

地上電波利用電離圏リモートセンシング衛星

～グローバルな VOR 局配置とソフトウェア受信技術を活用した電離圏擾乱マッピング～

電気通信大学電磁・電磁環境研究センター 富澤研究室

猪狩 靖弘 山中 拓也 山幡 琢也 横山 貴文 渡口 暢人

電気通信大学大学院情報システム研究科

藤井 厚太郎

1. 序論

電離圏電子密度の乱れ(擾乱)現象は、衛星測位や衛星通信などに影響を与え、GPS 測位精度の低下を招き、車輛、船舶、航空機の安全運航などに支障をきたしたりすることから、世界各地で観測が行われ、その物理機構の解明が進められている。最近では、GPS 衛星を利用した電離圏観測が頻繁に行われている。しかし GPS や観測地点の少ない地域では、未だ十分な電離圏の擾乱の観測を行うことが難しい。

そこで我々は航空機の安全な運航の為に方位情報を提供する無線システムとして整備されている VHF 帯航空無線標識局 (VOR: VHF Omnidirectional Range) が世界各地に分布し、連続運用されていることに着目した。本衛星では、その送信電波を利用して振幅シンチレーションとファラデー TEC の手法により、電離圏の擾乱現象をマッピングすることを主ミッションとし、そのオプションとして 2 周波 GPS によるプラズマ圏観測の TEC 観測を行う人工衛星を提案する。なお、サブミッションにおけるミッション検討は都合により省略した。

2. ミッションの目的

本ミッションでは電離層擾乱に対して VHF 帯電波の感度の高いという性質を利用するため、全球的に多数局が配置されている VHF 帯航空無線標識局(VOR)を用い、低軌道衛星で高速で走査することにより図1のような形で赤道域から極域にかけて電離圏擾乱の広域マッピングを行うことを目的とする。

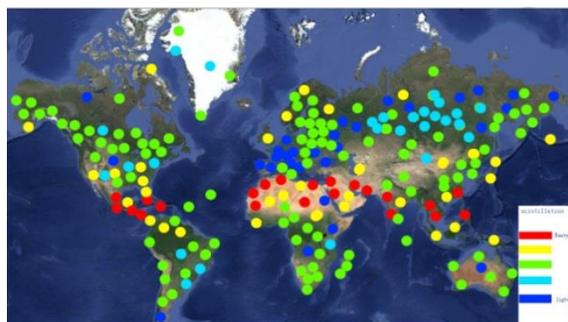


図1: 電離圏擾乱の広域マッピングのイメージ

3. ミッション設計

3.1. ミッション概要

本ミッションでは、2006年に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」のような低軌道地球

観測衛星のピギーバックにとりして電離圏とプラズマ圏の境界にあたる高度 600km 上空の極円軌道上に打ち上げ、VOR の送信電波を利用した非連続ブッシュブルーム型の走査による電離圏擾乱広域リモートセンシングを行う。

3.2. 従来の衛星電離圏観測方法との違い

電離圏擾乱観測にあたり、最近活発に用いられている観測手段として、地球を周回する GPS 衛星の受信機を地上に設置し観測する方法である。この電離圏擾乱観測方法にはシンチレーション観測(振幅と位相の乱れ観測)と 2 周波による電離圏総電子数(伝搬路における全電子数)観測がある。

しかし地上で衛星電波を受信するこの方法は、広域に渡る構造を見るために GEONET のように大規模な GPS ネットワークを整備することで不可欠であり、アフリカや極域などの地域では整備が難しく、使用周波数が 1.6 GHz と高いため小規模の変動は観測しにくい。これらの観測では、シンチレーションの世界的観測を組織立って行われていないので、VOR によるシンチレーション観測は世界中の全ての地域において有用である。

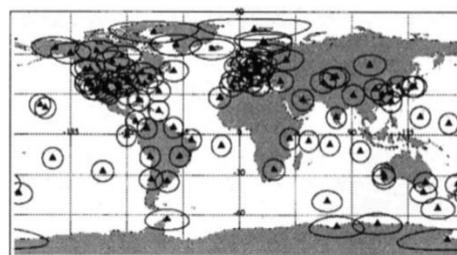


図2: GPS ネットワーク図 [1]

