

# 地震予知用電離圏観測衛星群

## IONOSS

(The **I**ONosphere **O**bservation **S**atellite**S** for Predicting an Earthquake)

防衛大学校 航空宇宙工学科 石黒巧真 滝口謙介 齋藤健太

### 1. 開発の背景

#### 1.1 地震予知の重要性

人類はこれまでの長い歴史の中で天災から身を守ろうと様々な研究を行ってきた。それら天災の中で、最も大きな被害をもたらすものが地震である。日本列島は4枚のプレートの上に位置し、世界的にも地震が多発する地域であるといわれている。20世紀以降、日本で発生したマグニチュード6以上の地震は41件あり、その中で最も大きな被害が大正12年の関東大震災で死者99331人、行方不明者43476人であった。また、最近では平成7年に発生した阪神淡路大震災で死傷者約44000人、被害総額は約10兆円規模であったと推定されている。一方、海外に目を向けると2004年に発生したスマトラ島沖地震において死傷者35万人以上、被害総額は9億7700万ドルにのぼると推定されている。このように地震発生によりいかに甚大な被害がもたらされるのかは過去の経験より明白である。

これまでに地震から身を守るため、あらゆる方法で地震を予知しようとする研究が行われてきた。地震発生のメカニズムは地殻変動によって生じたプレートの歪が原因であることが研究により判明しつつあるが、その予知となると地球規模で広範囲にわたるプレートの歪からでは正確な発生時期を推定することができないのが

現状である。本衛星ではこれまでに地震の前兆として報告されてはいるものの未だに確立されていない技術の検証を目的とする。今回検証する技術は2つあり、1つ目は電離圏の観測を用いた地震予知法、2つ目が極超長波の観測を用いた地震予知法である。これらの予知法に対し、複数機の衛星で観測することで技術の確立を目指す。

#### 1.2 地震予知法

##### 1.2.1 電離圏について

電離圏とは大気圏中の窒素や酸素などの気体が上空で太陽からの宇宙線等によって分解・電離状態となっている領域（高度約80-500km）である。飛来する宇宙線のエネルギーが高度によって異なるため、電離圏には高度による電子密度の違いが生まれる。図1に電離圏の概要図を示す。下から順にD層（約80km）、E層（約100-120km）、F1層（約170-230km）、F2層（約200-500km）の4つに分けられる。上層に行くほど電子密度は高く、逆に下層では電子密度が低い。また、電離圏は太陽光の照射状況によって状態が変化するため、夜間は全体的に電離圏の電子密度は小さくなる。具体的には夜間ではD層が消失し、F1、F2層はF層という1つの層に統合される<sup>[1]</sup>。

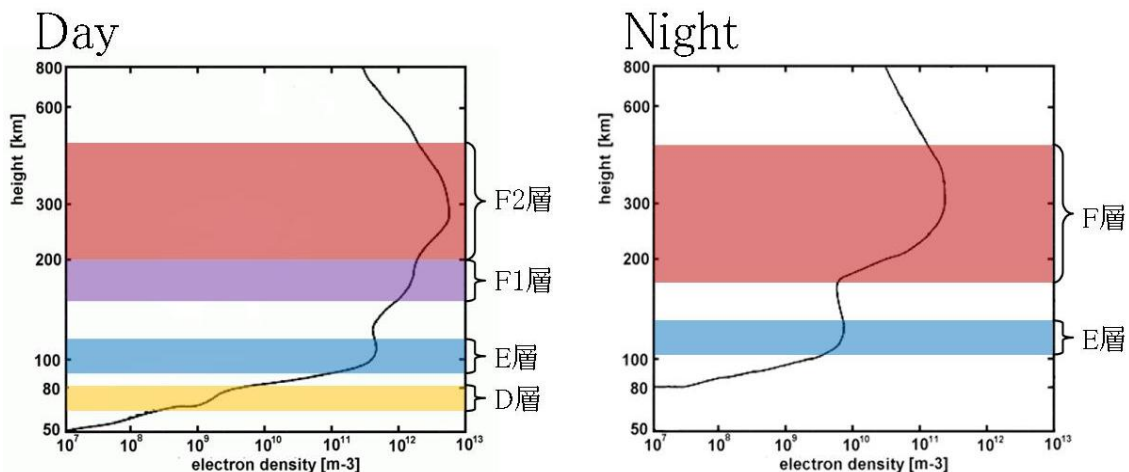


図1 電離圏の概要図<sup>[1]</sup>

### 1.2.2 地震予知の仮説（電離圏の擾乱）

地震発生の予兆として電離圏に擾乱が発生することが数多く報告されている。そのメカニズムにはいくつかの仮説が唱えられている。その中で有力視されている3つの仮説<sup>[3]</sup>について説明する。

