

名古屋工業大学博士論文

甲第538号(課程修了による)

平成18年3月23日授与

博 士 論 文

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

2006年

山 北 龍 児

目 次

第 1 章	緒 論	1
1.1	本論文の背景および目的	1
1.2	本論文各章の内容	5
1.3	廃棄プラスチック樹脂の特性	9
	第 1 章の参考文献	11
第 2 章	廃棄 PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性	17
2.1	はじめに	17
2.2	記 号	18
2.3	実験装置および方法	19
2.3.1	実験装置システム	19
2.3.2	PET 粉末特性	19
2.3.3	粉体搬送装置	22
2.3.4	総合当量比 ϕ および助燃率 α の定義	22
2.3.5	バーナの選択および改良	24
2.3.6	モデル窯業炉	24
2.3.7	白色度と曲げ強度の評価	27
2.3.8	実験手順および方法	27
2.4	実験結果および考察	31
2.4.1	改良形窯業用バーナの開放燃焼特性	31
(1)	ノズル管設置による保炎特性の改善	31
(2)	PET 粉末の燃焼特性	31
(3)	ノズル管設置位置の検討	33
2.4.2	助燃率 α が炉内燃焼特性に及ぼす影響	36
(1)	PET 粉末の炉内燃焼挙動	36
(2)	空間炉内温度分布	38

(3) 排気ガス特性	38
2・4・3 質量メディアン直径 d_m が炉内燃焼特性に及ぼす影響	41
(1) PET 粉末の炉内燃焼挙動	41
(2) 排気ガス特性	43
2・4・4 白色度および曲げ強度の比較・検討	45
2・4・5 考 察	45
2・5 第 2 章のまとめ	49
第 2 章の参考文献	51

第 3 章 バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および 飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の画像計測	53
3・1 はじめに	53
3・2 記 号	55
3・3 実験装置および方法	56
3・3・1 実験装置の構成	56
3・3・2 PET 粉末燃焼用改良バーナ	56
3・3・3 PET 粉末特性	56
3・3・4 水膜法を用いた固形残留粒子捕集装置	58
3・3・5 PIV/PTV計測装置	58
3・3・6 飛翔 PET 粒子形状の拡大観察	62
3・3・7 実験手順および方法	62
3・4 実験結果および考察	65
3・4・1 改良形窯業用バーナの開放燃焼特性	65
(1) 粒子径が火炎挙動に及ぼす影響	65
(2) 水膜法による未燃率の定量的検討	65
3・4・2 固形残留粒子の増加要因に関する検討	68
(1) プロパン火炎中の軸方向速度の断面分布	68
(2) PET 粒子速度および存在確率の断面分布	68
(3) 飛翔 PET 粒子の形状と粒径変化	70
3・5 第 3 章のまとめ	74

第3章の参考文献	75
第4章 プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称 一次元熱伝導解析	77
4・1 はじめに	77
4・2 記号	79
4・3 加熱過程および熱分解・ガス化過程の解析モデル	80
4・3・1 固体加熱過程	80
4・3・2 融解過程	83
4・3・3 液体加熱過程	83
4・3・4 熱分解・ガス化過程	84
4・4 解析結果および考察	85
4・4・1 プラスチック微粒子内の温度履歴	85
4・4・2 初期粒子径 d_0 と素過程の所要時間 τ の関係	88
4・4・3 初期粒子径 d_0 と寿命 τ_n の関係	88
4・4・4 考察	91
(1) ヌセルト数 Nu の影響	91
(2) 窯業用バーナ内の滞在時間との比較	93
4・5 第4章のまとめ	94
第4章の参考文献	95
第5章 環状バーナによって形成された高温酸化性領域における PET 樹脂粉末の燃焼特性	99
5・1 はじめに	99
5・2 記号	100
5・3 実験装置および方法	101
5・3・1 実験装置の系統図	101
5・3・2 環状バーナ	101
5・3・3 PET 粉末特性	103

5.3.4	実験手順および方法	103
5.4	実験結果および考察	108
5.4.1	高温酸化性領域の検討	108
(1)	環状バーナの火炎挙動	108
(2)	時間平均温度分布および酸素濃度分布	108
(3)	高温酸化性領域の解析的評価	111
5.4.2	高温酸化性領域における PET 粉末燃焼特性	112
(1)	PET 粉末燃焼時の火炎挙動	112
(2)	PET 粉末燃焼時の酸素濃度分布および消費酸素濃度場の概略	115
(3)	高速度撮影による PET 粉末燃焼挙動	119
5.4.3	環状バーナの基本燃焼特性	121
(1)	火炎挙動に及ぼす v_s と v_n の影響	121
(2)	高温酸化性領域に及ぼす v_s と v_n の影響	123
5.4.4	PET 粉末を供給したときの燃焼挙動	123
(1)	PET 粉末燃焼時の火炎挙動	123
(2)	PET 粉末燃焼に伴う温度場と O_2 濃度場の変化	126
(3)	PET 粉末の未燃率の変化	128
5.5	第 5 章のまとめ	131
	第 5 章の参考文献	133

第 6 章	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	137
6.1	はじめに	137
6.2	記 号	138
6.3	実験装置および方法	139
6.3.1	実験装置システム	139
6.3.2	透過・シュリーレン拡大同時撮影系	139
6.3.3	球状微粒子への成形および支持法	141
6.3.4	粒子の急速加熱方法	141
6.3.5	実験手順および方法	143

6・4	実験結果および考察	144
6・4・1	高速度透過・シュリーレン拡大同時撮影画像	144
(1)	過程①：加熱・融解に伴う体積膨張	144
(2)	過程②：穏やかな熱分解によるガス化	148
(3)	過程③：微小爆発・微小噴流を伴う激しい熱分解によるガス化	148
(4)	過程④：残留チャー（炭素分）の消滅	152
6・4・2	微小噴流および微小輝炎の寸法の概算	152
6・4・3	燃焼速度定数 C_b の算出	154
6・5	第 6 章のまとめ	155
	第 6 章の参考文献	156

第 7 章 廃棄 PET 樹脂粉末燃焼における未燃率の低減に関する実験的アプローチ 161

7・1	はじめに	161
7・2	記号	162
7・3	実験装置および方法	163
7・3・1	実験装置の系統図	163
7・3・2	基礎実験用バーナ	163
7・3・3	実験手順および方法	165
7・4	実験結果および考察	170
7・4・1	基礎実験用バーナの燃焼特性	170
(1)	火炎形状の直接写真	170
(2)	火炎温度分布	170
(3)	乱れ強さ特性	170
7・4・2	基礎実験用バーナにおける PET 粉末燃焼特性	173
(1)	PET 粉末燃焼時の火炎挙動	173
(2)	PTV に用いた PET 粒子の分散画像	173
(3)	PET 粒子存在確率分布の変化	173
(4)	飛翔 PET 粒子の平均速度分布の変化	177
(5)	ガラス管内平均滞在時間の概算	177

(6) 最小粒子間距離の算出結果	179
(7) 未燃率測定結果	179
7・4・3 分散度が未燃率に及ぼす影響	181
7・5 第7章のまとめ	182
第7章の参考文献	183
第8章 廃棄 PET 樹脂粉末燃焼における未燃率の数値予測	185
8・1 はじめに	185
8・2 記号	187
8・3 実験装置および方法	188
8・3・1 実験装置システム	188
8・3・2 実験手順および方法	188
8・4 実験結果および考察	190
8・4・1 PET 微粒子の高速度顕微鏡観察	190
8・4・2 粒子径計測による粒子挙動の把握	194
8・4・3 単一 PET 微粒子実験に基づく PET 粉末燃焼中の微粒子挙動の解明	194
8・4・4 球対称一次元熱伝導解析結果との比較・検討	200
8・5 解析手順および方法	203
8・5・1 粒子挙動のモデル化	203
8・5・2 個数分布への置換	204
8・5・3 未燃率の算出	206
8・6 解析結果	208
8・6・1 個数分布の時間変化	208
(1) 加熱直後の初期における個数分布の変化	208
(2) 加熱中期における個数分布の変化	211
(3) 加熱後期における個数分布の変化	211
8・6・2 未燃率の数値予測	214
8・6・3 予測値と実測値の比較・検討	216
8・7 第8章のまとめ	218
第8章の参考文献	219

第9章	結 論	223
付 録		231
(a)	第3章に関する付録	232
(b)	第4章に関する付録	237
(c)	第8章に関する付録	240
	付録の参考文献	242
	本論文に関する学術論文, 国際学会発表および国内講演論文	243
謝 辞		253

第1章 緒 論

1.1 本論文の背景と目的

経済成長に伴い大量生産 → 大量消費 → 大量廃棄の社会システムが定着し、その廃棄物の増加が有害物質の発生、不法投棄、大気汚染等の環境問題を引き起こしており、21世紀は経済活動と自然環境の調和、すなわち循環型社会形成が求められている。これまで日本では、法制度の改正・施行によって廃棄物処理の改善が行われてきた。その結果、近年、国内のプラスチック生産および排出量が横ばい傾向にある中、廃棄プラスチック樹脂の有効利用率は2002年度において55%（過去7年間で2倍以上）と着実に向上し⁽¹⁾、PETボトルの回収率も1997年に施行された容器包装リサイクル法により急速に増加し、2003年度には60%を超え、現在、世界最高水準となっている⁽²⁾。しかし、今なお未利用のまま埋め立てや単純焼却される割合が半分近くを占め、とくに最終処理に相当する埋め立ては国土の狭い日本にとって大きな問題であり、早急な解決が要求・期待されている。そこで同時に、回収された廃棄プラスチック樹脂のリサイクル手法に関する研究・開発が進められてきた。

現在、主なりサイクル手法としては、以下の(a)~(c)が挙げられる⁽¹⁾。

- (a) マテリアル・リサイクル； 回収された廃棄プラスチック製品の異物を除去し、粉碎・洗浄しフレーク状の再生樹脂にした後、繊維製品などの原料に再利用する。
- (b) ケミカル・リサイクル； 使用済みプラスチック樹脂を化学的に分解し、原料やモノマーに戻し（解重合）、再生樹脂にする（原料・モノマー化技術）。その他、還元剤として再利用する高炉原料化技術、コークス炉で再利用するコークス炉化学原料化技術、ガス化・油化技術が研究・開発され、実用化されている。
- (c) サーマル・リサイクル； 熱エネルギー源として再利用する。主に燃料として再利用するガス化・油化技術、ごみ焼却熱利用、ごみ焼却発電、セメントキルン原燃料化、ごみ固形燃料（RDF）などがある。

マテリアル・リサイクルでは、はじめに回収された廃棄プラスチック樹脂から不純物を取り除き、粉碎、洗浄、異物、異樹脂などの分離工程を経て、フレークまたはペレット状（フレークをさらに造粒機によって熱で溶融し粒状にしたもの）の再生原料にする。そして、その再生原料は繊維工場やシート製造工場に送られ、再度、溶融され繊維やシート状にしてから製品に加工される。しかし、このリサイクルでの異物の除去方法は、主に洗浄・分離によって行われているので、ごく微小な異物が残存する。そのため、食品容器や非常に細い糸が必要な繊維にする際にこの異物が問題となっている。よって、ペットボトルなどは繊維やシートなどには再利用されているが、飲料用ペットボトルそのものの原料には使われていない。結局のところ、汚れ、異物が多く純度が低いこと、樹脂の加水分解性による品質低下等により、最終的には埋め立て処理が不可避であるといった問題を有しているのが現状である。

ケミカル・リサイクルは、使用済みプラスチック樹脂を化学的に分解し、原料やモノマーに戻し、再度、プラスチック樹脂にする方法である。これまで、化学分解法によって作られたペット樹脂は、衛性面・匂いの問題から飲料用ペットボトルには適さないと考えられてきた。しかし、2000年度に食品衛生上の安全性の面で問題ないと判断されて以来、使用済みペットボトルから新品同様のペットボトルを作り出す研究・開発が行われ、その結果、2004年4月から『ボトル to ボトル』の実用化が始まり、一部店頭に並んでいる⁽²⁾。ケミカル・リサイクルは環境面では他のリサイクル方法よりも負荷が低いのが特徴だが、処理費用が高いためエコ効率（経済的側面と環境的側面の総合的評価）が低下して優位性が発揮されていない。また、マテリアル・リサイクルと同様、一時しのぎ的手法に他ならず、最終的には埋め立て処理が必要になるとと思われる。

サーマル・リサイクルは、廃棄プラスチック樹脂を燃料として燃焼させることによって、発生する熱エネルギーを利用するというものである⁽³⁾。このリサイクル手法においては、プラスチック樹脂の微粉工程・粉碎工程を除けば、手法そのものが最終処理に相当するという特徴を有し、商・工業用燃料に利用した場合は、化石燃料使用量の著しい節減効果も有し、エネルギー環境保全に繋がる。また、リサイクル後に残る固形廃棄物（灰分など）が極めて少なくクリーンである。しかし、燃料として使用する際には、燃料性状、燃焼特性、排気ガス特性等を把握することが非常に重要となる。

3つのリサイクル手法が環境、資源等に及ぼす影響については、LCA（Life Cycle Assessment）という計算法によって総合的に評価されている。その結果によれば、サーマル・リサイクルは他の2つのリサイクル手法に比べ負荷が小さくバランスのとれた手法であると報告されている⁽⁴⁾。

以上の研究報告⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾から、前述の埋め立て処理問題を早期に解決するためには、サーマル・リサイクルが最も有効である。

そこで、サーマル・リサイクルを行うにあたり、燃料の利用形態を選定する必要がある。この場合、廃棄プラスチック樹脂を効果的に燃焼させるためには、あらかじめ数百ミクロン程度の微粉末に粉碎した廃棄プラスチック樹脂粉末（以後、プラスチック粉末と略記）を二次空気または予混合気とともに燃焼器内に供給する方法が有効な方法である。粉碎技術に関しては、マテリアル・リサイクルの一環としてすでに確立されており、一方、粉碎のためのエネルギー・コストに関しては、非公式情報ではあるが、150 μm 程度の平均粒径の粉碎で量産ペースにのれば、現用のLPGを凌ぐ試算がなされている。以上から本研究では、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、プラスチック粉末を燃料の利用形態とした。また、本研究で用いるプラスチック粉末の種類として、主としてペットボトルの原料である廃棄ポリエチレンテレフタレート樹脂（PET: Polyethylene terephthalate）粉末（以後、PET粉末と略記）を選定した。PET樹脂は、炭素、酸素、水素の3つの元素、すなわち高純度の含酸素炭化水素から構成されているため、完全燃焼させた場合には二酸化炭素と水だけとなり、ごみ焼却で問題とされているダイオキシンなどの有害ガスは発生しない。また、その低位発熱量が21.8 MJ/kgと石炭と同程度の値であり、燃料としての再利用が可能であると考えられる。なお、物理的特性の異なる樹脂として廃棄ポリエチレン樹脂（PE: Polyethylene）を採用し、必要と思われる場合にはその粒子挙動も併記した。

一方、廃棄PET樹脂の燃焼に関しては、火力発電用燃料として取扱う研究⁽⁵⁾が行われ、基本となる廃棄PET樹脂の微粉碎技術、スラリー化技術および燃焼技術⁽⁶⁾についての基礎的な研究がすでに行われている。これらの研究では、粉末燃焼の方がスラリー燃焼方式に比べ技術的課題が少なく、実用に近いという報告がなされている。また、高温の炉内において300 μm 程度の比較的粗い粒子が使用されており、粉体燃焼の主流である微粉炭燃焼⁽⁵⁾と比較して非常に良好な燃え切り特性が得られている。しかし、炉内ではなく、バーナ単独で粉末を燃焼させることに関しては、未だ詳細な報告はされておらず、不明な点が多い。そのため、幅広い分野でサーマル・リサイクルを行うためには、バーナ内における粉末燃焼特性についても調べる必要がある。

そこで本研究では、PET粉末を助燃料として用いたときのサーマル・リサイクルにおける有効性を示すことのみならず、廃棄物の削減および化石燃料の有効利用に貢献できるレトロフィット可能な商・工業用バーナの開発を行うための基礎的知見についても検討する。

実験を行うにあたり、プラスチック粉末燃焼を基礎的な燃焼学的観点から捉えた場合、不均質燃焼に分類される。不均質燃焼に分類される主な燃焼形態としては、液体燃料の場合は噴霧燃焼、固体燃料の場合は微粉炭燃焼が挙げられる。

噴霧燃焼とは、液体燃料を数ミクロンから数十ミクロンに微粒化し噴霧にして燃焼させる形態である。そのため、燃料の微粒化、油滴の気相への分散、蒸発、燃焼といった素過程が同時に相互作用を及ぼしあいながら進行する複雑な反応性二相乱流現象であり、究極の複雑現象ともいわれている。そのため、その噴霧燃焼によって形成された火炎を解明するために、様々な実験的アプローチおよび数値解析が行われてきた。例えば、現象を細分化し、場を単純化する方法を用いた単一油滴あるいは油滴列の蒸発、着火、燃焼挙動に関する研究⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾、噴霧火炎の巨視的構造の解明に関する研究^{(14),(15)}がある。さらに最近では、Chiuらによって、油滴の密集度による火炎構造の変化を推測した油滴群燃焼理論の仮説が提唱された^{(16),(17)}。これに対して、赤松らは噴霧火炎中における群燃焼挙動を実験的に解明することを試み⁽¹⁸⁾⁻⁽²²⁾、時間平均的統計量のみでの測定ではなく、高時間・空間分解能を有する多チャンネルの同時時系列データを詳細に解析することにより、群燃焼仮説の実験的裏付けを示すことに成功している^{(18),(21)}。このように、計測技術の向上に伴い、噴霧燃焼の現象解明が着実に進んでいる。

一方、微粉炭燃焼とは石炭を微粉末に粉碎して燃焼させる形態であり、炉内に吹き込んで燃焼させる場合が多い。これに関しては、古くから燃焼機構に関する研究が行われており、膨大なデータが存在する⁽²³⁾⁻⁽³⁷⁾。例えば、レーザ加熱を用いた単一微粉炭粒子の燃焼過程に関する実験⁽³¹⁾、微粉炭粒子群の燃焼挙動の解明に関する実験⁽³³⁾などがある。

その他、多くの工場によく知られた危険事象である粉塵爆発および粉塵火炎を対象とした研究においても、粉体燃焼の解明に向けて多くの有意義な知見が得られている⁽³⁸⁾。

しかしながら、粉体は微粉炭を除いて、工業用のエネルギー源として利用されることは少なく、その粉体を構成している数百ミクロンの単一固体微粒子の基本的な燃焼特性解明を目的とする実験的研究はほとんど行われなかった。また、粉体燃焼は上述の噴霧燃焼と同様に現象が複雑で、そのうえ基礎実験が困難であることも、現象解明が進まない理由の一つである⁽³⁹⁾。

以上のような不均質燃焼を対象にした実験結果は、プラスチック粉末燃焼の燃焼機構に関する予備的知識を得る上では非常に有意義である。また、粉体燃焼の新規性、発展性および応用性を示唆するだけでなく、不均質燃焼に関する情報を与える可能性をも示すことに繋がると考えられる。

1.2 本論文各章の内容

本研究では、まず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探るために、その対象として窯業に着目し、PET 粉末を窯業用助燃料として使用した時の有効性を調べた。続いて、サーマル・リサイクルの可能性をより広げるために、その研究を通じて得られた情報あるいは示唆された研究の方向性に基づいて、PET 粉末を助燃料とする広範な汎用性を有する実用バーナの検討を行った。その場合、高温の窯業炉内において最終的に熱分解・ガス化し消失した PET 粒子は、低温の大気開放下においてバーナ単独で燃焼させた場合には、バーナによって形成された燃焼領域中で熱分解・ガス化しつくすことができず、その結果、大気中に飛散し多量の固形残留粒子が排出されることが問題点として明らかとなった。そこで、それら固形残留粒子の排出量低減に向けての基礎的知見を得るために、4つのサブテーマを設定した。その際、バーナ内に供給された PET 粒子をいかに効果的に熱分解・ガス化させるかといった点に的を絞り、その現象解明に関する研究を系統的に進めた。さらに、それぞれのサブテーマで得られた結果を総合的に検討し、一方で PET 粉末を助燃料とする実用バーナの開発する際、固形残留粒子の排出量低減を可能にする有用な提言を実験的に示し、他方では未燃率（PET 粉末供給量と固形残留粒子排出量との比）の数値予測を試みた。

本論文は9章で構成されている。以下に、各章の内容を示す。

第1章の内容

第1章では、本研究の背景および目的が述べられている。

第2章の内容

第2章では、既設炉へのレトロフィットも考慮して、市販の窯業炉用バーナに PET 粉末供給が可能のように改良を行い、その改良形窯業用バーナの開放燃焼時における特性を調べた^{(40), (41)}。つぎに、その改良形バーナをモデル窯業炉に設置して炉内運転を行い、窯業用助燃料としての適用可能な範囲を把握した。その際、PET 粉末の助燃率および質量メディアン直径を変化させたときの炉内における火炎挙動の可視化観察と排気ガス特性を調べた⁽⁴²⁾。そしてさらに、助燃率を30%と本実験における最大値に設定した場合の炉内温度場の均一性を確認するだけでなく、評価用試験片を用いた焼成試験も行い、PET 粉末供給の有無による白色度および曲げ強度

の比較を行った⁽⁴²⁾。以上から、窯業用助燃料としての有効性を検討した。

第3章の内容

第3章では、まず、PET粉末を助燃料とする広範な汎用性を有する実用バーナの検討を行う第一段階として未燃率増大に関係する諸要因を探ることとした。そのため、プロパン火炎のみのバーナ内部の燃焼ガス流動場のPIV計測、ならびにPET粉末供給時の燃焼ガスとPET粒子の流動状況およびPET粒子の形状変化のPTV計測を行った。得られた結果と未燃率の測定結果との関係から固形残留粒子の排出要因を調べ、PET粉末燃焼用のバーナに不可欠な要件を検討した⁽⁴³⁾、⁽⁴⁴⁾。なお、PET粉末の供給にあたっては、粒径分布との対応関係を明確にするため、粉末を分級して大中小の3種類に分割し、火炎概形と未燃率の測定を行った。

第4章の内容

第4章では、解析的に評価するための第一段階として、高温不活性雰囲気置かれた微小単一プラスチック粒子の加熱から熱分解・ガス化までの過程を固体加熱過程、融解過程、液体加熱過程、および熱分解・ガス化過程の4つの素過程に分割し、球対称一次元熱伝導解析を行った⁽⁴⁵⁾、⁽⁴⁶⁾。これにより、一方では実験による測定が困難なプラスチック樹脂微粒子の粒子内温度履歴の推測が可能となり、他方では、各素過程に要する所要時間および加熱開始から熱分解・ガス化までの累積時間などの解析的評価が可能となる。そして、ヌセルト数の粒子寿命に及ぼす影響を簡単に考察し、窯業用バーナ内の滞在時間の実測値と本解析結果の比較を行った。

第5章の内容

第5章では、環状バーナによって形成された高温酸化性領域に、PET粉末をプロパン・空気予混合気とともに供給し、その燃焼特性を調べた。はじめに、PET粉末無供給時の火炎の直接撮影、温度測定および酸素濃度計測を行い、PET粉末燃焼に最適な高温酸化性領域を把握した。つぎに、その領域中にPET粉末を供給し、供給量および質量メディアン直径を変化させた時の火炎形状の直接撮影、PET粉末燃焼に伴う酸素濃度消費量の把握およびPET粉末燃焼挙動の高速撮影を行い、PET粉末の燃焼特性を調べた。得られた結果から、PET粉末燃焼における高温酸化性領域の有効性を明らかにした⁽⁴⁷⁾、⁽⁴⁸⁾。最後に、環状バーナの作動条件をパラメータとし、高温酸化性領域の寸法と特性を変化させた時のPET粉末の未燃率特性の把握を行った⁽⁴⁹⁾。

第 6 章の内容

第 6 章では、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⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵²⁾。観察にあたっては、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⁽⁵¹⁾、これに透過・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 ビデオカメラを組み合わせた詳細な撮影法を導入した。

第 7 章の内容

第 7 章では、PET 粉末の分散度が未燃率に及ぼす影響を調べた⁽⁵³⁾。分散度に影響を及ぼす諸因子としては、粉末搬送管径、供給量、供給速度、平均粒径および燃焼流動場等が挙げられる。そこで本実験では、まず粉末搬送管径の相違のみによって分散度を変化させることが可能な基礎実験用バーナの設計・製作を行い、そのバーナの燃焼特性を調べた。続いて、そのバーナに PET 粉末を供給し PET 粉末燃焼特性を調べた。最後に、得られた結果から、分散度が未燃率に及ぼす影響を検討した。

第 8 章の内容

第 8 章では、第 4 章と第 6 章の微視的観点に立脚した研究結果と第 3 章、第 5 章および第 7 章の巨視的観点に立った研究結果を総合的に検討し、PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みた⁽⁵⁴⁾。まず、改めて単一球形 PET 微粒子の初期直径を変化させた時の急速加熱過程の可視化実験を光学顕微鏡と高速度 CCD ビデオカメラを組み合わせて行い、より詳細な微粒子挙動を把握した⁽⁵⁵⁾。続いて、得られた結果に基づき、一方では粒子形状に関して詳しく検討し、他方では球対称一次元熱伝導解析^{(45), (46)}で得られた解析値との比較・検討を行った。それらの検討結果を踏まえ、球形 PET 微粒子の急速加熱実験の画像計測結果に基づいて粒子挙動のモデル化を行い、PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みた。

第 9 章の内容

第 9 章は本論文の結論である。

以上のように、本研究では供給した PET 粉末をバーナ内で効果的に熱分解・ガス化させ、固形残留粒子の排出量を低減する際に必要な基礎的知見を得るために、加熱・融解・熱分解・ガ

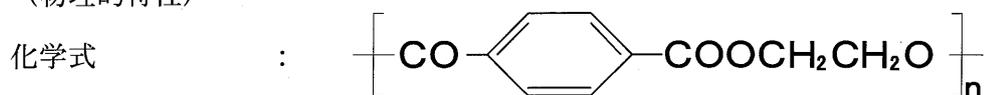
ス化といった現象に的を絞り、巨視的観点から微視的観点に至るまで実験的・解析的に研究を遂行した。そのため、各雰囲気温度条件下において熱分解・ガス化によって発生するガス成分分析とそのガス化ガスの燃焼反応に関しては、計測装置等を用いて詳細に検討するということをしていない。また、使用した PET 粉末に関しては助燃剤としての視点しか操っていない。

1.3 廃棄プラスチック樹脂の特性

本研究では、助燃料であるプラスチック樹脂として PET 樹脂および PE 樹脂を選定した。各プラスチック樹脂の物理的特性⁽⁵⁶⁾⁻⁽⁵⁹⁾および燃焼性状^{(6),(7)}を以下に示す。

ポリエチレンテレフタレート (PET: Polyethylene terephthalate)

(物理的特性)



外観	: 白色の固体
溶解性	: 通常の有機溶剤に不溶。フェノール, <i>m</i> -クレゾール, <i>o</i> -クロルフェノール, 濃硫酸, トリフルオロ酢酸に可溶。
融点	: 250 ~ 275 °C
密度	: 1380 kg/m ³
比熱	: 1.23 kJ/(kg·K)
重合度	: ボトル用の場合, 重合度は n = 120 ~ 170 になる。

(燃焼特性)

燃焼性	: やや困難
点火性	: やや困難
自燃性	: 有
臭気	: パラフィンの燃焼臭
分解温度	: 283 ~ 306 °C, 400 ~ 650 °C の 2 領域
主な熱分解生成物	: ベンゼン, トルエン, スチレン, テレフタル酸
引火点	: 398 °C
発火点	: 486 °C
低位発熱量	: 21.8 MJ/kg
標準生成熱	: 3.71 MJ/kg

ポリエチレン (PE: Polyethylene)

(物理的特性)

化学式 : $\left[\text{CH}_2\text{-CH}_2 \right]_n$

外観 : 白色の固体

溶解性 : 水, 酸, アルカリ, 溶剤などによく耐えるが, 高温の炭化水素および塩素化合物に溶解する.

融点 : 60 ~ 130 °C

密度 : 920 kg/m³

比熱 : 2.30 kJ / (kg·K)

(燃焼特性)

燃焼性 : 容易

点火性 : 直ちに点火

自燃性 : 有

臭気 : パラフィンの燃焼臭

分解温度 : 335 ~ 450 °C

主な熱分解生成物 : アセチレン, エチレン, プロパンの炭化水素系

引火点 : 340 ~ 350 °C

発火点 : 350 °C

低位発熱量 : 43.4 MJ/kg⁽⁵⁾

標準生成熱 : 1.87 MJ/kg

第1章の参考文献

- (1) プラ再資源化フロー図, (2003), (社)プラスチック処理促進協会.
<http://www2.pwmi.or.jp/flow/flame01.htm>
- (2) PET ボトルリサイクル年次報告書, (2004), (社)PET ボトルリサイクル推進協議会.
<http://www.petbottle-rec.gr.jp/nenji/2004/index.html>
- (3) プラスチック情報局, (2006), (社)プラスチック処理促進協会.
<http://www2.pwmi.or.jp/public/index.html>
- (4) LCA によるリサイクル手法の環境・資源インパクト評価, (2002),
(社)プラスチック処理促進協会.
<http://www2.pwmi.or.jp/pk/pk05/pkflm502.html>
- (5) 既設発電ボイラーを対象とした廃プラスチック燃料化基礎技術の調査研究報告書, (1993),
1-32, (社)プラスチック処理促進協会.
- (6) プラスチックのサーマルリサイクル技術基礎データ集, (1993), 27-59,
(社)プラスチック処理促進協会.
- (7) A. Williams, Combustion of Droplets of Liquid Fuels: A Review, *Combustion and Flame* **21**,
(1973), 1-31.
- (8) 角田敏一・廣安博之・大矢秀夫, 高温高圧の気体中における燃料液滴の着火おくれに関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), **41**-348, (1975), 2475-2485.
- (9) 梅村章, 超臨界蒸発の基礎理論, 日本機械学会論文集 (B 編), **52**-478, (1986), 2437-2443.
- (10) K. Annamalai and W. Ryan, Interactive Processes in Gasification and Combustion. Part I: Liquid Drop Arrays and Clouds, *Progress in Energy and Combustion Science*, **18**, (1992), 221-295.
- (11) N. Roth, A. Karl, K. Anders and A. Frohn, Flame Propagation in Planar Droplet Arrays and Interaction Phenomena between Neighboring Droplet Streams, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 1697-1703.
- (12) 三上真人・八木孝・小島直哉, 混合燃料液滴の燃焼における微小爆発の発生について, 日本機械学会論文集 (B 編), **64**-624, (1998), 2690-2695.
- (13) 角田敏一・佐藤公美・瀬川大資・佐藤順一・丸谷洋一, 航空機を利用した超臨界雰囲気中における燃料液滴燃焼現象の解明, 日本機械学会論文集 (B 編), **65**-631, (1999), 1122-1127.

- (14) G. M. Faeth, Spray Combustion Phenomena, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 1593-1612.
- (15) 水谷幸夫・若林卓, 噴霧燃焼, 微粒化, 第6巻16号, (1997), 16-28.
- (16) H. H. Chiu and T. M. Liu, Group Combustion of Liquid Droplets, *Combustion Science and Technology*, **17**, (1977), 127-142.
- (17) H. H. Chiu, H. Y. Kim and E. J. Croke, Internal Group Combustion of Liquid Droplets, *Proceedings of the 19th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1982), 971-980.
- (18) 赤松史光・中部主敬・水谷幸夫・香月正司, 予混合噴霧流中で燃焼する油滴群の光学的計測, 日本機械学会論文集(B編), **60-577**, (1994), 3172-3178.
- (19) 中部主敬・赤松史光・水谷幸夫・香月正司・井本泰造, 円柱後流における燃料噴霧の群燃焼挙動, 日本機械学会論文集(B編), **61-581**, (1995), 317-324.
- (20) 赤松史光・水谷幸夫・香月正司・津島将司・趙庸大, 予混合噴霧流の油滴群燃焼挙動と群燃焼数, 日本機械学会論文集(B編), **62-596**, (1996), 1622-1628.
- (21) F. Akamatu, Y. Mizutani, M. Katsuki, S. Tsushima and Y. D. Cho, Measurement of the Local Group Combustion Number of Droplet Clusters in a Premixed Spray Stream, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 1723-1729.
- (22) S. Tsushima, H. Saitoh, F. Akamatu and M. Katsuki, Observation of Combustion Characteristics of Droplet Clusters in a Premixed-Spray Flame by Simultaneous, Monitoring of Planar Spray images and Local Chemiluminescence, *Proceedings of the 27th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1998), 1967-1974.
- (23) J. B. Howard and R. H. Essenhigh, Mechanism of Solid-Partical Combustion with Simultaneous Gas-Phase Volatiles Combustion, *Proceedings of the 11th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1966), 399-408.
- (24) D. W. Pershing and J. O. L. Wendt, Pulverized Coal Combustion: The Influence of Flame Temperature and Coal Composition on Thermal and Fuel NO_x, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1977), 389-399.
- (25) H. Kobayashi, J. B. Howard and A. F. Sarofim, Coal Devolatilization at High Temperature, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1977), 411-425.

- (26) L. D. Timothy, A. F. Sarofim and J. M. Beer, Characteristics of Single Particle Coal Combustion, *Proceedings of the 19th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1982), 1123-1130.
- (27) L. D. Smoot, P. O. Hedman and P. J. Smith, Pulverized-Coal Combustion Research at Brigham Young University, *Progress in Energy and Combustion Science*, **10**, (1984), 359-441.
- (28) 岡崎健・宍戸秀夫・西川隆・大竹一友, 一次元炉における微粒炭の燃焼過程と NO_x 生成特性, 日本機械学会論文集 (B 編), **51**-465, (1985), 1549-1556.
- (29) T. F. Wall, *Principles of Combustion Engineering for Boilers*, (1987), 197-335, Academic Press.
- (31) D. Zhang, Laser-Induced Ignition of Pulverized Fuel Particles, *Combustion and Flame* **90**, (1992), 134-142.
- (32) L. H. Sorensen, O. Biede and R. E. Peck, An Experimental Study of High-Temperature, Oxidative Pulverized Coal Devolatilization, *Proceedings of the 25th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1994), 475-483.
- (33) M. Taniguchi, H. Kobayashi and S. Azuhara, Laser Ignition and Flame Propagation of Pulverized Coal Dust Clouds, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 3189-3195.
- (34) A. Williams, M. Pourkashanian and J. M. Jones, *Combustion and Gasification of Coal*, (1999), 86-122, Taylor & Francis.
- (35) A. Williams, M. Pourkashanian and J. M. Jones, The Combustion of Coal and Some Other Solid Fuels, *Proceedings of the 28th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (2000), 2141-2162.
- (36) J. Sun and R. H. Hurt, Mechanisms of Extinction and Near-Extinction in Pulverized Solid Fuel Combustion, *Proceedings of the 28th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (2000), 2205-2213.
- (37) C. Sheng and J. L. T. Azevedo, Modeling the Evolution of Particle Morphology During Coal Devolatilization, *Proceedings of the 28th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (2000), 2225-2232.
- (38) (社) 日本化学会, 粉じんの爆発と火災, (1981), 133-162.
- (39) 新岡嵩・河野通方・佐藤順一, 燃焼現象の基礎, (2001), 221, (株) オーム社.
- (40) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics

- of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (41) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), *日本機械学会論文集 (B 編)*, **71-701**, (2005), 357-364.
- (42) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), *日本機械学会論文集 (B 編)*, **71-711**, (2005), 2792-2799.
- (43) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の画像計測), *日本機械学会論文集 (B 編)*, 掲載決定, 論文 No. 05-0342.
- (44) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*, (2005), CD-ROM: Paper No. 074.
- (45) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称一次元解析), *日本機械学会論文集 (B 編)*, **71-708**, (2005), 2154-2161.
- (46) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2005), CD-ROM: Paper No. KD.08.
- (47) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere), *JSME International Journal (Series B)*, **48-1**, (2005), 83-91.
- (48) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, Burning Processes of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), 1531-1538.
- (49) 寺本啓祐・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 環状火炎バーナによって形成された高温酸化性雰囲気における PET 樹脂粉末の燃焼特性, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No. 05-13, (2005), 185-189.

- (50) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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), 日本機械学会論文集(B編), 校閲中, 論文 No. 05-0698.
- (51) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, High-Speed Direct Microscopic Observations of Ignition and Burning Processes of a Micro Plastic-Resin Particle Under Stationary and Abrupt Heating, *Proceedings of the 1st International Symposium on Micro and Nano Technology*, (2004), CD-ROM: Paper No. XXXIV-C-04.
- (52) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Appearances of Multiple Micro Explosions, Micro Jets and Micro Diffusion Flames around an Abrupt Heated Micro PET-Resin Particle, *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2005), 209-212.
- (53) 加藤雄貴・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の低減に関する実験的アプローチ, 第15回環境工学シンポジウム2005 講演論文集 No. 05-13, (2005), 181-184.
- (54) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の数値予測の試み, 中国四国支部第43期総会・講演会講演論文集 No. 055-1, (2005), 215-216.
- (55) 加藤慎也・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の高速顕微鏡観察, 2004年度年次大会講演論文集 Vol.3 No.04-1, (2004), 51-52.
- (56) 化学大辞典編集委員会, 化学大事典 8, (1962), 744-745, (株)共立出版.
- (57) 高分子大辞典, (1994), 1015, 丸善.
- (58) 伝熱工学資料, (1986), 321, 日本機械学会.
- (59) プラスチックの熱特性データベース; <http://www.aist.go.jp/RIODB/ptdb/entarupi.htm>

第 2 章 廃棄 PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性

2.1 はじめに

中部圏で盛んである窯業では、高温焼成工程において LP ガスを単なる熱源として多量に消費している。そのため、石油系資源の有効利用、省エネルギー化および低コスト化を考慮した場合、LP ガスの使用量削減は重要かつ解決すべき問題であり、PET 粉末を窯業用助燃料として使用し、サーマル・リサイクルを行うことは非常に有効である。

しかしながら窯業炉の燃焼では、焼成工程時の炉内温度調整、還元雰囲気の設定（窯業では焼成の最終段階で意図的に還元雰囲気にすることにより、陶器に含まれている鉄分等の不純物を還元し、白色の美しい表面仕上がりを得る手法が一般的に採用される。）など、いくつかの点でボイラー燃焼とは異なるため、窯業用助燃料としての廃棄 PET 樹脂の使用には検討が必要とされる。また技術面から、既設炉へのレトロフィット技術等も要求されている。

そこで本章では、はじめに上記のレトロフィットを考慮して、市販の窯業炉用バーナに PET 粉末供給が可能なように改良を行い、その改良形窯業用バーナの開放燃焼時における特性を調べた^{(1), (2)}。つぎに、その改良形バーナをモデル窯業炉に設置して炉内運転を行い、窯業用助燃料としての適用可能な範囲を把握した⁽³⁾。その際、PET 粉末の助燃率および質量メディアン直径を変化させたときの炉内における火炎挙動の可視化観察と排気ガス特性を調べた。そしてさらに、助燃率を 30 % と本実験における最大値に設定した場合の炉内温度場の均一性を確認するだけでなく、評価用試験片を用いた焼成試験も行い、PET 粉末供給の有無による白色度および曲げ強度の比較を行った。以上から、窯業用助燃料としての有効性を検討した。

なお、本章の内容は、文献 (1) において公表済であり、文献 (2) および文献 (3) に掲載済である。

2.2 記号

d	: PET 粒子の直径	[μm]
d_m	: 質量メディアン直径	[μm]
ΔH_{PET}	: PET 樹脂の低位発熱量	[MJ/kg]
$\Delta H_{\text{C}_3\text{H}_8}$: プロパンの低位発熱量	[MJ/m ³]
H_{PET}	: PET 粉末の熱発生率 ($= \Delta H_{\text{PET}} \times m_{\text{PET}}$)	[kW]
H_t	: 総熱発生率 ($= \Delta H_{\text{C}_3\text{H}_8} \times Q_{\text{f,m}} + \Delta H_{\text{PET}} \times m_{\text{PET}}$)	[kW]
N	: 総個数	[count]
n_i	: X_i の粒子数	[count]
m_i	: 単位質量の PET 粉末に含まれる各区間の粒子質量	[kg]
m_{PET}	: PET 粉末供給量	[g/min]
$Q_{\text{a,m}}$: プロパン用空気流量	[l/min]
$Q_{\text{f,m}}$: プロパン流量	[l/min]
$Q_{\text{a,PET}}$: PET 粉末搬送空気流量	[l/min]
$Q_{\text{a,t}}$: 総空気流量 $= Q_{\text{a,m}} + Q_{\text{a,PET}}$	[l/min]
q_0	: 球状粒子径 X_i の個数割合	[%]
q_3	: 球状粒子径 X_i の質量割合	[%]
X_i	: 各区間における球状粒子の平均径	[μm]
T	: 炉内温度	[$^{\circ}\text{C}$]
T_{ex}	: 排気ガス温度	[$^{\circ}\text{C}$]
T_s	: 炉内における空間平均温度	[$^{\circ}\text{C}$]
α	: PET 粉末の助燃率 ($= H_{\text{PET}}/H_t$)	[%]
ϕ	: 総合当量比	[-]
ρ_{PET}	: PET 樹脂の密度	[kg/m ³]

2.3 実験装置および方法

ここでは、使用したバーナ、PET 粉末性状、定量供給可能な粉末供給装置および実験方法について詳細に述べる。

2.3.1 実験装置システム

実験装置の系統図を図 2.1 に示す。実験装置は、バーナ、主燃料用空気（以後、主空気と略記）供給系、主燃料供給系、PET 粉末供給系、モデル窯業炉および各種計測装置から成る。図 2.1 に示すように、主空気の供給源としてブロワ（富士電機、VFC408AN、最大静圧：4.90 kPa、最大吐出流量：1950 ℓ/min）を採用した。主空気流量 $Q_{a,m}$ はスライダック（山菱電機、S3P-240-30、入力電圧：AC200V、出力電圧：0～240 V）によって調節される。また、 $Q_{a,m}$ はオリフィスマータ（ナリタテクノ、OM-3/4、使用範囲：5～300 mmH₂O）を用い、水マノメータで指示された差圧値を基に算出される。主燃料には市販の家庭用 LPG（プロパン純度：96.4 %、低位発熱量（25 °C、1 atm）：46.35 MJ/kg⁽⁴⁾）を用いた。プロパン流量 $Q_{f,m}$ はオリフィスマータ（ナリタテクノ、OM-1/2、使用範囲：5～300 mmH₂O）を用い、アナログ圧力変換器（豊田工機、AA2460、測定レンジ：500 mmH₂O）によって指示された差圧値から算出される。一方、助燃料には PET 粉末を用いた。なお PET 粉末の特性に関しては、次項で述べる。PET 搬送用空気の供給源としてブロワ（富士電機、VFC204P、最大静圧：100 mmH₂O、最大吐出流量：840 ℓ/min）を採用した。PET 搬送空気流量 $Q_{a,PET}$ はスライダック（東京理工社、入力電圧：AC100V、出力電圧：0～130 V）によって調節される。また、 $Q_{a,PET}$ は層流形空気流量計（司測研、LFE-100LM、流量レンジ：100 ℓ/min）を用い、アナログメータ（豊田工機、AA2460、測定レンジ：100 mmH₂O）で指示された差圧値を基に算出される。

2.3.2 PET 粉末特性

助燃料として用いた廃棄 PET 樹脂粉末の低位発熱量は $\Delta H_{PET} = 21.8 \text{ MJ/kg}^{(5)}$ 、密度は $\rho_{PET} = 1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3^{(6)}$ である。図 2.2 に質量メディアン直径 d_m が異なる 3 種類の PET 粉末の光学顕微鏡写真と粒径分布のヒストグラムを示す。図 2.2 (a)、(b) および図 2.2 (c) はそれぞれ $d_m = 89.7$ 、145 μm および 185 μm の場合である。PET 粉末が 30～400 μm の範囲に広く分散し、雑多な形状・寸法の粒子から成ること、 d_m の値が大きくなるにつれて粗大な粒子を多く含むことが知れる。

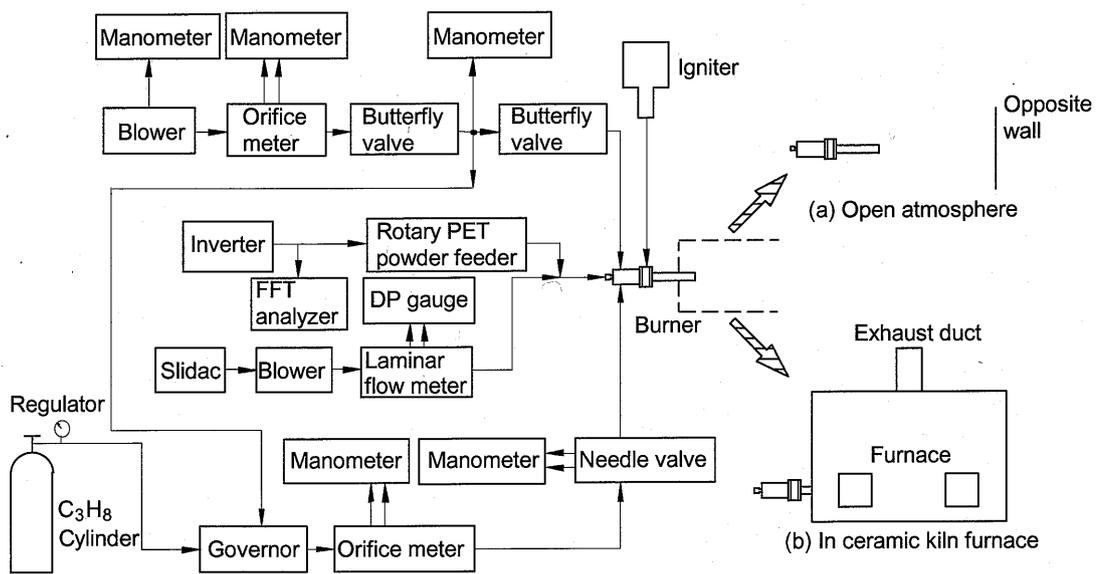
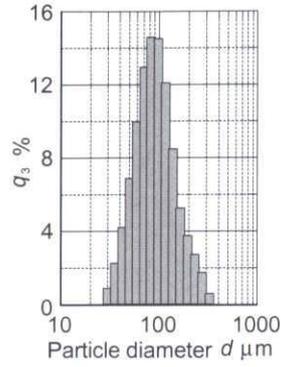
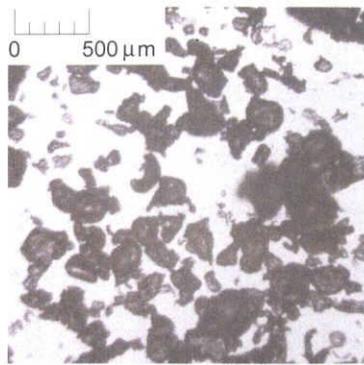
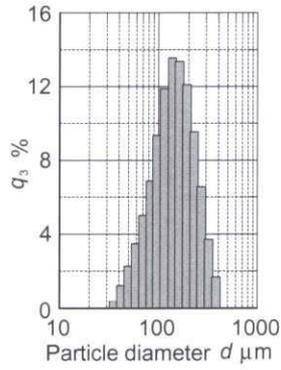
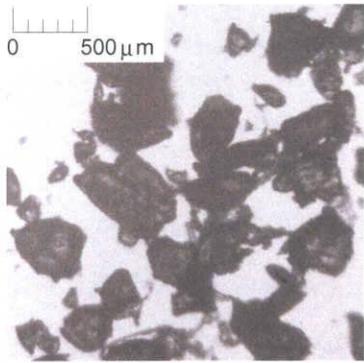


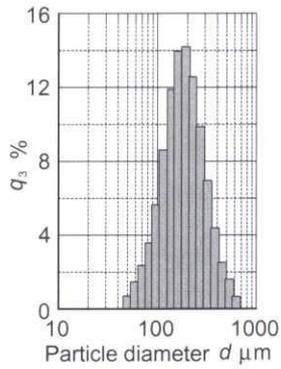
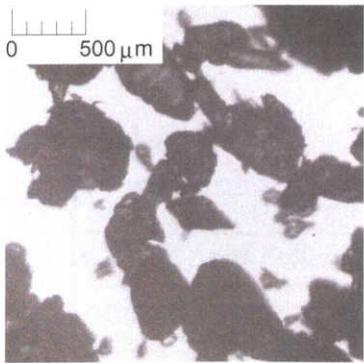
Fig. 2.1 Schematic diagram of the experimental apparatus used



(a) $d_m = 89.7 \mu\text{m}$



(b) $d_m = 145 \mu\text{m}$



(c) $d_m = 185 \mu\text{m}$

Fig. 2.2 Micrographs and histograms of PET-powder

2.3.3 粉体搬送装置

本実験で使用したロータリフィーダ方式の粉末供給装置⁽⁷⁾の概略を図2.3に示す。装置は、攪拌部およびロータ部から構成されている。図中の右下にはロータ部の詳細図が示されている。図2.2を見ると、ロータ部において粉末を輸送する複数の溝をもつロータ（図2.3中の詳細図）をインバータ（EMANY, SE-110）によって回転数制御されたインダクションモータ（オムロン、入力電圧：AC 24 V、周波数：60 Hz、回転数：49 rpm）を用いて回転させることにより、PET粉末は空気輸送管内に供給される。このとき、ロータ溝へのPET粉末の固着防止のため空気を吹き付ける対策を施した。また、ホッパの排出部のブリッジ防止対策として、ホッパ内のPET粉末をモータにより攪拌した。輸送管内に供給されたPET粉末は、PET搬送空気流量 $Q_{a,PET}$ によってバーナ内に供給される。なお、PET粉末供給量 m_{PET} はインバータによってモータの周波数を制御することで調節される。また、周波数の値はFFTアナライザ（小野測器、CF-300）に出力される。

2.3.4 総合当量比 ϕ および助燃率 α の定義

本実験では、プロパンおよびPET粉末の2種類の燃料を用いる。そこで、総合当量比 ϕ をプロパン流量 $Q_{f,m}$ およびPET粉末供給量 m_{PET} とそれらの理論空気量に対する総空気流量 $Q_{a,t}$ （主空気流量 $Q_{a,m}$ とPET搬送空気量 $Q_{a,PET}$ の和）に基づき、次式で定義する。

$$\phi = \frac{23.8 \times Q_{f,m} + 5.56 \times m_{PET}}{Q_{a,m} + Q_{a,PET}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

なお、PET樹脂の理論空気量の算出に際しては、化学式を $(C_{10}H_8O_4)_n$ とした。

また、PET粉末供給量を決定するために、理論上、完全燃焼したと仮定したときの総熱発生率 H_t に対するPET粉末の熱発生率 H_{PET} の割合を助燃率 α と定義する。以下にその定義式を示す。

$$\alpha = \frac{H_{PET}}{H_t} = \frac{\Delta H_{PET} \times m_{PET}}{\Delta H_{C_3H_8} \times Q_{f,m} + \Delta H_{PET} \times m_{PET}} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

表 2.1 に、 $H_t = 11.6 \text{ kW}$ および $\phi = 0.8$ とした場合の各 α の設定に必要な $Q_{f,m}$ 、 $Q_{a,m}$ 、 $Q_{a,PET}$ および m_{PET} の値を示す。

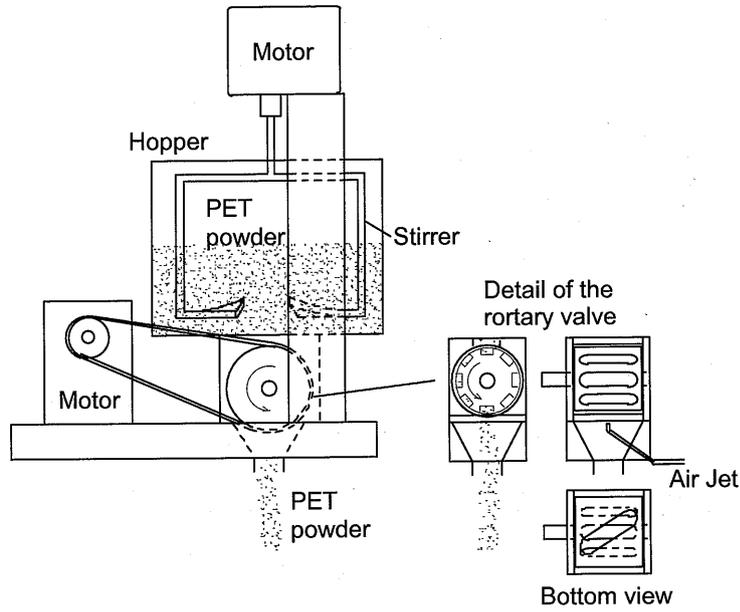


Fig. 2.3 Schematic diagram of the rotary type PET powder feeder proposed

Table 2.1 Experimental conditions ($H_t = 11.6 \text{ kW}$, $\phi = 0.8$)

$\alpha\%$	$Q_{f,m} \text{ l/min}$	$Q_{a,m} \text{ l/min}$	$Q_{a,PET} \text{ l/min}$	$m_{PET} \text{ g/min}$
0	8.3	233	11.7	0
5	7.9	232		1.6
15	7.0	229		4.8
30	5.8	222	14.7	9.6

2.3.5 バーナの選択および改良

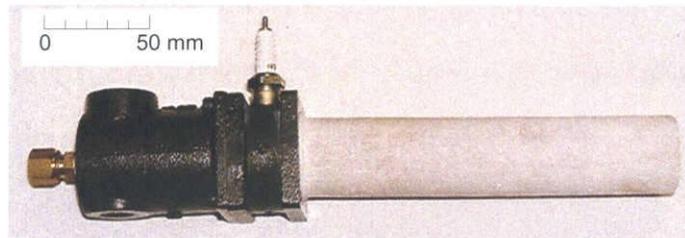
本実験では、窯業用バーナの中でも非常に幅広く用いられている市販のLPG用窯業用ハイジェットバーナ（成田製陶所：HJ-1.5U，標準熱入力：17.4 kW）を用いた。このバーナは、段階的混合燃焼^{(8),(9)}を保炎方式に用いており、広い空気比範囲で燃焼させることが可能である。また、高速燃焼ガス噴流の炉内対流によって均一な空間炉内温度場を形成させることが可能な特長をもつ。なお、バーナ内で粉末を燃焼させることを考慮した場合、高速噴流であるため火炎領域における粒子の滞在時間は短く不利であるが、既成炉へのレトロフィット性を重視して、このバーナ形式を選択した。改良前および改良後の窯業用バーナの外観写真を、それぞれ図 2.4 (a) および図 2.4 (b) に示す。本実験では、火炎の直接撮影が可能ないように、既存のセラミックス製バーナタイルを石英ガラス管（内径：28 mm，長さ：220 mm）に置換したものをを用いた。

PET 粉末を燃料として効率的に燃焼させる手段として、あらかじめ微粉末に粉碎して二次空気あるいは混合気とともに燃焼器内に供給する方法が有効である。この場合、プラスチック樹脂の融点が低いので、バーナ上流部での熔融樹脂の壁面への付着を防ぎ、安定して連続的な樹脂粉末の供給を実現する必要がある。そこで本実験では、樹脂粉末を室温空気で搬送することとし、高温燃焼領域への直接投入を可能にするための改良を施した。改良バーナの混合部の詳細図を図 2.5 に示す。図 2.5 (a) に示すように、改良前の保炎器の場合には、保炎器内部の高温領域に樹脂粉末が供給されるため、保炎器壁面への樹脂溶着が避けられない。それに対して図 2.5 (b) の改良保炎器では、保炎器を貫通するようにノズル管が配置されているため、保炎器下流の主燃焼領域に樹脂粉末が直接供給される。

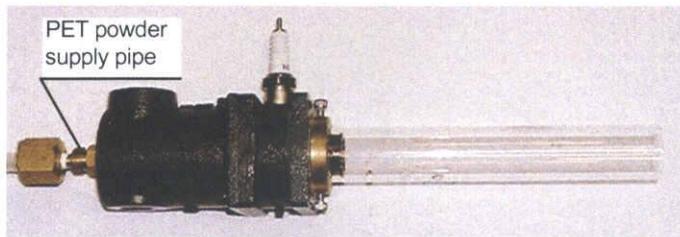
なお、ノズル管下流端の最適位置については PET 樹脂の付着を考慮する必要があるので、保炎器への付着状況の結果とともに示す。

2.3.6 モデル窯業炉

本実験で用いたモデル窯業炉の外観と内観図をそれぞれ図 2.6 (a) および図 2.6 (b) に示す。形状は、幅 700 mm，高さ 400 mm，奥行き 400 mm，容積 0.112 m³ の直方体で、セラミックファイバーボード（イソライト工業，厚さ：100 mm，耐熱温度：1400 °C）で構築されている。バーナの取り付け位置の決定に関しては、予備実験による空間炉内温度分布の結果⁽¹⁰⁾と高速燃焼ガス噴流の炉内対流を考慮して、4分割された側面（高さ 400 mm × 奥行き 400 mm の面）の第 3 象限の中心に設置し、バーナ先端を炉内壁面に一致させた。なお、排気ガスの排出口（直径：28 mm）が炉上面の中央に設置されている。



(a) An original commercial LPG-fueled ceramic burner



(b) The improved twin-fueled ceramic burner

Fig. 2.4 Appearances of the improved twin-fueled ceramic burner

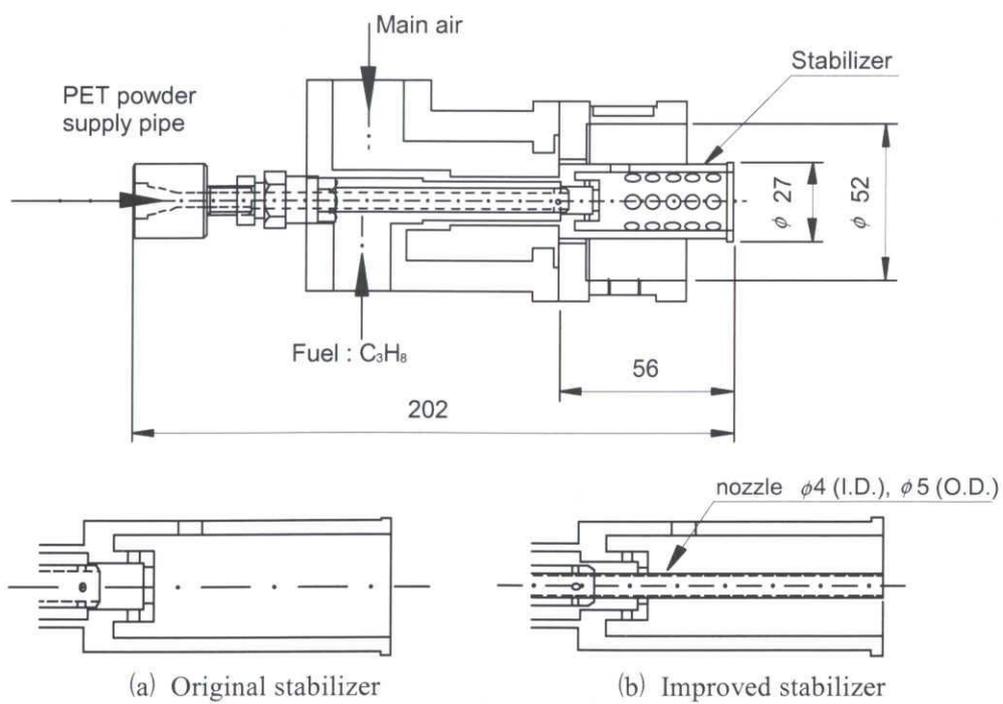
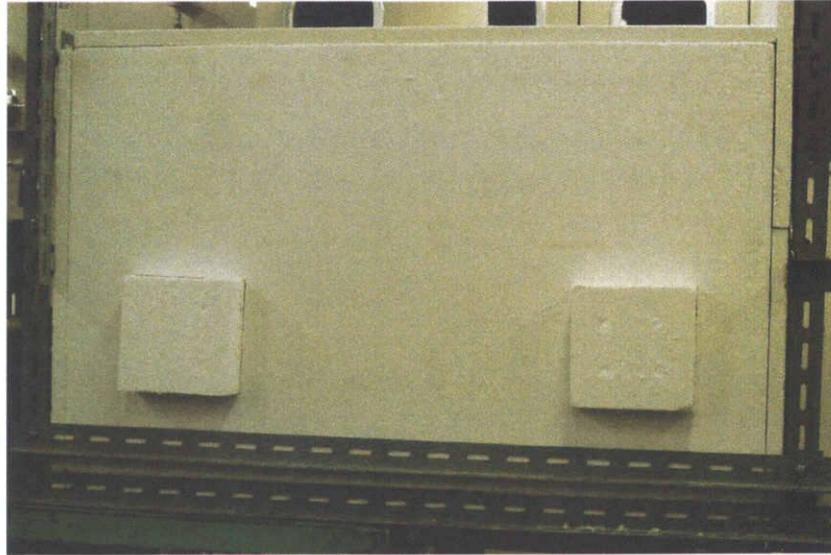
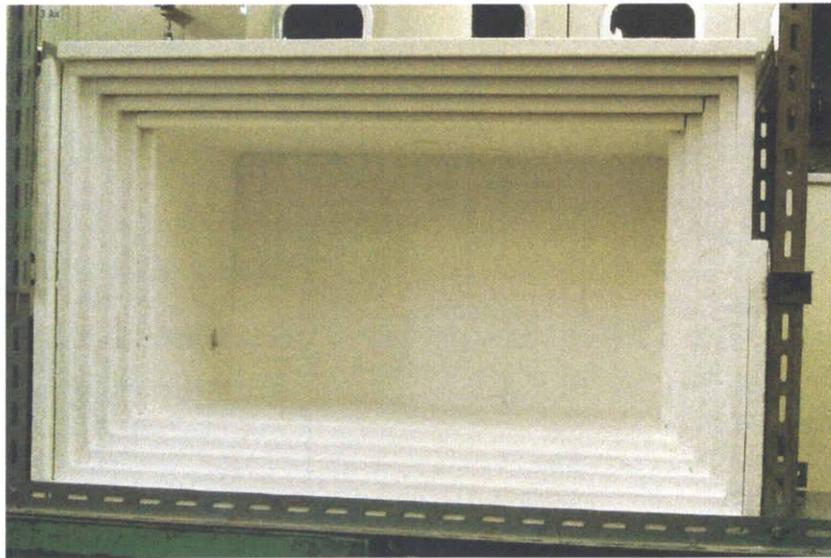


Fig. 2.5 Detailed construction and dimensions of the burner



(a) Outside-view



(b) Inside-view

Fig. 2.6 Appearances of the model ceramic furnace used

2.3.7 白色度と曲げ強度の評価

本実験では、釉薬を施し焼成試験を行った評価用試験片を用い、PET 粉末を供給した場合と供給しない場合の白色度および曲げ強度の比較^{(3),(15)}を行った。評価用試験片の白色度測定には、三次元分光変角色彩計（日本電色工業：GC-Σ90）を用いた。一方、強度測定には電子式万能試験機（米倉製作所：CATY-200BL）を用い、クロスヘッド移動速度を 0.5 mm/s、支点間距離を 50 mm に設定し行った 3 点曲げ試験を行った。評価にあたっては、各焼成条件に対して 6 個ずつ測定を行い、その平均値を採用した。なお試験方法は、食器用磁器の曲げ強さ評価方法（日本セラミックス協会規格：JCRS 203-1996）に準拠した。

2.3.8 実験手順および方法

本実験のバーナ作動手順を以下に示す。はじめに、目標総熱発生率 H_t および目標総合当量比 ϕ に基づいて、プロパン流量 $Q_{f,m}$ 、主空気流量 $Q_{a,m}$ および PET 搬送空気流量 $Q_{a,PET}$ を決定し、プロパンのみの火炎（主火炎）を形成させる。

ここで、PET 粉末の効果的な燃焼を考慮した場合、できる限り PET 粒子の高温場滞在時間を長くし、熱分解・ガス化するまでの過程を促進する必要がある。そこで、PET 粉末を搬送する流量 $Q_{a,PET}$ を助燃率 α から算出された PET 粉末 m_{PET} を搬送するのに必要な最低流量として、 $\alpha = 5$ および 15 % の時には $Q_{a,PET} = 11.7 \text{ l/min}$ に、 $\alpha = 30 \%$ の時は $Q_{a,PET} = 14.7 \text{ l/min}$ に設定した。これによって、 $Q_{a,m}$ は総空気流量 $Q_{a,t}$ から $Q_{a,PET}$ を差し引いた流量として定義される。なお、PET 粉末を供給しない予備実験において、PET 粉末搬送管入口部で主火炎用に供給された混合気の管内への逆流に伴う火炎形成が観察されたため、PET 粉末を供給しない場合でも PET 搬送空気を供給して実験を行った。

その後、形成された主火炎に助燃率 α から算出した PET 粉末 m_{PET} を供給し燃焼させる。このとき、 H_t および ϕ が変化しないように、 $Q_{f,m}$ 、 $Q_{a,m}$ および $Q_{a,PET}$ を調整する。

本章では、基準作動条件として総熱発生率を $H_t = 11.6 \text{ kW}$ 、総合当量比を工業炉の基準値である $\phi = 0.8^{(11)}$ とし、助燃率を $\alpha = 15 \%$ と設定した。なお、PET 粉末を供給しないときのプロパン流量は $Q_{f,m} = 8.3 \text{ l/min}$ ($H_t = 11.6 \text{ kW}$) に、助燃率を $\alpha = 15 \%$ に設定した場合は、プロパン流量を $Q_{f,m} = 7.0 \text{ l/min}$ 、PET 粉末を $m_{PET} = 4.8 \text{ g/min}$ (熱発生率： $H_{PET} = 1.7 \text{ kW}$) に設定される。

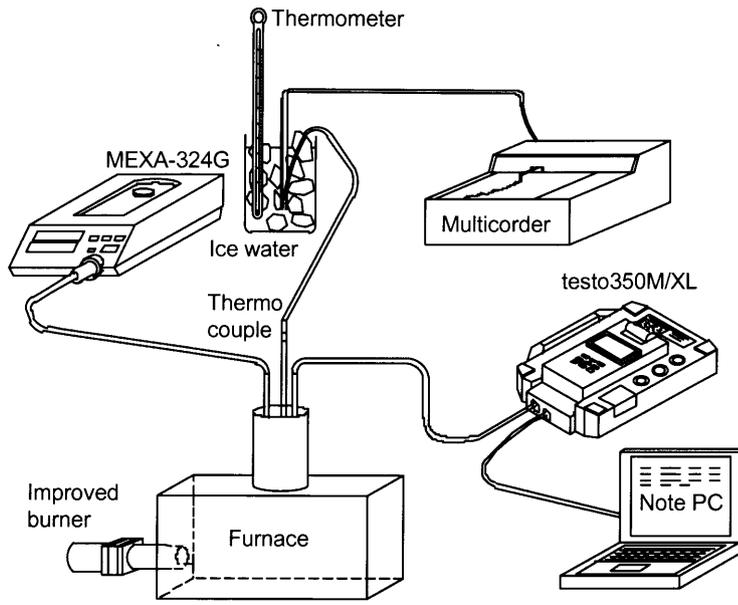
本実験では、まず改良形窯業用バーナの開放燃焼特性を調査し、改良の必要性和効果を検討した。火炎形状の撮影にはデジタルカメラを用いた。つぎに、改良形窯業用バーナを炉に設置した場合の PET 粉末の炉内燃焼特性を調べた。はじめに、質量メディアン直径 $d_m = 145 \text{ }\mu\text{m}$ の

PET粉末を用い、助燃率を $\alpha = 5, 15\%$ および 30% と変化させたときのPET粉末の炉内燃焼特性を、炉内ビデオ撮影および排気成分計測を行うことにより調べた。図2.7(a)に排気ガス分析装置を示す。排気ガス中の $\text{NO}_x, \text{O}_2, \text{CO}$ 成分の計測には、排ガス分析計(TESTO: testo350M/XL)を用いた。なお窯業炉に要求される高CO濃度域の測定には、堀場製作所のMEXA-324Gを用いた。排ガス計測位置に関しては、外気流入の影響をなくすために、図2.7(b)に示すように煙突出口から下へ350 mmの断面中央で行った。

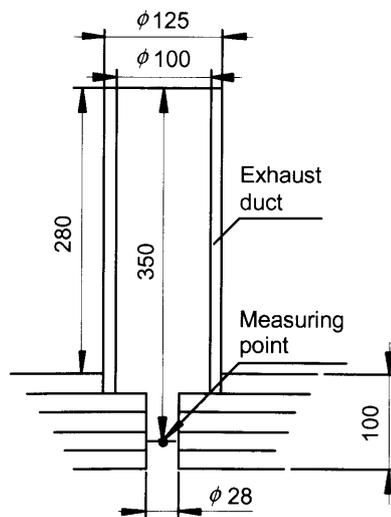
引き続き、本実験の設定条件において最大助燃率である $\alpha = 30\%$ の時の空間温度分布を把握し、焼成試験時に要求される炉内温度の均一性を確認した。図2.8(a)に炉内温度測定装置を、図2.8(b)にR型熱電対の詳細図を示す。図2.8(c)に示した上中下の3測定断面において、各断面あたり $9 \times 5 = 45$ の測定点(図中の●印)でR型熱電対(素線径: 0.5 mm)を用いて時間平均温度を測定し、それぞれの断面温度分布を得た。

つぎに、PET粉末の質量メディアン直径 d_m の影響を調べるために、助燃率を $\alpha = 15\%$ に固定し、 d_m を変化させたときのPET粉末の炉内燃焼特性を把握した。PET粉末の燃焼挙動および排気ガス計測には、前述と同様の測定機器を用いた。

最後に、モデル窯業炉でPET粉末を供給しない場合($\alpha = 0\%$)と供給した場合($\alpha = 15\%$)の2条件における評価用試験片の焼成試験を行い、焼成終了後の試験片の白色度と曲げ強度の測定を行った。その結果に基づいてPET粉末の窯業用助燃料としての有効性を検討した。



