

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の大陸間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 橋本 繭未

上昇するロケットや弾道ミサイルが電離圏に突入すると、排気ガスに含まれる水蒸気等の分子と電離大気の化学反応によって電子が減少する。全球航法衛星システム（GNSS）衛星で計測した全電子数（TEC）からこのような電子数の減少が観測できる。本研究では国土地理院の稠密観測網GEONETのデータを使い、2017年に北朝鮮から発射された複数の弾道ミサイルによる電離圏擾乱について調べた。7月と11月に発射されたICBMでは、ミサイル発射直後に電離圏の電子数の急激な減少が見られたが、9月に発射されたIRBMではTECの異常は観測できなかった。さらにTECの減少率から、7月のICBMは2012年や2016年のミサイル（テポドン2派生型）の二段目と推力が同程度であると推察されるが、11月のICBMはそれらを大幅に上回る推力を持つ可能性がある。

北朝鮮からのミサイル

北朝鮮はこれまで弾道ミサイルの発射実験を繰り返してきた。2016年からミサイル発射実験は活発になっており、2017年ではこれまでのミサイルとは異なる新型の弾道ミサイルの発射が複数回行われた。

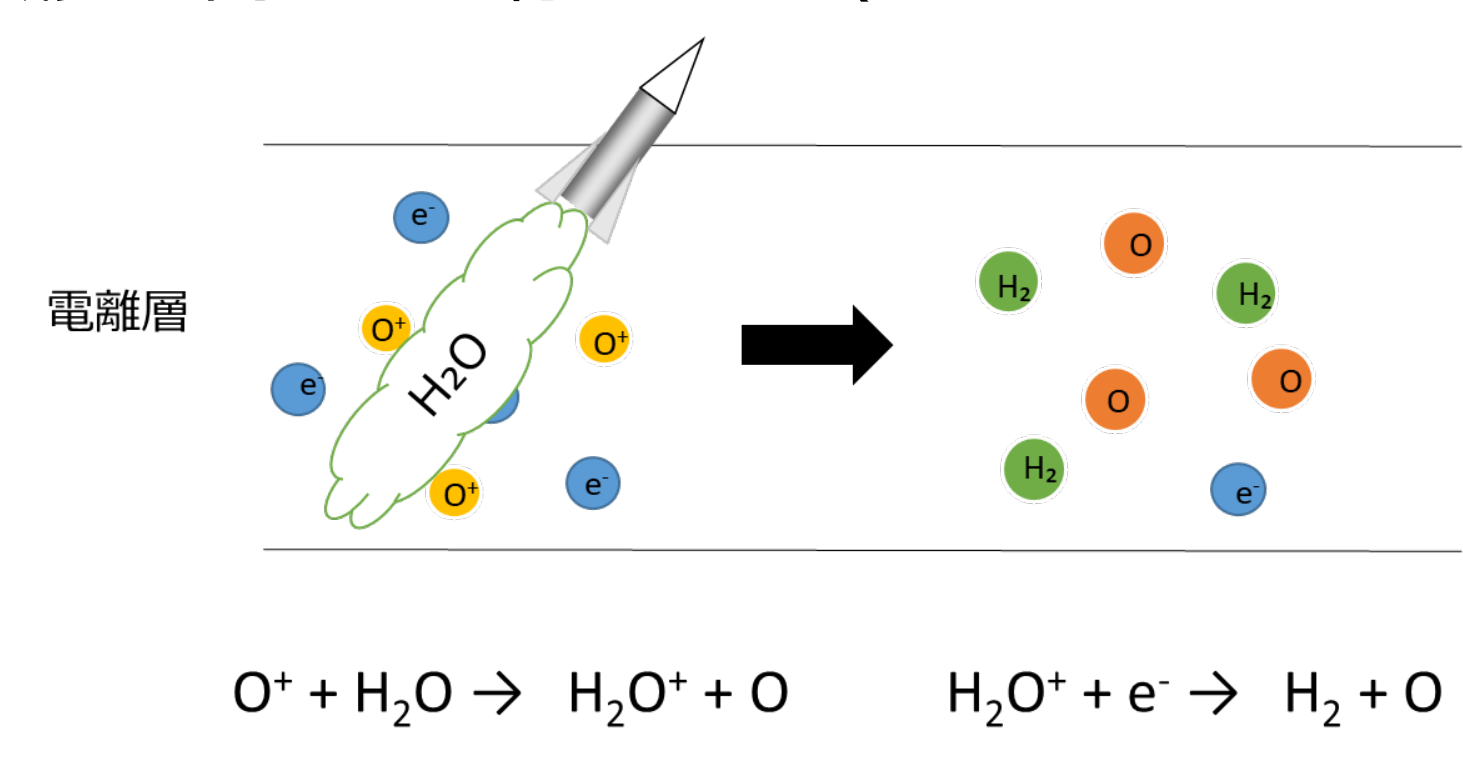
本研究では、北朝鮮政府から詳細な情報が公開されていない2017年に北朝鮮から発射された新型の中距離弾道ミサイル(IRBM)と大陸間弾道ミサイル(ICBM)に伴う電離圏擾乱を明らかにし、ミサイルの推力などの情報を得ることを目的とする。

