2017年に北朝鮮から発射されたミサイル による電離圏擾乱:中距離弾道ミサイルと 新旧ミサイルの大陸弾道ミサイルの比較

Ionospheric disturbance by the North Korean missiles in 2017: Comparison of IRBM and the old/new ICBM

北海道大学 理学部 地球惑星科学科 4年

宇宙測地学研究室

02140023

橋本 繭未

指導教官名 日置 幸介

近年北朝鮮によるミサイル発射実験が活発である。発射されたミサイルの詳細は北朝 鮮からは公開されておらず、アメリカや日本ではレーダーや人工衛星を使って様々な情 報を収集している。本研究では、一般公開されている GEONET データを使い、GNSS-TEC 法によりミサイル発射直後の電離圏電子数の異常を求めることによって、2017 年 に発射された複数の新型弾道ミサイルに関して推力や燃料等の情報を推測する。

超高層大気である電離圏では、太陽の紫外線により酸素や窒素分子が電離し、自由電 子が多く存在する。通常電離圏にはほとんど水蒸気が存在しないが、ロケット打ち上げ やミサイル発射により、それらの排気ガスに含まれる水蒸気が電離圏に持ち込まれる。 水蒸気分子は電離圏の正イオンや電子と化学反応を起こし、広域で電子が急速に消失す る。このため、ロケット打ち上げやミサイル発射に伴い電離圏の電子数が減少すること が知られている。

GNSS 衛星は複数の周波数を持つマイクロ波を送信しており、地上局でそれらの位 相差から衛星と受信機を結ぶ視線に沿って積分した電子数(TEC)が計測できる。本研 究では 2017 年に北朝鮮から打ち上げられたいくつかのミサイルに伴う TEC の減少を GNSS-TEC 法で観測した。先行研究では過去の北朝鮮のミサイル発射による電離圏の 電子数の打ち上げ前の値からの相対的な減少率から推力を推定している。本研究でも 2017 年のミサイルによる電離圏の電子数減少から推力の比較等を行うため、ミサイル 発射地点上空の電離圏におけるミサイル発射前後の TEC 変化を調べた。

本研究では 2017 年 7 月 4 日に発射された大陸間弾道ミサイル(ICBM)火星 14、9 月 15 日に発射された中距離弾道ミサイル(IRBM)火星 12、11 月 29 日に発射された ICBM 火星 15 の三つの事例について詳しく観測データを解析した。その結果、7 月と 11 月の ICBM では電離圏の電子数の減少を観測できたが、9 月 15 日の IRBM による 電離圏の電子数減少は観測できなかった。飛距離は大きいが推力の小さな IRBM は、 GNSS-TEC 法で捉えられるような変化を電離圏にもたらさないことが推察される。

また、同じ ICBM でも 7 月の火星 14 と 11 月の火星 15 では、後者が前者の約四倍 と TEC の減少率が大きく違うこともわかった。7 月の ICBM は先行研究で既に報告さ れている 2012 年や 2016 年のテポドン 2 号派生型ロケットの二段目と同じ程度の推力 を持つと考えることができる。一方 11 月の ICBM の推力はそれらを大幅に上回ってい る可能性があることが示唆された。

要旨

1. はじめに	1
1.1 電離圈	1
1.2 ロケットやミサイルの打ち上げに伴う電離圏電子数減少のメカニズム.	2
1.3 GNSS	3
1.3.1 GPS	4
1.3.2 TEC	5
1.3.3 GNSS-TEC 観測	6
1.4 北朝鮮のミサイル発射実験	8
1.4.1 弾道ミサイルとは	8
1.4.2 北朝鮮のミサイル発射実験	8
1.5 先行研究	11
2. 観測方法	13
2.1 個々の局を用いた STEC 観測	13
2.2 すべての局を用いた TEC 異常の解析	14
2.3 VTEC 変動	15
3. 観測結果	15
2.1 7月4日発射された ICBM 火星 14	15
2.2 9月15日に発射された IRBM 火星 12	18
2.3 11月29日に発射されたICBM 火星15	21
4. 考察	25
5. まとめ	27
6. 謝辞	27
7. 引用	27

1. はじめに

近年北朝鮮(朝鮮民主主義人民共和国)によるミサイル発射実験が活発である。2017 年では新型の弾道ミサイルが日本上空を2度も通過し、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)の発射実験も行 われた。だが北朝鮮は、ミサイルの発射の様子などは公開しているがミサイルの軌道や 仕様といった詳細な情報を公開していない。アメリカおよび日本は、軍事レーダーや人 工衛星を使い、これらのミサイルを捕捉している。しかし一般に公開されている情報は 限られている。本研究では一般に情報が公開されている GEONET のデータを使い、ミ サイル発射に伴う電離圏擾乱を明らかにすることを目指す。また、2017 年に発射され た複数の新型弾道ミサイルを比較し、その違いや推力などの有益な情報を得たいと考え ている。

1.1 電離圈

地球大気上層では窒素や酸素の原子・分子が太陽光線に含まれる波長約 0.1µm 以下 の紫外線を吸収し、そのエネルギーによって原子は原子核の周りを回転している電子を 放出する。この原子が光によりイオン化することを光電離といい、イオンや放出された 電子をプラズマという。この光電離により電子数密度が高くなっている領域(高度 60 ~500 km)のことを電離圏(電離層)という。

電離圏は4つの層(領域)に分けらており、下からD層、E層、F₁層、F₂層という。 特にE層、F₁層、F₂層の3つの層は電子数密度が大きくなっている(図1.1)。E層(100 km)では 1m³の空間の中に電子が約 10¹¹ 個あり、空気の原子や分子は約 10¹⁹ 個あるの で、電離している割合は約 10⁸ 個のうち 1 個である。300 kmでは 1000 個のうち 1 個の割 合で、500km では 100 個のうち 1 個の割合で電離が起き、電離する割合は高度ともに急 増する。

また一番下の層である D 層は E 層の下に弱いながら電離状態にあり存在している。 太陽からの紫外線は地球大気によって次第に吸収されるので、D 層に届く紫外線は弱く なっている。太陽からの紫外線の照射がない夜間では D 層は消失する。だが、D 層の高 度の大気の密度は E 層や F 層に比べると非常に大きいため、D 層は光電離によって生 成された電子が周囲の分子や原子に衝突する確率が高くなる。したがって、E 層や F 層 に比べると、D 層は同じ強さの紫外線によってより多くの電子を生成する。

このように太陽から照射された紫外線は地球大気中に入ると次第に吸収され、大気中 の分子や原子を電離し、高度100kmではかなり弱くなっている。そのため上層ほど電子 数が多いのである。しかし、下層ほど空気の密度は大きく、紫外線により電離しやすく なる。この2つの関係から電子数密度はある高さの層で極大になり、その上下で減少す る(チャップマン層の形成)。また、光電離によって生成された電子とイオンが衝突し て元の分子や原子に戻るという再結合も生じている。電子数密度は、電子がどのくらい の割合で生成され、また消失するかのバランスによって決まっている。



