

令和 4 年 9 月 9 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2021

課題番号：16K18126

研究課題名(和文) 高い高度分解能を持つロケットGPSトモグラフィ技術の実証実験

研究課題名(英文) Study on rocket GPS tomography with high altitude resolution

研究代表者

芦原 佑樹 (Ashihara, Yuki)

奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：50511557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：電離圏水平・鉛直構造を観測を行うため、新たな計測法であるロケットGNSS-TEC法を提案し、これに必要な観測ロケット搭載GNSS-TEC受信機とアンテナシステムの開発を行った。観測ロケットはスピンするため、単一アンテナでは衛星追尾が中断される。そのため、常にGNSS衛星を受信できるアンテナシステムの検討を行い、ロケット側面に6つ、開頭部に8つのパッチアンテナを搭載し、開頭前後でアンテナを切り替えるシステムを開発した。受信機とアンテナシステムを模擬ロケット構体に搭載して回転試験を行い、ロケットGNSS-TEC観測に必要な性能を有することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通信、放送、測位など宇宙利用が社会基盤として拡大するにつれ、電離圏が社会に与える影響度が大きくなっていく。例えば、太陽フレアや磁気嵐などにより引き起される電離圏擾乱は、衛星通信や衛星放送に影響を与え、衛星を利用したGNSS(Global Navigation Satellite System)測位技術の誤差原因となる。そのため、擾乱に代表される電離圏特異現象のメカニズムを解明することができれば、電離圏予報の精度向上に役立てることができ

研究成果の概要(英文)：In order to observe horizontal and vertical structures in the ionosphere, we proposed a new measurement method named a rocket GNSS-TEC tomography, and developed the GNSS-TEC receiver and the antenna systems with an observation rocket. Since the observation rocket is spinned, GNSS satellite tracking is interrupted in a single antenna. Therefore, we have studied an antenna system that can always receive GNSS satellites. We have concluded that the antenna systems, which has six patch antennas on the side of the rocket and eight patch antennas on the open part, to switch the antenna before and after opening.

研究分野：電波情報工学

キーワード：超高層大気 電離圏 電子密度計測 TEC 観測ロケット

1. 研究開始当初の背景

通信、放送、測位など宇宙利用が社会基盤として拡大するにつれ、電離圏が社会に与える影響度が大きくなっている。例えば、太陽フレアや磁気嵐などにより引き起される電離圏擾乱は、衛星通信や衛星放送に影響を与え、衛星を利用した **GNSS(Global Navigation Satellite System)** 測位技術の誤差原因となる。電離圏擾乱に代表される特異な問題を解明するためには、電場、中性粒子の運動量に加え、プラズマ物理の基本パラメータである電子密度の観測が不可欠である。

電離圏の電子密度は、一般的に水平方向にほぼ均一で、高度方向には密度変化を伴っており、高度帯に応じて電離圏 **D** 領域、**E** 領域、**F** 領域と呼ばれる。一般には水平方向に均一とみなされる一方で、電離圏擾乱発生時には水平方向にも粗密構造を持つ。例えば、中緯度電離圏における沿磁力線不規則構造(**Field-Aligned Irregularity: FAI**) [1]は、**E** 領域や **F** 領域の電子密度の不均一が原因で発生することが示唆されている[2]。電離層中の電子の運動は、磁力線に垂直な面内では磁力線に束縛されるが、沿磁力線方向には比較的自由に動くことができる。そのため、仮に **E** 領域内で電子密度が水平方向に不均一であった場合、電子は沿磁力線方向に移動できるため、**E** 領域の不規則構造が沿磁力線に引き伸ばされると考えられる。また、沿磁力線によって引き伸ばされた **E** 領域の不規則構造が **F** 領域に伝搬し、中規模伝搬性電離圏擾乱(**Middle-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: MSTID**)を発生させる[3]。**FAI** や **MSTID** は、水平に均一な構造を想定したイオノグラムやその場観測などの従来手法ではなく、レーダなどを用いた空間構造観測によって発見された現象といえる。

