

「2021年度最優秀発表賞受賞論文」 木曾105 cmシュミット望遠鏡トモエゴゼン を用いた地球接近小天体の観測的研究

紅山仁^{1,2}, 酒向重行¹, 大澤亮³, 瀧田怜¹, 小林尚人¹, 奥村真一郎⁴,
浦川聖太郎⁴, 吉川真⁵, 臼井文彦^{5,6}, 吉田二美^{7,8}

2022年6月17日受領, 査読を経て2022年10月6日受理

(要旨) ここ数年, 世界の大規模サーベイ観測により年間およそ3,000個の地球接近小天体(near-Earth object, 以下NEO) が発見されている. 地球に接近する軌道を持つNEOはプラネタリーディフェンス, 探査機によるその場探査, 微小小惑星の観測可能性など多くの観点から重要な天体である. 天球上のみかけ移動速度が大きいNEOは観測画像上で星像が伸び検出感度が低下する. また天体によっては地球接近時の数時間から数日の間の非常に限られた期間しか観測することができない. したがって直径100 m 以下の微小小惑星の自転周期やスペクトル型などの物理量の推定はほとんど行われていない. 微小小惑星の物理量の推定を行うためには小惑星を自ら発見し即座に追跡観測することが望ましい. 我々は2019年に木曾観測所105 cm シュミット望遠鏡に搭載された広視野高速カメラTomo-e Gozen (トモエゴゼン) を用いて地球接近小天体の観測的研究を進めてきた. 本稿では我々トモエゴゼンNEOチームが進めているトモエゴゼンを用いたNEO探索および微小NEOの高時間分解撮像観測について紹介する.

1. はじめに

地球の水や生命の起源に関する仮説の中で小惑星による物質輸送は有力な説の一つである[1]. 小惑星は太陽系初期に衝突合体・破壊過程を経て形成された微惑星の生き残りだが, 惑星に比べて熱的進化の度合いが小さいので, その内部に太陽系始原物質を保存している可能性が高い. 小惑星表面の詳細観測や物質分析を通じて惑星形成期の情報を読み解くため, 小惑星探査機による小惑星のその場探査およびサンプルリターンが実施されてきた. 太

陽系小天体の中で近日点距離が1.3 au 未満で定義される地球接近小天体(near-Earth object, 以下NEO) は地球から比較的アクセスしやすく, 日本のはやぶさ, はやぶさ2プロジェクトの探査先小惑星Itokawa, RyuguもNEOである[2]. 2024年に打ち上げが予定されている日本のDESTINY⁺ がフライバイ探査するPhaethonもNEOに分類されている[3]. NEOの中には地球に衝突する天体も存在する. 人類をその被害から守るプラネタリーディフェンスの観点からもNEOは重要な研究対象である[4].

近年, Catalina Sky Survey, Pan-STARRS, ATLAS[5-7] などNEO発見を目的の一つとする多数の地上サーベイ観測が行われており, 2022年6月1日現在のNEO発見数は29,237天体¹にのぼる. 発見数に比べて数は少ないが, 発見したNEOの自転状態や組成を推定する観測も行われている[8].

NEOの多くは火星-木星間にある小惑星帯の小

1. 東京大学大学院理学系研究科付属天文学教育研究センター

2. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

3. 国立天文台

4. 日本スペースガード協会

5. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

6. 神戸大学大学院理学研究科惑星科学研究センター

7. 産業医科大学

8. 千葉工業大学惑星探査研究センター

beniyama@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

¹Center for Near Earth Object Studies(https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/site_all.html)2022-06-17 にアクセスした.

惑星が軌道進化した天体であると考えられている[9, 10]. 小惑星帯内で衝突破壊過程を経て生成した小惑星は、太陽輻射に起因する非重力的な力学機構(Yarkovsky効果)により軌道要素が徐々に変化する[11,12]. その後巨大惑星との軌道共鳴に入った小惑星の一部は数百万年程度の時間をかけてNEOへと軌道進化する. この軌道進化過程では、小惑星表面での太陽輻射の反射、再放射の非等方性に起因するトルクによって小惑星の自転状態が変化する(YORP効果). 小惑星表面に垂直な方向の熱伝導に起因するYORP効果はNYORP効果と呼ばれ、2000年以降精力的に研究されてきた. 近年では天体表面に並行な方向の熱伝導に起因するTangential YORP (TYORP) 効果が提唱、研究されている[13]. 小惑星の慣性モーメントと表面積に依存するYORP効果による自転速度変化は天体直径の2乗のサイズ依存性を持ち、直径が小さい小惑星ほど自転状態が変化しやすい. YORP効果は天体サイズ以外にも形状、熱物性(熱慣性)、質量密度、自転軸の向きなど多くの物理量に依存して作用する. YORP自転加速の末に、天体を構成する物質に働く遠心力が自己重力よりも大きくなった場合、小惑星形状の変形や分裂が起こる. ゆえにYORP効果が強く働く直径が小さい小惑星の自転周期分布は、微小小惑星の力学史および物理的性質を反映していると考えられる.

