

# NEO新規発見手法とその成果 —近地球天体 2017 BK及び 2017 BN<sub>92</sub>の発見—



柳沢



黒崎

柳 沢 俊 史<sup>1</sup>・黒 崎 裕 久<sup>1</sup>・伊 藤 孝 士<sup>2</sup>・  
奥 村 真 一 郎<sup>3</sup>・吉 田 二 美<sup>4</sup>・小 田 寛<sup>5</sup>・  
池 永 敏 憲<sup>5</sup>・吉 川 真<sup>6</sup>

〈<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1；<sup>2</sup>国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1；<sup>3</sup>日本スペースガード協会 〒714-1411 岡山県井原市美星町大倉 1716-3；<sup>4</sup>千葉工業大学 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1；<sup>5</sup>宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1；<sup>6</sup>宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉

<sup>1</sup>e-mail: yanagisawa.toshifumi@jaxa.jp

地球に接近し衝突する可能性のある天体（Near Earth Object; NEO）を早期に発見しようと世界中のサーベイプログラムが毎晩観測を実施しているが、数十–数百mのサイズのNEOの多くがいまだ発見されていない状況である。われわれはこれに対し従来のNEO観測、検出手法とは全く異なる手法を提案している。新規アルゴリズムを用い、大量の画像から高速で暗いNEOの検出が可能で、コスト、NEO検出数等の観点から従来手法より優れており、今後のNEOサーベイの概念を一新する可能性を秘めている。2017年1月に実施した18cm望遠鏡を用いた試験観測において提案手法を用いて二つのNEOを連続発見した。NEOの日本での発見はおおよそ9年ぶりである。提案手法は既存のサーベイプログラムでは発見できなかったNEOの発見のみならず、太陽系天文学の新たな知見を与えることにも大きく貢献すると考えられる。

## 1. 序 論

近地球小天体（Near Earth Object; 以降はNEO記載）は太陽系のさまざまな場所から飛来し、太陽系進化の履歴を背負う天体である。しかもそれらは太陽系形成直後からおおむね“凍結保存”された惑星構成物質の破片であると考えられる。したがって、近地球小天体がどこからどのようにして地球近辺にやってきたのかを詳しく知れば、太陽系内での惑星構成物質の動径方向移動についての知見が得られ、惑星構成物質の空間分布が太陽

系史においてどう変化してきたのかという基礎データの取得につながる。そうしたデータは近年目覚ましい発展を遂げる太陽系外惑星の研究にも寄与するだろうし、太陽系小天体が果たしたとされる有機物質の輸送を介して生命の起源に迫る方法論にもなりうる。

昨今は各種のサーベイ観測により近地球小天体の発見は大きな進歩を遂げつつあるが、未解決な問題もまだ多い。例えば近地球小天体の主要な供給源は火星–木星間のメインベルトであると考えられてきたが、メインベルトからの天体供給量が

実際に地球近傍で確認されている近地球小天体の現在数と真に整合的かどうかはいまだ推定の域を出ない。近地球領域で天体の分裂破壊が頻繁に生じて個数を増したり、メインベルト以外からも多くの小天体が地球近傍に飛来しているなら、われわれがもつ力学的知見が本質的に誤っていることになる。また、過去数億年における近地球小天体との衝突履歴を残すとされる月面クレーター記録に基づく研究では、現在の近地球小天体の観測結果だけでは説明できない、相対速度の小さい天体群の存在が示唆されている<sup>1)</sup>。このような問題や矛盾の多くは近地球小天体のより詳しい軌道分布やサイズ頻度分布を知ることでしか解決されない。そのためには従来は発見率の低い領域にある天体を多数、そして効率的に検出する手法の開発が重要である。

また、NEOの問題は人類の安定的な繁栄のためには解決しなくてはならない重要な課題の一つである。過去に地球には多数のNEOが衝突しているはずであるが、記録に残っているものとしてはユカタン半島に衝突して恐竜を絶滅させた10 km級のもの、1908年、シベリア上空で爆発し2,000平方キロメートルを焼き払った数十m級のものや2013年、ロシア、チェリャビンスク上空で爆発し1,200名を負傷させた17 m級のものがある。NEOは数十mのサイズのものでも局所的には甚大な被害を及ぼすため、早期発見、対抗措置の実施が必要である<sup>2), 3)</sup>。これらの危険なNEOを発見するため、多くのNEOサーベイグループ<sup>4)-6)</sup>が毎晩観測を実施しており、近年その発見数は増加の一途をたどっている。詳細は本誌2月号に特集が組まれているためそちらを参照されたい<sup>7)</sup>。多くのサーベイグループがNEO探索を実施しているにもかかわらず、数十-数百mのサイズのものでは大部分が発見されていない。これらのグループは基本的には口径数メートルの望遠鏡1台に大面積のCCDカメラを装着し、撮影した数枚の画像を解析することによってNEOを検出

