

動画観測のススメ

トモエゴゼンによるLessons learned

酒向重行（東京大学, さきがけ）, トモエゴゼンチーム

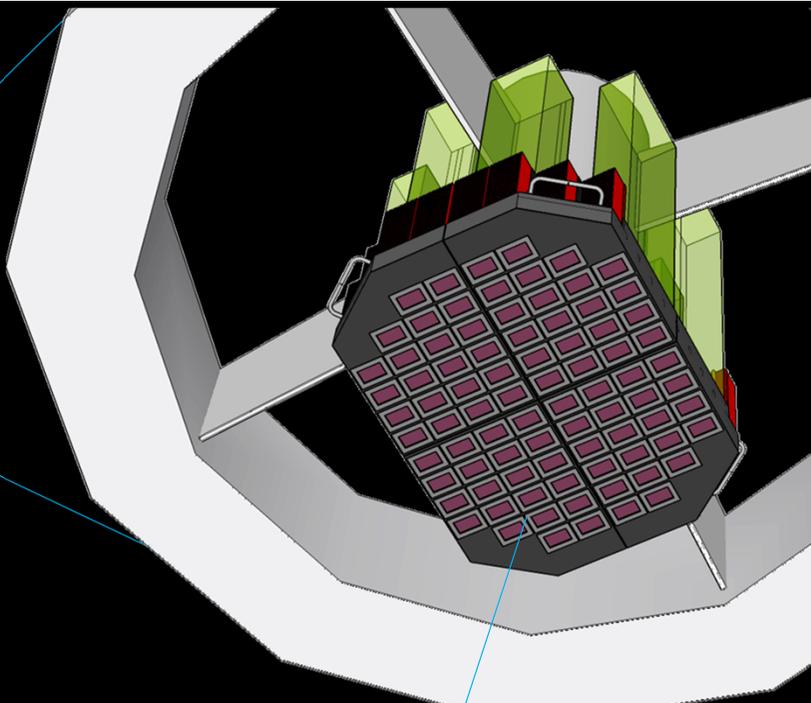
関連発表

- | | |
|--|-----------|
| P-1 木曾超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen Q0の試験観測による性能評価 | 小島悠人（東京大） |
| P-6 木曾超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen によるグリズム分光観測の検討 | 大澤亮（東京大） |
| P-11 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） |



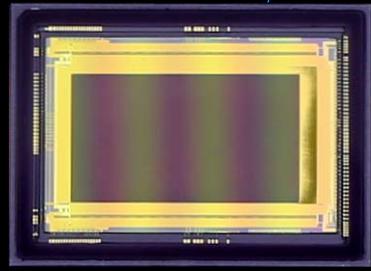
Sako, Shigeyuki^{a, b}, Ohsawa, R.^a, Takahashi, H.^a, Kikuchi, Y.^a, Doi, M.^{a, c}, Kobayashi, N.^a, Aoki, T.^d, Arimatsu, K.^e, Ichiki, M.^a, Ikeda, S.^f, Ita, Y.^g, Kasuga, T.^h, Kawakita, H.ⁱ, Kokubo, M.^a, Maehara, H.^j, Matsunaga, N.^k, Mito, H.^d, Mitsuda, K.^a, Miyata, T.^a, Mori, K.^a, Mori, Y.^d, Morii, M.^f, Morokuma, T.^a, Motohara, K.^a, Nakada, Y.^a, Osawa, K.^a, Okumura, S.^l, Onozato, H.^g, Sarugaku, Y.^d, Sato, M.^m, Shigeyama, T.^c, Soyano, T.^d, Tanaka, M.^e, Taniguchi, Y.^a, Tanikawa, A.ⁿ, Tarusawa, K.^d, Tominaga, N.^o, Totani, T.^k, Urakawa, S.^l, Usui, F.^p, Watanabe, J.^e, Yamaguchi, J.^a, and Yoshikawa, M.^q

