

## 6.4. 高精度観測衛星のミッション達成のための 地上指向精度評価試験技術について

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

高原 修 氏



第14回試験技術ワークショップ 2016-10-20  
「Test Effectiveness ～Best practice makes  
the next success～」  
@筑波宇宙センター

## 高精度観測衛星のミッション達成のための 地上指向精度評価試験技術について

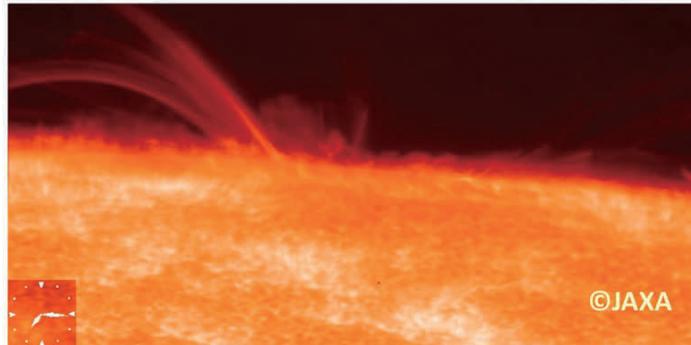
三菱電機株式会社 先端技術総合研究所  
高原 修

© Mitsubishi Electric Corporation

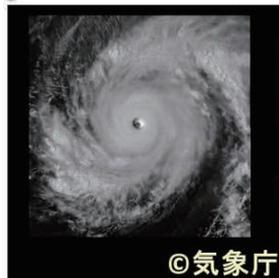


### 1. 高精度観測衛星で取得された画像

#### ■ 太陽観測衛星「ひので」(可視光磁場望遠鏡)



#### ■ 気象衛星ひまわり8号



2

© Mitsubishi Electric Corporation



## 2.高精度観測衛星の指向安定度要求(1)

### ■超高精度観測衛星の指向安定度要求

[典型的な要求値のオーダー]

▶天文衛星: <math>0.1 \mu\text{rad}</math> (1-100 s間)



Fig.A. ひので

▶地球観測衛星: <math>0.1 \mu\text{rad}</math> (0.1-1 ms間)

(1 pix=0.6m、高度h=600km、速度Vel=7km/s のとき、  
GSD(Ground Sample Distance)の見込角=1  $\mu\text{rad}$ 、  
GSDの通過時間~0.1ms)

▶静止気象衛星: <math>1 \mu\text{rad}</math> (0.1 ms間)

(GSD=0.5km、走査速度=1 deg/s~700km/sのとき、  
GSDの見込角=10  $\mu\text{rad}$ 、GSDの通過時間~0.1ms)



Fig.B. ひまわり8号

© Mitsubishi Electric Corporation



## 2.高精度観測衛星の指向安定度要求(2)

### ■指向安定度要求(典型値)の周波数領域への換算

(正弦波状定常誤差成分に対して、1成分あたり要求の1/10を配分する場合)

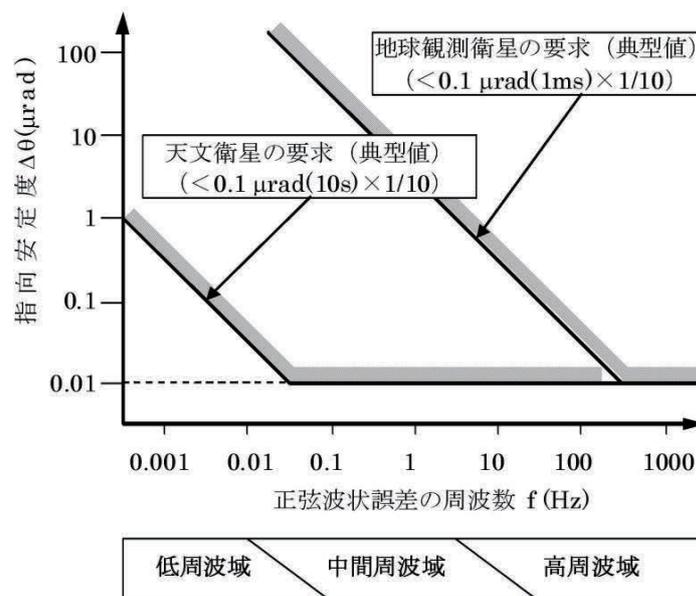


Fig.指向安定度要求

4

© Mitsubishi Electric Corporation



## 2.高精度観測衛星の指向安定度要求(3)

### ■周波数の定義

- 低周波域(DC~0.01-0.1Hz程度)  
衛星全体がほぼ剛とみなせる周波数域  
姿勢制御系の帯域とも大体一致
  
- 中間周波域(0.01-0.1Hz~10Hz程度)  
太陽電池パドル等の“柔軟付属物”の構造共振はあるが、  
衛星本体やミッション機器自体の構造はまだ剛な領域
  