2017年の北朝鮮による主なミサイル発射実験		
日付	弾種（推定）	飛翔距離
2.12	固体燃料を使用した新型の地上発射型弾道ミサイル	500km
3.06	スカッドER	1000km
5.14	IRBM級の新型ミサイル	800km
5.21	新型弾道ミサイル（2.12と同型）	500km
5.29	スカッドを改良した新型弾道ミサイル	400km
7.04	ICBM級の新型弾道ミサイル	900km
7.28	ICBM級の新型弾道ミサイル（7.4と同型）	1000km
8.29	IRBM級の新型ミサイル（5.14と同型）	2700km
9.15	IRBM級の新型ミサイル（5.14および8.29と同型）	3700km
11.29	ICBM級の新型弾道ミサイル（7.4および7.28とは違う型）	1000km

■ 本研究の対象 (防衛省資料を基に作成)

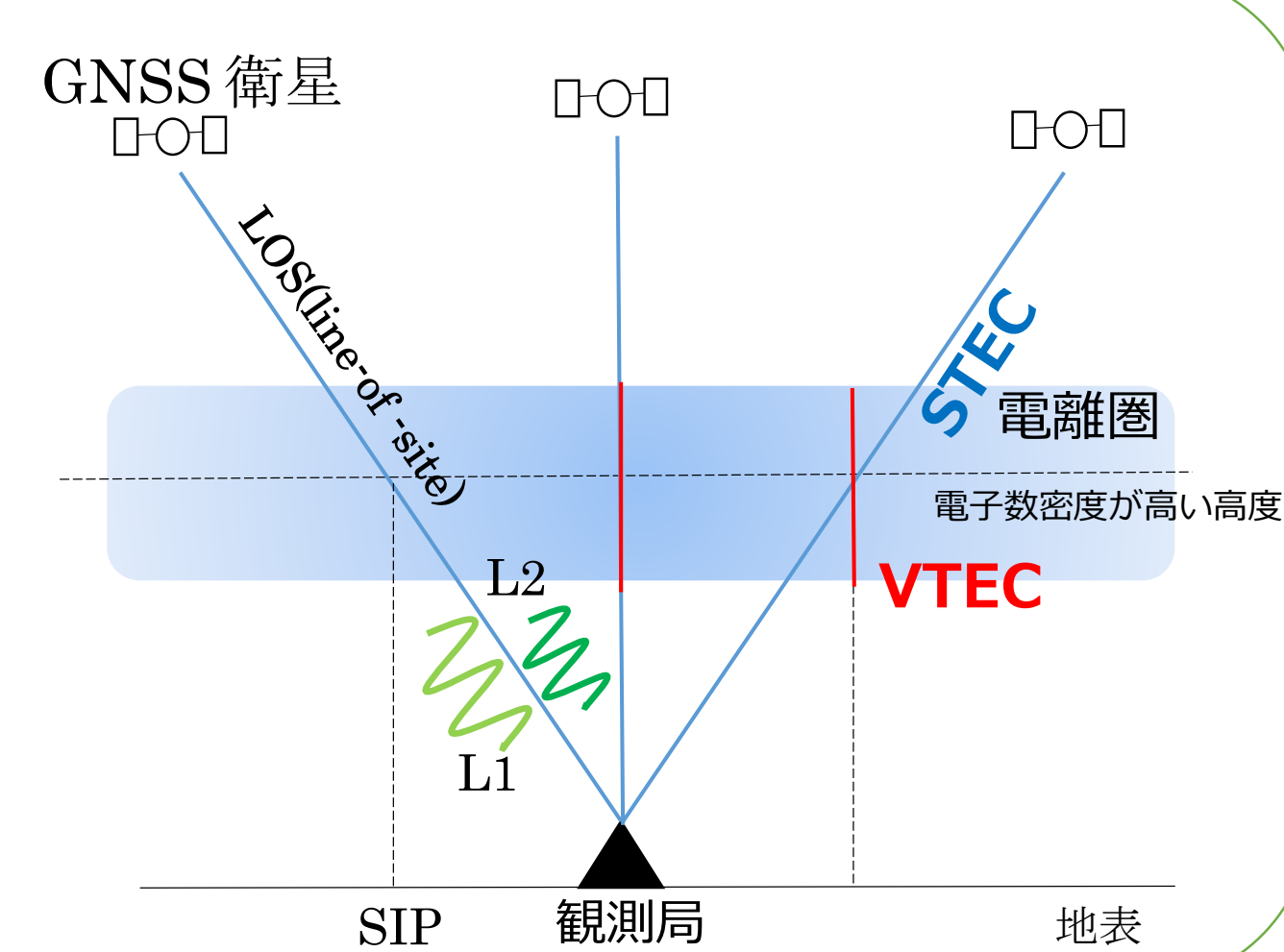
