

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05736

研究課題名(和文)人工衛星電波を用いた電離圏シンチレーション観測のカस्प・極冠域への展開

研究課題名(英文) Observations of ionospheric scintillation at cusp and polar cap regions using satellite signals

研究代表者

大塚 雄一 (Otsuka, Yuichi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：40314025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：低軌道衛星から送信される電波の受信装置、及びGPSなど汎地球測位衛星システム(GNSS)の電波を受信する受信機を極冠域及びオーロラ帯に設置し、電離圏構造とイレギュラリティの観測を実施した。イレギュラリティによって生じる電波の揺らぎであるシンチレーションの発生特性を明らかにし、イレギュラリティの移動速度を導出した。また、磁気嵐中に発生する電離圏イレギュラリティの発生機構について新しい発見があった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電離圏にはプラズマが存在しているため、電離圏内を伝搬する電波は、プラズマとの相互作用により、真空中での伝搬とは異なった速度をもつ。このため、GPSなどの衛星測位にとって、電離圏は測位誤差の要因となる。また、電離圏中にプラズマ密度の疎密構造が存在すると、電離圏を透過する電波の位相や振幅が変動することがある。この現象はシンチレーションと呼ばれており、激しいシンチレーションが起こると、衛星放送・通信が途絶えたり、GPSなどの衛星測位に対して誤差をもたらすことがある。本研究では、これら電離圏擾乱の特性を調べた。

研究成果の概要(英文)：At polar and auroral regions, we have carried out measurements of ionospheric plasma structures and irregularities by receiving radio waves of Global Navigation Satellite System (GNSS) and low-Earth orbit satellites. We have revealed statistical characteristics of scintillation occurrence at polar and auroral regions, and estimated drift velocities of the ionospheric irregularities. We have found a new generation mechanism for the irregularities during magnetic storms.

研究分野：超高層大気物理

キーワード：GPS GNSS 電離圏 シンチレーション 電離圏擾乱 TEC 全電子数

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球の電離圏は、大気の一部が電離し、中性大気とプラズマが混在する弱電離プラズマの状態にあり、地球磁場の影響により、電磁気的な作用と力学的な作用がはたらくため、条件によって異なる電離圏不安定が発生し、プラズマ密度の粗密構造(イレギュラリティ)が生成される。従来より、VHF/UHF 帯のレーダーを用いて、メーター・スケールの空間構造をもつイレギュラリティ(沿磁力線不規則構造; FAI)の観測が赤道域、中緯度及び高緯度で行われ、そのレーダー・エコーの性質から、イレギュラリティを起こすプラズマ不安定のメカニズムに関する研究が行われてきた。近年は、光学観測機器や GPS 受信機網の発達により、これらメーター・スケールのイレギュラリティが数百 km の空間構造をもつ現象(特に高緯度においてはオーロラの構造)と深く関連していることが明らかになってきた。しかし、両者は空間スケールが5桁も違うため、両者の関係からは状況証拠は得られるものの、プラズマ不安定がどのように FAI を生成するかの詳細な物理機構にまで踏み込んだ議論ができなかった。

近年、GPSをはじめとする GNSS(Global Navigation Satellite System)が広く普及し、電離圏観測においても有力な手段として多く用いられるようになってきた。人工衛星から送信された電波が、電離圏プラズマの粗密構造を通過すると、電波の信号強度や位相が変動する。この現象は、シンチレーションと呼ばれている。このシンチレーション現象を利用することにより、これまで観測手段が無かった、空間スケール数百メートルのイレギュラリティを直接観測することができるようになり、レーダーで観測されるイレギュラリティと数百 km スケールの現象との間の空間スケールの情報が得られるようになった。

2. 研究の目的

本研究課題では、オーロラ及びカスプ域において、GNSS 及び低軌道衛星から送信されるビーコン電波のシンチレーションと光学観測などとの同時観測を行い、数 10m ~ 数 km の空間スケールをもつ電離圏イレギュラリティの生成・消滅機構に関与しているプラズマ不安定現象を明らかにすることを目的とする。さらに、この結果を中低緯度及び赤道域におけるイレギュラリティと比較し、イレギュラリティを生成するプラズマ不安定の緯度による違いを明らかにする。

3. 研究の方法

GNSS 受信機及び、低軌道衛星から送信されるビーコン電波の受信機をノルウェーのロングイヤービエンとニーオルセンにそれぞれ新規設置し、人工衛星から送信される電波のシンチレーションを観測する(図 1)。