小天体の光度曲線観測結果がまとめられているThe Asteroid Lightcurve Database (LCDB, [14]) 2021年6月版では5,060天体の自転周期が精度よく求められている. これらの天体直径と自転周期の関係(直径-自転周期関係)を図1に示す. 直径200 m 以上の小惑星は自転周期約2時間で分布が頭打ちになっており、この明瞭な構造はスピンバリアとよばれる. スピンバリアは直径200 m 以上の小惑星のほとんどが岩塊が集積したラブルパイルであることを示唆する[15]. 同様に微小小惑星(本稿では直径100 m 以下を微小と定義する)の直径-自転周期関係からは微小小惑星の力学史が制約できると考えられるが、観測時の課題が多くあり、自転周期が求まった微小小惑星は少ない.

現存の地上観測装置を用いて微小小惑星の自転周期を推定するためには、地球に接近時に見かけ上明るくなった微小NEOを観測する必要がある. ハワ

イマウナケアにある有効口径8.2 m のすばる望遠鏡を用いても、直径100 m 以下の微小メインベルト小惑星を観測することは難しい. 地球接近時に明るくなった微小NEOであれば自転周期推定が容易かというところでもなく、観測好機が短い(数時間-数日)、高速自転している(周期1分以下)、天球上移動速度が大きい(毎秒数秒角)といった多くの課題がある. それゆえ自転周期が推定された微小小惑星は少ない.

図1には平均絶対等級(太陽、小惑星、地球がなす角が0度かつ地球と小惑星、太陽と小惑星の距離が1天文単位という仮想的な状況での小惑星のVバンド等級) $H \sim 24$ (直径約50 m) の300天体超の小さいNEOを観測している米国のサーベイ観測Mission Accessible Near-Earth Objects Survey (MANOS) の観測結果が含まれる[16, 17]. MANOSは世界の大中口径望遠鏡を用いてNEOの自転状態および組成の推定を行ってきた. MANOSは数多くの微小NEOの自転周期推定に成功したが、その観測戦略は高速自転の検出に特化しておらず、1から300秒の長時間露光観測によって小惑星の高速自転を見逃している可能性がある. 高速自転領域まで信頼できる直径-自転周期関係を得るためには、微小小惑星の系統的な高時間分解観測が求められる.

以上の背景のもと、我々は広視野高速カメラトモエゴゼンを用いてNEOの観測的研究を進めてきた.

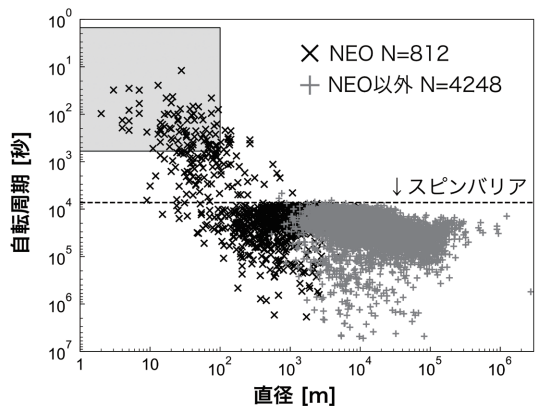


図1: LCDB に登録されている天体の直径-自転周期関係. NEO をバツ印, NEO 以外を十字で示した. 周期2 時間程度の破線は典型的な質量密度 2.67 g cm^{-3} を仮定したときのスピンバリアを示す[18]. 左上の四角内は本研究で着目する微小かつ高速自転領域. 著者らの論文[19] を元に作成.

本稿では関連する2つの話題を紹介する。2章では観測装置トモエゴゼンおよびトモエゴゼンを用いたNEO探索についてまとめる。3章ではトモエゴゼンを用いた微小NEOの高時間分解観測結果を紹介し、約二年間の観測で得た微小惑星の自転周期分布について議論する。本稿を通じて、高時間分解観測により明らかにされる微小惑星の新たな一面をお伝えできれば幸いである。

2. トモエゴゼンによるNEO探索

2.1 木曾広視野高速カメラトモエゴゼン

トモエゴゼンは長野県木曾郡に位置する東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所の口径105 cmシュミット望遠鏡用に開発された、世界初の可視光広視野動画カメラである。木曾観測所は1974年の開所以来全国の天文学者の観測研究に利用され、特にシュミット望遠鏡の特徴である広視野を利用した観測装置が開発されてきた(図2上)。2014年には現在の完全自動観測の礎となるキューシステムを用いた自動観測が実施され、さらに同年よりシュミットの直径9度の全視野を覆う広視野高速カメラトモエゴゼンの開発が始まった(図2下, [20])。シュミット望遠鏡の強みである広視野に加えCMOSセンサを用いた高時間分解観測がトモエゴゼンの最大の特徴である。トモエゴゼンの焦点面は84枚のCMOSイメージセンサーで覆われており、有効視野約20平方度の広い空の範囲を高い時間分解能で観測できる。光学フィルタは搭載しておらず可視域の幅広い波長の光を捉えることができる。1秒積分での $10\text{-}\sigma$ 限界等級は17.7等級である²。

広視野望遠鏡を用いて夜空を掃天観測する観測計画は世界中にいくつか存在するが、それらの典型的な露出(積分)時間は30秒以上であり、秒スケールの変動現象を検出することはできない[5-7]。一方トモエゴゼンは毎晩1秒に2枚のフレームレートで1視野に対して18枚(9秒間)の高時間分解観測を行い、高度30度以上の領域を約2時間かけて掃天観測する。高時間分解観測が故に毎晩生成されるデータ

