

電子温度測定器の改良，小型化について

平尾邦雄・小山孝一郎

An Improved Type of Electron Temperature Probe

By

Kunio HIRAO and Kohichiro OYAMA

Abstract: One of the methods of electron temperature measurements as an application of resonance probe theory has been presented by one of the authors.

However, on account of a single probe, detected signal includes $\vec{V} \times \vec{B}$ voltage induced by geomagnetic field and rocket velocity as well as other noise.

In order to get rid of the effects of geomagnetic field and rocket velocity and random noise, an improved type of electron temperature probe is tested. At the same time, the instrument was made smaller to some extent.

概 要

計測器をできるだけ小型に，より精度のよい回路に改良することは，飛しょう体搭載の場合には特に考えねばならないし，また，テレメータにより送信されてきた信号を，できるだけすみやかに，処理できるような回路構成を行なうことも必要である．本論文では，従来の電子温度測定器を上述の要求をみたすように改良した結果を報告する．

1. 測定原理

1.1 イオンの影響を無視する場合 [1][2][3]

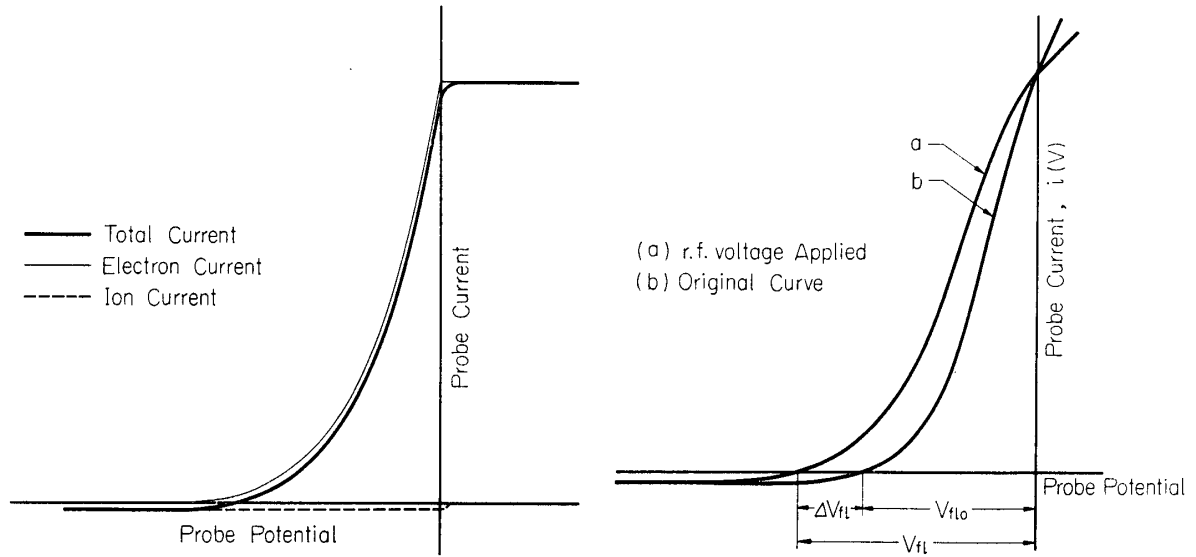
イオン電流が電子に対して，減速電界の領域ではプローブ電圧によらない，あるいはイオンがプローブに印加した高周波電圧に follow できないような領域を考える．

プラズマ中のプローブの電圧電流特性は，第1図のようになる．この場合のプローブ電流は，

$$i(V) = S \cdot J_e \cdot \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) - J_i \cdot S \quad (1)$$

ここで J_e : 電子電流密度, J_i : イオン電流密度
 S : プローブ面積, k : ボルツマン定数
 e : 電子の電荷, T_e : 電子温度
 $V(\leq 0)$: 空間電位からのプローブ電位

Floating Potential は,



第 1 図 イオン電流がプローブ電圧によらないときの i - V 特性

第 2 図 高周波電圧を印加したときの i - V 特性

$$V_{flo} = -\frac{kT_e}{e} \cdot \ln\left[\frac{J_e}{J_i}\right] \quad (2)$$

さらに、この Probe に $a \sin \omega t$ なる高周波電圧を重畳したときの電圧電流特性は、

$$\begin{aligned} i_{dc} &= \langle S \cdot J_e \cdot \exp[e(V + a \sin \omega t)/kT_e] - J_i \cdot S \rangle_{\text{time } AV} \\ &= S \cdot J_e \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right) - J_i \cdot S \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $I_0(ea/kT_e) \geq 0$ は第一種零次の変形ベッセル関数である。

