

アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査 (その3:アークプラズマ計測技術)

佐藤誠四郎*・天田 重庚**・植松 進**・千田 哲也**

Feasibility Studies on Generation-, Measurement-and Application-Techniques of Ultra-high Temperature Fields by Arc-Discharge (Part 3: Laser Diagnostic Techniques of Arc - Plasma)

By

Seishiro SATO, Shigeyasu AMADA, Susumu UEMATSU and Tetsuya SENDA

Abstract

Recent developments in laser techniques for the diagnostics of partially ionized plasmas such as arc-discharge are reviewed. Since laser measurements may provide excellent temporal and spatial resolution and its possibility of non-intrusive nature, compared to other conventional techniques, it may be said that laser measurements are a new diagnostic tools for plasma. This report presents both methods and applications of interferometry, laser scattering, spectroscopy and laser velocimetry to the determinations of electron temperature, electron densities, species concentrations and flow velocity. The basic principles of these methods are described and their advantages and practical limitations are discussed.

目 次

1. まえがき	58	3.2 コヒーレント反ストークスラマン分光法 (CARS)	62
2. 温度, 密度計測	58	3.3 レーザ誘起蛍光法(LIF)	63
2.1 レーザ干渉法	58	3.4 オプトガルバノ谷光法(OGS)	64
(1) 測定原理および特徴	58	4. 流速計測	64
(2) 現状および展望	59	4.1 レーザドップラー法	64
i) 測定精度向上	59	(1) 測定原理および特徴	64
ii) 任意の分布形状の場合	60	(2) 現状および展望	65
iii) 低電離プラズマへの適用	60	i) 光学系	65
2.2 レーザ散乱法	61	ii) 信号処理技術	66
(1) 測定原理および特徴	61	iii) トレーサ粒子	67
(2) 適用例および展望	62	iv) 適用例	67
3. 化学種計測	62	4.2 レーザ2焦点流速計	67
3.1 レーザラマン法	62	(1) 測定原理および特徴	67
		(2) 適用例および展望	68
		5. まとめ	68
		参考文献	68

* 機関動力部

** 材料加工部

原稿受付: 昭和61年6月30日

1. まえがき

プラズマ計測の目的は、超高温状態の評価を行いアークプラズマ及び高周波プラズマなどのプラズマ発生装置の改良や開発への知見を与えること、関連現象の基礎的な理解によりプラズマの組成、温度、流速を高精度に制御する技術を開発し新材料創製のための条件設定などに用いることであり、プラズマ計測技術の確立が超高温の発生及び利用技術の一層の発展に重要であると認識されている。¹⁾

プラズマの計測すべき基礎量として、プラズマ中の電子、イオン、原子などに直接関係する温度、密度、原子やイオンの化学種、あるいはこれと密接に関係する電離度、熱伝導度、流速、拡散係数などがある。プラズマ計測には、受動的な方法としてプラズマ自体から放出される光や電子、イオンなどの粒子を用いて測定するもの、能動的な方法として外からレーザー等を照射しその応答をもとに測定する方法があり、後者の方が一

表一 1 プラズマ計測法

測定法	測定量	
伝搬法		
干渉法	電子密度、ガス密度	線積分値、分布
ファラディ回転法	電子密度、磁界	線積分値
散乱法		
トムソン散乱法	電子温度、電子密度、イオン温度	局所値
レーザー誘起蛍光法	化学種	局所値、分布
CARS	化学種、ガス温度	局所値
共鳴散乱法	原子密度	局所値
レーザドップラ法	ガス流速、マクロ粒子径	局所値
線スペクトル法		
線強度(比)	電子温度	線積分値
線幅・ドップラ幅	イオン温度	線積分値
線幅・シュタルク幅	電子密度	線積分値
ドップラシフト	イオン流速	線積分値

般に測定しうる領域が広く、また空間分解能を良くすることもできる。プラズマ計測のうちレーザーを応用したもの、従来の分光法によるものなど光学的方法の一例を表一1に示す。

レーザーを応用した計測法の特徴は、非接触でプラズマ場を乱さないこと、時間、空間分解能が優れていることであり、従来の手法では成しえなかった計測が可能となり近年盛んに研究が行なわれている。本報告では、プラズマ計測として現在脚光を浴びている、あるいは将来有望と考えられるレーザーを応用した計測をとりあげ、プラズマの温度、密度、化学種、流速測定の現状について調査した結果をのべる。

2. 温度、密度計測

2.1 レーザ干渉法

レーザー干渉法ではプラズマの電子密度の絶対値が得られるので、プラズマが局所熱平衡 (Local Thermodynamic Equilibrium, 略称LTE) 状態にある場合には電子密度と共に電子温度を求めることができる。

(1) 測定原理および特徴

プラズマの電子密度の測定は、マイクロ波や光がプラズマを通過するときの位相変化を測ることによって行う。プラズマの電子の屈折率 N_e は周波数 f の電磁波に対してプラズマ周波数を f_p 、電子密度を n_e (cm^{-3}) とすると次式で表わされる。²⁾

$$N_e = [1 - (f_p/f)^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$f_p = 0.898 \times 10^{14} \times (n_e)^{1/2} \quad (2)$$

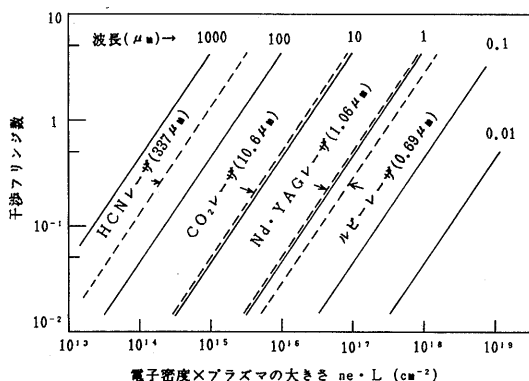
周波数 f が f_p に等しくなったところで $N_e = 0$ になり電磁波は透過できず反射する (カットオフ周波数という)。 $f \gg f_p$ の場合は、電子の屈折率 N_e は電磁波の波長 λ (cm) とすると(1), (2)式から次式が得られる。

$$N_e = 1 - 4.49 \times 10^{-14} \cdot n_e \cdot \lambda^2 \quad (3)$$

干渉法ではプラズマの屈折率の変化を光路長の変化として検出する。プラズマの光路方向の長さを L (cm) とすると、干渉フリッジ数の変化として、次式を得る。

$$\Delta(N_e \cdot L) / \lambda = 4.49 \times 10^{-14} \cdot \lambda \cdot n_e \cdot L \quad (4)$$

