

## LF 及び MF 電波のロケット観測による冬季夜間下部電離層の電子密度推定

芦原 佑樹<sup>†a)</sup>      石坂 圭吾<sup>†</sup>      岡田 敏美<sup>†</sup>      三宅 壮聡<sup>†</sup>  
 村山 泰啓<sup>††</sup>      長野 勇<sup>†††</sup>

Estimation of Electron Density Profile in the Lower Ionosphere at Winter Nighttime by Rocket Observations of LF and MF Radio Waves

Yuki ASHIHARA<sup>†a)</sup>, Keigo ISHISAKA<sup>†</sup>, Toshimi OKADA<sup>†</sup>, Taketoshi MIYAKE<sup>†</sup>, Yasuhiro MURAYAMA<sup>††</sup>, and Isamu NAGANO<sup>†††</sup>

あらまし 電離層中を伝搬する電波の強度は、伝搬領域の屈折率及び電子と中性粒子間の衝突回数に依存する。したがって、電離層中を伝搬する電波の強度を観測することによって、逆問題として電子密度の高度分布を推定することができる。本研究では、冬季夜間にロケット搭載長中波電波受信機を用いて、地上から送信される鹿屋航空基地無指向性ビーコン (238 kHz) の長波電波、及び NHK 熊本第 2 放送 (873 kHz) の中波電波の地上—電離層間における磁界強度を観測した。これら 2 波の磁界強度は、高度 89 km 付近で著しく減衰した。長波及び中波の磁界強度観測値と Full wave 解析による理論計算値の比較から下部電離層の電子密度推定を行った結果、高度 89 km で電子密度が大幅に増加している層が存在するため、磁界強度が急激に減衰することが分かった。この層の厚さは約 1 km、最大電子密度は  $2.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  であった。

キーワード 電離層, 電子密度, Full wave 解析, 長中波電波伝搬特性

### 1. ま え が き

電離層中の電子密度の主な観測手法として、電波の垂直打上げによる地上観測とロケット観測による直接観測がある。前者は連続時間観測が可能であるという利点があるが、昼間に比べて電子が減少する夜間の電離層下部領域は観測できない。これは中波放送受信保護のため、電波の垂直打上げ周波数が 1.6 MHz より高い周波数で行われているためである [1]。そのため夜間下部電離層の電子密度観測は、主にロケットによる直

接観測によって行われてきた。

代表的な電離層の電子密度の直接観測手法として、固定バイアスプローブ (CLP) に流れる電流量から電子密度を測定する方法がある。この方法は、ロケットが帯電したときに基準電位が変動するため、測定値はロケットの帯電電位の影響を受けるおそれがある。これに対して電波伝搬特性を用いる電子密度推定方法は、ロケット帯電の影響を受けないという利点がある。電波伝搬特性を利用した電子密度推定は、これまでに数々行われ成果を上げている。S-310-18 号機ロケット実験では、873 kHz の電波強度観測より冬季昼間の D 層電子密度推定が行われた [2], [3]。また S-310-21 号機ロケット実験では、873 kHz の電波強度観測と偏波観測、17.4 kHz の電波強度観測、そして DC プローブによる電子電流観測が行われた。その結果、冬季夜間の E 層におけるスポラディック E (Es) 層が同定された [1]。

本研究では、観測ロケット S-310-33 号機に搭載した長中波電波受信機で観測された電波の磁界強度の高度

<sup>†</sup> 富山県立大学大学院工学研究科, 射水市  
 Graduate School of Engineering, Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa, Imizu-shi, 939-0398 Japan

<sup>††</sup> 情報通信研究機構電磁波計測研究センター, 小金井市  
 Applied Electromagnetic Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-kita, Koganei-shi, 184-8795 Japan

<sup>†††</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, 金沢市  
 Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, 920-1192 Japan

a) E-mail: ashihara@rdw.pu-toyama.ac.jp

分布を示す．更に，長野らによって開発された電波伝搬特性から電子密度を推定する方法（電波吸収法）[2]を適用して，この観測結果から推定した下部電離層の電子密度分布を示す．

## 2. 実験の概要

2004年1月18日午前0時30分（JST）にS-310-33号機観測ロケットが宇宙航空研究開発機構内の浦宇宙空間観測所（USC）より打上げられた．ロケットは打上げ後60秒の高度68kmでノーズコーンが開頭され，最高高度141kmに達した後，内之浦南東海上に落下した．ロケット飛行中，ロケット搭載の科学観測機器はすべて正常動作した．

### 2.1 観測電波

ロケットに搭載された長中波電波受信機は，鹿児島県鹿屋市の鹿屋航空基地無線航行用無指向性ビーコン238kHz（送信出力100W）及び熊本県熊本市のNHK熊本第2放送873kHz（送信出力500kW）の二つの電波の地上-電離層間における磁界強度を観測する．プラズマ中を伝搬する電波は，その周波数によって異なる伝搬特性を示す．本実験では観測された二つの電波伝搬特性を満足する電子密度プロファイルを推定する．そのため，単一周波数を用いた場合と比較して，より正確に電子密度推定を行うことができる．

観測ロケット軌道及びロケット上昇時高度68kmにおける電波通路を図1に示す．長中波電波受信機のループアンテナはロケット上昇時の高度68kmで展開された．その後，長中波電波受信機は最高高度141kmを経て，ロケット下降時の高度42kmまで観測を行った．ロケットと各電波送信所との直線距離は，ロケット上昇時の高度68kmにおいて，鹿屋航空基地（238kHz）から約68km，NHK熊本第2放送大津ラジオ放送所（873kHz）から約207kmである．

