マイクロ波干渉計による定常プラズマ の密度測定 (I) 移相量の精密測定

桑原千代・松浦清剛・宮原 昭

(昭和 47 年 1 月 31 日受理)

§ 1. 緒 言

プラズマの電子密度をマイクロ波の透過波の移相量から求めるマイクロ波干渉計による測定は、被測定プラズマを乱さないと云う大きな利点をもつので、プラズマの空間分布が分かっている場合は、プラズマ全体の総合的情報しかえられない欠点をもつにもかかわらず広く用いられている。著者らも QP プラズマの流れにそった電子密度の分布を測定するために多チャンネルのマイクロ波干渉計¹⁾を用いている。この場合、電子密度が流れにそって 10^{10} から 10^{12} 個/cm³ 程度まで変化するので使用マイクロ波は比較的波長の長い K バンド (25 GHz) を用いたが、それでも密度の低い領域を測定する場合には少ない移相量を測定することになる。そこで、従来等閑視していた立体回路の不整合などによる影響を再検討する必要にせまられた。

また、QP プラズマではプラズマ柱の直径が使用マイクロ波の波長より大巾には大きくないので、受信アンテナに、プラズマを透過せぬマイクロ波も廻折によって受信されるのでその影響についても検討しなければならなかった。

従って、論文を I, II に分けて I においてはもっぱら立体回路の不整合による移相量測定の誤差について述べ、II においてはプラズマ直径が段々小さくなり slab モデルが成り立たないような場合の取扱いについて論ずる。なお、これらの解析は位相差の検出方法などを顧慮すれば、過渡プラ

* Density Measurement of Steady Plasma with Microwave Interferometer (I)
Precise Phase Shift Measurement

* Chiyo Kuwahara, Kiyotake Matsuura, Akira Miyahara
Institute of Plasma Physics, Nagoya University

ズマについても一般性をそこなわずに通用する。

第1図に著者らが使用した多チャンネル干渉計の1チャンネル分を示す。これはごく典型的な回路で、マジックTの第3端子に位相の基準となるマイクロ波を、また第4端子にはプラズマを透過してきたマイクロ波を入れ、それらをマジックTで分岐して、第1, 2端子に結合してある検波器で平衡検波するようになっている。測定の手順は、まずプラズマのないとき立体回路の整合を取り平衡検波出力をゼロにしておく。この状態でプラズマをつけると、プラズマを透過したマイクロ波の位相は変化をうけるので平衡がくずれる。そこでプラズマ路に挿入されている移相器を調整して検波出力の平衡を取り、その移相量からプラズマの電子密度を推定するわけである。

—257—

相量はプラズマによる移相量とは違うものとなる。そのうえ、プラズマを通ってきた波の強度は基準路の波にくらべてもともと小さいので、基準路からプラズマ路へ通り抜けてきたマイクロ波の強度と同じ程度となり、その影響は大きい。そこで、以下のように問題を設定し、移相量測定を解析する。

(i) 立体回路に不整合がある場合どのような手順で回路を調整すれば正しい測定がおこなわれるか。

(ii) (i)の調整をおこなっても残る不整合による誤差はどの程度か。

§ 3. 検波器入力解析

マジックTに接続する2個の検波器への入射波を、基準路の入射波を基準にして、マイクロ波電界のベクトル $\vec{D}_1$ および $\vec{D}_2$ であらわされるとしよう。 $\vec{D}_1$ 、 $\vec{D}_2$ は、基準路への単位入射波が、マジックTで分岐して検波器に加わるマイクロ波電界のベクトル $\vec{R}_1$ 、 $\vec{R}_2$ と、アンテナで受信されてプラズマ路へ入射する波 ξ （基準路の入射波に対する強度比および位相差を複素数 ξ で表示した）がマジックTで分岐して検波器へ加わるマイクロ波電界ベクトル $\vec{T}_1$ 、 $\vec{T}_2$ との合成である。

すなわち

$$\vec{D}_{1,2} = \vec{R}_{1,2} + \vec{T}_{1,2} \quad (3.1)$$

であらわされる²⁾。

第1表にマジックTのSマトリックス要素(S_{mm})や各端子に接続する素子の反射係数(Γ_m)と $|\xi|$ の実測値を示したが、これらの値などから次のように簡単化をおこなう。

