

# Tomo-e Gozenの本格運用の開始から2年

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  
酒向 重行 (さこう しげゆき)



# アウトライン

1. スライド 4 枚でTomo-e Gozen
2. Tomo-e Gozenの本格運用の開始から2年

## 世界初の広視野動画カメラによる高頻度の時間軸サーベイ

# T O M O E G O Z E N



Sako et al. 2018

### カメラ概要

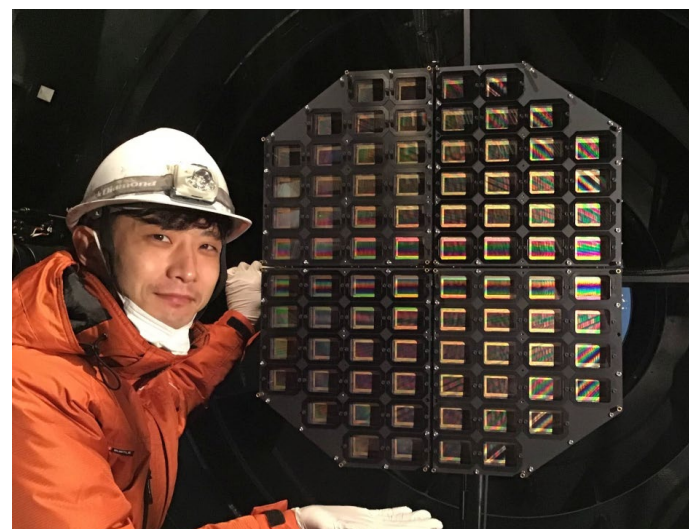
- 視野 20平方度
- 84台のCMOSセンサ (1億9,000万画素)
- 2 fpsの動画 (部分読み出しで~100fpsも可)
- 可視光単色
- 2019年10月より本格運用を開始

### データの出力と処理

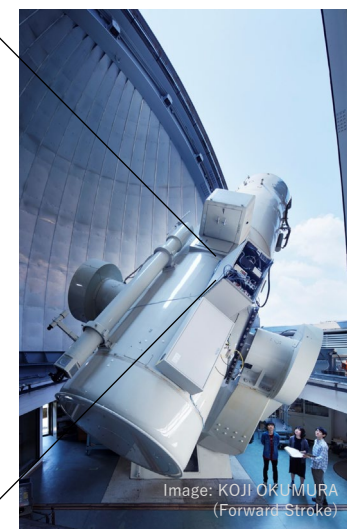
- 毎夜30TBの画像ビッグデータ
- カメラと直結した計算処理システム
- CPU 200コア, ストレージ 1PB
- 機械学習・最適化アルゴリズムによる逐次処理とアラート生成

### 観測運用

- 全天領域の動画サーベイ (2 fps)
- 特定領域の高頻度サーベイ (2 fps)
- 特定領域の高速モニタリング (>10 fps)
- 即時の広域追観測 (重力波, ニュートリノ等)



望遠鏡焦点に搭載されたトモエゴゼンカメラ 84台のCMOSセンサが並ぶ



東京大学木曾観測所  
105cmシュミット望遠鏡



「巴御前出陣図」  
東京国立博物館蔵  
Image: TNM  
Image Archives

詳細はTomo-e Gozenウェブサイトを参照

<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/>



トモエゴゼン計画の研究グループ, 約50名が参加

# トモエゴゼンが切り拓く時間軸天文学

## ① 短い時間スケールに残された未解明の宇宙

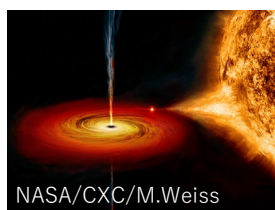
これまでのサーベイでは、多くの高速移動現象、短時間突発現象が見過ごされている



惑星間ダスト



太陽系小天体



活発な質量降着



未知の爆発現象



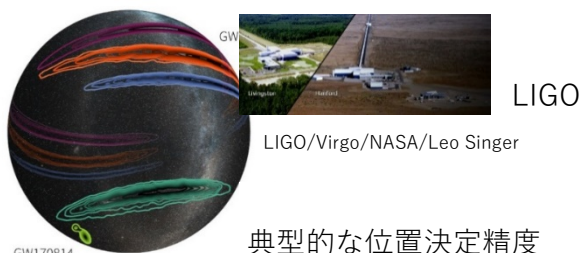
未知の知的生命体

トモエゴゼンによる  
広視野 + 高頻度の観測で探る

## ② マルチメッセンジャー天文学

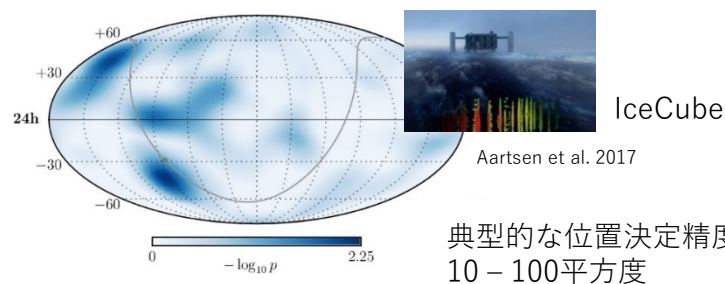
重力波イベントの初検出 (2015), 電磁波/非電磁波観測の融合による新しい天文学が始まる

LIGO/Virgoにより検出された重力波イベント



典型的な位置決定精度  
10 - 100平方度

IceCubeにより検出された宇宙ニュートリノイベント



典型的な位置決定精度  
10 - 100平方度

トモエゴゼンによる  
広視野 + 迅速な追観測で探る

# トモエゴゼン全天動画サーベイ

## データの取得方法

- 気象条件の自己判断による「自動スケジューリング+自立運転」, 「遠隔操作可」
- 20平方度/ポインティング, 0.5秒 x 18フレームの動画
- 晴天夜のほぼ毎日 (年間~100夜)

