

S-310-40 号機ロケットによる夜間中緯度電離圏電子密度直接観測

遠藤 研, 小野 高幸, 熊本 篤志, 佐藤 由佳, 寺田 直樹, 加藤 雄人
東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

地球の電離圏は、D 領域、E 領域、F 領域の主に 3 つに区分される。これらのうち D 領域は、日陰時にプラズマの再結合が進むため、一般に夜間は消滅するとされている。一方、地上から送信された中波帯電波は D 領域で吸収されるため、D 領域が存在する昼間は遠方に到達しないが、夜間は E 領域で屈折するために遠くのアンテナで受信できるというのが一般的な説である。

ところが、最近の観測から、遠方の地上局から送信される中波帯ラジオ放送が、夜間に一時的に受信できなくなる場合があることが分かってきた。その原因は、夜間に突発的に D 領域または E 領域に局所的な高密度プラズマ領域が発生し、電波の遠距離伝搬を妨げるためと推測されているが、その実態は良く分かっていない。

そこで、東北大グループは、電波の異常伝搬時における電離圏の電子密度直接観測を目的として、観測ロケット S-310-40 号機にインピーダンスプローブを搭載した。今回は、その初期解析結果を報告する。

2. インピーダンスプローブ

インピーダンスプローブはプラズマ中のアンテナインピーダンスの共振周波数から絶対電子密度を高精度に測定する観測機器である[1, 2]。図 1 は、プラズマ中における、プローブ等価容量の振幅・位相成分の理論計算値[3]である。UHR 周波数において、振幅成分は極小値をとり、位相成分は -180° から 0° へと変化する性質をもつ。つまり、インピーダンスプローブはこれらの情報からプラズマの UHR 周波数を同定することで電子密度を導出する機器である。従来の観測では振幅成分のみ測定されてきたが、今回の観測では位相成分の測定も同時に行った。

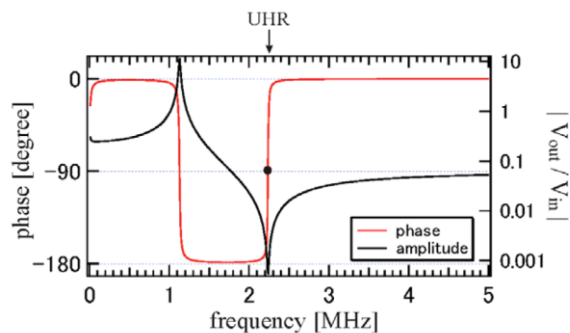


図 1. プラズマ中におけるプローブ等価容量の振幅・位相成分の理論計算 [3]

搭載したインピーダンスプローブは、印加信号の周波数を 0.1 MHz~21.1 MHz まで変化させる周波数掃引方式を採用しており、その時間分解能は約 130 msec とした。これは測定可能電子密度 $10^3 \sim 6 \times 10^6 / \text{cc}$ 、高度分解能 $\sim 250\text{m}$ に相当し、高度分解能については従来のものに比べ 4 倍向上した。

3. 観測結果

ロケットの打ち上げは鹿児島県にある内之浦宇宙空間観測所で行われた。打ち上げは、観測所に設置したアンテナで測定する電波受信強度が減衰した時間を狙い、2011 年 12 月 19 日 23 時 48 分に実施された。

インピーダンスプローブは高度 93km からロケットの最高到達高度 180km にわたり、振幅・位相両成分においてプラズマの UHR 周波数を検出した。観測データの一例を図 2 に示す。

