

観測ロケット S-520-27/S-310-42 号機によるロケット＝地上ビーコン観測実験

山本衛（京都大学生存圏研究所）

Gopi Seemala（Indian Institute of Geomagnetism）

Paul Bernhardt（NRL）

1. 目的と方法

本実験は電離圏電子密度の空間分布の観測を目的としている。本観測では S-520-27 号機と S-310-42 号機のロケットにそれぞれ同一の 2 波のビーコン(Dual-Band Beacon; DBB)送信機を搭載し、地上の受信機で 2 波の伝搬遅延の差を測定することによって、ロケットと地上の間の全電子数(Total Electron Content; TEC)を観測する。

ロケットからのビーコン観測の場合、衛星＝地上間のビーコン観測とは違って発射時の TEC 値がゼロであるため、TEC の絶対値の推定が容易という特徴がある。ロケット上昇時・下降時の TEC の時間変動から電子密度の高度プロファイルが求められる。またロケットの水平移動とともに TID に伴う電子密度の変動が観測される。更にトモグラフィ解析を施すことによって、ロケット軌道を含む鉛直断面内の電子密度の 2 次元分布が推定できる。

2. 搭載機器と地上観測の概要

S-520-27 号機、S-310-42 号機ロケットに搭載されるビーコン送信機は同一の構成を持つ。ロケットに搭載される送信機・フィルタ・分配器・アンテナの概要を図 1 に示し、観測の緒元を表 1 に示す。送信機からは、周波数 150 MHz と 400 MHz の 2 波の無変調

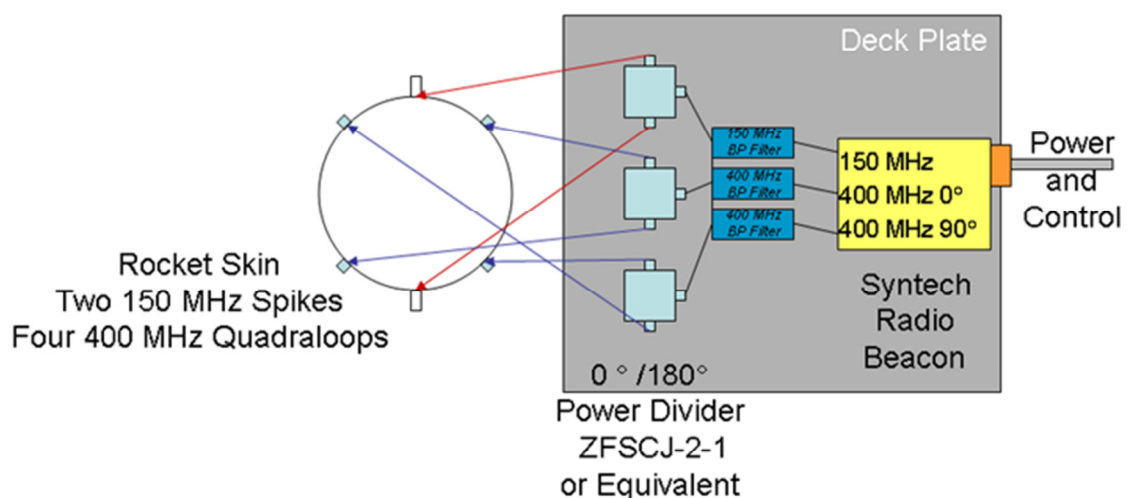


図 1 ロケット搭載機器(送信機・フィルタ・分配器・アンテナ)の概念図。

波(各出力 1 W)が発射される。正確な TEC 測定を行うため、2 波の周波数の比が正確に 3 対 8 の比率になるよう厳密に制御されている。送信アンテナは 150 MHz 用に 2 本、400 MHz 用に 4 本がロケット外壁に取り付けられた。

ビーコン受信機は、トモグラフィ解析に最適となるよう、ロケット飛翔方向に沿って一直線上に配置することが望ましい。今回は 2 機のロケットの打上げ方位角が異なるため、最も西側の地上観測点を 2 ケ所（薩摩川内と日置市吹上町）に増やすことで、両方のロケットに対して一直線上の受信機配置を確保することとした。さらに海上ボートに受信機を搭載して内之浦の沖合約 50 km に配置することで、ロケット軌道下から観測しようとした。さらに広域の電子密度分布を高知工大から観測した。地上の受信機設置点を図 2 に示す。

