



T O M O - e
G O Z E N



Tomo-e Gozenと重ね合わせ法による 高速移動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（国立天文台）

吉川 真（JAXA）、吉田二美（産業医科大学）

紅山 仁（東京大学／コートダジュール天文台）

酒向重行、高橋英則（東京大学）

浦川聖太郎（日本スペースガード協会）

阿部新助（日本大学）

内容

- 地球接近天体(NEO)観測の概要
- 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：計画の進捗
- 現状と今後のアップデートなど

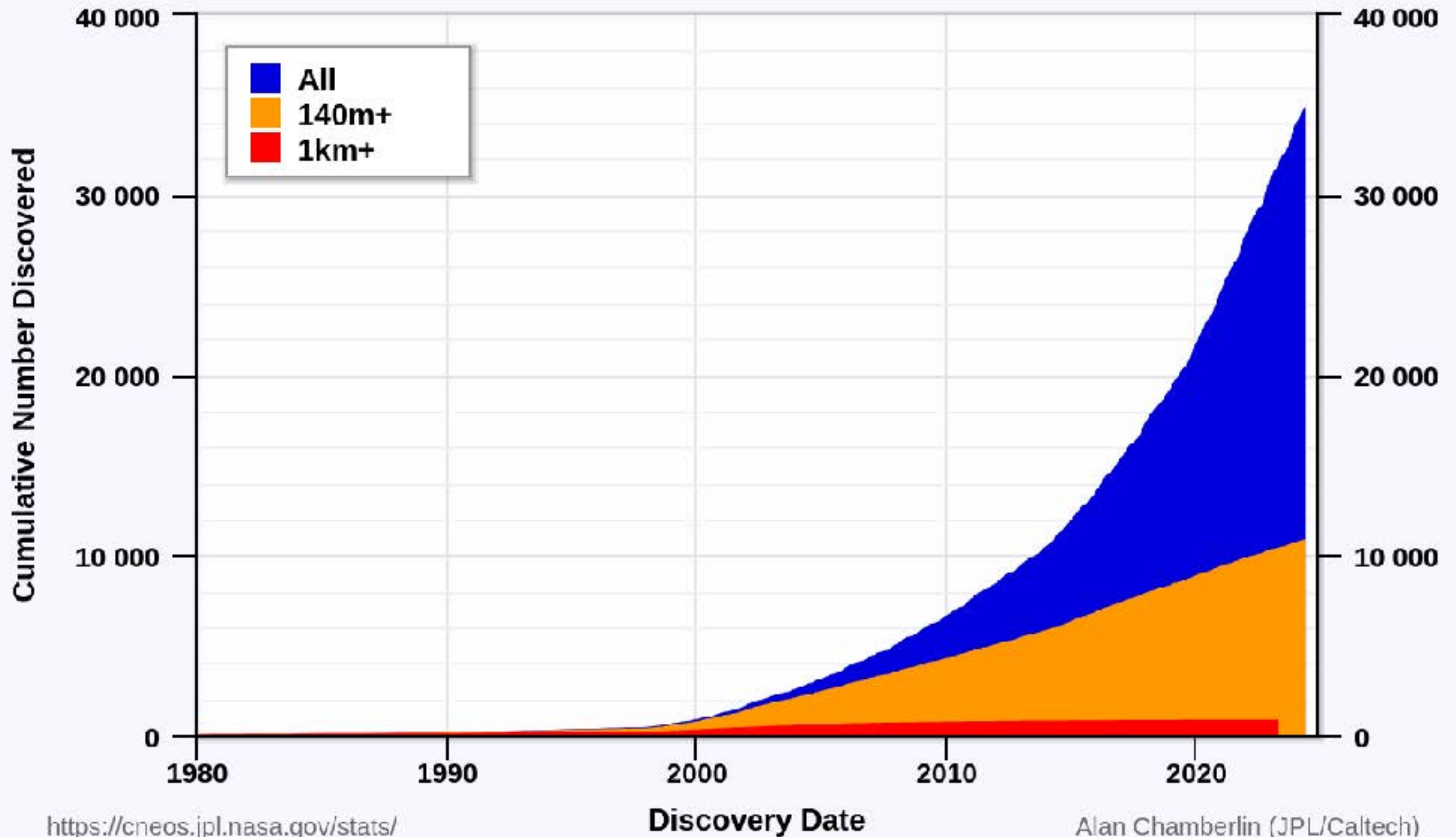
地球接近天体(NEO)観測の概要

NEOについて

- ・ NEO = Near Earth Object
- ・ まれに彗星(Comet)もある(120個程度)が、
ほとんどは小惑星
(地球接近天体 $\cong$ 地球接近小惑星Near Earth Asteroid)
- ・ 2024年5月現在、約35,000個が発見されている

