

NAL TR-940

ISSN 0389-4010

UDC 662.611.2

535.37

535.8

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-940

C A R S による燃 焼 計 測

(II) 成分濃度計測

渡 辺 泰 夫 ・ 五 味 光 男

江 口 邦 久 ・ 手 崎 衆

1987 年 8 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

CARSによる燃焼計測

(II)成分濃度計測*

渡辺泰夫** 五味光男***
江口邦久**** 手崎 衆*****

CARS Measurements of Combustion

(II) Gas Species Concentration Measurements

by

Yasuo Watanabe, Mitsuo Gomi, Kunihiisa Eguchi
and Atsumu Tezaki

Abstract

An improved phase-match arrangement for generating broadband CARS signals was devised and applied to the detection of low concentration species in a burned gas. This arrangement was effective in eliminating nonresonant signals generated in the light path and was capable of keeping the signal levels higher than BOXCARS arrangement. It was shown that by single-pulse measurements the lowest detection level of O₂ concentration was possible down to 2% volumetric fraction. A nonresonant background suppression technique was also attempted and background-free spectra of O₂ and CO were obtained to demonstrate the background rejection ability and the enhancement of detectivity.

1. まえがき

CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering or Spectroscopy)は、燃焼を伴う流れや低密度のプラズマ等の反応性気体の計測手段として非常に有望視され、研究開発が精力的に進められてきた。その特徴は、通常のラマン分光法に比べてはるかに大きな信号光強度が得られること、信号光が入射レーザー光と同様の強い指向性を持ったコーヒーレン

トな光であること等で、発光、蛍光を伴う系やすす等の微粒子による散乱を生じる系でも、高いS/N比での測定が可能である。高いパルス出力、早い繰り返し発振の可能なYAGレーザーの使用により、空間的にも時間的にも対象と非接触で高分解能な計測が可能であるから、時間的変動の激しい実用燃焼器内の流れの観測には最も有望と考えられ、ここ数年来様々な応用が試みられてきた。ジェットエンジン排気の温度測定¹⁾、ピストンエンジンシリンダー内の温度変化^{2,3)}、模擬ジェットエンジン燃焼器⁴⁾、乱流燃焼場の温度分布⁵⁾等が代表的な応用例である。これらの例も含めて現在までに広くおこなわれているCARS計測は、空気をもちいた燃焼気体中に多量に存在するN₂分子のQブランチスペクトルによる温度

*昭和62年6月1日 受付

** 空気力学第一部

*** 航空機公害研究グループ

**** 原動機部

***** 元研修生 (東大院)

計測である。これに関しては理論計算法も確立し、測定精度の検討も進められており、実用的なシングルパルス測定も可能である。

シングルパルス測定とは、色素レーザーを広帯域発振させてストークス光とし、検出器には多チャンネル検出器を用いて、光源や分光器の波長掃引を行うことなく YAG レーザーの単一パルス毎にスペクトルを得る方式で、ブロードバンドまたはマルチプレックス CARS (broadband or multiplex CARS) と呼ばれ、検出感度、分解能の点では劣るが、信号強度が十分にある場合には、瞬間の物理量の決定が出来る。励起光、ストークス光共に狭帯域レーザーとする方法では、スペクトルを得るためには、一方の波長掃引を必要とするが、感度の点では有利である。この方式はスキャン法 (scanned CARS) とも呼ばれる。

一方、CARS による成分濃度測定は、温度測定に比べて、未だ広く応用がなされている状況ではない。成分検出が報告されている分子種は、 $H_2^6)$ 、 $N_2^7)$ 、 $O_2^4)$ 、 $CO^8)$ 、 $CO_2^9)$ 、 $H_2O^{10)}$ 、等があるが、多くは定性的な結果に留まっている。CARS は非線型現象であることから、本質的に微量成分測定が困難であるという不利な点を持っている。信号強度は共鳴単位密度の二乗に比例するので、低濃度の場合および単位分布の広がる高温の場合に不利である。特に混合気中の微量成分に対しては、混合気の非共鳴背景信号が共鳴信号よりはるかに大きくなり、これが検出限界を決めてしまう。非共鳴光の存在下での少量成分の検出限界は、常温常圧空気中では 0.1%、火炎温度では 1% 程度と云われている。実験的には、検出限界をより悪くする要因がある。即ち、ストークス光として使われる色素レーザーの波長分布と強度の不安定性で、温度測定の場合と共通の問題である。また、成分濃度を決定するためには、同時に温度を知らなければならないと云う問題もある。

CARS は、過渡的な状態や変動する系に対して非常に有力な計測手段である。最近反応動力学への応用例も出はじめているが、気相の化学反応としての燃焼現象の解明にきわめて有効であろう。前述の欠点を改善すれば、対象もさらに拡がり測定法としての意義が増すと考えられる。通常の CARS について

は、原理的な感度の向上は望めないが、技術的改良により誤差要因を排除して再現性を確保し、現在かなり定性的な濃度測定法を定量的技術とすることは可能であろう。単一レーザーパルス当りの感度を高めて、温度測定と同様にシングルパルス測定が可能になれば、非定常場の計測にきわめて有意義である。

新しい原理によって CARS の検出感度を改善する方法としては、共鳴 CARS と偏光を用いた非共鳴背景光の消去 (以後偏光 CARS と呼ぶ) がある。共鳴 CARS は、励起光、ストークス光共に波長可変として、電子遷移をも共鳴させて散乱断面積の増加をねらう方法である。これまでに NO_2 、 OH 、 I_2 についての実験結果が報告されているが、対象化学種も非常に少く、実用にはほど遠い段階である。

偏光 CARS は、CARS 信号の共鳴成分と非共鳴成分との偏光特性の違いを利用して非共鳴成分を消去する方法である。Rahn⁸⁾ らは、通常の CARS ではノイズレベル以下の濃度の火炎中の CO を偏光 CARS により見事に検出した。しかし、濃度の定量値や検出限界については明らかにされていない。一方、Eckbreth¹¹⁾ は、ブロードバンド CARS で火炎中の CO の検出感度を調べ、非共鳴背景光の存在する時の方が検出感度がよいと報告している。

本報告では、平面火炎後流中の酸素分子を対象とした、ブロードバンド CARS による濃度測定の基礎実験結果について述べる。YAG レーザーの単一パルス当りの信号強度を大きくするために光学系配置の工夫を行ない、検出感度、定量測定精度について検討した。従来困難であったシングルパルスでの濃度測定の結果を示す。また、検出感度向上を目的として、偏光 CARS による非共鳴背景光の排除を試みた結果について述べる。

2. CARS スペクトルの濃度依存性

CARS スペクトル計算の基礎式は、 N_2 による温度測定の際に用いたものと全く同じである¹²⁾ 即ち、波数 ω_3 における信号光強度は、励起光、ストークス光強度 I_1 、 I_2 、非線型感受率 χ により

$$I_3 = \left(\frac{4\pi^2 \omega_3}{c^2} \right)^2 \cdot I_1^2 \cdot I_2 \cdot |\chi|^2 \cdot z^2 \quad (1)$$

と表される。感受率 χ は、共鳴項と非共鳴項の和で

$$\chi = \chi_R + \chi_{NR} \quad (2)$$

と書ける。燃焼気中の主成分である N_2 分子の場合には、非共鳴項 χ_{NR} が無視出来たが、低濃度成分に対しては $\chi_R \sim \chi_{NR}$ となり、スペクトル形状はその比に応じた変調を受ける。 χ_R はラマン散乱断面積($d\sigma/d\Omega$)と共鳴線巾 γ_j で決まる。 χ_{NR} は定数で与えられ、様々の気体分子についてRado¹³⁾の測定値があ

