



T O M O · E
G O Z E N

Tomo-e Gozenと重ね合わせ法による NEO観測の進捗

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）

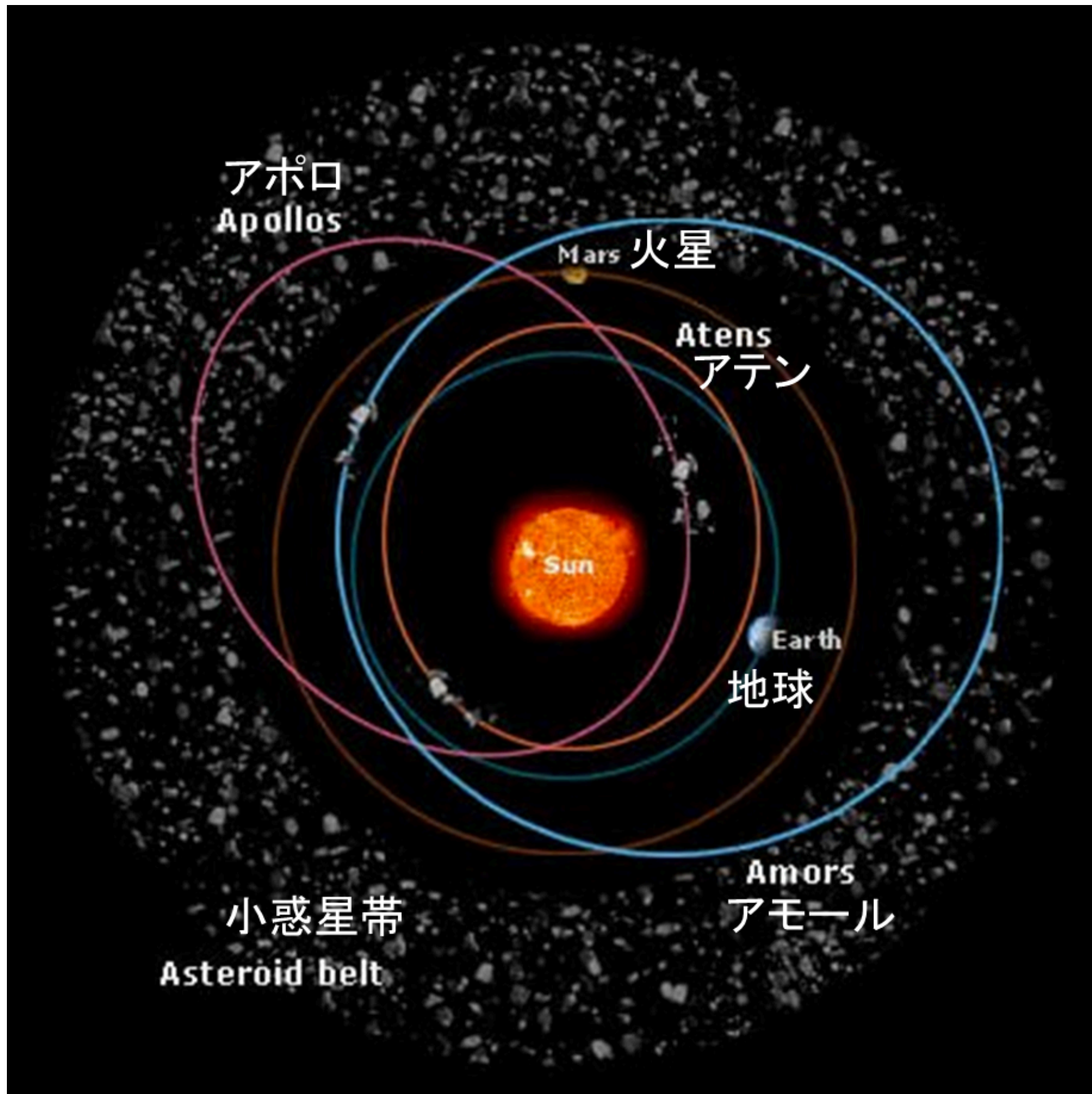
内容

- NEOについて
- 移動天体の観測とトレイルロス
- 重ね合わせ法による移動天体観測
- Tomo-e Gozenカメラ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+重ね合わせ法 計画の進捗
- まとめ（と野望）

