

# 衛星コンステレーションによるリアルタイム津波観測

東京工業大学

## 1. 緒言

古くから津波は沿岸に大きな被害を与えてきた。近年でも、2004年のスマトラ島沖地震に付随して発生した津波により、各国で甚大な被害を出したことは記憶に新しい。

津波は海底の大規模な地形の変形によって引き起こされる。地震はその最たる原因であり、世界で見るとチリ沖、インドネシア沖、日本近海で起きた地震を起因とした津波による被害がある(図1)。日本では、近海で起きた地震によって引き起こされる津波に対し、シミュレーション結果のデータベースに基づいて津波を予測する津波予報システムが実用化されている。しかし、今村らの研究によれば、沿岸部の津波シミュレーションにおいて実際の津波高さ2mに対し予測値は約1mの誤差がある[1][2]。この誤差の要因のひとつは海底形状モデルが不十分なことであり、もうひとつは、津波発生源の位置及び形状を特定できないことである。

津波予測精度を向上させる手段のひとつとして、外洋を伝播する津波の直接的な観測が挙げられる。直接観測を行うことによって、発生源を厳密に特定できなくても現在の津波の高さ・場所が測定できるので、これをシミュレーションにフィードバックすることにより精度向上が行える。今村によれば、シミュレーションの精度向上のためには、1時間間隔で10cmオーダの精度で観測が必要である。

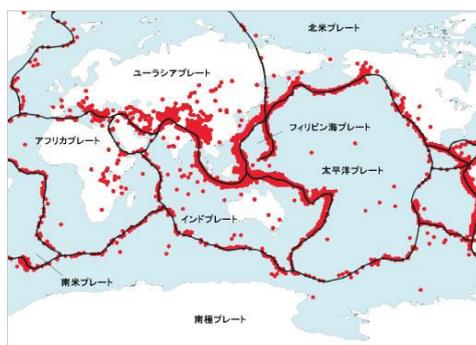


図1 世界各国の地震発生源分布(参考[1])

## 2. ミッション

### 2.1 ミッション定義

本提案では、マイクロ波高度計を有する衛星(Tsunami Early Observation satellite :TEOS)を高度650kmの軌道上に多数配置するコンステレーションにより、外洋の津波伝播状況を1時間以

内の間隔で、高さ10cmオーダの精度で観測することをミッション目的とする。今回は具体的に太平洋上を伝播する津波を想定し、そのためのシステムを構成する。なお本稿では、1時間以内の観測をリアルタイム観測と定義する。

### 2.2 津波観測方法

#### 2.2.1 外洋での津波の特徴

津波は外洋において、周期:数10~数100sec、振幅:数10cm~数m、伝播速度:100~200m/sの波として伝播する。このため、津波波面の先端部において、長さ1~数10kmの領域が幅広く隆起する。本ミッションでは、通常の波浪に比べ波長の長い津波をマイクロ波高度計により直接観測する。これは前述のスマトラ沖地震の際に、偶然通過した地球観測衛星Jason-1が、マイクロ波高度計により津波を直接観測した例があり、実際に津波が観測できるものと考えられるためである。

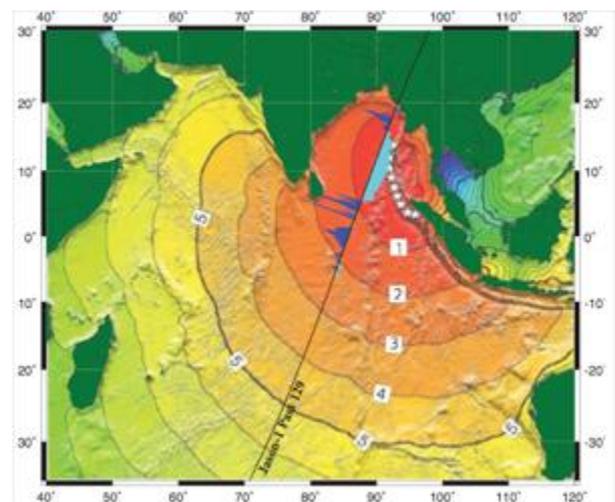


図2 Jason-1が捉えた津波(参考[2])

