



## トモエのつくりかた

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

科学技術振興機構さきがけ

酒向 重行

**1. 木曾超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen**

2. トモエのつくりかた



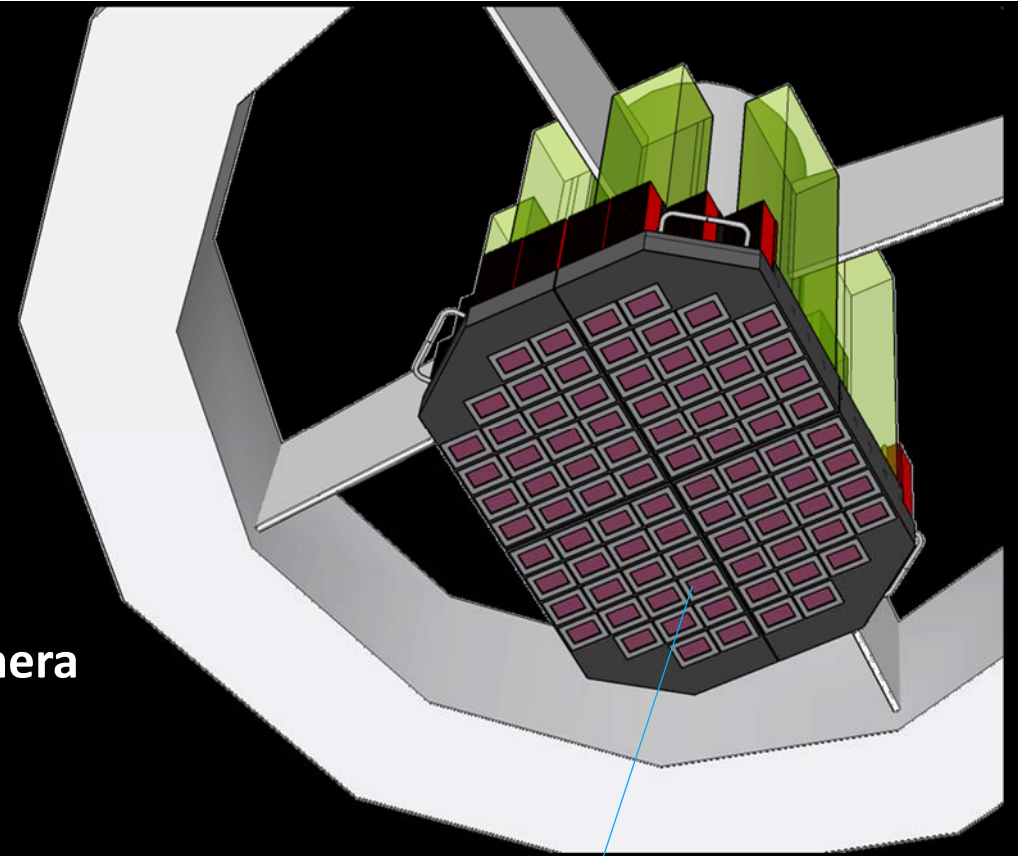
Sako et al. 2016, SPIE

Ohsawa et al. 2016, SPIE

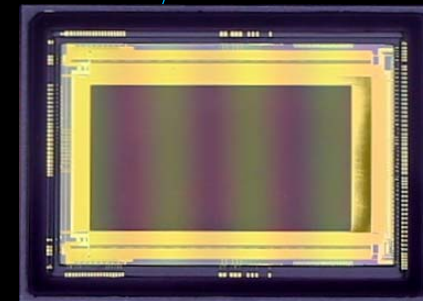
# Extremely wide-field high-speed camera the Tomo-e Gozen

- Telescope Kiso 105-cm wide-field Schmidt
- Field of view 20 deg<sup>2</sup> in  $\phi$ 9 deg,  $A\Omega = 28$
- Image sensors 84 chips of CMOS
- Data acquisition rate 2 fps (max)
- Data production rate 30 TB/night (max)
- Commissioning Aug. 2018

常温・常圧運用, フィルタ(透過, g, r, grism)日中のみ交換

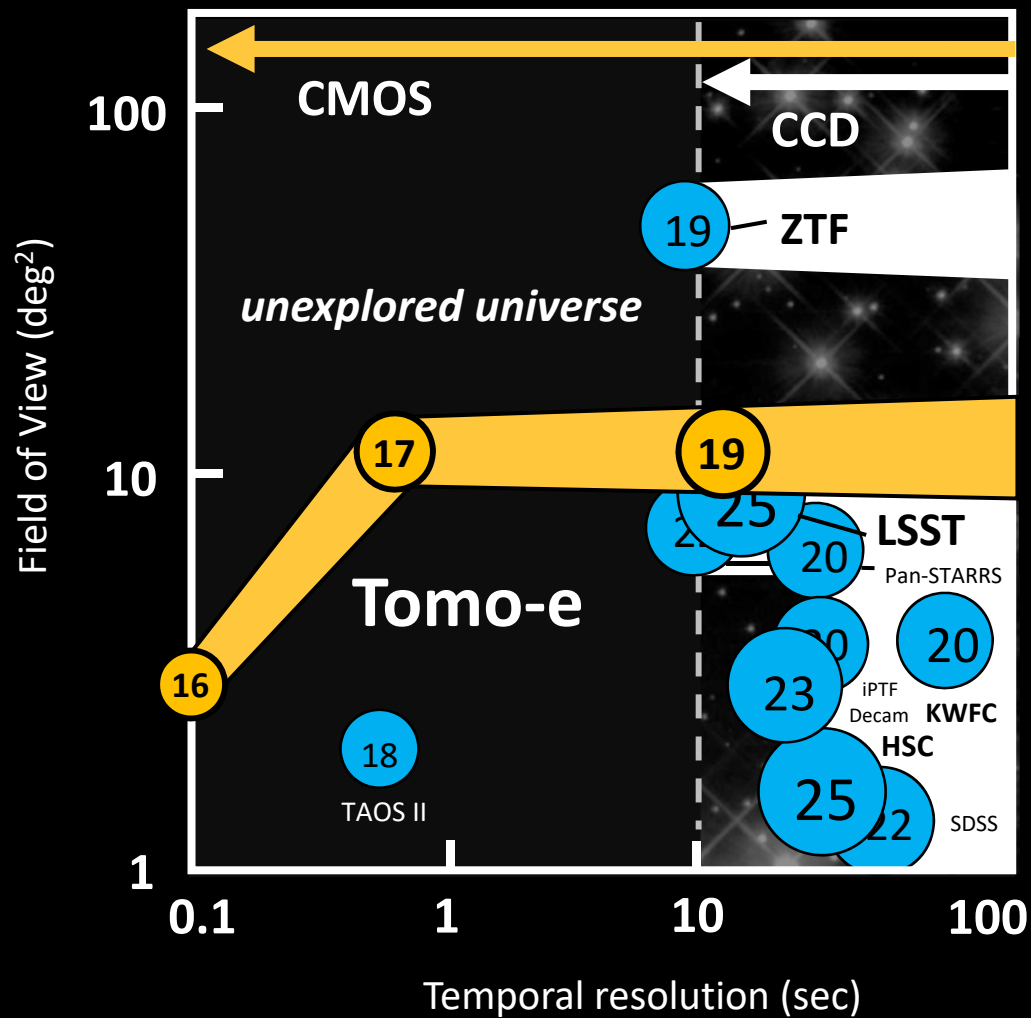
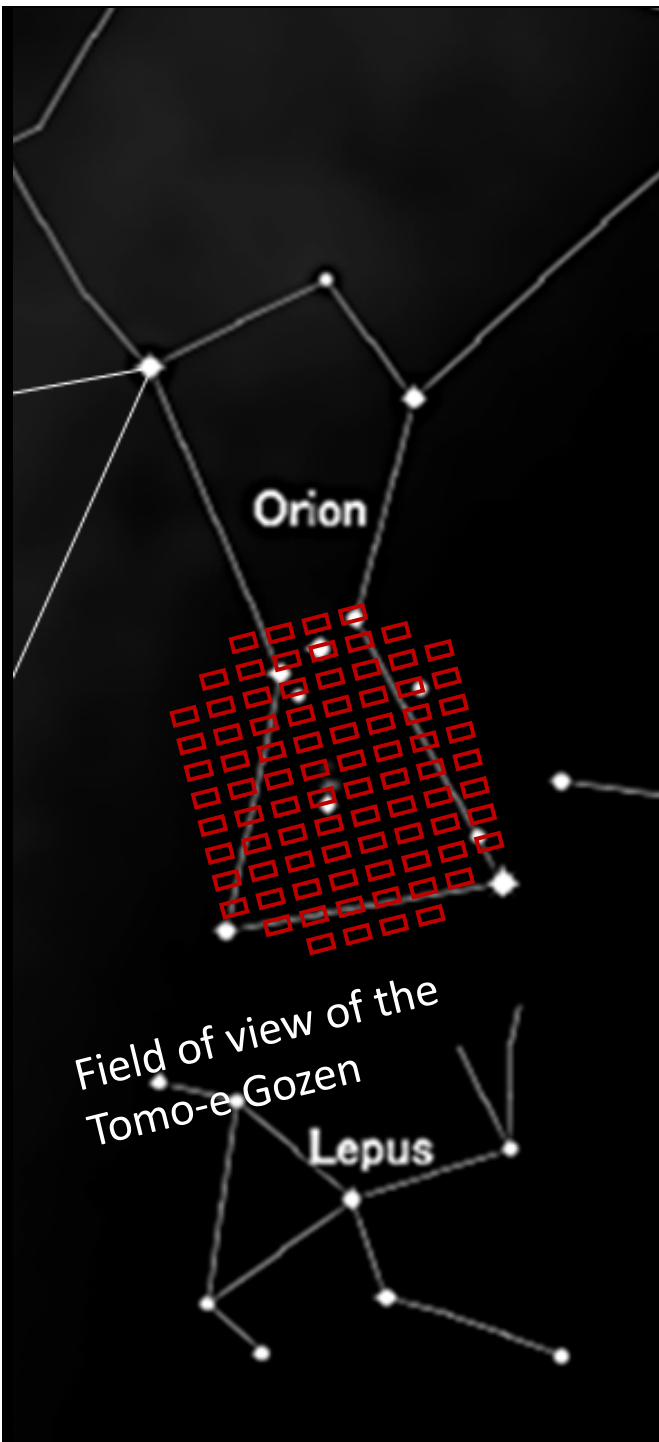


