燃 焼 火 炎 の 可 視 化*

佐 藤 誠四郎**

Laser Aided Visualization of Combustion Flame

Seishiro SATO

1. まえがき

最近の燃焼の可視化の特徴は、ある断面における物理量を瞬間の空間分布として2次元平面上に表示する例が多いことである。これは近年のレーザーや撮像管などの電子機器およびデータ処理技術等の進歩を背景としており、とくにレーザー分光法では主に1点の計測だったものが、瞬時の2次元イメージ計測が可能になり燃焼の可視化手法として有力なツールとなっている¹⁾。

燃焼研究にとって可視化の重要性は論をまたない。例えば対象とする現象等の詳細な計測や解析を行う前に、あるいはこれと並行してなんらかの方法で対象場を可視化し、全体的なイメージを把握することによって理解や指針等を得るのが一般的な研究手法と思われる。内外の燃焼シンポジウムなどの報告では、このための可視化の手法として従来からシュリーレン法が最も多く用いられている。最近ではシート状にしたレーザービームを用いた断面像や前述の分光画像、さらにはいくつかの手法を組み合わせた同時複合計測法²⁾が用いられている。これら断面像や分光画像の多くは、データの数学的な変換等が不要であり、そのまま理解しやすく現象を直感的に把握できること、また1点の計測法を強力に補間する方法として有力視されている¹⁾。

以上のように燃焼の可視化の重点は、現象を2次元的に把握することにあるが、最終的には非定常現象中での諸量の瞬間状態³⁾などの3次元的な現象の理解が必要なことはいうまでもない。燃焼

の画像計測を中心とした可視化や研究の動向については、すでに解説、展望がなされているので^{4),5)}本稿では、瞬時の3次元空間分布の測定が可能なレーザー干渉法とコンピュータ断層撮影法(CT)による火炎の温度分布の可視化を中心に、原理、適用例およびレーザー分光法によるイメージ計測例など、レーザーを用いた燃焼計測法の概要について述べる。

2. 燃焼のレーザー応用計測

レーザー応用計測の特徴は、非接触で対象場を乱さないこと、時間、空間分解能が優れていること、従来の計測法では得られない新しい情報が得られることなどである。

対象とする燃焼場にレーザーを照射すると、レーザーは図1に示すように透過、屈折、散乱およびシード粒子等によって反射される。これらのレーザーの情報は、対象とする燃焼状態を反映しているので、これから診断が可能である。

レーザーの透過情報を基にした計測法としては、レーザー光の減衰などの強度変化を検出するもの、燃焼場によるレーザーの速度変化を位相情報として検出する干渉法があり、マッハツェンダー法、ホ

図1 レーザー応用計測

*原稿受付 1990年4月19日

**正会員 船舶技術研究所

ロググラフィ法などが用いられる。レーザーの屈折を基にした方法には、シュリーレン法、シャドウグラフ法、モアレ偏向法があり、ともにレーザーの進行方向と直角方向の密度勾配の情報が得られる。これら透過法、屈折法の特徴は、レーザー進行方向の積分値が得られるので、一般に回転対称など分布形状がわかっている場合の他は、局所値を求めるにはCTとの組合せが必要となることである。

散乱情報を基にした方法には、照射したレーザーと波長シフトの生じないミー散乱、レイリー散乱波長シフトの生ずるラマン散乱などがあり、一般に局所値が得られ成分濃度、温度等が計測される。またレーザーによる蛍光を利用したレーザー誘起蛍光法があり、信号強度が強いので平面光束を用いるとラジカル等の2次元的な検出が可能である。反射情報を用いるものとして、レーザーライトシート法による火炎面形状や渦構造の観察などが行われている。

3. 3次元温度分布計測

レーザー干渉法を用いた火炎温度の測定原理を図2⁹⁾に示す。前述のように、干渉法では対象火炎の光路方向に沿った屈折率の積分量が得られるので、局所の値を求めるには、通常温度場が2次元分布とか、回転対称(軸対称)分布の場合に限定される。しかしCTを用いることによって、分布形状が任意の場合でも局所的な値のみならず広い範囲の空間分布の測定が可能となる。また気体の屈折率は密度の関数であり、密度はガス組成、温度、圧力によって変化するため、温度を求めるにはガス組成と圧力が必要となる。このうちガス組成の影響は、炭化水素火炎の場合は小さく、ガス