電離圏電子密度測定は、これまで種々の観測ロケット実験で行われている。観測ロケットを使った電子密度観測では、ラングミュアプローブ法やインピーダンスプローブ法など、プローブを用いたその場観測が多く実施される。一般にプローブ用いたその場観測は、精密な観測結果を得られるのが利点とされる。しかしながら、その場観測であるために、**FAI** や **MSTID** などの空間構造観測には不向きである。このように近年の電離圏研究は空間構造にも注目が集まっているため、観測ロケットでも空間構造観測の試みが行われている。栗原らは **S-310-38**, **S-520-29** 号機でマグネシウムイオンイメージャー(**Magnesium Ion Imager: MII**) による撮像観測を行い、**Es** 層の水平構造観測に成功している[4]。また、山本らは **S-520-26** 号機で **2** 周波数ビーコン(**Dual-Band Beacon: DBB**)を用いたロケット飛翔軌道面(鉛直方向)の空間分布観測を行っている[5]。**DBB** 実験では、観測ロケットに位相の揃った **2** 周波数のビーコン送信機を搭載し、ロケット飛翔軌道面を通る場所に複数の地上観測点を設置する。地上観測点で得られた **2** 周波のビーコン電波の位相偏位からロケット - 地上間の全電子密度を求め、複数観測点のデータにトモグラフィ解析を施すことで、ロケット軌道面の電子密度空間分布を得ることができる。

2. 研究の目的

研究背景で述べたように、**FAI** や **MSTID** などのプラズマ輸送過程の解明には、電離圏空間構造を観測することが必要となる。電離圏空間構造を観測することを目的として、新たな電離圏観測手法としてロケット **GNSS-TEC(Total Electron Content)** トモグラフィ法を提案し、これに必要な観測ロケット搭載 **GNSS** 受信器を開発する。

レーダ電波を用いたりモートセンシングでは、使用周波数や観測場所等の自由度がある一方で、落成検査や実験局免許の取得等の煩雑な手続きが必要となる場合が多い。しかし、本研究で提案するロケット **GNSS-TEC** トモグラフィ法は、**GNSS** 衛星から送信される電波を利用するため、自前の送信局等を設置する必要がない。観測ロケットに **2** 周波対応 **GNSS** 受信器とアンテナを搭載するだけよく、シンプルな構成で観測できるのが利点である。**GNSS-TEC** は、地上に設置した **GNSS** 受信器を用いて広く行われているが、観測ロケット機上ではこれまで実施されていない。また、ロケット **GNSS-TEC** では、電離圏中を飛翔する特徴を生かして、**E** 領域と **F** 領域の分離観測が可能となる。ロケット **GNSS-TEC** を新手法として確立することによって、超高層大気研究の発展に貢献する。

3. 研究の方法

観測ロケットは飛翔姿勢の維持のため、機軸を中心に回転しながら飛翔する。そのため、指向性を持つパッチアンテナを単一で機体側面に配置した場合、回転によって衛星に対するアンテナの向きが変わり、受信状況が不安定になる。本研究では、複数アンテナでの合波方式を提案し、**TEC** 観測に最適なアンテナ数および配置を検討する。図 1 に示す観測ロケットを模擬した地上実験装置を用いて、**60rpm** のロケットスピンを模擬する。アンテナ数や配置等を変化させてデータを取得する。

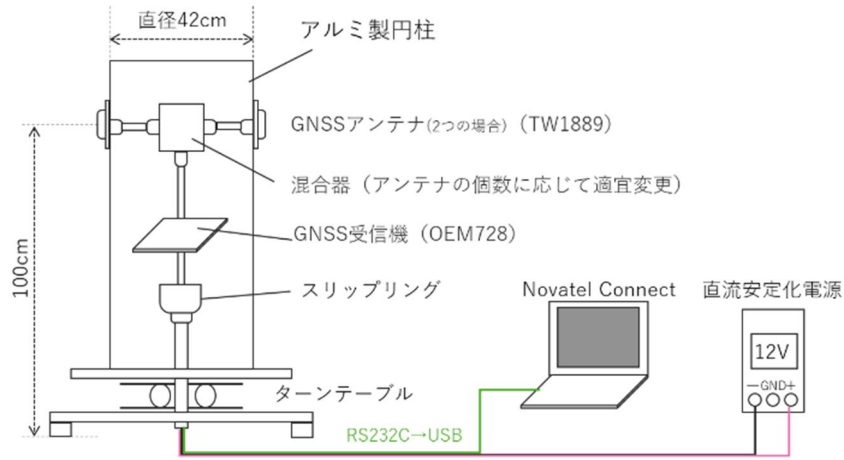


図1 複数アンテナ合波方式のGNSS-TEC観測装置

4. 研究成果

一平面上に複数のアンテナを均等に配置する。アンテナ数8の結果を図2および図3に示す。図2の仰角52度に位置する衛星では、赤破線で示す回転開始の直後、加速度変化による搬送波位相のロック外れでTEC値がジャンプしているが、その後は青破線で示す回転終了まで-0.07TECU程度の振動がみられる。これに対して図3の仰角35度に位置する衛星では、回転開始からTEC値が分散し不安定になっており、TEC値変化を正常に観測できていない。観測結果をまとめると、アンテナ数2つの場合はTEC算出ができず、4つの場合は仰角80度の衛星まで、6つの場合は仰角60度の衛星まで、8つの場合は仰角50度の衛星までTEC算出が行えることを確認した。

