

K-9 M-73 及び S-520-5 号機による
微小ダイポールアンテナ
のインピーダンス測定

長野 勇**・満保正喜**・安田一博**・松本 紘***

(1986年4月20日受理)

Impedance Measurements of Short Dipole Antenna
in the Ionosphere by K-9 M-73 and S-520-5 Rockets

BY

Isamu NAGANO, Masayoshi MAMBO, Kazuhiro YASADA
and Hiroshi MATSUMOTO

Abstract: Impedance of two different kinds of short dipole antenna were measured in the vicinity of the lower hybrid resonance (LHR) frequency in the ionosphere by the sounding rockets. One is a wire antenna of 10 meter tip-to-tip length aboard the K-9M-73 rocket. The other is a short dipole antenna of 10 meter tip-to-tip length aboard the S-520-5 rocket. The experimental results were compared with theoretical values in this paper.

Main results are as follows: (1) The impedances of both antenna were capacitive near LHR frequency at the altitude below 240km. (2) The impedance of a short dipole antenna was mainly dependent on the length of an ion sheath surrounding the antenna near LHR frequency in the altitude ranging from 70 to 240km. (3) There seems to be no change of the impedance of the wire antenna as the bias current was varied stepwise from -1.4 to $+1.4 \mu\text{A}$.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 金沢大学工学部電気・情報工学科

*** 京都大学超高層電波研究センター

1. ま え が き

1980年代後半における国際的な磁気圏探査 (ISTP: International Solar-Terrestrial Physics) の一翼を担うものとして、宇宙科学研究所 (ISAS) を中心に計画が進められている。その物理的な課題は、「太陽風から磁気圏へのエネルギー供給と磁気圏プラズマの加速」である⁽¹⁾。予定されている観測項目は、磁場、電場、低・高エネルギー粒子、及びプラズマ波動である。

GEOTAIL 衛星では、周波数が数 Hz から数百 kHz までにわたるプラズマ波動を幾つかの異なった方式の装置で観測し、波動スペクトル密度、 k ベクトル、ポインティングフラックスなどを観測する予定である。その際に、プラズマ波動の電界成分の絶対強度を正確に知るためには、使用する電界測定用アンテナの入力インピーダンスを計測する必要がある。又、ワイヤーアンテナでは電場測定と共用するため、バイアス電流印加時に波動測定に及ぼす影響を調べておく必要がある。

今回、一部衛星搭載用波動測定器 (周波数掃引受信機, 多チャンネルアナライザ) の方式が決まり、その特性試験と、低周波における微小ダイポールアンテナのインピーダンス計測を兼ねて鹿児島宇宙空間観測所より打ち上げられた K-9 M-73 号機, 及び S-520-5 号機によって電離層レベルで試験実験が行われた。本論文では、電離層プラズマの低域ハイブリッド周波数付近の 5 m—5 m の微小ダイポールアンテナ, 及び 5 m—5 m のワイヤーアンテナのインピーダンス計測の結果, 及び理論との比較を行ったので報告する。

2. 実験の概要及び搭載装置

2.1 アンテナの形状

アンテナインピーダンスを計測する実験は、昭和 57 年 1 月 15 日 18 時 20 分に打ち上げられた K-9 M-73 号機, 及び昭和 57 年 9 月 6 日 11 時 00 分に打ち上げられた S-520-5 号機によって行われた。実際の衛星で必要な 100 m—100 m 程度の長いアンテナの伸展機構の基礎実験も兼ねて、両機で以下に述べる 2 種類の形状のアンテナが用いられた。

K-9M-73 号機

5 m—5 m のワイヤー (ケーブル) アンテナで銅より線にテフロン被覆を施したものである (外径 1.0 mm)。先端から 1 メートルを残して、1 メートルだけ被覆を取り除いて電場計測の電極としてある。又、アンテナには、 $-1.4 \sim +1.4 \mu\text{A}$ のバイアス電流を印加し、これにより変化するアンテナの対プラズマインピーダンス測定を行った。又、ケーブルは、ロケット本体内のスプール内に収納されており、伸展時にはモーターによりスプールを回転させケーブルを送り出す機構になっている。送り出されたケーブルは、先端のおもり、及びケーブル自身に働く遠心力とコリオリの力で伸展していく⁽²⁾。