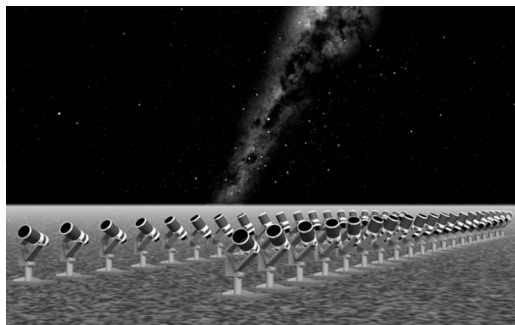


図1 NEO観測網。

するという手法をとっているが、そのような手法は地球近傍を高速移動するNEOの検出には不利である。そこでわれわれは地球近傍で高速に移動する数十-数百mサイズのNEOを大量に発見するためのNEO観測網を提案している。図1に示すように小型の望遠鏡を多数配置して天球の広い領域を一度に観測する。個々の望遠鏡で取得された数十枚の画像を従来法とは異なる画像処理手法で解析し、地球近傍を高速移動するNEOの検出を実施する。このようなNEO観測網は建設費、NEOの発見期待数等、従来の大型望遠鏡1台の観測システムと比較して優れている点が多い。2章において現在行われているNEO探索における問題点を提起し、3章においてこの問題を解決するための新たな手法を提案する。4章では既存手法の弱点とされるトレイルロスについて考察する。本年1月には試験観測において提案手法を18 cm望遠鏡で得られた画像に適用することによりNEOを2個発見した。日本でのNEO発見はおよそ9年ぶりで快挙である。5章では、本試験観測の詳細を述べ、6章においては既存手法と提案手法の違いを議論する。

## 2. 現在行われているNEO探索の問題点

図2にこれまでに発見されたNEOの絶対等級分布を示す<sup>8)</sup>。図2よりサイズ400 mあたりから観測能力の限界による発見数の減少が見られ、

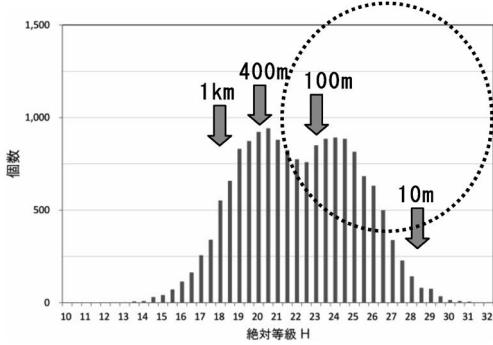


図2 NEOの絶対等級分布.

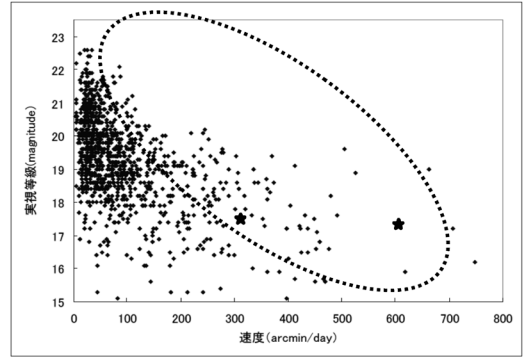


図4 NEOの発見時の明るさと速度.

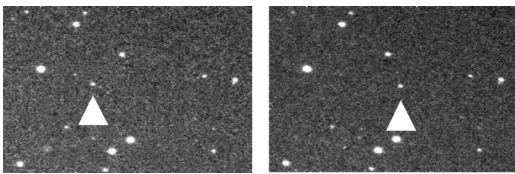


図3 通常のNEO発見手法.

数十-数百mのサイズのもの大部分が発見されていないことがわかる。既存の観測グループが用いているNEO発見手法は基本的には口径数メートルの望遠鏡に大面積のCCDカメラを装着して図3に示すように数十秒から数分の積分時間で数十分程度の時間間隔をおいた同一視野の画像を2-5枚程度取得し、恒星の間を移動していくNEOを発見するという手法である。これはNEOがその特異な軌道のため、移動方向、速度の予測が不可能であることによる。この手法には以下のような根本的な弱点が存在する。NEOが地球に接近してくると高速で移動するが、図3のような観測をしているとNEOは画像上に線状の航跡を描く。これではNEOからの光量が複数のCCD画素にまたがるため検出の効率がNEOの速さに比例して悪くなる（いわゆるトレイルロス）。一方、NEOが地球に近づいてくると高速で移動するが、同じサイズでも距離の2乗に反比例して明るくなる。図4に図2で示したNEOの発見時の明るさと移動速度を示す<sup>8)</sup>。横軸にNEOの速度を分角/日、縦軸は明るさを実視等級で表してお

り、値が高いほど暗いことを意味する。暗いNEOほど発見時の移動速度が遅いことがわかる。つまり、口径数メートルの大きな望遠鏡を使って暗いNEOを発見してもそれはNEOが地球から離れた場所にいるときに観測し、速度が遅いからこそ見つかったものであり結果的には小さいサイズのNEOを見つけたことにはならないのである。

