



THE TOMO-E GOZEN CAMERA

Institute of Astronomy, The University of Tokyo

木曾超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen試験機の機械系の開発

- ❖ Tomo-eとは？
- ❖ 装置の概要
- ❖ 開発上の特徴
- ❖ 初期観測

東京大学 大学院理学系研究科 天文学教育研究センター
高橋 英則



Tomo-eのユニークネス

【天文学の常識】

- 裏面照射型CCD
- 真空・冷却
- 筐体は頑丈
- 温度制御
- センサーはしっかり固定
- パーツは精密に
- センサーはuntouchable
- 静止画
- 生データは総て保存
- 装置の特性を表した名前
- ……………

【Tomo-e】

- CMOS
- 常温・常圧
- 軽量
- 周囲のなすがまま
- センサー固定は両面テープ
- 調整用パーツのみちゃんと作る
- センサーを拭ける
- 動画
- データはどんどん捨てる
- 人名
- ……………



Tomo-e Gozen Cameraプロトタイプ (PM) の開発

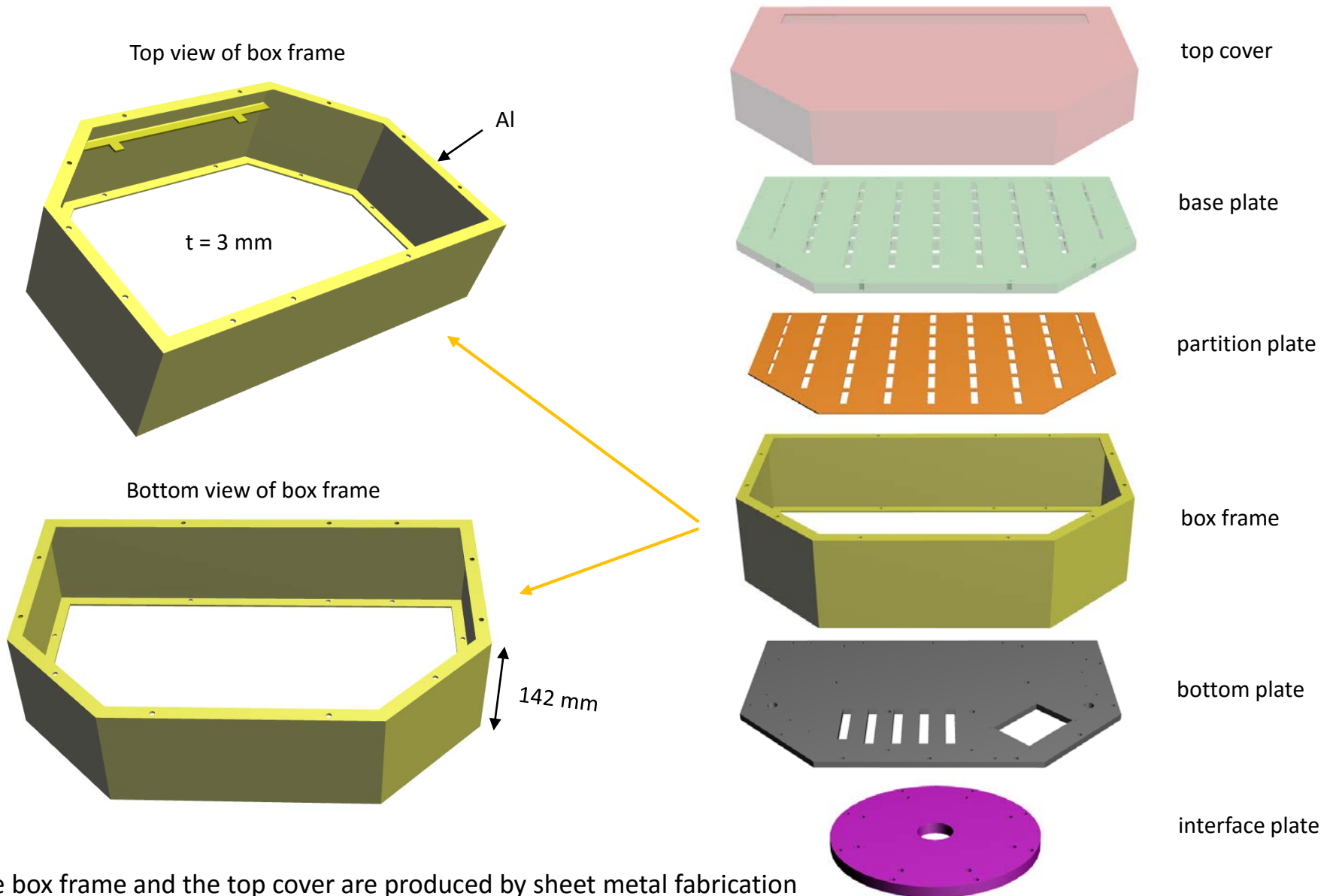
- ❖ 基本設計は最終版を視野に入れた構造。
 - 形状はフルサイズを大凡半分にしたもの。
 - センサーは**8チップ**を赤経方向に並べる。
 - 構造体形状の歪みを望遠鏡波面に補正する補正機構の採用。
 - 熱制御のための空冷機構を搭載。

- ❖ 様々な開発要素の**技術実証機**としての位置づけ
(センサー性能、光学系、大きさ、重量、ハンドリング、熱、エレキ、データ処理、解析ソフトウェア、望遠鏡との噛み合わせ、観測シミュレーション、試験観測、etc…)
 - 製作・組立誤差 ⇔ 光学設計から許容される値 (**被写界深度~40um**) .
 - 発生する熱を逃がす構造
 - 改修・交換時のハンドリングのしやすさ
 - 発生するビッグデータに対応した処理系 (ソフトウェア) とデータストレージ。

データ量 (1フレーム) : 380 MB
データレート (2Hz観測) : 760 MB/sec
データレート (1晩) : 27 TB/夜/84 chip



Tomo-e Gozen Cameraプロトタイプ (PM) の開発



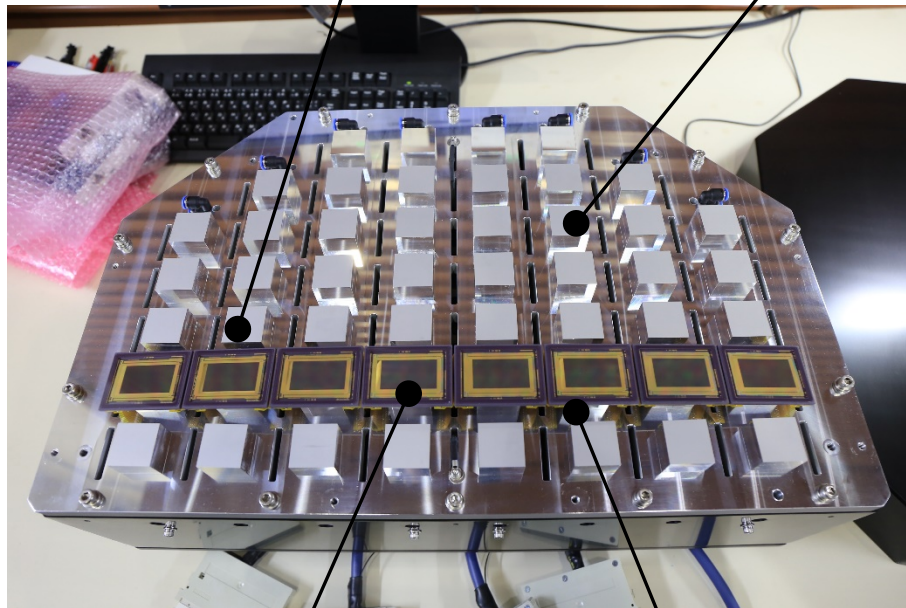


Tomo-e Gozen Cameraプロトタイプ (PM) の開発

接着テープ

ダミー (42個)

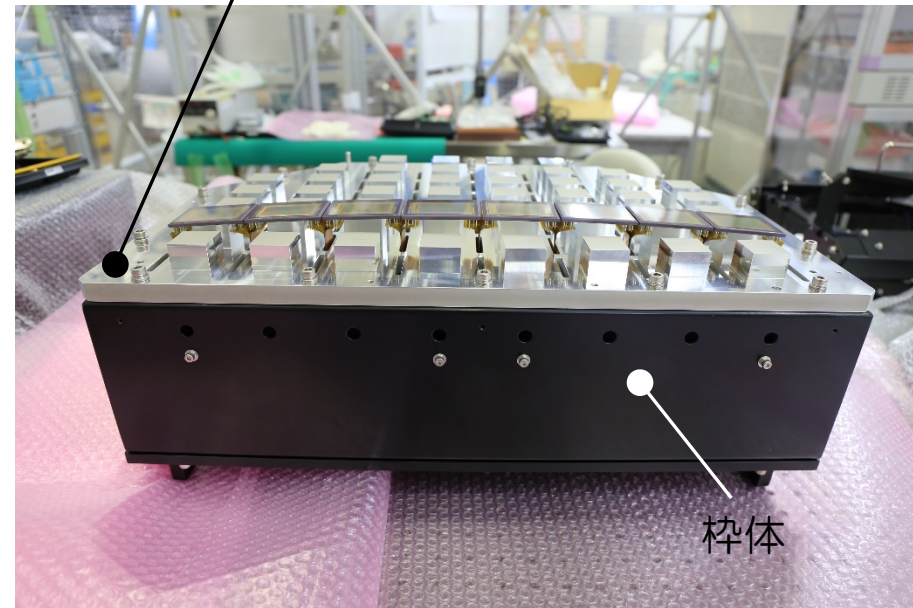
ベースプレート



381mm

588mm

本物センサー (8個)



枠体

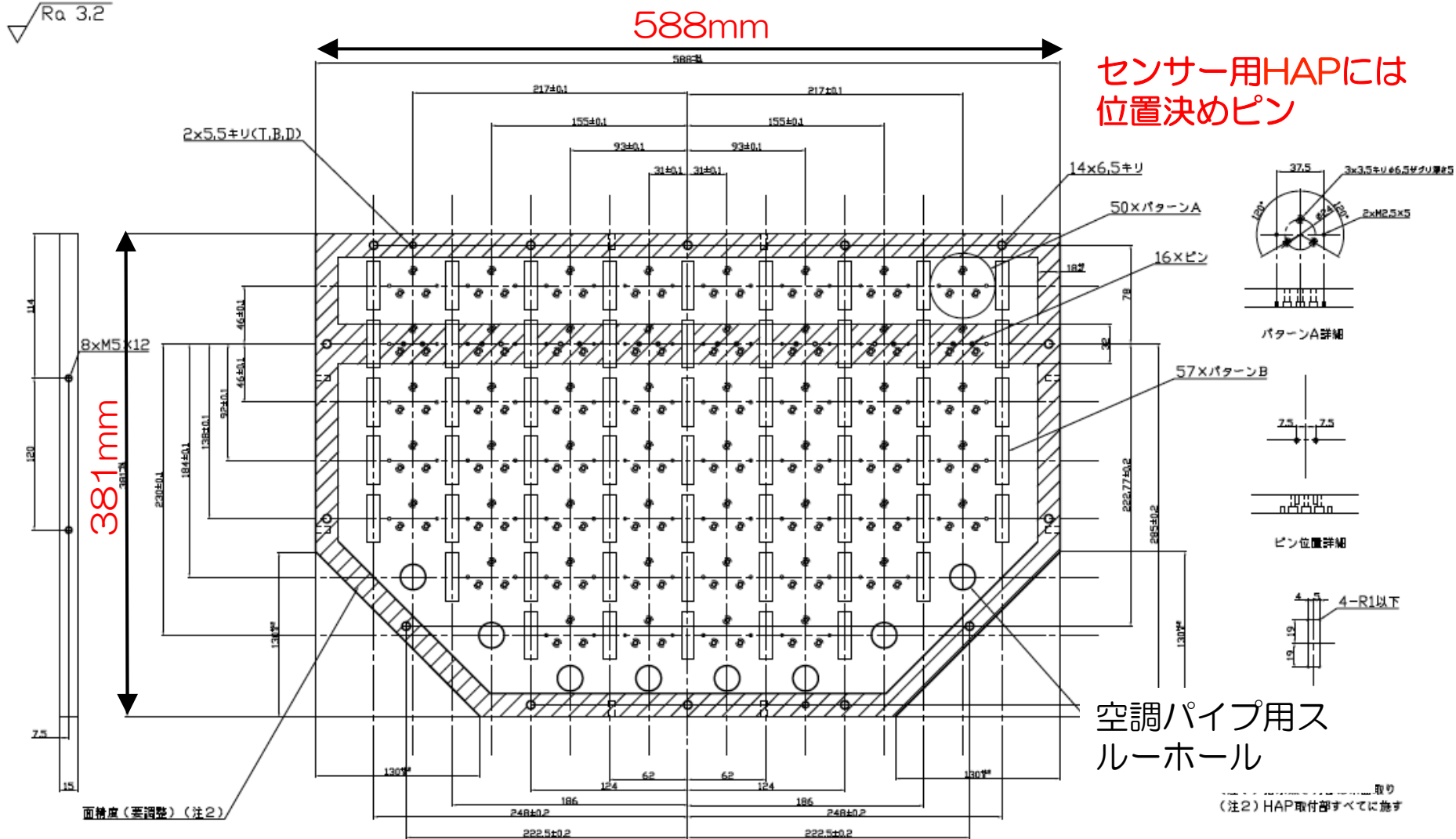
- ❖ 波面に合わせてセンサー面を湾曲
- ❖ センサー高さを個別の台座で調整

HAP

(Height Adjustment Plate)



