

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23403010

研究課題名(和文)GPSシンチレーション観測による極域電離圏イレギュラリティの研究

研究課題名(英文)Studies of Ionospheric Irregularities in the Polar Region by GPS Scintillation Observations

研究代表者

大塚 雄一(Otsuka, Yuichi)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：40314025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：GNSS受信機3台をノルウェー・トロムソのEISCATレーダーサイトに設置し、GNSS衛星が送信する2周波の電波の位相と信号強度を記録するシステムを構築した。これにより、電離圏擾乱によって生じる電波の変動(シンチレーション)を観測し、光学観測で捉えられたオーロラとの比較を行った。また、欧州における800点以上のGNSS受信機から得られたデータを用いて、全電子数を算出し、伝搬性をもつ電離圏擾乱の統計的性質を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have installed 3 GNSS receivers at EISCAT radar site in Tromsø, Norway and developed a system to measure phase and amplitude of the received radio waves at dual frequencies. With this system, we have observed fluctuations of the radio waves (scintillation) and compared them with aurora observed with optical instrument. Using more than 800 GNSS receivers in Europe, we have calculated total electron content and revealed statistical features of traveling ionospheric disturbances.

研究分野：超高層大気

キーワード：GPS GNSS シンチレーション 電離圏 電離圏擾乱 オーロラ 北極 ノルウェー

## 1. 研究開始当初の背景

人工衛星から送信された電波が、電離圏中に生じたプラズマ密度の不均一構造を通過すると、地上で受信された信号強度が変動する。この現象は、シンチレーションと呼ばれている。地球上において最もシンチレーションが発生しやすい地域は、赤道域とオーロラ帯を含む極域である。近年、GPS 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。特に、赤道域において、シンチレーションはプラズマバブルとよばれる赤道域特有の擾乱現象によって発生することから、プラズマバブルの観測手段の一つとして GPS シンチレーション観測が頻繁に行われるようになってきた。一方、極域では、大型短波レーダー網 (SuperDARN) による数十メートル・スケールのイレギュラリティの観測が行われてきた。しかし、これらのイレギュラリティが磁気圏と電離圏のどちらで生成されているかは未解明であり、磁気圏・電離圏結合過程を考える上で限界があった。この問題を解決するためには、空間スケールのより大きなイレギュラリティとの同時観測が必要である。GPS シンチレーションは、空間スケールが数 100m ~ 数 km のイレギュラリティによって起こることから、極域においても GPS シンチレーションの観測が熱望されるようになってきた。近年、夜側オーロラ帯や昼側カスプ域において GPS シンチレーション観測が行われるようになってきた (Prikrýl 他, Ann. Geophys., 2010)。この結果、オーロラ発光に関連してシンチレーションが発生していることが分かりつつあるが、両者の詳しい時間的・空間的対応関係についてはほとんど明らかにされていない。

研究代表者である大塚らは、2006 年に赤道域・インドネシアにおいて 3 台の GPS 受信機を設置し、以来、電離圏シンチレーションの連続観測を行っている。各々の受信機で受信

された信号強度変動の時間差から電離圏不規則構造の移動速度 (プラズマの  $E \times B$  ドリフト速度) を観測することに成功している。この結果、プラズマの  $E \times B$  ドリフトの大きさが赤道域のイレギュラリティ生成に重要な役割を果たしていることを明らかにした。同様のシステムを用いて、高緯度で GPS シンチレーション観測を行うため、本研究申請者らは、2008 年 3 月より、本研究の予備調査として GPS 受信機をノルウェーのトロムソ EISCAT (欧州非干渉散乱) レーダー・サイトに設置し、連続観測を開始した。その結果、赤道域とは異なり極域では受信信号強度の変動である振幅シンチレーションの発生頻度は非常に低いことが明らかになった。従来より、極域では、振幅シンチレーションよりも受信電波の位相が変動する位相シンチレーションの方が発生頻度が高いことが知られているため、位相シンチレーションが測定できる GPS 受信機 (情報通信研究機構が所有) 一台を同トロムソ・サイトに設置し、2009 年 1 月より連続観測を開始し、オーロラに伴うシンチレーションの観測に成功した。現在、太陽活動度は非常に低い状態にあるが、本研究期間中には活発な時期をむかえる。高太陽活動期には、オーロラがより低い緯度領域まで拡大するため、トロムソ (磁気緯度 66.2 度) よりも低緯度にオーロラが発生する。高緯度において、GPS 衛星は常に低緯度側に見られるため、本研究期間中には、オーロラ中を GPS 電波が透過する機会が増え、多くのシンチレーション現象を観測できると考える。