図一1は(4)式から求めた干渉法による電子密度測定の波長依存性を表わし、測定対象となるプラズマ温度の比較的低い領域では長波長ほど検出感度は向上する。しかしカットオフ周波数の制限などからむやみに長波長は使用できない。アークプラズマでは、溶射、微粒子製造などその用途によって異なり、圧力は0.1~1気圧、電子密度が $10^{14} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度が3,000~20,000Kの範囲にあると考えられる。従って干渉法の測定精度にもよるが、可視光レーザー (ルビーレーザー0.69 μm) から赤外レーザー (CO₂レーザー10.6 μm) など、対象とするプラズマの電子密度の範囲、大きさによって使用波長を選ぶ必要がある。



図一 電磁波波長と検出感度

アークプラズマのように大気圧付近で作動するプラズマは、電子のほかイオン、中性ガスの混合体でありそれぞれの影響を考慮する必要がある。プラズマの屈折率 N_p は各成分の比屈折率 K と粒子密度 n を用いて、次式で与えられる。³⁾

$$N_p - 1 = K_n \cdot n_n + K_e \cdot n_e + K_i \cdot n_i \quad (5)$$

ただし添字 e は電子、 i はイオン、 n は中性ガスを示す。また $K_e \cdot n_e \gg K_i \cdot n_i$ であり(5)式の右辺の第三項は省略できる。

今プラズマがある場合と無い場合の屈折率の変化を ΔN とすると、光路差 ΔL は、

$$\Delta L = \int_0^L \Delta N dx \quad (6)$$

ここで x : 光路方向の座標、 L : プラズマの大きさである。

基準状態を大気にとり、空気密度を n_0 とすれば(5)、(6)式からフリンジ移動量 (またはフリンジ次数) ΔS は、次式となる。

$$\Delta S = (1/\lambda) \int_0^L \{K_n(n_n - n_0) + K_e n_e\} dx \quad (7)$$

比屈折率 K_n , K_e は波長の関数であるから、中性ガスと電子の密度は二種類の波長 λ_1 , λ_2 を用いる干渉法から測定することができる。

波長 λ_1 , λ_2 に対するフリンジシフトを S_1 , S_2 , 比屈折率 K を添字 1 , 2 で表わすと、

$$S_1 = (1/\lambda_1) \int_0^L \{K_{n1}(n_n - n_0) + K_{e1} n_e\} dx \quad (8)$$

$$S_2 = (1/\lambda_2) \int_0^L \{K_{n2}(n_n - n_0) + K_{e2} n_e\} dx \quad (9)$$

これから、

$$\int_0^L (n_n - n_0) dx = \frac{\lambda_1 K_{e2} S_1 - \lambda_2 K_{e1} S_2}{K_{n1} K_{e2} - K_{n2} K_{e1}} \quad (10)$$

$$\int_0^L n_e dx = \frac{\lambda_1 K_{n2} S_1 - \lambda_2 K_{n1} S_2}{K_{n2} K_{e1} - K_{n1} K_{e2}} \quad (11)$$

プラズマの密度は円筒状の回転対称分布の場合、(10)、(11)式を Abel 変換することにより求められ、任意の分布の場合、多方向からの干渉データを用いるコンピュータ断層撮影法 (Computed Tomography, 略称 CT) の手法から求められる。

干渉計としてマッハツエンダー型、マイケルソン型があり、これらは主として赤外域に使用され、ホログラフィ法は可視域に用いられる。ホログラフィ法の利点として、①干渉計の光路長など面倒な調整が不要なこと、②高精度の光学部品を必要としないこと、③光学系の配置の自由度が大きいこと、④干渉像の多重記録が可能でありコンピュータ断層撮影法の適用が容易であることなどがある。

干渉法の特徴は写真乾板、イメージセンサーなどを用いて面的な信号の検出ができ、空間の局所値のほか1ショットで非定常状態の広い範囲の分布が測定できることである。

(2) 現状および展望

i) 測定精度向上

干渉法によるプラズマの密度測定精度向上には使用レーザーの波長をのばしていく方法、干渉測定に位相変調して検出するヘテロダイン法などの高精度干渉法^{4), 5)}を用いる方法がある。

マイクロ波などの長波長を用いる際の問題として、前述のプラズマ周波数によるカットオフ効果による制限のほか、プラズマの密度勾配によるレーザービームの屈折によりフリンジシフトの測定が難しくなること、温度約7000K以下の低電離プラズマでは中性原子・分子の情報が得られないこと、測定の空間分解能が悪くなることである。⁶⁾従って短波長を用いてフリンジ測定の精度向上をはかる方が光学系の組み立て、検出器の取り扱い易さなど利点が多いと考えられる。

位相変調干渉法はフリンジの測定精度を向上するもので、図-2に示すように、信号光と周波数をずらせた参照光とのビート信号を光電的に検出し、光の位相を電気的位相に変換して測定するもので、1/500フリンジ程度まで計測できる。赤外線領域ではいくつか適用例があり、⁷⁾可視領域では適用が期待される手法である。現在用いられている赤外レーザー源は、CO₂レーザー(波長10.6μm)、水蒸気レーザー(波長28μm)、CH₃OH

レーザ (波長 $119\mu\text{m}$), HCN レーザ (波長 $337\mu\text{m}$) などがある。

検出器として, Ge-Cu 素子または HgCdTg 素子などが用いられており, ノイズを小さくするため液体ヘリウムまたは液体窒素で冷却する必要がある。また高出力の CO_2 レーザを用い干渉縞を黒いフィルム上に焼き付けパターンとして測定している例もある。⁸⁾ 可視光では, ルビーレーザ ($0.69\mu\text{m}$), Ar イオンレーザ ($0.515\mu\text{m}$ または $0.488\mu\text{m}$), N_2 レーザ ($0.34\mu\text{m}$) などがあり受光には通常の写真フィルムや, ホログラフイでは高解像力の乾板やサーモプラスチック乾板などが用いられている。

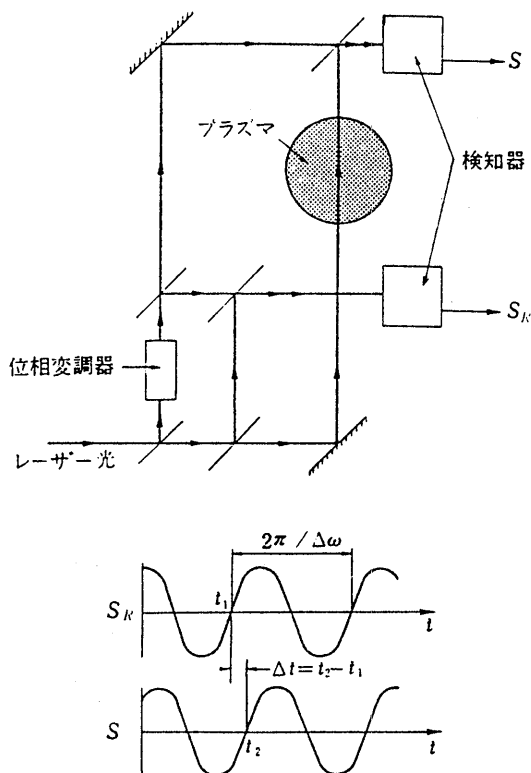


図-2 位相型レーザ干渉計

ii) 任意の分布形状の場合

干渉法ではプラズマの観測視線方向の積分値が得られるので, 定量測定には視線方向に変化のない二次元分布や軸対称分布の場合に限定される。軸対称分布からのずれが小さい場合は非対称 Abel 変換法が試みられているが,⁹⁾ 任意の分布形状を用つ場合は前述のコ

