

入笠高原での未知小惑星の発見技術

黒崎裕久、柳沢俊史、中島厚

JAXA

Discovery Technology for Unknown Minor Planets in Nyukasa highland

Hirohisa Kurosaki, Toshifumi Yanagisawa and Atsushi Nakajima

Abstract

Institute of Aerospace Technology (IAT) of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is developing the optical observation technology as one of the space debris researches. The space debris and the minor planets are observed in this observatory with two telescopes. Applying the detection technology of the space debris, it developed the moving object detection software which can discover the asteroid. A small telescope of the caliber 35cm enabled the discovery of the faint minor planet of 22-magnitude by using the moving object detection software. As a result, the minor planets of the main belt is discovered, many new designation has been acquired.

Key Words: Minor Planets, Optical Observation, Telescope, CCD Camera, Detection

1 はじめに

JAXA総合技術研究本部ではスペースデブリ対策の一つの研究として光学観測技術の研究を進めており、未知デブリの検出や軌道決定を目標にしている。観測技術開発の拠点として、長野県入笠高原に観測施設を設置している。ここでは主にGEO, GTOなどの高々度デブリの観測をしながら応用として小惑星の観測研究を行っている。観測所に設置した2台の望遠鏡を自動観測ソフトによって制御し、取得した画像データから微光移動天体を自動で検出する技術を開発している。移動天体検出ソフトを用いることで小口径の望遠鏡ながら22等級もの暗い微光小惑星の発見に成功している。

2 小惑星の発見

我が国はかつて小惑星発見大国といわれるほど、アマチュア天文家による小惑星の発見が盛んであった。ところが、地球近傍小惑星が問題となり、10年ほど前に国際的なサーベイプロジェクトが開始された頃を境に、日本での発見は激減してしまった。これは海外での大型望遠鏡による観測が毎夜続き、明るい小惑星を根こそぎ発見してしまうため、アマチュア天文家が持つような小型望遠鏡では対抗できなくなり、ほとんどの小惑星ハンターがあきらめてしまった。5年前には日本での年間発見個数が数個という窮地に陥ったが、ここ2,3年は増え出している。これはJAXAによる小惑星の発見が始まったからである。図1に過去10年の小惑星センターに登録された仮符号数の推移を示す。

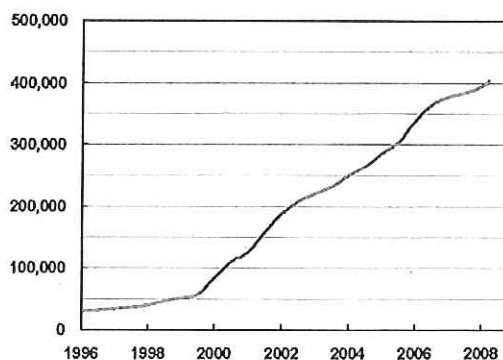


図1 小惑星仮符号数の推移¹⁾

3 入笠山光学観測所

入笠山光学観測所は、主に静止軌道上の人工衛星やデブリの光学観測技術の研究施設として、長野県伊那市高遠町の入笠高原、入笠牧場内に設置された。観測所は北緯35°54'05"、東経138°10'18"、に位置し標高は1870mである。図2の写真は入笠山頂から観測所方面を写したものであり、観測所がある大沢山と入笠牧場、後方には諏訪湖を望むことができる。ここに観測所を移設する前は、牧場を数百m降りたところにある入笠山アマチュア観測所の隣に設置してあったが、周囲の落葉松が成長し観測に支障をきたすため、見晴らしのよい山頂付近に移設した。入笠山付近は地形からみて八ヶ岳よりも気流が安定しており、空気が澄み観測には適している。冬季の日中の晴天率は85%と高く、東京から近く観測に行くのが容易である。



図2 入笠山から見た光学観測所の風景

入笠山光学観測所は直径3mのドーム2つとプレハブ小屋2つから構成される(図3)。ドームの下は観測制御室となっており階段を上ることで屋外に出ずにドームへ入ることができる。第1ドームは2年前に設置され35cm望遠鏡を用いた観測を開始していた。第2ドームには、サーベイ観測を主とするための25cm望遠鏡を設置しており、観測機器の研究開発も進めている。この観測所は常時滞在者はおらず、現在のところ新月を挟んだ前後2週間を観測期間としており、我々が観測に出向いている。今後は画像解析を含めて外部からのリモート観測についても検討している。