NEOについて

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

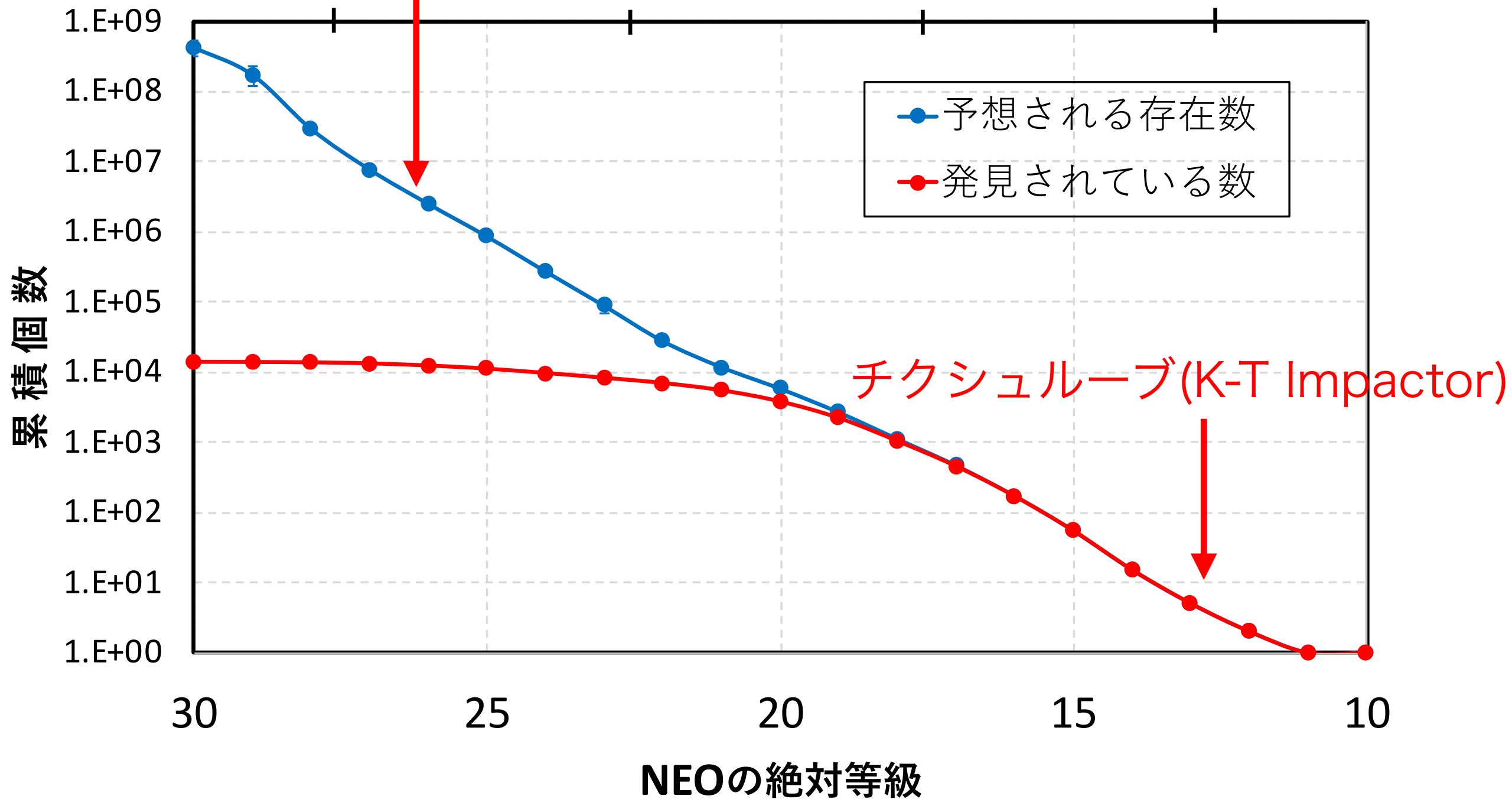
NEOの直径

10m

100m

1km

10km



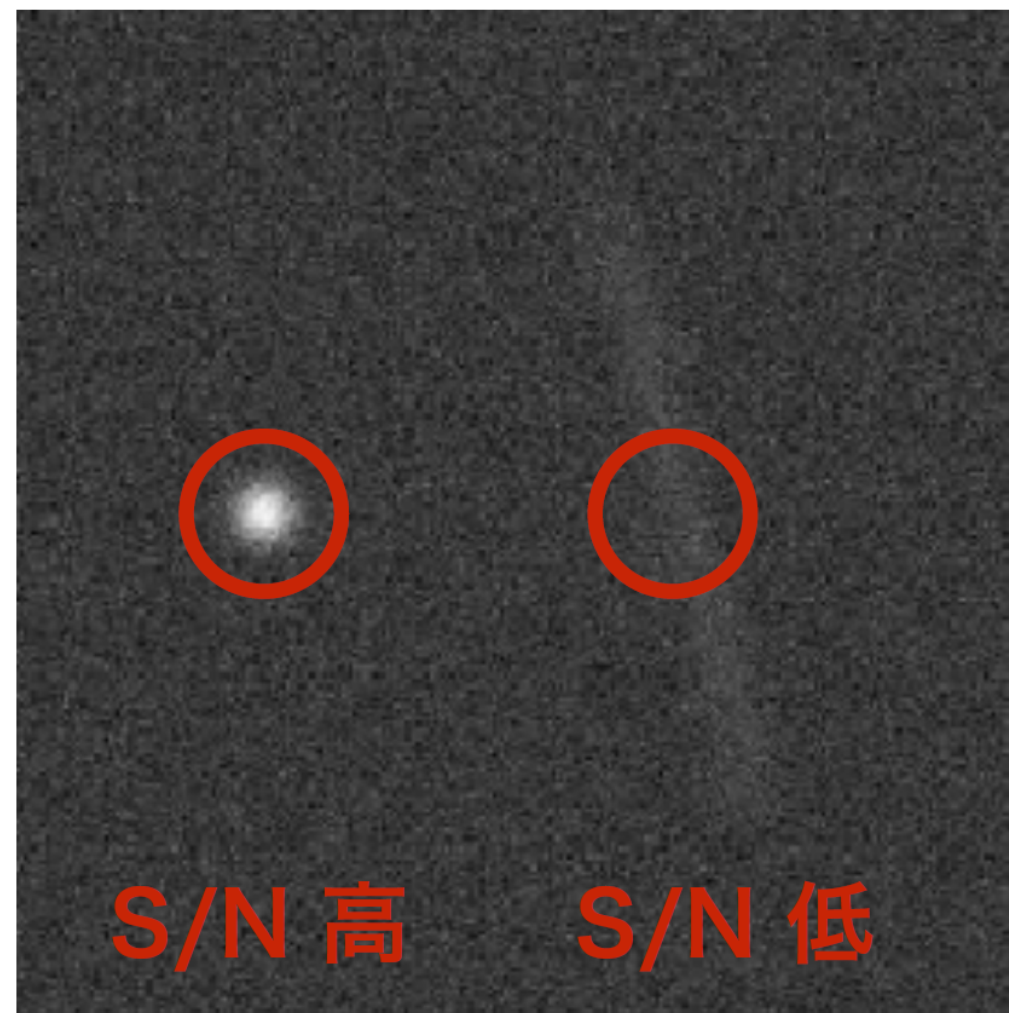
移動天体とトレイルロス

サイズの小さいNEO

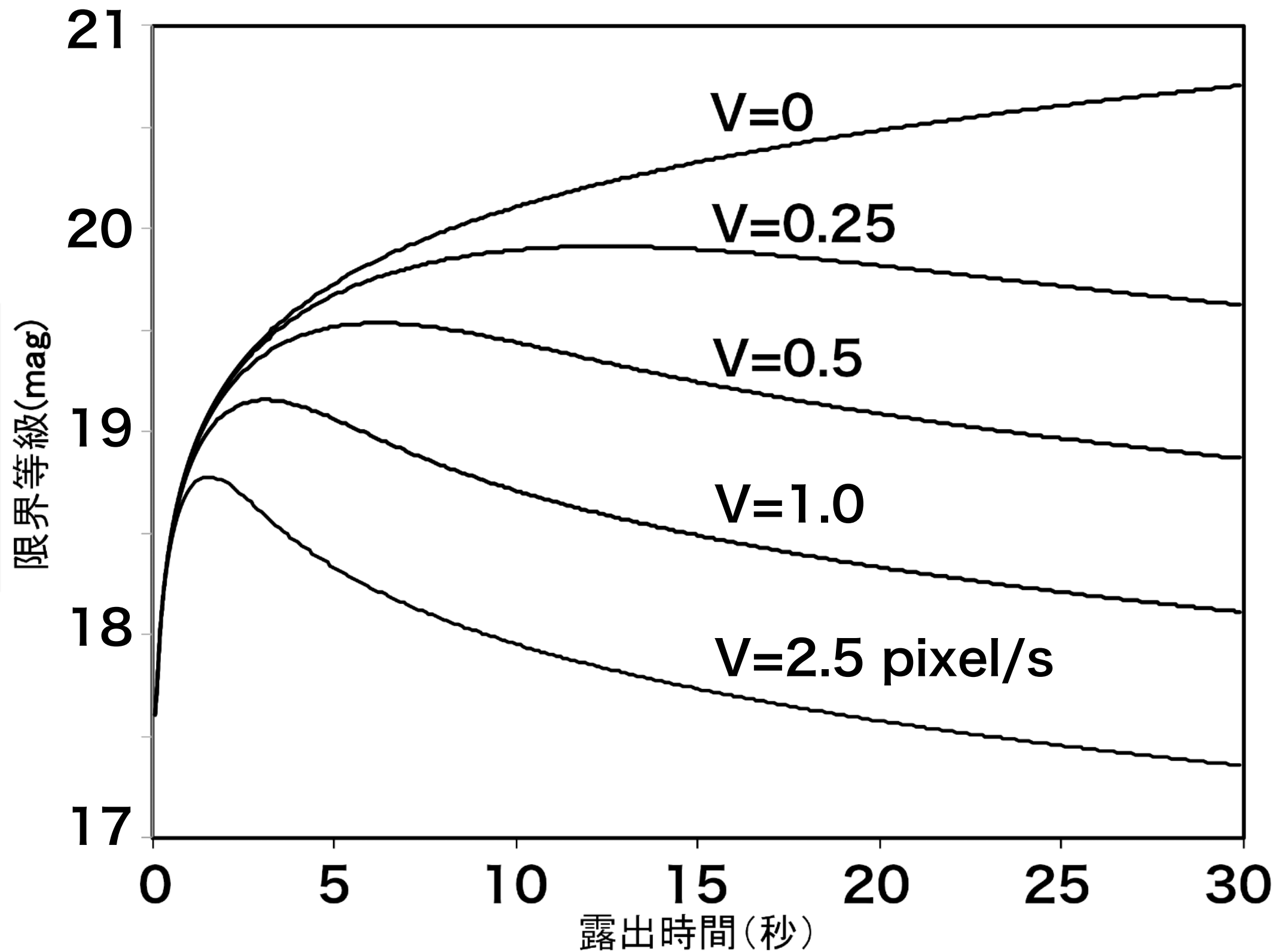
- ・ 小さい → 暗い
- ・ 地球に近づかないと検出不可
- ・ 地球に近づくと → 見かけの移動速度：大

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)