(a) Experimental apparatus of exhaust gas analyses



(b) Measuring point of the exhaust gas analyses

Fig. 2.7 Schematic diagram of exhaust gas analyses

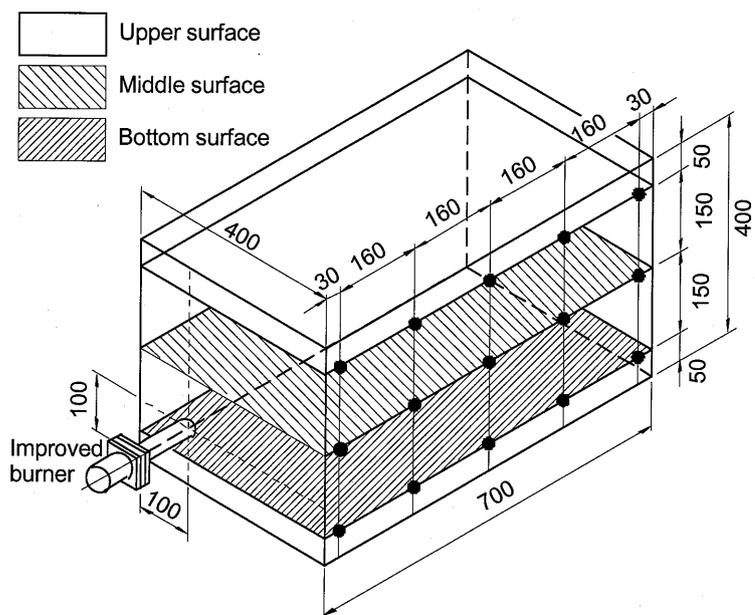
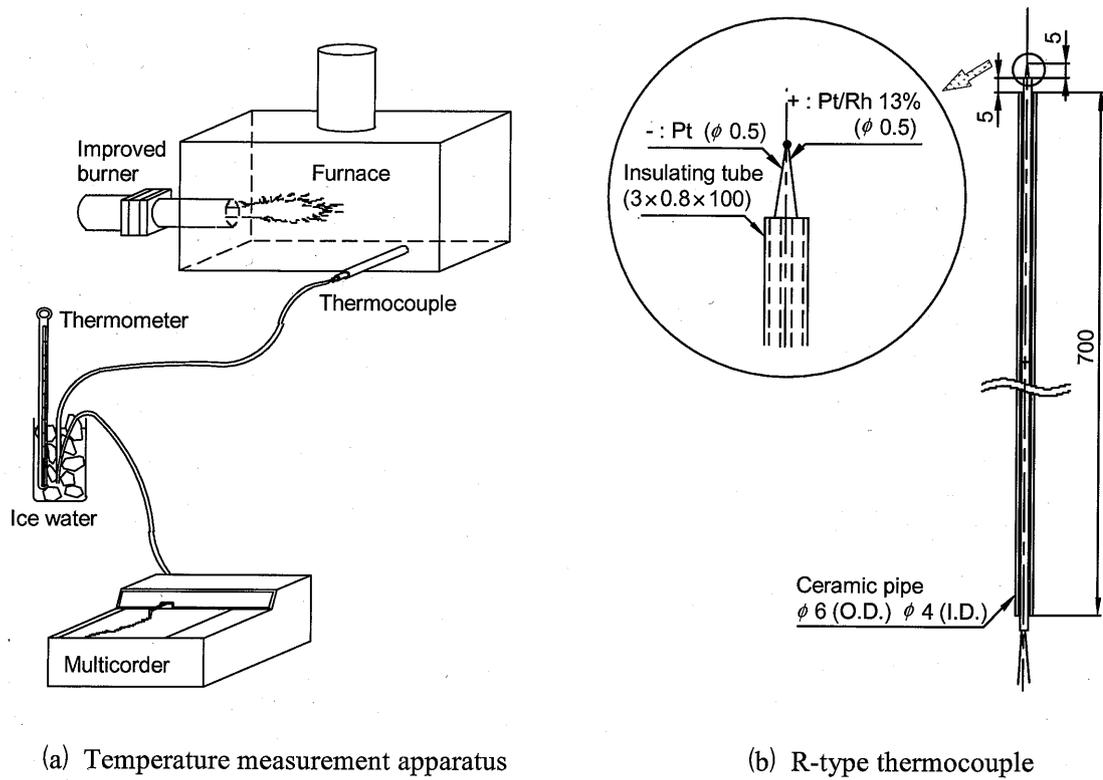


Fig. 2.8 Schematic diagram of the spatial temperature field measurements

2・4 実験結果および考察

2・4・1 改良形窯業用バーナの開放燃焼特性

まず、改良形窯業用バーナの開放燃焼特性への PET 搬送空気とノズル管設置の影響を調べた。このとき、PET 搬送空気の供給によって火炎形態が変化し、火炎長が著しく増加するため、前述の基準条件とは異なる小燃料流量（プロパン流量： $Q_{f,m} = 4.6 \text{ l/min}$ ，総合当量比： $\phi = 0.7$ ，総熱発生率： $H_t = 6.5 \text{ kW}$ ）で実験を行った。

(1) ノズル管設置による保炎特性の改善

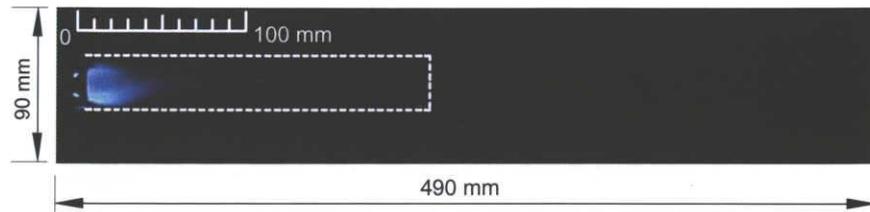
図 2.9 に火炎の直接写真を示す。ここで、図 2.9 (a) および図 2.9 (b) はノズル管が設置されていない場合であり、図 2.9 (c) および図 2.9 (d) はノズル管が設置されている場合である。PET 粉末の供給は行っていない。図 2.9 (a) によれば、ノズル管が設置されていない場合でも、PET 搬送空気が供給されなければ、良好で短い火炎形態である乱流予混合火炎となり、ガラス管出口から高速噴流燃焼ガスが噴出する。しかし図 2.9 (b) から、これに PET 搬送空気が供給されると保炎器部での保炎が困難となり、バーナ出口で保炎される乱流予混合火炎となる。これは、本来保炎器内に形成される再循環領域⁽⁸⁾が PET 搬送空気の流れによって乱され形成されないからであると考えられる。このような火炎形態の変化は、炉内温度の均一性が要求される窯業用バーナとして不適切であると考えられる。

一方、図 2.9 (c) および図 2.9 (d) によれば、ノズル管を設置することによって火炎長さが長くなっているが、PET 搬送空気の有無によらず保炎器での火炎安定化が可能となる。この理由として、保炎器出口部の断面積の減少に伴う流速の増加と、それに伴う再循環領域長さの増大が挙げられる。また、PET 搬送空気流の有無による火炎形状の変化がほとんど無く、常に窯業用バーナとして適切な乱流予混合火炎形態を保った状態で、高速噴流燃焼ガスを噴出していることがわかる。

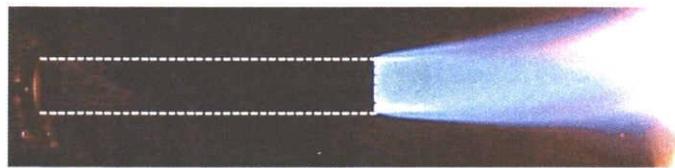
以上の結果から、ノズル管設置というわずかな改良によってハイジェットバーナ固有の要件を満たす乱流予混合火炎の形態を保ったまま、PET 搬送空気を供給することが可能となった。

(2) PET 粉末の燃焼特性

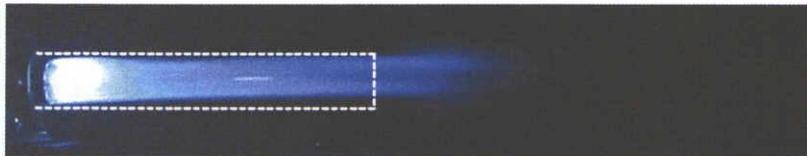
改良形窯業用ハイジェットバーナに PET 粉末を供給し、開放時における PET 粉末燃焼特性について調べた。図 2.10 に、基準作動条件（総熱発生率： $H_t = 11.6 \text{ kW}$ ，総合当量比： $\phi = 0.8$ ，助



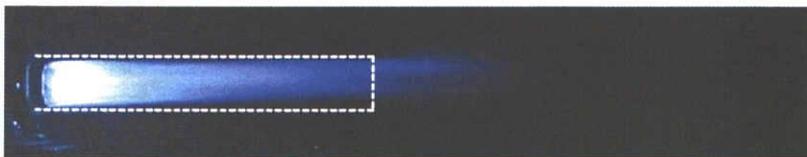
(a) Flame formed in the stabilizer without nozzle,
where $Q_{a,m} = 154.7 \text{ l/min}$, $Q_{a,PET} = 0 \text{ l/min}$



(b) Flame stabilized at the burner exit without nozzle,
where $Q_{a,m} = 142.9 \text{ l/min}$, $Q_{a,PET} = 11.7 \text{ l/min}$



(c) Flame stabilized within the quartz glass tube with nozzle,
where $Q_{a,m} = 154.7 \text{ l/min}$, $Q_{a,PET} = 0 \text{ l/min}$



(d) Flame stabilized within the quartz glass tube with nozzle,
where $Q_{a,m} = 142.9 \text{ l/min}$, $Q_{a,PET} = 11.7 \text{ l/min}$

Fig. 2.9 Effects of the nozzle and the auxiliary air flow rate on flame appearances
($Q_{f,m} = 4.6 \text{ l/min}$, $\phi = 0.7$, $H_t = 6.5 \text{ kW}$)

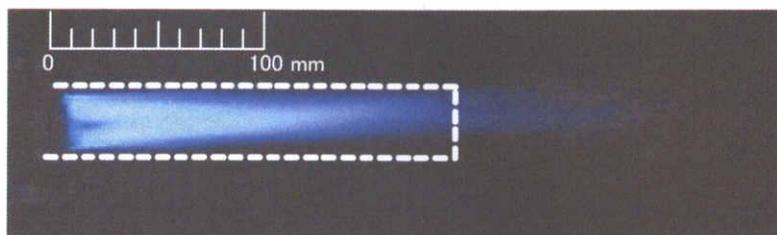
燃率： $\alpha = 15\%$ ）における火炎の燃焼状態の直接写真を示す。図 2.10 (a) に PET 粉末を供給していない場合を、図 2.10 (b) に PET 粉末供給量 $m_{\text{PET}} = 4.8 \text{ g/min}$ の PET 粉末を供給した場合を示す。いずれも PET 搬送空気流量は $Q_{\text{a,PET}} = 11.7 \text{ l/min}$ である。

図 2.10 によれば、PET 粉末を供給することにより、著しく火炎が長くなっている。これは、PET 粉末の着火過程に要する時間が気体燃料であるプロパンよりも長く、その間に PET 粉末がバーナ下流に流されていくためである。つぎに火炎の色彩を見ると、図 2.10 (a) の PET 粉末が供給されていない火炎は青炎であるのに対して、図 2.10 (b) の PET 粉末を供給した火炎は明るい輝炎である。これは、PET 樹脂がすすの前駆物質であるベンゼン環を主成分に含むため⁽¹²⁾にすすが発生しやすく、そのすすの熱輻射により発光していると考えられる。また、図 2.10 (b) の火炎先端部にスジ状の火炎が見られる。これに関しては、使用した PET 粉末の粒径が直径 $30 \sim 400 \mu\text{m}$ の範囲に広く分散しているため、その内の比較的粗大な PET 粒子が火炎内で熱分解・ガス化しつくさずガラス管外へ放出され、周囲の低温空気のエントレインによる冷却もあいまって、固形残留粒子として飛散するためであると考えられる。なお、写真では示さないが、ノズル管出口から 400 mm 離れた対向壁に固形残留粒子の溶着が確認されている。

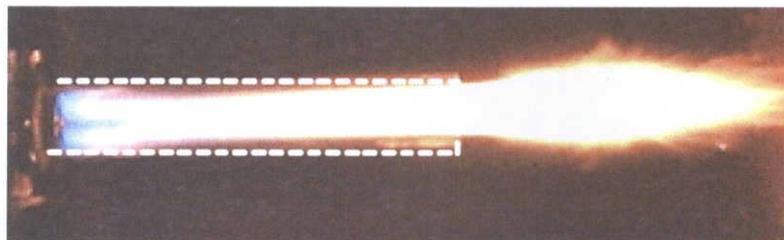
つぎに、ノズル管の有無におけるバーナ保炎器への PET 樹脂の付着状況の変化を確認した。PET 粉末を供給して数時間燃焼させた後の保炎器の直接写真を図 2.11 に示す。図 2.11 (a) および図 2.11 (b) に、それぞれノズル管を設置しない場合と設置した場合を示す。図を見ると、ノズル管を設置しない場合には、図中に矢印で示されているように、保炎器内部に多量の PET 樹脂が付着・融着しているのに対して、ノズル管を設置した場合には、保炎器への PET 樹脂の付着・融着が全く無いことが確認される。ノズル管なしの場合、保炎器内の燃焼域の上流域に PET 粉末が供給されるため、軟化・熔融した PET 樹脂が保炎器内部の壁面に付着しやすい。それに対してノズル管がある場合は、PET 粉末をバーナ中心軸付近の保炎器下流の燃焼域に直接供給することになり、保炎器および壁面への PET 樹脂の付着が防止されたためである。

(3) ノズル管設置位置の検討

最後に、ノズル管の設置位置が保炎器およびノズル管内への PET 樹脂の付着に及ぼす影響⁽¹³⁾について簡単に述べる。図 2.12 (a)、(b) および図 2.12 (c) は、それぞれノズル管下流端が保炎器内部、保炎器先端および保炎器外部に位置する場合を示す。まず、ノズル管下流端が保炎器内部に位置する場合 [図 2.12 (a)]、供給された PET 粉末の一部が主燃料および主空気により形成される循環流によって保炎器内側に飛散することになり、壁面への溶着・堆積が避けられない。



(a) Flame appearance without PET-powder supply, where $m_{\text{PET}} = 0 \text{ g/min}$,
 $Q_{\text{a,m}} = 233.0 \text{ l/min}$, $Q_{\text{f,m}} = 8.3 \text{ l/min}$



(b) Flame appearance with PET-powder supply, where $m_{\text{PET}} = 4.8 \text{ g/min}$,
 $Q_{\text{a,m}} = 229.1 \text{ l/min}$, $Q_{\text{f,m}} = 7.0 \text{ l/min}$

Fig. 2.10 Effects of PET-powder supply on flame appearances
 ($Q_{\text{a,PET}} = 11.7 \text{ l/min}$, $H_t = 11.6 \text{ kW}$, $\phi = 0.8$, $\alpha = 15 \%$)

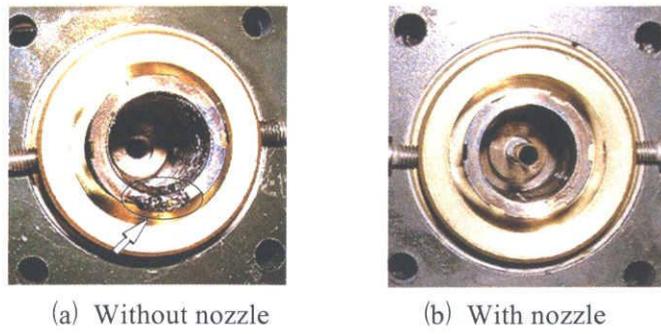


Fig. 2.11 Deposit conditions of PET-resin on each stabilizer wall

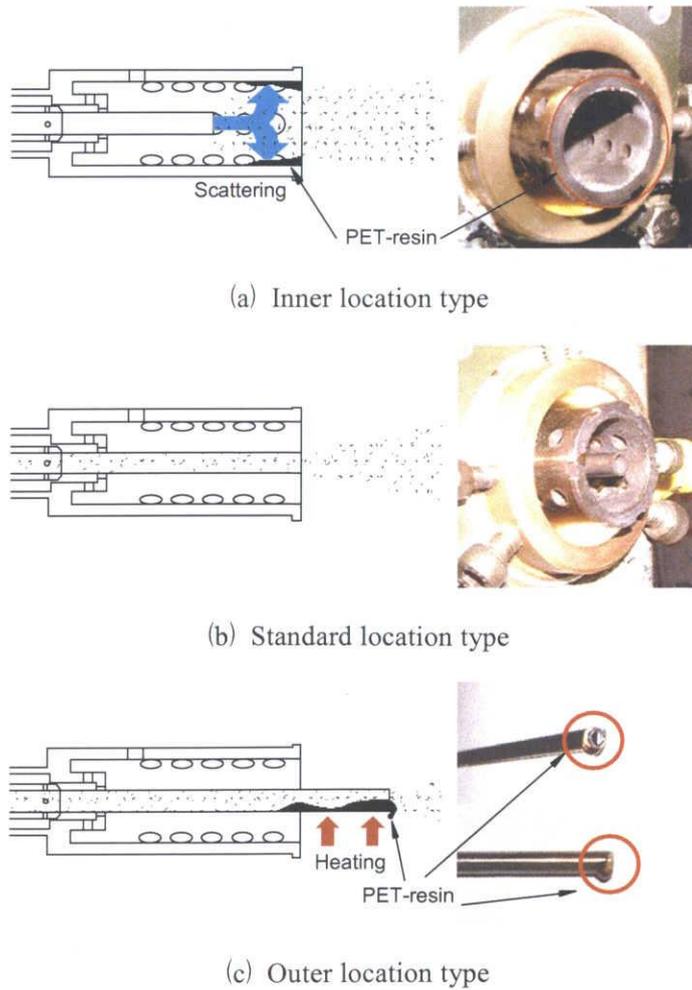


Fig. 2.12 Effects of location of PET powder supply pipe

一方、ノズル管下流端が保炎器外部の燃焼領域に位置する場合 [図 2.12 (c)] , ノズル管は形成された火炎により加熱されるため、供給される PET 粉末がノズル管内に融解・溶着することになる。以上の結果から、保炎器およびノズル管内での PET 樹脂の熔融を考慮すると、ノズル管下流端を保炎器先端に一致させた場合 [図 2.12 (b)] が最適位置であると考えられる。

以上の改良結果から、市販の窯業用バーナに PET 粉末を供給した場合でも、本来の保炎特性を維持したまま、そして保炎器およびノズル管へ PET 樹脂を付着させずに PET 粉末を燃焼させることが可能となった。

2.4.2 助燃率 α が炉内燃焼特性に及ぼす影響

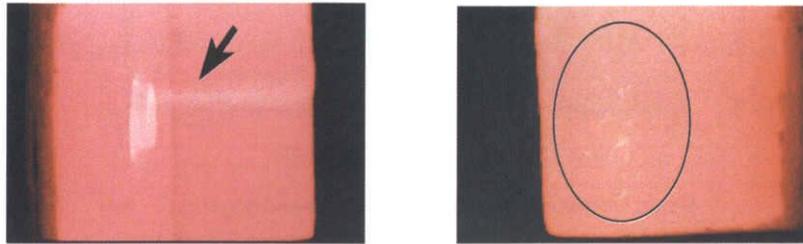
(1) PET 粉末の炉内燃焼挙動

まず、質量メディアン直径 $d_m = 145 \mu\text{m}$ の PET 粉末を用い、総熱発生率を $H_t = 11.6 \text{ kW}$ に、総合当量比を従来の工業炉の基準値⁽¹¹⁾である $\phi = 0.8$ に固定して実験を行った。図 2.6 (a) に示す二つの観察窓から直接撮影されたバーナ出口付近とその対向壁付近における炉内の様子を、図 2.13 (a) および図 2.13 (b) に示す。図 2.13 (i) , (ii) および図 2.13 (iii) は、それぞれ助燃率 $\alpha = 5, 15 \%$ および 30% の場合である。なお、炉内は高温であるため、炉壁は著しく赤熱している。そのため、ここで示す炉内写真は相対的に炉壁の発光に比して強い輝炎部を表している。

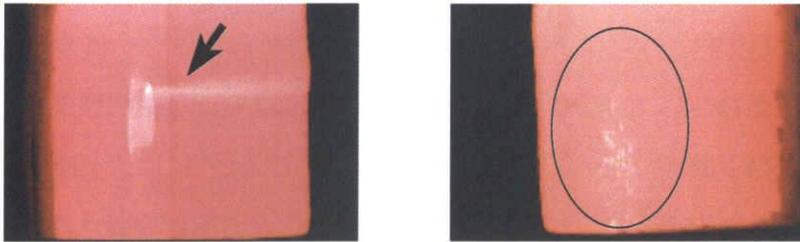
図 2.13 (a) を見ると、矢印で示すように、いずれの α においても出口から噴出する PET 粒子群の軌跡が多重の明るい筋状の輝炎として捉えられている。輝炎の発生は局所当量比の高い領域の存在と PET の熱分解・ガス化直後のガス化ガスの拡散燃焼の様子を示していると考えられる。また α の増加に伴い、発光が強くなっている。これに関しては、 α が増加するにつれて PET 供給量および粉末中の微細な粒子の絶対量が増加し、バーナ出口付近での PET の熱分解・ガス化ガスの発生量が多くなるためであると考えられる。

一方、図 2.13 (b) に楕円で示されているように、高温場であるにもかかわらず、PET 粉末が 700 mm 離れた対向壁に到達し、付着して熱分解・ガス化・拡散燃焼していることが知れる。これについては、粉末中の比較的粗大な粒子は加熱・融解・熱分解・ガス化・燃焼に至るまでに時間を要し、消失せず対向壁に到達するからであると考えられる。また、 α の増加に伴い到達量は多くなっていることがわかる。これに関しては、PET 粉末量の増加と共に、粗大な粒子の絶対量も増えることに起因すると考えられる。

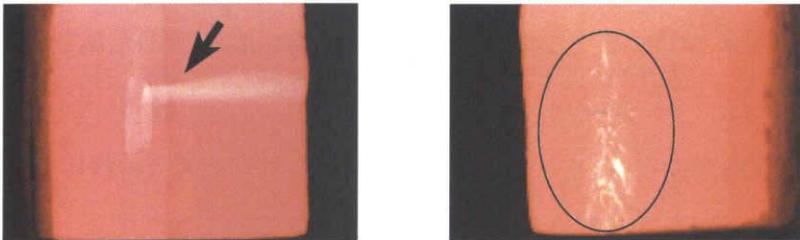
以上の燃焼挙動の観察から、 α の増加に伴って微細な粒子および粗大な粒子の絶対量が増える



(i) $\alpha = 5\%$



(ii) $\alpha = 15\%$



(iii) $\alpha = 30\%$

(a) Near the burner exit

(b) Near the opposite wall

Fig. 2.13 Effects of the auxiliary burning rate on the in-furnace combustion
 ($H_t = 11.6 \text{ kW}$, $\phi = 0.8$, $d_m = 145 \mu\text{m}$)

ため、一方では、バーナ出口部で PET の熱分解・ガス化ガスの発生量の増加と、その PET のガス化ガスに伴う拡散燃焼に起因する発光の増強をもたらし、他方では、対向壁に衝突するまでに熱分解・ガス化しつくさなかった粒子の到達量を増加させることがわかった。しかし、 α の値によらず実験終了後の壁面には衝突し付着していた PET 粒子の残留痕跡は認められなかった。このことは、対向壁に到達し付着した PET 粒子は高温の炉内で最終的にすべて消費されることを意味する。このことから、炉内で飛散する粗大な PET 粒子が焼成品に付着したとしても、製品表面に痕跡は残らず、著しく商品性が低下しないことが推測される。

(2) 空間炉内温度分布

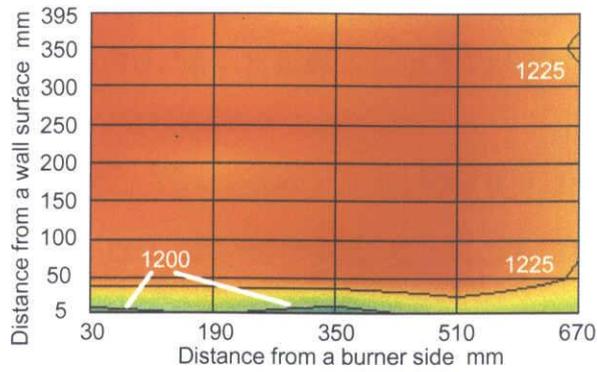
本実験の最大助燃率である $\alpha = 30\%$ の設定条件で目標炉内温度 $1220\text{ }^{\circ}\text{C}$ の燃焼実験を行い、空間温度場の均一性を調べた。図 2.14 (a), (b) および図 2.14 (c) に炉内の上段面、中断面および下断面の温度場をそれぞれ示す。なお、図中の格子点は測定点 ($5 \times 9 = 45$ 点) に対応する。上段面の温度分布 [図 2.14 (a)] によれば、 $1220 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ とほぼ均一な空間温度場が得られている。一方、中断面および下断面の温度分布 [図 2.14 (b) および (c)] には、上断面と比較していくぶん不均一な温度場が観察される。バーナがこの中下 2 断面の間に設置されていることが原因と考えられるが、その場合でも両断面ともに $1220 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ と不均一性は小さい。

なお、いずれの断面においても熱電対挿入孔 (図 2.8 中の●印) から 50 mm 内側の温度分布がいくぶん低い値を示している。これは、用いた熱電対プローブの金属製保護管の影響であろうと考えられる。

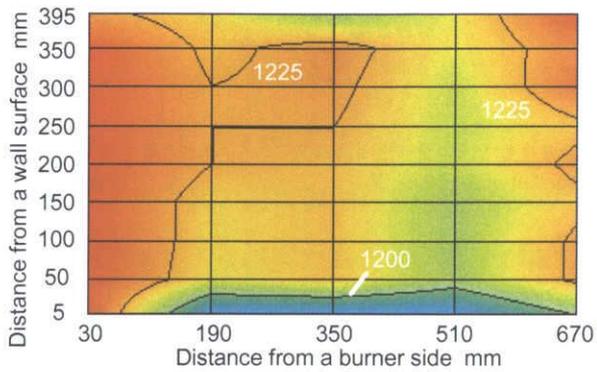
以上から、目標炉内温度を $1220\text{ }^{\circ}\text{C}$ に設定した場合、PET 粉末供給時にも $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲でほぼ均一な焼成試験に適した空間温度場が得られることがわかった。

(3) 排気ガス特性

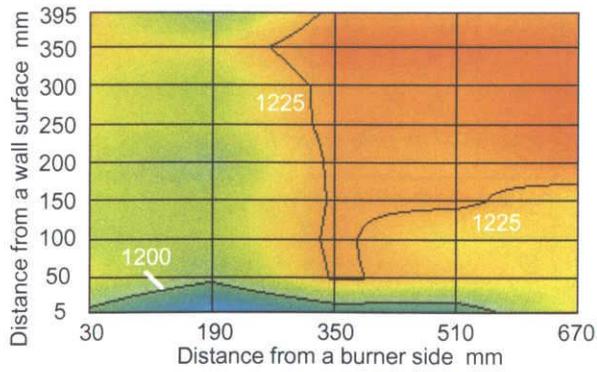
助燃率を $\alpha = 0, 5, 15\%$ および 30% と変化させて、排気ガスの温度測定および濃度分析を行った。排ガス測定にあたっては、外気流入の影響をなくすために、図 2.7 (b) に示すような排気ダクトを設置し、その出口から 350 mm 上流の断面 (直径 28 mm) 中央で行った。図 2.15 (a), (b), (c) および図 2.15 (d) に、総熱発生率を $H_t = 11.6\text{ kW}$ とし、主空気流量 $Q_{a,m}$ を変えて、総合当量比 ϕ を変化させた場合の排ガス温度 T_{ex} 、 O_2 濃度、 NO_x 濃度および CO 濃度の変化をそれぞれ示す。



(a) Temperature field in the upper horizontal plane



(b) Temperature field in the middle horizontal plane



(c) Temperature field in the bottom horizontal plane

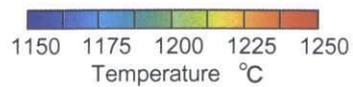
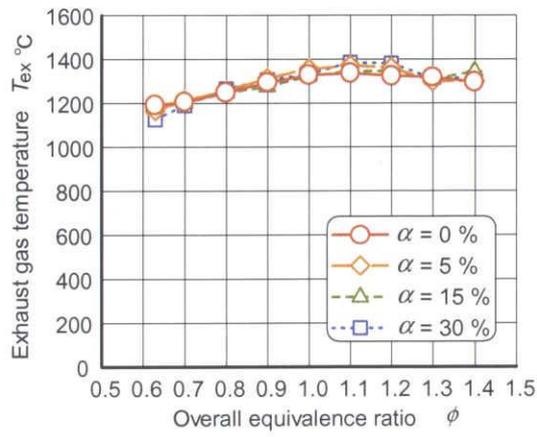
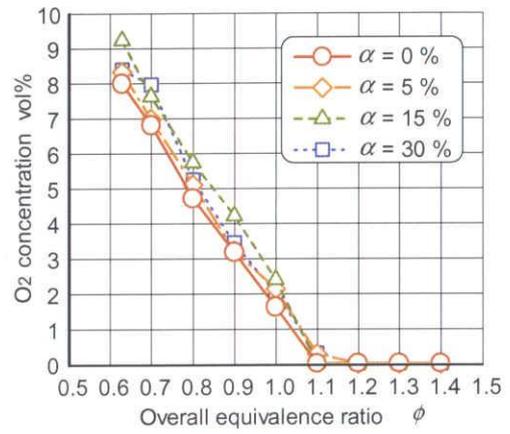


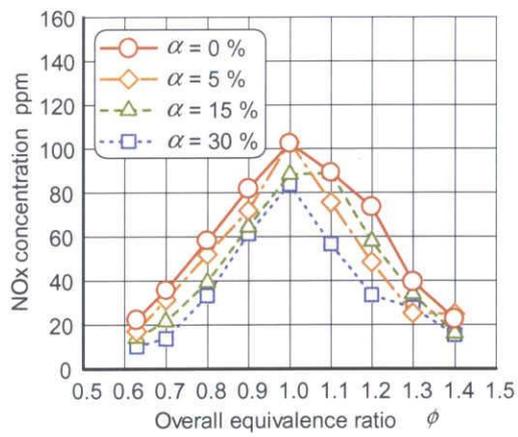
Fig. 2.14 Spatial temperature fields in three horizontal planes
 $(H_t = 11.6 \text{ kW}, \phi = 0.8, \alpha = 30 \%, d_m = 145 \mu\text{m})$



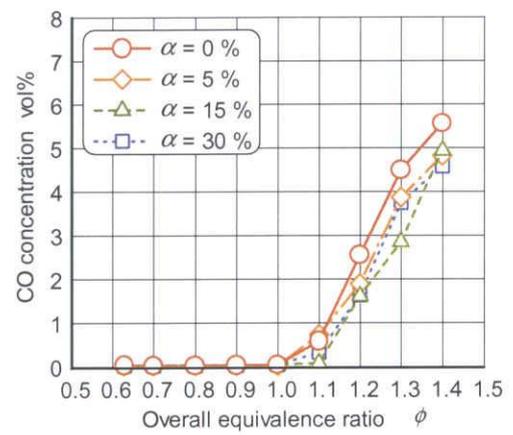
(a) Exhaust gas temperature



(b) O₂ concentration



(c) NOx concentration



(d) CO concentration

Fig. 2.15 Effects of the auxiliary burning rate on exhaust gas properties
($H_t = 11.6$ kW, $d_m = 145$ μ m)

図 2.15 (a) の排気ガス温度に関しては、 α の増加による大きな温度変化は認められないことがわかる。本実験では、総熱発生率一定条件下で総合当量比を設定するため、 $\phi = 1.0$ に近づくとつれて温度が高くなる。いずれの α においても $\phi = 1.1 \sim 1.2$ の場合が最も温度が高く、最高温度 1400°C 近くに達していることが知れる。

図 2.15 (b) の O_2 濃度については、 α の増加による大きな差異は認められず、いずれの α においても $\phi = 1.1$ で O_2 濃度は 0.5% 程度と低い値を示す。さらに、図 2.15 (c) の有害成分である NO_x 濃度においては、 α の増加に伴って、全体的に低下し、良好な NO_x 排出特性を示す。これに関しては、 ϕ を一定にして α を変化させているため、 α の増加に伴ってプロパン火炎の当量比が希薄となり、バーナ出口直後の火炎温度が低下するためであると考えられる。

最後に、窯業では焼成の最終段階で還元雰囲気を設定することで、陶器に含まれている鉄分等の不純物を還元し、白色の仕上がりを得る手法が一般的に採用されている⁽¹⁴⁾。このため、PET 粉末を助燃料として使用する場合にも、炉内雰囲気を強い還元条件 (CO 濃度： $3 \sim 5\%$) に調整できることが要求される。そこで本実験の図 2.15 (d) の CO 濃度挙動をみると、いずれの α においても $\phi = 1.4$ に設定することで容易に 5% 程度の高い CO 濃度が得られ、要求を満たしていることがわかる。

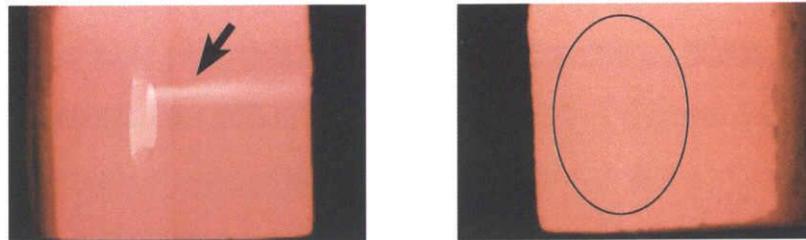
ここで、例えば、基準作動条件である $\phi = 0.8$ の加熱時には、 α によらず 1300°C 近くの排気ガス温度で、 NO_x 濃度が $40 \sim 60$ ppm、 CO 濃度が 0% の良好な燃焼特性を示していることがわかる。また、 $\alpha = 30\%$ 、 $\phi = 0.8$ の条件では、 $T_{\text{ex}} = 1240^\circ\text{C}$ 、 $T_s = 1220 \pm 20^\circ\text{C}$ という排気ガス温度と炉内温度の対応が得られている。この対応関係から $\alpha = 15\%$ 、 $\phi = 1.4$ の場合には、炉内温度は 1300°C 近くに達していると考えられ、後述する還元温度条件を満たしていることがわかる。

このように、助燃率 α を 30% まで変化させても、プロパンのみを燃料として使用した場合とほぼ同等な排気特性を示すことが明らかとなった。

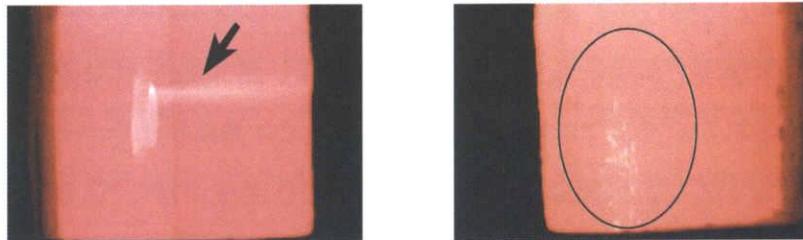
2.4.3 質量メディアン直径 d_m が炉内燃焼特性に及ぼす影響

(1) PET 粉末の炉内燃焼挙動

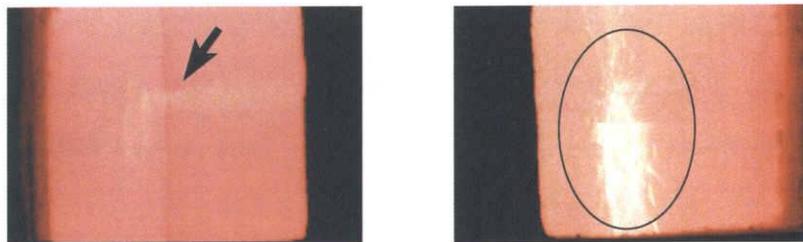
図 2.16 (a) に炉内バーナ出口部の、図 2.16 (b) に対向壁近傍の写真を示す。また、図 2.16 (i)、(ii) および図 2.16 (iii) はそれぞれ質量メディアン直径 $d_m = 89.7, 145 \mu\text{m}$ および $185 \mu\text{m}$ の場合である。総熱発生率を $H_t = 11.6 \text{ kW}$ に、総合当量比を $\phi = 0.8$ に固定し、助燃率を $\alpha = 15\%$ に設定して実験を行った。



(i) $d_m = 89.7 \mu\text{m}$



(ii) $d_m = 145 \mu\text{m}$



(iii) $d_m = 185 \mu\text{m}$

(a) Near the burner exit

(b) Near the opposite wall

Fig. 2.16 Effects of the mass median diameter on the in-furnace combustion
 ($H_t = 11.6 \text{ kW}$, $\phi = 0.8$, $\alpha = 15 \%$)

バーナ出口部 [図 2.16 (a) の矢印部] を見ると、 d_m の値が大きくなるほど、輝炎の発光が弱くなっている。これは、 d_m の値が大きいかほど粗大な粒子を多く含んでいる (図 2.2 参照) ため早期に熱分解・ガス化し難くなり、その PET のガス化ガスに伴う拡散燃焼が緩慢になるためであると考えられる。一方、対向壁部 [図 2.16 (b) の楕円部] においては、これとは逆の明確な相違が出ている。 $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の場合 [図 2.16 (i)]、対向壁に衝突する PET 粒子は肉眼では全く確認されないことがわかる。このことは、PET 粒子が炉に入ってから 700 mm の距離に置かれた対向壁に到達するまでの間に消失していることを意味する。しかし、 d_m の値が大きくなるにつれて対向壁に到達する PET 粒子が観察されるようになる。とくに、 $d_m = 185 \mu\text{m}$ [図 2.16 (iii)] の場合を見ると、多数の PET 粒子が対向壁に激しく衝突し燃焼している様子が観察できる。これは前節と同様に、粗大な粒子ほど着火・燃焼に至るまでに時間を要するため、消失せず対向壁に衝突・付着するためであると考えられる。

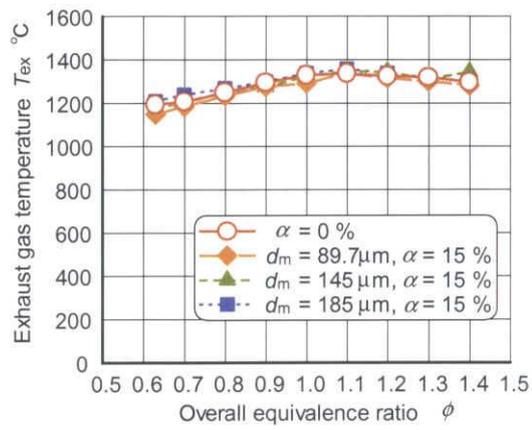
なお、 d_m の値によらず、実験終了後の壁面には、PET 粉末の痕跡は認められなかったことから、前節と同様に高温の炉内において衝突していた粗大な PET 粒子はすべて消失すると考えられる。

(2) 排気ガス特性

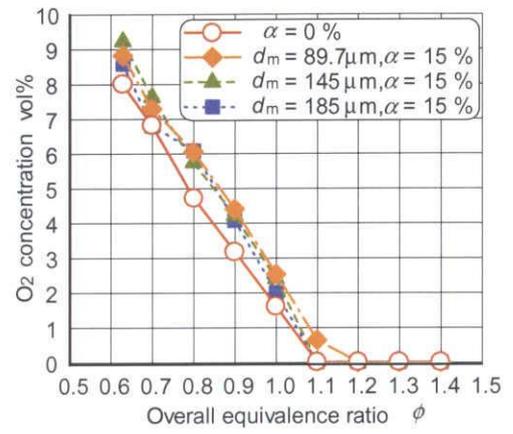
助燃率を $\alpha = 15\%$ に設定し、PET 粉末の質量メディアン直径 d_m を変化させたときの排ガス温度測定およびガス濃度分析を、図 2.7 (b) に示した測定位置で行った。図 2.17 にそれらの総合当量比 ϕ による変化を示す。総熱発生率は $H_t = 11.6 \text{ kW}$ である。なお、図中には PET 粉末供給しない場合 ($\alpha = 0\%$) の結果も示されている。

図から、例えば、基準作動条件である $\phi = 0.8$ の加熱時には、 d_m によらず $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 近くの排気ガス温度で、 NO_x 濃度が $40 \sim 60 \text{ ppm}$ 、 CO 濃度が 0% の良好な燃焼特性を示していることがわかる。また全体的に見ると、 d_m を変化させた場合でも排気ガス温度 T_{ex} およびガス濃度 (O_2 および NO_x) は、プロパンのみを燃料とした場合 ($\alpha = 0\%$) とほぼ同等な挙動を示すことが知れる。とくに、図 2.17 (d) の CO 濃度挙動は、窯業炉として要求される高 CO 濃度による還元雰囲気の設定が可能であることも示している。

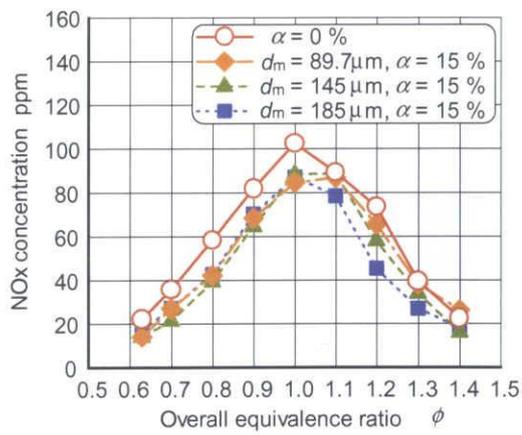
以上の結果から、 $d_m = 185 \mu\text{m}$ 程度までの PET 粉末を用いた場合でも、窯業用助燃料として使用可能であると考えられる。



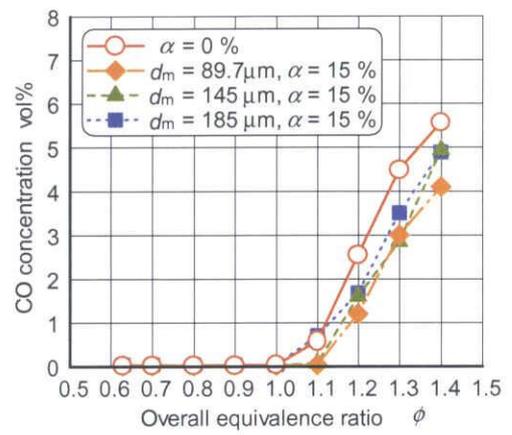
(a) Exhaust gas temperature



(b) O₂ concentration



(c) NO_x concentration



(d) CO concentration

Fig. 2.17 Effects of the mass median diameter on exhaust gas properties
($H_t = 11.6 \text{ kW}$, $\alpha = 15 \%$)

2・4・4 白色度および曲げ強度の比較・検討

最後に、評価用試験片に対して、以下の手順 (a) ~ (c) で焼成試験を行った。

- (a) 目標還元開始温度 (1300 °C) まで上昇させる。
- (b) 還元開始温度に到達した後、所定の還元雰囲気を設定し、1 時間焼成を行う。
- (c) 焼成終了後、主燃料および助燃料の供給を止めて、空気のみで炉内温度の調整を行い、徐冷する。

なお、本実験の焼成条件は、(1) PET 粉末未供給 (総合当量比: $\phi = 1.4$, CO 濃度: 5%, 助燃率: $\alpha = 0\%$) および (2) PET 粉末供給 ($\phi = 1.4$, CO 濃度: 5%, $\alpha = 15\%$) の 2 条件である。

図 2.18 に PET 粉末を供給しない場合とした場合の (a) 白色度, および (b) 曲げ強度の比較を示す。図 2.18 (a) から、標準白色板 (図中の S.W.B) に比べて値は低いものの、PET 粉末の有無による差は見られず、同程度の白色度を示している。なお白色度に関しては、還元開始時期および還元雰囲気の調整により改善可能とされている⁽¹⁵⁾。

一方、図 2.18 (b) に示した施釉試験片の 3 点曲げ強度を見ると、52.5 MPa と PET 粉末の有無によらず同程度の値を示している。この値は、無施釉試験片の 3 点曲げ強度で得られた 65 ~ 75 MPa の値に比して約 20 ~ 30 % 低い値であるが、今回用いた原料から得られる磁器の曲げ強度としては十分な値であると評価されている⁽¹⁵⁾。

2・4・5 考 察

本実験の炉内のビデオ撮影による観察結果において、高温場を通過しているにもかかわらず対向壁に到達し燃焼する PET 粒子が確認された。そこで、どの程度の粒子が対向壁に到達していたのか定性的考察を行う。

対向壁に到達している粒子を検討するためには、任意の粒子径における粒子数を把握する必要がある。そこで、図 2.2 で示した質量基準割合のヒストグラムを基に、個数基準割合に換算した分布図への変換を試みる。その際、粒子は球状であると仮定し、PET 樹脂の密度を ρ_{PET} kg/m³, 図 2.2 のヒストグラムに示された各区間における球状粒子の平均径を X_i μm , 単位質量の PET 粉末に含まれる各区間の粒子の質量を m_i kg, X_i の粒子数を n_i , 総個数を N とする。これらの値によって、球状粒子径 X_i の個数割合 q_0 は次式により求められる⁽¹²⁾。

$$q_0 = \frac{n_i}{N} = \frac{1}{N} \left(\frac{m_i}{\frac{\pi}{6} (X_i)^3 \rho_{\text{PET}}} \right) \dots\dots\dots (2.3)$$

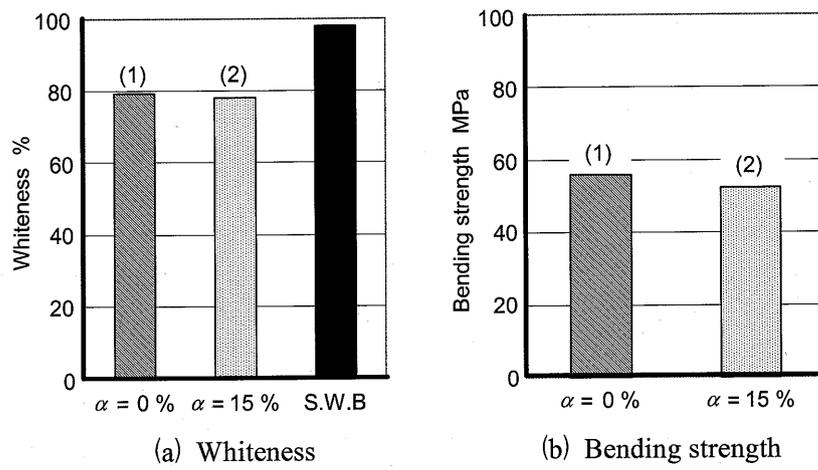


Fig. 2.18 Comparison of the whiteness and bending strength without and with PET powder supply

式(2.3)を用いて個数基準割合に変換した分布図を図 2.19 に示す。図によれば、質量メディアン直径 d_m の増大とともに分布が粗大粒子径側にシフトし、とくに 100 μm 以上の粒子の個数割合にきわめて大きな差が生じているのがわかる。さらに詳しく見ると、 $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の粉末は 200 μm 以上の粒子をほとんど含んでいないこと、 d_m の値が大きくなるにつれて、200 μm 以上の粒子を多く含むことが知れる。

これらの分布挙動に図 2.16 (b) で示された燃焼挙動を考慮すると、対向壁に衝突している粒子径は 200 μm 以上の粗大な粒子径であると推測される。

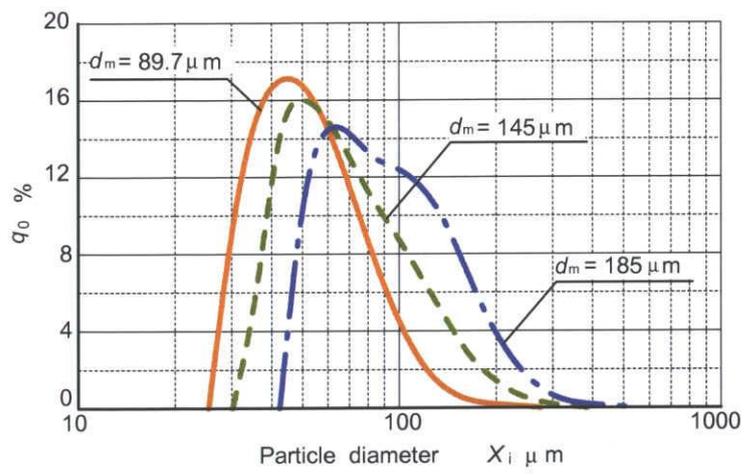


Fig. 2.19 Number distributions of virtual spherical PET particles

2・5 第2章のまとめ

本章では、まずバーナの既設炉へのレトロフィットおよび PET 粉末を助燃料としての使用を想定して、市販の窯業用バーナにノズル管を設置する改良を加えた。その結果、保炎性および PET 粉末のバーナ壁面への付着性の両面から燃焼特性の改善が得られ、PET 粉末の助燃料としての利用が可能となった。

続いて、PET 粉末を助燃料とする窯業用バーナにおいて、助燃率 α および質量メディアン直径 d_m の影響を調べ、窯業用助燃料としての適用範囲を把握した。そしてさらに、試験片を用いて焼成試験を行い、PET 粉末を供給しない場合と供給した場合の白色度および曲げ強度の比較から、窯業用助燃料としての有効性を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- ① 炉内の直接撮影結果から、 α および d_m の値が大きくなるにつれて、対向壁まで到達する PET 粒子は増加する。しかし、実験終了後の炉内において PET 粉末の痕跡は認められなかったことから、高温の炉内ではいずれの条件においても、熱分解によるガス化もしくは PET の熱分解によるガス化ガスの拡散燃焼によってすべて消失すると考えられる。このことから、炉内に焼成品を入れても PET 樹脂の付着の影響は小さい。
- ② 本実験の最大助燃率である $\alpha=30\%$ に設定し、目標炉内温度設定 1220°C で炉内運転を行った結果、 $\pm 20^\circ\text{C}$ の範囲内ではほぼ均一な目標空間温度場を得ることができた。このことから、 $\alpha=30\%$ までの範囲においては、均一な炉内温度調整が可能である。
- ③ 排気ガス分析の結果、 α および d_m の変化によらず、プロパンのみを燃料としたときの燃焼特性とほぼ同等な結果が得られることがわかった。とくに、窯業炉として要求される高 CO 濃度による還元雰囲気の設定が、いずれの条件においても可能であることが確認された。
- ④ 粒子を球状仮定し、質量基準割合のヒストグラムを個数基準割合の分布図に変換し、対向壁に衝突していた粒子が、 $200\ \mu\text{m}$ 以上の粗大な粒子であることを定性的に示した。
- ⑤ 白色度および曲げ強度を比較した結果、PET 粉末の有無によらず同程度の値を示したことから、PET 粉末の窯業用助燃料として有効性が示された。

以上から、 $\alpha \leq 30\%$ の範囲で、 $d_m \leq 185 \mu\text{m}$ までのPET粉末を用いるならば、十分に窯業用助燃料として適用可能であり、その有効性が明らかとなった。このことから、PET粉末を窯業用助燃料として使用したサーマル・リサイクルの可能性が示された。

第2章の参考文献

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (2) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), 日本機械学会論文集 (B 編), **71**-701, (2005), 357-364.
- (3) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 (B 編), **71**-711, (2005), 2792-2799.
- (4) 岡島敏・河野通方, 工業熱力学, (1995), 99, 学献社.
- (5) 既設発電ボイラーを対象とした廃プラスチック燃料化基礎技術の調査研究報告書, (1993), 13, (社)プラスチック処理促進協会.
- (6) 高分子大辞典, (1994), 1015, 丸善.
- (7) 坂下攝, 図解粉粒体機器トラブル改善事例集, (2000), 65, 工業調査会.
- (8) 吉田邦夫, ガス燃焼の理論と実際, (1992), 76-77, (財)省エネルギーセンター.
- (9) 日本機械学会, 燃焼工学ハンドブック, (1995), 159.
- (10) 石野洋二郎・山北龍児・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃 PET 樹脂粉末を助燃料とする窯業用バーナーの燃焼特性, 東海支部第 51 期総会講演論文集 No.023-1, (2002), 193-194.
- (11) 日本工業炉協会, 工業炉ハンドブック, (1997), 52.
- (12) 廃プラスチックのサーマルリサイクル技術基礎データ集, (1993), 13, (社)プラスチック処理促進協会.
- (13) 石野洋二郎・黒田茂男・山北龍児・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃 PET 樹脂粉末を助燃料とする窯業用バーナーの燃焼特性 (燃焼挙動に及ぼす PET 置換率および PET 粉末供給管長さの影響), 第 40 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002), 61-62.
- (14) 文献 (11) の p. 491.

- (15) 加藤正樹・不二門義仁, 愛知県産業技術研究所研究報告,
www.aichi-inst.jp/html/reports/repo2003/.
- (16) 椿淳一郎・早川修, 現場で役立つ粒子径計測技術, (2001), 13, 日刊工業新聞社.

第3章 バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および 飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の画像計測

3.1 はじめに

前章で述べた改良バーナを用いた窯業炉内の燃焼実験によれば、① 供給した PET 樹脂粉末はすべて熱分解・ガス化・燃焼して消費されること、② 炉内に焼成に必要な高温で均一な空間温度場が形成されること、③ 焼成の最終工程で要求される還元雰囲気制御が可能なこと、④ PET 粉末供給時にも焼成品の白色度が維持されること、などの特性が得られ、窯業用助燃料としての可能性が示された⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、低温の大気開放条件下で改良バーナを作動させた場合には、PET 粉末の質量メディアン直径に依存して、多量の PET 粉末が熱分解・ガス化しつくさないまま固形残留粒子として排出された⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。一例として、PET 粉末の質量メディアン直径 d_m および助燃率 α をパラメータとしたときの未燃率 M_U の測定結果を図 3.1 に示す。なお未燃率は、PET 粉末の供給量と固形残留粒子の排出量の比で定義されている。この主原因として、バーナ出口下流での周囲空気の誘引による冷却が考えられるが、廃棄プラスチック樹脂の燃料としての効果的な再利用を図るためには、さらにバーナ内部から出口下流域のできるだけ広い範囲におけるプロパン火炎の燃焼ガスと PET 粉末の流動状況を把握し、未燃率増大に関する諸要因を探る必要がある。

そこで本章からは、大気開放条件下でこの固形残留粒子をいかに低減するかを主目的とし、それらの固形残留粒子の排出量低減に向けての基礎的知見を得るために一連の研究を行った。その第一段階として、第 3 章では改良バーナを対象に、プロパン火炎のみのバーナ内部の燃焼ガス流動場の PIV 計測、ならびに PET 粉末供給時の燃焼ガスと PET 粒子の流動状況および PET 粒子の形状変化の PTV 計測を行った。得られた結果と未燃率の測定結果との関係から固形残留粒子の排出量の増加要因を調べ、PET 粉末燃焼用のバーナに不可欠な要件を検討した^{(7),(8)}。PET 粉末の供給にあたっては、粒径分布との対応関係を明確にするため、粉末を分級して大中小の 3 種類に分割し、火炎概形と未燃率の測定を行った。

なお、本章の内容は、文献(7)において公表済であり、文献(8)に掲載決定済である。

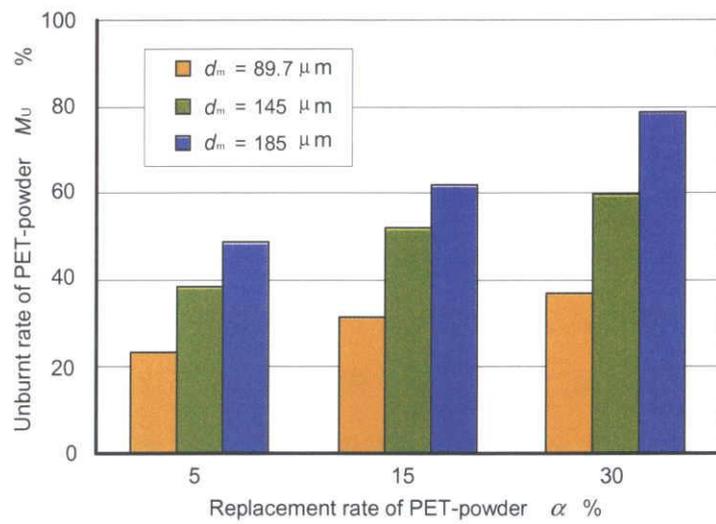


Fig. 3.1 Variations of the unburnt rate of PET-powder with the median diameter and the replacement rate

3・2 記 号

d	: PET 粒子の直径	[μm]
d_m	: 質量メディアン直径	[μm]
H_m	: プロパン主火炎の熱発生率	[kW]
H_{PET}	: PET 粉末の熱発生率	[kW]
M_U	: 未燃率 ($= m_C/m_{\text{PET}}$)	[%]
m_{PET}	: PET 粉末供給量	[g/min]
m_C	: 固形残留粒子の質量	[g/min]
x	: 保炎器出口からの軸方向への距離	[mm]
V_t	: 中心軸上における燃焼ガス速度	[m/s]
V_{PET}	: 中心軸上における PET 粒子速度	[m/s]
α	: 第 2 章で定義した PET 粉末の助燃率	[%]
ϕ_m	: プロパン主火炎の当量比	[-]

3.3 実験装置および方法

3.3.1 実験装置の構成

図 3.2 に、実験装置の系統図を示す。実験装置は、PET 粉末燃焼用改良バーナ、プロパン供給系、プロパン用空気供給系、PET 粉末供給系、および各種計測装置から成る。図 3.2 に示すように、主空気の供給源として前章と同様のプロワ（富士電機、VFC408AN、最大静圧：4.90 kPa、最大吐出流量：1950 ℓ/min）を採用した。主空気流量はスライダック（山菱電機、S3P-240-30、入力電圧：AC200 V、出力電圧：0～240 V）によって調節される。また、主空気流量の値はオリフィスマータ（ナリタテクノ、OM-3/4、使用範囲：5～300 mmH₂O、精度：±2%）を用い、アナログ圧力変換器（豊田工機、AA2460、測定レンジ：500 mmH₂O）で指示された差圧値を基に算出される。主燃料には市販の家庭用 LPG（プロパン純度：96.4%、低位発熱量（25 °C、1 atm）：46.35 MJ/kg⁽⁹⁾）を用いた。プロパン流量は、マスフローコントローラ（エステック、SEC-60、流量精度：±1.0%F.S）およびコントロールユニット（エステック、PAC-D2）によって調節される。一方、助燃料には PET 粉末を用いた。PET 粉末の特性に関しては、次項で述べる。PET 搬送用空気の供給系に関しては、前章と同様である。

3.3.2 PET 粉末燃焼用改良バーナ

図 3.3 の上側および下側に、それぞれ改良バーナの直接写真および PET 粉末供給用に改良されたバーナ基部の構造と寸法を示す。バーナ内の火炎の直接観察が可能なようにセラミックス製のバーナタイルを石英ガラス管（内径：28 mm、長さ：220 mm）に置き換えた点、および PET 粉末を直接燃焼領域に導入するための搬送管（内径：4 mm、外径：5 mm、長さ：202 mm）をバーナ軸に沿って設置した点が市販の窯業用バーナからの改良点である。

プロパンと空気は所定の流量でバーナ上流部において半径方向内向きに流入・混合し、保炎器下流に予混合火炎を形成させる。PET 粉末は、搬送用空気とともにバーナ中心部の供給管を通過して保炎器出口直後の中心軸近傍のプロパン火炎領域に供給され、その下流に輝炎の PET 粉末火炎を形成させる。

3.3.3 PET 粉末特性

本章では、粉末を構成する粒子の粒径分布の影響を明確にするため、質量メディアン直径 $d_m =$

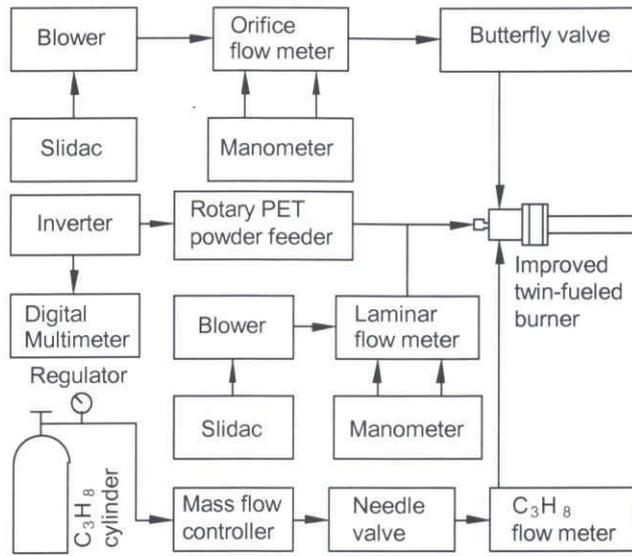


Fig. 3.2 Schematic system diagram for the twin-fueled burner experiment

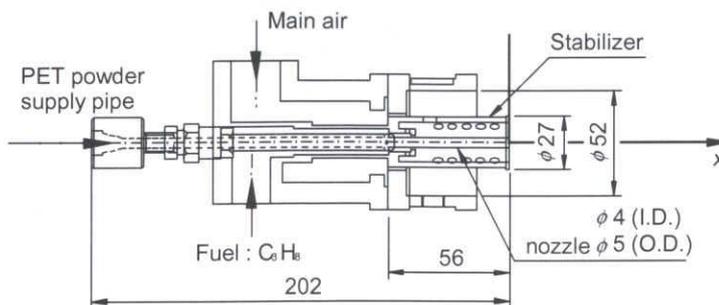
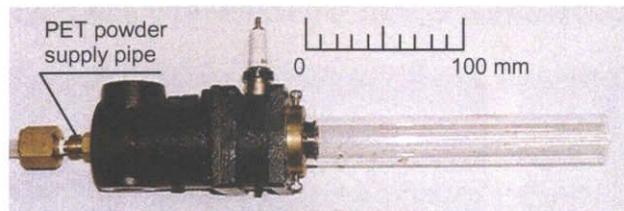


Fig. 3.3 Direct photograph, construction and dimensions of the twin-fueled burner

176.4 μm の粉末を# 80 および# 150 の篩を用いて大： $d > 180 \mu\text{m}$ ，中： $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ ，小： $d \leq 100 \mu\text{m}$ の3種に分級した。図 3.4 に、分級前の $d_m = 176.4 \mu\text{m}$ の PET 粉末特性を示す。図 3.4 (a) および図 3.4 (b) は、それぞれ質量粒度分布および光学顕微鏡写真を表す。図 3.4 (b) を見ると、質量粒度分布に対応した大小様々な粒子を含んでいることがわかる。分級された各 PET 粉末の光学顕微鏡写真を図 3.5 に示す。図 3.5 (a)，(b) および図 3.5 (c) は、それぞれ $d \leq 100 \mu\text{m}$ ， $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ および $d < 180 \mu\text{m}$ の場合を表す。図 3.5 から、比較的正確に分級されていることが知られる。

3.3.4 水膜法を用いた固形残留粒子捕集装置

大気開放燃焼実験で用いた固形残留粒子捕集装置の概略を図 3.6 に示す。なお、この装置は図 3.1 に示した未燃率測定結果を得る際にも用いられている。図に示されているように、バーナ出口から 400 mm の位置に垂直に衝突板を置き、この板の上部から水道水を流して水膜を形成させ、燃焼ガスを衝突させて大気中に飛散した PET 粒子を受け止めてフィルタで捕集する。捕集された固形残留粒子の質量 m_c と供給した PET 粉末の質量 m_{PET} の比を用いて、未燃率を $M_U = m_c/m_{\text{PET}}$ と定義した。なお、ガラス管への PET 粒子の溶着はほとんど確認されなかった。

3.3.5 PIV/PTV 計測装置

図 3.7 に、プロパン火炎の燃焼流動場計測に用いた PIV/PTV 計測装置の系統図を示す。本実験の改良バーナによって形成される PET 粉末火炎は輝炎の形態を取り、PET 粒子は火炎中を燃焼ガスとともに高速度で飛翔する。そのため、パルス発光時間が短く出力の大きいダブルパルス Nd:YAG レーザ (Continuum 製, CLP10PIV, 発振波長：532 nm, 最大出力：220 mJ/pulse, パルス幅：5 ns) を光源として採用し、撮影には CCD カメラを用いた。発振されたレーザ光は、第一および第二直角プリズムによって測定部と同程度の高さに導かれ、2 個のシリンドリカルレンズおよび平凸レンズ (焦点距離：600 mm) によって厚さ 0.3 mm, 幅 50 mm のシート光として測定部に入る。

レーザ光のトリガとカメラシャッタの同期には、遅延装置 (nexus 製, VSD-1000, DIGITAL DELAY) を用いた。同期方法は 1 フレームあたりに 1 回のレーザ照射が行われ、同様の画像 2 枚から各情報を得る 2 frame/単一露光方式⁽¹⁰⁾を採用する。図 3.8 に同期タイミングのモデル図を示す。本研究ではダブルパルス方式の Nd:YAG レーザを使用しており、内蔵された 2 つのレーザシステムがそれぞれの周波数、タイミングで発振することができる。内蔵された 2 つのレーザをそれぞれ

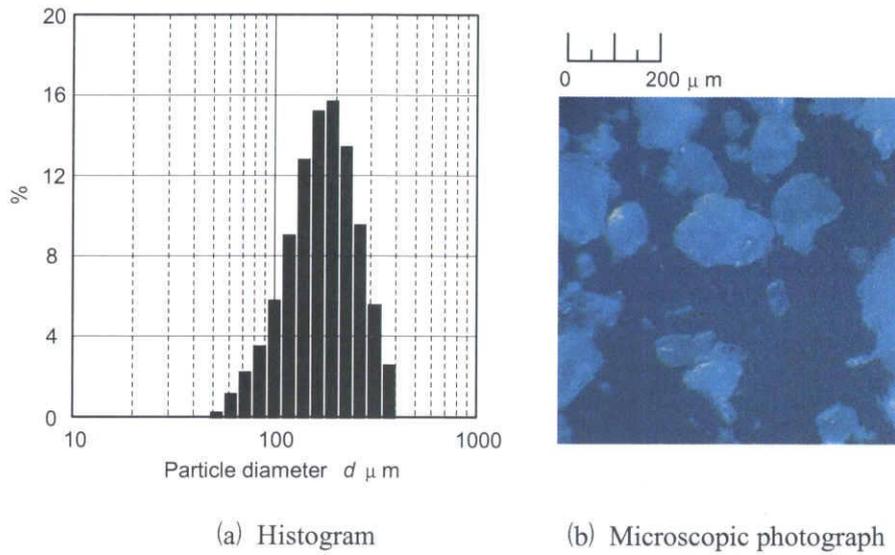


Fig. 3.4 Properties of the PET-resin powder ($d_m = 176.4 \mu\text{m}$)

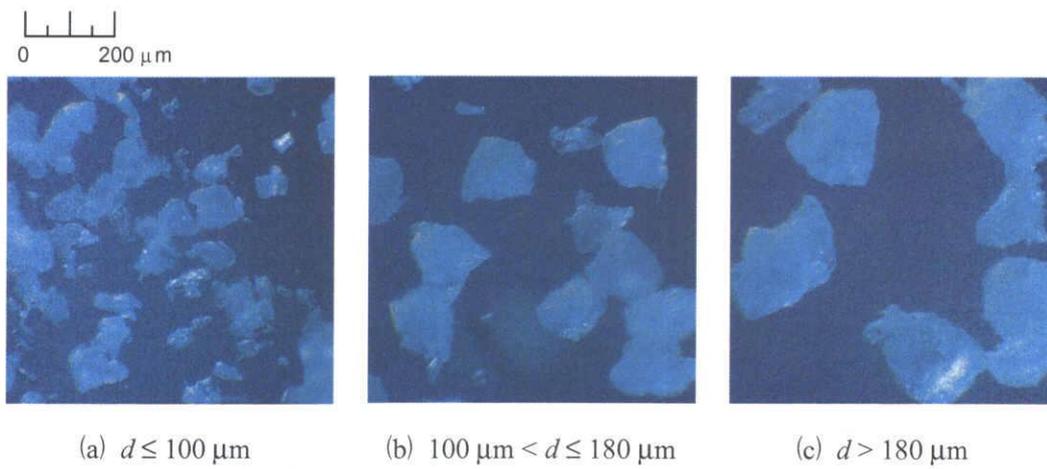


Fig. 3.5 Microscopic photographs of the sieved PET-powder employed

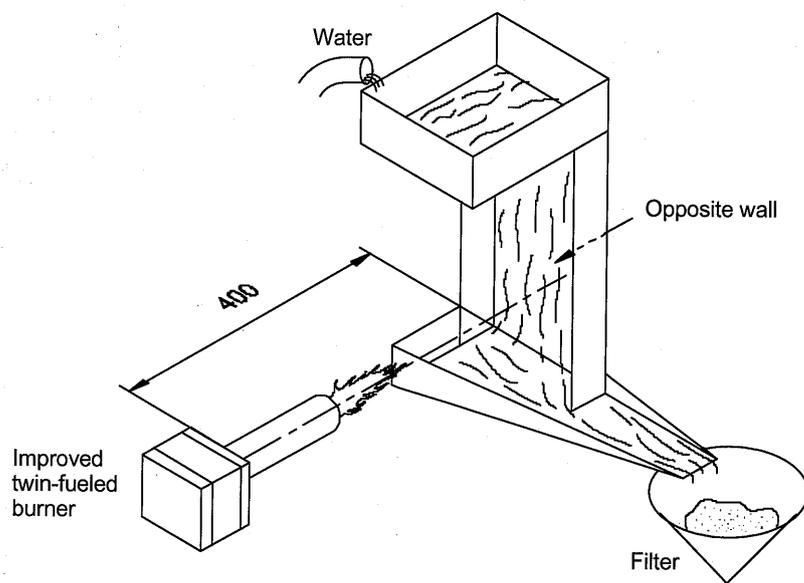


Fig. 3.6 Schematic diagram of the water curtain method;
collection of unburned PET-resin particles