### 3. 新規NEO発見手法の提案

#### 3.1 重ね合わせ法

2章において、従来の観測手法では地球近傍を高速で移動するNEOの検出が不十分であることが示された。これらのNEO、具体的には図2, 4中の円で囲まれた領域に存在するであろうNEOを効率よく検出するため、図1に示すような多数の小口径望遠鏡を利用し天球の広範な領域を一度に監視する観測システムを提案している。われわれはこれまで1枚の画像では確認できない非常に暗い宇宙デブリ等の移動物体を検出する重ね合わせ法という画像処理技術を開発してきた<sup>9)-11)</sup>。本技術を地球近傍を高速で移動するNEO検出に適用する。短い露出時間で撮影された数十枚のCCD画像について図5に示すように宇宙デブリの移動方向を仮定して画像の切り取りを行う。その後、すべての切り取り画像の中央値画像を作成する。この過程において仮定した移動方向と移動天体の移動方向が一致した場合、移動天体からの

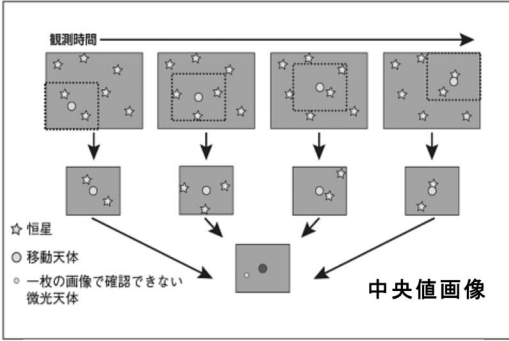
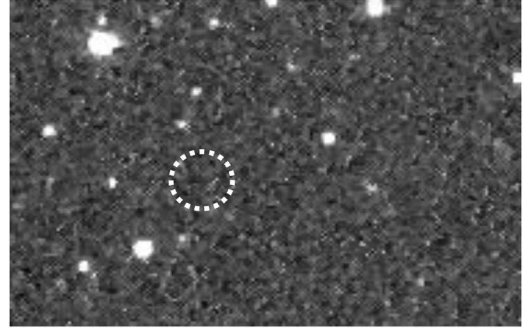


図5 重ね合わせ法.

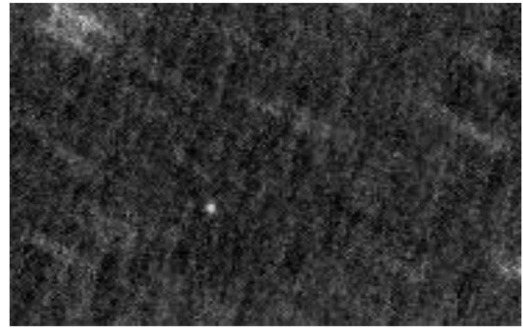
光子はすべての切り取り画像上の同じ画素に蓄積される。また、恒星は切り取り画像上では移動しているため、中央値画像を作成することによりほぼ完全に除去することができる。このような作業をあらゆる移動方向を仮定して実施する。これにより仮定した移動方向の一つと偶然同じ移動を示す非常に暗い移動物体の検出が可能になる。式(1)に本手法で利用した画像の枚数と背景雑音の関係を示す。Nは利用した画像の枚数、 $\sigma_{\text{final}}$  および  $\sigma_{\text{individual}}$  は、それぞれ重ね合わせ法の最終画像、1枚の画像における背景雑音の値である。この式より利用する画像の枚数が多いほど最終画像における背景雑音が低減され、暗い移動物体の検出が可能であることがわかる。図6にこの手法による移動物体の検出例を示す。(a)は1枚のCCD画像であり、(b)は40枚の画像を本手法で処理した最終画像である。一つの移動物体が検出されていることがわかる。この移動物体は(a)の円内に存在するはずであるが雑音に埋もれて確認することはできない。一方、(b)においては移動物体が明確に認識され、恒星は完全に除去されている。本手法の有効性は多数のメインベルト小惑星を新発見したことで証明されている。

$$\sigma_{\text{final}} = \frac{1.2}{\sqrt{N}} \sigma_{\text{individual}} \quad (1)$$

本手法の最大の弱点として画像の切り取りをあらゆる移動方向を仮定して行わなくてはならない



(a)



(b)

図6 検出例.

という点がある。メインベルト小惑星のようにある程度の動きが予想されるもの、またあらかじめ軌道要素のわかっている暗いデブリの追跡観測には有効であるが、動きの予想のつかないNEOの検出には膨大な解析時間を要し、現実的ではないことがわかった。例えば1,024×1,024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すべて検出しようとした場合65,536通り(256×256)の探索回数が必要であるが、重ね合わせ法がこれだけの回数の計算に要する時間は通常のPCで約280時間である。計算機を複数台ならべて並列で解析する手法も考えられるが、今後のCCDの大型化や画像読み出し速度の速いCMOSセンサーの発展を考えると新たなアルゴリズムの開発や斬新な技術改革が必要である。



