



3. 先進計測技術・最近の進展

3.1 マイクロ波イメージング

長山好夫, 吉永智一¹⁾, 近木祐一郎²⁾

核融合科学研究所, 防衛大学校¹⁾, 福岡工業大学²⁾

(原稿受付: 2011年4月8日)

マイクロ波イメージング計測は局在化した揺動の強力な観測技術として期待されているが, イメージング検出器の開発の困難さから従来 Luhmann (UC Davis) グループの独擅場となっていた. 最近, 大型ヘリカル装置 (LHD) では二次元ホーンアンテナアレイを開発し, これを用いて世界初の三次元マイクロ波イメージング反射計 (MIR) と電子サイクロトロン放射イメージング (ECEI) の同時計測システムを構築し, プラズマ実験での使用を開始した. 本節では LHD でのマイクロ波イメージング計測の技術的側面とともに, LHD での MIR および Luhmann グループの ECEI の最新の実験成果について, 紹介する.

Keywords:

Plasma diagnostics, microwave, imaging, MIR, ECE, reflectometry, turbulence, instability

3.1.1 はじめに

磁気閉じ込めプラズマが放射するマイクロ波 (ECE) は, 周波数が磁場強度に比例し, 放射強度が電子温度に比例することから, 局所的な電子温度の時間変化の計測に用いられている. プラズマは電磁波を反射するがそのカットオフ周波数は電子密度と磁場に依存するので, マイクロ波反射計は高感度の電子密度の揺動計測器として使用されている. 高性能プラズマ閉じ込めの研究では, バルーンモード[1]や端部局在モード (ELM) のような局所的 MHD 不安定性や, 輸送で重要な役割を果たす乱流構造[2]などの局所的な揺動が重要となるが, その計測法としてマイクロ波イメージングが注目されている[3]. なぜなら ECE も反射マイクロ波も周波数から奥行き方向の位置がわかるので結像することで観測対象の三次元位置が確定できる, すなわち電子温度や電子密度の揺動の可視化が可能だからである.

磁場中のマイクロ波は電気ベクトルが磁場に平行な O モードと, 磁場に垂直な X モードとに分けられる. ECE は主に電子サイクロトロン周波数 (f_{ce}) の第二高調波 X モードを計測し, その周波数 (f_{ECE}) は

$$f_{ECE} [\text{GHz}] = 2f_{ce} = \frac{2eB}{2\pi m_e} \simeq 56B [\text{T}] \quad (1)$$

である. O モードのカットオフ周波数はプラズマ周波数 (f_{pe}) と同じであり, 電子密度 (n_e) のみに依存し

$$f_{pe} [\text{GHz}] = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} \simeq 28.4 (n_e [10^{19} \text{m}^{-3}])^{1/2} \quad (2)$$

である. X モードのカットオフ周波数 (f_R) は電子密度だけでなく磁場 (B) にも依存し,

$$f_R = \frac{1}{2} \{ f_{ce} + (f_{ce}^2 + 4f_{pe}^2)^{1/2} \} \quad (3)$$

である. X モードのカットオフ密度は式 (2), (3) より

$$n_{\text{cutoff}} = \frac{f_R^2 - f_{ce}^2}{806.4} \quad (4)$$

となる. 単位は電子密度 [10^{19}m^{-3}], 周波数 [GHz] である.

周波数の一例として, LHD の配位と電子密度分布についての ECE やカットオフ周波数の半径分布を図 1 に示す. 図 1 を見ると, 一つの周波数について, 外側から, ECE 周波数, 次に X モードのカットオフ周波数, 一番内側が O モードのカットオフ周波数となる. このことから, プラズマの一番外側のカットオフ周波数が X モードのカットオフ周波数であることがわかる. ECE はカットオフされずに外側で受信可能であることがわかる. LHD のマイクロ波イメージングでは同一光学系で ECE と X モードの反射を受信する. また, 図 1 に示すようにトムソン散乱で測定した電子密度分布とマイクロ波周波数のカットオフ密度の交点をとることで反射面の位置がわかる.