観測されたイレギュラリティの特性を明らかにするとともに、背景のプラズマ密度勾配及び電場をシンチレーション発生場所及びドリフト速度と比較することにより、イレギュラリティの生成原因となるプラズマ不安定を同定し、赤道や中緯度に発生するイレギュラリティと比較する。

4. 研究成果

(1) シンチレーション指数と電離圏イレギュラリティ ROTI の比較

ノルウェーのトロムソ EISCAT レーダーサイトにアンテナ間隔約 200m で近接して設置している 3 台の Global Navigation Satellite System(GNSS)受信機を用い、約 1.2GHz と 1.5GHz の 2 周波の受信信号強度と位相、疑似距離をサンプリング周波数 50Hz で取得し、シンチレーションと全電子数を観測することにより、極域に発生する電離圏イレギュラリティの特性について調べた。

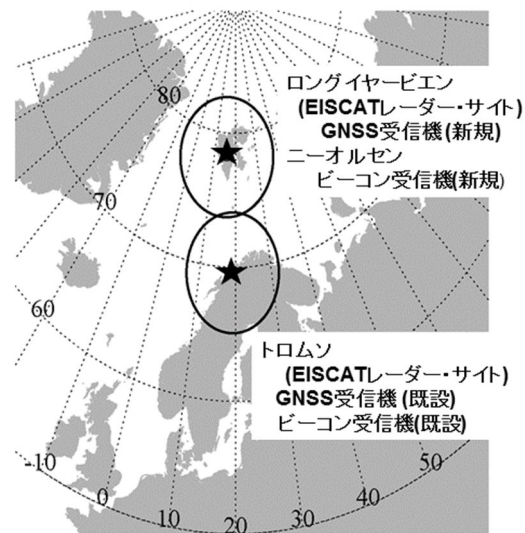


図 1: GNSS 及びビーコン受信機の位置と観測視野。

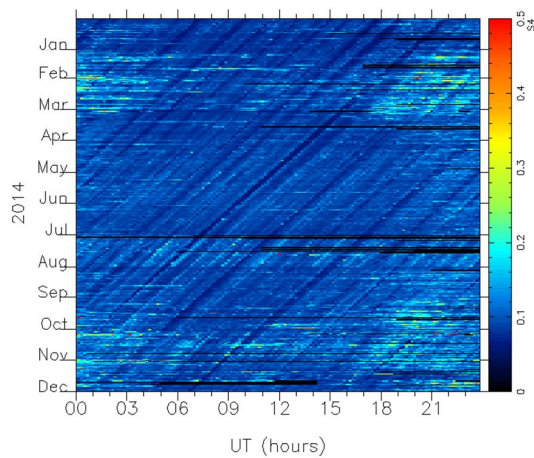


図 2: 2014 年 1 月-12 月にノルウェー・トロムソの GNSS 受信機で観測された S_4 の季節・時間変化。縦軸は月、横軸は世界時を示す。

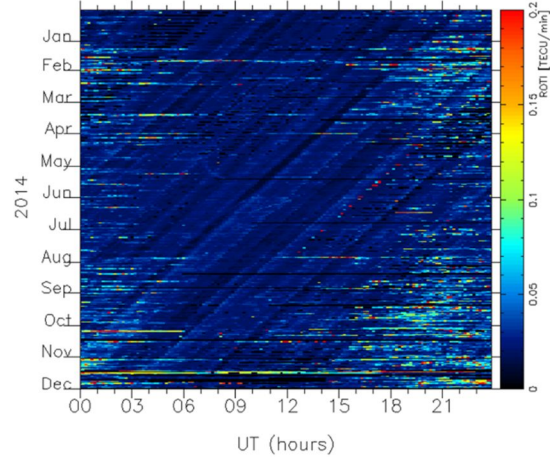


図 3: 2014 年 1 月-12 月にノルウェー・トロムソの GNSS 受信機で観測された ROTI の季節・時間変化。縦軸は月、横軸は世界時を示す。

2013-2015 年の 3 年間に GNSS 受信機で得られたデータから振幅シンチレーション指数である S_4 と、電子数(Total Electron Content; TEC)の変動率である ROTI (Rate of TEC change Index) を求め、その季節・時間変化を調べた。図 2 に振幅シンチレーションの指数 S_4 、図 3 に ROTI の 2014 年における時間・季節変化を示す。振幅シンチレーション及び ROTI の増大で表される電離圏イレギュラリティは、春・秋及び冬季の夜間に発生頻度が高いことが明らかになった。これは、主にオーロラ活動に起因する電離圏イレギュラリティを観測しているためと考えられる。また、振幅シンチレーション指数 S_4 は、2014 年に大きく、2015 年に小さい傾向があり、太陽活動と関係があることが明らかになった。これは、オーロラ活動及び背景の電子密度が太陽活動と正の相関をもつためと考えられる。

