



レーザーによるプラズマ計測

村岡 克紀*・前田 三男**

* 九州大学総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻 〒816 春日市春日公園 6-1

** 九州大学工学部電気工学科 〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1

(1991年5月10日受理)

Plasma Diagnostics by Lasers

Katsunori MURAOKA* and Mitsuo MAEDA**

* Department of Energy Conversion, Graduate School of Engineering Sciences,
Kyushu University, 6-1, Kasugakoen, Kasuga 816

** Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Fukuoka 812

1. ま え が き

プラズマは一般にエネルギー状態が高いので、その計測を行うに当たって接触型計測器の適用は限られ、リモートセンシングが中心になる。プラズマのリモートセンシングには電磁波を用いるものと粒子を用いるものがある。その際、プラズマから逸失してくる電磁波や粒子を検出する受動的的方法と、入射した電磁波または粒子のプラズマによる応答を検出する能動的的方法がある。従来より、高温プラズマ研究では各種の受動的または能動的粒子計測法が用いられてきており、特に核融合反応を起すプラズマでは中性子や α 粒子などの計測は有用な情報源になっている。一方、電磁波を用いる方法はマイクロ波からX線までの波長域の広さと、過去100年余にわたって蓄えられた光学機器や計測機器の幅広さによって、極めて多面的な計測が可能になっており、高温および産業応用の両方のプラズマのリモートセンシングの中心に位置するものである。その中でプラズマの受動的電磁波計測は、簡単である上に有用なプラズマ情報を与えることも多いが、プラズマ現象を理解するために必要な量が放射電磁波に反映されないことも多く、また反映されても十分な空間分解能や精度が確保されないこともしばしばである。

レーザーによるプラズマ計測は、能動的電磁波計測法として1960年代後半より開発され、レーザー工学の進

歩とともに極めて有用なものとなっており、今後も新しい進展が期待されている。また、プラズマ研究の進展によって計測を求められる量が拡大していくが、レーザーを工夫してその測定を可能にすることも可能であろう。そのような発展をより積極的に推進するために『レーザー応用プラズマ計測 (laser-aided plasma diagnostics, LAPD)』の分野が開拓され、確立してきた。本稿ではその内容を概観し具体的な測定例を示すとともに、今後の発展の方向を示そう。

なお、本解説とほぼ同じ題目で数年前に高温プラズマに限って研究状況の解説を行ったが¹⁾、本稿はその後の進展および産業応用プラズマも含めた改訂版に当るものである。また、同じ内容を異なる観点から考察した解説²⁾も参照していただければ幸いである。

2. レーザー応用プラズマ計測法の原理

いかなる計測においても、解明を行おうとする現象の「何を」、「どの精度で」測ることが求められているかを明確に把握することがまず第一である(測らねばならぬ量)。この目標に対して、ある計測法により測れる量とその精度を対比させ、十分な計測が行える場合にはその方法は「確立している」と考えられる。他方、不十分な場合には隘路になっている事項を克服するための研究が「計測法の開発」研究である。この間の事情をレーザーによるプラズマ計測に対して模式的に図1に示す。すな

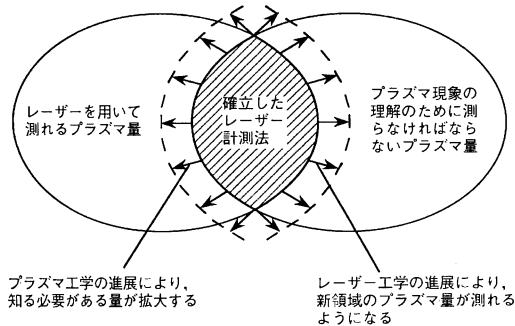


図1 レーザーによるプラズマ計測法の開発に関する模式図

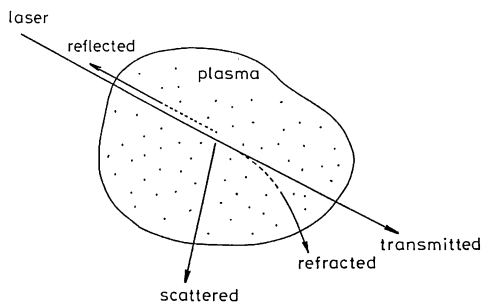


図2 プラズマがレーザー伝播に及ぼす影響。プラズマの存在により、レーザーはカットオフ点で反射されたり (2.1項)、透過光に影響がでたり (2.2項)、電子密度勾配により屈折されたり (2.3項)、また散乱されたり (2.4項) する。

わち、プラズマ工学上測らねばならぬ物理量の領域に対して、それとは独立にレーザーを用いて測れる物理量の領域があるが、その重なる部分は「確立したレーザー計測法」を示している。ところで、レーザー工学の進歩により、それを用いて測れるプラズマの物理量は常に拡大しているが、それをプラズマ工学上測らねばならぬ量の方向へ拡大することが有効な計測法の開発研究の一つになる。他方、プラズマ工学の研究の進展によって、従来求められなかったプラズマの物理量の測定が必要になると、そのうちあるものはすでに実行可能なレーザー計測法を用いて測れるものがあるかも知れない。これを意識的に進める研究も必要になる。

以上を背景にして、ここではまずレーザーにより測れるプラズマの諸量を明らかにするため、図2にレーザーによるプラズマ計測法を、実験的に計測する立場から分類して示した。すなわち、レーザーはプラズマ中を伝播した結果、反射されたり、同じ寸法の真空中を伝播した場合と比べて透過光への影響がでたり、また伝播経路が

屈折したり、散乱光や蛍光が生じたりする。その程度は、入射レーザー光の波長やスペクトル形状、コヒーレンス、パルス長および強度とともに、プラズマの諸パラメータによって決定される。レーザーを用いたプラズマ計測は、このレーザー伝播に及ぼすプラズマの影響を定量的に抜き出して、その伝播特性に影響を与えている量をプラズマのパラメータと関係づけて抽出しようとするものである。逆に、SN比の高い測定を行うには影響の程度を雑音分に比して十分大きくするようにレーザーの波長、スペクトル幅、強度、パルス幅 (パルスまたはcw発振) 等のレーザー特性を規定する量をうまく選択することが必要で、それが計測の優劣を決めるきめ手になる。そのような適当な特性を持つレーザーがないときは、レーザー開発から手がけることが必要になる。

2.1 反 射

反射にはプラズマ固有のものと、プラズマ中の粒子によるものがある。前者はプラズマのカットオフ³⁾によるもので、プラズマ中の電磁波の伝播の分散関係において、屈折率がゼロになると、レーザー光がそこで反射されることによる。後者はプラズマ中の電子、中性原子・分子・イオン・微粒子などによるトムソン散乱、レーリ-散乱、蛍光、ミー散乱などによる後方散乱である。しかし、これらは2.4項の散乱の一部として考えた方が適当であろう。

2.2 透 過

透過光がプラズマにより受ける影響としては、強度の減少 (吸収)、伝播速度 (屈折率) の変化、さらには偏光面の回転、がある。

(i) プラズマによるレーザー光の吸収

吸収にはプラズマ固有のものと、プラズマ中の粒子によるものがある。前者はプラズマ中の電磁波伝播の分散関係において、屈折率が ∞ になる共鳴条件に近づいた時に起るものである³⁾。他方後者は、レーザー光のプラズマの構成原子、分子、イオン等による吸収であり、高温プラズマの場合一部例外的な場合を除いてほとんど問題にならないが、低温プラズマには原子、分子が多数含まれるので、それを用いてプラズマ中の原子、分子計測を行うことができる。

(ii) プラズマによるレーザー伝播速度の変化

プラズマにレーザーを入射すれば、電子密度、中性粒子密度、ないしは磁界中プラズマの場合には磁界強度によっても分散関係が変化するので、伝播速度が変化する。従って、適当な配置でレーザー光のプラズマ中での伝播速度の変化を測定すれば電子密度または磁界強度が