(i) 基準路から第3端子への入射波は、受信アンテナ系を通してプラズマ路へ入射する波にくらべて大きいとする。

(ii) 基準路の素子はマジックTの第3端子に対して完全に整合がとれている。しかし第4端子に接続しているプラズマ路には受信アンテナや真空窓のように反射の大きい素子がある。

第1表 マジックTのSマトリックス要素と各素子の反射係数の実測値

$S_{11} \approx S_{22}$	0.1
S_{12}	0.2
S_{33}	0.1
S_{44}	0.2
S_{34}	0.1
$S_{14} \approx S_{24} \approx S_{13} \approx S_{23}$	0.7
$\Gamma_1 \approx \Gamma_2$	0.3
Γ_3	0.1
Γ_4	0.3
$ \xi $	~ 0.3

マイクロ波干渉計による定常プラズマの密度測定 (I) 移相量の精密測定

(iii) 第 3, 4 端子からみてマジック T および 2 個の検波器は対称であるとする。第 3, 4 端子はそれぞれ H および E 面分岐であるから, 検波器へ配分される波は第 3 端子の入射波に対して, 各々同位相で対称に分かれ, 第 4 端子の入射波に対して各々反対位相で対称に分かれるとする。

このように考えると, 第 2 図 (a) のようにプラズマ路の入射波 $\vec{E}$ はマジック T で均等に分かれ $\vec{T}_{1,2}$ はそれぞれ $\pm \vec{T}$ であらわされる。しかし, 基準路の入射波に対しては; 出力レベルが高いので, プラズマ路へ通り抜け, アンテナ系で反射して, プラズマ路からの入射波となって検波される波も無視できない。そこで第 2 図 (b) のようにアン

第 2 図 検波系におけるマイクロ波の流れ
(a) プラズマ路からの入射波に対して
(b) 基準路からの入射波に対して

テナ系に反射がないとき検波される成分を $\vec{R}_0$ とし, アンテナ系の反射によってプラズマ路から入射する成分を $\Delta \vec{R}$ とすると $\vec{R}_{1,2}$ はそれぞれ $\vec{R}_0 \pm 1/2 \Delta \vec{R}$ であらわされる。従って $\vec{D}_{1,2}$ は

$$\vec{D}_{1,2} = \vec{R}_0 \pm \vec{T}', \quad (3.2)$$

ただし,

$$\vec{T}' = 1/2 \Delta \vec{R} + \vec{T}, \quad (3.3)$$

であらわされることになる。 $\vec{D}_1, \vec{D}_2$ を同じ基点, o から描くと第 3 図のようになる。 $\vec{R}_0$ と $\Delta \vec{R} = \vec{R}_1 - \vec{R}_2$ のなす角を ϕ とすると, これはマジック T の第 4 端子とアンテナ系を往復することによる位相変化に対応している。マイクロ波干渉計で移相量を測定する際, プラズマ路からくる波として, 元来プラズマを通ってきた波に対する $\vec{T}$ に不整合分 $1/2 \Delta \vec{R}$ が加わったベクトル $\vec{T}'$ を信号波とみなすことになり, 平衡検波によって正しい $\vec{T}$ の変化を示さないことになる。

第3図 各検波器のマイクロ波電界ベクトル

§ 4. 立体回路の調整の手順

以上の議論をもとに移相量測定のための回路の調整を解析する。この場合、鉍石検波器の検波特性は2乗法則が成りたっていると仮定し、2つの鉍石検波器の感度や整合がよく平衡しているものを選び出しておくこととする。検波器の出力の平衡をとるため、移相器、抵抗減衰器、差動増巾器を用い、次の手順で平衡をとるものとする。

- (i) 抵抗減衰器で、プラズマ路からの入力分をゼロにしておき、基準路からの入力分のみで両検波器の出力が平衡するよう増巾器の利得を調整する。
- (ii) 抵抗減衰器を開いてプラズマ路をいかに移相器の調整によって両検波器の出力の平衡をとる。
- (iii) プラズマをつけ、移相器の調整によって両検波器の出力を再び平衡させる。(ii)と(iii)における移相器の読みの差を測定値とする。

