



マイクロ波イメージング

長山好夫, 間瀬 淳¹⁾
(核融合科学研究所, ¹⁾九州大学産学連携センター)

Microwave Imaging Diagnostics

NAGAYAMA Yoshio and MASE Atsushi¹⁾
National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan
¹⁾KASTEC, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan
(Revised 24 January 2005)

Present status of the development of microwave imaging diagnostics is presented. Electron cyclotron emission imaging (ECEI) is useful to obtain 2-D cross-sectional view of electron temperature. Microwave imaging reflectometer (MIR) is useful to obtain 2-D picture of electron density fluctuation. They will be powerful tool to study localized magnetohydrodynamic (MHD) instability and micro instability, which cause turbulence in plasma. Microwave imaging sensor is key technology, and several types of antenna array with Schottky barrier diodes have been developed. In order to reduce the size and cost, microwave circuits on board have been also developed. Microwave imaging diagnostics are now installed in LHD and TEXTOR. Comparison between the ECEI in TEXTOR to the rotational ECE imaging in TFTR shows advantages of ECEI.

Keywords:

plasma diagnostics, microwave, MMW, ECE, reflectometry, imaging, turbulence, instability

1. はじめに

「マイクロ波イメージング (Microwave Imaging)」とはマイクロ波でプラズマなど物体の画像を撮像することである。核融合プラズマの場合マイクロ波の波長がミリメートル単位であることから「ミリ波イメージング (Millimeter Wave Imaging)」とよばれることも多い。核融合プラズマが放射するマイクロ波を撮像するのがECE イメージング (Electron Cyclotron Emission Imaging: ECEI), プラズマにマイクロ波を投射して反射してくるマイクロ波を撮像するのがマイクロ波イメージング反射計 (Microwave Imaging Reflectometry: MIR) である。

なお、本文で「核融合プラズマ」と呼ぶのは、トカマクやヘリカルなど核融合研究のために数テスラ (T) もの強磁場中に閉じ込められた高温プラズマのことである。実際に核融合反応を起こしている必要はない。

第2章で詳述するように、プラズマはカットオフ周波数より低い周波数の電磁波は反射する。カットオフ周波数はサイクロトロン周波数と電子密度で決まる。それより高い周波数については、サイクロトロン周波数の整数倍の電磁波は吸収・放射されるが他の周波数では透明である。放射された電磁波は電子サイクロトロン放射 (ECE) と呼ばれるが、ECE の強度は電子温度に比例する。したがって、ECE [1]を用いると電子温度の空間分布が、反射計 [2]を用いると電子密度あるいは電子密度揺動の空間分布が測定で

Corresponding author's e-mail: nagayama@nifs.ac.jp

きる。

マイクロ波画像計測で何がわかるのだろうか? Fig. 1 に TFTR プラズマの鋸歯状波崩壊における ECE 断面像の時間変化を示す [3]。TFTR は米国プリンストン大学でかつて運転されていた主半径 2.45 m, 小半径 0.8 m の円形断面トカマクである。これは 1 つのアンテナで受信した ECE

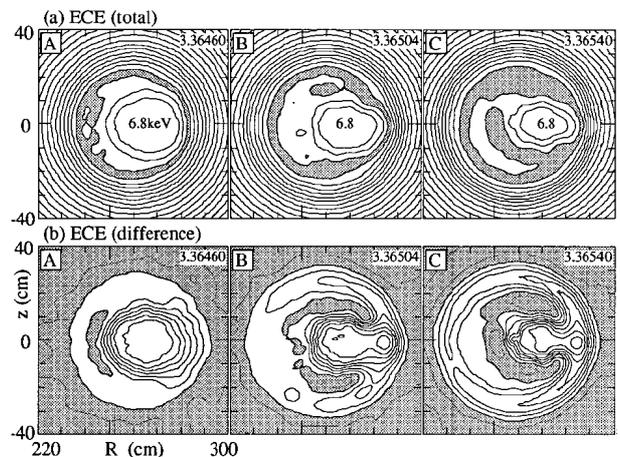


Fig. 1 (a) Series of rotational ECE images when the hot spot is on the bad curvature side. The contour step size is 250 eV. The hatched region indicates $T_e = 6 - 6.25$ keV. (b) Reconstruction of the temperature difference. The contour step size is 100 eV and the hatched region indicates less than 300 eV (from Ref.[3]).

を 20 ch の分光器でスペクトル分解することで測定した赤道面上の電子温度を、プラズマの剛体回転を利用して得た断面像である。一般に MHD 不安定性は磁気面を変形するような運動でありプラズマと一緒に回転するため、単一モード構造の場合はこの回転イメージング法 (rotational ECE imaging) [4] は大変有効である。上記のように $m/n = 1/1$ モードだけが成長するトカマクの鋸歯状波振動の観測には大変強力であり、その結果、局所磁気再結合現象が鋸歯状波振動を引き起こしていることが見いだされた [3]。

回転イメージング法はプラズマ回転より不安定性の成長が速い場合には使えない。また、バルーニングモードのように特定の場所で発生するような局所的現象にも使えない。そこで、2次元計測により各瞬間の ECE 画像を計測することが必要となったのである。

2. マイクロ波イメージングの原理

2.1 ECE による電子温度計測の原理 [1]

プラズマ中の電子は磁場中でサイクロトロン運動をしている。電子の円運動は振動する双極子であるため電磁波を

放射・吸収する。特にサイクロトロン周波数

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} \quad (1)$$

の 2 倍の周波数を持ち、電場が磁場と直交するマイクロ波 (異常波: X モード) をよく吸収する。逆に高温プラズマは黒体放射する。放射強度 $I_B(\omega)$ は

$$I_B(\omega) d\omega = \frac{\omega^2}{8\pi^3 c^2} T_e d\omega \quad (2)$$

すなわち放射強度は温度に比例する。

これが電子サイクロトロン放射 (ECE) である。原理的に放射領域はサイクロトロン周波数に対応する磁場近傍の狭い領域に限られており、また、他の磁場領域では透明である。従ってプラズマ外部から ECE を観測した場合、周波数から磁場強度すなわち放射源の位置、強度から電子温度がわかる。

2.2 反射計による電子密度揺動計測の原理 [2]

電磁波の関数形を $\exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$ とすると、電場が磁場と平行方向のマイクロ波 (正常波: O モード) の分散関

高まる期待

核融合科学研究所 伊藤公孝

「わかったつもの知らぬが仏」とばかりに、学会全体が不確かな思いこみに安住していることがある。質的に新しい計測が実現すると (精度がひと桁上がると)、謎に気づき、ついには理解が一気に飛躍する。

核融合研究の進歩はこうした歴史に満ちている。例えば、sawtooth の発見や CHS の electric pulsation の発見を例に取ると、それらは予想もしなかったものであり、測られなければ知らぬままになっていた (sawtooth crash 後の磁場が、中心で $q = 1$ だろうという予測とは異なっていることもまた、精密な測定が新たな謎をもたらした例である)。電磁的な構造を作る非線形力の大きさはダイナミックな応答を観測することで測られるものであり、これらの発見にチャレンジすることでプラズマの理解が深まり、また学問としても飛躍がもたらされてきた。

重大な発見は、何にもまして、大きな謎の提示であり、謎を認識することが (とりわけ学術研究を標榜する時) 研究の価値を高める原動力である。「プラズマらしさ」を定式化し、その中に起きる現象を法則化することが、核融合研究の課題として一層重視される。プラズマらしさといえ、場との強い結合、乱流、構造形成と構造相転移、非等分配則と高エネルギー粒子、トポロジー変化と突発性などがある。最初にも触れたダイナミックな MHD 現象の多くは磁気アイランドが発生するなど磁場のトポロジカルな変化のダイナミクスが謎の中心に居座っている。トポロジーの急変の問題は、高い時間分解で最低二次元の計測を行うことが必須である。

