

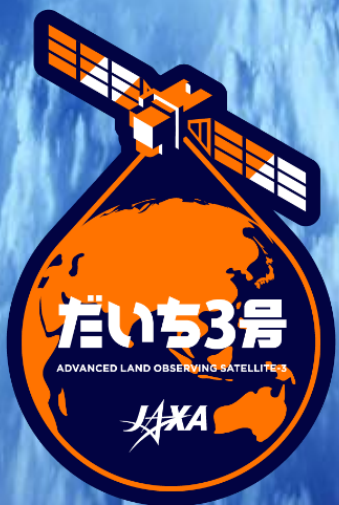
先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)搭載 「広域・高分解能センサ」の概要と周辺技術

宇宙航空研究開発機構 JAXA

第一宇宙技術部門 先進光学衛星プロジェクトチーム

度會 英教

第10回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ



1. はじめに(第一宇宙技術部門の紹介)
2. 地球観測衛星の撮像原理
3. 高分解能地球観測センサ(カメラ)の設計思想
4. 先進光学衛星「だいち3号」ALOS-3概要
5. ALOS-3搭載 広域・高分解能センサ
6. 周辺技術

講演者プロフィール

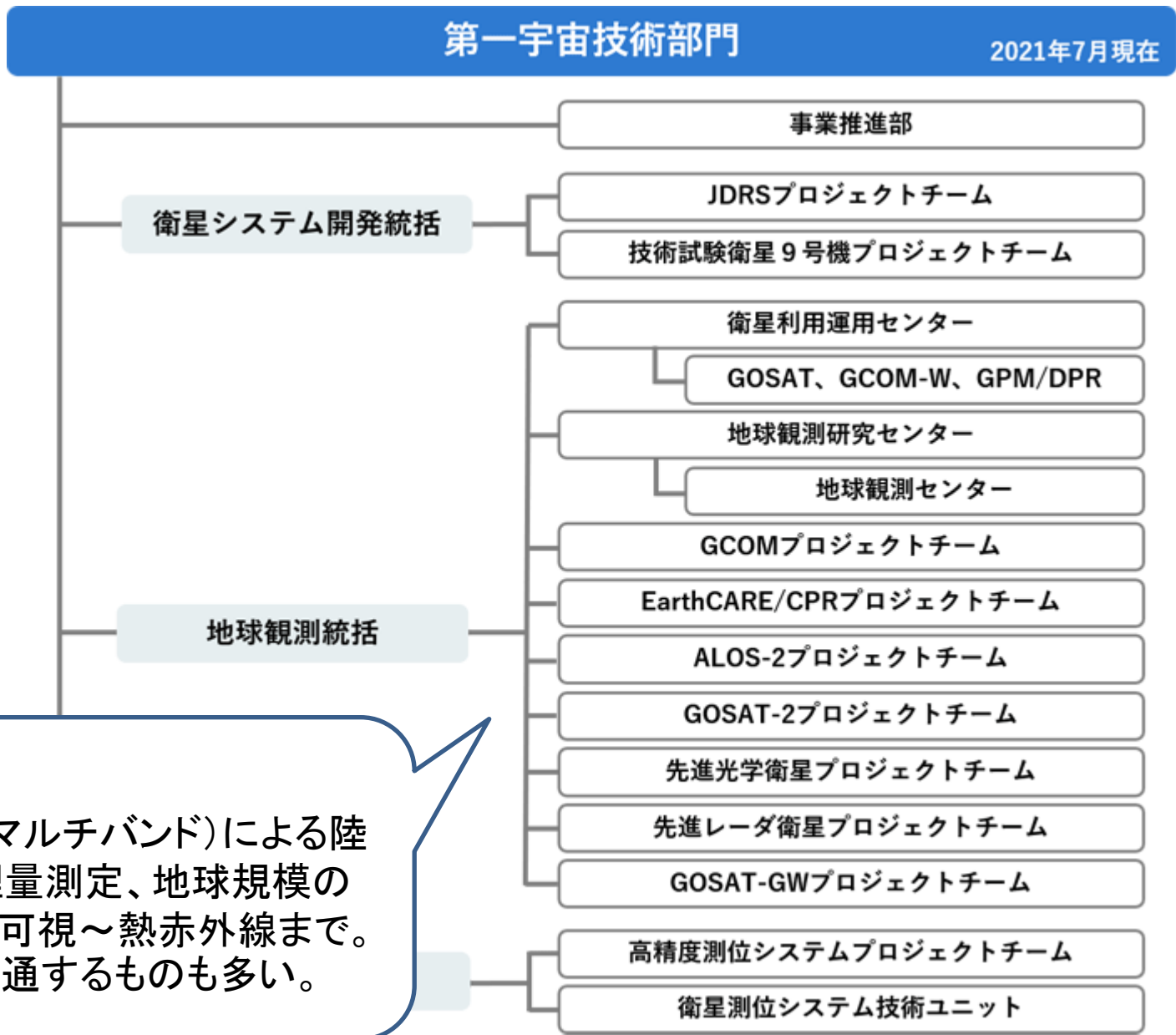
名古屋大学U研(赤外)出身。中間赤外線による超コンパクトHII領域の観測で1998年に学位。赤外線天文衛星「あかり」の開発に従事(1997~2001)。宇宙科学研究所COE研究員、日本学術振興会特別研究員PDを経て、2001年に宇宙開発事業団(当時)に入社。2006年に打上げられた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)搭載のパンクロマチック立体視センサ(PRISM)、高性能可視近赤外放射計2型(AVNIR-2)の開発を担当。

2016年より先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)プロジェクトチーム。広域・高分解能センサの開発、データ利用推進業務に従事。

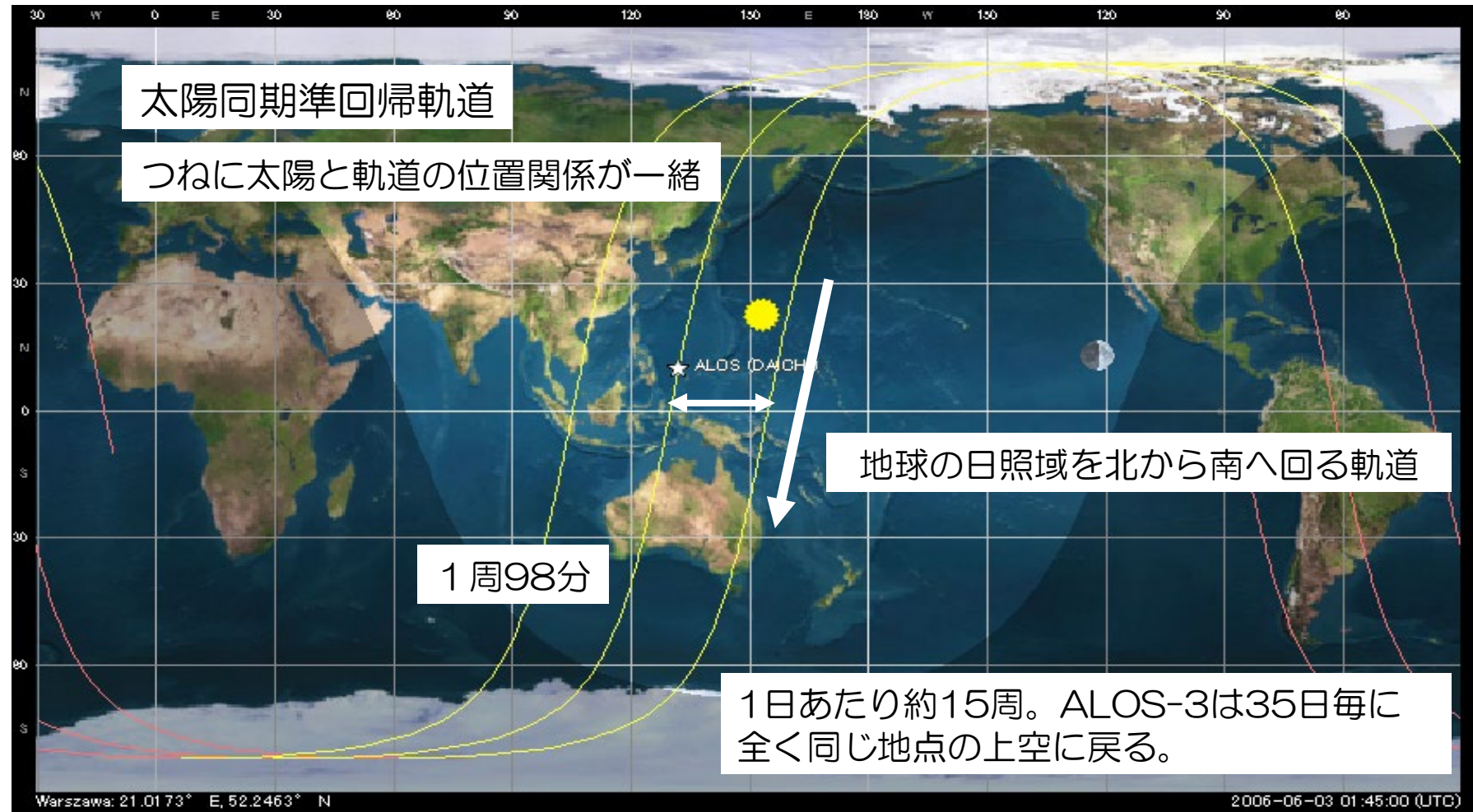
宇宙航空研究開発機構の 開発系組織

- 宇宙輸送技術部門(133)
- **第一宇宙技術部門(184)**
- 有人宇宙技術部門(142)
- 研究開発部門(263)
- 宇宙科学研究所(211)
- 航空技術部門(189)
- 宇宙探査イノベーションハブ(9)
- 国際宇宙探査センター(24)

地球観測衛星は「光学」と「レーダ」に大別される。
光学衛星は、低～高地上分解能撮像(パンクロ・マルチバンド)による陸域・海域の観測、分光による温室効果ガスの物理量測定、地球規模の気候変動のモニタなどを目的とする。観測波長は可視～熱赤外線まで。必要とする技術は可視・赤外スペース天文学と共通するものも多い。



2. 地球観測衛星の撮像原理



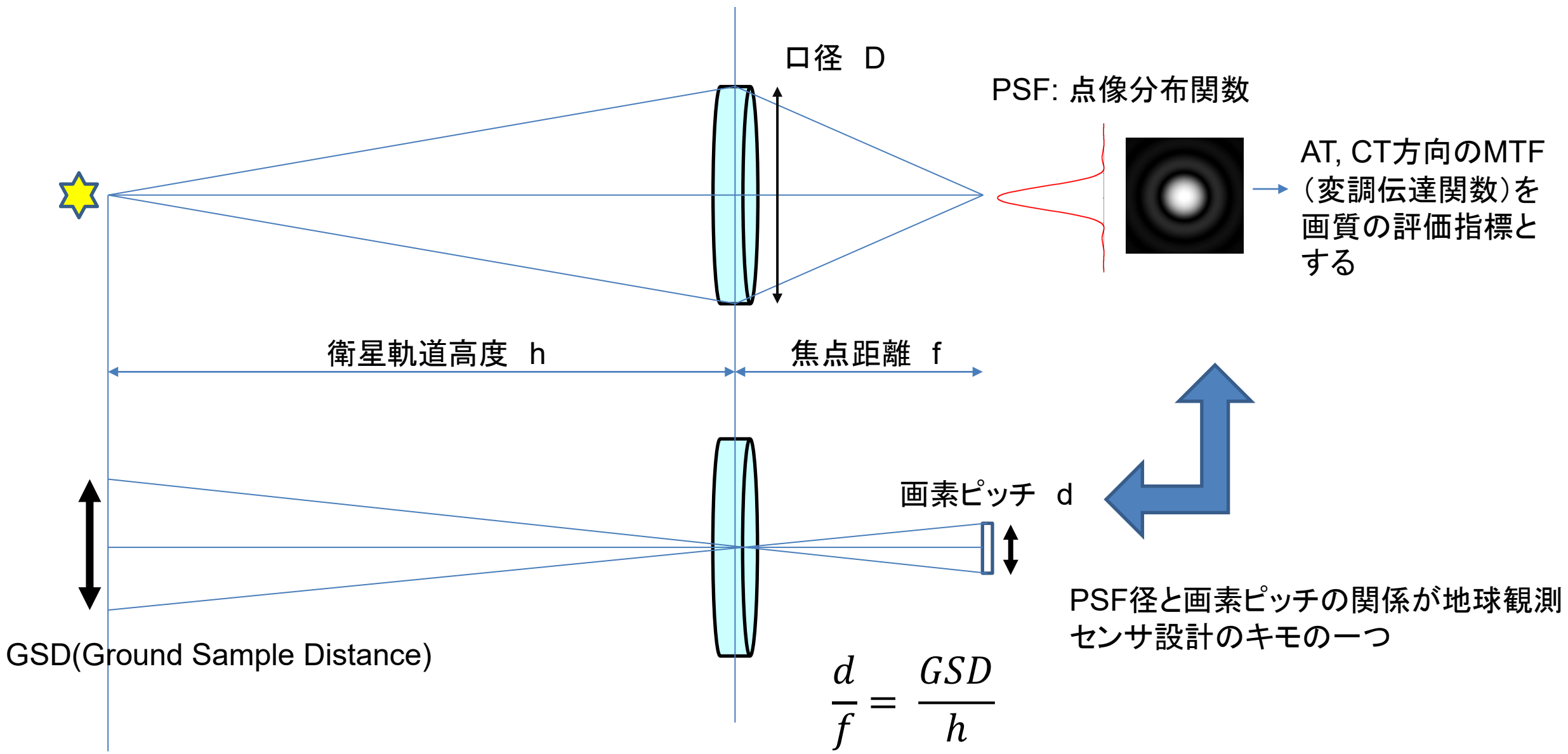
衛星の軌道周回運動に合わせ、リニア検出器で地表面をスキャンするプッシュブルーム撮像方式が基本。地上処理で2次元画像化(ただし近年、2次元検出器を用いる観測方式もあり)。