## サーベイ領域

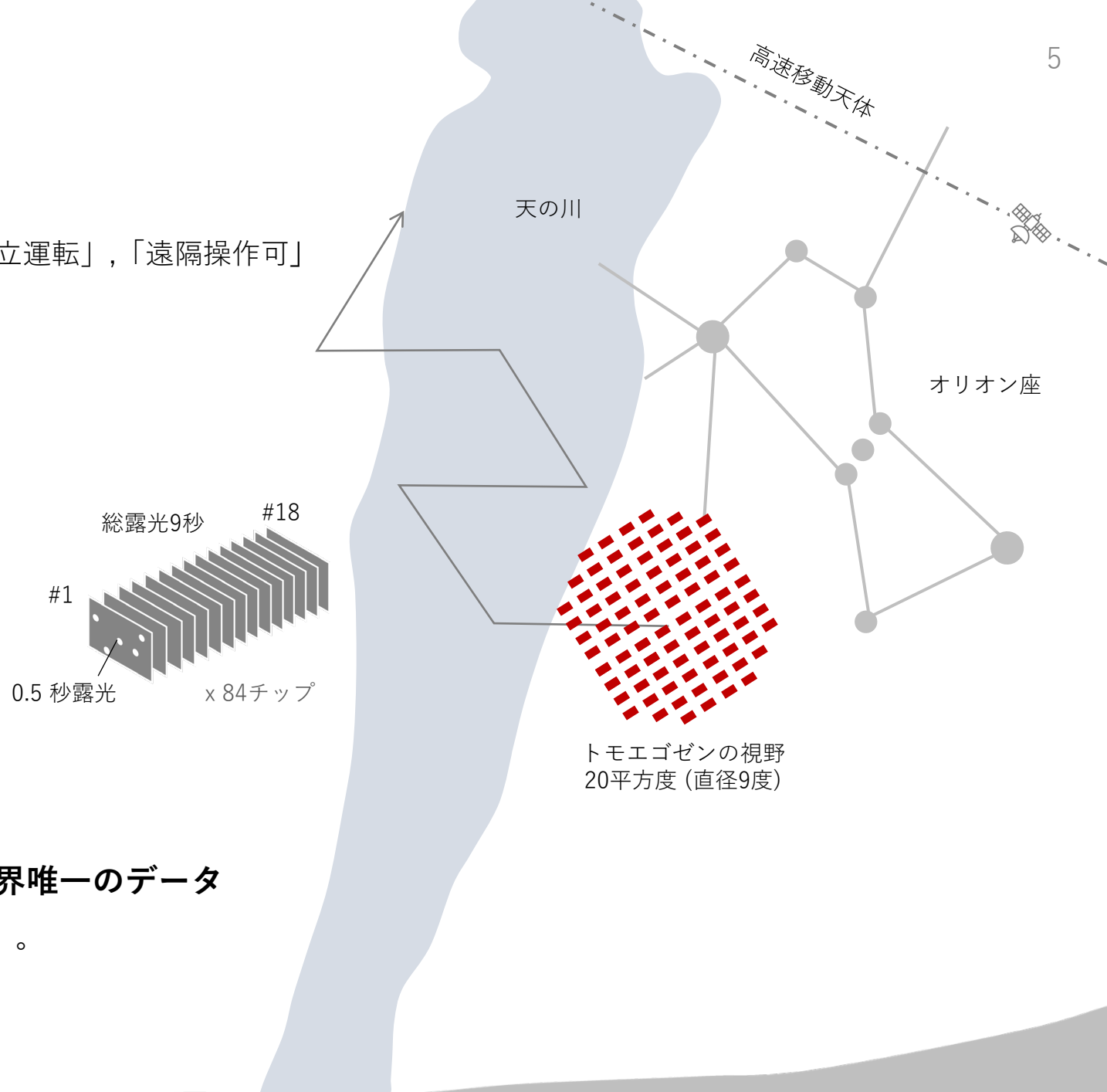
- 7,000平方度 (高度 $>35^\circ$ ), 1回/夜, 2.5時間で完了
- 2,000平方度 (深夜南中領域),  $<10$ 回/夜

## 達成感度

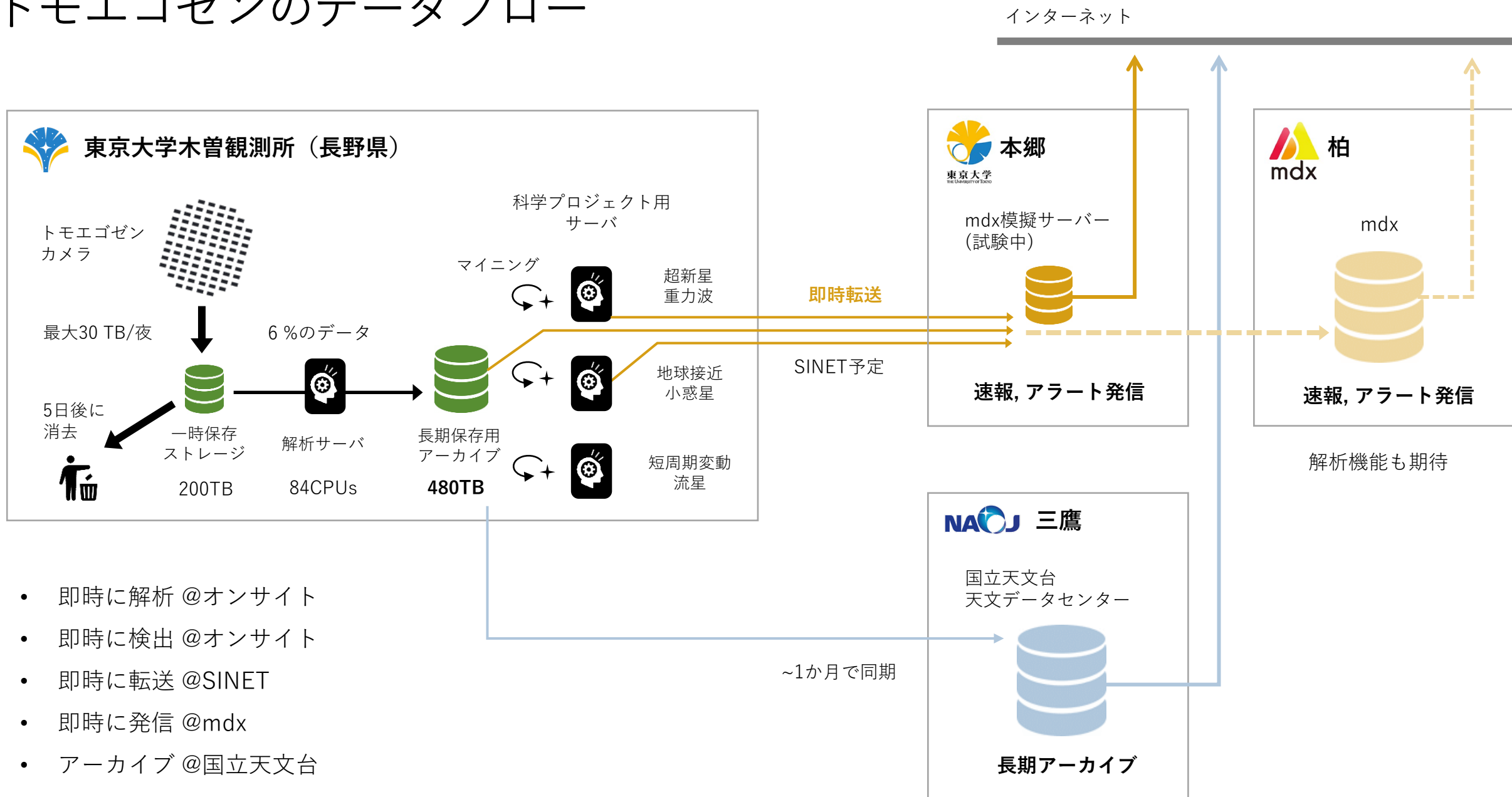
- $<17$ 等級,  $<18$ 等級 (スタック時)
- 1回の全天スキャンで約1億天体を検出