#### ・仮説1

地盤の圧縮が地震を誘発し、その際に電磁波が放射される。この発生した電磁波の影響で、電離圏に擾乱が発生するという説である。

#### ・仮説2

岩石を圧縮した際に電子が外に飛び出し、その電子が地表にまで到達する。そのことで下部電離圏と大気圏間の電流に変化が生じる。その結果、下部電離圏の擾乱が発生するという説である。

#### ・仮説3

ガス放出による仮説である。地震前に地中の放射性のラドンが空气中に放出され、空气中の伝導率を変えるので、電磁波の伝播条件が変わる。その結果、下部電離圏と地表間の電流が変化し、下部電離圏の擾乱が発生するという説である。今回は本仮説についてより詳細な説明を以下に述べる。

図2に示すように地震が起こる前に地殻運動でプレートに圧力が加わり、プレートに微細な亀裂が発生し、そこからラドン（元素記号:Rn）が放出され、大気中で放射壊変し、鉛イオン（元素記号: $^{210}\text{Pb}^+$ ）へと変化していく。その後、Rnや $^{210}\text{Pb}^+$ といったイオンが大気中のイオン濃度を異常な値にすることにより電子等で構成されている電離圏に擾乱が発生するというメカニズムである。

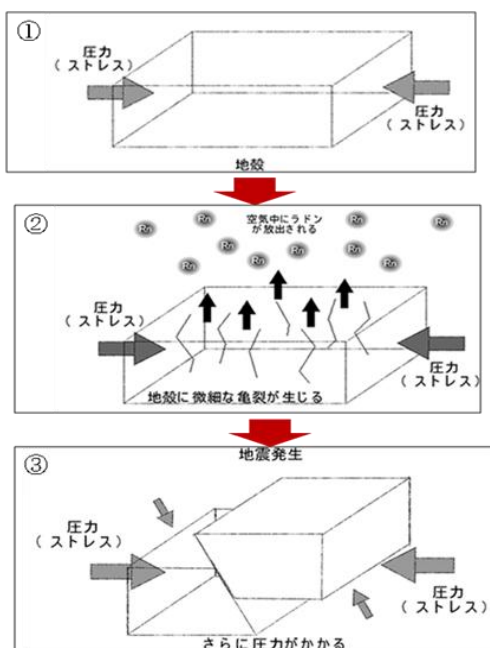


図2 地震発生のメカニズム（仮説3）<sup>[3]</sup>

### 1.2.3 電離圏の擾乱を用いた地震予知法

本衛星ではこのような不安定な電離圏の状態を観測することで地震を予知しようとするものである。地震発生の予兆は仮説段階ではあるものの、宇宙空間で観測することで大気からの外乱を受けることなく、より精度の高い地震予知が可能になることが予想される。今回のミッションでは、特に300-500kmの高度において電離圏の擾乱が著しいことが報告<sup>[4]</sup>されているので、その領域の電離圏の観測を重点的に行うように設計する。

### 1.2.4 極超長波（ELF）を用いた地震予知法

今回のミッションにおける地震予知方法の2つ目として、宇宙空間における極超長波の観測を実施する。極超長波（Extremely Low Frequency: ELF）と呼ばれる電磁波は周波数3Hz-3kHz（波長100-100000km）となる極めて低い周波数をもつ電磁波の種類である。地震発生前の電磁波放射の存在は1982年gokhbergや芳野らによって報告<sup>[5]</sup>されて以来、多くの世界的な関心が寄せられ今日に至っている。そのメカニズムとしては、先ほど1.2.2で述べたように地殻運動でプレートに圧力が加わる際に圧電効果などにより電荷生成が起こることによってパルス状の電流が発生する。これらの電流の複合によって電波が放射されるという仮説である。この際、放射される電波の周波数帯が極超長波である。

しかしながら、地上では太陽からの紫外線や太陽風の照射に起因する磁気圏・電離圏の変動による地球環境での雑音、さらには電離圏と地球大地間で形成されるシューマン共振によって蓄えられている雷放電などの電磁波エネルギーによる雑音は、数十Hz以下の低周波域で卓越している。それらの雑音は検出すべき地殻起源の電磁波よりかなりレベルが大きいことが地上での観測で問題となっている<sup>[6]</sup>。

また、ELF帯等の極超低周波数の電離圏透過特性については、電磁層プラズマのほか地球磁力線からなる磁気圏が深く伸びており、そのジャイロ周波数が高く、異方性媒質である。そのため一部の電力が電離圏を透過し観測が可能であることが示されている。具体的には、500km以上の高度において磁界エネルギーが夜間約10%、昼間で約4%透過するとされている<sup>[7]</sup>。

