

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
次期広視野観測装置計画

木曾超広視野高速CMOSカメラTomoe Gozenの 開発の進捗報告



酒向重行, 小林尚人, 土居守, 本原顕太郎, 宮田隆志, 諸隈智貴, 高橋英則, 大澤亮, 菊池勇輝, 猿楽祐樹, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 三戸洋之, 中田好一 (東京大学天文学教育研究センター), 臼井文彦, 松永典之, 有松亘 (東京大学天文学教室), 田中雅臣, 渡部潤一, 前原裕之, (国立天文台), 富永望 (甲南大学), 板由房, 小野里宏樹, 花上拓海, 岩崎仁美 (東北大学), 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, 近藤荘平 (京都産業大学), 谷川衝 (理化学研究所)

2014.4 - 2015.6

- Tomo-e装置検討会 14回
- Tomo-eサイエンス検討会 5回



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



KONAN



TOHOKU
UNIVERSITY



K computer



NAOJ
National Astronomical
Observatory of Japan



JSGA
JAPAN SPACEGUARD ASSOCIATION

木曾超広視野CMOSカメラの名前募集



the Tomoe Gozen
Kiso Observatory

Kiso Observatory, the University of Tokyo

- 期限 木曾シンポ2日目 7/11(金) 11:10 (休憩時間の終了まで)
- 投稿方法 ポスター掲示板の場所にある箱へ
- 選考方法 木曾観測所の代表者4名
- ガイドライン
 - ✓ アルファベット4文字以上
 - ✓ 発音しやすいこと
 - ✓ 記憶に残ること
 - ✓ 名前から装置の性能・形状・目的などを想像できること
 - ✓ ライバルであるsky mapper, PTF(Palomar transient factory)などを連想させないこと
 - ✓ 何かの略でなくてもよい(例 BANANA, バナナみたいな形状の装置だから)



—— 2014年度木曾シュミットシンポジウムの酒向の資料より

Tomoe Gozenに決まりました。
ご協力ありがとうございました。

アウトライン

- Tomo-eの開発状況
- Tomo-eの観測戦略



巴御前出陣図
東京国立博物館蔵

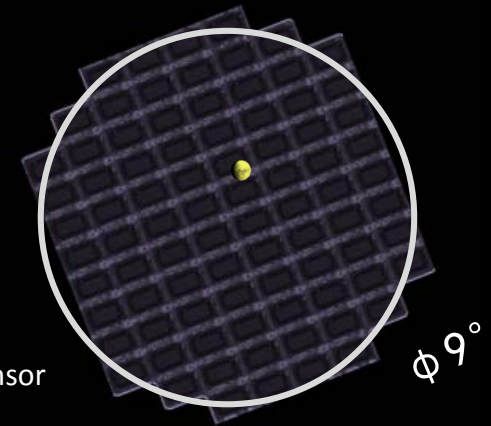


木曾福島の足湯の横のポスト

東京大学木曾観測所次期広視野観測装置

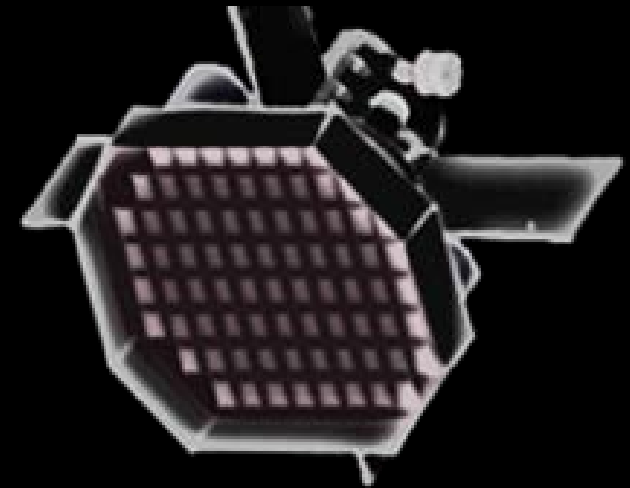
超広視野高速カメラ

Tomo-e Gozen

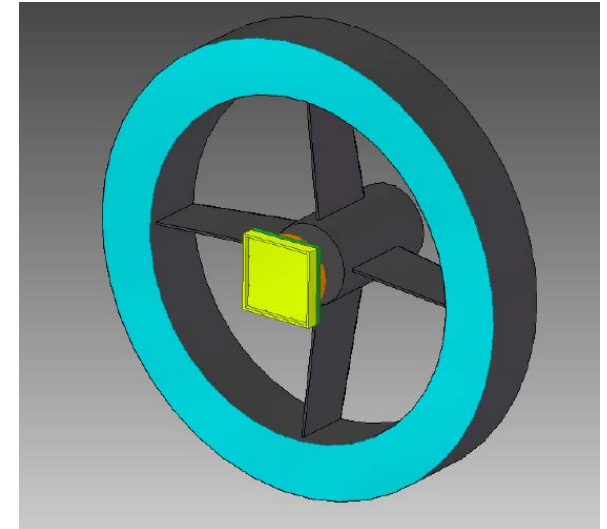
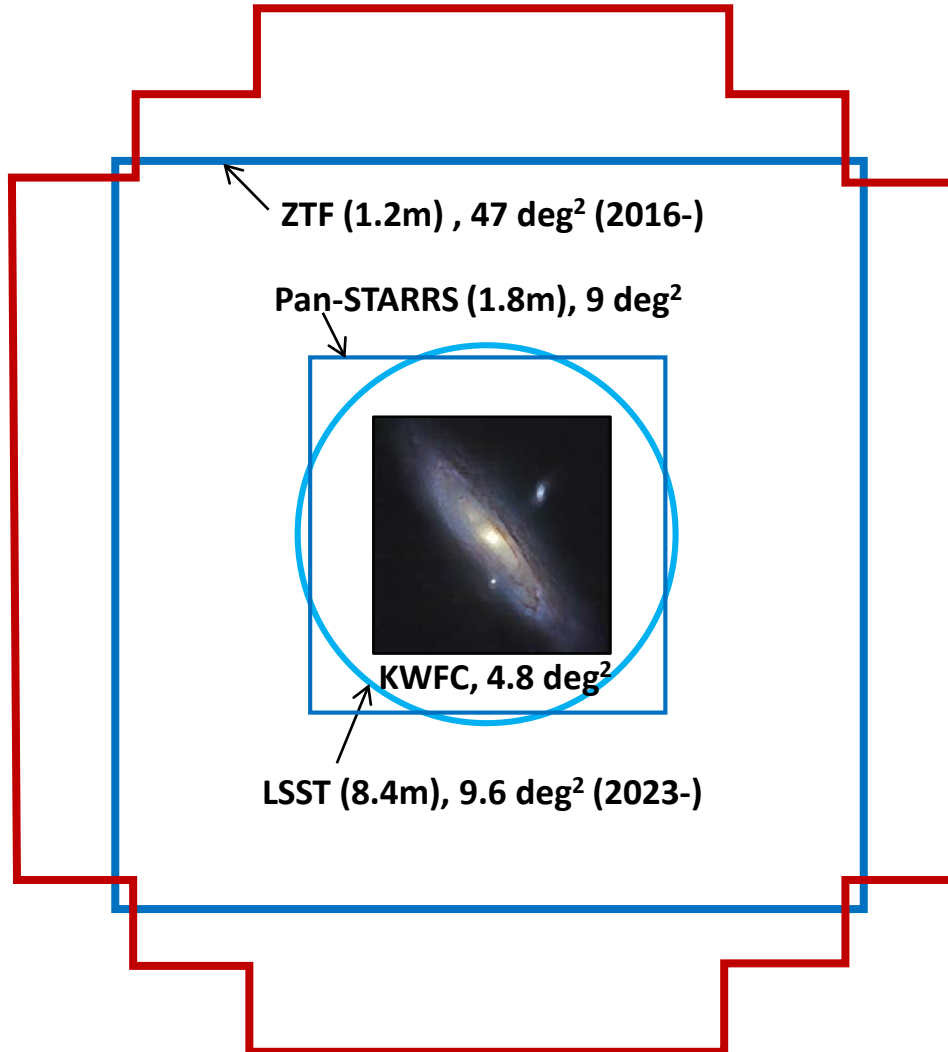


