

# 美星スペースガードセンターにおける 小惑星観測 Tomo-e Gozenとの協力観測の可能性

浦川 聖太郎<sup>1</sup>、奥村 真一郎<sup>1</sup>、柳沢 俊史<sup>2</sup>、黒崎 裕久<sup>2</sup>、  
吉川 真<sup>2</sup>、酒向 重行<sup>3</sup>、大澤 亮<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> 日本スペースガード協会

<sup>2</sup> JAXA

<sup>3</sup> 東京大学

- スペースガード(Planetary Defense)の現状
- 美星スペースガードセンター(BSGC)
- 重ね合わせ法による地球接近小惑星の発見  
(JAXA/柳沢氏、資料)
- Tomo-e Gozen + BSGCの観測計画案

# スペースガード(Planetary Defense)の現状



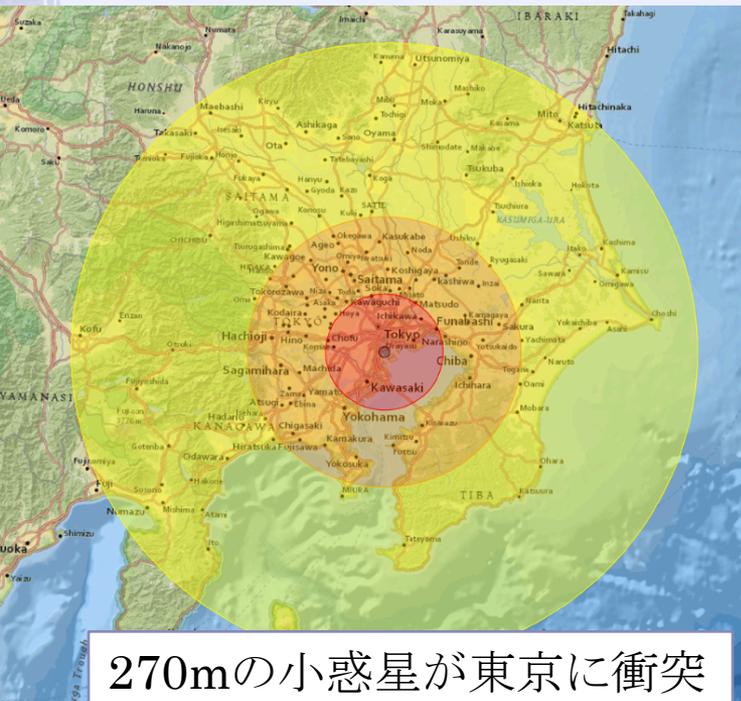
Asteroids passing Earth. Photo: ESA/Pierre Carril

小惑星の地球衝突は、人類全体で考えなければならぬ共通課題  
=>国連宇宙空間平和利用委員会 (COPUOS)

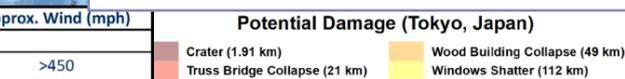


# Planetary Defense Conference Exercise -2017

- \* 東京に直径270mの小惑星が衝突。その時どうする？
- \* いつ知らせる？
- \* どう回避する？核の使用/探査機を衝突させる
- \* 海に落ちたら津波が発生するのでは？
- \* 小さな都市への落下でも回避するか？



270mの小惑星が東京に衝突





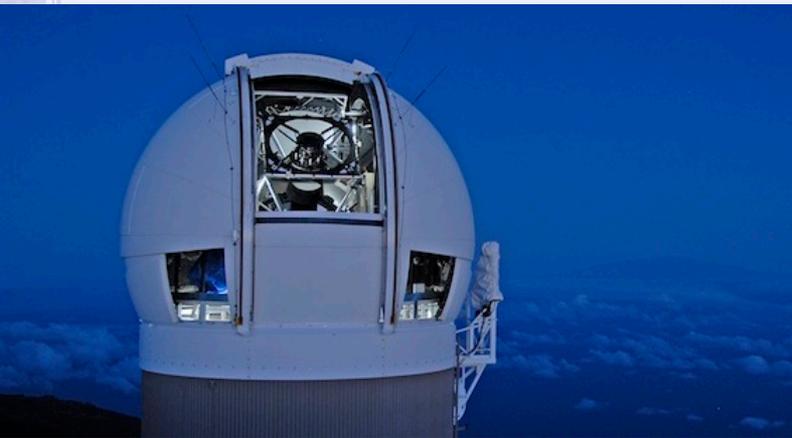
ブライアン メイ氏  
Queen ギターリスト  
兼  
天体物理学者  
We will rock you!

