工業用代替燃料としての廃棄プラスチック樹脂粉末の
急速加熱時の多相過程の高速度拡大観察*大 岩 紀 生^{*1}, 石野 洋二郎^{*1}, 加 藤 篤 徳^{*2}High-Speed Microscopic Observation of the Multiphase Process
in a Micro Plastic Resin Particle under Abrupt HeatingNorio OHIWA^{*3}, Yojiro ISHINO and Atsunori KATO^{*3} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

To realize thermal recycling of waste plastic resin as one of alternative fuels, detailed microscopic observation is made of the multiphase process in a micro spherical PET particle under abrupt heating. It is observed that multiple internal micro bubbling occurs within the micro PET-droplet independent of its initial diameter and is triggered by flash vaporization of thermally decomposed products of PET resin. Internal random explosions of micro bubbles follow and blow up multiple irregular micro jets from the micro droplet. The latter forces the micro droplet to move around irregularly on the fine wire, while micro diffusion flames are randomly established behind them. Based on the observation results, the key factor to such a violent burning process of PET particles as to exceed that of well-known volatile liquid fuels can be attributed to the internal multiple micro bubbling due to the flash vaporization of thermally decomposed products.

Key Words: Combustion, Solid Particle Combustion, Alternative Energy, Thermal Decomposition, Flash Vaporization, Internal Micro Bubbling, Heat Transfer Enhancement

1. 緒 言

本研究ではこれまで、廃棄プラスチック樹脂のサーマルリサイクルの可能性を検討するため、まず実用的・総合的観点に立脚して、LPGを燃料とする窯業用バーナにPolyethylene terephthalate resin粉末(以後PET粉末と略記)を補助燃料として供給した場合の燃焼特性を調べた^{(1)~(3)}。その結果、炉内燃焼時には未燃粒子は全く排出されず極めて良好な燃焼特性を示すが、反面、開放空間での燃焼時には粗大粒子が未燃のまま排出されることが明らかとなった。そこで基本に立ち返り、単一PET微粒子の急速加熱過程の高速度拡大観察^{(4)~(6)}、高温燃焼ガス中を飛翔するPET粒子の画像解析⁽⁷⁾⁽⁸⁾および二次元火炎面を通過するPET粒子の拡大追跡観察⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を行った。なお、単一粒子加熱の高速度観察においては、不規則な形状の粒子をタングステン細線周りに球状に凝縮・成形することによって画像解析の再現性の向上と微粒子固定の間

題を同時に解決し、PET粒子の加熱から融解・熱分解・ガス化・燃焼に至るまでの物理的・化学的挙動を調べた。これと並行して、一方では球対称一次元を仮定した熱伝導解析により素過程の所要時間や粒子寿命などの予測を可能にし⁽¹¹⁾、他方では加熱過程のモデル表現とPET粉末粒径分布の個数分布への変換ならびにパーセル近似の導入により、PET粉末燃焼における未燃率の数値予測を行った⁽¹²⁾。

これらの一連の研究において、単一プラスチック微粒子の加熱過程を強制的に吹き消して中断させたときの燃え残り粒子、およびバーナ燃焼時に回収された未燃粒子の顕微鏡写真から、急速加熱時にPET液滴内部に多数の微細気泡が発生している可能性が示された。一方、プラスチック樹脂には蒸発という物理的相変化は起こらず、熱分解によって熱分解温度より低い飽和温度を有する成分が新たに多種発生し、その分解生成物の瞬間的な蒸発が燃焼の前提条件となる。表1にPET樹脂の物性値と主要熱分解生成物を示す⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。主な熱分解生成物はベンゼン、トルエン、スチレンで、それらの飽和温度は括弧内に示すように80~145°CとPET樹脂の熱分解温度(283~306°C, 400~650°C)よりはるかに低い。したがって、一旦、熱分解すれば瞬間的に蒸発し、樹脂内部での多重発泡に至る