1ショットの露光時間が極めて短い(0.8m 地上分解能だとおよそ110 μ sec)。

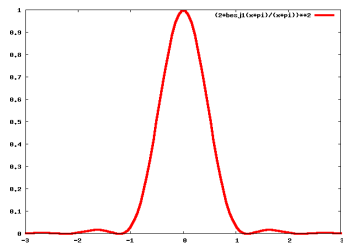
露光時間を稼ぐために、対地速度に合わせ、衛星進行方向(AT)に電荷を転送・加算できるTDI (Time Delay and Integration) 型CCD検出器を使用。

高周波擾乱が画質に影響。

3. 高分解能地球観測センサ(カメラ)の設計思想



3. 高分解能地球観測センサ(カメラ)の設計思想

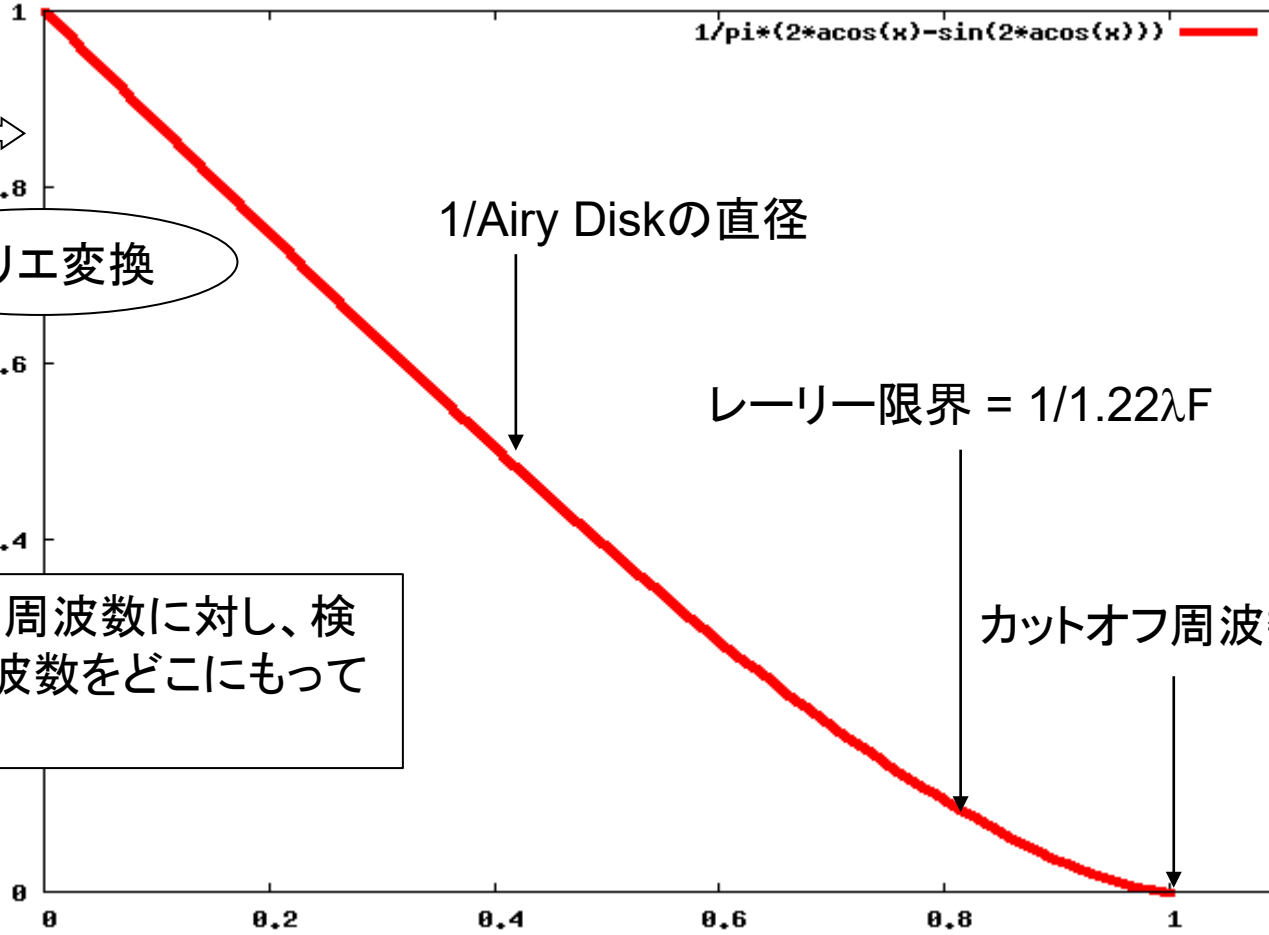


PSF

フーリエ変換

MTF

無収差レンズの理論的MTF

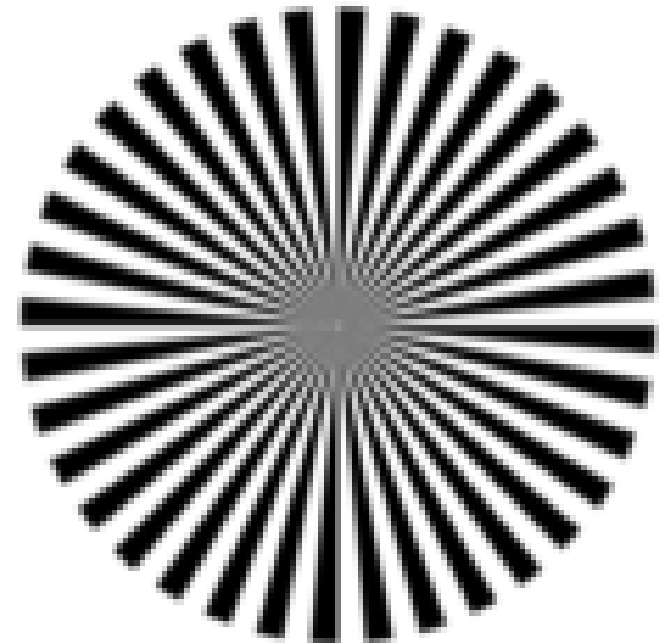
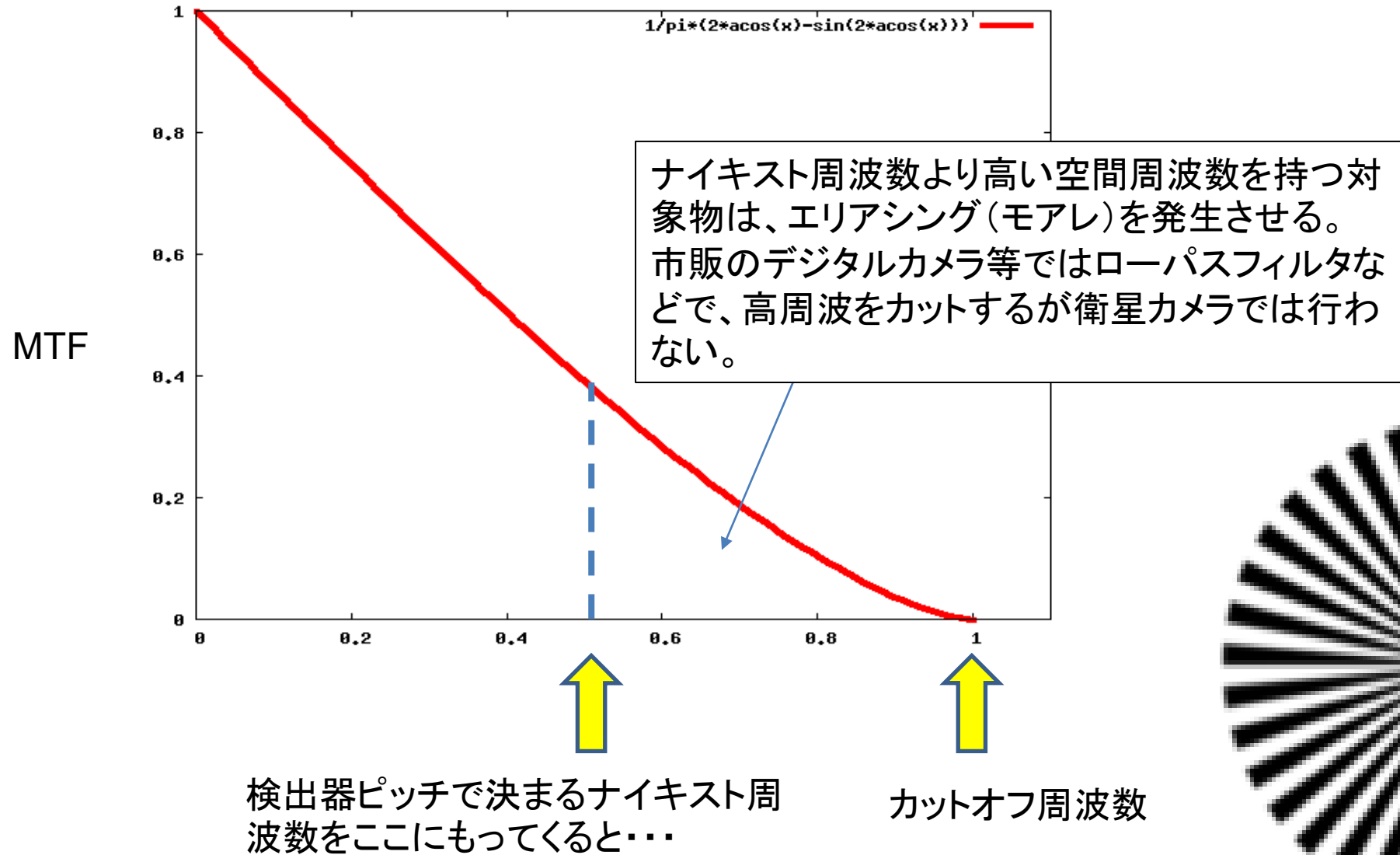