## 空の広域を動画にて高感度・高解像度で監視する世界唯一のデータ

特定の天体を狙っているわけではない。対象は夜間の「空」。



# トモエゴゼンのデータフロー

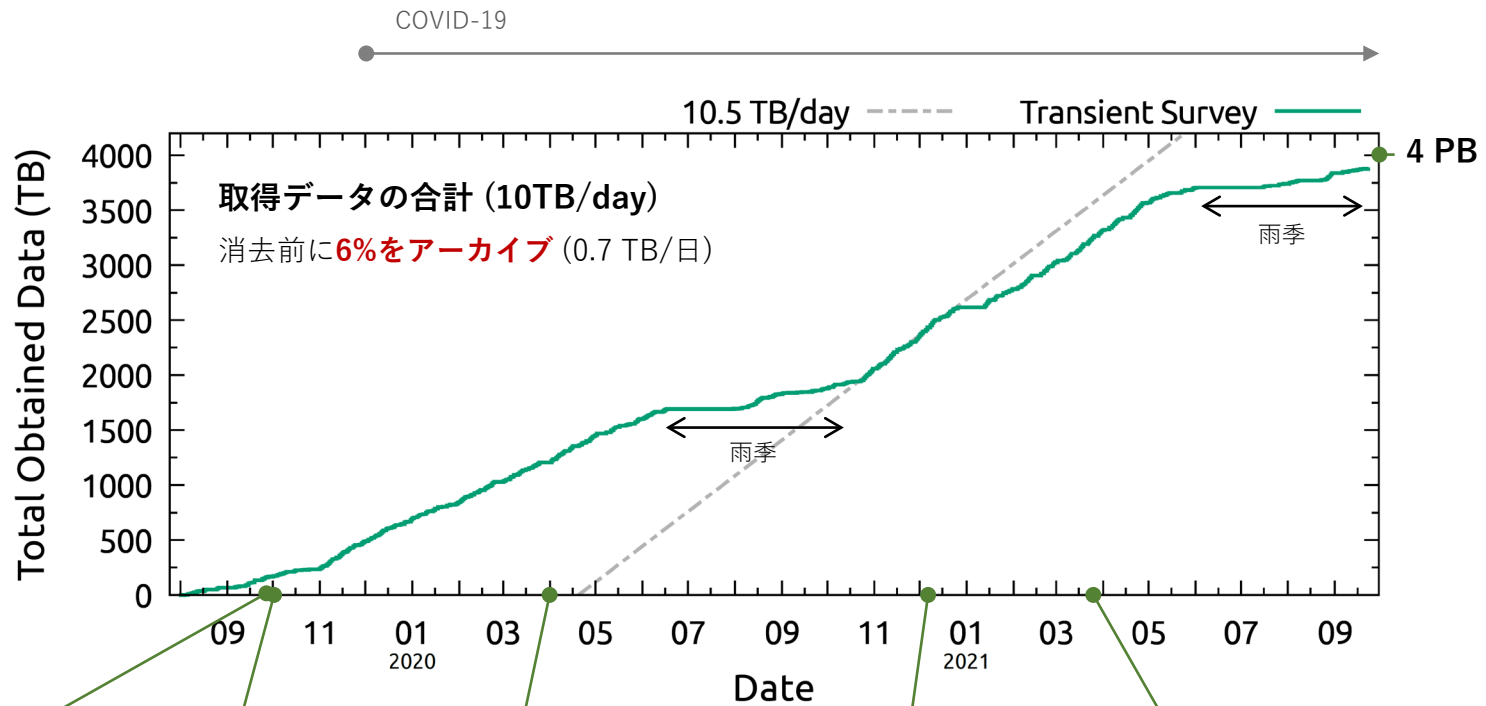
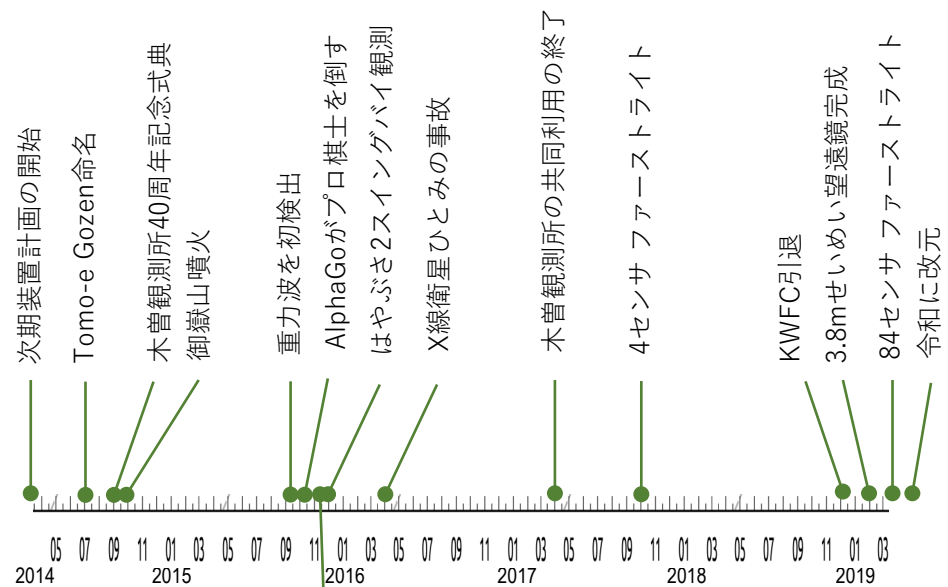