アンテナの位置関係と仰角による影響について考察する。アンテナを同一平面に配置することで、隣り合うアンテナに同時に受信される信号には、仰角により生じた信号波面の傾きによって、搬送波に位相差が生じることが考えられる。アンテナ8個の場合、図4(a)に示すようにアンテナ配置間隔の76mmだけ進行(遅延)し位相がずれることになる。また、このアンテナ同士の間隔はアンテナ数に反比例し、アンテナを増やした場合ほど間隔が詰まることになり、位相のずれが少なくなる。図4(b)に示すように仰角 θ [deg]の衛星から波面が届くとき、アンテナ間隔が d_n [mm]であれば、位相のずれは次式で求められる。

$$d = \cos \theta \cdot d_n \text{ [mm]} \quad (1)$$

式(1)に実験結果を当てはめると、表1が得られ、TEC算出において許容されると考えられる位相差が50mm程であると推測できる。

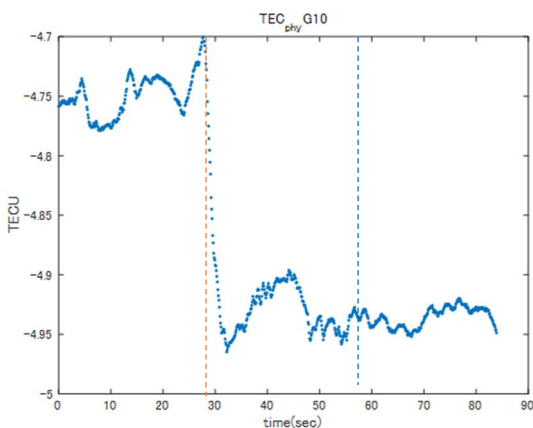


図2 TECの時間変化(N=8,52度,G10)

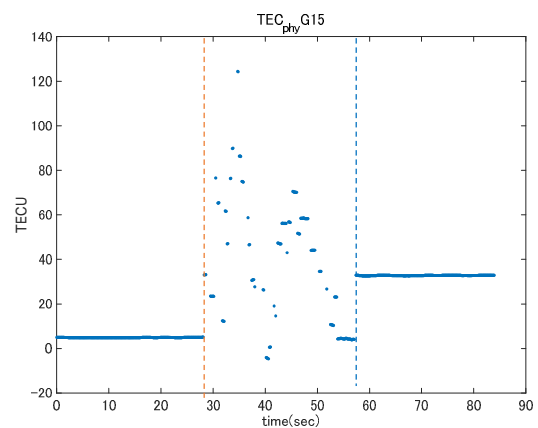


図3 TECの時間変化(N=8,35度,G15)

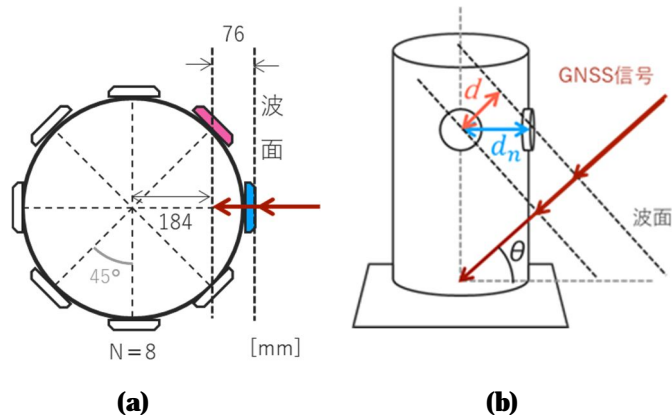


図 4 アンテナ配置によって生じる模擬距離と位相差

表 1 仰角とアンテナ数毎の位相差の関係

仰角 [deg]	位相差d[mm]		
	N=4	N=6	N=8
	$d_n=260$	$d_n=130$	$d_n=76$
90	0.0	0.0	0.0
85	22.7	11.3	6.6
80	45.1	22.6	13.2
75	67.3	33.6	19.7
70	88.9	44.5	26.0
65	109.9	54.9	32.1
60	130.0	65.0	38.0
55	149.1	74.6	43.6
50	167.1	83.6	48.9
45	183.8	91.9	53.7
40	199.2	99.6	58.2
35	213.0	106.5	62.3
30	225.2	112.6	65.8
25	235.6	117.8	68.9
20	244.3	122.2	71.4
15	251.1	125.6	73.4
10	256.1	128.0	74.8
5	259.0	129.5	75.7
0	260.0	130.0	76.0