以上より、本衛星では地上より外乱が少ない宇宙空間においてELF観測を行うことで地震予知の精度を高める。また、あまり明らかにされていない宇宙空間におけるELF帯の電磁波を観測することで、その全容を明らかにする。

### 1.3 本観測において何がわかるか

電離圏の擾乱を観測・調査することによって、電離圏の変化と地震の関係を明らかにする。今までの電離圏の観測は地上からの観測であり大気から受ける様々な外乱が加わっていた。しかし本衛星での観測では宇宙空間から観測を行うため、外乱の少ない環境でのデータを収集できると考えられる。

電離圏上空から衛星による極超長波観測は可能であるものの、宇宙空間で極超長波を観測した例は少ない。また、電離圏のE層からF層にかけて電子密度の増加に伴い、極超長波の周波数帯において伝搬特性が大きく変化する等の環境雑音が問題となることが予想される。今回の観測では詳細なデータを収集し、その結果から地震と極超長波の関係を明らかにするとともに、宇宙空間における極超長波自体の特性を観測し今後の宇宙研究の資とする。衛星の構造に関しては約300kmという非常に長いテザーを用いての運用になることから、今後の宇宙開発の重要な参考資料になると考えている。

### 1.4 期待される社会的効果

近年、日本において大地震発生の可能性が危惧されている。また、世界では地震に関する宇宙開発が盛んに行われている。そのような中で地震大国といわれている日本が未だ開発していない独自の地震予知衛星を開発することは急務であると言える。また、これまでのP波やS波の特性を用いた予知方法ではP波が到達した数秒後に主要動であるS波が到達するといった非常に短期的な予知しか行うことができず、事前に地震発生時の対策を行うことが困難であった。しかし、今回の電離圏の擾乱による観測を用いた予知方法では3-6日前、極超長波の観測を用いた予知法では1-2週間前及び数時間前における異常の観測が期待できるため、これまでの地震予知に比べ、余裕をもって地震発生時の対策を行うことが可能になる。

衛星による宇宙空間からの観測によって広大な領域を効率的に観測することができ、本衛星ではテザーを用いて局所的な電離圏の観測も可能となっている。

本衛星による地震予知によって、地震による直接的な被害を減少させることができ、今後大地震が起こると予測されている日本において非常に重要な役割を果たすことができる。

## 2. 開発計画

### 2.1 ミッション目的

宇宙空間での電離圏の観測及び極超長波の観測を行い、得られた結果と地震発生における関係性を調査することで将来の地震予測に貢献する。また長距離間のテザー構造を使用した宇宙飛行を試験的に運用することで今後の宇宙開発に役立つ。

### 2.2 ミッション概要

地震予知のための電離圏の観測において、大きな地震の予兆として電離圏の擾乱が3-6日前の期間に大きな変化として観測される。そのため、電離圏を観測するにあたってその観測する周期が重要となってくる。本ミッションでは太陽同期準回帰軌道を使用する。さらに、本ミッションでは3機の衛星を同じ軌道に時間差をおいて投入することにより、短い周期での観測が可能になる。この際、各衛星間で連携することにより、電離圏を大局的に観測する。その各衛星間での電離圏の観測の様子を図3に示す。

また、同時に各衛星にテザーによってつながった子機衛星を設置することによって局所的な観測を行う。これらにより親機衛星間で大局的及び親機と子機間で局所的な電離圏観測が可能となる。また、極超長波の観測を行うことで短期的な予知だけでなく、1-2週間前といった比較的長期的な予知も可能にする。テザーを伸展した状態で運用する様子を図4に示す。