#### 2.2.2 マイクロ波高度計

マイクロ波高度計は衛星と海面までの距離を測る装置である。マイクロ波を用いることで天候や大気の影響を最小限にすることができる。衛星から放射されたマイクロ波の海面への入射角が30度以内のとき、マイクロ波は海面で準鏡面反射(鏡面での反射に近い反射)する。この反射波を衛星が受信し、放射から受信までにかかった時間を測定することにより、衛星から海面までの距離を求めることができる。測定中はサンプリング時間内に数十回の測定を行い、待機時間にデータ処

理及びデータの平均化をして、高度データを算出する。

### 2.2.3 津波観測原理

図 3 にマイクロ波高度計による海面高度の測定イメージを示す。高度計は衛星から海面までの距離のみを測定する機器であるので、津波を検出するためには、事前に蓄積しておいた該当時刻・場所の平均海面高度を参照する必要がある。そのため、津波が発生していない時は津波を検出するための平均海面高度を測定する定常観測フェーズとする。

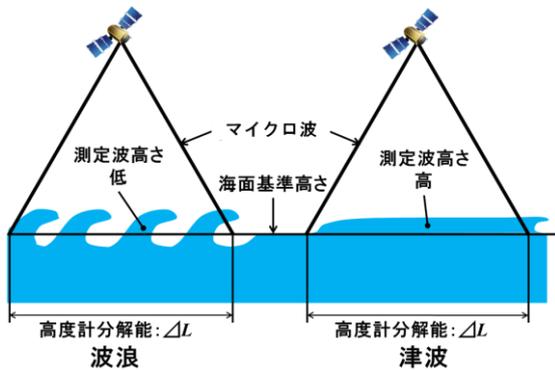


図 3 高度計の観測原理

津波を高度計で観測するためには津波を波浪と区別する必要がある。表 1 に示す様に、津波は波長が長く、波浪は短い。高度計は海面観測分解能の平均海面高さを測定する。図 3 に示す様に、波浪が発生しているとき理想的には海面高は 0m に近い値で計測される。一方津波は波長が長いので、平均化されても有意な高度として観測できる。

表 1 津波と波浪の区別

	波長	周期
津波	数 [km] ~ 数 100 [km]	1 ~ 30 [s]
波浪	数 [m] ~ 数 100 [m]	2 [min] ~ 1 [h]

### 2.2.4 軌道設計

#### 2.2.4.1 軌道要求

軌道への要求として、以下の項目が挙げられる。

- ①太平洋上（北緯 60 度から南緯 60 度、西経 90 度から東経 150 度まで）の津波をリアルタイムで観測できること。
- ②太平洋上を伝播する津波を観測できること。
- ③決まった点の参照高度を取得するため、準回帰軌道または回帰軌道であること。
- ④高度計の電波出力より、高度を 800km 以下とす

ること。また衛星寿命を考慮して、高度下限を 600km とすること。

要求①・④を 1 機の衛星で同時に満たすことはできないため、衛星コンステレーションを提案する。

要求②に関して、例えば太平洋沿岸で発生した津波は外洋を東西方向に伝播することが予測される。津波観測衛星は地球全域を観測することは主眼に置かず、外洋における津波を確実にとらえることを目的とする。そのため、軌道傾斜角を低くして、衛星の軌跡を津波の伝播方向と平行にすることで津波伝播面の検出確率を上げる。軌道傾斜角を決定するために、30 度、45 度、60 度のそれぞれで津波を観測できる頻度を比較した結果、45 度が適切であると判断した。また、衛星配置の不均一を解消するため、近地点引数を異なる軌道傾斜角ごとに 45 度ずつずらして配置した。

以上の検討により、軌道を Walker コンステレーションに従い、衛星数 8 機、軌道面 4 面となるように定めた(図 5)。軌道諸元を表 2 に示す。

表 2 軌道諸元

軌道傾斜角	45 [deg]
高度	650 [km]
離心率	0 (円軌道)
昇交点赤経	0, 90, 180, 270 [deg]
近地点引数	0, 45, 90, 135 [deg]
回帰数	29
各軌道上での衛星配置	0, 180 [deg]

