

第23回衛星設計コンテスト

事務局使用欄

受付番号 2707

年 月 日

ミッション概要説明書

応募区分 アイデアの部

1. 作品情報・応募者情報

作品名（20文字以内） 電離層観測衛星「HATO SATs」			
作品名 副題（これは公式文書では省略する場合があります） 2機の衛星による電離層内部の3次元構造の解析			
	氏名(フリガナ)	所属学校<大学>等、学部、学科（研究室）	学年
代表者(正)	石川 卓磨(イシカワタクマ)	東京電機大学 理工学部 理工学科(量子計測研究室)	B4
代表者(副)	倉崎 大樹(クラサキヒロキ)	東京電機大学 大学院 理工学研究科(量子計測研究室)	M1
メンバ1	木村 慶也(キムラヨシナリ)	東京電機大学 大学院 理工学研究科(量子計測研究室)	M1
メンバ2	高橋 悠太(タカハシユウタ)	東京電機大学 理工学部 理工学科(量子計測研究室)	B4
メンバ3	小林 実樹哉(コバヤシミキヤ)	東京電機大学 理工学部 理工学科(量子計測研究室)	B4
メンバ4	須賀 洋文(スガヒロフミ)	東京電機大学 理工学部 理工学科(量子計測研究室)	B4
メンバ5	浜田 政利(ハマダマサトシ)	東京電機大学 理工学部 理工学科(量子計測研究室)	B4

2. ミッションの概要（プレスリリース等で使用するので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。）

2機の3UサイズCubeSatを、高度約400kmのISSからタンデムで放出する。2機の衛星から150MHzと400MHzの2周波（ビーコン）を地上へ送信し、衛星と地上の間にある電離層の影響を受けた電波を受信する。受信した電波の位相やドップラー周波数の変動を解析し、電波伝搬路に沿った総電子数TECを求めることで、電離層の空間分布や時間変化の計測を行う。また、衛星は徐々に高度を下げていくため、電離層内部の観測を行うことが可能である。

3. ミッションの目的と意義（目的・重要性・技術的／社会的意義等）

(a) 目的

人工衛星との宇宙通信やGPS、レーダーによる地球観測など、宇宙空間と地球との情報交換の手段として電波が使用されている。しかし、上空100-1000kmに存在する電離層は、時々刻々と変化し、電波伝搬に異常をもたらす。具体的には電離層の変動は、電波の信号強度や衛星からの電波のドップラー周波数が異常な変動を示したりするなど宇宙通信へ影響を及ぼす場合がある。

本ミッションは、2機の衛星によって、電離層の3次元構造を明らかにし、宇宙通信や地球観測における電波の異常動作の解明につながるデータを得ることが目的である。

(b) 重要性・技術的／社会的意義等

電離層の構造が明らかになれば、宇宙通信や地球観測における電波の異常に対処でき、宇宙通信の信頼性向上に重要な役割を果たすことができる。例えば、レーダーによる地球観測の際には、現状より高い精度で行うことが可能となる。また、2機の3UサイズCubeSatのタンデム飛行、電離層観測、衛星の高度が徐々に高度が下がることを利用した観測（電離層内部の観測、衛星の大気による姿勢変化の計測）を行うことで技術的意義があると考えられる。2機の衛星を使用して電離層観測を行うことで、今後の複数衛星を使用した電離層観測の基礎データが得られ、必要観測地点数や衛星数の検討を行えると推察する。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

衛星の機器や軌道など全体構成をまとめた衛星諸元を表1に示す。

サイズ	W100mm × H100mm × 300mm
質量	3kg
軌道	高度 4km 起動傾斜各 51.6km
姿勢制御	磁気トルク, リアクションホイール
通信周波数	Sバンド, 144/430MHz
バッテリー	リチウムイオン 18650
バス機器	メイン CPU, ROM, 電力制御基板, バッテリー, テレメトリ用通信機, アンテナ
ミッション機器	150/400MHz アンテナ 150/400MHz 通信機, 磁気センサ, ジャイロセンサ, 太陽センサ加速度センサ, 地球センサ, GPS

データ取得を含む運用手順について

衛星への制御コマンドを送信するメイン地上局は、東京電機大学鳩山キャンパスに設置する。テレメトリを送信する周波数は Uplink に 430MHz, Downlink に 144MHz とアマチュア無線周波数を使用する予定である。Extra ミッションである衛星の軌道変化の計測には、衛星に搭載した GPS やジャイロセンサ、加速度センサのデータを用いるため Downlink データが膨大になる。したがって、Sバンドを使用し Downlink を行う。

ミッションの電離層観測用周波数 150MHz, 400MHz のビーコン電波の受信局は本学の1局だけではなく、国際・国内・地域協力により複数箇所の受信局を配置し、共同受信実験を行う。電離層は一様に分布しておらず、地域により変化する特徴があり、前述で示した観測を行うためである。特に磁気赤道付近では赤道異常と呼ばれる電離層の密度ピークが存在する。赤道異常が発生する磁気赤道付近の東南アジアやアフリカなどの地域の機関と共同し、赤道異常の影響を受けて伝搬した電波を受信、電離層の構造解析を国際実験で行う。電離層観測のデータ取得と運用手順を図1に示す。

