

GAMMA10 セントラル部におけるマイクロ波干渉計の多チャンネル化

嶋頼子

筑波大学プラズマ研究センター

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

プラズマ研究センターでは磁場によるプラズマ閉じ込め装置 GAMMA10 によりプラズマ閉じ込めの実験を行っている。磁場により閉じ込められたプラズマの密度分布を計測する為、セントラル部においては可動式のマイクロ波干渉計を用いた密度分布計測が行われている。現在のシステムでは加熱条件を固定した平均 10 ショット程度のデータが必要となる。半径方向に測定ポートを複数設置する干渉計の多チャンネル化を行うと 1 ショットで電子密度分布を求められるようになる。測定精度が上がるとともに、半径方向の局所的な揺動計測にもつながりプラズマ閉じ込めの改善に役立つ情報が得られる。今回は、干渉計の多チャンネル化に向けた設計と設置について報告する。

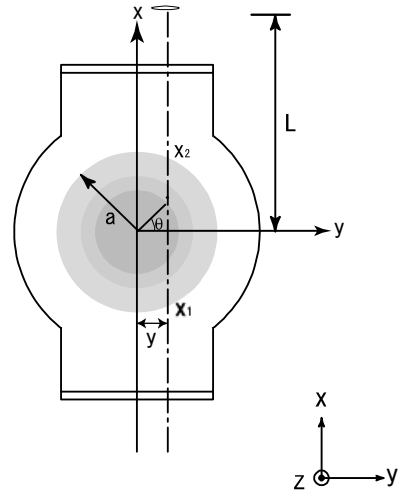


図 2. プラズマの伝搬

1. 電子密度計測

1.1 干渉計

プラズマの電子密度を測定する方法に、マイクロ波をプラズマ内部に透過させてその位相の変化を計測する干渉法がある。マイクロ波を用いることの利点は、プラズマに非接触でプラズマの内部を乱すことなく測定できる点である。プラズマ研究センターでも密度計測には干渉計を使用している。特にアップコンバータを使用したヘテロダイン型干渉計^[1]の導入を進めている。図 1 に干渉計の概念図を示す。プラズマ中を伝搬した透過波とプラズマ中を伝搬しない参照波との位相差から伝搬経路の密度の積分値を算出する。

図 2 は GAMMA10 の真空容器の全体図とセントラル部の断面を示している。プラズマ断面の中心から距離 y だけ離れたところに x 軸に平行にマイクロ波を入射させる。 X_1 から X_2 に電磁波がプラズマ中を伝搬したことによる位相の変化量^[2] $\phi(y)$ は、

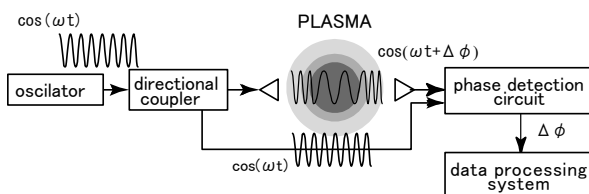


図 1. 干渉計の概念

$$\phi(y) = \int_{x_1}^{x_2} (k_0 - k_p) dx = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{x_1}^{x_2} (1 - N) dx \quad (1)$$

とあらわされる。ただし、 k_0 は真空中の波数、 k_p はプラズマ中の波数である。入射電磁波の電場が外部磁場と平行 (O-mode) に入射した場合の屈折率は

$$N = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2(r)}{\omega^2} \right)^{1/2} = \left(1 - \frac{n_e(r)}{n_c} \right)^{1/2} \quad (2)$$

で与えられる。ただし $\omega_{pe}/2\pi$ は電子プラズマ周波数、 $\omega/2\pi$ は入射波の周波数、 n_e は x の位置での電子密度、 $n_c = m_e \epsilon_0 \omega^2 / e^2$ は屈折率が 0 となるときの密度でカットオフ密度と呼ばれている。ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 m_e は電子の質量、 e は電子の電荷である。プラズマの密度が入射波に対するカットオフ密度よりも十分小さいとき、 $\phi(y)$ は次式のようにになる。

$$\phi(y) \cong \frac{k_0}{2n_c} \int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx \quad (3)$$