ベースプレートの製作



製作後面形状の精密測定→センサー取り付け位置調整に反映



ベースプレートの製作

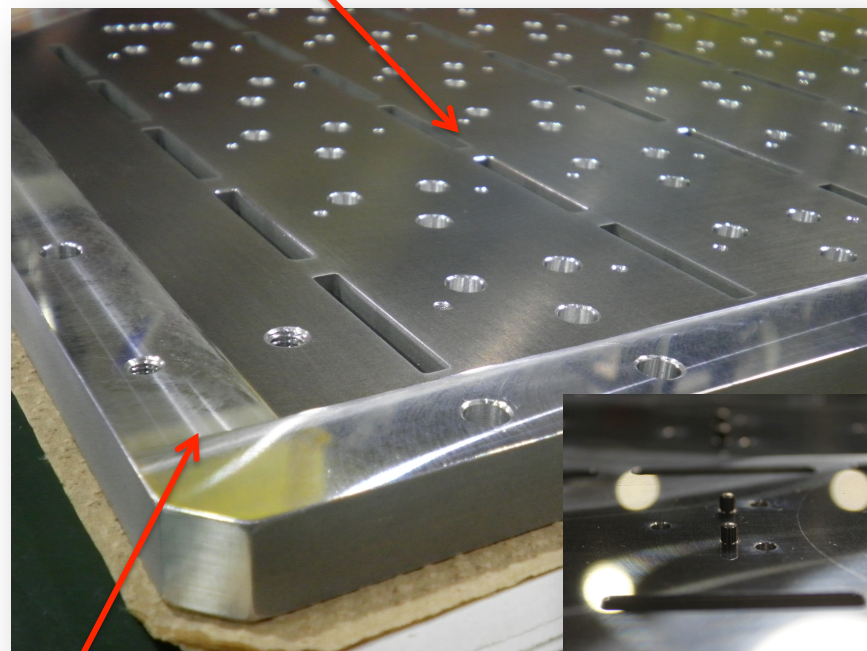
- ❖ 加工機 : MAKINO AEV4-85
- ❖ 製作期間 : 2015年9月1日~10月8日
- ❖ 加工材料 : Hi-plate, t=15mm

テーブル寸法	長さ1350mm × 幅480mm
運動範囲	左右 (X軸) 850mm
	前後 (Y軸) 500mm
	上下 (Z軸) 400mm

*** 国立天文台先端技術センターで製作するにはこのサイズが限界！**
*** 半分になれば工程、材料の歪みの減少で精度はあがる！**

・テーブルの端出しはCではなくR加工。

製作のポイント

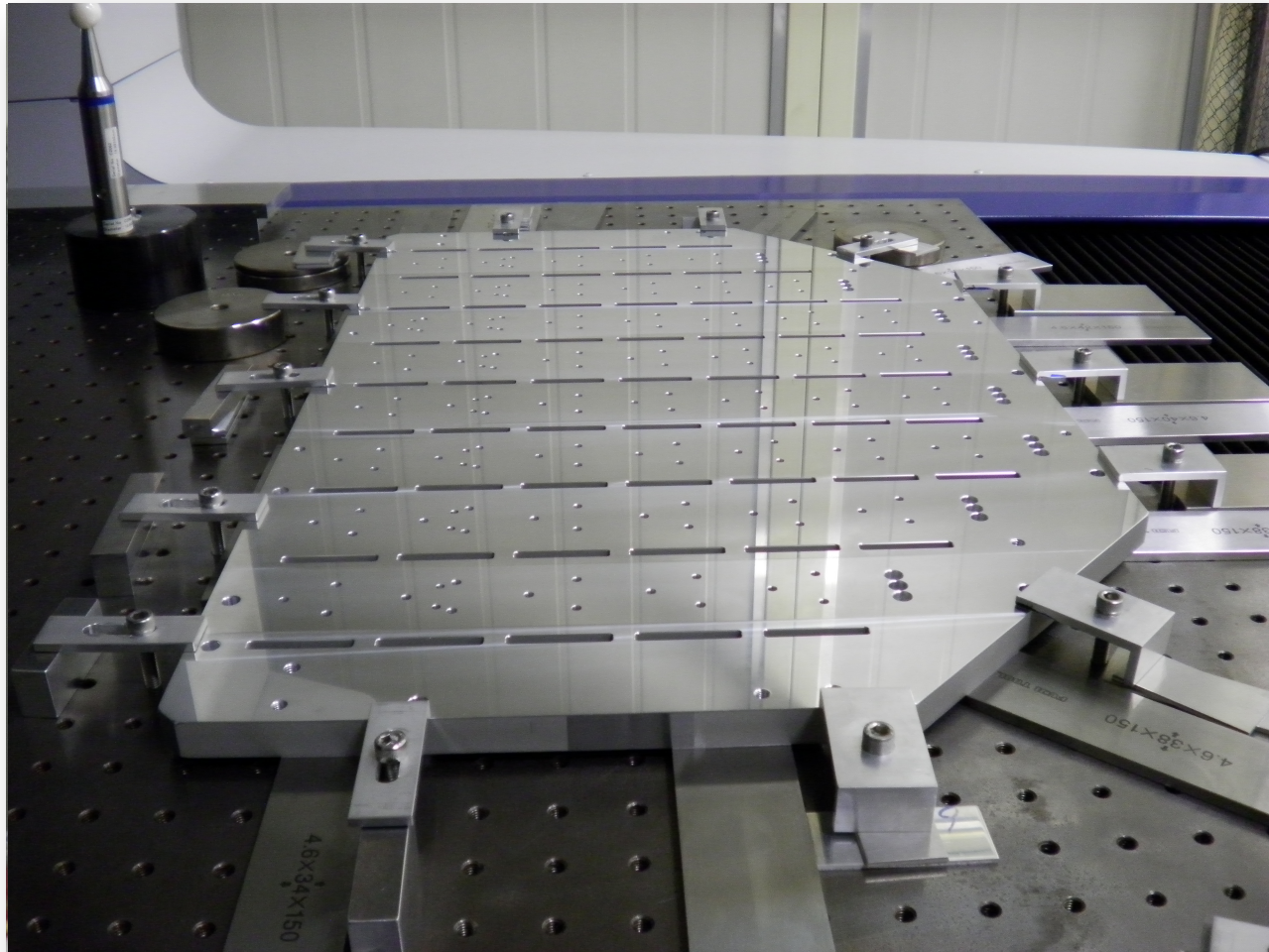


・面引き方向が変わるところで段差
 (min=1um, max=8um)

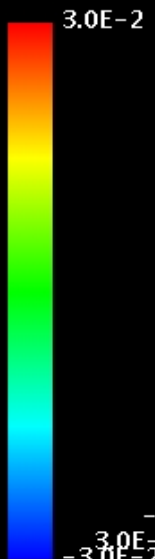
・ピン穴：
 入り1mmが2.98mm、下2mmが2.99mm。
 ※ピン打ちのしやすさを考えると、
 もうちょっと深いほうがベター。



ベースプレートの測定

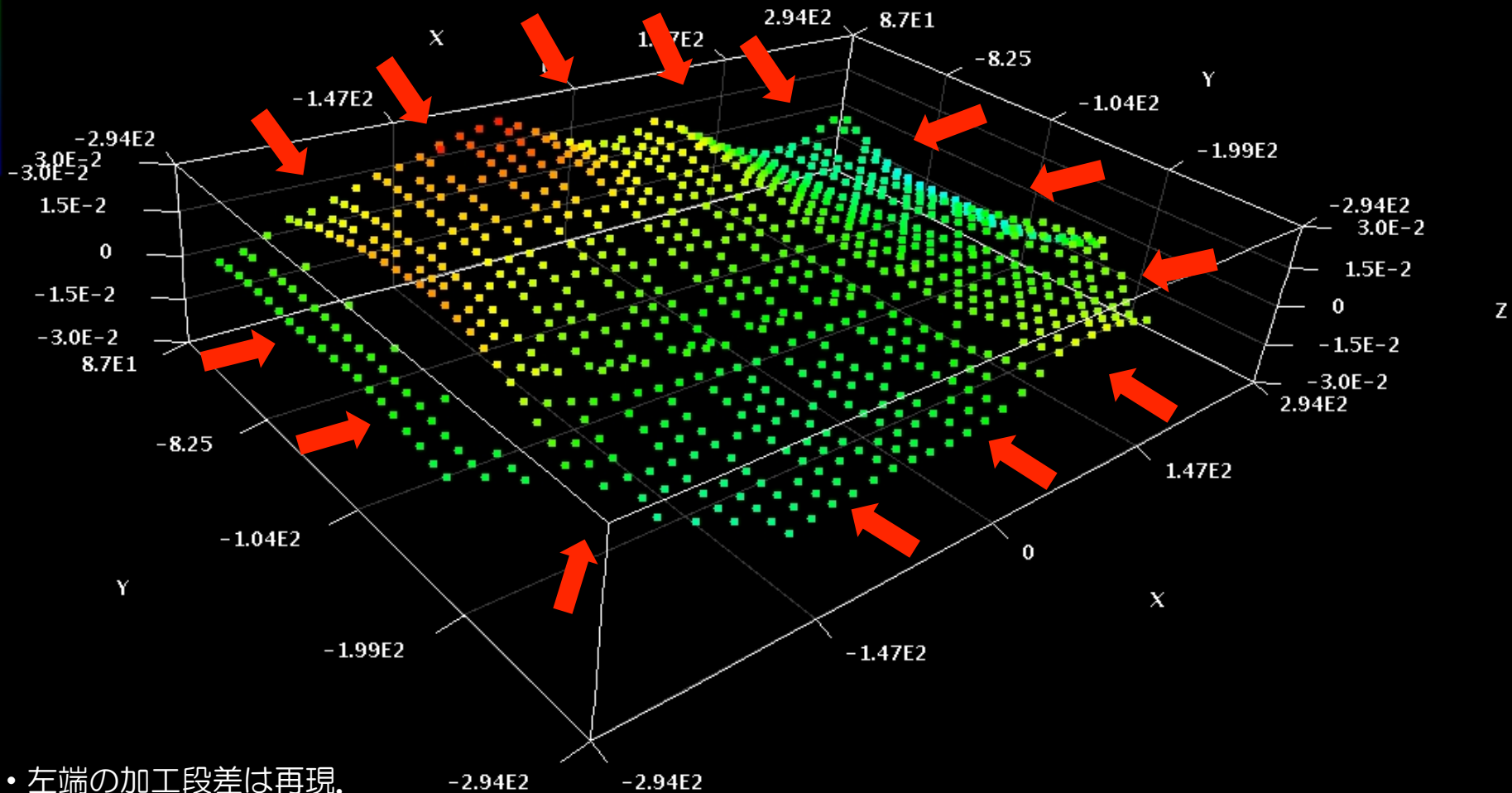


- ❖ 測定範囲 : 900(x) × 1000(y) × 600(z) mm
- ❖ 指示誤差 : $(0.35 + L/1000) \mu\text{m}$
(L:任意測定長[mm])