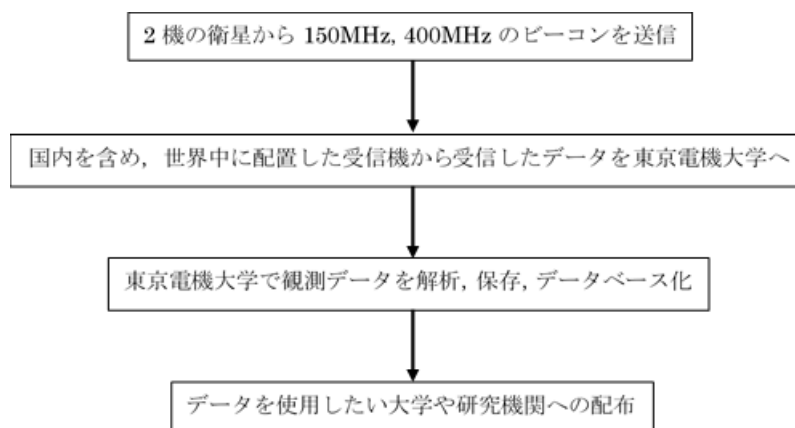


図 1. データ取得と運用手順

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

表1の衛星諸元を満たした衛星を2機開発する必要がある。2機は、互いに接近した軌道になるようISSからタンデムで放出を行う。2機の衛星から150MHzと400MHzの2周波(ビーコン)を地上へ送信し、衛星と地上の間にある電離層の影響を受けた電波を受信する。受信した2周波の解析を行い総電子

数 TEC の計測を行う。

2機の衛星は、それぞれ2周波(150MHz, 400MHz)の電波を送信するため、送信機の開発が必要である。また、電離層は一様に分布しておらず、地域により変化する特徴があり、これも観測するため、国際・国内・地域協力により複数箇所の受信局を配置し、共同受信実験を行う。特に、磁気赤道付近では赤道異常と呼ばれる電離層の密度ピークが存在する。国際実験を行うため、磁気赤道付近に位置する東南アジアやアフリカなどの地域に協力要請することは課題の1つである。

国際実験を安価かつ円滑に行うため、アンテナとPCのみで2周波の受信が可能なSDR (Software defined radio) 受信機の開発が必要である。

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

ミッションは、2機の3UサイズCubeSatを、高度約400kmのISSからタンデムで放出する。2機の衛星から150MHzと400MHzの2周波(ビーコン)を地上へ送信し、衛星と地上の間にある電離層の影響を受けた電波を受信する。受信した電波の位相やドップラー周波数の変動を解析し、電波伝搬路に沿った総電子数TECを求めることで、電離層の空間分布や時間変化の計測を行うことである。電離層は高度約100-1000kmに存在する。高度による電離層の電子密度分布と総電子数を図2に示す。

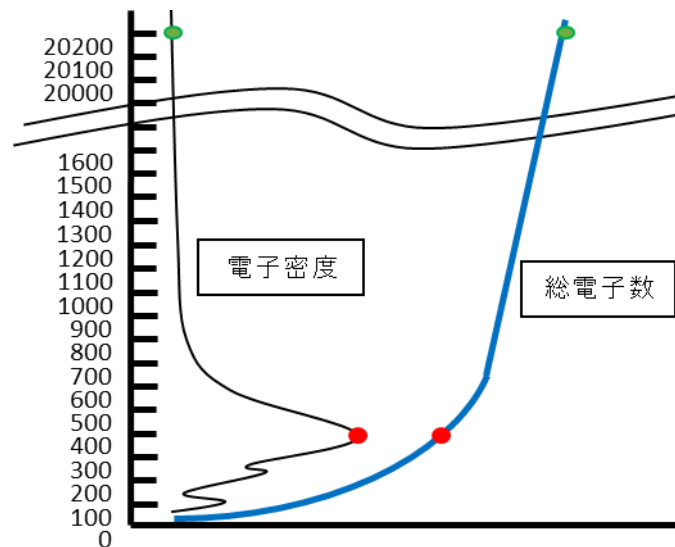


図2. 高度による電離層の電子密度分布と総電子数

図2の緑の丸がGPS衛星の飛行する高度約20200km, 赤丸がHAT SATsの飛行する高度約400kmを示す。電離層密度は図2に示すように、高さ500km以下で大きく密度を変える。その電離層の空間分布や時間変化は日によって変わり、その3次元構造を理解するためには、1機の衛星の繰り返し観測では困難が伴う。衛星が地球を1周すると電離層は変化しており短時間での電離層変化は観測できない。しかし、2機の衛星が同じ軌道、近い位置(タンデム飛行)で飛行させた場合、同じ位置を短時間で2回観測でき、短時間での電離層変化が観測できると考える。また、徐々に衛星の高度が下がることを利用した、電離層内部の高度による変化も観測できると考える。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