光学系を透過する空間周波数に対し、検出器のサンプリング周波数をどこにもってくるか。

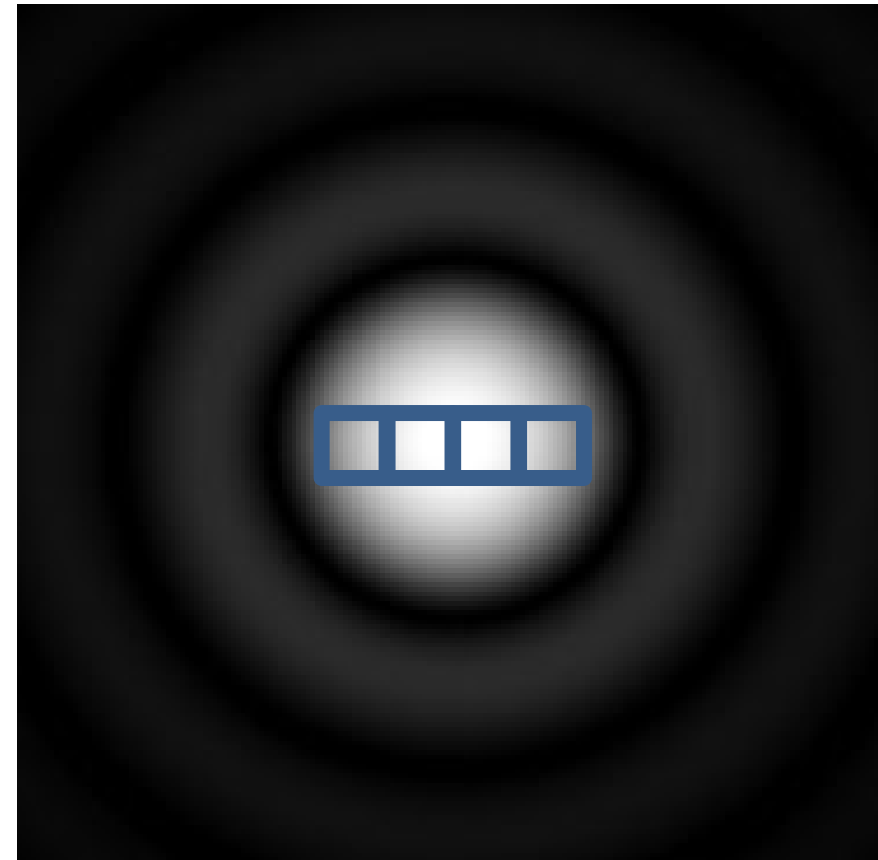
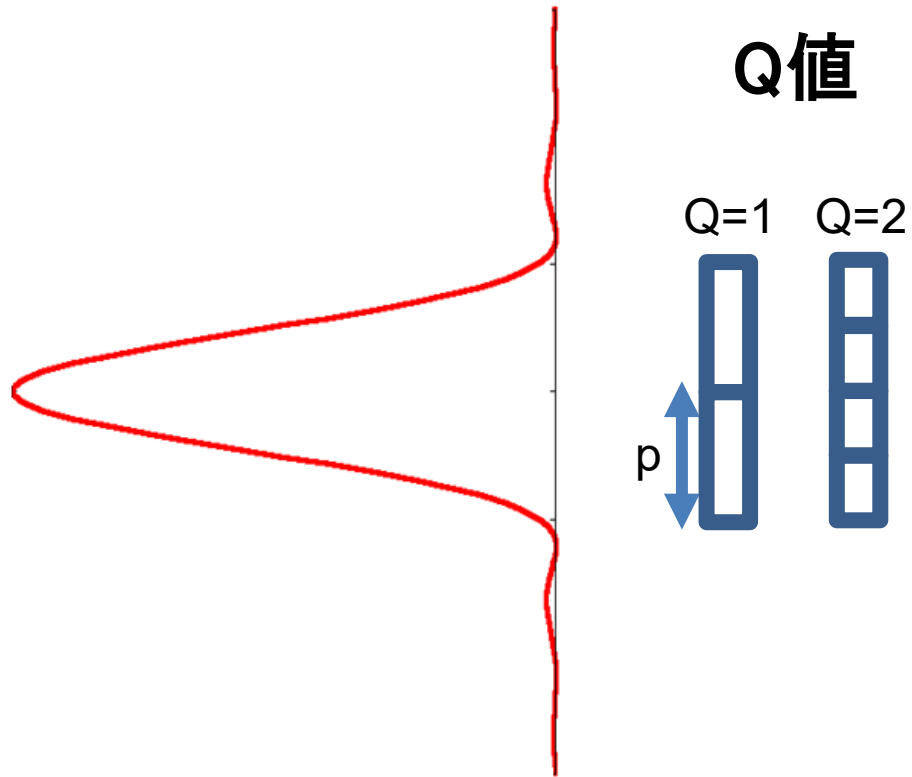
$$f_c = \frac{1}{\lambda F} = \frac{D}{\lambda f}$$

空間周波数(1/Fλ)

3. 高分解能地球観測センサ(カメラ)の設計思想



3. 高分解能地球観測センサ(カメラ)の設計思想



$$Q = \frac{\lambda F}{p}$$

λF とピクセルピッチの関係を示す指標。

ITT Geospatial Systems (Kodak → ITT → Exelis → Harris)のエンジニアであるFieteが提唱。
 $Q=2$ のとき、光学系のカットオフ周波数をナイキストサンプリングする。

“Image Quality and $\lambda FN/p$ for Remote Sensing Systems”, *Optical Engineering*, 38 (7), July 1999

4. 先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)概要



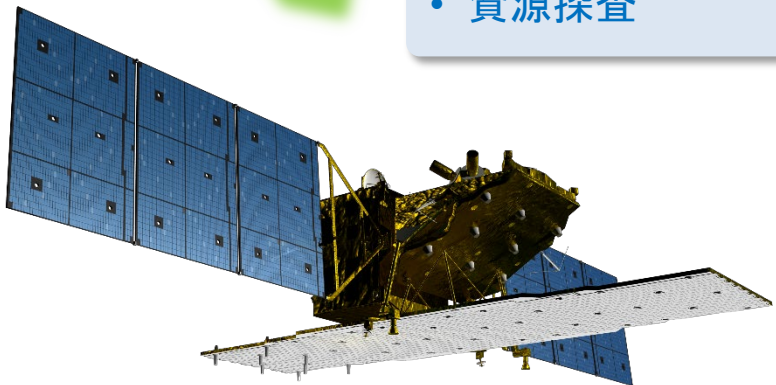
陸域観測技術衛星
「だいち」(ALOS)

2006 - 2011

光学センサ・レーダセンサ搭載

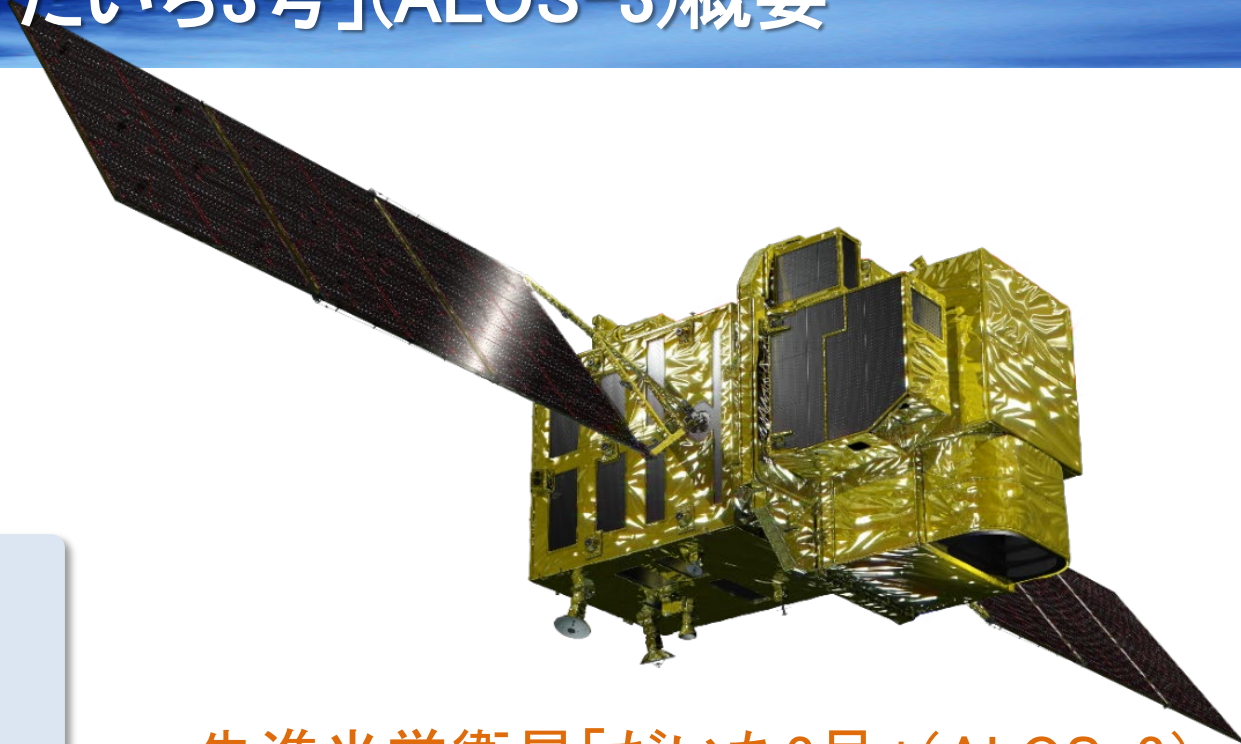


- 日本・世界の地図作成
- 地域観測
- 自然災害の監視
- 資源探査



「だいち2号」(ALOS-2)

2014 -



先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)
FY2021(予定) -

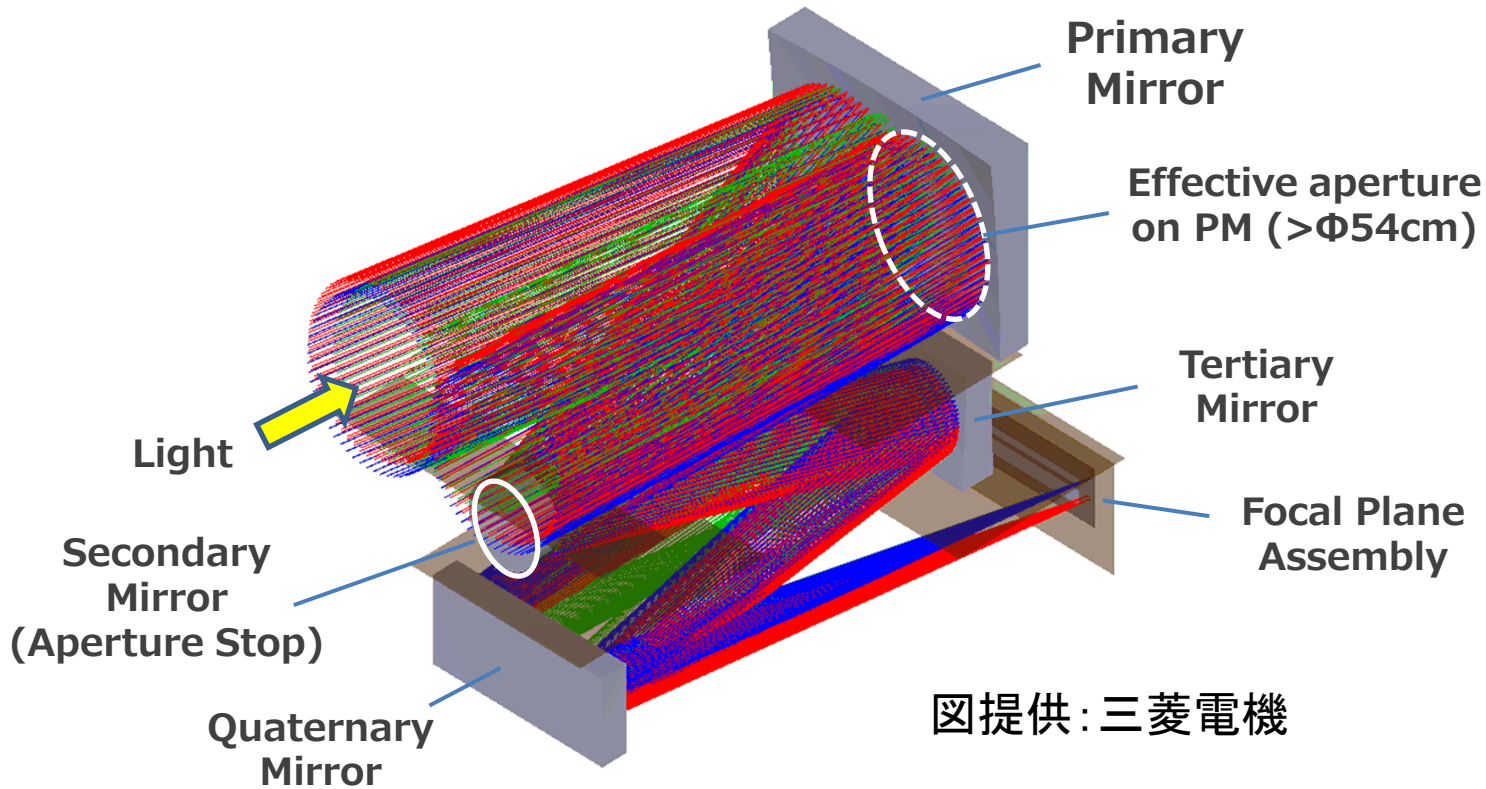
陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)の光学ミッションを継承する「だいち」シリーズの3号機。初代「だいち」搭載光学センサの広視野(直下70km幅)を維持しつつ、約3倍の高分解能(直下GSD 2.5m→0.8m)を有する広域・高分解能センサを搭載。