量も膨大となり、晴れた日に取得される観測データは約10TBにも達する。1秒に2枚のフレームレートで連続観測を行うトモエゴゼンの「動画観測」は観測対象を選ばず、秒スケールの変動現象全てがサイエンスターゲットとなる。観測開始から数年ですでに増光直後の超新星爆発の観測[21]、流星観測[22]、太陽系外縁天体による恒星の掩蔽観測[23]、矮新星の多波長同時観測[24]など幅広い分野の研究成果が報告されている。

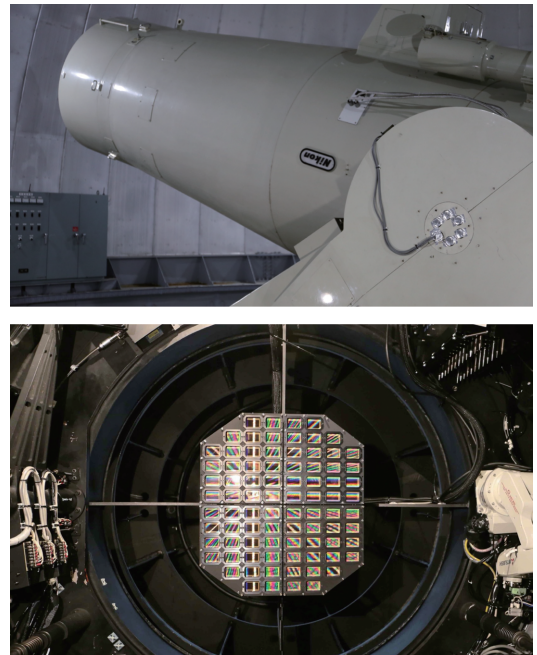


図2: (上) 木曾観測所口径105 cm シュミット望遠鏡。(下)シュミット望遠鏡の焦点面に搭載されたトモエゴゼンカメラ。84枚のCMOS センサーがシュミットの直径9度の視野を覆う。

2.2 サーベイビッグデータからの小惑星探し

トモエゴゼンNEOチームはトモエゴゼンが毎晩生成するサーベイ観測ビッグデータからNEOを発見する試みを続けてきた。近年NEOを多く発見している米国のPan-STARRSやCatalina Sky Surveyは時間間隔を空けて取得した比較的長い露出(積分)時間の複数枚の画像中から移動天体を探索している。空の同じ領域を観測した時刻の異なる2枚の画像があるとき、恒星などの非移動天体は理想的にはどの画像上でも同じ位置で検出される。一方NEOなどの移動天体は時間が経つと文字通り画像上を移

²Tomoe-e Gozen プロジェクト(<https://tomoe.mtk.ioa.s.utokyo.ac.jp/ja/>)2022-07-27 にアクセスした。

動する。2枚の画像の引き算を行うと、非移動天体が存在する領域は同じ値の差し引きでシグナルはゼロに近い値をとるが、移動天体が存在する領域は値が相殺されず正負のシグナルが現れる(図3, 1)。

このように、複数枚の画像から移動天体を検出できるか否かは、画像の観測時間間隔と天体の移動速度に依存する。地球から遠い位置に存在する見かけの移動速度が小さい天体の移動を検出するには長い時間間隔の観測が必要となる。一方、地球近傍を通過するために見かけ上は高速に移動する天体を検出するには短い時間間隔で画像を取得する必要がある。1枚の画像の典型的な露光時間が30秒以上の従来のサーベイ観測データでは、数秒間で観測視野を移動する天体を捉えることは難しい。微小な天体は地球近傍を通過して見かけ上明るい時期でなければ検出できないため、高速移動天体は微小小惑星の唯一の観測機会を提供するといえる。我々はトモエゴゼンの高速サーベイ観測データを用いることで、これまで発見はおろか探索されてこなかった高速移動小惑星を検出できると考えた。

トモエゴゼンサーベイ観測データからの移動天体探索手順を図3に示す。トモエゴゼンのサーベイ観測は一つの領域に対して0.5秒積分の画像18枚からなるフレームセットを取得する。我々NEOチームが開発したパイプラインではこの中からまず移動天体検出を行う。最初に18枚の画像全てで天体検出を行い天体のリストを作成する。それをもとに非移動天体が存在する領域を表すマスクを作成し、マスク外の検出を移動天体と判定する。移動天体検出システムの詳細の一部は出版済み論文[25]を参照されたい。トモエゴゼンが生成する毎晩10TBの膨大なサーベイデータからは多数の高速移動天体を検出される。同時に、天候状況の変化や望遠鏡トラッキング時の星像のずれに起因する誤検出が大量に検出されてしまう。その数は一晩で約100万天体となり、目視で確認して移動天体か否かを判断することは難しい。

そこで我々は天体検出時の情報(天体の星像の形状、移動速度、18フレーム中の動画内検出数など)を用いて、検出天体が移動天体か否かを判断する機械学習モデルを開発した。アルゴリズムは結果の解釈が容易なランダムフォレストを採用した。我々のモデルは天体検出時の情報からその天体が移動天体

