

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-979

燃焼診断のための遠隔レーザ計測方法の研究

五味光男・江口邦久・渡辺泰夫

1988年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 燃焼診断のための遠隔レーザ計測方法の研究\*

五味光男\*\* 江口邦久\*\*\* 渡辺泰夫\*\*\*\*

## A Remote Laser-Probing System for Combustion Measurements

Mitsuo GOMI, Kunihisa EGUCHI  
and Yasuo WATANABE

### ABSTRACT

The simultaneous measurement of velocity and temperature in combustion flows by the combined use of a laser Doppler velocimeter (LDV) and coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS) was studied. In order to avoid hostile surroundings in the combustion area, high power laser beams for CARS were sent to the test section over a distance of 44 meters by a pipe with corner mirrors. The LDV and CARS signals were sent back to the measurement room by fiber optics.

Using a specific mirror, four beams for both the LDV and the CARS were focused onto the measuring point by a lens. The signals thus generated were passed through dichroic mirrors and interfero-filters. The coincidence of the LDV and the CARS signals was checked by the lag time between the two signals. Velocity-temperature correlations were given for turbulent flames behind a bluff-body flame stabilizer.

### 1. 緒 言

本研究の目的は二つある。第一は、燃焼ガスの温度を測定するための1つのレーザ計測技術であるCARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy) 法において、ビーム配送による遠隔測定法を確立させること、第二は、この方法に燃焼ガスの流速を測定するためのLDV (Laser Doppler Velocimeter) を結合させて、速度と温度を同一地点で同時に測定するための遠隔レーザ計測システムを実現することである。

高性能、高出力レーザの普及にともなってCARS法、LDV、レーザラマン法などのレーザを利用し

た光学的計測手法が燃焼計測に盛んに用いられるようになった。しかし、大きな実バーナやエンジン等の計測への応用については問題がある。燃焼ガス、塵介、および高温、多湿などの環境条件がレーザや他の精密分光・受光装置に悪影響を及ぼすためである。とくに高出力レーザを使用する場合、レーザ発振系光学部品(出力ミラー、波長変換光学素子等)が燃焼時に発生する炭素系化合物や周辺からのほこりの付着によって、膜面の劣化や、これに起因した焼損を生じ、出力低下や故障の原因となる。CARS法においてはピークパワーが極めて大きいパルス出力(ジャイアントパルス)レーザを用いるため一層ダメージを受けやすい。このような危険を回避する方法として、レーザおよびミラー等光学部品を全てボックス内に収納してガスシールドする方法<sup>1,2)</sup>がある。可搬的で便利な方法であるが、レーザヘッドが大きい

\* 昭和63年5月11日受付

\*\* 熱流体力学部

\*\*\* 宇宙研究グループ

\*\*\*\* 空気力学部

でボックスが大きくなるほか、電源部の配置およびヘッドの電気配線、冷却水配管、さらにシールドした場合、多数の光路調整部品をリモートコントロール方式にする必要性があり、制御を含めて取扱いが極めて複雑になる。また非常に高価な装置となることも実用上の欠点として見逃せない。

もう1つの方法として、高価なレーザ等を保護するため別室に設置してレーザビームを実験室まで配送する方法が考えられる。この方法はレーザ等を保護する上では前述の方法より一層有効であり、光学台のみ実験室に設置すればよいので広いスペースを必要としない。しかしレーザビーム配送管の設置、ミラーによるレーザエネルギーの損失、光路の調整および実験時の連絡手段など困難な点も多い。

本研究においては LDV との結合方式を実行する際に、LDV の信号発生に用いるためガス中に混入させる散乱粒子の実験室内への拡散により環境条件は一層悪化することが予想される。燃焼実験装置周辺のスペースも充分ではない。そのため測定対象、建物の構造およびその他の条件をも考慮し、後者の「遠隔CARS法」を選択した。

LDV による速度測定法は既に筆者らが広く利用してきた<sup>3-5)</sup>計測技術である。しかしCARS法

との結合を考えたとき、次のようないくつかの困難な問題がある。(1) LDV の信号発生のためにガス中に混入させる微粒子が、逆にCARS信号の発生を妨害する可能性がある。(2) LDV 信号は散乱粒子に依存して周期的には不規則に発生するが、CARS信号は25Hzの一定周期で発生し、かつ信号発生時間が約 $10^{-8}$ secと短いため、両信号が時間的に完全に一致する確率がほとんど無い。(3) CARS用およびLDV用の波長が異なる3種類のレーザビームを同一レンズで一点に集光させる方法。(4)微弱な2種類の信号光を、強力な励起光から抽出する方法などである。

本研究は、これらの諸問題の解決を計りながら、燃焼計測に適用できる新しいレーザ計測技術を確立するための1つの試みである。

## 2. 遠隔CARSのための構成

燃焼温度を測定するためのCARS法(以下CARSと呼ぶ)についての測定原理<sup>6,7)</sup>、測定方法<sup>8,9)</sup>については本稿では省略する。図1にCARS法の基本構成を示す。光源用レーザとしてNd・YAG (Neodymium Yttrium Aluminium Garnet, Molelectron MY-32-20)および色素レーザ (Molelectron DL-18) を使用した。受光・信号処理系として分

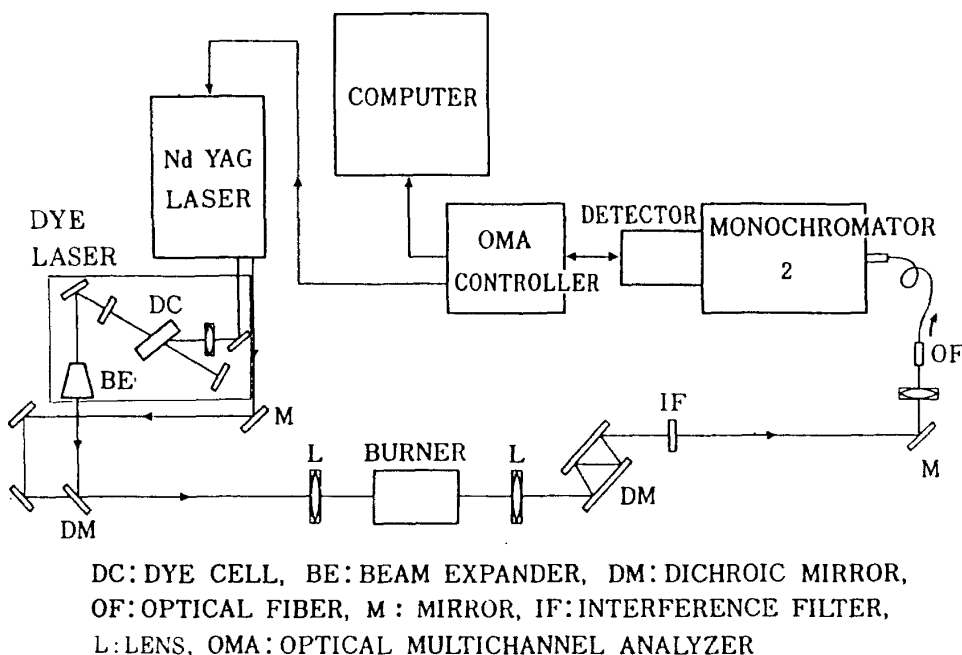


図1 CARS計測装置の概要

光器 (SS-100, 日本分光), 高感度多チャンネル受光解析器 OMA (Optical Multichannel Analyzer, OMA-2, Detector; SIT 1254EW, P. A. R. 社) およびコンピュータ (AIDACS-4200G, アイ電子測器) を用いた。本構成要素のうち, 上記光源部と受光・信号処理系を全て制御室に置いて保護し, 光学系部品のみ実験室側へ設置することにした。

建物の構造上, レーザビームをミラーで配送するためには制御室と実験室までの距離は約44mとなる。建物の構造と遠隔CARSのための配置構成を図2に示す。光源ビームの配送は全てミラーを用い, 信号光は光ファイバーで実験室から制御室へと転送する。

2.1 レーザビームの配送

配送するビームは, YAG レーザからの基本光 (波長  $\lambda_1=532\text{nm}$ ) と色素レーザーによって発生させた窒素分子 ( $\text{N}_2$ ) に対するストークス光 (波長  $\lambda_2=607\text{nm}$ ) である。建物の構造上, 制御室より燃焼実験室の光学台上まで全長約44mに対して6枚のミラーを図2のように配置した。各ミラー間の距離は図中に記入した。最大距離は29.2mである。配送にあたって次の条件を考慮した。

(1) レーザビーム ( $\lambda_1$ ) のパワーを光学台到着地点で150mJ/パルス以上を確保する。

この値は従来の実験から得た燃焼温度計測に必要なものである。レーザーの最大パワーは250mJ/パルス ( $\lambda_1$ ) であるからレーザーの発光寿命等を考慮して80~90%の出力で作動させると, 6枚のミラーによる合計配送効率  $P_2/P_1$  ( $P_1$ : レーザ発振パワー,  $P_2$ : 光学台到着地点でのレーザーパワー) を70%以上に保つ必要がある。

(2) 配送用ミラーには国産のものを使用する。

高パワーレーザー用の薄膜蒸着に関する国産技術は外国製に比べて劣るとして過去, CARS用光学部品として多くは外国製に依存してきた。レーザー最大出力時の単位面積当りのピークパワー ( $W$ ): パルスレーザー特有のパワー表示方法) は約50MW/cm<sup>2</sup>となり, 国産品は焼損しやすいという筆者らの過去の経験から, ビーム径を約2倍 (10→20mm) に拡大し, 初段ミラーへの最大入力パワーを約12MW/cm<sup>2</sup>以下に下げた。そのためミラーの直径は80mmとした。配送ビームが2種類のため, 反射波長帯域が広帯域の誘電体多層膜ミラーを使用した。45°入射で  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  に対する反射率はいずれも98%以上であった。