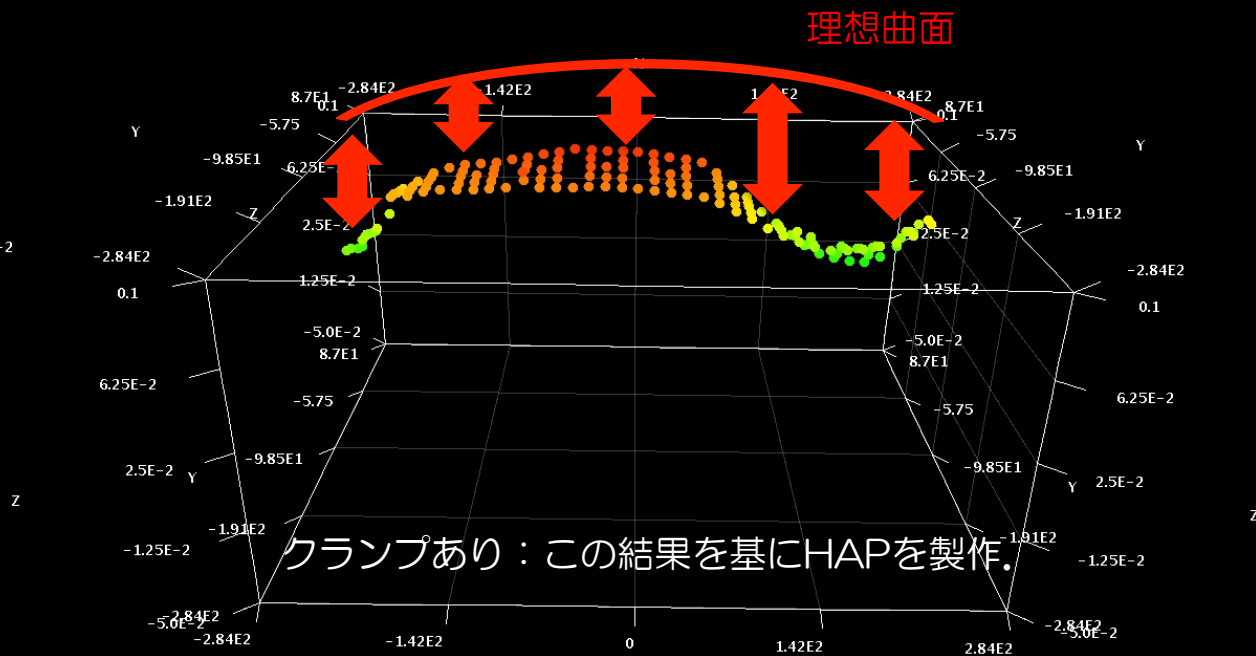
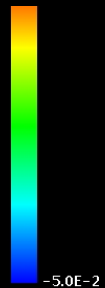
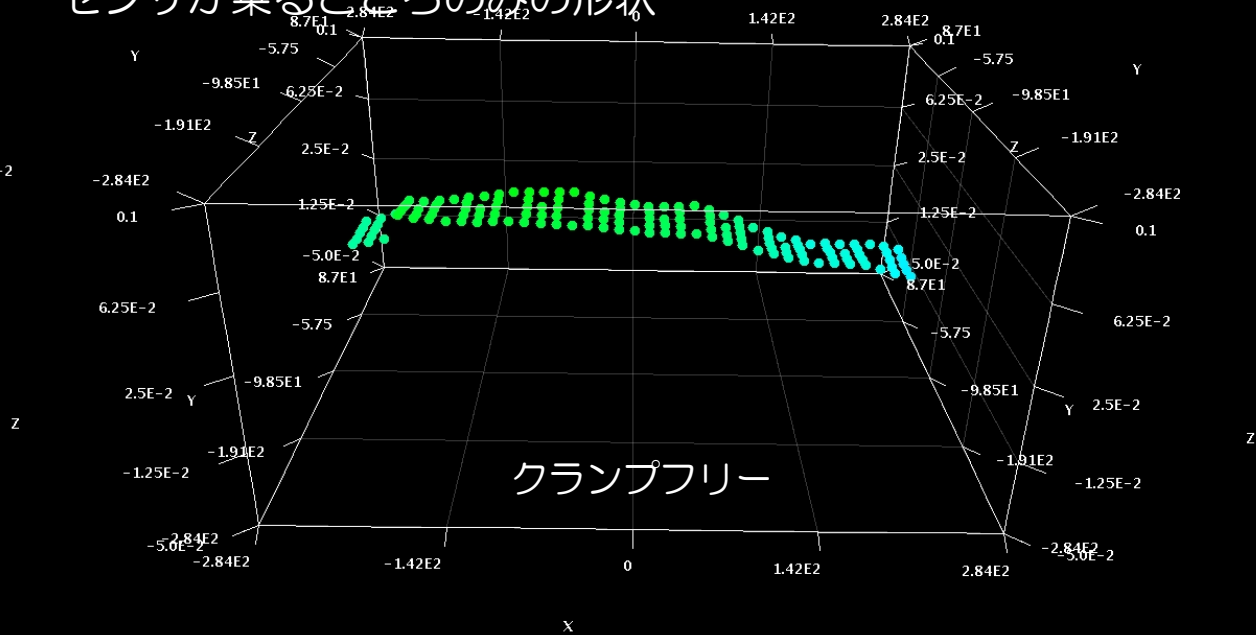
Max : 28.305 um
Min : -14.645 um
Av. : 4.231 um
Stdv : 8.854 um

クランプあり



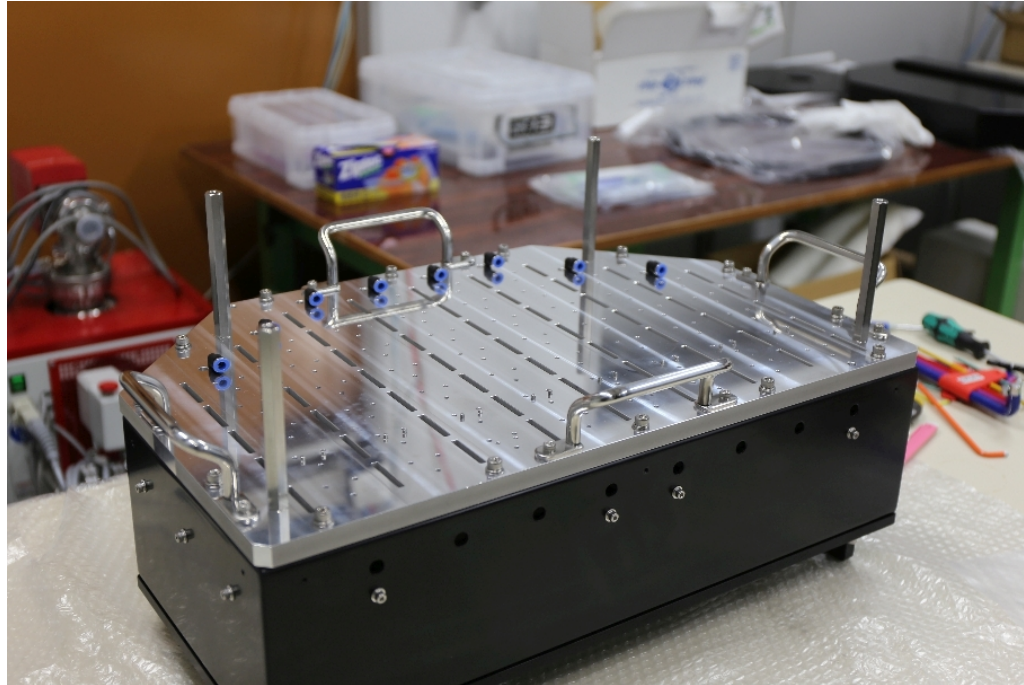
- 左端の加工段差は再現。
- クランプの仕方で形状が異なる。

センサが乗るところのみの形状

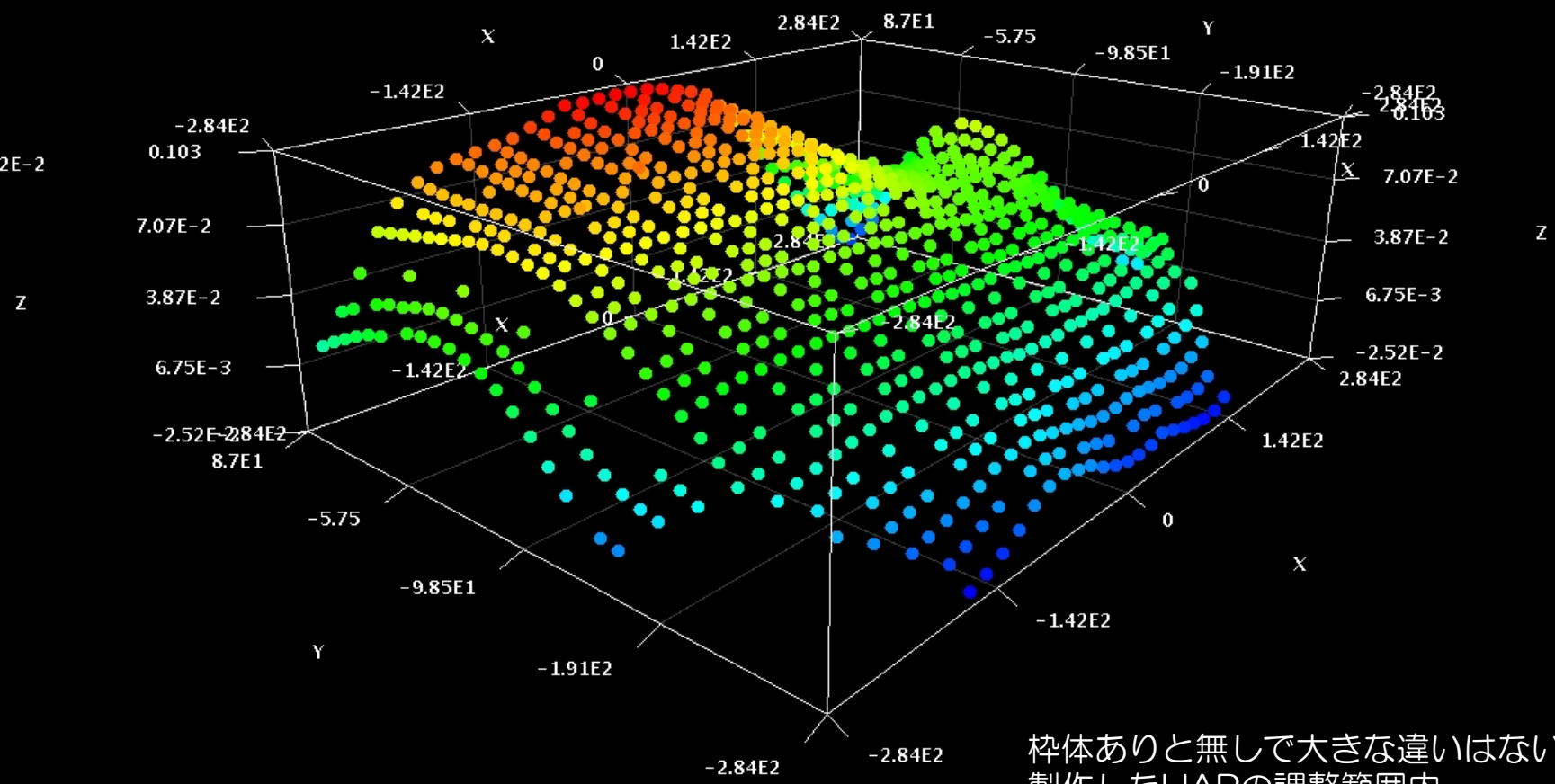
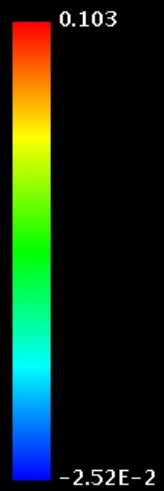




ベースプレートの測定 (w/枠体)



- ※測定時は付属パーツは取り外し.
- ※枠体取り付け穴（拡げ）加工後.
- ※位置は位置決めピンで.
- ※基本BPが剛で、枠体はそれに従うと思っている.
- ※BP単体フリー測定と同じ結果.
(と期待している. HAPはもう作ってしまっているので.)