- 即時に解析 @オンサイト
- 即時に検出 @オンサイト
- 即時に転送 @SINET
- 即時に発信 @mdx
- アーカイブ @国立天文台

Tomo-e Gozenの本格運用の開始から2年



# サーベイデータの取得状況とこれまでの歩み



Tomo-e PMファーストライト



前回のシュミットシンポジウム 御料館 (木曾福島)



本格運用を開始を記者発表



青木さん, 征矢野さん, 樽澤さんが退職



はやぶさ2帰還 ランデブーを捉える



新ウェブサイトと 一部データの公開





# あの頃、われわれは何を考えていたのか？

## シュミットシンポジウム2014

2014年9月 木曾観測所40周年記念式典  
2014年9月 御嶽山噴火

### 酒向の1件

- 常温CMOSセンサでシュミット望遠鏡の全焦点を埋めます。
- 超広視野+ 高速観測という全く新しい天文学を切り開きます。
- 稀な時間変動現象を追います。
- 2017年度完成予定です。

稀な時間変動現象

1. 重力波候補天体の探査
2. 超新星爆発の瞬間の検出
3. 地球近傍天体の探査
4. 太陽系外縁天体の探査
5. スーパーフレア現象の探査
6. ガンマ線バーストの瞬間の検出
7. 系外惑星トランジットの探査
8. 深宇宙の探査
9. X線天文学での利用



KWFCが一段落した2013年頃

俺、やっぱりシュミットの焦点埋めたいんだよね

ですよー

征矢野さん  
スコップ三味線世界大会4位

## シュミットシンポジウム2015

2015年10月 AlphaGoがプロ棋士を倒す  
2015年11月 Tomo-e PMファーストライト  
2015年12月 重力波の検出が発表される

### 酒向, 大澤の2件

- 動画ビッグデータ
- データ処理の自動化, 並列化, 圧縮, 機械学習が必要
- 観測の4つの柱と重力波

- (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)

Gravitational Wave Counterpart

## シュミットシンポジウム2016

2016年3月 X線衛星ひとみの事故

### PM試験観測データ

- 高頻度測光の評価(一木) 2fpsで精度3%
- 微光流星の検出法(大澤)
- フラッシュの探査(菊池, 酒向) 人工天体が厄介
- データ科学の導入(池田, 森井) スパースモデリング, GoDec

### サーベイ検討

- 超新星サーベイ(冨永) : 3,000 deg<sup>2</sup>, 30 min cadence, 18 mag, no-filter
- 重力波追観測(田中) : 100 deg<sup>2</sup>, 20 min/visit x 5 pointing, no-filter

シュミットシンポジウムの議論のメモより

- ディスカバリーに専念しよう
- 全天サーベイと重力波に注力しよう。他はキャンペーン的に。
- シンプルな運用体系にしよう
- キューで自動実行
- no filter (交換は基本的に無し)

# あの頃、われわれは何を考えていたのか？ (つづき)

## シュミットシンポジウム2017

2017年3月 共同利用の終了  
2017年10月 4チップでファーストライト

### 装置

- データプロダクト(大澤)： RAWデータを1週間で消去することにする
- 感度計算(小島)： 高速移動とフラッシュ天体に対して高感度

### サーベイ検討

- 超新星サーベイ(諸隈)： 10,000 deg<sup>2</sup>, 2 hr cadence, 18 mag, サーベイパターン, 検出パイプラインの検討
- 重力波追観測(田中)： 100-300 deg<sup>2</sup>, 20-21 mag, 2 hr cadence, no filter

### 新規提案

- 高速移動天体： 地球接近小惑星NEO(浦川), 人工天体(奥村), 微光流星とMUレーダー連携(阿部)
- 秒スケールの短時間変動： YSO(森), 系外惑星(河原), X線連星, 恒星フレア(野上)
- Tomo-e起点の追観測連携： せいめい望遠鏡・大学間連携望遠鏡(松林, 山中, 野上)

- 1. 全天体測光値テーブル at 2 Hz**  
2Hz で映る全天体 (~19 mag.) の測光結果を保存  
変動していない天体も含めて全情報を保存する
- 2. stacked deep images**  
1 visit での最大積分画像 (3s — 180s) を保存する
- 3. cropped movies of fast transients**  
1, 2 の情報を元に変動があった領域のみ動画情報を残す
- 4. 高速移動天体スナップショット**  
流星や低軌道デブリ, NEOs など 2Hz では線状に現れる信号