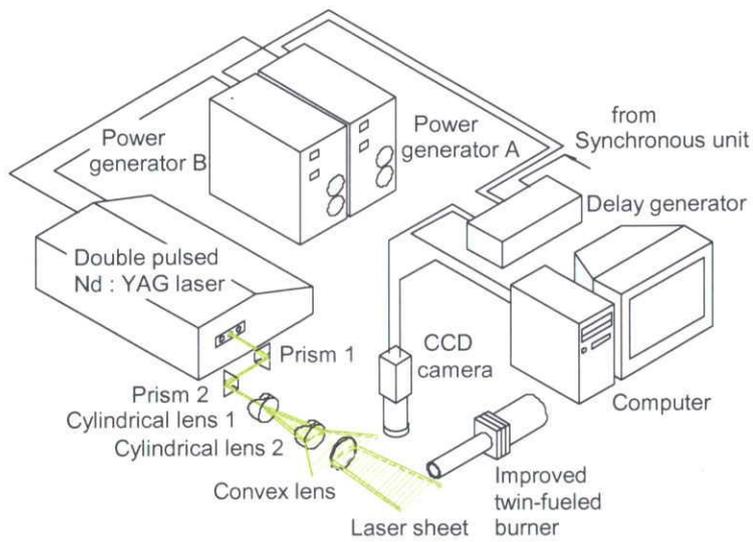


Fig. 3.7 Schematic diagram of the PIV/PTV measurements

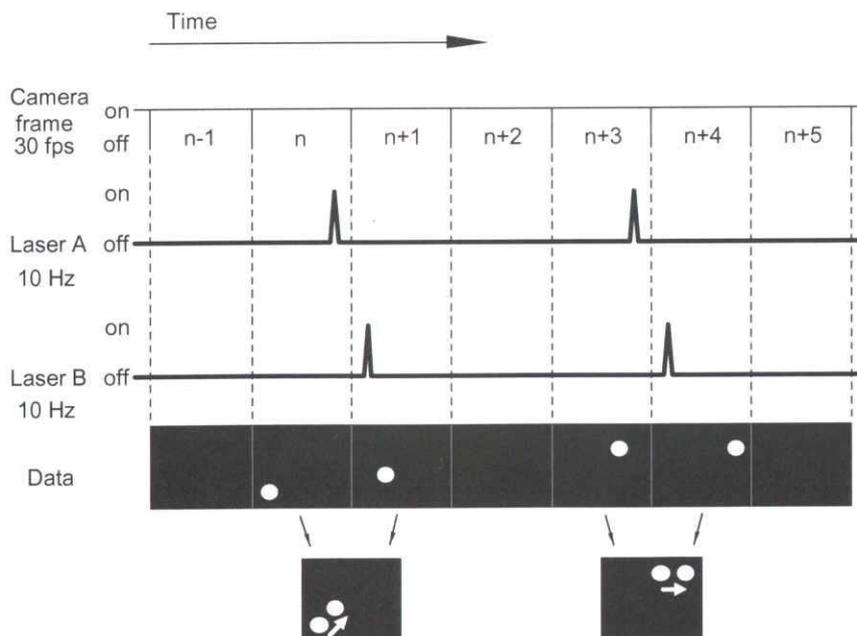


Fig. 3.8 Timing diagram of the PIV/PTV measurements

れAレーザ，Bレーザとする．図3.8に示すように，AレーザおよびBレーザを10 Hz，CCDカメラの出力を30 fpsとすることで3枚のうち2枚に画像情報（図中の白丸印）が得られる様に設定した．

このとき，AレーザとBレーザの間隔をパルス間隔とし，2枚の画像とパルス間隔から流体の各情報を得る．CCDカメラによって得られた画像は接続したコンピュータのメモリーに記録される．火炎の自発光の写り込みを避けるため，中心波長532 nm，透過率80.0%を有する干渉フィルタを装着させた．

なお，PIV計測時のトレーサ粒子には市販の歯科用焼石膏（粒子径：約20 μm ）を，PTV計測時のトレーサ粒子には粒子径 $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ に分級されたPET粉末を用いた．1断面の速度分布を得るのに用いたPIVデータ数は60個，1断面の粒子分布および粒子存在確率の算出に用いたPTV計測時の粒子数は約3000個である．両者の流れへの追従性に関しては，付録(a-1)に示されている検討結果を参照されたい．

3.3.6 飛翔PET粒子形状の拡大観察

本実験では，既存のPIV/PTVシステムに工夫を加え，高速で飛翔中のPET粒子形状の瞬間拡大観察を可能にした．図3.9に，PIV/PTV計測に用いたダブルパルスレーザの一方を停止させ，もう一方のパルス光のみを利用した拡大撮影装置の系統図を示す．第一および第二プリズムを用いて光軸を調節されたパルス光は（光路①）凹レンズによって広げられ（光路②），さらに測定断面下部で反射シート（白紙）によって垂直上方に曲げられて測定断面を通過し（光路③），粒子を照射する．5 nsという短いパルス幅を有するレーザ光で照射された飛翔中のPET粒子は，接写レンズ（Ken製，40 mm）を介して比較的シャープな画像として記録される．なお，予備実験の粒子画像の検討結果〔付録(a-2)を参照〕によれば，この光学系の焦点深度は $\pm 0.5 \text{ mm}$ と見積もられている．

図3.10(a)に，レーザ光を背景光として256階調で撮影された粒子画像の一例を示す．また，この画像の明暗を反転させて二値化処理を施した画像を図3.10(b)に示す．図3.10(b)を見ると，粒子の影の輪郭が正確に表示されていることが知れる．そこで，この白い領域のピクセル数から粒子の投影断面積を求め，それに等価な投影断面積を有する球状粒子を想定し，その粒子径の下流方向の変化を把握した⁽¹⁾．

3.3.7 実験手順および方法

実験に際しては，まずプロパン火炎を形成させ，それに3種類に分級されたPET粉末を供給し

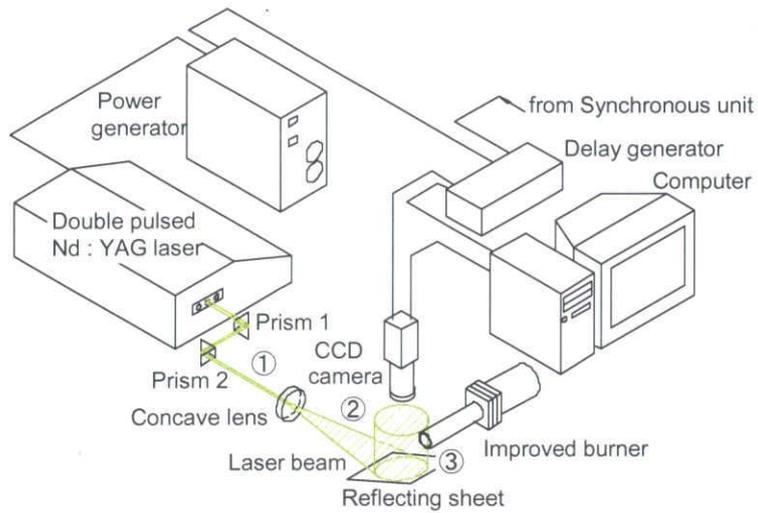
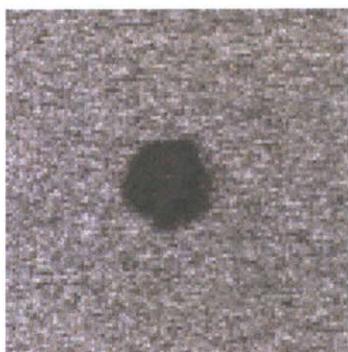
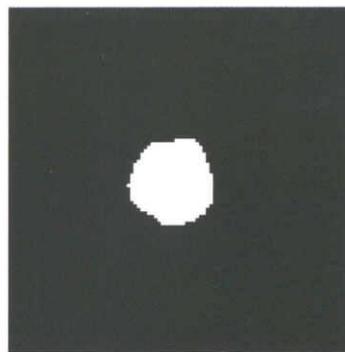


Fig. 3.9 Optical system for observing of appearances of high-speed flying PET particles in the PET-powder combustion



(a) Photograph



(b) Segmentation

Fig. 3.10 Direct and processed photographs of a PET particle

て燃焼状態の観察と熱分解・ガス化しつくさないまま大気中に飛散した固形残留粒子の排出量の測定を行う。この場合、5分間にわたる2回の測定を行い、それらの平均値をその排出量とした。続いて、プロパン火炎の燃焼流動場のPIV計測、ならびにPET粉末供給時のPET粒子速度、粒子の存在確率の算出、および飛翔中の粒子形状の拡大観察を行った。最後に、拡大粒子画像を解析することにより下流方向への粒子径の変化を把握する。

なお、用いた石英ガラス管は14 mmの半径に対して2 mmの肉厚を有するので、ガラス管内の壁面近傍における粒子画像への影響が予想される。しかし、本実験で用いたバーナの特性から、ガラス管内では供給されたPET粉末の中心軸まわりへの集中が著しく、壁面近傍の粒子存在確率が小さいこと、したがって、ガラス管内の粒子挙動の平均的考察に対する影響は小さいと考えられること、および中心軸に沿う平均粒子速度を除いて定量的考察を行っていないこと、などの理由から、本論文ではガラス管内部の屈折率の影響を考慮していない。

以上で得られた結果から、熱分解・ガス化しつくさないまま大気中に飛散した固形残留粒子の排出量の増加要因、すなわち未燃率の増加要因を検討する。

3・4 実験結果および考察

3・4・1 改良形窯業用バーナの開放燃焼特性

本実験では、はじめに分級された3種類のPET粉末粒径 d をパラメータとし、各粒径条件における火炎挙動および未燃率の把握を行った。PET粉末を供給する前のプロパン主火炎の設定条件に関しては、当量比を $\phi_m = 0.8$ に、熱発生率を $H_m = 11.6 \text{ kW}$ に固定した。そして、その燃焼場にPET粉末を $m_{\text{PET}} = 9.6 \text{ g/min}$ 供給した。なお、PET粉末の熱発生率は $H_{\text{PET}} = 3.5 \text{ kW}$ に相当する。

(1) 粒子径が火炎挙動に及ぼす影響

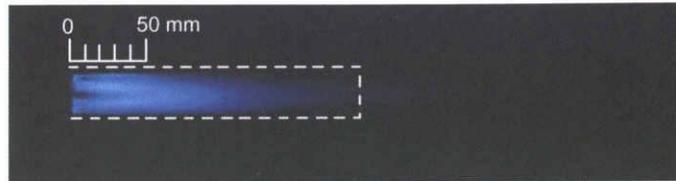
図 3.11 に火炎の直接写真を示す。図 3.11 (a) は PET 粉末を供給する前のプロパン火炎を、図 3.11 (b), (c) および図 3.11 (d) はそれぞれ小： $d \leq 100 \mu\text{m}$ ，中： $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ ，大： $d > 180 \mu\text{m}$ に分級された PET 粉末を供給した場合の火炎を表す。なお、PET 粉末の有無による火炎形状の変化は文献(2)に記されているので、ここでは省略する。

図 3.11 によれば、分級された粒子径が小さいほど火炎は太くかつ長くなり、輝炎の発光も強くなっている。また、輝炎の発光開始位置もより上流に位置する。微細な粒子は粗大な粒子に比べて早期に融解・熱分解によるガス化・着火すると考えられるので、同一の滞在時間および PET 粉末供給量の条件下では、微細な粒子を多く含む粉末ほど熱分解によるガス化ガスの発生量も多くなり、その PET のガス化ガスの活発な拡散燃焼がそれに続く。その結果、図 3.11 のような顕著な相違が現れると考えられる。

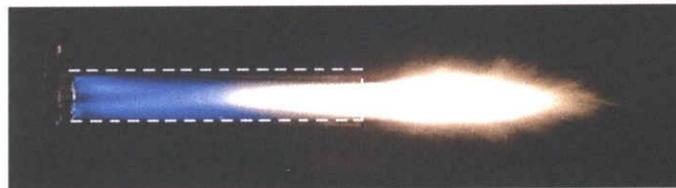
(2) 水膜法による未燃率の定量的検討

図 3.12 に未燃率 M_U の測定結果を示す。左から順に、小： $d \leq 100 \mu\text{m}$ ，中： $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ ，大： $d > 180 \mu\text{m}$ に分級した PET 粉末を用いた場合である。図によれば、小： $d \leq 100 \mu\text{m}$ の場合には未燃率が約 30% であるのに対して、大： $d > 180 \mu\text{m}$ の場合には 90% を超えており、ほとんど熱分解・ガス化・燃焼が行われずに大気中に飛散していることがわかる。中： $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ の場合には、この粉末中に $180 \mu\text{m}$ に近い直径の粒子を多く含んでいるため、大： $d > 180 \mu\text{m}$ の場合と同様に高い未燃率（約 80%）を示している。

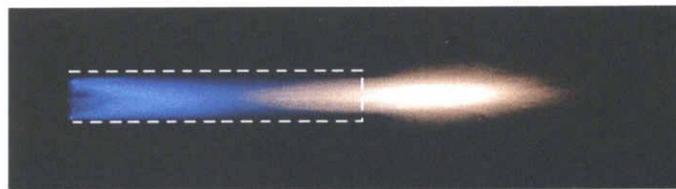
この未燃率の測定結果は火炎形状に基づく予測結果とよく符合しているため、定性的には、



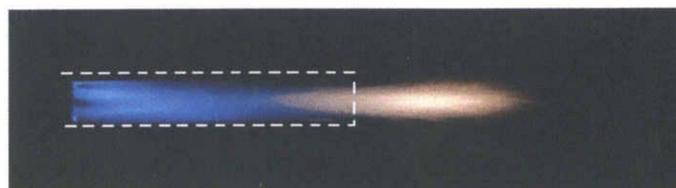
(a) Without PET powder supply



(b) $d \leq 100 \mu\text{m}$



(c) $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$



(d) $d > 180 \mu\text{m}$

Fig. 3.11 Variation of flame appearances with sieved PET-powder
($\phi_m = 0.8$, $H_m = 11.6 \text{ kW}$, $m_{\text{PET}} = 9.6 \text{ g/min}$)

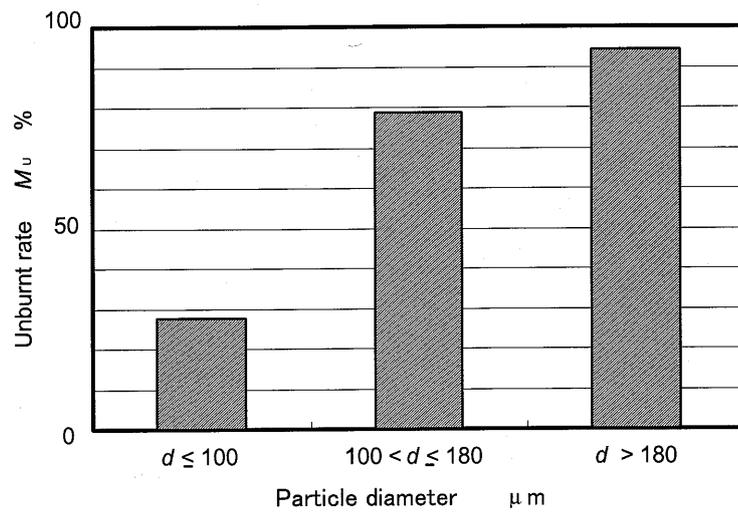


Fig. 3.12 Variation of unburnt PET particle rate with sieved PET powder
 ($\phi_m = 0.8$, $H_m = 11.6$ kW, $m_{PET} = 9.6$ g/min)

火炎発光強度が弱く火炎長が短い場合には、供給された PET 粉末の多くは熱分解によるガス化しつくさないまま大気中に飛散していることがわかる。

3.4.2 固形残留粒子の増加要因に関する検討

本節では、前節の結果を受けて固形残留粒子の増加要因に関する検討を行った。設定条件はプロパン主火炎の当量比と熱発生率を $\phi_m = 0.8$ と $H_m = 11.6 \text{ kW}$ とし、 $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ に分級された PET 粉末の供給量を $m_{\text{PET}} = 9.6 \text{ g/min}$ とした。

(1) プロパン火炎中の軸方向速度の断面分布

図 3.13 に、ガラス管内のプロパン火炎の主燃焼領域における 11 断面の軸方向平均速度の断面分布を示す。横軸は保炎器出口からの距離 x を表す。図によれば、分布形状が下流方向に進むに従い平均化されていくと同時に、発熱により全体的に加速されていることがわかる。加速流中における 2 流体は混合しにくい性質があるので^{(12), (13)}, PET 粒子は分散されにくい条件下に供給されていることがわかる。

(2) PET 粒子速度および存在確率の断面分布

図 3.14 に、 $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ の PET 粉末を供給した場合の火炎の直接写真を改めて示す。図中には、PET 粉末燃焼挙動と PIV および PTV の計測位置との関係がわかるよう軸方向距離 x が併記されている。図 3.15 にその火炎の中心軸上における燃焼ガス速度 V_t および PET 粒子速度 V_{PET} の推移を示す。燃焼ガス速度および PET 粒子速度の測定に関しては、それぞれ図に記された●印 (9 点) および■印 (8 点) の中心軸上の位置で行った。

図 3.14 を見ると、 $x \geq 100 \text{ mm}$ の領域に輝炎が発生し、ガラス管出口下流の $x = 200 \sim 300 \text{ mm}$ の領域で最も発光が著しい。したがって、この領域では融解・熱分解・ガス化・燃焼に伴う PET 粒子径の顕著な減少が予想される。

一方図 3.15 によれば、 $x \leq 100 \text{ mm}$ の上流域では、PET 粒子と燃焼ガスはほぼ等しい軸方向速度と下流方向への速度増加の傾向を示している。しかし $x \geq 150 \text{ mm}$ の下流域では、燃焼ガス速度が $x = 225 \text{ mm}$ 付近で最大値 $V_t = 42.5 \text{ m/s}$ に達してから減速しているのに対して、PET 粒子速度は $V_{\text{PET}} = 25 \text{ m/s}$ とほぼ一定値を示している。このような両者の速度挙動の差が生じる要因として、燃焼ガス流速の PIV 計測に用いたトレーサ粒子と PET 粒子の粒径と質量の差および慣性力による PET 粒子の加速遅れなどが挙げられる。

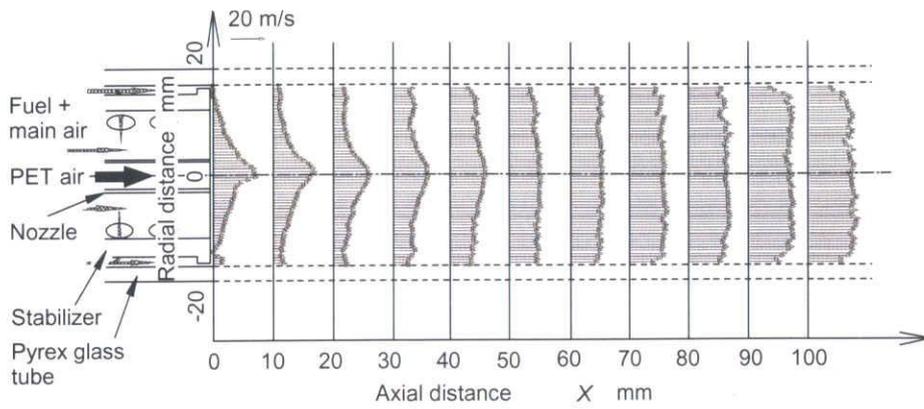


Fig. 3.13 Mean velocity profiles across the sections without PET-powder supply ($\phi_m = 0.8$)

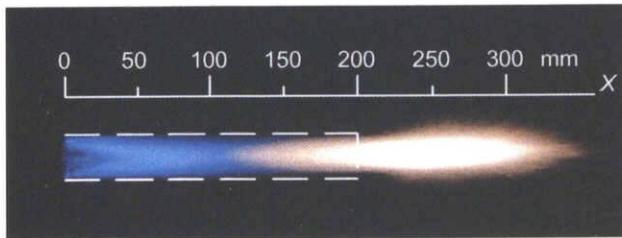


Fig. 3.14 Appearances of the PET-powder flame ($\phi_m = 0.8, m_{PET} = 9.6 \text{ g/min}$)

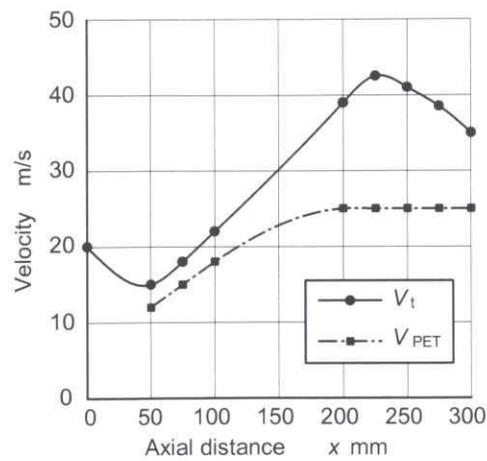


Fig. 3.15 Velocity variations along the axis

なお、図 3.15 の結果に基づいて、ガラス管内 ($x=0 \sim 200 \text{ mm}$) の火炎領域における PET 粒子の滞在時間を概算すると約 11 ms となった。この滞在時間は、次章で述べる単一球形粒子の急速加熱実験の球対称一次元解析結果^{(14), (15)}において得られた粒径 150 μm の粒子の寿命に比して短い。このような高温領域における滞在時間が不十分である PET 粉末の燃焼条件も、十分な熱分解・ガス化が行われず、未燃率が增大する要因の一つとなることが知れる。

次に、PTV 画像における粒子座標を統計的に処理して得られた粒子の空間分布図と存在確率のヒストグラムを、それぞれ図 3.16 の上側と下側に示す。上図に関しては、ガラス管内の $x=50 \sim 100 \text{ mm}$ の領域と、バーナ出口下流の $x=200 \sim 300 \text{ mm}$ の中心軸を通る横断面において計測した。また下図のヒストグラムは、上図中に引かれた 5 mm 間隔の二本の破線に囲まれた領域内に存在する粒子群に基づいて作成されている。

図 3.16 (a) によれば、 $x=50 \text{ mm}$ 断面の中心軸付近に偏って多く存在していた PET 粒子が、 $50 \sim 100 \text{ mm}$ の範囲ではガラス管内全体に分散していく様子が観察できる。しかし、それより下流の断面 [図 3.16 (b), (c)] ではわずかに PET 粒子の存在範囲が広がるものの、大部分の粒子が中心軸付近に存在していることが知れる。この原因の一つとして、先に述べたガラス管内での加速流の影響が考えられる^{(12), (13)}。

以上の PIV/PTV 計測の結果から、未燃率の増加要因として、加速流の影響によりバーナ内において PET 粒子が効果的に分散されていなかったこと、PET 粒子が中心軸付近に多く偏って存在しているため個々の粒子への熱伝達が阻害されて有効に熱が利用されていなかったこと、および高温領域における十分な滞在時間が得られていなかったことの 3 点が考えられる。これにより、未燃率低減のための基本的なバーナ設計方針が得られたことになる。

(3) 飛翔 PET 粒子の形状と粒径変化

図 3.17 に、いくつかの代表的な計測断面における PET 粒子写真および粒子径計測結果から得られたヒストグラムを示す。図 3.17 (a) は非燃焼時の $x=50 \text{ mm}$ 断面、図 3.17 (b), (c) および図 3.17 (d) はそれぞれ燃焼時における $x=100, 200, 300 \text{ mm}$ の断面の測定結果である。下側の図中の右上の数字は計測に用いたデータ数を表す。なお、図 3.17 に示した粒子写真は互いに対応するものではなく、得られた画像から任意に抽出されたものである。

上図から、まず非燃焼時に撮影された粒子の概形はスパイラルミルで粉碎されたままの角張った不規則な形を呈している。しかし一旦、高温燃焼場にさらされて融解過程を経ると、小さい粒子から次第に角が丸くなり、中心部分が明るくなっていく。このような概形の変化は下流

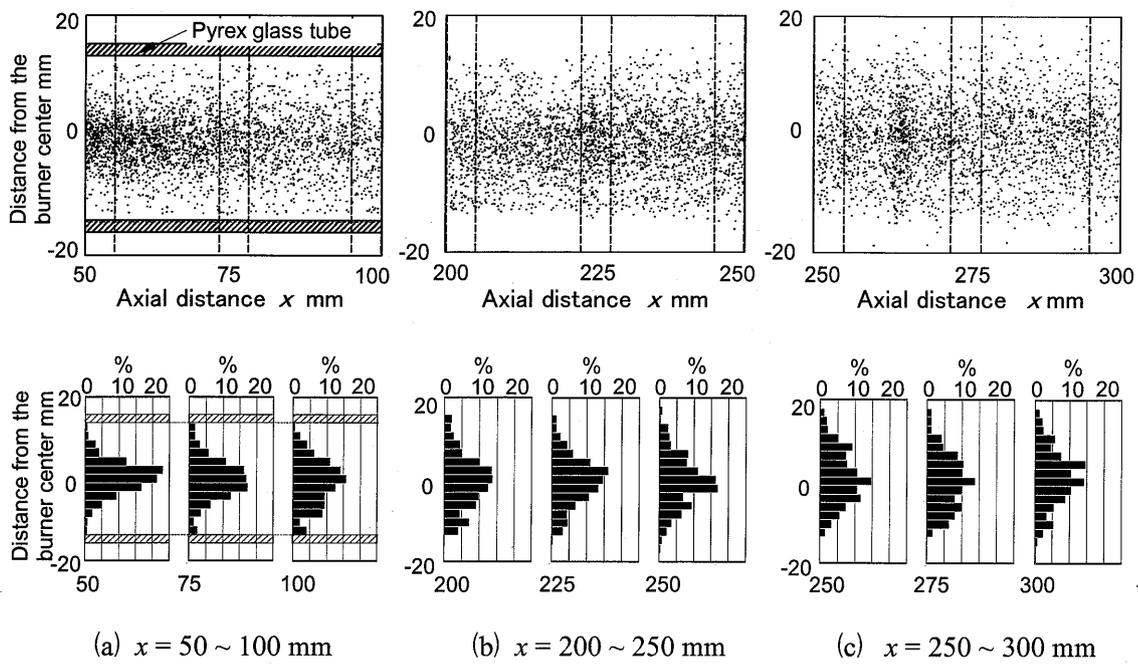


Fig. 3.16 Variations of distributions and histograms of PET-particles

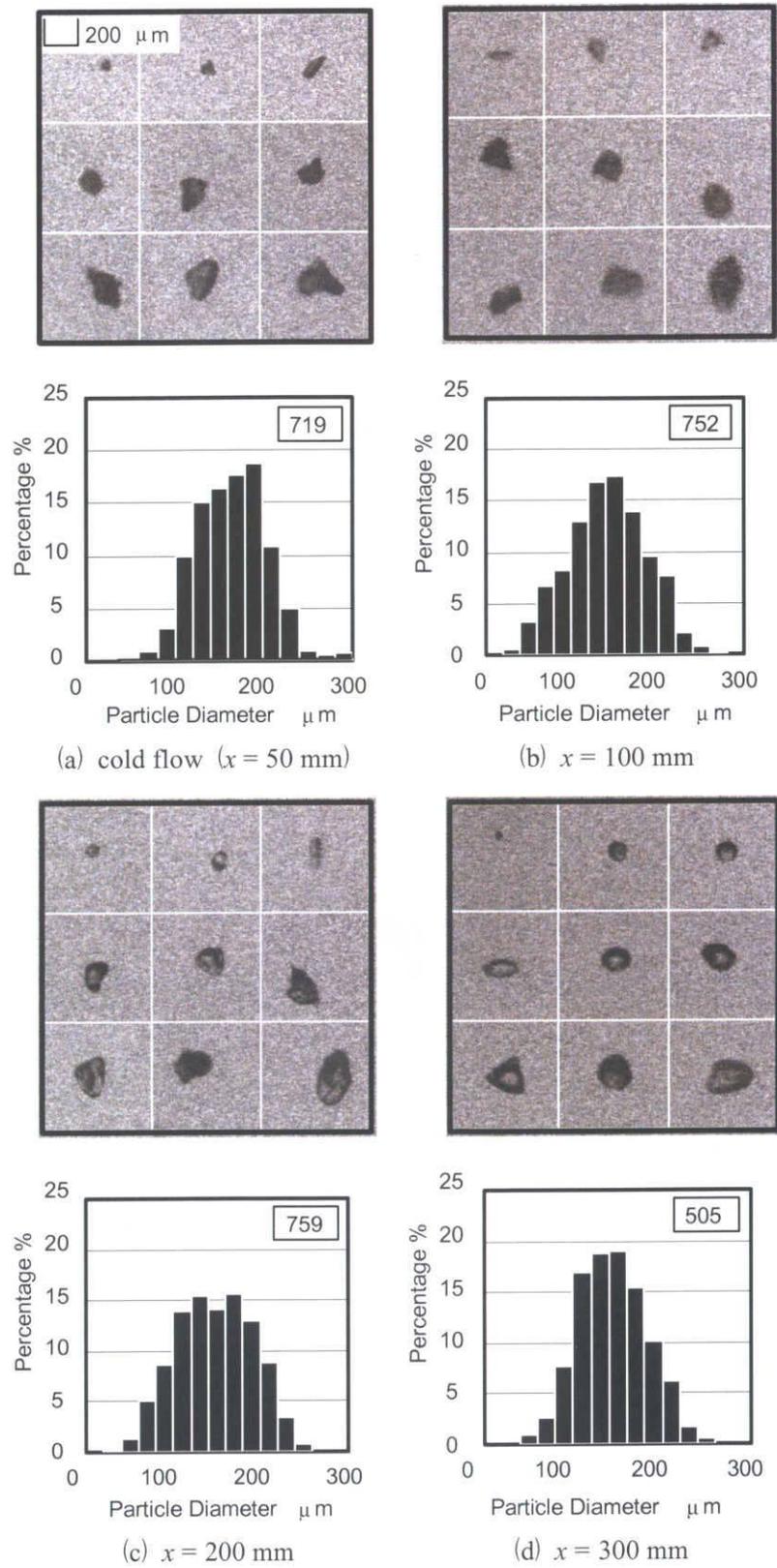


Fig. 3.17 Variations of direct photographs and histograms of PET-particles

ほど激しく、融解による粒子形状の変化と透過性の増大が主要因となっていると考えられる。

一方、図 3.17 下図のヒストグラムを見ると、測定断面が下流側へ移動するに従い、分布のピークが粒径の小さい方向へ移行していく傾向が見られる。しかし、PET 粒子の平均粒径の大きい本実験の作動条件では基本的に未燃率が高いため、ヒストグラムに現われる変化は小さいと考えられる。

以上、レーザ光を背景光に用いることにより、高速燃焼ガス中を飛翔している PET 粒子の詳細な形状観察と粒子径計測が可能となり、下流方向への PET 粒子の形状と粒径の変化を把握することができた。

3・5 第3章のまとめ

本章では、PET 粉末燃焼用改良バーナを大気開放燃焼させたときに熱分解・ガス化しつくさないまま大気中に飛散した固形残留粒子の排出量を測定し、粒子径に伴う未燃率の変化を把握した。そして、その未燃率を系統的に低減させるための諸要因を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

① PIV/PTV 計測結果から、未燃率の増加要因として、

- ・ 加速流の影響によりバーナ内において PET 粒子が効果的に分散されていないこと
- ・ PET 粒子が中心軸付近に多く存在して粒子個々への熱伝達が悪く有効に熱が使われていないこと
- ・ 十分な滞在時間が得られていないこと

の3点が考えられる。

② ダブルパルスレーザの一方の光を背景光として利用することにより、燃焼領域を飛翔している粒子の詳細な形状の拡大観察を可能にした。また、得られた粒子写真に画像処理を施して粒子径計測を行うことで、下流方向への粒子径変化も明らかにした。

第3章の参考文献

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (2) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), 日本機械学会論文集 (B 編), **71-701**, (2005), 357-364.
- (3) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 (B 編), **71-711**, (2005), 2792-2799.
- (4) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (廃棄 PET 樹脂粉末の置換率が燃焼挙動に及ぼす影響), 第 13 回環境工学シンポジウム 2003 講演論文集 No.03-10, (2003), 326-329.
- (5) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (樹脂粉末の種類と粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 21-22.
- (6) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (PET 粉末粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 23-24.
- (7) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*, (2005), CD-ROM: Paper No. 074.
- (8) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の画像計測), 日本機械学会論文集 (B 編), 掲載決定, 論文 No. 05-0342.
- (9) 岡島敏・河野通方, 工業熱力学, (1995), 99, 学献社.
- (10) 岡本孝司・川橋正昭・西尾茂 (訳), PIV の基礎と応用-粒子画像流速測定法-, (2000), 96.

- (11) 椿淳一郎・早川修, 現場で役立つ粒子径計測技術, (2001), 120-121.
- (12) 石野洋二郎・山口譽起・大岩紀生, 広がり流路内の火炎の安定性および保炎(平面せん断流中の拡散火炎の構造と挙動), 日本機械学会論文集(B編), 57-538, (1991), 206-212.
- (13) 石野洋二郎・山口譽起・大岩紀生, シュバルツ・クリストッフエル写像変換を用いた離散渦法による二次元拡大・縮小流路内のせん断流の数値解析, 日本機械学会論文集(B編), 68-667, (2002), 299-306.
- (14) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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(プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称一次元解析), 日本機械学会論文集(B編), 71-708, (2005), 2154-2161.
- (15) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2005), CD-ROM: Paper No. KD.08.

第4章 プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の 球対称一次元熱伝導解析

4.1 はじめに

第2章では、LPガスを熱源として多量に消費している窯業をサーマル・リサイクルの対象とし、まず市販の窯業用バーナにPET粉末の供給が可能なよう改良を施した。そして、その改良形窯業用バーナをモデル窯業炉に設置し、PET粉末を助燃料として使用したときの炉内燃焼特性を把握した。その結果、窯業の焼成工程において要求される均一な空間炉内温度場および還元雰囲気の設定がPET粉末供給時においても実現でき、窯業用助燃料としての有効性が示された⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、高温の炉内にPET粉末の残留は全く確認されなかった。しかし一方、改良形窯業用バーナの大気開放燃焼実験においては、多量のPET粉末が熱分解・ガス化しつくさないまま固形残留粒子として排出された⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。そのため、今後プラスチック粉末を工業用・産業用助燃料として用い、レトロフィットも含めて幅広い分野でサーマル・リサイクルを行うためには、大気開放燃焼時にも形成される火炎内で十分な熱分解・ガス化を行わせることが可能な、すなわち、良好な熱分解・ガス化特性をもつ新たな実用バーナの開発が必須条件である。そこで第3章では、PIV/PTV計測手法によって、窯業用バーナ内部の燃焼ガスとPET粉末の流動および飛翔PET粒子の形状と直径変化の画像解析結果からいくつかの固形残留粒子の増加要因を明らかにした⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。

一方、新たな実用バーナの設計をするに当たり、これまでの微粉炭燃焼に関するデータ⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁹⁾に基づいて、微粉炭とプラスチック粉末の燃焼特性の比較を試みている。その結果、(1)融点の低いプラスチック樹脂粉末は容易に軟化・融解するので、バーナ壁への付着を避けるためには、燃焼器入口直前まで融点以下の低温雰囲気で供給しなければならないこと、(2)効率的な加熱・融解・熱分解・ガス化・燃焼を支援するための高温酸化性領域をバーナ出口近傍に形成させる必要があることが判明した。また、プラスチック粉末は多数のプラスチック微粒子の集まりであることから、単一プラスチック微粒子の加熱・燃焼特性を知ることは、粉末燃焼を考える上で重要な意味をもつ。とくに、高温雰囲気に置かれたプラスチック粒子が消滅するまでにかかる時間(プラスチック粒子の寿命)を把握することは、バーナの構造および寸法に影響する因子を調べる上で重要な知見となる。このような観点からこれまでに、プラスチック粉末燃焼を対象としたマクロな研究^{(1)-(9), (20)-(22)}から単一プラスチック微粒子を対象としたミクロな研究⁽²³⁾⁻⁽²⁵⁾まで幅広い先行実

験を行ってきた。

本章では、それらの先行実験を解析的に評価するための第一段階として、高温不活性雰囲気
に置かれた微小単一プラスチック粒子の加熱から熱分解・ガス化までの過程を固体加熱過程、
融解過程、液体加熱過程、および熱分解・ガス化過程の4つの素過程に分割し、球対称一次元
熱伝導解析を行った^{(26),(27)}。これにより、実験による測定が困難なプラスチック樹脂微粒子の粒
子内温度履歴の推測が可能となり、各素過程に要する所要時間および加熱開始から熱分解・ガ
ス化までの累積時間などの解析的評価も可能となる。そして、ヌセルト数の寿命に及ぼす影響
を簡単に考察し、窯業用バーナ内の滞在時間の実測値⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾と本解析結果の比較を行った。

なお、本章の内容は、文献(26)において公表済みであり、文献(27)に掲載済みである。

4.2 記 号

a	: 温度伝導度	[m ² /s]
Bi	: ビオ数	[-]
c	: 比熱	[kJ/kg·K]
d	: 樹脂粒子の直径 (= 2R)	[m]
Fo	: フーリエ数	[-]
L	: 潜熱	[kJ/kg]
Nu	: ヌセルト数	[-]
Pr	: プラントル数	[-]
r	: 粒子中心から半径方向への距離	[m]
r_m	: 粒子体積を二等分する半径	[m]
R	: 樹脂粒子の半径	[m]
Re	: レイノルズ数	[-]
T	: 温度	[°C]
t	: 加熱開始からの時間 (累積時間)	[s]
$T(t, r)$: 粒子内の温度変化	[°C]
α	: 粒子周りの気体の熱伝達率	[W/m ² ·K]
λ_a	: 熱伝導率	[W/m·K]
$\theta(t, r)$: 粒子内の無次元温度変化	[-]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
τ	: 素過程における所要時間	[s]

添 字

a	: 粒子の周囲気体
c	: 代表温度
f	: 膜温度
g	: 周囲状態
i	: 素過程 ($i = s, m, l, v$)
l	: 液体加熱過程
m	: 融解過程
n	: 寿命
P	: プラスチック樹脂
PE	: ポリエチレン樹脂
PET	: ポリエチレンテレフタレート樹脂
s	: 固体加熱過程
v	: 熱分解・ガス化過程
0	: 初期状態

4.3 加熱過程および熱分解・ガス化過程の解析モデル

本解析では、初期直径 d_0 の微小プラスチック粒子が温度 T_g の高温不活性雰囲気突然さらされた場合の加熱から熱分解・ガス化に至る一連の過程を解析の対象とする。この場合、すでに述べた加熱・熱分解・ガス化過程の先行実験⁽²³⁾⁻⁽²⁵⁾において、タングステン線まわりにほぼ球状に成形されて保持されたプラスチック樹脂微粒子を用いていることを考慮して、解析を球対称一次元に簡単化する。さらに、加熱開始から熱分解・ガス化終了までの全過程を固体加熱過程、融解過程、液体加熱過程、および熱分解・ガス化過程の4つの素過程に分割し、それぞれの素過程が互いに独立に進行するものと仮定する。以下に、対象とするプラスチック樹脂の物性値とその取扱いを含めて、それぞれの素過程における解析について述べる。なお、本解析では、ポリエチレンテレフタレート (Polyethylene terephthalate, PET と略記) およびポリエチレン (Polyethylene, PE と略記) を代表的なプラスチック樹脂として選定した。

4.3.1 固体加熱過程

高温不活性雰囲気に投入後の粒子内の温度履歴 $T(t, r)$ を記述する球対称一次元非定常熱伝導方程式および初期・境界条件は、プラスチック樹脂物性値の温度依存性を無視すると、

$$\text{支配方程式} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left\{ \frac{1}{r^2} \left[r^2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right) / \partial r \right] \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\text{初期条件} \quad t = 0; \theta = 1 \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\text{境界条件} \quad r = 0; \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \dots\dots\dots (4.3)$$

$$r = R; \lambda_p \frac{\partial \theta}{\partial r} = \alpha \theta \dots\dots\dots (4.4)$$

と与えられる。ここで、 t , r および R は加熱開始からの経過時間、粒子中心からの半径方向距離およびプラスチック粒子の初期半径を表し、 a , λ_p および α は固体プラスチック樹脂の温度伝導度と熱伝導率およびプラスチック粒子周りの熱伝達率を表す。また $\theta(t, r)$ は、次式で定義される粒子内の無次元温度を意味する。

$$\theta(t, r) = \frac{T(t, r) - T_g}{T_0 - T_g} \dots\dots\dots (4.5)$$

表 4.1 に、PET と PE の二種類のプラスチック樹脂の主要物性値を示す。解析では物性値の温度依存性を考慮せず、PET 樹脂に対しては 1 atm, 25 °C における値⁽²⁸⁾を、PE 樹脂に対しては 1

atm, 300 K における値⁽²⁹⁾をそれぞれ採用する。

粒子周りの熱伝達率 α の評価には、よく知られた微小浮遊粒子、また対流が無関係な場合に対する近似式⁽³⁰⁾を用いる。

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda_a} = 2.0 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、 Nu , $d_0 (= 2R)$ および λ_a はそれぞれヌセルト数、プラスチック粒子の初期直径および粒子周りの気体の熱伝導率を表す。この場合、粒子の初期温度と融解温度の平均値を粒子側の代表温度 T_c とし、これと高温周囲ガス T_g の平均温度を膜温度 T_f として、空気の熱伝導率を算出した。

$$T_f = \frac{T_g + T_c}{2}, \quad T_c = \frac{T_0 + T_m}{2} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

表 4.2 に、二種類の樹脂の融解および熱分解・ガス化に関する物性値⁽³¹⁾を示す。表 4.2 から知れるように、プラスチック樹脂の融解温度と熱分解・ガス化温度が数十度の温度範囲をもって与えられている。そこで本章では、それらの上限値と下限値の単純平均値をもって融解温度および熱分解・ガス化温度と定義し、表 4.2 に平均融解温度 T_m あるいは平均熱分解・ガス化温度 T_v として与えられている。なお、参考として表 4.3 に、PET および PE 樹脂の各素過程で用いた代表温度 T_c の値を示す。

式 (4.2) ~ (4.7) の諸条件を加味して式 (4.1) の熱伝導方程式を解くと、次式の解析解が得られる。

$$\theta(t,r) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(\sin k_n - k_n \cos k_n)}{2k_n - \sin 2k_n} \exp(-k_n^2 Fo) \frac{\sin\left(k_n \frac{r}{R}\right)}{k_n \frac{r}{R}} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、 Fo はフーリエ数を意味し、

$$Fo = \frac{at}{R^2} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

で定義される。また、 k_n は次式の特性方程式を満足する連続根で、固有値を意味する。

$$k_n \cot k_n = 1 - Bi \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

ここで、 Bi はビオ数を表し、式 (4.6) で定義されるヌセルト数を用いて次式で与えられる。

Table 4.1 Fundamental properties of a plastic-resin

Resin	a mm ² /s	λ_p mW/m·K	ρ_p kg/m ³	c_p kJ/kg·K
PET	0.171	290	1.38×10^3	1.23
PE	0.161	340	0.92×10^3	2.30

Table 4.2 Properties of plastic-resin for fusion and vaporization⁽³¹⁾

	Resin	Temp. range [°C]	Ave. Temp. [°C]		Latent heat [kJ/kg]
			T_m		
Fusion	PET	250 ~ 275	T_m	260	35
	PE	60 ~ 130		95	121
Vaporization	PET	400 ~ 500	T_v	450	114
	PE	410 ~ 515		460	321

Table 4.3 Typical temperature T_c of each heating process

Resin	T_c [°C]			
	Solid	Melting	Liquid	Vaporization
PET	143	260	355	450
PE	60	95	278	460

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda_p} = \frac{1}{2} Nu \frac{\lambda_a}{\lambda_p} \dots\dots\dots (4.11)$$

なお、直径百マイクロン程度の微粒子の場合でも、粒子表面が融解点に達してから中心温度が融解点に達するまでに加熱遅れが生じる。そこで、この加熱遅れ期間の取扱いを簡単化するために、表面温度が融解点になった後も固相を維持したまま加熱が進行し、粒子外殻部分の融解温度以上の超過熱量と融解点に達しない粒子内殻部の不足熱量が等しくなった時刻を固体加熱期間の終了とみなし、この時点で改めて粒子温度を融解温度に等しく均一であると設定する。また、樹脂の密度と比熱の温度依存性を無視している本解析では、不足熱量と超過熱量の平衡関係に対して次のような考察 [付録 (b-1) を参照] が可能である。すなわち、粒子内殻部の融点までの不足温度と粒子外殻部の融点以上の超過温度の変化をそれぞれ平均不足温度差および平均超過温度差の変化に置き換えて考えると、熱量バランスが成立する時刻近傍では、両者がほぼ一定で互いに等しいと近似することができる。この場合、粒子の内殻部と外殻部の体積が互いに等しくなる半径位置の温度が融解温度に達する時刻を、固体加熱時間の終了時間に対応させることが可能となる。すなわち、

$$T(t, r_m) = T_m, \quad r_m = \frac{1}{\sqrt[3]{2}} R \dots\dots\dots (4.12)$$

を満たす時間が固体加熱過程の終了時間を与える。

4.3.2 融解過程

融解過程の期間中、密度が一定で粒子温度が融解温度に均一に保たれると仮定し、高温ガスからの伝達熱量が融解の潜熱に利用されるとすると、次式によって融解に要する時間 τ_m が評価される。

$$\tau_m = \frac{d_0 \rho L_m}{6\alpha(T_g - T_m)} \dots\dots\dots (4.13)$$

ここで、式 (4.6) を適用するにあたり代表温度を融解温度に等しく $T_c = T_m$ とした。また、 L_m は融解潜熱を表す。

4.3.3 液体加熱過程

固体加熱過程の場合と同様に樹脂の物性値の温度依存性を無視し、式 (4.1) ~ (4.11) の一連の方

程式系を解いて粒子内の温度変化を計算する。式(4.6)を適用するにあたり、周囲流体の熱伝導率を算出する場合の粒子側の代表温度 T_c として、次式で定義される融解温度と熱分解・ガス化温度の平均値を用いる。

$$T_c = \frac{T_m + T_v}{2} \dots\dots\dots (4.14)$$

液体加熱期間の終了時間の決定に際しても固体加熱と同様に簡単化し、粒子内の半径位置 r_m における温度が熱分解・ガス化温度になった時刻をもって当てる。すなわち、次式を満たす時間が液体加熱時間の終了時間となる。

$$T(t, r_m) = T_v, \quad r_m = \frac{1}{\sqrt[3]{2}} R \dots\dots\dots (4.15)$$

4.3.4 熱分解・ガス化過程

熱分解・ガス化過程も著しく簡単化し、準定常蒸発の考え方を適用する。すなわち、熱分解・ガス化過程を通して粒子内温度は熱分解・ガス化温度に等しく一様であるとし、 d^2 -則を適用することにより、熱分解・ガス化に要する時間 τ_v が次式のように評価できる。

$$\tau_v = \frac{d_0^2 \rho L_v}{8\lambda_{a,v}(T_g - T_v)} \dots\dots\dots (4.16)$$

ここで、 L_v は分解・気化潜熱を意味する。なお、周囲流体の熱伝導率を算出するにあたり、代表温度として熱分解・ガス化温度を採用し、 $T_c = T_v$ とした。

4.4 解析結果および考察

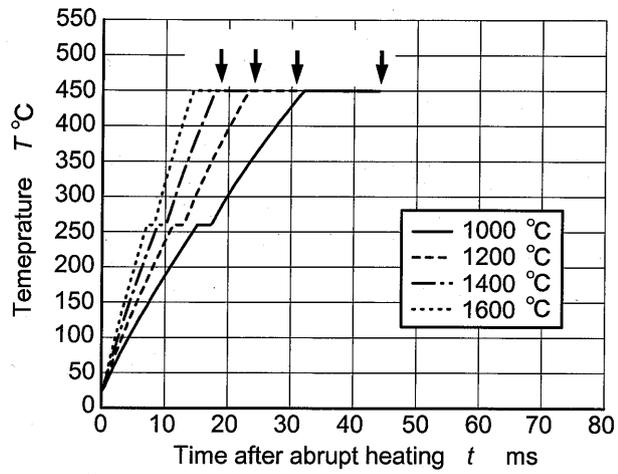
解析に際して、粒子の初期温度を $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ とし、雰囲気温度を $T_g = 1000, 1200, 1400\text{ }^\circ\text{C}$ および $1600\text{ }^\circ\text{C}$ と $200\text{ }^\circ\text{C}$ 毎に 4 段階に変化させた。また、初期粒子径を、 $d_0 = 100, 150\text{ }\mu\text{m}$ および $200\text{ }\mu\text{m}$ と変化させた。

4.4.1 プラスチック微粒子内の温度履歴

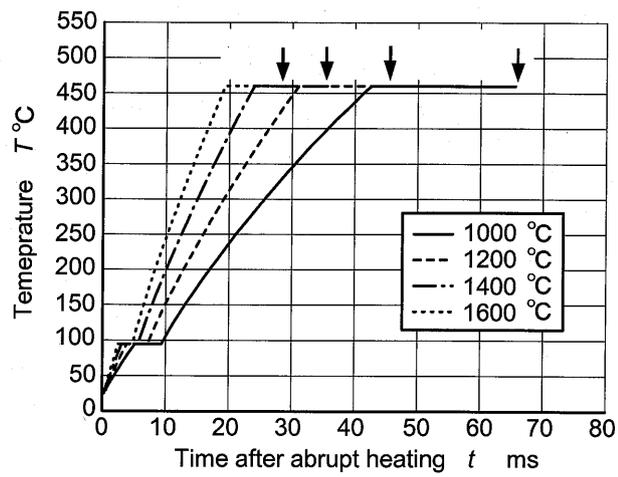
粒子内温度解析結果の代表例として、初期粒子径 $150\text{ }\mu\text{m}$ の粒子の半径位置 r_m における温度の時間変化 $T(t, r_m)$ を、雰囲気温度をパラメータとして図 4.1 に示す。図 4.1 (a) には PET 樹脂を、図 4.1 (b) には PE 樹脂を用いた場合の結果を示す。縦軸には $r = r_m$ における粒子内温度 $T\text{ }^\circ\text{C}$ が、横軸には加熱開始からの経過時間 $t\text{ ms}$ がとられている。なお、図中の矢印↓はそれぞれの周囲温度 T_g における熱分解・ガス化終了時間を示す。また、素過程における所要時間 τ_s 、各素過程までの累積時間 t_i および 2 種類の樹脂の寿命 τ_m の解析結果を、初期粒子径 d_0 および周囲温度 T_g をパラメータとして表 4.4 に示す。

図 4.1 (a) および図 4.1 (b) を見ると、両者ともに固体加熱過程および液体加熱過程では、ほぼ直線的な温度上昇が続くこと、そして周囲温度の低下とともにそれぞれの素過程の所要時間が増大することがわかる。ちなみに表 4.4 から初期粒子径 $150\text{ }\mu\text{m}$ の PET 粒子の場合、固体加熱時間は $\tau_{s,PET} = 7.1 \sim 15.1\text{ ms}$ 、融解時間は $\tau_{m,PET} = 0.9 \sim 2.0\text{ ms}$ 、液体加熱時間は $\tau_{l,PET} = 6.4 \sim 15.0\text{ ms}$ 、熱分解・ガス化時間は $\tau_{v,PET} = 4.8 \sim 12.0\text{ ms}$ となり、融解時間の割合が極めて小さいこと、加熱開始から熱分解・ガス化までの累積時間 (PET 粒子の寿命) は比較的長く $\tau_{m,PET} = 19.2 \sim 44.1\text{ ms}$ と与えられることが知れる。

一方、PE 粒子の場合は、固体加熱時間は $\tau_{s,PE} = 2.5 \sim 5.2\text{ ms}$ 、融解時間は $\tau_{m,PE} = 1.9 \sim 4.0\text{ ms}$ 、液体加熱時間は $\tau_{l,PE} = 14.9 \sim 33.5\text{ ms}$ 、熱分解・ガス化時間は $\tau_{v,PE} = 9.1 \sim 22.8\text{ ms}$ となり、加熱開始から熱分解・ガス化までの累積時間 (PE 粒子の寿命) は $\tau_{m,PE} = 28.4 \sim 65.5\text{ ms}$ となる。PET 樹脂に比べて PE 樹脂の融点が低く比熱および潜熱も大きいという表 4.1 および表 4.2 のデータからもうかがい知れるように、PE 粒子の固体加熱時間が短く、寿命の大部分が液体加熱と熱分解・ガス化に費やされていること、PE 粒子の寿命が PET 粒子の寿命の約 1.5 倍に相当することなどの特徴がわかる。このことは、粒子の寿命が樹脂の熱分解・ガス化温度と融解温度との差、比熱、および潜熱に大きく依存することを意味する。



(a) PET-resin particle



(b) PE-resin particle

Fig. 4.1 Temperature variations of the particle at r_m with the ambient gas temperature; $d_0 = 150 \mu\text{m}$

Table 4.4 Numerical summary of the heating time and the particle life time; the ambient and the initial particle diameter are varied as two main parameters

d_0 μm	T_g $^\circ\text{C}$	τ_g/t_g ms		τ_m/t_m ms		τ_ℓ/t_ℓ ms		τ_v/t_v ms		τ_i ms	
		PET	PE	PET	PE	PET	PE	PET	PE	PET	PE
100	1000	6.7/6.7	2.3/2.3	0.9/7.6	1.8/4.1	6.6/14.2	14.9/19.0	5.3/19.5	10.2/29.2	19.5	29.2
	1200	5.0/5.0	1.7/1.7	0.6/5.6	1.3/3.0	4.7/10.3	10.8/13.8	3.7/14.0	6.9/20.7	14.0	20.7
	1400	3.9/3.9	1.4/1.4	0.5/4.4	1.0/2.4	3.6/8.0	8.3/10.7	2.7/10.7	5.2/15.9	10.7	15.9
	1600	3.2/3.2	1.1/1.1	0.4/3.6	0.8/1.9	2.8/6.4	6.6/8.5	2.1/8.5	4.1/12.6	8.5	12.6
150	1000	15.1/15.1	5.2/5.2	2.0/17.1	4.0/9.2	15.0/32.1	33.5/42.7	12.0/44.1	22.8/65.5	44.1	65.5
	1200	11.2/11.2	3.9/3.9	1.4/12.6	3.0/6.9	10.6/23.2	24.2/31.1	8.2/31.4	15.6/46.7	31.4	46.7
	1400	8.8/8.8	3.1/3.1	1.1/9.9	2.3/5.4	8.0/17.9	18.6/24.0	6.1/24.0	11.6/35.6	24.0	35.6
	1600	7.1/7.1	2.5/2.5	0.9/8.0	1.9/4.4	6.4/14.4	14.9/19.3	4.8/19.2	9.1/28.4	19.2	28.4
200	1000	26.9/26.9	9.2/9.2	3.5/30.4	7.1/16.3	26.6/57.0	59.5/75.8	21.3/78.3	40.6/116.4	78.3	116.4
	1200	20.0/20.0	6.9/6.9	2.5/22.5	5.3/12.2	18.8/41.3	43.0/55.2	14.6/55.9	27.8/83.0	55.9	83.0
	1400	15.6/15.6	5.5/5.5	2.0/17.6	4.2/9.7	14.3/21.9	33.0/42.7	10.9/42.8	20.7/63.4	42.8	63.4
	1600	12.6/12.6	4.5/4.5	1.6/14.2	3.4/7.9	11.3/25.5	26.4/34.3	8.6/34.1	16.2/50.5	34.1	50.5

4.4.2 初期粒子径 d_0 と素過程の所要時間 τ の関係

初期粒子径 d_0 の変化に伴う素過程の所要時間 τ の変化を、周囲温度を $T_g = 1600$ °C とした場合について図 4.2 に示す。図 4.2 (a) に PET 樹脂を用いた場合を、図 4.2 (b) に PE 樹脂を用いた場合を示す。横軸には初期粒子径 d_0 μm が、縦軸には加熱開始からの各素過程までの累積時間 t_i ms がとられている。また、図中には、4 素過程の所要時間 τ_i が区分表示されている。

球対称一次元非定常加熱過程では、それぞれの素過程における加熱時間は粒子径の二乗に比例して増加する。図 4.2 はその依存性を明確に示しており、たとえば PET 樹脂の場合、 $d_0 = 200$ μm の PET 粒子は 100 μm の粒子と比較して 4 倍の 34.1 ms の寿命を有し、PE 樹脂の場合は、50.5 ms の寿命をもつことが知れる。

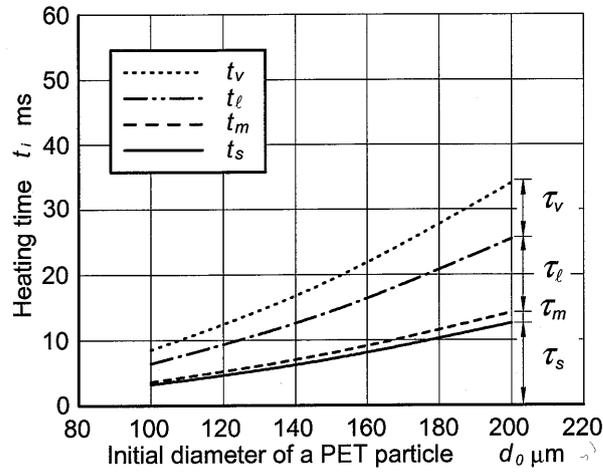
つぎに、それぞれの素過程の所要時間の割合を見てみると、PET 樹脂の場合、固体加熱過程は 37 %、融解過程は 5 %、液体加熱過程は 33 %、熱分解・ガス化過程は 25 % となる。これにより固体加熱および液体加熱時間は PET 粒子の寿命に対してほぼ同程度の割合で貢献し、熱分解・ガス化時間を含めると全体の 95 % を占めているのに対して、融解時間はわずか 5 % であることがわかる。一方、PE 樹脂の場合を見ると、固体加熱過程は 9 %、融解過程は 6 %、液体加熱過程は 52 %、熱分解・ガス化過程は 33 % となり、粒子の寿命に対して液体加熱時間が半分以上の割合を占めていることがわかる。融解時間は PET 粒子の場合と同様、わずか 6 % である。

以上から、2 種類のプラスチック樹脂粒子の加熱から熱分解・ガス化に至るまでの過程では、融解過程の影響は小さく、ほとんど無視できることが明らかである。

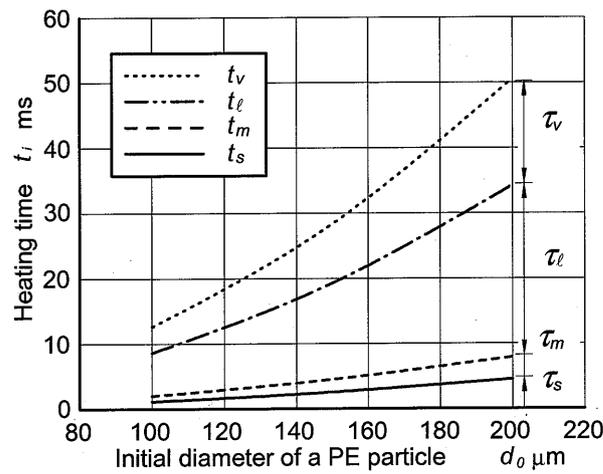
4.4.3 初期粒子径 d_0 と寿命 τ_n の関係

初期粒子径 d_0 の変化に伴う粒子の寿命 τ_n の変化を、周囲温度をパラメータとして図 4.3 に示す。図 4.3 (a) に PET 樹脂の場合を、図 4.3 (b) に PE 樹脂の場合を示す。また、横軸に初期粒子径 d_0 μm が、縦軸に粒子の寿命 τ_n ms がとられている。図 4.2 でも触れたように、粒子径の影響は粒子表面積の比を通して現れるので、それぞれの周囲ガス温度に対して二次的に増加している。それに対して、周囲ガス温度 T_g の影響はそれぞれの代表温度との差 ($T_g - T_c$) を通じて発現する。それぞれの素過程における代表温度 T_c が表 4.3 に示した値であることを考慮すると、 $T_g = 1600$ °C の場合は $T_g = 1000$ °C の場合の約 2 倍の温度差を有していることがわかり、図 4.3 から明確にその依存性を読み取ることができる。

以上の解析で得られた値は、高温不活性・浮遊雰囲気における 4 つの素過程の独立した加熱を仮定して得られた値であり、燃焼の影響、素過程の複合性、および熱伝達へのレイノルズ数の依存

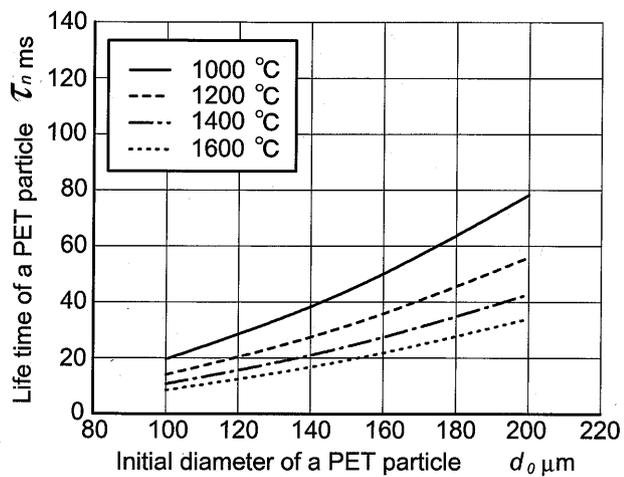


(a) PET-resin particle

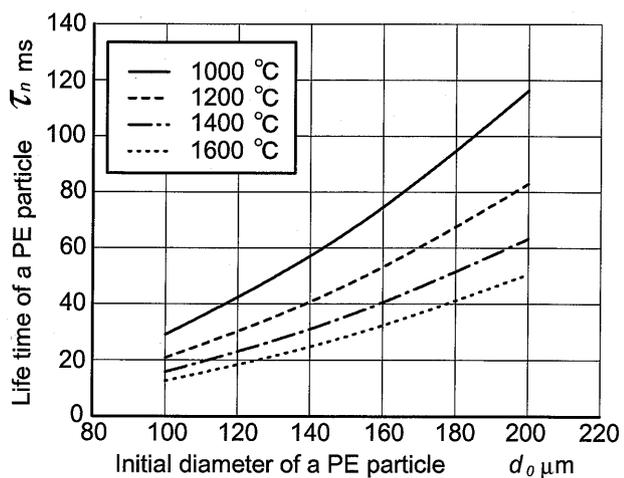


(b) PE-resin particle

Fig. 4.2 Contribution of each heating time to the particle life time at the initial diameter; $T_g = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$



(a) PET-resin particle



(b) PE-resin particle

Fig. 4.3 Variations of the particle life time with the ambient gas temperature and the initial particle diameter

性等が重畳する現実の加熱および熱分解・ガス化過程とは異なる。しかし、両者の寿命の概略を知ることは、プラスチック樹脂粉末を代替燃料とするバーナや燃焼器の構造・寸法などを決定する際の極めて重要な知見となる。

4.4.4 考 察

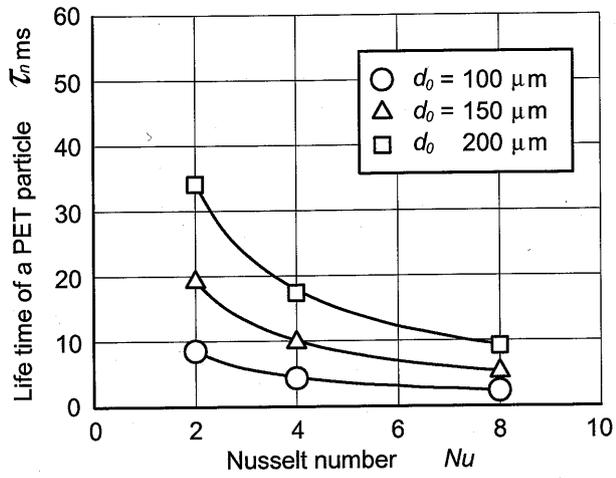
以上のように、球対称一次元非定常熱伝導解析により二種類の樹脂の粒子内温度履歴、素過程における所要時間 τ_r および粒子寿命 τ_n を解析的に評価することができた。しかし、これらの結果はいくつかの単純化の仮定の下で得られたものである。そこでまず、これらの仮定の中で解析結果にもっとも重要な影響を及ぼすと考えられる微小浮遊粒子近似について検討を行う。つぎに、窯業用バーナ内の滞在時間の実測値⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾と本解析結果を比較し、実験における滞在時間の解析的評価の可能性を調べる。

(1) ヌセルト数 Nu の影響

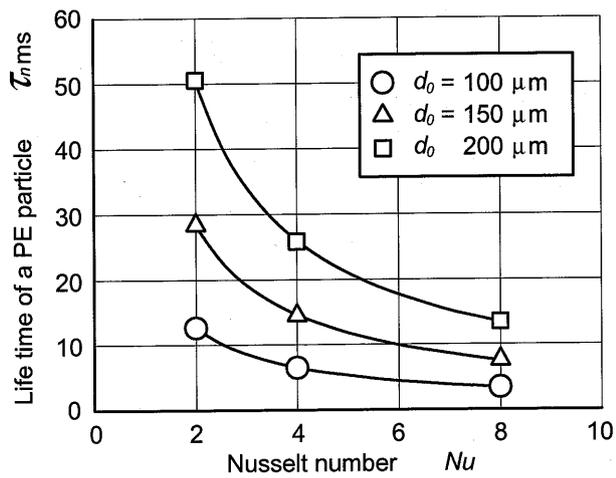
本解析では、式(4.6)に示した微小浮遊粒子に対する熱伝達近似式を適用した。しかし、微小粒子でも実際の燃焼場との間には相対流れの存在が予想されるため、ヌセルト数は2.0よりも大きい値となる。そこで、ヌセルト数の変化によって本解析で見積った粒子寿命がどの程度変化するかを検討する。ここでは代表的な値として、弱い相対流れを想定した場合を $Nu = 4.0$ 、非常に強い相対流れを想定した場合を $Nu = 8.0$ とし、 $Nu = 2.0$ と近似して求めた値と比較・検討を行う。なお、相対流れを想定した場合にも、球対称一次元の熱伝導解析が適用できると単純化して考察する。

周囲温度を $T_g = 1600$ °C と設定した場合の寿命の変化を図4.4に示す。図4.4(a)にはPET樹脂の場合を、図4.4(b)にはPE樹脂の場合を示す。図から、樹脂の種類によらずヌセルト数の値が大きくなるにつれて、粒子の寿命が短くなることがわかる。ちなみに、図4.4(a)のPET樹脂の場合を例にとると、 $d_0 = 200$ μm (□印)の場合、 $Nu = 2.0$ の浮遊微粒子近似のときには $\tau_n = 34.1$ ms であるのに対して、2倍の $Nu = 4.0$ の比較的弱い相対流れ場では $\tau_n = 17.4$ ms と約2分の1の寿命に、4倍の $Nu = 8.0$ の非常に強い相対流れ場では $\tau_n = 9.2$ ms と約4分の1の寿命となり、ヌセルト数の影響が非常に大きいことがわかる。

以上から、粒子周りの熱伝達を評価する場合、相対流れを無視した微小浮遊粒子の近似は粒子寿命の過大評価をまねく。したがって、相対流れ場が存在する実用バーナの形状・寸法を設計する場合には、粒子の寿命に対するヌセルト数の影響を適切に考慮しなければならない。



(a) PET-resin particle



(b) PE-resin particle

Fig. 4.4 Effects of Nusselt number Nu to the particle life time τ_n with the initial diameter; $T_g = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$

(2) 窯業用バーナ内の滞在時間との比較

前章の図 3.15 に示した PET 粉末を助燃料とした窯業用バーナ内の中心軸に沿う流れ場に関する PIV および PTV 計測結果によれば, 27.5 m/s の平均燃焼ガス流速, 18.5 m/s の粒子平均速度, および 9 m/s の相対速度が得られている. これにバーナ内の平均温度 1600 °C を加味すると, 粒子周りのヌセルト数は $Nu \approx 3.0$ と概算される. これらの数値を用いると, 一方では長さ 200 mm の窯業用バーナ内の PET 粒子の平均滞留時間が 10.8 ms と見積もられ, 他方では, 図 4.4 (a) から粒子径 150 μm の寿命が 13.2 ms と与えられる. この結果によれば, 先行実験の窯業用バーナの作動条件は, 粒子径 150 μm の PET 粒子の熱分解・ガス化させるのに必要な滞在時間の条件を満たすことができず, 150 μm より粗大な粒子が熱分解・ガス化しつくさないまま排出されることが推察される.

このように単純化された解析ではあるが, 適切な熱伝達の評価を行えば, 実用バーナにおける PET 粒子の巨視的な熱分解・ガス化特性の評価が可能となる.