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

重ね合わせ法による高速移動天体の観測

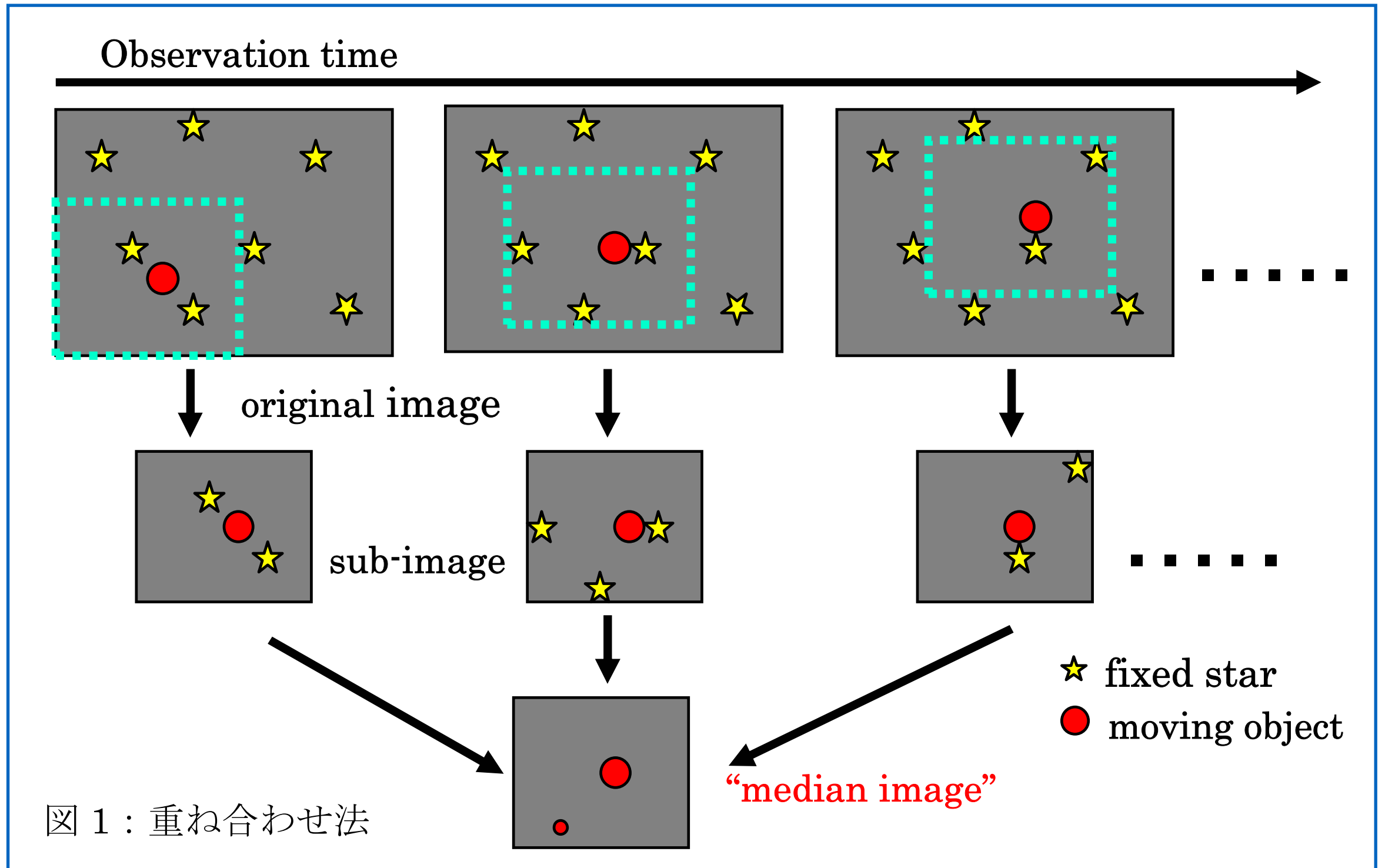
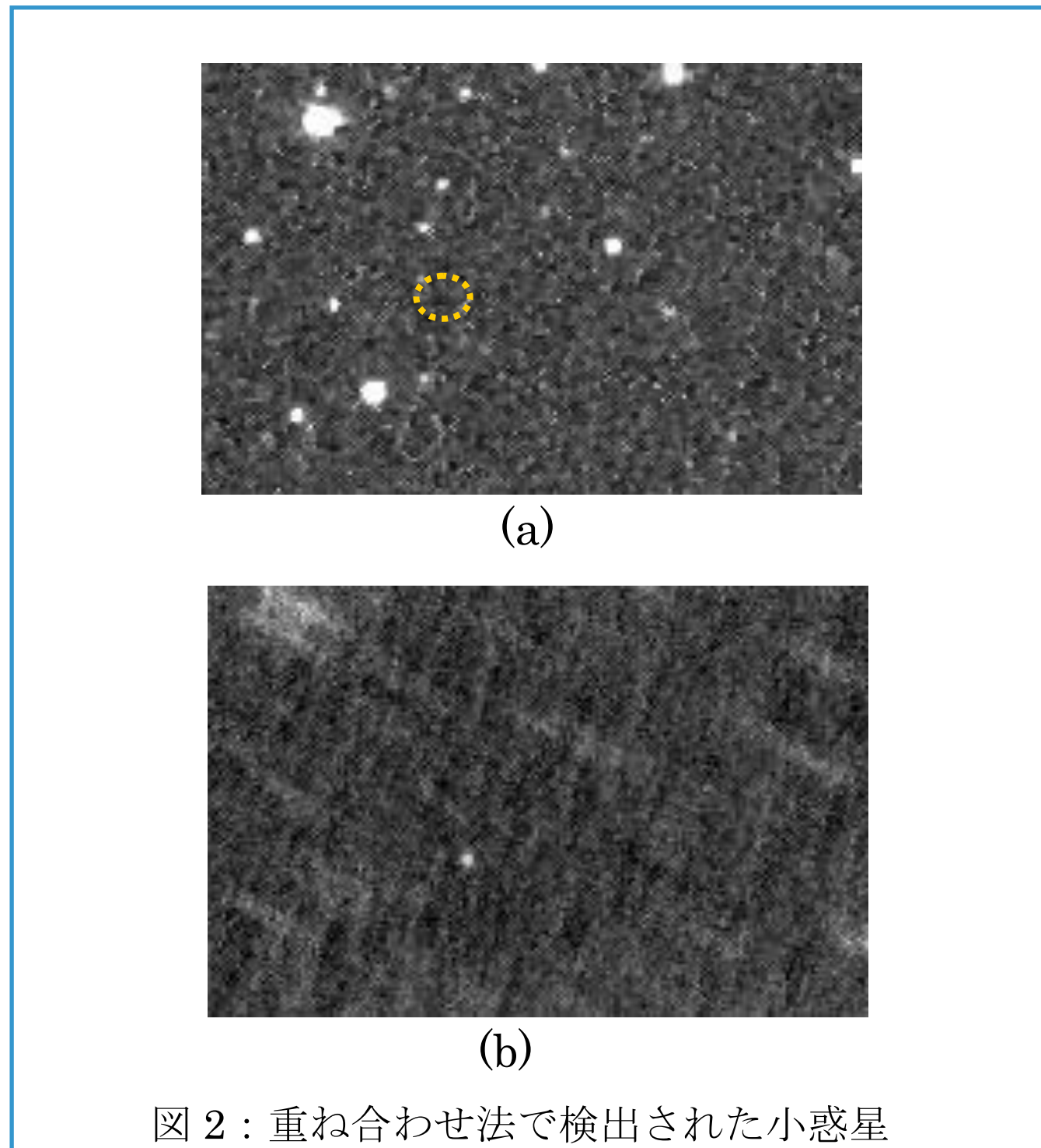
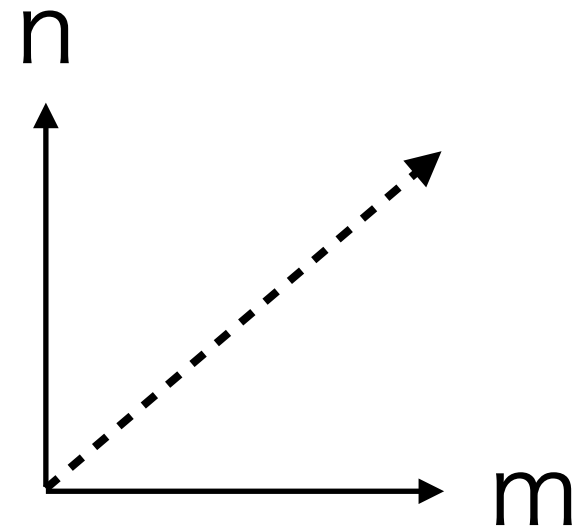
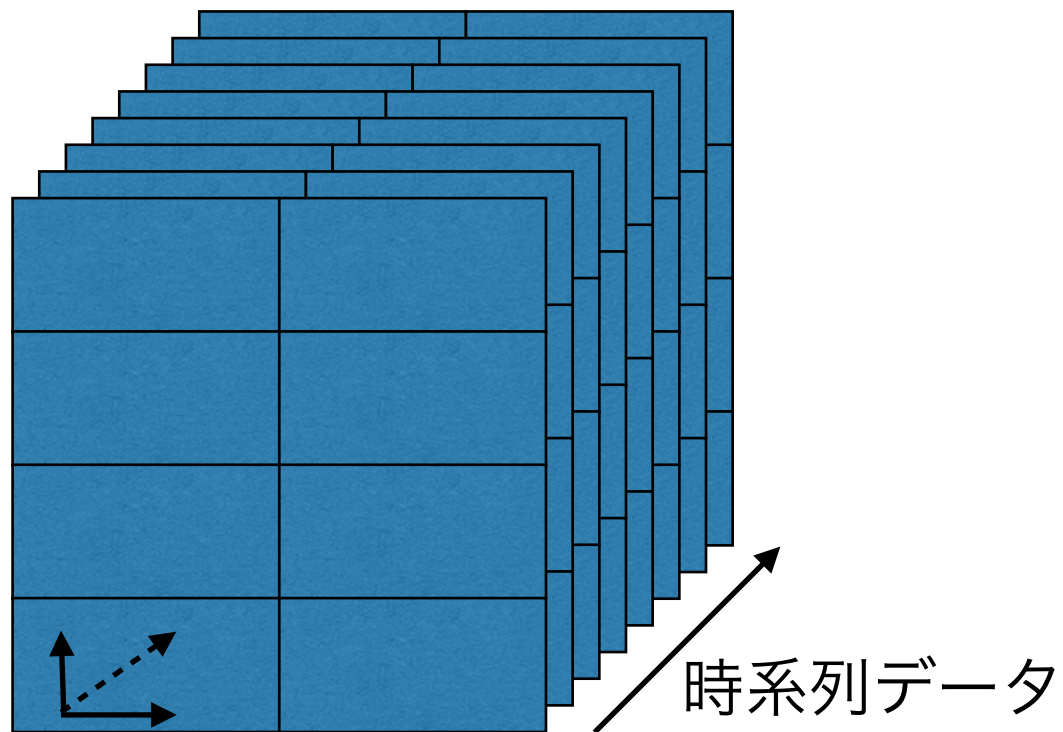


