



解説

プラズマ計測のためのマイクロ波反射計

江 尻 晶

(東京大学大学院新領域創成科学研究科)

Microwave Reflectometry for Plasma Diagnostics

EJIRI Akira

Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

(Received 28 April 2003)

Abstract

Microwave reflectometry is a plasma diagnostic that launches microwaves to a plasma and measures the wave reflected at a cutoff layer in the plasma. It is used mainly for density profile and density fluctuation measurements. Because of its high radial resolution, high sensitivity, and relatively easy implementation, microwave reflectometry has been used in many devices. In this report, highlights of the measurements, as well as the features of reflectometry, are described.

Keywords:

microwave reflectometry, density profile, density fluctuation, O-mode, X-mode, transport

1. はじめに

マイクロ波反射計とは、マイクロ波をプラズマに入射して、反射した波を測定することによってプラズマの情報を得る計測器と定義される。マイクロ波が利用される理由は、多くの実験室プラズマのプラズマ振動数 f_p 、および電子サイクロトロン周波数 f_{ce} がマイクロ波帯(~ GHz)にあることと、波長がちょうどプラズマの代表的な揺動の波長に対応するためである。マイクロ波反射計は反射という強い相互作用を測定するものであり、干渉計や散乱計、その他の測定方法に比べ非常に感度のよい測定が可能である。もうひとつの側面としてマイクロ波技術の進展が上げられる。より短い波長の電磁波と異なり、波の制御性がよく、高精度、高時間分解能の測定が可能である。

マイクロ波反射計は、物理的にもコスト的にも小規模

author's e-mail: ejiri@k.u-tokyo.ac.jp

なシステムで密度分布、密度揺動の情報が得られるという特徴があり、多くのプラズマ装置に適用されている。一方、マイクロ波反射計ほど奥の深い測定はない。一口に反射計といっても原始的なものから、非常に複雑なシステムが存在する。また、華々しい成果の一方で、測定結果の解釈について多くの議論を引き起こしてきた。当学会誌には、これまで優れた反射計の解説、講座があるが[1],ここでは、非専門家を対象に反射計のおもしろさ・難しさを理解してもらうことを目的に、わかりやすい解説を試みる。また、この解説とは別にこれからプラズマに反射計を適用しようとする初心者へのガイドとして「マイクロ波反射計を作ろう」という講座を予定している。本稿では、最初に反射計の原理と特徴を述べる。次にプラズマ研究に大きなインパクトを与えた反射計の結果を紹介する。これらの成果により、世界の研究者が反

射計の有用性を認識しただけでなく、多くの研究者が反射計計測に従事するきっかけとなった。また、最近の成果も一部紹介する。最後に反射計の難しさとその理由を述べる。

2. 反射計とは

反射計の主な用途は、密度分布測定と密度揺動測定である。原理については後述するが、粗っぽく言うと、反射計が測定するのはカットオフの位置である。Fig. 1 は反射計の概念図である。周波数 f の発振器からのマイクロ波をアンテナでプラズマへ入射する。プラズマ中を伝播したマイクロ波は、(周波数で決まる)ある密度の場所で、カットオフとなり反射される。プラズマから再び外へ出てきた反射波をアンテナ、検出器で受信する。カットオフまでの距離を測るために、受信した波の位相や、到着時刻を測定する。このようにしてある周波数に対応する密度の位置の情報が得られる。そこで、さまざまな周波数で測定することにより密度分布がわかる。また、ある周波数での位相の時間変化を測定することにより密度揺動が得られる。

原理についてもう少し説明しよう。通常、反射計では、磁気面(～等密度面)に垂直にマイクロ波を入射し、垂直に反射波が帰ってくる。したがって、電磁波のモードとしては正常波(O-mode)と異常波(X-mode)のみを考慮すればよい。正常波のカットオフ周波数と屈折率の自乗は

$$2\pi f_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad , \quad N_o^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad (1)$$

となる。異常波の場合は、これらは、密度だけでなく磁場にも依存する。反射計では、カットオフからの反射波の位相を測定してカットオフの位置を検出する。正常波のカットオフは密度に依存するので、密度分布、密度揺動が得られる。一方、異常波を用いると磁場に関する情報が得られる。また、2つの異なる周波数(カットオフ)を測定することにより密度揺動の相関長が得られる。

1次元波動方程式を解くことにより反射の様子をうかがうことができる。定常状態で、正常波、異常波間のモード間結合がない場合には、解くべき式は1変数の2階常微分方程式

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + N_{oX}^2 k_0^2 E = 0 \quad (2)$$

となり、数値計算が可能である。ここで x は波動伝播に

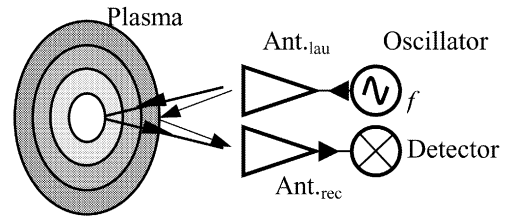


Fig. 1 Conceptual diagram of microwave reflectometry.