ンピュータ断層撮影法 (CT) が必要である。CT は多方向の透過データから元の分布などを再構成するもので, 従来得られなかった情報が計算機の利用によって入手可能となった。CT法の適用例としてプラズマ断面の軟 X 線の放射強度分布の測定が報告されている。¹⁰⁾

iii) 低電離プラズマへの適用

大気中のアークプラズマの測定には, 低電離領域の中性原子, 分子の影響を考慮した測定が必要である。これには He-Ne レーザ ($0.633\mu\text{m}$) と CO_2 レーザ ($10.6\mu\text{m}$) の二つのレーザを用い, それぞれ独立に電子と中性ガス密度を求めた例が報告されている。¹¹⁾ また図-3, 図-4 に示すようにルビーレーザと窒素レーザの二波長干渉像から各波長に対するフリンジシフトの差を求め, 電子と中性ガスのそれぞれの密度を同時に測定した例がある。¹²⁾ この方法では電子密度が低

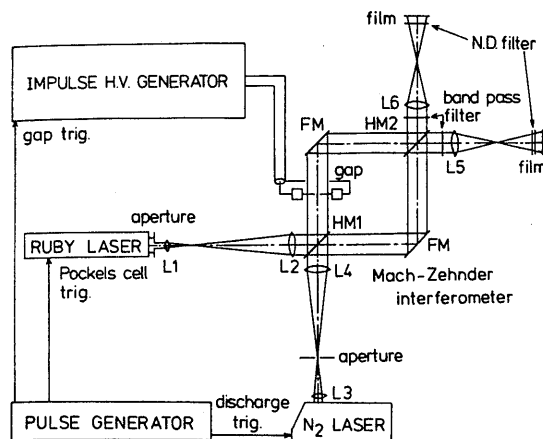


図-3 二波長干渉法

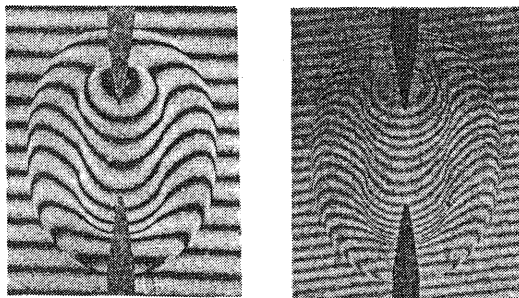


図-4 二波長干渉像

い場合フリンジの測定精度を高める必要があるが、大気圧プラズマの有力な測定手法と思われる。

プラズマの温度、密度などの制御を高精度に行うため、プラズマ計測では局所の代表値計測から多点同時計測、面的な分布計測さらにはプラズマ場全体の三次元的な空間分布の計測が要請される機運にある。レーザー干渉法はもともと面的な分布計測が可能であり、これにCT法とホログラフィ法の特徴を用いた三次元空間分布計測法の開発の可能性がある。

2.2 レーザ散乱法

(1) 測定原理および特徴

電磁波の散乱計測の中でプラズマ計測に最も広く用いられているのがレーザートムソン散乱法である。¹³⁾ プラズマにレーザー光を照射すると、主に電子が光の電界によって加速度を受け光を放出する。この再放出光(散乱光)はプラズマ状態の情報を持っており、散乱スペクトルから温度、密度を測定することができる。

図-5はルビーレーザーを用いた測定系の一例である。散乱計測では電磁波の進行方向とは異なる方向への散乱光を観測するので、透過光を利用するのと異なりプラズマの局所値が直接求まるのが大きな特徴である。

トムソン散乱光の特性は次式で定義される散乱パラメータ α の大小により異なる。

$$\alpha = 1 / (2k_0 \cdot \lambda_d \cdot \sin\theta / 2) \quad (12)$$

ここに k_0 : レーザの波数, λ_d : プラズマのデバイ長さ, θ : 散乱角である。

i) $\alpha < 1$ の場合

この場合はデバイ距離に比べ密度の揺らぎの波長が

短いため、電子一つ一つの自由な散乱となりスペクトルの広がりには電子の熱運動によるドップラー幅を示す。ルビーレーザーを用いた $\theta=90^\circ$ 散乱の場合ドップラー幅 $\Delta\lambda$ は次式で与えられる。

$$\Delta\lambda = 3.23(k \cdot T_e)^{1/2} \quad (13)$$

ただし k : ボルツマン定数, T_e : 電子温度, $[k \cdot T_e]$: eV 単位, $[\Delta\lambda]$: オングストローム。これから電子温度 T_e が求まり、また一個の電子のトムソン散乱断面積がわかっているのだから散乱された全光子数の絶対値から電子密度を求めることができる。

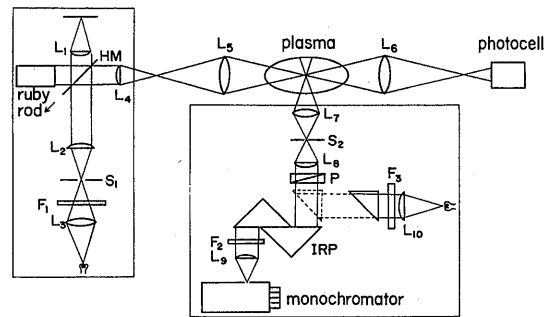


図-5 トムソン散乱法

ii) $\alpha \geq 1$ の場合

この場合は電子はもはや独立に散乱に寄与できなくなり、集団運動の効果が大きく集団散乱と呼ばれる。散乱スペクトルは図-6のようにイオンのドップラー幅をもった λ_0 を中心としたピークとプラズマ周波数で決まるサイドピークが表れる。

