

新たなNEO観測手法の提案 -その2-

柳沢俊史¹⁾・黒崎裕久¹⁾・藤田直行¹⁾

¹⁾JAXA

New Observation Strategy of NEO

Toshifumi YANAGISAWA¹⁾, Hirohisa KUROSAKI¹⁾ and Naoyuki FUJITA¹⁾

Abstract

In order to secure the activities of our human being on Earth, finding NEOs is one of the most important issues to be addressed. As present observation strategies of all over the world is conventional, there may be some dangerous NEOs that are not detected yet. In this paper some evidences of those NEOs are shown and a new observation strategy of the NEOs is proposed.

Key Words: NEO, optical observation

1. 序論

地球接近天体の早期発見、軌道決定は人類が未来永劫存続するためにも積極的に取り組むべき課題の1つである。世界には多くの地球接近天体 (NEO) サーベイプログラムが存在するが、多くが同様の観測手法、データ解析手法をもちいている。そのため特定の軌道をもつNEOが世界のサーベイ観測で検出できていない可能性がある。本論文ではこのようなNEOの存在を示唆する状況証拠を2つあげ、その軌道を推測する。その後、推測された軌道のNEOが地球からどのように観測されるかを示し、それに対応した観測手法を提案する。

2. 未発見NEO存在の状況証拠

2. 1 月の若いクレータの非対称性

月は自転周期と公転周期が同期しており、常に公転の進行方向に同一面をむけている。このためランダムにNEOが飛び交う中を地球が通過していれば月の公転の進行方向に多くのNEOが衝突することになる。地球と

の相対速度が遅いほどその影響は顕著になるはずである。諸田らは比較的若いとされる光条クレータの非対称性を調査した結果、進行方向及び反進行方向の光条クレータ数は1.67倍の違いがあることを発見した。¹⁾そこで伊藤らは現在までに発見されている約9000個及び観測バイアスを考慮した約9000個NEOを数値シミュレーションにより1億年分の軌道伝播をさせ、月に衝突したNEOによるクレータの非対称性を調査した結果、現存のNEO場合、非対称性は1.4倍、観測バイアスを考慮した場合は1.32倍であった。^{2), 3)} 諸田らの観測結果1.67倍、及び伊藤らのシミュレーション結果1.4倍、1.32倍の非対称性を生じるためのNEOの地球に対する相対速度はそれぞれ約10km/s、17km/s、21km/sである。つまり、実際のクレータ非対称性を生じさせたものは現在のNEOより地球に対して遅い相対速度を持っていることになる。それはどのような軌道を持つ天体なのだろうか？