以上のように、本研究課題では観測ロケットに搭載可能なアンテナシステムの構築・性能評価を行った。複数のアンテナでの合波による手法を検討する上で、観測ロケット搭載に向けた最適な設置数を導くことが重要であり、アンテナ数 **2,4,6,8** のパターンについて実験を行った。その結果、アンテナ数 **8** の場合が最も広い測位角度を得られ、約 **50** 度の仰角の衛星まで観測が行えることを確認した。

測位角度が制限された理由として、合波する際の信号の位相差を挙げた。この位相差が大きくなりすぎると受信機の位相追尾に影響を及ぼし、結果として測位角度が制限されるということが推察できた。すなわち位相差を減らすためにはアンテナ数を増やしたいが、電力・構造面での制限があるため、相反する課題となっている。本実験の結果から、同一平面上にアンテナ数 **8** つの配置が最も適しており、その他の配置についても優先順位をつけることができた。

<参考文献>

- [1] Yamamoto, M., S. Fukao, R. F. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda, and S. Kato (1991), Mid-latitude E region field-aligned irregularities observed with the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **96**(A9), 15943–15949, doi:10.1029/91JA01321.
- [2] Yokoyama, T., M. Yamamoto, and S. Fukao (2003), Computer simulation of polarization electric fields as a source of midlatitude field-aligned irregularities, *J. Geophys. Res.*, **108**, 1054, doi:10.1029/2002JA009513, A2.
- [3] Yokoyama, T., and D. L. Hysell (2010), A new midlatitude ionosphere electrodynamic coupling model (MIECO): Latitudinal dependence and propagation of medium-scale traveling ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L08105, doi:10.1029/2010GL042598.
- [4] Kurihara, J., et al. (2010), Horizontal structure of sporadic E layer observed with a rocket-borne magnesium ion imager, *J. Geophys. Res.*, **115**, A12318, doi:10.1029/2009JA014926.
- [5] 山本衛, Bernhardt, Paul, Wilkens, Matthew, 横山竜宏, 観測ロケット S-520-26 号機から地上までのビーコン実験結果速報, 第 26 回大気圏シンポジウム: 講演集録, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 2012 年 3 月 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥村 誠, 芦原 佑樹
2. 発表標題 ロケットGNSS-TEC観測搭載用アンテナシステムの構築
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第148回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 芦原 佑樹, 山本 衛, 石坂 圭吾, 熊本 篤志, 白澤 秀剛, 頭師 孝拓
2. 発表標題 中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) 発生時の電子密度構造観測 : S-520-32号機の準備状況
3. 学会等名 第3回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村 誠, 芦原 佑樹
2. 発表標題 観測ロケット搭載のためのGNSS-TEC受信機の性能評価
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 芦原 佑樹, 山本 衛, 石坂 圭吾, 熊本 篤志, 白澤 秀剛, 頭師 孝拓
2. 発表標題 MSTID 発生時における電離圏E-F 領域の電子密度鉛直・水平構造観測
3. 学会等名 第2回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芦原 佑樹, 山本 衛, 石坂 圭吾, 熊本 篤志, 白澤 秀剛
2. 発表標題 電離圏擾乱時における電離圏鉛直構造の空間観測実験 機器内製化と打ち上げオペレーションを通じた実践的な宇宙人材教育
3. 学会等名 第1回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 芦原 佑樹, 山本 衛, 石坂 圭吾, 熊本 篤志, 白澤 秀剛
2. 発表標題 電離圏擾乱時における電離圏鉛直2次元構造の観測ロケット実験
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第144回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池端祐太郎, 芦原佑樹
2. 発表標題 高い高度分解能を持つロケットGPS-TECトモグラフィ法の検証
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 池端 祐太郎, 芦原 佑樹, 石坂 圭吾
2. 発表標題 ロケットGPS-TECトモグラフィ法の高度分解能評価
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 上垣柊季, 芦原佑樹, 阪口喜晃, 西本宏樹
2. 発表標題 ロケットGNSS-TEC による電離圏電子密度構造観測
3. 学会等名 第4回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------