か否かを0から1のスコアで表現する。

毎晩のサーベイ観測データに天体検出、機械学習による移動天体抽出を適用する。そして移動天体らしい天体が存在すれば軌道決定のための追跡観測を行えばよい。機械学習のスコアが0.7以上の天体が移動天体であるとすると、毎晩の移動天体は数千件程度になる(図3, 2)。この中で既知の人工天体としてカタログ化されている天体、カタログ化されていなくとも人工天体の可能性が高いと考えられる移動速度が大きい超高速移動天体(速度が毎秒5秒角よりも早い天体)は追跡対象から除外する(図3, 3)。こうして抽出される約100天体を目視で確認、吟味し、未知の移動天体候補と判断した天体に対して軌道精度を高めるための追跡観測を実施する(図3, 4)。一晩に30分以上の時間間隔を空けて合計3回以上の観測点を取得できた天体に対して地球周回軌道で軌道決定を行う。地球周回軌道での軌道離心率が1以上の天体は地球を周回する軌道になく、太陽周回軌道の小天体であろうから、小惑星候補天体としてIAU小惑星センタへ報告する。なお現在の判断条件では、一時的に地球重力に束縛された状態にある地球周回軌道の小天体が存在しても人工天体と判断されるので、結果的に小天体を見逃す可能性がある。トモエゴゼンを用いたさらなる追跡観測や世界中の小惑星観測家による追跡観測の後に軌道精度が高まった小惑星には、IAU小惑星センタより小惑星としての仮符号が付与される³。

我々は開発したパイプラインを用いることで、2019年から2022年6月1日までの期間に合計42個の微小NEOを発見した。我々が発見したNEOはPan-STARRSやCatalina Sky Surveyの深い画像で検出されるNEOに比べて格段に明るい(ほとんどがV等級17等以下)。通常暗く検出される微小NEOを明るく検出できたため、追跡観測をすることで知られざる微小天体の物理量(自転周期やスペクトル型)推定することができる。ただし多くの天体は地球最接近時の最も明るい時期に発見できた天体で、発見後数時間や数日で数等級暗くなる。微小NEOの物理量の推定を行うためには発見直後の追跡観測が求められる。

³本稿ではIAU小惑星センタより仮符号が付与されることを小惑星の発見と定義する。

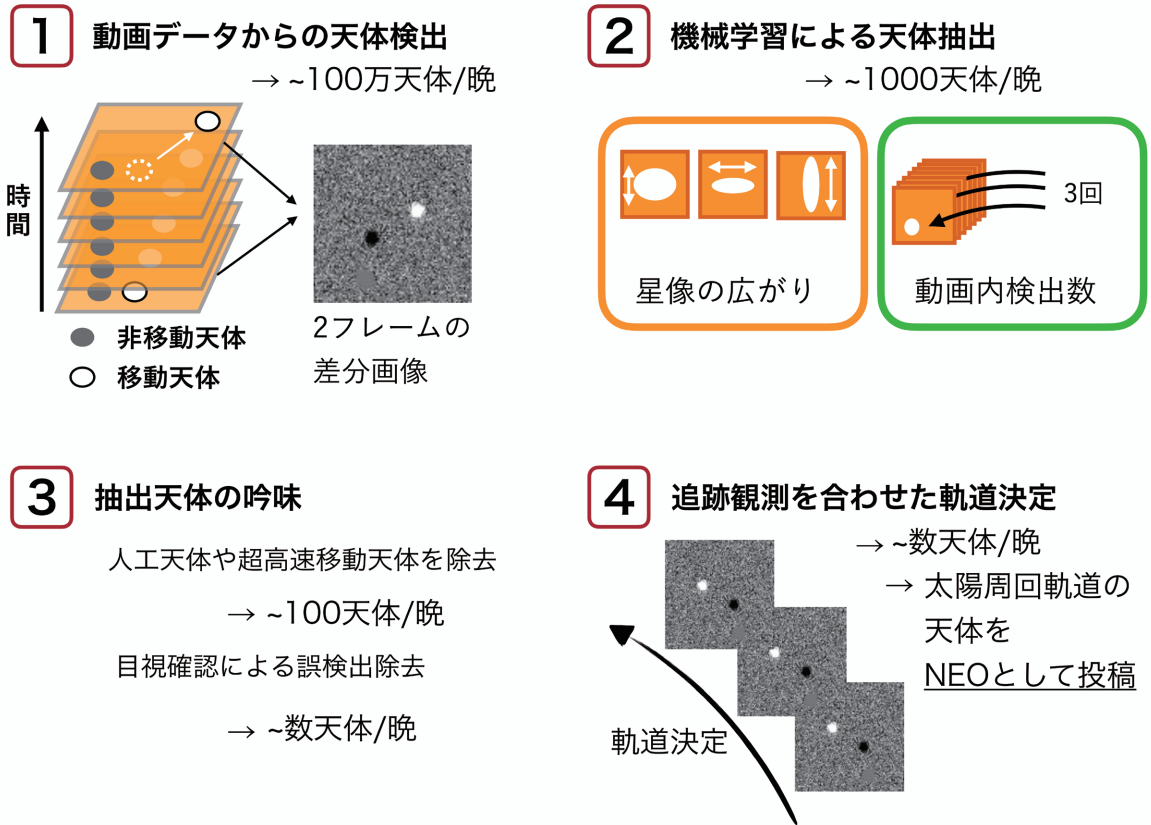


図3: トモエゴゼン NEO パイプラインで行われている移動天体探索手順。

3. トモエゴゼンによる微小NEOの高時間分解観測

本章では著者らの論文[19]の主題であるトモエゴゼンのサーベイ観測で発見した小惑星を含む微小NEO60天体の即時追跡観測について紹介する。高時間分解観測で得た高時間分解光度曲線の解析から多数の高速自転小惑星を発見した。さらに微小NEOの自転周期分布の理論的解釈を行い、我々の観測で得た自転周期分布が近年提唱されたTYORP効果で説明できることを示した。本章の解析や議論の詳細については引用元を参照されたい。

