

## 放出電子ビーム流の直撃によるプローブの大きな帯電特性

## Charging of the impedance-probe by the electron-beam emitted from the sounding rocket

# 渡辺 勇三[1]

# Yuzo Watanabe[1]

[1] 宇宙研

[1] ISAS

ロケットから放出された電子ビーム流は地球磁場によって曲げられてプローブ表面に接触した場合にはプローブを負方向に帯電させる。また近傍のプラズマ密度を増加させてその時点で掃引している周波数に応じて急峻な、或は、ブロードなUHR共鳴特性がプローブ周波数特性に現れる。大気の影響が大きい低高度では電離現象が急速に増大して磁場との角度に依存してプローブ等価容量値が増す場合がある。帯電に寄与する電荷は接触する時間 ( $T$ ) と直撃電流値 ( $I$ ) の積で与えられ総電荷 ( $Q = I \times T$ ) がプローブを負方向に沈め、帯電々位 ( $V$ ) は  $V = Q / C_{po}$  となる。

## (1) 電子ビーム流の振舞いとビーム周辺の様子

ロケットから放出された電子ビーム流は磁場と角度を持つと磁場に平行な成分が螺旋のピッチを定めて直角成分が旋回半径を決めて通常は磁場の方向に向かって右ネジの方向に螺旋状に回転しながら進んで平均自由行程を越える距離で熱化して消滅する。電子流が一周して出来る水牛の角状の管の電子密度を概算する。この細い円錐状のビーム管の形状は観測されたスペクトルから推定することが出来る。〔中略〕電子銃の放出電流値 ( $i$ ) に  $t$  を乗じて放出された電荷量 ( $q = i \times t$ ) を定め電子の単位電荷量で割って放出粒子の総数 ( $N = q / e$ ) を見積って、更に電子ビーム流の管の体積 ( $V$ ) で割ればビーム成分の電子密度 ( $N_e$ ) が ( $N_e = N / V$ ) として得られ、 $N_e \sim 3 \times 10^{15} (1/cc)$  となる。衝突電離型のプラズマ源と同じくこの熱電子流で中性大気が電離されてビーム管の周辺は高電子密度空間になっている。この領域にプローブが接近すればその時点での掃引周波数に応じて急峻な、或は、ブロードなUHR共鳴特性が現れる。低高度では大気の影響が大きくなって電子流が中性粒子に衝突して電離現象が急速に増大し磁場との角度に依存してプローブ等価容量値が増して短絡現象のようなデータが得られる。

## (2) 電子ビーム流が直撃した時の帯電現象

長さが  $L$  で半径が  $a$  の円筒状プローブの真空中等価容量値 ( $C_{po}$ ) は、 $C_{po} = 2 \times \pi \times \epsilon_0 \times L / \log(1 + L/a)$  で表されその値は約  $12 \text{ pF}$  で実験で得られた較正值と同じである。その容量値の導体に放出電荷量の一部分が突入して帯電すると考える。観測されたスペクトルから円錐状のビーム管の広がり小さく直接プローブに接触して帯電に寄与する電荷は接触時間 ( $T$ ) と接触面積、即ち、直撃電流値 ( $I$ ) の積で与えられ総電荷 ( $Q = I \times T$ ) がプローブを負方向に沈める。帯電々位 ( $V$ ) は  $V = Q / C_{po}$  となる。 $V$  の最大値は電子銃の加速電圧 (約  $1 \text{ kV}$ ) である。数  $\text{mA}$  のビーム電流が数ミリ秒の間だけ接触すれば数マイクロクーロンの電荷がプローブ系の数百  $\text{pF}$  の容量を充電して瞬時に数  $\text{kV}$  の高電圧になるが実際には前述の最大値の約  $1 \text{ kV}$  になる。シースの厚さは十分に厚くなりプローブ等価容量値は殆ど真空中の値に近くなる。

一般にプラズマ中に浸された金属製平板プローブはプラズマの空間電位 ( $V_S$ ) よりも負方向に沈んで浮遊電位 ( $V_F$ ) になる。ボルツマン定数、電子の電荷量、電子とイオンの質量と温度を、 $k$ 、 $e$ 、 $m$ 、 $T_e$ 、 $M$ 、 $T_i$  として、 $-V_F = (k T_e / 2 e) \log(T_e M / T_i m)$  と表される。負方向のバイアスが深くなってくるとシースの領域が大きくなる。プローブ電位 ( $V_P$ ) が変化した場合の近傍の電位分布 ( $V$ ) を、 $V = V_P \times \exp(-X / R_D / S Q R^2)$  と表わすと周辺の電子密度 ( $N_e$ ) は、 $N_e = N_{e0} \times \exp(eV / k T_e)$  と表される。ここで  $X$  はプローブ表面からの距離で  $R_D$  はデバイ長を表わす。電子密度が周辺の一様な値の  $1/e$  になる所 ( $X$ ) をシースの端とするとシース厚さ ( $S$ ) はプローブ電位 ( $V_P$ ) によって定まる。

シースの厚さが  $S$  で長さが  $L$  の円筒状のシースを仮定するとプローブの半径を  $a$  としてシース容量値 ( $C_S$ ) は、 $C_S = 2 \times \pi \times \epsilon_0 \times L / \log(S/a + 1)$  のようになる。シースの厚さ  $S$  が  $L$  に等しい時、 $C_S = C_{po}$  となって、 $S = L/3$  の時、 $C_S = C_{po} \times (1 \pm 0.2)$  となって  $C_S$  の値は  $C_{po}$  に近い値となる。

円筒形プローブを含むプリアンプ系の等価容量値 ( $C$ ) を数  $100 \text{ pF}$  として等価抵抗値 ( $R$ ) を数  $\text{M}\Omega$  とすれば時定数は数ミリ秒となる。プローブ電位はビームが去れば即時に立ち下がりその放電特性は、 $V(t) = Q / C_{po} \times \exp(-t / CR)$  で表わされる。プローブ容量値もほぼこの放電特性に従って減少する。

シースと周辺の一様プラズマを含めたプローブ容量値 ( $C_P$ ) は、 $C_P = C_S \times C_{po} \times (f \times f - f_U \times f_U)$

$f U) / ((C S + C p o) \times f \times f - (C S \times f H \times f H + C p o \times f U \times f U))$  で与えられる。周辺プラズマ中に掃引周波数で定まる電子密度の領域が混在している場合にはCの値は低い値を示す。

( 3 ) 電子流直撃時に観測された周波数特性 [省略]