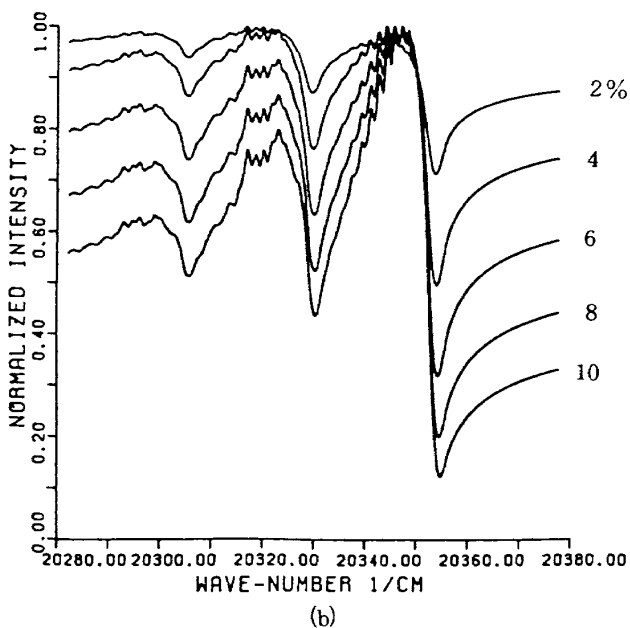
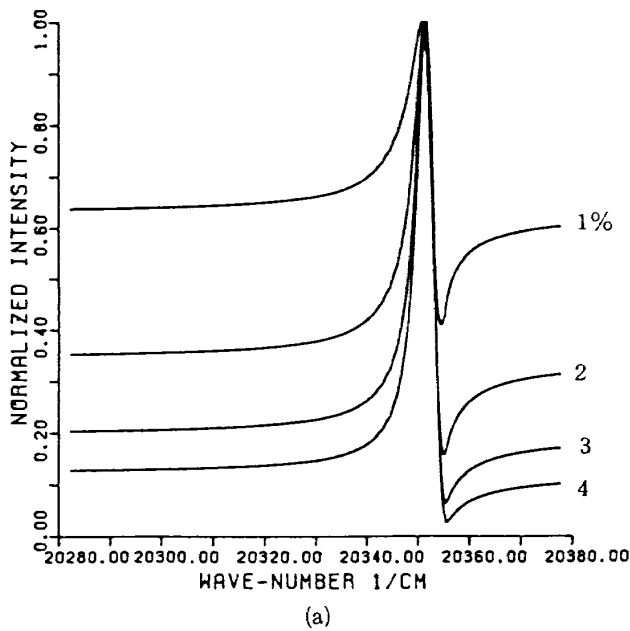


図1 O₂ CARS スペクトルの濃度依存性
 (a) $T = 300^{\circ}\text{K}$, 1~4% O₂ in N₂
 (b) $T = 1700^{\circ}\text{K}$, 2~10% O₂ (メタン/空気
 既燃焼ガス中)

る。混合気体の χ_{NR} は、成分率の加重平均で与えられる。 O_2 分子の γ は実測値がないので、 N_2 と同じ温度依存性をもつと仮定した。 O_2 分子のCARSスペクトルの濃度依存性を示す計算スペクトルを図1に示す。スペクトル形状は上述の χ_R と χ_{NR} との相対的關係によって決まる特徴的な波形を示す。 χ_R の計算で、 γ_j は後述のように実測スペクトル形状を良く再現出来るように定めるが、共鳴線の絶対強度に比べて形状変化は γ_j に対して鈍感であるので、CARSスペクトルの濃度依存性を非経験的に正しく予測出来るほど厳密には決定出来ない。従って、実測されている χ_{NR} の値も相対的にのみ意味があり、濃度決定は既知濃度での実測値との比較により校正を行なって比例定数を決定する必要がある。

3. 実験装置

図2に実験装置光学系配置の概略を示す。これは N_2 CARSによる温度測定の設定と基本的に同じである。励起光 ω_1 には、Nd-YAGレーザー(モレクtron MY-34-20, パルス巾15ns, 最大出力250mJ/パルス, 20Hz)の2倍波(532nm)を用い、ストークス光 ω_2 は、色素レーザー(モレクtron DL-18)を広帯域発振させて用いている。 O_2 CARSにはローダミン610を用いて中心波長を580nmに調

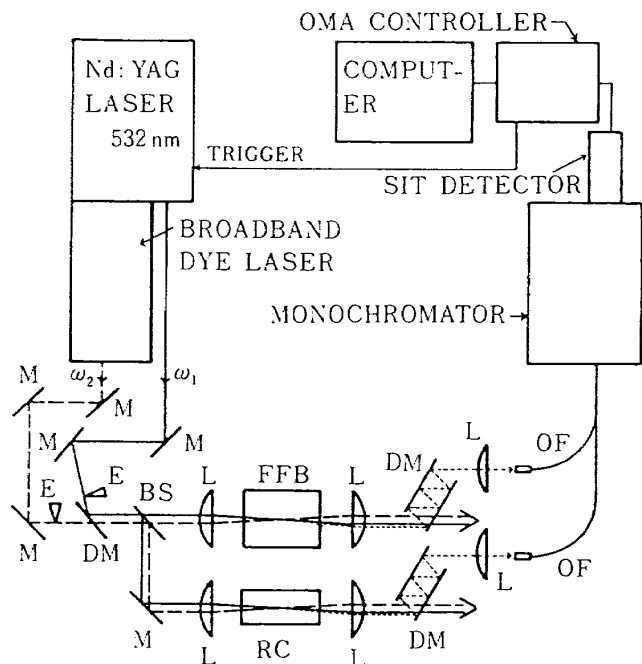


図2 Broadband CARS 実験装置

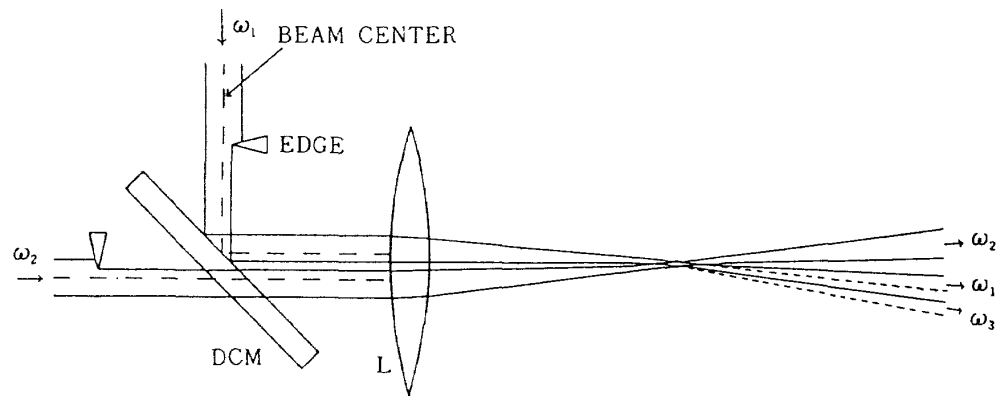


図3 最小角交差法ビーム配置

整する。帯域巾は約6nmである。

光学系配置は、図3に示すように ω_1 、 ω_2 両ビームを共軸とせず、平行にずらしてレンズに入射し、焦点で交差する配置とした。各ビームパス中にナイフエッジを置いてビーム断面の一部をカットし、両ビームが焦点以外で重ならないように保ちながらビーム交差角を小さくして信号強度を得ようとする方法で、最小角交差法(MAC法: Minimum Angle Crossed-beam Method)と名付けた。類似の2ビーム交差法は、Eckbreth¹⁰⁾等がCOのスペクトルを測定した例があるが、MAC法ではナイフエッジによって交差角を小さくしてブロードバンドCARSのような検出感度の不利な方法にも使用出来るようにした。通常使用される共軸光学配置では、レンズ焦点以外でもビームの重なりが生ずるために、周辺空気、レンズ、観測窓ガラスより発生するCARS信号が混入してしまう。これは常温の高密度試料のように、焦点で発生する信号強度が圧倒的に大きい場合には問題にならないが、密度が小さいために信号強度が小さくなる高温気体では重大な問題である。本研究でも、当初は共軸配置で火炎のO₂スペクトル測定を試みたが、妨害CARS信号の混入を避けられなかった。周辺空気よりのO₂信号を排除するために光路を覆って不活性ガスを通じ、窓材を取り除く等の工夫をしても、最終的にレンズで発生する妨害信号でO₂のスペクトルが歪み、正しい測定は不可能であった。MAC法では、共軸配置に比べればサンプリング体積が小さくなるので、信号強度は約一桁低下するが、BOX CARSよりは尚一桁優っている。ビーム交差角の大きさによっては位相整合条件が満足されない可能性

があるが、今回の実験条件($f=100$ mmのレンズでレーザービームの中心間隔を1.5mmとし、ビーム端の最小近接距離を約0.3mmとする)では、コーヒーレンス長 L_c は4.8mmとなり、軸方向の空間分解能 z (相互作用長)の実測値1mmより十分大きく、条件を満足していると判断出来る¹⁴⁾。 z の測定は、CO₂の噴流をレーザービームと焦点付近で交差させ、軸方向に移動させながら空気からの信号を観測し、信号強度が5%から95%に達するまでの長さとした。

信号検出系は、ダイクロックミラーによる前置分光器、オプティカルファイバー、回折格子分光器、OMA-II (Optical Multichannel Analyzer + SIT管検出器)およびミニコンから成る。火炎からのCARS信号と共に、30気圧のアルゴンガスを封入した高圧セルから参照CARS信号を得て、OMAの2トラックモード走査によって、主スペクトルと参照スペクトルの同時検出を行なっている。