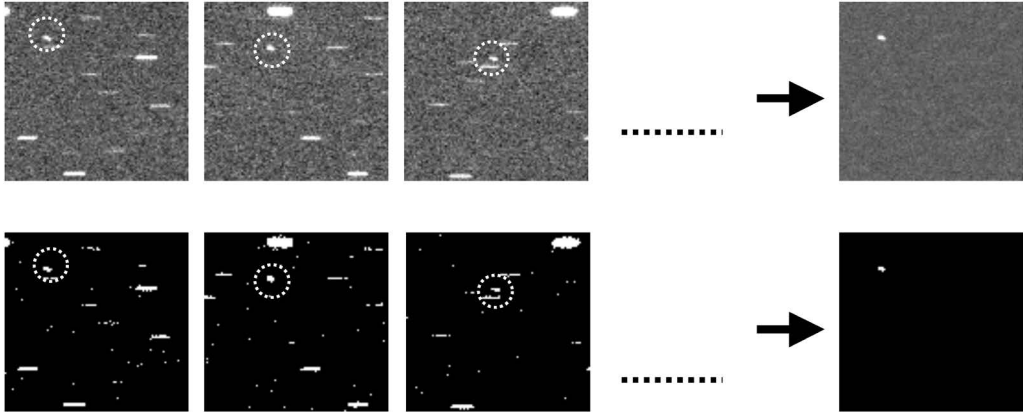


図7 (上) 16ビットの画像，複数枚を利用して中央値画像を作成している様子。(下) 16ビットのデータを2値化しその加算データのうちある閾値(閾値B)以上を示す画素を表示したもの。

### 3.2 新規アルゴリズムの開発

図5の重ね合わせ法で最も計算時間を要する部分は中央値を計算する箇所である。中央値の計算は複数ある値を値の高い順に並べ替え、中央の値を採用するというもので加算や平均と比較すると高い値を示す雑音の影響を受けなくて済むので、重ね合わせ法にとっては必要不可欠であり、肝となる部分である。われわれは、画像をある閾値(閾値A)で2値化し中央値の計算部分を計算速度の速い加算にして最終画像においてある閾値(閾値B)以上の値を示すものを移動天体とすることで、図5の重ね合わせ法とほぼ同じ結果を示し、かつ解析時間を飛躍的に短縮できることを発見した。図7にこれまでの重ね合わせ法と新規アルゴリズムの比較を示す。

既存の重ね合わせ法において利用する画像は通常各画素は65,536階調の16ビットの画像データを使用するが、新規アルゴリズムにおいては利用するすべての画像データがある閾値(閾値A)以上は1、それ以下を0という2値データに変換する(図7参照)。閾値Aの決定については後で述べる。移動物体の移動量を仮定して切り取ってきた画像についてはそのまま加算する。できあがった画像について、ある閾値(閾値B)以上を示すものがその移動量を有する移動物体と判断する。

この手法の利点を以下に述べる。まず、16ビットデータを1ビットデータに変換したことで扱うデータ量が16分の1と大幅に軽減された。次に2値化した画像の切り取り画像すべての中央値画像を作成するのではなく加算画像を作成することにより最も時間を要していた中央値の計算する必要がなくなった。

なぜ、中央値の計算の必要がなくなったかを述べる。移動天体検出方法では雑音となる恒星等の影響を除去するために中央値の計算を実施している。中央値は非常に大きな値を示す雑音(恒星や検出器の熱雑音)の影響を除去する目的において加算平均や加算より有効であるため移動天体検出方法で採用されている。しかし画像の2値化によって各画像における雑音の大小は関係なくなり、そこに移動物体もしくは雑音があるかないかのみ情報になる。また、2値化画像の切り取り画像を加算した結果は、その移動量をもつ物体もしくは雑音はその最終加算画像の示す位置に該当する各画像の位置に何回現れたかを示す。最終加算画像の示す値は0から利用した画像の枚数になるが、この値が利用した枚数の値に近ければ、雑音が偶然仮定した移動量の場所に多数回出現する可能性は低く、移動物体である可能性が高い。つまり、ここで最終加算画像についてある閾値(閾

値B)を設定しその値より大きいものを移動物体とすることが可能になる。このような操作により16ビット画像の中央値画像を作ったときとほぼ同じ結果を出すことが可能になる。

閾値AおよびBの選定について述べる。閾値Aにより画像中の何%が2値(0か1)のうち1を示すかを決定される。すなわち閾値を背景雑音レベルの $1\sigma$ とした場合、それ以上の値を示す画素が1となるため画像全体の16%が1となる。図8に画像中の値の頻度分布を示す。図8中で黒く塗られた部分が1を示す画素でありそのほとんどが雑音であるが、なかには背景雑音レベル $1\sigma$ 以上の値を示す移動物体の信号も含まれている可能性が

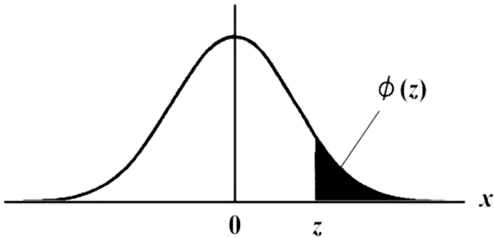


図8 画像中の値の頻度分布.