35mm CMOS sensor
x 84 chips

- Telescope: Kiso 105 cm Schmidt
- Field of view : 20 deg² in ϕ 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

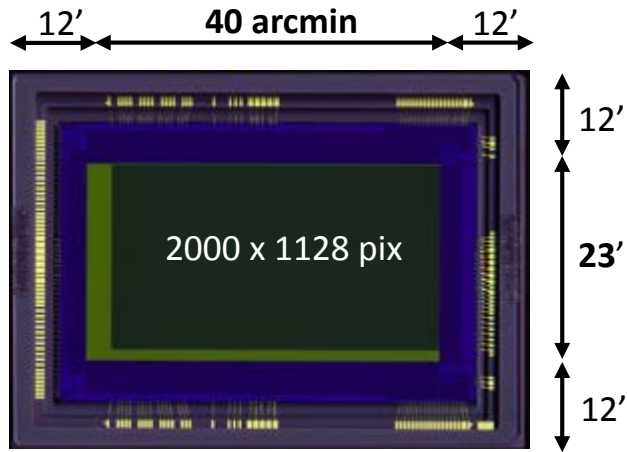


視野の比較



Focal plane of Schmidt telescope and Tomo-e

Tomo-e
20 deg² in ϕ 9 deg
Mosaic CMOS sensors

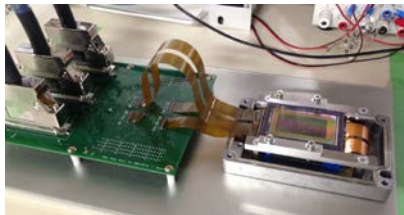


Canon 35 mm CMOS sensor

Pixel size	19 μm
Architecture	Front side illuminated + micro lens array
QE ($A\eta$)	0.45 @ $\lambda_{\text{peak}}=500\text{nm}$, 0.25 @ $\lambda=380, 700\text{nm}$
Read out noise	2 e^- rms @ 1 fps @ $G = 16 \times 1$, Well = 5,500 e^- 7 e^- rms @ 1 fps @ $G = 1.3 \times 1.3$, Well = 55,000 e^-
Dark current	1 $e^-/\text{pix}/\text{sec}$ @ 18deg, 3 $e^-/\text{pix}/\text{sec}$ @ 26deg
Frame rate	2 frame/sec (max), limited by readout-circuits