今回の実験の対象は、基礎実験用のフラットフレームバーナーで、30×80mmの焼結金属のフレームホルダー上に平面火炎を形成する¹²⁾。中心部付近の平面性は良好で、層流火炎近似が成立していると考えられる。

熱電対による温度測定の結果、火炎後流領域となるホルダー上の高さ5~15mm、水平面20×60mmの範囲内では、はらつき10K以内の定温領域となっている。燃料としては、メタン/空気の予混合気を用い、オリフィス式流量計を介してバーナーに供給した(供給圧0.147 MPa, 室温)。

4. 実験結果

図4にメタン/空気火炎(測定位置は火炎後流で

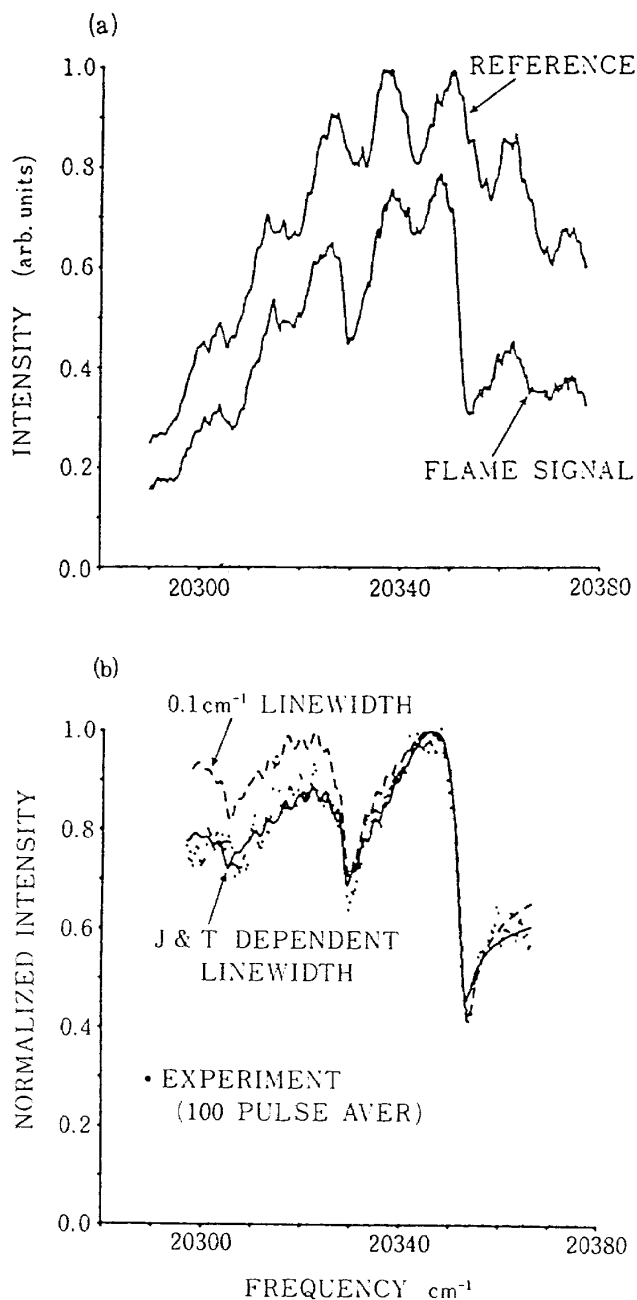


図4 メタン-空気火炎の O_2 CARS
スペクトル実測値

メタン流量 $24.7 \text{ cm}^3/\text{s}$, 空気流量 $337 \text{ cm}^3/\text{s}$,
既燃ガス中酸素濃度測定値 5.9%

- (a) 補正前の火炎の信号および参照信号
(b) 補正後の信号および理論値 ($T=1770 \text{ K}$)

あるが、便宜的に火炎と呼ぶ)の O_2 CARSスペクトルを示す。(a)では火炎信号と参照信号のそれぞれ100パルスの平均値を示し、(b)には参照信号との比をとって補正した信号と、それに対応する理論スペクトルを示す。流量比から平衡計算により求めた O_2 濃度は 5.9% である。火炎信号、参照信号は共に色素レーザーによる複雑な波長分布を示すが、補正操

作により O_2 のスペクトルが正しく得られている。色素レーザーは、同一レーザーでも実験ごとの光学系の調整によって一定でなく、またパルスごとに変化する。従って、火炎信号と参照信号とは、同一パルスに対して得る必要がある。

理論スペクトルを計算するためのパラメーターの中で、高温での O_2 分子のラマン線巾 γ はデータがない。そこで、①常温での値 $\gamma=0.1 \text{ cm}^{-1}$ で一定、② 300°K では 0.1 cm^{-1} で $T^{-1/2}$ に比例する、③ N_2 分子と同じ T 、 J の依存性を持つとした3つの場合について計算値と実測値との比較を行った。図4に示す如く、③の場合は実測値との一致は良好であるが、①および②の場合は最小誤差の状態に調整しても、一致は良くない。これより、 O_2 分子の T 、 J 依存性は厳密には決められないが、実用的には N_2 分子と同程度と考えて良いことがわかる。図5は常温常圧での標準ガスサンプルの O_2 CARSスペクトルである。検定用として、 N_2 で希釈した1, 2, 4%の O_2 濃度のサンプルを用意し、分割器(N_2 により希釈する)によりさらにその $1/5$ 倍の濃度を設定出来るようにした。(d)でわかるように 0.2% の濃度でも十分に信号の検出が可能であることがわかる。図6には表1に示す燃焼条件(実験番号で対比)の O_2 CARSスペクトルの測定例を示す。濃度決定には温度が必要なので、燃焼条件は N_2 CARSによる温度測定を行ったのと同じ条件に設定した。CARS計測による O_2 濃度測定結果を表1に示す(CARS濃度と表示)。測定点は火炎帯後流の平衡領域で、空気/燃料比から平衡計算により O_2 濃度が計算出来、CARS濃度測定の検定に使用出来る(表中流量濃度で示す)。図7にCARSで計測した濃度と流量濃度との比較を示す。(記号は実験日時の違いを示す。)実験点は直線上にあり、再現性もあるので実験方法は適切であり定量性もあると結論出来る。CARS測定濃度は流量濃度のほぼ $2/3$ であるので、校正係数は 1.5 とすればよい。図7において高濃度側データのばらつきが大きいのは、この燃焼条件領域で火炎が多少不安定になるのが原因で濃度、温度のゆらぎがあるためと思われる。

