

レーザー利用計測技術の現状－燃焼を中心にして－

Recent Advances in Combustion Diagnostics Using Laser-based Methods

山口 滋*・小原 正孝**

Shigeru Yamaguchi Masataka Ohara

1. はじめに

酸性雨、オゾン層破壊、温暖化現象など地球規模の環境問題の重要性が、最近、広く認識されるようになってきている。これらの環境問題について共通して言えることは、いずれも生活環境を維持、発展させるために消費するエネルギーがその一因となっていることである。様々な代替エネルギーへの転換が進められてはいるが、石油、石炭等、化石燃料の燃焼によるエネルギー消費は、その大半を占めており、効率の良い燃焼の達成や制御は、非常に重要で、今後とも現象の解明に基づいて、精度が高くかつ効率良く制御する技術の発展が必要である。

レーザーによる計測や制御は、対象となる場を乱さずに非接触に遠隔から監視、制御に還元する手法で、これまでに確認できなかった因子を容易に可視化、制御する技術へと結び付けることが可能である。ミリ波、マイクロ波を利用しての非接触計測技術も、従来から存在するが、とりわけ、レーザー（光）計測は、時間的、空間的分解能が高く、また、波長の選択性といった点で、特定分子を効率よく検出できる利点がある。

レーザーの計測は、以前からプラズマや反応プラズマ等の高温、高密度場を対象としてよく使用されていた。このような計測場は、他の計測方法では容易に現象に追従できない、流れ、拡散、混合、反応、熱移動が複合した場である。最近では、レーザー加工のプラズマ現象観測にもレーザー誘起蛍光計測が使用されている¹⁾。高密度のプラズマの計測場と比較すると、燃焼場そのものやあるいは燃焼排気ガス流動場の計測は、温度や密度がやや低く密度濃度場の勾配は緩やかな、いわば、低密度のプラズマ計測と位置付けることがで

きる。

レーザーによる燃焼計測では、まず煤の粒子径計測や速度場の計測が行われ、He-NeレーザーやArイオンレーザーが使用された。測定は、ミ－散乱や回折現象を主体としたものが多く、レーザーへの要求も単純に高い輝度を主体としたものであった。その後、濃度や温度を求めて、現象の解明や制御をするという計測方法の開発要求が高まり、分光計測手法が採用され、それまでのハロゲンランプやナトリウムランプ光源にレーザーが置き換わる形で、レーザー吸収分光法、レーザーラマン法、レーザー誘起蛍光法が活発に研究されてきた。このような分光測定では、分子や原子の遷移線にレーザー波長を一致させ効率良く吸収や蛍光、ラマン散乱を起こすように周波数輝度 (spectral brightness) の高いレーザー光源が要求される。このような要求に対応して、光源となるレーザーの開発も進み、赤外線領域から、可視領域、さらに紫外線領域の広い波長範囲で装置を選択し使用することができるようになってきた。最近では、波長可変のレーザー装置も小型で安定安価なものが入手できるようになっている。また、繰り返し周波数に制限があった固体レーザーの高繰り返し化が実現し、半導体レーザーにも高出力なものが出現している。時間領域では、10fs (10⁻¹⁵s) 程度の超短パルスが、実現されてきており、分子や原子の挙動、現象を探るプローブとしてのレーザーの役割は、ますます高くなってきている²⁾。これらを応用すると、定常的な変化を捉える従来センサーの時間平均的な計測、制御ではなく、むしろ非定常現象に十分追従できる。この結果、高温の炉内の制御、内燃機関やボイラー、煙道のガス濃度、温度分布計測等でも革新的な計測、制御が可能となることに大きな期待が寄せられている。

ここでは、代表的なレーザー分光計測の原理や手法をまず概説し、レーザー計測のキーワードとなる、レーザー光源と検出器の現状と技術展開の動向を述べる。

* 石川島播磨重工業(株)航空宇宙事業本部

技術開発事業部光プロジェクト部課長

** " " " " 光プロジェクト部

〒235 横浜磯子区新中原町1

また、最近、研究が盛んに行われている代表的な2次元計測、4光波混合による燃焼計測装置の構成例について紹介する。

2. 計測方法

分光計測は、吸収や蛍光を利用して分子との相互作用が線形な線形分光計測と散乱や位相共役波発生をする非線形な相互作用による非線形分光計測とに大別される。各計測方法の特徴を表1に示し、以下に概説する。

