

小型望遠鏡と高速画像解析によるNEOの発見

柳沢俊史、黒崎裕久、池永敏憲、杉本洋平、
神谷浩紀、吉川真(JAXA)、黒田信介(JAMSS)、
伊藤孝士(国立天文台)、吉田二美(千葉工大)、
奥村真一郎(JSGA)

序論

我々は2016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。Pas-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。

昨年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内においても地上及び軌道上でNEOを監視するシステムの検討がミッション探求フェーズに採択され、NEO問題に積極的に取り組むべく研究活動を昨年度より開始した。豪州の遠隔観測施設を利用したサーベイ観測により、今年3月以降に5個のNEOを発見している。また、NEO観測衛星等の検討を進めている。

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

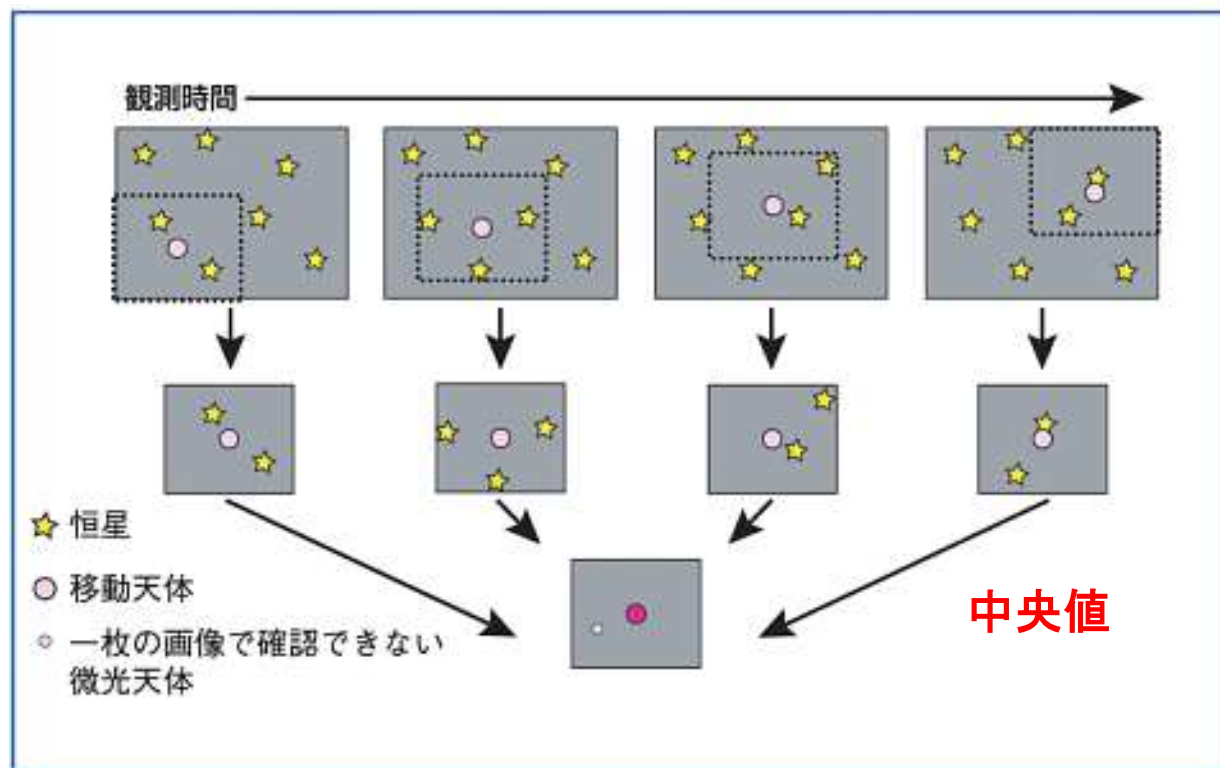
特定の非常に近傍に存在するNEO群を見落としている可能性がある。

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。

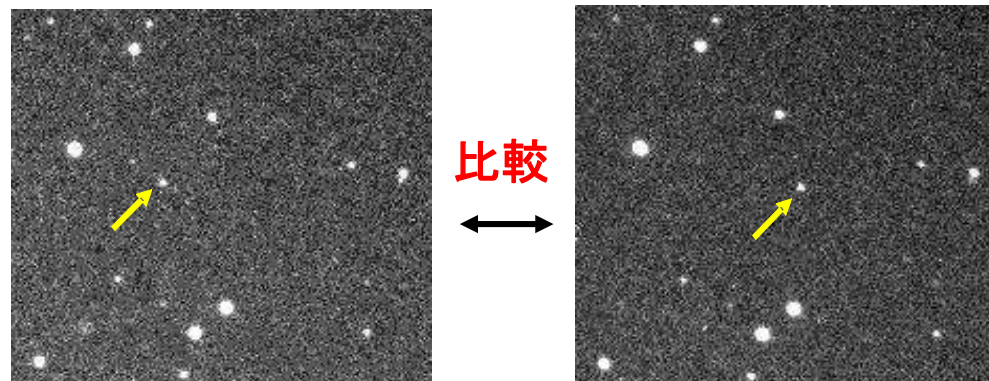
重ね合わせ法概念図



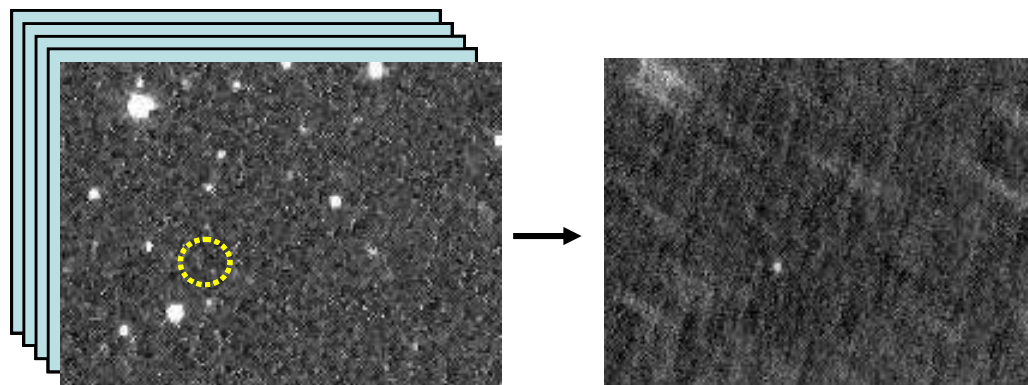
移動物体の動きを仮定し、複数の観測画像の切り取りを行う。切り取られた画像の中央値画像を作成することにより暗い移動物体の検出が可能になる。