3.1 観測と解析

可視光等級 $V \leq 17$ 等, 絶対等級 $H \geq 22.5$ (直径約100 m 以下) を条件として, 60個の微小NEO

の光度曲線を取得した。観測天体のうち23天体はトモエゴゼンを用いて我々自身が発見したNEOである。他37天体はCatalina Sky Survey やPan-STARRSなど他のサーベイ観測で発見された小惑星である。観測対象の多くは発見後間もない天体でありその自転周期は報告されていない。

観測天体の典型的な天球上移動速度は毎秒1–10秒角と非常に速く、ほとんどが地球から月-地球間距離の数倍の極めて地球近傍を通過する天体である。典型的な観測可能時間が短いため発見後数時間から数日で観測を実施した。

LCDBで精度良く自転周期が求まった天体⁴で絶対等級 $H \geq 22.5$ の天体の平均自転周期は約9分である。これをもとに各天体の典型的な観測時間は

⁴クオリティコードが3 または3-である測定値を採用した。

20分間とした。観測天体の平均絶対等級は $H \sim 26$ で、可視光での幾何アルベドを0.2と仮定した換算直径は約20 mである。図4より、米国のMANOSと比較して地球に接近する微小なNEOの観測に成功したことがわかる。観測期間は2018年5月–2021年10月で、観測装置は小惑星探索と同様に木曾トモエゴゼンを用いた。観測にはトモエゴゼンの1枚のセンサー(視野0.24平方度, 39.7分角× 22.4分角)を用いた。恒星追尾観測を行い、高速移動する天体はその都度再ポインティングして観測した。観測天体は2 fps(積分時間は0.5秒)でほぼ点源として観測される。

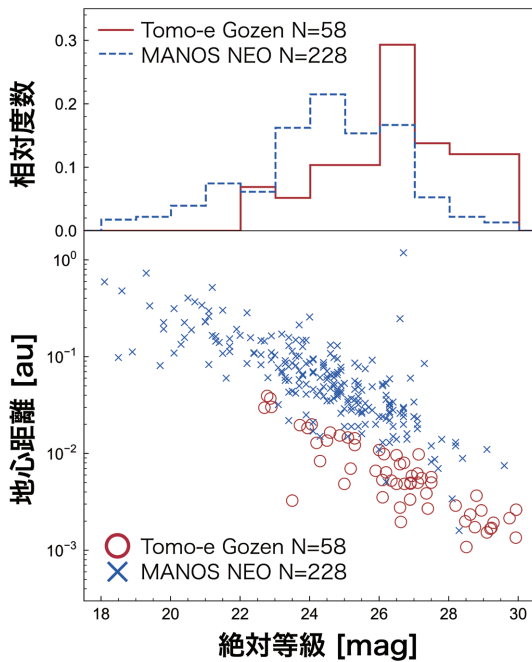


図4: 本研究とMANOSの観測天体の比較。(上)絶対等級分布。本研究, MANOSをそれぞれ実践, 破線で示した。(下)絶対等級と観測時地心距離の関係。本研究, MANOSをそれぞれ丸, バツ印で示した。本研究観測天体のうち仮符号を取っていない2天体は含まない。

取得したデータのバイアス引き, ダーク引き, フラット補正を行った後, SExtractor [26] ベースのpythonパッケージsep⁵を用いてNEOと視野内の参照星の開口測光を行った。測光半径は本観測での典型的シーイング3–5秒角の2–3倍に設定した。

相対測光にはトモエゴゼンに近い波長感度特性をもつGaiaによるGaia DR2カタログを用いた[27]。GaiaのG等級が $10 \leq G \leq 15$ を満たす天体を参照星として採用し, 相対測光で求めたNEOのG等級を日心距離, 地心距離を用いて換算等級に変換した。さらに太陽位相角補正, 光差補正を行い最終的な光度曲線を取得した。

本観測では高速移動するNEOを恒星追尾観測した。天体が視野内を一定距離移動するたびに視野を変更すると視野移動中の観測データ点が欠如し完全な連続観測とはならない。このような不等サンプリングデータから小惑星の自転周期を推定するためLomb-Scargle法を用いた[28–30]。小惑星の自転に伴う周期的な光度変動はLomb-Scargleピリオドグラムのピークとなって現れる。自転周期と等級振幅の不定性はモンテカルロ法により評価した。

本研究の観測天体には非主軸回転天体(タンブラー)候補が存在した。単一周りで自転する天体と異なりタンブラーは複雑な自転状態にある。複数の周期が組み合わさったタンブラーのピリオドグラムは多数のピークをもつ。本研究ではピリオドグラムをみてタンブラーか否かの判断を行った。タンブラーの詳細解析は今後の課題である。

3.2 観測結果

観測した60天体のうち32天体(以下Tomo-e NEO)の自転周期推定に成功した。すでに自転周期が報告されている天体は32天体中11天体であった。18天体は本観測の範囲では自転周期が求められなかった。これらは形状が自転軸周りに対称, 自転周期が観測時間よりも長い, 自転周期が露光時間よりも短い, または自転軸が視線方向に平行であると考えられる。残り10天体は非主軸回転天体候補である。