Kiso 105cm Schmidt telescope, the Univ. of Tokyo



Sako et al. 2016, SPIE

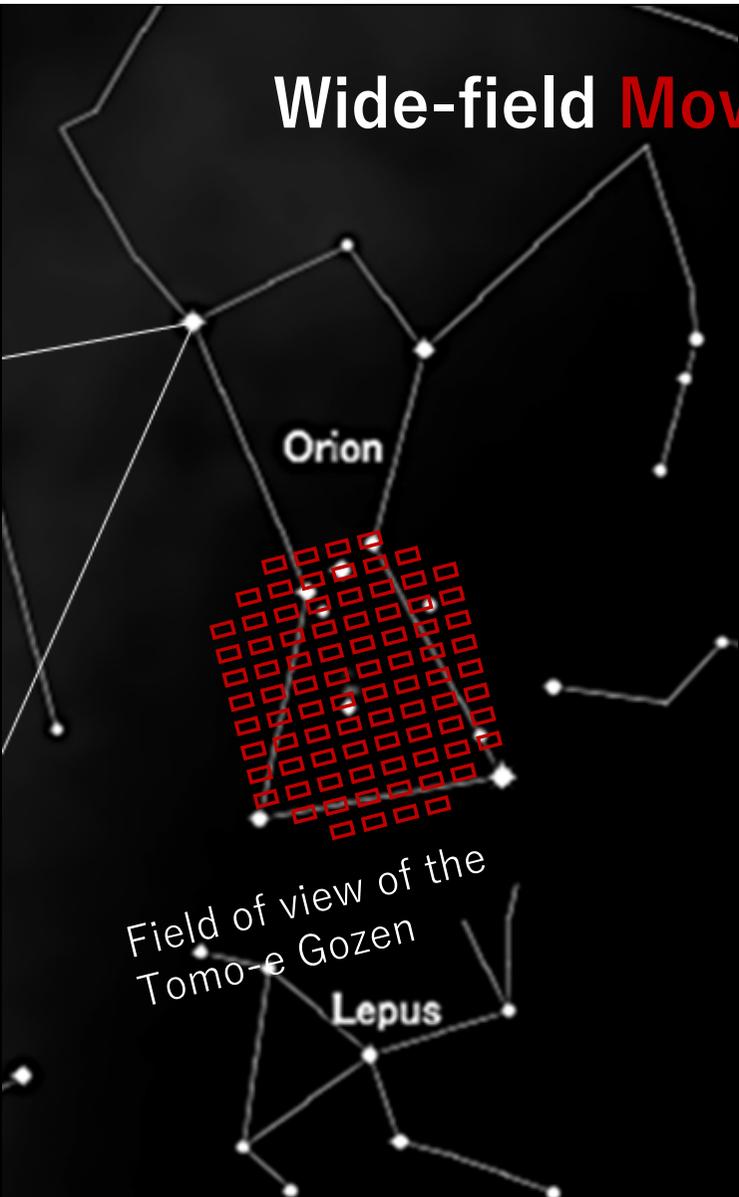
84 chips of high-sensitive CMOS sensors



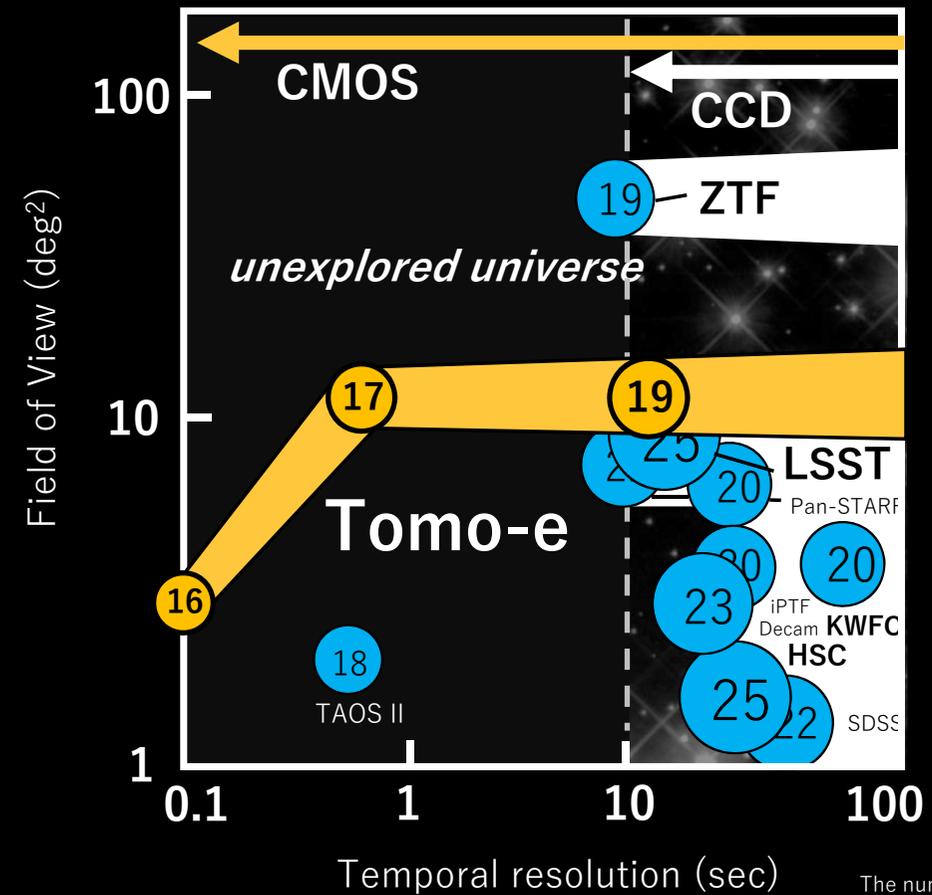
the first astronomical wide-field CMOS camera the Tomo-e Gozen

- Telescope Kiso 105-cm wide-field Schmidt
- Field of view 20 deg² in ϕ 9 deg
- Image sensors 84 chips of CMOS
- Data acquisition rate 2 fps (max)
- Data production rate **30 TB/night (max)**
- Commissioning Aug. 2018
- Operation 10 years

Wide-field **Movie** Survey is the World's First Trial



Completion of survey powers for transient events



The numbers in the circles show limiting magnitudes.

動画データと静止画データ

動画データの良いこと

- 情報量が多い
- 時間分解能が高い

動画データの悪いこと

- 情報量が多い
- 重複・無駄なデータが多い
- 特徴量の抽出が難しい
- データの解釈が難しい

AIによるキャプチャの自動生成

静止画

Microsoft Captionbot
<https://www.captionbot.ai/>

“I think it’s a group of people sitting at a table with a birthday cake and they seem 😊😊😊😊😊😊”



動画

Miyao (NII) et. al
Perception and Language Understanding Project
<https://aistairc.github.io/plu/sample-captions.html>



“a woman is slicing a tomato”



“men are playing football”

天文学と動画データ

- 天文学データの大部分は静止画データ
 - 本講演では時間分解能<数秒の連続2次元画像を“動画”と呼ぶことにします。

- 理由

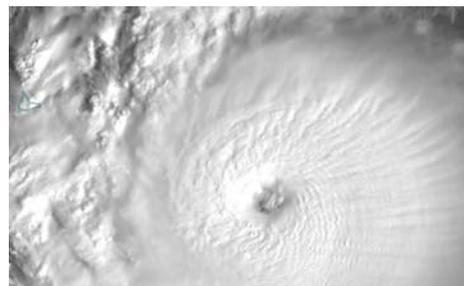
1. 微かな光を追い求めてきたから
(露光時間, 読み出しノイズ)
2. 宇宙は簡単には変化しないから

- 例外

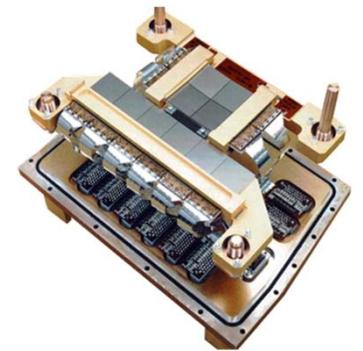
1. 太陽観測 (変化が速い、明るい)
2. 地球観測 (変化が速い、明るい)
3. 高エネルギー観測 (エネルギー分解能)
4. 地上中間赤外線観測 (0.1secで飽和,背景変動)



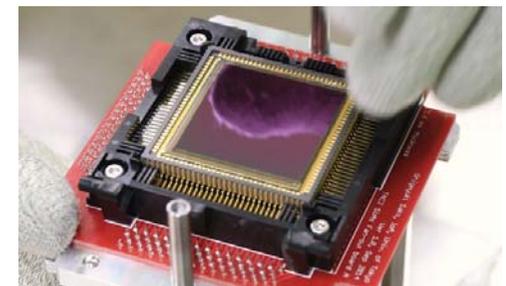
ひので衛星, 太陽の採層 (JAXA)



ひまわり衛星, 台風 (気象庁)