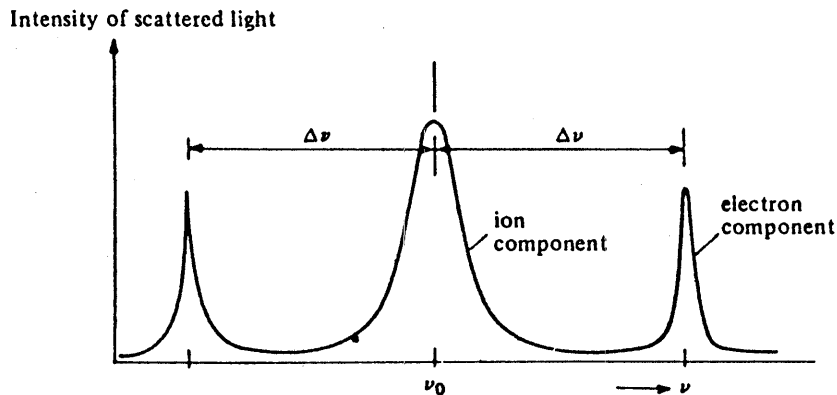


図-6 散乱スペクトル ($\alpha > 1$)

(2) 適用例および展望

図-7はルビーレーザーを用いた大気中直流アーク放電で測定した例で $\alpha < 1$ の場合に相当し、 $\pm 4\%$ (300K)の精度があると報告されている。¹⁴⁾ 図-8はCO₂レーザーを用い水素アークを測定した例で、¹⁵⁾ $\alpha > 1$ の場合に相当し、 $T_e = T_i = 5\text{eV}$ のカーブが実験値と一致する。このように長波長レーザーを用いてイオンなどを検出する試みが最近多くなっている。

トムソン散乱は他の分光法に不可避な遷移確率の不確かさなどの誤差要因が少ないので確度の高い方法と考えられ、多くのプラズマ研究の分野で用いられようとしている。また時間および空間分解能に優れているが、一回のレーザー発振の間に一点の測定しか得られないのが難点である。しかし多パルスレーザーを用い数箇所からの散乱光を同時に測定すれば、電子温度の空間分布や時間変化が求められる可能性がある。

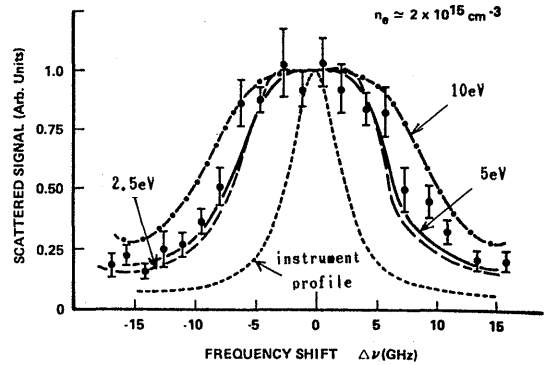
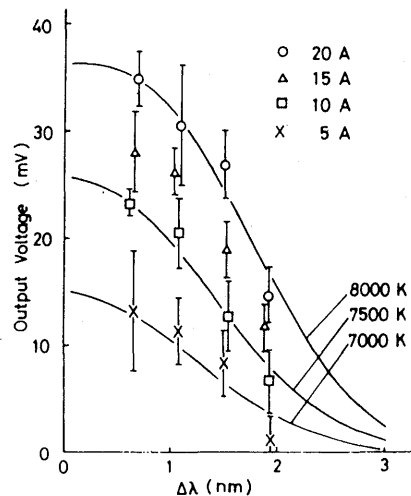
3. 化学種計測

プラズマおよび燃焼計測の分野では、化学種濃度や温度測定のためレーザーを用いた新しい分光学的計測法が開発されている。プラズマの場合、強力な発光を伴うのでノイズ除去が大きな問題であるが、レーザー分光法はプラズマ中で再結合により分子が形成される低電離領域の化学種計測などに有効と考えられる。本章では、レーザー分光法のうち、レーザーラマン法 (Laser Raman Spectroscopy)、コヒーレント反ストークスラマン分光法 (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, 略称CARS)、レーザー誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence Spectroscopy)、オプトガルバノ分光法 (Opto-Galvanic Spectroscopy) について述べる。

3.1 レーザラマン法

ラマン散乱は非弾性散乱として古くから知られているが、散乱断面積が小さく得られる信号が微弱なので、強力なレーザー光を用いることにより実際の適用が広がった。ラマン散乱は、機器構成およびデータ解析が比較的簡単で、一つのレーザー波長で多くの化学種が検出できるのが特徴である。

レーザーラマン法の適用例として、Cummingsら¹⁶⁾は連続発振のArイオンレーザー(出力1.1W, 波長488nm)を用いフッ素の回転ラマン信号から温度とフッ素原子の密度を測定している。また燃焼ガスの計測として高出力パルスレーザーと受光処理の制御によりノイズの多い輝炎部の温度と濃度分布の計測例が報告されてい

図-7 大気中アーク測定例 ($\alpha < 1$)図-8 水素アーク測定例 ($\alpha < 1$)

る¹⁷⁾。本手法はS/N比が良くプラズマ場への適用が可能と思われる。

3.2 コヒーレント反ストークスラマン分光法 (CARS)

プラズマ中の原子、ラジカル等の計測法としてCARSの有用性が注目されている。CARSは物質と光の非線形相互作用に基づく新しいラマン過程であり、高出力レーザーの使用によって観測されるようになった。図-9はCARS過程のエネルギー順位図である。図で

レーザの角振動数が $\omega_1 - \omega_2 = \omega_R$ となる二本のレーザを入射させると、対象物質の固有振動数 ω_R の振動が誘起され、これが第三の入射レーザ ω_1 とビートを起こし ω_3 の誘導出光を出す。このとき $\omega_3 = \omega_1 + \omega_R$ となり ω_3 の光りはラマン効果の反ストークス線に相当している。

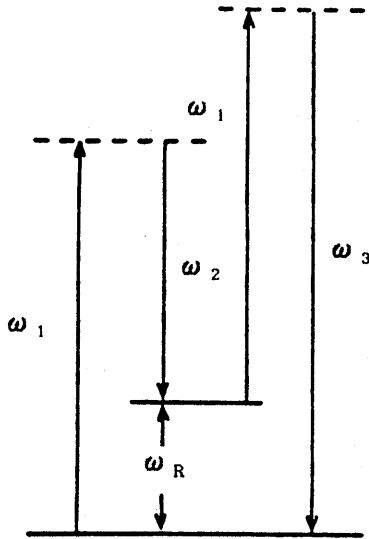


図-9 CARSのエネルギー順位

CARSの特徴として、①通常のマラン散乱に比べて $10^5 \sim 10^{10}$ 高い信号強度が得られること、②ビーム状の信号が得られ集光効率が高いこと、③信号の振動数 ω_3 が励起レーザ光より高いので蛍光の影響がないことなどである。欠点として①一度に種類の物質しか検出できないこと、②1%以下の微量成分の検出が難しいこと、③圧力変化などによるカーブスペクトルの解析が複雑であることなどが挙げられる。