Near-Earth Asteroids Discovered

Most recent discovery: 2024-May-09





チェリャビンスク

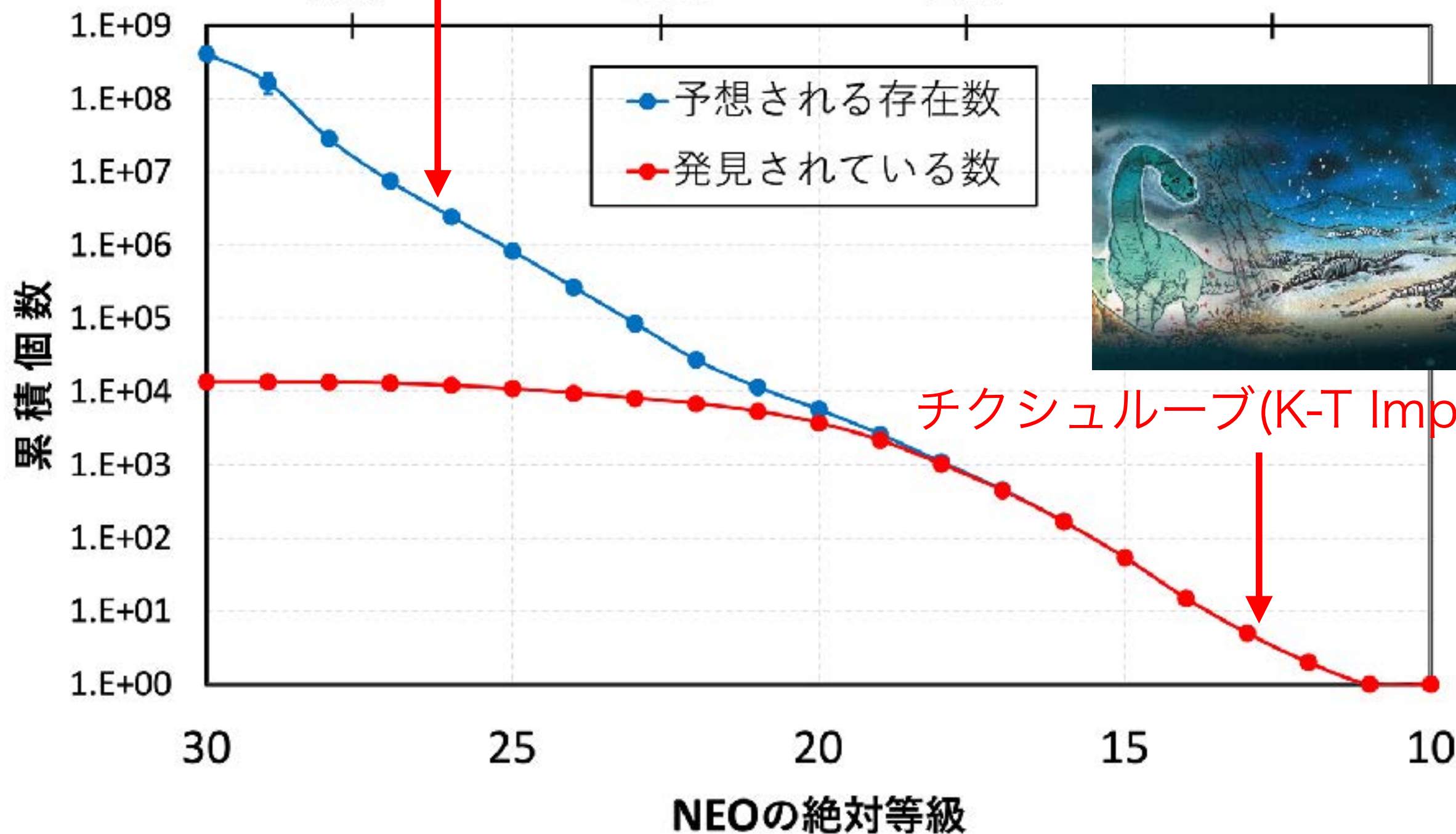
NEOの直径

10m

100m

1km

10km



移動天体の観測とトレイルロス

小さい地球接近天体は なぜ発見が難しいのか??