2機の衛星によって、電離層の3次元構造を明らかにし、宇宙通信や地球観測における電波の異常動作の解明につながるデータを得る。また、2機の衛星を使用して電離層観測を行うことで、今後の複数衛星を使用した電離層観測の基礎データが得られ、必要観測地点数や衛星数の検討を行える。ドップラー周波数データ、衛星高度の低下とともに得る衛星の加速度データなどは学生フィールド実験で扱うことができる。宇宙を移動する物体の運動を直接計測することができ、大学生などの若年研究者の興味を喚起する可能性があり、裾野の拡大につながると考えられる。他にも、データ受信機はパソコンと組み合わせたSDRであり、今後の安価な開発と個数の増大化によって、開発メーカー数の増加が期待できる。

以上

電離層観測衛星「HATO SATs」

—2機の衛星による電離層内部の3次元構造の解析—

東京電機大学 量子計測研究室

石川卓磨 倉崎大樹 木村慶也 高橋悠太 小林実樹哉 須賀洋文 浜田政利

1. 序論

現在、人工衛星との宇宙通信やGPS、レーダーによる地球観測など、宇宙空間と地球との情報交換の手段として電波が使用されている。上空100–1000kmに存在する電離層は、時々刻々と変化し、電波伝搬に異常をもたらす。具体的には電離層の変動は、電波の信号強度や位相、衛星からの電波のドップラー周波数に異常な変動を及ぼす。このように、宇宙通信へ影響を及ぼす場合がある。実際、2014年に打ち上げられた「だいち2号」では、搭載されたL-band SARが磁気赤道域や中緯度帯で、電離層のシンチレーションや中緯度変動の影響を受け、画像に大きな乱れが生じた。電離層の構造が明らかになれば、宇宙通信時の電波の異常に対処できる。例えば、レーダーによる地球観測の際には、現状より高い精度で行うことが可能となる。しかし、電離層に関する研究は、宇宙通信の信頼性向上に重要な役割を果たすにも関わらず、これまでの検討では不十分であると考えられる。

そこで提案する衛星は、電離層の構造解析をミッションとする。衛星からビーコン電波を送信し、それを地上局で受信、解析を行うことにより電離層の構造を明らかにする。先行研究^[1]より衛星から送信された電波は、電離層の存在によって屈折し、位相や信号強度、ドップラー周波数が電離層のない時に比べて変化することが予想される。受信信号と理論値を比較・検討し、また衛星より周波数の異なる2周波を送信して受信信号から電離層の影響による電波の周波数偏移や位相を解析することにより、実際の電離層の電波伝搬路に沿っての総電子数TEC (total electron contents) を求める。

高度200km以下の宇宙空間は、比較的大気密度が高い。その影響を受け、衛星は徐々に高度が下がり、やがて大気圏に突入し燃え尽きる。衛星は徐々に高度を下げていくため、電離層内部の観測が可能である。また、その間の衛星の運動について、衛星に搭載したGPSやジャイロセンサ、加速度センサにより低高度衛星の運動を計測する。最も本ミッションの特徴的である点は、衛星は1機ではなく2機として、電離層

の3次元構造を解析することである。この2機は、互いに接近した軌道(タンデム軌道)を通り、それぞれが上述のミッションを遂行する。これにより電離層の空間分布や時間変化を計測し3次元構造を得る。

本ミッションは、2機の衛星によって、電離層の3次元構造を解明し、宇宙における機器の異常動作の解明につながるデータを得ることが目的である。

2. ミッション内容

2.1. ミッション概要

2機の3UサイズCubeSatを、高度約400kmのISSからタンデムで放出する。2機の衛星から150MHzと400MHzの2周波(ビーコン)を地上へ送信し、衛星と地上の間にある電離層の影響を受けた電波を受信する。受信した電波の位相やドップラー周波数の変動を解析し、電波伝搬路に沿った総電子数TECを求めることで、電離層の空間分布や時間変化の計測を行う。また、衛星は徐々に高度を下げていくため、電離層内部の観測を行うことが可能である。

2.2. ミッション・シーケンス

本ミッションのミッション・シーケンスは以下に示す。

1. ISSから2機の衛星をタンデムで放出。
2. 2機の衛星から150MHz, 400MHzのビーコンを送信。
3. 国内を含め、世界中に配置した受信機から受信したデータを東京電機大学で集約。
4. 東京電機大学で観測データをデータ解析、保存、データベース化。
5. 解析結果を各大学や研究機関にインターネットを通して情報提供。
6. 2機の衛星を使用して観測を行うことで複数機衛星を使用した電離層観測の基礎データを収集し、必要観測地点数や衛星数の検討。

7. 高度 200km 以下を飛行する衛星の大気による姿勢変化の計測.
8. 大気圏に突入し燃え尽きる.

2.3. サクセスクライテリア

表 1 に、本ミッションのサクセスクライテリアを示す.