### 2.2 長中波電波受信機

S-310-33号機に搭載された長中波電波受信機は，ループアンテナ，プリアンプ，238kHz及び873kHzの各電波用の検波部で構成される．長中波電波受信機のブロックダイアグラムを図2に，ループアンテナ及び電子機器の配置図を図3に示す．地上から送信された電波の磁界成分は，ロケット側面に展開したループアンテナ（15回巻き， $0.032\text{m}^2$ ）で受信される．受信された電波はプリアンプを経て，検波部でスーパーヘテロダイン方式を用いて検波される．中間周波段での通過帯域は2kHzである．検波部はHigh-gain

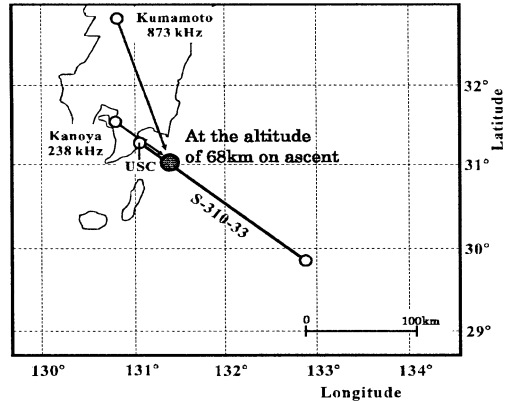


図1 観測ロケット軌道及びロケット上昇時高度68kmにおける電波通路

Fig.1 Trajectory of S-310-33 sounding rocket and the wave propagation routes from radio transmitting stations at the altitude of 68 km.

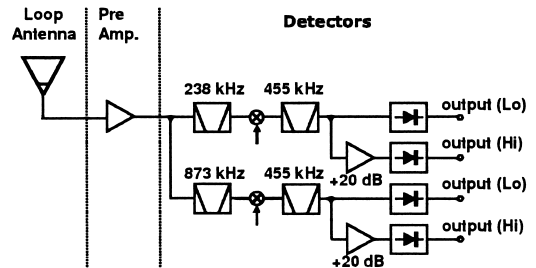


図2 長中波電波受信機のブロックダイアグラム

Fig.2 Block diagram of the low and medium frequency receiver.

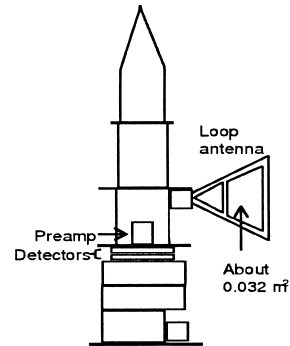


図3 ループアンテナ及び電子機器の配置

Fig.3 Configuration of the loop antenna and electronics.

と Low-gain の二つの検波出力をもち，High-gain は Low-gain に比べて利得 20 dB 増大している．長中波電波受信機の最小感度・ダイナミックレンジは，238 kHz において  $-20\text{dB}\mu\text{A}/\text{m} \cdot 60\text{dB}$ ，873 kHz において

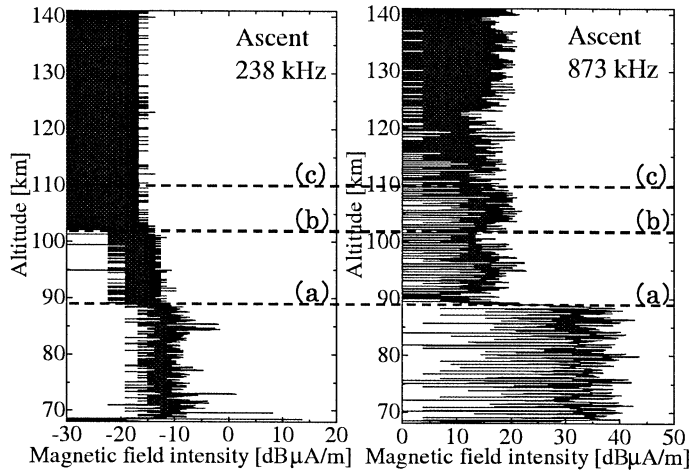


図 4 ロケット上昇時に測定された磁界強度の高度分布 (左図: 238 kHz, 右図: 873 kHz)  
 Fig. 4 Observation results of the magnetic field intensities at 238 kHz (left) and 873 kHz (right) on ascent.

-8 dB $\mu$ A/m · 70 dB である .

### 3. 観測結果

ロケット上昇時 (高度 68 ~ 141 km) に観測された磁界強度の高度分布を図 4 に示す [4]. 縦軸は高度, 横軸は磁界強度である. 磁界強度の短い周期の振幅は, ロケットスピンによりループアンテナが回転しているため生じたものである. 両周波数の磁界強度に顕著な変化のある高度 89, 102, 110 km をそれぞれ (a) (b), (c) として, それぞれの高度及び高度間の領域における磁界強度の特徴について以下に述べる.

#### (1) 高度 68 ~ 89 km の領域 (a 以下)

高度 68 km でアンテナが展開され, 238 kHz 及び 873 kHz の電波が観測されている. この領域における磁界強度は, ほぼ一定である. また, 873 kHz の磁界強度は約 38 dB $\mu$ A/m である. 873 kHz の磁界強度の観測値は, 過去のロケット実験で観測された観測値 [1] ~ [3] と一致している.

