

小惑星探査機「はやぶさ」のリエンリーの スペースガード的軌道解析

吉川 真¹⁾・山口智宏²⁾

¹⁾JAXA、²⁾総合研究大学院大学

Orbital Analysis of Reentry of Asteroid Explorer "Hayabusa" from the point of Spaceguard

Makoto YOSHIKAWA¹⁾ and Tomohiro YAMAGUCHI²⁾

¹⁾JAXA, ²⁾The Graduate University for Advanced Studies

Abstract

Asteroid Explorer Hayabusa came back to the earth on June 13, 2010. Hayabusa is the first sample return mission from an asteroid in the world and it was successful to return the surface material from Asteroid Itokawa. Just before Hayabusa got into the atmosphere of the earth, ground-based optical observations were tried by many people and some of them were successful to observe Hayabusa. We analyzed the optical data and tried to determine the reentry orbit of Hayabusa. This is the simulation of orbit determination of an earth-colliding asteroid using real observation data. We found that we can determine the landing point by the very limited data, and that such optical observation can be back up for reentry missions.

Key Words: Hayabusa, Reentry, Spaceguard

1 はじめに

小惑星探査機「はやぶさ」が、2010年6月13日22:51（日本時間）、地球に帰還した（図1）。2003年5月9日に打ち上げられてから、7年1ヶ月余りたったの帰還である。その最後の姿は、自分自身は燃え尽きながらも、その使命であるカプセルを地球に戻すということを全うした感動的なものであった。「はやぶさ」は、大きさが500mくらいの小さな小惑星イトカワを探査したわけであるが、このような小さな小惑星について様々な知見をもたらしただけでなく、その表面物質の採取にも成功したので、さらに惑星科学に貢献することになると思われる。もちろん、「はやぶさ」の主目的であるサンプルリターン技術を実証するという点においても大きな成果を挙げた。

「はやぶさ」の地球帰還に際して、我々は、光学望遠鏡による観測を呼びかけた。この主な目的はアウトリーチである。つまり、「はやぶさ」についていろいろな角度から関心を持ってもらおうという活動の1つなのである。しかし、単なるアウトリーチで終わるものではない。それは、観測が成功すれば、そのデータは地球に衝突してくる天体の軌道解析として役に立つものとなるからだ。地球に実際に衝突してくる天体について、衝突前に観測されることはほとんどないわけ

で、我々は、このアウトリーチの活動を進めつつ、もし観測が成功すれば、そのデータをスペースガード的に解析してみることにしていた。

ちなみに、地球に衝突する前に観測されて軌道が計算された天体は過去に1例だけある。2008 TC3という小惑星である。この小惑星は、2008年10月6日06:39UTCにMt. Lemmonの1.5m望遠鏡（カタリナ・スカイ・サーベイ）で発見されたもので、その明るさから大きさは2、3mの小さい天体であると推定された。最初の観測後、数時間のうちに地球に衝突することが判明した。

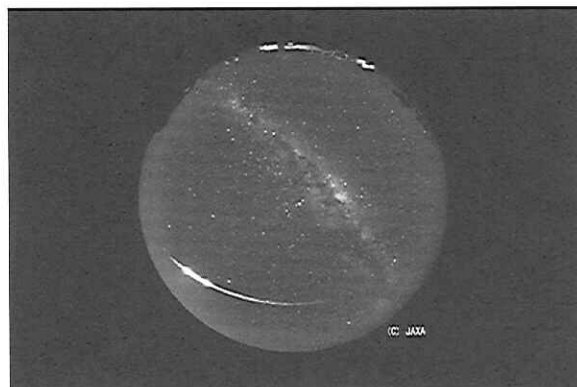


図1 2010年6月13日、地球に帰還して流星となった「はやぶさ」（JAXA撮影）

衝突予想時刻は、10月7日02:46UTC頃で、場所はスーダンの北部、衝突速度は12.8 km/sと推定されたのである。そして、実際にほぼ予測通りに衝突があり、のちに小さな隕石として発見された。

