

# 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 using  
ionospheric holes made by exhaust gas of ascending rockets

北海道大学理学部地球惑星科学科

宇宙測地学研究室

学籍番号 01120019 小池 央晋

指導教官名 日置幸介

# 要旨

地球大気上層には酸素、窒素などの中性原子、分子が太陽光の放射エネルギーによって電離し、極めて電子密度が高い電離圏（電離層）と呼ばれる領域がある。電離圏には周波数の低い電波を反射する性質があり、宇宙からきた低周波の電波を地上で観測することは難しい。

Mendillo et al. (1987) は Space Shuttle Challenger の軌道修正用エンジンの排気ガス（主成分は水蒸気）によって電離圏を一時的に消失させ、低周波電波の観測に成功した。そこで Space Shuttle のサブエンジンよりも莫大な量の水蒸気を排出する H-2A ロケットの打ち上げ時なら、低周波電波天文観測に関してより期待できる結果が出るのではないだろうか。

本研究では GNSS-TEC 法という手法で H-2A ロケット 打ち上げ時の電離圏消失を観測する。国土地理院が公開しているデータを用いるので、データ解析の勝手さえわかれば誰にでも可能な手法である。

本研究で解析したいくつかの H-2A ロケットの打ち上げ後に、電子数の急激な減少を確認することができた。どこまで減少すれば、電離圏の「穴」から普段は観測することができない低周波の宇宙電波観測が可能となるか、電子数の絶対値の減少から評価してみた。

# 目次

1. はじめに	4
1.1 電離圏	4
1.2 電離圏と電波	4
1.3 Spacelab-2 を利用したプラズマ減少実験	5
1.4 H-2A ロケット	6
1.5 電離圏消失のメカニズム	8
1.6 TEC	9
1.7 GIM	9
1.8 本研究の目的	10
2. 観測手法	11
2.1 GNSS-TEC 法	12
2.2 周波数間バイアスの除去	12
2.3 斜め TEC から鉛直 TEC へ	13
3. 結果	14
4. 考察	24
5. 謝辞	26
参考文献	26

# 1.はじめに

## 1.1 電離圏

地球大気上層部の熱圏（高度約 60-500km）にて、窒素や酸素の原子・分子が、太陽光に含まれる波長が約0.1 $\mu$ m以下の紫外線を吸収すると、そのエネルギーにより原子が電子を放出する。これを光電離(photoionization)といい、これにより電子が密になっている領域を電離圏（又は電離層）という。

電離圏はその中でも4つの領域（層）に分けられ、下からD領域、E領域、F<sub>1</sub>領域、F<sub>2</sub>領域というように分けられる。(表 1.1)

表 1.1 電離圏内の各領域の高度

	高度(km)	電子密度
F <sub>2</sub> 領域	220-800	大
F <sub>1</sub> 領域	150-220	⇕
E領域	90-130	
D領域	60-90	小

紫外線は上空から分子・原子に吸収されていくので高度が下がるとともに弱くなっていく。一方、下層ほど分子・原子の密度は大きくなっていくので紫外線と衝突する確率は上昇する。また、紫外線により放出された電子が、他の電子を失った分子・原子(イオン)と衝突し元の分子・原子に戻ると当然電子数は減少することとなる。さらに、太陽放射が途絶える夜間にはD領域は消滅してしまう。様々な要因によって電離圏中の電子が生成・消滅を繰り返すのである。

## 1.2 電離圏と電波

電離圏を電波が通過するとき波長によって透過したり、反射したり、一部が吸収されることがある。基本的には同じ波長の電波なら電子密度が大きい層が反射しやすく、小さい層だと透過しやすい。また、同じ電子密度の層では電波の波長の短い電波ほど透過しやすく、波長の長いものは反射されやすい。

アマチュア無線では地上から電波を送信し、電離圏で反射をさせることによって、見通し距離より遠方との通信を行うために電離圏が利用されている。テレビ放送などで利用されるUHF帯(300MHz-3GHz)と呼ばれる高周波の電波は電離圏を突き抜けるが、春から夏にかけては、高度100km付近に突発的に発生するスポラディックE層(E<sub>s</sub>層)という高電子密度の層に反射されてしまい通信

障害が起きてしまうこともある。

### 1.3 Spacelab-2 を利用したプラズマ減少実験

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ている. なお電離圏に持ち込んだ水蒸気が電子を減少させる過程については 1.5 章に詳しく述べる.

さらにその際にできた「電離圏の穴」より, 平時では電離圏に反射され地上で観測することの難しい, 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も成功している.

図 1.3 は Mendillo et al. (1987) より引用した実験結果である. A は電離圏 F 領域の臨界周波数(観測可能な宇宙電波の最低周波数)をあらわしており, OMS burn は軌道修正エンジンを噴射した時刻をしめしている. B はそれぞれの周波数帯で観測できた宇宙電波の強度の時間変化である. 1.070MHz-1.704MHz までの周波数帯では OMS burn の後に受信強度が増しているのが顕著に見られる. C は周波数と電波強度の関係をプロットしたもので, ▲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. ●と■は地上から観測されたもので, (a), (b), (c)はそれぞれ B のものと対応している.

要約すると, 数 MHz という短波帯でも周波数の低い宇宙電波が, 月で観測したものと同じように, 地上でも観測できたということの意味する.

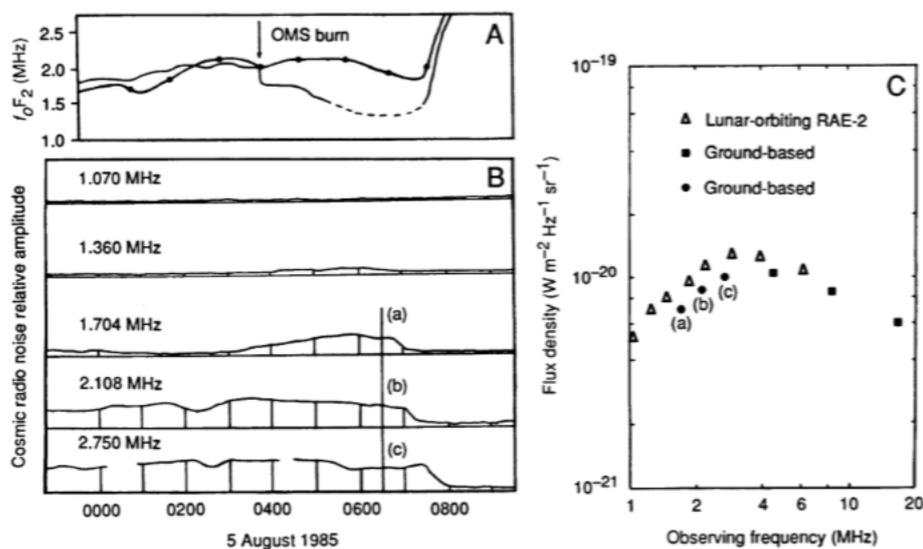


図 1.3 Mendillo et al. (1987)の実験結果. Aは電離圏 F 領域の臨界周波数(観測可能な宇宙電波の最低周波数)をあらわしており, OMS burn は軌道修正エンジンを噴射した時刻をしめしている. Bはそれぞれの周波数帯で観測できた宇宙電波の強度の時間変化である. 1.070MHz-1.704MHz までの周波数帯では OMS burn の後に受信強度が増しているのが顕著に見られる. Cは周波数と電波強度の関係をプロットしたもので, ▲は月の衛星軌道から観測された銀河系からの低周波電波放射のスペクトル. ●と■は地上から観測されたもので, (a), (b), (c)はそれぞれ B のものと対応している.

#### 1.4 H-2A ロケット

H-2A ロケットは三菱重工業により製造, 打ち上げが行われている, 人工衛星打ち上げ用の, 主に液体水素・液体酸素を燃料としたロケットである. 種子島宇宙センターより, 2001年夏に試験機1号機が打ち上げられて以来, 2016年2月現在までの間に29回中28回の打ち上げに成功している.

H-2A ロケットは打ち上げの際に莫大な量の排気ガス(主に水蒸気)を排出する. 上述の Space Shuttle を使った実験で排出された排気ガスの総量は244 kg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3.2秒間の噴出量にでしかなく (Furuya & Heki, 2008), H-2A ロケットの排気ガスを用いればより広範囲, 長時間, かつより低い周波数の宇宙電波の観測が可能になると考えられる.

宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)は H-2A ロケットの飛行経路を一部しか公表していない. 図 1.4-1, 1.4-2 は JAXA が公表している H-2A ロケット4号機と17号機の飛行経路である. 一般的に極軌道や太陽同期軌道の衛星は種子島から打ち上げられた後, 南方に向かって上昇してゆくが, 惑星探査機の打ち上げや静止軌道に衛星を投入する場合は東に向かって上昇してゆくことが多い. 前者では電離圏の穴は大東諸島近辺に生じるが, 後者では小笠原諸島の西に生じる.

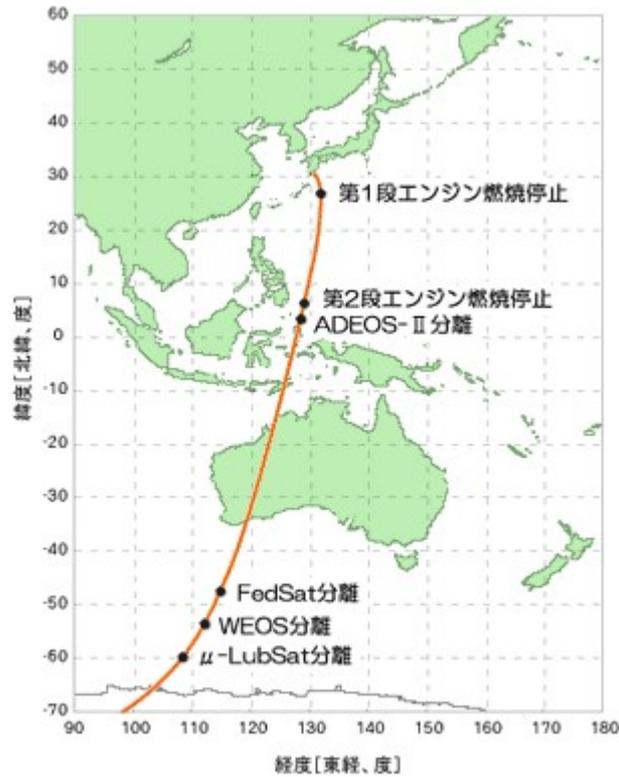


図 1.4-1 H-2A ロケット 4 号機の飛行経路図. 衛星は太陽同期軌道に投入された.

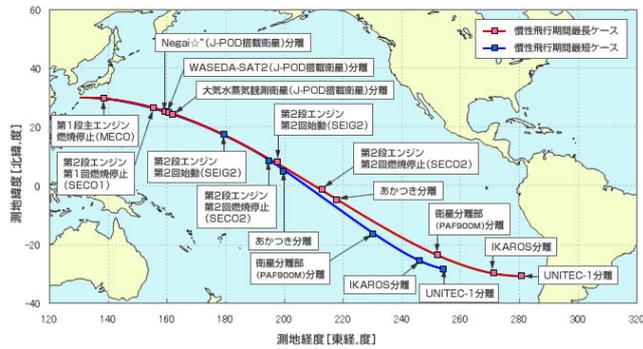


図 1.4-2 H-2A ロケット 17 号機の飛行経路図. これにより金星探査機「あかつき」が打ち上げられた.

## 1.5 電離圏消失のメカニズム

水蒸気による電離圏電子の消失現象であるが、Mendillo et al. (1987)による化学反応の詳細を述べる。まず窒素や酸素などの通常の大気分子のみを考える。



$K_*$  : 反応速度 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

右の電子式は瞬時に起こるため、電子の消失速度は左の式に依るところが大きい。よって電子の消失速度（電子密度の変化率）は以下になる。

$$\frac{dn(e^-)}{dt} = -\{K_1n(\text{N}_2) + K_2n(\text{O}_2)\} \cdot n(e^-) \quad (1)$$

$n(*)$ : \* の密度 ( $\text{個}/\text{m}^3$ )

この反応速度と太陽の紫外線による電子の生成速度の変化によって電離圏の電子数は日変化している。通常は紫外線の強い昼に最大、夜間に減少し続け、明け方に最小になる。

ロケットの打ち上げがあると、これに以下の水蒸気の効果加わる。



ここで(1)にこの水蒸気の方の消失速度も加えると

$$\frac{dn(e^-)}{dt} = -\{K_1n(\text{N}_2) + K_2n(\text{O}_2) + K_5n(\text{H}_2\text{O})\} \cdot n(e^-) \quad (2)$$

この  $K_5n(\text{H}_2\text{O})$  は  $K_1n(\text{N}_2)$  や  $K_2n(\text{O}_2)$  に比べ2桁ほど値が大きいため、

反応は瞬時に起こる。よって紫外線による電子の生成が追い付かなくなり、その結果電離圏電子の大規模な減少（電離圏の穴の出現）がおこるのである。

## 1.6 TEC

本研究において、視線方向の電子数を積分した全電子数を TEC (Total Electron Content)と呼ぶ。TEC の単位には TECU (TEC Unit)を用いる。1TECU は視線に沿った底面積  $1\text{m}^2$  の円柱に  $10^{16}$  個の電子が含まれることを意味する。

TEC は電離圏の研究において比較的新しい定義であるため上記の Mendillo et al. (1987) と本研究で得られる結果の単純比較はできないが、一般的かつ後続の研究の指標にもなるためこれを用いる。衛星の視線方向の TEC を斜め TEC (Slant TEC, STEC), 鉛直方向に積分した TEC は鉛直 TEC (Vertical TEC, VTEC) と呼ばれる。前者は衛星の移動に伴う視線と電離圏の成す角度の変化によって見かけ上の変化が存在するが、後者は見かけの変化を除いた実質的な TEC 変化を反映する。

## 1.7 GIM

電離圏全電子数は緯度や時刻、太陽活動度によって大きく変化する。ある時刻の鉛直 TEC の地理的分布を世界地図上にプロットしたものが全球電離圏マップ (GIM ; Global Ionospheric MAP) である。GIM は世界中に分布する全球測位衛星 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 局で観測された STEC を観測データとして、特定の一日の様々な時刻における VTEC のグリッド点の値をモデル化したものであり、いくつかの解析センターで IONEX ファイルの形式で作成され公開されている。

図 1.5 はベルン大学が作成している GIM を用いて、2013 年 1 月 27 日 4 時 40 分 (UT) 頃の VTEC の分布を描いたものである。TEC の値は太陽放射を受ける昼半球が夜半球に比べて高い。また、太陽活動の影響を大きく受ける赤道域は中高緯度地域よりも高くなる。磁気嵐や移動性擾乱、太陽フレアなどの様々な現象に応じてこれらの分布や、TEC の絶対値は変化する。

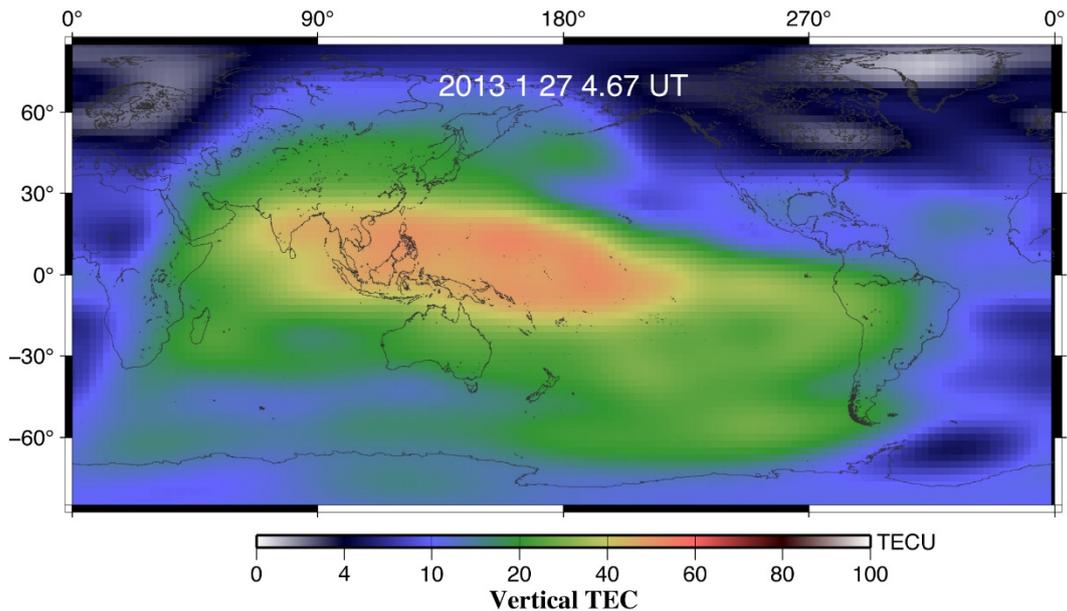


図 1.5 ベルン大学の GIM から作成した 2013 年 1 月 27 日 4 時 40 分ごろの鉛直 TEC 分布. 昼側の低緯度で VTEC は大きな値を取る. 逆に中緯度の夜間では VTEC は数 TECU 以下まで下がる.

