

中波帯電波受信機 (MFR) による電子密度推定

芦原 佑樹¹・石坂 圭吾¹・岡田 敏美¹
三宅 壮聡¹・村山 泰啓²

Estimation of electron density with MF radio receiver (MFR)

By

Y. ASHIHARA¹, K. ISHISAKA¹, T. OKADA¹, T. MIYAKE¹, Y. MURAYAMA²

Abstract: The S-310-33 rocket was launched at 0:30 JST on 18th January, 2004. Our purpose of the rocket experiment is the investigation of electron density profile in mid-latitude D-region ionosphere during the nighttime. The Medium Frequency Receiver (MFR) was installed on the rocket to estimate the D-region electron density by the MF radio wave absorption method. The MFR measured the intensities of radio waves 238 kHz and 873 kHz transmitted from the ground stations. The electron density profile was estimated from absorption of these radio waves. It is found that there was a thin layer of high electron density of $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ at the altitude of 89 km. The thickness of its layer is about 0.9 ~ 1.0 km.

概 要

2004年1月18日0時30分 (JST) にS-310-33号観測ロケットが宇宙科学研究本部・内之浦宇宙空間観測所 (USC) より打ち上げられた。ロケット観測における我々の目的は、夜間中緯度電離層D領域の電子密度分布を調査することである。電子密度の推定はロケットに搭載された電波受信機により観測された電波の受信強度の減衰特性を用いて行う。そのため、ロケットに中波帯電波受信機 (MFR) を搭載し、地上から送信される238 kHzおよび873 kHzの電波を受信する。受信された238 kHzおよび873 kHz電波強度は、ロケット上昇時・下降時とも高度約89 kmにおいて急激に減少した。観測された電波受信強度とFull Wave計算を用いて電離層下部領域の電子密度を推定したところ、高度89 kmに周辺の電子密度よりも1桁程度増加した層が存在し、その電子密度は約 $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、厚さは0.9 ~ 1.0 kmであると推定された。

重要語：中波帯電波観測，電離層下部領域，電子密度，電波吸収法，Full Wave計算

¹富山県立大学

²情報通信研究機構

1. はじめに

電離層下部に見られる大気発光の波状構造の解明を主目的としたS-310-33号観測ロケットが、宇宙科学研究本部・内之浦宇宙空間観測所（USC）より2004年1月18日0時30分（JST）、上下角72度で打ち上げられた。ロケットの飛翔および搭載された機器の動作は全て順調で、打ち上げ60秒後にノーズコーンが開頭された。ロケットは発射後186秒に最高高度141 kmに達し、内之浦南東海上に落下した。

本ロケット実験において、筆者らは中波帯電波の伝搬特性を用いた電子密度分布の測定を担当した。ロケットに搭載された中波帯電波受信機（MFR）は、熊本県熊本市から送信されているNHK熊本第2放送873 kHz（500 kW）の電波および鹿児島県鹿屋市からの鹿屋航空基地無線航行用ビーコン238 kHz（100 W）の電波を観測した。図1にS-310-33号観測ロケットの軌道と受信した地上局電波の通路を示す。ここで、本ロケット実験で観測される873 kHz電波は、過去のロケット実験において観測され、873 kHz電波の受信強度分布とFull Wave計算を用いて中緯度電離層の電子密度分布が推定されている（長野他，1989；長野他，1990；満保他，1997）。さらにVLF帯の電波を用いて電子密度が推定され、873 kHz電波による電子密度推定結果とのクロスチェックを行っている。本ロケット実験においても異なる周波数の電波を観測し、比較する必要がある。しかし、これまでのロケット実験で観測されたVLF電波発信局はすでに廃局となっており、本ロケット実験では使用できない。そのため電波発信源がUSCに近く、できるだけ低い周波数を調査した結果、鹿児島県鹿屋市から発信されている238 kHz電波を使用することにした。これにより、873 kHz電波と238 kHz電波を用いたクロスチェックが可能である。なお、238 kHz電波は過去のロケット実験では計測されておらず、本ロケット実験が初めてである。

本報告ではS-310-33号観測ロケットで得られた238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度分布を示し、これらの受信強度分布を用いた電子密度推定結果について述べる。