- 天体が小さい→地球に近づかないと検出できる明るさにならない
…近づけば近づくほど、明るくなるが見かけの移動速度が大きくなる。
- 見かけの移動速度が大きいと
…露出中に天体が素子間を移動してしまい、星像が伸びて写りにくくなる。（トレイルロス）

同じ明るさでも…



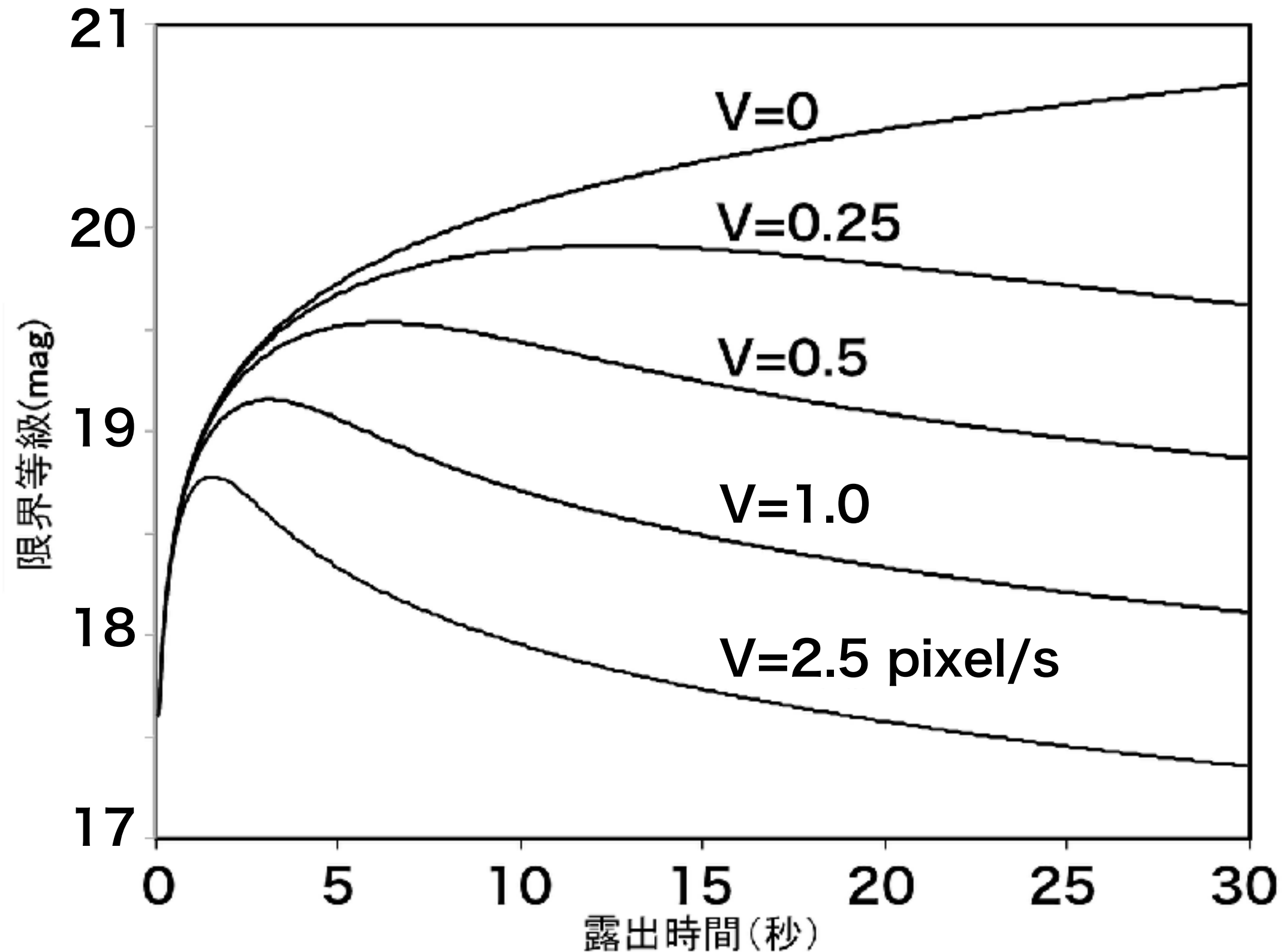
よく写る



写りにくい



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

Tomo-e Gozen カメラによるNEOの発見

- ・ 2018年度
 - Tomo-e Gozenの開発（21チップ→63チップ）
 - Tomo-e Gozenによる初のNEO 2019 FA の発見（小島）
- ・ 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）
- ・ 2021年度
 - NEOを16個発見（紅山、大澤）（+3個追加（2024/5/7））
- ・ 2022年度
 - NEOを11個発見（紅山、和田）（+2個追加（2024/5/7））