しかし、検波系やアンテナ系の整合が不完全であるための影響として、これらの調整素子のプラズマ路中の挿入場所(送信アンテナ側か受信アンテナ側か)とそれによる差動増巾器の利得調整をおこなう状態によって移相量の測定値が異なることになる。第2表に素子の配置(A-F)とその各々の場合の測定値を示した。著者らが使用している第1図の回路、Dについて平衡手順を解析しよう。

マイクロ波干渉計による定常プラズマの密度測定 (I) 移相量の精密測定

第2表 調整用素子の配置による移相量 θ と測定値 θ' の関係

第1欄 測定回路, OSC: 発振器, DET: 検波器

第2欄 $\vec{T}$ の軌跡, 実線: 透過マイクロ波に減衰のある場合, $\alpha \neq 1.0$
点線: 減衰のない場合, $\alpha = 1.0$

第3欄 θ に対する θ'

各調整においてマイクロ波の入力レベルがあまり変化しないとして、以上の(i)(ii)(iii)の平衡操作によって次の条件が確立される。

$$\left. \begin{aligned} \text{(i)} \quad & (\vec{R}_0 + \frac{1}{2} \Delta \vec{R})^2 / (\vec{R}_0 - \frac{1}{2} \Delta \vec{R})^2 = 1 + r, \\ \text{(ii)} \quad & \vec{D}_{10}^2 / \vec{D}_{20}^2 = (\vec{R}_0 + \vec{T}_0')^2 / (\vec{R}_0 - \vec{T}_0')^2 = 1 + r, \\ \text{(iii)} \quad & \vec{D}_{1p}^2 / \vec{D}_{2p}^2 = (\vec{R}_0 + \vec{T}_p')^2 / (\vec{R}_0 - \vec{T}_p')^2 = 1 + r, \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

$\vec{D}_{1,2}$ および $\vec{T}'$ の指標、o と p はそれぞれプラズマがない場合、ある場合のそれらの値をあらわす。また $r (< 1)$ は両検波器の不均衡分をあらわす量で

$$r = \frac{R_1^2 - R_2^2}{R_2^2} = \frac{2 \Delta R R_0}{R_2^2} \cos \phi \approx 2 \frac{\Delta R}{R_0} \cos \phi \quad (3.5)$$

となる。

第4図 平衡手順(i)(ii)(iii)における検波器のマイクロ波電界ベクトルの平衡
(a) $r=0, \phi=\pi/2$ の場合 (b) $r \neq 0, \phi \neq \pi/2$ の場合

マイクロ波干渉計による定常プラズマの密度測定 (I) 移相量の精密測定

さて、(i)(ii)の調整によってベクトル $\vec{R}_0$, $\vec{T}_0'$ はどのようになっているかと云うとまず、検波器の出力に不平衡がない $r=0$ の場合、すなわち $\Delta R=0$ かまたは $\phi=\pi/2$ のときは第4図(a)のように $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_0'$ とは直交している。しかし不平衡があり $r \neq 0$ の場合には第4図(b)のように $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_0'$ とは直交していない。 R_0 と $\vec{R} = \frac{1}{1+(1+r)} \{ \vec{R}_1 + (1+r)\vec{R}_2 \}$ のなす角を δ ($r < 1$ であるから δ は極めて小さい)とすれば、 $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_0$ のなす角 θ_0 が次式で与えられる状態で平衡する。

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{r}{2(2+r)} \left| \frac{T_0}{R} \right| \right) + \delta \quad (3.6)$$

この θ_0 は $2\pi - \theta_0$ でおきかえてもよいので、このいずれかの状態で平衡することになる。

最後に(iii)によるプラズマがあるときの平衡の状態を考える。第4図(a)の場合は、このときも $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_0'$ とは直交している。すなわち(ii)の平衡状態と一致しており、プラズマによる移相量を測定したことになる。しかし第4図(b)の $r \neq 0$ の場合には $\vec{T}_0 = \vec{T}_p$ の場合以外は、 $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_p'$ のなす角はもとの $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_0'$ のなす角と一致しない。この $\vec{T}_0$ の位相変化に対して調整できなかった分、 $\Delta\theta$ は(iii)における $\vec{T}_p'$ と $\vec{R}_0$ の角度を $\theta_p + \delta$ とすれば、次のようにして求められる。

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta_p = \cos^{-1} \left(\frac{r}{2(2+r)} \left| \frac{T_0}{R} \right| \right) - \cos^{-1} \left(\frac{r}{2(2+r)} \left| \frac{T_p}{R} \right| \right) \quad (3.7)$$