既存の検出法との違い

ブリンク法



重ね合わせ法

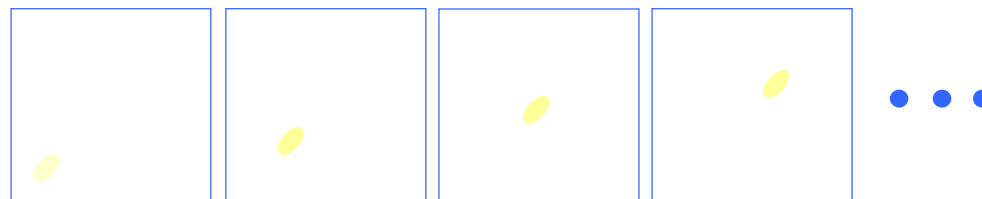


重ね合わせ法で検出された小惑星の例。撮影画像（左）、検出画像（右）

本手法により350個以上の小惑星を発見している。

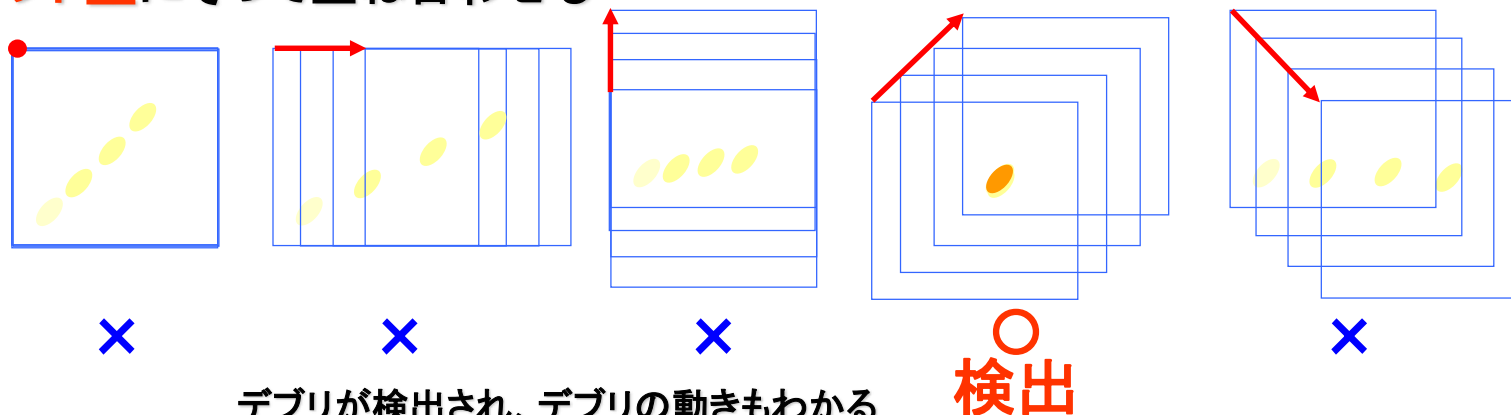
重ね合わせ法の弱点

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

シフト量にそって重ね合わせる



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。



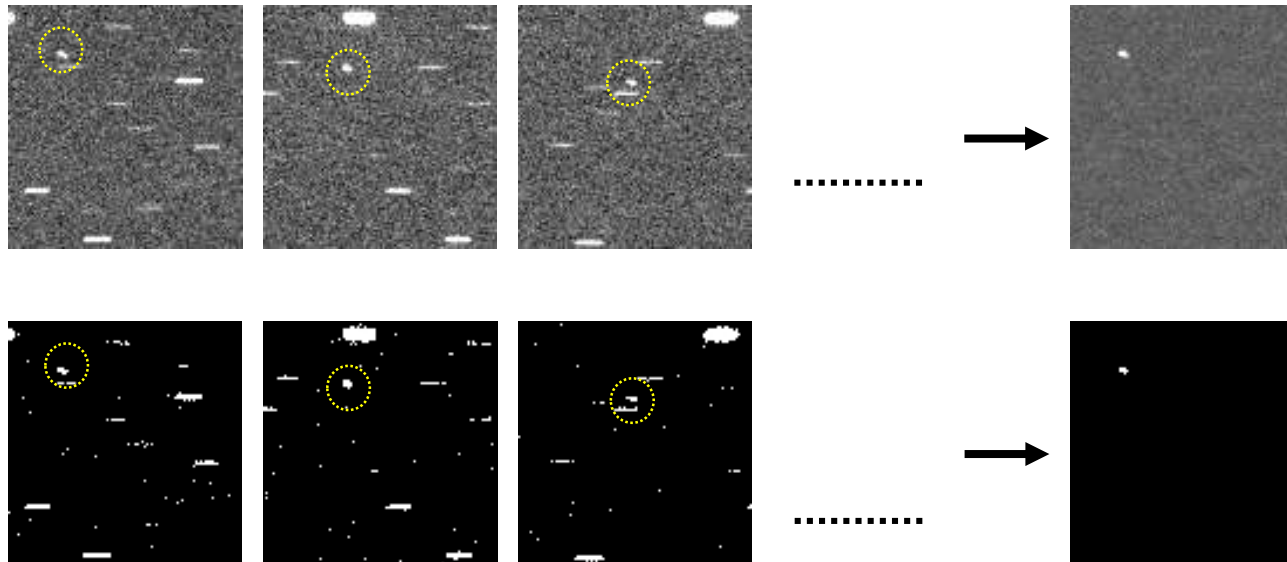
市販のPC1台で要する解析時間は280時間！！

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

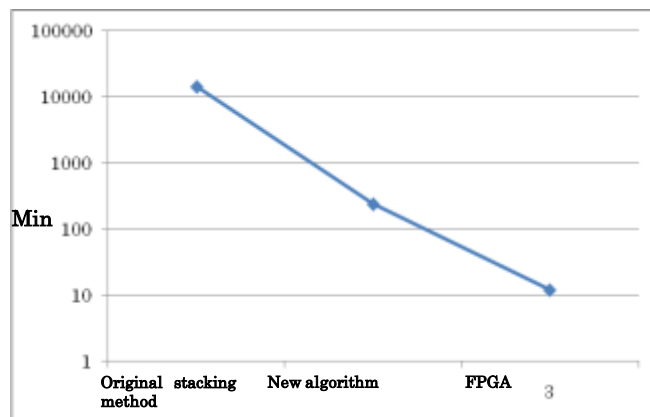
新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM



