

P-15

## HFドップラー・TEC観測による H-IIA25号打ち上げに伴う電離圏擾乱の解析

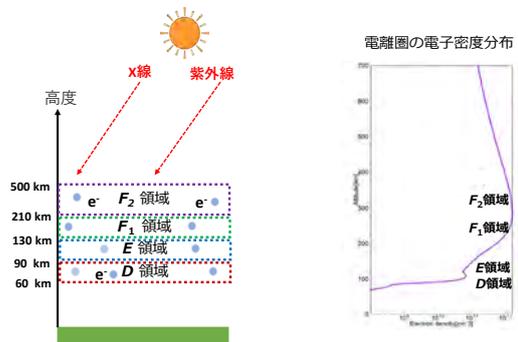
中田裕之<sup>1</sup>, 山崎淳平<sup>1</sup>, 細川敬祐<sup>2</sup>, 大矢浩代<sup>1</sup>,  
鷹野敏明<sup>1</sup>, 津川卓也<sup>3</sup>, 西岡未知<sup>3</sup>

<sup>1</sup>千葉大学大学院工学研究院  
<sup>2</sup>電気通信大学  
<sup>3</sup>情報通信研究機構

第24回 環境リモートセンシングシンポジウム 2022/2/17 オンライン

### Introduction

電離圏：地球上層部にある大気が電離しプラズマ状態になっている領域。  
電子密度が極大となる高度が複数存在し、D層、F<sub>1</sub>層、F<sub>2</sub>層に分けられる。上空からの磁気圏からの影響や、下層大気からの大気波動などによって擾乱が発生する。

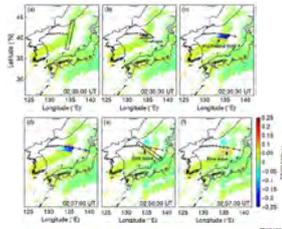


### Introduction

1960年代からロケットの排気煙や超音速などによって大気波動(音波)が励起され、電離圏変動を起こすことが知られている。その変動は二つのパターンに分けられることが観測されている(Noble, 1990; Bowling et al., 2013; Lin et al., 2014)。

#### First wave

- ロケットの排気煙などの衝撃波による。
- 水平伝搬速度は約800~1200 m/sである。
- 周期は数十秒~10分程度。
- 主にロケットの軌道周辺で見られ長距離伝搬しない。



#### Delay wave

- 水平伝搬速度は約700~900 m/sである。
- 周期は2~4分程度。
- 軌道から離れた位置で現れ、500 kmを超え伝搬する。
- 発生した音波が地面で反射などして伝搬したものにより発生すると考えられている。

具体的なメカニズムはまだ解明されていない

#### 本研究の目的

ロケット打ち上げに伴う電離圏の変動について、メカニズムや音波(インフラサウンド)の伝搬について解析し解明する。

### Event and Observation method

#### Event

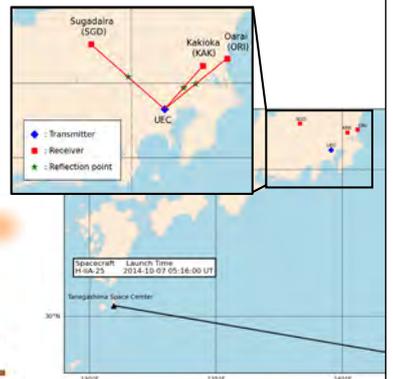
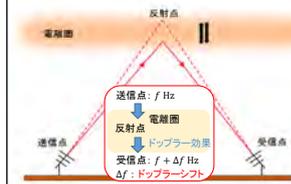
Event	Launch Time(UT)	Launch site	Payload
H-IIAロケット25号	2014年10月7日 05:16:00 (UT)	種子島宇宙センター	ひまわり8号

#### HFドップラー観測

- 送信周波数と受信周波数の差(ドップラーシフト)を観測

- 送信周波数: 5.006 MHz (高度約160~170 km)
- 8.006 MHz (高度約190~200 km)

(電気通信大学 宇宙・電磁環境センターより提供)



### Event and Observation method

#### GPS-TEC観測

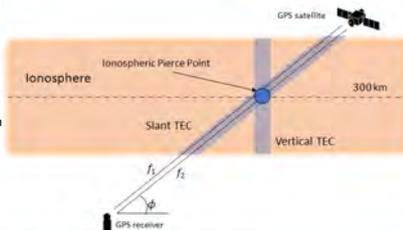
- GPS衛星から周波数の異なる2周波を送信し遅延差から全電子数(Total Electron Content: TEC)を算出
- 国土地理院のGPS連続観測システム(GPS Earth Observation Network: GEONET)により導出されたTECデータ
- 日本全国約1200点の受信点、衛星仰角30°以上の30秒値データを使用