表 1 観測の緒元

搭載送信機	周波数: 149.988 MHz と 399.968 MHz の 2 波 (2 波の周波数の比が 3:8 となるよう制御されている) 空中線電力: 1 W 電波の形式: 無変調
地上観測点	地上観測点 5 地点と海上観測点を設けた 内之浦：鹿児島県肝属郡肝付町(JAXA 内之浦宇宙空間観測所(USC)) 垂水：鹿児島県垂水市(名古屋大学太陽地球環境研究所鹿児島観測所) 薩摩川内：鹿児島県薩摩川内市(せんだい宇宙館) 日置市吹上町（吹上温泉新湯旅館） 高知県香美市（高知工科大学） 海上ボート：JAXA 内之浦宇宙空間観測所の沖合い約 50km

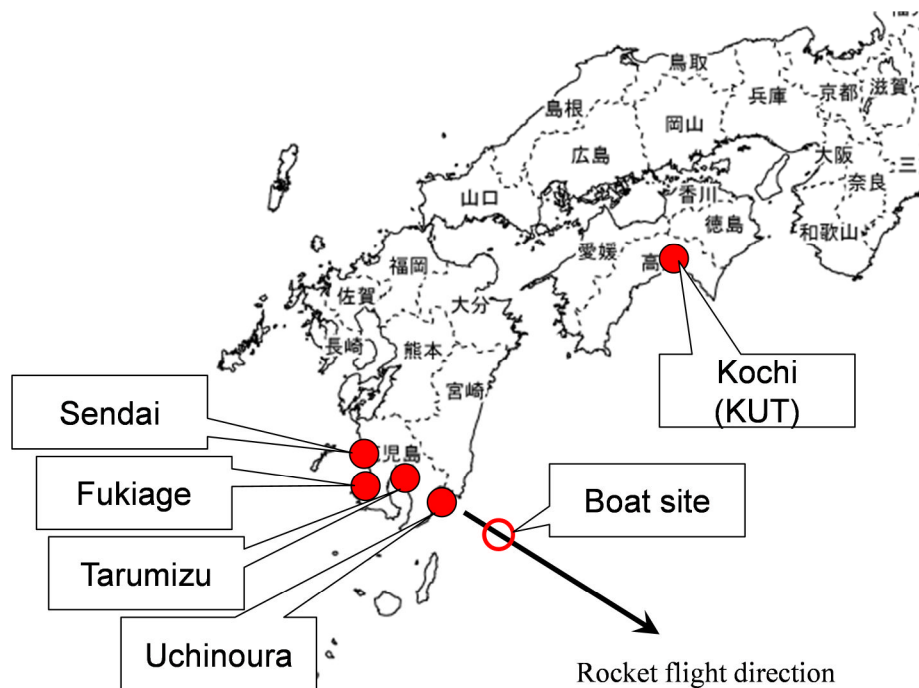


図 2 地上観測点の配置図

3. 観測結果

2機の観測ロケットは、それぞれ2013年7月20日23:00 JSTと23:57 JSTに打上げられた。各地の受信機で観測されたビーコン電波のスペクトルを図3と図4に示す。図中のそれぞれの段が受信点に対応しており、左側2つのパネルがS-520-27号機の400MHzと150MHz信号、右側2つのパネルがS-310-42号機の400MHzと150MHz信号を示す。ほぼ全ての受信点で良好な信号が得られているが、図4中段の海上サイトのみ、150MHz信号が得られておらず400MHz信号も弱い。受信系統の一部に不具合が生じたと考えら得る。これより、ロケット発射位置より前方からの観測は失敗した。