したがって高周波電圧を重畳したときの Floating Potential は

$$V_{fl} = -\frac{kT_e}{e} \cdot \ln\left[\frac{J_e I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right)}{J_i}\right]$$

高周波電圧を重畳しないときの Floating Potential からのずれは、

$$\Delta V_{fl} = V_{fl} - V_{flo} = -\frac{kT_e}{e} \ln\left[I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right)\right]$$

$a \leq 0.5 kT_e/e$ のときは、2%以内の誤差で $\Delta V \approx ea^2/4kT_e$ とかける。電子温度の算出を容易にし、イオン電流（後述）、および伝送系による誤差をなくするために、高周波振幅 a_1 と $2a_1$ の電圧を重畳する。

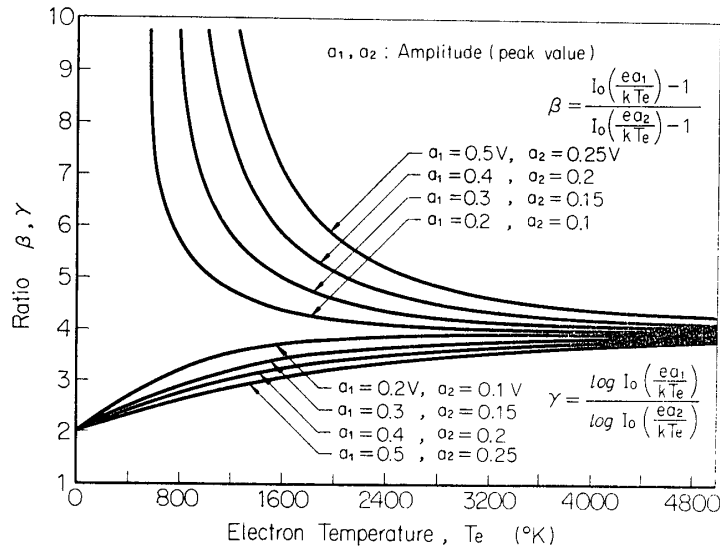
電子温度は、電流一定としたときの二つの Floating Potential の変位の比、

$$\gamma = \frac{kT_e \ln\left[I_0\left(\frac{2ea_1}{kT_e}\right)\right]}{e} \bigg/ \frac{kT_e \ln\left[I_0\left(\frac{ea_1}{kT_e}\right)\right]}{e} \quad (4)$$

あるいは電圧一定としたときの電流分の変化の比、

$$\beta = \frac{I_0(2ea_1/kT_e) - 1}{I_0(ea_1/kT_e) - 1} \quad (5)$$

からも求められる。



第 3 図 二つの振幅を印加することにより得られた直流分の比と電子温度との関係

γ, β と電子温度 T_e の関係は, 第 3 図に示されている.

(5)式による方法(電流測定法)より, (4)式による方法(電圧測定法)がバイアスの制限を受けず, かつ検出増幅器の利得が少なくすむことから, 一般に(4)式による回路を採用している.

1.2 イオン電流の影響について

実際の Probe 測定の場合, 前述の場合と異なり, イオン電流が Probe 電圧に依存する. ここでは Probe 電圧に対して, イオン電流は直線的にかわるものとして, イオン電流の影響を考えてみる.

この場合の Probe 電流は,

$$i(V) = S \cdot J_e \cdot \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) - S \cdot J_i \cdot [1 - b(V - V_{fl0})] \quad (6)$$

ここで J_i は, $V = V_{fl0}$ のときのイオン電流, b は Probe イオン電流部の傾きである.

$$b = \frac{d}{dV} [J_i(V)] \frac{1}{J_i}$$

これに高周波電圧を重畳すると,

$$i(V + a \sin \omega t) = S \cdot J_e \cdot \exp\left(\frac{V_{fl} + a \sin \omega t}{kT_e}\right) - J_i \cdot S [1 - b(V_{fl} + a \sin \omega t - V_{fl0})] \quad (7)$$

積分したのち零とおくと, 高周波電圧を印加したときの Floating Potential が計算される.

$$V_{fl} = -\frac{kT_e}{e} \left[\ln \frac{J_e}{J_i} + \ln \left[I_0 \left(\frac{ea}{kT_e} \right) \right] - \ln(1 + b \Delta V_{fl}) \right] \quad (8)$$

$$\Delta V_{fl} = V_{fl} - V_{fl0}$$

(8)式より(2)を引き式(8)の三番目の対数項を展開すると,

$$\Delta V_{f1} = \frac{\frac{kT_e}{e} \ln \left[I_0 \left(\frac{ea}{kT_e} \right) \right]}{1 + b \cdot \frac{kT_e}{e}}$$

b は, Probe の大きさとデバイ長の比に依存する.

