

観測ロケットによる電子密度測定用 インピーダンスプローブのプラズマ共鳴特性

渡辺勇三・江尻全機・大林辰蔵

Plasma Resonance Characteristics of Impedance
Probe Data Obtained by Sounding Rocket Experiments

By

YUZO WATANABE, MASAKI EJIRI and TATSUZO OBAYASHI

Abstract: Re-examination of the impedance formula of a short cylindrical probe in a plasma by K.G. Balmain reveals the existence of two new plasma resonances, besides the well-known upper hybrid resonance (UHR) at the frequency, f_{UHR} . They are the plasma resonance (PR) and the modified plasma resonance (MPR). The characteristics of these resonances have been investigated by comparing with results of the sounding rocket (K-9M-54) experiments. The frequency spectrum of the probe impedance shows a distinct PR at the local plasma frequency, f_P , which is quite independent to the gyro-frequency, f_H and the probe aspect to the magnetic field line. On the other hand, the MPR is very much sensitive to the magnetic aspect. Two branches of MPR ($f_{\pm\text{MPR}}$) vary with respect to the magnetic aspect angle ($0^\circ \rightarrow 90^\circ$), for $q \equiv \frac{f_H}{f_P} > 1$; $f_{+\text{MPR}} = f_{\text{UHR}} \rightarrow f_H$, $f_{-\text{MPR}} = 0 \rightarrow f_P$, for $q = 1$; $f_{+\text{MPR}} = f_{\text{UHR}} \rightarrow f_P (= f_H)$, $f_{-\text{MPR}} = 0 \rightarrow f_P (= f_H)$, and for $q < 1$; $f_{+\text{MPR}} = f_{\text{UHR}} \rightarrow f_P$, $f_{-\text{MPR}} = 0 \rightarrow f_H$.

1. 緒 言

インピーダンスプローブ (IP) は超高層大気中の電子密度を観測するために開発されたプラズマ測定器である。1965年、観測ロケットに搭載されて電離層における電子密度の高度分布を測定して以来、多くの実験と研究が重ねられてきた。この IP はプラズマ中における金属製円筒プローブの等価容量値の周波数スペクトルを測定する装置である。プローブを一辺に含む容量ブリッジに 0.2~10MHz の高周波掃引信号を印加し、ブリッジの不平衡成分として検出されるプラズマ中プローブのインピーダンス成分を測定する。このスペクトルには種

々のプラズマ共鳴現象の効果が現れるが、とりわけ検出された高域ハイブリッド共鳴周波数からは領域の電子密度が精度良く求められる[1]。本報告は新たに検出されたプラズマ共鳴現象 (PR) と変形プラズマ共鳴現象 (MPR) について検討し、その理論的根拠と実験的な共鳴特性を明らかにしようと試みたものである。

2. プラズマ共鳴と変形プラズマ共鳴の理論的検討

プラズマ中に置かれた円筒型プローブの等価容量 (C) は Balmain により次式で与えられている [2]。

$$C = \frac{\sqrt{K}\sqrt{F}}{\ln \frac{2F}{(\sqrt{K_0} + \sqrt{F})\sqrt{K_0}} + \ln \frac{L}{\rho} - 1} \quad (1)$$

ここで、

$$K_0 = \frac{U-X}{U}, \quad K = 1 - \frac{XU}{U^2 - Y^2}, \quad F = K_0 \sin^2 \alpha + K \cos^2 \alpha$$

$$X = \frac{f_p^2}{f^2}, \quad Y = \frac{f_H}{f}, \quad U = 1 - j \frac{f_\nu}{f}, \quad f_{UHR}^2 = f_p^2 + f_H^2$$

L : プローブ長, ρ : プローブ半径, f_p : プラズマ周波数, f_H : ジャイロ周波数, f_{UHR} : 高域ハイブリッド共鳴周波数, f_ν : 衝突周波数, α : プローブ軸と外部地球磁場とのなす角度。

共鳴条件, すなわち $C=0$ ($f_\nu=0$ の場合) となる条件は, (i) $K=0$, (ii) $K_0=0$, (iii) $F=0$ の場合がある。(i) の時には周波数が f_{UHR} のところで共鳴現象が現われる [3]。ここでは, (ii) と (iii) の条件で生じるプラズマ共鳴現象について検討する。

