

電離層プラズマ中で観測された SHR 共鳴の特性
(*E* 層総合観測実験のインピーダンスプローブ特性)

渡辺 勇三

Rocket Observation of Characteristics of the Sheath
Resonance (SHR) in the Ionosphere

By

Yuzo WATANABE

Abstract: Characteristics of the sheath resonance (SHR) observed by the impedance probe are discussed. Two phenomena about SHR on the fSHR-fP diagram have been observed at the sounding rocket experiment of S-310-18, launched at 11:00 JST on January 26, 1988. Those are as follows: first, at the lower *E* region, a frequency at SHR (fSHR) increases slightly, the *Q* value of SHR decreases, and the equivalent probe-capacitance at the low frequency (CL) increases slightly. The ratio of the sheath thickness (*S*) to the local debye length (S/λ_D) has changed from 1.0 to 1.5 at about 75 second after launch when the height is about 100 km.; second, at the higher region, the CL value which is interpreted to be equal to the equivalent ion sheath capacitance around the probe (CS) decreases with the simultaneous increasing of the fSHR frequency. The S/λ_D value has changed from 1.5 to 1.75 at about 140 second, at 170 km. The CL value has decreased gradually and the fSHR frequency increased discontinuously.

Above observed results in the first case at about 75 second are

explained by taking into account of an effect of collision frequency (f_c) and adequately explained by using an unique modified sheath model which has a different physical structure. The second variation at about 140 second is sufficiently interpreted to be due to the negative bias effect at the probe potential.

概 要

昭和63年1月26日11時00分00秒に内之浦(31.2°N, 131.1°E)から打ち上げられた観測ロケットS-310-18号機に搭載されたインピーダンス・プローブによって電離層電子密度の高度分布が高精度で測定された。また、プローブ特性が検討された結果、低い高度領域では、fSHR-fP ダイアグラム、CS-fP ダイアグラムが特徴のある変化を示して、低周波数領域でのプローブ等価容量値と、シース共鳴周波数(fSHR)がともに僅かに増加するとともに、fSHRなどの共鳴のQ値が悪化した。検討の結果、低い高度領域では、衝突周波数の影響で、一様プラズマ領域の誘電率、シース領域の構造、共鳴のQ値の変化などの現象が生じることがわかった。すなわち、一様プラズマ領域の低周波数での誘電率が上昇するので、その結果、低周波数領域でのプローブ等価容量値が増加する。また、衝突周波数の増加によって電子がプローブ表面に到着するのが困難になり、等価的にシースの厚さが厚くなって、その結果、fSHRが僅かだが増加する。さらに、衝突周波数の増加によって一様なプラズマ領域とシース内の両方の抵抗分の増加でfSHRなどの共鳴のQ値が減少する。

このロケット実験で観測されたもう一つの電離層プラズマ中でのシース共鳴周波数(fSHR)の特徴的变化は、高い高度領域で観測されたCSの減少とfSHRの不連続的な増加で、これはシースの厚さが増加したためであると考えられる。シース厚/デバイ長の比の値は1.5から1.75に増加している。検討の結果、プローブが負に帯電したらしいことが推測されたが帯電の原因は謎である。

ま え が き

S-310-18号機は前日の同時刻に発射されたK-9M-81号機と共同で電離層を総合的に観測して、約100kmの高度に出現する異常高温層の熱的電子と励起された原子分子の相互作用、ならびに、波動による同電子の加熱機構の研究を行なうことを主目的として、昭和63年1月26日11時00分00秒にKSCから打ち上げられた。ロケットは正常に発射