Chandra/ACIS X-ray CCD
3.2 sec/frame



中間赤外線検出器Si:As 1kx1k

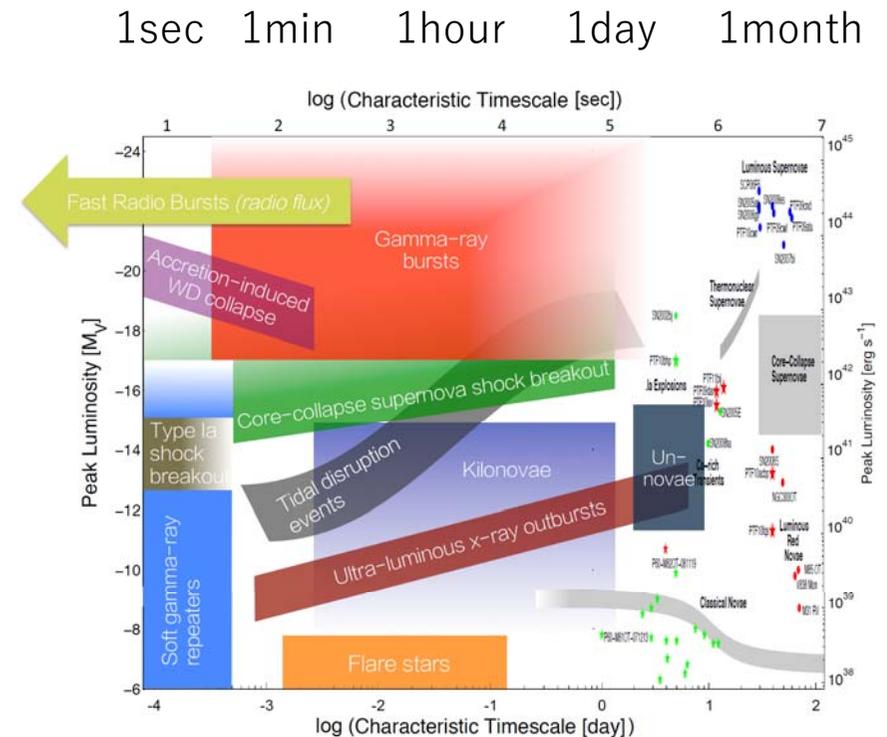
可視赤外線天文学では動画データは不要？

- 微かな光を検出するには長時間露光が必要
 - そうでもない（だろう）
 - そんなこと言ったら小口径望遠鏡の存在意義がない
 - 集光力を何に配分するかは自由

とはいえ、大丈夫か？

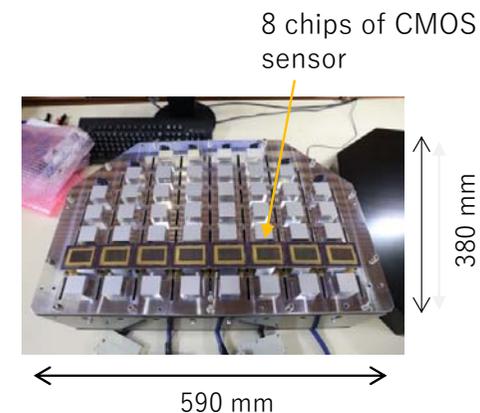
- 宇宙は簡単には変化しない
 - そうでもない（だろう）
 - 調べていないだけ。知らないだけ（だろう）。

ほんとうか？ 説得力が無い。



http://www.astro.caltech.edu/~ycao/B&ETalks/B&E_FRBs_Cooke.pdf

可視光で空の動画をとってみる



Kiso 1.0-m Schmidt telescope
Tomo-e PM
CMOS image sensors
1 chip, 39.7' x 22.4'
2 fps

- トランジェント現象は、露光を継続すると背景ノイズにより消されてしまう。
- 雲の通過はフラットエラーとして、うやむやにされる

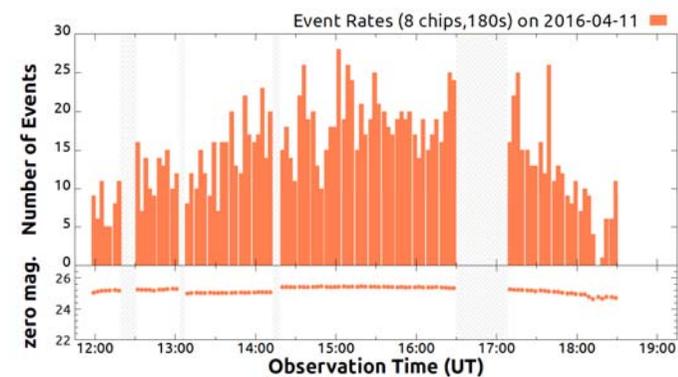
可視光で空の動画をとってみる



- 空はたいへんにぎやかだ

252P/LINEAR

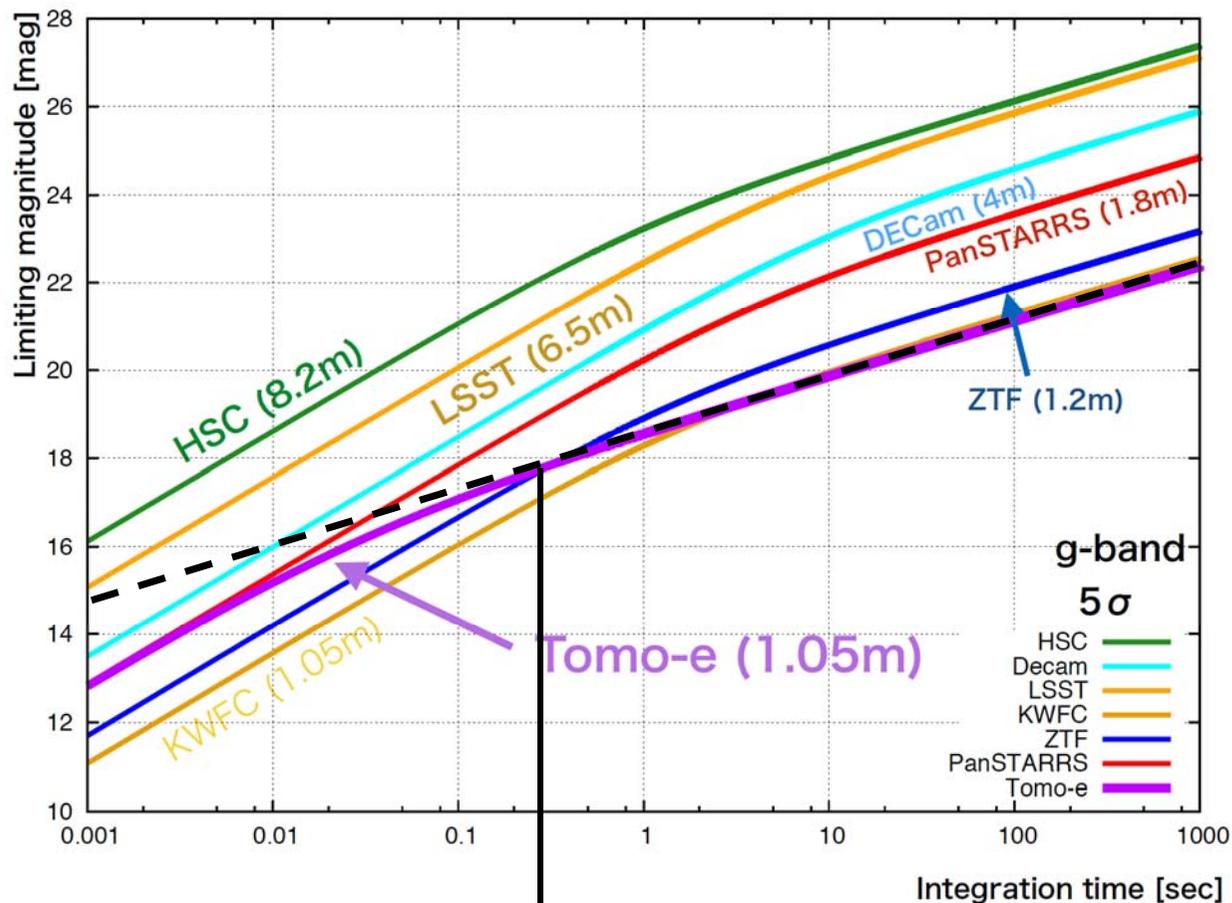
Kiso 1.0-m Schmidt telescope
Tomo-e PM
CMOS image sensors
1 chip, 39.7' x 22.4'
2 fps