防災・発災時の緊急対応、地理空間情報の維持更新

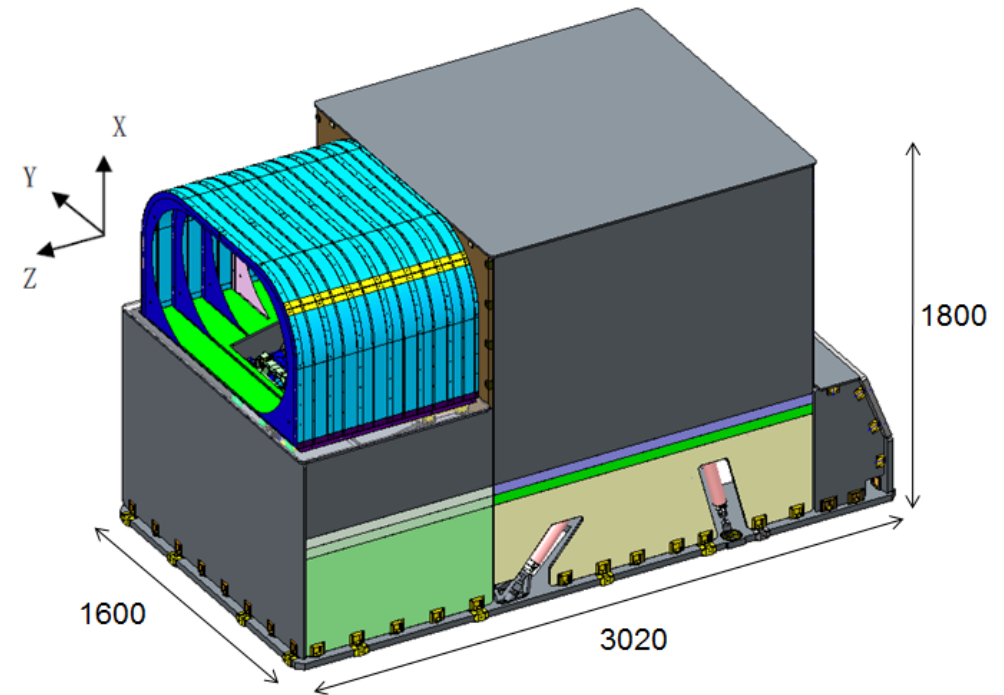
4. 先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)概要

項目		諸元
運用軌道	軌道種別	太陽同期準回帰軌道
	軌道高度	669 km (赤道上)
	降交点通過地方太陽時	10時30分
	回帰日数	35日(サブサイクル3日)
センサシステム		広域・高分解能センサ
地上分解能(GSD)		パンクロ:0.8m / マルチ:3.2m @直下観測時
観測幅		70 km
ミッションデータ発生レート		約4Gbps (パンクロ1/4、マルチ1/3 画像圧縮時)
データ伝送		直接伝送(Ka帯:1.8 Gbps X帯:0.8 Gbps) 光データ中継 1.8Gbps
質量		2,900 kg以下(打上時)
衛星寸法		5 m × 14 m × 3.5 m (太陽電池パドル展開時)
観測時間		1周回あたり10分
設計寿命		打上げ後7年

5. 広域・高分解能センサ



図提供：三菱電機



3枚の非球面鏡により球面収差・コマ収差・非点収差を除去、かつ平坦な視野を実現できる軸外し3枚鏡光学系 (TMA: Three Mirror Anastigmat) がベース。4次鏡にもわずかに曲率を持たせ、コンパクトな光学系とした。

広視野 ($>70\text{km}$) と高分解能 ($< 0.8\text{m}$) を同時に実現するカメラは世界的にも非常にユニーク

5. 広域・高分解能センサ

項目	性能
観測波長帯	<p><u>パングロ</u> 0.52~0.76 μm</p> <p><u>マルチ</u></p> <p>バンド1 0.40~0.45 μm (コースタル)</p> <p>バンド2 0.45~0.50 μm (ブルー)</p> <p>バンド3 0.52~0.60 μm (グリーン)</p> <p>バンド4 0.61~0.69 μm (レッド)</p> <p>バンド5 0.69~0.74 μm (レッドエッジ)</p> <p>バンド6 0.76~0.89 μm (近赤外)</p>
地上分解能 (GSD)	パングロ :0.8m / マルチ :3.2m @軌道高度 669km 直下
観測幅	70 km
MTF(変調伝達関数)	パングロ :0.1 / マルチ :0.2 @ナイキスト周波数
S/N(信号ノイズ比)	パングロ :200 / マルチ :200 @規定輝度 N35° 春秋分、アルベド30%
量子化ビット	11ビット



©三菱電機

フライトモデル

5. 広域・高分解能センサ



「だいち」(ALOS) 2.5m分解能画像



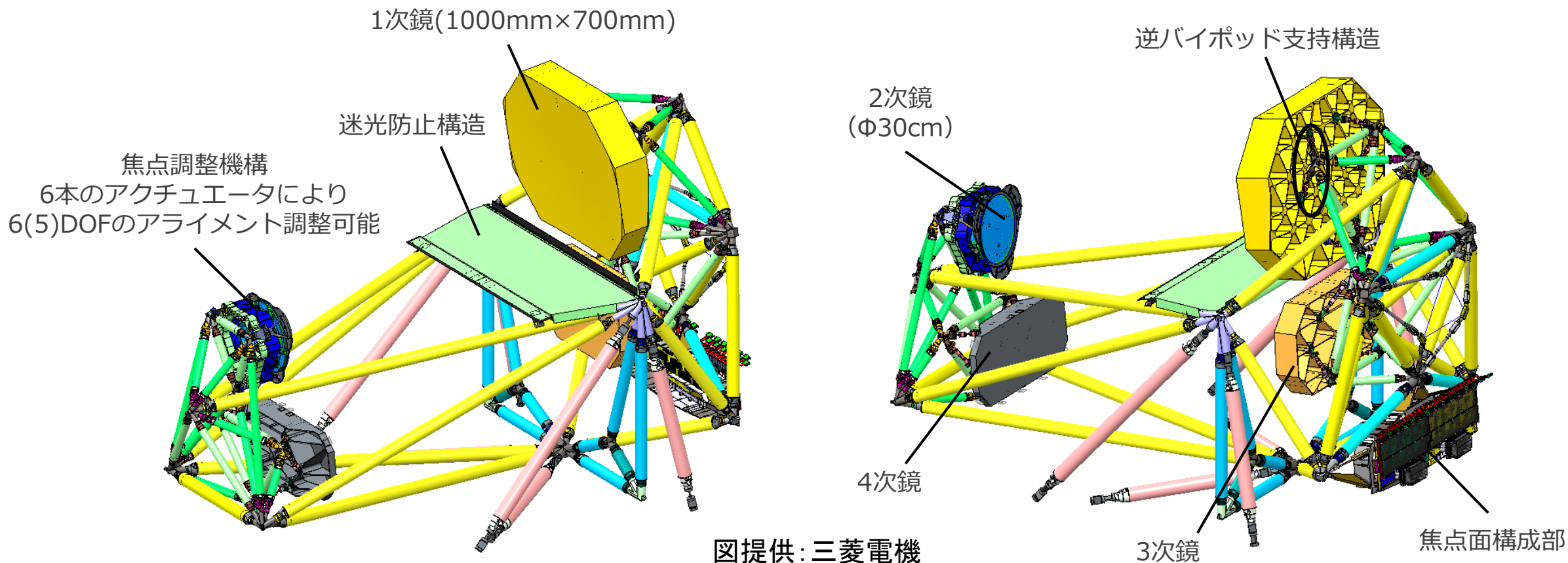
先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)
0.8m分解能シミュレーション画像(直下)

パンクロバンド(白黒)画像とマルチバンド(カラー)画像を合成した高分解能
カラー画像(パンシャープン画像)

* 本シミュレーション画像は衛星・センサの開発仕様値をベースに作成

5. 広域・高分解能センサ

- ◆ サブメートル級の高分解能とALOSと同等の広視野を両立させるため、光学系を大型化(2006年打上げの「だいち」(ALOS)と比較して有効開口径比2倍、焦点距離比3倍)
- ◆ 軸外し光学系としては世界最大級。国内メーカーの技術を結集(三菱電機、キヤノン、オハラなど)



● 広域・高分解能センサの設計パラメータ

有効開口径 : 0.54 m

焦点距離 : 6.86m (F/# = 12.7)

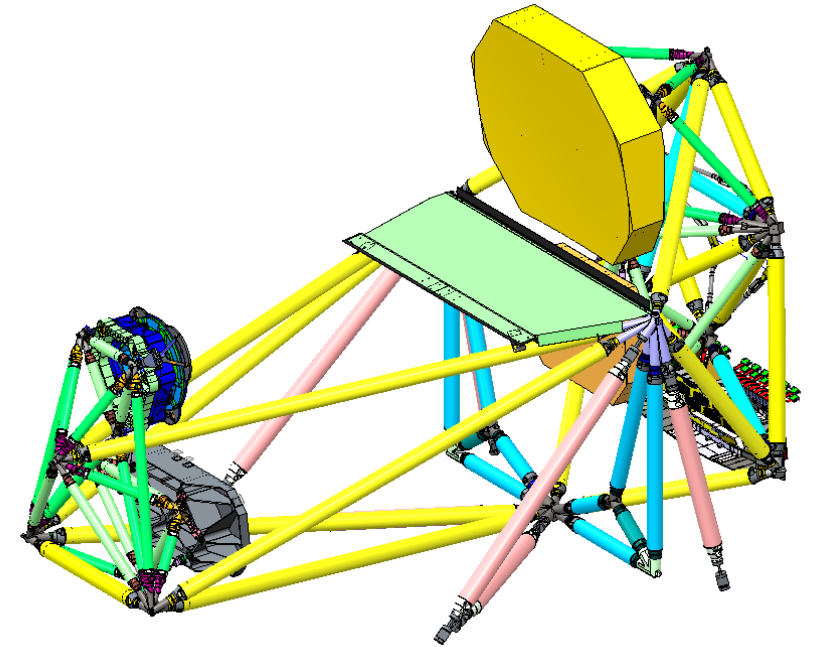
視野角 : 6° 以上

中心波長 : 0.64μm

ピクセルピッチ: 8μm (ナイキスト周波数 : 62.5 mm⁻¹)

瞬時視野角 : 1.17e-6 rad (0.24 arcsec)

$Q = \lambda F/p = 1.0$



図提供: 三菱電機

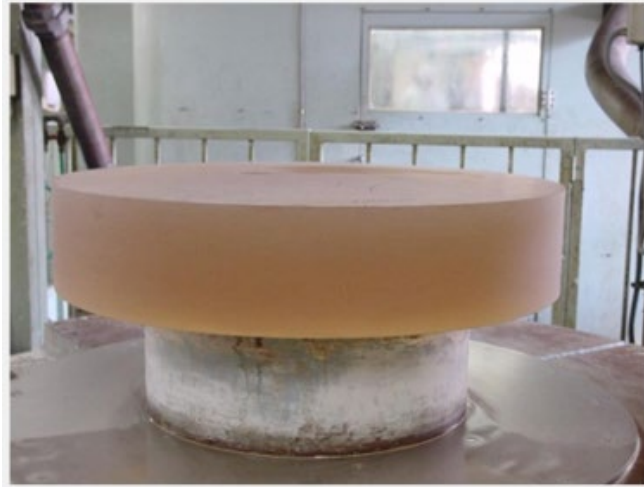
光学系
カットオフ周波数

$$f_c = \frac{1}{\lambda F} = \frac{D}{\lambda f} = \frac{0.54}{0.64E-6 \times 6.86} = 123 \text{ mm}^{-1}$$

