



T O M O · E
G O Z E N

Tomo-e Gozenと重ね合わせによる 微小NEO観測：進捗報告

奥村真一郎（日本スペースガード協会）
柳沢俊史（JAXA）、大澤 亮（東京大学）
吉川 真（JAXA）、吉田二美（産業医科大学）
酒向重行、紅山 仁、高橋英則（東京大学）
浦川聖太郎（日本スペースガード協会）

実施計画

- ・ 2018年度～2020年度の3年間
→ Covid-19の影響で2年延長
(通常繰越+事故繰越)、2022年度末まで
- ・ サイエンスの動機：
小サイズの地球接近小惑星を大量に発見し、
サイズ分布の議論に制限を与える。

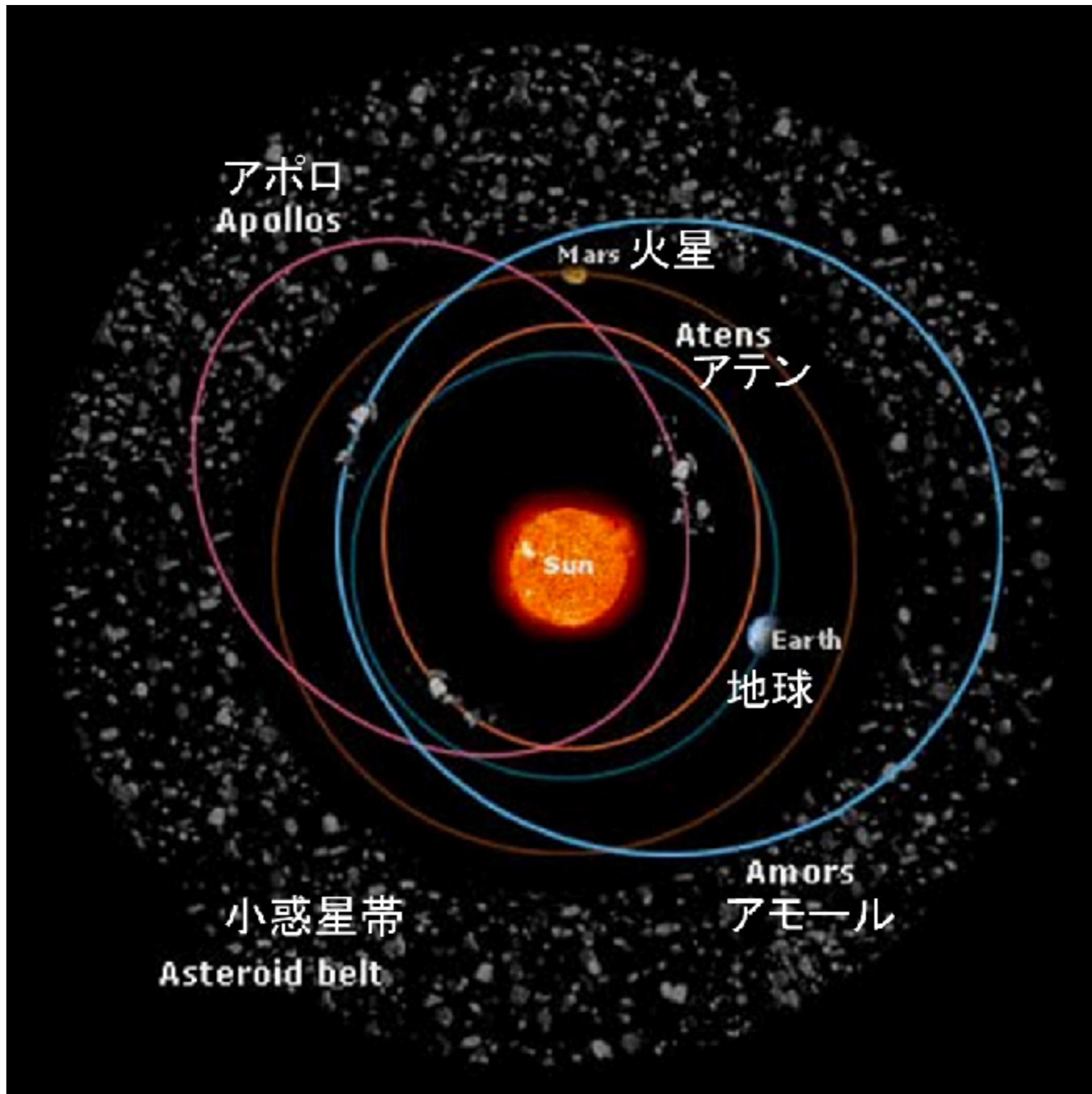
内容

- 地球接近天体(NEO)観測の概要
 - NEOについて
- 移動天体の観測とトレイルロス
- Tomo-e Gozenカメラによる移動天体観測
- 重ね合わせ法による移動天体観測
- Tomo-e カメラと重ね合わせ法の組み合わせによる高速移動NEOの観測
- Tomo-e カメラ + 重ね合わせ 計画の進捗
- 今後の計画

地球接近天体(NEO)観測の概要

NEOについて

- NEO = Near Earth Object
(地球接近天体 \cong 地球接近小惑星)



天文学辞典より (もとの図は

http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/Apollo_group.html)