マイクロ波イメージング計測には, パッシブイメージングである ECE イメージング (ECEI) と, アクティブイメー

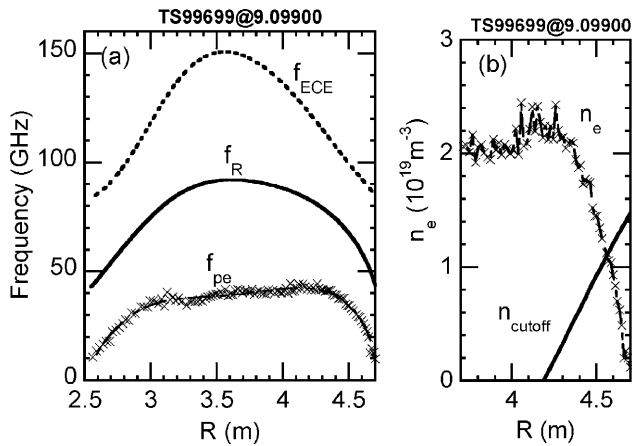


図1 LHD (shot99699, $R_{ax}=3.6$ m, $B_{ax}=2.75$ T, $t=9.1$ s) での, (a)ECE 周波数(f_{ECE}), Xモードカットオフ周波数(f_R), プラズマ周波数(f_{pe}), (b)電子密度, 60.41 GHz のカットオフ密度. 交点から反射面は $R=4.58$ m となる.

ジングであるマイクロ波イメージング反射計(MIR)とがある。電子は磁力線に沿って光速の数分の1といった非常に高速度で動き回っているため、一般に磁気面と等電子温度面は一致する。MHD不安定性は磁気面変動を引き起こすので電子温度が変動する。したがってECEIによりMHD不安定性を観測することができる。一方、ドリフト波のような静電不安定性は密度揺動を引き起こすので、MIRではMHD不安定性だけでなく静電不安定性も観測できる。マクロなMHD不安定性はヘリカル構造を持つのでその観測ではトロイダルモード数とポロイダルモード数の同定が重要である。ミクロな不安定性あるいは帯状流(Zonal Flow)などの乱流構造では磁気面に沿った波数成分だけでなく、半径方向の分布が重要となる。したがって、とくにMIRのような乱流観測をめざす場合は、三次元計測が重要となる。

本節ではLHDのマイクロ波イメージング計測システム

[4-6]を例にとり、マイクロ波イメージング技術について解説する。イメージング計測の問題点は、チャンネル数が多いことによる各検出器に対する感度、スペースおよびコストである。そこでコア技術であるイメージング検出器と周波数分離回路、位相検出回路についても述べる。また、最後にLuhmannグループのECEイメージングについても紹介する。

3.1.2 LHDにおけるマイクロ波イメージングシステム

LHDにおけるマイクロ波イメージングシステム概念図を図2に示す。MIRの場合、マイクロ波(RF)を照射光学系(M6, M7)で一度対物鏡M1の焦点に集光し、M1で平行光としてプラズマを照射する。反射波については、集光光学系(M1-M4)でプラズマの反射面の一点がイメージング検出器(HMA)の受光面の一点に結像する。実際は、対物鏡M1と検出器までの距離が意外に長く、M1が作る実像はBS1あたりにあり、それをもう一度検出器結像光学系(M3-M4)で検出器に結像する。イメージング検出器はヘテロダイン受信用ミキサである。局部発振(LO)波が検出器を一樣に照射するよう凹面鏡M5で検出器結像光学系(M3-M4)の焦点に集光し、イメージング検出器に平行光を照射する。LHDではFDTDシミュレーションを用いて光学設計しており[7]、その結果を図3に示す。照射波はプラズマの観測領域を一樣に照射し、プラズマの一点から出発した波はHMAの受信面に結像する。また、MIRではコヒーレントなマイクロ波を用いることから干渉が障害となるので、真空窓は 8° 傾けられ、光学系は鏡だけで結像している。

MIRでは複数の周波数を用いることで異なる反射面すなわちプラズマの半径方向の電子密度揺動分布を観測できる。LHDの4周波数発生装置では、4周波数(f_{RFj} , $j=1-4$)に位相検出用の基準信号(f_{REF})を加算し、さら

