

# 木曾超広視野高速カメラTomo-e Gozen プロトタイプ機の開発



酒向重行（東京大学大学院理学系研究科付属天文学教育研究センター）

大澤亮, 高橋英則, 菊池勇輝, 土居守, 小林尚人, 本原顕太郎, 宮田隆志, 諸隈智貴, 小久保 充, 満田和真, 谷口由貴, 猿楽祐樹, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 三戸洋之, 中田好一, 臼井文彦, 松永典之, 谷川衝（東京大学）, 渡部潤一, 田中雅臣, 前原裕之, 有松亘（国立天文台）, 富永望（甲南大学）, 板由房, 小野里宏樹（東北大学）, 吉川真（JAXA）, 浦川聖太郎（日本スペースガード協会）, 佐藤幹哉（かわさき宙と緑の科学館）, 河北秀世（京都産業大学）



# アウトライン



Tomo-eの概要

Tomo-eのユニークネス

Tomo-eプロトタイプ機

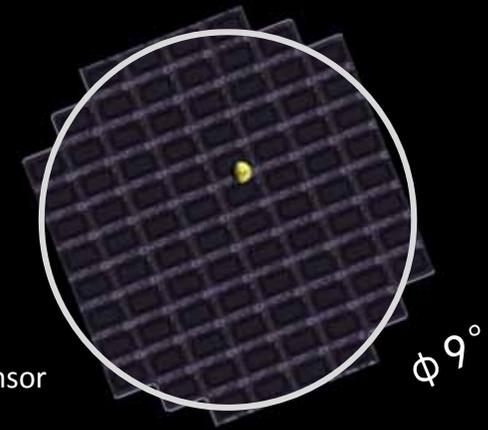


巴御前出陣図  
東京国立博物館蔵

東京大学木曾観測所次期広視野観測装置

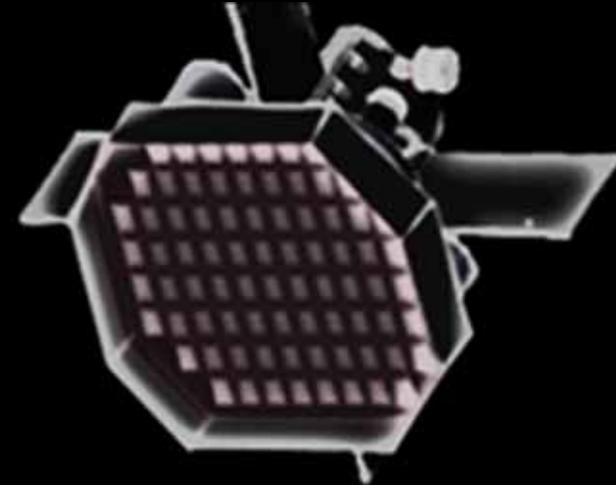
# 超広視野高速カメラ

# Tomo-e Gozen



35mm CMOS sensor  
x 84 chips

- Telescope: Kiso 105 cm Schmidt
- Field of view : 20 deg<sup>2</sup> in  $\phi$  9 deg
- Sensor: 1k x 2k CMOS sensor
- Chips: 84
- Pixel scale : 1.2 arcsec/pix
- Frame rate : 2 frames/sec (max)
- Filter : SDSS-g+r, g, r, no-filter

