

ジャイロ・プラズマプローブによる 電離層電子密度の測定

大家 寛*・大林 辰蔵**

Measurement of Ionospheric Electron Density by Gyro Plasma Probe

By

Hiroshi OYA and TATUZO OBAYASHI

Abstract: The first experiment of a new impedance probe, called the gyroplasma probe, was carried out by using K-9M-13 rocket launched at 1210 JST, on July 27, 1965 from KSC (Kagoshima Space Center), Japan. Two spheres with radius 20mm are stuck out into the ionospheric medium and sustained by the thin and short booms symmetrically for the rocket body. Impedance of this probe system is measured in the frequency range from 0.5 Mc to 16 Mc, swept continuously in 0.93 second. The data was obtained from 80km to 317km, successfully.

Theoretical result on the performance of the RF impedance probe in wide frequency range was confirmed by detecting the upper hybrid resonance and so called sheath resonance in each sweep interval. The accurate electron density was deduced from the upper hybrid resonance frequency $\sqrt{f_P^2 + f_H^2}$, where f_P is plasma frequency and f_H is the electron gyro-frequency. An detailed structure of the ionosphere under the stormy condition which is characterised by the existence of a valley structure between F₁ and F₂ layers was disclosed.

The second experiment was performed by using K-9M-14 rocket launched at 1200 JST, on October 4, 1965 from KSC. To ascertain the resonance effects observed in the first experiment, two fixed frequencies, 1.15 Mc and 5.01 Mc were employed for measurement of the impedance of a short cylindrical-type probe with length 1.20 m. The detection of three resonances was successful at each height where the employing frequencies correspond to the gyro, sheath and upper-hybrid resonances.

概 要

ジャイロ周波数およびプラズマ周波数を含む周波数範囲でプラズマインピーダンスを掃引測定する新しいプラズマプローブとしてジャイロプラズマプローブを開発した。

理論的に電子ジャイロ共鳴, シース共鳴およびハイブリッド共鳴の存在を予測していた

* 京都大学工学部

** 京都大学工学部 宇宙研副主任研究員

が、まず1965年7月27日1210 JSTに発射されたK-9M-13号ロケットによる実験でシース共鳴とハイブリッド共鳴を含むジャイロプラズマプローブのデータが得られ、理論を一部実証した。特にハイブリッド共鳴周波数から正確な電子密度分布が得られた。

続いて1965年10月4日に発射されたK-9M-14号ロケットによる実験では測定周波数を1.15Mcと5.01Mcの二つに固定して、共鳴の基本的な性質を観測した。その結果ジャイロ共鳴の存在を実証するとともに、ハイブリッド共鳴がイオンシースの存在およびプローブの磁場となす姿勢に無関係に定まることがわかり、これを電子密度測定に応用した場合に精度の高い結果が得られることが確認された。

1. 序

近年、インピーダンスプローブによる電離層プラズマの測定研究は急速に進歩してきた[1~5]が、本論文でのべるように新しくインピーダンスプローブ、“ジャイロプラズマプローブ”が開発された。このプローブは、電子のジャイロ周波数、およびプラズマ周波数を含む広い周波数帯域にわたって周波数を掃引しながらプローブの高周波インピーダンスを求めるもので、この周波数範囲には、上記した電子サイクロトロン共鳴[6]のほかハイブリッド共鳴、さらにイオンシース共鳴[7]が含まれている。一掃引でこれらの諸共鳴現象を検出することは、ほかに周波数掃引法を採用しているプラズマプローブ、すなわちプラズマ周波数プローブ[8]、あるいはレゾナンスプローブ[9]、と区別される点である。

現在までに、理論および実験面で確認されてきたものはシース共鳴現象であるが、この研究により、ジャイロ共鳴、およびハイブリッド共鳴についても確認されるに至った。特にハイブリッド共鳴周波数 $\sqrt{f_p^2 + f_H^2}$ （ただし f_p はプラズマ周波数であり、 f_H はジャイロ周波数である）からは、 f_p が求められ、局所的な電子密度の測定にきわめて有力なものである。これらのインピーダンス測定はまた、プラズマ測定にかぎらず、電離層媒質中での宇宙電波受信、通信、に関して重要な、アンテナインピーダンス特性そのものとして有意義である。

本論でとりあつかう問題は

- i) 共鳴現象の理論の総括
- ii) ジャイロ・プラズマプローブによる電子密度の測定
- iii) ジャイロ共鳴と、ハイブリッド共鳴の存在に関する実験的証明

の三項目である。

電離層の電子密度の測定は1965年7月27日、1210 JSTに内之浦より発射されたK-9M-13号ロケットにより遂行されたもので、ハイブリッド共鳴周波数から $\pm 3\%$ 以内の精度で電子密度が求められた。

第2回目の実験はジャイロ・プラズマプローブそのものによる測定ではなく、プローブアドミッタンスの基礎的な特性を確認するために、5.01Mcと1.15Mcの二つの固定周波数で波長に対して短いアンテナの特性を測定したもので、1965年10月4日、1200 JSTに発射された、K-9M-14号機によって得られた成果である。これにより、ハイブリッド共鳴とジャイロ共鳴の存在が確認された。

