

地球接近天体による電離圏擾乱
火球イベントの GPS-TEC 観測による比較と
日本上空の QZSS-TEC 観測

Ionospheric disturbances caused by near earth object:
A comparison of the fireball events by GPS-TEC and
observation of TEC record above Japan from QZSS

北海道大学 理学部 地球惑星科学科
宇宙測地学研究室
学生番号 02161018

松下 愛

指導教官 日置 幸介

要旨

地球軌道の近くには多くの小さな天体が存在している。これらの天体が軌道の変化などによって地球に衝突した事例はいくつもあり、最近では2018年12月18日、ベーリング海上空で起こった火球の爆発が挙げられる。本研究では火球のような地球接近天体が地球に衝突した際の電離圏における電子数の変化を見て、その信号を捉えることができるか検討する。

地球大気の上層には、高度60 kmから1000 km以上にわたって電離圏と呼ばれる領域が存在する。地球接近天体が電離圏を通過すると、電離圏の電子数に不自然な変化が見られることがある。例えば小惑星が電離圏に達した時は、岩石が電離圏内の電子を押しつけて周辺の電子数が一時的に増加し、その後復元力が働くことで、TECの値が上下に振動すると考えられる。さらに、火球のように電離圏を通過した後地上付近で爆発する場合は、爆発による音波や重力波が大気を伝わって電離圏電子を振動させる。2013年2月15日にチェリャビンスクに出現した、観測史上最大といわれる火球では、実際に音波などが大気を伝わって電離圏に到達したと思われる信号が確認されている(*Ding et al.*, 2016)

本研究では、GNSS衛星で観測した電波から視線方向の電離圏全電子数(TEC, Total Electron Content)を求めるGNSS-TEC法を用いて、地球接近天体による電離圏擾乱を観測した。観測は、先述した2018年ベーリング海上空と2013年チェリャビンスクの2つの火球イベントを対象とした。また、対象を具体的に絞らず日本上空のTECを長期間観測することで不自然な擾乱が見られないかどうか検討した。前者の火球出現に伴うTEC擾乱観測に関しては、地球全体を網羅し、より多くの衛星からデータを得ることが可能な米国のGPSを利用した。後者の日本上空のTEC観測には、長期間の安定した観測が可能なQZSS静止衛星を利用した。

2013年チェリャビンスクの火球イベントでは、いくつかの衛星にN字型のTEC変化が認められた。いずれの信号も前後の日の同じ時間、同じ衛星ではみられなかったため、その日に特有な火球イベント由来の信号である可能性が高いと考えられる。距離と擾乱開始時間を比較してみたところ、TEC変化が伝搬していることも確認できた。その伝搬速度から、N字型のTEC変化は火球の爆発に伴う音波や重力波によるものだと考えられる。2018年ベーリング海の火球イベントでは、火球が出現した日に特有な正のTEC変化や継続した変動がみられた。しかし火球の爆発エネルギーと背景TECに対する振幅の割合などから判断して火球由来とは断定できない。

日本上空のQZSS-TEC観測では、TECの時系列を見るほか、TEC時系列に対するスペクトル解析も行った。TECの時系列観測では2019年8月と2月の時系列を比較し、TECの値が季節によって系統的に異なることを見出した。また、8月5日には緩始型磁気嵐によるTEC減少が観測された。スペクトル解析では、日周運動に伴う周期変動が見られるなど、TECが太陽活動の影響を強く受けていることが示唆された。

目次

1. はじめに	1
1.1 地球接近天体	1
1.2 地球接近天体の衝突による電離圏擾乱のメカニズム	2
1.3 先行研究	3
1.3.1 2013年チェリャビンスクにおける火球イベント	3
1.3.2 ロケットによるTEC減少	5
2. 観測・解析方法	5
2.1 GNSS	6
2.2.1 GPS	6
2.2.2 QZSS	7
2.1.3 GNSS-TEC法	9
2.2 スペクトル解析	11
3. 観測結果	13
3.1 火球によるTEC変動	13
3.1.1 2013年チェリャビンスクの事例	13
3.1.2 2018年ベーリング海上空の事例	16
3.2 日本上空におけるQZSS-TEC変動	19
4. 考察	24
5. まとめ	26
6. 謝辞	26
7. 引用・参考文献	26

1. はじめに

地球軌道の近くには多くの小さな天体が存在している。これらの天体が軌道の変化などによって地球に衝突した事例はいくつもある。最近では2018年12月18日、ベーリング海上空で火球の爆発が起こった。この爆発では173 ktものエネルギーが放出されたとNASAの記事上で報告されている(<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7355>)。このエネルギー量は第2次世界大戦の広島原爆の約10倍に値し、過去に観測された火球のうち2013年のイベントに次いで2番目に大きい規模であるということが分かっている。本研究では火球のような天体が地球に衝突した際の電離圏における電子数の変化を見て、その信号を捉えることができるか検討する。この章では本研究が対象とする地球接近天体とそれらが電離圏に突入したときの電子のふるまいについて説明し、電離圏で火球の爆発を捉えた例として2013年のチェリャビンスク火球に関する先行研究を紹介する。

1.1 地球接近天体

太陽系小天体のなかで、近日点距離が1.3 AU以下で地球軌道に接近する軌道を持つ天体の総称を地球接近天体(NEO, Near Earth Object)と呼ぶ。NEOを大きく2つに分類すると、小惑星と彗星の2種類に分かれる。本節1.1ではこれら2種類のNEOについてそれぞれ紹介する。

小惑星は金属や岩石、炭素などから成る太陽系小天体であり、主に火星と木星の間の小惑星帯に存在している。NEOとしての小惑星はさらに、その軌道によって「アポロ型小惑星」、「アモール型小惑星」、「アテン型小惑星」の3種類に分類される。

彗星は、その成分の約8割を氷が占める大きさが数kmから数10kmの小天体で、ガスと微量の塵も含む。NEOとしての彗星はさらに2種類に分類され、公転周期が200年以上のものを「長周期彗星」、200年以下のものを「短周期彗星」と呼ぶ。長周期彗星は太陽系の外側のオールトの雲から、短周期彗星は海王星の外側の黄道面に沿ったエッジワース・カイパーベルトからやってきていると考えられていて、短周期彗星は黄道面に沿った軌道で公転している。地球に接近する彗星には長周期彗星が多く、例えば1996年に地球に接近し、日本でも観測された百武彗星などがある。短周期彗星では、例えばハレー彗星が地球に接近した彗星として有名である。彗星が地球の軌道に近づくと、太陽の熱により表面の氷が融け、含まれているガスや塵を放出する。これにより彗星本体(核)を囲むようにぼんやりとした淡い光(コマ)が見られる。放出されたガスは帯電しているため太陽風に流され太陽の反対側に尾をつくり、塵は太陽からの光圧が塵のサイズによって異なるため太陽の反対側に広がりのある尾をつくる(図1.1)。

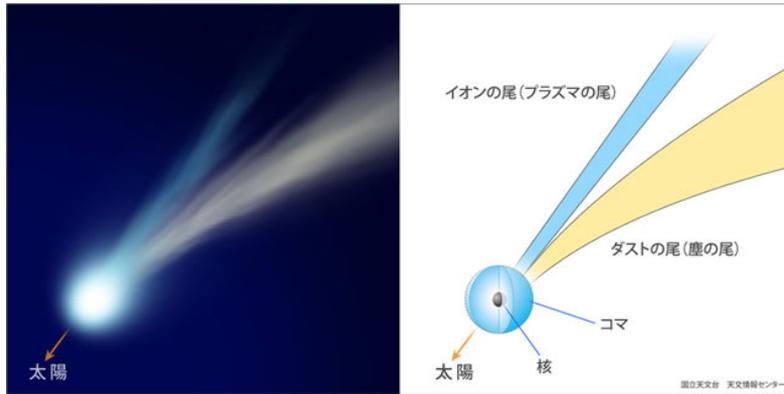


図 1.1 彗星の写真(左)と各部の名称(右) (国立天文台のページより)

これらの彗星や小惑星が地球大気に突入すると、摩擦により高熱を発生して燃え、流星として観測される。流星のうち、観測者の天頂において実視等級が-3以下のものを火球と呼び、燃え尽きずに地上まで落下したものを隕石と呼ぶ。

1.2 地球接近天体の衝突による電離圏擾乱のメカニズム

地球大気の上層には、高度 60 km から 1000 km 以上にわたって電離圏と呼ばれる領域が存在する。電離圏では、太陽紫外線や X 線の吸収などにより、大気分子の一部がイオンや電子に分かれた状態になっている。また、電離の程度は高度によって異なるため、その高度分布から電離圏は D 領域、E 領域、F 領域に分けられる(図 1.2)。電離圏の電子数は太陽光の入射強度に大きく影響されるため、昼夜の電子密度の違いや太陽の自転周期などを反映し規則的に変動する。また、背景大気の状態や太陽フレア、磁気圏の乱れなどにより不規則な変動が見られることもある。本研究では、GNSS 衛星で観測した電波から視線方向の電離圏全電子数(TEC, Total Electron Content)を求める GNSS-TEC 法を用いて地球接近天体の衝突に伴う電離圏擾乱を観測した。この手法に関しては 2 章で詳しく説明する。

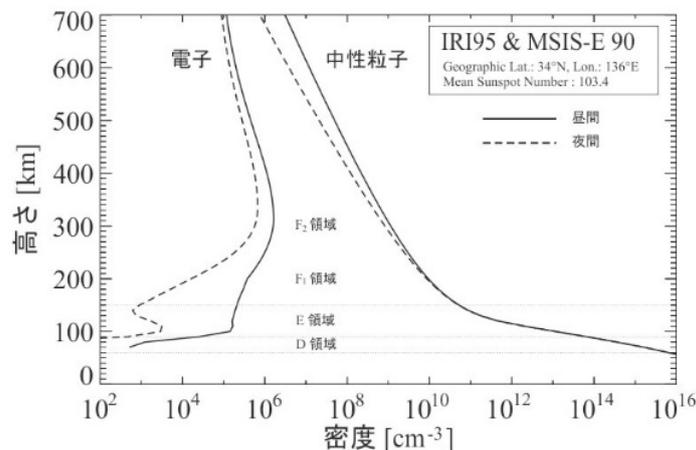
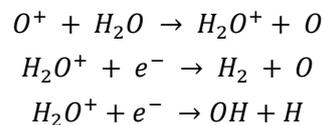


図 1.2 電離圏の電子密度構造(宇宙天気予報センターのページより)

電離圏に天体が突入すると、TEC に変化がみられることがある。ここでは、地球に小惑星や彗星が衝突したときに見られるとされる電離圏擾乱のメカニズムについて説明する。

まず、電離圏に小惑星などの岩石からなる物質が突入することを考える。小惑星が電離圏に達した時、岩石が電離圏内の電子を押しよけることによって周辺の電子数が一時的に増加する。その後、押しよけられた電子が元に戻ろうとする復元力が働き、TEC の値が上下に振動すると考えられる。さらに、火球のように電離圏を通過した後地上付近で爆発する場合は、爆発による音波や重力波が大気を伝わって TEC を振動させる。このような事例を検出した例として、1.3 節で *Ding et al.* (2016) を紹介する。

次に、彗星のように水蒸気を伴う天体が地球に衝突することを考える。電離圏に水蒸気が入ると、水蒸気と電離大気が化学反応を起こすことが分かっている。その化学反応式は、*Hashimoto and Heki* (2016) によると