二つの高周波振幅 a_1 , $2a_1$ を印加したときの Floating Potential の変位は,

$$\Delta V_{f11} = \frac{\frac{kT_e}{e} \ln \left[I_0 \left(\frac{ea_1}{kT_e} \right) \right]}{1 + b \cdot \frac{kT_e}{e}}$$

$$\Delta V_{f12} = \frac{\frac{kT_e}{e} \ln \left[I_0 \left(\frac{2ea_1}{kT_e} \right) \right]}{1 + b \cdot \frac{kT_e}{e}}$$

したがってこのときの両者の比 γ_i は,

$$\gamma_i = \frac{\Delta V_{f12}}{\Delta V_{f11}} = \frac{\ln \left[I_0 \left(\frac{2ea_1}{kT_e} \right) \right]}{\ln \left[I_0 \left(\frac{ea_1}{kT_e} \right) \right]} = \gamma$$

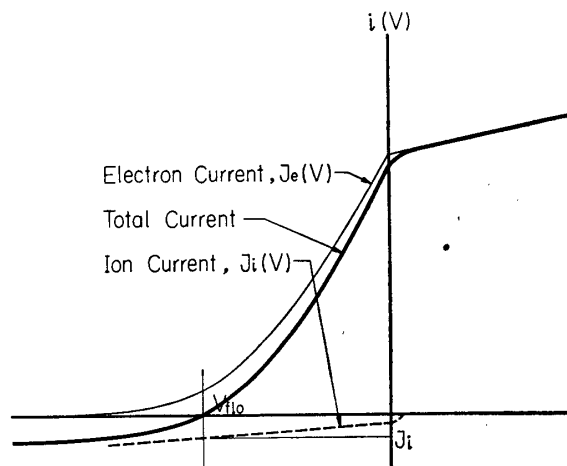
でイオン電流の効果は, 両者の比をとることにより消される.

2. 測定回路

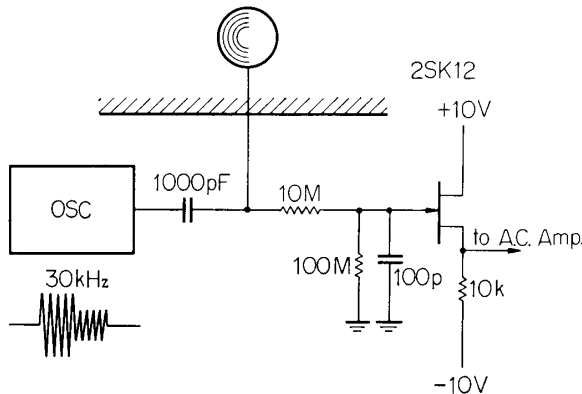
2.1 交流増幅器とシングルプローブを使った従来回路

以上の原理に基づいて構成される回路は, 第 5 図のようである. 電子温度測定回路として, この回路が長い間用いられてきたのは, フローティングポテンシャルの変化を, 適切に処理すべき方法がみいだされなかったのが大きな理由である. 従来まで本測定回路で十分な成果をあげており, 改良の必要がなかったとも考えられる.

しかしながら, 電子温度について詳しく論じるには, 現在の電子温度測定器では不十



第 4 図 イオン電流がプローブ電圧に対してリニアに変化するときの $i-V$ 特性



第 5 図 従来の電子温度計の原理

分である。本測定回路の欠点として

(1) 遅いくりかえし矩形波の増幅のために、おもに低域増幅可能な増幅器を必要とするが、そうなれば、大容量のコンデンサーが必要となり、このことは、必然的にウォールポテンシャルの急激な変化についていけなくなるし、大容量のコンデンサーは回路の小型化をはばむ一つの素子である。