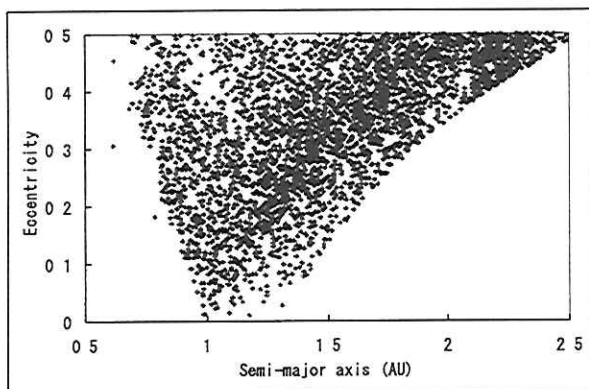


図1: NEOの軌道長半径、離心率分布

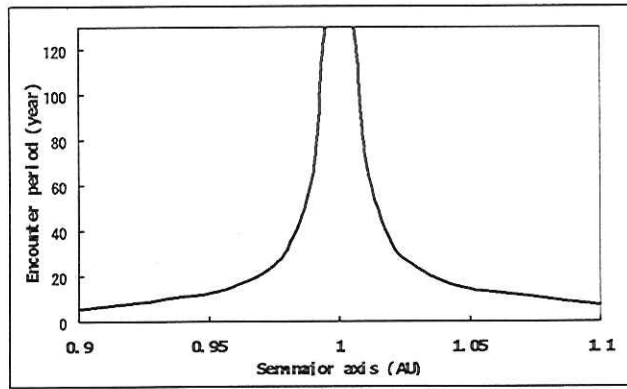


図2: ENEOの軌道長半径と地球との会合周期

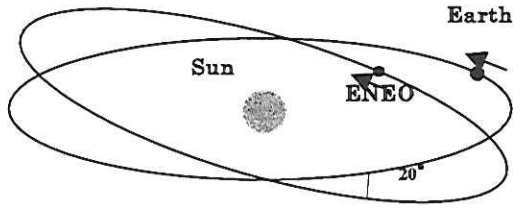


図3：仮定した ENEO の軌道

2. 2 NEOの軌道長半径-離心率分布

図1にApollo、Amor、Aten 3つのNEO群を合わせた軌道長半径-離心率分布を示す。⁴⁾ 図1から軌道長半径1AU、離心率0付近のNEOの数が少ないことがわかる。これは実際にその付近のNEOが少ないのではなく、地球に非常に近いNEOは天球上を非常に高速で移動していくため、現在の観測、解析手法では検出できていない可能性もある。

3. ENEO (Earth coorbiting NEO) とその見え方

このような状況から軌道長半径1AU程度、離心率も0に近い地球と非常に似たような軌道を回る天体の可能性が考えられる。このような天体を仮にENEEO (Earth coorbiting NEO) と呼ぶことにする。図2にENEEOの軌道長半径に対する地球との会合周期をあらわす。軌道長半径が1AUに近いほど会合周期長くなることがわかる。1.02AUの場合は34年、1.005AUの場合は130年である。人類がCCDカメラや自動追尾赤道儀など高性能な観測装置を手にして30年程度しかたっていない。つまりこのようなENEEOは会合周期が長すぎるため、いまだ現代天文学の観測機器による観測機会に遭遇していない可能性が高い。そこでこのようなENEEOが実際に地上で観測した場合、天球上をどのように移動するか調べてみた。簡単のために地球は軌道長半径1AU、離心率0とし、ENEEOは軌道長半径1.02AU、離心率0、軌道傾斜角 20° 、 $H=23$ (100mサイズ) とした。図3に仮定したENEEOの軌道の様子を示す。軌道傾斜角を 20° とした根拠は地球とENEEOの相対速度が月の光条クレータの非対称性から導出される衝突天体の相対速度10km/sとなるためである。図4に地上から観測した際のENEEOの黄経、黄緯の様子を表す。各図の左上に黒枠で囲まれて数値は最も地球とENEEOが接近する日をXとしたときの日付を示す。また、図中の赤で示した数字はENEEOの天球上での日々運動量を角度であらわし、濃緑で示した数字はENEEOの実視V等級を示す。実視V等級はENEEOまでの距離、位相角を考慮して計算した。位相角による減光を計算する際のGパラメータはENEEOをSタイプの小惑星と仮定し0.25とした。また、各図の右に該当する期間の太陽、地球、ENEEOの位置関係を示した。図4をみながら以下のような考察が可能である。地球とENEEOの会合周期は