という式で表される。この反応は紫外線による電子の生成速度より速いため、水蒸気の供給に伴い電子が減少すると考えられる。

最後に、金属を含む小惑星が衝突する場合についてであるが、このようにして金属イオンが電離圏に供給されるとスプラディック E が発生すると考えられている (*Whitehead*, 1960)。まず、金属を含む天体が地球に衝突し、はぎ取られた金属陽イオンが電離圏に供給される。供給された陽イオンは電離圏内部に吹く風に流されて運動するが、この運動に地磁気が影響してローレンツ力が働く。電離圏内部に風の鉛直シアがあり上下で風の吹く方向が反対向きになっている場合、このローレンツ力により陽イオンは内部に押し込められる。これにより電離圏内部に陽イオンの密度が高い層が生まれ、電子が引き寄せられてスプラディック E が発生する。このように、スプラディック E が発生するためには陽イオンの供給があること、電離圏内部で鉛直シアがあること、という 2 つの条件が必要となるが、金属を含む天体の衝突は前者の陽イオンの供給に繋がると考えられる。

1.3 先行研究

1.3.1 2013 年チェリャビンスクにおける火球イベント

過去に NEO 由来の TEC 変動が観測された事例として、2013 年チェリャビンスクでの火球が挙げられる。本節では、それを中国で観測した *Ding et al.* (2016) を紹介する。

2013 年 2 月 15 日 3:20UT に、北緯 54.8 度、東経 61.1 度にあるチェリャビンスクの上空で火球が爆発する事件が起こった。この火球は観測史上最大規模であり、爆発のエネルギーは TNT 爆

葉に換算すると 440kt に及ぶ。Ding et al. (2016)は、この火球爆発に伴う TEC 変化を中国北西部の GPS 観測局と GPS 衛星 PRN24 を用いて観測した。観測に用いた局の位置を図 1.3 に示す。

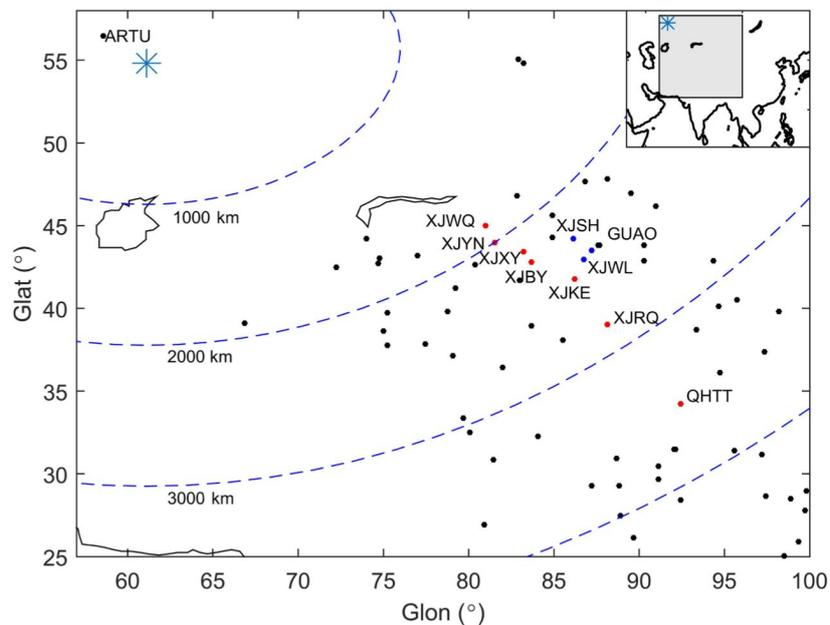


図 1.3 2013 年火球爆発に伴う TEC 観測に用いた局の分布 (Ding et al.,2016)。米印は火球が爆発した位置 (北緯 54.8、東経 61.1)を、点線は爆発地点からの距離を表す。図上の点は GPS 観測局の位置を示す。右上の影になっている部分は、観測範囲の位置を示している。

この論文では図 1.3 の赤点と青点で示された観測点における TEC の時系列変化と、TEC 変動が伝搬する様子を示している(図 1.4)。ここで、図 1.4(a)における DTEC とは、TEC の値から近似曲線の値を差し引き、衛星の運動による仰角変化に伴う変動などを取り除いたものである。

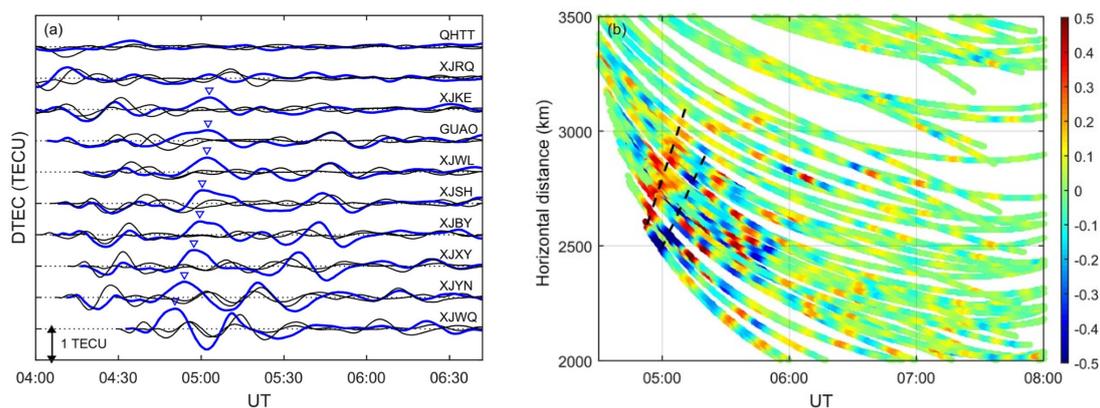


図 1.4 (a) 2013 年 2 月 15 日チェリャビンスクで起こった火球爆発に伴う TEC の時系列変化を爆発からの距離に近い順に並べたものと(b)TEC 変化の空間分布 (Ding et al.,2016)。(b)の y 軸は火球の爆発地点と IPP の間の距離を表す。色変化はその座標(時刻、距離)における TEC の値を表し、単位は TECU である。

図 1.4(a)から、爆発後しばらくしてN字型の TEC 擾乱がみられ、その擾乱は爆発地点から徐々に遠ざかっていることが分かる。また、図 1.4(b)で TEC の変動のピークである赤色と青色の部分を見ると、変動の遠ざかる速度は一定であることが分かる。この論文ではこれら2つの図から、火球爆発に伴って TEC 擾乱が伝搬しているとされる。また、図 1.4(b)点線の傾きから、擾乱の伝搬速度は 410 m/s であったとされ、その伝搬速度から爆発に伴って生じた音波や重力波が大気を通じて電離圏まで届いたと考えられている。

1.3.2 ロケットによる TEC 減少

電離圏に彗星が突入してきた時の化学反応と似た事例として、ロケットの電離圏通過に伴う電離圏電子の減少が挙げられる。本節ではその例として、*Hashimoto and Heki*(2016)を紹介する。

ここでは 2017 年 7 月 4 日に朝鮮民主主義人民共和国から打ち上げられた火星 14 号と 2017 年 11 月 29 日に打ち上げられた火星 15 号の2つの大陸間弾道ミサイルについて、電離圏通過後の TEC 変動を観測し、通過の数分後に電子の減少が見られたことを示している。

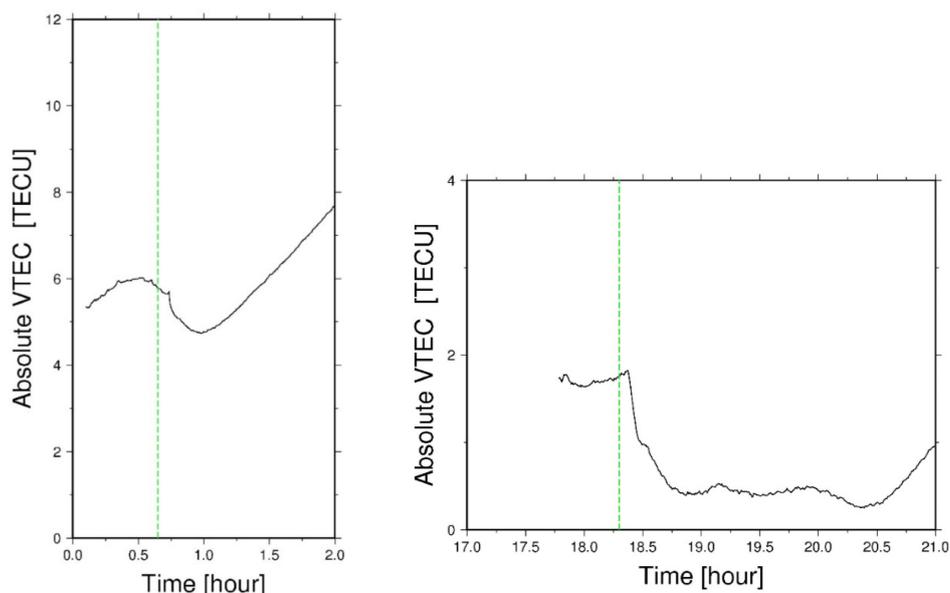


図 1.5 大陸間弾道ミサイルの通過に伴う電離圏の電子数を示したものの。図中の緑破線はミサイル発射時刻を表す。いずれも発射の数分後に電子の減少が見られる。

(左)2017 年 7 月 4 日に打ち上げられた火星 14 号の通過に伴う VTEC 変動

(右)2017 年 11 月 29 日に打ち上げられた火星 15 号の通過に伴う VTEC 変動

2. 観測・解析方法

TEC の導出には、全球測位衛星システム (GNSS, Global Navigation Satellite System) が用いられる。本章では本研究で利用した GNSS 衛星と TEC の導出方法を説明する。また、求めた TEC の時系列変化から、周期的な変動を見出すために行ったスペクトル解析についても説明する。

2.1 GNSS

GNSS とは、複数の衛星から送信される電波を地上の局で受信することで、電波に含まれる衛星位置や時刻等の情報から地上の座標を測定するシステムである。GNSS には米国の Global Positioning System(GPS)、日本の準天頂衛星システム(QZSS, Quasi-Zenith Satellite System)、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo といった世界の国々が生み出した多様なシステムが含まれる。本研究では GNSS のうち、米国の GPS と日本の QZSS を利用した。

2.2.1 GPS

GPS は、アメリカ合衆国によって、航空機・船舶等の航法支援のために開発された衛星測位システムである。このシステムは上空約 20,000km を周回する GPS 衛星、衛星の追跡と管制を行う管制局、利用者の受信機からなる。GPS 衛星から発信される電波には、衛星の軌道情報・原子時計の正確な時間情報などが含まれている。この電波が GPS 衛星から受信機に到達する時間を測ることで、衛星-受信機間の距離を求めることができ、複数の GPS 衛星からの距離を求めることで受信機の位置情報を知ることが可能である。

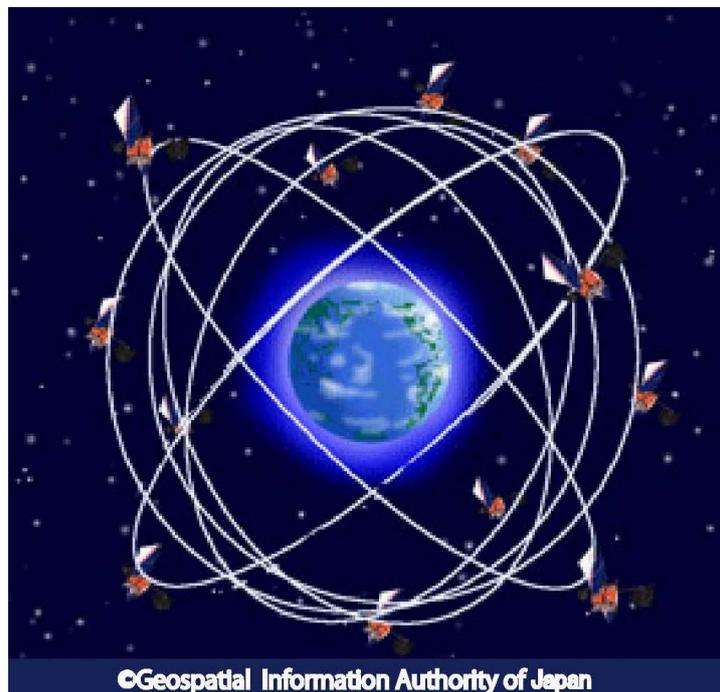


図 2.1 GPS 衛星のイメージ(国土地理院のページより)

