

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 量から質へ エンジン排ガス分析 September 1995 ■ No.11

2-D イメジングによる ディーゼル機関内の燃焼生成物の計測

2-D Imaging of Pollutants formed in the Combustion Chamber
of Diesel Engines

神本武征

Takeyuki KAMIMOTO

(Pages 4-9)

株式会社 堀場製作所

2-Dイメージングによるディーゼル機関内の 燃焼生成物の計測

2 - D Imaging of Pollutants formed in the Combustion Chamber of Diesel Engines

1. 燃焼研究の動向

ディーゼル機関の燃焼研究の歴史は古く、1940年代から火炎の高速撮影や分光分析が行われていた。その後、燃焼研究が急速に進展したのは、各国でディーゼル車に対する排気規制が云々され始めた1970年代の後半からである。この当時の研究の主流は、シリンダ内から燃焼ガスを直接サンプルして分析し、すすやNOといった有害成分の空間的、時間的变化を調べることであった。図1は典型的な測定例であって、ボア95mmの直接噴射式ディーゼル機関のシリンダヘッドに電磁式の高速度ガスサンプリング弁を取り付け、直接1.5mmの採取孔から約1.0msの期間、セットしたクランク角度で燃焼ガスを約0.5cc、30~300サイクルにわたってサンプル、分析した結果である。図より、すすは着火と同時に急速に生成され、ほぼ噴射終了時に最大値を示したのち酸化、消滅していくこと、最大値の1/50程度が未酸化のまま排出されること、NOについては、すすに比べて生成速度が遅く、すすが極大となる時期にクランク角度で約15°遅れて極大値をとり、その後空気に希釈されてゆるやかに濃度が低下することなどがわかる。このようなガス分析の研究により、直噴式、副室式ディーゼル機関燃焼室内の有害成分の生成と消滅の過程はおおむね理解されるに至った。

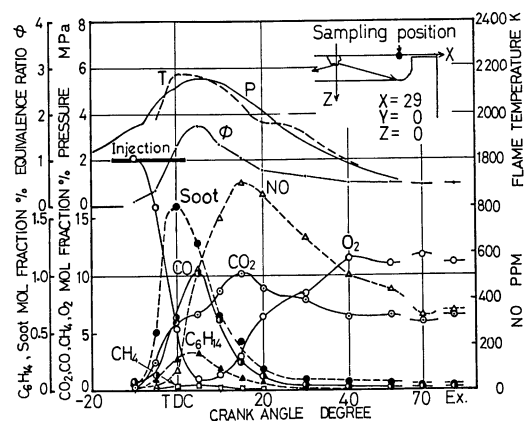


図1 ガスサンプリング法により計測された直噴式ディーゼル機関内の燃焼生成物濃度の時間履歴
Time histories of combustion products concentrations in a direct injection Diesel engine measured by a gas sampling analysis

その後、レーザードップラ流速計を始めとしてCARS法、ラマン法といったレーザー分光法をディーゼル機関の燃焼計測に応用しようとする動きが続いたが、火炎が輝炎であること、雰囲気圧力が高いことなどが障害となり信頼性のある測定結果が得られないまま今日に至っている。他方、Gosman教授(現インペリアルカレッジ)がパイオニアとなって始めた多次元数値流体モデリングがコンピュータの発達



東京工業大学工学部制御システム工学科教授
工学博士

神本 武征

Takeyuki KAMIMOTO, Dr.Eng.

<略歴>

1965年：東京工業大学助手
1981年：東京工業大学助教授
1986年：東京工業大学教授

<兼任>

1990～1992年：
航空宇宙技術研究所客員
研究官

<専門>

内燃機関の燃焼とその計測

<研究業績>

ディーゼル噴霧内の燃料粒子径と
当量比分布の定量測定，火炎温度
の画像計測，火炎内のすすとOHの
画像計測など

と呼応して急速に進展し，ある程度、理論的にディーゼル燃焼や有害成分の生成過程を追求することが可能となりつつある．アメリカではDOE (Department of Energy) の資金でKIVAを開発したロスアラモス研究所，イギリスではインペリアルカレッジ，ヨーロッパではオーストリアのAVL社などが有名である．