表 1. サクセスクライテリア

Minimum	HK(Housekeeping)データのダウンリンク
Full	150MHz, 400MHz のビーコン電波を送信電離層の 3 次元構造の解析
Extra	高度 200km 以下を飛行する衛星の大気による姿勢変化の計測

2.4. 電離層とは

電離層とは、太陽からの放射エネルギーを吸収して、地球上の大気が電離し、電子とイオンに分かれている層のことである。太陽活動、季節、時刻などにより絶えず複雑に変化している。電離層で電波は屈折、反射、時には散乱をするほか、減衰、偏波面の回転を受ける^{[2],[3]}.

図 1 に電離層の影響を受けてドップラー周波数が変化した例を示す.

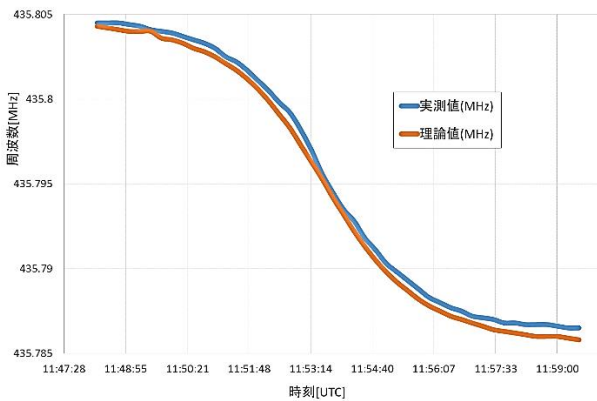


図 1. ドップラーシフトによる周波数変化

図 1 は、アマチュア衛星 FO-29 の CW ビーコンを受信した実測値と計算によって求めた理論値の比較である。図 1 のグラフより電離層の影響によってドップラー周波数が変化するということがわかる^[4].

2.5. 電離層の観測方法

衛星から送信された電波は、電離層の存在により屈折し、位相や信号強度、ドップラー周波数が電離層のない時に比べて変化する。変化した受信信号と理論値を比較し、また衛星より周

波数の異なる 2 周波を送信して受信信号から電離層の影響による電波の周波数偏移や位相を解析することにより、実際の電波伝搬路に沿っての総電子数 TEC を求める。

屈折率 n のプラズマ中の電波伝搬の式は以下のように表される。

$$u(t) = U \cos\left\{2\pi f\left(\frac{x}{C_p} - t\right)\right\} = U \cos\left\{2\pi f\left(\frac{nx}{C} - t\right)\right\} \quad (1)$$

ここで、 U は振幅、 f は周波数、 C は光速、 C_p は位相速度、 x は位置、 t は時間である。 n (屈折率) $=C/C_p$ は次式で示される。

$$n = \frac{C}{C_p} = 1 - \frac{A}{2f^2} N \quad (2)$$

ただし、 $A = \frac{(2\pi e)^2}{m\epsilon_0} = 80.6[\text{m}^3/\text{s}^2]$ 、 N は電子密度

である。したがって $\int N ds$ は電波伝搬路に沿っての総電子数(TEC)となる。距離 L を伝搬する電波の位相 Ψ は次式で表現される。

$$\Psi = \frac{2\pi f}{c} L - \frac{\pi A}{Cf} \int N ds \quad (3)$$

2 種類の電波を用いて L を消去する。 $f_1 = pf_r$ 、 $f_2 = qf_r$ とする。(本ミッションでは $f_r = 50$ [MHz]、 $p = 3$ 、 $q = 8$ 、つまり $f_1 = 150$ [MHz] と $f_2 = 400$ [MHz] の 2 つの電波を使用する)。

それぞれの周波数での位相を Ψ_1 、 Ψ_2 とすると位相差の評価には以下の式を用いる。

$$\Phi = \frac{\Psi_1}{p} - \frac{\Psi_2}{q} = \frac{\pi A}{Cf_r} \left(\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right) \int N ds \quad (4)$$

したがって、TEC は

$$\int N ds = \frac{\Phi}{\frac{\pi A}{C} \frac{1}{f_r} \left(\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right)} \quad (5)$$

位相 Ψ_1 、 Ψ_2 の時間微分はドップラー周波数偏移 f_{d1} 、 f_{d2} である。式(4)の両辺を時間で微分すると以下の式が得られ、周波数差の評価に用いる。

$$\frac{f_{d1}}{p} - \frac{f_{d2}}{q} = \frac{\pi A}{Cf_r} \left(\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right) \frac{d}{dt} \int N ds \quad (6)$$

2.6. 従来の電離層観測衛星との違い

近年、盛んに行われている GPS 衛星からの 2 周波 L1 (1575.42MHz), L2 (1227.60MHz) を受信し電離層の総電子数 TEC 観測 (GPS-TEC) も 2 周波の電波伝搬の差を用いた同様の手法である^[5]. しかし GPS-TEC では, GPS 衛星の高度が上空 20200km と電離層のある電離圏だけではなくその上部のプラズマ圏を含めた全電子数の観測である. そのため, 電離層のみの全電子数の観測はできない.

本ミッションでは, 高度約 400km の低軌道衛星による総電子数の観測を行うため, GPS-TEC よりも正確な電離層の観測データが得られると推察される.