- 常温でも、低い暗電流
- 高速読み出しでも、低い読み出しノイズ

読み出し回路の開発と駆動試験

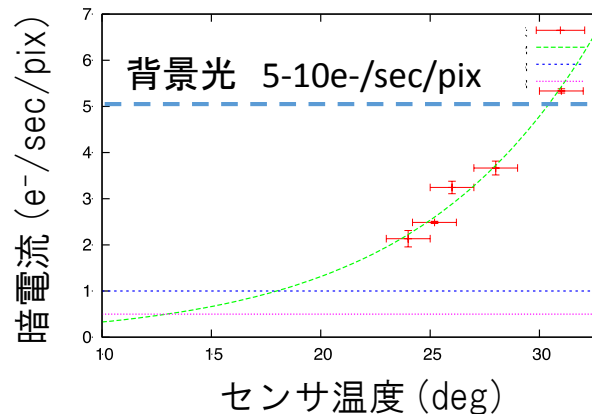


駆動試験中のCMOSセンサ



ピンホールで取得した画像

暗電流の測定結果



- 読み出しシステムの開発
- センサの駆動試験
- 低発熱駆動を実現

230mW/chip

19 W/84chips

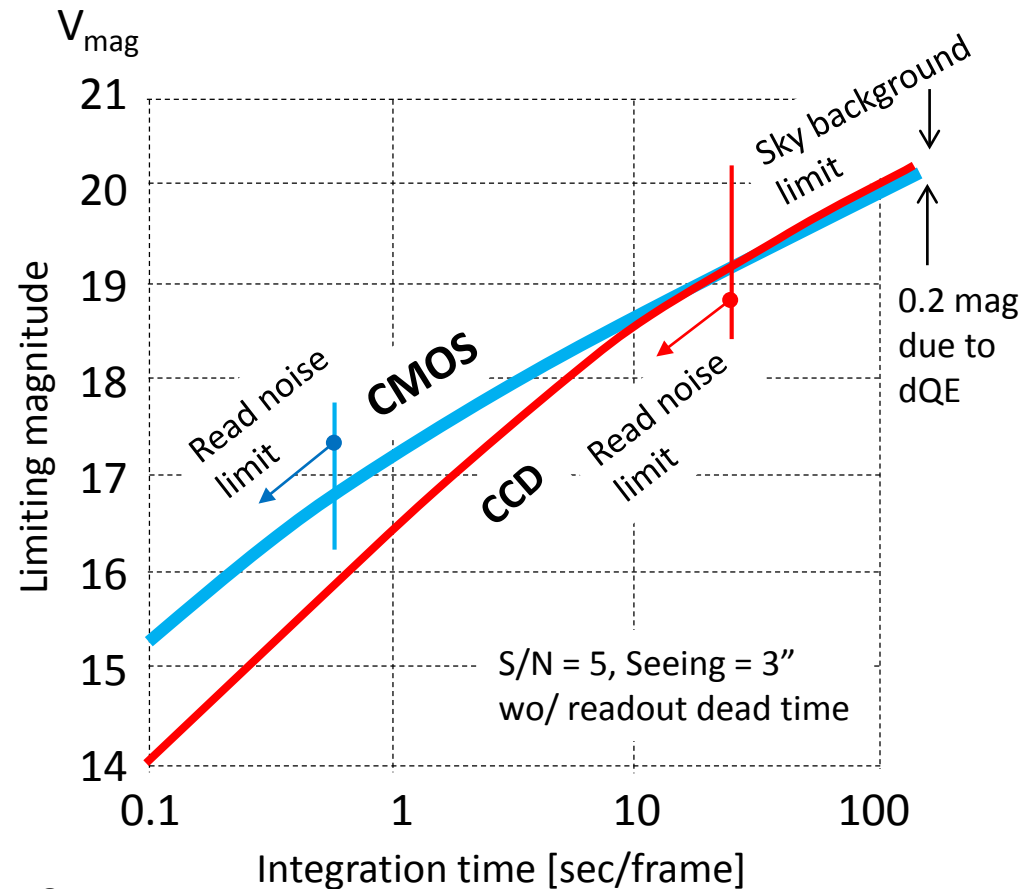
Estimated Limiting Magnitude

Integration time (sec)	V_{mag}
1/10	15.3
1	17.2
10	18.7
100	19.9

Parameters used for the estimation

Background photons:	13 $e^-/s/pix$
Readout noise:	2.5 e^-
Dark current at 273 K:	0.05 $e^-/s/pix$

Assuming w/ broad band on Kiso Schmidt in dark sky (20 mag/arcsec²)



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

筐体部の開発状況

センサのモザイク化

- 望遠鏡の焦点面（球面）に沿って設置
- 事前に形状を高精度測定
- 支持構造(HAP)の加工精度で位置決定
- 熱電接着シート

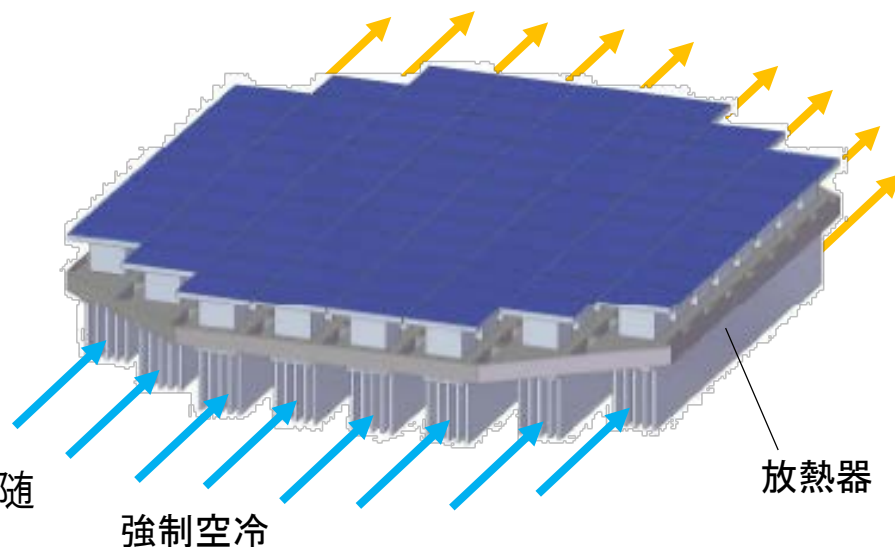
空冷システムの採用

- センサ温度+25°C以下, 外気温変動に追随
- 背面に放熱器, 強制空冷
- $0.23\text{W} \times 84\text{chips} = 19\text{W}$ を排熱