84 chips of high-sensitive CMOS sensors



Canon

# Completion of survey powers for transient events



The numbers in the circles show limiting magnitudes.

## New fields developed by Tomo-e

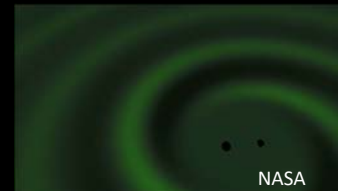
- **Survey for extremely rare transient events**

極めて稀な時間変動イベントの探査

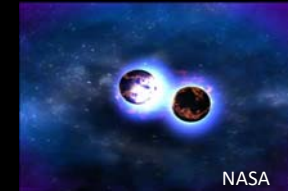
- **Survey for rapid transient events with  $\tau < 1$  sec**

1秒以下で変化するイベントの探査

- 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



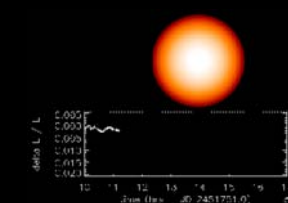
Optical counterpart of GW



Neutron star merger



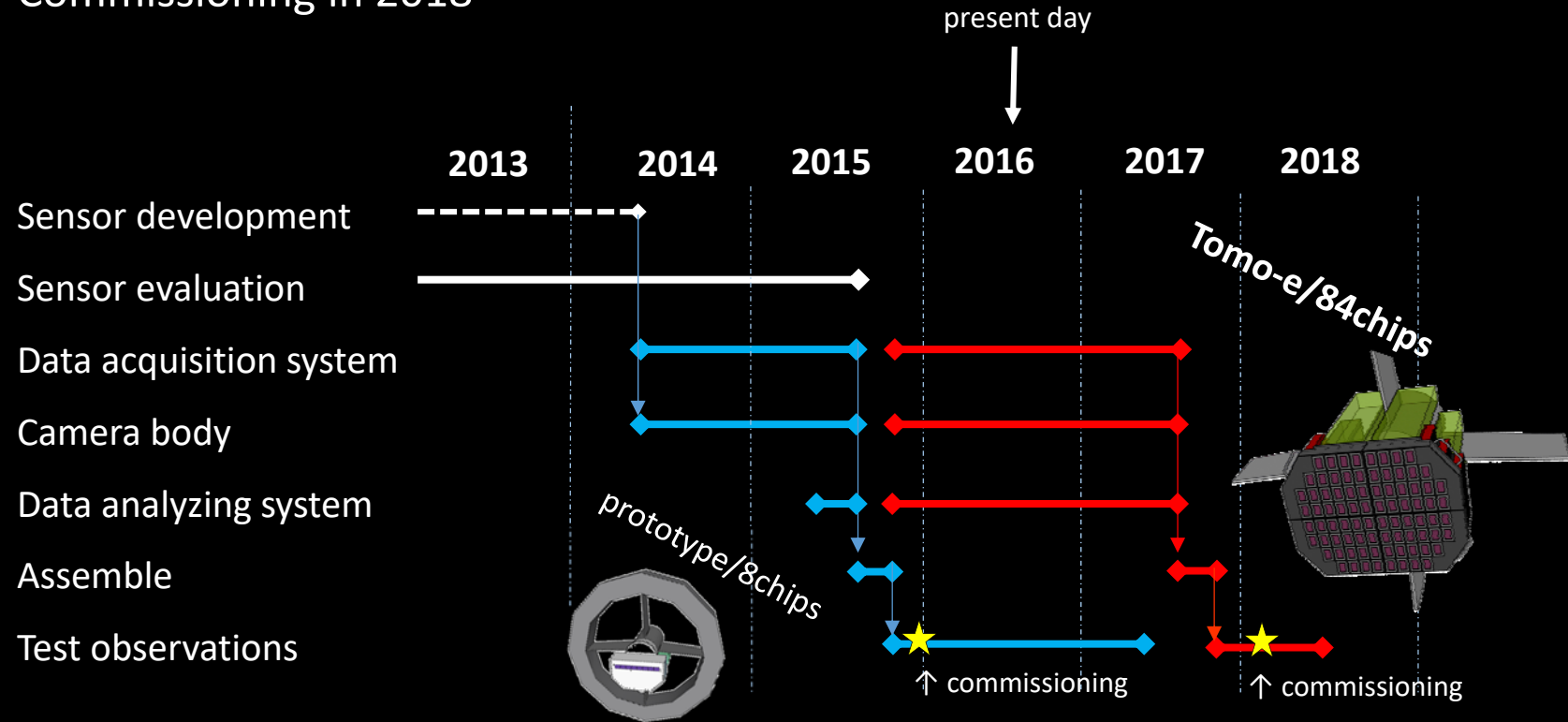
Potentially hazardous asteroid



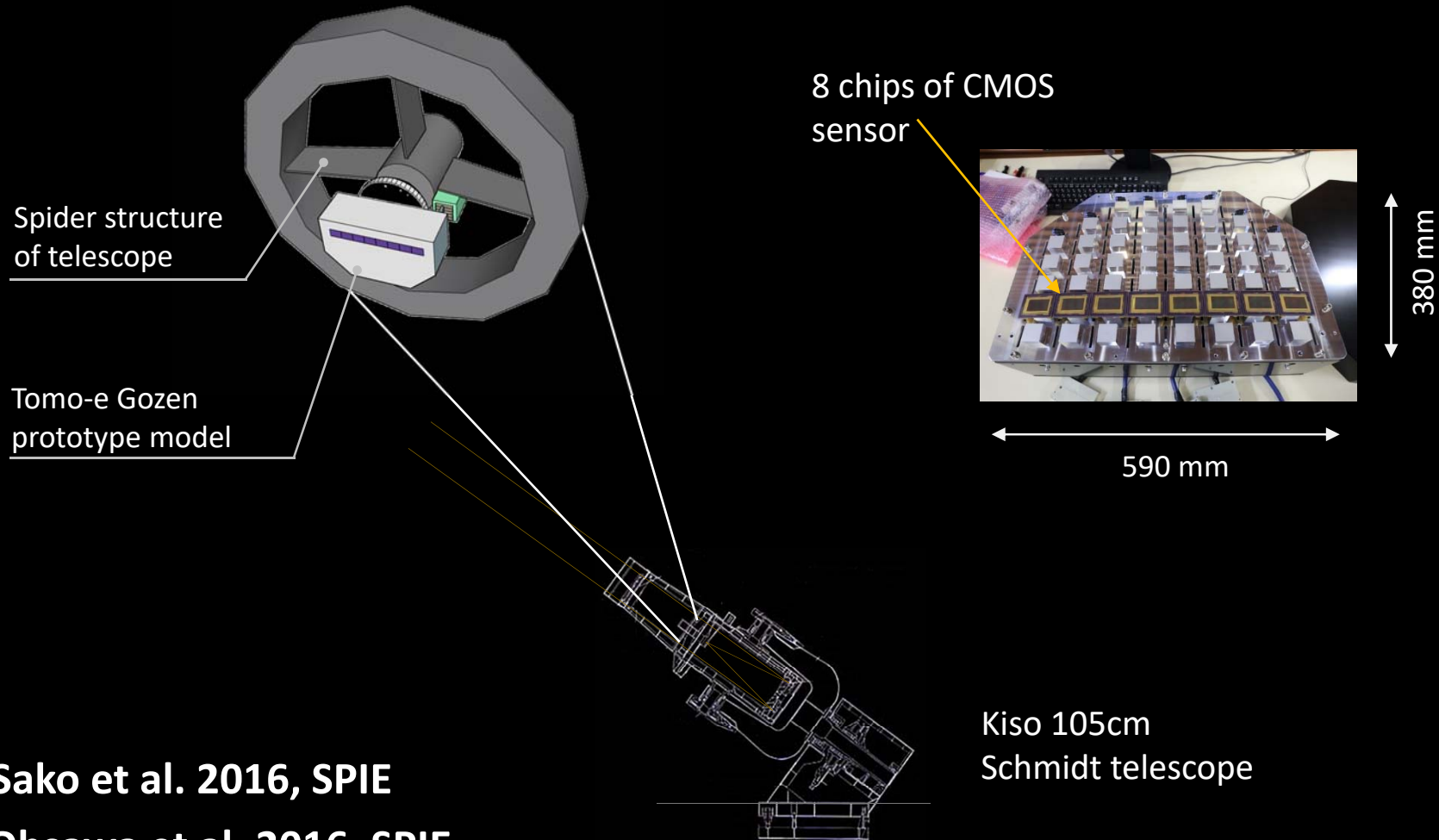
Transit of exoplanet

# Timeline for Development

Commissioning in 2018



# Tomo-e Gozen Prototype model



Sako et al. 2016, SPIE

Ohsawa et al. 2016, SPIE







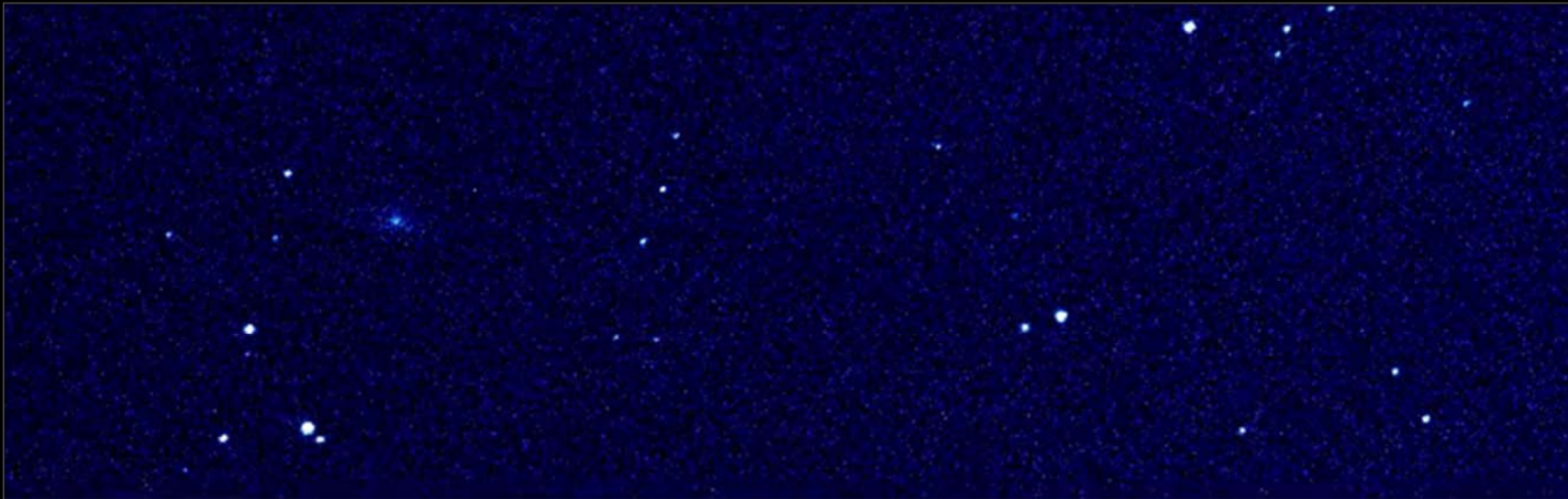
## Data sample obtained by Tomo-e PM



First light image, h-x Per open star cluster  
(1 chip, 5 sec exposure, FoV of 39.7' x 22.4')

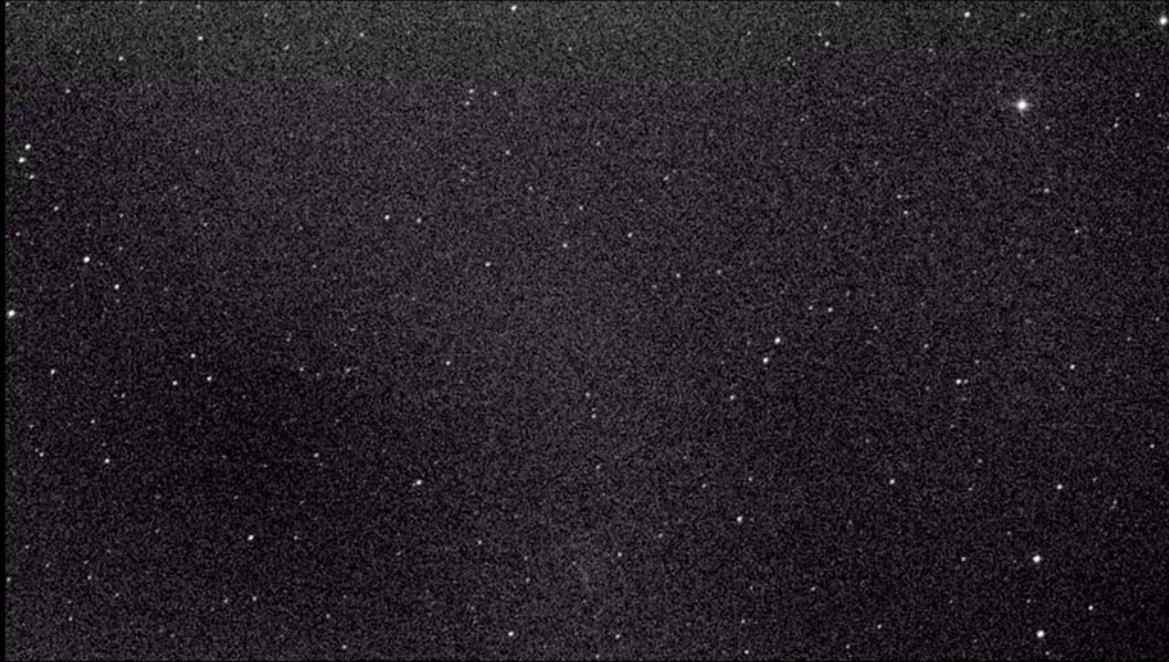


High dynamic image of M42 Orion nebula  
(1 chip, 0.5 sec/exposure x 5,018 frames)