34年であるため、ENEEO-太陽-地球のなす角度は1年に 11° 程度変化する。つまり、地球からみるとENEEOは非常にゆっくりとした速度で地球に近づいてくるように、また、ENEEOは 20° という軌道傾斜角を持つため、黄道に垂直に1周期で一回の上下運動をしながら近づいてくるように見える。図4(a)、(b)はそのような状況を表しており、黄緯方向の振幅が徐々に増幅しているのは地球とENEEOの距離が近づくにつれてENEEOの軌道傾斜角による上下運動が大きくなるためである。地球からみたENEEOの黄道に水平方向の動きは図4(a)、(b)あたりではあまり変化しないが、黄経、黄緯は天球に固定されるために地球の公転により1年で一周する。その影響が黄経の変化である。図4(c)は地球に最もENEEOが近づく $X=0$ 近傍の様子を表している。図4(c)からわかるようにENEEOの明るさ、天球上での運動ともに大きく変化する。 $X=0$ に近づくにつれて明るさは急速に上昇、それに伴い日々運動量も大幅に増加する。2週間程度で明るさは100倍に速度は8倍になる。 $X=0$ を通過後は $X=0$ 通過前とほぼ逆の変化を辿る。図4(c)に示した変化はENEEOの最接近距離、位相角ともに最も小さくなる、つまりENEEOが最も明るくなる時のもので、ENEEOの昇交点黄経の違いにより最大輝度は14.8~18.4等まで、最大日々運動量は $7.5\sim 16.3^\circ$ まで変化する。

4. 新たなNEO観測手法

3章でみてきたようにENEEOは高速で天球上を移動する、また最接近時は明るさがかなり増す一方速度もさらに高速になる。このような天体はこれまでのNEOサーベイ観測ではほぼ検出不可能と思われる。図5に $120^\circ \times 120^\circ$ の視野(地平線上の天球の約70%)を4日、9日、16日かけて掃天観測した場合の高速移動天体の検出効率を示す。図5は簡単のためある1つの軌跡についての結果を示したのみであるが、おおよその傾向はつかめるとと思われる。 $120^\circ \times 120^\circ$ を4日、9日、16日で掃天するという事は1日に3600、1600、900平方度を観測するという事で現在世界で行われているNEO観測プログラムの観測装置の視野を考慮すると妥当であると考えられる。図5からわかるようにNEOの速度が速いほど検出効率が下がることがわかる。これは高速で移動するNEOが掃天観測に際し、ある領域を観測している時間帯に別の領域に存在しておりその領域を別の日に観測してもすでにそこにはNEOがないという状況を表している。さらに図5は観測の支障となる天候や月、銀河面の位置の影響を全く考慮ので図5の検出効率は実際はさら4分の1-5分の1程度になるはずである。図5から地球に最接近するENEEOをとらえるには毎晩、全天を観測するよう観測システムが必要であることがわかる。以下ではENEEOが地球に最接近した際に

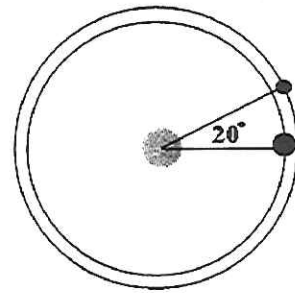
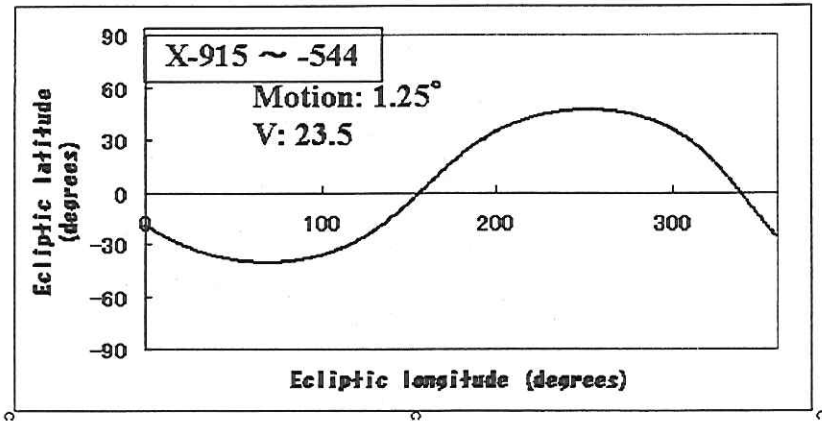


図 4 (a)