* 原稿受付 2008年9月2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)。^{*2} 正員、カワサキプラントシステムズ(株)(☎136-8588 東京都江東区南砂2-11-1)。

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

Table 1 Properties of PET and main decomposed products

Melting point	250 ~ 275 [°C]
Linear expansion coefficient	7.0×10^{-5} [1/K]
Thermal decomposition temperature	283 ~ 306, 400 ~ 650 [°C]
Char content	17.0 % [wt% at 700 °C]
Lower heating value	21.8 [MJ/kg]
Main products of thermal decomposition	Benzene (80 °C), Toluene (112 °C), Styrene (145 °C)

Table 2 Properties of three kinds of supporting wires

Materials	Tungsten	SiC	Quartz
Heat conductivity λ [W/m·K (at 1000 °C)]	129	10.1	2.55
Range of diameter D [μm]	5	12 ~ 20	3 ~ 10

SiC: Silicon-carbide

ことが予想される。なお、これらの分解生成物はいずれも芳香族炭化水素で、すすの前駆物質として知られている。

しかし、これまでの研究でなお不十分なのが、著しく大きな燃焼速度定数と内部多重発泡の関連性に関する考察で、そのためにはプラスチック樹脂の燃焼過程に固有の熱分解・瞬間的蒸発に起因する気液二相の共存する多相過程の詳細な観察が必要となる。そこで、単一球形微粒子の急速加熱過程の高速度観察時の照明手法を、これまでのシュリーレン像と後方照明によるシルエット像同時撮影法⁽⁵⁾⁽⁷⁾から斜め直接照射法に変えることを試みた。その結果、熔融 PET 液滴内部における熱分解・蒸発に起因する多重発泡現象を拡大観察することができた。本論文では、主として、高速度直接観察に基づいて液滴内部発泡の挙動を報告する。

2. 実験装置および方法

図 1 に装置の系統図を示す。装置はミニバーナ、プロパン・空気混合気供給系、点火系、撮影系および PC 制御系から成る。撮影系は高速度 CCD カメラ (Photron, FASTCAM-PCI-I, 1×10^4 fps, 16.7 μs)、レンズ系⁽⁵⁾⁽⁶⁾、光学フィルター (KENKO, PRO ND-4) および Xenon ランプ (1 kW) から構成される。本論文では、熔融 PET 粒子の内部構造を写し出すために、レンズを通して集光された Xenon 光が、水平カメラ軸に直角に斜め上方 (角度 45°) から直接照射される。

急速加熱用ミニバーナに供給されるプロパン・空気予混合気の流れは $u_0 = 0.5$ m/s、当量比は $\phi = 0.84$ である。この層流火炎中心軸上の平均温度分布を予め測定して 1000°C となる点 ($z = 33$ mm) を決定し、この点に PET 微粒子を置くことにより加熱温度を $T_g = 1000^\circ\text{C}$ とした。この点における平均酸素濃度は 11.3% と計測された。平均温度測定 (温度補正な

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

し)には線径 50 μm の R 形熱電対を、酸素濃度の測定には酸素分析器 (Testo, 350 M/XL) を用いた。なお、燃料には工業用純プロパン (純度 96.4%) を用いた。

PET 粒子の成形に際しては、まず 1 個の粒子を支持細線に付着させ、これに灼熱したニクロム線を、樹脂の熱分解温度を超えないようにゆっくりと近づけて加熱・融解させる。溶融粒子は表面張力によって支持線周りに球形に凝集し、熱源を除去すると支持線周りにほぼ球形に凝固する。この顕微鏡画像を PC モニター上に拡大表示し、支持線方向とそれに直角方向の二方向の粒子寸法を測定し、その相乗平均値を粒子直径とした。この場合、得られた粒子径に奥行き方向の情報を反映することはできないが、粒子径の時間変化の考察には画像解析された粒子径をそのまま用いた。PET 粒子の急速加熱過程の高速度撮影では、設定されたプロパン・空気予混合気流中心軸上の所定の位置に成形された粒子を素線を用いて牽架し、火花点火の信号に同期させてカメラを作動させた。なお、支持線にはタングステン線、炭化珪素線および石英ガラス線を用いた。表 2 に、3 種の支持線の線径と 1000°C における熱伝導率の値を示す。なお、用いた炭化珪素線と石英ガラス線の線径が大きくばらついたので、加熱実験に用いた支持線の実測値の範囲を示した。表 2 は、熱伝導率がタングステン、炭化珪素、石英ガラスの順