2. 理論的検討

2.1. 共鳴効果

定常磁場の存在する、いわゆる磁気活性プラズマではアドミッタンスの理論的取扱は特にイオンシースの存在することによって複雑になる。しかしこれらはプローブをとりまくイオンシース領域とさらにそれをとりまく外部の均質なプラズマ領域に分離できる。この場合アドミッタンスはこれら二者が直列に結合されたものと等価であり、総合のアドミッタンス A は、

$$A = \frac{A_a A_s}{A_a + A_s} \quad (1)$$

となる。ただし A_a は、プラズマとシースの境界によって切られた、外部の均質プラズマのアドミッタンスであり、 A_s はプローブの表面とシースと均一プラズマの境界で切られる、いわゆるシース領域のアドミッタンスである。電子の衝突による効果を見捨てた場合、共鳴の条件はそれぞれ

$$\text{i) } A_a = 0 \quad (2)$$

$$\text{ii) } A_a + A_s = 0 \quad (3)$$

$$\text{iii) } A_a \text{ および } A_s \rightarrow \infty \quad (4)$$

となる。

まず A_a が 0 という意味は、外部の均質プラズマ中には全電流が流れていないことであり、これによってプラズマ中において偏移電流と対流電流とがつり合っている。これはハイブリッド共鳴となる。第 2 の条件は、シースのアドミッタンスが、共鳴の条件を定める重要な因子となっているものでシースレゾナンスと呼ばれる。第 3 の条件は、 A_s と A_a が同時に無限大になる場合に表われるが、定常磁場による非等方性媒質においてはジャイロ共鳴そのものとなる。回路論的な表現をすれば、条件の i) は並列共振であり、ii) および iii) は直列共振となる。

2.2. 平行平板プローブ

アドミッタンスの周波数特性を検討するにあたって、まず比較的簡単なモデルとして一次元的取扱が出される。主として平行平板プローブであるが、特にイオンシースの影響を考慮して検討されている[6]。

無限平面を仮定しているため、特にハイブリッド共鳴周波数は次のように変形される。すなわち

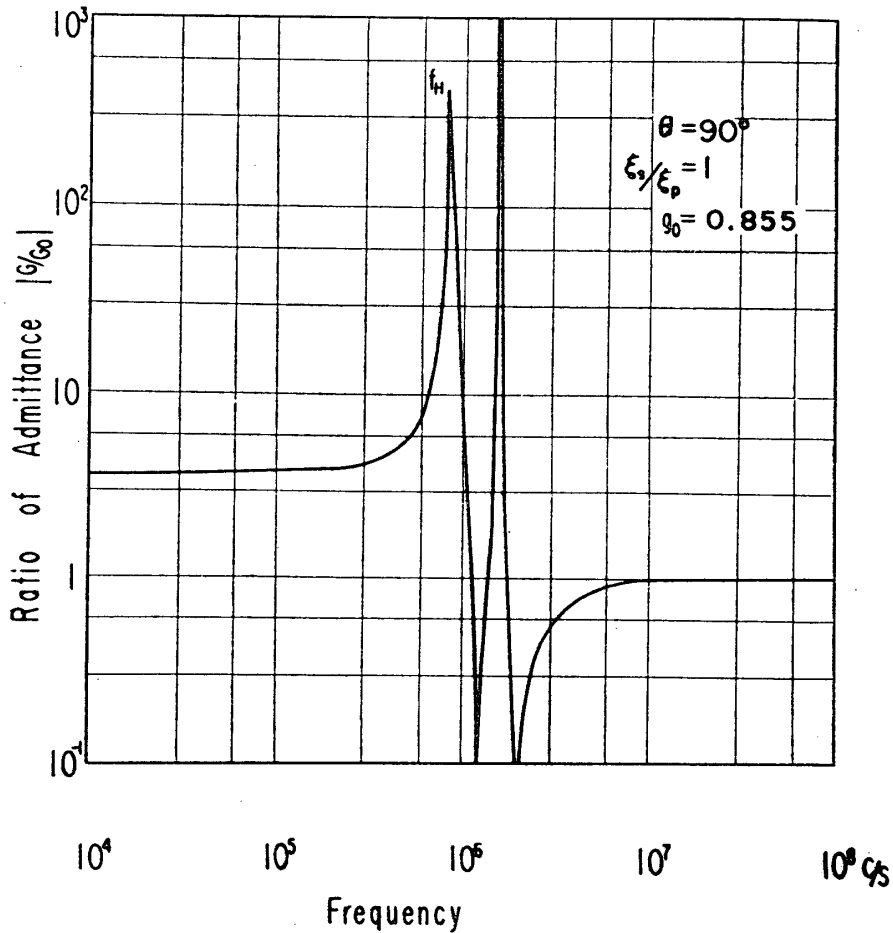
$$f_{r1} = \sqrt{\frac{f^2_H + f^2_P + \sqrt{f^4_P - 2f^2_H f^2_P \cos 2\theta} + f^4_H}{2}} \quad (5)$$

$$f_{r2} = \sqrt{\frac{f^2_H + f^2_P - \sqrt{f^4_P - 2f^2_H f^2_P \cos 2\theta} + f^4_H}{2}} \quad (6)$$

となる。ここに θ は平行平板の法線方向と磁場の方向との間の角度である。

シースレゾナンス周波数 f_{rs} はイオンシースの構造を決定するようなプラズマ定数、たとえば温度を含んでいる。したがって適当なシースモデルによってプラズマの温度が求めら

れる。ジャイロ共鳴は衝突周波数が無視できる範囲では完全に磁場の強さのみで定まる。特に平行平板プローブについて計算した結果[6]を第1図に再録する。



第1図 平板プローブのアドミッタンス比 G/G_0 G_0 : 真空中のアドミッタンス, $N=8 \times 10^4/\text{cm}^3$, $f_H=823\text{Kc}$, $g_0=eV/\kappa T=0.855$, ξ_s/ξ_p シースの厚さとプラズマの厚さの比

