

# 木曾超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen Q0の構造特性の評価

○高橋 英則（東京大学大学院理学系研究科・天文学教育研究センター）

酒向重行<sup>a</sup>, 大澤亮<sup>a</sup>, 一木真<sup>a</sup>, 小島悠人<sup>a</sup>, 土居守<sup>a</sup>, 小林尚人<sup>a</sup>, 宮田隆志<sup>a</sup>, 本原顕太郎<sup>a</sup>, 諸隈智貴<sup>a</sup>, 小西真広<sup>a</sup>, 満田和真<sup>a</sup>, 有馬宣明<sup>a</sup>, 青木勉<sup>a</sup>, 征矢野隆夫<sup>a</sup>, 樽沢賢一<sup>a</sup>, 猿楽祐樹<sup>a</sup>, 森由貴<sup>a</sup>, 中田好一<sup>a</sup>, 戸谷友則<sup>a</sup>, 松永典之<sup>a</sup>, 茂山俊和<sup>a</sup>, 臼井文彦<sup>b</sup>, 渡部潤一<sup>c</sup>, 山下卓也<sup>c</sup>, 田中雅臣<sup>c</sup>, 前原裕之<sup>c</sup>, 春日敏測<sup>c</sup>, 有松巨<sup>c</sup>, 猪岡皓太<sup>c</sup>, 富永望<sup>d</sup>, 板由房<sup>e</sup>, 小久保充<sup>e</sup>, 奥村真一郎<sup>f</sup>, 浦川聖太郎<sup>f</sup>, 池田思朗<sup>g</sup>, 森井幹雄<sup>g</sup>, 佐藤幹哉<sup>h</sup>

<sup>a</sup> 東京大学、<sup>b</sup> 神戸大学、<sup>c</sup> 国立天文台、<sup>d</sup> 甲南大学、<sup>e</sup> 東北大学、  
<sup>f</sup> 日本スペースガード協会、<sup>g</sup> 統計数理研究所、<sup>h</sup> 日本流星研究会

## 概要

東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡は 2016 年度をもって共同利用を終え、超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen を中心とするプロジェクト観測運用へと移行した。現在は、これまでのプロトタイプモデル (PM) の製作工程やシュミット望遠鏡での観測を受けての改良・改善点の洗い出しを経て、84 センサ搭載のフルモデル (FM) 製作に向けて開発が進んでいる。FM の特筆すべき点は焦点面全体が 4 分割されており、各々独立なカメラとして使用できることである。それらを焦点面で組み合わせることで、最終的に視野 20 平方度の Tomo-e Gozen が完成する。機械的特徴として、内梁を残した削り出しによる筐体の軽量化・コンパクト化がされている他、配線や組立、フィルター窓の組み込みの際のハンドリングの良さなどを考慮したアイデアが盛り込まれている。また多数センサによる大きな発熱対策のため、別途製作した熱モデルを用いた熱試験も行われ、熱浴(望遠鏡本体)と熱コンタクトを大きく取ることによって排熱が可能であることを確認した。さらに PM でも採用されたシュミット望遠鏡の 3 次元曲面焦点面を再現するためのセンサ毎に独立した形状の高さ調整機構 (Height Adjustment Plate : HAP) がベースプレートの 3 次元測定の結果を基に製作された 2017 年 10 月には 4 センサ搭載の最終評価モデル (Q0 : Q series type-zero) をシュミット望遠鏡に取付け、試験観測を行った。実際に天体の結像性能を評価した結果、機械的設計・製作に問題ないことが確認された。熱的にはセンサから発生する熱は望遠鏡側へスムーズに排熱されているが、逆にエレクトロニクスからの熱がかなり大きいことがわかった。実験室での模擬試験では自然空冷でも許容範囲内であるが、強制冷却によってさらに温度上昇を抑えることができ、FM にむけての冷却機構を模索中である。

## 1. Tomo-e Gozenとは？

Tomo-eは東京大学木曾観測所105cmシュミット望遠鏡の全視野を84チップの常温駆動CMOSセンサーで覆い、20平方度の視野をフルフレームで最速2Hz観測できる超広視野高速カメラである。高速で時間変動する天体の広域サーベイを主な目的としている。用いられるセンサーはCanon製のCMOSセンサーで、通常の動作温度範囲ではCCDに匹敵する低ノイズを実現する。天文学では常識となっている真空・冷却のための装備が必要ないため、本体は軽量且つ簡易な構造にすることができる。