iDAQs社製FPGAボードシステム



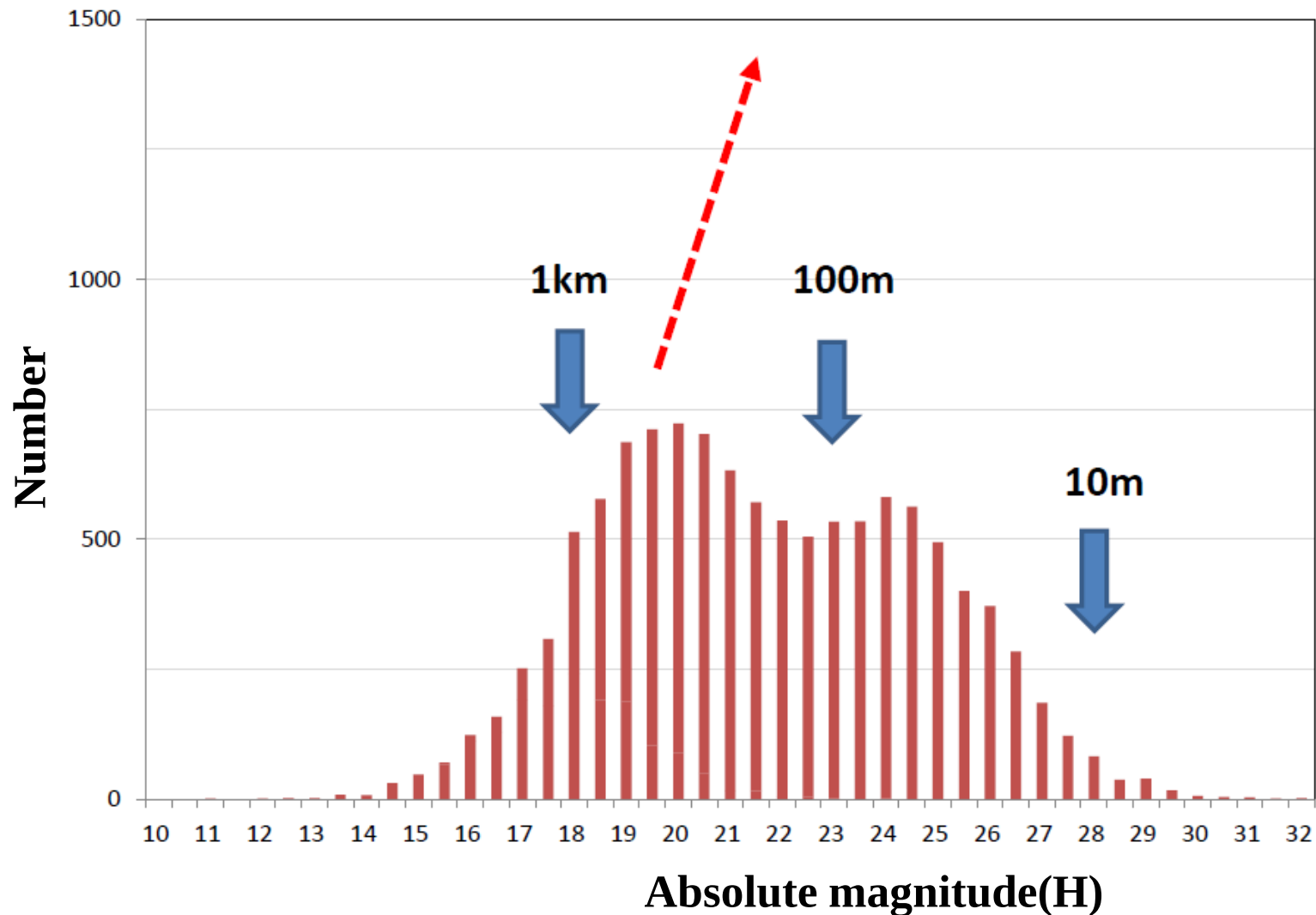
解析時間の変化

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。

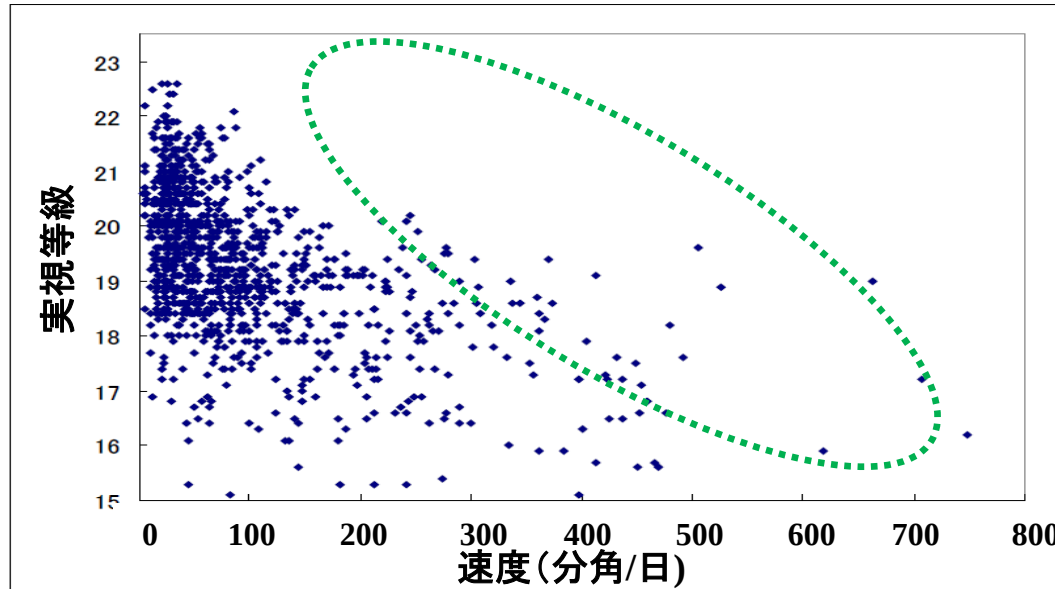
280時間 → 14分

絶対等級分布

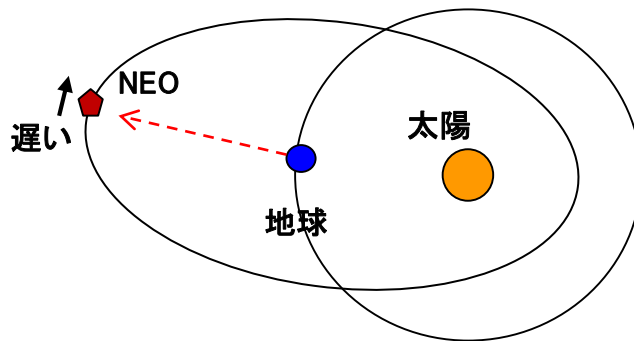
— Size distribution of NEO —



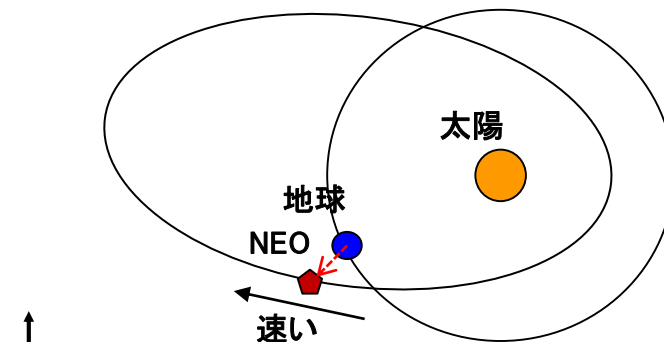
速度実施等級分布（発見時）



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。



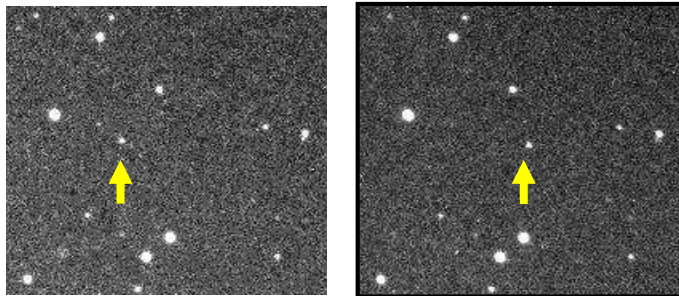
既存手法：大きな望遠鏡で遠くの遅いNEOを検出