## シュミットシンポジウム2018

2018年11月 42チップでファーストライト

### 装置

- GPS時刻管理を搭載(酒向)： 0.1msec精度
- 計算機を三鷹 → 木曾に移設(大澤)： Slack連携

### 試験観測

- 性能試験(大澤)： 広域サーベイ, 高頻度ライトカーブ, 高速移動天体, 微光流星
- 科学観測： NEO(浦川, 小島), 天の川の2fps監視(猪岡), Crabパルサー(一木), 微光流星 w/MU(弘田)

### サーベイ検討

- 超新星サーベイ(諸隈)： 7,000 deg<sup>2</sup>, 2 hr cadence, 18 mag, 検出パイプラインの開発

### 新規提案

- 太陽系外縁天体の掩蔽(有松), 高速回転天体(川名), MAXI-NICER連携(岩切)
- 高速電波バースト(新納), 可視光パルサーサーベイ(一木)

## シュミットシンポジウム2021

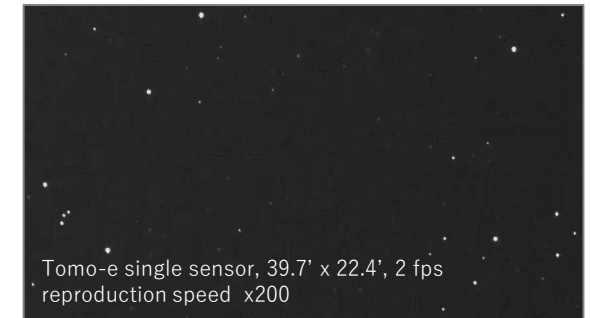
野中

有松

村田

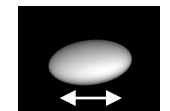
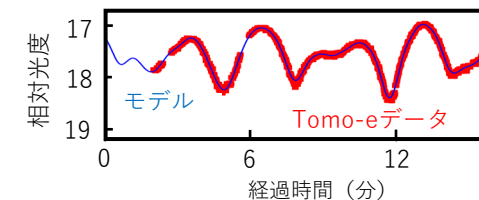
西野

NEO 2012 TC<sub>4</sub>の観測動画



2012 TC4のライトカーブ

形状と運動を推定



Urakawa+ 2019

# あの頃、われわれは何を考えていたのか？ (つづき)

## シュミットシンポジウム2019

## シュミットシンポジウム2021

### 装置

- SINETへの接続構想, データによる産学連携と教育普及 (酒向)
- ライトカーブの異常検知法(山本)

### 全天サーベイ

- サーベイ経路の最適化(諸隈, 池田, Pedro) : いずれ雲を避けたい
- CNN機械学習による超新星の検出(富永, 浜崎) : 誤検出をあと1桁落としたい
- 重力波追観測の進捗(新納) : 6件を実施

### 新規提案 (連携)

- すばる/HSCとの超新星観測の連携(Jiang)
- せいめい, 広大かなたとの超新星観測の連携(川端美穂)
- せいめい/TriCCSとのCMOS連携(松林)
- 山口大とのFRB同時観測(青木)
- IceCubeニュートリノイベント追観測(諸隈)

### 新規提案 (キャンペーン観測)

- 系外惑星の重力マイクロレンズ(福井)
- 高速回転白色矮星(樫山)
- フラッシュ探査(有馬, Richmond)
- 金属欠乏星の探査(富永, 岩崎)

### 新規提案 (全天サーベイデータからの探査)

- 古典新星(田口)
- 晩期型星のダスト形成(中田, 大澤)
- NEO+mini-moon(紅山)

- 満田
- 瀧田
- 山本
- 津々木
- 高橋
- 富永
- Jiang
- 前原
- 松林
- 新納
- 福井
- 逢澤
- 青木
- 田口
- 紅山
- 奥村