求められる。特に、電磁波の電界を磁界方向と一致させた正常波の分散関係は電子密度のみで決まる。

(iii) 偏光面の回転

プラズマに直線偏光したレーザーを入射した場合、磁界中プラズマの異方性のため、プラズマ通過後偏光面が回転する(ファラデー回転)³⁾。

2.3 屈折

プラズマ中の電子や中性原子に密度の勾配 ∇n_e , ∇n_n があると、それにより生じた屈折率の勾配によってレーザーの伝播経路は屈折する⁴⁾。

2.4 散乱, 蛍光

レーザーの電界によりプラズマ中の電子が強制振動させられ、その結果二次的に電磁波が放射されることにより生ずるのが散乱である。それは、電離した自由電子によるトムソン散乱(Thomson scattering)と、原子やイオンに束縛された電子によるレーリー散乱(Rayleigh scattering)に分けて考えられる。トムソン散乱は $k\lambda_D \gg 1$ (k は散乱波数; λ_D はデバイ長と呼ばれ、プラズマ中の個々の電荷による電界の影響が及ぶ距離を表す尺度)の条件で決まる非協同散乱(incoherent scattering)と、 $k\lambda_D < 1$ で決まる協同散乱(collective scattering)に分けられる⁵⁾。前者は個々の電子の散乱の加え合せで決まる散乱であり、後者はプラズマの波動, 乱れ, デバイシールド等による散乱である。レーザー光子がちょうど束縛電子のエネルギーの準位差に共鳴した時のみ起る散乱を蛍光というが、レーザー共鳴散乱(laser resonance scattering)とか、レーザー誘起蛍光(laser-induced fluorescence, LIF)と呼ばれることもある⁶⁾。この他にラマン散乱(Raman scattering)現象がある。

3. レーザーによるプラズマ計測の実例

プラズマの測らねばならぬ量と要求される測定精度, 時間・空間分解能等は, プラズマ研究の進展に応じて変化するが, ここではプラズマ研究の現状をベースに将来の方向を予測しながら検討する。測らねばならぬプラズマ諸量を次の3種に分けて述べる。(1)荷電粒子(イオンが1種類以上から構成されているときはそれぞれについて)の密度, 温度(エネルギー分布関数がマックスウェル分布から外れるときは, 分布関数の情報も必要)。(2)中性の原子・分子・ラジカル密度, 速度分布関数(または温度)。(3)プラズマ中の電磁界強度(その時間・空間分布から求められる電位および電流密度を含む)。ここにはそれら電磁界および電子密度の揺動も含める。

これら測らねばならぬ量が, 極めて広範なパラメータ領域を占めるプラズマのすべてについてレーザーを用いて計測できるわけではない。その事情は概念的に図1に示した通りである。しかし, そのようにして測れる範囲は徐々に明らかになりつつあり, また新しい性能を持つレーザーの出現によってその範囲も拡大できる。

表1には, これら測らねばならぬ量を縦コラムに, 2節に示した測れる量を横軸にして一覧表にして示した。以下には各縦コラムに対して横軸の各方法を用いての計測法の説明を行う。

3.1 荷電粒子の密度, 温度

3.1.1 非協同トムソン散乱

電子の密度, 温度をレーザーを用いて局所的に測定する最も直接的な方法は, 2.4項で述べた非協同トムソン散乱によるものである⁵⁾。この場合には, 散乱光は個々の電子の散乱の加え合せになるが, 電子の運動により散乱光の波長はレーザーのそれからドップラーシフトする。そこで, 散乱光スペクトルから電子の熱運動の情報が得られ, 電子速度分布関数がマックスウェル分布のときは電子温度が求められる。また全スペクトル域の散乱光強度を加えたものは電子密度に比例するので, 何らかの方法で光学系を校正して散乱光強度の絶対値を求めることにより電子密度が求められる。

トムソン散乱断面積は小さいので, 十分な信号強度を得るにはパルス当り1~10Jのレーザーエネルギーを要し, しかもプラズマ背景光に対して十分なSN比を確保するためには10ns程度以下のパルス幅が必要である。また, レーザー光の器壁による迷光が十分低減できるようにバッフル, ピームダンプを注意深く設計するとともに, 90°方向から観察するのが望ましい。 $k\lambda_D = (4\pi\lambda_D/\lambda_0)\sin(\theta/2)$ (ここで λ_0 はレーザー波長, θ は散乱角)において, $\theta=90^\circ$ として $k\lambda_D \gg 1$ となる波長を持ち, 上記のレーザーエネルギー, パルス幅を満たすのはルビーレーザー(波長694.3nm), YAGレーザー(1.06 μm)などのQスイッチ固体レーザーである。これらの大出力レーザーを用いても散乱光は微弱で, 通常の観測系では電子密度 10^{18}m^{-3} が検出の下限と考えてよい。以下には, 核融合を目指した高温プラズマ, および各種産業応用プラズマに対する非協同トムソン散乱の実行例を挙げる。

(1) 高温プラズマ

1968年に行われたソ連のトカマクT-3での実験が最も著名である⁷⁾。その実験装置配置を図3に, また得られた散乱光スペクトルの例を図4に示す。この実験は,

表 1 プラズマのレーザー計測のまとめ。下線は確立したもの、無印は開発途上のものを示す。

測らねばならぬ量 レーザー計測法の分類		荷電粒子の密度、 温度 (3.1 項)	中性の原子・分子・ ラジカルの密度、速 度分布関数 (3.2 項)	プラズマ中の電磁界 (3.3 項)	備 考
反 射 (2.1 項)		電子密度 (マイクロ波 反射干渉計)		電子密度揺動 (相関反射干渉計)	
透 過 (2.2 項)	吸 収	イオン温度 (外部励 起波動の分散関係)		磁界方向 (高域ハイ ブリッド共鳴点にお いて発生する高波長 の偏波面測定)	
	伝 播 速 度	電子密度 (レーザー干渉計)		電子密度と磁界強度 の積 (ファラデー回転)	レーザー干渉とファ ラデー回転を同時計 測するシステム
屈 折 (2.3 項)					ザブミリレーザー等 長波長レーザーを用 いてのプラズマ測定 の際、プラズマによ る屈折結果の評価
散 乱 (2.4 項)	トムソン散乱		電子密度、温度 (非協同トムソン散乱) イオン温度、 α 粒子 密度・エネルギー (協同トムソン散乱)	磁界強度 (ω_{ec} での モジュレーション測 定) 電子密度揺動 (協同トムソン散乱)	
	レー ザ ー 散 乱	非共鳴			トムソン散乱やレー ザー蛍光測定光学系 の較正
		共 鳴 (レー ザー 蛍 光 法)		基底状態の金属原子 励起原子・イオン (200 nm 以上の励起 波長) 基底単位の軽元素、 イオン (200 nm 以下の励起 波長)	磁界強度 (ゼーマンパターン) 電界強度 (レーザーオプトガ ルバノ法、レーザー 励起された原子が発 する禁制線の強度)
	ラ マ ン 散 乱				トムソン散乱やレー ザー蛍光測定光学系 の較正
問 題 点		周辺プラズマ (電子 密度 10^{17}m^{-3} , 温度 100 eV 程度以下) の測定法		高温プラズマ中の電 界強度 (10 kV/m 程 度) の測定法	

1950年代に始められた核融合を目指した磁界による種々のプラズマ閉じ込め実験が異常なプラズマ逸失により1960年代にはいずれも困難に遭遇して研究方向を見失っていた時に、ソ連で開発されてきたトカマク方式の優秀性を極めて鮮明に示したものとして、その後の高温プラズマの研究を決めたものであった。その意味で、核融合研究にとって記念碑的なものである。すなわち、放電電流と電圧から求めたプラズマの抵抗率を基に推測されていた電子温度数百 eV~1 keV の値が本実験によりほぼ正しかったことが実証されたものである。その結果、各国の主要研究機関の研究が一斉にトカマク方式による

研究に方向転換し、その後 20 年間で研究は順調に進展して、臨界プラズマ (高温プラズマ生成と維持に要したエネルギーと核融合による出力エネルギーが同じになる条件のプラズマ) の達成が1~2年後に予定されるまでになった。これらを通じて、この非協同トムソン散乱実験はレーザー計測の有用性をプラズマ研究者一般にも認識させ、必須の計測法としてプラズマ研究の中で市民権を与えたものとして記憶されている。