$\int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx$ は電子密度を伝搬経路で積分したものと

で線密度という。位相差は線密度に比例する。ヘテロダイン型干渉計では $\cos \phi(y), \sin \phi(y)$ が得られ、この 2 つの値から $\phi(y)$ を求め、線密度を計算することができる。

また、(3)式は

$$\begin{aligned} \phi(y) &= \frac{\pi}{\lambda n_c} \int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx \\ &\cong \frac{2\pi}{\lambda n_c} \int_x^a n_e(r) \frac{1}{\sqrt{(r^2 - y^2)}} r dr \quad r > x \quad (4) \end{aligned}$$

と変形でき、 $n_e(r)$ が軸対称であるとき、アーベル変換により $\phi(y)$ から $n_e(r)$ がもとまる。

$$n_e(r) \cong \frac{-\lambda n_c}{\pi^2} \int_r^a \frac{d\phi}{dy} \frac{1}{\sqrt{(y^2 - r^2)}} dy \quad y > r \quad (5)$$

(5)式からもわかるように、線密度の半径方向の分布から電子密度の分布を求めることができる。

1.2 GAMMA10 における電子密度計測

GAMMA10 は全長 2.7メートルの直線型の実験装置で、線密度 (NL) を計測する為に現在 8 箇所干渉計が設置してある。このうち、セントラル部 ($z=60[\text{cm}]$) に設置してあるものが、ラックアンドピニオン式で真空容器内の上下に設置したホーンが y 方向に可動になっている。プラズマの加熱には、マイクロ波加熱や高周波加熱など様々な加熱が用いられているが分布計測を行う際にはこれらの加熱の条

件を一定に保ちショットごとに手動でホーンを動かして測定を行っている。通常、 $y=-9\text{cm} \sim +15\text{cm}$ の間で 10 ショットを使いホーンを移動させて線密度の分布を計測している。

図 3 に線密度の分布計測結果とそこから計算した電子密度の分布を示す。(a) が実測したデータである。 $y=0,3,6,9,12,15,-3,-6,-9$ の 9 点の線密度を計測した。(b) は 10ms ごとに、測定位置に対するプラズマの線密度を描いたものである。真空容器の中心から遠ざかるほど、線密度が低くなっている。(c) はある時刻 (195ms) の線密度の分布である。線密度の分布をとり、データを補間し、8 次の偶関数で近似する。横軸はプラズマの半径である。プラズマの中心が真空容器の中心とずれるが、その量は r_0 で表される。ans1 ~ ans5 は関数の係数で ans1 がプラズマ中心の値を与える。(d) は得られた線密度の分布関数をアーベル変換し密度分布を求めたものである。

電子密度分布を計測することにより、電子線密度では判断の付かないプラズマの太さやプラズマの消滅の原因の究明を行うことができる。しかしながらプラズマを同じ状態で 10 ショット保つことは変化の大きいプラズマの場合難しく、うまく分布計測ができないこともある。これを多チャンネル化することにより、1 ショットで分布計測ができるようになれば、プラズマの密度分布が常時出せると共に、局所的な揺動も解析することができるようになる。

