

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

宇宙測地学研究室 4年 古屋智秋

1. はじめに

近年、GPSを用いて電離層の電子数を観測することが注目されており、それを用いることで電離層の日変化や季節変化、さらには太陽活動による影響などもわかってきている。

本研究では、2006年1月24日午前10時33分(UT 1時33分)に種子島宇宙センターから打ち上げられたH-II Aロケット8号機が電離層を通過する時の電離層の電子数の変化に注目し、H-II Aロケットが電子に与えた影響について検証する。

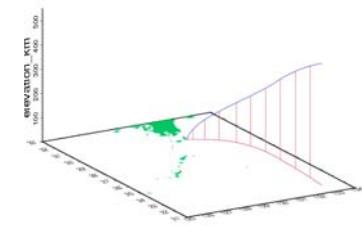


図1 H-II Aロケット8号機の軌道
赤の縦線は50秒毎の高度 (提供JAXA)

2. 観測方法

GPSから周波数の異なる電波が発信されており、それは電離層の電子の影響を受けて遅らされる。その2つの電波の遅れは電子密度に比例することから、衛星と受信機間の全電子数(TEC)を求める。

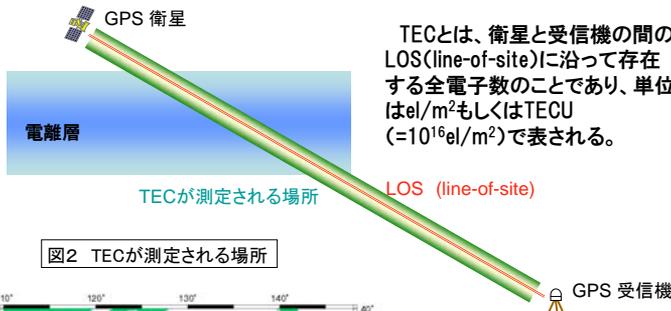


図2 TECが測定される場所

TECとは、衛星と受信機間のLOS(line-of-site)に沿って存在する全電子数のことであり、単位は el/m^2 もしくはTECU ($=10^{16}\text{el}/\text{m}^2$)で表される。

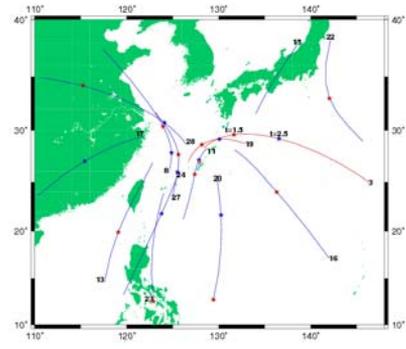


図3 伊是名(沖縄県)のGPS局で観測できる電離層(300km)の位置(2006年1月24日)

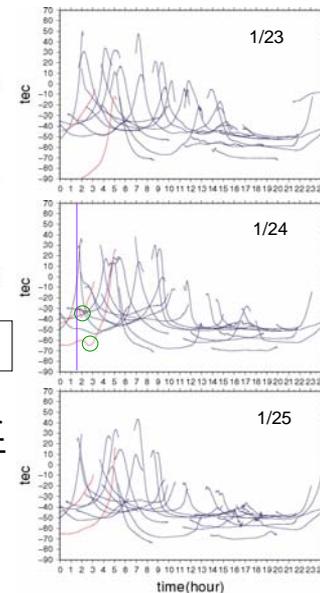


図4 伊是名で求めたTECの変化

H-II Aロケット発射前日、当日、翌日の伊是名のGPSで求めたTECを見ると、1月24日のみUT 2.0後に明らかなTECの減少が見られる。これはH-II Aロケットによる影響だと考えられる。この研究では特に減少の大きかった3番衛星のデータを使った。

なお、このTECの減少量は、本来のTECの絶対値を考えるとH-II Aロケットの軌道近傍における電離層電子がほぼ完全に消失していることを示している。

3. 観測結果

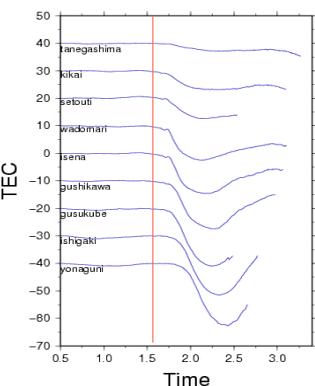


図5 発射前後の日のTECの平均を発射当日のTECとして、そのTECと観測されたTECとの差

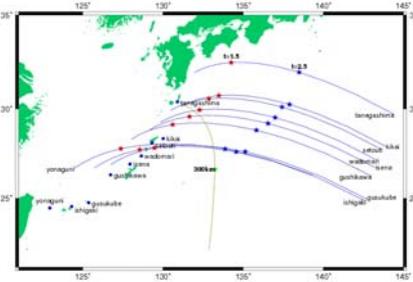
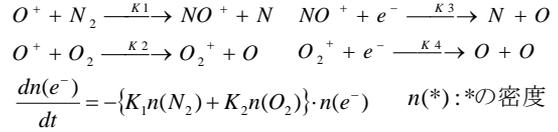