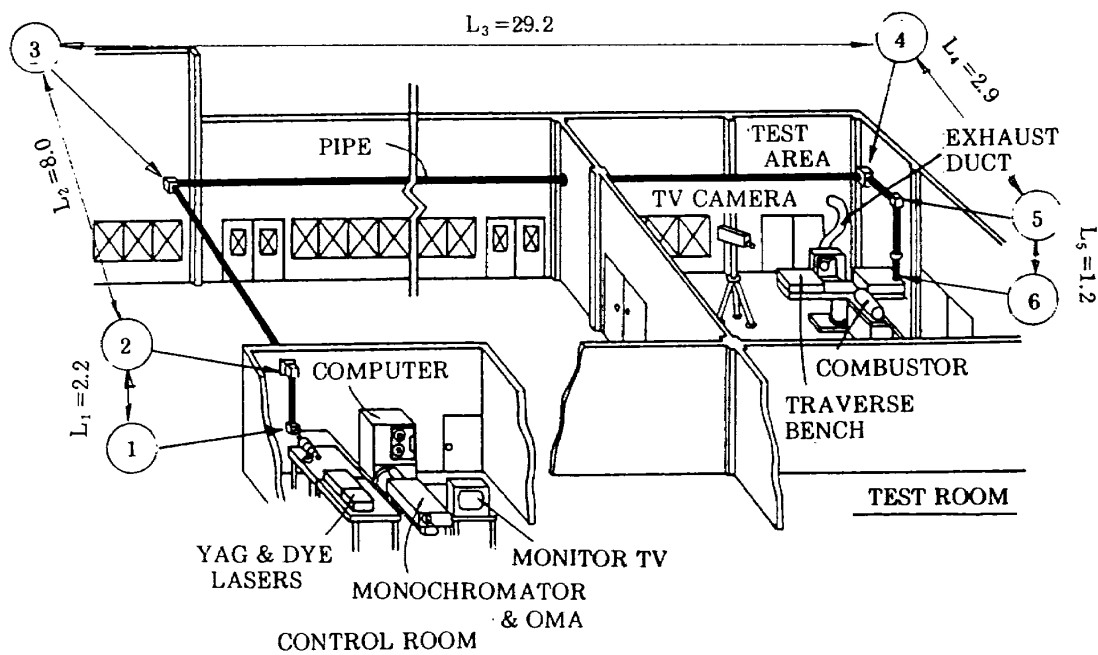


図2 遠隔 CARS 計測装置の配置とビーム配送経路  
○内数字: ミラー番号,  $L_1 \sim L_5$ : 各ミラー間距離 m

(3) 配送用光路に鋼管を使用し、ほこりや外部からの光の影響を排除する。

光路は地上約3mの位置に直径150mmの鋼管を配置しその内部を通した。各コーナーミラーはボックス内に取り付ける(図3)。ミラーホルダーは2方向調整用のマイクロメータ付で、とくに長距離間を調整するミラー2, 3には精密微動用ミラーホルダーを使用した。ミラー3→4間の距離29.2mにおいては、直径80mm(直効径76mm)のミラーに対して径20mmのビームの振れ幅は33mm(振れ角 $0.06^\circ$ )しか許容されない。ビームの広がり角が若干あるため実際の許容範囲はさらに小さく、調整にもっとも慎重を要する部分である。ミラーボックスは一箇所が開閉でき、ミラーの取り付けと調整が行える。ミラー2→3は約 $3^\circ$ の勾配があり、4→5は水平および垂直方向にそれぞれ $9^\circ$ の勾配がある。各ミラーは入射角 $45^\circ$ で反射率が最大になるので、これらの勾配による入射角のずれから多少の反射損失が生ずる。

(4) 配送ビームの光路調整は小型He-Neレーザーで行う。

配送用ビームと平行に入射させたHe-Neレーザー光で、ミラー1から順次目視で光路を調整した。調整後、建物の構造の影響でビームが多少揺らぐ

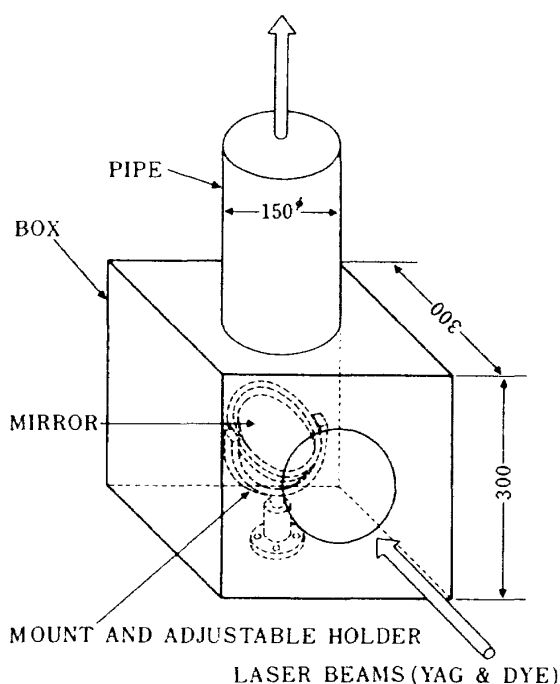


図3 ビーム配送用ミラーと収納ボックス

こともあったが、振れ幅は小さく、CARS測定時の焦点およびビームの位相整合にはほとんど狂いは生じなかった。

以上の結果、ミラーによるビームの配送において、合計反射効率を85%以上に保つことができ、比較的容易に光路調整を行うことができた。

## 2.2 光ファイバーによるCARS信号光の転送

CARS光(波長 $\lambda_3 \approx 473\text{nm}$ )は、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ と異なって微弱光でありミラーによる転送は不可能なため光ファイバー(表1, 藤倉電線)を用いた。大きいコア径を使用したのは入射光軸の調整の容易さと入射時の光損失を少なくするためであったが、 $f=30\text{mm}$ のレンズで入射させた場合、焦点位置が必ずしもファイバー中心とはならず出射側ビームの広がり角に大きな影響を及ぼした。出射ビームの広がり角が大きいと分光器内の回折格子に対して、はみ出しによる光量損失(F値と不一致)が生ずる。そのため使用上調整不良の原因となり得る次の三つのパラメータに関して出射ビーム径への影響を調べ(図4), 光ファイバーへの最適入射方法の検討を行った。

表1 光ファイバーの仕様

コア/クラッド径	400/550 $\mu\text{m}$
材質	石英
形状	グレーテッド・インデックス
開口数	0.2
長さ	95 m

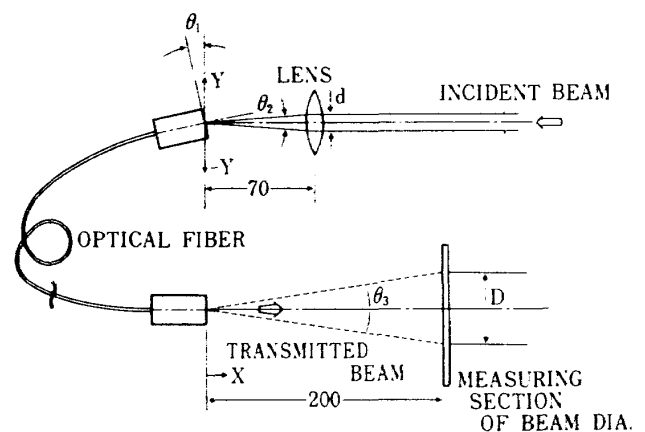


図4 光ファイバーの出射ビームパターン試験概要図

- (1) 入射光軸の光ファイバー中心からのずれ ( $\Delta Y$ )
- (2) 入射光軸の傾き角 ( $\theta_1$ )
- (3) ビーム集光角 ( $\theta_2$ )

出射ビーム径は光ファイバー出射面からの距離  $X=200\text{mm}$  における値を測定した。図5に  $\Delta Y$  に対するビーム径の変化を示す。図6(a), (b)に  $\Delta Y=0$  および  $0.17\text{mm}$  でのビーム断面光強度パターンの写真例を示す。(a)ではスペックルパターン(斑点模様)が明瞭であるのに、 $\Delta Y$  が大きくなって消失しビーム径は次第に大きくなり、 $0.17\text{mm}$  では(b)のような形状となる。図7に  $\theta_1$  に対するビーム径の変化を示す。 $\theta_1 = \pm 2^\circ$  の範囲ならば影響は比較的少なく、使用上このように大きく傾けることはないので問題とならない。

図8に  $\theta_2$  との関係を示す。出射面からの測定位置を変化させて測定した結果を示す。 $\theta_2 = 4.5$  および  $1.3^\circ$  ではほとんど差は認められなかったが、平行光で入射させた場合は著しく異なった。ビーム径の広がりが出射面からの距離に対してほぼ直線的に増加している。

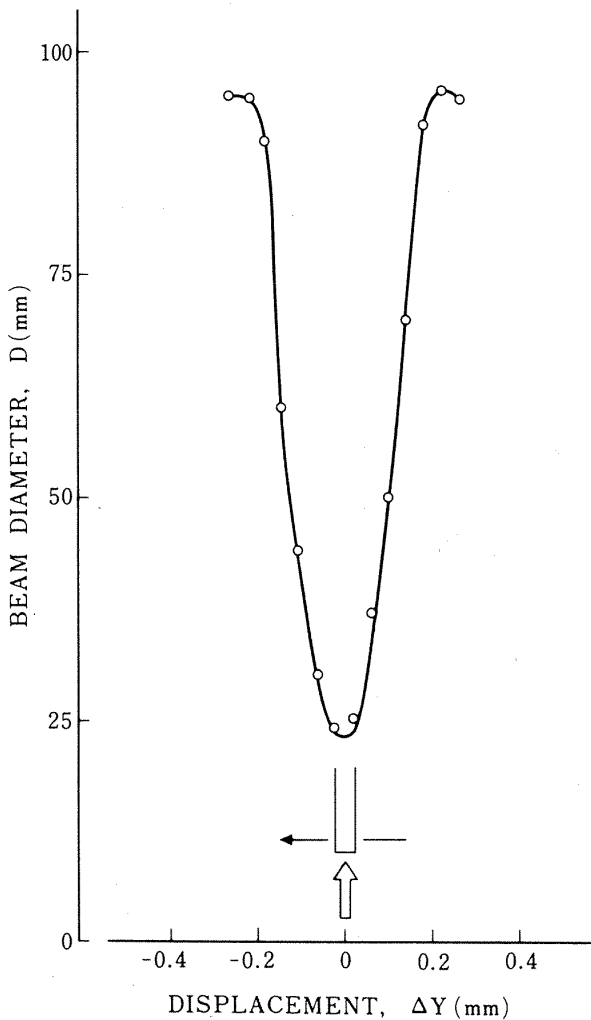
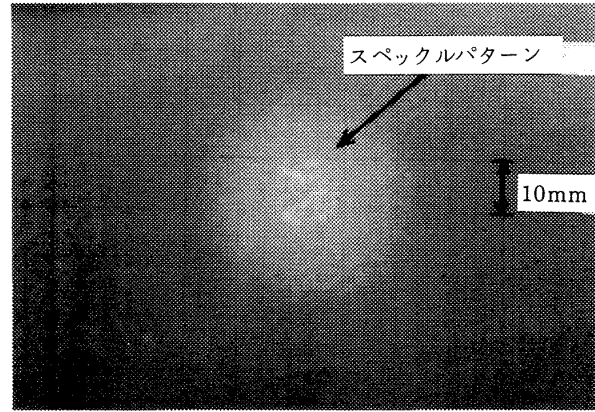
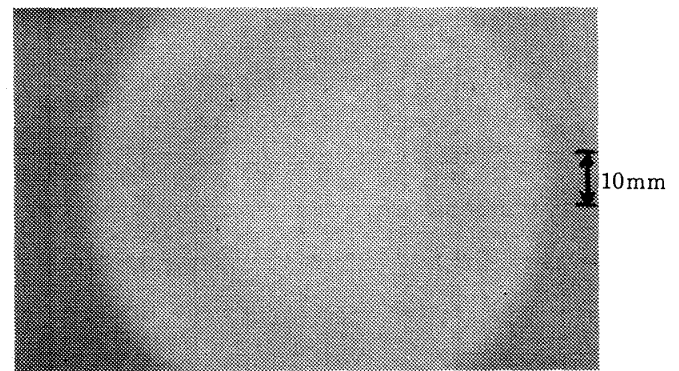


図5 光ファイバー中心からの入射光軸の変位  $\Delta Y$  と出射ビームパターンとの関係 (出射面からの距離  $X=200\text{mm}$ )



(a)  $\Delta Y=0$



(b)  $\Delta Y=0.17\text{mm}$

図6 光ファイバーからの出射ビームパターンの写真(出射面からの距離  $X=200\text{mm}$ )

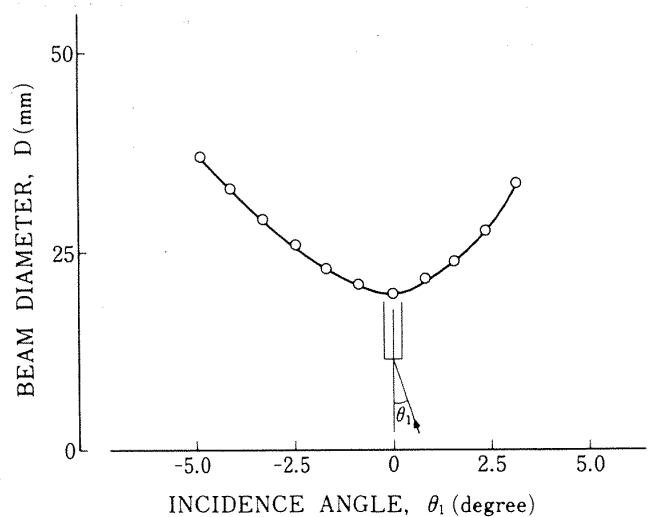


図7 入射角  $\theta_1$  と出射ビーム径との関係 (出射面からの距離  $X=200\text{mm}$ )

