

第23回衛星設計コンテスト

ミッション概要説明書

事務局使用欄

受付番号

2726

年 月 日

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）			
共役性オーロラの観測衛星			
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）			
	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)	北尾 彰浩 (キタオ アキヒロ)	防衛大学校 システム工学群 航空宇宙工学科 構造材料研究室	4 学年
代表者(副)	居波 亮輔 (イナミ リョウスケ)	上に同じ	4 学年
メンバ1	山近 大生 (ヤマチカ ヒロキ)	上に同じ	4 学年
メンバ2	金澤 健太 (カナザワ ケンタ)	上に同じ	4 学年
メンバ3	高木 健太郎 (タカギ ケンタロウ)	防衛大学校 理工学研究科 航空宇宙工学専攻 構造材料研究室	修士1年

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。)

プラズマ粒子観測器、多波長オーロラカメラ、電磁場観測器、電場・プラズマ波動観測器を搭載した衛星により磁力線上の南北2つの共役点に現れるオーロラを、両極が夜となる秋分、春分の新月の夜を対象に観測する。共役点でのオーロラの相似性や内部の現象を調べることによって発生するメカニズムを解明するとともに、南北それぞれの共役点上で2機が同時に撮った画像でオーロラを立体的に観測することができる。

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

本ミッションでは、人工衛星を用いてオーロラを宇宙から観測し、オーロラの様子を3次元的に計測すること、及びその周辺又は内部現象に関して調べることでオーロラの発生や形の違いがなぜ起こるのかを解明する。

(b) 重要性・技術的/社会的意義等

地上においても観測はされているものの、形や色の観測に限られており、内部構造を観測することができない。地上の観測においては観測点の日照等の天気の制約があり、南北両半球の観測点为好天の夜空である必要がある。衛星を用いた観測では以下の利点がある。

i 現実性の高さ

限られた期間(春分、秋分の新月付近の年2回)の観測において地上では両極が晴れた夜でなければならぬが軌道上でオーロラを観測するため天候に左右されない。そのため、同時に南北半球同時の共役点オーロラ観測、撮像を行える。

ii 観測データの貴重性

前述のように、地上からは限られた条件の中でしか共役点でのオーロラ観測が行えず、このオーロラ周辺の衛星による観測のデータにより、オーロラの謎の解明が期待できる。

iii 技術の確立による有効性

共役点での衛星観測を確立することによって、地上観測が難しく地球と異なる大きさの磁場を持つ木星や水星といった惑星を観測できることを実証することができ、将来のオーロラ研究においても貢献できる。

iv 宇宙天気研究

観測によるオーロラの細部や太陽と地球の関連性について調べることによって、衛星障害や飛行機の通信妨害などといった社会への影響の予測精度を向上させ、災害を回避することができるようになる。

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)

i 概要

プラズマ粒子観測器、多波長オーロラカメラ、電磁場観測器、電場・プラズマ波動観測器を搭載した衛星を4機用いて両極で観測する。また、多波長オーロラカメラを用いて、2つの衛星から得た画像を組み合わせ3次元的なデータ取得する。

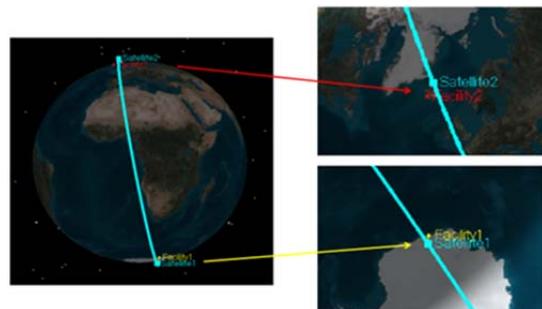
ii 衛星

本ミッションはオーロラを両極同時に観測する必要があるため、秋分で両観測地が夜の時間帯に観測できるよう、軌道設定を行った。また、軌道傾斜角は現在の地磁気の極のある80.2度に設定しオーロラを接近して観測できるよう、高度を274.4[km]で1日16周の回帰起動に設定した。

衛星諸元

周期[sec]	5400
遠地点[km]	274.419
近地点[km]	274.419
離心率	0
軌道傾斜角[deg]	80.2

軌道イメージ



地磁気の極の移動にあわせて軌道を移動させる必要があるため、本衛星においては1年間で少なくとも0.2度以上軌道を移動させることができ、空気抵抗に勝つよう、3機のイオンエンジンを搭載する。また、オーロラの三次元化を実現するために、2機で1組の計4機を用いて両極において同時撮影する。