この2008 TC3の場合には、地球衝突の約20時間前の発見であり、衝突の直前であったが、事前に衝突が予測されて実際に衝突した天体の初めてのケースとなった。「はやぶさ」については、本来は、地球に帰還したときにカプセルを切り離しカプセルのみが地球大気に突入する予定であったが、機器のトラブルにより探査機の制御が不自由になってしまったため、カプセルを地球帰還軌道に乗せることができず、探査機本体も地球に突入せざるを得なくなった。つまり、「はやぶさ」を地球衝突天体と見立てて、光学望遠鏡による観測を行えば、地球衝突天体を事前に観測したことと同じことになる。そして、光学望遠鏡で観測したデータを解析することで、どのくらい衝突位置が特定できるのか確認できることになる。これは非常に貴重な機会である。

スペースガードだけではなく、ミッションにとっても、光学望遠鏡による観測はバックアップとなりうる。「はやぶさ」の場合、カプセルが大気に突入し、パラシュートが開くと、ビーコン信号が送信されることになっている。その信号を地上の数カ所で受信することによって、カプセルの落下位置を割り出すわけである。実際には、ビーコン信号が出てカプセル落下位置がすぐに特定されたのだが、もし、ビーコンがでなければ、直前の流星となったカプセルの飛跡から、落下位置を推定する予定であった。ミッションではここまでを考えていたが、光学望遠鏡による観測もカプセル落下位置の推定に役立つかもしれない。このような目的も念頭に置いて、解析を進めた。

以下では、「はやぶさ」地球帰還直前の光学望遠鏡による観測の概要とデータの初期解析結果を示す。

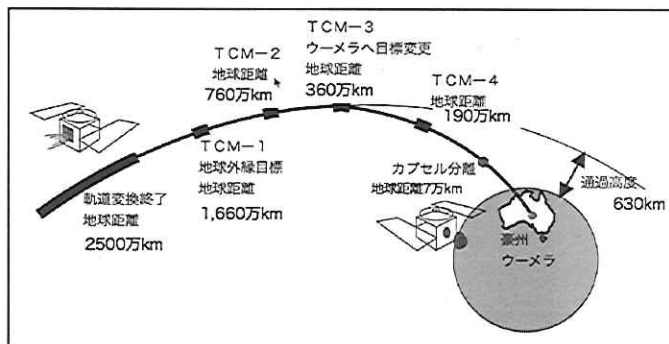
2 「はやぶさ」の地球帰還の軌道

「はやぶさ」カプセルのリエントリーに向けての軌道制御は、「はやぶさ」の地球帰還の約2ヶ月前から行われた。軌道制御の状況を模式的に示したものが図2である。2003年5月に打ち上げられ太陽の周りをほぼ5周してきた「はやぶさ」に対して、2010年6月13日にオーストラリアのウーメラ立ち入り制限区域にカプセルを着地させるべく、軌道修正がなされた。ただし、最初のうちは、地球のすぐそばを通過する軌道に誘導されていた。これは、「はやぶさ」にトラブルが発生して制御不能になったとしても、地上に被害を及ぼさないようにするためである。

そして、リエントリーの約10日前に、オーストラリア政府の許可が下りて、「はやぶさ」の軌道をウーメラに落下するように修正した。この10日前になると、軌道修正後の誤差が十分小さくなるので、この軌道修正さえ成功すれば、その後、探査機の制御ができなくなったとしてもカプセルは目的の範囲内に落ちることを保証できることになるのである。実際には、2010年6月3日から5日にかけて行われたTCM-3 (Trajectory Correction Maneuver) によって、「はやぶさ」の軌道を、地球の外側を通過する軌道からウーメラに衝突する軌道に変更した。このときの「はやぶさ」の地球からの距離が約360万kmであった。

その後、さらに軌道修正を行い、結果的には、予定していた場所に非常に正確にカプセルを戻すことができたのである。

ここでは、「はやぶさ」が地球大気に飛び込む前に観測をしようとするものであるが、「はやぶさ」の軌道を描いてみると図3のようになる。図3で示されているように、「はやぶさ」は地球から見ると太陽方向から接近してくることになる。そして、リエントリーの直前に、夜側に回り込むわけである。このような軌道は、光学望遠鏡による観測にはあまり都合の良いものではない。つまり、観測できる時間帯が日没直後の



日にち	軌道修正	備考
4月6日	TCM-0	地球外縁部への誘導
5月1-4日	TCM-1	地球外縁部への誘導
5月23-27日	TCM-2	地球外縁部への誘導
6月3-5日	TCM-3	豪州への誘導(→着地想定地域へ)
6月9日	TCM-4	豪州への誘導(詳細誘導)