図 1.1 電離圏の電子数密度の高度プロファイルと、様々な層の高度と正イオンの 代表的な種類(情報通信研究機構 NiCT のページより)

1.2 ロケットやミサイルの打ち上げに伴う電離圏電子数減

少のメカニズム

本節ではロケット打ち上げやミサイル発射による電離圏の電子数減少がなぜ発生するのか Mendillo et al. (1975)をもとに記述する。

電離圏の大気について考えると、以下のような化学反応が様々な反応速度を持って起 こっており、電子が正イオンと再結合して消失する。

$$0^+ + N_2 \xrightarrow{\kappa_1} N O^+ + N \tag{1.1}$$

$$0^{+} + 0_{2} \xrightarrow{\kappa_{2}} 0_{2}^{+} + 0 \tag{1.2}$$

$$NO^+ + e^- \stackrel{\kappa_3}{\to} N + 0 \tag{1.3}$$

$$0_2^+ + e^- \stackrel{n_4}{\to} 0 + 0 \tag{1.4}$$

$$K_{1,K_{2}}, K_{3}, K_{4}$$
:反応速度($\frac{m^{3}}{s}$)

(1.3)、(1.4)式の化学反応は、反応速度が速く即座に起こる。そのため、(1.1)、(1.2)式に ある NO や O₂のイオンの生成する速度が実質的に電離圏の中で電子が消失する速度を 決めている。よって大気による電子の変化率は、(1.5)式のようになる。

$$\frac{dn(e^{-})}{dt} = -\{K_1n(N_2) + K_2n(O_2)\} \cdot n(e^{-})$$
(1.5)
$$n : \text{ \mathbb{n} : \mathbb{C} \mathbf{m} (\fild{m}/\mathbf{m}^3))}$$

この反応速度は再結合によって電子が消失する率を示し、電子の密度に比例する。従っ てある電子密度の時に、太陽の紫外線による電離圏の電子の生成速度と上記の反応によ る消失速度がバランスして電離圏の電子密度が一定となる。

通常の状態であれば、大気中の水蒸気(H₂O)はほぼ対流圏に限られ、電離圏にはほ とんど存在しない。しかしロケットの打ち上げやミサイルの発射があると、その排気ガ スに含まれる水蒸気が電離圏に入る。すると以下のような化学反応が起きる。

$$0^{+} + H_2 0 \xrightarrow{K_5} H_2 0^{+} + 0 \tag{1.6}$$

$$H_2 0^+ + e^- \to H_2 + 0$$
 (1.7)

$$H_2 O^+ + e^- \to OH + O$$
 (1.8)

この反応により、水蒸気によって電子が消失する。この水蒸気の効果を考えると、

$$\frac{dn(e^{-})}{dt} = -\{K_1n(N_2) + K_2n(O_2) + K_5n(H_2O)\} \cdot n(e^{-})$$
(1.8)

このK₅はK₁やK₂とくらべると2桁ほど値が大きい。そのため、この電子の消失反応は、 水蒸気が無い場合(N₂やO₂しかない場合)に比べて、ほぼ瞬時に起きる。紫外線によ る電離圏の電子の生成速度より、水蒸気による消失速度のほうが大きくなるため、電離 圏の電子数が大きく減少する。

1.3 GNSS

全球衛星測位システム(Global Navigation Satellite System、GNSS)とは、地球を

周回する複数の人工衛星が送信される電磁波を地上局で受信し、その搬送波の位相変化 等を観測・分析することによって高精度の測位を行うシステムである。アメリカが運営 する GPS (Global Positioning System 全球測位システム)は GNSS の一つであり、 主に用いられてきた。現在、GNSS は GPS のほかにもロシアの GLONASS、中国の北 斗 (Beidou)、欧州連合の Galileo、日本の準天頂衛星システム (QZSS) などといった ものがあり、現在打ち上げが続いている。

1.3.1 GPS

本節では、本研究で用いた GPS について説明する。GPS はアメリカによって航空機・ 船舶等の航法支援用として開発されたシステムである。現在、地表高度約2万kmの6つ の軌道面に5,6個ずつ、計約30個配置されている GPS 衛星(図1.2)と、GPS 衛星の追 跡と管制を行う管制局、測位を行うための受信機で構成される。



図 1.2 GPS 衛星のイメージ (国土地理院のページより)

GPS は複数の GPS 衛星が発する電波を受信し、受信点の3次元位置を決定する。衛 星から発信される電波には衛星の軌道情報や原子時計の正確な時間情報などが含まれ る。その情報によって GPS 衛星からの受信機までの距離や伝搬に要した時間を求め、 位置を決定する。

GPS による測位には受信点の絶対位置を単独で決定する単独測位とすでに位置が求

められている基準点に対するもう一方の点の相対位置を決定する相対測位(干渉測位) の二つがある。一般に単独測位は地球に対し、静止または運動している物体している物 体の概略位置を求めるのに使われ、カーナビなどがその代表例である。相対測位は静止 点の精密位置を決定するのに用いられ、地殻変動の計測などに用いられる。

GPS では L1 (約 1.5GHz)および L2 (約 1.2GHz)の二つの周波数の搬送波に軌道や時間 などの情報をのせ、衛星ごとの固有のコードで変調して送っている。これより衛星ごと の信号を識別している。



図 1.3 GPS 衛星と受信機、および IPP, SIP の模式図。STEC に視線の電離圏への 入射角の余弦をかけることによって VTEC (図中の赤い線) に換算できる。

1.3.2 TEC

TEC (Total Electron Content, 電離圏全電子数)とは衛星と受信機の視線方向、LOS (line-of-sight)に沿って存在する電子数を積分した値のことである。単位は TECU (=10¹⁶el/m²) で表される。特に衛星視線方向 (LOS) の TEC を斜め TEC (Slant TEC, STEC)、鉛直方

向に積分した TEC を鉛直 TEC (Vertical TEC、VTEC) という。STEC では衛星の移動に 伴い、衛星視線方向と電離圏がなす角度が変化することによって見かけ上の変化が生ま れる。一方 VTEC の場合は見かけ上の変化を取り除いた実質的な TEC 変化を見ること ができる。

電離圏は上下に幅を持っているが、便宜的に最も電子密度の高い高度に薄い層(本研 究では 300 km)を仮定し、衛星と受信機を結ぶ視線ベクトルがその層と交わる点を IPP (Ionospheric Penetration Point)、その地表への投影点を SIP (Sub-ionospheric Point)という (図 1.3)。