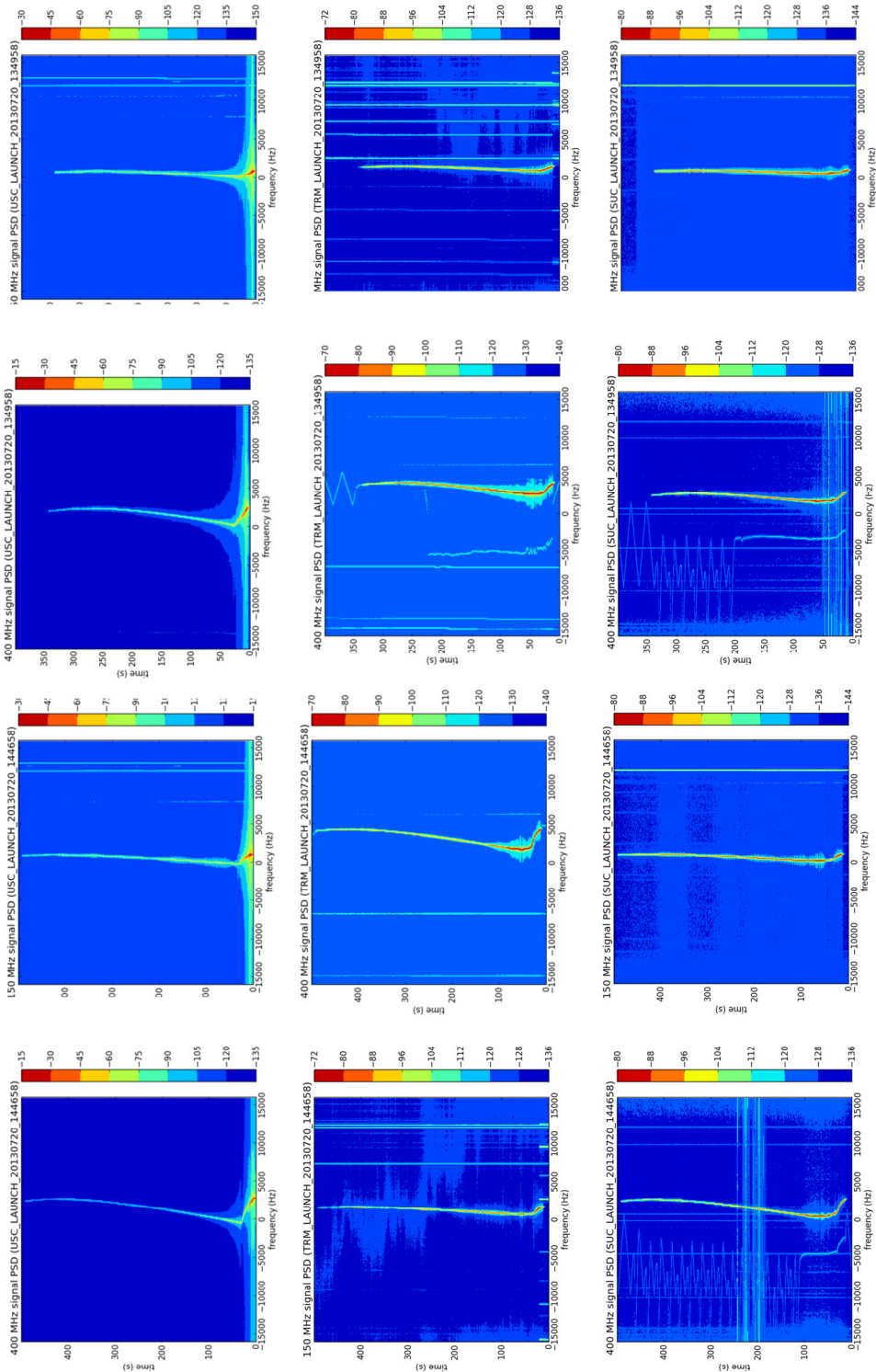
次に各地の受信データよりTECの解析を行った。S-520-27号機について、一直線上に並ぶ内之浦、垂水、薩摩川内からのTEC時間変化を図5に示す。赤い縦線は、それぞれロケットの高度が上昇時の300km、頂点約315km、下降時の300kmに達した時刻に対応している。電子密度が水平に一樣で高度変化のみがあるとき、TEC値の時間変化は頂点の周りにほぼ対称であるが、この結果では下降時の方がTEC値が高いという明確な非対称が現れている。3点からのTEC値の変動にも微妙な差が見られることから、今後はトモグラフィー解析を行って電子密度の空間変化を調べたい。