Movie data (10 fps, partial readout, 1 chip)

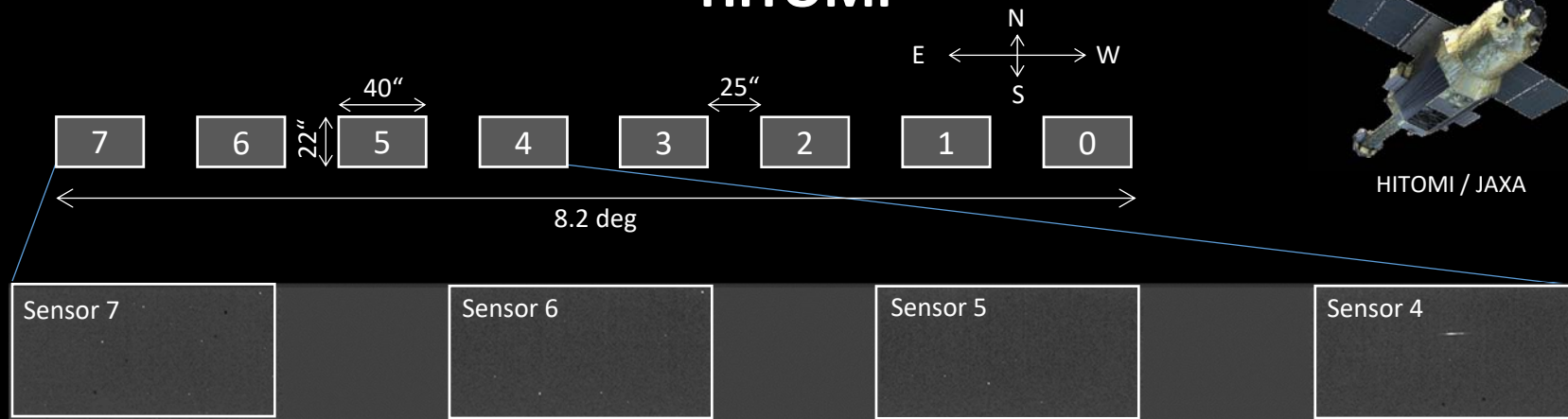
# Faint meteors



Trail of faint meteor

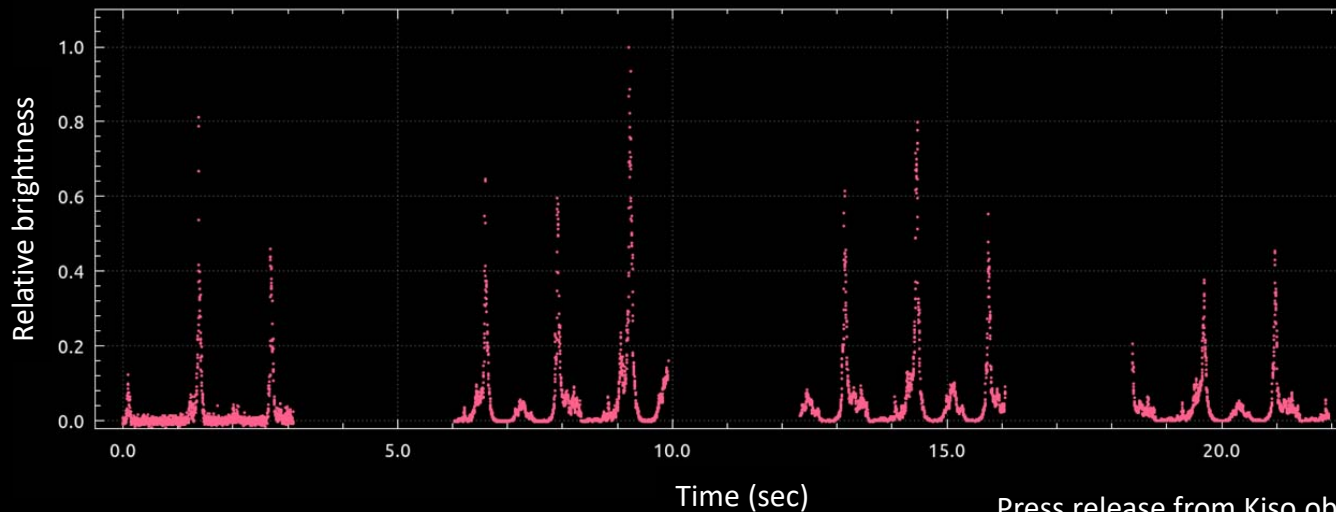
- Faint meteors up to 14 mag detected. (> 9 mag in previous study)
- About 1,000 events of sporadic meteors detected in a night.

# Ground based observation of X-ray space telescope HITOMI



2 fps, 50 sec starting from 20:24:08 31<sup>st</sup> Mar. 2016

- Light curve

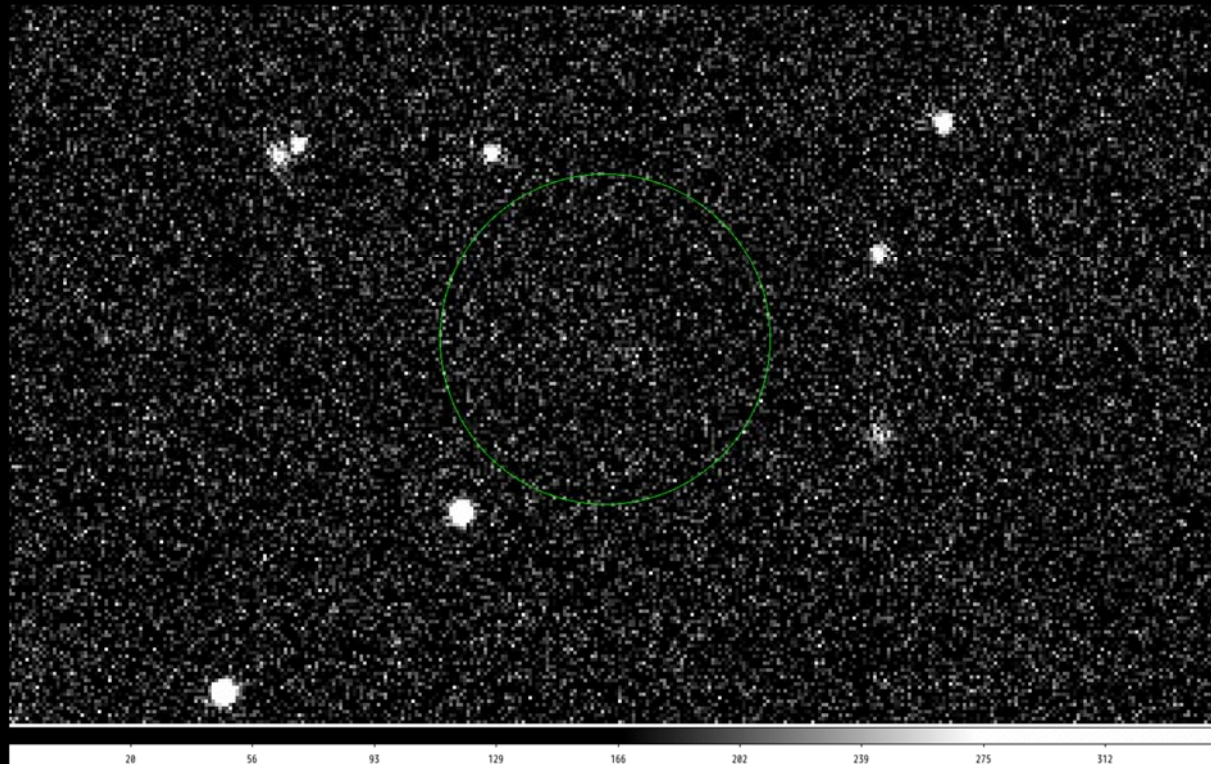


Press release from Kiso observatory. U. of Tokyo  
Used in press releases at JAXA  
Reported in NHK news and major news papers