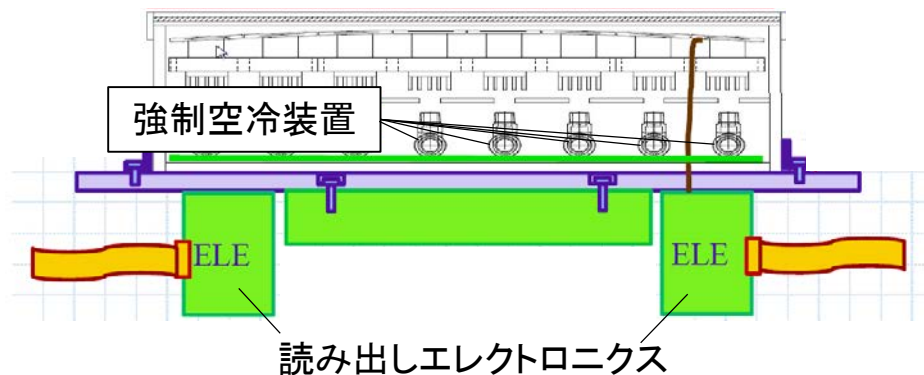
軽量設計

- 総重量 30 kg以下
- 非真空設計, 軽量構造体
- 軽量フィルタ

光学基盤に配置した84台のセンサ

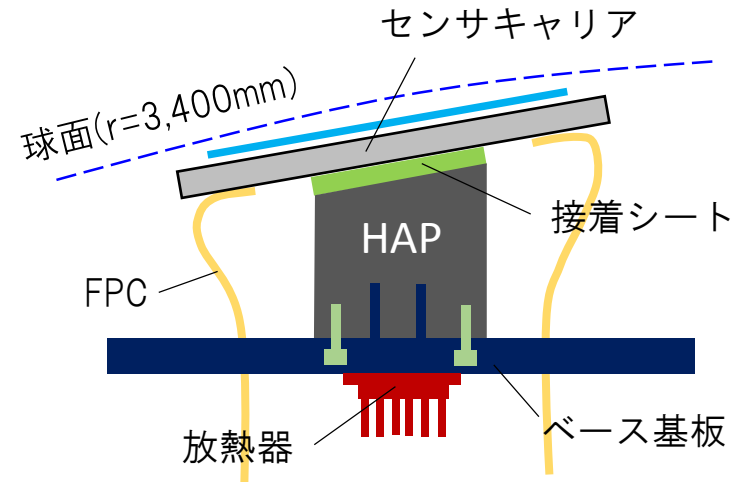


筐体断面図



センサの固定方法

- 望遠鏡の焦点面（球面）に沿って設置
- 事前に形状を高精度測定
- 支持構造(HAP)の加工精度で位置決定
- 熱電接着シート



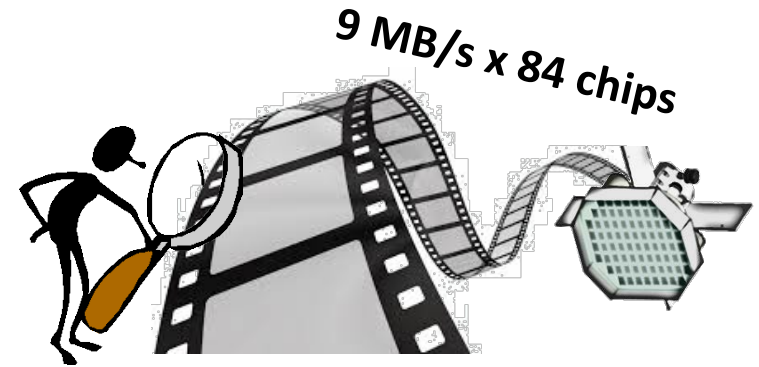
両面テープの接着耐久試験

メーカー	型番	施工性
Dexerials	• UT6006W	テープそのものが柔らかい。 普通。 ガムのように伸びるの貼付けが難しい。 5918ほどではないがやや難。 まずまず。 比較的易しい。
	• UT2210W	
	• UT5918W	
	• UT6520	
	• UT2525P	
	• UT6530ML	
Nitto電工	• TR-5912F	柔らかく、貼りにくい。
3M	• 8904-02	普通。
	• 8904-025	普通。

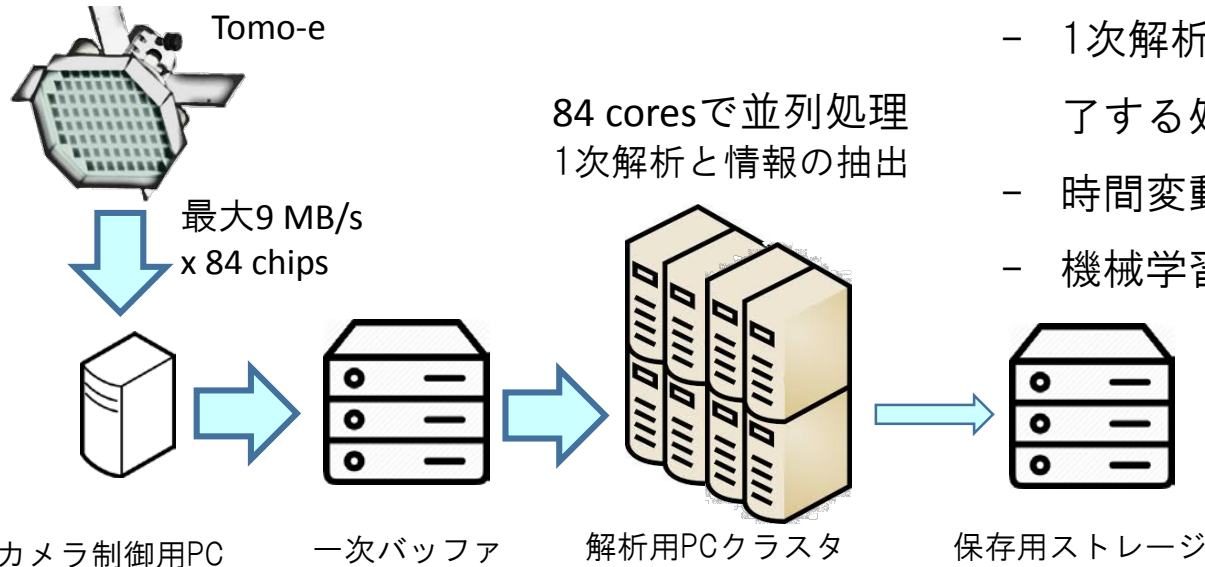
評価中の両面テープ

動画ビッグデータ

- 9 MB/s x 84 chips (最大)
- 27 TB/night (最大)
- 全データの保存は不可能
- 即時解析、価値ある情報を抽出



動画リアルタイム処理システムの開発



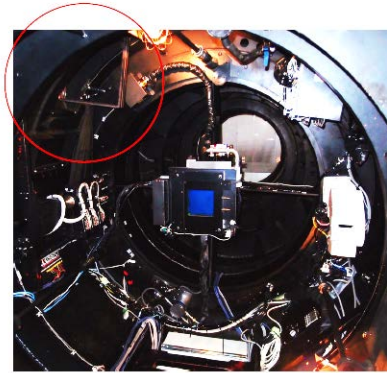
- 1コア ⇔ センサ1チップ
- 1次解析(WCSまで)を0.5sec以内に完了する処理速度を実現
- 時間変動の早期検出が課題
- 機械学習、動画圧縮の導入を検討中

