい。また、図7(a), (b)で示した蒸発開始後の過程②における粒子径挙動の相違に関しては、定性的に多重内部沸騰に伴う膨張力と粒子表面の膜性状の物理的特性(粘度、表面張力など)とのバランスが影響していると推察している。

3・1・4 過程④：残留炭素の消滅 図5および図7(a)に見られるように、PET樹脂の場合には $t=96\sim 262$ msという長時間をかけて、残留炭素が表面燃焼しながら消滅していく。それに対して図6および図7(b)に示されているPE樹脂の場合には、残留炭素の消滅過程は存在しないことがわかる。これに関しては、PETおよびPE樹脂の温度 700°C における熱分解生成物のうちでチャー分が占める割合がそれぞれ17%および0%であるといった報告⁽¹³⁾を加味すると、残留チャー分の差異が主要因であると考えられる。

以上のように、本実験で提案した高速度透過・シュリーレン拡大同時撮影法を用いることで、直径約 $200\text{ }\mu\text{m}$ という微粒子の急速加熱下での一連の物理的過程を詳細に観察することができ、粒子近傍で生じているいくつかの特徴的な挙動についても明らかにすることができた。

3・2 微小噴流および微小輝炎の寸法の概算 微小噴流および微小輝炎の寸法を概算するにあたり、 $t=90\sim 94$ msにおいて観察されたPET粒子の微小噴流および微小輝炎のシュリーレン画像を図10(a)に、 $t=90\sim 94$ msにおいて観察されたPE粒子の微小噴流の透過画像を図10(b)に示す。図10中には、微小噴流の軸方向長さおよび幅をそれぞれ l_m および d_m 微小輝炎の幅を w_f と定義し、それぞれの計測箇所を図中に併記した。それぞれの寸法の概算値を表1にまとめる。

表1を見ると、微小噴流に関しては $l_m\approx 200\sim 350\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_m\approx 10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 程度であり、微小輝炎に関して

は、 $w_f\approx 360\text{ }\mu\text{m}$ といずれも微細な寸法であることが知れる。また、撮影間隔の 2 ms を用いて微小噴出速度 v_m を概算すると、おおよそ $v_m=10\sim 20\text{ cm/s}$ の平均噴出速度が得られる。ちなみに、これら概算された値はマイクロフレームに関する実験⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾で見積もられた数値よりもさらに小さい。

3・3 燃焼速度定数 C_b の算出 図7(a), (b)から、過程③における d^2-t の関係を見ると、ほぼ直線的な減少を示し、 d^2 -則が成立している。そこで、この過程における直線の傾きから燃焼速度定数 C_b を算出し、従来の単一液滴のそれとの比較・検討を行った。なお傾きを算出する際は、PET樹脂の場合には $t=78\sim 96\text{ ms}$ 、PE樹脂の場合には $86\sim 112\text{ ms}$ の間で最小二乗法を適用した。その結果、PET粒子の場合には $C_b=2.99\text{ mm}^2/\text{s}$ 、PE粒子の場合には $C_b=1.33\text{ mm}^2/\text{s}$ と算出された。

ここで参考までに、初期直径 $d_0=1.0\text{ mm}$ 、加熱温度 $T_g=995^{\circ}\text{C}$ の高温空気の下で行われたディーゼル軽油、ベンゼンおよびイソオクタン⁽¹⁶⁾の C_b の値は、それぞれ 2.15 、 $1.40\text{ mm}^2/\text{s}$ および $1.35\text{ mm}^2/\text{s}$ と報告されている⁽¹⁶⁾。これらの参考値と比較すると、PET粒子の場合は参考値に比べ大きい値を示しているのに対して、PE粒子で得られた値はイソオクタンの場合と同程度であることが知れる。参考値は高温空気の下で行われた値であるため、燃焼ガスを用いた本実験に比べ燃焼促進効果が大きいと予想される。しかし一方で、初期粒子径は本実験に比して約5倍大

Table 1 Properties of micro jets and micro flames

	Micro jet			Micro flame
	d_m [μm]	l_m [μm]	v_m [cm/s]	w_f [μm]
PET	10	200	10.0	360
PE①	35	350	17.5	
PE②	17	204	10.2	
PE③	30	222	11.1

(a) PET-resin particle ($d_0=200\text{ }\mu\text{m}$)

(b) PE-resin particle ($d_0=202\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 10 Quantitative estimation of the micro jet velocity under the conditions of $\phi=0.8$ and $T_g=1\,000^{\circ}\text{C}$

きく、粒子の表面積/体積比は逆に約 1/5 となること
がわかる。

これらを総合的に加味すれば、燃焼速度定数の差異
に関して以下のように検討することができる。粒子径
が小さいほど粒子内部の急速で一様な加熱が可能とな
り、微小粒子内における多重内部沸騰、多重微小爆発
が誘起され、粒子表面から多重微小噴流が噴出され
る。その結果、粒子周りの境界層がかく乱されて伝熱
促進と蒸発促進が同時に得られ、低酸素濃度の燃焼ガ
スを用いることによる火災発生に対する負の要因を相
殺、あるいは超越したものと考えられる。