この解説に詳説されているように、二次元計測が実際に結果を出しつつあるということは大変嬉しい話である。突然発生する巨視的な変動によりメソスケールの現象も同時に起きるが、それも分解し、トポロジー変化、つなぎ変わる磁力線や磁気面の相対的位置関係など、まさにツボである。また温度揺動などの計測が実現してきたが、突発的発生との因果関係などもいずれは調べられるだろうとの希望もふくらむ。密度と温度の変動差の観測は、粒子種とエネルギーの違いによる応答差の解明へ道を拓くものであり非平衡性に新しい光を照らす。間違いなく、従来の論争に決着を付ける発見があるだろう。それ以上に、今の議論が極めて限られた世界での理解に止まっていたことが明白になるような、思っても見なかった発見があるに違いない。新たな深い謎を提示してくれることがさらに大きな楽しみである。読者のなかで最近核融合研究に新たに踏み出した方々にとっては、先人が手を付けていない謎を目の前にして、自分の独創力を実証する大きなチャンスになる。

ここで解説されている計測機器を開発してきた今日まで、著者と共同研究者達は智恵と工夫を注ぎ込んでこられた訳であるが、その結果が実現の運びとなつていよいよ新たな研究意欲を刺激することになる。新たな発見が引き続き、学会の諸賢に「今日と明日が楽しみ」という元気をもたらししてくれるに違いない。

科学研究費特別研究 (16002005) ならびに基盤研究 (15360495) の援助を受けている。

係は

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \quad (3)$$

Xモードのマイクロ波についての分散関係は

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{\omega^2 - \omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_h^2} \quad (4)$$

となる。ここで

$$\omega_{pe} = (e^2 n_e / \epsilon_0 m_e)^{1/2} \quad (5)$$

$$\omega_h^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \quad (6)$$

である。電磁波が真空からプラズマに入射すると、密度が上がって ω_{pe} が大きく、 k^2 は小さくなっていき、ついには 0 になる。波は、 $k^2 < 0$ の方向には進行できないので反射する。Oモード波は $\omega = \omega_{pe}$ のカットオフ面で反射するし、Xモード波は $\omega = \omega_R$ の右回りカットオフ面、あるいは $\omega = \omega_L$ の左回りカットオフ面で反射する。ここで

$$\omega_{R,L} = \left(\frac{\omega_{ce}^2 + \omega_{pe}^2}{4} \right)^{1/2} \pm \frac{\omega_{ce}}{2} \quad (7)$$

である。

プラズマ周波数 ω_{pe} は電子密度の平方根に比例するので、一つの周波数の Oモードマイクロ波の反射面は等電子密度面 (=磁気面) である。端的に言えば磁気面の振動はそのまま反射面の振動となり、反射マイクロ波の位相変動として観測される。したがってマイクロ波反射計は非常に敏感な電子密度揺動の計測器となる。

より正確にはプラズマ中の電磁波の屈折率 η は、 $\eta = ck/\omega$ であるから、一次元系の場合ならばマイクロ波が $z=0$ から入射し $z=z_c$ で反射する時、反射波の位相 ϕ は

$$\phi(\omega) = \frac{2\omega}{k} \int_0^{z_c} \eta(\omega; z) dz \quad (8)$$

となる[5]。あらゆる ω について ϕ が測定されれば $\eta(z)$ 、すなわち電子密度分布が測定できる。

Fig. 2 に LHD ($B_{ax} = 2.75$ T, $R_{ax} = 3.6$ m) での $f_{ECE} = 2\omega_{ce}/2\pi$, $f_{pe} = \omega_{pe}/2\pi$, $f_R = \omega_R/2\pi$, $f_L = \omega_L/2\pi$ を図示する。ECE(f_{ECE})と反射計(f_R, f_L)は周波数帯が異なるので、受光系を共通にしても、周波数で分離できる。

2.3 光学結像の原理

マイクロ波は光と同じ電磁波であるので当然レンズや鏡を用いて光学的に結像可能であるが、波長が長いので可視光のように幾何光学計算のみで光学系を設計することは困難であり、波動光学が必要である。波動光学では Maxwell 方程式を簡略化したスカラー変数 u (例えば電場の各成分) の波動方程式 (Helmholtz 方程式)

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad (9)$$

を用いることが多い。ここで k は電磁波の波数であり、 $k = 2\pi/\lambda$, λ は波長である。 z 軸方向に進行する電磁波についての軸対称解は

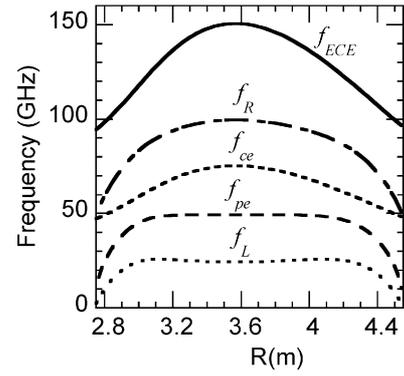


Fig. 2 ECE frequency (f_{ECE}), cyclotron frequency (f_{ce}), cutoff frequencies (f_R, f_L, f_{pe}) in LHD ($B_{ax} = 2.75$ T, $R_{ax} = 3.6$ m, $n_{e0} = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$).

$$u(r, z) = \frac{u_0}{w} \exp \left\{ -\frac{r^2}{w^2} - ik \left(z + \frac{r^2}{2R} \right) + i\chi \right\} \quad (10)$$

である。ただし、 r は半径、 χ は波の位相である。これは r についてガウス分布をしているため、ガウスビームと呼ばれる[6]。ここでビーム半径 w が最小値 w_0 になる位置 z を $z=0$ とし、そのときの振幅を u_0 とした。ビーム半径の最小値 w_0 はしばしばビームウエストと呼ばれる。位置 z におけるビーム半径 w は

$$w^2 = w_0^2 + \frac{4z^2}{k^2 w_0^2} \quad (11)$$

波面の曲率半径 R は

$$R(z) = z + \frac{k^2 w_0^4}{4z} \quad (12)$$

と与えられる。

干渉計や反射計のようにプローブビーム (入射波) を使用する計測法にイメージング技術を組合わせたアクティブイメージング (位相イメージング, イメージング反射計) の場合、送信アンテナからプラズマまでの入射光学系は、レンズによるガウスビームの伝送公式[7]

$$\frac{z_2}{f} = 1 + \frac{z_1/f + 1}{(z_1/f - 1)^2 + (\pi w_{01}/\lambda f)^2}$$

$$\left(\frac{w_{02}}{w_{01}} \right)^2 = \frac{1}{(z_1/f - 1)^2 + (\pi w_{01}/\lambda f)^2} \quad (13)$$

を用い、要求される仕様になるようプラズマに照射する。ただし、 f はレンズ等結像系の焦点距離、 w_{01}, w_{02} はレンズの前側および後側におけるビームウエスト、 z_1, z_2 はレンズ表面からの距離である。

一方、プラズマから検出器までの光学系 (受光結像系) は、電子サイクロトロン放射などのパッシブイメージングでも同様であるが、プラズマで散乱した、あるいはプラズマからの放射波を効率よくアレイに集光すること、かつ幾何光学的な結像が得られることの両方の要求を満足するよう、光線追跡計算を用いて収差を最小にするように設計する。

円形の開口部を持つ集光系の分解能は、回折理論を用いると、ECEのようなインコヒーレント光の場合には $0.61\lambda / \eta \sin \theta$ 、反射計のような、コヒーレント光の場合には、 $0.71\lambda / \eta \sin \theta$ となる [8]。ここで η は媒質の屈折率、 θ は光線の入射角である。 $\eta = 1$ 、開口部の口径を D 、開口部と対象物間の距離を z とすれば近似的に、 $\sin \theta \sim D/2z$ であるから、分解能 δ は、

$$\delta \sim \lambda z / D \tag{14}$$

となる。したがって高分解能を得ようとするなら、 z/D 値を大きくしなければならない。

2.4 マイクロ波結像反射計

前節2.2で述べたマイクロ波反射計は暗黙の内に、プラズマは光軸と直角な平面であり光軸方向に運動することを仮定している。しかし実際のプラズマは曲がっており、観測対象の揺動はむしろ光軸と直角方向に運動する。したがって、反射と言うより散乱であり、四方に飛び散った散乱光を集めないで揺動の情報を正確に得ることはできない。そこでマイクロ波結像反射計(Microwave Imaging Reflectometry: MIR) が考案された [9]。