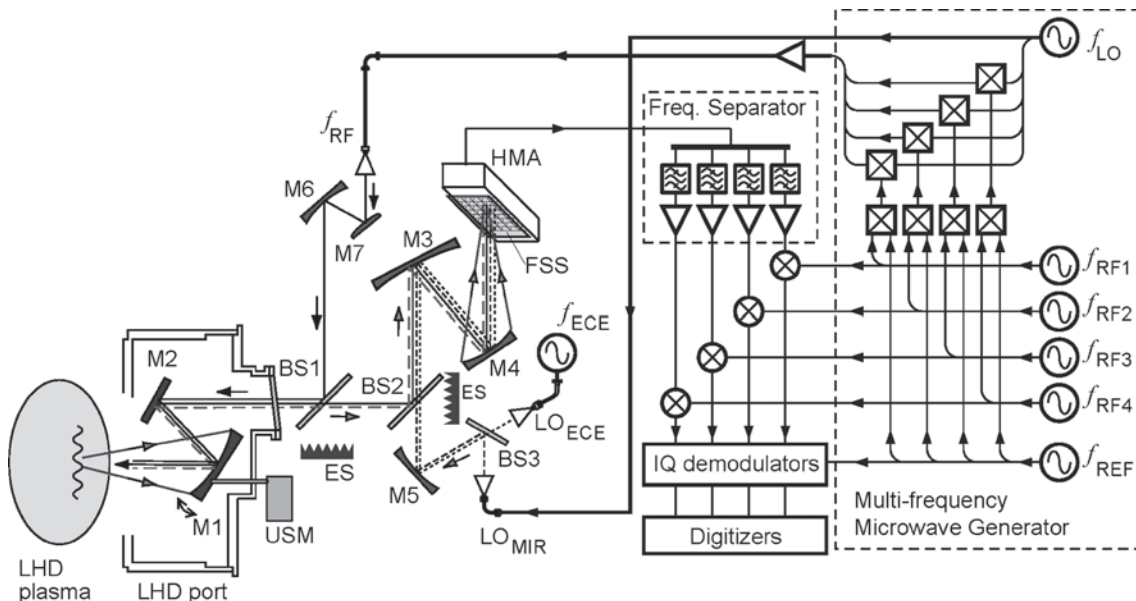


図2 LHDのマイクロ波イメージングシステム。

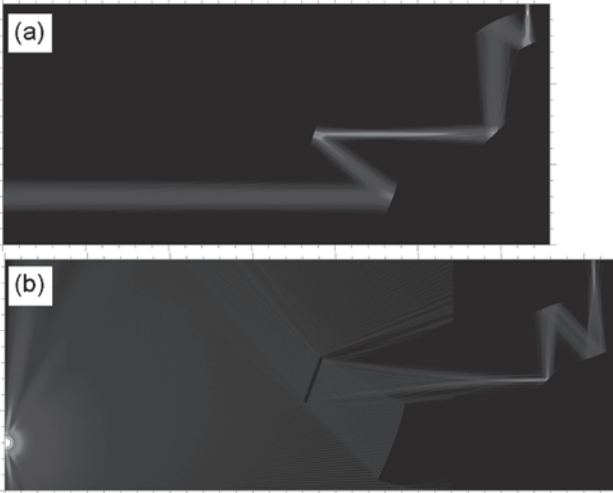


図3 (a) プラズマ照射波と(b)反射波のFDTDシミュレーション[6].

にLO波(f_{LO})を加算したあと増幅し、出力を25 dBmとしている。したがって照射マイクロ波の周波数は

$$f_{MIR} = f_{LO} + f_{RFj} + f_{REF}$$

となる。マイクロ波(角周波数: $\omega_{MIR} = 2\pi f_{MIR}$)をプラズマに照射すると、反射波はプラズマの反射面の振動(角周波数: ω_{pl} , 振幅: A , 位相: ϕ)で変調をうけるので、マイクロ波イメージング検出器が受信する反射波は

$$A \exp i(\omega_{MIR}t + \phi)$$

となる。マイクロ波イメージング検出器内では反射波とLO波(角周波数: $\omega_{LO} = 2\pi f_{LO}$)が混合されて、中間周波数(IF)信号(角周波数: $\omega_{IF} = 2\pi f_{IF}$),

$$A \exp i(\omega_{IF}t + \phi)$$

が出力される。IF信号の周波数は

$$f_{IF} = f_{MIR} - f_{LO} = f_{RFj} + f_{REF}$$

である。中間周波数を電子回路で扱える周波数帯にすることで、狭帯域増幅による感度向上が可能となる。IF信号を周波数分離後、各4周波数(f_{RFj})と混合することで、

$$f_{REF} = f_{IF} - f_{RFj}$$

と基準信号と同じ周波数となる。そこで基準信号と比較することで位相検出が可能となる。LHDでは直交復調器を用いて位相信号($I \sim \cos \phi$, $Q \sim \sin \phi$)を出力する。

3.1.3 マイクロ波イメージング検出器

LHDではマイクロ波イメージング用にミキサ内蔵ホーンアンテナアレイ(Horn Mixer Array: HMA)を開発した[8,9]。一組の一次元ホーンアンテナアレイの構造を図4に示す。これはホーンアンテナを2分割し、それらでミキサやIF回路を搭載したプリント基板(PCB)を挟むものである。導波管断面の内径はVバンドの規格品と同じ(1.9×3.8 mm)であり、導波管長は12 mmである。ホーンの開口部の口径は13×13 mm, ホーン長は15.5 mm, 開口角は