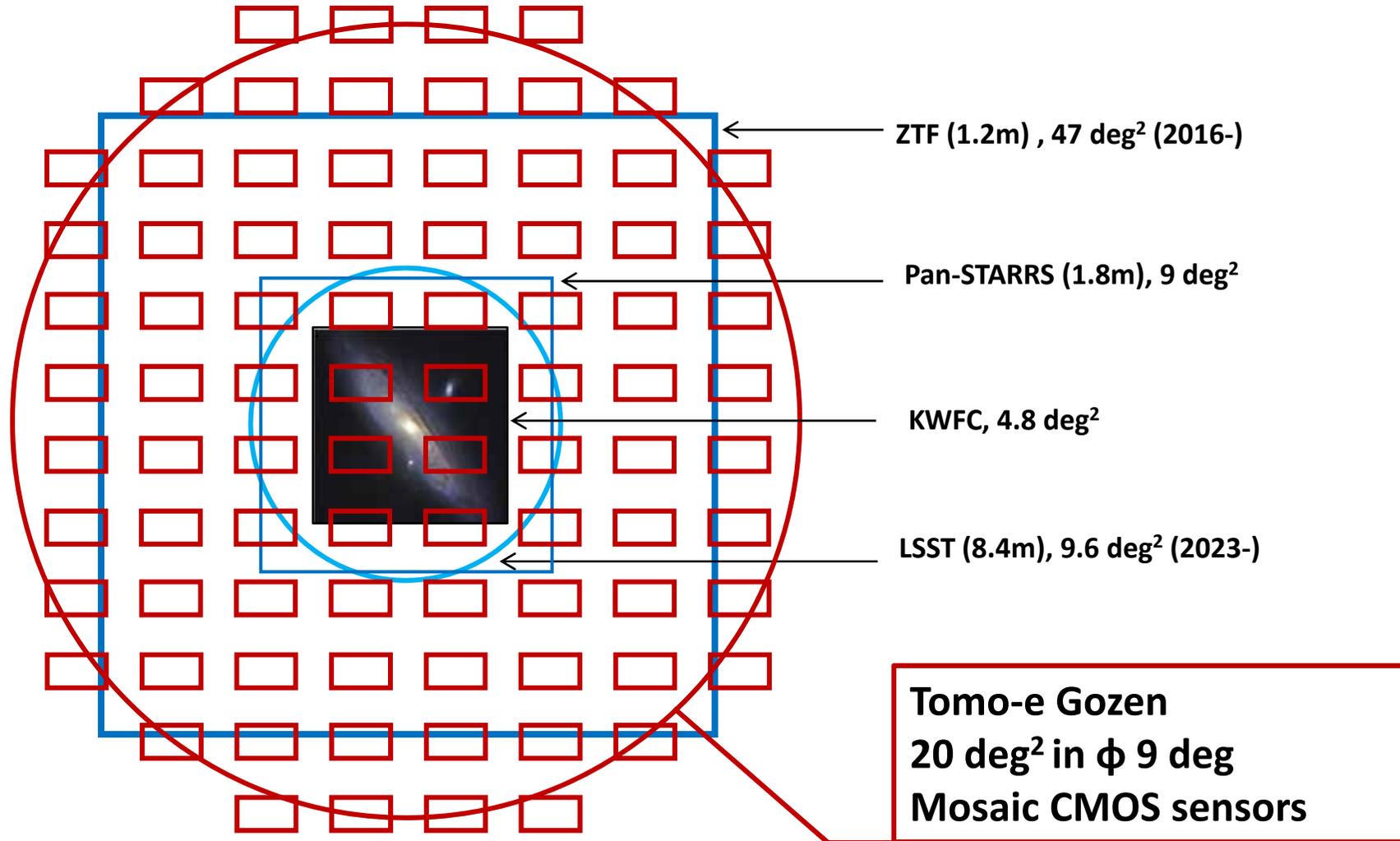


科研費基盤A  
JSTさきがけ  
新領域重力波  
国立天文台共同開発研究

P.I. 渡部潤一  
P.I. 酒向重行  
P.I. 中村卓史  
P.I. 酒向重行

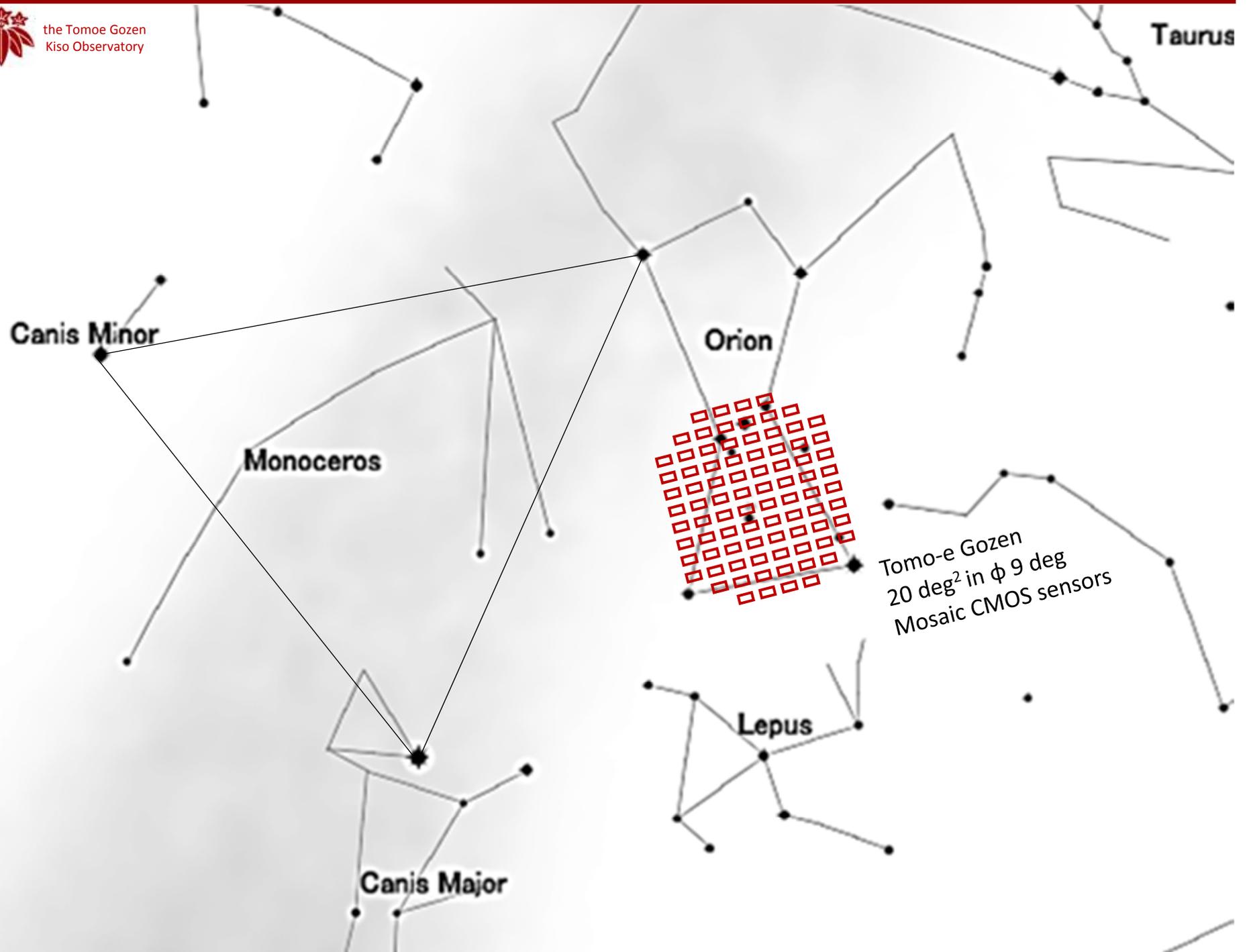


# 視野の比較

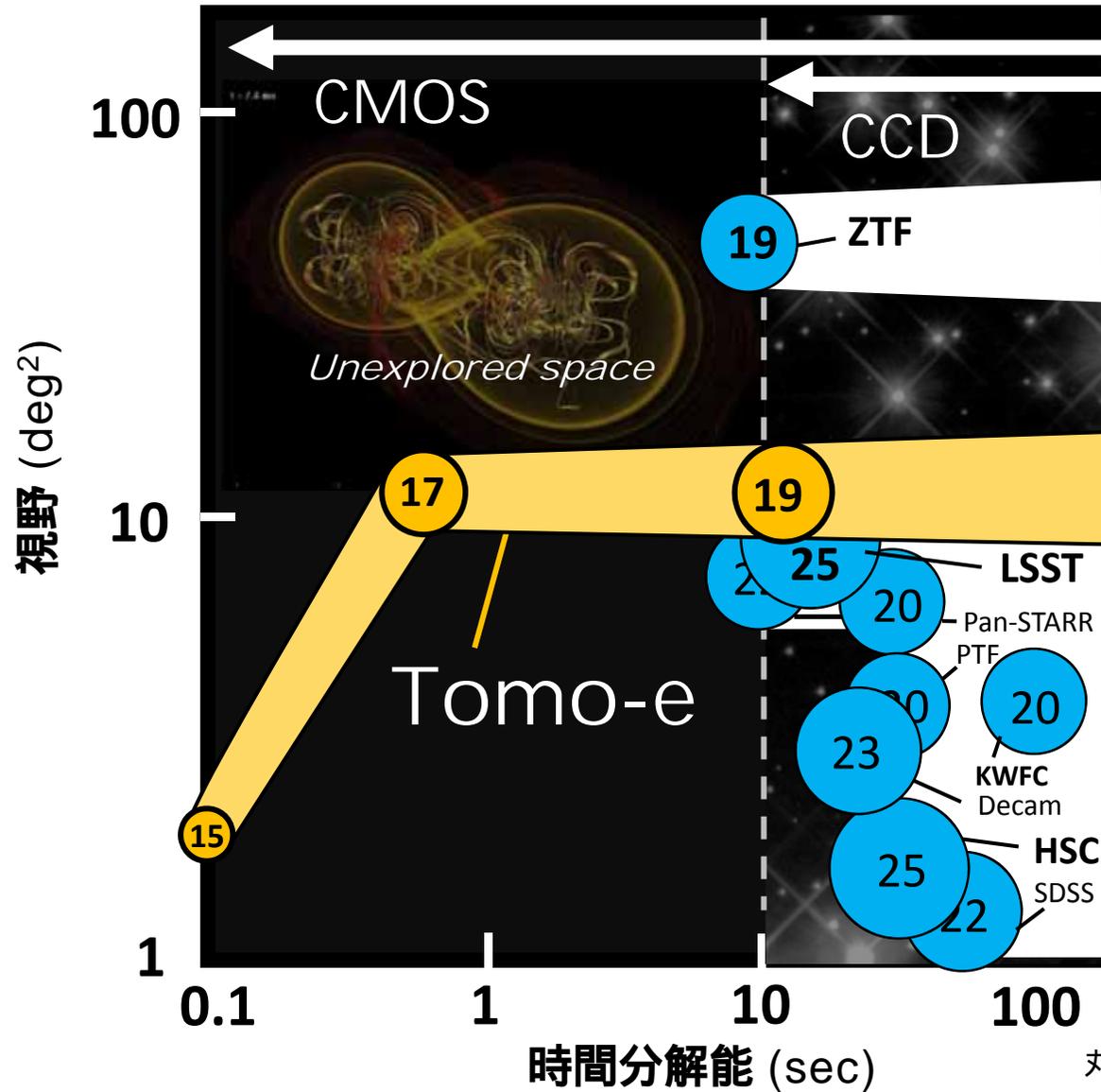




the Tomoe Gozen  
Kiso Observatory



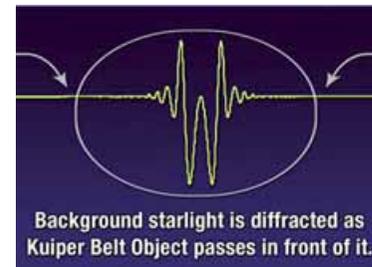
## 時間変動現象の検出能力の比較



# Tomo-eが切り開く新領域

## Rare and Transient Phenomena

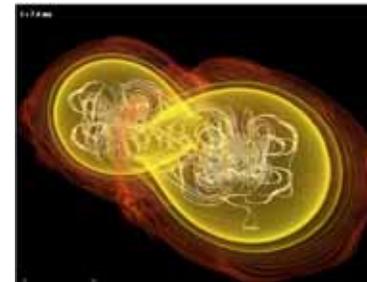
- ❑ Shock Breakout of core-collapse SN
- ❑ Explosion of Nova
- ❑ Optical follow up of Gravitational wave
- ❑ Afterglow of Gamma-ray burst
- ❑ Optical candidate of fast radio burst
- ❑ X-ray time variable objects
- ❑ Transit of Exoplanet
- ❑ Occultation by Trans-Neptune object
- ❑ Potentially Hazardous Asteroid
- ❑ Faint meteor