チェリャビンスク

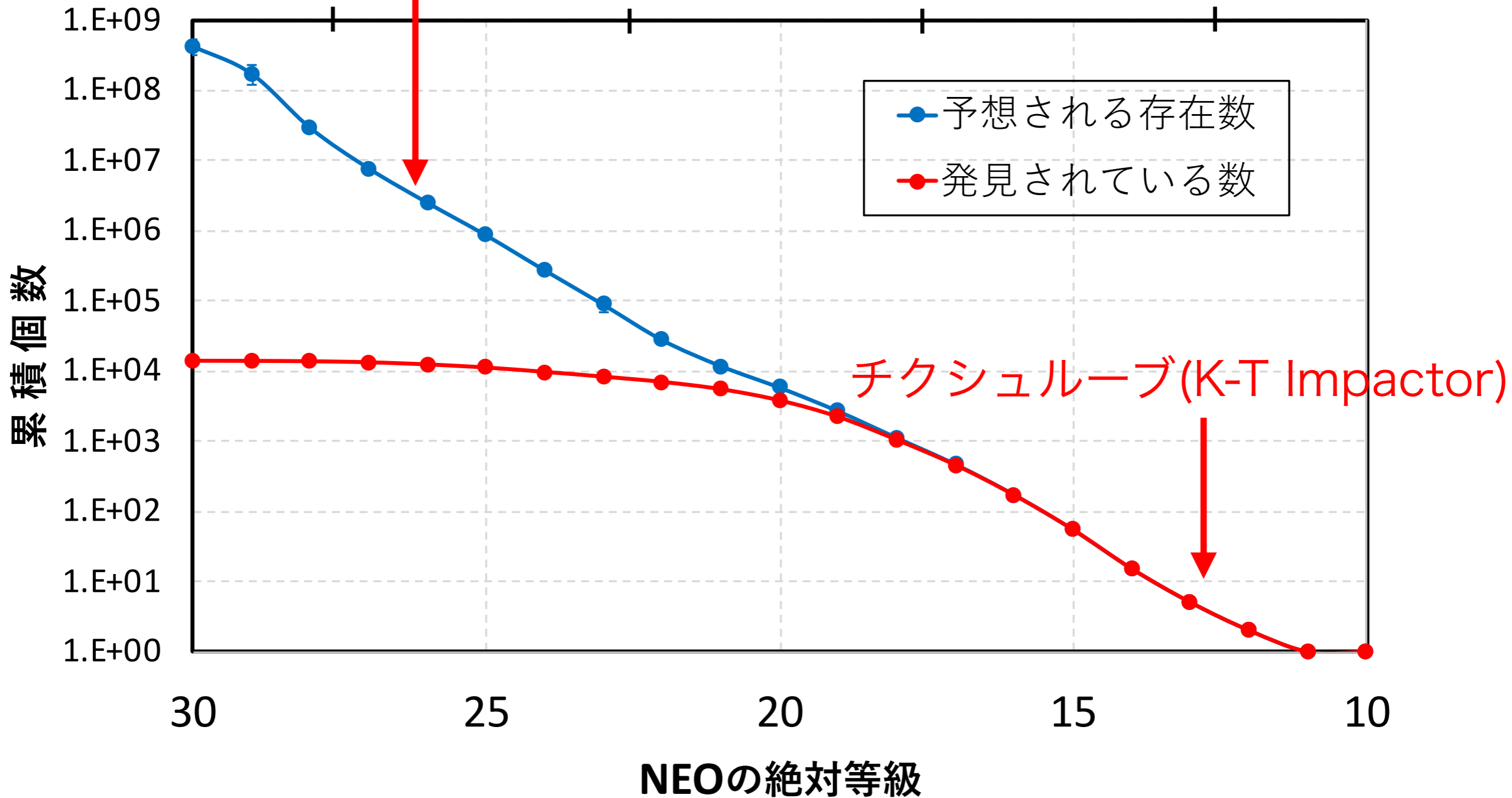
NEOの直径

10m

100m

1km

10km



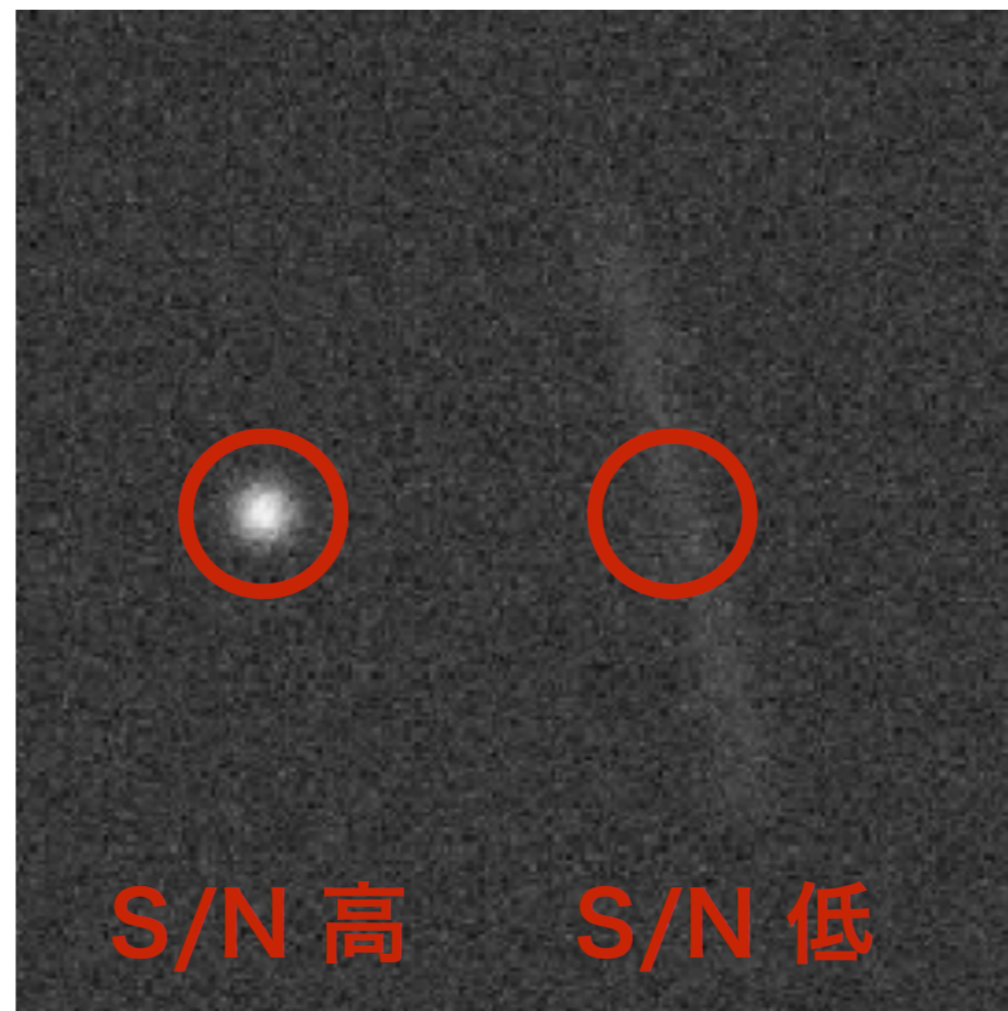
移動天体とトレイルロス

サイズの小さいNEO

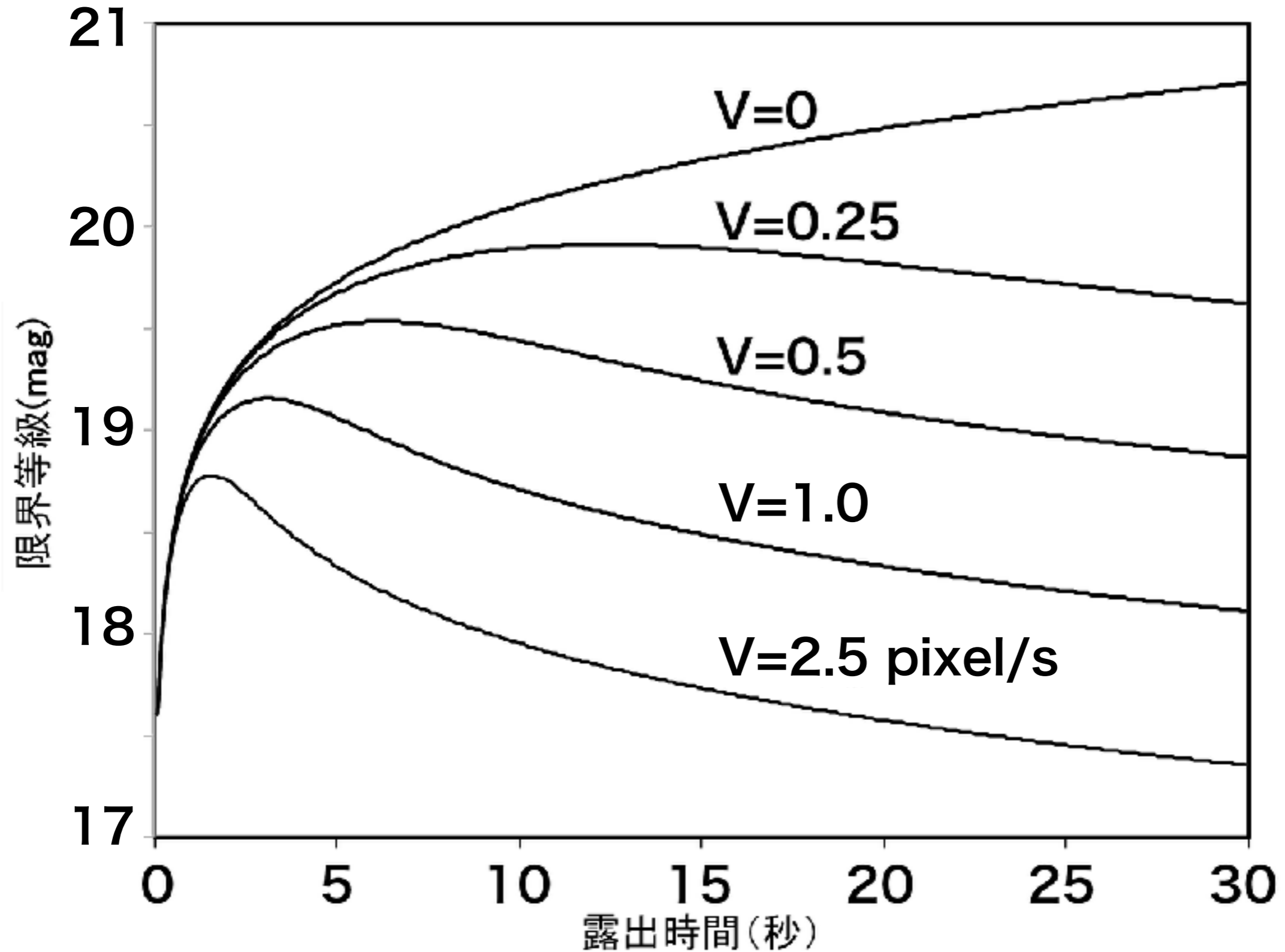
- ・ 小さい → 暗い
- ・ 地球に近づかないと検出不可
- ・ 地球に近づくと → 見かけの移動速度：大

高速移動天体の観測

- ・ 移動天体→露出中に素子間を移動(トレイル)するため
検出しにくい (トレイルロス)



移動速度と限界等級 (トレイルロス)



Tomo-e Gozenカメラによる 移動天体観測

Tomo-e カメラによる移動天体観測

- ・ 広視野・高速カメラという特徴



Tomo-e Gozenカメラは移動天体に対して非常に有効

- 2019FAを皮切りに、これまでに42個の微小NEOを発見。

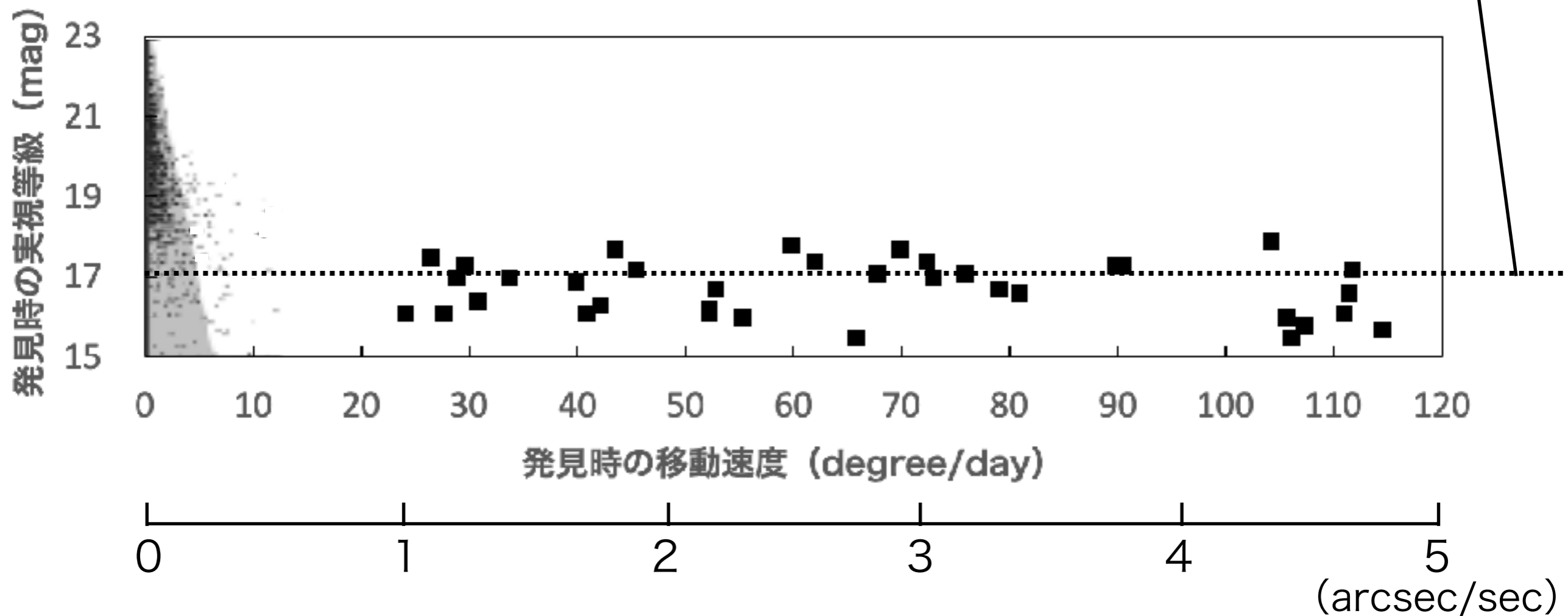
Asteroid discovered by Tomo-e Gozen [†]