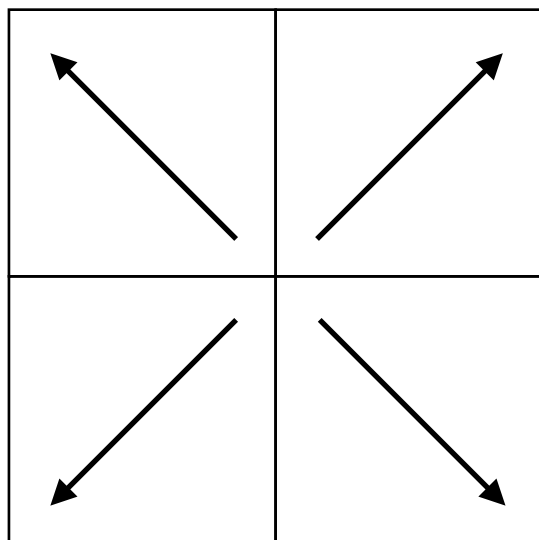
図 1 : 重ね合わせ法

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

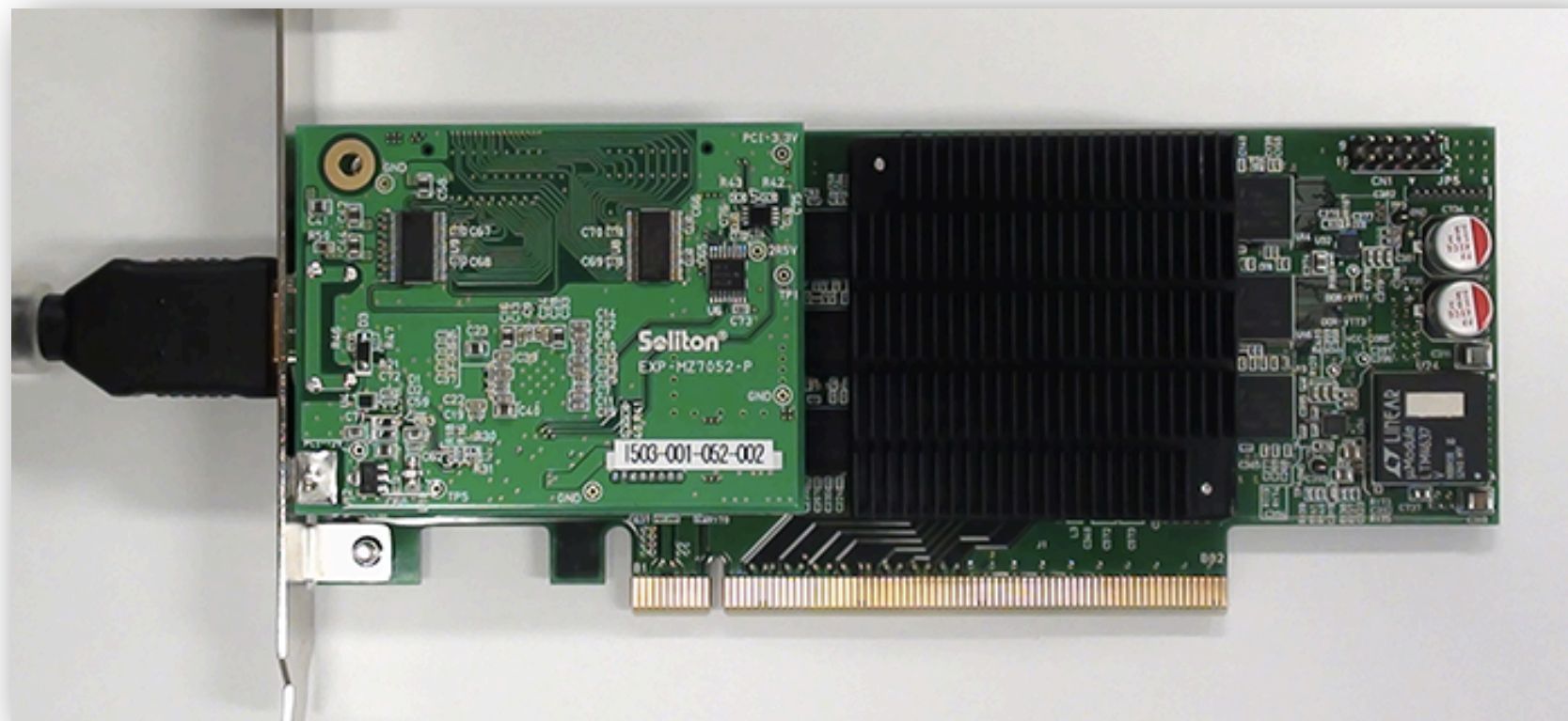
FPGA (field-programmable gate array)