Fig. 2 High-speed direct observation of the multiphase process in a micro PET particle under abrupt heating, where $d_0=321\ \mu\text{m}$, SiC supporting wire of $D=14\ \mu\text{m}$ and $T_0=1\ 000^\circ\text{C}$

に小さいこと、石英ガラスはタングステンの約 1/50 の熱伝導率を有することを示している。

3. 実験結果および考察

3・1 溶融 PET 粒子内部の多重発泡過程の高速度観察 初期直径を $d_0=321\ \mu\text{m}$ としたときの急速加熱過程における溶融粒子内部の多重発泡の挙動を図 2 に示す。支持線には線径 $D=14\ \mu\text{m}$ の炭化珪素を用い、撮影コマ数は 1 000 fps、露出時間は 1 ms である。初期粒子径が $321\ \mu\text{m}$ と大きく寿命が 350 ms を超えるので、特徴的な挙動を呈する時間帯は 2 ms 間隔で、その他は長い時間間隔で撮影画像が示されている。なお、加熱開始時間の決定にあたっては、高速度撮影された連続画像から支持線が灼熱し始める画像を特定し、その 1 コマ前の画像を加熱開始と定義した。これにより、1 ms の精度で加熱時間を決定することができる。粒子寸法の概略を知ることができるように、最

初の画像にはスケールバーが付記されている。また図 3 に、図 2 の画像解析から得られた PET 粒子直径の二乗 $d^2\ [\text{mm}^2]$ の時間変化が示されている。縦軸には直径の二乗がリニアスケールで、横軸には加熱後の経過時間 $t\ [\text{s}]$ が取られている。図 3 中には、いくつかの特徴的な抜粋画像が矢印で付記されている。

図 2 によれば、これまでの背景光を用いたシルエット画像とは異なって、透明な粒子内部における多重の微細気泡の発生状況を観察することができる。加熱期間 $t \leq 100\ \text{ms}$ では内部発泡は散発的・表面的でその頻度は低く、したがって顕著な粒子径の増大は認められず、温度上昇に起因する緩やかな体積膨張期間と考えられる。しかし $100\ \text{ms} \leq t \leq 165\ \text{ms}$ になると、溶融粒子表層部のみならず内部にも発泡が拡がり、多重発泡となって粒子径増大が顕著となる。またこれに伴って、粒子表面にも微細で滑らかな凹凸が生じて形状が歪になる。このことは、熱分解生成物の瞬間的な蒸

発が内部構造のみならず、粒子の表面形状にも影響を及ぼしていることを意味する。なお、画像解析によれば、これらの内部気泡の寸法は $20\sim 50\ \mu\text{m}$ と見積もることができる。