Num.	Object	Discovery Date (UTC)	Ap. mag. (mag)	Velocity (arcsec/s)	H (mag)	D (m)	a (au)	e	i (degree)	LoA (degree)	AoP (degree)	M (degree)
1	2019 FA (TMG0002)	2019-03-16	16.0	2.30	28.7	6	1.34	0.30	1.10	174.25	320.38	38.75
2	2019 SU10 (TMG0005)	2019-09-25	16.9	1.66	27.2	12	2.57	0.61	16.34	182.25	195.20	92.93
3	2019 VD3 (TMG0010)	2019-11-05	16.3	1.75	25.9	21	2.45	0.60	1.68	227.46	152.98	96.85
4	2019 XM2 (TMG0013)	2019-12-05	16.6	4.64	26.6	16	1.20	0.19	32.80	73.15	326.14	271.59
5	2019 XT2 (TMG0014)	2019-12-08	16.1	4.62	26.4	17	0.93	0.16	13.47	255.58	56.15	110.59
6	2019 XL3 (TMG0016)	2019-12-15	15.8	4.47	27.0	13	0.87	0.14	23.64	262.82	19.50	182.73
7	2020 EO (TMG0018)	2020-03-12	16.4	1.28	25.9	21	1.30	0.25	7.07	352.39	149.74	172.25
8	2020 FA2 (TMG0019)	2020-03-18	17.0	1.20	27.5	10	1.22	0.22	11.05	358.48	223.05	137.31
9	2020 GY1 (TMG0021)	2020-04-05	13.3	2.79	26.6	16	1.28	0.41	5.97	195.60	278.97	180.50
10	2020 HU3 (TMG0022)	2020-04-21	17.3	1.23	26.0	21	1.43	0.30	24.13	211.03	342.70	120.42
11	2020 HT7 (TMG0023)	2020-04-27	16.1	1.15	26.9	14	1.29	0.22	4.95	215.34	10.89	119.89
12	2020 PW2 (TMG0024)	2020-08-14	17.7	2.91	28.8	6	1.48	0.37	13.08	321.66	316.97	61.89
13	2020 QW (TMG0026)	2020-08-17	17.5	1.10	25.3	28	1.56	0.41	7.84	149.36	126.55	57.67
14	2020 UQ6 (TMG0028)	2020-10-27	14.8	1.19	22.7	94	2.34	0.76	4.53	37.22	266.73	13.53
15	2020 VJ1 (TMG0029)	2020-11-09	15.5	4.42	26.7	15	1.35	0.31	32.58	47.12	316.17	23.36
16	2020 VR1 (TMG0030)	2020-11-09	17.2	4.65	28.9	5	2.06	0.56	12.58	47.02	39.86	350.61
17	2020 VH5 (TMG0032)	2020-11-13	16.0	4.40	29.2	5	1.94	0.49	4.83	51.33	13.66	359.75
18	2020 YJ2 (TMG0034)	2020-12-21	15.7	4.77	27.3	11	1.60	0.53	1.72	85.85	292.30	23.03
19	2020 YO3 (TMG0035)	2020-12-23	16.1	1.70	24.6	39	2.08	0.63	9.49	91.21	295.98	14.10
20	2021 CC7 (TMG0036)	2021-02-12	17.1	2.82	29.8	4	1.02	0.05	7.39	143.77	50.36	315.32
21	2021 EP4 (TMG0038)	2021-03-15	17.4	3.01	29.3	4	1.58	0.39	4.99	355.66	154.12	13.10
22	2021 FA (TMG0039)	2021-03-16	15.5	2.74	25.0	32	0.93	0.11	22.73	175.42	223.27	132.56
23	2021 CDE (TMG0040)	2021-04-08	17.4	2.58	27.2	11	0.99	0.22	26	18.02	71.88	87.02

NEO発見時の移動速度

■ : Tomo-e Gozenによる発見

Tomoeの検出限界
(0.5s露出)