本ミッションと従来の観測手段の大きな違いは、地上に多数の局が全球的に置かれている VHF 帯航空無線標識局(VOR)を電波ビーコンとして扱い、衛星搭載受信機で電離圏擾乱に敏感な VHF 帯電波シンチレーション観測や TEC 観測を行う点にあり、観測により得られた TEC 値から GPS の測位誤差や SAR(合成開口レーダ)の電離圏の影響等を評価することが可能となる。また、地上の GPS 衛星 1 局で受信出来る衛星数よりも、衛星から VOR を観測した方が、観測パス数が圧倒的に多いので、従来の観測でカバーしきれない極域か

ら赤道域にわたる広い領域の電離圏擾乱観測を行うことにできる。

本ミッションでは直接的な GPS 測位精度向上には繋げられないが、GPS の測位精度を招くシンチレーション領域を詳しく観測できるので、これまでの衛星・地上観測と統合解析することで Klobuchar モデルや全地球電離圏モデルの改良に結び付く可能性がある[2]。

3.3. VOR 送信局を観測に用いる有効性と問題点

VOR 送信局は VHF 帯の 108MHz~118MHz で 100W または 200W の送信を行い、連続運用がされている。

この無線システムは水平方向に対して無指向性の主搬送波と指向性のある副搬送波の位相比較により、方位情報を出すシステムである。その送信アンテナにはアルフォードループアンテナ(図 3 左)が用いられており、水平方向には無指向であり、仰角 50° と 90° にアンテナ利得の劣化がみられる構造になっている[3] (図 3 右)。また、このシステムは ICAO(国際民間航空機関)によって定められた全世界共通のシステムであり、その送信局は 2500 局以上存在し(図 4)、GPS による観測網と比較して偏りのない幅広い地域に分布しており、水平分解能は約 100km となる。これらの点から電離圏擾乱観測のために大規模設備を維持することなく、観測が可能である点为本観測に利用する最も大きな有効性である。

各送信局に 50kHz 間隔でその周波数が割り当てられているシステムであり、かつ同一周波数で送信する VOR 局がかなりの確率で存在するため、衛星上で観測する際には広い帯域で同時に観測を行い、その局分離をするための対策を取ることが必要となる。

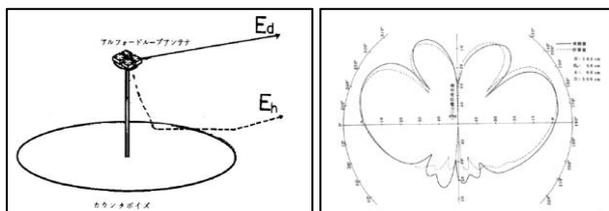


図 3: VOR のアンテナ構造とその垂直面指向性[3]



図 4: 世界的 VOR 局配置

また VOR 使用に際し、表 1 に示すようにファラデー回転法による TEC 値を求める際のファラデー回転量が問題になる。ファラデー回転法による TEC 観測を実現するにはナイキスト条件によりファラデー回転による偏波面の 1 回転の間に 2 回以上のサンプリングを行う必要がある。従って電子密度変動量を観測するには、高速サンプリングをする必要がある。

表 1: 100MHz におけるファラデー回転量 [4]

電子密度[el/m ²]	10 ¹⁶	10 ¹⁷	10 ¹⁸	10 ¹⁹
ファラデー-回転量[rad]	1	10	100	1000

3.4. 低軌道電離圏観測における問題点

地上での GPS 衛星による観測では、GPS の周回速度が電離圏擾乱の動きに比べて十分に遅いため、静止系で電離圏観測をしていると考えられる。

本ミッションでは受信機を搭載する衛星高度が 600 km の極円軌道で速度 7.6 km/s、周期 96.7 分で観測を行うため、衛星が大気密度勾配等により動く電離圏擾乱の速度 50~150 m/s に比べて極めて速く動き、電離圏擾乱構造をごく短時間で読み取ることになる。シンチレーション指数として使われる 2 分間の積分値で表される S4 は本衛星上で観測するにはその時間の約 1/50 にあたる 2.4 秒程度の時間で観測することになる。すなわち、電離層擾乱構造によって起きるシンチレーションのスペクトルは衛星上ではコーナー周波数が大きく遷移し、その 70 倍である 0Hz-500Hz までの領域で起こり、その振幅シンチレーションを観測するにはナイキスト条件から 1ms の高速サンプリングが振幅シンチレーションの観測する条件となる。

