

GNSS-TEC 観測によるミサイル/ロケットの推力の評価

Estimation of thrust powers of missiles/rockets by GNSS-TEC observations

橋本繭未・日置幸介

Mayumi Hashimoto & Kosuke Heki

北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

Dept. Natural Hist. Sci., Graduate School of Science, Hokkaido University

Abstract

Water vapor molecules from ascending rockets/missiles often cause ionospheric electron depletion, which could be detected as changes in total electron content (TEC) by ground Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers. Here we present six cases of North Korean rockets/missiles launched in 1998-2017 and compare them with three examples of H2A launches from Japan. We found that the TEC drops are proportional to the background TEC for the same type of rockets and classified the past cases into three groups using the ratios of TEC drops to the original TEC, i.e. the H2A class, the Taepodong-2 class, and the Taepodong-1 class. Rockets/missiles from North Korea 2009-2016 all belonged to the Taepodong-2 class. In 2017, two inter-continental ballistic missiles (ICBM) were launched from North Korea in July and in November. The first one showed ionospheric electron depletion comparable to the Taepodong-2 class cases, but the second missile much larger TEC drops possibly reflecting a significant technological progress within 2017.

1. はじめに

過去 20 年の間、北朝鮮（朝鮮民主主義人民共和国）によるミサイル発射実験がしばしば行われてきた。2017 年には新型の弾道ミサイルが相次いで発射され、その中にはアメリカも射程圏内にはいると推定される大陸間弾道ミサイル（Inter-continental ballistic missile, ICBM）も含まれる。しかし発射当事国の北朝鮮からは、ミサイルの発射時の映像などが公開されるものの、ミサイルの軌道や仕様の詳細情報は公表されていない。一方アメリカおよび日本の政府は軍事レーダーや人工衛星を使ってこれらのミサイルを捕捉している可能性が高いが、一般に公開される情報は限られている。

ロケット打ち上げやミサイル発射直後に電離圏の電子が減少することが知られてい

るが、それらの排気ガスとして電離圏に持ち込まれた水蒸気と電離大気の化学反応が原因と考えられている(Mendillo *et al.*, 1975). 我が国でも、一般に公開されている GNSS (Global Navigation Satellite System)の稠密観測網である国土地理院の GEONET (GNSS Earth Observation Network)データを使い、様々なロケット打ち上げやミサイル発射に伴う電離圏全電子数 (Total Electron Content, TEC) の変化が報告されている. 例えば Furuya & Heki (2008)は、H2A ロケット打ち上げに伴う TEC 減少を報告した. また 1998 年と 2009 年に北朝鮮から発射されたテポドン 1 号と 2 号ミサイルの二段目のエンジンがもたらした TEC 減少が Ozeki & Heki (2010)によって、また 2012 年に発射された銀河 3 号の二段目と三段目による TEC 減少が Nakashima & Heki (2014)によって報告されている. 2016 年の光明星 4 号ミサイルの事例は、日置他(2016)だけでなく韓国の GNSS 網による観測データが Ssessanga *et al.* (2017) によって解析されている.

本研究では、これらの過去の事例について TEC の相対的な減少量を整理し、それらの大きさからミサイルの推力を推測する手法を探る. また 2017 年に北朝鮮から二度にわたって打ち上げられた ICBM がもたらした TEC 減少を推定して過去の事例と比較し、それらの推力等に関する情報の取得を試みる.

2. GNSS-TEC 観測データの解析手法

GNSS-TEC 観測の一般的な説明は日置他(2010)に詳しい. 本研究では GNSS として米国の GPS とロシアの GLONASS を用いた. ダウンロードした生データに含まれる L1 と L2 の搬送波位相に波長をかけて距離に換算し、その差をとったもの (本論文中では L4 と呼ぶ) の時間変化は、衛星視線方向の TEC (Slant TEC, STEC) の変化に比例する. しかしその値には電離層の状態変化だけではなく、衛星仰角の変化によって視線が電離層を通過する距離が変わることに伴う変化が含まれる. また、その絶対値には搬送波特有の整数値バイアス、および周波数間バイアスが含まれる. Ozeki & Heki (2010)のように GEONET 全体を用いてミサイル・ロケットによる TEC 減少の分布を求める際は、数時間程度の STEC の時系列から、時間の多項式で表した鉛直 TEC (Vertical TEC, VTEC) の変化とバイアスを同時に推定するという手順を取っている.