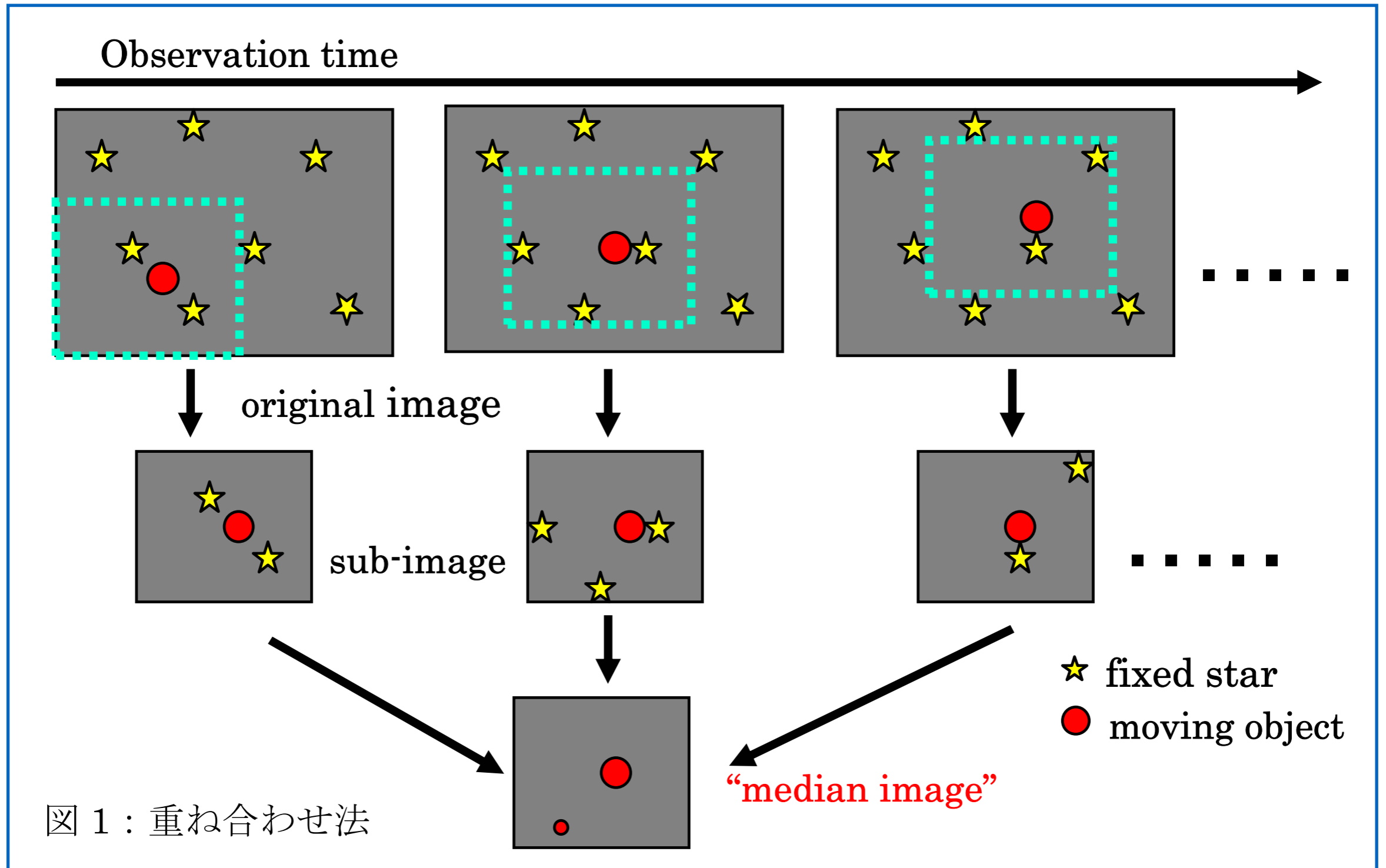


重ね合わせ法による 移動天体観測

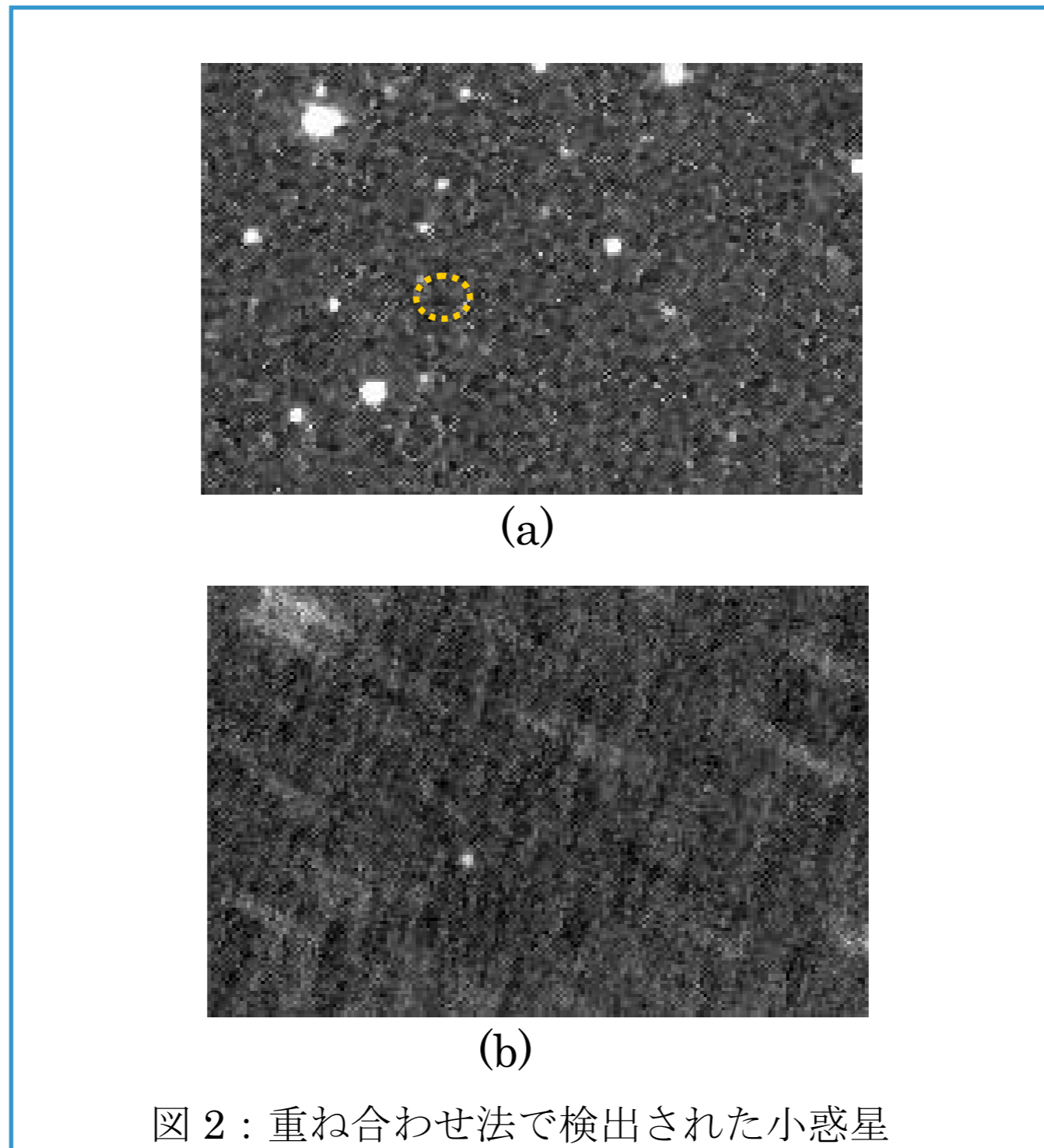
重ね合わせ法による高速移動天体の観測

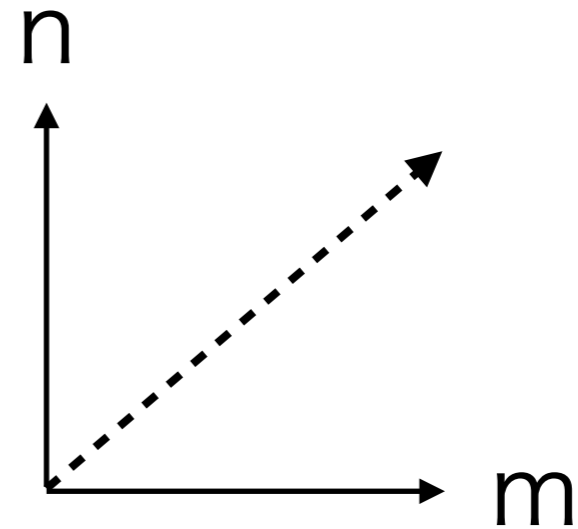
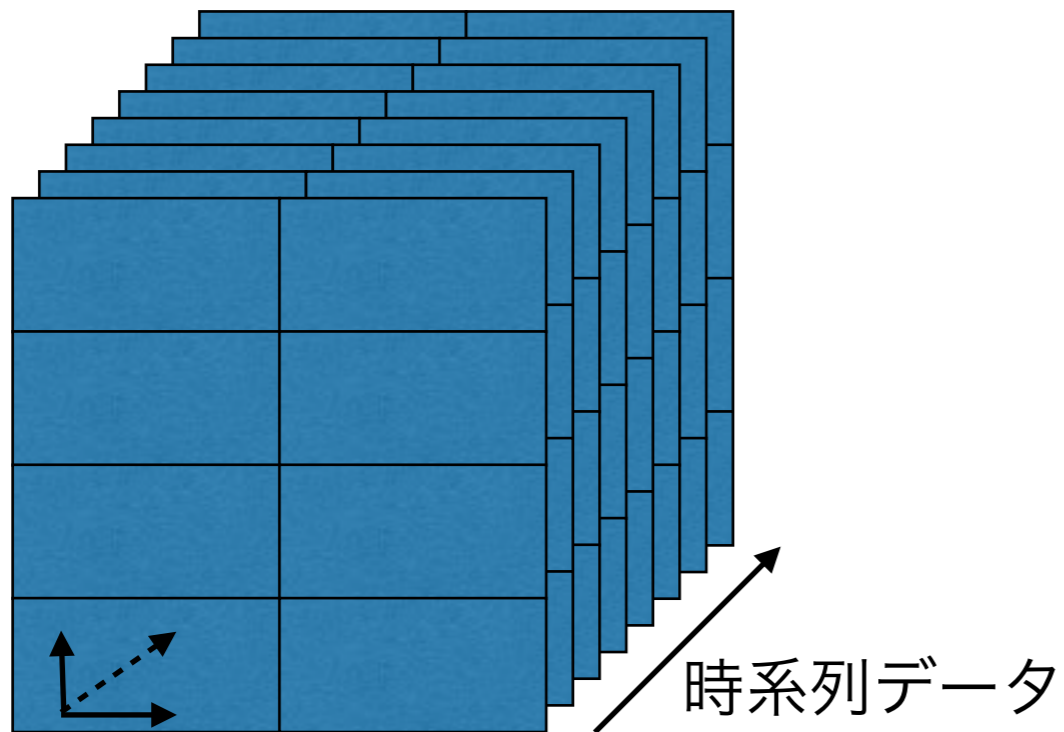
- ・ 移動天体→露出中に素子間をトレイルするため
検出しにくい（トレイルロス）
- ・ 短い露出の画像を足し合わせる「重ね合わせ法」
Yanagisawa+ 2005, PASJ 57, 399
柳沢他2017, 天文月報110(10), 645
様々な方向、様々な移動速度を仮定して足し合わせ

重ね合わせ法による高速移動天体の観測

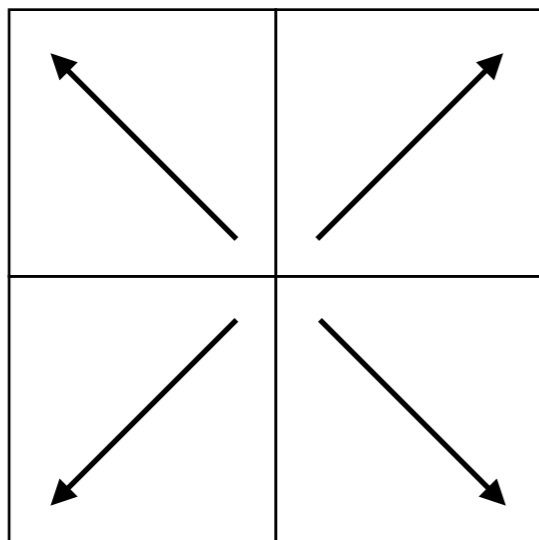


重ね合わせ法による高速移動天体の観測





(m, n): m=0-255, n=0-255の
 $256 \times 256 = 65536$ 通り
 (m,nは縦方向・横方向の
 移動速度 (pix/frame))

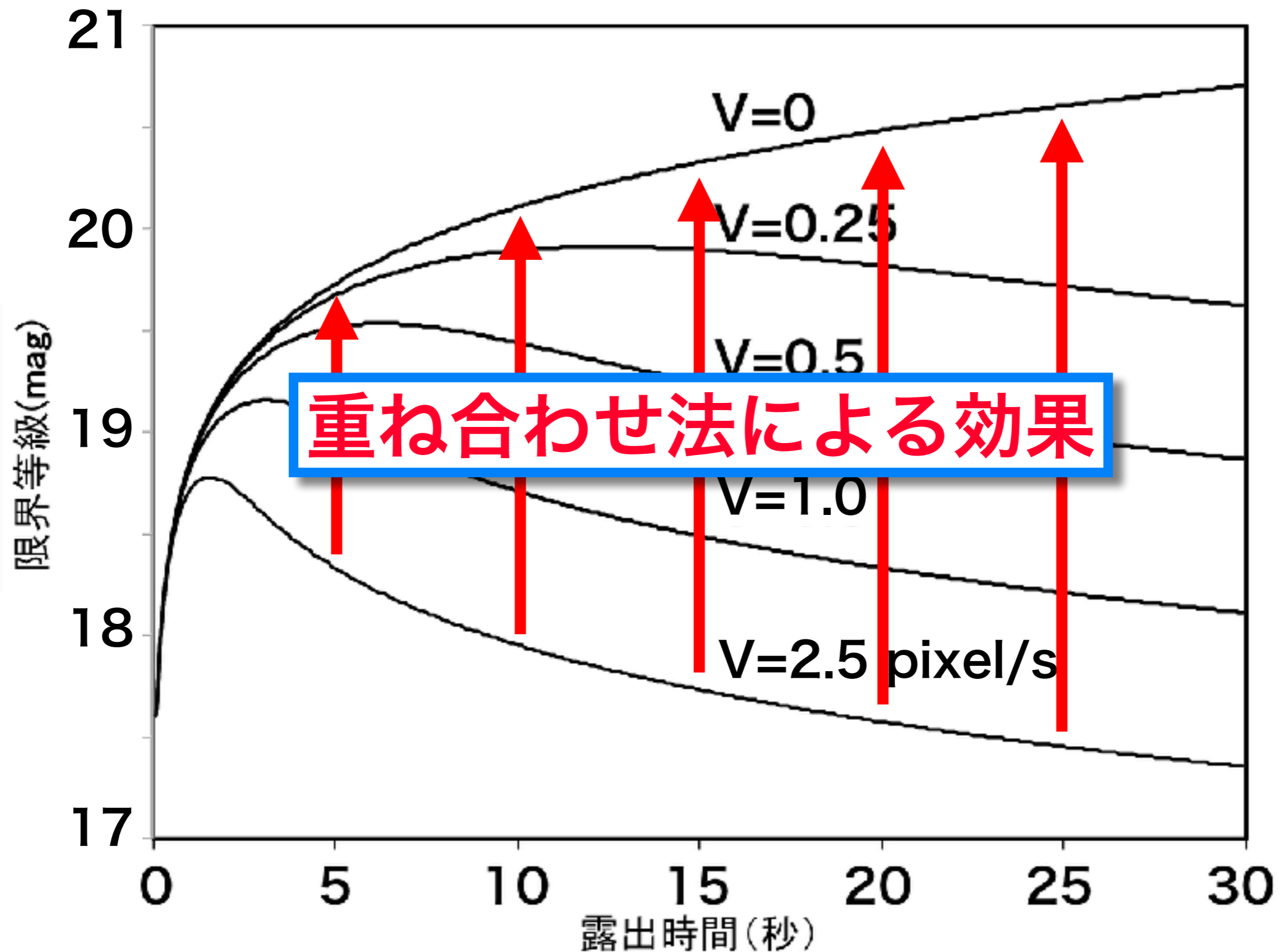


の4方向 $\times 65536 = 262144$ 通り

重ね合わせ法による高速移動天体の観測

- ・ 移動天体→露出中に素子間をトレイルするため
検出しにくい（トレイルロス）
- ・ 短い露出の画像を足し合わせる「重ね合わせ法」
 - Yanagisawa+ 2005, PASJ 57, 399
 - 柳沢他2017, 天文月報110(10), 645様々な方向、様々な移動速度を仮定して足し合わせ
- ・ マシンパワーが必要
 - アルゴリズムの最適化と専用FPGAボードの導入により
解析時間を短縮

移動速度と限界等級 (トレイルロス)



重ね合わせ法によるNEOの発見

- 小望遠鏡に重ね合わせを適用し、これまでに11個の10mクラスのNEOを発見
(<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/debris/neo.html>)

地球接近小惑星の発見

JAXAでは、長野県入笠山、及びオーストラリアのサイディング・スプリングにおいて、地球接近小惑星の早期発見のための監視システムの一環として、JAXAが開発した画像解析手法を用いて、地球接近小惑星の搜索観測を実施しています。