図-10に装置の一例を示す。CARSのプラズマ中の原子、ラジカル等の適用例として、低圧放電プラズマ中のシラン (SiH_4) および中性ラジカル SiH_2 の測定がある。¹⁸⁾ このほか Moore ら¹⁹⁾ によるマイクロ波放電で生じた塩素基を検出した例がある。

CARS法の問題として、測定精度を上げるための励起用レーザ出力および周波数の安定化、CARS信号に影響する非共鳴成分の除去、SN比を上げるため

の共鳴CARSの適用化などがある。CARS法は多種の成分に適用できる可能性があり、今後アークなどの熱プラズマにとって重要な計測法の一つになると思われる。

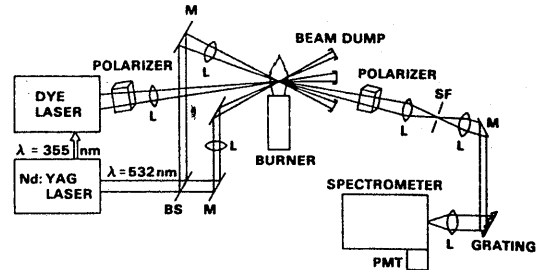


図-10 CARS測定装置

3.3 レーザ誘起蛍光法 (LIF)

プラズマ中の原子、イオンの二順位間の遷移波長に同調したレーザ光を入射すると、各順位の占有密度は、吸収、誘導放出、自然放出過程により変化する。もしレーザ光の強度が十分に強ければ蛍光強度はレーザ強度に依存しなくなり飽和して、蛍光強度の測定だけで原子やイオンの密度を求めることができる。¹⁹⁾ LIFの利点として、高い空間、時間分解測定が可能、検出感度が大きい、濃度の絶対値を求めることができることなどがある。しかし、対象原子、分子などの実際のエネルギー順位への励起を行うためのレーザがあるかどうかが実用上の問題となる。またLIFでは高濃度の場合に励起光の吸収、蛍光の再吸収などが生じて一般には難しく、むしろ微量成分の測定に特徴がある。

プラズマ診断に用いられているLIFの装置例を図-11に示す。²⁰⁾ 化学種の測定としてプラズマ中のバリウム原子密度²⁰⁾ や、放電電極からのアルミニウム蒸気濃度の二次元的な分布がイメージンテンシファイヤ、ビジコン等により観測されている²¹⁾。またKrFエキシマレーザ(波長248nm)を用いた CF_2 ラジカルの濃度測定例¹⁹⁾ などが報告されている。検出限界はプラズマの背景光により決まりこれの除去が必要である。LIFは検出感度が高く、前述のアルミニウム蒸気の面的な分布測定の可能性が確かめられており、今後真空紫外域に大出力レーザの開発が進めば、プラズマ計測法としてその重要性は大きくなると思われる。

3.4 オプトガルバノ分光法 (OGS)

放電プラズマ内の原子、分子の光学遷移に共鳴する光を照射するとプラズマの電気的性質（インピーダンス、電流、電圧）が変化する。この現象を利用して高感度な化学種が検出される。²²⁾ 図-12は波長可変レーザを光源としたOG分光法の実験配置例である。²³⁾ OGS分光法は他のレーザ分光法と比べて、①光検出器、分光器などの独立した信号検出器を必要としないこと、②ラジカルや寿命の短い中間体などの高感度分光が可能であること、③光源のスペクトル幅に特に厳しい制限はないことであり、欠点としてスペクトルの検出方法が間接的であり、光学遷移の順位占有密度とOG信号の関係が定量的に理解されていないことである。適用例としてネオン放電、高周波放電の不安定分子、 N_2 の高分解能スペクトルが測定されている。^{16),22)}

4. 流速計測

4.1 レーザドップラー法

(1) 測定原理および特徴

流体中に浮遊させた微粒子にレーザ光を当てると粒子から散乱される光はドップラー効果により粒子の移動速度に応じた周波数の変化を生ずる。この周波数の変化を検出して流体の流速を求めるものがレーザドップラー流速計 (LDV) である。特徴として、①プローブを挿入する必要がないので流れを乱さないこと、

② 流体の温度、圧力、濃度に無関係であり特別の校正を必要としないこと、③ 流れの方向の検出も可能であることなどの利点があり、従来の測定法では困難な条件下での測定が可能となった。²⁴⁾

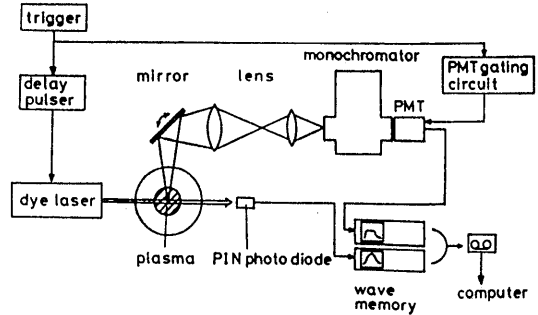


図-11 レーザ誘起蛍光装置

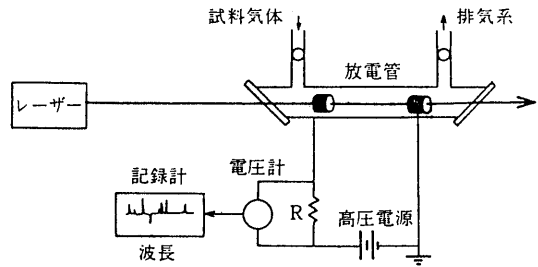


図-12 オプトガルバノ効果

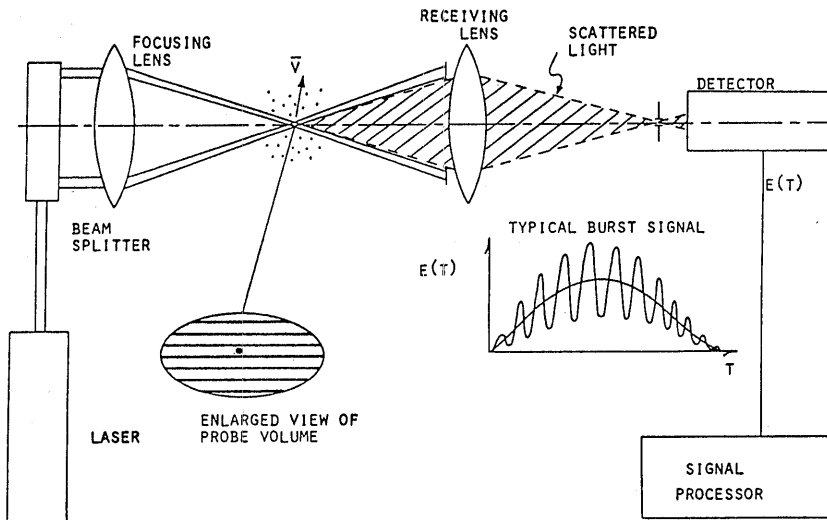


図-13 差分ドップラー法

ドップラー周波数の変化の検出には、参照ビーム法、差分ドップラー法などがあり、一般に受光開口の大きくとれる図-13²⁵⁾の差分ドップラー法がよく使われる。差分ドップラー法では二つのレーザービームを交差させ、その交差点を測定点としている。交差部は同図-13に示すように各ビームの位相差によって、フリッジパターンができると考え、その中を粒子が通過するときに散乱光の強弱が変化すると説明できる。この考えから明らかのように差分ドップラー法ではビーム軸に垂直な方向の速度成分を検出することになる。