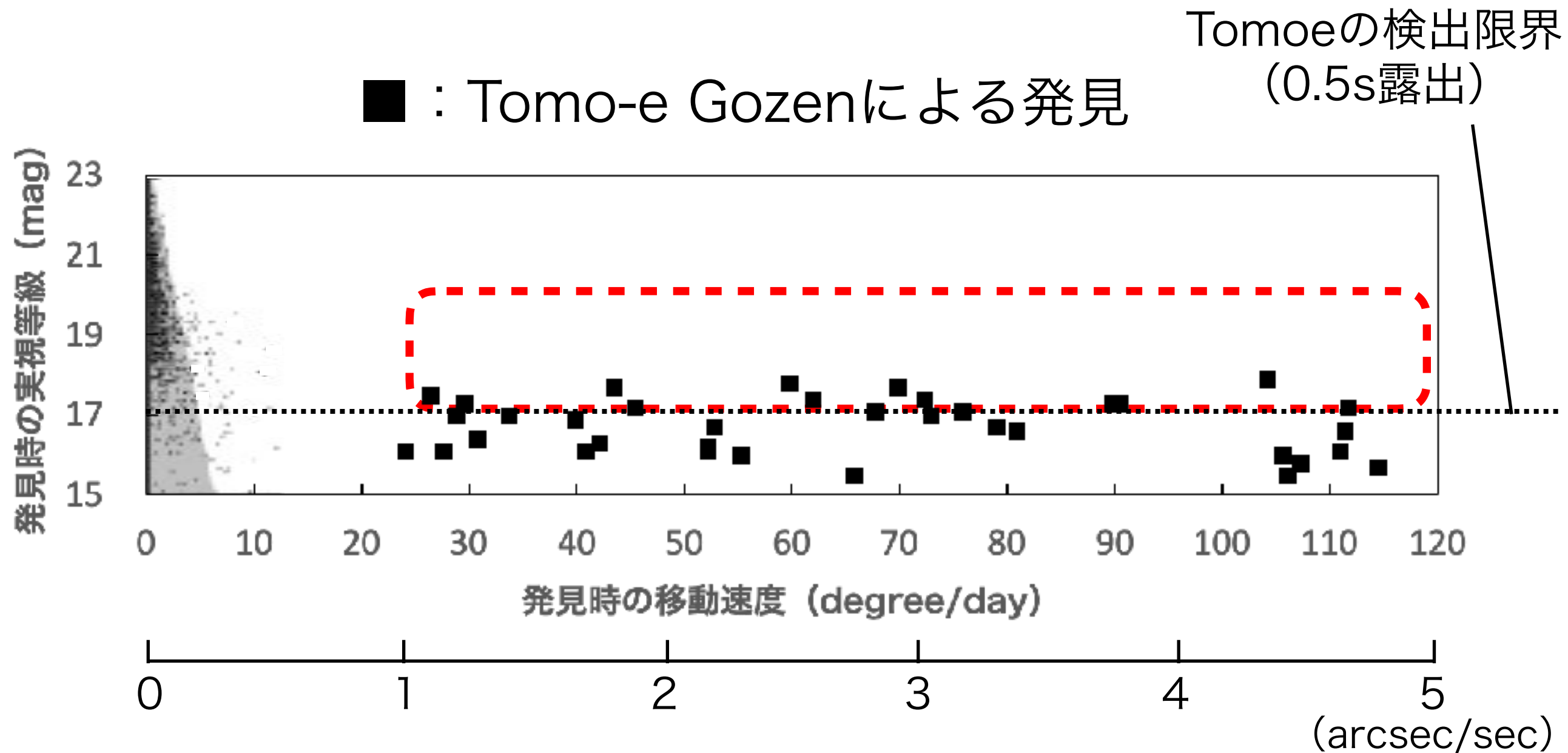
54個？

- 2019FAを皮切りに、これまでに~~49~~個の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 CD5 (TMG0040)	2021-04-08	17.4	2.58	27.2	11	0.90	0.22	26.00	18.02	71.88	87.02