沿う座標、 E は電場、 N_{oX} は正常波または異常波の屈折率であり、 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ は真空中での入射マイクロ波の波数である。 E 、 N_{oX} は x の関数であるが、波長に比べて、 N_{oX} の変化のスケールが十分長いとすると(WKB 近似の考え方を用いて)、電場は近似的に

$$E \propto \exp(\pm i N_{oX} k_0 x) \quad (3)$$

となる。 $N_{oX}^2 > 0$ であれば N_{oX} は実数となり、電場は正弦的に振動する。一方、 $N_{oX}^2 < 0$ であれば、 N_{oX} は虚数となり、電場は指数関数的に発散もしくは収束する。WKB 近似では、(3) 式の位相項を積分

$$\phi = \int_x^{x_c} N_{oX}(x) k_0 dx + \frac{\pi}{4} \quad (4)$$

で表すことができる。WKB 近似はカットオフ付近で破綻するが、通常の分布計測、揺動計測では、WKB 近似で十分な場合が多い。1次元波動方程式(2)は簡単に数値計算することができる。Fig. 2 は放物型の密度分布での正常波の電場を計算したものである。2階常微分方程式であるから、2つの独立解が存在し、Evanescent な領域で x が小さくなるに従って収束する解(A)と発散する解(A')が存在する。右側の真空領域から左へ(プラズマ側へ)マイクロ波を入射する場合はほぼ解(A)となる。時間変化も考慮すると、この解は、左へ進む波と反射して右へ進む波がつくる定在波と解釈することができる。一方解(A')はプラズマ中の左端からマイクロ波が右側へ伝播する解であり、激しい減衰を伴う。カットオフ付近の密度勾配が(波長に比べて)滑らかであれば、この付近で、 N_{oX}^2 が線形に変化すると近似することができ、解析解はAiry関数で与えられる。カットオフ付近で波長が大きくなることは、 N_{oX} が小さくなること(あるいは(3)式から予想できる。実際には、Fig. 2 のようになり、最も内側の電場の山の幅をAiry幅と呼ぶ。密度分布がわずかに変化し、カットオフの位置が動くと、位相の変化は、カットオフ付近の波長、すなわちAiry幅に対応した変化を示す。Fig. 2 の解(A)と解(B)は密度の違う2つの場合

の波動を示したもので、右端での位相が丁度一周期異なるように密度を選んだ場合である。2つの解のずれは、カットオフに近づくに従って大きくなることからわかる。これは、カットオフに近づくに従って波長が長くなるからであり、密度変化に対する感度という意味では、カットオフ付近の変化に敏感であること、すなわち、測定の局所性を意味する。ただし、より正確には(Born近似の考え方、すなわち密度変化を摂動として扱う場合には)電場の大きなところで大きな感度を持つ[2]。密度揺らぎのスケールが波長よりも十分大きな場合には、密度揺らぎと位相揺らぎの関係は、

$$\frac{\tilde{n}_e}{n_e} = \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dr} \frac{\lambda}{4\pi} \tilde{\phi} = \frac{1}{L_n} \frac{\lambda}{4\pi} \tilde{\phi} \quad (5)$$

となる。ただし L_n は密度の勾配長であり、 λ は実効的な波長である。数値計算の結果 λ は真空中の波長 λ_0 の約1.7倍となる[3]。カットオフの手前でも、密度揺らぎが波長程度のスケールを持つときには、干渉(Bragg散乱)により大きな感度をもつ[4]。

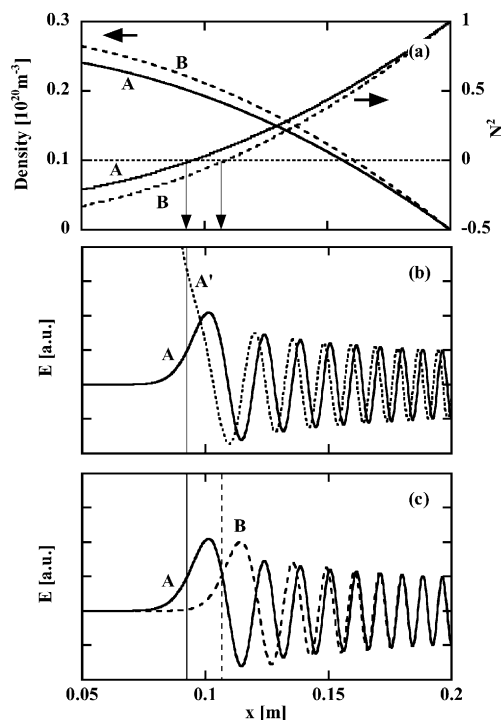


Fig. 2 Solutions of the wave equation. (a) Density profiles (A, B). (b) Two independent solutions. (c) Solutions for different density profiles.