図2 温度測定原理

図3 CTデータの収集⁹⁾

図4 露光時間と干渉縞

組成を燃焼ガスの代わり空気として求めても誤差が最大4～5%以内であることが明かにされている⁷⁾。

3.1 多方向干渉光学系

CTを適用するには、 180° にわたる円周方向からの投影データが必要である。本節では、火炎以外への適用の場合を含めて多方向干渉光学系の現状を述べる。

多方向からの干渉データを得る方法として図3に示すX線CTスキャナと同様に回転、スキャンニングによる方式、拡散光照明を用いる方式、マルチブルビーム方式などが提案されている⁸⁾。しかし多方向干渉法を火炎に適用する際、干渉データの取得時間の問題がある。図4はブンゼンバーナ火炎の干渉写真を示す。図からCT計算に用い

る干渉縞の次数を一義的に測るには、露光時間を少なくとも 1/250 秒以内にすることが必要であることがわかる。

1) 回転スキャンニング方式

光学系または物体を回転する方式である。干渉法では火炎が完全に定常であっても、回転による光学系のずれなどを光の波長のほぼ1/10以内にしなければならぬため安定性などの点で難しく、一つの干渉計を固定しておいて物体を逐次回転する方式が採用されている。Hertz⁹⁾ はマッハツェンダー干渉計を用い、対象物体を撮影ごとに回転させ多方向の干渉像を得ている。

レーザビームを回転する方式として、Snyder ら¹⁰⁾ は図5に示すよう反射ミラーを固定し、二つの同期回転ミラー（図の記号M1, M2）を用いてビームを回転させ、多方向の干渉像を得る方法を提案している。各方向の像の分離、ビームの安定化を確実に行えば、時間分解能も 500~1000 方向/秒と高く有望な方法と思われる。

2) 拡散光照明方式

対象物体の照明光をスリガラスなどを通して拡

散光として用いる方法である。Murata ら¹¹⁾ は加熱空気の流れ場の測定に図6に示す本格的な多方向干渉光学系を提案している。図6の光学計では干渉像が得られる円周方向の角度範囲は 150~160°である。

拡散光照明方式では、円周方向に連続した多方向の干渉像が得られる利点がある。しかしレーザ光量の損失が大きく高出力のレーザが必要なこと、干渉縞が特定の位置に局在するため、干渉像の再生の際フリンジと物体を同時にピントを合わせる必要からカメラの絞りを小さくしなければならず、これに伴いスペックルノイズが増し干渉縞の解像が悪くなるなどの問題がある。

3) 位相格子照明方式

Sweeney ら¹²⁾ は拡散光照明に伴うスペックルノイズを低減するため、1本のビームから幾つかの方向に伝播する波面が得られる位相格子を用いている。一つの位相格子につき約 20° の範囲で8方向の干渉像が得られるとしている。ビーム強度の利用効率の向上等の問題があると思われる。

4) マルチプルビーム方式

平行光などの指向性のビームを用い、全部の干渉像の撮影を瞬時に得る方法としてマルチプルビーム方式がある。図7は4方向の干渉像が得られる配置例である¹³⁾。図でわかるように、この方式では光学部品が多数必要なのが難点である。ホログラフィ法では通常、参照光、物体光を用いるので、マルチプルビーム方式では撮影方向数のほ

図5 回転方式光学計¹⁰⁾

図6 拡散照明光学計¹¹⁾

図7 4方向干渉光学計¹³⁾

図8 多方向ホログラフィ干渉計¹⁴⁾

ば2倍のビームが必要となり所要部品も多くなる。図8は円周24方向からの干渉像が一度に得られるもので、光学部品を減らすため、参照光は物体光6個毎にし、平行光を用いる代わりレンズからの発散光をそのまま用いている。多方向の干渉像は、約6方向をまとめて1枚の乾板に多重記録する。本光学計では、干渉像を撮影できる角度範囲は 168° 、視野は縦、横とも80mmが得られている¹⁴⁾。

