

小型望遠鏡によるNEO探索システム —その後の進捗—

JAXA： 柳沢俊史、黒崎裕久、黒田信介、
池永敏憲、杉本洋平、河津要、吉川真

慶応大：平子敬一

国立天文台：伊藤孝士

千葉工大：吉田二美

JSGA： 奥村真一郎

序論

JAXAは昨年度より、国立天文台、日本スペースガード協会と共同で科研費を利用した新規NEO探索システムの開発を開始している。Pan-StarrsやCSS等既存のNEOサーベイチームとは全くことなる戦略に基づく観測法であり、これまでのNEOサーベイの概念を一新する可能性を秘めている。

今年1月に18cm望遠鏡及び専用解析ボードを利用した試験観測により2個のNEOを連続発見した。日本でのNEO発見はおよそ9年ぶりである。

JAXA内においてもNEO問題に積極的に取り組むべく専門のチームが編成され予算獲得や関連する研究活動をはじめた。

地球接近天体の脅威

地球接近天体(NEO: Near Earth Object)の問題は人類の安定的な繁栄のためには解決しなければいけない重要な課題の1つである。



ツングースカ



チェリャビンスク

過去に確認されている
NEOの地球衝突事例

- ・ユカタン半島に衝突し恐竜を絶滅させた。10km
- ・1908年、ロシア、シベリア上空で爆発し20km²を焼き払った。数10m
- ・1972年、アメリカ、カナダ上空で目撃。数10m
- ・2007年、ペルー、カランカス村に衝突、住民に健康被害。サイズ不明
- ・2008年、スーダンに落下。数m
- ・2013年、ロシア、チェリャビンスク上空で爆発、1200名負傷。17m

新規NEOサーベイ手法の提案

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

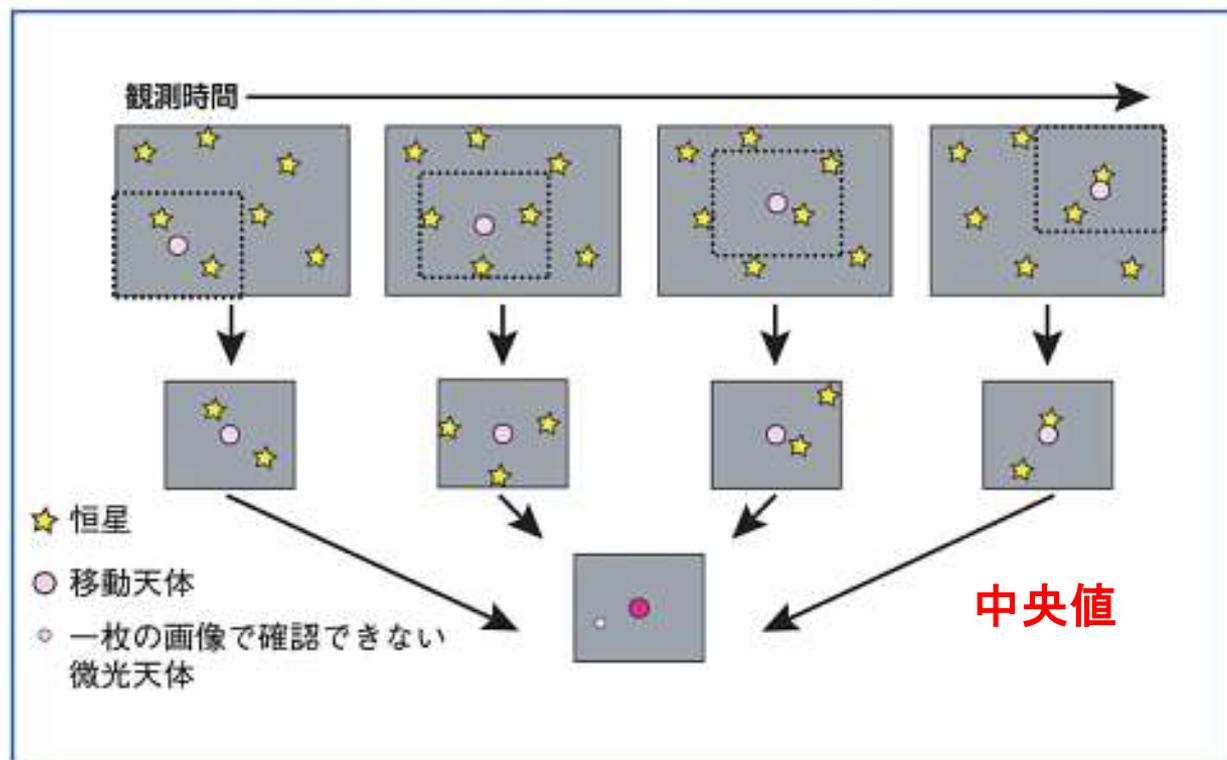
特定の非常に近傍に存在するNEO群を見落としている可能性がある。

新しい観測技術の導入を提案

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。

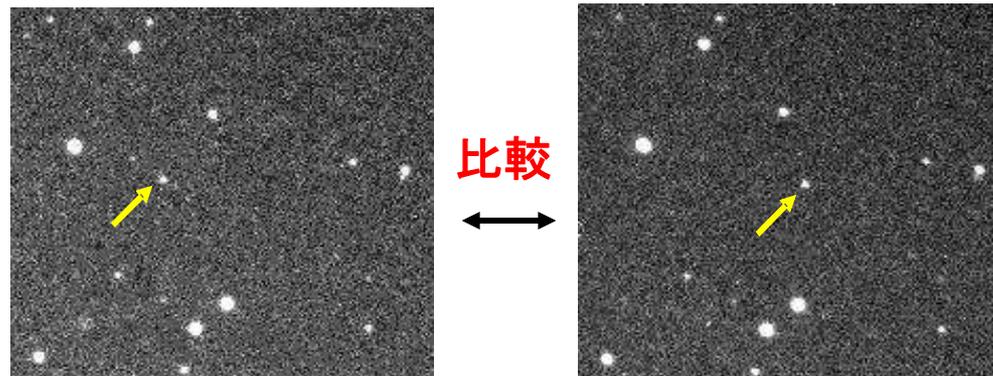
重ね合わせ法概念図



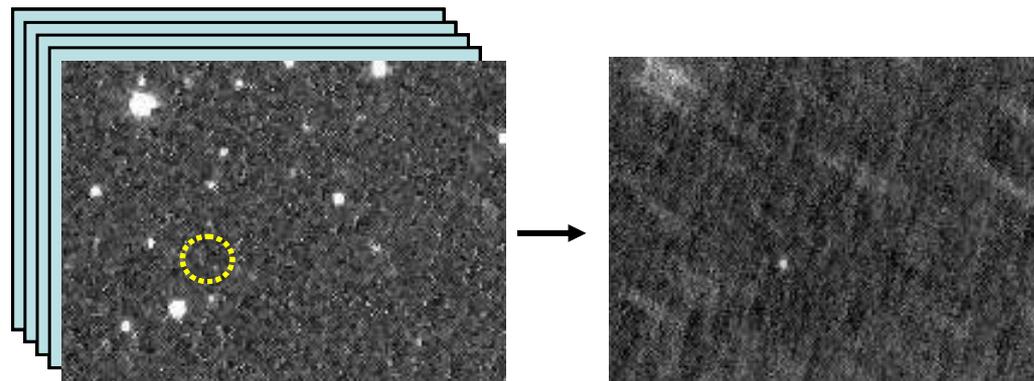
移動物体の動きを仮定し、複数の観測画像の切り取りを行う。切り取られた画像の中央値画像を作成することにより暗い移動物体の検出が可能になる。