2.1 吸収分光

分子の振動回転遷移による吸収線に同調したレーザー波長による、光の吸収効果を利用して測定を行う。レーザーの透過光の強度変化は、吸収する分子の濃度が一定であれば透過距離に対して指数関数的に減少するというLambert-Beerの法則による。長い光路(数m~10m)であれば、ppbレベルの検出感度を得られる。振動回転遷移を利用する場合には、濃度の定量は、温度の分布の影響を受けやすいが、この効果を利用して、吸収線幅の測定を詳細に行うことによって、並進温度を知ることできる。電子遷移の吸収を利用する可視、紫外線の吸収測定では、濃度測定は、一般的には、燃焼温度の影響を受けにくい。差分吸収法では、吸収線に一致した波長(信号光)とそれとはわずかに離調した波長(参照光)を使用して測定を行う。すなわち、常に信号の校正を行いながらデータ処理をするので、一般的にS/N比が高い。ポイント計測や1次元の線計測が主体で、2次元の面計測は、1次元の線計測の重ね処理がほとんどである。レーザーダイオード等の進歩とともに測定できる分子の種類が拡大して、利用が拡大してきている³⁾。

2.2 レーザー誘起蛍光法

(Laser Induced Fluorescence, LIF)

一般的には、分子の電子遷移を利用する。可視、紫外線領域の強度が高いパルスレーザーを使用する。ある波長で、特定分子を励起して、励起波長とは、異なった波長の蛍光を検出する。蛍光の遷移確率が高ければ、濃度の低い活性な分子を定量できる。蛍光の強度から、分子の濃度分布が、また、蛍光スペクトルの周波数に対する強度分布から、温度を定量することが可能である。これらの情報には、他の分子や原子による失活の影響が含まれるので、その影響が極力少ない分子について計測するか、その影響を取り除くため、飽和蛍光などを利用して計測する。レーリー散乱と信号が混在

することもあり、計測を併用する場合がある。研究初期には、CARS計測と同様に、ポイント計測であり、光子数レベルでの蛍光計測が行われ、1980年代後半になって、温度や濃度分布を直接2次元的に捉える研究が盛んに行われるようになった^{4), 5)}。火災中のNOやOHを計測して、濃度や温度を測定した研究報告が多い。

2.3 コヒーレント反ストークスラマン散乱法

(Coherent Anti-stokes Raman Scattering, CARS)

一般的には分子の振動ラマン遷移を用いるものが多く、可視から近赤外線のレーザーを使用する。

CARSはラマン散乱の一種であるが、この分光法では放射されるラマン光が入射波と同じコヒーレントな光として観測されるため、自然放出の背景光と容易に分離できる上、散乱強度がラマン散乱に比して、 $10^3 \sim 10^{10}$ 倍も大きい。さらに、分子からの非弾性散乱で、入射(励起)光の波長と散乱光の波長は、大きく異なるため、高いS/N比で観測できる有利さがある。窒素ガスなどの非接触温度計測などでは多くの研究実績がある。ただし、低濃度の分子(ppmレベルの濃度)から信号を良く得るには、困難がある。1980年代初頭から盛んに研究が行われ、小型可搬型のCARS測定装置も開発されており、各種の燃焼場に適用された⁶⁾。最近では、ポイント計測ではあるが、他種類のガス分子を同時に測定することも行われている。ポイント計測であるため、温度分布等を求めるためには後処理の繁雑さがあり、現在は、この処理方法も研究されている⁷⁾。

2.4 4光波混合位相共役法

(Degenerate Four Wave Mixing, DFWM)

元来、DFWMは、分子の3次の非線形感受率を利用して位相共役波を発生させる非線形現象で、レーザーが大気中を伝播するときの揺らぎを除去する技術の1つとして注目を浴びてきた方法である⁸⁾。検出しようとする特定分子の吸収線に同調させて、強度の高いレーザーを入射し、飽和吸収を起こした時に発生するDFWMの光強度分布(S)は、レーザーの入力強度(I)の3乗と特定分子の濃度(N)の2乗との積に比例する。

