# 2-6 GNSS 受信機を用いた電離圏全電子数の高解像度二次元観測

2-6 High-resolution Observation of Ionospheric Total Electron Content by GNSS Receivers

#### 西岡未知 津川卓也

NISHIOKA Michi and TSUGAWA Takuya

情報通信研究機構(NICT)では、電離圏の状況を把握するため、国内外の地上GNSS 受信機のデー タを収集し、GNSS 衛星と地上受信機を結ぶ経路に沿って積分した単位面積あたりの全電子数 (TEC)を算出、高解像度 TEC 二次元観測を実施している。この高解像度 TEC 二次元観測を用いる と、これまでの限られた場所における観測で断片的にしか捉えられなかった電離圏の現象の全体 像を捉えることが可能となる。我々は、この TEC 観測を用いて様々な電離圏現象を明らかにして きた。また、宇宙天気情報としてリアルタイムに TEC と電離圏嵐に関する情報を発信するシステ ムの構築を進めてきた。さらに、高解像度 TEC 二次元観測をより広範囲に拡張するためのプロジェ クトを立ち上げ、TEC データの標準化や各種ツールの開発、データ共有等に取り組んでいる。

In order to monitor the ionosphere, NICT collects GNSS receiver data in Japan and overseas and calculates ionospheric Total Electron Content (TEC), which is integrated electron density along the path between GNSS satellites and receivers. TEC is projected onto two-dimensional map resulting in high-resolution TEC maps due to the large number of ground-based receivers. Using the high-resolution TEC maps, we have clarified various ionospheric phenomena. We also have developed to provide the information on TEC data and ionospheric storms. In addition, we have conducted a project to extend the high-resolution TEC observations to a wider area.

# 1 まえがき

電離圏の観測を飛躍的に発展させた観測技術の一つ に、地上 GNSS 受信機による電離圏観測がある。電離 圏を通過する電波は、伝搬経路上の電子の総数と電波 の周波数に依存して、その速度に違いが生じる。その 性質を利用すると、GPS 衛星などの GNSS 衛星から送 信される周波数の異なる2つの信号から、受信機と衛 星を結ぶ経路に沿って積分した単位面積当たりの全電 子数 (Total Electron Content: TEC) を算出することが できる。地上 GNSS 受信機は国内外に多数展開されて いるため、それらを用いることで水平方向二次元にお けるTECの分布を調べることができる。イオノゾンデ などの従来の電離圏観測機器はその観測点数が限定さ れている一方、GNSS 受信機は測位等の目的で多数設 置されることが多いため、その観測点数は従来の電離 圏観測機器に比べ桁違いに多い。そのため、GNSS 受 信機網データを用いると、これまでの「点」のみの観測 が「面」としての観測となり、部分的にしか観測できな かった電離圏現象の全体像を捉えることが可能である。 全球 TEC マップはいくつかの機関により作成され ており、IONEX (IONosphere map Exchange) と呼ば れる受信機に依存しないデータフォーマットにより提 供されることが多い [1]。例えば、CODE (Center for Orbit Determination in Europe) によって提供されて いる全球 TEC マップは、経度5度・緯度 2.5 度の空間 分解能と2時間の時間分解能を持つ [2]-[4]。IONEX に よる全球 TEC マップは、水平方向 1,000 km 規模の構 造を捉えることができ、全球規模での電離圏変動の解 明に寄与してきた [5][6]。

一方で、高度な衛星測位に影響を与えるプラズマバ ブルや中規模伝搬性電離圏じょう乱 (Medium-Scale Traveling Iohspheric Disturbances: MSTID)と呼ばれ る電離圏現象は水平方向 100 km 程度の構造を持つた め、IONEX のような時間・空間分解能では捉えられ ない。文献[7]では、国内に多数展開されている受信機 網データを収集し、高解像度で TEC 二次元観測を実 現、水平方向数百 km 規模の構造を持つ MSTID の二 次元的な描像を捉えることに成功した。我々は、定常 的に地上 GNSS 受信機網データを収集し、高解像度 TEC 二次元観測を行うことで電離圏監視を行ってい る。本稿では2で、国内の高解像度 TEC 二次元観測 の概要とそれによって捉えられた電離圏現象について 紹介し、さらに、宇宙天気情報として発出している TEC データについて解説する。3では、国外における 高解像度 TEC 二次元観測の概要を紹介し、さらに観 測視野を拡大するために行っている DRAWING-TEC (Dense Regional and Worldwide International GNSS TEC observation)プロジェクトについて紹介する。