電離圏電子が減少する理由

電離圏にロケット/ミサイルの排気ガスに含まれる水蒸気が入ることにより、酸素イオンと水分子が陽イオンを交換し、水分子イオンと電子が結びつくことで電子の減少が高速に進行する。（Mendillo et al.1975）



GNSS-TEC法

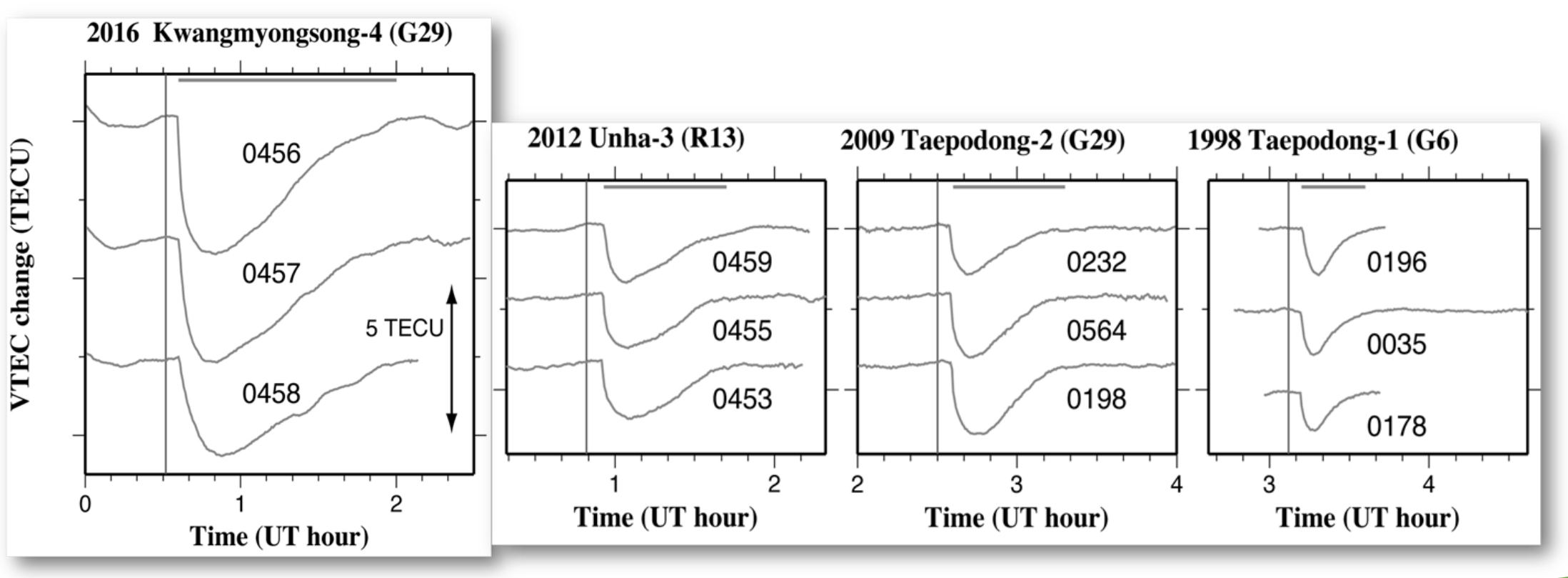
GNSS衛星から送信される二種類の搬送波であるL1とL2の差L4（=L1-L2）は中性大気遅延や衛星位置などの情報が相殺され、電離圏の情報のみを含む。L4にある定数をかけると衛星視線方向LOSに沿った斜めTEC(STEC)が求められる。またSTECに視線の電離圏の入射をかけることで鉛直TEC(VTEC)に換算できる。STECは見かけの変化をするが、VTECの変化は実際の電子数の増減を示す。薄い層として近似した電離層を視線が貫く点の地上投影をSIPと呼ぶ。