(2) 現状および展望

i) 光学系

光学系ではビームスプリッターが重要である。図-14は典型的なスプリッターで二つのビーム距離が等しくとれる。また回転に対して Self-aligning であることも実用上重要である。さらにスプリッターとレンズ系が正しく測定領域に絞り込むようになっていないとフリッジがはずみ、ドップラー周波数測定 of 誤差となる。図-13のように二つのビームが同じ周波数だとドップラーシフトの正負が分からず、速度方向が検出できない。図-15は光音響素子により元のレーザー光の周波数をシフトさせて速度の正負も測定できる装置である。

以上は一次元の速度検出であるが、Ar イオンレーザーは多波長で同時発振できるので、例えば波長514.5nmと488.0nmの光をフィルタで分離しそれぞれについてフリッジを直交させて作ると二次元の速度検出ができる。これらの方法では多くの光学要素が必要となるため、その機構と操作が複雑になる。そこでLDV光学系の複雑さを解消するため光ファイバを用いる方法が報告されている。²⁶⁾ 光ファイバを用いると光学系が簡単になるほか、融通性や遠隔測定も可能となる。

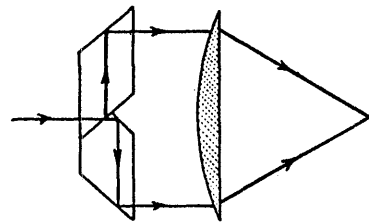


図-14 LDV用ビームスプリッター

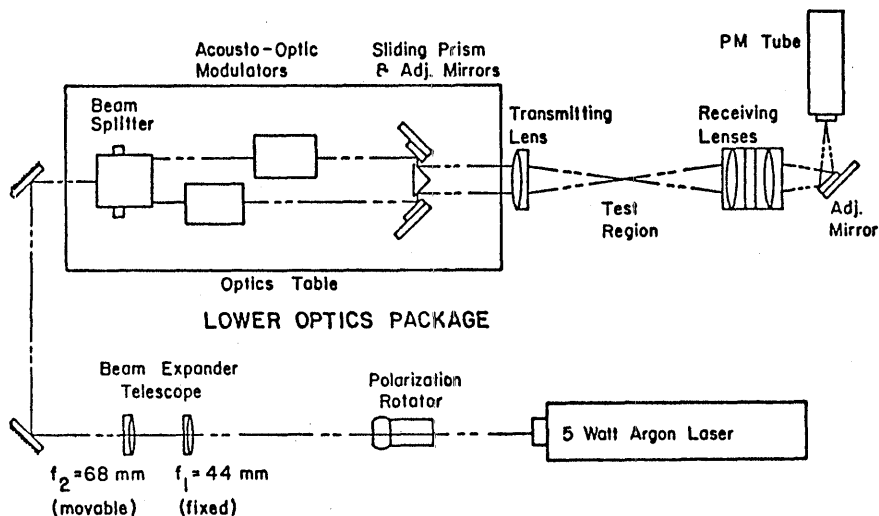
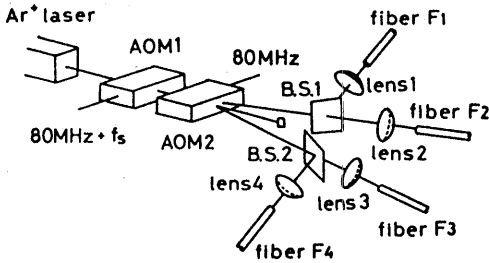
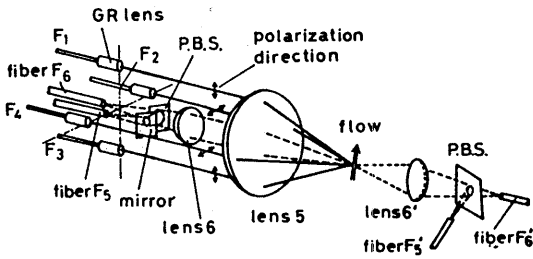


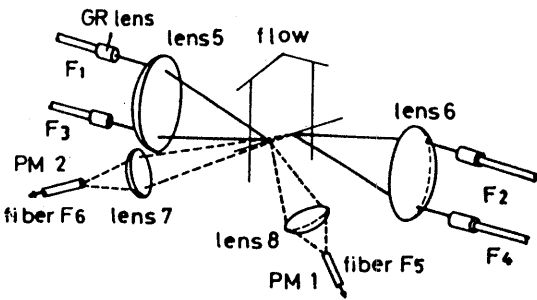
図-15 速度方向検出LDV



a) 光ファイバ入力部



b) 二次元速度ベクトル測定出力部



c) 二点同時測定出力部

図-16 光ファイバ応用LDV

図-16は光ファイバを用いた光学系の一例である。二次元測定の場合、光ファイバの出口端でファイバの軸を相対的に回転させるだけで任意の面内の速度測定が可能である。

三次元測定の場合はビームスプリッタでレーザービームの組みをもう一組増すだけでよい。

ii) 信号処理技術

ドップラーシフトした信号の形として図-17に示す三種がある。²⁵⁾(b)はほぼ連続した信号が得られる場合で、スペクトラムアナライザまたは周波数トラッカで検出する。前者は速度変動の情報が失われることが欠点である。トラッカ型では入力信号の周波数に追従して電圧を出力し、トレーサが十分多い時に使用しやすく多粒子散乱による信号波形のくずれはあまり問題とならない。(a)の場合はカウンタが用いられる。これは入力するドップラー信号の周期を処理器内のクロックを用いてカウントし周波数を算出して出力する。使い難い点は波形のくずれに影響されやすく、信号の質が悪いとカウントの割合が減少するといわれる。

(c)のように信号が単一光子の入射になるような場合には光子相関法が用いられる。この原理は相関関数のフーリエ変換はパワースペクトルになっていることを利用したものである。例えばドップラー信号が周期 t_0 の正弦波であるとする。この原理は相関関数のフーリエ変換はパワースペクトルになっていることを利用したものである。例えばドップラー信号が周期 t_0 の正弦波であるとする。その周期から流速がわかる。前述の処理方法ではなるべく強い散乱光を得る必要があるのに対して、相関法では使用機器や論理素子の応答の限界からあまり光強度の大きいときは使えない反面、長時間にわたる統計平均が得られるので微弱信号から高精度の測定ができる。