$$S \propto N^2 \times I^3 \quad (1)$$

与えられたレーザーの入力強度(I)に対して、DFWMの光強度(S)の分布を回転量子数(J)の異なる2つの吸収線について測定、比較すれば、既知のJか

表1 各種分光計測の特徴

原 理	線 形 分 光 計 測		非 線 形 分 光 計 測	
	吸 収	レーザー誘起蛍光 (LIF)	コヒーレント反ストークス ラマン散乱 (CARS)	4光波混合 (DFWM)
使用波長領域	中赤外線(2~10 μ m) 可視~紫外線(~200 μ m)	可視~紫外線 (~200nm)	近赤外~紫外線(~200nm)	可視~紫外線 (~200nm)
測定対象分子等	CH ₄ , NO, CO, NH ₃ 等	CH, NO, OH, O ₂ アルカリ蒸気等	N ₂ , O ₂ 等	NO, OH, O ₂ アルカリ蒸気等
主に測定できる パラメータ	濃 度	濃 度 温 度	温 度	濃 度 温 度
計測の形状	ポイント計測 1次元線計測	2次元面計測 (ポイント計測 1次元線計測)	ポイント計測	2次元面計測 (ポイント計測 1次元線計測)
検出の下限界	ppb~ppm	~ppm	~%	~ppm
適用場所	燃焼ガス中の濃度計測 排気ガス中の濃度計測	火炎の反応観測	火炎の温度観測 排気ガスの温度計測	火炎の反応観測
備 考	————	————	多種の分子を同時観測可 高い空間分解能	CARSの 2次元展開

ら温度の面分布を知ることができる^{9), 10)}。近年, 注目されるようになり, 1990年台になって, 本格的に燃焼場に適用されるようになった。検出される光はコヒーレント光で立体角の損失が小さくなるため, 測定対象から測定光学系の距離が大きくなり, また, 光学系の口径が小さい場合にも, 確実に2次元面情報を捉えられる。さらに, 火炎等の温度分布による屈折率分布揺らぎを位相共役波の発生によって補償するので, 検出される2次元光強度分布は, 鮮明なものとなり, 空間分解能が高い。CARSの高感度化と2次元計測への展開という特徴を持つ。

3. レーザー光源と検出素子

3.1 レーザー光源

一般的な, レーザー計測, レーザードップラー計測などでは, レーザーの安定性や装置のコンパクト性が重視されていた。使用されてきたレーザーも, He-Neレーザー, Arイオンレーザー等連続発振のレーザーを中心にレーザーの空間的高輝度性を利用した応用が盛んであった。しかし, 分光計測には, パルス発振や変調を利用したこのようなレーザーでは, 周波数輝度に加えて, 様々なガス分子の分光特性に同調できる広帯域な波長の可変性や選択性が必要となる。

(1) 波長可変レーザー

広帯域波長可変レーザーとして, 色素レーザー (300~950nm), Ti:Al₂O₃レーザー (700~930nm) やCr:

LiSrAlF₆レーザー (780~1010nm), Co:MgF₂レーザー (1.75~2.5 μ m), 光パラメトリック発振のレーザー (400nm~2.5 μ m) があり, 最近では, 市販製品の性能も充実してきている。

色素レーザー, Ti:Al₂O₃レーザーやCr:LiSrAlF₆レーザー, Co:MgF₂レーザーは, レーザー媒質として動作する色素や結晶内部のエネルギー準位を使用するレーザー発振器である。これらのレーザーでは, 励起光源の品質に大きな影響を受けることなく, レーザー発振を得られるが, 媒質の利得が存在する波長域のみ波長可変である。これに対して, 光パラメトリック発振レーザーは, 波長の可変範囲では, 他のレーザーに比較して大きな優位性があるが, この方式は, レーザー発振器というより, 使用する励起レーザーの波長変換装置といったほうがよく, 励起レーザー光の安定性やスペクトル特性を強く反映した出力が得られる^{11), 12)}。

1) 色素レーザー (レーザー励起の液体レーザー)

近赤外線領域から可視光線, 紫外線領域の波長で広範囲にスキャンをせずにレーザーを使用するという場合, 色素レーザーは開発の歴史も長くそのラインアップや周辺機器の豊富さから最も研究開発用として使用しやすいレーザーに位置づけられる。すなわち, 1色素の発振波長範囲は実用上最大でも50nm程度までに限られるが, 色素種類のデータベースが, 豊富であり, 得たい波長を容易に選択できる。300nm~950nmと

いった領域で高い強度をもつレーザー出力が得られるが、紫外線への波長変換は、KTP, KDP, BBOといった結晶による高調波変換によって行われる。より長波長の赤外線への変換では、和周波や差周波のミキシングが試みられているが、安定な出力を得るには光学系も複雑で困難な点が多い。

燃焼計測に多く用いられてきた色素レーザーは、強度の比較的高いパルスレーザーが多く用いられている。その励起には、Nd:YAGレーザーの第二高調波(SHG, 532nm)や第三高調波(THG, 355nm)、エキシマレーザー(248, 308nm)といったレーザー光源が良く用いられており、平均パワーやピーク強度、繰返しといった点で各々に特徴があり計測の用途に応じて選択できる。

パルス発振でも、スペクトルの線幅は、容易に1 pm以下に狭めることが実現されており、分光計測上に必要な仕様を提供できる。

2) レーザー励起の固体レーザー (Ti: Al₂O₃ レーザー)