従って、この場合でもプラズマによる減衰がなく、 $T_0 \approx T_p$ とみなせるときは測定誤差が小さくなる。

その他の配置A, B, Cについて同様の解析をしてみるとAでは信号波の状態によってはどうしても平衡がとれなかったり、B, Cでは平衡がとれてもとんでもない測定値がえられたりする。一番良い配置は、以上検討したDのように信号波の位相のみ調整でき、かつ鉋石検波器の感度の不平衡だけでなく検波系の不整合による出力の不平衡も含めて増巾器の利得調整がおこなえるように移相器も抵抗減衰器も送信アンテナ側におく場合である。

§ 5. 誤差の評価

前節で解析した調整手順における測定誤差は3-7式からえられる。3-7式において $r < 1$, $T_0 < R$ であることを考慮すると誤差 $\Delta \theta$ として, 3-8式がえられる(鉱石検波器の検波特性が2乗検波でなく, 直線検波でも同様の誤差の式に導かれる)。

$$\Delta \theta \approx \epsilon \frac{1}{4} r (1 - \alpha) |\xi| \quad (3.8)$$

ここに ϵ は3-6式で与えられる平衡位置 θ_0 に対して次のような値をとる。

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq \theta_0 - \delta \leq \pi & \text{の場合} \quad \epsilon = -1, \\ \pi \leq \theta_0 - \delta \leq 2\pi & \text{の場合} \quad \epsilon = 1. \end{array} \right\}$$

第5図 $\theta_0 - \delta = \cos^{-1} \left(\frac{r}{4} \frac{T_0}{R} \right)$ の値に対する測定誤差 $\Delta \theta$ の変化,

$\alpha = |T_p / T_0|$ はマイクロ波の透過率

マイクロ波干渉計による定常プラズマの密度測定 (I) 移相量の精密測定

また, $\alpha \equiv |T_p / T_o|$ はプラズマによる透過率, $|\xi| \approx |T_o / R_o|$ は基準路に対するプラズマ路のそれぞれの入射波の比, δ は $\vec{R}_o$ と $\vec{R}$ のなす角をあらわす。従って, (1) 不平衡度 r の値が大きい程, (2) プラズマによるマイクロ波の減衰が大きく, α の値が小さくなる程, (3) ξ の値が大きい程 $\Delta \theta$ が大きくなる。 ξ の値が小さい程, $\Delta \theta$ が小さいのは, $\vec{T}_o$ が $\vec{T}_p$ に変化しても, $\vec{T}_p$ は $\vec{T}_o'$ とあまり変わらなくなるからで T_o / R_o をどこまで小さくできるかは検波器の熱雑音による S/N との兼ね合いである²⁾。第5図に α をパラメーターとして, r 値に対応する $\theta_o - \delta$ ($= \cos^{-1} \left(\frac{r}{2(2+r)} |\xi| \right)$, 平衡手順 (II) における $\vec{T}_o$ と $\vec{R}$ のなす角度をあらわす) の値による誤差 $\Delta \theta$ を 3-7 式より計算した結果を示した。

3-5 式より r を小さくするためには, ϕ を $\pi/2$ に近づけて両検波器の平衡をよくすること, 不整合を除き ΔR を小さくすることが必要となる。 $\vec{\Delta R}$ と $\vec{R}_o$ を直交させるために第2表Eのようにプラズマ路の受信アンテナ側にも, もう一組の移相器 (Φ') と抵抗減衰器 (R') をおき, 手順 (I) の代わりに, はじめ R' を働かせて $\vec{R}_o$ のみで増巾器による平衡操作をおこない, 次に抵抗を取り除き, Φ' による平衡操作をおこなうことにすれば, Φ を $\pi/2$ に設定できるはずである。しかし, 第3, 4端子からみて, 両検波器および第1, 2端子は厳密には対称でないので誤差をゼロにすることは出来ない。第2表Fのように第4端子にアイソレーターをつけ, まず実質的にアンテナ系の反射を低減させておくことが望ましい。アイソレーターを挿入しておけば, プラズマが濃くなりアンテナ系の反射がプラズマによって変化しても問題となくなる。