2.3. 球型プローブ

球型プローブをとりまくイオンシースは高い近似度で同心球面の境界をもっていると仮定できる。今プローブの半径を r_0 とすればイオンシースの外側の均質プラズマの容量は

$$C_{s0} = C_{0a} \frac{S\sqrt{1-(P/S)^2}}{\tanh^{-1}\sqrt{1-(P/S)^2}} \quad (7)$$

となる。

ただし

$$C_{0a} = 4\pi\epsilon_0(r_0 + r_s)$$

であり、これは半径 $(r_0 + r_s)$ の球の真空中での容量となる。ここで

$$S = 1 - \bar{x}/(1 - \bar{y}^2) \quad (8)$$

$$P=1-\bar{x} \quad (9)$$

であり、さらに

$$\begin{aligned} \bar{x} &= f^2_p / f(f + i\nu/2\pi) \\ \bar{y} &= f_H / (f + i\nu/2\pi) \end{aligned}$$

となる。なお ν は電子の衝突回数である。

電子の平均ジャイロ半径に比して、かなり小さい厚さのイオンシースに対しては、シース内の高周波電界の方向はほぼ半径ベクトルの方向に向い、イオンシース領域の容量は

$$C_{ss} = C_{s0} \left(\frac{2}{3} S_s + \frac{1}{3} P_s \right) \quad (10)$$

で表わされる。ただし C_{s0} は

$$C_{s0} = 4\pi\epsilon_0(r_s + r_0) \cdot (r_0/r_s) \quad (11)$$

であり、これはシース領域がそのままの大きさを保って真空になった場合の容量である。また S_s および P_s は (8) および (9) 式から f_p を f_{sp} におきかえることによって得られる。これは

$$f_{sp} = f_p \exp(-eV/\kappa T) \quad (12)$$

なる関係によっている。ここに V はプローブとなる導体球の電位であり、 $\kappa \cdot T$ は電子の熱エネルギーである。プローブの全アドミッタンスは (1) 式に、 $A_a = i\omega C_{sa}$, $A_s = i\omega C_{ss}$ とおくことにより求められる。この結果 f_H および $\sqrt{f_H^2 + f_p^2}$, でそれぞれジャイロ共鳴およびハイブリッド共鳴が観測され、またシース共鳴が $f_H \cdot \sqrt{f_H^2 + f_p^2}$, の間に存在することが知られる。

2.4. 短い円筒プローブ

波長に比して短い円筒型プローブに適用できる理論として、イオンシースの存在がない場合に対して Kaiser[12], および Balmain[13] 等の研究がある。Balmain によって与えられている理論式は

$$C_{ca} = \frac{2\pi\epsilon_0 L S \sqrt{F}}{\alpha} \left[\ln \frac{L}{\rho_s} - 1 - \ln \frac{\alpha + \sqrt{F}}{2F} \right] \quad (13)$$

ただし L は円筒の長さであり、 ρ_s はプローブを、同軸の円筒でつむイオンシース領域の半径である。ここで

$$\begin{aligned} F &= \sin^2 \Psi + \alpha^2 \cos^2 \Psi \\ \alpha^2 &= S/P \end{aligned}$$

であって Ψ は円筒軸の磁場方向となす角である。シース領域がうすい場合にはこの領域の容量は球型プローブの場合と全く同じ仮定を使って次のように求める。

$$C_{ss} = 2\pi\epsilon_0 L \left[S_s + \frac{1}{2} (P_s - S_s) \sin^2 \Psi \right] / \ln(\rho_s/\rho_0) \quad (14)$$

ただし ρ_0 は円筒型導体の半径である。

このプローブにおいても $f = f_H$, $f = \sqrt{f_p^2 + f_H^2}$ でジャイロ共鳴、およびハイブリッド共鳴が観測される。また f_H と、 $\sqrt{f_p^2 + f_H^2}$ の間にシース共鳴が存在する。

1) センサー

一対の複合型プローブを並列に結合して使用する。この場合第3図に示すように球の半径は約20mm 支持棒の長さは500mm でありこれはプラスチック被覆がされており、全容量はロケット本体に関して、12.2PF となる。

2) 500kc~16Mc 掃引周波数発生部

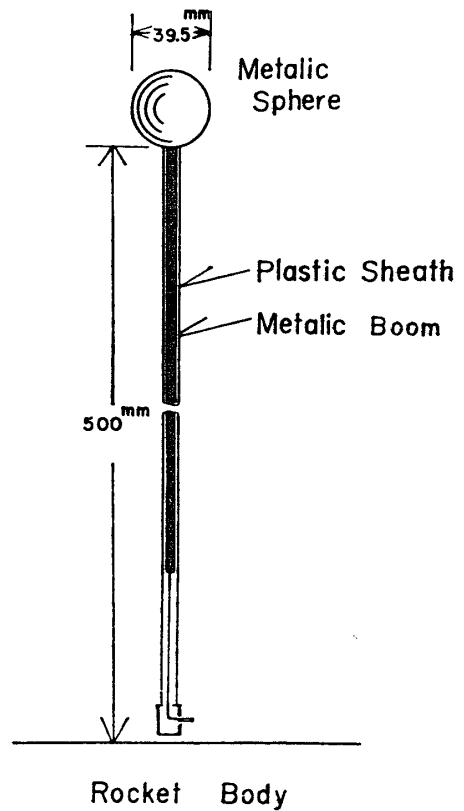
この掃引発振は、54Mc~69.5Mc の掃引発振器と70,000Mc の水晶制御発振器の出力とのビート信号として発生させる。54Mc~65.5Mc の発振はVCO で、1c/s 程度ののこぎり歯状電圧で制御する。