シュミット望遠鏡のTomo-eへの対応

望遠鏡へのマウント方法の検討



退避スペースの位置



鏡筒内より



リフターでアクセス

- 内蔵フィルタの退避スペースを利用できそう
- 開口66cm x 30cm
- クレーン不可

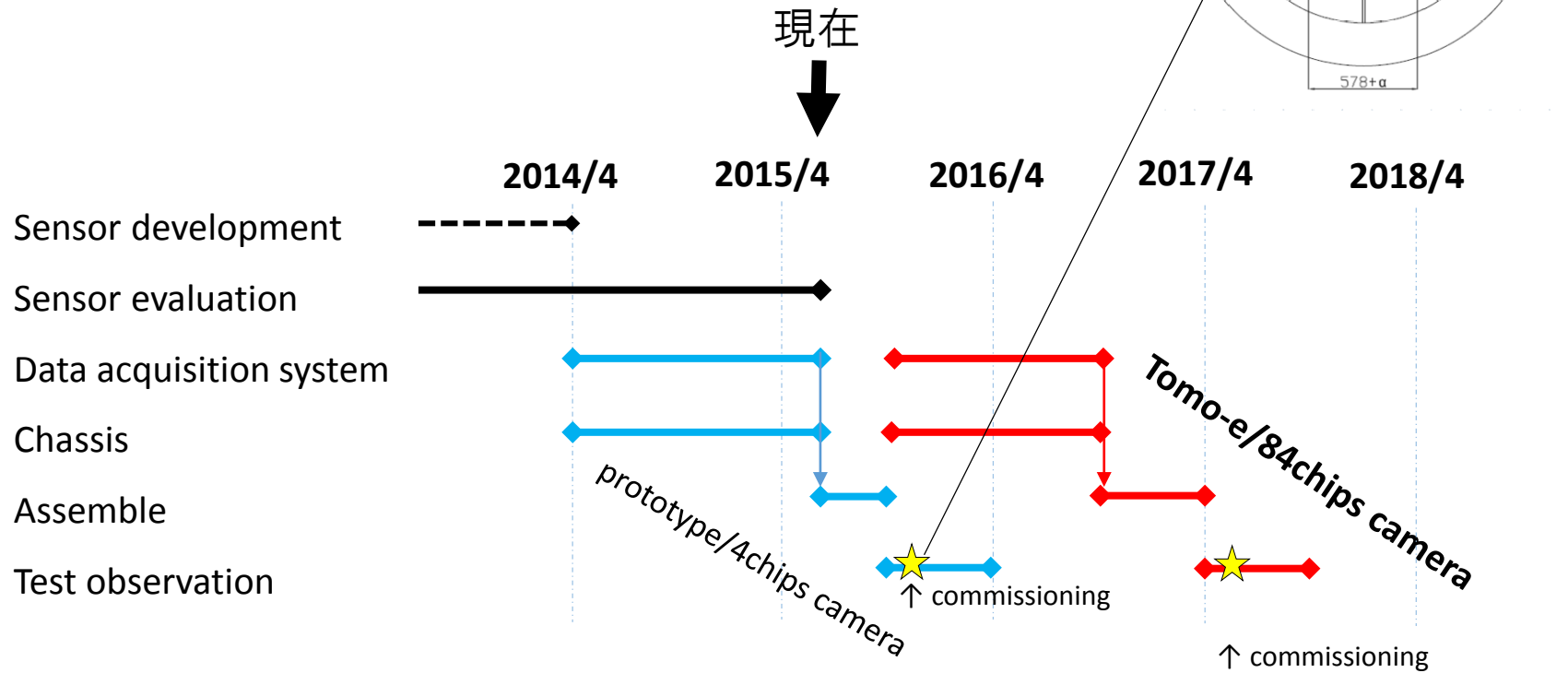
望遠鏡駆動速度の評価

視野の移動量 (deg)	静定時間 (sec)
0.5 deg = 1チップ分	7.2 ±1.2
9 deg = 1視野分	15.8 ±1.3

- 広視野スキャン観測時の効率に影響
- 静定時間3secを目指す

開発スケジュール

Tomo-e will be commissioning in 2017



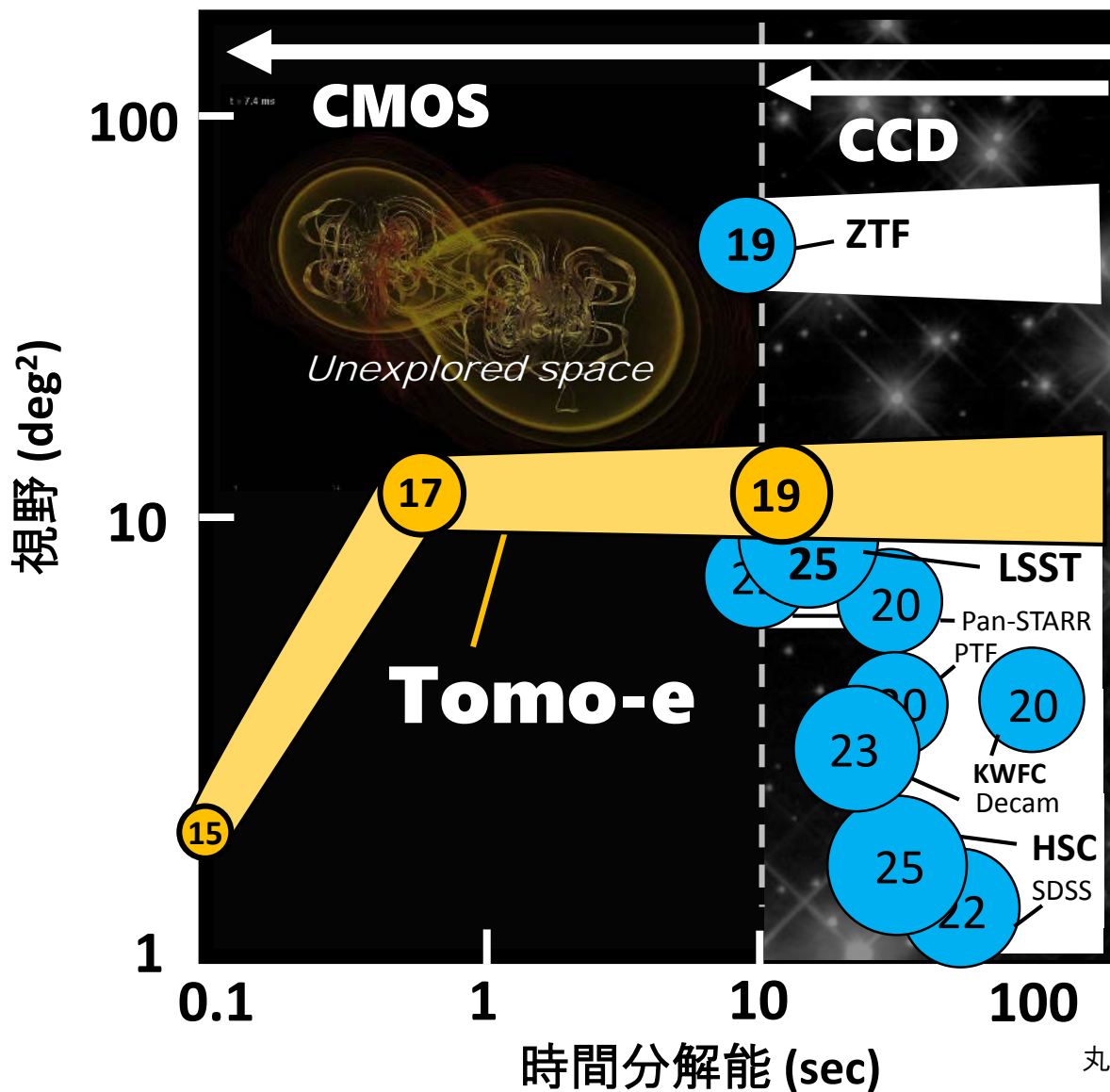
2015年12月にTomo-eプロトタイプ機による試験観測を実施予定
 興味をお持ちの方はお知らせください。