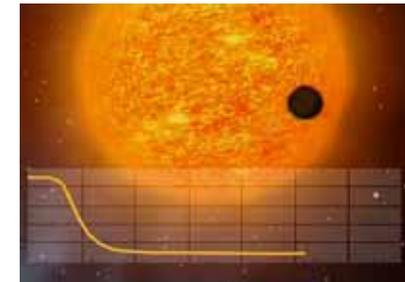
Occultation by TNO



Gamma ray burst



Neutron star merger → GW

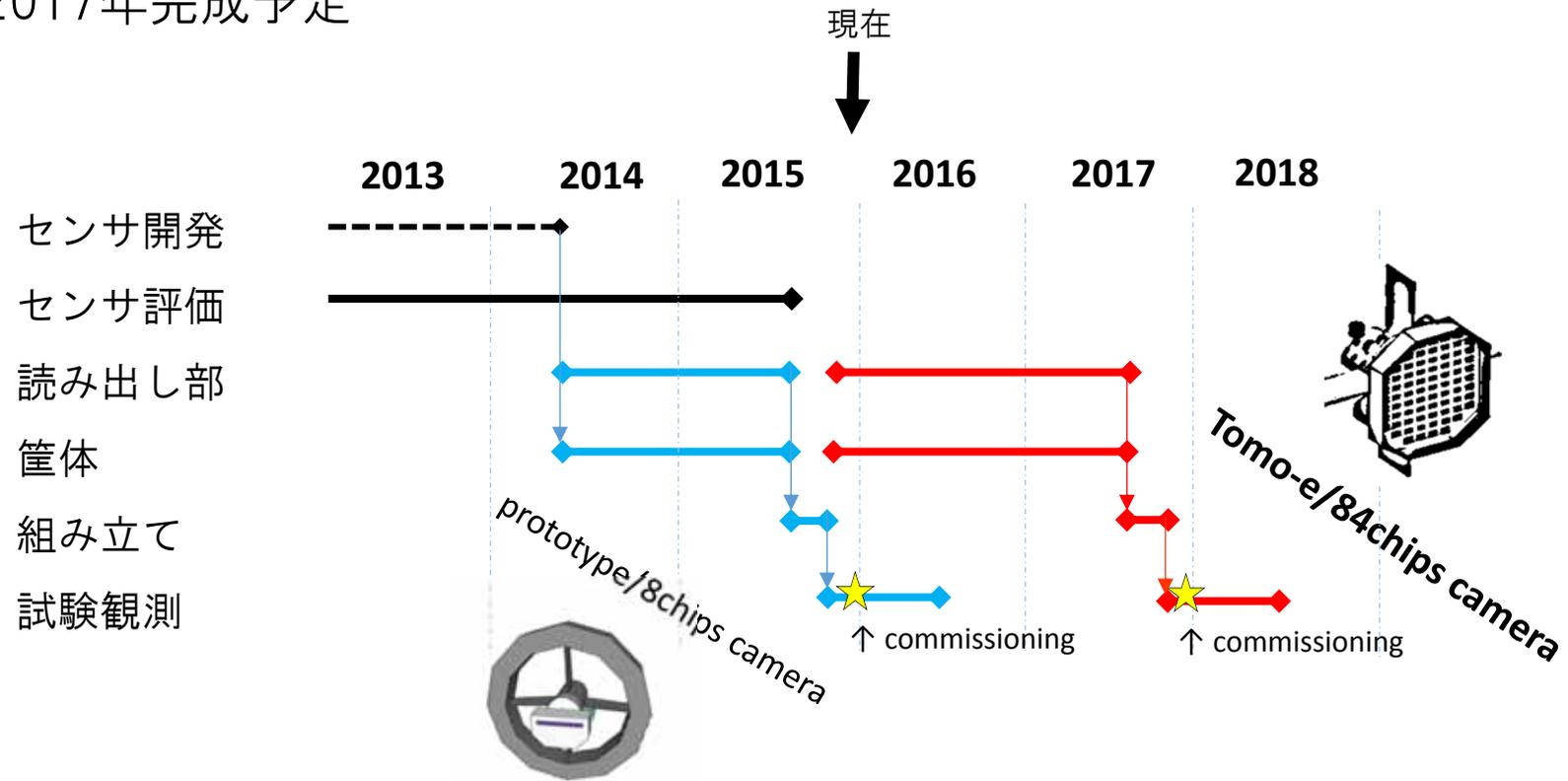


Planet transit



# 開発スケジュール

2017年完成予定





## アウトライン

Tomo-eの概要

✓ Tomo-eのユニークネス

Tomo-eプロトタイプ機



内田三郎の首をねじ切る  
巴御前（月岡芳年画）



## 【天文の常識】

イメージセンサといえは裏面照射CCD。

## 【トモエ】

あえて表面照射CMOSセンサ。



## 【天文の常識】

表面照射は低効率。測光ができないのでは？

## 【トモエ】

マイクロレンズアレイと、適切なサンプリングで、そこそこいける。



## 【天文の常識】

表面照射は感度波長が狭いと聞きましたが。

## 【トモエ】

はい、そのとおり。

必要性はサイエンス次第。



## 【天文の常識】

やはり裏面照射CCDは最強ですね。

## 【トモエ】

そうでもない。表面照射CMOSは、

- 読み出しノイズが低い
- 読み出しが高速
- 安い



## 【天文の常識】

センサは冷やすと良い。だから強制冷却。

## 【トモエ】

大変なので常温駆動。受動的冷却。



## 【天文の常識】

センサは精密に温度制御。

## 【トモエ】

大変なので外気温の変化にゆだねる。



## 【天文の常識】

センサは真空下。頑丈な筐体に納めるべし。

## 【トモエ】

大変なので大気圧。軽量な筐体。



## 【天文の常識】

光路をセンサの都合に合わせて曲げる。

## 【トモエ】

大変なのでレンズなし。

センサを光路の都合に合わせて曲げる。



## 【天文の常識】

センサの固定は強固で安定な接着剤。

## 【トモエ】

大変なので両面テープ。



## 【天文の常識】

センサのアライメントの調整は念入りに。

## 【トモエ】

大変なので、形状を測定した後、補正パーツ  
を外注。



## 【天文の常識】

センサの表面はデリケート。触れてはいけません。

## 【トモエ】

カバーガラスを布でふきましょう。



## 【天文の常識】

モザイク配置がスカスカは勿体ない。

## 【トモエ】

木曾は視野は余っているが、お金は余っていない  
視野は不動産。



## 【天文の常識】

複数枚のフィルタを搭載。精巧な交換メカ。

## 【トモエ】

大変なのでフィルタは1夜1種。手動交換。



## 【天文の常識】

観測装置は1人でひっくりかえせない。

## 【トモエ】

ひっくりかえせる。



## 【天文の常識】

静止画が基本。

## 【トモエ】

動画が基本。



## 【天文の常識】

取得した生データをすべて保存。

## 【トモエ】

大変なので生データを捨てる。



## 【天文の常識】

雲が晴れた瞬間にデータを取得。

## 【トモエ】

雲が晴れた瞬間のデータをピックアップ。



## 【天文の常識】

装置の名前は正式名の頭文字。

