S-310-40 号機による夜間中緯度電離圏下部領域の電波伝搬解析

石坂 圭吾, 深澤 達也 (富山県大), 阿部 琢美 (ISAS/JAXA), 井口 恭介 (総研大), 熊本 篤志, 遠藤 研 (東北大)

1. はじめに

夜間に内之浦にて中波帯ラジオ放送を受信すると,昼間は受信不可能な放送を受信することができる.これ は、中波帯電波を吸収する電離圏 D 領域が夜間は消滅するため、電波の反射高度が上昇し,昼間よりも遠方に 中波帯電波が伝搬可能になるためである.しかし、夜半ごろになると、突然放送波が受信できなくなる場合が ある.これは、夜間に発生したスポラディック的に発生した D 層もしくは E 層が発生し、放送波が昼間と同 じような高度で反射もしくは吸収されたと考えられる.電波伝搬の異常が見られるときにおいて、山川に設置 されているイオノグラム観測によると、下部電離圏にはスポラディック E 層 (or D 層)は確認されていない. このことから、夜間に局所的な電子密度増加領域が発生し、中波帯ラジオ電波の電波伝搬に影響を与えている と推測される.このような中波帯電波が異常伝搬をしている際の、電離圏環境は調査されておらず、夜間電離 圏下部領域の電子密度プロファイルは得られていない.また、夜間におけるスポラディック D 層もしくは E 層の発生原理については未解明である.そこで、中波帯電波の異常伝搬する原因の特定を目的として、電離圏 下部領域内において直接電波伝搬観測と電子密度計測を行い、電離圏環境と電波障害の関係について調査する.

本ロケット実験は 2011 年 12 月 19 日 23:48 (JST)に内之浦宇宙空間観測所にて実施された. ロケットは打ち 上げ後,最高高度 180 km に達した.また,搭載機器はすべて正常動作し,有益な観測が行われた.本報告で は,S-310-40 号機搭載の科学観測装置による観測結果について述べる.

2. S-310-38 号機観測ロケット実験概要

本ロケット実験では、夜間の電波伝搬異常時の電離圏中の様子を調査する.そのため、地上において、NHK 熊本第2放送波(873kHZ)を観測し、5分程度受信できない状態が継続していることを確認したのち、ロケット を打ち上げる.本ロケット実験計画の模式図を図1に示す.本ロケット実験では、4つの電波を同時に観測す

る. これは、図1に示すように1つの送信局からロ ケットまでの伝搬路において、高電子密度領域が存 在している場合、急激な減衰が見られる.しかし、 その他の送信局からの電波では、減衰が見られない 場合、ロケットの飛翔位置と地上送信局との位置関 係を用いることにより、電波を減衰させる局所的な 高電子密度領域の位置と大きさを推定することが可 能となる.なおロケットの高度に関しては、できる だけ高度方向の電子密度プロファイルを調査するた め、最高高度は180 km 程度とし、ロケット打ち上 げ角は、76 度程度とする.





図 2 S-310-40 号機搭載科学観測装置外観

図2はS-310-40号機に搭載された科学観測機器の外観 であり,表1は科学観測装置一覧である. S-310-40 号機 には 6 種類の科学観測装置が搭載されている。中波・長 波帯電波受信機は、図3に示すように地上から発信され ている電波時計用電波 60 kHz (JJY), 中波帯放送波 873 kHz (NHK 熊本第2 放送), 無線航行用ビーコン 405 kHz (南 大東空港),大阪から送信されている中波帯放送波 666kHz (NHK 大阪第1放送)をロケット軌道上で受信し,得られ た電波伝搬特性から電離圏中の電子密度プロファイルを 推定することができる.図3中の赤線はロケットの軌道 を投影したものであるが、本ロケット実験では、ロケッ トから見ると、北・南・東方向から伝搬してくる電波を 受信することにより、電離圏中の電子密度プロファイル の微細構造の推定が可能となる.また、地上から電波を 受信することができるようにループアンテナを電波透過 性のノーズコーン内に展開している. これにより地上-電離圏間の電波伝搬特性が得られる.

表1 科学観測装置一覧

搭載機器名	測定項目
長波・中波帯電波受信機 (LMR)	中波・長波帯電波伝搬特性
ラングミューアプローブ (FLP)	電子温度・密度
固定バイアスプローブ(FBP)	電子電流・イオン電流
インピーダンスプローブ (NEI)	電子密度
地場計測器 (DFG)	磁場
地平線撮像姿勢計 (HOS)	ロケット姿勢