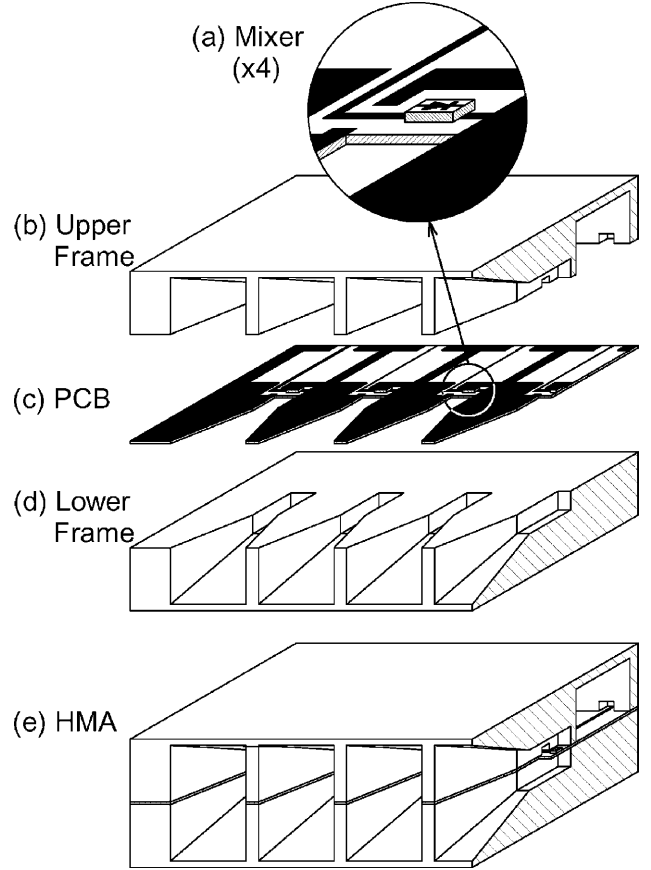


図4 ミキサ内蔵ホーンアンテナアレイ(HMA)の構造。

39°である。PCBは厚さ0.254 mmのテフロン基板であり、両側に9 μmの銅箔が貼られている。PCBは半割ホーンを持つ底板上にビス留めされており、IF回路が発生する熱は底板を通して放熱される。PCB回路パターンは電解エッチングで製作され、腐食防止のために金メッキが施される。図3(a)に示すように導波管内にミキサ用のビームリード型ショットキーバリアダイオードが入るようPCB回路は作られている。PCB上には、マイクロ波増幅集積回路(MMIC)も搭載されている。ミキサ用ダイオードには直流バイアス電流を流し、最適なミキサ動作が得られるようにしている。ホーンから信号マイクロ波とLO波を両方入力することで導波管内のショットキーバリアダイオードがミキサとなってIF信号を発生する。LHDで使用するVバンド(50~75 GHz) HMAは実測したところ50~110 GHzと広帯域であり、市販のホーンアンテナ+シングルエンドミキサと比べてホーン開口部の面積比程度の感度差となっている。

3.1.4 周波数分離回路と位相検出回路

HMA内で得られたIF信号の4周波数を分離するためにバンドパスフィルタを用いる。LHDではHMAのチャンネル数が35あるため、IF周波数分離回路基板は35枚必要であり、バンドパスフィルタの数は140個にもなる。そこで図5に示すようなプリント基板化したバンドパスフィルタを開発した。これはHMAのIF信号出力を流す50 Ωマイクロストリップラインにプリント基板の回路パターンで作成した。

んだバンドパスフィルタを並列接続し、特定周波数のみを取り出すものである[10]。周波数分離回路基板上では選択した周波数に各 RF 周波数を混合し、第 2 IF 信号 (110 MHz) を作る。

マイクロ波がプラズマで受けた変調の振幅を A 、位相を ϕ とすると、周波数分離回路基板から出力される信号は

$$A \exp i(\omega_{\text{REF}} t + \phi)$$

となる。LHD では、 $\omega_{\text{REF}}/2\pi = 110 \text{ MHz}$ である。信号 A 、 ϕ を取り出す検波回路と直交復調回路の概念図を図 6 に示す。回路はプリント基板化され、IF 選択のバンドパスフィルタとしてコンパクトな SAW フィルタを使用している。振幅検出には対数パワー検出器を使用しており、対物鏡の角度調整を厳密に行わなくてもデジタイザの入力として十分高い電圧の信号を出力できる。位相検出には信号と 90° 位相が異なる基準周波数 (110 MHz) との積をとることで I 信号 ($\cos \phi$ に対応) と Q 信号 ($\sin \phi$ に対応) を出力する直交復調器 IC を使用している。これらの信号は単一電源の低雑音 OP アンプでデジタイザの入力電圧に合わせて出力する。