地上分解能
(Ground Sample Distance)

$$GSD = \frac{d}{f} h = \frac{8E-6}{6.86} \times 669E3 = 0.78 \text{ m}$$

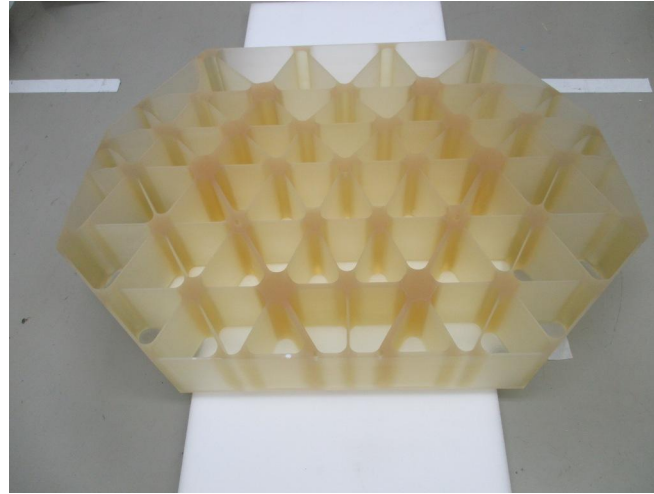
OHARA



硝材：クリアセラム
極超低膨張ガラスセラミックス

軽量化後の酸処理
(マイクロクラック除去)

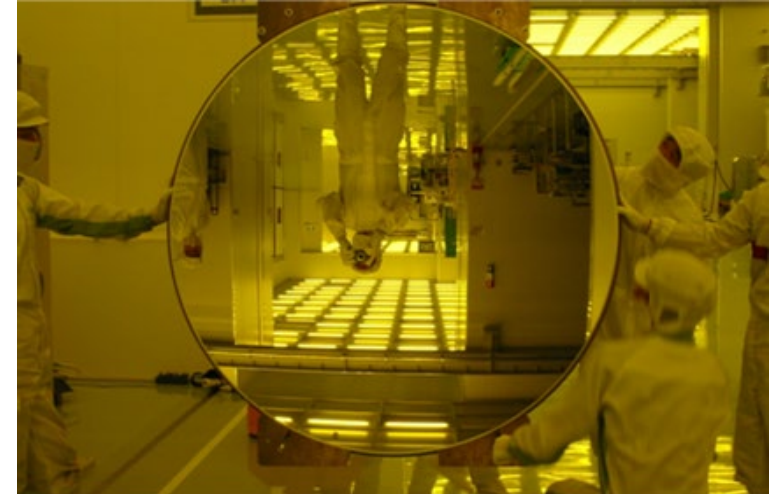
MITSUBISHI ELECTRIC



軽量化（構造）設計
軽量化加工
R加工

センサ光学設計
熱・構造設計
電気設計
TDI型CCD検出器製造

Canon



研削・面形状測定・研磨

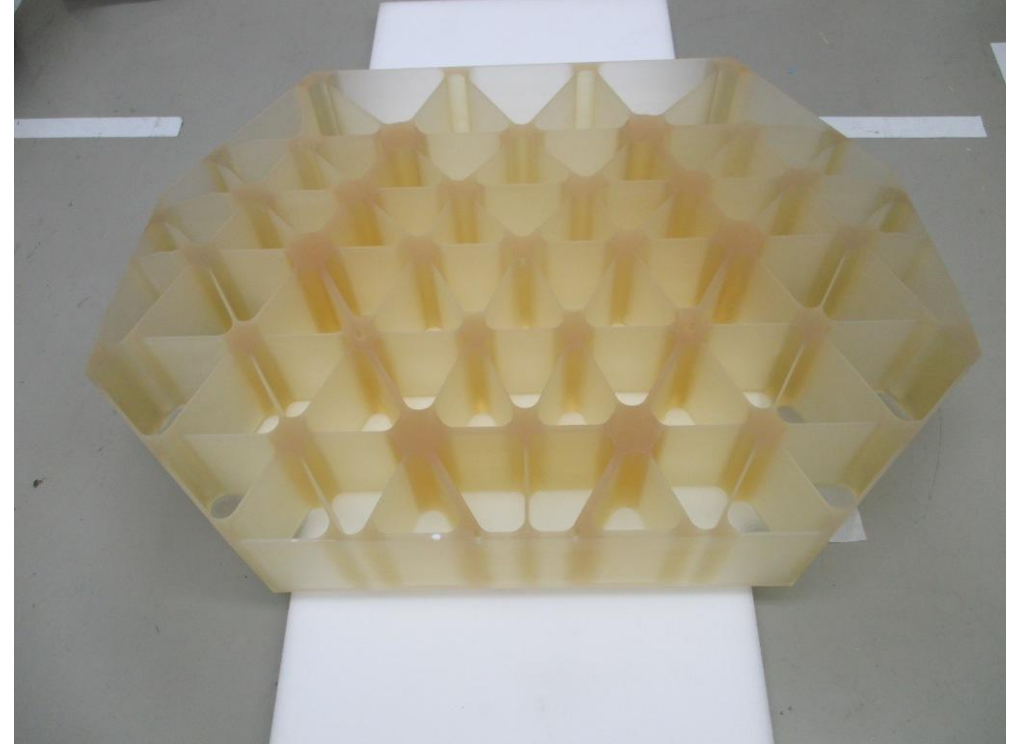
研削研磨：クリスタル光学
コート（Ag）：河合光学

半導体露光装置用光学系や超大型
FPD露光装置用光学系の技術。

軽量化加工後の1次鏡(エンジニアリングモデル)



表面



裏面

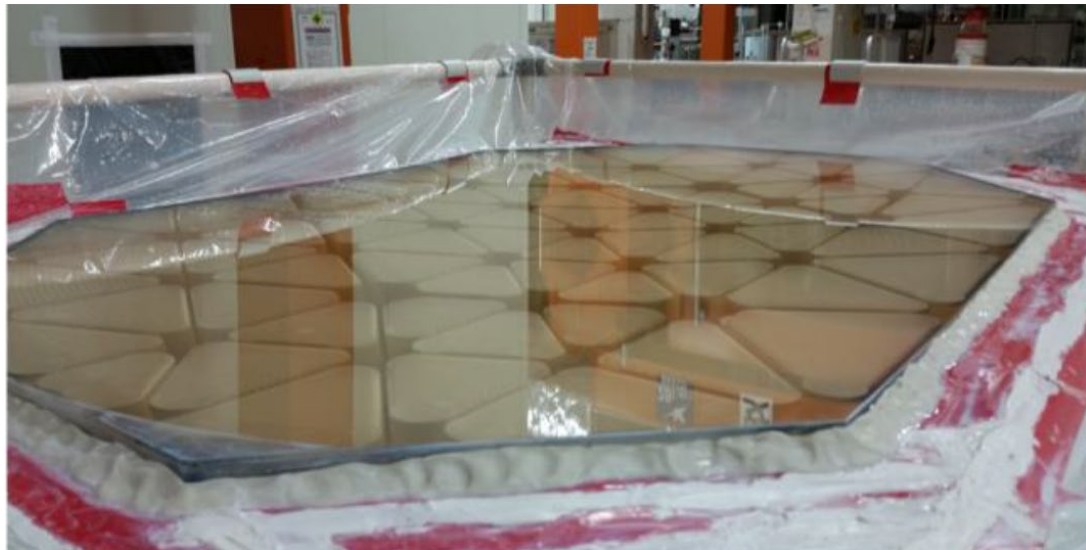
約100cm×70cm×厚16cmのボリュームがありながら、
質量は45kg以下(80%程度の肉抜き)

写真提供:三菱電機

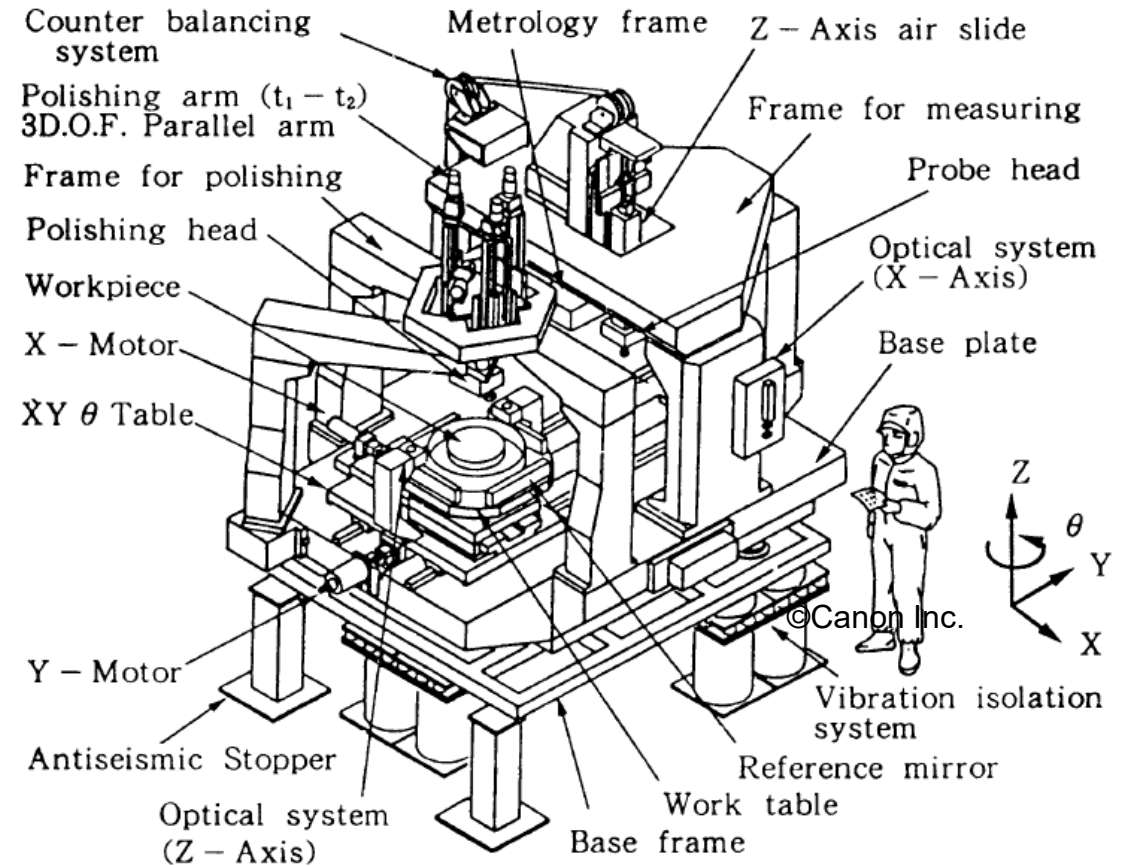
Canon Super-Smooth Polisher (CSSP)