- 高周波域(>10Hz程度)  
衛星本体やミッション機器の構造の内部の共振が生じる領域

5

© Mitsubishi Electric Corporation



## 3.高精度観測衛星のための技術課題(1)

### ■ 低・中間周波域の課題

- 要求される指向安定度が、姿勢制御系(ACS)により実現可能な姿勢安定度を超える可能性有
- 測定限界以下の極めて小さい擾乱でも許容できない指向誤差を生じる可能性有
- 高周波擾乱の姿勢センサを介した低周波への回り込み

### ■ 中間周波域の課題

- 姿勢制御系(ACS)は、過渡擾乱や低周波定常擾乱を抑制するのに、制御帯域が不足しがち

### ■ 高周波域の課題

- ACSコンポーネントをはじめとする様々な衛星内部搭載機器から発生する振動(擾乱)による指向誤差発生  
⇒微小擾乱問題

6

© Mitsubishi Electric Corporation



### 3.高精度観測衛星のための技術課題(2)

#### ■微小擾乱(Microvibration)問題※

※以降、微小擾乱は単に擾乱と呼ぶ

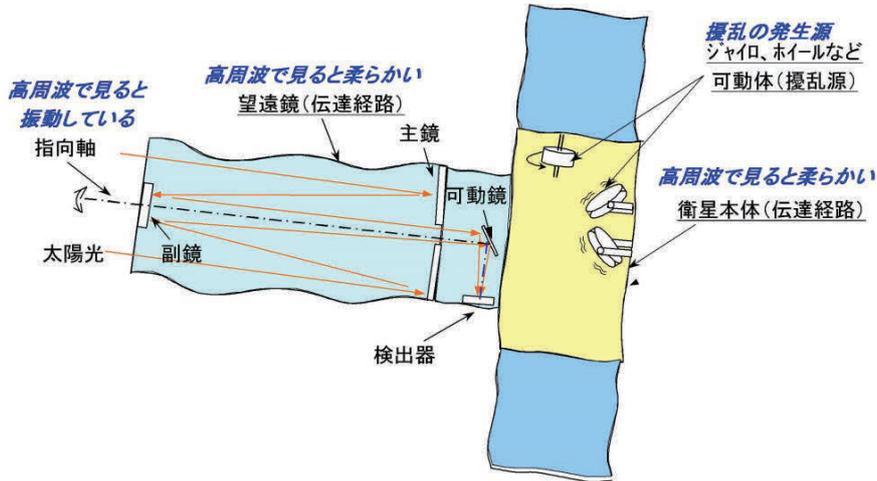
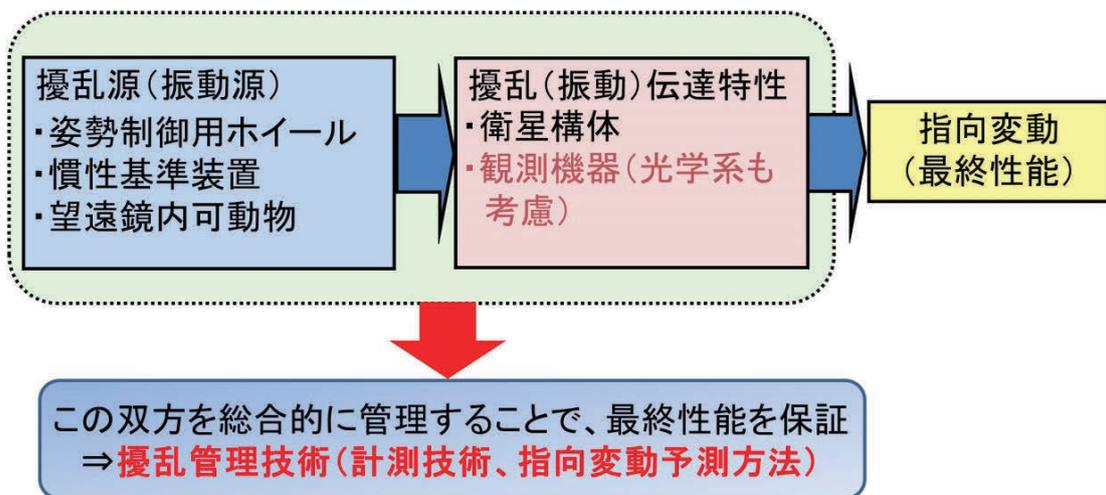


