

H-IIA ロケットの排気による電離圏の消失と電波天文への応用

日置幸介、古屋智秋¹

北海道大学理学部地球科学科（¹現在 国土地理院測地観測センター）

要旨 上昇する液体燃料ロケットから排出される大量の中性分子（水蒸気等）によって、電離圏中で局地的に電子が消失することが知られている。2006年1月24日に種子島から打ち上げられた H-IIA ロケットによって生じたこのような電離圏の「穴」の出現と修復を、GPS 全国稠密観測網によって全電子数の変化として観測した。穴の成長は、ロケットからの水分子の拡散と電子との化学反応を考えた簡単なモデルで説明できる。半径数百キロにわたる地域で電離圏の実質的な消失は一時間程度継続し、低周波数帯での地上電波天文観測への利用可能性も考えられる。

1. はじめに

全地球測位システム(Global Positioning System, GPS) 衛星から発射されている二つの搬送波 L1 (~1.5 GHz) L2 (~1.2 GHz) を地上で受信した際の位相差は、視線に沿って電離圏電子数を積分した全電子数(Total Electron Content, TEC) を反映している。GPS による TEC の時間空間的な変化の計測は、移動性電離圏擾乱 (Saito *et al.*, 2002)、太陽面爆発に伴う TEC の急増 (Zhang and Xiao, 2005)や日食に伴う TEC の急減 (Afraimovich *et al.*, 2002)、磁気嵐時の scintillation (Mitchell *et al.*, 2005)などの観測を通じて超高層大気科学の研究に貢献している。

ロケット排気による局地的な電子密度の減少は、1959年のヴァンガード II 打ち上げ時の電離圏 sounding 観測で初めて見出された(Booker, 1961)。また Mendillo *et al.* (1975)は、静止衛星の電波のファラデー回転観測から、Skylab 打ち上げに伴う急激な TEC の減少を見出し、ロケット排気中の水および水素分子と電子との解離性再結合モデルでそれを説明した。最近では Space Shuttle の軌道修正用エンジンを噴射して意図的に作り出した電離圏の穴の時間発展の観測研究が盛んに行われている(e.g. Bernhardt *et al.*, 2005)。

これらの観測は、カメラによる大気光撮像や Incoherent scatter radar による電子密度の高度分布の推定等、特殊装置を装備した地上局で行われてきた (Mendillo *et al.*, 1987; Bernhardt *et al.*, 1998)。一方、世界各地で地殻変動観測の目的で GPS 連続観測局網が整備拡大されており、ロケットによる電離圏擾乱も時間空間的に十分な分解能および coverage で捉えられる時代になった。かつてロケット打ち上げに伴う超低周波音波が Donn *et al.* (1968)によって観測され、それと類似の音波擾乱が TEC 変化として GPS で観測されている(Calais and Minster, 1996)が、本研究はこのような「物理的」擾乱ではなく電離圏の電子消失という「化学的」擾乱を稠密 GPS 網で観測した例を紹介する。