精密研削中の
3次鏡



研磨中の
1次鏡

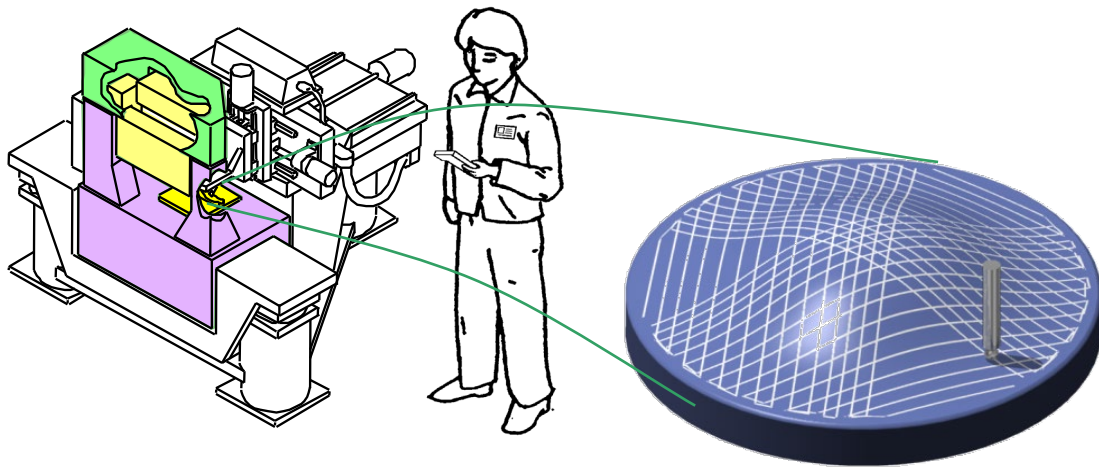


©Canon

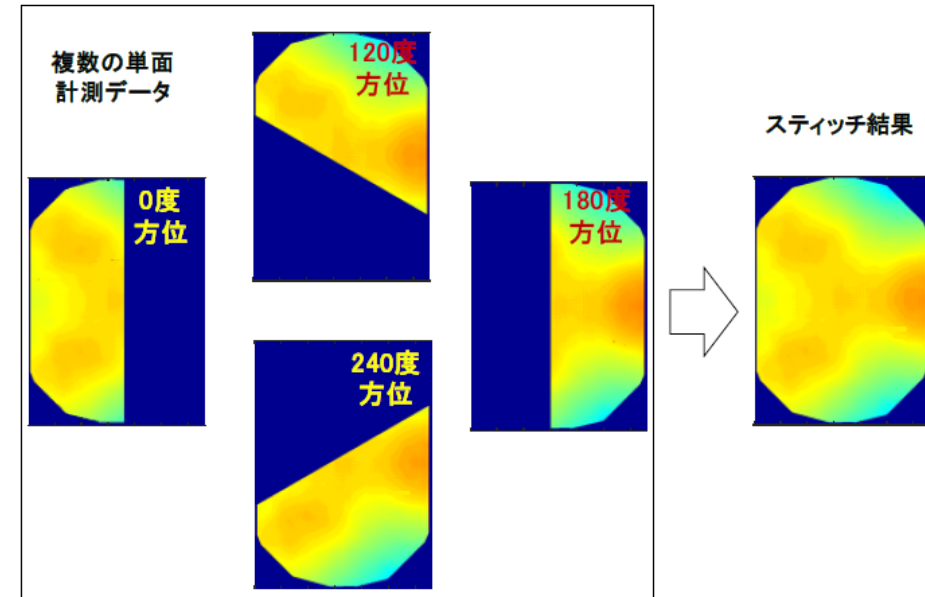
A-Ruler

The high-precision free-form measuring machine developed by Canon Inc.

- a contact type measuring device
- Accuracy : < 10 nm rms
- Measuring area : 1000 x 500 mm



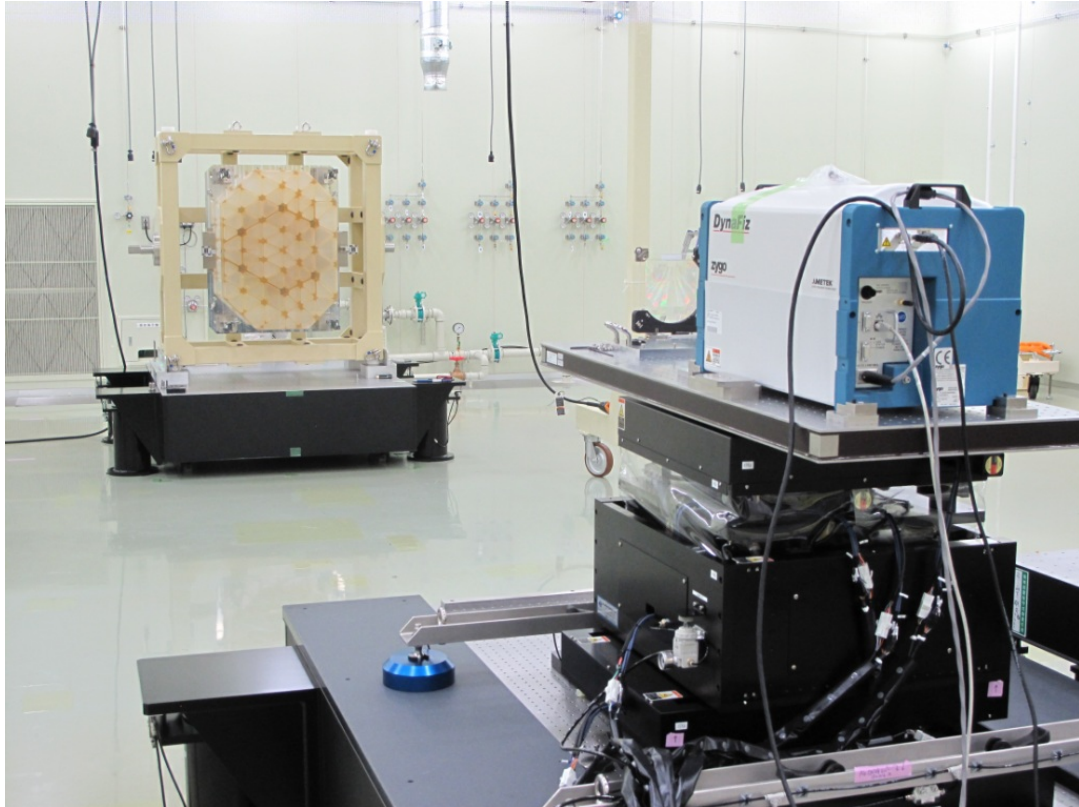
図提供: キヤノン



A-Rulerは接触型の面形状測定装置であり、測定時の重力印加は一方向のみ。OGでの面形状予測は構造解析による。
 → 構造解析の誤差がそのまま最終面形状に誤差として残る。

接触型で宇宙用軽量化ミラーの面形状測定をすることは初めての経験。
 → 非接触測定(レーザ干渉計)もバックアップで導入(次ページ)

A-Rulerによる面形状測定のバックアップとして、当初計画にはなかったCGHによる面形状測定設備をキヤノン宇都宮工場に構築。

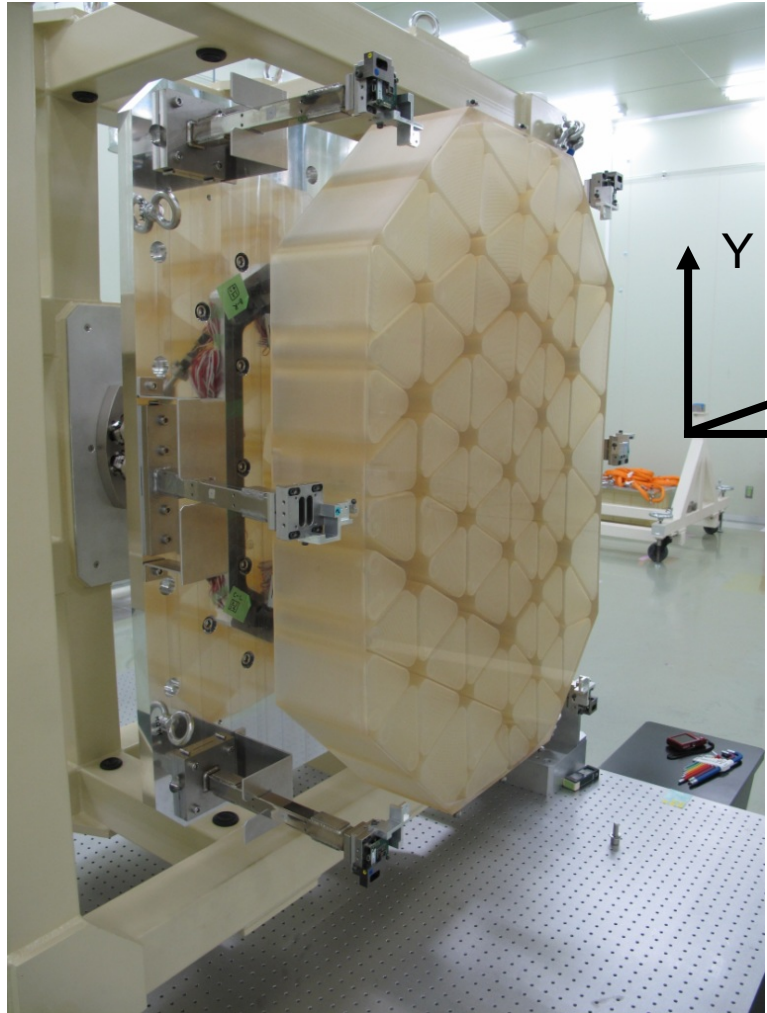


レーザ干渉計とコンピュータ生成ホログラム(CGH)を用いた軸外し非球面鏡の面形状測定

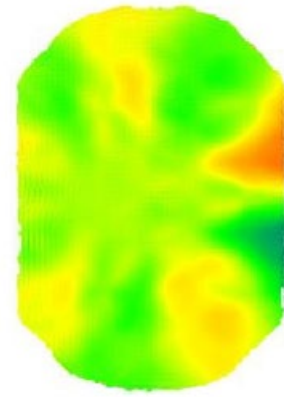
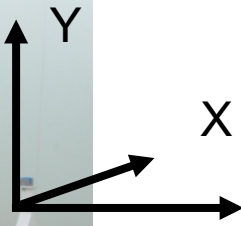


ミラーの曲率半径が非常に大きい(~8m)ため、大気ゆらぎなどの擾乱除去が課題。簡易空調ブース、Zygo DynaFiz干渉計を用いた。

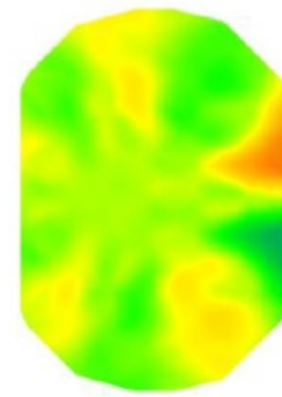
CGHによる面形状測定(1次鏡・3次鏡)