1.3.3 GNSS-TEC 観測

本節では GNSS、特に GPS の生データからどのようにして STEC が算出されるのかを記述する。STEC は LOS に沿って電子数密度 N_e を積分したものである。LOS を積分の経路 s で表すと、

$$STEC = \int N_e ds \tag{1.9}$$

TEC を導出するために電離圏の屈折率について考える。ファインマン物理学2巻6章 より、屈折率nは

$$n = 1 + \frac{N_e q_e^2}{2\varepsilon_0 m_e(\omega_0^2 - \omega^2)}$$
(1.10)

n:屈折率
 N_e:単位体積あたりの電子数
 q_e:電子の電荷
 ε₀:真空中の誘電率
 m_e:電子の質量
 ω₀:媒質中で束縛される電子の共鳴角振動数
 ω:外から媒質に入る電磁波の角振動数

と表せる。電離圏の中で電子は自由電子として存在しているので、 $\omega_0 = 0$ と考えることができる。したがって、(1.10)式より電離圏の屈折率 n_p は

$$n_p = 1 - \frac{N_e q_e^2}{2\varepsilon_0 m_e \omega^2} \tag{1.11}$$

$$n_p = 1 - \frac{a}{f^2} \quad \left(a = \frac{N_e q_e^2}{8\pi^2 q_0 m_e}\right)$$
 (1.12)

(1.12)式から、屈折率の1からの差 (n_p-1) が、周波数の二乗に反比例することがわかる。 ここで電離圏によって起こされるマイクロ波の遅延について考える。電離圏により衛星 から受信機までの距離は真空中と電離圏によって見かけ上の距離の差ΔSが生まれる。こ れが電離圏遅延を長さの単位で表したものに相当する。ΔSは屈折率 n によってあらわ すと、

$$\Delta S = \int (n-1)ds \tag{1.13}$$

となる。(1.13)式に(1.12)式を代入すると、

$$\Delta S = -\int \frac{a}{f^2} ds$$

= $-\frac{b}{f^2} \int N_e ds$
= $-\frac{b}{f^2} TEC$ (1.14)

ここで、周波数 f_1 、 f_2 で同時に観測していた場合、それぞれ ΔS_1 、 ΔS_2 は(1.14)式より、

$$\Delta S_1 = -\frac{b}{f_1^2} STEC \tag{1.15}$$

$$\Delta S_2 = -\frac{b}{f_2^2} STEC \tag{1.16}$$

すなわち、電離圏遅延は周波数の二乗に反比例する。式をひいて、変形すると

STEC =
$$\frac{\Delta S_1 - \Delta S_2}{b} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$
 (1.17)

となる。bは定数であり、 $\Delta S_1 - \Delta S_2$ は、距離で表した電離圏遅延の周波数による差である。ここで GPS の場合、L1 と L2 の異なる周波数の搬送波が衛星から受信機へ送られている。L1、L2 の周波数をそれぞれ f_1 、 f_2 とする。L1 と L2 の位相に波長をかけて距離に変換し、この L1 と L2 の単純な距離の差を L4 とする。bに適当な値を代入すると(1.17)式は、

STEC =
$$\frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta L4$$
 (L4 = L1 - L2) (1.18)

となる。(1.18)式より、GPS 衛星から発せられる 2 つの周波数の搬送波の位相差を単純 な距離の差として表した値から TEC が求まることが分かる。

1.4 北朝鮮のミサイル発射実験

1.4.1 弾道ミサイルとは

弾道ミサイルとは、放物線(弾道軌道)を描いて飛翔するロケットエンジン推進のミ サイルである。大陸間のように長い距離離れた目標を攻撃することが可能である。弾道 ミサイルは基本的に多段式であり、燃料を使いながら切り離し、ほぼ垂直に上昇してい く。弾頭の誘導装置を使って、目標に落下するように調整する。このように、弾道ミサ イルの発射には大型の推進装置の制御や多段階式の推進装置の分類、姿勢・誘導制御等 が必要であり、ロケットの打ち上げと共通する技術が多い。

ミサイルはその射程により分類されている。射程が約 1000 km未満は短距離弾道ミサ イル (Short Range Ballistic Missile, SRBM)、約 1000 km以上 3000 km未満で準中距離 弾道ミサイル (Medium Range Ballistic Missile, MRBM)、約 3000 km以上 5500 km未 満で中距離弾道ミサイル(Intermediate Range Ballistic Missile, IRBM)、約 5500 km以 上で大陸間弾道ミサイル(Inter-Continental Ballistic Missile, ICBM)と区分される。ま た潜水艦から発射される弾道ミサイルは SLBM (Submarine-Launched Ballistic Missile) と呼ばれる。

1.4.2 北朝鮮のミサイル発射実験

過去北朝鮮は SRBM 級であるスカッドや IRBM 級であるノドン、そして ICBM 級 のテポドン 2 号を中心にミサイル発射実験を行っていた(図 1.6)。2016 年にはいり、 2 月のテポドン 2 号の発射実験を筆頭に、新型の IRBM 級とされるムスダンや SLBM のミサイル発射実験が盛んになった。2017 年では、これまでのミサイルや改良版では なく、新型の IRBM 級と ICBM 級のミサイルが多数発射された(図 1.7)。

2017年5月14日にロフテッド軌道(通常より高い仰角で打ち上げる軌道)で発射、 また8月29日および9月15日に日本上空を通過する形で発射された新型のIRBM(火 星12)の射程は最大で約5000kmに達するとみられている。7月4日および28日に ロフテッド軌道で発射されたICBM(火星14)は、飛翔高度や距離を考えると最大射 程距離が少なくとも5500kmを超えるとされる。エンジンがメインエンジン1基と4つ の補助エンジンから構成されていることや推進部の下部の形状がラッパ状であること、 液体燃料式推進方式の直線状の炎が確認できることなどが5月14日に発射された IRBM 火星12と共通していることから、この ICBM は火星12を基に開発した可能 性が考えられる。

さらに 11 月 29 日に発射された新型の ICBM (火星15) については、搭載する弾 頭の重量によっては、1 万㎞を超える射程となりうると推定されている。このように近 年北朝鮮は弾道ミサイルの長射程化を図っており、今後も ICBM の開発を進めていく ものとみられている。



図 1.4 北朝鮮が保有・開発中である弾道ミサイル、2017 年 11 月に発 射された火星 15 号はまだ図に含まれていない(防衛省資料)。



図 1.5 北朝鮮が保有する様々な弾道ミサイルの射程 (防衛省資料)