(2) プローブが磁場中を動くときに、磁場とロケットの運動による電圧を

生じ、誤差を生じる。この誘起電圧は、純粹に高周波を印加したときの数 10% の order であり、特にロケットがスピニングしている場合にはげしい。

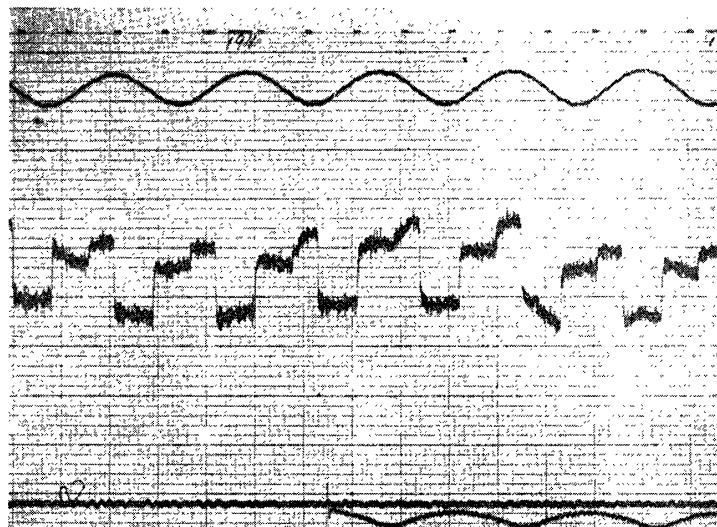
(3) 室内実験において、プラズマに多い低周波雑音 (30 kHz) までも増幅し、特に電源 noise を pick up しデータ読取りの場合に誤差を生じる。

(4) たとえば、SRATS 衛星用として本測定器を使い、波形をそのまま伝送することなく、電子回路的に計算をおこなう場合、増幅器特性の不完全のために誤差を生じる。特に(2)は電子温度算出の際、誤差を生じる大きな原因である。

第 6 図は、K-9 M-20 号機の電子温度測定データであるが、このデータは電子温度の高さ分布を議論することがいかに困難かを示しており、まして、微細構造を議論するにははるかに不十分である。

2.2 直流増幅器と Reference Probe の組合せ

2.1 に述べた従来の回路のもつ欠点を除去するための一つの試みとして新しい回路が考えだされた。



第 6 図 K-9 M-20 のデータ、下より 2 番目の波形

Floating Potential において、一方の Probe に高周波電圧を重畳し、他方の Probe には、高周波電圧を重畳せずにおくと、いま磁場の強さ \vec{B} 、ロケットの速度 \vec{V} とすると、一方の Probe の電圧は、

$$V_1 = V_{flo} - \frac{kT_e}{e} \ln \left[I_0 \left(\frac{ea}{kT_e} \right) \right] + (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{d}$$

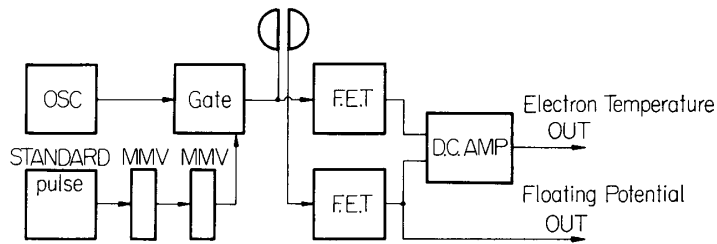
他方の Probe の電圧は、

$$V_2 = V_{flo} + (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{d} \left(V_{flo} = -\frac{kT_e}{e} \ln \frac{J_e}{J_i} \right)$$