1908年6月30日  
ロシア・ツングースカ  
天体衝突

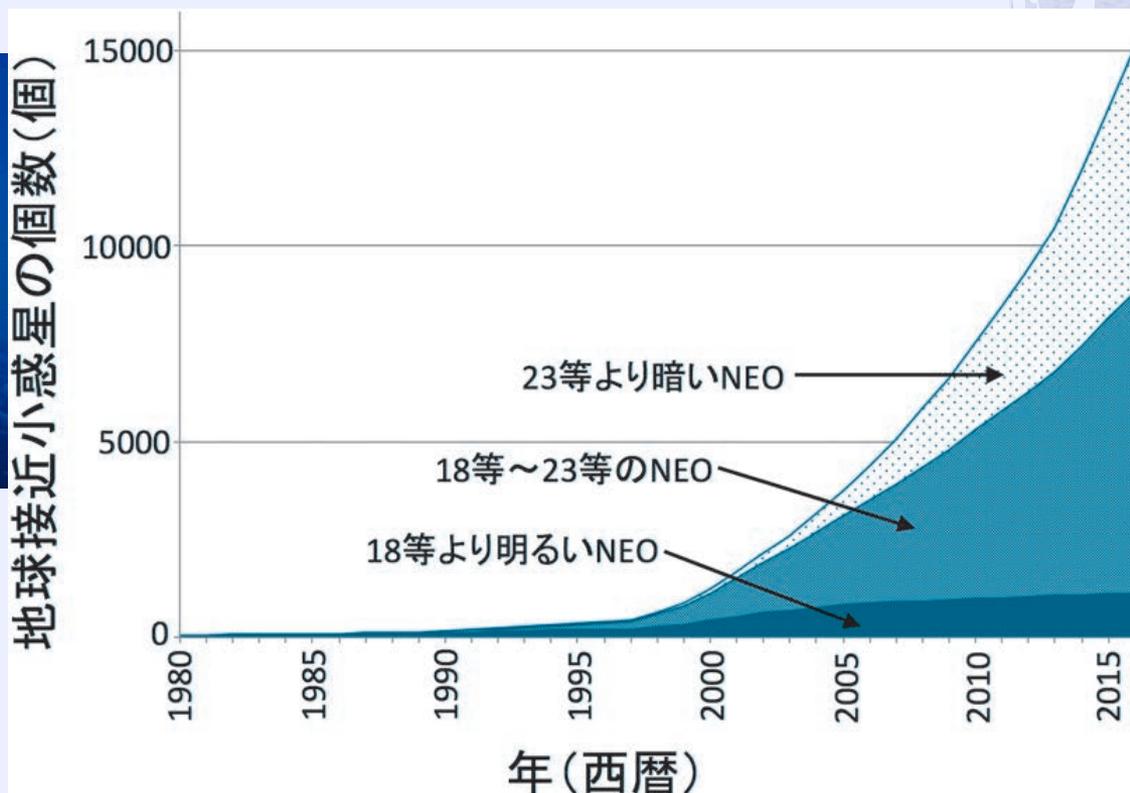


# 地球接近小惑星の観測状況

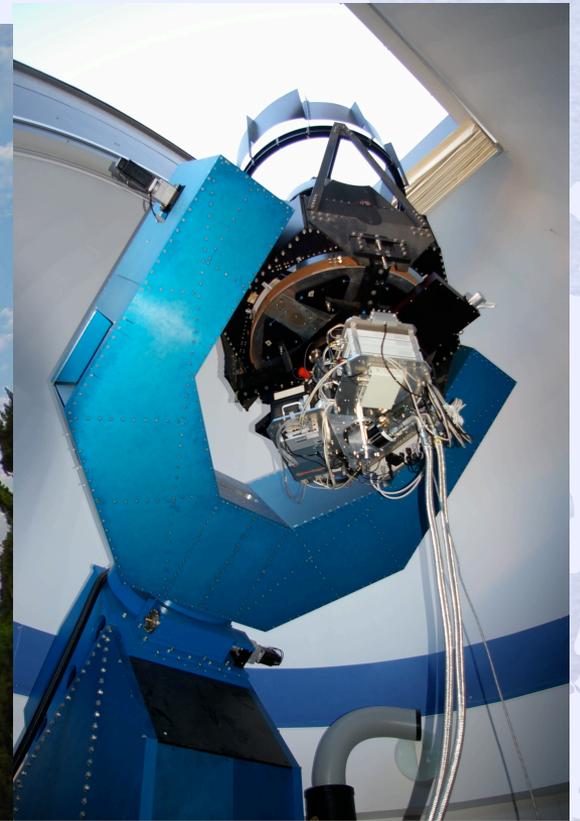
地球接近小惑星を発見し、軌道を求めることが第一の対策  
初期目標:2008年までに直径1km以上の地球接近小惑星の90%  
を発見する。=>達成  
次の目標:2030年頃までに直径140m以上の地球接近小惑星の  
90%以上を発見する。



パンスタース望遠鏡。  
口径1.8m。視野7平方度  
23等級程度まで検出



# 美星スペースガードセンター



日本における地球接近小惑星観測の拠点 (岡山県井原市美星町)。  
口径1m、視野2.96平方度、限界等級18.7等(2分露出)、小惑星の移動  
方向がわかれば、画像を重ねることで、21等級程度も検出可  
口径50cm望遠鏡  
視野:2.78平方度、限界等級17等(2分露出)