図3 入笠山光学観測所の外観

3 観測システム

3.1 35cm望遠鏡と2K2KCCDカメラ

第1ドームに設置した35cm望遠鏡はニュートン式反射望遠鏡で高橋製作所製 ϵ -350Nであり、焦点距離は1248mm、F3.5である。赤道儀は昭和機械製作所製のフォーク式赤道儀25EFを用いている。CCDカメラは英国e2V technologies社の2K2K_400万画素裏面照射CCDチップを用いたナカニシ・イメージ・ラボ製である。CCDの冷却はペルチェ方式であるが排熱処理のため冷却水の循環を行っている。この望遠鏡とカメラの組み合わせで視野角は1.28deg.四方となる。図4 に35cm望遠鏡

と2K2KCCDカメラを示す。この観測システムが小惑星探索の主要装置となっている。

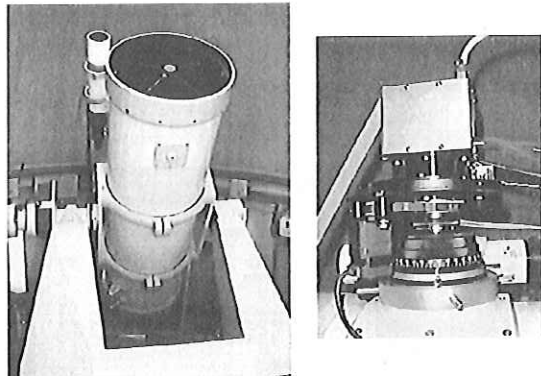


図4 35cm望遠鏡と2K2Kカメラ

3.2 25cm望遠鏡と4K4KCCDカメラ

第2ドームに設置した25cm望遠鏡はペーカー・リッチー・クレチアン方式の高橋製作所製BRC-250である。焦点距離は1268mm、F5.1である。赤道儀は昭和機械製作所のエキセントリックエルボ式赤道儀25ELである。25cm程度の小型望遠鏡であれば2台まで同架可能である。CCDカメラは英国e2V technologies社の2K4K裏面照射CCD2枚を用いたモザイク構成のナカニシ・イメージ・ラボ製4K4Kカメラである。このカメラは冷凍機冷却方式を採用しており、冷凍機により冷却された冷媒(ハイドロフルオロエーテル)をCCDカメラまで循環させることでCCDの冷却を行っている。冷媒は-100℃以下まで下がり、CCDも-88℃を達成している。25cm望遠鏡との組み合わせで視野角は2.5deg.四方である。図5 に25cm望遠鏡と赤道儀そして4K4KCCDカメラを示す。

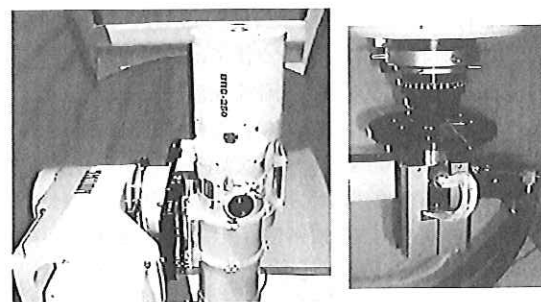


図5 25cm望遠鏡他と4K4Kカメラ

3.3 観測ソフト

観測所内の望遠鏡赤道儀とCCDカメラは統一したソフトウェア(デブリ自動観測ソフト)で制御できる。スケジュール観測が可能で、指定時刻に指定した視野に望遠鏡を向け、指定した撮影を連続で行える。視野

導入は赤道座標，地平座標，衛星直下点座標により指定でき星図上からの導入も可能である(図6)。一晩の様々な観測(露出時間、撮影枚数ほか)をスケジュール設定により自動で行える。

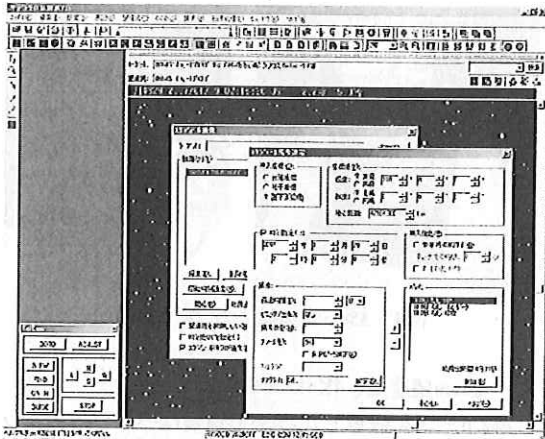


図6 自動観測ソフトのユーザーインターフェース

3.4 時刻管理

観測所のシステムは特にデブリ観測に重点を置いている。観測時刻の精度を高めるために、全てのカメラはGPSから取得した正確な時刻情報を基に、カメラに取り付けられたセンサによってシャッターの開閉時刻を1msec単位で取得し、画像を保存する際にfitsヘッダに記録している。