3.5. サクセスレベル

以上の VOR 局と低軌道電離圏擾乱における問題点を踏まえ、本ミッションの運用期間を 1 年とし、サクセスレベルを表 2 のように定めた。

表 2: サクセスレベル

Minimum	シンチレーションマッピングの作成
Full	VOR ファラデー-TEC マップの作成 E 層と F 層の電離圏擾乱分離
Extra	2 周波 GPS による電離圏とプラズマ圏の分離同時観測の実現 10 年連続運用

4. 衛星設計

4.1. 衛星の概要

観測における問題点と表 2 のサクセスレベルを踏まえて作成した衛星の外観と主要諸元を図 5、表 3 に記した。

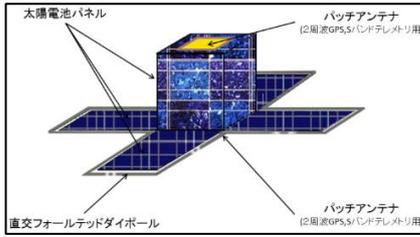


図 5: 衛星の外観

表 3: 衛星の主要諸元

サイズ	W500mm×H500mm×500mm	
質量	50kg	
軌道	高度	600km
	軌道	極円軌道
	周期	96.7分(速度:7.6km/s)
姿勢制御	2軸制御 磁気トルカ,地磁気センサ	
発生電力	107W	
通信バンド	Sバンド	
2次電池	リチウムイオンバッテリー、58A	
主要ミッション機器	フォールテッドダイポールアンテナ, ルビジウム発振器, ソフトウェア受信機, パッチアンテナ, 2周波 GPS, 薄膜太陽電池パネル	

4.2. 観測系

高度 600 km の極円軌道において、太陽パネルとその周囲に比較的広帯域で利用可能な直交フォールテッドダイポールアンテナを展開する。アンテナから得た RF をルビジウム発振器と 2 周波 GPS により時刻供給と周波数の安定度を取ったソフトウェア受信機を使って処理し、電離圏擾乱のシンチレーション観測とファラデー回転法による TEC 観測により、主ミッションの電離圏擾乱の広域マッピングを行う。軌道の制約条件が少なく、構成の簡単な受信機を搭載している上に、経年変化による軌道低下が起こってもミッションを継続できるので、長期運用に適する。

4.2.1. 観測機器構成

VOR 送信局を利用した電離圏擾乱の広域マッピング観測装置の構成が図 6、ソフトウェア受信機の内側の処理について示したものが図 7 である。なお、この衛星に搭載する観測機器の構成図の作成には現時点で大学での研究用途で性能の高さに定評のある NI 社の USRP-2930 の仕様をもとに作成を行った。

観測データの前処理として VOR の帯域のみ単純 FFT 操作を行うため受信した信号はさまざまな周波数の信号を含んでいる。VOR よりも送信出力の大きな信号によってシンチレーションの解析が出来ない可能性があり、特に 200kW におよぶアナログ TV 局や FM ラジオの電波が入る可能性が高い。その可能性を考慮に入れ図 6 のハードウェアの構成についてはアンテナの次段に

VOR の周波数帯域(108~118MHz)のみ通すバンドパスフィルタを接続した。またファラデーTECを観測する必要があるため、偏波面の分離が必須であり、ソフトウェア受信機の処理では不安があるため、バンドパスフィルタに 90° 位相器(クワドラチャハイブリット)により偏波面を分離し、観測データをソフトウェア受信機による処理へ持ちこむ構成とした。USRP-2930 を用いた観測システムの検討の結果、周波数精度が 10^{-9} /dayと高いルビジウム発振器と GPS による時刻を外部供給することで 10MHz,50000points/ms(周波数分解能:200Hz)でドップラシフトの分離ができ、衛星上での観測をできると判断した。