図3 ロケットで観測する電波の送信局の位置

電子密度プロファイルを観測するものとしてラングミューアプローブ・固定バイアスプローブおよびイン ピーダンスプローブが搭載されている.ラングミューアプローブはロケットに搭載されたガラス封じ円筒型ラ ングミューアプローブを用いて電子温度と電子密度の測定を行う.また,固定バイアスプローブは,直径 3cm の球プローブに直流電圧を印加し,プローブに流入する電流をモニタすることで電流の変化を測定する.特に 本ロケットでは,2つの球プローブを搭載し,一方には正,他方には負の電圧を印加し,それぞれ電子電流と イオン電流を測定する.インピーダンスプローブはロケットに搭載された長さ1.2mのリボンアンテナ(Be-Cu) をプローブとする標準型インピーダンスプローブによって,電離圏プラズマ中のUHR 周波数を検出し,ロケ ットの軌道に沿った電子密度プロファイルを高精度で得ることができる.本ロケット実験では,これらの電子 密度観測結果を相互比較し,クロスチェック観測が可能である.

本ロケットには、S-310-38 号機に搭載されたデジタル方式フラックスゲート磁力計を改良した磁力計が搭載されている. S-310-40 号機に搭載された磁力計は、新たに分解能 16bit のデルタ-シグマ DAC を組み込んだものとなっている.磁力計による姿勢決定の目標精度は、主磁場とロケット機軸の成す角度 2°以内である.

また、ロケットの姿勢を決定する機器として、地平線センサーが搭載されている.地平線センサーは、波 長10~15µm付近の熱赤外線領域において大気からの放射を検出し、ロケットから見た地平線方向を決定する. 上述の磁力計のデータと合わせて、搭載された観測機器のデータ解析を行う際に重要となるロケットの姿勢を 正確に決定することが可能である.

3. S-310-40 号機観測結果

地上での電波観測において受信強度が減衰していることを確認したのち,S-310-40 号機観測ロケットは, 2011 年 12 月 19 日 23:48 (JST)に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた.ロケットは,打ち上げ後 210 秒で 最高高度 180 km に達した.以下に S-310-40 号機観測実験により得られた観測結果を記す.

図4はロケット上昇時に得られた 666 kHz の電波強度の高度プロファイルおよび 873 kHz 電波の強度である. 両者とも縦軸は高度,横軸は電波強度である.



(a) 666 kHz

(b) 873 kHz

図 4 ロケット上昇時における(a) 666 kHz 電波および(b) 873 kHz 電波の強度の高度プロファイル. (右から x, y, z 成分の観測結果である.)

図4より,666 kHz 電波は,高度90 km で減衰し始めている.一方873 kHz 電波は高度100 km で減衰し始めている.しかし,両方の周波数の電波は,減衰し始めてから約20 dB 減衰してその後は一定であった.特に873 kHz 電波においては,高度100 km で減衰した後,ほぼ一定値で推移し,その後,高度160 km 付近で電波強度が増加した.また,これまでのロケット観測において873 kHz 電波は数多く観測されてきたが,今回の観測のようにロケットが電離圏に進入した後に電波強度が減衰しなかった観測例は見られなかった.

次に図4の観測結果とFull wave 計算法を用いて、電離圏中の電子密度プロファイルをそれぞれの周波数ご とに推定したところ、図5のような電子密度の高度プロファイルが得られた.高度110km以上の高度プロフ ァイルについては、電波伝搬特性に影響を与えないため、参考データとして点線で表示されている.873kHz 電波による電子密度推定結果より、高度100km付近において、電子密度が約6.0×10³cm⁻³のピークが見られ、 90km付近に電子密度が約2.0×10²cm⁻³のピークが見られた.666kHz電波による電子密度推定結果を見ると、 高度90km付近に電子密度が約3.0×10²cm⁻³のピークが見られた.両者を比較すると、電子密度のピークの数 が異なっており、電波伝搬路の違いによって電子密度プロファイルの推定結果が異なったと考えられる.



図5 電波観測結果および Full wave 計算法を用いて推定した電子密度プロファイル

次にロケットで同時観測されたラングミューアプローブ(FLP),固定バイアスプローブ(FBP),インピーダン スプローブ(NEI)の観測結果を図 6~図 8 に示す.これらのパネルの縦軸は高度[km]である.横軸はそれぞれの 観測機器の出力に応じた単位になっている.なお,FLP,NEIの観測はノーズコーン開頭後のセンサー展開・ プローブ伸展後(ロケット打ち上げ後 62 秒,高度約 79 km)から行われた.FBP,NEIの観測結果から,ロケッ ト上昇時において,電子密度のメインピークが高度 105 km 近傍にあり,電子密度は 5.8×10³ cm⁻³と観測され ている.このとき,873 kHz の電波観測結果をみると,高度約 100 km 付近から徐々に電波強度が減衰しており, 電子密度のメインピークの高度付近においても電波強度の急激な減衰は見られない.また,高度 105 km 以上 の領域において,電子密度は 2.0×10³ ~ 3.0×10³ cm⁻³でほぼ一定となっている.そのため,観測された電 波伝搬特性をみると,電波強度が減衰することなく高度 180 kmの領域まで伝搬している.これはこれまで観 測された電子密度プロファイルと比べると低い電子密度プロファイルとなっているため,電波が電離圏下部領 域で反射・吸収されず,上空まで伝搬していること示唆している.FLP 観測により得られた電子温度プロファ イルを見ると,電子密度のピークの高度において電子温度が低くなっている.電波伝搬特性から得られた電子 密度プロファイルはロケット上昇時のものであるが,FBP,NEIのロケット下降時の観測結果を見ると,上昇 時よりも下降時において,電子密度が高くなっており,複数のピークが見られる.