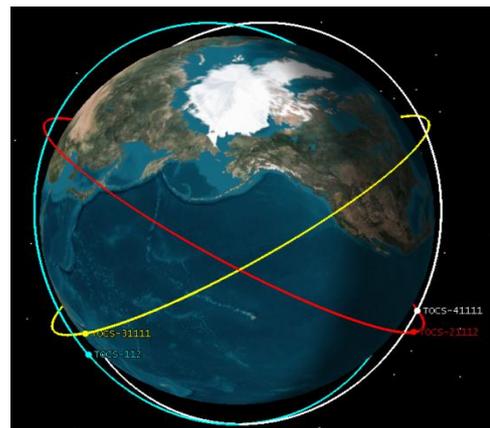
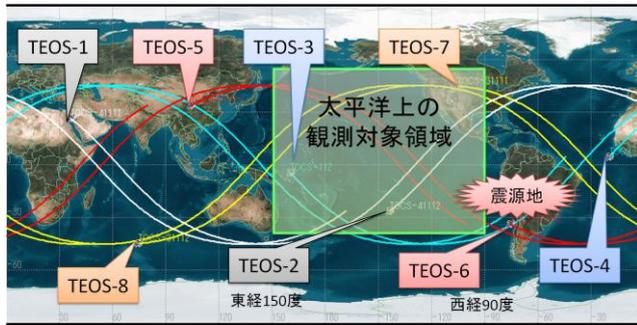


図 4 衛星コンステレーション

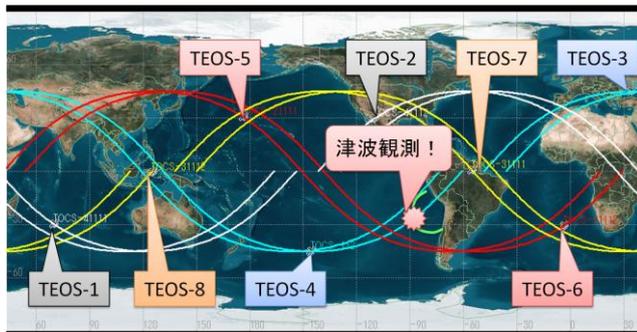
#### 2.2.4.2 津波観測シミュレーション

前項で設定した軌道が、リアルタイム観測の要求を満たすことを検証する。シミュレーションの結果、この軌道上の衛星群は、緯度・経度それぞれ 15 度で囲まれた領域を 1 日に最低 22 回観測することができ、リアルタイム観測の要求をほぼ満

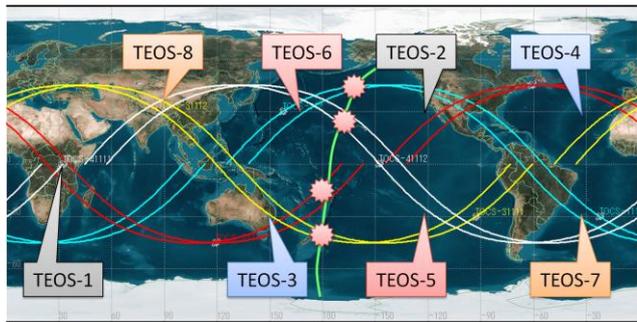
たす。さらに、実際の津波観測の可否を検証するために、2007年6月にペルー沖で発生し、太平洋をアジアに向けて伝播した津波を対象として評価した(図5(a))。この結果、津波発生後2時間で最初の衛星が津波を観測し(図5(b))、その後毎時間ごとに複数の衛星が津波を観測できるという結果が得られた(図5(c))。以上より、設定した軌道はリアルタイム観測の要求を満たす。