GPS 衛星を用いた電離層観測と低軌道衛星を用いた電離層観測の精度を比べた場合, 以下の 2 点において特徴がある.

1. 電離層観測で使用する 2 周波が GPS 衛星では L1 (1575.42MHz), L2 (1227.60MHz), HATO SATs では 150MHz と 400MHz である. (5)式より, 右辺の分子は位相計測値であり, 計測に含まれる誤差の TEC 推定に関

わる影響を考えると $\frac{1}{f} \left(\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right)$ を GPS と

HATO SATs で比較すれば良い. GPS では $7.83e^{-13}$, HATO SATs では $4.88e^{-10}$ であり, HATO SATs の方が約 3 桁大きく, TEC への計測誤差の影響は少ない. これは周波数を低く且つ周波数の比率を大きくすることによる効果だと考える.

2. 電離層は高度約 100–1000km に存在する. 電離層観測は, 電波伝搬路の総電子数を求める. 高度 20200km の GPS 衛星は, 高度 400km の HATO SATs より高度が高いため, 電波伝搬路が長く, 且つ電離層が激しく変化する高度約 400km より高い高度になる. 電離層が激しく変化する高度を飛行する HATO SATs は, 総電子数の変化量が GPS 衛星より大きくなり, 電離層の内部構造 (垂直構造や緯度方向への水平構造) を観測でき, 観測精度が向上すると考える. このことを図 2 に示す.

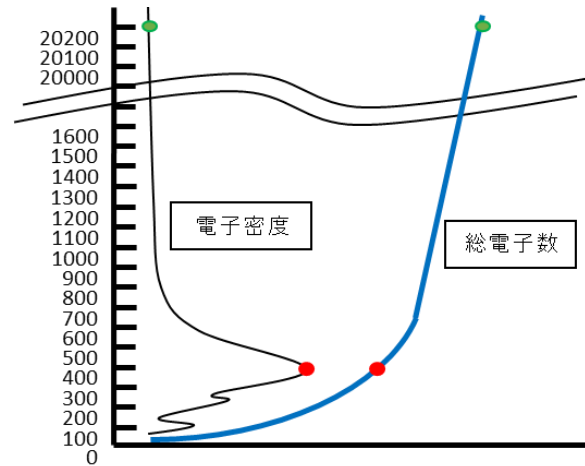


図 2. 高度による電離層の電子密度分布と総電子数

緑の丸が GPS 衛星の高度を表し, 赤丸が HATO SATs の高度を示す.

図で見られるように, TEC は電子密度の高さ方向の積分数である. GPS では地球上の垂直方向の総数を計測する目的を持っている. HATO SATs の目的は, 電離層の下層部の構造を明確にすることである. 例えば, 高さ 400km で落下しながら計測したとすると, 図の赤い点以下の総電子数が計測できるため, 高さ方向に微分すれば, 電子密度の高さ依存性を計測することが可能になると考える.

電離層密度は図 2 に示すように, 高さ 500km 以下で大きく密度を変える. その空間分布や時間変化は日によって変わるため, その 3 次元構造を理解するためには, 1 機の衛星の繰り返し観測では困難が伴うことが予想される. その解決策として多くの衛星を横に配置し, 同時に観測する必要がある. しかし, それは現実的ではないため, 本研究では, そのスタートとして 2 機の衛星を使用して観測する方法を提案した. 衛星が地球を 1 周すると電離層は, 変化しており短時間での電離層変化は観測できない. しかし, 2 機の衛星が同じ軌道, 近い位置で飛行させた場合, 同じ位置を短時間で 2 回観測でき, 短時間での電離層変化が観測できると考える. また, 徐々に衛星の高度が下がるため, 高度による電離層の変化も観測できると考えられる.

図 3 に本ミッションの電離層観測の概要を示す.