新規手法：小さな望遠鏡で近くの速いNEOを検出

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。



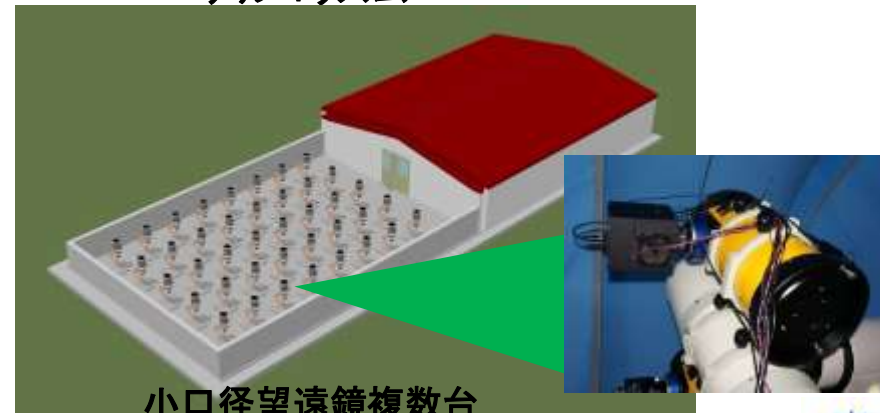
ブリンク法



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

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 ϵ 180ED (D:180mm F: 500mm)

検出器: FLI ML23042, Canon CMOS

観測モード: 24秒露出 $\times$ 32画像 $\times$ 40領域 / 日

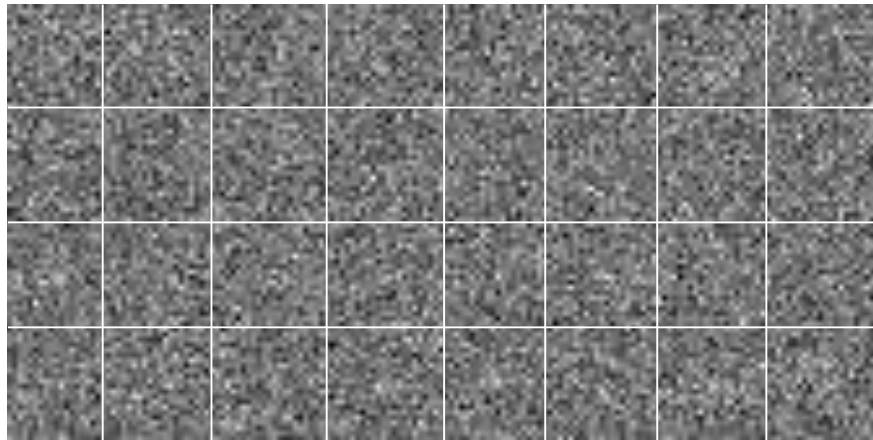
掃天領域: 986 平方度 / 日

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!!