過去北朝鮮から打ち上げられたミサイルまたはロケット（2016年光明星4号、2012年銀河3号、2009年テポドン2号、1998年テポドン1号）では発射の5－6分後に急激な電子数の減少が確認された。

過去の例

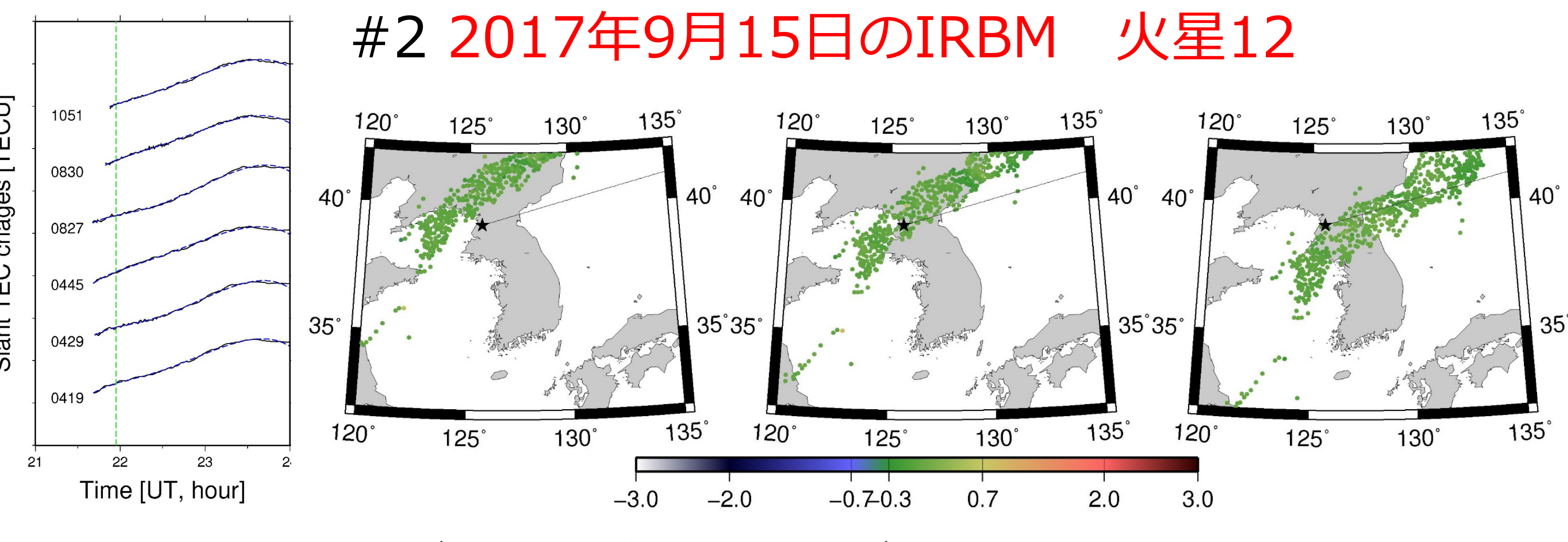
データはOzeki & Heki (2012)、Nakashima & Heki (2014)、日置他 (2016)による。