さらに加熱が進行して $t=167\ \text{ms}$ になると、粒子下流に微かに輝炎が観察され始め、熱分解・ガス化によって生じた熱分解生成物の蒸気が燃焼ガス中の残留酸素と拡散燃焼し始めたことを示している。また、明確には認識できないが、干渉フィルターを用いた CH 発光の測定結果によれば、すでにこの時期に粒子上流の淀み点近傍にも青炎が形成されている。このように、粒子周りに火炎が形成されると、ふく射熱による加熱が相乗して熔融粒子内部における熱分解と分解生成物の蒸発がさらに促進され、輝炎がほぼ粒子全体を覆うようになる。その結果、撮影された画像には中心部の球状の灼熱粒子とそれを覆う輝炎が観察されるようになる。この灼熱粒子の外形変化および支持線周りの挙動に関しては、前報までのシルエット画像^{(4)~(6)}との差異が認められなかったため、本論文では灼熱粒子の直径を画像解析により算出して考察の対象とした。このように粒子周りに輝炎が形成されると粒子径はさらに顕著に増大し、加熱後 $t=220\sim 225\ \text{ms}$ で最大となり初期粒子径 d_0 の 1.5 倍を、また $t=167\ \text{ms}$ の火炎発生時の粒子径の 1.2 倍を超える。この火炎発生に起因する著しい粒子径の増大は、図 3 の時間軸の $t=167\ \text{ms}$ 前後の極端な傾きの増大として示されている。これにより、急速加熱時の過剰な体積膨張と熔融粒子内部における多重発泡との対応関係が示されたことになる。

この顕著な体積膨張に引き続いて、二種の特徴的な

Fig. 3 Temporal variation of particle surface area, where $d_0=321\ \mu\text{m}$, SiC wire of $D=14\ \mu\text{m}$, and $T_0=1\ 000^\circ\text{C}$

挙動が観察される。一つは粒子周りに不規則に変動する輝炎であり、もう一つは急峻な粒子径の減少である。これらはいずれも多重微小気泡の爆発に起因する多重微小蒸気噴流に起因すると考えられる。図 3 中の左右非対称の火炎形状と歪な灼熱粒子画像に示されているように、微小噴流の噴出方向に輝炎が振られて不規則に揺れ動く様子が観察される。多重微小噴流は内部から分解生成物の蒸気を噴出すると同時に、粒子周りの温度・濃度境界層を破壊する効果も有し、熱・物質輸送を促進して熱分解・蒸発をなお一層促進すると考えられる。後述するように、このような自己加速的な多相過程が、よく知られた軽油、ベンゼン、イソオクタンなどの液体燃料を大きく上回る燃焼速度定数を可能にしているものと考えられる。最後に、この急速な粒子径の減少の後に緩慢なチャー分の表面燃焼過程が $t\approx 350\ \text{ms}$ まで引き続く。

なお、初期粒径や支持線の種類が変わっても、PET 微粒子の急速加熱過程に現れる一連の多相過程の構成と特徴が大きく変化することはない。それぞれの素過程に要する時間間隔が変わるのみである。しかし、ポリエチレンやスチレンのようにチャー分を含まないプラスチック微粒子の場合には、長時間を要する表面燃焼過程が現れないので、その分だけ寿命は短くなる^{(6)(15)~(17)}。

3・2 多重発泡の挙動と残留粒子の顕微鏡写真との対比 3・1 節で内部多重発泡の挙動が詳細に捉えられたので、つぎに、対応する時刻に強制的に粒子周りのすべての火炎を吹き消して得られた燃え残り粒子の顕微鏡写真との比較を試みる。すでに 3・1 節で示したように、球形に成形された PET 微粒子の全加熱過程は、温度上昇に伴う緩やかな体積膨張期間(期間 I)、内部発泡に起因する著しい体積膨張期間(期間 II)、激しい熱分解・ガス化・燃焼に起因する直線的な表面積減少期間(期間 III)、および残留チャー分の緩やかな表面燃焼期間(期間 IV)に分けることができ、この加熱過程の特徴は初期粒子径と支持線の種類ほとんどに依存しない。そこで、すでに得られている強制吹き消し後の残留未燃粒子の顕微鏡写真⁽⁵⁾⁽⁷⁾を参考に、対応する時刻の内部多重発泡の挙動と相関関係を調べる。

図 4 に、初期の成形粒子写真を含む加熱途中の代表的な 5 時刻における多重発泡の直接写真を上側に、それに対応する時刻に吹き消して得られた残留粒子の顕微鏡写真を下側に対応させて示す。それぞれの図に対応する加熱時刻が図 3 中に 4 本の白矢印 (I~IV) で示されている。なお、観察結果のばらつきをできるだけ抑制するため、成形された粒子の中から $d_0=200\pm 4$