以上のように多方向干渉光学系では、レーザー光量、光学部品の制約などから干渉像が得られる角度範囲、撮影方向数、視野の大きさが限られるなどの問題がある。

3.2 温度分布

干渉法による温度測定では、まず火炎の屈折率を求める必要がある。干渉写真は、対象物体の屈折率分布の投影を表すので、CTの再構成計算により屈折率が求められる。再構成計算には種々の方法があり、通常重畳積分法が用いられている。

火炎温度 T は、再構成計算により求めた屈折率から Gladstone-Dale の式および気体の状態方程式を用いて次式から求められる⁷⁾。

$$\frac{1}{T} = \frac{P_0 \cdot K_0 \cdot G}{P \cdot K \cdot G_0} \left\{ \frac{1}{T_0} - \frac{R(x, y)}{\rho_0 \cdot K_0 \cdot T_0} \right\} \quad (1)$$

ただし、

$$R(x, y) = N_0 - N(x, y) \quad (2)$$

ここに、 P : 圧力、 G : ガス定数、 K :

Gladstone-Dale 定数、 N : 屈折率、 ρ : 密度、 x, y : 平面座標、添字0: 基準状態(通常大気室温)を表す。

3.3 適用例

レーザー干渉、CT法の適用例として Hertz⁹⁾ はマツハツェンダー干渉計を用い、メタン拡散火炎を回転して得た8方向の干渉写真を用いて、図9に示す水平断面の温度プロファイルを求めている。図10は24方向干渉光学計を用いてアルコール芯火炎の干渉写真の一例であり、図11、図12はこれから求めた水平断面の温度プロファイルおよび垂直断面の等温線を表示したものである。また温度の空間分布の表示方法として、火炎の温度分布形状をソリッドモデルのシェーディング表示した例がある。図13¹⁵⁾にはこれを示し、図11などと同様にして求めたアルコール芯火炎の温度分布の立体形状であり、垂直面と水平面(同図a)および傾斜

図9 メタン拡散火炎の温度分布(水平断面)⁹⁾ 図10 アルコール芯火炎¹⁴⁾

図11 アルコール芯火炎の温度分布(水平断面)

図14 層流予混合火炎の温度分布(水平断面)¹⁶⁾

図12 アルコール芯火炎の等温線分布(垂直断面)

図15 乱流予混合火炎の温度分布(水平断面)¹⁷⁾ 図13 温度分布のソリッドモデルによる表示¹⁵⁾

面(同図b)で切断した等温面形状を示す。

図14¹⁶⁾は同じ24方向干渉計を用いて測定した層流予混合バーナの温度プロファイルを示す。図15は同じバーナの乱流条件の温度プロファイルであり、干渉写真の撮影には光源にルビーレーザーを用いる8方向マルチパス干渉計を用いている¹⁷⁾。図16は図15と同じ干渉データを用い、軸対称分布の仮定からアーベル変換で求めた温度分布の例であり、各方向で温度レベルが異なっている。この結果は、レーザー干渉法による温度測定では、流れて規制された円錐状火炎の場合でも、従来用いられている軸対称の仮定では、定性的な傾向は求められるが、定量測定にはCTが必要であることを示すものである。

図16 軸対称の仮定による温度分布¹⁷⁾

レーザー干渉、CT法では、多方向の干渉写真を用いるため膨大なデータ処理を必要とすること、干渉縞の画像処理では、フリンジパターンの頂上か谷かなどの判断を要するため、データ処理の自動化が困難なことなどがある。また気体の屈折率は高温になると変化が小さくなり、精度向上には干渉法の検出感度を高める必要がある。このため、フーリエ変換干渉法¹⁸⁾をCTに適用し、データ処