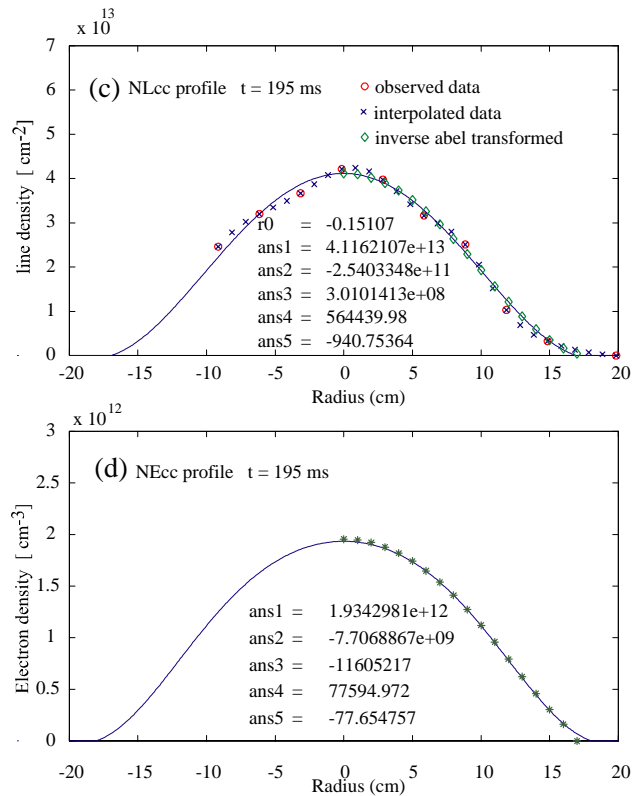
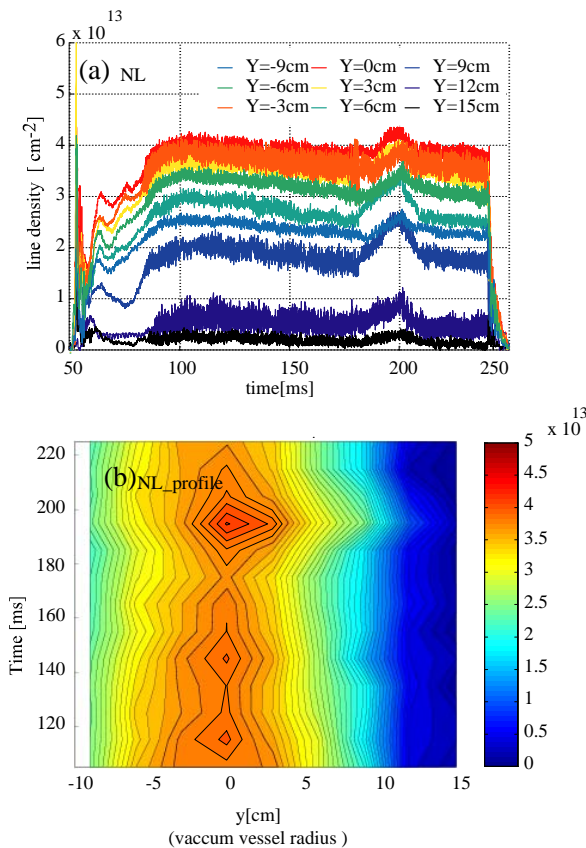


図 3. 線密度の分布計測

2. 多チャンネル干渉計の設計

2.1 システム

今回の多チャンネル干渉計はヘテロダイン方式で設計を行った。予算の都合で今年度3チャンネルを設置し、来年度に6チャンネルに増設する予定となった。チャンネル数を増やす場合には基本的にディテクターとホーンの増設だけですむ。干渉計に使用する発振器は現在半導体を用いた発振器が主流になっている。プラズマ研究センターでも、クライストロン発振器から GUNN ダイオード発振器、IMPATT ダイオード発振器へと変えてきた。干渉計の多チャンネル化の場合には高出力の発振器が必要となる。プラズマ中をマイクロ波が伝搬した際の電力の損失は伝送路での損失を含み他部での計測結果から約20dBm と考え発振器の出力は1W とした。出力の高い発振器はIMPATT 発振器であるが、現在使用しているIMPATT 発振器が設置場所によってはプラズマ生成の為の高周波加熱の影響を受けることがわかっており、セントラル部でどの程度の影響があるか調べる必要があった。そこで、GAMMA10 実験装置の様々な場所で発振器にのるノイズの測定を行った。その結果セントラル部での実験中の発振器への影響は無視できる程度とわかった。