散在流星の個数カウント (大澤, 天文学会2017春)

検出限界等級

シュミットシンポ2017, 小島より



read-noise limited

$$S/N \propto D^2 / N_{\text{read}}$$

background limited

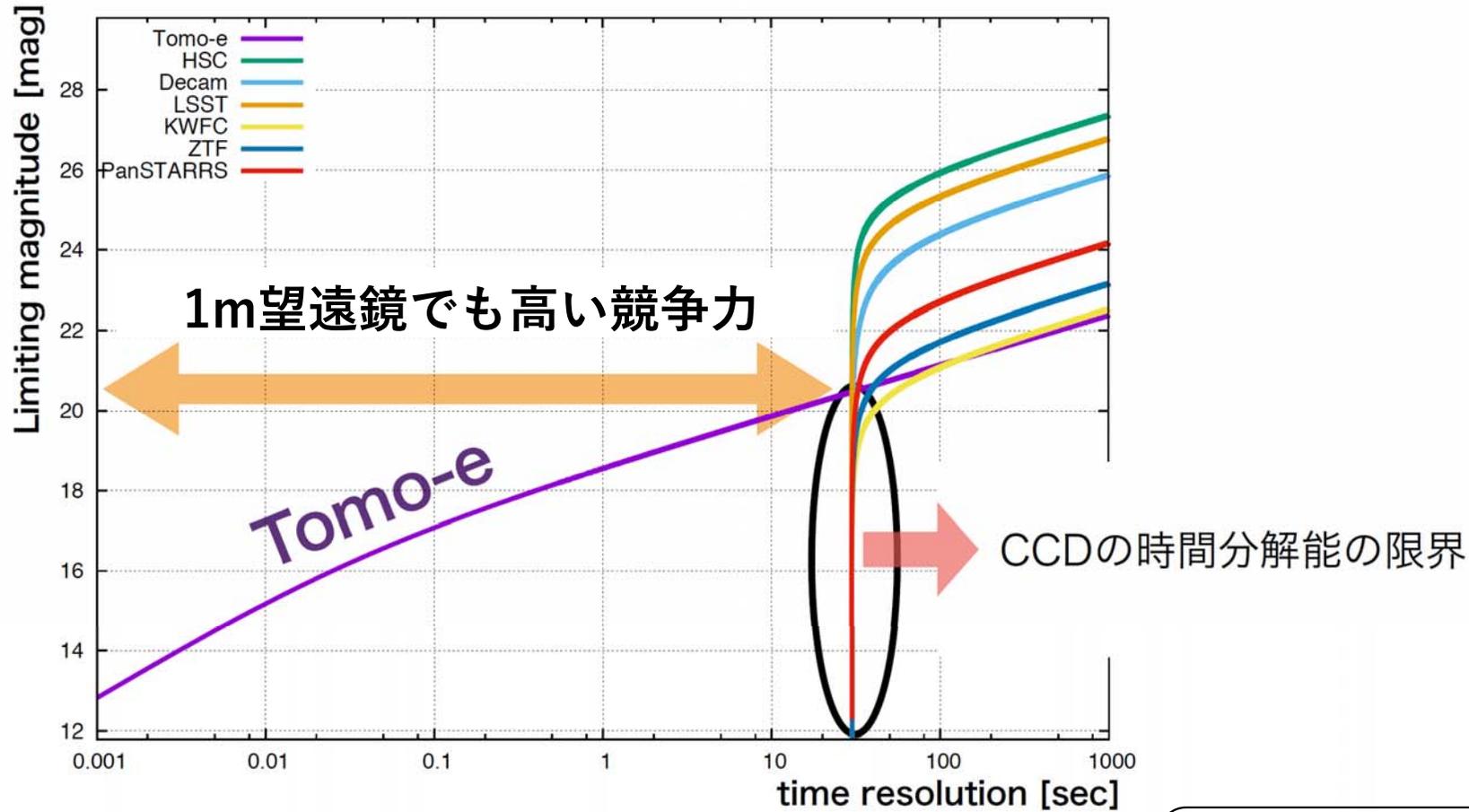
$$S/N \propto D / \sqrt{F_{\text{sky}}}$$

- Kiso 105cm f/3.1 Schmidt telescope
- CMOS, read noise 2e-
- g-band ($\lambda = 475\text{nm}$, $d\lambda = 150\text{nm}$)
- Background 21 mag/arcsec²

- $T_{\text{exp}} > 0.3\text{sec}$ でbackground limit
- 動画でもS/Nを損しない
- 高速動画では空の明るさは影響しない
- 口径1mでも16 – 18magを検出可