2-1 プラズマ共鳴 (PR) の特性

$K_0=0$ における共鳴現象は $f_\nu=0$ の場合, $f=f_p$ で起こる。これをプラズマ共鳴 (PR) と名付ける。図-1 は (1) 式から得られるプローブ容量 (C) に関する周波数スペクトルの計算例である。図は f_p を変数 (0.5, 1.0, 1.4, 2.0 MHz) として, $f_H=1.2$ MHz, $f_\nu=0.01$ MHz, $\alpha=0^\circ$ の場合の計算結果である。PR の共鳴周波数は $f=f_p$ で現れる。また, $q \equiv \frac{f_H}{f_p}$ とし、 $q>1$ の場合に PR 現象の Q 値 (共鳴の尖鋭度) は高い値になる。この PR は、磁場の強さ、ならびに磁場とプローブの角度 (α) に依存しないが、後述の変形プラズマ共鳴 (MPR) は α の影響をうけるのが特徴である。

2-2 変形プラズマ共鳴 (MPR) の特性

(1) 式より, $F=0$ の条件を満たす共鳴周波数を f_{MPR} とすると,

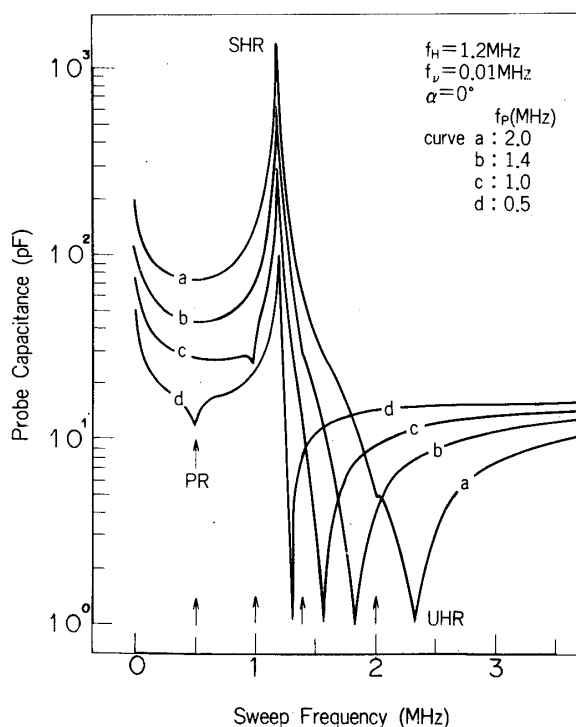


図-1 プラズマ周波数 (f_p) を変数とした時のプローブの等価容量値の理論曲線. UHR, SHR, PR はそれぞれ高域ハイブリッド共鳴, シース共鳴, プラズマ共鳴を表す.

$$f_{\text{MPR}}^2 = \frac{f_{\text{UHR}}^2}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4f_p^2 f_H^2}{f_{\text{UHR}}^4} \cdot \sin^2 \alpha} \right] \quad (2)$$

すなわち,

$$\sin^2 \alpha = \frac{f_{\text{MPR}}^2 (f_{\text{UHR}}^2 - f_{\text{MPR}}^2)}{f_p^2 \cdot f_H^2} \quad (3)$$

(2)式の f_{MPR} を±の符号に応じて $f_{+\text{MPR}}$, $f_{-\text{MPR}}$ と表記することにする. これらは (3)式で $\alpha=0^\circ \rightarrow 90^\circ$ と変化すると次のように移動する.

	$f_{-\text{MPR}}$	$f_{+\text{MPR}}$
$q > 1$	$0 \rightarrow f_p$	$f_{\text{UHR}} \rightarrow f_H$
$q = 1$	$0 \rightarrow f_p (= f_H)$	$f_{\text{UHR}} \rightarrow f_p (= f_H)$
$q < 1$	$0 \rightarrow f_H$	$f_{\text{UHR}} \rightarrow f_p$

(3)式は, $\frac{f_{\text{MPR}}}{f_{\text{UHR}}} = p$, $\frac{f_H}{f_p} = q$ とすると次のようになる.