4.5 第4章のまとめ

本章では、高温不活性雰囲気中に置かれた単一プラスチック樹脂微粒子の温度履歴と加熱から熱分解・ガス化に要する時間（寿命）を解析的に評価することを目的として、粒子の加熱から熱分解・ガス化に至る過程を固体加熱過程、融解過程、液体加熱過程、および熱分解・ガス化過程の4つの互いに独立した素加熱過程に分割し、それぞれの加熱過程における物性値の温度依存性を無視した球対称一次元熱伝導解析に簡単化することにより、粒子内部の温度履歴と粒子寿命を評価した。解析の対象とした樹脂はPET樹脂とPE樹脂で、粒子径を $d_0 = 100 \sim 200 \mu\text{m}$ に、周囲ガス温度を $T_g = 1000 \sim 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ に変化させた。得られた結果は以下のように要約される。

- ① PET および PE 微粒子の融解時間は短く、それらの寿命に比して無視できる。
- ② 樹脂粒子の寿命は、熱分解・ガス化温度が高く、熱分解・ガス化温度と融解温度との温度差、比熱、および潜熱が大きいほど長くなる。本研究の場合、温度差、比熱、潜熱のいずれも大きい値を有する PE 樹脂粒子の寿命が長くなり、PET 樹脂の約 1.5 倍と見積られた。
- ③ それぞれの加熱過程までの累積時間 t_i および粒子の寿命 τ_i は初期粒子径 d_0 の二乗比に比例し、周囲温度 T_g と代表温度 T_c の差にほぼ反比例する。
- ④ ヌセルト数が粒子寿命に及ぼす影響は非常に大きい。したがって、粒子と周囲ガス流の間に相対流れ場が存在する実用バーナの構造および寸法に影響する因子を調べる場合、“微小浮遊粒子近似”は粒子寿命の過大評価をまねく。
- ⑤ 簡単化された解析であるにもかかわらず、熱伝達の影響を適切に考慮すれば、実用バーナにおける PET 粒子の巨視的な熱分解・ガス化特性の評価が可能となる。

第4章の参考文献

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (2) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), *日本機械学会論文集 (B 編)*, 71-701, (2005), 357-364.
- (3) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), *日本機械学会論文集 (B 編)*, 71-711, (2005), 2792-2799.
- (4) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (廃棄 PET 樹脂粉末の置換率が燃焼挙動に及ぼす影響), 第 13 回環境工学シンポジウム 2003 講演論文集 No.03-10, (2003), 326-329.
- (5) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (樹脂粉末の種類と粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 21-22.
- (6) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (PET 粉末粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 23-24.
- (7) 山北龍児・加藤慎也・Tun, Maung, Kaung, Myat・加藤雄貴・西野光祐・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄 PET 樹脂粉末を助燃料とする工業用バーナーの燃焼特性 (燃焼流動場とそこにおける粒子径挙動・速度の画像計測), 第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004), 433-434.
- (8) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*, (2005), CD-ROM: Paper No. 074.
- (9) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直径変

- 化の画像計測), 日本機械学会論文集(B編), 掲載決定, 論文 No. 05-0342.
- (10) J. B. Howard and R. H. Essenhigh, Mechanism of Solid-Partical Combustion with Simultaneous Gas-Phase Volatiles Combustion, *Proceedings of the 11th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1966), 399-408.
 - (11) D. W. Pershing and J. O. L. Wendt, Pulverized Coal Combustion: The Influence of Flame Temperature and Coal Composition on Thermal and Fuel NO_x, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1976), 389-399.
 - (12) H. Kobayashi, J. B. Howard and A. F. Sarofim, Coal Devolatilization at High Temperature, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1977), 411-425.
 - (13) L. D. Timothy, A. F. Sarofim and J. M. Beer, Characteristics of Single Particle Coal Combustion, *Proceedings of the 19th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1982), 1123-1130.
 - (14) L. D. Smoot, P. O. Hedman and P. J. Smith, Pulverized-Coal Combustion Research at Brigham Young University, *Progress in Energy and Combustion Science*, **10**, (1984), 359-441.
 - (15) 岡崎健・宍戸秀夫・西川隆・大竹一友, 一次元炉における微粒炭の燃焼過程と NO_x 生成特性, 日本機械学会論文集(B編), **51**-465, (1985), 1549-1556.
 - (16) T. F. Wall, *Principles of Combustion Engineering for Boilers*, (1987), 197-335, Academic Press.
 - (17) L. H. Sorensen, O. Biede and R. E. Peck, An Experimental Study of High-Temperature, Oxidative Pulverized Coal Devolatilization, *Proceedings of the 25th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1994), 475-483.
 - (18) M. Taniguchi, H. Kobayashi and S. Azuhara, Laser Ignition and Flame Propagation of Pulverized Coal Dust Clouds, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 3189-3195.
 - (19) A. Williams, M. Pourkashanian and J. M. Jones, *Combustion and Gasification of Coal*, (1999), 86-122, Taylor & Francis.
 - (20) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, Burning Processes of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), 1531-1538.
 - (21) 三浦勝也・山北龍児・寺本啓祐・石野洋二郎・大岩紀生, 環状火炎によって形成された高温

- 酸化性雰囲気における PET 粉末の燃焼特性, 第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004), 435-436.
- (22) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere, *JSME International Journal (Series B)*, **48-1**, (2005), 83-91.
- (23) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, High-Speed Direct Microscopic Observations of Ignition and Burning Processes of a Micro Plastic-Resin Particle Under Stationary and Abrupt Heating, *Proceedings of the 1st International Symposium on Micro and Nano Technology*, (2004), CD-ROM: Paper No. XXXIV-C-04.
- (24) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Appearances of Multiple Micro Explosions, Micro Jets and Micro Diffusion Flames around an Abrupt Heated Micro PET-Resin Particle, *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2005), 209-212.
- (25) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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), 日本機械学会論文集(B編), (2005), 論文 No. 05-0698, 校閲中.
- (26) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2005), CD-ROM: Paper No. KD.08.
- (27) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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(プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称一次元解析), 日本機械学会論文集(B編), **71-708**, (2005), 2154-2161.
- (28) 高分子大辞典, (1994), 1015, 丸善.
- (29) 伝熱工学資料, (1986), 321, 日本機械学会.
- (30) A. M. Kanury, *Introduction to Combustion Phenomena*, (1982), 156, Gordon and Breach.
- (31) プラスチックの熱特性データベース; <http://www.aist.go.jp/RIODB/ptdb/entarupi.htm>

第5章 環状バーナによって形成された高温酸化性領域 における PET 樹脂粉末の燃焼特性

5.1 はじめに

廃棄 PET 樹脂を効率的に燃焼させるにあたり、予め微粉末に粉碎した PET 粉末を二次空気または混合気とともに燃焼器内に供給する方法が有効である。一方、微粉炭燃焼に関するデータ⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾に基づいて、微粉炭と PET 粉末の燃焼特性の比較を行った結果、PET 樹脂は室温では揮発しないため、効率的に融解・熱分解・ガス化・燃焼を行わせるためには、プロパンなどの支援燃料によって予め準備した高温酸化性領域に PET 粉末を供給する必要があることがわかった。

本研究では、プロパン・空気予混合気によって高温酸化性領域を形成させるためにノズル火炎と管状火炎を有する環状バーナを採用した。このバーナは、石塚らによって研究されてきた管状火炎バーナ⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁴⁾に基づいている。バーナ内部に形成されるリング状の管状火炎は、温度分布が対称であるために火炎背後への熱損失がほとんど無く熱的に安定である上に、内部が密度の低い高温既燃ガス、外部が密度の高い低温未燃ガスという構造から、レイリーの安定判別条件より流れの回転に対して空気力学的にも安定であるといった特徴をもつ^{(13),(14)}。また、管状火炎をパイロット炎として用いた場合には、極めて高い保炎能力を有する。そのため、幅広い作動条件で安定した高温酸化性領域を形成させることが可能である。なおこれまで、管状火炎に関する実験研究⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁷⁾および数値解析⁽¹⁸⁾⁻⁽²²⁾が基礎から実用まで幅広く行われており、最近では、次世代バーナ^{(23),(24)}としても注目されている。

本章では、その環状バーナによって形成された高温酸化性領域に PET 粉末をプロパン・空気予混合気とともに供給し、その燃焼特性を調べることを目的とする。はじめに、PET 粉末無供給時の火炎の直接撮影、温度測定および酸素濃度計測を行い、PET 粉末燃焼に最適な高温酸化性領域を把握した。つぎに、その雰囲気中に PET 粉末を供給し、供給量および質量メディアン直径を変化させたときの火炎形状の直接撮影、PET 粉末燃焼に伴う酸素濃度消費量の把握および PET 粉末燃焼挙動の高速度撮影を行い、PET 粉末の燃焼特性を調べた。得られた結果から、PET 粉末燃焼における高温酸化性領域の有効性を明らかにした^{(25),(26)}。最後に、環状バーナの作動条件をパラメータとし、高温酸化性領域の寸法と特性を変化させたときの PET 粉末の未燃率特性の把握を行った⁽²⁷⁾。

なお、本章の内容は、文献 (25) および (27) において公表済みであり、文献 (26) に掲載済みである。

5.2 記 号

d	: PET 粒子の直径	[μm]
d_m	: 質量メディアン直径	[μm]
ΔH_{PET}	: PET 樹脂の低位発熱量	[MJ/kg]
H_{PET}	: PET 粉末の熱発生率	[kW]
L_c	: 高温酸化性領域を半楕円形状としたときの長径	[mm]
L_{th}	: 必要な高温領域の軸方向長さ	[mm]
m_{PET}	: PET 粉末供給量	[g/min]
m_c	: 固形残留粒子の質量	[g/min]
M_U	: 未燃率 ($= m_c/m_{\text{PET}}$)	[%]
r	: バーナ中心軸から半径方向への距離	[mm]
R_c	: 高温酸化性領域を半楕円形状としたときの短径	[mm]
T	: 温度	[$^{\circ}\text{C}$]
v_n	: 円管ノズルからの噴出速度	[m/s]
v_s	: スリットノズルからの噴出速度	[m/s]
X_i	: 各区間における球状粒子の平均径	[μm]
z	: 円管ノズル出口から軸方向への距離	[mm]
ϕ_0	: 総合当量比	[-]
ϕ_n	: ノズル火炎当量比	[-]
ϕ_s	: 環状火炎当量比	[-]
τ	: PET 粒子の寿命	[ms]

5.3 実験装置および方法

5.3.1 実験装置の系統図

実験装置の系統図を図 5.1 に示す。実験装置は、環状バーナ、環状火炎およびノズル火炎用予混合気供給系、PET 粉末供給系および各種計測装置から成る。図 5.1 に示すように、環状火炎用空気の供給源として、コンプレッサー（日立、POD-7.5EA6、最高圧力：7 kgf/cm²、最大吐出流量：850 l/min）を採用した。環状火炎用空気流量はレギュレーター（SMC、IR401）によって調節され、層流形空気流量計（司測研、LFE-400LM、使用範囲：0～400 l/min）と DP ゲージ（コスモ、DP-320）によって指示された差圧値を基に算出される。ノズル火炎用空気に関しては、供給源としてコンプレッサー A（日立、最高圧力：9.5 kgf/cm²、最高吐出流量：400 l/min）とコンプレッサー B（日立、35RC-20SC6、最大静圧：0.5 kg/cm²、最大吐出流量：15 l/min）を用いた。コンプレッサー A によって供給された空気流量は、レギュレーターによって調節され、層流形空気流量計（コスモ、Z-500L、使用範囲：0～500 l/min）と DP ゲージ（コスモ、DP-320）によって指示された差圧値から算出される。一方、コンプレッサー B によって供給された空気流量は、空気用フロート形面積流量計（ウエシマ、使用範囲：4～40 l/min）によって調節される。なお、コンプレッサー B によって供給された空気は、PET 粉末搬送用空気として PET 粉末を搬送し、ノズル管内でコンプレッサー A によって供給された空気およびノズル火炎用燃料と混合される。よって本実験では、ノズル火炎用空気流量を各コンプレッサーによって供給された空気流量の和として定義した。環状火炎およびノズル火炎用燃料には、市販の家庭用 LPG（プロパン純度：96.4%，低位発熱量（25℃，1 atm）：46.35 MJ/kg⁽²⁸⁾）を用いた。環状火炎用燃料流量はマスフローコントローラ（SEC-E50、流量レンジ：0～10 l/min、流量精度：±1.0 %F.S.以内）で、ノズル火炎用燃料流量はプロパン用フロート形面積流量計（ウエシマ、使用範囲：0.8～8 l/min）で調節される。

5.3.2 環状バーナ

図 5.2 に高温酸化性領域を形成させるために用いた環状バーナの詳細図を示す。バーナ形状は円筒形（内径：50 mm、高さ：90 mm）であり、ノズル火炎用円管ノズル（内径：17.3 mm）および環状火炎用スリットノズル（厚さ：2 mm、高さ：30 mm）から構成されている。図 5.2 に示すように円管ノズル出口をバーナ底から 3 分の 1 の位置に一致させ、その上部にスリットノズルを 90° 間隔で 4 箇所設けた。環状火炎は、この 4 つのスリットノズルから接線方向に噴

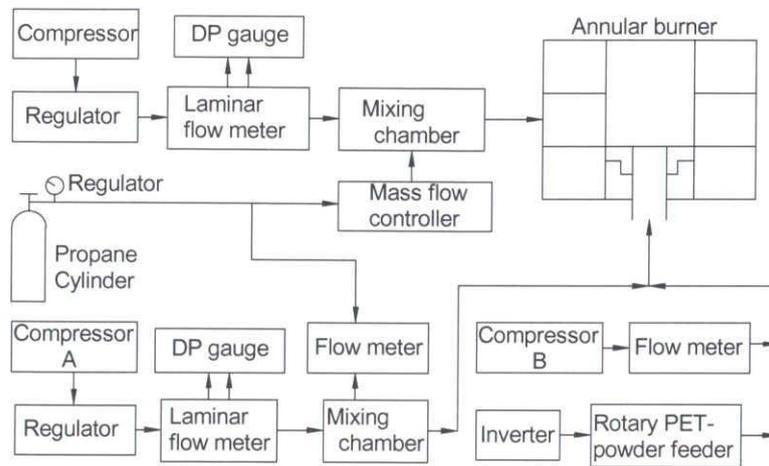


Fig. 5.1 Schematic diagram of the experimental system

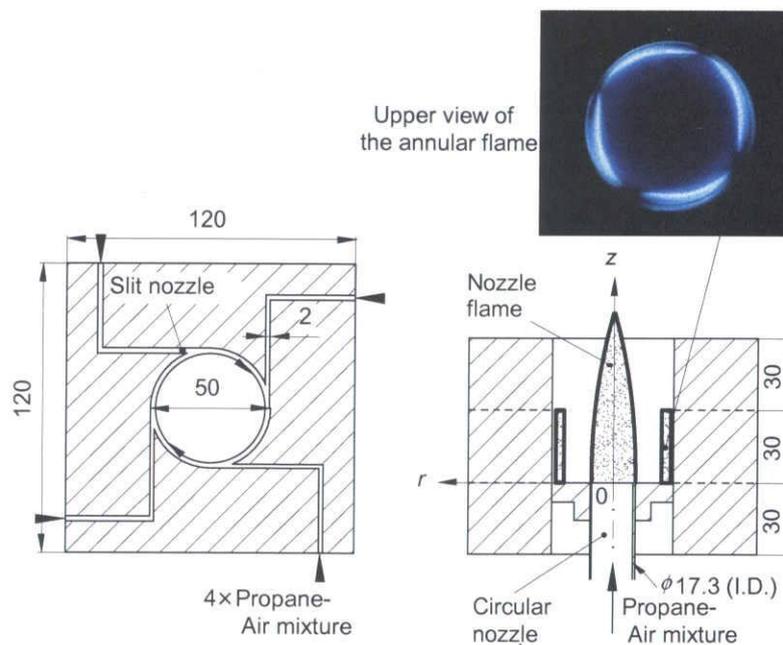


Fig. 5.2 Construction and dimensions of the annular burner

出する予混合気によって形成される。図 5.2 の挿入図に、環状火炎の上面方向からの直接写真を示す。

5.3.3 PET 粉末特性

図 5.3 (a) に、質量メディアン直径 $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ および $145 \mu\text{m}$ の PET 粉末のヒストグラムを示す。低位発熱量は $21.8 \text{ MJ/kg}^{(29)}$ 、密度は $1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3^{(30)}$ である。図から、それぞれ $30 \sim 400 \mu\text{m}$ と広い範囲に分散していることが知れる。また、粒子を球状と仮定し、区間平均径 X_i を横軸にとり、縦軸を個数割合に変換した分布を図 5.3 (b) に示す。図より、 $100 \mu\text{m}$ 以上の粒子の個数割合に明確な相違が見られる。

なお本実験では、これまで使用してきた PET 粉末が不足したため、追加注文した PET 粉末 (図 5.4 を参照) に置換した。図を見ると、 d_m に多少の相違があるものの、ほぼ同等の粒度分布を有していることが見て取れる。

5.3.4 実験手順および方法

本実験では、まず PET 粉末を供給しない状態で、環状火炎およびノズル火炎によって環状バーナ出口に高温酸化性領域を形成させる。表 5.1 に環状バーナの設定条件を示す。環状火炎当量比を $\phi_s = 1.0$ に、スリット噴流流速を $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ に固定し、ノズル火炎当量比を $\phi_n = 0.4 \sim 1.6$ まで変化させて実験を行った。形成された火炎に対して、デジタルカメラによる直接撮影、R 型熱電対 (素線径: 0.1 mm) による断面温度測定およびガス分析器 (テストー, testo350M/XL) による酸素濃度計測を行った。図 5.5 (a) および図 5.6 (a) に、それぞれ断面温度測定および酸素濃度計測装置の系統図を示す。測定に際しては、図 5.5 (b) および図 5.6 (b) に示すようにバーナ出口 ($z = 60 \text{ mm}$) から下流方向 ($z = 270 \text{ mm}$) へ 6 断面に等分割し、各断面あたり中心 ($r = 0 \text{ mm}$) から半径方向 ($r = 65 \text{ mm}$) へ 25 点 (温度測定) あるいは 7 点 (酸素濃度計測) の測定点を設けた。得られた結果から、PET 粉末の効率的な融解・熱分解・ガス化・燃焼のための最適設定条件を検討した。つぎに、その最適条件で形成した火炎に PET 粉末を供給し、その供給量 m_{PET} および質量メディアン直径 d_m を変化させたときの燃焼特性を調べた。PET 粉末供給量 m_{PET} を表 5.1 に併記する。測定に際しては、PET 粉末燃焼ときの火炎形状の直接撮影、PET 粉末燃焼による酸素濃度消費量の把握および高速度 CCD ビデオカメラ (フォトロン, FASTCAM-PCI) による PET 粉末燃焼挙動の撮影を行った。得られた結果から、PET 粉末燃焼時における高温酸化性領域の有効性を検討した。

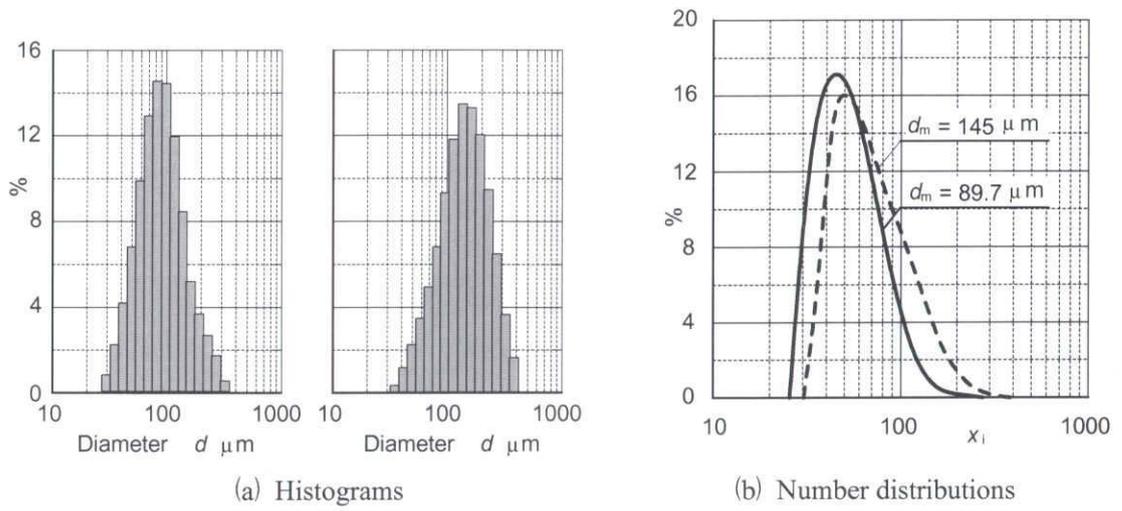


Fig. 5.3 Histograms and number distributions of two kinds of PET-powder used

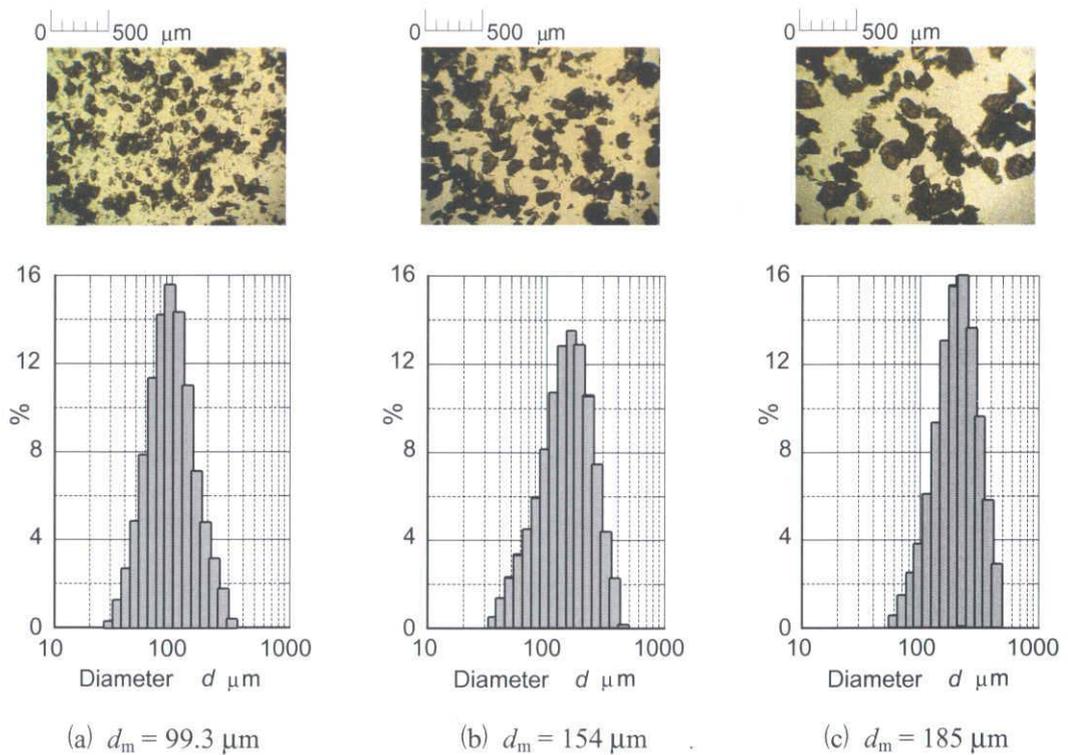
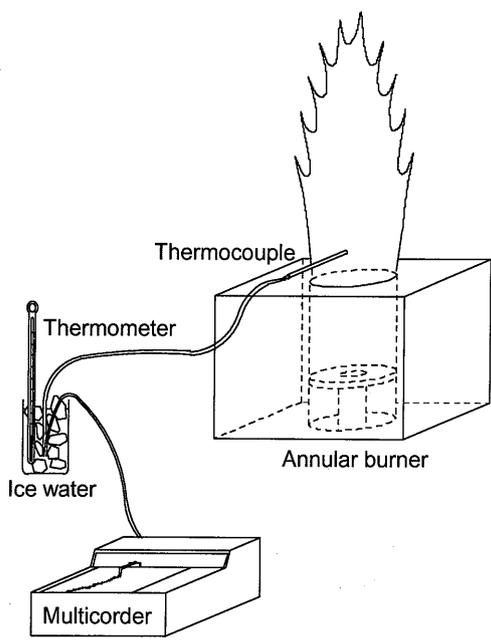
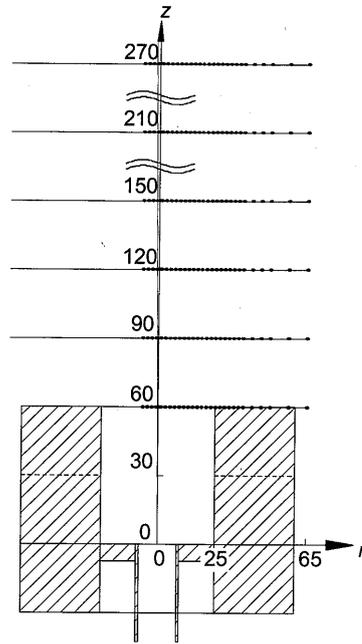


Fig. 5.4 Micrographs and histograms of PET powder used

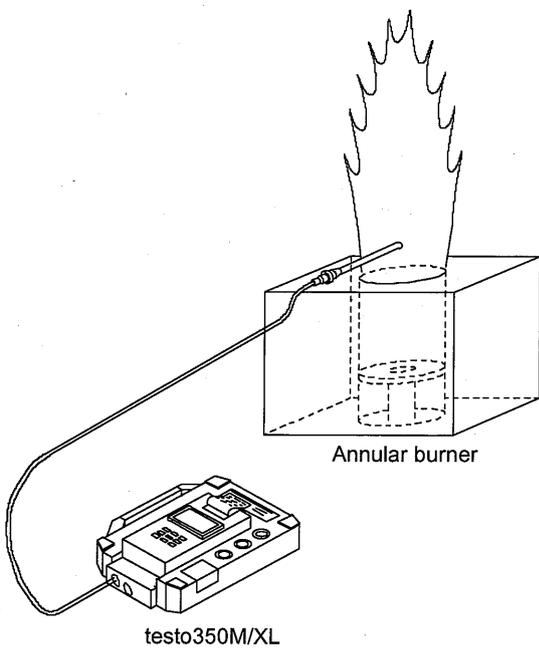


(a) Schematic diagram

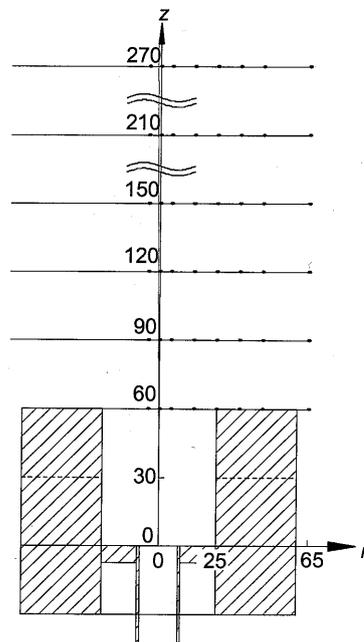


(b) Measuring points

Fig 5.5 Measurement system of a time-averaged temperature field



(a) Schematic diagram



(b) Measuring points

Fig. 5.6 Measurement system of a time-averaged O₂ concentration field

Table 5.1 Setting conditions of the annular burner

Slit jet properties		Circular jet properties	PET-powder
ϕ_s	v_s m/s	ϕ_n/v_n m/s	m_{PET} g/min
1.0	6.0	0/3.59, 0.4/3.66, 0.8/3.72 1.0/3.75, 1.2/3.78, 1.6/3.84	4.0, 8.0, 12

Table 5.2 Setting conditions of the annular burner

Slit jet properties		Circular jet properties		PET-powder
ϕ_s	v_s m/s	ϕ_n	v_n m/s	m_{PET} g/min
0.6, 0.8, <u>1.0</u>	3.0	0, 0.4, 0.8	2.5	8.0
1.2, 1.6	<u>6.0</u>	<u>1.0</u> , 1.2, 1.6	<u>3.7</u>	
	12		5.6	

続いて、環状バーナの作動条件をパラメータとし、高温酸化性領域の寸法と特性を変化させたときの PET 粉末の燃焼挙動および未燃率特性の把握を行った。作動条件の設定に関しては、基本条件 ($\phi_s = 1.0$, $v_s = 6.0$ m/s, $\phi_n = 1.0$, ノズル噴流流速: $v_n = 3.7$ m/s) から 4 個のパラメータ (ϕ_s , v_s , ϕ_n , および v_n) をそれぞれ一つずつ変化させた。表 5.2 に本実験における環状バーナの作動条件を示す。表 5.2 中に下線を引かれた条件が基本条件に対応する。

測定に際しては、形成された火炎に PET 粉末を供給し、 v_s , v_n および d_m を変化させたときの燃焼特性を調べた。PET 粉末供給量は $m_{\text{PET}} = 8.0$ g/min に設定した。得られた結果から、高温酸化性領域と未燃率との関係を考察・検討した。なお、第 3 章で示されているように、未燃率とは PET 粉末の供給量と大気中に飛散した固形残留粒子の排出量の比で定義されている。

5.4 実験結果および考察

5.4.1 高温酸化性領域の検討

本節では、PET粉末を供給しない状態で実験を行い、環状火炎当量比を $\phi_s = 1.0$ に固定し、ノズル火炎当量比を $\phi_n = 0, 0.4, 0.8, 1.0, 1.2$ および $\phi_n = 1.6$ と変化させたときの燃焼特性を調べ、PET粉末燃焼を行うのに最適な高温酸化性領域の検討を行った。

(1) 環状バーナの火炎挙動

図 5.7 にノズル火炎当量比 ϕ_n を変化させたときの火炎の直接写真を示す。図 5.7 (a), (b), (c), (d), (e) および図 5.7 (f) は、それぞれ $\phi_n = 0, 0.4, 0.8, 1.0, 1.2$ および $\phi_n = 1.6$ の場合である。上側と下側の図は、それぞれ上面および側面からの写真である。なお、図 5.7 (a) の写真中の矢印は環状火炎の旋回方向を表す。

上面方向からの写真から、いずれの場合も 4 つの独立した平面状の乱流予混合火炎がそれぞれスリット下流に形成されている。一方、ノズル火炎に関しては、プロパンの下限可燃限界当量比以下の $\phi_n = 0.4$ の場合には明確なノズル火炎は形成されないが、 $\phi_n = 0.8, 1.0, 1.2$ および $\phi_n = 1.6$ の場合は、中心軸まわりにノズル火炎の発光が確認でき、 $\phi_n = 1.0$ でバーナ内部での発光が最も強くなる。つぎに側面の写真を見ると、 ϕ_n の増加に伴い青炎の発光領域が下流方向に長くなっていることがわかる。とくに $\phi_n = 1.6$ の過濃条件では、バーナ下流部に過剰燃料の乱流拡散燃焼領域が観察される。

以上の火炎観察から、 ϕ_n の増加に伴いバーナ出口下流部の高温領域が広がる一方で、中心軸付近の酸素濃度は低下すると考えられる。次節では、各 ϕ_n の条件におけるバーナ出口下流部の温度測定および酸素濃度計測を行う。

(2) 時間平均温度分布および酸素濃度分布

図 5.8 にノズル当量比 ϕ_n を変化させた場合の、中心軸を含む断面における時間平均温度分布および酸素濃度分布を示す。図 5.8 の (a) から (f) は、それぞれ $\phi_n = 0, 0.4, 0.8, 1.0, 1.2$ および $\phi_n = 1.6$ の場合である。左側に温度分布を、右側に酸素濃度分布を示す。なお、両分布の比較を容易にするために温度分布を反転して示した。

図 5.8 の温度分布によれば、ノズル火炎の影響により中心軸付近で最高温度となり、中心軸が

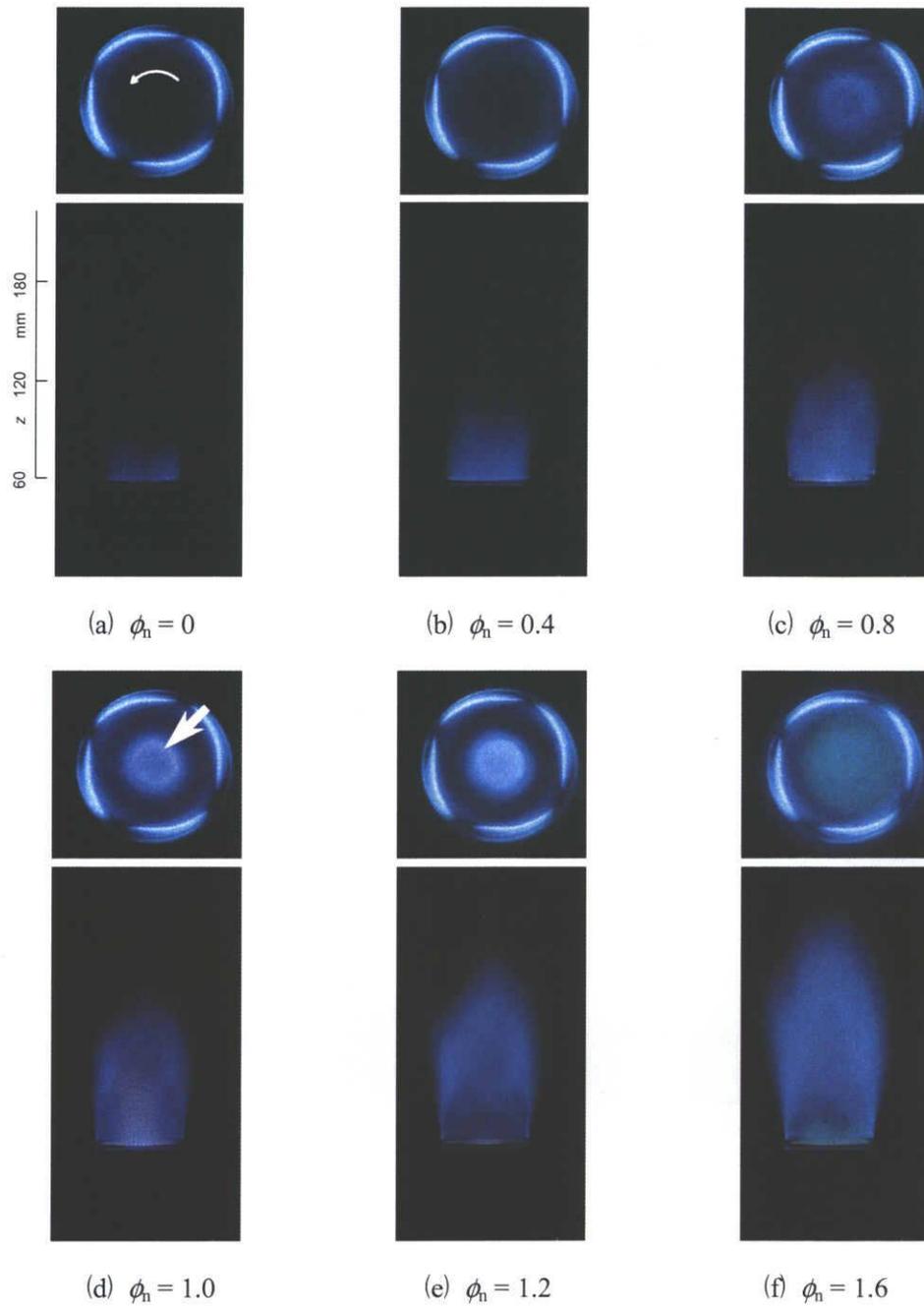


Fig. 5.7 Variation of flame appearances with the circular jet equivalence ratio

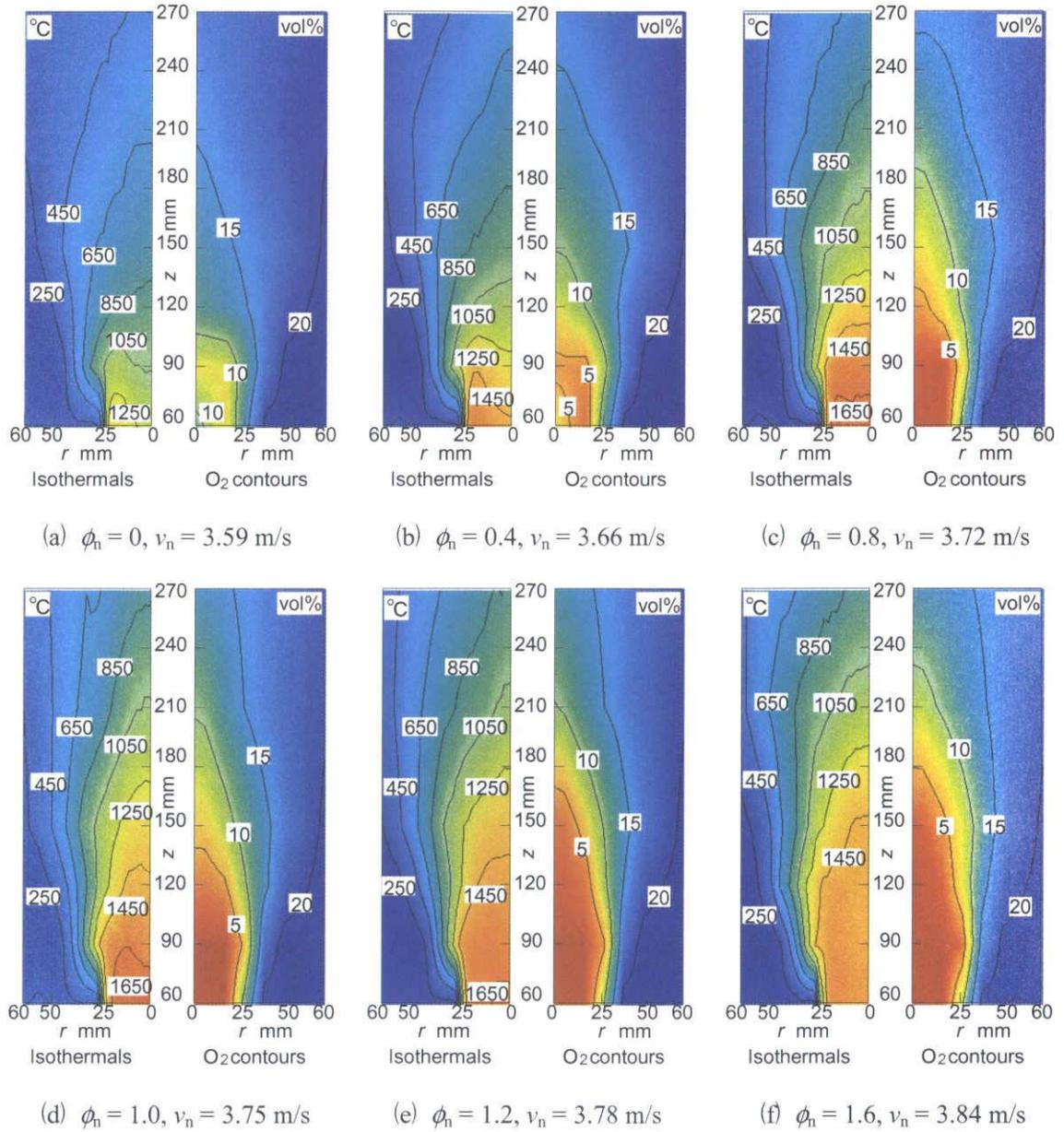


Fig. 5.8 Isotherms and O₂ concentrations contours downstream the annular burner without PET-powder supply; $\phi_s = 1.0, v_s = 6.0$ m/s

ら遠ざかるにつれて温度が徐々に低下することがわかる。また、 $\phi_h = 0.4 \sim 1.0$ の範囲までは、 ϕ_h の増加に伴い全体的に高温領域が広がる。 $\phi_h = 1.6$ の過濃条件になると、バーナ出口付近の火炎温度が低下するが、過剰プロパンの拡散燃焼に起因してバーナ下流部の高温領域が $\phi_h = 1.0$ の場合より広がる。このことから、温度条件だけを考えるならば $\phi_h = 1.0$ 付近が最適な条件であると考えられる。

同様に図 5.8 の断面酸素濃度分布を見ると、中心軸付近で低く、中心軸から半径方向に遠ざかるにつれて大気中の酸素濃度である 21 % の値に漸近する。また、 ϕ_h の増加に伴い低酸素濃度領域が下流および半径方向に広がることをわかる。

続いて、両者の分布形状を対比させて見ると、1050 °C の等温線が、10 % の酸素等濃度線とよく対応していることがわかる。ここで図 5.8 において、温度が 1050 °C 以上で酸素濃度が 10 % 未満の領域を半楕円と見なし、その長径（軸方向長さに対応）を L_c 、短径（半径方向長さに対応）を R_c と定義する。それらの値を図 5.8 から読み取ると、 $\phi_h = 0$ では $(L_c, R_c) = (100 \text{ mm}, 25 \text{ mm})$ であるのに対して $\phi_h = 1.6$ では $(L_c, R_c) = (230 \text{ mm}, 33 \text{ mm})$ となり、ノズル火炎当量比の増加に伴い、半楕円領域も増加することが伺える。

以上から、 $\phi_h = 0.4 \sim 1.6$ の範囲では、

- (1) 火炎領域における温度と酸素濃度が互いに相反関係にあること
- (2) 等温線と酸素等濃度線の分布形状がよく類似していること
- (3) 1050 °C の等温線が 10 % の酸素等濃度線とよく対応していること

などのいくつかの対応関係が明らかとなった。

そこでこれらの対応関係に基づいて、以下の実験的考察では 1050 °C 以上の温度と 10 % 以下の酸素濃度を高温酸化性領域の目安とし、PET 粉末の燃焼挙動を観察する。

(3) 高温酸化性領域の解析的評価

第 4 章で述べた解析的評価の第一段階では、PET 粒子径 $d = 100, 150 \mu\text{m}$ および $200 \mu\text{m}$ の単一 PET 微粒子を球と仮定し、加熱開始から熱分解・ガス化しつくすまでの時間（寿命）を球対称一次元熱伝導解析により評価した^{(31), (32)}。その結果、雰囲気温度が $T_g = 1000^\circ\text{C}$ の場合、それぞれの粒子径の寿命は $\tau = 19.5, 44.1, 78.3 \text{ ms}$ と評価された。これにノズル当量比 $\phi_h = 1.0$ の場合の平均流出速度が $v_n = 3.75 \text{ m/s}$ であることを加味すると、必要な高温領域の軸方向長さ L_{th} は単純に $L_{th} = 3.75 [\text{m/s}] \times (19.5, 44.1, 78.3) \times 10^{-3} [\text{s}] = (73.1, 165, 294) [\text{mm}]$ と概算することができる。 ϕ_h の増加に伴う平均流速の変動割合が 4.9 % と小さいことから、 ϕ_h の増加に伴う領域長さの変化

は小さい。したがって、本実験で PET 粉末を効率良く熱分解・ガス化・燃焼させるために要求される 1000 °C 以上の高温領域の長さはおおよそ 75 ~ 290 mm と見積もられる。一方、図 5.8 の 1050 °C を示す等温線から各 ϕ_n の高温酸化性領域の軸方向長さを読み取ると、 $\phi_n = 0.4, 0.8, 1.0, 1.6$ に対してそれぞれ 136, 180, 216, 230 mm となり、150 μm 程度の粉末燃焼を考慮した場合にも温度条件をほぼ満足している。

一方、酸素濃度分布から、1050 °C の等温線に対応していた 10 % の等濃度線の中心軸上の長さを概算すると、 $\phi_n = 0.4, 0.8, 1.0, 1.6$ に対してそれぞれ 150, 190, 205, 232 mm となり、低酸素濃度領域が広がる。PET 粉末の融解から燃焼に至る過程を考えた場合、バーナ内はもちろんのこと、その下流域においても十分な酸素の存在が好ましい。そこで、上述の温度場と同様に、粒径 150 μm の PET 粉末燃焼を想定し、 $z \geq 165$ mm の下流域で 10 % 以上の酸素が存在する条件を満たすノズル火炎当量比 ϕ_n を調べると、 $\phi_n \leq 0.8$ の希薄条件が該当することが知れる。

以上の温度条件と酸素濃度条件の検討結果を総合し、これに融解・熱分解・ガス化に対する高温条件の効果を加味することにより、本実験の環状バーナにおいて PET 粉末燃焼に適した高温酸化性領域を形成させる条件として $\phi_n = 0.8$ のノズル火炎を選定した。

5.4.2 高温酸化性領域における PET 粉末燃焼特性

本節では、前節で検討した高温酸化性領域に PET 粉末を供給し、その燃焼特性を調べた。

(1) PET 粉末燃焼時の火炎挙動

はじめに、それぞれ質量メディアン直径 $d_m = 89.7$ および 145 μm の場合における PET 粉末燃焼時の火炎の直接写真を図 5.9 および図 5.10 に示す。図の左側から順に PET 粉末供給量は $m_{\text{PET}} = 4.0, 8.0$ g/min および 12 g/min である。なお表 5.3 に、各 PET 粉末供給量に相当する熱発生率 H_{PET} を示す。

火炎の色彩を見ると、図 5.9 および図 5.10 とともに、図 5.8 で示した高温酸化性領域に対応した部分で非常に強い輝炎部が観察されており、良好な燃焼が行われていると考えられる。

つぎに図 5.9 から、 $d_m = 89.7$ μm の場合の PET 粒子の軌跡を見ると、高温酸化性領域を通過した下流部において PET 粒子の軌跡はほとんど観察されず良好な熱分解・ガス化特性が得られていることがわかる。それに対して、図 5.10 に示した $d_m = 145$ μm の場合には、下流部において多数の筋状の粒子軌跡が確認される。これに関しては、図 5.3 (b) に示した個数分布で述べたように、粉末中の 200 μm 程度の粗大な PET 粒子が熱分解・ガス化しつくさないまま低温の大気中へ

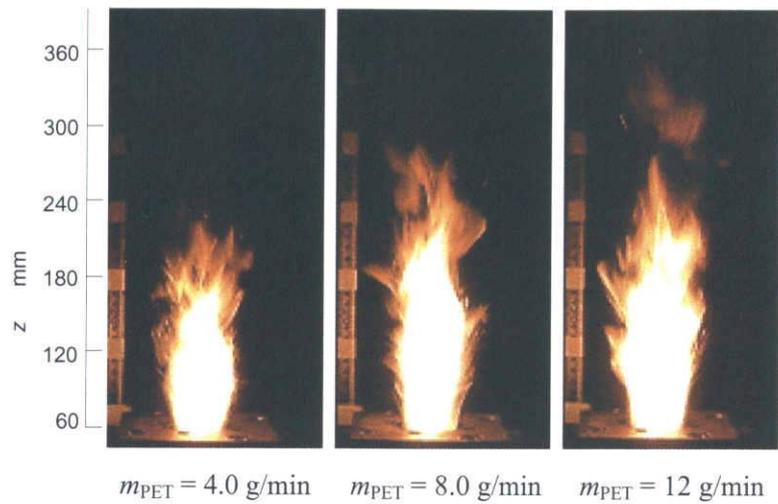


Fig. 5.9 Appearances of flames supplied with PET-powder of $d_m = 89.7 \mu\text{m}$; an exposure time of $1/100 \text{ s}$ for $\phi_h = 0.8$, $v_n = 3.72 \text{ m/s}$

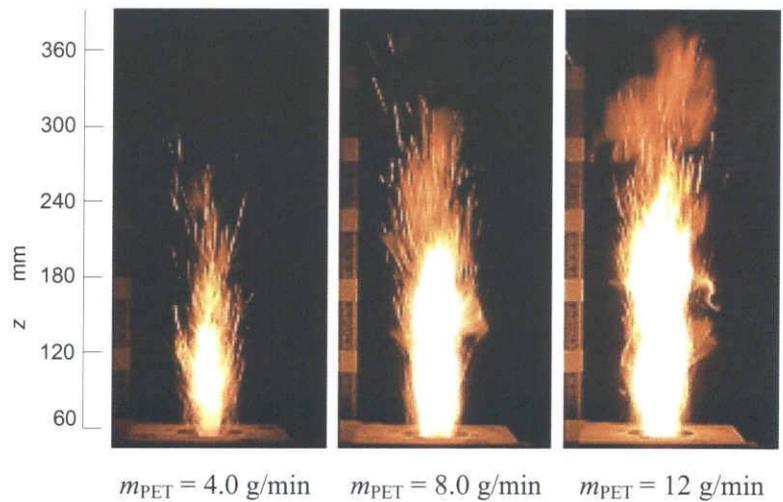


Fig. 5.10 Appearances of flames supplied with PET-powder of $d_m = 145 \mu\text{m}$; an exposure time of $1/100 \text{ s}$ for $\phi_h = 0.8$, $v_n = 3.72 \text{ m/s}$

Table 5.3 Heating properties and conditions of PET-powder

m_{PET} g/min	ΔH_{PET} MJ/kg	H_{PET} kW
4.0	21.8	1.45
8.0		2.91
12		4.36

Table 5.4 Variation of the overall equivalence ratio with increasing the PET mass flow rate

m_{PET} g/min	ϕ_s	ϕ_n	ϕ_o
4.0	1.0	0.8	1.10
8.0			1.28
12			1.46

飛散するためであると考えられる。

なお、表 5.4 に示された PET 粉末を供給したときの総合当量比を考えた場合、いずれの場合も量論比以上の過濃条件になるため多量のすすの発生が予想され、写真からもそれに伴う雲状の薄い発光が観察される。

以上から、高温酸化性領域を通過する PET 粉末は熱分解に伴うガス化・燃焼に伴って非常に強く発光し、PET のガス化ガスの激しい拡散燃焼が進行していると推察される。

(2) PET 粉末燃焼時の酸素濃度分布および消費酸素濃度場の概略

続いて、各雰囲気温度条件下で発生する熱分解・ガス化ガスの成分分析、またそのガス化ガスの燃焼反応に関する詳細な検討はできないが、PET 粉末の有無による流れ場の変化はないという仮定の下で、PET 粉末を供給した場合としない場合の酸素濃度の差から PET 粉末燃焼による消費酸素分布を作成し、熱分解によるガス化ガスがどの領域で酸素を消費しているかに関して定性的に調べた。なお、図 5.11 および図 5.12 に、ノズル当量比を $\phi_n = 0$ から 1.6 まで変化させたときの PET 粉末燃焼に伴う時間平均断面温度および酸素濃度変化の測定結果を示す。それぞれの分布の左側および右側は、PET 粉末無供給時および供給時（PET 粉末供給量： $m_p = 8.0$ g/min）の場合を示す。また上述のように、PET 粉末の有無による流れ場の変化はないという仮定の下で、単純に両者の差を取った値を PET 粉末による酸素消費量および温度変化量と定義し、その分布を図 5.13 に表す。なお、温度と酸素濃度を測定するにあたり、熔融 PET 樹脂の付着およびガス化ガスの凝着に起因するプローブの閉塞とそれに起因する測定誤差を避けるため、微細な質量メディアン直径 $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の PET 粉末を用いた。また図 5.11 に示した PET 粉末供給時の温度分布を作成するにあたり、バーナ出口部の中心軸付近では熱電対への煤の付着が確認されたため、その範囲における測定値は除外した。そのため、白い領域として表示されている。

図 5.12 から、PET 粉末供給前のバーナ中心軸に沿う高温領域の酸素濃度は ϕ_n の増加に伴い低下し、5%以下の低酸素濃度領域が $z = 180$ mm まで広がっている。そのような酸素濃度場に PET 粉末を供給すると、 ϕ_n の増加に伴い等濃度線が下流方向に長くなると同時に、半径方向外側にも広がるのがわかる。このことは、PET の熱分解によるガス化ガスの燃焼領域がノズル火炎の当量比の増大とともに下流方向および半径方向外側に移行していくことを示している。図 5.11 に示した温度分布からも、この移行傾向が伺える。

PET の熱分解によるガス化ガスの燃焼領域のこのような挙動は図 5.13 に明確に現れている。すなわち、ガス化ガスの燃焼による顕著な酸素消費域を示す“濃度の浮島”が ϕ_n の増加に伴っ

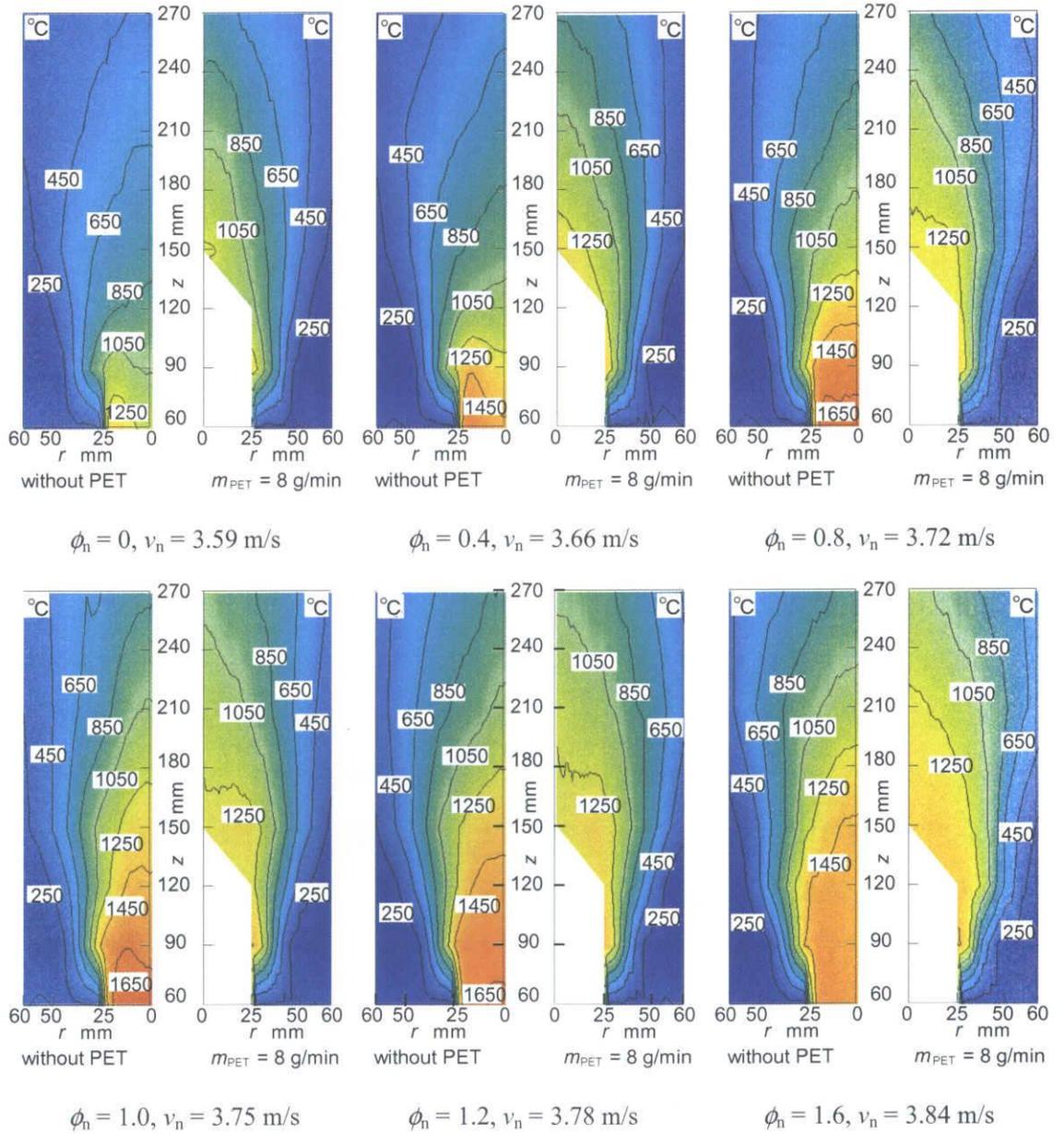


Fig. 5.11 Comparison of isothermals between flames without and with PET-powder supply; $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ and $m_{\text{PET}} = 8.0 \text{ g/min}$

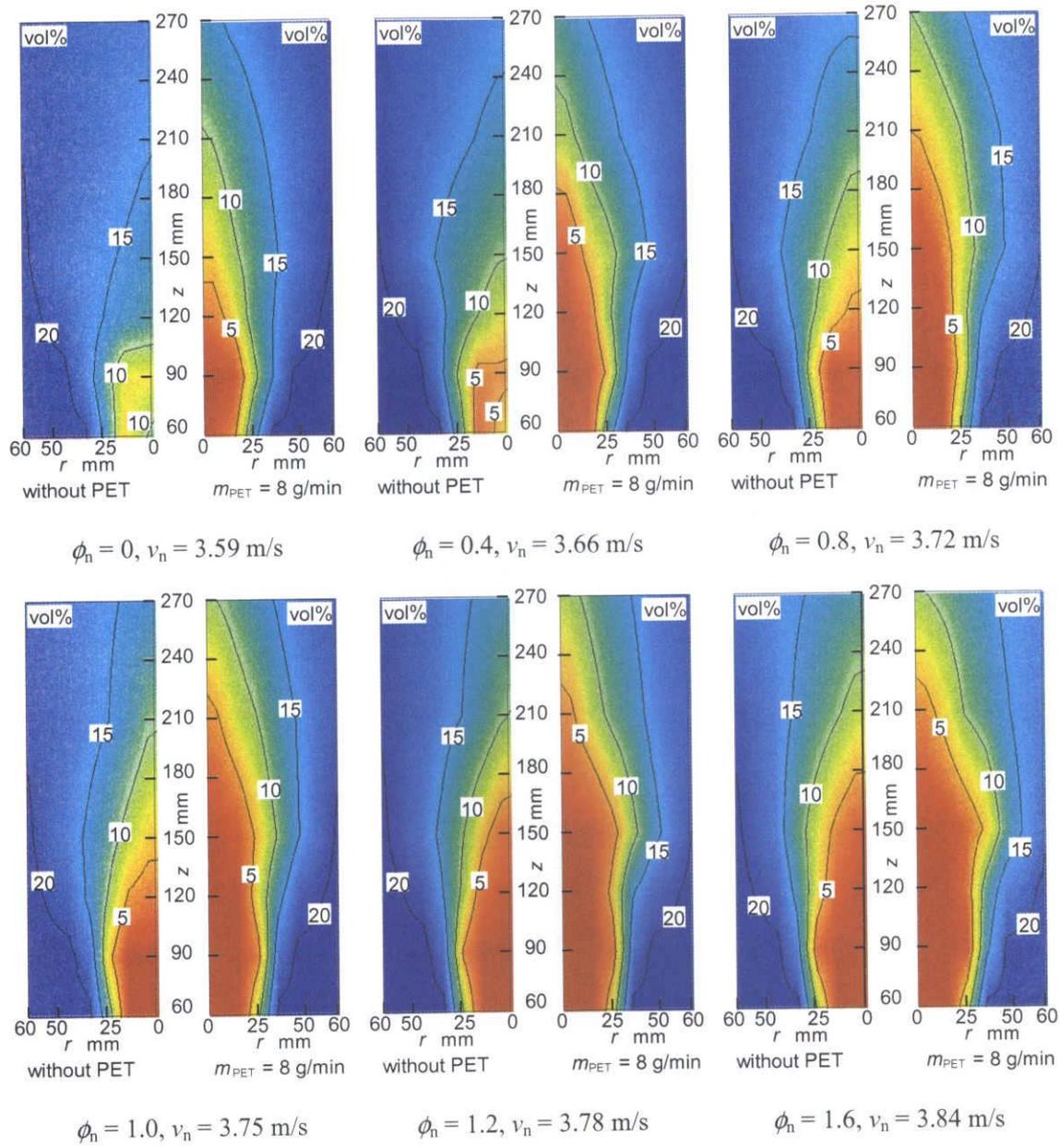
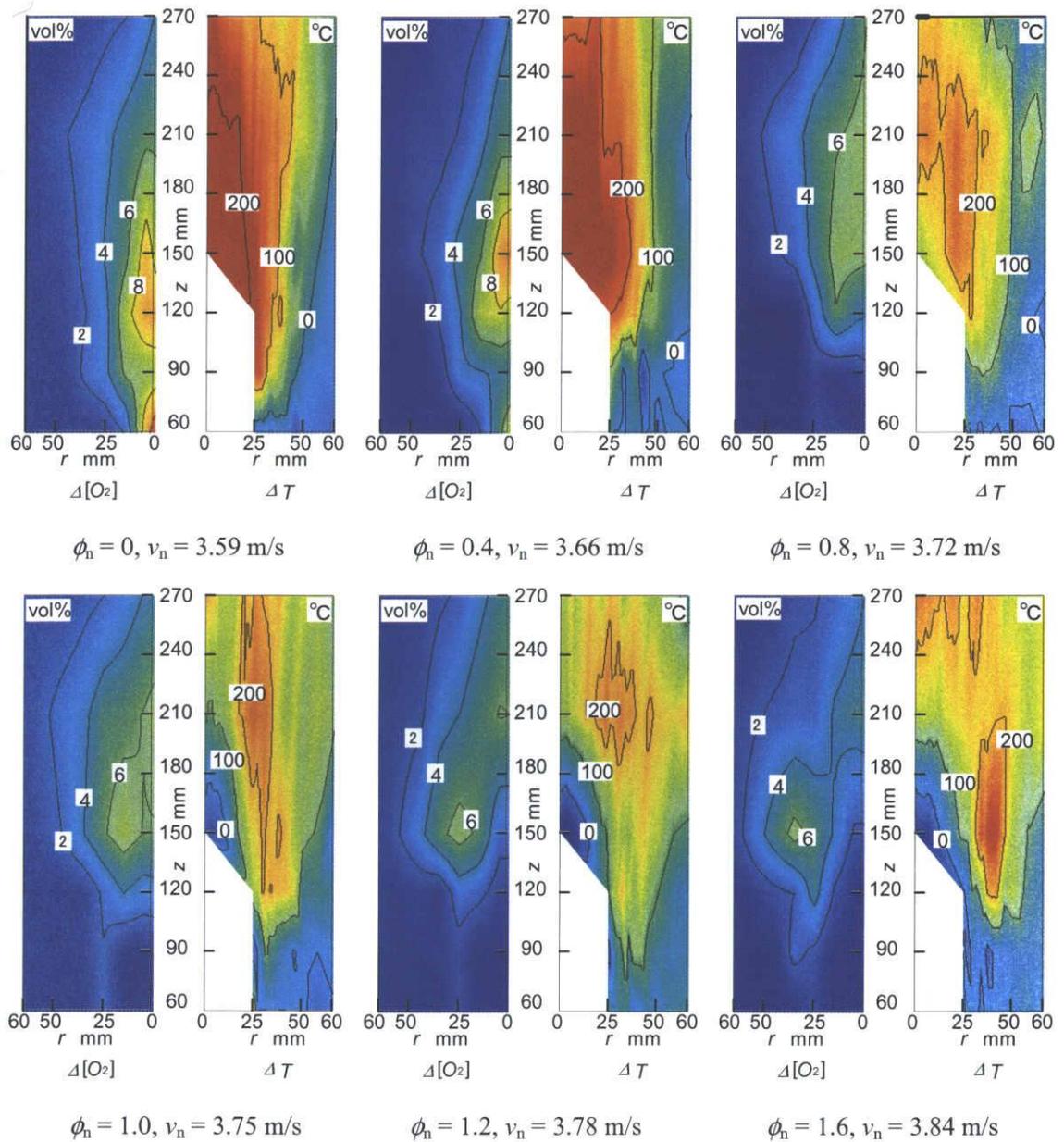


Fig. 5.12 Comparison of O_2 concentration contours between flames without and with PET-powder supply; $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ and $m_{\text{PET}} = 8.0 \text{ g/min}$



5.13 Variations of O_2 concentration contours and isothermals between flames without and with PET-powder supply; $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ and $m_{\text{PET}} = 8.0 \text{ g/min}$

て中心軸近傍から下流に伸びると同時に半径方向に移動している。また、 ϕ_n の増加とともに浮島の標高が低くなり、形状は小さくなる。この場合、PET 粉末の熱分解によるガス化ガスの燃焼による最大酸素消費量は $\phi_n = 0.8 \sim 1.6$ で 6%、 $\phi_n = 0.4$ で 8%と与えられる。

このような消費酸素濃度の浮島の ϕ_n に伴う変化挙動は、PET 粉末の融解・熱分解によるガス化とその後の PET のガス化ガスの燃焼過程と密接に関係している。 ϕ_n が希薄条件の場合には、バーナ内の中心軸付近にも残存酸素が存在するため、バーナ出口に至るまでに熱分解しガス化した PET のガス化ガスが燃焼し、酸素を消費する。しかし $\phi_n = 1.6$ になると、バーナ内の中心軸付近はむしろ高温過濃燃焼ガス領域となるために PET のガス化ガスの燃焼は起こらず、バーナ下流域で周囲空気との拡散燃焼により消費される。すなわち、高温過濃燃焼ガス領域中では PET 粉末の加熱・融解・熱分解によるガス化だけが起こり、高温酸化性領域中ではじめて燃焼が起こると考えられる。また図 5.13 に示した PET の熱分解に伴うガス化ガスの燃焼に起因する酸素消費量分布と温度変化量分布の対応関係から、高温過濃燃焼ガス領域では主に PET 粉末の融解・熱分解・ガス化に伴う吸熱が起こり温度が低下するのに対して、高温酸化性領域では PET の熱分解によるガス化ガスの燃焼による発熱によって温度が上昇していることが伺える。

以上から、高温領域の形成は速やかな PET 粉末の融解・熱分解によるガス化には効果的であるが、効率的な燃焼を考えた場合、高温領域の形成よりもむしろ高酸化性領域の形成の方が重要であると考えられる。

(3) 高速度撮影による PET 粉末燃焼挙動

前項で示したように、質量メディアン直径 $d_m = 145 \mu\text{m}$ の PET 粉末を用いた場合に PET 粒子の軌跡が多数確認された。そこで高速度撮影を行い、PET 粉末の燃焼過程と PET 粒子の挙動について調べた。撮影結果を 2 ms 間隔の連続写真として図 5.14 に示す。

図中の○印で示した位置を見ると、上流部で熱分解・ガス化した PET のガス化ガスの塊が周囲の空気を巻き込みながら燃焼し、下流方向へ移動しながら消滅していく様子がわかる。このことから、比較的微細な PET 粒子はバーナ上流部で熱分解・ガス化し、乱流拡散燃焼しながら消滅していくと考えられる。また、図中の太い矢印で示した部分を見ると、バーナ中心軸付近で燃焼しているガス塊が下流方向に移動するにつれて周囲の空気を巻き込みながら徐々に消滅していく様子が観察でき、PET の熱分解に伴うガス化ガスの効率的な燃焼には下流領域における周囲空気の誘引が重要であることを示唆している。

つぎに多数の粒子の発光の軌跡を見ると、細い矢印で示したいくつかの粒子は、高温酸化性

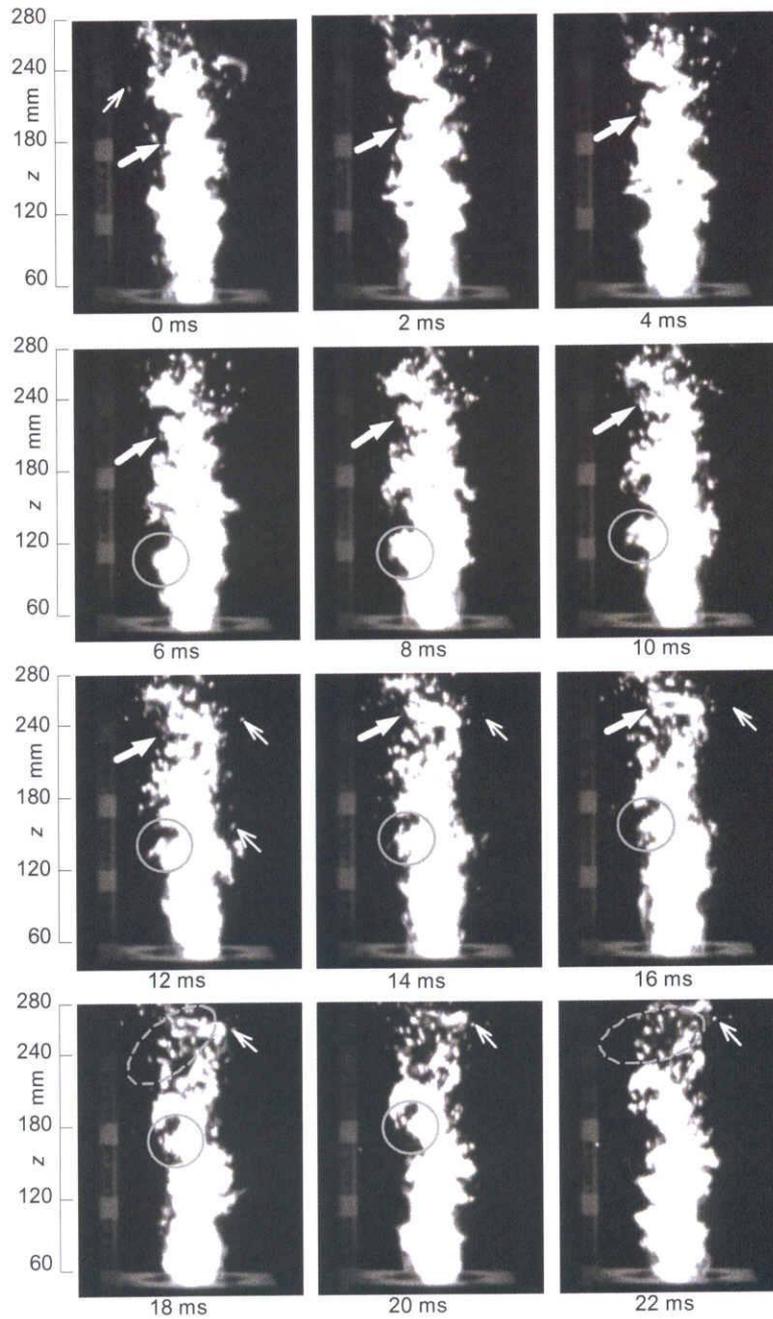


Fig. 5.14 A series of high-speed direct photographs of a PET-powder flame taken at 1000 fps; $\phi_h = 0.8$, $v_n = 3.72$ m/s, $d_m = 145$ μ m and $m_{PET} = 8.0$ g/min

領域を通過する間に燃焼し消滅すると推察される。しかし一方、破線の楕円で示した領域では、高温酸化性領域を通過したにもかかわらず、多数の粒子の軌跡が観察される。これに関しては、図 5.4 に示した個数分布に示されているように、 $d_m = 145 \mu\text{m}$ の PET 粉末には $200 \mu\text{m}$ 程度の粒子が多く存在していること、および前節の高温酸化性領域の解析的評価に際して、 $150 \mu\text{m}$ 程度の粒子まで十分な高温酸化性領域の滞在時間が得られるという結果が得られたことを併せ考えると、これらの粒子の発光は PET 粉末に含まれている比較的粗大な PET 粒子によるものであることがわかる。

5.4.3 環状バーナの基本燃焼特性

続いて、前節までの高温酸化性領域の検討結果から、基本作動条件として環状火炎当量比を $\phi_s = 1.0$ 、スリット噴流流速を $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ 、ノズル火炎当量比を $\phi_n = 1.0$ 、ノズル噴流流速を $v_n = 3.7 \text{ m/s}$ を選定し、それら 4 個のパラメータ (ϕ_s , v_s , ϕ_n , および v_n) を表 5.2 に示した環状バーナの作動条件にしたがって、各々一つずつ変化させたときの環状バーナの基本燃焼特性を調べた。

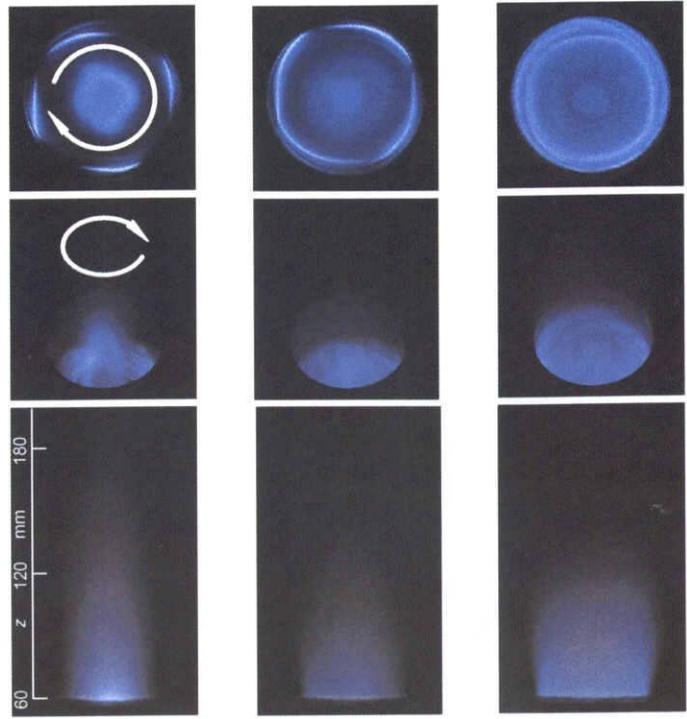
(1) 火炎挙動に及ぼす v_s と v_n の影響

図 5.15 に、環状火炎およびノズル火炎の当量比をそれぞれ $\phi_s = 1.0$ および $\phi_n = 1.0$ に固定し、スリット噴流速度 v_s およびノズル出口流速 v_n を変化させたときの火炎の直接写真を示す。図 5.15 (a) は $v_n = 3.7 \text{ m/s}$ に固定し v_s を、図 5.15 (b) は $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ に固定し v_n を変化させた場合である。上、中および下段の図は、それぞれ上面、斜め上および側面方向からの写真である。なお、図 5.15 (a) の写真中の矢印は環状火炎の旋回方向を表す。

図 5.15 (a) から、 $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ において 4 つの独立した平面状の乱流予混合火炎がそれぞれスリット下流に形成されていることがわかる。この状態から $v_s = 12 \text{ m/s}$ に増加させると一つにつながった環状火炎が形成され、逆に $v_s = 3.0 \text{ m/s}$ に減少させると個々の環状火炎は短くなることが知れる。