S-520-5 号機

5 m—5 m の円柱 (直径 1.0 cm) 形のダイポールアンテナである。無バイアスである。伸展は、ボビンに巻かれた薄板をモーターで駆動させて、円柱形に整形しながら送り出す方式が取られている。又、このロケットは、太陽を観測するために上昇時に高度 140 km でス

ピンが止められ、CN において太陽にポインティングされた。従って、アンテナは、ほぼ地球磁場と一定角度を保った。図 1 a, b に各ロケットに搭載したアンテナの形状を示す。

2.2 搭載装置

K-9 M-73 号機, S-520-5 号機両ロケットのアンテナのインピーダンス測定装置はほぼ同じで、そのブロック図を図 2 に示す。

インピーダンスの測定は、単純で以下のようなものである。アンテナを高抵抗を通して低域ハイブリッド周波数 (LHR) 付近の 6 kHz 正弦波を印加し、アンテナの端子電圧 (SFL) と位相 (SFP) を検出することからアンテナの複素インピーダンスを測定する。図 3 に K-9 M-73 号機の下降時の SFL, SFP, CAL の地上へ伝送されたテレメータ例を示す。CAL 信号は、他の観測信号に 10 秒に 1 回割り込ませてある。これらのテレメータ出力 (SFL, SFP) よりアンテナのインピーダンスを求めるためには、図 4 に示すようにアンテナを抵抗 R と容量 C で表した等価回路を考える。ここで

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{RR_2 e^{-j\phi}}{[(RR_2 + RR_1 + R_1 R_2)^2 + \omega^2 R^2 R_1^2 R_2^2 (C + C_2)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega R R_1 R_2 (C + C_2)}{RR_2 + RR_1 + R_1 R_2} \tag{1}$$

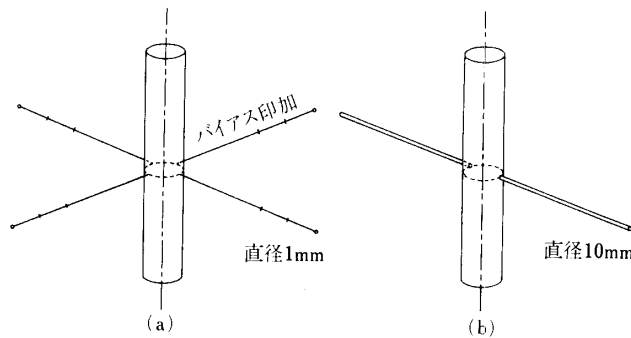


図 1 a. K-9 M-73 号機で用いたワイヤーアンテナ
 図 1 b. S-520-5 号機で用いた微小ダイポールアンテナ

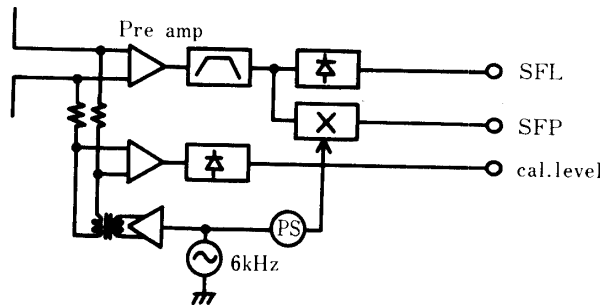


図 2. インピーダンス測定のブロック図

となる。ここに V_i は印加電圧、 V_o はアンテナの端子電圧である。又、 R_1 は電圧印加用抵抗、 R_2 はプリアンプの入力インピーダンスであり、K-9 M-73 号機ではそれぞれ $2\text{ M}\Omega$ 、 $1\text{ M}\Omega$ 、S-520-5 号機では、共に $4.4\text{ M}\Omega$ である。 C_2 は、アンテナを共有する他の PI (観測装置) の容量も含んでいる。このため、K-9 M-73 号機では約 250 pF で、S-520-5 号機では約 60 pF であった。

そして、それぞれロケット打ち上げ前に行われたキャリブレーション・データ (アンテナに既知の抵抗および容量を別々に、又は、パラレルに接続して SFL, SFP の各電圧を調べた。) と、(1) 式で得られた SFL, SFP のテレメータ出力を比較して SFL レベル特性 (V_o 対 SFL テレメータ出力) 及び、PSD 特性 (位相差対 PSD テレメータ出力) の較正を行い、その較正した特性を用いて観測結果よりアンテナの R 成分 (アンテナ抵抗) と C 成分 (アンテナ容量)、アンテナのインピーダンスの絶対値 $|Z|$ を (1) 式に基づいて計算した。