#### (2) 高度 89 km (a)

磁界強度は, 高度 89 km (a) で急しゅんな減衰を受ける. ここで (a) 付近の磁界強度の高度分布を詳しく見るため, 高度 86.5 ~ 91.5 km における磁界強度分布の拡大図を図 5 に示す. 電波が減衰を受ける高度範囲は, 図 5 左図より 238 kHz では 88.5 ~ 90.0 km, 図 5 右図より 873 kHz では 88.5 ~ 90.5 km である. これより, 高度 89 km 付近で電子密度が増加している領域があったと推察される.

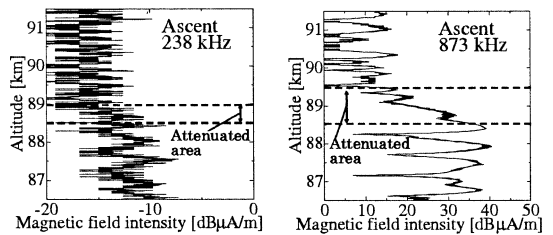


図 5 ロケット上昇時の高度 89 km 付近で測定された磁界強度の高度分布 (左図: 238 kHz, 右図: 873 kHz)  
 Fig. 5 Observation results of the magnetic field intensities at 238 kHz (left) and 873 kHz (right) in the vicinity of 89 km on ascent.

#### (3) 高度 89 ~ 102 km の領域 (a ~ b)

238 kHz の磁界強度は, ほぼ一定である. 一方 873 kHz は高度 89 km (a) から徐々に大きくなり, 96 km をピークにして高度 102 km (b) にかけて減少している.

#### (4) 高度 102 ~ 110 km の領域 (b ~ c)

238 kHz の磁界強度は高度 102 km (b) で減衰して, その後高度 110 km (c) まで電波磁界強度は一定である. 873 kHz の磁界強度は高度 102 km (b) から高度 106 km にかけて大きくなり, 高度 106 km から高度 110 km (c) にかけて小さくなる.

## 4. 夜間電離層 D 領域から下部 E 領域の電子密度推定

### 4.1 電子密度推定方法

電子密度の推定方法として, 本研究ではロケット観

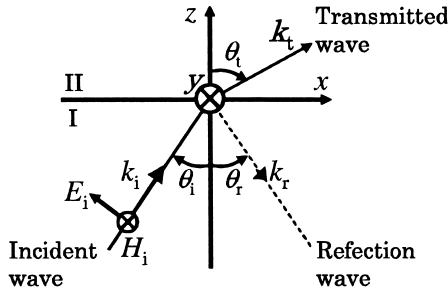


図 6 TM モードにおける 2 層境界面での入射波, 反射波, 透過波の関係

Fig. 6 Relation of incidence wave, reflection wave, and penetration wave with TM mode in the boundary surface.

測した電波伝搬特性 (観測値) と, 仮定した電子密度の高度分布を用いた Full wave 解析により理論計算した電波伝搬特性 (計算値) を比較・一致させることにより電子密度推定を行う電波吸収法 [2] を用いる。

夜間下部電離層の電子密度は, 高度に対して大きく変化する。電波伝搬特性の理論計算を行う際に, 媒質の変化が波長に比べて急しゅんである場合は幾何光学理論として取り扱えず解析的に解けない [5]。このような場合, Full wave 解析を用いた数値計算により電波伝搬特性を求めることができる。ここで TM モードにおける 2 層境界面での入射波, 反射波, 透過波の関係を図 6 に示す。電波進行方向の水平成分を  $x$  軸, 天頂方向を  $z$  軸にとると, 電波は  $x-z$  面を進行する。このとき, 入射角  $\theta_i$  をもつ TM モードの入射波の電界成分  $E_i$  は  $x-z$  面に存在し, 磁界成分は  $y$  方向の成分  $H_y$  のみをもつ。入射波は, 媒質 I と媒質 II の境界面を通過する際, 屈折角  $\theta_t$  の透過波と反射角  $\theta_r$  の反射波となって伝搬する。Full wave 解析は, 不均質媒質 (電離層) を均質な薄い層の積層とみなし, それぞれの積層内の反射・透過係数 (高さ方向の屈折率) に, 各薄層の境界での境界条件を適用して層全体の解析解を導出し, 数値計算により電磁界伝搬特性を求める方法である [6], [7]。

層内の反射・透過係数は屈折率として与えられ, 電波の進行方向の屈折率はアップルトン・ハートレーの関係式から, 電波周波数, 電子プラズマ周波数, 電子サイクロトロン周波数及び電波進行方向と磁場のなす角の関数として得られる。しかし, 電離層の電子密度は高さ方向に変化することから, 高さ方向の屈折率であるブッカー根 (Booker root) を用いて論じられ

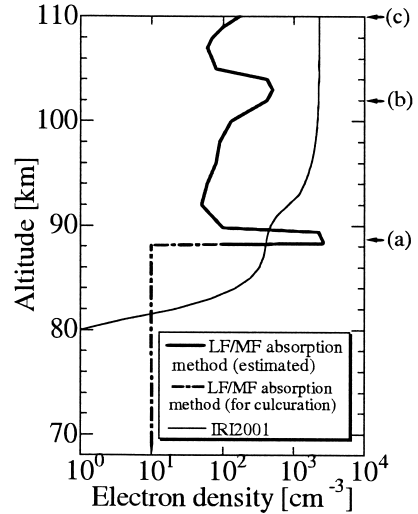


図 7 電波吸収法 (太線) と IRI2001 (細線) の電子密度の高度分布

Fig. 7 Electron density profiles of the estimated by LF/MF absorption method, and the measured by FLP and the IRI2001 electron density profiles.