## 【トモエ】

人の名前。

特に深い意味はない。



## 【天文の常識】

口径 1 m で何ができるのか？

## 【トモエ】

A はHSCが95。SCが13。

トモエは16。



## 【天文の常識】

シーイング4秒角で何ができるのか？

## 【トモエ】

20um/pixにちょうどよい。

これより良いとアンダーサンプリング



## 【天文の常識】

木曾は天気が悪いって本当ですか？

## 【トモエ】

国内平均の3割程度

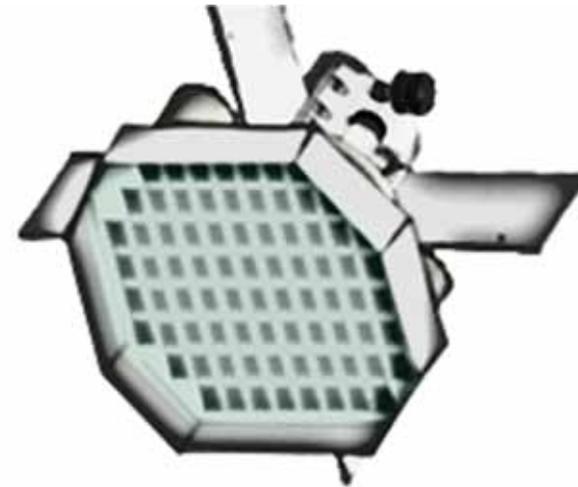
これを悪いと言うなら、国内は皆悪い

トモエは天気に強い相対測光が基本



# Tomoe-eのユニークネス

- **超広視野**
- **高速**
- **軽量**
- **非冷却・非真空**
- **駆動部なし**
- **組み立て簡単**
- **動画**





## アウトライン

---

Tomo-eの概要

Tomo-eのユニークネス

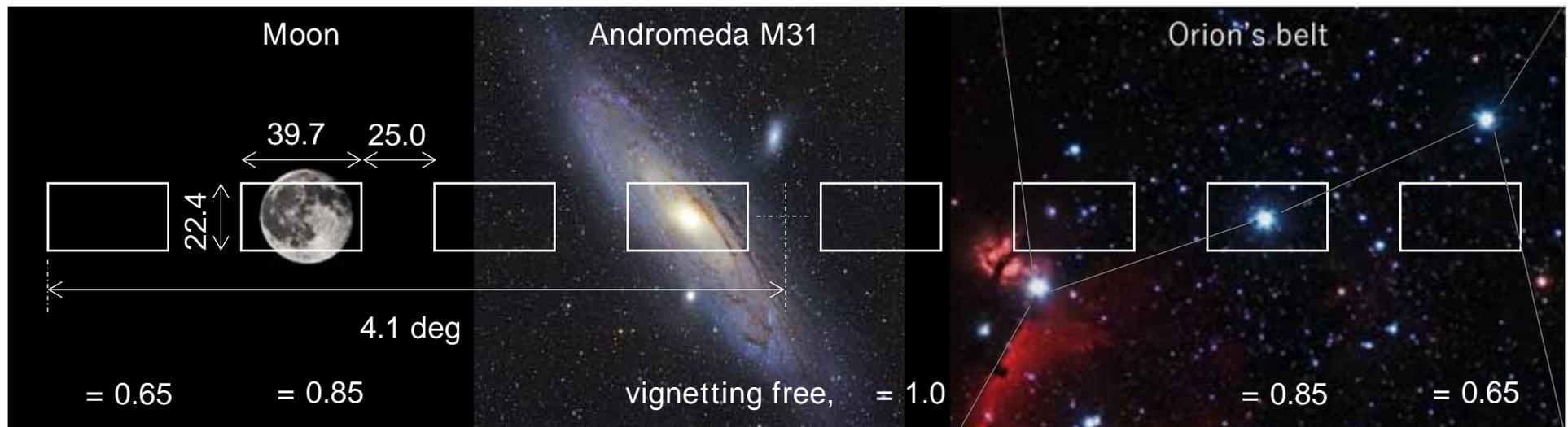
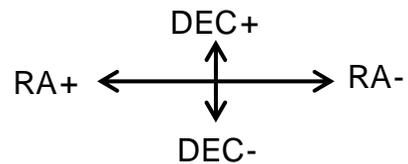
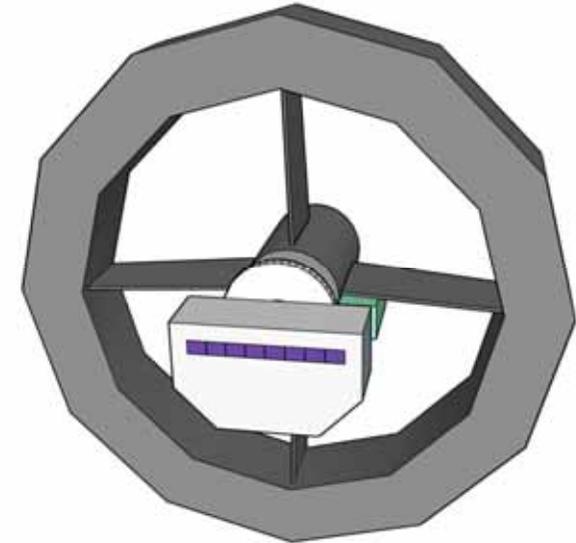
✓ Tomo-eプロトタイプ機

浮世絵の巴御前（歌川豊国画）

# Tomoe-e prototype model

## 概要

- Tomoeの技術実証、科学観測実証が目的
- CMOSセンサ x8台
- 視野2 deg<sup>2</sup>
- 2015/11/24-12/22試験観測

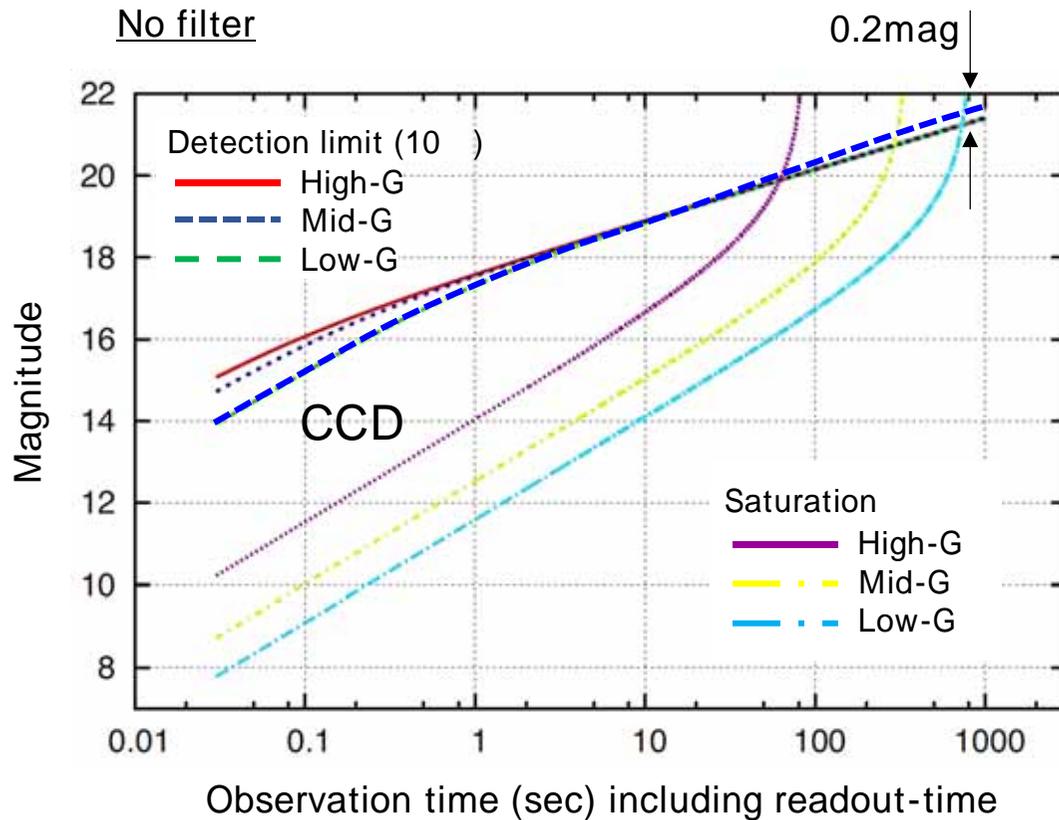




## Specifications

- Chips 8 sensors
- Format 2000 x 1128 pix<sup>2</sup>/chip (photosensitive area)
- File size (full-area) 4.9 Mbyte/frame/chip  
30 GByte (800 frames, 8 chips)
- Pix size and scale 19 um/pix, 1.19 arcsec/pix
- Frame rate 0.5 sec/frame
- Available exposure time 0.5 60 sec (full-area readout)  
0.05 sec (512x512 readout)
- Available continuous read 800 frames (full-area readout)  
8,000 frames (512x512 readout)
- Sensor gain Low (read noise= 7 e-, full-well = 55,000 e-)  
Mid (read noise= 4 e-, full-well = 23,000 e-)  
High (read noise= 2 e-, full-well = 6,100 e-)
- Sensitive wavelength = 400 650 nm
- Filter None (transparent windows)