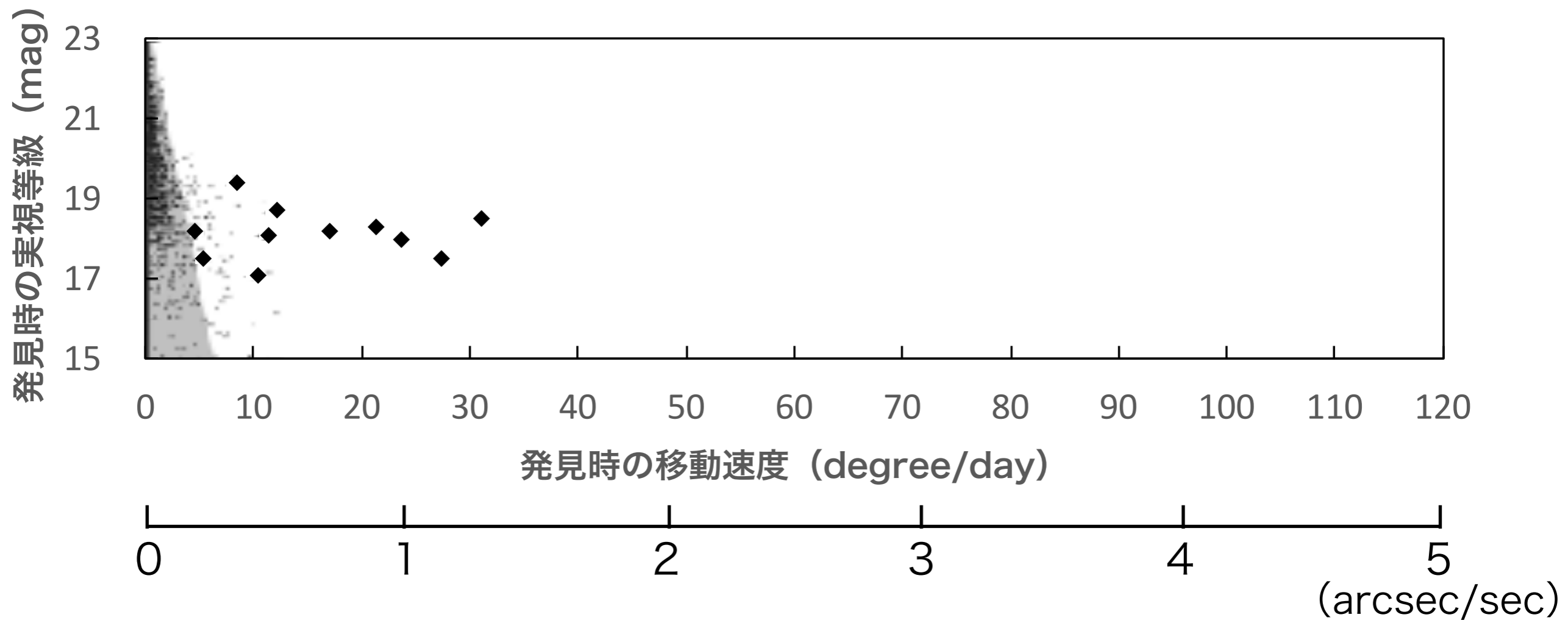
なお、本研究は国立天文台、日本スペースガード協会と共同で実施している科研費補助事業基盤研究(C)「極めて大きな視線速度をもつ近地球小天体の効率的検出方法の開発」（代表者 柳沢俊史）により行っています。

JAXAによる地球接近小惑星の発見

No.	仮符号	発見日時 (日本時間)	発見地点	備考
1	2017 BK	2017年1月17日	入笠山光学観測所	詳しくはこちら

NEO発見時の移動速度

◆ : 重ね合わせ法による発見



Tomo-eカメラと重ね合わせ法の 組み合わせによる高速移動NEOの観測

Tomo-e カメラと重ね合わせ法の組み合わせによる高速移動NEOの観測

Tomo-e Gozenカメラは
移動天体観測に適する

重ね合わせ法は移動天体
に対して強力な手法

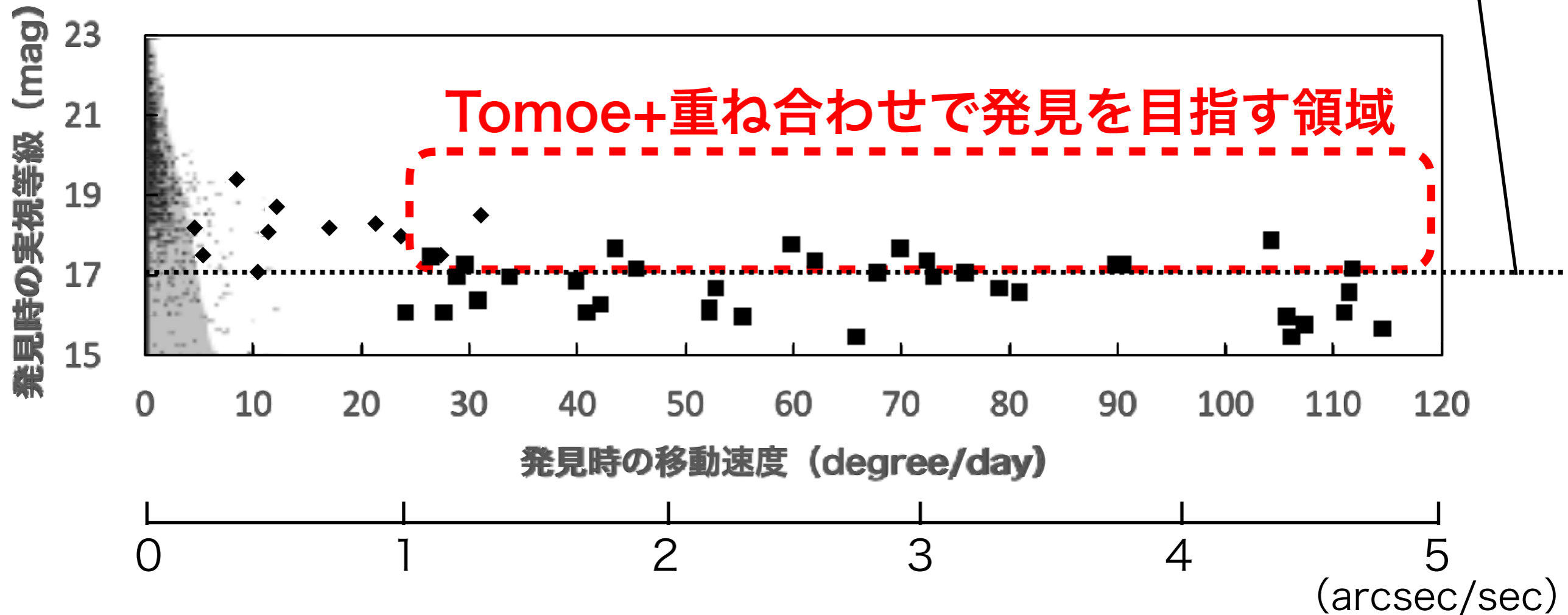
Tomo-e Gozenカメラと重ね合わせ法の組み合わせにより
より暗い（より小さい）高速移動NEOを発見

発見した候補天体を
美星スペースガードセンターにて即時追跡

NEO発見時の移動速度

- : Tomo-e Gozenによる発見
- ◆ : 重ね合わせ法による発見

Tomoeの検出限界
(0.5s露出)



Tomo-e カメラ＋重ね合わせ 計画の進捗

Tomo-e Gozen + 重ね合わせ観測 実現に向けた作業

1. 重ね合わせ法の開発・改修・インストール
2. Tomo-e Gozen カメラの開発と
動画データの転送システム
3. 効率化に向けた検出データの後処理
4. 美星スペースガードセンターでの追跡観測

1. 重ね合わせ法の開発・改修・インストール

- ・ 2018年度

- 解析用FPGAシステムを
JAXA調布と美星スペースガードセンターに導入、
解析アルゴリズムの開発

- ・ 2019年度

- FPGAによる重ね合わせシステムの改修
(2K×2K対応→4K×4K対応に：処理の効率化)
- 解析用FPGAシステムと一次処理用PCを木曾に導入

- ・ 2020年度

- 重ね合わせシステムを木曾観測所PCの導入 (2021年3月)

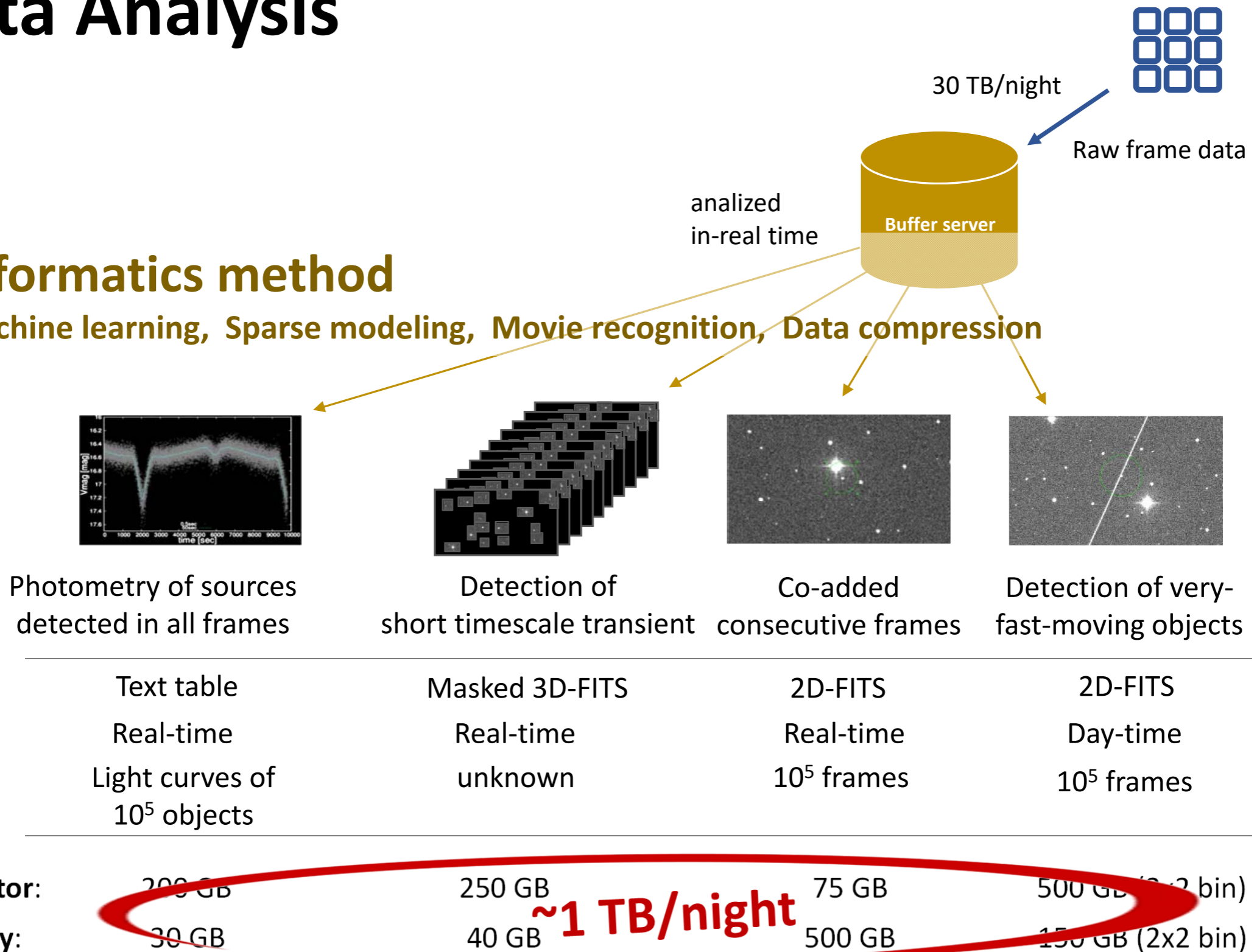
2. Tomo-e Gozen カメラの開発と 動画データの転送システム

- ・ 2018年度
 - Tomo-e Gozenの開発（21チップ→63チップ）、試験データ取得
 - Tomo-e Gozenによる初のNEO 2019 FA の発見
- ・ 2019年度
 - Tomo-e Gozen 84チップ搭載、実機完成
 - NEOを7個発見（紅山）
- ・ 2020年度
 - NEOを14個発見（紅山）
 - Tomo-e Gozen カメラから産出される動画データを重ね合わせシステムPCに取り込むシステム構築（2021年3月）
- ・ 2021～2022年度
 - NEOを20個発見（紅山）