### 2 国内における高解像度 TEC 観測

#### 2.1 GEONET による高解像度 TEC マップ

日本国内では、国土地理院が GNSS Earth Observation Network System (GEONET) と呼ばれる GNSS 受 信機網を展開しており [8]、約1,300 観測点において連 続観測を実施している。NICT では、国土地理院の FTP サイトにて公開されている全観測点の 30 秒値 RINEX (Receiver INdependent EXchange format) データを1時間ごとに取得し、TECを算出、数種類の 高解像度 TEC マップを作成している。作成された TEC マップは、準リアルタイムデータとして約 2-3 時 間遅れで公開している [9]。これら TEC マップは、緯 度 0.15 度、経度 0.15 度の分解能、つまり数十 km の高 空間分解能であり、水平方向数百 km 規模の現象を捉 えるための十分な空間分解能を持つ。さらに、NICT では、国土地理院から数日遅れで公開される確定版 RINEX も同様に処理することで、より精度の高い確 定版 TEC マップも提供している [10]。

現在 NICT で作成・公開している高解像度関連 TEC マップには、TEC の衛星・受信機バイアスを除去した 絶対値 TEC マップ、60 分以下、30 分以下、15 分以下 の TEC 変動 マップ、ROTI (Rate of TEC change Index)と呼ばれる電離圏じょう乱指数マップ、GPS 信 号ロック損失率マップ、の6種類がある。60分以下、 30 分以下、15 分以下の TEC 変動マップは、それぞれ の衛星-受信機間で算出した TEC 値から各時間幅の移 動平均を除去することで求められる。それぞれの変動 成分は、衛星-受信機間の経路が電離圏高度を貫通す る点に投影される。全ての衛星-受信機の組み合わせ に対して本処理が行われることで、高分解能の TEC 二次元マップが作成される。なお、NICT で作成され る高解像度 TEC マップは、衛星-受信機の経路の電離 圏での長さを鉛直の経路長に補正し、鉛直方向に積分 した TEC に換算して表示されたものである。図1は 60分以下の TEC 変動成分マップの一例で、北西-南東 方向に多数の波面を持った構造を持つ MSTID が顕著 に捉えられている[11]。このような TEC 変動マップを



図 1 GEONET を用いた高解像度 TEC マップ、60 分以下の変動成分マップ[11] 夏の夜間に日本で頻発する MSTID の観測例

用いて、これまで、日本に出現する MSTID の特性が 明らかにされている [12]-[14]。

TECデータには、衛星と受信機固有のバイアスが含 まれるため、絶対値 TEC を算出するためには衛星・ 受信機バイアスを推定して除去する必要がある。我々 は、TEC の1時間の平均値はある範囲内において一定 という仮定の下、最小二乗法を用いて衛星-受信機バ イアスを算出している[15]。各衛星-受信機間で算出さ れた絶対値 TEC は、変動マップと同様にマップ化さ れる。絶対値 TEC マップの例を図2(a) に示す。通常、 日本の緯度では、太陽天頂角の小さい南方の方が北方 よりも TEC 値は大きい。図2(a) は 21:20 IST の夜間 において、南方で 60 TECU (1 TECU=10<sup>16</sup>/m<sup>2</sup>)、北方 で20 TECUという TEC 値が観測されている。一方で、 地磁気じょう乱等の影響で電離圏に電場や風系の変化 等があると、通常とは異なる振る舞いをすることがあ る。図2(a)の矢印で示した南北に伸びた TEC の減少 領域はその一例である。磁気赤道域で発生したプラズ マバブルと呼ばれる局所的に電子密度が減少する現象 が、地磁気じょう乱起源の強い電場により中緯度まで 発達していた [16]。図2(b) に同時刻の ROTI と呼ば れる電離圏じょう乱指数のマップを示す。ROTIとは、 TECの時間変動の5分間での標準偏差で、水平方向数 + km の現象を捉えるために広く使われている [17]。 図2(a)でTECの減少として見られたプラズマバブル の位置に ROTI の大きい領域が存在していることがわ かる。これは、プラズマバブルの内部に電離圏電子密 度のじょう乱が存在していることを示している。 図2(c)は同時刻のGPS信号のロック損失率を示す。 GPS 信号のロック損失率は、RINEX ファイルに記録



図 2 GEONET を用いた高解像度 TEC マップ (a) 絶対値 TEC マップ、(b) ROTI マップ、(c) ロック損失マップ [11]、矢印の部分がプラズマ バブルの位置を示している。

されているロック損失指数に基づき、L1 または L2 信 号が5分間の間でロック損失を起こしたと考えられる 割合を示している。GNSS のロック損失は、一般にマ ルチパスやアンテナ特性によって引き起こされるが、 電離圏に水平方向数百 m 規模の電子密度不規則構造 がある場合に、L1 や L2 信号にシンチレーションが発 生して引き起こされることもある。図 2 (c) で見られ た GEONET の多くの受信機のロック損失率の増大は、 プラズマバブルの内部に電子密度不規則構造が存在し ていたことを示唆する。