以上の結果より、実用上注意すべきパラメータは $\Delta Y$ である。広がり角 $\theta_3$ (図9)でみると、 $\Delta Y = 20\mu\text{m}$ で入射した時、 $\theta_3 = 7.2^\circ$ である。この時、分光器の $F = 8.6$ にはほぼ一致し、ほとんど損失なくCARS光を捉えることができる。したがって、 $\Delta Y \leq 20\mu\text{m}$ で調整する必要がある。なお、光ファイバーの長さによる影響は5mのものと比較した結果、差は認められなかった。

### 2.3 光学系配置

光学台は油圧式上下移動台上に設置された600x

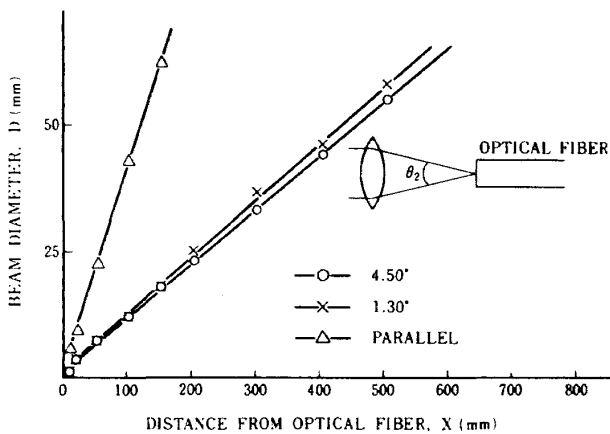


図8 集光角 $\theta_3$ と出射ビーム径との関係

2500mmの長方形の鋼板で製作した。配送されたビームは台の上方にあるミラー5を介してミラー6で受ける。移動台が上下に移動しても光路は狂

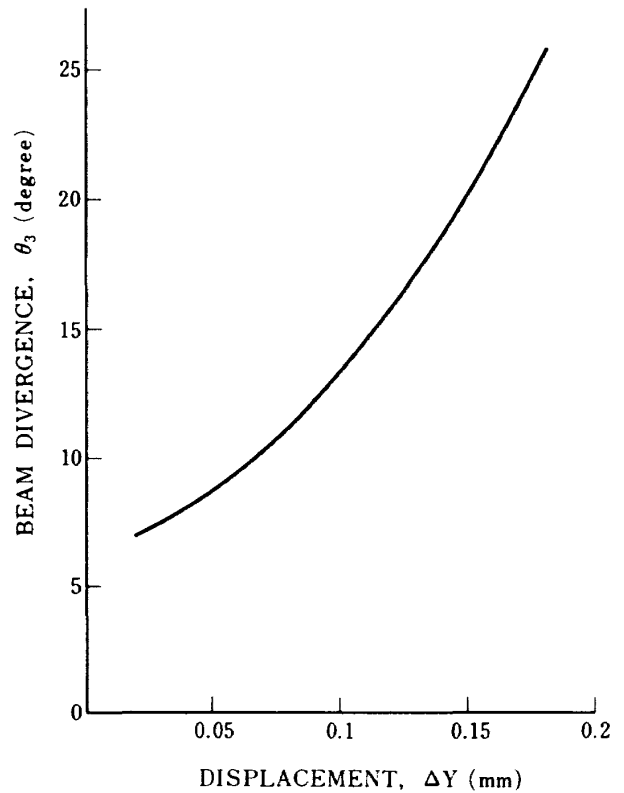


図9 光ファイバー中心からの入射光軸の変位 $\Delta Y$ とビーム広がり角との関係

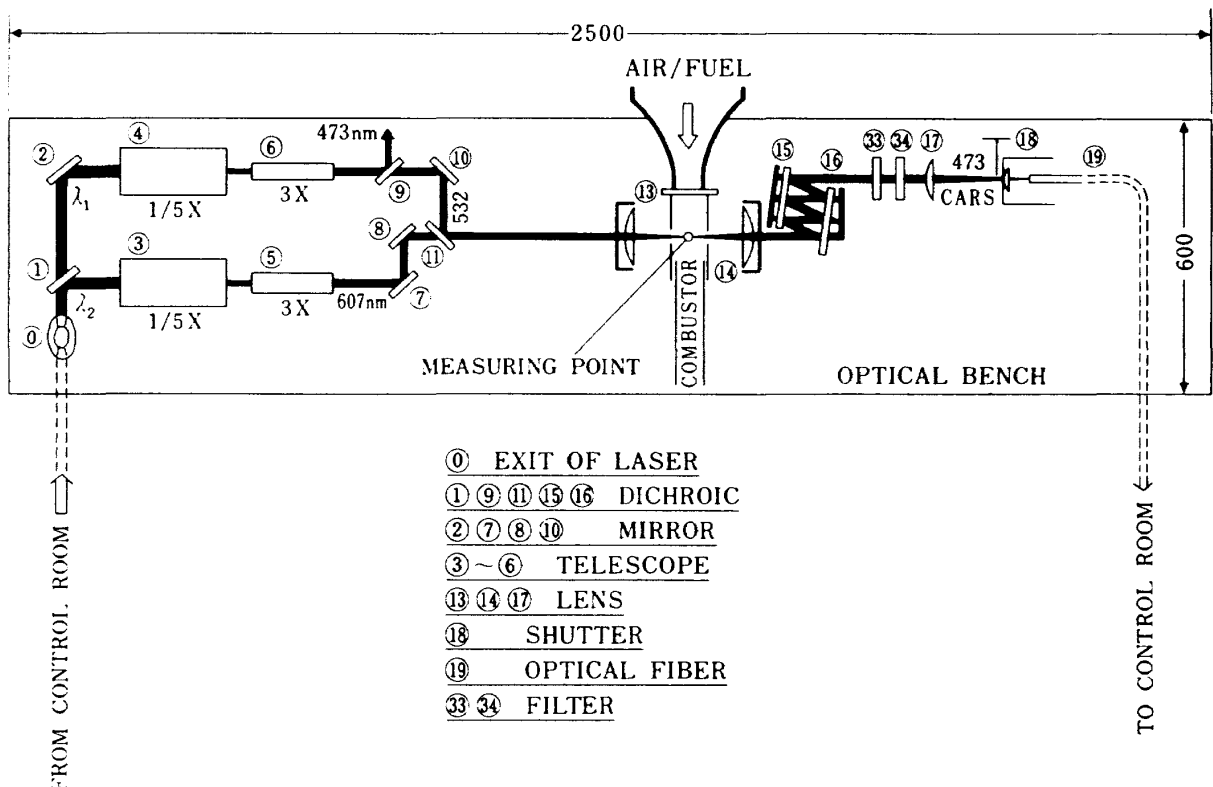


図10 遠隔 CARS 用光学台上の部品配置と光路系統図

われないが、前後左右に移動できない。したがって、測定点を変える場合は燃焼器自体を移動することにした。

光学系の配置を図10に示す。光学部品は全てマグネットスタンドに取り付けてあり、光学台上の任意の場所に移動できる。燃焼器左側を入射光学系、右側を出射光学系とする。同軸上で配送されてきたビーム $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ は、まずミラー1でふたたび分離する。テレスコープ3~6は拡大されてきたビーム径をもとの大きさに戻すとともに、ビームの広がり角を調整する。その後のミラーによって二つのビームの光軸をそれぞれ調整した後、ミラー11で混合し収束レンズ13で測定点に集光する。なお配送途中の $\lambda_1$ と $\lambda_2$ が共軸上にあるため空気中の $N_2$ から微弱な $\lambda_3$ が発生するので、これを除くためテレスコープ6の後方にダイクロック(二色性)ミラー9を置いた。

出射光学系では、レンズ14で平行光に戻したレーザ光 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ とほぼ同軸上にCARS光 $\lambda_3$ が含まれている。ミラー15、16は $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を透過し、 $\lambda_3$ のみ反射する特性をもっている。この透過と反射を数回繰返すことによって不用となった励起光は

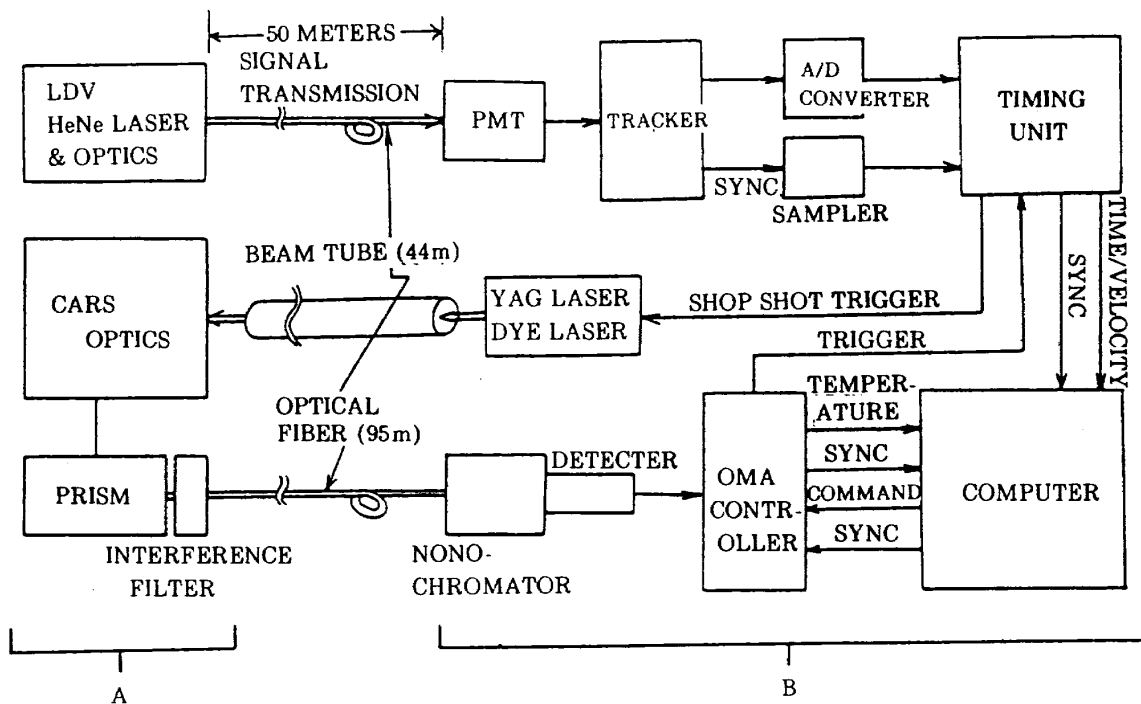
ほぼ排除される。狭帯域干渉フィルター33によって $\lambda_3$ のみ抽出される。さらに透過量連続可変型フィルター34およびレンズ17を介して光ファイバー19へ入射され、制御室へと転送される。

### 3. CARS/LDV 結合方式

LDV はすでに確立した測定技術である。前述の遠隔CARSシステムとの結合上考慮すべき光学系は、(1)入射系において波長の異なるLDV用レーザ光(波長 $\lambda_4=633\text{nm}$ )をいかにしてCARS用レーザ光と混合して同一レンズへ入射させるか、(2)出射系においてCARS用の強力なレーザ光からLDV用の信号光をいかにして分離するか、(3)LDV信号光をどのようにして制御室へ転送するか等の点である。なお、LDV用レーザ(He-Ne出力15mW, S. P.-124A)は出力も小さく堅牢であることからビーム配送とせず光学台に直接取り付けられた。装置全体の構成を図11に示す。Aの部分を実験室に、Bの部分を実験室に設置した。