図2 「はやぶさ」のリエントリー前の軌道修正 (TCM : Trajectory Correction Maneuver)

小惑星探査機「はやぶさ」のリエントリーのスペースガード的軌道解析

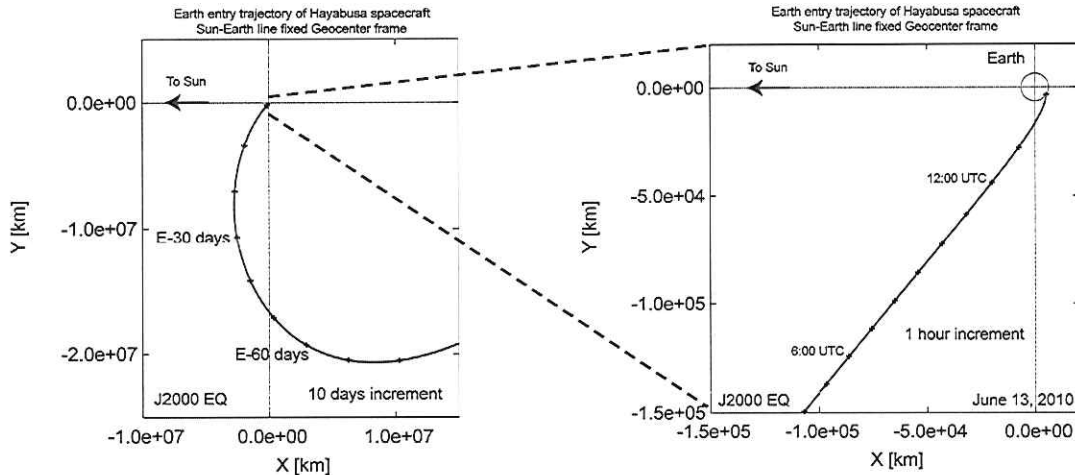


図3 「はやぶさ」のリエントリー直前の軌道
図の左の方向に太陽があり、地球の公転運動に乗った回転座標系で示す。

数時間程度しか取れないのである。さらに、太陽、「はやぶさ」、地球がなす角度もあまり都合の良いものではなく、鏡面反射的に探査機が太陽の光を反射してそれを地上の望遠鏡で受けるには条件が悪い。したがって、「はやぶさ」は観測されたとしても非常に暗いものと思われた。そのために、大型の望遠鏡でないと観測は難しいと説明したうえで情報提供を行った。

3 「はやぶさ」の観測

光学望遠鏡による「はやぶさ」の観測を呼びかけたのは、リエントリー直前の2010年6月10日だった。これは、最後の軌道修正も終わって、リエントリーの軌道が確定するのを待って呼びかけることにしたためである。実際には、この時点では大きく軌道が変わることはないので、もう少し早めに呼びかけても問題はなかった。最終的には、日本国内および国外で、合計36箇所で「はやぶさ」の観測が試みられることになった。観測地ごとに、観測に必要な予報値を提供した。

観測できる可能性が最も高いのは、リエントリー直前の6月13日の日没直後である。これは、もちろん、地球から「はやぶさ」の距離が近くなるためである。しかし、実際には、残念なことに日本国内は梅雨入りのためほとんどの場所で天気が悪くて観測ができなかった。前々日、前日から観測を試みていたところもあったが、観測はされなかった。

リエントリーの約8時間前、6月13日15:01（日本時間）に、ハワイのすばる望遠鏡から「はやぶさ」観測成功の一報が入った。このときの「はやぶさ」の等級は約21等であったという。これで、予定通りに「はやぶさ」が地球に接近していることが、光でも確認できたのである。その後は、「はやぶさ」の劇的な地球帰還のために非常に興奮状態が続いたが、落ち着いてくると合計4箇所で「はやぶさ」の観測が成功したことが分かっ

た。成功したのは、観測の時刻順に、Tenagra II Observatory、Mt. Lemmon Survey、すばる望遠鏡、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡（CFHT）である。いずれも日本国外の大型の望遠鏡である。前者2箇所は、アメリカのアリゾナにある天文台で、後者2箇所はハワイ島にある天文台である。

日本国内でも観測が成功したという報告があったが、調べてみると「はやぶさ」の軌道からはかなりはなれており、別の人工天体であると思われる。残念ながら、日本国内では、天気が悪かったことと「はやぶさ」が暗かったことで観測には成功しなかった。