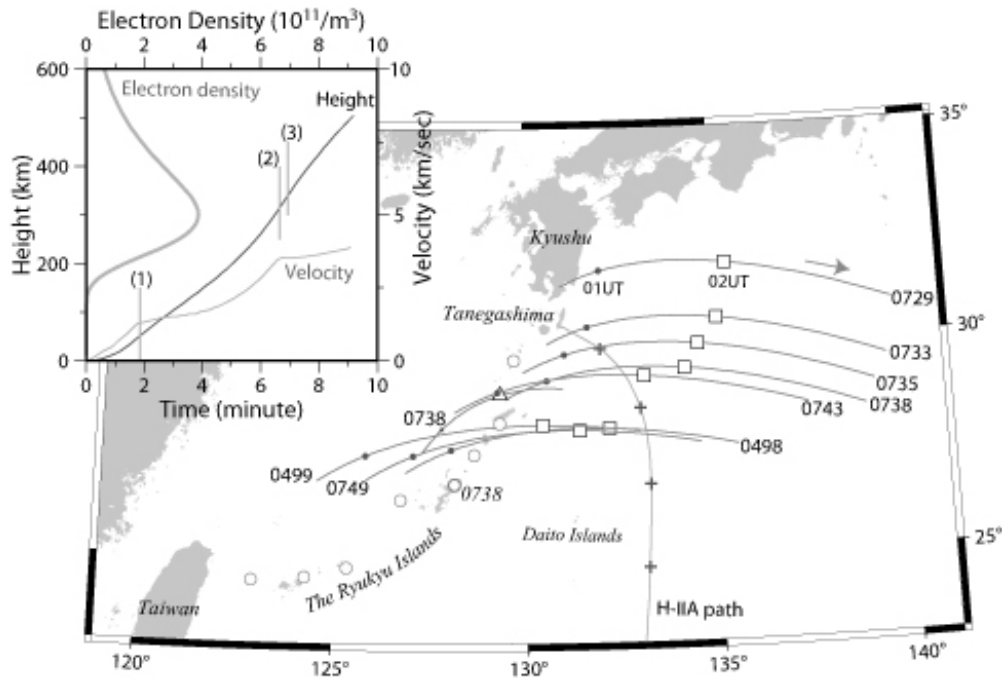


Figure 1. Eight gray curves with time marks running parallel indicate trajectories of subionospheric points (ground projections of intersections of line-of-sights and a hypothetical surface as high as 300 km) of Satellite 3 from GPS stations in the Ryukyu Islands. The trajectories cover the period shown in Fig. 4. Numbers denote the IDs of the GPS sites (locations shown as open circles). For 0738, an additional trajectory is shown for Satellite 19 (open triangle is the 02 UT time mark). The H-IIA rocket was launched from Tanegashima, and ascended southward along the gray track (crosses show positions at altitudes 100, 200, 300, and 400 km). The height and velocity of the rocket are shown as functions of time in the inset together with the electron density profile drawn using the equation (1) in the text. The three epochs in the inset show (1) the solid fuel booster stop (111 seconds), (2) first engine stop (399 seconds), and (3) second engine start (416 seconds).

2. データ解析

液体水素を燃料とする国産ロケット H-IIA の八号機は、種子島から 2006 年 1 月 24 日 10:33JST に打ち上げられ、Advanced Land Observation Satellite (ALOS、衛星「だいち」) を高度約 700 km の極軌道に投入した。国土地理院の GPS 連続観測網 GEONET (GPS Earth Observation Network)では千局を超える受信局で L1/L2 両周波数の搬送波位相を三十秒ごとに記録しており、それらのデータは www.terras.gsi.go.jp から取得できる。南西諸島の GPS 局と衛星 3 (および衛星 19) を結ぶ視線は、ロケット上昇の軌跡付近にあり、排気による電離圏の穴の観測に相当である(Fig. 1)。

0738 局 (沖縄県大宜味) から様々な GPS 衛星で観測した TEC の 24 時間分の時間変化を Fig.2a に示す。打ち上げ直後に衛星 3 と 19 で TEC が急激に減少している。Fig.2c に衛星 3 の TEC 時系列を前日および翌日の同じ時刻のものと比較する。これらを二次の多項式でモ

デル化して平均したものを打ち上げ当日の予想 TEC 変化と仮定し、実際の値との差を穴の形成に伴う TEC 異常と考えた(Fig.2b)。

京都大学齊藤昭則氏が www-step.kugi.kyoto-u.ac.jp/~saitoua/GPS_TEC において GEONET データから推定して公開している TEC 変化によると、当日打ち上げ時刻の鉛直方向の TEC は約 10 TEC unit (TECU, 1TECU = 10^{16} electrons/m²)である。Fig.2b では打ち上げ直後の TEC 減少は 10 TECU を超えており、「穴」の言葉どおり TEC 減少が絶対量に匹敵することを示す。