2.2.2 QZSS

QZSS は、準天頂軌道の衛星が主体となって構成される日本の衛星測位システムのことである。このシステムは 2020 年現在、3 機の準天頂軌道衛星と 1 機の静止衛星で構成されている。静止衛星は赤道上空の高度約 36,000km にある軌道を地球の自転と同じ速さ、同じ方向に進むため、地上から見ると静止しているように見える。準天頂軌道衛星の自転周期は静止軌道衛星と同じだが、軌道離心率が大きく遠地点が日本上空にあるため日本から見た天頂に長時間滞在することが特徴である。それらは日本だけでなくアジア・オセアニア地域でも見ることができる (図 2.2)。



図 2.2 準天頂軌道衛星の軌道と利用可能地域(内閣府のページより)

2.2.1 節で説明した GPS 衛星は、地球全体を網羅した軌道を持っているためどこでも利用できるという利点がある一方、都市部や山間部など斜め方向からの電波が届きにくい地域では電波の反射による誤差(マルチパス)などが生じ精度が悪かった。そこで、高い仰角で長時間日本上空に留まっていられる準天頂軌道・静止軌道上に、GPS 衛星と同じ周波数の電波を送信できる QZSS 衛星を打ち上げることとなった。この QZSS 衛星を GPS 衛星と併せて使うことにより、都市部や山間部でもより安定した測位を行うことができるようになった。

また、GPS 衛星は同じ場所にずっと留まっていられないため、1つの衛星からある場所を観測する際、数時間のデータしか得られない(図 2.3)。それに対して QZSS 静止衛星による観測では、日本上空を常に同じ位置から観測しているため、より長い期間のデータを連続して得ることができる(図 2.4)。

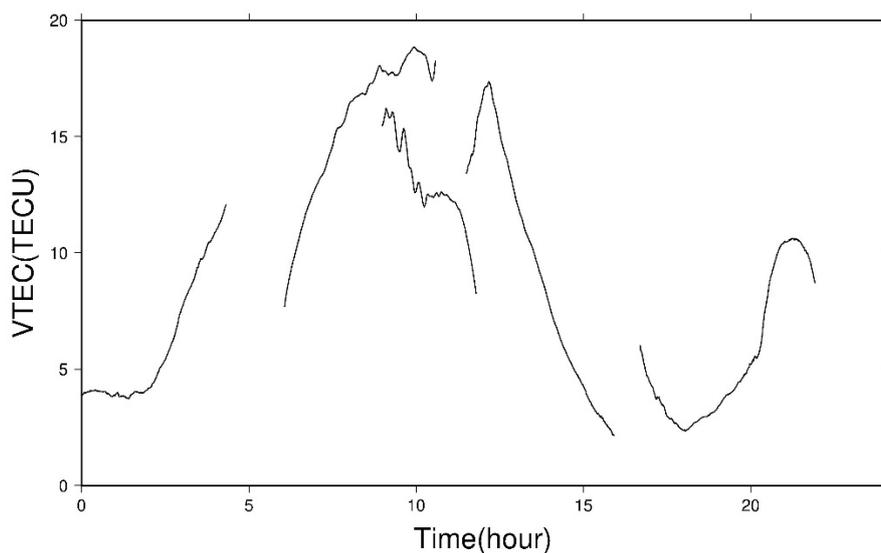


図 2.3 artu 局から GPS 衛星を見て得た観測データを用いて求めた TEC 時系列。図に描かれた 5 つの曲線はそれぞれ異なる衛星のデータをもとに描画している。1 つの衛星につき、長くても 5 時間ほどしか連続データが得られていないことが分かる。

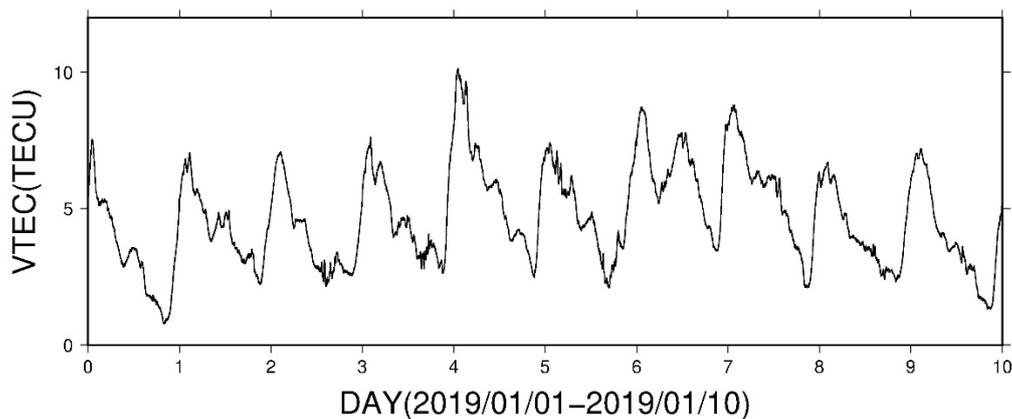


図 2.4 稚内(0001)局から QZSS 静止衛星を見て得た観測データを用いて求めた TEC 時系列。1 つの衛星だけで、同じ場所の連続データを長期間得ることができる。この図では 10 日間しか描画していないが、さらに長い期間で描画することも可能である。

本研究では、日本上空を常に観測し、より長い期間の TEC 連続データを得るため、QZSS 衛星のうち静止軌道衛星を用いた。

2.1.3 GNSS-TEC 法

本研究では、GPS 衛星、QZSS 衛星が共に 1.5 GHz (L_1) と 1.2 GHz (L_2) の 2 種類の周波数で電波を発信しているという特徴を利用し、受信した信号の位相差から電離圏の電子数を推定する GNSS-TEC 法という手法を利用した。本節では、GNSS-TEC 法の原理について説明する。

GNSS 衛星が発信する搬送波は、中性大気や電離圏などで屈折し、伝搬遅延が生じる。電離圏による遅延は電子がマイクロ波の伝搬を妨げるために起こり、搬送波の周波数ごとに異なる一方、中性大気など他の要因による遅延は周波数に依存しない。そのため、周波数の異なる 2 種類の波の位相差は、電離圏遅延の周波数による違いだけを含む。ここでは、周波数 f_1 、 f_2 で観測された位相にそれぞれ波長をかけて、長さの単位 (m) に直したものを L_1 、 L_2 とおく。また、式 (1) のように、その差を L_4 とする。

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (1)$$

ここで、周波数 f_1 (f_2) の電波における電離圏遅延を S_1 (S_2) m とおくと、

$$L_4 = S_1 - S_2 \quad (2)$$

また、 S は電離圏を通る経路と真空を通る経路での見かけの距離の差に等しいので、電離圏の屈折率 n_p を用いると (3) のように表せる。

$$S = \int (n_p - 1) ds \quad (3)$$

電離圏の屈折率 n_p は、周波数 f (Hz)、電子数密度 N_e ($/m^3$)、比例係数 b とおくと

$$n_p = 1 - \frac{N_e}{f^2} b \quad (4)$$

(ファインマン物理学 2 巻 6 章より)

であることから、(4) を (3) に代入して電離圏遅延 S_1 、 S_2 を得る。

$$S_1 = -\frac{b}{f_1^2} \int N_e ds = -\frac{b}{f_1^2} STEC \quad (5)$$

$$S_2 = -\frac{b}{f_2^2} \int N_e ds = -\frac{b}{f_2^2} STEC \quad (6)$$

ここで、(5)、(6) の STEC (Slant TEC) は、衛星視線方向に電子数を積分した値を表す。

次に、(2)と上式を用いて比例定数bに適当な値を入れると、 L_4 と STEC の関係式が得られる。

$$\text{STEC} = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_4 \quad (7)$$

ただし L_4 には整数値の不確かさがあるため、本研究をはじめ TEC の議論をする際は、式(8)のように、位相差の変化量から STEC の変化量を求めている。

$$\Delta\text{STEC} = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta L_4 \quad (8)$$

次に、GNSS-TEC 法の模式図を図 2.5 に示す。求めた STEC の値と、衛星や観測局の位置座標を用いることで鉛直方向の電離圏全電子数(VTEC, Vertical TEC)が求められる。

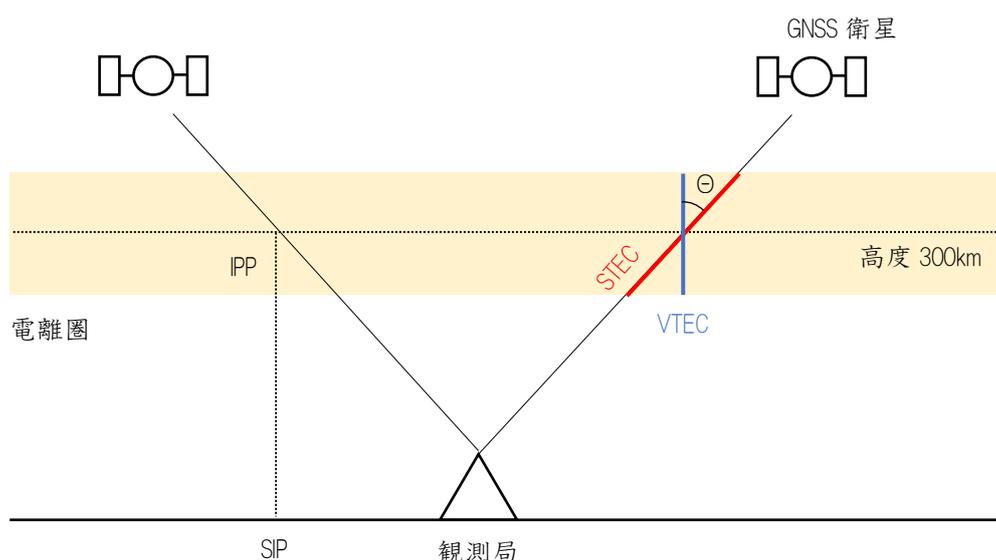


図 2.5 GNSS-TEC 法の模式図。VTEC は STEC に入射角の余弦を乗じて求める。求めた VTEC は、電離圏の中で最も密度の高い高度 300km に薄い層を仮定し、その層と視線が交わる所(IPP, Ionospheric Penetration Point)に位置すると考える。また、IPP を地上に投影した地点を SIP(Sub-ionospheric Point)と呼ぶ。

SIP が同じでも入射角によって視線が貫く電離圏の範囲は変化するため、STEC の絶対値は入射角により大きく異なる。一方、VTEC は入射角に関係なく絶対値が決まるため、変化量の全体に対する割合の比較など、TEC の絶対値が必要な場合は VTEC が多く使われる。

2.2 スペクトル解析

この節では、2011年出版の「スペクトル解析」に基づき、本研究で行ったスペクトル解析について記述する。スペクトル解析の手法には、直接パワースペクトルを求める方法と、自己相関関数から求める方法がある。前者では、振幅の2乗がエネルギーを表すことを利用し、それぞれの周波数における単位時間当たりの平均エネルギーに期待値を乗じることでパワースペクトルを求める。後者では、比較的計算が容易な自己相関関数をまず求め、これをフーリエ変換することでパワースペクトルを求める(Wiener-Khinchineの公式)。本研究では、後者の自己相関関数から求める方法のうち、Blackman-Tukey法(B-T法)を用いた。