直径 60 cm、幅 20 cm の円筒に深さ 1.7 mm、ピッチ 5 cm の波形表面を持つ金属円筒をプラズマに見立てて回転し、それにマイクロ波を照射する模擬実験がある [10]。その反射信号の例を Fig. 3 に示す。波形は金属表面の波形に相当する。結像しない場合は、反射計が 30 cm 離れるだけで原信号とは全く異なる波形となる。一方、結像した場合は、235 cm 離れても正しい波形が得られる。

マイクロ波結像反射計では反射面とカットオフ層が異なる。例えば O モードの屈折率は、 $\eta = [1 - (\omega_{pe}/\omega)^2]^{1/2}$ 、であり、プラズマの端から入射された光(マイクロ波)線がカットオフ層に近づくにつれて屈折率は減少していくので、入射光線は曲がる。そのため結像系から見た反射点は、Fig. 4

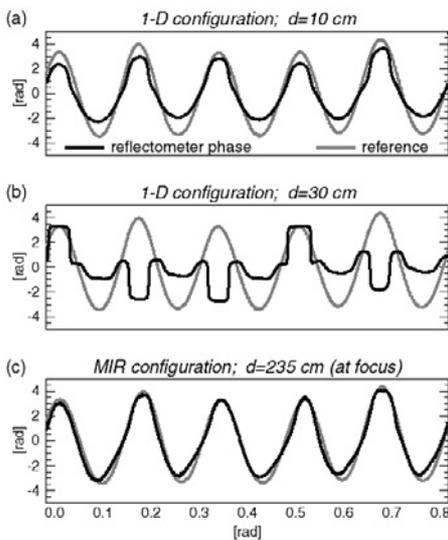


Fig. 3 Waveforms from the one-dimensional system (a), (b) and MIR system (c), from measurements of a target reflector having corrugations of $k_y = 1.25 \text{ cm}^{-1}$ and depth $\sim 1.7 \text{ mm}$, leading to $\Delta\phi \sim 2\pi$ (from Ref.[10]).

に示すように、あたかもカットオフ層より内側にあるように見える [9, 10]。

2.5 反射計の波動シミュレーション

近年の計算機の性能の進歩に伴い、核融合研究におけるシミュレーションの重要性が高まっている。マイクロ波・ミリ波診断においても反射計による揺動計測を対象として、理論シミュレーションの研究がなされてきた [9-14]。

反射計は、外部から入射された電磁波によるプラズマ中のカットオフ密度層からの反射を解析することによりカットオフ層の位置やその時間・空間変位を調べることを目的としている。真空中およびプラズマ中における電磁波の伝播は、Maxwell 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E} \tag{15}$$

を解くことにより得られる。Maxwell 方程式の二次元・三次元解として現在最も利用されているのは、有限差分時間領域 (Finite-Difference Time-Domain: FDTD) 法と呼ばれるシミュレーション技法である。核融合実験プラズマでは、使用波長が短ミリ波領域 ($\lambda = 2-6 \text{ mm}$) であるため、シミュレーション精度を上げるため空間分解を、例えば波長の 1/10 に選ぶと実際の実験領域 ($> 1 \text{ m}$) を計算するにはかなりの時間を要することになる。

最近、真空中では解析解、周辺の薄いプラズマ領域では WKB 近似による解、カットオフ密度層近傍では FDTD 法による数値解を求め、それらを組み合わせることにより計算時間を大幅に短縮する手法が提案され (Fig. 5)、マイクロ波イメージング反射計のシミュレーションに適用された [13]。波形表面を持つ金属円筒の模擬実験について (Fig. 3)、モデル計算を行った結果、従来型反射計では反射面か

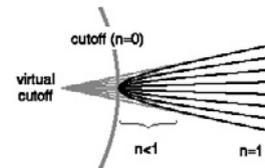


Fig. 4 Heuristic description of the virtual cutoff layer (from Ref. [10]).

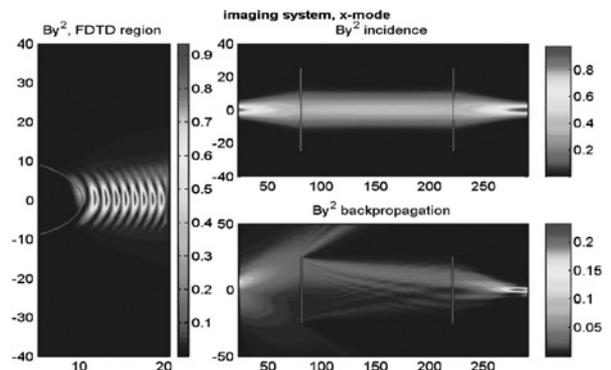


Fig. 5 Microwave propagation in a vacuum (top right), inside plasma (left), and reflect signal (bottom right).

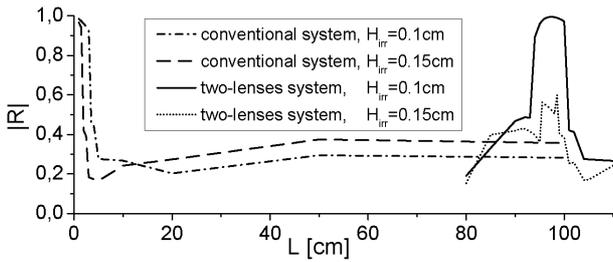


Fig. 6 Cross-correlation coefficient R of the shape of received phase fluctuations and corrugations at different distances (from Ref. [13]).

ら離れると揺らぎの情報が直ちになくなるが、イメージング反射計では、対物レンズの焦点面において揺らぎの情報が得られることが検証された (Fig. 6)。また、反射面の波動の波数が入射マイクロ波の波数と比較して十分小さい場合か揺動レベルが小さい (4%以下) 場合には波動を忠実に反映するが、波数が同程度になるか揺動レベルが大きくなるとイメージング反射計に優位性が現れる。対物レンズの口径が大きくなるに従い、揺動を良く反映するようになることも示された。

3. マイクロ波イメージング技術

はじめにイメージングシステムの模式図を Fig. 7 に示す。上が ECEI、下が MIR である。プラズマからのマイクロ波はビームスプリッタ (BS₁) によって、ECEI と MIR とに分けられる。ECEI と MIR のマイクロ波周波数は異なるため、ビームスプリッタとして後述のダイクロイック板 (Dichroic Plate) を使用する場合もある。

ECEI ではプラズマの深さ方向の情報を得るために、複数の周波数で検波する。そのために 1 つのミキサの信号をプリアンプで増幅後、パワーデバイダで分割し、中間周波数増幅後検波する。ミキサでは LO の周波数との差周波数が中間周波数となるので、一つのチャンネルで LO より高い周波数と低い周波数の両方を同時に検波することになる。そこで、ミキサの前にダイクロイック板を設けて、LO の周波数より高い ECEI だけ選別する。

イメージング反射計ではプローブビーム源 (RF) と受信系が同軸になるようにビームスプリッタ (BS₂) によって混合する。プローブビームはきれいなガウスビームとして観測領域のプラズマを照射することが求められるため、コルゲートホーンを用いる。一方、受信系の各チャンネルが照射領域の一部だけに焦点が合うように結像光学系は工夫されている。

プラズマからのマイクロ波を結像光学系により、小さなマイクロ波受信アンテナ列に結像し、ヘテロダイン検波する。ホーンアンテナでは大きすぎて多数並べることができないため、レンズでマイクロ波を平面アンテナ列に集光する。平面アンテナにはミキサを取り付け、局部発振器 (LO) からのマイクロ波と受信マイクロ波と受信したマイクロ波を混合して中間周波数 (IF) を作る。バンドパスフィルタ (BPF) とアンプで増幅後、検波し、信号とする。これらのミキサ、アンプ、BPF、検波器はアンテナ列の各チャンネル

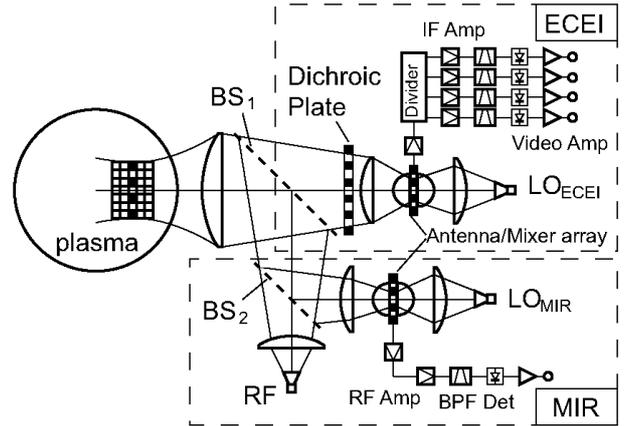


Fig. 7 Schematic diagram of microwave imaging system.