Fig.高周波(約10Hz以上)の擾乱から見た衛星構造



### 4.擾乱管理技術(1)

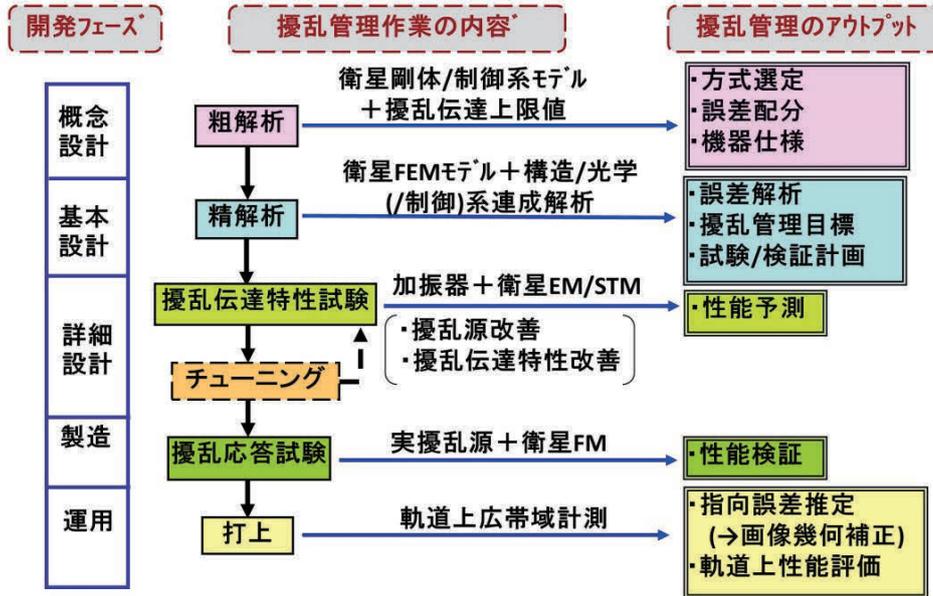
#### ■擾乱管理とは





## 4. 擾乱管理技術(2)

### ■ 擾乱管理技術のフロー



9

© Mitsubishi Electric Corporation



## 4. 擾乱管理技術(3)

### ■ 擾乱評価技術方法

軌道上性能保証のため、打上前に指向安定度評価が必要  
評価方法:

a) 有限要素法(FEM)による解析

高精度な指向誤差評価が困難

(理由) 高周波数帯域での固有振動数/固有モードが不正確  
構造減衰は推定値

b) 実測



**最終性能を保証するには、実測が唯一の評価方法**

10

© Mitsubishi Electric Corporation



## 5. 擾乱試験手法(1)

### ■ 擾乱管理の核となる試験技術(その1)

#### 【指向誤差評価方法】

➤ 直接法…… 実際に擾乱源を駆動し、指向安定度を計測する方法

測定は、装置がそろそろ開発最終段階のみ適用可

➤ 間接法…… 擾乱伝達関数(単位加振力/トルクに対する指向誤差)と擾乱源モデルもしくは、実測擾乱データを用いて、指向安定度を予測する方法

測定は、衛星開発の初期段階から衛星構造(SM)モデル等を用いて適用可能



## 5. 擾乱試験手法(2)

### ■ 擾乱管理の核となる試験技術(その2)

#### 【指向軸(応答)評価方法】

方法	光学計測法	慣性計測法
試験コンフィギュレーション		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>望遠鏡が光学系として完成している必要有、初期段階での試験困難</li> <li>光源の振動と望遠鏡内の振動の分離が困難</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>望遠鏡はフライト品と構造的に等価な構造モデルを用いて早期に試験可能</li> <li>光源を使用しないので、望遠鏡自体の振動の影響だけを実測可能</li> </ul>



## 5. 擾乱試験手法(3)

### ■慣性計測方法の原理

#### 慣性計測の指向軸変動算出式

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \end{bmatrix} = \sum_j T_j \cdot \begin{bmatrix} \delta_{jx} \\ \delta_{jy} \end{bmatrix} + \sum_j R_j \cdot \begin{bmatrix} \phi_{jx} \\ \phi_{jy} \end{bmatrix}$$