2019年2月 3.8mせいめい望遠鏡完成  
 2019年4月 84チップでファーストライト  
 2019年9月 完成記者発表, サーベイ開始



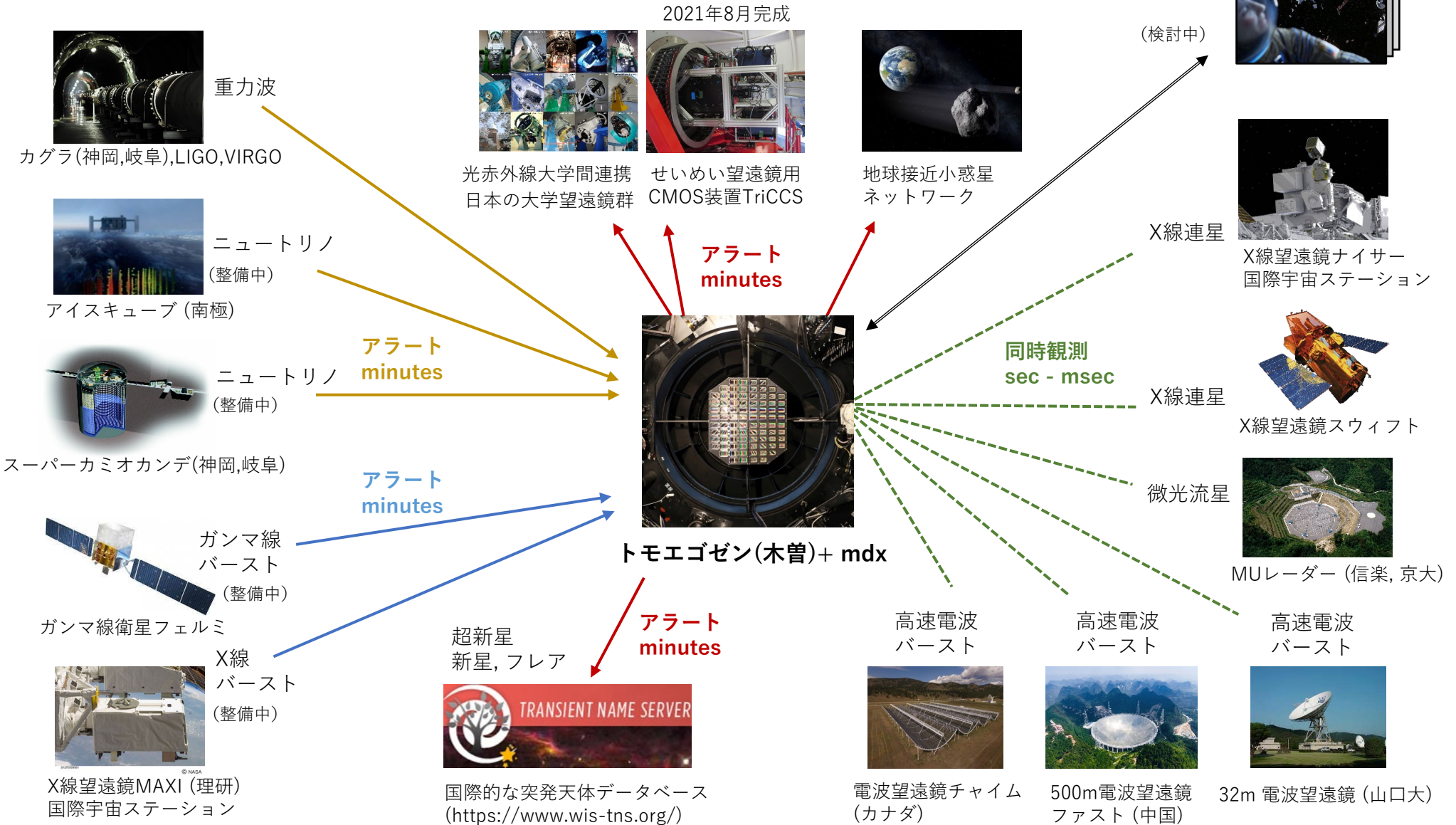
シュミットシンポジウム2019の記念写真



# 時間軸天文学の連携システムを構築

マルチメッセンジャー

高エネルギー観測連携

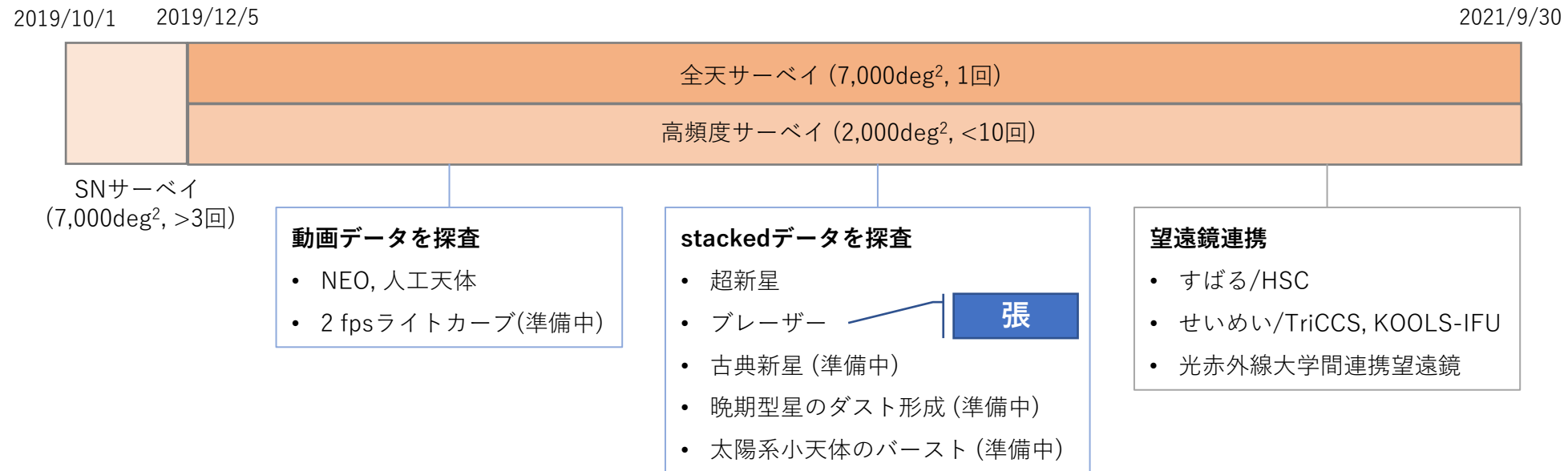


多分野, 社会連携

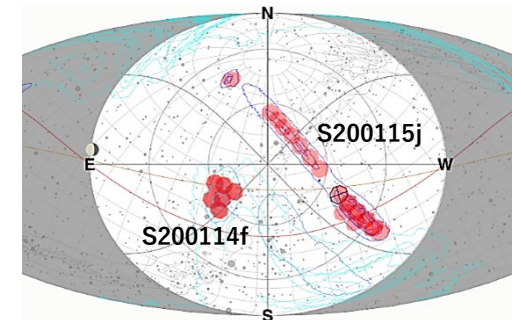
サブ秒の多波長+同時連携

## 観測の実施

### • 全天サーベイを起点とした観測 (全観測時間の~90%)




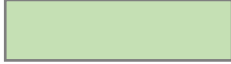



### • 即時の追観測サーベイ










2020年1月15日に実施した重力波追観測赤丸がTomo-e Gozenの視野

## 観測の実施

### • 中規模キャンペーン観測 (各10-20夜)

地球影サーベイ (1-2 fps)		フラッシュ探査, 高速回転, 短時間フレア, 重力マイクロレンズ, 稀な系外惑星
HeSOサーベイ (1-2 fps)		高速回転, 短時間フレア, 重力マイクロレンズ, 稀な系外惑星
FRB同時観測 (1-2fps)		CHIME
金属欠乏星サーベイ		準備中
パルサーサーベイ		準備中

### • 小規模キャンペーン観測 (各数夜)

FRBの同時観測 (>10 fps)		w/ 山口大, FAST
X線連星の同時観測 (>10 fps)		w/ NICER, Swift
微光流星の同時観測 (1-2 fps)		w/ MUレーダー
掩蔽観測 (>2 fps)		
NEO, 人工天体の追観測		
特殊イベント, 大学間連携等		
アウトリーチ		はやぶさ2, 彗星