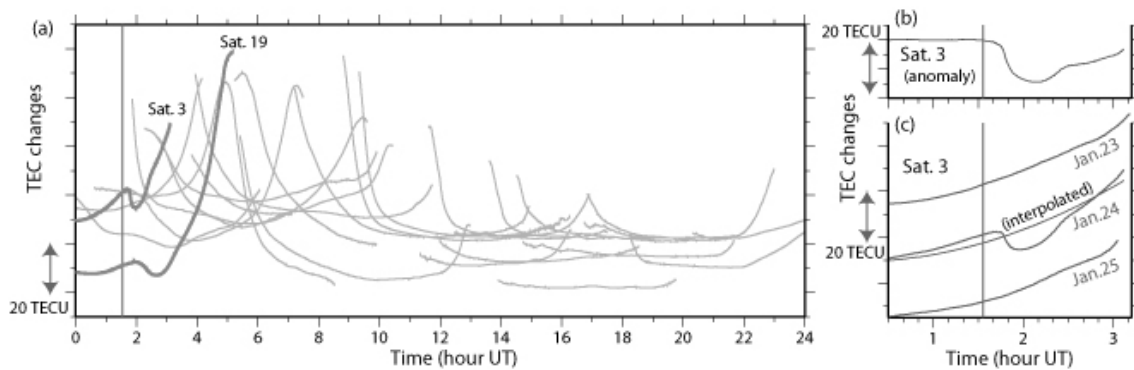


Figure 2. (a) Raw time series of TEC on January 24 observed at 0738. Curves show TEC obtained with different GPS satellites, and their concave patterns reflect changes of satellite elevation. Satellites 3 and 19 show unusual TEC decrease shortly after the launch at 01:33 UT. In (b) we show the anomalous component of Satellite 3 TEC changes isolated as the difference from the expected curve, the average of the curves in the same period on the previous and next days (c).

3. 電離圏消失のメカニズム

3.1 打ち上げ前の状態

昼側の電離圏では、太陽の紫外線や x 線による酸素原子の電離に代表される様々なプロセスで電子が絶えず生成されている。その率 f は高度 z と太陽天頂角 θ に依存する。一方 O^+ と電子が N_2 や O_2 を介して再結合する反応は単位体積中の電子の個数 $n(e^-)$ に比例する。

$$\frac{dn(e^-)}{dt} = -\beta_{eff} \cdot n(e^-) + f(z, \theta) \quad (1)$$

Mendillo *et al.*(1975)によると、係数 β_{eff} は高度 350 km で $\sim 1.98 \times 10^{-5}$ である。 θ に伴う f の時間変化によって TEC は日変化する。またその高度 z への依存性が電子密度の高度分布を決め、以下の式で近似されるような Chapman 分布(Fig.1 inset)が生じる。

$$n(e^-) \propto \exp \frac{1 - \xi - \exp(-\xi)}{2} \quad \xi \equiv \frac{z - h_c}{H} \quad (2)$$

h_c は電子密度が極大になる高度 (沖縄や山川での電子密度の高度分布は情報通信研究機構

wdc.nict.go.jp で提供されている ionogram から推察できるが、本研究では 300 km とする)で、 H は 65 km (Calais *et al.*, 1998)とした。また高さ z にそって $n(e^-)$ を積分して得られる鉛直 TEC が 10 TECU となるように全体を scaling した。また今回議論する時間幅では f と $\beta_{\text{eff}} \cdot n(e^-)$ が等しい、すなわちロケット打ち上げがなければ $n(e^-)$ は定常状態にあると仮定した。

ロケット排気は大量の中性分子(H-IIA の場合ほとんどが H_2O)を超高層大気に持ち込む。それらは触媒として O^+ と e^- 間の再結合を大幅に加速する。本研究ではその過程を二つの過程、すなわち排気からの H_2O 分子の拡散、それと同時に進行する e^- との解離性再結合でモデル化し、穴を中心とするある範囲の大気中での電子密度の推移を数値計算する。そして Fig. 1 に示す GPS 局と衛星 3 のそれぞれの組み合わせで TEC の時間変化を計算した。

3.2 H_2O の拡散

ロケットから排出された H_2O 分子は大気中に高速で拡散してゆく。気体の初速がゼロ(排気速度とロケットの対気速度が等しい)とすると、点源から r の距離における分子の密度は以下の式で表される。

$$n(r, t) = \frac{S_0}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp \frac{-r^2}{4Dt} \quad (3)$$