- ・ FPGAって何？

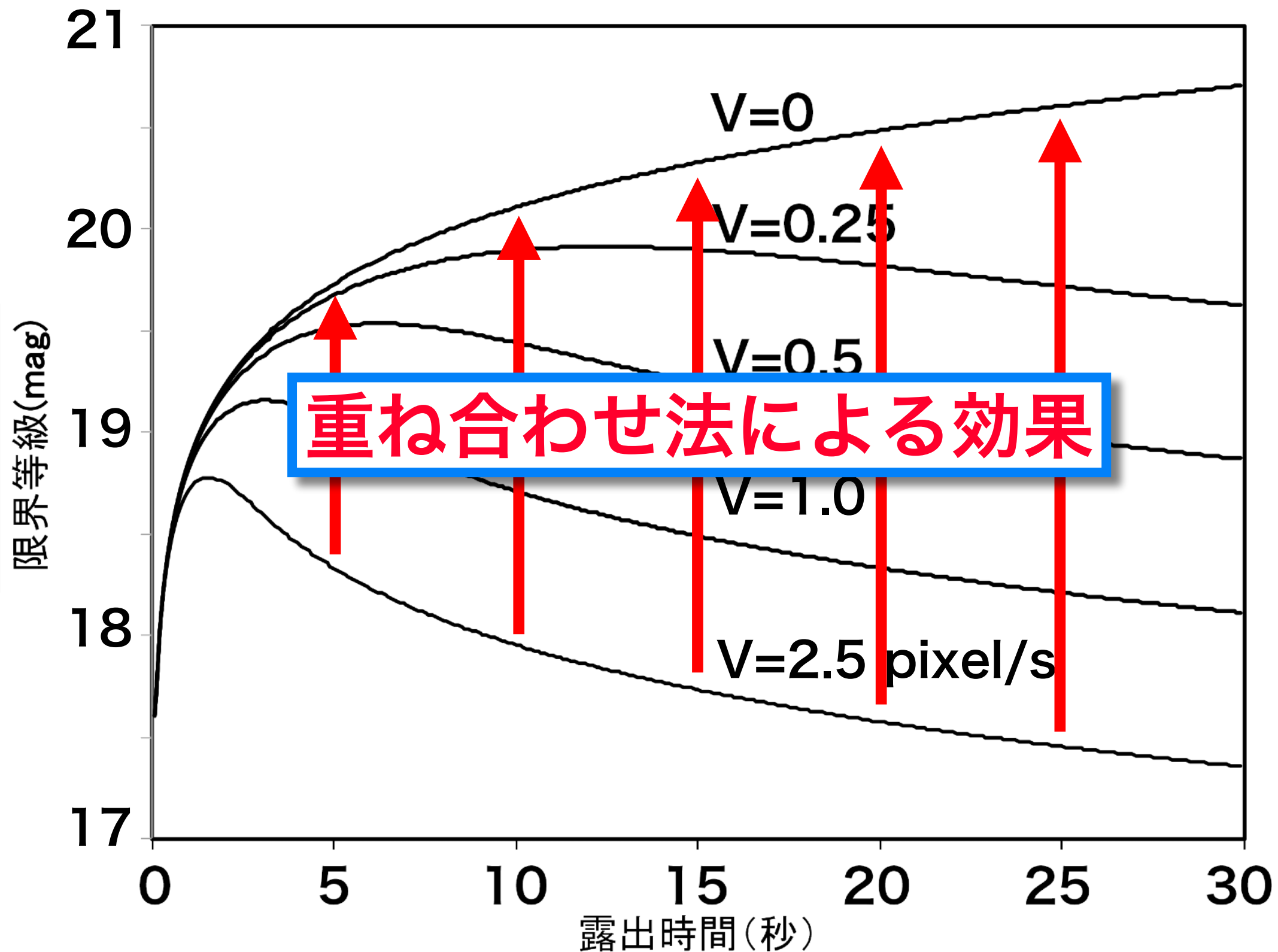
直訳すると

「現場で書き換え可能な論理回路の多数配列。」

「ハードウェア言語を使ったプログラミングによって書き換えのできる論理回路。」



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。

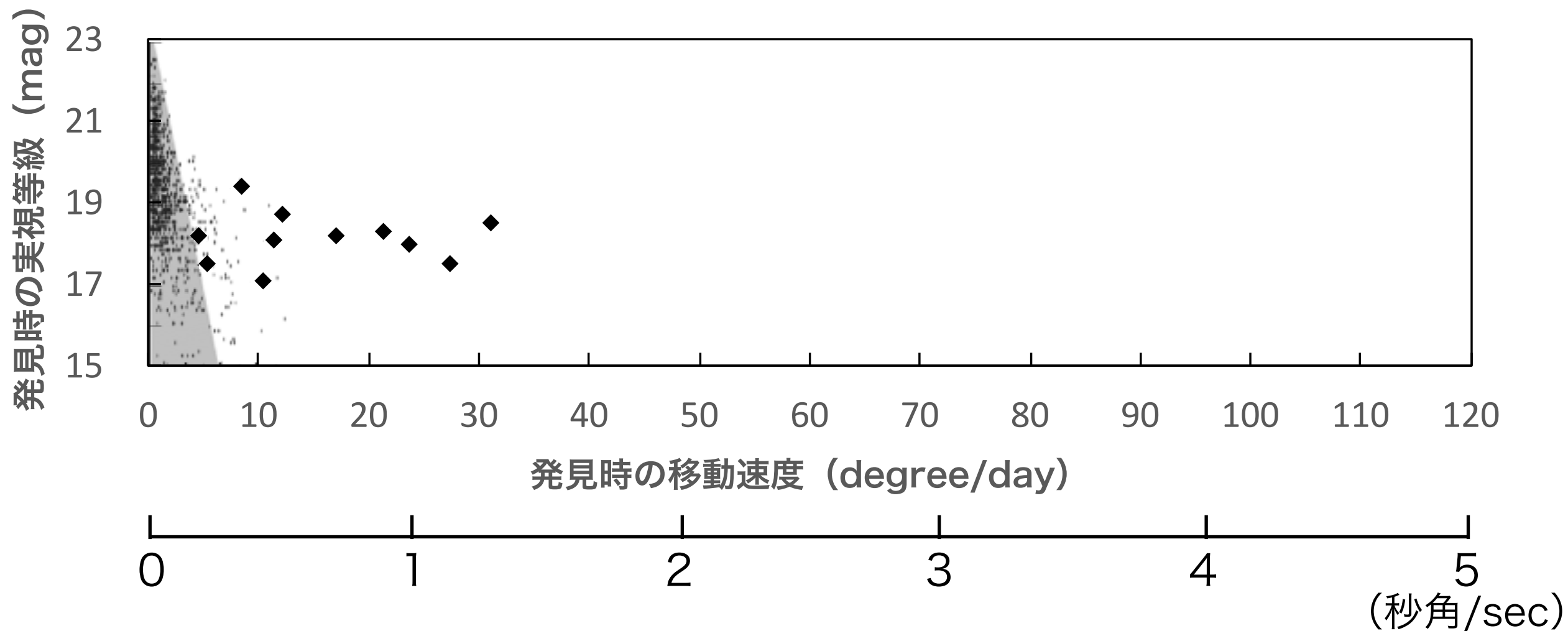
なお、本研究は国立天文台、日本スペースガード協会と共同で実施している科研費補助事業基盤研究(C)「極めて大きな視線速度をもつ近地球小天体の効率的検出方法の開発」（代表者 柳沢俊史）により行っています。