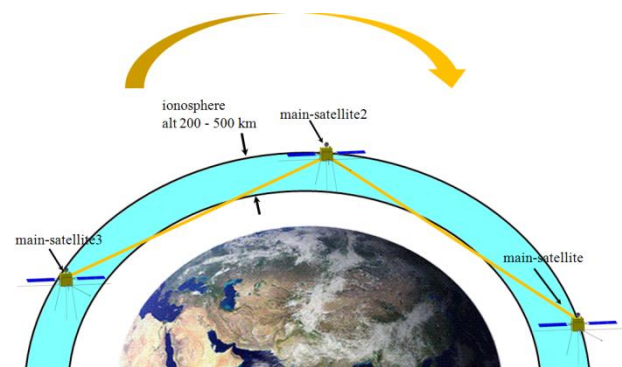


図3 各衛星間での電離圏観測の概要図

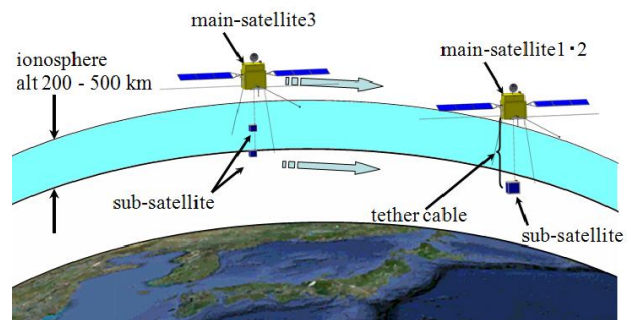


図4 テザーを用いた運用の概要図

## 2.3 今までの衛星との違い

これまでに数例ではあるが地震予知を目的とした衛星が計画され打ち上げられている。しかし、本衛星では以下の6つの点において他の衛星と異なる。

- (1) 複数機の衛星を同時に打ち上げ、連携する。
- (2) 複数の衛星を打ち上げることで電離圏の大局的な観測が可能になる。
- (3) テザーを用いた子機衛星との連携により局所的な観測が可能になる。
- (4) テザーの重力傾斜トルクによる姿勢制御の効率化
- (5) 宇宙空間において観測を行うことで、大気などからの外乱による影響の抑制
- (6) 宇宙空間における極超長波の詳細な観測

## 2.4 観測機器

今回のミッションでは極超長波を観測するために磁界観測装置と電界観測装置を用いてELF帯の電磁界を観測する。また、電離圏の観測にはイオノゾンデ観測システム及びTEC観測システムを使用する。極超長波を観測することによって長期的な地震予知を行い、電離圏を観測することによって中・短期的な地震予知を行うことを目的とする。

### 2.4.1 ELF観測システム

本ミッションのELF観測装置としては、図5に示すように電界観測装置と磁界観測装置の2種類の観測装置を用いてELF帯の電界及び磁界の変動を観測する。このとき、電界・磁界でそれぞれ直交した3成分の強度を測定する。その観測結果から、ELFの到来方向を決定する。

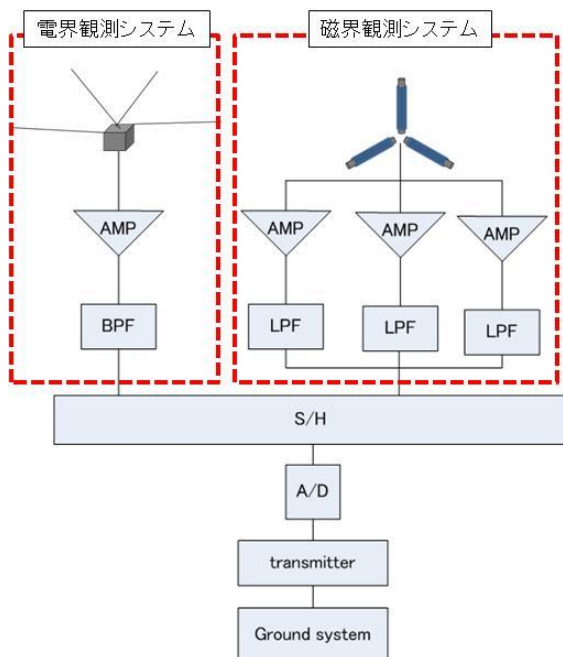


図5 ELF観測システム概要

磁界観測装置は衛星自身から発せられる磁界の影響を受けないように衛星から約2m伸びたブームの先端にサーチコイルを搭載する。また、FFT解析を行う前に、窓関数の一つであるブラックマンハリス窓を使用しELF帯のみを検出する。

電界観測装置は電界を測定するための約4mのアンテナを4本搭載し3成分の電界を測定する。

これらの観測装置から得られた電界及び電場の計6成分を用いてkベクトル（伝播ベクトル）を算出し、ELFの到来方向を決定する。この到来方向と地震発生位置が一致すれば、当該電磁波が地震の前兆であることを実験的に明らかにすることができる。

### 2.4.2 電離圏観測システム

本衛星では、2種類の観測装置を用いて電離圏を観測する。以下に観測装置について述べる。本衛星ではテザーを用いて親機衛星と子機衛星をつなぎ、親機衛星は高高度、子機衛星は低高度から観測対象となる領域の電離圏を挟み込むようにして電離圏の観測を行う。また、さらに詳細な電離圏の観測を行うために、3機目の親機衛星には2機の子機をテザーで接続し、より局所的な電離圏の観測を実施する。