図8にシングルパルスでの O_2 CARSスペクトルを示す。このスペクトルはS/N比は良好でなく、相当

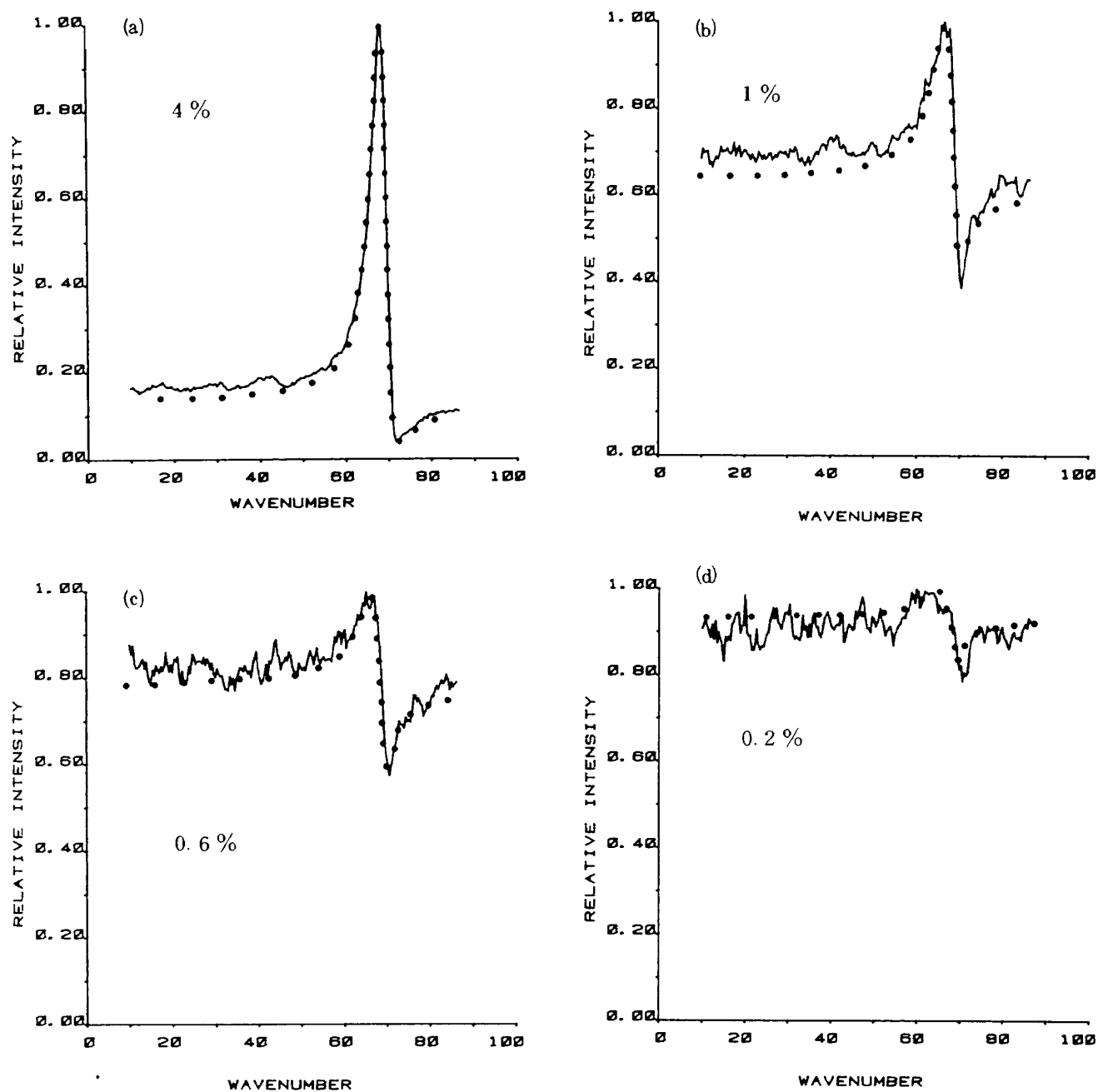
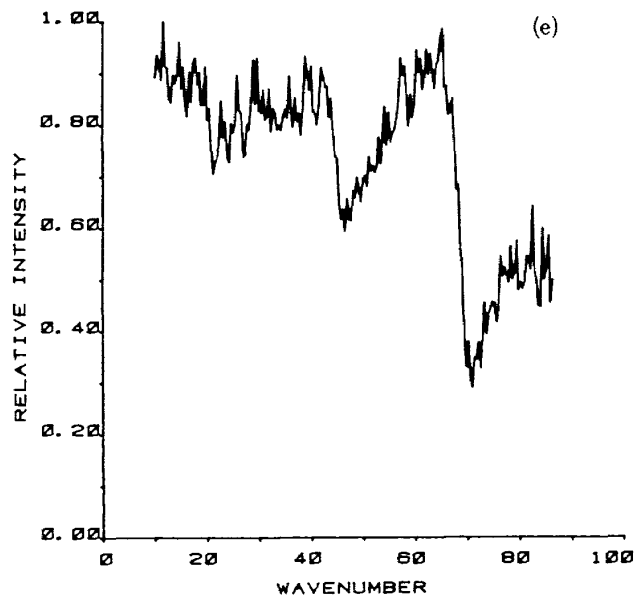
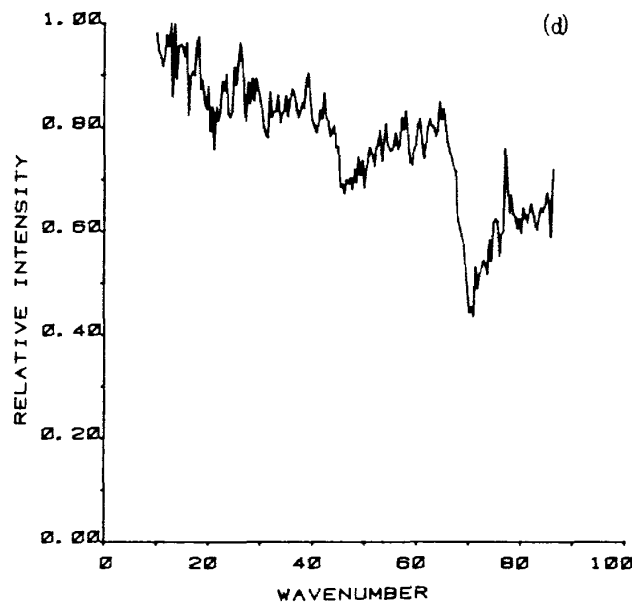
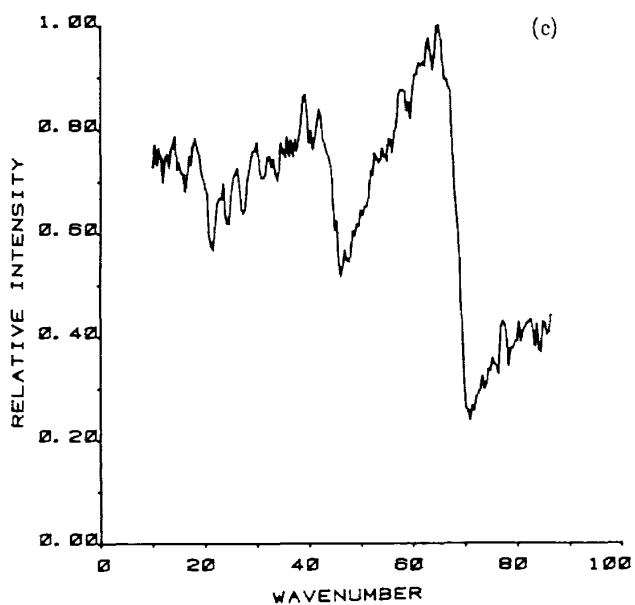
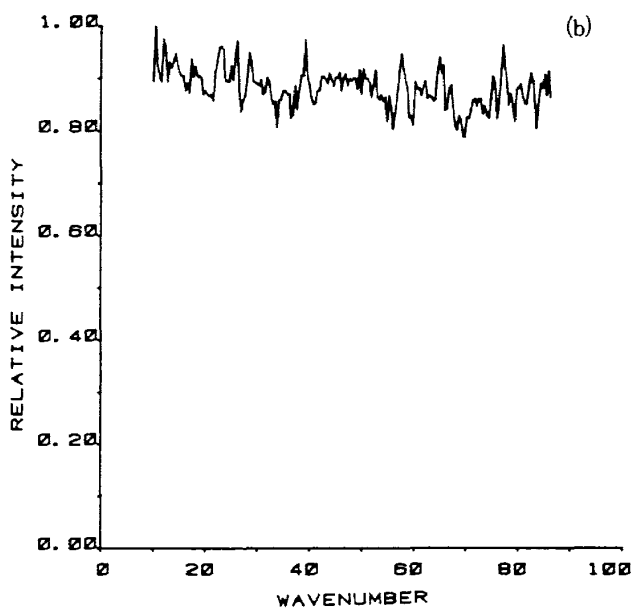
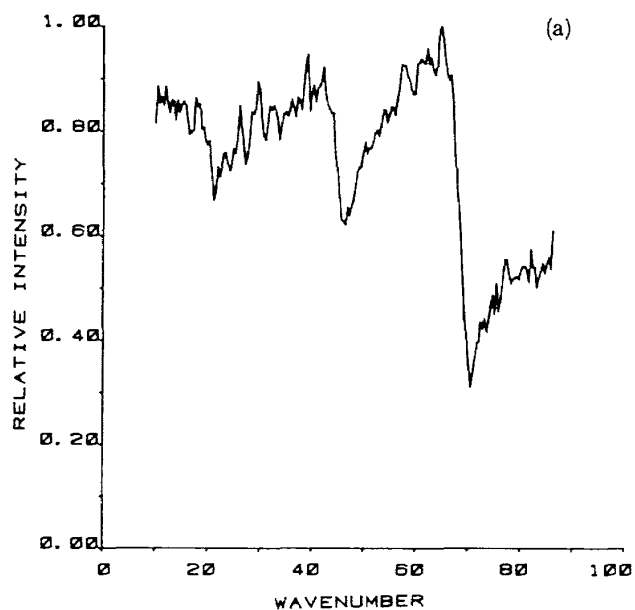


図5 O₂ CARS スペクトル実測値
 $T = 300 \text{ K}$, N₂中に希釈した標準ガス



- 実験番号
- (a) 1403 A
 - (b) " B
 - (c) " C
 - (d) " D
 - (e) " E

図6 O₂ CARS スペクトル実測値
メタン/空気フラットフレーム上部にて測定

表 1 O₂ CARS の実験条件と結果

実験番号	CH ₄ 流量 cm ³ /sec	空気流量 cm ³ /sec	流量濃度 %	温 度 K	CARS 濃度 %
1403 A	24.7	337	5.9	1770	4.12
B	"	251	1.2	1830	0.5
C	"	400	7.9	1730	4.97
D	48.1	528	2.5	1930	3.00
E	"	630	5.3	1880	4.38
1412	24.7	337	5.9	1730	4.16
1421	"	"	5.9	1730	4.53