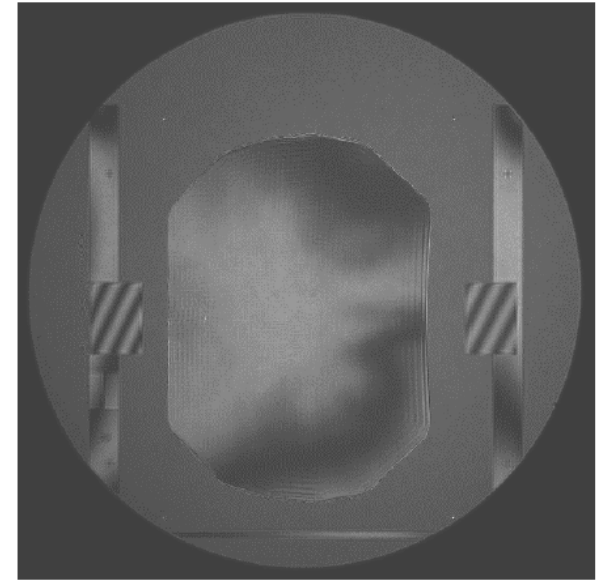
自重変形を実測できるように重力方向に対し180°回転できるステージ



CGH反転計測



FEM構造解析

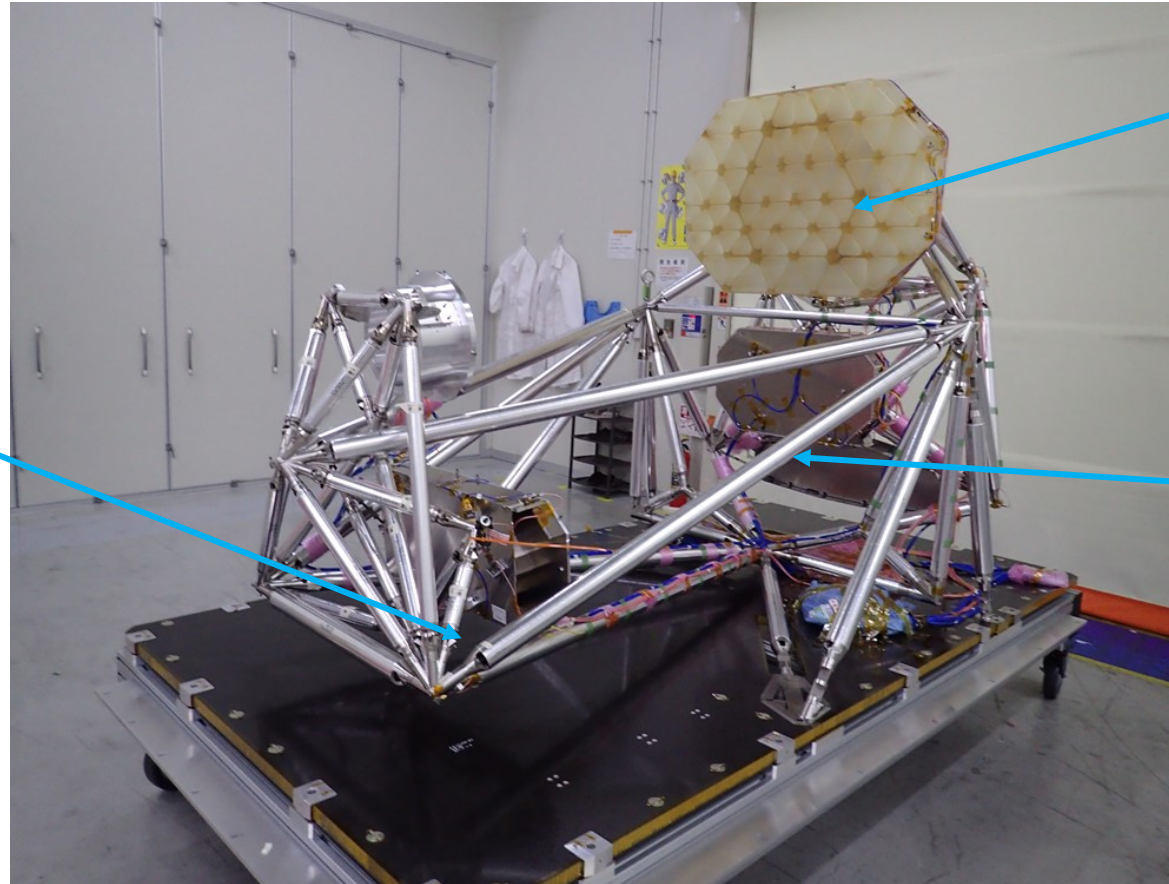


Y軸に重力を印加したときに最も重力変形が小さくなるように構造設計。
Y±1Gで面形状を測定し、0Gでの面形状を算出(実測)。

CGHと被検面とのアライメントに起因する誤差(低次の収差)が残存(今後の課題)。CGHは高周波面形状誤差成分、A-Rulerは低次と使い分けることにより、最終面形状を確定した。総合透過波面の計測結果より、面形状測定に問題がなかったことを確認。

ミラー間アライメントのため
パイプの長さをターンバックル
構造で微調整可能。
(1,2,4次鏡の並進・回転、
1/3次鏡ペアに対する2/4次
鏡の並進・回転)

調整の際、構造に歪を与え
ないようにジョイント・パイプ接
合部には球面座を用いている。



各ミラーはストレスリリーフ構
造を有した逆バイポッド脚に
よる静定支持。軌道上熱変動、
排湿によるCFRP鏡筒の変形
歪をミラーに伝えない。

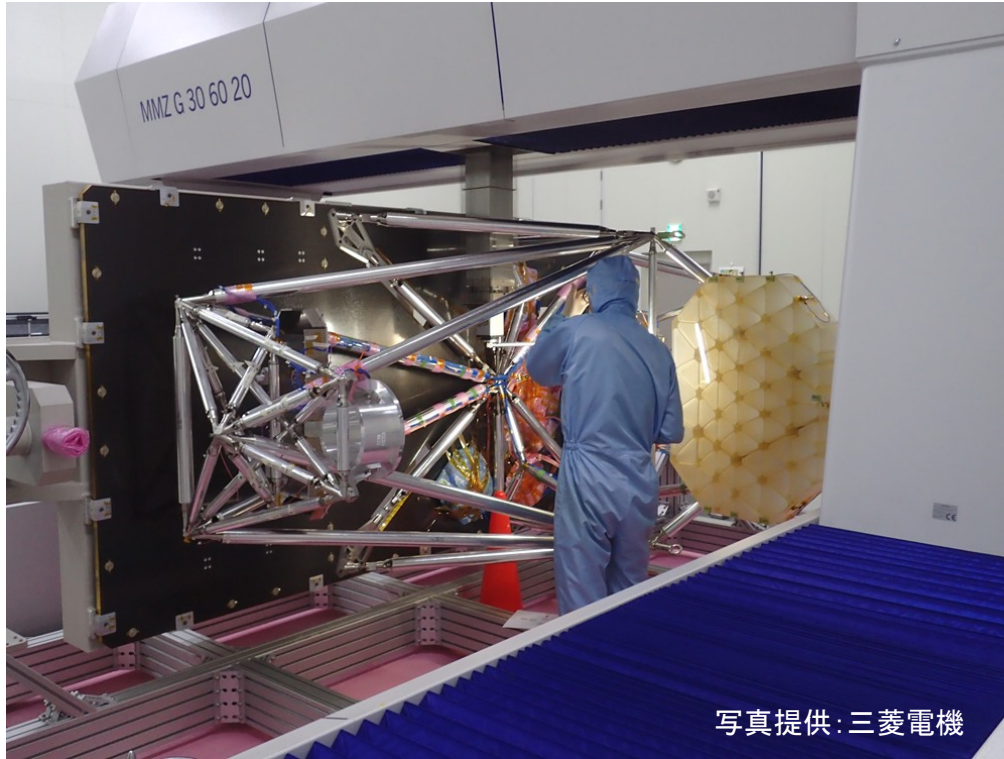
鏡筒構造はCFRP製。表
面処理により吸湿を抑制。

パイプは黒色MLIで覆う
か、黒色塗装を施す。

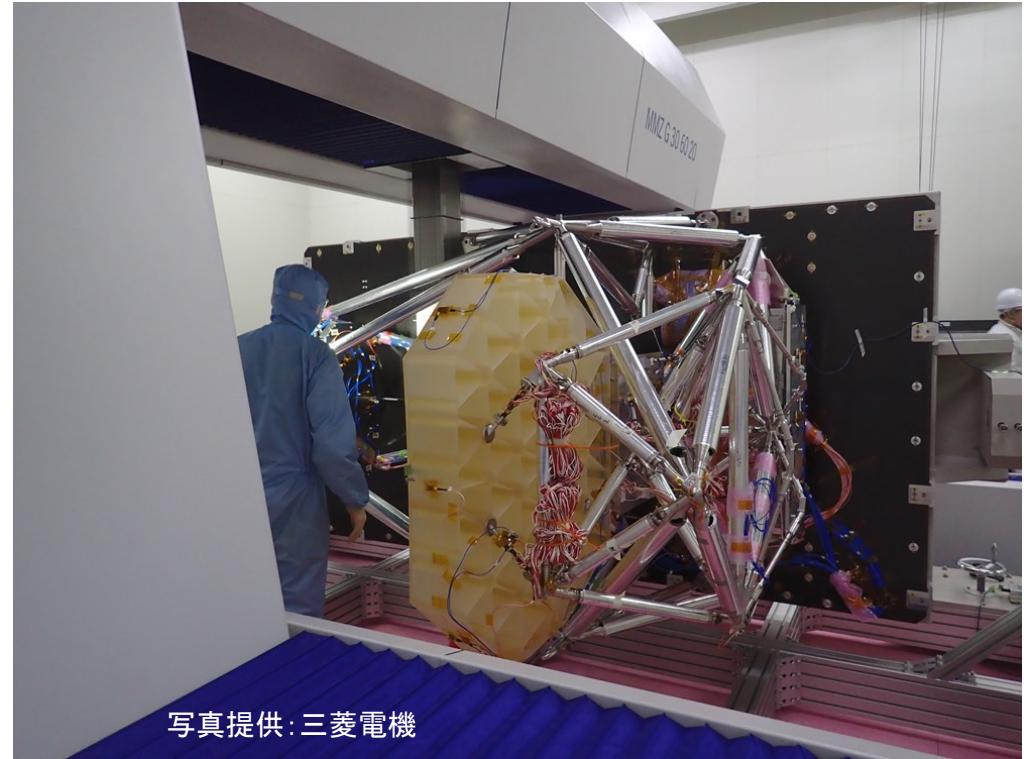
光学系ストラクチャーモデル(SM)

写真提供: 三菱電機

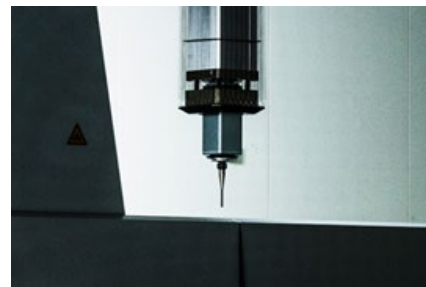
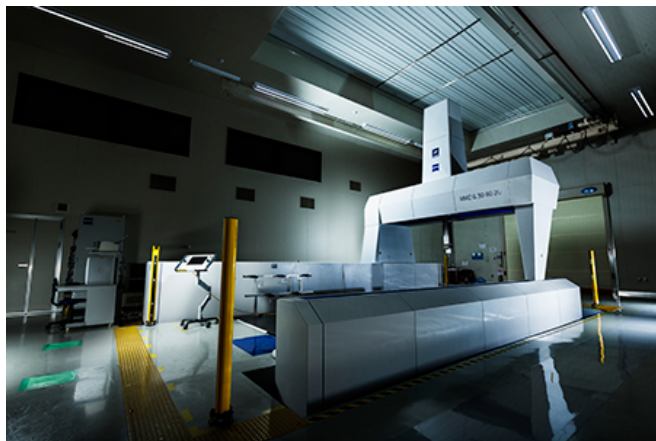
鏡筒の組立て



写真提供：三菱電機



写真提供：三菱電機

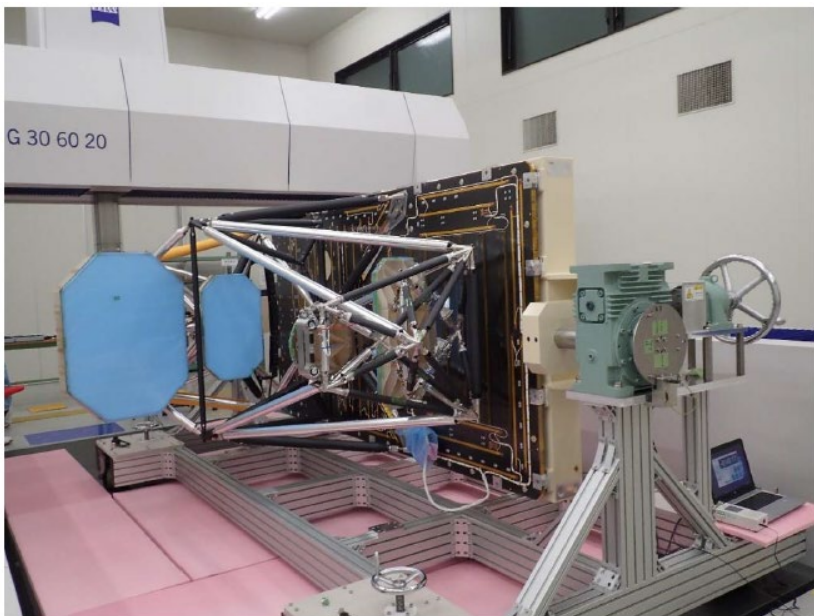


写真提供(左・上)：クリスタル光学

超大型三次元座標測定機(CMM) MMZ-G306020

クリスタル光学(京都工場)にて光学系の組立調整を実施。写真はストラクチャーモデル(SM)の測定時の様子。プローブを光学系各部に付けられた基準球に接触させ、その空間座標を高精度に測定。