3. 活躍するマイクロ波反射計

プラズマにおける反射計は、電離層の測定が最初とされている。これは、レーダーによって、遅れ時間から電離層までの距離を測定したものである。基礎プラズマでも早い時期から測定がおこなわれている。磁場閉じ込めプラズマでの測定も早くから試みられたが、分布測定といってよい結果が現れたのは、1985年である[5]。しかしながら反射計の有用性が認識されたのは、1990年の ASDEX における H モード時の周辺部の密度分布の変化によってである[6]。周辺部の詳細な密度が H-mode 遷移後に徐々に増えて、輸送障壁の形成される様子を明確に示した(Fig. 3)。この結果により、反射計は、時間、空間分解能に優れた分布計測であると認識された。

揺動測定も早くから試みられ1985年には、MHD が観測されている[7]。プラズマ研究に与えた影響という点では、DIII-D における H モード遷移時の測定があげられる[8]。Fig. 4 は異なる場所での反射計信号の高周波成分の変化を示したもので、遷移後に密度揺動が減少したと解釈された。その後、減少している場所が局所シア、フローのある付近と一致することも確かめられた[9]。こ

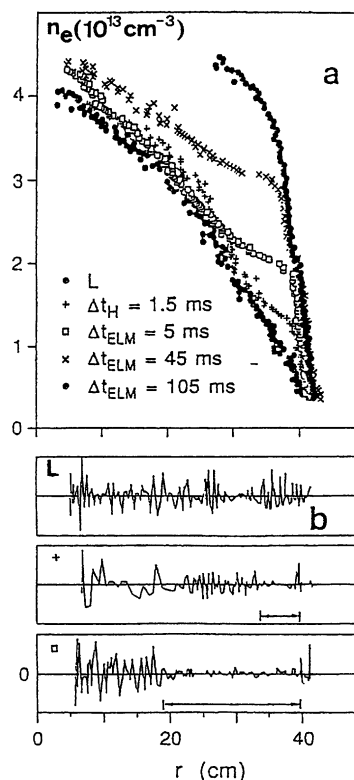


Fig. 3 Development of edge density gradient after L-H transition (a), and the perturbations (b) [6].

の成果から、反射計は局所的な密度揺動を測定できる優れた計測と認識されるようになった。

この2つの結果は、プラズマの研究者の予想とも一致し、それがために、反射計に対して過度の期待と安心感を与えたようにも思われる。一方、この2つの結果後に形成された反射計の専門家集団内で、分布測定に対しても、揺動測定に対しても種々の論争が起きた。これについては後述するが、プラズマの研究者に与えた影響という意味では、この2つが大きな貢献をし、これ以降、異常輸送、輸送障壁は反射計のもっとも得意とする用途となった[10]。ちなみに、JETのH-mode遷移時にFig.4と同様の反射計信号の揺動の減少が観測されているが、密度勾配長の減少が激しく、密度揺動が減少したとは言えないと報告されている(〔5〕参照[11])。

マイクロ波の周波数を変えることにより、異なる位置の揺動を測定することができる。このことから不安定性の径方向の構造を測定しようという試みは早くから行われてきたが、明瞭な構造が得られた例は意外に少ない。そのような中で Toroidal Alfvén Eigenmode (TAE) はマクロな現象であり、また時間的にコヒーレントなので(すなわち特定の周波数をもつので)、反射計で比較的容易に観測することができる。Fig.5はTFTRのDTプラズマにおいてアルファ粒子によって駆動されたTAEの構造を示したものである[12]。この測定では、異常波を用いることで、弱磁場側の測定を可能としている。また、異なる位置を測定するために、3つの周波数を用い、さらにトロイダル磁場を10%程度変化させて測定した。磁気揺動に同期した成分が弱磁場側と強磁場側で異なることを示し、TAEの理論から予測される構造との類似性と相違点が見つかった。