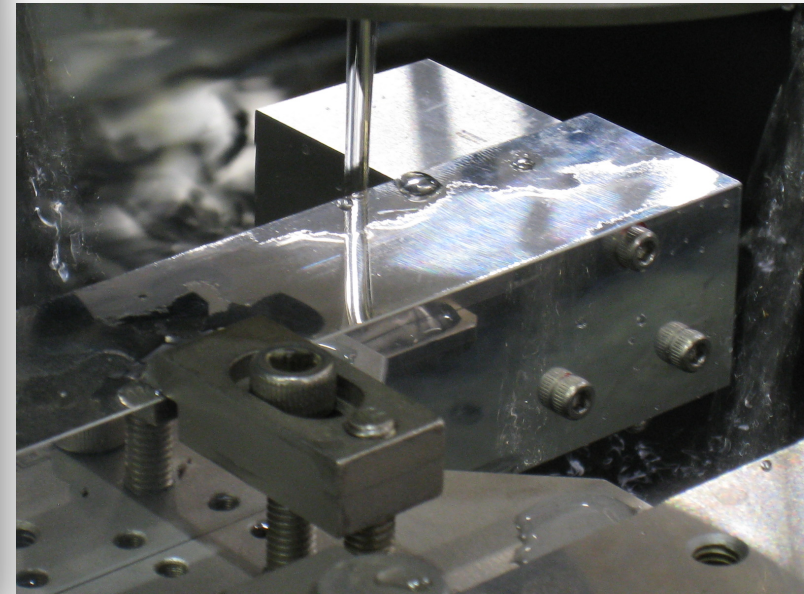
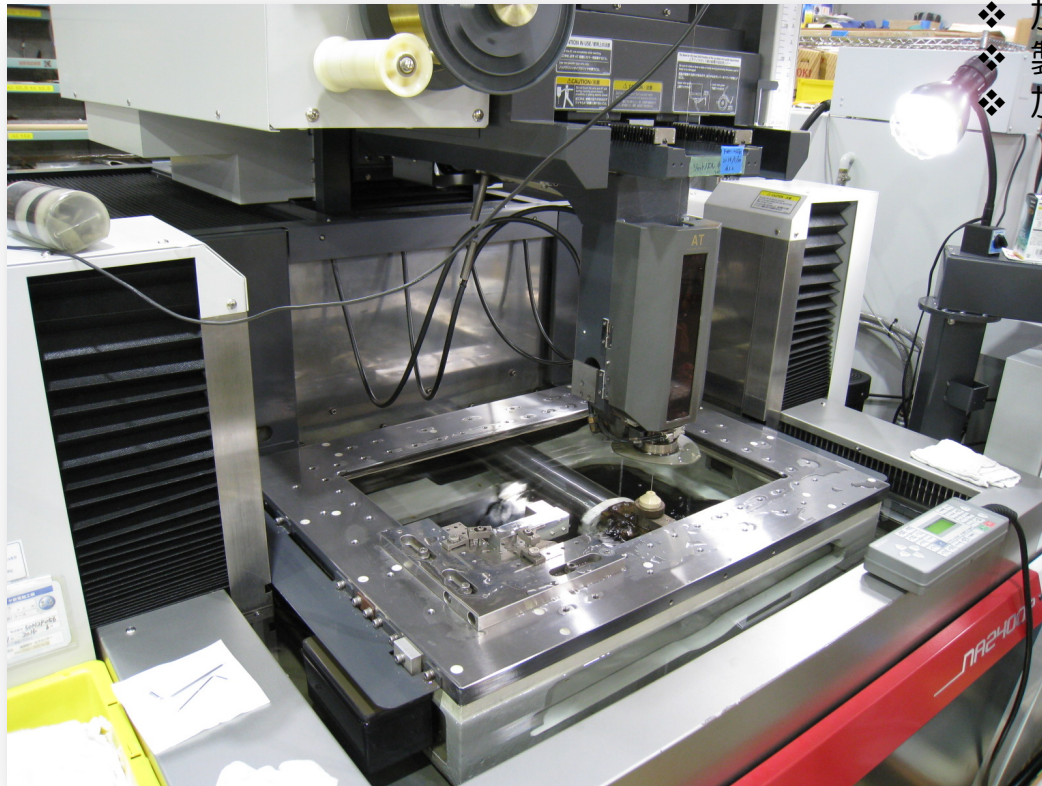


枠体ありと無しで大きな違いはない。
製作したHAPの調整範囲内。



HAPの製作

- ❖ 加工機 : 主にNA2400P (ワイヤー放電加工機)
- ❖ 製作日 : 2015年10月26日~30日
- ❖ 加工材料 : A5052スーパーサーフェス6面研磨 (29.99x29.99x30)



テーブル寸法	長さ 880mm × 幅 670mm
運動範囲	左右 (X軸) 600mm 前後 (Y軸) 400mm 上下 (Z軸) 310mm
最大加工物寸法	1050(W) x 820(L) x 305(H)
制御装置	入力最小指令単位 : 0.1um 最小駆動単位 : 50nm