ここ7~8年程度のあいだに最も注目され開発されてきたレーザーであるが、それは、むしろ、広利得領域をもつスペクトルから、超短パルス発生の研究が進んだためといえる¹⁰⁾。Ti: Al₂O₃レーザーのスペクトルは、近赤外線領域で、しかし、基本波700nm~930 nmの領域はもちろんのこと、高調波200nm~310nm, 350nm~460nmといった領域では、十分に安定な出力が得られている。

各発振波長で、発振までの遅延時間があり同時に二波長を得て波長のミキシングようとすると技術的に困難な側面が出てくる。色素レーザーと同様な斜め入射の回折格子をもつ発振器では、パルス発振でも、スペクトルの線幅は、容易に~pm程度に狭めることが実現されており、分光計測上に必要な仕様を満足できる。筆者らも、小型のバッテリー駆動のTi: Al₂O₃レーザー装置を開発し、既に、フィールド等での計測を開始している¹⁰⁾。

3) 光パラメトリック発振

光パラメトリック発振(Optical Parametric Oscillator, OPO)は、いまのところ比較的安定なNd:YAGレーザー励起のものが多く、2.5 μmまでの発振線で同調可能である。KTP, BBO, LBO, 等の非線形結晶の品質が充実するとともに、その性能が高まってきたといえる。

入射波長の変換は結晶の角度を制御するか、温度を

制御するかで行う。波長変換の線幅は、結晶に変換の許容角度があるため、広がる。このため、容易には、高い周波数輝度を得られない。いくつかの市販品では、発振器内部に回折格子を挿入して波長選択する方式がとられている。また他の解決方法として、励起レーザー光源に極度に狭帯域化したシード光を注入して励起レーザーを狭帯域化する手法が開発され、実験室レベルで使用されている。LD励起のNd:YAGレーザーとの組み合わせ等から、全固体化の波長可変レーザー装置ができるとかなり実用にも近くなるであろう⁹⁾。

(2) ガスレーザー

中赤外線の発振線をもつ炭酸ガスレーザーは、高出力レーザーとして主に加工機としての用途が高いが、一方、測距儀用やレーザーレーダーの光源として小型で高品質な光源が市販されている。未燃の有毒ガスに関連した検出、燃焼排気ガス中のアンモニア成分の検出に多く用いられている。小型高出力なレーザーが多く市販されている。9~10 μmのQ, Rブランチの発振線にあわせて検出ガスを選択できる。レーザー出力は、ほとんどの場合、10kHz程度のRF変調がかかった擬似連続発振で、1つのパルスはμs程度のパルス幅を持つ。

紫外線で発振するエキシマレーザーは、193, 248, 308nmが代表的な波長で、容易に高出力なものが入手できる。波長可変領域は、中心波長に対して±2 nm程度となる。10ns程度のパルス幅で、100mJ/パルスクラスの出力は、容易に得られるので、測定時の光学系の損失をあまり考慮しないで使用できる。小型化安定化が進んでおり、実験室レベルのLIFや4光波混合の測定には、重要な機器となると考えられる。ハロゲン系のガスを使用するレーザーであるため、現在、封じ切型で、ガスを頻りに交換しないものが登場して、炭酸ガスレーザーの技術レベルの成熟度に近づきつつある。

(3) レーザダイオード (Laser Diode, LD) 及び LD励起レーザー

小型で、インラインでのプロセスモニターとしてLDに優るものはないであろう。これまでに一般化して使用されているのは、通信用の1.3, 1.5 μmの他、906nm, 800nm等である。ほとんどすべての燃焼計測応用のLDは、吸収分析を目的に製作され使用されている。これは、発振線幅が、十分に狭く(~5 MHz程度)になっており、変調がかけられ、ヘテロダイン検出などでS/Nを向上できるためである¹⁰⁾。ピーク出