ホログラフィ法

フーリエ変換法

図17 従来法、フーリエ変換法干渉写真¹⁸⁾

理の自動化と測定精度の向上が図られている。フーリエ変換干渉法¹⁹⁾は、図17に示すように従来の干渉縞に干渉光線を傾けて得られる等間隔の縞を加え、空間的に変調した干渉縞をもとに位相を抽出する方法で、照明むらなどによる不要な信号を精度良く分離、除去できる。フーリエ変換法では、1フリンジ以下の精度が容易に得られること。コンピュータによる処理に適していること。干渉縞次数の勾配（増減）が自動的に判別できることなどである。

4. 2次元計測

4.1 レーザライトシート法

瞬間の火炎面形状を可視化するため、ある断面をシート状のレーザー光で照射し火炎中に混入させた微粒子からの散乱光の強度変化によって、燃焼領域と未燃領域などを識別する方法でレーザトモグラフィとも呼ばれている。

図18に測定装置²⁰⁾を示し、図19は水素拡散火炎の瞬間像である²¹⁾図19では、YAGパルスレーザーを用い火炎の発光を除くため、干渉フィルターおよびレーザーと同期したゲーティングを行っている。本方法を用いて、火炎面形状のフラクタル解析や、火炎の渦構造と混合の関連などが調べられている。

4.2 平面 LIF

レーザー誘起蛍光法 (LIF) は、火炎の安定成分のみならず OH, CH, NO など燃焼反応の進行を支配するラジカル（活性基）濃度の瞬時の空間

分布を可視化できる。この方法は測定成分に応じた固有の波長のレーザー光を照射し、対象成分のエネルギー準位を励起させ、基底状態に遷移する際の蛍光強度から濃度などを求めるものである。蛍光法では条件によって、他の分子による衝突や放射等の影響があり、これらを考慮した測定が検討されている²²⁾。

平面 LIF ((Planar Laser Induced Fluorescence) は、レーザーシート光による蛍光を2次元的に検出する方法であり、図20はその装置例²³⁾である。図21は図20の装置を用いたプロパン拡散火炎のOHの水平断面の瞬間像と平均像である。このような2次元計測法の拡張として、レーザーシート照射面の高速スキャンニングによる3次元イメージ計測が試みられている¹⁾

4.3 同時複合計測

乱流火炎では、温度、密度、濃度、流速などすべての量が変動しており、単独の量の測定によって現象のすべてを理解することはむずかしく²⁴⁾、また2種類の量の相関が火炎構造などの理解に必要とされている⁴⁾。このためレーザー誘起蛍光法、

図18 レーザライトシート法²⁰⁾ 図19 水素拡散火炎の瞬間像²¹⁾

図20 平面 LIF 実験装置²³⁾ 図21 プロパン拡散火炎の OH 像²³⁾

ラマン散乱法，ミー散乱法などを組み合わせて，各種成分濃度や温度の同時測定が行われている。図22²⁵⁾は，乱流拡散火炎の CH の蛍光像と CH₄ のラマン散乱像を示し，2 波長レーザを用いてこれらの像を同時に計測できるシステムを用いている。二つの像からフレームフロントの位置が決定できるとしている。また図23²⁶⁾の上図は噴流拡散火炎の平面 LIF による OH 像，下図はシード粒子によるミー散乱像を表し，これらの像の組合せによって火炎構造の情報が得られる。

5. あとがき

レーザ干渉，CT 法による火炎温度測定について，筆者の行っている結果を中心に述べた。現状では，本方法はデータ処理に手間と時間がかかり，手軽に使える手法となっていない。これは，ホロ

図22 乱流拡散火炎の CH-CH₄ イメージ²⁵⁾ 図23 噴流拡散火炎の分光像²⁶⁾

グラム記録に従来写真の銀塩方式を用いていること，干渉縞の画像処理やデータの数学的変換が必要なことなどによっている。

今後は電子写真方式を用いること，画像処理の自動化やインテリジェント化をはかること，計算処理の高速化などにより，瞬時の空間的温度分布のオンライン測定のほか，高速度カメラを用いれば空間分布の時系列測定が可能であり，分光法による 2 次元イメージ計測の相補的計測法としても発展することが期待される。