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



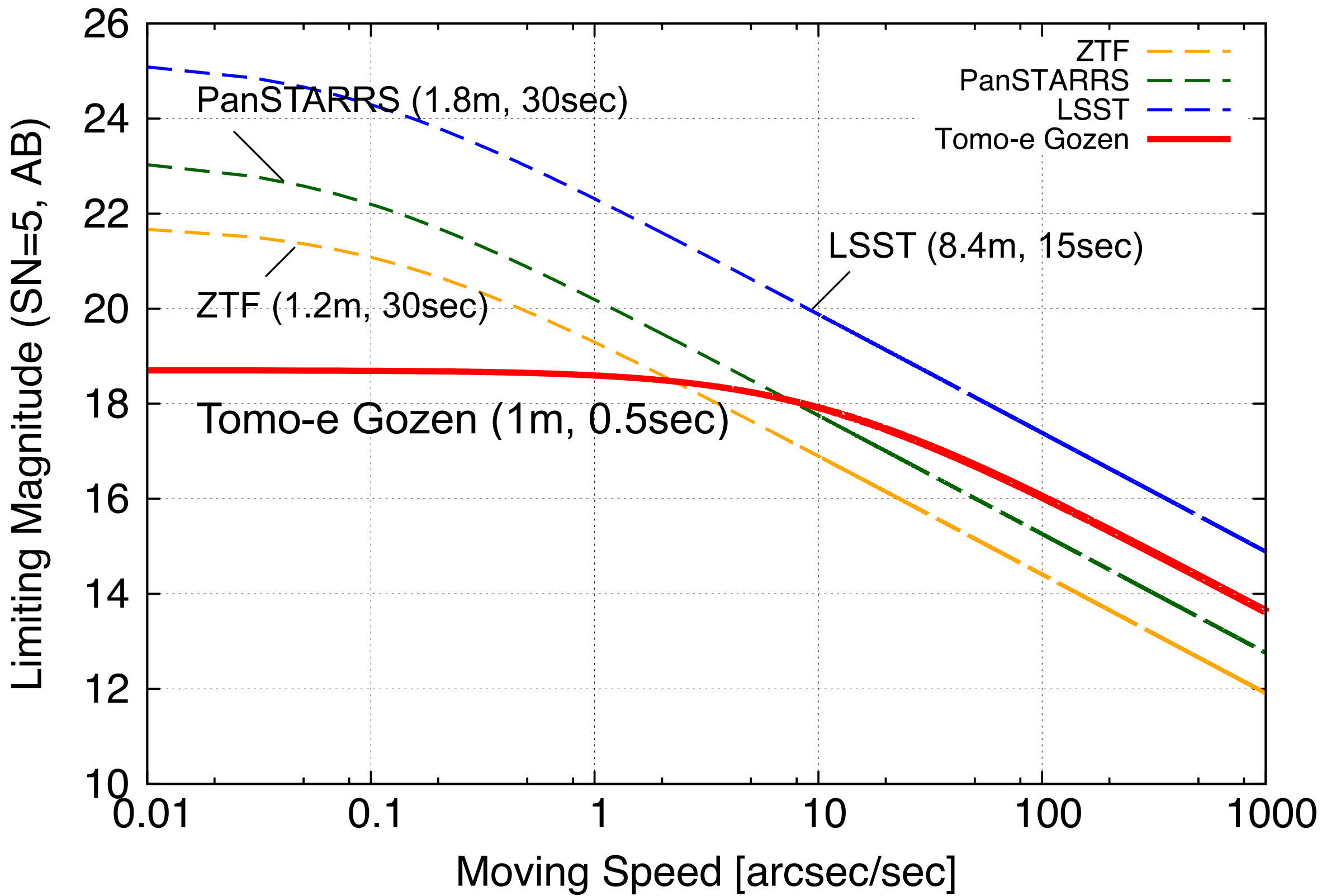
Tomo-e Gozenカメラによる 移動天体観測

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



移動天体に対する感度 (小島氏作成)

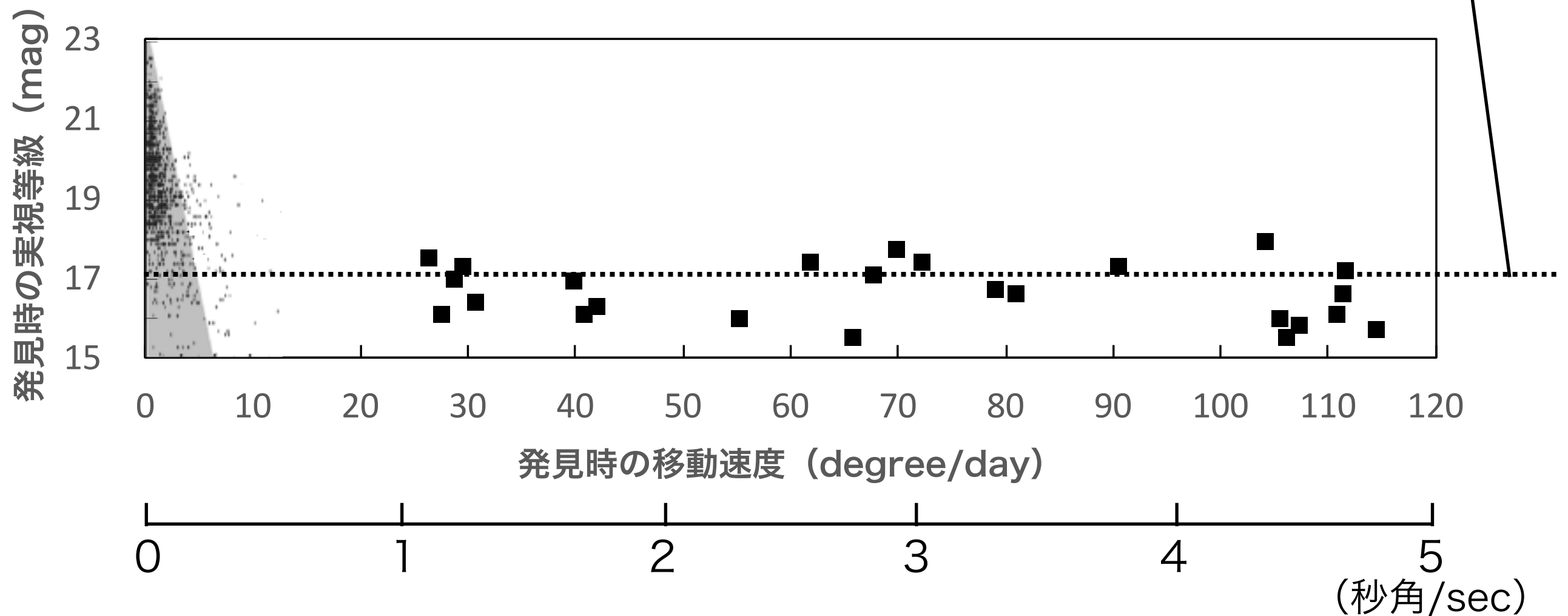
- 2019FAを皮切りに、これまでに28個の微小NEOを発見。

Num.	Object	Discovery Date (UTC)	Ap. mag. (mag)	Velocity (arcsec/s)	H (mag)	D (m)	a (au)	e	i (degree)
1	2019 FA (TMG0002)	2019-03-16	16.0	2.30	28.7	6	1.34	0.30	1.10
2	2019 SU10 (TMG0005)	2019-09-25	16.9	1.66	27.2	12	2.57	0.61	16.34
3	2019 VD3 (TMG0010)	2019-11-05	16.3	1.75	25.9	21	2.45	0.60	1.68
4	2019 XM2 (TMG0013)	2019-12-05	16.6	4.64	26.6	16	1.20	0.19	32.80
5	2019 XT2 (TMG0014)	2019-12-08	16.1	4.62	26.4	17	0.93	0.16	13.47
6	2019 XL3 (TMG0016)	2019-12-15	15.8	4.47	27.0	13	0.87	0.14	23.64
7	2020 EO (TMG0018)	2020-03-12	16.4	1.28	25.9	21	1.30	0.25	7.07
8	2020 FA2 (TMG0019)	2020-03-18	17.0	1.20	27.5	10	1.22	0.22	11.05
9	2020 GY1 (TMG0021)	2020-04-05	13.3	2.79	26.6	16	1.28	0.41	5.97
10	2020 HU3 (TMG0022)	2020-04-21	17.3	1.23	26.0	21	1.43	0.30	24.13
11	2020 HT7 (TMG0023)	2020-04-27	16.1	1.15	26.9	14	1.29	0.22	4.95
12	2020 PW2	2020-08-14	17.7	2.01	28.8	6	1.48	0.27	13.08

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)