この間，内外のディーゼル車に対する排気規制は年を追うごとに厳しくなり，国内では1994年規制をクリアしたエンジンが市場に投入されつつある．この規制は噴射ポンプの高圧化など従来技術の延長でクリアされたが，将来の厳しい排気レベル規制を満足するには高過給，EGR，電子制御式ユニットインジェクター，脱硝触媒など高レベルな新技術の投入が避けられないものと予想される．さらに炭酸ガスによる地球温暖化というグローバルな問題が顕在化したのでディーゼル機関の持つ他種エンジンに比して高効率という優位性を維持向上させることも重要な課題となっている．

このようにディーゼルエンジンに対する社会的要求には厳しいものがあるが，燃焼現象が複雑であるため従来からのアプローチでは燃焼チューニングに限界があり，燃焼に対するより深い理解が求められている．

2. ディーゼル火炎の不均一構造と排気

従来のガスサンプリング法やLDV法などの計測法では，シリンダ内一点における組成や流速を多数サイクルにわたってサンプリングし，そのサイクル平均値の時間変化を調べていた．しかし，ディーゼル機関の燃焼は，燃料を直接エンジンシリンダ内に噴射させつつ燃焼させる，いわゆる乱流拡散燃焼であるため，火炎内はきわめて不均一な構造を有する．すなわちノズル近傍の噴霧周辺の剪断流において発達した大規模な渦によって誘引された空気と燃料蒸気が混合し，カスケード的に微小なスケールに混合してゆく過程で燃焼は進行する．このような燃焼場において有害成分の生成や燃焼過程を調べるには，サイクル平均値の時系列データだけでは現象の本質を把握することは困難であり，瞬時の濃度分布，温度分布，流速分布などを画像として観察することが有効である．

ディーゼル機関では全当量比は理論当量比より低く，いわゆる希薄混合気で燃焼が行われている．それにもかかわらず黒煙あるいは微粒子が排出され，またNOも当量比から予想されるよりも高い濃度が排出される．これらはいずれも火炎構造が不均一であることに由来しており，すすは局所的に空気不足の領域で生成され，NOは，局所的に温度の高い理論混合比の領域で生成されるものと推定されている．このように不均一な火炎構造と有害成分の生成は深く関わっていると考えられるので，火炎内成分の瞬時の2次元濃度分布を可視画像化する事が重要な計測上の課題となる．

3. エンジンにおける2次元画像計測

定常火炎内の化学成分の2次元濃度分布測定については、1970年代からレーザー誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence:LIF法)によるOH測定などが米国サンディア国立研究所を中心に始められた。一方、エンジンにおけるレーザー応用計測も進み、火花点火機関ではレーザードップラ流速計により、シリンダ内平均流速だけでなく火炎面前後の乱れの変化が測定された。またラマン散乱法やCARS法によりエンドガスや既燃ガスの温度の点測定も行われた。しかし、ディーゼル機関においては輝炎中のすすからの輻射光が妨げとなってこれらのレーザー計測法の応用は不成功に終わっている。

エンジンシリンダ内の現象解明のためにレーザー画像計測が応用され始めたのは1980年代の後半になってからである。ガソリン機関ではリーンバーンエンジンや直接噴射式エンジンの開発が世界的に活発化し、シリンダ内の混合気の分布が燃焼と排気特性を支配することからLIF法やレイリー散乱法によるシリンダ内燃料蒸気濃度分布の2次元画像計測が広く行われるようになった²⁾。さらに火炎の伝播状況を可視化するためLIF法によるOHラジカルの画像計測も行われている³⁾。

ディーゼル機関については、火炎内のすすの2次元可視化に関する研究が米国サンディア研究所⁴⁾、京大、東工大でほぼ同時に1990年頃始まり、現在も継続されている。その後OHやNOのLIF画像計測が進展しつつある⁵⁾。また窒素雰囲気中の蒸発噴霧内の燃料蒸気濃度分布もLIF法により定量的に測定できるようになった。

4. ディーゼル火炎内のすすとOHの2次元画像計測

火炎内のすすを可視化する方法は二つある。一つは入射したレーザーシート光をすす粒子が散乱する散乱光を画像化する方法であり、この方法ではすす粒子径が入射レーザー光の波長より一桁小さいので、レイリーの散乱理論が近似的に適用できる。すなわち散乱光強度はすす粒子径の6乗と粒子数密度の積に比例する。レーザーシート光入射方向に対して直交する方向の散乱光を撮影するが、レーザー光の偏光面をレーザーシート面と一致させ、すす粒子からの熱輻射の連続スペクトルの中から散乱光のみを抽出するため出力の大きなレーザーを用い、かつ撮像レンズの前に狭帯域のレーザーフィルターを設ける必要がある。欠点は視野中に燃料液滴粒子が残存する場合、その粒子も弾性散乱光を発生し、それがすすからの散乱光画像に重複することである。したがってこの方法の適用は燃料粒子の存在しない火炎先端領域に限られる。