ここで t は排出後の経過時間、 S_0 は排出された分子の総数、 D は拡散係数である。実際の排気は第一段ロケットのエンジン燃焼中は、後ろ向きの初速を持つ。H-IIA ロケットの比推力(specific impulse)が 429 秒なので(大澤, 2003)、排気のロケットに対する相対速度は 4 km/sec 程度であろう。ロケットがこの速度を達成するのは高度 300 km 付近 (Fig.1)なので、それ以下では排気は後ろ向き絶対速度を持つのである。しかし諸条件から拡散に先立つ無衝突流での水分子の典型的な移動距離は数十キロを越えないと思われる(Bernhardt, 1979b)ので、本研究では初速を無視した。

実際の排気は連続的であるが、計算を簡単にするために軌道に沿って十秒間隔においた点源から拡散した水分子の数を合計して $n(\text{H}_2\text{O})$ を求めた。一秒あたりの排気質量は H-IIA の推力 $1.073 \times 10^6 \text{N}$ (大澤, 2003)を比推力で割れば得られる。これと H_2O 分子の質量から、十秒あたりに排出される水分子の数を 8.5×10^{28} とした。

(3) 式は等方的な拡散を仮定しているが、実際の拡散係数 D は高度に依存する(空気の薄い上空ほど速く拡散)。本研究ではこのような非等方拡散を二つの方法で近似した。最初の方法(Model 1)は、 $n(\text{H}_2\text{O})$ を計算する地点と拡散源との中間高度における拡散係数 D を用いる簡便なものである。第二の方法(Model 2)では、Bernhardt (1979a)が与えた非等方拡散の近似式を用いた。なお任意の高度における拡散係数 D は高度 250, 350, 450 km における値 2, 12 and $67 \text{ km}^2/\text{second}$ (Mendillo *et al.*, 1975)から内挿した。なお第一段エンジンは高度 300 km で切り離され、第二段エンジンが点火される。後者の推力が前者の十分の一以下であること

から、本研究では高度 100-300 km における第一段ロケットの排気のみを考慮した。Fig.3a は、七つの epoch で Model 1 から計算された H₂O 分子の拡散の snapshot である。Model 2 から計算されたもの (Fig.3c) は初期においてより速い上方への拡散を示す。