表 1 : Tomo-e Gozen の仕様

本 体	
サイズ	600 (W) x 500 (L) x 200 (H) mm
重量	~50kg (本体のみ)、~80kg (エレキ等含む)
Canon CMOS センサー	
センサー数	84 個
センサーフォーマット	2160 x 1200 (total), 2000 x 1128 (photosensitive)
ピクセルサイズ/スケール	19 um/pix, 1.19 arcsec/pix
ファイルサイズ(フル)	4.9 MB/frame/chip, 3.8 GB (100 frames, 8 chips)
フレームレート	0.5 sec/frame
ダークカレント	1e- (~18°C)
積分時間 (typical)	0.5 sec (全読み出し), 0.05 sec (512 x 512 読み出し)
可観測波長域	$\lambda = 400 \sim 650$ nm
フィルター	なし
望 遠 鏡	
搭載望遠鏡	東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡
高度リミット	8 deg
シーイングサイズ	4 arcsec

## 2. Tomo-e PM から FM へ

これまで 8 センサ搭載の Tomo-e/PM を製作し、性能評価試験を行ってきた。これは Tomo-e の技術実証機であり、形状はフルサイズを半分にしたものである。PM では、構造体形状の歪みを望遠鏡焦点面形状に補正する機構 (高さ調整用治 : Height Adjustment Plate : HAP) を採用し、その有効性が試験観測で実証されている。Tomo-e Gozen Q series は FM84 チップ搭載を想定した最終モデルであり、基本的な機械的形狀・製作のコンセプト (HAP など) は PM を踏襲している。但し、望遠鏡への設置のハンドリングやセンサーが多数になることを考慮し、焦点面を 4 分割した形状に変更した。さらに最終型を想定した望遠鏡インターフェースも新規製作した。

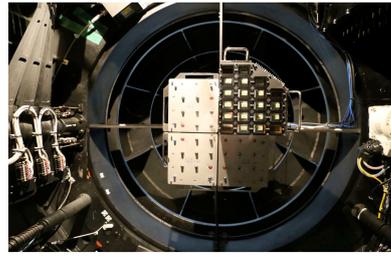
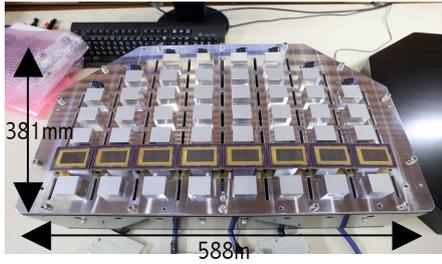


図1：PM 筐体（左）とシュミット望遠鏡に搭載された FM/Q0（右）

### 3. Tomo-e/FM の機械的特徴

FM筐体の特徴は、木曾シュミット望遠鏡への搭載に最適化されたコンパクトな構造となっていることである。前述の通り、焦点面を4分割したユニットで構成され、これにより、各種試験、搭載、交換時のハンドリングが容易になる。2017年秋に、センサーを外周に4つ搭載したQ0が試作され、2017年10月には実際にシュミット望遠鏡に搭載され、試験観測も行われた。そこで望遠鏡との噛み合わせ、強度確認、焦点位置の確認、温度環境などの試験が行われた。