# 2.2 GEONET によって捉えられた巨大地震後の TEC 変動

国内における高解像度 TEC 二次元観測を用いて明 らかになってきた電離圏現象の一つに、下層大気由来 の電離圏じょう乱がある。このような電離圏じょう乱 の一つとして、地震や火山後に伴う大気波動が引き起 こす電離圏変動が知られており、1960 年代より短波の ドップラー観測等により報告されてきた [18]-[20]。し かし、これまでの観測では、観測点の数が少なく、現 象の全体像を捉えることが難しかった。近年、GPS に よる TEC 観測の発展とともに、こうした電離圏変動 の二次元構造が捉えられ始めてきた [21]-[24]。ここで は、高解像度 TEC 二次元観測により捉えられた、2011 年 3 月 11 日 14:46 JST (5:46 UT)に発生した東北地方 太平洋沖地震 (震央:北緯 38.3 度、東経 142.37 度、モー メントマグニチュード 9.0[25]) 後の電離圏変動につい て紹介する。

図3に東北地方太平洋沖地震の(a)3分後、(b)13分後、(c)68分後に観測されたTECの10分以下の変動 成分を示す。図3では、水平方向数十km以上の構造 に注目するため、緯度、経度3ピクセルずつで移動平 均した値を示している。この時刻の背景の絶対値 TEC は 20-30 TECU であり、図3の色で示される +0.2 TECUから-0.4 TECUの変動成分は背景の数パーセ ントに相当する。図3(a)に星印で示される位置は地 震の震央を示している [26]。地震発生3分後はまだ電 離圏に顕著な変動はないが、地震約8分後には震央付 近を中心に TEC の変動がみられ、その後、図3(b)か ら(c)に示すように同心円状の波動が広範囲に広がっ ていった。この同心円状の波動は、図3(c)の後も観 測され続け、西日本では17時 IST 過ぎまで観測され ていた [27]。同心円の中心 (電離圏震央) は図3(b)及 び(c)の×印で示された震央から約170km南東にず れた場所であり、海底津波計等で推定された津波の最 初の降起ポイントとほぼ一致していたことがわかって いる。この同心円状の波動の第一波は、3.475 m/sの 速度で伝搬していることから、地震波であるレイリー 波で励起された音波が電離圏高度まで伝わったものと 考えられる。また、第二波以降は秒速数百mの速度で 伝搬しており、津波波源の海面で励起された音波が直 上の電離圏下部で起こした大気重力波あるいは伝搬す る津波波面で励起された大気重力波によるものと考え られる [23][28]-[30]。

また、同心円状の波動とは別に、震央付近の東経 140-145度の領域で短周期(約4分)の変動も観測され た。この短周期変動は同心円状波動が震央付近から離 れた16時 JST を過ぎた後も小さい振幅ながら持続し ている。この短周期変動の周期は、地面・海面と熱圈 下部の間の音波共鳴の周期と一致し[29]、複数の波群 が混在している特徴も音波伝搬の数値計算で再現され た[30] ことから、音波共鳴によるものと推測されてい る [25][31]。

なお、本稿では詳細には取り上げていないが、地震



図 3 東北地方太平洋沖地震の (a) 3 分後、(b) 13 分後、(c) 68 分後の 10 分以下の TEC 変動マップ [25]

発生後に震央のごく近い範囲で TEC の増加と減少が 観測されており、従来の観測的研究で断片的に捉えら れてきたもの [32] と一致する [31]。さらに、電離圏震 央より南西方向に高速で伝搬する TEC の構造が 2,500 km離れた台湾で観測されていること [33]、6,000 km以 上離れたハワイにおいても電離圏変動が観測されてい ること [34] など、地震・津波に伴う電離圏の変動は全 球的に及んでいたことがわかってきている。

#### 2.3 電離圏嵐基準の策定

ここまでは、電離圏の変動成分や水平方向100 km 規模の電離圏じょう乱に焦点を当ててきたが、宇宙天 気情報としては、変動成分に加えて絶対値TECの情 報も重要である。一般に、絶対値TECなど電離圏の 状態を表すパラメータは、太陽活動度や地方時、緯度 によって変化するが、特に地磁気じょう乱等が原因で 通常と大きく異なる状態となることは「電離圏嵐」と呼 ばれ[35]、宇宙天気情報ユーザーにとっては注意すべ き情報となっている。