4. 結 言

本論文では、透過・シュリーレン同時拡大撮影シス
テムに高速度 CCD ビデオカメラを組合せることで、
単一球状プラスチック微粒子の加熱から消滅に至るま
での粒子挙動の光学的観察を試みた。得られた結果は
以下のように要約される。

(1) 粒子挙動は、①加熱・融解に伴う体積膨張、
②穏やかな蒸発、③微小爆発・微小噴流による激しい
蒸発および④残留炭素の消滅の四つの過程からなるこ
とがわかる。

(2) 拡大透過・シュリーレン写真像から、多重内
部沸騰、微小爆発および微小噴流の存在が明らかとな
った。特に多重微小噴流は蒸発促進効果を有していると
推察される。

(3) 微小噴流の長さ l_m と幅 d_m 、および微小輝炎
の幅 w_f の寸法を概算した結果、それぞれ $l_m \approx$
 $200 \sim 350 \mu\text{m}$ 、 $d_m \approx 10 \sim 30 \mu\text{m}$ 、 $w_f \approx 360 \mu\text{m}$ を得た。
これらの値は従来のマイクロフレームの寸法に比して
小さいことがわかった。

(4) PET 微粒子の場合には $C_b = 2.99 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、
PE 微粒子の場合には $C_b = 1.33 \text{ mm}^2/\text{s}$ の燃焼速度定
数 C_b が得られた。これを既存の単一液滴の場合と比
較・検討することにより、多重微小爆発および微小噴
流の発生に伴う伝熱・蒸発促進効果が明らかとなっ
た。

本研究の実施にあたり、平成 16 年度大学院生の加
藤慎也、西野光祐両君と 4 年生の日比野文美君の多大
な協力を得た。ここに記し、心からの感謝の意を表
す。

文 献

- (1) Ishino, Y. et al., Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proc. 6th ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, CD-ROM, (2003), Paper No. TED-AJ 03-181.
- (2) Yamakita, R. et al., Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of PET-Resin Powder in a Ceramic Kiln Furnace), *Trans. JSME, Series B*, Vol. 71, No. 701 (2005), pp. 357-364.
- (3) Yamakita, R. et al., An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Effects of Auxiliary Rate and Median Diameter of PET-Resin Powder), *Trans. JSME, Series B*, Vol. 71, No. 711 (2005), pp. 2792-2799.
- (4) Yamakita, R. et al., Combustion Characteristics of an Industrial Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel (PIV/PTV Measurements of Reactive Flow and Burning Processes of PET particles), *Proc. 42nd Symp. Combust.*, (2004), pp. 433-434.
- (5) Yamakita, R. et al., An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere), *JSME Int. J., Series B*, Vol. 48, No. 1 (2005), pp. 83-91.
- (6) Yamakita, R. et al., An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic-Resin Particle), *Trans. JSME, Series B*, Vol. 71, No. 708 (2005), pp. 2154-2161.
- (7) Yamakita, R. et al., Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proc. 6th KSME-JSME Thermal and Fluid Eng. Conf.*, CD-ROM, (2005), Paper No. TFEC 6-078.
- (8) Yamakita, R. et al., Energy Recycling of Recycled Plastic-Resin Powder (Comparison of Combustion Characteristics Using Recycled PET- and PE-Resin Powder), *Proc. 2003 Symp. Environmental Eng.*, No. 03-10 (2003), pp. 330-333.
- (9) Yamakita, R. et al., Energy Recycling of Recycled Plastic-Resin Powder (Effects of Resin Powder Construction and Diameter on Combustion Properties), *Proc. Mech. Eng. Cong. Vol. III*, (in Japanese), No. 03-1 (2003), pp. 21-22.
- (10) Database of Thermal Properties of Plastic-Resin, (in Japanese), <http://www.aist.go.jp/RIODB/ptdb/entaru/upi.htm>
- (11) JSTP, *Handbook of Polymer Processing*, 2nd ed., (in Japanese), (2002), p. 37.
- (12) *Data of Technical Fundamentals for Thermal Recycling of Recycled Plastic-Resin*, (in Japanese), (1993), pp. 20-21, PWMI.
- (13) *Guidelines of Practical Furnace Design and Control*, (in Japanese), (2001), p. 208.
- (14) Ban, H. et al., Convection-Diffusion Controlled Laminar Micro Flames, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 116 (1994), pp. 954-959.
- (15) Ida, T. and Fuchihata, M., A Microscopic Flame Phenomenon on an Extremely Small Flame, *J. Combust. Soc. Jpn.*, Vol. 45, No. 134 (2003), pp. 207-211.
- (16) Kobayasi, K., A Study on the Evaporation and Combustion of a Single Droplet (3rd Report: Combustion), (in Japanese), Vol. 20, No. 100 (1954), pp. 837-843.

- (1) Ishino, Y. et al., Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proc. 6th ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, CD-ROM, (2003), Paper No. TED-AJ 03-181.