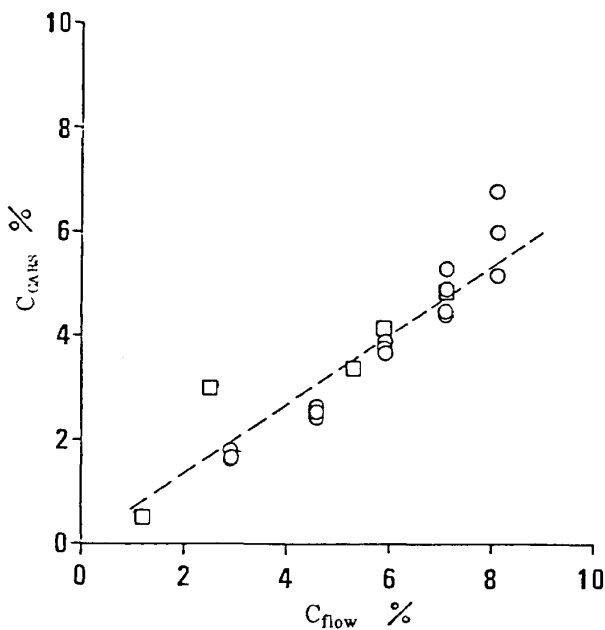


図 7 O₂ CARS 濃度測定値

C_{CARS}: CARS スペクトルから full fitting によって求めた濃度

C_{flow}: 燃料, 空気流量比から求めた火炎後流の酸素濃度

量の雑音即ち誤差要因を含んでいるが, N₂ CARS による温度測定と同様に full fitting 法 (FF 法) により濃度決定が出来る。図の理論値は O₂ 濃度 7.1% (T = 1730°K) に対応する。FF 法の測定結果のヒストグラムを図 11(a) に示す。実験対象の火炎は本来温度, 濃度の変動は殆どないと考えられるので, 測定値の広がりやシングルパルス測定の誤差と考え得る。プロフィール上での点のばらつきは主としてダイレーザの波形不安定性によるが, プロフィール全体でのフィッティングにより平均化され, O₂ 濃度が 2~3% 以上であれば, 1% の標準誤差でシングルパルス測

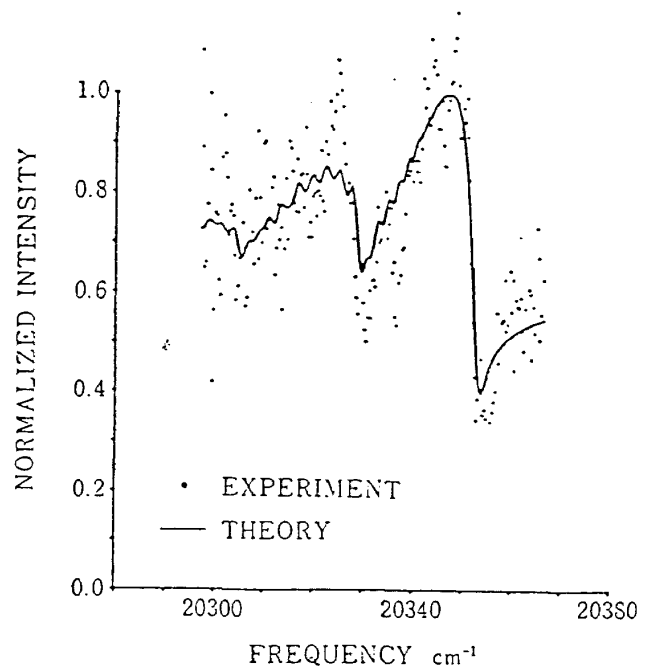


図 8 シングルパルス O₂ CARS スペクトル
NO. 1621 D: メタン / 空気火炎, [O₂] = 7.1%,
T = 1730 K
メタン流量 24.7 cm³/sec, 空気流量 467 cm³/sec,
当量比 0.64

定が可能であった。

温度測定と同様の quick fitting 法 (QF 法) も試みてみた。図 9 に示す様に, O₂ のスペクトルにピーク領域とボトム領域を定義し, その面積比により濃度を決定する。ピーク/ボトム面積比と O₂ 濃度との関係の温度依存性を図 10 に示す。これらの領域は, 濃度依存性を大きくするためには, ピーク位置一点のみを用いればよいが, 実験値のノイズを平滑化して誤差を減少させるために一定の巾をとってある。QF 法による測定のヒストグラムを図 11 (b) に示す。

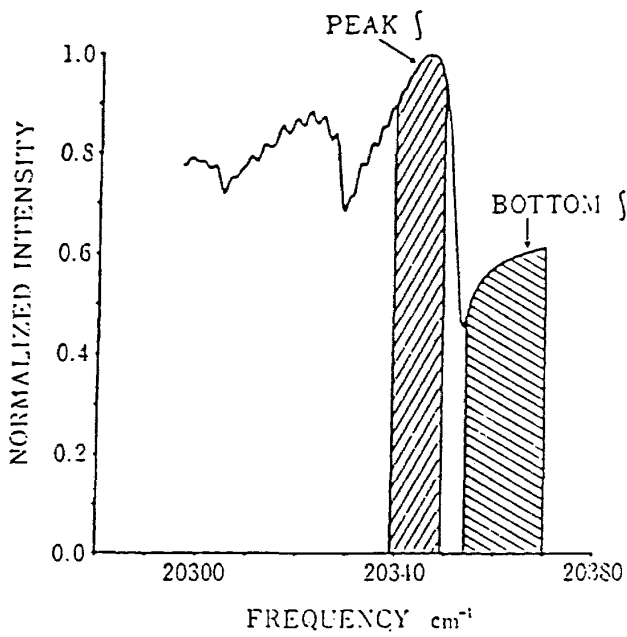


図9 濃度測定のQuick fitting法の概念図
Peak/Bottom 面積比によって濃度を決定する

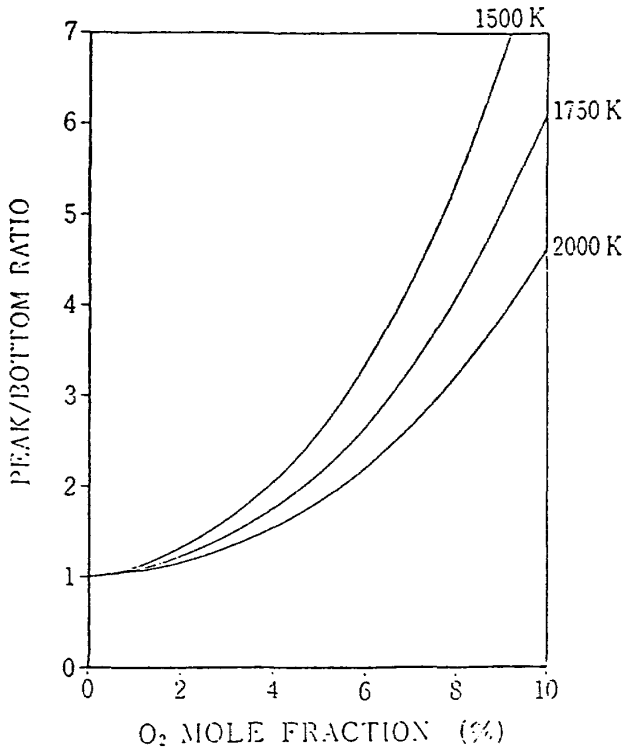


図10 QF法変数のO₂濃度依存
 $\Gamma = 8T^{-0.71} - 18.6T^{-1.45} J$, $\Delta\omega = 0.5 \text{ cm}^{-1}$,
slit width = 2.3 cm^{-1}