$\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$  : x軸、y軸周りの光学望遠鏡の指向軸変動、

$T_j, R_j$  : 光学要素の並進変位・回転角に対する指向軸変動の換算係数

$\delta_{jx}, \delta_{jy}$  : j番目の光学要素の慣性空間に対する並進変位

$\phi_{jx}, \phi_{jy}$  : j番目の光学要素の慣性空間に対する回転変位

13

© Mitsubishi Electric Corporation



## 6. 当社における微小擾乱問題への取組み

	2000	2005	2010	2015	2020
低軌道周回衛星	ひので(SOLAR-B)	いぶき(GOSAT)		GOSAT2 先進光学衛星	
静止衛星		きく8号(ETS-VIII) 気象衛星ひまわり7号(MTSAT-2)		気象衛星ひまわり8号/9号	
研究開発		JAXA殿業務受託「衛星模型を用いた擾乱計測方法の検討」	JAXA殿業務受託「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」		
		・伝達特性評価/擾乱源評価 ・光学計測による指向誤差評価 ・軌道上データ評価	・擾乱による慣性センサへの評価 ・伝達特性評価/擾乱源評価 ・光学計測を用いたTANSO観測精度への影響評価		
		・伝達特性評価/擾乱源評価 ・指向誤差予測精度の向上検討	・伝達特性評価/擾乱源評価 ・光学計測による指向誤差評価法の精度向上技術の検証 ・広帯域姿勢決定精度評価		

14

© Mitsubishi Electric Corporation



## 7.太陽観測衛星「ひので」における取組み(1)

### ■ 擾乱試験(間接法/慣性計測)

#### ➤ 試験コンフィギュレーション

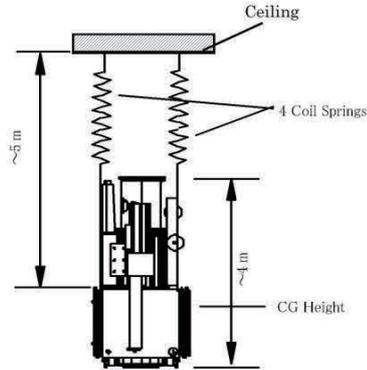


Fig.A. 試験コンフィギュレーション (概念図)

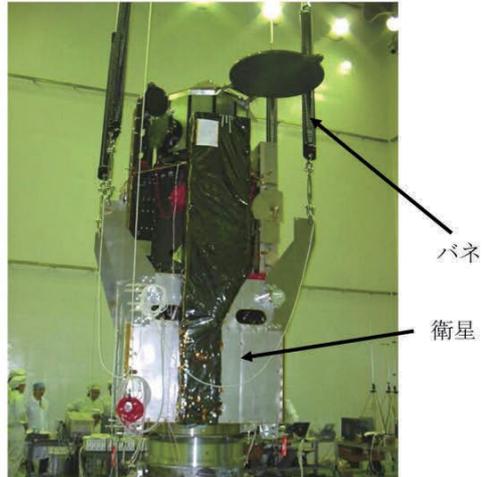


Fig.B. 試験コンフィギュレーション (写真、於:三菱電機鎌倉製作所)

バネで衛星全体を天井から吊る理由:

- 軌道上の境界条件(両端自由)の模擬
- 試験棟建屋からの振動の絶縁  
(バネで衛星を吊り下げた状態での固有振動数:  
縦・横・振りすべて0.5Hz以下)

15

© Mitsubishi Electric Corporation



## 7.太陽観測衛星「ひので」における取組み(2)

### ■ 擾乱試験(間接法/慣性計測)

#### ➤ センサ配置

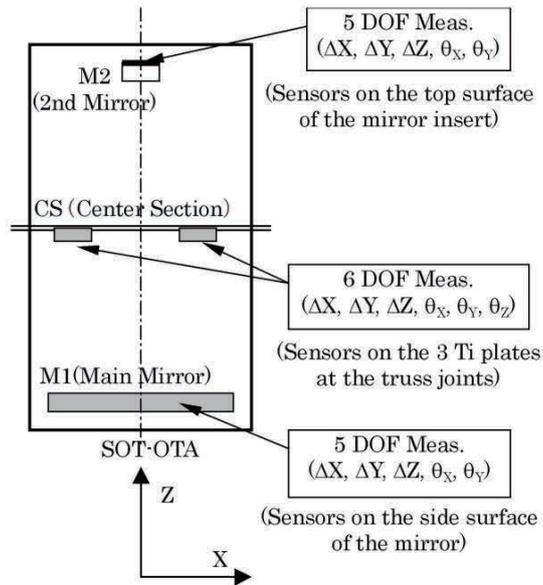
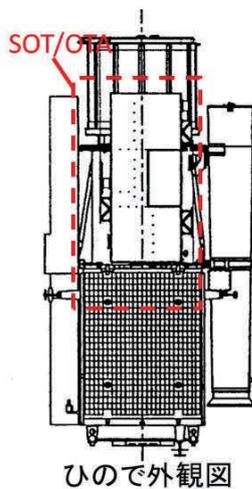


Fig. センサ配置(OTA)