#### (1) イオノゾンデ観測システム

電離圏の観測を行う際にイオノゾンデ観測システムを用いて観測を行う。イオノゾンデ観測システムではHF帯の電波を数十MHz掃引させながら電離層に対し送信し、電離圏による鏡面反射によるエコーを観測し、電離圏高度を求めるといったものである。これを親機・子機衛星ともに搭載し、電離圏を挟み込むように観測する。

#### (2) TEC観測システム

TEC(Total Electron Content)とは親機衛星間または親機衛星と子機衛星間のLOS (line of site)上の電子数の合計で電離圏の電子密度の総数を表す量である。TECはLOSに沿って電子密度を積分することで表すことができる。特に電子密度がもっとも大きい高度300-500km付近の電離圏F層の寄与が大きい。

この観測方法はマイクロ波の特性を利用している。マイクロ波はTECが大きいほど伝搬速度や経路に影響を及ぼすという特性がある。この特性を利用して異なる周波数の遅延差を計算し、電離圏の電子数を算出する。

### 2.4.3 各衛星の観測システム

1機目の親機衛星と子機衛星間はイオノゾンデにより観測する。2機目及び3機目の親機衛星と子機衛星間はTEC観測システムにより観測す

る。また、3機目には2機の子機衛星が接続され、より詳細な総電子数が求められる。

大局的な観測として各親機間はTEC観測システムにより電離圏の観測を実施する。

## 2.5 衛星概観

図6に衛星の概観を示す。

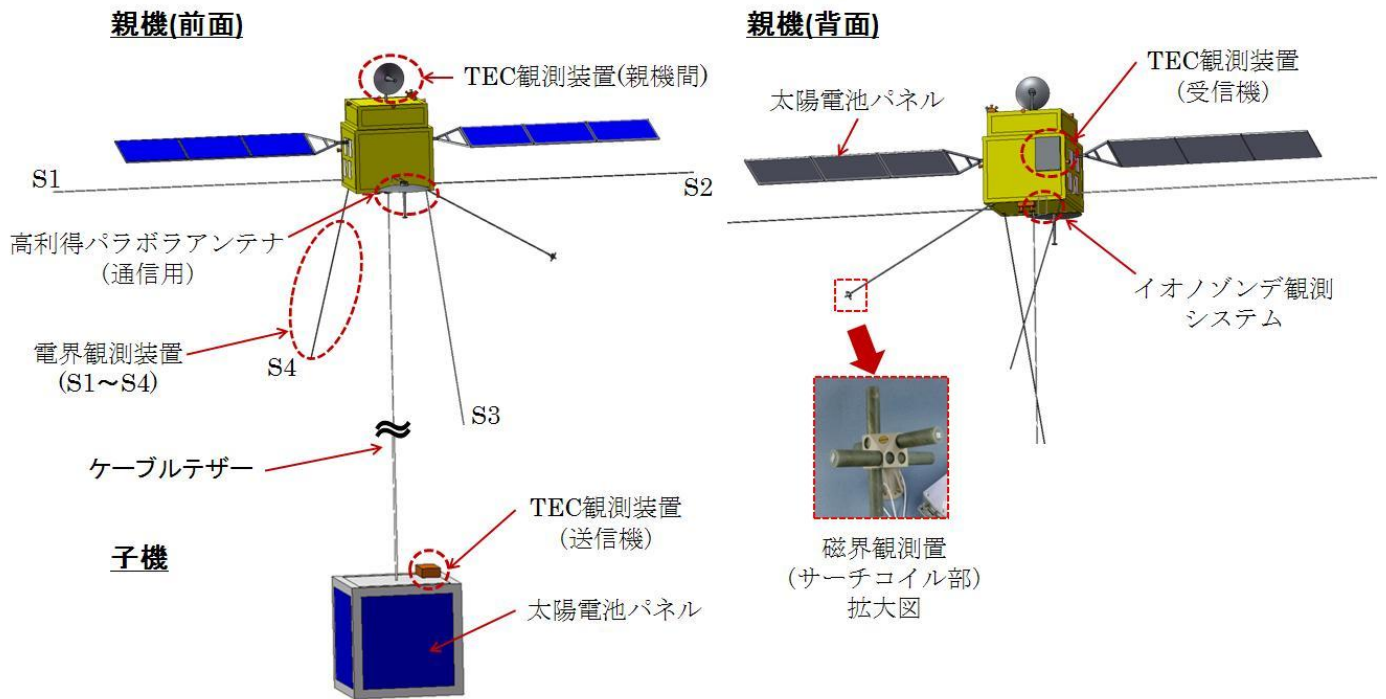


図6 衛星概観

## 2.6 衛星緒言

表1に本衛星の緒元を示す。

表1 衛星諸元

ミッション		地震予知のための電離圏・極超長波の観測
構造	質量	約2100kg (主衛星M=600kg、子機衛星m=100kg各3機)
	形状	1000mm×1000mm×1100mm (主衛星) 600mm×600mm×600mm (子機衛星)
軌道	高度	416.7km (主衛星 $h_{main}=500.4\text{km}$ 、子機衛星 $h_{sub}=200.0\text{km}$ )
	傾斜角	97.4438度
	種類	太陽同期準回帰軌道
	周期	92.90323分 (回帰日数2日)
姿勢制御方式		バイアスモーメンタム方式 重力傾斜トルク
設計寿命		5年 (ミッション期間)
主要ミッション機器		イオノゾンデシステム、TEC観測システム、 磁界観測システム、電界観測システム
推進系		電気イオンエンジン、GAPロケットシステム
電源系		太陽電池、リチウム電池
通信系		ダイポールアンテナ、フェイズドアレイアンテナ

## 2.7 軌道決定

本衛星では3機の衛星を同時に打ち上げ、各衛星間で電離圏を観測することにより電離圏を大域的に観測する。この際、3機が同じ距離で飛行する必要があるため、そのための軌道を決定する。観測軌道への投入方法としては周期の長い高高度の楕円軌道から低高度の太陽同期準回帰軌道に順次投入する方法を採用する。

(i) 最初に本衛星が観測をおこなう際の地球周回軌道を決定する。本ミッションでは電離圏及び極超長波を継続的な観測の必要があるため大量の電力を必要とする。また、今回の対象となる高度200-500kmの領域の電離圏を観測する条件として、高度500-600kmを親機衛星が飛行する必要がある。