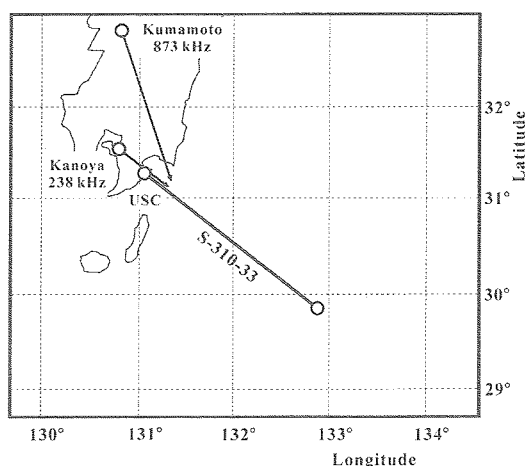


図1 S-310-33号観測ロケットの軌道とロケットで受信した地上局の電波通路

2. 中波帯電波受信機（MFR）

S-310-33号観測ロケットに搭載されたMFRはループアンテナ、プリアンプおよび238 kHz、873 kHzの各周波数の検波部で構成される。MFRのブロック図および外観図を図2、図3に示す。受信機のセンサは、15回巻きの台形ループアンテナ（上底30 cm、下底10 cm、高さ15 cm）である。ループアンテナはロケット打ち上げ後61秒で展開する。メインエレクトロニクスである検波部では、スーパーヘテロダイン方式を採用し、受信された238 kHz電

波および873 kHz電波は455 kHzの中間周波数に変換された後、検波される。検波部の周波数帯域幅は2 kHzである。検波部はHigh-gain, Low-gainの2つの検波出力をもつ。なお、High-gain出力電圧はLow-gain出力電圧に比べ20 dB増幅されている。これによって、2出力を持つ受信機のダイナミックレンジは1出力のものに比べ拡大される。MFRの最小感度・ダイナミックレンジはそれぞれ、238 kHzが $-20 \text{ dB } \mu\text{A/m} \cdot 60 \text{ dB}$ 、873 kHzが $-8 \text{ dB } \mu\text{A/m} \cdot 70 \text{ dB}$ である。