#### 3.1 LDV

測定方法としては干渉縞法(または差動型法)



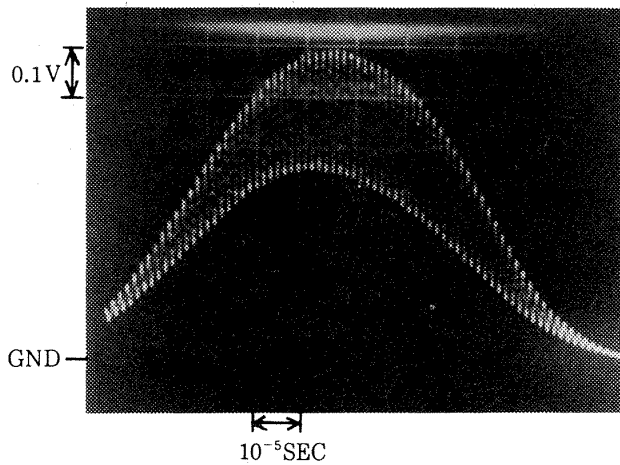
A : OPTICS LOCATED IN THE TEST ROOM

B : LASER AND DATA ACQUISITION DEVICES LOCATED IN THE CONTROL ROOM

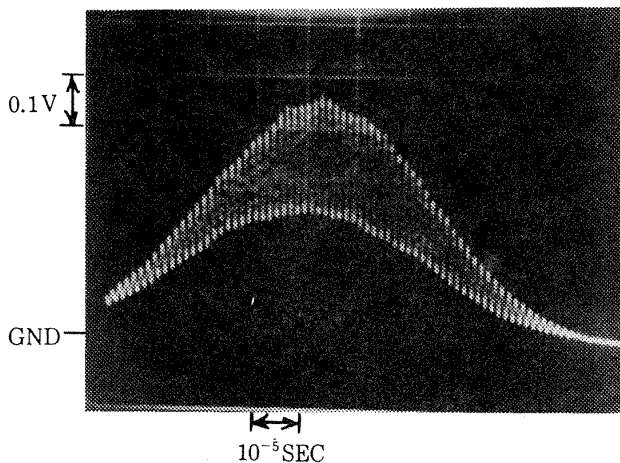
図11 遠隔レーザ計測システム(LDV/CARS 結合方式)の系統図



がもっとも一般的である<sup>10)</sup>。装置の構成およびデータ処理方法は参考文献<sup>3)</sup>と基本的に同じである。ただし、新しい試みとして採用した光ファイバーによる信号光の長距離(95m)転送において、高周波(ドプラー遷移周波数<40MHz)波形への影響が懸念された。確認のため径5 $\mu$ mのタングステン線を粒子とみなしてサンプリングボリューム(ビーム交差部)内を通過させ、発生したドプラーバースト信号(1粒子によって発生するドプラー信号)を測定した。図12(a)にフォトマルチプライヤー(以下PM)で直接測定した場合を、(b)にファイバーを使用した場合の結果を示す。(b)の波形は(a)に比べ多少変化している。しかし、周波



(a) DOPPLER BURST SIGNAL WITHOUT OPTICAL FIBER



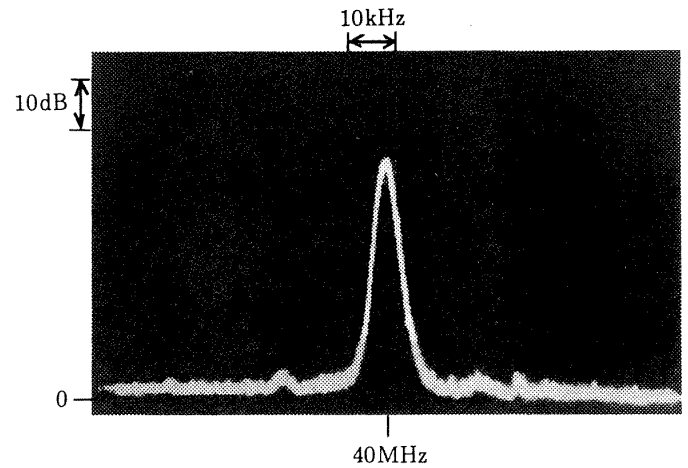
(b) DOPPLER BURST SIGNAL WITH OPTICAL FIBER

図12 光ファイバーを利用して転送した場合と直接測定した場合のドプラーバースト信号の違い

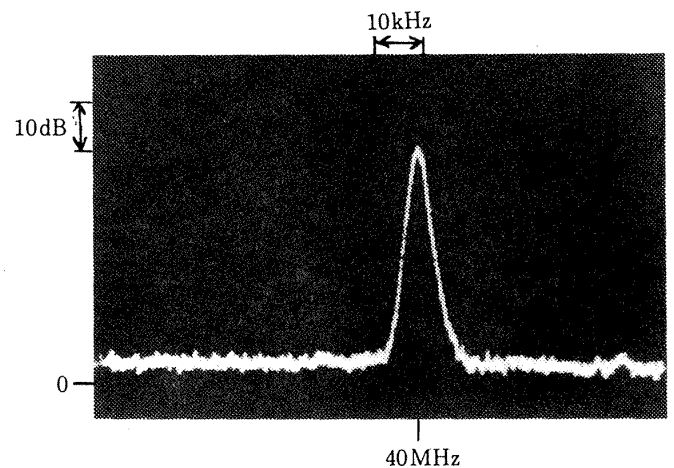
数40MHzのときのドプラー周波数を周波数解析器で処理した結果(図13(a), (b))では測定周波数での違いは見られず、速度測定上の問題は無いことが確認できた。PMへの光の入射孔径は0.2mmで、光ファイバーとの接合時には出射面中心が入射孔に一致するよう微動装置を用いて調整した。

### 3.2 入射および出射光学系

光学台上にセットしたLDV/CARS結合時の全光学部品の配置を図14に示す。CARS系についてはすでに述べたのでここでは省略する。光学台下端に取り付けたHe-Neレーザからのビームは、ミラー26, 27によって光学台上のCARS光中心軸



(a) DOPPLER SHIFTED FREQUENCY WITHOUT OPTICAL FIBER



(b) DOPPLER SHIFTED FREQUENCY WITH OPTICAL FIBER

図13 光ファイバーを利用して転送した場合と直接測定した場合のドプラー周波数の違い

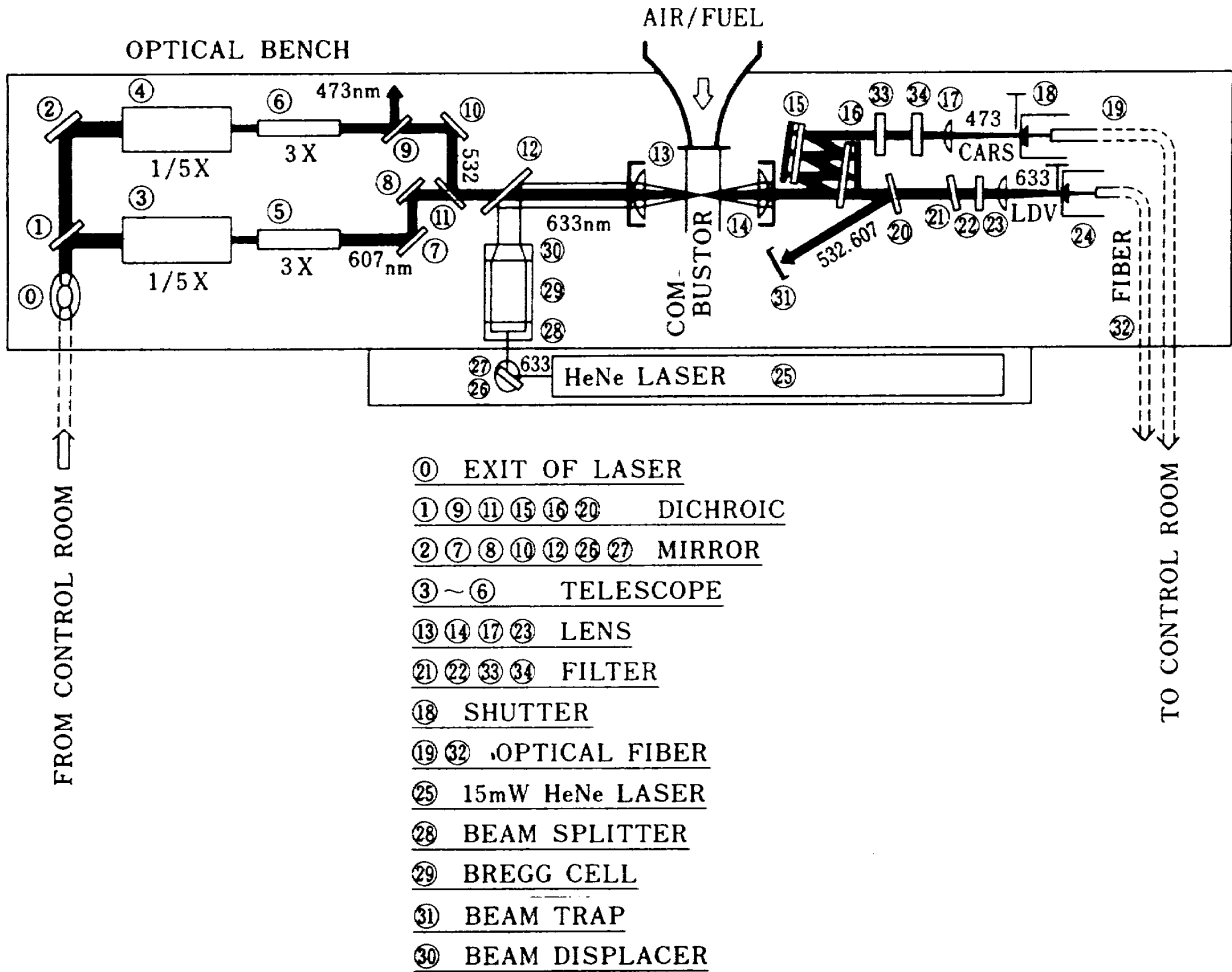


図14 LDV/CARS 結合方式における光学台上の光学部品の配置と光路系統図

の高さに設定される。ビームスプリッタ 28 で二等分した後、ブラッグセルで一方のビームに 40 MHz の周波数シフトを行う。ビーム間隔短縮器 30 でビーム間隔を 50 → 22 mm に小さくする。ミラー 12 は特製で、図 15 に示すようにミラーの中心に CARS 用ビームが通過する空間がある。こうして全てのビームは平行光となってレンズ 13 に達し、同一焦点に集光される。

出射光学系において、散乱粒子からの散乱光（ドプラー信号）はレンズ 14 で平行光となり、CARS 用ビームと同じ光路を進みミラー 20 を透過する。詳細は図 16 に示す。散乱粒子からの散乱光  $\lambda_1$  は、Mie 散乱なので波長としてはソース光の He-Ne レーザ光と同一であり  $\lambda_2$  とは波長が接近しているため、透過帯域 (FWHM) 10 nm のフィルター 21, 22 を使用した。調整上注意を要したのはミラー 20 の角度設定である。 $\lambda_1$  の透過を最小限に押えたいため、 $\lambda_1$  の透過量が多いとフィルター