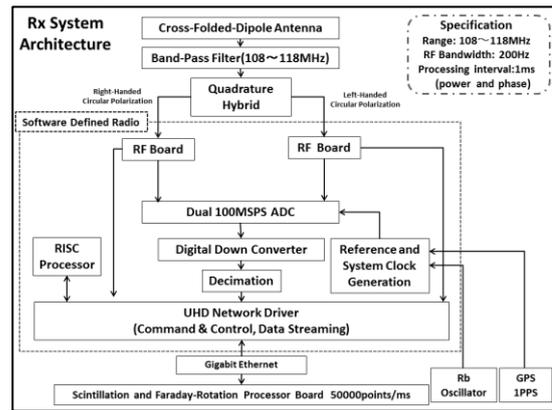


図 6: 観測系機器構成

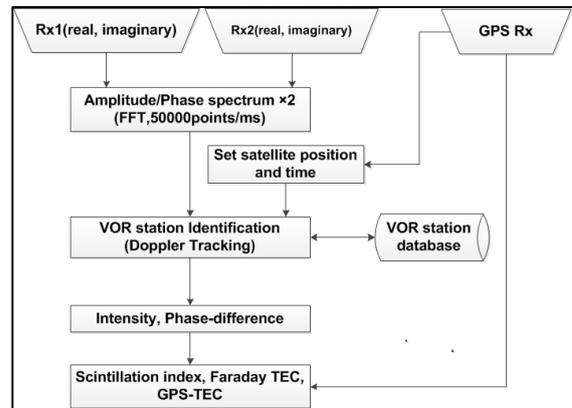


図 7: ソフトウェア受信機内での処理

図 7 にあるソフトウェア受信機内での処理は、90° 位相器により分配した 50000points/ms の高速サンプリングした後のデータ処理について表したものである。まず、GPS による時刻と位置情報をもとに VOR 局のデータベースから VOR 局を絞り込み、ドップラシフト量をもとに局分離を行う。そして検出した強度と位相差から最終的なシンチレーションインデックス、ファラデーTEC、GPS-TEC を出力して、それらを衛星本体のメモリに保存を行う。不要なデータは破棄し保存を行わない。これらのハードウェアとソフトウェアの処理により局分離を行い、多数の局で同様の処理を準リアルタイムに進めることで初めて電離圏

擾乱マッピングが可能となる。ソフトウェア受信技術はまだまだ発展途上であり、今後の技術開発によって更なる高精度の観測が可能になると推察される。

4.2.2. 電離圏擾乱マッピング観測での回線設計

VORの周波数を100MHz、送信電力100Wとし、VORから見て垂直(伝搬距離600km)、水平(伝搬距離2000km)方向に対して受信信号強度と信号雑音比について評価を行った(表4)。その結果受信電界強度は高く、高い垂直水平方向どちらでも高いS/Nが得られることが分かった。

表4: 観測VOR回線設計

	単位	垂直方向	水平方向
送信電力(VOR)	W	100	100
周波数(VOR)	MHz	110.0	110.0
伝搬距離	km	600.0	2000.0
自由空間損失	dB	45.6	35.2
送信アンテナ利得	dB	2.1	5.1
受信アンテナ利得	dB	2.1	2.1
受信電界強度	dB μ V	37.8	30.4
受信信号電力	dBm	-69.2	-76.6
等価入力雑音電力(NF=0dB, Bw=200Hz)	dBm	-150.8	-150.8
信号雑音比(S/N比)	dB	81.6	74.2

4.2.3. 観測用アンテナの検討

比較的広帯域で利用可能なフォールデットダイポールアンテナを用いて観測を行う。VOR局の周波数は108~118MHzなので広帯域で安定した特性のアンテナを使用しなければならない。フォールデットダイポールアンテナは比較的広帯域の特性である。

図8に半波長ダイポールアンテナにおける特性の検討を示した。図8は50 Ω 負荷に対するVSWRの特性を示している。アンテナの負荷を200 Ω にすることによって、VORの帯域において1dB程度の反射損失で抑えられることがわかる。フォールデットダイポールアンテナは半波長ダイポールよりアンテナのQを低くできるため更にアンテナの特性が改善できる。

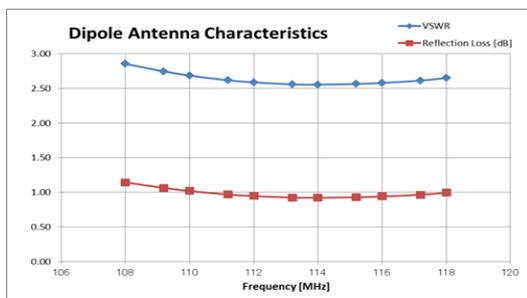


図8: 観測用アンテナの検討

4.3. 電源系

パドルと中心部分に50cm四方の太陽電池パネルを計14枚3.5m²取り付ける。この時1日平均

107W受電出来る。これは観測機器やセンサ類の合計30Wを優に超え、残りをダウンリンク送信用に用いる。なおバッテリーにはリチウムイオン電池UR18650ZTAを20個用いて58Aを確保する。

4.4. 通信系

4.4.1. テレメトリ通信について

地上との通信は電気通信大学菅平電波観測所の3.6m ϕ パラボラアンテナ衛星追尾システムを利用する(図9)。気象衛星NOAAの受信実績があり、VHF帯でコマンドを送り、SバンドのQPSK方式でテレメトリを行って、衛星制御と観測データ取得を行う(図10)。自前の大型通信設備を用い、勉学の一助にもなり運用コストが安価にでき、長期運用に適する。