既存の検出法との違い

ブリンク法



重ね合わせ法

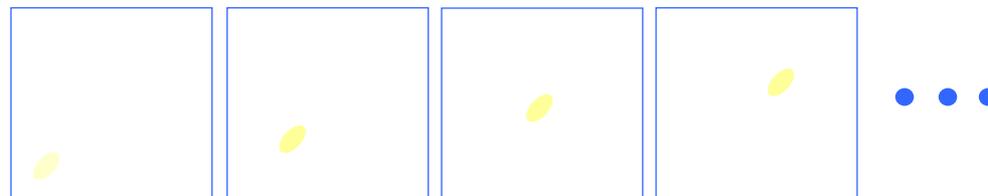


重ね合わせ法で検出された小惑星の例。撮影画像(左)、検出画像(右)

本手法により350個以上の小惑星を発見している。

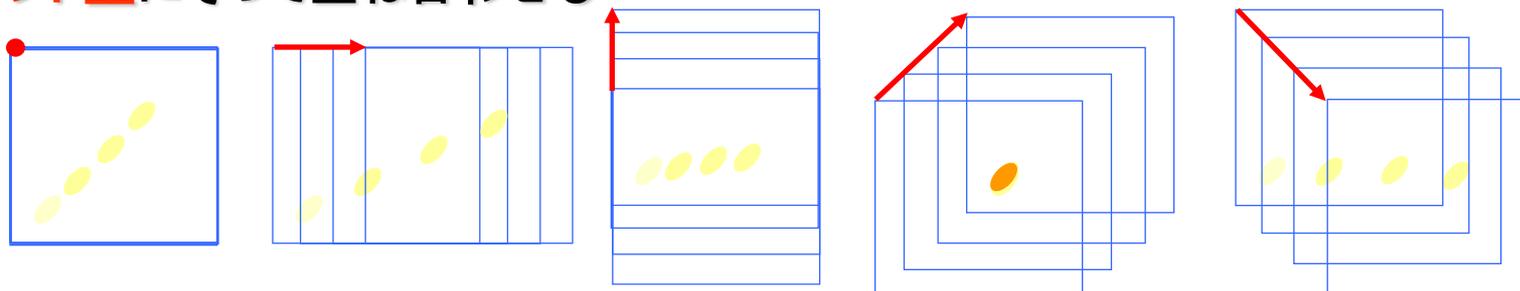
重ね合わせ法の弱点

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



×

×

×

○
検出

×

デブリが検出され、デブリの動きもわかる

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。



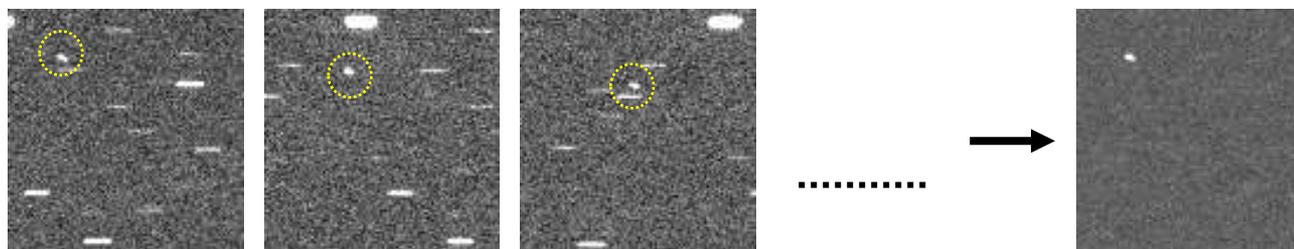
市販のPC1台で要する解析時間は280時間！！

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。



新旧アルゴリズム
の比較

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

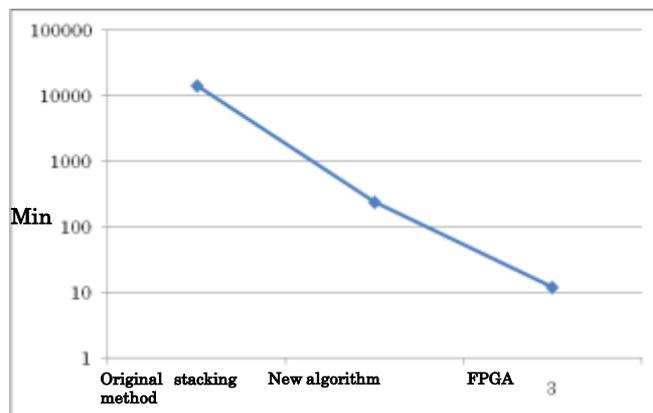
新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM



iDAQs社製FPGAボードシステム



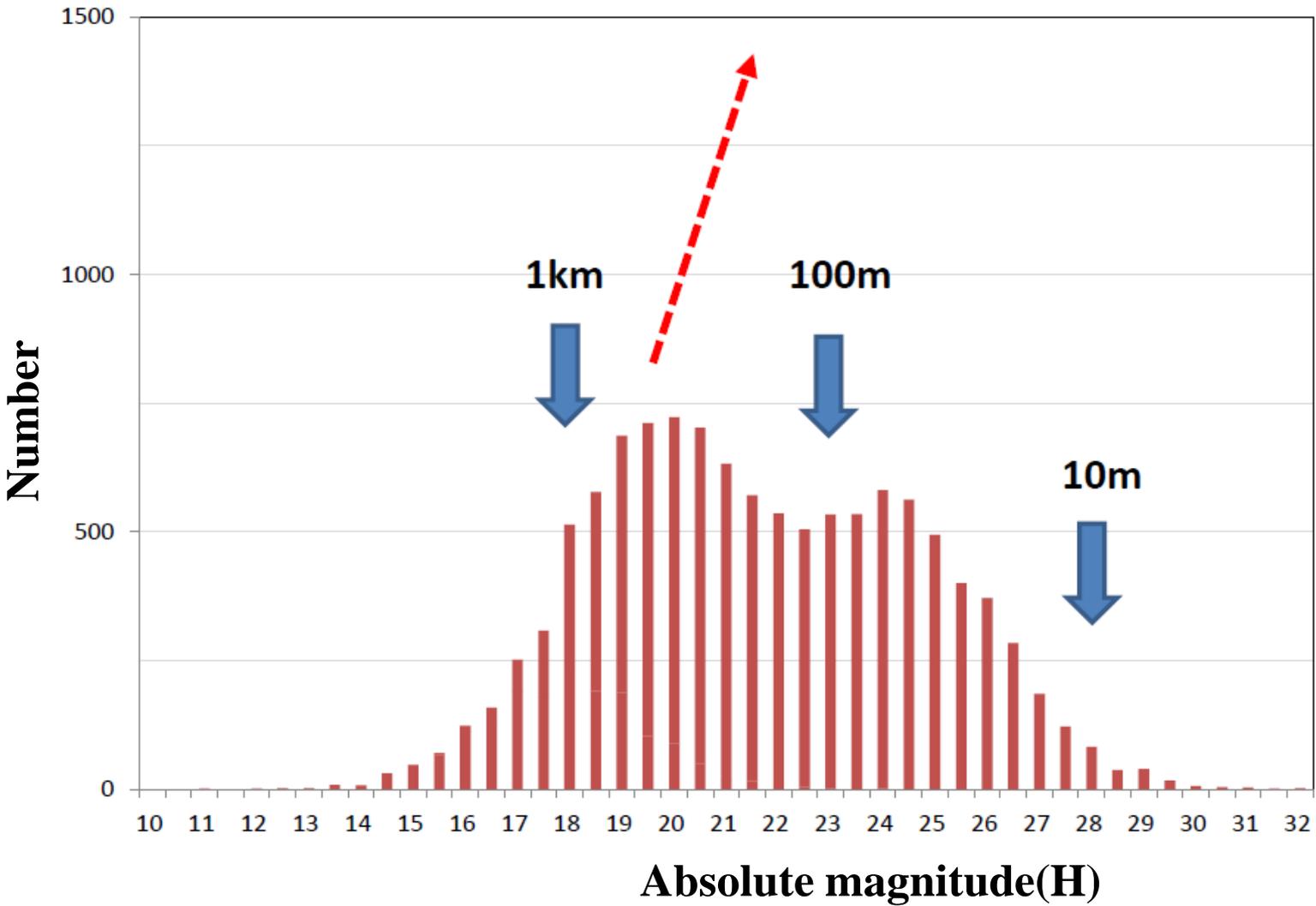
解析時間の変化

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。

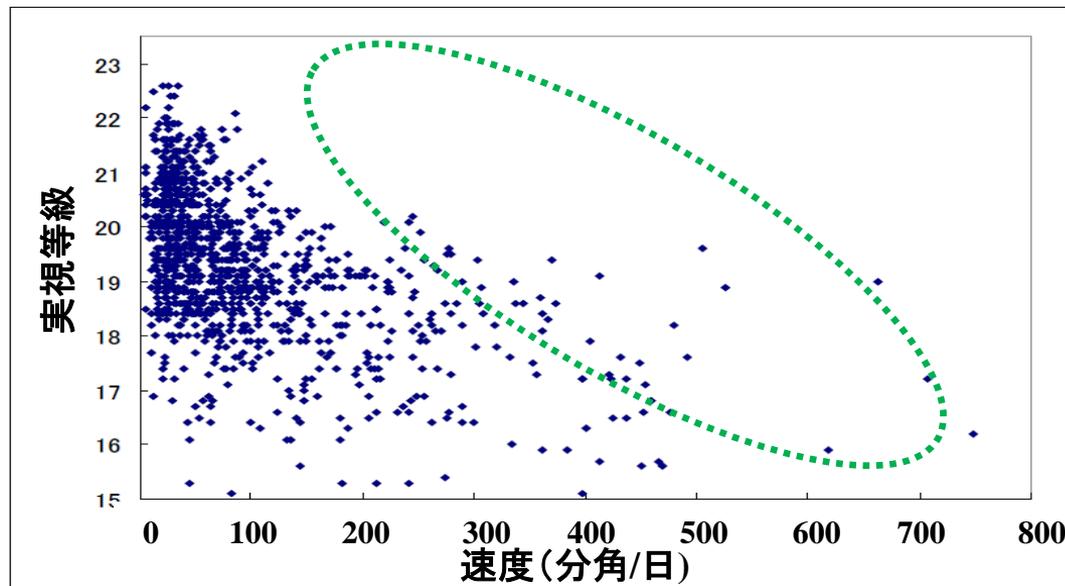
280時間 → 14分

絶対等級分布

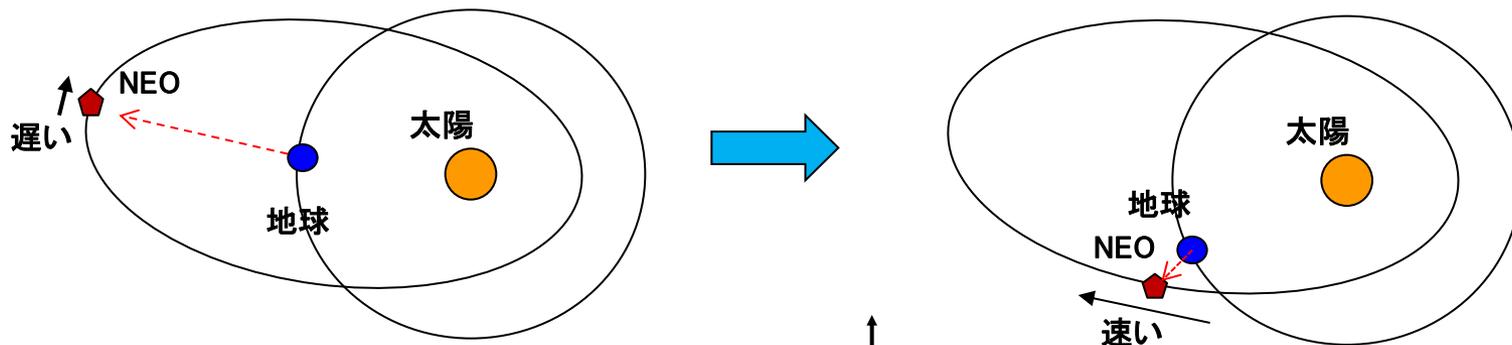
— Size distribution of NEO —



速度実施等級分布（発見時）



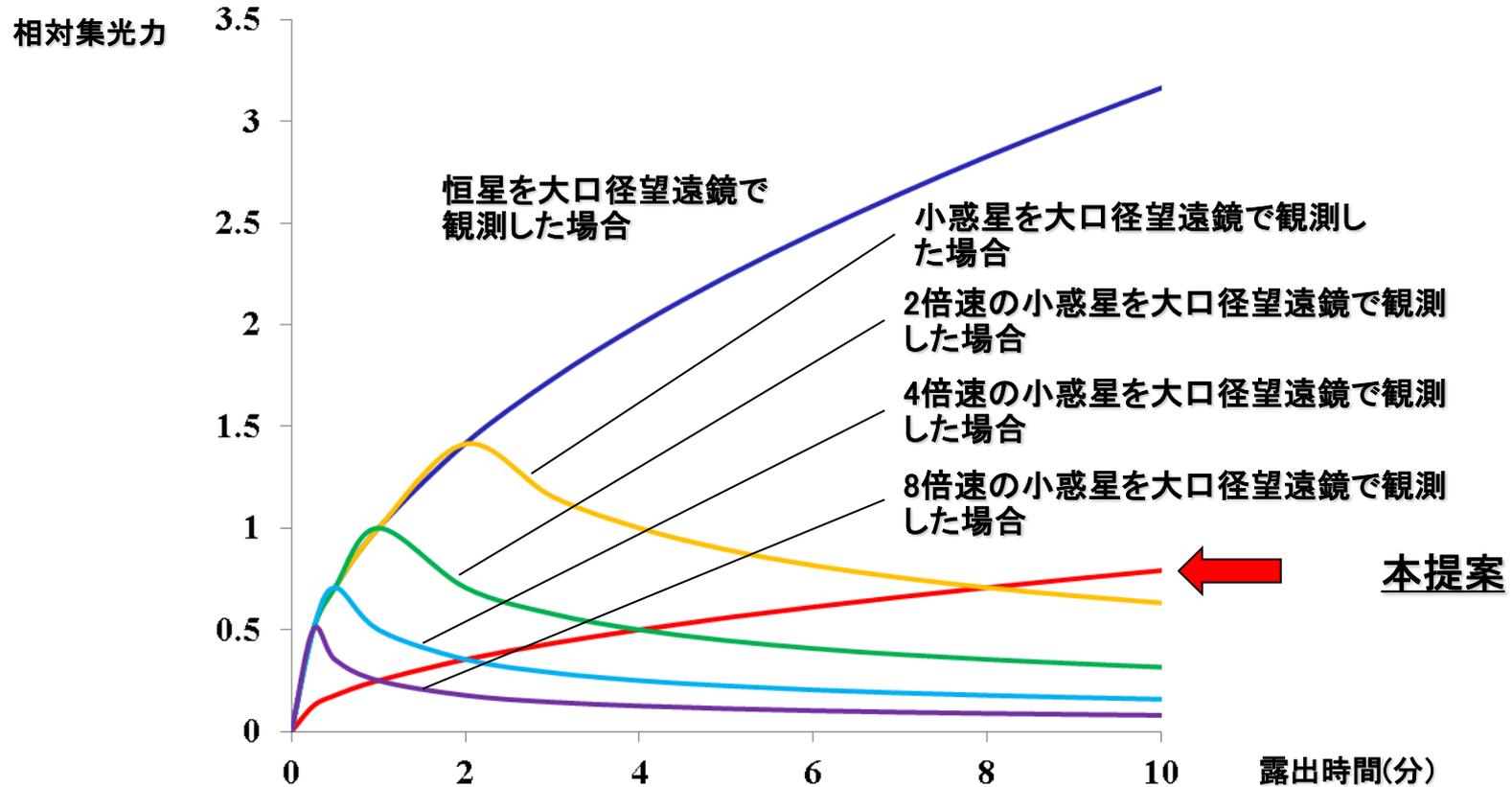
多くの暗いNEOは遅い状態のときに検出されている。つまりサイズ小さいからではなく遠くにあるから暗くみえている。近く(つまり明るい)を高速で移動するNEOを小さい望遠鏡と新しい観測技術で検出できる可能性がある。