以上検討してきた第2表Dの回路による測定誤差は $\alpha \approx 1$ の範囲では十分小さくすることができる。その他の誤差の要素と共に第3表にあげて比較した。3-8 式の不整合誤差は受信アンテナ側の不整合のみが考慮されているが, 送信アンテナ側で位相調整するので送信アンテナとプラズマ路中の素子例えば, 基準路とプラズマ路とを分岐するためのマジックT との間の多重反射の影響が考えられる。送信アンテナ側にもアイソレーターを挿入するか, 抵抗減衰器を全開にせず, 常にある程度の減衰を与えるかして送信アンテナの整合にも気をつければ小さく出来る。

誤差の種類	誤差の式	移相量測定条件		誤差の値	
				$\alpha=0.9$	$\alpha=0.1$
立体回路の不整合	① 3.8式 $\Delta\theta = \frac{1}{4} \gamma \xi (1-\alpha)$	第2表 D回路	$\gamma = 0.4$ $\xi = 0.5$ $\theta = \pi/2$	0.005	0.05
	② 送信アンテナ側の多重反射 $\Delta\theta_1 = \Gamma_a \Gamma_m \sin 2\theta$ ③ 送, 受信アンテナ間の多重反射 $\Delta\theta_2 = \Gamma_a^2 \sin 2\theta$	第2表 E, F回路	$\gamma = 0.01$ $\xi = 0.5$ $\theta = \pi/2$	0.0002	0.002
発振器の周波数不安定 ($\Delta\phi_f$)	$\Delta\phi_f = \left(\frac{2\pi}{c}\right) \left(\frac{\lambda_g}{\lambda}\right) \Delta L \cdot \Delta f$ $\approx 3 \times 10^{-10} \Delta L \cdot \Delta f$	冷却槽 A.F.C装置付	$\Delta L = 100 \text{ cm}$ $f = 25 \text{ GHz}$ $\Delta f = 500 \text{ kHz}$	0.01	
導波管の熱膨脹 ($\Delta\phi_t$)	$\Delta\phi_t = \frac{2\pi}{\lambda_g} \left(\frac{\lambda_g^2}{4a^2} + 1 \right) \kappa \Delta L \cdot \Delta t$ $\approx 10^{-4} \Delta L \cdot \Delta t$	空冷装置付	$\Delta L = 100 \text{ cm}$ $f = 25 \text{ GHz}$ $\Delta t = 1^\circ\text{C}$	0.01	
移相器の精度 ($\Delta\phi_p$)		較正式 (フラップ, ベイン形)		0.01	

第3表 測定誤差の一覧表

f, λ : 測定周波数および波長, c : 光速, a : 導波管断面の長辺,
 κ : 熱膨脹係数, 銅の $\kappa = 16.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, ΔL : 基準路とプラズマ路
 の長さの差, Δf : 周波数変化, Γ_a : アンテナの反射係数
 Γ_m : 立体回路素子の反射係数, θ : 位相変化

§ 6. シュミレーション実験

k-バンドのマイクロ波を用い, 以上解析した移相量測定に及ぼす不整合の影響を実験的に調べた。使用した回路は第6図のような構成で, アンテナ系とプラズマ系を誤差測定のために立体素子で構成した。アンテナ系は導波管にピンを挿入して, これによって実際の場合のアンテナ系の反射をつくり, 移相器Φ-3で $\vec{R}_0$ とつき抜け分 $\Delta \vec{R}$ のなす角 ϕ を変化させる。プラズマ系には抵抗減衰器 $R \rightarrow 0$ と移相器Φ-0を並列に接続して使用し, この2つの素子の調整によって合成された移

マイクロ波干渉計による定常プラズマの密度測定 (I) 移相量の精密測定

相量と減衰量でプラズマの特性を代表させる ($\Phi-0$ と $R-0$ を直列につなぐと、マイクロ波の減衰量と移相量を分離して設定できなくなる)。これによってある移相量 θ における透過波の変化 $\alpha = |T_p/T_0|$ を任意に設定することができる。