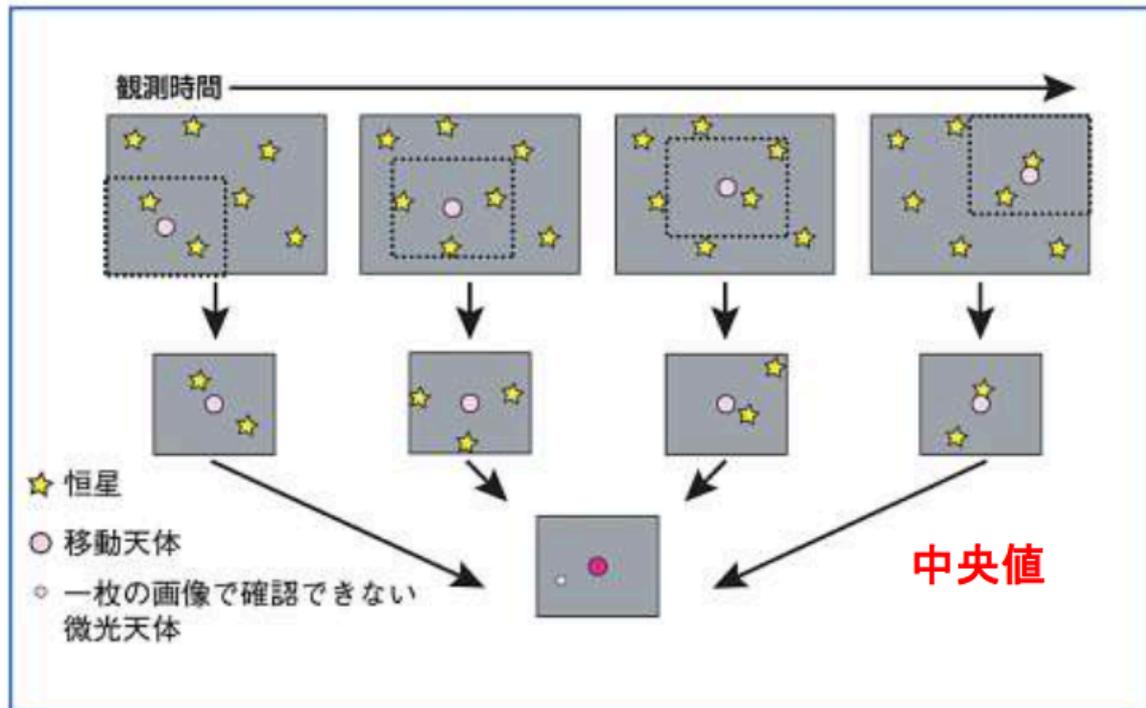
2017年4月よりJAXA所有(スペースデブリ観測を主目的)  
観測は日本スペースガード協会、スタッフ6名、365日観測体制

重ね合わせ法による  
地球接近小惑星の発見  
(JAXA / 柳沢氏資料)

# JAXAで開発中の移動物体検出手法(重ね合わせ法)

多数の画像を利用することにより1枚の画像では検出できない暗い移動物体を検出する技術。

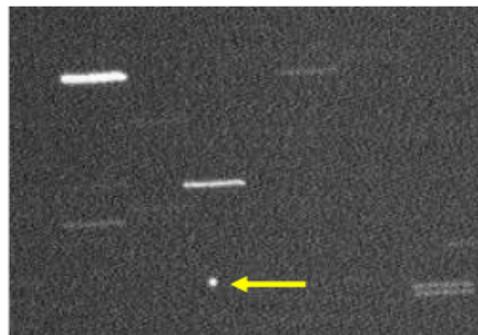
## 重ね合わせ法概念図



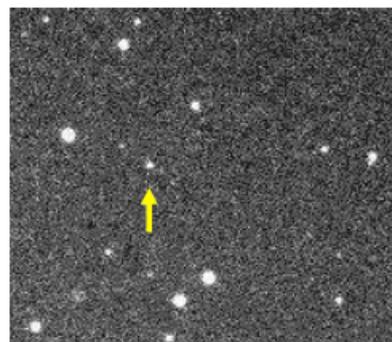
移動物体の動きを仮定し、複数の観測画像の切り取りを行う。切り取られた画像の中央値画像を作成することにより暗い移動物体の検出が可能になる。

# 従来の検出方法との比較

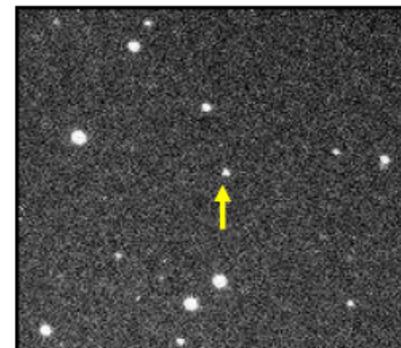
静止デブリ



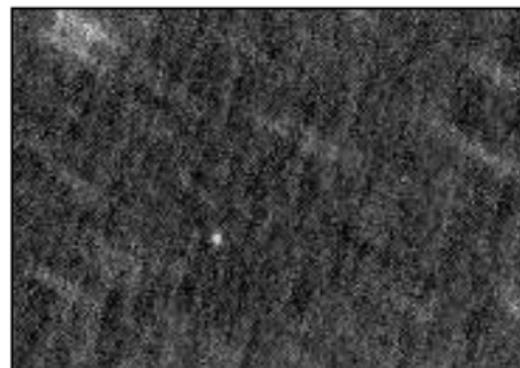
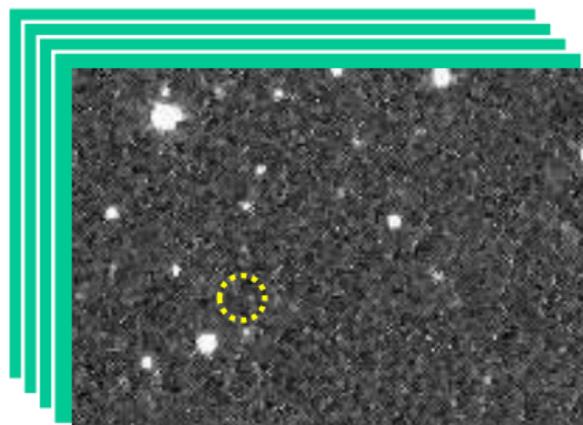
従来の検出法