3) 入力回路

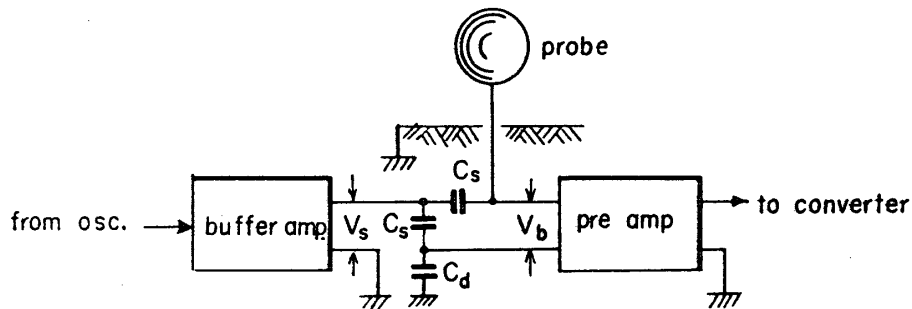
この部分の主要部分は第4図に示すような浮遊容量の影響を打ち消すためのインピーダンスブリッジ回路である。ブリッジ回路からの出力電圧 V_b は電源電圧に対して

$$V_b = V_s(C_d - C_p) / C_s \quad (16)$$

であたえられる。ここに C_p はプローブの容量であり、 C_s は標準容量である。 C_d は浮遊容量平衡用の容量である。このインピーダンスブリッジにより、



第3図 第1回ロケット実験に使われた複合プローブ



第4図 インピーダンスブリッジ回路

buffer amp: ブリッジ入力側緩衝増幅器
pre amp: ブリッジ出力側前置増幅器

最少の検出容量は 2PF になる。

4) 圧縮増幅器

この増幅器の初段でまず 455kc の固定周波数に変換される。この変換は 955kc~16.455 Mc までプローブに印加する高周波から 455kc ずらした状態で同期的に掃引されている信号との間でビートをとる。変換回路を出たあとは、60db の変化範囲が $0 \sim 5V_0/t$ におさま

るよう圧縮される。

5) 振幅検出器

これは簡単なダイオード検波器であり、インピーダンスの絶対値に関して対数的に変化している 455kc のレベルをとり出す。

6) 位相検出器

これは参照信号とインピーダンス測定信号との掛算型の位相検出を行なう。したがって位相差 θ に対してとりだされる信号は $\cos\theta$ と $\sin\theta$ の二つとなる。

7) 参照信号発生部

位相検出には装置自体のもつ位相づれを極力おさえる必要がある。特に参照信号とインピーダンス測定用信号とは常時同位相でなくてはならない。こうしたことを考慮して 70.000 Mc と 70.455Mc の二つの水晶制御信号は第 2 図に示すような構成によって 455kc の参照信号を発生しこれは位相検出器において位相のランダムなずれを完全に打ち消すように働く。

4. ジャイロ・プラズマプローブによる測定結果

1965 年 7 月 27 日 1200 JST に発射された K-9M-13 号機により 70km~317km にわたるジャイロ・プラズマプローブによる観測に成功した。第 5 図はそのときに得られたデータの一例であり、発射後 96.8 秒~97.7 秒の間に得られたものである。600kc 以下の周波数範囲にみられる極大な周波数変換器の特性のための 455kc 信号のもれによる。結果は対数的に圧縮されているため変化の少ないものになっているが、これに対して容量変化に換算された結果の例が第 6 図に示されている。

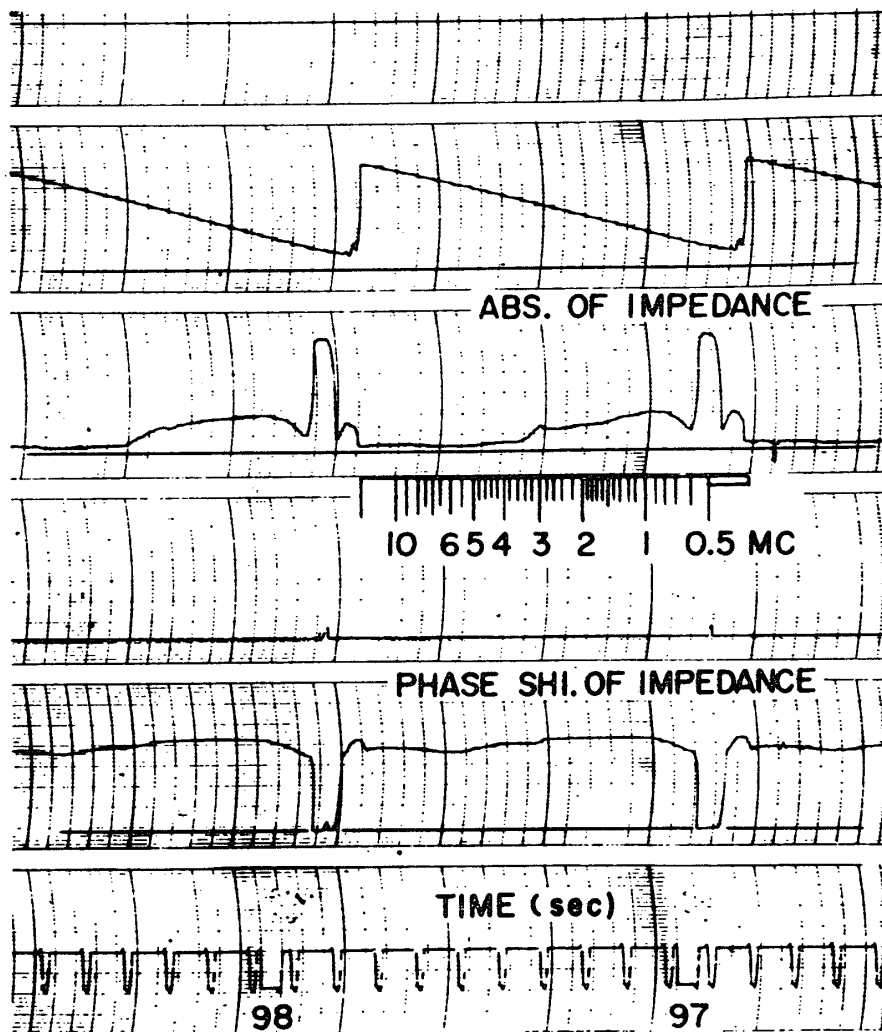
第 6 図で、3 のデータは電離層下部で得られたものでありハイブリッド周波数はほぼ f_H に接近し、しかも衝突回数が大きいためレゾナンスは非常にゆるやかになっている。1 および 2 のデータは観測点の高度が上り、電子衝突回数の低下によってシース共鳴およびハイブリッド共鳴現象が明瞭に現われている。この実験においては、レベル調整が不適當であったためジャイロ共鳴のピークは検出されていない。