3.1.5 ECE イメージング

ECE イメージングの光学系は図 2 に示すように、MIR と同一光学系を使用する。ただし、MIR とは LO 周波数が異なり、LO 周波数より高く広い周波数帯域を分割して測定する。ヘテロダイン受信では LO 周波数の高周波数側と低周波数側が同一 IF 周波数となるため区別がつかない。そこで高周波数側のみを選択するため HMA 前面にダイクロイック板を置く。LHD では LO 周波数を 95 GHz とし、ダイクロイックプレートのカットオフを 93 GHz とした。これは、直径 1.9 mm の孔を 2.1 mm ピッチで多数開けた 6 mm 厚のアルミ合金板である。ダイクロイック板は円形導波管

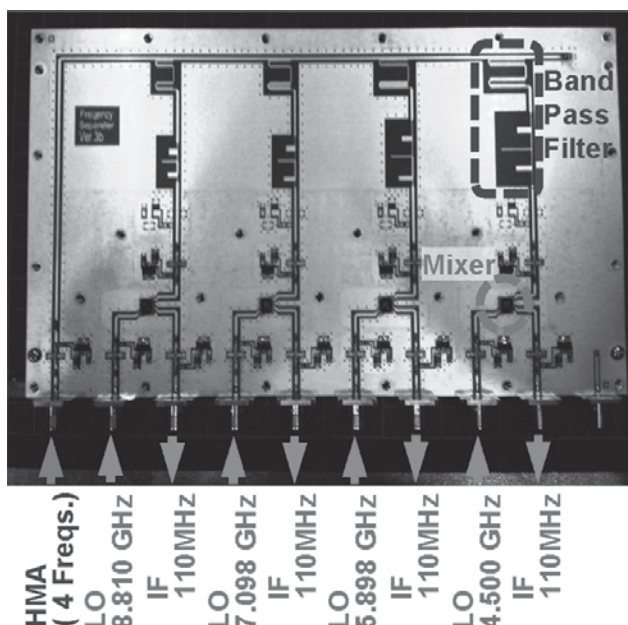


図 5 MIR 用周波数分離回路[6]。

の集合体でありハイパスフィルタとして働く。その低域カットオフ周波数は円形導波管と同じで、

$$f_c = \frac{1.841c}{2\pi a}$$

(c は光速: 299792458 m/s, a は孔の半径) で与えられ、 $a = 0.95 \text{ mm}$ では、 $f_c = 92.5 \text{ GHz}$ となる。また、カットオフ周波数近傍での遮断特性や通過領域での特性は孔のピッチや板厚に依存する[11]。このダイクロイック板を用いることで、LO 波 (95 GHz) は損失なしに透過できるが、IF 信号中では 97 GHz と区別がつかない 93 GHz 信号は -5 dB 以下になっている。

HMA で受信された ECE は 8 チャンネル周波数分離回路で周波数毎に分離され、検波される。バンドパスフィルタはテフロンプリント基板上の銅箔のエッチングパターンで生成し、銅箔には金メッキが施されている。バンドパスフィルタの直後にパワー検出器を置き、パワー検出する。ECE 信号は電子雑音を含むために検波したときプラズマがなくても直流オフセットがある。そこで LHD では ECE 信号を ADC でデジタル化し、プラズマ生成トリガーでメモリーに一時保存し、DAC でアナログ出力する。これは直流オフセットとほとんど同じはずであり、差動アンプを用いて ECE 信号から DAC 出力を引き算した上で増幅すると、プラズマからの放射 (ECE) 成分のみを大きく増幅できる。その後、デジタイザでデータ収集している。

3.1.6 MIR の実験例

マイクロ波イメージング計測システムにより計測した LHD のエッジプラズマの MIR 強度 (A) の二次元像の例を図 7 に示す。LHD のエッジプラズマではしばしば周波数が数 kHz 程度の多くの高調波を伴うモード (端部高調波モード: EHO) が発生する。この像はその EHO である。強度を表すカラーバーは 4 つの像で共通である。RF1, RF2, RF3, RF4 はそれぞれ、周波数 60.41, 61.81, 63.01, 64.61 GHz に対応する。RF2 と RF3 のトロイダル方向のチャンネル 4 とポロイダル方向のチャンネル 7 付近に磁力線に沿った細長いモード構造が現れている。図 6 では少しずつ異なる時刻の異なる周波数 (異なるプラズマ半径) の像を示している。RF1 が一番早い時刻であり、RF4 が一番遅い。RF1, RF2, RF3, RF4 はそれぞれ、 $R = 4.56, 4.55, 4.54, 4.525 \text{ m}$ に対応する。したがって、このモードは $R = 4.54$