非協同トムソン散乱による高温プラズマ計測法はその後大きく発展させられた。その最も高度な形として、図 5 に示すプリンストン大学で開発されてきた TVTS

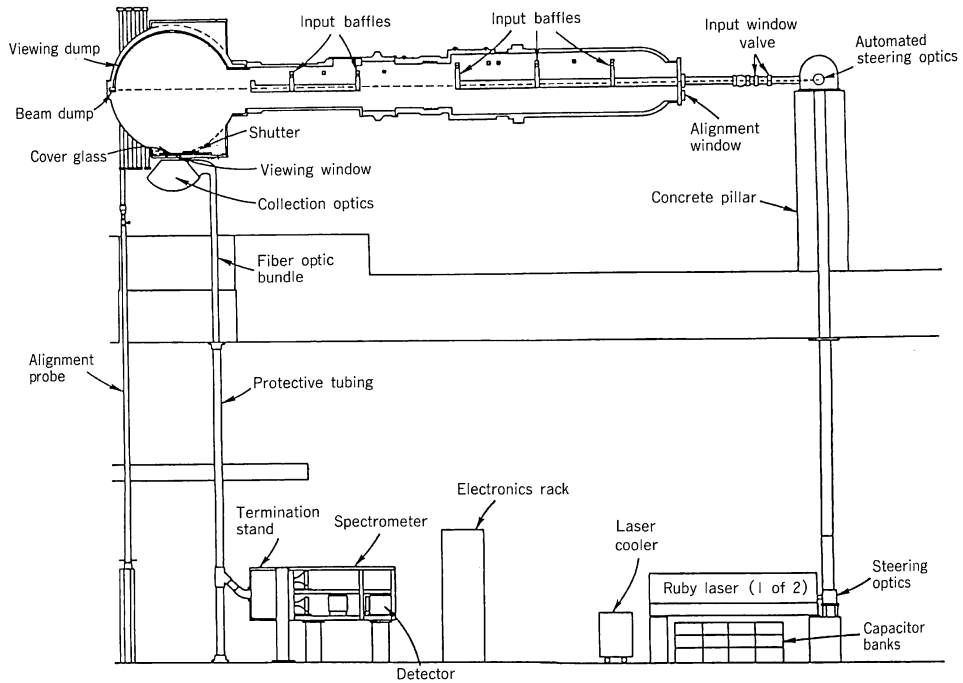


図 5 TFTR トカマクにおける TVTS システム. TFTR トカマクの小断面 (左上部) にレーザー光を真空引きの配管より導き, プラズマの水平断面のレーザー通路上 76 点からの散乱光を多チャンネルのファイバーに導き, 分光器で波長分解後検出器で検出する.

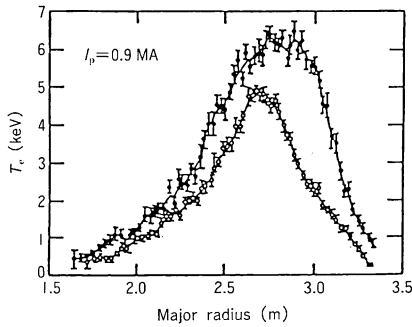


図 6 TFTR の TVTS システムで観測した電子温度プロファイル結果の一例

同トムソン散乱法は, そのデータ解釈の際に電子の速度分布関数がマックスウェル分布であることを確認するため, ECE 強度を電子温度に読み直す時の絶対値較正のために用いられるようになり, それぞれの特徴を生かした対応がとられ始めた.

最近の新しい動きとして, 高温プラズマ装置が大型化し, 特に D-T 核燃焼を行う段階になると中性子シールド更にはブランケット設置等により光学測定の観測窓の

寸法および数が限られるので, 小さな観測窓を用いて最大限の情報を得ようとする方向がある. その非協同トムソン散乱への対応例として, JET (Joint European Torus) で開発された LIDAR (light detection and ranging) トムソン散乱⁹⁾システムについて述べる. 図 7 において, パルス幅 300 ps, 出力 2J, 繰返し 0.5 Hz のルビーレーザー光をプラズマに入射し, 180° 散乱 (後方散乱) 光を入射ポートの同心円外縁に設置した集光レンズで集光光学系へ導く. 空間分解能は, レーダーと同じ原理によりレーザーパルス幅と検出系の時間応答 (マイクロチャンネル型の光電子増倍管を用いており, 700 ps である) で決まり約 150 mm である. 入射ポートその他のからの迷光は時間差を利用して信号と区別できる.

JET の LIDAR システムは 1987 年から稼働を開始し, 図 8 に示すようなデータがルーチ的に得られている. 今後は, レーザーの繰返しを 10 Hz 程度まで増加させ 0.1 秒ごとにデータ収集ができるようにすること, および検出系にストリークカメラを用いて時間応答を 300 ps 以下として空間分解能を 50~70 mm 程度とすべく改良が加えられている.

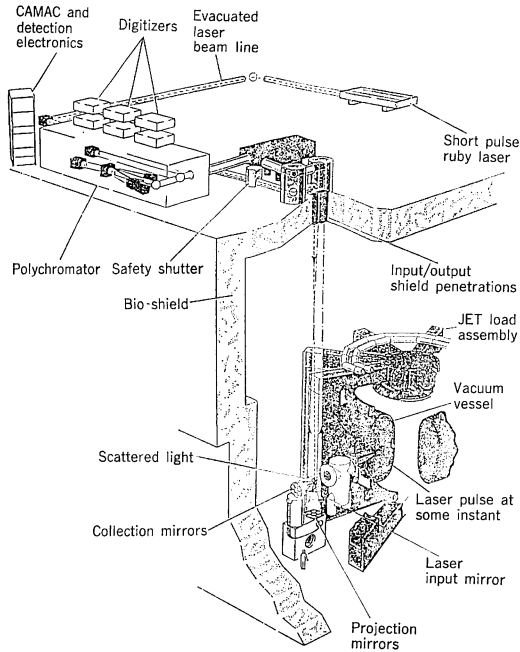


図7 JET トカマク装置での LIDAR 装置の配置図

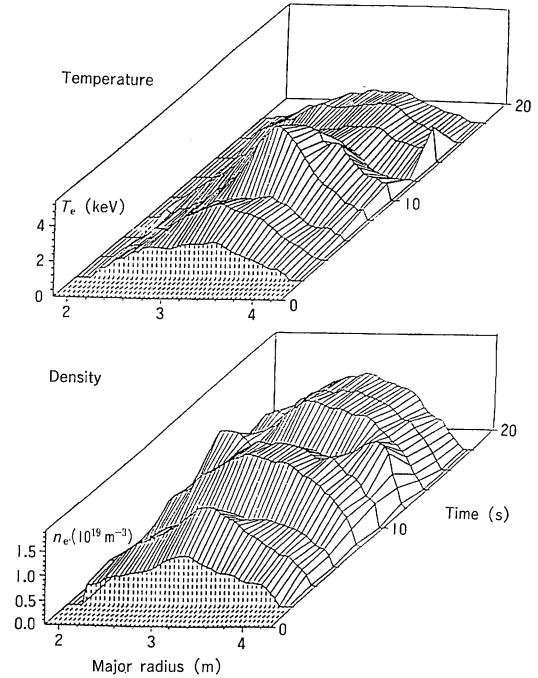


図8 JET の LIDAR 装置で得られた電子温度 T_e および電子密度 n_e の空間分布の経時変化観測例

(2) 産業応用プラズマ

産業応用プラズマでは、いずれも放電電界による電子エネルギーのゲインを混合ガスの化学変化の駆動力としてその後の材料作成、光の発生、レーザーの励起等に利用するので、電子エネルギー分布関数の測定は、プラズマ過程の理解に必須のことである。そこでその計測に、非協同トムソン散乱を適用しようとする試みが最近数年間、特に著者らのグループによりなされてきた。現在までに、(i) インパルス¹⁰⁾ および直流¹¹⁾ 放電プラズマ、

(ii) 低圧溶射用プラズマ¹²⁾、(iii) エキシマレーザー中の放電プラズマ^{13,14)}、(iv) ECR 放電プラズマ¹⁵⁾を対象にした測定が行われてきた。これら産業応用プラズマの計測では、高温プラズマの計測にはない種々の困難性があるために、その場に応じた解決を図りながら計測を行うことが必要である。そのような測定例として上記(iii)を示そう。

実験装置配置を図9に示す。測定対象としたエキシマ

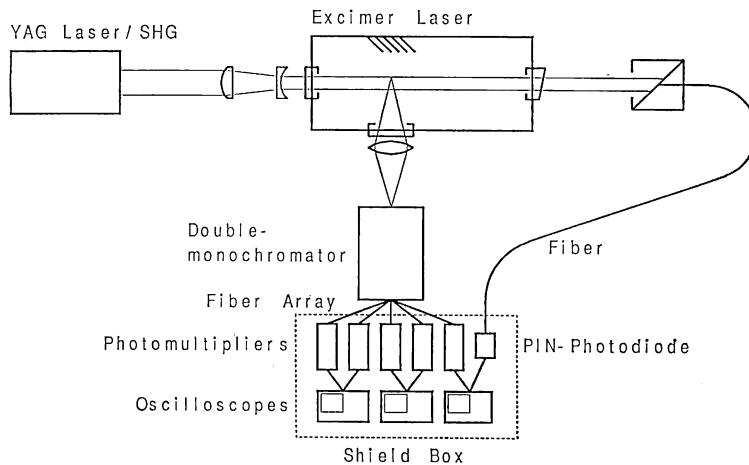


図9 放電励起エキシマレーザーの電子密度、速度分布計測のための実験装置配置

レーザーは UV 自動予備電離容量移行型の標準的な放電方式であり、プラズマの断面積は $20 \times 12 \text{ mm}^2$ である。本トムソン散乱実験の最大の問題は、放電時間が 50 ns 程度でありこの間の経時変化を求める必要があること、および電子密度 10^{22} m^{-3} 程度に対して、封入気体の密度が 10^{26} m^{-3} 以上であることである。後者については封入気体からのレーリー散乱とトムソン散乱断面積の違い (通常 2 桁程度) を考慮しても、4 桁以上大きなレーリー散乱がレーザー波長に集中するので、分光器としてダブルモノクロメータを使用し、入口スリット幅および軸合せを微細に調整する必要がある。