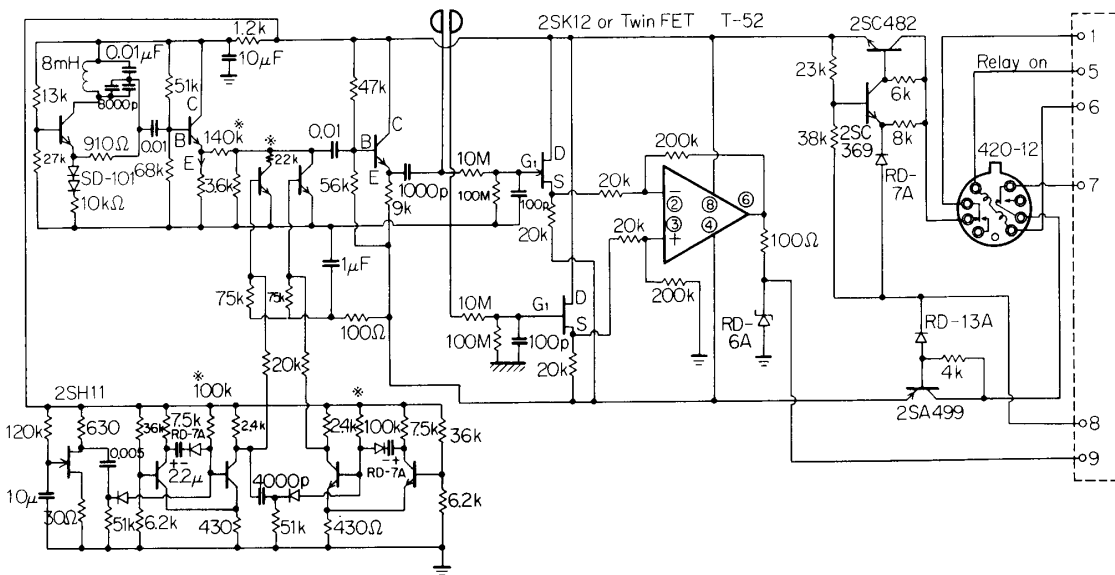
したがって、両者の差をとると、

$$\Delta V = -\frac{kT_e}{e} \ln \left[I_0 \left(\frac{ea}{kT_e} \right) \right]$$

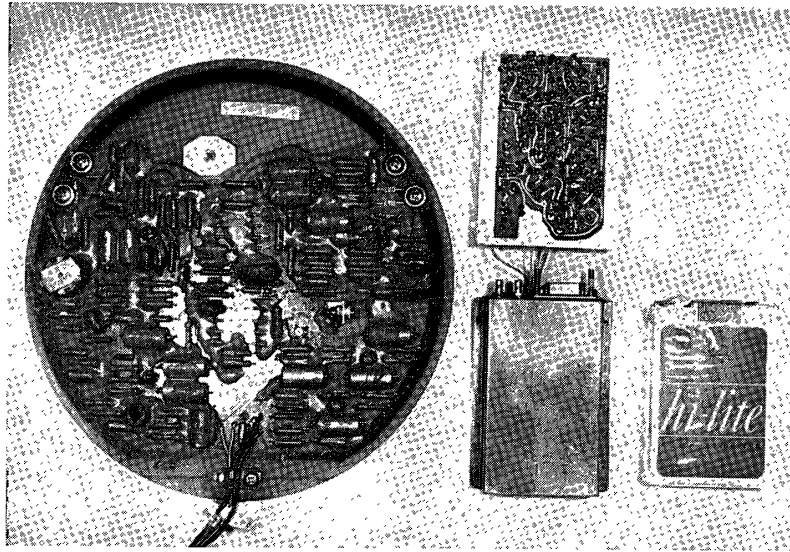
となり、磁場とロケットの運動による影響を打消し、同時に低周波雑音成分を打消し、純粋に印加した高周波電圧による Floating Potential の変化分だけを取り出すことができる。この考え方を実現すれば第 7 図(a)になる。したがって本節でのべる回路は、2.1 にのべた従来の電子温度測定器のもつ欠点をすべて取り去ることが可能である。



第 7 図(a) 新しい電子温度計の原理とその回路



(b) 回路図



第 8 図 新しい回路の概観(右)と従来の電子温度計(左)

本測定回路の諸元

発振電圧振幅	: 0.4 V, 0.2 V (変更可能), 30 kHz
くりかえし周期	: 2 Hz
検出部入力抵抗	: 1000 M Ω 以上
利得	: 26 db
重量	: 100 g~150 g
外型寸法	: 53×86×27 (mm)
消費電力	: 135 mW

第 8 図に新しく作られた回路の写真を示す。本測定器は正負 10 V の出力の定電圧回路、電源電圧 on-off 用の小型リレーを内蔵している。

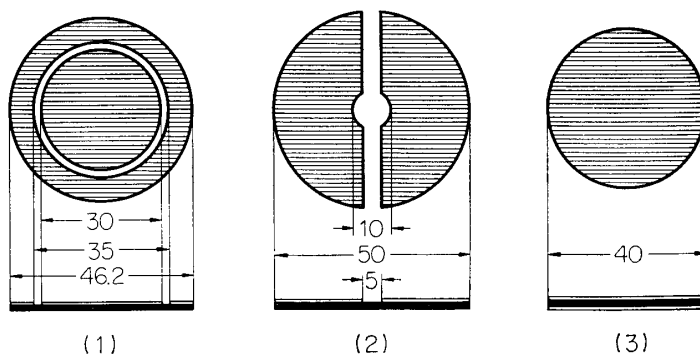
2.3 プローブの選択について

2.2 に述べた、直流差動増幅器と Reference probe の組合せが、本来の能力を発揮するためには、プローブの選択が重要である。いま高周波電圧を印加する Probe を Electron temperature probe, 片方を Reference probe と名づける。