近年の異常輸送の研究においては、揺動の大きさだけでなく、相関長の測定が重要であると認識されている。輸送をランダムウォークと考えると、輸送係数は、空間ステップの幅の2乗に比例し、時間ステップに反比例する。乱流輸送に当てはめて考えると、これらは、揺動の相関長と相関時間に対応する。したがって、輸送が増減したかどうかは、揺動レベルの増減だけでなく、相関長や相関時間がどうなったかに依存する。特に輸送障壁では、シア流が揺動の空間的な成長を抑制し、相関長の長い大きな構造(渦)を抑制することが、輸送の低減に寄与していると考えられる。したがって、揺動測定では、揺動レベルや周波数スペクトルだけでなく、相関長の測定が重要だと考えられようになってきた。反射計による径方向の相関の測定は、比較的早くから行われてきた

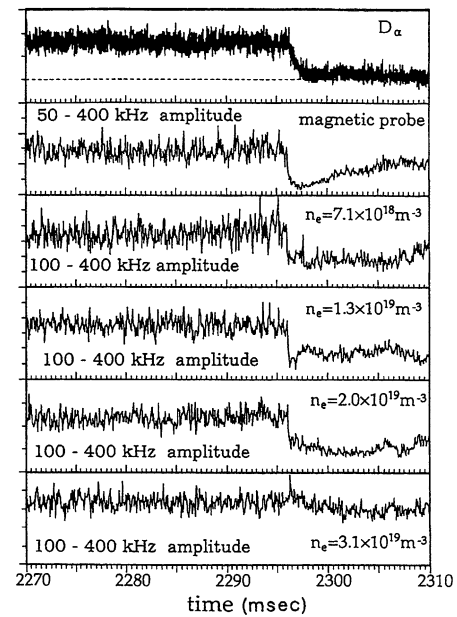


Fig. 4 Variation of divertor D_α , reflectometer signals and magnetic probe signals across the L to H transition [8].

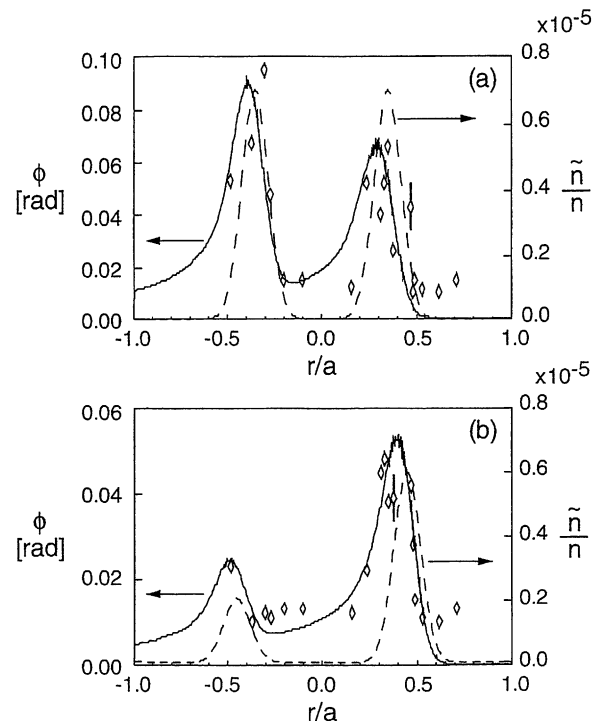


Fig. 5 Phase magnitude from reflectometer measurements. The dashed lines indicate model density perturbations and the solid lines indicate corresponding phase perturbations. Profiles at two different timings are shown [12].

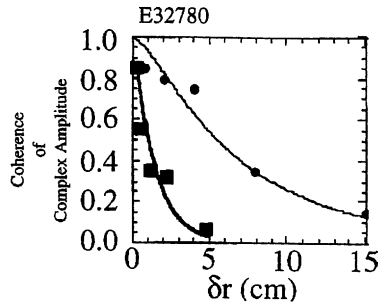


Fig. 6 Radial profile of the correlation function outside (circles) and inside (squares) the internal transport barrier [13].

が、上記の観点で、プラズマ研究者に注目される結果を出したのは、JT-60Uにおける内部輸送障壁の測定であった[13]。いくつかの近接した周波数で揺動測定を行い、輸送障壁形成後に障壁中で相関長が減少していることが見出された (Fig. 6)。

反射計は電子サイクロトロン周波数帯、プラズマ周波数帯のマイクロ波を測定するが、より低いイオンサイクロトロン周波数帯の信号は反射計の中間周波数部を工夫することにより、比較的容易に測定することができる。一方、プラズマ加熱、電流駆動では、入射した波動がプラズマ中を予想どおりに伝播し、減衰するかどうかが重要である。ここで反射計の局所測定を生かすことができる。Fig. 7はGAMMA-10におけるイオンサイクロトロン加熱時の反射計測定結果である[14]。加熱の効果が見られる時間帯とそうでない時間帯で波の径方向分布が異なることを示している。また、この例では、温度非等方性により励起されたアルヴェンイオンサイクロトロン波が観測されており、加熱効率への影響が示唆されている。同種の測定は速波電流駆動実験でも行われている[15]。