る [8]。ブッカー根は, ブッカーの 4 次方程式の解として与えられる。この四つの解は, 電離層中の二つのモード (O mode, X mode)<sup>(注1)</sup>の上昇波, 下降波と対応する [9]。

#### 4.2 電子密度推定結果

図 4 に示した 238 kHz 及び 873 kHz の磁界強度の高度分布において, 強度変化が大きい高度 68 ~ 110 km の観測値に電波吸収法を適用して電子密度の高度分布を推定する。

Full wave 解析では電子密度の高度モデルのほかに, 電子と中性大気との衝突回数の高度モデル, 電子ジャイロ周波数, 電離層薄層モデルに対する入射角, 方位角 (電波の進行方向と地球磁場のなす角), 地球磁場の伏角, 電波の伝搬モードが必要である。衝突回数は大気圧に比例する [10] ものとして超高層大気標準モデル (MSIS-E-90) [11] から計算し, 電子ジャイロ周波数及び方位角, 伏角の計算に必要な地球磁場は IGRF (国際標準地球磁場) [12] を用いる。

図 7 に電波吸収法による推定電子密度を太線及び一点鎖線で, 国際標準電離層 2001 (IRI) [13] による電

(注1): 本論文文中での O, X mode とは, 古くからの電離層電波伝搬の研究で使われている正常波 (O), 異常波 (X) モードを指す。最近のプラズマ波動の論文に見られる磁場に対して  $\theta = 90^\circ$  で伝搬する二つのモードのことではない。

子密度を細線でそれぞれ示す．以下に，図 4 で指摘した (a)~(c) の高度に対応させて，電波吸収法で得られた電子密度 (図 7 太線) の特徴について述べる．

(1) 高度 68~89 km の領域 (a 以下)

この領域では観測された磁界強度に大きな変化が見られなかったため，正確な電子密度推定はできない．しかし， $10^2 \text{ cm}^{-3}$  の電子密度であると仮定して Full wave 解析を行うと，238 kHz 及び 873 kHz での計算値は緩やかに減衰し，観測値と一致しない．このことから，この領域での電子密度は  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  より小さいと推定され，Full wave 解析には  $10^1 \text{ cm}^{-3}$  を用いた．この領域の電波吸収法による電子密度は，Full wave 計算に使用した値として図 7 に一点鎖線で示す．

(2) 高度 89 km (a)

高度 88.5~89.5 km の約 1 km の高度範囲に，その前後の領域よりも電子密度が少なくとも 1 けた以上大きい層が存在し，この層の電子密度の最大値は  $2.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  である．この層の下部の電子密度は少なくとも  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  より小さいと推定されることから， $10^2 \text{ cm}^{-3}$  以上の電子密度を推定値として太線で示す．

(3) 高度 89~102 km の領域 (a~b)

この領域の電子密度は，高度 89 km (a) と比較して 1 けた小さい  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  程度で，高度 92~100 km にかけて緩やかに増加している．

(4) 高度 102~110 km の領域 (b~c)

高度 102 km (b) から高度 104 km まで  $5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$  程度で，前後の高度よりも大きい電子密度の領域が存在する．そして，高度 104 km から 107 km にかけて電子密度が減少し，高度 107 km から再び増加している．

二つの周波数の伝搬特性を用いて電子密度高度分布を推定した結果，高度 89 km で厚さ約 1 km の高電子密度をもつ層が存在し，高度 102~104 km は前後の領域と比較して高い電子密度であることが推定された．

### 4.3 磁界強度の計算値と観測値の比較

推定電子密度を用いた磁界強度の Full wave 解析値とロケット観測値を比較する．Full wave 解析では，図 6 に示した天頂方向を  $z$  軸とした  $x-y-z$  座標系を用い，それぞれの座標系に対する電波強度を計算する．しかし，ロケット姿勢は時間経過に従い逐次変化する．ここで，Full wave 解析で使用する天頂方向を  $z$  軸とした  $x-y-z$  座標系とロケット機軸を  $w$  軸とした  $u-v-w$  座標系の関係を図 8 に示す．

ロケットは機軸 ( $w$  軸) を中心に回転するので，ロ

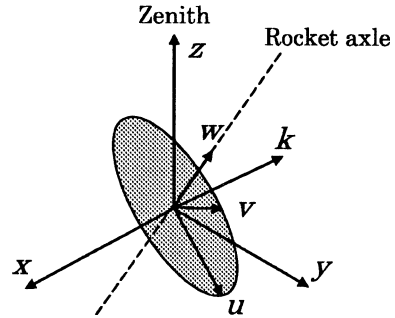


図 8 Full wave 解析で使用する天頂方向を  $z$  軸とした  $x-y-z$  座標系とロケット機軸を  $w$  軸とした  $u-v-w$  座標系の関係

Fig.8 Relation of the  $x-y-z$  and the  $u-v-w$  coordinate system.