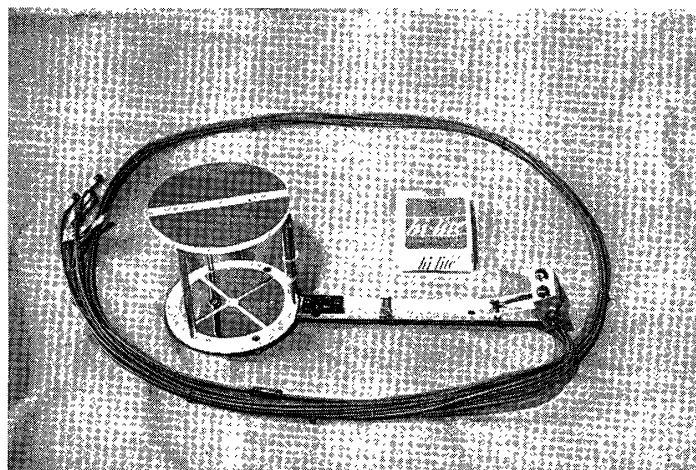
磁場中におけるロケットボディの運動による誘起電圧, Floating potential を打消すのみならば、二つのプローブの面積は理論的には等しくなくてもいいが、これら以外の雑音を除去するためには、面積が等しく、かつまた、イオンの運動に対する二つの Probe の方向性は同じでなければならない。

このためには、二つの Probe は同一平面上にあること、同時に全く同じ型であることがのぞまれる。

本測定器の試験に用いた三つの Probe は、(1)面積の等しい同心円状の Probe で片方を Electron temperature probe, 一方を Reference probe, (2)同一平面上におかれた二つの半円形の面積のひとしい Probe, (3)円板状の二つの Probe を絶縁物をはさんで表裏 2 枚張



第 9 図(a) プロブの種類, 3 種



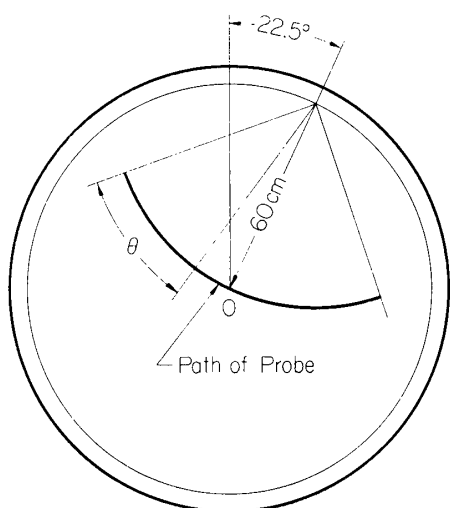
第 9 図(b) 良好に動作した電子温度プローブと同型の K-10-5 号機のプローブ(上部), 下部は方向センサー

り合わせたものである。

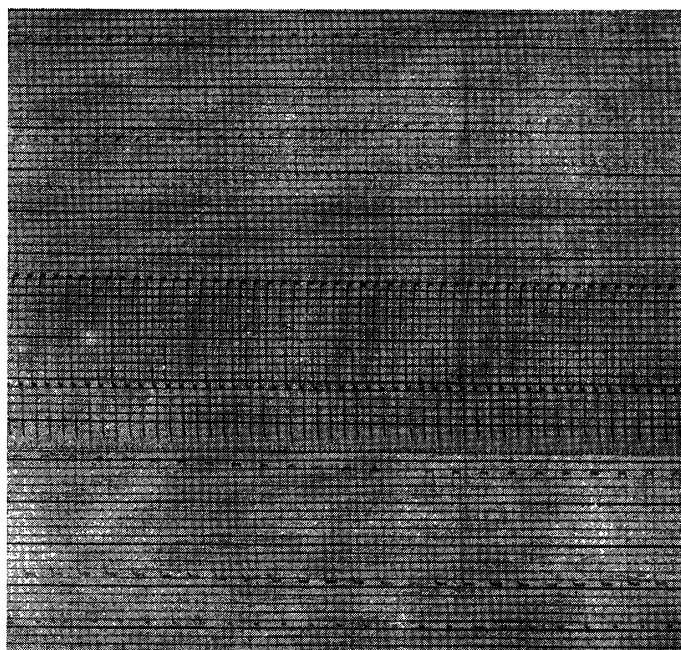
第 9 図(a)に試験的に作った三つの Probe の寸法を, 第 9 図(b)に後述するように最も良好に作動した Probe の写真を示す。