4 移動天体検出方法

観測したデータは観測所内で即座に移動天体検出ソフトによって解析することを目標にしている。このソフトは小惑星など移動天体のモーションを仮定して画像をシフトさせながら重ね合わせることで移動天体の検出を行うものである²⁾。これにより1枚の画像ではノイズに埋もれ従来のブリンク法では確認できないような微光小惑星などの移動天体を検出可能である。既にこの検出ソフトの検出能力は、これまでに同観測所において多数の小惑星を発見していることから、2倍の口径をもつ望遠鏡以上に相当する性能があることが実証されている。現在は296個の仮符号を取得している。

移動天体検出ソフトでの探索の流れは次のとおり。

- ・ダーク/フラット補正
画像のノイズ，ムラなどを補正する
- ・視野マッチング
カタログとのマッチングで視野の特定する
- ・位置合わせ
望遠鏡の追尾ずれを補正する
- ・スカイレベル補正
スカイの明るさを揃える

- ・恒星マスク処理
探索に邪魔な恒星のみを除去する
- ・一次探索
モーションを仮定し画像を重ね合わせて探索
- ・二次探索
モーションのチューニング、ふるい分け、ブリンクでの最終確認
- ・精測
正確な赤道座標の測定と光度を測定する
- ・軌道決定/同定
軌道決定・数夜の観測の同定する
小惑星センターでの既知未知の判断
- ・星図表示
検出位置の確認と既知小惑星を表示する
今後の小惑星の位置を推算する

これらの処理の流れに沿って探索を行うことで初心者でも容易に小惑星の検出が可能になっている。

5 観測と探索

最近の観測として2007年12月16日の例を示す(図7)。これは赤経6時13.5分、赤緯+32度30分付近を3分露出で40枚撮影した画像を解析したものである。探索モーションは赤経-20.6~-10.6分角/日、赤緯-6.7~7.3分角/日で行っている。観測視野1.3deg.内には17.8~21.4等級までの既知小惑星が18個あり、このソフトによってすべて検出できている。さらに図中の黄色の丸で囲んだものが未知小惑星で20.4~21.7等級の28個ほど検出している。このように既知小惑星を上回る数の未知小惑星が検出できている。これらは前述のモーションに限って検出を行っているため、このモーションを拡げるとさらに小惑星が検出できる可能性もある。ただし、モーションを拡げるとそれだけ探索にかかる時間がかかるのでどこまで検出するかの見極めが必要である。

