

ロケットの排気による電子減少を利用した低周波電波天文の可能性

On the possibility of low frequency radio astronomy utilizing ionospheric electron depletion by rocket exhaust

宇宙測地学研究室 小池 央晋 Hiroyuki Koike

1) はじめに

- Mendillo et al. (1987)はSpace Shuttle Challengerの軌道修正用エンジンシステムから中性分子(主に水蒸気)を噴出し電離圏を部分的に消失させ、さらに銀河系からの1.7-2.7MHzの電波の強度スペクトルを観測することに成功している。
- この際に放出された排気ガスの重さは約244kgであるが、これはH-2Aロケットの第1段エンジンのわずか1秒分の噴出量でしかなく、H-2Aロケットの排気を用いればより長時間広範囲での観測が可能になると思われる。

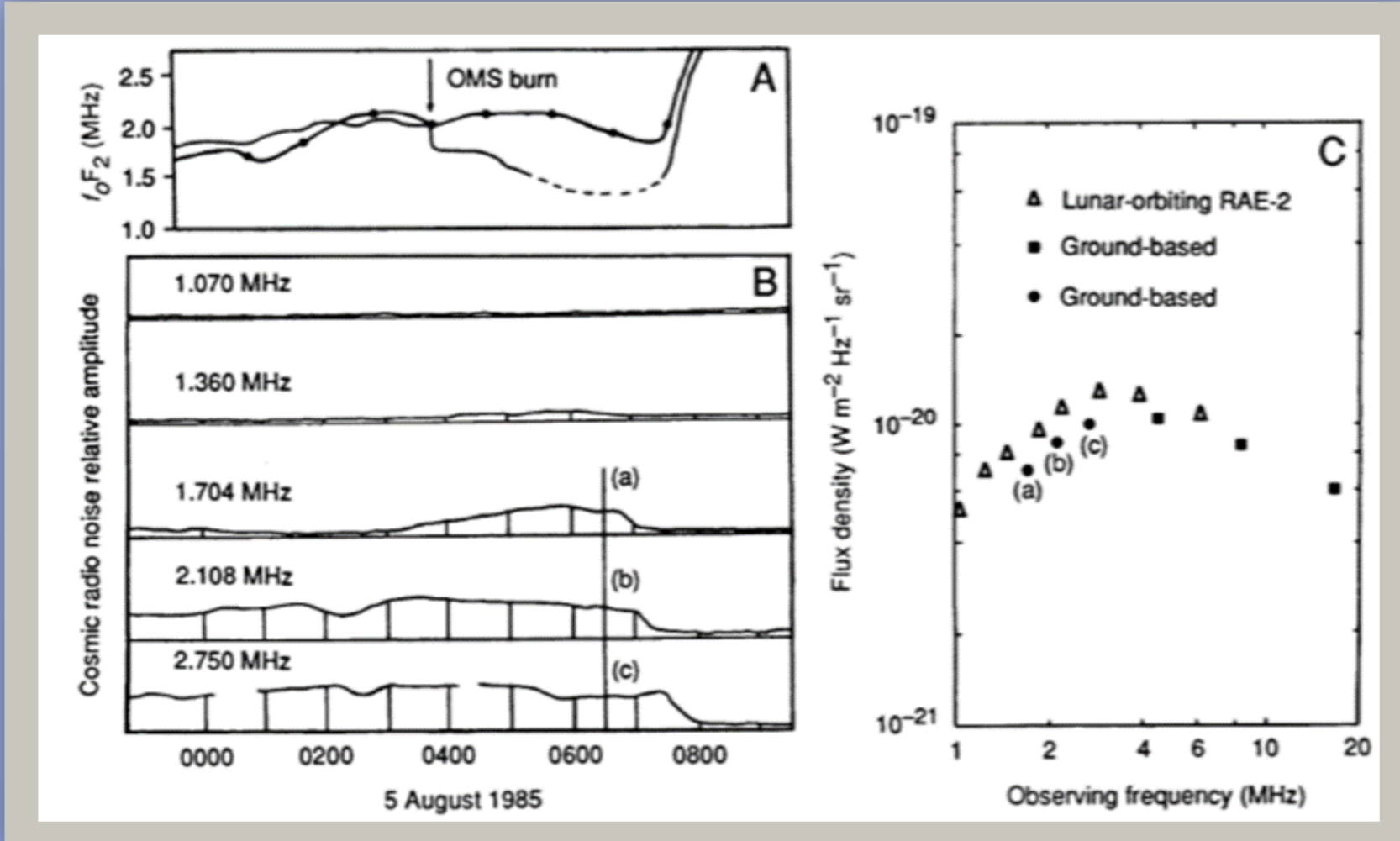


図1. Medillo et al. (1987)の実験結果。Aは電離圏F層の臨界周波数(観測可能な宇宙電波の最低周波数)を表しており、OMS burnは軌道修正エンジンを噴射した時刻を示している。Bは様々な周波数帯で観測できた宇宙電波の強度の時間変化を示す。Cは周波数と電波強度の関係を示し、▲は月の衛星軌道から観測された銀河系からの低周波電波放射のスペクトル。●はBと(a), (b), (c)に対応しており、数MHzという低周波の宇宙電波が地表で受信できたことを示している。