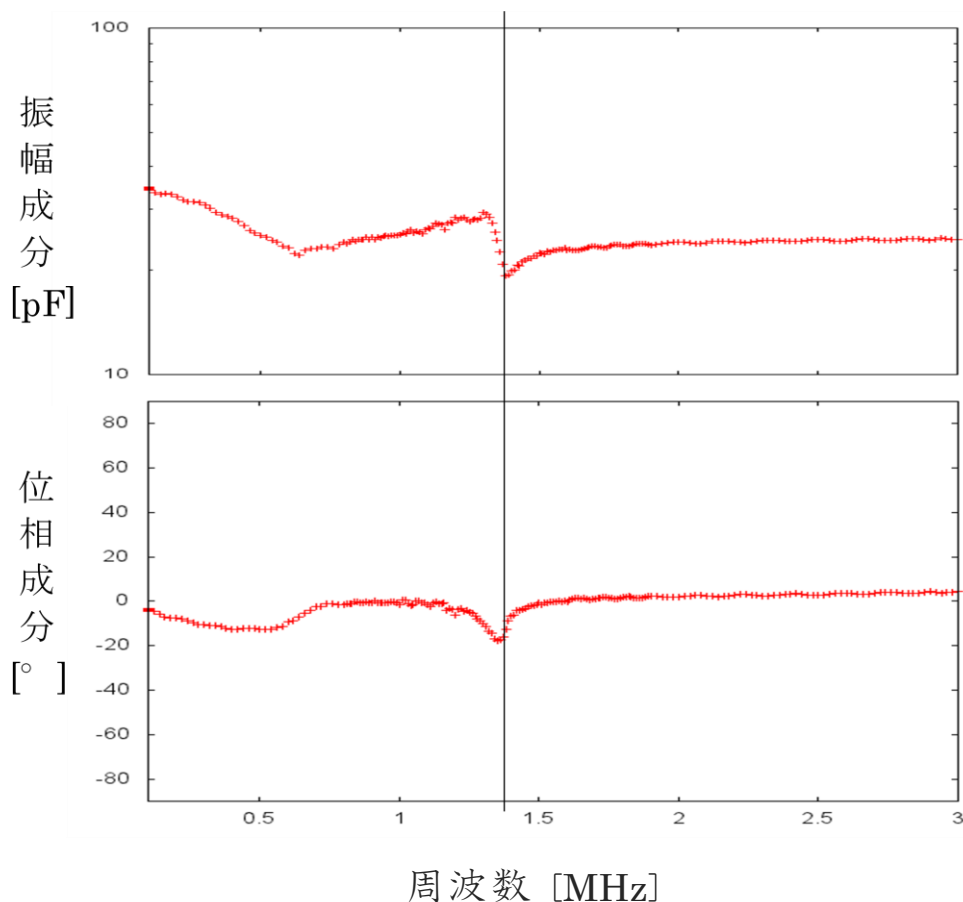


図 2. 観測で得られたデータ例（上昇時、高度 104.6 km）。図の縦線が UHR 周波数に相当し、本例では 1.38MHz を示している。電子サイクロトロン周波数は 1.22MHz。従ってプラズマ周波数は 0.64MHz。

振幅成分のデータから読み取った UHR 周波数から算出した電子密度の高度プロファイルを図 3 に示す。図 3 に見られる主な特徴は、

- (1) 全体的には $\sim 10^3$ /cc と低密度
- (2) 上昇時、高度 ~ 104 km に電子密度 $\sim 5.7 \times 10^3$ /cc のピーク
- (3) 下降時、高度 ~ 100 - 102 km に電子密度 $\sim 7.0 \times 10^3$ /cc のピーク
- (4) 下降時、(2)以外にも高度 ~ 140 km、 ~ 96 km に電子密度の極大点
- (5) 特に下降時、ロケット Wake の影響と思われる大きな電子密度変動である。

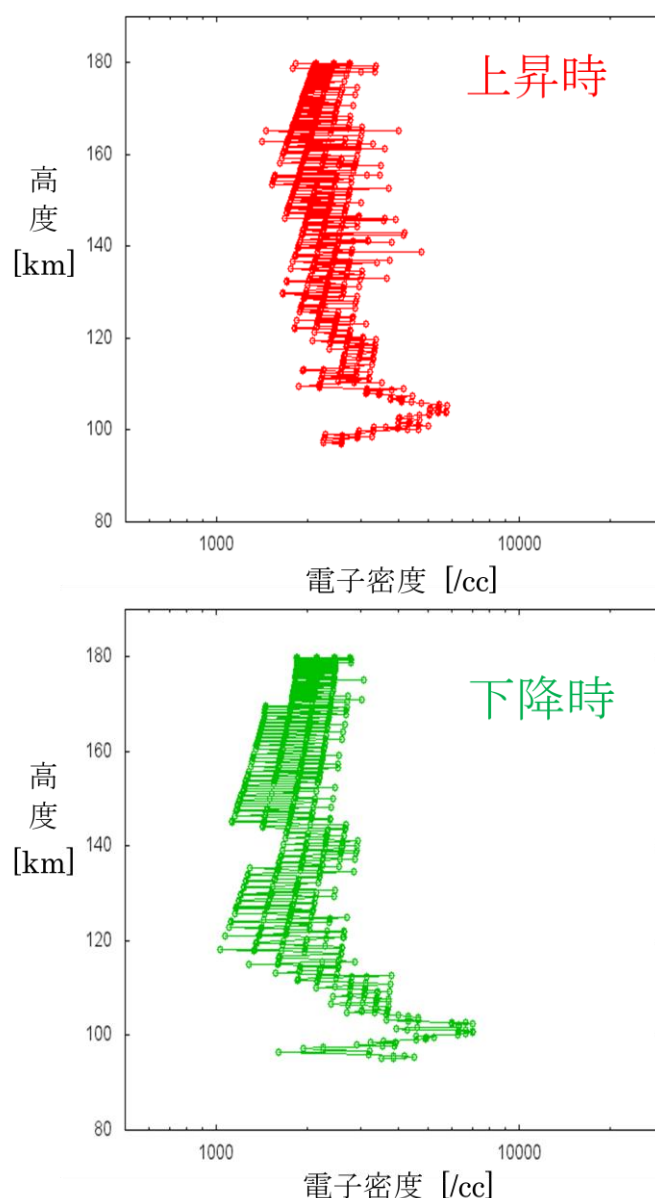


図 3. プラズマの UHR 周波数から求めた電子密度プロファイル。上が上昇時。下が下降時のもの。ただし、上昇時の高度 130~170 km のデータについては、UHR 周波数の読み取りが困難なものもあるため、暫定的な電子密度とした。