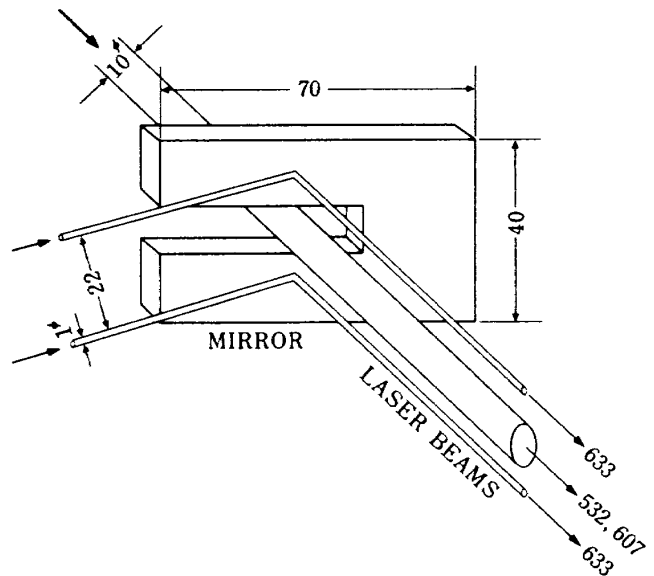


図15 LDV/CARS 用の全ての光線を同一方向にするためのミラー（ビームに表示した数値はレーザー光の波長を示す）

を焼損する危険があった。

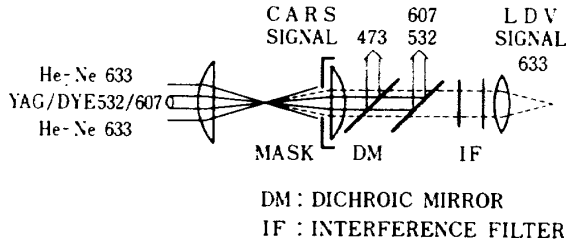


図16 励起光からのCARS信号光(波長=473nm)とLDV信号光(波長=633nm)の抽出方法

#### 4. 実験方法

$\lambda_3, \lambda_4$ の分光処理およびデータ解析は制御室で行う。実験担当者と測定担当者がそれぞれ分離して作業を進めるので、統一して効率よく実験を行うための方法を検討した。各作業を細分化し、その流れ図(図17)を作成した。準備作業として(1)燃焼系、(2)コンピュータと計測機器系、(3)光学

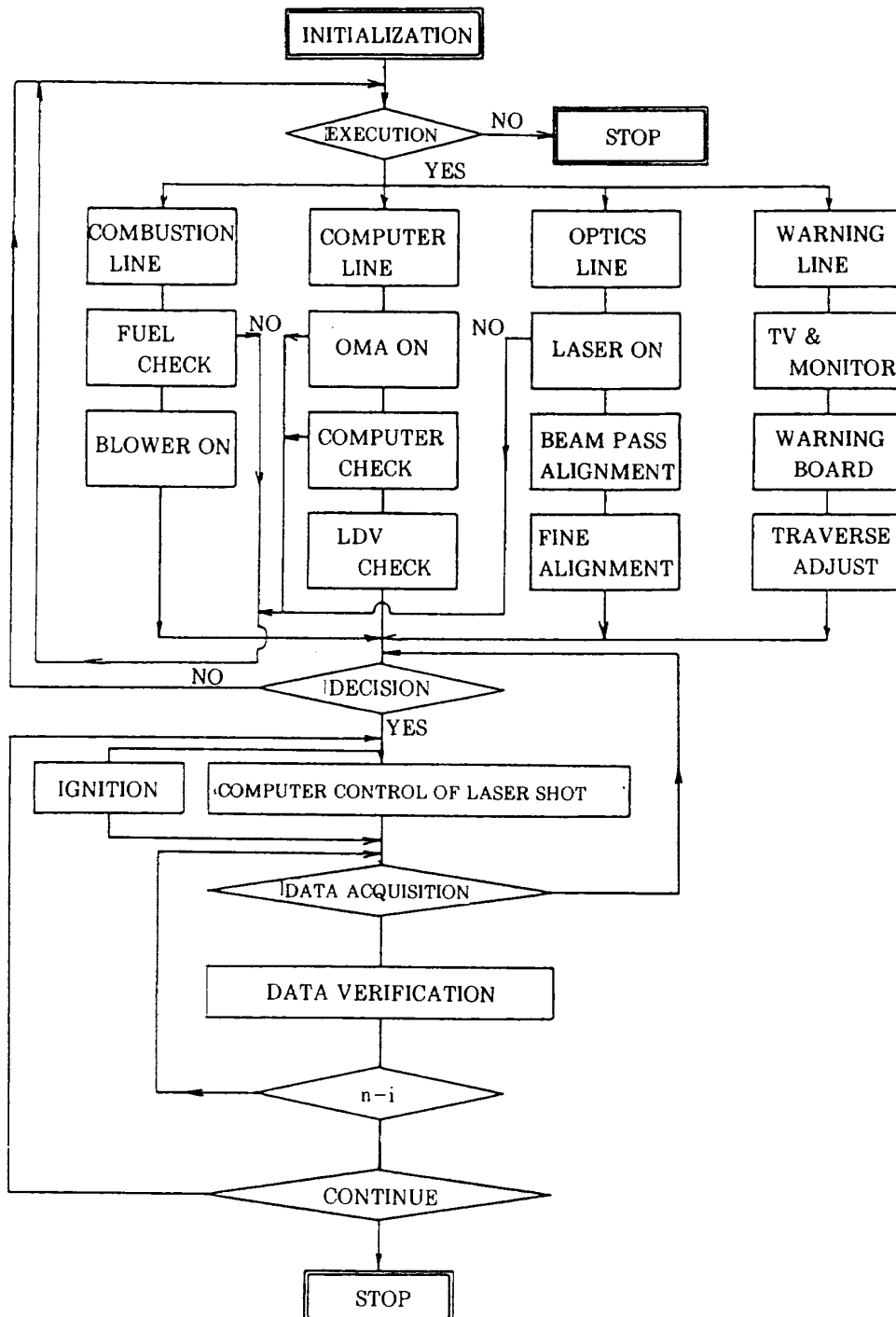


図17 遠隔レーザ計測における実験のため系統図

系および(4)モニター系の各系統がある。(1)では燃料空気制御機器, 冷却系, 記録機器の点検, 調整を, (2)では OMA の動作, データ収集, レーザの発振コントロール, LDV 信号処理装置および他の計測機器のチェックを行う。(3)では多数の光学部品の異常の有無, CARS 光発生のための最適な調整, 光ファイバーへの入射調整等極めて入念な調整を必要とし最も時間のかかる系統である。

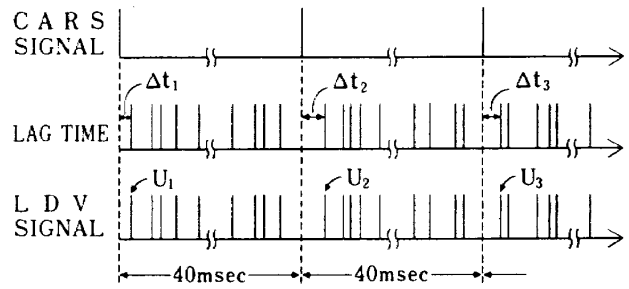
(4)では TV カメラおよび受像機のチェック, 実験室周辺への警報, 移動台の動作チェック等が含まれる。実験の指揮は制御室から行い, 各系統の担当責任者の状況報告が全て正常となった時, データ収集を行う。さらに CARS 信号(スペクトル形状)の良否を最終的に判断してデータ集録を行う。燃焼実験室の状況はビデオカメラでモニターし, 交信はインターホーンで行った。

## 5. データ処理方法

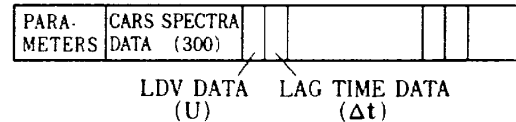
### 5.1 データ集録

CARS 信号はレーザー発振周波数に依存した周期的な信号であり, LDV は流体中に混入した散乱微粒子に依存して発生する間欠信号である。この信号間の同時性を保つために同期回路を必要とする。まずデータ集録の概要について先に示した図 11 の系統図を用いて説明する。コンピュータからのコマンドデータで OMA コントローラから同期トリガーが 25Hz で発振する。同期調整ユニットを経由した発振トリガーに同期して YAG および色素レーザーが発光し, 光線がミラーを介して燃焼室の光学系へと配送される。測定点で発生した  $\lambda_s$  は分光器, 受光器, OMA コントローラを経て 300チャンネル分のスペクトルデータとしてコンピュータへと送られる。

一方, LDV 系では散乱粒子によって生じたドプラー信号は光ファイバー, PM, トラッカーを経て周波数/電圧変換される。トラッカーからの出力信号にはドプラー周波数の 10 サイクル毎に出力する同期信号 (SYNC) と速度を示す電圧値とがあり, 前者は 1 粒子毎の同期信号に変換するためのサンプラーを介して, また後者は A/D 変換器を介してそれぞれ同期調整ユニットへ入る。CARS



(a) TIMING OF OUTPUT SIGNALS



(b) DATA FILING

図 18 LDV/CARS 測定時の出力信号の出力タイミングとデータ集録フォーマット

信号と LDV 信号の出力タイミングは図 18(a)となる。CARS 用レーザーの発光に同期して  $1\mu\text{sec}$  のクロックが作動し, 最初の LDV 信号発生までの時間  $\Delta t_i$  を測定し, その時の電圧値  $U_i$  とともに集録する。

以上の結果, データとしての 1 レコードは図 18(b)に示すように, CARS 用のレーザーショットあたり得られるスペクトルデータ 300 個と LDV 用の遅れ時間  $\Delta t_i$ , 速度情報  $U_i$  とから構成される。

### 5.2 速度と温度の同時性

CARS 信号からの LDV 信号遅れ時間  $\Delta t_i = 0$  が理想であるが, 前述のごとく YAG レーザ発光時間は 1 ショット当たり約  $10^{-8}\text{sec}$  であるから, この時間内に LDV 信号が一致する確率はほとんどない。逆に完全に一致した場合には強力な YAG レーザ光によって粒子が燃焼し, 発生したノイズ光によって CARS 信号が妨害される。したがって次の点を考慮した。

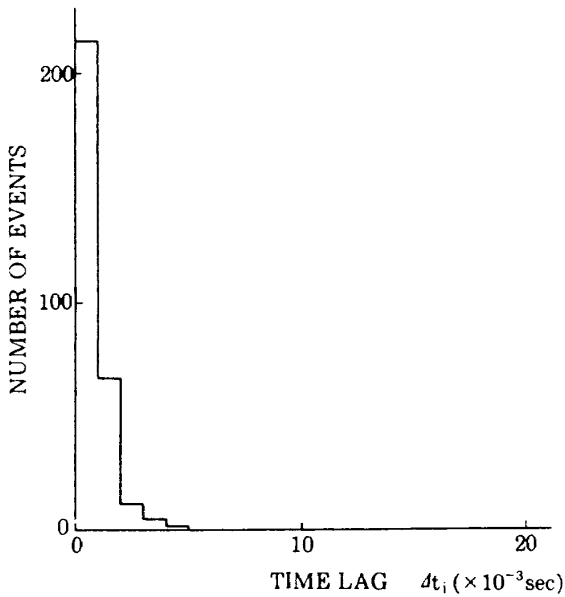
(1) CARS 用サンプリングボリュームを通過する粒子を少なくするために粒子濃度を必要以上に高くしない。