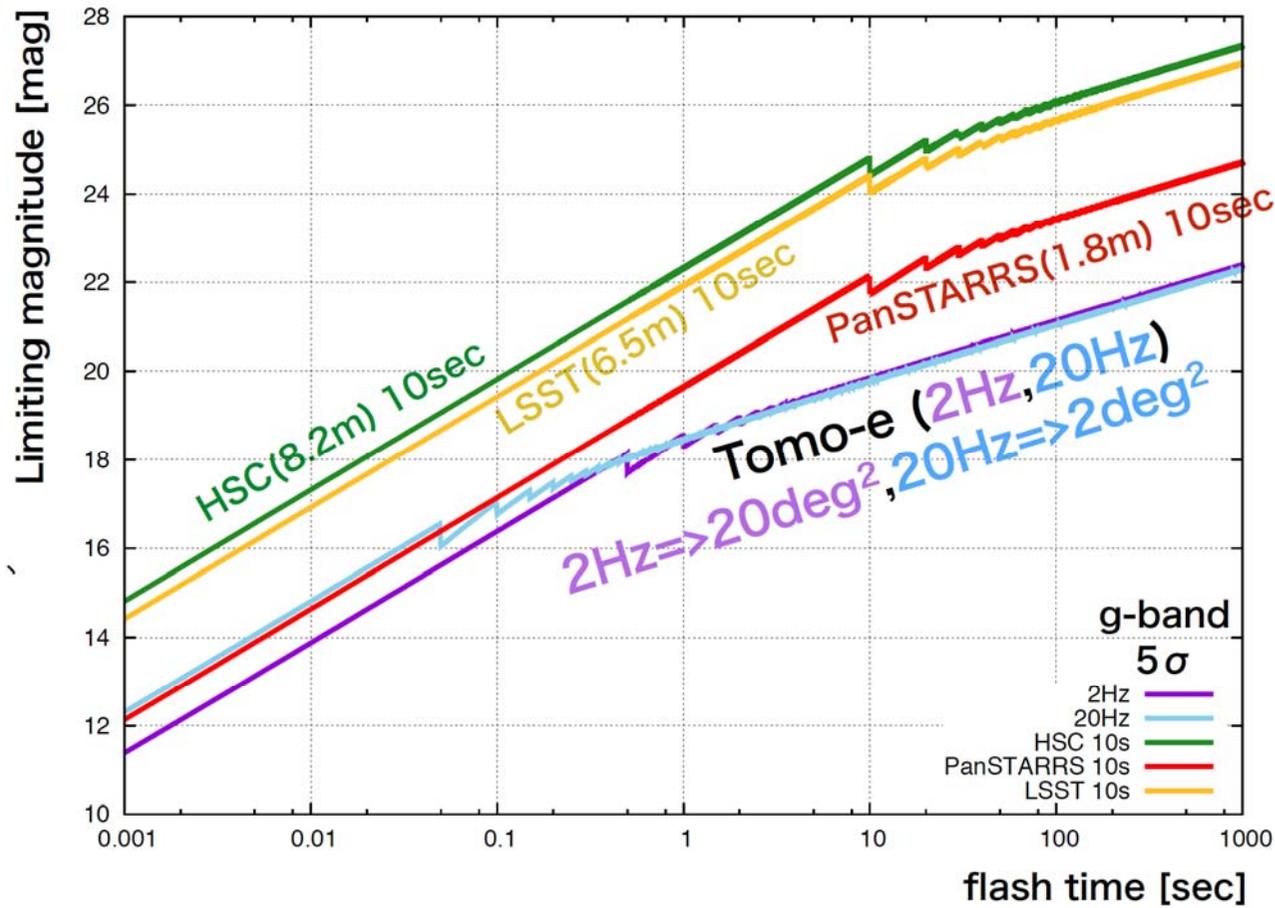
時間分解能 vs 検出限界等級

シュミットシンポ2017, 小島より



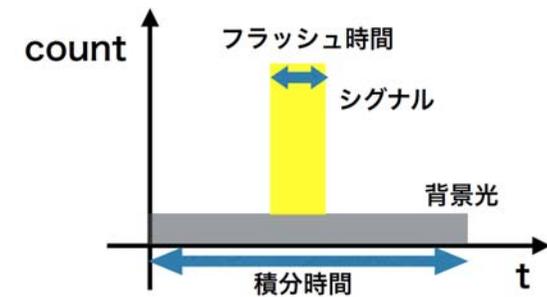
- 10秒以下の時間分解能を持つ観測装置はそもそも少ない

フラッシュの検出限界等級



- Pulsar, FRB, flash

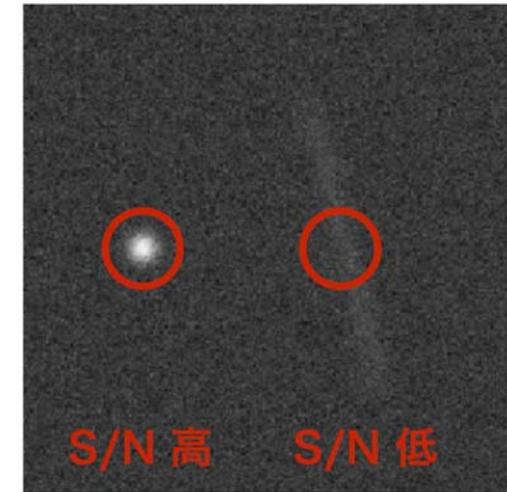
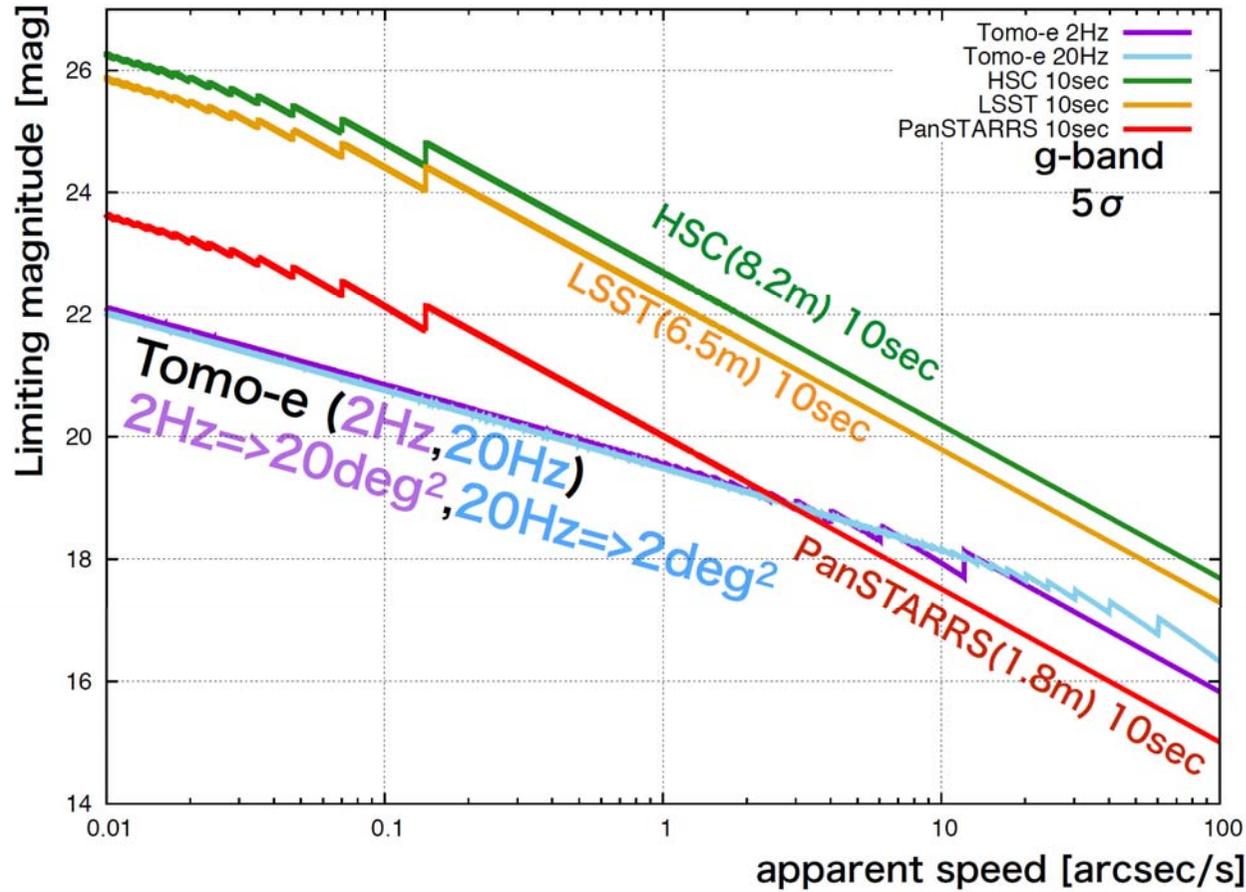
シュミットシンポ2017, 小島より



- 大型望遠鏡との差が大幅に縮まる
- 未発見のフラッシュ現象が存在するはず

移動天体の検出限界等級

シュミットシンポ2017, 小島より



トレイルロス

- NEOs, meteor, space debris

- 大型望遠鏡との差が大幅に縮まる
- 未発見の移動天体が大量に存在するはず

Near earth object 2012 TC4



Kiso 1.0-m Schmidt telescope
Tomo-e Q0
CMOS image sensors
1 chip, 39.7' x 22.4'
2 sec/frame