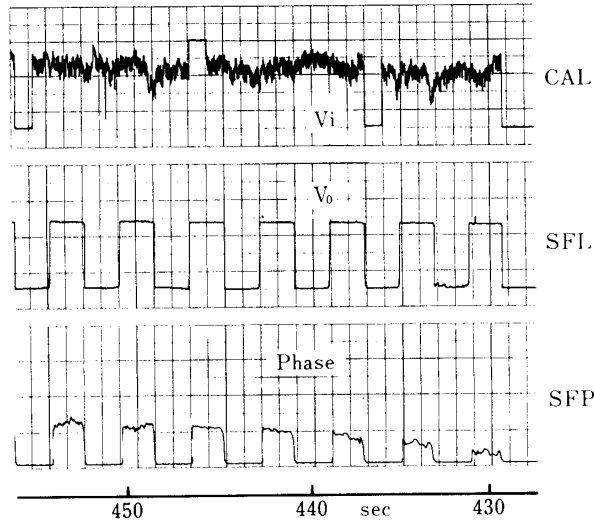


図 3. K-9 M-73 号機のテレメータ出力例

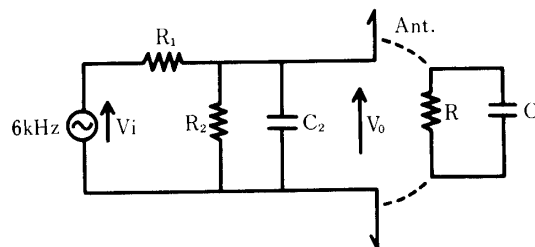


図 4. アンテナの等価回路

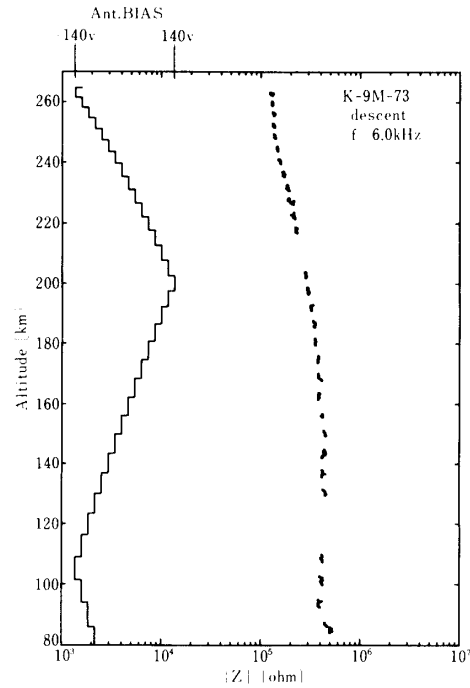


図 5 b . K-9 M-73 号機のインピーダンスの絶対値
 左側のステップ状の変化は、電流バイアスを加えるため
 に $10^8 \Omega$ に加えられた電圧値を示す