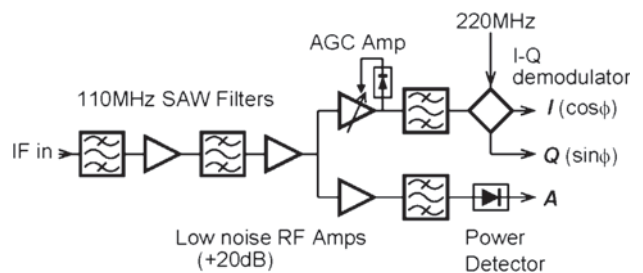


図 6 MIR 用の直交復調器 (I-Q デモジュレータ) とパワー検出器の模式図[6]。

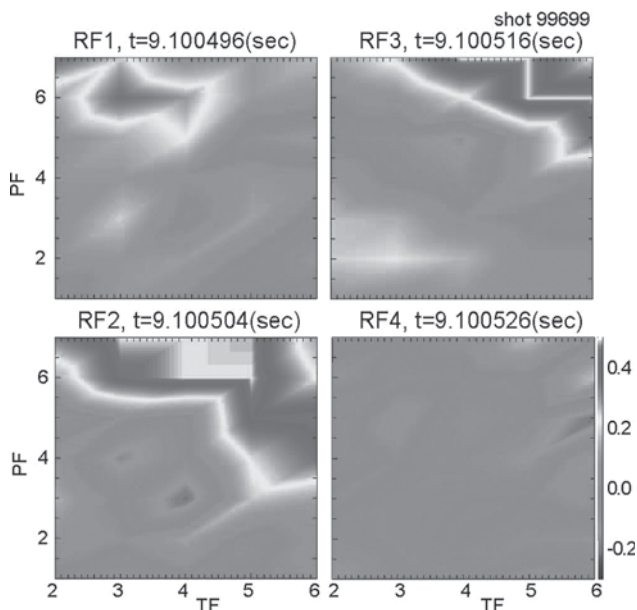


図7 LHDのエッジプラズマのMIR像[6].

～4.56 m に局在していることがわかる．モード構造の幅は2チャンネル分(4 cm)と大変細く，磁力線に沿って伸びている．このように，MIRによって非常に局在化したモードが可視化できるようになった．

3.1.7 Luhmann らのECE イメージング

ECE イメージングはLuhmannによって研究が始められ，1995年には単一周波数の一次元ボウタイアンテナアレイにプラスチックレンズでプラズマから放射されるマイクロ波を結像して，TEXT-Uトカマクで一次元ECEイメージング計測を行った[12]．次に高指向性・広帯域のデュアルダイポールアンテナと周波数分離回路を開発し[13]，TEXTORトカマクの鋸歯状波崩壊の二次元(断面)ECEイメージング計測を行った．その結果，TFTRトカマクプラズマの「悪い曲率側」において観測されていた局所的磁気再結合[14]が，「良い曲率側」でも発生することがわかり，「磁気再結合がなぜ局所的か」が注目されることになった[15, 16]．

ここではDIII-Dトカマクでの二次元(断面)ECEイメージングの例を示す[17]．図8に20chアンテナミキサーアレイの構造と写真を示す．これはプリント基板にエッチングで成形されたデュアルダイポールアンテナ上に1個ずつ小型の半球レンズを置き，ハーフミラーでRFとLOを混合してアンテナに入射し，アンテナ上のミキサでIF信号を生成する．ECEはダイクロイック板で高周波数側を選択している．図9に，2～18GHzの16ch周波数分離回路の模式図を示す．これはLHDでのECEイメージングで用いられたバンドパスフィルタアレイによる周波数分離回路とは異なり，VCOで発生した16周波数とをそれぞれ混合し，得られた第二中間周波数をローパスフィルタに通すことで周波数分離するものである．このECEイメージング装置を用いて撮像したDIII-Dトカマクプラズマ中の反転シア誘起アルベン固有モード(RSAE)の断面像を図10に示す．従来，ECE