なお、すばる望遠鏡では、リエントリーの前々日と前日でも観測が行われていた。ただし、両日ともに「はやぶさ」は撮影されなかった。撮影の限界等級が22.3等ということなので、前々日、前日の「はやぶさ」の光度はこれよりも暗かったものと思われる。このことは、観測条件が良くないということと矛盾しない結果である。

4 データ解析

前節で述べたように、「はやぶさ」のリエントリー前の観測は、4箇所で成功した。計測されたデータの数は、Tenagraが3個、Mt. Lemmonが9個、すばるが8個、CFHTが3個の合計23個である。計測されたデータは、「はやぶさ」の赤経、赤緯の値であるが、それらの計算値からの差（残差）を示したものが図4である。ここで計算値というのは、光学観測データのみを用いて、「はやぶさ」の軌道を推定して、その推定された軌道から赤経、赤緯を計算したものである。この計算値と観測値との差が図4にはプロットされている。

図4を見ると、TenagraとMt. Lemmonのデータのばらつきが大きいことが分かる。赤経、赤緯ともに2秒角ほどのばらつきがある。これに対して、すばるやCFHT

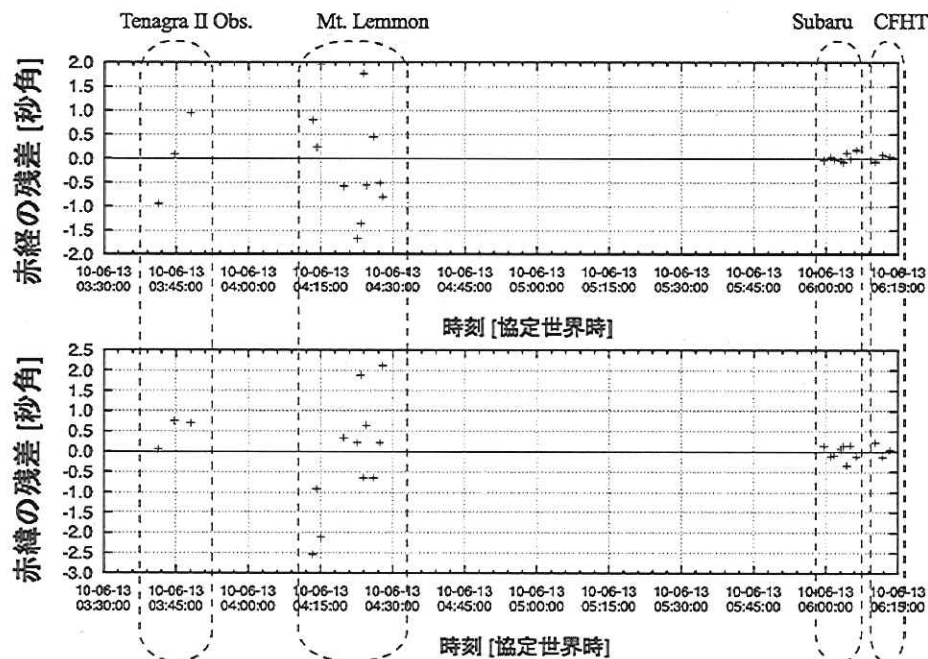


図4 「はやぶさ」の光学観測データの赤経、赤緯の残差

はデータのばらつきが小さく0.3秒角程度である。この理由は不明であるが、TenagaraやMt. Lemmonで使われた望遠鏡の口径は、それぞれ0.8mと1.5mであるのに対して、すばるやCFHTはそれぞれ8.2m、3.6mとより大きいので、それだけ集光力がありデータの精度も向上しているのかもしれない。

これら23個の観測データは、その期間も2時間半ほどと短いがこのデータが「はやぶさ」の地球衝突位置(ないし、カプセル着地位置)の推定にどのくらい役立つのかを解析してみた。ここでは、予備的解析として、決定された軌道の誤差を、惑星への探査機接近を解析するときによく使われるB-plane上での誤差と比較してみた結果を示す。

まず、光学観測データのみで軌道決定をしてみると、B-plane上の誤差楕円の大きさ(楕円の長軸の長さ)が、300kmほどになった。これが、「はやぶさ」を小惑星に見立てたときの軌道決定精度になる。この場合、地上への落下領域は、大体500kmくらい広がった領域となる。短い期間の観測データであるが、この程度の軌道決定はできるということが示せたことになる。