まずB-T法を説明する前に、自己相関関数について記述する。自己相関関数とは、変数 $x(t)$ について、時間 τ (ラグと呼ぶ)だけずらした値 $x(t + \tau)$ との積のアンサンブル平均(時刻を固定、様々な周波数での値の平均)を取ったものである。ただし、定常確率過程での自己相関関数は、大抵式(9)のように時間平均で表すことができ、これは時刻に依存しない τ だけの関数である。

$$C(\tau) = \overline{x(t)x(t + \tau)} \quad (9)$$

また、これを正規化した関数のことを、自己相関係数といい、式(10)に示す。

$$\begin{aligned} R(\tau) &= C(\tau)/C(0) \\ &= \overline{x(t)x(t + \tau)}/\overline{x^2(t)} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)で示した自己相関係数は直感的に、ラグ τ だけずらした時間における波形がもとの時間の波形とどれだけ似ているかを表し、似ているほど1に近い値になる。

次に、B-T法について記述する。この手法は1950年代後半に提案された比較的古い手法であり、分解能が低い、短いデータの処理ができないなどの欠点がある。一方、計算の原理が明確であることや、標本誤差が少なく安定したスペクトル解析が可能なることから、半世紀ほど経った今でもよく利用されている。ここで、B-T法の詳しい計算手順を図2.6に示す。

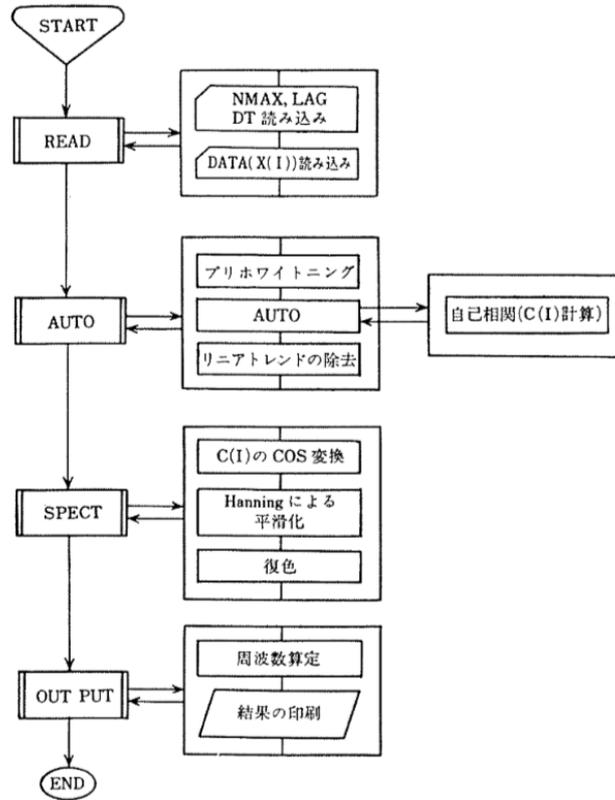


図 2.6 B-T 法による計算手順(スペクトル解析より)

まず、ラグやデータの読み取り間隔、データ数の値を与える。エイリアシングを避けるため、読み取り間隔はナイキスト周波数が生データの最大周波数より大きくなるよう設定する。ここでナイキスト周波数は、読み取りの際にサンプリングする周波数の2分の1の周波数である。次に、平均勾配の算出による低周波数のトレンド除去を行い、式(11)から相関関数を計算する。

$$\tilde{C}_r = \frac{1}{N-r} \sum_{k=1}^{N-r} \tilde{x}_k \tilde{x}_{k+r} - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{x}_k \right)^2 \quad (r = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

求めた相関関数について、式(12)のようにフーリエの有限離散 cosine 変換を行う。

$$\tilde{V}_r = \left[\tilde{C}_0 + 2 \sum_{q=1}^{m-1} \tilde{C}_q \cos\left(\frac{qr\pi}{m}\right) + \tilde{C}_m \cos r\pi \right] \Delta t \quad (12)$$

3. 観測結果

本研究ではGPS衛星とQZSS衛星を用いて、それぞれ別の見方でTECの観測を行った。1つ目の火球によるTEC変動に関しては、時間や観測範囲を具体的な火球イベント周辺に限定し、イベントに伴う電離圏擾乱を観測した。2つ目の日本上空におけるQZSS-TEC変動に関しては、観測対象を限定せず、長期間の時系列変動を見ることで、どこかに異常なNEO由来の信号が見られな
いか検討した。

3.1 火球によるTEC変動

本節では、2013年のチェリャビンスク、2018年のベーリング海上空で起こった2つの火球イベントに伴うTEC変化を紹介する。2013年チェリャビンスクの事例は既にいくつかの国でTEC観測が行われた結果が発表されているため、本研究では1.3.1で紹介したDing et al. (2016)の再現を行った。

3.1.1 2013年 チェリャビンスクの事例

まず、2013年2月15日3:20UT頃、ロシアのチェリャビンスクに落下した火球爆発に伴う電離圏擾乱について説明する。NASAが公開している過去の火球データによると、火球が落下した地点は北緯54.8度、東経61.1度であり、爆発のエネルギーはTNT爆薬に換算して440 ktと観測史上最大規模である。火球の位置とその時刻に上空を飛んでいたGPS衛星のSIP軌跡（電離圏は高度300 kmの薄い層と仮定）を図3.1に示す。

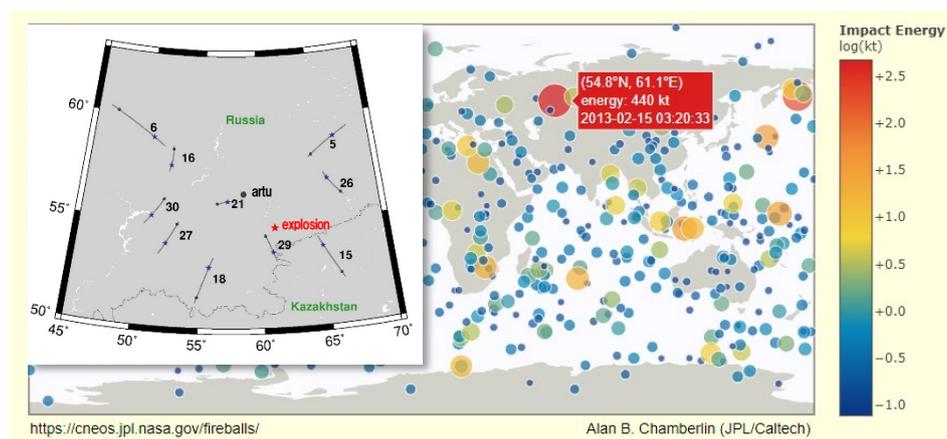


図 3.1 ロシアのチェリャビンスク上空で爆発した火球とGPS衛星の位置。(前面)チェリャビンスク近傍のartu局から見えるGPS衛星の軌道データから作成した。局位置を黒い丸、爆発した地点を赤い星印、上空を飛ぶGPS衛星の3:00-3:30 UTのSIP軌道を直線で表している。直線の横に書かれた数字は衛星番号である。SIP軌道上の黒丸は3:00 UT、星印は爆発の起きた3:20 UT時点の衛星位置を示している。(背面)NASAで公開されている火球観測データ。吹き出しで示す赤い丸が、チェリャビンスクの火球の爆発地点である。

次に、artu 局から GPS 衛星を見て得られた 2:30-5:00 UT の VTEC 時系列を図 3.2 に示す。15 番衛星、26 番衛星、29 番衛星などいくつかの衛星に N 字型の VTEC 変化が認められた。

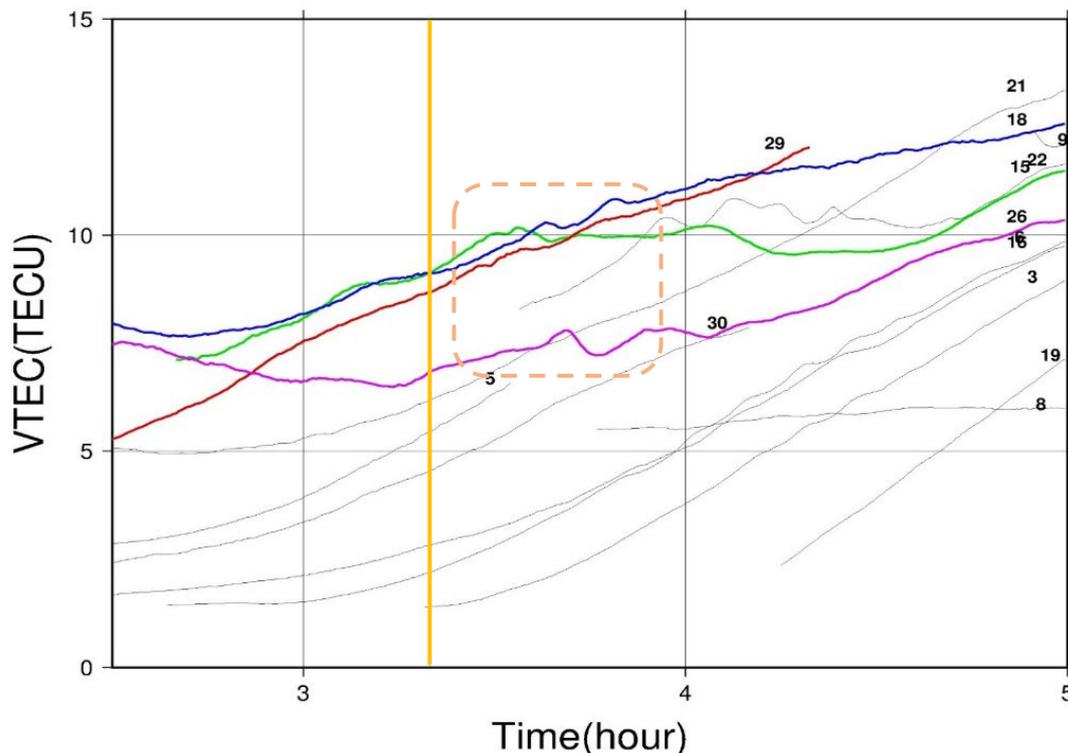


図 3.2 チェリャビンスク近傍の artu 局における火球出現時刻前後の VTEC 変化。橙色で示す時刻は、火球爆発時刻の 3:20 UT である。橙色点線で囲んだ所に N 字型の VTEC 変動が見られる。

図 3.2 は 15 番衛星、18 番衛星、26 番衛星、29 番衛星の 4 つの衛星から見た VTEC に、N 字型の TEC 変化があることを示している。最も大きい 26 番衛星の信号の振幅は、約 0.5 TECU 程度であった。擾乱が見られた衛星はいずれも爆発した時刻にその周辺を飛んでいた (図 3.1) が、同じように近くを飛んでいる 21 番衛星には、N 字型の TEC 変化は認められなかった。

次に、これらの衛星の VTEC 時系列について、N 字型変化を除いた部分を 5 次で近似し、そこからの差分をとったものを図 3.3 に示す。近似曲線からの差をとることで、軌道や太陽活動などによる長時間の変化を差し引いて、短時間の細かい変動をよりよく見ることが出来る。また、求めた差分の図を爆発からの距離ごとに並べた。