ある。N枚の画像を利用してある移動量の仮定をした場合、各画像の $1\sigma$ 以上の雑音が偶然その移動量で並ぶ確率は0.16のN乗になる。図9に用いるCCDの画素数を $1,024 \times 1,024$ 、仮定する移動量を16,384通りとしたときに、偶然、雑音が仮定した移動量のように並んで検出される(誤検出)回数の様子を3通りの閾値A( $0.8\sigma, 1\sigma, 1.2\sigma$ )について示す。横軸は利用した複数枚の画像のうち仮定した移動量に沿って1を示す画素がいくつあったかを示す。つまり閾値Bということになる。図9から以下のことがわかる。1の数が増えればそれぞれの閾値で雑音による誤検出の数が減る。また、閾値が $0.8\sigma$ のように低い場合は移動物体を検出するために、より多くの1を示す画素が必要になる。つまりより多くの画像を利用する必要がある。一方、閾値が $1.2\sigma$ のように高くなるとより少ない画像数で検出できる。当然 $0.8\sigma$ では $1.2\sigma$ より暗い移動物体が検出できる。より暗い移動物体を検出するためにはより多くの画像を利用する必要がある。移動物体を雑音と区別して検出するために、閾値Aを低くすれば閾値Bは多め

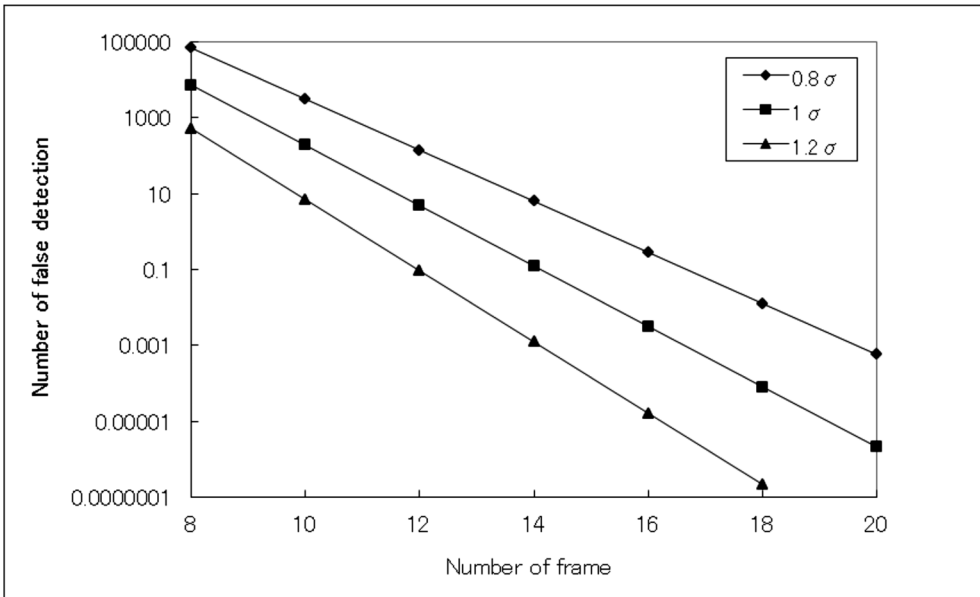


図9 仮定した移動量に沿って1を示す画素数と誤検出の関係.

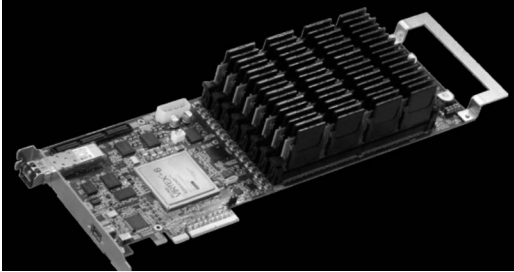


図10 専用FPGAボード.

に設定しておく必要があり、閾値Aを高くしておけば閾値Bは少なくてすむ．図9から閾値Aが0.8, 1.0, 1.2 $\sigma$ のそれぞれの場合、閾値Bが18, 15, 13あたりであれば雑音による誤検出をすることなく移動物体の検出が可能となることがわかる．この新しいアルゴリズムを用いることにより中央値を計算していた従来の重ね合わせ法と比べて解析時間を60分の1に短縮することが可能になった．

### 3.3 専用FPGAボードの製作

3.2節で示したアルゴリズムは複数の2値化データの一部を加算して閾値を設けて移動物体を検出するというもので比較的単純なアルゴリズムである．そこで、図5に示した解析においてこの部分を専用に行うFPGA (Field Programmable Gate Array) ボードを製作した．FPGAはこのような単純な計算を大量に高速で実行するのに適している．図10に製作したFPGAボードを示す．3.2節のアルゴリズムのFPGA化によりさらに解析時間を20分の1に短縮することが可能になった．2.2節の結果と合わせると従来の重ね合わせ法と比べて解析時間を1,200分の1に短縮したことになる．これは大きな進歩であり、今後、宇宙デブリやNEOの発見に大きく貢献するはずである．

## 4. トレイルロス

NEO検出の従来法の弱点とされるトレイルロスについて考察する．トレイルロスとはCCDセ

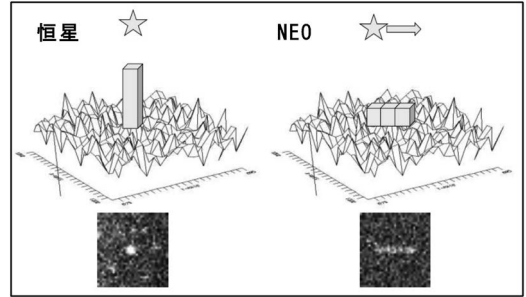


図11 トレイルロス効果.