15 (平成27) 年以前							
日付	推定される弾種	発射数	場所	飛翔距離			
1993.05.29	ノドン(可能性)	不明	不明	約500km			
1998.08.31	テポドン1	1発	テポドン地区	約1,600km			
2006.07.05	スカッド及びノドン	6発	旗対嶺(キテリョン) 地区	約400km			
2006.07.05	テポドン2	1発	テポドン地区	不明、失敗と推定			
2009.04.05	テポドン2又は派生型	1発	テポドン地区	3.000km以上			
2009.07.04	スカッド又はノドン	7発	旗対嶺(キテリョン) 地区	最長約450km			
2012.04.13	テポドン2又は派生型	1発	東倉里(トンチャリ) 地区	不明、失敗と推定			
2012.12.12	テポドン2派生型	1発	東倉里(トンチャリ)地区	約2,600km (2段目落下地点)			
2014.03.03	スカッド	2発	元山(ウォンサン) 付近	約500km			
2014.03.26	ノドン	2発	粛川(スクチョン) 付近	約650km			
2014.06.29	スカッド	2発	元山(ウォンサン) 付近	約500km			
2014.07.09	スカッド	2発	平壌の南方約100km	約500km			
2014.07.13	スカッド	2発	開城(ケソン) 付近	約500km			
2014.07.26	スカッド	1発	海州(ヘジュ) の西方約100km	約500km			
2015.03.02	スカッド	2発	南浦(ナンポ) 付近	約500km			
16 (平成28) 年							
16 (平成28)	年						
16 (平成28) 日付	年 推定される弾種	発射数	場所	飛翔距離			
16 (平成28) 日付 2016.02.07	年 推定される弾種 テポドン2派生型	発射数 1発	場所 東倉里(トンチャンリ)	飛翔距離 約2.500km (2段目落下地点)			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド	発射数 1発 2発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンポ) 付近	飛翔距離 約2,500km(2段目落下地点) 約500km			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン	発射数 1発 2発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンポ) 付近 粛川(スクチョン) 付近	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘)	発射数 1発 2発 1発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンポ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.23	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM	発射数 1発 2発 1発 1発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンポ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンポ)沖	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参)			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.23 2016.04.28	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン	<u>発射数</u> 1発 2発 1発 1発 1発 2発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンポ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンポ)沖 元山(ウォンサン)	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.23 2016.04.28 2016.05.31	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン(可能性)	発射数 1発 2発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン)	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.23 2016.04.28 2016.05.31	年 <u>推定される弾種</u> テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン(可能性) ムスダン	発射数 1発 2発 1発 1発 1発 1発 1発 2発 1発 2発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン)	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 1発目:約100km (最大)、2発目:約400km			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.23 2016.04.28 2016.05.31 2016.06.22 2016.07.09	年 <u>推定される弾種</u> テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン(可能性) ムスダン SLBM	発射数 1発 2発 1発 1発 1発 1発 2発 1発 2発 1発 1発 2発 1発 1発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 新浦(シンボ)沖	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 1発目:約100km (最大)、2発目:約400km 数km (韓国報道)			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.23 2016.04.28 2016.05.31 2016.06.22 2016.07.09 2016.07.19	年 <u>推定される弾種</u> テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン(可能性) ムスダン SLBM スカッド及びノドン	発射数 1発 2発 1発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 3発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 新浦(シンボ)沖 黄州(ファンジュ)付近	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 7明、失敗と推定 1発目:約100km (最大)、2発目:約400km 数km (韓国報道) 1発目:約400km、3発目:約500km			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.15 2016.04.28 2016.05.31 2016.06.22 2016.07.09 2016.07.19 2016.08.03	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド /ドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン SLBM スカッド及びノドン ノドン	 発射数 1発 2発 1発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 2発 2発 	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 新浦(シンボ)沖 黄州(ファンジュ)付近 股栗(ウンニュル)付近	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 1発目:約100km (最大)、2発目:約400km 数km (韓国報道) 1発目:約400km、3発目:約500km 約1,000km (1発は発射直後に爆発)			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.25 2016.04.28 2016.05.31 2016.06.22 2016.07.09 2016.07.19 2016.08.03 2016.08.24	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムズダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン SLBM スカッド及びノドン ノドン SLBM	発射数 1発 2発 1発 1発 1発 1発 1発 1発 3発 2発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンポ)付近 南川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンポ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 新浦(シンポ)沖 黄州(ファンジュ)付近 酸栗(ウンニュル)付近 新浦(シンポ)付近	飛翔距離 約2,500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 7明、失敗と推定 1発目:約100km (最大)、2発目:約400km 数km (韓国報道) 1発目:約400km、3発目:約500km 約1,000km (1発は発射直後に爆発) 約500km			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.23 2016.04.23 2016.05.31 2016.05.31 2016.07.09 2016.07.09 2016.07.19 2016.08.03 2016.08.24	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン ムスダン(可能性) ムスダン SLBM スカッド及びノドン ノドン SLBM スカッド及びノドン	発射数 1発 2発 1発 1発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 3発 2発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 南川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 新浦(シンボ)沖 黄州(ファンジュ)付近 新浦(シンボ)付近 黄州(ファンジュ)付近	飛翔距離 約2.500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約300km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 予約 第1秒100km (最大)、2発目:約400km 数km (韓国報道) 1発目:約400km、3発目:約500km 約1.000km (現は発射直後に爆発) 約500km 約1.000km			
16 (平成28) 日付 2016.02.07 2016.03.10 2016.03.18 2016.04.23 2016.04.23 2016.05.31 2016.05.21 2016.07.09 2016.07.09 2016.07.19 2016.08.03 2016.08.24 2016.09.05	年 推定される弾種 テポドン2派生型 スカッド ノドン ムスダン(指摘) SLBM ムスダン(可能性) ムスダン SLBM スカッド及びノドン ノドン SLBM スカッド及びノドン メドン SLBM スカッド及びノドン	発射数 1発 2発 1発 1発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 2発 1発 3発 2発 1発 3発 1発	場所 東倉里(トンチャンリ) 南浦(ナンボ)付近 粛川(スクチョン)付近 東岸地域 新浦(シンボ)沖 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 元山(ウォンサン) 新浦(シンボ)沖 黄州(ファンジュ)付近 新浦(シンボ)付近 黄州(ファンジュ)付近 電城(クソン)付近	飛翔距離 約2.500km (2段目落下地点) 約500km 約800km 不明、失敗と推定 約30km (韓国合参) 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 不明、失敗と推定 1発目:約100km (最大)、2発目:約400km 数km (韓国報道) 11名目:約100km (1発は発射直後に爆発) 約500km 約1,000km 約1,000km 不明、失敗と推定			

図 1.6 2016 年以前の北朝鮮による弾道ミサイル発射 (防衛省資料)