参考文献

- 1) Hanson, R. K. : Combustion Diagnostics : Planar Imaging Techniques, 21st Symp. (International) on Combustion, (1986), 1677.
- 2) 塩路 : 燃焼の計測および診断技術, 機械学会関西支部, 172 回講習会教材, (1990), 1.
- 3) 水谷 : 燃焼研究と燃焼技術の動向と問題, 機械学会論文集 B 編, 54-502, (昭63-6), 1215.
- 4) 水谷 : 燃焼の画像計測, 流れの可視化, 8-28, (1988-1), 24.
- 5) 竹野 : 燃焼学の新しい研究方法の動向, 航空宇宙学会誌, 37-421, (1989), 91.
- 6) 佐藤 : レーザ干渉法による燃焼計測, 光技術コンタクト, 26-2, (1988), 132.
- 7) 佐藤, ほか 2 : 機械学会論文集 B 編, ホログラフィ干渉法による火炎温度分布測定, 53-490, (昭62-6), 1852.
- 8) Vest C. M. : Optical Metrology and Computer Tomography for Measurement of Temperature and Density, NATO ASI Ser E, 131, (1987), 343.
- 9) Hertz. H. M. : Experimental Determination of 2-D Flame Temperature Fields by Interferometric Tomography, Optics Communications, 54-3, (1985), 731.
- 10) Snyder. R., Hesselink L. : High speed optical tomography for flow visualization, Appl. Opt., 24-23, (1985), 4046.
- 11) Murata K. et al : Holographic interferometry with a wide fiels of view and its applications to reconstruction of refractive index fields, Optik, 53-4, (1979), 285.
- 12) Sweeney D. W. : Experimental Capabilities of Holographic Interferometry, Goulard R. Edi., Combustion Mesurements, Hemisphere Publ. Corp. (1976), 262.
- 13) Lübke D., Mayinger F. : Die optisch holographische Tomographie-ein Meß fahren zur Erfassung instationärer dreidimensionaler Mischvorgänge, Ver. Dtsch. Ing., 545, (1984), 1271.
- 14) 佐藤, 熊倉 : レーザ干渉法と CT 法による火炎温度分布測定, 機械学会論文集 B 編, 55-511, (1989-3), 841.
- 15) Doi, J., Sato, S. : Three-Dimensional Reconstruction of Flame Structures using Multiple Interferograms, Proc. Int'l Conf. on Optical Methods in Flow and Particle Diagnostics, Laser Institute of America, (1988), 131.
- 16) 機械学会編 : 燃焼のレーザ計測とモデリング (1987), 363. 丸善.
- 17) 佐藤ほか 2 : 第26回燃焼シンポジウム前刷集 (昭63-11), 13.
- 18) 佐藤ほか 2 : 第27回燃焼シンポジウム前刷集, (平元-12), 374.
- 19) 武田 : サブフリンジ干渉計基礎論, 光学, 13-1, (1984), 55.
- 20) 安藤, 吉田 : 第27回燃焼シンポジウム前刷集, (平元-12), 389.
- 21) 森口ほか 3 : 機械学会関西支部第65回講演会概要集, 904-2 (平2-3), 39.
- 22) 出口ほか 2 : レーザ誘起蛍光法を開いた OH の温度・濃度計測, 機械学会論文集 B 編, 55-517, (1989-9), 2830.
- 23) Gutmark, E. : Azimuthal Structure of an Annular Diffusion Flame, Combust. Flame, 75, (1989), 229.
- 24) 香月 : 乱流火炎の計測, 機械学会論文集 B 編, 55-510, (1989-2), 261.
- 25) Namazian, M. et al : Two-wavelength single laser CH and CH₄ imaging in a lifted turbulent diffusion flame, Appl. Opt., 27-17, (1988), 3597.
- 26) Vandsburger, U. et al : Visualization Methods for the Study of Unsteady Non-Premixed Jet Flame Structure, Combustion Sci. and Tech. 59, (1988), 455.