ハイブリッド周波数からあらかじめ地球磁場の強度をあたえて電子密度を計算した。ロケット上昇時に得られたものは第 7 図の点であり下降時に得られたものが第 8 図の点である。

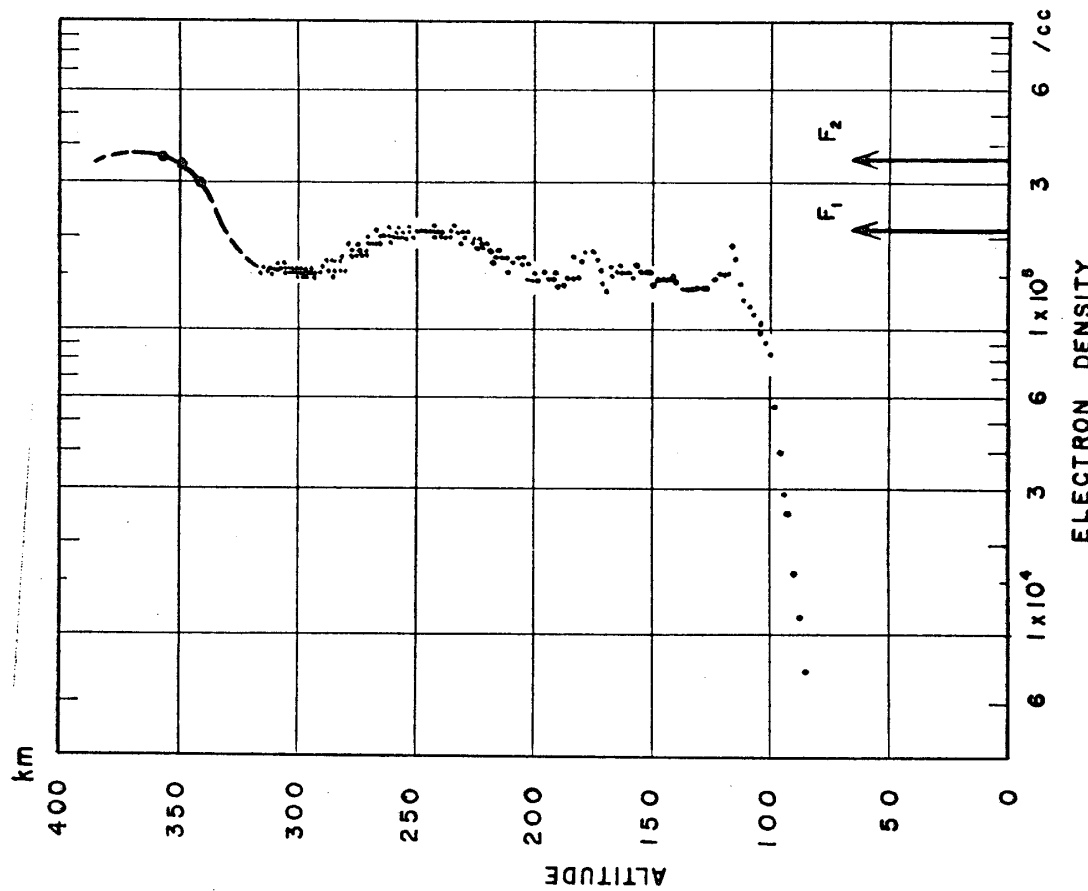
測定し得た最少の電子密度は D 層における $7.8 \times 10^3/\text{cm}^3$ であった。データの分散はきわめて少なく、誤差は $\pm 3\%$ 以下と見積られる。D 層領域は平均的な静穏日の値 [14] の 5~6 倍になっている。100 km~300 km にわたってはきわめて除々に変化していて、わずかに E_s 層の存在が示された。

電子密度分布をロケット飛しょう時に内之浦で同時観測した電離層電波探測のデータと比較検討した結果、全体にエコーはきわめて弱くこれは D 層の吸収を示しているが、ロケット観測の示す D 層領域の電子密度が高かったという事実を反映している。電波探測の結果に多少のスプラディック E 層がやはり認められた。