(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

衛星の機器に関しては既存の機器で運用することができると考える。4機の衛星を連携させ同時に運用するため、地上との観測データの共有システムの導入が必要である。衛星で得られたデータをより有効的に使用できるように南北両極地で観測している観測データと比較対照できる体制を確立する必要があると思われる。また、オーロラの発生原理について理解を深めるためには地球磁気圏に軌道に持つ他国の衛星と連携した国際的な観測が必要となってくる。

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

本ミッションでは各極で2機の衛星を用いることによって、同時に得られた画像を組み合わせ三次元化する。観測は両極で同時に行い、共役性オーロラの内部構造の相違性を調べることで、オーロラの発生メカニズムを解明する。

また、変化する磁極線にあわせて衛星を移動させることで、継続的な観測を行っていく。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

本ミッションでは共役地点でのオーロラの3次元的な動きを両極で同時に計測することで、オーロラ発生のメカニズムを解明できると期待される。さらに立体的にとらえた神秘的で一般にも馴染み深いオーロラの動きを一般市民へ公開することで、物理学および宇宙開発にたいする一般の興味や理解を増やし、将来的な科学への理解向上にも役立つと考えられる。

以上

共役性オーロラの観測衛星

防衛大学校 システム工学群 航空宇宙工学専攻
学部4年 北尾彰浩 居波亮輔 金澤健太 山近大生
修士1年 高木 健太郎

1 序論

1-1 ミッションの目的

本ミッションは南北両半球に2機ずつ、計4機の観測衛星を地球の両極の同じ磁力線上に配置し、同時期に発生するオーロラの形や動きの違いを観測する。発生するオーロラの相似性や内部の現象を調べることによって、オーロラ発生のメカニズムを解明することを目的とする。地球磁気圏において観測してNASAの「MMS」やJAXAの「ERG」と連携し、「外部供給」や「内部供給」との相互関係を調べることでオーロラの形成過程や両極における形の違いの原因の理解を深めることができる。

また、地上観測との連携やオーロラの3次元化によって、微細構造の理解を深めることができる。

1-2 ミッションの背景

昨今のオーロラ研究では日本の人工衛星である「あけぼの」やアメリカの4機の人工衛星を用いた「MMS計画」によってその発生原因が徐々に解明されている。しかし、オーロラの変化の研究などに未だ多くの余地が残っている。今回、注目したのは、オーロラの共役性である。オーロラの共役性とは、南北の同じ磁力線で結ばれた2点において似た形のオーロラが観測されることであり、メカニズムは明確ではない。

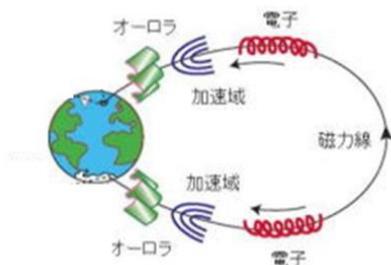


図1 同磁極線上のオーロラ

本ミッションにおいては人工衛星を用いてオーロラを宇宙から観測し、オーロラを撮影した画像の3次元化及びその周辺又は内部現象に関して調べることでオーロラの発生や形の違いがなぜ起こるのかを解明する。

オーロラは地上においても観測はされているものの、形や色の観測に限られており、内部構造を観測することができない。地上の観測においては観測点の日照等の天気の制約があり、南北両半球の観測点が好天の夜空である必要がある。衛星を使用することで、気象に影響を受けることがない。また、形や色の観測だけでなく、内部の構造に関しても毎日同じ時刻に同じ場所で観測することができる。

2 本論

2-1 ミッション概要

2-1-1 オーロラの原理

オーロラとは宇宙空間において「オーロラ粒子」が他の分子に当たることによって起こるエネルギーの放出である。

太陽風(プラズマ)には負または正の電荷をもつ電子や陽子によって成り立っている。地球に到達すると、地球の磁場の影響を受けて、地球の磁気圏の中に取り込まれ、電子や陽子は高速になる。この高速になった電子や陽子が「オーロラ粒子」と呼ばれる。