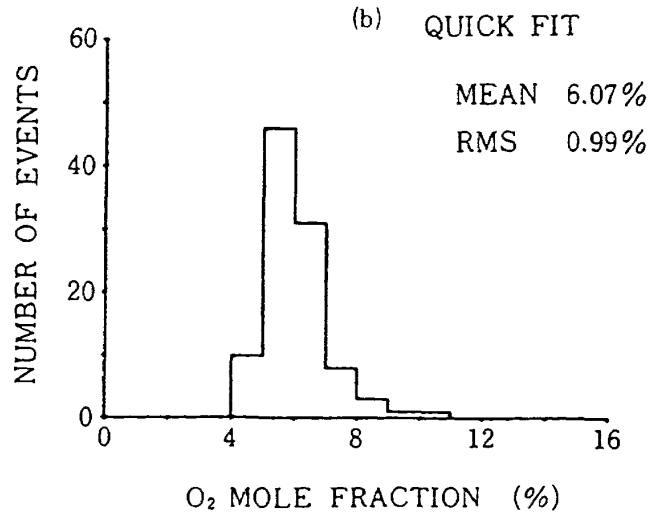
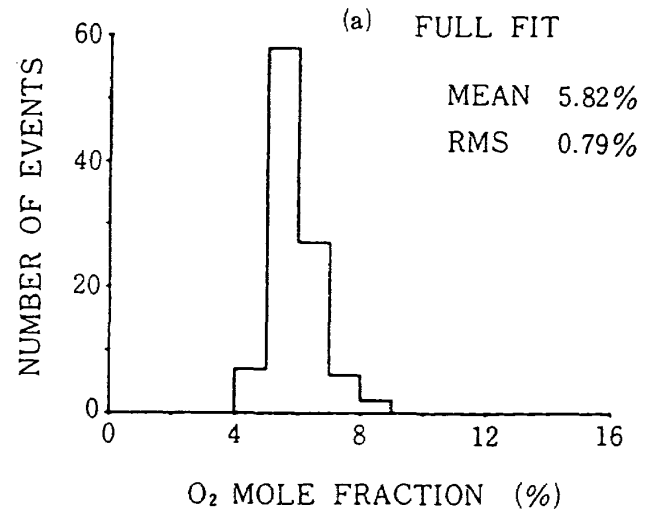


図11 シングルパルス濃度測定の実験結果

FF法とQF法の結果は同程度の精度を持っていると言える。標準偏差値でみると、1%以下になる場合が最良であったが、これは実験ごとに再現出来るとは限らない。この原因は光軸調整の微妙さにあると思われる。Eckbreth¹⁾がSpread testと名付けた方法、即ちパルスごとのデータをすべて無条件に採用するのではなく、誤差を大きく含むデータを選択して切り捨てる方法を種々の判定基準で適用してみたがばらつきは減少しなかった。FF法とQF法は相関が強く、同じ誤差要因が両方法に同程度に影響していると考えられる。

シングルパルスでの濃度の計測の精度を規定する要因は、信号のS/N比と温度測定の場合と同様に色素レーザーの雑音であろう。信号強度増加のためには、入射レーザー励起光強度 I_1 を大きくすればよい

が、これは無限に大きくは出来ず、焦点での気体のブレイクダウン（絶縁破壊現象）により限定される。本実験では励起光 ω_1 のパルス出力の上限値は 100 mJ 程度であり、対応するストークス光 ω_2 の出力 10 mJ 程度であった。 ω_2 光の強度は原理的に増強可能であるが、そのためには新しい色素レーザーの設計が必要である。我々が後日製作した色素レーザーは、本実験で使用したものよりはるかによい発振効率が得られており¹⁵⁾、低 S/N 比での計測に非常に有効であろう。またそのスペクトル波形もなめらかで、CARS スペクトルの波形歪みの減少も期待出来る。その他の測定系の雑音レベルは、OMA の検出素子の冷却を行う等の改善である程度の低減は可能であろう。

5. 偏光 CARS

CARS 信号は分子数密度に非線形に依存するから、低密度になると信号発生効率は著しく低下する。特に混合物中の微量成分を対象とするときには、既述のように非共鳴信号が共鳴信号を上回るようになり S/N 比を低下させ、スペクトル波形の変調も大きく定量的な解析が困難となる。そこでこの非共鳴光を排除する方法が考えられてきた。原理的には共鳴項と非共鳴項 χ_R , χ_{NR} が互に異なるテンソル特性を持つことを利用する^{8, 16)} 即ち、入射レーザー光で誘起される分極の共鳴成分と非共鳴成分は一般に異なった方向を向いているので、発生する共鳴信号光の非共鳴信号光に垂直な偏光成分のみを取り出すことに

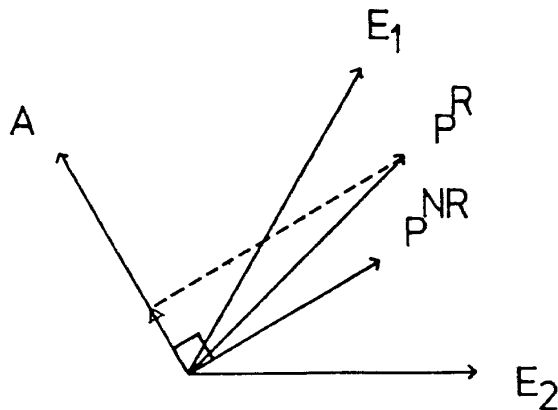


図12 偏光 CARS の偏光方向配置図

E_1, E_2 : 励起光, ストークス光の電場ベクトル
 P^R, P^{NR} : 非線型分極の共鳴, 非共鳴成分
 A : 検光子

より非共鳴背景光を取り除く。このための実験的な偏光面の配置を図12に示す。これは非共鳴背景光の排除に最適でかつ信号を最大にするような配置で、励起光, ストークス光 ω_1, ω_2 の偏光面を 60° の角度で交差させると、非共鳴信号の偏光面はその二等分面に来ることが知られている。従って、検光子の偏光面をこれと直角方向において CARS 信号 ω_3 の偏光成分を取り出せば、非共鳴信号が排除出来る。このとき信号光の強度は、通常の CARS の信号強度の $1/16$ となることが理論的に導かれている。即ち、偏光を利用して非共鳴信号を完全に排除出来るが、同時に共鳴信号の強度も必然的に減少する。

6. 偏光 CARS の実験と結果

図13に偏光 CARS の光学系配置を示す。(a)はダイクロイックミラー (DCM) による混合方式, (b)は直角プリズムによる混合方式である。YAG レーザー, 色素レーザーの出力は水平偏光となっている。偏光方向を任意に回転させるために半波長板を、また直線偏光を完全にするために Glan-Thompson プリズム (GT) を ω_1, ω_2 両ビームパス中に置いている。出力信号光 ω_3 も、GT を通して所定方向の偏光成分のみを取り出す。この実験では、色素レーザーは狭帯域で発振させ、回折格子の回転により波長走査を行っている。従って、検出系には分光器を使用せず、プリズムと干渉フィルタにより妨害光を排除し、光電子増倍管 (PM) により信号検出を行っている。強力な励起光 ω_1 については、特に高い排除比を必要とする。

偏光 CARS 実験の光学系で注意すべきことは、光学素子を透過または反射した光の直線偏光の保存性である。偏光性が完全でない光が光学素子に対して垂直でない角度で入射すると、S成分とP成分の位相差が生じ、反射（透過）光は楕円偏光となる。図13(a)の DCM 混合方式は偏光特性としては完全でないが、実際には比較的直線偏光の乱れが少ないので、この配置で非共鳴光排除は可能である。より完全な偏光を得る方法として(b)のプリズム混合方式を考えた。この方法では、DCMを直角プリズムに代えて、ストークスビーム ω_2 の GT 以後の光路では偏光を乱す素子を用いないようにした。