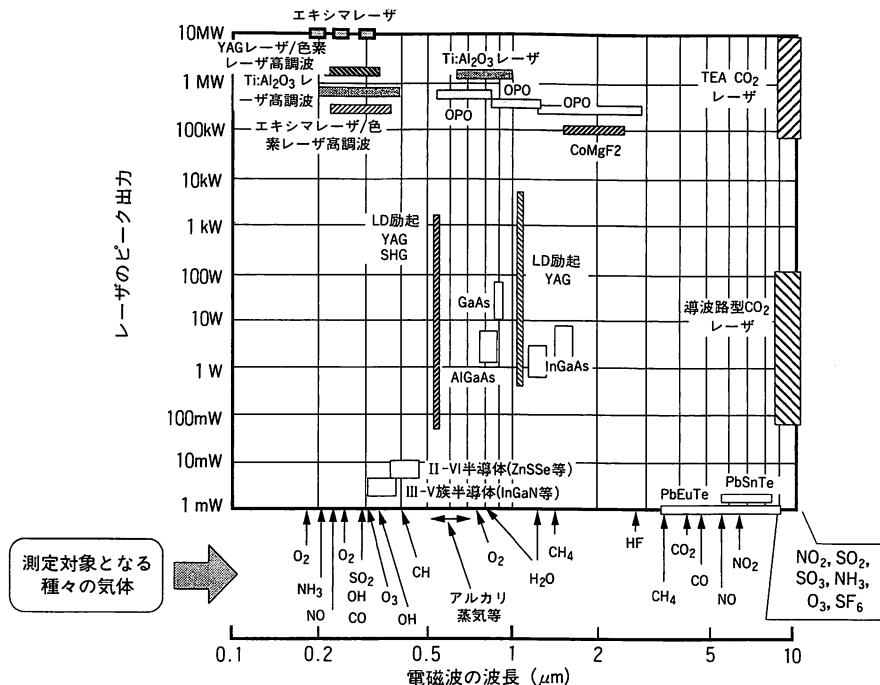


図-1 計測用各種レーザー装置の出力と波長

力は高々~W程度に制限されている。可変波長領域は、製作時に指定ができるが、広いものでも、実用上10 nm程度に制限される。微細加工により、半導体レーザー本体に、回折格子を埋め込む構造で、波長可変にしているものも製作されているが、まだ初期の研究段階である。

最近、多くの短波長化に関する研究がなされているが、青緑色の発振をめざした研究が多い。これは、DVD等のメモリー記録光源を主眼としたものである。安価で高出力のものが登場するようになると、SHG等による波長変換も考えられ、燃焼計測の新しい紫外光源としても期待できる¹⁹⁾。

一方、赤外線領域で、ガスレーザーや固体レーザーで容易に出力を得られない、3~9 μmでは、LD光源の有用性は高い。この領域では、いくつかのLDが製品化され測定結果も報告されている¹⁹⁾。赤外線領域のLDは、そのほとんどが冷却を必要としており、レーザー発振器は非常に小型であるが、周辺機器を含めるとその装置の規模は他の波長可変レーザーとあまり大きな差異はない場合もある。

これまで、燃焼ガスに関連した計測に使用されているパルスレーザーの種類と検出ガス種を図-1に示す。

3.2 光の検出

燃焼分野でのレーザー計測、制御における光信号は、たとえ高出力のパルスレーザーを使用しても、多くの場合、微量分子からの微弱な蛍光や、微量な透過光の変化を検出しなければならない。検出素子には、高感度、高精度で、広いダイナミックレンジが、要求される。また、広い波長領域にわたって、また応答周波数も高く安定に動作するといったことも必要となり、技術的に相反する困難な課題が多く要求される。

(1) 1次元検出器

光の検出技術では、近年の半導体素子の技術が成熟してきていることは、広く認識されている点とあって良いであろう。特に、1980年半ばからは、アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode APD) による光子計数 (フォトンカウンティング) レベルでの光検出が、実現されており、最近では、その波長範囲も400nm~1.5 μmまで広がってきている^{17), 18)}。各種光検出器の波長に対する相対的感度の指標を図-2に示す¹⁹⁾。

赤外線の2.0 μm以上の領域では、検出器の感度を維持するのに素子の冷却等が必要である。

(2) 2次元検出器 (撮像管, 撮像素子)

紫外線, 可視から近赤外線の波長帯域を考えたとき、

表2 赤外2次元半導体撮像素子¹⁹⁾

DETECTOR MATERIAL	SPECTRAL BAND (μm)	OPERATION TEMPERATURE (K)	ELEMENT NUMBER	PIXEL SIZE (μm^2)	FILLING FACTOR (%)
InSb	3-5	70-85	256×256 512×512	50×50 25×25	>85 >80
CdHgTe	3-5	195	1024×1 256×256 512×512 (under development)	40×40 27×27	100 >60 >65
Pt Si-Schottky Barrier	3-7	40-90	512×512 640×480 1040×1040	32×25 20×20 17×17	66 80 71
Si : in GaAs/AlGaAs Quantum-well	3-7	<50 77	128×128 256×256	50×50 50×50	>90 >65
CdHgTe	8-12	77	256×256 640×480	40×40 27×27	>75 >70
Si : Ga	8-17	<30	128×128	75×75	>90
Si : Sb	12-36	<30	128×128	25×35	>90
Pyroelectric	1-30	~300	192×128	35×35	>65
Lithium tantalate					