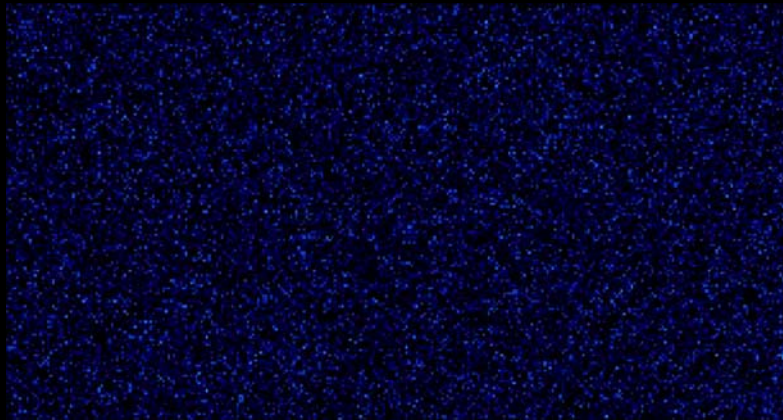


# Flash

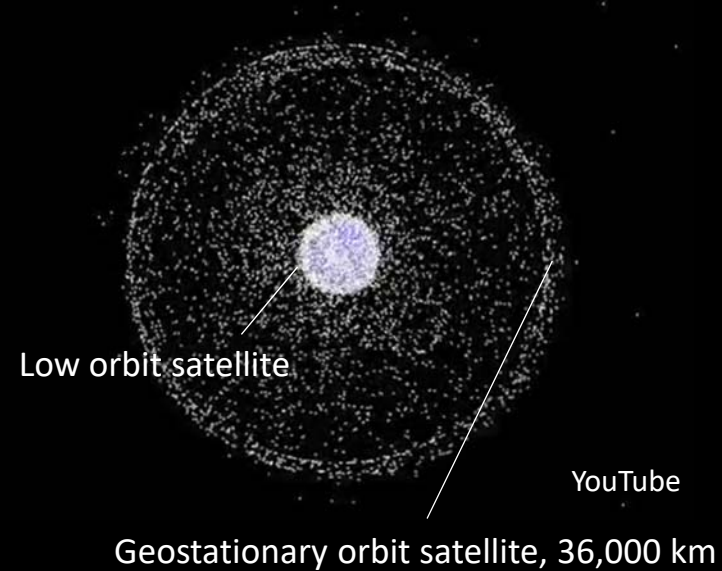
- Unidentified Flash Objects detected in frames taken in 2-fps



# Contamination of Artificial stellar objects



Example of flashing and moving object  
Geostationary orbit satellite JCSAT2  
30<sup>th</sup> Nov. 2015, 10 fps



- Space debris with  $\phi$  1 cm on the geostationary orbit can be detected.
- Rotating debris are observed as “flash phenome”. → **Serious problem!!**