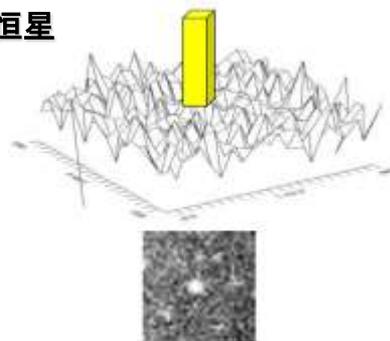
既存手法：大きな望遠鏡で遠くの遅いNEOを検出

新規手法：小さな望遠鏡で近くの速いNEOを検出

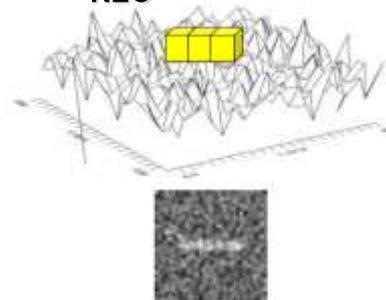
トレイルロス



恒星

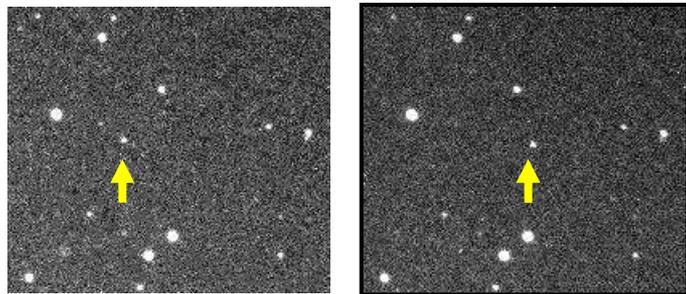


NEO



新規観測技術を利用したNEO探索

既存のNEO検出手法は時間間隔をおいた数枚の画像比較から移動物体を検出していた。しかし既存手法は高速で移動するNEOの検出が難しい。我々はこれらの高速NEOを効率的に検出するアルゴリズムや専用ボードを開発した。高速NEOは地球に非常に接近しているため我々の技術を利用すれば小型望遠鏡でも検出が可能である。



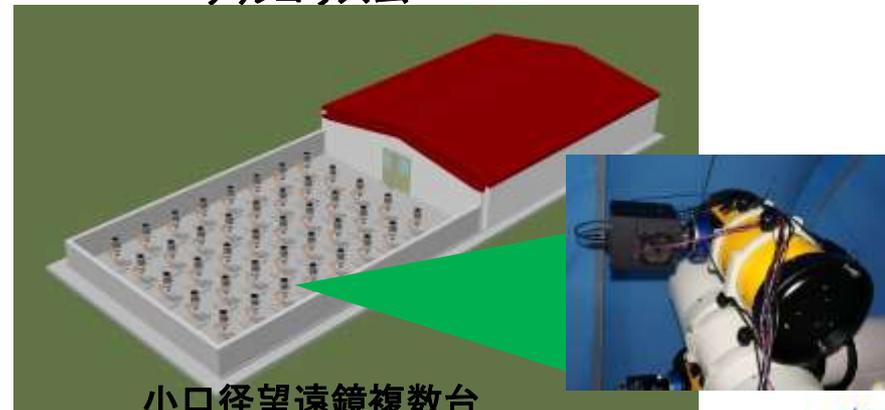
ブリンク法



FPGAを利用し高速検出
アルゴリズム



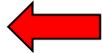
大口径望遠鏡1台



小口径望遠鏡複数台

新規観測技術を利用したNEO探索

既存手法と新規手法の比較

	既存手法	新規手法
集光力	○	×
視野	×	○
低速NEO	○	×
高速NEO	×	◎ 
解析時間	○	×
コスト	×	○
投資リスク	×	○
観測の利便性	×	○

試験観測

JAXA入笠山光学観測施設において18cm望遠鏡を利用した試験観測を2017年1月17,25,26,31日に実施した。



望遠鏡: タカハシ ε180ED (D:180mm F: 500mm)

検出器: FLI ML23042, Canon CMOS

観測モード: 24秒露出 × 32画像 × 40領域 / 日

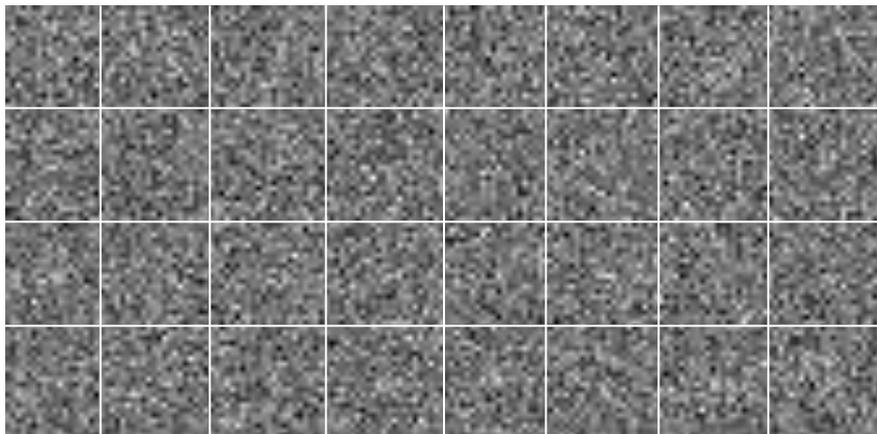
掃天領域: 986 平方度 / 日

検出限界: 日々運動量 5.3° で18.4等

2つのNEO(2017 BK, 2017 BN92)を発見した!!