第 6 図 シュミレーション実験の立体回路

第 7 図 (a) は抵抗器 $R-1$ を最大に効かせ、 $R-2$ を開放して、プラズマ路からの入力を完全に遮断したときの両検波出力の変化を測定したものである。この場合には $T_0 = 0$ なので検波器出力はそれぞれ非対称分、 $\frac{1}{2} \Delta R$ の影響があらわれ $|\Delta R/R_0|$ の値が実測される。第 7 図 (b) は $R-1$ が全開、 $R-2$ が閉めきられた状態で $\Phi-3$ の移相量を変えて検波出力を測定したものである。この測定値と検波特性とを組合せると $|T_0/R_0|$ が求まる。 $|T_0|$ が $\Phi-3$ で多少変化するのは、マジック T とピンとの間の多重反射の影響である。 $|\Delta R/R|$ や $|T_0/R_0|$ の測定において検波特性はその都度、抵抗減衰器を用い較正した。第 7 図 (a) で出力の最大最小は $\vec{R}_0$ と ΔR のなす角がゼロかあるいは π の場合に対応していて、 $r (= \frac{2 \Delta R}{R_0} \cos \phi)$ および $\Delta \theta$ が最大となるところである。このいずれかの点に $\Phi-3$ の位相を固定して、前節の測定手順 (i) (ii) によって両検波器の平衡をとる。このときの $\vec{R}_0$ と $\vec{T}_0$ のなす角、 θ_0 において、手順 (iii) に従ってプラズマ系の移相量を測定し、次に $2\pi - \theta_0$ に対しても同様の測定をすれば、2 つの測定値の差は 3-8 式および第 5 図によると、 $2 \Delta \theta$ に相当するはずである。 $r \approx 0.16$ の場合の $\Delta \theta$ の実測値と、 $r, |\xi|$,

α の実測値を代入した計算値とを第8図に示した。 $\alpha \approx 0$ の近くでは、検波器の感度が悪くなり測定精度が落ちることや、移相器その他の精度を考えれば計算値と実測値とはよい一致を示している。

第7図 移相器 $\Phi-3$ の位相に対する各検波器出力の変化
 (a) 抵抗減衰器R-1の減衰をきかせR-2を開放した場合
 (b) R-2の減衰をきかせR-1を開放した場合

第8図 マイクロ波の減衰率、 $1 - |T_p/T_0|$ に対する測定誤差の実測値と
 (3-8)式による計算値

§ 7. 結 語

移相量を測定するにあたって、立体回路の不整合が測定に及ぼす影響についてベクトルを用いて解析をおこない適当な手順による調整の後にも残る誤差について述べた。検波回路のマジックTには、鉍石検波器、アンテナ、真空封じ窓等の反射係数の大きな、整合のとりにくいものが接続されている。従って基準路からプラズマ路へ通り抜け、再び検波される波は以外に大きく、これが信号波ベクトルに加わるので、平衡検波する際の回路調整の手順について注意しなければならない。ここでは基準路からのマイクロ波入力からプラズマ路からの入力にくらべて大きいとして、基準路から検波器へ加えられる波について、アンテナ系が完全に整合しているとした場合の入射波ベクトル $\vec{R}_0$ と不整合による入射波ベクトル $\frac{1}{2}\vec{\Delta R}$ を出来るだけ直交させるように回路の調整の手順を決めた。この調整による測定では、不整合誤差が、プラズマによる波の減衰が少ないうちは殆ど問題とならなくなる。

しかし、プラズマが濃い場合や、論文Ⅱで述べる細いプラズマの測定のように回折現象が著しい場合は、波の透過も悪くなり、従って不整合による測定誤差も増大する。例えば、アイソレーターをつけていない場合、透過率 $\alpha = |T_p / T_o| = 0.9$ では $\Delta\theta \approx 0.005$ ラジアン程度であるが、 $\alpha = 0.1$ になると $\Delta\theta \approx 0.05$ ラジアンとなる。マジックTのプラズマ路の入力端子にアイソレーターをつけることによって、これらの値の約 $1/30$ 程度に小さくすることが出来る。

なお、この研究の遂行にあたっては、東北大学の長尾重夫教授、プラズマ研究所の堀越源一助教授はじめQPグループの方々の討論にまつところが極めて多かった。感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) QPプラズマの密度測定のための多チャンネルマイクロ波(25Gc)ブリッジ
IPPJ-DT-13 桑原千代, 船戸康幸, 松浦清剛, 宮原昭
- (2) Analysis of Microwave Interferometer for plasma Density Measurement
IPPJ-107
Chiyo Kuwahara, Kiyotake Matsura and Akira Miyahara