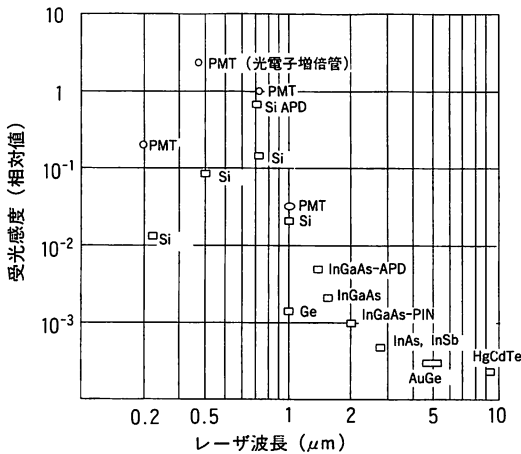


図-2 光検出素子の受光感度と波長の関係¹⁹⁾

撮像管の性能は、いまだにCCD半導体素子の性能より高いといえるであろう。撮像管では、SITや、ハーピコンといった素子は、素子単体性能は非常に高い²⁰⁾。これらの、素子はいずれも低雑音で、マイクロチャネルプレート方式のイメージンシファイアとCCDデジタルカメラの組み合わせ (ICCDデジタルカメラ) と比較すると画像品質が高いことが特徴である。

光子を捉えるといった観点からするとICCDは、短いパルスのレーザーと組み合わせると短時間のゲート (10ns程度) が利用でき、背景光の輝度が高い場合にも、抽出したい信号を取り出せる。検出信号の線形性

といった観点からも、ダイナミックレンジは、ICCDのデジタルカメラが優れ、16ビット相当のものが容易に入手できるため、蛍光輝度から分子濃度を求める際などに有利といえる。また、ICCDデジタルカメラでは、画像蓄積をして素子からの信号読み出し時の雑音を低減できる。ただし、ビデオレートでは、1秒に30フレームの画像信号が取り出せるのに対し、低雑音のデータ取得では1秒に3フレーム程度に制限される。今後はさらに画質の向上が期待される。

一方、赤外線領域では、最近ではInSb, HgCdTe, GaAs等のIRCCDが登場し、十分な性能が臨めるようになってきている²⁰⁾。今後、赤外線レーザーとの組み合わせで、燃焼排気ガスの監視等に使用できる。2次元CCD素子の、波長と種類を表2に示す。

(3) その他の高感度検出技術

波長の選択の自由度は、まだ、少ないが、微弱な光信号をS/N良く増幅する方法として、最近、希土類ドープの光ファイバーを増幅器として利用し光検出する方法が行われている。増幅媒体である光ファイバの長さを増すと増幅率が高くなり、周波数応答性も高い。微弱光を直接、光/電気信号の変換をおこなって電気信号の増幅度を向上させようとする、回路雑音の低減等に困難がともなう。しかし、光ファイバアンプでは、電気信号に変換する前に微弱光を十分に光増幅をおこなって、電気信号に変換するのでも回路雑音が少

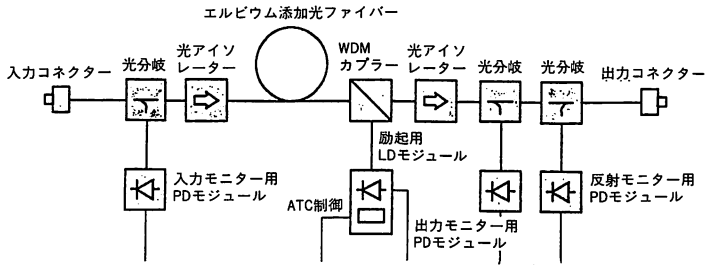


図-3 光ファイバ増幅器の構成例²¹⁾

なくS/N比を改善するという設計ができる²¹⁾。100dB程度の増幅は、十分に可能であろう。この光検出、増幅器の構成の模式図を図-3に示す²²⁾。励起光源としては通信分野で頻繁に使用されている、レーザーダイオードで、小型のシステムが期待できる。通信分野では、汎用となりつつあるこの技術は、今後、実環境下で燃焼分野の計測での応用は、レーザー波長と特定の分子の遷移線が一致するような領域では、比較的容易ではないかと考えられている。とりわけ、500nm~2.0μm程度の波長では、今後、燃焼計測でも興味ある応用が考えられる。

4. 計測例

ここでは、波長可変レーザーとイメージインテンシファイアの組み合わせから燃焼火炎中のOHの4光波混合技術の温度計測装置の構成と測定結果概略についてP. Ewart等の測定を例にあげて述べる²³⁾。