反射計と散乱計には共通点が多いが、通常の反射計は鏡面反射を測定する配位で行われるので、Fig. 2を用いて説明したように $k_r \sim 0$ に感度をもつ。一方、プラズマとその上に乗った摂動はしばしば回転しているので、回転回折格子と見なすことができる。すなわち、マイクロ波を等密度面に斜めに入射し、斜めに帰ってきたマイクロ波を観測すると、ドップラー効果により周波数がずれる。このような効果は早くから認識され後述する位相Runawayの一因と考えられてきた。逆にこの効果を積極的に用いることにより、摂動（揺動）の速度を求めることができることを実証したのがW7-ASにおける実験である[16]。Fig. 8は揺動の速度が異なる場合の反射波の周波数スペクトルを入射周波数を基準に示した図で、速度とともに、スペクトルのピークがシフトする様子が

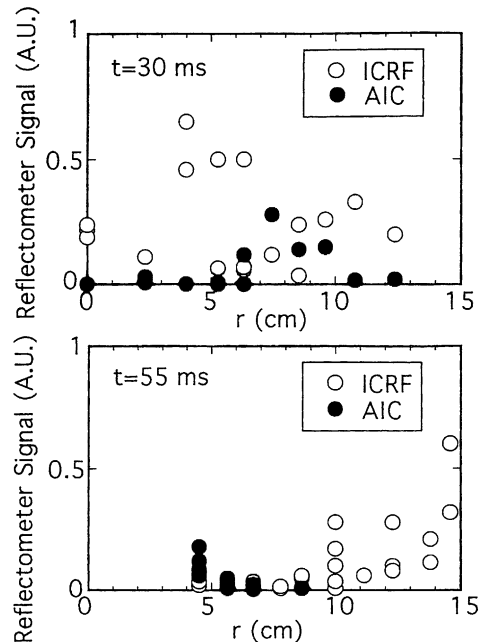


Fig. 7 Radial profile of reflectometer signals during ICRF heating [14].

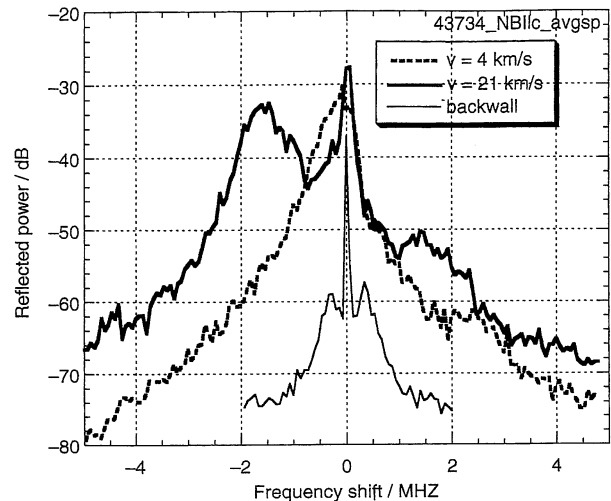


Fig. 8 Doppler reflectometry spectra for two discharges with different propagation velocities [16].

わかる。このドップラーシフト量は、回転回折格子あるいは、散乱計測の場合と同じであり、揺動の波数と（他の計測器で求めた）速度で決まること確かめられた。これにより、異常輸送の抑制に寄与すると考えられている速度シアを反射計によって精度良く測定する可能性が開かれた。なお、別の手法として、回転方向に離れた2点で反射計測定を行い、遅れ時間（相互相関関数のピーク）

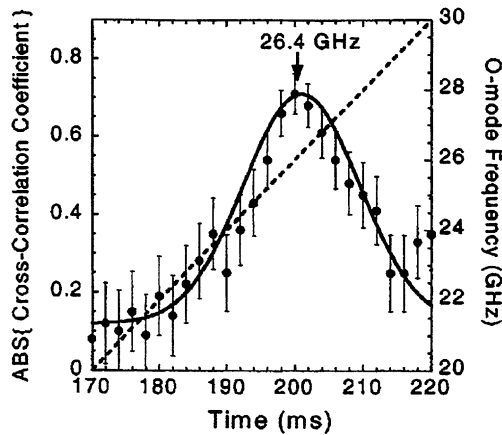


Fig. 9 Cross correlation between O- X-mode reflectometers. The frequency of X-mode is 30 GHz, while that of O-mode is swept [18].