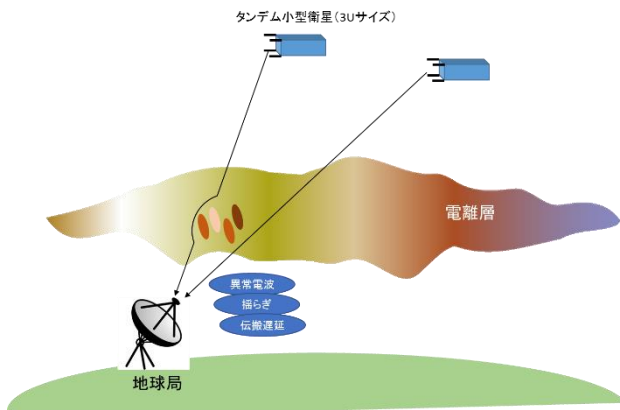


図 3. 電離層観測

3. 衛星設計

3.1. 衛星の概要

図 4 に衛星の外観を示す。表 2 には衛星の諸元を示す。

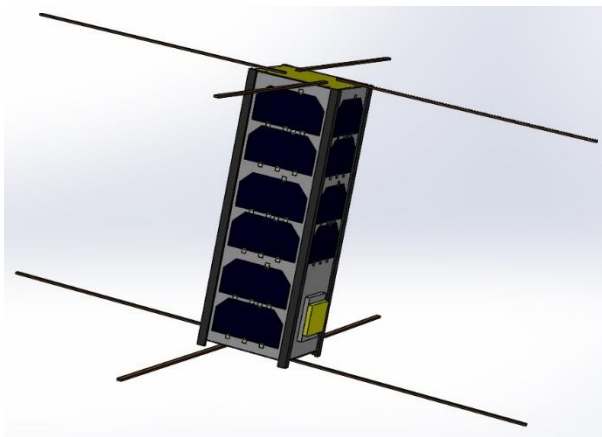


図 4. 衛星外観

表 2. 衛星諸元

サイズ	W100mm×H100mm×300mm
質量	3kg
軌道	高度 400km 軌道傾斜角 51.6km
姿勢制御	磁気トルカ, リアクションホイール
通信周波数	S バンド, 144/430MHz
バッテリー	リチウムイオン 18650
バス機器	メイン CPU, ROM, 電力制御基板バッテリー, テレメトリ用通信機・アンテナ
ミッション機器	150/400MHz アンテナ, 150/400MHz 通信機, 磁気センサ, ジャイロセンサ, 太陽センサ, 加速度センサ, 地球センサ, GPS

3.2. 軌道投入方法

2 機の衛星を高度約 400km, 軌道傾斜角 51.6 度の ISS からタンデムで放出し, 軌道投入を行う。図 5 に ISS の衛星放出機構を示す。

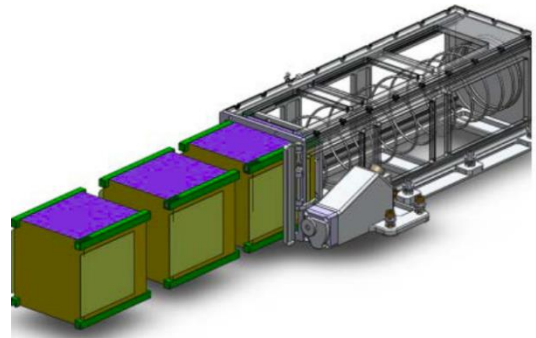


図 5. 衛星放出機構

放出システムは, 大別して衛星搭載ケース, 分離機構, 電気ボックスとで構成される。衛星搭載ケースは, ケース構造, バネ機構, ドア, ロンチカバーから成り, 衛星はこのケースに収納される。衛星搭載ケースをロボットアームで把持されるアダプタに搭載し, 分離機構とドアを接続した後に, ロンチカバーを船内で取り外す。その後, 分離機構のカムで閉拘束したドアにより, 放出までケース内に保持される。船内からの信号により分離機構が動作し, ドアの閉拘束が解除されると, バネ機構のスプリング力によって衛星が放出される。このとき, 衛星側のレール部が搭載ケース内壁のガイドレール上を滑ることにより, 衛星の放出方向が制御される。搭載衛星ケースは, 最大 2 式搭載することができ, それぞれの分離機構は個別に駆動する⁶⁾。

超小型衛星の放出条件を表 3 に示す。図 6 には衛星の放出方向を示す。

表 3. 超小型衛星放出条件

項目	条件
放出軌道条件	ISS の軌道条件による (通常, 高度 380~420km, 軌道傾斜角 51.6°)
放出速度	1.1~1.7m/sec (衛星質量による) ※放出システムの性能値 (3U 衛星放出時)
放出方向	ISS 後方下 45°以下 (ノミナル) 尚, 放出方向は, 参照座標系に対して ISS の姿勢変動の影響を受ける。
放出誤差	ノミナル放出方向に対して, ±5°の半頂角の円錐内 (目標値)

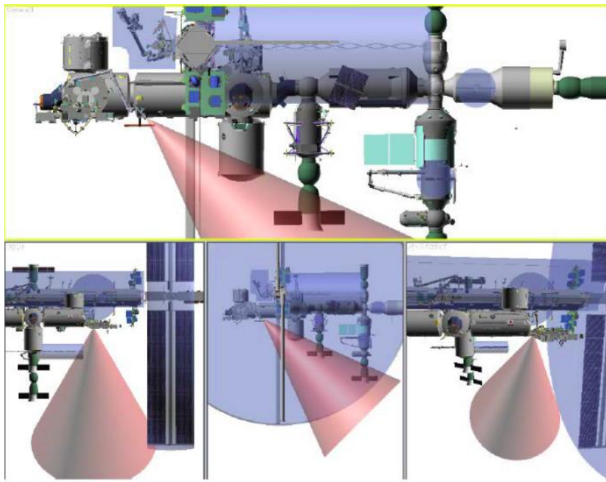


図 6. 衛星の放出方向

地上局からの送信出力を 10W，電離層観測に使用する 2 周波の送信出力を 0.05W と設定した。また，S バンド受信アンテナは JAXA 相模原キャンパスに設置されている 3.6m パラボラアンテナと同等なものを東京電機大学鳩山キャンパスに設置したと考え，回線設計を行った。衛星と地上局，電離層観測局の回線設計結果を表 4 に示す^{[7][8]}。