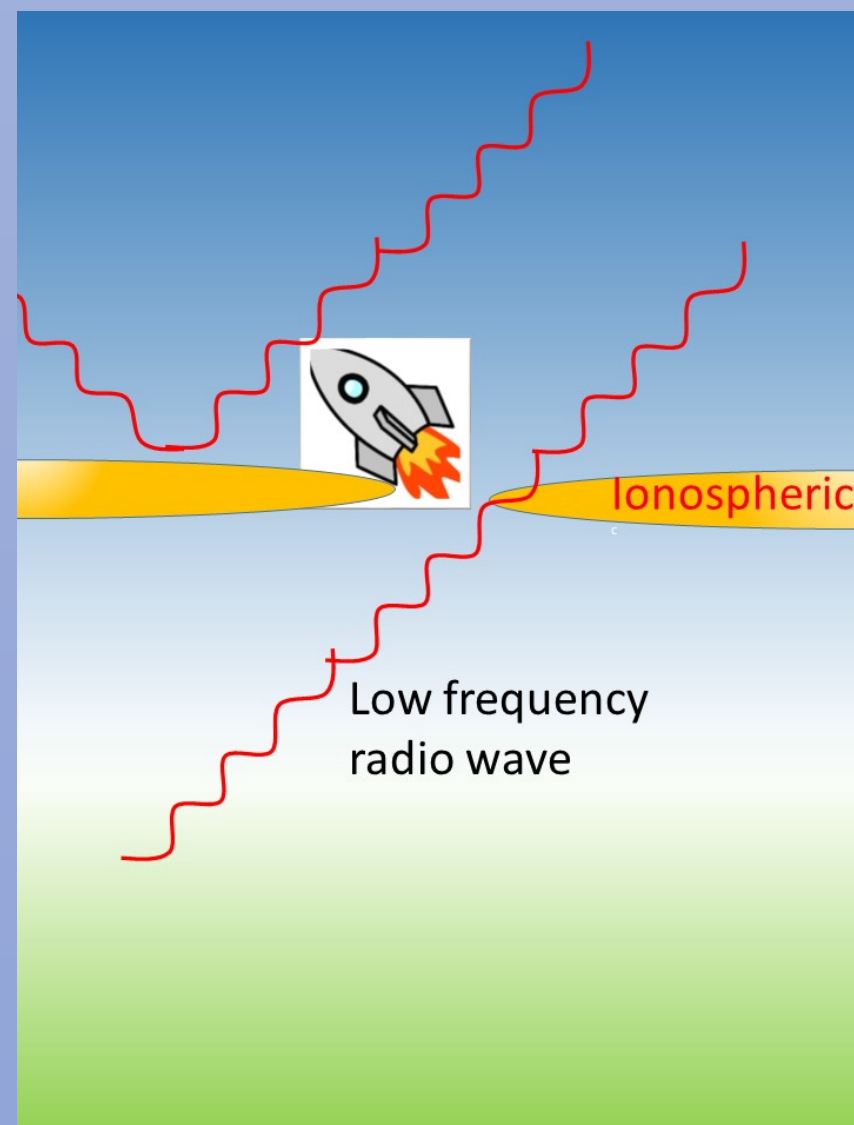


図2 本研究のイメージ
ロケットの排気で電離層に穴を作り、そこから低周波電波を観測することを目的とする。

2) 解析方法

Heki et al. (2010)で用いられたGNSS-TEC法を応用する。GNSS-TEC法とはGNSS (Global Navigation Satellite System)を用いた、国土地理院による電子基準点データ提供サービスにて公開されているRINEX (Receiver Independent Exchange format) ファイルから、視線方向の電子数を積分した全電子数 Total Electron Content (TEC) の情報を抽出する。TECの単位はTECU (TEC Unit, 1TECUは視線に沿った底面積 1m^2 の円柱に 10^{16} 個の電子が含まれていることを意味する)。

・周波数間バイアスの除去

RINEX観測ファイルの生データには周波数間バイアスが含まれているため、視線方向のTEC (Slant TEC, STEC) の時間変化(ΔSTEC)しかわからず、STECの絶対値まではわからない。周波数間バイアスはGNSS衛星ごとに異なり、受信機ごとに違った値になるが、ほとんど時間変化しないので別途推定して補正可能である。ここでは電子航法研究所・衛星航法グループのホームページにて1日ごと各衛星、各受信機の周波数間バイアス推定値が公開されているのでそれを利用してSTECの絶対値を求め、視線ベクトルの入射角の余弦を掛けて鉛直方向のTEC (Vertical TEC, VTEC)を求めた。