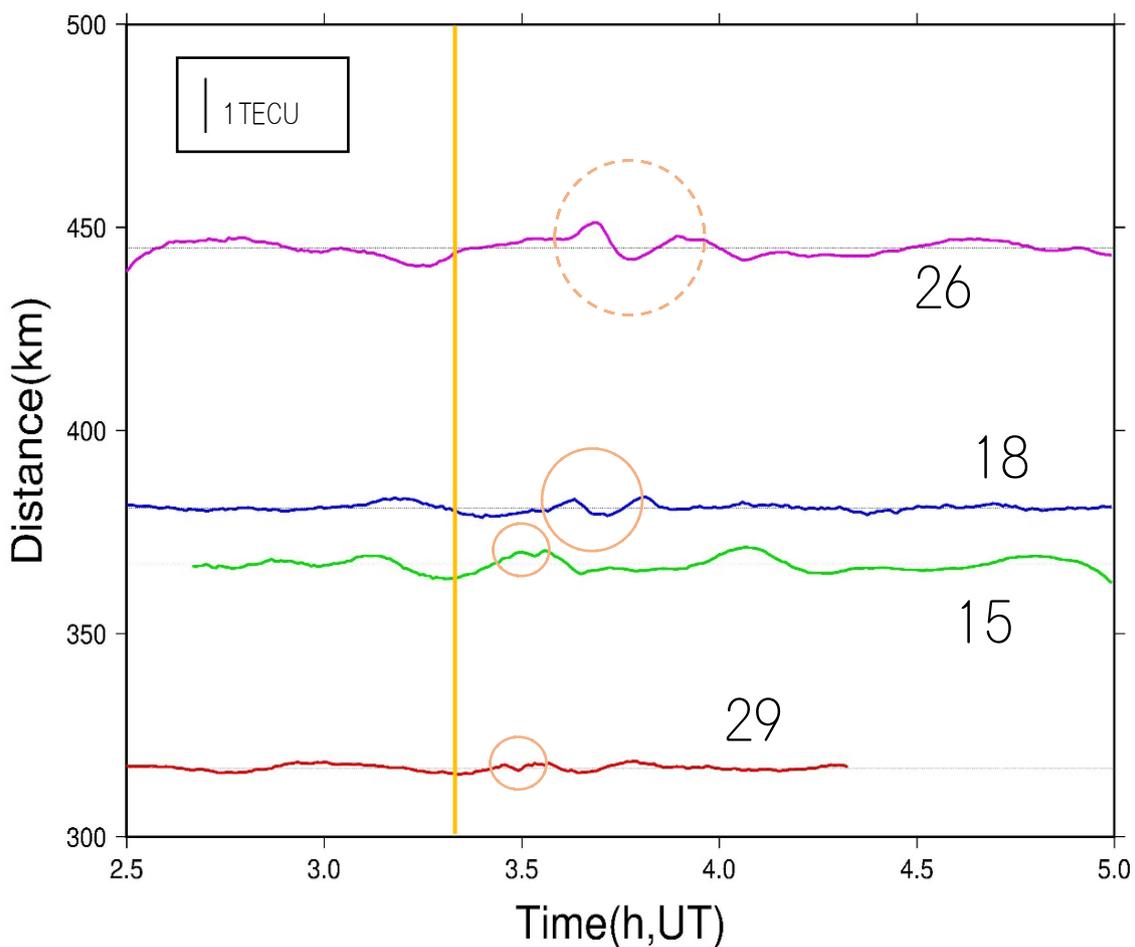


図 3.3 VTEC 時系列の近似曲線から差を取り、爆発-SIP の距離ごとに並べたもの。artu 局が得た観測データのうち、擾乱が見られた 15 番衛星、18 番衛星、26 番衛星、29 番衛星からのデータを用いた。また、N 字型の TEC 変動が確認できる部分を橙色で囲んだ。

図 3.3 では、爆発から近い衛星ほど信号も早く見えている。また、距離の近い 29 番衛星、15 番衛星の VTEC 擾乱は、距離の遠い 18 番衛星、26 番衛星の擾乱に比べ周期が短く、振幅も小さいことが読み取れる。

次に、信号の見られた VTEC を前後の日の VTEC と比べ、爆発の起きた日に特有な信号なのかどうかを確かめた(図 3.4)。描画には artu 局から見た GPS 衛星の観測データのうち、15 番衛星、26 番衛星、29 番衛星のデータを用いた。

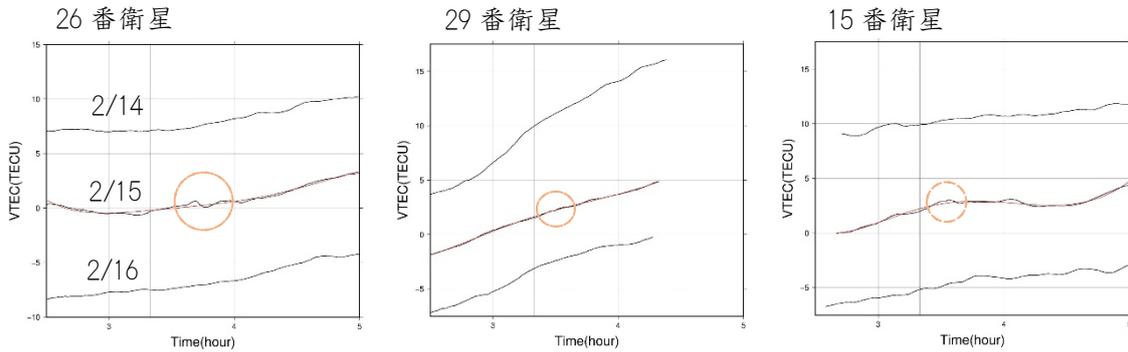


図 3.4 擾乱がみられる3衛星のVTECを前後の日と比較したもの。2月15日を基準とし、14日のVTEC値に5を加え、16日のVTEC値から5を引くことで前後の日のグラフを上下にずらした。また、図3.3作成時に除いた近似曲線を2月15日のVTECに重ねて橙色で描画してある。

15番衛星、26番衛星、29番衛星のいずれも、前後の日にN字型のTEC変化はみられなかった。このことから、2月15日の変動は火球起源である可能性が高いといえる。

3.1.2 2018年 ベーリング海上空の事例

次に、2018年12月18日23:48 UT頃、ベーリング海上空に落下した火球の爆発に伴う電離圏擾乱について説明する。NASAによると、火球が落下した地点は北緯56.9度、東経172.4度、爆発のエネルギーはTNT爆薬に換算して173 ktである。このエネルギー量は観測史上2番目に大きな値であるが、史上最大規模であるチェリャビンスク火球のエネルギーの半分にも満たない。火球の位置とその時刻に上空を飛んでいたGPS衛星のSIP軌道を図3.5に示す。

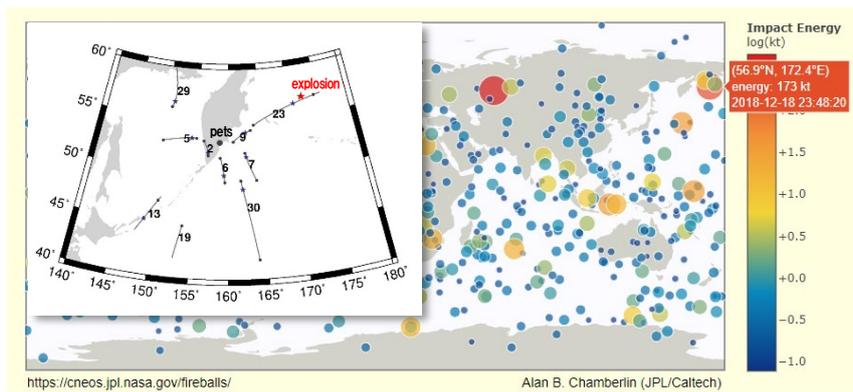


図 3.5 ベーリング海上空で爆発した火球とGPS衛星の位置。(前面)ベーリング海近傍のpets局から見えるGPS衛星の軌道データから作成した。局位置を黒い丸、爆発した地点を赤い星印、上空を飛ぶGPS衛星の23:00-24:00 UTのSIP軌道を直線で表している。直線の横に書かれた数字は衛星番号である。SIP軌道上の黒丸は23:00 UTと24:00 UT、星印は爆発の起きた23:48 UT時点の衛星位置を示している。(背面)NASAで公開されている火球観測データ。吹き出しで示す橙色の丸が、ベーリング海上空の火球の爆発地点である。

次に、pets 局から GPS 衛星を見て得られた 12 月 18 日 23:00 UT-12 月 19 日 3:30 UT の VTEC 時系列を図 3.6 に示す。9 番衛星、13 番衛星、30 番衛星、7 番衛星にそれぞれ不自然な TEC 変化が観測された。

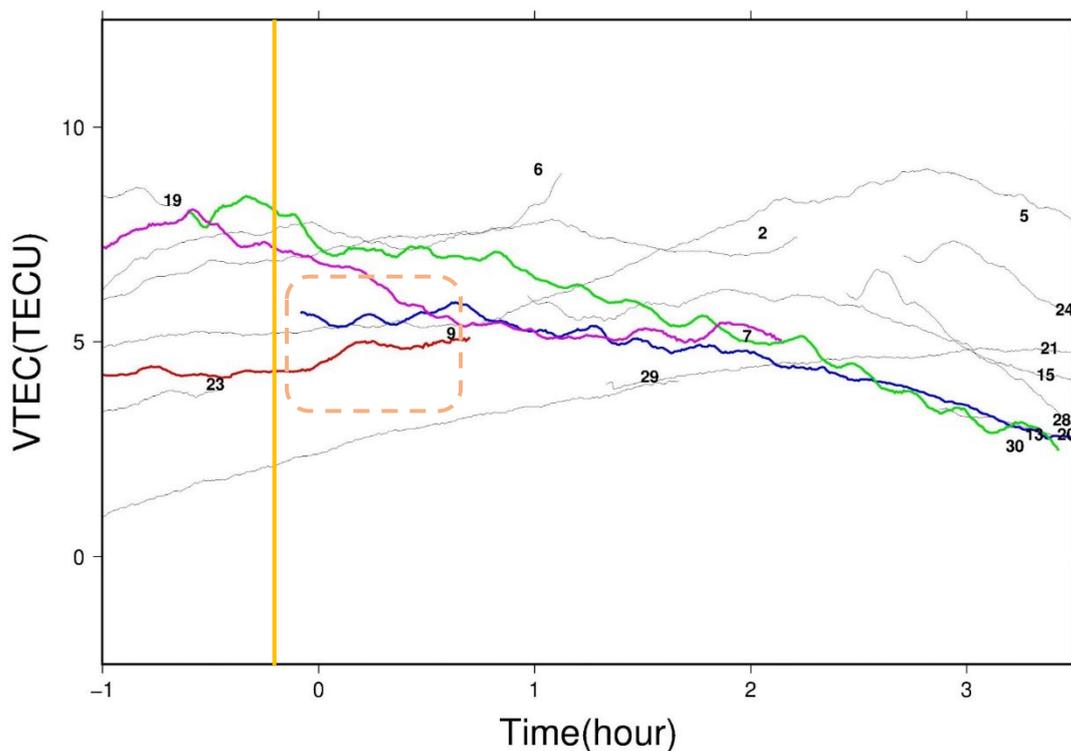


図 3.6 ペーリング海近傍の pets 局における火球出現時刻前後の VTEC 変化。橙色で示す時刻は、火球爆発時刻の 23:48 UT である。橙色点線で囲んだ所に正の VTEC 変化が見られる。

9 番衛星では、衝突 20 分後に振幅 0.5 TECU 程度の正の VTEC 変化が観測された。30 番衛星では爆発直後の急激な TEC 減少が観測された。また、13 番衛星、30 番衛星、7 番衛星では周期 20 分程度の継続した変動が認められた。9 番衛星、30 番衛星、7 番衛星は爆発地点の周辺を飛んでいるが、13 番衛星は少し離れたところを飛んでいる(図 3.5)。また、これらの衛星と同じくらい近くを飛んでいる衛星は他にも多くあるが、いずれも不自然な TEC 変化は観測されなかった。