1. 超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen

## 2. トモエのつくりかた

まだ完成していないので成功例とはかぎらない



# はじまり

2010年ある日某所

C社： 実は、こんなCMOSセンサがあるのですが、なにかに使いませんか？

私： ああ、この仕様だと、天文観測では使いませんねえ。

C社： そうですか。しかし、ご迷惑でなければ試させていただきませんか？

私： そうですねえ。搭載は簡単そうなので、やってみましょうか。  
あまり期待しないでください。

2011年1月木曾観測所

C社： わあ、さすがに星がたくさん写りますね。

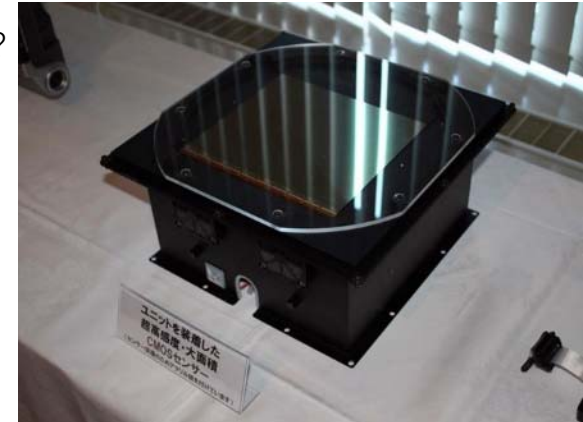
私： はい、これくらいは写ると思います。

C社： あ、雲がきた。あ！人工衛星、あ！流れ星、また、これも

私： ……??。なんだろうこの違和感は、

## 教訓

- 仕様値からは想像できないことがある
- データに触れて初めて感じることもある
- 分野外の専門家のコメントは大切に



観測に使用した200mm x 200mm  
CMOSセンサを搭載した試験カメラ



2011年9月15日キヤノン記者発表  
の様子

# やってみる

2012年ある日某所

C社： 実は、こんなCMOSセンサもあるのですが、使えますか？

私： ああ、この仕様だと天文観測では使えませんが、画素サイズはマッチしてますね。試験観測をやってみましょうか。

C社： 評価用の読み出し装置はありますよ。

私： ああ、この仕様だと天文観測では使えませんが、すぐに試験ができて便利なのでお貸してください。

2012年12月木曾観測所

私： まあまあ写りますね。でも、バックグラウンドが高いですね。

C社： 非冷却ですからね。触ると熱いくらいですから。

私： 天文観測に用いるには、冷却が必須なのですよ。

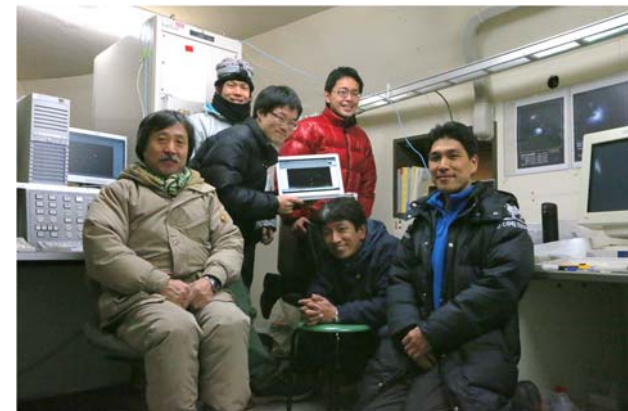
C社： そうですものね。冷却がなければ楽なんですけどね。

## 教訓

- すぐに試験できる環境を持つことが大切
- すぐに試験する意思が大切
- これらこそ大学の研究室の役割



カメラを準備する様子（B4藤堂さんら）

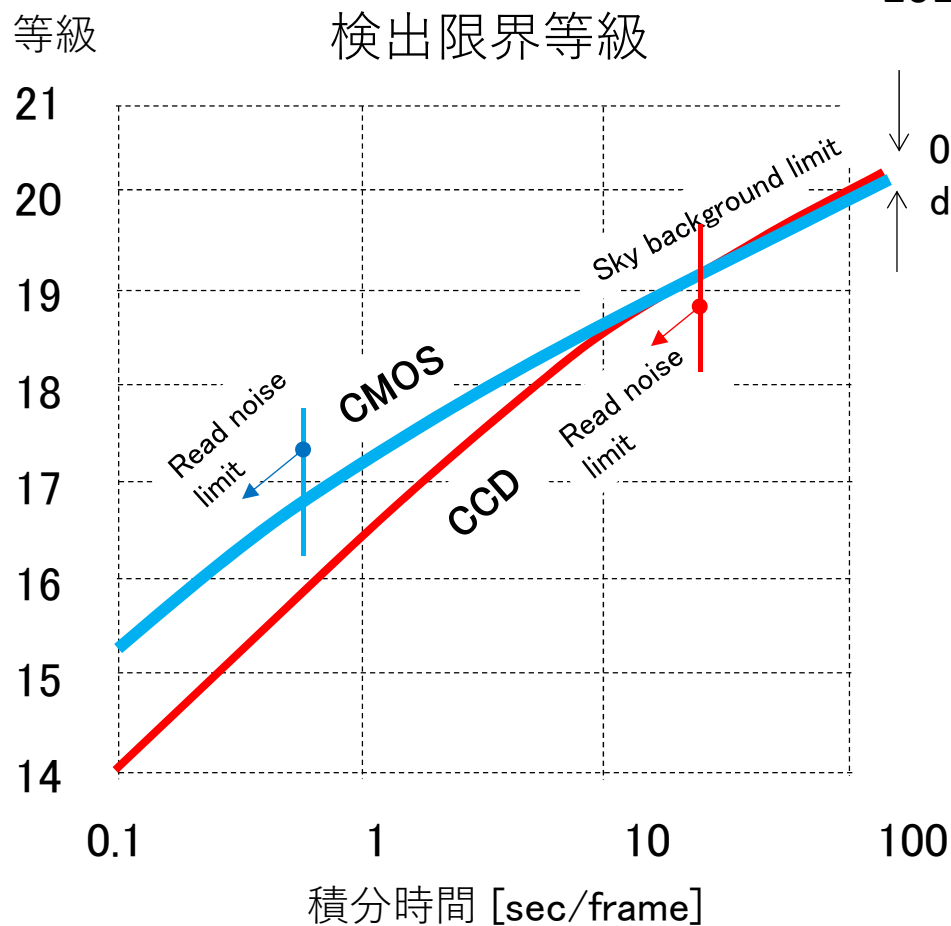


2012年12月35mmセンサの1回目の試験観測の様子

# 高速観測ではCCDよりCMOSの方が高感度

しかも、非冷却で実現が可能

2012年度東大B4卒業研究 藤堂氏より



検出限界等級 (CMOS)

積分時間 (sec)	等級
1/10	15.3
1	17.2
10	18.7
100	19.9

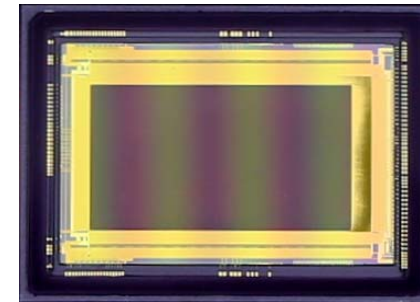
- 天文用CCDと同程度の感度を達成
- 10sec/frame以下では、CCDを上回る感度を達成

*V-band, S/N = 5, Seeing = 3"*

読み出し時間による観測効率の損失をふくまず

# 業界の伝統を疑ってみる

- センサの冷却は必要なのか？
- センサの真空設置は必要なのか？
- センサの温度制御は必要なのか？
- センサは粗末に扱うと壊れるのか？
- センサは高感度でないと使えないのか？
- 練習中に水を呑んではだめなのか？