図6 各GPS局で3番衛星を使って観測できる電離層(300km)の位置とロケットの軌道

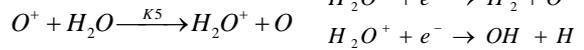
図5・6から、南で観測すればするほどTECの減少が大きくなっていることがわかる。これは、H-II Aロケットが最も電離層の電子の密度の濃い場所(300km)を通過するのが、GPSで観測できる場所よりも南であるからと考えられる。

4. モデル計算

電離層内の化学反応



通常、電子の消失は上の式のような化学反応式と消失速度になる。しかし、H-II Aロケットから噴射される水蒸気が加わると次のような反応も起こり、消失速度が速くなる。



$$\frac{dn(e^-)}{dt} = -\{K_1 n(N_2) + K_2 n(O_2) + K_5 n(H_2O)\} \cdot n(e^-)$$

この消失速度の式で表されている $K_5 n(H_2O)$ は、 $K_1 n(N_2)$ や $K_2 n(O_2)$ と比較して2桁ほど値が大きいため、通常の場合に比べて瞬時に電子の消失が起こる。これにより太陽の紫外線による電子の生成が間に合わないため、電離層の電子数が減少してしまう。

水蒸気の拡散

H-II Aロケットから噴射された水蒸気の密度 n は、球対称に拡散していくと考えると以下の式で拡散していく。

$$n(r, t) = \frac{S}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp(-r^2/4Dt)$$

D : 拡散係数 (m^2/s)

S : 排出される分子数 (個/s)

r : 距離 (m)

t : 時間 (s)

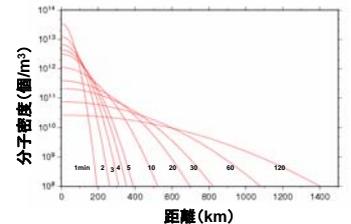


図7 高度350kmでのH-II Aロケットから噴射された水蒸気分子の拡散の様子

5. 観測結果との比較

消失速度と水蒸気の拡散、そして太陽の紫外線による生成を考えると以下の式が成立し、計算結果は図8のようになる。なお、拡散係数はロケットの噴射高度と電子密度を求めたい場所の高度を1:2に内分した高度を使用し、H-II Aロケットは水蒸気の噴射の激しい第1段エンジンを10秒毎に噴射させながら上昇したと考えた。

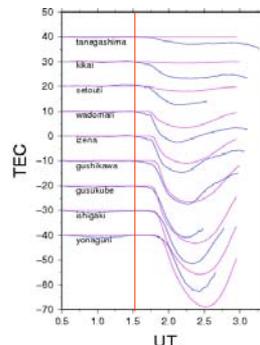


図8 モデル計算によるTECの減少量(紫)
観測結果によるTECの減少量(青)

$$\frac{dN(z, t)}{dt} = \beta_{\text{eff}} \cdot \frac{N_{\text{all}}}{h_w} \exp\left\{\frac{1 - \xi - \exp(-\xi)}{2}\right\} - (\beta_{\text{eff}} + \beta_{H_2O}) \cdot N(z, t)$$

$N(z, t)$: 電子密度(el/m^3) $\xi = (z - h_e)/H$
 $\beta_{\text{eff}} = K_1 n(N_2) + K_2 n(O_2)$ z : 高度(m)
 $\beta_{H_2O} = K_5 n(H_2O)$ N_{all} : 1m^2 あたりの全電子数 (TECU)
 h_w : 電離層の層の厚さ (km)
 h_e : 電子密度の最も濃い高度 (km)
 H : 電離層の最下層の高度 (km)

6. 結論・課題

当研究からH-II Aロケットの打ち上げは、ロケット軌道近傍の電離層の電子をほぼ完全に消失させており、その消失は簡単なモデル計算で表されることがわかった。

今後の課題としては、拡散係数を正確にモデル計算にとりいれ、LOSIに沿ったTECだけでなく電離層の各部分での密度を求めることが課題である。

また、電離層の電子がほぼ完全に消失ということは、今まで電離層に反射されたり、吸収されたりした宇宙からの電波が地上に届くということである。これを利用することで宇宙空間でなければ観測できない電波を地上でもほんの数時間だけだが観測できるようになる。この電離層消失を利用した研究・観測もできるのではないだろうか。

7. 参考文献

- [1] Michael Mendillo, Gerald S.Hawkins, John A.Klobuchar, 1975, A Sudden Vanishing of the Ionospheric F Region Due to the Launch of Skylab, Journal of Geophysical Research, vol.80, p2219-2228
- [2] Eric Calais, J.Bernard Minster, Michelle A.Hofton, Michael A. H.Hedlin, 1998, Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements, Geophysical Journal International, vol.132, p191-202
- [3] GEONET http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_top.html
- [4] GPS Total Electron Content <http://stepgs.kugi.kyoto-u.ac.jp>
- [5] 宇宙航空研究開発機構 JAXA <http://www.jaxa.jp/>
- [6] 大澤弘之・黒田泰弘・久保園晃・西條寿雄・柴藤洋二・梶谷利男・的川泰宣・山田誠・和地英磨, 2003, 新版日本ロケット物語, 誠文堂新光社