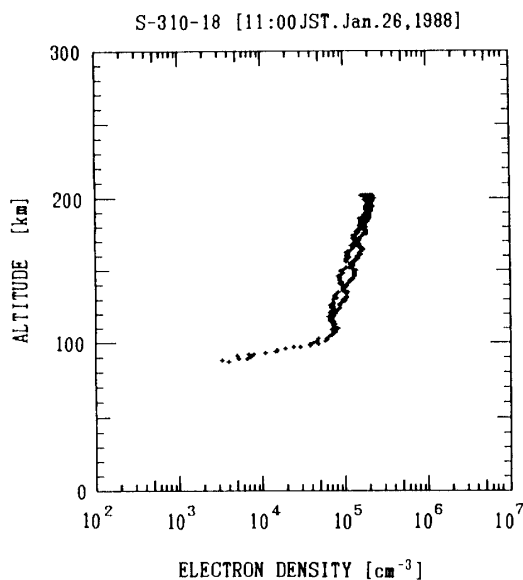
され、最高々度 202.2 km に到達後、内之浦の南東の遙か 208 km の海面上に落下着水した。同号機に搭載されたインピーダンス・プローブは機体からプラズマ中に突き出した円筒型金属製プローブの RF 帯における等価容量値の周波数スペクトルを容量ブリッジの不均衡成分として測定することによって、検出される UHR, PR, SHR などの共鳴周波数およびプローブの周囲に形成されるイオンシースの等価容量値 (CS) などから電離層電子密度の高度分布を高精度観測することができる。

上述の SHR (シース共鳴) は金属プローブ周辺のイオンシース領域と一様な電離層プラズマ領域の直列共鳴現象で、その直列共鳴周波数 (fSHR) で測定しているインピーダンスがゼロになる。すなわち、イオンシースの等価容量値 (CS) と周辺プラズマの情報を持っており、従って、SHR 共鳴周波数 (fSHR) を測定することによって周辺のイオンシースの変化を検知することができる。シース容量値は電子密度、電子温度、プローブの形状、および電位によって定まるので、CS-fP 特性、fSHR-fP 特性を利用して帯電の変化の様子などが考察された。

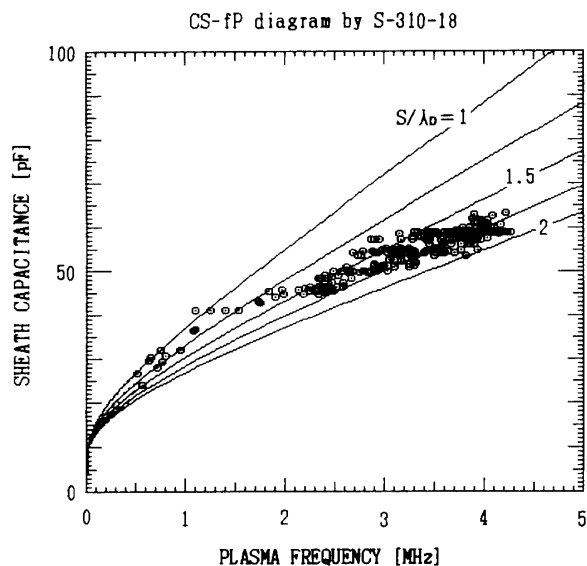
I S-310-18 号機による観測結果

S-310-18 号機は昭和 63 年 1 月 26 日 11 時 00 分 00 秒に鹿児島県肝属郡内之浦町の KSC 実験場 (31.2°N, 131.1°E) から打ち上げられ、223.7 秒後に最高々度 202.2 km, 距離 105.8 km の海上位置 (30.3°N, 131.4°E) を通過し、560 秒後に、内之浦の南東の遙か 208 km の海面上 (29.5°N, 131.8°E) に落下した。搭載されたインピーダンスプローブは電離層電子密度の高度分布を高精度で測定した。観測は発射後 65.3 秒の高度 87.3 km から始まり、381 秒の高度 88.2 km まで続いた。測定値はロケットウェイクによって周期約 16.7 秒のスピントーンを受けていた。また、それはロケットの上昇時に比べて降下時に大きく現れた。第 1 図はロケット上昇時に観測された電離層電子密度の高度分布である。観測された電離層 E 層の高度はロケット上昇時に約 110.0 km で最大電子密度値は $8.3 \times 10^4 (\text{cm}^{-3})$ を示し、降下時には、高度約 101.6 km で最大電子密度値は $8.6 \times 10^4 (\text{cm}^{-3})$ で E-F 領域の電子密度の高度分布は E 層のピークから高度とともに単調に増加しており、また E 層下部も単調に減少していた。姉妹機の K-9 M-81 号機と併せた総合観測実験時の電離層電子密度分布の世界的な背景を同時測定する目的で、両機の実験当日に、科学衛星 '大空' を用いたプラズマモードのリアル観測が行なわれた。25 日は 21631 周と 21632 周、26 日には 21646 周と 21647 周、また 24 日には 21617 周でロケット実験が支援された。衛星は全パスとも南から北へ北上する軌道をとった。実験両日のトップサイドサウンダーの観測結果には顕著な緯度変化が現れた。