図6 FBP(固定バイアスプローブ)の観測結果. 左:上昇時,右:下降時.



図7 FLP(ラングミュアプローブ)による電子密度観測結果. 左:上昇時,右:下降時.



図8 NEI(インピーダンスプローブ)による電子密度観測結果. 左:上昇時,右:下降時.

ロケット上昇時において、電波伝搬特性および NEI、FBP により観測された電子密度プロファイルについ て解析すると、電波伝搬特性から得られる電子密度分布はロケット周辺の電子密度ではなく、電波伝搬路にお ける電子密度である.一方、NEI、FBP の観測結果はロケット飛翔軌道での電子密度を直接観測している.し たがって、ロケット観測時において、図9に示すように西側から伝搬してくる 666 kHz 電波の伝搬路には高電 子密度領域は見られず、北から伝搬してくる 873 kHz 電波の伝搬路には高度約 100 km 付近に高電子密度領域 が存在していることから、この高電子密度領域は西側に存在しておらず、ロケットから見て北側の極めて局所 的な領域に存在していると推測される(図9の緑色でマーキングされている場所).



図9 高電子密度領域の予測地点

図 10 はデジタル方式フラックスゲート磁力計(DFG)の観測結果である.DFG は打上げから着水まで正常に 動作し、期待された磁場データを取得できた.図 10 において、赤・緑・青色でプロットしたデータは磁力計 の測定した磁場を表している.磁力計はこのように、ロケットに固定された3軸の各磁場強度を測定する.本 実験における磁力計の役割の一つは、ロケットのスピン周波数を算出することである.赤と緑のプロットは、 スピン軸に垂直な成分の磁場強度なので、スピンに伴って磁場が大きく変化している.この図の 0nT をクロス する時刻の時間差がスピン周期を表しており、これより算出したスピン周波数を最下部に示す.打上げから 60 秒後まで、ロケットは 1.5 から 2Hz 程度でスピンしており、その後、デスピンによりスピンダウンし、大気 に再突入するまで約 0.7Hz で安定してスピンしていた.

磁力計を用いて、ロケットの姿勢を算出するために、ロケットの機軸と地磁気のなす角、地磁気姿勢角 θ を求める.図11は、3 成分の磁場データをもとに求めた地磁気姿勢角 θ である.横軸は、打上げからの時間、縦軸が地磁気姿勢角である.ノーズコーンの開頭 60 秒から大気に再突入する 350 秒まで、ロケットは約18 度の角度で歳差運動をしていたと考えられる.



図 10 DFG による観測結果. (上:スピン周期,下:地磁気姿勢角)



図 11 DFG の観測結果から得られたロケットの地磁気姿勢角

4. まとめ

本報告では 2011 年 12 月に打ち上げられた S-310-40 号機観測ロケットに搭載された科学観測装置の観測結 果について述べた. 搭載機器はロケット飛翔中,正常動作し,電離圏中の有益な観測が実施できた. 電離圏中 の電子密度プロファイルを計測するために搭載されたラングミューアプローブ,固定バイアスプローブ,イン ピーダンスプローブ,長波・中波帯電波観測装置によって得られた結果から,ロケット上昇時の高度 104 km 付近に電子密度のピークが見られた. なお,観測されたメインピークの電子密度は 5.8×10³ cm⁻³ であった.ま た,異なる 2 か所から送信された電波の伝搬特性を用いることにより,高電子密度領域が局所的に存在してい る可能性を得ることができた.本ロケット実験において改良型のデジタル方式フラックスゲート磁力計が搭載 され,ロケット軌道上において正常動作し,宇宙空間での動作が実証された.

本ロケット実験は、夜間地上で電波が受信できない時の電離圏中の電子密度を直接観測および電波を用い て、総合的に観測した.今後、観測された電波の周波数解析を行うことにより、より詳細な電波伝搬特性の調 査を行い、各観測装置によって得られた観測結果を総合し、電離圏中の電子密度構造の調査を行う.これによ り、夜間における電波の異常伝搬発生時の電離圏プラズマ密度構造と電波伝搬の関係について解明する.そし て、中波帯放送を含む電波の電離圏中の伝搬に関する情報を提供することができ、安定した電波利用を行うた めの基礎データを提供することができると期待される.