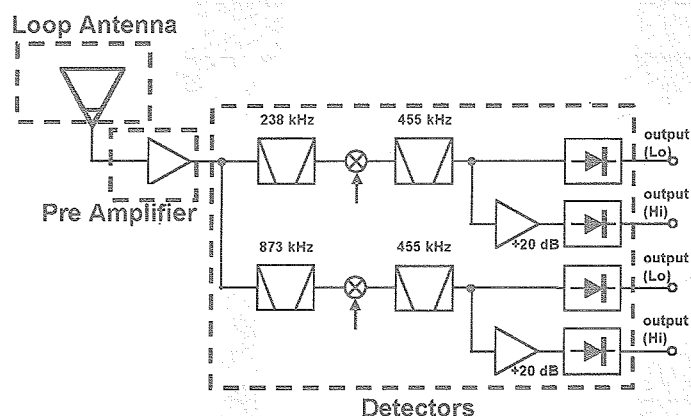


図2 S-310-33号観測ロケット搭載中波帯電波受信機のブロック図

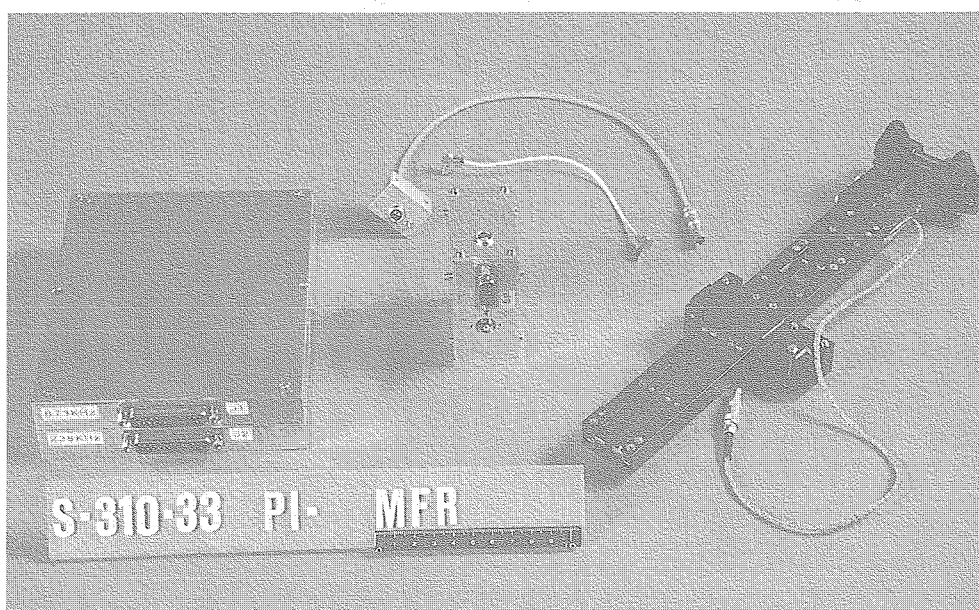


図3 中波帯電波受信機外観図

3. ロケットによる中波帯電波の受信強度観測結果

図4, 図5はMFRにより観測されたロケット上昇時・下降時の238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度分布である。縦軸は高度、横軸は電波受信強度である。また、観測結果に見られる細かい振幅の変化はロケットのスピンの影響である。図4のロケット上昇時において高度68 kmで2つの電波の受信強度が急激に増加しているのはループアンテナが展開されたためである。高度68 kmから高度89 kmまでの領域では238 kHz、873 kHz電波の受信強度は減衰していないが、高度89 kmで873 kHz電波の受信強度は約20 dB $\mu\text{A/m}$ 減衰している。しかし、238 kHz電波の受信強度は高度89 kmで約5 dB $\mu\text{A/m}$ 減衰し、高度105 kmで受信機のノイズレベルに埋もれるまで緩やかに減

衰している。図5のロケット下降時における観測結果をみると、高度約89 kmにおいて238 kHz、873 kHzそれぞれの電波受信強度が急激に減少している。特に238 kHz電波はロケット上昇時に見られた緩やかな変化ではなく、急激な変化が見られる。