当初ルビレーザーを用いて信号検出ができることを示した¹³⁾。その後、Nd: YAG レーザーの第二高調波 (パルス半値幅 10 ns) を用いてより詳細な測定を行い¹⁴⁾、(1) 電子エネルギー分布はシミュレーションから予測されていたようなマックスウェル分布からの外れは認められないこと、(2) 図 10 に示すように、放電時間にわたる電子温度、密度はシミュレーションから予測される傾向とはほぼ一致すること (ただし、シミュレーションの電子温度は、電子の平均エネルギーから換算した)、などの結果を得た。

現在、より高い SN 比で詳細な経時変化を追跡すべく、パルス幅 300 ps のモードロック YAG レーザーと応答時間 1 ns 以下のマイクロチャンネルプレート式光

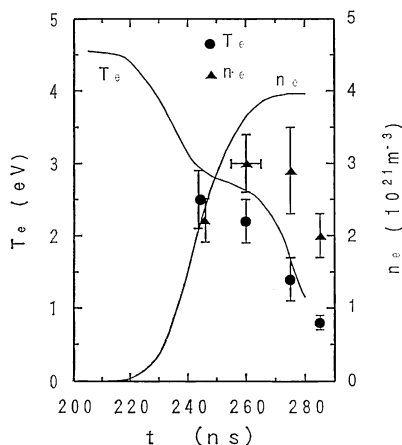


図 10 放電励起エキシマレーザー内の電子密度、温度の経時変化計測結果の一例。データ点が実験値であり、実線はシミュレーションによるもの。時間原点は放電トリガー時の時間を示し、縦方向エラーバーは実験の精度を、横方向のそれはレーザーパルス幅で決まる時間分解能を示す。気体圧は $\text{Kr/Ne} = 30 \text{ Torr}/3 \text{ atm}$ である。

電子増倍管を用いた実験の準備を進めている。

3.1.2 干渉法

2.2 項の(ii)に示した電磁波の分散関係、すなわち伝播速度が密度に関係することを利用して、干渉法により電子密度や中性気体密度を求めることができる。すなわち、伝播速度を既知の長さの空气中 (標準アーム) とプラズマアームを伝播した電磁波の位相差を干渉効果を利用して強度変化で検出する。干渉計は、マッハツェンダー型とマイケルソン型があり、特徴があるので、それぞれ使い分けられている。

(1) 高温プラズマ

高温プラズマでは電磁波の伝播速度への中性気体の影響は無視できるので、干渉法は信頼性の高い電子密度の計測方法になってきた。さらに最近では、電子密度のみでなく、3.3 項に関連して電流密度を 2.2 項(iii)で述べたファラデー回転で同時測定するのが標準的になってきた。その最も高度な形として TEXTOR での干渉および偏光測定系を図 11 に示す¹⁶⁾。レーザーとしては波長 $337 \mu\text{m}$ のシアンレーザーを用い、9 チャンネルの同時測定を行っている。この干渉計では、各チャンネルのレーザービームに沿う線積分された位相差が検出されるので、局所的なプラズマ密度を求めるには、筒対称かまたはプラズマ形状を仮定してのアーベル変換をしなければならない。このようにして得られた電子密度測定結果の一例を図 12 に示す。ファラデー回転から得た電流密度については 3.3 項で述べる。

図 11 から明らかなように、アーベル変換後に電子密度の精度の良い測定を行うには、プラズマ断面をおおう多チャンネル測定が必要であり、そのような光学窓の設置は今後の核燃焼プラズマではシールドやブランケットのため不可能になる。トムソン散乱での LIDAR 法の導入と同様の立場から図 13 に示す反射干渉計 (reflecto-

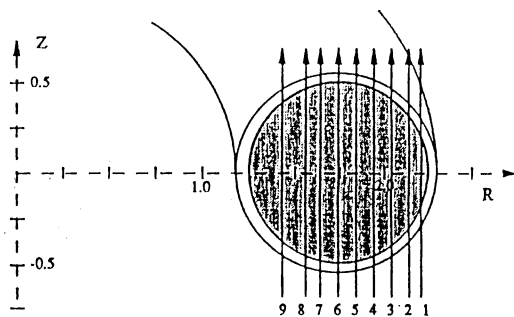


図 11 TEXTOR トカマクでの干渉/偏光計のレーザービームのプラズマ中の通過配位

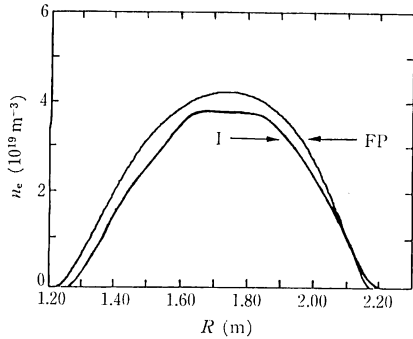


図 12 TEXTOR トカマクでの干渉計により得た電子密度プロファイルの一例。I, FP はアーベル変換の行い方の違いによる差異を示す。

interferometer) が開発されつつある。その原理は、2.1 項に述べた電磁波の反射とカットオフ周波数との関係を利用してその反射点までの伝播距離と位相変化を基準アームとの位相差として干渉計で測定するものである。ここで、入射波の周波数を掃引して、周波数に関するアーベル変換から電子密度の空間分布を求める。当初、フランスの TFR トカマクで原理が試され¹⁷⁾、その後上記の JET トカマクで本格的な開発が進められてその有効性が確認された¹⁸⁾。図 14 に、この方法により得られた等

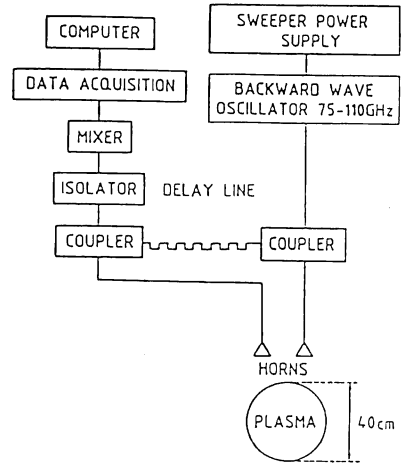


図 13 TFR トカマクでのマイクロ波反射計構成。マイクロ波の発振同調数を 5ms ごとに 110~75 GHz の間スイープし、その間の反射光の位相を参照光との干渉として検出し、その位相差の周波数に関するアーベル変換から密度の空間分布を求める。

電子密度線の経時変化を示す¹⁹⁾。現在、マイクロ波反射計はこの密度プロファイル測定とともに、プラズマの異常輸送の原因になっていると考えられている電子密度揺

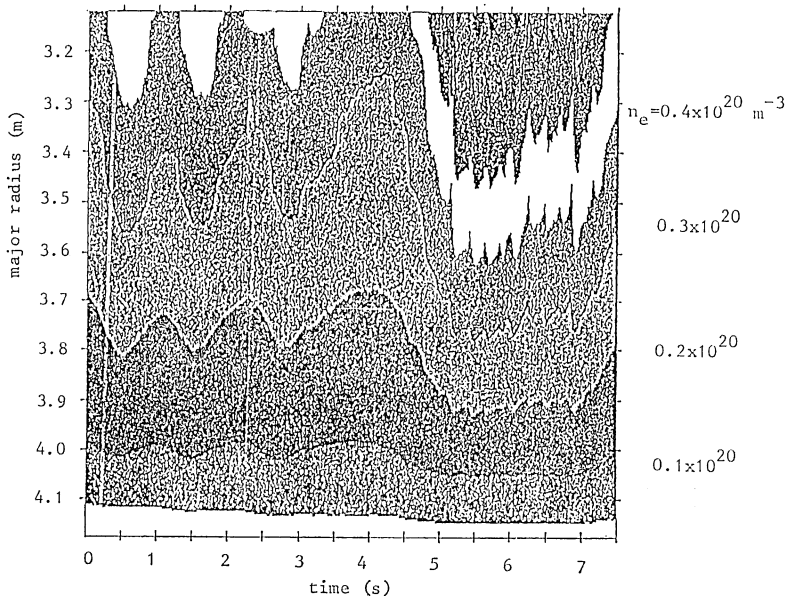


図 14 反射計で得られた JET トカマクでの電子密度プロファイルの経時変化を半径位置と時間の座標軸内での等密度線として表したもの。放電開始から 9.5 秒から 12 秒の間は追加加熱がスイッチされたので、等密度線が大半径側に押されて、更にこの時間内には周期 0.5 秒程度の鋸歯状 (sawtooth) のプラズマの振動が観測されている。