例として高速自転小惑星2021CGの光度曲線と周期解析結果を図5–7に示す。1秒に2枚のフレームレートでの高時間分解観測により高速自転に伴う光度変動を捉えることに成功し, 2021CGの自転周期は 15.296 ± 0.002 秒と求まった。

Tomo-e NEOとLCDBに登録されているNEO(以下LCDB NEO)の直径–自転周期関係を図8に示す。Tomo-e NEOは直径3–100 m, 自転周期3–420秒の微小高速自転領域に位置する。Tomo-e NEOに

⁵<https://sep.readthedocs.io/en/v0.4.x/>

は周期60秒以下の高速自転小惑星が13天体含まれる。さまざまな露光時間での観測が含まれる先行研究の自転周期分布は高速観測を行った本観測に比べて高速自転小惑星を見落としている可能性がある。両分布が等しいという仮説を検定するためコルモゴロフ-スミルノフ検定を実施した。Tomo-e NEOに合わせて絶対等級22.5以上、自転周期420秒以下を条件とし、さらに自転周期が精度良く求められている(クオリティコードが3または3-) LCDB NEOを検定対象とした。検定量とp値はそれぞれ0.330, 0.013と求まり、Tomo-e NEOとLCDB NEOの自転周期分布が等しいという帰無仮説は有意水準1.3%で棄却された。この結果は露光時間が長い従来観測で高速自転小惑星の自転周期を正しく推定できなかったことを示唆する。

3.3 高速自転小惑星の欠如

図8の直径-自転周期関係においてTomo-e NEOの分布には周期約10秒の頭打ちがみられる。もし本研究で観測した天体の中に自転周期が1.5秒よりも長い天体が含まれていた場合、1秒間に2枚のフレームレートの高時間分解観測を行った本研究で見逃さずに周期を推定できることを確認している。よって本観測では2020 HS₇を除いて自転周期10秒以下の天体が存在しなかった。直径-自転周期関係の頭打ちを議論するためには、観測で期待される小惑星の自転周期分布を知る必要がある。我々はYORP効果による自転加速を考慮したモデル計算を実施した。

地球近傍で観測される微小NEOの起源はメインベルト内の衝突で生じた破片であると考えられる。衝突破壊過程で生成した小惑星はYarkovsky効果によって軌道長半径が変化する。その一部はメインベルト内の巨大惑星との共鳴位置に入り、数百万年の時間をかけてNEOへと軌道進化する[9, 10]。以上の過程を踏まえ、現在観測されるNEOの典型的な年齢は10 Myr程度であると考えられる。

この軌道発展の間にYORP効果によって小惑星の自転周期が変化する。ゆえに現在のNEOの自転周期分布はNEO生成からの経過時間(NEO年齢)を反映していると考えられる。YORP効果により自転が減速する小惑星はYORP効果により自転が加速する小惑星と同程度の割合で存在すると考えられる。

しかし自転減速が起きた小惑星は短い時間でタンブリング状態に発展し、その後の進化を正確に予測することは難しい。我々が注目しているのは自転周期分布の頭打ち(最短自転周期)である。よって以下では自転加速のみを考えて、YORP効果による自転加速を受けた微小小惑星の自転周期がどの程度まで加速されるかを計算する。

まず、より大きな小惑星の衝突破壊破片である微小小惑星の初期自転周期分布は実験室実験によるmmサイズの衝突破壊破片の自転周期を外挿した次に沿うと仮定する[31]。

$$P_{\text{init}} = 10 \left(\frac{D}{1 \text{ m}} \right) \text{ s.} \quad (1)$$

さらにYORP効果による自転加速の強さは地球接近小天体(101955)BennuのYORP加速度をスケールリングした次式で与える[32, 33]:

$$\frac{d\omega}{dt} = 8.5 \cdot 10^{-18} \cdot \left(\frac{a_{\text{Bennu}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}}{a_{\text{ast}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}} \right) \left(\frac{D_{\text{Bennu}}}{D} \right)^2 \text{ rad s}^{-2}, \quad (2)$$

ただし ω は小惑星の角速度、 D_{Bennu} はBennuの直径、 a_{Bennu} 、 a_{ast} はそれぞれBennuと小惑星の軌道長半径、 e_{Bennu} 、 e_{ast} はそれぞれBennuと小惑星の軌道離心率である。 D_{Bennu} は482 m、 e_{Bennu} は1.126 au、 e_{Bennu} は0.204とした⁶。またNEOの多くは内側メインベルトから軌道進化した天体であることから $a_{\text{ast}} = 2 \text{ au}$ 、 $e_{\text{ast}} = 0$ に固定した。2022年7月までに発見されているNEAの離心率の中央値は約0.45、平均値は約0.44である。NEAの離心率が0.45の場合の自転加速の強さは、離心率0の場合に比べて $\sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}^{-1} = \sqrt{1 - 0.45^2}^{-1} \sim 1.1$ 倍で、本稿の議論は変わらない。

YORP効果による小惑星の自転速度は複雑に変動するはずだが、ここでは第一近似として簡単のために線形な加速を考える。時刻 t での角速度 ω は以下のように表される:

⁶NASA JPL Small-Body Database(https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html/)2021-12-20 にアクセスした。