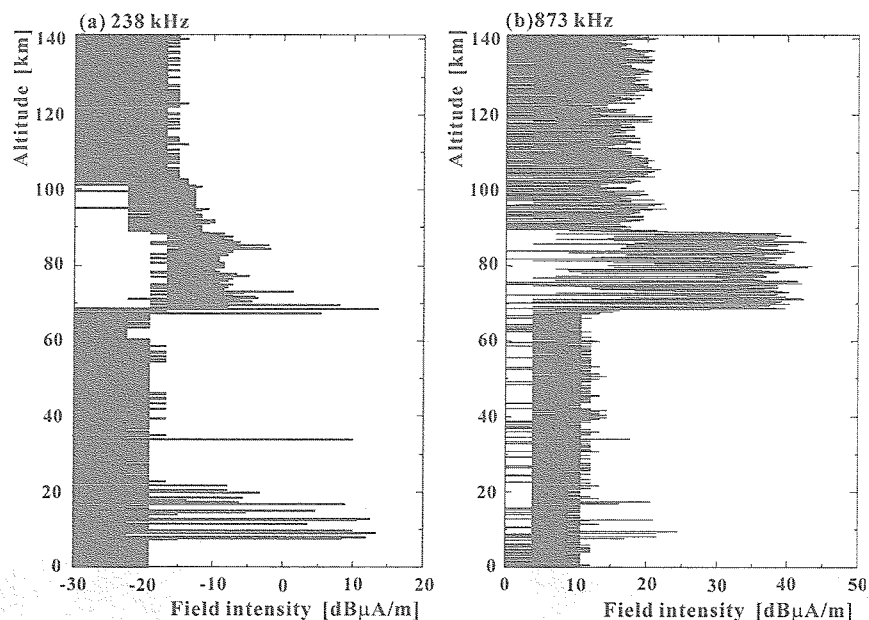


図4 ロケット上昇時に観測された(a) 238 kHz電波および(b) 873 kHz電波の受信強度分布

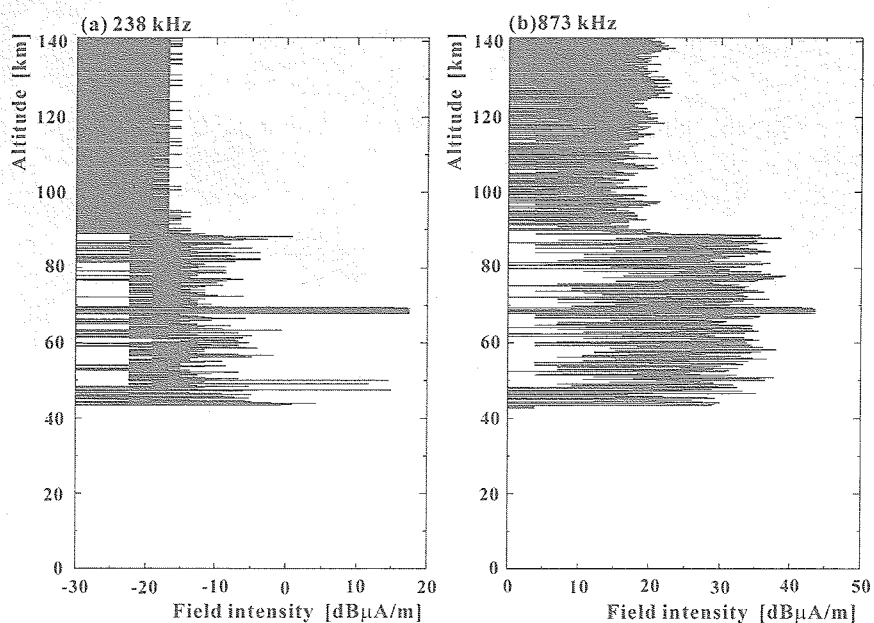


図5 ロケット下降時に観測された(a) 238 kHz電波および(b) 873 kHz電波の受信強度分布

4. 電波受信強度を用いた電子密度推定

ロケット観測された電波受信強度プロファイルに電波吸収法を用いることによって、電子密度を推定する。電波吸収法とは、ロケット搭載電波受信機によって観測した電波受信強度と電子密度や衝突を考慮したFull Wave計

算値より導いた電波受信強度の比較を行い、それらが一致するように電子密度を修正することにより、電子密度を推定する手法である（長野，1997）。

4.1 ロケット上昇時の電子密度推定

図4より、高度89 kmにおいて873 kHz電波は急激に減衰していることから、高度89 kmの位置での電子密度が急激に増加していると推定される。一方、238 kHz電波は、高度89 kmにおいて約5 dB μ A/m減衰しているが、高度105 kmまで緩やかに減衰している。ここで、ロケット上昇時において、238 kHz電波の波長は約1.26 km、高度89 kmにおける電離層に対する238 kHz電波の入射角は43.7°、一方873 kHz電波の場合、波長は約0.34 km、入射角は69.0°である。電波の波長と電離層に対する電波の入射角を考慮し、電子密度が増加していると思われる領域の厚みを推定すると、0.12 ～ 0.9 kmとなる。これらの推測を元に初期電子密度分布を仮定し、Full Wave計算を行い、観測された電波受信強度とFull Wave計算値が一致するまで電子密度分布を修正した結果、図6(a)に示す電子密度分布が得られた。図6(a)の電子密度分布より、高度89 kmにおいて電子密度が $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ まで増加している領域が存在し、その厚さは約0.9 kmであるということが分かった。ここで、図6(b)，(c)は図6(a)の電子密度分布を用いてFull Wave計算した電波受信強度と観測値を比較したものである。計算値と観測値が一致していることがわかる。特に高度80 kmから高度105 kmの領域において両者の受信強度の減衰特性がよく一致している。