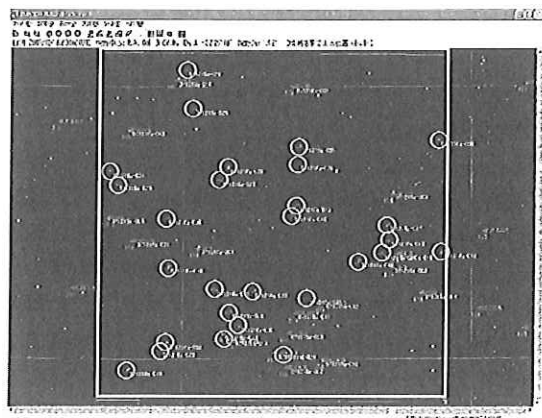


図7 2007年12月16日の観測から検出した小惑星
丸印が未知小惑星

6 小惑星の検出状況

図8,9に最近の未知小惑星発見の仮符号取得数の傾向について美星スペースガードセンター：BSGC（観測所コード300）と入笠山光学観測所（同408）を示す。

BSGCでは3分露出を5〜7枚撮影し、目視プリンクによる小惑星の検出を行っている。取得した仮符号を見ると20等級付近にピークがある。

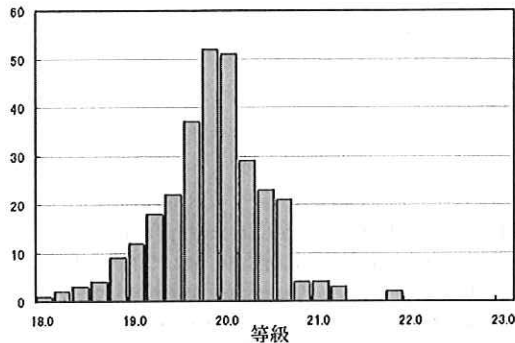


図8 BSGCの1mの仮符号取得等級
2007.8.9~2007.12.9 JSGC WebNews³⁾

一方、入笠山では3分露出を40枚程度撮影し、探索ソフトによる小惑星の検出を行っている。取得した仮符号を見ると21等級付近にピークがある。

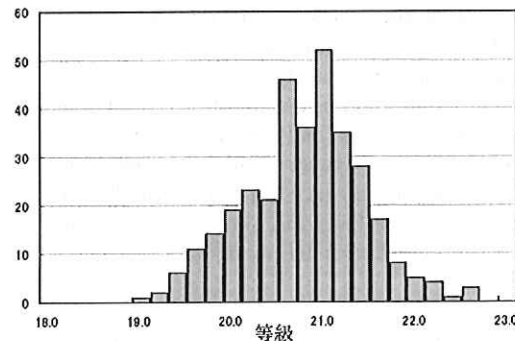


図9 入笠山0.35m+探索ソフトの仮符号取得等級
~2007.3.18

なお、これらは傾向をみるために単純に発見等級の個数を比較したことに注意されたい。それぞれ探索の目的も異なり、撮影条件、探索方法も異なる。BSGCではNEO発見が主目的でありできるだけ多くの領域をサーベイするが、入笠では技術開発のためにある領域を深く探索している。なお、探索ソフトを用いた場合5枚程度の少ない枚数でも目視と同等の検出が可能であることは把握できている。ただし、通常のメインベルト小惑星でのモーションを逸脱しているような特異小惑星などの探索については、さらに探索を広げる必要があるが、これらの検出向上を図っているところである。

7 探索の高速化（分散処理）

デブリ探索ソフトでの一次探索は、設定したシフト量に応じて画像を移動させて重ね合わせる処理を繰り返すために最も計算時間を要する。この探索問題をいかに短縮するかがNEO発見等のポイントとなるが、現在はPCを探索サーバーとして多数用意し、それぞれに探索範囲を分散させることで計算時間の短縮を図っている。図10にネットワーク分散処理のイメージを示す。サーバーPCには一次探索のみを行うソフトを入れネットワーク接続しており、クライアントPCは探索のシフト量を各PCに配分する。性能が異なるPCを用いたとしても、それぞれのPCの能力をあらかじめ設定することで、すべてのPCでの探索がほぼ同時時間で終わるように自動配分している。クライアントPCは最後に各サーバーからの探索結果をまとめてソートする。この方法ではクライアントPC1台で探索した場合に比べサーバー数台を用いた場合では、ほぼ台数分の高速化が可能になっている。

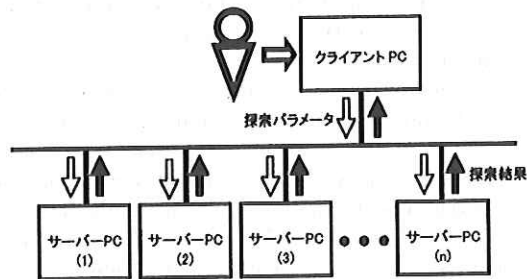


図10 分散探索のイメージ

これにより、探索範囲を広げてあらゆる方向と移動速度での探索が可能になり、比較的暗いNEOの検出も短時間で可能になると思われる。

8 考察

JAXAでは入笠山光学観測所を設置してデブリの光学観測技術の研究を進めながら小惑星の探索も行っている。現在は2台の望遠鏡で観測機器の研究と本格的な観測を始めている。観測で得られた画像は移動天体検出ソフトで自動検出している。探索処理の高速化を図るために分散探索を行ったところ効率的な結果が得られた。今後はNEO発見等にも視野を向け、さらに検出方法の効率化を図ったアルゴリズムも検討していく。

参考文献

- 1) <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>
- 2) Yanagisawa, T. et al, *Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects*, PASJ, 57, pp.399-408, 2005.
- 3) <http://www.spaceguard.or.jp/ja/index.html>

(2008年3月23日受付, 2008年6月15日受理)