## 2. 研究の目的

極域において GPS 電波のシンチレーションを引き起こす電離圏プラズマ・イレギュラリティの生成・消滅過程を明らかにすることを目的とする。このため、極域において電離圏観測装置が充実しているノルウェーのトロムソ EISCAT レーダー・サイトに 3 台の GPS

受信機を用いたシンチレーション・ドリフト速度観測装置を設置し、既存の EISCAT レーダー、大型短波レーダー網(SuperDARN)、オーロラの光学観測装置や欧州における GPS 全電子数との比較を行い、異なる空間スケールをもつイレギュラリティの総合観測を実施する。極域電離圏は、磁場を介して磁気圏プラズマとも繋がっていることから、極域電離圏に生起するイレギュラリティの生成・消滅機構を明らかにすることにより、磁気圏から電離圏へ流入するエネルギーの変換過程について重要な知見を得る。

特に、観測されたイレギュラリティが磁気圏におけるプラズマダイナミクスが磁力線を介して電離圏に反映されたものか、電離圏中で駆動された不安定によって生成されたものを区別し、磁気圏・電離圏結合過程の中でイレギュラリティが果たす役割りを明らかにする。

### 3. 研究の方法

3台のGPS受信機をノルウェーのEISCATトロムソ・サイトに設置し、シンチレーションを引き起こすプラズマ・イレギュラリティのドリフト速度の観測を開始する。得られたシンチレーション観測データをオーロラの光学観測と比較し、イレギュラリティとオーロラの時間的・空間的変動の関係を明らかにする。また、欧州におけるGPS受信機網データを活用し、全電子数の水平二次元構造を明らかにし、シンチレーションとの比較を行う。また、シンチレーション・ドリフト速度を観測することにより、プラズマ不安定によって生じた局所的な電場を推定することができる。イレギュラリティ生成に果たす電場の役割を明らかにする。

### 4. 研究の成果

(1) ノルウェー・トロムソの EISCAT レーダーサイトに3台の2周波GPS受信機を設置し、

極域においてドリフト速度を導出するシステムを開発した(図1)。アンテナを互いに150-250m離して設置し、50Hzのサンプリングで衛星からの信号の信号強度や位相を記録している。本装置により導出されたドリフト速度と、他の観測手法から得られた観測データと比較することにより、下記の方法で、本システムの妥当性を検証した。

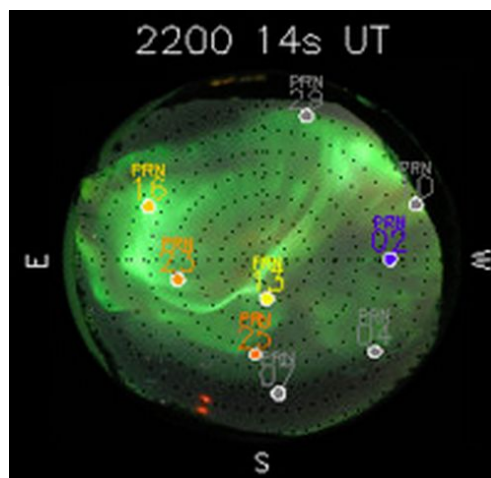
国立極地研究所がノルウェー・トロムソに設置している全天カラーデジタルカメラで、2012年11月20日16時UT前後にオーロラブレイクアップが観測され、オーロラの発光領域は時間の経過とともに北西方向に動いていた。この時間帯にGNSS受信機で観測されたGPS衛星PRN20の電波から求めたドリフト速度は、東西方向が西向きに300-900m/s、南北方向が北向きに250-650m/sであった。その結果は、GNSS受信機で観測したドリフト速度は電離圏プラズマのドリフト速度であることを示している。また、この時、GPS衛星PRN20の電波が電離圏を通過する場所は、フィンランドに設置されたSuperDARN HFレーダーによっても観測されていた。HFレーダーの観測結果は、西向きに100m/sのドリフト



図1：ノルウェーのトロムソ EISCAT レーダー・サイトに設置したアンテナ(上)と受信機(下)。

速度があったことを示していた。よって、GNSS 受信機で得られたドリフト速度の東西成分と向きは一致するが、速度の大きさは GNSS 受信機で得られたドリフト速度の方が大きい。これは、SuperDARN レーダーから得られたドリフト速度は、観測されたドリフト速度を球面調和関数により、極域全体の大きな空間スケールのプラズマの速度を近似したのに対し、GNSS 受信機では局所的なプラズマドリフトを観測しているために差が生じたものと考えられる。