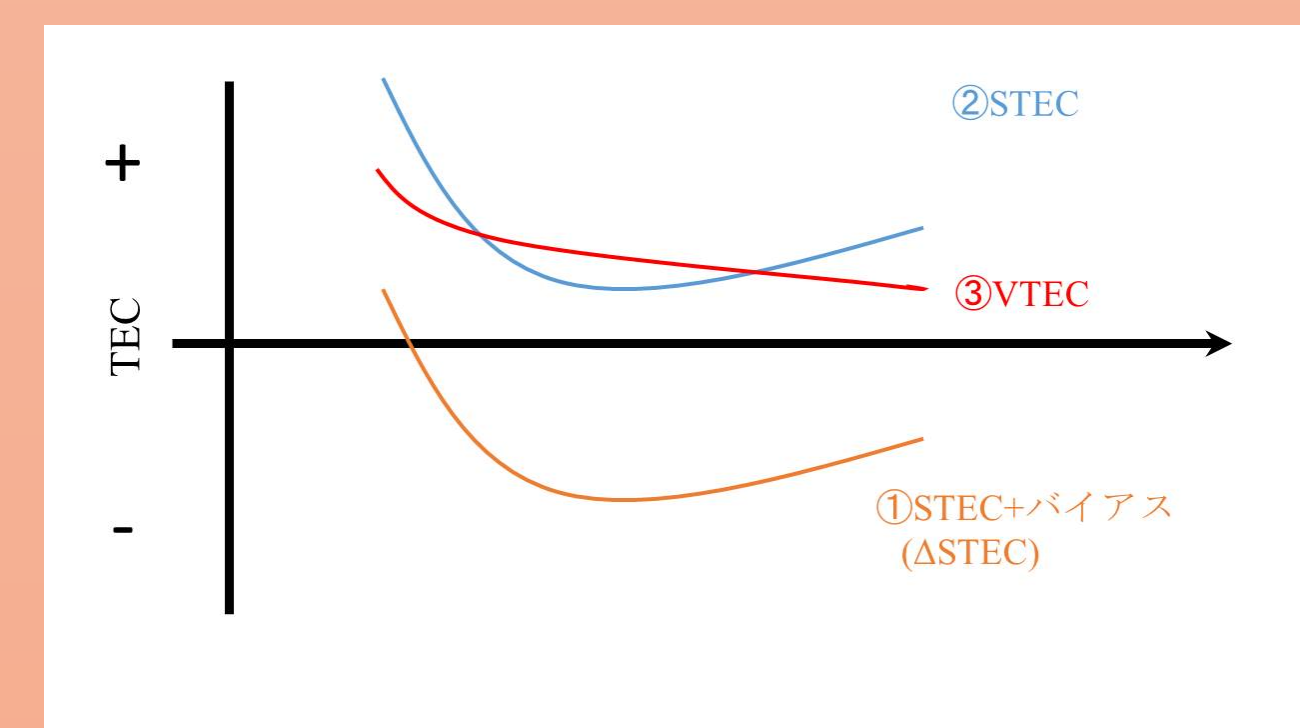


図3 解析のイメージ。①周波数間バイアスが含まれている状態だとSTECの変化までしかわからないがバイアスを除去することで②STECの絶対値に直すことができる。③STECは衛星の移動に伴って見かけ上のU字型変化を示すので、VTECにして単純比較できるようにする。

・斜めTEC (STEC) から鉛直TEC (VTEC)へ

図2で、STECの変化がU字型になっているが、これは衛星の仰角変化によって視線ベクトルが貫通する電離層の見かけ上の厚さ変化するためである。ここでは電離層を高度300kmの薄い層と近似し衛星の座標データから視線の電離圏への入射角を計算し、その余弦をかけることによって鉛直TEC(VTEC)を求める。