次に、探査ミッションとしてどのくらい役に立つかであるが、例えば、最後の軌道修正(TCM-4、図2)の直後に電波データが途絶えてしまったと仮定すると、B-plane上での誤差は、90kmほどになる。これに光学観測データを加えて軌道決定をしてみる。すると、誤差は約2kmとなる。つまり、光学観測があれば軌道決定精度がかなり向上することになる。ちなみに、電波が途絶えずに最後まで電波によって軌道決定ができた場

合には、軌道決定の誤差は約0.5kmである。したがって、最終段階で電波が途絶えたとき光学データがあればバックアップとして非常に有用であるということになる。

5 まとめ

ここでは、「はやぶさ」の地球リエントリーという機会を使って、地球に衝突してくる天体と見なした軌道決定を行ってみた。その結果、非常に短い期間のデータでも、衝突位置がかなり特定できることが分かった。また、探査ミッションとしても、カプセル落下位置の推定のために、バックアップデータとして有用であることも確認できた。今後は、このデータについてさらに詳細な解析を行っていく予定である。

謝辞

「はやぶさ」の地球帰還の光学望遠鏡による観測にあたり、非常に多くの方々に参加していただきました。ここに協力していただいたすべての方々に感謝いたします。特に、実際にデータを提供して下さったすばる望遠鏡の八木雅文氏をはじめ高見英樹所長、林左絵子氏およびスタッフの方々に感謝いたします。また、すばる望遠鏡以外のデータを取りまとめて提供していただいたハワイ大学のDave Tholen氏に感謝いたします。

(2011年5月22日受付, 2011年5月25日受理)