ンサー上を対象（本研究の場合はNEO）が観測期間中に移動してしまうため、対象からの光子がCCD上の同一画素に集まらず複数の画素に分散してしまうため信号雑音比が劣化する現象である．図11にその概念を示す．恒星や移動方向のわかっている物体に対しては望遠鏡をその方向に合わせて駆動してやることでこの効果を打ち消すことができるが、未発見のNEOの場合は移動方向や速度は未知であるため通常は恒星の動きに合わせて望遠鏡を駆動し適当な時間、CCDセンサーを露光することによりNEOの検出を試みる．しかし高速に移動するNEOの場合は露光中に多くの画素に光子を分散させるため露光時間が長いほど信号雑音比が低下しその検出が難しくなる．世界の多くのNEO探索グループはより大きな望遠鏡でNEOの検出を実施することを検討している．大きな口径の望遠鏡を利用すればNEOからの光子を大量に集めることができるが、口径を大きくすることは相対的に光学系の焦点距離を長くすることになり、視野を狭くすることを意味する（もちろん大口径で短い焦点距離の光学系の製作は可能であるが、そのような光学系の製作は一般に困難で、経費もかかる．また、うまく性能をだすことができないこともよくある）．つまり同じ速度のNEOを同じセンサーを利用して観測した場合、小口径の望遠鏡のセンサー上を移動する距離よりも大口径望遠鏡のセンサー上を移動する距離が焦点距離に比例して長くなる（トレイルロス

の効果が大きくなる)。本研究で開発している手法は短い露光時間の画像を大量に利用しトレイルロスを打ち消すような画像処理を施すため高速で移動するNEOの検出が可能になる。

## 5. 試験観測

3章の新規NEO発見手法の有効性を確かめるために試験観測をJAXA入笠山光学観測施設で2017年1月17, 25, 26, 31日の4日間実施した。タカハシ製望遠鏡ε180 ED（口径180 mm, 焦点距離500 mm）2台に対し、1台にFLI製CCDカメラML23042を、もう1台にキヤノン製CMOSを装着して異なる視野を指向するよう望遠鏡を赤道儀に設置した。CCDカメラは約3.5×3.5°の視野をカバーしCMOSは4.4×2.5°の視野をカバーする。1回の露光時間をCCDは24秒、CMOSは26秒（CCDの読み出し時間2秒程度に対しCMOSは読み出し時間を無視できるためそれだけ長い露出時間をとることができる）として各視野で32枚の画像を取得する。1視野の観測時間を15分とし一晩40領域のサーベイ観測を行った。一晩で観測できる視野は約930平方度である。

CCD, CMOSの各センサーは専用のWindowsマシンで制御され、データはNASシステムに蓄えられる。解析はFPGAを内蔵したPC 2台をそれぞれのセンサーの主要部分の解析にあて、そのほか9台のリナックスマシンを1次解析に、1台のWindowsマシンを検出物体の確認、位置推定用に利用した。リナックスマシンは2 core搭載であるため二つのプロセスを同時に並列で処理することが可能である。15分おきに吐き出される32枚の画像データのすべての解析には2時間を要するが、9台のリナックスマシンを同時駆動させているため解析時間が観測時間を超えることはなく準リアルタイムで解析結果を得ることができる。検出物体の確認、位置推定用のWindowsマシンにはアストロアーツ製のステラハンタープロフェッショナルがインストールされている。ステ

表1 2017 BKの詳細.

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 (°)	110.9219
近日点引数 (°)	39.62114
平均近点角 (°)	0.82779
絶対等級	24
スロープパラメータ	0.15

表2 2017 BN92の詳細.

元期	2017-02-16.0
離心率	0.4833413
軌道長半径 (au)	1.922712
軌道傾斜角 (°)	1.0737
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

ラハンタープロフェッショナルは3.1節のアルゴリズムを利用した小惑星、彗星探索用のソフトウェアでJAXAがアストロアーツ社に技術移転して開発されたものである。

1月17日および31日のサーベイ観測中に高速で移動するNEOを1個ずつ発見した（2017 BK および2017 BN92）。両天体ともステラハンターで位置確認後、数時間後に追跡観測を行い、4点の観測位置を薄明前までにMinor Planet Centerへ報告した。それぞれのNEOの情報を表1, 2に示す。1月17日に発見した2017 BKについて、観測画像中に該当天体がいるとされる部分を切り出したもの、8枚の画像を重ね合わせたもの、32枚の画像を重ね合わせたものを図12に示す。1枚の観測画像ではほとんど確認ができないほど暗いということがよくわかる。また、図13に2017 BKの発見時の軌道を示す。地球軌道（内側から3番目の軌道）に接近している楕円が2017 BKの軌道である。われわれの狙いどおり、地球近傍を高速でかすめている時期に捉えていることがわかる。2017 BKの日々運動量は5°であった。検出時の実