電離圏以外の宇宙天気現象である太陽フレアや地磁 気じょう乱は、その指数が明確に定義されている。一 方、電離圏嵐にはこれまでそのような指数はなく、宇 宙天気情報として発出するためには、電離圏嵐の基準 の定義が必要となる。そこで、文献[36]では、18年分 のTECデータを統計的に解析し、太陽活動度・季節・ 地方時・緯度変化等を考慮した上での電離圏嵐指数を 定義した。実際には、太陽活動度・季節・地方時・緯 度に依存しない指数Pを考案し、指数Pの分布を調べ た。指数Pの分布に従い、絶対値TECが通常より大 きくなる「正相嵐」及び小さくなる「負相嵐」それぞれに ついて、1か月に数回起こるレベル(レベル1)、1か月 に1回起こるレベル(レベル2)、1年に1回起こるレ ベル(レベル3)について指数Pを調査した。その結果

を踏まえ、正相嵐と負相嵐それぞれについてのレベル 1からレベル3の6レベルに静穏レベルを加えた7レ ベルに分類した。図4は2019年5月11日から16日の 6日間の電離圏パラメータの時系列変化を示している。 上段はイオノゾンデで観測されたF領域の臨界周波数 [37]、中段は北緯 37 度における絶対値 TEC、下段は地 磁気じょう乱指数の一つである柿岡 K 指数である [38]。 上段と中段においては、赤線で観測値を示しており、 黒線で示す参照値(過去27日間の中間値)からの乖離 がどれくらいあるかで電離圏嵐のレベルが決まる。P 指数を元に策定した電離圏嵐の基準「I-scale」はグレー スケールで表され、色の濃い順にレベル0、レベル1、 レベル2、色のついていない部分がレベル3である。観 測値(赤線)がそれぞれレベル2あるいは3に2時間以 上達していた場合に、図4の上段と中段段に"I<sub>p</sub>2"と示 すように I-scale のレベルとともに電離圏嵐があった ことを明示する。図4の場合は、5月11日と14日に 発生した地磁気じょう乱に伴い、レベル2の正相嵐が あったことがわかる。

#### 2.4 TEC データリアルタイム配信

宇宙天気現象をいち早く捉えるため、国内 GEONET 観測点の一部のストリーミングデータを受 信し、2015年より日本上空のTECをリアルタイムで 算出し配信する取組を実施している。図5に示すよう に、GEONETの200観測点のデータに対し、日本測 量協会/データ配信業者の配信サーバから閉域網 VPNを経由し、NICT本部(小金井)でストリーミング データを受信している。NICT本部内に設置されてい る受信サーバ及び解析サーバを用いてほぼリアルタイ ムにTECを算出、各種マップを作成、公開している [39]。このTECのリアルタイムデータは準リアルタイ ムデータと共に、宇宙天気情報として活用されている。



図 4 宇宙天気センターの Web ページで表示されるイオノゾンデパラメータ foF2 (上段)、絶対値 TEC (中段) 及び K 指数 (下段) の例 [38]



図 5 GEONET の電子基準点 200 点のリアルタイム処理の流れ

# 3 DRAWING-TEC プロジェクト

### 3.1 国内外の受信機状況

GNSS 受信機網データを用いた高解像度 TEC 二次 元マップは、電離圏に頻発する水平方向100 km 規模 の現象を捉える上で、また、絶対値 TEC も含めた宇 宙天気情報を提供する上で重要な役割を果たしている。 国内のみならず国外においても、CORS [40] や UNAVCO[41]など複数の機関によって多数のGNSS受 信機データが提供されており、それらのデータを用い ることで、広域で高解像度二次元 TEC 観測が可能と なる。NICT では、名古屋大学等と協力し、オンライ ンで利用可能な国内外機関の GNSS データを収集して きた。収集された GNSS データの観測点数は、2000 年 に2.000点以上、2007年に5.000点以上、2011年に7.000 点以上と増加し、2019年時点で8,600観測点に上る。 図6に2017年時点においてデータ利用可能なGNSS受 信機の分布を示す。収集された GNSS 受信機データは、 国内での TEC マップと同様の処理を経て、図7に示 す領域ごとの絶対値 TEC マップ(上段)、TEC の変動 成分マップ(中段)、ROTIマップ(下段)へ変換されて いる[42]。ヨーロッパ及び北アメリカでは、日本と同 様、受信機が稠密に配置されているため、高解像度の TECマップの作成が可能である。 図8はヨーロッパ (a) 及び北アメリカ(b) における TEC 変動成分マップ で捉えられた MSTID であり、その特性解明等の研究 が進められている [43][44]。また、全球 TEC マップを 用いた地磁気じょう乱時電離圏変動についての研究等 も進んでいる [45][46]。