2017年に行われた北朝鮮による核実験・弾道ミサイル発射事案等 核実験 弾道ミサイル発射							
日付	挑発の概要	場所	弾種	飛翔距離			
17.02.12	弾道ミサイル1発を発射	西岸・亀城(クソン)付近	固体燃料を使用した新型の地上発 射型弾道ミサイル(推定)	約500km			
17.03.06	「スカッドER」と推定される弾道ミサイル4発を発射	西岸・東倉里(トンチャンリ)付近	スカッドER(推定)	約1,000km			
17.03.22	弾道ミサイル1発を発射	元山(ウォンサン)付近	分析中	発射後数秒以内に爆発、失敗と 推定			
17.04.05	弾道ミサイル1発を発射	新浦(シンポ)付近	分析中	約60km			
17.04.16	弾道ミサイル1発を発射	新浦(シンポ)付近	分析中	発射直後に爆発、失敗と推定			
17.04.29	弾道ミサイル1発を発射	北倉(プクチャン)付近	分析中	約50km離れた内陸部に落下、 失敗と推定			
17.05.14	弾道ミサイル1発を発射	西岸・亀城(クソン)付近	IRBM級の新型弾道ミサイル(推 定)	¥匀800km			
17.05.21	弾道ミサイル1発を発射	北倉(プクチャン)付近	新型弾道ミサイル(17.02.12と同型) (推定)	約500km			
17.05.29	弾道ミサイル1発を発射	元山(ウォンサン)付近	スカッドを改良した新型弾道ミサイ ル(推定)	約400km			
17.07.04	弾道ミサイル1発を発射	西岸・亀城(クソン)付近	ICBM級の新型弾道ミサイル(推 定)	約900km			
17.07.28	弾道ミサイル1発を発射	舞坪里(ムピョンニ)付近	ICBM級の新型弾道ミサイル (17.07.04と同型)(推定)	約1,000km			
17.08.26	ミサイル又はロケットを複数発発射	旗対嶺(キテリョン)付近	分析中	約250km(韓国合参)			
17.08.29	弾道ミサイル1発を発射	順安(スナン)付近	IRBM級の新型弾道ミサイル (17.05.14と同型)(推定)	約2,700km			
17.09.03	6回目の核実験を実施	豊渓里(プンゲリ)					
17.09.15	弾道ミサイル1発を発射	順安(スナン)付近	IRBM級の新型弾道ミサイル (17.05.14及び08.29と同型)(推定)	約3,700km			
17.11.29	弾道ミサイル1発を発射	平城(ピョンソン)付近	ICBM級の新型弾道ミサイル (17.07.04及び07.28とは異なる型) (推定)	約1,000km 2			

図 1.7 2017 年に行われた北朝鮮による弾道ミサイルの発射 (防衛省資料)

1.5 先行研究

北朝鮮によるロケットないしミサイルの発射に伴う電離圏の電子数の減少の観測は 過去も行われてきた。本節では *Heki et al.* による 2016 年地球惑星連合大会 (JpGU)ポス ター発表に基づいて詳しく説明したい。

図 1.8 は 1998 年 8 月 31 日のテポドン 1 号、2009 年 4 月 5 日のテポドン 2 号、2012 年 12 月 12 日のテポドン 2 号派生型(銀河 3 号 Unha-3)、2016 年 2 月 7 日のテポドン 2 号派生型(光明星 4 号 Kwangmyongsong-4) に伴う VTEC の変動を表したものである。テポドン 2 やその派生型は射程距離が 10,000 kmを超えるとされる ICBM である。いずれのミサイル発射時にも、発射後から 5,6 分後に VTEC の急激な減少が観測されている。



図 1.8 過去北朝鮮から発射された弾道ミサイルによる VTEC 変動。4 桁の数字はすべて GEONET 観測局名、縦線が発射時刻を示す(Heki et al., 2016)。
(a)2016年2月のテポドン2号派生型による GPS29番衛星、観測局3局の VTEC 変動
(b)2012年12月のテポドン2号派生型による GLONASS13番衛星、観測局3局の VTEC 変動
(c)2009年4月のテポドン2号による GPS29番衛星、観測局3局の VTEC 変動
(d)1998年8月のテポドン1号による GPS6番衛星、観測局3局の VTEC 変動

さらにここでは、ミサイルの推力の推定を行っている。H2A ロケットの打ち上げに伴う TEC 減少(*Furuya & Heki*, 2008)より、推力が同じ場合でも、TEC の変動量は大きく 異なる(図 1.9 左図)。しかし、減少前の TEC(背景 TEC)と減少した TEC 量を比較する と、その減少率はそれほど違わない。したがって、推力は TEC 減少の絶対的な値では なくもとの TEC からの減少率によって推定できるとされる。過去のテポドンによる VTEC 減少率は 2012 年や 2016 年の場合と比べ 1998 年の場合は小さく、同時に 2012 年 と 2016 年の減少率はそこまで変わらない(図 1.9 右図)。よって、1998 年のテポドン1 号は 2012 年と 2016 年のテポドン 2 号の派生型に比べて、推力が小さい。2012 年と 2016 年のテポドン 2 号派生型は同程度の推力であったと考えられる。



図 1.9 日本の JAXA が打ち上げた H2A ロケット(18 号機と19 号機)と北朝鮮によるミサ イルによる VTEC 変動の比較(Heki et al., 2016)。左図は同推力の H2A ロケットによる絶対値 TEC 量の変動であり右図は 1998 年、2012 年、2016 年のテポドン1 号や2 号派生型による絶 対値 VTEC 量の変動を示す。

2. 観測方法

2.1 個々の局を用いた STEC 観測

まず国土地理院の公開データのサーバー(terras.gsi.go.jp)から、ミサイル発射日の連 続 GNSS 観測網(GEONET)データをダウンロードした。次にミサイル発射に伴う電 離圏電子数が減少しているか確認するため、ミサイル発射地点付近の上空の電離圏を捉 えていると思われる STEC をプロットして電子数減少の有無を確認した。ミサイルに よる電離圏電子数が減少する範囲は局所的であることから、ミサイル発射地点付近を観 測する GPS 衛星とその観測局を絞る必要がある。その際に、ある GNSS 局から様々な GPS 衛星がどの方向に見えているかを地図上にプロットして確認した。電離圏の電子 密度は日周変化や緯度による変化があるため、時間の推移や衛星の移動により自然に変 化する。それらの変化と識別してミサイルによる TEC 異常なのか明確にするため、ミ サイルによる影響が出ると思われる時間帯を除いたデータに対して多項式近似したモ デルを併せて描いた。

2.2 すべての局を用いた TEC 異常の解析

2.1 節での STEC 観測では GPS 衛星と観測局をあらかじめ絞っているので、非常に局 所的な現象しか捉えられない。ミサイルによる TEC 異常が出なかった場合には、本当 にどこにも出ていなかったのかの検証が難しい。想定した場所から離れた箇所で発生し た TEC 異常は捉えることができないからである。したがって、より多くの点で同一時 間帯での TEC 変動を捉えることが必要である。