4.2 ロケット下降時の電子密度推定

ここで、ロケット下降時において高度89 kmの位置での電波の入射角はそれぞれ、238 kHz電波の入射角は71.3°、873 kHz電波は77.3°となる。ロケット上昇時と同じように電子密度を推定した結果、図7(a)のような電子密度分布が得られた。図7(a)の電子密度分布を見ると、高度89 kmに電子密度が $7.5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ まで増加している領域があり、その厚さは約0.9 kmであった。図7(a)の電子密度分布を用いてFull Wave計算を行った結果、図7(b)，(c)に示すように238 kHz、873 kHz電波とも観測値と計算値がほぼ一致した。

ロケット上昇時・下降時における電子密度推定結果から、ロケット観測時において高度89 km付近の領域では図8に示すように、電子密度が $7.5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3} \sim 2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ約0.9 kmの層が存在していると推定した。ここで、1992年に打ち上げられたS-310-21号ロケット観測において推定された電子密度分布を見てみると、高度89 kmの位置で電子密度が $1.7 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、層の厚さが約1.0 kmの領域が存在していると報告されている（Okada et al., 1997, Nagano and Okada, 2000）。これより、冬季夜間の中緯度電離層において、高度89 kmに電子密度が約 10^3 cm^{-3} 、厚さが約1.0 kmの層が存在することが示された。

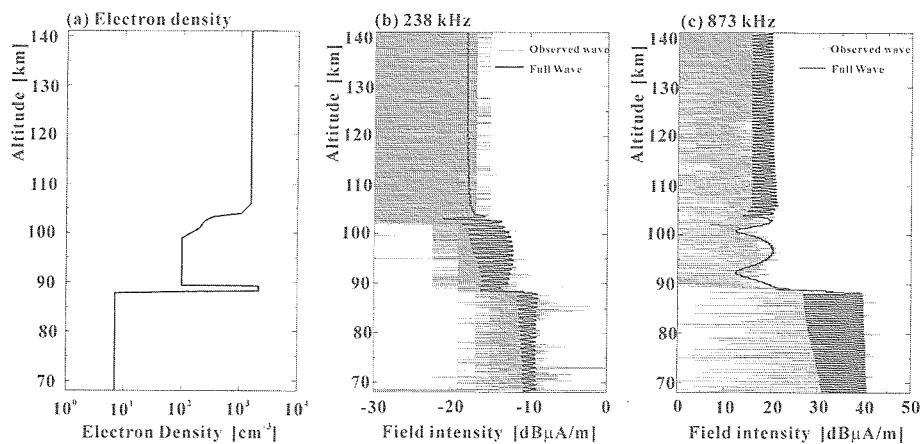


図6 ロケット上昇時において(a)推定された電子密度分布、(b) 238 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較、(c) 873 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較

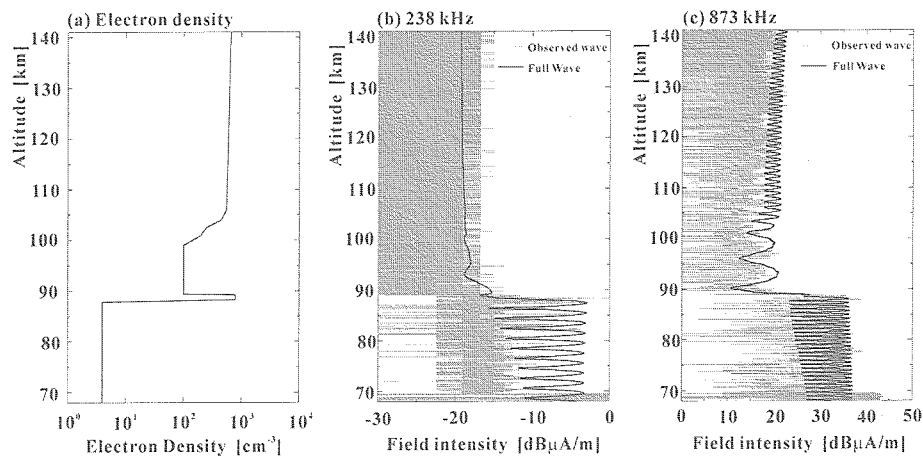


図7 ロケット下降時において(a)推定された電子密度分布, (b) 238 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較, (c) 873 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較