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？

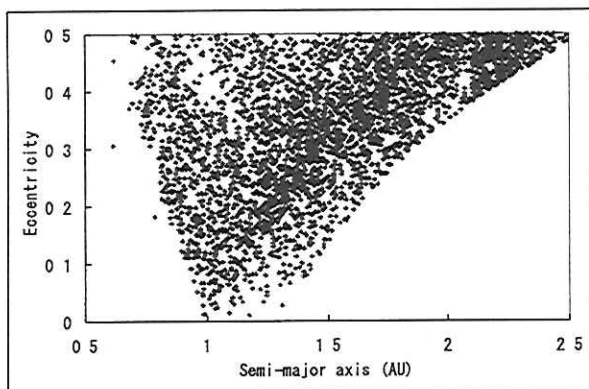


図1: NEOの軌道長半径、離心率分布

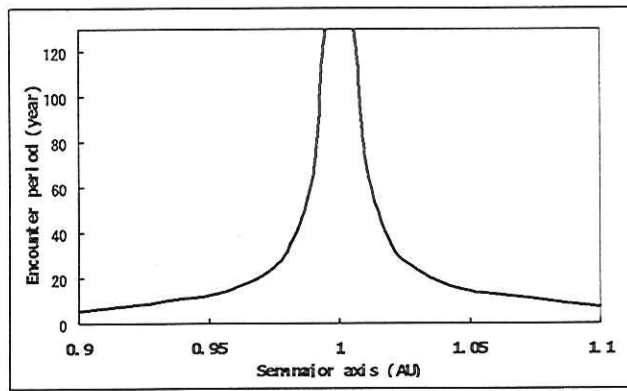


図2: ENEOの軌道長半径と地球との会合周期

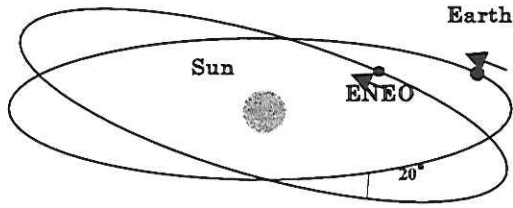


図3：仮定した ENEO の軌道

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

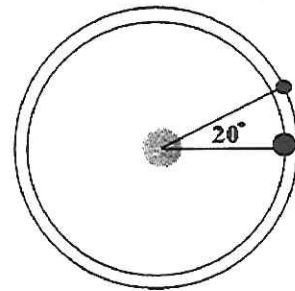
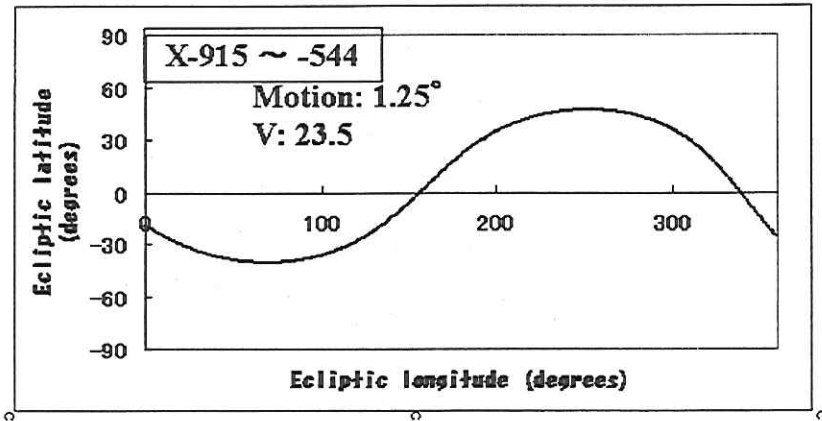


図 4 (a)

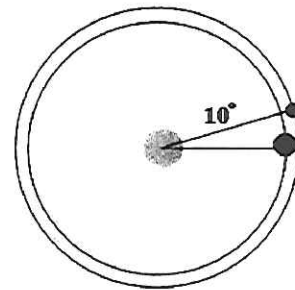
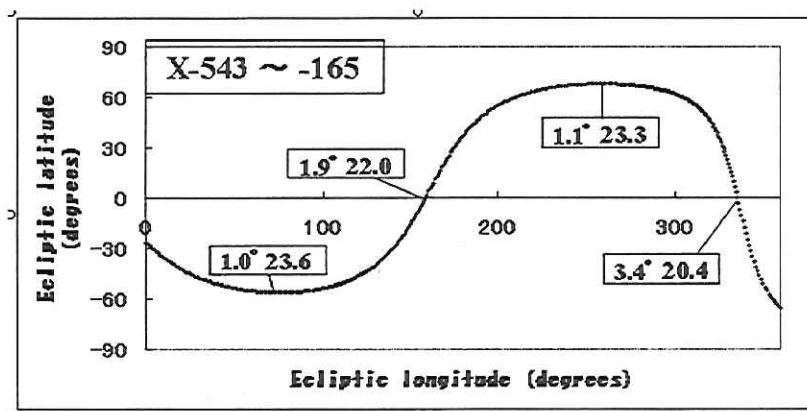


図 4 (b)

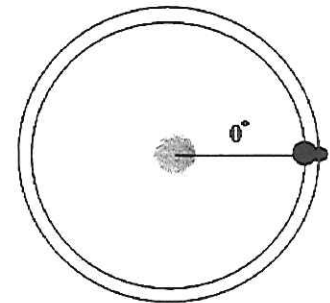
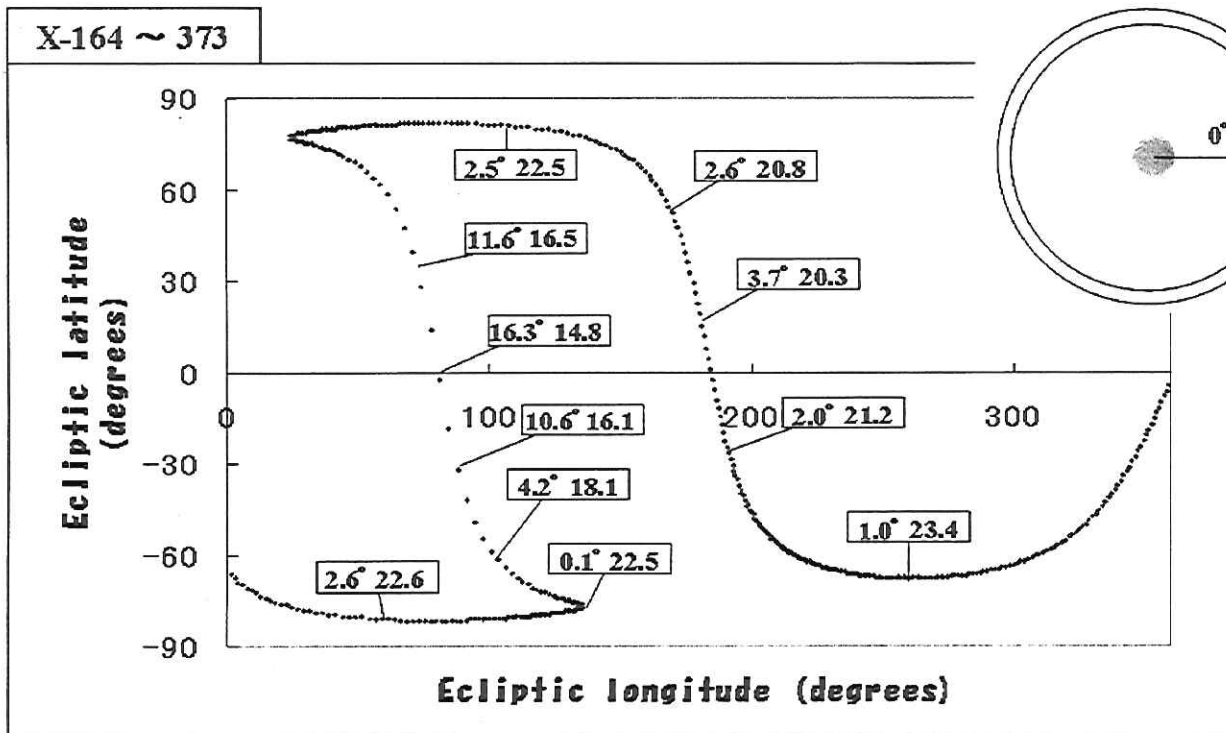