HAPの製作

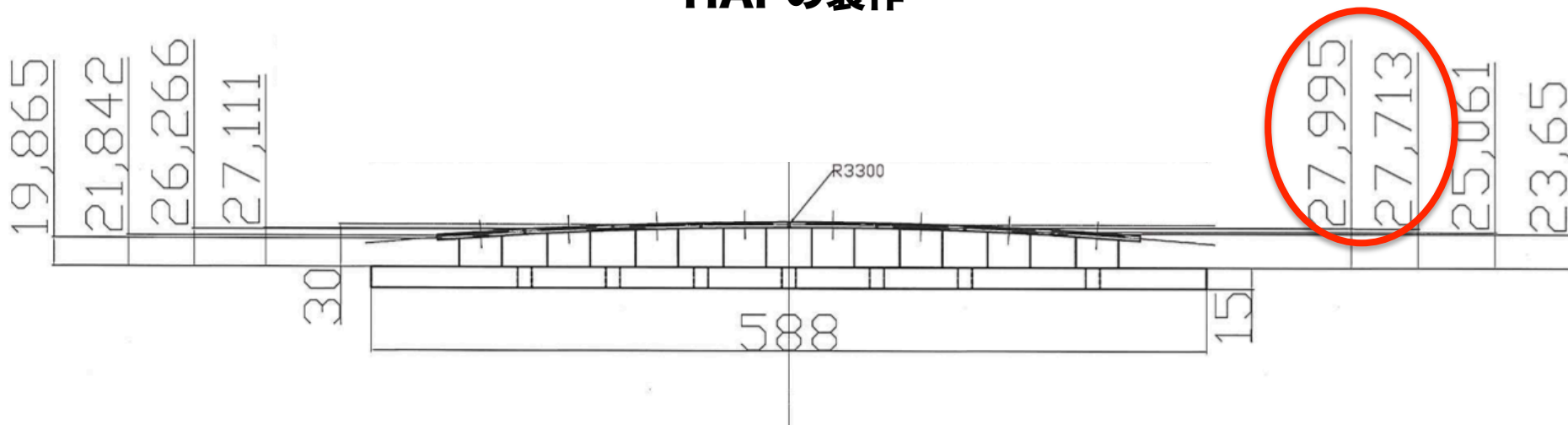
**個数が増えても、数値さえあれば
ATCでの製作は可能。**



完成！



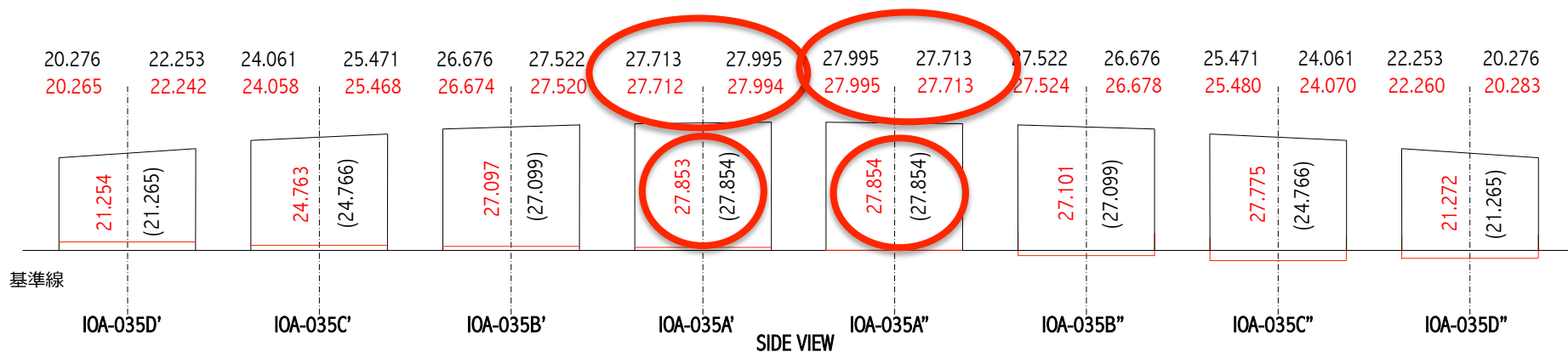
HAPの製作



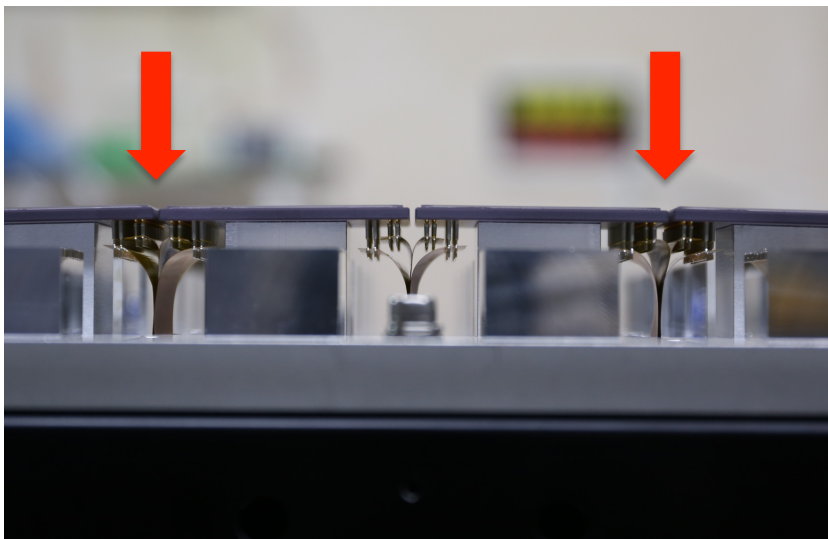
- ❖ ベースプレート
- ❖ 望遠鏡波面曲率

数値が間違っていた！

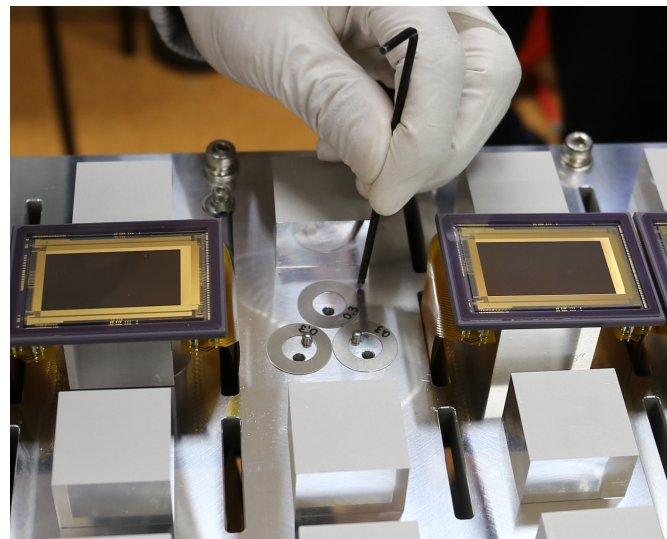
センサーごとに決定



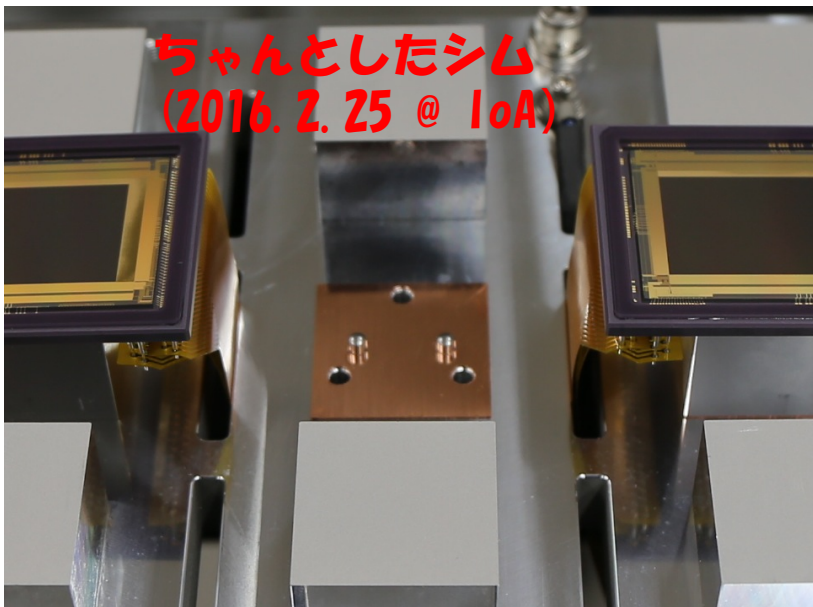
真ん中2つのHAPが低くなっている



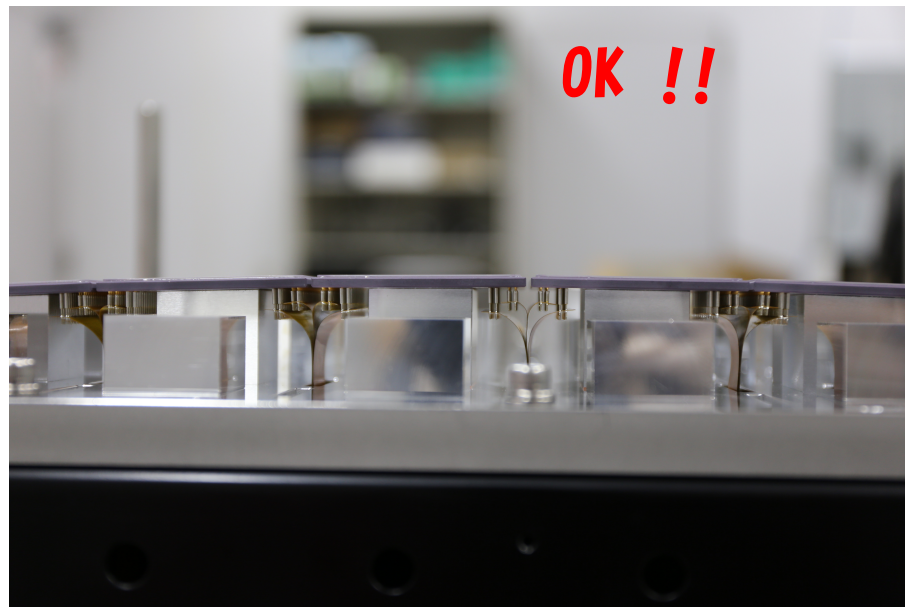
0.3mmのリングシムで対応
(2015. 11. 26 @ 木曾)



ちゃんとしたシム
(2016. 2. 25 @ IoA)



OK !!





センサーチップキャリアとHAPの貼付け

要求項目

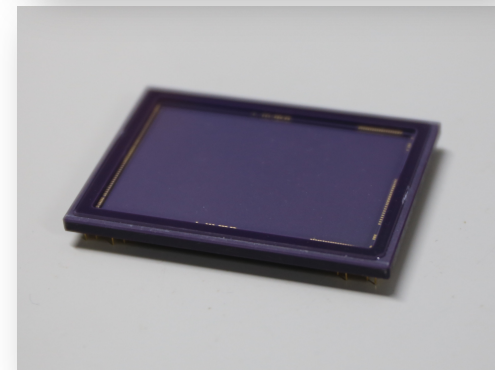
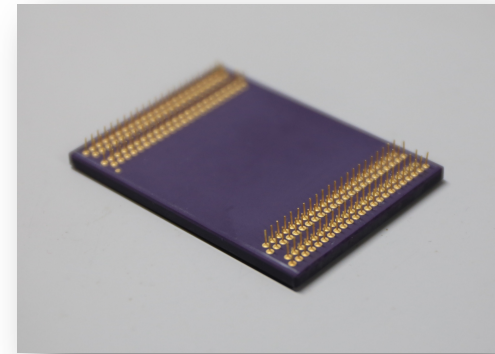
- ❖ 高い接着性.
- ❖ 高精度.
- ❖ センサー故障時に容易に交換が可能.
- ❖ センサーからの発生熱を速やかにHAPを通してベースプレートに流す.
- ❖ センサーチップキャリアに加工はできない.



熱伝導両面接着テープ! ?

【試験テープ】今回試験を行う接着テープ9種類.

メーカー	型番
Dexerials	• UT6006W
	• UT2210W
	• UT5918W
	• UT6520
	• UT2525P
	• UT6530ML
	• TR-5912F
3M	• 8904-02
	• 8904-025



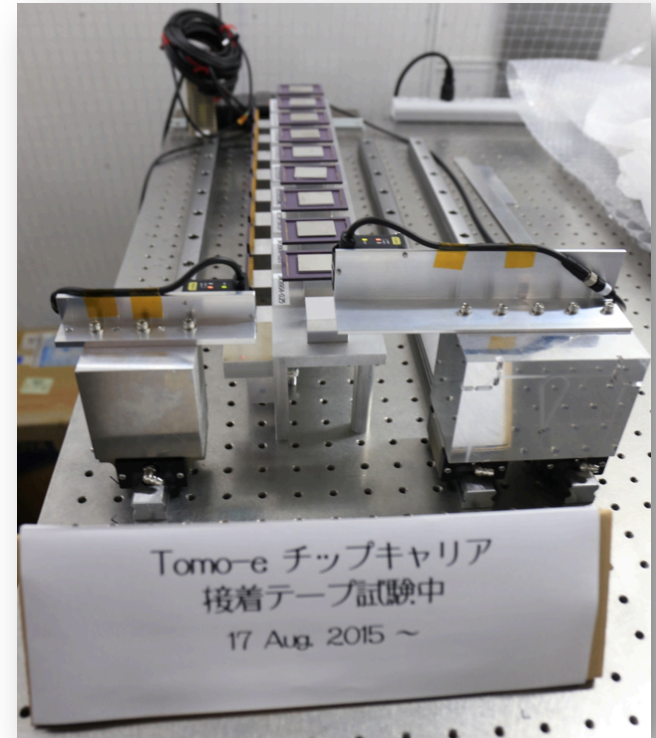


採用試験

- ❖ 接着性 → データシート、剥がし試験
- ❖ 変形の有無 → 変位測定試験
- ❖ 長時間安定性 → 長期間貼付け試験
- ❖ 熱伝導性 → TBD



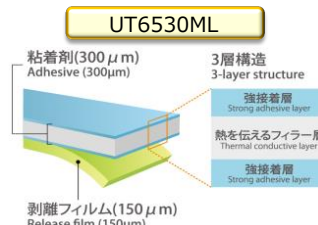
レーザー変位計
on 光学定盤で測定 (中)



熱伝導テープ ラインナップ

	UT6006W	UT2210W	UT5918W	UT2520	UT6520	UT2525P	UT6530ML
テープ厚み (um)	60um	100um	180um	200um	200um	250um	300um
剥離フィルム厚み (um)	75/50um	75/50um	75/50um	140um	150um	140um	150um
基材	基材レス	不織布	基材レス	不織布	基材レス	PET	基材レス
熱伝導率 (W/mk)	0.53W	0.46W	0.35W	0.8W	1.0W	0.8W	0.6W
熱抵抗 (°C/W)	0.58°C	1.07°C	2.4°C	1.11°C	0.89°C	1.4°C	2.1°C
接着力 (N/20mm)	3N	5.6N	25N	9N	8N	10N	21N
UL94	-	-	-	-	-	VTM-2	V-2

上記数値は保証値ではございません。

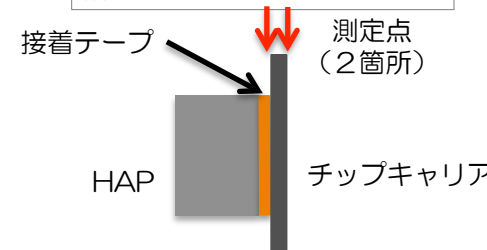
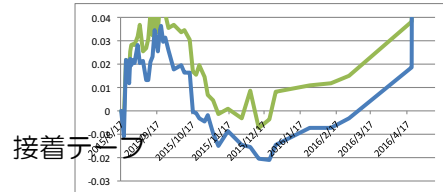
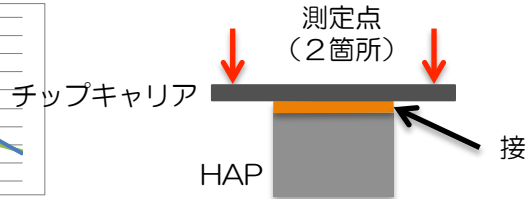
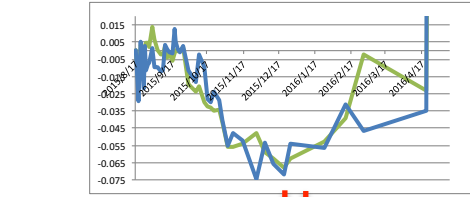
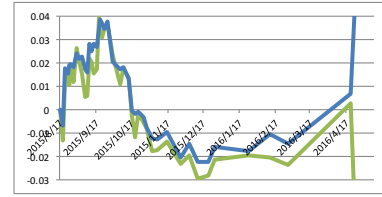
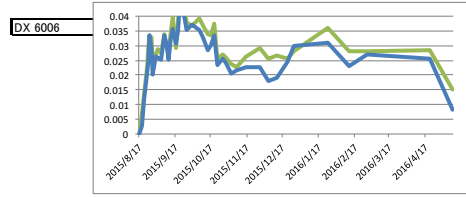
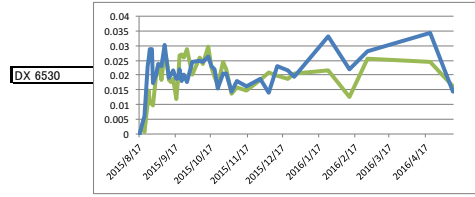
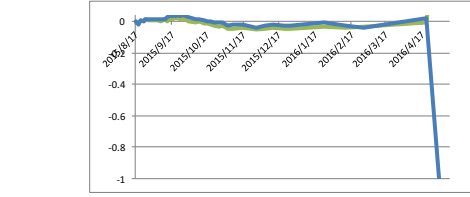
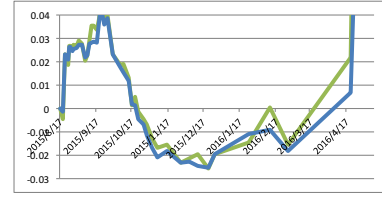
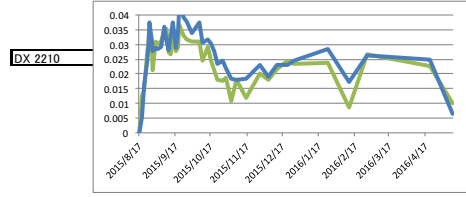
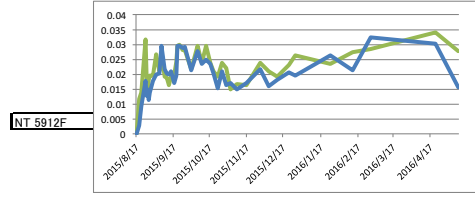
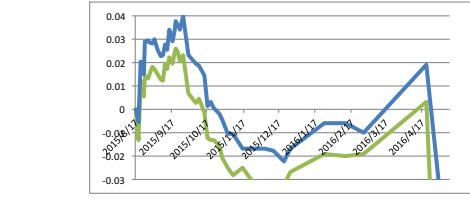
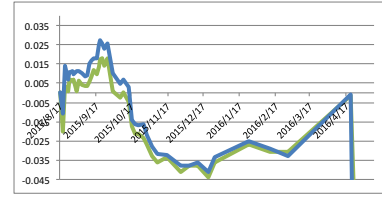
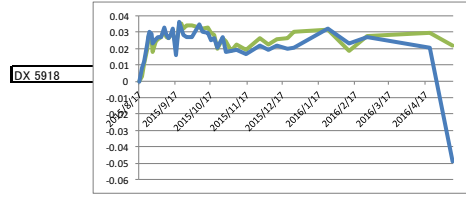
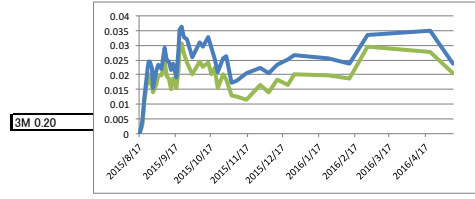
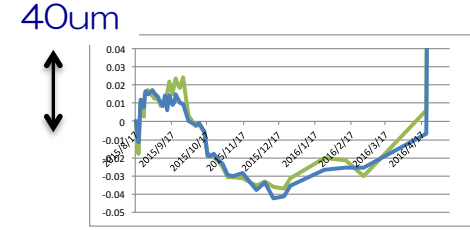
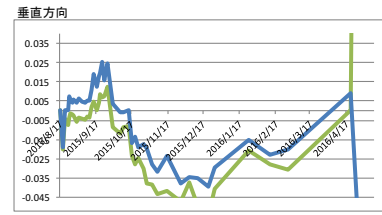
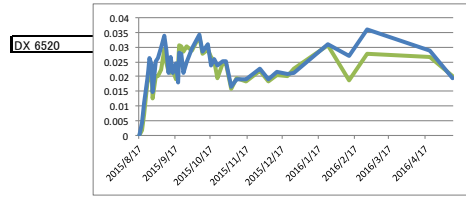
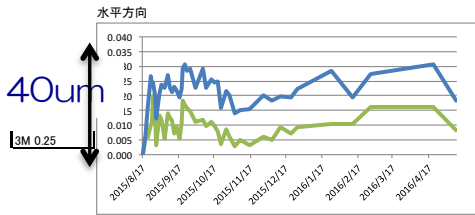