2.2 設置

ホーンの位置はセントラル部 $z=0\text{cm}$ で、上下にホーンを取り付ける。セントラル部の上・下部には楕円のポートがあり、そこに y 方向に6ポート設置する設計である。現在設置してあるセントラル部の干渉計は $z=60\text{cm}$ であり、二つの干渉計を利用し、より詳細な分布計測も可能になる。また、セントラル部には様々な計測器があるため、専用の架台を用意することにした。全体の設計図を図4に示す。

プラズマは真空容器内に磁場により閉じ込められる。真空容器の内半径は50cmである。プラズマの中心からホーンまでの距離は650mm。発振器は本体より1400mm程離れたところ、高さ約250cmに設置する。発振器の出力は伝送損失を考えオーバーサイズ (x -band) の導波管で本体近くまで運ぶ。GAMMA10 本体の近くで方向性結合器によりプラズマを透過する透過波と、プラズマを透過させない参照波とにわけられる。透過波は上部のポートからプラズマに入射する。ホーンは6cm間隔で設置することになる。中心軸上にビームを収束させる為にテフロンレンズを設計し送信側のホーンに取り付けることとした。

透過波と参照波との合成された出力は検波器によって得られる。一つの発振器の出力を6つに分割することからパワーの減衰が懸念される為、なるべく伝送経路は短くするために検波器も本体近くに設置した。