一方、ノズル火炎に関しては、 v_s の増加に伴い不明瞭になり、斜め上方向からの写真（図中の中段）からもこの変化が見て取れる。また下段に示したノズル火炎の発光領域を見ると、 v_s の増加に伴い半径方向へ拡大し軸方向へ短くなっていくことがわかる。

続いて図 5.15 (b) を見ると、 $v_n = 5.6 \text{ m/s}$ の場合、明確なノズル火炎が形成されているが、 v_n の低下に伴い不明瞭になっていくことがわかる。また火炎の発光領域（図中の下段）は、 v_n の増加に伴い軸方向へ長く伸びていくことが伺える。

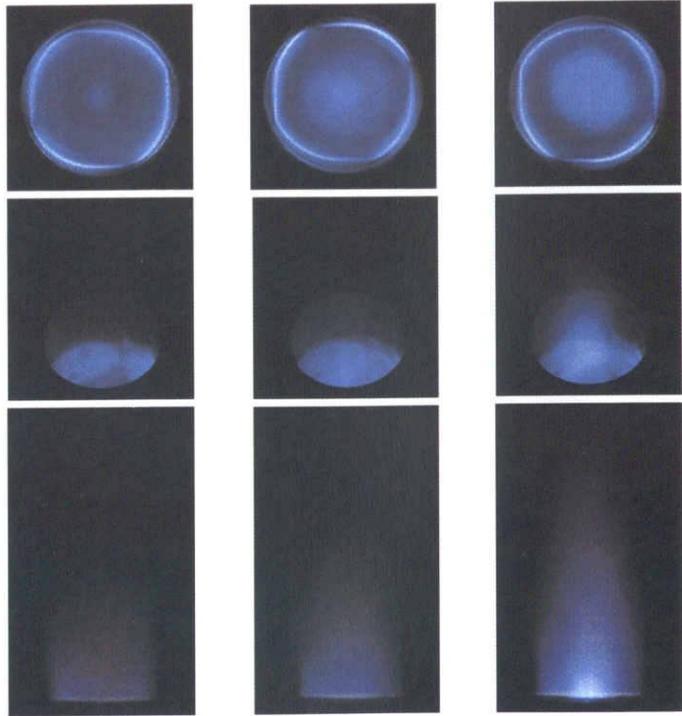


$v_s = 3.0 \text{ m/s}$

$v_s = 6.0 \text{ m/s}$

$v_s = 12 \text{ m/s}$

(a) $v_n = 3.7 \text{ m/s}$



$v_n = 2.5 \text{ m/s}$

$v_n = 3.7 \text{ m/s}$

$v_n = 5.6 \text{ m/s}$

(b) $v_s = 6.0 \text{ m/s}$

Fig. 5.15 Variations of flame appearances with v_n and v_s ;
 $\phi_s = 1.0$ and $\phi_n = 1.0$

(2) 高温酸化性領域に及ぼす v_s と v_n の影響

図 5.15 に対応した条件に設定したときの中心軸を含む断面における時間平均酸素濃度分布および温度分布を図 5.16 に示す。左側に酸素濃度分布を、右側に温度分布を示す。横軸は中心軸から半径方向への距離 r mm を、縦軸はノズル管出口から軸方向への距離 z mm を意味する。なお、両分布の比較を容易にするために温度分布を反転して示した。また、測定範囲を前節からさらに下流の $z = 390$ mm まで広げた。

図 5.16 から、いずれの条件においても、ノズル火炎の影響により中心軸付近で最高温度となり、中心軸から遠ざかるにつれて温度が徐々に低下し、酸素濃度は増加していくことが知れる。そこで先行実験⁽²⁵⁾⁻⁽²⁷⁾を加味して、 1000 °C 以上の温度と 10 %未満の酸素濃度領域を高温酸化性領域の目安とし、その領域の変化について検討する。図 5.16 (a) を見ると、 v_s が増加するにつれて高温酸化性領域が半径方向へは広がるが、軸方向へは短くなっていく様子が認められる。この要因としては、旋回流による高温燃焼ガスの半径方向への拡がり、バーナ上流部に形成される循環流による低温の周囲空気と高温燃焼ガスの混合促進が挙げられる。

つぎに図 5.16 (b) から、 v_n の増加に伴い高温酸化性領域は下流方向へ伸長するものの、半径方向へはそれほど変化しないことがわかる。これに関しては、 v_n の増加に伴い軸方向へ噴出するノズル火炎の影響が顕著になるためであると考えられる。

5.4.4 PET 粉末を供給したときの燃焼挙動

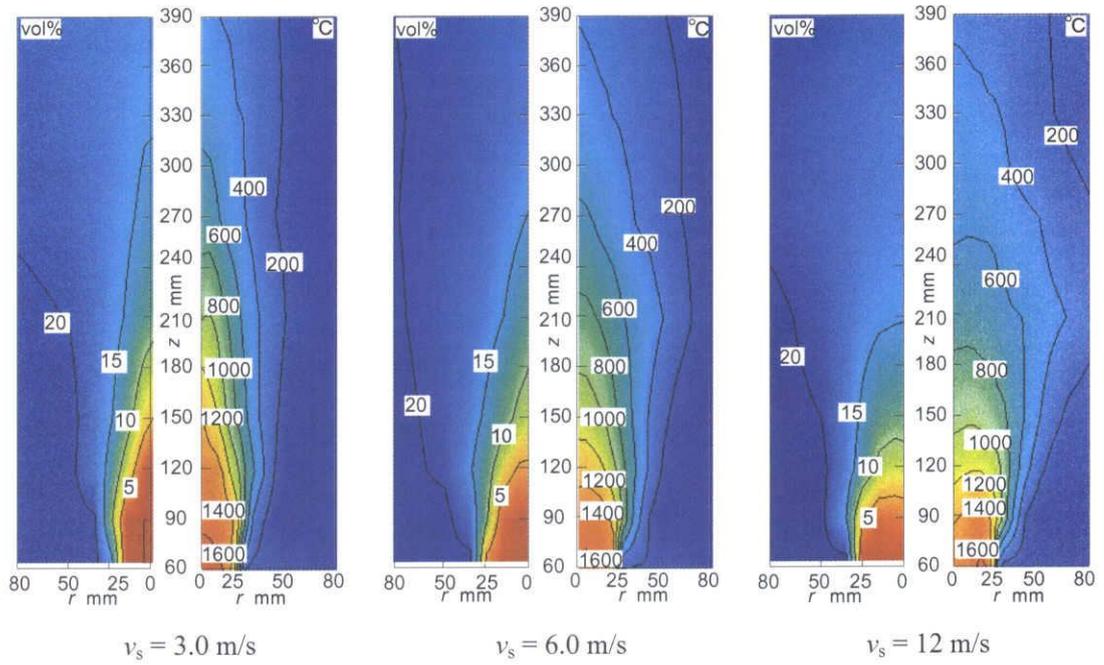
本項では、各設定条件によって形成された高温酸化性領域中に PET 粉末を供給したときの燃焼特性を調べた。

(1) PET 粉末燃焼時の火炎挙動

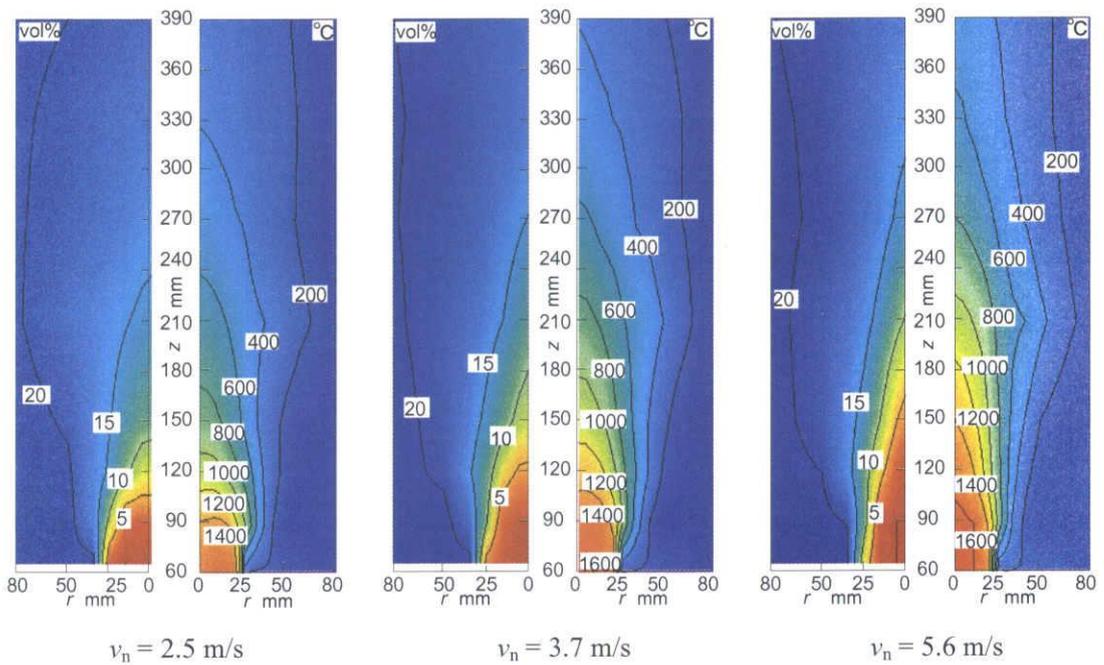
まず、PET 粉末燃焼時の火炎の直接写真を図 5.17 に示す。図 5.17 (a)、(b) および図 5.17 (c) は、それぞれスリット噴流速度 v_s 、ノズル出口流速 v_n および質量メディアン直径 d_m をパラメータとして変化させた場合の火炎写真で、PET 粉末供給量は $m_p = 8.0$ g/min に設定されている。火炎の色彩を見ると、図 5.17 (a)、(b) および図 5.17 (c) とともに、図 5.16 で示した高温酸化性領域に対応した部分で非常に強い発光を伴う輝炎が観察されていることが知れる。

図 5.17 (a) を見ると、 v_s の増加に伴い火炎長が短くなっていくことがわかる。とくに $v_s = 3.0$ m/s の場合には、輝炎領域上部に雲状の薄い発光が顕著に確認でき、多量のすすの発生が予想される。

一方図 5.17 (b) によれば、 v_n の増加に伴い火炎長が長くなる一方で、火炎基部の発光が弱くなっ

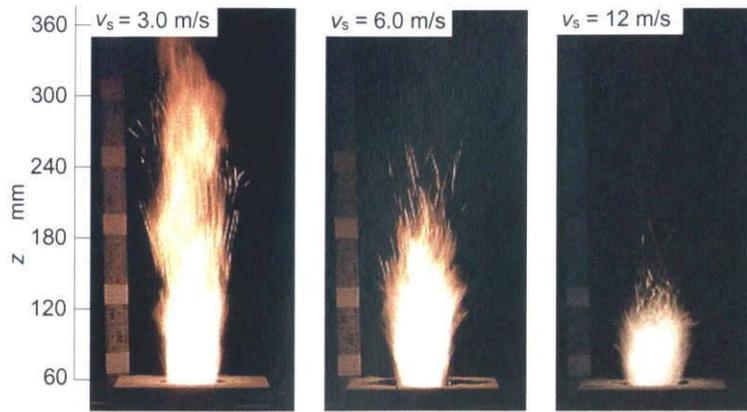


(a) $v_n = 3.7$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $\phi_n = 1.0$

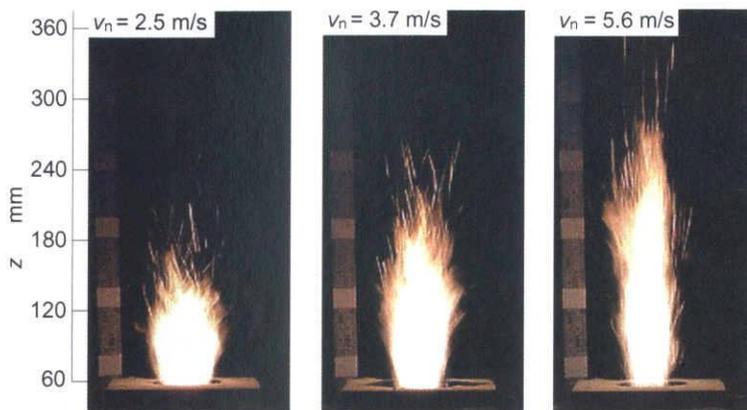


(b) $v_s = 6.0$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $\phi_n = 1.0$

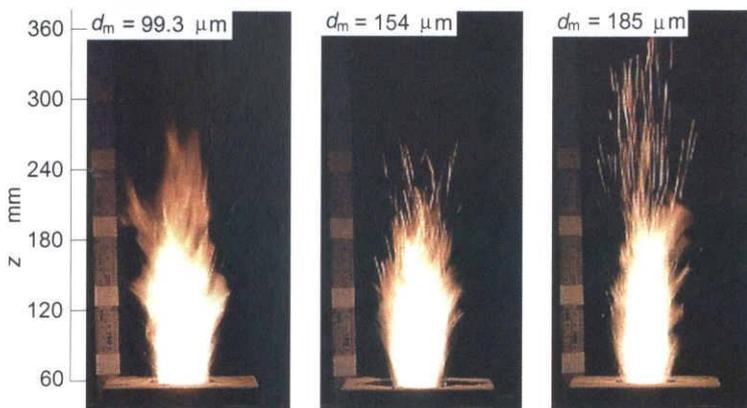
Fig. 5.16 O₂ concentration contours and isothermals downstream the annular burner without PET-powder supply



(a) $v_n = 3.7 \text{ m/s}$, $d_m = 154 \mu\text{m}$



(b) $v_s = 6.0 \text{ m/s}$, $d_m = 154 \mu\text{m}$



(c) $v_n = 3.7 \text{ m/s}$, $v_s = 6.0 \text{ m/s}$

Fig. 5.17 Dependency of the PET-powder flame appearances on v_n , v_s and d_m ;
 $\phi_n = 1.0$, $\phi_s = 1.0$, $m_{\text{PET}} = 8.0 \text{ g/min}$

ていることが観察される。これに関しては、 v_n の増加に伴う飛翔PET粒子速度の増大、バーナ内部のノズル出口近傍での低温領域の拡大が主要因と推察される。

さらに、図 5.17 (c) の PET 粉末の d_m の相違について見ると、基本的に同一条件の高温酸化性領域中に供給されているため、いずれの d_m においても輝炎の発光領域の外見はほぼ同じであるが、輝炎上流部の筋状の粒子の軌跡数に顕著な相違が見られる。

以上から、いずれの場合も高温酸化性領域において輝炎の発光が強いことがわかるが、詳細な PET 粉末燃焼反応に関しては把握できない。そこで、つぎに PET 粉末燃焼に伴う消費酸素量と温度変化量の把握を行う。

(2) PET 粉末燃焼に伴う温度場と O_2 濃度場の変化

前項の図 5.13 の場合と同様に、PET 粉末の供給と燃焼の有無による流れ場の変化はないという仮定の下で、単純に PET 粉末供給前後の O_2 濃度場と温度場の差を取った値を PET 粉末による酸素消費量および温度変化量として定義し、その分布を図 5.18 に示す。図 5.18 (a) および図 5.18 (b) は、それぞれ基本条件からスリット噴流速度 v_s またはノズル出口流速 v_n を変化させた場合で、質量メディアン直径 $d_m = 99.3 \mu\text{m}$ の粉末を用い、PET 粉末供給量を $m_{\text{PET}} = 8.0 \text{ g/min}$ とした。なお温度変化量の分布において、中心軸付近で負の温度領域が存在する。これに関しては、前節で述べたように、熱電対へのすすの付着による影響が主要因であり、検討する際は注意する必要がある。

図 5.18 (a) から、 v_s の増加に伴い PET 粉末の燃焼に伴う酸素消費領域が上流側へ移行しながら、半径方向へ広がっていることが知れる。等酸素濃度線と等温線の対応関係を見ると、 $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ の場合に最も変化量が大きく、6 %以上消費している領域で、 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の PET 粉末の燃焼に伴う温度上昇が認められる。このことから、 $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ の条件が、他の条件に比して良好な燃焼特性を実現していると考えられる。

つぎに図 5.18 (b) を見ると、 v_n の増加に伴い酸素消費領域が下流方向へ移行しながら、軸方向へ伸長していることが伺える。これに関しては、 v_n の増大に伴う PET 粒子の着火遅れの増大が挙げられる。また、酸素消費量を見てみると、 $v_n = 2.5$ および 3.7 m/s に関しては、同じ分布傾向を示しているものの、 $v_n = 5.6 \text{ m/s}$ の場合は、中心軸上の酸素消費量が少し小さいことが見て取れる。このことから、 $v_n = 5.6 \text{ m/s}$ の場合は、他の条件に比べて PET 粉末の燃焼促進効果が低いことが知れる。

続いて、図中に PET 粉末供給前の $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ の等温線と 10 % の等酸素濃度線を白破線で併記し、高温酸化性領域と PET 粉末の燃焼反応領域との定性的関係を検討する。図 5.18 から、全体的に

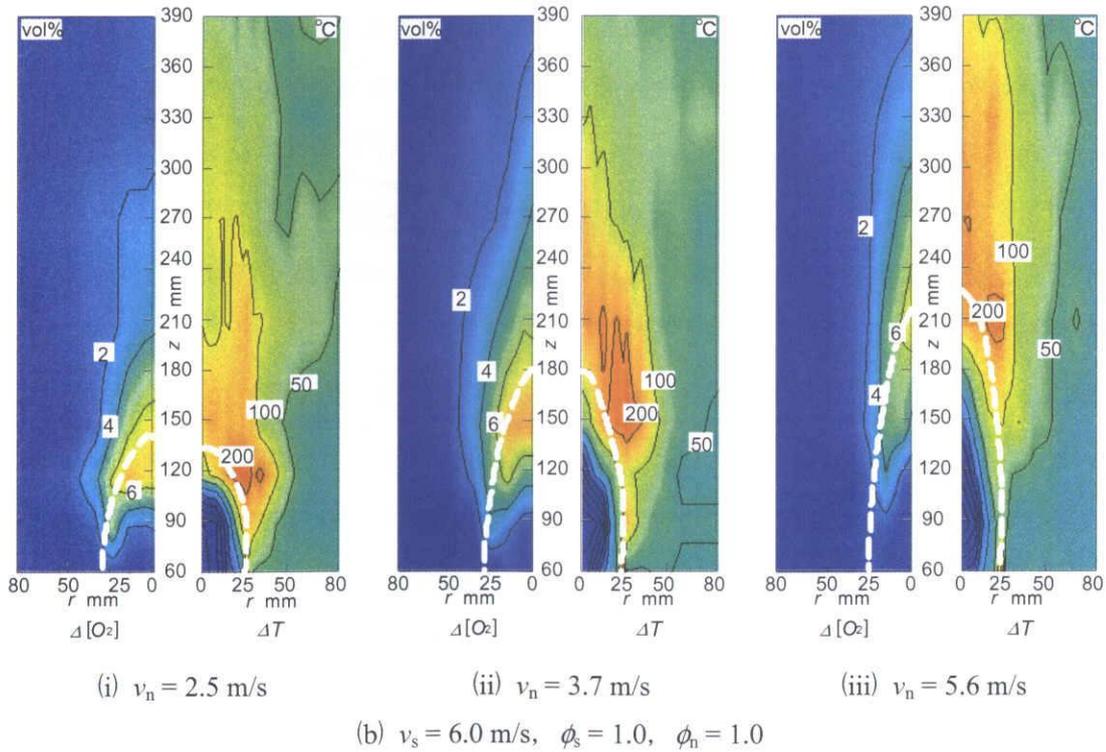
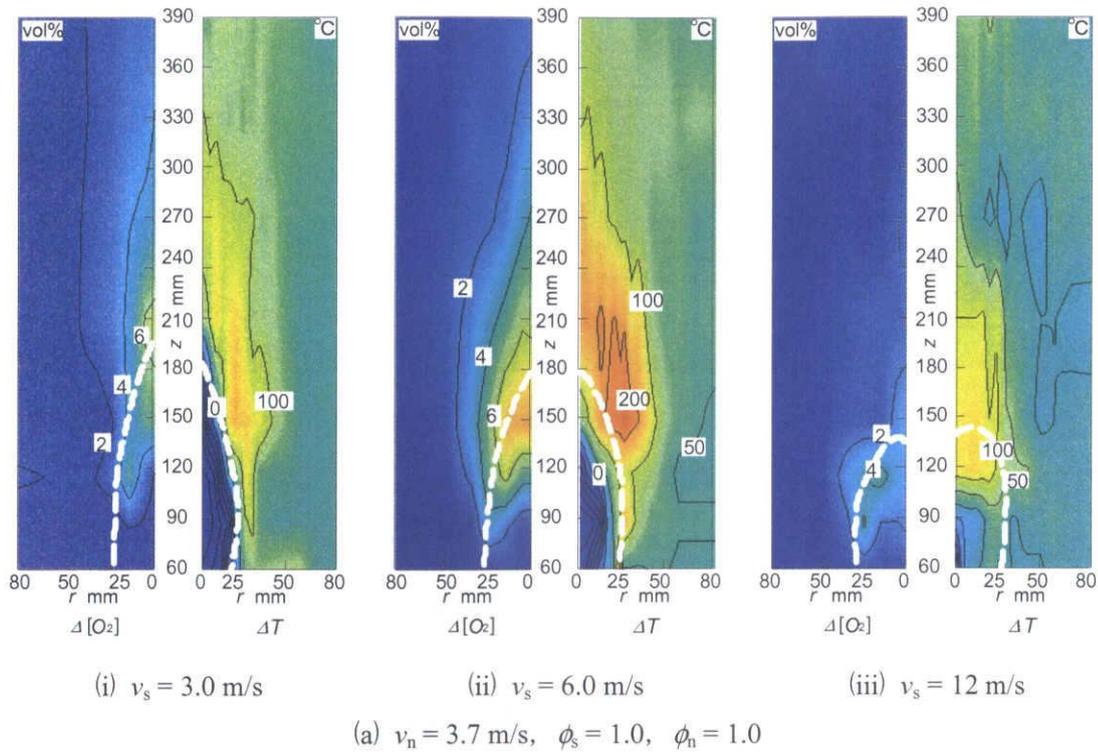


Fig. 5.18 Variations of O_2 concentration contours and isothermals between flames without and with PET-powder supply; $m_{PET} = 8.0$ g/min

白破線の前後に高酸素消費領域と高温場域が対応し存在している。このことは、PET 粉末が残存酸素または周囲からエントレインされた空気中の酸素と拡散燃焼し、その反応に伴い発熱し温度上昇していることを示している。とくに温度上昇領域に関しては、白破線に沿って下流領域まで広がっていることがわかる。

(3) PET 粉末の未燃率の変化

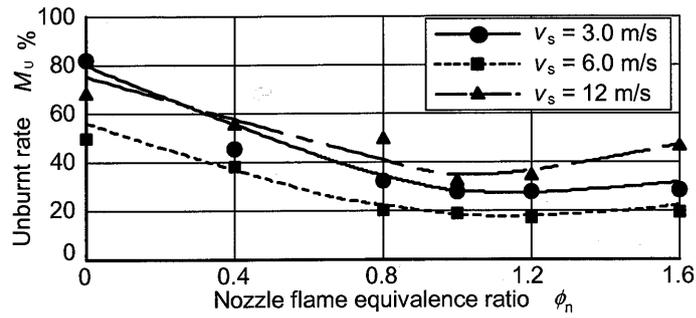
最後に、高温酸化性領域と熱分解・ガス化特性との関係を検討するために、未燃率測定を行った。図 5.19 (a), (b) および図 5.19 (c) に、質量メディアン直径 $d_m = 154 \mu\text{m}$ の PET 粉末を用い、基本条件からそれぞれスリット噴流速度 v_s 、ノズル出口流速 v_n および環状火炎当量比 ϕ_s を変化させた場合の未燃率の変化を、図 5.19 (d) にはバーナの設定条件を基本条件に固定し d_m を変化させた場合の未燃率の変化を示す。横軸はノズル火炎当量比 ϕ_n を、縦軸は未燃率 M_U % を意味する。

まずバーナの設定条件を変化させた場合 [図 5.19 (a), (b) および図 5.19 (c)] を見ると、希薄域では ϕ_n の増加に伴って M_U は減少し、その後わずかに増大する傾向となる。これに関しては、希薄条件下では PET 粉末供給前に燃焼領域に残存する酸素濃度は高いものの、燃焼領域の温度低下により熱分解・ガス化が行われ難く、その後の燃焼反応が活発に進行しないためと推察される。一方、過濃条件においては、PET 粉末供給前の燃焼領域中の残存酸素濃度は 0 % となっているものの、下流方向まで高温領域が広がり、さらに周囲空気の同伴効果もあいまって、高温領域で熱分解しガス化に至った PET のガス化ガスが同伴された空気中の酸素と拡散燃焼により消費される。したがって、良好な熱分解・ガス化特性を得るためには、第一段階として酸素濃度条件よりも温度条件を優先する方が好ましいと考えられる。

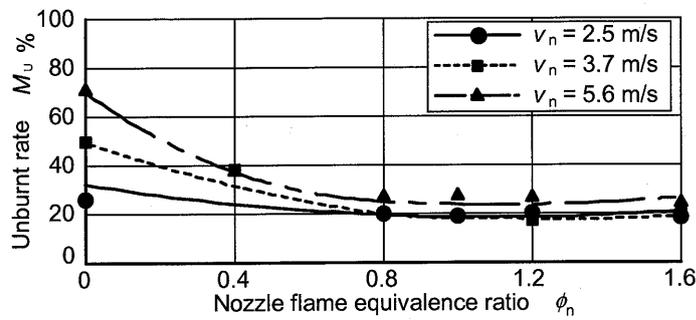
つぎに図 5.19 (a) および (b) から未燃率 M_U に及ぼす v_s および v_n の影響について見ると、 $v_s = 6.0 \text{ m/s}$ の場合、 $v_s = 3.0 \text{ m/s}$ の場合に比べて全体的に減少するものの、 $v_s = 12 \text{ m/s}$ の条件になると逆に増加することが知れる。また v_n の増加に伴い、同一 ϕ_n 下では単調に増加していること、 $\phi_n = 1.0$ 付近では $v_n = 2.5$ および 3.7 m/s とともに同程度であることがわかる。これらの v_s と v_n の相違に伴う未燃率挙動は図 5.18 で述べた PET 粉末の燃焼反応領域の遷移の特徴に符号していることがわかる。

続いて図 5.19 (c) を見ると、 $\phi_s = 0.6 \sim 1.2$ の範囲では未燃率 M_U にほとんど差は見られない。しかし $\phi_s = 1.6$ になると、 M_U が全体的に低下する傾向にある。この要因としては、過剰燃料と周囲空気との拡散燃焼に伴う下流方向への高温領域の拡大が挙げられる。

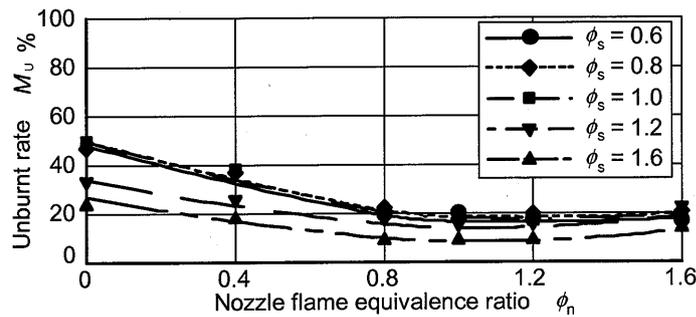
最後に、図 5.19 (d) から未燃率 M_U に及ぼす d_m の著しい影響が知れる。例えば $\phi_n = 1.0$ とした場合、 $d_m = 99.3, 154, 185 \mu\text{m}$ の場合の M_U はそれぞれ約 2, 20, 40 % となる。このことから、現状



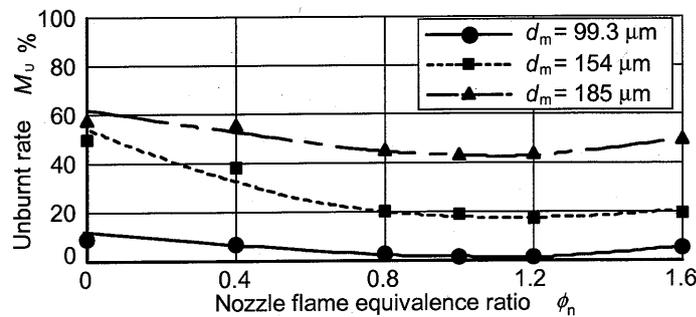
(a) $\phi_s = 1.0$, $v_n = 3.7$ m/s, $d_m = 154$ μm



(b) $\phi_s = 1.0$, $v_s = 6.0$ m/s, $d_m = 154$ μm



(c) $v_n = 3.7$ m/s, $v_s = 6.0$ m/s, $d_m = 154$ μm



(d) $\phi_s = 1.0$, $v_s = 6.0$ m/s, $v_n = 3.7$ m/s

Fig. 5.19 Unburnt rate profiles of PET-powder; $m_p = 8.0$ g/min

のバーナの設定条件で平均粒径 100 μm 程度の粉末を用いた場合, 良好な熱分解・ガス化特性が得られると予測される.

5.5 第5章のまとめ

本実験では、まず環状火炎バーナを用いて高温酸化性領域を形成し、その領域に PET 粉末を供給したときの燃焼特性を調べた。その際、効果的な熱分解・ガス化に要する高温酸化性領域の把握、またガス化ガスの燃焼領域に関して定性的な検討を行った。得られた結果は以下のように要約される。

- ① PET 粉末を供給しない場合の温度分布および酸素濃度分布の対応関係から、希薄ノズル火炎の場合には燃焼領域中の温度と酸素濃度との間には互いに相反する関係があること、1050 °C の等温線が 10 % の酸素等濃度線によく対応することが確認された。この結果に基づき、1050 °C 以上の温度と 10 % 以下の酸素濃度を高温酸化性領域の目安とした。
- ② PET 粉末燃焼の火炎挙動観察によれば、高温酸化性領域を通過する微細な粒子は容易に PET の熱分解によるガス化ガスとなり気相燃焼する。しかし、粗大な粒子に関しては、本実験で形成した高温酸化性領域では十分な滞在時間が得られず、大気中へ飛散することが明らかとなった。
- ③ PET 粉末燃焼による酸素消費分布の検討から、 ϕ_h が希薄条件下の場合には、高温領域内の残存酸素と PET の熱分解によるガス化ガスの燃焼反応が確認された。しかし、 ϕ_h の値が大きくなり過濃条件になるにつれて、中心軸まわりに形成される高温過濃燃焼ガス領域が広がるため、PET の熱分解によるガス化ガスは周囲空気のエントレインによる拡散燃焼により消費されることとなり、その燃焼領域は ϕ_h の増加に伴い外側へ移行する。
- ④ PET 粉末の速やかな融解・熱分解によるガス化には第一段階としては高温場が必要であるが、その後の PET の熱分解に伴うガス化ガスの燃焼を考慮した場合、高酸素濃度場の形成の方が重要であることが理解できた。

続いて、環状火炎バーナの作動条件を変化させたときの高温酸化性領域の変化を把握し、その領域に PET 粉末を供給したときの未燃率特性を調べた。得られた結果は以下のように要約される。

- ⑤ PET 粉末を供給しない場合の酸素濃度および温度分布の対応関係から、高温酸化性領域は v_s の増加に伴い半径方向へ広がり軸方向へ短くなること、 v_n の増加に伴い半径方向へ短くなり、軸方向へ広がることがわかった。
- ⑥ PET 粉末燃焼による酸素消費量および温度変化量分布の定性的検討結果から、PET 粉末のガス化ガスの燃焼反応領域は v_s の増加に伴って上流側に移行すること、一方、 v_n の増加に伴って下流方向へ広がることがわかった。また、PET 粉末の主燃焼領域は、PET 粉末供給前の高温酸化性領域の外周部に沿って形成されていることが明らかとなった。
- ⑦ 高温酸化性領域と未燃率特性の結果から、高温酸化性領域によって PET 粉末が熱分解・ガス化し、その後の PET のガス化ガスと酸素との拡散燃焼反応が活発なほど、未燃率は低いことが定性的に理解できた。

以上のように、高温酸化性領域を通過する微細な粒子は容易に加熱・融解・熱分解・ガス化し、その PET のガス化ガスと酸素との拡散燃焼反応が活発なほど、固形残留粒子の排出量が低減されることが定性的に明らかとなった。

なお、本論文ではバーナ内に供給された PET 粒子をいかに熱分解・ガス化させ、固形残留粒子の排出量を低減させるかといった点に的を絞り系統的に研究を進めたため、PET 粒子が各温度・酸素濃度領域を通過して発生する熱分解・ガス化ガスの成分分析、またそのガス化ガスの詳細な燃焼反応機構に関しては検討しなかった。

第 5 章の参考文献

- (1) J. B. Howard and R. H. Essenhigh, Mechanism of Solid-Partical Combustion with Simultaneous Gas-Phase Volatiles Combustion, *Proceedings of the 11th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1966), 399-408.
- (2) D. W. Pershing and J. O. L. Wendt, Pulverized Coal Combustion: The Influence of Flame Temperature and Coal Composition on Thermal and Fuel NO_x, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1976), 389-399.
- (3) H. Kobayashi, J. B. Howard and A. F. Sarofim, Coal Devolatilization at High Temperature, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1977), 411-425.
- (4) L. D. Timothy, A. F. Sarofim and J. M. Beer, Characteristics of Single Particle Coal Combustion, *Proceedings of the 19th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1982), 1123-1130.
- (5) L. D. Smoot, P. O. Hedman and P. J. Smith, Pulverized-Coal Combustion Research at Brigham Young University, *Progress in Energy and Combustion Science*, **10**, (1984), 359-441.
- (6) 岡崎健・宍戸秀夫・西川隆・大竹一友, 一次元炉における微粒炭の燃焼過程と NO_x 生成特性, 日本機械学会論文集 (B 編), **51**-465, (1985), 1549-1556.
- (7) T. F. Wall, *Principles of Combustion Engineering for Boilers*, (1987), 197-335, Academic Press.
- (8) L. H. Sorensen, O. Biede and R. E. Peck, An Experimental Study of High-Temperature, Oxidative Pulverized Coal Devolatilization, *Proceedings of the 25th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1994), 475-483.
- (9) M. Taniguchi, H. Kobayashi and S. Azuhara, Laser Ignition and Flame Propagation of Pulverized Coal Dust Clouds, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 3189-3195.
- (10) A. Williams, M. Pourkashanian and J. M. Jones, *Combustion and Gasification of Coal*, (1999), 86-122, Taylor & Francis.
- (11) 中野雅司・水口裕之・下栗大右・長友真吾・石塚悟, 管状火炎による火炎の安定化, 第 39 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2001), 191-192.

- (12) 下栗大右・中野雅司・水口裕之・石塚悟, 管状火炎による安定化(第2報), 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002), 281-282.
- (13) S. Ishizuka, Characteristics of Tubular Flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, **19**, (1993), 187-226.
- (14) S. Ishizuka, On the Behavior of Premixed Flames in a Rotating Flow Field: Establishment of Tubular Flames, *Proceedings of the 20th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1984), 287-294.
- (15) Y. Sakai and S. Ishizuka, Extinction Characteristics of Tubular Flames Diluted with Nitrogen in a Rotating Stretched Flow Field, *Proceedings of the 24th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1992), 153-159.
- (16) K. Yamamoto, T. Hirano and S. Ishizuka, Effects of Pressure Diffusion on the Characteristics of Tubular Flames, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 1129-1135.
- (17) S. Ishizuka, An Experimental Study on Extinction and Stability of Tubular Flames, *Combustion and Flame* **75**, (1989), 367-379.
- (18) T. Takeno and S. Ishizuka, A Tubular Flame Theory, *Combustion and Flame* **64**, (1986), 83-98.
- (19) T. Takeno, M. Nishioka and S. Ishizuka, A Theoretical Study on Extinction of a Tubular Flame, *Combustion and Flame* **66**, (1986), 271-283.
- (20) M. Nishioka, T. Takeno and S. Ishizuka, Effects of Variable Density on the Characteristics of Tubular Flames, *Combustion and Flame* **73**, (1988), 287-301.
- (21) P.A.Libby, N.Peters and F.A.Williams, Cylindrical Premixed Laminar Flames, *Combustion and Flame* **75**, (1989), 265-280.
- (22) K. Yamamoto, S. Ishizuka and T. Hirano, Effects of Rotation on the Stability and Structure of Tubular Flame, *Proceedings of the 25th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1992), 1399-1406.
- (23) 石塚悟・萩原良一・鈴木実・中村章・濱口惣, 管状火炎バーナの燃焼特性, 日本機械学会論文集(B編), **65-639**, (1999), 3845-3852.
- (24) 萩原良一・岡本昌也・石塚悟・小林秀峰・中村章・鈴木実, メタンを燃料に用いた場合の管状火炎バーナの燃焼特性, 日本機械学会論文集(B編), **66-652**, (2000), 3226-3232.

- (25) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, Burning Processes of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), 1531-1538.
- (26) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere), *JSME International Journal (Series B)*, **48-1**, (2005), 83-91.
- (27) 寺本啓祐・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 環状火炎バーナによって形成された高温酸化性雰囲気における PET 樹脂粉末の燃焼特性, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No. 05-13, (2005), 185-189.
- (28) 岡島敏・河野通方, 工業熱力学, (1995), 99, 学献社.
- (29) 既設発電ボイラーを対象とした廃プラスチック燃料化基礎技術の調査研究報告書, (1993), 13, (社)プラスチック処理促進協会.
- (30) 高分子大辞典, (1994), 1015, 丸善.
- (31) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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(プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称一次元解析), 日本機械学会論文集(B編), **71-708**, (2005), 2154-2161.
- (32) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2005), CD-ROM: Paper No. KD.08.

第6章 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

6.1 はじめに

これまでの章では、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、数百ミクロン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 計測手法を用いた大気開放燃焼時における未燃率の増加要因の検討⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾、高温酸化性領域における粉末燃焼特性の把握⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾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。これに関して、プラスチック粉末は多数のプラスチック微粒子の集まりであることから、単一プラスチック微粒子の加熱・燃焼特性を知ることは、粉末燃焼を考える上で重要な意味をもつ。とくに、高温雰囲気中に置かれたプラスチック粒子が熱分解・ガス化して消滅するまでにかかる時間（プラスチック粒子の寿命）を把握することは、バーナの構造および寸法に影響する因子を調べる上で重要な知見となる。

そこで本章では、高温雰囲気中に置かれた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内、加熱・融解・熱分解・ガス化といった物理的な現象を把握するために、詳細な光学的観察を試みた^{(10),(11)}。観察にあたっては、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⁽¹²⁾、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 ビデオカメラを組み合わせた詳細な撮影法を導入した。

なお、本章の内容は、文献 (11) および (12) において公表済である。

6.2 記号

C_b	: 燃烧速度定数	[mm ² /s]
d	: プラスチック粒子の直径	[mm]
d^2	: 直径の二乗値	[mm ²]
d_0	: プラスチック粒子の初期直径	[μ m]
d_b	: 微小気泡の幅	[μ m]
d_m	: 微小噴流の幅	[μ m]
l_m	: 微小噴流の軸方向長さ	[μ m]
w_f	: 微小輝炎の幅	[μ m]
t	: 加熱時間	[s]
T_g	: 加熱温度	[°C]
v_m	: 微小噴出速度	[cm/s]
U	: バーナ出口部における平均流速	[m/s]
ϕ	: 火炎当量比	[-]

6.3 実験装置および方法

6.3.1 実験装置システム

実験装置の系統図を図 6.1 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, 最小シャッタ露出時間: 1/120,000 sec) および PC コントローラ (Photron) からなる。燃料と空気には、それぞれ市販の家庭用 LPG (プロパン純度: 96.4%, 低位発熱量 (25 °C, 1 atm): 46.35 MJ/kg⁽¹³⁾) および混合標準ガス (O₂: 20.78%, N₂: 79.22%) を用いた。それぞれレギュレーター (山本産業, MODEL NPR-1) によって圧力調整された後、プロパン用マスフローコントローラ (エステック, SEC-E40, 流量範囲: 6 ~ 300 ml/min, 流量精度: ± 0.1 %F.S.以内) および空気用マスフローコントローラ (エステック, SEC-E40, 流量範囲: 0.2 ~ 10 l/min, 流量精度: ± 0.1 %F.S.以内) によって流量調整され、予混合器に供給される。

6.3.2 透過・シュリーレン拡大同時撮影系

図 6.2 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一レンズで集光され、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) と第二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三レンズを通過し、図 6.2 中の拡大挿入図に示すような各々 2 個のプリズム (Edmund Optics Japan 製, BK7 直角プリズム, 寸法: 5.0 mm) とビームスプリッタ (Edmund Optics Japan 製, キューブ型ビームスプリッタ, 寸法: 5.0mm) 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、拡大画像調節用第四レンズを経て、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 6.2 のナイフエッジの方向は撮影された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

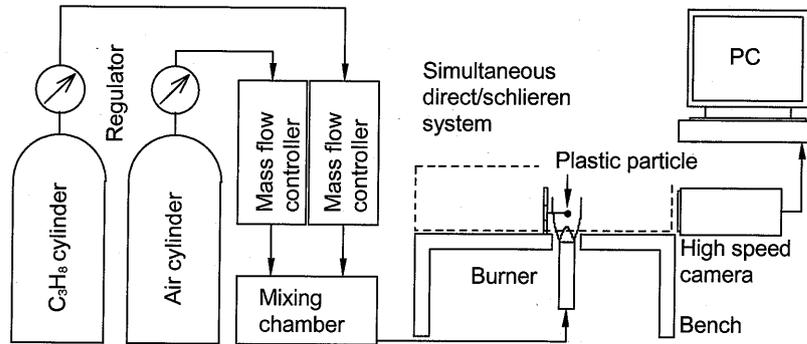


Fig. 6.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

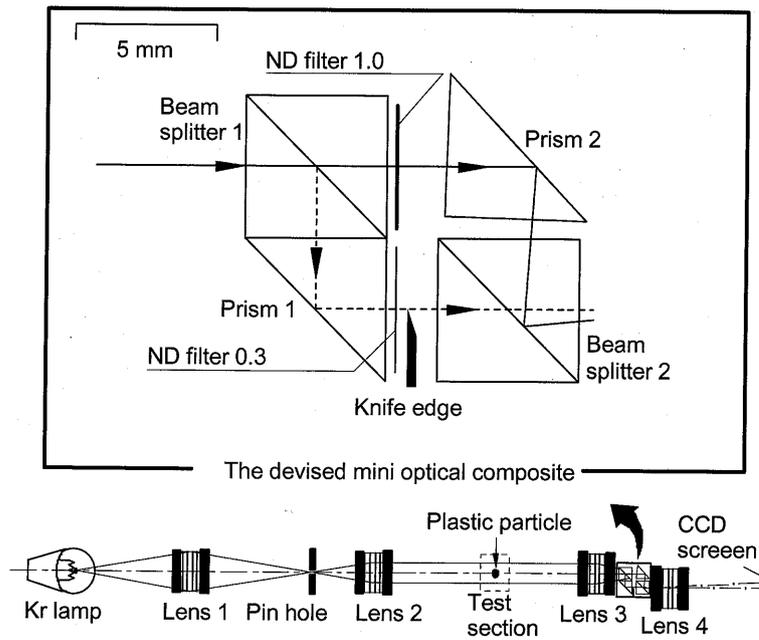


Fig. 6.2 The devised simultaneous direct and schlieren system

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。

6.3.3 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揃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，まず一個の微粒子を線径5 μm のタングステン線に付着させ，それを灼熱したニクロム線の輻射熱により加熱・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熔融微粒子がタングステン線まわりに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同時に解決され，さらに解析的に評価する際，球対称一次元熱伝導解析^{(14), (15)}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，先行の粉末燃焼実験^{(1)-(9), (15)-(17)}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，タングステン線上に溶着・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6.3に示す．図から，原料の PET 微粒子形状が不揃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．

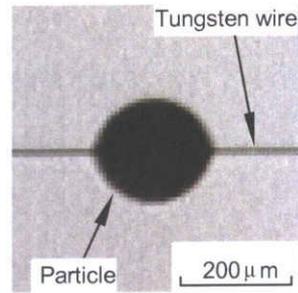
6.3.4 粒子の急速加熱方法

本実験では，燃焼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焼ガスを採用した．図 6.4 (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上向きに供給し [図 6.4 (a)]，バーナ出口付近で火花点火し火炎伝ばさせる [図 6.4 (b)]．下流方向へ伝ばした火炎面が通過した後に，粒子は燃焼ガスに覆われ加熱が始まる．そして，点火開始から約 20 ms 後に安定な円錐状の層流火炎が形成され [図 6.4 (c)]，粒子は定常加熱される．このように，定在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 μm 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，その一コマ前の時刻を加熱開始時刻 ($t = 0 \text{ ms}$) とした．



(a) Original rugged PET particle



(b) Reformed PET particle

Fig. 6.3 Microscopic photographs of an original and spherically rounded PET particle

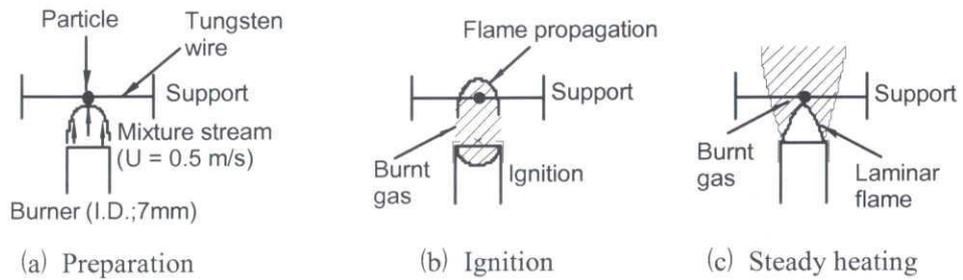


Fig. 6.4 A series of the burner heating processes ($\phi = 0.8$)

6.3.5 実験手順および方法

本実験では、雰囲気温度が1000 °C以上かつ酸素濃度が10 %以下の高温酸化性領域が効率的な粉末燃焼に対して有効であるという結果⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾を踏まえ、予混合気の当量比を $\phi = 0.8$ に、加熱温度を $T_g = 1000$ °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。本実験では、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 d として粒子径の時間変化を調べることにより、燃焼速度定数 C_b についての検討も行った。

6.4 実験結果および考察

6.4.1 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の一例を、それぞれ図 6.5 および図 6.6 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 $T_g = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 6.7 (a) および (b) に、それぞれ図 6.5 および図 6.6 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_s を、縦軸は粒子径 $d \text{ mm}$ およびその二乗値 $d^2 \text{ mm}^2$ を意味する。なお図中には、特徴的なシュリーレン画像が挿入されている。

これらの図を見ると、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：穏やかな熱分解によるガス化

過程③：微小爆発・微小噴流を伴う激しい熱分解によるガス化

過程④：残留チャー（炭素分）の消滅

の 4 つの過程に分割できる。図 6.5, 6.6 および図 6.7 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。

(1) 過程①：加熱・融解に伴う体積膨張

図 6.5 および図 6.7 (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、図 6.6 および図 6.7 (b) から、PE 粒子の場合には、 $t = 0 \sim 50 \text{ ms}$ の期間に、PET 樹脂に比べて体積膨張による変化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^{(18), (19)}。またこの間、両シュリーレン像には熱分解によるガス化ガスの発生を示す明暗の影は明確に現れていない。

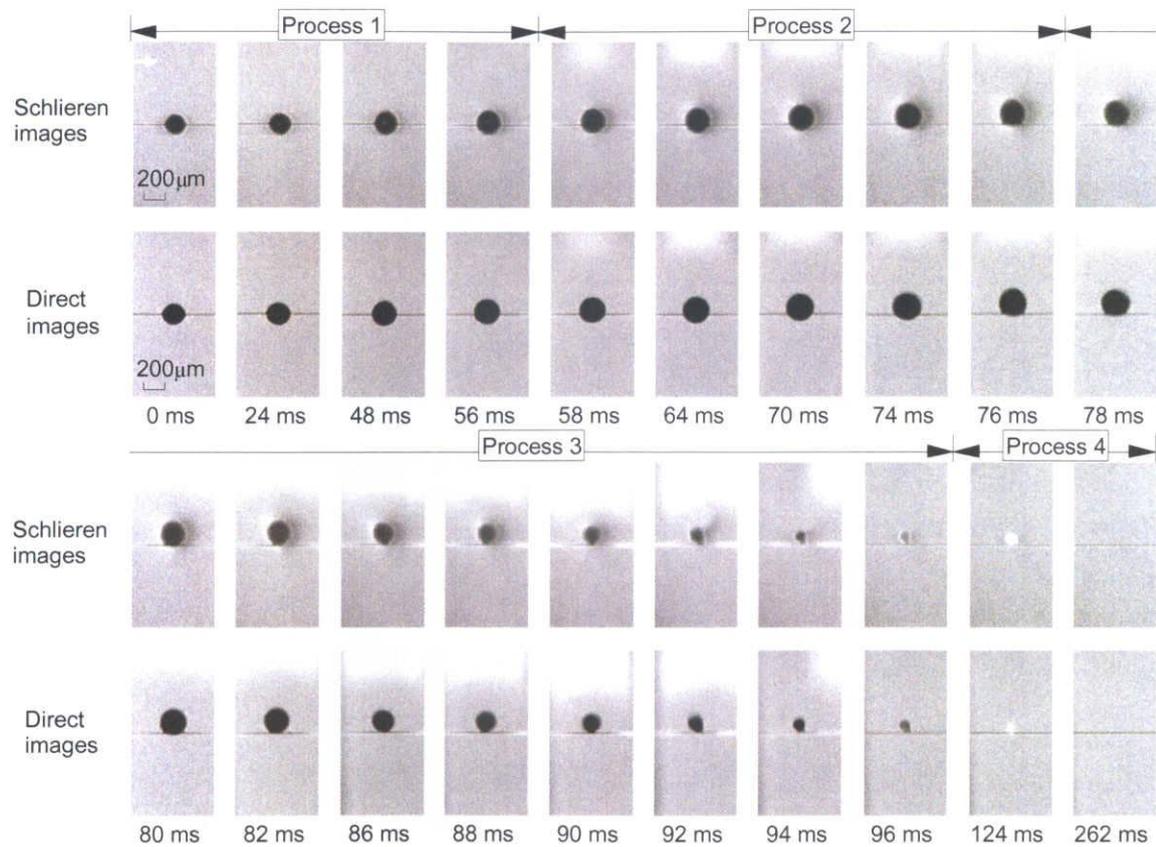


Fig. 6.5 A series of high-speed direct and schlieren images of a micro PET-resin particle under the abrupt heating ($d_0 = 200 \mu\text{m}$, $\phi = 0.8$, $T_g = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, shutter speed; 500 fps, exposure time; 1 ms)

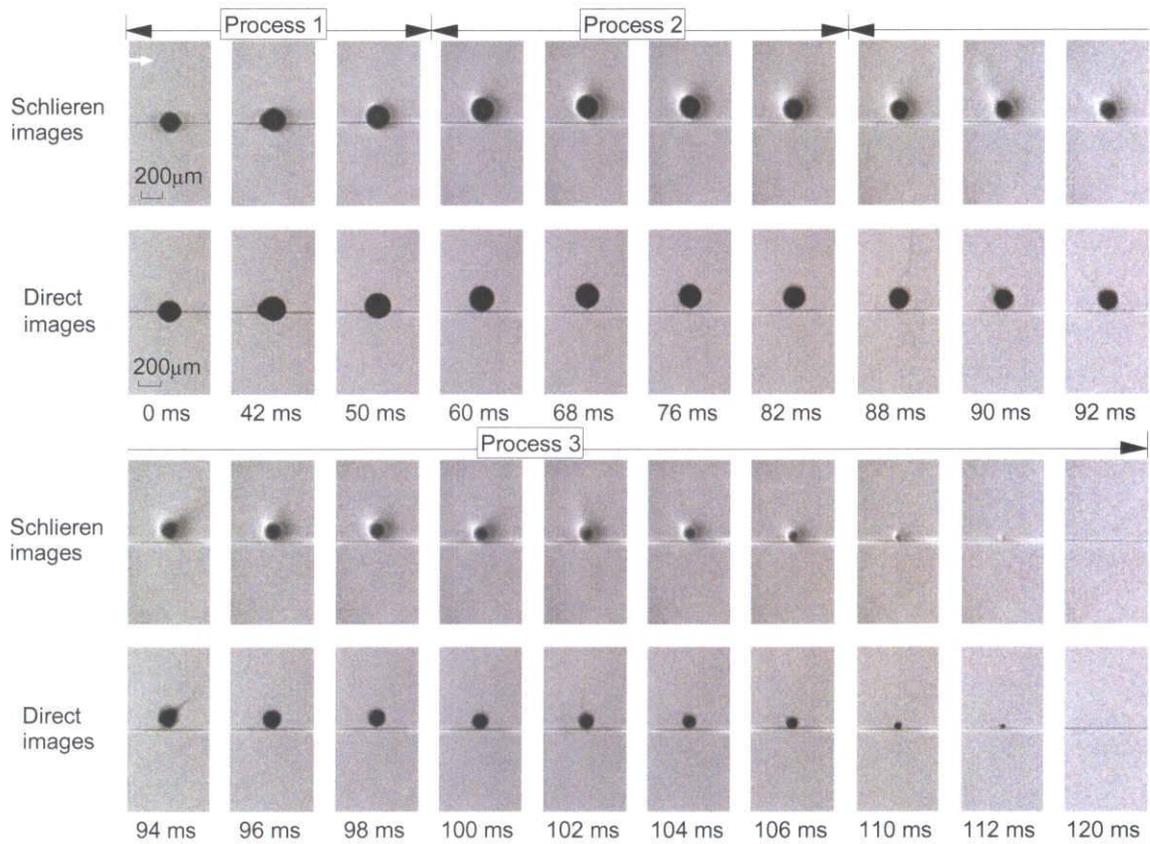
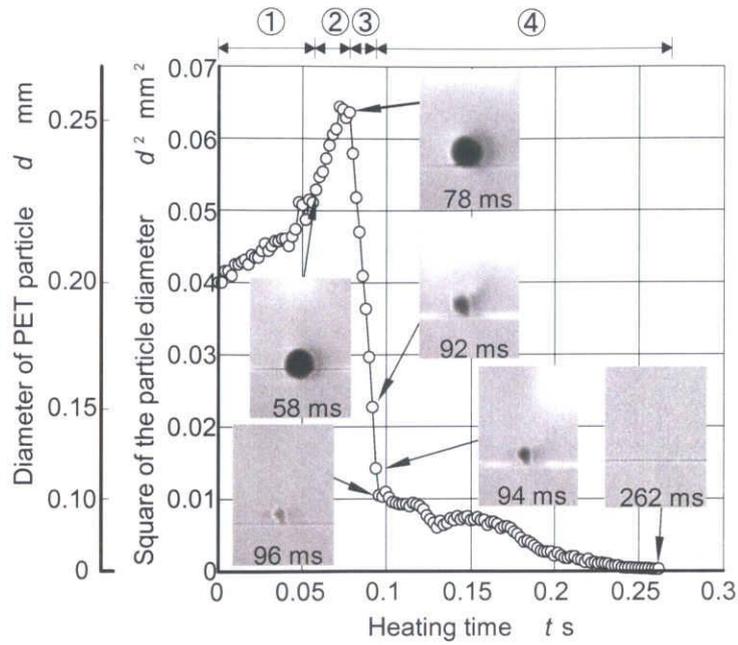
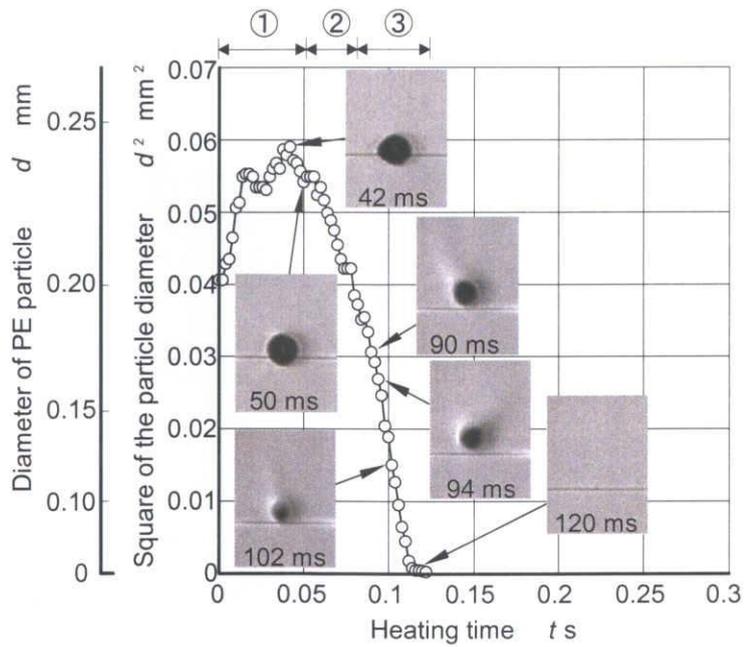


Fig. 6.6 A series of high-speed direct and schlieren images of a micro PE-resin particle under the abrupt heating ($d_0 = 202 \mu\text{m}$, $\phi = 0.8$, $T_g = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, shutter speed; 500 fps, exposure time; 1 ms)



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



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

Fig. 6.7 Temporal variations of a plastic-resin particle diameter ($\phi = 0.8$ and $T_g = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)

(2) 過程②：穏やかな熱分解によるガス化

続いて、PET 粒子の場合は $t \approx 56$ ms, PE 粒子の場合は $t \approx 50$ ms から、シュリーレン写真の粒子周りに微かに明暗の影が現れ始めていることから、樹脂の熱分解によるガス化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。この後流型の火炎形態は、周囲の燃焼ガス流速と樹脂粒子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⁽²⁰⁾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 $t \approx 78$ ms, PE 樹脂の場合には $t \approx 82$ 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、ほぼ一定の熱分解速度を保ちながら穏やかに熱分解しガス化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次項で検討する。

(3) 過程③：微小爆発・微小噴流を伴う激しい熱分解によるガス化

図 6.7 (a) から、PET 粒子の場合には $t = 78 \sim 96$ ms の間で急激な粒子径の減少が観察される。一方図 6.7 (b) から、PE 粒子の場合には $t = 84 \sim 112$ ms の間で粒子径の減少速度が幾分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 6.5 と 6.6 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 6.8 および図 6.9 に示す。

図によれば、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、粒子内部での熱分解によるガス化に伴う泡立ちおよび粒子表面での多重微小爆発の存在が挙げられる。熱分解・ガス化による樹脂の泡立ちの存在に関しては、両者の過程②で観察されたタングステン線まわりの不規則な粒子挙動からも伺える。ちなみに、このような粒子表面における微小挙動を詳細に把握するために、初期粒子径 $d_0 = 620 \mu\text{m}$ の PET 樹脂を用い、同一条件（火炎当量比： $\phi = 0.8$, 加熱温度： $T_g = 1000$ °C, 撮影速度： 500 fps, 露光時間： 1 ms）で急速加熱実験を行っている。図 6.10 に、 2 ms 間隔で撮影されたシュリーレン画像の一例を示す。シュリーレン画像中には加熱開始からの経過時間 t ms が、最初の画像の上側にはスケールバーが併記されている。図中の粒子表面の斑点模様（図中の破線で示した楕円領域）から、熱分解・ガス化に

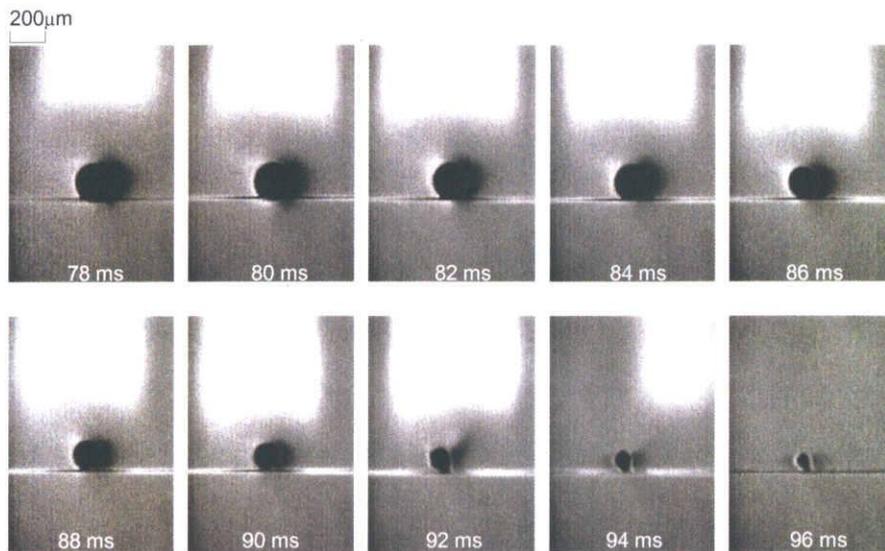


Fig. 6.8 Appearances of multiple micro explosions, micro jets and micro diffusion flames ($\phi = 0.8$, $T_g = 1000$ °C, PET-resin particle, $d_0 = 200$ μm)

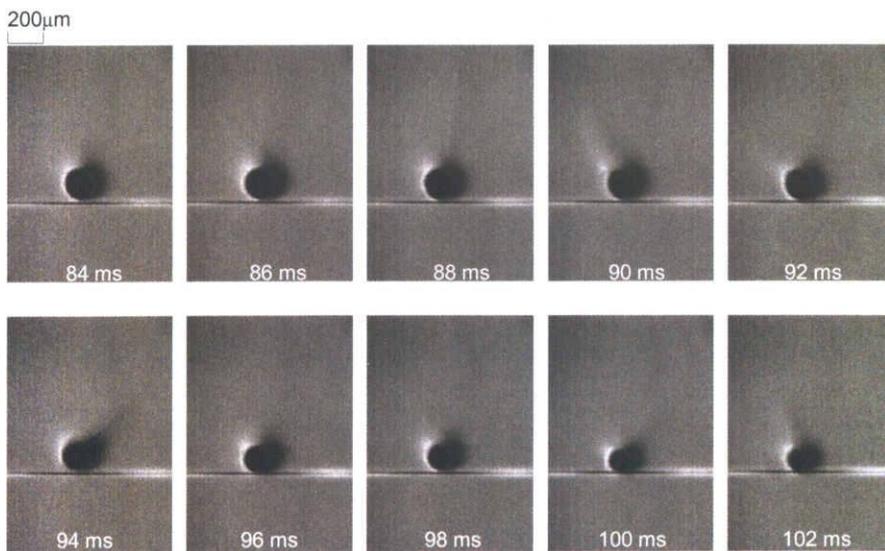


Fig. 6.9 Appearances of multiple micro explosions and micro jets ($\phi = 0.8$, $T_g = 1000$ °C, PE-resin particle, $d_0 = 202$ μm)

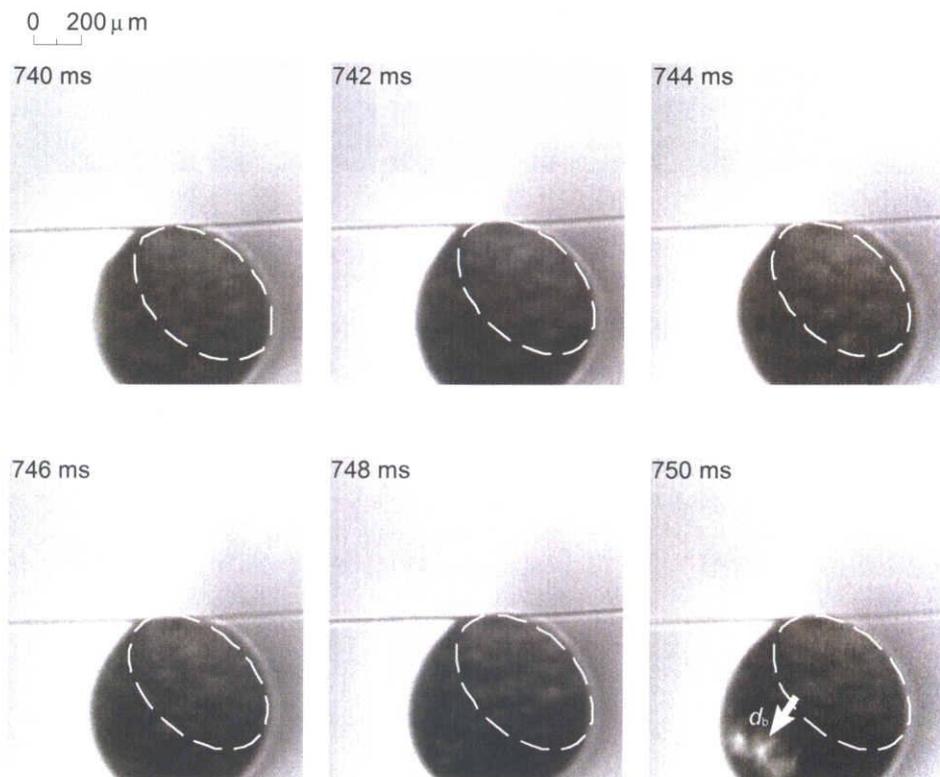


Fig. 6.10 Appearances of multiple micro bubbles on the PET-particle surface
($\phi = 0.8$, $T_g = 1000\text{ }^\circ\text{C}$, PET-resin particle, $d_0 = 620\text{ }\mu\text{m}$)

よる樹脂の泡立ちによって発生した多重微小気泡の存在が認められる。また、それらは時間の経過によらず粒子全体に亘って、比較的、規則正しく出現していることが見て取れる。とくに $t = 750 \text{ ms}$ においては、粒子表面の左下部（図中の白矢印）に多重微小気泡が明確に観察される。ちなみに、図 6.10 中の破線で示した楕円領域に存在している多重微小気泡の大きさを概算すると、 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 程度であり、その領域に存在している気泡の数は数十以上である。また、白矢印で示した気泡の大きさに関しても、 $d_b \approx 90 \mu\text{m}$ であることが知れる。

さらに図 6.8 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様子などが観察されている。一方、図 6.9 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。

以上から、過程③における微粒子挙動をまとめると、まずプラスチック樹脂の微小液滴内部で熱分解・ガス化による樹脂の泡立ちが生じ、それによって粒子表面に多重微小気泡が発現する。そして、それらの気泡において多重微小爆発が生じ、その結果、粒子内部に蓄積していた熱分解・ガス化ガスが噴出し、多重微小噴流が発生する。このことから、熱分解・ガス化による泡立ちと多重微小噴流の間には密接な関係があると予想される。また、このような微小爆発に伴う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、熱分解によるガス化・燃焼の促進に繋がっていると考えられる。

ところで、微小爆発に伴う単一液滴の飛散現象は、蒸発のみが支配的な純粋燃料では観察されず、内部沸騰や液相分解が生じる重油粒などの燃焼実験（加熱温度： $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ，初期直径： 1 mm ）において観察されるといった報告がある⁽²¹⁾。それによれば、着火までに揮発性成分の相当部分が蒸発し、残った燃焼中の液滴は非常に粘度の高いものになるため、内部沸騰や液相分解で生じた燃料蒸気によって多数の気泡が発生し、泡立ちが生じる。その結果、その泡の破裂によって粘い液滴の粒が不規則に飛散すると考えられている。一方、微小爆発現象に関しても、燃焼学的な興味だけでなく、液体燃料の微粒化促進という実用的な観点から重要視されており、多くの研究者により調べられてきている。そこでの微小爆発は燃料に水を混入させた乳化燃料を用いた場合⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾または混合燃料を用いた場合^{(23), (25)-(28)}を対象とし観察されている。また最近では、三上らによって混和性の二成分から成る混合燃料を対象とした微小爆発の詳細な検討がされている^{(29), (30)}。その結果によれば、微小爆発の発生は気泡核生成率といった確率的な側面を持ち、過熱限界温度と液滴温度のみでは決まらないこと⁽²⁹⁾、また初期液滴直径 $d_0 \approx 200 \sim 300 \mu\text{m}$ において、 d_0 が小さくなるほどその発生確率は低くなることが実験的に報告されている⁽³⁰⁾。し

かしながら、以上の実験⁽²¹⁾⁻⁽³⁰⁾は、本実験に比して粗大な粒子を用いた場合^{(23), (24), (27)}、また多成分混合燃料により強制的に微小爆発を誘発させた場合⁽²²⁾⁻⁽³⁰⁾を対象としているため、本実験のように $d_0 \approx 200 \mu\text{m}$ という非常に小さなプラスチック粒子を用いた場合において観察された熱分解による泡立ちに伴う多重微小気泡の発生、粒子表面における気泡の多重微小爆発、さらに混合燃料により強制的に微小爆発を誘発させることなく、プラスチック粒子自身の自発的な微小爆発によって不規則に噴出する多重微小噴流など、微小スケールにおける現象とはいくつかの点で異なるように思われる。よって、本実験において詳細に観察した熱分解によるガス化・燃焼の促進にもつながるであろういくつかの興味深いミクロ挙動は、今後の燃焼学・伝熱学に新たな知見を与える可能性を有しているように思われる。

ちなみに、図 6.7 (a) および (b) で示した熱分解によるガス化開始後の過程②における粒子径挙動の相違、および図 6.10 で示されている粒子表面に規則正しく配列された多重微小気泡の発現に関しては、今のところ、定性的に熱分解による泡立ち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)との確率的なバランスが複雑に影響していると推察している。

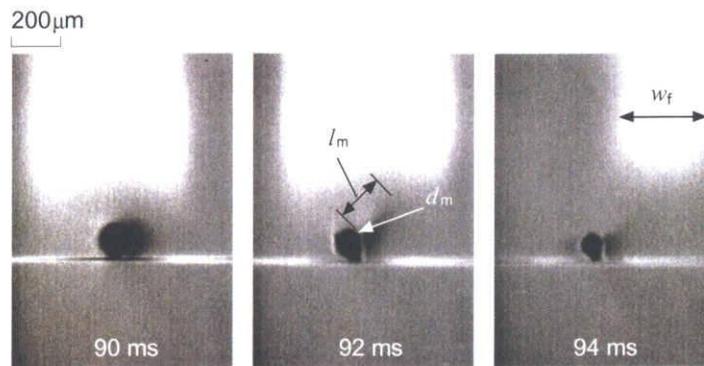
(4) 過程④：残留チャー（炭素分）の消滅

図 6.5 および図 6.7 (a) に見られるように、PET 樹脂の場合には $t = 96 \sim 262 \text{ ms}$ 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 6.6 および図 6.7 (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 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ における熱分解生成物の中でチャー（炭素分）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⁽³¹⁾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。

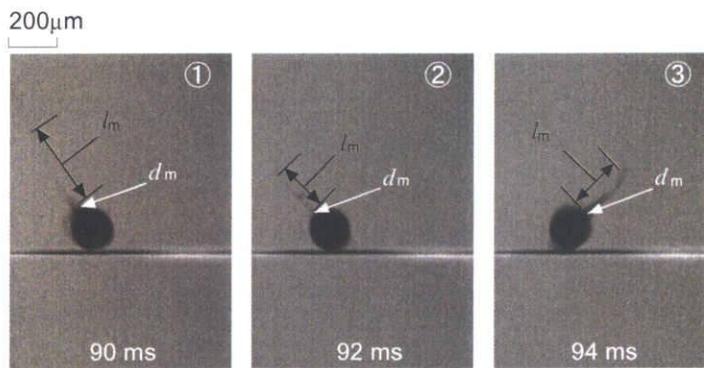
以上のように、本実験で提案した高速度透過・シュリーレン拡大同時撮影法を用いることにより、直径約 $200 \mu\text{m}$ という微粒子の急速加熱下での一連の物理的過程を詳細に観察することができ、粒子近傍で生じているいくつかの特徴的な挙動についても明らかにすることができた。

6.4.2 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、 $t = 90 \sim 94 \text{ ms}$ 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 6.11 (a) に、 $t = 90 \sim 94 \text{ ms}$ において観察された PE 粒子の微小噴流の透過画像を図 6.11 (b) に示す。図中には、微小噴流の軸方向長さ l_m と幅をそれぞれ 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。



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



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

Fig. 6.10 Quantitative estimation of the micro jet velocity
($\phi = 0.8$, $T_g = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)

Table 6.1 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	

それぞれの寸法の概算値を表 6.1 にまとめて示す。

表を見ると、微小噴流に関しては $l_m \approx 200\sim 350 \mu\text{m}$, $d_m \approx 10\sim 30 \mu\text{m}$ 程度であり、微小輝炎に関しては、 $w_f \approx 360 \mu\text{m}$ 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、最近報告されているマイクロフレームに関する実験⁽³²⁾⁻⁽³⁴⁾で見積もられた数値よりもさらに小さい。

6.4.3 燃焼速度定数 C_b の算出

図 6.7 (a) および (b) から、過程③における d^2-t の関係が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、従来の単一液滴の場合との比較・検討を行った。なお傾きを算出する際は、PET 樹脂の場合は $t = 78 \sim 96 \text{ ms}$ 、PE 樹脂の場合は $86 \sim 112 \text{ ms}$ 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 $T_g = 995 \text{ }^\circ\text{C}$ の高温空気の条件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の C_b の値は、それぞれ 2.15, 1.40 および 1.35 mm^2/s と報告されている⁽²¹⁾。これらの参考値と比較すると、PET 粒子の場合に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条件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熱分解・ガス化による樹脂の泡立ち、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熱分解によるガス化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炎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。

6.5 第6章のまとめ

本章では、透過・シュリーレン同時拡大撮影システムに高速度 CCD ビデオカメラを組み合わせることで、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内、加熱・融解・熱分解に伴うガス化といった現象に的を絞り、それに対して詳細な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、(I) 加熱・融解に伴う体積膨張、(II) 穏やかな熱分解によるガス化、(III) 微小爆発・微小噴流に伴う激しい熱分解によるガス化および(IV) 残留チャー（炭素分）の消滅の4つの過程からなることがわかった。
- ② 拡大透過・シュリーレン写真像から、熱分解・ガス化による樹脂の泡立ち、多重微小爆発および多重微小噴流の存在が明らかとなった。とくに多重微小噴流は熱分解によるガス化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 $l_m \approx 200 \sim 350 \mu\text{m}$ 、 $d_w \approx 10 \sim 30 \mu\text{m}$ 、 $w_f \approx 360 \mu\text{m}$ 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および熱分解によるガス化促進効果が著しいことが明らかとなった。

このように、プラスチック粉末を構成しているスケールの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を把握することができた。これらの観察結果は、今後、プラスチック粉末燃焼の際に発生する固形残留プラスチック粒子の排出量を低減させるための基礎的知見となると考えられる。

第 6 章の参考文献

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (2) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), 日本機械学会論文集 (B 編), 71-701, (2005), 357-364.
- (3) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 (B 編), 71-711, (2005), 2792-2799.
- (4) 山北龍児・加藤慎也・Maung Kaung Myat Tun・加藤雄貴・西野光祐・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄 PET 樹脂粉末を助燃料とする工業用バーナーの燃焼特性 (燃焼流動場とそこにおける粒子径挙動・速度の画像計測), 第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004), 433-434.
- (5) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の画像計測), 日本機械学会論文集 (B 編), 掲載決定, 論文 No. 05-0342.
- (6) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*, (2005), CD-ROM: Paper No. 074.
- (7) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere), *JSME International Journal (Series B)*, 48-1, (2005), 83-91.
- (8) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, Burning Processes of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), 1531-1538.