結果

- 2箇所ではほぼ同程度に変化。
- 初期変化は2-3週間で落ち着く。
- 最新測定結果がおかしい→測定セットアップが崩れた模様。
- 水平方向：テープのヘタリによる沈み込みはなさそう。
- 垂直方向：下に行ったり、上に行ったり。。

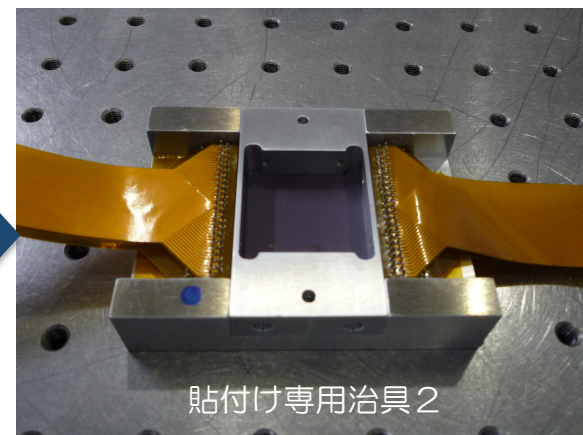
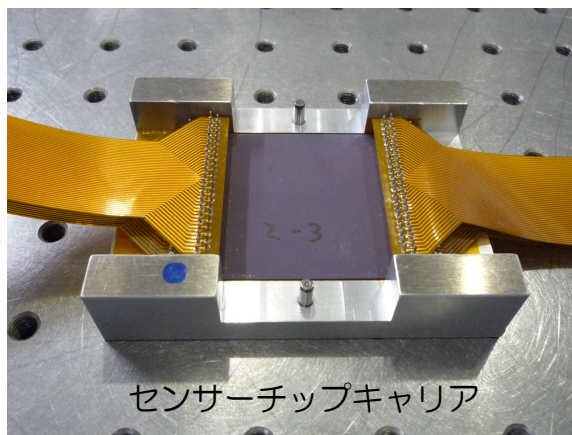
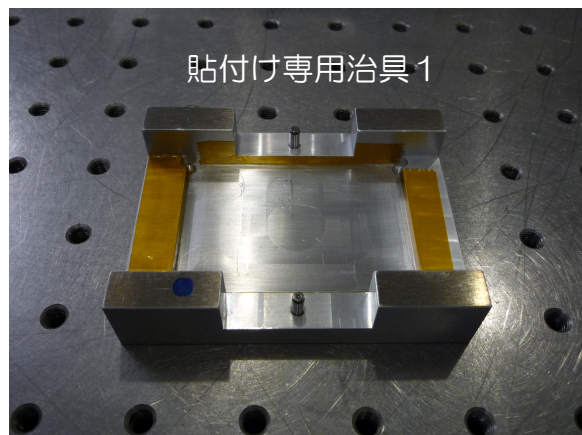
水平方向

垂直方向

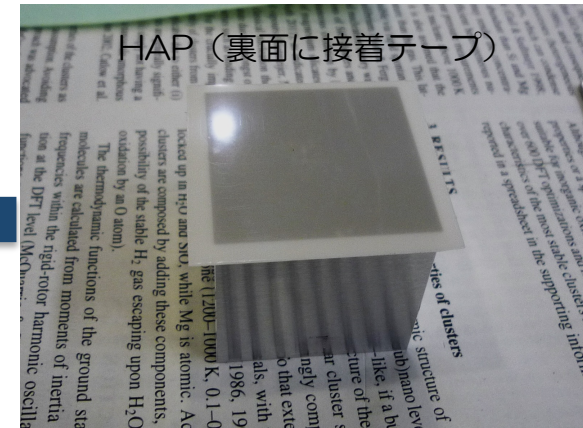
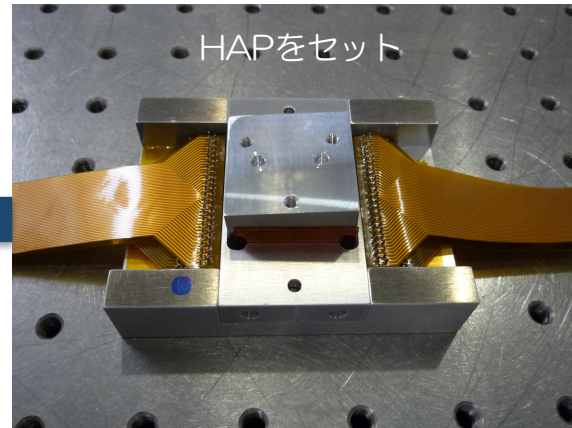
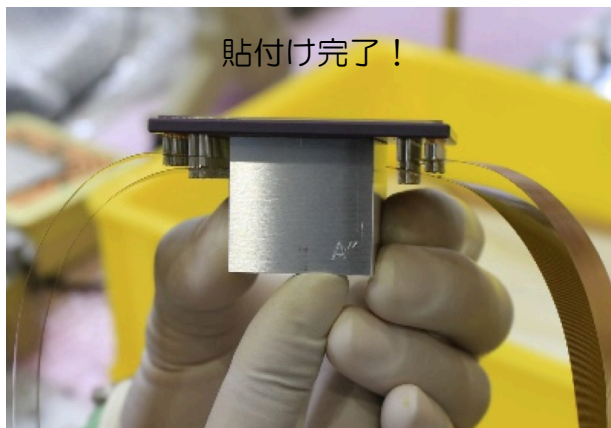




センサーチップキャリアとHAPの貼付け手順



**フルサイズモデルにおいて、2次元配置
用貼付け治具を製作する必要有り。**



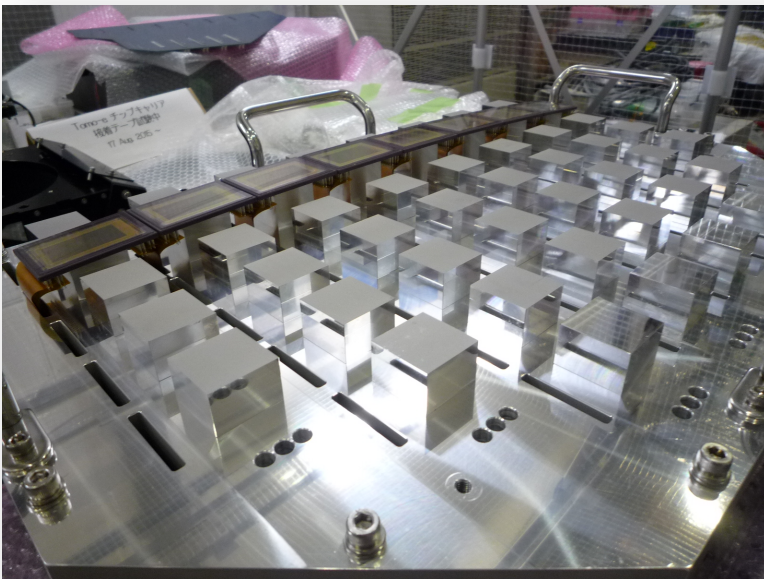
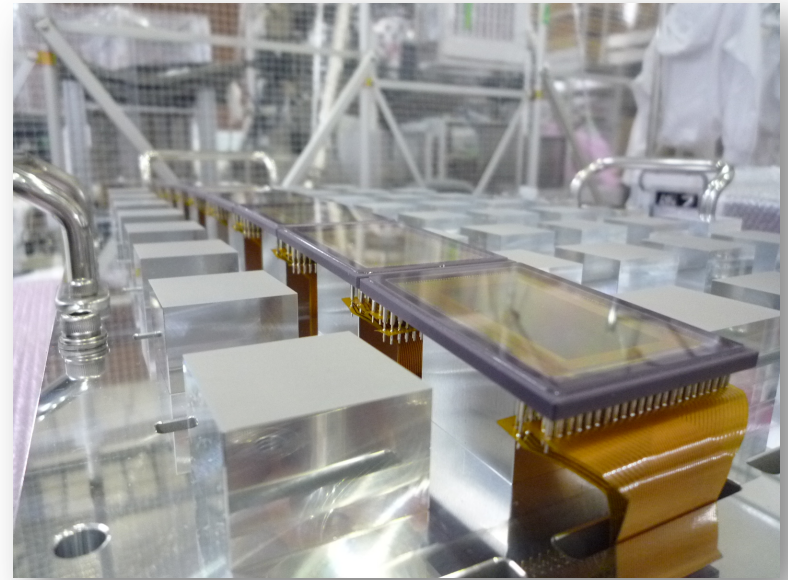
※重しを乗せる

※HAP (テープ) を暖める

THE TOMO-E GOZEN CAMERA



The Tomo-e Gozen Camera PM Gallery





The Tomo-e Gozen Camera PM Gallery

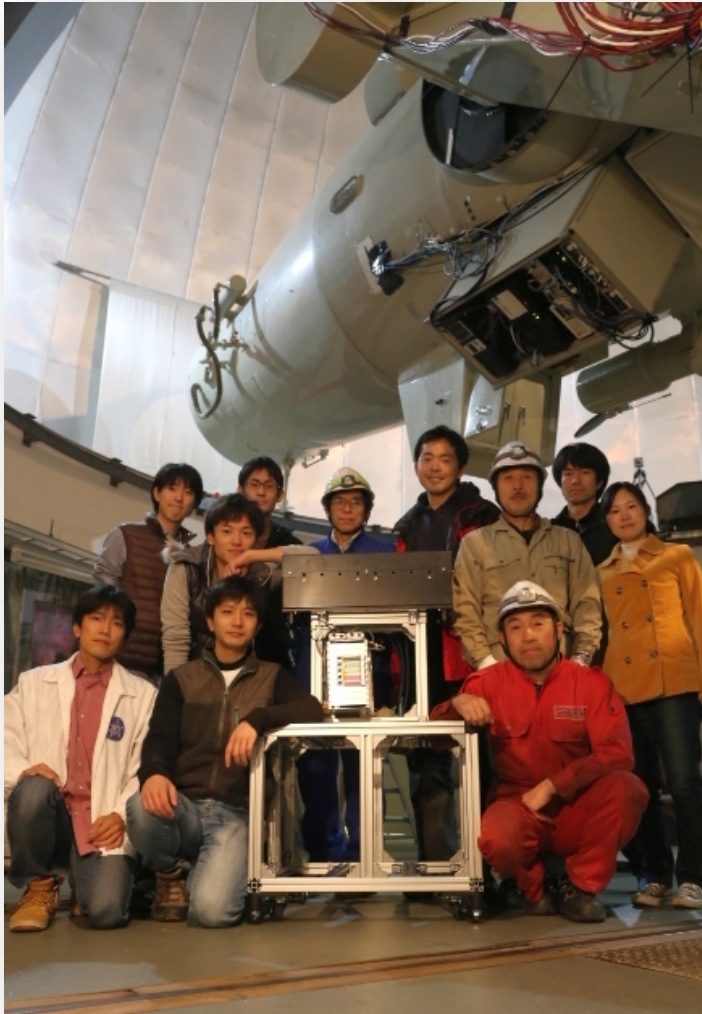


再組立の際、簡単作業できるような構造に...