続いて S_4 と ROTI の増大に関し、両者の対応関係を調べた。その結果、必ずしも常に両者の増大が一致しているわけではないことが分かった。 S_4 は比較的長時間増大が続き、昼間でもしばしば大きな値を示すことがあるが、ROTI の増大は短時間であり、ほとんどが夜間だけに起こった。 S_4 が増大した事例について、ROTI の増大が同時に起こる場合と、ROTI の増大を伴わない場合の違いを調べるため、それぞれの場合において、2 点間の受信信号強度の相互相関係数の値を調べた。その結果、ROTI の増大が見られた場合には、ROTI の増大が観測されなかった場合に比べて相互相関係数の値が低いことが明らかになった。この結果より、ROTI 及び S_4 の増大を起こす電子密度イレギュラリティは、オーロラを生成する粒子の降込みによって生成されているものと考えられる。

(2) 電離圏イレギュラリティのドリフト速度の測定

近接する三地点に設置された GNSS 受信機で得られた信号強度の相互相関係数から電離圏電子密度イレギュラリティの水平面内ドリフト速度を求め、 S_4 及び ROTI と比較した。図 4 に、2014 年 3 月 1 日に、国立極地研究所の全天デジタルカメラで撮影された画像の南北断面図の時間変化(ケオグラム)と、 S_4 、ROTI、ドリフト速度の東西、南北成分、及び速度の大きさを示す。それぞれの値は 1 分毎に得られている。20UT ごろに S_4 と ROTI とともに同時に増大しており、ドリフト速度の増大およびドリフト速度の東西・南北成分の変動がみられた。それとほぼ同時刻にケオグラムにおいてオーロラ爆発が観測されている。2014 年の 3-12 月に観測された ROTI 及びドリフト速度データを解析したところ、ROTI の増大が見られた時間帯の平均ドリフト速度は、増大のない時間帯の速度よりおよそ 10m/s から 30m/s 大きく、ROTI とドリフト速度の大きさと関係があることが分かった。これは、ROTI の増大は、衛星-受信機間の電波の経路上における全電

子数の変動の大きさに対応するが、電子密度のイレギュラリティは空間スケールが大きいほど粗密の振幅が大きく、ドリフト速度が大きい場合には、空間スケールが大きいイレギュラリティが電波の経路上を移動し、大きな TEC 変動をもたらしたためと考えられる。また、大きなドリフト速度の存在は、強い電場が存在したことを示しており、プラズマ不安定によって電子密度のイレギュラリティが生成された可能性も考えられる。

(3) 磁気嵐による TEC 数変動

極域だけでなく全球における GNSS-TEC データを用いて 2004 年 11 月 7 - 8 日及び 2017 年 5 月 27 - 28 日に発生した磁気嵐時の電離圏電子密度変動を解析した。その結果、IMF (Interplanetary Magnetic Field) が南を向いた後 1 時間程度経過すると、昼側の高緯度または中緯度域に Storm Enhanced Density (SED) に関連した TEC 増加域が出現したことが

明らかになった。このとき、低緯度に赤道異常に関連した TEC 増加域は見られず、中緯度 SED の発達から 2 - 3 時間遅れて出現していた。以上の解析結果から、SED は赤道異常の高緯度側への拡大によって形成されるのではなく、高緯度または中緯度域に最初に発生することが示された。これは、従来考えられてきた SED の生成機構とは適合しない。

また、磁場観測から、IMF が南を向いた後に昼側の赤道域に北向き磁場成分の増加が見られた。一方、IMF が南を向いた後 1 - 2 時間程度経過すると、夕方側の赤道域にプラズマバブルを示す ROTI 増加域が出現していた。その後、2004 年 11 月と 2017 年 5 月の磁気嵐時に発生したプラズマバブルは、それぞれ磁気緯度 45°N と 50°N の中緯度域まで拡大し、これらは中緯度トラフを横切ることなくその構造に沿って西向きに移動していた。2017 年 5 月の磁気嵐では、中緯度 SuperDARN レーダーが西向きドップラー速度をもつプラズマバブルに伴うエコーを観測していた。