# 3.2 高解像度 TEC マップで捉えられた巨大積乱 雲による同心円構造

本章では、2.2 同様、高解像度 TEC 二次元観測を用 いて、初めてその全体像が捉えられた現象について紹 介する。2013年5月20日にアメリカオクラホマ州ムー ア市で巨大な竜巻が発生した後に観測された電離圏 じょう乱である[47]。ムーア市(北緯35.2 度、西経97.7 度)での竜巻発生時刻は、19:45 UT(現地時間14:45) で、その規模は、竜巻の規模を示す改良藤田スケール (EF) で最大レベルの EF5 であった [48]。

図9は北アメリカの20分以下のTEC変動成分マッ プで、竜巻発生15分後(a)、更に1時間から3時間後 (b-d) のものである。+0.1 TECU から -0.2 TECU の変 動は背景の TEC 値 1-2 % 程度の変動に相当する。 図9(a)の星印は、19:45 UT に巨大な竜巻の発生が報 告されたムーア市の位置である。図9(a)にはまだ顕 著な TEC 変動は見られないが、図9(b)には、×印で 示した位置を中心とした数個の同心円状の TEC 変動 の構造が現れている。このような同心円状の構造は 図9(c)及び図9(d)も続いて現れた。19:45 UT に ムーア市で発生した EF5 の竜巻の原因となった巨大 積乱雲が、アメリカ NOAA の気象衛星 GOES-13 の赤 外線観測によって捉えられており、その位置が同心円 状の構造の中心に一致していることがわかった。巨大 積乱雲の位置の南への移動に伴い、同心円上の構造の 中心の位置も同様に南に移動していることから、観測 された同心円状の TEC 変動の構造が巨大積乱雲起源 であることが推測される。文献[47]では、高度約 300 km の電離圏で観測された同心円状の構造が大気



図 6 国内外でデータ利用可能な地上 GNSS 受信機網 [11]





図 8 (a) ヨーロッパ及び (b) 北アメリカの稠密受信機網データにより作成された TEC の変動マップ [45][46] MSTID の波面が観測されている。

重力波であると仮定し、その伝搬を逆方向に高度 20 km 程度までレイトレースして発生源を調べ、巨大 積乱雲の場所に一致することを明らかにした。このこ とから、竜巻を生み出した巨大積乱雲が上方の電離圏 まで伝搬する大気重力波も生み出し、その大気重力波 が観測された同心円状の構造として現れたと結論付け ている。また、本稿では触れていないが、同心円状の 構造とは別に、北緯 30 – 36 度の範囲で音波共鳴が原 因と考えられる周期約4分の短周期 TEC 変動も観測 されている [47]。

### 3.3 TEC データの標準化とデータシェアリング

上述したように、多数の GNSS 受信機データを利用 すると、高解像度での TEC マップの作成が可能で、こ れまで明らかにされていなかった現象を捉えることが できる。一方で、密な GNSS 受信機データが利用可能



図 9 巨大竜巻発生 (a) 15 分後、(b) 1 時間 15 分後 (c) 2 時間 15 分後 (d) 3 時間 15 分後に観測された 20 分以下の TEC 変動成分 [47]

な地域は、現状図6に示すように、主にヨーロッパ・北 アメリカ・日本と限定的である。更に広域でMSTIDや プラズマバブルなど水平方向100km規模の電離圏現 象を捉えるためには、日本以外のアジア地域、アフリカ 地域、その他、赤道域や極域のGNSS受信機データが 必要であるが、これらの地域でデータを十分に収集す ることが難しい。その理由の一つとして、国やデータ提 供機関におけるGNSSデータの公開ポリシーがある。 一般に、GNSS受信機データには、精密測位、気象観測、 電離圏観測などに利用可能で、商業的にも軍事的にも 非常に価値の高い位相・疑似距離情報が含まれている ため、RINEX データの公開に制限がある可能性が考え られる。この問題を解決するために、NICTでは、 DRAWING-TEC プロジェクトを立ち上げ、以下の課題 に取り組んでいる。

- 高解像度 TEC マップのためのデータフォーマットの策定と標準化
- 標準化された TEC データ及びマップ作成技術の 開発
- 3. 標準化された TEC データの共有

「1. 高解像度 TEC マップのためのデータフォーマットの策定と標準化」に関しては、RINEX フォーマットをベースとした TEC 情報のみを記載した新たなデー

タフォーマット GNSS-TEC EXchange (GTEX)を提案 し、その標準化を進めてきた。GTEX は、RINEX フォーマットと同様に、受信機ごとに1ファイルとし、 エポックごとの衛星-受信機間の slant TEC を記載す るフォーマットである。RINEX データを GTEX デー タに変換することで、位相・疑似距離情報等が除外さ れるため、より公開ポリシー問題のハードルを下げる ことが期待できる。GTEX フォーマットは、2013 年に 国際電気通信連合の無線通信部門 (ITU-R) において提 案され、2015 年に電波伝搬に関わる電離圏データの標 準データフォーマットの一つとして認められ、ITU-R 勧告に掲載された [49]。