ルにそれぞれ必要である。LO はしばしば平面アンテナ列の裏側から光学的に入射する。これらはマイクロ波イメージングに共通である。

このようにプラズマのイメージング計測には、結像光学系と同時に集積化したアレイ検出器が不可欠である。以下、マイクロ波・ミリ波領域のイメージングアレイの重要な要素技術である、アンテナ、検出器、その他のデバイスについて記述する。

3.1 イメージングのためのマイクロ波アンテナ

イメージング計測に使用するアンテナに要求される性能としては、i) アレイ状の配列を容易にするため平面形状であること、ii) 回折限界の像を得るため寸法が半波長程度であること、iii) 隣接検出器間の相互結合 (クロストーク) が小さいこと等がある。マイクロ波・ミリ波において、その集積度および配列は以下のようにして決定される。

電磁波の波長を λ とし、主鏡 (対物レンズ) の口径を D 、レンズから像面までの距離を z 、像を形成する媒質の屈折率を η とすると、光学系の空間遮断周波数は $D\eta / 2\lambda z$ となる。これは分解能の表式 (14) に対応する。したがって、サンプリング定理より回折限界の振幅像を再生するための空間サンプリング間隔は

$$T_E = \lambda z / D\eta \tag{16}$$

となる。自乗検波器を用いてビデオ検出により強度像を形成する場合には、振幅像の 2 倍の空間周波数を含むので、強度像を再生するための空間サンプリング間隔は以下のようになる。

$$T_I = \lambda z / 2D\eta \tag{17}$$

(A) ボウタイアンテナ

ミリ波イメージング計測に初めて用いられたのが Fig. 8 に示すボウタイアンテナである。ボウタイアンテナは、形状が簡単のため設計・製作が容易である。アンテナインピーダンスは

$$Z = \sqrt{\frac{2\mu_0}{\epsilon + \epsilon_0}} \cdot \frac{K(k)}{K'(k)} \tag{18}$$

ただし、 μ_0 は真空中の透磁率、 ϵ および ϵ_0 はそれぞれ誘電

体基板中および真空中の誘電率, K は第一種完全楕円積分, K' は $K(k)$ の k についての微分, $k = \tan^2(\pi/8 - \theta/4)$, θ はボウタイの角度である. 例えば Fig. 8 のように基板が石英ガラス ($\epsilon = 4$) で $\theta = \pi/6$ の場合, $Z = 150 \Omega$ である. インピーダンスが誘電率と角度のみに依存するため, 極めて広帯域の特性を持つという特長を有している [15].

Fig. 9 は RTP および TEXTOR トカマクの ECE イメージング測定に使用されたアンテナアレイである. Fig. 8 とは金属の部分と切り抜き部分が逆になっているのでスロットボウタイと呼ばれている [16]. Fig. 10 は GAMMA 10 タンデムミラーの位相イメージング干渉計に使用されたボウタイアンテナの例で, 大きさ $38.1 \text{ mm} \times 38.1 \text{ mm}$, 厚さ 1 mm の石英基板上にフォトソグラフィにより 4×4 配列で形成され, 二次元イメージング計測に使用された [17].

ボウタイアンテナは電磁波の電場面と磁場面とで指向性が異なる上, サイドローブ (正面以外にある感度のピーク) が大きいなど指向性に問題があり, 回折限界にまで集積化した場合には検出器間のクロストークが避けられない.

(B) ダイポールアンテナ

ボウタイアンテナで問題となった指向性を改善するために考案されたのが, ダイポールアンテナを改良した八木宇

田アンテナやデュアルダイポールアンテナである. 八木宇田アンテナアレイの例を Fig. 11 に示す. 誘電体基板の表面に給電素子である半波長ダイポールアンテナを, 裏面に無給電素子である導波器を備えている. 両端に反共振回路 (トラップ) が装荷された共振ダイポールアンテナであるが, トラップの共振周波数をダイポールの共振周波数と一致させると十分大きな共振抵抗を持ち, 不要な放射がない. そのため, 半無限誘電体上の半波長ダイポールアンテナに近い指向性を実現している [18].

最近考案されたものに Fig. 12 に示されるデュアルダイポールアンテナがある. デュアルダイポールアンテナは, ボウタイアンテナと同様に広帯域特性を示し, しかも磁場面と電場面での指向性が対称で, サイドローブも小さいという特長があり, TEXTOR の ECEL/MIR システムで採用された [19].

(C) テーパーダスロットアンテナ

主として二次元アレイとして使用することを目的として考案されたのがテーパーダスロットアンテナ (Tapered slot antenna: TSA) である (Fig. 13). アンテナの特徴としては, 適当な集積化が可能であること, 半値ビーム幅が $10 - 20^\circ$ でイメージングシステムに適していること, 比較的広帯域特性を持ち, ヘテロダイン検波への適用も容易であることなどがあげられる. Fig. 13 左図がアンテナ 1 素子の拡大図で, 指向性, 利得の改善のため, 外側にコルゲート構造を有し, テーパー部分が Fermi-Dirac 関数で計算されているので Fermi アンテナともよばれる [20, 21]. 右図は, シンプルな TSA を使用した二次元アレイの例を示す. 一枚の基板上に 4 素子の一次元アレイを構成し, これを 4 層重ねることにより, 検出器間隔 $1.36 \lambda_0$ の 4×4 素子アレイを実現している. ここで λ_0 は受信マイクロ波の中心波長である.

3.2 イメージングのためのマイクロ波検出器

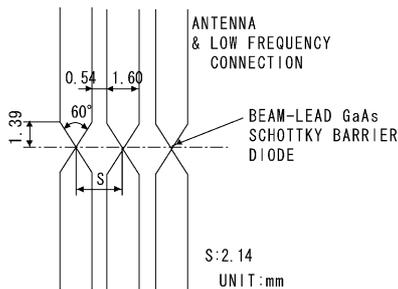


Fig. 8 Bowtie antenna array.

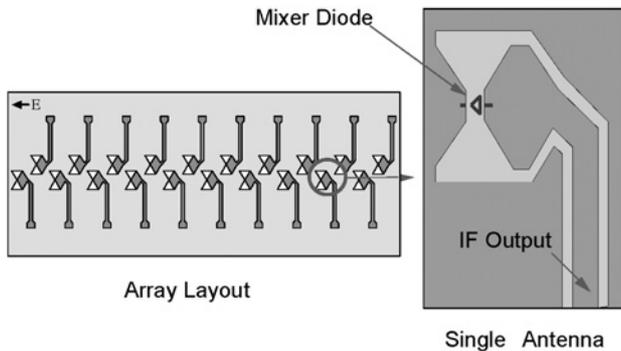


Fig. 9 Layout of a hybrid bowtie antenna array and magnification view of the element (from Ref. [16]).

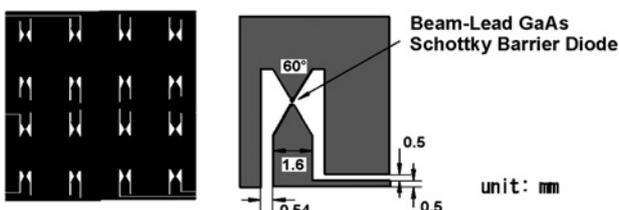


Fig. 10 Schematic of the 2D imaging array (from Ref. [17]).

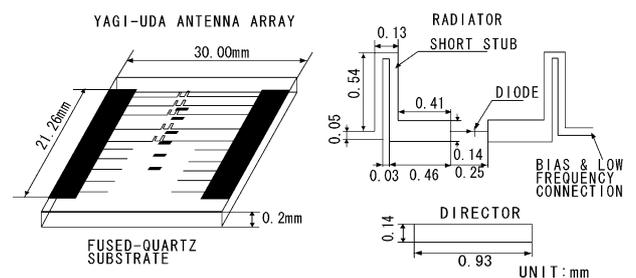


Fig. 11 Layout of Yagi-Uda antenna array and magnification view of the element (from Ref [18]).