Canon

## 教訓

- 技術はいつのまにか進んでいる
- 伝統が足かせになっていないか。伝統を一度はうたがってみるべき。

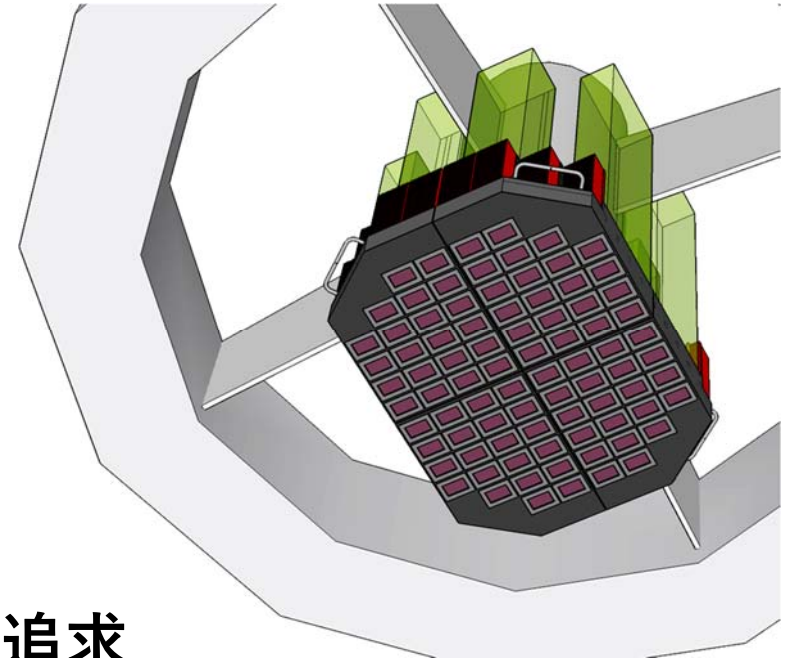
# トモエゴゼンの設計ポリシー

- シンプルなシステムの追求

- 軽量
- 非冷却・非真空
- 駆動部なし
- 組み立て簡単

- シンプルな目的（サイエンス）の追求

- 突発天体の「発見」に注力する。
- フィルタ交換は日中のみ、手動。
- データを全て保存しない。



→ 他に類の無い観測装置の実現につながる

人皆直行

我独横行

榊莫山  
さかきぼくざん





# 横行は慎重に

- 横行すると決めたら慎重に歩くべき。地雷が埋まっているかも。
- 慎重でも迅速にやらないと、直行する世間に取り残される。



- 要素試験を迅速に繰り返す



# トモエゴゼンの開発方針

- 計算はほどほどに。
- 実物を見ながら考える。
- 試験機を迅速に製作。迅速に測定、設計にフィードバック。

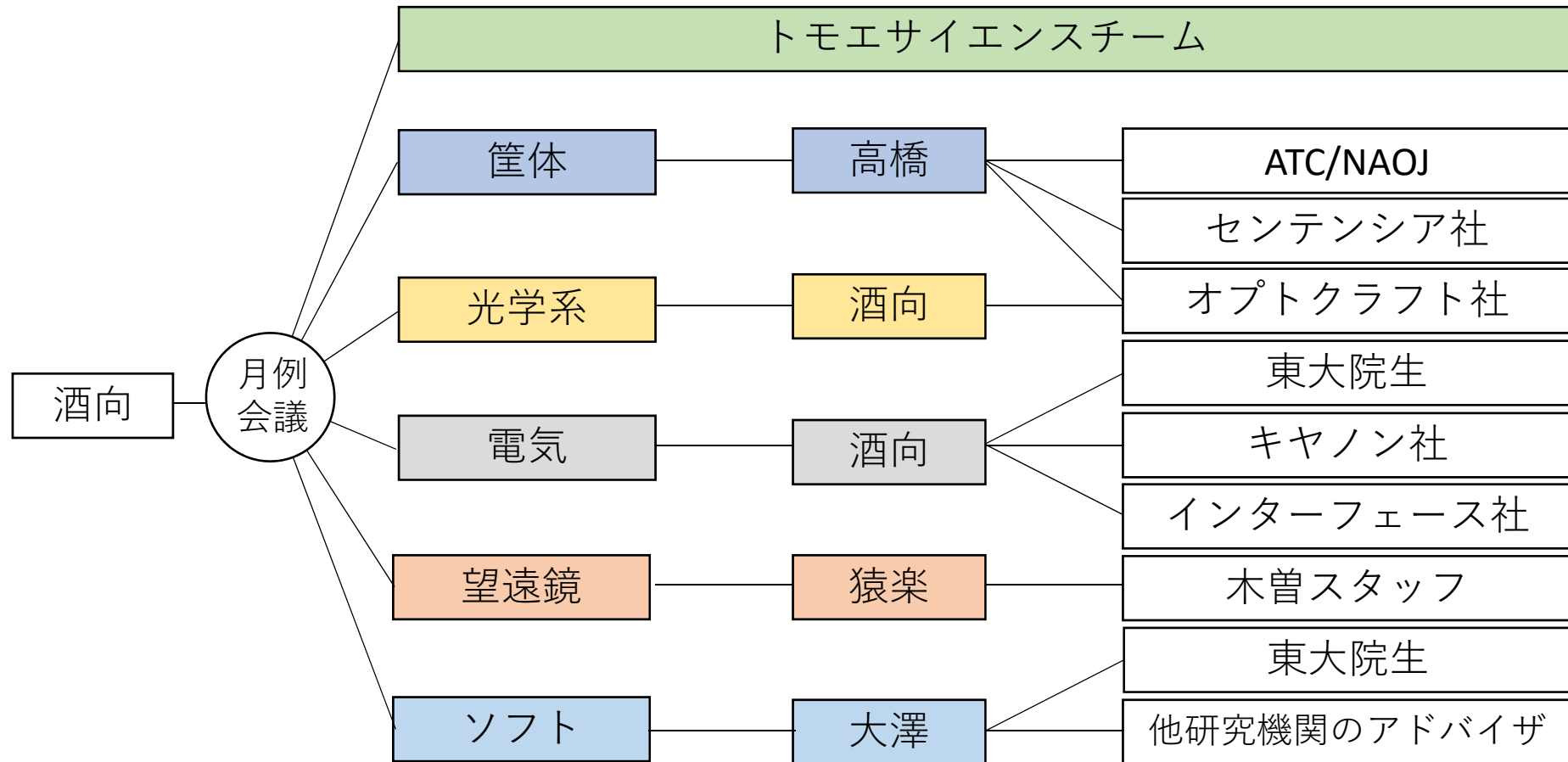
## これまでに製作した試験機

2012年	センサ単体試験機
2014年	センサ実験室評価試験機
2015年	センサ8台試験機 (Tomo-e PM)
2016年	熱試験機
2016年	コネクタ試験機
2017年予定	光通信試験機



フラットケーブルを通す穴のサイズを検討するための試験機

# トモエゴゼンの開発体制



## 特徴

- 試験装置をメーカーに依頼。試験を大学が担当。
- 試験結果をメーカーに迅速にフィードバック。
- 大学院生にシステム概念設計を担当させる

→ 実機へつなげる

# 既存技術をとりいれる

- 既存技術をそのまま使うのではなく、いかに味付け（応用）して使うかがポイント。アイデアだけでなく試験も大切。
- コンシューマー向け35mm CMOSセンサ（キヤノン社）
- 半導体用熱伝導両面テープ（3M社）
- 汎用アナログー光変換システム（インターフェース社）
- 精密加工技術（先端技術センター／国立天文台）
- 赤外線CMOSセンサ用動画読み出しシステム（東京大学）
- 赤外線CMOSセンサ用データ伝送システム（東京大学）
- 超広視野望遠鏡（1974年建設、東京大学木曾観測所）
- 情報数値処理技術（統計数理研、情報研、各大学）



熱伝導両面テープの長期耐久比較試験の様子。結果、3M社8904-02が選ばれる。

# トモエゴゼンの開発ツール

## □ トモエチーム（大学）が利用するソフト

- ドキュメント作成      Power Point, Excel
- CAD      Sketch up（3D, 指示書用）, Auto CAD（2D, 製造用）
- 回路設計      EAGLE, Xilinxデザインツール
- 観測視野確認      ステラナビゲータ（広い視野をカバー）

## □ トモエチーム（大学）が利用するサービス

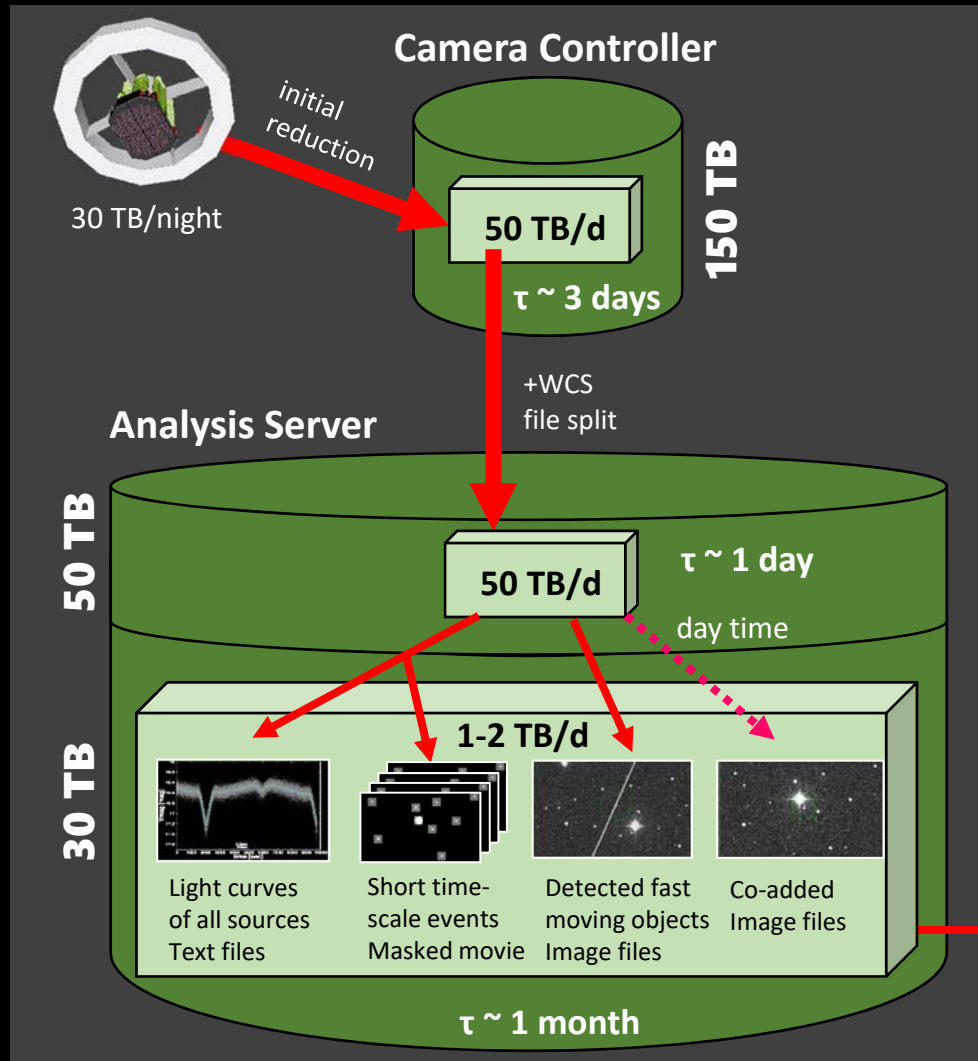
- 情報管理      Pukiwiki
- スケジューリング      みんなでガント.com
- 電子回路部品      Chip1Stop, RSコンポーネンツ
- 電気一般、アルミ製品      MISUMI, タカチ電機（ラック）
- 電気基板製作・実装      P板.com
- Web即時購入      Amazon.com, モノタロウ, アズワン