## 主な科学論文

1. Arimatsu et al. `New Constraint on the Atmosphere of (50000) Quaoar from a *Stellar Occultation*' The Astronomical Journal, Volume 158, Issue 6, article id. 236, 7 pp. (2019).
2. Richmond et al. `An optical search for *transients lasting a few seconds*' Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol 72, 1, id.3 (2020)
3. Ohsawa et al. `Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of *Faint Meteors*' Planetary and Space Science, Vol 194, id. 105011 (2020)
4. Morokuma et al. `Follow-up observations for *IceCube-170922A*: Detection of rapid near-infrared variability and intensive monitoring of TXS 0506+056' Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol 73, 1, pp.25-43 (2021)
5. Wakamatsu et al. `ASASSN-18aan: An eclipsing SU UMa-type *cataclysmic variable* with a 3.6-hr orbital period and a late G-type secondary star' Publications of the Astronomical Society of Japan, psab003 (2021)
6. Nakaoka et al. `Calcium-rich Transient *SN 2019ehk* in a Star-forming Environment: Yet Another Candidate for a Precursor of a Double Neutron-star Binary' The Astrophysical Journal, Vol 912, 1, id.30, 14 pp. (2021)
7. Sasada et al. `J-GEM optical and near-infrared follow-up of *gravitational wave* events during LIGO's and Virgo's third observing run' Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol 2021, 5, id.05A104, 23 pp. (2021)

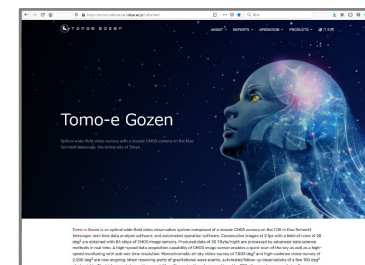
## 主なプレスリリース

1. 記者発表「東京大学木曾観測所トモエゴゼンの観測運用の開始について」, 2019年9月30日, 木曾合同庁舎(木曾福島)
2. ウェブリリース「トモエゴゼンによる地球接近小惑星2019 SU10の発見について」, 2019年10月8日
3. ウェブリリース「トモエゴゼンでポリソフ彗星を観測」, 2019年11月25日
4. ウェブリリース「トモエゴゼンを用いて太陽系外縁天体クワオアアによる恒星掩蔽現象の高感度動画観測に成功」, 有松ら, 2019年11月27日
5. ウェブリリース「トモエゴゼンでアトラス彗星を観測」, 2020年4月3日
6. ウェブリリース「トモエゴゼンで水星探査機ベピコロンボを観測」, 2020年4月10日
7. 木曾観測所のオンライン特別公開, 2020年8月1日
8. ウェブリリース「トモエゴゼンと京大大学生存圏研究所MUレーダーによって微光流星の同時観測に成功」, 大澤ら, 2020年11月11日
9. ウェブリリース「トモエゴゼンで「はやぶさ2」を観測」, 大澤ら, 2020年12月7日

## トモエゴゼンのデータ公開 (本郷, mdx経由)

- 東京大学理学部1号館(本郷)に設置したサーバーにて画像データを公開中
- mdx(柏)にデータ公開の機能を移設予定

<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/>

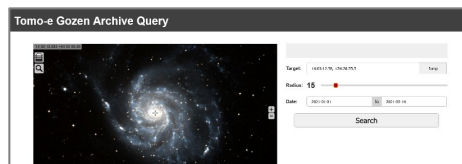


### オープンデータ (制限なし)

#### Stacked画像データ

- 較正済み科学データ (FITS形式)
- 取得6か月後から順次公開
- 位置+期間ブロックあり

#### 検索画面



#### 観測ログ

Date	Exp ID	Object	Observer	Project	(RA, Dec)
2021-03-11 20:10	499117	J1817+0000_0#4	Morokuma	All-Sky Survey	(273.905, -0.001)
2021-03-11 20:10	499119	J1817+0000_0#3	Morokuma	All-Sky Survey	(273.905, -0.269)
2021-03-11 20:10	499115	J1817+0000_0#2	Morokuma	All-Sky Survey	(274.455, -0.600)
2021-03-11 20:09	499114	J1817+0000_0#1	Morokuma	All-Sky Survey	(274.455, -0.000)
2021-03-11 20:08	499113	J1827+0725_0#4	Morokuma	All-Sky Survey	(278.222, +7.627)
2021-03-11 20:09	499112	J1827+0725_0#3	Morokuma	All-Sky Survey	(278.222, +7.827)
2021-03-11 20:08	499111	J1827+0725_0#2	Morokuma	All-Sky Survey	(278.778, +7.827)
2021-03-11 20:08	499110	J1827+0725_0#1	Morokuma	All-Sky Survey	(278.778, +7.428)
2021-03-11 20:08	499109	J1855+1451_0#4	Morokuma	All-Sky Survey	(283.374, +14.854)
2021-03-11 20:07	499108	J1855+1451_0#3	Morokuma	All-Sky Survey	(283.374, +15.254)
2021-03-11 20:07	499107	J1855+1451_0#2	Morokuma	All-Sky Survey	(283.045, +15.250)

#### ファイルリスト

Date	Exp ID	Object	Observer	Project	(RA, Dec)
2021-03-11 20:09	499114	J1817+0000_0#1	Morokuma	All-Sky Survey	(274.455, +0.000)