The Tomo-e Gozen Camera PM Gallery



◀木曾観測所105cmシュミット望遠鏡とTomo-e PM

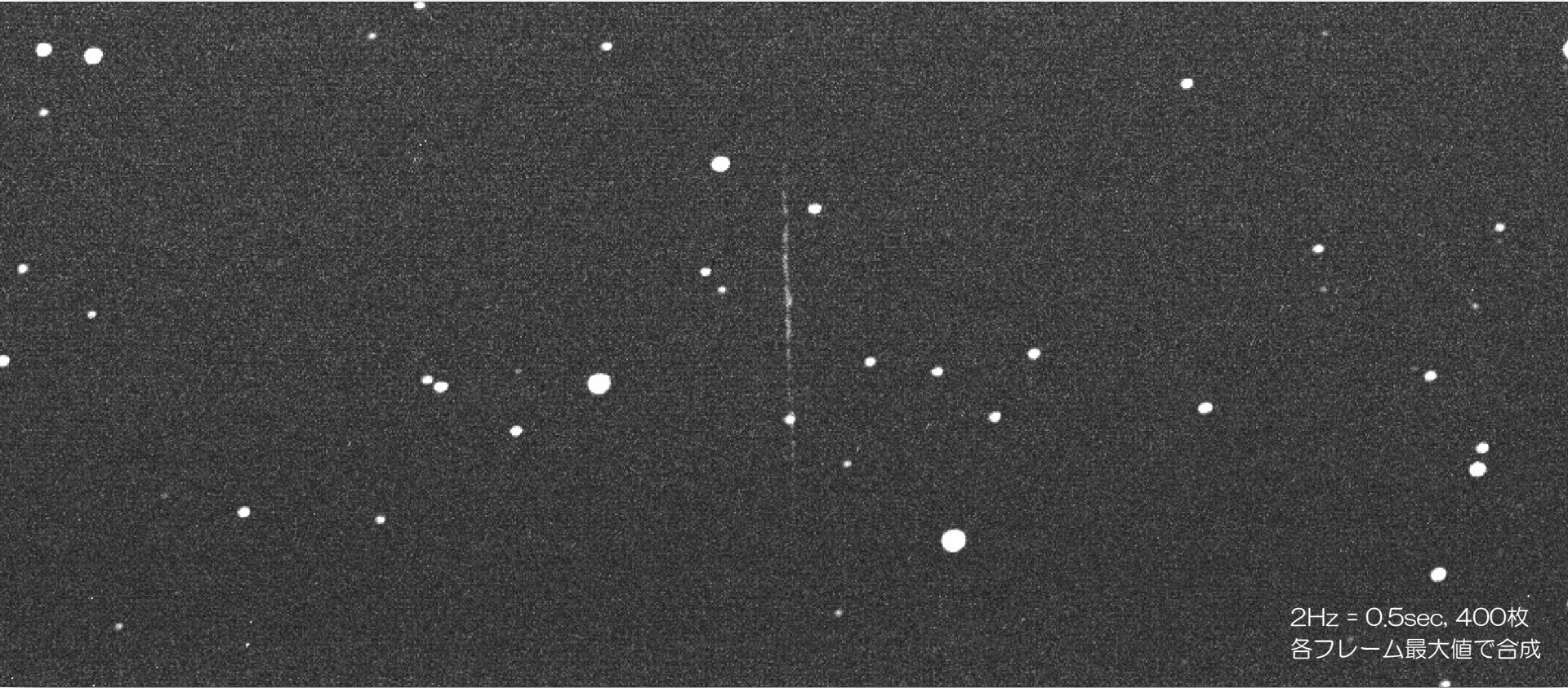


▲ファーストライト
(2015年11月24日)





Tomo-e観測



2Hz = 0.5sec, 400枚
各フレーム最大値で合成

はやぶさ2地球スイングバイ (2015年12月3日 18:28)