ケット側面に展開するループアンテナは機軸に垂直な  $u-v$  面を回転する．ゆえに，計算値と観測値を比較するためには，ロケットに搭載された星撮像姿勢計のロケット姿勢データ [14] を用いて，磁界強度の計算値を  $x-y-z$  座標系から  $u-v-w$  座標系に座標変換を行う必要がある．図 9 に，Full wave 解析によって得られた磁界強度の計算値を黒線で，ロケット観測値を灰線で示す．この計算値は，ロケット座標系に座標変換を行い，ロケット回転面 ( $u-v$  面) でループアンテナが受信する最大値を示している．一方，観測値はロケットスピンに起因する磁界強度の振幅変化を含むため，電波吸収法では観測値のロケットスピンを含む振幅の最大値が，計算値と一致するように電子密度の高度分布モデルの修正を繰り返し，図 7 に示す推定結果を得た．

図 9 に示した 238 kHz と 873 kHz の磁界強度計算値において，238 kHz では高度 68~110 km の全解析領域で，873 kHz では高度 89 km (a) 以下の領域で細かな振幅が見られる．これらの振幅の周期は，238 kHz で約 440 m，873 kHz で約 870 m である．これらの周期は，それぞれの周波数から計算される定在波長と一致することから，上昇波と電離層反射により生じた下降波によって発生する定在波であるといえる．この定在波は，受信機感度に余裕のあった 873 kHz の高度 89 km (a) 以下の領域で確認されている．

図 9 左図に示した 238 kHz における磁界強度の Full wave 計算値では，高度 89 km (a) と 102 km (b) に磁界強度の減衰が見られる．これらは，図 7 の電子密度の高い (a) 及び (b) の高度と一致する．このことから 238 kHz の電波は (a)(b) の高電子密度層で一部が反射したものと考えられる．しかしながら，図 9

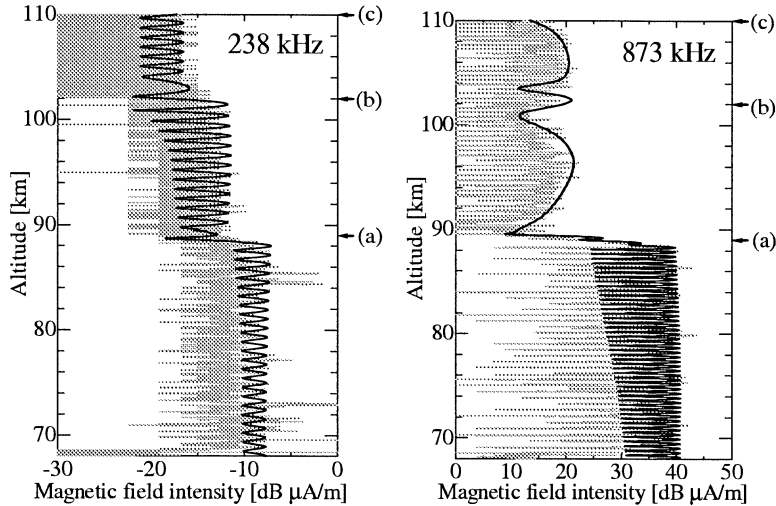


図 9 推定電子密度を用いた Full wave 解析から求めた磁界強度計算値 (黒線) とロケット観測値 (灰線) の比較 (左図: 238 kHz, 右図: 873 kHz)

Fig.9 Comparison between the calculated with the estimated electron density profile and the observed magnetic field intensities. (Left:238 kHz, Right:873 kHz)

右図に示した 873 kHz の磁界強度の計算値では、高度 89 km (a) で著しく減衰した後、高度 89 ~ 110 km (a ~ c) で長い周期の振幅をもった伝搬特性となる。高度 89 km での急激な減衰は、図 7 (a) の高電子密度層と一致するが、一方で高度 89 km (a) 以上で生じる長周期振幅をもつ磁界強度の伝搬特性と電子密度との相関関係は見られない。

## 5. 考 察

### 5.1 減衰高度における電子密度と屈折率

238 kHz と 873 kHz の電波における電子密度に対するブッカー根の変化を図 10 に示す。図中に示した電子密度 (a) 及び (b) は、図 4 に示した観測磁界強度に顕著な変化のあった高度 89 km (a) と 102 km (b) の電子密度をそれぞれ示している。ブッカー根は鉛直方向の屈折率を表し、例えば 238 kHz における (a) の電子密度では X と O のホイッスラーモードが伝搬するが (b) の電子密度では X モードは伝搬できるが O モードは伝搬することができない。本研究で電子密度推定を行った高度 89 ~ 110 km (a ~ c) の領域における最大電子密度は、高度 89 km (a) で  $2.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  である。この電子密度における屈折率は、238 kHz 及び 873 kHz のそれぞれ O, X の四つのモードのうち、両周波数の X モードの屈折率が零に到達していない。