Data Analysis

Informatics method

Machine learning, Sparse modeling, Movie recognition, Data compression



3. 効率化に向けた検出データの後処理

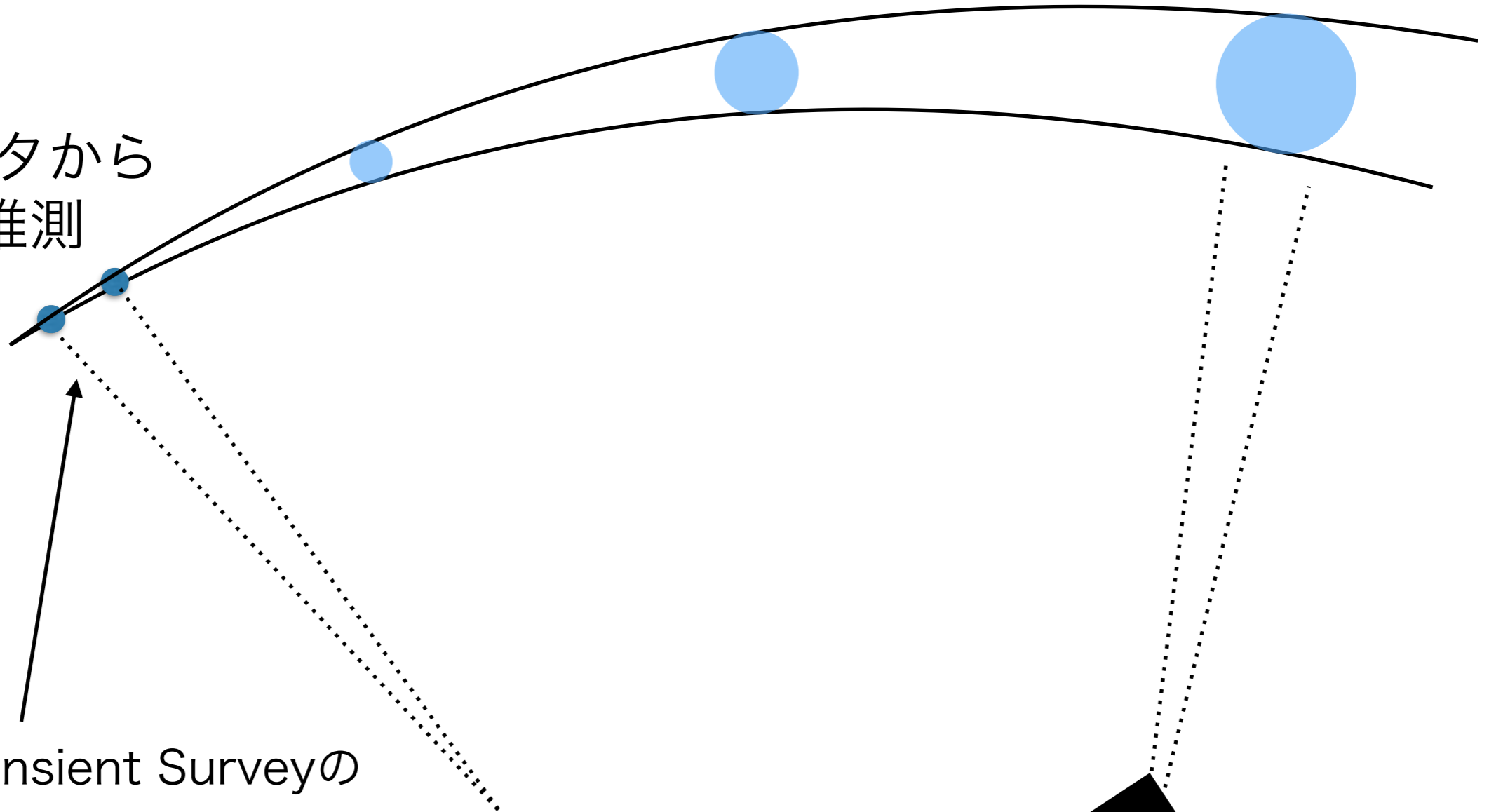
- ・ 2022年度-
 - 人工天体やノイズなどが山のように検出されるため
それを取り除く（必要な情報のみを選び出す）作業が必要。

4. 美星スペースガードセンターでの追跡観測

- ・ 2018年度
 - 2019FA(TMG0002)、重ね合わせ+豪州設置望遠鏡により発見されたNEOの追跡観測など実施
- ・ 2019年度, 2020年度
 - 1 m望遠鏡の改修 (JAXA, 2019年8月~2021年6月)
 - 別の望遠鏡でTMG0010,12,18などの追跡観測実施
- ・ 2021年度
 - 1 m望遠鏡でTMG0055他の追跡観測実施
 - Tomo-e Gozen+重ね合わせシステムにより検出した移動天体の即時追跡観測試験 (2021年9月-)

位置誤差が
時間と共に増大

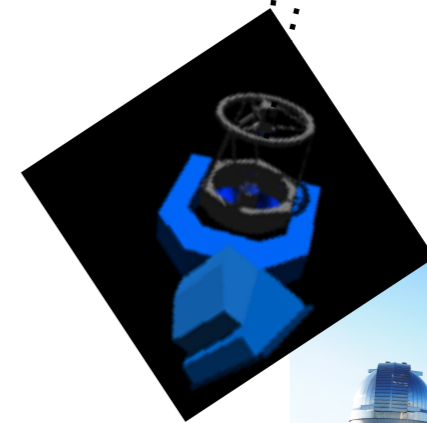
2点のデータから
軌道を推測



Tomo-e Transient Surveyの
12/18枚動画を利用



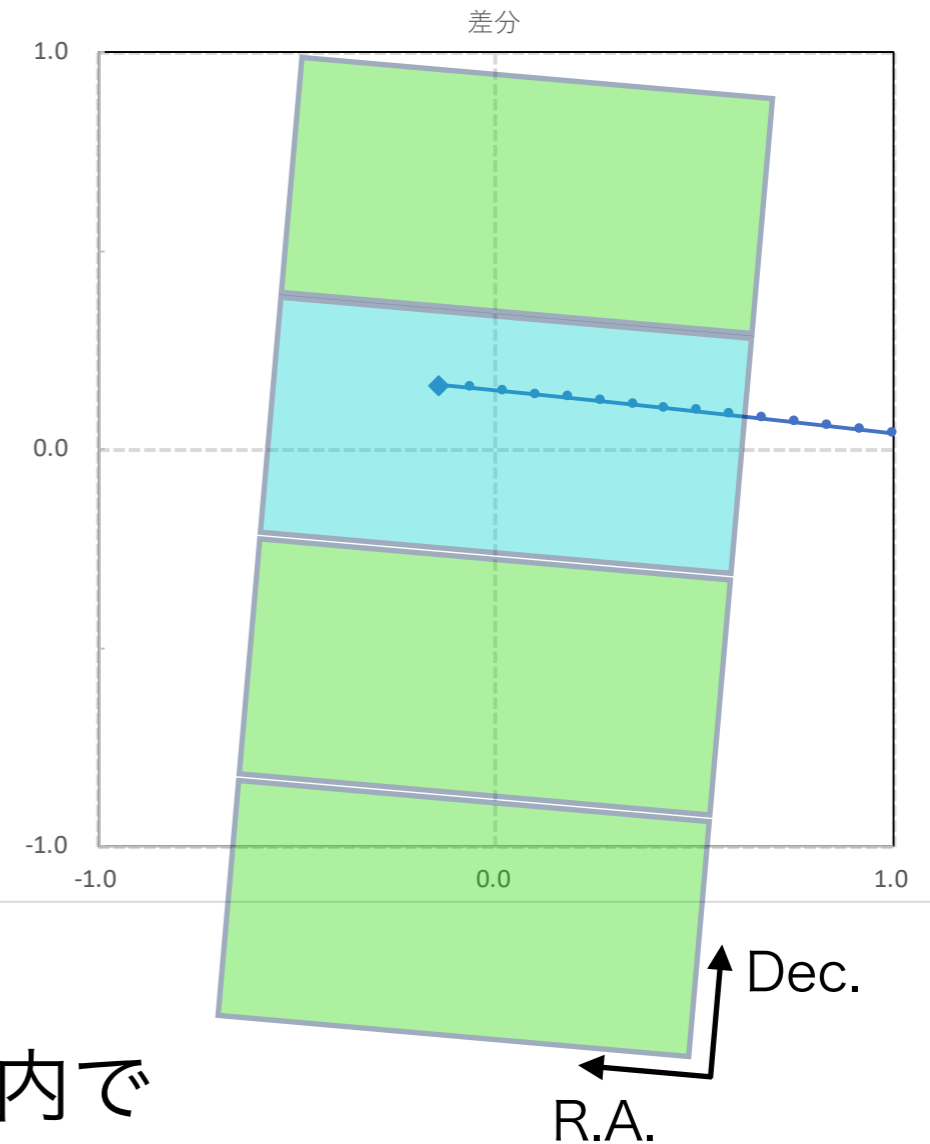
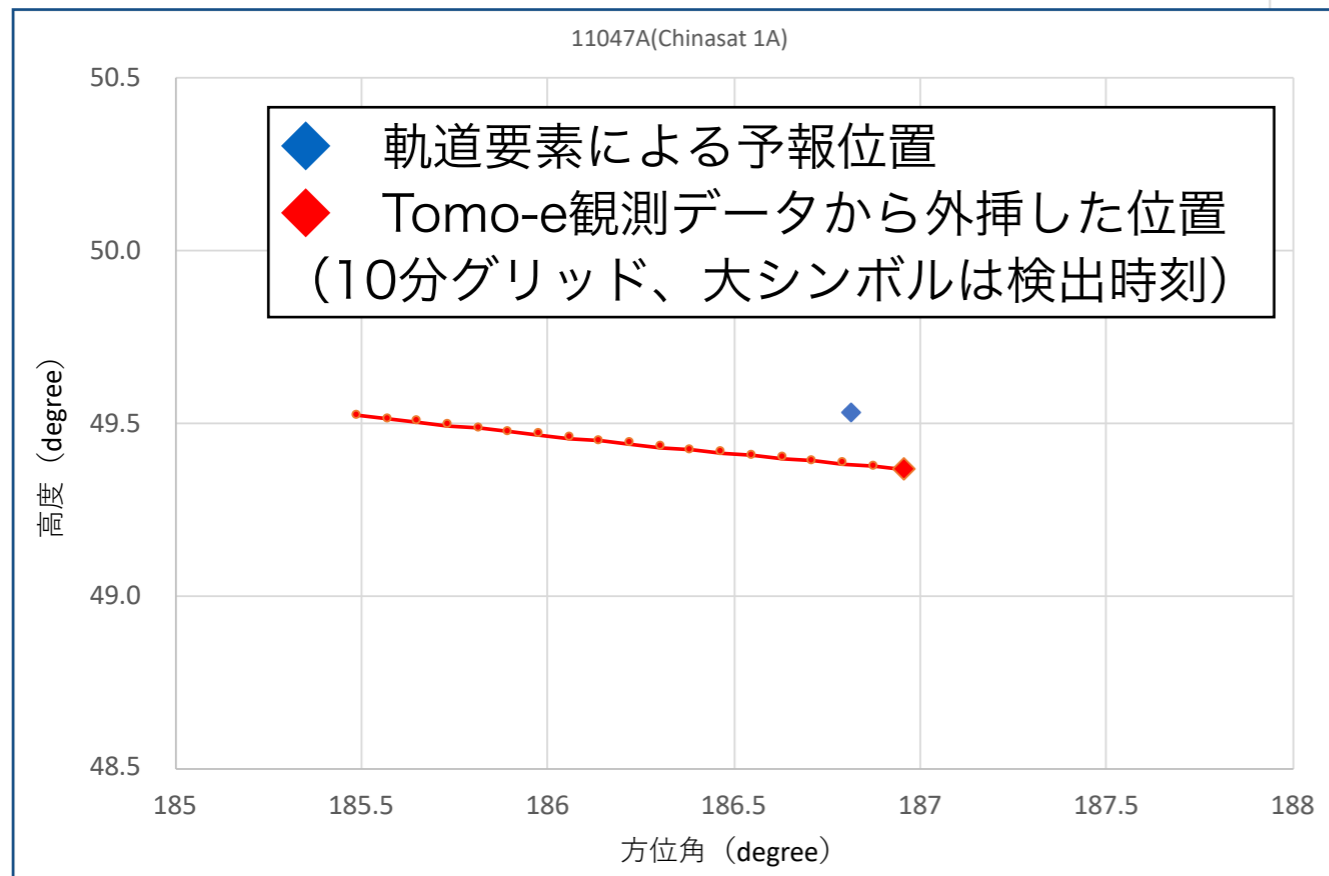
©東京大学木曾観測所