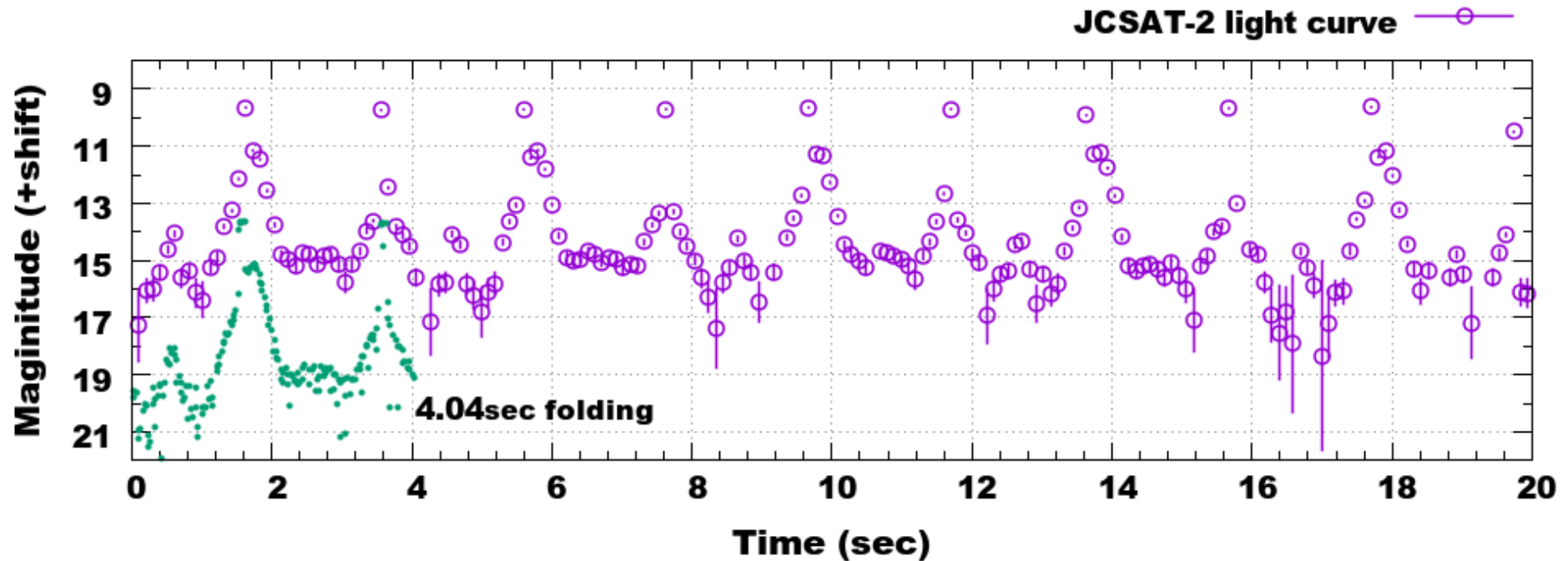


初期観測

JCSAT-2

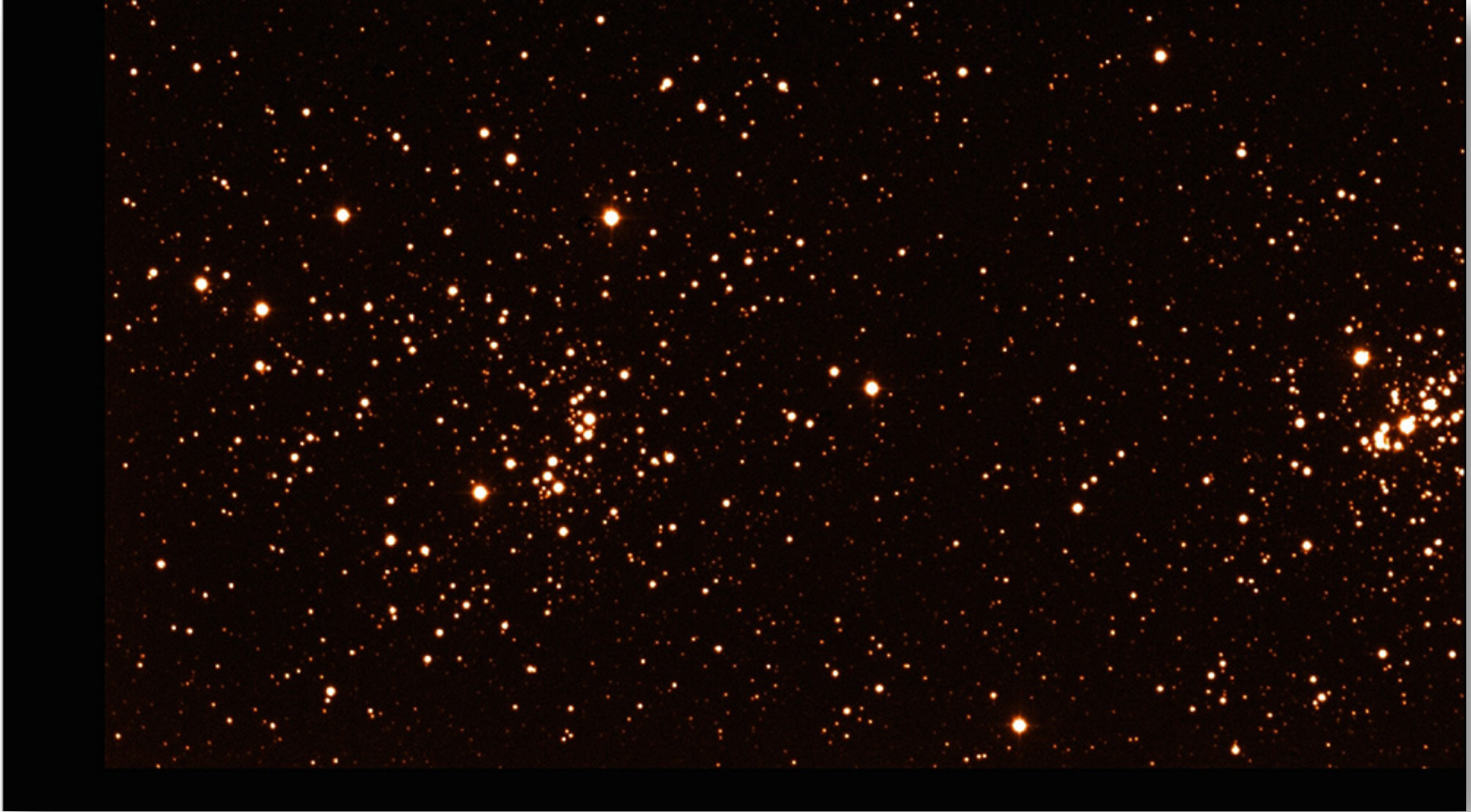
2015.11.29

- ▲人工衛星JCSAT-2：回転により明るさが変わっている。
- ▼時間軸で見ると、回転周期が約4秒であることがわかる。





初期観測

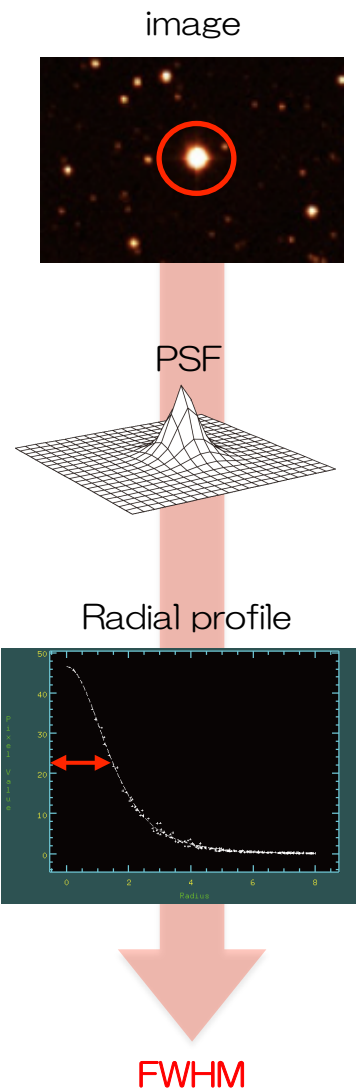


ファーストライト画像：散開二重星団h-x（中央の1チップのみの画像）

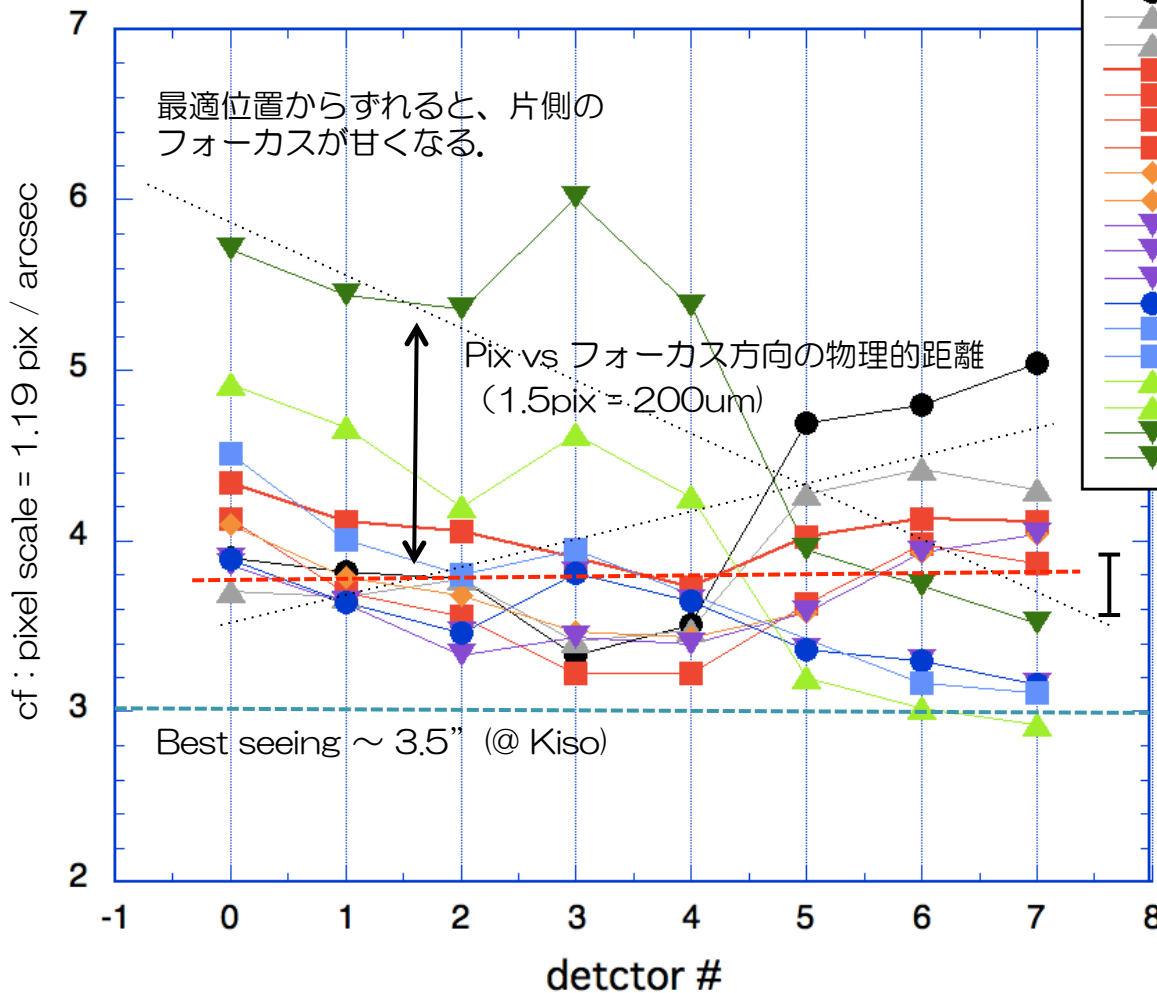


星像 (PSF) vs フォーカス位置

望遠鏡フォーカス
(副鏡) 位置



PSF (picel size)



●	28.00
●	28.00
▲	28.05
▲	28.05
■	28.10
■	28.10
■	28.10
◆	28.14
◆	28.14
▼	28.19
▼	28.19
▼	28.19
●	28.20
■	28.25
■	28.25
▲	28.30
▲	28.30
▼	28.40
▼	28.40

←
ベスト
(ベター)
フォーカス

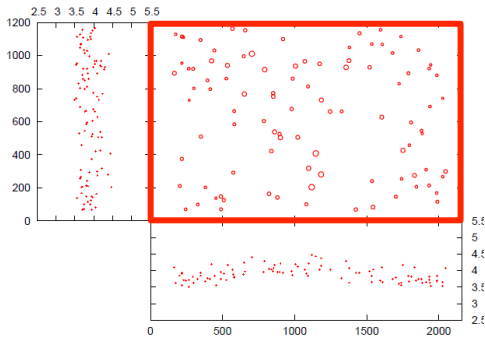
シーイングによる不定性
(0.33pix = 0.4")

- ❖ 被写界深度(~40um)以内で収まっている(ように)見える。
- ❖ Det 0~7にかけて、ややチルトがあるかも知れない。

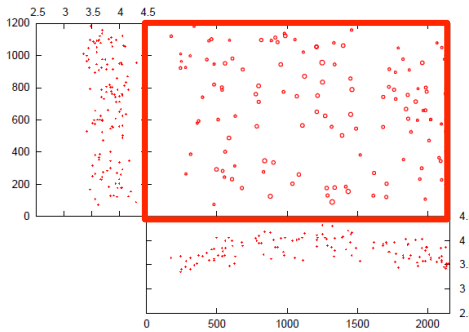


チップ内のPSFの分布

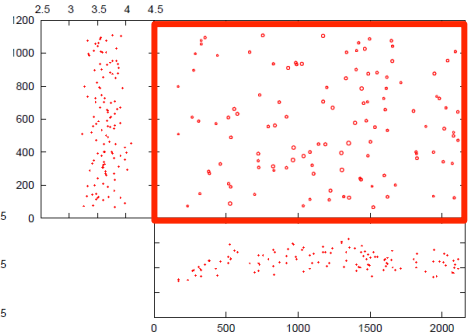
Det 0



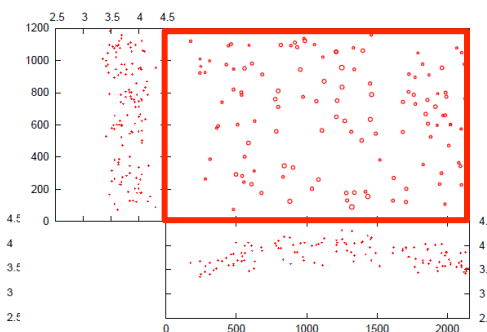
Det 1



Det 2

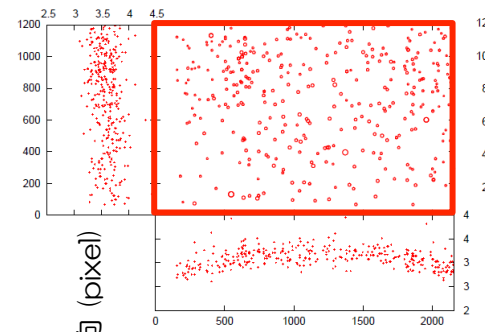


Det 3

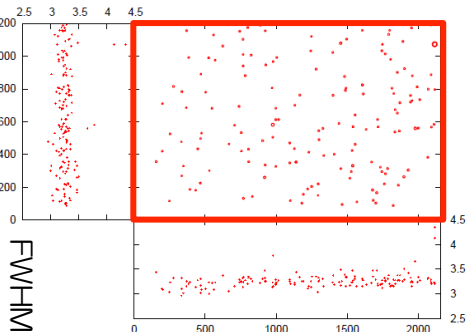


FWHM

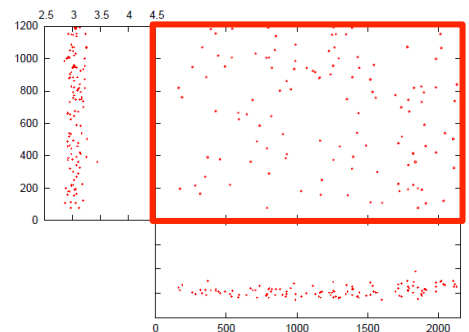
Det 4



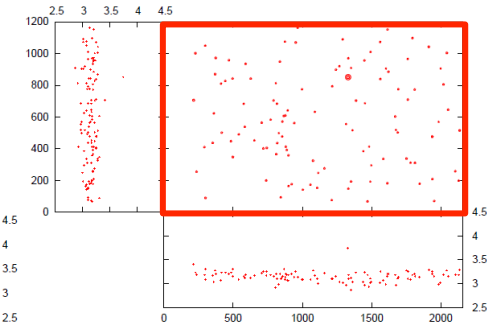
Det 5



Det 6



Det 7



縦軸:Dec方向 (pixel)

横軸:RA方向 (pixel)

- ❖ フォーカスが最適値付近での各チップでのPSFをプロット.
- ❖ Det 0~Det4で凸型 → 面内でのフォーカスのずれ? (1 pix ~ 120umは大き過ぎる...)
- ❖ Det 5~7はほぼフラット. (Det.0-4との比較→チルト成分か?)



THE TOMO-E GOZEN CAMERA

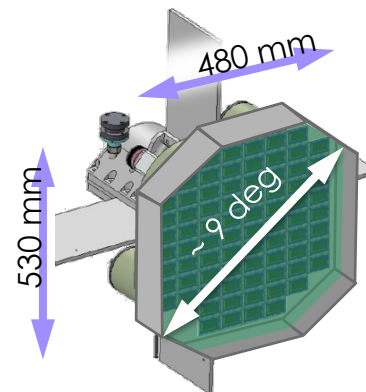
まとめ

- ❖ Tomo-e プロトタイプ (PM) を**技術実証機**として製作 (CMOSセンサー8個) .
- ❖ 東京大学木曾観測所105cmシュミット望遠鏡に搭載.
- ❖ 予定通り**ファーストライト**に成功.

- ❖ 画像から得られる値と機械加工精度・測定等からの値を比較.
 - **誤差の範囲内で一致** (許容範囲内) .
 - 製作工程はこれでOK!
- ❖ **熱評価試験はまだ.**
 - 空冷システムはさほど効果なし?
- ❖ **ハンドリングにはまだ改善の余地あり.**

今後

- ❖ 温度環境 (発生熱) の評価実験.
- ❖ 空冷機構の有効性の評価.
- ❖ フルサイズモデル (84センサー) へのフィードバックと設計.

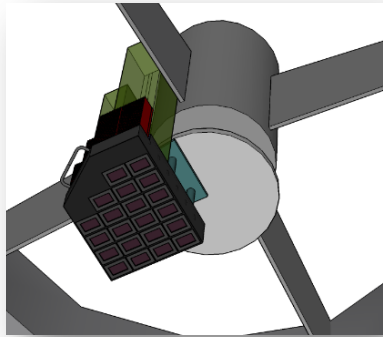


Tomo-e Gezen Camera (Full chip (84) model)

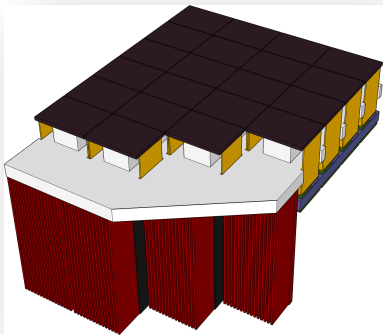




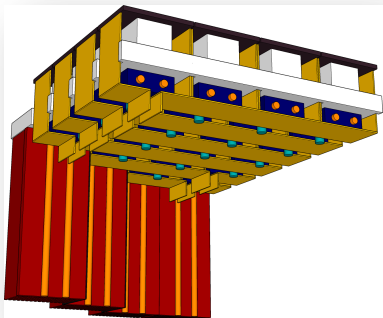
超広視野高速カメラTomo-e Gozen



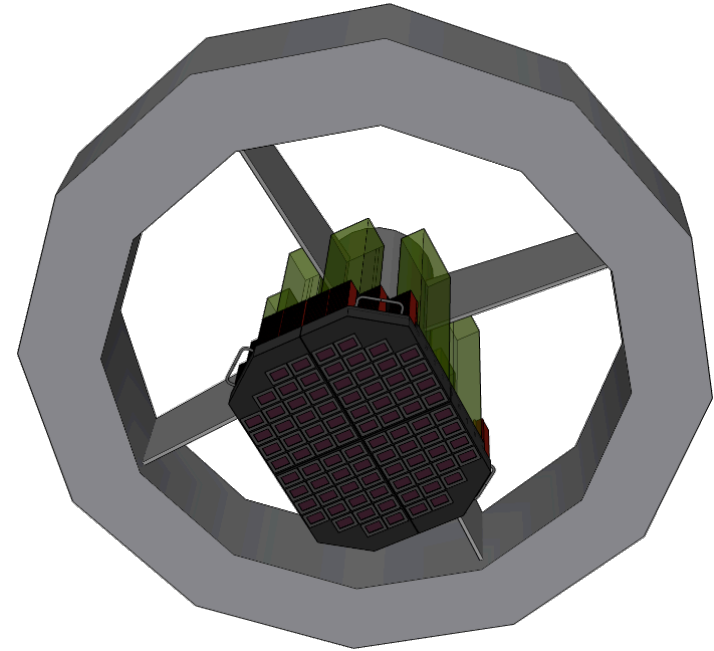
4台のカメラで構成



CMOSセンサを
21チップ搭載



常温常圧
空冷
背面に読み出し回路



- CMOSセンサを84台搭載
- 2017年度完成予定
- 同設計の4台のカメラで構成
- 1台のカメラを完成させた後に量産