図9: 衛星追尾用パラボラアンテナ



図10: 衛星追尾用パラボラアンテナ

4.4.2. 送信データ容量

ミニマムサクセスでは受信強度のみを菅平宇宙電波観測所で受信する。3分に一度測定を行い6bitで出力すると $6 \text{ bit} \times \frac{86400 \text{ s}}{180 \text{ s}} = 3213 \text{ bit}$ より一日あたり約400Bとなる。

フルサクセスでは2分間隔のS₄インデックスと1秒間隔のファラデーTECを受信する。共に8bitで出力すると $8 \text{ bit} \times \frac{86400 \text{ s}}{120 \text{ s}} \times 50 \text{ steps} + 8 \text{ bit} \times 86400 \text{ s} = 979.2 \text{ kbit}$ より一日約130kBになる。これを一日1回15分間に菅平宇宙電波観測所で受信すると、 $\frac{979.2 \text{ kbit}}{900 \text{ s}} \geq 1.1 \text{ kbps}$ より1.1kbps以上であれば受信できる。

エクストラサクセスでは1秒間隔の2周波GPS-TECを受信する。8bit出力の場合一日約2.8MBなので、同様に一日1回15分間に菅平宇宙電波観測所で受信すると25kbps以上であれば受信できる。

菅平宇宙電波観測所には直径3.6mのアンテナが3基あるので、同時に操作して衛星を追尾すれば利得向上が期待できる。

5. データ処理

5.1. 処理で得られる例

5.1.1. シンチレーションインデックス

シンチレーションを表す指数としてシンチレーションインデックス(S_4)がある。これは(5.1)式のように信号強度を平均信号強度で正規化した信号強度変化の標準偏差で、通常0~1の範囲の値をとる。この値が大きいほど振幅の変動が大きいことを表す。

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle (SI - \langle SI \rangle)^2 \rangle}{\langle SI \rangle^2}} \quad (5.1)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は時間平均を表し、SI は振幅強度の値である。振幅強度を120秒で積分し S_4 を導出する。

5.1.2. ファラデー回転法による TEC 観測

電離圏の状況を知るために総電子数(TEC)と呼ばれる地上から電離圏高度までの電子数を数え挙げその変動を調べることがある。

GPS 受信機を用いた TEC 観測では、2周波の異なる周波数による電離圏での屈折差を利用している。VOR 観測は各局から1周波ずつの送信なので2周波法 TEC を適用できない。

そこで今回はファラデー回転法による TEC 観測を行う。ファラデー回転法とは磁場中を磁場と平行に直線偏光が通過する時、電磁波が進むに従い偏光面が回転することで観測されることを利用する。左右円偏波角の差分がファラデー回転角 Ω [rad]となる。搬送波周波数を f [Hz]電離圏上での地磁気の平均の大きさを B_0 [T]、伝搬路と地磁気のなす角を θ [rad]とすれば $TEC N_T$ [m^{-2}]は式(5.2)で表される。

$$N_T = \frac{\Omega f^2}{2.365 \times 10^4 B_0 \cos \theta} \quad (5.2)$$

ここで $\Omega = 300$ deg, $f = 113$ MHz, $B_0 = 40000$ nT, $\theta = 60$ deg とすると、 $N_T = 14$ TECUとなる。

5.1.3. シンチレーションの FFT 解析

一般にシンチレーションは周期構造を持っており、地上観測時100 m/s で移動する電子密度擾乱を観測した場合、図11のように0.1 Hz でコーナー周波数を持ち 10^{-3} で電力が低下していく。

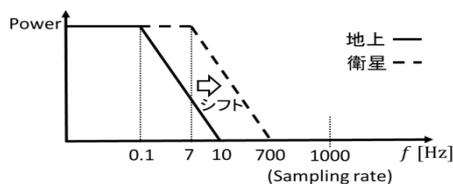


図 11: 振幅シンチレーションスペクトルとサンプリングレートの関係

今回は約7 km/s で移動する衛星から観測するので、図11に示すように7 Hz でコーナー周波

数を持ち電力が低下していく。今回の観測では1 kHz サンプリングで行うので、シンチレーションの観測を問題なくできることが保証され、また高いS/N が得られることから従来のGPS 観測で得られなかったスペクトルのすそのを見ることができるようになると期待される。