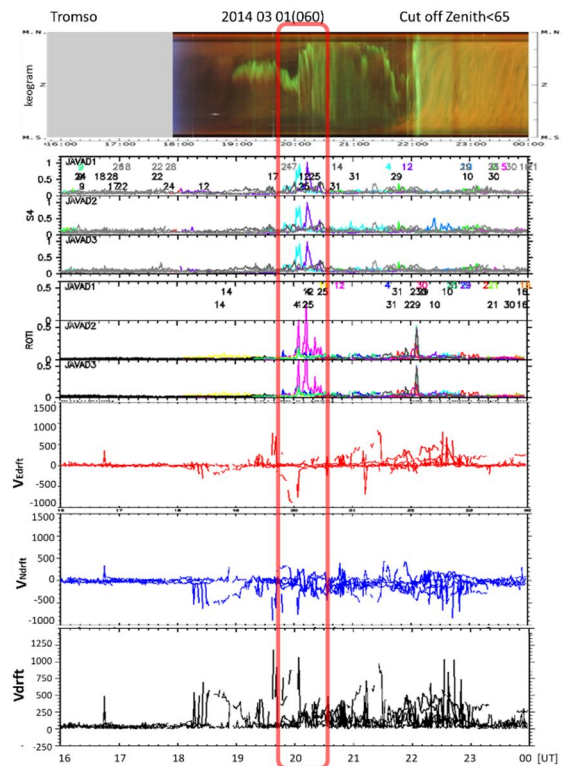


図 4: (上から順に) 2014 年 3 月 1 日に、ノルウェー・トロンソで撮影された全天画像のケオグラムと GNSS 受信機で観測された S_4 および ROTI、ドリフト速度の南北・東西成分とドリフト速度の絶対値の時間変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sori T., Shinbori A., Otsuka Y., Tsugawa T., Nishioka M.	4. 巻 124
2. 論文標題 Characteristics of GNSS Total Electron Content Enhancements Over the Midlatitudes During a Geomagnetic Storm on 7 and 8 November 2004	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 10376 ~ 10394
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JA026713	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shinbori Atsuki, Otsuka Yuichi, Tsugawa Takuya, Nishioka Michi, Kumamoto Atsushi, Tsuchiya Fuminori, Matsuda Shoya, Kasahara Yoshiya, Matsuoka Ayako, Ruohonieminen J. Michael, Shepherd Simon G., Nishitani Nozomu	4. 巻 45
2. 論文標題 Temporal and Spatial Variations of Storm Time Midlatitude Ionospheric Trough Based on Global GNSS-TEC and Arase Satellite Observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 7362 ~ 7370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018GL078723	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jayachandran P.T., Hamza A.M., Hosokawa K., Mezaoui H., Shiokawa K.	4. 巻 164
2. 論文標題 GPS amplitude and phase scintillation associated with polar cap auroral forms	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics	6. 最初と最後の頁 185 ~ 191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jastp.2017.08.030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Figueiredo C. A. O. B., Wrasse C. M., Takahashi H., Otsuka Y., Shiokawa K., Barros D.	4. 巻 122
2. 論文標題 Large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS dTEC maps over North and South America on Saint Patrick's Day storm in 2015	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 4755 ~ 4763
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2016JA023417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnith	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 Dr13-3-9026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 惣宇利 卓弥、大塚 雄一、新堀 淳樹、津川 卓也、西岡 未知
2. 発表標題 2004年11月7-8日に発生した磁気嵐に伴う午後側から夕方側における全球全電子数の極端な増加について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 惣宇利 卓弥、大塚 雄一、新堀 淳樹、津川 卓也、西岡 未知、Bristow William A., Ruohoniemi John M., Shepherd Simon G., 西谷 望
2. 発表標題 Relationship between the large TEC fluctuation and ionospheric echoes observed by the SuperDARN radars during a geomagnetic storm
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚雄一
2. 発表標題 GNSS を用いた電離圏変動の観測
3. 学会等名 太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本 明香、大塚 雄一、小川 泰信、細川 敬祐
2. 発表標題 ノルウェー・トロムソにおけるGNSS受信機を用いた電離圏シンチレーションと全電子数の観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大塚 雄一、山脇 景太、塩川 和夫
2. 発表標題 Observations of Total Electron Content Using Multi-frequency and Multi-constellation Global Navigation Satellite System Receivers
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山 俊樹、大塚 雄一、津川 卓也、西岡 未知
2. 発表標題 北米のGPS-TECを用いた電離圏擾乱の微細構造に関する研究
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新堀 淳樹、大塚 雄一、津川 卓也、西岡 未知
2. 発表標題 Temporal and spatial variations of the ionosphere and plasmasphere during geomagnetic storms on the basis of global Total Electron Content (TEC) data analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大塚 雄一
2. 発表標題 中緯度における中規模伝搬性電離圏擾乱について
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山 俊樹, 大塚 雄一, 新堀 淳樹, 津川 卓也, 西岡 未知
2. 発表標題 Temporal and spatial variations of storm-time ionospheric irregularities on the basis of GPS total electron content data analysis