この解析方法は Ozeki & Heki (2010)の第3章を参考に行った。STEC は観測データか ら算出しており、TEC の日変化に加えて衛星の移動に伴う変化も加わり、複雑な様相を 示す。そこで STEC のモデルを考える際、電離圏への視線の入射角の変化に伴う見かけ の変化を取り除いて TEC の実質的な変化を表す VTEC を時間の関数としてモデルにあ てはめて、それを使って STEC をモデル化する。LOS と観測局がなす角度をζとすると、 STEC と VTEC の関係は以下のようになる。

$$STEC(t,\zeta) = \frac{VTEC(t)}{\cos\zeta} + d$$
 (2.1)

t:時間 ζ:LOS と観測局がなす角度 d:周波数間バイアス

この周波数間バイアス(Inter-frequency bias, IFB)とはアンテナや受信機のハードウェアの設計によって生じる 2 つの周波数の信号間の経路長の差によって生じる時間差である。 GEONET の観測データからそのまま STEC を求めると、この IFB の誤差も含まれる。この IFB は衛星と地上局に固有なものであり、衛星の IFB や一部の地上局の IFB は公開されて いるが GEONET 局のバイアスは一般に公開されていない。その場合は様々な手法を用いて バイアスをあらかじめ求めたり、(2.1)式を用いて最小二乗法によって推定したりする必要が ある。

ここで VTEC(t)が(2.2)式のように時間の二次方程式に従って変化すると仮定する。

$$VTEC(t) = at^2 + bt + c \tag{2.2}$$

この(2.2)式の係数である a、b、c とバイアスである d をミサイルの影響が出ると思われ る時間帯を除いた STEC のデータより推定する。これより推定できる(2.1)式の STEC のモデルと観測されたデータの差を電離圏電子数の異常と考え、その値の大きさを観 測局ごとに色を与え、SIP の場所に示す。これにより、GEONET の観測局で TEC 異常 が起きているところが面的に把握できる。本研究では 2.1 節でミサイルを観測した GPS 衛星からみた GEONET 観測局の TEC 異常を示す。

2.3 VTEC 変動

先行研究同様に推力を考えるため、ミサイルによる TEC の減少がみられた弾道ミサ イルについては実質な TEC 変動を表す VTEC を求めた。2.2 節では VTEC を時間の関 数と仮定し、STEC の観測データから VTEC のモデルを求めた。本節では周波数バイア ス *d* について、衛星の IFB は電離圏モデルファイル (IONEX) のヘッダー情報を利用 し、地上局の IFB については Minimum Scallopping 法を用いて別途推定した値を入れて 除去し、バイアスの無い STEC に視線の電離圏への入射角の余弦をかけて VTEC を求め た。

3. 観測結果

本研究では、北朝鮮によって 2017 年に発射された様々なミサイルから、7月4日に発 射された ICBM 級のミサイル、9月15日に発射された IRBM 級のミサイル、11月29日 に発射された ICBM 級のミサイルの三つの事例について観測データを解析した。

3.1 7月4日に発射された ICBM 火星 14

日本時間 2017 年 7 月 4 日 9 時 39 分頃(0:39 UT)、北朝鮮・亀城付近から ICBM 級 と推定される弾道ミサイル火星14が発射された。このミサイルは約40分間飛行した 後に男鹿半島から約300 kmの日本海上の日本の排他的経済水域(EEZ)内に落下した。 このミサイルはこれまで北朝鮮がロケットの打ち上げと称していたミサイル実験とは 異なり、北朝鮮政府が初めてミサイルであると公表して弾道ミサイルを発射したもので ある。また、ミサイルの軌道は意図的に高い軌道をとるロフテッド軌道で打ち上げられ ており、水平距離は900 km、最高高度は2500 kmを超え飛翔した。



図 3.1 7/4 に打ち上げ られた火星 14 号発射時 前後に GPS9 番衛星を 観測局 0656 局から 0-2UT の間見たとき の SIP の軌跡。実線が SIP の軌跡、破線がミサ イルの発射地点と落下 地点を結ぶ線である。 星印は発射地点を示 す。SIP 軌跡上の赤丸は 発射時刻、赤い三角は 発射 15 分後の SIP を示 す。青四角は GEONET の観測局を示す。



図 3.2 7/4 に打ち上げられた 火星 14 号によってもたらさ れた GPS9 番衛星の STEC 変 動。実線は観測値、青い破線 は 0.7 UT から 1.5 UT までのデ ータを除外し、多項式近似し たモデルを示す。番号は GEONET 観測局の名称であ る。縦線の点線は発射時刻を 示す。0656 局では発射約5分 後に有意な STEC の減少がみ られる。緑の破線は打ち上げ 時刻を示す。

ミサイル発射地点近くの電離圏を観測している、GPS9 番衛星と地上観測局 0656 局の組み合わせを見ると、発射時間から 5,6分後急激に TEC が減少していることがわか

16

る。また、0656 局から距離が離れるほどつまり発射地点から観測が離れるほど STEC の 減少が小さくなり、0216 局では TEC の減少は観測できない(図 3.1 と図 3.2)。

次にGPS9番衛星と多くの地上局を組み合わせて電子数減少の面的な分布を調べたものを図 3.3 に示す。そこでは、発射時にはすべての局で異常がない緑色を示している(図 3.3a)のに対して、発射から6分後には島根県北部のGNSS局が負の電子数異常を示す 青色に変化しており(図 3.3b)、発射地点の東側の電離圏で局地的にTECが減少していることがわかる。さらには発射から15分後にはTEC減少が起きている範囲が広がっている様子も見て取れる(図 3.3c)。



図 3.3 7/4 に打ち上げられた火星 14 号による TEC 異常を GPS9 番衛星で捉えたもの。 各 GEONET 観測局でのモデル曲線からの観測値の差を、高度 300 km で計算した SIP の位置に示す。青が電子数の負の異常を示す。(a)発射時、(b)発射 6 分後、(c)発射 15 分 後の様子。

最後にこのミサイルによる電子数の減少を最も良くとらえている 0656 局と GPS9 番

衛星の組み合わせを取り上げて、VTEC の変動を描いたものを図 3.4 に示す。そこでも ミサイル発射の 5-6 分後から VTEC が急激に減少していることが分かる。発射時に 6 TECU ほどあった電離圏全電子数が 1 TECU ほど減少しており、もともとの VTEC 量に 対して約 1/6 (17%) ほど VTEC が減少したことがわかる。



図 3.4 7/4 に打ち上げられた火星 14 号による電離圏電子数の減少を、GPS9 番 衛星と観測局 0656 局の組み合わせで、VTEC 絶対値の変動として求めたもの。 緑の破線が発射時刻で、その 5-6 分後に急激な VTEC の減少が見られ、その量 は元々の VTEC の 1/6 程度である。

3.2 9月 15 日に発射された IRBM 火星 12

日本時間 2017 年 9 月 15 日 6 時 57 分(21:57 UT)頃に北朝鮮・順安から、後に IRBM (中距離弾道ミサイル)級と推察された弾道ミサイル火星 12 が発射された。7 月に発 射された弾道ミサイルとは異なり、ロフテッド軌道でなく通常軌道で発射された。日本 海を超え、北海道の襟裳岬から東 2200 kmの地点まで飛翔した(図 3.5)。同様のミサイル は 8 月末にも打ち上げられ、これら二回の発射に伴う J アラートによる警告の運用が日 本政府によって開始され、社会にも衝撃を与えた。このミサイルの最高高度は800 km以上、水平距離3700 kmで、飛翔時間はおおよそ20分であった。