# Detection limit and Saturation



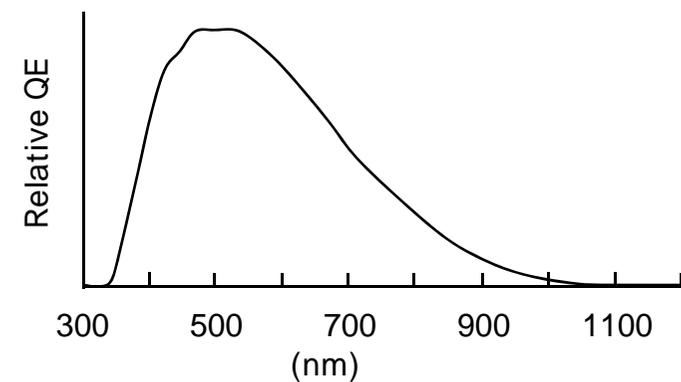
## High-Gain

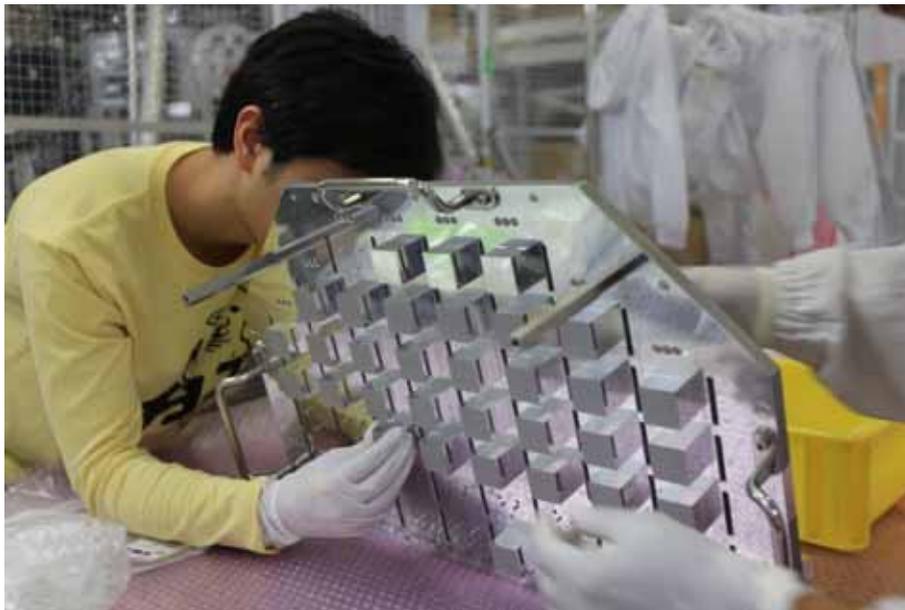
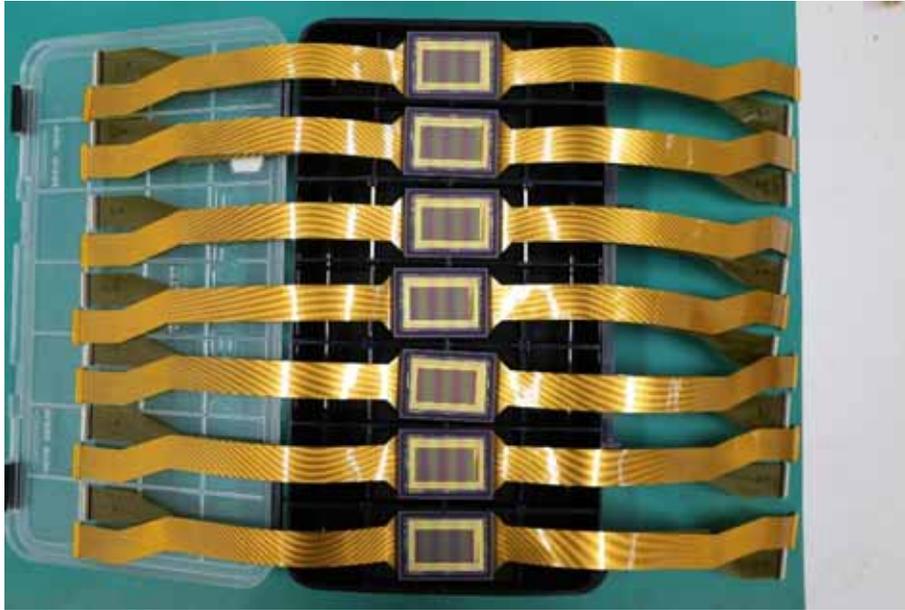
Integration time (sec)	Limiting Mag ( $10\sigma$ )	Saturation Mag
0.1	16.0	11.6
1	17.6	14.0
10	18.8	16.8
100	20.2	saturated by sky

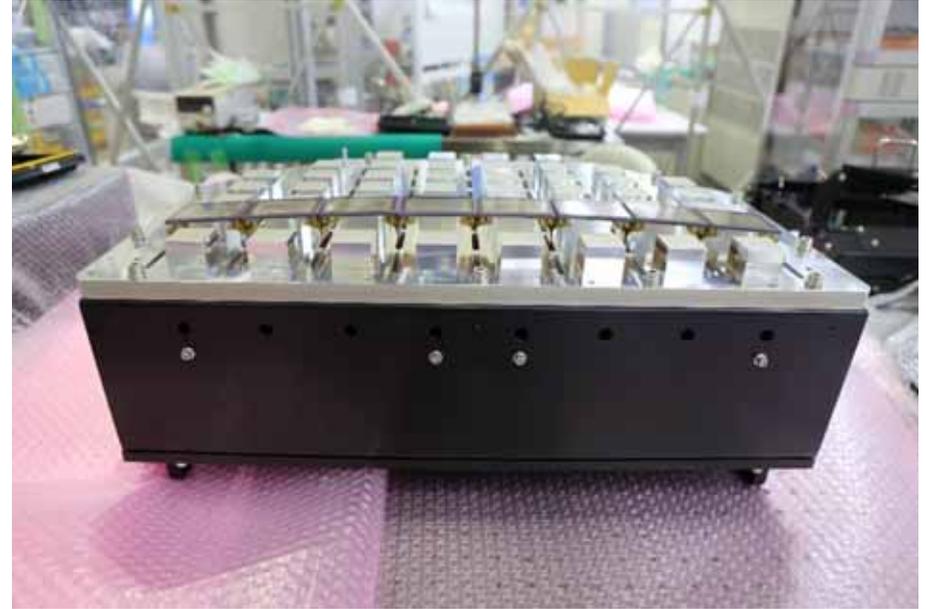
## Low-Gain

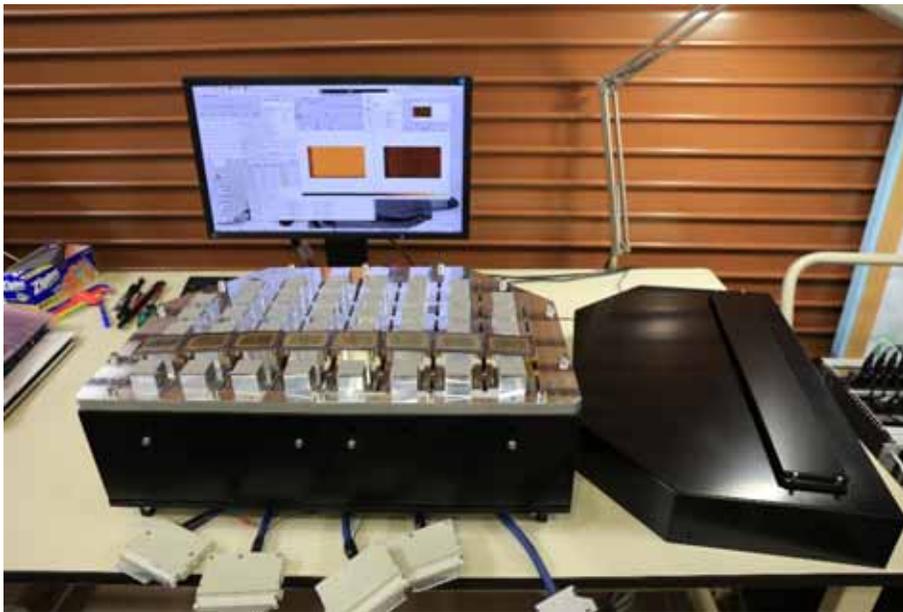
Integration time (sec)	Limiting Mag ( $10\sigma$ )	Saturation Mag
0.1	15.2	9.2
1	17.4	11.6
10	18.8	14.2
100	20.2	16.6

- Higher sensitivity than CCD in  $t_{\text{integ}} < 10$  sec.
- Higher exposure efficiency expected in continues observations owing to zero readout time.