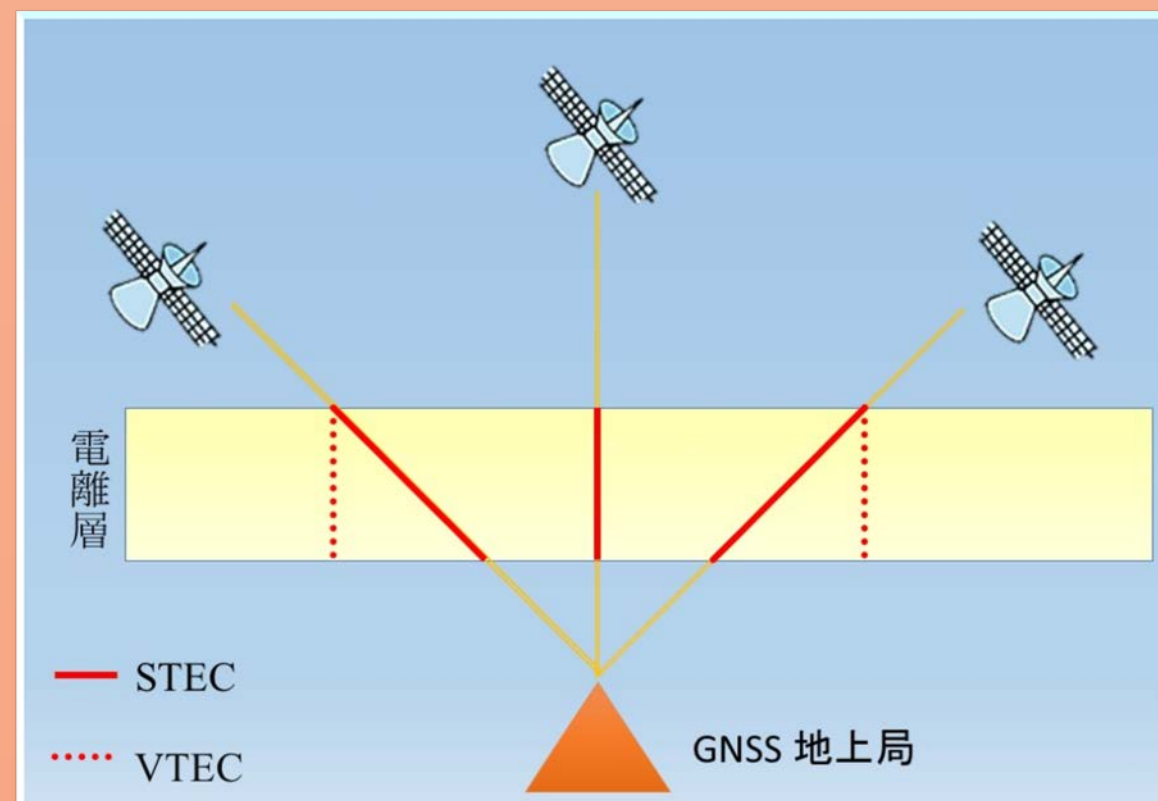


図4. GNSS衛星の仰角の変化により電離層の見かけ上の厚さが増えるため、STECもU字型の見かけ上の時間変化を示す。

3) 全球電離圏マップ Global Ionospheric Map (GIM)

電離圏全電子数は緯度や時刻や太陽活動度によって大きく変わる。図5はベルン大学が作成した全球電離圏全電子数の分布図である。夜間のロケットの噴出によって電子が消失し低下したTEC値が、この図において最もTEC値が低い地域より低くなればロケットの噴出を利用した電波天文の可能性が広がることとなる。図5で最も電子数が少ないところで2TECU程なので種子島周辺で少なくとも同程度のTEC値になる条件を検討する。もともと電子数が小さい夜間のロケット打ち上げでは、本研究で求めたものよりTECの値が減少することが期待される。