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂本 明香, 大塚 雄一, 小川 泰信, 細川 敬祐
2. 発表標題 ノルウェー・トロムソにおけるGNSS受信機を用いた電離圏シンチレーションの多点観測
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新堀淳樹、大塚雄一、津川卓也、西岡未知
2. 発表標題 全球TECデータに見られる磁気嵐時の電離圏・プラズマ圏の時間・空間変動
3. 学会等名 「極域・中緯度 SuperDARN 研究集会」「MTI 研究集会」「IUGONET 研究集会」「宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会」合同研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山俊樹、大塚雄一、新堀淳樹、津川卓也、西岡未知
2. 発表標題 Temporal and spatial variations of storm-time ionospheric irregularities on the basis of GPS total electron content data analysis
3. 学会等名 「極域・中緯度 SuperDARN 研究集会」「MTI 研究集会」「IUGONET 研究集会」「宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会」合同研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Panasenko, Y. Otsuka, T. Tsugawa and M. Nishioka
2. 発表標題 AGW/TID events over Europe during solar eclipse of 20 March 2015
3. 学会等名 「極域・中緯度 SuperDARN 研究集会」「MTI 研究集会」「IUGONET 研究集会」「宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会」合同研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新堀淳樹、大塚雄一、津川卓也、西岡未知
2. 発表標題 Temporal and spatial variations of the ionosphere and plasmasphere during geomagnetic storms as seen in global Total Electron Content (TEC) data
3. 学会等名 第8回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山俊樹、大塚雄一、新堀淳樹、津川卓也、西岡未知
2. 発表標題 GPS全電子数データ解析に基づくSED現象に伴う電離圏不規則構造の時間・空間変動について
3. 学会等名 平成29年度 名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会 ・ 電磁圏物理学シンポジウム ・ 地域ネットワークによる宇宙天気観測・教育活動に関する研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新堀淳樹、大塚雄一、津川卓也、西岡未知
2. 発表標題 全球GNSS-TEC観測に基づく磁気嵐時の中緯度電離圏トラフの時間・空間変動特性について
3. 学会等名 平成29年度 名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会 ・ 電磁圏物理学シンポジウム ・ 地域ネットワークによる宇宙天気観測・教育活動に関する研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsuki Shinbori, Yuichi Otsuka, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka
2. 発表標題 Temporal and spatial variations of the ionosphere and plasmasphere during geomagnetic storms as seen in global Total Electron Content (TEC) data
3. 学会等名 Fifth International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚 雄一、上部 広大、小川 泰信、細川 敬祐
2. 発表標題 ノルウェー・トロムソにおける GNSS 受信機による電離圏シンチレーション観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 杉山 俊樹、大塚 雄一、津川 卓也、西岡 未知
2. 発表標題 GPS-TECを用いた北米における電離圏不安定性に関する研究
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第140回講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 坂本 明香、大塚雄一、小川泰信、細川敬祐
2. 発表標題 ノルウェーにおける GPS 受信機を用いたシンチレーションと TEC 変動の研究
3. 学会等名 中間圏・熱圏・電離圏研究集会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 杉山俊樹、大塚雄一、津川卓也、西岡未知
2. 発表標題 The analysis of the ionospheric irregularity using GPS-TEC over North America
3. 学会等名 中間圏・熱圏・電離圏研究集会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Otsuka, P. Abadi, and K. Shiokawa, Y. Clara
2. 発表標題 Ionospheric Scintillation and Irregularity Drift Observed with Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia
3. 学会等名 International Symposium on GNSS 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Otsuka, T. Sugiyama, T. Tsugawa, and M. Nishioka
2. 発表標題 Ionospheric Irregularity Observations using GPS Receiver Networks in North America
3. 学会等名 2nd GEOlab-RISH Joint workshop on GNSS and SAR Technologies for Atmospheric Sensing The 331st Symposium on Humanosphere Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小川 泰信 (Ogawa Yasunobu) (00362210)	国立極地研究所・国際北極環境研究センター・准教授 (62611)	
研究 分担者	細川 敬祐 (Hosokawa Keisuke) (80361830)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	