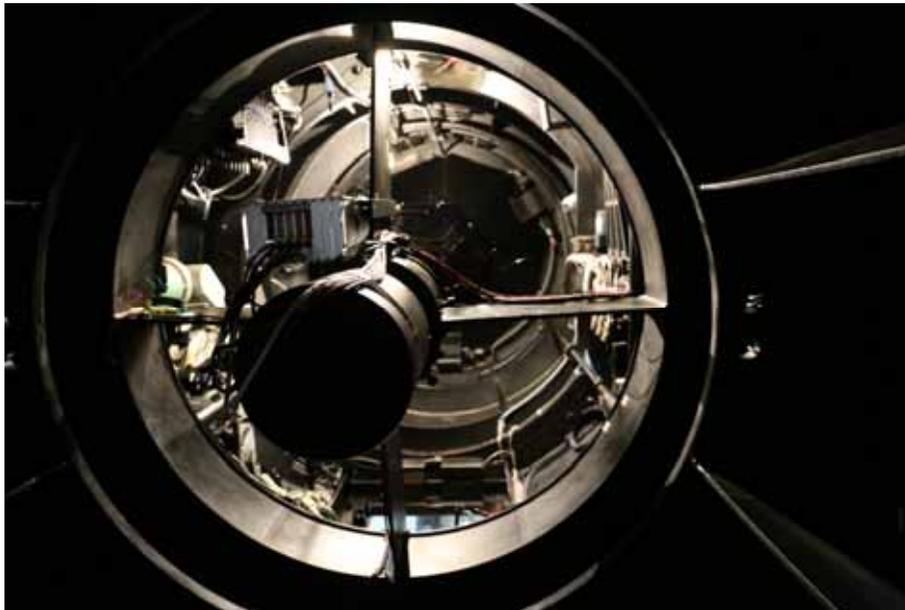
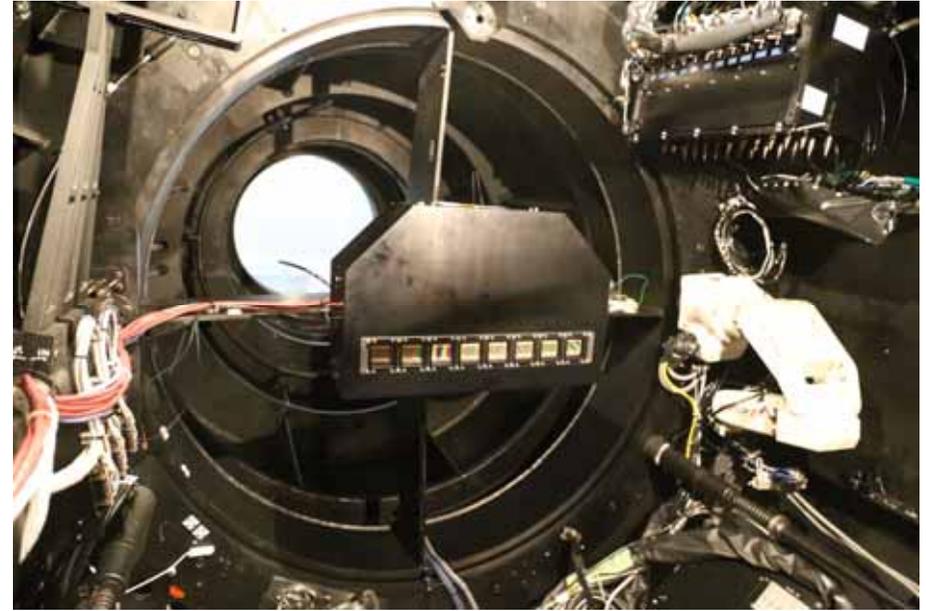
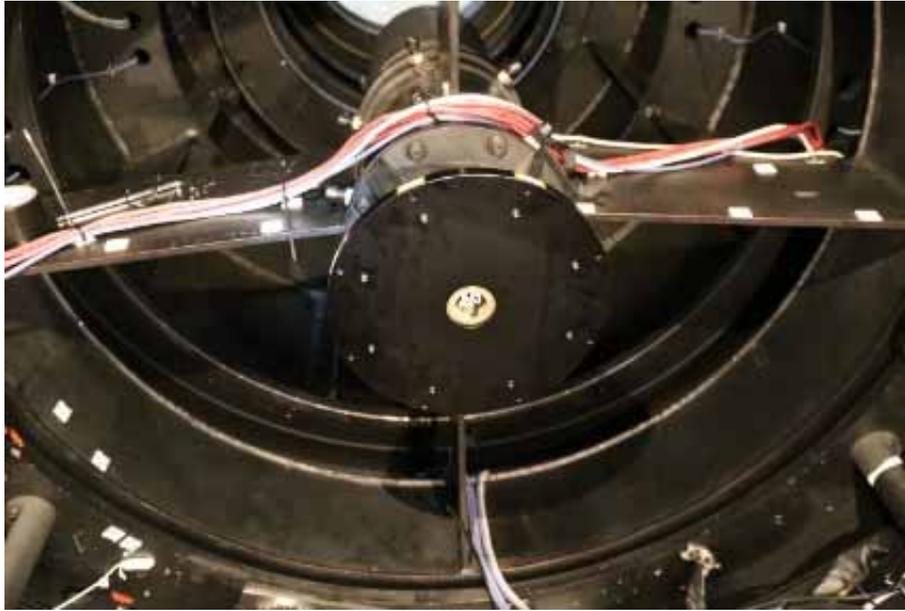


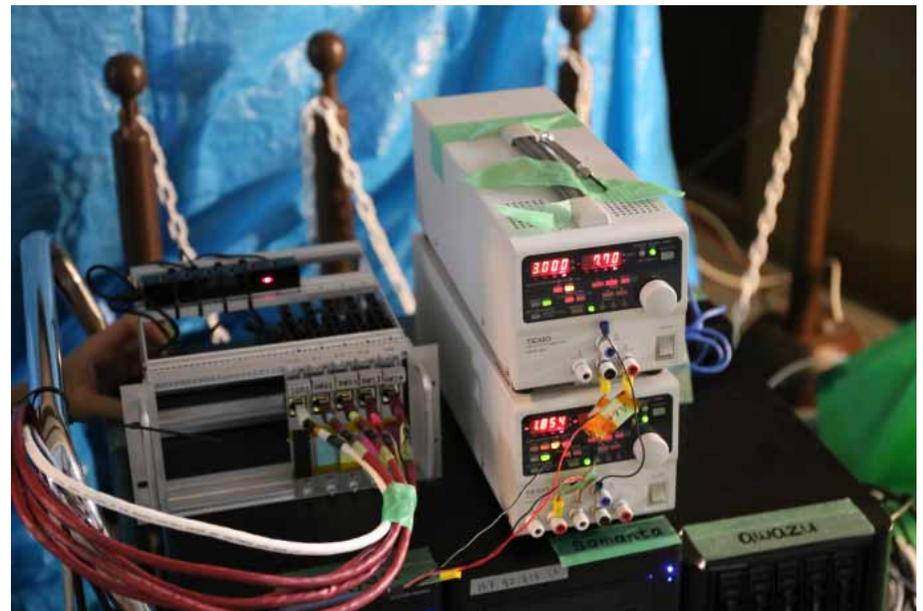
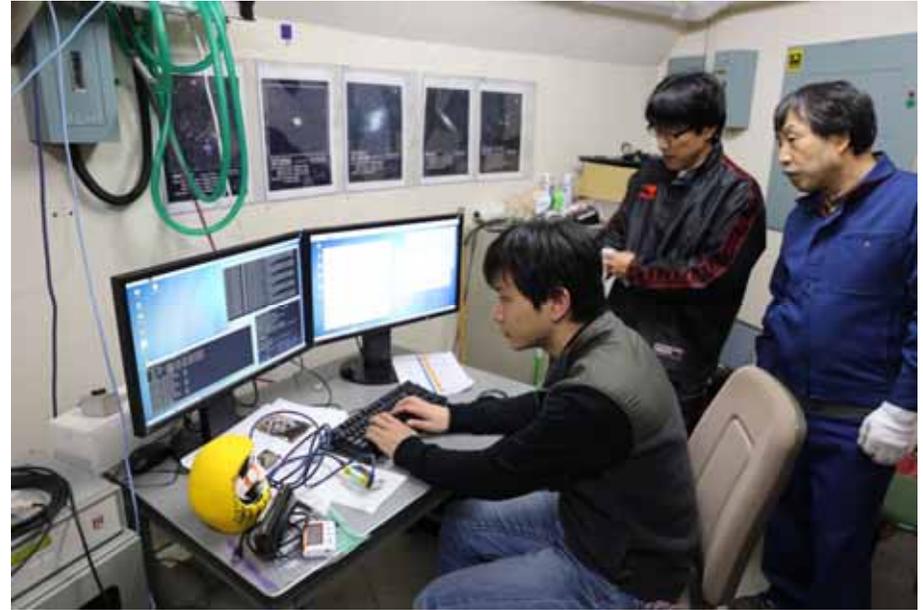