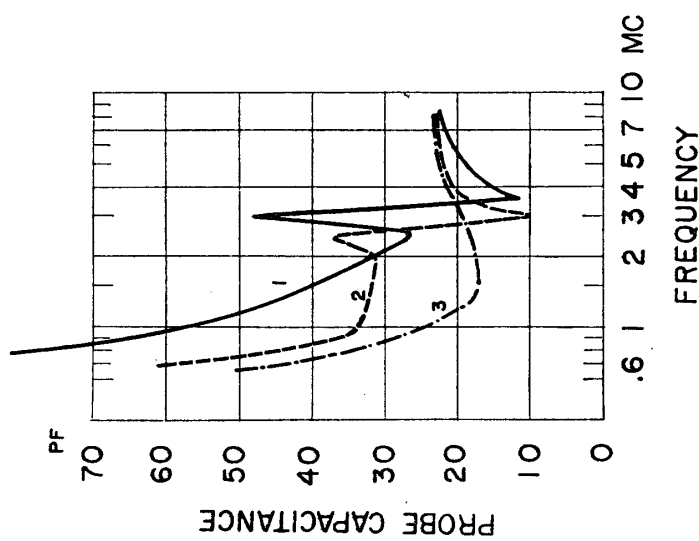
F₁ 層からのエコーはきわめて大きな電波の遅延を示しているがこれも F₁ 領域での電子



第5図 ロケットによる観測データの一例
 F₁層下部を通過しているときのもの、ABS. OF IMPEDANCEは、インピーダンスの振幅を、また、PHASE SHI. OF IMPEDANCEは位相ずれを表わす。ハイブリッド共鳴は3.6Mcに表われ、シース共鳴は3.1Mcに表われている。

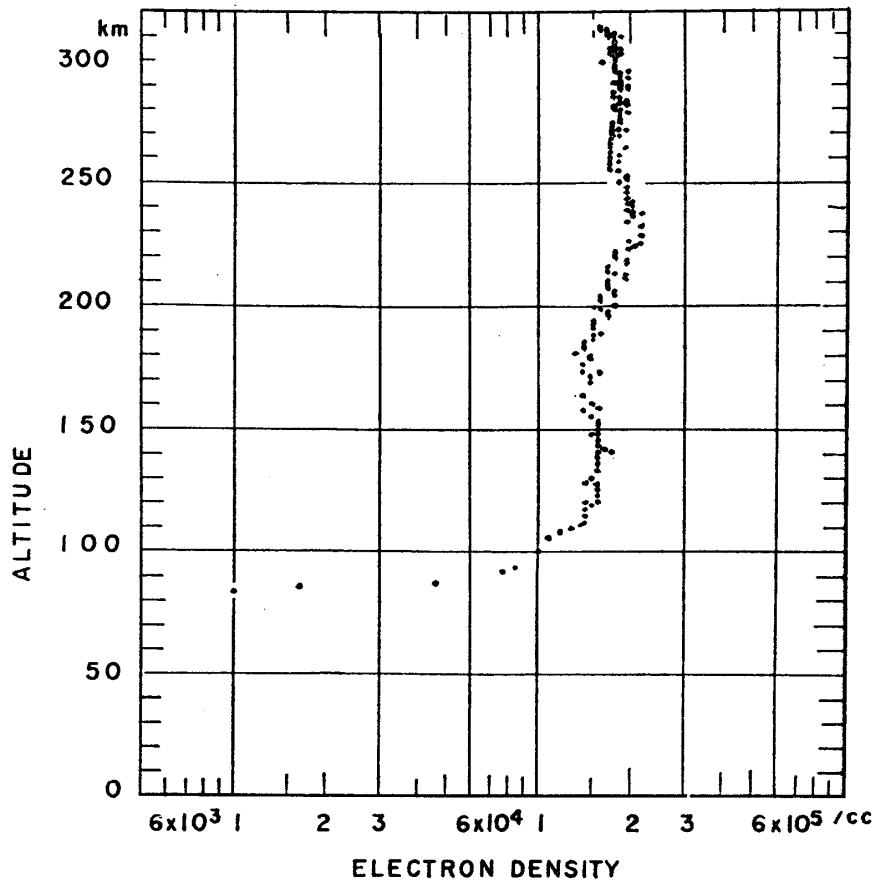


第 7 図 上昇時に測られた電子密度分布 (点) と F_2 層まで算出された (アイオノグラム) のデータをもとに) 電子密度 (実線), 矢印 F_1 はアイオノグラムから出た $N_m F_1$, F_2 は同じく $N_m F_2$



第 6 図 電離層プラズマ中で測定されたプローブ容量の例

- 1: 高度 160km で測定されたもの
 - 2: 高度 99km で測定されたもの
 - 3: 高度 78km で測定されたもの
- 極大はシース共鳴によるものであり, 極少はハイブリッド共鳴によるもの.