美星スペースガードセンター ©JAXA

軌道から求めた予報位置と 観測データから外挿した予測位置の比較

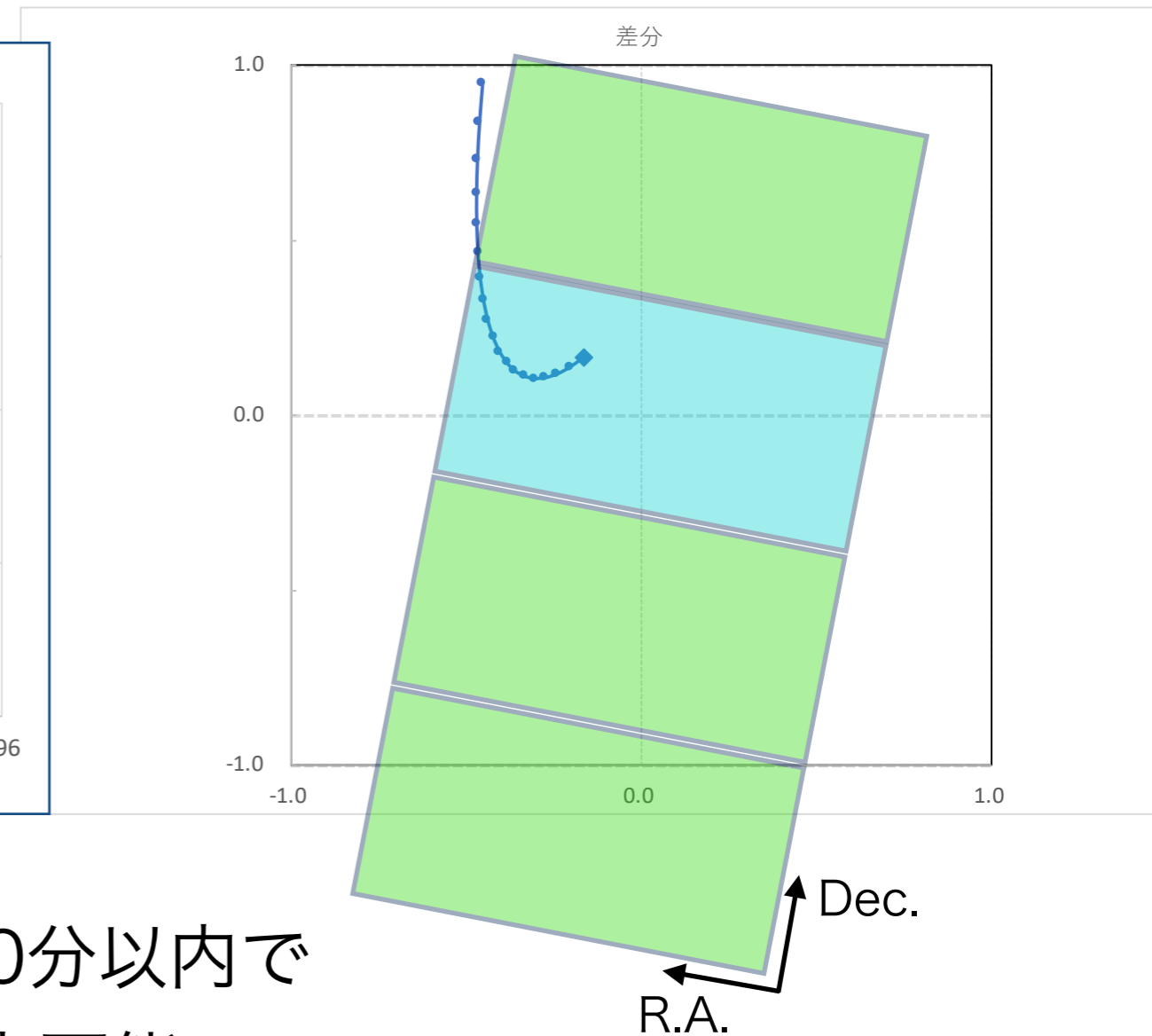
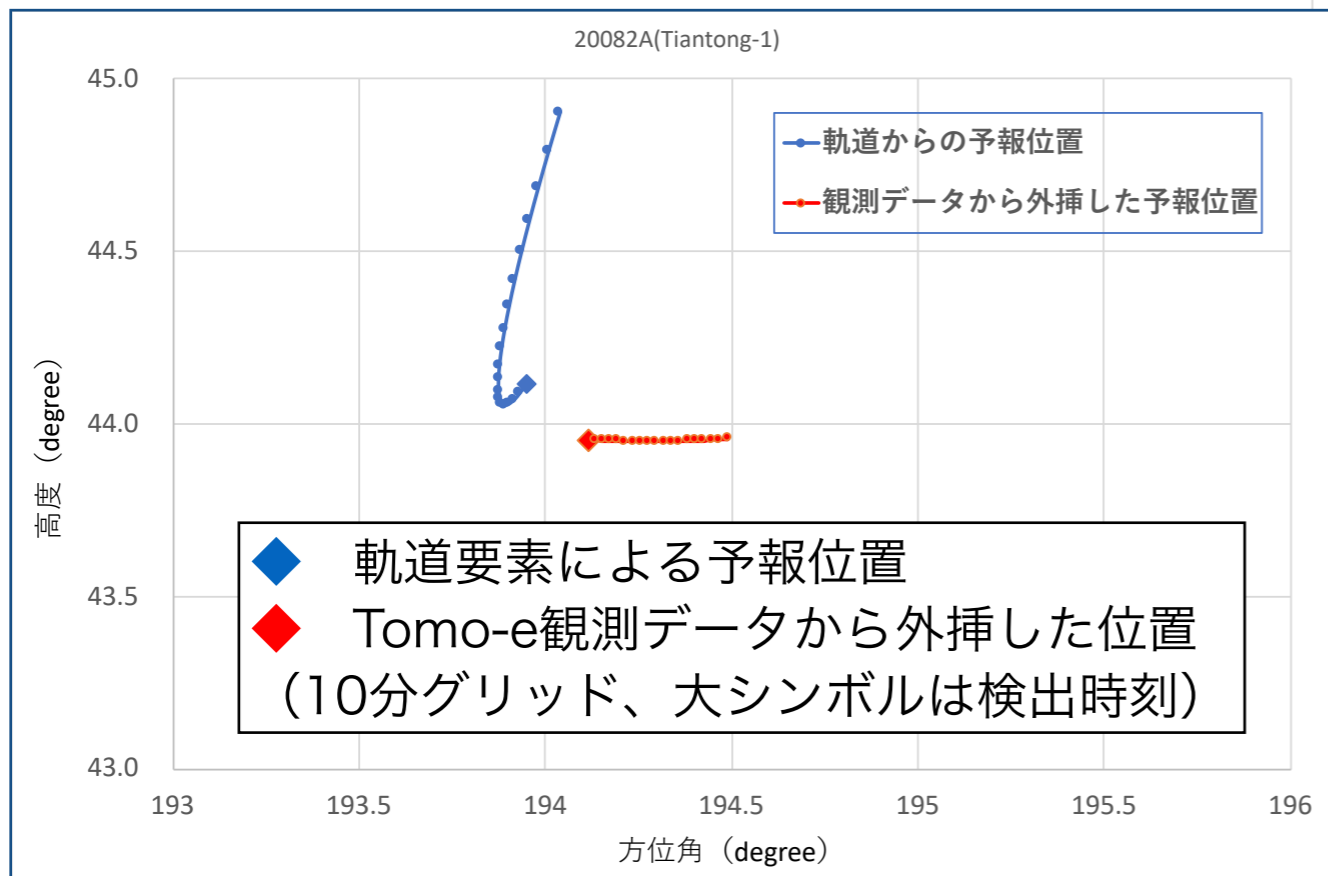
美星スペースガードセンター
1m望遠鏡CCDカメラの視野