次に、これらの衛星の VTEC 時系列について、5 次で近似した曲線からの差分をとり、爆発からの距離ごとに並べたものを図 3.7 に示す。

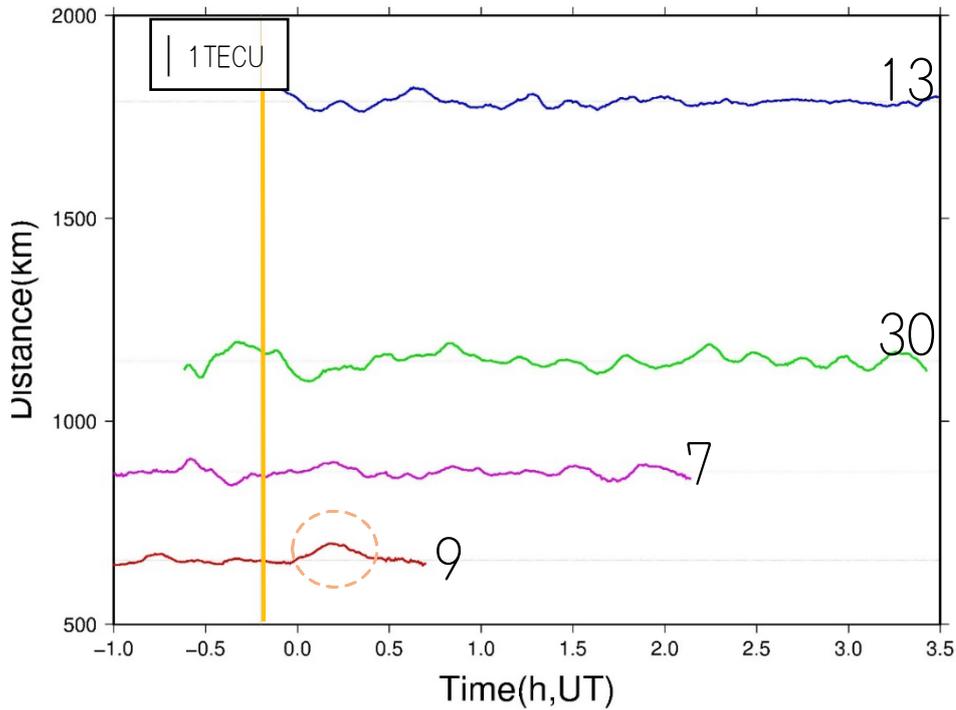


図 3.7 VTEC 時系列の近似曲線から差を取り、爆発-SIP の距離ごとに並べたもの。pets 局が得た観測データのうち、擾乱が見られた 7 番衛星、9 番衛星、30 番衛星、13 番衛星からのデータを用いた。また、正の TEC 変動が確認できる部分を橙色で囲んだ。

最も近い 9 番衛星の正の変化は 30 番衛星の急激な減少よりも後に起こっており、距離と擾乱が起こる時刻にはこれといった相関が見られない。

次に、図 3.8 で、信号の見られた VTEC を前後の日の VTEC と比較した。描画には 9 番衛星、13 番衛星、30 番衛星のデータを用いた。

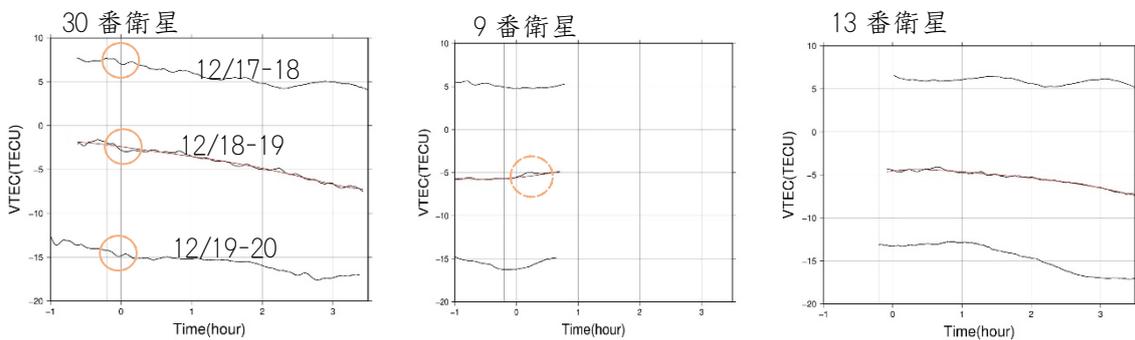


図 3.8 擾乱が見られた 3 衛星の VTEC を前後の日と比較したもの。12 月 18-19 日を基準とし、17-18 日の VTEC 値に 5 を加え、19-20 日の VTEC 値から 5 を引くことで前後の日のグラフを上下にずらした。また、図 3.7 作成時に除いた近似曲線を 12 月 18-19 日の VTEC に重ねて橙色で描画してある。

30 番衛星では、爆発の前後の日でも同じような急激な TEC 減少がみられる。従って 30 番衛星が示す変動は火球とは無関係であり、ほぼ同じ時刻に起こっていることからマルチパス起源の変動と思われる。9 番衛星の正の変化と、13 番衛星の継続した変動は前後の日には見られなかった。13 番衛星は火球と反対の南西の遠くの空を観測しているため火球起源の現象である可能性は低い。一方 9 番衛星の SIP は地上局と火球の発生地点の中間にあり、最も火球起源の TEC 変動を観測しやすい幾何学的条件を満たしている。9 番衛星の振幅は 0.5 TECU 程度であり、チェリャビンスクの 26 番衛星と同程度の変動であった。振幅については、考察の章で詳しく検討する。

3.2 日本上空における QZSS-TEC 変動

本節では、北海道の稚内(0001)局から QZSS 静止衛星を見て得た、TEC の時系列変化を紹介する。まず、夏と冬でそれぞれ TEC 時系列を求め、これらを比較した。次に、QZSS-TEC 変動の周期的特徴を得るためにスペクトル解析を行った。スペクトル解析は 2019 年の 1 年分と、8 月と 2 月のそれぞれ 1 ヶ月分で行った。

まず、図 3.9 に 2019 年 2 月と 2019 年 8 月の TEC 時系列を並べた図を示す。

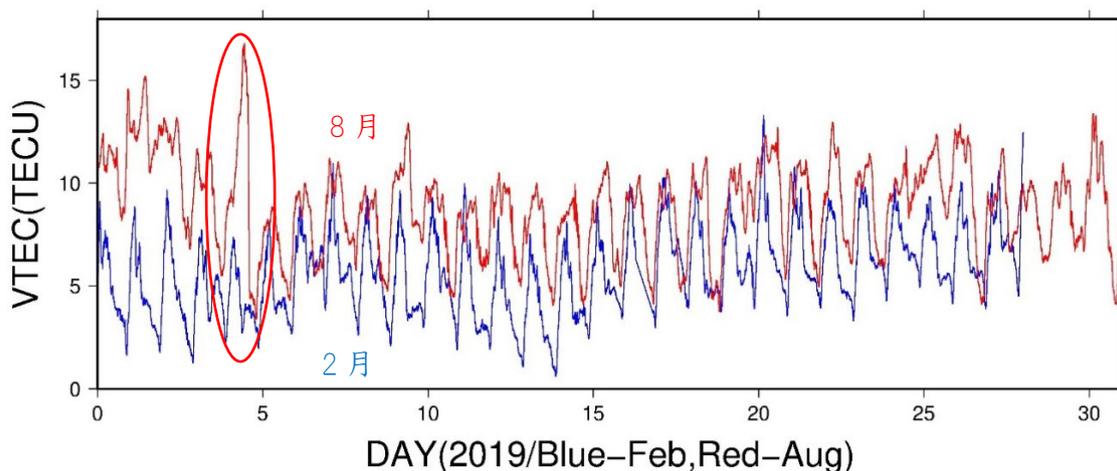


図 3.9 稚内(0001)局から QZSS 静止衛星を見て求めた TEC 時系列を、2019 年 2 月(青)と 2019 年 8 月(赤)で並べたもの。8 月 5 日の部分を赤い丸で囲んである。

1 ヶ月を通した傾向を見ると、2 月に比べ 8 月の TEC 値が系統的に大きい。また、赤い丸で囲んだ 8 月 5 日の TEC 変化を見ると、急激に増加していることが分かる。TEC が急激に変化する要因の 1 つとして、太陽活動が挙げられる。宇宙天気予報センターのサイトでこの日の宇宙天気レポートを見ると、8 月 5 日 3:00 UT 頃に緩始型地磁気嵐が確認されている。磁気嵐の発生を示すため、北向きの地磁気の強さに対応する Dst 指数を表す図を作成した(図 3.10)。Dst 指数は中緯度で、経度的に広がりをもった柿岡、Hermanus, San Juan, Honolulu の 4 か所の地磁気データを用いて、その対称成分の変動の大きさを 1 時間単位で指数化したものである(Nagatsuma, 2002)。太陽から大量のエネルギーが放射されると、赤道を西向きに流れる赤道円環電流が強め

られる。この電流により南向きの磁場が生成されるため、北向きの地磁気が減少、Dst 指数も減少する。つまり、Dst 指数の減少は磁気嵐の発生を表すといえる。

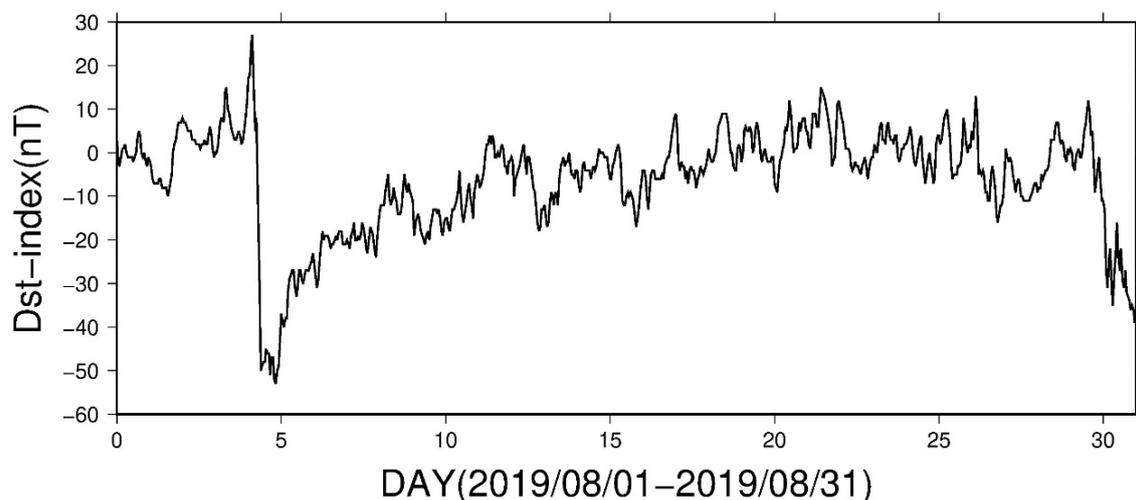


図 3.10 8 月の Dst 指数を示した図。NASA OMNIWeb Data Explorer より取得したデータを用いて作成。

(<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>)

確かに 8 月 5 日に Dst 指数の減少、すなわち磁気嵐の発生が確認できる。これを踏まえると、図 3.9 で見られた TEC の急激な変化は、磁気嵐と深く関わっている可能性が高い。

次に、TEC 時系列のスペクトル解析を行った。図 3.11 に 2019 年 1 月 1 日から 1 月 10 日にかけてスペクトル解析を行った結果を示す。

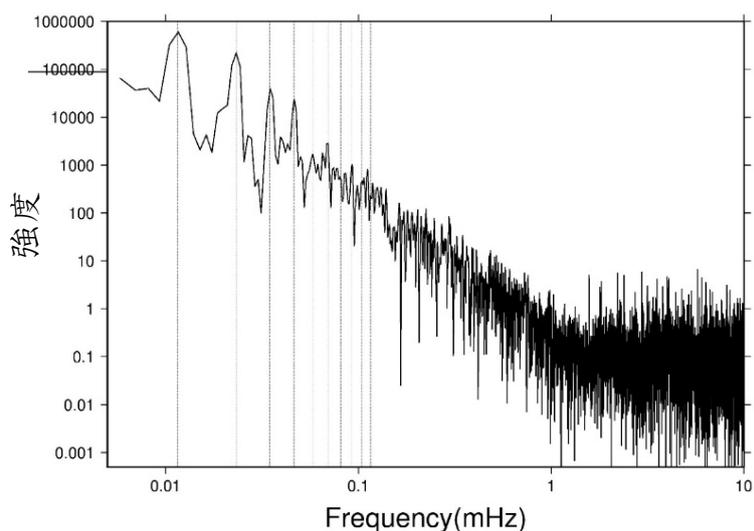


図 3.11 稚内(0001)局から GZSS 静止衛星を見て求めた TEC 時系列のスペクトル解析。期間は 2019 年 1 月 1 日から 1 月 10 日まで、読み取り間隔は 30 秒で設定した。直線を引いた周波数は左から順に 1 日周期に対応する周波数とその 2 倍、3 倍、…、10 倍の高調波である。