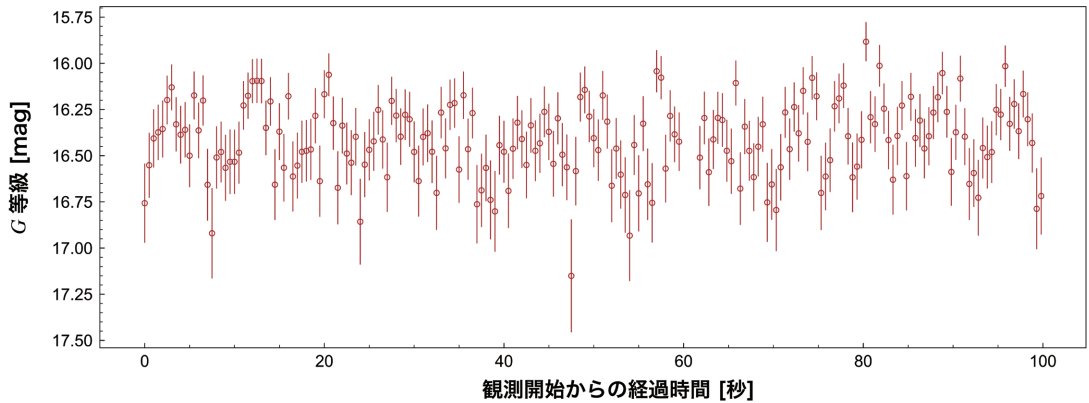


図5: 2021CG の光度曲線. 全20分間のうち最初の100秒間を图示した. 誤差棒は1- σ の不定性を表す. 著者らの論文[19]を元に作成.

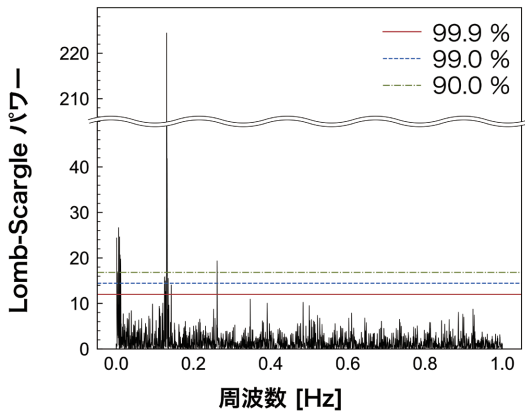


図6: 2021CG のLomb-Scargle ピリオドグラム. 実線, 破線, 点線はそれぞれ90, 99, 99.9%の信頼度を表すパワーである. 著者らの論文[19]を元に作成.

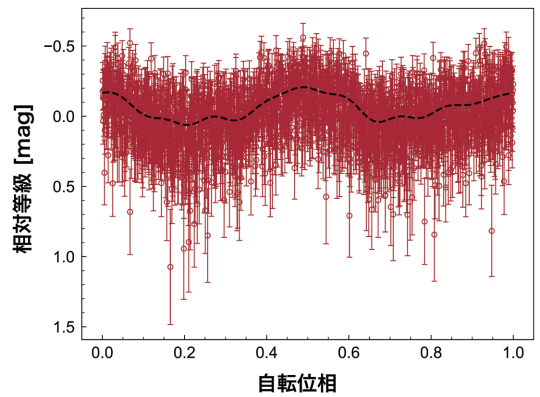


図7: 2021CG の折り返し光度曲線. 周期15.296秒で折り返したんだ. 丸は観測データ, 破線はモデル曲線を表す. 著者らの論文[19]を元に作成.

$$\omega = \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} t + \omega_0, \quad (3)$$

ただし ω_0 は小惑星の初期自転速度である.

式(3) を t について解けばNEO年齢 τ_{YORP} が計算できる:

$$\tau_{\text{YORP}} = 3.7 \cdot 10^3 \left(\frac{a_{\text{ast}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}}{a_{\text{Bennu}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}} \right) \cdot \left(\frac{D}{D_{\text{Bennu}}} \right)^2 \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{10D} \right) \text{Myr}. \quad (4)$$

図10左に $\tau_{\text{YORP}} = 1, 10, 100 \text{ Myr}$ の等時線を示す. 等時線から直径10 m 以下のNEOのNEO年齢がNEOの典型的な力学的タイムスケール(10 Myr)程度であれば, それらの現在の自転周期は10秒よりも短いと期待される. しかし本節の冒頭で述べた通り, 本観測で見つかった自転周期10秒以下の高速自転小惑星は2020 HS₇のみであった. YORP自転加速を考慮したモデルでは観測結果にみられる周期10秒付近の頭打ちを説明することができず, 他のメカニズムによる解釈が求められる.