小惑星

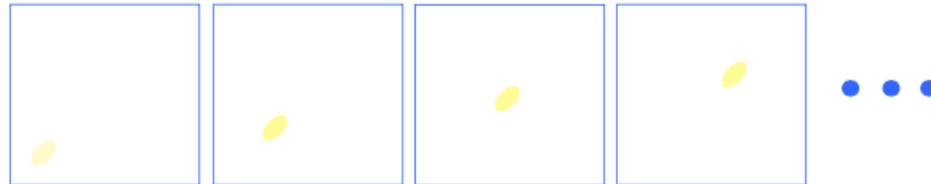


重ね合わせ法



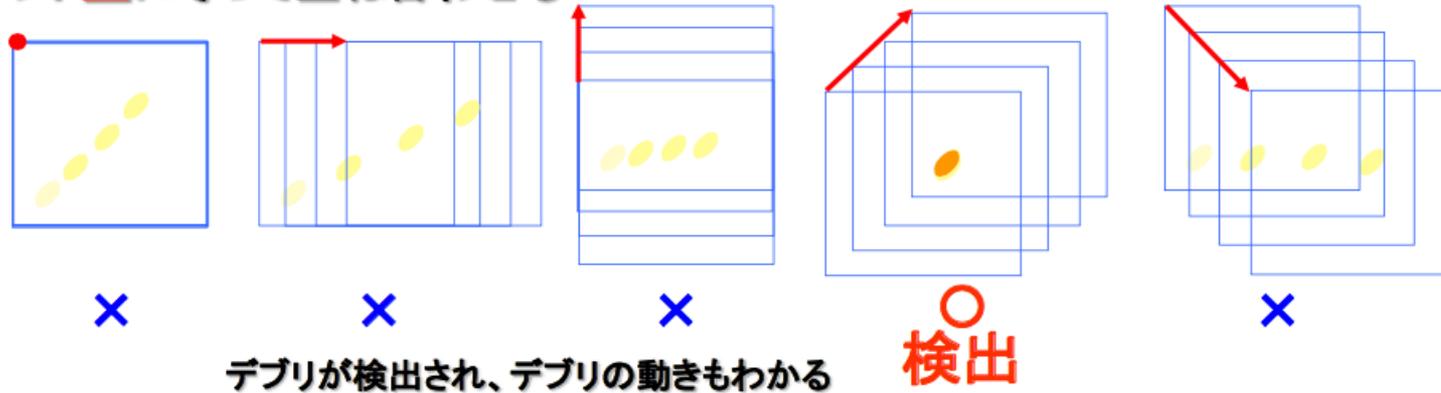
## 重ね合わせ法の弱点

移動方向が未知のデブリや地球接近小惑星の検出にはあらゆる方向で重ね合わせをしないといけないため解析に時間がかかる。



望遠鏡を固定して連続で撮影した画像

シフト量によって重ね合わせる



1024×1024画素のCCD画像32枚について画像内を256×256画素の範囲内で移動する物体を検出しようとした場合65536通りの解析をする必要がある。



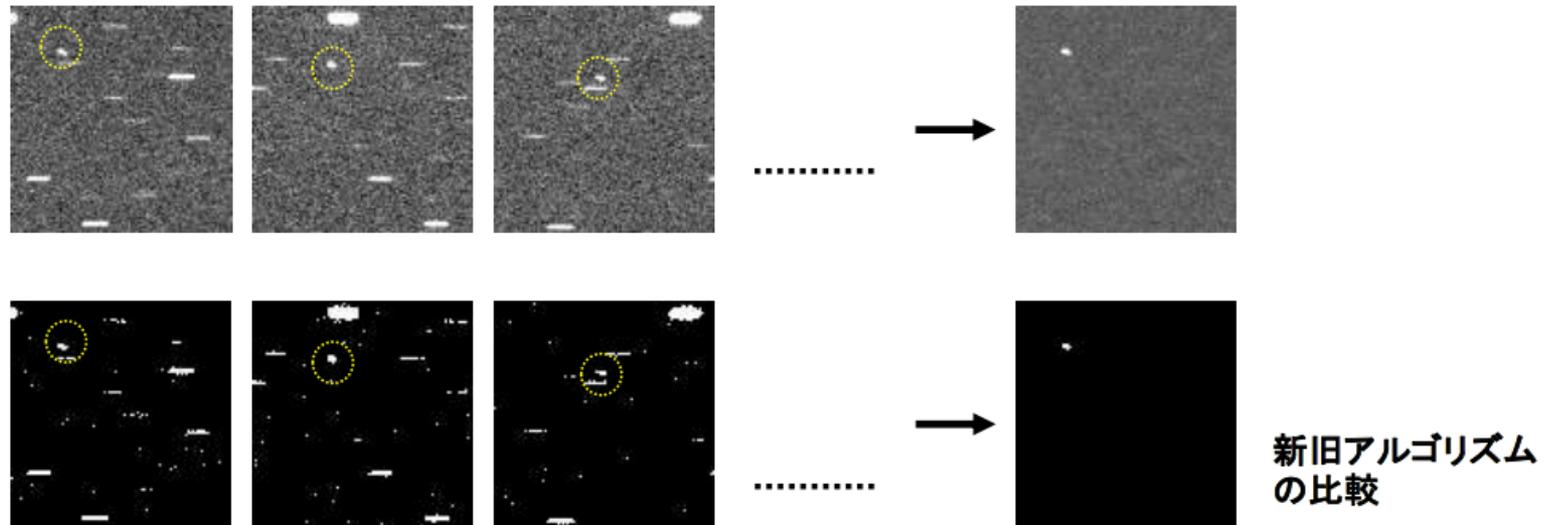
市販のPC1台で要する解析時間は**280時間！！**

# 新アルゴリズムの開発

中央値の計算は加算や平均と比較すると計算が複雑で時間を要する。

中央値の利点(高いノイズの影響を除去できる)をいかしつつ加算などの単純な計算と代用できないか。

画像を2値化することにより2つの特徴を網羅できる。



解析時間を**60分の1**に短縮できる。

# 新アルゴリズムの開発

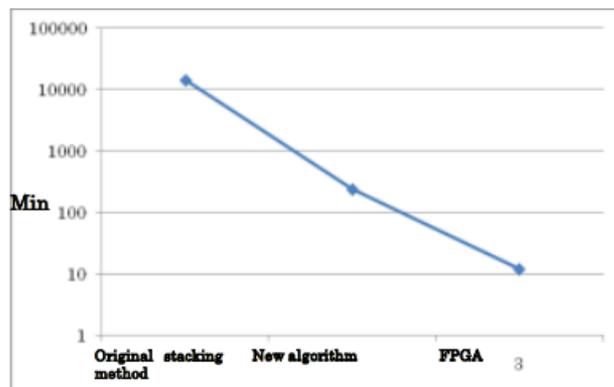
新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM



iDAQs社製FPGAボードシステム



解析時間の変化

解析時間をさらに**20分の1**にできる。  
合計で**1200分の1**に短縮。

**280時間 → 14分**

# デブリ観測技術を利用したNEOサーベイの提案

**世界には多くのNEOサーベイプログラムが存在する。CSS, Linear, Space Watch, Bisei, Pan-Starrsなど。**

**基本的な観測、解析手法は同じ。**

**1-2m級望遠鏡+大面積CCDカメラ+Blink。**

**観測視野:数平方度**

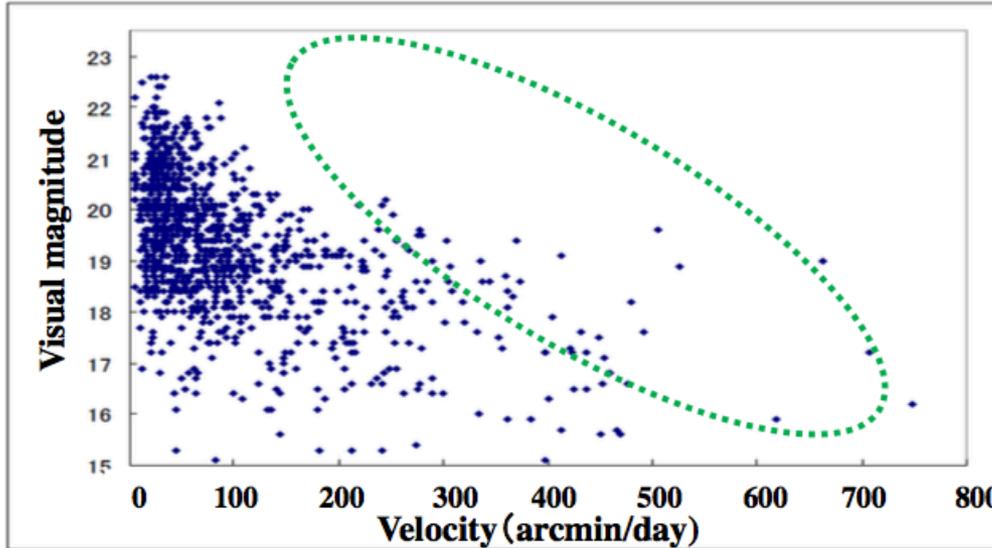
**露出時間:数10秒-数分**

**特定の非常に近傍に存在するNEO群を見落として  
いる可能性がある。**

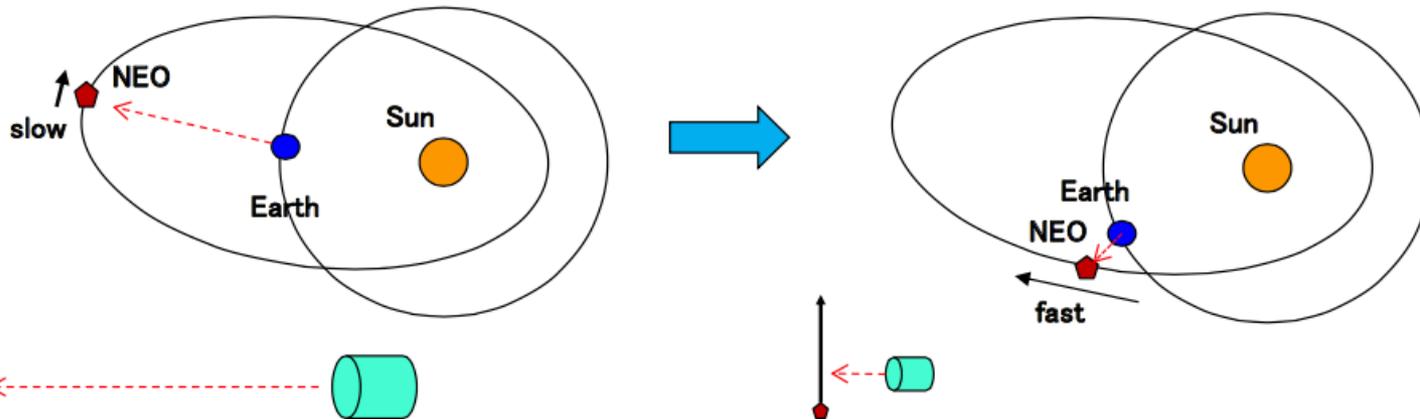
**Tomo-e Gozenの超短時間露出画像の重ね合わせが有効!**

# 状況証拠 3 : 観測データ 2

## Velocity vs brightness of the first detection of NEOs



Dark NEOs were detected only at low velocities which means those NEOs are dark not because of the sizes but the distances. Fast moving NEOs which come very close to the Earth will be detected using small telescopes and our technologies