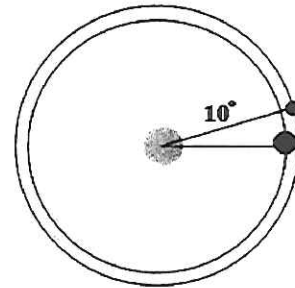
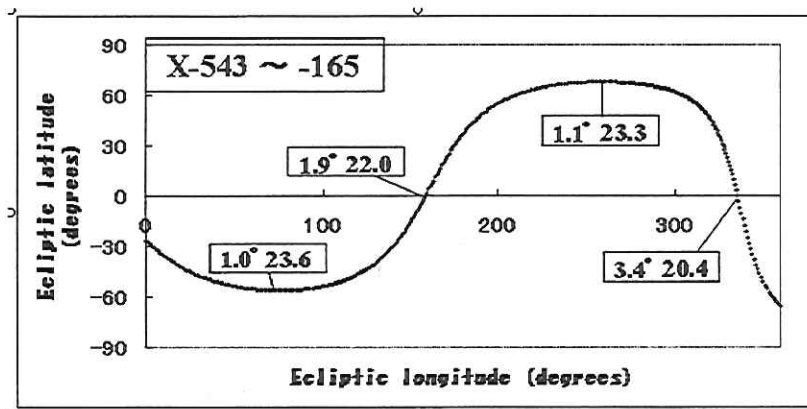


図 4 (b)

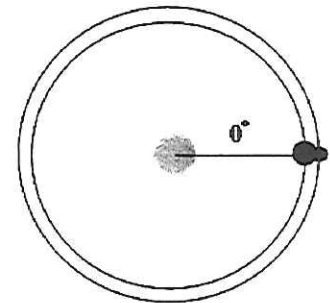
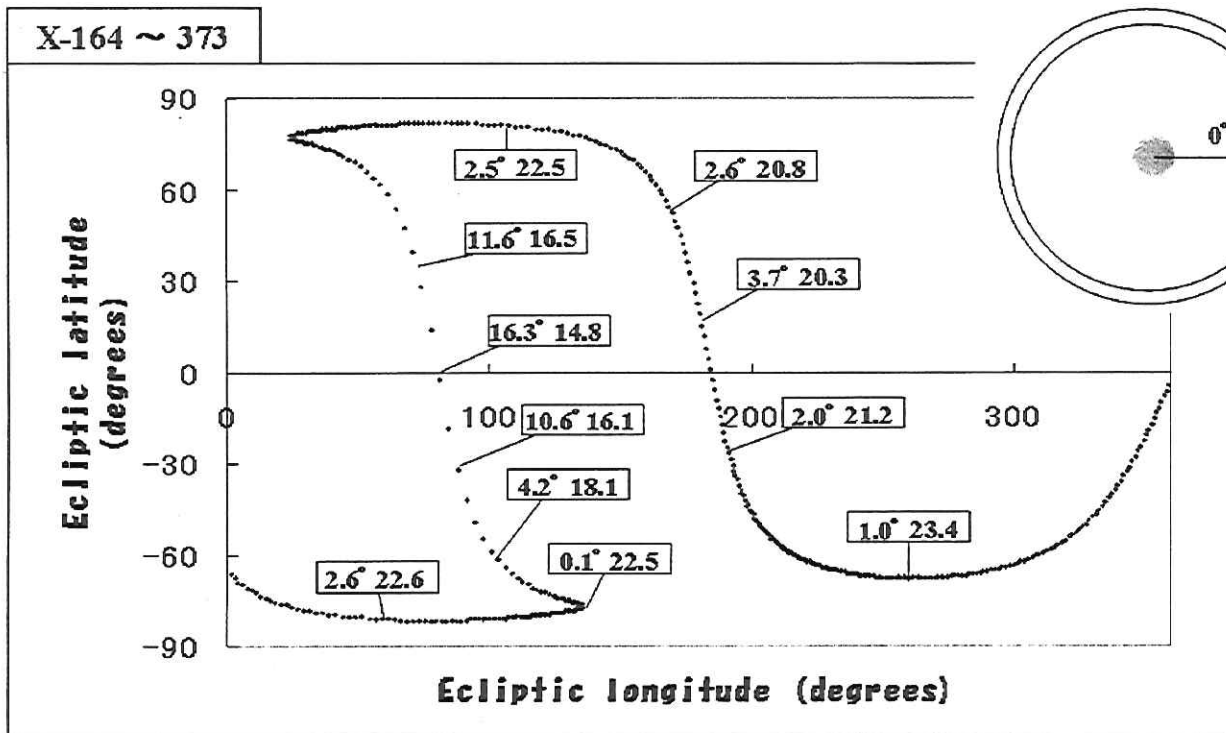