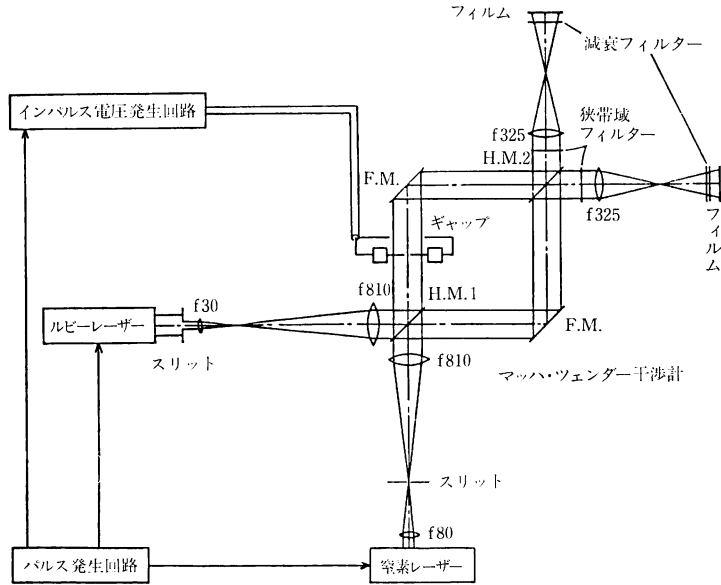


図 15 同時刻二波長干渉計測用実験装置構成

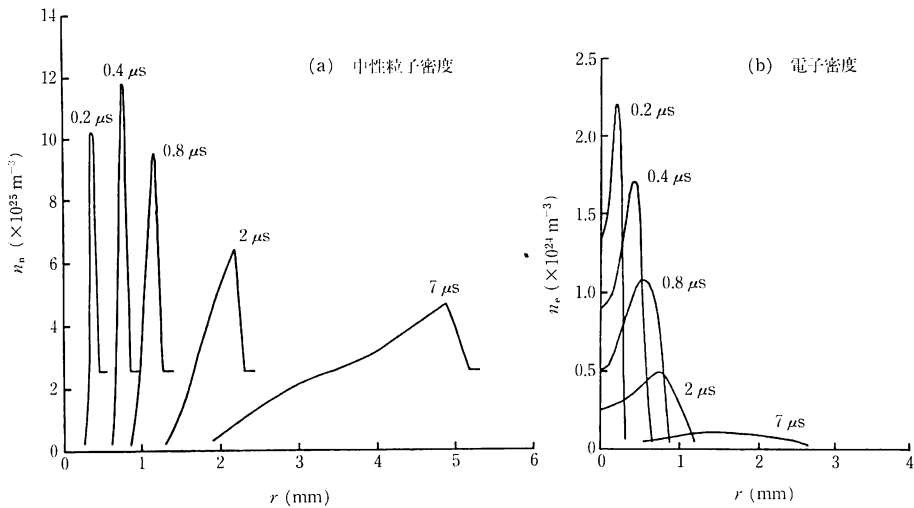


図 16 空气中インパルス放電時の中性粒子 (a) および電子 (b) 密度の分布の経時変化の測定結果の一例

動を測定する相関反射干渉計 (correlation reflecto-interferometer) としても開発が進められている。

(2) 産業応用プラズマ

干渉法は産業応用プラズマでも広く用いられている。すなわち、電子密度が、 10^{18} m^{-3} 台のグロー放電に対してマイクロ波を用いたものから、 10^{23} m^{-3} 台の大気圧アーク放電での可視域レーザーを用いたものまで多彩な干渉計測がなされてきた。その中で、電子密度ばかりでなく中性気体密度も電磁波の伝播速度に影響を与える様子

を計測した例として、大気圧インパルスアークプラズマの干渉計測の例を挙げよう。

図 15 に計測系の構成を示す²⁰⁾。一つのレーザーについてはマッハツェンダー干渉計の構成になっているが、電子密度中と中性気体中の電磁波の伝播速度の波長依存性が異なることを利用して二波長の干渉計構成とし、同時刻瞬時計測ができるようにしたことが特徴である。各波長での干渉写真の解析結果から、図 16 に示すような放電進展に伴う密度プロファイル変化が得られて²¹⁾、空

間分解能 0.1 mm, 時間分解能 30 ns の詳細な放電構造の解明がなされた。その結果, アーク放電の進展に伴うプラズマコラムの成長とそれに押された衝撃波の伝播が明瞭に認められる。

3.1.3 協同トムソン散乱

イオンの挙動を電磁波を用いて測定するのは電子の場合よりはずっと困難である。そこで, たとえば高温プラズマ中のイオン温度測定法として受動分光法等が発達するにつれ, レーザー計測法は段々省みられることが少なくなった。しかし, 高温プラズマ研究において, D-T 反応による α 粒子の大規模な発生が目前のことになってきて, 磁界に閉じ込められた α 粒子のエネルギー分布を測定する有効な手段がないことから, 協同トムソン散乱による方法が真剣に検討され始めた。協同トムソン散乱はイオンをシールドする電子群からの散乱からイオンの運動の様子を調べようとするもので, 電子群がイオンから受ける協同的 (collective) 運動を検出するところからこの名称がつけられた。

2.4 項に述べた $k\lambda_D = (4\pi\lambda_D/\lambda_0) \sin(\theta/2) < 1$ の条件を満たすためには臨界プラズマではレーザー波長を長くするか, 散乱角を小さくしなければならない。現在までに, パルス CO₂ レーザー (波長 10.6 μm) の極微小角 (1° 以内) 散乱を用いるもの²²⁾と, マイクロ波領域のジャイロトロンを用いた 10~30° の散乱が検討されてき

た²³⁾が, 空間分解能や測定精度の点から後者がすぐれているとされている。図 17 に JET で計画されている散乱実験装置を示す。ジャイロトロン周波数 140 GHz, 出力 400 kW のものを用いることが予定されており, 1991 年後半には最初の試行がなされる予定である²⁴⁾。

その他, プラズマ中に外部からレーザーにより波動を励起して, その波動伝播の分散関係を協同トムソン散乱で測定し, そのイオン温度依存性を利用してイオン温度を求める方法の開発が進められている²⁵⁾。

3.2 中性の原子・分子・ラジカルの密度, 速度分布関数

中性粒子がレーザー光の伝播に影響を及ぼすものとして, 密度変化に伴う屈折率変化が 2.2 項の伝播速度ないしは 2.3 項の屈折効果として現れるものと, 非共鳴のレーリー散乱, 共鳴散乱 (レーザー蛍光, LIF) を挙げることができる。散乱のマクロ効果が屈折率の変化になるもので原理的には同じ現象である。このうち, レーリー散乱やラマン散乱は光学系の校正に利用されているが, プラズマ計測に最も有力な方法として最近 10 年前後で広く利用され始めたのは可変波長レーザーを用いた LIF 法である²⁶⁾。