(a) 初期配置



(b) 津波発生2時間後



(c) 津波発生14時間後

図5 津波観測シミュレーション

## 2.2.5 ミッションシーケンス

### 2.2.5.1 定常観測フェーズ

定常観測フェーズでは、海洋の平均海面高度を収集し、地上局にデータベースとして蓄積することを目的とする。通信は各衛星が地上局に直接ダウンリンクする(図6)。

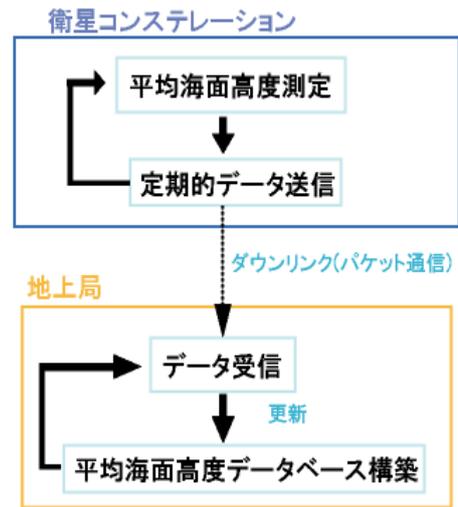


図6 定常観測フェーズ

### 2.2.5.2 津波観測フェーズ

地震が発生すると、地上局からのコマンドにより津波観測フェーズへ移行し、観測データを中継衛星経由で地上局にダウンリンクする(詳細は通信系の項目参照)。得られたデータを地上局で平均海面高度のデータベースと比較し、津波を抽出する。得られた津波情報をシミュレーションにフィードバックし、津波予報の精度を高める(図7)。従来の方式が地震発生源のみを初期条件として計算しているのに対し、本システムでは衛星コンステレーションによりリアルタイムに実観測データを取得して計算を修正し、誤差を小さくすることができる(図8)。

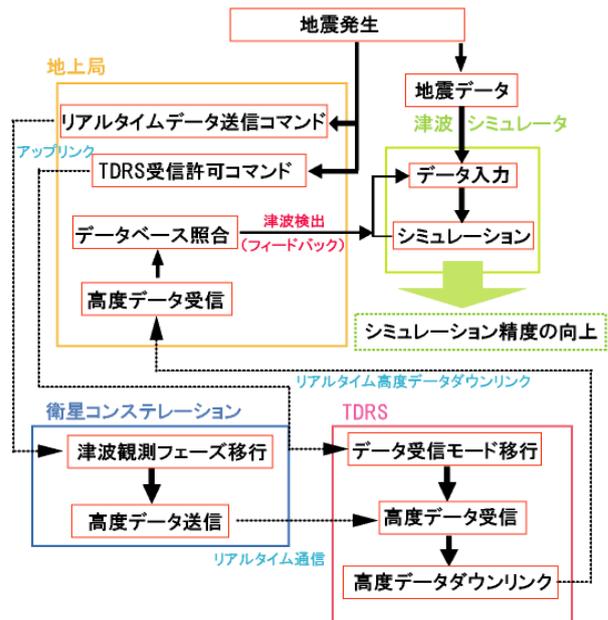


図7 津波観測フェーズ

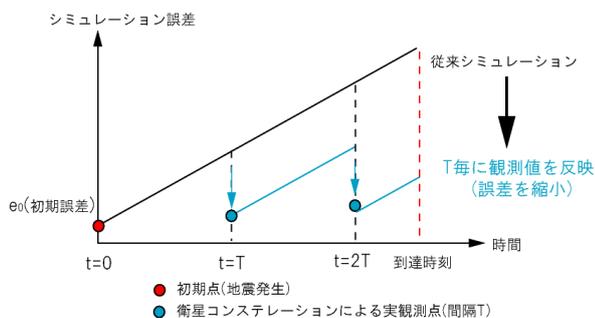


図 8 実観測データによる計算精度向上

### 3. 衛星システム設計

#### 3.1 衛星概要

本衛星のシステムは、海面高度を計測するミッション系、衛星バス系(姿勢、軌道、通信、電源、構造、熱制御)及び地上系により構成される。衛星寿命を10年と設定する。以下に各サブシステムの詳細を示す。

#### 3.2 ミッション系

ミッション機器であるマイクロ波高度計は、NASAの地球観測衛星 Jason-1 に搭載された Poseidon-2(表 3)を用いる。

表 3 マイクロ波高度計(Poseidon-2)

質量	25[kg]
消費電力	70[W]
送信機出力	7[W]
高度分解能	3.3[cm]
送信周波数	5.3/13.575[GHz]
パルス幅	105[μsec]
サンプリングレート	1[sec]
アンテナ開口径	1.2[m]