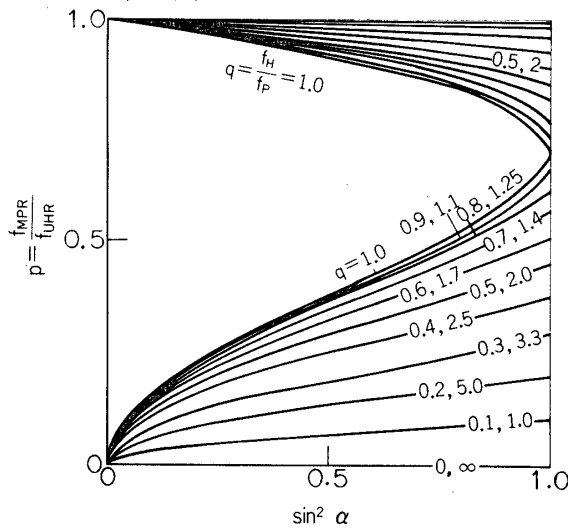


図-2 変形プラズマ共鳴の周波数 (f_{MPR}) とプローブと磁場の角度 (α) との関係を表わす理論曲線.

$$\sin^2 \alpha = \frac{p^2}{q^2} (1-p^2)(1+q^2)^2 \tag{4}$$

p と $\sin^2 \alpha$ の関係を q をパラメーターとして図-2 に示す. (4) 式より明らかなように, f_{-MPR} は $0 \leq p \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$ の領域で f_{+MPR} は, $\frac{1}{\sqrt{2}} \leq p \leq 1$ の領域で検出される.

また, MPR の周波数 ($f_{\pm MPR}$) の α に対する変化の様子を (1) 式を計算して図-3, 図-4 に掲げてある. 図-3 は $q > 1$ の場合のプローブ容量の周波数スペクトルで $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の時の結果である. $q < 1$ の例は図-4 に示してある.

3. 観測結果

PR 現象はプラズマチェンバーによる実験ならびに観測ロケット実験 (S-210-9 号機, 10 号機, K-9M-43 号機, 47 号機, 54 号機) で検出されている. MPR 現象は L-3H-2 号機 [4] [5]. および S-210-9 号機, K-9M-54 号機で観測されている.

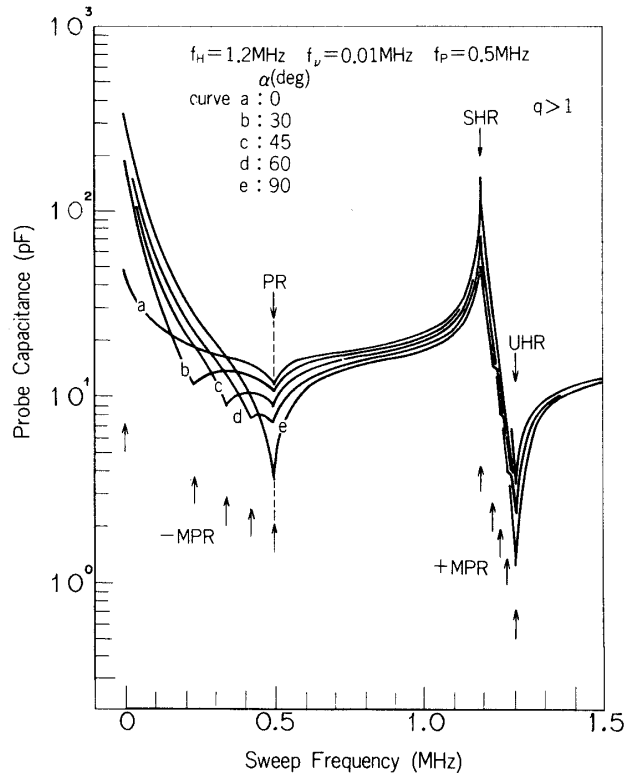


図-3 プローブと磁場の角度 (α) を変数とした時のプローブの等価容量値の周波数特性 ($q > 1$ の場合). MPR と PR はそれぞれ変形プラズマ共鳴とプラズマ共鳴を表わす.

