

フラウンホーファ回折によるプラズマ中の 電子密度揺動の計測

園田 義人・松尾 敬二・村岡 克紀・赤崎 正則

九州大学大学院総理工学研究所 〒816 春日市春日公園 6-1

プラズマ中では、圧力こう配や電流等を自由エネルギーとして不安定性が誘起され、それにより密度や電位に熱揺動以上 (suprathermal) の揺動が存在するのが普通である。この揺動は、たとえば磁界閉じ込め核融合の閉じ込め性能を劣化させたり、慣性閉じ込め核融合や天体プラズマでの高エネルギーへの粒子加速を引き起こす。他方、プラズマ波動を励起してそれを熱化することによりプラズマの加熱を行なう波動加熱においては、揺動が基本的な役割を果たす。これらの現象を解明し、ひいてはその制御を通じて目標プラズマを得るためには、まず揺動のパワースペクトル $I(\vec{k}, \omega)$ の測定が必要である。

$I(\vec{k}, \omega)$ を求める簡単な方法は、図 1 のような 2 本の金属探針をプラズマ中に挿入し、両者の電位の相関をとるものである。この方法は簡単である上に、上記の閉じ込め劣化やプラズマ加熱と直接関係する電位揺動のパワースペクトルを測定できることから有力である。しかし、探針の太さより短い波長の電位揺動は検出できないし、また高温プラズマ中には探針が挿入できない。これに代わる方法として、電磁波の散乱を利用する方法がある。これは、結晶の X 線回折 (ブラッグ回折) による分析と同じ原理によっており、プラズマ中の揺動のうち電子密度揺動が検出される。すなわち、図 1 に示すように入射電磁波の波長と入射角で決まる電子密度揺動のブラッグ条件を満たす (\vec{k}, ω) で散乱光に相関を生じ、そこだけで強い散乱光が観測される。

X 線の結晶回折と異なるのは、結晶間隔に相当する電子密度揺動の波長が正弦波的 (そのフーリエ変換は、ある波数 k でデルタ関数的となる) ではなく幅広いスペクトルをもつので、入射電磁波はコヒーレントなものを用い、電子密度揺動のなかでブラッグ条件を満たすフーリエ成分のみを検出するようにすること、および電子密度揺動が位相速度 ω/k で移動しているので、散乱光は入射光の角周波数 ω_0 から $\omega_0 - \omega$ のドップラーシフトを生じることである。 k とともに ω スペクトルも電子密度揺動

の重要な情報である。 k とは異なる k' を求めるためには、入射電磁波波長または散乱角を変えなければならない。これら電子密度揺動による電磁波散乱は、1 個の電子によるトムソン散乱を多電子系に適用した場合の協同的散乱 (collective scattering) として定式化されている。

実験を行なう際には、測定する電子密度揺動の波数に合わせて、コヒーレントな電磁波としてマイクロ波やレーザーが用いられる。この電磁波協同散乱法は、高温高密度プラズマ中でもプラズマを乱すことなく電子密度揺動を測定できるため、広く利用されてきた。ところが、同法の適用に当たっては、(i) 電子密度揺動の広い範囲の波数スペクトルを得るためには、多くの散乱角または異なる波長の電磁波で測定を行なう必要があるが、これに応じた観測窓・スペースの確保は、実際のプラズマ発生装置、とくにプラズマ核融合研究の進展に伴い新たに建設されてきた大型プラズマ装置では容易に行なえず、また広い波長範囲をカバーするコヒーレント光源がない、(ii) プラズマの磁界閉じ込めに重要な影響を与えると予想されるドリフト波等の長波長領域の波動を測定する際、散乱角が小さくなりすぎるため、入射光と散乱光の分離や空間分解能が悪くなる、(iii) 電子密度揺動の強度を求めるための光学系の校正が困難である、等の問題点が指摘されている。

従来の散乱法のこれらの弱点を補う方法として、最近極前方散乱法が提案された¹⁾。この新しい電子密度揺動計測法は、後述のようにフラウンホーファ回折領域に観測面を置いて回折波のホモダイン測定を行なうことと同等であることから、フラウンホーファ回折法とも呼ばれる²⁾。図 2 (a) にこの計測配位の概略を、(b) に受光面で得られる信号の空間的強度プロファイルの一例を示す。

電磁波 (ガウスビーム) をプラズマ中に入射したとき、一種の屈折率波としての電子密度揺動の位相変調作用によって生じた回折波 (散乱波) は透過波とともに受光レ

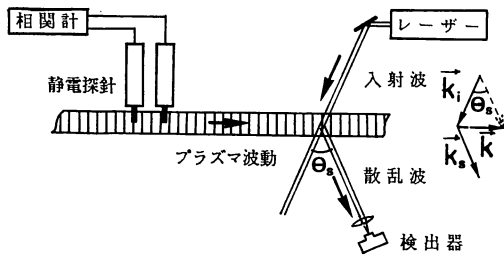


図1 静電探針と電磁波散乱

プラズマ波動の波数 k と入射電磁波の波数 k_i ($\equiv 2\pi/\lambda_i = 2\pi c/\nu_i$; λ_i, ν_i は電磁波の波長および振動数) の間には、 $k = 2k_i \sin(\theta_s/2)$ の関係がある。 θ_s は図に示す散乱角であり、また $\vec{k} = \vec{k}_i - \vec{k}_s$ のベクトル関係がある。