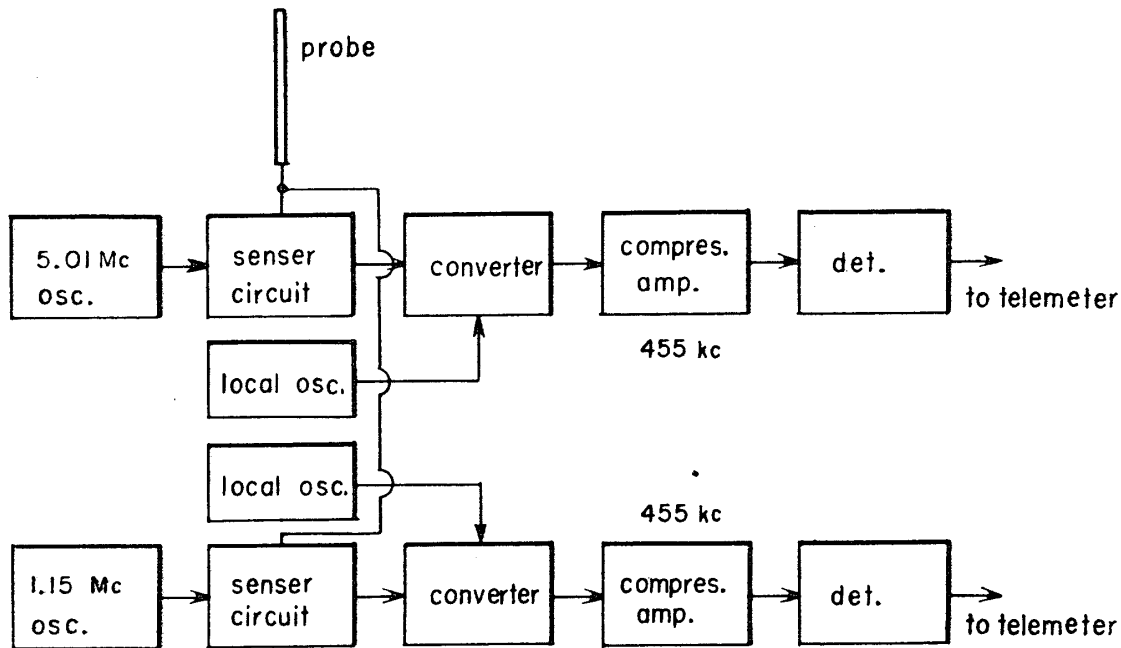
第 8 図 下降時に測られた電子密度分布

密度分布の高度変化はきわめてゆるやかであったという観測事実を反映している。第 7 図の矢印が示すように電波探測から得られた F_1 層の極大臨界周波数から求めた電子密度（図中矢印）とこのロケット観測から出た $F_1 N_m$ とは全く一致している。

第 7 図の実線部分はロケット観測で得られた実際の電子密度分布をもとに、Jackson の方法[15]を適用して電波探測エコーから算出された電子密度分布である。ここで F_1 層と F_2 層の間に明確な電子密度分布の谷が認められる。

5. 共鳴現象の追実験

K-9M-14 号機によりインピーダンスプローブにおける共鳴現象の追実験を行なった。この場合波長に比して短い (1.2m) 円筒プローブのインピーダンスを二つの固定周波数 5.01 Mc および 1.15Mc で電離層プラズマ中で測定した。測定装置はインピーダンス変化の絶対値を送るように設計された。この場合第 9 図にブロック線図を示すが、センサーに印加する高周波の周波数が固定されている以外はジャイロプラズマプローブ測定装置の構成と同じ特性を持っている。なおプローブの DC 電位をフローティングの状態から空間電位へ 1c/s の速度で直線的に変化している。



第 9 図 固定周波数インピーダンス測定装置ブロック線図

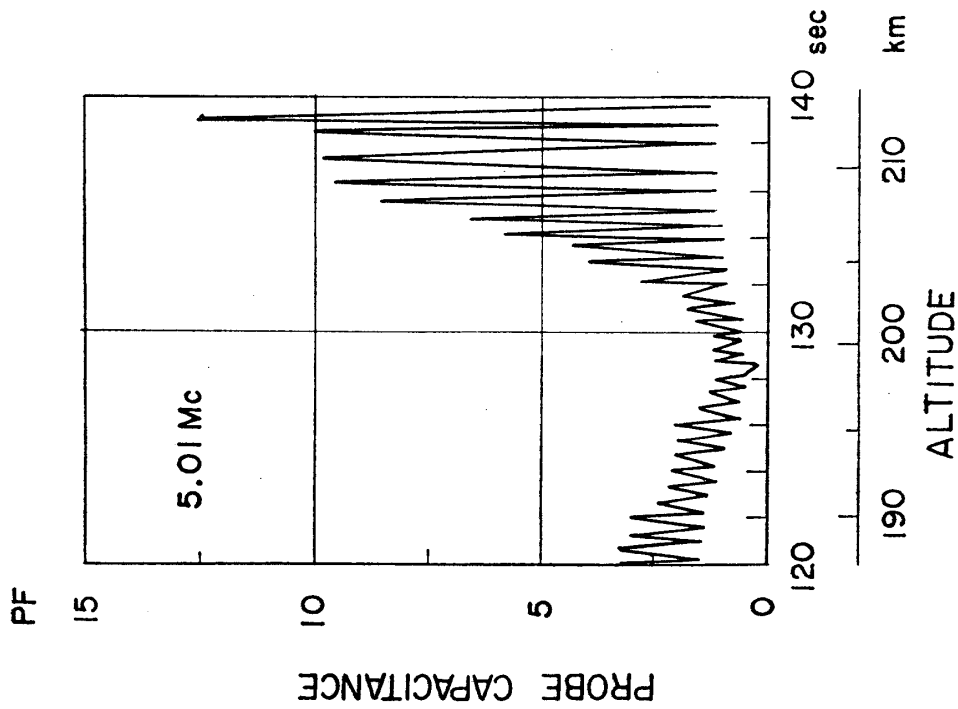
OSC.	発振器 (5.01Mc および 1.15Mc)
Sensor Circuit	インピーダンスブリッジを中心とするセンサー入力回路
local OSC.	局部発振器
Converter	周波数変換回路
Compres. amp	圧縮増幅器
det.	振幅検出器

データは、70km から 295km まで連続的に得られ、電子ジャイロ共鳴、ハイブリッド共鳴が観測された。第 10 図は 5.01Mc のチャンネルにて得られたプローブ容量の一例である。198km の点に示される極少はハイブリッド共鳴によるものである。この付近では容量の変化は DC 電位には全く無関係となり、ロケットのスピンの運動による磁場との方向の変化だけに依存している。しかも極少値においてはこの磁場との方向変化にも無関係となり、理論的に予測されたハイブリッド共鳴の性質を実証している。