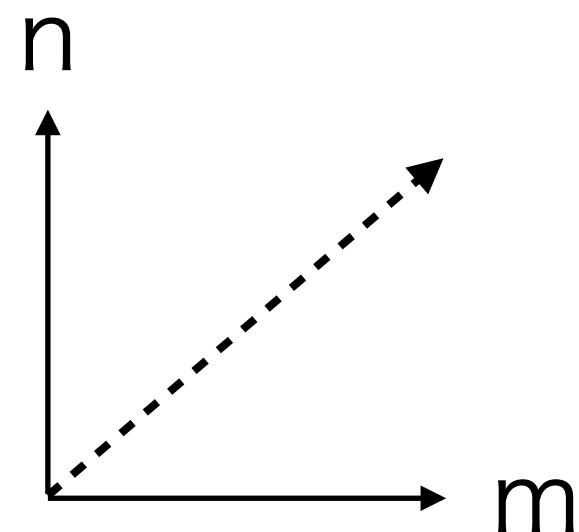
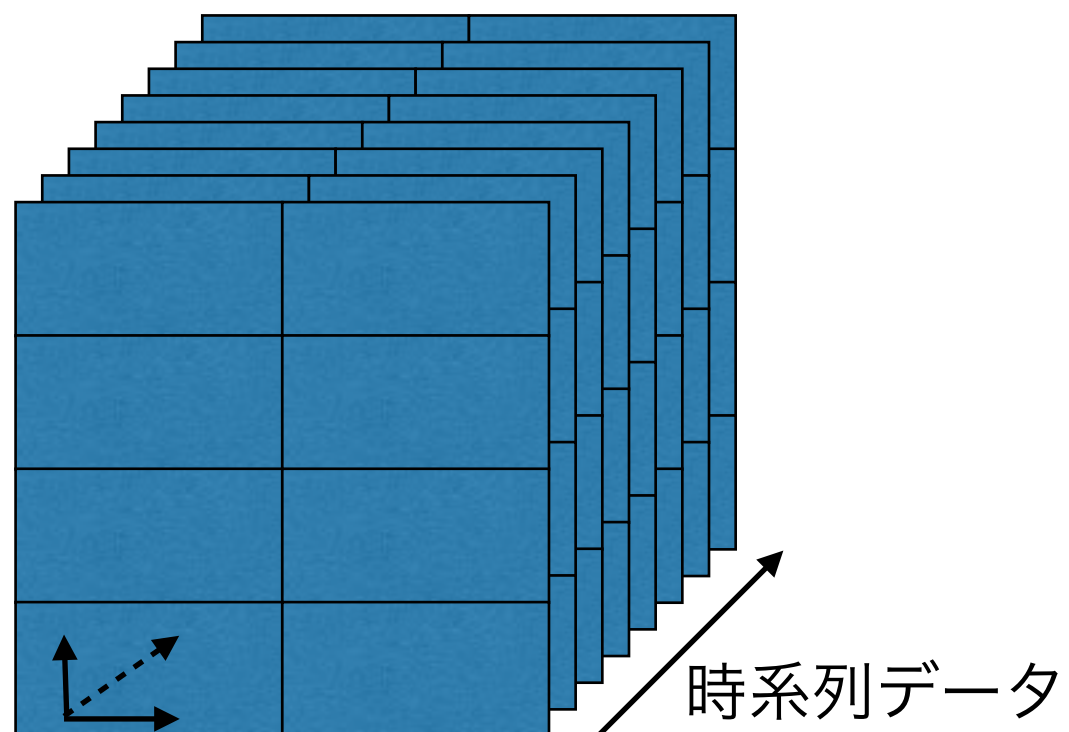
NEO発見時の移動速度