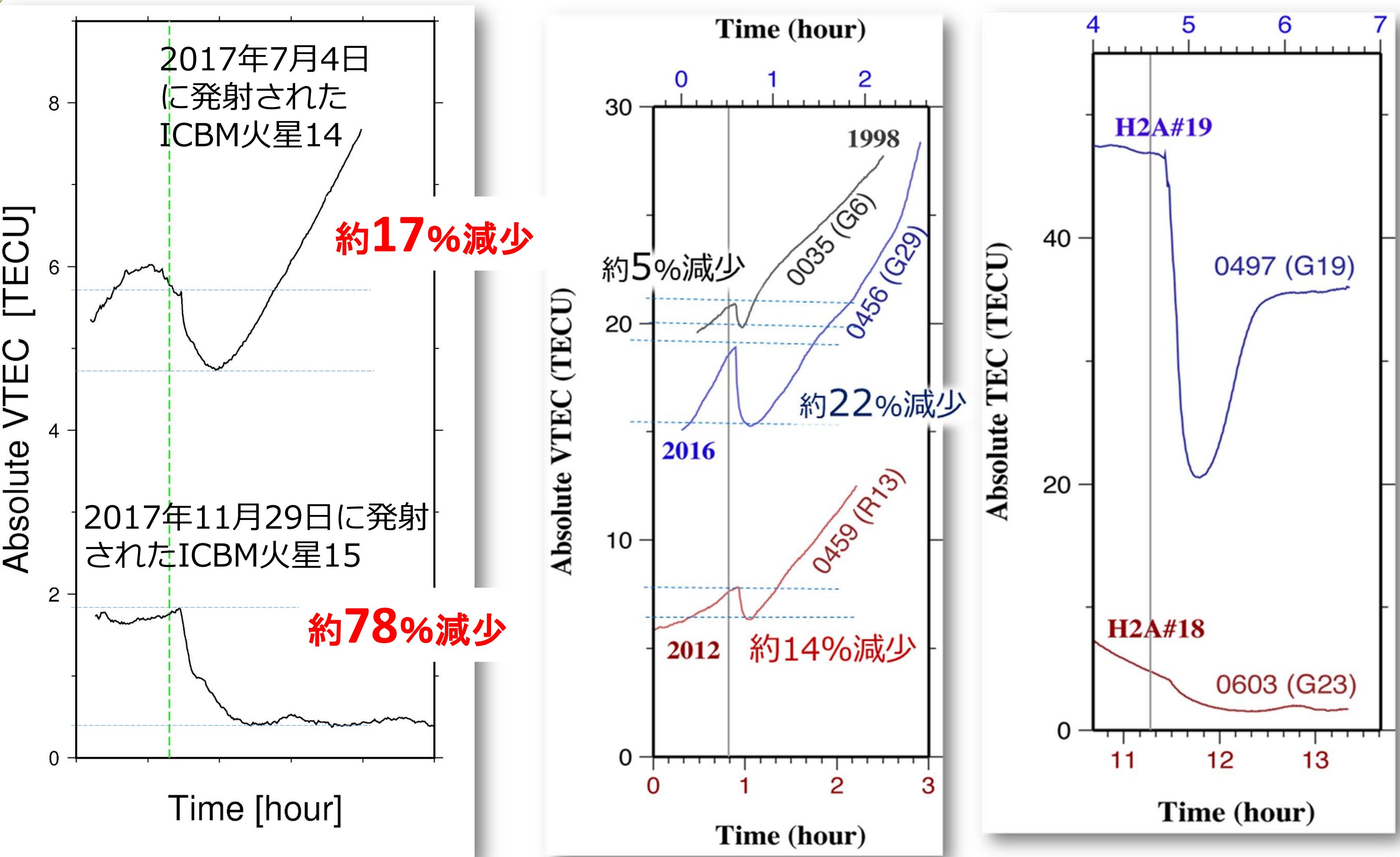
2017年の三つの事例 (7/4, 9/15, 11/29)

本研究では2017年に北朝鮮から発射された複数のミサイルの中で、同年7月4日9時39分(日本時間、以下同)に発射されたICBM火星14、同年9月15日6時57分に発射されたIRBM火星12、同年11月29日3時18分に発射されたICBM火星15の三つのミサイル発射に伴う電離圏擾乱を調べた。

