



# 噴霧燃焼における噴霧挙動と乱れ構造に関する研究

河原, 伸幸

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1997-03-31

(Date of Publication)

2008-05-21

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1655

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3129765>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001655>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	かわ はら のぶ ゆき 河 原 伸 幸	（岡山県）
博士の専攻分野の名称	博 士（工 学）	
学位記番号	博い第106号	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の日付	平成9年3月31日	
学位論文題目	噴霧燃焼における噴霧挙動と乱れ構造に関する研究	
審 査 委 員	主査 教授 中 島 健	
	教授 藤 井 照 重	教授 神 吉 博
	教授 濱 口 八 朗	

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、オイルバーナーが形成する噴霧火炎の火炎安定性やNO<sub>x</sub>生成に最も影響のある循環流領域における噴霧構造、噴霧の乱流混合および噴霧燃焼構造を解明するために、噴霧油滴の飛行特性と炉内の燃焼特性の関係、噴霧の分散過程と乱流場との関係、噴霧油滴のクラスター構造によって生じる群燃焼形態について実験と数値シミュレーションにより行った研究について述べたものである。

ボイラ等の油燃料を用いた工業用の燃焼炉においては、これに設置されるオイルバーナーが炉の性能に重要な役割を果たしている。オイルバーナーにおける噴霧燃焼特性は、燃料の微粒化、燃料液滴の分散、蒸発、周囲空気との混合、群燃焼、ガスと液滴との相互作用などに支配される。特に、小型オイルバーナーとして多く用いられている循環流保炎方式では、乱れによる噴霧の分散状態が、火炎長さ、NO<sub>x</sub>排出などに影響を及ぼしている。従って、設計を行う際にも、炉内噴霧燃焼シミュレーションを行う際にも、入口条件となる（保炎器を含めた）バーナー付近の流れと噴霧挙動の詳細な把握は不可欠である。本研究においては、噴霧火炎の火炎安定性やNO<sub>x</sub>生成に最も影響のある循環流領域において、噴霧構造および噴霧の乱流混合を解明するために、まず、噴霧油滴の飛行特性と炉内の燃焼特性の関係を明らかにした。次に、噴霧の分散過程と乱流場との関係に着目し、噴霧油滴のクラスター構造によって生じる群燃焼形態を推測した。その際、位相ドップラ法（PDA）を用いた計測システムの最適化および燃焼場へ適用する際の問題点に言及した。また、数値解析において、燃焼乱流場における噴霧挙動を、得られた計算結果と実験結果とを比較することにより、モデルの妥当性と適用性について検討を行った。本研究により得られた結果を以下に要約する。

#### 第1章 緒論

概要を述べた後、従来行われてきた理論ならびに実験的研究について言及した後、本論文で取り上げるテーマの設定を行い、論文全体の構成をまとめた。

#### 第2章 実験装置および計測システム

噴霧火炎内の噴霧挙動と乱れ構造解明に有力な手段であり、レーザー応用計測の代表であるPDA計測システムについて述べた。噴霧火炎にFLDVシステム、PDA計測システム、レーザーシート法を適用するため、光学系、信号処理系について検討を行い、各々の計測システムの構築を行った。特にPDA計測システムにおいては、燃焼場での油滴の粒径・流速計測の誤差要因を検討し、システムの最適化を行った。また、PDAおよびレーザーシート法などのレーザー計測の利点を最大限に活かせる実用オイルバーナーを用いた噴霧燃焼炉の設計、製作を行った。レーザー計測用の噴霧燃焼炉を設計、製作することにより、特にバーナー近傍において噴霧液滴の特性を詳細に把握することが可能になった。また、最適化を行ったPDA計測システムを用いることにより、燃焼状態で最大25kHzの高データレートで高精度な計測が可能になり、噴霧燃焼火炎中の乱流渦、噴霧のクラスター構造および群燃焼形態を把握することができた。さらに、PDA計測を燃焼場に適用した場合、流速の測定値は火炎の影響を受けず、実際の値を示しているが、粒径の測定値に誤差が生じることが明らかになった。この誤差項目は、(1)火炎面での屈折率変化、(2)屈折率変化による計測位置のずれ、(3)油滴内の屈折率変化、(4)油滴周りの蒸気ガスの屈折率変化など7項目にわたり、今後は誤差要因を絞った実験的および理論的研究による誤差評価が必要である。