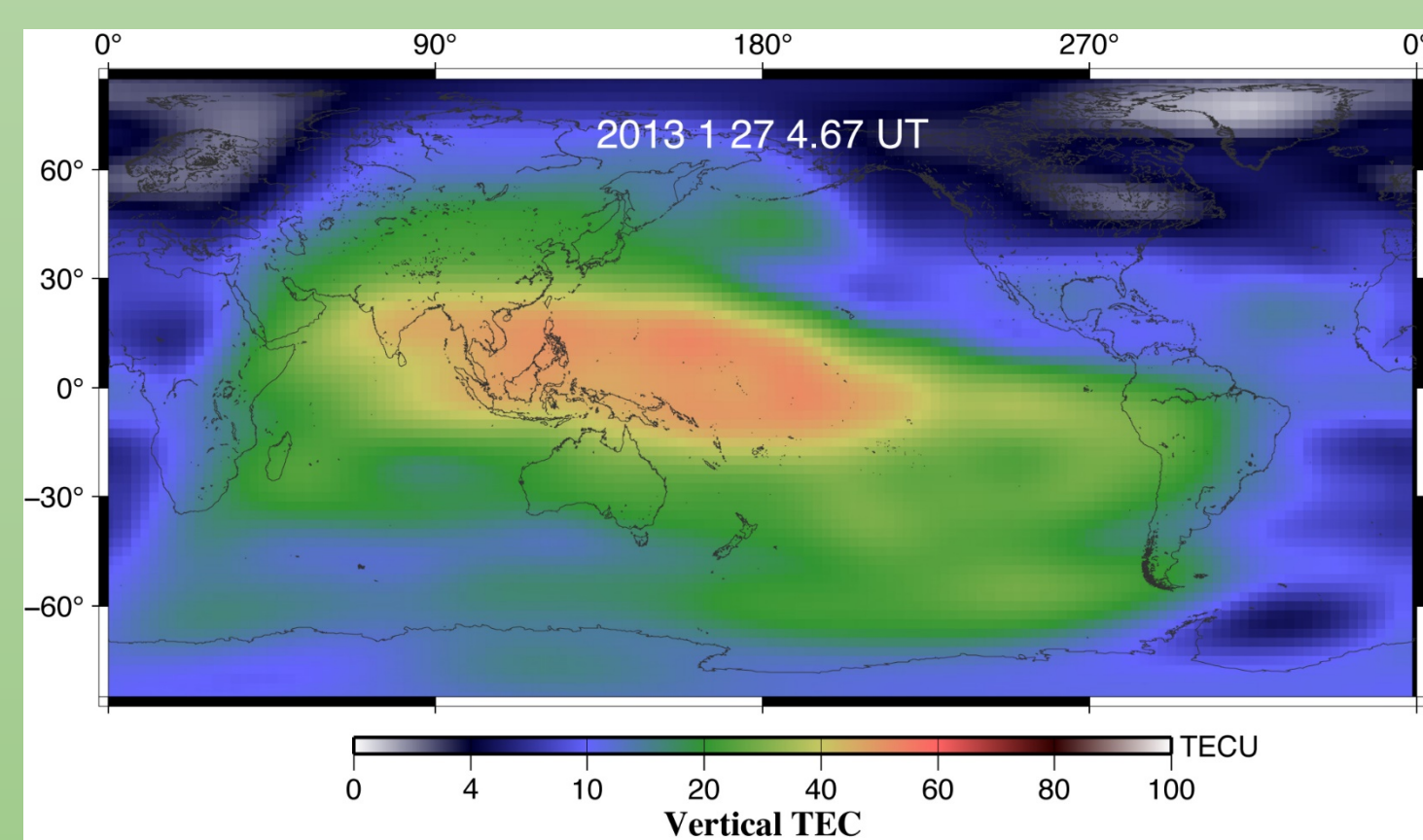


図5.2013年1月27日4:40 (UT)におけるGIM。種子島上空では30TECU程度であるが、これが2TECU程度以下になれば理想的である。

4) 結果

H-2Aロケット17号機 2010年5月20日 UT21:58 (JST21日6:58) 打ち上げ

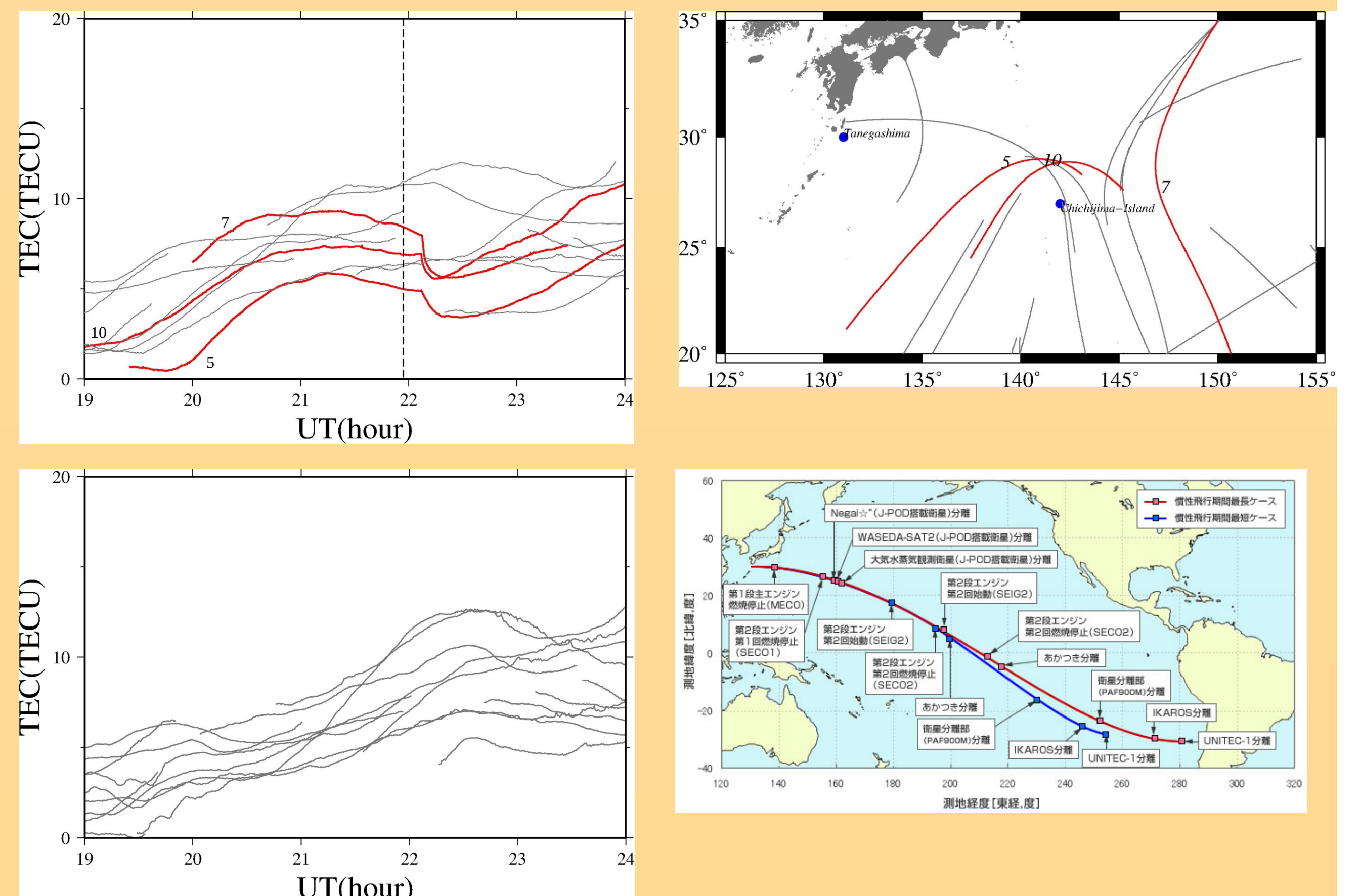


図6 (左上) 2010年5月20日UT19-24時(JST4-9時)の小笠原諸島父島上空のTEC変化。破線部は打ち上げ時刻(UT21:58) (左下) ロケット打ち上げ前日同時刻同地点上空のTEC変化。 (右上)小笠原諸島父島から見たGNSS衛星への視線が高度300 kmの層と交わる点の軌跡。 (右下)JAXAによるH-2Aロケット17号機の飛行計画

ロケット打ち上げ後に5, 7, 10番衛星にてTEC減少が見られる。明け方ということで打ち上げの時にはTECが上昇し始めているためTECの減少はそれほど大きなものとはならなかった。JAXAの飛行計画によるとちょうど小笠原諸島上空あたりで第一エンジンが停止したようでそこまでの道中にはより大きな電離圏の穴が空いていた可能性も考えられる。