またコーナー周波数がシフトすることで、0.1 回転/s のようなゆっくりとした衛星スピンの発生した場合でもその影響を回避できる。

5.1.4. 2周波 GPS による TEC 観測

従来の TEC 観測では TEC 変動がどの領域に起因して発生したのかを分離することができなかった。本ミッションの衛星は2周波 GPS 受信機を搭載することにより、高度600 km よりも高い領域のみの TEC 観測が可能となる。この高度で GPS 観測を行うことは前例がなく、電離圏・プラズマ圏にはスポラディック E、スプレッド F、プラズマバブル等の様々な現象が存在するので、高度方向の分離が明確に分離できるようになる。

5.1.5. 実際の観測波形

VHF 帯人工衛星から送信した電波ビーコンを地上で観測した結果では地域により次の結果が得られている。

図12に赤道域のブラジル Campo Grande で244 MHz の VHF 通信衛星を受信した S_4 インデックスを示す[5]。

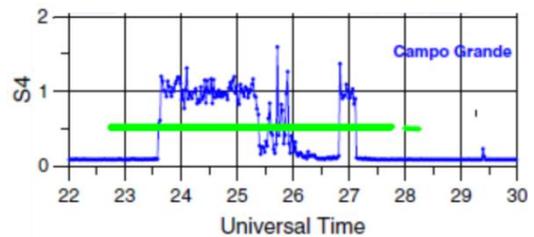


図 12: 赤道域における S_4 [5]

赤道域では S_4 が1を超えるほどの強いシンチレーションが観測された。これをプラズマバブルと呼ぶ。

図13に中緯度のオーストラリア Brisbane で150 MHz の NOVA1 衛星を受信した電界強度を示す[6]。

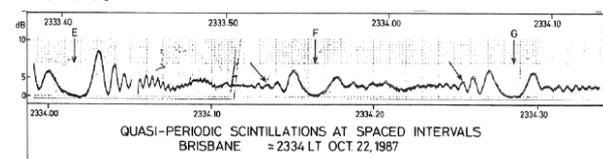


図 13: 中緯度における C/N0 [6]

波形に凸凹が見られるが、これはQPシンチレーションと呼ばれ典型的なスポラディック E である。スポラディック E は夏季に突発的に起こり、E 層で極端に電子密度の高い領域が発生することで、通信や測位に影響を与える現象である。

この他に中緯度の日本には地殻変動を調べる目的で GEONET とよばれる 1200 点の GPS 観測網がある。GEONET を用いると図 14 に示したように電子密度変動に伴う TID や磁気嵐による変動が 2 次的に描かれ直感的に理解し易い。今回提案する衛星は多数の送信局を受信することになるので、2 次元マップが GEONET よりも広範囲で描けることが期待される。

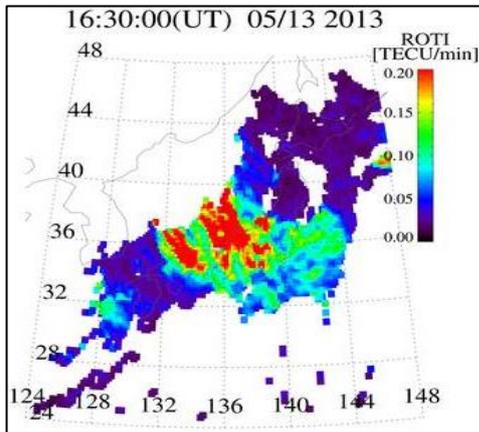


図 14: GEONET による TID 観測例 (NICT の HP より) [7]

図 15 に極域のグリーンランド Sondrestrom で 250 MHz の NIMS 衛星を受信した σ_{ϕ} を示す[8]。 σ_{ϕ} は搬送波位相変動値の標準偏差で位相シンチレーションの指標である。 σ_{ϕ} が最大で 9.5 を、 S_4 で 0.7 を観測し、オーロラ観測と対応する。電気通信大学は北欧で大気光観測による地上オーロラ撮像を実施しているので、同時観測が期待できる。

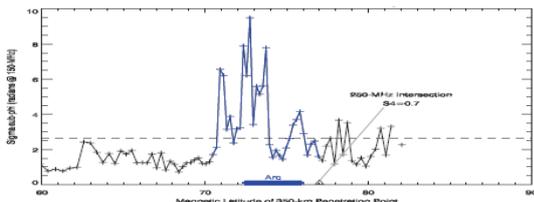


図 15: 極域における σ_{ϕ} [8]