Fig. 4 Comparison of appearances of internal multiple bubbling with those of embers at five typical timings

μm の条件を満たす粒子を選別して強制吹き消し実験に用いた。

まず、加熱前の初期粒子の外見を捉えた図 4(a)はともに滑らかな外形と透明な内部構造を呈していて、PET 微粒子の加熱成形時には熱分解・ガス化が生じていないことが知れる。温度上昇に伴う緩やかな体積膨張期間 I の対応する時刻の加熱像と吹き消し像の発泡の様子である図 4(b)はよく合っており、粒子表層部の散発的な発泡頻度の漸増に起因して粒子径が増加するという加熱期間 I の特徴がよく示されている。

加熱期間 II の加熱画像である図 4(c)では、粒子が灼熱していて内部構造を観察することができない。しかし、その時刻に至るまでの加熱画像 ($t=145\sim 167$ ms) の継続性から、粒子表層部のみならず内部領域でも多重発泡が起こり、火炎ふく射も相まって次第にその頻度が激しくなると考えられる。このような内部構造は図 4(c)の顕微鏡写真からその概略をうかがい知ることができる。したがって、この期間における著しい体積膨張の要因に粒子内部の多重発泡が関係していることが推察される。

さらに加熱過程が進行した期間 III では、加熱画像が灼熱した歪な形状の粒子と左右非対称・不規則な後流火炎を捉えており、微細気泡の内部爆発に起因する不規則な微細噴流の噴出とそれに起因する火炎の歪みが推察される。この時刻に対応する吹き消し画像である図 4(d)は、上述の内部の気泡が爆発してぶくぶくと蒸気を噴出している様子^{(4)~(6)}を容易に想像させるような泡状の歪な塊を示している。吹き消し画像は冷却後の写真であるため、加熱時の微小気泡のサイズは不明であるが、急速な粒子径減少の主要因が多重微細気泡の不規則な多重微細爆発・微細噴流であることを示唆している。

最後に、期間 IV の加熱画像である図 4(e)には灼熱した凸凹の塊が捉えられていて粒子の構造を明確に観

Fig. 5 Dependency of PET particle burning rate constants on the conduction heat index of supporting wire

察することができない。しかし対応する時刻の吹き消し画像によれば、この期間でもやはり凸凹した歪な泡状の塊となっていて、期間 III における激しい内部発泡・微細噴流の痕跡が残っていることを示している。なお、チャー分の含有は熱分解・蒸発の進行とともに残留未燃分の色を無色透明から茶色、黒色へと変色させることが知れる。その様子は、図 4 の吹き消し画像の色彩の変化に見ることができる。

3.3 支持線の物理的特性の燃焼速度定数への影響

本研究では、3 種類の熱伝導率の異なる支持線を用いたので、急速加熱時の多相過程に及ぼす支持線を通しての伝導熱量の影響を調べることができる。しかし、表 2 に示すように、タングステン線の直径は $D=5\ \mu\text{m}$ と一定であるが、炭化珪素線と石英ガラス線の直径は大きくばらつく。そこで、熱伝導率 λ [W/(m·K)] と素線径の断面積 $A(=\pi D^2/4)$ の積 $A\lambda$ を構成すると、その構成単位系は支持線を通して軸方向に流入す

る単位温度勾配あたりの伝導熱量: $[W/(K/m)]$ という物理的意味を有し、多相過程への熱伝導率と素線径の影響を同時に表現するパラメーターとなることが知れる。そこで本論文では、これを伝導熱量指数と呼ぶことにする。