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

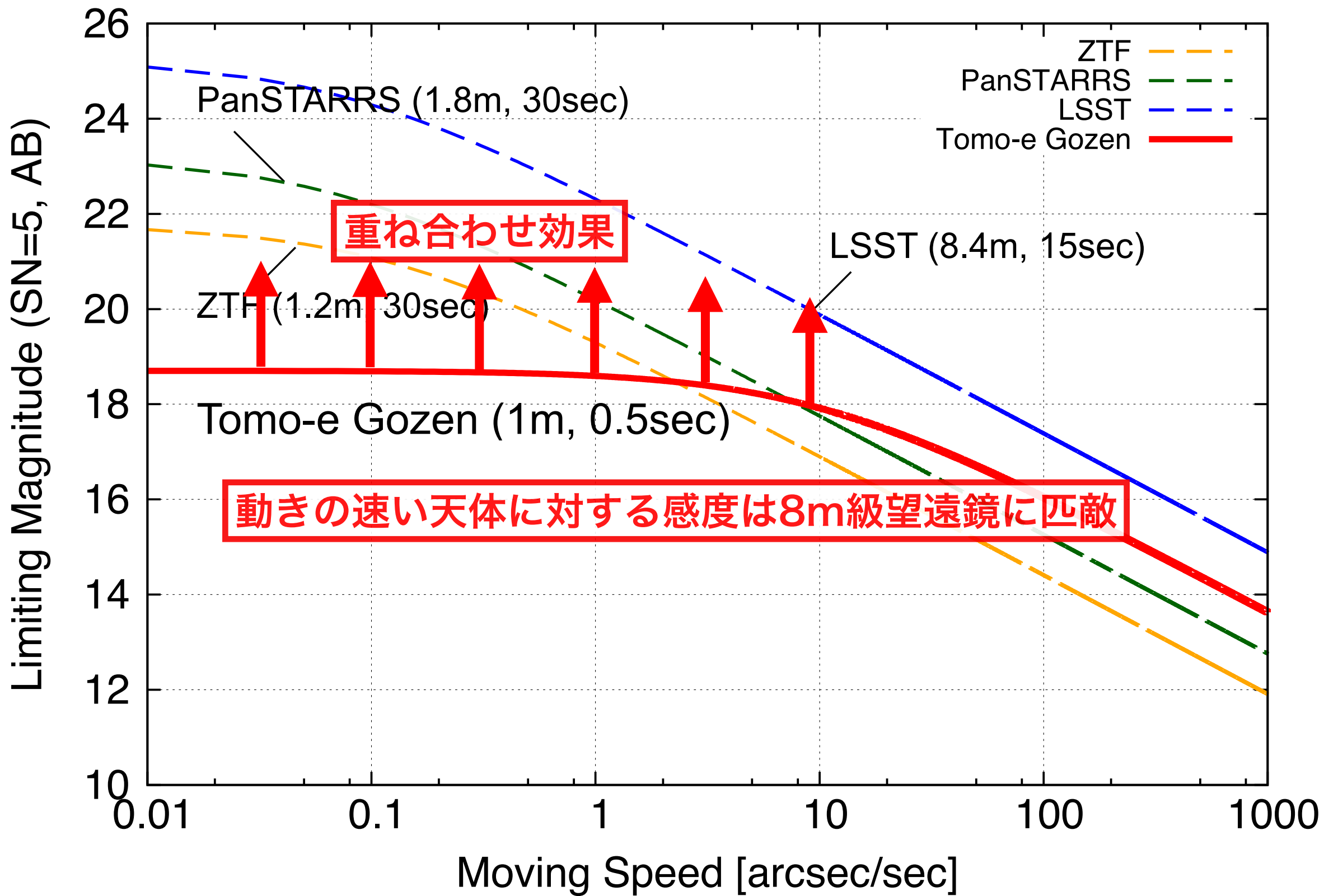
Tomo-e カメラと重ね合わせ法の組み合わせによる高速移動NEOの観測

- ・ 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カメラと重ね合わせ法の組み合わせにより移動天体に対して非常に高いパフォーマンスを発揮

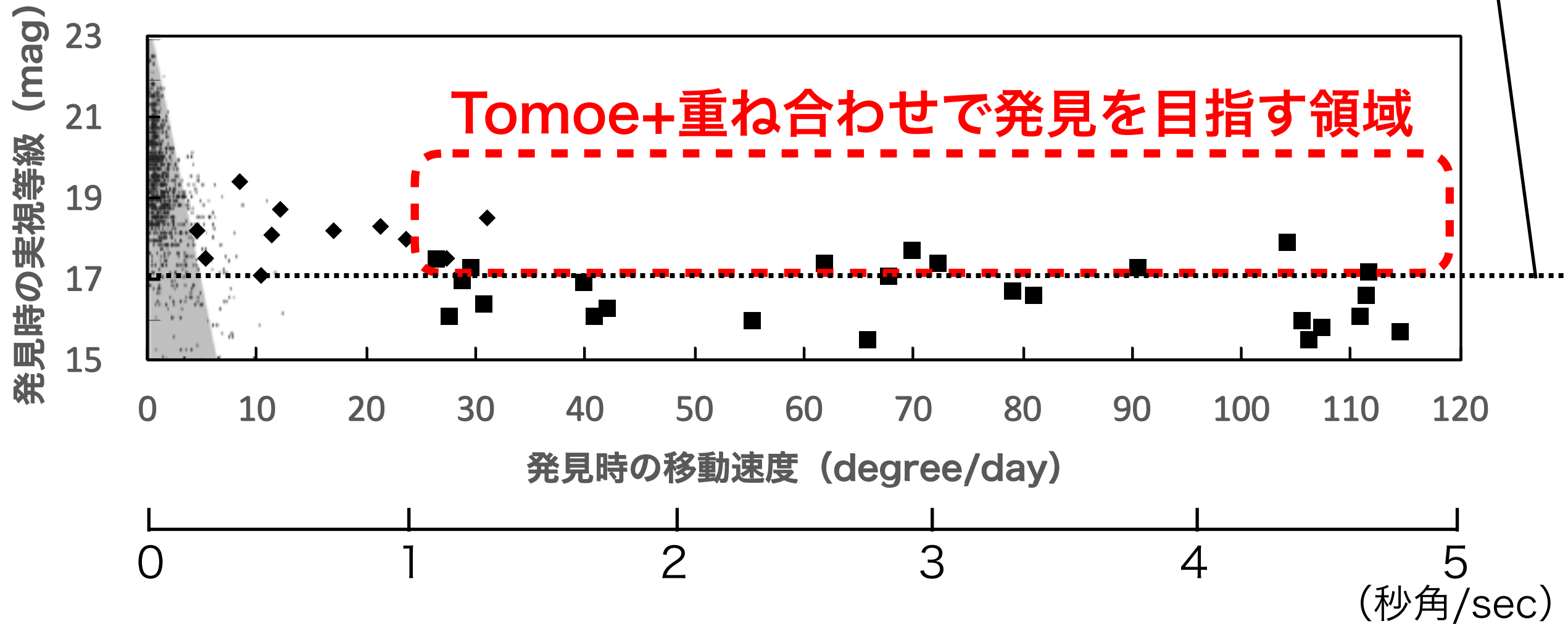


移動天体に対する感度 (小島氏作成のグラフを改変)

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)