本研究では

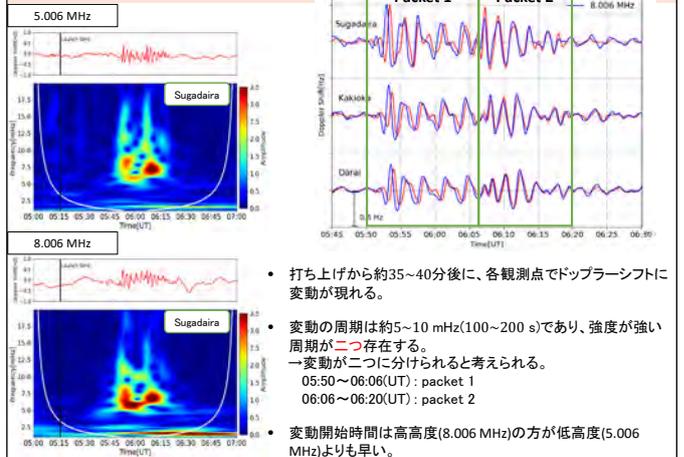
$VTEC = STEC \sin \phi$   
に変換したTEC値を使用している。

電子密度が最大となる高度は約300 km  
→TEC変動の影響を受けやすい

観測高度は約300 kmとする



### HF Doppler observation



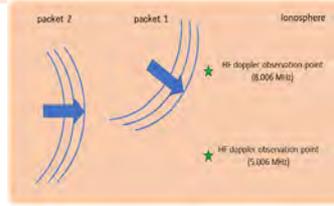
## Direction of propagation

### ドップラーシフトの高度別の変動

Table: 8.008 MHzと5.006 MHzの変動時間差

packet	Sugadaira	Kakioka	Oarai
packet 1	24 s	24 s	24 s
packet 2	5 s	6 s	9 s

- packet 1では音波は高高度から低高度へ伝搬
- packet 2では地面に対し水平に伝搬



### 変動の伝搬方向

異なる観測点で変動の遅延差から変動の伝搬方向を算出

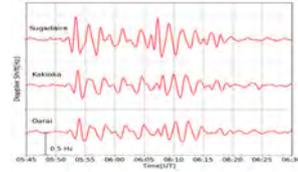


Table: 各パケットの観測点間での遅延差 (音平の方が早い)

packet	Kakioka	Oarai
packet 1 (Sugadaira)	20 s	37 s
packet 2 (Sugadaira)	50 s	71 s

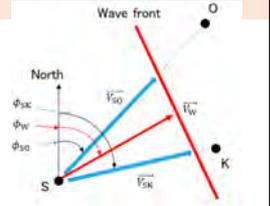
## Direction of propagation

観測点間の遅延差と観測点の方位角を用いて、

$$\tan \phi_W = \frac{V_{SO} \cos \phi_{SO} - V_{SK} \cos \phi_{SK}}{V_{SO} \sin \phi_{SO} - V_{SK} \sin \phi_{SK}}$$

と算出できる。ただし、方位角は北を0°とする。

$V_{SK}$ : SKへの速度  
 $V_{SO}$ : SOへの速度  
 $W$ : 音波の速度  
 $\phi_{SO}$ : SOからの方位角  
 $\phi_{SK}$ : SKからの方位角  
 $\phi_W$ : 音波の方位角  
 $d_{SO}$ : SOの距離  
 $d_{SK}$ : SKの距離  
 $V_{SO} = d_{SO}/t_{SO}$   
 $V_{SK} = d_{SK}/t_{SK}$



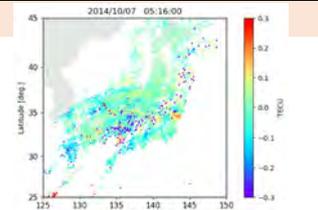
packet 1	→
Azimuth[°]	19.7
packet 2	→
Azimuth[°]	35.5

- パケット毎に伝搬してくる位置が異なる
- パケット1は高高度から、パケット2は低高度から伝搬してきている

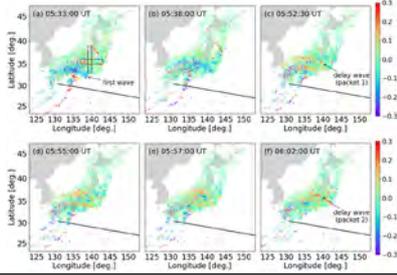


## GPS-TEC observation

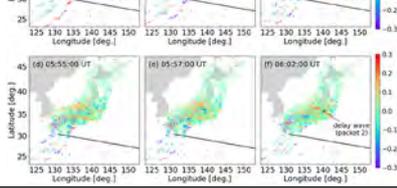
GPS-TEC観測でもH-IIAロケットによる変動が伝搬していることが確認できる。



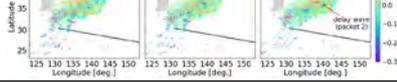
-First wave  
05:30:00 UTごろから発生し、北東方向に伝搬。  
主にTEC変動値がマイナス。



-Delay wave (packet 1)  
05:50:00 UTごろに発生し、北東方向に伝搬。  
プラス・マイナス両方の変動値を持っており、複数の波面構造から成る。