もう一つの方法はレーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence:LII)である。

エネルギー密度の高いレーザーシート光を輝炎に入射すると、火炎中のすす粒子がレーザー光の一部を吸収して燃焼温度(～2300K)よりさらに高温となる。レーザーのパワーと照射時間を適当に選べばレーザーシート入射面(厚さ0.2mm程度)に存在するすす粒子の温度は4500K程度に上昇し、その熱輻射スペクトルのピーク波長は2300Kにおける $1.26\mu\text{m}$ から $0.644\mu\text{m}$ へシフトする。火炎の厚みを考慮しても、紫外波長域における4500Kのすす粒子からの熱輻射は2300Kのすす粒子の熱輻射の数十倍に達する。したがって撮像レンズの前に狭帯域の紫外波長フィルタを設ければレーザーシート入射面内のすす粒子からの熱輻射のみを画像として捉えることができる。観察領域内に燃料液滴粒子が存在してもその影響を受けないという長所を有する。またこの熱輻射は粒子直径の3乗と数密度の積に比例する。

筆者らは図2に示すような直径196mm、圧縮比15の大形急速圧縮装置を用いて実際のディーゼル機関燃焼室内と同等の雰囲気の中にディーゼル火炎を実現し、この火炎にNd:YAGレーザーからのシート光を入射してすすの可視化実験を行っている⁹⁾。

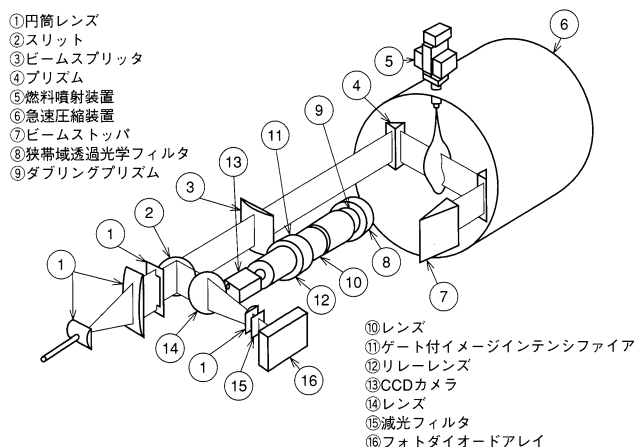


図2 非定常噴霧火炎内のすすとOHの同時二次元画像計測のための光学系
Optical arrangement for 2-D imaging of soot and OH in a transient spray flame

レーザーの波長は532nm、出力は100mJ/パルス、パルス巾は6～9nsである。すす粒子からのレイリー散乱光とLII光をシート入射方向に直交する方向からイメージインテンシファイアで撮像している。撮像レンズの前にダブリングプリズムを設け、左右にレイリー散乱画像用のレーザーフィルタとLII用の中心波長400nm、半値巾66nmのフィルタを各々付けて両画像を同時に撮影している。図3がその一例であり、両画像より粒子直径の相対値 $(I_{SCA}/I_{LII})^{1/3}$ の分布と粒子数密度の相対値 (L_{II}^2/I_{SCA}) の分布を得ている。火炎先端の周辺部のすす濃度 (L_{II}) が高いこと、この例では画像の右側で粒子径が大きく、数密度が低いことがわかる。