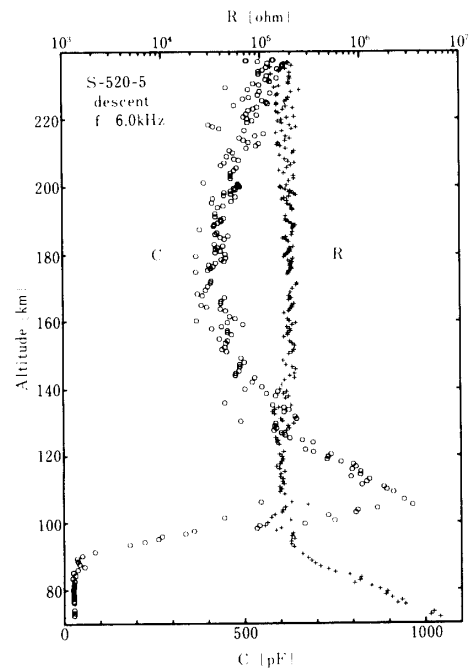


図 6 a . S-520-5 号機における、5 m-5 m 微小ダイポールアンテナのインピーダンス

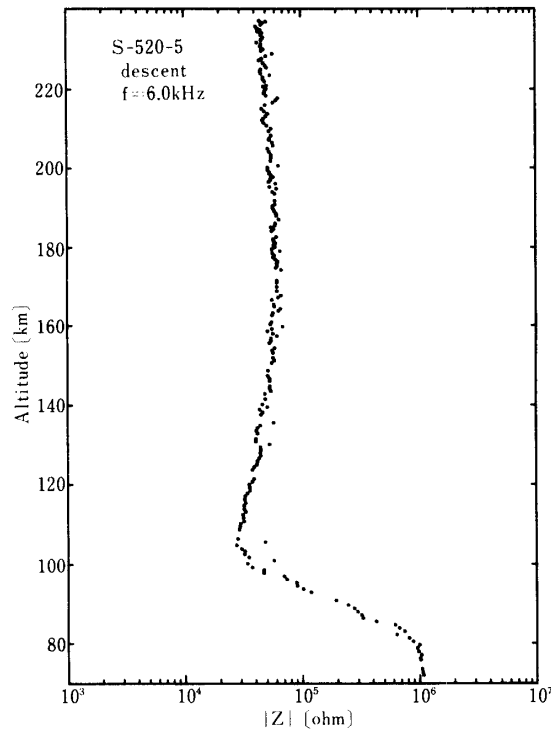


図 6 b. S-520-5 号機のインピーダンスの絶対値

4. 理論との比較検討

S-520-5 号機ロケット

磁場のあるプラズマ中のホイップアンテナのインピーダンスは、これまで多くの人によって解析的に得られている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。観測したインピーダンスが理論式とどのように対応するかを調べるため、ここでは、先ず Balmain によって導出された次式を用いる⁽³⁾。

$$Zp = \frac{a}{j\omega 2\pi\epsilon_0 K_1 L \sqrt{F}} \left[\ln \frac{L}{\rho + s} - 1 - \ln \frac{a + \sqrt{F}}{2F} \right]$$

$$F = a^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \quad (2)$$

$$a = \frac{K_1}{K_0}$$

θ はアンテナ軸と地球磁場のなす角度、 L 、 ρ はアンテナの長さ、及び半径、 s は Debye length 分を考慮したシースの厚さである。

最初に、S-520-5 号機の観測時における(2)式の評価を行う。前に述べたようにこのロケットは太陽にポインティングされ、しかもスピニングが停止されていたので、アンテナと地球磁場のなす角度 θ は容易に計算され約 65° であった。電子密度は、同時搭載のインピーダンスプローブ法(東北大, 大家, 森岡両氏提供)で得られている(図7)。又、電子温度は、

内ノ浦で観測された平均的モデルを用いた⁽⁶⁾。そして、ジャイロ周波数は1.18 MHzとした。これらの数値を用いて(2)式を計算した結果を図8に示す。この結果と図6 aとを比較してみると、理論値が観測値に比べて2ケタも小さくなった。そこで、次にこの観測は低域ハイブリッド周波数付近の周波数(6 kHz)で行ったためプラズマパラメータが少し異なり低域ハイブリッド周波数が変化することを考える。すなわち、周波数に対するアンテナのインピーダンスの変化が激しいとき図8の結果が周波数により大きく変化する可能性がある。このことを図9に示す。

図9より、低域ハイブリッド周波数でインピーダンス $|Z|$ は最大となっているがその値は、その付近の周波数での値と大差ない。すなわち、図8に示したアンテナのインピーダンスの理論値は、プラズマパラメータの多少の変化に対して大きく変化しない。このことより、S-520-5号機のアンテナのインピーダンス(図6 a, 6 b)は、プラズマインピーダンスでは説明がつかない。そこで次に、アンテナとプラズマとの間に生じるイオンシースの影響について考察する。図10のようにプラズマ中に置かれたアンテナには、周囲で熱運動している電子と正イオンの一部がアンテナに流れ込み、その結果として通常わずかながら負に帯電する。このため、アンテナとプラズマ間にイオンシースが生じる。このイオン