これらの結果はすべて地上で観測された結果であり、従来は衛星からの電波を受信する事しか観測ができなかった。本ミッションは地上の VOR 局の電波を電波ビーコンとして扱い、衛星で観測するため、極域から赤道域までのシンチレーションをすべて準リアルタイムで観測することが可能となる。

5.2. 処理時に考えられる問題点の検討

5.2.1. シンチレーション検出高度推定

シンチレーションは代表的なものとして F 層高度で発生するスプレッド F や E 層高度で発生するスポラディック E がある。これらの高度分離はイ

オノゾンデ等を用いた局所領域での観測は行われているが広域構造は未だ未解明な部分が多く、電離圏の構造を把握するうえで非常に重要である。前項で紹介した GEONET においても、結果を地図投影した場合に誤った高度を推定する場合がある。2012 年 6 月 4 日に観測したイベントで、地図上に投影高度 350 km で投影された ROTI マップでは図 16 のように 0.05 TECU/min 以上 TEC 変動が観測された領域が 2 か所に分離した。そこで、本研究室と NICT との共同研究契約に基づいて NICT から観測データを頂き、投影高度を 100 km にして再解析を行ったところ、図 17 となった。TEC 変動の大きな領域が 1 か所に集まり静止衛星や HF ドップラ(HFD)観測等からも高度 100 km が妥当とされている[9]。HFD 観測とは電離層で短波(HF)が反射する際に、伝搬路長が変動することで生じたドップラシフトを観測する方法である。

今回の観測では MacDougall の高度推定法[10]を応用する。

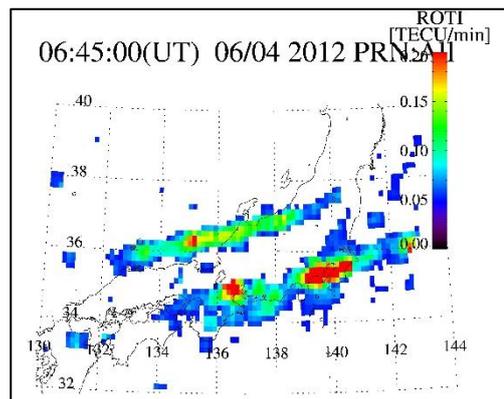


図 16: 高度 350 km 投影時の ROTI [9]

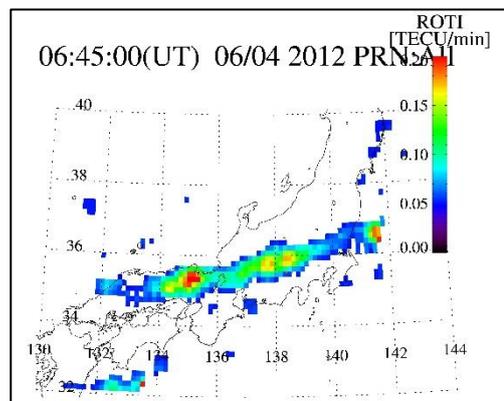


図 17: 高度 100 km 投影時の ROTI [9]

図 18 に示すように衛星が高度 600 km で周回する場合周回速度は 7.6 km/s となる。

衛星移動距離を地上に投影した時高度 300 km では 7.6 km/s で移動し、高度 100 km では 1.5

km/s で移動する。VOR 局の間隔が 300 km とすると、VOR1 と VOR2 で観測される時間差が 39 s の場合高度 300 km であると推定し、200 s の場合は 100 km だと推定できる。これらの時間差を利用して高度推定を行い投影することができる。と考える。

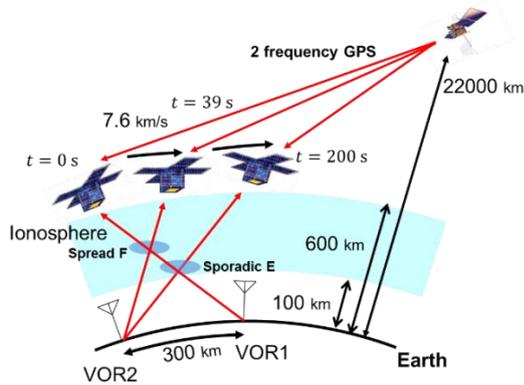


図 18: 観測高度の分離

5.2.2. VOR 局の分離

VOR は 10 MHz の帯域で 50kHz の間隔で全世界に局を配置している為、同一周波数による混信が避けられない。

例えば千歳・羽田・福岡・那覇において同一周波数 113 MHz で送信され衛星で受信した場合、衛星と空港の距離およびドップラ周波数は図 19 になる。点線は衛星と空港の距離を、実線はドップラ周波数を表す。なお衛星の軌道計算には高度約 600 km を周回するハッブル宇宙望遠鏡で行った。