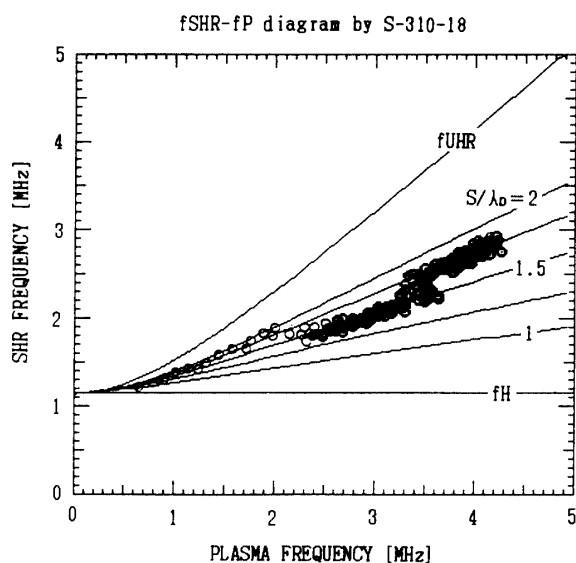
今回の観測実験で得られた CS-fP ダイアグラムを第 2 図に、fSHR-fP ダイアグラムを第 3 図に掲げる。縦軸は第 2 図がシース容量値 (CS)、第 3 図がシース共鳴周波数 (fSHR) で、横軸はともにプラズマ周波数 (fP) である。図中の曲線は理論曲線でパラメーターはシース厚とデバイ長の比 (S/λ_D) である。通常は電子密度、すなわち fP の増加、減少につれてシース容量値 (CS) もシース共鳴周波数 (fSHR) も特性曲線上で増加、減少する。今回得られた CS-fP ダイアグラムによるとシース厚/デバイ長の比の値は 65 秒~75 秒の期間



第1図 インピーダンスプローブによって観測された電離層電子密度の高度分布を掲げる。電離層 E 層の高度はロケット上昇時に、高度 110.0 km で最大電子密度は $8.3 \times 10^4 (\text{cm}^{-3})$ を示し、下降時には 101.6 km で最大電子密度値は $8.6 \times 10^4 (\text{cm}^{-3})$ で、 E - F 領域の電子密度の高度分布は E 層のピークから高度とともに単調に増加しており、また E 層下部も単調に減少していた。



第2図 シース容量値—プラズマ周波数特性 (CS-fP ダイアグラム) を掲げる。縦軸はシース容量値 (CS) で、横軸はプラズマ周波数 (fP) である。図中の曲線は理論曲線でパラメーターはシース厚とデバイ長の比 (S/λ_D) である。シース厚/デバイ長の比の値は 65 秒~75 秒の期間に 1.0 で、75 秒~140 秒の期間 1.5, 140 秒~最高々度の領域で 1.75 であった。



第3図 シース共鳴周波数—プラズマ周波数特性 (fSHR-fP ダイアグラム) を掲げる。縦軸はシース共鳴周波数 (fSHR) で、横軸は電子プラズマ周波数 (fP) である。図中の曲線は理論曲線でパラメータはシース厚とデバイ長の比 (S/λ_D) である。SHR 共鳴周波数は 65 秒～75 秒, 75 秒～140 秒, 及び, 140 秒～最高々度の三つの領域で異なる特性を示した。75 秒と 140 秒の高度は、それぞれ、約 101 km, 約 170 km である。

1.0, 75 秒～140 秒の期間 1.5, 140 秒～最高々度の領域で 1.75 であった。すなわち、75 秒と 140 秒の秒時に特徴のある時間変化をした。シース厚/デバイ長の比の値が、約 75 秒の秒時に 1.0 から 1.5 と増加し、約 140 秒の秒時に 1.5 から 1.75 と増加した。また、fSHR-fP ダイアグラムにも 75 秒と 140 秒で特徴的な変化が現われた。すなわち、同号機で測定された SHR 共鳴周波数は 65 秒～75 秒, 75 秒～140 秒, および、140 秒～最高々度の三つの領域で異なる特性を示した。同機に搭載された他の観測装置によれば、電子密度ゆらぎ観測装置の直流成分の減少、電場ゆらぎ観測装置の HF 成分の増加、HF 波動受信機の HF 波成分の増加、VLF 波動受信機の VLF 波動成分の増加などが現われている。