ロケットビーコン観測においては、TEC値の時間微分値から電子密度の高度分布を推定することができる。図6に、2機のロケットに対しての解析結果を示す。S-520-27号機においては、高度100km付近にスプラディックE層があり、高度200km以上にF領域の電子密度分布が見られる。また下降時の電子密度は上昇時に比べて数倍大きくなっている。この結果は垂水のデータからの解析でも同様であった。またインピーダンスプロープによる直接測定とも一致している。一方、S-310-42号機においては、高度90~130kmの範囲に複数のスプラディックE層が見られた。図6より、更に検討は必要であるが、この手法による電子密度の測定限界は、およそ 3×10^9 個/m³であることがわかる。

4. おわりに

今回のロケットビーコン観測では、海上ボートを除く全受信点において良好なデータを得ることに成功した。そこからTECを得るためのデータ解析については、ロケットの飛翔によるドップラー速度の変動、スピンによる見かけのTEC値の増大、線偏波(=右回りと左回り円偏波の合成)で放射される150MHz信号から右回り円偏波のみの抽出、といった問題点に対処する必要があるが、これまでの解析手法の工夫によって、おおむね成功しつつある。結果として、S-520-27号機からは内之浦、垂水、薩摩仙台という前後に配置された3点からのTEC値の取得にも成功した。ロケットからの直接観測から明らかにされつつあるように、観測領域には水平方向の強い電子密度勾配が存在する。3点からの観測データを活用することで、電離圏の水平構造の解明に取り組んでいきたい。