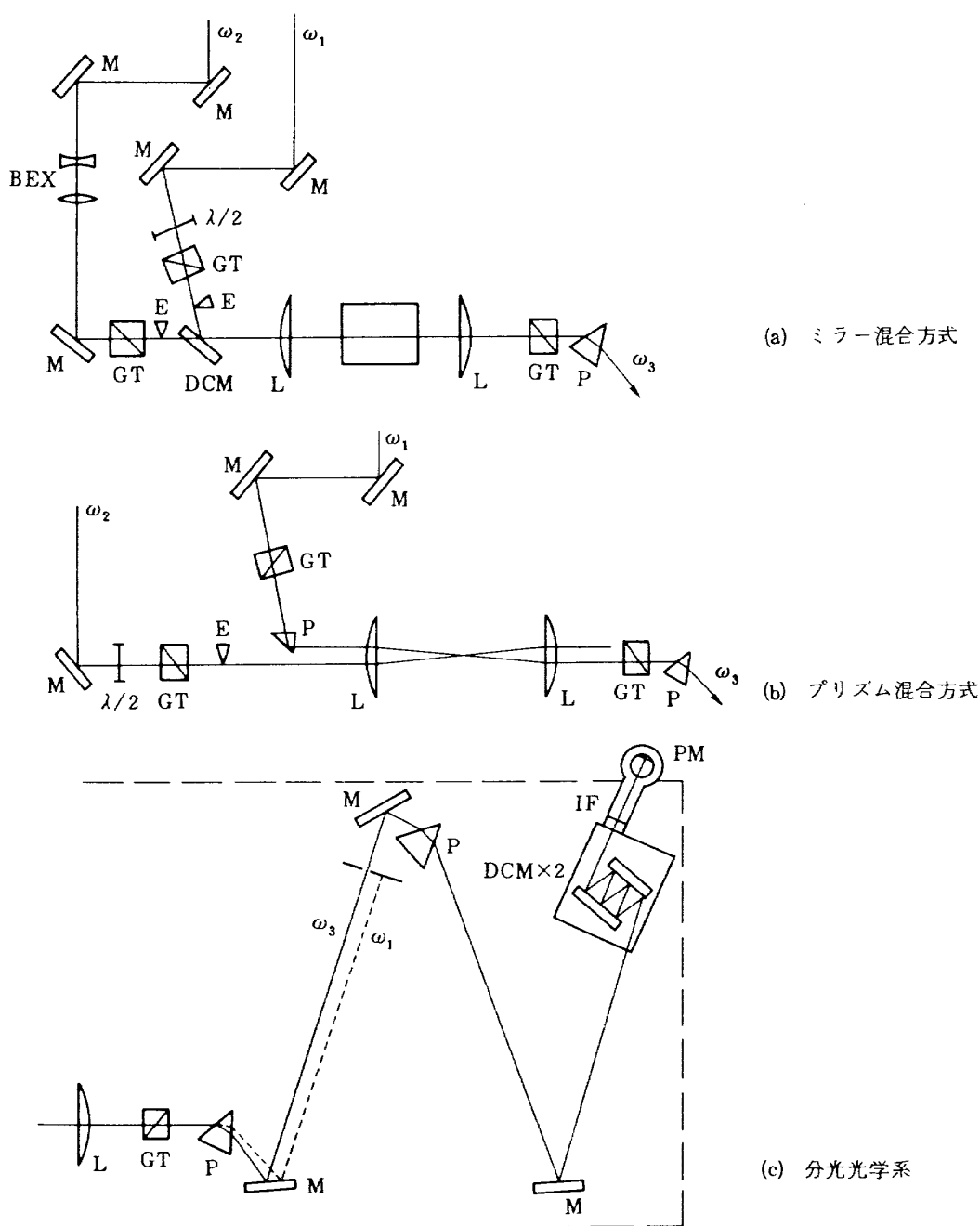


図 13 偏光 CARS 光学系

BEX: ビームエクパンダー, BS: ビームスプリッター, DCM: ダイクロイックミラー, E: ナイフエッジ, GT: グラン・トムソンプリズム, IF: 干渉フィルター, L: レンズ, M: ミラー, P: プリズム, PM: 光電子増倍管, $\lambda/2$: 半波長板

図 14 は常温で N_2 中に O_2 を希釈した試料ガスの偏光 CARS スペクトルである。1%, 0.2% whichever のスペクトルに於ても、非共鳴信号の影響である変調による形状の非対称性等は見られない。図 15 は常温での成分濃度と CARS 信号強度の関係を示している。 O_2 , CO whichever の場合にもリニアな関係が成立している。

図 16 にはフラットフレイムバーナーで得られた CH_4 / 空気火炎中の CO 分子の Q 枝 CARS スペクトルを示す。(a) はバーナー面上 6 mm のポストフレイムと面上 1 mm のフレイム面近傍でのスペクトルである。 whichever の場合にも、本来微弱な N_2 分子の O-枝回転スペクトル線が明確に現れている。フレイム面では微弱であるが CO のスペクトルが確認出来た。

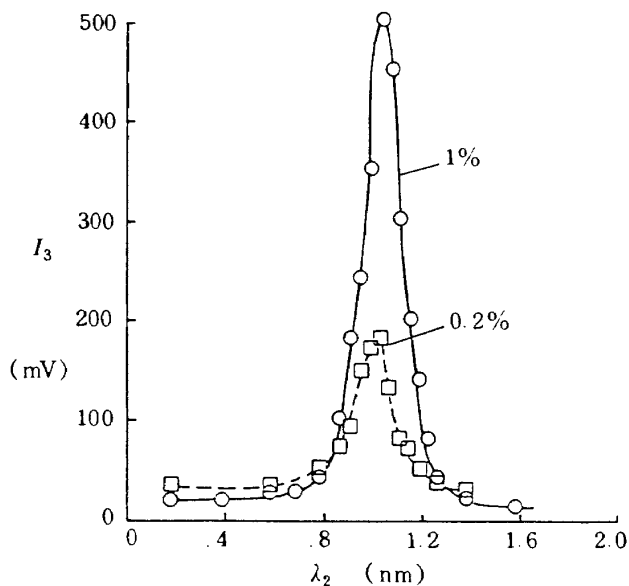


図14 バックグラウンドを消去した O₂ CARS スペクトル

T = 300 K, N₂ 希釈標準ガス使用, narrowband CARS, 光電子増倍管により検出
横軸は ω_2 の波長で相対値, 1 nm = 3.35 cm⁻¹

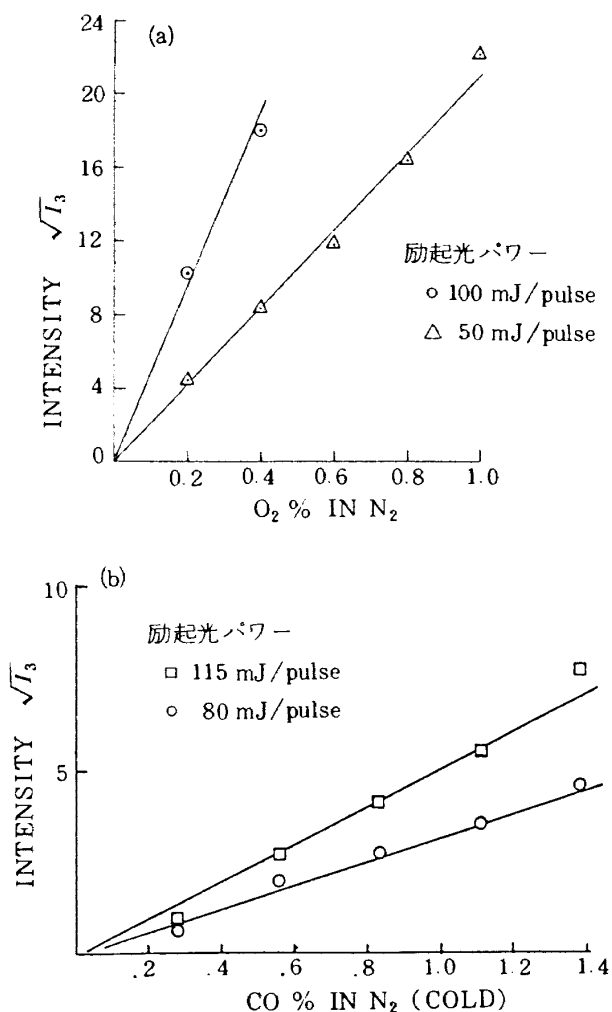


図15 偏光 CARS の成分濃度と信号強度の関係

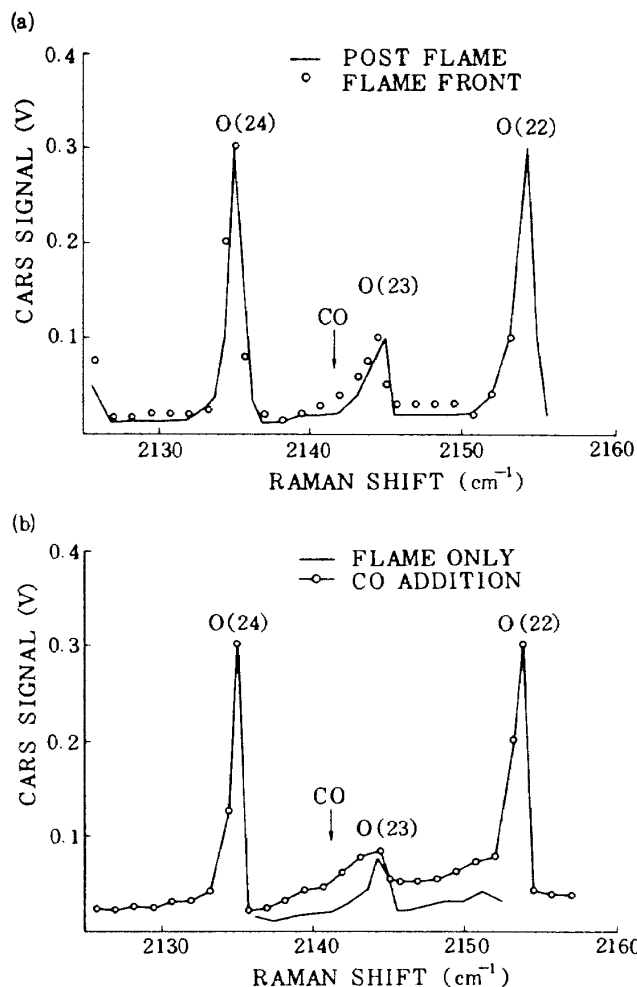


図16 偏光CARSにより非共鳴背景光を消去した 火炎のスペクトル

(b)は燃料ガス中に CO を混入した場合のスペクトルで, 未燃ガス中に 0.6% 以上の CO 濃度がある場合に CO 信号が検出された。

MAC 法光学配置による偏光 CARS 実験により, 非共鳴背景信号光の排除が可能であることを, 常温標準試料, 燃焼ガスの両者において示した。従来, 燃焼ガスについては 3 ビーム方式の BOXCARS 法が用いられているが, 光学系の安定度と信号強度の点で 2 ビーム方式の方がより有利である。今後の課題は, 測定の定量化とより微量の成分の検出可能性を調べ, 実用的な燃焼器の計測への応用を計ることである。色素レーザーの波長送りの自動化, PM 出力信号処理回路の整備等がすでに進められている。