レーザー光源として、Nd:YAGレーザーを励起源とした色素レーザーを基本波に使用した。非線形光学結晶により波長は、306~310nmの紫外線領域で可変波長として、線幅は、0.16cm⁻¹、出力は、0.2~0.3mJ/パルス、パルス幅約10nsを得ている。光学系の構成を図-4に示す。

このレーザー光をOHの吸収線に同調した波長で発振させ、DFWM発生光学系を構成する。具体的には、ビーム参照光とプローブ光の2つに分岐して、メタンと空気の燃焼火炎に多少の角度を持って入射させ、イメージインテンシファイア付のCCD素子で、DFWM信号光を観測する。測定領域近辺のレーザーの周波数輝度は500kW/cm²/cm⁻¹程度と考えられる。

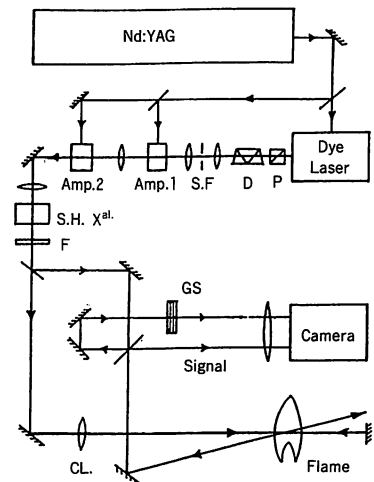
この観測を2つの異なった吸収遷移線について行い、コンピュータにより2次元面内の各点でDFWM信号光強度、励起レーザーの参照強度を比較、演算処理すると、温度分布図が作製できる。その結果を図-5に示す。分解能は、約100μm程度である。1600~1800K

の測定結果に対して、計算の過程から10%程度の検出誤差が見積もられる。

この実験では、特殊なUVカメラレンズは、使用せず、単レンズで測定が可能となっている。また使用した、ICCD素子の検出下限界は、10⁻³lx程度と中程度の感度であり、検出できる、OHの濃度は100~500ppmレベルであると予想できる²⁴⁾。しかし、カメラの感度を10⁻⁷lx程度まで高感度化を図ればppmレベルの微量分子も測定が可能と考えられる。

5. おわりに

燃焼場の計測にレーザー光源は有力な“道具”で、その技術進展は著しい。火炎内の流速、温度、濃度の瞬時、2次元分布の測定が可能になりつつある。これらから、火炎内のより詳細な現象、機構の解明がさら



Schematic representation of the apparatus used for recording images by DFWM in the OH radical in a flame : Amp. 1 and Amp.2, dye cell amplifiers ; S. F, spatial filter ; D, dispersing prism ; P, polarizing prism ; S. H. X^{al}, second harmonic generating crystal ; F, filter ; GS, glass slide attenuators ; CL, cylindrical lens.

図-4 4光波混合計測の実験装置構成²³⁾

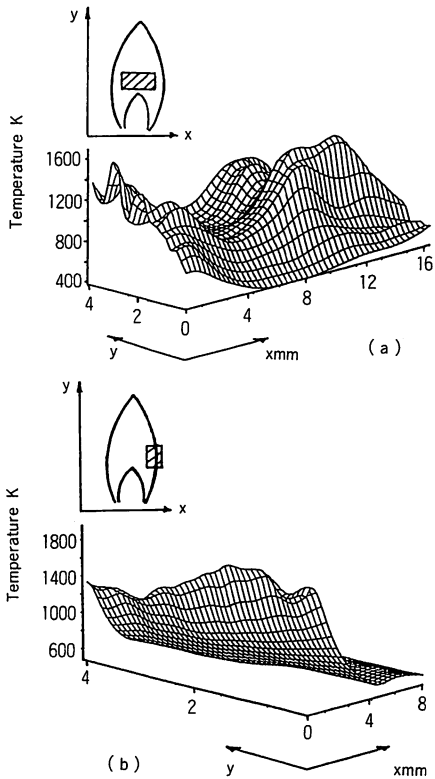


図-5 4 光波混合計測の計測結果²³⁾

に発展すると期待できる。

すでに、レーザー計測方法が、高価な計測装置かつ実験室レベルの分光計測に使用していた時期が終わりつつあり、次第に高機能な制御センサーとして工学的に用いられ始めていると言っても過言ではない。今後、実環境でのシステム運用のノウハウが蓄積されてくれば、燃焼の現象を理解するばかりか、電気的な制御装置に置き換わって、光制御が用いられるようになるであろう。また、光通信技術の分野で進んでいる技術、たとえば、半導体光増幅やファイバ増幅の原理等を燃焼の計測制御に応用するとさらにその汎用性、工学性は飛躍的に高まってゆくものと考えられる。