この電子加速のメカニズムは、磁気圏の太陽と反対側(磁気圏尾部)で非断熱的な加速が行われ、その後、磁場が強い地球方向に輸送されるにつれて断熱的に加速されていくと考える「外部供給説」と放射線帯の内部で非断熱的な加速が行われると考える「内部加速説」に意見が分かれている。

高速になった粒子が大気圏内の酸素分子や窒

素分子に当たることによって、オーロラが発生する。

また、オーロラの動きは光っている酸素分子や窒素分子が実際に動いているわけではなく、オーロラ粒子が飛び込んでくる場所が次々に代わっているためであり、電場、磁場、プラズマ粒子などの複雑な要因によって引き起こされる。

よって電場や磁場の変化、プラズマ粒子の量やその種類に関して観測することがオーロラを調べる上で必要になる。

2-1-2 オーロラの出現場所、時期

オーロラの高さは上空 100 km から 500 km の熱圏と呼ばれる領域に生じ、緑のオーロラの最も明るい部分は地上 110km 付近、赤いオーロラの最も明るい部分は 250km 付近である。極においては、夏と冬はどちらかが白夜となるため観測できない。よって共役性のあるオーロラが観測できるのは、春分と秋分の前数週間のみであり、1 年間で同時撮影が実施できるのは 8 月～9 月、2 月～3 月の秋分、春分の時期の新月付近に限られる。またその時期においてもオーロラが出現するのは 1 日に約 5 時間であるため、その時間内に衛星が同じ磁力線付近になければならない。



図 2 オーロラの高さ

2-1-3 共役点オーロラ

共役点オーロラとは一本の磁力線上に現れるオーロラのことであり、南北 2 つの共役点は「北緯」・「南緯」という言葉を除くと、地磁気の緯度経度の数字が同じになる。下図 3, 4 は北極・南

極付近のオーロラ帯を描いた地図である。

観測点としてはオーロラ帯の中に入っており、かつ南北のオーロラ帯を重ね合わせた場合、地磁気からの緯度経度が同じ場所になる場所を探していく。

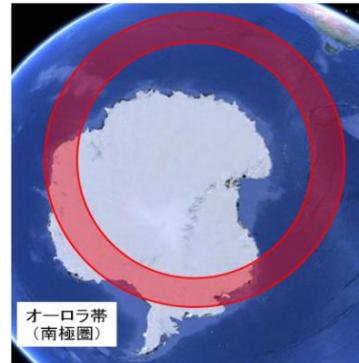


図 3 南極圏オーロラ帯



図 4 北極圏オーロラ帯

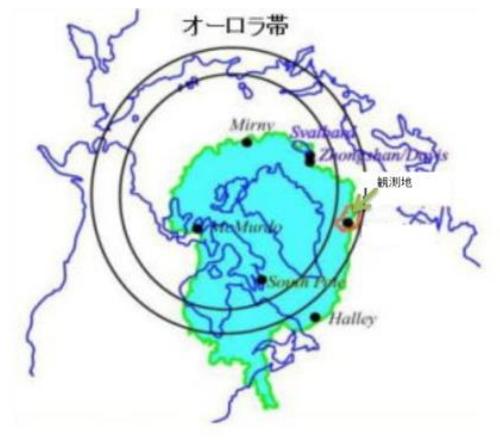


図 5 両極を合わせたオーロラ帯

上記の図 5 は「北緯」・「南緯」という言葉を除き、北極圏の地図に南極大陸が同じ地磁気の緯度、

経度となるように重ね合わせたものである。

ここで、本ミッションの条件が成り立つ南極圏側では南緯 70 度、東経 40 度付近、北極圏側では北緯 65 度、西経 15 度付近を最初の観測場所として選定した。地磁気の緯度と経度が同じになる場所を選定したため、北極点や南極点を基準とした経度や赤道を基準とした緯度では数字にずれが生じる。

2-2 衛星の概要

2-2-1 衛星の特徴

- (1) オーロラの中に入ることによりオーロラの構造内の電磁場、粒子、プラズマの状態を観測する。
- (2) コリレーショントラックを用いた衛星 2 機によるオーロラの 3 次元化によって、これまで行われてきた 2 次元的なオーロラの理解から、3 次元的な分析に拡張する。
- (3) 274 km という低高度を飛行し、空気抵抗の影響を受けるため、イオンエンジンを搭載し、高度を維持する。
- (4) 3 次元化するため衛星を 2 機使うことで、各極で 2 次元的な観測においても低軌道の衛星の特徴である衛星時間の短さを解消でき、より長い時間での共役点観測と、比較画像が入手できる。
- (5) 消費電力の大きいイオンエンジンを搭載しているため、三軸安定で太陽電池を太陽指向する駆動モータを装備する。