(2)北極域で発生するオーロラ爆発現象（オーロラサブストーム）がどのような電離圏シンチレーションを引き起こすのかについて、トロムソに設置されている全天カラーデジタルカメラと GPS シンチレーションモニタリングシステムを用いた観測的研究を行った。特に、成長相、爆発相、回復相の3つに分けられるオーロラ爆発の各フェーズにおいて GPS 測位信号の振幅、位相がどのように変動するかに着目し、2009年11月19日に観測された小規模な孤立型オーロラ爆発についての事例解析を行った。図2に、その一例を示す。解析の結果、爆発相の開始後数分にはわたって、GPS 測位信号の位相に顕著なシンチレーションが現れることが明らかになった。これに加え、位相シンチレーションが観測されるときには、測位電波の経路を、明るいオーロラが速いスピードで通過していたことも分かった。これは、オーロラ爆発に伴う電離圏プラズマの激しい時間変化が位相シンチレーションの発生に重要な役割を果たしていることを意味する。位相シンチレーションとは対照的に、オーロラ爆発の全てのフェーズにおいて、測位信号の振幅にはシンチレーションが生じないことが示された。赤道域におけるこれまでの観測から、振幅シンチレーションは、電離圏プラズマの空間的不規則構造による電波の回折に起因すると考えられ



**図 2: オーロラ爆発の爆発相開始後すぐの時間帯に得られた全天オーロラ画像。GPS 衛星の位置が丸印で示されており、丸の大きさは位相シンチレーションの強度を示す。**

ている。このことは、北極域においては、電離圏プラズマの空間的非一様性ではなく、その激しい時間変化が、測位信号に影響を与えるということを示している。

(3) 欧州における GPS 観測網データを用いて全電子数 (Total Electron Content; TEC) を算出し、全電子数変動の水平二次元分布を調べた。2008年に得られた一年間のデータを調べることで、以下の成果が得られた。

地磁気緯度に沿って東西方向にのびる電離圏トラフの水平二次元構造を明らかにした。昼間における MSTID は、冬季に発生頻度が高く、南向きに伝搬するものが多い。この結果は、他の観測機器による MSTID の観測結果や GPS-全電子数 データを用いた他地域での観測結果と一致しており、従来から考えられてきたように、昼間の MSTID が大気重力波に起因するものであることを支持している。夜間において MSTID は南西方向に伝搬するものが多いことを明らかにした。この結果は、中緯度での GPS や大気光観測によって得られた結果とも一致することから、夜間の MSTID の生成に Perkins 不安定が重要な役

割を果たしていると考えられる。さらに、本研究では、MSTID の発生頻度には緯度依存性があり、高緯度では低緯度に比較して発生頻度が低いことを明らかにした。MSTID の緯度変化に関しては、モデル計算を行い、磁気伏角の違いが緯度変化の原因であることを明らかにし、重力波を起源とする MSTID よりも Perkins 不安定による MSTID の方が緯度変化が大きいことを示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Hosokawa, K., Y. Otsuka, Y. Ogawa, and T. Tsugawa, Progress in Earth and Planetary Science, 10.1186/2197-4284-1-16, 2014 (査読有り)

小川泰信, 門倉昭, 元場哲郎, 田中良昌, 細川敬祐, トロムソ/ロングイアピンにおけるオーロラ観測用並列イメージャーの大量データ処理と可視化, 宇宙科学情報解析論文誌, vol. 2, 51-61, 2013 年 3 月 (査読有り)

Otsuka, Y., K. Suzuki, S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe, Ann. Geophys., 31, 163-172, doi:10.5194/angeo-31-163-2013, 2013 (査読有り)

[学会発表](計 19 件)

上部 広大, 大塚雄一, 小川泰信, 細川敬祐, 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観測、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 05 月 24~28 日、幕張メッセ(幕張市)

三井俊平, 細川敬祐, 大塚雄一, 塩川和夫, 大山伸一郎, 小川泰信, オーロラ発光と GPS シンチレーションの関連性、地球電磁気・地球惑星圏学会、2014 年 10 月 31 日~11 月 03 日、長野県松本市キッセイ文化ホー

ル(松本市)