## 1.8 本研究の目的

本研究ではロケットの打ち上げによる電離圏消失を積極的に利用して低周波電波天文を行う意義があるかについて議論する. 種子島から打ち上げられる H-2A ロケットが電離圏の穴を作るのは大東諸島や小笠原諸島などの, 日本国内では比較的低緯度で本来 TEC 値が高い領域である. 従って, ロケットの打ち上げに伴って電離圏の穴が生じ, TEC が減少したときの TEC の絶対値が問題となる. その値が, ロケット打ち上げの無い平時でも TEC 値の低い中緯度地域の夜間と同等か上回るようであれば, わざわざ種子島周辺で低周波電波天文観測を行う意義がなくなってしまう.

ちなみに図 1.5 において最も TEC 値が低い地域での鉛直 TEC の値は 2 TECU 程度である. よって, 本研究では H-2A ロケット打ち上げの際, 電離圏の穴が生じた地域における TEC 値がこの値を下回るかどうかの検証を目的とする. また, TEC が十分下がった例と十分下がらなかった例があった場合, どのような条件でその差が生まれるかについて考察する.

## 2. 観測手法

### 2.1 GNSS-TEC 法

全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) は、衛星から発射される L バンドのマイクロ波を地上局で受信し、その搬送波位相の変化から測位を行うシステムである。1990 年代から地殻変動の計測に用いられている米国の GNSS である GPS (Global Positioning System) がその代表格であるが、今ではロシアの GLONASS、中国の Beidou (北斗)、欧州連合の Galileo、日本の準天頂衛星 (みちびき) QZSS など整備が進んでいる。本研究では主に GPS を用いている。

GPS 衛星では搬送波として 1.5GHz ( $L_1$ ) と 1.2GHz ( $L_2$ ) の二つの周波数が同時に用いられる。マイクロ波が電離圏を通過する際に電子がマイクロ波の伝搬を遅延 (電離圏遅延) させる。GNSS 受信機では二つの周波数を同時受信することによって、周波数の二乗に逆比例する電離圏遅延を除去している。そのときに使用する搬送波位相  $L_1$  と  $L_2$  の線形結合を取ることによって電離圏遅延を除いた位相データ  $L_3$  は (ionosphere-free linear combination), それぞれの搬送波周波数を  $f_1, f_2$  とすると

$$L_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 \quad (1)$$

で表される。このとき  $L_1, L_2$  は、観測された位相に波長を掛けて長さ (m) の単位にしてある。

日置他 (2010) で用いられた GNSS-TEC 法は、二つの搬送波位相の単純な差を取る。1990 年代に国土地理院によって整備された全国 GNSS 稠密観測網 (電子基準点とも呼ばれる) である GEONET (GNSS Earth Observation Network System) のデータはウェブ上のデータ提供サービス (<http://terras.gsi.go.jp/>) にて Receiver Independent Exchange format (RINEX) 形式の生データファイルが公開されている。従って日本国内の地上局の受信データはこのサービスを利用してダウンロードすることができる。我々はそれらの RINEX ファイルを読み込み、二つの搬送波の差 (これを  $L_4$  ionospheric linear combination と呼ぶ) を求める。

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (2)$$

$L_4$  は視線に沿って積分した電子の数に比例し、(3)式で示すように適切な係数

を掛けると斜め TEC に変換することができる。また、位相差を取ることで、電離圏以外の衛星位置や局位置、中性大気による大気遅延などの情報はすべて除かれる。そのため  $L_4$  は **geometry-free linear combination** と呼ばれることもある。

位相データには一般的に整数値の不確かさがあるので、 $L_4$  の絶対値には意味がなく、時間変化にのみ意味がある。すなわち  $L_4$  の時間変化  $\Delta L_4$  から

$$\Delta \text{TEC} = \left( \frac{1}{40.308} \right) f_1^2 f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \Delta L_4 \quad (3)$$

とすることによって TEC の時間変化に変換することができる。

## 2.2 周波数間バイアスの除去

国土地理院からダウンロードできる GEONET の RINEX ファイルから位相データを抽出し、TEC を求める。しかし一般的に位相データには整数値のアンビギュイティが含まれる。この研究で用いた RINEX から TEC を求めるプログラム (rdnrx.f) では、整数値アンビギュイティの無い疑似距離 (pseudorange) の二周波での値 ( $L_1$  の搬送波に乗った C/A コードまたは P コードと  $L_2$  の搬送波に乗った P コードを組み合わせる) の **ionospheric linear combination** に、位相から求めた  $L_4$  を合わせることによってそれらを取り除いている。

しかしまだ、疑似距離と搬送波位相で共通の周波数間バイアス (アンテナや受信機の中で生じる二つの周波数の信号間の時間差) が含まれている。そのためそのままでは TEC の変化 ( $\Delta \text{TEC}$ ) しか求めることができない。過去の研究 (古屋, 2007; Furuya and Heki, 2008) でも、TEC の絶対値は求められておらず、その減少のみが論じられている。

本研究ではこの周波数間バイアスを除去し、STEC を VTEC に変換することによって、TEC の絶対量がどの程度ロケットによって減少したかを求める点だが、これまでの研究にない新しい点である。周波数間バイアスは GNSS 衛星、受信機それぞれが異なった値を取るが、その時間変化はとても緩慢としたものなので、一度決定した値はある程度の期間使用が可能である。本研究では、電子航法研究所衛星航法グループ (<http://www.enri.go.jp/~sakai/pro.htm>) が GEONET の特定の年代のデータに限って公開している衛星と受信機の周波数間バイアス推定値を利用する。それに含まれていない時期のデータに関しては、前出の GIM が与えられている IONEX ファイルのヘッダに含まれている衛星の周波数バイアスと、minimum scalloping で求めた受信機バイアス (Rideout and Coster,

2006)を用いた.

### 2.3 斜め TEC から鉛直 TEC へ

GNSS-TEC 法にて, TEC の値は U 字型の曲線を描くことが多い. 静止衛星でない限り, 地上からみる衛星は地平線から上がり, 上空を移動して再び地平線に沈んでゆく. それに伴って生じる衛星の仰角 (視線と水平線の成す角度) の変化によって, 視線ベクトルが貫通する電離圏の見かけ上の厚みが変わる. そのため斜め TEC (STEC) が U 字型の変化をするのである.

異なる衛星間で TEC 値を比較する場合, STEC で比較すると仰角の違いによる分を補正しないと行けない. そのため STEC を鉛直方向の TEC (VTEC) に換算することが望ましい.

本研究では, 電離圏を高度 300km にある薄い層と近似し, GEONET が公開している衛星の軌道情報ファイルから時々刻々の衛星位置を計算し, 衛星と地上局を結ぶ視線の電離圏への入射角を求めた. 入射角の余弦を STEC にかけることによって鉛直 TEC (VTEC) に変換することができる.

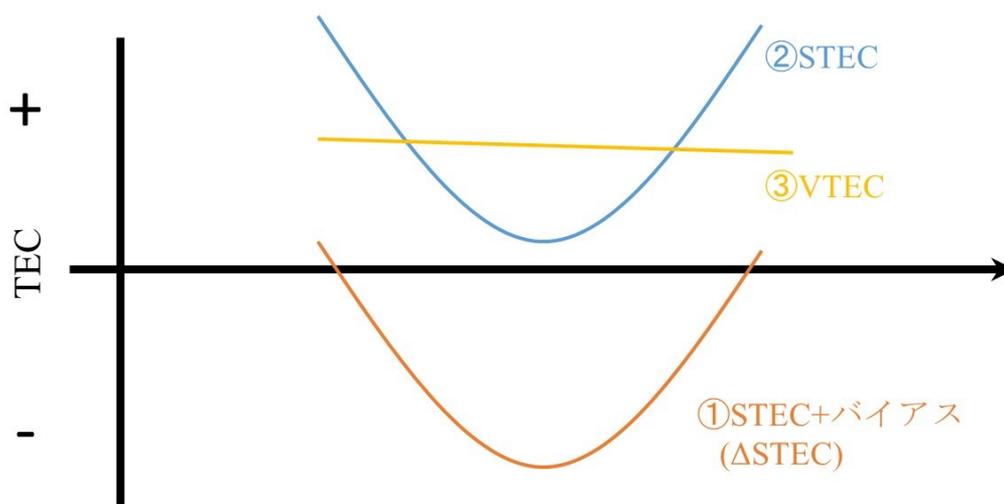


図 2.3-1 VTEC に変換するまでのイメージ. 周波数間バイアスが含まれていると TEC の変化しかわからないが, 周波数間バイアスを取り除くことで絶対値に直すことができる. さらに, STEC は衛星の移動に伴い見かけ上の U 字型曲線を描くので, VTEC に変換すると衛星間で比較しやすくなる.