から速度を求める方法がある．

ここまでは、正常波と異常波を特に区別せずに解説したが、異常波のカットオフは、密度だけでなく、磁場にも依存する．したがって、この2つを上手に利用すれば、磁場に関する情報が得られる．例えば、2つのモードで測定した揺動レベルを比較することにより磁場揺動の大きさを評価することができる[17]．ここでは、相関反射計を用いた磁場強度測定の実験について紹介する．Fig. 6の例にもあるように、一般に2つの測定点（カットオフ）が離れるに従って、揺動の相関は下がっていく．そこで、一つの反射計は正常波、もう一方は異常波を測定して、両者の相関が最大になる条件を探す．当然これは、両者の測定しているカットオフの位置が一致したときであるが、この時、正常波と異常波では周波数が異なる．この周波数の違いは磁場と密度に依存するので、その場所の密度と磁場の関係がわかる．反射計などによって、密度分布が既知であれば、磁場強度分布を測定することができる．Fig. 9はNSTXにおける正常波異常波相関反射計の相関を示したものである[18]．異常波反射計の周波数を固定して、正常波反射計の周波数を時間とともに変化させると揺動の相関関数が得られる．相関が最大となる点で、2つのカットオフが一致し、その周波数から磁場の大きさを求めることができる．

4．反射計の難しさと解決策

実際に反射計でプラズマを計り始めると困難に直面することが多い．具体的には、フリンジジャンプ、位相Runaway、密度分布の多価性である．当初、これらの原因は、プラズマ中の密度が時間的に揺らぐことだと考え

られたが、様々な試行錯誤の結果、最近では、密度の空間的な揺らぎが引き起こす回折効果が主要な原因と考えられるようになった．なぜ回折効果が起こり、どのような条件で起こるか、どのような対策があるかを述べる．また、わかりやすい解説が今までなかったので、その点に重点をおいた解説を行う．

フリンジジャンプとは、測定した位相が 2π の整数倍、突然急激にジャンプする現象である．現象論的には、反射波のパワーが0に近づく時に起きる．そこで、これらに対する対策として、時間分解能の改善、精度の改善、揺動の平滑化が試みられた．しかしながら、分解能、精度の改善には、あまり効果がないことがわかった．一方、揺動の平滑化は効果がある．具体的には、測定した信号（複素振幅）を低域通過フィルタに通して、揺動成分を除去してから位相を計算するとフリンジジャンプや位相Runawayの少ない信号が得られ、ゆっくりとした密度の変化、位置の変化が測定できるようになる．また、フリンジジャンプが相対的に急激に起きることを利用して、フリンジジャンプをソフトウェア的に除去する方法が開発され、成果を上げた[19]．密度分布の多価性は、分布測定時の問題である．反射計の場合、密度の関数としてカットオフの位置が求められるので、同じ位置に対して、2つの密度が存在しうる(Fig. 10)．もちろんこれは、物理的にはありえない分布である．密度分布を測定するためには、周波数を掃引するが、これには、一定の時間がかかる．この時間内に密度が時間的に揺らぐと正しい分布が得られない．そこで、掃引時間を短くすることにより、密度揺らぎの影響を除去できると期待され、事実これにより成果を上げた[20]．しかしながら、これだけでは不十分で、下記に示すような平滑化が行われるのが普通である．入射マイクロ波の周波数を固定した測定では、上述した時間空間での平滑化（低域通過フィル

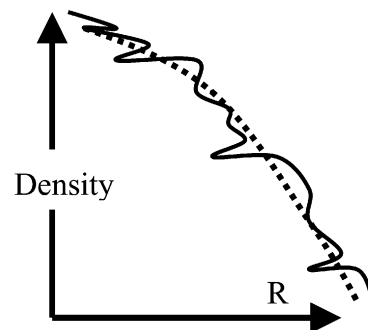


Fig. 10 Unreasonable density profile affected by fluctuations.

タ)が有効であり、周波数を掃引する分布測定においては、周波数空間での平滑化が有効である。また、AM 反射計や、短パルスレーダー反射計のように広がりのある周波数を測定する場合には、周波数空間での平滑化が測定に組み込まれている。

次に、密度揺動の空間構造に起因する回折効果を説明する。ここでは、単純化したモデルを導入する。測定したいカットオフ面がほぼ平面で、密度の揺らぎをこの平面上に同在する位相(波面)の揺らぎに置き換える。また、入射波として平面波を考える。位相揺らぎの同在は、カットオフ手前での密度揺らぎの影響を無視することに対応する。