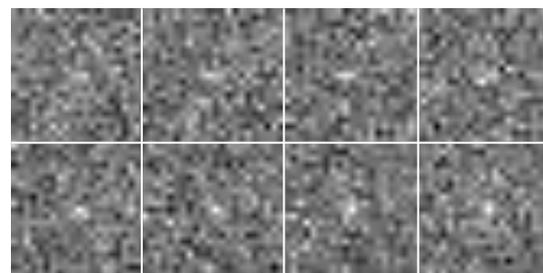
試験観測結果

2017 BK



候補天体付近のオリジナル画像

ステラハンター8枚重ね合わせのブリンク



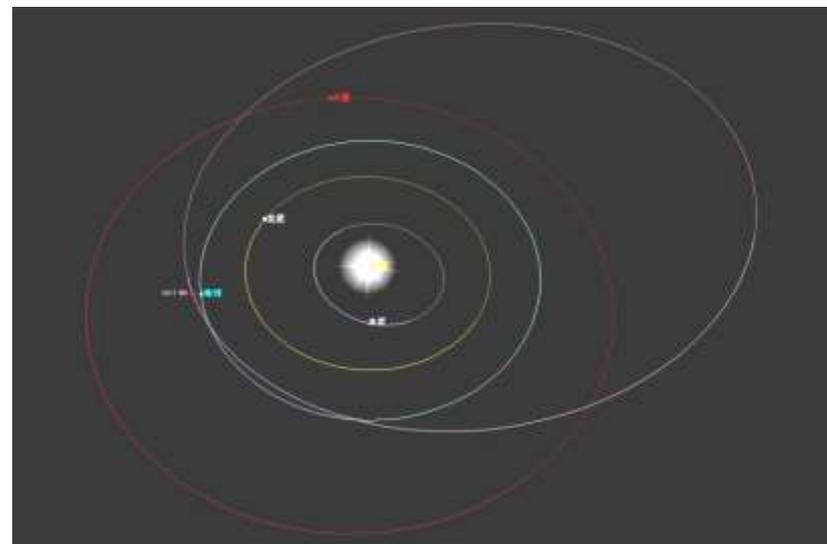
8画像重ね合わせ



32画像重ね合わせ

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

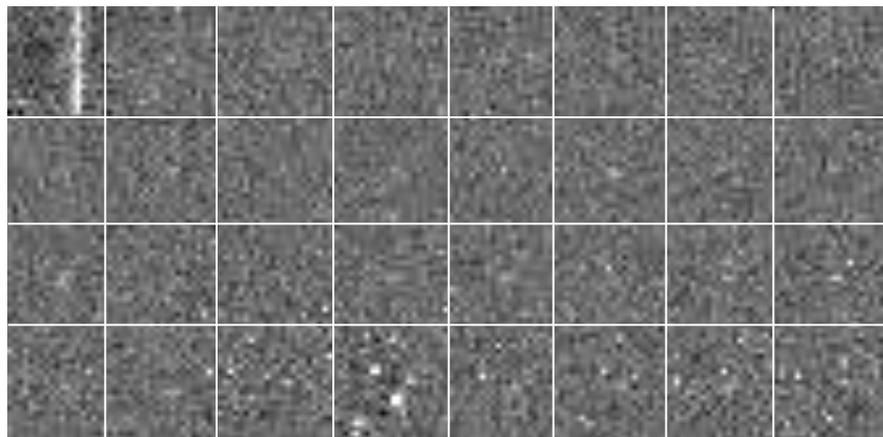
サイズ50m程度。2017年1月22日に地球からおおよそ600万km(月軌道の約16倍)まで接近。



暫定軌道

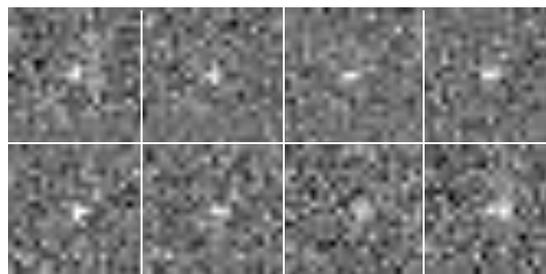
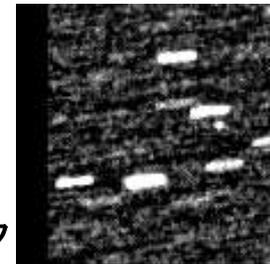
試験観測結果

2017 BN92

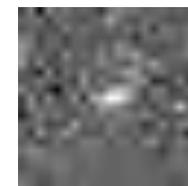


候補天体付近のオリジナル画像

ステラハンター8枚重ね合わせのブリンク



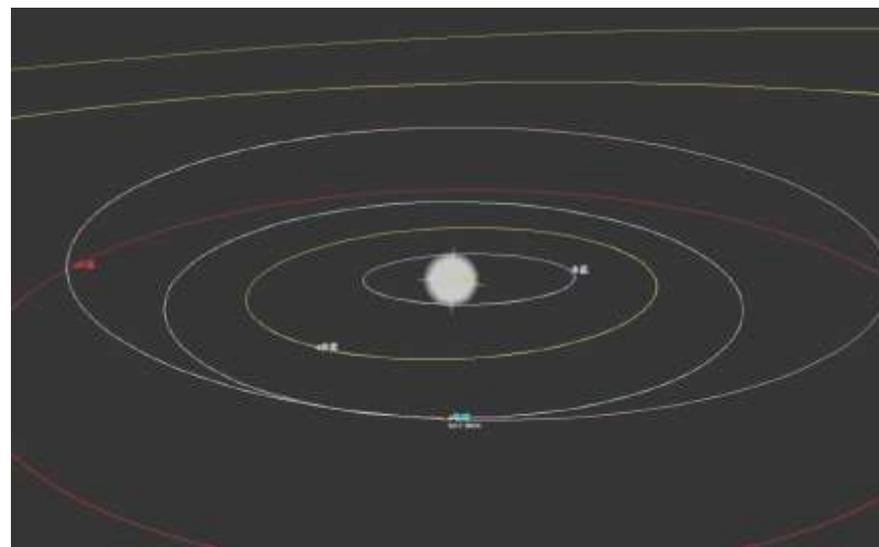
8画像重ね合わせ



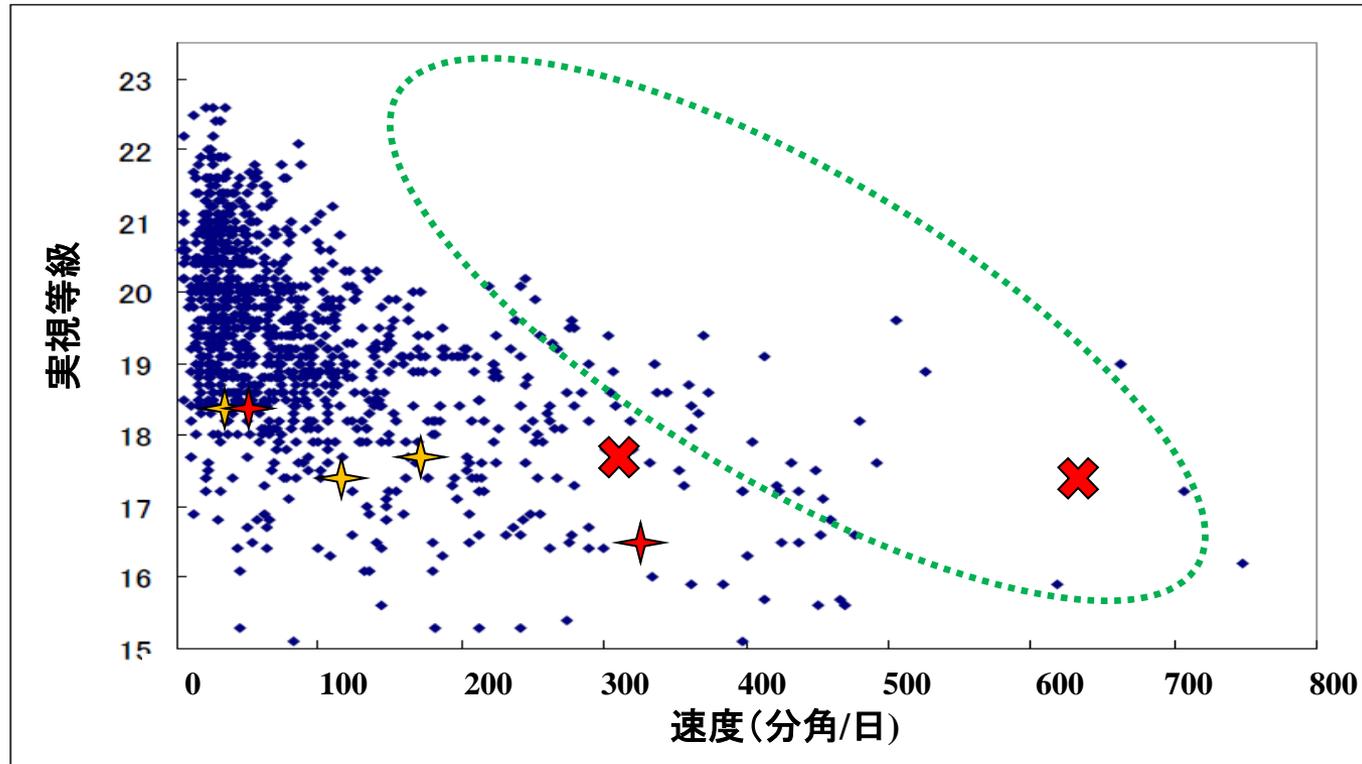
32画像重ね合わせ

元期	2017-02-16.0
離心率	0.4833413
軌道長半径 (AU)	1.9227120
軌道傾斜角 (°)	1.07370
昇交点経度 (°)	324.10877
近日点引数 (°)	159.83225
平均近点角 (°)	7.94639
絶対等級	25.6
スロープパラメータ	0.15