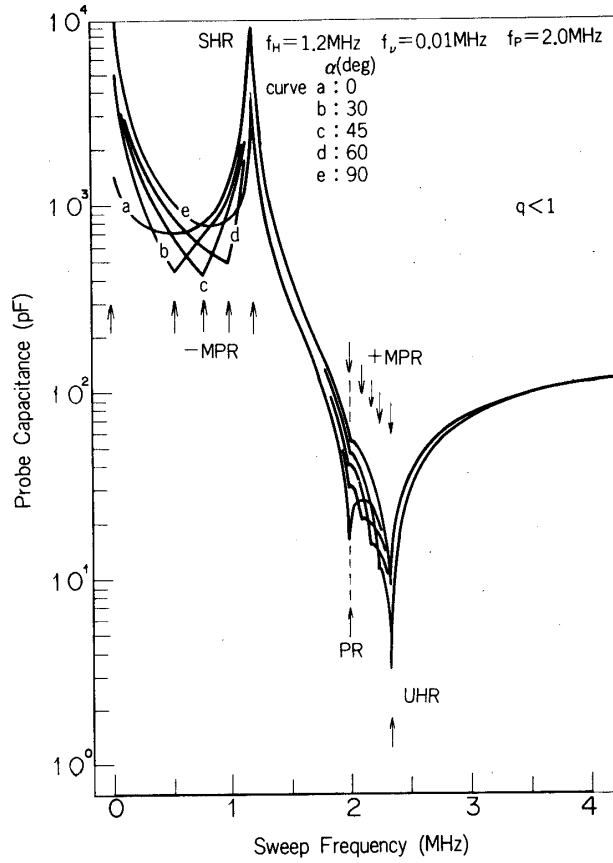


図-4 図-3と同様の理論曲線 ($q < 1$ の場合).

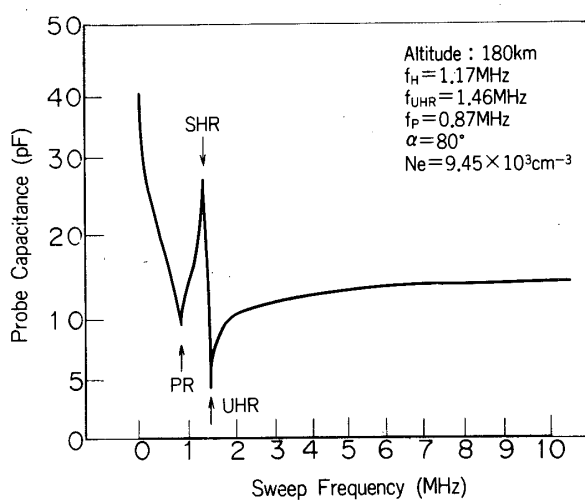


図-5 K-9M-54号機で観測されたプローブ容量の周波数特性の代表的データ. SHR, UHR, PR はそれぞれシース共鳴, 高域ハイブリッド共鳴, プラズマ共鳴を表わす.

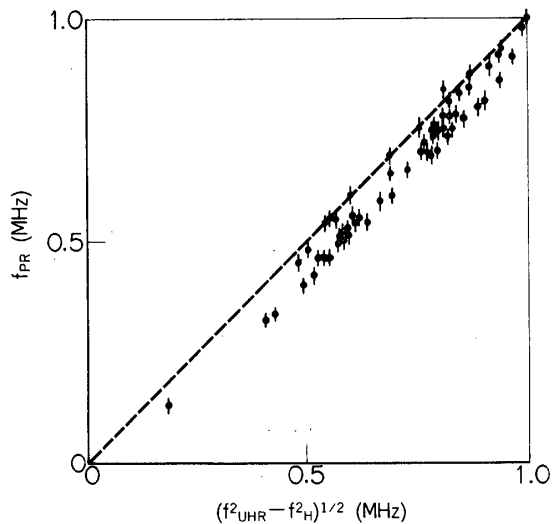


図-6 縦軸は観測されたPRの周波数 (f_{PR}), 横軸はUHRから計算された値 (f_p)を示す.

3-1 PRの実験結果

図-5はK-9M-54号機の観測データの一例である。図のプロープ容量に関する周波数スペクトルではシース共鳴 (SHR) が1.3MHzに、高域ハイブリッド共鳴 (UHR) が1.46MHzに現われている。また、PRは0.87MHzのところにも明瞭に検出されている。観測されたPRの周波数 (f_{PR}) と計算された $f_P = (f_{UHR}^2 - f_H^2)^{1/2}$ の関係を図-6に示す。良く一致している。