(2)  $\Delta t_i$  を出来る限り小さくするために粒子濃度をできるだけ高くする。

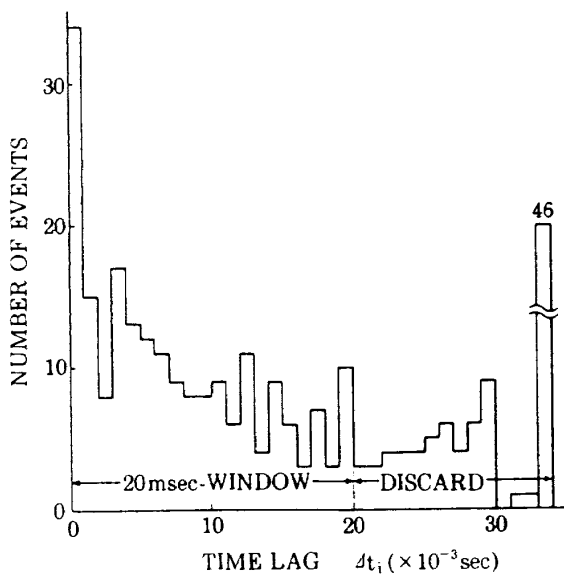
(3) 粒子の燃焼により発生した不適格 CARS 信号はデータ処理時に排除する。

粒子の濃度分布は、スワールバーナのような燃焼器内の複雑な流れの場合には測定位置によって非常に異なるので、一定の濃度を作ることは難しい。したがって(1)および(2)項目については測定位置に合せて経験的に粒子の混入量を調整した。(3)については妨害を受けたCARS信号のスペクトルが、正しい形状と異なるので分別できる。

上記の検討事項を前提として、常温の層流中で測定した時の  $\Delta t_i$  の度数分布列を図19(a)に示す。



(a) 非燃焼，低乱流の場合（データ数：300）



(b) 燃焼，高乱流の場合（データ数：300）

図19 CARS信号にたいするLDV信号の遅れ時間

全ての値が5msec以内にある。しかし、燃焼時かつ、高乱流時の分布は図19(b)に示すように広い範囲に存在する。オーバーフロー値は33msec以上の値である。この極めて悪い場合を想定して、同時性の基準を  $\Delta t_i \leq 20\text{msec}$  と設定した。

### 5.3 データ処理

集録データは一旦磁気テープ (MT) に落とし、別の大型コンピュータ (FACOM 230-75) で処理する。図20に処理フローを示す。温度を決定するには複雑な計算手続を必要とする<sup>9)</sup>。OMAで測定したラマンスペクトル (CARS信号スペクトル) 分布に対し、予め計算された各温度での理論スペク

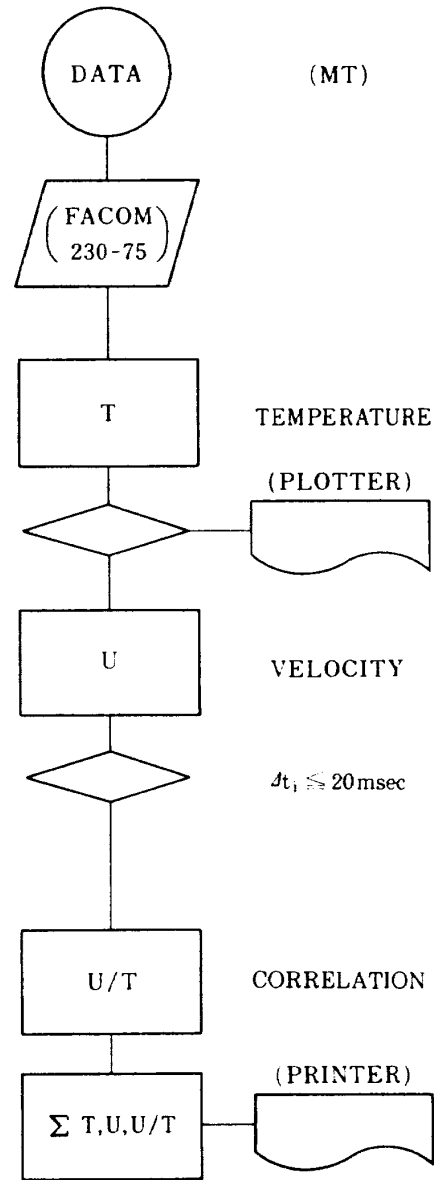


図20 LDV/CARS測定におけるデータ処理フロー

トルを逐次比較し、最も良い近似を得た理論スペクトルから温度を決定する。この作業を一カ所の測定点で測定したN回数繰返す。必要であればN<sub>i</sub>回目の近似スペクトルを実験データとの比較で表示することもできる。次に速度データUをN回処理して速度を決定する。遅れ時間Δtの判別を行って、有効データのみU/Tを求める。最後に全てのデータについて統計処理を行い、平均値、標準偏差値、ヒストグラム等を計算して出力する。

### 6. 測定例

燃焼装置の系統図を図21に、実験状況の写真を図22に示す。燃焼器(図23)は、一辺が50mmの正方形断面をもつ長さ305mmのダクト内に一辺が25mmの正三角柱を、最小通路面積比が1/2になるように設置したブラフボディ型保炎器を有するものである。燃料(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)は空気との予混合で供給する。LDV用散乱粒子として粒径0.3μmのアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を燃焼器上流の混合器(500×500mm)内に注入した。混合器内での風速は約0.5m/sで、注入された粒子のうち合体して発生した大きな粒子は沈降または内部の消音材(グラスウール)に付着し、小さい粒子のみがガス中に混入し

た。粒子濃度はこの混合器への注入量を調整した。

散乱粒子が強力なCARS用レーザービームによって焼失する時の発光について観察すると、実際に不良信号として排除される割合は少なく、2~3%以内であった。

燃焼装置は一方向への移動台(前後方向)上に設置されている。したがって上下方向の測定時には光学台の方を移動した。ブラフボディへの接近風速は10m/s、当量比φ=0.7の条件で、ブラフボディ後方x=89mm、y=10mmの点での測定結果の一例を図24(a)~(c)に示す。(a)は速度、(b)は温度のヒストグラムを示す。これらのデータのうち同時性に関して前述の条件を満足した速度と温度との相関U/Tを(c)に示した。高乱流領域に測定点が位置したため同時性の条件を満足したデータの割合は、約70%であった。U/Tで整理した目的は、燃焼過程における速度と密度の相関を検討するためで、詳細に関しては別稿にゆずる<sup>11,12)</sup>。

本測定においては、測定対象が二次元燃焼器モデルであるからビーム方向に一様と考えられ、ビーム径、レンズの焦点距離(f=100mm)を考慮してもビーム方向の空間分解能は問題としなくてよい。測定精度への影響としてCARSにおける色素

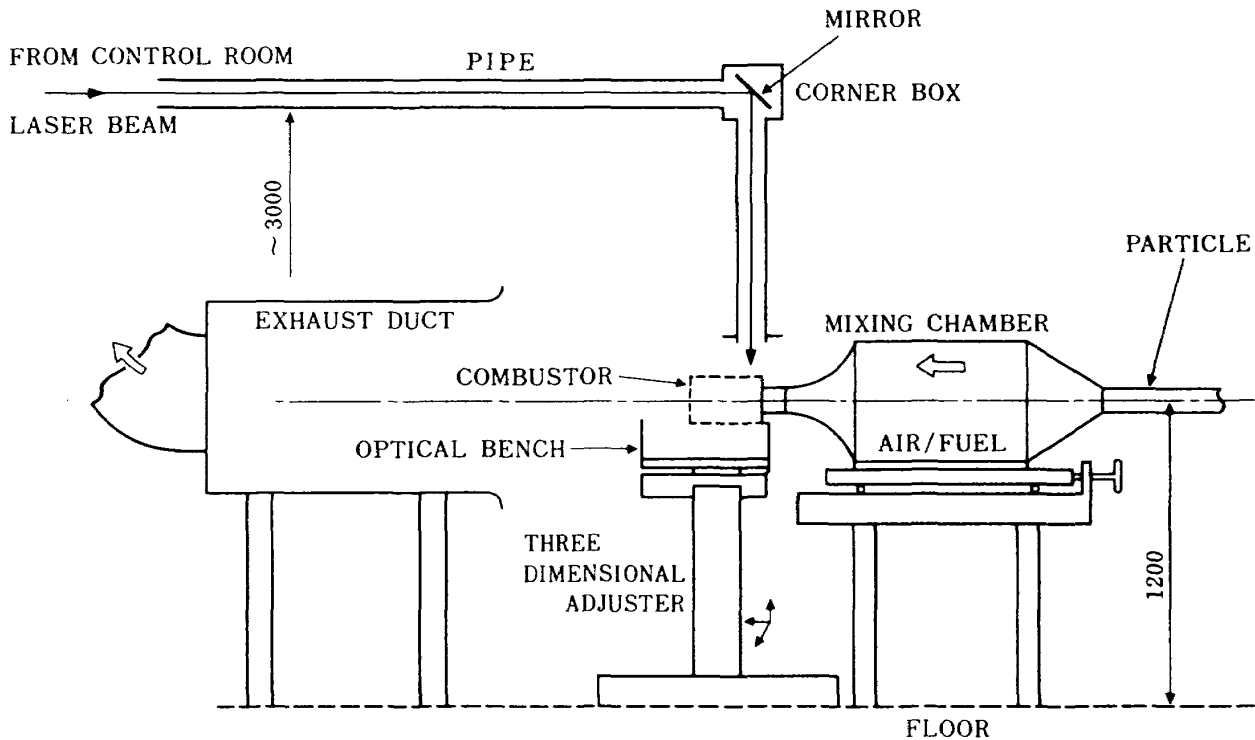


図21 燃焼実験装置の概要図

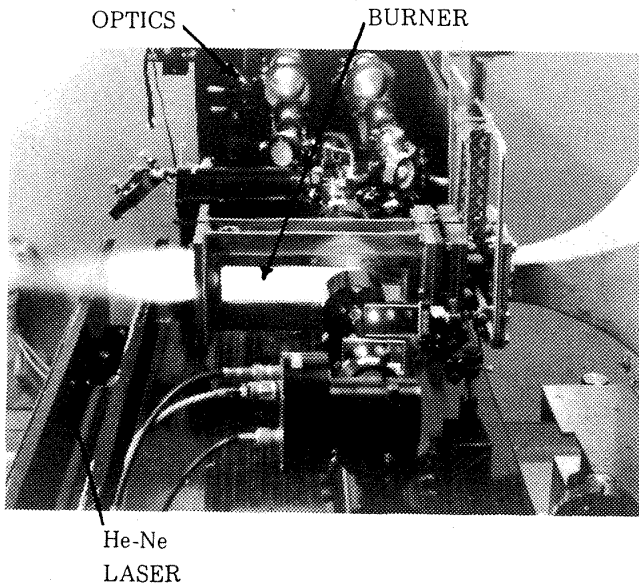


図22 実験装置の写真

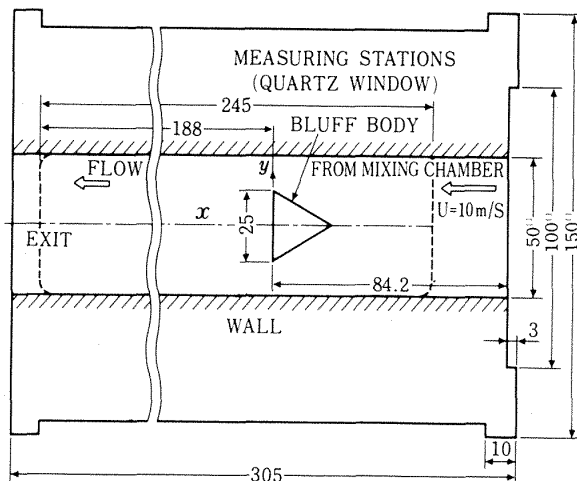
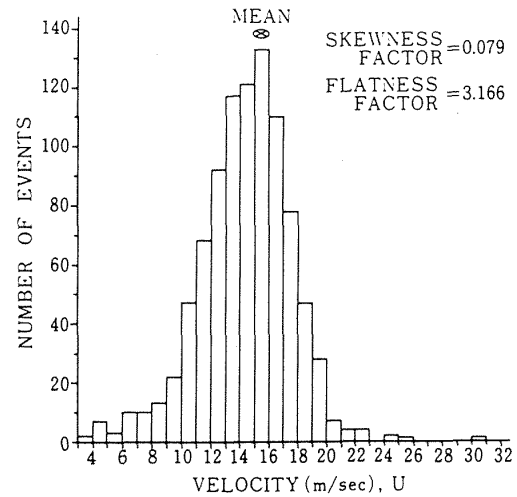