今回観測対象とする津波は海面上昇10cm、周期 $T_t=200$ s、伝播速度 $V_t=200$ m/sの正弦波形と定める。津波の波長 $\lambda_t$ は、

$$\lambda_t = T_t \times V_t = 200 \times 200 = 40\text{km}$$

である。津波を観測可能な条件は、マイクロ波高度計の分解能が津波の半波長より小さいことである。アンテナ直径 $D=1.2$ m、マイクロ波周波数帯 $B=13.575$ GHz、波長 $\lambda_{1a}=0.0221$ m、衛星高度 $R=650$ kmで海面でのレーダ分解能を計算すると、

$$\Delta L = 1.2 \times R \times \frac{\lambda_{1a}}{D} = 14.4\text{km} < \lambda_t / 2 = 20\text{km}$$

となるので波長40kmの津波を観測することが可能である。今回用いるマイクロ波高度計のサンプリングレートが1s程度であり(表3)、衛星の飛

行速度が7km/s程度であるから、津波の半波長を観測する時間は3s程度と計算できる。すなわち、サンプリングレートが半波長を観測する時間より短いので、津波の検出が可能である。

#### 3.3 姿勢制御系

姿勢制御系への要求として、以下の項目が挙げられる。

- ①地心方向を指向すること。
- ②高度計の要求より、地心方向の指向精度が0.03度以下であること。
- ③アクチュエータの発生トルクが外乱トルクより大きいこと。ただし外乱トルクは重力傾度トルク、地磁気トルク、太陽輻射圧トルクを考慮し、合計 $3.6 \times 10^{-4}$ Nmであると見積もった。

これらの要求項目からゼロモーメント方式の3軸安定方式を用いる。リアクションホイール(表4)は3軸直交に配置し、アンローディングには磁気トルカ(表5)を用いる。

表 4 リアクションホイール(MPC製)

サイズ	$\phi 142 \times 91$ [mm]
質量	2.5[kg]
消費電力	2[W]
最大蓄積角運動量	1.6[Nms]

表 5 磁気トルカ(SSTL製MTR-5)

サイズ	$251 \times 30 \times 66$ [mm]
質量	0.5[kg]
消費電力	1[W]
最大磁気モーメント	6.2[Am <sup>2</sup> ]

#### 3.4 軌道制御系

空気抵抗による軌道低下を補償するためのイオンスラスタを搭載する。空気抵抗の大きさは、高度650kmにおいて約15uNである。常に一定高度に衛星を保つという要求からAstrium社のイオンスラスタRIT-10を選定した(表6)。軌道修正に必要なエンジン燃焼時間は軌道1周あたり約90sであり、バッテリーへの負担を軽減するために軌道修正は1周毎に行うものとする。なお、衛星は全て同高度・同軌道傾斜角に投入されるため、重力による摂動は全ての衛星に同様に働くものとみなし、空気抵抗のみを考慮した。

表 6 イオンスラスター (Astrium 製 RIT-10)

サイズ	φ160×160[mm]
質量	1.8[kg]
消費電力	580[W]
定格推力	41[mN]
定格比推力	3300[sec]
設計寿命	>20,000[h]

### 3.5 姿勢・高度決定系

海面高度を 10cm のオーダで測定するために、衛星自身の位置情報を数 cm オーダで決定する必要がある。衛星の小型化と精密な姿勢決定を両立するため、姿勢決定には小型スタートラッカと光ファイバジャイロを使用する。また、磁気トルカによる姿勢制御のために磁気センサを搭載する。

衛星の軌道を測定するために GPS レシーバーを搭載し、特に高度決定精度を向上させるためにレーザーリフレクタを搭載する。レーザーリフレクタは ALOS や Jason-1 に搭載したものと同程度のものを搭載する(表 7)。レーザーリフレクタを用いたレーザ測距と、S バンド帯を用いたレンジ&レンジレート計測 (R&RR 計測) を行い、高度決定精度 3cm を達成する。

表 7 レーザリフレクタ

サイズ	φ15×10[cm]
質量	1[kg]
高度分解能	3[cm]
測距可能条件	Elevation >16[deg]