以上の条件より、今回のミッションでは太陽同期準回帰軌道を採用する。太陽同期準回帰軌道の利点として以下の3つがあげられる。

- (1) 常時太陽入射が得られ反太陽面は放熱面に利用できる。
- (2) 太陽電池パドルの展開・駆動機構を不要とすることが可能
- (3) 擾乱が発生するとされる期間中に必ず1度は上空を通過できるような軌道になる。

(ii) 次に太陽同期準回帰軌道を極軌道に近似して計算を行った。さらに、最低2日に1度は同じ上空を通過するように設定した。

結果は表2に示される値となった。今回は親機の高度と子機の高度が200-600km以内の範囲で

観測を行うので、高度が566.9kmまたは416.7kmとなる軌道を選択した。

次に、親機・子機衛星それぞれの高度、重量を考慮したうえで計算を実施した。計算の詳細を以下に示す。

親機と子機におけるつり合いの式をそれぞれ立てると、各衛星にかかる重力、遠心力、テザーの張力がつり合っているため、以下のように表せる。

$$m_1 r_1 \omega^2 = G \frac{m_1 M}{r_1^2} + T$$

$$m_2 r_2 \omega^2 + T = G \frac{m_2 M}{r_2^2}$$

ここで、 $m_1$ ：親機質量、 $m_2$ ：子機質量、 $M$ ：地球質量、 $r_1$ ：親機軌道半径、 $r_2$ ：子機軌道半径、 $\omega$ ：角速度、 $G$ ：重力定数、 $T$ ：張力とする。

ここで、親機軌道の高度とテザーの張力 $T$ を未知数として、テザー伸展後の親機の質量を400kg、子機の質量を100kg、子機の高度を200kmとして計算すると表3のような結果になった。ここで、親機が500-600km以内で航行できるのは周回数が15.5回の時のみであるため、この軌道を採用する。この際、テザーを伸ばさない際の軌道の半径 $R_G$ は

$$R_G = 6794.87 \text{ km}$$

太陽同期準回帰軌道の周期より角速度 $\omega$ は

$$\omega = 0.0011272 \text{ (rad/s)}$$

となる。図7に衛星間の距離と角度の関係を示す。この時、テザーの張力 $T$ を計算すると

$$T = 94.10 \text{ N}$$

表2 重心の軌道の計算結果

周回数(回/日)	周期(s)	角速度(rad/s)	高度(km)
14.5	5958.6	0.00105447	725.645
15	5760	0.001090831	566.8927
15.5	5574.2	0.001127192	416.7224
16	5400	0.001163553	274.4149

表3 親・子機衛星の周回数に伴う計算結果

		親機		子機		テザー張力
周回数	角速度	質量	高度	質量	高度	
(回/日)	$\omega$ (rad/s)	$m_1$ (kg)	$h_1$ (m)	$m_2$ (kg)	$h_2$ (m)	T(N)
15	0.001091	400	692754.1425	100	200000	146.9762454
15.5	0.001127	400	500390.7196	100	200000	94.0963177