本研究では、あらかじめバイアスを除いた STEC を VTEC に変換した上で、VTEC 時系列に時間の多項式を当てはめた. まず、搬送波位相から求めた L4 を擬似距離から求めた L4 に合わせ込んだ. 擬似距離の周波数間バイアスである DCB (Differential Code Bias)は衛星や受信機の L1 と L2 の経路長の差によって生じる時間差である. 本研究では GNSS 衛星の DCB を、ベルン大学の解析センター(<http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>)が提供している電離圏モデル(Global Ionospheric Model, GIM)を与える IONEX ファイルのヘッダー情報から抽出して用いた. GEONET 局の DCB はそこで与えられていないため、Minimum Scalloping 法を用いて独自に推定した(Rideout & Coster, 2006). バイアスを除去した STEC に視線の電離圏への入射角の余弦をかけると VTEC が得られる. 電離圏は高

度 300 km の薄層モデルを仮定した。時間の多項式を推定する際には、打ち上げ前後の数時間程度のデータから、ロケット/ミサイルの影響が出るとされる打ち上げから一時間程度のデータを除いた部分を用いた。観測された VTEC のレファレンス曲線（推定された多項式）からの差を VTEC 減少量と定義した。

本研究では日本または北朝鮮から打ち上げられたロケット/ミサイルによる TEC 減少を、打ち上げ地点からそう遠くない稠密な地上局網(GEONET)で捉えている。そのため Ozeki & Heki (2010)や Nakashima & Heki (2014)で示されているように、ある程度 TEC 減少域が面的に捉えられている。本論文では多くの点から成る TEC 減少域の中心に近い一点を抽出して、その局における VTEC の最大減少量を当該ロケット/ミサイルの打ち上げによる VTEC 減少量として代表させた。

3. 過去の事例の規模とそのクラス分け

Mendillo *et al.* (1975) のモデルによると、人為的に電離圏に持ち込まれた水分子による電子数減少率は、単位体積あたりの水分子の数と単位体積あたりの電子数（電子密度）の積に比例する。したがって、電子数の減少が電離圏 F 領域を貫くロケット/ミサイルによって作られ、また時間や場所によらず電子密度の高度分布が相似であり、また排気の高度分布も相似であると仮定すると、等量の水蒸気が電離圏に排出された場合の VTEC 減少量は打ち上げ直前の VTEC におおむね比例するだろう。

日本の JAXA（宇宙航空研究開発機構）によって種子島から 2006/1/24 の 10:33 JST に打ち上げられた H2A ロケットの 8 号機の一段目がもたらした TEC 減少は Furuya & Heki (2008)によって報告されている。それに夜間 (2010/9/11 20:17 JST)に打ち上げられた 18 号機と、昼間(2011/9/23 13:36 JST) に打ち上げられた 19 号機を併せて、三つの事例を Fig.1a に示す。いずれの事例でも打ち上げ 5-6 分後に急速な VTEC 減少がみられるが、減少量は VTEC が大きな 19 号機で最大で VTEC が小さな 18 号機で最小であることがわかる。これらの VTEC 曲線から求めた VTEC 減少量を縦軸に、減少が始まる直前の VTEC を横軸にとって両対数でプロットすると、それらはほぼ傾き 1 の直線上に乗る（両者が比例する）ことがわかる (Fig.2)。H2A ロケットは同推力であり、同程度の水蒸気排出量だと考えられるので、同じ水蒸気排出量（≒推力）の場合、背景 VTEC と VTEC 減少量はほぼ比例することが確認できる。

Fig.1b には北朝鮮から発射された過去のミサイルの事例として、Ozeki & Heki (2010)で報告されたテポドン 1 号(1998/8/31)と 2 号(2009/4/5)、Nakashima & Heki (2014)で報告された銀河 3 号(2012/12/12)、日置他 (2016)で報告された光明星 4 号(2016/2/7)について、TEC 減少域の中心にある GNSS 局で観測された電子数減少の時系列を示す。またそれらについて H2A と同様に打ち上げ時の VTEC とその減少量を比較したものを Fig.2 に示す。テポドン 2 号、およびその派生型と見られている 2012 年の銀河 3 号、2016 年の光明星 4 号が傾き 1 の線上に分布しており、それら三例の推力が同程度であることが推