16

© Mitsubishi Electric Corporation



## 7. 太陽観測衛星「ひので」における取組み(3)

### ■ 擾乱伝達関数(擾乱源→指向軸変動)の測定結果(間接法/慣性計測) (IRU-B1搭載位置のX力加振)

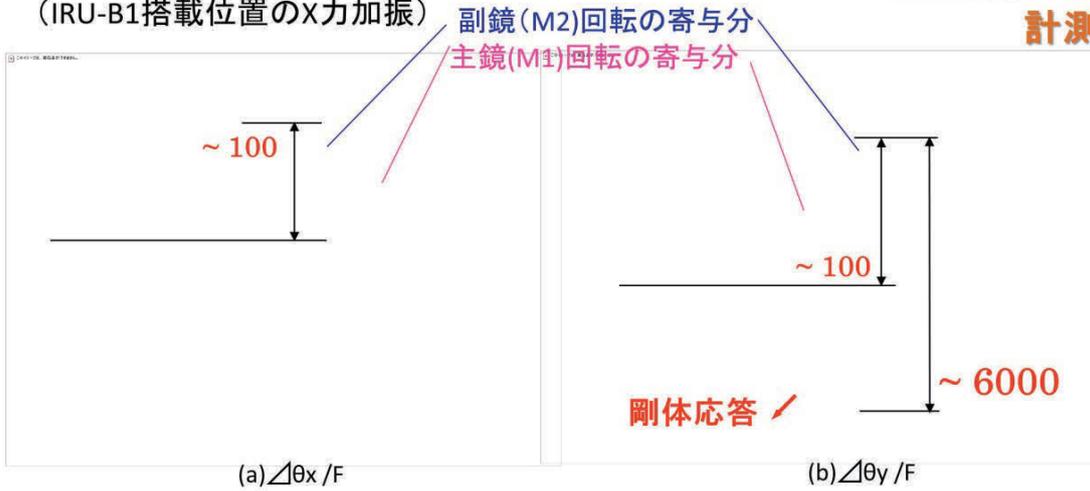


Fig. 擾乱伝達率

- 高周波域では、指向変動は**仮想剛体応答の数千倍**になりうる！  
⇒ **指向と姿勢は全く異なる**
- 擾乱源だけでなく、指向誤差への**擾乱伝達関数も重要**

17

© Mitsubishi Electric Corporation



## 7. 太陽観測衛星「ひので」における取組み(4)

### ■ 擾乱試験(直接法/光学計測)

#### ➤ 試験コンフィギュレーション

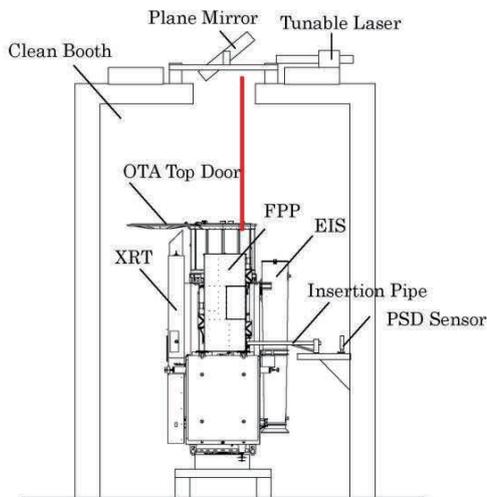


Fig.A. 試験コンフィギュレーション (概念図)

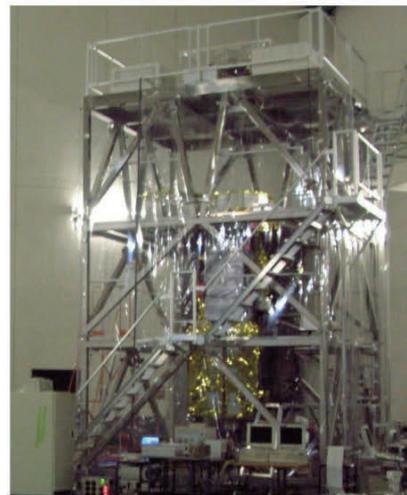


Fig.B. 試験コンフィギュレーション (写真、於: ISAS)

© Mitsubishi Electric Corporation



## 7. 太陽観測衛星「ひので」における取組み(5)

### ■ 擾乱試験(直接法/光学計測)

#### ➤ 光源と光学計測系センサ配置

##### ☆ 光源

- ・チューナブルレーザー
- 設置位置:クリーンブース天井
- レーザー光を平行光化

##### ☆ 光学計測用センサ

- ・Correlation Tracker(CT)-CCD
- 設置位置:FPP内部
- Tip-Tilt Mirror(TTM)制御用  
誤差信号を出力
- ・Position Sensitive Detector(PSD)
- 設置位置:OTA-FPP間
- レーザー光を分岐して、計測