LIF 法で粒子の検知を行うためには, まず被測定粒子の電子共鳴準位に同調できる可変波長レーザーを要する。大部分の金属原子の基底準位からの遷移は色素レー

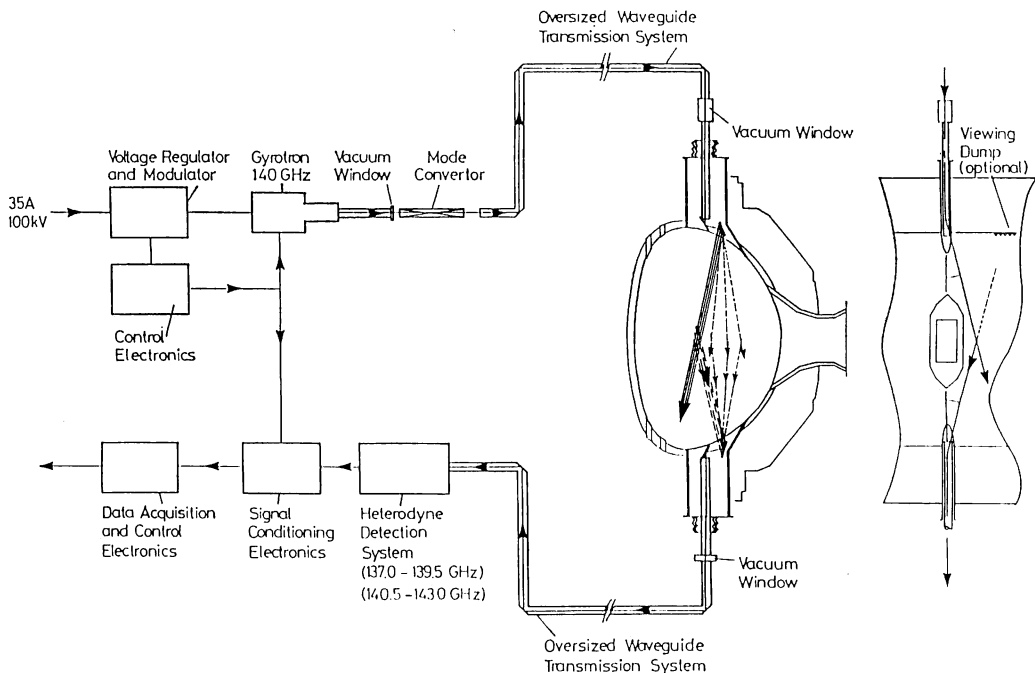


図 17 JET トカマクでのジャイロトロン散乱実験装置配置の一例

ザー、およびその非線形結晶を用いた第二高調波発生により励起することができることから光源には問題がない。他方、酸素、水素、炭素などの軽元素や各種イオンについては、可変波長真空紫外光を要するので、光源開発から進める必要があるが、最近その目途もたち、計測実行が可能なレベルに達した。イオンのドップラープロファイルを狭帯域化したレーザーにより計測してイオンの運動状態を求める種々の試みも行われている。

(1) 高温プラズマ

高温プラズマが真空容器壁と相互作用することにより、壁面付着物質および壁構成物質がプラズマ中に放出される。それらは不純物として混入すれば荷電数の多いイオンとなり、制動放射を通じての大きなエネルギー損失の原因となる。またトカマク等のプラズマ電流により平衡を維持するシステムでは、不純物混入によるプラズマ電流の半径方向分布の急峻化により MHD 不安定が誘起されるので、運転可能な密度の上限が決められることもよく知られている。そこで、不純物の種類とそれぞれの密度の空間分布、更にはその発生メカニズムやプラズマ中への侵入深さを知らるために速度分布関数を求めることが望まれる。

壁面近傍の不純物はプラズマの電子による励起、電離も不十分なため、大部分は中性原子でしかも基底準位にあることから、放射スペクトルが観測できない。そこでレーザー蛍光法の適用が考えられ、すでにトカマク等高温プラズマ発生装置の壁近傍での不純物の LIF 法による

検出が行われている。図 18】はその一例で、TEXTOR トカマクで主リミターにより決まるスクレープオフ領域のプラズマ中にステンレス製の参照リミターを挿入して、そのスクレープオフ層への挿入深さによるスパッター鉄原子の空間分布を求めている²⁶⁾。また高温プラズマ中心部の中性水素原子を次に述べるライマン系列に同調した LIF 法で測ることは現状では望めないで、励起準位の密度を 656.3 nm (H α 線) から始まるバルマー線を用いて計測し、衝突放射モデルにより基底準位密度を求めることが行われてきた。すでに同法でトカマク²⁷⁾、ステラレータ²⁸⁾、ミラー²⁹⁾、ヘリオトロン³⁰⁾の各装置での水素原子密度が求められてそれぞれでの粒子閉じ込め、荷電交換損失の評価が行われた。

励起波長 200 nm 以上に準位差のある原子のレーザー蛍光測定には原理的な困難はなく、この波長域では RAFS レーザーによる瞬時の粒子スペクトルプロファイル測定から速度分布関数³¹⁾、更にはゼーマンパターンから磁界に関する情報を求めるシステムも完成し³²⁾、より高度な測定へ向いつつある。

これに対して、 $E > 6 \text{ eV}$ となる炭素、酸素、水素等の軽元素を対象とした LIF 計測には $\lambda < 200 \text{ nm}$ の可変波長の真空紫外 (VUV) 光が必要となり、そのレーザー光源開発の種々の試みがなされてきた。軽元素の中で最も計測要求の高い水素原子について、ライマン β 遷移を ArF レーザー出力を D₂ ガス中でラマン変換した 205 nm の光で二光子的に励起し、H α 線を観測するス

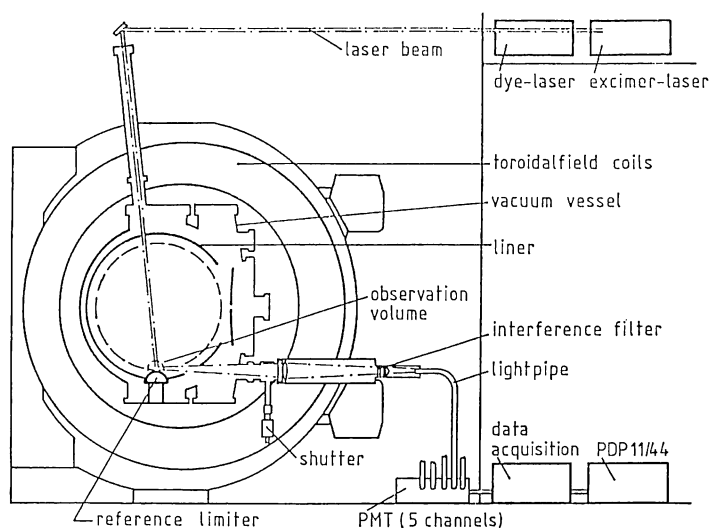


図 18 TEXTOR トカマクの周辺プラズマに鉄の参照リミターを挿入し、その表面からスパッターされた鉄原子を上方から入射したエキシマレーザー励起色素レーザー (100 Hz で発振) で照射し、蛍光を検出するシステム

キーム³³⁾が注目されている。すなわち、真空紫外光を扱わなくてよいこと、レーザー波長と観測波長が大きく異なるため迷光の問題がないこと、レーザー入射と蛍光観測を同軸的な配置にしても空間分解能が確保できること³⁴⁾、等の長所のため開発が進み、高温プラズマ周辺での測定で初期的データが得られた³⁵⁾。

(2) 産業応用プラズマ

産業応用プラズマ中の中性粒子を LIF で検出した報告は極めて多岐にわたり、その文献を列挙するのも容易でないほどである。このテーマに関して最近本誌に分光法の立場から解説をまとめたので³⁶⁾、本稿ではその後の文献³⁷⁻³⁹⁾を引用するにとどめる。

3.3 プラズマ中の電磁界の計測

プラズマ中で測定することが求められる電磁界の量は、電界と磁界およびそれらの揺動である。これらを、レーザーを用いて測定しようとする種々の試みの中で、ようやく実用化のレベルに達したものが現れたので、今後それを用いてのプラズマ現象解明の進展が期待される。

(i) 電 界

高温プラズマ中の電磁波を用いての電界の測定は一般に困難である。放射スペクトルないし 2.4 項で述べたレーザーによる励起と入射粒子ビームとの相互作用を利用した電界測定の方法の提案、試みがなされている⁴⁰⁾がそれぞれに原理的な問題を抱えており、高温プラズマ中の電界測定法として実用の域に達していない。

電界揺動に関連して、高温プラズマ中の電子密度揺動は 2.4 項で述べた協同トムソン散乱により揺動の (k, ω) スペクトルを求める方法は確立し、広く用いられている。また最近、限られた観測窓からの情報で電子密度揺動を得る方法として、直線状の光学系配置で (k, ω) スペクトルと強度から求まるフラウンホーフェー回折法⁴¹⁾やレーザーイメージ法⁴²⁾が発展させられた。これら電子密度揺動測定の報告は数多くあるにもかかわらず、それを用いて高温プラズマの閉じ込め、加熱過程を解明する試みは十分の成功を収めているとは言いがたく、他の方法による結果と併せて、より詳しい研究が必要である。