- (9) 寺本啓祐・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 環状火炎バーナによって形成された高温酸化性雰囲気における PET 樹脂粉末の燃焼特性, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No. 05-13, (2005), 185-189.
- (10) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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), 日本機械学会論文集(B編), 校閲中, 論文 No. 05-0698.
- (11) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Appearances of Multiple Micro Explosions, Micro Jets and Micro Diffusion Flames around an Abrupt Heated Micro PET-Resin Particle, *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2005), 209-212.
- (12) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, High-Speed Direct Microscopic Observations of Ignition and Burning Processes of a Micro Plastic-Resin Particle Under Stationary and Abrupt Heating, *Proceedings of the 1st International Symposium on Micro and Nano Technology*, (2004), CD-ROM: Paper No. XXXIV-C-04.
- (13) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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(プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称次元解析), 日本機械学会論文集(B編), 71-708, (2005), 2154-2161.
- (14) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2005), CD-ROM: Paper No. KD.08.
- (15) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル(廃棄 PET 樹脂粉末の置換率が燃焼挙動に及ぼす影響), 第 13 回環境工学シンポジウム 2003 講演論文集 No.03-10, (2003), 326-329.
- (16) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル(樹脂粉末の種類と粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 21-22.
- (17) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル(PET 粉末粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 23-24.
- (18) プラスチックの熱特性データベース, <http://www.aist.go.jp/RIODB/ptdb/entarupi.htm>
- (19) (社)日本塑性加工学会, プラスチック成形加工ハンドブック(第2版), (2002), 37.

- (20) 廃プラスチックのサーマルリサイクル技術基礎データ集, (1993), 20-21, (社)プラスチック処理促進協会.
- (21) 小林清志, 液粒の蒸発および燃焼に関する研究(第3報 燃 焼), 日本機械学会論文集(B編), **20-100**, (1954), 837-843.
- (22) L. T. Yap, I. M. Kennedy and F. L. Dryer, Disruptive and Micro-Explosive Combustion of Free Droplets in Highly Convective Environments, *Combustion Science and Technology*, **41**, (1984), 291-313.
- (23) 津江光洋・山崎博司・角田敏一, 微小重力下における乳化燃料液滴のマイクロ爆発(マイクロ爆発発生に関する統計的検討), 日本機械学会論文集(B編), **61-583**, (1995), 1189-1194.
- (24) M. Tsue, T. Kadota and D. Segawa, Statistical Analysis on Onset of Microexplosion for an Emulsion Droplet, *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1996), 1629-1635.
- (25) J. C. Lasheras, A. C. Fernandez-Pello and F. L. Dryer, Experimental Observations on the Disruptive Combustion of Free Droplets of Multicomponent Fuels, *Combustion Science and Technology*, **22**, (1989), 195-209.
- (26) C. H. Wang, X. Q. Liu and C. K. Law, Combustion and Microexplosion of Freely Falling Multicomponent Droplets, *Combustion and Flame* **56**, (1984), 175-197.
- (27) T. Niioka and J. Sato, Combustion and Microexplosion Behavior of Miscible Fuel Droplets under High Pressure, *Proceedings of the 21th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1986), 625-631.
- (28) J. C. Yang, G. S. Jackson and C. T. Avedisian, Combustion of Unsupported Methanol/Dodecanol Mixture Droplets at Low Gravity, *Proceedings of the 23th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1990), 1619-1625.
- (29) 三上真人・八木孝・小嶋直哉, 混合燃料液滴の燃焼における微小爆発の発生について, 日本機械学会論文集(B編), **64-624**, (1998), 2690-2695.
- (30) M. Mikami and N. Kojima, An Experimental and Modeling Study on Stochastic Aspects of Microexplosion of Binary-Fuel Droplets, *Proceedings of the 29th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (2002), 551-559.
- (31) あなたの实用燃焼炉設計および制御, (2001), 208.

- (32) H. Ban, S. Venkatesh and K. Saito, Convection-Diffusion Controlled Laminar Micro Flames, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, **116**, (1994), 954-959.
- (33) L. M. Matta, Y. Neumeier, B. Lemon and B. T. Zinn, Characteristics of Microscale Diffusion Flames, *Proceedings of the 29th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (2002), 933-939.
- (34) 井田民男・湍端学, 「きわめて小さな火炎」が造りだす微小領域での火炎現象, 日本燃烧学会誌, **45-134**, (2003), 207-211.

第7章 廃棄 PET 樹脂粉末燃焼における未燃率の低減 に関する実験的アプローチ

7.1 はじめに

第2章では、PET粉末を窯業用助燃料として用い、窯業炉内における燃焼特性を調べた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。その結果、助燃率 $\alpha \leq 30\%$ の範囲で、質量メディアン直径 $d_m \leq 185 \mu\text{m}$ までのPET粉末を用いた場合、① 窯業用バーナ内から飛散したすべての粒子は最終的には熱分解・ガス化し消失すること、② 均一な空間温度場の形成が可能であること、③ 焼成の最終工程時に要求される還元雰囲気調整が可能であることなどの燃焼特性が得られ、十分に窯業用助燃料として適用可能であることが明らかとなり、窯業用助燃料としてのサーマル・リサイクルの可能性が示された。しかし、低温の大気開放下においては、窯業用バーナ内で熱分解・ガス化しつくさないまま飛散したPET粒子は周囲の低温空気の影響によって固形残留粒子となり、その未燃率（PET粉末供給量と固形残留粒子の排出量との比）を測定した結果、供給したPET粒子の大部分が固形残留粒子として排出されていることがわかった⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

そこで第3章では、その未燃率を系統的に低減させるために、PIV/PTV計測手法を用いて未燃率の増加要因の把握を行った⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。その結果、主に、(a) 加速流の影響によって粒子がバーナ内に効果的に分散されていなかったこと、(b) 粒子が中心軸付近に多く存在しており、粒子個々への熱伝達が悪く有効に熱が使われていなかったこと、(c) 十分な高温場滞在時間が得られていなかったことの3つの要因が明らかとなった。これらの増加要因を踏まえ、効果的なPET粉末の熱分解・ガス化・燃焼を考えた場合、燃焼領域中にPET粉末を効果的に分散させ、十分な滞在時間を確保するといった試案が挙げられる。

本章では、そのような試案を実験的に明らかにするために、PET粉末の分散度が未燃率に及ぼす影響を調べた。分散度に影響を及ぼす諸因子としては、粉末搬送管径、供給量、供給速度、平均粒径および燃焼流動場等が挙げられる。そこで本実験では、まず粉末搬送管径の相違のみによって分散度を変化させることが可能な基礎実験用バーナ的设计・製作を行い、そのバーナの総合的燃焼特性を調べた。続いて、そのバーナにPET粉末を供給し、PET粉末燃焼挙動を観察した。最後に、得られた結果から、分散度が未燃率に及ぼす影響を考察・検討した⁽¹⁰⁾。

なお、本章の内容は、文献(10)で示されているように公表済である。

7.2 記号

D	: PET 粉末搬送管径	[mm]
d	: PET 粒子の直径	[μm]
d_m	: 質量メディアン直径	[μm]
r	: バーナの中心軸から半径方向への距離	[mm]
l_{ij}	: PET 粒子間距離	[μm]
l_{\min}	: 最小 PET 粒子間距離	[μm]
L	: 各計測区間距離	[mm]
m_{PET}	: PET 粉末の供給量	[g/min]
m_C	: 固形残留粒子の捕集量	[g/min]
m_D	: 固形残留粒子の付着量	[g/min]
M_C	: フィルタによる捕集率 ($= m_C/m_{\text{PET}}$)	[%]
M_D	: ガラス管への付着率 ($= m_D/m_{\text{PET}}$)	[%]
M_U	: 未燃率 ($= (M_C+M_D)$)	[%]
N	: 代表速度を算出する際に用いた値の数	[個]
S	: 検査領域 ($= 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)	[mm^2]
t_{PET}	: 区間毎の滞在時間	[ms]
T_f	: PET 粉末供給前の火炎温度	[$^{\circ}\text{C}$]
u'	: 非燃焼時における乱れ強さ	[m/s]
v_{in}	: PET 粉末搬送管出口における速度	[m/s]
v_{out}	: 保炎器脇における速度	[m/s]
v_t	: ガラス管出口における速度	[m/s]
v_{PET}	: 軸方向平均飛翔 PET 粒子速度	[m/s]
V_{PET}	: 代表速度	[m/s]
x_i	: i 番目の PET 粒子の x 座標	[μm]
x_j	: j 番目の PET 粒子の x 座標	[μm]
y_i	: i 番目の PET 粒子の y 座標	[μm]
y_j	: j 番目の PET 粒子の y 座標	[μm]
z	: PET 搬送管出口から軸方向への距離	[mm]
ϕ_{in}	: 外管内における予混合気の当量比	[-]
ϕ_{out}	: PET 粉末搬送用予混合気の当量比	[-]
ϕ_t	: ガラス管内における予混合気の当量比	[-]

7.3 実験装置および方法

7.3.1 実験装置の系統図

実験装置の系統図を図 7.1 に示す。実験装置は、基礎実験用バーナ、主空気供給系、主燃料供給系、PET 粉末供給系および各種計測装置から成る。

主空気流量は、スライダック（山菱電機，S3P-240-30）とバタフライバルブ（成田製陶所，BV3/4）で調整され、オリフィスマータ（ナリタテクノ，OM-3/4，使用範囲：5 ~ 300 mmH₂O，精度：±2%）とアナログ圧力変換器（豊田工機，AA2460，測定レンジ：500 mmH₂O）で指示された差圧値を基に算出される。

主燃料には、市販の家庭用 LPG（プロパン純度：96.4%，低位発熱量（25 °C，1 atm）：46.35 MJ/kg⁽¹¹⁾）を用いた。図 7.1 に示されているように、総プロパン流量はマスフローコントローラ（エステック，SEC-60，流量精度：±1.0%F.S）およびコントロールユニット（エステック，PAC-D2）で、分岐後の主空気および PET 搬送用プロパン流量はそれぞれフロート形面積流量計によって計測される。PET 搬送空気流量はスライダックで調整され、層流形空気流量計（司測研，LFE-100LM，流量レンジ：100 l/min）とアナログ圧力変換器（豊田工機，AA2460，測定レンジ：500 mmH₂O）で指示された差圧値を基に算出される。

PET 粉末に関しては、第 3 章と同様の予め分級した $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ の粉末（図 3.5 参照）を用いた。なお、PET 樹脂の低位発熱量は 21.8 MJ/kg⁽¹²⁾，密度は $1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ⁽¹³⁾ である。

7.3.2 基礎実験用バーナ

基礎実験用バーナの詳細図を図 7.2 に示す。バーナは主管（内径：28 mm）および PET 粉末搬送管の同軸二重管構造を有し、リング型保炎器が搬送管から分離した状態で設置されている。プロパンと主空気は主管上流部に 90° 間隔で設けた 4 箇所の接続管に、PET 粉末はプロパン・空気予混合気とともに搬送管内に供給される。バーナ本体には、火炎の直接撮影が可能なようガラス管（内径：28 mm，長さ：220 mm）を取り付けた。

本実験では、PET 粉末の分散度を変化させるために、PET 粉末搬送管径を $D = 10, 14, 17 \text{ mm}$ と変化させた。それぞれのバーナ出口の配置と寸法を図 7.2 の挿入図 (a)~(c) に示す。なお、 D の相違によらず乱れが同程度となるように、搬送管内にハニカムを挿入した。図中には、PET 搬送管出口から軸方向への距離 $z \text{ mm}$ と中心軸から半径方向へ距離 $r \text{ mm}$ が併記されている。

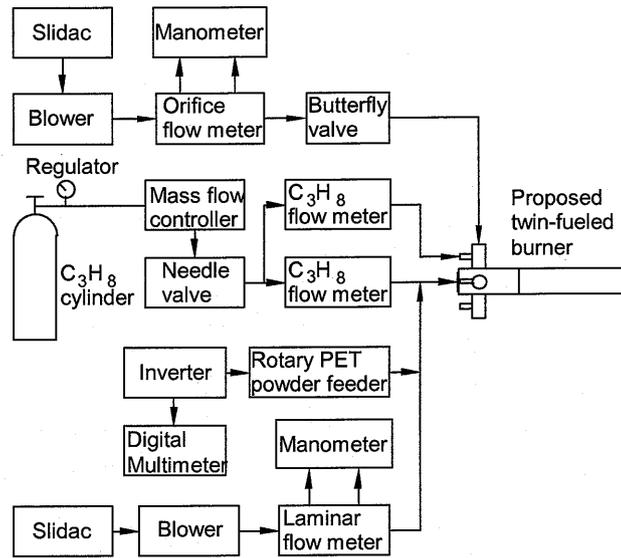


Fig. 7.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

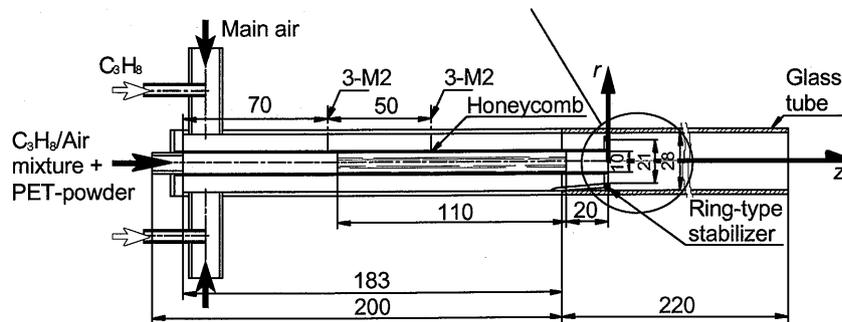
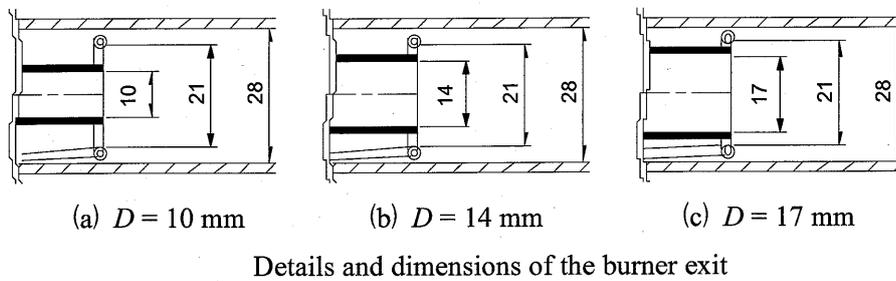


Fig. 7.2 Construction and dimensions of the proposed burner

7.3.3 実験手順および方法

本実験では、はじめに PET 粉末搬送管径 D による基礎実験用バーナの燃焼特性の相違を把握するために、PET 粉末を供給しない状態でプロパン火炎を形成させた。この際、PET 粉末搬送管径以外の分散度に影響を及ぼす諸因子が一定の条件となるように設定した。図 7.3 に各条件の設定箇所を、表 7.1 にバーナの設定条件を示す。

図 7.4 および図 7.5 に、それぞれ温度測定および乱れ強さ測定系を示す。各図 (a) および (b) は、それぞれ計測位置および実験装置の系統図を表し、図 7.4 (c) には、高温場においても長時間、測定することが可能な水冷式熱電対の詳細図を示す。形成された火炎に対して、デジタルカメラによる直接撮影と R 型熱電対（素線径：0.1 mm）を用いた温度測定を行った。なお、乱れの影響を把握する際には、非燃焼時において定温度形熱線流速計（ハヤカワ測研，MODEL HC-30）に I 形熱線プローブ（司測研，HC-25-51，線径：5 μm ，タングステン線）を装着し測定した。測定された出力を FFT アナライザ（小野測器，CF-350）に取り込み 128 回の平均処理を行った。熱線流速計の校正にはピトー管と精密微差圧計（柴田化学器械工業，ISP-3-50）を用いた。

次に、それぞれのバーナに PET 粉末を供給し、 D の変化に伴う PET 粉末燃焼特性を調べた。その際、一方ではダブルパルス Nd:YAG レーザ（Continuum 製，CLP10PIV，発振波長：532 nm，最大出力：220 mJ/pulse，パルス幅：5 ns）と CCD カメラを用いた画像撮影を、他方では未燃率測定を行った。なお測定する際には、第 3 章の PIV 計測および未燃率測定と同様の装置（図 3.6 ~ 図 3.8 を参照）を用いた。トレーサ粒子として、予め質量メディアン直径 $d_m = 176.4 \mu\text{m}$ の粉末を分級した $100 \mu\text{m} < d \leq 180 \mu\text{m}$ の PET 樹脂粒子を採用した。なお、輝炎の自発光の写り込みを避けるために干渉フィルタ（OMEGA OPTICAL 製，中心波長：532 nm，透過率：> 80 %）を、光量を低減するために ND フィルタ（Kenko 製，PRO ND2）を使用した。続いて、得られた画像に対して PTV 演算・統計処理を施し、ガラス管内（軸方向距離 $z = 0 \sim 200 \text{ mm}$ ）における PET 粒子存在確率分布、飛翔 PET 粒子速度分布および平均滞在時間を把握した。

まず、下流方向への PET 粒子存在確率の分布変化の解析にあたっては、100 枚の撮影画像に対して、PET 粒子の重心座標をそれぞれ算出する。その 100 枚の重心座標分布を積算し、空間的な存在確率分布として捉える。その得られた分布に基づいて、下流方向への変化を考察・検討する。なお、座標処理に用いた粒子数に関しては、各領域で異なる。

続いて、飛翔 PET 粒子速度分布解析には 2 時刻パターンマッチング法⁽¹⁴⁾を用いた。各測定範囲において、PTV 演算処理によって求められた移動距離をパルス間隔で除し、飛翔 PET 粒子速度を算出する。これに基づいて、二次元的にその飛翔 PET 粒子速度分布の把握を行う。分布作

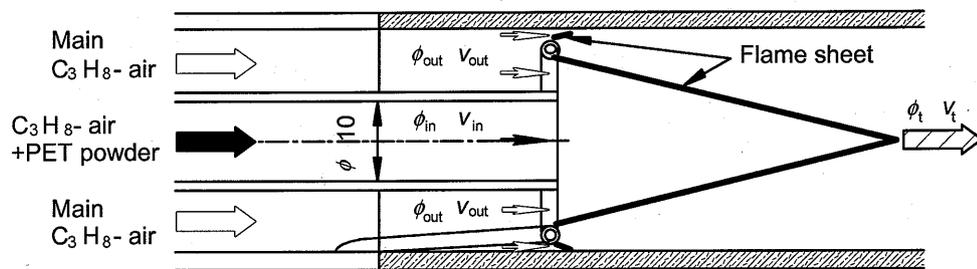


Fig. 7.3 Parameters of the proposed burner

Table 7.1 Experimental conditions of the proposed burner

D mm	v_{in} m/s	ϕ_{in}	v_{out} m/s	ϕ_{out}	v_t m/s	ϕ
10	3.8	0.9	3.8	0.9	2.7	0.9
14					2.6	
17					2.6	

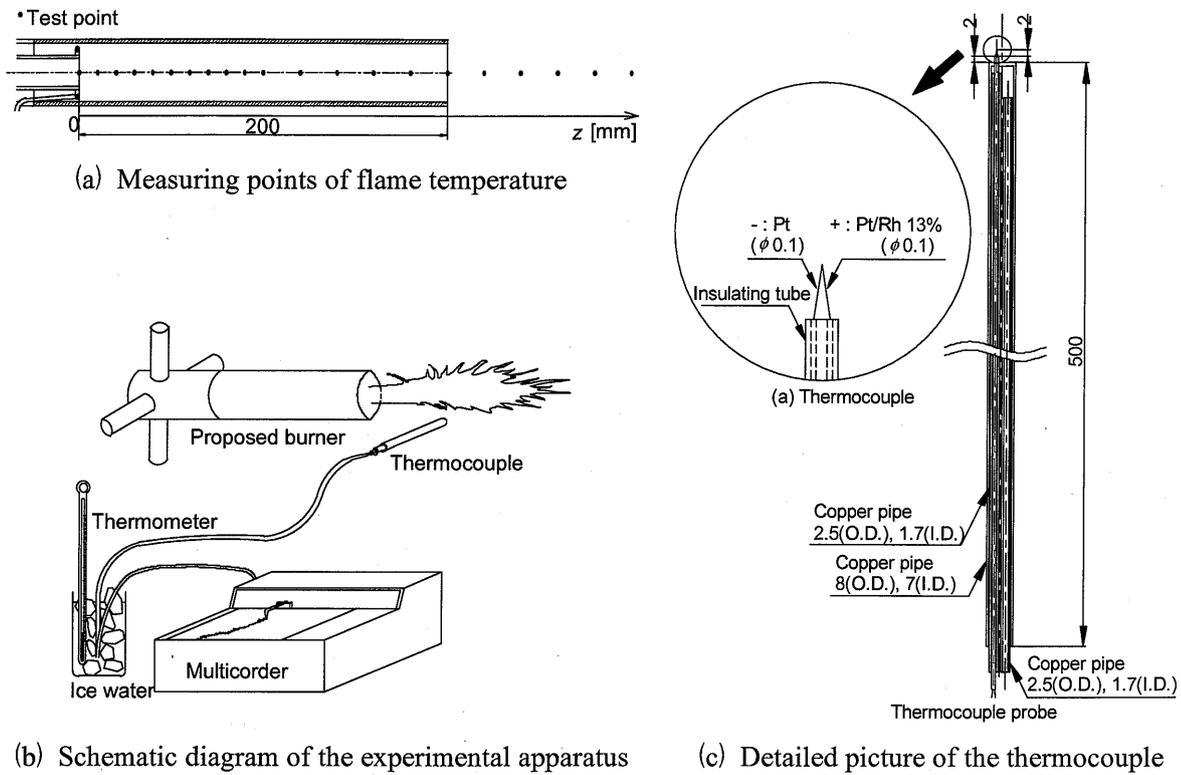


Fig. 7.4 System for flame temperature measurement

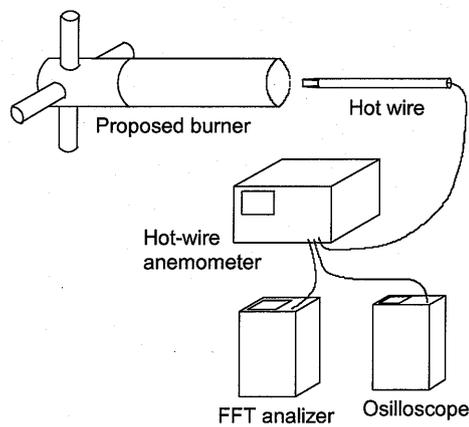
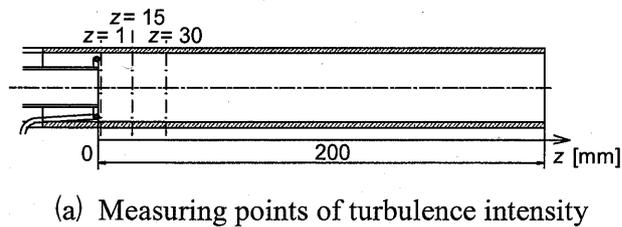


Fig. 7.5 System for turbulence intensity measurement

成手順を (a)~(c) に列記する.

- (a) まず対象とする算出領域 $z = 0 \sim 40 \text{ mm}$, $150 \sim 190 \text{ mm}$ を 10 mm 間隔ごとに分割し, それぞれ基準断面とする.
- (b) 基準断面から下流方向 10 mm までの範囲における個々の飛翔 PET 粒子速度を算出する.
- (c) 算出した飛翔 PET 粒子速度を同一軸上で平均処理し, 得られた飛翔 PET 粒子平均速度を基準断面位置上に示す. これにより各区間における飛翔 PET 粒子速度分布が得られる.

最後に, PET 粒子の高温場平均滞在時間を算出する. そのため, 同一断面上において, 算出した飛翔 PET 粒子速度を平均処理し, 軸方向平均飛翔 PET 粒子速度分布 v_{PET} を得る. 得られた速度に基づいて $z = 0 \sim 50 \text{ mm}$, $50 \sim 100 \text{ mm}$, $100 \sim 150 \text{ mm}$ および $150 \sim 200 \text{ mm}$ の区間における代表速度 V_{PET} を算出する. この場合に, V_{PET} は次式によって定義される.

$$V_{\text{PET}} = \Sigma v_{\text{PET}} / N \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

ここで N は, その区間において代表速度 V_{PET} を算出する際に用いた値の数を意味する. したがって, 区間毎の滞在時間 t_{PET} は各区間距離 L を代表速度 V_{PET} で除することにより, 次式で得られる.

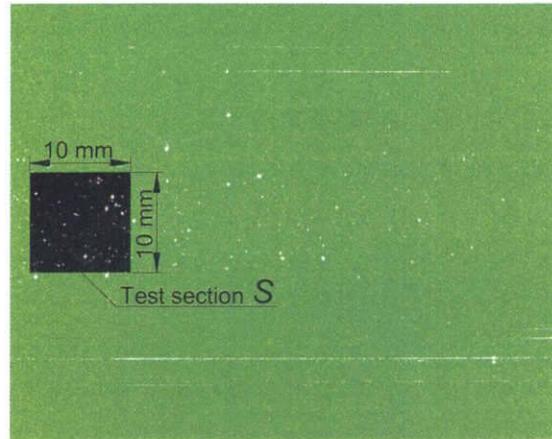
$$t_{\text{PET}} = L / V_{\text{PET}} \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

このようにして得られた区間毎の t_{PET} を合計し, その値を PET 粒子の高温場平均滞在時間とした.

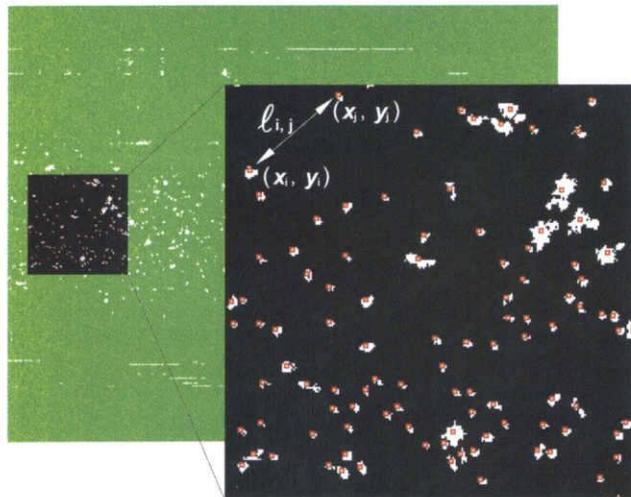
なお, 最小 PET 粒子間距離 ℓ_{min} の算出も行い, 各 D における分散度の定性的評価を試みた. 図 7.6 に最小粒子間距離の算出の際に用いた処理画像の一例を示す. 図に示すように, まずある 1 枚の画像においてマスキング処理[図 7.6 (a) の緑色部分]を施し, 検査領域 $S (= 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm})$ を決める. 定められた検査領域内で検出された粒子座標を (x_i, y_i) , (x_j, y_j) と表わせれば, その PET 粒子間距離 ℓ_{ij} は次式 (7.3) で定義される. [図 7.6 (b) 中の拡大図]

$$\ell_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

そして, 得られた粒子間距離の値の中から, 最小 PET 粒子間距離 ℓ_{min} を選出し, それぞれの PET 搬送管径 D を用いた場合の分散度の定性的評価を試みた. 得られた結果から PET 粉末の分散度が未燃率に及ぼす影響を考察した.



(a) Masking process of an image



(b) Calculation method

Fig. 7.6 Calculation processes of distance between two adjacent PET particles

7.4 実験結果および考察

7.4.1 基礎実験用バーナの燃焼特性

本実験では、予め形成したプロパン火炎に PET 粉末を供給し、PET 粉末を燃焼させる。そのため、PET 粉末の燃焼挙動はプロパン火炎の燃焼挙動に強く依存すると考えられる。そこで、はじめに PET 粉末を供給する前のプロパン火炎の燃焼特性の把握を試みた。

(1) 火炎形状の直接写真

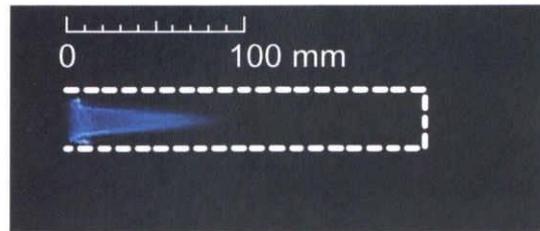
図 7.7 (a) ~ (c) に、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14, 17 \text{ mm}$ とした場合の PET 粉末供給前の火炎形状の直接写真を示す。当量比は $\phi = 0.9$ に設定されている。図中の破線は、ガラス管を意味する。図を見ると、いずれの D においても保炎器下流の V 形の環状火炎から下流に円錐状火炎が形成されていること、円錐形の発光領域の軸方向長さが 80 mm 程度であることから、 D の相違は基礎火炎形状の変化にほとんど影響を及ぼしていないと推察される。

(2) 火炎温度分布

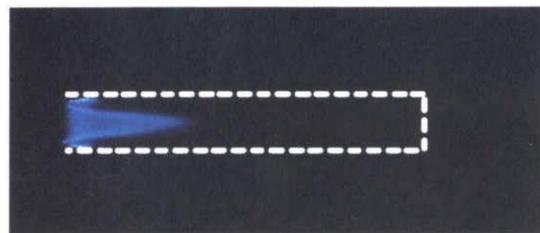
図 7.7 の火炎の中心軸上の温度分布を図 7.8 に示す。横軸は軸方向距離 $z \text{ mm}$ を、縦軸は火炎温度 $T_f \text{ }^\circ\text{C}$ を意味する。図中の \circ , \triangle および \square 印は、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14, 17 \text{ mm}$ の場合を表す。図によれば、 D の相違によらず $z = 30 \sim 80 \text{ mm}$ で急激な温度上昇をし、 $z = 80 \sim 260 \text{ mm}$ 付近まで $1450 \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ とほぼ一定となり、その後、周囲の低温空気の同伴によって温度が低下していくことが知れる。

(3) 乱れ強さ特性

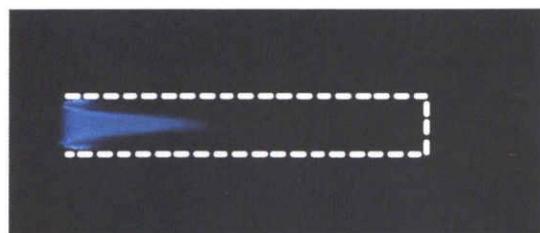
図 7.9 (a) ~ (c) に、火炎設定時の流速条件下での軸方向距離 $z = 1, 15, 30 \text{ mm}$ の非燃焼時の断面における乱れ強さ分布を示す。横軸は乱れ強さ $u' \text{ m/s}$ を、縦軸は半径方向距離 $r \text{ mm}$ を意味する。図中の破線番号① ~ ③は、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14 \text{ mm}$ および 17 mm の PET 搬送管の内径に対応する。図から、分布形状やばらつきの程度に少し相違が見られるが、 D の変化によらず、すべての測定断面において PET 粉末搬送管後流近傍（点線の内側）の乱れ強さは、 $u' \approx 0.2 \text{ m/s}$ であることがわかる。従って、PET 粉末を搬送する際の乱れの影響に関してはほぼ同程度で、乱れに起因する PET 粉末の分散も同程度であると考えられる。



(a) $D = 10$ mm



(b) $D = 14$ mm



(c) $D = 17$ mm

Fig. 7.7 Flame appearances without PET-powder supply ($\phi = 0.9$)

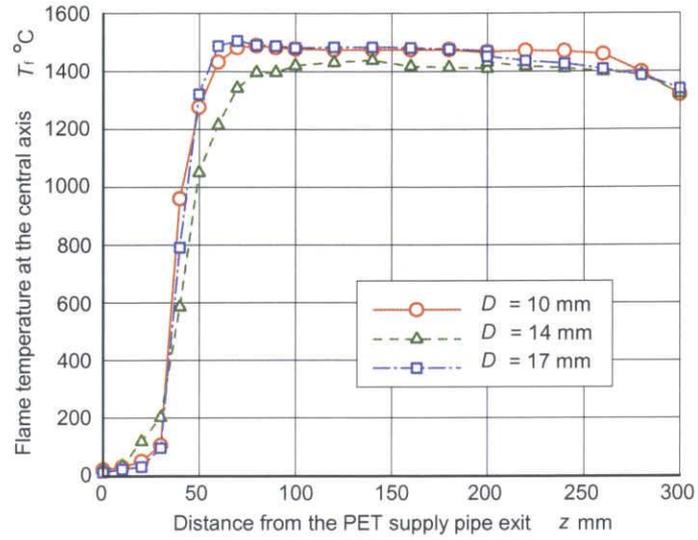


Fig. 7.8 Temperature profiles along the central axis

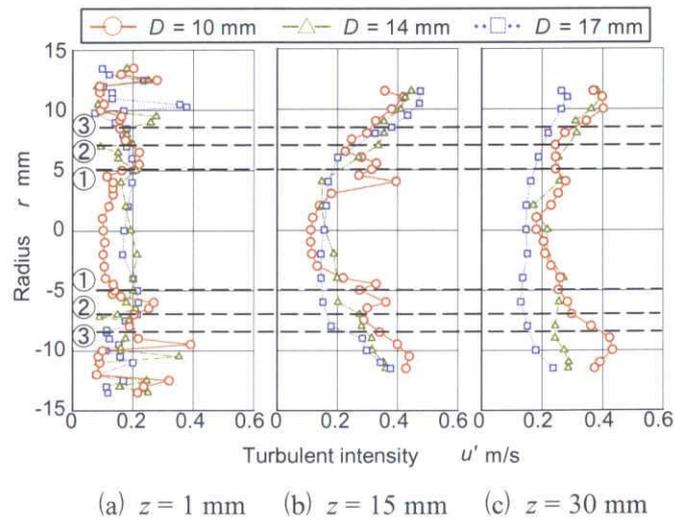


Fig. 7.9 Turbulent intensity profiles at three cross-sections

以上から、基礎火炎形状、温度および乱れ特性は D の相違によらず同程度であり、PET 粉末燃焼時の PET 粉末の分散度に及ぼす影響を D に帰着させることが可能となった。

7.4.2 基礎実験用バーナにおける PET 粉末燃焼特性

続いて、それぞれの PET 粉末搬送管径 D の基礎実験用バーナに PET 粉末を供給し、そのときの PET 粉末燃焼特性を調べた。

(1) PET 粉末燃焼時の火炎挙動

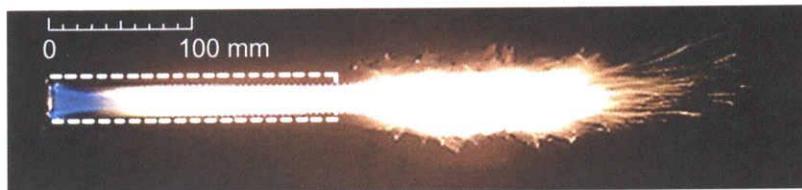
図 7.10 に、PET 粉末燃焼時の火炎の直接写真を示す。図 7.10 (a)~(c) は、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14, 17$ mm の場合に対応し、PET 粉末供給量は $m_{\text{PET}} = 9.6$ g/min と一定に設定されている。図を見ると、 $D = 14, 17$ mm の場合、 $D = 10$ mm の場合に比して少し火炎が長くなり、先端部に浮力の影響も見られる。また、火炎先端におけるすじ状の軌跡が少ないことが観察される。これらの火炎形状の観察から D の増大に伴い未燃率が小さくなることが予測される。

(2) PTV に用いた PET 粒子の分散画像

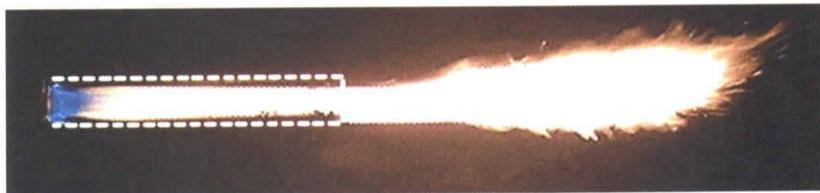
図 7.11 に、PET 粉末搬送管出口直後の領域における PET 粒子の分散の様子を捉えた画像の一例を示す。図 7.11 (a)~(c) は、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14, 17$ mm の搬送管を用いた場合のガラス管内を表している。横軸は軸方向距離 z mm を、縦軸は半径方向距離 r mm を意味する。また、図中の白線で囲まれた矩形は最小 PET 粒子間距離 l_{min} を算出する際の観察対象領域 (10 mm \times 10 mm) を表す。図から、 D の増大に伴い PET 粉末がガラス管内に次第に広く分散されるようになることが明確に観察される。とくに $D = 10$ mm の場合は、他の D に比べてガラス管の中心軸付近への密集度が大きいことが伺える。

(3) PET 粒子存在確率分布の変化

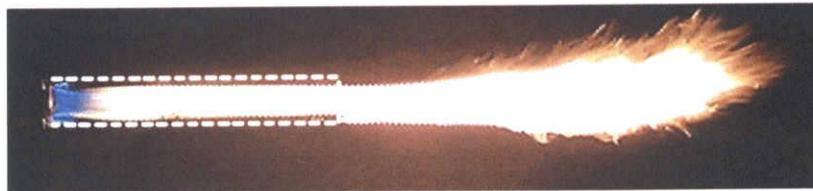
図 7.11 に示した撮影画像に対して PTV 演算処理した画像を積層し作成した $z = 0 \sim 75$ mm と $z = 150 \sim 200$ mm の領域における PET 粒子存在確率分布の下流方向への変化を図 7.12 に示す。上側には存在確率分布を、下側には上側の分布を基に作成したヒストグラムを示し、左から順に $z = 0 \sim 25$ mm, $25 \sim 50$ mm, $50 \sim 75$ mm, $150 \sim 175$ mm および $175 \sim 200$ mm の場合である。なお、各ヒストグラムの右上の数値は、演算処理の際に用いた粒子数を意味する。存在確率分布およびヒストグラムの縦軸は半径方向距離 r mm を、横軸はそれぞれ軸方向距離 z mm および個数



(a) $D = 10$ mm

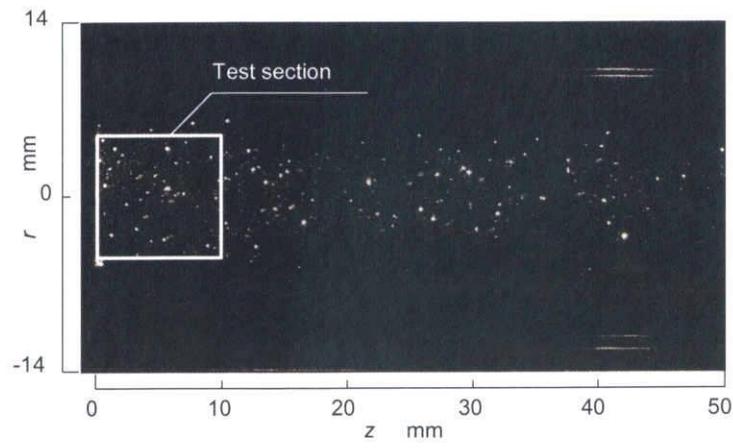


(b) $D = 14$ mm

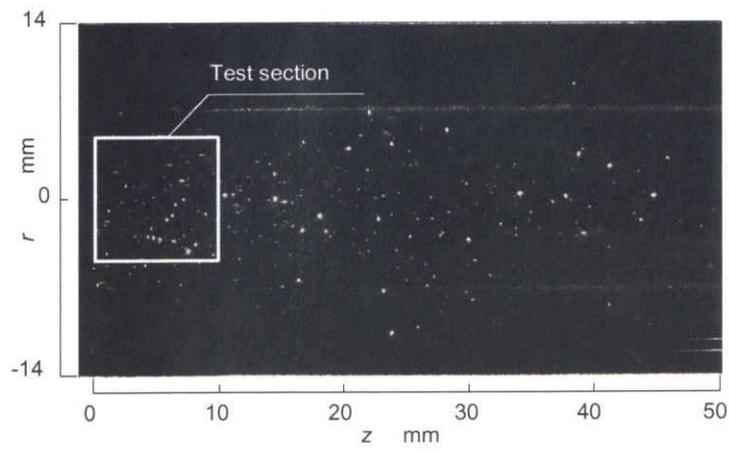


(c) $D = 17$ mm

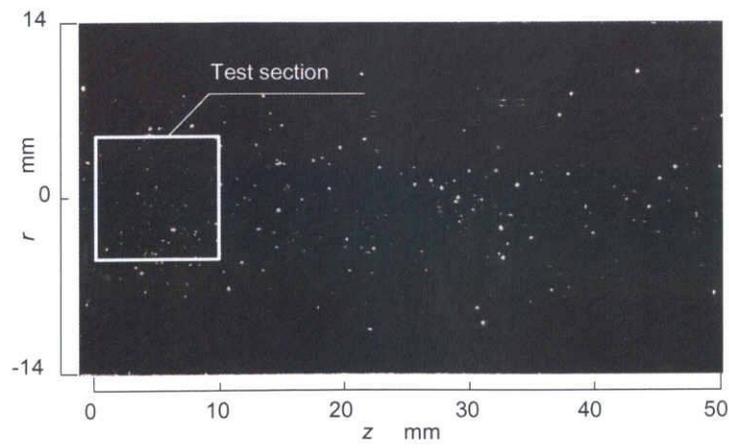
Fig. 7.10 Flame appearances with PET-powder supply ($m_{\text{PET}} = 9.6$ g/min)



(a) $D = 10$ mm

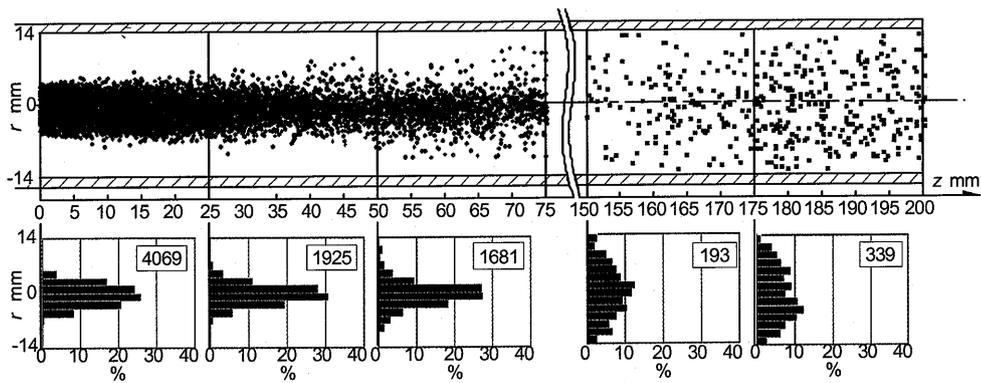


(b) $D = 14$ mm

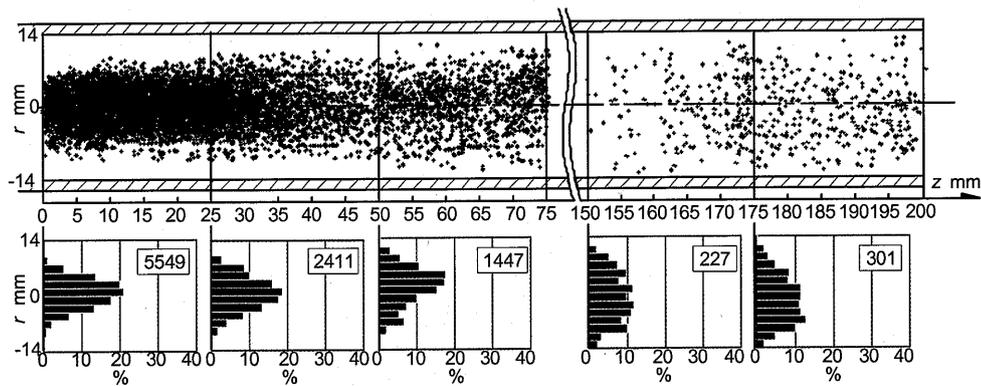


(c) $D = 17$ mm

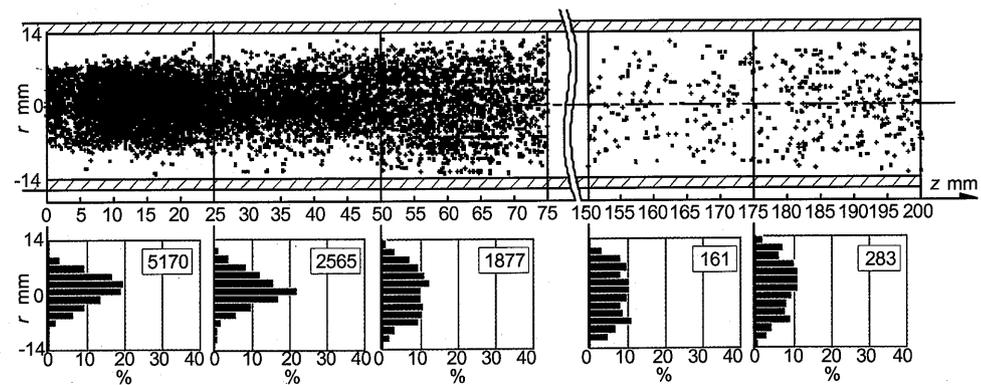
Fig. 7.11 Examples of PTV measurements along the lateral cross-section including its axis



(a) $D = 10$ mm



(b) $D = 14$ mm



(c) $D = 17$ mm

Fig. 7.12 Variations of PET particle distributions and histograms with D along the lateral cross-section including its axis

割合 %を表す。

図によれば、ガラス管内上流部 ($z = 0 \sim 75$ mm) において、PET 粉末搬送管径 D の増加に伴い分布が次第に広がっていくことが知れる。またヒストグラムを見ると、 $D = 10$ mm の場合には、中心軸付近の個数割合が大きいのに対して、 $D = 14, 17$ mm の場合は半径方向へ広がっていることがわかる。これらの分布傾向は、図 7.11 に見られた PET 粒子の分散状況とも符号している。そして、さらに下流の $z = 150 \sim 200$ mm の領域では、 $D = 17$ mm の場合に分布がわずかに平坦に見えることを除けば、下流および半径方向への分布に大きな変化は認められないことから、この領域では PET 粒子は十分に分散していると考えられる。なお、上流と下流側の粒子数に大きな差異が見られる。この要因の一つとして、PET 粒子の熱分解・ガス化・燃焼に伴う粒子数の減少が挙げられる。

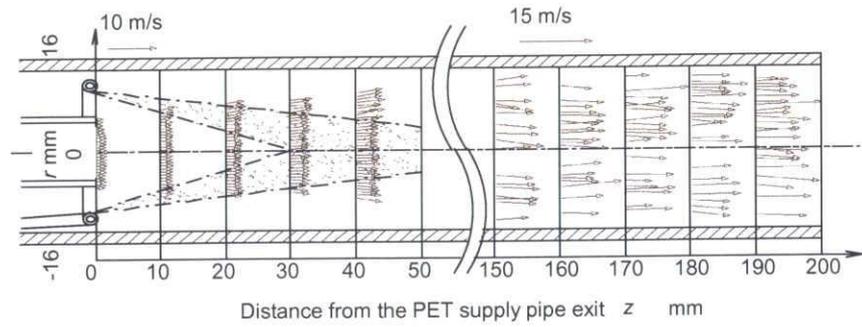
(4) 飛翔 PET 粒子の平均速度分布の変化

図 7.13 に、PET 粉末燃焼時の飛翔 PET 粒子平均速度の下流方向への変化を示す。なお、分布を作成するにあたっては、図 7.12 の PTV 演算処理を行った画像を 2 時刻パターンマッチング法によって解析処理し、得られた飛翔 PET 粒子速度に対して軸方向 10 mm 間隔毎に平均化処理を施した。図 7.13 (a)~(c) は、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14, 17$ mm の場合である。破断線の左側は $z = 0 \sim 50$ mm の上流域、右側は $z = 150 \sim 200$ mm の下流域における分布を表す。なお図中には、直接写真 (図 7.7) および火炎温度分布 (図 7.8) に基づいて作成した火炎帯の概形が一点破線で示されている。

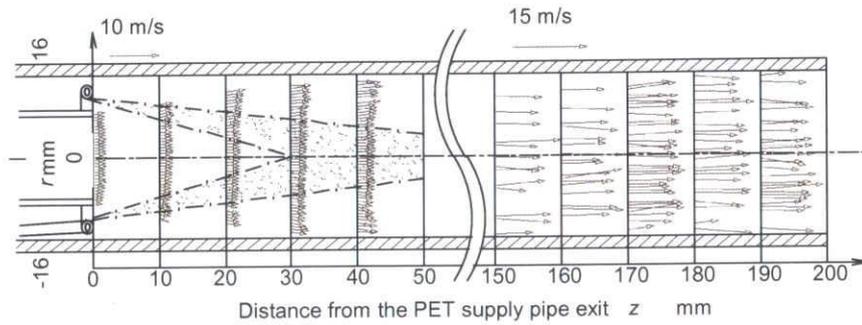
図を見ると、いずれの D においても、上流域 ($z = 0 \sim 50$ mm) では、火炎帯を通過する未燃予混合気の反応・熱膨張に伴う加速流の影響によって PET 粒子が加速されていること、膨張に起因して軸方向のみならず半径方向にも加速していることがわかる。一方、下流域 ($z = 150 \sim 200$ mm) では、管内高温燃焼ガス流の特徴が現われ、軸方向への比較的一様な速度分布となることが認められる。

(5) ガラス管内平均滞在時間の概算

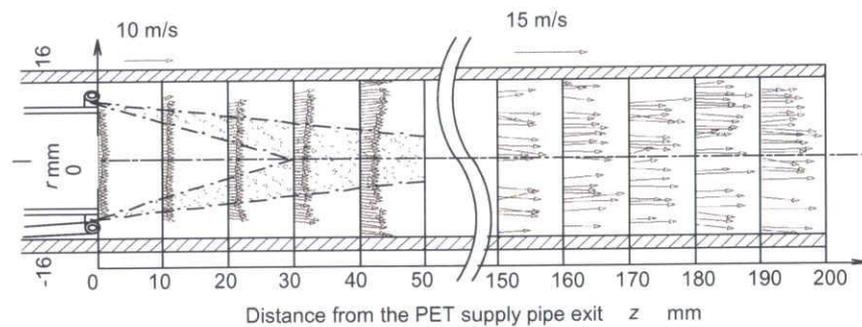
まず、同一断面における速度分布を平均化処理して算出した軸方向平均飛翔 PET 粒子速度変化を図 7.14 に示す。図中の○、△および□印は、それぞれ PET 粉末搬送管径 $D = 10, 14, 17$ mm の場合を表す。横軸は軸方向距離 z mm を、縦軸は平均飛翔 PET 粒子速度 V_{PET} m/s を意味する。



(a) $D = 10$ mm



(b) $D = 14$ mm



(c) $D = 17$ mm

Fig. 7.13 Mean velocity vector profiles across the sections

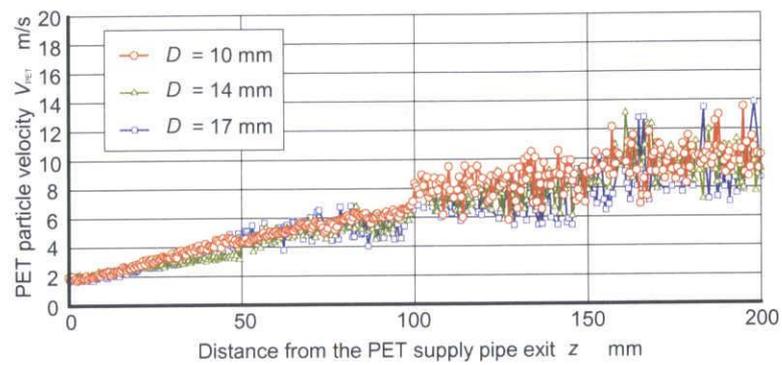


Fig. 7.14 Mean velocity variations of flying PET particles

図から、いずれの D においても、PET 粉末搬送管出口 ($z = 0$ mm) から $z = 150$ mm 付近に至るまで PET 粒子は徐々に加速し、 $z = 150$ mm 以降からは、ほぼ一定の速度に落ち着くことがわかる。この速度分布に基づいて、ガラス管内における平均滞在時間 t_{PET} を概算すると、 $D = 10, 14, 17$ mm の場合において、それぞれ $t_{PET} = 36.0, 39.6, 39.2$ ms となり、単純平均値 (38.3 ms) から高々 $\pm 5\%$ の範囲で納まっている。したがって、滞在時間が未燃率に及ぼす影響に関しては、ほぼ同等であると考えられる。

(6) 最小粒子間距離の算出結果

粒子個々の熱伝達特性を検討する際、最も隣接した粒子間の距離を把握することは重要な見を与える。そこで、PET 粉末搬送管径 D の相違が分散度に最も影響を及ぼしていると考えられる PET 粉末搬送管出口付近に算出対象領域 (図 7.11 中の白四角) を設け、その範囲に存在する粒子の重心座標を算出し、その座標を用いて最小粒子間距離の算出を試みた。得られた結果を、累積分布として図 7.15 に示す。横軸は最小粒子間距離 l_{min} μm を、縦軸は累積割合 % を表す。図中の \circ, \triangle および \square は、それぞれ $D = 10, 14, 17$ mm の場合である。

図を見ると、 D の増加に伴い分散度は全体的に l_{min} の大きい側に移行していることが知れる。とくに $D = 10$ mm の場合は、 $D = 14, 17$ mm の場合に比して l_{min} が小さいことがわかる。このことから、 D の増加に伴い粒子間距離が大きくなり、粒子個々への熱伝達が良好となり熱が有効に使われ、その結果、未燃率は小さくなると推察される。

(7) 未燃率測定結果

図 7.16 に、各 PET 粉末搬送管径 D を変化させた場合の未燃率の測定結果を示す。横軸は PET 粉末搬送管径 D mm を、縦軸は未燃率 M_U % を表す。 M_U は第 3 章で示した捕集装置を用いて捕集した固形残留粒子の捕集率 M_C % とガラス管へ付着した固形残留粒子の付着率 M_D % の和で定義されている。また、 M_C は PET 粉末供給量 m_{PET} と固形残留粒子の捕集量 m_C との比で、 M_D は PET 粉末供給量 m_{PET} と固形残留粒子の付着量 m_D との比として定義されている。

図によれば、 $D = 10$ mm の場合は、他の D に比べて未燃率が高く約 13 % であること、 $D = 14, 17$ mm の場合は、それぞれ約 6 % および 4 % と $D = 10$ mm の場合の半分以下に低減されていることが知れる。

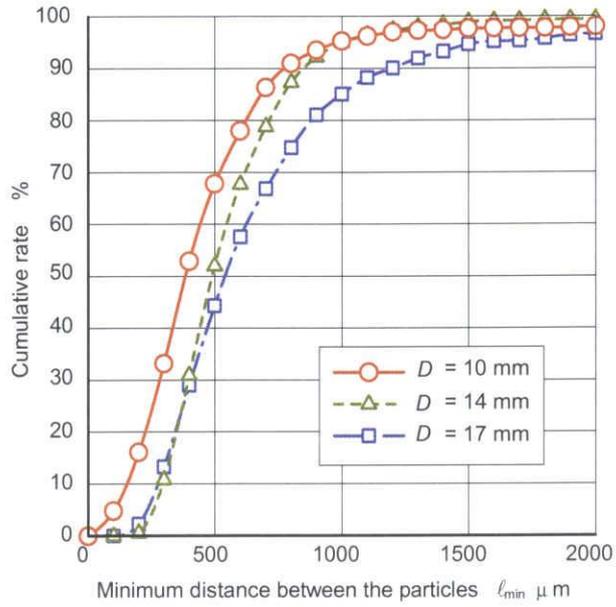


Fig. 7.15 Minimum distance between two adjacent PET particles

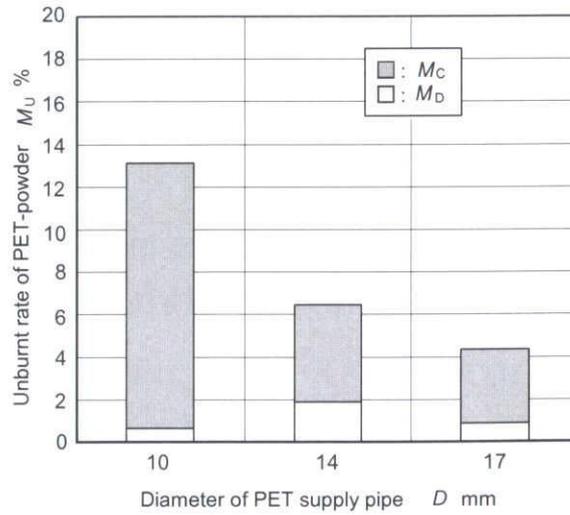


Fig. 7.16 Variations of PET-powder unburnt rate M_U with D

7・4・3 分散度が未燃率に及ぼす影響

最後に、分散度が未燃率に及ぼす影響を考察する。図 7.15 および 7.16 の結果から、初期の分散状況における最小粒子間距離が大きいほど未燃率が小さくなるという相関関係が得られた。このことは、早期の分散が未燃率の低減に繋がることを意味する。

以上から、早期の分散度が増大するに伴い固形残留粒子排出量の増大要因がより改善され、結果、未燃率の大幅な低減に繋がったことが実験的に明らかとなった。

7.5 第7章のまとめ

本実験では、PET 粉末搬送管径の相違のみによって分散度を変化させ、未燃率に及ぼす影響を調べた。得られた結果は以下のように要約される。

- ① 基礎実験用バーナの燃焼特性を調べた結果、PET 粉末搬送管径 D の相違によらず、プロパン火炎の概形、温度および乱れ特性は同程度であることがわかった。この結果、PET 粉末未燃焼時の分散度に及ぼす影響を PET 粉末搬送管径に帰着させることが可能となった。
- ② 撮影画像の PTV 解析および未燃率測定結果から、 D を大きくするほど早期の分散が促進され、未燃率は小さくなることが実験的に明らかとなった。このことは、第3章の実験によって得られた加速流の流れによって効果的に分散されていなかったこと、PET 粉末が中心軸付近に多く存在しており、粒子個々への熱伝達が悪く熱が有効に使われていなかったことの両排出量の増加要因が分散度を大きくするほど改善され、その結果、未燃率の低減に繋がったことを意味する。

第7章の参考文献

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (2) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), 日本機械学会論文集 (B 編), 71-701, (2005), 357-364.
- (3) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 (B 編), 71-711, (2005), 2792-2799.
- (4) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (廃棄 PET 樹脂粉末の置換率が燃焼挙動に及ぼす影響), 第 13 回環境工学シンポジウム 2003 講演論文集 No.03-10, (2003), 326-329.
- (5) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (樹脂粉末の種類と粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 21-22.
- (6) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル (PET 粉末粒径の影響), 2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 23-24.
- (7) 山北龍児・加藤慎也・Maung Kaung Myat Tun・加藤雄貴・西野光祐・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄 PET 樹脂粉末を助燃料とする工業用バーナーの燃焼特性 (燃焼流動場とそこにおける粒子径挙動・速度の画像計測), 第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004), 433-434.
- (8) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*, (2005), CD-ROM: Paper No. 074.
- (9) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直

径変化の画像計測), 日本機械学会論文集 (B 編), 掲載決定, 論文 No. 05-0342.

- (10) 加藤雄貴・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の低減に関する実験的アプローチ, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No. 05-13, (2005), 181-184.
- (11) 岡島敏・河野通方, 工業熱力学, (1995), 99, 学献社.
- (12) (社)プラスチック処理促進協会, 既設発電ボイラーを対象とした廃プラスチック燃料化基礎技術の調査研究報告書, (1993), 13.
- (13) 高分子大辞典, (1994), 1015, 丸善.
- (14) (社)可視化情報学会, PIV ハンドブック, (2002), 63-66, 森北出版.