アウトライン

- Tomo-eの開発状況
- Tomo-eの観測戦略



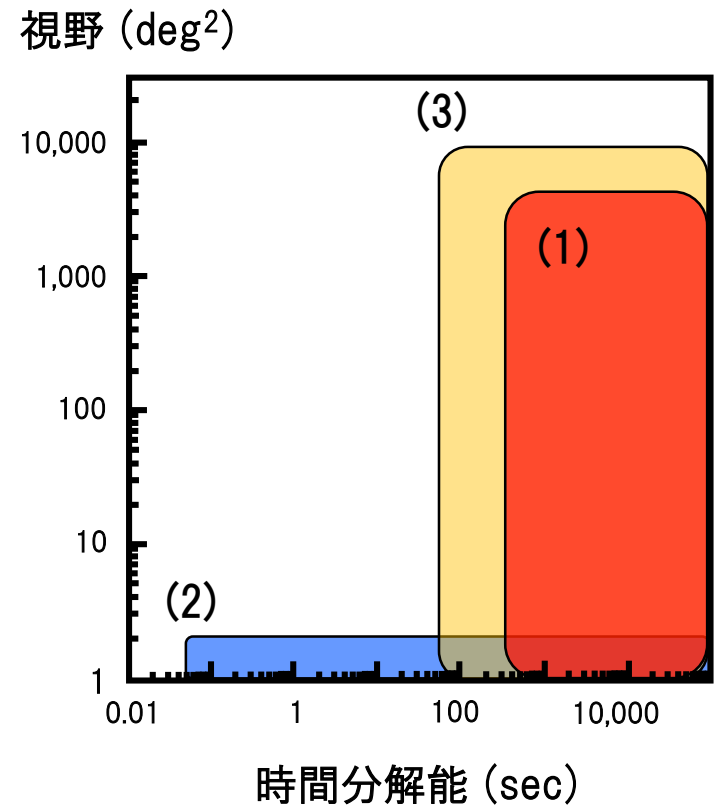
時間変動現象の検出能力の比較



丸の大きさと数字は限界等級

Tomoe-eの観測戦略

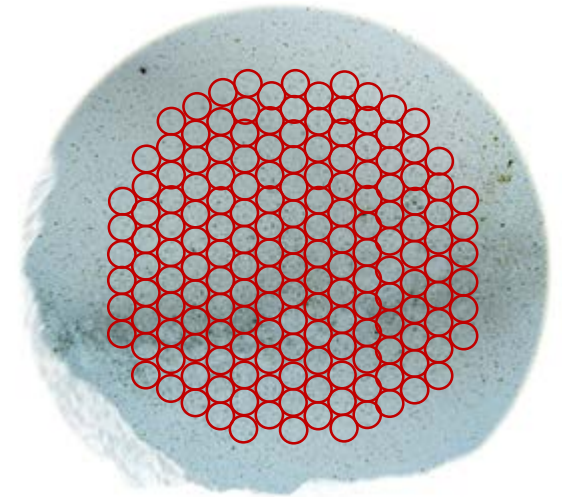
- (1) **1-hour-cadence all-sky** monitoring
(high-cadence + **very**-wide-field)
- (2) **20-fps wide-field** monitoring
(**very**-high-cadence + wide-field)
- (3) Synergy with **high-energy** astronomy
(**very**-wide-field + **quick** follow-up)
- (4) **Near and interior** Earth objects
(wide-field monitoring for **fast moving** objects)



(1) 1-hour-cadence All-sky Monitoring

観測計画

- All-sky (10,000 deg²), 1 hour cadence
- Recording period: 3 years
- Observation sequence:
 - 4 dithers x 170 pointing
 - short exposure (3 sec) → readout (0 sec) → dithering (2 sec)
- Limiting magnitude: $V_{\text{mag}} \sim 18$ (1 hour cadence)
 $V_{\text{mag}} \sim 19$ (1 day cadence)



ϕ 9 deg x 170 pointing,
1 hour cadence, 18 mag

期待される成果

Bright, but **Rare** and **Fast time-variable** events

- Supernovae, Neutron star mergers, AGNs, Gravity lensing
- Novae, Stellar flares, Eclipsing binaries, Late type star, Exosolar planets
- Bursts of comets and asteroids
- Unknown transient phenomena

Expected detection rates of Novae and SNe

- 1 hour cadence, all-sky, 18 mag**

N. Tominaga+ 2014/10

Event	Detection rate (events/year)	
Early phase of Nova	2	including M31
Shock breakout of C-C SN	5	

- 1 day cadence, all-sky, 19 mag**

Event	Detection rate (events/year)	
Discovery of Nova	10	including M31
Early phase of Ia SN	1,600	$M_v \sim -18$ mag, 260 Mpc
Early phase of C-C SN	300	$M_v \sim -16$ mag, 100 Mpc
Superluminous SN	30	$M_v \sim -21$ mag, 1,000 Mpc
SN in Near-by Galaxy	0.5	$M_v \sim -11$ mag, 10 Mpc
Discovery of Faint SN	unknown	

(2) 20-fps Wide-field Monitoring

観測計画

- 2 deg² (partially readout) in ϕ 9 deg
- 20 frame/sec
- Continuous monitoring of 10,000 stars
- Recording period: 1 year
- Limiting magnitude: $V_{\text{mag}} \sim 14$



2 deg² in ϕ 9 deg,
20-fps, 10,000 stars

期待される成果

Very bright, but **Rare** and **Very Fast time-variable** events

- X-ray variable objects: AGNs, YSOs, stellar flares
- Optical counterparts of Fast Radio Bursts
 - Duration time: ~ 10 msec, Rate: 0.5 events/day (when brightest case)
- Stellar occultations by Solar system objects
 - Duration time: a few 100 msec, Rate: a few dozen events/year

by Totani-san (private communication). Note, this flux estimation contains an inaccuracy of 7 orders.

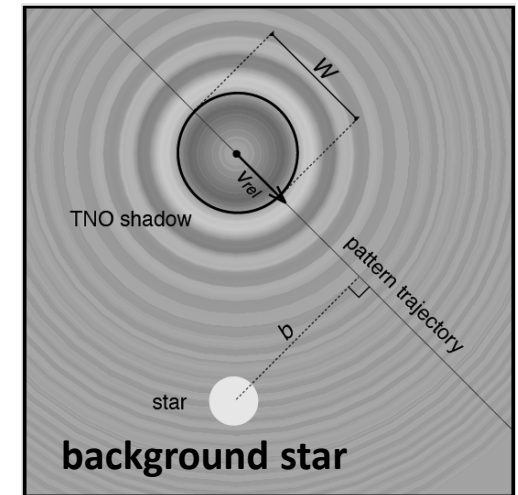
Stellar occultations by TNOs

- TNOs (Trans Neptune Objects) keep composition in pre-solar age.
- Bodies with km-size are important.
- It is too small to detect them even with large telescopes.