II 観測された SHR 共鳴の特性

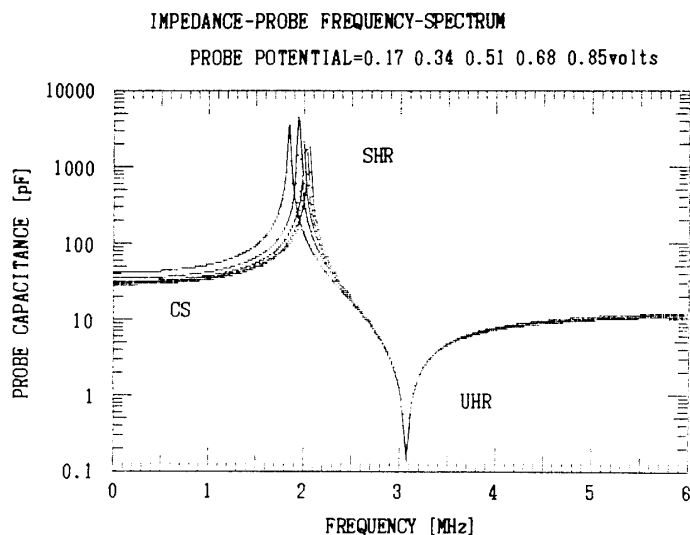
第2図の CS-fP ダイアグラムからシース厚とデバイ長の比の値 (S/λ_D) が 65 秒～75 秒の期間 1.0, 75 秒～140 秒の期間 1.5, 140 秒～最高々度で 1.75 と段階的に増加していることがわかる。また、第3図に掲げた fSHR-fP ダイアグラムから 75 秒と 140 秒の秒時にシース共鳴周波数が特徴的な変化をしたことがわかる。

S-310-18 号機の高い高度の領域で観測された CS-fP ダイアグラムにおける CS の減少と fSHR-fP ダイアグラムにおける fSHR の不連続的な増加はシースの厚さが増加したた

めで、その原因として、プローブが負に帯電したことが考えられる。一方、低い高度領域で観測されたCS-fP ダイアグラムにおけるCSの増加とfSHR-fP ダイアグラムにおけるfSHRの増加は衝突周波数の影響によるものと考えられる。上述のそれぞれの場合についてどのようなシースの構造の変化があったかについて簡単に考察を試みる。

II-1 高々度領域でのシース構造

140秒のシース厚とデバイ長の比の値(S/λ_D)の増加、つまり、1.5 → 1.75の変化の原因はシースの厚さが増加したためであると解釈される。シース厚の増加に従って、CSが減少し、fSHRが増加したと解釈される。プラズマ中の金属製プローブはいわゆるフローティング電位($-U_f$)まで沈んだ状態で落ち着いている。通常、 $-U_f = (kTe/2e)\log(TeM/Tim)$ と表わされる。ここで、 k, e, m, Te, M, Ti はそれぞれ、ボルツマン定数、電子電荷量、電子とイオンの、それぞれ質量と温度である。バイアスが深くなっていくとシース領域が多くなってきて、シース容量値やシース共鳴周波数などが変化してくる。今、プローブ電位($-U_f$)が変化した時のプローブ近傍の電位分布(V)を、 $V = -U_f e^{-x/\lambda_D}$ とすると、周辺の電子密度分布は、 $N_e = N_{e0} e^{eV/kTe}$ と表わすことができる。ここで、 x はプローブ表面からの距離を表わす。単位面積、単位長のプラズマの誘電率を用いて空間全体を積分して、プローブインピーダンスの周波数特性を求めると、第4図は計算の結果得られたプローブインピーダンスの周波数スペクトルである。プローブ電位が -0.17 V, -0.34 V, -0.51 V, -0.68 V, -0.85 Vと変化した場合の計算結果である。低周波数でのプローブ等価容量値は