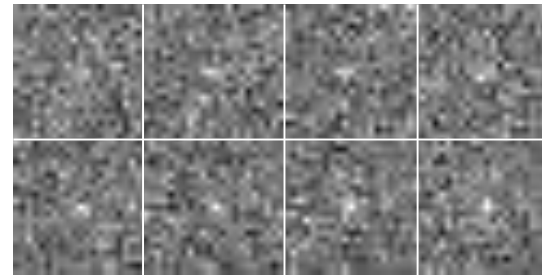
試験観測結果

2017 BK

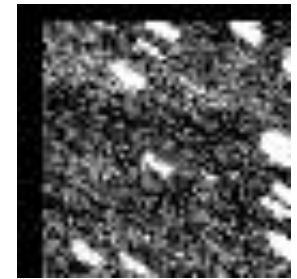


候補天体付近のオリジナル画像

ステラハンター8枚重ね合わせのブリンク

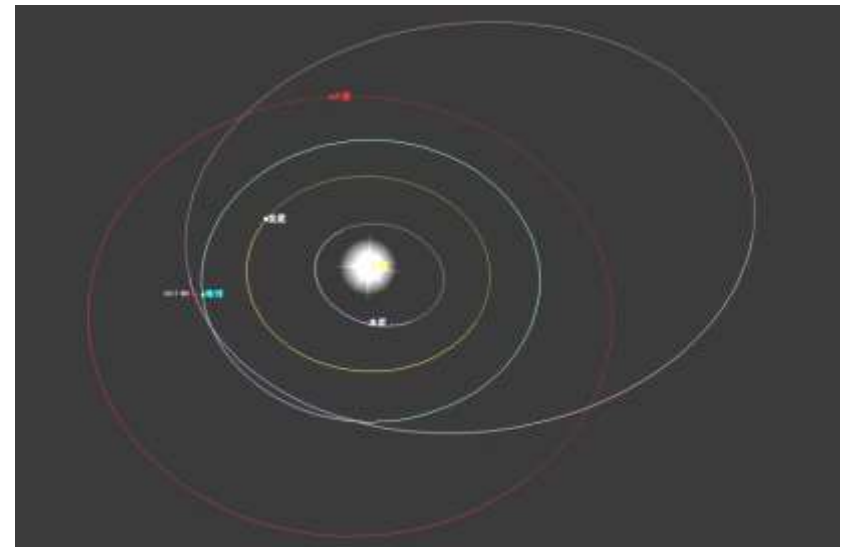


8画像重ね合わせ



32画像重ね合わせ

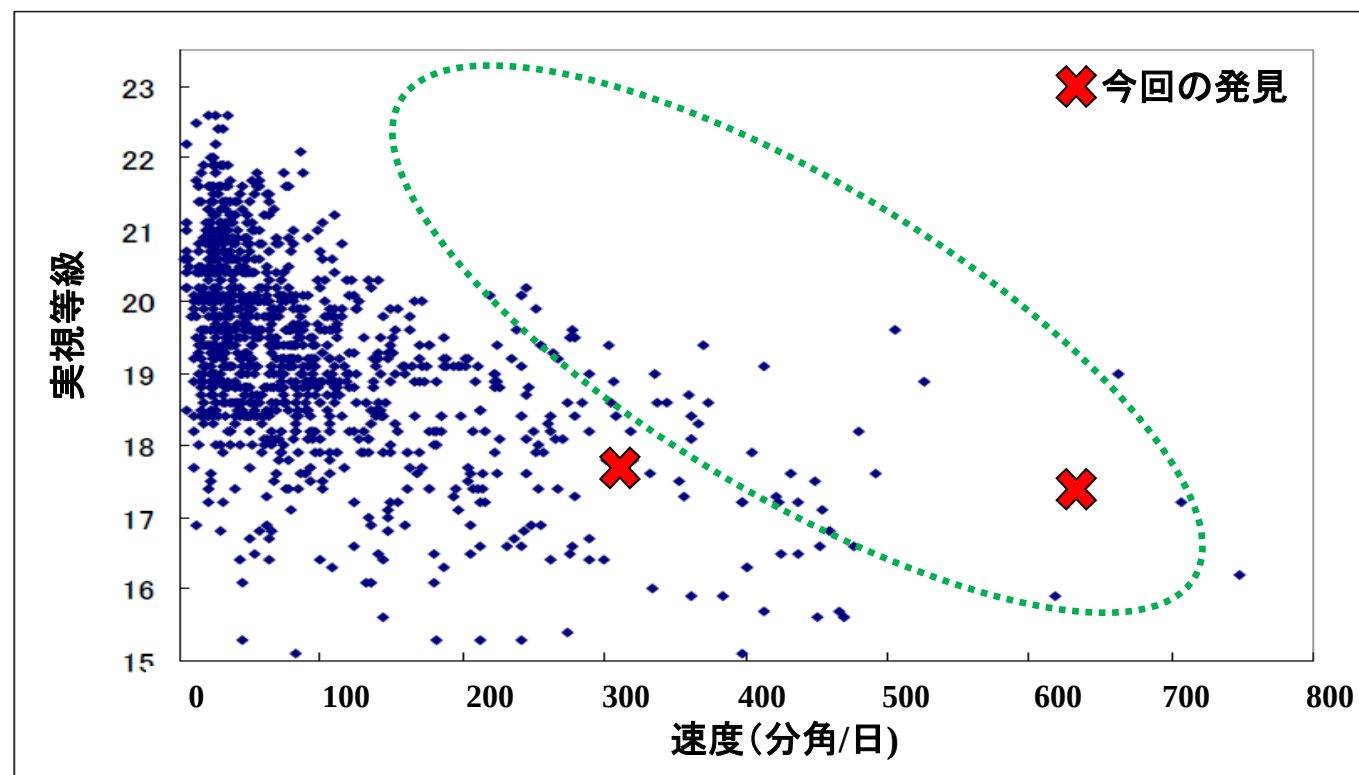
元期	2017-02-16.0
離心率	0.4902647
軌道長半径 (AU)	1.9107853
軌道傾斜角 (°)	6.64014
昇交点経度 (°)	110.92190
近日点引数 (°)	39.62114
平均近点角 (°)	0.82779
絶対等級	24.0
スロープパラメータ	0.15



暫定軌道

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。

試験観測結果



NEO発見時の速度と実視等級分布

JAXA内での動き

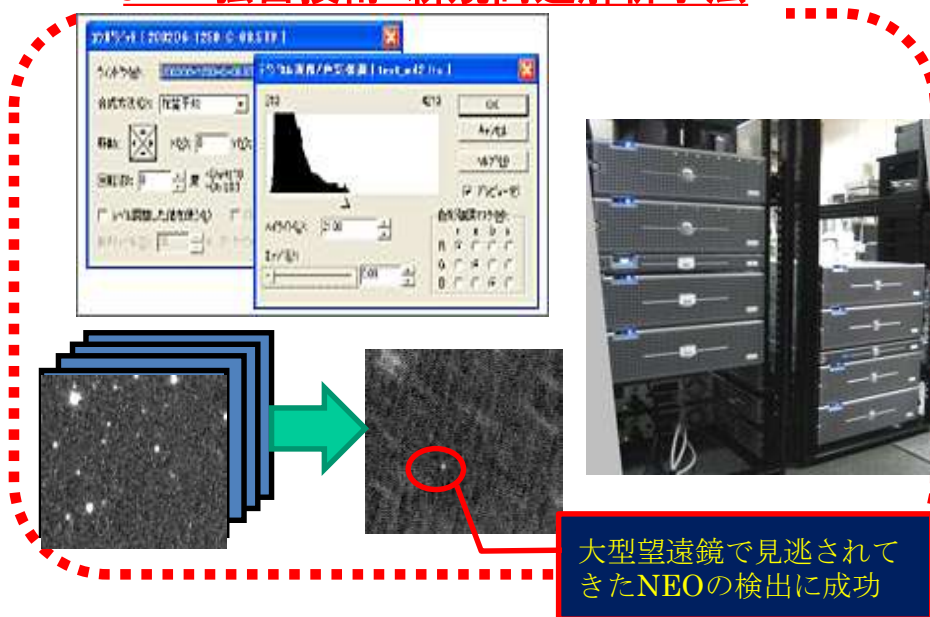
ミッション探求フェーズとして研究を開始

JAXa NEo Survey System (JANESS)