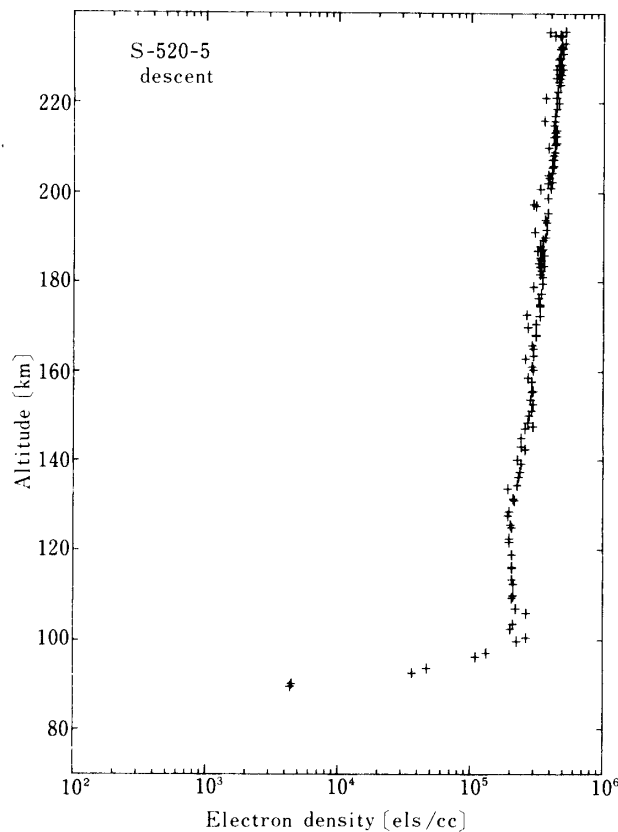


図7. S-520-5号機下降時における電子密度の高度分布(東北大大家, 森岡氏測定)

シースによるシースアドミッタンス Y_s は、次式で与えられる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ここに

$$Y_s = G_s(V_p) + j\omega C_s(V_p)$$

$$G_s = I_{se} \cdot \exp(V_p/V_e) / V_e$$

$$C_s = (2\pi\epsilon_0\rho L/\lambda_D)\xi(V_p) \tag{3}$$

である。

ただし、 I_{se} は飽和電流、 $V_e = kT_e/e$ 、 V_p はスペースポテンシャルに対するアンテナの電位である。また $\xi(V_p)$ は