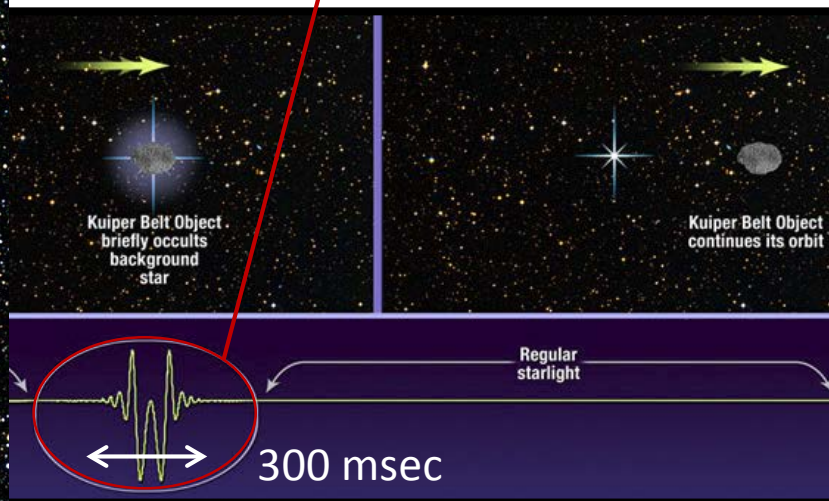
→ **Stellar occultations**

→ **Fast (20 fps) wide-field monitoring by Tomo-e**
A few events/year

TNO shadow

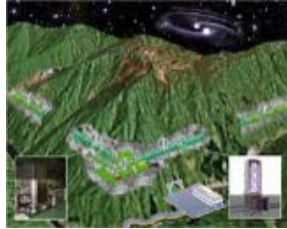


Size and distance
of TNOs



Arimatsu 2014,
Kiso Schmidt
symposium

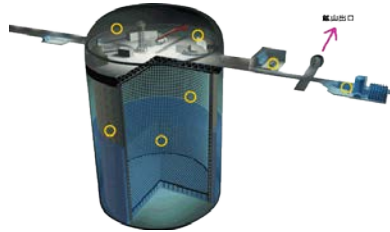
(3) Synergy with **High-energy Astronomy**



Gravitational wave detector

KAGRA

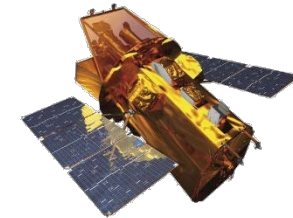
N-N merger?
N-B merger?
Core collapse SN?
Magnetar?



Neutrino detector

Super-Kamiokande

Nearby Supernova



Gamma-ray telescope

SWIFT, Fermi, MAXI

Gamma-ray burst

External trigger

w/ error of arrival direction: a few degrees

Optical wide-field follow-up by Tomo-e

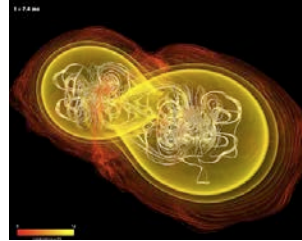
Gravitational Wave Counterpart



Collapsar, Long GRB
NS/BH formation
< 10 Mpc for GW



Magnetar Flare, Short GRB
NS oscillation
< 10kpc for GW



Neutron Star Merger, Short GRB?
NS-NS/NS-BH
< 200 Mpc for GW

GEO600/UK-GR



LIGO x2/USA

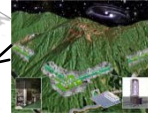


VIRGO/FR-IT

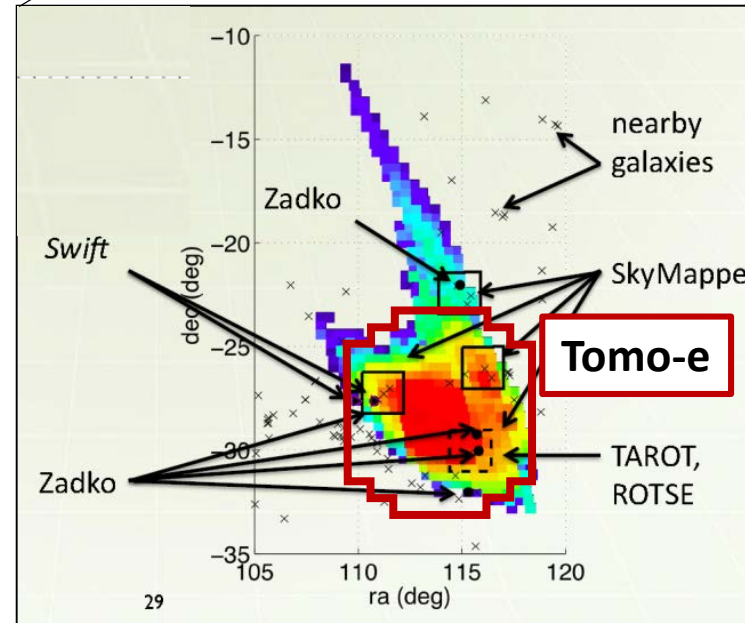
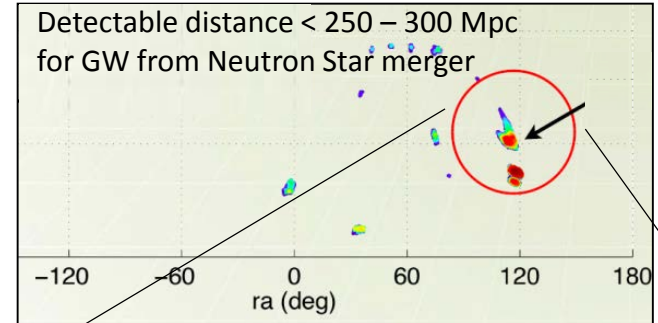
indigo
LIGO- India
In prop.

KI 01, Kashiyama & KI 11

KAGRA/JAPAN



LIGO- Australia
In prop.



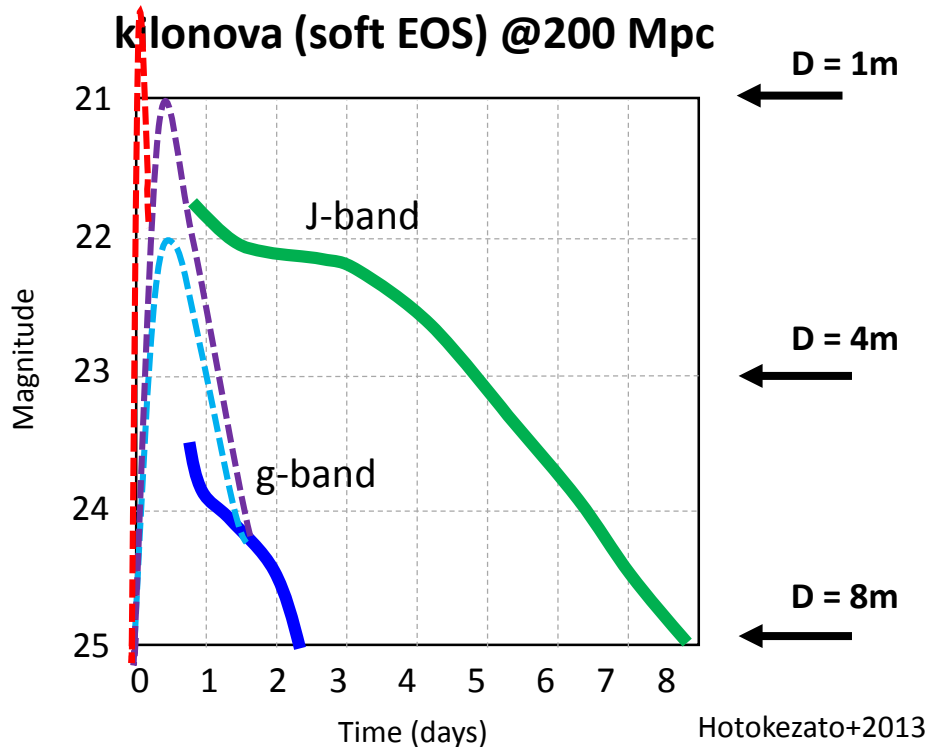
- ✓ Error circle of arrival direction of GW $\sim \phi$ 5 deg
- ✓ Tomo-e can follow-up GW events with ϕ 9 deg