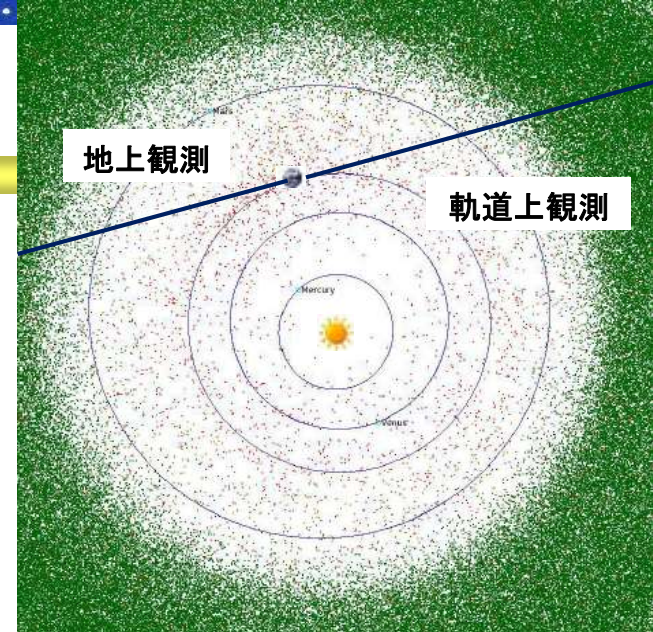
メンバー: 柳沢、黒崎、池永、杉本、神谷、吉川、黒田、平子

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。

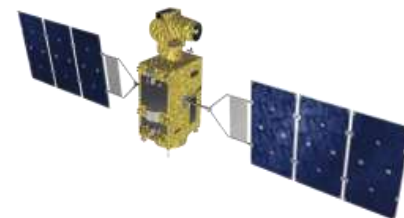
JAXA独自技術: 新規高速解析手法



メンバー募集中!!

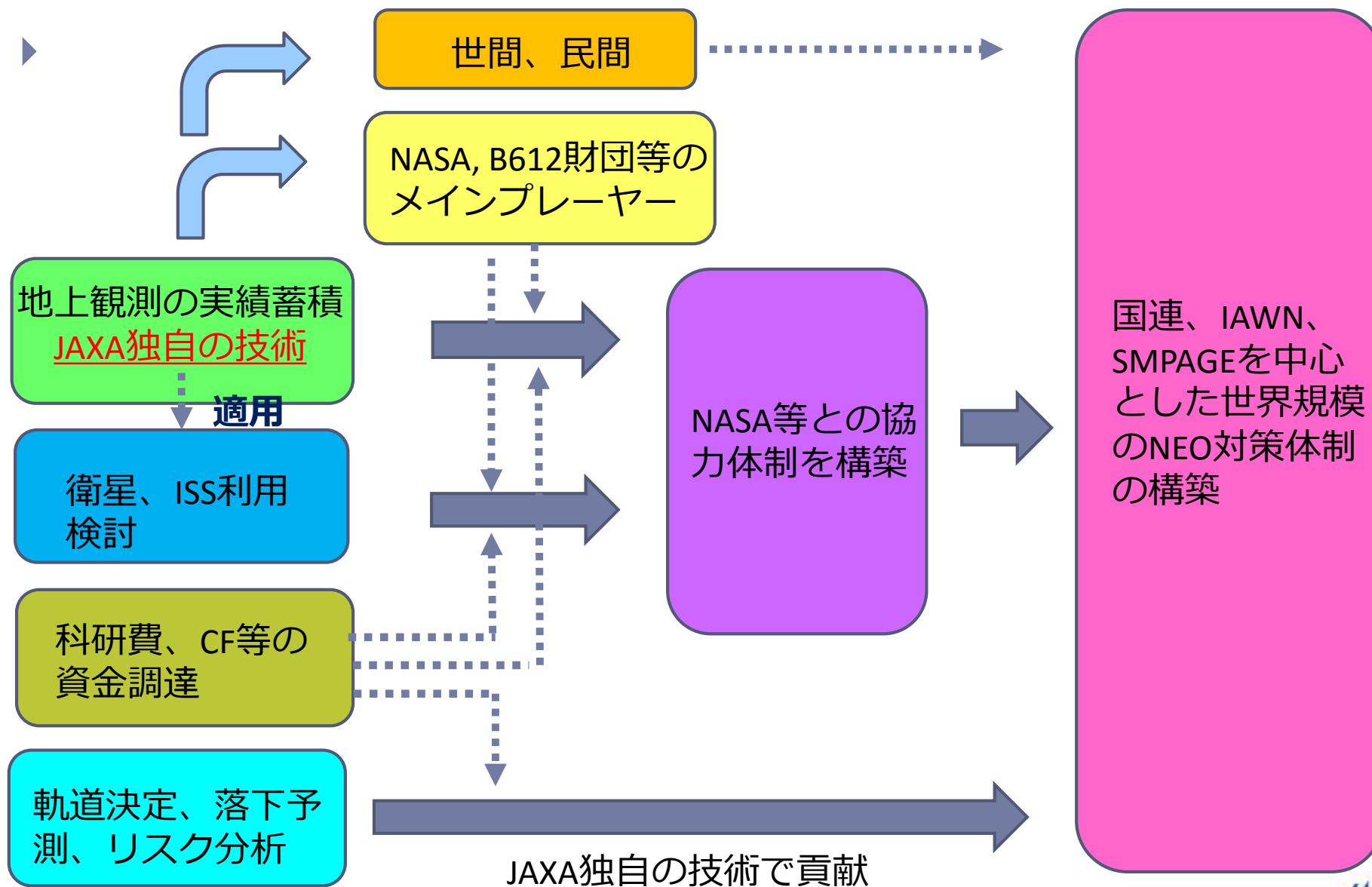


地上小型望遠鏡観測網



軌道上観測衛星群
16

ミッションの目標、方針



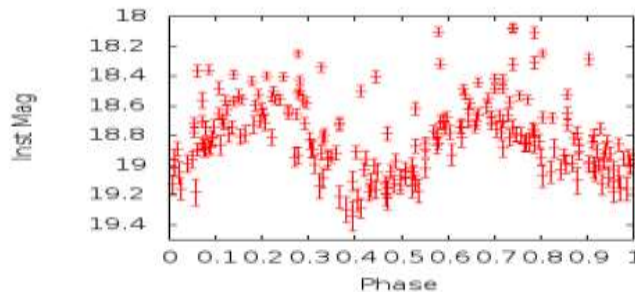
地上観測

地上観測: 2018年3月以降豪州で5つのNEOを発見(2018EZ2等)。追跡観測していただいたBSGC, なよろ市立天文台、Tomoe-Gozenチーム、石垣島天文台に感謝。

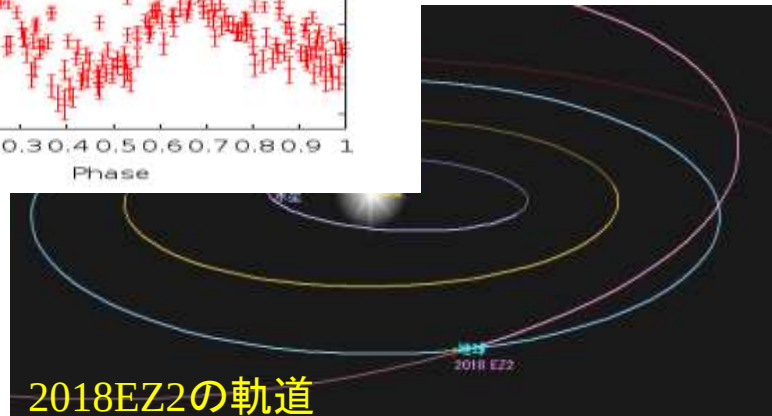


2018EZ2について

- ・日本時間3月14日11時24分頃に地球に0.0014 AU(月の軌道の約半分の距離)まで接近。
- ・サイズ18m程度。2013年のチェリャビンスクとほぼ同じサイズ。
- ・CSS, Pan-Starrsのサーベイをすりぬけてきたものを発見。
- ・高速回転していることも判明。(周期172秒: 科学的な価値)