「2.標準化された TEC データ及びマップ作成技術の 開発」については、RINEX データから GTEX データを 作成するソフトウェア及び GTEX データから高解像 度マップを作成するソフトウェアを作成している。前 者については、Linux/Unix 版に加え、Windows 版も 作成している。現在、GPS 以外の GNSS データを扱う ための GTEX データフォーマットの改訂や、それに伴 うソフトウェアの改修も行っている。

「3.標準化された TEC データの共有」は、広域の高 解像度 TEC 二次元マップ作成のために最重要と考え る。NICT では、特に日本における電離圏変動予測に



図 10 東南アジア地域の ROTI マップ [50] プラズマバブル内部の電子密度 じょう乱が捉えられている。

重要なアジア・オセアニア地域に主軸を置き、GTEX データの共有を進めてきた。図10は、その成果の一つ で、マレーシアのGNSS受信機網(MyRTKnet)等東南 アジア域のGNSS受信機網データからGTEXデータを 作成し、ROTI二次元マップとして可視化したもので ある[50]。楕円で示すようにROTIの大きい領域が南 北に伸びており、電子密度じょう乱を内包するプラズ マバブルの存在が捉えられている。東南アジア域の 様々な国でRINEXやGTEXデータのシェアが進み、 高解像度の電離圏二次元マップが利用できるようにな れば、プラズマバブルの発生・伝搬の正確な把握に繋 がり、東南アジア域のみならず、日本に影響を与える ような発達したプラズマバブルの現況把握・予測精度 向上にも大きく貢献できると考えられる。

# 4) まとめと今後の展望

近年の高度 ICT 社会において、通信・放送・測位な どに影響を与える電離圏の監視・予測やその情報の利 用はますます重要となっている。密な GNSS 受信機網 を利用した TEC の二次元観測は、高い空間解像度で 広範囲に電離圏が連続観測できるため、電離圏監視の 手法として必要不可欠である。日本やヨーロッパ、北 アメリカなどの受信機が稠密に展開されている地域に おいては、MSTID やプラズマバブルなど水平方向 100 km 規模の電離圏じょう乱も明確に捉えることが可能 である。一方で、日本以外のアジア・アフリカ地域、そ の他、赤道域や極域では利用可能な GNSS 受信機網 データが不足しているのが現状であり、DRAWING-TEC プロジェクトを通じて、高い空間分解能の観測の 範囲を全球に拡張していくことが課題である。 今後の取組として、日本上空のみならず全球を含む 国外のTEC 情報のリアルタイム発信も重要である。 国際民間航空機関 (ICAO) において、宇宙天気情報の 本格利用が開始され、NICT はグローバル宇宙天気セ ンターの一員としてデータ提供を行っている。現在リ アルタイムで衛星測位に関わる電離圏情報としてデー タ提供を行っているものは、GEONET に基づく日本 周辺のTEC 情報のみであるが、今後は全球のTEC 情 報についてもリアルタイムで作成・配信し、宇宙天気 情報として提供していくことが求められる。

高解像度 TEC 二次元観測は、宇宙天気情報の提供 という実用面のみならず、学術的にも重要な役割を果 たしている。電離圏じょう乱を引き起こす主な原因と しては、太陽の活動やそれに伴う地磁気じょう乱であ ることはよく知られているが、電離圏よりも下層に位 置する大気からの影響も無視できないことが明らかに なってきた。本稿の2.2及び3.2で紹介した2例は、高 解像度のGNSS-TEC 観測により、これまで現象の一部 しか捉えられなかった下層大気由来の電離圏じょう乱 の全体像を初めて詳細に捉えた事例である。巨大地震 や極端気象現象に伴う電離圏変動の観測は、下層大気 の変動と電離圏変動の因果関係が明確であるため、ま だ未解明な点が多い両者の関係を明らかにする研究の 貴重な情報となる。このように、GNSS 受信機網を利 用した電離圏観測の広域化と高解像度化を進め、これ まで未解明であった物理現象の解明にも貢献していき たい。

### 謝辞

現在、宇宙天気に関わる GNSS-TEC 観測業務は、総務省からの委託業務「電波伝搬の観測・分析の推進」に基づき実施されております(R1-0155-0112, R2-0155-0133)。GNSS 受信機のデータ提供は GEONET の他、GSI, UNAVCO, IGS, SOPAC, CORS, EPN, BKGE, OLG, IGNE, DUT, ASI, ITACYL, ESEAS, SWEPOS, NMA, BIGF, MyRTKnet, and SuGAr の機関より受けております。RINEX のデータ収集や高解像度 TECマップの作成に当たっては、名古屋大学の大塚雄一准教授と新堀淳樹研究員及び京都大学の齊藤昭則准教授の協力を得ています。また、リアルタイム GNSS データを利用した電離圏観測には電子航法研究所の斎藤享上席研究員に多数の助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