Fig. 11 は、左端($x=0$)に波長 10λ 、振幅 0.5 rad の位相揺らぎがあったときに右側へ伝搬した波の各 x での y 方向の位相の変化を示したもので波面の形と見なすことができる。右端のスケールが 5 倍異なることに注意。これは 2 次元的なスカラー波 e^{ikr}/\sqrt{r} の波源が $x=0$ で $\Delta\phi \cos(k_0 y)$ の初期位相分布を持っているとしてホイヘンスの原理を用いて計算したものである。この図で $x=20\lambda$ では左端の位相変化をほぼ忠実に再現しているが、さらに右に進むと波面が歪みはじめ、位相情報がなくなっていく。これは、 y 方向の構造による回折のためである。したがって、反射計によって、位相変化を測定するためには、波面が歪まない位置に受信アンテナを設

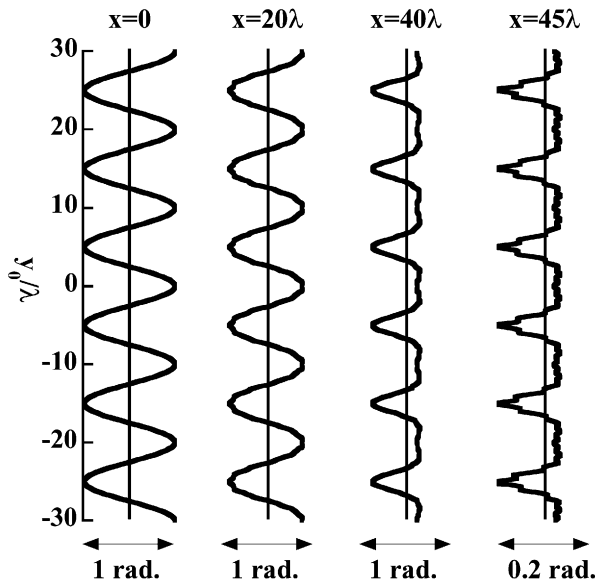


Fig. 11 Phase as a function of y for several x . Initial phase perturbation is given at $x=0$ and the phase is distorted as the wave propagates in x -direction.

置する必要がある。計算式を近似すると、干渉効果が顕著になる距離、すなわち位相が 1 rad 程度理想的な値からずれる距離は $x \sim k/\Delta\phi^2/k_f^2$ (図の条件では、 $x \sim 30\lambda$ となる)と評価することができる。すなわち、プラズマの揺らぎの振幅や波数が大きいほど、この距離は短くなる。また、図の $x=40\lambda$, $x=45\lambda$ でわかるように、位相は非線形な変化をする。したがって、波数の大きな揺らぎを測定するためには、カットオフ面の非常に近くに受信アンテナを設置しなければならない。ところで、結像光学系を用いることで、物空間焦点のイメージを像空間焦点のイメージに変換することができる。ここにアレイ状の検出器を配置すれば、 $x=0$ (カットオフ面)にアンテナを設置したことに等価になり、このような回折の影響を受けない(Fig. 12)。この手法は、イメージング反射計と呼ばれ、TEXTORでの初期実験では、上記の考え方が正しいことが示された[21]。ただし、結像させるためには、大きな立体角を確保しなければならず、これが実用上の困難である。また、カットオフ以外の場所での揺動が大きいと、曇りガラスを通して観測することになり結像は難しくなる。実用上のもう一つの問題は、カットオフ面が移動すると結像条件が変わり、ピンぼけが起きることである。そこで、光学系による結像の代わりに、レンズの位置に多数のアンテナ(あるいは検出器)を配置する方法が考えられる。結像は計算機上で行うので、結像条件の変化を考慮したイメージの再構成が可能であると期待されているが、理論的検討、実験による検証がされていない。イメージング反射計は、今の所もっとも完璧で、もっともコストのかかる反射計と見なされている。その一因は、アレイ状の検出器であるが、研究開発の盛んな分野であり、今後の発展が期待される[22]。ここでは、結果のみを示したが、干渉条件の導出過程、

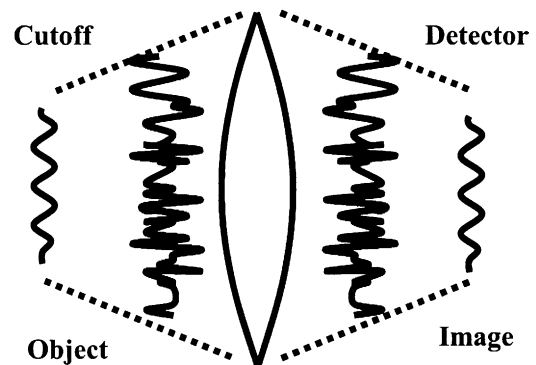


Fig. 12 Schematic drawing of the imaging reflectometer.