### 第3章 噴霧挙動と燃焼特性との相関

噴霧火炎内の基礎的な噴霧挙動を把握するために、油滴の飛行特性と炉内の燃焼特性の関係を明らかにした。噴霧燃焼火炎として、工業的に汎用性のあるガンタイプバーナーが形成する噴霧火炎を対象とした。このバーナーにおいては、バッフルプレートが形成する循環流により保炎を行う形式が使用されている。噴霧燃焼場において、PDAを用いて燃料油滴の粒径および流速の同時計測を行い、油滴の空気力学的特性に着目し、噴霧油滴挙動の把握を行った。炉内の燃焼特性と油滴の飛行特性の関係をPDAによる燃焼火炎場での噴霧計測から実験的に検討した。燃焼による体積膨張により油滴が受ける影響は粒径の大きさにより異なり、小さい油滴は加速されるが、大きな油滴は噴射された初速度により飛行していることが明らかになった。噴霧を油滴径により分類し、粒径群ごとの噴霧の空気力学的特性を把握することは、噴霧挙動を把握する上で、非常に有用であることが分かった。油滴の気流に対するすべり速度から相対レイノルズ数を求め、大きな油滴ほどCD値は小さく、流れを貫通しやすいことが分かった。また、非燃焼時と同じく、30~50 $\mu\text{m}$ の油滴を境にして噴霧油滴挙動は異なり、30 $\mu\text{m}$ 以下の油滴はバッフルプレート後方の循環流に取り込まれ、保炎に寄与し、50 $\mu\text{m}$ 以上の油滴は噴霧のコーンとプレート外側からの空気流と衝突している領域で蒸発し、下流の大きな輝炎を形成していることが明らかになった。

### 第4章 噴霧の分散過程と乱れ構造

噴霧火炎では保炎器後流付近での強い乱れや大規模構造渦（コヒーレント渦）により、噴霧のクラスター構造が形成され、群燃焼をしていると考えられる。そこで、噴霧の分散過程と周囲燃焼流が形成する乱流場との関係に着目し、PDA計測結果の時系列解析を行った。噴霧の存在する流れ場の乱流渦に着目し、その特性値である積分スケールからStokes数を算出し、油滴の局所的な追従／貫通するクライテリアを求めた。噴霧と周囲燃焼乱流との相互作用の結果発生する噴霧油滴のクラスター構造を把握し、噴霧中心部において30 $\mu\text{m}$ 以下の油滴がコヒーレントな乱流渦に取り込まれることにより、クラスター構造を形成していることが明らかになった。また、クラスターの大きさはコヒーレントな乱流渦構造により決定されることが明らかになった。これに対し、噴霧のコーン部においては

油滴はクラスターを形成せず、 $50\ \mu\text{m}$ 以上の大きい油滴が個々に独立した運動を行い、循環流を貫通して飛行していることが分かった。また、噴霧のクラスター構造の結果、噴霧火炎は群燃焼を形成していることが分かっている。Chiuらは、油滴の蒸発速度と拡散速度の比の目安である群燃焼数 $G$ の大きさにより、(1)単滴燃焼、(2)内部群燃焼、(3)外部群燃焼、(4)外殻燃焼の4つの形態に分類されることを示している。本研究においては、PDA計測結果を用いてChiuらの提唱している群燃焼数 $G$ を推算し、コヒーレントな乱流渦構造によって形成される群燃焼形態を推測した。本研究で得られた群燃焼数はChiuらの理論解析結果と一致し、噴霧中心部においては、外部群燃焼と内部群燃焼の遷移状態にあることを明らかにした。