Uchinoura



400 MHz

150MHz

400 MHz

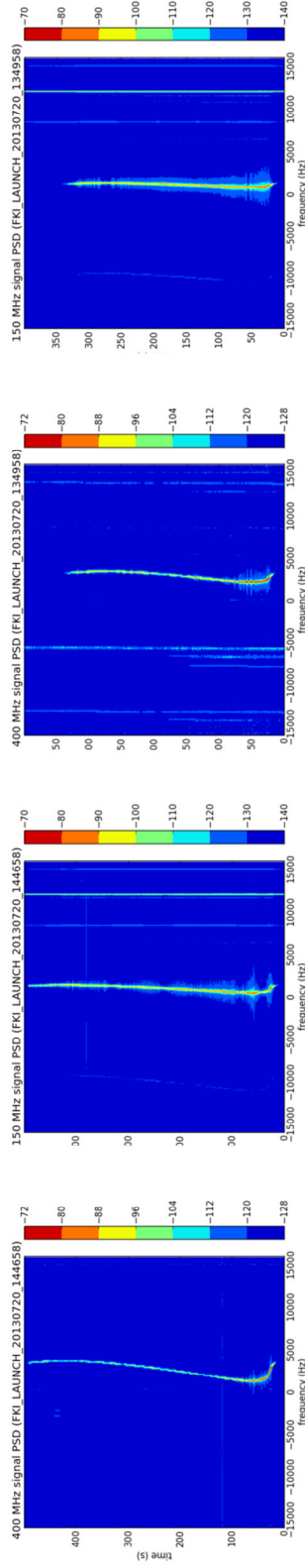
150MHz

S-520-27

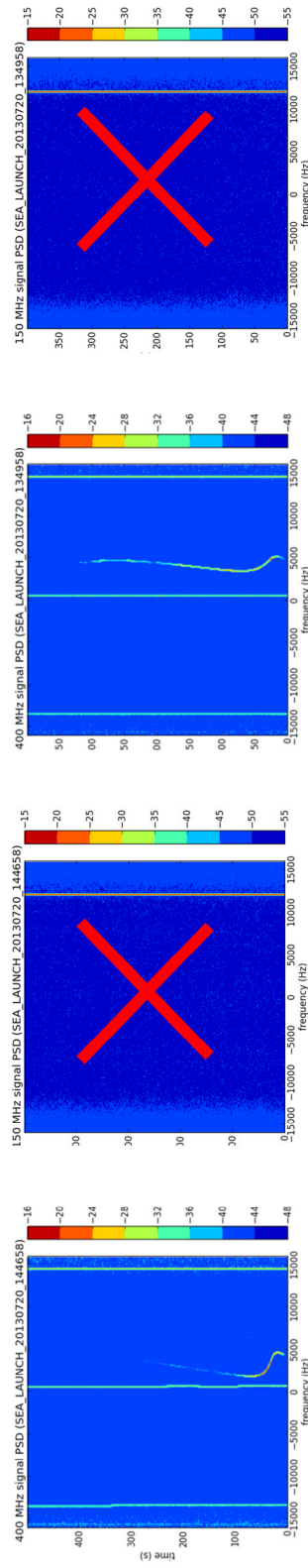
S-310-42

図3 内之浦、垂水、薩摩川内で受信されたロケットビーコン波のスペクトル

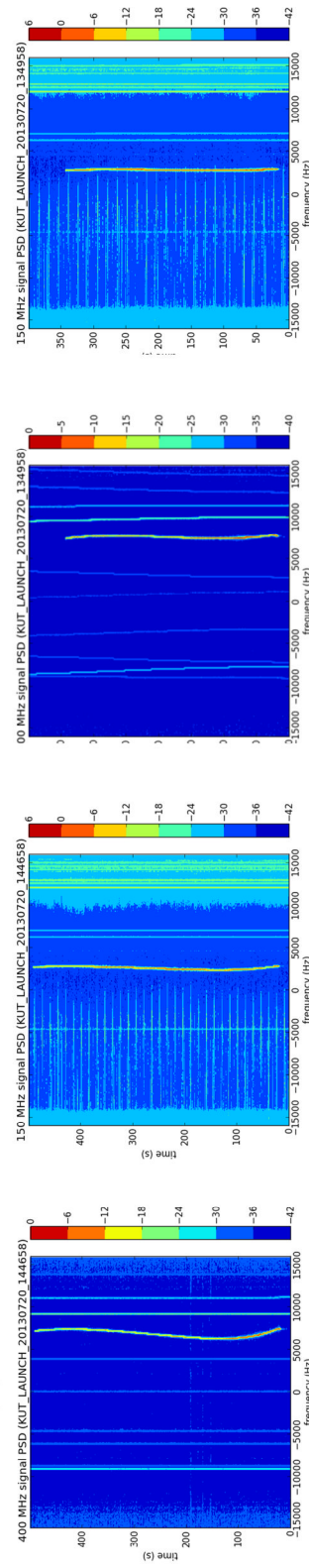
Fukiage



Boat



KUT



400 MHz

150MHz

400 MHz

150MHz

S-520-27