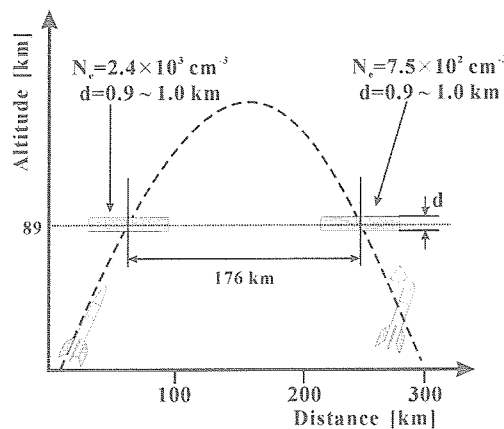


図8 ロケット観測時に推定される高度89 km付近の電子密度分布

5. まとめ

S-310-33号観測ロケット搭載中波帯電波受信機によって中緯度夜間電離層中の238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度観測を行った。その結果、ロケット上昇時において873 kHz電波は高度89 kmで受信強度が急激に減衰したが、238 kHz電波は高度89 kmから高度105 kmにかけて緩やかに減衰した。一方ロケット下降時では高度89 kmで238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度は急激に減衰した。電波受信強度の観測結果およびFull Wave計算から電子密度分布を推定したところ、高度89 kmで電子密度が増加している領域が存在し、その厚さが約0.9 kmであることが示された。また、高度89 kmの位置に存在すると推定された電子密度の増加している層は、ロケットに搭載された高速ラングミュアプローブ (FLP) 観測によっても観測されている (小泉他, 2004)。また、高度89 kmの位置に電子密度の高い層が存在したことは1992年のS-310-21号ロケット実験でも観測されている。なお、今回のロケット実験においては、情報通信研究機構 (NICT) の山川電波観測所において、MFレーダ観測、イオノグラム観測が行われたが、これらの地上観測では高度89 kmでの電子密度の増加している層は観測されなかった (川村, 2004)。

謝 辞

本ロケット実験は、宇宙開発機構宇宙科学研究本部のご協力により行われたものであり、実験主任加藤学教授

には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。電波吸収法を用いた電子密度推定を行うにあたり、Full Wave計算についてご指導いただいた金沢大学長野勇教授、石川工業高等専門学校深見哲男教授に深く感謝いたします。

ロケット搭載機器は、明和システム株式会社の製作であり、特に高野博氏に負うところが大きく、ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 川村 誠治, 山川MFレーダで観測された電子密度変動と風速変動, NICT大気光ワークショップ, 2004.
- [2] 小泉 宜子, 村山 泰啓, 阿部 琢美, 小山 孝一郎, S-310-33号機で観測された中性風と電子密度の鉛直構造の関係, 第116回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, B22-04, 2004.
- [3] 満保 正喜, 深見 哲男, 岡田 敏美, 長野 勇, 木村 磐根, MFおよびVLF電波のロケット観測による夜間の下部電離層の電子密度測定, 電子情報通信学会論文誌B-II, **80-B-II**, 416-423, 1997.
- [4] 長野 勇, 岡田 敏美, 井上 良彦, 牧野 将美, 森田 慎一郎, 満保 正喜, S-310-18号機による中波強度の高度分布からD層電子密度分布の推定, 宇宙科学研究所報告, 特集 第23号, 221-232, 1989.
- [5] 長野 勇, 岡田 敏美, 井上 良彦, 牧野 将美, 満保 正喜, 電波吸収法による電子温度と中性大気温度比及びD層電子密度の測定, 宇宙科学研究所報告, 特集 第26号, 49-62, 1990.
- [6] 長野 勇, 不均質媒質中の電磁波伝播—ロケット・衛星観測による宇宙空間の電波伝播—, 朋友印刷, 1997.
- [7] Nagano, I. and T. Okada, Electron density profile in the ionospheric D-region estimated from MF radio wave absorption, Adv. Space Res., **25**, 33-42, 2000.
- [8] Okada, T., M. Mambo, T. Fukami, I. Nagano, and K. Okumura, Multiple thin layers of enhanced ionization in the ionospheric E-region derived from VLF wave measurements, J. Geomag. Geoelectr., **49**, 69-76, 1997.