次にフォーメーションフライトの際の各衛星間の距離を計算する。この際、太陽同期準回帰軌道を極軌道に近似して計算を行う。

先に得られた角速度より衛星の速度 $v$ を求めると

$$v = r\omega = 7659.12 \text{ (km/s)}$$

となる。次に太陽同期準回帰軌道に本衛星を投入するための楕円軌道を決定する。地球の中心から見た各衛星間の角度を $\theta$ (rad)とおくと

$$\theta = 2\cos^{-1}\left(\frac{R + h_{\text{sub}}}{R + h_{\text{main}}}\right)$$

$$= 0.594176 \text{ (rad)}$$

以上の結果より各衛星間の時間差を $\Delta t$ (s)とすると

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega}$$

$$= 527.129 \text{ (s)}$$

となるので、各衛星が約500秒の差をつけて同じ極軌道に投入するための楕円軌道が必要となる。太陽同期準回帰軌道のグラウンドトラックの概要図を図8、太陽同期準回帰軌道と楕円軌道の概要を図9に示す。

次に、(i) 及び(ii)で設定した太陽同期準回帰軌道に本衛星を投入するための楕円軌道を設定する。楕円軌道衛星の周期を $T'$ (s)、長半径を $a$ (km)、角速度を $\omega'$ (rad/s)とおくと