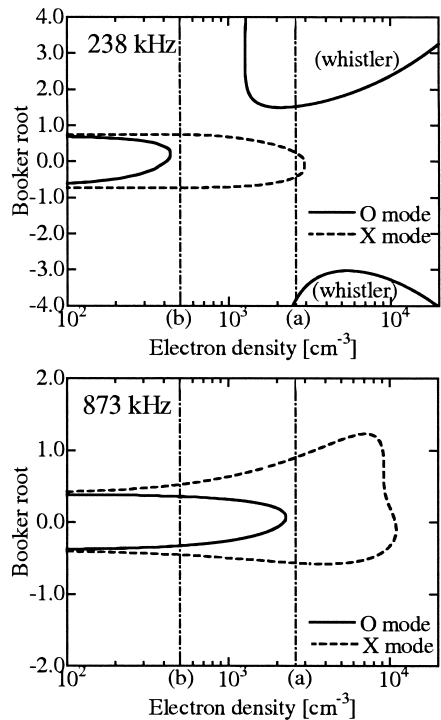


図 10 電子密度に対するブッカー根の変化 (上: 238 kHz, 下: 873 kHz. 衝突項は考慮していない)

Fig.10 Booker root characteristics for electron density. (Above: at 238 kHz, Below: at 873 kHz. Electron collision is neglected)

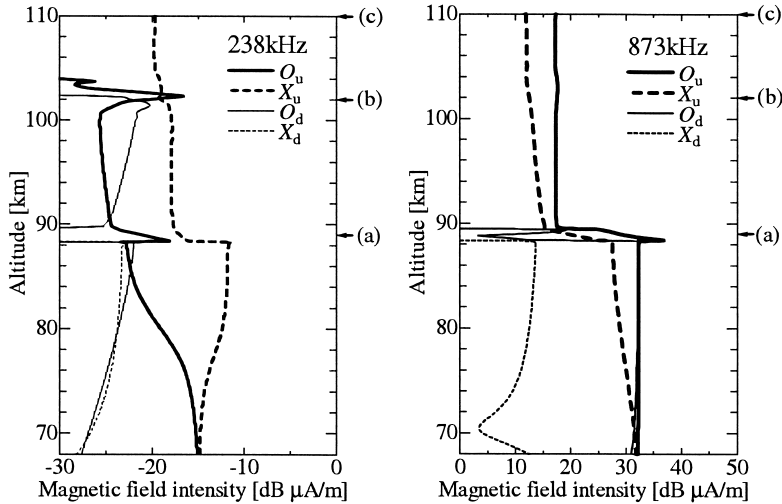


図 11 磁界強度  $H_y$  の各モードにおける高度分布 (左図: 238 kHz, 右図: 873 kHz, 添字 u, d はそれぞれ上昇波, 下降波を示す)

Fig.11 Amplitude of each propagation mode in  $H_y$ . (Left: 238 kHz, Right: 873 kHz)

したがって電波は完全反射されておらず、高度 89 km (a) 以上の領域においても両周波数の X モードが伝搬するということがブッカー根の計算からいえる。また、高度 102 km (b) の電子密度では 238 kHz の O モードの屈折率が零となり、完全反射されると予測できる。

ここで、図 9 右図に示した Full wave 解析から得た 873 kHz の磁界強度計算結果は、ロケット回転面内で受信可能な最大磁界強度を示しており、O, X モードのそれぞれ上昇波と下降波である四つの屈折率に従うそれぞれの磁界強度を合成したものである。屈折率に従う四つのモードの伝搬特性を調べるために、Full wave 計算結果の主要素である鉛直磁界成分  $H_y$  について電磁波のモード分離を行った。Full wave 解析から得た磁界強度  $H_y$  の各モードにおける高度分布を図 11 に示す。図 10 より、873 kHz の電波は高度 89 km (a) において O モードの上昇波 ( $O_u$ ) が反射されるはずである。しかし、図 11 より高度 89 km (a) で減衰を受けるものの完全反射はされずに上層に伝搬していることが分かる。これは高度 89 km (a) の電子密度の高い領域が約 1 km という狭い範囲であり、観測電波の数波長程度と狭い領域であるため、O モードの電波は完全反射されずに上層に透過したものと考えられる。したがって図 11 より、873 kHz の電波は高度 89 km (a) 以上の領域で O と X の両モードの電波が伝搬していることが分かる。また、238 kHz にお

いても同様の理由で高度 89 km (a) 以上の領域に X モードが伝搬している。また、高度 102 km (b) において 238 kHz の O モード  $O_u$  が反射されており、これはブッカー根の計算結果と一致する。

### 5.2 高度 89 km 以上における 873 kHz の磁界強度の振幅

4.2 で指摘した 873 kHz の高度 89 km 以上で生じる長周期振幅をもつ磁界強度の伝搬特性について考察する。図 11 右図の Full wave 解析から得た 873 kHz の磁界強度計算値の高度分布より、高度 89 km 以上ではブッカー根に従う四つの伝搬モードのうち、上昇波の  $O_u$  と  $X_u$  モードが伝搬する。図 11 に示した各モードにおける磁界強度計算値は、各モードの振幅値であり、実際に観測される電波は O と X モードの合成波となることから、両モードの位相差を考慮が必要がある。上昇波  $O_u$  と  $X_u$  の位相差の高度分布を図 12 に示す。 $O_u$  と  $X_u$  の位相差は、高度 89, 101, 103 km の各高度で  $180^\circ$  となっている。これは、図 9 右図に示した 873 kHz の電波磁界強度計算値で電波磁界強度の振幅の節となっている高度とほぼ一致している。したがって、873 kHz の高度 89 km 以上に見られる磁界強度の振幅は、電離層中を伝搬する電波の  $O_u$  と  $X_u$  の位相速度の変化量の違いから、位相差が変化したために生じたと考えられる。