### 3.6 通信系

#### 3.6.1 システム概要

本衛星はフェーズによって 2 つの通信方法を切り替える。

##### 3.6.1.1 定常観測フェーズ

定常観測フェーズにおいては、衛星内に蓄積したデータを定期的にダウンリンクする。通信方式には S-Band を用いて、地上局と直接通信する。また、観測フェーズにかかわらず、データダウンリンク回線とは別回線で R&RR 計測のための測距信号を送受信している。主たる地上局としては、勝浦局を用いるものとする(図 9、表 8)。

#### 3.6.1.2 津波観測フェーズ

津波観測フェーズにおいては、地上局と直接通信した場合、不可視領域が大きく、リアルタイム津波観測の要求を満足できない。そこで、地上局 (JAXA) に加えて、データ中継衛星を用いたダウンリンクも行う(図 10)。データ中継衛星は、現在 JAXA が ALOS 運用のために提携している NASA の TDRS (Tracking and Data Relay Satellite) の SSA (S-Band Single Access) を利用するものとする。地上局としては、ALOS と同様にホワイトサウンズ試験施設の地上局でダウンリンクし、インターネット経由でデータを取得する。

津波観測フェーズにおける、地震発生直後からのシーケンスは以下のようにになっている。

①各地上局は、最寄の TEOS に震源地の情報と津波観測フェーズへのフェーズ移行コマンドのアップリンクを行う(図 10)。

②津波観測フェーズへ移行した衛星は、地震発生源付近で津波観測を行う(図 11)。

③津波を観測した衛星は、最寄の TDRS または地上局 (JAXA 追跡ネットワーク) に観測データをダウンリンクを行う(図 11)。津波観測位置が TDRS の直下の場合には、観測しながらダウンリンクを行い、そうでない場合は観測後に衛星を TDRS または地上局方向へ指向させる。TDRS は太平洋上と大西洋上の広域をカバーしており、洋上で観測直後にダウンリンクを開始することが可能である。

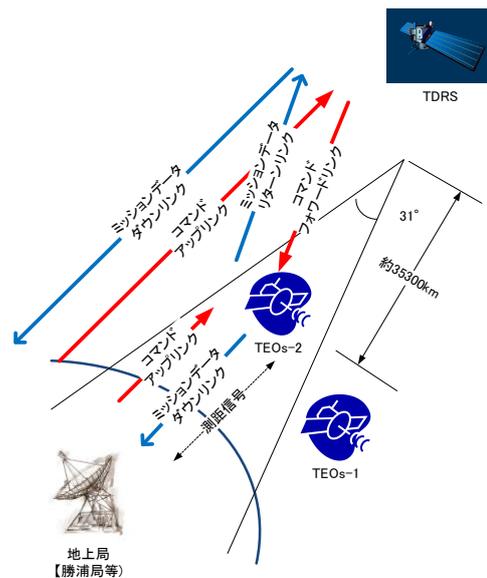


図 9 通信回線

表 8 通信回線

回線	周波数
コマンドアップリンク	2100.25 [MHz]
テレメトリダウンリンク	2250.25 [MHz]
ミッションデータ フォワードリンク	2020.00 [MHz]
ミッションデータ リターンリンク	2200.00 [MHz]
測距信号アップリンク	2050.06 [MHz]
測距信号ダウンリンク	2200.17 [MHz]

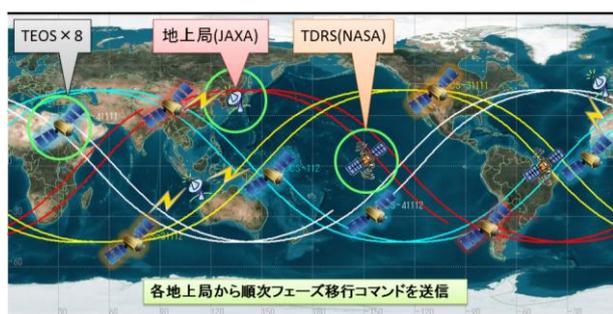


図 10 津波観測シーケンス(1)