図 4 (c)

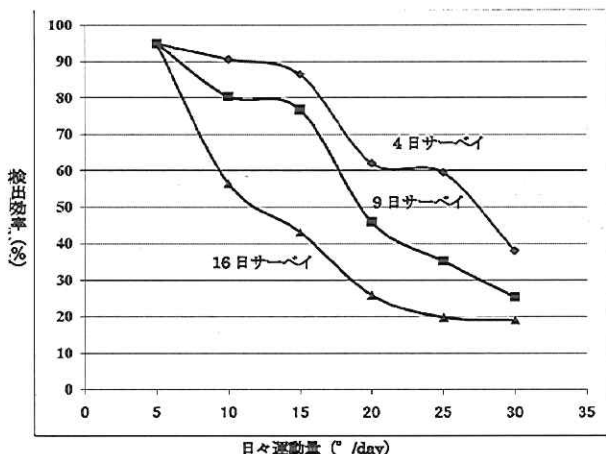


図5：ENEEOの検出効率

検出する観測手法を提案する。この手法の利点はENEEOが非常に明るくなることにある。つまり、1-2m級の望遠鏡を使用しなくても検出できる可能性がある。しかし、不利な点はENEEOが非常に高速であること、また非常に長い会合周期の中で(3章の例の場合は34年)観測できるのはわずか20日程度である。千載一遇の機会をのがさないようにしなくてはならない。このような状況を考えた場合、より現実的な観測は20-30cm程度の小口径望遠鏡を数10-100台程度配置し、1晩の観測でほぼ全天をカバーするような観測システムを構築すべきである。小口径望遠鏡の場合はF数が大きくても容易に焦点距離を小さくできる。つまり広い視野を観測できる。大口径望遠鏡の場合は焦点距離を短くするためにはF数を小さくしなくてはならないため光学系の設計が難しくなり費用もかさむ。対象とするENEEOは移動量が非常に大きいため、トレイルロスを抑えるために露出時間は短くしなくてはならない。小口径、短露出時間によるSN不足を補うためには画像を多数取得して画像処理により画像を重ね合わせてSN比を稼ぐ必要がある。宇宙航空研究開発機構(JAXA)ではこのような画像処理手法を開発しており、これについては5章で述べる。