#### 【参考文献】

- 1 Stefan Shaer and Werner Gurtner, "IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1," https://files.igs.org/pub/data/format/ionex1.pdf
- 2 NASA's Archive of Space Geodesy data, GNSS Atmospheric Productes, https://cddis.nasa.gov/Data\_and\_Derived\_Products/GNSS/atmospheric\_ products.html#iono
- 3 A. J. Mannucci, B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister, and T. F. Runge, "A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements," Radio Science, vol.33, issue 3, pp.565–582, 1998.
- 4 M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orus, A. Garcia-Rigo, J. Feltens, A. Komjathy, S. C. Schaer, and A. Krankowski, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," Journal of Geodesy, vol.83, pp.263–275, 2009.
- 5 Stanislawska, I., Gulyaeva, T. L.,Grynyshyna-Poliuga, O., and Pustovalova, L. V., "Ionospheric weather during five extreme geomagnetic superstorms since IGY deduced with the instantaneous global maps GIM-foF2," Space Weather, vol.16, issue 12, pp.2068–2078, 2008. https://doi.org/10.1029/2018SW001945
- 6 He Huang, Libo Liu, Yiding Chen, Huijun Le, and Weixing Wan, "A global picture of ionospheric slab thickness derived from GIM TEC and COSMIC radio occultation observations," J. Goephys. Res., vol.121, Issue 1, pp.867–880, 2016.
- 7 A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan," Geophys. Res., Lett., vol.25, Issue 16, pp.3079–3082, 1998.
- 8 国土交通省国土地理院、https://terras.gsi.go.jp
- 9 準リアルタイム GEONET-TEC マップ, https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/ QR\_GEONET/
- 10 確定版 GEONET-TEC マップ, https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/
- 11 Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, Mamoru Ishii, Kornyanat Hozumi, Susumu Saito, Atsuki Shinbori, Yuichi Otsuka, Akinori Saito, Suhaila M. Buhari, Mardina Abdullah, and Pornchai Supnithi, "Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS," Journal of Disaster Research, vol.13, no.3, pp.535-545, 2018. https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0535
- 12 T. Tsugawa, N. Kotake, Y. Otsuka, and A. Saito, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review," GPS Solut., vol.11, pp.39–144,2007. doi:10.1007/ s10291-006-0045-5
- 13 Nishioka, M., A. Saito, and T. Tsugawa, "Super-medium-scale traveling ionospheric disturbance observed at midlatitude during the geomagnetic storm on 10 November 2004," J. Geophys. Res., vol.114, A07310, 2009. doi:10.1029/2008JA013581
- 14 Yuichi Otsuka, Atsuki Shinbori, Takuya Tsugawa, and Michi Nishioka, "Solar activity dependence of medium-scale traveling ionospheric disturbances using GPS receivers in Japan," Earth, Planets and Space, vol.73 article no.22, 2021. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01353-5
- 15 Y. Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," Earth Planets and Space., vol.54, pp.63–70, 2002.
- 16 G. Ma and T. Maruyama, "A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes," Geophys. Res. Lett., vol.33, L21103, 2006. doi:10.1029/2006GL027512
- 17 Pi, X., A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, and C. M. Ho (1997), "Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network," Geophys. Res. Lett., vol.24, no.18, pp.2283–2286, 1997.
- 18 K. Davies. and D. M. Baker, "Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964," J. Geophys. Res., vol.70, pp.2251–2253, 1965.
- 19 R. J. Hung and J. P. Kao, "Ionospheric observation of gravity waves associated with Hurricane Eloise," J. Geophys. Res., vol.45, pp.67–80, 1978.
- 20 Tadahiko Ogawa, Hiroshi Kumagai, and Kenji Sinno," Ionospheric disturbances over Japan due to the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens," Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol.44, Issue 10, pp.863–868, 1982.
- 21 E. Calais and J.B. Minster, "GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake," Geophys. Res. Lett., vol.22, pp.1045–1048, 1995.