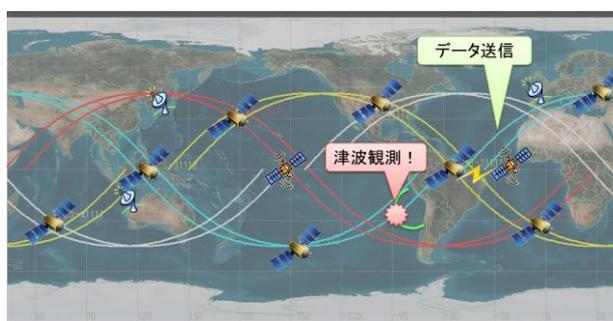


図 11 津波観測シーケンス(2)-(3)

### 3.6.2 送信データ容量

観測したデータの送信に必要な情報は、サンプリング番号、観測時刻、衛星の位置、衛星の姿勢、海面高度データである。各情報をセンサの分解能や測定時間を考慮して見積ると、全体で 320bps 程度となる。定常観測フェーズにおいて測定時間 50min とすると、データ量は 120KB となり、これは 10kbps で 100s あればダウンリンクできるデータ量である。また、津波観測フェーズにおいても同様に測定時間を 50min とすると、データ量・データ送信速度は定常観測フェーズと同等となる。TDRS のリターンリンクの最高データ送信速度が 6Mbps であることを考えれば、これは十分実現可能である。

### 3.6.3 データ中継衛星

NASA の TDRSS は地上全体の可視範囲が約 80%~100% であり、常に津波観測命令を発信することが可能である。また、フォワードリンクでは最大 300kbps、リターンリンクでは 6Mbps でのデータ中継が可能である。ミッションにかかるデータの必要通信速度が 10kbps であることを考えると、常に最低 1 機の人工衛星がデータ中継衛星の視野範囲にあり、リアルタイムダウンリンクが可能である(図 9)。

### 3.6.4 通信機及びアンテナ

データ中継衛星との通信には S-Band 帯を用い、1.2m のパラボラアンテナを用いる。

一方、地上局との通信も S-Band 帯を用い、アンテナには直径 90mm 程度の小型パッチアンテナを用いる。

### 3.7 地上系

JAXA の勝浦局を主たる地上局として利用する。加えて、JAXA の追跡ネットワーク [5] をデータ通信と R&RR 計測のために利用し、NASA の TDRSS (図 12) を津波観測フェーズにおけるデータ通信のために利用する。また、ILRS(International Laser Range Station) (図 13) を利用して世界各地でレーザ測距を行う。

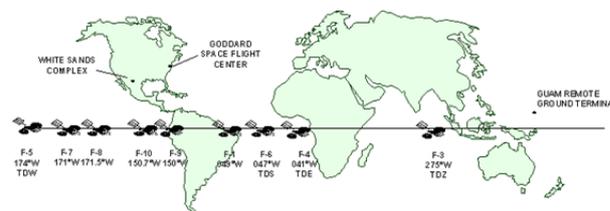


図 12 TDRSS のシステム構成 [6]

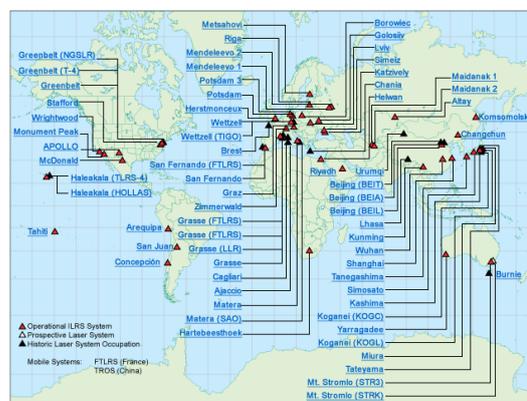


図 13 世界のレーザ測距局ネットワーク (ILRS 加盟局) [7]

### 3.8 電源系

電力は太陽電池及びバッテリーから供給する。設計寿命 10 年を考慮して DOD (Depth of Discharge) を 20% までとし、平均消費電力 102W (表 9) とすると容量は 720Wh、ニッケル水素バッテリーでは質量は 7kg となる。イオンスラスタを使用する際には最大 700W 近く電力を消費するが、周回当たりの使用時間は 90s と短いため、平均消費電力の 102W をまかなえるよう電力設計をする。