筐体 約30kg  
KWFCより軽い





---

## Tomoe-PM First Light Successfully Achieved on Nov. 24<sup>th</sup>, 2015



First light image  
(h-x Per, FoV 40' x 22', 5sec, 1chip)

---

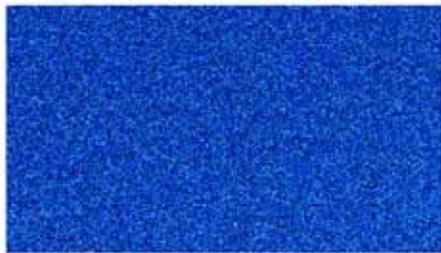


## M42 star forming region HDR image

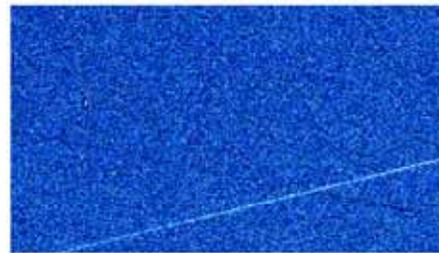


2Hz, 5108 frames

## Meteors



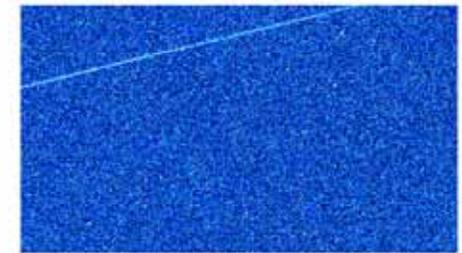
22.4



39.7



25.0



2Hz



## Cosmic ray

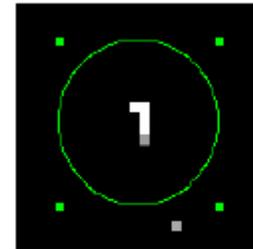
- 1-2 events/sec/frame
- 大半は1pixのイベント
- 複数pixにまたがるイベントは1/100程度