産業応用プラズマ中の電界測定に関しては、最近数年間でレーザーオプトガルバノ (LOG) 法⁴³⁾、レーザー蛍光 (LIF)⁴⁴⁾ 法を用いた方法が提案されてきたが、後者がプロセッシングプラズマの電界測定法として本命と目され、その較正法も確立されて⁴⁵⁾、最近 RF 放電電界計測に適用された。今後、これら方法を用いての放電電界計測が実際に即して行われ、放電過程の理解が進展するこ

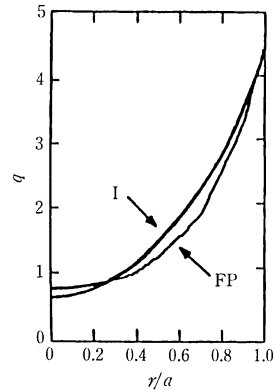


図 19 TEXTOR トカマクでの偏光計により求めた放電の安全係数 q の半径方向分布。放電条件、I, FP などの記号は図 12 のものと同じ。

とが期待される。

(ii) 磁 界

高温プラズマ中の磁界をレーザーを用いて測ろうとする際、今までに、(a) 2.2 項に述べたプラズマ中の電磁波伝播の異方性を利用したファラデー回転の測定⁴⁶⁾、(b) 2.2 項に述べた共鳴点での吸収のうち、高域ハイブリッド共鳴点で発生する非線形高調波の偏波面測定によるもの⁴⁷⁾、(c) 2.4 項で述べた非協同トムソン散乱が、磁界と直角な平面から見た場合の散乱スペクトルが電子サイクロトロン周波数 ω_{ce} で変調されることを利用するもの⁴⁸⁾、および (d) レーザー蛍光法によるゼーマンパターンの測定⁴⁹⁾、が考えられてきた。このうち、(a) の開発が大きく進展し実用化に達した。図 11 で示したのは TEXTOR トカマクへの適用例であり、ファラデー回転の磁界測定結果から電流密度分布を得て、それからトカマク放電の安全係数 q を求めたのが図 19 である¹⁶⁾。これから、中心部の q は 0.75~0.8 となり、 $q < 1$ では安定な放電は得られないとの理論的な予測と反するところから大論争を引き起こした。現在でも十分な決着がなされるわけではないが、測定精度の詳細な評価や、他の装置での追試により、実験的には $q < 1$ が実現されているのは間違いないと考えられている。

(c) については、直線状 θ ピンチプラズマを用いてモジュレーションの測定が初めてなされて⁴⁸⁾以来、低ベータトラスプラズマの電流密度分布測定への種々の提案があり、それに基づいてなされた DITE トカマクでの測定結果が報告された⁴⁹⁾。現在、この方法で上記ファラデー回転測定で得られた $q < 1$ の値を独立な方法で確認

するため、JET トカマクへ適用する検討が進められている⁵⁰⁾。

4. あとがき

以上レーザー伝播に及ぼすプラズマの影響を定量的に抜き出すことによりプラズマの多くのパラメータを測定できることを示した。この全体像を表1に示した。同表では2節に示した分類を縦コラムに、3節に示した測らねばならぬ量を横軸にとり、確立したもの、開発途上のものに分けて示している。紙数の関係で、個々の測定法の詳細と用いるレーザーおよび得られた結果に立ち入ることが出来なかったもので、それについては引用文献を参照していただきたい。

プラズマ研究の進展に伴い測定に必要な精度の要求も上がり、また従来行われてきた計測も限られた観測窓を通じて行うことが要求されるようになる。他方、日進月歩のレーザー技術を駆使すれば、従来不可能であった計測も行えるようになる。そこでは、プラズマ計測の側からのレーザーの性能に対する要求がレーザー技術の進展をうながしてきた例も多い。これらプラズマ計測へのレーザー技術の適用の大きな流れと将来の発展の可能性を検討するため、1983年に九州大学でレーザー応用プラズマ計測に関する国際シンポジウム (International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics) が開催された⁵¹⁾。そこでの実り多い討論とこの分野の大きな発展の可能性が国際的にも認められ、上記を第1回として第2回が1985年9月にオックスフォード⁵²⁾、第3回が1987年10月にカリフォルニア大学⁵³⁾、第4回が1989年11月に再度九州大学⁵⁴⁾で開催された。第5回以降は、アジア地区、ヨーロッパ地区、米国で持ちまわりの会合となることも決め、次回は1991年にエッセン/ポッフム/デュッセルドルフの世話でライン河畔の景勝地 Bad Honnef での開催が決まっている。本シンポジウムその他を通じて、ここ数年のうちにプラズマのレーザー計測は現状から大きく進展し、表1で開発中と述べた内容が次々に完成することが期待されている。

文 献

- 1) 村岡克紀, 前田三男: “高温プラズマのレーザー計測”, 日本物理学会誌, **41** (1986) 485-494.
- 2) 村岡克紀, 前田三男: “プラズマのレーザーによる計測”, 真空 (投稿中).
- 3) T. H. Stix: *The Theory of Plasma Waves* (McGraw-Hill, New York, 1962).
- 4) R. H. Lovberg: “Schlieren photography of a coaxial accelerator discharge,” *Phys. Fluids*, **8** (1965) 177-185.
- 5) J. Sheffield: *Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation* (Academic, New York, 1975).
- 6) P. Bogen and E. Hintz: “The application of fluorescence spectroscopy to the study of the plasma-wall interaction in magnetic-confinement devices,” *Comm. Plasma Phys. Cont. Fusion*, **4** (1978) 115-130.
- 7) N. J. Peacock, D. C. Robinson, M. J. Forrest, P. Wilcock and V. V. Sannikov: “Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in Tokamak T3,” *Nature*, **224** (1968) 488-490.
- 8) D. Johnson, D. Dimock, B. Grek, D. Long, D. McNeill, R. Palladino, J. Robinson and E. Tolnas: “TFTR Thomson scattering system,” *Rev. Sci. Instrum.*, **56** (1985) 1015-1017.
- 9) H. Salzmann, K. Hirsch, P. Nielsen, C. Gowers, A. Gadd, M. Gadeberg, H. Murmann and A. Schroder: “First results from LIDAR Thomson scattering on JET,” *Nucl. Fusion*, **27** (1987) 1925-1928.
- 10) K. Uchino, T. Muraoka, K. Muraoka and M. Akazaki: “Studies of an impulse breakdown process in an atmospheric air using ruby-laser scattering,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (1982) L696-L698.
- 11) 逸見義男, 内野喜一郎, 村岡克紀, 赤崎正則: “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** (1984) 278-283.
- 12) R. Hidaka, T. Ooki, K. Takeda, K. Kondo, H. Kanda, K. Uchino, Y. Matsuda, K. Muraoka and M. Akazaki: “Ruby-laser scattering diagnostics of a supersonic flow for low-pressure plasma spraying,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) L1724-L1726.
- 13) H. Yamakoshi, M. Kato, K. Uchino, T. Iwata, M. Masuda, K. Muraoka, M. Maeda and M. Akazaki: “Thomson scattering diagnostics of a discharge-pumped excimer laser,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L1589-L1591.
- 14) K. Uchino, Y. Kubo, K. Muraoka, T. Sakoda, H. Yamakoshi, M. Kato, A. Takahashi and M. Maeda: “Investigation of electron density and velocity distribution in high pressure discharge for excimer laser pumping using laser Thomson scattering,” *J. Appl. Phys.* (to be published).
- 15) T. Sakoda, S. Momii, K. Uchino, K. Muraoka, M. Bowden, M. Maeda, Y. Manabe, M. Kitagawa and T. Kimura: “Thomson scattering diagnostics of an ECR processing plasma,” *Jpn. J. Appl. Phys.* (to be published).
- 16) B. Ph. van Milligen, H. Soltwisch and N. J. Lopes Cardozo: “Application of function parametrization to the analysis of polarimetry and interferometry data in TEXTOR,” *Nucl. Fusion*, **31** (1991) 309-318.
- 17) F. Simonet: “Measurement of electron density profile by microwave reflectometry on Tokamaks,” *Rev. Sci. Instrum.*, **56** (1985) 664-669.
- 18) A. E. Costley, P. Cripwell, R. Prentice and A. C. C. Sips: “Recent developments in microwave reflectometry at JET,” *Rev. Sci. Instrum.*, **61** (1990) 2823-2828.
- 19) R. Prentice: Private communication (1990).
- 20) M. Hamamoto, K. Muraoka and M. Akazaki: “Simultaneous recording of two-wavelength interferometer outputs of an atmospheric impulse breakdown process,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) 443-444.