表 4 より，それぞれの回線マージンが Up-link 430MHz が 21.55dB，Down-link 145MHz が 10.84dB，2200MHz が 6.50dB，電離層観測用 2 周波 150MHz が 15.49dB，400MHz が 6.97dB と 十分に通信が可能ということを示した。

3.3. 回線設計

衛星から地上局までの電波伝搬距離を最長の 2200km と設定し，衛星からの送信出力を 0.1W，

表 4，衛星と地上局，電離層観測局の回線設計

項目	単位	Up-link	Down-link		電離層観測用 2 周波	
周波数	MHz	430.00	145.00	2200.00	150.00	400.00
送信 EIRP	dBW	29.00	-17.00	-15.00	-20.01	-20.01
送信機出力	dBW	10.00	-10.00	-10.00	-13.01	-13.01
送信系給電損失	dB	1.00	2.00	5.00	2.00	2.00
送信アンテナ利得	dBi	20.00	-5.00	0.00	-5.00	-5.00
送信アンテナポインティング損失	dB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
自由空間損失	dB	151.96	142.47	166.16	142.81	151.33
偏波損失	dB	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
大気吸収損失	dB	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
降雨損失	dB	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
各種損失	dB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G/T	dB/K	-37.84	-12.04	7.31	-24.04	-24.04
受信アンテナポインティング損失	dB	0.00	0.20	0.20	0.20	0.20
受信アンテナ利得	dBi	-5.00	20.00	36.40	8.00	8.00
受信系給電損失	dB	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00
システム雑音温度	dBK	30.84	30.84	27.89	30.84	30.84
受信電力	dBW	-133.21	-143.92	-149.21	-159.27	-167.79
雑音電力密度	dBW/Hz	-213.71	-213.71	-214.15	-213.71	-213.71
受信 C/N0	dBHz	64.55	53.84	51.50	38.49	29.97
総合 C/N0	dB	64.55	53.84	51.50	38.49	29.97
ビットレート	kbps	1.00	1.00	10.00	10	10
要求 Eb/N0	dB	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50
ハードウェア劣化量	dB	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
符号化利得	dB	0.00	0.00	8.00	0.00	0.00
ビットレート	dBHz	30.00	30.00	40.00	10.00	10.00
変調損失	dB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
要求 C/N0	dB	43.00	43.00	45.00	23.00	23.00
回線マージン	dB	21.55	10.84	6.50	15.49	6.97

3.4. 運用方法

衛星への制御コマンドを送信するメイン地上局は、東京電機大学鳩山キャンパスに設置する。テレメトリを送信する周波数は Up-link に 430MHz, Down-link に 144MHz とアマチュア無線周波数を使用する予定である。日本の多くの大学衛星がコマンド Up-link に 144MHz 帯, テレメトリ Down-link に 430MHz 帯を使用している。テレメトリ Down-link に使用される 430MHz 帯は、大出力の違法無線など混信が多く問題になっている。430MHz 帯で衛星からのテレメトリ受信が難しく、且つコマンド Up-link に使用される 144MHz 帯は、大出力の違法無線も少なく、更に現在日本の大学衛星でコマンド Up-link にしか使用されていないため、430MHz 帯より S/N が良くテレメトリ Down-link の受信が容易と考え、Up-link に 430 MHz, Down-link に 144 MHz を選択した。Extra ミッションである衛星の軌道変化の計測には、衛星に搭載した GPS やジャイロセンサ、加速度センサのデータを用いるため Down-link データが膨大になる。したがって、S バンドを使用し Down-link を行う。

ミッションの電離層観測用周波数 150MHz, 400MHz のビーコン電波の受信局は本学の 1 局だけではなく、国際・国内・地域協力により複数箇所の受信局を配置し、共同受信実験を行う。なぜなら、電離層は一様に分布しておらず、地域により変化する特徴があり、前述で示した観測を行うためである。特に磁気赤道付近では赤道異常と呼ばれる電離層の密度ピークが存在する。磁気赤道と赤道異常の場所を図 7 に示す^[9]。

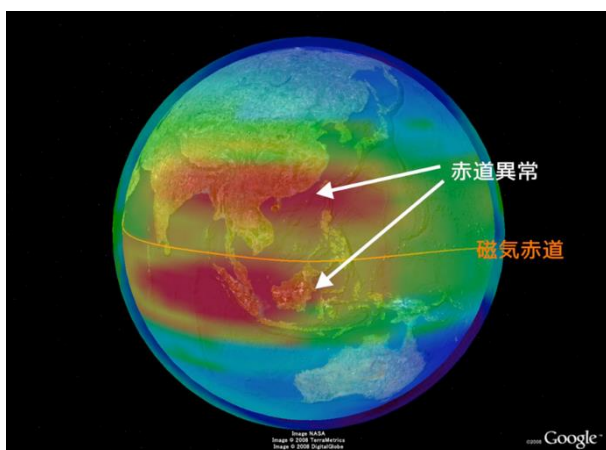


図 7. 磁気赤道と赤道異常の場所

図 7 のように赤道異常が発生する磁気赤道付近の東南アジアやアフリカなどの地域の機関と共同し、赤道異常の影響を受けて伝搬した電

波を受信、電離層の構造解析を国際実験で行う。

国際実験を安価かつ円滑に行うため、アンテナと PC のみで 2 周波の受信が可能なソフトウェア (SDR: Software defined radio) 受信機の開発を行い、磁気赤道付近の東南アジアやアフリカなどの地域に設置する。