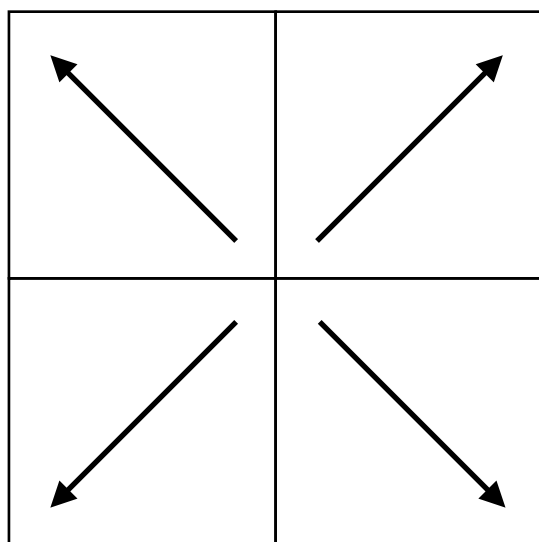
重ね合わせ法による 移動天体観測

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
- ・ 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

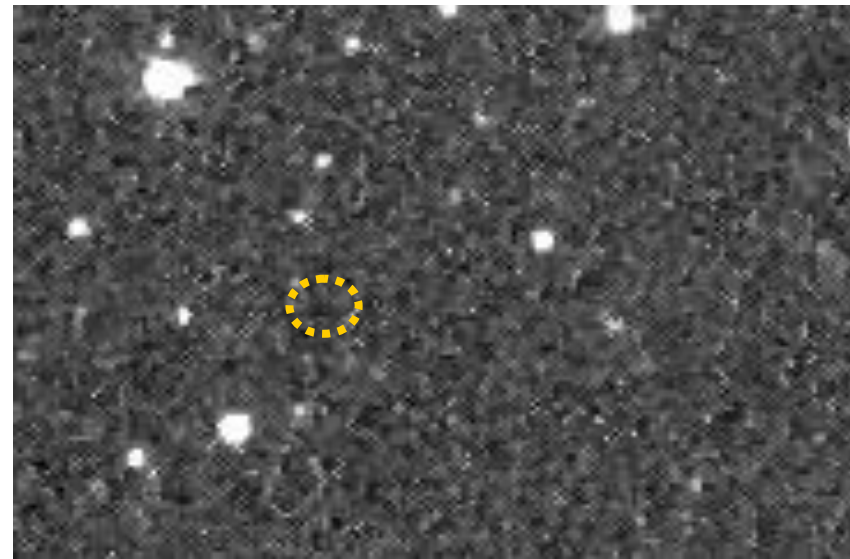


(m, n): m=0-255, n=0-255の
 $256 \times 256 = 65536$ 通り
 (m,nは縦方向・横方向の
 移動速度 (pix/frame))

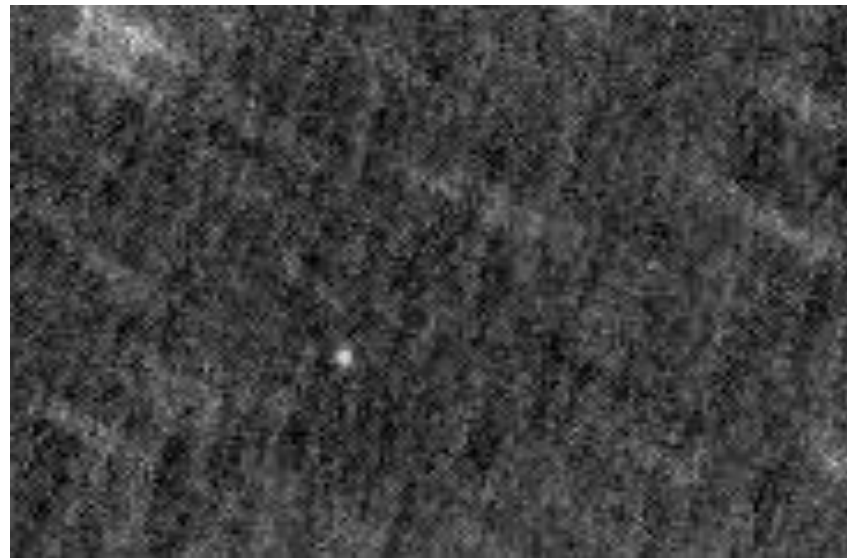


の4方向 $\times 65536 = 262144$ 通り

重ね合わせ法による高速移動天体の観測



(a)



(b)