- 21) 赤崎正則, 村岡克紀, 浜本 誠: “二波長レーザー干渉法を用いた大気中インパルスアークの研究”, 電学論, **A 101** (1981) 255-262.
- 22) R. K. Richards: “Alpha particle measurement by CO₂ laser Thomson scattering,” *Proc. Fourth Symp. Laser-Aided Plasma Diagnostics* (Kyushu Univ., 1989) pp. 450-455.
- 23) P. P. Woskoboinikow, D. R. Cohn, J. S. Machuzak, R. C. Myer and R. Y. Rhee: “Gyrotron scattering alpha particle diagnostics,” *Proc. Third Symp. Laser-Aided Plasma Diagnostics* (UCLA, 1987) pp. 47-50.
- 24) A. E. Costly, J. A. Hoekzema, T. P. Hughes, P. E. Stott and M. L. Watkins: “A Thomson scattering diagnostic to measure fast ion and α -particle distributions in JET,” JET-R(88) 08 (1988).
- 25) M. Nagatsu and T. Tsukishima: “Driven scattering method for high temperature plasma diagnostics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) 2155-2169.
- 26) H. L. Bay and B. Schweer: “Investigation of metal atom fluxes from a reference limiter in TEXTOR,” *J. Nucl. Mater.*, **128 & 129** (1984) 257-261.
- 27) M. M. Larionov, L. S. Levin, Yu. V. Petrov, G. T. Razdobarin, V. V. Semenov and G. A. Strebreny: “Measurements of atomic hydrogen density in the plasma of FT-1 Tokamak by the resonance fluorescence method,” *Plasma Phys. Cont. Fusion*, **30**(1988) 1637-1640.
- 28) Yu. V. Gutarev, A. G. Dikii, P. G. Krystal', A. N. Letuchii and O. S. Pavlichenko: “Local measurements of the hydrogen-atom density in the Uragan-2 stellarator,” *Sov. J. Plasma Phys.*, **10** (1984) 371-372.
- 29) K. Muraoka, K. Uchino, Y. Isumi, M. Hamamoto, M. Maeda, M. Akazaki, T. Kawamoto, R. Kumazawa, S. Okamura, K. Adati, T. Aoki, H. Fujita, K. Hattori, S. Hidekuma, Y. Okubo, T. Sato, H. R. Garnar, D. R. Baker and H. D. Price: “Measurements of atomic hydrogen-density profiles in the RFC-XX-M machine using laser fluorescence spectroscopy at the H α transition,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24** (1985) L59-L61.
- 30) K. Uchino, T. Koga, K. Muraoka, M. Maeda, M. Akazaki, S. Sudo, O. Motojima, F. Sano, M. Sato, T. Mutoh, H. Zushi, Y. Takeiri, A. Iiyoshi and K. Uo: “Studies of particle behaviour in Heliotron E by means of Balmer-Alpha laser fluorescence spectroscopy,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **57** (1988) 909-917.
- 31) K. Muraoka, K. Uchino, M. Maeda, T. Kajiwara, K. Matsuo, T. Okada, C. Honda, Y. Suehiro, N. Yano, K. Takeda, H. Hagiwara, M. Akazaki, S. Sudo, K. Kondo, H. Matsuura, T. Mizuuchi, F. Sano, M. Sato, H. Zushi and T. Obiki: “Atomic hydrogen behaviour in Heliotron E,” *J. Nucl. Mater.*, **176 & 177** (1990) 231-235.
- 32) C. Honda, M. Maeda, M. Yakoo, K. Muraoka, M. Akazaki, K. Kadota, M. Hosokawa, H. Iguchi, Y. Takita, C. Takahashi, M. Fujiwara and J. Fujita: “Transient local magnetic field measurement in a bumpy torus by rapid-frequency-scan laser spectroscopy,” *Rev. Sci. Instrum.*, **58** (1987) 1593-1596.
- 33) 金 熙済, 梶原寿了, 本山廉夫, 村岡克紀, 赤崎正則, 岡田龍雄, 前田三男: “高温プラズマ周辺部での水素原子計測のための二光子励起レーザー蛍光法の開発”, 核融合研究, **61** (1989) 170-184.
- 34) T. Kajiwara, K. Takeda, K. Muraoka, T. Okada, M. Maeda and M. Akazaki: “Coaxial laser fluorescence system by two-photon excitation for atomic hydrogen detection in high-temperature plasmas,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L826-L828.
- 35) T. Kajiwara, T. Shinkawa, K. Uchino, M. Masuda, K. Muraoka, T. Okada, M. Maeda, S. Sudo and T. Obiki: “Application of two-photon excited LIF to atomic hydrogen measurements in edge region of high temperature plasmas,” *Rev. Sci. Instrum.* (to be published).
- 36) 前田三男, 岡田龍雄, 村岡克紀: “光およびプラズマを用いた薄膜堆積過程のレーザー分光計測”, 光学, **20** (1991) 2-9.
- 37) T. Kajiwara, T. Takeda, H. J. Kim, W. Z. Park, T. Okada, M. Maeda, K. Muraoka and M. Akazaki: “Application of laser fluorescence spectroscopy by two-photon excitation into atomic hydrogen density measurement in reactive plasmas,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L154-L156.
- 38) W. Z. Park, T. Eguchi, C. Honda, K. Muraoka, Y. Yamagata, B. W. James, M. Maeda and M. Akazaki: “Investigation of the thermalization of sputtered atoms in a magnetron discharge using laser induced fluorescence,” *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 2564-2566.
- 39) C. Honda, S. Fujiyoshi, H. Kawamoto, K. Muraoka, M. Maeda and M. Akazaki: “Instantaneous temperature measurement in a flame by rapid-frequency-scan laser spectroscopy,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 72-75.
- 40) W. P. West and D. M. Thomas: “Poloidal magnetic field measurements on TEXT using the Zeeman current profile diagnostic,” *Rev. Sci. Instrum.*, **56** (1985) 1071.
- 41) Y. Sonoda, Y. Suetsugu, K. Muraoka and M. Akazaki: “Applications of the Fraunhofer-diffraction method for plasma-wave measurements,” *Plasma Phys.*, **25** (1983) 1113-1132.
- 42) K. Matsuo, K. Tanaka, K. Muraoka and M. Akazaki: “Generalization of laser imaging method for measurements of electron density fluctuations in plasmas,” *Jpn. J. Appl. Phys.* (to be published).
- 43) Y. Yamagata, K. Suenaga, K. Muraoka, M. Maeda and M. Akazaki: “Improvement in detection limit of electric field measurement using optogalvanic signals by laser excited Rydberg atoms,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) 565-566.
- 44) C. A. Moore, G. P. Davis and R. A. Gottsho: “Sensitive, nonintrusive, *in-situ* measurement of temporally and spatially resolved plasma electric fields,” *Phys. Rev. Lett.*, **52** (1984) 538-541.
- 45) Y. Yamagata, Y. Kawano, K. Muraoka, M. Maeda and M. Akazaki: “*In-situ* calibration for electric field measurements in glow-discharge plasmas by laser-induced fluorescence using the optogalvanic technique,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 166-177.
- 46) H. Soltwisch and T. F. R. Equipe: “Experimental test of far-infrared polarimetry for faraday rotation measurements on the TFR 600 Tokamak,” *Infrared Phys.*, **21** (1981) 287-298.
- 47) R. Cano, I. Fidone and M. J. Schwartz: “Spatial determination of the direction of the magnetic field in a Tokamak configuration,” *Phys. Rev. Lett.*, **27**

- (1971) 783-786.
- 48) D.E. Evans and P.G. Carolan: "Measurement of magnetic field in a laboratory plasma by Thomson scattering of laser light," *Phys. Rev. Lett.*, **25** (1970) 1605-1608.
- 49) M.J. Forrest, P.G. Carolan and N.J. Peacock: "Measurement of magnetic fields in a Tokamak using laser light scattering," *Nature*, **271** (1978) 718-722.
- 50) P.G. Carolan, M.J. Forrest, C.W. Gowers and P. Nielsen: "Proposal to measure the q profile on JET by Thomson scattering," *Rev. Sci. Instrum.*, **61** (1990) 2926-2928.
- 51) *Proc. Int. Symp. Laser-Aided Plasma Diagnostics* (Kyushu Univ., 1983).
- 52) *Proc. Second Symp. Laser-Aided Plasma Diagnostics* (Culham Lab., 1985).
- 53) *Proc. Third Symp. Laser-Aided Plasma Diagnostics* (UCLA, 1987).
- 54) *Proc. Fourth Symp. Laser-Aided Plasma Diagnostics* (Kyushu Univ., 1989).