$$T' = T + \Delta t$$

$$= 6101.32 \text{ (s)}$$

となる。ここでケプラーの第3法則より

$$T'^2 = (2\pi/\sqrt{\mu})a^3$$

と表せるので

$$a = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{\mu}}{2\pi} T'^2}$$

$$= 7216.77 \text{ (km)}$$

$$\omega' = \frac{2\pi}{T'}$$

$$= 0.0010298 \text{ (rad/s)}$$

となる。よって楕円軌道上での速度を $V_{\text{ini}}$ (km/s)、極軌道上での最終速度を $V_f$ (km/s)とすると

$$V_{\text{ini}} = a\omega'$$

$$= 7.43188 \text{ (km/s)}$$

$$V_f = r\omega$$

$$= 7.65912 \text{ (km/s)}$$

となる。

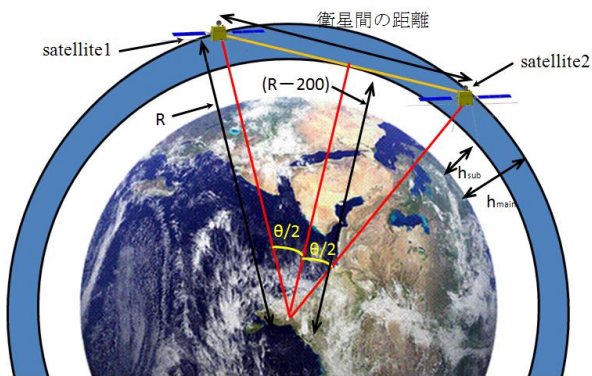


図7 衛星間の距離と角度の関係

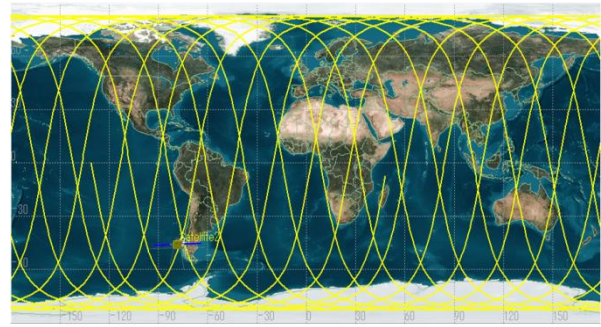


図8 太陽同期準回帰軌道の概要図

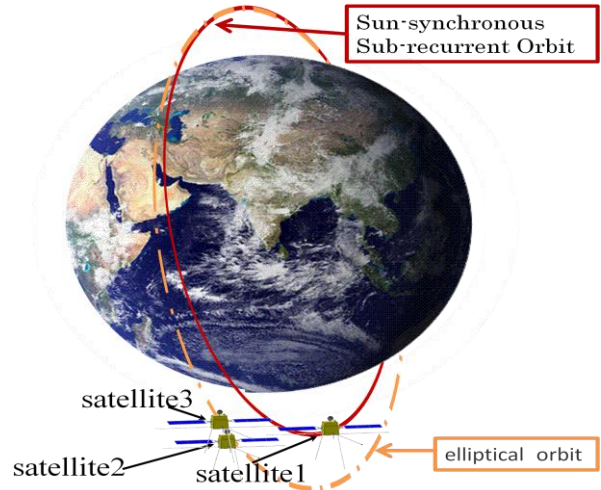


図9 太陽同期準回帰軌道と楕円軌道の概略図

## 2.8 テザー伸展機構

本衛星ではリール式の伸展機構をもったテザーを使用する。また、巻き戻し方法に関しては巻き戻す必要がないため考慮しない。

ここで本ミッションでは長さ約300kmのテザーを用いて衛星を運用するため、テザーにかかる張力をより、テザーに使用する材料を決定する。テザーにかかる張力は2.7節で計算した通り、約95Nの力であり、その張力を達成できるようにテザーに用いる材料をケブラー29に決定した。

約300kmの長さのテザーを運用するにあたってデブリとの衝突によってテザーが破損してしまう可能性が考えられる。そのため、テザーを19本伸ばし、ホイテザー<sup>8</sup>と呼ばれる構造で子機と接続する。

ホイテザーとはテザーとテザーの間をメッシュ構造のように互いに補完することでデブリ等による破断を減少させる構造であり、19本を1束として使用することで、張力に対する強度も増し、より安定した観測が可能になると考えている。図10にホイテザーの概要図を示す。

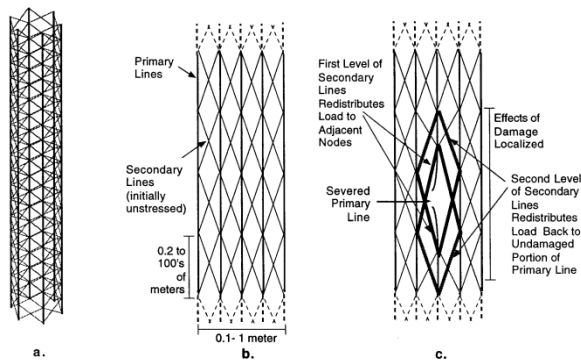


図10 ホイテザーの概要図<sup>[8]</sup>

テザー機構の質量及び大きさを計算すると、おおむね800mmの立方体に収まる程度の大きさになり、芯を含め約200kgの質量となった。

親機、子機衛星間の地球に対して垂直方向は重力傾斜トルクを用いて伸展させる。

デブリ等の影響でテザーが破断した場合、子機は地球の重力により、大気圏に突入し消失、親機はスラスターで軌道を制御し観測を継続する。

### 3. 結論

現在、日本のみならず世界各国で地震が大きな問題となっている。地震に対する短期的な予知に加え、比較的長期的な予知を可能にするような衛星を提案した。今回地震予知用観測衛星のアイデアを考えるにあたり、数々のプレートの境目に存在している日本が、他国に比べて地震予知に対しあまり高い関心を持って取り組んでいないのが現状である。特に宇宙開発に関して様々なベンチャープランを提案しているアメリカやロシアのみならず、徐々に宇宙産業に着手し始めたフランスや中国までもが地震予知に関する衛星開発に取り組んでいる。この点に関しては、日本は大きく後れを取っているといえる。この機会に、大きな脅威でありながら非常に身近である地震について今一度認識し、近い将来起こると予測されている大震災に対する事前準備を積極的に取り組んでいく必要があると考える。今回提案したような衛星についての研究を深め、より地震を始めとする災害の対策を提案していく必要があるといえる。

### 参考文献

[1] INGP (Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia)

[http://roma2.rm.ingv.it/en/research\\_areas/4/ionosphere](http://roma2.rm.ingv.it/en/research_areas/4/ionosphere)

[2] 宇宙から地震を予知できるか? Demeterの回答

[http://www.geocities.jp/semsweb/DEMETER\\_podcast.html](http://www.geocities.jp/semsweb/DEMETER_podcast.html)

[3] NPO法人大気イオン地震予測研究e-PISCO

[http://www.e-pisco.jp/r\\_intro/ion/intro\\_i1.html](http://www.e-pisco.jp/r_intro/ion/intro_i1.html)

[4] 内陸地震に先行する電離圏変動:GPSによる検証

菅原守 著

[5] 地震に伴う電磁気現象のいろいろ

早川正士 著

[6] 電磁波と地震の前兆現象について

<http://www.geocities.jp/natureland4679/exp/index.html>

[7] 極超長波 (ELF Waves) 地球放射波の電離圏突き抜け特性と衛星による観測について

中部大 畑雅恭、馬場 清秀、藤井 隆、太田 健次  
名工大内匠 逸 著

[8] Space Tethers and Space Elevators, VANPELT