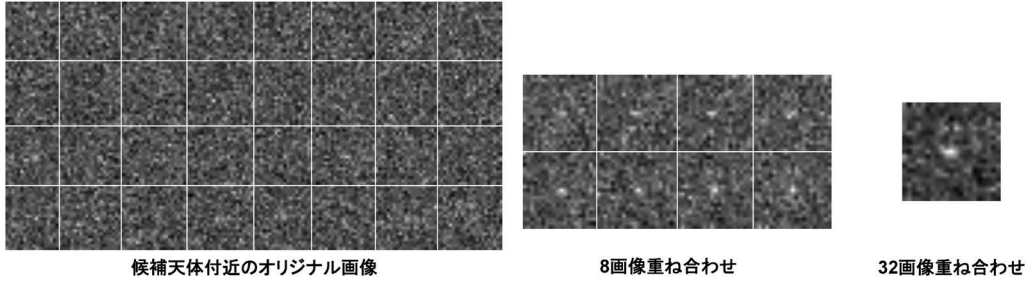


図12 2017 BKの観測画像.

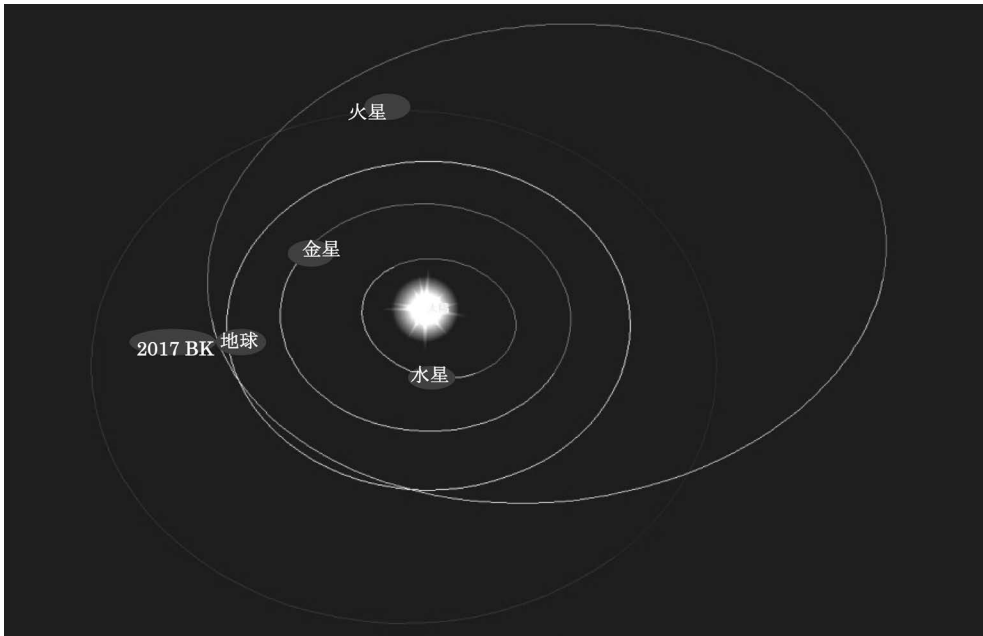


図13 2017 BKの発見時の暫定軌道.

視等級は17.5等で絶対等級は24等、およそ50 m サイズで発見から5日後の2017年1月22日に地球からおよそ600万km（月軌道の約16倍）まで接近した。図4に今回発見した二つのNEOの位置を星印で示した。提案されている観測手法が既存の観測手法では捉えられない高速のNEOの領域に対する検出能力があることがわかる。

## 6. 議 論

本試験観測では2台の望遠鏡を利用して4日間のサーベイ観測を実施し、2個のNEOを立て続

けに発見した。日本でのNEO発見はおよそ9年ぶりであるが、試験観測での発見頻度を見るとわれわれが推測しているとおりに、高速で地球近傍をかすめているNEOの相当数が未発見である可能性が高い。図1に示すような多数の小型望遠鏡を利用した観測網を構築することによりさらに多数のNEO、しかも地球に接近する危険なものを選択的かつ効率的に発見できるはずである。

表3に既存の観測手法と提案手法の比較を示す。望遠鏡の集光力に注目した場合、既存手法は口径数メートルの望遠鏡を利用しているためわれ

表3 既存手法と提案手法の比較.

	既存手法	提案手法
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	×	○

われが利用している 18 cm の小型望遠鏡と比較して圧倒的に勝るものがある。しかしこの集光力は高速で移動する物体に対しては2章で述べたようにトレイルロスの効果でありあまり有効に働かない。特に大口径になればなるほど相対的に視野は狭くなり同じ速度のNEOがつくるトレイルもセンサー上では長くなってしまい余計不利になる。NEOサーベイのようにどこにいるかわからない対象を探索する場合は視野が広いほうが断然有利であるためそういう意味でも小口径の望遠鏡のほうが有利である。

低速のNEOについてはトレイルロスの影響が少ないため既存手法が有利であるが高速NEOの検出に関してはトレイルロスの影響が少ない短時間露出の画像を多数利用する提案手法のほうが圧倒的に有利であり、試験観測結果もそれを証明している。