カットオフ面の曲率，アンテナの指向性の影響，より正確な取り扱い方法については，講座にて述べる．

イメージング反射計と別のアプローチとして散乱法がある．Fig. 8はその一例であるが，アンテナが十分遠方であり，かつ，ある条件を満たすと揺動を回折格子とみなし，配位で決まる波数を選別して測定することができる．また，このような考え方でデータ解析を行っている例もある[23]．一般的な条件で，どのような配位が最適で，どのような解析を行うべきかについては，必ずしも整理されていない．

5. まとめ

この解説では主に磁場閉じ込めプラズマにおけるマイクロ波反射計の成果を紹介してきたが，プラズマ研究，特に輸送の研究に大きな役割を果たしてきたことがわかる．その一因は，異常輸送のスケールとマイクロ波の波長が同じオーダーであり，プラズマの変化に対して反射計が高い感度を持つことである．もう一つの理由は，反射計には計測手法としての柔軟性があり，様々な需要に応えることができたという点である．ここで紹介した実験結果は，主としてプラズマ研究に与えた影響という観点から選んだものであるが，それぞれの手法を初めて適用したものではない．すなわち，これらは，手法がある程度成熟した後に，その時の研究のニーズに応えられたものである．これには，反射計の専門家集団の存在が大きな貢献をしている．また，この解説では取り上げなかったが，反射計の理論的研究も活発で，それらの成果が実験を支えていることも見逃せない．

最後に助言をいただいた田中謙治先生，間瀬 淳先生にこの場をかりて感謝いたします．

参考文献

- [1] 間瀬 淳他：プラズマ・核融合学会誌 74, 1382 (1998)；間瀬 淳他：プラズマ・核融合学会誌 71, 49 (1995)；永津雅章：プラズマ・核融合学会誌 71, 132 (1995)．
- [2] E. Mazzucato and R. Nazikian, Plasma Phys. Control. Fusion 33, 261 (1991)．
- [3] A.E. Costley, in International School of Plasma Phys. Bologna, 1986, p. 379-396．
- [4] X.L. Zou, L. Laurent and J.M. Raz, Plasma Phys. Control. Fusion 33, 903 (1991)．
- [5] F. Simonet, Rev. Sci. Instrum. 56, 664 (1985)．
- [6] F. Wagner *et al.*, Plasma Phys. Controlled Nuclear Fusion Research 1990, IAEA Vienna 1991 Vol.1 277-290; M.E. Manso *et al.*, 18th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Berlin, (1991) 15C 1-393．
- [7] TFR Group, Plasma Phys. Control. Fusion 27, 1299 (1985)．
- [8] K.H. Burrell *et al.*, Phys. Fluids B 2 1405 (1990); E. Doyle *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 61, 3016 (1990)．
- [9] E. Doyle *et al.*, Phys. Fluids B 3, 2300 (1991)．
- [10] N. Oyama and K. Shinohara, Rev. Sci. Instrum. 73, 1169 (2002)．
- [11] G.J. Kramer *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion, 35, 1685 (1993)．
- [12] R. Nazikian *et al.* Phys. Plasmas 5, 1703 (1998)．
- [13] K. Shinohara *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 70, 4246 (1999); R. Nazikian *et al.*, Fusion Energy 1998 (IAEA Vienna, 1999) Vol.4 p.1689．
- [14] A. Mase *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 66, 821 (1995)．
- [15] J. H. Lee *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 66, 1225 (1995)．
- [16] M. Hirsch *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 43, 1641 (2001)．
- [17] A. Mase *et al.*, Phys. Fluids B 5, 1677 (1993)．
- [18] M. Gilmore *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 74, 1469 (2003)．
- [19] A. Ejiri, K. Shinohara and K. Kawahata, Plasma Phys. Control. Fusion 39, 1963 (1997); M. Gilmore, W.A. Peebles and X.V. Nguyen, Rev. Sci. Instrum. 72, 293 (2001)．
- [20] T. Tokuzawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 68, 443 (1997)．
- [21] E. Mazzucato *et al.*, Phys. Plasmas 9, 1955 (2002)．
- [22] 間瀬 淳他：プラズマ・核融合学会誌 78, 439 (2002)．
- [23] K. Shinohara, Y. Miura and K. Hoshi, J. Plasma Fusion Res. 74, 607 (1998)．



えじり あきら
江尻 晶

1965年生まれ．1992年に東京大学大理学系研究科退学後，核融合科学研究所を経て，1999年より新領域創成科学研究科．最近の研究テーマは，球状トカマクを用いたMHD不安定性の研究，揺動計測手法の開発です．学生の研究テーマとは微妙に異なっており，学生を手足のように使うというよりは，学生の手足となることが多いようです．また，現在の趣味は育児と家事です（共働きの方には，この意味がわかると思いますが）．