## 第5章 噴霧燃焼シミュレーション

燃焼器設計に寄与できる数値計算コードの開発を目指して、実用計算に用いられる汎用的なモデルを応用して、燃焼乱流場における噴霧挙動の数値シミュレーションを行った。その際、得られた計算値と実験値を比較することにより、循環流領域内の乱流特性と噴霧の飛行特性、乱流混合特性、燃焼特性に着目し、用いたモデルの妥当性と適用性について検討を行った。計算対象は前章までと同一のバーナーとし、2次元乱流場を $k-\varepsilon$ モデルを用いて計算した。噴霧に対しては、個々の油滴について飛行計算を行い、ガスと油滴との相互作用にPSI-Cellモデルを用いて評価した。ここでは、入口条件としてPDAによる油滴径、粒子速度、分散の測定結果を与え、バッフルプレート後方の循環流における解析結果を得た。燃焼反応には渦消散モデルを、放射伝熱には放射熱線法を用いた。数値解析結果と実験結果との比較により幾つかの油滴径群ごとのグループに分けた燃料油滴の挙動と、循環流との乱流混合に着目し、循環流を伴う乱流場への噴霧の貫通と巻き込みを詳細に検討した。また、炉内全体におけるガス流動と燃焼特性( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ )の定量的な把握を行うために、実験的に有用性を示された対流フラックスを用いてバーナー近傍と炉全体の燃焼特性を調べた。その結果、燃焼時のバーナー近傍の2次元ガス流動ベクトルを実験と計算で求め、循環流内の乱流混合特性を比較した。計算ではバッフルプレート外周からの循環流内への巻き込みを低く見積もってしまうため、後流での縮流が十分に予測できなかった。PDAによる実験結果を数値解析の初期条件に用いることにより、噴霧火炎内で定量的な噴霧油滴挙動を把握することが可能になった。バーナー近傍、特に循環流内での油滴径群に分けた噴霧の飛行特性の計算結果は、実験結果とよく一致した。循環流に巻き込まれる油滴と貫通するものとの境界は、実験値と同じくほぼ $30\sim 50\ \mu\text{m}$ であることが分かった。バッフルプレートにより形成される循環流は油滴の空力特性を大きく2つに分けており、油滴分散の役割を果たしていると同時に、火炎を安定化させ、着火性向上の役割を果たしていることが明らかになった。また、炉内の燃焼特性を把握するために、対流フラックス値を用いると、火炎内の流れと自己再循環流による流れと区別でき、火炎の安定化に影響のある自己排ガス再循環流による熱や酸化剤の供給を把握することができた。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、オイルバーナーが形成する噴霧火炎の火炎安定性や $\text{NO}_x$ 生成に最も影響のある循環流領域における噴霧構造、噴霧の乱流混合および噴霧燃焼構造を解明するために、噴霧油滴の飛行特性と炉内の燃焼特性の関係、噴霧の分散過程と乱流場との関係、噴霧油滴のクラスター構造によって生じる群燃焼形態について実験と数値シミュレーションにより行った研究について述べたものである。

オイルバーナーにおける噴霧燃焼特性は、燃料の微粒化、燃料液滴の分散、蒸発、周囲空気との混合、群燃焼、ガスと液滴との相互作用などに支配される。特に、小型オイルバーナーとして多く用いられている循環流保炎方式では、乱れによる噴霧の分散状態が、火炎長さ、NO<sub>x</sub>排出などに影響を及ぼしている。本論文は、噴霧燃焼火炎の循環流領域における粒子の分散過程と乱流火炎構造について研究したものである。

以下に各章の概要を述べる。

第1章は緒論であり、概要を述べた後、従来行われてきた理論ならびに実験的研究について言及した後、本論文で取り上げるテーマの設定を行い、論文全体の構成をまとめている。

第2章では使用した実験装置および計測システムについて述べている。噴霧火炎内の噴霧挙動と乱れ構造解明に有力な手段であるレーザー応用計測（FLDVシステム、PDA計測システム、レーザーシート法）について、光学系・信号処理系について検討を行い、各々の計測システムの構築を行っている。特にPDA計測システムにおいては燃焼場での油滴の粒径・流速を計測する際の誤差要因を検討し、流速の測定値は火炎の影響を受けず、実際の値を示しているが、粒径の測定値に誤差が生じることを明らかにするとともに、計測システムの最適化を行っている。最適化を行ったPDA計測システムを用いることにより、燃焼状態で今まで難しいとされていた最大25kHzの高データレートでの計測を可能にし、噴霧燃焼火炎中の乱流渦、噴霧のクラスター構造および群燃焼形態を把握するための有効な手段を構築している。