第 8 章 廃棄 PET 樹脂粉末燃焼における 未燃率の数値予測

8.1 はじめに

本研究ではこれまで、廃棄プラスチック樹脂の一種である廃棄 PET (polyethylene terephthalate) 樹脂粉末 (PET 粉末と略記) を助燃料とするため、まずプロパンを燃料とする市販の窯業用バーナの燃焼領域に、PET 粉末を溶着せずに直接供給できるように改良を加えた。そしてこの改良バーナを用いて、窯業炉内における燃焼特性⁽¹⁾⁻⁽³⁾を把握した。また一方で、環状バーナによって形成された高温酸化性領域中における PET 粉末燃焼特性の把握⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾、単一プラスチック微粒子の急速加熱過程の可視化実験⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾と球対称次元解析^{(10), (11)}を実施してきた。

改良バーナを用いた窯業炉内の燃焼実験^{(1), (2)}によれば、供給した PET 樹脂粉末はすべて熱分解・ガス化し消失すること、炉内に焼成に必要な高温で均一な空間温度場が形成されること、焼成の最終工程で要求される還元雰囲気⁽¹²⁾の制御が可能なこと、PET 粉末供給時にも焼成品の白色度が維持されること、などの特性が得られ、窯業用助燃料としての可能性が示された。しかし、低温の大気開放条件下で改良バーナを作動させた場合には、PET 粉末の質量メディアン粒径に依存して、供給量の約 80% の粉末が熱分解・ガス化しつくさないまま固形残留粒子として排出された⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。

そこで、その排出量を増加させる主要因に関して、PIV/PTV 計測手法を用いて調べた結果、加速流の影響によりバーナ内において PET 粒子が効果的に分散されていないこと、PET 粒子が中心軸付近に多く存在して粒子個々への熱伝達が悪く有効に熱が使われていないこと、十分な滞在時間が得られていないことが明らかとなった。また、この実験において、ダブルパルスレーザーの一方の光を背景光として利用する撮影手法を提案することにより、燃焼領域を高速度で飛翔している微粒子の詳細な形状の拡大観察に成功し、得られた高速度微粒子写真に画像処理を施して粒子径計測を行うことで、下流方向への粒子径変化についても明らかにした⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾。

以上のようにこれまでの章では、プラスチック粉末燃焼を対象としたマクロな研究^{(1)-(6), (12)-(17)}から単一プラスチック微粒子を対象としたミクロな研究⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾まで幅広い先行実験⁽¹⁾⁻⁽¹⁷⁾を行い、その結果について述べてきた。ところで、高温場における PET 微粒子の加熱から熱分解・ガス化に至る過程を観察し、効率的な PET 粉末燃焼を可能にするバーナ構造・寸法を検討する際、加熱時間と未燃率との関係を把握することが重要な知見を与える。

そこで本章では、微視的および巨視的観点に立脚した実験結果を総合的に検討し、PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みる。まず、改めて単一球形 PET 微粒子の初期直径を変化させたときの急速加熱過程の可視化実験を光学顕微鏡と高速度 CCD ビデオカメラを組み合わせで行い、より詳細な微粒子挙動を把握した⁽¹⁸⁾。続いて、得られた結果に基づき、一方では粒子形状に関して総合的に検討し、他方では球対称一次元解析^{(10), (11)}で得られた解析値との比較・検討を行った。それらの検討結果を踏まえ、球形 PET 微粒子の急速加熱実験の画像計測結果に基づいて粒子挙動のモデル化を行い、PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みた⁽¹⁹⁾。最後に、得られた予測値と第 3 章で得られた未燃率の実測値を比較し、一連の本モデル化の妥当性を検討した。

なお、本章の内容は、文献(18)および(19)で示されているように公表済である。

8.2 記号

d	: PET 粒子の直径	[μm]
$d(t)$: 加熱時刻 t における粒子径	[μm]
d^2	: 粒子径の二乗	[μm^2]
d_0	: 初期粒子径	[μm]
Δd_0	: 微小区間	[μm]
d_{150}	: モデル化の基準とした粒子の初期直径 (= 150 μm)	[μm]
d_m	: 質量メディアン直径	[μm]
d_s	: 分級された粉末の粒子径	[μm]
D	: PET 粉末搬送管径	[mm]
$f_M(d_0)$: 累積質量近似曲線	[%]
$F_M(d_0)$: 質量分布	[g]
$N_0(d_0)$: 初期粒子径 d_0 の個数分布	[count]
$N_0[d(t)]$: 加熱時刻 t における粒子径 $d(t)$ の個数分布	[count]
m_{PET}	: PET 粉末供給量	[g/min]
$M(t)$: 加熱時刻 t における未燃率	[%]
M_U	: 第 3 章で測定された未燃率	[%]
Nu	: ヌセルト数	[-]
$Nu_{\text{ex},150}$: モデル化の基準とした球形 PET 微粒子 の加熱実験時のヌセルト数 (= 2.3)	[-]
T_g	: 加熱温度	[$^{\circ}\text{C}$]
t	: 加熱時刻	[ms]
t_i	: 各素過程までの所要時間	[ms]
t_m	: 融解開始時間	[ms]
t_ℓ	: 熱分解・ガス化開始時間	[ms]
t_v	: 熱分解・ガス化終了時間	[ms]
t_{cf}	: 加熱に伴う膨張終了時刻	[ms]
t_{vf}	: 熱分解・ガス化終了時刻	[ms]
v_n	: ノズル出口速度	[m/s]
v_s	: スリット噴流速度	[m/s]
$\rho[d(t)]$: 時刻 t における加熱に伴う膨張時の粒子径 $d(t)$ の密度	[kg/m^3]
ρ_ℓ	: 熱分解・ガス化時の密度 (= $8.91 \times 10^2 \text{ kg}/\text{m}^3$)	[kg/m^3]
ρ_0	: 初期状態における密度 (= $1.38 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$)	[kg/m^3]
ϕ_n	: ノズル火炎当量比	[-]
ϕ_s	: 環状火炎当量比	[-]
ϕ	: プンゼンバーナに形成された火炎当量比	[-]

8.3 実験装置および方法

8.3.1 実験装置システム

図 8.1 に、実験装置の系統図を示す。装置は、小形バーナ（外径：9 mm，内径：7 mm），点火装置，プロパン-空気予混合気供給装置，光学顕微鏡（Olympus 製，ECETr-II，倍率：7×4），高速度 CCD ビデオカメラ（Photron 製，FASTCAM-PCI-i，最大撮影速度：10,000 fps，最小露光時間：16.7 μ s）および PC コントローラーから成る。光学顕微鏡の光源として白色高輝度 LED を用い，ハレーションを抑制するために ND-4 フィルタ（KENKO 製，PRO ND4）をカメラに取り付けた。なお，図の上側には，急速加熱手順 [(a)~(c)] を表す詳細図が併記されている。

8.3.2 実験手順および方法

本実験では，はじめに予混合気の当量比を $\phi=0.8$ に設定し，点火直後の燃焼ガスによって PET 粒子を急速加熱したときの高速度顕微鏡観察を行い，一方でその燃焼挙動を詳細に観察し，他方では，得られた任意の時刻における画像から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，粒子径の時間変化を調べた。加熱温度は，PET 粉末燃焼時の高温燃焼場を想定し， $T_g=1600$ $^{\circ}$ C に設定されている。続いて，PET 粉末燃焼実験時^{(4)-(6), (15)-(17), (22)}に捕集した未燃 PET 微粒子の光学顕微鏡写真と本実験で観察した単一 PET 微粒子挙動の高速度顕微鏡写真を比較し，PET 粉末燃焼中における PET 微粒子挙動の微視的考察を行った。さらに，融解開始時刻，熱分解・ガス化開始時刻および熱分解・ガス化終了時刻に関して，得られた実験結果と先行の球対称一次元熱伝導解析結果^{(10), (11)}との比較・検討を行った。

以上の検討結果を踏まえ，粒子挙動のモデル化を行い，PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みた。

なお，球状 PET 微粒子への成形および支持法と粒子の急速加熱方法に関しては，それぞれ第 6 章の 6.3.3 および 6.3.4 に記載されているので省略する。

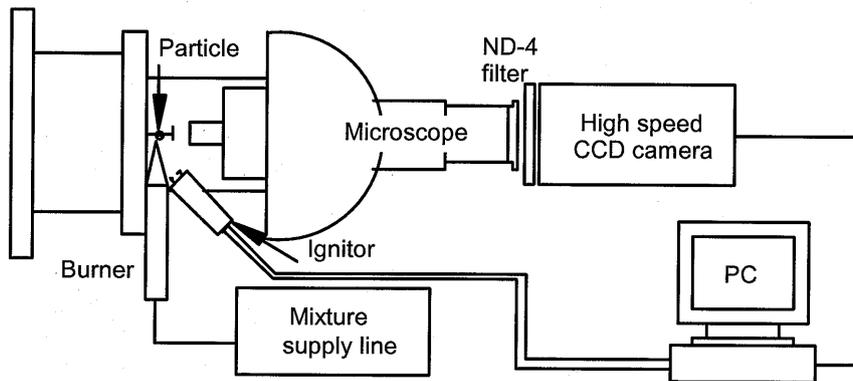
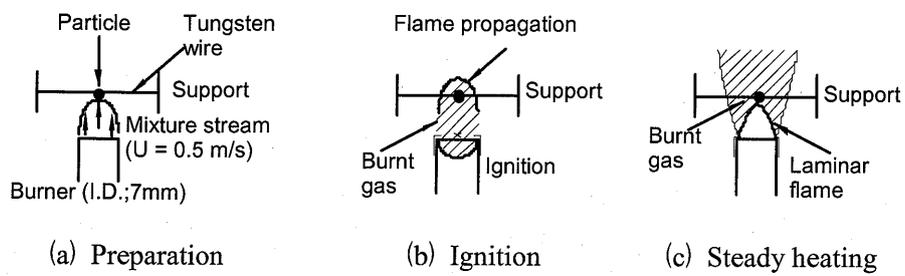


Fig. 8.1 Optical system used for abrupt heating experiment

8.4 実験結果および考察

8.4.1 PET 微粒子の高速度顕微鏡観察

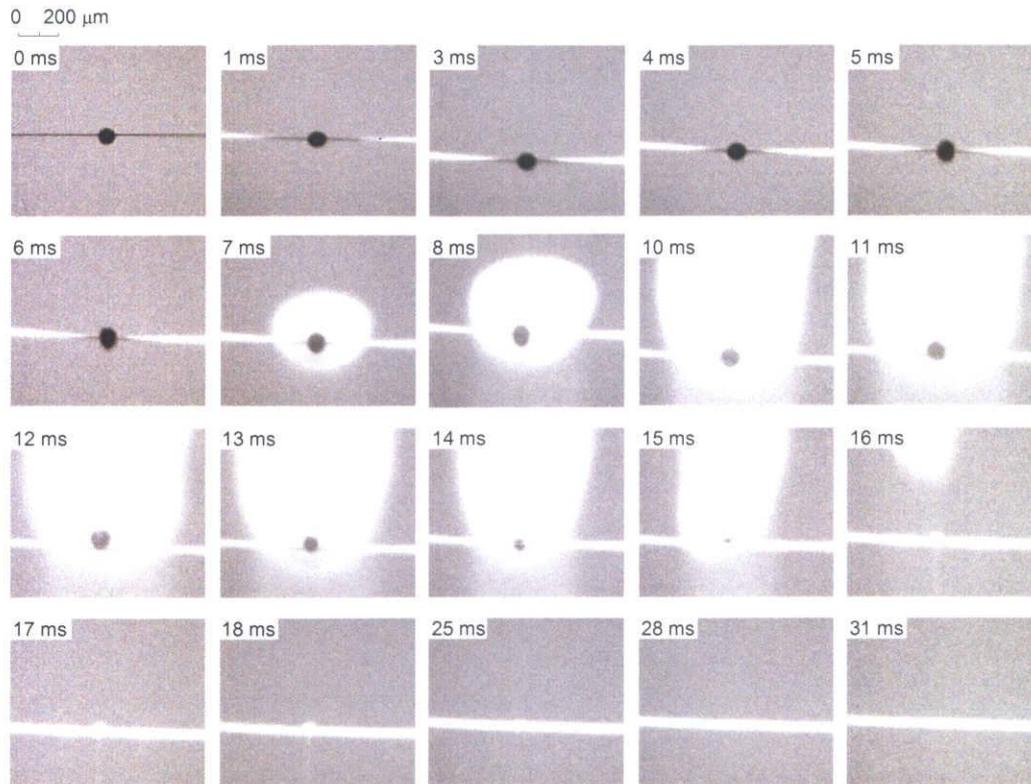
図 8.2 (a), 8.3 (a) および図 8.4 (a) に, それぞれ初期粒子径 $d_0 = 100, 150 \mu\text{m}$ および $199 \mu\text{m}$ を燃焼ガスによって急速加熱したときの一連の高速度顕微鏡画像を示す. 火炎当量比と加熱温度は, それぞれ $\phi = 0.8$ および $T_g = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ である. 撮影速度は 1000 fps に, 露光時間は 0.1 ms に設定されている. 図中の左上には加熱後の時刻 $t \text{ ms}$ が併記されている.

図 8.2 (a) によれば, $d_0 = 100 \mu\text{m}$ の場合, $t \approx 4 \text{ ms}$ で融解が開始し, $t \approx 7 \text{ ms}$ で粒子全体が液状となって形が崩れ, 熱分解温度まで達した部分から熱分解によるガス化が始まる. それと同時に粒子を覆うように輝炎が形成され, $t \leq 16 \text{ ms}$ までエンベロープ形⁽²⁰⁾の輝炎が観察される. そして, $t \approx 16 \text{ ms}$ で輝炎が吹き飛び, ガス化が終了する.

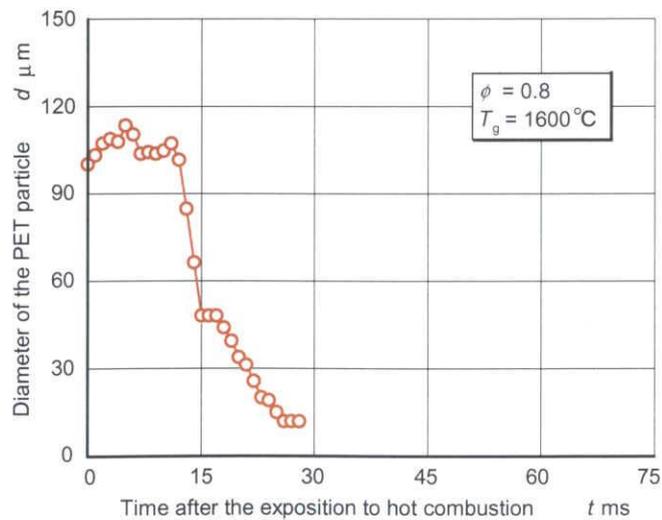
続いて, 図 8.3 (a) に示した $d_0 = 150 \mu\text{m}$ の場合を見ると, $t \approx 6 \text{ ms}$ で融解が開始する. $t \approx 15 \text{ ms}$ で熱分解によるガス化が始まり, そのガス化ガスの噴出から約 1 ms 後に後流形⁽²⁰⁾の輝炎が形成され, $t \approx 30 \text{ ms}$ に至るまで, 輝炎と粒子の間に球殻状の弱い発光領域が形成される. そしてガス化後, 粒子自身は急激に膨張し始め, その膨張した液滴の表面には幾重にも重なる凸型の膨らみが存在する. 多重の丸い膨らみは不規則に, そして頻繁に現れ, その間, 粒子はタングステン線上で踊るように動き回っている. $t \approx 30 \text{ ms}$ 以降から, それまで熱分解・ガス化による樹脂の泡立ちによって粒子内部に蓄積していた熱分解によるガス化ガスが放出され, それに伴い粒子は急激に小さくなる. また, 形成された輝炎は徐々に粒子を覆うように接近する. $t \approx 39 \text{ ms}$ で PET 粒子の熱分解によるガス化が終了し, 輝炎は周囲の燃焼ガスの流れにより下流方向へ流される.

さらに図 8.4 (a) から, $d_0 = 199 \mu\text{m}$ では, 基本的な粒子挙動は $d_0 = 150 \mu\text{m}$ の場合と同様であるが, とくに熱分解によるガス化後, 粒子自身は急激に膨張し始め, その膨張した液滴の表面において幾重にも重なる凸型の膨らみが $d = 150 \mu\text{m}$ に比して顕著に現れており非常に興味深い. これに関しては, 微小液滴内部における熱分解によるガス化が起因していると考えられる. なお, いずれの粒子径においても, 熱分解によってガス化した後, タングステン線上に残留した炭素が長時間をかけて表面燃焼しながら消滅する. これに関しては, 第 6 章で述べた残留チャー (炭素分) の影響⁽²¹⁾が主要因であると考えられる.

以上のように, PET 粉末を構成している寸法に相当する $d_0 = 100, 150 \mu\text{m}$ および $199 \mu\text{m}$ の微

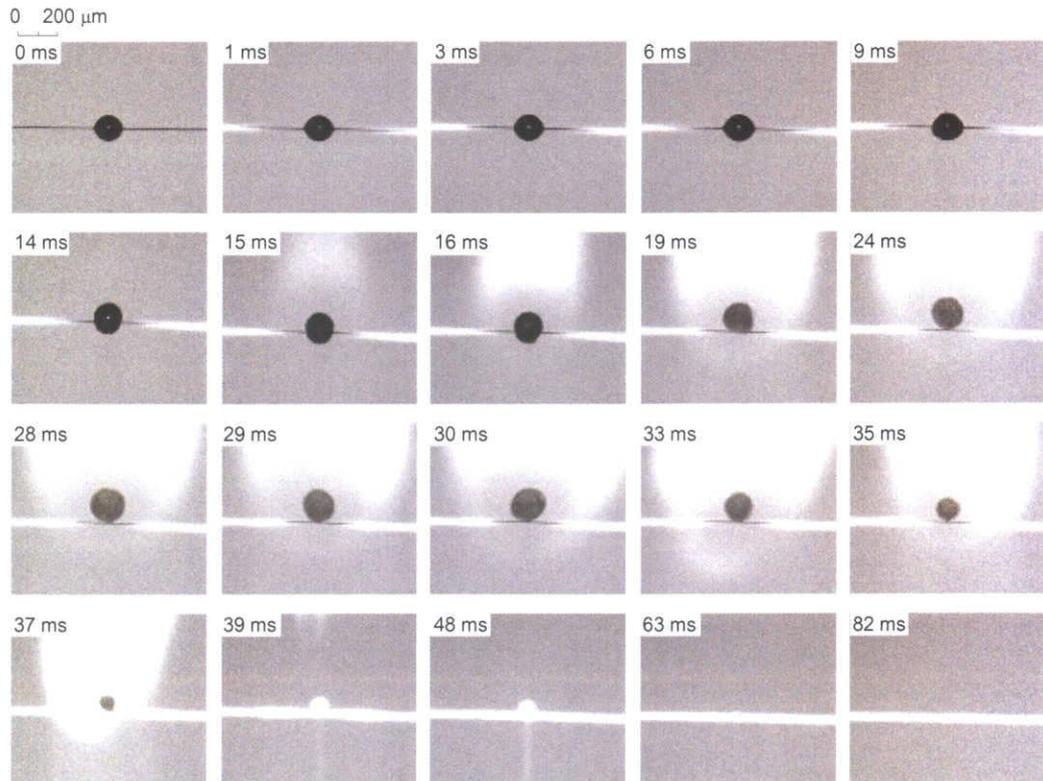


(a) High-speed direct microscopic photographs of the PET particle

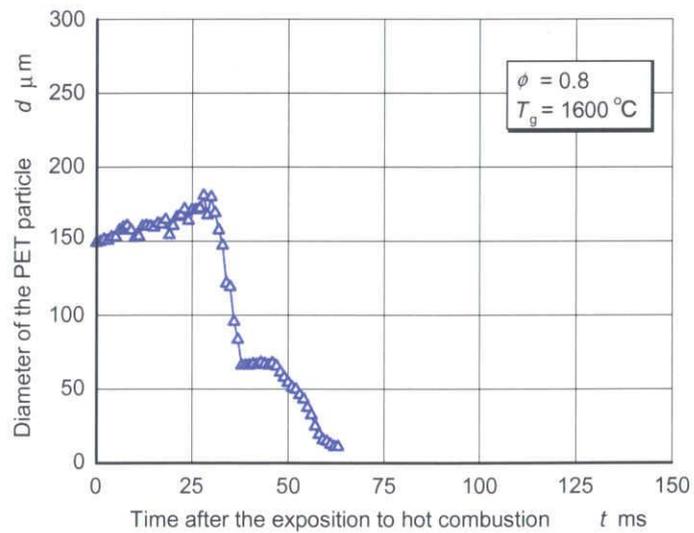


(b) Variation of the PET particle diameter

Fig. 8.2 High-speed microscopic photographs and particle diameter profile of the micro PET particle ($\phi = 0.8$, $T_g = 1600^\circ\text{C}$, $d_0 = 100 \mu\text{m}$)

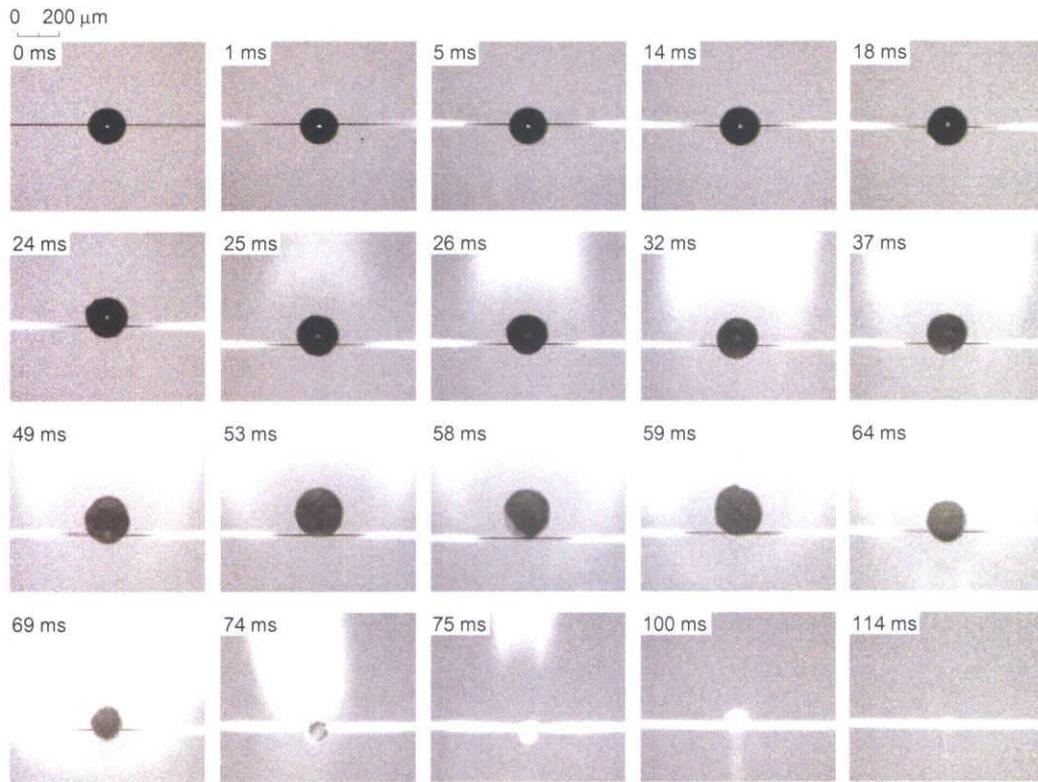


(a) High-speed direct microscopic photographs of the PET particle

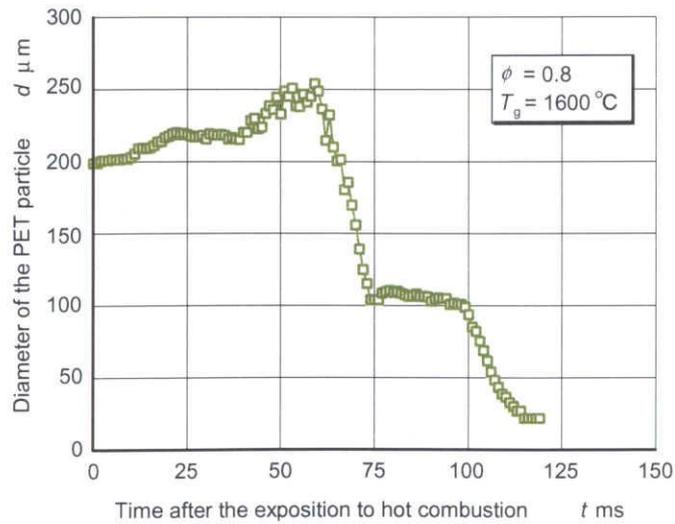


(b) Variation of the PET particle diameter

Fig. 8.3 High-speed microscopic photographs and particle diameter profile of the micro PET particle ($\phi = 0.8$, $T_g = 1600^\circ\text{C}$, $d_0 = 150 \mu\text{m}$)



(a) High-speed direct microscopic photographs of the PET particle



(b) Variation of the PET particle diameter

Fig. 8.4 High-speed microscopic photographs and particle diameter profile of the micro PET particle ($\phi = 0.8$, $T_g = 1600$ $^{\circ}\text{C}$, $d_0 = 199$ μm)

小 PET 微粒子を $\phi = 0.8$, $T_g = 1600$ °C と本研究で用いたバーナ内の高温・低酸素濃度場に近い条件下で加熱したときの微粒子挙動および微小火炎挙動を詳細に観察し明らかにした。

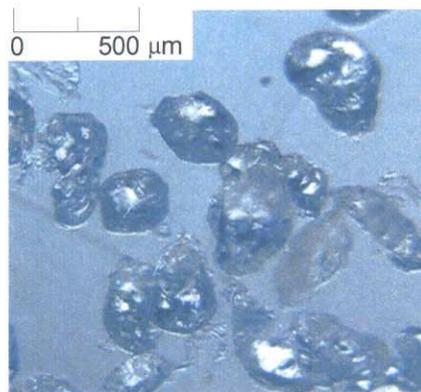
8.4.2 粒子径計測による PET 微粒子挙動の把握

各初期 PET 粒子径 d_0 における撮影画像から粒子径計測を行った結果を、それぞれ図 8.2 (b), 8.3 (b) および図 8.4 (b) に示す。図から、初期粒子径の増大に伴い融解、膨張、熱分解によるガス化等の各素過程に要する時間が長くなること、初期粒子径によらず粒子径挙動の全体的特徴は変化しないことが挙げられる。また、いずれの粒子径においても、熱分解によるガス化開始後に急激な体積膨張が現れていることがわかる。これに関しては、8.4.1 で述べた要因に帰着させることができる。

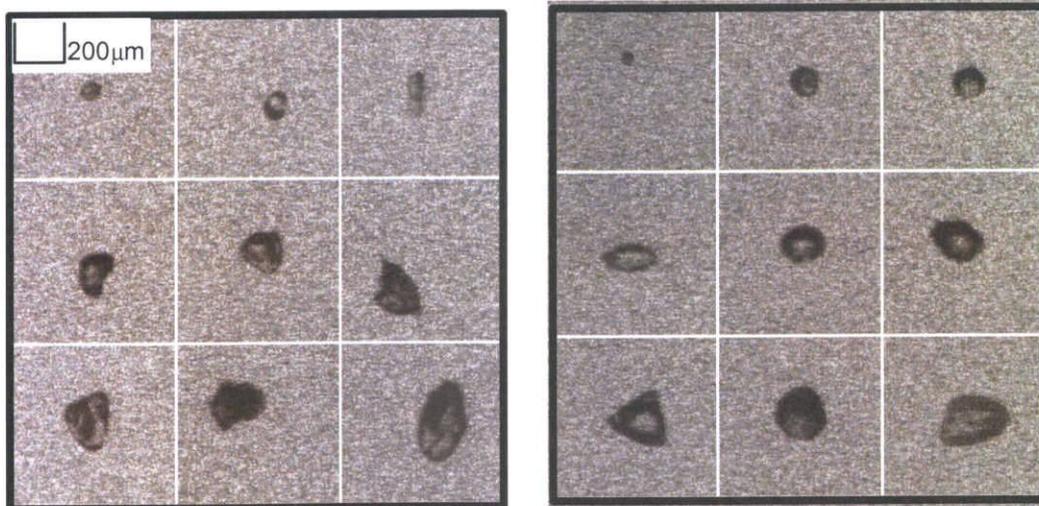
8.4.3 単一 PET 微粒子実験に基づく PET 粉末燃焼中の微粒子挙動の解明

第 3 章、5 章および第 7 章では、大気開放燃焼時において多量に発生した固形残留粒子⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾を効果的かつ系統的に低減するために、様々な巨視的な観点に基づき PET 粉末燃焼実験を行った^{(4)-(6), (15)-(17), (22)}。その際、水膜法を用いた固形残留粒子捕集装置⁽¹⁵⁾によって固形残留粒子の排出量を測定し、各条件における未燃率 (PET 粉末供給量と固形残留粒子排出量との比) を把握した。それと同時に、光学顕微鏡を用いて排出された固形残留粒子の直接撮影も行ってきた。

そこで、上記の PET 粉末燃焼実験時に捕集した固形残留 PET 微粒子の光学顕微鏡写真と本実験で観察した単一 PET 微粒子挙動の高速度顕微鏡写真を比較し、PET 粉末燃焼中における微粒子挙動の微視的考察を行った。図 8.5 (a) には第 3 章の実験において未燃率が高い条件のときに捕集した固形残留粒子の光学顕微鏡写真を、図 8.5 (b) には同章において短パルス性を有するレーザー光を背景光とし、PET 粉末燃焼中を高速度で飛翔する PET 微粒子を拡大撮影した写真を示す。また、第 5 章で述べた環状バーナを用いた実験において捕集した固形残留粒子の光学顕微鏡写真のうち、環状バーナを基本条件 (スリット噴流速度 $v_s = 6.0$ m/s, ノズル出口流速 $v_n = 3.7$ m/s, 環状火炎当量比 $\phi_s = 1.0$ およびノズル当量比 $\phi_n = 1.0$) に、PET 粉末供給量を $m_{PET} = 8.0$ g/min に設定し、質量メディアン直径を $d_m = 99.3, 154, 185$ μm と変化させたときの写真を図 8.6 (a) ~ (c) に示す。なお、図の左側は燃焼前の PET 粒子 [図 8.6 (i)] の、右側に燃焼後に捕集された固形残留粒子 [図 8.6 (ii)] の光学顕微鏡写真を表す。一方、図 8.7 (a) ~ (d) には図 5.19 (a) に示した $d_m = 154$ μm の粉末を用い、基本条件から v_s および ϕ_n を変化させたときの写真を示す。図 8.7 の左側には、固形残留粒子の直接写真が併記されている。さらに、図 8.8 には、 $d_0 = 199$ μm におい



(a) Microscopic appearances of collected unburnt PET particles ($M_U \approx 80\%$)



(b) Examples of high-speed flying PET particles appearances

Fig. 8.5 Brief discussion for physical behaviors of PET particles

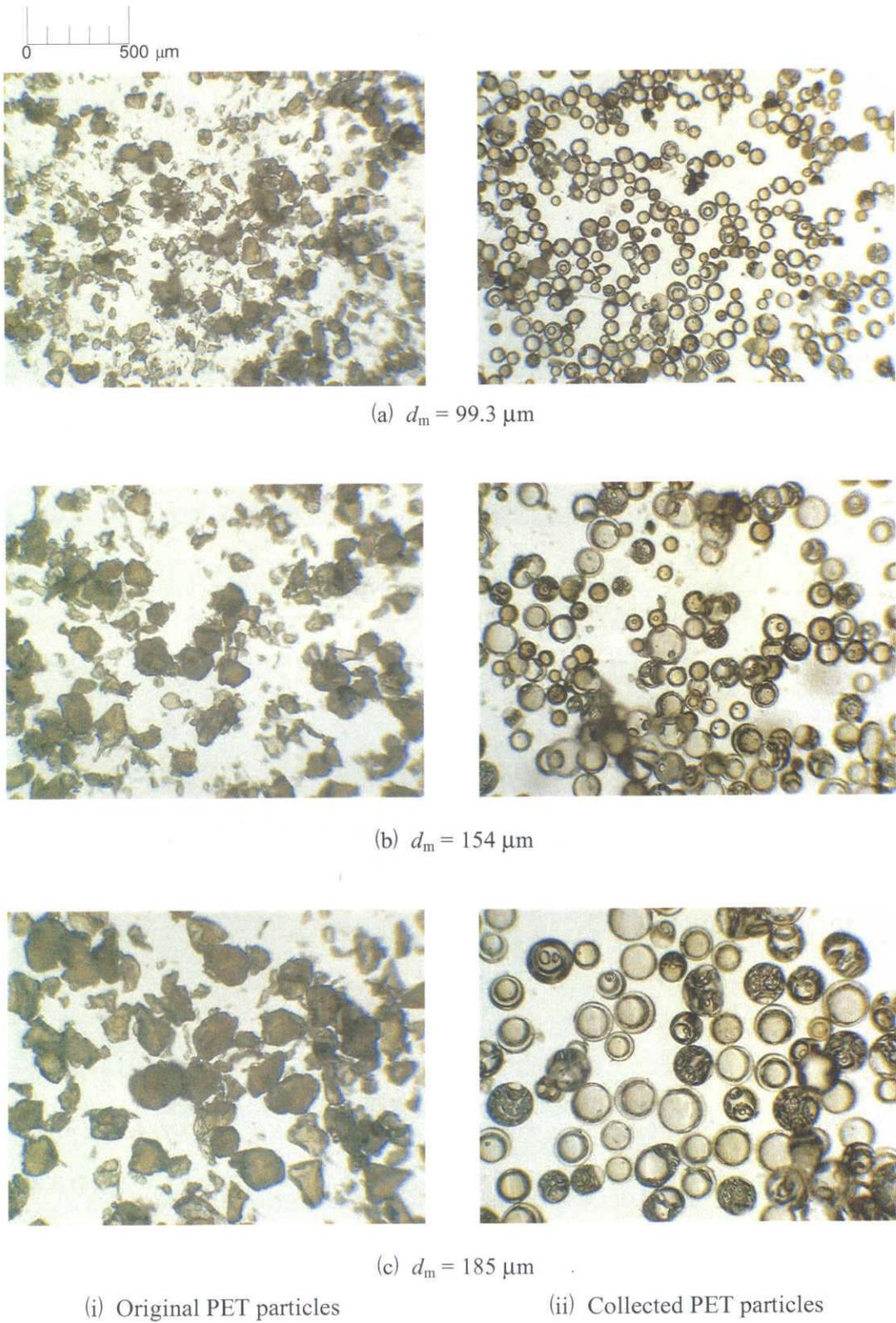
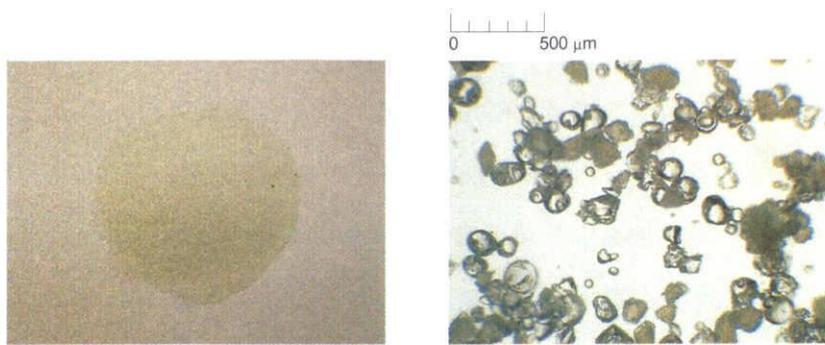
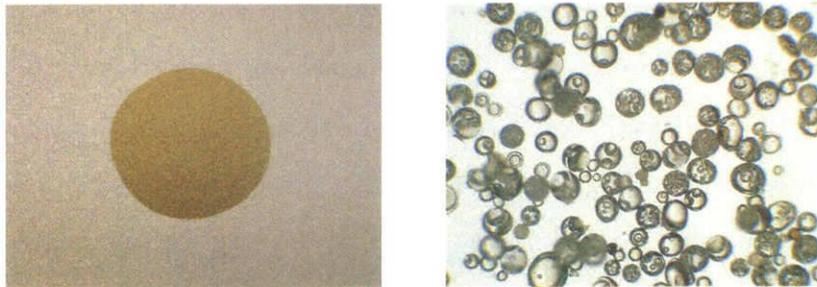


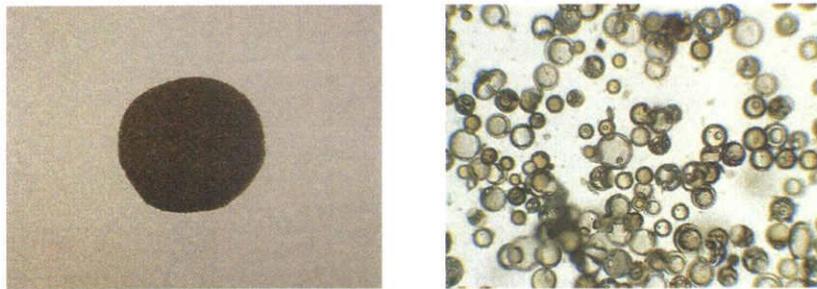
Fig. 8.6 Microscopic photographs of collected unburnt PET particles



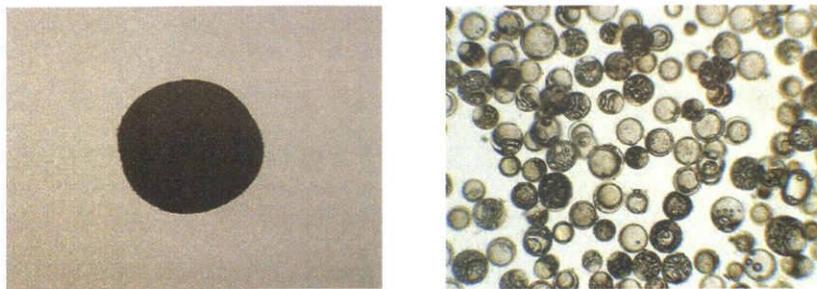
(a) $v_s = 3.0$ m/s, $v_n = 3.7$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $\phi_n = 0$, $M_U = 82$ %



(b) $v_s = 12$ m/s, $v_n = 3.7$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $\phi_n = 0.4$, $M_U = 55$ %



(c) $v_s = 6.0$ m/s, $v_n = 3.7$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $\phi_n = 1.0$, $M_U = 19$ %



(d) $v_s = 3.0$ m/s, $v_n = 3.7$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $\phi_n = 1.0$, $M_U = 28$ %

(i) Direct photographs

(ii) Microscopic photographs

Fig. 8.7 Appearances of collected unburnt PET particles
 ($d_m = 154$ μ m, $m_{PET} = 8.0$ g/min)

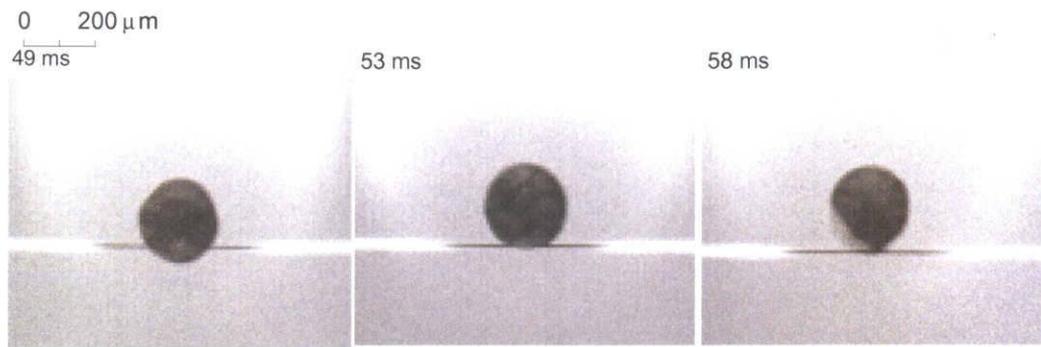


Fig. 8.8 Examples of high-speed microscopic photographs
($\phi = 0.8$, $T_g = 1600\text{ }^\circ\text{C}$, $d_0 = 199\text{ }\mu\text{m}$)

て熱分解・ガス化に伴う樹脂の泡立ちによって幾重にも重なる凸型の膨らみが観察された高速度顕微鏡画像（図 8.4 から抜粋）が示されている。

まず、図 8.5 (a) から、固形残留粒子中に多数の微細な気泡の存在が明確に観察される。一方図 8.5 (b) によれば、PET 粉末燃焼中において融解・熱分解によるガス化に伴い丸みを帯びた PET 微粒子や粒子表面において多数の透明な斑点を有する粒子の存在が認められる。これらの観察結果と図 8.8 に示した PET 微粒子表面において観察された幾重にも重なる凸型の膨らみの存在は符合している。

続いて、図 8.6 (a)~(c) を見ると、いずれの d_m の場合においても、燃焼前の粒子形状は角張っているのに対して、固形残留粒子形状は丸みを帯びていることがわかる。これについては、図 8.5 (a) および (b) で示した捕集された固形残留粒子形状と高速度飛翔 PET 粒子形状が比較的、同じであることから、高温燃焼領域を飛翔している間に十分溶融した PET 粒子が表面張力によって球状に変形したためであると推察される。なおこの点については、図 8.7 (a) の説明を踏まえ、後述する。

続いて、いずれの d_m においても排出された固形残留 PET 微粒子表面に凹みおよび気泡が存在していることがわかる。また、粗大な粒子を多く含む $d_m = 185 \mu\text{m}$ の場合は、一個の粒子中に多数のそれらが存在しているのに対して、微細な粒子を多く含む $d_m = 99.3 \mu\text{m}$ の場合は、そのような粒子はほとんど認められない。このような多重微小気泡および凹みの存在は、図 8.8 に示した PET 微粒子表面において観察された粒子内部での熱分解・ガス化による泡立ちに伴う幾重にも重なる凸型の膨らみと非常によく一致している。さらに第 6 章で述べた熱分解・ガス化による樹脂の泡立ちと多重微小噴流の関係を加味すると、多重微小気泡の存在は溶融した PET 微粒子が高温燃焼領域を飛翔中に粒子内部で熱分解・ガス化していることを、凹みの存在は熱分解ガスが粒子表面から微小噴流した跡を意味していると考えられる。

その他に、二重の円形を有している微粒子が多数確認できる。これらの粒子は内部が空洞である可能性をもつ。すなわち、空洞微粒子の断面形状が図のような二重円形となって写っていると推察される。これについては、いくつかの空洞であるかどうかの実験を行っており（付録 c-1 を参照）、その結果から空洞の球殻形状をした微粒子の存在が明らかとなっている。

さて、ここまで述べたことを踏まえて、図 8.7 (a)~(d) を見ると、固形残留粒子中に熱分解・ガス化に伴う多重微小気泡の存在および多重微小噴流に伴う凹みの存在が同様に確認できる。また、図 8.7 (a) では、角が取れ丸みを帯びた粒子と燃焼前の PET 粉末とほぼ変わらない凹凸微粒子の両方が観察されているが、それ以外の図 8.7 (b)~(d) においては凹凸粒子が認められない。

図 8.5 (a) で示した未燃率が高い条件においても、このような凹凸粒子が観察されていることから、十分溶融し切らないまま大気中に飛散した粒子であると推察している。なお全体を通して、粒子の色彩に関しては、すすの含有量および光の屈折が影響していると考えられる。

以上のように、急速加熱された単一 PET 微粒子の粒子挙動の高速度拡大撮影において詳細に観察された熱分解・ガス化による樹脂の泡立ち、多重微小爆発および多重微小噴流が、PET 粉末燃焼中においても生じており、その結果、固形残留粒子の形状として表れたと考えられる。このことは、従来の噴霧燃焼および微粉炭燃焼中の微視的な挙動を把握する際と同様に、PET 粉末燃焼中の微視的な粒子の加熱から消滅に至るまでの物理的挙動を把握する上で、実用燃焼場を模擬した条件下における単一 PET 微粒子挙動の可視化実験が非常に有効であり、また有意義な知見を与えることを明らかにした。ちなみに、実際の噴霧燃焼時の液滴は数十 μm から構成されているにもかかわらず、単一液滴実験を行う際はほとんどの場合、支持法の問題上、数百 μm の粒子を用い微小重力下で実験が行われている。そのため、単一液滴実験を基づいて噴霧燃焼内の微視的な現象を実験的に把握する際、粒子寸法の影響を考慮しなければならない。それに対して、本実験の場合は、PET 粉末を構成している寸法に対応した数百 μm の微粒子を用いているため、以上のような PET 粉末燃焼内の微視的な物理的現象を議論する際、粒子寸法の影響を気にする必要はなく、その点に関しても意義が大きい。

しかしながら、今回の考察は、あくまでも固形残留粒子の形状と単一 PET 微粒子の可視化実験を基に PET 粉末燃焼中で起こっている微視的な現象を把握しているにすぎず、実際の PET 粉末燃焼中は相互作用、相対流れなどが存在するため非常に複雑な現象が起きているように思われる。これについては、すでに燃焼領域中を飛行中の単一 PET 微粒子挙動の高速度拡大撮影が可能な特殊な装置を設計・開発し、単一 PET 微粒子の可視化実験の際には観察されなかったいくつかの興味深い現象が得られている。今後、その画像解析結果が待たれる。

8.4.4 球対称一次元熱伝導解析結果との比較・検討

PET 粒子の観察および解析で得られた時間経過の結果を、図 8.9 に示す。図中の●、○および□印はそれぞれ図 8.2 (a)、8.3 (a) および図 8.4 (a) の高速度顕微鏡観察結果から読み取った粒子の融解開始、熱分解・ガス化開始および熱分解・ガス化終了時刻を表す。表 8.1 に、それらの値をまとめて併記する。一方、図中の 4 種類の直線は微小浮遊近似等の仮定によって簡単化された球対称一次元熱伝導解析^{(10),(11)}により算出された各素過程までの所要時間 t_i を示す。雰囲気温度は $T_g = 1600\text{ }^\circ\text{C}$ に設定されている。

Table 8.1 Experimental results of heating time

$d_0 \mu\text{m}$	Initiation of melting ms	Initiation of vaporization ms	End of vaporization ms
100	4	7	16
150	6	15	39
199	14	24	75

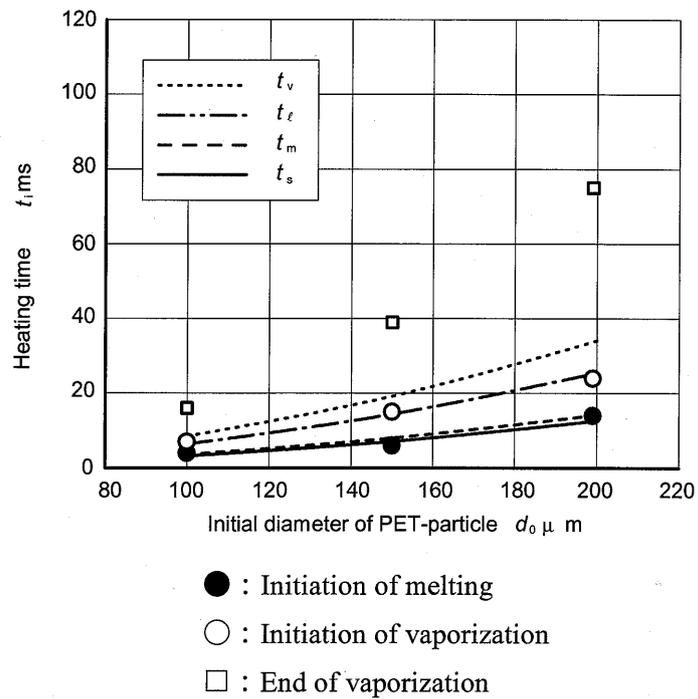


Fig. 8.9 Comparison of the experimental results with the numerical results

図を見ると、融解開始時間（●印）および熱分解・ガス化開始時間（○印）が解析によって見積もった時間 t_m および t_e とほぼ一致している。この要因として、熱分解・ガス化開始まで粒子は内部での流動がほとんどなく、ほぼ球形を維持した状態で相変化をしていることが挙げられる。しかし、熱分解・ガス化終了時間を見ると、実験結果（□印）の方が解析結果の時刻 t_v に比して非常に長い。この理由として、解析には実験で観察されたような熱分解・ガス化による泡立ちに伴う膨張過程が考慮されていないことが考えられる。なお、この点に関しては、解析で得られた熱分解・ガス化終了時間 t_v に図 8.2 (b), 8.3 (b) および 8.4 (b) から読み取った熱分解・ガス化による泡立ちに伴う膨張過程の時間を加味すれば、観察で得た熱分解・ガス化終了時間（□印）とほぼ一致することからも伺える。

8.5 解析手順および方法

前節では、急速加熱された単一 PET 微粒子の粒子挙動の高速度拡大撮影において詳細に観察された熱分解による樹脂の泡立ち、多重微小爆発および多重微小噴流が、PET 粉末燃焼中においても生じていることを示した。また、解析で得られた熱分解・ガス化終了時間 t_v に図 8.2 (b), 8.3 (b) および図 8.4 (b) から読み取った熱分解・ガス化による泡立ちに伴う膨張過程の時間を加味すれば、観察で得た熱分解・ガス化終了時間 (□印) と定性的にはほぼ一致した。以上の結果を加味し、モデル化を簡単化するためのいくつかの仮定を施し、総合的に現実性の高い粒子挙動のモデル化を進めた。

8.5.1 粒子挙動のモデル化

図 8.2, 8.3 および図 8.4 に基づいて、それぞれの単一の球形 PET 微粒子の加熱から熱分解・ガス化に至るまでの過程の画像計測結果をまとめて図 8.10 に示す。縦軸は粒子径の二乗 $d^2 \mu\text{m}^2$, 横軸は加熱時間 $t \text{ ms}$ を意味し, ○, △, □印はそれぞれ初期直径 d_0 が 100, 150 μm および 199 μm の場合を表す。また、燃焼ガス温度 (加熱温度) は $T_g = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ である。図中にそれぞれの初期粒子径に対して、2本の直線によって示されているように、粒子は加熱によって一旦膨張し、その後、一定の傾きで熱分解・ガス化することがわかる。そこで近似的ではあるが、以下のような総合的に現実性の高い粒子挙動のモデル化を試みた。

モデル化するにあたっては、図 8.3 に示した $d_0 = 150 \mu\text{m}$ の挙動を基準とし、加熱および熱分解・ガス化過程を 2つの素過程 (加熱に伴う膨張過程と熱分解に伴うガス化過程) に分割し各過程は独立して進行すると仮定する。そして、加熱に伴う膨張挙動を膨張比 $(d/d_0)^3$ と時刻 t の直線近似で、一方、熱分解に伴うガス化挙動を d^2 -則に従いモデル化する。その結果、基準となる $d_0 = 150 \mu\text{m}$ のモデル挙動を用いて、その挙動に対して式 (8.1) に示した時間に関する相似則を適用することで、任意のモデル粒子挙動を表現することが可能となる。すなわち、得られる任意のモデル粒子挙動は $d_0 = 150 \mu\text{m}$ の直線を、相似則に従って平行移動したものとして表現される。任意の初期直径に対する加熱時間 t と得られた各過程のモデル式を式 (8.1) ~ (8.3) に、加熱に伴う膨張終了時刻 t_{ef} , 熱分解に伴うガス化終了時刻 t_{vf} を、それぞれ式 (8.4) および (8.5) に示す。

任意の初期直径に対する加熱時間

$$t = t_{150} (d_0/d_{150})^2 (Nu_{ex,150}/Nu) \dots\dots\dots (8.1)$$

加熱に伴う膨張過程

$$[d(t)/d_0]^3 = [1 + 1.80 \times 10^{-2} (Nu/Nu_{ex,150}) (d_{150}/d_0)^2 t] \dots\dots\dots (8.2)$$

熱分解に伴うガス化過程

$$d(t)^2 = (2.49d_0)^2 - 3.60 \times 10^3 (Nu/Nu_{ex,150}) t \dots\dots\dots (8.3)$$

加熱に伴う膨張終了時刻および熱分解に伴うガス化終了時刻

$$t_{ef} = 1.36 \times 10^{-3} d_0^2 (Nu_{ex,150}/Nu) \dots\dots\dots (8.4)$$

$$t_{vf} = 1.73 \times 10^{-3} d_0^2 (Nu_{ex,150}/Nu) \dots\dots\dots (8.5)$$

ここで $d(t)$, d_0 , d_{150} は、それぞれ時刻 t における任意の粒子径、初期粒子径およびモデル化の基準とした粒子の初期直径 (= 150 μm) を、 Nu , $Nu_{ex,150}$ はヌセルト数および球形 PET 微粒子の加熱実験時のヌセルト数 (= 2.3) を表す。

得られたモデル粒子挙動を図 8.10 に併記する。破線、実線および一点破線は、それぞれ $d_0 = 100$, 150 μm および 199 μm の場合である。図を見ると、モデル粒子挙動は粗大な粒子径に対しては過小評価、微細な粒子径に対しては過大評価傾向にあるものの、全体としては画像計測で得られた粒子挙動を適切に表現していることが伺える。

8.5.2 個数分布への置換

本解析では、計算負荷を軽減させる目的で、汎用の噴霧燃焼の数値シミュレーションコードでもしばしば用いられているパーセル近似モデル⁽²³⁾を適用した。この手法は、火炎中の無数の油滴をすべて追跡する代わりに、多数の同一径 $d(t)$ の油滴 $N_0[d(t)]$ 個を含んだ仮想的な油敵パーセルを追跡し、単滴の蒸発量を単純に $N_0[d(t)]$ 倍して、蒸発量等を見積もる方法である。しかしながら、噴霧燃焼の数値解析に用いる場合、計算負荷の軽減に対しては有効であるが、油滴は個々に異なった挙動をするため、これでは油滴の密集効果、すなわち油滴群燃焼⁽²⁴⁾を全く考慮することができない。ちなみに、油滴の密集度が高い場合、パーセル近似を適用すると蒸発量が多く見積もられるといった解析結果も報告されている⁽²⁵⁾。したがって、本解析でもその手法を適用する場合、計算負荷にあわせて 1 パーセルあたりに含まれる粒子数をよく吟味して用いる必要があると考えられる。

以上のことを考慮し、データとして与えられた粒径のヒストグラムから累積分布、質量分布および個数分布への変換を試みた。その手順を、第 2 章および第 5 章で用いた質量メディアン

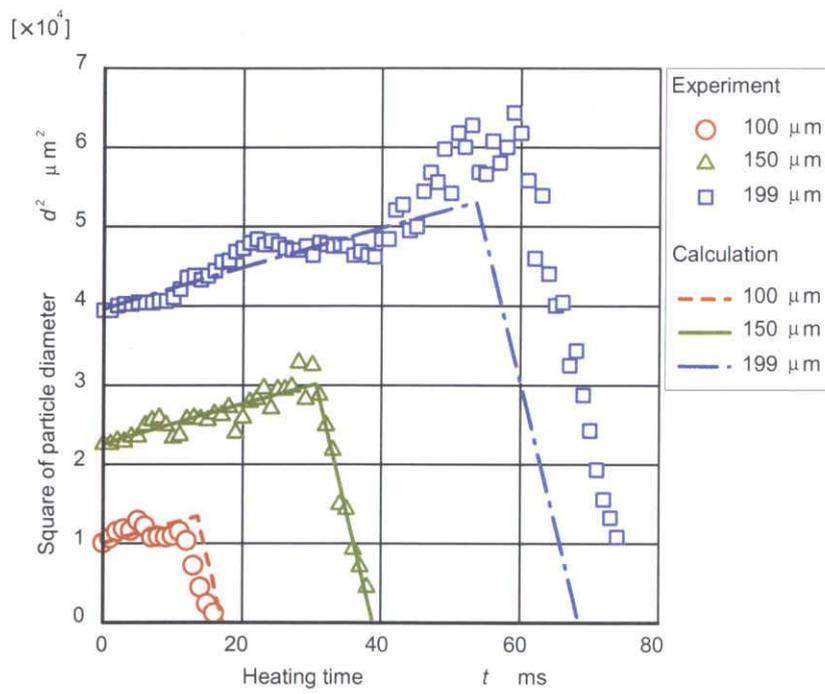


Fig. 8.10 Comparison for the modeled particle behavior with the measured particle behavior

直径 $d_m = 145 \mu\text{m}$ の粉末を例に挙げて説明する。まず球形粒子の仮定を導入し、ヒストグラムを累積分布に表し、累積質量近似曲線 $f_M(d_0)$ を導出する [図 8.11 (b) 中の実線]。つぎに、離散的な計測区間を微小区間 $\Delta d_0 (= 0.01 \mu\text{m})$ に分割し、現実に近い連続的な粒子径分布パターンを模擬する。そして、 $f_M(d_0)$ を微分・正規化し、質量分布 $F_M(d_0)$ に置換する。最後に、次式を用いて質量分布 $F_M(d_0)$ を個数分布 $N_0(d_0)$ に置換する。

$$N_0(d_0) = 6F_M(d_0) / \pi\rho_0 d_0^3 \quad \dots\dots\dots (8.6)$$

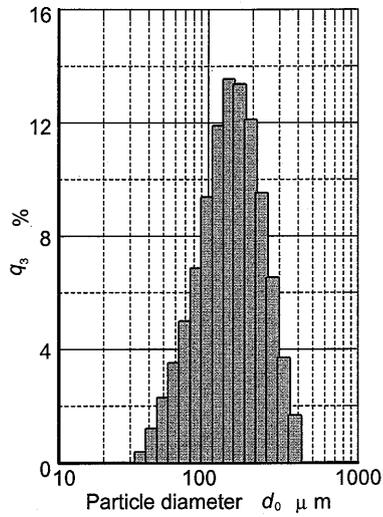
図 8.11 に、(a) 基となるヒストグラム、(b) 累積質量近似曲線 $f_M(d_0)$ 、(c) 微分・正規化後の質量分布 $F_M(d_0)$ および (d) 個数分布 $N_0(d_0)$ を示す。図から、階段状の離散的なヒストグラムが滑らかな分布形状に変換されていくことがわかる。

8.5.3 未燃率の算出

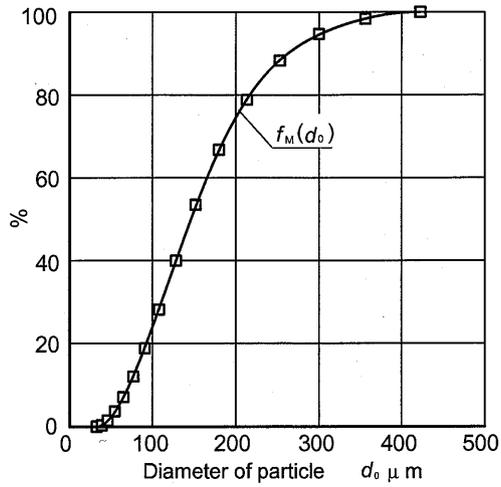
本解析では、加熱時刻 t における未燃率 $M(t)$ は、加熱時刻 t の状態における質量を初期状態の質量で除した値で定義され、式 (8.7) のように表される。

$$M(t) = \{ \sum N_0[d(t)] \rho[d(t)] d(t)^3 + \sum N_0[d(t)] \rho_t d(t)^3 \} / \sum N_0(d_0) \rho_0 d_0^3 \quad \dots (8.7)$$

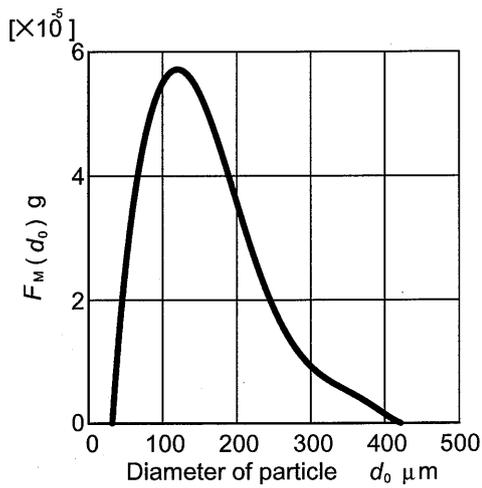
ここで右辺の分子第一項と第二項は、それぞれ時刻 t に至るまでに加熱に伴う膨張および熱分解に伴うガス化した状態における質量を意味する。加熱に伴う膨張時の粒子径 $d(t)$ の密度 $\rho[d(t)]$ は質量保存則に従って変化し、熱分解・ガス化時の密度は $\rho_t = 8.91 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ と一定に保たれる。なお、分母は初期状態を表し、初期状態における密度 ρ_0 は $1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。



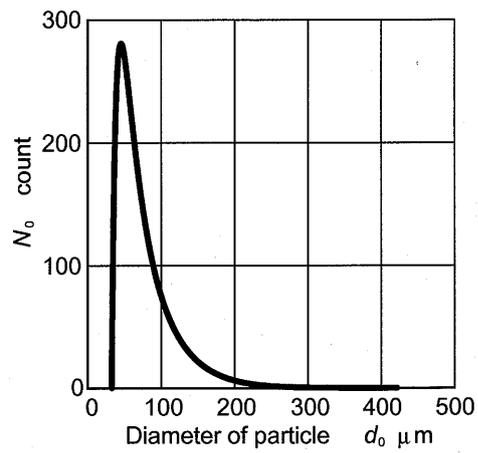
(a) Histogram



(b) Cumulative mass



(c) Mass distribution



(d) Number distribution

Fig. 8.11 A series of transformation processes to number distribution ($d_m=145 \mu\text{m}$)

8・6 解析結果

本解析では、まず粒子挙動モデル式(8.2)および(8.3)を用いて、初期粒子径 d_0 の粒子挙動 $d(t)$ を表現する。そして、初期個数分布 $N_0(d_0)$ [図 8.11 (d)] を基に、 $N_0[d(t)]$ 個の同一径 $d(t)$ を含んだ仮想的な粒子群を追跡し(パーセル近似)、時刻 t における個数分布 $N_0[d(t)]$ を把握する。得られた $N_0[d(t)]$ を基に粒子径 $d(t)$ の粒子挙動およびガス化量を単純に $N_0[d(t)]$ 倍し、式(8.7)を用いて未燃率 $M(t)$ を予測する。

以下、得られた解析結果について述べる。

8・6・1 個数分布の時間変化

はじめに、単一 PET 微粒子の加熱実験に対応する条件(ヌセルト数 $Nu = 2.3$)において、粉末の質量メディアン直径 $d_m (= 89.7, 145, 185 \mu\text{m})$ をパラメータとして加熱時刻 t を変化させたときの個数分布 $N_0[d(t)]$ について考察する。図 8.12, 8.13 および図 8.14 に、それぞれ加熱直後の初期($t = 0 \sim 5 \text{ ms}$)、加熱中期($t = 8 \sim 32 \text{ ms}$)および加熱後期($t = 40 \sim 85 \text{ ms}$)における分布の変化を示す。横軸は時刻 t における各球状粒子の直径 $d(t)$ を、縦軸は粒子数 $N_0[d(t)]$ を意味する。なお、各 d_m の個数分布を作成する際、一方で $N_0 < 1$ の範囲は物理的に意味をもたないことを考慮し、他方では過剰な粒子と過少な粒子を含む互いの個数分布を際立たせるために、縦軸には片対数表示を用いた。ここで、図 8.12 (a) は加熱開始時($t = 0 \text{ ms}$)の個数分布 $N_0[d(0)] [= N_0(d_0)]$ を与え、 d_m が大きくなると微細な粒子数が減少し、粗大な粒子数が増加することがわかる。また、図 8.12 (c) 以降に見られる折点は加熱に伴う膨張過程と熱分解に伴うガス化過程の境界に対応する。なお本解析では、前節で述べたようにパーセル近似を適用しているため、同時刻での d_m の変化に伴う粒子数の相違は初期個数分布 [図 8.12 (a)] に依存する。以上を踏まえ、それぞれの加熱時期について述べる。

(1) 加熱直後の初期における個数分布の変化

図 8.12 に、加熱直後における初期の個数分布の時間変化を示す。図 8.12 (a)~(f) は、それぞれ加熱時刻 $t = 0, 1, 2, 3, 4 \text{ ms}$ および 5 ms の場合である。

図 8.12 (b) を見ると、 $t = 1 \text{ ms}$ では $t = 0 \text{ ms}$ と比べて、全体的な分布傾向はほとんど同じであり、加熱に伴う膨張過程と熱分解に伴うガス化過程の境界に対応する折点も現れていない。このことは、いずれの粒子も熱分解に伴うガス化開始までに至っていないことを意味する。また、各

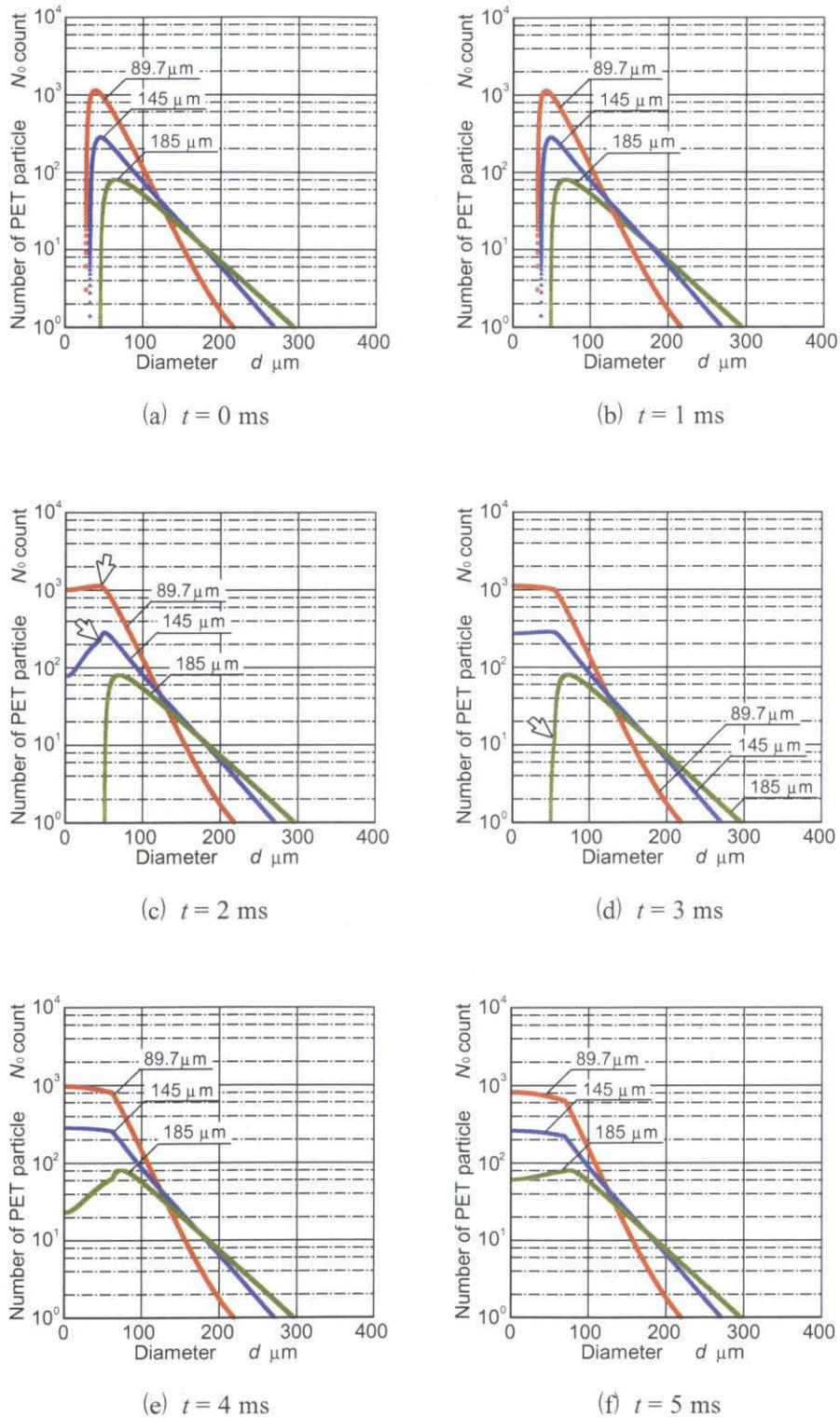


Fig. 8.12 Variations of number distributions in the early heating period ($Nu = 2.3$)

d_m に含まれている 30 ~ 50 μm 程度の微細な粒子の加熱に伴う膨張による粒子径の変化量（すなわち、分布の移動量）は、200 ~ 300 μm 程度の粗大な粒子のそれに比して大きいことがわかる。

そして $t=2\text{ ms}$ で [図 8.12 (c)] , $d_m = 89.7$ および 145 μm の個数分布において折点 [図 8.12 (c) 中の矢印] が認められる。折点の左側は熱分解に伴うガス化過程まで進行した微細な粒子の、右側は加熱に伴う膨張中の粒子の個数分布に相当している。また、分布と縦軸との交点近傍は消滅直前の粒子数を表しているため、初期の個数分布 [図 8.12 (a)] において、その粒子数よりも少ない個数をもった微細な粒子は熱分解・ガス化しつくして消滅したことを意味する。よって、 $t=2\text{ ms}$ においては、初期に存在していた 30 μm 程度の微細な粒子は熱分解・ガス化しつくして、それに代わって熱分解に伴うガス化過程まで進行し 50 μm 以下の粒子径まで至った微細な粒子と 50 μm 以上の加熱に伴う膨張中の粒子が共存し分布していると予測される。一方、 $d_m = 185\text{ }\mu\text{m}$ の場合、分布上に折点は見られないため、熱分解・ガス化過程まで進行した粒子は存在せず、加熱に伴う膨張中の粒子のみであることがわかる。以上から、実用燃焼場においても、微細な粒子ほど早期に熱分解・ガス化しつくすため、結果、早期の燃焼につながっていくことが予想される。

さらに、 $t=3\text{ ms}$ になると [図 8.12 (d)] , $d_m = 89.7$ および 145 μm の折点の位置が粗大な粒子側へ移行しており、先ほどよりも粗大な粒子が熱分解に伴うガス化過程に進行し、それに伴い微細な粒子が熱分解・ガス化しつくしたことが伺える。 $d_m = 185\text{ }\mu\text{m}$ の個数分布においても、分布頂点から左勾配の途中で折点 [図 8.12 (d) の矢印] を確認することができる。先ほどの $d_m = 89.7$ および 145 μm の折点における分布挙動とは異なり、 $d_m = 185\text{ }\mu\text{m}$ の場合は、若干勾配が左側へ緩くなっているに過ぎず、50 μm 程度の微細な粒子が熱分解・ガス化し始めたと考えられる。

その後の $t=4\text{ ms}$ および 5 ms を見ると、 $d_m = 185\text{ }\mu\text{m}$ の場合、明確な折点が現れており、その折点が粗大な粒子側へ移行するにつれて、初期の個数分布 [図 8.12 (a)] において存在していた微細な粒子は熱分解・ガス化しつくし、熱分解に伴うガス化過程まで進行した微細な粒子が増加していくことが知れる。一方、 $d_m = 89.7$ および 145 μm の場合を見ると、折点の位置が粗大な粒子側へ移行するにつれて、熱分解に伴うガス化過程まで進行した微細な粒子に伴う分布箇所 [図 8.12 (e) および (f) の比較的、平らな部分] が徐々に下がっていくことが伺える。これに関しては、初期の個数分布 [図 8.12 (a)] から、粗大な粒子径ほど粒子数が少ないためである。なお、 $t=0\text{ ~ }5\text{ ms}$ の間、 $d \geq 150\text{ }\mu\text{m}$ における加熱に伴う膨張中の粒子の個数分布挙動を見ると、さほど変化していないことが認められる。

以上のように、加熱直後においては微細な粒子の個数分布は粗大な粒子のそれに比べ、顕著

に変化していくことがわかった。

(2) 加熱中期における個数分布の変化

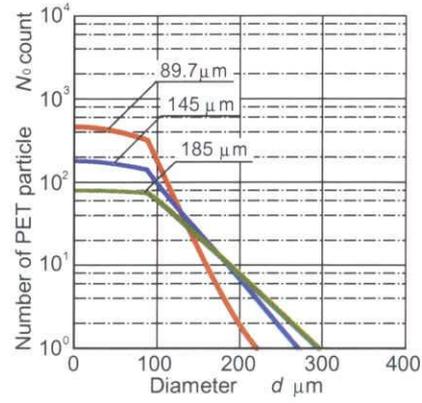
加熱中期における個数分布の変化を検討するために、加熱時刻 $t=8, 10, 16, 24, 25$ ms および 32 ms における個数分布を、それぞれ図 8.13 (a)~(f) に示す。いずれの質量メディアン直径 d_m においても、折点の粗大な粒子側への移行に伴い熱分解に伴うガス化過程まで進行した粒子径の範囲が $200 \mu\text{m}$ 付近まで広くなること、その分布が比較的、平らであること、また加熱に伴う膨張によって加熱直後の初期よりも粗大な粒子が多く存在していくことなどの共通点が伺える。

つぎに、各 d_m の分布挙動について比較すると、 $t=16$ ms の分布 [図 8.13 (c)] に至るまでは、折点の左側の熱分解に伴うガス化過程まで進行した粒子数は d_m の値が小さいほど多くなることが知れる。しかし、 $t=24\sim 32$ ms の間に、その粒子数は一旦、同程度となり [図 8.13 (d) および (e)]、その後、 d_m の値が小さいほど少なくなることが認められる [図 8.13 (f)]。このことから、全体の粒子数に対する熱分解・ガス化しつくす粒子の割合は d_m の値が小さいほど大きくなることわかる。

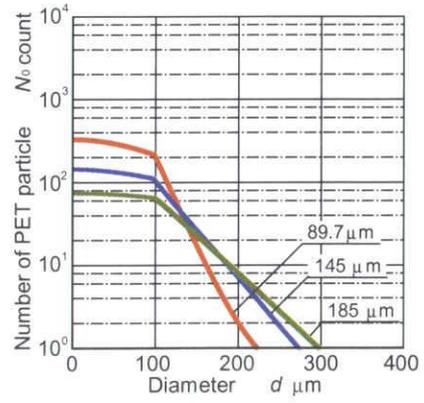
以上から、加熱中期においては、加熱時間の経過とともに、一方で熱分解に伴うガス化過程まで進行した粒子径の範囲が $200 \mu\text{m}$ 付近まで広がり、他方では加熱に伴う膨張中の粒子が増加していくことがわかった。また d_m の値が小さいほど、全体の粒子数のうち熱分解・ガス化しつくす粒子の割合も増加するため、その結果、時間の経過に伴い活発な燃焼につながっていくと予想される。

(3) 加熱後期における個数分布の変化

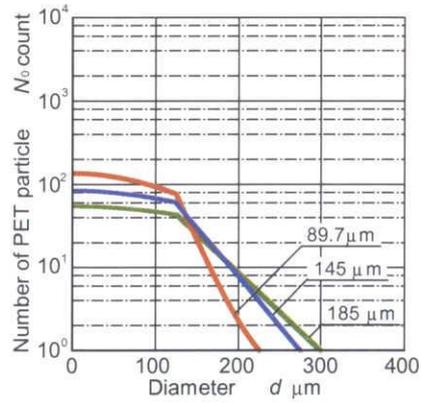
加熱後期における個数分布の変化について把握するために、加熱時刻 $t=40, 55, 70$ ms および 85 ms における個数分布を、それぞれ図 8.14 (a)~(d) に示す。図を見ると、いずれの質量メディアン直径 d_m においても加熱中期の分布傾向が継続しており、時間の経過とともに折点の位置が粗大な粒子側へ移行していくことがわかる。それに伴って、一方で加熱によって $200 \mu\text{m}$ 以上まで膨張した粗大な粒子径の熱分解・ガス化が始まり、他方では微細な粒子から徐々に熱分解・ガス化しつくしていくことが認められる。また、 $d_m=89.7 \mu\text{m}$ の熱分解・ガス化中の粒子の個数分布の移動量が、 $d_m=145$ および $185 \mu\text{m}$ のそれに比べて大きいことが知れる。微細な粒子を多く含む粉末ほど、熱分解・ガス化しつくす粒子の割合が大きくなるためである。とくに、 $d_m=89.7 \mu\text{m}$ の場合を見ると、 $t=70$ ms ではもはや膨張中の粒子は存在しておらず、いずれの粒子におい