Tomo-eで検出後、90分以内で
あれば視野内に検出可能

軌道から求めた予報位置と 観測データから外挿した予測位置の比較

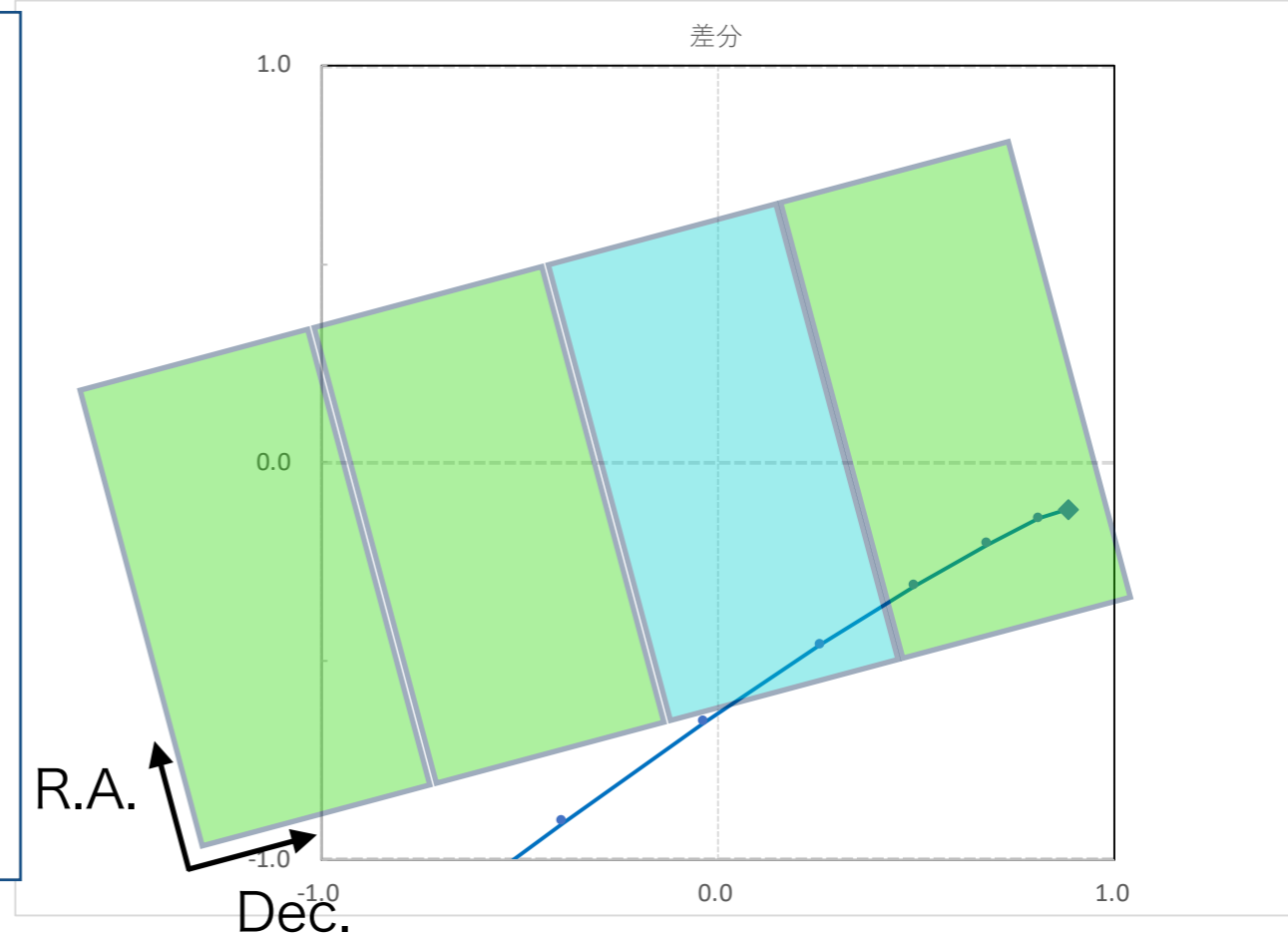
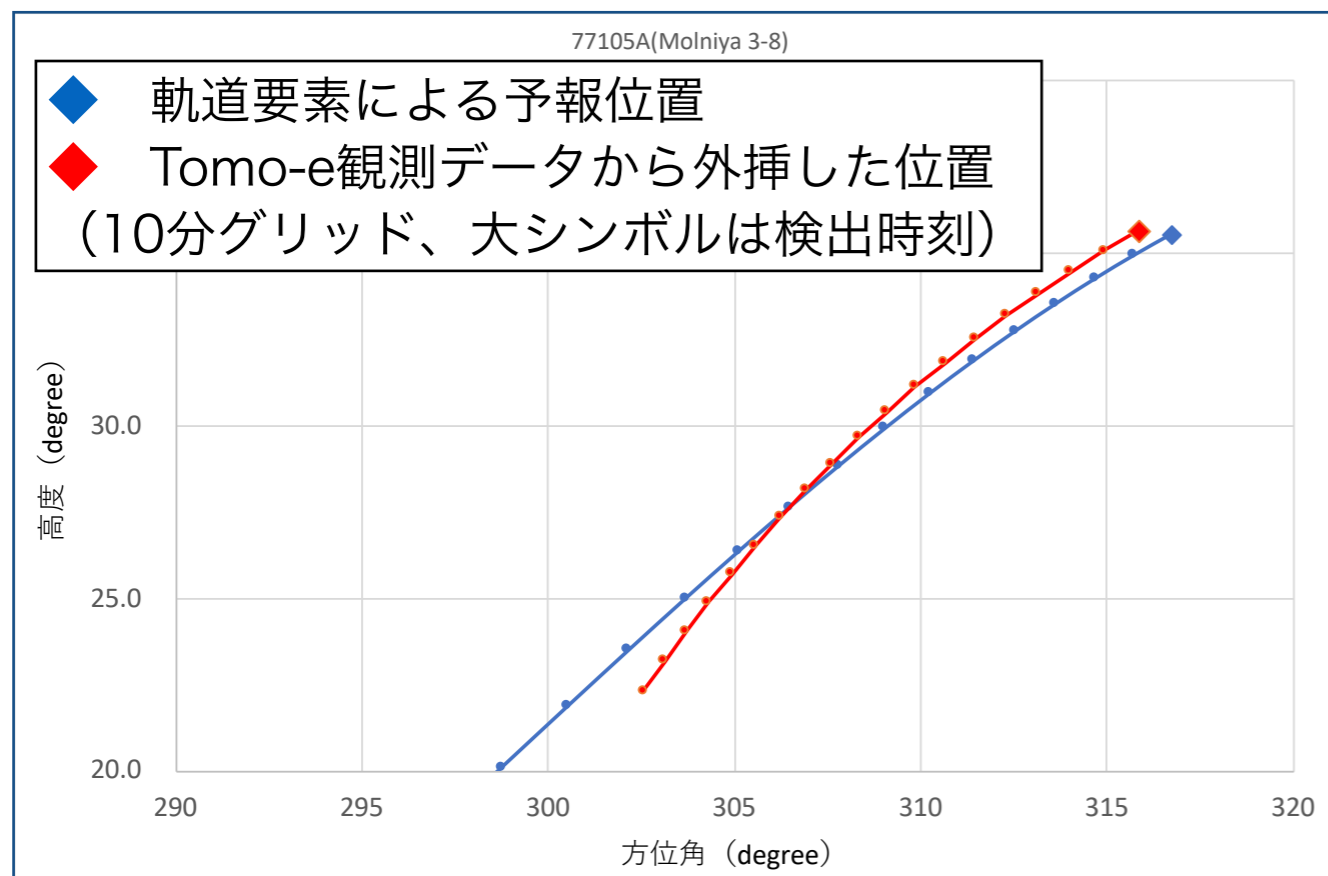
美星スペースガードセンター
1m望遠鏡CCDカメラの視野



Tomo-eで検出後、120分以内であれば視野内に検出可能

軌道から求めた予報位置と 観測データから外挿した予測位置の比較

美星スペースガードセンター
1m望遠鏡CCDカメラの視野



Tomo-eで検出後、50分以内で
あれば視野内に検出可能

4. 美星スペースガードセンターでの追跡観測

- ・ 2018年度
 - 2019FA(TMG0002)、重ね合わせ+豪州設置望遠鏡により発見されたNEOの追跡観測など実施
- ・ 2019年度, 2020年度
 - 1 m望遠鏡の改修 (JAXA, 2019年8月~2021年6月)
 - 別の望遠鏡でTMG0010,12,18などの追跡観測実施
- ・ 2021年度
 - 1 m望遠鏡でTMG0055他の追跡観測実施
 - Tomo-e Gozen+重ね合わせシステムにより検出した移動天体の即時追跡観測試験 (2021年9月-)
- ・ 2022年度
 - Tomo-e Gozen+重ね合わせにより検出した既知の人工天体について美星での追跡観測に成功 (2022年5月)

追跡観測試験の結果

- ・ 突発天体サーベイ観測データを使用し、即時解析・即時追跡
 - Tomoe84チップの半数(42チップ)に限定すれば
おおよそリアルタイムで解析可能
 - 作業領域(2TB)が 42チップ×3時間 でfullに
 - 多くの高速移動天体が検出できることを確認
(ただし紅山システムで見つからない暗いものは
今のところ数個程度(@42チップ×3時間))
 - 追跡観測で視野にとらえるためには検出後およそ
1時間以内の即時追跡観測が必要

今後の課題

- ・ 18枚セットを重ね合わせる様に改修予定
(現状は18枚ある場合でも12枚しか使用していない)
- ・ 作業領域の容量を4倍に増設
- ・ 候補天体リストから目的天体を効率的に抽出する機能が必要
(検出データの後処理)
- ・ 即時追跡観測の体制強化

まとめ

- ・ 移動天体の観測に有効な二つの技術要素
 - ✓ Tomo-e Gozenカメラ
 - ✓ 重ね合わせ法
- を組み合わせ、地球に接近して高速で移動するより暗い(より小さい)NEOを発見する
- ・ 上記目的のために重ね合わせシステムを木曾観測所に構築
- ・ 追跡観測試験実施、人工天体について追跡観測成功
- ・ 今後はデータの後処理システムなどを構築しながらNEOの新発見を目指す。
- ・ 微小NEO発見に特化した観測を希望
 - (突発天体サーベイデータでは重ねる枚数が少ないため)
 - 一晩に10-20個とか一週間に100個とか発見できるかも？