計画の進捗

計画の進捗

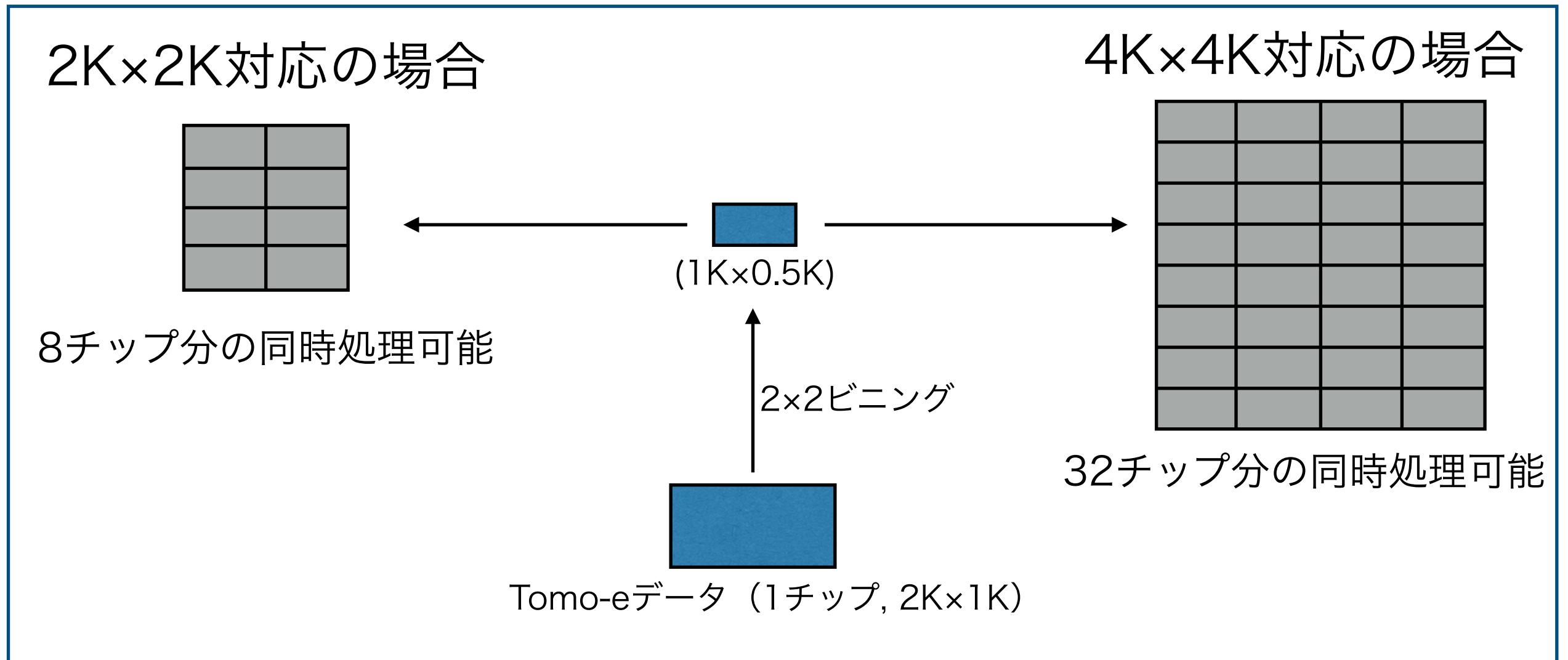
- ・ 2018年度～2020年度の3年間
→ Covid-19の影響で1年延長、2021年度末まで
- ・ 2018年度
 - Tomo-eの開発、試験データ取得
 - 解析用FPGAシステムを
JAXA調布と美星スペースガードセンターに導入、
解析アルゴリズムの開発・最適化
 - Tomo-e Gozenによる初の地球接近小惑星
2019 FA の発見

計画の進捗

- ・ 2019年度
 - Tomo-e Gozen 84チップ完成
 - 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)
 - 必要な計算機類を木曾観測所に導入
 - 重ね合わせシステムの木曾観測所への導入 →延期

FPGAシステムの改修

- 2K×2Kデータ対応だったFPGAを4K×4Kデータに対応させるアップデートを実施



重ね合わせシステム用PCの 木曾観測所への導入

- 一次処理用PC
(AMD Ryzen Threadripper2、24コア/48スレッド)
 - CentOS7インストール
 - 木曾観測所内の10Gbpsネットに接続
 - M.2 SSDでRAID構成 (500GB×4)
- FPGA用PC
 - 一次処理用PCと直接接続
 - 一次処理PCの作業領域をNFSマウント



一次処理 P C

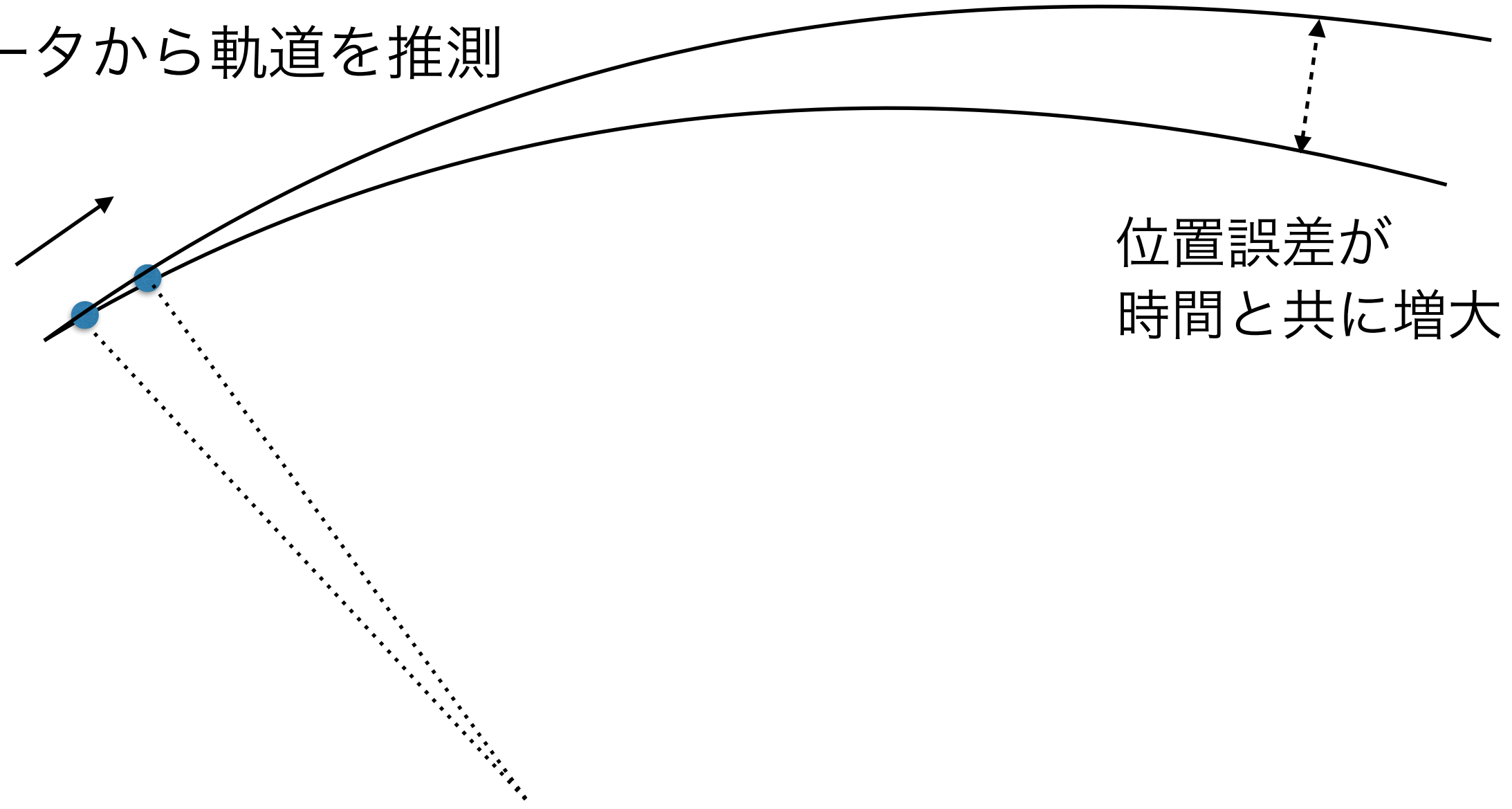


FPGA用 P C

計画の進捗

- ・ 2020年度-2021年度
 - 重ね合わせシステムの本曾観測所への導入（2021年3月）
 - Tomo-e Gozen観測データの転送システム構築（2021年3月）
 - 即時解析動作試験実施（2021年9月）
突発天体サーベイ（1視野につき6秒or9秒露出（12or18フレーム））の観測データを利用

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



即時解析動作試験の結果と今後の課題

- ・ 突発天体サーベイ観測データを使用し、即時解析
 - 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
 - 多くの高速移動天体(残念ながら今のところ既知の
天体ばかり)が検出できることを確認
 - 候補天体リストから「ホンモノ」を効率的に
抽出する機能が必要 →検討中
 - 作業領域(2TBのRAID)がすぐにfullに
→処理の終わったデータを消す方向で検討
 - 即時追跡観測の体制強化

まとめと野望

- 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FPGAを用いた解析システムを木曾観測所に構築
- 動作試験実施、いくつかの課題が明らかに
- 次の科研費があたれば、計算機を増強して84チップ全面の即時処理を可能に
- 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個とか発見したい