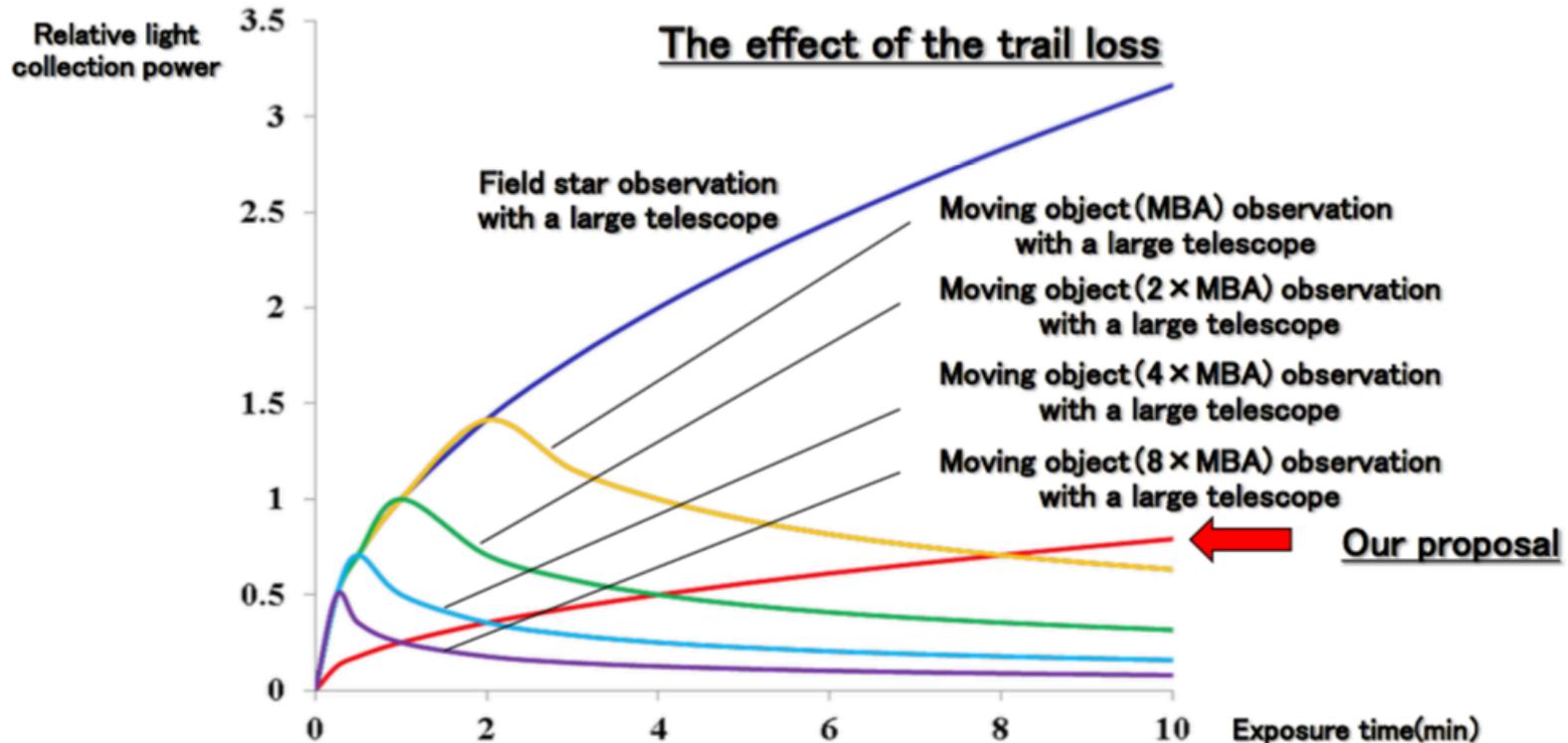


Conventional method: Detect slow NEOs with large telescope

New one: Detect fast NEOs with small telescopes

# Tomo-e Gozenの最大の特徴

あらゆる速度領域の物体に対してトレイルロスの影響を完全になくすることができる。



Tomo-e Gozenの2Hzという読み出し速度は従来のCCDの性能をはるかに超えている。前出のトレイルロスの議論を持ち出すと、重ね合わせに利用する露出時間を1つ設定した場合、重ね合わせ法がもっとも有効に働く移動物体は厳密にはその露出時間内に1画素移動する物体のみである。Tomoe-e Gozenの2Hz(露出時間0.5秒)という超短時間の露出時間は、それを2枚加算すれば1秒露出、10枚加算すれば5秒露出と0.5秒以上の任意の露出時間に相当する画像群を構築できる。そのうえで各露出時間について重ね合わせ法を適用することにより効率的にCCDではとらえられなかった暗くてさらに低速から高速に移動するあらゆるデブリ、NEOの検出が可能となる。

# Test Observation

Test observations were carried out using the 18cm-telescopes at Mt. Nyukasa optical facility in Jan 17, 25, 26, 31 of 2016.