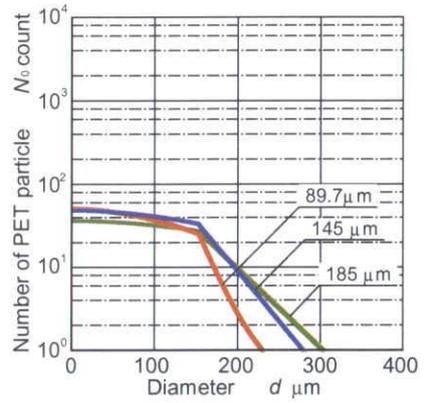
(a) $t = 8$ ms



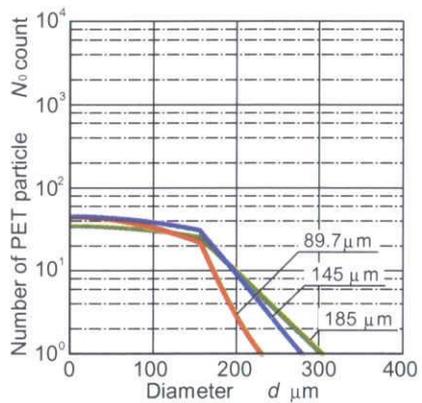
(b) $t = 10$ ms



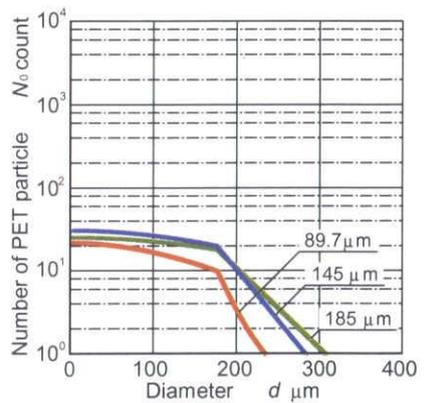
(c) $t = 16$ ms



(d) $t = 24$ ms

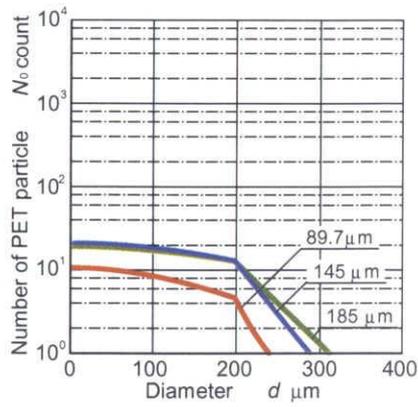


(e) $t = 25$ ms

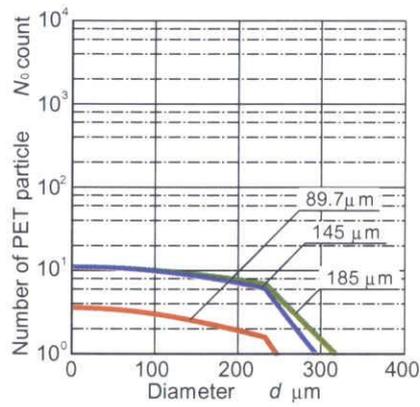


(f) $t = 32$ ms

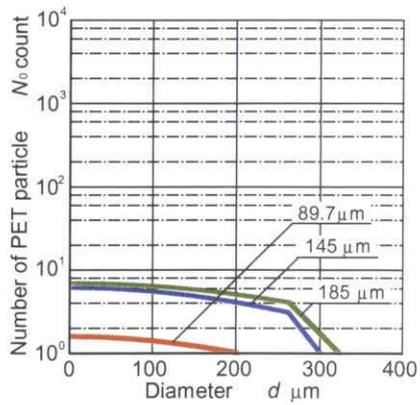
Fig. 8.13 Variations of number distributions in the middle heating period ($Nu = 2.3$)



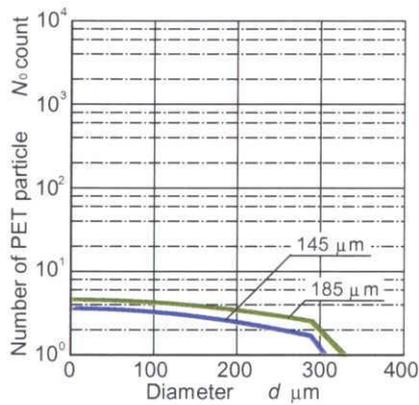
(a) $t = 40$ ms



(b) $t = 55$ ms



(c) $t = 70$ ms



(d) $t = 85$ ms

Fig. 8.14 Variations of number distributions in the latter heating period ($Nu = 2.3$)

ても熱分解に伴うガス化過程まで進行しており、 $t = 85 \text{ ms}$ においてはすべての粒子が熱分解・ガス化しつつしていることが容易に理解できる。

以上の各期間を総括し、最後に PET 粒子群から成る集合的粉末燃焼挙動を簡単に検討する。上記の個数分布挙動から、粉末燃焼中ではいずれの d_m においても、主に早期に熱分解・ガス化・燃焼しつつ微細な粒子、熱分解・ガス化・燃焼中の粒子および膨張中の燃焼に至っていない粗大な粒子が存在していると推察される。微細な粒子は早期に消滅し、それらの燃焼が一方で後続する微細な粒子の熱分解・ガス化・燃焼を、他方では比較的粗大な粒子の加熱に伴う膨張を促進すると考えられる。よって、 d_m が小さいほど、早い段階から活発な燃焼が起こり、結果、未燃率は低くなると予測される。

8.6.2 未燃率の数値予測

図 8.15 に、質量メディアン直径 d_m およびヌセルト数 Nu を変化させたときの未燃率の時間変化を示す。図 8.15 の 3 本の太線は単一 PET 微粒子加熱実験 ($Nu = 2.3$)，細線は PET 粉末燃焼実験 ($Nu = 3.5$)⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾ に対応する条件下での解析結果を表し、実線、破線、一点破線はそれぞれ $d_m = 89.7, 145 \mu\text{m}$ および $185 \mu\text{m}$ の場合を表す。横軸は加熱時刻 $t \text{ ms}$ を、縦軸は未燃率 $M_U \%$ を表す。

図 8.15 から、 $Nu = 2.3$ の場合に注目すると、微細な粒子を多く含む $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の粉末の場合、未燃率は加熱の初期段階で急激に減少し、 $t = 40 \text{ ms}$ で $M_U = 10 \%$ 以下となり、それ以降、徐々に減少していく。一方、比較的粗大な粒子を多く含む $d_m = 145, 185 \mu\text{m}$ の粉末の場合には、 $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ に比べ緩やかな減少傾向を示し、 $t = 50 \text{ ms}$ でそれぞれ $M_U = 20 \%$ および 40% 程度になることが知れる。

Nu の影響に関しては、式 (8.2) および (8.3) で示されているように、単一微粒子実験を基準としたヌセルト数の比 $Nu/Nu_{\text{ex},150}$ で表現され、 Nu が大きいほど未燃率が小さくなることがわかる。

図中の $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の場合を見ると、 $M_U = 0 \%$ に至るまでの加熱時刻が 80 ms ($Nu = 2.3$) から 50 ms ($Nu = 3.5$) 程度と約 0.7 倍 ($Nu/Nu_{\text{ex},150}$ の逆数に相当) 短くなっていることから容易に理解できる。また、 $t = 50 \text{ ms}$ 以降において、 Nu の増大に伴う未燃率の低下量は d_m の値が大きいほど、すなわち、粗大な粒子を多く含むほど多いことが伺える。これについては、 Nu の増大に伴う熱伝達率の上昇に帰着させることができる。

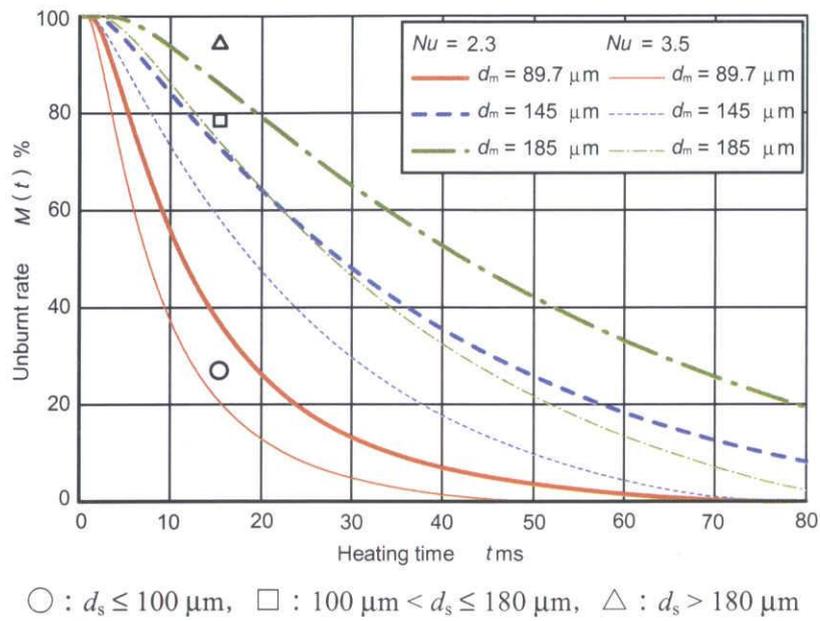


Fig. 8.15 Comparison of numerical results with experimental results

8・6・3 予測値と実測値の比較・検討

最後に、PET 粉末燃焼実験で得られた未燃率の実測値（ヌセルト数 $Nu = 3.5$ ）を図 8.15 に併記し、細線（ $Nu = 3.5$ ）で示した予測値との比較・検討を行った。図中の○、□および△印は、質量メディアン直径 $d_m = 176.4 \mu\text{m}$ の粉末をそれぞれ $d_s \leq 100 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m} < d_s \leq 180 \mu\text{m}$ および $d_s > 180 \mu\text{m}$ に分級し用いた場合を表す。なお比較する際、PET 粒子の燃焼場滞在時間の算出には PTV 計測結果⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾を用いた。また $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の予測値は $d_s \leq 100 \mu\text{m}$ の実測値（○印）を、 $d_m = 185 \mu\text{m}$ の予測値は $100 \mu\text{m} < d_s \leq 180 \mu\text{m}$ の実測値（□印）および $d_s > 180 \mu\text{m}$ の実測値（△印）を数値予測した結果にほぼ相当する。

図を見ると、 $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ の予測値と $d_s \leq 100 \mu\text{m}$ の実測値（○印）、また $d_m = 185 \mu\text{m}$ の予測値と $100 \mu\text{m} < d_s \leq 180 \mu\text{m}$ の実測値（□印）の差はそれぞれ 6.2% および 3.2% であり十分に数値予測していることが見て取れる。しかしながら、予測値は実測値を過少評価していることが伺える。そこでその要因を考察するにあたり、いくつかの予測値と実測値における解析条件および実験条件を比較・検討する。

まず本解析は、火炎当量比 $\phi = 0.8$ の燃焼ガスによって急速加熱された単一微粒子の粒子径挙動（図 8.10 を参照）を基に総合的に現実性の高い粒子挙動のモデル化を行っている。一方、第 3 章で行った PET 粉末燃焼時のプロパン主火炎当量比は $\phi = 0.8$ に設定されており、PET 粉末が加熱される高温燃焼領域は単一微粒子の急速加熱時の高温雰囲気 conditions に近いと推察される。

つぎに、単一 PET 微粒子の急速加熱実験時と PET 粉末燃焼実験時の微粒子周りの熱伝達の評価に関しては、それぞれの実験で測定された平均燃焼ガス流速と温度を加味してヌセルト数を変化させて対応させている。よって、相似則を適用している任意の粒子径 $d(t)$ の加熱時間 t に及ぼす Nu の影響は、式 (8.1) に示されているようにヌセルト数の比として考慮されている。

さらに PET 粉末の粒度分布については、第 2 章の図 2.2 (a) で示した $d_m = 89.7 \mu\text{m}$ と第 3 章の図 3.5 (a) で示した $d_s \leq 100 \mu\text{m}$ のそれぞれの顕微鏡写真から、両者とも微細な粒子を多く含む粉末である点で一致していることが知れる。一方、図 2.2 (a) で示した $d_m = 185 \mu\text{m}$ と第 3 章の図 3.5 (c) で示した $100 \mu\text{m} < d_s \leq 180 \mu\text{m}$ のそれぞれの顕微鏡写真を見ると、両者とも同程度の粒子径を含んでいる点で一致していることに加え、 $d_m = 176.4$ および $185 \mu\text{m}$ の粒度分布にほとんど差異がないことから、両者ともにほぼ同様の粒度分布であると考えられる。

したがって、燃焼ガスによる加熱温度、当量比、単一 PET 微粒子と平均燃焼ガス流速との対流れおよび PET 粉末の粒度分布の解析条件および実験条件の相違は予測値と実測値の差異にさほど影響を与えていないように思われる。

これらを踏まえると、実測値と予測値との差異の主要因は、粒子間の相互干渉から生じる局所的な温度、およびそれに伴う熱伝達率の評価の相違であると推察される。すなわち、実際の PET 粉末燃焼場においては必ず粒子間の相互干渉が存在する。しかし、今回の数値予測では、パーセル近似を用いているため個々の粒子間における相互干渉の影響は考慮できないため、お互いに干渉せず個々の PET 粒子が急速加熱され単一燃焼していく集合的燃焼挙動として扱っている。よって、粒子間の相互干渉から生じる局所的な温度低下およびそれに伴う熱伝達率の低下を評価することができない。したがって、本解析では、PET 微粒子の加熱温度および PET 微粒子周りの熱伝達率を過大評価し、結果として、予測値は実測値を過少評価していると考えられる。ちなみに、実測値を得た第 3 章の PET 粉末燃焼実験では、PET 粉末はバーナ中心軸上に供給されているため、図 3.16 に示したように中心軸付近の密集度は燃焼領域全体に亘って、比較的、高い傾向にある。このことから、今回、比較の対象とした実測値と得られた予測値との差異に及ぼす相互干渉の影響は顕著に現れるように思われる。またこのことは、油滴の密集度が高い場合、パーセル近似を適用すると蒸発量が多く見積もられるといった解析結果⁽²⁵⁾にも符号しており、予測値が実測値を過少評価することは容易に理解できる。

なお、 $d_s > 180 \mu\text{m}$ の実測値 (Δ 印) が $100 \mu\text{m} < d_s \leq 180 \mu\text{m}$ の実測値 (\square 印) に比して $d_m = 185 \mu\text{m}$ の予測値から離れている要因として、上記の主要因のほかに、 $d_s > 180 \mu\text{m}$ の粒度分布が $d_m = 185 \mu\text{m}$ のそれに比べて、粗大な粒子を多く含んだ粒子から構成されていることが挙げられる。

以上から、相互干渉の影響を考慮できないパーセル近似を用いた場合でも、PET 粉末に対応した寸法の球形 PET 微粒子の加熱実験を基に物理現象およびヌセルト数の影響を適切に表現・加味さえすれば、単純化された本解析モデルでも PET 粉末燃焼時の未燃率を十分に数値予測することが可能であり、一連の本モデル化手法の妥当性が示されたと言える。

8.7 第 8 章のまとめ

本章では、球形 PET 微粒子の急速加熱実験の画像計測結果に基づいて粒子挙動のモデル化を行い、PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みた。さらに、得られた予測値と第 3 章で得られた未燃率の実測値を比較し、一連の本モデル化の妥当性を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- ① 高速度顕微鏡観察結果によれば、初期粒子径 $d_0 = 100 \sim 200 \mu\text{m}$ の加熱から消滅に至る一連の PET 微粒子挙動が詳細に明らかとなった。とくに、急激に膨張している過程においては、熱分解・ガス化による樹脂の泡立ちによって幾重にも重なる凸型の膨らみが観察された。またそれらの観察結果は、PET 粉末燃焼領域を高速度で飛翔中の PET 微粒子画像、および未燃率測定の際に捕集した固形残留粒子の顕微鏡写真において観察された融解・熱分解・ガス化に伴う丸みを帯びた形状、および粒子表面において多数の透明な斑点の存在と符合している。このことは、PET 粉末燃焼中の微視的な粒子の加熱から消滅に至るまでの物理的挙動を把握する上で、実用燃焼場を模擬した条件下における単一 PET 微粒子挙動の可視化実験が非常に効果的であり、また有意義な知見を与えることを意味する。
- ② 単一 PET 微粒子加熱実験の粒子挙動を加熱に伴う膨張および熱分解に伴うガス化過程の 2 つの独立した素過程に分割し、相似則を適用することで簡単な近似式で表現した。これによって、物理現象を加味した現実性の高いモデル挙動が得られた。
- ③ 粉末粒子径のヒストグラムに球状粒子仮定を施し、個数分布に置換することにより、各粒子径に対して粒子挙動モデルの適用が可能となった。
- ④ 個数分布に粒子挙動モデルとパーセル近似を適用することで、任意の時刻における個数分布および未燃率の数値予測が可能となった。
- ⑤ PET 粉末に対応した寸法の PET 微粒子の加熱実験を基に物理現象およびヌセルト数の影響を加味しモデル化した結果、未燃率の予測値と実測値はよい一致を示し、一連の本モデル化の妥当性が示された。

第 8 章の参考文献

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa, Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel, *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, (2003), CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181.
- (2) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性), 日本機械学会論文集 (B 編), 71-701, (2005), 357-364.
- (3) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生, 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 (PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 (B 編), 71-711, (2005), 2792-2799.
- (4) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin (Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere), *JSME International Journal (Series B)*, 48-1, (2005), 83-91.
- (5) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa, Burning Processes of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature Oxidizing Atmosphere, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), 1531-1538.
- (6) 寺本啓祐・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 環状火炎バーナによって形成された高温酸化性雰囲気における PET 樹脂粉末の燃焼特性, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No. 05-13, (2005), 185-189.
- (7) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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), 日本機械学会論文集 (B 編), 校閲中, 論文 No. 05-0698.
- (8) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, High-Speed Direct Microscopic Observations of Ignition and Burning Processes of a Micro Plastic-Resin Particle Under Stationary and Abrupt Heating, *Proceedings of the 1st International Symposium on Micro and Nano Technology*, (2004), CD-ROM: Paper No. XXXIV-C-04.

- (9) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Appearances of Multiple Micro Explosions, Micro Jets and Micro Diffusion Flames around an Abrupt Heated Micro PET-Resin Particle, *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2005), 209-212.
- (10) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 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(プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称一次元解析), 日本機械学会論文集(B編), 71-708, (2005), 2154-2161.
- (11) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle, *Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2005), CD-ROM: Paper No. KD.08.
- (12) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル(廃棄 PET 樹脂粉末の置換率が燃焼挙動に及ぼす影響), 第13回環境工学シンポジウム2003講演論文集 No.03-10, (2003), 326-329.
- (13) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル(樹脂粉末の種類と粒径の影響), 2003年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 21-22.
- (14) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生, 廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル(PET粉末粒径の影響), 2003年度年次大会講演論文集 Vol.III No. 03-1, (2003), 23-24.
- (15) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生, 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(バーナ内部の燃焼ガスとPET粉末の流動および飛翔PET粒子の形状と直径変化の画像計測), 日本機械学会論文集(B編), 掲載決定, 論文 No. 05-0342.
- (16) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa, Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*, (2005), CD-ROM: Paper No. 074.
- (17) 山北龍児・加藤慎也・Tun, Maung, Kaung, Myat・加藤雄貴・西野光祐・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄PET樹脂粉末を助燃料とする工業用バーナの燃焼特性(燃焼流動場とそこにおける粒子径挙動・速度の画像計測), 第42回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004), 433-434.
- (18) 加藤慎也・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の高速度顕微鏡観察, 2004年度年次大会講演論文集 Vol. 3 No. 04-1, (2004), 51-52.

- (19) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の数値予測の試み, 中国・四国支部第43期総会・講演会講演論文集 No. 055-1, (2005), 215-216.
- (20) 平野敏右, 燃焼学-燃焼現象とその制御-, (2000), 153-155, 海文堂.
- (21) あなたの实用燃焼炉設計および制御, (2001), 208.
- (22) 加藤雄貴・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生, 廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の低減に関する実験的アプローチ, 第15回環境工学総合シンポジウム2005講演論文集 No. 05-13, (2005), 181-184.
- (23) 中村摩理子・赤松史光・黒瀬良一・香月正司, 噴霧燃焼数値解析における気相-油滴間熱移動とパーセルモデルの検証, 熱工学コンファレンス2005講演論文集 No. 05-17, (2005), 87-88.
- (24) H. H. Chiu, H. Y. Kim and E. J. Croke, Internal Group Combustion of Liquid Droplets, *Proceedings of the 19th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, (1982), 971-980.
- (25) 中村摩理子・赤松史光・香月正司, 対向流場における燃料噴霧の蒸発・燃焼挙動の数値解析, 熱工学講演会2002講演論文集 No. 02-22, (2002), 449-450.

第9章 結 論

第2章では、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探るために、その対象として中部圏で盛んな窯業に着目し、PET粉末を窯業用助燃料として使用したときの有効性を調べた。その際、まずバーナの既設炉へのレトロフィットおよびPET粉末を助燃料としての使用を想定して、市販の窯業用バーナにノズル管を設置する改良を加えた。その結果、保炎性およびPET粉末のバーナ壁面への付着性の両面から燃焼特性の改善が得られ、PET粉末の助燃料としての利用が可能となった。

続いて、PET粉末を助燃料とする窯業用バーナにおいて、助燃率 α および質量メディアン直径 d_m の影響を調べ、窯業用助燃料としての適用範囲を把握した。そしてさらに、試験片を用いて焼成試験を行い、PET粉末を供給しない場合と供給した場合の白色度および曲げ強度の比較から、窯業用助燃料としての有効性を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- ① 炉内の直接撮影結果から、 α および d_m の値が大きくなるにつれて、対向壁まで到達するPET粒子は増加する。しかし、実験終了後の炉内においてPET粉末の痕跡は認められなかったことから、高温の炉内ではいずれの条件においても、熱分解によるガス化もしくはPETの熱分解によるガス化ガスの拡散燃焼によってすべて消失すると考えられる。このことから、炉内に焼成品を入れてもPET樹脂の付着の影響は小さい。
- ② 本実験の最大助燃率である $\alpha=30\%$ に設定し、目標炉内温度設定 1220°C で炉内運転を行った結果、 $\pm 20^\circ\text{C}$ の範囲内ではほぼ均一な目標空間温度場を得ることができた。このことから、 $\alpha=30\%$ までの範囲においては、均一な炉内温度調整が可能である。
- ③ 排気ガス分析の結果、 α および d_m の変化によらず、プロパンのみを燃料としたときの燃焼特性とほぼ同等な結果が得られることがわかった。とくに、窯業炉として要求される高CO濃度による還元雰囲気の設定が、いずれの条件においても可能であることが確認された。
- ④ 粒子を球状仮定し、質量基準割合のヒストグラムを個数基準割合の分布図に変換し、対向壁に衝突していた粒子が、 $200\ \mu\text{m}$ 以上の粗大な粒子であることを定性的に示した。

- ⑤ 白色度および曲げ強度を比較した結果、PET 粉末の有無によらず同程度の値を示したことから、PET 粉末の窯業用助燃料として有効性が示された。

以上から、 $\alpha \leq 30\%$ の範囲で、 $d_m \leq 185 \mu\text{m}$ までの PET 粉末を用いるならば、十分に窯業用助燃料として適用可能であり、廃棄プラスチック樹脂粉末の一種である PET 粉末を窯業用助燃料として用いた場合のサーマル・リサイクルの可能性を明らかにした。

続いて、サーマル・リサイクルの可能性をさらに広げるために、その研究を通じて得られた情報あるいは示唆された研究の方向性に基づいて、PET 粉末を助燃料とする広範な汎用性を有する実用バーナの検討を行った。その場合、高温の窯業炉内において最終的に熱分解・ガス化し消失した PET 粒子は、低温の大気開放下においてバーナ単独で燃焼させた場合には、バーナによって形成された燃焼領域中で熱分解・ガス化しつくせず、結果、大気中に飛散し多量の固形残留粒子となって排出されることが問題点として明らかとなった。そこで、第 3 章から第 6 章において、それらの固形残留粒子の排出量低減に向けての基礎的知見を得るために、4 つのサブテーマを設定した。その際、バーナ内に供給された PET 粒子をいかに熱分解・ガス化させるかといった点に的を絞って、物理的な現象解明に関する研究を系統的に進めた。

第 3 章では、PET 粉末燃焼用改良バーナを大気開放燃焼させたときの固形残留粒子の排出量を測定し、粒子径に伴う未燃率の変化を把握した。その際、未燃率を PET 粉末供給量と固形残留粒子排出量の比で定義した。そして、その固形残留粒子の排出量を系統的に低減させるために、未燃率の増加要因を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- ① PIV/PTV 計測結果から、未燃率の増加要因として、
- ・ 加速流の影響によりバーナ内において PET 粒子が効果的に分散されていないこと
 - ・ PET 粒子が中心軸付近に多く存在して粒子個々への熱伝達が悪く有効に熱が使われていないこと
 - ・ 十分な滞在時間が得られていないこと
- の 3 点が考えられる。

- ② ダブルパルスレーザの一方の光を背景光として利用することにより、燃焼領域を飛翔している粒子の詳細な形状の拡大観察を可能にした。また、得られた粒子写真に画像処理を施して粒子径計測を行うことで、下流方向への粒子径変化も明らかにした。

ここで得られた研究結果は、大気開放燃焼の際に増大する固形残留粒子の排出量低減のため基礎データとなり、今後の廃棄プラスチック樹脂を助燃料とするバーナ開発に有用な提言を示しており、工業的な観点から有意義な知見を与える。

第 4 章では、高温不活性雰囲気中に置かれた単一プラスチック樹脂微粒子の温度履歴と寿命を解析的に評価することを目的として、粒子の加熱から熱分解・ガス化に至る過程を固体加熱過程、融解過程、液体加熱過程、および熱分解・ガス化過程の 4 つの互いに独立した素加熱過程に分割し、それぞれの加熱過程における物性値の温度依存性を無視した球対称一次元熱伝導解析に単純化することにより、粒子内部の温度履歴と粒子寿命を評価した。解析の対象とした樹脂は PET 樹脂と PE 樹脂で、粒子径を $d_0 = 100 \sim 200 \mu\text{m}$ に、周囲ガス温度を $T_g = 1000 \sim 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ に変化させた。得られた結果は以下のように要約される。

- ① PET および PE 微粒子の融解時間は短く、それらの寿命に比して無視できる。
- ② 樹脂粒子の寿命は、熱分解・ガス化温度が高く、熱分解・ガス化温度と融解温度との温度差、比熱、および潜熱が大きいほど長くなる。本研究の場合、温度差、比熱、潜熱のいずれも大きい値を有する PE 樹脂粒子の寿命が長くなり、PET 樹脂の約 1.5 倍と見積られた。
- ③ それぞれの加熱過程までの累積時間 t_i および粒子の寿命 τ_i は初期粒子径 d_0 の二乗比に比例し、周囲温度 T_g と代表温度 T_c の差にほぼ反比例する。
- ④ ヌセルト数が粒子寿命に及ぼす影響は非常に大きい。したがって、粒子と周囲ガス流の間に相対流れ場が存在する実用バーナの構造および寸法に影響する因子を検討する場合、“微小浮遊粒子近似”は粒子寿命の過大評価をまねく。

- ⑤ 単純化された解析であるにもかかわらず、熱伝達の影響を適切に考慮すれば、実用バーナにおける PET 粒子の巨視的な燃焼特性の評価が可能となる。

第 5 章では、PET 粒子の効果的な加熱・融解・熱分解・ガス化・燃焼を可能にするために予め形成する燃焼場として、高温酸化性領域に着目した。その有効性を明らかにする実験を行うにあたり、保炎性に優れた環状火炎バーナを採用し、幅広い燃焼条件で安定な高温酸化性領域を形成させ、高温酸化性領域の特性およびその領域に PET 粉末を供給したときの燃焼特性を調べた。得られた結果は以下のように要約される。

- ① PET 粉末を供給しない場合の温度分布および酸素濃度分布の対応関係から、希薄ノズル火炎の場合には燃焼領域中の温度と酸素濃度との間には互いに相反する関係があること、1050 °C の等温線が 10 % の酸素濃度線によく対応することが確認された。この結果に基づき、1050 °C 以上の温度と 10 % 以下の酸素濃度を高温酸化性領域の目安とした。
- ② PET 粉末燃焼の火炎挙動観察によれば、高温酸化性領域を通過する微細な粒子は容易に PET の熱分解によるガス化ガスとなり気相燃焼する。しかし、粗大な粒子に関しては、本実験で形成した高温酸化性領域では十分な滞在時間が得られず、大気中へ飛散することが明らかとなった。
- ③ PET 粉末燃焼による酸素消費分布の検討から、 ϕ_n が希薄条件下の場合には、高温領域内の残存酸素と PET の熱分解によるガス化ガスの燃焼反応が確認された。しかし、 ϕ_n の値が大きくなり過濃条件になるにつれて、中心軸まわりに形成される高温過濃燃焼ガス領域が広がるため、PET の熱分解によるガス化ガスは周囲空気のエントレインによる拡散燃焼により消費されることとなり、その燃焼領域は ϕ_n の増加に伴い外側へ移行する。
- ④ PET 粉末の速やかな融解・熱分解によるガス化には第一段階としては高温場が必要であるが、その後の PET の熱分解に伴うガス化ガスの燃焼を考慮した場合、高酸素濃度場の形成の方が重要であることが理解できた。

続いて、環状火炎バーナの作動条件を変化させたときの高温酸化性領域の変化を把握し、その領域に PET 粉末を供給したときの未燃率特性を調べた。得られた結果は以下のように要約される。

- ⑤ PET 粉末を供給しない場合の酸素濃度および温度分布の対応関係から、高温酸化性領域は v_s の増加に伴い半径方向へ広がり軸方向へ短くなること、 v_n の増加に伴い半径方向へ短くなり、軸方向へ広がることがわかった。
- ⑥ PET 粉末燃焼による酸素消費量および温度変化量分布の定性的検討結果から、PET 粉末の燃焼反応領域は v_s の増加に伴って上流側に移行すること、一方、 v_n の増加に伴って下流方向へ広がることがわかった。また、PET 粉末の主燃焼領域は、PET 粉末供給前の高温酸化性領域の外周部に沿って形成されていることが明らかとなった。
- ⑦ 高温酸化性領域と未燃率特性の結果から、高温酸化性領域によって PET 粉末が熱分解により十分にガス化し、その後の PET のガス化ガスと酸素との拡散燃焼反応が活発なほど、未燃率は低いことが定性的に理解できた。

以上のように、高温酸化性領域を通過する微細な粒子は容易に加熱・融解・熱分解・ガス化し、その PET のガス化ガスと酸素との拡散燃焼反応が活発なほど、固形残留粒子の排出量が低減されることが定性的に明らかとなった。よって、PET 粉末を効率的に燃焼させるためには、広範囲の高温酸化性領域を早期に形成させることが非常に有効であると考えられる。

プラスチック粉末は多数のプラスチック微粒子の集まりであることから、単一プラスチック微粒子の加熱・燃焼特性を知ることは、樹脂粉末燃焼を考える上で重要な意味をもつ。そこで、第 6 章では、単一プラスチック樹脂微粒子の詳細な画像観察を試みた。その際、観察結果のばらつきを低減と微粒子の効果的な支持を同時に実現させるために、5 μm のタングステン細線のまわりにプラスチック樹脂を融解・凝縮・凝固させ、球状に成形する手法を考案した。また、樹脂粉末が高温燃焼領域に供給される状況を模擬するために、高温燃焼ガスを急速加熱源として採用した。そして、透過・シュリーレン同時拡大撮影システムに高速度 CCD ビデオカメラを組み合わせることで、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、(I) 加熱・融解に伴う体積膨張、(II) 穏やかな熱分解によるガス化、(III) 微小爆発・微小噴流に伴う激しい熱分解によるガス化および(IV) 残留チャー（炭素分）の消滅の4つの過程からなることがわかった。
- ② 拡大透過・シュリーレン写真像から、熱分解・ガス化による樹脂の泡立ち、多重微小爆発および多重微小噴流の存在が明らかとなった。とくに多重微小噴流は熱分解によるガス化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および熱分解によるガス化促進効果が著しいことが明らかとなった。

以上のように、プラスチック粉末を構成しているスケールの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を把握することができた。これらの観察結果は、今後、プラスチック粉末燃焼の際に発生する固形残留プラスチック粒子の排出量を低減させるための基礎的知見となると考えられる。また、 $200 \mu\text{m}$ 程度であるにもかかわらず、熱分解・ガス化による樹脂の泡立ち、多重微小爆発および多重微小噴流など伝熱および熱分解によるガス化促進効果につながるいくつかの興味深い微視的現象を捉えることができた。このことは、樹脂粉末燃焼の基礎的な燃焼学的観点からも今後の不均質燃焼に関する情報を与える可能性をも示していると考えられる。

さらに、以上の各サブテーマで得られた結果を総合的に検討し、一方で未燃率の増加要因の一つである分散度の影響を実験的に調べ、他方では廃棄 PET 粉末燃焼における未燃率の数値予

測を試みた。

第 7 章では、PET 粉末搬送管径の相違のみによって分散度を変化させ、未燃率に及ぼす影響を調べた。得られた結果は以下のように要約される。

- ① 基礎実験用バーナの燃焼特性を調べた結果、PET 粉末搬送管径 D の相違によらず、プロパン火炎の概形、温度および乱れ特性は同程度であることがわかった。この結果、PET 粉末燃焼時の分散度に及ぼす影響を PET 粉末搬送管径に帰着させることが可能となった。
- ② 撮影画像の PTV 解析および未燃率測定結果から、 D を大きくするほど早期の分散が促進され、未燃率は小さくなることが実験的に明らかとなった。このことは、第 3 章の実験によって得られた加速流の流れによって効果的に分散されていなかったこと、PET 粉末が中心軸付近に多く存在しており、粒子個々への熱伝達が悪く熱が有効に使われていなかったことの両燃え残り要因が分散度を大きくするほど改善され、その結果、未燃率の低減に繋がったことを意味する。

第 8 章では、球形 PET 微粒子の急速加熱実験の画像計測結果に基づいて粒子挙動のモデル化を行い、PET 粉末燃焼における未燃率の数値予測を試みた。さらに、得られた予測値と第 3 章で得られた未燃率の実測値を比較し、一連の本モデル化の妥当性を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- ① 高速度顕微鏡観察結果によれば、初期粒子径 $d_0 = 100 \sim 200 \mu\text{m}$ の加熱から消滅に至る一連の PET 微粒子挙動が詳細に明らかとなった。とくに、急激に膨張している過程においては、熱分解・ガス化による樹脂の泡立ちによって幾重にも重なる凸型の膨らみが観察された。またそれらの観察結果は、PET 粉末燃焼領域を高速度で飛翔中の PET 微粒子画像、および未燃率測定の際に捕集した固形残留粒子の顕微鏡写真において観察された融解・熱分解・ガス化に伴う丸みを帯びた形状、および粒子表面において多数の透明な斑点の存在と符合している。このことは、PET 粉末燃焼中の微視的な粒子の加熱から消滅に至るまでの物理的挙動を把握する上で、実用燃焼場を模擬した条件下における単一 PET 微粒子挙動の可視化実験が非常に有効であり、また有意義な知見を与えることを意味する。

- ② 単一 PET 微粒子加熱実験の粒子挙動を加熱に伴う膨張および熱分解に伴うガス化過程の 2 つの独立した素過程に分割し、相似則を適用することで簡単な近似式で表現した。これによって、物理現象を加味した現実性の高いモデル挙動が得られた。
- ③ 粉末粒子径のヒストグラムに球状粒子仮定を施し、個数分布に置換することにより、各粒子径に対して粒子挙動モデルの適用が可能となった。
- ④ 個数分布に粒子挙動モデルとパーセル近似を適用することで、任意の時刻における個数分布および未燃率の数値予測が可能となった。
- ⑤ PET 粉末に対応した寸法の PET 微粒子の加熱実験を基に物理現象およびヌセルト数の影響を加味しモデル化した結果、未燃率の予測値と実測値はよい一致を示し、一連の本モデル化の妥当性が示された。

以上から、PET 粉末が熱分解・ガス化しつくすまでの巨視的な物理現象を解明する際、それに対応したスケールの PET 粒子が熱分解・ガス化しつくすまでの微視的な物理現象の把握は非常に重要かつ有意義な知見をもたらす。微視的観点から巨視的観点まで総合的な物理現象の評価を可能することを示している。

以上のように、本研究では、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探るために、その対象として窯業に着目し、廃棄プラスチック樹脂粉末の一種である PET 粉末を窯業用助燃料として用いた場合のサーマル・リサイクルの可能性を示した。そして、サーマル・リサイクルの可能性をさらに一層広げるために、PET 粉末を助燃料とする広範な汎用性を有する実用バーナを検討し明らかとなった固形残留粒子の排出問題に対して、バーナ内に供給された PET 粒子をいかに熱分解・気化させるかといった点に的を絞って、その物理的な現象解明に関する研究を系統的に進めた。その結果、固形残留粒子の排出量低減に関する非常に有意義ないくつかの基礎的知見が得られた。また本研究結果は、今後の樹脂粉末燃焼の新規性、発展性、応用性を示唆しているばかりでなく、基礎的な燃焼学的観点からも今後の不均質燃焼に関する情報を与える可能性をも有していることを明らかにした。

付 録

- (a) 第 3 章に関する付録
 - (a-1) PIV 計測における粒子の追従性
 - (a-2) 焦点深度に関する検討

- (b) 第 4 章に関する付録
 - (b-1) r_m の評価に関する検討

- (c) 第 8 章に関する付録
 - (c-1) 固形残留粒子内の空洞に関する検討

(a) 第3章に関する付録

(a-1) PIV 計測における粒子の追従性

PIV 計測では、トレーサ粒子の追従性が測定結果に大きな影響を及ぼす。トレーサ粒子の追従性に影響する因子としては、粒子に働く浮力や重力などが考えられるが、特に検討を要する因子は、流れ場の振動であると考えられる⁽¹⁾。流体の主流が、周波数 f で変動している場合、流体の速度変動と粒子の速度変動との振幅比 η は、次のように定義される⁽²⁾。

$$\eta = \sqrt{(1+f_1)^2 + f_2^2} \times 100 \quad \dots\dots\dots (a-1.1)$$

ただし、

$$f_1 = \frac{\left[1 + \frac{9}{\sqrt{2}(S+1/2)} Ns \right] \left[\frac{1-S}{S+1/2} \right]}{\frac{81}{(S+1/2)^2} \left[2Ns^2 + \frac{Ns}{\sqrt{2}} \right]^2 + \left[1 + \frac{9}{\sqrt{2}(S+1/2)} Ns \right]^2} \quad \dots\dots\dots (a-1.2)$$

$$f_2 = \frac{\frac{9(1-S)}{(S+1/2)^2} \left[2Ns^2 + \frac{Ns}{\sqrt{2}} \right]}{\frac{81}{(S+1/2)^2} \left[2Ns^2 + \frac{Ns}{\sqrt{2}} \right]^2 + \left[1 + \frac{9}{\sqrt{2}(S+1/2)} Ns \right]^2} \quad \dots\dots\dots (a-1.3)$$

$$S = \rho_p / \rho_f \quad \dots\dots\dots (a-1.4)$$

$$Ns = \sqrt{\frac{\nu_f}{2\pi f d_p^2}} \quad \dots\dots\dots (a-1.5)$$

ここで、 ρ_p 、 ρ_f は、それぞれ流体の密度および粒子の真密度、 ν_f は流体の動粘性係数、 d_p はトレーサの粒子径を表す。また、 S は密度比を、 Ns は無次元周波数を意味する。 f_1 および f_2 は位相遅れに関するパラメータである。表 a-1.1 にはトレーサ粒子である歯科用石膏の真密度および

平均粒径の値が、表 a-1.2 には計算の際に仮定した各温度に対する空気の密度および動粘性係数の値⁽³⁾が示されている。

図 a-1 に、周波数 f を変化させた場合の各条件における振幅比 η の関係を示す。横軸は周波数 f [kHz] を、縦軸は振幅比 η [%] を表す。また、図中の太線は 20 °C の空気を、細線は 1600 °C の高温空気を仮定し計算した場合である。

図を見ると、20 °C の空気を仮定し計算した場合（赤色の太線）、 $f = 0.1$ kHz 付近において PIV 計測のトレーサ粒子として用いた歯科用石膏粉末は、振幅比 $\eta = 70$ % と比較的高い追随性を有していることがわかる。一方、1600 °C の高温空気を仮定し計算した場合（赤色の細線）は、振幅比 $\eta = 90$ % 以上となり高い追随性を有することが認められる。

ちなみに参考までに、PTV 計測を行う際に用いた PET 粒子の追随性に関して、 $d_p = 100$ μm （緑色の線）および 200 μm （青色の線）の場合を例に挙げ、図中に併記しておく。

Table a-1.1 Properties of the plaster powder
(20 °C, 1 kgf/cm²)

Tracer	d_p μm	ρ_p kg/m ³
Plaster powder	20	1250

Table a-1.2 Properties of air (1 kgf/cm²)

Temp. °C	ρ_f kg/m ³	$\nu_f \times 10^{-4}$ m ² /s
20	1.166	0.156
1600	0.183	3.31

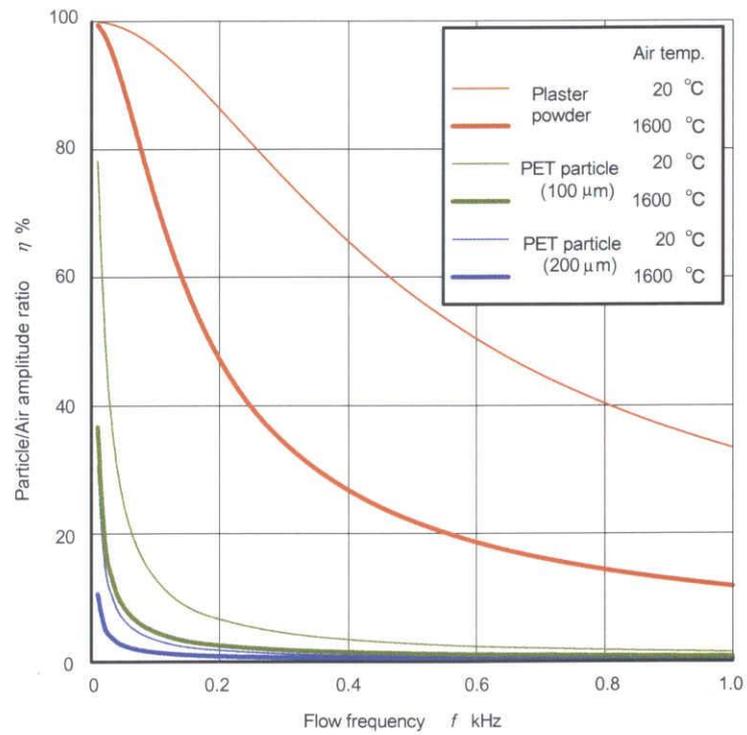


Fig. a-1 Relationship between f and η

(a-2) 焦点深度に関する検討

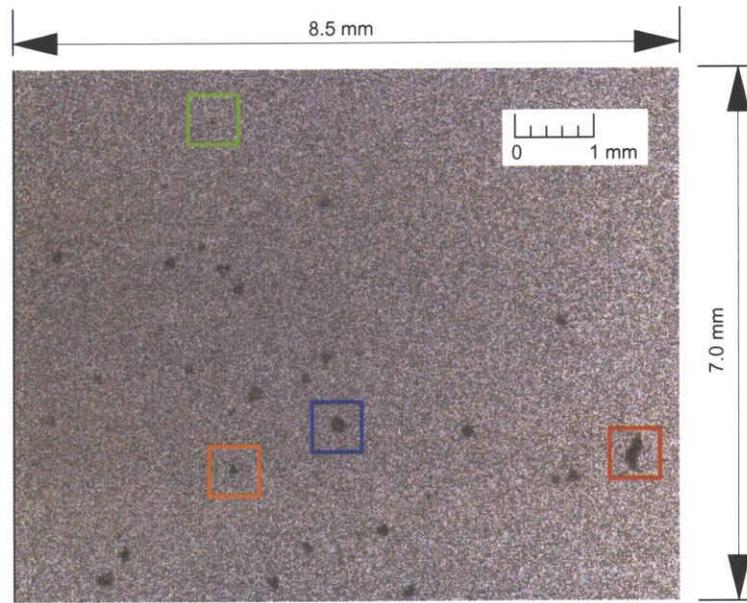
第3章の高速で飛行中のPET微粒子の拡大画像撮影において、得られる画像の奥行き方向（焦点深度）に関して検討した。本撮影を行うにあたり、まずCCDカメラを固定し、粒子を塗したプレパラートの中心軸を通る軸方向断面と平行になるように設置して下側からレーザー光を照射し、ピントの合った状態からプレパラートを奥行き方向（上下方向）に変化させて事前に検証した。

図 a-2 に、焦点深度の検証結果を示す。図 a-2 (a) は、本撮影法によって撮影された画像の一例を表している。撮影領域は横 8.5 mm、縦 7.0 mm に相当する。一方図 a-2 (b) は、図 a-2 (a) 中の赤、青、橙および黄緑枠で囲まれた粒子に着目して、焦点深度を変化させたときのそれぞれの位置での拡大写真を示している。図中の上側に示した数値は、奥行き方向に変化させた距離（上方向が+、下方向が-に相当）を意味する。

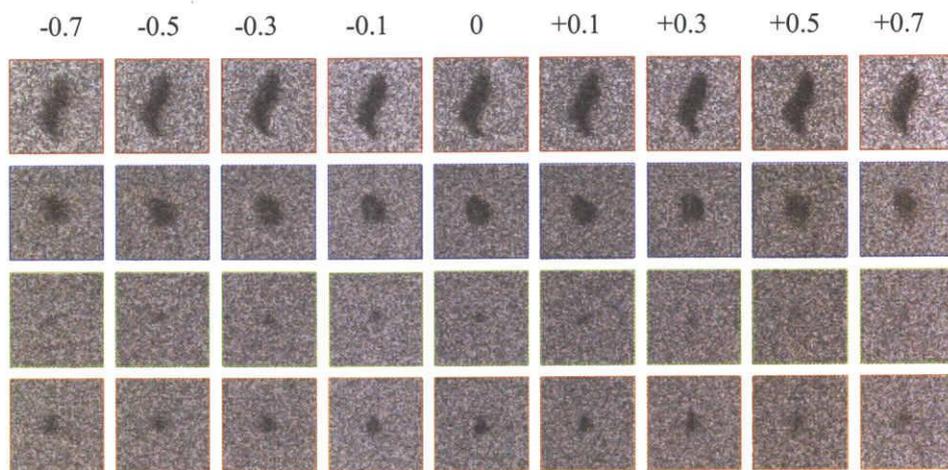
図 a-2 (a) を見ると、撮影画像内には大小さまざまな形状を持つ粒子が観察され、また、ピントの合った粒子、合っていない粒子についても画像から容易に判断できる。

一方、図 a-2 (b) から、奥行き方向による微粒子の大小の誤差は小さいが、微細な粒子ほど焦点位置から外れると見えなくなる傾向にある。また粒子の大きさによって異なるが、少なくとも ± 0.5 mm 程度までなら粒子形状の把握が可能であり、さらに明瞭な粒子を認識できる範囲は、わずかに ± 0.1 mm 程度であることがわかる。

このように、焦点深度が浅いため、奥行き方向にずれた微粒子の影はほとんど写らないと考えられる。また写ったとしても、焦点の合っていない微粒子は肉眼で容易に判断でき、形状観察および粒子径計測を行う際、解析画像として採用しないことで画像解析精度を保った。



(a) An example of PET-particles images



(b) Estimation of the depth of focus (Unit : mm)

Fig. a-2 Experimental results of the depth of focus

(b) 第4章に関する付録

(b-1) r_m の評価に関する検討

第4章で述べた加熱遅れ期間の取扱いを簡単化するための r_m の評価に関して、以下に述べる。
『表面温度が融解点になった後も固相を維持したまま加熱が進行し、粒子外殻部分の融解温度以上の超過熱量と融解点に達しない粒子内殻部の不足熱量が等しくなった時刻を固体加熱期間の終了とみなし、この時点で改めて粒子温度を融解温度に等しく均一である』と記載されている条件を数式化し整理すると、

$$\int_0^r 4\pi r^2 [T_m - T(t, r)] dr = \int_r^R 4\pi r^2 [T(t, r) - T_m] dr \quad \dots\dots\dots (b-1.1)$$

となり、共通項をそれぞれまとめると次式が得られる。

$$\int_0^R 4\pi r^2 T(t, r) dr = \frac{4\pi R^3 T_m}{3} \quad \dots\dots\dots (b-1.2)$$

本来なら、式 (b-1.2) を満足する時間が加熱時間になり、無条件には本文中の式 (4.12) を導出することはできない。また、粒子内の温度分布を与える式 (4.5) および (4.8) を式 (b-1.2) に代入して積分方程式を解くと、極めて複雑な級数解が得られる。しかしながら、第4章で導入された簡単化のための種々の仮定を考慮すると、この級数解を採用することはそれほど大きな意味はないと考えられる。

このような観点から、以下のようなさらに取扱いを簡単化するための仮定を導入した。すなわち、式 (b-1.1) において、粒子内殻部の融点までの不足温度 $[T_m - T(t, r)]$ と粒子外殻部の融点以上の超過温度 $[T(t, r) - T_m]$ を、それぞれ平均不足温度差： ΔT_u および平均超過温度差： ΔT_e で近似的に表現し、両者が互いに等しいと仮定する。そうすると、式 (b-1.1) の変数は半径： r のみになり、容易に第4章中の式 (4.12) が得られる。

ちなみに、先ほどの級数解の第10項までを考慮して得られた加熱時間と、本章中の式 (4.12) を導いて得られる加熱時間を比較した結果を、雰囲気設定温度 $T_g = 1600^\circ\text{C}$ とした場合の固体加熱時間を例にとって図 b-1 に示す。図中の曲線は式 (b-1.2) で求められた PET 粒子と PE 粒子の固

体加熱終了時の粒子内温度分布を、初期粒子径をパラメータとして示し、直破線はそれぞれ PET 樹脂と PE 樹脂の融点を示します。また、上向きの矢印は式 (4.12) で決定される半径位置： r_m を、温度曲線先端の○印は固体加熱時間終了時の粒子表面温度を意味します。図 b-1 から、温度曲線と融点の交点と、矢印と融点の交点の位置との差は極めて小さく、加熱時間に現れる差は PET 樹脂粒子の場合で高々2.4 %、PE 樹脂粒子の場合で高々1.6 %にすぎないことがわかる。また、半径の 3 乗の重みを考慮すると平均不足温度差と平均超過温度差にも僅かな差しか存在しないこと、したがって、上記の仮定がほぼ妥当であることが理解できる。また、固体加熱時間終了時の粒子表面温度が PET 粒子で 326 °C、PE 粒子で 150 °C となることもわかる。なお、液体加熱時間に関してもほぼ同様の傾向であり、加熱時間に見られる誤差は PET 粒子の場合で 2.6 %、PE 粒子の場合で 1.3 %となっている。

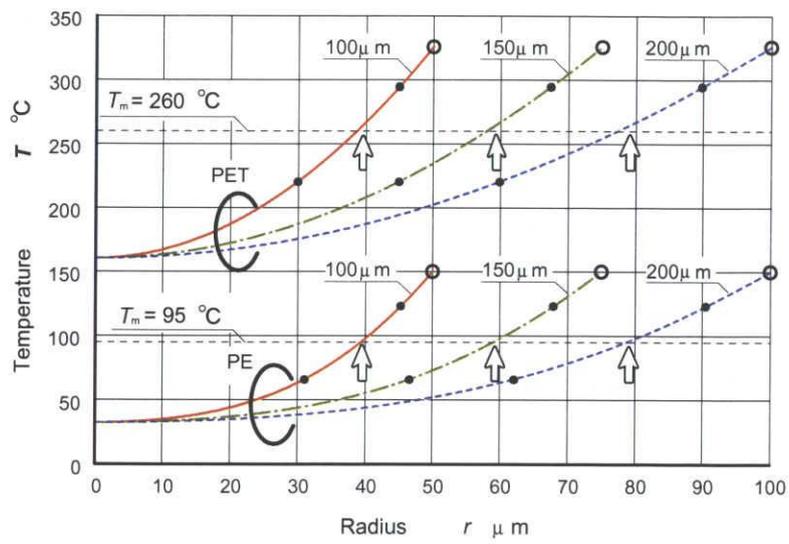


Fig. b-1 Comparison of r_m with series solution

(c) 第 8 章に関する付録

(c-1) 固形残留粒子内の空洞に関する検討

第 8 章の図 8.6 に示した顕微鏡写真において、二重の円形をしたいくつかの固形残留 PET 微粒子の存在が確認できる。これらの粒子は内部が空洞になっている可能性がある。これに関しては、粒子の断面形状が写っているのではないかと推察される。

そこで、図 8.6 (b) に示した $d_m = 153 \mu\text{m}$ の固形残留 PET 微粒子を代表例とし、図 c-1 および c-2 を用いて詳細に観察し簡単に検討を行った。図 c-1 の左側は倍率を 40 倍に、右側は倍率を 100 倍に設定されている。左側の写真に示した赤枠は右側に示した撮影領域に相当する。右側の上段には粒子手前の表面近傍に、下段には粒子奥の表面近傍に、そして中段にはその中間に焦点位置を合わせた写真である。

右側の 3 枚の写真から、各焦点位置における粒子の見え方が顕著に変化していくことが知れる。上段と下段に示した写真から、粒子は球状の外形を有しているように見えるのに対して、中段の写真は薄肉球殻の断面形状を捉えているように見て取れる。しかし、写真だけからは完全に球殻形状であるとは確証しがたい。そこでさらに、捕集した固形残留粒子を粉碎し顕微鏡撮影を行った。撮影した顕微鏡写真を図 c-2 に示す。倍率は 100 倍に設定されている。図 c-2 中の固形残留粒子の破片形状から、粉碎前の粒子は薄肉球殻形状していたことが明確に確認できる。ちなみに、固形残留粒子を水に入れよく攪拌させたところ、水に浮かぶ粒子が多数確認された。PET 樹脂の比重は水より大きい 1.38 であることを加味すると、固形残留粒子内部が空洞になっていると考えられる。

以上の検討から、粒子内部が空洞で球殻形状である固形残留粒子の存在が明らかとなった。

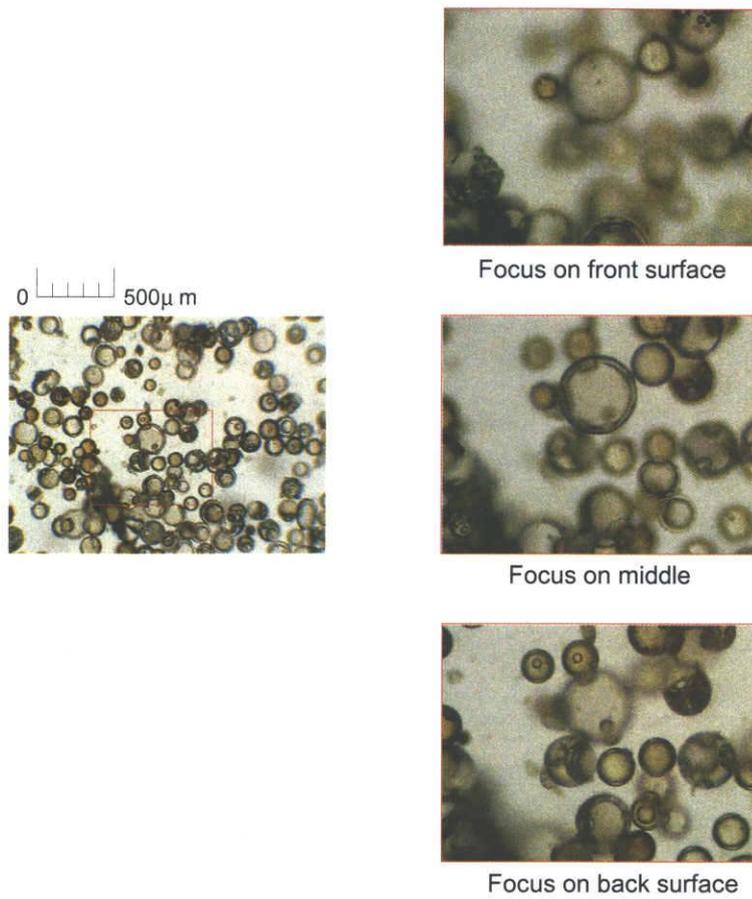


Fig. c-1 Microscopic photographs of collected unburnt PET particles
 ($v_s = 6.0$ m/s, $\phi_s = 1.0$, $v_n = 3.7$ m/s, $\phi_n = 1.0$, $m_{PET} = 8.0$ g/min)



Fig. c-2 Microscopic photograph of the grinded unburnt PET particles

付録の参考文献

- (1) 村岡正宏・熊谷輝雄, トレーサ微粒子の非定常流への追従性に関する研究(第1報, 振動流中における球形微粒子の低レイノルズ数域での運動の数値解析), 日本機械学会論文集(B編), 59-559, (1993), 713-720.
- (2) 流れの可視化学会, 流れの可視化ハンドブック, (1986), 163, 朝倉書店.
- (3) 日本機械学会, 伝熱工学資料(改訂第3版), (1975), 300.

本論文に関する学術論文，国際学会発表 および国内講演論文

学術論文

- (1) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生
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
(PET樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性)
An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin
(Combustion Characteristics of PET-Resin Powder in a Ceramic Kiln Furnace)
日本機械学会論文集 (B 編), 71-701, (2005-1), 357-364.

- (2) R. Yamakita, K. Miura, Y. Ishino and N. Ohiwa
An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin
(Combustion Characteristics of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature
Oxidizing Atmosphere)
JSME International Journal (Series B), 48-1, (2005-2), 83-91.

- (3) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa
Appearances of Multiple Micro Explosions, Micro Jets and Micro Diffusion Flames around an
Abrupt Heated Micro PET-Resin Particle
Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion
(2005-7), 209-212, Adelaide, South Australia, Australia.

- (4) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生
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
(プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の球対称一次元解析)
An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin
(Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic-Resin Particle)
日本機械学会論文集 (B 編), 71-708, (2005-8), 2154-2161.

- (5) 山北龍児・石野洋二郎・加藤正樹・大岩紀生
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
(PET 樹脂粉末の助燃率およびメディアン直径が炉内燃焼特性に及ぼす影響)
An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin
(Effects of Auxiliary Rate and Median Diameter of PET-Resin Powder)
日本機械学会論文集 (B 編), 71-711, (2005), 2792-2799.
- (6) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生
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
(バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の
画像計測)
An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin
(PIV/PTV Measurements of Flow Characteristics and Appearances of Flying PET-particles
in the Improved Industrial Burner)
日本機械学会論文集 (B 編), 掲載決定, 論文 No. 05-0342.
- (7) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生
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)
An Investigation on Thermal Recycling of Recycled Plastic Resin
(Optical Analysis of Abrupt Heating Characteristics of a Micro Plastic-Resin Particle)
日本機械学会論文集 (B 編), 校閲中, 論文 No. 05-0698.

国際学会発表 (_____ ; 講演者)

- (1) Y. Ishino, R. Yamakita, S. Kuroda, M. Kato, M. Yasuda and N. Ohiwa
Combustion Characteristics of a Twin Fuel Ceramic Burner Using Recycled
PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel
Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference
(2003-3) , CD-ROM: Paper No. TED-AJ03-181, Hawaii Island, Hawaii, U.S.A.

- (2) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa
High-speed Direct Microscopic Observations of Ignition and Burning Processes
of a Micro Plastic-Resin Particle Under Stationary and Abrupt Heating
Proceedings of the 1st International Symposium on Micro and Nano Technology
(2004-3) , CD-ROM: Paper No. XXXIV-C-04, Honolulu, Hawaii, U.S.A.

- (3) R. Yamakita, K. Miura, Yojiro Ishino and Norio Ohiwa
Burning Processes of Polyethylene Terephthalate Resin Powder in a High Temperature
Oxidizing Atmosphere
Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation
(2004-9) , 1531-1538, Pisa, Toscana, Italy.

- (4) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa
Spherically Symmetric Analysis of Abrupt Heating Processes of a Micro Plastic Resin Particle
Proceedings of the 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference
(2005-3) , CD-ROM: Paper No. KD.08, Jeju, Korea.

- (5) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa
Optical Analyses of Burning Processes of Recycled Plastic-Resin Powder
Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena
(2005-8) , CD-ROM: Paper No. 074, Prague, Czech Republic.

国内講演論文(_____ ; 講演者)

- (1) 石野洋二郎・山北龍児・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生
廃 PET 樹脂粉末を助燃料とする窯業用バーナーの燃焼特性
(Combustion Characteristics of Ceramics Burners Using Recycled PET-Resin Powder as an Assist Fuel)
東海支部第 51 期総会講演会論文集 No.023-1, (2002-3), 193-194.
- (2) 石野洋二郎・黒田茂男・山北龍児・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生
廃 PET 樹脂粉末を助燃料とする窯業用バーナーの燃焼特性
(Combustion Characteristics of a Ceramic Burner Using Recycled PET-Resin Powder as an Assist Fuel)
第 12 回環境工学総合シンポジウム 2002 講演論文集 No.02-14, (2002-7), 401-404.
- (3) 石野洋二郎・山北龍児・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生
廃 PET 樹脂粉末を助燃料とする窯業用バーナーの燃焼特性
(燃焼挙動における PET 粉末の置換率の影響)
Combustion Characteristics of Ceramics Burners Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel
(Effects of Replacement Rate of PET-Powder on Combustion Behavior)
熱工学講演会 2002 講演論文集 No.02-22, (2002-11), 159-160.
- (4) 石野洋二郎・黒田茂男・山北龍児・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生
廃 PET 樹脂粉末を助燃料とする窯業用バーナーの燃焼特性
(燃焼挙動に及ぼす PET 置換率および PET 粉末供給管長さの影響)
Combustion Characteristics of Ceramics Burners Using Recycled PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel
(Effects of Replacement Rate of PET-Powder and Length of PET-Powder Supply Nozzle on Combustion Behavior)
第 40 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002-12), 61-62.

- (5) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・安田益雄・大岩紀生
廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル
(廃棄 PET 樹脂粉末の置換率が燃焼挙動に及ぼす影響)
Energy Recycling of Recycled Plastic-Resin Powder
(Effects of a Replacement Rate of PET-Powder on Combustion Behavior)
第 13 回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集 No.03-10, (2003-6), 326-329.
- (6) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・大岩紀生
廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル
(廃棄 PET 粉末および廃棄 PE 粉末使用時の燃焼特性の比較)
Energy Recycling of Recycled Plastic-Resin Powder
(Comparison of Combustion Characteristics Using Recycled PET- and PE-Resin Powder)
第 13 回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集 No.03-10, (2003-6), 330-333.
- (7) 山北龍児・石野洋二郎・佐藤毅・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生
廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル
(樹脂粉末の種類と粒径の影響)
Energy Recycling of Recycled Plastic-Resin Powder
(Effects of Resin Powder Construction and Diameter on Combustion Properties)
2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No.03-1, (2003-8), 21-22.
日本機械学会 熱工学部門 講演論文表彰を受賞
- (8) 佐藤毅・山北龍児・石野洋二郎・黒田茂男・加藤正樹・安田益雄・大岩紀生
廃プラスチック樹脂粉末のエネルギーリサイクル
(PET 粉末粒径の影響)
Energy Recycling of Recycled Plastic-Resin Powder
(Effects of PET-Powder Diameter on Combustion Behavior)
2003 年度年次大会講演論文集 Vol.III No.03-1, (2003-8), 23-24.

- (9) 山北龍児・石野洋二郎・加藤慎也・大岩紀生
炭酸ガスレーザー加熱による単一プラスチック粒子の燃焼挙動の高速度顕微鏡観察
High Speed Microscopic Observations of Combustion Processes of a Single Plastic Particle under
Rapid Heating by a CO₂-laser
熱工学コンファレンス 2003 講演論文集 No.03-30, (2003-11), 495-496.
- (10) 山北龍児・三浦勝也・石野洋二郎・大岩紀生
環状火炎によって形成された高温酸化性雰囲気を用いたペット樹脂粉末の
エネルギー・リサイクルの試み
An Attempt at Energy-Recycling of Wasted PET-Resin Powder Using High-Temperature and
Oxidizing Atmosphere Established by the Annular Flame
第 14 回環境工学シンポジウム 2004 講演論文集 No.04-10, (2004-7), 227-230.
- (11) 山北龍児・佐藤毅・石野洋二郎・大岩紀生
PET 樹脂粉末を助燃料とする工業用バーナーの特性
(流動場と粒子径・速度の画像計測)
PIV/PTV Measurements of Reactive Flow and Burning Process of PET Particles in an Industrial
Burner Using PET-Resin Powder as an Auxiliary Fuel
2004 年度年次大会講演論文集 Vol.3 No.04-1, (2004-9), 7-8.
- (12) 加藤慎也・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生
プラスチック樹脂微粒子の急速加熱過程の高速度顕微鏡観察
High-Speed Microscopic Observation of Abrupt Heating Processes
of a Micro Plastic-Resin Particle
2004 年度年次大会講演論文集 Vol.3 No.04-1, (2004-9), 51-52.
- (13) 山北龍児・加藤慎也・Maung Kaung Myat Tun・加藤雄貴・西野光祐
石野洋二郎・大岩紀生
廃棄 PET 樹脂粉末を助燃料とする工業用バーナーの燃焼特性
(燃焼流動場とそこにおける粒子径挙動・速度の画像計測)

Combustion Characteristics of an Industrial Burner Using Recycled PET-Resin Powder
as an Auxiliary Fuel

(PIV/PTV Measurements of Reactive Flow and Burning Process of PET Particles)

第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004-12), 433-434.

- (14) 三浦勝也・山北龍児・寺本啓祐・石野洋二郎・大岩紀生

環状火炎によって形成された高温酸化性雰囲気における PET 粉末の燃焼特性

Burning Characteristics of PET-powder in High Temperature Oxidizing Atmosphere

Stabilized by the Annular Burner

第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2004-12), 435-436.

- (15) 山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生

廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の数値予測の試み

An Approach to Numerical Prediction of Unburnt Rate in Recycled

Plastic-Resin Powder Combustion

中国四国支部第 43 期総会・講演会講演論文集 No.055-1, (2005-3), 215-216.

- (16) 加藤雄貴・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生

廃棄プラスチック樹脂粉末燃焼における未燃率の低減に関する実験的アプローチ

An Experimental Attempt at Reducing Unburnt Particle Emission

in the Recycled PET-Resin Powder Combustion

第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No.05-13, (2005-7), 181-184.

- (17) 寺本啓祐・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生

環状火炎バーナによって形成された高温酸化性雰囲気における PET 樹脂粉末の燃焼特性

Burning Properties of Wasted PET-Resin Powder Using High-Temperature and Oxidizing

Atmosphere Stabilized by the Annular Flame

第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集 No.05-13, (2005-7), 185-189.

- (18) 西野光祐・山北龍児・石野洋二郎・大岩紀生
急速加熱された単一 PET 微粒子周りにおける多重微小爆発および微小噴流挙動
Multiple Micro Explosions, Micro Jets Properties around
an Abruptly Heated Micro PET-Resin Particle
熱工学コンファレンス 2005 講演論文集 No. 05-17, (2005-11), 89-90.
- (19) 山北龍児・寺本啓祐・石野洋二郎・大岩紀生
高温酸化性領域における PET 粉末燃焼特性
Combustion Characteristics of PET-Resin Powder in
the High Temperature Oxidizing Atmosphere
熱工学コンファレンス 2005 講演論文集 No. 05-17, (2005-11), 73-74.
- (20) 山北龍児・西野光祐・石野洋二郎・大岩紀生
急速加熱された単一プラスチック微粒子挙動の光学的観察
Optical Observations of Abrupt Heating Characteristics of
a Micro Plastic-Resin Particle
第 43 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2005-12), 292-293.

国内外ポスター発表(_____ ; 講演者)

- (1) R. Yamakita, Y. Ishino and N. Ohiwa

High-Speed Microscopic Observations of Combustion Processes of
a Micro Plastic Particle Under Abrupt Heating

The 30th International Symposium on Combustion; Abstracts of Work-In-Progress Posters
(2004-7) , 427, Chicago, Illinois, U.S.A.

- (2) 山北龍児・加藤慎也・石野洋二郎・大岩紀生

炭酸ガスレーザー加熱による単一プラスチック微粒子の燃焼挙動の高速度顕微鏡観察

High Speed Microscopic Observations of Combustion Processes of a Single Plastic Particle
under Rapid Heating by a CO₂-laser

第41回燃焼シンポジウム講演論文集, (2003-12), 149-150.

日本燃焼学会 ベストプレゼンテーション賞を受賞

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、始終ご懇切丁寧なる御指導と有益なる御助言を賜りました名古屋工業大学 大学院工学研究科 機能工学専攻 教授 大岩 紀生 博士に心から深く感謝の意をささげます。

本論文を推敲するにあたり、貴重なご指摘を賜りました同大学 大学院工学研究科 機能工学専攻 教授 太田 安彦 博士，同大学 大学院工学研究科 物質工学専攻 教授 荒木 修喜 博士に御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、常日頃よりご懇切な御指導と御助言，また多大なる御助力を賜りました同大学 大学院工学研究科 機能工学専攻 助教授 石野 洋二郎 博士に心から厚く感謝申し上げます。

第2章『廃棄 PET 樹脂粉末の窯業用助燃料としての燃焼特性』の研究を遂行するにあたり、共同研究者である黒田 茂男 氏（当時，同大学大学院生）には昼夜を問わず実験に協力していただき、愛知県産業技術研究所 加藤 正樹 氏，(株)成田製陶所 安田 益雄 氏には窯業に関する貴重な御支援と御教示をいただきました。心から感謝の意を表します。また本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の平成13年度および14年度産業技術研究助成事業研究助成（プロジェクト ID：01B62012c）の交付を受けました。ここに記して、謝意を表します。

第3章『バーナ内部の燃焼ガスと PET 粉末の流動および飛翔 PET 粒子の形状と直径変化の画像計測』の研究を遂行するにあたり、共同研究者である佐藤 毅 氏（当時，同大学大学院生）の多大なご尽力を賜ったことに対し、心から感謝の意を表します。

第5章『環状バーナによって形成された高温酸化性雰囲気における PET 樹脂粉末の燃焼特性』の研究を遂行するにあたり、共同研究者である三浦 勝也 君，寺本 啓祐 君（いずれも当時，同大学大学院生）に献身的な協力を得ました。心より感謝いたします。

第6章『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』の研究を遂行するにあたり、共同研究者である加藤 慎也 君，西野 光祐 君（いずれも当時，同大学大学院生）に多大な協力を得たことに対し、心より感謝いたします。

第7章『廃棄 PET 樹脂粉末燃焼における未燃率の低減に関する実験的アプローチ』の研究で

は、共同研究者である加藤 雄貴 君（当時、同大学大学院生）に研究に対して懸命に取り組んでいただきました。心より感謝いたします。

大岩・石野研究室 秘書 木内 朋子 女史には、常日頃より本研究を円滑に遂行できるような環境を整えていただきました。心から感謝の意を表します。また、大岩・石野研究室にて共に研究生活を送らせていただいた大学院生ならびに学部生の諸兄には多岐にわたって御協力、御援助していただきました。ここに記して感謝いたします。

最後になりましたが、今日まで陰ながら多大なるご支援をしていただいた両親である父 山北 英雄，母 波津文に心から深く感謝の意をささげます。