それぞれの左図は発射地点上空の電離圏を貫く視線を持つGEONET観測局のSTEC変動。青い破線はミサイルによる影響が出るとされる時間帯を除いた部分のデータを時間の多項式を用いて近似したモデルを示す。また縦の緑の破線は発射時刻を示す。それぞれの右図はミサイルによるTEC異常を面的に捉えて地図上に示したもの。各GEONET観測局でのモデル曲線からの観測値の差をTECの異常と考え、高度300kmで計算したSIPの位置に示す。TECが正常であれば緑色。電子数が減少していれば青色、増加していれば黄色や赤色を示す。



GPS30番衛星を使用。モデルは発射直後から18分間のデータを除外して推定した。ミサイル発射地点や上昇中の軌道上の電離圏を観測しているが、異常が出るべき場所にTECの異常は見られなかった。

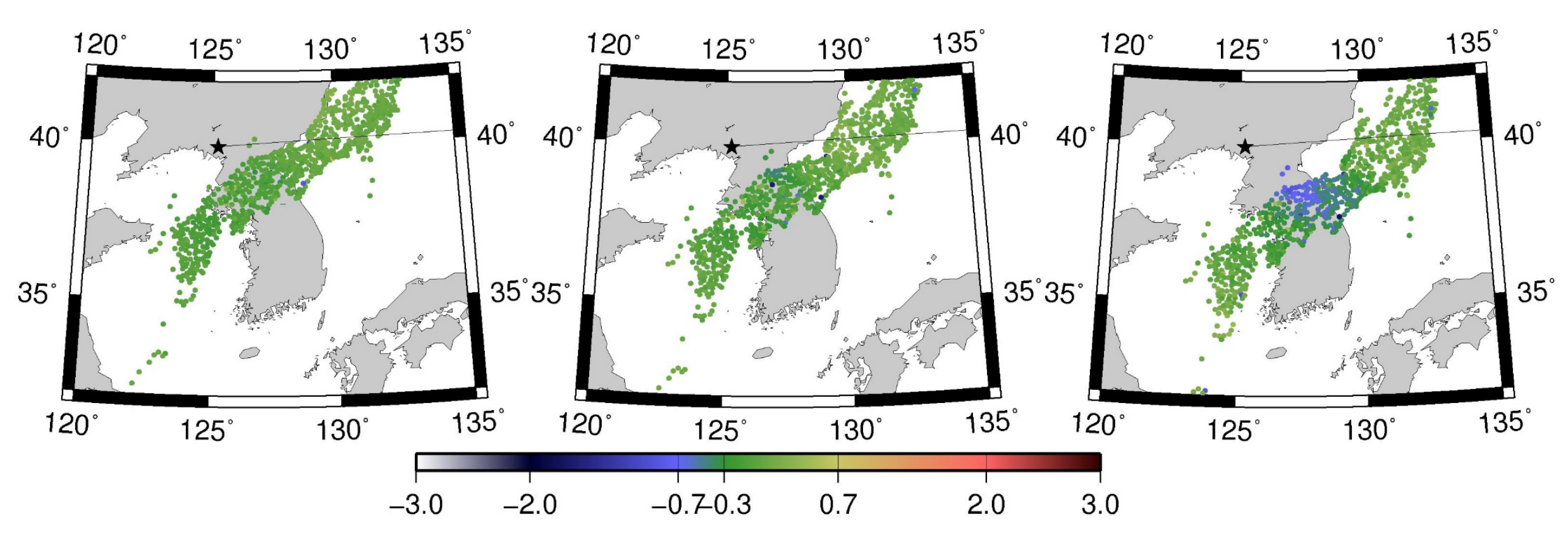


2017年7月の火星14(GPS9番衛星0656局)と同年11月の火星15(GPS28衛星0383局)発射に伴うVTEC変動

過去の北朝鮮から打ち上げられたロケット(ミサイル)打ち上げに伴うVTEC変動(日置他、2016)