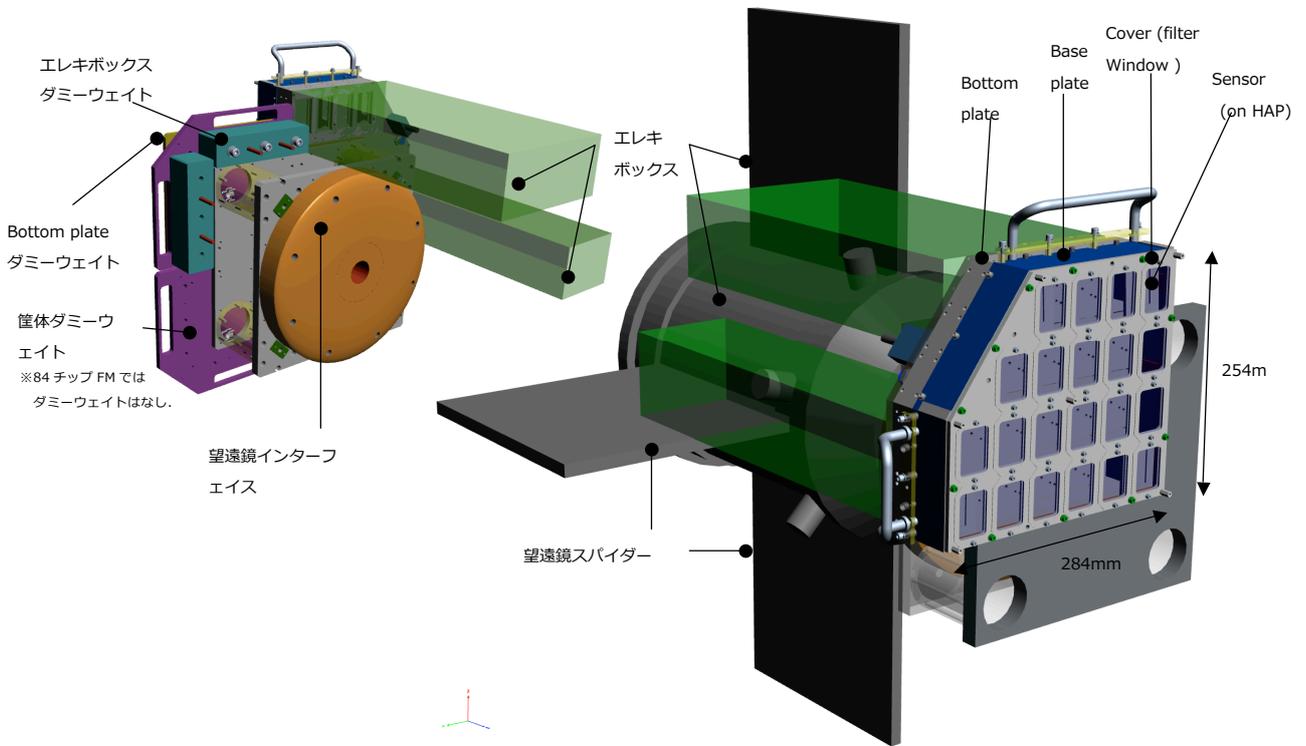
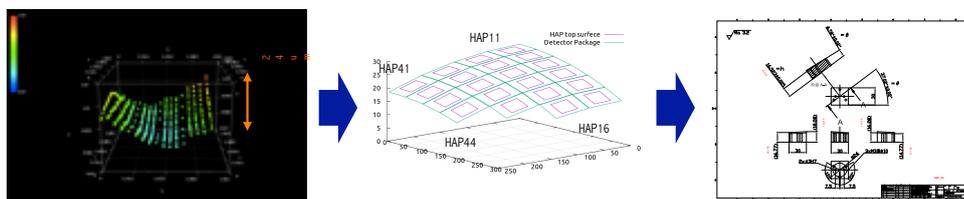


図2：望遠鏡に搭載した状態の Tomo-e/Q0

### 4. ベースプレートの形状測定と焦点位置調整

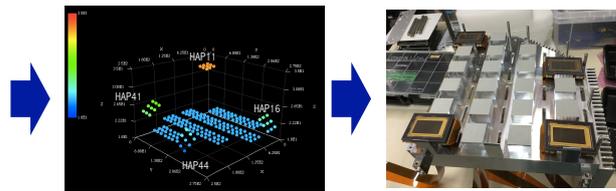
84 チップを使用する Tomo-e はシュミット望遠鏡の大きな湾曲焦点面に位置するすべてのセンサーの焦点を合わせる必要がある。センサー（ピクセル）の大きさを考慮するとその被写界深度（焦点が合う厚み）は  $60\mu\text{m}$  となり、機械加工と組立をあわせた精度はこれ以下にしないといけない。そこでセンサーが搭載されるベースプレート形状に対応した個別の HAP を製作、配置することでこの精度を達成した。その手順を図3に示す。



(1) BPの3次元測定結果。P-Vで24umの高  
低差があるが、個々のセンサー（HAP）の範  
囲内では1-2umの傾きで収まっている。

(2) 1/4 Quadrantのシュミット望遠鏡焦点面  
曲面。この面にセンサー面が配置されるよう  
に、個々のHAPの高さで調整する。

(3) HAPの製作図面。BPの形状（傾き）に  
合わせて、HAPの形状も各位置で異なる。



(4) HAP込みのBPの3次元測定結果。FM/Q0では四隅のみセンサーを配置予定。(2)の理想曲面に沿った形状になっていることがわかる。

(5) センサーを搭載。固定には簡便性・可換性などを考慮し、熱伝導性両面テープを用いている。

図3：ベースプレートの形状測定とHAPの製作および焦点位置調整。

## 5. シュミット望遠鏡での焦点位置測定

前章の製作の確認のために、シュミット望遠鏡に搭載した状態でフォーカスを変えながら画像を取得、センサー毎の最適フォーカス位置で全面に渡って天体(点源)を使ってPSFを計測した。その結果、**最適フォーカス位置が4つのセンサーで一致**することを確認した(図4中央下)。つまりシムなどの調整なしに、現状の機械加工およびHAPで光学的精度を達成した。さらに、各センサー面内でPSFがほぼ一定値となっている(図4の左右)。これは、各センサーが「**あおり**」、「**傾き**」なしに、ローカルな焦点湾曲面を正確に再現していることを示している。