H-2Aロケット18号機 2010年9月11日 UT11:17(JST20:17) 打ち上げ

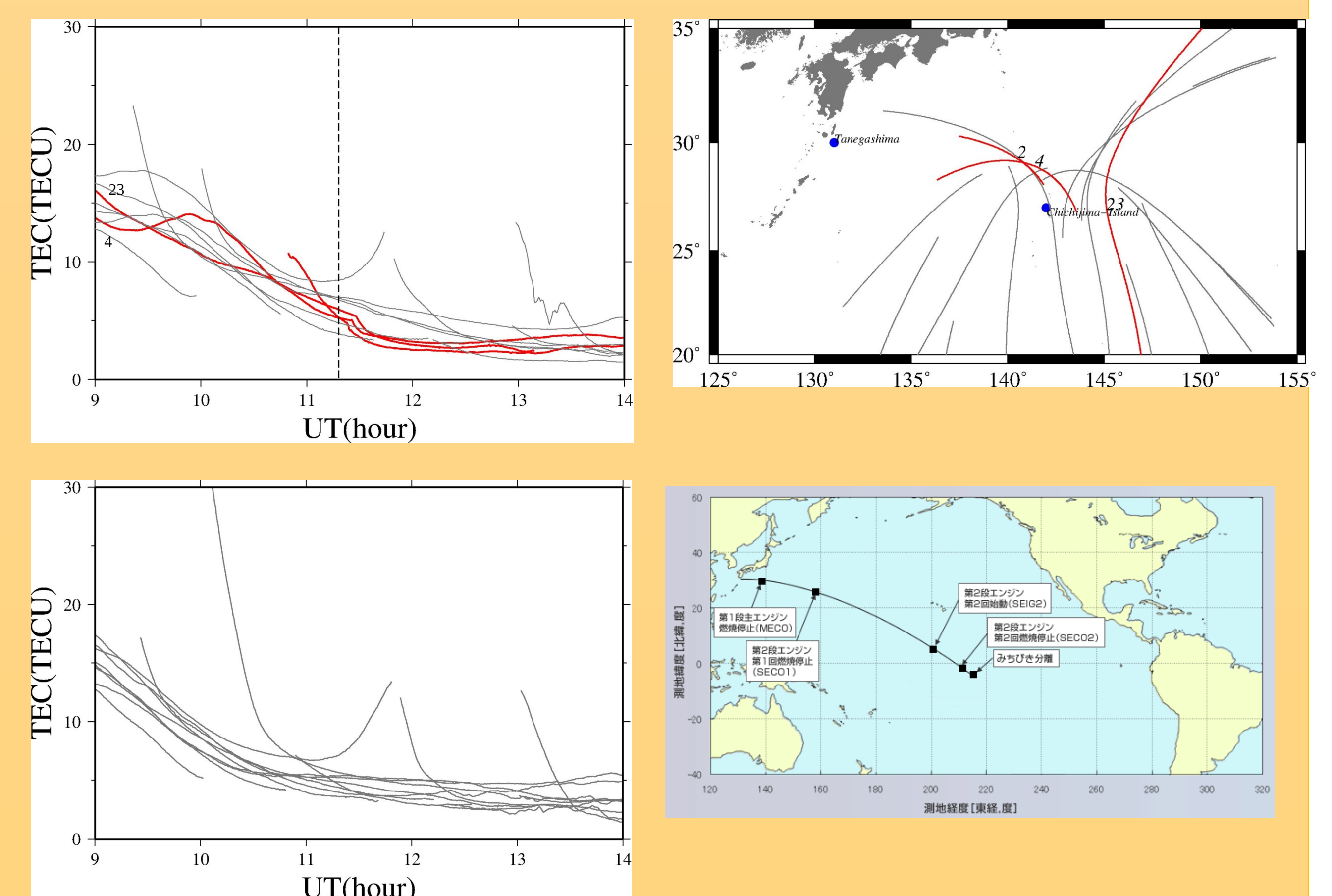


図7 (左上) 2010年9月11日UT9-14時(JST18-23時)の小笠原諸島父島上空のTEC変化。破線部は打ち上げ時刻(UT11:17) (左下) ロケット打ち上げ前日同時刻同地点上空のTEC変化。 (右上)小笠原諸島父島から見たGNSS衛星への視線が高度300 kmの層と交わる点の軌跡。 (右下) JAXAによるH-2Aロケット18号機の飛行計画

ロケット打ち上げ後に2, 4, 23番衛星にてTEC減少が見られる。こちらは夜間の打ち上げということで打ち上げ前からTEC値が減少していて、ロケットによりさらに低下しているのが確認できるが目標値である2TECUに届いた範囲はごく狭い範囲であったと思われる。

5)まとめ

低緯度地域は太陽光が強い、つまり電離層生成の原因である紫外線が強いいため、TECの値が中緯度のそれより比較的高くなっている。TECが小さくなる夜間での打ち上げにおいてもその差は大きなものであり、低緯度帯での低周波電波天文を試みるのは非合理的なことであるらしい。しかし、本研究での目標値である2TECUは仮に設定した値に過ぎず、低周波電波天文の可能性が潰えたわけではない。

6)参考文献

- Furuya, T. and K. Heki, Ionospheric hole behind an ascending rocket observed with a dense GPS array, Earth Planets Space, 60, 235-239, 2008
- 日置幸介、菅原守、大関優、岡崎郁也 GPS-TEC法による地球物理学、測地学会誌, 56 (解説・入門講座)、125-134, 2010
- Mendillo, M., J. Baumgardner, D.P. Allen, J. Foster, J. Holt, G.R. A. Ellis, A. Klekociuk, and G. Reber, Spacelab-2 plasma depletion experiments for ionospheric and radio astronomical studies, Science, 238, 1260-1264, 1987.
- 独立行政法人 電子航法研究所 衛星航法グループ <http://www.enri.go.jp/~sakai/>
- GEONET http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_top.html
- JAXA H-2Aロケット http://www.jaxa.jp/projects/rockets/h2a/index_j.html