図 3.5 2017 年 9 月 15 日早朝に発射された IRBM 級ミサイルの弾道イメージ。星印 が発射地点、×印が落下地点を示す。



図 3.6 火星 12 発射時の前後、GPS30 番衛星を四国の 6 つの観測局から観測した際の 21UT から 24UT にかけての SIP 軌跡。実線が SIP 軌跡、破線がミサイルの発射地点 から落下地点を結ぶ線である。星印は発射地点を示す。SIP 上の赤丸は発射時刻の SIP の位置、赤い三角は発射 15 分後の SIP の位置(電離圏高度は 300 km を仮定)を示 す。青い四角は観測した GEONET の地上観測局である。

ミサイル発射地点近くの上空の電離圏を捉えていると考えられる GPS30 番衛星と四 国の観測局 6 つの組み合わせで観測された TEC 変動を図 3.7 に示す。ミサイル発射後 にどの観測局でも STEC は特別な変動を見せていない。



図 3.7 2017 年 9/15 の早朝に発射 された火星 12 号による電離圏変 化を捉える目的で、GPS30 番衛星 と四国の地上 GNSS 局の組み合わ せによる STEC 変動の時系列をプ ロットしたもの。実線は観測値、 青い破線は 21.95UT から 22.25UT までのデータを除外し、多項式近 似したモデルを示す。番号は GEONET 観測局名で、縦線の点線 は発射時刻を示す。有意な TEC の 変化はみられなかった。

さらに多くの GEONET 観測局を用いた解析でも TEC 異常を求めた(図 3.8)。これら のデータでは、発射地点近くやミサイルの軌道上の STEC を観測しているがわかる。 しかし、TEC 異常を示す観測局は見つからない。



図 3.8 2017 年 9/15 早朝に打ち上げられた火星 12 による TEC 異常を表す図。各 GEONET 観測局でのモデルと観測値の差を示す。(a)発射時、(b)6 分後、(c)15 分後の様子。詳細は 図 3.3 と同様であるが、この例では異常を示す局が存在しない。

3.3 11月29日に発射された ICBM 火星15

日本時間 2017 年 11 月 29 日午前 3 時 18 分(18:18 UT)頃に北朝鮮・平城から新型の ICBM 級と見られる弾道ミサイル(火星 15 号)が発射された。ロフテッド軌道で発射されており、最高高度は 4000 kmを超え、水平距離は約 1000 km以上で約 53 分間飛翔した。落下地点は青森県西方約 250 km地点である。



図 3.9 2017 年 11/29 日未明に発射された ICBM である火星 15 の発射時刻前後におい て、GPS28 番衛星を中国地方の6つの観測局から見た時の SIP 軌跡(17 UT-21 UT)(図 中の実線)。破線はミサイルの発射地点から落下地点を結ぶ線である。星印は発射地点を 示す。SIP 軌跡上の赤丸は発射時刻の、また赤い三角は発射 15 分後の SIP 位置を示す(電 離圏高度は 300 km を仮定)。青い四角は観測した GEONET の観測局名。

ミサイル発射地点近くの電離圏を観測したと思われる、GPS28 番衛星と中国地方の6 つの GNSS 観測局の組み合わせによる TEC 変動の時系列を図 3.10 に示す。9 月の IRBM の事例とは対照的に、発射数分後にどの観測局でも TEC が急に減少している。図 3.11 に、ミサイル発射後で TEC 異常を面的に調べた結果を示す。そこでも明らかに TEC が 広域で減少しているのがわかる。また、その影響が及ぶ範囲は7月のミサイル発射の事 例(図 3.3c)より広い。



図 3.11 2017 年 11/29 日に発射された火星 15 による TEC 異常を、GPS28 番衛星と GEONET 局を用いて面的に捉えた図。各 GEONET 観測局でのモデル曲線と観測値の差 を色で示し、高度 300 km を仮定して計算した SIP の場所にプロットしている。(a)発射 時、(b)6 分後、(c)15 分後の様子。(b)では負の異常は島根県の地上局に限られるが、(c) ではそれが西日本の広域に広がっていることがわかる。

次に周波数間バイアスを除いて STEC を VTEC に変換し、その時系列を見てみる。 0383 局から GPS28 番衛星を見て得られた VTEC 絶対値のミサイル発射前後の時系列は 図 3.12 のようになっている。現地時間で未明の発射であり、もともと電離圏全電子数 が 2TECU 以下しかない時間帯であった。元々の TEC の量は約 2 TECU と少ないが、そ の値がミサイル発射直後に 0.5TECU ぐらいまで減少している。これはおおよそ 75%ほ どの減少に相当し、これまでのテポドン 2 号派生型のミサイルに比べて減少率が極めて 大きく、推力が大きく向上していることが示唆される。



図 3.12 2017 年 11/29 日に発射された火星 15 号による電離圏電子数の減少を、 GPS28 番衛星と観測局 0383 局の組み合わせによって、絶対値 VTEC の変動として とらえたもの。緑の破線で示す発射時刻の 5 - 6 分後に急激な電子数の減少がみら れ、その減少の割合はこれまでのどの事例よりも大きい。

4. 考察

観測結果をまとめると、2017 年 7 月 4 日に発射された ICBM 火星 14 と 11 月 29 日に 発射された ICBM 火星 15 では、ミサイル発射による電離圏の電子数減少が確認された。 一方で、発射地点近くや軌道上の電離圏の TEC 変動を観測しているにも関わらず、9 月 15 日に発射された IRBM 火星 12 ではミサイル発射による電子数減少が観測されなかっ た。この IRBM は 2017 年に北朝鮮から発射された弾道ミサイルの中では、飛翔距離が 3700 kmと一番飛翔距離が長かった弾道ミサイルであった。しかし、電離圏電子数の減 少の有無から、IRBM 級のミサイルでは ICBM と違い電離圏の電子数減少が起きるほど、 推力が大きくないと推察される。

また、7 月と 11 月の ICBM では、どちらもミサイル発射による電離圏の電子減少が 観測されたが、その VTEC の減少率(図 4.1)や地理的な広がり(図 3.3 と図 3.11)は大き く違う。11 月の ICBM 火星 15 に伴う VTEC 減少率は、7 月の火星 14 に伴う VTEC 減 少率の4 倍以上である。

ここで、先行研究(Heki et al., 2016)でまとめられた過去のロケットやミサイルによる VTEC の減少と、2017年の二つの ICBM による VTEC 減少を比較する。図 4.2 は過去の 事例について、横軸に背景 VTEC を、縦軸に VTEC の減少量を取って両対数グラフにプロ ットしたものである。両者が単純な比例関係にあれば、同じ推力を持つロケットのデータは 傾き1の直線に沿って分布するはずである。例えば H2A ロケットについて三回の打ち上げ の時の背景 VTEC と VTEC 減少はそのような分布を示しており、それらの推力が同程度で あることを示している。またテポドン 2 号及び 2012年 12 月と 2016年 2 月に打ち上げら れたその派生型も傾き1の線上に分布しており、それらの推力が同程度であることがわか る。一方 1998年のテポドン1号はそれより有意に右下にずれており、推力が小さいことが 明瞭である。