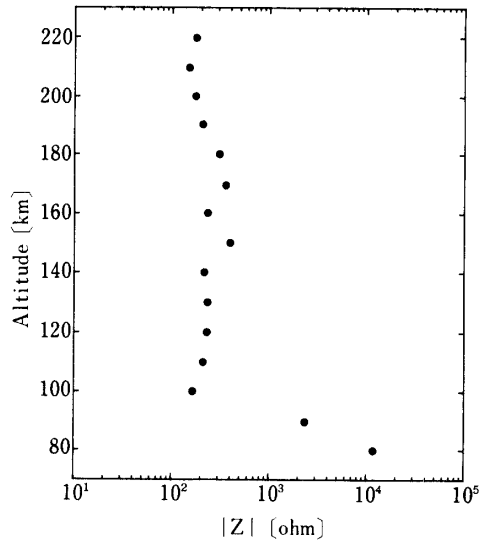


図 8. Balmain の式によるインピーダンスの理論値

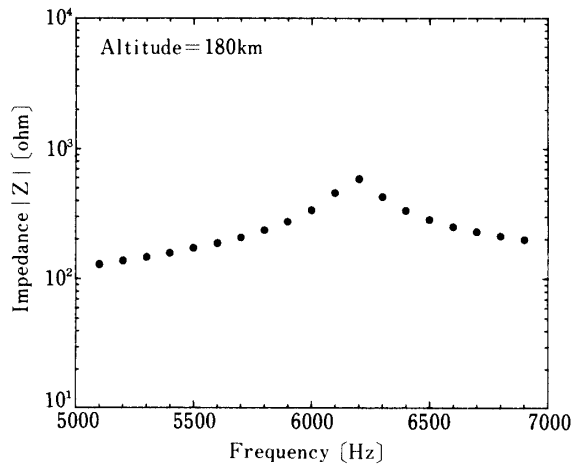


図 9. インピーダンスの理論値の周波数特性

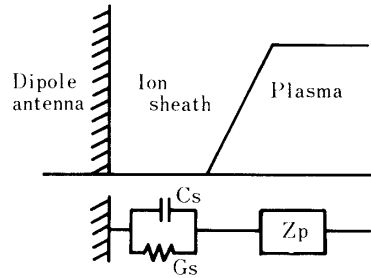


図 10. プラズマ中のアンテナの等価回路

$$1 - 4n_p/x = (1 - 2/\xi x) \exp(2/\xi x)$$

$$n_p = -V_p/V_e, \quad x = \rho/\lambda_D, \quad V_e = kT_e/m_e \quad (4)$$

によって決められる。又、シースの厚さ s は

$$s/\lambda_D = x [\exp(1/\xi x) - 1] \quad (5)$$

より λ_D (Debye length) の何倍であるかが求まる。以上より、シースアドミッタンスを求めればよいのだが、 V_p の値がわからないのでここでは逆に、観測で得られた R の値から V_p を決め、次に、その V_p の値を用いて s/λ_D 及び C_s を求め、観測結果のアンテナ容量 C と比較した。図 6 a の R の分布から V_p の分布を求め、そして、その V_p の分布から (5) 式を使ってイオンシースの厚さ、シースによるアンテナの容量を計算した。結果を図 11, 12, 13 に示す。

図 11 よりスペースポテンシャルに対するアンテナの電位 V_p は高度が低くなるにつれてゼロに近づいていることがわかる。これは、自由空間に近づくにつれてアンテナと空間の電位差がなくなるためである。又、図 12 で見られるようにシースの厚さは、高度 100 km 以上では Debye length の約 3 倍で、それ以下になるにつれて小さくなっている。これは、高度 100 km 以下で電子密度分布が急峻に減少しているためである。次に、図 13 に示すアンテナ容量の理論値と観測値の比較をしてみると、高度 130 km 以上ではほとんど観測値と理論値は一致しているが、高度 120 km 以下では、それらの値に差が現れてきている(図 10)。これは、下部電離層に近づくにつれて正イオン及び衝突回数が増加し複雑な影響を与えているためであろう。

K-9M-73号機ロケット

このロケットは、姿勢を安定させるためにスピンがかけられている。又、ワイヤーアンテナを一部テフロン被覆で被っているため、アンテナの周囲に生じるシースの影響を定量的に扱うことが困難なようである。ただこの実験で明らかになったことは、バイアス電流の印加の影響がアンテナの高周波インピーダンスに表れなかった。すなわち、アンテナに約 $-1.4 \sim 1.4 \mu\text{m}$ のバイアス電流が加えられているが、アンテナのインピーダンスは変化していない。