察される。この図では、左上ほどロケット/ミサイルの水蒸気排出量大きいことを意味し、H2A ではVTEC減少は40-60%，テポドン2号とその派生型ではVTEC減少は10-20%である。また、1998年のテポドン1号はVTEC減少率が約5%である。JAXAからは小型の固体燃料ロケットとしてSS-520が開発されているが、2018/2/3に内之浦から打ち上げられたその5号機によるVTEC減少が1998年のテポドン1号と同程度であることがわかった。

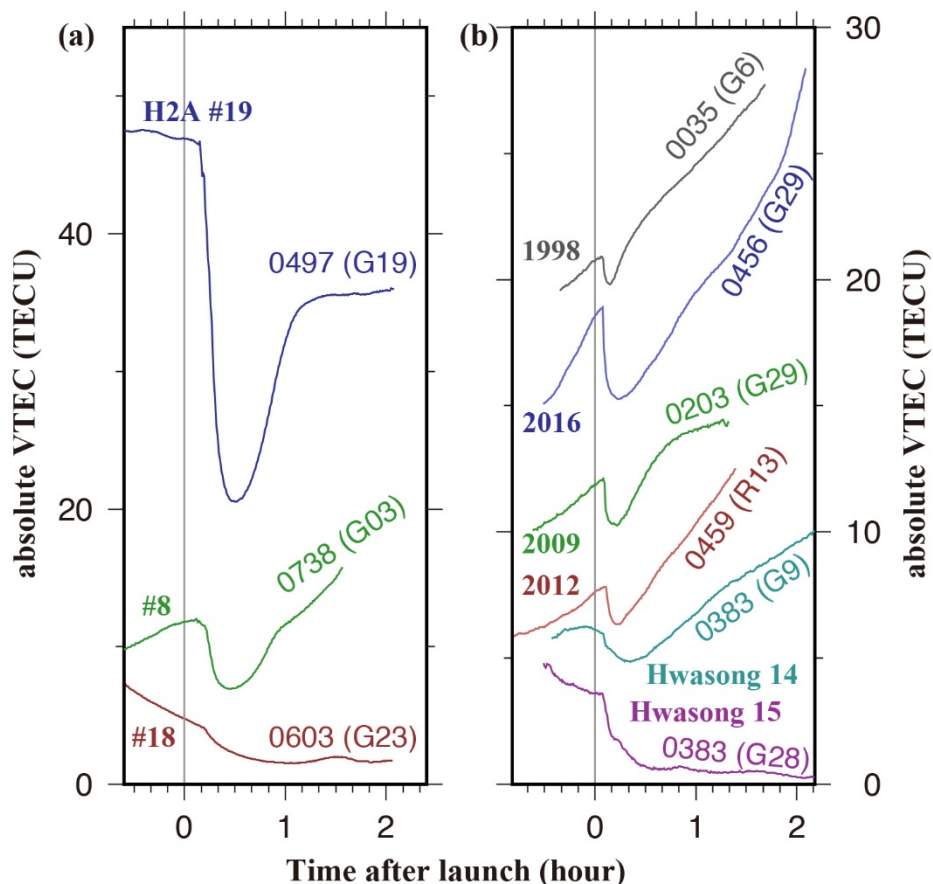


Figure 1. Electron depletion signatures expressed as changes in absolute VTEC for the three H2A launches (#8, #18, and #19) in Japan (a) and for the six cases of rocket/missile launches from North Korea (1998: Taepdong-1, 2009: Taepodong-2, 2012: Unha-3, 2016: Kwangmyongsong-4, 2017: Hwasong-14, 15) (b). In each case, the GNSS-TEC data from GEONET stations are used. The station IDs and satellite numbers (G for GPS, R for GLONASS) are given at the right ends of the curves.

4. 2017年に発射された二つのICBMの規模

Fig.2は、新規に発射されたミサイルに関して、背景VTECとVTEC減少量からその推力が過去のどのクラスと同等であるかを判断するのに有用と考えられる。ただしここで計測しているのは単位時間あたりに電離圏に排出された水蒸気量なので、燃料の種類

が異なる場合（液体燃料と固体燃料等），排気ガス中に水分子が占める割合に依存する誤差が生じる．残念ながら北朝鮮のミサイルの燃料の種類は推測するしかないため，ある程度の誤差が生じることを念頭におく必要がある．