ここで便宜的に過去の例を H2A の系列、テポドン2号とその派生型の系列、テポドン1 号の系列の3つに分かれると考えてみる。すると2017年夏に発射された ICBM 火星14は テポドン2派生型の系列に、また秋に発射された火星15は H2A ロケットの系列におおよ そ当てはまることが分かる。したがって、7月に発射された ICBM 火星14 はテポドン2派 生型の二段目の推力と同程度だったと推定される。それに対して、11月に発射された ICBM 火星15 は日本の主力ロケットである H2A ロケットと同程度もしくはそれを上回るもので あり、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 と推定できる。以上から、火星シリーズの燃料の種類が明らかでない等の不確定要素が あるが、11月に発射された ICBM 火星15の推力は衛星を打ち上げることも可能なほど であったと考えられる。北朝鮮のミサイル技術が着実に進歩している可能性を物語る。



Time [hour]

図 4.1 2017 年 7 月の火星 14 と同年 11 月 の火星 15 の発射に伴う VTEC 絶対値の変 動の比較。7 月の火星 14 は、GPS9 番衛星 と観測局 0656 局、11 月の火星 15 は GPS28 番衛星と観測局 0383 局がとらえたもので ある。緑の破線で示す発射時刻から 5,6 分 後に二つの事例のどちらでも急激な電子数 減少がみられる。オレンジの破線で示す発 射直後の絶対値 VTEC からの減少率は、7 月の火星 14 は約 17%、11 月の火星 15 は 約 75%である。



図 4.2 過去の様々なロケットやミサイルについて VTEC の減少と背景 VTEC を比較 したもの。同じ推力を持つロケットやミサイルは傾き1の直線上にのるはずであり、青 丸で示す H2A ロケット、緑四角で示すテポドン2号派生型、灰色の四角で示すテポド ン1号は、それぞれの推力の相違を反映した異なる系列に分かれることがわかる。こ の上に2017年の ICBM 級の火星14と火星15を、赤三角で7月の ICBM 火星14 を、橙の三角で11月の ICBM 火星15のデータをプロットしてみた。緑の破線で示す テポドン2派生型の系列に7月の火星14 がのるが分かる。さらに11月の火星15 は青 の破線で示す H2A ロケット3発の系列よりやや上に位置することがわかる。

以上のように北朝鮮より発射されたミサイルについて考えることができるが、本研究 ではミサイルの排気ガスに含まれる水蒸気による影響を、TEC 変動を観測することに よって捉えているにすぎない。したがって、打ち上げられたミサイルが電離圏を通り抜 けるのに要する時間や、どのような軌道で電離圏を通り抜けているかは、他の情報を併 せて解析しない限り不明である。例えばミサイルの推力が同じ場合であっても電離圏を 通り抜ける時間が長いほど電離圏の電子数への影響が大きいと思われるが、そのような 要因は本研究では考慮していない。

例えば本研究では観測対象とした7月や11月のICBMと9月のIRBMでは軌道が 大きく違うが、その点は考慮していないのである。ICBMはロフテッド軌道で発射され ており二つのミサイルの最高高度は2500、4000km以上と高い高度に達しているのに対 し、9月のIRBMの最高高度は電離圏の少し上層の800km程である。もしIRBMのエ ンジン燃焼が電離圏 F 領域に達する前に終了していて、あとは慣性で飛翔していたと 考えると電離圏電子数減少がみられなかったのは自然なのかも知れない。ちなみに水平 方向の飛翔距離ではICBMの二つに比べると、IRBMは4倍近く飛翔している。

また、ミサイルについての推力を推定したが、すべてのロケットやミサイルが用いて いる燃料を同じと仮定しているので、その点に注意が必要である。たとえば燃料の違い によって、液体水素を燃料として主に水蒸気を排気として噴出するロケットと、固体燃 料を用いて様々な化学組成のガスを排気するロケットでは、同じ推力でも排気に含まれ る水蒸気の量は大きく異なる。より正確な推力の推定には燃料の種類の違いを考慮すべ きであろう。ちなみに、本研究で観測対象にしたミサイルや先行研究で比較したミサイ ルは、防衛省よりすべて液体燃料と推定されている。

5. まとめ

本研究では、2017年に北朝鮮より発射された新型の弾道ミサイルによる電離圏擾乱

について、GEONET 局のデータを用いて GNSS-TEC データを解析し、排気がもたら す電離圏電子数の減少を比較した。その結果、7月と11月に発射された ICBM である 火星14と火星15に伴う電離圏電子数の減少を確認した。一方、9月に発射された IRBM 火星12では、観測できる状況下ではあったが実際のデータからは電離圏の電子数減少 が確認できなかった。このことから ICBM 級とは違い、IRBM 級のミサイルでは電離 圏の電子数減少を観測できないことが推察される。また、7月の ICBM 火星14 は、 2012年や 2016年のテポドン2号派生型と同程度の推力であったと考えられる。さら に11月に発射された ICBM 火星15は、過去のいずれのミサイルやロケットを大幅に 上回る推力を持っていたことが示唆された。

6. 謝辞

本研究で使用した GPS のデータは、国土地理院の GEONET より提供させていただき ました。

本研究を進める上で多くの方にお世話になりました。特に指導教官である日置幸介先 生には大変お世話になりました。日置先生には、研究の初歩から本研究にかかわるあら ゆる点で指導していただきました。本当にありがとうございます。また固体ゼミの皆さ まにも多くのアドバイスをいただき、より研究を進めることができました。ありがとう ございます。さらに、宇宙測地学研究室の先輩方や同期の皆さまにもこの一年お世話に なりました。改めて皆さまに感謝の意を申し上げたいと思います。皆さま本当にありが とうございました。今後ともご指導のほどよろしくお願いいたします。

7. 参考文献

- 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), Ionosheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, J. Geophys. Res., 115, A09314,

doi:10.1029/2010JA015531.

Furuya, T. and K. Heki (2008), Ionospheric hole behind an ascending rocket observed with a dense GPS array, *Earth Planets Space*, 60,235-239.

古屋正人、宇宙測地学 講義ノート (http://www.sci.hokudai.ac.jp/~furuya/lecture/). 防衛省資料 平成 29 年度版 防衛白書 (2017)

(www.mod.go.jp/j/publication/wp/wp2017/w2017_00.html)
 「北朝鮮による核実験・弾道ミサイル発射について – 防衛省資」
 (www.mod.go.jp/j/approach/surround/pdf/dpark_bm_20171220.pdf)