2-2-2 衛星の諸元

衛星の諸元を表 1 に、外観を図 6 に示す。

表 1 衛星の諸元

軌道諸元	2-2-5 に記述
寸法	1.6m × 1.6m × 1.6m
質量[kg]	約 50
ミッション機器	2-2-3 に記述
電源系	太陽光電池
姿勢安定	三軸安定

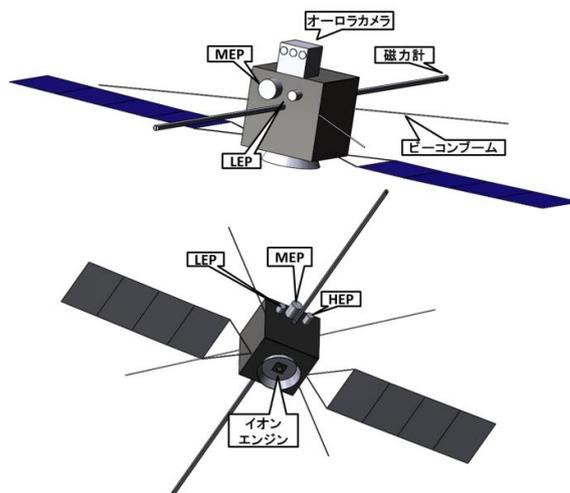


図 6 衛星外観

2-2-3 搭載機器

[1] プラズマ粒子観測器

プラズマ粒子観測器は、3 つの電子計測器（低エネルギー電子観測器、中エネルギー観測器、高エネルギー観測器）と 2 つのイオン計測器（低エネルギーイオン観測器、中エネルギーイオン観測器）から構成されている。電子計測器は 10 eV から 2 MeV までの電子を計測でき、イオン計測器は 10 eV/q から 180 keV/q までのイオンを質量分析して計測できる。

(1) 低エネルギー粒子観測器

低エネルギー粒子は（数 eV～50 keV）程度のエネルギー範囲であり、地球電離圏においてオーロラを光らせる粒子の運動エネルギー、地球電離圏の多くの領域におけるプラズマの持つ熱エネルギーや運動エネルギーに相当することから、磁気圏の構造やダイナミクスを解明するために必須の観測対象となっている。

(2) 中エネルギー粒子計測装置

これまで、低エネルギー粒子と高エネルギー粒子の計測はされていたが、感度の低さや視野の狭さ検出効率の不確実性といった問題があった。ここで、中間の（10 keV — 80 keV）の範囲を観測する機器を用いて調べる。

(3) 高エネルギー粒子計測装置

磁力線に沿って地球大気圏まで振り込んでくる、エネルギー粒子、数 100keV の高エネルギー粒子を調べる。

表 2 プラズマ粒子観測器ⁱⁱ

機器名		観測エネルギー範囲	計測センサー
電子観測器	高エネルギー電子計測器	70 keV – 2 MeV	多層 Si SSD
	中エネルギー電子計測器	10 keV – 80 keV	カスプ型静電分析器 (APD)
	低エネルギー電子観測機	12 eV – 20 keV	トップハット型静電分析器
イオン観測器	中エネルギー電子計測器	10 keV/q – 180keV/q	カスプ型静電分析器 (飛行時間型質量分析器, APD)
	低エネルギーイオン観測器	10 eV/q – 25 keV/q	トップハット型静電分析器 (飛行時間型質量分析器)

[2] 多波長オーロラカメラⁱⁱⁱ

窒素分子イオン、酸素原子、窒素分子の出す色を同時に観測でき、1秒間に最大約8枚の画像を取得することが出来る。3組のCCDとフィルターを組み合わせることによって、3色のオーロラ画像を取得することができる。

3色の観測波長はそれぞれ窒素分子イオン、窒素分子、酸素分子の輝線やバンドに対応している。レンズは暗いオーロラの空間構造を捉えるために明るく収差の小さい設計となっている。