2017/10/11 20:40:36(JST)から1時間
200倍速再生

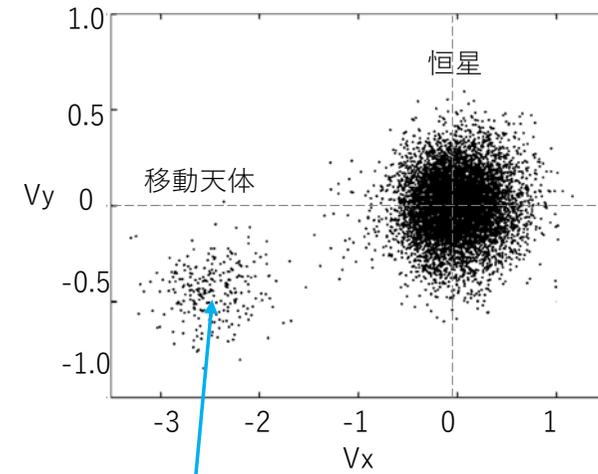
移動天体の検出と追尾

optical flow法にて追尾

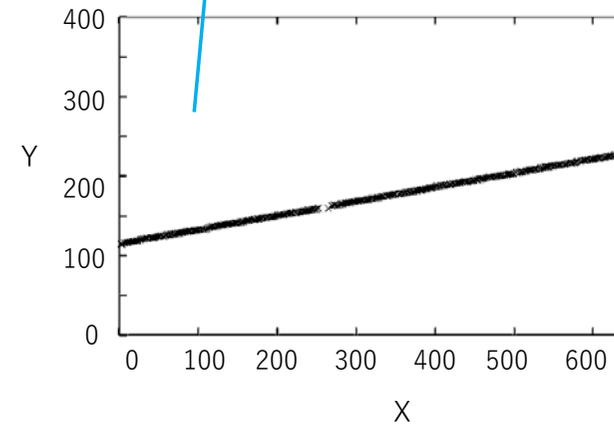


大澤ら

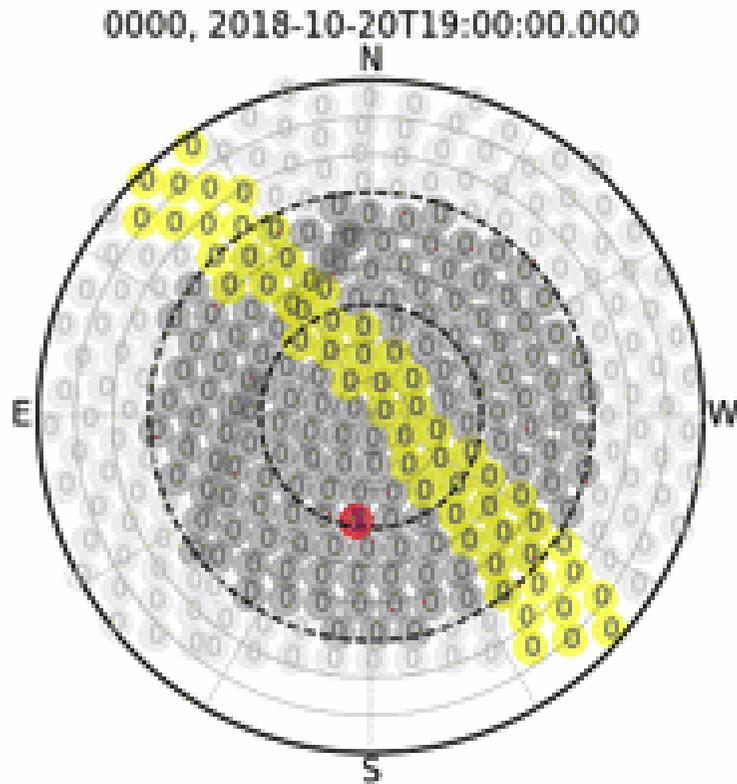
速度ベクトルの散布図



移動天体の経路



Tomo-e Gozenによる全天サーベイの計画



- 2時間で10,000 deg²
- 3 – 5回繰り返し/夜
- 各露光3sec
- 18等級以上のイベントを全て録画

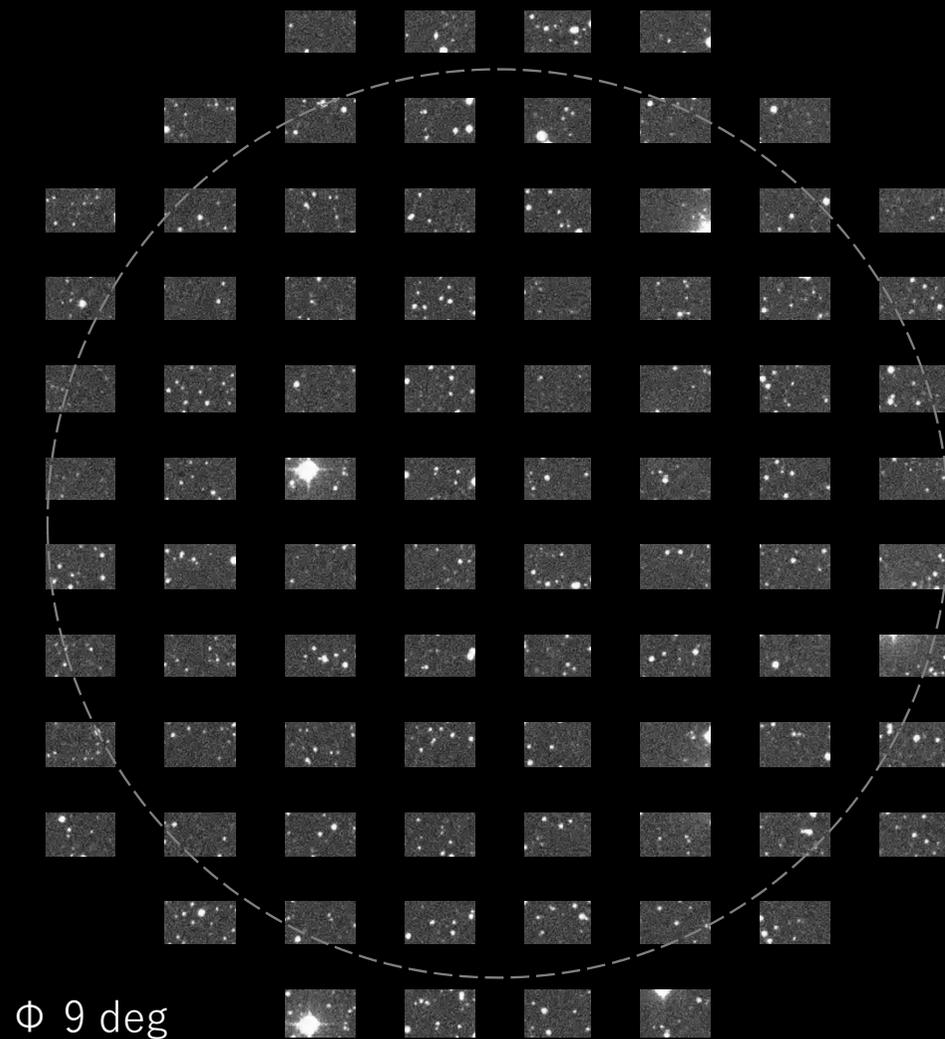
- Each circle: FoV with Φ 9 deg
- Yellow: Milky way
- ~300 sky areas