図 2：重ね合わせ法で検出された小惑星

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。

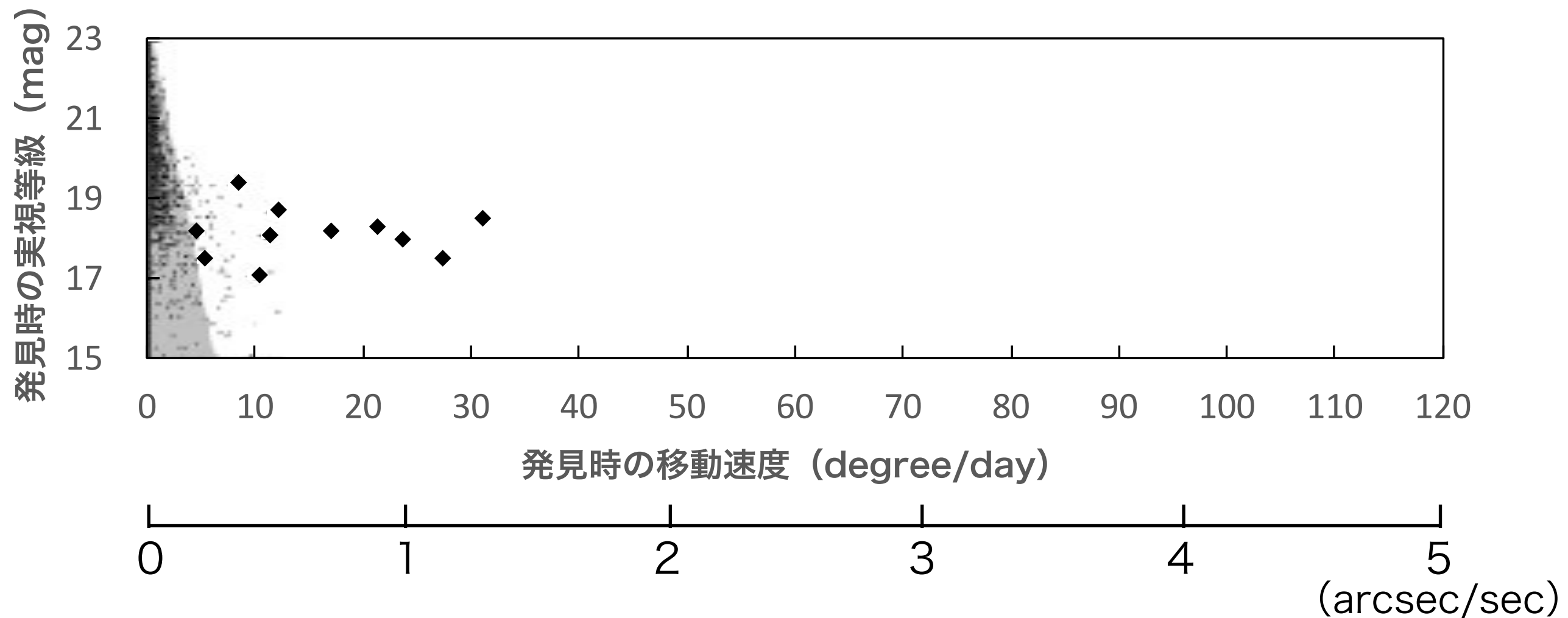
なお、本研究は国立天文台、日本スペースガード協会と共同で実施している科研費補助事業基盤研究(C)「極めて大きな視線速度をもつ近地球小天体の効率的検出方法の開発」（代表者 柳沢俊史）により行っています。