第4図 バイアス電位を変化させた時のプローブ等価容量値の周波数特性を掲げる。プローブ電位が変化すると、プローブ近傍の電位分布の変化に従って周辺の電子密度分布が変わってくる。バイアスが深くなっていくとシース領域が多くなってきて、等価的なシース容量値は減少し、シース共鳴周波数は増加する。また、fUHRは不変である。

シースの等価容量値を表わす。第4図から、プローブ電位が降下してシース内の電位分布、電子密度分布が変わった場合、等価的なシース厚は増加、シース容量値は減少、fSHRは増加、fUHRは不変であることがわかる。第5図にシース厚、シース厚/デバイ長、シース容量値(CS)、並びにシース共鳴周波数(fSHR)のバイアス電圧特性を掲げる。プローブ電位が～5倍くらい降下すれば、約140秒の時刻に発生した現象を説明できることがわかる。プローブの速度、プローブ自身のウェイク、ロケットウェイクの影響などは考慮していないが、140秒の時刻に何らかの理由でプローブ電位の負方向の変化が生じたらしいことがわかる。

II-2 低高度領域でのシース構造

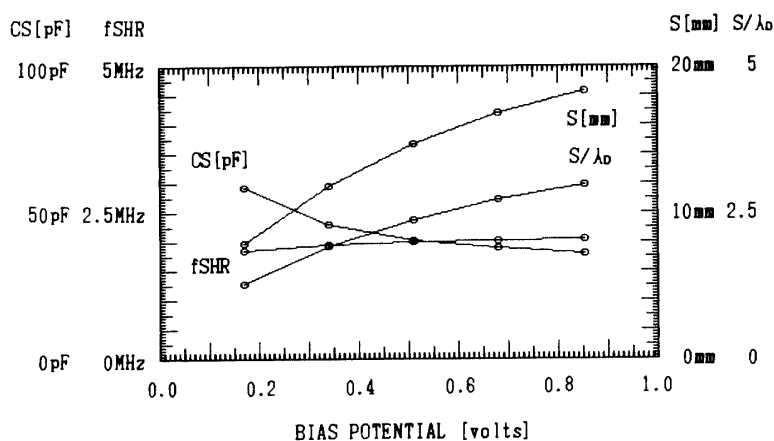
低い高度領域での観測結果によると、シースの等価容量値(CS)とシース共鳴周波数(fSHR)がともに僅かに増加している。また、fSHRの共鳴のQ値も悪化している。電離層プラズマ中の衝突周波数の影響によって一様プラズマ領域の誘電率、シース領域の構造、共鳴のQ値の変化などの現象が生じる。

① 一様プラズマ領域の低周波数での誘電率が上昇するので、その結果、低周波数領域でのプローブ等価容量値が増加する。

② 衝突周波数の増加によって電子がプローブ表面に到着するのが困難になり、等価的にシースの厚さが厚くなって、その結果、fSHRが僅かだが増加する。

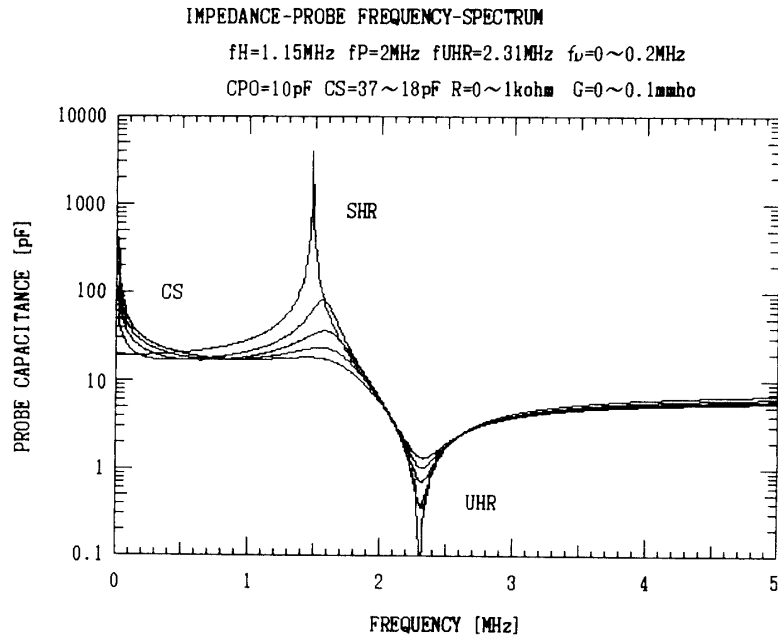
③ 衝突周波数の増加によって一様プラズマ領域とシース内の両方の抵抗分の増加でfSHRなどの共鳴のQ値が減少する。