図5に、PET粒子の燃焼速度定数 C_b $[mm^2/s]$ の支持線の伝導熱量指数 $A\lambda$ に伴う変化を示す。ここで、本研究のプラスチック樹脂微粒子の融解から熱分解・蒸発、および燃焼に至る一連の加熱過程が熱および蒸気の拡散に支配される典型的な拡散律速の現象と考えられるので、燃焼速度定数の算出に際しては、加熱期間IIIに最小二乗法を適用して直線の勾配を求めた。図5中には、素線の種類と線径を変化させて得られたすべての燃焼速度定数の値がプロットされ、すべての実験点に最小二乗法を適用して求めた直線が引かれている。

図5によれば、実験点のばらつきが大きく、それぞれの素線を用いた場合の伝導熱量指数の中心値における燃焼速度定数を基準として、石英ガラス線を用いた場合には $3.03 \pm 0.61 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、炭化珪素線を用いた場合には $3.16 \pm 0.44 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、タングステン線を用いた場合には $3.20 \pm 0.32 \text{ mm}^2/\text{s}$ に達している。このことは、燃焼速度定数の伝導熱量指数への依存性が実験点のばらつきに比して小さいことを示唆している。しかし、全体的には弱いながらも燃焼速度定数の伝導熱量指数への正の依存性が示されており、支持線の熱伝導率あるいは支持線の断面積の増大がPET粒子の熱分解・ガス化・燃焼を促進する効果を有することがうかがわれる。

なお、直線の縦軸切片は支持線からの伝導熱量の影響を無視できる極限条件下 ($A\lambda=0$) での燃焼速度定数を与え、その値は $C_b=3.02 \text{ mm}^2/\text{s}$ と得られる。この値は、本研究の加熱条件下に近い 970°C の高温空気中における軽油、ベンゼン、イソオクタンなどの代表的な液体燃料の線径 0.1 mm 石英ガラスによる直径 1 mm の垂直懸架液滴の燃焼速度定数(図5中の表に記載)より大きい⁽¹⁸⁾。この液体燃料の実験では高温空気をを用いているので、酸素濃度は21%と本実験の酸素濃度条件を凌ぎ、拡散燃焼を促進する方向に作用すると考えられる。それにも拘らず、PET微粒子は1.4~2.3倍に及ぶ燃焼速度定数を実現している。この結果は、一方では、プラスチック樹脂に特有の熱分解生成物の瞬間的蒸発に起因する内部多重発泡・爆発・噴出が燃焼過程を促進する主要過程であることを示し、他方では、PET粒子の熱分解・蒸発・燃焼の多相過程に及ぼす支持線の物性値の影響が相対的に小さいこと

を示している。したがって、プラスチック樹脂に特有な熱分解生成物の瞬間的蒸発に起因する内部多重発泡と、それに引き続く多重微小爆発・微小噴流に起因する著しい熱輸送と物質輸送の自己加速的促進効果がPET粉末燃焼において極めて重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

4. ま と め

本論文で得られた結果は以下のように要約される。

(1) カメラ軸に直角断面内で、斜め上方からキセノン光を直接照射した高速度拡大観察の結果、透明な溶融粒子内部における多重の微細気泡の発生状況が明らかにされた。また、加熱過程の進行とともに気泡の発生領域と発生頻度が増し、これにより著しい体積膨張が現れることを示した。

(2) 溶融粒子表層部において散発的なPETの熱分解と分解生成物の蒸発が生じ始めると、粒子後流に拡散火炎が発生する。一旦、火炎が形成されるとふく射熱によって加熱が促進され、熱分解・蒸発が溶融粒子内部でも発生するようになり、次第にその頻度が増加する。この内部多重微細発泡とその頻度増大は粒子体積の著しい増大の主要因となる。

(3) 内部多重微細発泡の活発化によって最大粒子径まで膨張すると、微細気泡の爆発による微小噴流の発生が顕著となる。この多重微小爆発・噴流は、その下流に微小拡散火炎を発生させたり、粒子周りの既存の火炎中に吹き込んで火炎の形状を不規則に複雑に乱したりする。この一連の多重微細爆発・噴流の攪拌効果は自己加速的に燃焼を促進し、粒子径を急速に減少させる。PET樹脂の場合には、含有チャー分の緩慢な表面燃焼過程があとに続く。