サイズ30m程度。2017年2月1日に地球からおおよそ186万km(月軌道の約5倍)まで接近。



試験観測結果



NEO発見時の速度と実視等級分布

豪州での遠隔観測体制の構築

望遠鏡: 田中光化学工業 BSC250-III (D:250mm, F:700mm)

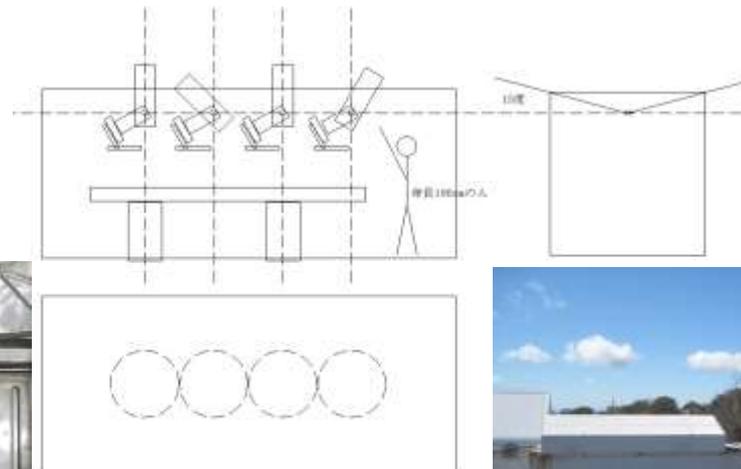
検出器: FLI ML23042 (FOV: $2.51 \times 2.51^\circ$)

10月末までにさらに1セット

望遠鏡: 田中光化学工業 BSC250-III (D:250mm, F:700mm)

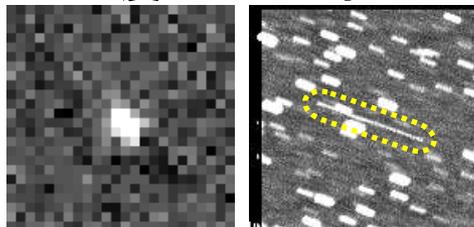
検出器: FLI ML4240 (FOV: $2.26 \times 2.26^\circ$)

現在稼働中
試験観測
実施中



豪州での試験観測結果

1. 10.3度/日 18.4等 H=26.4 既知天体 2017 OE7



X: -74 Y: -27

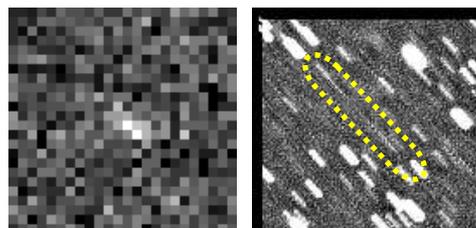


観測日: 2017/7/24

掃天領域: $2.51 \times 2.51 \times 37 = 233$ 平方度

検出移動天体: 3(うち1天体は新発見)

2. 11.8度/日 19.6等

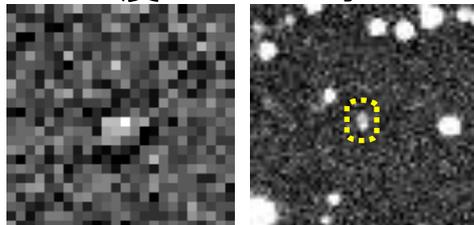


X: -61 Y: -66

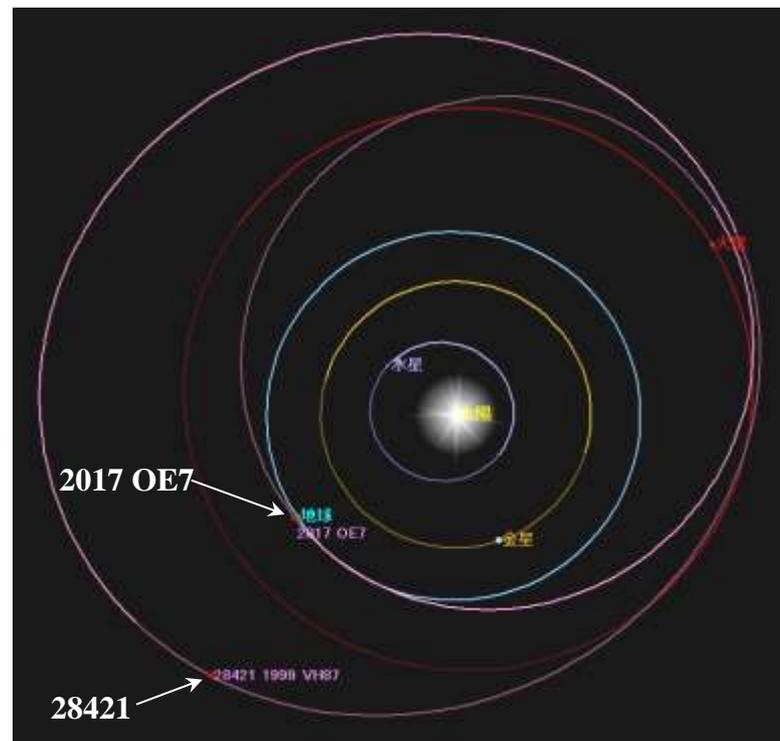
新発見!



3. 0.8度/日 18.0等 H=15.1 既知天体 28421



X: -1 Y: 6



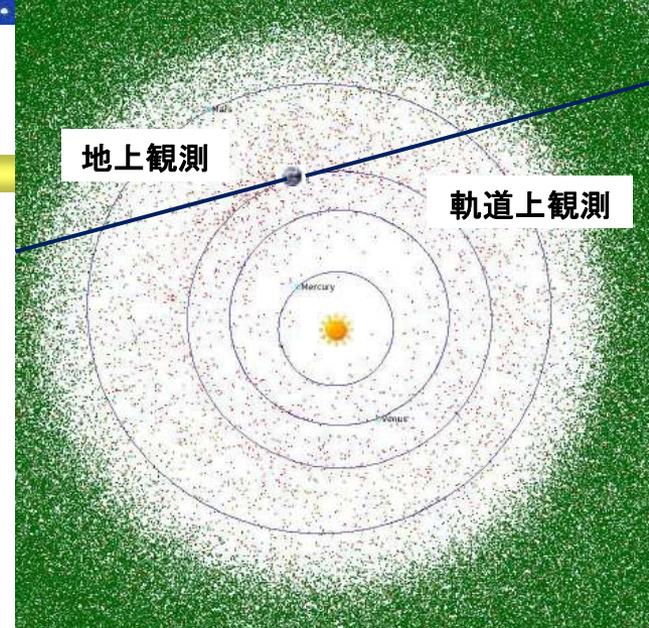
既知天体2つの軌道

JAXA内での動き

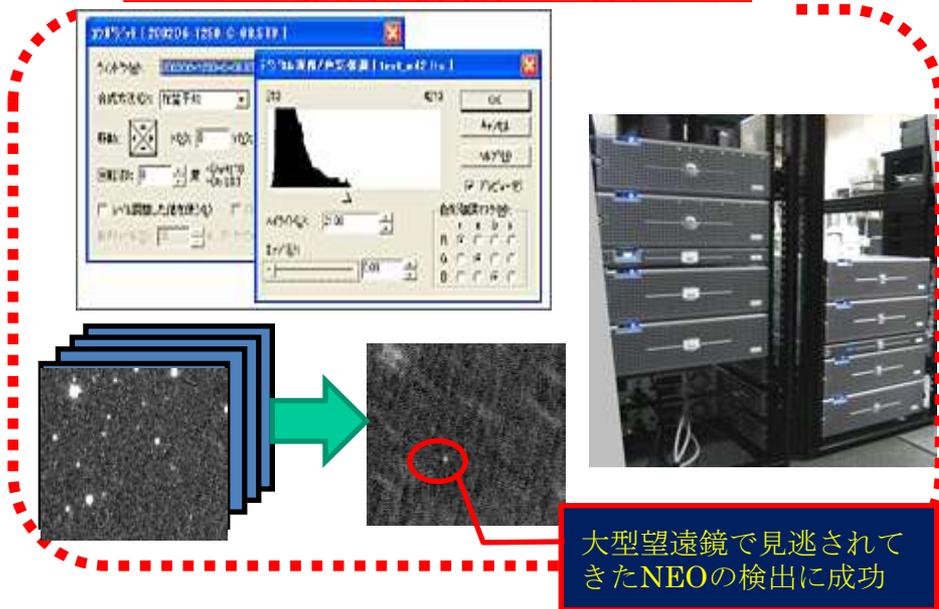
Jaxa NEo Survey System (Janess)