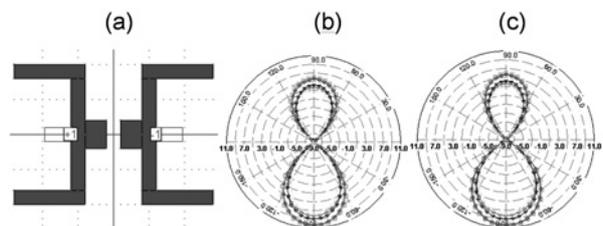


Fig. 12 (a) Dual-dipole antenna layout and corresponding (b) E-plane and (c) H-plane (from Ref. [19]).

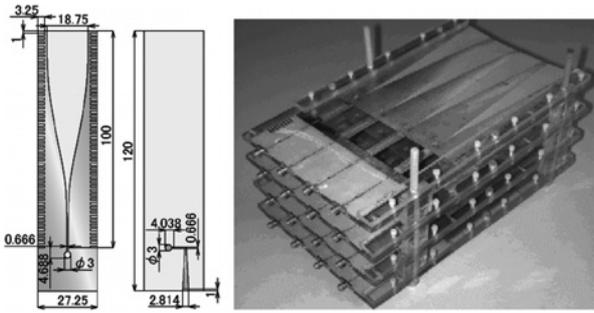


Fig. 13 Fermi antenna with corrugated structure (left, unit: mm), (from Ref. [20,21]), and 2D array of tapered slot antenna.

イメージング用検出器には、アレイアンテナにダイオードを接着するハイブリッド検出器、両者を一体化して製作するモノリシック検出器がある。

(A) ハイブリッド検出器

誘電体基板上に形成されたアレイアンテナの給電点に検出器を接着（ボンディング）したもので、検出器としては GaAs ショットキバリアダイオード (SBD) が用いられている。SBD は、応答速度が速くヘテロダイン検波用ミキサとして用いられた場合、中間周波数を 1 GHz 以上にとることも可能で、室温動作であることなどが特徴である。イメージング用には市販のビームリード形 SBD が多く用いられている。アンテナパターンの製作には、誘電体基板上にスパッタリングなどにより金属薄膜を形成したのち、フォトリソグラフィとエッチングを施す方法、あるいは、パターンにしたがって蒸着する方法などが用いられている。

(B) モノリシック検出器

ハイブリッド検出器では、アンテナと SBD 検出器の接着に高周波導電性エポキシやボンディングワイヤーを使用するため寄生インダクタンスが生じ、短ミリ波 (>100 GHz) 領域になると、アンテナと検出器の整合が劣化する場合がある。アンテナと SBD 検出器を基板上に一体化して製作するモノリシック検出器ではその影響は無視することができる。基板上に SBD を形成するためには、Si, GaAs, InP などの半導体材料を使用する必要がある。Fig. 14 左図に (株)テラテックにより製作された検出器のマスクパターンを示した[21-23]。上図が初期の検出器、下図が改良された検出器の例である。大きさはそれぞれ、4×2 mm, 2×2 mm である。受信アンテナ、周波数変換のための SBD、さらにはヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) アンプが GaAs 基板上に一体化している。ハイブリッド検出器では、通常検出器からの信号線の引き出しにはボンディングワイヤーを使用するため、高周波領域でインダクタンス成分が影響してくる。モノリシック検出器では無視することができるので広帯域の中間周波数がとれる。このモノリシック検出器のヘテロダイン特性を測定し、ハイブリッド検出器と比較した。Fig. 14 右図にその結果を示す。入射周波数 70-140 GHz にわたって良好な特性を示し、IF 特性も 1-10 GHz にわたってほぼ一様であり、ハイブリッド検出器と比較して約 1 桁以上の向上となっている [24]。

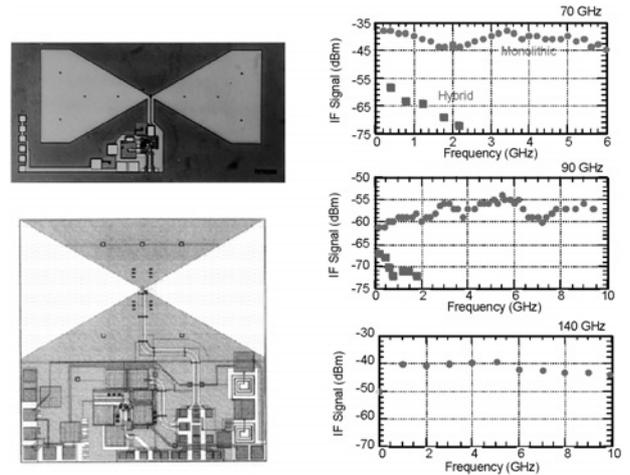


Fig. 14 Mask pattern of the monolithic detectors (left), and heterodyne characteristics (right) (from Ref. [22-24]).

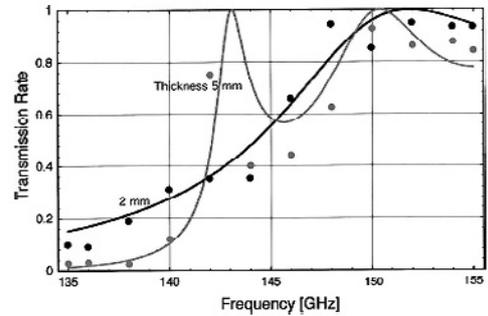


Fig. 15 Measured frequency response of dichroic plate with $d = 1.25$ mm (from Ref. [23]).

3.3 ダイクロイック板

マイクロ波領域でのダイクロイック板は無数の円形断面の孔があいた金属板である。各孔は円形導波管として働く。孔の直径を d とすると最低次の H_{11} モードの遮断周波数 f_c は、

$$f_c = j'_{11} c / \pi d \tag{19}$$

となる。ただし、 c は光速、 j'_{11} は 1 次微分した Bessel 関数 $J'_1(z)$ の 1 番目の零点 ($j'_{11} \sim 1.84$) である。Fig. 15 に核融合科学研究所で試作したダイクロイック板 ($d = 1.25$ mm) の周波数特性を示す [23]。実線は理論モデルである。

3.4 イメージングのためのマイクロ波回路

マイクロ波イメージングでは非常に多くのマイクロ波信号を処理するため、従来のマイクロ波コンポーネントを用いた場合、巨大なシステムとなる。そこでマイクロ波回路を小さくする努力が続けられている [26]。Fig. 16 は IF 信号を周波数ごとに分割して検波する回路の一例である。通常は、IF 信号を分割後異なる周波数の高周波フィルタを用いて増幅し、検波する。しかし 3-7 GHz の帯域ではプリント基板上に載る小さな高周波フィルタがない。そこで IF 信号を分割後異なる周波数の第二 LO と混合し、より低い周波数 (5-150 MHz) の第二 IF に変換する。この第二 IF を増幅後検波し、低周波信号にして、コンピュータに取り込む。

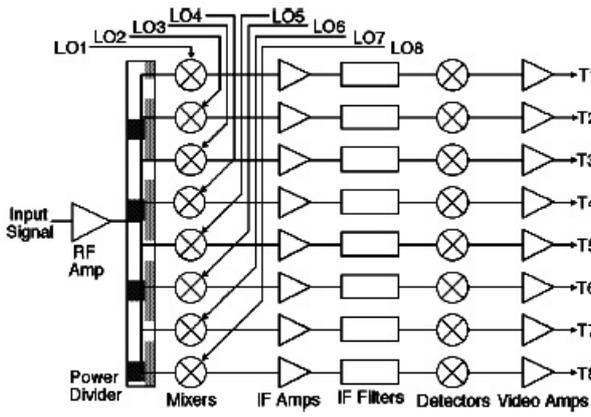


Fig. 16 Schematic layout of the ECEI double down (from Ref. [26]).