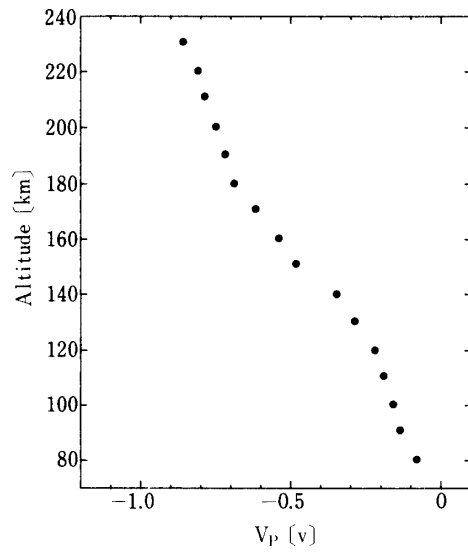


図 11. プラズマに対するアンテナポテンシャルの計算値

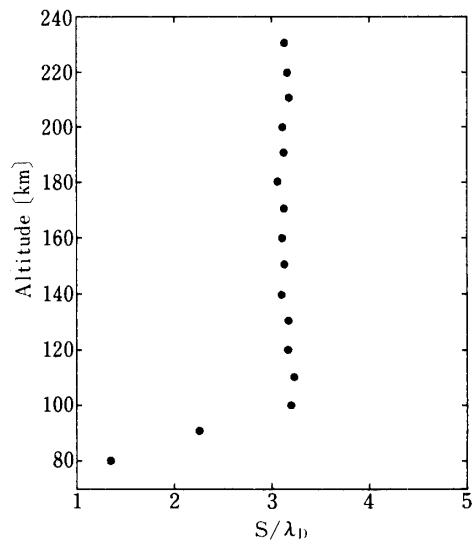


図 12. シースの厚さの計算値

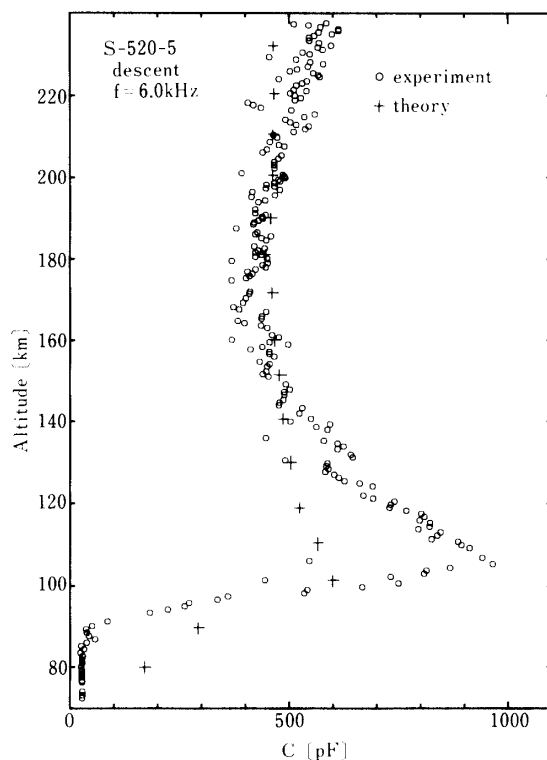


図 13. S-520-5 号機におけるアンテナ容量の実験値と計算値の比較

5. む す び

本論では、将来の科学衛星に搭載予定の VLF 波観測装置の開発に伴ない、その基礎データを得るため、電離層高度で実験を行った。特に、プラズマ中の VLF 波測定に関して、電界の絶対強度測定にかかせないアンテナのインピーダンスの計測について、実際の衛星に搭載する展開メカニズムを用いて、微小ダイポール及びワイヤーアンテナの計測を S-520-5 号機及び K-9 M-73 号機によって行った。観測結果と理論式とで比較し次のような結果を得た。(1) 低域ハイブリッド周波数付近のアンテナのインピーダンスは、両機とも高度 240 km 以下で容量性である。

(2) 高度 70~240 km での低域ハイブリッド周波数付近のダイポールアンテナのインピーダンスは、主にイオンシースによって決まる。バイアス電流を変化したワイヤーアンテナのインピーダンスは、一部従来の理論等では説明しにくい面があり今後検討していく予定である。

謝 辞

この実験は, EXOS-D, ISTP のワーキンググループの強いバックアップのもとで行われたものであり, 宇宙科学研究所平尾邦雄教授(現東海大学), 西田篤弘教授, 鶴田浩一郎助教授および, 京都大学木村磐根教授には, 実験の準備段階から色々とお世話いただいた。ここに, 深く感謝致します。東京電機大学橋本弘蔵助教授には, 機器の設計段階から終始有益なコメントをいただいている。ここに感謝致します。又, S-520-5号機の電子密度分布は, 東北大学大家寛教授, 森岡昭博士のご好意により提供されたものであり, 厚くお礼を申し上げます。S-520-5号機およびK-9 M-73号機の波動観測器は, 明星電気株式会社で製作されたものである。

参 考 文 献

- [1] 西田 篤弘, 磁気圏・電磁圏シンポ, 宇宙科学研究所, (1984)
- [2] 鶴田浩一郎, 西田 篤弘, 松本 紘, 佐々木進, 森岡 昭, 小川俊雄, 宇宙観測シンポジウム, 昭和57年度
- [3] Balmain, K. G., IEEE Trans., AP-12 5 (1964)
- [4] Aggson, T. L., NASA Technical Note (1966)
- [5] Adachi, S., Ishizone, T, and Mushiake, Y., Radio Sci., 12, 1 (1977)
- [6] Sounding Rocket Data in Japan Vol. 3, Hirao, K., Oyama, K., Electron Temperature (1976)
- [7] Grawford, F. W. and Graed, R., J. Appl. Phys., 37, 1 (1966)
- [8] Aso, T., Ionosphere Research Laboratory Kyoto Univ. Japan (1974)