-Delay wave (packet 2)  
06:00:00 UTごろに見られ、北東方向に伝搬。明確な波面構造は見えない。



## GPS-TEC observation

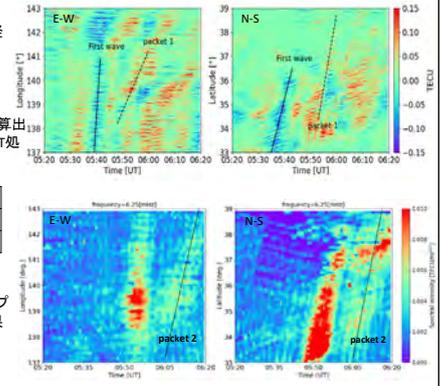
ケオグラムから各パケットの緯度・経度方向の速度を算出

各パケットの伝搬方向

- packet 1はTEC変動値データから算出
- packet 2はTEC変動値データにFFT処理したデータから算出

packet	packet 1	packet 2
GPS-TEC	18.2°	36.4°
HF Doppler	19.7°	35.5°

両方のパケットの伝搬方向はHFドップラー観測の結果とほぼ一致する結果となった。

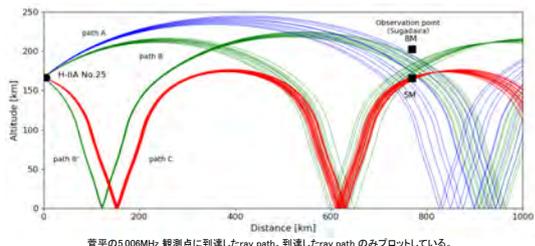


## Ray tracing

### Ray tracing

- ロケットの軌道のある位置を原点として、各観測点への音波の伝搬経路と伝搬時間を算出
- 推定したソース源からray tracingを行い伝搬パスを算出
- 今回は、Los Alamos National Laboratoryが公開しているコード(GeoAc)を用いる

- path A: ソース源から直接到達
- path B: 音波が地面で一回反射し、下から到達
- path B': 音波が地面で一回反射し、上から到達
- path C: 音波が地面で二回反射し到達



各パケットのソース源からray tracingを行い到達時間から伝搬パスを決定する。

## Ray tracing

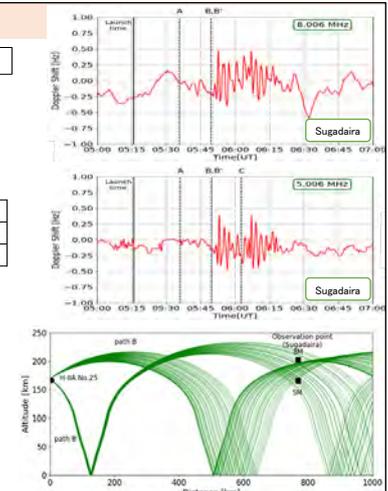
### packet 1 (05:50~06:00 UT)

各パスの到達時間から、伝搬パスはpath B or B'である(同じ観測高度では、B'の方がBよりも到達時間が約30秒ほど早い)。

path B'での高度別時間差			
packet 1	Sugadaira	Kakioka	Oarai
observed	24 s	24 s	24 s
ray tracing	26 s	23 s	25 s

- 観測値とray tracingでの、遅延差はどの観測所でも一致する結果となった。
- 高高度の変動の方が低高度のものよりも早い

✓ packet 1は音波がpath B'の伝搬経路で、到達したのにより発生した。



## Ray tracing

packet 2 (06:00~06:20 UT)

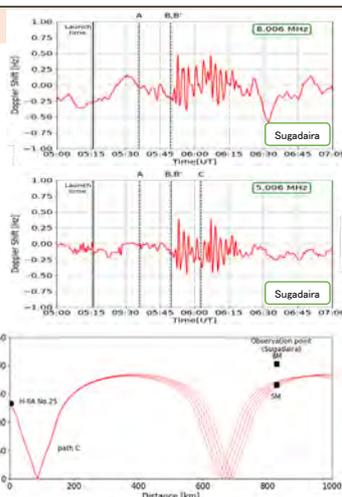
各パスの到達時間から、伝搬パスはpath Cである。音波もほぼ地面に平行で到達。

path Cの伝搬パスで低高度(5.006 MHz)の観測点に到達するものはあったが、高高度(8.006 MHz)到達するものはなかった。  
→GPS-TECでは見えているので音波 (Infrasound)は伝搬している

- ray tracingを行う際に大気のパラメーターや中性風を、高度方向は変化させているが水平には一律である
- 地面や海面で反射する際に、鏡面反射と仮定し算出している



パラメーターが二次元的に変化していないことや、鏡面反射以外を考慮していなかったため到達するpathはでてこなかったと考えられる。



## Conclusion

- HFドップラー観測とGPS-TEC観測を用いて、H-IIAロケット25号打ち上げ時の電離圏を観測し、打ち上げから約35~40分後に日本上空で変動が確認された。
- 得られた変動はpacket 1とpacket 2の二つに分けることができ、周波数の変動強度や伝搬方向などがそれぞれ異なる。
- packet 1では音波は地面で1回反射後に高高度から低高度へ伝搬、packet 2では音波は海面で2回反射後に地面に対し水平に伝搬していることが観測できて、ray tracingから得られる結果から確認した。