Ogawa, Y., Y. Otsuka, and Y. Hamaguchi, Ionospheric scintillation observations by a digital beacon receiver in Tromsø, 第 5 回極域科学シンポジウム、2014 年 12 月 02 日 05 日、国立極地研究所(立川市)

三井俊平, 細川敬祐, 大塚雄一, 塩川和夫, 大山伸一郎, 小川泰信, オーロラ発光と GPS シンチレーションの関連性、第 5 回極域科学シンポジウム、2014 年 12 月 02 日 05 日、国立極地研究所(立川市)

細川敬祐, 大塚雄一, 小川泰信, 津川卓也, 磁気嵐中に発生したサブストームに伴う GPS シンチレーション、第 3 回極域科学シンポジウム、2012 年 11 月 26~30 日、国立極地研究所(立川市)

大塚雄一, 伊藤祐作, 小川泰信, 細川敬祐, ノルウェー・トロムソにおける GNSS シンチレーション観測、地球電磁気・地球惑星圏学会 第 132 回講演会、2012 年 10 月 20~23 日、札幌コンベンションセンター(札幌市)

伊藤祐作, 大塚雄一, 塩川和夫, 細川敬祐, 小川泰信, トロムソにおける GNSS 受信機を用いたシンチレーションの観測、第 3 回極域科学シンポジウム、2012 年 11 月 26~30 日、国立極地研究所(立川市)

小川泰信, 細川敬祐, 田口聡, 鈴木臣, 門倉昭, 宮岡宏、昼間側極域電離圏で見られた脈動オーロラ、地球電磁気・地球惑星圏学会 第 132 回講演会、2012 年 10 月 20~23 日、札幌コンベンションセンター(札幌市)

大塚雄一, 小川泰信, 津川卓也, 西岡未知, EISCAT レーダーと欧州 GPS 受信機網を使った中規模伝搬性電離圏擾乱の観測、中間圏・熱圏・電離圏研究集会、2012 年 08 月 23~24 日、情報通信研究機構(小金井市)

Otsuka, Y., K. Suzuki, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, A Study of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances

Observed with a GPS Network in Europe, 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012年07月14~22日, Mysore, India

Otsuka, Y., S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe, International Symposium on Equatorial Aeronomy (ISEA) 13, 2012年03月12~16日, Paracas (Peru)

Y. Ogawa, Current status and future plan of NIPR optical and radio observations in Tromso and Longyearbyen, NIPR symposium on conjugate aurora and SuperDARN - past, present and future, 2012年02月17日, 国立極地研究所(立川市)

Otsuka, Y., S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2011, 2011年12月05~09日, San Francisco (USA)

細川敬祐, 大塚雄一, 小川泰信, 津川卓也, オーロラ爆発に伴う電離圏イレギュラリティ: 光学・GPS 受信機・短波レーダー同時観測、地球電磁気・地球惑星圏学会、2011年11月03~06日、神戸大学(神戸市)

Otsuka, Y., M. Nishioka, T. Tsugawa, and A. Saito, Study of the Ionospheric Variations Using Two-dimensional Maps of Total Electron Content Obtained from GPS Receiver Networks, ISROSES-II (International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System II), 2011年09月11~16日, Borovets (Bulgaria)

大塚雄一, 西岡未知, 塩川和夫, 津川卓也,

欧州のGPS受信機網を用いた電離圏擾乱の研究、中間圏・熱圏・電離圏研究会、2011年08月29~31日、九州大学(福岡市)

細川敬祐, 大塚雄一, 小川泰信, 津川卓也, 細川敬祐, オーロラ爆発に伴う電離圏イレギュラリティ: 光学・GPS 受信機・短波レーダー同時観測、中間圏・熱圏・電離圏研究会、2011年08月29~31日、九州大学(福岡市)

大塚雄一, GPSを使った電離圏擾乱の研究紹介、高精度測位技術研究セミナー ~ 最新のGNSS技術とその応用事例 ~ , 2011年06月03日、名古屋大学(名古屋市)

大塚雄一, 中川慎太, 塩川和夫, 津川卓也, 欧州のGPS受信機網を用いた全電子数変動の観測、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年05月22~27日、幕張メッセ(幕張市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大塚 雄一 (OTSUKA, Yuichi)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 40314025

### (2) 研究分担者

小川 泰信 (OGAWA, Yasunobu)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号: 00362210

細川 敬祐 (HOSOKAWA, Keisuke)  
電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号: 80361830

### (3) 連携研究者

久保田 実 (KUBOTA, Minoru)  
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ・研究員

研究者番号: 90250670