視野角 144° 感度分解能 8bit

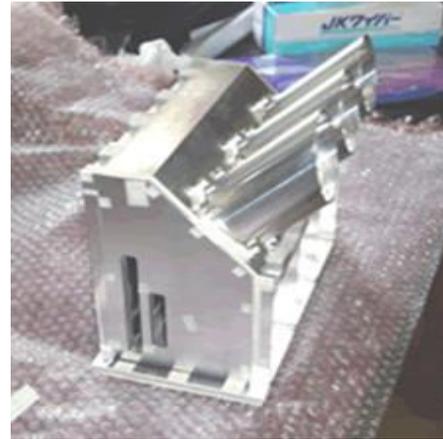


図 7 オーロラカメラ

[3] 電磁場観測器

ジオスペースには、背景電磁場に加えて、低周波プラズマ波動から高周波プラズマ波動まで様々な種類のプラズマ波動が存在する。そのため、電界はDC (<数十Hz) から 10 MHz まで、磁界はDC から 100 kHz までを計測する機能を有している観測機器を用いる。

(1) 磁場観測器 (MGF)

内部磁気圏の粒子の分布や軌道は背景磁場の変化の影響を受けるため、固有磁場からの変動分を正確に計測することが重要である。計測するためにフラックスゲート磁力計を採用した。観測データのノイズを軽減するために、衛星本体から伸びた5メートルのブームの先端に搭載する。

(2) 電場・プラズマ波動観測器 (PWE)

電場・プラズマ波動観測器は主に電波・波動観測を受け持つ伸展ブーム部分と電場を測る球プローブの部分とからなる。伸展ブームアンテナは、ラジオのアンテナと同様の原理で波動電場を測る。また、2つの球プローブを用いて2点間の電位差を測り、その電位の距離差から電場を求める。

また今回搭載する伸展ブームには伸展に遠心力が不要な Bi-Convex ブーム^{vii}を採用する。

表 3 電磁場観測器ⁱⁱ

	機器名	観測周波数範囲	計測センサー
電界	PWE	DC - 10 MHz	ロッドアンテナ (ビーコンブーム)
磁界	MGE	DC - 128 Hz	フラックスゲート磁力計

2-2-4 衛星機数

本ミッションは多波長オーロラカメラを用いてオーロラを3次元に捉えるため、同じオーロラに対して2機の衛星を用いる。

そのため、必要な衛星の機体数は両極にそれぞれ2機ずつ配備し、4機となる。

2-2-5 軌道

オーロラ帯は高緯度にあり、白夜の影響を受けるため観測できるのは春分と秋分の期間のみである。また、両観測地域の時差は6時間である。よって両観測地域とも夜でありオーロラが観測できるのは5時間ほどしかない。

上記の理由より、南極圏側においては2015年9月23日3時40分に北極圏側においては2015年9月23日21時40分の両観測地が夜の時間帯に同時観測できるよう、軌道設定を行った。また、軌道傾斜角は現在の地磁気の極のある80.2度に設定する。緑のオーロラの最も明るい部分は110km付近、赤いオーロラの最も明るい部分は250km付近で現れるため、それらを接近して観測できるよう高度を274.4[km]、1日16周の回帰軌道に設定した。

図8に軌道イメージ、図9にグランドトラックを示す。尚、軌道計算の開始及び終了時刻は、2015/9/23 06:00~2015/9/24 06:00としている。また軌道の諸元を表4にまとめる。