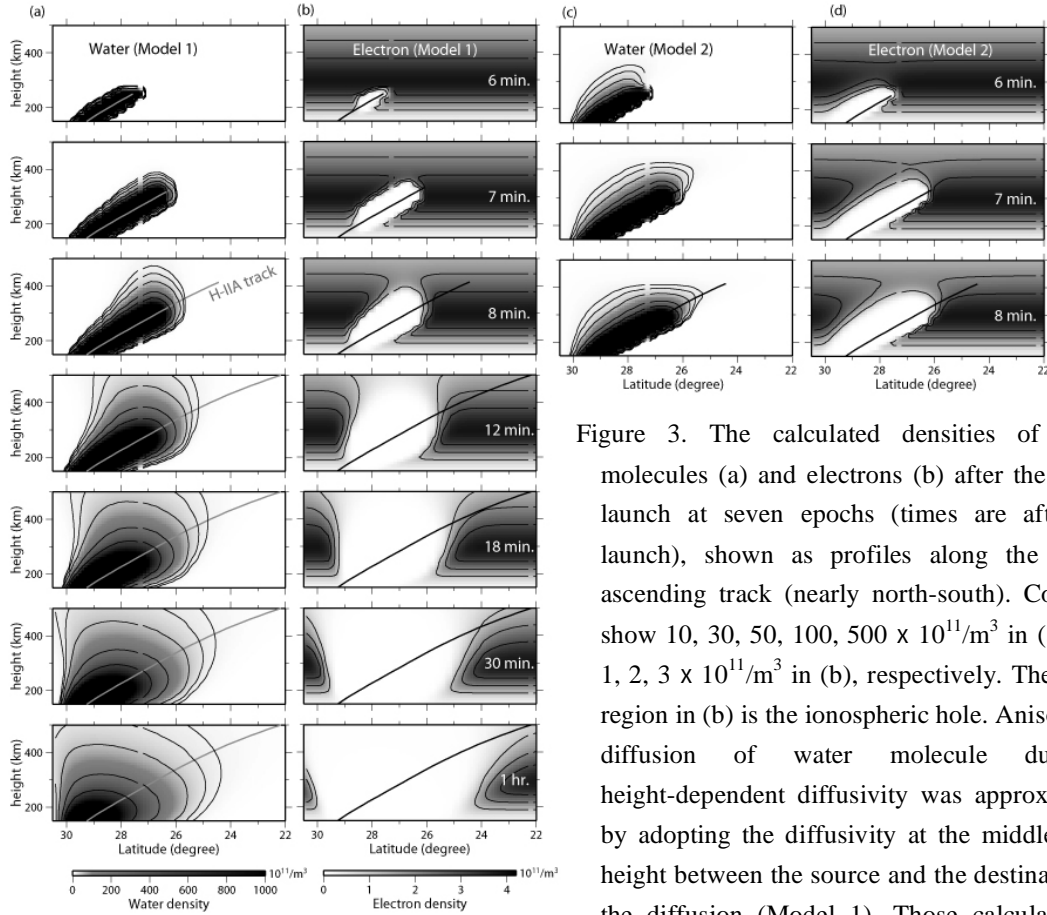


Figure 3. The calculated densities of water molecules (a) and electrons (b) after the H-IIA launch at seven epochs (times are after the launch), shown as profiles along the H-IIA ascending track (nearly north-south). Contours show 10, 30, 50, 100, 500 $\times 10^{11}/\text{m}^3$ in (a), and 1, 2, 3 $\times 10^{11}/\text{m}^3$ in (b), respectively. The white region in (b) is the ionospheric hole. Anisotropic diffusion of water molecule due to height-dependent diffusivity was approximated by adopting the diffusivity at the middle point height between the source and the destination of the diffusion (Model 1). Those calculated by equations of Bernhardt (1979a) for the first three epochs are given in (c) and (d).

3.3 穴の形成と全電子数の計算

ロケットが持ち込んだ水分子は O⁺イオンと電荷をやりとりして分子イオン H₂O⁺となるが、それらと e⁻の解離性再結合が電子を枯渇させる。(1)式の右辺に電子密度の減少を示す第三の項を加えて、ロケット打ち上げ後の電子密度 $n(e^-)$ の時間変化は

$$\frac{dn(e^-)}{dt} = -\beta_{eff} \cdot n(e^-) + f(z, \theta) - \beta_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n(e^-) \quad (4)$$

と表される。電子の減少率を表す $\beta_{\text{H}_2\text{O}}$ は水分子密度に比例するが、ここでは Mendillo *et al.* (1975)による $\beta_{\text{H}_2\text{O}} = 2.2 \times 10^{-15} \times n(\text{H}_2\text{O})$ を仮定する。

電子密度の時間変化をモデル化するため、本研究では水平に 1500 km x 1500 km、上下に

高度 150-700 km の大きさの空間を考えて H-IIA の軌跡をすっぽりと覆い、水平に 30 km きざみ、上下に 10 km きざみのグリッドをとった。ロケット排気から拡散してきた $n(\text{H}_2\text{O})$ 等を用いて、グリッド点での $n(e^-)$ を(4)式に従って 15 秒ごとに時間発展させた。Fig.3b,d に示す $n(e^-)$ の空間分布の snapshot から、電離圏の穴が急速に広がる様子がわかる。

GPS で観測された TEC 変化と比較するため、電離圏の穴を横切る 3 番衛星と八個の GPS 局を結ぶ視線に沿った TEC の一時間半にわたる変化を 30 秒毎に計算した。ここでは、(1) 放送軌道要素を用いて 3 番衛星の時々刻々の位置を地球固定座標系で求め、(2) 視線にそった $n(e^-)$ の値を高さ 10 km きざみで最寄りのグリッド点での値から内挿し、(3) それらを視線に沿って積分して slant TEC を求める、という手順で計算をすすめた。