Fig. 17はIF信号を分割し、第二LOと混合する回路の写真である。第二LOは8種類あるので、右側のSMAから入力したIF信号はトランジスタで増幅後、ストリップ導波路技術を用いて8つに分割される。左側のSMAから入力した第二LOとバランスドミキサで混合し第二IFを生成する。第二LOの発振回路も別の基盤上に形成されている。周波数が8種類であるから発振回路基盤も8枚ある。発振器は低コストのVCOである。16チャンネルの検出器列からの信号を処理するために、これを4分割後、増幅し、さらに4分割し、16枚の分割・混合回路基盤に供給する。このように128チャンネルの回路であり、従来のマイクロ波回路では巨大で高価なシステムになってしまうところだが、汎用品を使っているため安価であり、基板化されているためすべてを1つのシールドボックスに納めることができる。

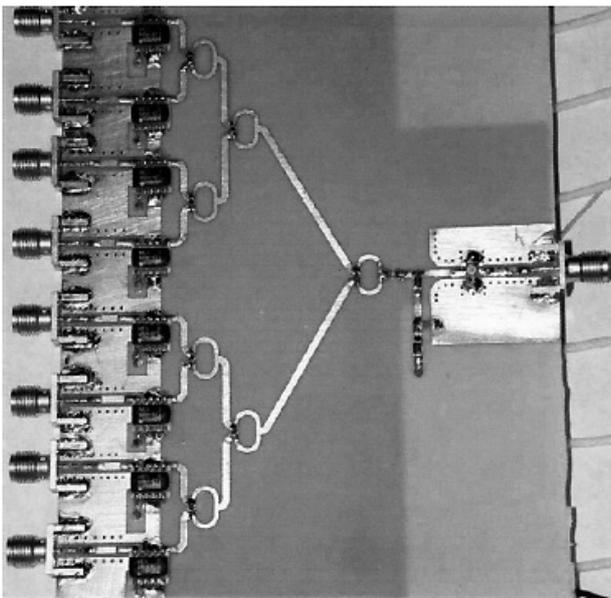


Fig. 17 Photograph of the eight way power divider/mixer circuit. LO power to each mixer is via SMA connectors on the left, while the RF signal comes from the right (from Ref.[26]).

4. マイクロ波イメージングシステムの適用例

4.1 位相イメージングの適用例

位相イメージング干渉計を GAMMA10に適用した例を Fig. 18 に示す。プローブビーム（周波数 70 GHz）はコルゲート（スカラー）ホーンを出たのち放物面鏡により拡大されプラズマに照射される。透過光は、楕円面鏡をもつ受光系により集光され、ビームスプリッタによりローカルビームとミックスされたのちボウタイアンテナ (Fig. 10) 上に位相像として描かれる。対向する測定窓間の距離は 3 m, 測定窓は 40 cm × 14 cm の熔融石英である。低周波の ECRH パワーの混入を防ぐため受信側測定窓にはダイクロミック板が設置されている。位相検出器としてはクオドラチャ方式を採用した。システムの空間分解はアンテナの間隔と光学系の倍率の積で評価され、垂直方向 2.7 cm, 水平方向 2.5 cm である。

本装置を GAMMA10 プラグ部プラズマに適用した結果の一例を Fig. 19 に示す。横軸が軸方向分布、縦軸が半径方

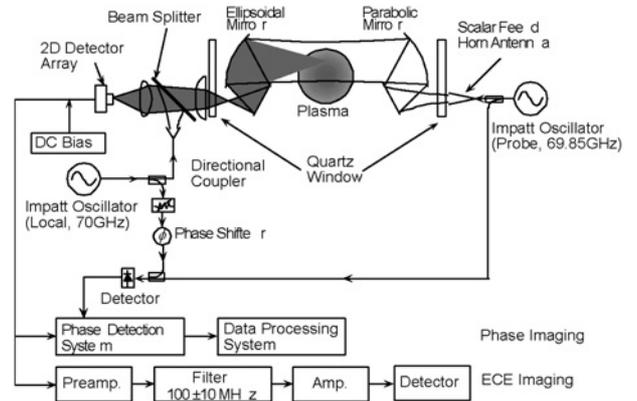


Fig. 18 Schematic of the 2D imaging system on GAMMA 10 (from Ref. [25]).

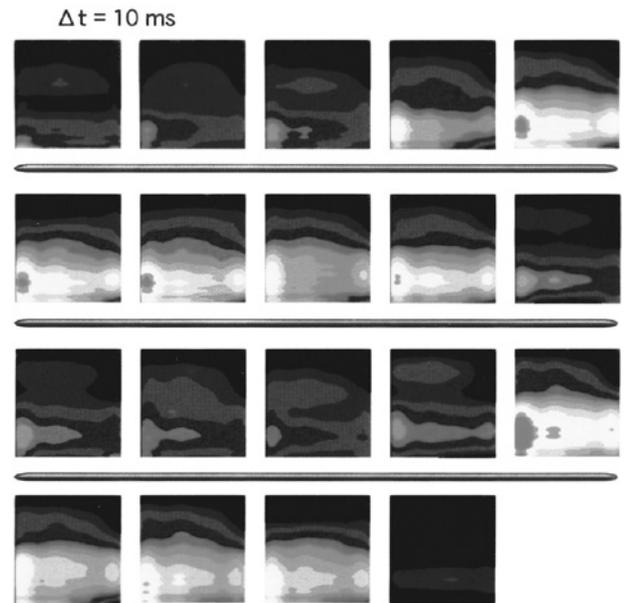


Fig. 19 The change of 2D line-density profiles (from Ref. [24]). The first frame is at $t = 50$ ms, and the frame separation is 10 ms.

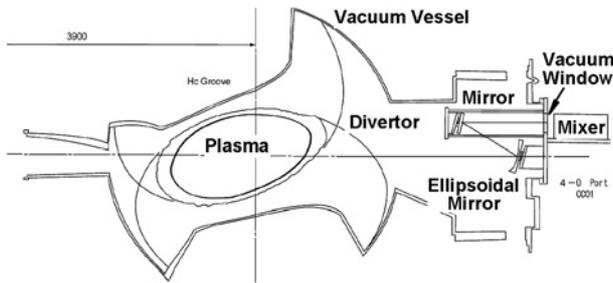


Fig. 20 Schematic of LHD-ECEI optical system (from Ref. [24]).

向分布である。1コマ目 ($t=50$ ms) でプラズマがスタートし、ビルドアップする。10コマ目 (140 ms) で電位形成のための ECRH が印加される電位が形成されると、電位形成位置の外側に設置されている測定径路上にプラズマがこなくなる。15コマ目 (190 ms) で ECRH が OFF となり、電位で閉じ込められていたプラズマが急激に流出する様子が見られる。

4.2 LHD における ECEI

中心周波数 140 GHz の ECEI 装置を LHD に適用した。Fig. 20 は、LHD 真空容器内に設置された光学系の概略である。回転楕円面の集光ミラー (40 cm × 30 cm) と平面ミラーを真空容器内に設置することにより、真空窓直径は実質 20 cm で済ませることができた。プラズマ中心に対応する位置に点光源を置いて測定したエアリー・パターンは理論結果と良く一致し、トロイダル方向 (X 軸)、ポロイダル方向 (Y 軸) いずれにおいても、中心から ±10 cm で有効なパターンを得ることができた。光学系の倍率も設計値と一致し 0.68 であった。検出器には、Fig. 14 に示されたモノリシック検出器を用いた。ECE 信号と LO 出力をミックスすることにより得られる IF 信号は HBT アンプおよびメインアンプ (周波数帯域 1–8 GHz, 全利得 80 dB) により増幅され、フィルターバンク (中心周波数 1–8 GHz, 帯域幅 300 MHz) により分割された後、周波数ごとに第 2 検波器により自乗検波される。

Fig. 21 は、1 個の検出器の IF チャンネル 4–7 GHz において得られた ECE 信号の時間変化である。LHD に既設のヘテロダイン受信機信号とよく一致していることが確かめられた。また、検出器間および各 IF チャンネル間の相互相関スペクトルを得ることに成功している。現状では IF チャンネル数の制限 (2 系統 4 周波数) のため、1 ショットで画像を再構成することは困難である。現在マイクロ波集積回路で IF システムを構成し、チャンネル数の拡張 (1 基板当たり 4 チャンネル, 10 基板) を行うべく準備中である。

4.3 TEXTOR における ECEI/MIR 複合システム

TEXTOR における ECEI と MIR との複合型マイクロ波イメージングシステムの構成を Fig. 22 に示す [26–29]。真空容器窓は高さ 40 cm, 幅 15 cm の BK 7 ガラスである。主鏡 (b) で集光したマイクロ波はビームスプリッター (c) で、ECEI システム (g) と MIR システム (d–e–f) の 2 つに分けられる。検出器の前にダイクロイック板を設置することで LO 周波数より高い周波数帯域を選択する。LO 周波数を 95–130 GHz の間を変えることで異なった場所を測定する。

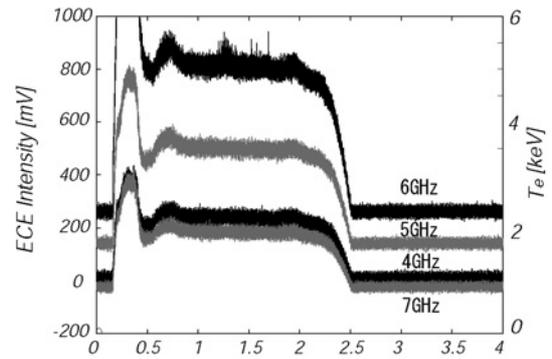


Fig. 21 Time evolution of the ECE signal (from Ref. [23]).