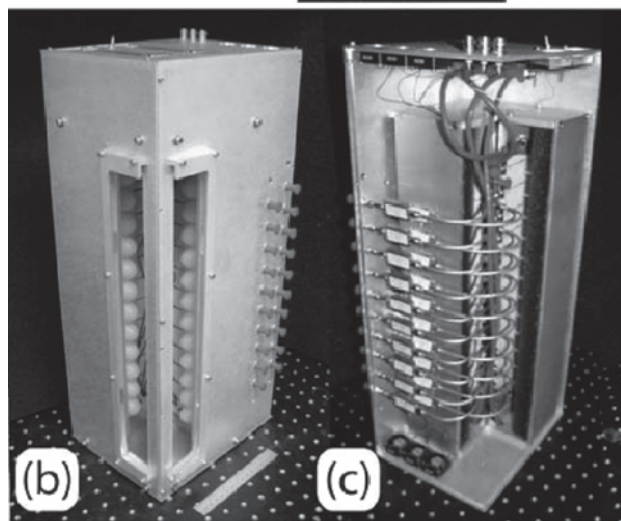
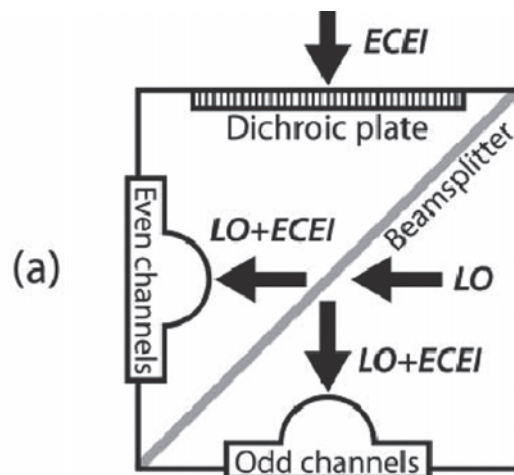


図8 Luhmann グループの一次元アンテナミキサーアレイの，(a)マイクロ波信号とLOの混合部分の模式図，(b)RF入力側からの写真，(c)IF出力側の写真[17]．

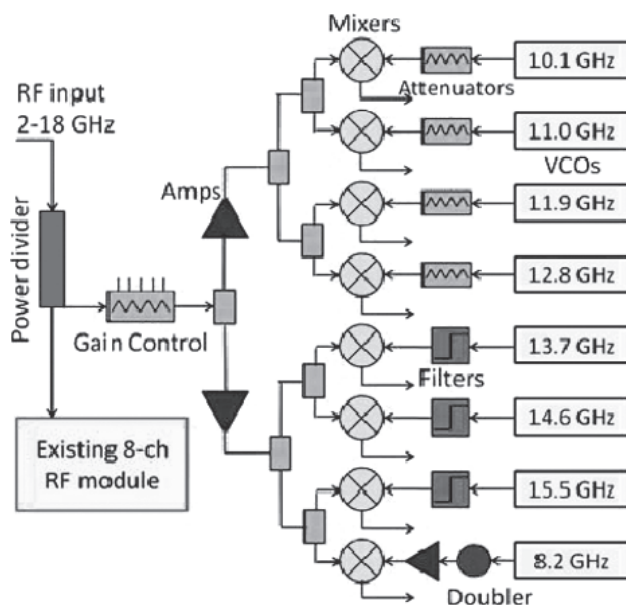


図9 Luhmann グループのECE用周波数分離回路[17]．

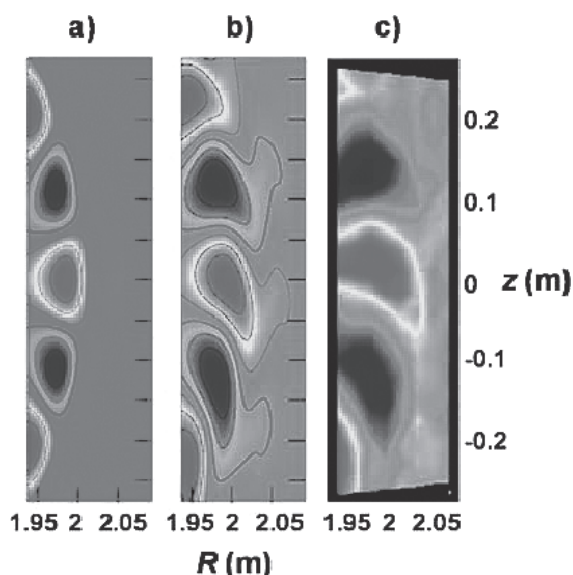


図10 DIII-D トカマクプラズマ中のアルベン固有モードの、(a)理想 MHD シミュレーション、(b)ジャイロ流体シミュレーション、(c)ECE イメージング ([17])。

ではアルベン固有モードのような弱い変動は計測できなかったが、この成果は、Luhmann グループの感度向上の努力が実を結んだ結果である。プラズマ物理としてもイメージングは明確に答えを与える。図10に理想 MHD コードの計算結果とジャイロ流体コードの計算結果を示すが、ECE 像からジャイロ流体コードの計算結果がより正しいことが一目瞭然である。