図 4 (c)

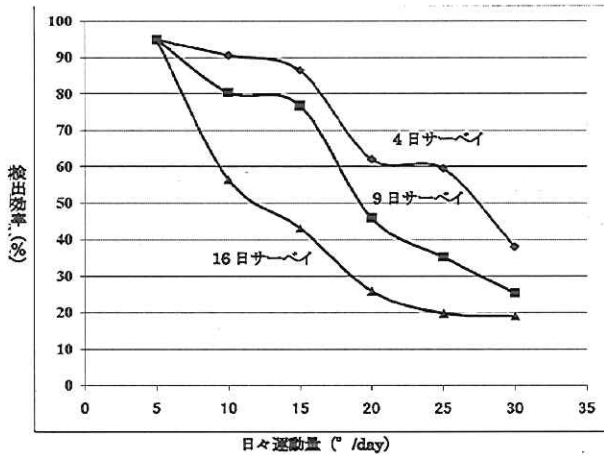


図5：ENEОの検出効率

検出する観測手法を提案する。この手法の利点はENEО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ENEО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るべきである。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ENEО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。

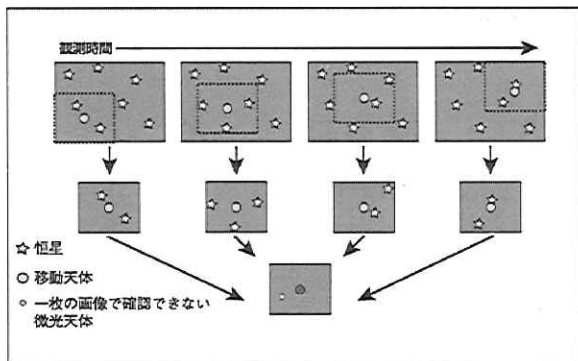


図6：重ね合わせ法の概念図

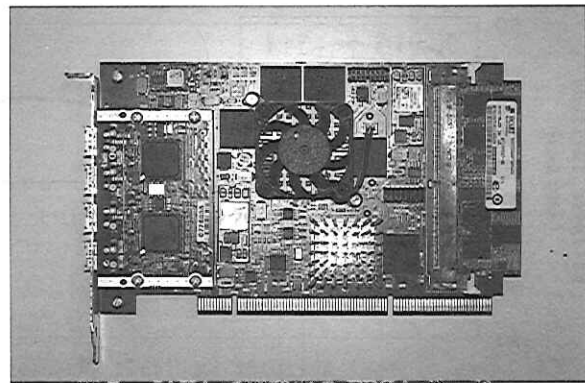


図7：JAXAで開発中のFPGAボード

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ENEОの存在の可能性を示唆した。このENEО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)