Det_011	3.66 pix
Det_016	3.07 pix
Det_041	3.57 pix
Det_044	3.48 pix
@Focus position	28.20

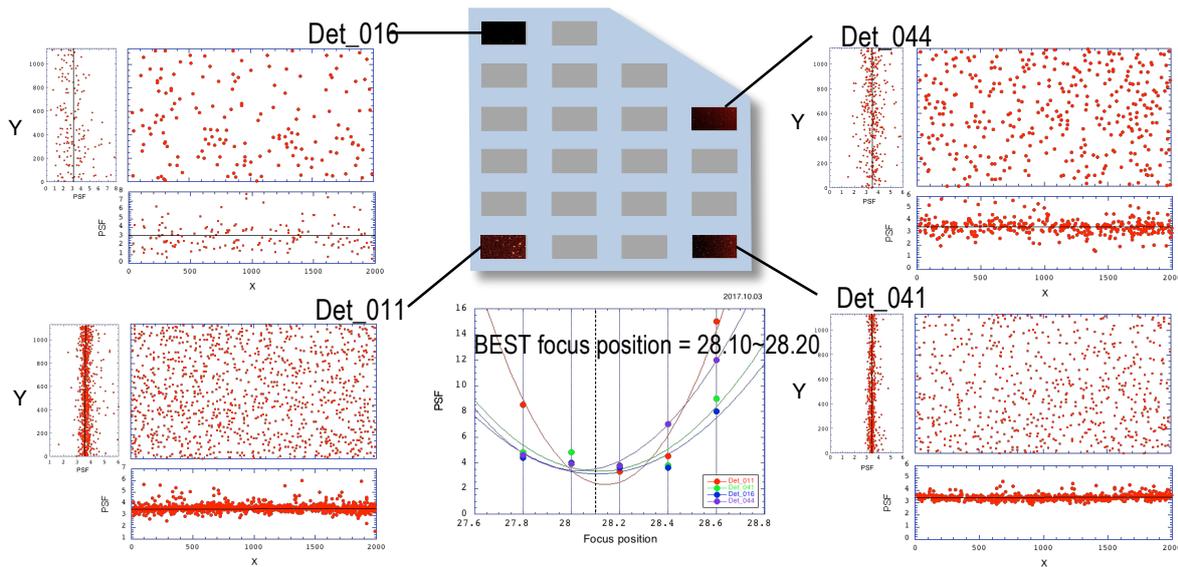


図4：シュミット望遠鏡でのフォーカス合わせとPSF測定結果。

## 6. Tomo-eの熱環境測定

Tomo-eは84個といふかなりの数のセンサーを用いるために、エレクトロニクスを含めるとかなり大きな発熱が想定される。一方で、Tomo-eは常温駆動でアクティブな冷却機構は有していない。過去の特性試験により、外気温より+2度程度以下での制御が必要である。そこでpassiveな排熱機構として、(1)センサー系は熟浴である望遠鏡へ積極的に熱結合する、(2)エレクトロニクスは可能な限り空冷機構を保有することで、この問題に対処する。

2017年10月の望遠鏡搭載試験において、温度環境測定を行った。その時点ではQ0のみであったため、現在は存在しないQ2~Q4については、センサーおよびエレクトロニクスと同等の発熱をヒーターによって付加した。温度は「Tomo-e筐体内」、「エレキボックス」、「Tomo-e周辺雰囲気」、「望遠鏡鏡筒内」をモニターした(図5)。

その結果、センサーのヒーターをONにした後でも急激な温度上昇はみられず、**望遠鏡本体への排熱が有効に働いている**ことが示された。エレキボックスのヒーターをONにした後は、望遠鏡鏡筒内をはじめ全体の温度上昇がみられる。エレクトロニクスおよびTomo-e本体が急激な温度上昇しないような冷却機構が必要である。