1日周期とその高調波が卓越していることが分かる。

また、1mHz までの範囲では、強度 S と周波数 f の間に以下の関係がある。

$$\begin{aligned} \log S &= -2 \log f + C \\ \therefore S(f) &\propto \frac{1}{f^2} \end{aligned} \tag{13}$$

この関係は、ブラウニアンノイズと呼ばれるスペクトル密度の傾向に似ている。1mHz 以上では、様々な周波数成分が同程度の強さを持っており、こちらはホワイトノイズの傾向がある。

次に、上記のようなスペクトル解析の期間を1ヶ月分とし、強度をカラーバーで示して1月から順に並べていったものを図 3.12 に示す。解析時間短縮のため、読み取り間隔は5分と先ほどより長めに設定した。読み取り間隔を長く取ると短周期スペクトルは見えづらくなるため、長周期スペクトルに注目して解析を行った。

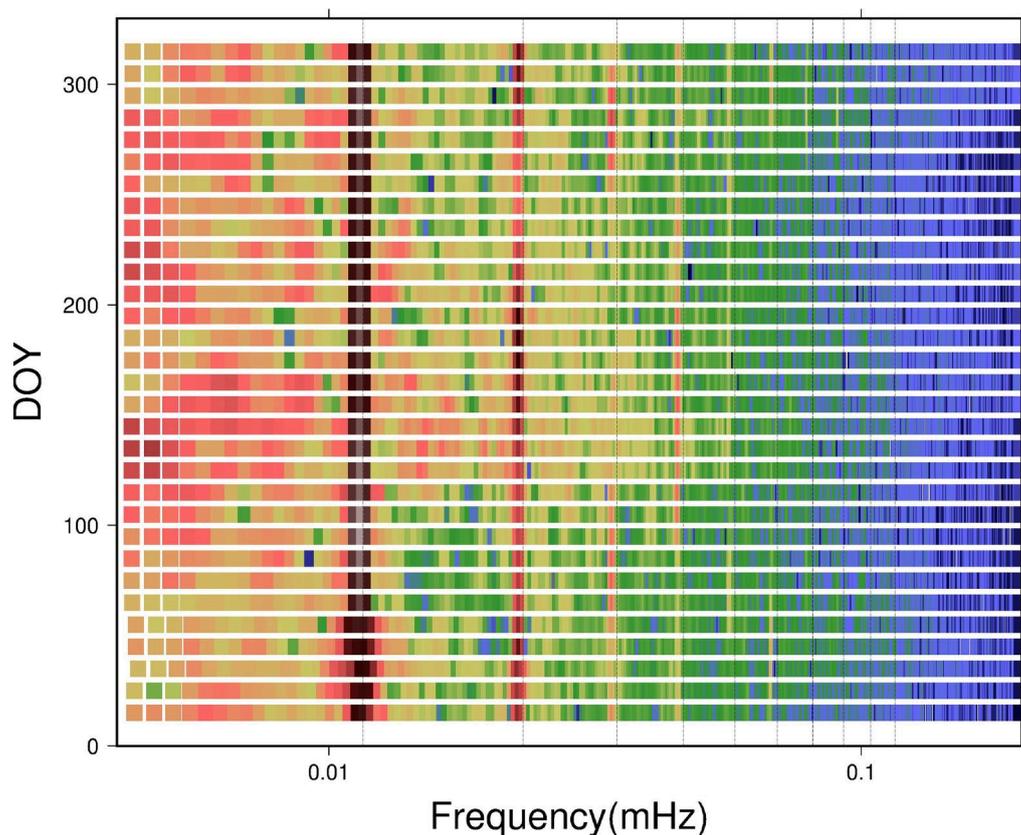


図 3.12 稚内(0001)局から QZSS 衛星を見て得た TEC 時系列のスペクトル解析を1ヶ月ずつ行い、1年分並べたもの。2019年1月1日から11月25日までのデータを用いた。スペクトルの強度を色で表し、暖色ほど強く、寒色になるほど弱い。読み取り間隔は5分に設定した。直線を引いた周波数は左から順に1日周期に対応する周波数とその2倍、3倍、…、10倍の高調波である。

図 3.11 と同様に 1 日周期とその高調波が卓越している。1 日周期は年間を通して見られる一方、高調波の出方は時期によって異なっている。これは 1 年を通して TEC の日周変化があること、またその波形に季節変化が生じることを示唆している。

次に、より短周期成分を見るために読み取り間隔を 30 秒に戻し、1 週間ずつのスペクトル解析を 1 ヶ月分を行った。図 3.13 に 2 月と 8 月のスペクトル解析を示す。

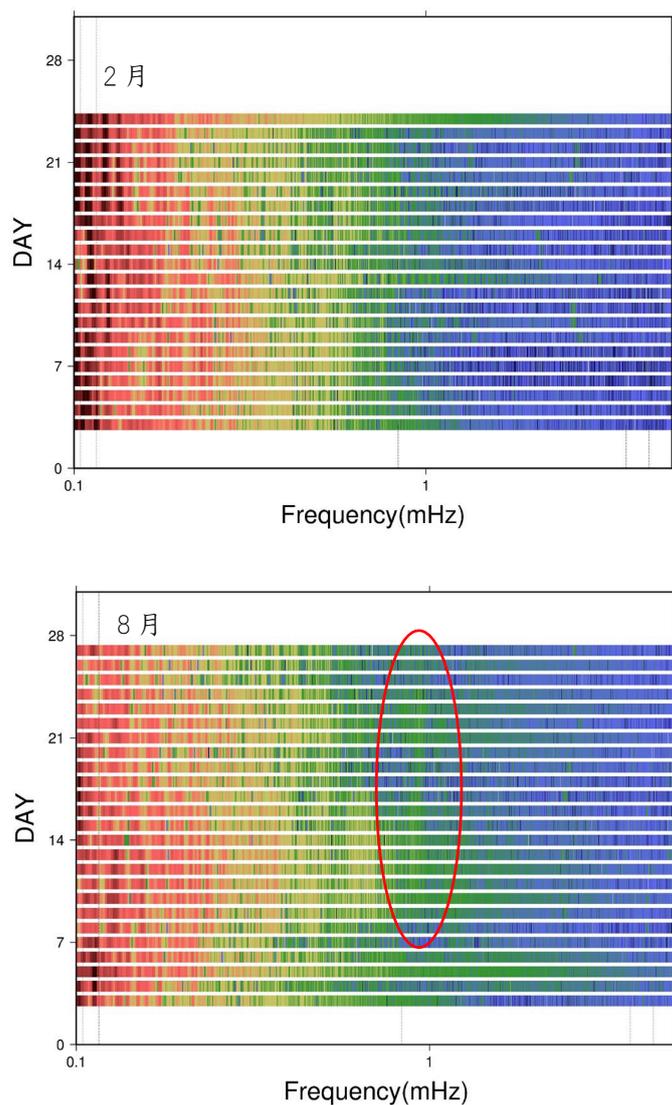


図 3.13 稚内(0001)局から QZSS 衛星を見て得た TEC 時系列のスペクトル解析を 1 週間ずつ行い、1 ヶ月分並べたもの。2019 年 2 月(上)と、2019 年 8 月(下)について行った。スペクトルの強度を色で表し、暖色ほど強く、寒色になるほど弱い。読み取り間隔は 30 秒に設定した。大気の共鳴周波数 3.7 mHz、4.3 mHz のスペクトルに直線を引いている。下図の赤い丸は、周りの周波数と比べ強度が強く表れた、周期 20 分程度のスペクトルを示す。

いずれの図でも、大気の共鳴周波数のスペクトルはよく見えなかった。夏の図に限って、周期 20 分程度の強いスペクトルが見られたが、これは MSTID によるものだと考えられる。

最後に、1 日周期より長い周期成分を見るため 1 年分のスペクトル解析を行ったものを図 3. 14 に示す。読み取り間隔は 50 分とした。

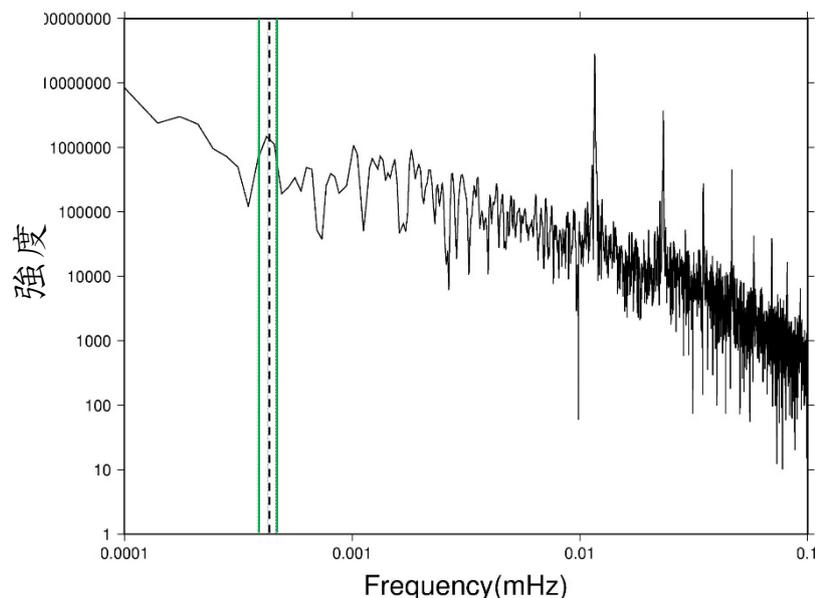


図 3.14 稚内(0001)局から GZSS 静止衛星を見て求めた TEC 時系列のスペクトル解析。期間は 2019 年 1 月 1 日から 11 月 30 日まで、読み取り間隔は 50 分で設定した。図の緑線で示す周波数は太陽の自転周期のうち最短(赤道付近)の 25 日と最長(極域)の 30 日であり、その間の点線は 27 日周期に対応する周波数を示している。

図 3. 14 では、太陽の赤道の自転周期に近い 27 日周期にピークが見られた。TEC のスペクトル解析における太陽周期のピークは、TEC の変化が太陽活動に深く関わっていることを示唆している。このピークが偶然でなく、本当に太陽の自転によるものか検討するため他の 3 つの局でも同様のスペクトル解析を行った(図 3. 15)ところ、3 つの局で同じ周波数にピークが見られた。