2018EZ2の光度変化



2018EZ2の軌道



海外機関との協力関係を模索。NASAから資金提供を受けているハワイ大のAtlasチームとの共同研究を実施。AtlasのデータをJAXA手法で解析する。

衛星検討

衛星検討: 太陽同期軌道に10cm望遠鏡を投入

LST=12:00 のSSO軌道においてSEL直交方向を360degスキャンする方法。

太陽電池セル面を太陽指向して飛翔。

太陽方向軸周りに姿勢をステップ状に回転させる。

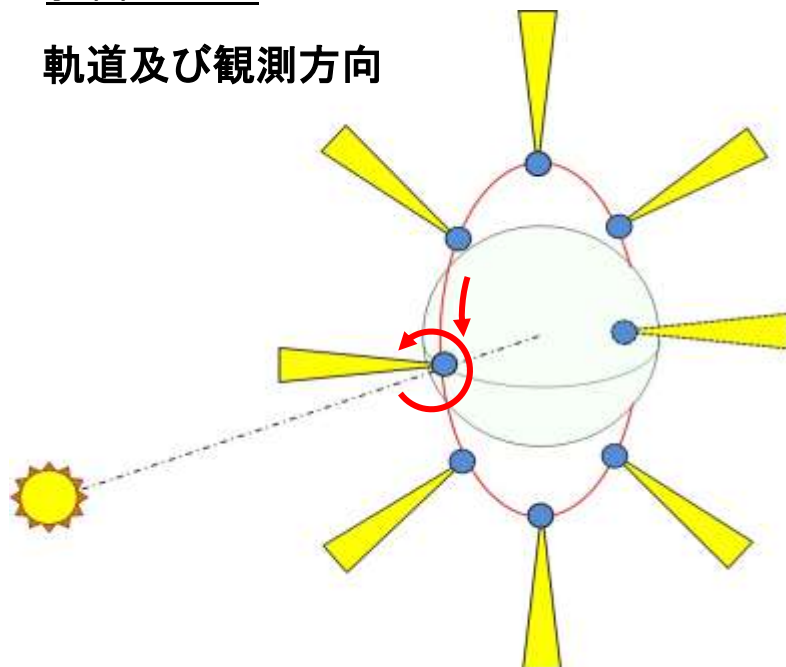
カメラが地球方向を指向しないように、カメラ視野方向と衛星軌道位置とを同期させる。

データ転送量を減らすため短時間露光の画像を位置補正してマッチングするオンボード処理及び画像圧縮を実施する。

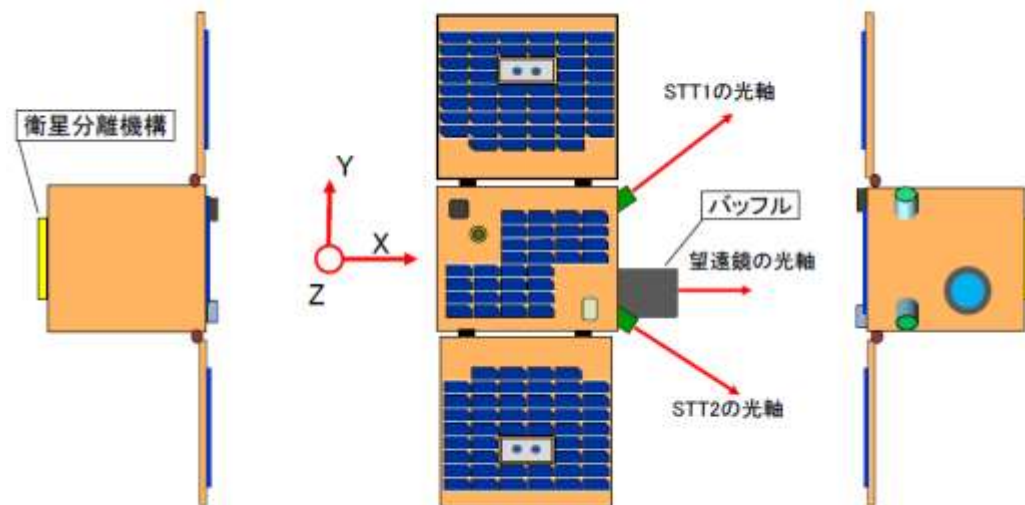
衛星1機のミッションからの開発費 約11~16億

ただし、データレコーダとデータダウンリンク用通信機の調達が課題であり、上記コストに影響する。

軌道及び観測方向



衛星コンフィギュレーション



衛星概観(両翼に展開パネル1枚)

ミッション探求フェーズの成果

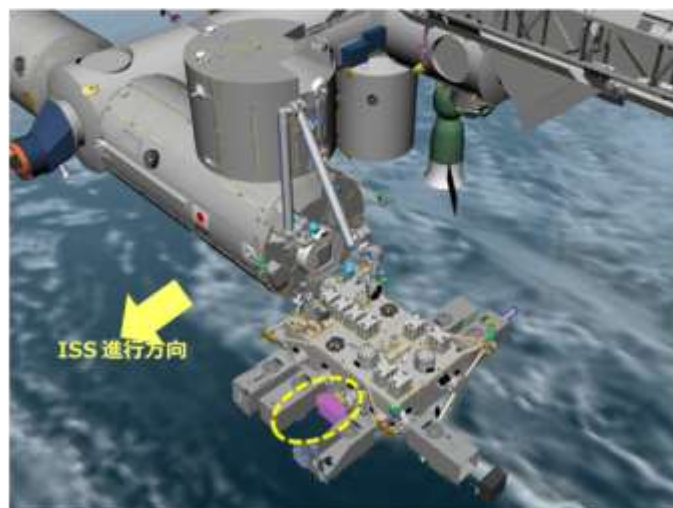
最新のGranvikモデルに基づき生成した擬似NEO群(総数約80万個)に対し観測解析を実施. 括弧内は20 m級までの推定総数300万とした場合の推定値. なお, 地上のケースは, 日照条件・天候等を考慮した推定値.