(4) 急速な燃焼過程における粒子表面積は直線的に減少するので、その勾配を求めることにより、PET粒子の燃焼速度定数の算出が可能となる。素線の直径と熱物性を変化させたときの燃焼速度定数の変化が伝導熱量指数を導入することにより評価された。その結果、素線を通しての熱伝導の影響を無視できないこと、およびPET粒子がよく知られた液体燃料より大きな燃焼速度定数を有することが明示された。

本研究に対して、日本カーボン(株)から炭化珪素線(商標ハイニカロン)の提供を受けた。また本研究の実施に対し、袋田聖君(現:(株)デンソー)および当時の卒研生の鈴木秀信君(現:自衛隊)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表わす。

文 献

- (1) Ishino, Y., Yamakita, R. and Ohiwa, N., *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 2, No. 1 (2007), pp. 136-147.
- (2) Yamakita, R., Ishino, Y., Kato, M. and Ohiwa, N., *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 2, No. 1 (2007), pp. 160-171.
- (3) Yamakita, R., Miura, K., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *JSME International Journal, Series B*, Vol. 48, No. 1 (2005), pp. 83-91.
- (4) Yamakita, R., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Proceedings of 1st International Symposium on Micro and Nano Technology*, CD-ROM: Paper No. XXXIV-C-04 (2004).
- (5) Ishino, Y., Yamakita, R. and Ohiwa, N., *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31 (2007), pp. 2097-2105.
- (6) Ohiwa, N., Ishino, Y., Yamamoto, A. and Yamakita, R., *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 3, No. 1 (2008), *Special Issue on ASME-JSME Thermal Engineering Conference and Summer Heat Transfer Conference*, pp. 11-22.
- (7) Yamakita, R., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *International Journal of Transport Phenomena*, Vol. 8 (2006), pp. 223-237, Old City Publishing.
- (8) Yamakita, R., Kato, M., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Transactions of JSME, Series B*, (in Japanese), Vol. 72, No. 722 (2006), pp. 2540-2546.
- (9) Nakama, T., Tomatsu, T., Tanaka, S., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Proceedings of Symposium on High-Speed Photographs and Photonics*, (in Japanese), (2007), pp. 57-60.
- (10) Ohiwa, N., Ishino, Y., Tomatsu, T. and Yamakita, R., *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 2, No. 2 (2007), pp. 212-223.
- (11) Ohiwa, N., Yamakita, R. and Ishino, Y., *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 2, No. 1 (2007), pp. 148-159.
- (12) Yamakita, R., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Transactions of JSME, Series B*, (in Japanese), Vol. 72, No. 724 (2006), pp. 3128-3136.
- (13) Maruzen ed., *Handbook of High Polymer*, (in Japanese), (1994), p. 1015, Maruzen.
- (14) Nagakura, S. et al. ed., *Physicochemical Handbook*, (in Japanese), 5th ed., (2004), p. 699, 975, 1275, Iwanami Publishing.
- (15) Kato, S., Yamakita, R., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Proceedings of Mechanical Engineering Congress of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Vol. 3, No. 04-1 (2004-9), pp. 51-52.
- (16) Yamakita, R., Nishino, K., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Proceedings of the 43rd Symposium on Combustion*, (in Japanese), (2005-12), pp. 292-293.
- (17) Yamamoto, A., Nishino, K., Tochigi, M., Yamakita, R., Ishino, Y. and Ohiwa, N., *Proceedings of the 16th Symposium on Environmental Engineering*, (in Japanese), No. 06-10 (2006-6), pp. 196-199.
- (18) Kobayashi, K., *Transactions of JSME*, (in Japanese), Vol. 20, No. 100 (1954), pp. 837-843.