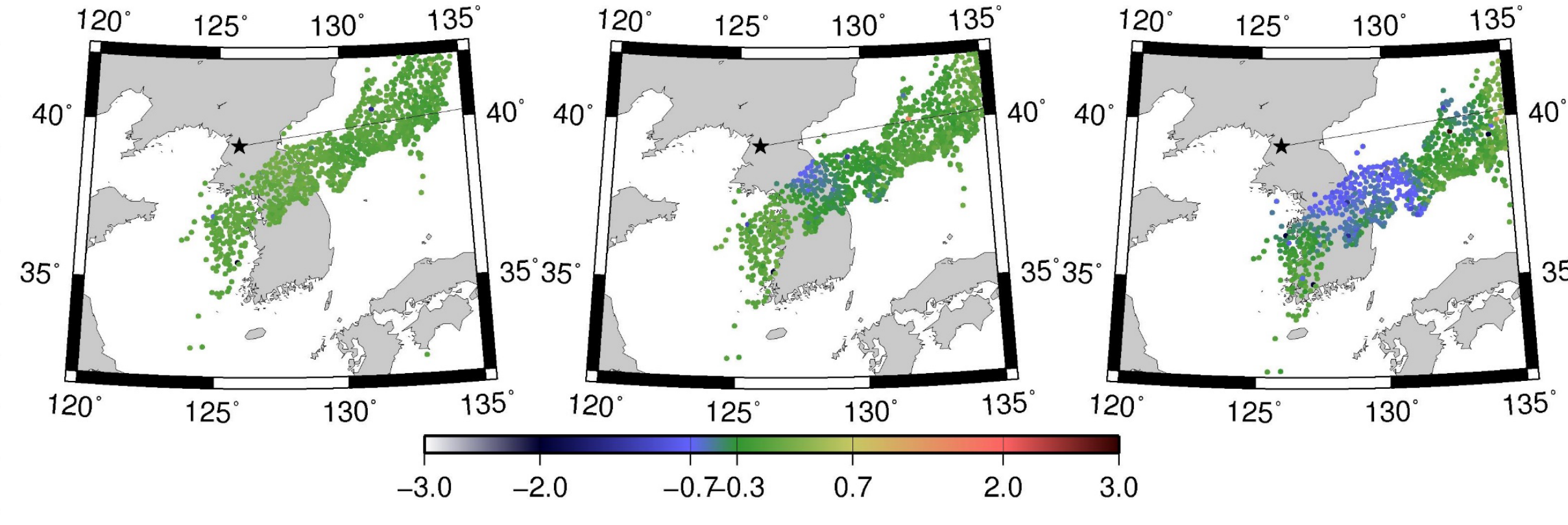
日本のH2Aロケット18号機と19号機の打ち上げに伴うVTEC変動(日置他、2016)

#1 2017年7月4日のICBM 火星14



GPS9番衛星を使用。発射3分後から48分間のデータを除外した部分からモデルを推定した。発射地点近くを電離圏を観測している島根の0656局で、発射5、6分後に急激にTECが減少している。発射15分後にはTECが減少した範囲が広がっている。

#3 2017年11月29日のICBM 火星15



GPS28番衛星を使用。モデルは発射時から1.7時間分のデータを除外して推定した。視線が発射地点近くの電離圏を貫いている中国地方の6つ観測局で、ミサイル発射数分後に急激にTECが減少している。発射6分後でも多くの局でTEC異常が起きており、発射15分後ではその範囲はさらに広がっている。概してTEC異常域は7月の火星14より広範囲に及ぶ。

同じ推力のH2Aロケットの打ち上げに伴うVTEC減少量は大きく異なるが、元のVTECに対する減少率は同程度である。このことよりVTEC減少率を比較すると、7月に発射された火星14の推力は、2016年の光明星4号や2012年の銀河3号などの二段目と同程度である。それに対して、11月に発射された火星15は火星14より相対的なTECの減少率4倍以上大きく、推力もそれらの4倍を超えた可能性がある。

結論

- 2017年に北朝鮮から発射された三つのミサイルの推力をGNSS-TECから比較検討した
- ICBMの排気は電離圏の電子数を有意に減少させるが、IRBMの排気はTECに影響を及ぼさない
- 7月のICBMは過去のテポドン2号派生型の二段目と同程度の推力であるが、11月のICBMの推力はそれを大幅に上回る

参考文献

日置幸介、中島悠貴、賀黎明、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, 2016

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, Ionospheric hole made by the 2012 North Korean rocket observed with a dense GNSS array in Japan, Radio Sci., 49, doi:10.1002/2014RS005413, 2014.

Ozeki, M. and K. Heki, 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, 2010

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