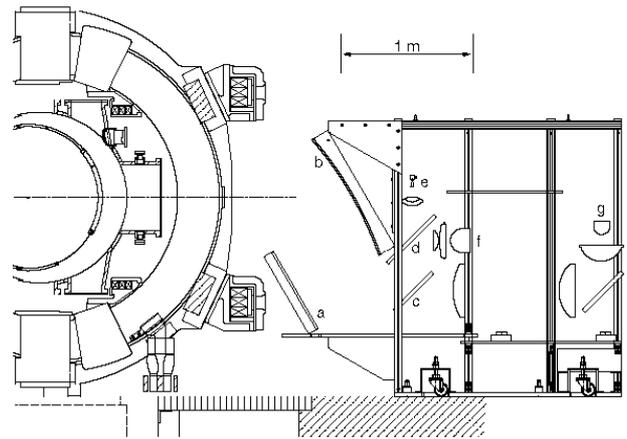


Fig. 22 TEXTOR poloidal cross section with the MIR/ECEI combined system. Visible in the diagram are the (a) toroidal and (b) poloidal focusing mirrors, (c) dichroic plate, (d) beam splitter, (e) probing beam source, (f) MIR detector array, and (g) ECEI detector array, as well as several focusing lenses (from Ref.[27]).

ECEI システムの検出器は 16 チャンネル 1 列のデュアルダイポールアンテナにビームリード型ショットキバリアダイオードをミキサとして用いている。広帯域バランを用いて平衡型アンテナ信号を非平衡型伝送路へと変換する。中間周波数として 3–7 GHz を 8 分割して測定する。TEXTOR プラズマの ECE について各チャンネルは垂直方向に 11 mm 刻み、水平方向に 8 mm 刻みで測定する。スポットサイズは垂直方向が 13 mm, 水平方向が 9 mm である。IF 信号はプリント基板上で周波数分解, 増幅, 検波する [26]。

その結果、剛体回転を仮定しなくてもプラズマの ECE 断層像を縦 16 分割, 奥行き 8 分割して測定することが可能となった。Fig. 23 に鋸歯状波崩壊時の ECE 断層像の時間変化を示す [29]。測定対象は、 $I_p = 400$ kA, $B_t = 2.3$ T, $n_{e0} = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_{e0} = 1$ keV の低ベータプラズマであり、プラズマ回転はおそい。Fig. 23 では黄色で示されたホットスポットが中心部から外に動いていき、実線で示された $q = 1$ 面に触れると $q = 1$ 面に沿うように拡がり、 $q = 1$ 面内部の熱が磁気再結合により吐き出される様子が見える。ホットスポットが横に伸びていくなど基本的には Fig. 1 に示した剛体回転を仮定した ECE 断層像と同じである。しかし、ECEI ではホットスポットの上下方向の変形や

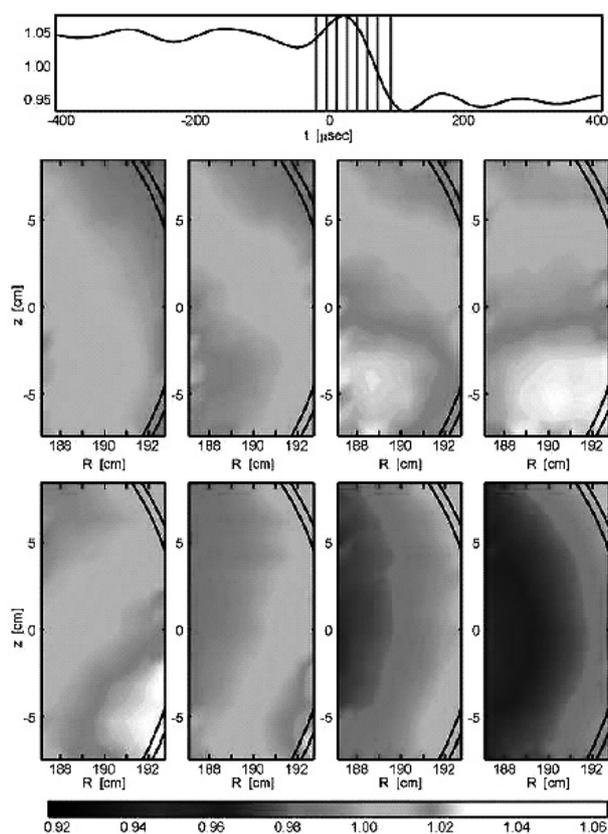


Fig. 23 Progression of images of a sawtooth crash. The inversion layer is estimated as the double black curve. The "hot spot" (yellow in the false-color scale) breaks through the inversion layer at the lower right corner of the field of view (Ref. [29]).

細かな構造をより鮮やかに表示している。ECEI が今後局所的な MHD 現象研究の有力な計測方法となるのは確実である。

MIR システムでは、プローブビーム (88 GHz) が 2 つのビームスプリッタ (d, c) を通って、主鏡 (b) によりプラズマに照射される。プローブビームはサイドローブのないきれいなガウスビームが望ましく、照射用アンテナ (e) にはコルゲートホーンアンテナを用いている。反射波は主鏡 (b) により集められ、2 つのビームスプリッタ (d, c) を通って、デュアルダイポールアンテナにビームリードダイオードを銀エポキシで接着した検出器アレイ (d) で受信される。システムは動き始めたばかりであり、本格的実験はこれからである [28]。

5. まとめと将来の展望

マイクロ波イメージングは局所的 MHD 不安定性や乱流構造の解明のための強力な画像計測法として大いに期待されている。そのために、結像光学系設計のためのシミュレーション技術やマイクロ波イメージセンサー、マイクロ波回路基板などの重要部品の開発が続けられている。プラズマ計測への応用が LHD や TEXTOR でなされており、TEXTOR では ECEI による鋸歯状波崩壊現象の観測で威力を発揮しつつある。また、密度揺動観測に適した MIR は、

ECEI の次のステップとして開発が進められている。

X 線 CT から始まった。プラズマの画像計測は現在すべての波長で行われている。最近、可視光領域の高速 TV 計測を用いてプラズマエッジにおいて重要な発見がなされている。さらに長波長のミリ波領域では本文で紹介したマイクロ波イメージングの開発が続けられており、成功すれば X 線 CT や可視光 TV に勝るとも劣らぬ重要な発見が期待できる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究 A (No.14208055) および特定領域研究 (No.16082205) および平成 14-16 年度科学技術振興調整費「産官学共同研究の効果的な推進」の援助を受けて遂行されている。