**Telescope:** Takahashi ε180ED (D:180mm F: 500mm)

**Sensor:** FLI ML23042, Canon CMOS

**Observation mode:** 24-sec exposure × 32 frames × 40sets / day

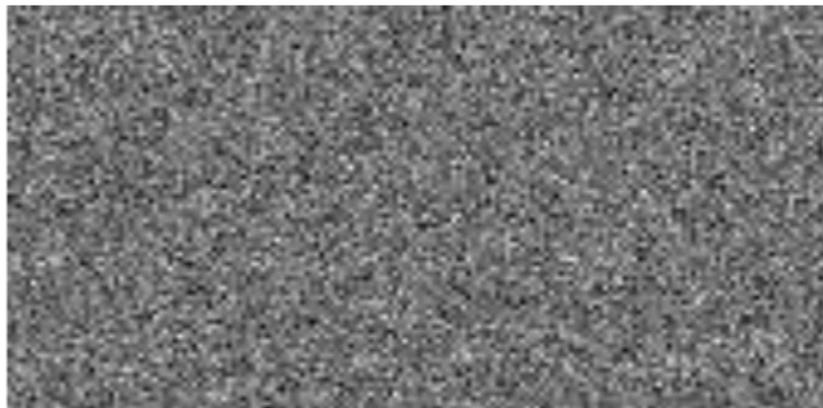
**Total sky coverage:** 986 square degrees /day

**Limiting magnitude:** 18.4-magnitude up to 5.3-degree/day

**We've discovered two NEOs (2017 BK, 2017 BN92)!!**

2017 BK

# Test Observation



Candidates in the 32 original frames.

移動方向さえ分かればBSGCで追観測可能  
位置精度が大幅向上



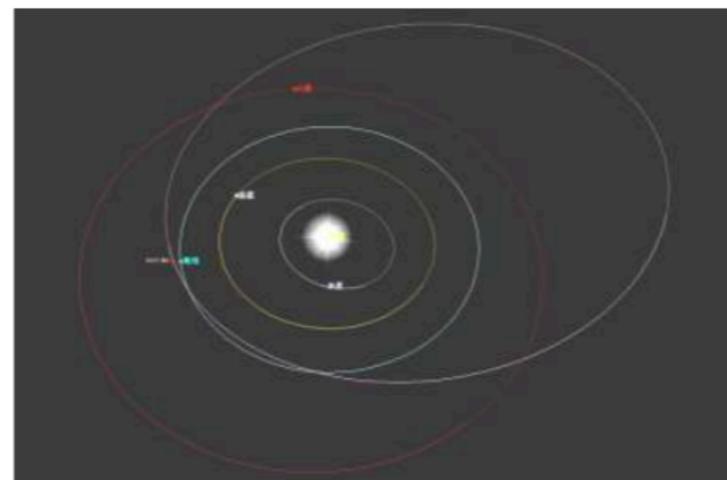
8-frames-stacked images



32-frames-stacked image

元期	2017-02-16.0
離心率	0.4902647
軌道長半径 (AU)	1.9107853
軌道傾斜角 (°)	6.64014
昇交点経度 (°)	110.92190
近日点引数 (°)	39.62114
平均近点角 (°)	0.82779
絶対等級	24.0
スロープパラメータ	0.15

サイズ50m程度。2017年1月22日に地球からおおよそ600万km(月軌道の約16倍)まで接近。



Temporal orbit of the candidate

# Tomo-e Gozen + BSGCの観測計画案 (そして、その課題)

JAXA/18cm望遠鏡 => 木曾105cm (集光力34倍)