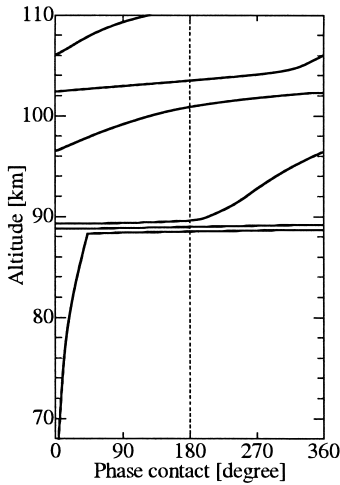


図 12 磁界強度計算値  $H_y$  の上昇波  $O_u$  と  $X_u$  の位相差の高度分布

Fig. 12 Phase-contact profile in between  $O_u$  and  $X_u$  of each propagation mode in  $H_y$ .

### 5.3 推定電子密度の評価

本実験では、238 kHz と 873 kHz の 2 波を同時観測し、両方の電波磁界強度の高度分布を用いて電子密度推定を行った。特に高度 102 km での電子密度の増加は、238 kHz で観測された減衰より特定されたものである。この高度 102 km で電子密度が増加するという情報をもとに、更に電子密度プロファイルの修正を進めた結果、高度 89 km 以上における 873 kHz の電波磁界強度観測値と計算値を一致させることができた。したがって、図 7 に示した電子密度推定結果は 238 kHz と 873 kHz の両方の観測結果から推定されたものである。

電波吸収法の推定精度について、Full wave 計算で使用する計算パラメータとしていくつかの仮定した値を用いている。計算パラメータを仮定したことから生じる誤差として、(1) 電子と中性大気との衝突回数の仮定による誤差、(2) 平面波が電離層へ入射する角度を一定として計算することによる誤差、(3) 電子ジャイロ周波数、地球磁場伏角、地球磁場から測った  $k$  ベクトルの方位角などの計算パラメータの高度変化による誤差、が考えられる。長野らが行った電波吸収法を用いた冬季昼間における D 層電子密度の推定実験 [3] では、(1) による誤差は  $-20 \sim +30\%$ 、(2) による誤差は  $-11 \sim +15\%$  であると評価した。また、(3) は電子密度の影響に比べて小さいため無視している。このうち (1) に関しては、本実験が冬季夜間に行われ

たことから、昼間に比べて中性大気との衝突の影響が小さいため、推定誤差は  $-20 \sim +30\%$  よりも小さいものと考えられる。

また、このロケット実験における電子密度計測は、電波吸収法のほかに固定バイアスプローブ (CLP) と高速ラングミュアプローブ (FLP) によって行われた。CLP 及び FLP の観測報告 [15] によると、CLP と FLP で測定される電子密度は  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  以下であるが、高度 89 km で CLP の測定値は飽和しているため電子密度が得られていない。また高度 89 km 以上においては FLP で測定されているが、それは図 7 で示した電波吸収法の推定電子よりも 2 けた程度大きい値であり、一部高度においては  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  となり飽和している。ここで FLP で得られた電子密度を用いて 238 kHz 及び 873 kHz の電波の Full wave 計算を行うと、両周波数がとも高度 89 km で大きな減衰を受ける。そして図 4 で示した電波強度観測値に見られるような高度 89 km 以上への伝搬は見られず、本実験で観測した電波強度の観測結果とは一致しない。

## 6. むすび

S-310-33 号機観測ロケットに長中波電波受信機を搭載し、地上局から送信される 238 kHz 及び 873 kHz の二つの長中波電波の磁界強度の高度変化を観測し、電波伝搬特性を得た。この結果、高度 89 km で両周波数の磁界強度に急激な減衰が見られた。次に、観測された電波伝搬特性を用いて下部電離層中の電子密度を推定した。推定手法として、ロケット観測した二つの電波の電波伝搬特性と、仮定した電子密度の高度分布から Full wave 法により数値計算した電波伝搬特性を比較・一致させることにより電子密度推定を行う電波吸収法を用いた。238 kHz と 873 kHz の磁界強度観測値の高度 89 km での急しゅんな減衰、また 238 kHz の高度 102 km における減衰と 873 kHz の高度 89 km 以上での長周期振幅から電波吸収法を用いて電子密度の高度分布推定を行った。電子密度推定の結果、高度 89 km に厚さ約 1 km、最大電子密度が  $2.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  である層が存在することが分かった。この層はその前後の高度と比較して、1 けた以上電子密度が増加していることが示された。また、同時に観測された高度 89 km 以上における FLP の観測結果と電波吸収法の推定電子密度の高度分布を比較すると、電子密度の増減傾向は一致するものの絶対値に違いが見られ、FLP は数十～百倍程度大きい値であった。ここで、FLP 測定電



子密度を用いて Full wave 計算を行ったが、ロケット観測した電波伝搬特性と一致しなかった。観測法の違いにより異なる電子密度分布が得られた原因の調査は、今後の課題である。

謝辞 このロケット実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部の御協力により行われました。実験主任の加藤學教授並びに観測ロケット実験班の皆様深く感謝します。FLP の電子密度測定結果を提供して頂きました宇宙航空研究開発機構の阿部琢美助教授に感謝の意を表します。また、東京大学の岩上直幹助教授、大月祥子氏から星撮動姿勢計の姿勢データを頂き、解析に使用させて頂きました。ここに感謝致します。