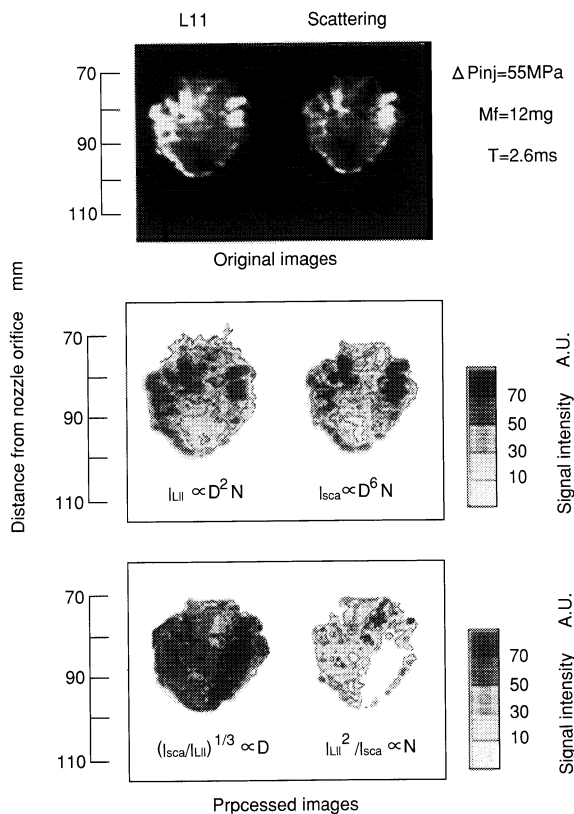


図3 LII画像と散乱光画像の解析による火炎内すすの濃度、粒径、数密度の同時測定
Simultaneous measurement of concentration, particle size and number density of soot in a flame by an analysis of LII image and scattering image



図4 火炎内のすすとOHの同時可視化画像
Images of LIF emission of OH and elastic scattering of soot in a flame taken simultaneously

同じ燃焼装置と光学系を用いてレーザー誘起蛍光法により火炎内のOHラジカルの画像測定を行っている。Nd:YAGレーザーの波長532nmで色素レーザーをポンピングし、OHの(1, 0)バンドの波長284nmのシート光を火炎に入射してOHの(0, 0)バンド、波長308nmの蛍光を画像として撮っている。色素レーザーの出力は3~6mJ、レーザーシート光の中は25mmである。通常のディーゼル軽油を燃料とすると火炎中のすす濃度が高すぎるため、含酸素燃料をブレンドしてすす生成量をコントロールして実験を行っている。図4が可視化画像の例であり、OHの蛍光とすすのレイリー散乱光を同時に撮影した珍しい写真である。OHはNOの生成に関与するだけでなくすすの酸化に強く関わっている分子であるが、この画像を見た限りではOHの存在領域はすすの存在領域とずれている。OHはすすが存在すると直ちにすすの酸化に消費されてしまう可能性が高い。

5. 今後の課題

ディーゼル機関の燃料計測について1970年代から今日までの経過の概略を述べ、最後に筆者らの行っている最新のレーザー画像計測の実際に触れた。最近になりようやくディーゼル火炎内の不均一の構造やすすの生成・酸化についての理解が深まってきたが、今後さらに現象を追求するには火炎内の速度ベクトル分布の画像計測を行い、各種成分の変化をラグランジェ的に追跡する必要がある。また一部で試みられているNOの可視化については、サイクル平均的な画像計測ではなく瞬時の画像計測の実現が望まれる。

参考文献

- 1) 青柳友三, 松井幸雄, 神本武征, 松岡 信, “直接ガスサンプリング法による直噴式ディーゼル機関におけるNOとすす生成に関する研究”, 日本機械学会論文集, 46巻403号, pp540-549 (1980)
- 2) R.Shimizu, S.Matsumoto, S.Furuno, M.Murayama and S. Kojima, “Measurement of Air-Fuel Mixture Distribution in a Gasoline Engine Using LIEF Technique”, SAE paper NO.922356 (1992)
- 3) 田中達也, 田端道彦, “PLIFを用いたガソリン機関燃焼室内のOHラジカルの2次元分布計測”, 第11回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp115-120 (1993)
- 4) A.O.zur Loye, D.L.Siebers and J.E.Dec. “2-D Soot Imaging in a Direct Injection Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence”, Int. Symp. on COMODIA 90, pp523-528 (1990)
- 5) B.Alatas, J.A.Pinson, T.A.Litzinger and D.A.Santavicca “A Study of NO and Soot Evolution in a DI Diesel Engine via Planar Imaging” SAE paper NO. 930973

2-D Imaging of Pollutants formed in the Combustion Chamber of Diesel Engines

In 1970s, when regulations for emissions from Diesel engines started, studies on combustion phenomena including NO and particulates formation were conducted worldwide mostly by means of gas sampling analysis. These studies provided deep insights into pollutant formation in the diesel engine cylinder, but the cycle averaged data was insufficient to describe the inhomogeneous nature of Diesel flame to which formation of NO and particulate in the Diesel flame is closely related. For this reason, two dimensional instantaneous imaging of pollutants in the combustion chamber has so far been developed intensively. Principles and instruments of simultaneous imaging of soot and OH radical in a Diesel flame on which the authors group is working are outlined and some of the images are presented.