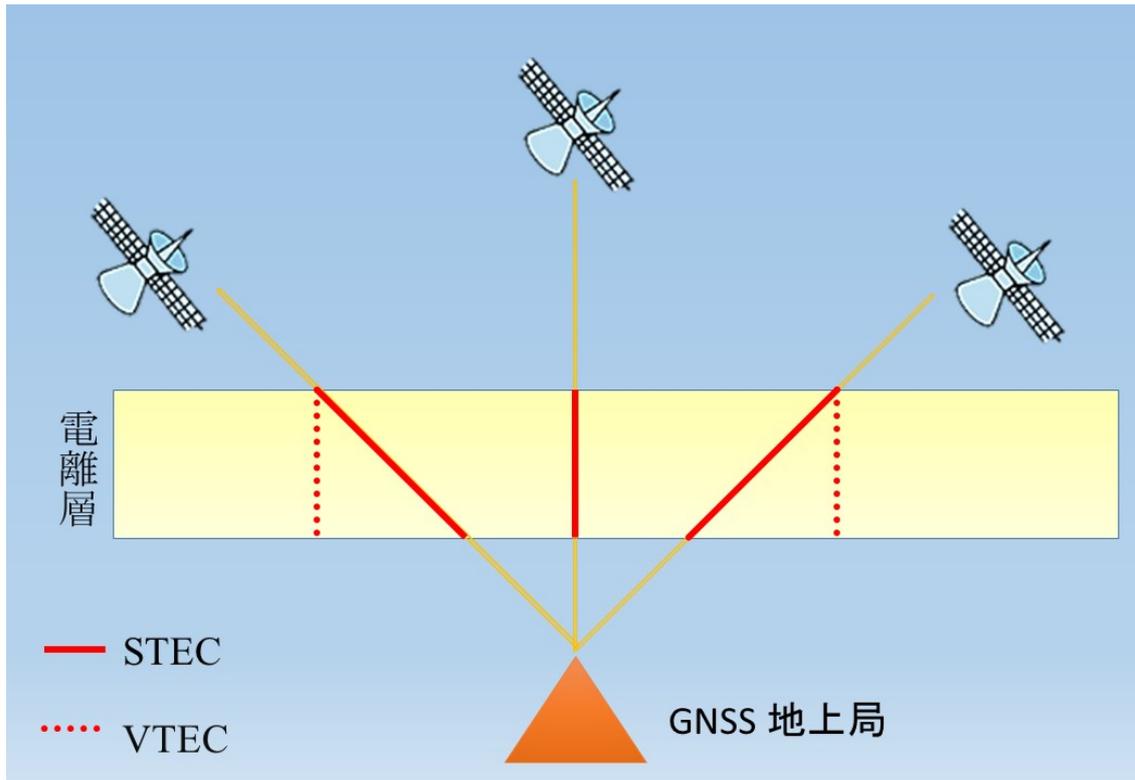


図 2.3-2 GNSS 衛星の仰角変化によって STEC の値が変化するイメージ.衛星が真上にある時は、視線が電離圏（電離層）を貫く部分（赤い実線）が短く、衛星が地平線近くにある時は、その部分が長い。しかし、それを VTEC（赤い点線）に換算すると見かけの変化が相殺される。

### 3.結果

本章では、過去の H-2A ロケットの打ち上げのいくつかの例に対して数地点の地上 GNSS 観測点を取り上げ、TEC の変化をグラフにした。また、その観測点から、ロケット打ち上げ時刻前後 1 時間の、GNSS 衛星への視線ベクトルと電離圏の交点の軌跡(SIP track)を地図上に記した。なお、ここでは電離圏を高度 300km に存在する薄い層と近似している。

#### 3.1 H-2A ロケット 17 号機 2010 年 5 月 20 日 21:58(UT)打ち上げ

最初に示すのは、金星探査機あかつきの打ち上げに使用された H2A17 号機の

例である。本ロケットは東に向かって上昇するため、小笠原諸島近辺に電離圏の穴を生じさせたと予測される。打ち上げ時刻は日本時間で午前6時58分である。

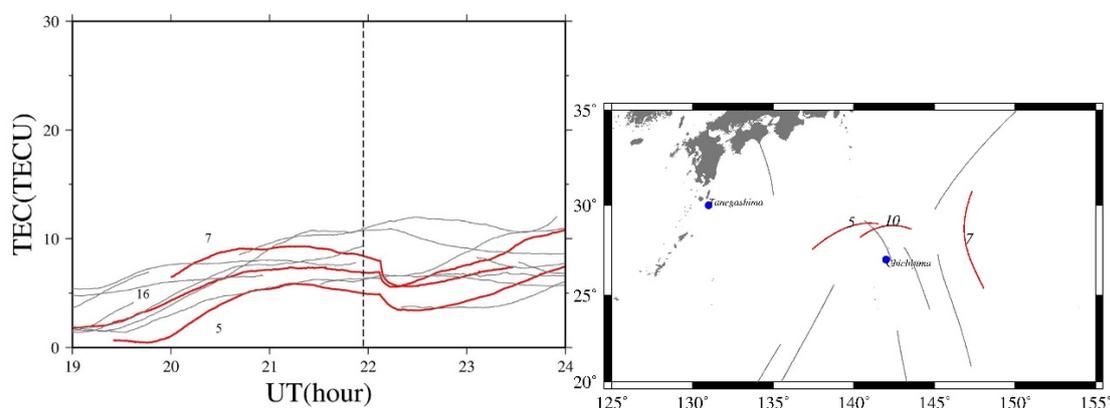


図 3.1-1 東京都小笠原諸島父島から観測された VTEC 時系列（左）と、打ち上げ前後一時間の SIP の軌跡。時系列の中央にある破線はロケット打ち上げ時刻を表す。赤で示した三つの衛星（GPS5, 7, 16）が打ち上げ直後に顕著な減少を示した。それらの衛星の SIP 軌跡の上空の電離圏に穴が生じていることが示唆される。H-2A 17 号機の事例。

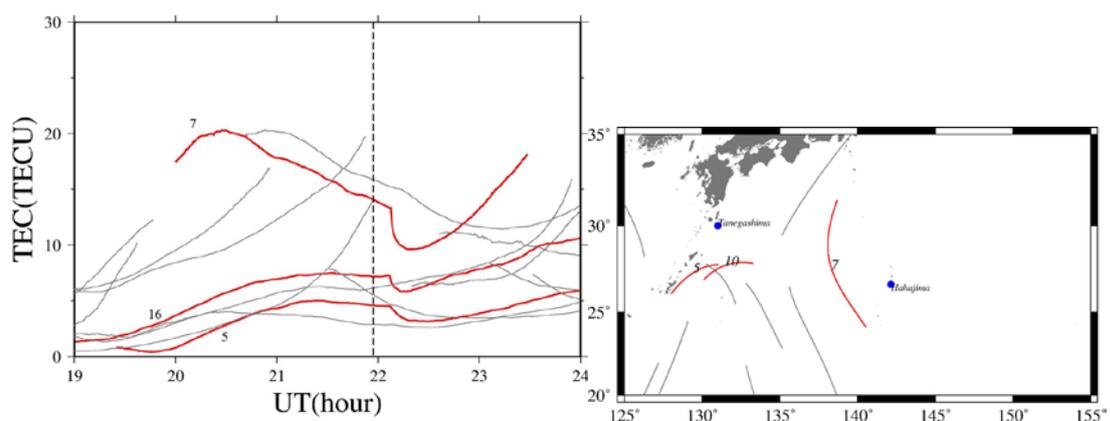


図 3.1-2 東京都小笠原母島からの観測。H-2A 17 号機の事例。図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと。

