

2012年12月に北朝鮮から発射されたロケットがもたらした電離圏の穴：ロシアの測位衛星による観測

日置 幸介 [1]; # 中島 悠貴 [2]; 前田 隼 [1]
[1] 北大・院理・自然史; [2] 北大・理・自然史

Ionospheric hole made by a North Korean rocket launched in 2012 December: Observation with the Russian GNSS

Kosuke Heki[1]; # Yuki Nakashima[2]; Jun Maeda[1]
[1] Hokkaido Univ.; [2] Natural History Sciences, Hokkaido Univ

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki>

From the Musdanri launch pad, at the Japan Sea side of North Korea, possible ballistic missiles, called Taepodong, were launched in 1998 and 2009. Water vapor molecules in the rocket exhaust cause electron depletion in ionosphere [e.g. Furuya & Heki, EPS 2008], and the ionospheric total electron content (TEC) can be measured easily with the GPS network, deployed nationwide originally to observe crustal deformation. Ozeki & Heki [JGR 2010] caught the trajectory of the 1998/2009 Taepodong-1 and -2 as the TEC anomalies with GEONET, and inferred that the Taepodong-2 is 6 times as powerful as the Taepodong-1.

The Unha-3 rocket was launched due southward at 00:49:46UT on Dec. 12, 2012, from the Tongchang-ri launch pad on the Yellow Sea side of North Korea. The rocket, an improved version of the Taepodong-2, has two stages, and the first stage fell onto the Yellow Sea west of South Korea about 8 minutes after the launch. The second stage engine is considered to have put a satellite into a sun-synchronous orbit with height ~500-600 km and inclination 97.4 degrees about 9.5 minutes after the launch. We converted the RIENX format GPS data of the launch day to TEC, and looked for the ionospheric hole signatures. We could not find clear electron depletion signals simply because no GPS satellites were available in the northwestern skies.

GPS is the American GNSS system, and other systems are becoming operational. GEONET receivers have been replaced with the new models capable of receiving multiple GNSS, and about 10 percent of them could observe GLONASS and QZSS, the Russian and the Japanese GNSS, respectively, at the time of the Unha-3 launch. More than 20 GLONASS satellites are already in operation, and we used the number 13 satellite to detect the ionospheric hole formation above the Yellow Sea (see Figure).

We modified the software to convert RINEX file into TEC time series [Heki et al., JGSJ 2010] in order to handle RINEX v.2.12 files including GLONASS/QZSS data. The broadcast orbits of the GLONASS satellites are given in the geocentric Cartesian coordinates instead of the Keplerian elements like GPS and QZSS. GLONASS uses different microwave frequencies for different satellites, which also required the modification for the original software to calculate TEC.

Ozeki & Heki [2010] compared the thrust of the 1998 and 2009 Taepodong missiles by comparing the sizes/depths of the ionospheric holes, and here we compare the hole made by the 2012 December Unha-3 launch with the past cases. The onset times of the depletion are the same, suggesting similar ascending speeds of the three rockets (missiles). Depth of the hole depends both on the amount of water vapor in the exhaust and the background TEC. The hole of the Unha-3 is similar to the 2009 case (or somewhat deeper/larger), which would reflect the vertical TEC in the 2012 case about 1/3 larger than that in 2009. The hole seems to last longer in the 2012 case possibly because the hole is elongated N-S and the ionospheric piercing point of the line-of-sight took more time to go through the hole.

Next we compared the size the holes at various time epochs for the three cases. The 1998 case shows clearly small size, but the other two showed similar hole sizes. In the 2009 case, the hole did not extend to the NE Japan (it remains above the Japan Sea). Likewise, the 2012 hole does not extend further south beyond the 33N line. In the both cases, the second stage engine would have stopped at similar heights and horizontal distances from the launch pads.

We can conclude as below,

1) We could observe the ionospheric hole made by the Unha-3 rocket launched from western North Korea in 2012 December using the GLONASS satellite data.

2) The electron depletion started ~6 minutes after the launch and remained for tens of minutes above the central Yellow Sea.

3) The size and depth of the hole was similar to that made by the 2009 Taepodong-2.