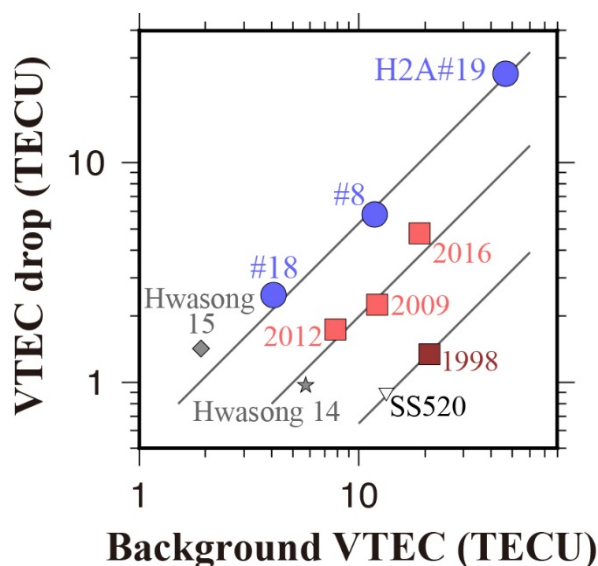


Figure 2. VTEC drops and background VTEC for the nine cases of rocket/missile launches from North Korea and Japan shown in Fig.1 (here we add the 2018 case of the SS520 launch by JAXA). They are divided into three groups, H-2A (blue), Taepodong-2 and its derivatives (red) and Taepodong-1 (dark red). Three lines show VTEC decrease of 53 % (H2A), 20 % (Taepodong-2 and its derivatives) and 6.5 % (Taepodong-1). The Hwasong-14 and 15, launched from North Korea in 2017, showed similar VTEC drops to Taepodong-2 and H2A groups, respectively.

2017年には，北朝鮮から7月4日と11月29日にICBM級ミサイル（新型であり，テポドン2号派生型と異なり多段式ではない）である火星14号と火星15号が東に向かって発射された．いずれも意図的に高い軌道をとるロフトッド軌道を取り，最高高度としてそれぞれ2,500 kmおよび40,000 kmに達したのちに日本海に着水した．

これら二つの事例に関して過去の例と同様の解析を行った．これらのミサイルはどちらもVTECの小さい早朝に打ち上げられ，過去の例と同様に打ち上げ5-6分後に急速なVTEC減少が確認された．Fig.2から火星14号はテポドン2号およびその派生型の系列に乗ることがわかった．したがって，その推力はテポドン2号の二段目の推力と同程度であった可能性がある．

一方2017年秋に発射された火星15号は，背景VTECに対する減少量がテポドン2号とその派生型に対して有意に大きく，過去に北朝鮮から発射されたミサイル（ロケット）を大幅に上回る推力であった可能性が高い．Fig.2の分類ではH2Aロケットの系列にお

およそ当てはまるが、火星シリーズの燃料の種類が明らかでない（液体燃料であると報道されているが化学組成は不明）、ロフテッド軌道の場合の排気の高高度分布が通常の打ち上げと異なる可能性がある等の不確定要素があり、火星 15 号の推力が H2A 並みであったと結論づけるのは早計である。しかし火星 14 号と 15 号が同じ種類の燃料を使用しているなら、北朝鮮のミサイル技術に 2017 年の段階で有意な進歩があったことは確かであろう。

参考文献

- Furuya, T. and K. Heki (2008), Ionospheric hole behind an ascending rocket observed with a dense GPS array, *Earth Planets Space*, 60, 235-239.
- 日置幸介, 菅原守, 大関優, 岡崎郁也 (2010), GPS-TEC 法による地球物理学, 測地学会誌, 56, 125-134.
- 日置幸介, 中島悠貴, 賀黎明 (2016), 2016 年 2 月 7 日に北朝鮮から発射されたロケット: 電離圏の穴から見える二段目の推力の増加, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, May 22-26.
- 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.
- Nakashima, Y. and K. Heki (2014), Ionospheric hole made by the 2012 North Korean rocket observed with a dense GNSS array in Japan, *Radio Sci.*, 49, doi:10.1002/2014RS005413.
- Ozeki, M. and K. Heki (2010), Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, *J. Geophys. Res.*, 115, A09314, doi:10.1029/2010JA015531.
- Rideout, W., and A. Coster (2006), Automated GPS processing for global total electron content data, *GPS Solution*, 10, 219-228.
- Ssessanga, N., Y. Kim, B. Choi, and J. Chung (2017), The 4 D-var estimation of North Korean rocket exhaust emissions into the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 123, 2315-2326, doi:10.1002/2017JA024596.