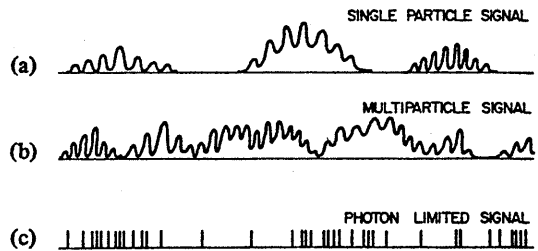


図-17 信号の種類

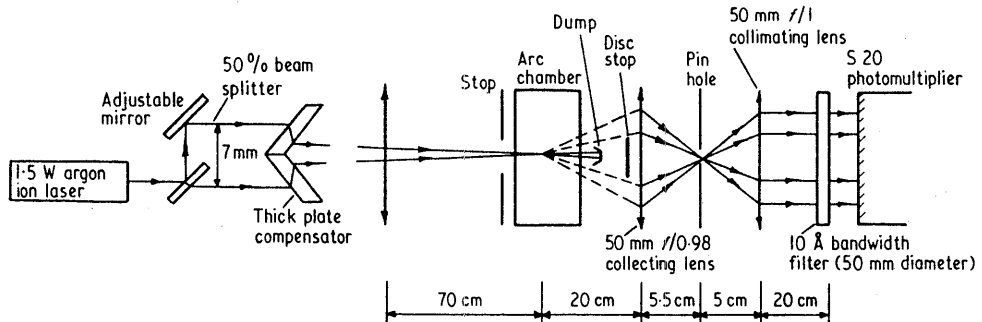


図-18 アーク計測LDVシステム

iii) トレーサ粒子

LDVではシードされた粒子からの散乱光を検出して流速の測定を行うため、使用する粒子に要求される条件として、① 流れに追従すること、② 光りの散乱特性が良いこと、③ 高温で安定なこと、④ 観測窓を汚さないこと、⑤ 装置および人体に悪影響を与えないことなどである。粒子径がサブミクロン程度の酸化チタン (TiO_2)、アルミナ (Al_2O_3) 等が用いられている。²⁴⁾

iv) 適用例

アークプラズマ中の流速を測定するときの問題は、アークの体積が小さくシード粒子の注入が難しいこと、背景光が強力なこと、流速が大きく高周波検出の限界に近づくことなどである。図-18はアークプラズマ測定装置の一例である。²⁷⁾ 出力1.5WのArイオンレーザーを用い、背景光は円盤状のディスクとフィルタで防いでいる。

LDVは短時間に膨大な信号を扱うため、データをいかに処理するかが一つの課題である。これにはコンピュータの利用と、流速の測定領域内を正しく通過したデータか否かを実時間で見極めてコンピュータに転送するといった処理技術が開発されており、²⁸⁾ 今後適用すべきものと思われる。また、これまでのLDVは空間内の一点の速度のみの測定が行われていた。しかしアークプラズマ場を明らかにするには、瞬時の空間分布や近接した領域がどのように関連し、時系列的に変化しているかを測定する必要がある。このため、ビーム捜査型LDV²⁹⁾、多点同時測定LDV³⁰⁾、レーザドップラーイメージシステム^{31), 32)} による二次元流速分布の測定が試みられており、今後の発展が期待される。

4.2 レーザ2焦点流速計

(1) 測定原理および特徴

レーザ2焦点流速計 (Laser 2 Focus Velocimeter, 略称L2FV) は散乱粒子が二つの光ビームの焦点間を通過する時間を測定して流速を求める方法であり、その原理を図-19に示す。³³⁾

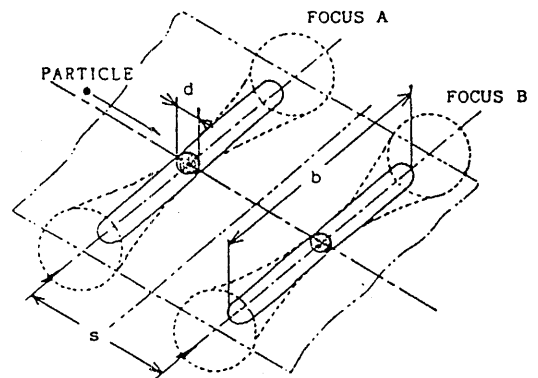


図-19 L2FV測定原理

L2FV法はつぎの特徴がある。① SN比が高いこと、LDVとの比較では約100倍、② 高速流に対して有利である、③ 背景散乱光の影響を受けにくい、④ 壁面近くでも測定できることなどである。一方欠点として、① 一對の信号パルスが同一粒子からのパルスという保障はないこと、② 流れの方向を決めるため二つのビーム設定角を変える必要があることである。しかしこれらは統計的なデータ処理によって解決される。

(2) 適用例および展望

L 2 F V法の適用例として Vardelle ら³⁴⁾ は窒素一水素 DC プラズマジェット velocity 分布を測定するため、流速 300m/s 以下は通常のフリンジ法を用いた L D V により行い、流速 300m/s 以上の範囲は L 2 F V 法を用いている。トレーサ粒子は $3\mu\text{m}$ 程度のアルミナ粒子を用いており、ノズル出口付近 (20mm 以内) ではプラズマの放射が強く粒子からの散乱光が測れないとしている。速度分布の一例を図-20に示す。

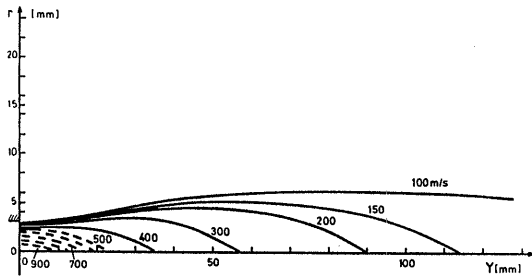


図-20 プラズマジェットの速度分布

L 2 F V法は S N比が高いこと、高速流の測定に有利であること、プラズマ場の密度勾配によるビーム光の屈折の障害が L D V法と比べて厳しくないこと、プラズマジェットではほぼ速度方向が決まっていることなどから、現状でもプラズマの流速測定に十分用いられる。今後の課題として、アークノズル近傍の流速測定のためプラズマからの放射光の遮蔽方法、トレーサ粒子としての蛍光物質利用の検討、ビーム焦点の多点化による測定時間の短縮などがあると思われる。

5. まとめ

本報告では、プラズマ計測法のうちレーザを応用した測定法をいくつか選んで述べた。レーザ計測法は、高い時間・空間分解能計測、時系列計測および三次元空間分布計測が可能なものが多く、取り扱うデータ量が膨大になる。これを迅速に処理しオンライン表示などをするため、計測装置と共に計算機処理システムの導入が望まれる。これは今後計測を基にしたプラズマパラメータのフィードバック制御などを行うためにも必要である。また計測法一般として、全てに万能な計