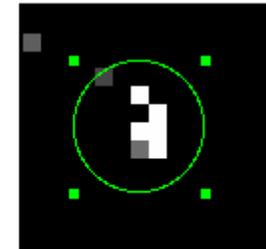
中心2pixがサチる



max5000ADU



max7000ADU

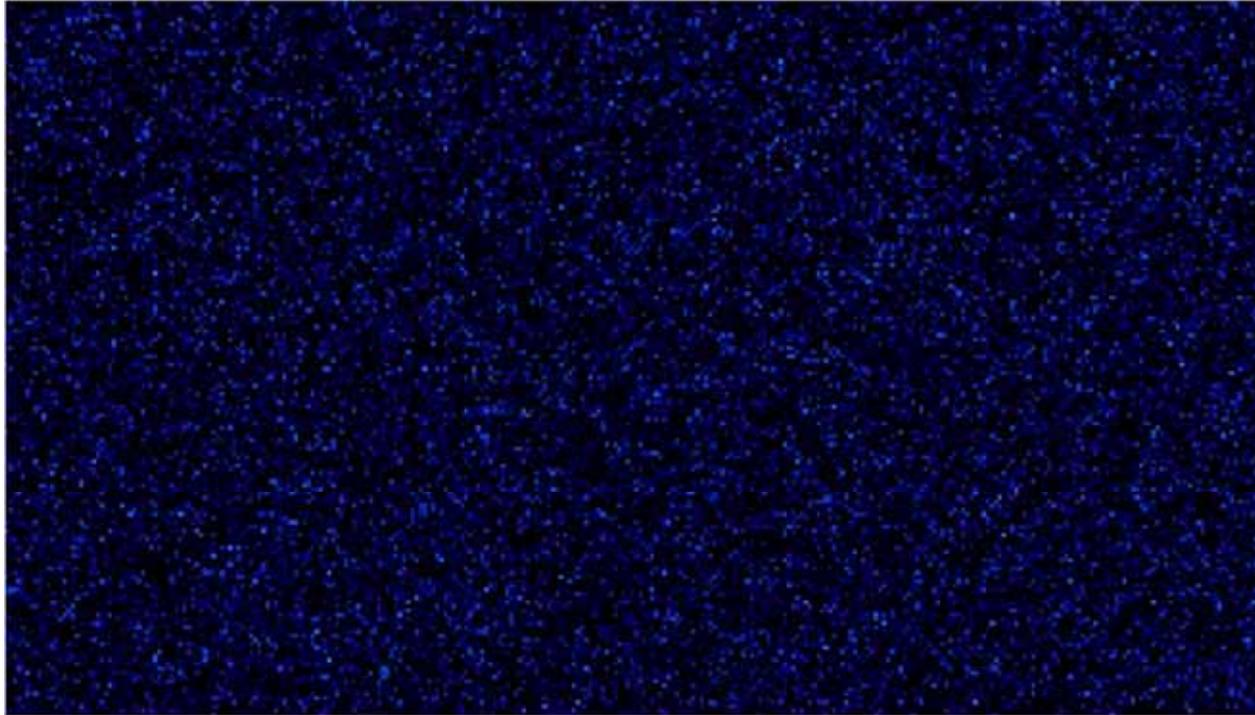


max15000ADU

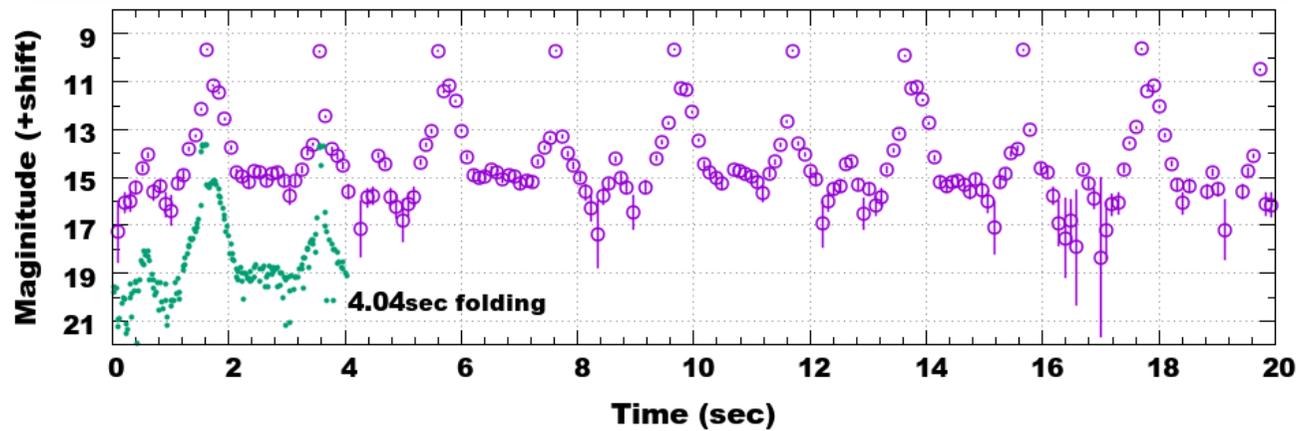


the Tomoe Gozen  
Kiso Observatory

# 運用を終えた静止衛星 JCSAT-2の周期フラッシュ



2015/11/30  
10Hz



# 人工衛星と微光流星



2015/11/30  
10Hz

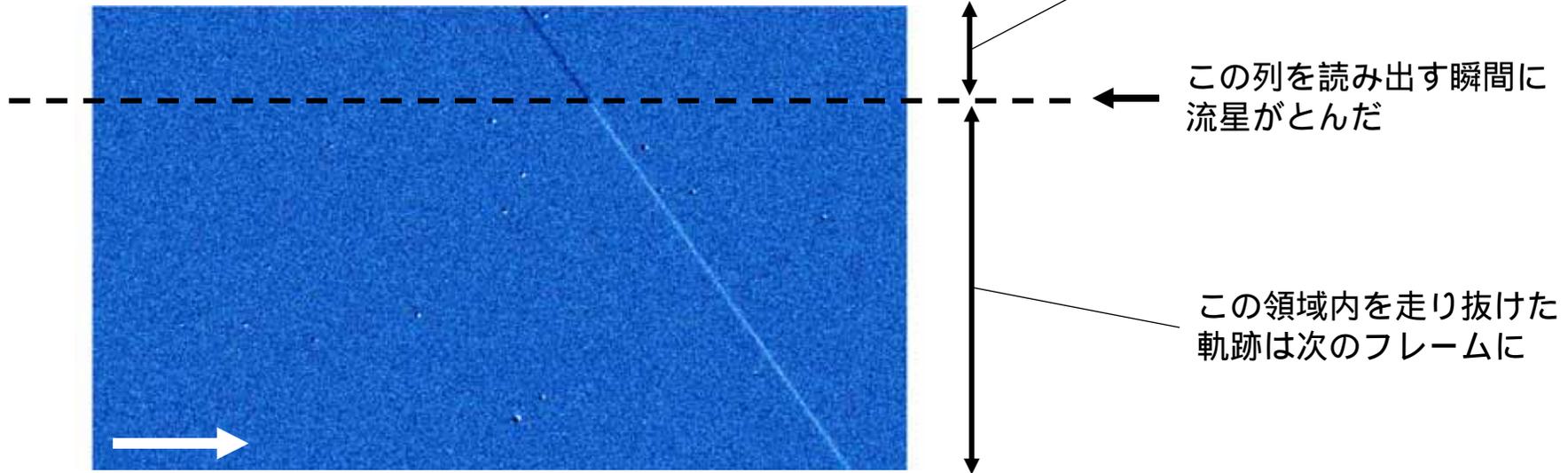
5,000個/夜の散在流星 (<16mag) を検出見込み



## ローリングシャッタと動画観測

- 画素間の同時性がない
- 対象が動くときは注意が必要

2Hz動画観測の連続する2フレームの  
引き算画像



最下段から横へ  
順に読み出し

微光流星



## Tomoe-PMの生成データレート

- 2Hz, フルフレーム, 8 chips読み出しで観測
- 400 sec積分 → 30 GB
- 0.5 1 TB/night (実績値)
- Max 2 TB/night

### 参考

- HSC 300 GB/夜
- LSST 15 TB/夜
- Tomoe 10-20 TB/夜

 the Tomo-e Gozen camera *PM*

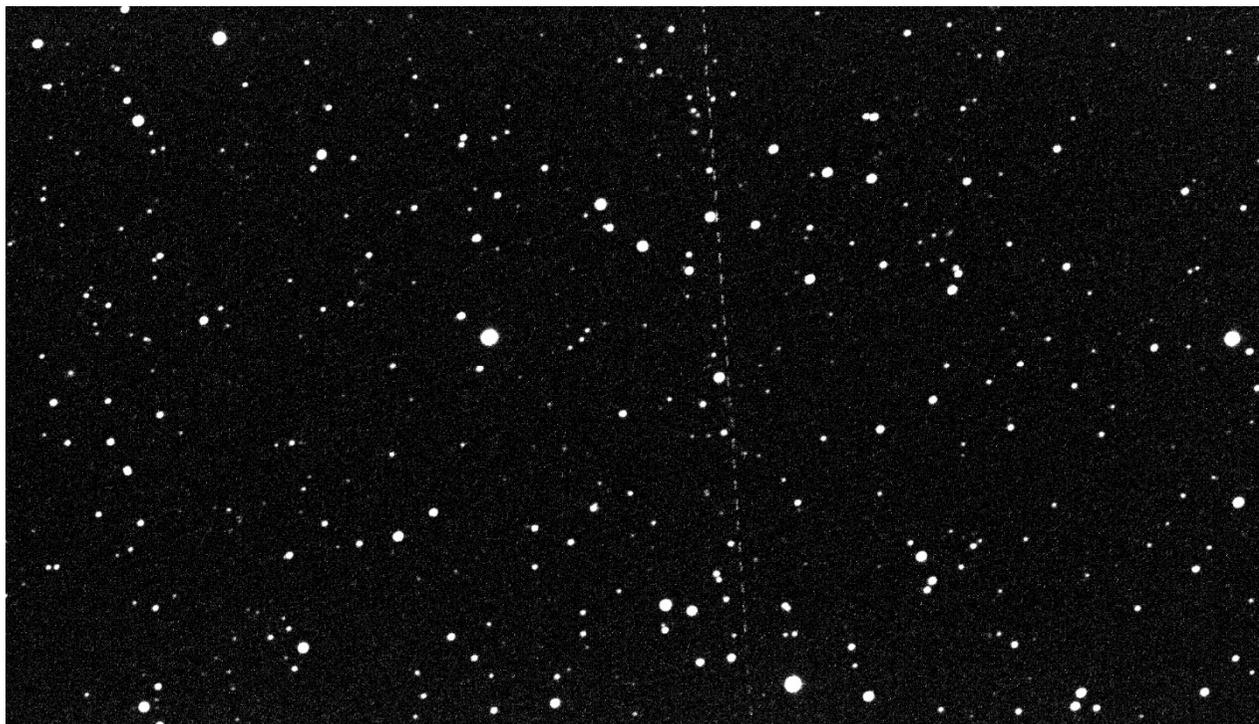
はやぶさ2 地球スイングバイ  
観測プロジェクト

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 木曾観測所



© 宮下重昭氏、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

<http://www.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/hayabusa2/hayabusa2.html>



2015/12/03 18:03:20

2Hzフルフレーム

1秒 x 35セットの重ね合わせ  
(時間間隔 1 秒)



the Tomoe Gozen  
Kiso Observatory



2015/12/03 18:08:20

2Hzフルフレーム（10倍速再生）



the Tomoe Gozen  
Kiso Observatory



2015/12/03 18:28:20

2Hzフルフレーム（10倍速再生）



# 試験科学観測

2015/12/22まで

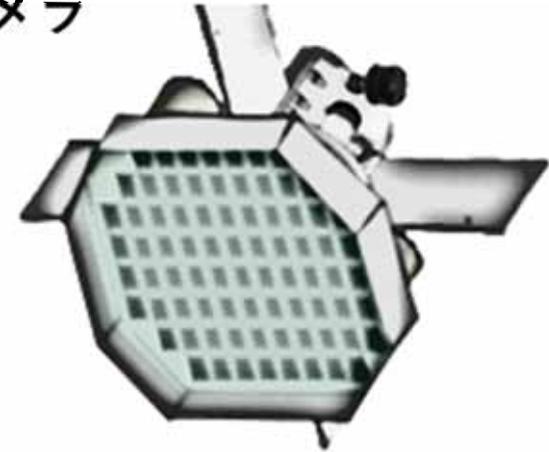
- ふたご座流星群の微光流星の観測 (2Hz, Gain-High, フルフレーム)
- 遠方宇宙からのフラッシュの探査 (2Hz, Gain-High, フルフレーム)
- 系内天体のフラッシュの探査 (2Hz, Gain-High, フルフレーム)
- 高エネルギー突発現象のフォローアップ (5sec, Gain-Mid, フルフレーム)



# Summary

## 東京大学木曾観測所 超広視野高速CMOSカメラ Tomoe-Gozen

- ❑ Field of view : 20 deg<sup>2</sup> in 9 deg
- ❑ Sensor: 84 CMOS chips
- ❑ Frame rate : 2 frames/sec (max)
- ❑ Commissioning : 2017



## Tomo-e Gozenプロトタイプ機

- ❑ Field of view : 2 deg<sup>2</sup>
- ❑ Sensor: 8 CMOS chips
- ❑ Frame rate : 2 frames/sec (max)
- ❑ First light : 2015/11/24