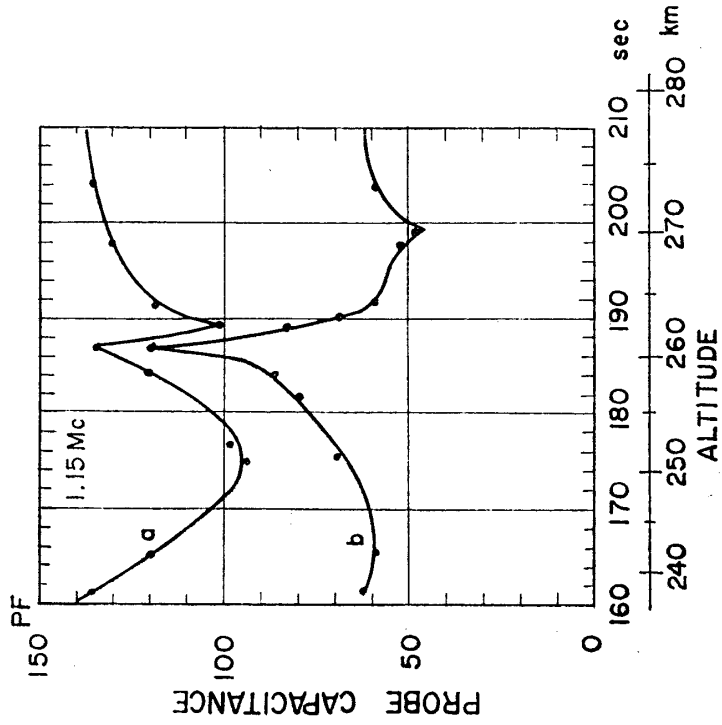
1.15Mc のインピーダンスプローブ測定チャンネルにて得られた結果の一例を第 11 図に示す。ピークは 1.15Mc が空間のジャイロ周波数に一致した点を示す。a) はプローブの DC 電位が空間電位に等しくなったときに得られたものであり、一方 b) はフローティング電位に保たれたときに得られたものである。またこのピークはジャイロ周波数の 4 倍の高調波の発生と一致している。

6. 結 論

ジャイロプラズマプローブの一つの特徴として、ハイブリッド共鳴を正確に測定しうることが確認された。この共鳴は電子密度測定に応用されるが、この共鳴がプローブと磁場のなす角度、およびプローブをとりまくイオンシースの構造に全く無関係に定まる点は実測上す



第10図 5.01Mcにおいて測られた短い円筒プローブの電離層中の容量の一例, これによってハイブリッド共鳴現象の存在が確認された。



第11図 1.15Mcにおいて測られた短い円筒プローブの電離層中の容量の一例, これによってジャイロ共鳴現象の存在が確認された. a) b) はそれぞれ,

- a) スペース電位における結果
- b) フローティング電位における結果

ぐれた点であってこれを使って求めた電子密度は $\pm 3\%$ 以内の精度であって、電離層の微細構造の測定が可能になった。

さらにジャイロ共鳴とハイブリッド共鳴の存在を確認する実験が実施され、電子密度測定に重要なハイブリッド共鳴がイオンシースの存在、およびプローブの磁場となす角度に無関係な周波数で起ることが実証された。

おわりにあたってこの研究に興味をもたれ、種々有益な議論をいただいた前田、平尾両教授に深く感謝するとともに、この実験が東京大学宇宙航空研究所のロケット観測プログラムの一環として推進されたものであり、ここに働く多くのスタッフの方々の努力によるものであること、ならびに、測定装置は明星電気株式会社により製作されたこと等々ここに深く感謝致します。

1966年6月3日

参 考 文 献

- [1] J. E. Jackson and J. A. Kane, : J. Geophys. Res., **64**, (1959) 107.
- [2] O. C. Haycock and K. D. Baker, : Electronics, **34**, (1961) 88.
- [3] J. A. Kane, J. E. Jackson and H. A. Whale, : J. Res. N. B. S., **66D**, (1962) 641.
- [4] K. G. Jacobs and K. Rawer, : Space Research V, (1964) 706.
- [5] J. C. Ulwick, W. Pfister, O. C. Haycock and K. D. Baker, : Space Research V, (1964) 293.
- [6] H. Oya, : Rep. Ionos. Space Res. Japan, **19**, (1965) 243.
- [7] R. S. Harp and F. W. Crawford, : Microwave Lab. Technical Rep. Stanford University, Stanford Calif., No. AF 33 (616) 8121 (1964)
- [8] O. C. Haycock and K. D. Baker, : Electronics, **35**, (1962) 81.
- [9] S. Miyazaki, K. Hirao, Y. Aono, K. Takayama, H. Ikegami and T. Ichimiya, : Rep. Ionos. and Space Res. Japan, **14**, (1960) 148.
- [10] T. Dote and T. Ichimiya, : Proc. I. E. E. E., **51**, (1963) 480.
- [11] H. Oya, : Rep. Ionos. Space Res. Japan, (1966) to be published.
- [12] T. R. Kaiser, : Planet. Space Sci., **9**, (1962) 639.
- [13] K. G. Balmain, : I. E. E. E. Trans., **PA-12**, (1964) 605.
- [14] J. S. Belrose, : Electron Density Distribution in Ionosphere and Exosphere, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1964) 41.
- [15] J. E. Jackson, J. Geophys. Res., **61**, (1956) 107.