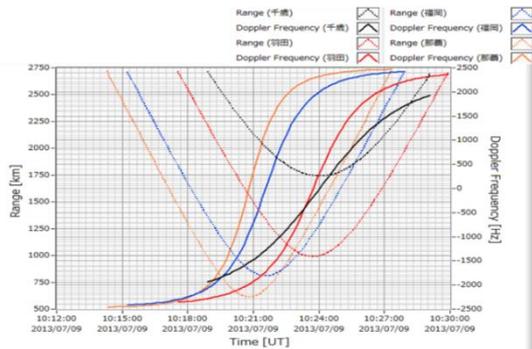


図 19: 衛星と空港の距離およびドップラ周波数

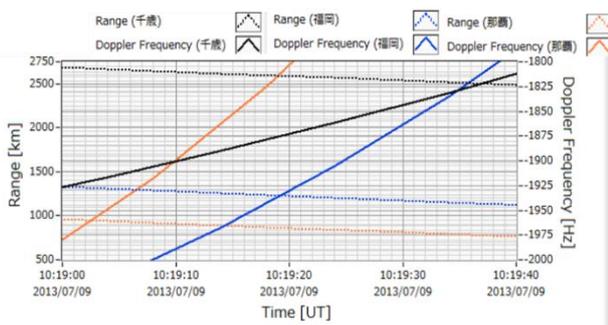


図 20: ドップラ周波数の重複例

10:19 UT に千歳と那覇のドップラ周波数およ

び千歳と福岡のドップラ周波数が、重複する場合がある。図 20 に示すように重複時間は数秒程度であり、距離も千歳と那覇で 1700 km、千歳と福岡で 1200 km それぞれ離れていることから電界強度と周囲の観測状況から分離できると考える。

6. 結論

本ミッションでは地上送信電波を低高度かつ極軌道で観測するため、4000km の範囲で電離圏の短時間広域イメージングができる事が可能となり、より詳細なシンチレーション現象を捉えることが可能となる。また電気通信大学の HF ドップラ、VHF 帯広域スプラディック E 観測、北欧での大気光観測による地上オーロラ撮像観測システムの同時観測を利用することで中緯度から極域までの電離圏の乱れを多角的に観測することが可能となる。

加えて、本衛星とこれまでの衛星・地上観測を長期的にわたって進め、解析することで L バンド SAR や GPS の測位誤差の質的評価だけでなく、最終的に GPS の測位精度向上や衛星通信システム等我々の生活に欠かすことのできないインフラへの向上につながるのではないかと考えている。

7. 謝辞

本ミッションの解析書の作成にあたり、電気通信大学の富澤一郎准教授、細川敬祐准教授、峯水延浩様から全面的に協力を頂きました。また NICT から観測データの提供をして頂きました。この場をお借りして深くお礼を申し上げます。

8. 参考文献

- [1] X.Pi et al.: Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, vol. 24, pp. 2283-2286, 1997
- [2] 杉本末雄,柴崎亮介: GPS ハンドブック,朝倉書店,2010.
- [3] 川田 輝雄: VOR 位置選定基準について,電子航法研究所報告, No.27,1980
- [4] K.Davies: Ionospheric Radio, IEE, 1990
- [5] L.F. McNamara et al: Signatures of equatorial plasma bubbles in VHF satellite scintillations and equatorial ionograms, Radio Sci., vol.48, pp.89-101, 2013.
- [6] G. G. Bowman: Quasi-periodic scintillations at mid-latitudes and their possible association with ionospheric sporadic-E structures, Ann. Geophys., vol.7, 259-268, 1989.
- [7] GEONET データ (NICT)
<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/>
- [8] C. Coker et al: High-latitude plasma structure and scintillation, Radio Sci., vol.39, RS1S15, 2004.
- [9] 横山貴文他: 静止衛星電波到来角変化による TEC 観測法の開発, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, PEM29-P07, 2013.
- [10] J.W. McDougall: Distributions of the irregularities which produce ionospheric scintillations, J. Atmos. Terr. Phys., vol.43, pp.317-325, 1981.