口径	概算規模	地上	地上+SSO	地上+SEL1	地上+AEP
10 cm	70kg級, 15億円程度	1,760 (6,600)	3,520 (13,200)	3,520 (13,200)	4,560 (17,100)
25 cm	100kg級 20億円程度	8,840 (33,150)	17,680 (66,300)	18,160 (68,100)	21,680 (81,300)
60 cm	500kg級 100億円程度	36,040 (135,150)	72,080 (270,300)	72,880 (273,300)	81,840 (306,900)

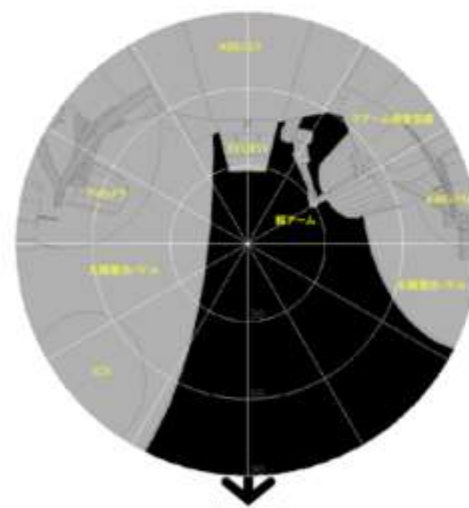
ISS利用の検討状況

NEOサーベイ小型衛星用光学系実証、軌道上運用実証、及び軌道上NEO観測プラットフォームとしてISS暴露部利用の実現性評価を実施した。

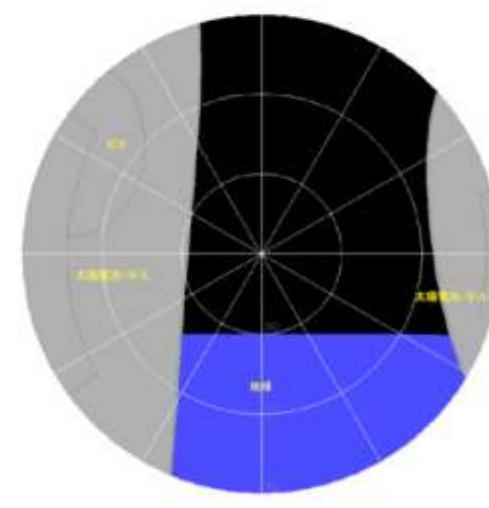
iSEEPを利用してNEO観測用の光学系を搭載する。



iSEEP



観測位置 : EFUS 標準実験ペイロードエンベロープ上最中央
観測方向 : 天頂方向



観測位置 : EFUS 標準実験ペイロードエンベロープ最前中央
観測方向 : フォワード方向 (ISS 進行方向前方)

視界

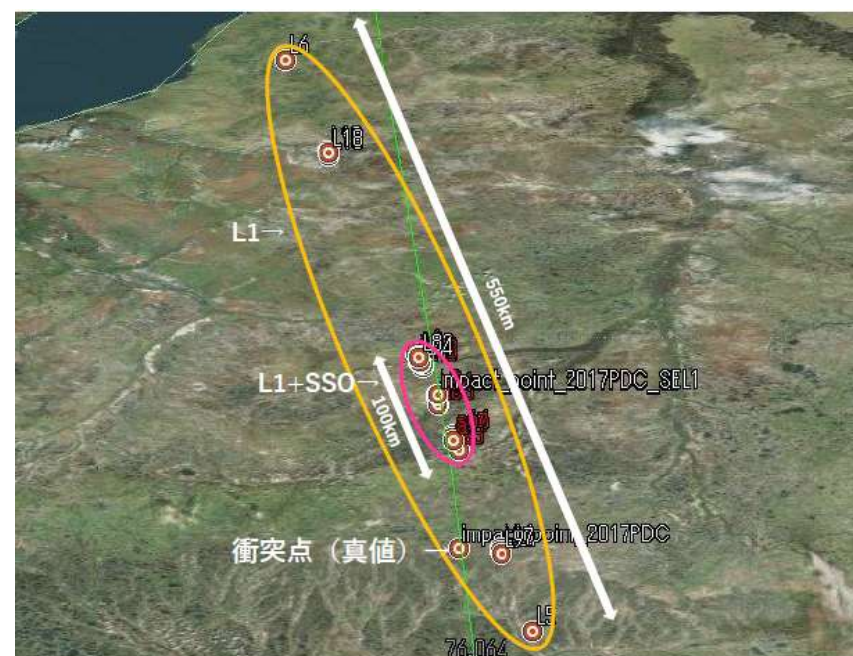
軌道決定・落下予測

観測データをMPCへ提供するだけでは今後の国際協力を見据えた場合力不足。
JAXA独自で軌道決定、落下予測ができる能力をもつ必要がある。

地球に衝突する架空のNEOを設定し、軌道上及び地上での観測を利用した際の軌道決定精度および落下地点の精度を評価した。



複数望遠鏡使用時の誤差共分散

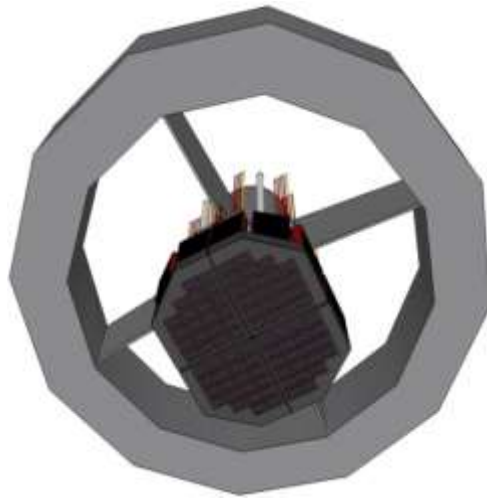


落下予測

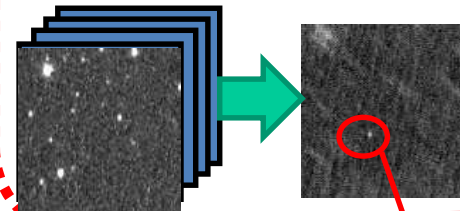
科研費の研究

今年度より科研費基盤(B)高速移動天体の検出による微小天体サイズ分布の解明がスタート(この後の講演)

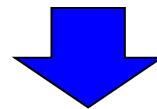
Tomoe Gozen



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



地球近傍を高速で移動するNEOを大量に発見

まとめ

我々は2016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。Pas-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。

昨年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内においても地上及び軌道上でNEOを監視するシステムの検討がミッション探求フェーズに採択され、NEO問題に積極的に取り組むべく研究活動を昨年度より開始した。豪州の遠隔観測施設を利用したサーベイ観測により、今年3月以降に5個のNEOを発見している。また、NEO観測衛星等の検討を進めている。