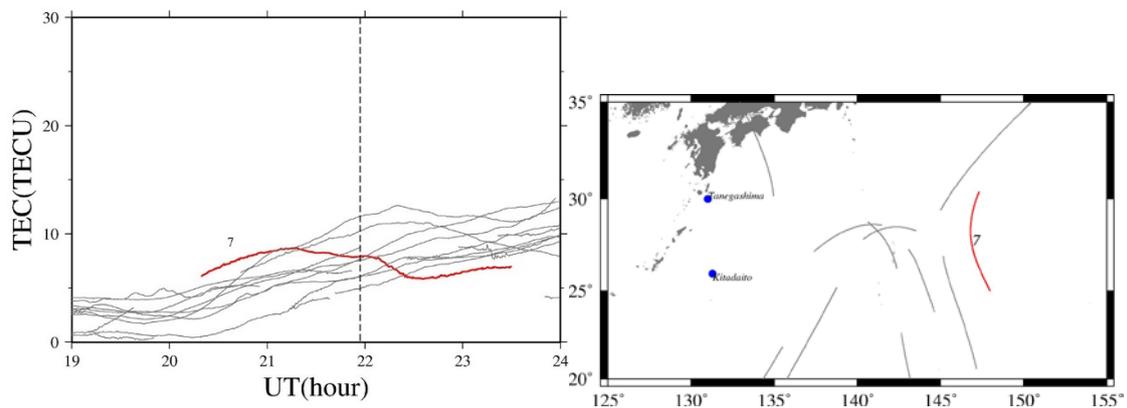


図 3.1-3 沖縄県北大東島からの観測. H-2A 17 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

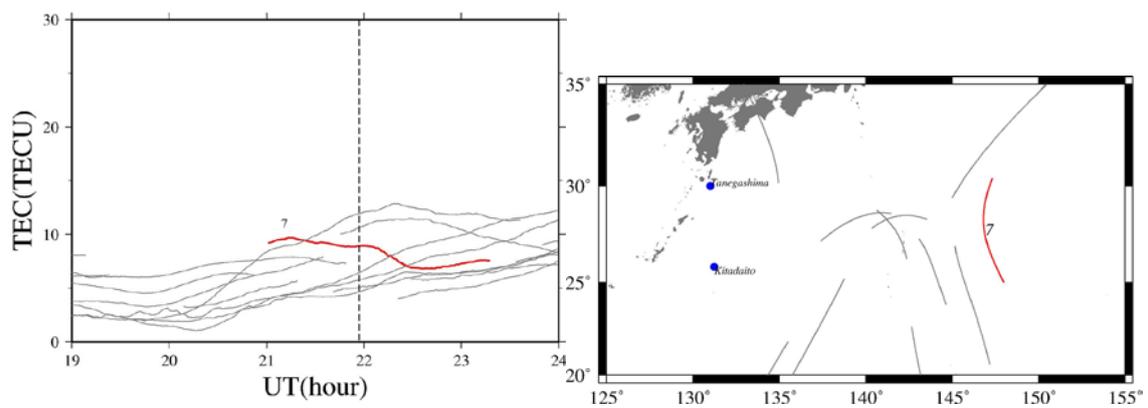


図 3.1-4 沖縄県南大東島からの観測. H-2A 17 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

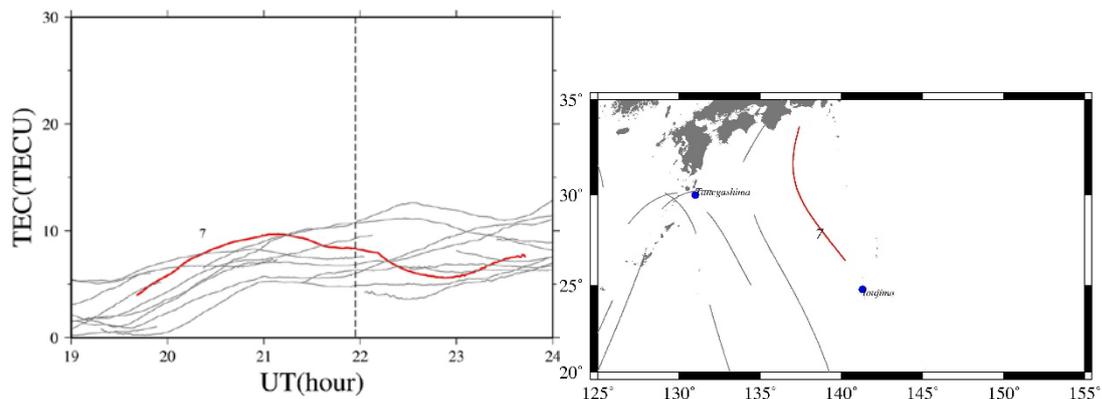


図 3.1-5 東京都硫黄島からの観測. H-2A 17 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

H-2A ロケット 17 号機は数少ない JAXA によって飛行経路が公開されている数少ない例である. TEC 値が減少している衛星の軌跡は, 図 1.4-2 のロケットの飛行経路をちょうど横切る形となっていることがわかる.

この例は早朝の打ち上げのものであるがもう太陽が昇り始めてしまっているのか TEC 値が上昇し始めている時刻に相当する. そのため打ち上げ数時間前の深夜における VTEC 値の方が, 打ち上げ直後にロケットの排気によって電離圏に穴が生じている間の VTEC の値よりも低くなっている. そのため, 低周波電波天文観測の意義を見出せるような例ではないと言える.

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

次に示す打ち上げの例は, 準天頂衛星「みちびき」を軌道投入するために打ち上げられた 18 号機である. この場合衛星が投入される準天頂軌道は, 静止軌道と同じく 24 時間の公転周期を持つが, 日本上空に遠地点をもつ楕円軌道である. また打ち上げは日本時間で 20 時 17 分である.

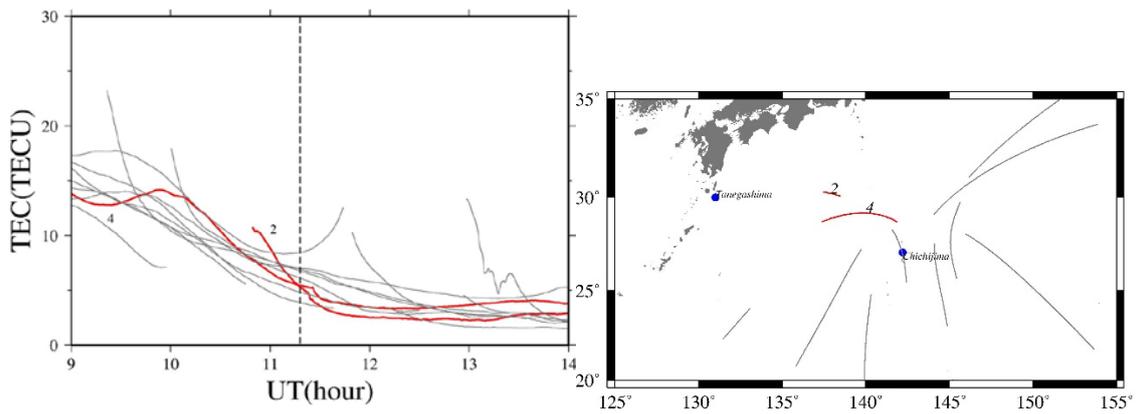


図 3.2-1 東京都小笠原諸島父島から観測. H-2A 18 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

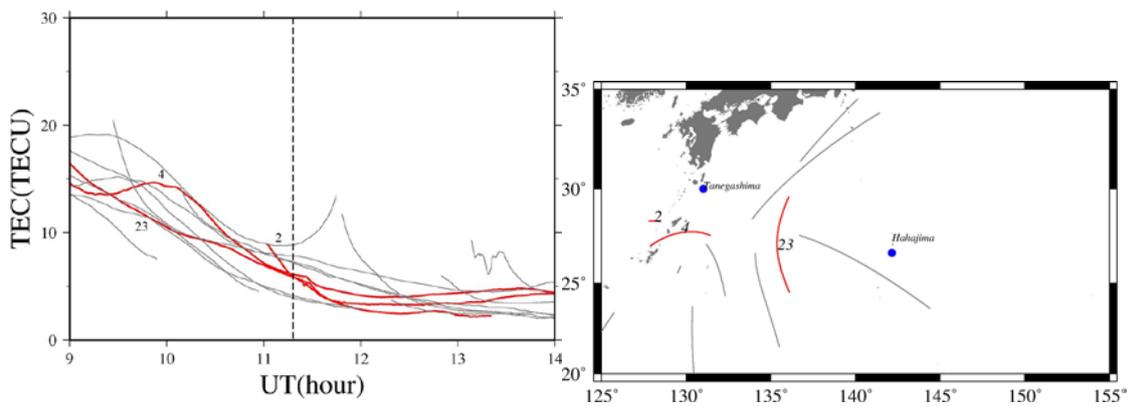


図 3.2-2 東京都小笠原諸島母島からの観測. H-2A 18 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