S-310-42

図 4 吹上、海上ボート (Boat)、高知 (KUT) で受信されたロケットビーコン波のスペクトル

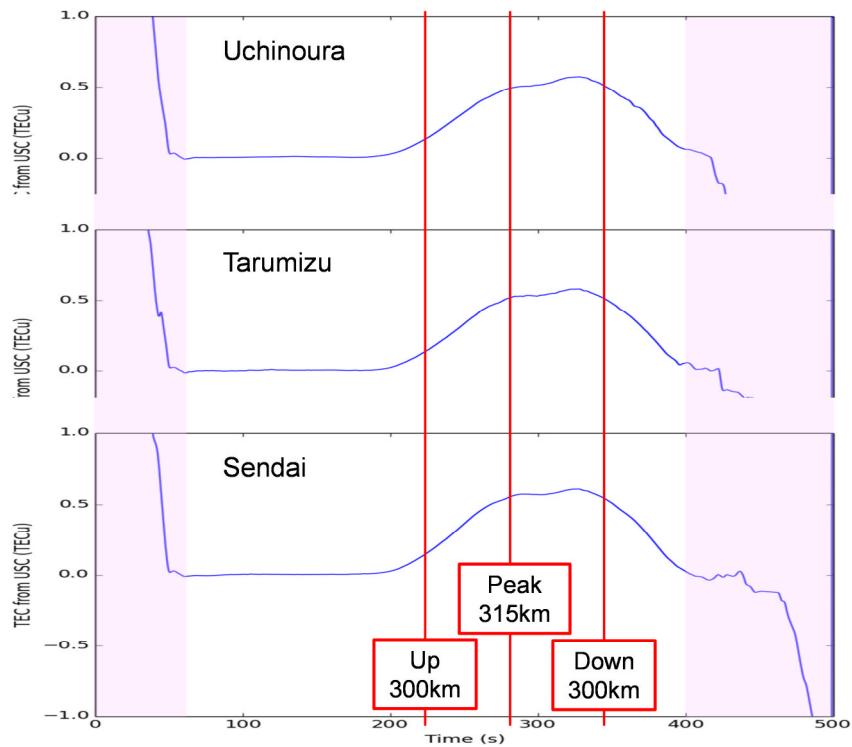


図5 S-520-27号機のロケットビーコンから求めた電離圏全電子数の時間変化。

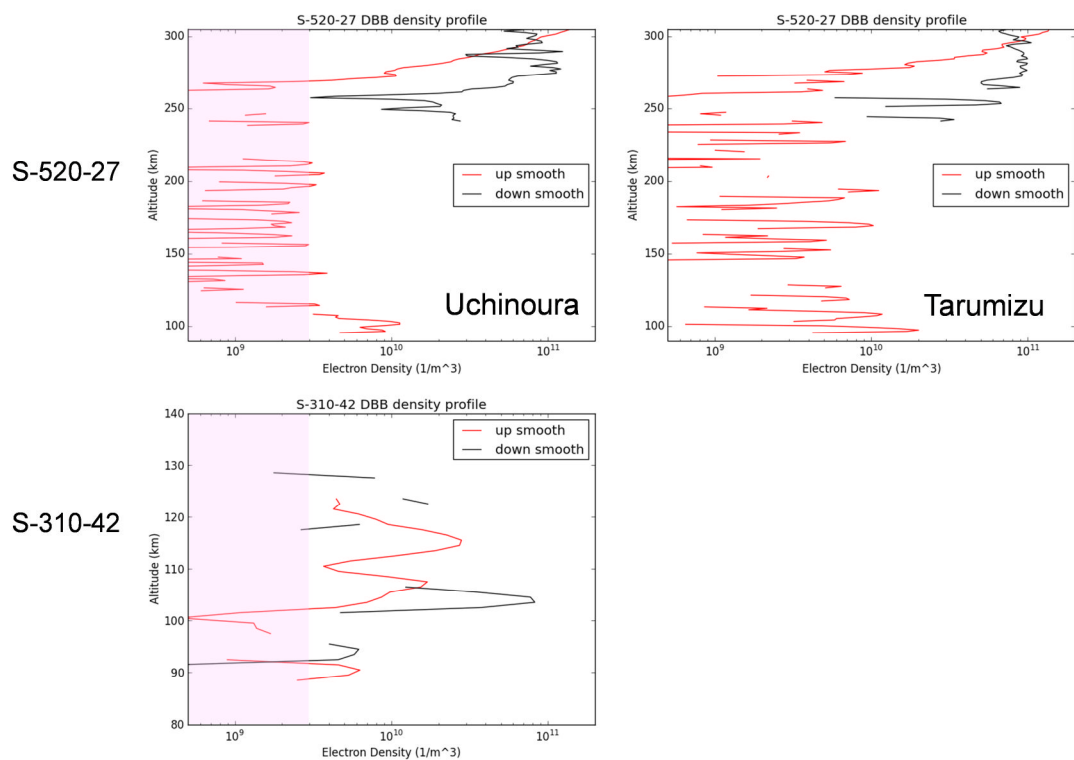


図6 電離圏全電子数の時間微分とロケット高度情報から求めた電子密度の高度分布。

上下図が、それぞれ S-520-27 号機と S-310-42 号機に対応する。

S-520-27 号機については内之浦と垂水のデータから求めた。