20等級より暗い(直径数十mより小さい)地球のごく近傍のNEOを発見

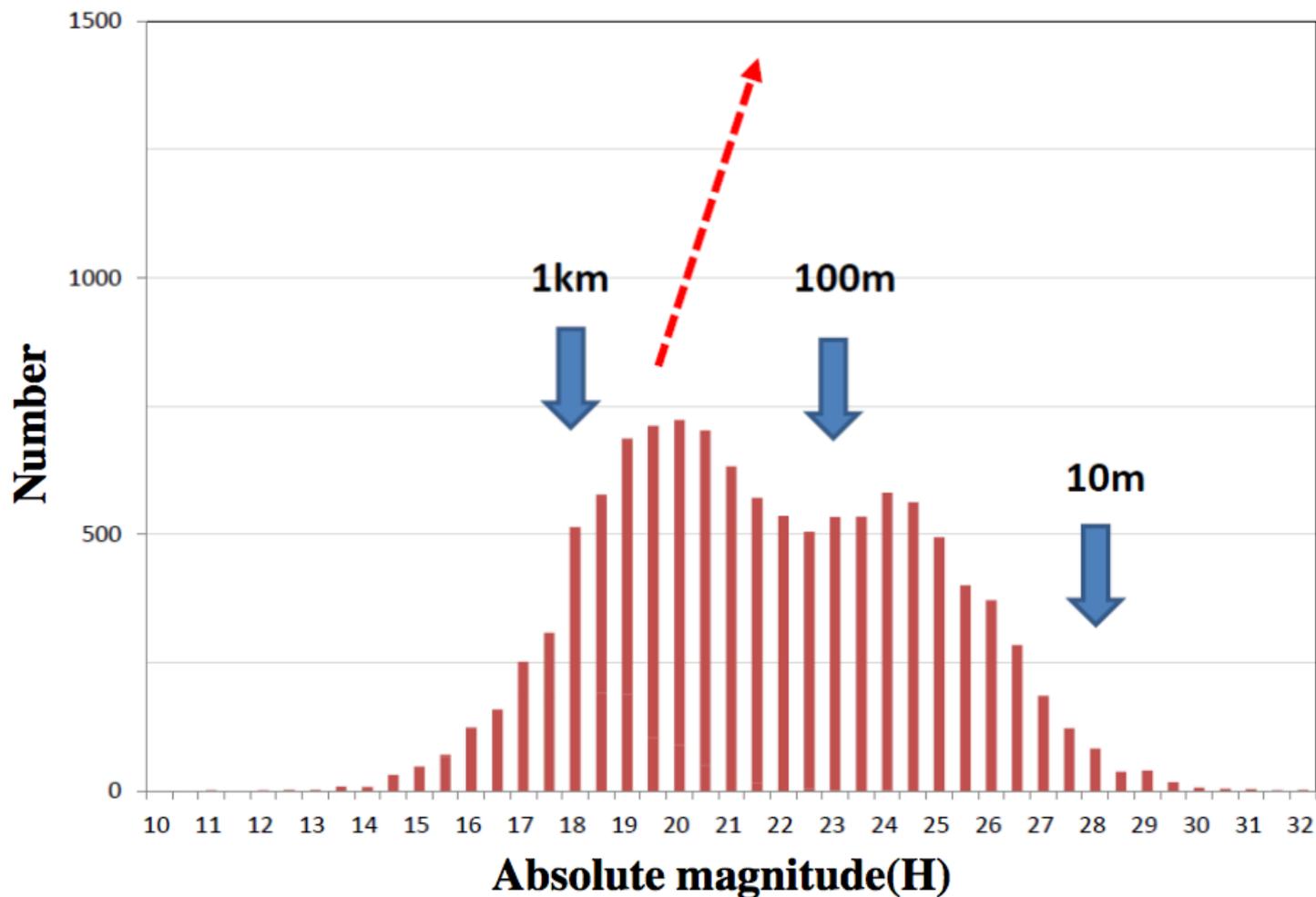
新重ね合わせ法により、観測と並行して解析可  
=>BSGCでの常時観測体制 (超高速NEOを見失わない)

効能

- \* 現実的な頻度で脅威となる直径数十mクラス小惑星衝突への対策
- \* 小惑星探査ターゲット
- \* 直径数十mクラス小惑星のサイズ分布 (ちいさな小惑星は、どのように力学輸送されるのか?)

# 状況証拠 3 : 観測データ 1

— Size distribution of NEO —



## 効能の続き

- \* 他の大規模小惑星サーベイ(8.4m LSSTや近赤外宇宙望遠鏡 NEO-Cam)が見逃すような NEOを1mクラス望遠鏡で発見&軌道決定
- \* 絶大な費用対効果

## 課題

- \* その場でのFPGA解析を誰がどのように行うか？
- \* リモート？ 来所？ FPGAのノウハウ習得(マルチコアPCでも可能か！？)。
- \* LSSTや宇宙望遠鏡に比べるとわずかな費用。ただ、そのわずかな費用/人員がない。

# まとめ

**Tomo-e Gozen + (BSGC)で小惑星  
サーベイの世界トップになりましょう！**