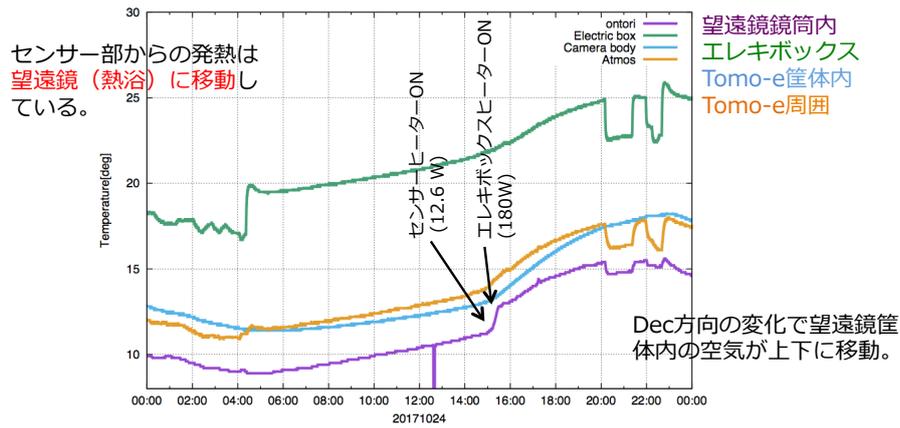


図5：Tomo-e をシュミット望遠鏡に搭載した状態での温度測定結果。熱の移動の様子をモニターした。

これまでの電気的な特性評価の結果、Tomo-e/FM (84 センサー)の総発熱量は～271W と想定されるが、そのうちエレクトロニクスの発熱量は～262W となり、Tomo-e の発熱の大半をエレクトロニクスが担っていることがわかった。つまり、エレキ部の排熱が Tomo-e の定常的な運用に重要であることがわかる。そこでエレクトロニクスについて別途実験室で発熱・温度特性試験を行った。

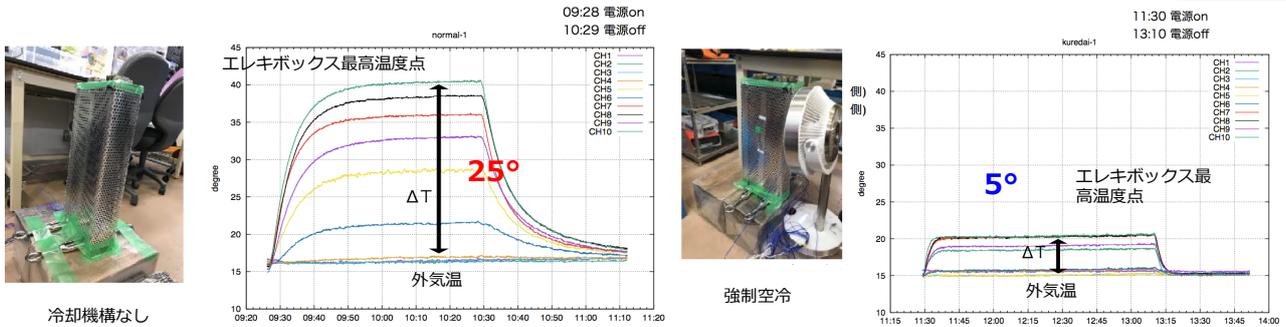


図6：実験室でも温度環境試験。左：冷却機構なし。右：強制空冷。

図6の写真に示すようにエレキボックスを置き、想定される発熱をヒーターにより付加した。エレキボックスは熱を逃がすため、穴の空いたパンチングアルミプレートで覆った。結果、自然冷却でもエレクトロニクスとしては許容範囲ではあるが、さらに強制空冷することで、定常運用時に安心できるレベルまで温度上昇を抑えることができた。具体的な冷却機構については現在検討中である。(候補としてマイクロブローなど。)

## 7. まとめと今後

### 7.1 まとめ

Tomo-e/FM の開発に関するまとめは以下の通り。

- (1) Tomo-e/PM (センサー数 8 個) の結果を受け、FM (Q0 : センサー数 4 個) を製作した。
- (2) 望遠鏡へ搭載した状態での光学試験の結果、個々のセンサー面内および異なるセンサーでの結像性能に問題はなかった。つまり、これまでの機械的コンセプトでの工法・設置方法の方向性が正しいことが示された。
- (3) 望遠鏡搭載時および実験室での温度環境試験の結果、センサー部は望遠鏡への積極的な熱結合、エレクトロニクスについては強制空冷機構が推奨されることがわかった。

### 7.2 今後

今回の結果を受け、84 センサーのフルモデルへと製作を進めていく。2018 年 2 月には 21 センサー搭載の Q1 モデルを製作、シュミット望遠鏡への搭載試験観測を行う。さらに引き続き Q2, Q3 そして Q4 の製作を進め、Tomo-e の特徴を活かしたサイエンス (銀河系内外のフラッシュ、人工天体のフラッシュ、既知の小惑星の掩蔽、流星の科学、重力波のフォローアップ、etc...) の成果を期待して、最終的な 84 センサーの Tomo-e Final の 2018 年度内完成を目指す。