Estimation of arrival direction of gravitational wave.
Hayama (NAOJ) 2012

kilonova

nasa.gov

- Binary neutron starsの合体 (Li & Paczynsky 1998)
- dynamical ejecta(msec) → wind ejecta(sec)
- 質量の数%が放射性元素として放出
- 放射性元素の崩壊により等方に明るく輝く (days)



- r-processによる重元素合成
- ランタノイド(Z=57-61)が可視opacity大
- 可視でやや暗い

中心残骸からのneutrino照射が強い場合

- 電子の割合が増加 (Kasen+2014)
- r-processがZ~58でとまる
- 可視が明るくなる(~2days)

ejectaの薄い外皮からの放射

- 可視で数hours強く光る (Metzger+2015)

KilonovaのレートはCCSNeの < 1/100程度
(Tsujiimoto & Shigeyama 2014)

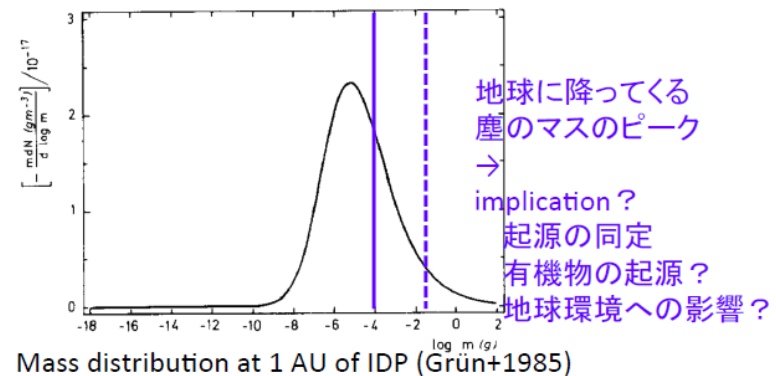
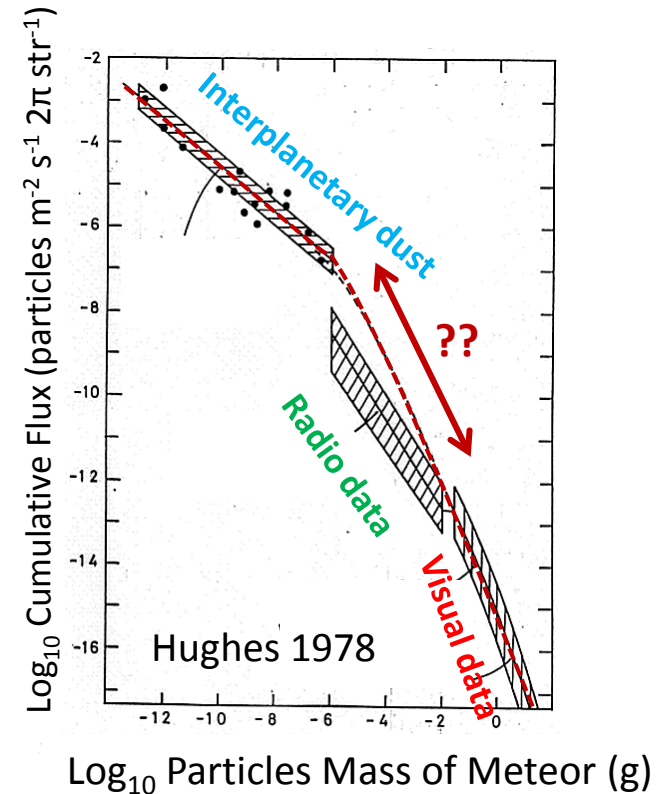
(4) Near and Interior Earth Objects

観測計画

- Phenomena in background
- During other surveys

期待される成果

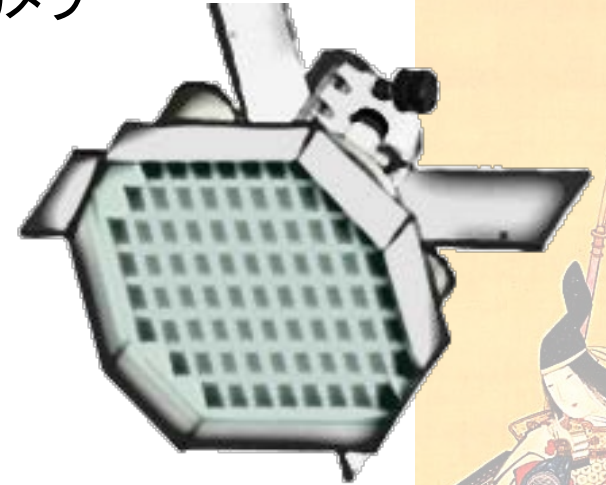
- Faint meteor (sporadic and meteor shower)
 - Rate: ~100 events/min
 - Brightness distribution of meteors.
 - Is the power law extended to faint meteors?
- Fast moving NEOs including PHA (Potentially Hazardous Asteroid)
 - Moving speed: 10-100 arcmin/sec
 - Such fast moving asteroids are not detected by CCDs with an ordinal FoV and exposure time.



Summary

▼ 東京大学木曾観測所 超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen

- ❑ Field of view : 20 deg² in ϕ 9 deg
- ❑ Sensor: 84 CMOS chips
- ❑ Frame rate : 2 frames/sec (max)
- ❑ Commissioning : 2017



▼ 観測戦略

ターゲット → 稀で貴重な突発現象、サブ秒に至る短時間現象

- ❑ **1-hour**-cadence **all-sky** monitoring
- ❑ **20-fps** wide-field monitoring
- ❑ Synergy with **high-energy** astronomy
- ❑ **Near** and **interior** Earth objects