メンバー：柳沢、黒田、黒崎、池永、杉本、河津、吉川、平子

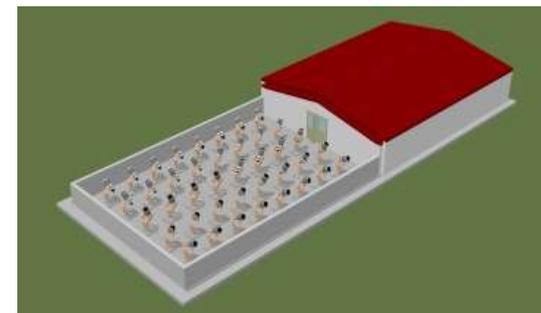
JAXA独自の技術を地上、軌道上に適用しこれまでほとんど発見されていない数10－数100m級のNEOを大量に見つけ出すシステムを構築するための検討を開始。
JAXA内外の予算獲得へ。



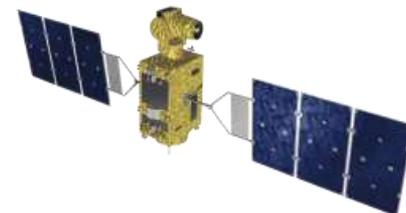
JAXA独自技術：新規高速解析手法



大型望遠鏡で見逃されてきたNEOの検出に成功

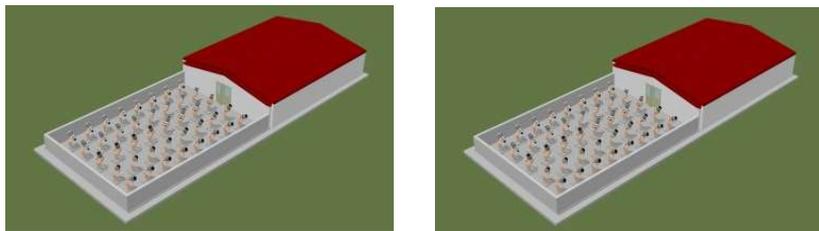


地上小型望遠鏡観測網



軌道上観測衛星群

JanessでどれだけNEOが発見できるかを検討

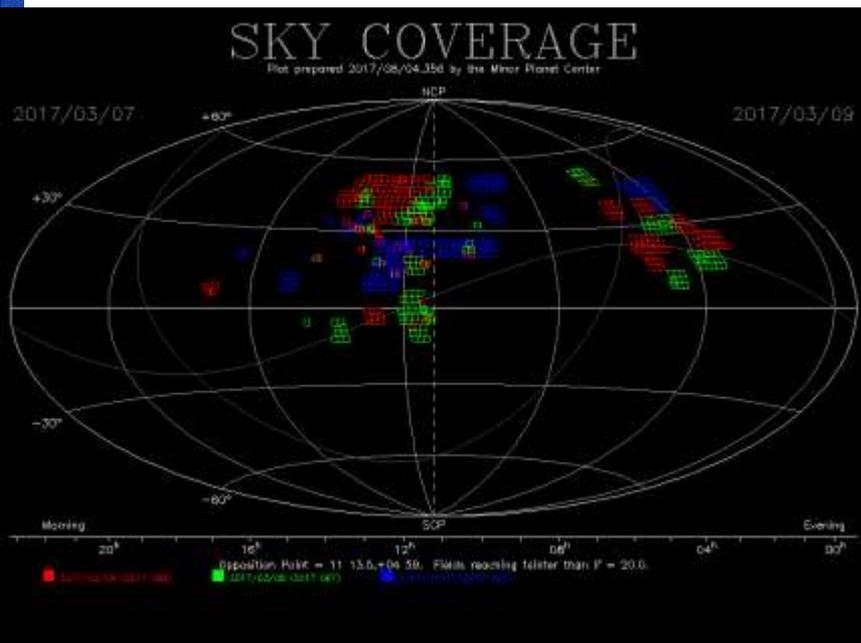


地上局は南北両半球に2局、1局に20台25cm望遠鏡を設置。地球の夜側を観測



軌道上は25cm望遠鏡搭載衛星を太陽同期軌道に4機を投入。地球の昼側を観測

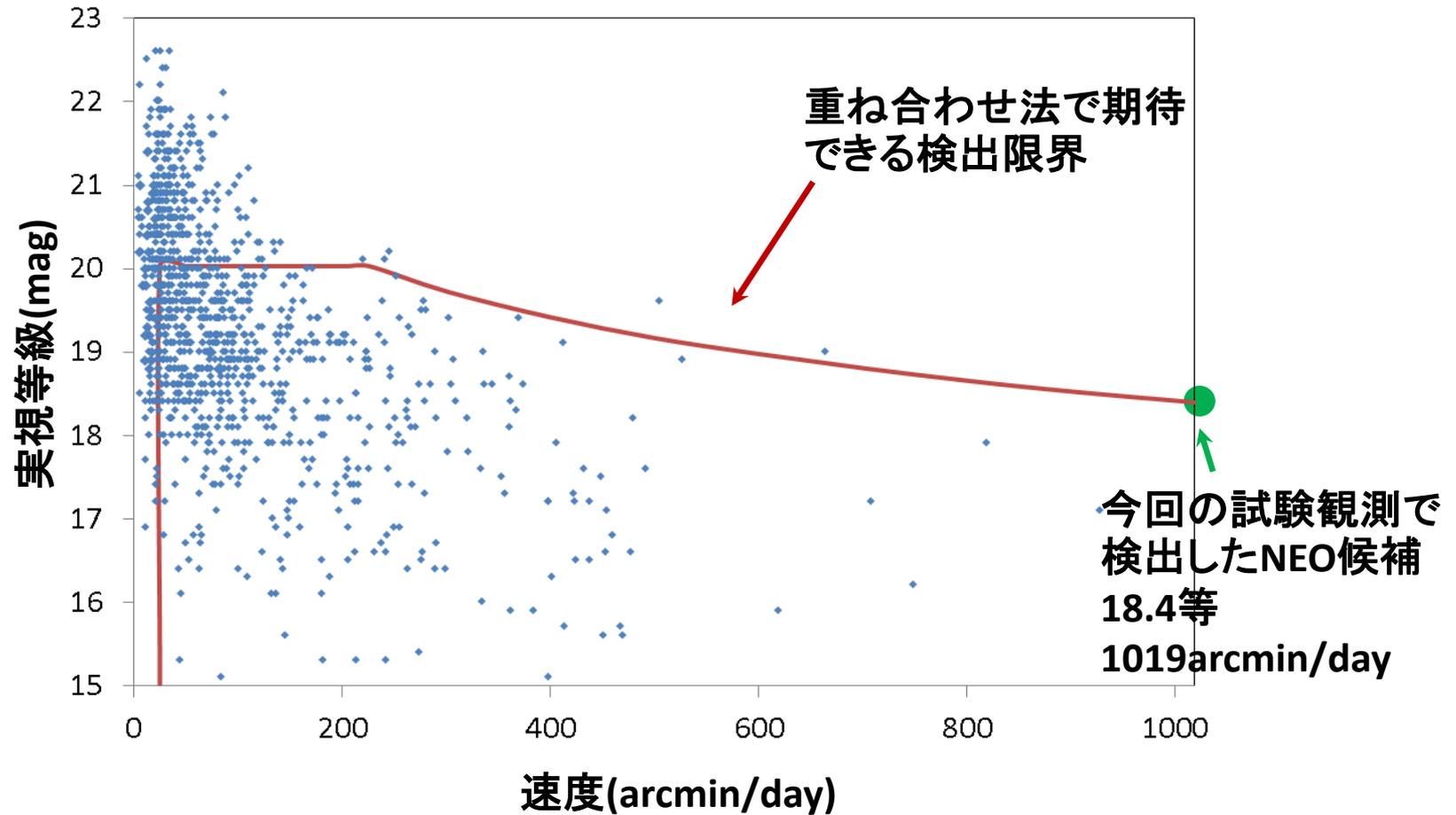
CSSの2017年の3月の観測結果及びPHAの発見時の実視等級一速度分布図から重ね合わせ法のトレイルロスを考慮した検出能力を推定し、地上及び軌道上でのNEOの検出数を見積もった。