3.1.8 まとめ

マイクロ波イメージングは究極の揺動観測手段として長い間待ち望まれてきたが、最近ようやく実現した。20世紀末に Luhmann らが単一周波数の一次元ボウタイアンテナにプラスチックレンズで TEXT-U トカマクからの ECE を結像したのがその嚆矢である。Luhmann らは広帯域のデュアルダイポールアンテナと多周波数受信器を開発し、TEXTOR や DIII-D トカマクでプラズマ断面の二次元 ECE イメージング計測を行い、MHD 不安定性の強力な計測器として注目されている。日本では、核融合研、東工大、九大の共同研究で二次元ホーンアンテナアレイ、多周波数マイクロ波発振器、多周波数受信器などを開発し、LHD で三次元 MIR 実験および ECE イメージング実験を開始した。MIR は高感度の局所的密度揺動計測器であることは初期的な実験結果からも十分伺うことができる。今後、輸送障壁領域の測定や、三次元スペクトル解析を行うことで、

乱流に関する新たな発見が期待される。

参考文献

- [1] Y. Nagayama, S.A. Sabbagh, J. Manickam, E.D. Fredrickson, M. Bell, R.V. Budny, A. Cavallo, A.C. Janos, M.E. Mauel, K.M. McGuire, G.A. Navratil, G. Taylor and M. Yamada, Phys. Rev. Lett. **69**, 2376 (1992).
- [2] 伊藤早苗：プラズマ・核融合学会誌 **86**, 334 (2010).
- [3] 長山好夫, 間瀬 淳：プラズマ・核融合学会誌 **81**, 337 (2005).
- [4] T. Yoshinaga, Y. Nagayama, D. Kuwahara, H. Tsuchiya, S. Yamaguchi, Y. Kogi, S. Tsuji-Iio and A. Mase, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10D915 (2010).
- [5] D. Kuwahara, S. Tsuji-Iio, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, H. Tsuchiya, S. Sugito, S. Yamaguchi, Y. Kogi, K. Akaki and A. Mase, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10D919 (2010).
- [6] 長山好夫, 吉永智一, 桑原大介, 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 359 (2011).
- [7] T. Yoshinaga, D. Kuwahara, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, S. Yamaguchi, Y. Kogi, S. Tsuji-Iio, H. Hojo and A. Mase, Plasma Fusion Res. **5**, 030 (2010).
- [8] D. Kuwahara, S. Tsuji-Iio, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, Z. Shi, S. Yamaguchi, M. Sugito, Y. Kogi and A. Mase, J. Plasma Fusion Res. SERIES **8**, 649 (2009).
- [9] D. Kuwahara, S. Tsuji-Iio, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, Z. Shi, S. Yamaguchi, M. Sugito, Y. Kogi and A. Mase, J. Plasma Fusion Res. SERIES **9**, 125 (2010).
- [10] Y. Kogi, T. Sakoda, A. Mase, N. Ito, Y. Yokota, S. Yamaguchi, Y. Nagayama, S.H. Jeong, M. Kwon and K. Kawahata, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10F115 (2008).
- [11] C.C. Chen, IEEE Trans. MTT-21, **1** (1973).
- [12] R.P. Hsia, W.R. Geck, S. Cheng, W.-M. Zhang, C.W. Domier and N.C. Luhmann, Rev. Sci. Instrum. **66**, 834 (1995).
- [13] T. Munsat, E. Mazzucato, H. Park, B.H. Deng, C.W. Domier, N.C. Luhmann, J. Wang, Z.G. Xia, A.J.H. Donne and M. van de Pol, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1426 (2003).
- [14] Y. Nagayama, M. Yamada, W. Park, E.D. Fredrickson, A.C. Janos, K.M. McGuire and G. Taylor, Phys. Plasmas **3**, 1647 (1996).
- [15] H. Park, E. Mazzucato, T. Munsat, C.W. Domier, M. Johnson, N.C. Luhmann, J. Wang, Z. Xia, I.G.J. Classen, A.J.H. Donne and M.J. van de Pol, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3787 (2004).
- [16] H.K. Park, A.J.H. Donne, N.C. Luhmann, Jr., I.G.J. Classen, C.W. Domier, E. Mazzucato, T. Munsat, M.J. van de Pol, Z. Xia and TEXTOR Team, Phys. Rev. Lett. **96**, 195004 (2006).
- [17] N.C. Luhmann *et al.*, submitted to Plasma Fusion Res. (2011).