太陽電池は、セル効率 27.5% のものを用い、40% マージンを取って 190W 発電するような設計とする。これをもとに EOL で計算すると太陽電池パドルの面積は 3m<sup>2</sup> 必要である。

### 3.9 構造系

表 9 に各サブシステムの構成要素一覧を示す。これより、衛星合計質量は約 130kg となる。衛星本体は直径 1.2m、高さ 0.5m の円柱状で、展開可能な 2 枚の太陽電池パドル (太陽指向面積 0.5m × 3m) を持つ。

表 9 コンポーネント一覧

構成要素		質量小計 [kg]	配分 [%]	電力 [W]
ミッション	高度計	25.0	18.8	70
構造系	衛星主構造	25.0	18.8	-
	太陽電池パドル	10.0	7.5	-
	パドル展開機構	5.0	3.8	-
	熱制御系	熱制御材料	5.0	3.8
姿勢制御系	RW	7.5	8.1	3
	MTQ	1.5		
	イオンスラスタ	1.8		
姿勢決定系	恒星センサ	1.0	5.4	7
	GPSレシーバ	0.4		
	レーザーフレクタ	1.0		
	光ファイバジャイロ	0.2		
	磁気センサ	0.1		
	計算機	4.5		
通信系	通信機	10.0	21.1	15
	ダイプレクサ	8.0		
	アンテナ	10.0		
電源系	バッテリー	7.0	5.3	4
バス系	計算機	10.0	7.5	2
質量合計		133.0	電力合計	102 (max.682)

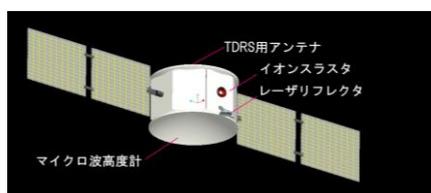
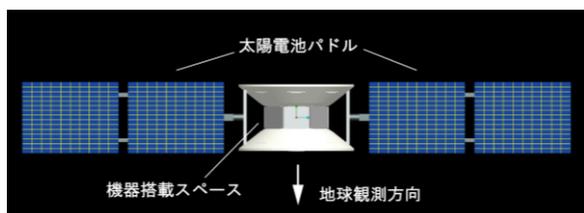


図 14 衛星外観

### 3.10 熱制御系

衛星本体は外側に白色ペイント (吸収率 0.4、放射率 0.8) を施す。外部から熱入力する面積を 1m<sup>2</sup> とすると、太陽放射による入力が 528W、地球赤外放射による入力が 27W、アルベドによる入力が 235W となるので、外部からの熱入力は合計で 790W となる。また、衛星内部の発熱は単純に消費電力と考えると 102W である。衛星の放熱面を 3m<sup>2</sup> として、熱平衡方程式を立て時間による変化の項を無視すると、衛星の平衡温度は約 18°C となり、衛星を適切な温度に保てていることが確認できる。

### 4. 結言

我々は、100kg 級の衛星 8 機のコンステレーションにより津波をリアルタイムに観測するシステムを提案した。従来の地球観測衛星とは異なり、リアルタイム津波観測に特化した機体・軌道配置により、確実にかつ効率よく津波を観測できることを示した。本提案により、空からの目となる人工衛星の有効利用が進むことを願ってやまない。

### 参考文献

- [1] 気象庁ホームページ  
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/known/tsunami/generation.html>
- [2] NOAA Center for Tsunami Research  
[http://www.noaanews.noaa.gov/stories2009/20090715\\_tsunami.html](http://www.noaanews.noaa.gov/stories2009/20090715_tsunami.html)
- [3] 大垣圭一・安間友輔・越村俊一・今村文彦 (2006)、リアルタイム観測情報を利用した津波予報の段階的修正法、海岸工学論文集、第 53 巻、p216-220
- [4] 今村文彦 (2000)、遠地津波の数値シミュレーションの開発と実用化 -リアルタイム数値予報に向けて-、自然災害科学 J. JSNDS 19-3、291p
- [5] JAXA 追跡ネットワーク  
<http://track.sfo.jaxa.jp/>
- [6] NASA TDRSS  
<https://www.spacecomm.nasa.gov/spacecomm/programs/tdrss/default.cfm>
- [7] ILRS  
<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>