参考文献

- [1] M. Bornatici *et al.*, Nucl. Fusion **23**, 1153 (1983).
- [2] N. Bretz, Rev. Sci. Instrum. **68**, 2927 (1997).
- [3] Y. Nagayama *et al.*, Phys. Plasmas **3**, 1647 (1996).
- [4] Y. Nagayama, Rev. Sci. Instrum. **65**, 3415 (1994).
- [5] N. Bretz, Phys. Fluids B **4**, 2414 (1992).
- [6] 霜田光一: レーザー物理入門 (岩波書店, 東京, 1983).
- [7] K. Kogelnik and T. Li, Appl. Opt. **10**, 1550 (1966).
- [8] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press, Oxford, 1975).
- [9] E. Mazzucato, Nucl. Fusion **41**, 203 (2001).
- [10] T. Munsat *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **45**, 469 (2003).
- [11] H. Hojo, Y. Kurosawa and A. Mase, Rev. Sci. Instrum. **70**, 983 (1999).
- [12] H. Hojo, T. Uruta, A. Fukuchi and A. Mase, Rev. Sci. Instrum. **73**, 387 (2002).
- [13] M. Ignatenko, A. Mase, L. G. Bruskin, Y. Kogi and H. Hojo, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3810 (2004).
- [14] E. Mazzucato, Plasma Phys. Control. Fusion **46**, 1271 (2004).
- [15] D.B. Rutledge and M.S. Muha, IEEE Trans. Antennas Propagation AP-30, 535 (1982).
- [16] B. Deng *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 301 (2001).
- [17] A. Mase *et al.*, Fusion Eng. Des. **53**, 87 (2001).
- [18] K. Hattori *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **62**, 2857 (1991).
- [19] H. Park *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 4239 (2003).
- [20] 佐藤弘康, 新井直人, 我妻壽彦, 澤谷邦男, 水野皓司: 電子情報通信学会論文誌 (B) **J86-B**, 1851 (2003).
- [21] K. Hattori *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3843 (2004).
- [22] H. Matsuura *et al.*, Electronics Lett. **33**, 1800 (1997).
- [23] A. Mase, Y. Kogi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1445 (2003).
- [24] A. Mase *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 375 (2001).
- [25] N. Oyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 1003 (1999).
- [26] J. Wang *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3875 (2004).
- [27] T. Munsat *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1426 (2003).
- [28] H. Park *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3787 (2004).
- [29] T. Munsat *et al.*, "2-D Imaging of Electron Temperature in Tokamak Plasmas", PPPL-3979, Princeton University (2004).

用語解説

黒体放射 Blackbody radiation

入射した電磁波を全て吸収する物体からは、逆に、温度に応じて電磁波が放射される。温度 T_e の黒体からの角周波数 $\omega \sim \omega + d\omega$ の電磁波の放射強度が有名な Plank の公式

$$I_B(\omega) d\omega = \frac{\hbar\omega^3}{8\pi^3 c^3} \frac{d\omega}{\exp(\hbar\omega/T_e) - 1}$$

である。プラズマの電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測では、 $\hbar\omega \ll T_e$ であるので Raileigh-Jeans の式

$$I_B(\omega) d\omega = \frac{\omega^2}{8\pi^3 c^2} T_e d\omega$$

が良い近似で成り立つ。すなわち高温黒体からの放射強度は温度に比例する。

Oモード O mode

プラズマ中で電場が磁場と平行方向の電磁波を Oモードという。カットオフ周波数はプラズマ周波数 (ω_{pe}) と同じである。電子サイクロトロン周波数 (ω_{ce}) の Oモード波はプラズマに良く吸収されるので、加熱に用いられる。

Xモード X mode

プラズマ中で静磁場と直交する方向の電場を持つ電磁波を Xモードという。例えば右回り円偏光では、電磁波の電場の回転方向と磁力線を中心軸とした電子の回転方向とが同じであることからわかるように、Xモードは電子サイクロトロン運動と相互作用するので電子サイクロトロン運動の影響を強く受ける。カットオフ周波数 (右回り: ω_R , 左回り: ω_L) は

$$\omega_{L,R} = \left(\frac{\omega_{ce}^2}{4} + \omega_{pe}^2 \right)^{1/2} \pm \frac{\omega_{ce}}{2}$$

である。電子サイクロトロン周波数の2倍の周波数の Xモード波はプラズマに良く吸収され、カットオフ周波数も高いので、電子温度計測に用いられる。

光線追跡計算 Ray tracing

幾何光学での光線追跡計算は、光線が各面での屈折や反射の様子を3次元的にコンピュータで追跡計算するものである。光線が屈折率 n_1 の媒質から n_2 の媒質へ入射するときは、ベクトル化したスネルの法則: $n_1 \mathbf{e} \times \mathbf{q}_1 = n_2 \mathbf{e} \times \mathbf{q}_2$ (\mathbf{q}_1 は入射, \mathbf{q}_2 は出射方向ベクトル, \mathbf{e} は面の法線ベクトル) を、反射するときはベクトル化した反射の法則を用いて計算する。市販のソフト (ZEMAX 等) もある。

ヘテロダイン検波 Heterodyne detection

ヘテロダイン検波は高周波信号の最も普通の検波方法であり、テレビやラジオでも使用されている。受信したい高周波 (角周波数 ω_{RF}) に内蔵の局部発振器の高周波 (ω_{LO}) を

混合し、自乗検波すると中間周波 ($\omega_{IF} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$) が発生する。中間周波を増幅する際、雑音は全帯域に一樣に広がっているのに対し、信号の含まれている帯域は狭いので、バンドパスフィルタを通して信号帯域だけを増幅することで、高感度受信が可能となる。これを、異なった (ヘテロ) 周波数を混合するという意味で、ヘテロダイン検波という。

ダイポールアンテナ Dipole antenna

給電用ケーブルの先に同じ長さの2本の電線を付けたアンテナをダイポール (双極子) アンテナとよぶ。各電線の長さが1/4波長 (全長は半波長) の時共振し最大感度となる。インピーダンスは $73 + 43i \Omega$ (i は虚数) である。このアンテナは平衡型なので非平衡の同軸ケーブルと接続するときはバラン (Balanced to Unbalanced Transformer: 平衡不平衡変換器) が必要となる。

ショットキーバリアダイオード Schottky Barrier Diode

金属と半導体を接触させると半導体側に空乏層ができる。その中の電気ポテンシャルが半導体の深さ方向の距離について一次関数である場合をショットキーバリア、二次関数である場合をショットキーバリアとよぶ。ショットキーバリアを用いたダイオードをショットキーバリアダイオードとよぶ。バリアが低いので順電圧降下が低いこと、多数キャリアが寄与するのでスイッチング時間が速いという特長があり、検波器はもとよりスイッチングレギュレータにもよく使われている。

ビームリード型 Beam lead type

薄くて細いリボン状の端子を持ち、全体として薄く平らなトランジスタやダイオードのパッケージのことをビームリード型とよぶ。高周波用の半導体でよく使われる。

SMA コネクタ SMA connector

SMA コネクタとは、Sub-Miniature-type-A の略で、内径 1.27 mm, 外径 4.2 mm の同軸型のコネクタである。マイクロケーブル (外被が銅管の細い同軸ケーブル) に適合しているため、超高周波伝送や低雑音伝送に用いられる。使用周波数は DC~18 GHz と規定されている。

クオドラチャー位相検出 Quadrature phase detection

クオドラチャー位相検出とは直交した (quadrature) 2つの成分を利用して位相差 ϕ を検出する方法である。よく用いられる方法は、入力信号, $\sin(\omega t + \phi)$, について直交した2つの参照波信号, $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$, を混合し検波することであり、それぞれ $\cos \phi$ と $\sin \phi$ が得られる。たとえば $\cos \phi$ だけなら ϕ の符号はわからないが、直交した2つの成分があることにより、正確に位相差 ϕ を求めることができる。



なが やま よし お
長山好夫

1951年北海道北見市生まれ。北海道北見北斗高校卒業後上京し、1979年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。原研、東大、PPPL、筑波大を経て、現在核融合科学研究所教授。LHDの見学者から「核融合の実用化まであと何年かかりますか？」とよくきかれる。先日、「ケネディが大統領になってからアポロ11号が月着陸するまで8年です。原理実証ができて皆さんの応援があればすぐですよ。」と答えたら、「あれは米ソで競争したからです。仲良くITERを作るようではどうでしょうか？」と逆襲された。



ま せ あつし
間瀬 淳

1945年中国北京市生まれ。和歌山県新宮高校卒業後1973年名古屋大学大学院工学研究科博士課程了。名大、筑波大を経て、現在九州大学産学連携センター教授。5年前より、プラズマ計測の研究を通じて得られた経験をもとに産学共同研究に携わり、実用化、製品化をめざした仕事も進めている。昨年より大学院進学時に、核融合研究と同時にやってみたいと思っていた分野(生体情報計測)の研究を約35年たつてようやく始めることができ、新たな意欲を燃やしているところである。