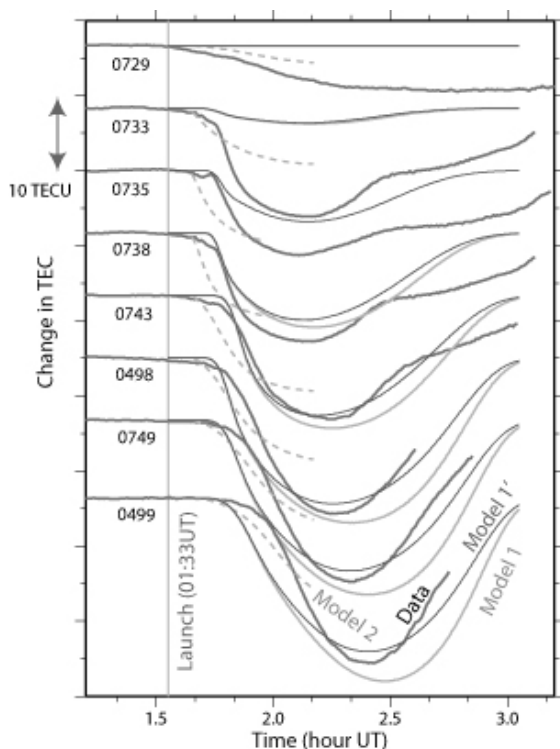


Figure 4. Dark gray curves show anomalous changes in TEC at eight GPS stations (Fig. 1) over two hours period including the launch time. Light gray curves show TEC changes simulated by two different models for the anisotropic water diffusion (Models 1 and 2). In Model 1' curves, natural decay of the hole with a time constant of 1.5 hour was added to those by Model 1.

Fig.4 は、計算された TEC 異常（計算された TEC と打ち上げ前の状態での TEC との差）を、Model-1,2 の水分子拡散モデルを用いて計算したものである。Fig.2b,c と同様に求めた八つの GPS 局での TEC 異常も示す。Model 2 は Bernhardt (1979a) の式が有効な最初の十分間のみ示したが、この範囲内では Model 2 がよりよいフィットを示す。極小値を示したあとの TEC の回復は、主に GPS 衛星の移動によって視線ベクトルが穴から離れてゆくことを反映しているが、穴そのものの減衰の影響も多少反映している。全般に、簡単なモデルにかかわらず、観測値と計算値はかなり良く一致しているといえよう。

4. 議論と結論

Fig.4を良く見ると、南西の方にあるGPS局で観測されたTEC減少はモデルより短時間で回復していることがわかる。本研究のモデルにあるいくつか弱点のひとつが食い違いの原因かもしれない。まず我々は第二段エンジンの影響を無視しているが、それを取り入れることはTEC減少のより長い継続につながり、Fig.4の食い違いは解決しない。(4)式の右辺第二項は太陽からの電磁波による穴の修復を意味するが、その効果に高度依存性等を導入して近辺度を向上させても、そもそも右辺第三項が圧倒的に大きく問題の解決にはならない。

Fig.4でModel 1'とした曲線は、穴の外からの電子の流入 (Fig.3b,dで黒い部分から白い部分への電子の流れ) による修復作用を適当に仮定(ここでは打ち上げ以前の状態との電子密度の差が90分で $1/e$ になるように時定数をとった)してModel 1の曲線を修正したものである。電子の流れは磁場方向に生じるため、穴の回復速度も地磁気方向(このあたりでは伏角 $\sim 43^\circ$)に支配される。たとえば、赤道上空に出来た電離圏の穴は電子が水平移動できるためより速く修復されるだろう。ペルー上空でスペースシャトルの軌道修正用のエンジンを噴射して人為的に電離圏の穴をつくる実験において、Bernhardt *et al.* (2001) は穴がほぼ10分で自然回復されたことを見出した。これは今回観測された穴の回復速度よりかなり速い。

最後に、穴の利用について述べる。Papagiannis and Mendillo (1975)は、電離圏の穴を宇宙からの低周波電波を受信する「窓」として利用することを提唱した。また Bernhardt and da Rosa (1977) は局地的に電子密度の下がった部分をレンズとした屈折電波望遠鏡の可能性を検討している。実際に Mendillo *et al.* (1987)は、スペースシャトルの軌道修正用エンジンシステムから中性分子を噴射することで部分的に電離圏を消失させ、銀河系からの 1.7-2.7 MHz の電波の強度スペクトルをオーストラリアの地上局で取得する実験に成功している。その実験で噴射されたガスの重さは 244 kg であるが、これは H-IIA ロケットの第一段エンジンのわずか 1 秒程度の噴射量に過ぎない。すなわち H-IIA の打ち上げによって生じる電離圏の消失によって生じる低周波電波の窓は、より長寿命かつより透明であろう。H-IIA ロケットは今後も毎年数回のペースで打ち上げられるだろう。たとえば今回生じた電離圏の穴の直下には沖縄県の大東諸島が含まれる(Fig.1)が、これらの島に簡単な地上観測局を設置すれば年数回低周波電波天文観測が行えるだろう。本格的な観測は電離圏の外、たとえば月の裏側や月周回軌道からの観測(Novaco and Brown, 1978)がしばしば検討されるが、ロケット打ち上げに合わせた地上観測もそれらのローコストな代用品として一考に価する。