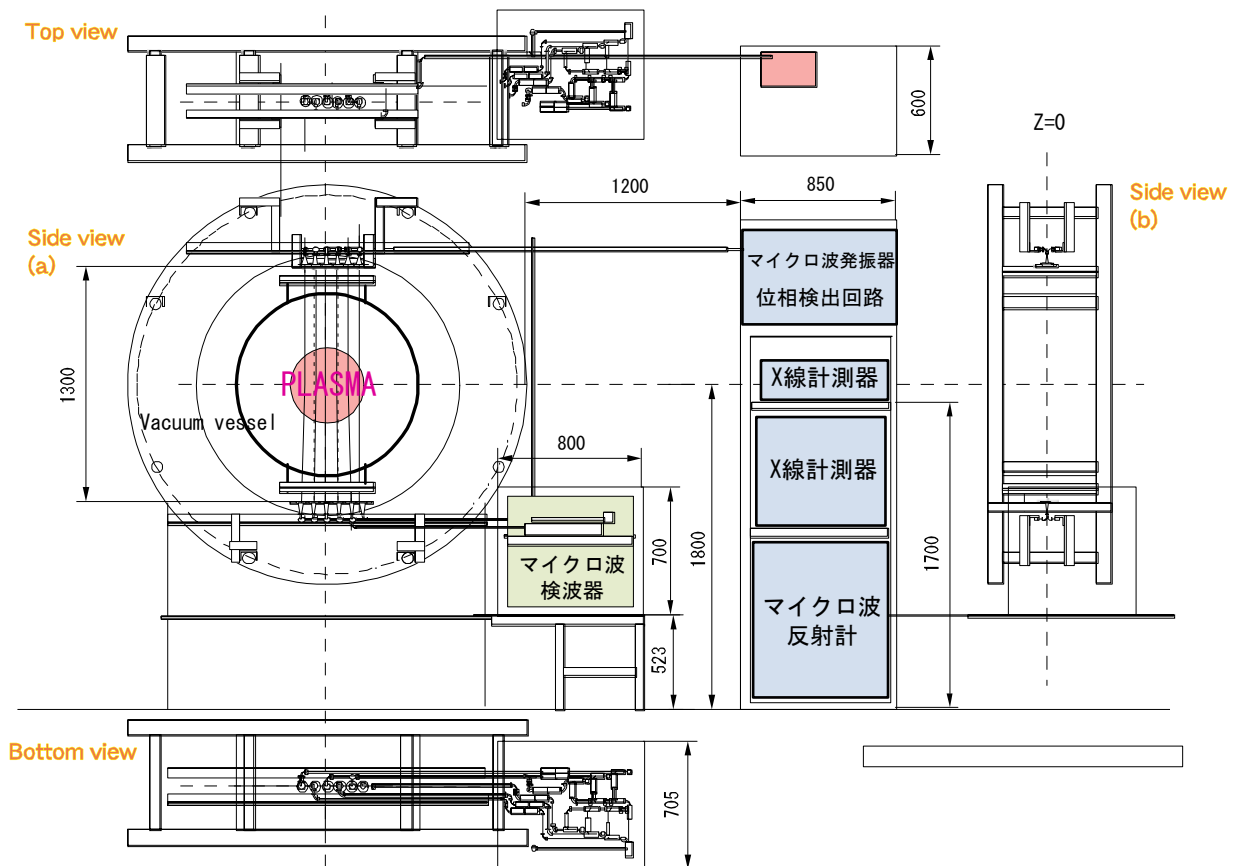


図4. 多チャンネルマイクロ波干渉計全体図

3. 稼働結果

レンズの製作が間に合わなかったため、とりあえず、システムの検証として1チャンネル($y=0$)で干渉計を設置した。測定結果を図5に示す。同時に $z=60\text{cm}$ ($y=0$) に設置してある干渉計でも線密度の計測を行った。図5に得られたデータを示す。(b),(d)が干渉計の出力である。赤線と青線がそれぞれ $\cos\phi(y)$, $\sin\phi(y)$ と対応する。その2出力の偏角求め、線密度を計算する。得られた線密度を(a),(c)に示す。(b),(d)の内側のリサージュは、干渉計の2出力をx軸、y軸にプロットしたものである。リサージュが円形を示していることから、計測が成功したことがわかる。しかし、本来セントラル部中心付近ではz方向には均一なプラズマが作られているはずだが、 $z=0\text{cm}$ に設置した干渉計が約10%小さい値を示している。これは、立体回路の設置の際、ホーンの真空容器の中心 ($y=0$) への合わせが仮固定だったため、ホーンが中心よりわずかにずれていた可能性が考えられる。ただ、本システムが加熱系の影響を受けないことが確認できた。

謝辞

本報告書を作成するに当たり、ご協力ご助言頂いた板倉昭慶先生、吉川正志先生、またマイクロ波グループの藤原君に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 嶋 頼子. ヘテロダイン型干渉計の製作と GAMMA10 への適用, 筑波大学技術報告 (2000) 29-34.
- [2] 間瀬 淳. プラズマの計測法 2. 電磁波によるプラズマ診断, 核融合研究 第52巻第2号 (1984) 129-162.

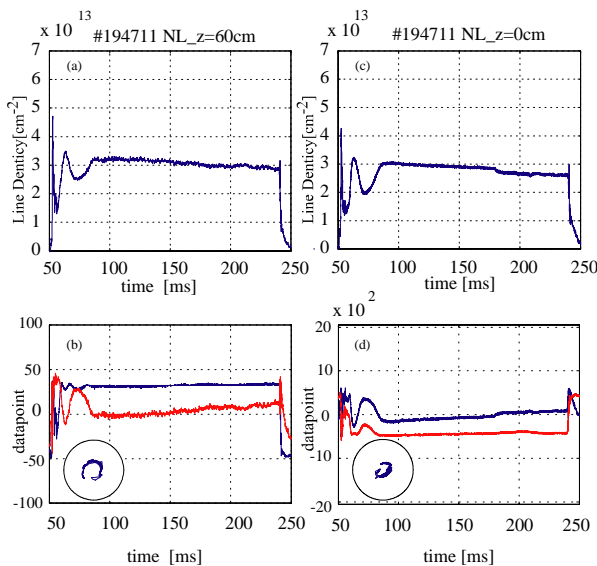


図5. 実測されたデータ

4. まとめ

電子密度分布の計測に向けて干渉計の多チャンネル化を進めている。予算の関係等もみながら6チャンネル全部の設置は来年度となるが、1チャンネルでの計測が問題ないことが確認されたので、レンズの製作を行い来年度は6チャンネルにして稼働させる予定である。