第3章では、工業的に汎用性のあるガンタイプバーナーが形成する噴霧火炎を対象として、噴霧挙動と燃焼特性との関係を明らかにしている。すなわち、噴霧燃焼場において、燃料油滴の粒径および流速の同時計測を行い、噴霧を油滴径により分類し、粒径群ごとの噴霧の空気力学的特性を検討している。その結果、燃焼による体積膨張により油滴が受ける影響は、径粒の大きさにより異なり、小さい油滴は加速されるが、大きな油滴は、すべり速度から求めた相対レイノルズ数を用いて計算したC<sub>D</sub>値が小さく、流れを貫通している。また、30~50 μmの油滴を境にして噴霧油滴挙動は異なり、30 μm以下の油滴はバッフルプレート後方の循環流に取り込まれ、保炎に寄与し、50 μm以上の油滴は噴霧のコーンとプレート外側からの空気流と衝突する領域で蒸発し、下流で主燃焼する大きな輝炎を形成していることを明らかにしている。

第4章では、噴霧の分散過程と乱れ構造を調べ、噴霧のクラスター構造や群燃焼について検討している。噴霧の分散過程と周囲燃焼流が形成する乱流場との関係に着目し、PDA計測結果の時系列解析を行っている。その結果、噴霧の存在する流れ場の乱流渦に着目し、その特性値である積分スケールからStokes数を算出し、油滴の局所的な追従／貫通するクライテリアを求めるとともに、噴霧と周囲燃焼乱流との相互作用の結果発生する噴霧油滴のクラスター構造の存在を確認し、噴霧中心部において30 μm以下の油滴がコヒーレントな乱流渦に取り込まれることにより、クラスター構造を形成していること、またクラスターの大きさはコヒーレントな乱流渦構造により決定されることが示されている。これに対し、噴霧のコーン部においては油滴はクラスターを形成せず、50 μm以上の大きい油滴が個々に独立した運動を行い、循環流を貫通して飛行していることを示している。また、噴霧のクラスター構造の結果、噴霧火炎は群燃焼を形成しており、PDA計測結果から群燃焼数を求めて、燃焼形態が、単滴燃焼や外殻燃焼ではなく、外部群燃焼と内部群燃焼の遷移状態であることを明らかにしている。

第5章では噴霧燃焼の数値シミュレーションを行っている。2次元乱流場にはk-εモデル、噴霧に対しては、個々の油滴について飛行計算を行い、ガスと油滴との相互作用にPSI-Cellモデル、乱流燃

焼モデルには総括反応による渦消散モデル，放射伝熱には放射熱線法を用いている。炉内全体におけるガス流動と燃焼特性（ $O_2$ ， $CO_2$ ）の定量的な把握を行うために，対流フラックスを用いてバーナー近傍と炉全体の燃焼特性を調べ，火炎内の流れと自己再循環流による流れを分離して，火炎の安定化に影響のある自己排ガス再循環流による熱や酸化剤供給のメカニズムについて検討している。また，燃焼時のバーナー近傍の2次元ガス流動ベクトルを実験と計算で求め，循環流内の乱流混合特性を比較し，バーナー近傍，特に循環流内での油滴径群に分けた噴霧の飛行特性の計算結果は，実験結果とよく一致し，計算の妥当性を示している。

第6章は総括である。

以上のように，本研究は定常噴霧燃焼における液滴粒子の分散過程，クラスターと大規模渦構造の関係，乱流火炎構造について明らかにするとともに，燃焼特性の実用的な評価にフラックスという概念を導入したものであり，群燃焼の存在を実用的に見つけた価値ある研究といえる。よって，学位申請者河原伸幸は，博士（工学）の学位を得る資格があると認める。