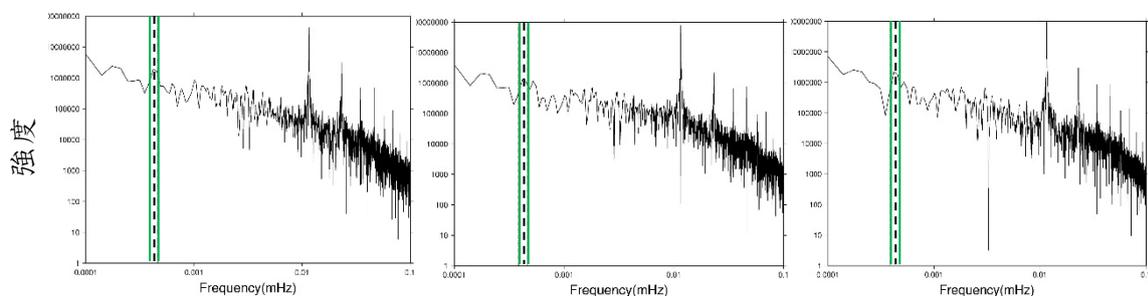


図 3.15 左から順に八戸(0156)、富山(0249)、鴨川(3044)の 3 つの局から GZSS 静止衛星を見て得られた TEC 時系列のスペクトル解析。期間は 2019 年 1 月 1 日から 11 月 30 日まで、読み取り間隔は 50 分で設定した。いずれも太陽周期(27 日)に対応する周波数にピークが見られる。

4. 考察

GPS-TEC を用いて 2013 年チェリャビンスクと、2018 年ベーリング海の 2 つの火球イベントを比較したところ、2013 年の事例では先行研究と同様に N 字型の TEC 変化が、2018 年の事例では正の TEC 変化や継続した変動が見られた。まず、2013 年チェリャビンスクの事例について考察する。図 3.2 の N 字型 TEC 変化は、爆発地点に近い衛星から伝搬していくように見られ、変化も短時間で起こっているため爆発に起因する信号である可能性が高い。TEC 変化が N 字型になっているのは、まず爆発に伴って何らかの原因で電離圏が圧縮されて電子密度が増加したのち、復元力(音波では圧力、内部重力波では浮力)がはたらいで電子密度が減るというプロセスを繰り返すためだと考えられる。ここで *Ding et al.* (2016) を基に、本研究で見られた擾乱を検討する。この論文では、チェリャビンスクの火球爆発に伴って 2 種類の波が伝搬したと考えられている。ここで 2 種類の波とは、爆発地点から 270–600 km の範囲に速度 369 m/s で伝搬した first TID(Traveling Ionospheric Disturbance) と、2500–3100 km の範囲に速度 410 m/s で伝搬した second TID のことを指す。また、この論文ではさらに内部重力波である first TID が second TID を励起したということも示唆されている。本研究において N 字型擾乱が見られた観測点は爆発地点から 300–500 km に位置しているため、first TID の内部重力波を捉えた可能性が高い。ただ、本研究ではデータ数が少なく、速度を見積もってそれを確かめることは難しい。GPS 衛星以外の衛星による観測データなど、さらにデータ数が増えればより信憑性の高い速度が計算できると期待される。

次に、2018 年ベーリング海の実例について考察する。図 3.6 の VTEC 時系列では、30 番衛星に衝突後の TEC 減少が、13 番衛星、30 番衛星、7 番衛星に周期 20 分程度の継続した変動が、9 番衛星に 0.5 TECU 程度の正の変化が観測された。30 番衛星の TEC 減少は前後の日にも見られたため、火球由来ではなくマルチパス起源だと考えられる。マルチパスとは、建造物や地形などの影響で電波の反射等が生じ、同時に発信した直接波と遅れて受信機に到達した反射波が干渉することで生じる位相のずれ、およびそれを原因とする測位誤差のことである。GPS 衛星は 0.5 恒星日の軌道周期を持つため、継続して同じような時刻で起こる(実際には日に 4 分ずつ遅れてゆく)特徴を持つ。一方 13 番衛星の継続した変動と 9 番衛星の正の変化は前後の日には観測されなかったため、火球由来の可能性はある。

次に 9 番衛星で見られた擾乱を火球起源と仮定し、2 つの火球イベントについて、爆発の規模と振幅の大きさを比較して考える。2018 年のイベントにおける爆発-SIP 間距離は、正の変化が見られた 9 番衛星で約 758 km だった。これは、2013 年のイベントで信号が見られ、最も爆発から遠い 26 番衛星の距離 445 km よりもさらに遠いことが分かる。2013 年のイベントにおける放出エネルギーが 2018 年の 2 倍もあったことも考えると、より遠くから小さな爆発を観測している 2018 年の信号は 2013 年の信号に比べかなり振幅が小さいと推測される。しかし 2018 年の 9 番衛星の信号を見ると、振幅が約 0.5 TECU であり、2013 年の 26 番衛星とほぼ同じ大きさである。また背景 VTEC に対する割合はそれぞれ 26 番衛星が 7%、9 番衛星が 10% である。従って振幅だけからは、2018 年の 9 番衛星の信号が火球由来とするとやや振幅が大きすぎる。しかし観測

される TEC 変化の振幅は視線の波面への入射角に大きく依存するので、幾何学的条件の違いを考慮するとこの程度の差は説明できる可能性がある。

日本上空において QZSS-TEC 観測を行ったところ、TEC 時系列の季節による違い、スペクトルの特徴、8月5日の不自然な TEC 変化などが認められた。TEC の大きさが季節により異なるのは、太陽光の入射角が変化するためだと考えられる。地球の自転軸が傾いていることにより、公転に伴って太陽の入射角が変化する。これにより電離圏に届く太陽光の強さが季節変化するため、電離する電子の量も季節によって変わる。したがって入射角が小さくより多くの電子が電離する夏は TEC の値が大きく、反対にあまり電離しない冬は TEC の値が小さくなるといえる。また、スペクトル解析で卓越していた1日周期とその高調波については、光の多い昼間は電離がよく起こり、夜はあまり起こらない、といった太陽の日周運動による TEC 変化が見えていると考えられる。1日周期の卓越は年間を通して見られたことから、太陽の日周運動による TEC 変化は1年中起こっていることが分かる。また、その高調波が季節によって異なるのは、季節ごとに昼間の太陽光の強さが異なるにも関わらず夜間の状況は季節を通じて同じであるため、同じ1日周期でも波形が少しずつ違うためである。このように、TEC は太陽の影響をかなり強く受けている。図 3.14 と図 3.15 から太陽の自転周期のスペクトルが見られたことも、TEC と太陽活動が深く関わっていることの根拠となる。

スペクトル解析の図 3.10 では、1 mHz までの範囲で強度が周波数の 2 乗に反比例していることを示した。これは、ブラウニアンノイズというブラウン運動に伴って発生するノイズのスペクトル密度によく似ている。一方 1mHz 以上では広範囲な周波数で同程度の強さを示しており、このような傾向を持つノイズはホワイトノイズと呼ばれる。ある程度長い時間スケールでは電離圏電子数の変動にはある程度過去の履歴がのこる(例えば一旦電子数が増えると、それを基準に次のランダムな変動が加わる)ためブラウニアンノイズとなると考えられる。

また、大気に励起されて地球が常時自由振動をしている (Nishida *et al.*, 2000) ことから、大気の共鳴周波数である 3.7 mHz、4.3 mHz が強く見られる可能性があると考えたが、図 3.13 で示したように、夏冬いずれの解析でも大気の共鳴周波数に有意なピークは見られなかった。ただし電離圏の電子が必ずしも大気と共鳴していないというわけではなく、解析に用いたデータ数が少なく、ピークが立つほどスペクトルを取り出せなかった可能性も考えられるので、今後多くの GNSS 局で得られたスペクトルをスタックするなどの更なる解析が必要だといえる。

最後に、図 3.9 の TEC 時系列で示した 8月5日の急激な TEC 変動について考察する。図 3.10 と比較すると、磁気嵐の発生と同時に TEC が急激に増加している。太陽活動が活発になりフレアが生じると、太陽の放射が一時的に増加し、電離圏に電磁波が到達した時点で電離が促進されるため一時的に電子数が増加する。しかしこの増加はフレアが継続する 10 分ほどであり、間もなく元にもどる。一方その後太陽風が地球に到達し、その中の磁場が南向きであった場合は磁気嵐が発生する。磁気嵐が発生すると、内部磁気圏の磁場構造が変化して、高エネルギー粒子の進入できる領域が低緯度側に拡大する (Nagatsuma, 2002)。この効果によって、高エネルギーのプロトン粒子が到来し、電子数が全球的に増えることがある。このようにして 8月初旬の TEC の増加は、磁気嵐が原因となって起こったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、NEOによる電離圏擾乱として、火球出現直後のGPS-TEC変化と日本上空のQZSS-TEC変化を調べた。2013年のチェリャビンスクにおける火球イベントでは、直後にN字型のTEC変化が伝搬していくようすが観測された。*Ding et al. (2016)*と比較検討してみたところ、N字型のTEC変化は火球の爆発に伴う音波や内部重力波によるものだと考えられる。一方2018年のベーリング海上空における火球イベントでは、正のTEC変化などいくつかの信号が見られたが、近傍のGNSS局が少ないため手持ちの情報で火球由来と断定するのは難しい。今後新たな火球イベントが起こるか、公開されていない他国の衛星の観測データ等新たな視点を得ることで、さらに詳細な解析ができることを期待する。日本上空のQZSS-TEC観測では、季節によるTEC値やスペクトルの変化、太陽活動に伴う電離圏擾乱などが観測された。今回強く見られた日周変化などの長周期成分を除去することで、NEO由来や大気モード由来の短周期の信号がより発見しやすくなることを期待する。また、本研究で解析したのは、稚内局における1年分のデータのみである。今後更に期間や観測点を増やし、データを集めていくことが求められる。

6. 謝辞

本研究で使用したRINEXデータは、国土地理院から提供させていただきました。

本研究を行うにあたり、宇宙測地学研究室及び固体ゼミの先輩方、先生方には大変お世話になりました。指導教官の日置幸介教授には研究の進め方からプログラムの作成、論文や発表資料作成に至るまで、研究に関する様々なことについてご指導いただきました。固体ゼミの先生方、先輩方には発表資料に関するアドバイスや内容の指摘、プログラム作成の手助けなどをしていただき、本当に多くのことを学ぶことができました。皆様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. 引用・参考文献

- Ding, F., T. Mao, L. Hu, B. Ning, W. Wan, and Y. Wang (2016), GPS network observation of traveling ionospheric disturbances following the Chelyabinsk meteorite blast, *Ann. Geophys.*, 34(11), 1045-1051
- 橋本繭未, 日置幸介(2018), GNSS-TEC観測によるミサイルまたはロケットの推力の評価, 測地学会誌, 64, 51-55.
- 日置幸介, 菅原守, 大関優, 岡崎郁也(2011), GPS-TEC法による地球物理学, 測地学会誌, 56(4), 125-134

Nagatsuma, T. (2002), 3-5 地磁気嵐, 情報通信研究機構研究報告, 48(3), 123-136

Perevalova, N.P., N. V. Shestakov, S. V. Voeykov, H. Takahashi, and M. Guojie (2015), Ionospheric disturbances in the vicinity of the Chelyabinsk meteoroid explosive disruption as inferred from dense GPS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42(16), 6535-6543

Nishida, K., N. Kobayashi, Y. Fukao (2000), Resonant oscillations between the solid earth and the atmosphere, *Science.*, 287(5461), 2244-2246

Whitehead, J. D. (1960), Formation of the sporadic E layer in the temperate zones, *Nature*, 188(4750), 567.

日本スペースガード協会 (2013). 大隕石衝突の現実 天体衝突からいかに地球をまもるか
Newton Press

日野幹雄 (2010). スペクトル解析新装版 朝倉書店 pp.184

Fireballs
(<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>)

GNSS とは | 国土地理院
(https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_aboutGNSS.html)

NASA OMNIWeb Data Explorer
(<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>)

NEWS | NASA Instruments Image Fireball over Bering Sea
(<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7355>)

彗星 | 国立天文台 (NAOJ)
(<https://www.nao.ac.jp/astro/basic/comet.html>)

みちびきの必要性 | みちびきについて | みちびき (準天頂衛星システム : QZSS)
(https://qzss.go.jp/overview/services/sv02_why.html)

ユーザーガイド | 電離圏 | 宇宙天気予報センター
(<http://swc.nict.go.jp/knowledge/ionosphere.html>)