今、上記の検討結果を考慮に入れたシースモデルとして、従来の一様プラズマ領域とシース領域の直列モデルを改善して、両者に衝突周波数の効果を表わす抵抗成分を入れると

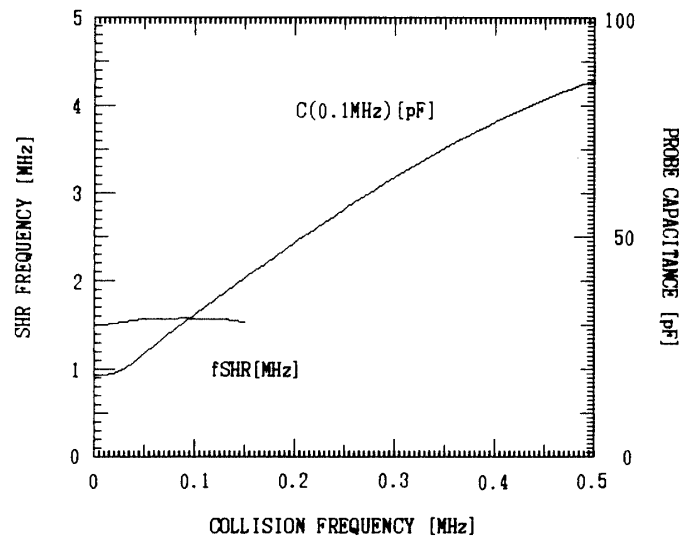


第5図 シース厚、シース厚/デバイ長、シース容量値、およびシース共鳴周波数のバイアス電位依存性を掲げる。プローブ電位が～5倍くらい降下すれば、約140秒に発生した現象を説明できることがわかる。

ともに、衝突周波数の増加に従ってシースの厚さが厚くなるようなシースモデルを用いることにした。一様プラズマ領域の誘電率は、衝突周波数を f_c として複素数で表わす。シース領域は、イオンシースを CS で表わし、これに並列の抵抗成分を G 、両者に直列する抵抗成分を R とする。イオンシースの厚さは衝突周波数に従って大きくなって、シースの等価容量値 (CS) は減少する。今、衝突周波数 (f_c) が 0~0.2 MHz と増加した時、シースの等価容量値 (CS) が 37~18 pF と減少し、並列抵抗成分 (G) が 0~0.0001 mho, 直列抵抗 (R) が 0~1000 ohm と変化するようなシースモデルを用いる。電子ジャイロ周波数 (f_H) を 1.15 MHz, 電子プラズマ周波数 (f_P) を 2 MHz, UHR 共鳴周波数 (f_{UHR}) を 2.31 MHz, 真空中プローブ等価容量値 (C_{po}) を 10 pF とした場合、プローブインピーダンスの周波数スペクトルの計算結果は第 6 図のようになる。衝突周波数の増加とともに、低周波数でのプローブ等価容量値が増加している。このため、シースの等価容量値が増加しているように見えたのである。また、シースの厚さが厚くなるにつれて f_{SHR} が増加し抵抗分の増加に従って f_{SHR} 共鳴などの共鳴の Q 値が減少している。第 7 図にシース共鳴周波数 (f_{SHR}) と低周波数でのプローブ等価容量値の衝突周波数特性を示す。衝突周波数が大きくなると共鳴の Q 値が悪化してシース共鳴周波数 (f_{SHR}) が読めなくなってくる。第 7



第 6 図 新しいシースモデルを用いた時のプローブ等価容量値の周波数特性を掲げる。衝突周波数の増加に従って一様プラズマ領域とシース内の両方の抵抗分が増加し、かつ、シースの厚さが厚くなるようなシースモデルを考えた。衝突周波数の増加によって電子がプローブ表面に到着するのが困難になり、等価的なシースの厚さが厚くなって、その結果、 f_{SHR} が僅かだが増加する。また、抵抗成分の増加に従って f_{SHR} 共鳴などの共鳴の Q 値は悪くなっている。