3. Space Chamber における電子温度測定

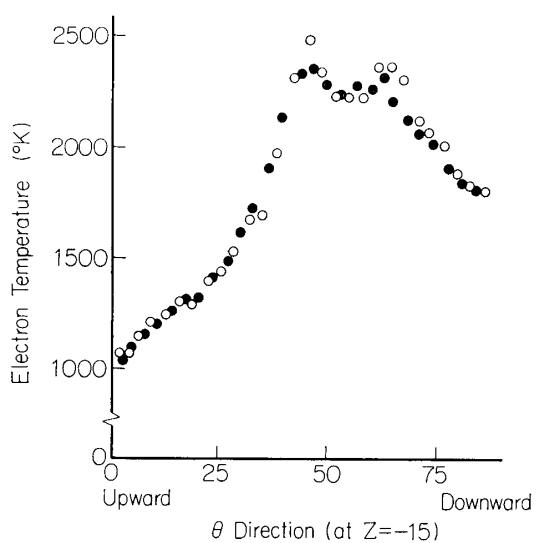
5×10^{-6} mmHg の Back ground pressure の状態でアルゴンガスが封入される。いままでしばしば使われてきた Beam type の Plasma Source は, 今までの実験で, プラズマの電子温度が, 電離層プラズマの電子温度に比較して数倍高い (約 $4000^{\circ}\text{K} \sim 8000^{\circ}\text{K}$) ことが, 知られているゆえに, 本実験においてはラッパ状の拡散型を用い, この Plasma Source にアルゴンガスを導入しつつ, 一方では, 常に真空ポンプを働かせ, Chamber 内の封入ガス圧力を一定に保つ方法により, 電離層プラズマの電子温度とほとんどひとしい電子温度を得ることができる。このプラズマ中において, 改善された測定器のテスト, 最適な Probe の選択をかねて, Chamber 内の電子温度を測定した。アルゴンガスの導入されるパイプ内の圧力は $0.11 \sim 0.31$ Torr, Chamber 内のアルゴンガス圧力 $1.8 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$ Torr である。



第 10 図 スペースチェンバー断面



第 11 図 三つのプローブにより得られた波形 (まん中の波形が第 9 (a) 図中の (2) によるもの)



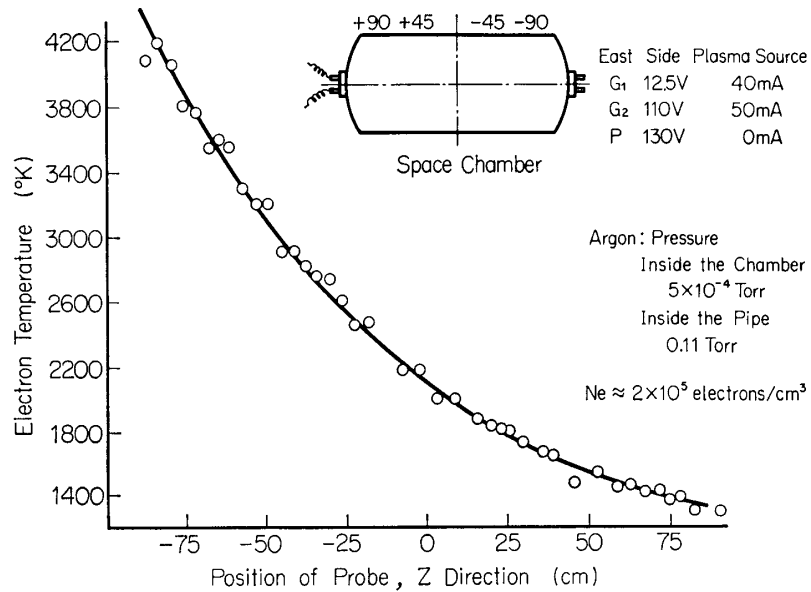
Argon: Neutral pressure
 Inside the Chamber
 6×10^{-4} Torr
 Inside the pipe 0.08 Torr
 Plasma Source
 West side
 G_1 : 20 V 55 mA
 G_2 : 75 V 29 mA
 V_p : 0
 V_H : 14.4 V 166 A
 East Side
 G_1 : 21 V 55 mA
 G_2 : 60 V 28 mA
 V_p : 0
 V_H : 8.2 V 170 A
 ○ Random Pick up
 ● mean value