### 文 献

- [1] 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” 信学論 (B-II), vol. J80-B-II, no.5, pp.416-423, May 1997.
- [2] I. Nagano and T. Okada, “Electron density profiles in the ionospheric D-region estimated from MF radio wave absorpion,” Adv. Space Res., vol.25, no.1, pp.33-42, 2000.
- [3] 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” 宇宙研究所報告, 特集 23, pp.221-232, 1989.
- [4] 芦原佑樹, 石坂圭吾, 岡田敏美, 三宅壮聡, 村山泰啓, “中波帯電波受信機 (MFR) による電子密度推定” 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-04-007, 2005.
- [5] 長野 勇, “電離層の影響” 「電波伝搬ハンドブック」編集委員会 (編), 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社, 1999.
- [6] 長野 勇, 不均質中の電磁波伝搬 -ロケット・衛星観測による宇宙空間の電磁波伝搬, 朋友印刷, 1997.
- [7] I. Nagano, M. Mambo, and G. Hutatsuishi, “Numerical calculation of electromagnetic waves in an anisotropic multilayered medium,” Radio Sci., vol.10, pp.611-617, 1975.
- [8] 長野 勇, 平面層状媒質中の波動的電磁界解析法とロケットによる下部電離層調査 (定数の推定に関する研究), 京都大学博士論文, 1980.
- [9] 前田憲一, 木村磐根, 現代電磁波動論, オーム社, 1984.
- [10] E.V. Thrane and W.R. Piggott, “The collision frequency in the E- and D-regions of the ionosphere,” J. Atmospheric and Terrestrial Physics, vol.28, pp.721-737, 1966.
- [11] NASA's National Space Science Data Center, MSIS-E-90 Atmosphere Model 1990, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>
- [12] NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC), Geomagnetic Models and Software, <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/models.shtml>
- [13] NASA, International Reference Ionosphere - IRI-2001, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/>

<models/iri.html>

- [14] 岩上直幹, 阿子島匡史, 大月祥子, “大気光波状構造キャンペーン 2004 における酸素原子密度・大気光放射率のロケット観測および姿勢解析” 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-04-007, 2005.
- [15] 阿部琢美, 小山孝一郎, “FLP (Fast Langmuir Probe) による電子温度と密度の観測” 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-04-007, 2005.  
(平成 17 年 12 月 28 日受付, 18 年 5 月 19 日再受付)



芦原 佑樹

平 15 富山県立大・工・電子情報卒。平 17 同大学院工学研究科修士課程了。現在、同大学院工学研究科博士課程在学中。電波伝搬特性を用いた電離層 D~E 領域における電子密度分布推定の研究に従事。



石坂 圭吾 (正員)

平 7 富山県立大・工・電子情報卒。平 9 同大学院工学研究科修士課程了。平 12 同博士後期課程了。同年富山県立大・工・助手, 現在に至る。工博。飛翔体搭載電場観測装置の開発, 衛星電位解析による宇宙プラズマ環境調査, 電波伝搬特性を用いた電離層電子密度分布推定の研究に従事。アメリカ地球物理学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 日本航空宇宙学会各会員。



岡田 敏美 (正員)

昭 47 金沢大・工・電気卒。昭 49 名大大学院工学研究科修士課程了。昭 49 群馬大・工・助手。昭 51 名大・空電研究所助手。平 2 富山県立大・工・助教授。平 9 同教授。工博。昭 62 地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞。アメリカ地球物理学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会各会員。科学探査衛星あけぼの, ジオテイル, 火星探査機のぞみの低周波電磁波動観測システムの開発, VLF 帯電波の方向探知法の研究などに従事。



三宅 壮聡 (正員)

平 6 京大・工・電子卒, 平 8 同大学院工学研究科修士課程了。平 12 同博士後期課程了。同年富山県立大・工・助手, 平 16 同講師, 現在に至る。工博。宇宙プラズマ物理学, 宇宙電波工学の研究に従事。アメリカ地球物理学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会各会員。



村山 泰啓

昭 63 阪大・基礎工卒．平 2 京大大学院工学研究科修士課程了．平 5 同博士後期課程了．平 5 通信総合研究所（CRL）地球環境計測部．平 9 同第 5 研究チームリーダー．平 12 国立極地研究所助教授（併任）．平 13 CRL 北極域国際共同研究グループグループ長．平 18（独）情報通信研究機構電磁波計測研究センター環境情報センシング・ネットワークグループ研究マネージャー，現在に至る．アメリカ地球物理学会，地球電磁気・地球惑星圏学会，日本気象学会各会員．



長野 勇（正員）

昭 43 金沢大・工・電気卒，昭 45 同大大学院修士課程了．同年同大工学部電気工学科助手．昭 58～59 米国ジェット推進研究所 NRC 研究員．昭 62 同大電気工学部電気・情報工学科教授．平 12～17 同大総合情報メディア基盤センター長，大学院自然科学研究科教授．現在，同大理事・副学長．異方性不均質媒質中の電磁界計算法，VLF 波による D 層電子密度計算法の開発，衛星搭載用プラズマ波動観測装置（GEOTAIL 等）の開発に従事．工博．昭 62 地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞受賞．平 10 NASA Group Achievement Award．平 12 北國文化賞受賞．電子情報通信学会，地球電磁気・地球惑星圏学会，米国地球物理学会各会員．