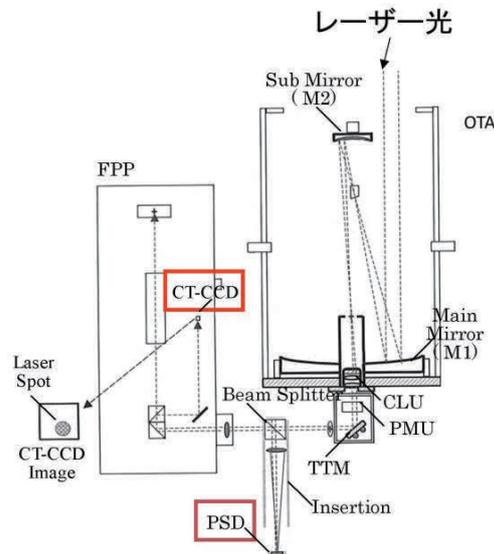


Fig. 光学系概念図

© Mitsubishi Electric Corporation



## 7. 太陽観測衛星「ひので」における取組み(6)

### ■ 軌道上実績と地上試験による予測との比較(直接法/光学計測)

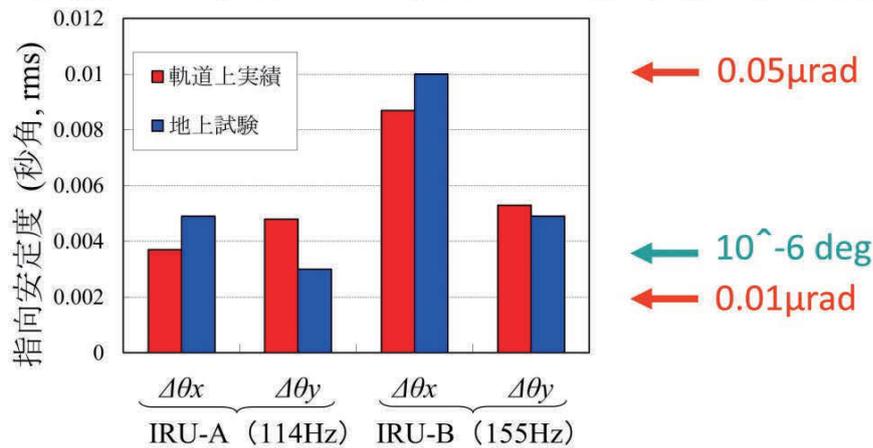


Fig. 指向安定度評価(地上VS軌道上)

➤ 地上試験の精度: 百万分の1度以下を実現できていたことがわかる。  
(軌道上実績と地上試験の差  $< 0.002 \text{ arcsec} \approx 0.6 \times 10^{-6} \text{ deg}$ )