解析時間は数枚の画像中を移動している物体を探索する既存手法のほうが、大量の画像に対して複雑な処理を施す提案手法と比べて有利である。5章でも述べたが提案手法は32枚の画像の解析に2時間を要するが、計算機を並列化することにより準リアルタイムでの解析が可能であり、観測日のうちに発見報告が可能である。

コストに関しては提案手法が有利である。一般に望遠鏡の建設費用は口径の3乗に比例するといわれている。1 m 望遠鏡の建設には数億円程度かかるが18 cm 望遠鏡については数十万で購入できる。また、解析用のFPGAボードおよび計算機は

150万程度で準備でき、大量に利用する場合は価格をさらに低減できる。これはたいへん重要な要素で、より迅速に研究開発することができる。

投資のリスクという面でも提案手法は有利である。口径数メートルクラスのNEOサーベイ望遠鏡を購入しようとした場合、多くが新規設計の望遠鏡となり光学設計、鏡面精度や機械精度、など多くの厳しい要求仕様をクリアする必要がある。特にNEOサーベイには広視野が要求されるため必然的に無理な光学設計となり、巨額の資金投入にもかかわらず、要求仕様を満たさない可能性がある。市販の小型望遠鏡のほうは、多くのアマチュア天文家に評価されたものを安価に購入できるため投資リスクは極めて低い。

運用の利便性についても提案手法が有利である。提案手法は基本、豪州等、観測条件の良い場所における遠隔観測を想定している。簡易なスライディンググループに複数台の望遠鏡を設置し日本から遠隔で観測、解析を実施する。専用の建築物や観測要員を準備する必要がない。また、故障時について、既存手法の場合、大型の観測装置1台を運用しているため、些細な不具合でも全体の観測が長期間中断される可能性がある。提案手法は複数の望遠鏡を独立に制御できるため、一つの望遠鏡が不具合により稼働しなくても全体へのインパクトは少ない。また、市販品であるため不具合部分を修理せずに即時交換することが可能であり、復旧に要する時間を極力短縮できる。

## 7. 結 論

われわれは、Pan-STARRSやCSS等既存のNEOサーベイチームとは全く異なる戦略に基づく観測手法を提案しており、その手法はこれまでの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18 cm望遠鏡および専用解析FPGA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、本手法の有効性を示すことができた。

本手法を用いて図1に示すような小型望遠鏡を多数利用した新たなNEOサーベイプログラムを立ち上げることにより、これまで発見できなかった地球近傍を高速で移動するNEOを大量に発見できる可能性がある。このことは地球衝突天体の早期発見以外にも太陽系天体に関する新たな知見を得ることに大きく貢献するであろう。

今後は本システムでさらに検出数を増やすと同時に大規模化を目指して新規予算の獲得を試みたい。

## 謝 辞

本研究は科研費（16K05546）の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) Ito T., Malhotra R., 2010, A&A 519, A63
- 2) 日本スペースガード協会, 2013, 大隕石衝突の現実 (ニュートンプレス)
- 3) 地球衝突小惑星研究会, 1993, いつ起こる小惑星大衝突 (講談社)
- 4) <http://www.lpl.arizona.edu/css/>
- 5) <http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/>
- 6) <http://www.ll.mit.edu/mission/space/linear/>
- 7) 日本天文学会, 2017, 天文月報2月号スペースガード特集
- 8) [http://www.minorplanetcenter.net/db\\_search/](http://www.minorplanetcenter.net/db_search/)
- 9) Yanagisawa T., Kurosaki H., 2012, Trans. JSASS Aero Tech. Japan 10, Pr\_29
- 10) Yanagisawa T., et al., 2005, PASJ 57, 399
- 11) Yanagisawa T., et al., 2002, Trans. JSASS 44, 190

## New Search Strategy for NEO and Its First Result: Discovery of Two NEOs, 2017 BK and 2017 BN<sub>92</sub>

Toshifumi YANAGISAWA<sup>1</sup>, Hirohisa KUROSAKI<sup>1</sup>, Takashi ITO<sup>2</sup>, Shin-ichiro OKUMURA<sup>3</sup>, Fumi YOSHIDA<sup>4</sup>, Hiroshi ODA<sup>5</sup>,

Toshinori IKENAGA<sup>5</sup> and Makoto YOSHIKAWA<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu,

Tokyo 182-8522, Japan; <sup>2</sup>National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588,

Japan; <sup>3</sup>Japan Spaceguard Association, Ibara,

Okayama 714-1411, Japan; <sup>4</sup>Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0016, Japan;

<sup>5</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba,

Ibaraki 305-8505, Japan; <sup>6</sup>Japan Aerospace

Exploration Agency, Sagami-hara 252-5210, Japan

Abstract: Although many survey programs are trying to detect the near earth objects (NEOs) to prevent catastrophic collision to the Earth, most of the small NEOs with the size range from 10 m to a few 100 m have not been discovered, yet. We propose a new NEO detection method for such NEOs. Unlike the conventional strategy, many frames are analyzed to detect fast NEOs using a new algorithm. This system has better performance concerning the cost and expected detection number of NEO than the conventional strategy. In the test observation using two 18 cm telescopes, we succeeded in the discovery of two NEOs.