3-2 MPRの実験結果

図-7, 図-8はK-9M-54号機で得られた観測データでMPRの検出されている代表的スペクトルである。図-7は $q > 1$ の場合で $f_{-MPR} = 0.58, 0.66$ MHzのところでもPRが明らかに検出されている。また、図-8は $q < 1$ の場合で $f_{-MPR} = 0.75, 0.95$ MHzのところでもMPRが観測されている。いずれの場合にも、 α によるMPRの変化が明らかに現われている。観測値から求められた $\sin^2 \alpha$ と f_{-MPR}, f_{+MPR} の関係を図-9に示す。実線は $q = 1.7, 1.25, 1.0, 0.8, 0.6, 0.5, 0.4$ の時の理論曲線で $q = 1.7$ と 0.6 , および $q = 1.25$ と 0.8 は同一の曲線である。 $p \geq 0.71$ では $+MPR$ が検出され、 $p \leq 0.71$ では $-MPR$ が検出されるが、いずれの場合にも実験結果は極めて良く理論値と一致している。

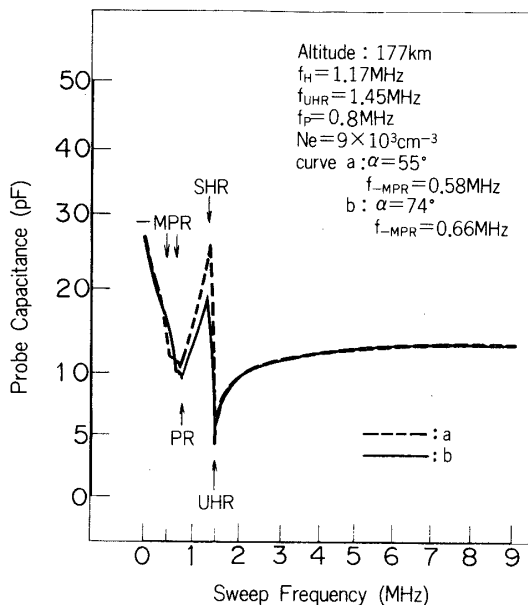


図-7 K-9M-54号機で観測された変形プラズマ共鳴 (MPR) とプラズマ共鳴 (PR) の代表的データ ($q > 1$ の場合)。

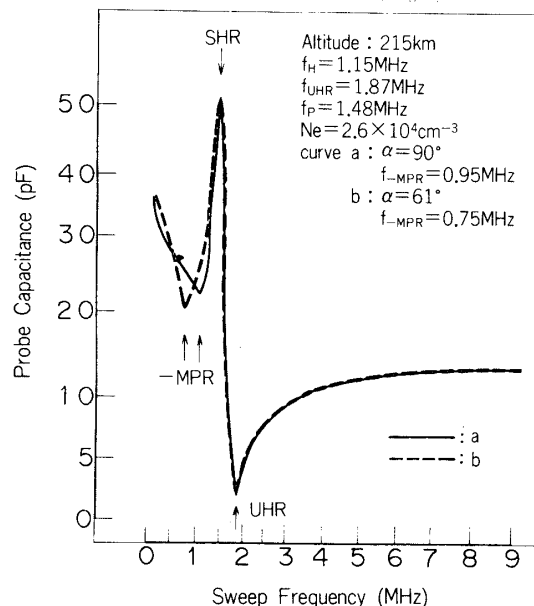


図-8 K-9M-54号機で観測された変形プラズマ共鳴 (MPR) の代表的データ ($q < 1$ の場合)。

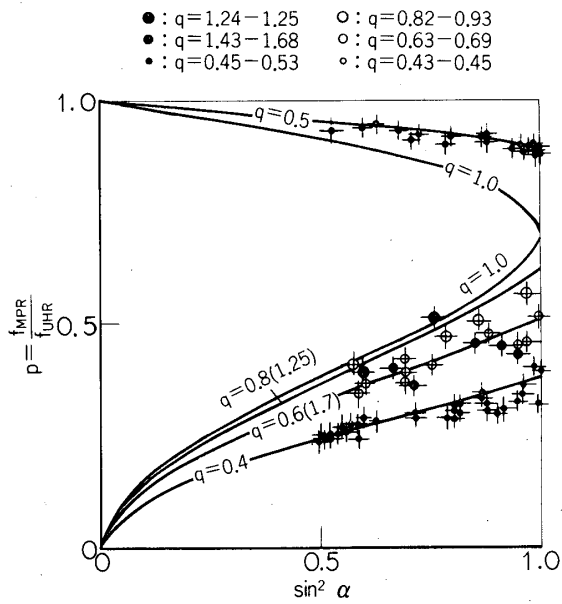


図-9 観測された $f_{\pm MPR}$ と α の関係を q を変数として示す。
実線は理論的に計算された曲線。

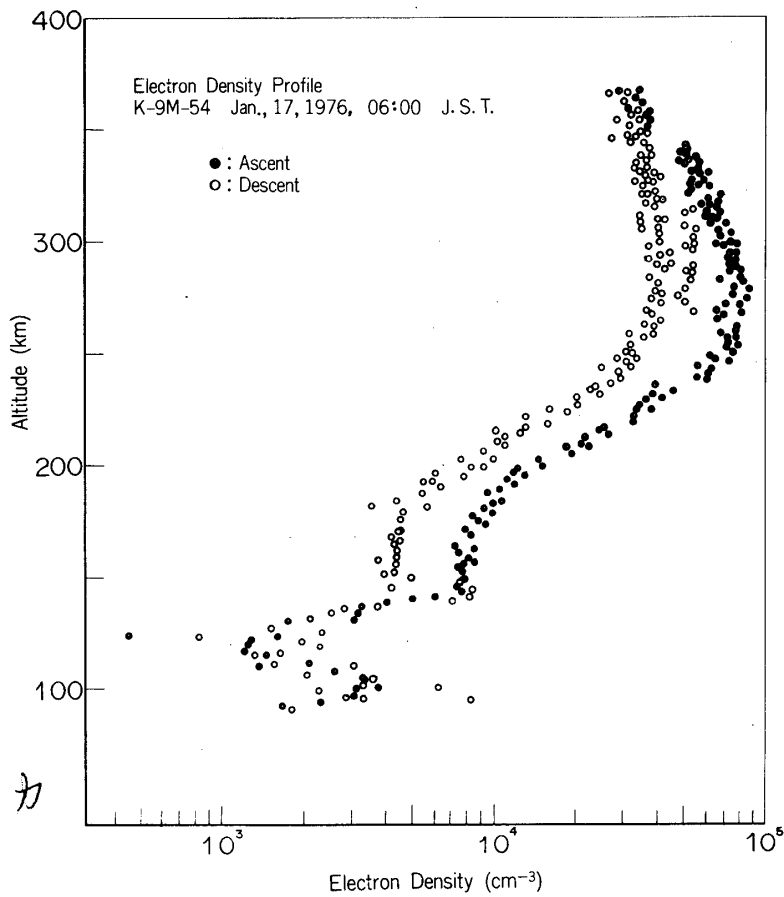


図-10 K-9M-54 号機のインピーダンスプローブによって観測された電子密度の高度分布。

4. 結 言