北朝鮮の日本海側にあるロケット発射場である舞水端里からは1998年四月のテポドン1号、2009年四月の同2号と大陸間弾道弾の実験と思われるロケット発射があった。ロケット排気中の水蒸気は電離圏電子と反応して電子を枯渇させる [e.g. Furuya & Heki, EPS 2008]。また電離圏全電子数 (TEC) は測位目的で全国展開されている GPS 網で簡単に計測できる。Ozeki & Heki [JGR 2010] は、1998/2009 のテポドン発射に際して GEONET でその航跡を電子枯渇域として捉えるとともに、テポドン1号と2号の排気量 (推進力) の差を約6倍と推定した。

2012年12/12 00:49:46UTに北朝鮮黄海側にある東倉里発射場からロケット銀河3号が真南に向けて発射された。このロケットは二段式であり、テポドン2を改良したものと考えられている。第一段ロケットは約8分後に韓国の黄海沖

に着水、打ち上げ約9分半後には光明星と称する衛星を高度494-588km、軌道傾斜角97.4度の太陽同期軌道に投入したことが確認されている。

当日のGPS生データ(RINEX file)を国土地理院より取得し、TECに変換してロケットの痕跡を探したが、テポドン発射時のような顕著な信号を見出すことができなかった。その原因は、発射時刻前後に西北の空にGPS衛星がたまたま居なかったため、電離圏電子の減少が始まる打ち上げ6分以降に発射基地近傍上空の電離圏を的確に観測できなかったためである。

GPSは米国が打ち上げた測位衛星であるが、近年は他の国や団体が打ち上げた測位衛星が実用段階に入っており、GNSSと総称される。GEONETでは段階的に複数GNSSも受信できる受信機への交換を行っており、昨年の時点で約1割の局でロシアの測位衛星GLONASSと我が国の準天頂衛星システムQZSSの信号を日常的に受信し、RINEXファイルを公開している。QZSSはまだ一機しか運用されていないが、GLONASSは既に二十機以上が軌道にある。本研究では13番のGLONASS衛星を用いて、ロケット打ち上げ直後の黄海上空のTECから電離圏の穴を捉えた(添付の図参照)。

GPS生データファイルの形式であるRINEX v.2.11ではマルチGNSSへの拡張がGLONASSに限定されている。そこでGPSデータをTECに変換するプログラム[日置他, 測地学会誌2010]を、新しいRINEX v.2.12形式のファイルで使用するための改修を行った。またGLONASS衛星の放送軌道は直交座標三成分で与えられており、ケプラー要素で与えられるGPSやQZSSと異なる。

Ozeki & Heki [2010]は、電離圏の穴の規模の比較から1998年と2009年のテポドンの推力を比較した。2012年12月の銀河3号の作った電離圏の穴を過去二回のテポドン打ち上げ時と比較してみる。電子の急減の生じるタイミングはすべての例でほぼ同じであり、ロケット(ミサイル)の上昇速度に大きな差がないことを示唆する。穴の深さ(電子数減少の規模)はロケット排気に含まれる水蒸気量と背景TECで決まる。同じ化学組成の燃料の場合水蒸気量が多いほど推力が高い。データを比較すると銀河3号の推力はテポドン2と同程度かやや大きく見える。これは打ち上げ時の黄海上空の鉛直TECがテポドン2打ち上げ時の日本海上空より三分の一程度多かったことを反映しているのだろう。また2012年の方が2009年に比べてTEC減少がやや長引くのは、減少域が南北に延びているため衛星と受信機を結ぶ視線が減少域を通過する時間が余計にかかったことを示唆している。

打ち上げ後6分、10分、20分における電子の枯渇域(穴)の広がりを三つの事例で比較すると、1998年の打ち上げに伴う電子数減少域が他二者より小規模であることが顕著であるが、2009年と2012年の打ち上げに伴う穴の地理的な広がりは大差ない。特に2009年の打ち上げで減少域が東北日本上空に達していない(減少域が日本海上空に留まる)のと同様に、2012年の打ち上げでは黄海上の電子減少域は北緯33度以南に及んでいない。いずれの打ち上げでも二段目のロケットの燃焼は同じような高度と発射基地からの水平距離の地点で停止したのだろう。

以上をまとめると、

- 1) 2012年12月12日に北朝鮮・東倉里から発射された銀河3号ロケットの排気が電離圏にもたらした電子の穴(枯渇域)を、ロシアの測位衛星を用いて見出した。
- 2) 電子の穴は打ち上げ6分後から黄海中央部分上空の電離圏に生じ、数十分にわたって存在した。
- 3) 電子の穴の規模は2009年4月に北朝鮮・舞水端里から日本海に向かって打ち上げられたテポドン2号と類似していた。