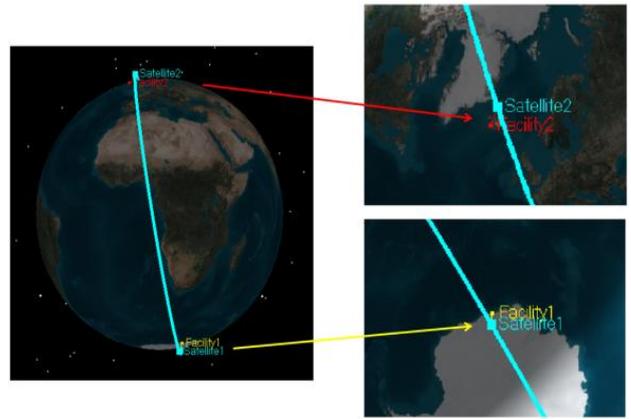


図 8 軌道イメージ

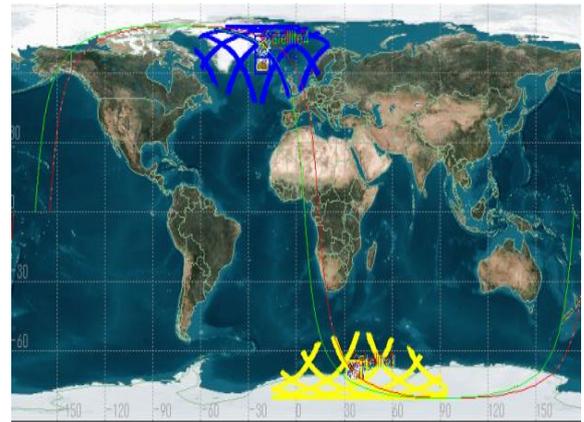


図 9 グランドトラック

表 4 衛星軌道諸元

周期[sec]	5400
遠地点[km]	274.419
近地点[km]	274.419
離心率	0
軌道傾斜角[deg]	80.2

2-2-6 オーロラの3次元化

本衛星の目的でもあるオーロラの3次元化したモデル作成において、オーロラを観測する方法として、夜間に限定した可視光による撮影を行なうものとする。ステレオ視に必要な画像を2機で1組としたものの2組、計4機の衛星で南北両半球それぞれを同時撮影する。

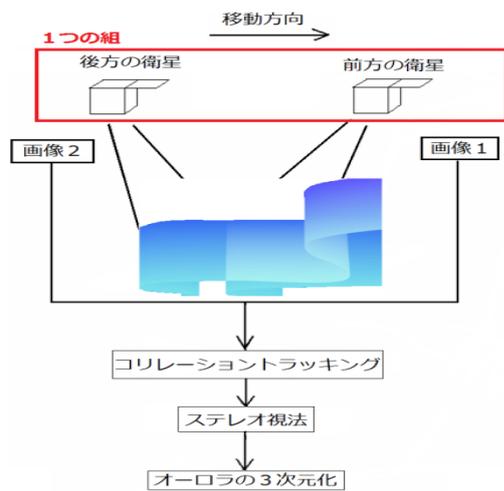


図 10 オーロラの3次元データ取得^{iv}

軌道上の各南北両半球において図 10 のように組となっている衛星が移動中にオーロラを同じタイミングで撮影し、前方の衛星が撮影した画像を「画像 1」、後方の衛星を「画像 2」とし、2 枚の画像をコリレーショントラッキング演算によって視差を求める。オーロラの形状は輪郭が明確でなく、短い時間でオーロラの形が変化するので、対応点抽出が難しい。そこで、画像をブロック分けし、そのブロックを用いて相関演算するコリレーショントラッキングを用いて対応点を算出する。コリレーショントラッキングにより対応点を求めた後に視差を利用して雲を 3 次元的に立体視する。

2-2-7 観測範囲

オーロラ帯は北半球では、北緯 63 度から北緯 70 度程の約 800 km の緯度方向幅をもっている。オーロラの 3 次元化と観測時間の確保のため、視野範囲を 500 km とし、100 km 先のオーロラが観測できるように、魚眼レンズを用いてオーロラカメラの視野角を 144 度とした。

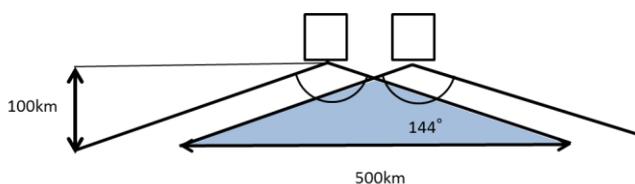


図 11 観測範囲

北極と南極を通る地球の周囲の長さが約 40007 km あり、90 分間に 1 周しているため、衛星は 1 分間に約 444.5 km 進む。よって、オーロラの観測時間は約 3 分 9 秒となる。

2-2-8 イオンエンジン

従来の衛星は高度 600~800 km であるのに対し、本衛星は高度 270 km という超低高度衛星である。超低高度では大気抵抗は従来の衛星に比べて、約 1000 倍に増えている。よって、イオンエンジンによる軌道修正が必須となってくる。