謝辞 H-IIA 8号機の上昇軌跡データはJAXAの島田政信氏を通じて入手した。北海道大学のElvira Astafyeva氏には電離圏の物理に関するアドバイスをいただいた。本稿の英語版(Furuya and Heki, 2008)はEarth Planets and Space誌に掲載されている(Vol.60, pp.235-239, 2008)が、査読者であるPurdue大学のEric Calais氏に有益なコメントをいただいた。

参考文献

- Afraimovich, E.L., E.A. Kosogorov, and O.S. Lesyuta, Effects of the August 11, 1999, total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network, *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, **64**, 1933-1941, 2002.
- Bernhardt, P.A., Three-dimensional, time-dependent modeling of neutral gas diffusion in a nonuniform, chemically reactive atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **84**, 793-802, 1979a.
- Bernhardt, P.A., High-altitude gas releases: transition from collisionless flow to diffusive flow in a nonuniform atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **84**, 4341-4354, 1979b.
- Bernhardt, P. and A. V. da Rosa, A refracting radio telescope, *Radio Sci.*, **12**, 327-336, 1977.
- Bernhardt, P.A., J.D. Huba, W.E. Swartz, and M.C. Kelley, Incoherent scatter from space shuttle and rocket engine plumes in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **103**, 2239-2251, 1998.
- Bernhardt, P. A., J.D. Huba, E. Kudeki, R.F. Woodman, L. Condori, and F. Villanueva, Lifetime of a depression in the plasma density over Jicamarca produced by space shuttle exhaust in the ionosphere, *Radio Sci.*, **36**, 1209-1220, 2001.
- Bernhardt, P.A., P.J. Erickson, F.D. Lind, J.C. Foster, and B.W. Reinisch, Artificial disturbances of the ionosphere over the Millstone Hill Incoherent Scatter Radar from dedicated burns of the space shuttle orbital maneuver subsystem engines, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JA010795, 2005.
- Booker, H.G., A local reduction of F-region ionization due to missile transit, *J. Geophys. Res.*, **66**, 1073-1079, 1961.
- Calais, E. and J. B. Minster, GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1897-1900, 1996.
- Calais, E., J.B. Minster, M.A. Hofton, and H. Hedlin, Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements, *Geophys. J. Int.*, **132**, 191-202, 1998.
- Donn, W. L., E. Posmentier, U. Fehr, and N.K. Balachandran, Infrasound at long range from Saturn V, 1967, *Science*, **162**, 1116-1120, 1968.
- Furuya, T. and K. Heki, Ionospheric hole behind an ascending rocket observed with a dense GPS array, *Earth Planets Space*, in press.
- Mendillo, M., G. S. Hawkins, and J. A. Klobuchar, A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab, *J. Geophys. Res.*, **80**, 2217-2225, 1975.
- 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.
- Mitchell, C.N., L. Alfonsi, G. De Franceschi, M. Lester, V. Romano, and A. W. Wernik, GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2004GL021644, 2005.
- Novaco, J.C. and L. W. Brown, Nonthermal galactic emission below 10 megahertz, *Astrophys. J.*, **221**, 114-123, 1978.
- 大澤弘之監修、新版日本ロケット物語、誠文堂新光社、pp.277, 2003.
- Papagiannis, M.D. and M. Mendillo, Low frequency radio astronomy through an artificially created ionospheric window, *Nature*, **255**, 42-22, 1975.
- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki, and M.C. Kelley, Observations of traveling ionospheric disturbances and 3-m scale irregularities in the nighttime F-region ionosphere with the MU radar and a GPS network, *Earth Planets Space*, **54**, 31-44, 2002.
- Zhang, D.H. and Z. Xiao, Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JA010738, 2005.