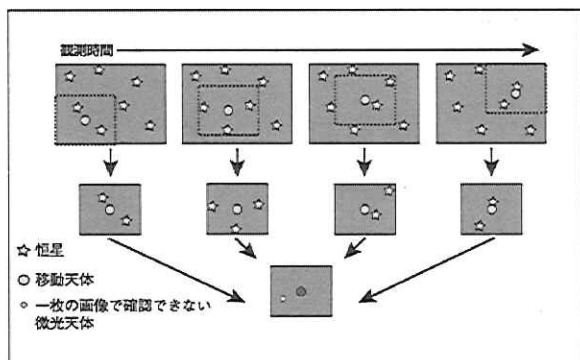


図6：重ね合わせ法の概念図

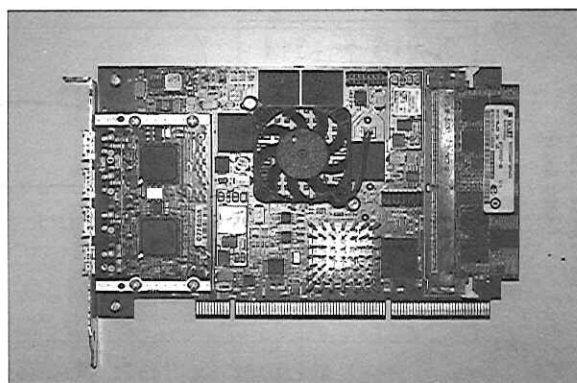


図7：JAXAで開発中のFPGAボード

5. 移動天体検出技術

JAXAでは光学観測装置を利用した宇宙デブリ検出技術の研究開発をしている。そのなかで移動量の大きい宇宙デブリに対しより小さいサイズのものまで検出したいという要望から多数の画像を利用して画像をデブリの移動方向に重ね合わせてSN比を上げるという画像処理手法を開発している。^{5), 6)} 図6にその概念を示す。複数のCCD画像から、ある移動天体の動きを仮定した画像の切り取りを行い、切り取った画像全てを利用した中央値画像を作成する。中央値を用いることによりSN比を向上させるとともに背景天体の影響等も効率よく除去できる。これにより1枚の画像では確認できないほど非常に暗い移動天体の検出も可能となった。本手法の有効性は多数の小惑星の発見によって示された。

しかし、対象となる移動天体の移動量や移動方向が未知の場合は図6に示すような操作をあらゆる移動量、移動方向を仮定して実施しなくてはならず、そのため解析時間が膨大になるという欠点があった。そこで、このような欠点を解決するために、前述のアルゴリズム自体を実装したFPGA(Field Programable Gate Array)ボードの開発をおこなっている。図7に開発中のFPGAボードを示す。現在は試作段階であるが、試験画像の解析によりこれまでPC上で行っていた解析時間を数百倍短縮できることがわかった。

4章にて提案された観測手法は、JAXAで開発中の移動天体検出技術を利用することによって実現可能なものである。今後は実際の観測データを利用した技術開発を進め本技術の実用化をめざし、新たなNEOサーベイ観測システムの構築を実施したい。

6. 結論

月の若いクレータの非対称性やこれまで発見されているNEOの軌道長半径-離心率分布から、これまでのNEOサーベイ観測ではみつきにくい、地球と非常に似た軌道をもつ天体ENEEOの存在の可能性を示唆した。このENEEOを地上から観測した際の見え方を吟味した結果、2つの新しい観測手法を提案した。この2つの観測手法を実現するにはJAXAで開発中の移動天体検出技術を利用する必要がある。今後はこの技術の実用化のため

の研究開発を進め、これまでのNEOサーベイでは捉えられない新たなNEOの発見に貢献していきたい。

参考文献

- 1) Morota, T. & Furumoto, M., Asymmetrical distribution of rayed craters on the Moon, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 206, 315, 2003.
- 2) Ito, T., Asymmetric impacts of near-Earth asteroids on the Moon, *Advances in Geosciences*, 15, 107, 2009.
- 3) Ito T. and Malhotra, R., Asymmetric impacts of near-Earth asteroids on the Moon, *Astronomy & Astrophysics*, 519, pp. A63 (1-9), 2010.
- 4) <http://www.cfa.harvard.edu/iau/mpc.html>
- 5) Yanagisawa, T. et al., Detection of Small GEO Debris by Use of the Stacking Method, *Transactions of JSASS*, 44, 190, 2005.
- 6) Yanagisawa, T. et al., Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects, *PASJ*, 57, 399, 2005.

(2011年3月28日受付, 2011年5月15日受理)