動画システムは瞬時に録画の開始と終了が可能

Test observations for All-sky survey

Kiso 1.0-m Schmidt telescope
Tomo-e Q0
CMOS image sensors

0.5 sec/frame x 6 exp =
total 3 sec/pos



ϕ 9 deg

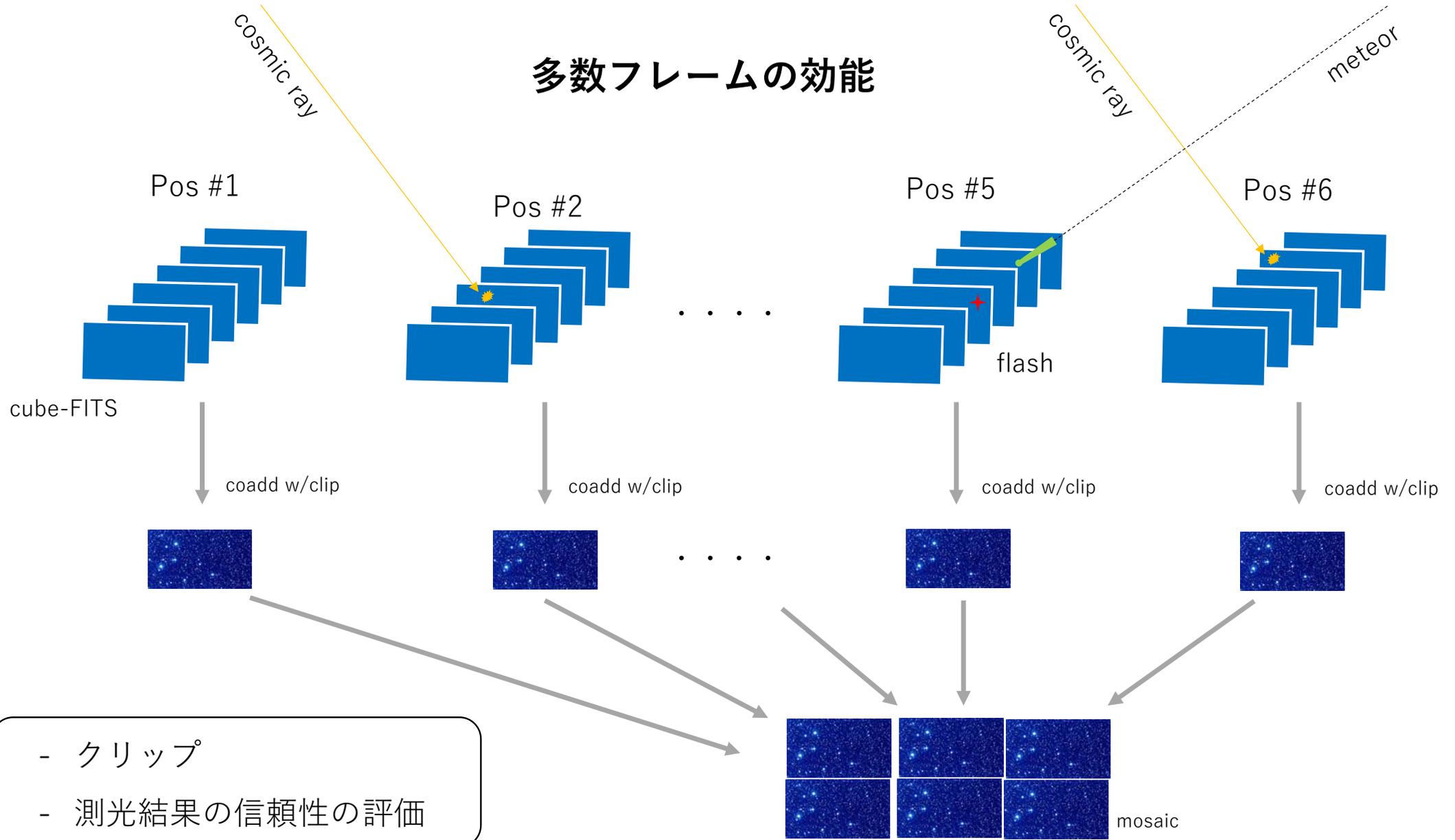
pseudo data



39.7' x 22.4'

real data taken by Tomo-e

多数フレームの効能

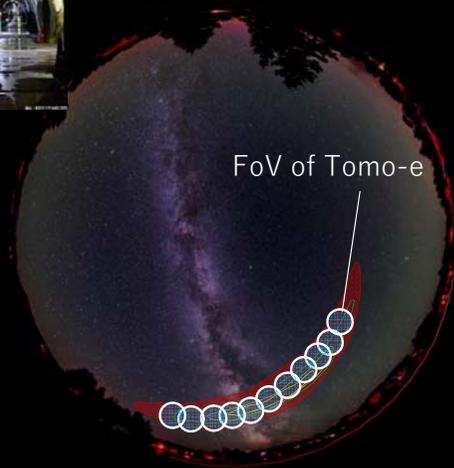


Quick & wide-field follow-ups of GW events

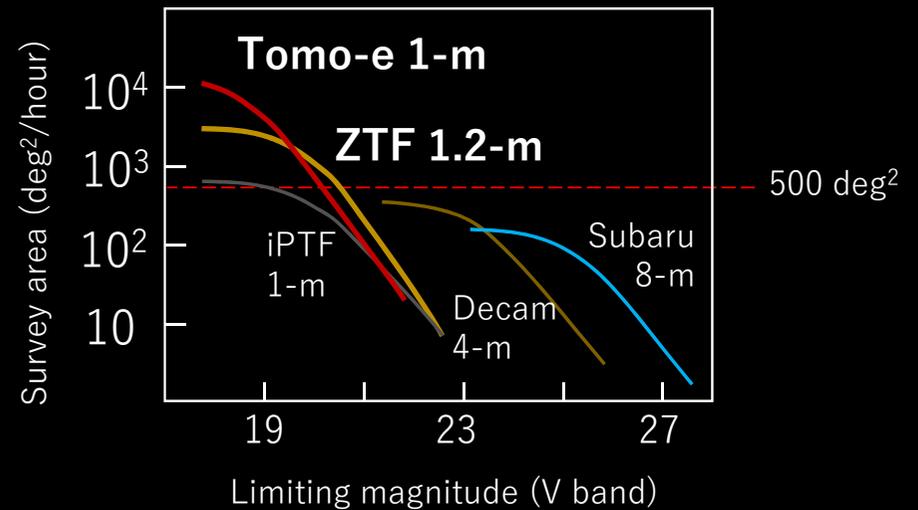


NS-NS merger

Gravitational wave observatory
(KAGRA, LIGO, VIRGO)

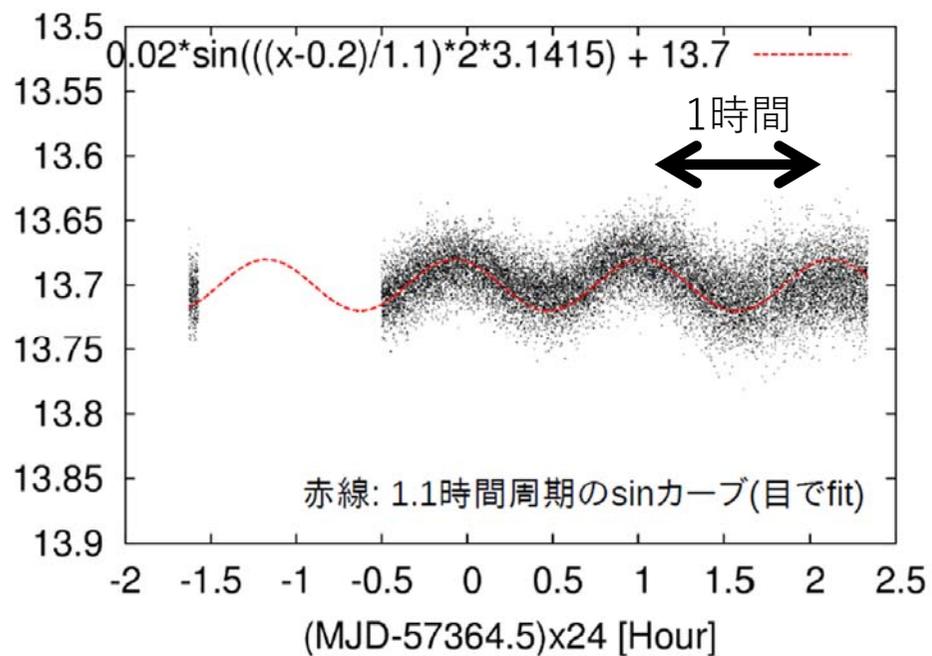


Example of localization map by
two GW obs. (a few 100 deg²)



短時間変動現象 + 高速オーバーサンプル観測

Visible Mag



δ Scui型変光星, Tomo-e PM

- データの信頼度が高い
- 日本の天候が安定する時間スケール

まとめ

- 光赤外線天文学に長時間露光が必要とはかぎらない
- 高速に変動する宇宙は見過ごされている。

- 中小望遠鏡では~1secでbackground limitになる。
- ~1secでも16-18magを検出できる。
- 動画はフラッシュ、高速移動現象の検出に強い

- 動画センサはクイックな観測を実現
- 時間軸にオーバーサンプルする利点： 多様な情報、信頼度向上
- 課題： ビッグデータとどう向き合うか、逐次処理、データ消去