測法はなく異なる測定法は互いに相補的要素を持っている。従ってプラズマ計測では別方法による重複した計測が必要と思われる。

現在レーザ計測法はプラズマ診断の全てについて主力ではない。しかし流れ場の計測にレーザドップラー流速計が不可欠のものとなったように、時間的、空間的に変動するプラズマの温度、密度、化学種測定的主力がレーザを用いたものになることは必至と考えられる。³⁵⁾

本報告は、昭和59年度科学技術振興調整費「アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」研究成果報告書のアークプラズマ計測技術の部分をもとにしている。とくに本報告をまとめるにあたって、電波研究所 巖本巖研究室長には調査におけるご協力と引用についてご快諾いただきここに感謝の意を表します。また「アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」を行うにあたり、神尾部長 (材料加工部)、塚田部長 (機関動力部) には種々ご配慮をいただきました。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) 科学技術庁研究調整局：「超高温の発生・計測・利用技術に関する調査報告書」, (1986)
- 2) R. H. Huddleston, S. L. Leonard, Ed. : Plasma Diagnostic Techniques, Academic Press, (1965), 431
- 3) 赤崎, 村岡, : 二波長レーザ干渉法を用いた大気中インパルスアークの研究, 電気学会論文誌A, 101-5, (昭和56), 255
- 4) 築島, 間瀬, : 核融合プラズマ診断, 月刊フィジクス, 3-3, (1982), 187
- 5) 谷田貝, : 光干渉計測法の最近の進歩, 精密機械, 51-4, (1985), 695
- 6) S. Goto et al, : A $28\mu\text{m}$ Water Vapor Laser Interferometer For Plasma Diagnostics, Intern. Jour. Infrared and Millimeter Waves, 4-4, (1983), 549
- 7) T. Fukuda et al, : A Heterodyne Interferometric Polarimeter With $28\mu\text{m}$ H_2O Laser For Faraday Rotation Measurement, Intern. Jour. Infrared and Millimeter Waves, 5-7, (1984), 1039
- 8) J. L. Lachambre et al, : Large cross-section TEA- CO_2 interferometer for plasma diagnos-

- tics, Appl. Opt. 21-14, (1982), 2538
- 9) Y. Yasutomo et al, : A New Numerical Method For Asymmetrical Abel Inversion, IEEE Trans. Plasma Science, PS-9, (1981), 18
 - 10) Y. Nagayama et al, : Soft X - Ray Tomography for the $m=2$ Magnetic Island Structure in the JIPP T - II Tokamak, Jap. Jour. Appl. Phys., 20-11, (1981), L 779
 - 11) 赤崎, 村岡, : 大気中アークプラズマ電子密度のレーザー干渉法による測定, 高温学会誌, 5-5, (1979), 235
 - 12) M. Hamamoto et al, : Simultaneous Recording of Two-Wavelength Interferometer Outputs of an Atmospheric Impulse Breakdown Process, Jap. Jour. Appl. Phys., 20-2 (1981), 443
 - 13) 関口忠編 : 現代プラズマ理工学, オーム社, (昭和58年), P.203
 - 14) 逸見ほか3, : 大気中DCアークのレーザー散乱による研究, 高温学会誌, 10-6, (1984), 278
 - 15) W. A. Peebles et al, : CO₂ Laser Thomson Scattering From a Pulsed Hydrogen ARC, IEEE Trans. Plasma Science, PS-6, (1978), 564
 - 16) R. A. Gottscho et al, : Optical Techniques in Plasma Diagnostics, Pure and Appl. Chem., 56-2, (1984), 189
 - 17) 山岸ほか1, : パルスレーザーラマンによる燃焼ガス計測, 第23回燃焼シンポジウム前刷集, (昭和60), 7
 - 18) N. Hata et al, : Neutral Radical Detection in Silane Glow - Discharge Plasma Using Coherent Anti - Stokes Raman Spectroscopy, Jour. Non - Crystalline Solid, 59/60, (1983), 667
 - 19) 近藤ほか2, : レーザ誘起蛍光法によるプラズマ計測, 応用物理, 53-12, (1984), 1042
 - 20) 土田, : レーザ誘起蛍光法によるプラズマ診断, 光学, 13-3, (1984), 228
 - 21) R. A. Dougal et al, : Time - resolved two - dimensional imaging of ground - state species using laser - induced fluorescence, Rev. Sci. Instrum., 54-5, (1983), 572
 - 22) 岡崎, : プラズマ粒子の診断—分光的手法を中心に—, 真空, 28-4, (1985), 193
 - 23) 宮崎, : オプトガルバノ分光, 応用物理, 53-7, (1984), 590
 - 24) 日本機械学会, RC-56燃焼に関するレーザー計測研究分科会研究成果報告書, (昭和57), 91
 - 25) W. H. Stevenson, : Laser Doppler Velocimetry - A Status Report, Proc. IEEE, 70-6, (1982), 652
 - 26) N. Nakatani et al, : LDV using polarization - preserving optical fiber for simultaneous measurement of two velocity components, Appl. Opt., 23-11, (1984), 1681
 - 27) M. R. Barrault et al, : A laser Doppler technique for measuring flow velocities in high current arc discharges, Jour. Phys. E, Scientific Instruments, 7, (1974), 663
 - 28) 前田ほか2, : 混相流中の微粒子の粒径, 速度および濃度の非接触測定, 日本機械学会論文集 (B編), 47-420, (昭和56-8), 1563
 - 29) G. R. Grant et al, : Two - Colour Dual - Beam Back - scatter Laser Doppler Velocimeter, Appl. Opt., 12-12, (1973), 2913
 - 30) 中谷ほか3, : 2チャンネル光ファイバLDVによる予混合火炎の測定, 第22回燃焼シンポジウム前刷集, (1984), 13
 - 31) 柏木, 黒崎, : レーザによる流体計測と情報処理, 日本機械学会誌, 87-1785, (昭和59-4), 341
 - 32) T. Yoshimura et al, : Real - time measurements of velocity distributions with a laser Doppler imaging system, Appl. Opt., 22-16, (1983), 2448
 - 33) 速水, : レーザ2焦点流速計の特徴と回転羽根車内流れの計測, ターボ機械, 11-3, (1983), 164
 - 34) A. Vardelle et al, : Measurements of the Plasma and Condensed Particles Parameters in a DC Plasma Jet, IEEE, Trans. Plasma Sci., PS-8, (1980), 417
 - 35) 幸田, : レーザによる火炎計測の進歩, 高压ガス, 21-6, (1984), 299