高度 270 km における空気抵抗 D は

$$D = \frac{1}{2} \rho c_d A V^2 = 1.36 \times 10^{-2} [N] \text{ である}$$

(ρ : 空気密度 (@ $6.073 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$),

c_d : 空気抵抗係数 (@2.5)、 A : 断面積 (@ 3m^2)、 V : 速度 (@ $7.74061 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)

よって、この空気抵抗より推力が勝るイオンエンジンを搭載しなければならない。

そこで本衛星には、きく 8 号に搭載されている、カウフマン型イオンエンジンを使用する。

表 5 イオンエンジン諸元^v

推進剤	キセノン
入力 [W]	580
推力 [mN]	21
比推力 [s]	2900
イオンビーム口径 [mm]	120
重量 [kg]	3.7

きく 8 号に搭載されていた、イオンエンジンの諸元は推力 21 mN、比推力は 2900 sec であるため、空気抵抗より推力が勝っており運用が可能である。

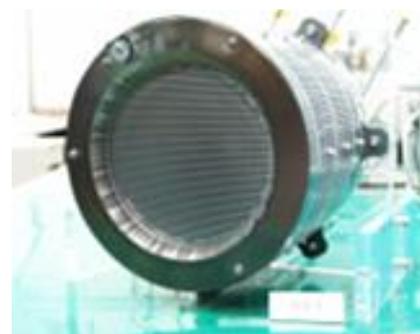


図 12 イオンエンジン^v

2-2-9 地磁気の移動による影響

地磁気の極は毎年表 6 のように移動する。表 6 より 2015 年現在においては地磁気緯度 80.4 度であるのに対し、2019 年においては地磁気緯度 80.6 度に変化している。ここで 1900 年からのデータによると地磁気は 1 年で 0.2 度より移動することはなかった。この 0.2 度のズレは微小であるため、本衛星においては特に地磁気の移動に関して考慮する必要はないことが分かった。

表 6 地磁気移動の推移^{VI}

年	地磁気北極		地磁気南極	
	緯度	経度	緯度	経度
2015	80.4N	72.6W	80.4S	107.4E
2016	80.4N	72.7W	80.4S	107.3E
2017	80.5N	72.8W	80.5S	107.2E
2018	80.5N	73.0W	80.5S	107.0E
2019	80.6N	73.1W	80.6S	106.9E

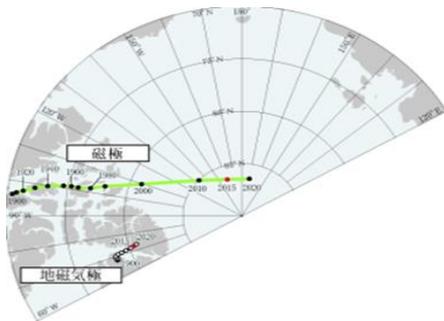


図 13 地磁気極の移動（北極圏）

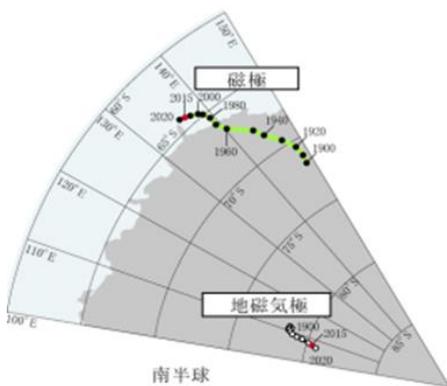


図 14 地磁気極の移動（南極圏）

3 結論

本ミッションでは4つの衛星を配置することにより、毎日1回衛星が共役性のあるオーロラが発生しうる地点までいき、観測することができる。これらの観測がオーロラ解明の資となると考えている。

参考文献

- i オーロラデータセンター
<http://polaris.nipr.ac.jp/~aurora/indexJ.html>
(2015年5月25日閲覧)
- ii ERG SCIENCE CENTER
<http://ergsc.stelab.nagoya-u.ac.jp/>
(2015年10月9日閲覧)
- iii 多波長オーロラカメラ
<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/reimei/scienti.shtml>
(2015年6月10日閲覧)
- iv 出口 光一郎, ロボットビジョンの基礎, コロナ社, 2000
- v きく 8 号 仕様
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/ets8/>
(2015年10月22日閲覧)
- vi 地磁気センター
<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp-j.html>
(2015年6月19日閲覧)
- vii 渡邊秋人, 他, 組紐を被覆した伸展構造物の検討, 第56回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4496, 2012.