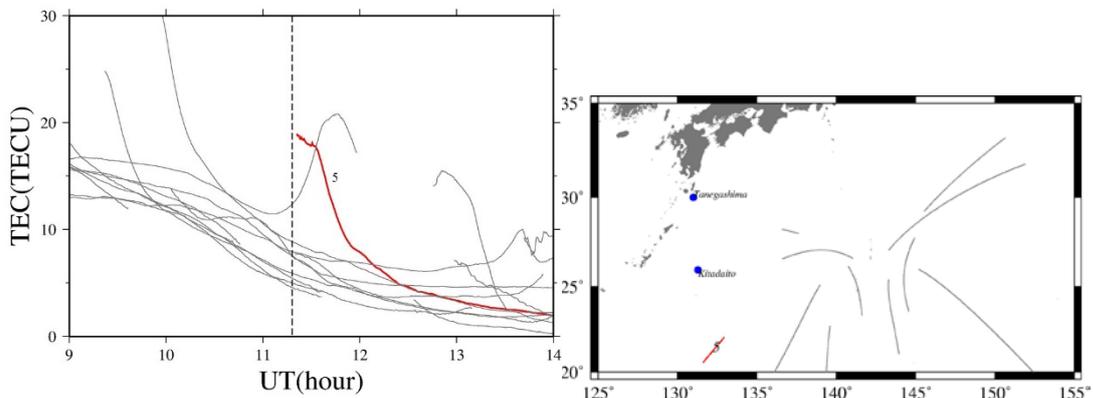


図 3.2-3 沖縄県北大東島からの観測。H-2A 18 号機の事例。図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと。

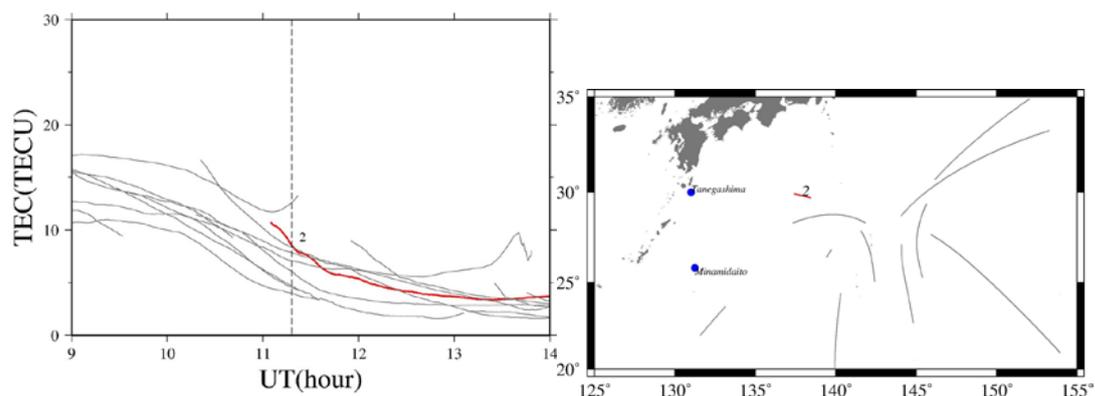


図 3.2-4 沖縄県南大東島からの観測。H-2A 18 号機の事例。図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと。

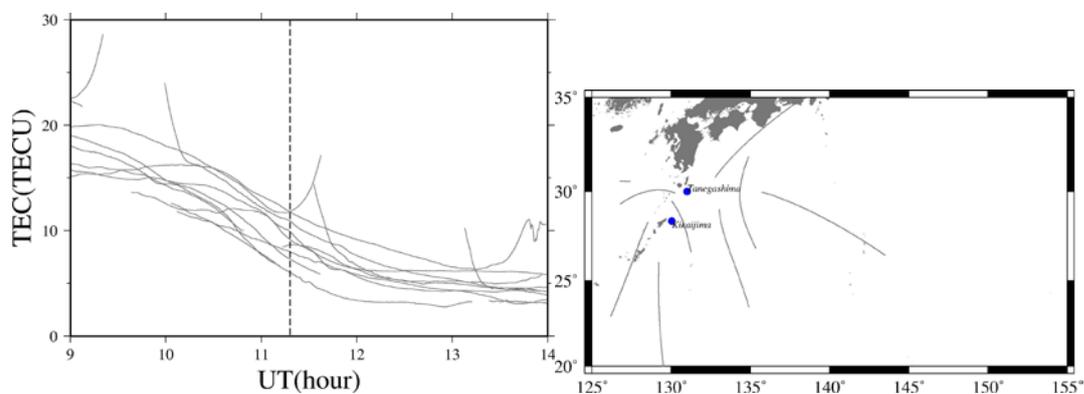


図 3.2-5 鹿児島県喜界島からの観測。H-2A 18 号機の事例。図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと。

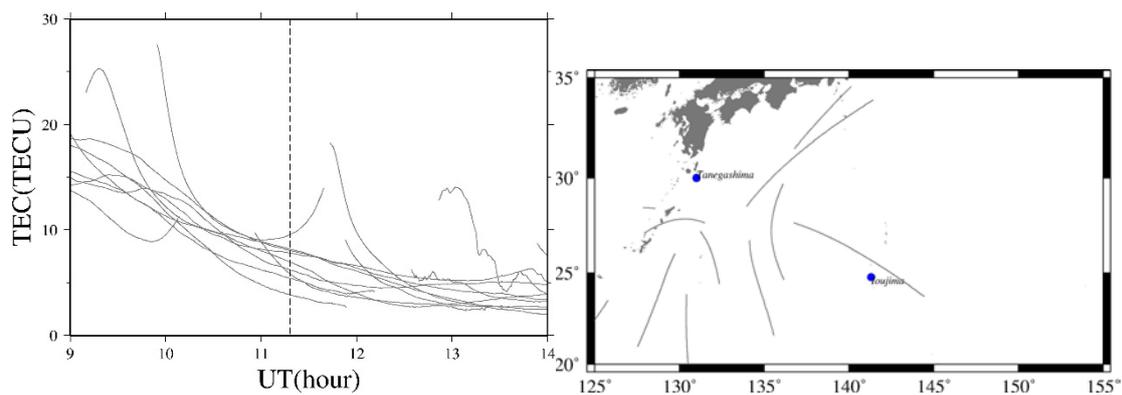


図 3.2-6 東京都硫黄島からの観測. H-2A 18 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

早朝に打ち上げられた 17 号機と異なり, 午後 8 時過ぎという夜間の打ち上げであり, 昼間の高い TEC の値が打ち上げ前から減少している時刻における打ち上げであった. そのため, ロケットに依ると思われる減少が起きてないところでも TEC は減少中であり, 全体に低い値を示している. ロケット打ち上げ直後には, 最も低いところでは 2 TECU ほどまでの VTEC の減少が見える.

この 18 号機は準天頂衛星の打ち上げのためのもので飛行経路は南東の方角だと考えられる. 種子島の南西に当たる鹿児島県の喜界島や硫黄島の観測点では顕著な VTEC の減少が見られなかった. それらの島はロケットの航跡から遠く離れているのだと考えられる. .

### 3.3 H-2A ロケット 19 号機 2011 年 9 月 23 日 4:36(UT) 打ち上げ

次に 19 号機についてデータ解析を行う. このロケットは情報収集衛星光学 4 号機を太陽同期軌道に打ち上げたもので, これまでの例と異なり昼間 (日本時間 13 時 36 分) の打ち上げである. この場合, 夜間のように極めて小さい VTEC 値を達成する可能性はないが, 夜間との比較の意味で参考に TEC 減少量の絶対値に対する割合等を検討してみる.