観測日数: 22日
観測領域: 2917領域
トータル掃天視野: 14585平方度
発見PHA: 2個 (2017 ED4, 2017FE1)
推定発見NEO: 18個※

※現在発見されているNEOの数16364個に対しPHAはそのうち1830個で約9倍になっているから。

PHAの発見時の実視等級—速度分布



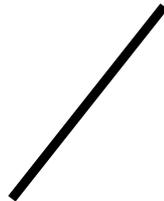
発見数の推定

既存のサーベイと比較してどれだけ多く発見できるか(効率数)

①実視等級一速度分布で観測バイアスがない場合は速度方向について一定の密度で分布すると仮定する。

②重ね合わせをつかうことにより図の赤線よりしたの部分のNEOは検出できるはずである。

仮定した分布に対して重ね
合わせ法で検出できるPHA数
(2891)



既存の手法で発
見されたPHA数
(1010)

= 2.86

発見数の推定

CSSの今年3月の実績および効率数から地上及び軌道上のNEO検出数を推定する。

地上

Janess-Gの1か月の掃天視野

$$\begin{array}{ccccccc} 6.32 & \times & 40 & \times & 40 & \times & 10 & = & 101120 & \text{平方度} \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & & \\ \text{視野} & & \text{領域/day} & & \text{台数} & & \text{日数} & & & \end{array}$$

年間NEO検出数

Janess-Gの掃天視野(101120)

$$\begin{array}{ccccccc} \text{CSSの掃天視野}(14585) & & \times & 18 & \times & 2.86 & \times & 12 & = & 4283 \text{個} \\ & & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \\ & & & \text{CSS検出NEO数} & & \text{効率数} & & \text{1年分} & & \\ & & & \text{(1か月分)} & & & & & & \end{array}$$

発見数の推定

軌道上

Janess-Sの1か月の掃天視野

$$\begin{array}{ccccccc} 6.32 & \times & 96 & \times & 4 & \times & 30 & = & 72806.4 \text{平方度} \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \\ \text{視野} & & \text{領域/day} & & \text{台数} & & \text{日数} & & \end{array}$$

年間NEO検出数

Janess-Sの掃天視野(72806.4)

CSSの掃天視野(14585)

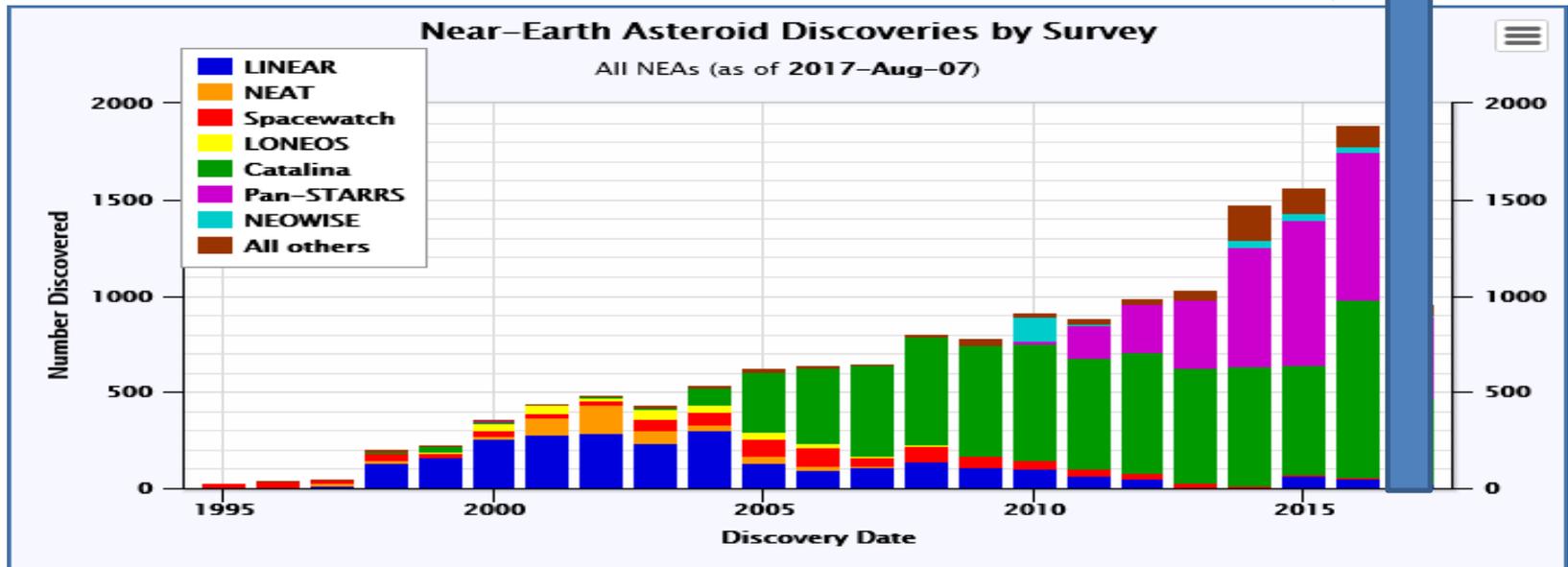
$$\begin{array}{ccccccc} & \times & 18 & \times & 2.86 & \times & 12 & = & 3084 \text{個} \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \\ & & \text{CSS検出NEO数} & & \text{効率数} & & \text{1年分} & & \\ & & \text{(1か月分)} & & & & & & \end{array}$$

発見数の推定

地上、軌道上すべてを整備すれば年間7000個が検出できる。地上では他のサーベイが2000個程度みつけるのでJanessのみは5000個になる。いずれにせよ新規発見NEOの大半をJanessが占めることになる。一方、チェリヤビンスク級のNEOは300万個は存在するため、全てをみつけだすのは400年以上かかることになる。

今回の推定では1日1台の望遠鏡で1個弱NEOを発見できることになる。試験観測結果からあながち間違った推定ではないといえる。

JanessによるNEO検出数 →



まとめ

JAXAは昨年度より、国立天文台、日本スペースガード協会と共同で科研費を利用した新規NEO探索システムの開発を開始している。Pan-StarrsやCSS等既存のNEOサーベイチームとは全くことなる戦略に基づく観測法であり、これまでのNEOサーベイの概念を一新する可能性を秘めている。

今年1月に18cm望遠鏡及び専用解析ボードを利用した試験観測により2個のNEOを連続発見した。日本でのNEO発見はおよそ9年ぶりである。

JAXA内においてもNEO問題に積極的に取り組むべく専門のチームが編成され予算獲得や関連する研究活動をはじめた。