7. まとめ

CARS による成分濃度の測定法に関して, 定量的測定を行うことと検出感度を高めることを目的とし

て、平面火炎を対象にしていくつかの基礎実験を行い、次のような結果を得た。

1. ブロードバンドCARSにより酸素分子濃度の測定を行なった。低濃度での測定は、周辺空気、光学素子から発生する妨害信号により重大な影響を受ける。これに対してMAC法と名付けた新しい光学系配置の採用により妨害光の排除が可能となり、火炎中の酸素分子のCARSスペクトルを得るとともに、光軸方向の空間分解能も向上させることが出来た。
2. 高圧参照セルよりの参照信号を用いた補正により、精度のよい酸素分子CARSスペクトルを得、そのラマン線巾を評価して、理論計算予測の精度を向上させた。
3. MAC法により、火炎中でのシングルパルス濃度測定を可能にした。1700°Kの火炎では2%までの酸素濃度測定が出来た。
4. 偏光CARSによる非共鳴背景信号の排除能力を調べた。2ビーム配置で常温の酸素、火炎中のCOのスペクトルを測定し、通常のCARS法よりも検出感度が向上することを示した。

シングルパルス測定法を発展させ、非定常燃焼、過渡的燃焼での成分濃度測定を実現するためには、同時に温度の測定が必要であり、さらにLDV等も組合せて総合的な計測系を構成することが望ましい。そのための複数の光学測定系をまとめた総合計測装置の設計、試験が現在進められている。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、終始指導、助言を頂いた航空機公害研究グループ藤井昭一室長に深く感謝の意を表します。本研究は通産省工業技術院省エネルギー技術開発「汎用スターリングエンジンの研究開発：低公害・高負荷燃焼技術の研究」の一環として行った。

参 考 文 献

- 1) A.C.Eckbreth, G.M.Dobbs, J.H.Stufflebeam, and P.A.Tellex :
CARS Temperature and Species Measurements in Augmented Jet Engine Exhausts
Appl. Opt., 23, 1328 (1984)
- 2) D.Klick, K.A.Marko and L.Rimai :
Broadband Single-pulse CARS Spectra in a Fired Internal Combustion Engine
Appl. Opt. 20, 1178 (1981)
- 3) G.C.Alssandretti and P.Violino :
Thermometry by CARS in an Automobile Engine
J. Phys. D: Appl. Phys, 16, 1953-1954 (1983)
- 4) R.Bédué, P.Gastebois, R.Bailly, M.Péalat, and J.P.Taran :
CARS Measurements in a Simulated Turbomachine Combustor
Combust. Flame 57, 141-153 (1984)
- 5) S.Fujii, M.Gomi, K.Eguchi, S.Yamaguchi, and Y.Jin :
Time-Resolved LDV and CARS Measurements in a Premixed Reacting Flow
Combust. Sci. and Tech. 36, 211-226 (1984)
- 6) P.R.Regnier, F.Moya and J.P.E.Taran :
Gas Concentration Measurement by Coherent Raman Anti-Stokes Scattering
AIAA J., 12, 826-831(1974)
- 7) L.P.Goss, G.L.Switzer, and P.W.Schreiber :
Flame Studies with the Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy Technique
AIAA-80-1543 (1980)
- 8) L.A.Rahn, L.J.Zych, and P.L.Mattern :
Background-Free CARS Studies of Carbon Monoxide in a Flame
Opt. Comm., 30, 249-252 (1979)
- 9) A.Ferrario, M.Garbi, and C.Malvicini :
Real Time CARS Spectroscopy in a Semi-industrial Furnace
Conf on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, CISE 2042(1983)
- 10) A.C.Eckbreth, R.J.Hall, and J.A.Shirley :
Investigations of Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy(CARS) for Combustion

- tion Diagnostics
AIAA-79-0083 (1979)
- 11) A.C.Eckbreth and R.J.Hall :
CARS Concentration Sensitivity with
and without Nonresonant Background
Suppression
Comb. Sci. and Tech. 25, 175-192(1981)
- 12) 渡辺 他
CARSによる燃焼計測(I) 温度計測精度の検
討
航技研報告 TR-939(1987)
- 13) W.G.Rado :
The Nonlinear Third Order Dielectric
Susceptibility Coefficients of Gases and
Optical Third Harmonic Generation
Appl. Phys. Lett. 11, 123 - (1967)
- 14) 手崎 衆 :
燃焼, 爆発系へのCARSの応用に関する研究
東京大学工学部学位論文 (1985)
- 15) 五味光男他
燃焼温度計測のための遠隔CARS計測装置
航技研報告, 出版予定 (1987)
- 16) G.L.Eesley :
Coherent Raman Spectroscopy
Pergamon (1981)

既 刊 報 告

- | | | | |
|--------|--|----------|--|
| TR-930 | 高アスペクト比複合材翼の遷音速フラッタ特性に与える繊維方向最適化の効果について
Effect of an Optimized Fiber Orientation on Transonic Flutter Characteristics of a High-Aspect-Ratio Composite Wing | 1987年 5月 | 磯貝 紘二, 菊池 孝男
山根 皓三郎, 熊倉 郁夫
外崎 得雄, 峯岸 正勝
野口 義男 |
| TR-931 | 水平軸風車の回転数制御に関する研究
Study on a Roter Speed Control System for a Horizontal Axis Windmill. | 1987年 5月 | 外立 政隆, 半沢 麻雄
室田 勝一, 野口 正芳 |
| TR-932 | 渦のある翼間流れの数値シミュレーション
Flow patterns induced by Vortices. | 1987年 5月 | 西村 英明 |
| TR-933 | 一方向進行波リングレーザージャイロの研究(1)
— 動作原理の提案と要素技術の研究 —
Study on a Unidirectional Ring Laser Gyro (Part 1)
Proposition of the Principle and Studies on the Components | 1987年 5月 | 滝沢 実 |
| TR-934 | 炭素繊維織物強化熱可塑性複合材料の力学的特性試験
Mechanical properties of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Matrix Composites. | 1987年 6月 | 野口 義男 |
| TR-935 | 離着陸時における革新プロペラの空力並びに音響特性
Aeroacoustics of an Advanced Propeller Design under Takeoff and Landing Conditions. | 1987年 6月 | 西脇 英夫, 武田 克己 |
| TR-936 | 高アスペクト比翼のフラッタ特性に与える複合材桁の繊維方向の効果について
EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF CARBON FIBER ORIENTATION ON FLUTTER CHARACTERISTICS OF HIGH-ASPECT-RATIO TRANSPORT WING. | 1987年 6月 | 江尻 宏, 中道 二郎
菊池 孝男, 峯岸 正勝 |
| TR-937 | 亜音速流中で振動する翼およびプロペラの理論における無限遠の条件
Conditions at Infinity for Theories of Oscillating Wings and Propellers in Subsonic Flow. | 1987年 7月 | 市川 輝雄 |
| TR-938 | ふく射と熱伝導の影響を受けるガスタービン燃焼器試験用ガス温度測定プローブの評価
Error evaluation of some practical thermocouple probes for gas turbine combustor tests. | 1987年 7月 | 田丸 卓, 下平 一雄 |
| TR-939 | CARSによる燃焼計測 (1)温度計測精度の検討
CARS Measurements of Combustion (1) Precision of Thermometry | 1987年 8月 | 渡辺 泰夫, 五味 光男
江口 邦久, 手崎 衆 |

航空宇宙技術研究所報告940号

昭和62年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