本報告では Balmain の理論式から予期されるプラズマ共鳴と変形プラズマ共鳴の存在を実験的に確認しその特性を調べた。観測ロケット (K-9M-54号機) のデータを用いて、 $f=f_P$ の位置にプラズマ共鳴が起こること、また、 α に依存して変形プラズマ共鳴が検出されることを確認した。参考のため、1976年1月17日6時00分に発射された K-9M-54号機に搭載されたインピーダンスプローブによって測定された電離層電子密度の高度分布を図-10に示した。

おわりに東京大学宇宙航空研究所観測ロケット実験班および搭載用インピーダンスプローブの製作にあられた明星電気株式会社の各位に謝意を表します。

1976年3月10日 新設部 (科学)

参 考 文 献

- [1] Oya, H. and T. Obayashi, A rocket experiment by a new impedance probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, **20**, 199-213 (1966).
- [2] Balmain, K. G., The impedance of a short dipole in a magnetoplasma, IEEE Trans. Ant., AP-12, No. 5, 605-617 (1964).
- [3] Oya, H., Effect of resonances on the admittance of an rf plasma probe surrounded by an ion sheath, Rept. Ionos. Space Res. Japan, **19**, 243-271 (1965).
- [4] Oya, H., Theoretical prediction on discrimination of modified and hybrid plasma resonances, Rept. Ionos. Space Res. Japan, **22**, 119-122 (1968).
- [5] Ejiri, M., Oya, H. and Obayashi, T., A modified plasma resonance observed by a rocket-borne gyro-plasma probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, **22**, No. 3, 201-204 (1968).