但し、「ひので」の開発では、慣性計測方法の精度について十分な検証が行われていない。

20

© Mitsubishi Electric Corporation



## 8. 「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」※1における取組み(1)

※1 JAXA 殿業務委託にて実施

### ■ 慣性計測による指向安定度評価の妥当性検証 (直接法/光学計測/慣性計測)

光学計測と慣性計測による指向安定度評価結果の比較により、慣性計測の妥当性を検証する

そこで、

- ・観測センサを模擬した望遠鏡を、含む光学計測サブシステムを製作
- ・光学計測サブシステムを用いて、微小擾乱試験を実施し、その評価から慣性計測の妥当性を検証

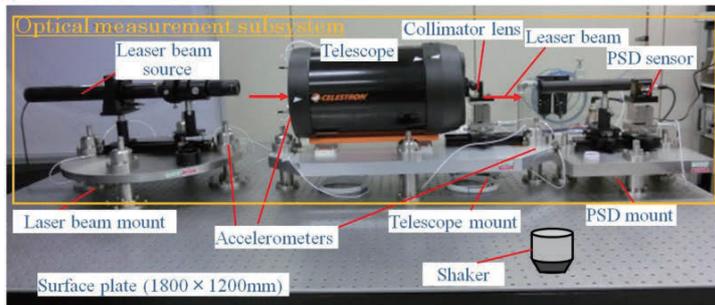
21

© Mitsubishi Electric Corporation



## 8. 「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」における取組み(2)

### ■ 光学計測サブシステム



光学系分解能 =  $4.2 \times 10^{-2} \mu\text{rad}$

Fig. A: 光学計測サブシステム

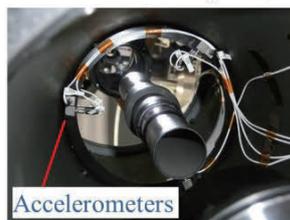


Fig. B: 1次鏡周りの慣性センサ(加速度センサ)配置

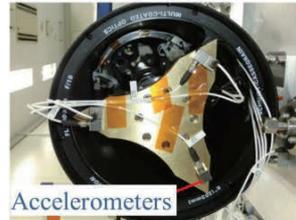


Fig. C: 2次鏡周りの慣性センサ(加速度センサ)配置

➡ 同じ光学系で光学計測と慣性計測を同時に計測可能な測定系を実現

22

© Mitsubishi Electric Corporation



## 8. 「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」における取組み(3)

### ■ 慣性センサとその配置

#### ● 慣性センサ(加速度センサ)の仕様

- 感度 : 1V/G
- サイズ : < 10mm角
- 質量 : < 10g

#### ● 慣性センサの配置

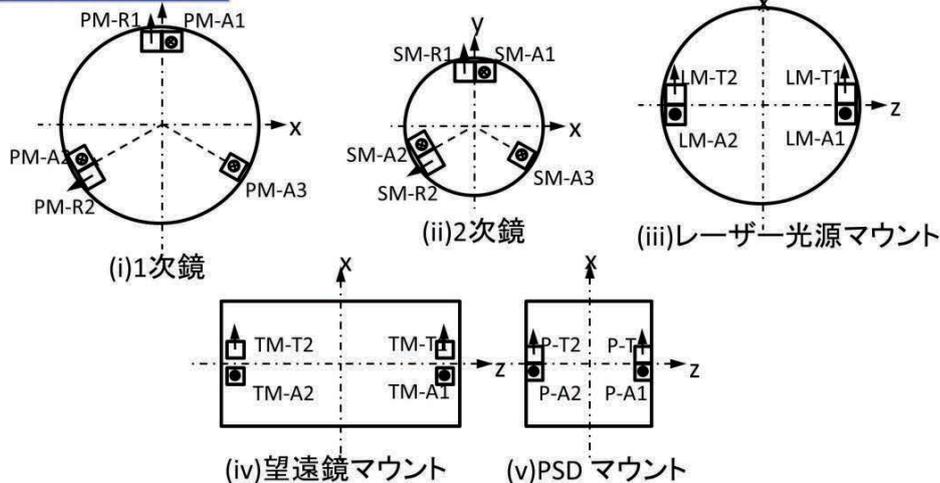


Fig. B : 慣性センサ(加速度センサ)の配置



333B52

Fig. A: 加速度センサ外観

23

© Mitsubishi Electric Corporation



## 8. 「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」における取組み(4)

### ■ 試験方法(衛星システム擾乱試験)

#### ➤ 試験コンフィギュレーション:

- 光学計測サブシステムを衛星バス※1上に設置
- ※1三菱電機静止衛星標準バスDS2000構造モデル

#### ➤ 試験条件:

- 擾乱源実機(リアクションホイールRWAおよびジャイロIRU)の個別駆動
- RWA: 3000~0rpmスイープ
- IRU: 定常動作

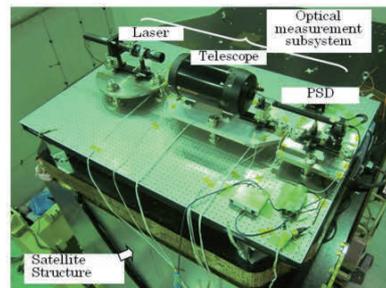


Fig. 衛星システム擾乱試験の試験コンフィギュレーション

### ■ 測定方法

- 微小擾乱により発生する光学計測サブシステムの指向軸変動を光学計測と慣性計測で、同時計測

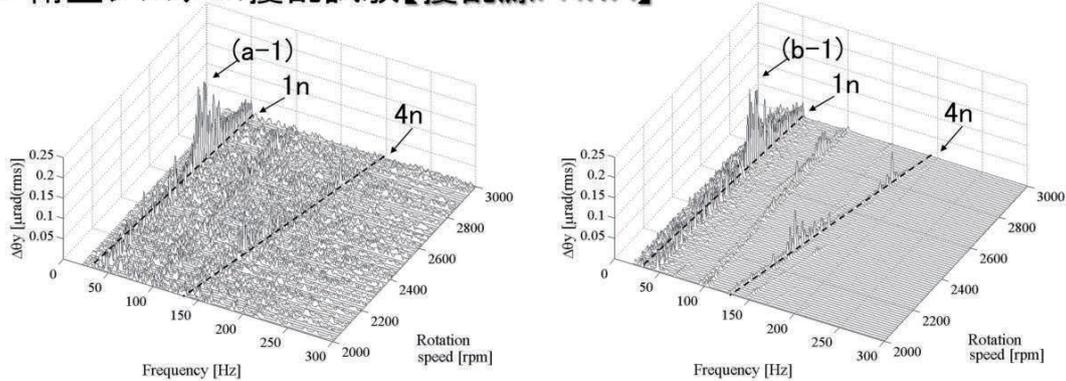
24

© Mitsubishi Electric Corporation



## 8. 「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」における取組み(5)

### ■ 衛星システム擾乱試験【擾乱源: RWA】



( i ) 光学計測

( ii ) 慣性計測

Fig. RWA駆動時の指向誤差 $\Delta\theta_y$ のWater fall図  