ズを通して、その後焦点面 (プラズマ計測の分野では、これを前方焦点面, front focal plane と呼ぶ^{1,2)}) に到達する。ここで、受光レンズは、入射ビームのビームウエストおよび観測面からそれぞれ受光レンズの焦点距離 f に等しい距離に置かれ、フーリエ変換光学系を構成している。後方焦点面にできる像は、フーリエ変換レンズがないときの無限遠でのフラウンホーファ回折像と同等である。そのプロファイル (図2 (b)) は電子密度揺動の波数によって変化する。電子密度揺動の周波数、波数等の情報は、受光面での1次回折波振動成分の周波数および空間強度分布プロファイルを測定することにより得られる。後方焦点面での電磁波強度および位相分布に関する理論式は、フーリエ光学の解析手法を用いて得られている。以上の内容は、音響光学や光変調の分野で扱われる超音波・光相互作用と原理を同じくするものである。

本法では入射ビームが完全なガウスビームであることが前提となり、また、そのスポットサイズが重要な意味をもつ。詳細は参考文献²⁾に譲るが、適用に有利な条件は入射ビーム直径がプラズマ波動の波長の約0.3~1.3倍くらいのときである。一方、ビームウエストから電子

密度揺動までの距離とスポットサイズによって決まるレーゾーンとの比が1に近づくにつれ、図2 (b)の2山分布の中心部が盛り上がるので、これから逆に電子密度揺動の存在する位置を求めることもできる。

本法の利点として、(i)従来の散乱法では散乱角が小さくなりすぎる長波長波動の検出が可能、(ii)光学系が一直線形の簡単な構造で、大型プラズマ核融合装置への設置が容易、(iii)従来の散乱法のヘテロダイン検波に必要だった参照電磁波も必要でない、(iv)波動の強度と波動幅の積が容易に求まる、等があげられる。

本法は、マイクロ波や炭酸ガスレーザーで、直流放電中のイオン音波および小型トカマク中のドリフト波の測定へ適用され、基本的計測技術が確立された。現在、国内では各種大型プラズマ装置 (RFC-XX-M および GAMMA 10 のミラー型プラズマ閉じ込め装置、HELIOTRON-E および JIPP T-II Uのトラス装置) への適用が試みられている。

最後に、本法で改善を要する問題として次のものがある。まず、電子密度揺動の強度と幅の積は容易に求まるが、それから強度を求めるには、幅を他の方法により測定するか、適当に推定しなければならない。また、レーゾーンと電子密度揺動幅が同程度であるようなスポットサイズが設定できない場合、空間分解能の低さが問題となることがある。さらに、トカマク装置等で方位角方向に伝搬するドリフト波等の計測を行なうような場合、入射ビームが電子密度揺動と2回交差するという新たな条件を加味する必要性が生じる。これらの条件下での計測についての検討も種々なされているが³⁾、なお改善の余地が残されている。

以上、フラウンホーファ回折法の概要を記したが、同法と類似の方法として、フレネル回折領域で計測を行なう位相シンチレーション法や、位相変調に比例した実空間強度分布の測定を行なう位相コントラスト法が、同じく長波長電子密度揺動の測定を目的に開発されている。

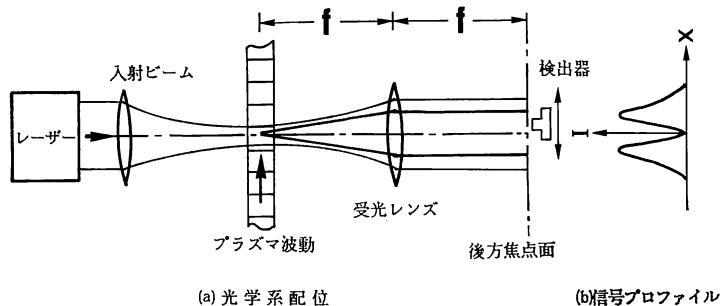


図2 フラウンホーファ回折光学系の概略

これらのイメージング技術の各手法は、いずれも音響光学・光通信の研究、天体プラズマ観測、ホログラフィの研究等のプラズマ・核融合とは別の分野において開発された手法をプラズマ計測に応用したものである。レーザー技術を含むコヒーレント光工学の最近の急速な発展とともに、これらの各分野で開発された手法が、プラズマ診断の分野に今後も新たに有望な手法を提供することが期待される。また、プラズマ計測での研究が、新しい光応用技術を生み出すことも期待したい。

文 献

1) D. E. Evans, E. J. Doyle, D. Frigione, M. von Hel-

lermann and A. Murdoch: "Measurements of long wavelength turbulence in a tokamak by extreme far forward scattering," *Plasma Phys.*, **25** (1983) 617-640.

2) 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.

3) K. Matsuo, Y. Goshō, T. Toyoda, Y. Sonoda, K. Muraoka and M. Akazaki: "Development and application of the Fraunhofer-diffraction method for measurements of plasma density fluctuations using infrared lasers," *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **6** (1985) 1051-1059

(1986年2月3日受理)