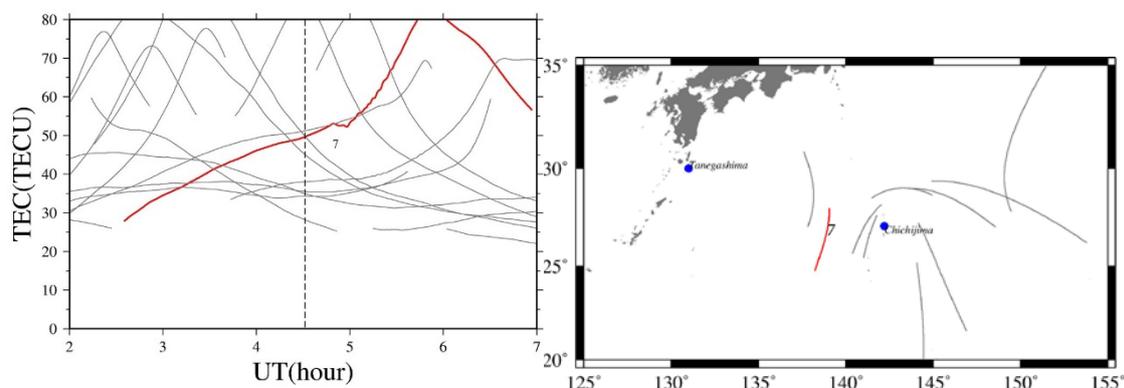


図 3.3-1 東京都小笠原諸島父島からの観測. H-2A 19 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

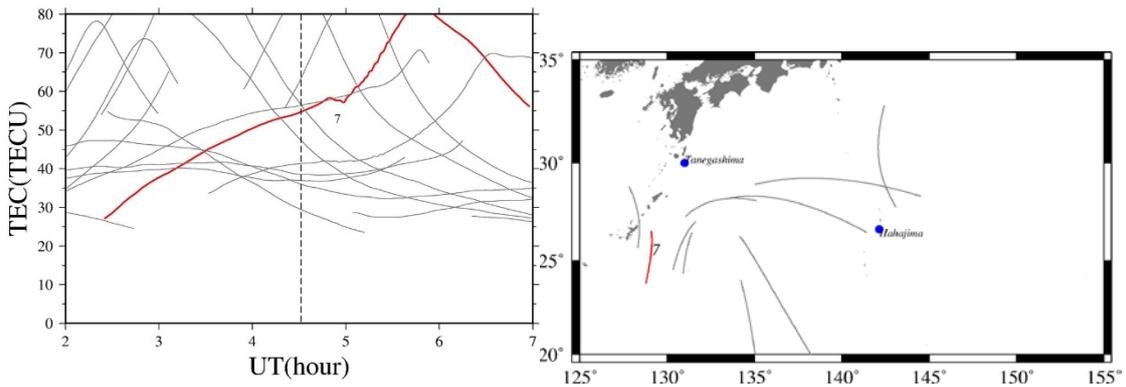


図 3.3-2 東京都小笠原諸島母島からの観測. H-2A 19 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

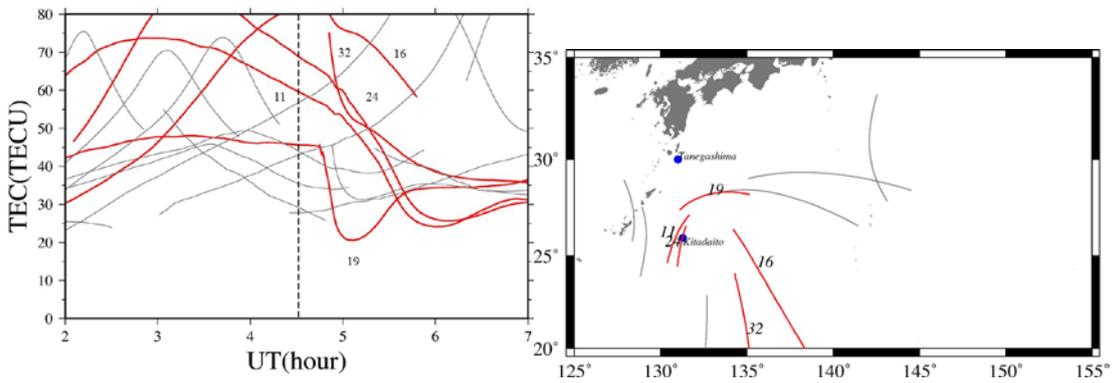


図 3.3-3 沖縄県北大東島からの観測. H-2A 19 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

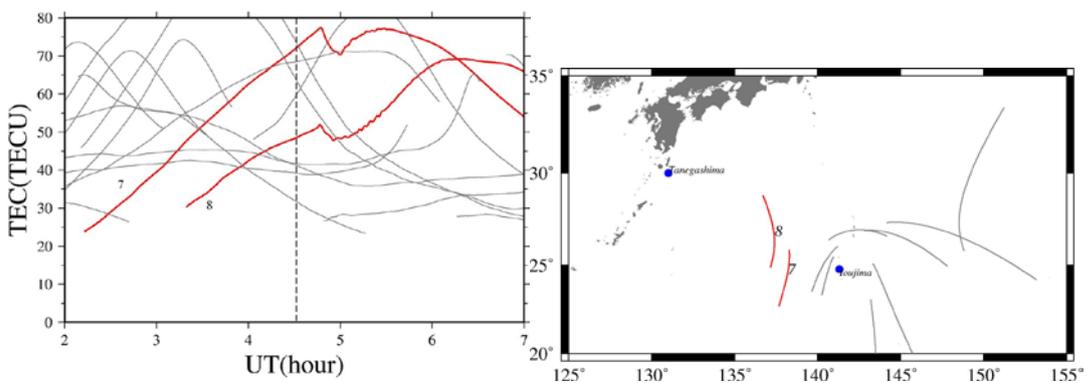


図 3.3-4 東京都硫黄島からの観測. H-2A 19 号機の事例. 図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと.

真夏，なおかつ真昼の打ち上げということでほとんどの観測で 50 TECU を超える値を示している．衛星の軌道から判断すると，ロケットは南方に上昇していったと考えられる．従って小笠原諸島や硫黄島では，打ち上げ後にわずかな減少が見られるところもあるが減少量はわずかである．

一方大東諸島では大きな TEC 減少が見られた．最も大きな減少は図 3.3-3 北大東島から 19 番衛星を見た場合である．ここでは約 45 TECU から 20 TECU ほどまでの減少を見せている．減少の絶対量は 21 TECU ほどであり，これまで解析した中で最も大きな減少量である．しかしながら，打ち上げ前の TEC が極めて大きいため，減少後の TEC は絶対量としては決して小さいとは言えない値である．

### 3.4 H-2A ロケット 20 号機 2011 年 12 月 12 日 4:36(UT) 打ち上げ

次に示す打ち上げの例は，情報収集衛星レーダ 3 号機を軌道投入するために打ち上げられた 20 号機である．この場合衛星は太陽同期軌道に投入されるため，ロケットは南方へ向けて上昇する．また打ち上げは日本時間で太陽が十分に上がった午前 10 時 21 分である．

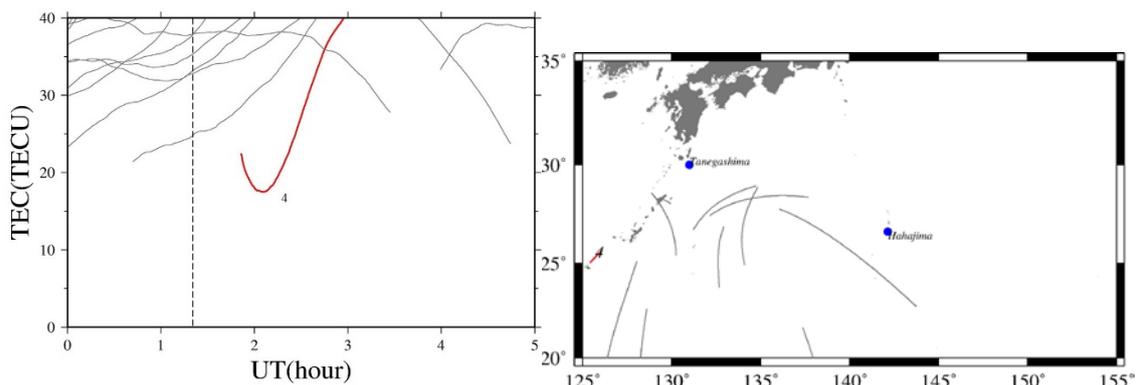


図 3.4-1 東京都小笠原諸島母島からの観測．H-2A 20 号機の事例．図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと．

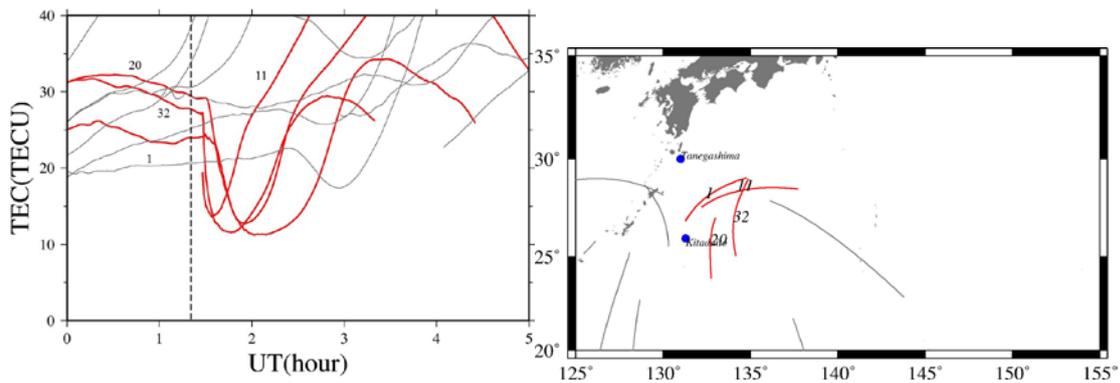


図 3.4-2 沖縄県北大東島からの観測．H-2A 20 号機の事例．図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと．