(RWA: 3000 → 2000 rpm)

- 最大の指向誤差をとる周波数とその振幅は、光学計測と慣性計測で一致。
- 擾乱源実機駆動において、慣性計測と光学計測の値は一致。

25

© Mitsubishi Electric Corporation



## 9. 結論

高精度観測衛星のミッション達成のための地上指向精度評価試験技術に関連し、以下を言及した。

- ・ミッション達成のためのキー技術の1つが、擾乱管理技術である。
- ・擾乱管理技術において核となる擾試験方法として、直接法/間接法の2種、指向軸変動計測技術として、光学計測法/慣性計測法の2種がある。
- ・「ひので」における地上試験データと軌道上データとの比較から試験評価方法(光学計測法)の妥当性を示した。
- ・「静止観測衛星システム擾乱低減技術の研究」において光学計測法と慣性計測法の2手法による指向安定度評価結果から慣性計測法による指向安定度評価の妥当性を示した。

26

© Mitsubishi Electric Corporation



## 質疑応答

### 質問者① キヤノン電子 丹羽様

素晴らしい内容をお話し頂きありがとうございました。質問が2点あります。1点目が13Pの慣性計測の指向軸変動算出式の大文字のTとRに関してですが、これは3次元のCADモデルの様なものから計算して出てくるのでしょうか。

### 発表者

これは光学解析ツールを使用して出しています。また、光学要素の形状配置等で決まるパラメータで、解析的に計算することも可能です。

### 質問者① キヤノン電子 丹羽様

慣性計測の手法で角速度センサをいくつか使用されているということですが、計測する位置が重要だと思います。今回、一次鏡周り、二次鏡周り、そこが一番揺れに対して感度があるということでしょうか。

### 発表者

そうです。この試験では基本的に市販の望遠鏡を使用しておりますので、構成としては主鏡、副鏡とあとは瞳の部分になってきますので、効くところというとその2つとなります。

### 質問者① キヤノン電子 丹羽様

実際のミッションでは光学系はいろいろな形態をとると思うのですが、ものによっては揺れそうなところを見極めてその揺れ方等を計測して、先程のモデル式を作らないと、うまく光学計測と合わないということもあり得るのでしょうか。

### 発表者

はい、その通りです。実際には観測センサによって光学要素の数や配置、感度も変わってくるので、それらを吟味したうえで通常は必要な光学要素にセンサを貼るような対応をしています。

質問者② 齋藤様

この慣性センサの感度が出ているのですが分解能はどのくらいで、応答周波数範囲はどのくらいのセンサなのでしょうか。

発表者

分解能は  $10^{-4}$ [G]で、周波数帯域は 3[kHz]までだったと思います。

質問者② 齋藤様

わかりました。周波数範囲と分解能がある程度ないと高精度に測れないのでは？と気になりました。

発表者

そういう意味ではこのセンサを選定した理由と致しまして、まず観測性能、分解能が十分あることと、重量が軽い、モードに影響を与えないという観点で世の中にある一番条件に適合するものを選定して試験を行っています。

質問者③ 株式会社エイ・イー・エス 三宅様

測定系についてですが、望遠鏡が設置してあるところにレーザと検出系も設置してあり、レーザにも検出系にも擾乱が入っているような気がするのですが、測定原理が今一つよく分かりませんでした。

発表者

すみません、説明が足りず申し訳ありません。ご指摘は正しく、振動は入ってきます。一応、1つ目の影響を排除するということで、レーザ光源に対しては簡単なアイソレーション機能を設けて下からの振動を受けないようにしています。検出系も同様の構成にしています。

光学系と関係ないところに加速度センサを配置していると思いますが、実際にはレーザの乗っている台であるとか Position Sensitive Detector が乗っている台が揺れるとそれも誤差に乗ってきますので、そこを分離できるように計測系を設けてその差分の影響も考慮して評価を行っております。