瀧田

#### スカイアトラス

- 日々の全天画像 (PNG形式)
- インタラクティブビューア
- 全データを即時公開

### 共同研究用データ (制限あり)

トモエゴゼン計画との共同研究下で実施

#### Stacked画像データ

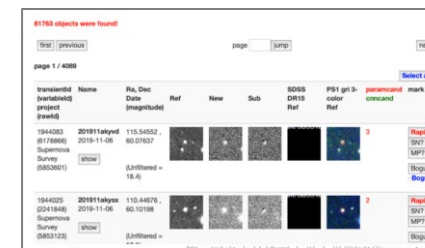
- 較正済み科学データ (FITS形式)
- 全データを即時公開

#### 突発現象・移動天体データ

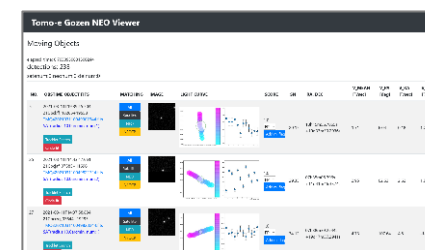
- 価値ある情報を抽出したデータ群
- 全データを即時公開

#### 産学連携用データ

#### 突発現象データビューア



#### 高速移動天体データビューア



## トモエゴゼンのデータ公開 (SMOKA経由)

#### Stacked画像データ

- 較正済み科学データ (FITS形式)
- 取得2年後から順次公開 (2019/10/1のデータから)
- 位置+期間ブロックなし

小野里

今後、方針を変更する可能性あり

## 学術情報ネットワークSINETへの接続

### 準備状況

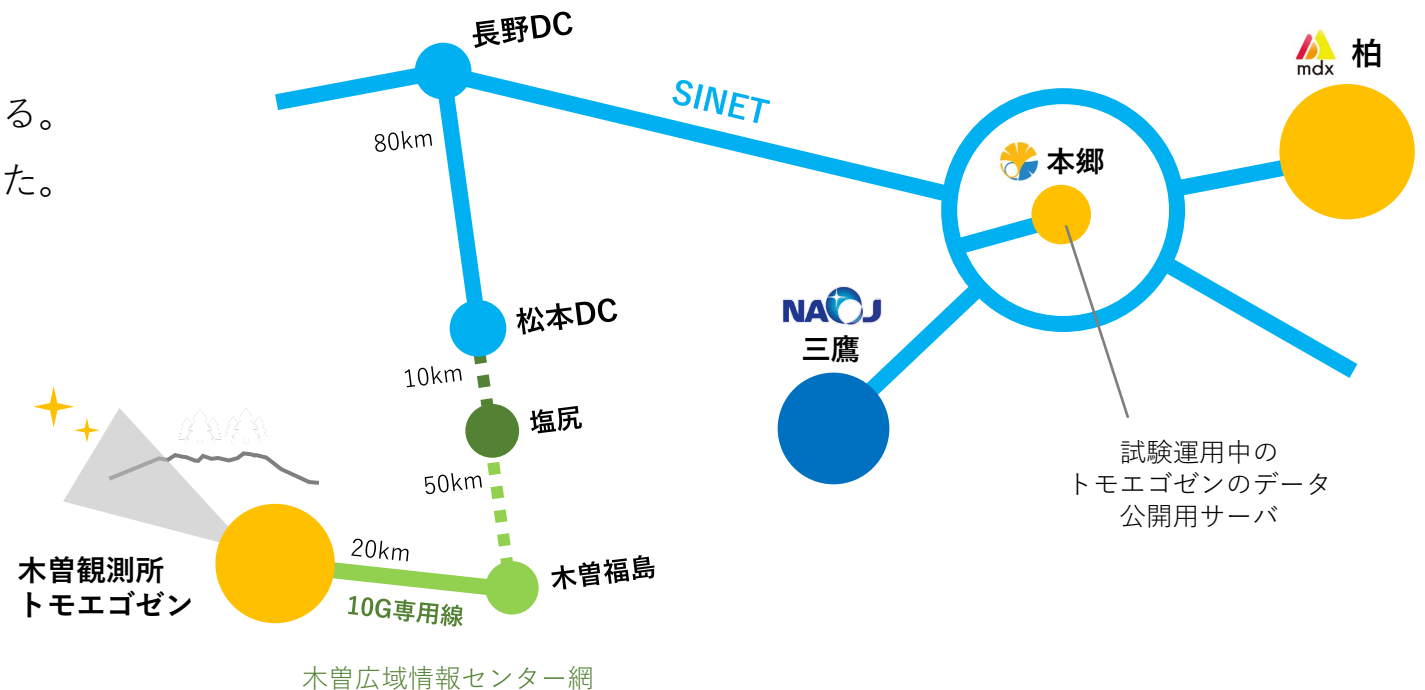
- 松本DCを経由してSINETに10Gで接続予定
- 長野県内自治体ネットワーク網（木曾郡町村, 塩尻市）の協力を得ながら実現に向けて努力



東京大学木曾観測所の遠景  
“木曾路はすべて山の中である”, 島崎藤村

### 課題

- 都市部から離れた場所の研究所のSINET接続は予算的に厳しい。
- 自然科学データの多くは非都市部で得られる。
- 大学からは自己努力で整備するようと言われる。
- トモエゴゼンは地元自治体から温かく迎えられた。



# Tomo-e Gozenサイエンスグループへの参加を歓迎します。

## 方法

- 酒向またはTomo-e Gozen関係者にご連絡ください。

## 条件

- 東京大学木曾観測所との共同研究になります（共同利用ではありません）。
- 日本の研究機関に所属する研究者を基本とします。
- Tomo-e Gozenサイエンスグループのメーリングリストに加入してください。Slackへの参加は任意です。
- Tomo-e Gozenのデータを用いた成果発表の際は東京大学木曾観測所のメンバ数名を共著に加えてください。
- Tomo-e Gozenのデータを主に使用したサイエンス査読論文にTomo-e Gozen装置チームメンバを共著に加えてください。（総数20本 or 2023年末まで）
- Tomo-e Gozenの長期安定運用にご協力ください。
- Tomo-e Gozenサイエンスグループの他のメンバと仲良くしてください。
- Tomo-e Gozenを使用してデータをとった場合は、定期的に東京大学木曾観測所に解析、出版の状況を報告してください。

## 利点

- Tomo-e Gozenのキャンペーン観測に提案できます。東京大学木曾観測所メンバが可否を決めます。
- Tomo-e Gozenの非公開データと非公開ドキュメントにアクセスできます。
- Tomo-e Gozenを遠隔観測することができます（訓練後）。
- Tomo-e Gozenの公開データに対して位置+期間ブロックができます（件数が多い場合は応相談）。
- 挑戦的な課題、教育的な課題に対して温かいです。