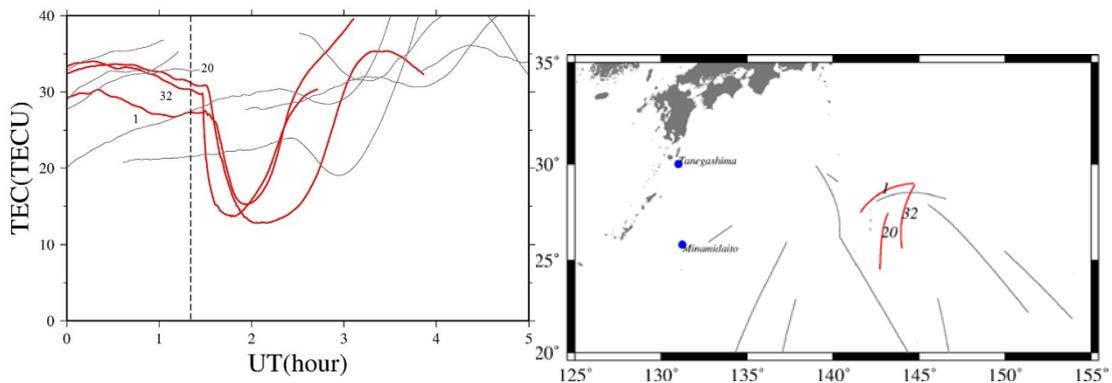


図 3.4-3 沖縄県南大東島からの観測．H-2A 20 号機の事例．図の詳細は図 3-1-1 を参照のこと．

TEC 値は 19 号機の時と同様に大きく減少している．打ち上げ前の VTEC 値は 30 TECU 程度と大きな値であり，ロケットによる減少で半分以下の 13 TECU 程度まで下がっている．しかし減少後の TEC は絶対値としては低いとは言えず，中緯度の夜間の VTEC を下回るほどではない．従って低周波電波天文に資する可能性はないと考えられる．このロケットの飛行経路が図 1.4-1 のものと似た経路であるとしたら，大きく TEC 減少が見られた観測点での受信機と衛星を結ぶ視線は，その経路を横切っていると考えられる．

## 4. 考察

### 4.1 H-2A ロケットの打ち上げに伴う VTEC の減少

本研究で観測した 4 例では、どれも自然とは思えないような急激な TEC 値の減少が見られ、ロケットの排気に伴う電子の消失（電離圏の穴の生成）であることが明白である。今回の研究では、周波数間バイアスを取り除いて VTEC に変換することにより、電子数の減少を絶対値としてとらえることに成功した。また夜間の打ち上げと昼間の打ち上げの双方を比較した。ここでは個々の例における電子数減少の程度を比較してみたい。

早朝打ち上げの 17 号機と日没後の打ち上げの 18 号機の例を比べてみる。いずれの例でもロケット打ち上げ前の VTEC の値は 10 TECU 程である。17 号機の場合は日の出前の TEC が低い状態から、昼半球に入って電離圏全電子数が上昇しつつある段階であり、18 号機の場合は既に日没後で太陽光がなく、電離圏全電子数が減少しつつある段階であった。いずれもその段階でロケットが打ち上げられ、低い VTEC がロケット排気中の水蒸気の影響で、さらなる減少につながったものと考えられる。

打ち上げ前の VTEC の値からの減少率を見てみると、18 号機（図 3-2-2）、20 号機（図 3-4-2, 3-4-3）の打ち上げでは電離圏の穴の生成によって VTEC が約半分になっていることが図から読み取れる。17 号機（図 3-1-1, 3-1-2）のときは、ロケットが東に向かって上昇したため、丁度うまく穴を捉えるのに適当な地上局が少なく、明瞭なロケット排気による VTEC 減少量が決められなかったが、この時刻ではそもそも電子数が急激に上昇する時間帯であるため、18 号機や 20 号機と同様に打ち上げ前の VTEC は半分ほどになっていると考えても良いかも知れない。19 号機の例では、小笠原諸島での電子数減少は少なかったが、北大東島（図 3.3-3）では約 50% の VTEC の減少が見られる。

これらの情報を総合すると、ロケットの上昇の向きによっては電離圏の穴の中央を貫くデータが取得できなかった可能性はあるが、おおむね H-2A ロケットによって打ち上げ前の電子数が「半減」すると考えて良いのではないだろうか。すなわち 40 TECU は 20 TECU になり、4 TECU は 2 TECU になるといった具合である。H-2A ロケットによる電子数の減少は、絶対値として何 TECU 下がるというのではなく、元の TEC に比例する減少が生じると言い換えることもできるだろう。

## 4.2 電離圏の穴の位置による H-2A ロケットの打ち上げ経路の推測

H-2A ロケット 19, 20 号機に関しては、情報収集衛星という衛星の目的から、日本政府および JAXA は衛星の軌道を始めロケットの打ち上げの軌跡も公開されていない。しかし、大きな TEC 減少が確認できた局が大東諸島などの種子島の南方に位置していることから、それらのロケットは南方に上昇するロケットによって極軌道や太陽同期軌道に投入されたことが推測できる。このように、電離圏の穴の観測によって、詳細が公開されていないロケットの打ち上げ経路を推測できることがわかった。

## 4.3 ロケットの打ち上げを利用した低周波電波天文観測の可能性

本研究の狙いである低周波電波天文の可能性について最後に考察する。そもそも中緯度地域の夜間の電離圏の電子数は VTEC で数 TECU 程度とかなり低い値を持っている。従って、昼半球でもともと VTEC の大きな時間帯のロケット打ち上げでは、たとえ減少量は大きくても減少後の VTEC の絶対値は夜間の値を下回ることはなく、低周波電波天文観測のためにわざわざロケットを打ち上げる意義を認めることは難しそうである。

一方、夜間の打ち上げについては、もともとの電子数が少ない状態ではあるが、ロケット打ち上げに伴う減少量は昼間に比べて有意に小さいことがわかった。すなわち、昼間の打ち上げで 60 TECU が 30 TECU に下がったといっても、夜間で 5 TECU の状態を 0 TECU の状態にすることは出来ないということである。ただし、ロケット打ち上げによって VTEC の値をほぼ半減させることができるので、もともとの VTEC 値が 1-2 TECU という極めて低い値であれば、1 TECU を切る電離圏を実現でき、低周波電波天文観測に有効な状態を作り出す可能性がある。要するに、何時打ち上げても役に立つ穴を作れるわけではなく、かなり好条件がととのった季節・時刻に打ち上げられた際にのみ、役に立つ穴とすることができると言えよう。

Mendillo et al. (1975) に紹介されている、スペースラブからの放出物質による電離圏電子数減少の実証実験が行われたのは、オーストラリアのタスマニア上空で、時刻は深夜である。そこがどれだけ低周波電波天文に適した地であったかをあらためて確認することができた。我が国でも、将来何らかの形で H-2A の打ち上げに伴う電離圏の穴を利用した低周波電波天文観測が実現されることを願っている。

## 5.謝辞

本研究に取り掛かるにあたってまず、電離層の知識も興味もなかった私に対して懇切丁寧にご教授して下さった指導教官の日置先生、本当にありがとうございました。また、ゼミにて私の稚拙な発表に対して的確な指摘をして下さった固体系ゼミのみなさんにも大変お世話になりました。私は、院進学はしないのでたった1年の付き合いということになりますがそれでも分け隔てなく接していただき感謝しています。

最後にもう一度日置先生、宇宙測地学研究室のみなさん、固体系ゼミのみなさま、ほんとうにありがとうございました。

### <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., G. S. Hawkins, and J. A. Klobuchar (1975): A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab, *J. Geophys. Res.*, 80, 2217-2225.
- 古屋 智秋(2007), H-II A ロケットの打ち上げに伴う電離層の局地的な消失の GPS による観測 北海道大学理学部 卒業論文
- JAXA H-IIA ロケット  
[http://www.jaxa.jp/projects/rockets/h2a/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/rockets/h2a/index_j.html)
- GEONET [http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet\\_top.html](http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_top.html)
- 電子航法研究所 衛星航法グループ – ENRI  
<http://www.enri.go.jp/~sakai/>
- Rideout, W. and A. Coster (2006): Automated GPS processing for global total electron content data, *GPS Solutions*, 10, 219-228.