測定精度(メーカー公称値)： $3.2 + 2.5 \times L(m)$ μm



クリスタル光学でのPFM最終アライメント調整



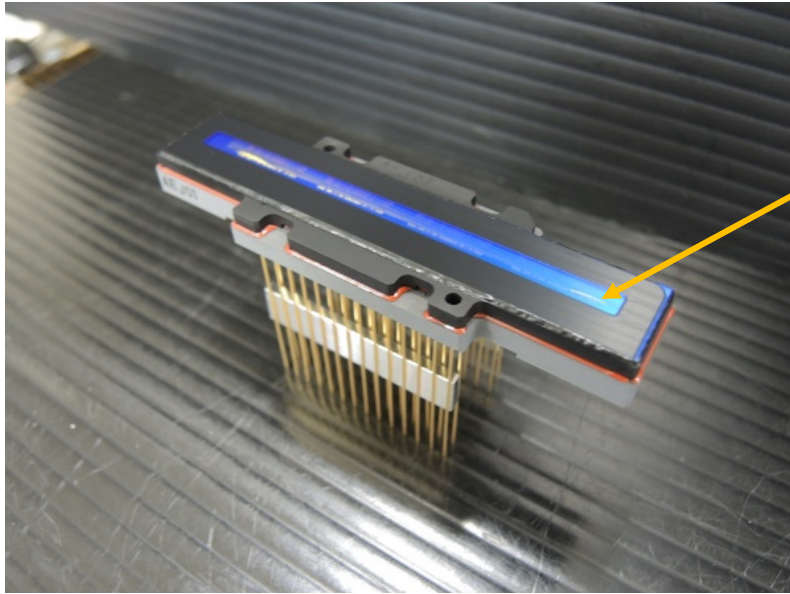
MELCO鎌倉工場での全系透過波面測定（ダブルパス測定）

項目	Pa -Y視野端	Pa 視野中心	Pa +Y視野端
実測評価結果			
事前解析予測			

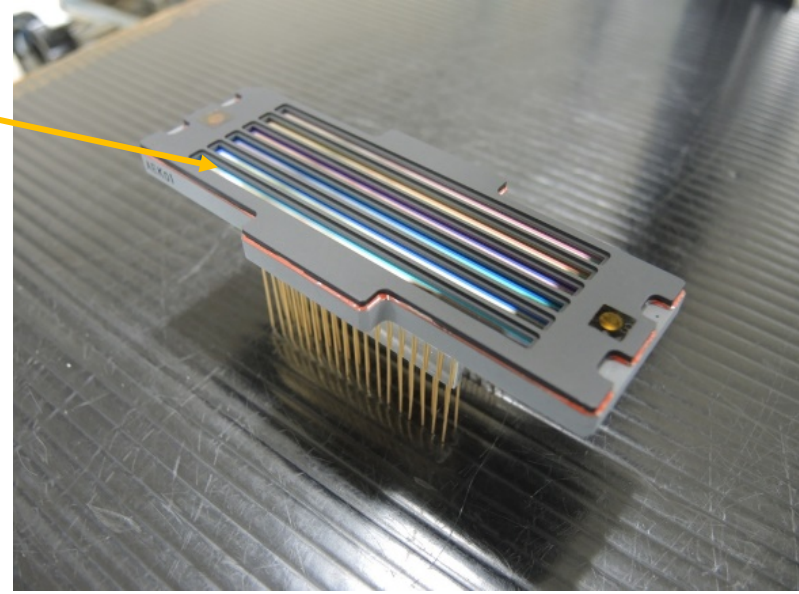
光学系全体の自重変形解析結果

項目	Pa -Y視野端	Pa 視野中心	Pa +Y視野端
実測評価結果			
事前解析予測			

0 G波面の実測（Y±1G）と解析の比較
組立後の常温・常圧下では回折限界性能を達成



長尺の
バンドパスフィルター



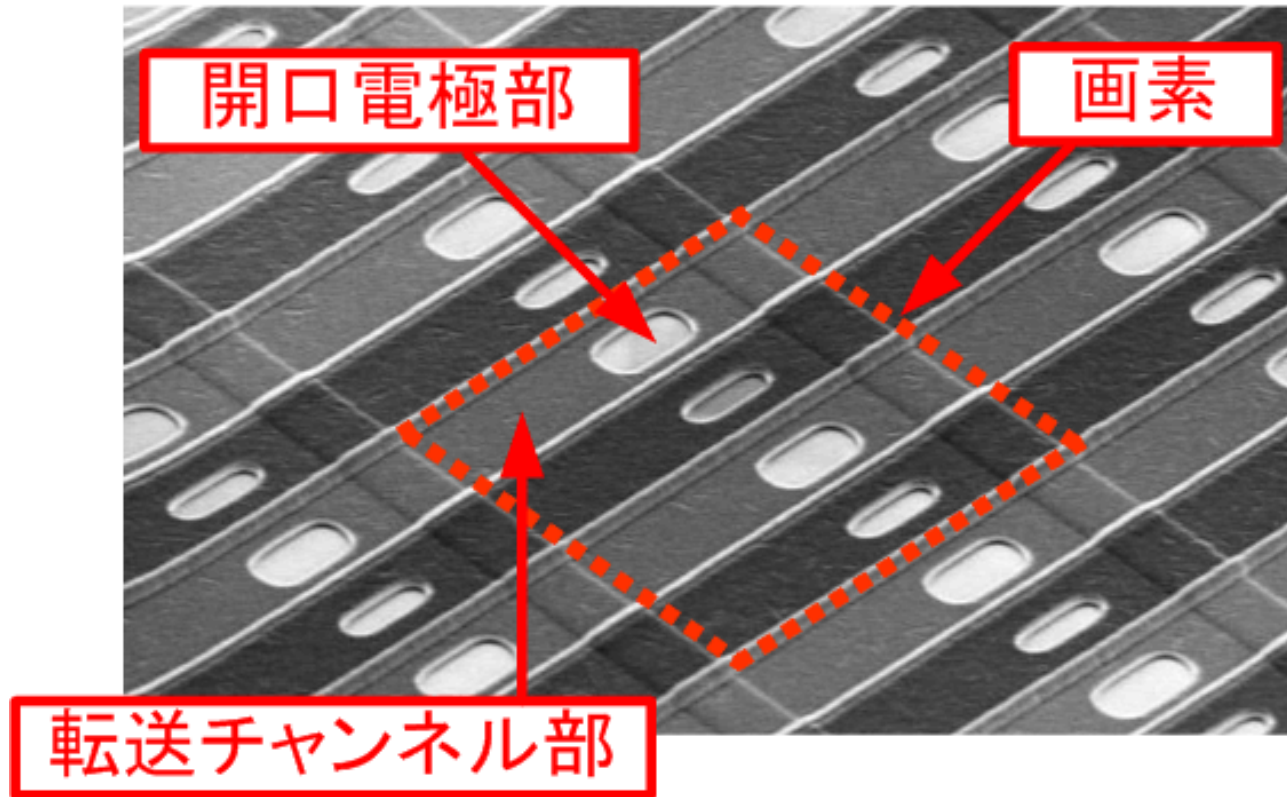
パングロマチックバンド用検出器

8ch/CCD total 12 CCD 96 ch
 1024pix/ch (8192pix/CCD)
 Integration time (minimum) : 108.9 μ sec
 TDI 128段
 8 μ m ピッチ

マルチバンド用検出器 (6バンドを1チップ上に搭載)

1ch/band/CCD total 12 CCD 72 ch
 2048 pix/band/CCD
 Integration time (minimum) : 435.6 μ sec
 TDI 32段
 32 μ m ピッチ

各チャンネルにはon-chip CDS (correlated double sampling) 回路を実装



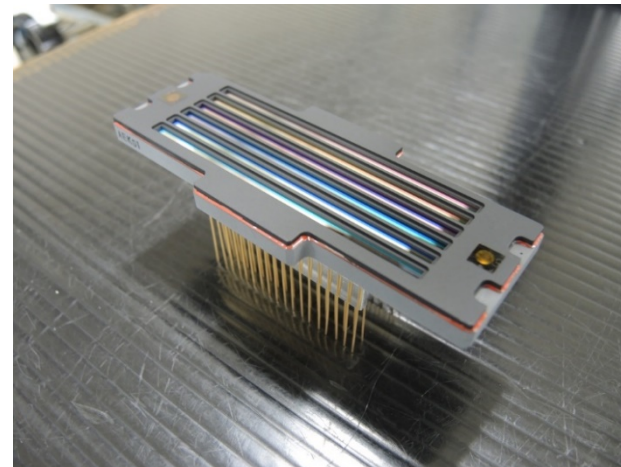
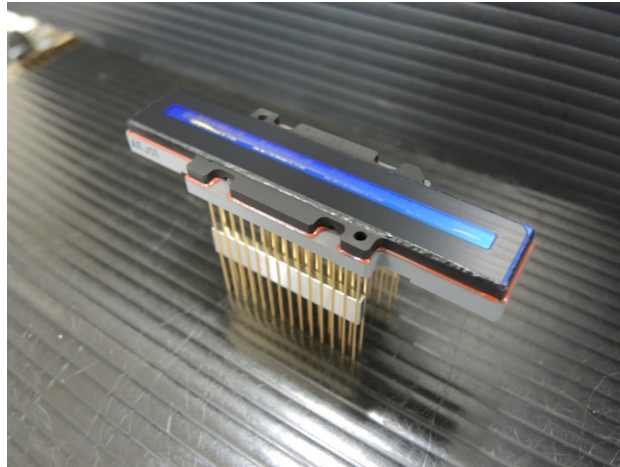
1画素あたり4個の電極で蓄積された電荷を転送し、衛星進行方向の変調伝達関数 MTFの劣化（画像のボケ）を防いでいる。

また写真では示されていないが、実機では各画素の上にマイクロレンズを形成し、集光力を高め感度向上を図っている（パンクロバンドのみ）。

写真提供：三菱電機

焦点面の検出器配置

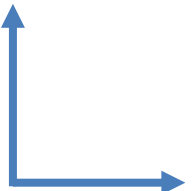
Pa



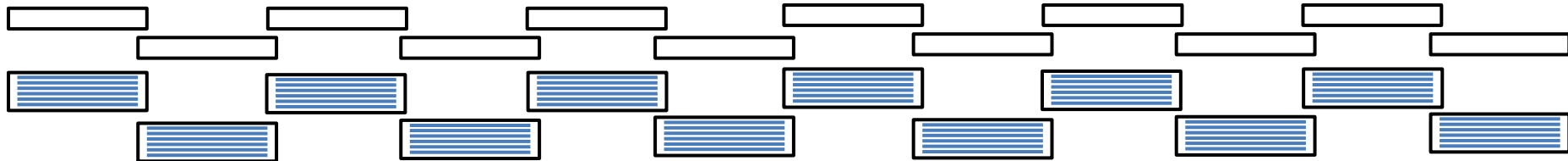
写真提供: 三菱電機

Mu

AT方向



CT方向

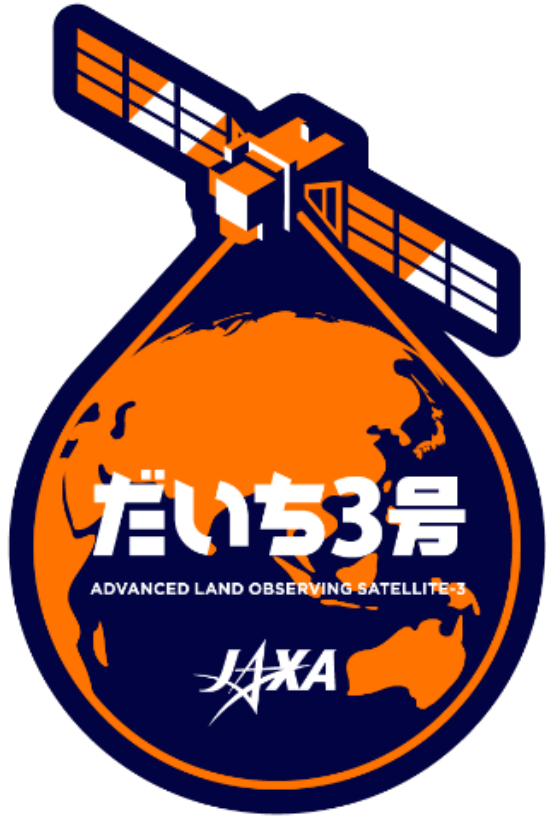


~750mmの巨大焦点面 およそ $6^\circ \times 1^\circ$ (注)の有効視野

検出器を設置するプレートには高熱伝導・低線膨張係数素材であるモリブデンを使用。難加工性の材質だが、三菱電機には豊富な加工実績がある。

(注)先進光学衛星の要求仕様(Pa, MuのMTF要求など)に対して。別用途としては要検討。

- ◆ 先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)搭載「広域・高分解能センサ」に用いられている国産技術を紹介した。
- ◆ 軸外し3枚鏡光学系は開口に遮蔽がなく、良好な結像性能と広視野($\sim 6^\circ$)を確保できる光学系であり、広域サーベイ型宇宙望遠鏡(可視～近赤外領域)などに応用可能。
- ◆ 口径1m超クラス(製造可能な最大径はメーカーに確認されたい)の宇宙用軽量化ミラーの製造は国産技術で可能。各ミラーは回折限界性能に必要な面精度配分を(余裕で)達成。
- ◆ 光学素子・鏡筒構造など光学系全体の製造技術、試験技術はほぼ確立しており、光学系全体の総合透過波面として回折限界性能を有す(有効視野は用途による)。



ご清聴ありがとうございました

ALOS-3