図23 ブラフボディ型保炎器を有する燃焼器の詳細図

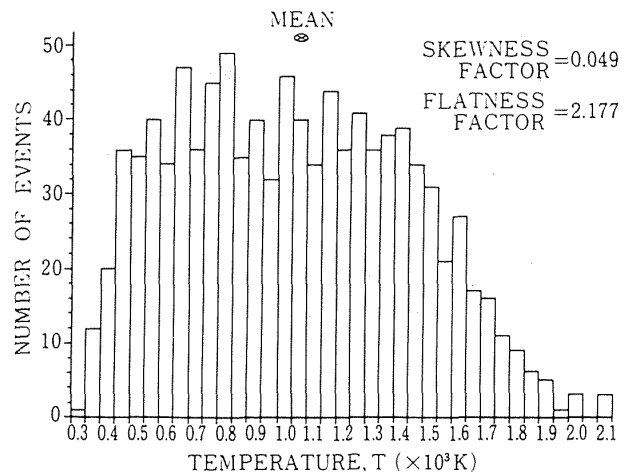
レーザの波長変動がある。広帯域であり、各レーザショット毎にスペクトル強度分布が多少変化し、CARSスペクトル分布に歪を生ずる。図25に1ショットのCARSスペクトルを測定値と理論値との比較例で示す。このような不一致は各ショット毎で異なり、測定温度のバラツキとなる。大気温度での結果として標準偏差値が約30Kある。

7. ま と め

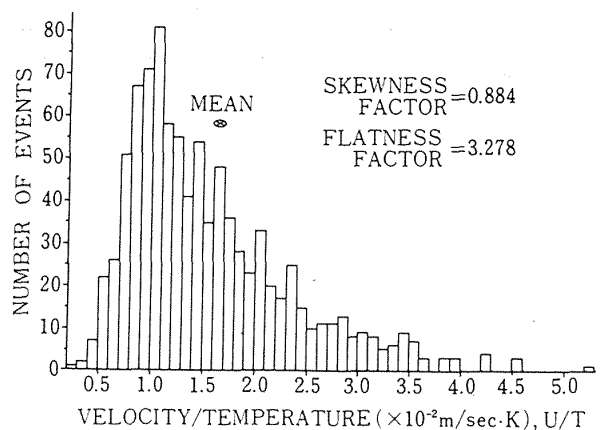
CARSによる温度計測法を実バーナ計測へ適用する際、燃焼実験室内に発生するほこり、燃焼ガスなどがレーザおよび精密光学分析装置等へおよ



(a) 速度のヒストグラム



(b) 温度のヒストグラム



(c) 速度 / 温度のヒストグラム

図24 測定例 (x=89mm, y=10mm)

ぼす悪影響を避けるため、遠隔測定方法を試みた。制御室から燃焼実験室までの全長44mの距離に対して、ミラーによる高出力レーザビームの配送と

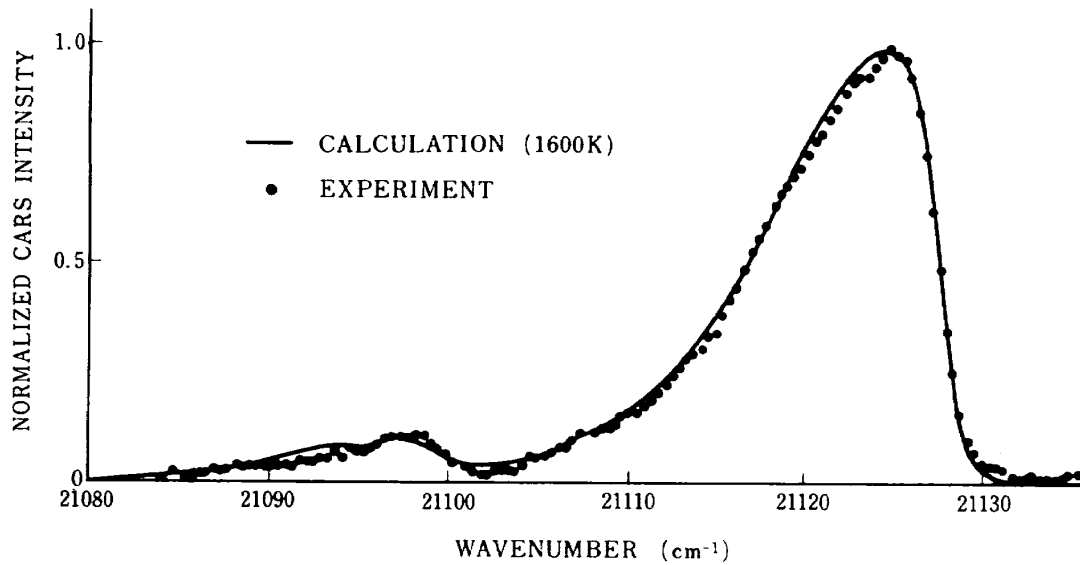


図25 シングルショットCARSスペクトル例

光ファイバーを利用した信号光の転送方式を用いた。さらにCARSとLDVを組合せて燃焼器内の温度と速度を同時に測定する遠隔レーザー計測システムを実現した。本研究を通じて得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 高出力用、高反射率国産ミラー6枚を使用したビーム配送において約85%の配送効率を得た。

(2) ミラーボックスおよび配送管を用いた方法において、He-Neレーザーおよびマイクロメータの微調整によってレーザービームを精度よく配送できた。

(3) CARS信号光およびLDV信号光の転送に光ファイバーを使用し、良好な結果を得た。

(4) 接近した波長をもつCARS用励起光 $\lambda_2$ とLDV用He-Neレーザー光とを、特殊ミラーを用いて同一方向の光路に乗せることができた。

(5) 上記方法によりCARS用ビームとLDV用ビームの全てを同一レンズに導き、空間上の同一点に集光させてサンプリングボリュームを形成させることができた。

(6) 各種ミラー、フィルター等の組合せにより微弱なCARSおよびLDV信号光を、強力な励起光から有効に抽出することができた。

(7) 散乱粒子の混入方法の工夫によりCARS用ビームによる焦点での粒子焼失光による影響を最小限に押え、速度、温度ともに有効なデータを得た。

本研究を遂行するに当たり、熱流体力学部流体騒

音研究室・藤井昭一室長より、終始懇切なる御指導を頂いた。山口進氏(アイシン精機)には、実験およびデータ整理で御協力を頂いた。心から感謝の意を表したい。

なお本研究は通産省工業技術院の大型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」の支援研究である「低公害・高負荷燃焼技術の研究」の一環として行ったものである。

### 参 考 文 献

- 1) A. C. Eckbreth ; CARS Thermometry in Practical Combustors, Combustion and Flame, Vol.39, pp.133-147, 1980.
- 2) A.C.Eckbreth, G.M.Dobbs, J.H.Stufflebam and P. A. Tellex ; CARS Temperature and Species Measurements in Augmented Jet Engine Exhausts, AIAA/SAE/ASME 19th Joint Propulsion Conf., Seattle, AIAA-83-1294, 1983.
- 3) S. Fujii, M. Gomi and K. Eguchi ; Cold Flow Test of a Bluff-Body Flame Stabilizer, Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, Vol.100, Sept., 1978.
- 4) 五味光男, 貴俵幸子, 藤井昭一 ; レーザ・ドプラー流速計のデータ処理方法の研究, 航技研報告, TR-521, 1978.
- 5) S. Fujii, K. Eguchi and M. Gomi ; Swirling



Jets with and without Combustion, AIAA Journal Vol.19, No.11, 1981.

- 6) F. Moya, S. Druet, M. Pealat and J. P. Taran ; Flame Investigation by Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, Experimental Diagnostics in Gas Phase Combustion System, B. T. Zinn Ed., AIAA, New York, 1977.
- 7) R. J. Hall ; CARS Spectra of Combustion Gases, Combustion and Flame, Vol.35, pp.47-60, 1979.
- 8) S. Fujii, M. Gomi and Y. Jin ; Instantaneous CARS Thermometry in Turbulent Flames, Combustion and Flames, Vol.48, pp.233-240, 1983.
- 9) 五味光男, 石塚只夫, 藤井昭一 ; CARSによる火炎温度の計測方法, 航技研報告, TM-457, 1982.
- 10) 流れの計測懇談会 ; LDVの基礎と応用, 日刊工業新聞社.
- 11) S. Fujii, M. Gomi and K. Eguchi ; Time-Resolved LDV and CARS Measurements in a Premixed Reacting Flow, Combustion Science and Technology, Vol.36, pp.211-226, 1984.
- 12) S. Fujii, M. Gomi and K. Eguchi ; A Remote Laser-Probe System for Velocity and Temperature Measurements, Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, Vol.105, June 1983.
- 13) A. C. Eckbreth ; BOXCARS : Crossed-beam Phase-matched CARS Generation in Gases, Applied physics Letter, Vol.32, No. 7, 1, April 1978.

## 付録 種々の位相整合法と空間分解能

### 1. 目的

CARS光は二本のレーザ光の位相整合条件(Phase Matching)によって発生する。周波数 $\omega_1$ の基本光,  $\omega_2$ のストークス光,  $\omega_3$ のCARS光の波数ベクトルをそれぞれ $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ とすれば位相整合条件は

$$4K = 2K_1 - K_2 - K_3$$

と表せる(付図1)。ここに $4K$ は位相整合を表すパラメータで,  $4K=0$ の時, CARS光強度は

$$I_3 \propto I_1^2 I_2 L^2$$

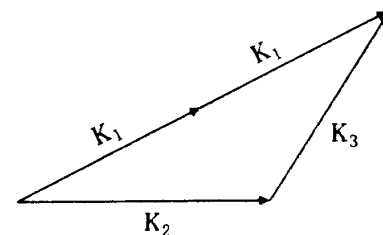
と表せる。ここに

$I_1, I_2$ :  $\omega_1, \omega_2$ の強度

$L$ :  $\omega_1, \omega_2$ の相互作用長

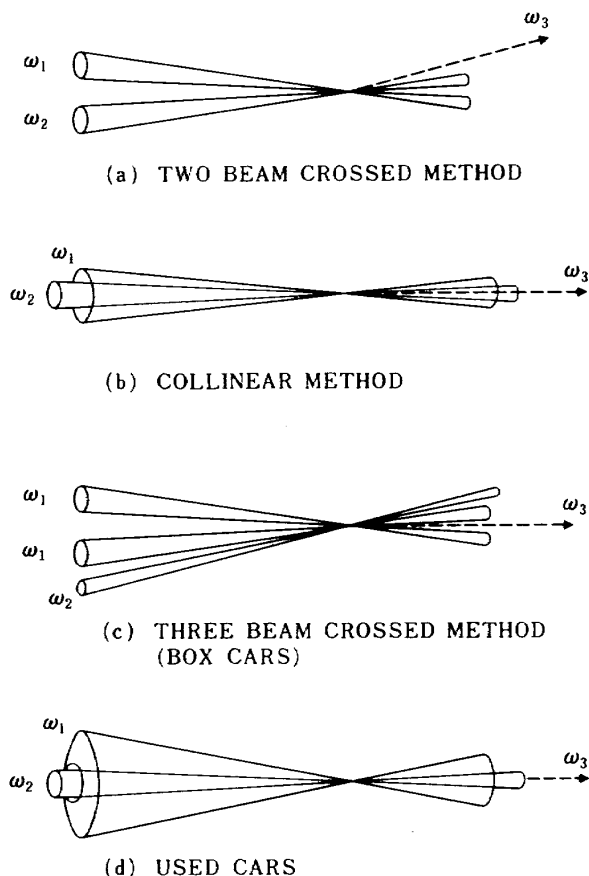
通常, レーザ光をレンズで集光させて用いる。焦点近傍ではビーム径は極めて小さくなりレーザ光の強度は増大するので, CARS光はこの地点で強く発生する。したがって測定上の空間分解能としてはビーム径は無視出来, 相互作用長のみ考慮すればよい。