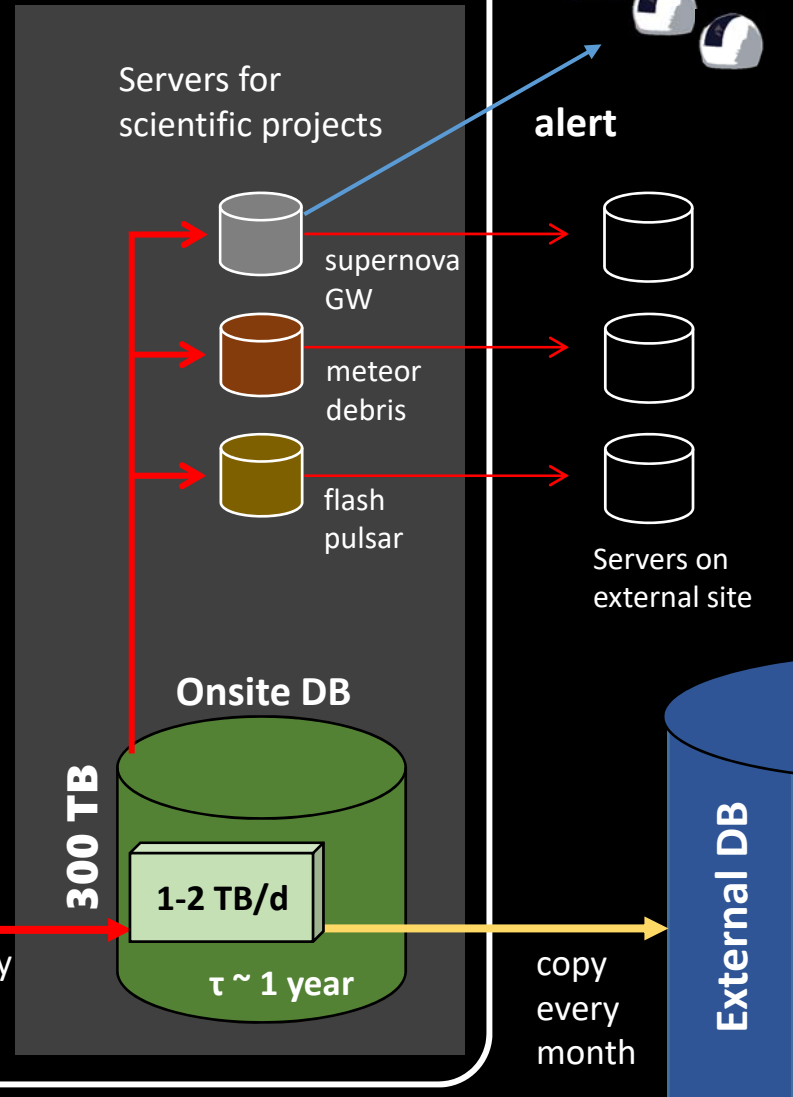
# Data flow for 1-night data

## KISO OBSERVATORY

### Telescope building

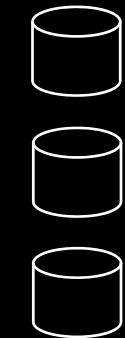


### Support building



Telescopes around the world

alert



Servers on external site

External DB



# Informatical approach

These studies are now ongoing under collaborative research.

- **Machine learning**

*Collaborator: Wide-field survey team/CREST, IPMU (PI Prof. Yoshida)*

- Source detection
- Classification

- **Sparse modeling**

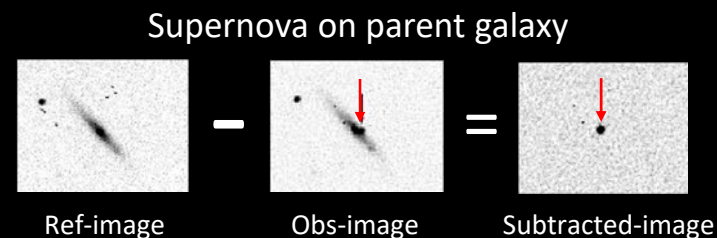
*Collaborator: Prof. Ikeda, Dr. Morii @ CREST, ISM*

- Flash detection
- Movie compression

- **Data mining / compression**

*Collaborator: Dr. Yamamoto @ SAKIGAKE, Yamanashi U.*

- Source detection
- Fast computation



<https://www.youtube.com/watch?v=BTrbow8u4Cw>





# Looking for “Spark-joy” = “ときめき” in Movie Big data.

When keeping only the items you feel  
“spark joy”, you will definitely become happy.

ときめくモノだけを残すと  
かならず幸せになれます。

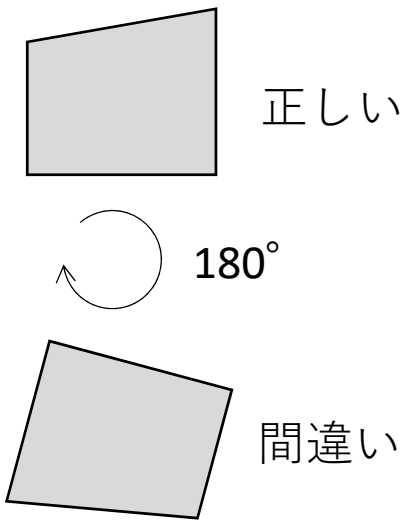
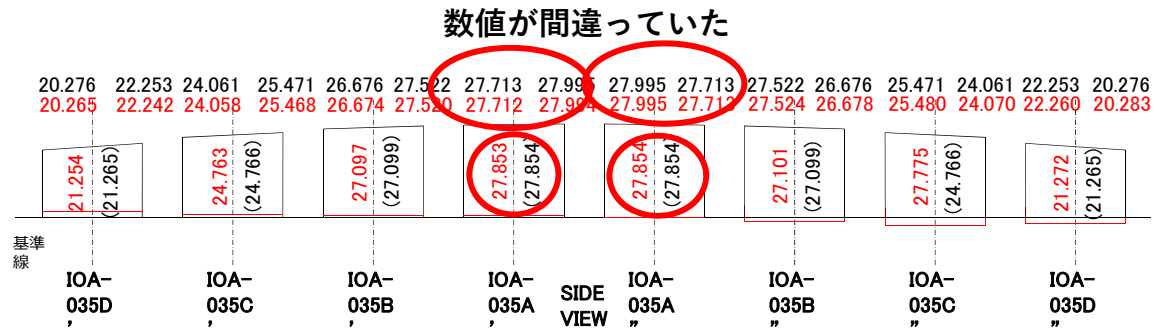
KONDO Marie “The Life-Changing Magic of Tidying Up”  
ISBN 1607747308 (2014)

近藤麻理恵 “人生がときめく片づけの魔法”  
ISBN 4763131206 (2010)



# トモエPMでの失敗例

- 加工は精確だった。図面をまちがえた。

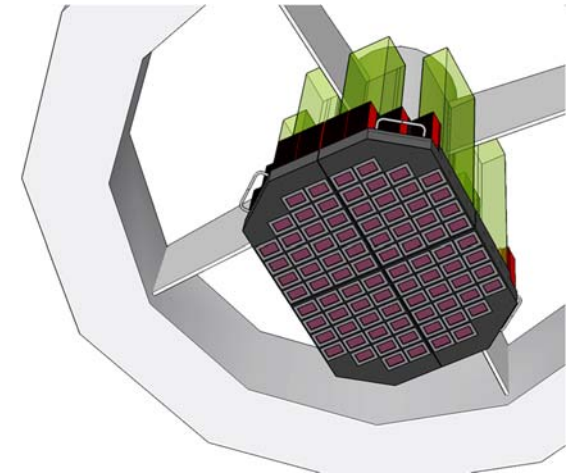


- 筐体内の空冷のために圧縮乾燥空気を通す穴をあけた。  
でも風がでない  
→ 計算をまちがえた。筐体内の空冷を中止。
- アナログ高速通信の線が長すぎて通信エラーが多発  
→ 光ファイバに変換

# まとめ

## □ 木曾超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen

- 世界初の天文用広視野CMOSカメラ
- CMOS x 84枚、20平方度、最大2 fps、最大30 TB/夜。
- 2018年完成予定



## □ トモエのつくりかた

- データに触れて初めて感じることもある。
- すぐに試験する環境と意思が大切。大学の研究室の役割
- 装置の設計とサイエンスを目的をできる限りシンプルにする。
- 技術はいつの間にか進んでいる。伝統を疑う。
- 既存技術をできるだけ上手に使う。使うときは少し工夫と試験をする。
- 試験装置の開発もメーカーの援助を受けて迅速化する。
- ビッグデータの考え方を導入する。