第 12 図 スペースチェンバー θ 方向の電子温度分布

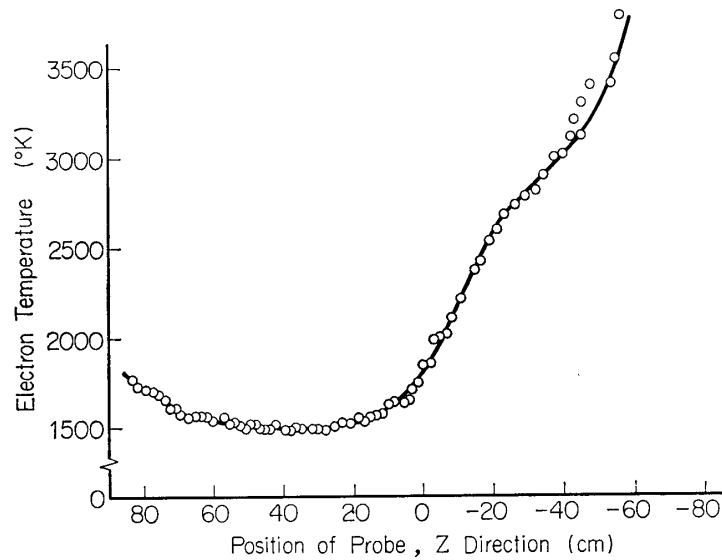
前述した 3 種類の Probe を, ほぼ同じ回路形式をもつ試作電子温度計につなぎ, Chamber 内の θ 方向, Z 方向にうごかし, その性能がテストされた.

これによれば, もっとも効果的に働いたのが第 9 (a) 図 (2) の Probe で, 出力の零レベルの変動はほとんどない.

したがって直流増幅器と Reference Probe を組合せる測定器の Probe として第 9 (a) 図,



第 13 図 スペースチェンバーにおいてプラズマソース 1 個の場合の電子温度分布



第 14 図 スペースチェンバーにおいてプラズマソース 2 個の場合の電子温度分布

(2)の半円状 Probe を採用する。

第 10 図は Chamber 内における Probe の θ 方向のうごきで、三つのプローブは、この Path に沿って、Chamber の外側から操作され、C 点を中心として $\pm 45^{\circ}$ の角度で可動である。

第 11 図は三つの Probe のうち、きわめて良好に動作した半円状 Probe により得られた

θ 方向の電子温度分布である.

第 12, 13, 14 図は Chamber 内の軸方向の電子温度分布である.

電離層プラズマの Simulation として, Chamber 内のプラズマの電子温度測定器と, この測定値の正しさを確かめる意味で得られた Langmuir Curve からの結果は, Plasma Source の型, Source の電圧, また, 第 11, 12, 13, 14 図よりわかるように空間を適当に選べば, 電子温度 $1,000^{\circ}$ から $8,000^{\circ}$ まで広範囲に制御できることを示している.

結 論

改良された直流増幅器と, Reference probe の組合せは, $\pm 50^{\circ}\text{K}$ の精密さで今後の電子温度測定を可能にし, 電離層電子温度に関する微細構造を知るうえにおいて, 強力な計測器となることを確信するものである.

また, この電子温度測定にもちいた DC AMP-Reference Probe の考え方は, noisy な Plasma 中での空間電位測定, Energy 分布測定回路へ応用できるであろう.

謝 辞

本実験は, スペースチェンバーにおいて小嶋, 三留両氏のご助力のもとにおこなわれた. 特に小嶋氏には深夜までお助けいただいた.

また, 横河ヒューレットパッカード社三村氏は部品, 回路に関する有益なご意見をよせられた. 心からお礼申しあげる.

1969 年 9 月 10 日 宇宙科学

参 考 文 献

- [1] 平尾邦雄, 小山孝一郎: 宇宙観測シンポジウム p.15~20 (1968)
- [2] 平尾邦雄, 小山孝一郎: 宇宙研報告, 第 5 卷第 3 号, p.450~462 (1969)
- [3] 平尾邦雄, 小山孝一郎: 宇宙研報告, 第 5 卷第 3 号, p.441~449 (1969)