4. 議論

電子密度の高度プロファイルについて

上昇時、下降時の電子密度プロファイルと打ち上げ時刻における IRI-2007 モデルを重ねたものを図 4 に示す。図 4 から、「3. 観測結果」で挙げた特徴(2)~(4)の電子密度ピークは IRI モデルに比べ約 6 倍程度高いことが分かる。

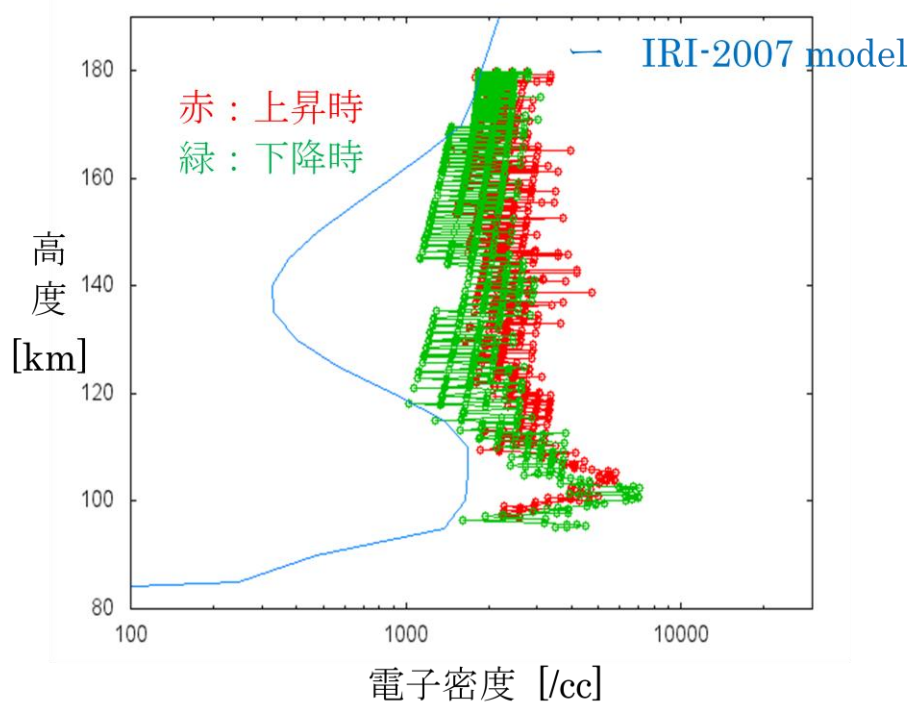


図 4. 測定電子密度プロファイルと IRI-2007 モデルとの比較

UHR 周波数より低周波側での共振について

図 2 に示した観測データ例から分かるように、UHR 周波数よりも低周波側に共振が生じる現象が、全高度域にわたって観測された。図 2 の共振周波数はプラズマ周波数に一致しており、この共振はプラズマ共鳴[e.g., 3]と考えられる。この観測結果は、電離圏低電子密度領域において、電子密度の導出に本共振が積極的に利用できる可能性を示唆している。

5. まとめ

冬季夜間に起こる電波の異常伝搬の原因を解明するために、2011 年 12 月 19 日 23 時 48 分に観測ロケット S-310-40 号機が打ち上げられた。東北大グループはロケットにインピーダンスプローブを搭載し、電子密度のその場観測を行った。インピーダンスプローブは等価容量及び位相の計測に成功し、測定された最高電子密度はロケット上昇時で $\sim 5.7 \times 10^3$ /cc、下降時で $\sim 7.0 \times 10^3$ /cc、対応する高度はいずれも 100~105 km であった。特に下降時のデータは Wake の影響を強く受けていた。また、プローブは UHR 周波数よりも低い周波数で

も共振を起こしていた。今後は、Wake の効果を取り除き、背景の電離圏電子密度プロファイルを求める予定である。

参考文献

- [1] Balmain, K. G. The impedance of a short dipole antenna in a magnetoplasma, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP-12, 5, AP-12, 605, 1964
- [2] Oya, H., and T. Obayashi, Measurement of ionospheric electron density by a gyro-plasma probe: A rocket experiment by a new impedance probe, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 20, 199, 1966
- [3] Suzuki, T., On the impedance probe measurements in space plasmas, Ph. D. thesis, Tohoku University, 2011