参考文献

- 1) 岡田 龍雄, 前田 三男, "パルスレーザーデポジションプロセスのレーザー分光計測," レーザー研究, vol. 22, pp.160-171, (1994).
- 2) 渡部 俊太郎, "高ピーク出力レーザーとその応用," 応用物理, vol. 64, pp. 868-877, (1995).
- 3) 鷺尾 邦彦, "LD励起高出力固体レーザーの新展開," レーザー研究, vol. 24 pp. 316-323(1996).
- 4) J. D. Bradshaw, M. O. Rodgers, and D. D. Davis, "Single photon laser induced fluorescence detection of NO and SO₂ for atmospheric conditions of composition and pressure," Appl. Opt., vol. 21, pp. 2493-2500 (1982).
- 5) R. K. Hanson, J. M. Seitzman, and P. H. Paul, "Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases," Appl. Phys. B, vol. 50, pp. 450-461(1990).
- 6) T. J. Anderson, G. M. Dobbs, and A. C. Eckbreth, "Mobil CARS instrument for combustion and plasma diagnostics," Appl. Opt., vol. 25, pp. 4076-4085 (1986).
- 7) W. Reckers, L. Huwelk, G. Grunefeld, and P. Andersen, "Spatially resolved multispecies and temperature analysis in hydrogen flames," Appl. Opt., vol. 32, pp. 907-918 (1993).
- 8) R. A. Fisher, Ed., Optical Phase Conjugation(Academic Press, New York, 1983).
- 9) J. Pender and L. Hesselink, "Phase conjugation in a flame," Opt. Lett. vol. 10, pp. 264-266(1985).
- 10) P. Ewart and S. V. Oleary, "Detection of OH in a flame by degenerate four-wave mixing," Opt. Lett. vol. 11, pp. 279-281(1986).
- 11) 佐々木 孝友, "新固体レーザー材料と非線形光学結晶," 応用物理, vol. 64, pp. 878-887, (1995).
- 12) 佐々木 孝友, "高効率新固体レーザー," オプトロニクス, vol. 157, pp. 55-65, (1990).
- 13) 浜野 靖徳, 小原 正孝, 藤森 俊郎, 山口 滋, 佐藤 順一, "小型可搬型LIF測定装置の開発," 石川島播磨磨報, Vol. 6, No. 2, pp. 84-90, (1996).
- 14) W. Lenth, "Optical heterodyne spectroscopy with frequency-and-amplitude-modulated semiconductor lasers," Opt. Lett., vol. 8, pp. 575-577(1983).
- 15) 岡 美智雄, 久保田 重夫, "全固体高出力コヒーレント紫外光源," 応用物理, vol. 64, pp. 912-915, (1995).
- 16) 古賀 隆治, 和田 修己, 小坂 恵, M. Bouzidi, 佐野 博也, "高速掃引による長光路大気ガス分光分析法," 光学, vol. 18, pp. 74-75, (1989).
- 17) 木谷 恵一, 林 孝, "アバランシェフォトダイオードを用いた光子計数法による可視及び赤外極微弱光の検出," 光学, vol. 13, pp. 131-139, (1984).
- 18) H. Dauter, P. Deshamps, B. Dion, A. D. MacGregor, D. MacSween, R. J. McIntyre, C. Trottier, and P. P. Webb, "Photon counting techniques with silicon avalanche photodiodes," Appl. Opt., vol. 32, pp. 3894-3900 (1993).
- 19) EGG Canada, EGG Judson及びSBRC社データシート
- 20) The photonics design and application handbook, Laurin Publication, (1996), 及び木内 雄二著 "イメージセンサーの基礎と応用," 日刊工業新聞社(1991)
- 21) 小山 二三夫, "半導体光増幅器," 応用物理, vol. 64, pp. 13-18, (1995).
- 22) 水戸 郁夫, 石川 信, 深谷 一夫, "光ファイバ増幅器励起用高出力半導体レーザー," 応用物理, vol. 64, pp. 2-12, (1995).
- 23) P. Ewart and M. Kaczmarek, "Two-dimensional mapping of temperature in a flame by degenerate four-wave mixing in OH," Appl. Opt. vol. 30, pp. 3996-3999(1991).
- 24) R. L. Farrow, D. J. Rakestraw, and T. Dreier, "Investigation of the dependence of degenerate four-wave mixing line intensities on transition dipole moments," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 9, pp. 1770-1777(1992).