電離層観測のデータ取得と運用手順を図 8 に示す。

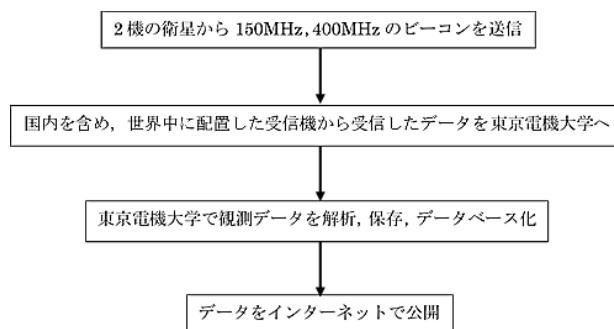


図 8. データ取得と運用手順

4. 得られる成果・対象となる受け取り手

2 機の衛星によって、電離層の 3 次元構造を明らかにし、宇宙通信や地球観測における電波の異常動作の解明につながるデータを得る。また、2 機の衛星を使用して電離層観測を行うことで、今後の複数衛星を使用した電離層観測の基礎データが得られ、必要観測地点数や衛星数の検討を行える。

ドップラー周波数データ、衛星高度の低下とともに得る衛星の加速度データなどは学生フィールド実験で扱うことができる。宇宙を移動する物体の運動を直接計測することができ、大学生などの若年研究者の興味を喚起する可能性があり、裾野の拡大につながると考えられる。他にも、データ受信機はパソコンと組み合わせた SDR であり、今後の安価な開発と個数の増大化によって、開発メーカー数の増加が期待できる。

5. まとめ

漸次高度を下げる 2 機のタンデム衛星を接近飛行させ、刻々と変化する電離層の挙動による電波伝搬の異常を調査する。このような電離層異常を位相やドップラー周波数の偏移により解明する。さらに今回の衛星は徐々に高度が下がるため、電離層内部の診断が可能であり 2 機の衛星で電離層構造の 3 次元解析を行う方法は新規性のある実験である。

2 機の衛星で電離層の空間分布や時間変化を

計測，電離層の構造解析を高精度化するなど，電離層解明に貢献する技術が得られることを示唆する。

「平和」は誰もが追い求めているものである。宇宙から全世界に平和を届け，社会に貢献し，埼玉県鳩山（ほとやま）町から初の衛星を打ち上げたい。そんな想いを込めて「HATO SATs」と名づけた。

平和を運ぶ2機の衛星，「HATO SATs」は鳩山町を旅立ち，電離層を飛び回る。

6. 謝辞

本稿を作成するにあたり，ご指導を頂いた指導教員の東京電機大学工学部理工学科電子・機械工学系 田中慶太准教授，建築・都市環境学系 島田政信教授，電子・機械工学系 鈴木源治非常勤講師，ラジオ・サポート・ハセガワ 長谷川晃様に感謝致します。さらに，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた電子・機械工学系量子計測研究室の皆様にも感謝致します。

参考文献

- [1] 山本衛：“衛星ビーコンと GPS-TEC による電離層 3 次元トモグラフィの研究開発”，科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書
https://kaken.nii.ac.jp/pdf/2012/seika/C-19_1/14301/22656092seika.pdf
- [2] 諏訪欣也，古谷恒雄：“空中線系および電波伝搬”，啓学出版，pp.66-67，1979
- [3] 松田豊稔，宮田克正，南部幸久：“電波工学”，コロナ社，pp.203-205，2014
- [4] 金平茂夫：“衛星通信ハンドブック”，CQ 出版社，pp.124-125，1997
- [5] 京都大学生存圏研究所，奥村健太，山本衛：“デジタル受信機を用いた電離圏ビーコン観測からの全電子数推定法の開発”
http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2008/image/0227_proc/P-21.pdf
- [6] JAXA：“国際宇宙ステーション「きぼう」からの超小型衛星の放出機会提供（有償の仕組み）”
http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/ainori/kibo_yusyou.html
- [7] 衛星設計コンテスト技術資料
- [8] 齋藤宏文，れいめいプロジェクトチーム：“第 23 回相乗り小型衛星セミナー 高機能な小型衛星の作り方—れいめいを例にして—”
http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/topics/data/110310_03_02.pdf
- [9] NICT：“宇宙への玄関”電離圏の観測
http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/leaflet/NICT_RPP_leaflet2008.pdf