第7図 低周波数値でのプローブ等価容量値，シース共鳴周波数の衝突周波数依存性を掲げる．衝突周波数が大きくなると共鳴の Q 値が悪化してシース共鳴周波数（fSHR）が読めなくなってくる．また，衝突周波数の増加とともに，低周波数でのプローブ等価容量値が増加するので，シースの等価容量値が増加しているように見える．

図の計算は，衝突周波数（ f_c ）が0～0.5 MHz，シースの等価容量値（CS）が37～14 pF，並列の抵抗成分（ G ）が0～0.00025 mho，直列抵抗成分（ R ）が0～2500 ohm，電子ジャイロ周波数（ f_H ）が1.15 MHz，プラズマ周波数（ f_P ）が2 MHz，UHR共鳴周波数（ f_{UHR} ）が2.31 MHz，真空中プローブ等価容量値（ C_{po} ）が10 pFの時の結果である．衝突周波数の高度分布は大気温度によって異なるので，fSHR-fPダイアグラムにおけるfSHRの増加の割合が顕著でない場合もあるが，CS-fPダイアグラムにおけるCSの増加は低い高度領域でよく観測されるものである．

結 び

S-310-18号機で観測されたCS-fP特性とfSHR-fP特性を検討した結果，今回，得られた二つの現象，すなわち，高々度領域で観測されたCSの減少とfSHRの不連続的な増加，低高度領域で観測されたCSとfSHRの連続的な増加は，それぞれ，プローブの負帯電モデルと衝突周波数の増加につれてシース厚の増加するシースモデルを用いて説明することができた．

地磁気擾乱時の極域などの高緯度地方でのロケット実験や科学衛星搭載のプローブ観測では，プローブや飛翔体が降下荷電粒子によって負帯電することがある．プローブの電位が変化する可能性があるのは，例えば，電子ビーム放出実験や機体電位制御実験を行なう場合や昼間の日照時の実験で光電子放出効果のある場合などが考えられる．この場合には主としてプローブの正帯電が生じるが，放出電子ビームが直接プローブ表面に流入する時

には負帯電となる。また、イオンビーム放出実験の時にはプローブやロケット機体は負帯電となる。同時に搭載されている他の観測装置のプローブに正または負の高電圧が印加された時にはロケット機体は逆方向に帯電するのでプローブ電位も変化する可能性がある。今回の観測で見い出された現象は、地磁気平穏時の中低緯度で、アクティブ実験も無かったことから非常に解釈が困難なものになっている。ロケットの最上部に搭載された電子密度ゆらぎ測定用の固定バイアス・ラングミュア・プローブの球プローブの背景電子密度を測定するための直流電流信号がゼロに近い状態になったことと関連があるかもしれない。熱化していないエネルギー電子によるロケット機体の負帯電現象が生じているかもしれない。

衝突周波数の増加に従ってシース厚の増加するシースモデルは独特のものであり低高度領域で観測された現象を説明する時に極めて有用であった。衝突周波数の高度分布は大気温度によって違うので、衝突周波数の高度分布によっては fSHR-fP ダイアグラムにおける fSHR の増加の割合が顕著でない場合もある。CS-fP ダイアグラムにおける CS の増加は低い高度領域ではよく観測されている。

以上、ロケット実験で観測されたシース容量値とシース共鳴周波数に関する特異な現象および特性について簡単な考察を試みた。

謝 辞

観測ロケット S-310-18 号機の実験主任に感謝致します。搭載したインピーダンス・プローブは明星電気株式会社・宇宙開発部で製作調整されました。

参 考 文 献

- [1] 渡辺, 雨宮, 中村, S-310-16 号機による電離層電子密度の観測, 昭和 61 年度 宇宙観測シンポジウム (1986), 154.
- [2] 渡辺, 大林, S-310-14 号機による電離層電子密度の観測, 昭和 59 年度 宇宙観測シンポジウム (1984), 71.
- [3] 渡辺, 雨宮, 中村, 電子密度ゆらぎのロケット観測, 宇宙科学研究所報告, 宇宙観測特集号, 第 23 号, 192-204, 1989.
- [4] Watanabe, Y., H. Amemiya, and Y. Nakamura, Rocket Observation of Electron Density Irregularities in the Lower E Region, J. Geomag. Geoelectr., 42, 19-33, 1990.