位相整合法として用いられているものに付図2に示すものがある。(a)は二線交差法(Two Beam Crossed Method), (b)は共線法(Collinear Method), (c)は箱型法(Three Beam Crossed Method, 通称BOXCARS)<sup>13)</sup>, (d)はUnstable型共振器によって発振された特殊なビームパターンをもつレーザ光を利用した, (a)と(b)の中間型である。この中で最も空間分解能が優れているので多く用いられているのは(c)であるが, 調整が他の方法に比較して難しいこと, 信号光が弱い欠点がある。(c)以外の方法も測定対象によっては容易に使用できるので利

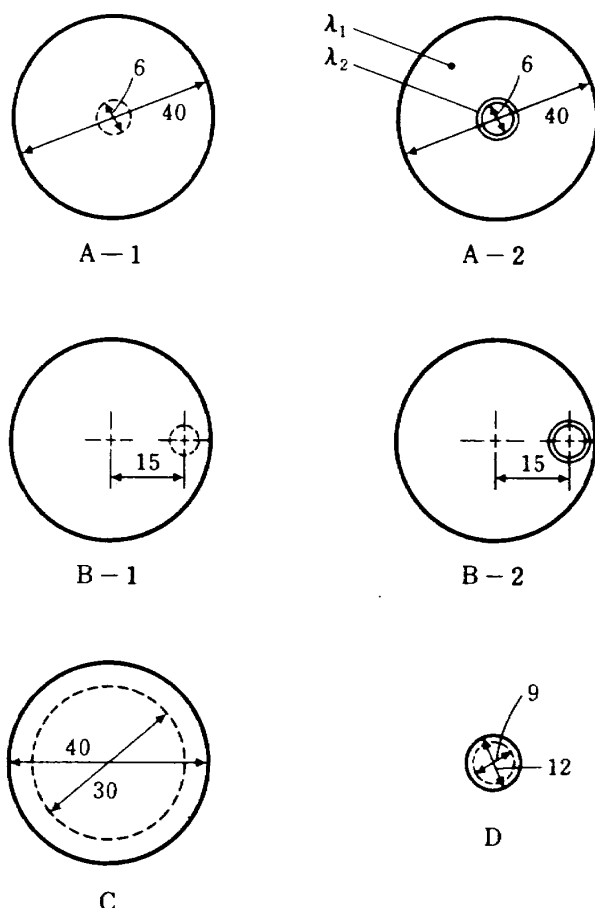


付図1 位相整合条件

( $K_i$ : 周波数 $\omega_i$ の波数ベクトル)



付図2 種々の位相整合法



付図3 ビーム混合方法

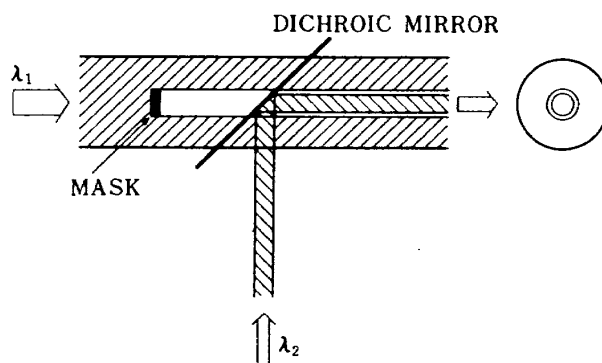
用価値は高い。本付録では(c)以外の方法に着目して幾つかの整合法を試み、空間分解能の推定を行った。

2. ビーム形状

2つのビームの波長を $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ とし、その組合せ方法を付図3に示す。A-1は $\lambda_1$ を40mmに拡大し、その光路上にマスクを置いて中心部の $\lambda_1$ を遮断し、その部分にビーム径6mmの $\lambda_2$ を通す方法(付図4), A-2はマスクをせずに $\lambda_1$ の中心部に $\lambda_2$ を通す方法, B-1, B-2は同様の考え方で $\lambda_1$ と $\lambda_2$ の光軸を15mm離れた。Cは $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ をそれぞれ40mm, 30mmに拡大した方法, Dは従来のビーム径のままである。

3. 試験方法

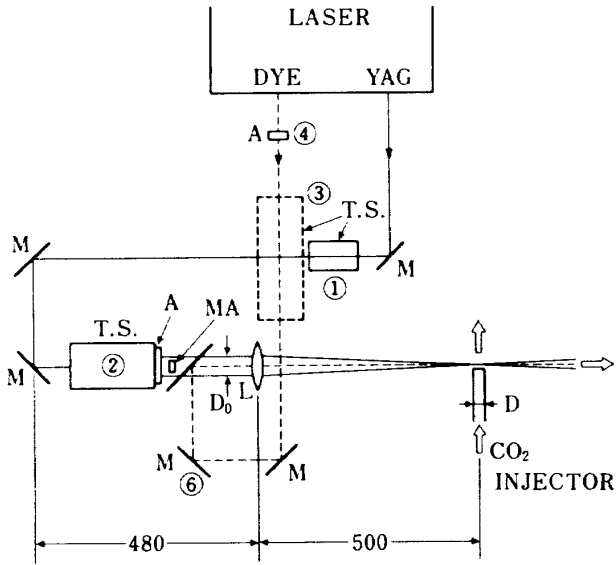
試験に用いた光学系の配置を付図5に示す。 $\lambda_1$ はテレスコープ1, 2でビーム径を拡大または縮小し,  $\lambda_2$ は6mmのアパチャー4およびテレスコープ3でビーム径を調整した。ミラー6は微動装



付図4 レーザビーム $\lambda_1$ と $\lambda_2$ の混合例

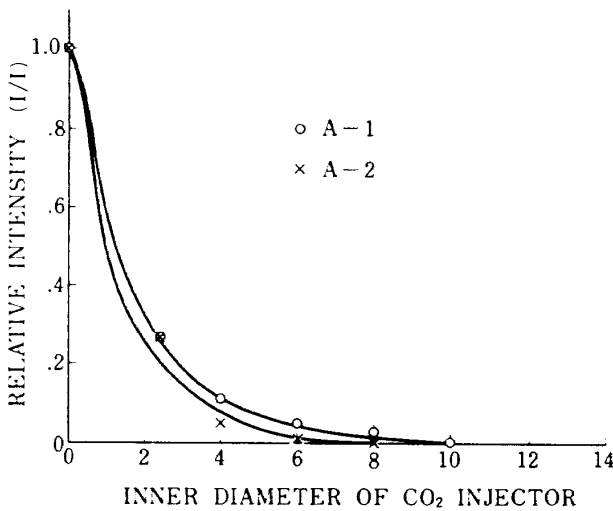
置付で光軸をずらす時に使用する。レンズの焦点距離は $f=500\text{mm}$ , レーザパワーはレンズ直後で $\lambda_1=125\text{mJ/パルス}$ ,  $\lambda_2=2\text{mJ/パルス}$ である。

ノズルから $\text{CO}_2$ ガスをビームに対して直角に噴出する。CARS信号は空気中の $\text{N}_2$ から発生するので、この $\text{CO}_2$ ガスの噴流径の長さ分だけ信号の発生が遮断され、全体の信号強度が低下する。ノズルは内径 $D=2, 4, 6, 8, 10, 15\text{mm}$ の6種類とし、ビーム焦点から約1mm離れた位置からガスを噴



M: MIRROR, A: APERTURE, L: LENS  
T.S.: TELESCOPE, MA: MASK

付図5 試験方法

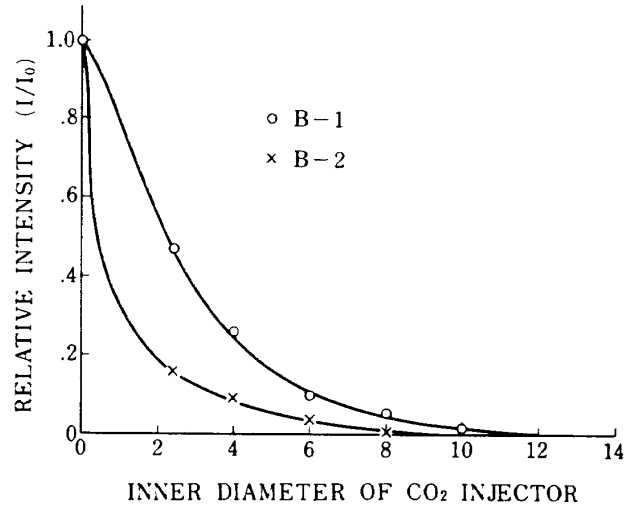


付図6 CO<sub>2</sub>噴出径とCARS信号強度の関係(1)  
A-1とA-2の比較

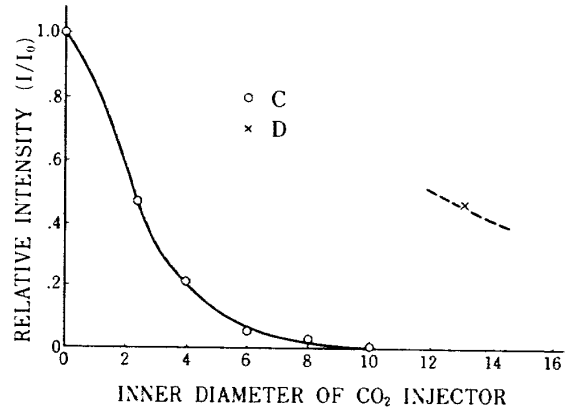
出した。 $\lambda_3$ の強度はOMAで測定し各ピーク値を、CO<sub>2</sub>を噴出しないときのピーク値で無次元化した。

4. 結果

(A-1, A-2), (B-1, B-2), (C, D)の結果をそれぞれ付図6~8に示した。 $I/I_0=0.05$ での値を分解能とみなして整理すると付表の通りである。最も良い結果はA-2であった。空間分解能は入射ビーム径 $D_0$ に反比例し、焦点距離 $f$ に比例し



付図7 CO<sub>2</sub>噴出径とCARS信号強度の関係(2)  
B-1とB-2の比較



付図8 CO<sub>2</sub>噴出径とCARS信号強度の関係(3)  
CとDの比較

付表 空間分解能の比較

ARRANGEMENT OF TWO BEAMS	SPATIAL RESOLUTION (mm)
A-1	6.0
A-2	4.0
B-1	7.5
B-2	5.0
C	6.5
D	—

て小さくなるので、実用上はさらに種々工夫する余地がある。

---

## 航空宇宙技術研究所報告 979号

昭和63年6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丁目44番地1  
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

**Printed in Japan**