- 22 K. Heki and J. S. Ping, "Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array," Earth Planet. Sci. Lett., vol. 236, pp.845–855, 2005.
- 23 Otsuka, Y., N. Kotake, T. Tsugawa, K. Shiokawa, T. Ogawa, Effendy, S.Saito, M. Kawamura, T. Maruyama, N. Hemmakorn, and T. Komolmis, "GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake," Earth Planets and Space, vol.58, pp.159–165, 2006.
- 24 E. Astafyeva and K. Heki, "Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms", Earth Planets and Space, vol.61, pp.939–943, 2009.
- 25 T. Tsugawa, A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, and K. T. Murata, "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake," Earth Planets and Space, vol.63, pp.875–879, 2011. doi:10.5047/eps.2011.06.035
- 26 U.S. Geological Survey, http://earthquake.usgs.gov/
- 27 https://2011tohokuearthquake.nict.go.jp/index\_j.html
- 28 M. Matsumura, M., A. Saito, T. Iyemori, H. Shinagawa, T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, and C. H. Chen, "Numerical simulations of atmospheric waves excited by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, vol.63, pp.885–889, 2011.
- 29 H. Shinagawa, T. Iyemori, S. Saito, and T. Maruyama, "A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004," Earth Planets and Space, vol.59, pp.1015–1026, 2007.
- 30 T. Maruyama, T. Tsugawa, H. Kato, M. Ishii, and M. Nishioka, "Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes," J. Geophys. Res., 117, A08306, 2012. doi:10.1029/2012JA017952
- 31 A Saito, T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Iyemori, M. Matsumura, S. Saito, C. H. Chen, Y. Goi, and N. Choosakul, "Acoustic resonance and plasma depletion detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, vol.63, pp.863–867, 2011.
- 32 西岡未知、大塚雄一、塩川和夫、"2010年2月のチリ中部地震に伴う電離 圏全電子数の変動", 第 128 回 地球電磁気・地球惑星圏学会、2010年11 月1日.
- 33 C. H. Chen, A. Saito, C. H. Lin, J. Y. Liu, H. F. Tsai, T. Tsugawa, Y.Otsuka, M. Nishioka, and M. Matsumura, "Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, vol.63, pp.881–884, 2011.
- 34 J. J. Makela, et al., Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011, Geophys. Res., Lett., vol.38, L00G02, 2011. doi:10.1029/2011GL047860
- 35 https://swc.nict.go.jp/knowledge/ionosphere.html#ionospheric\_storm
- 36 M. Nishioka, T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, "A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics," Space Weather, vol.15, pp.228–239, 2017. doi:10.1002/2016SW001536
- 37 西岡未知,前野英生,山川浩幸,津川卓也, "VIPIR2 による国内電離圏定常 観測",情報通信研究機構研究報告,本特集号,2-1,2021.
- 38 https://swc.nict.go.jp/forecast/ionosphere.html
- 39 https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/RT\_GEONET/
- 40 https://geodesy.noaa.gov/CORS/
- 41 https://www.unavco.org
- 42 https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/
- 43 T. Tsugawa, Y. Otsuka, A. J. Coster, and A. Saito, "Medium scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," Geophys. Res., Lett., vol.34, L22101, 2007. doi:10.1029/2007GL031663
- 44 Y. Otsuka, K. Suzuki, S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, "GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe," Annales Geophysicae, vol.31, pp.163–172, 2013. doi:10.5194/angeo-31-163-2013
- 45 Shinbori, A., Otsuka, Y., Sori, T., Tsugawa, T., and Nishioka, M., "Temporal and spatial variations of total electron content enhancements during a geomagnetic storm on 27 and 28 September 2017," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol.125, e2019JA026873. https:// e2019JA026873. https://doi.org/10.1029/2019JA026873
- 46 Sori, T., Shinbori, A., Otsuka, Y., Tsugawa, T., and Nishioka, M., "Char-

acteristics of GNSS total electron content enhancements over the midlatitudes during a geomagnetic storm on 7 and 8 November 2004," Journal of Geophysical Research, vol.124, pp.10376–10394, 2019. https://doi.org/10.1029/2019ja026713

- 47 M. Nishioka, M., T. Tsugawa, M. Kubota, and M. Ishii, "Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 Tornado," Geophys. Res., Lett., vol.40, pp.5581–5586, 2013. doi:10.1002/2013GL057963
- 48 National Weather Service Weather Forecast Office, Norman, OK, https:// www.weather.gov/oun/?n=events-20130520, 2013.
- 49 Recommendation ITU-R P.311-16, ITU-R, 2016.
- 50 S. M. Buhari, M. Abdullah, A. M. Hasbi, Y. Otsuka, T. Yokoyama, M. Nishioka, and T. Tsugawa, "Continuous generation and two dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia," Journal of Geophysics Research, Space Physics, vol.119, 2014. doi:10.1002/2014JA020433



西岡未知 (にしおか みち) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 主任研究員 博士(理学)

超高層大気物理



津川卓也 (つがわ たくや) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 室長 博士(理学) 超高層大気物理