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

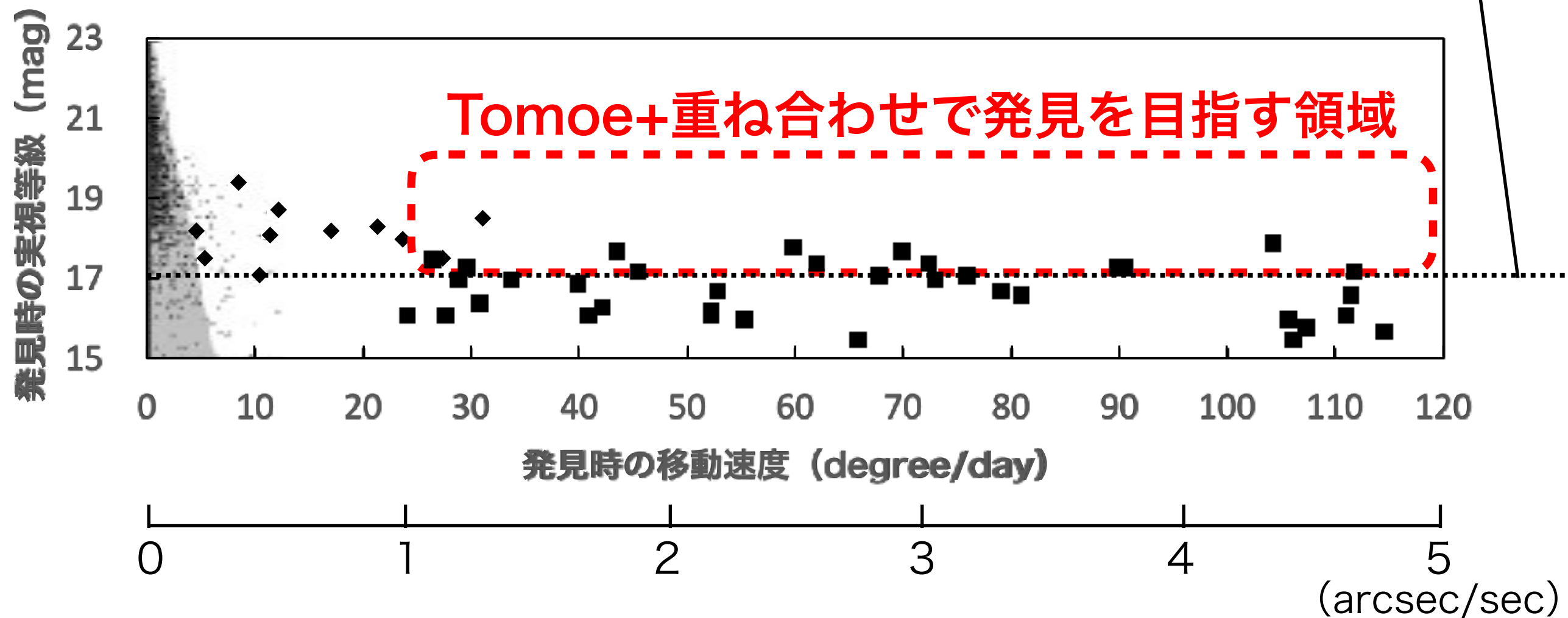
NEO発見時の移動速度

◆：重ね合わせ法による発見



NEO発見時の移動速度

- : Tomo-e Gozenによる発見 Tomoeの検出限界
◆ : 重ね合わせ法による発見 (0.5s露出)



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：計画の進捗

Tomo-e カメラ＋重ね合わせ 計画の進捗

1. 重ね合わせ法の開発・改修・インストール
2. Tomo-e Gozen 動画データの転送・処理システム
3. 美星スペースガードセンターでの追跡観測
4. 試験観測の結果
5. 現状と今後のアップデート

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を木曽に導入
- ・ 2020年度
 - 重ね合わせシステムを木曽観測所PCの導入 (2021年3月)

2. Tomo-e Gozen 動画データの 転送・処理システム



3. 美星スペースガードセンターでの追跡観測

NEO候補天体：即時に追跡観測を実施、位置観測データを追加で取得しないと見失ってしまう

即時追跡観測：美星スペースガードセンターの望遠鏡で実施

2点のデータから
軌道を推測

位置誤差が
時間と共に増大

Tomo-e 突発天体Surveyの
12/18枚動画を利用



美星スペースガードセンター ©JAXA

©東京大学木曾観測所

3. 美星スペースガードセンターでの追跡観測

これまでの実績

- ・ 2018年度
 - 2019FAの追跡観測、豪州に設置の望遠鏡で重ね合わせにより発見したNEOの追跡観測など実施
- ・ 2019年度, 2020年度
 - TMG0010,12,18などの追跡観測実施
- ・ 2021年度
 - 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)

4. 試験観測の結果

- ・ 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(8TB)は 84チップ×6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・和田システムで見つからない暗いものは
一晩で数個程度)
 - 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。
 - 追跡観測で視野にとらえるためには検出後おおよそ
1時間以内の即時追跡観測が必要

5. 現状と今後のアップデートなど

- ・ 重ね合わせ用PCの換装
（昨年度にGPUマシンを購入、現在セッティング中）
→ 全象限（84チップ）データのリアルタイム解析が可能に
- ・ 一次処理PCの修理
- ・ Tomoeによる流星群の観測データ（from 阿部新助さん）を使った解析

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
- ・ データの後処理（候補から必要な物体のみを選び出す）
が今後の課題
- ・ 重ね合わせ用PCのアップデートを予定