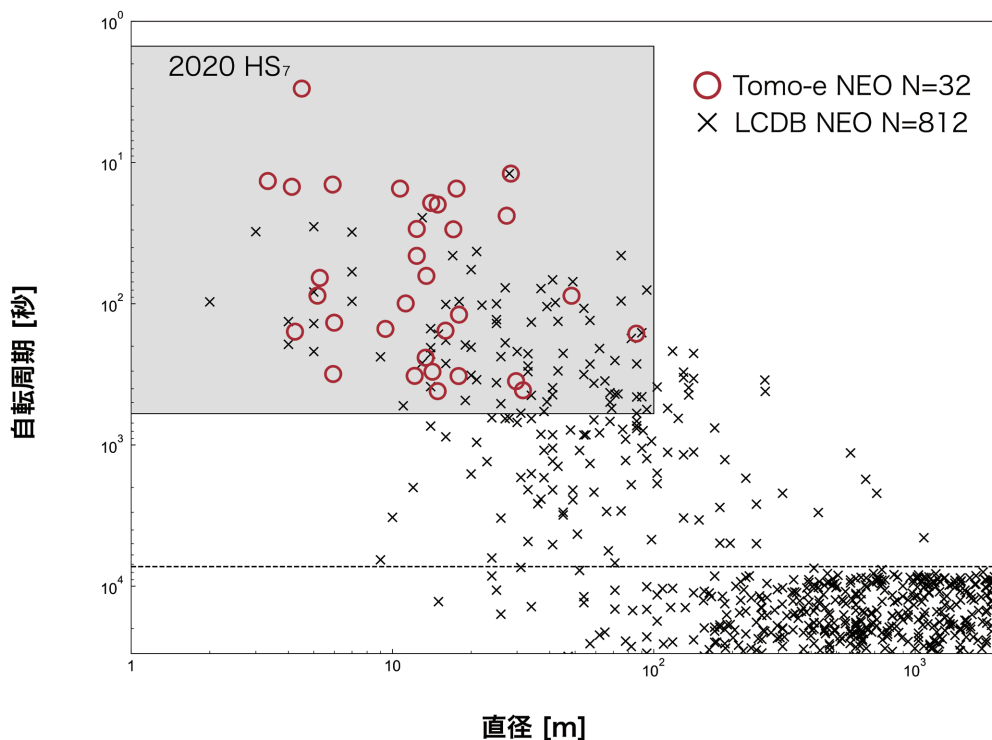


図8: 本観測天体を含む直径-自転周期関係. Tomo-e NEO, LCDB NEO をそれぞれ円とバツで表した. 左上の四角内は本研究で着目する微小かつ高速自転領域. 周期2 時間程度の破線は典型的な質量密度 2.67 g cm^{-3} を仮定したときのスピンバリアを示す[18]. 著者の論文[19] を元に作成.

3.4 Tangential-YORP効果による 自転周期分布の説明

前節の計算では小惑星表面に沿う熱伝導に起因するYORP効果(TYORP)を無視して小惑星表面に垂直な熱伝導に起因するYORP効果(NYORP)のみを考慮に入れていた. TYORPはNYORPと同様, 小惑星の自転周期と熱物性に依存して自転状態を変化させる. またTYORPはNYORPと異なり多くの場合自転加速を引き起こすことがわかっている[35].

本節ではNYORPとTYORP両方を考慮し, YORP自転加速の強さを以下で表現する:

$$\frac{d\omega}{dt} = 8.5 \cdot 10^{-18} \left(\frac{a_{\text{Bennu}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}}{a_{\text{ast}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}} \right) \cdot \left(\frac{D_{\text{Bennu}}}{D} \right)^2 (\gamma + (1 - \gamma)\eta(\theta)) \text{ rad s}^{-2}, \quad (5)$$

ただし γ は全YORPにおけるNYORPの寄与(γ)とTYORPの寄与($1 - \gamma$)を表す定数, $\eta(\theta)$ はTYORPの効率, θ は熱伝導に関係する二つのスケールである熱伝導長さ L_{cond} と表皮厚さ(skin depth) L_{wave} の比で表されるサーマルパラメタである.

まず太陽直下点温度(熱慣性0を仮定した際の平衡温度) T_{ss} を定義する. 天体表面でのエネルギーバランスから:

$$\varepsilon \sigma T_{\text{ss}}^4 = (1 - A)\Phi, \quad (6)$$

ただし ε と A はそれぞれ小惑星表面の放射率とボン

トアルベド, Φ は太陽エネルギーフラックス, σ はシュテファン-ボルツマン定数である. 次に天体の内部に熱が伝わることで天体の表面温度が ΔT 変化するスケール x は次式を満たす:

$$(1 - A)\Phi = \lambda \frac{\Delta T}{x}, \quad (7)$$

ただし λ は小惑星の熱伝導度である. 熱伝導長さは表面温度が $T = 0$ から $T = T_{ss}$ に変化する時 ($\Delta T = T_{ss} - 0 = T_{ss}$) のスケールで定義される:

$$L_{cond} = \lambda \frac{T_{ss}}{(1 - A)\Phi} = \frac{\lambda}{((1 - A)^3 \Phi^3 \varepsilon \sigma)^{1/4}}. \quad (8)$$

L_{cond} は天体に流入する太陽エネルギーフラックス $(1 - A)\Phi$ が太陽直下点温度 T_{ss} に相当する温度差を生じる長さのスケールを表す.

表皮厚さは以下で定義される:

$$L_{wave} = \left(\frac{\lambda}{C\rho\omega} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

ただし C は小惑星の熱容量, ρ は小惑星の質量密度である. L_{wave} は熱源の時間変動(ここでは小惑星の自転)を考えた際に熱がどの深さまで浸透するかを表す.

以上から, θ は次のように記述できる:

$$\theta(\omega) = \frac{L_{cond}}{L_{wave}} = \frac{(C\rho\lambda\omega)^{1/2}}{((1 - A)^3 \Phi^3 \varepsilon \sigma)^{1/4}}. \quad (10)$$

θ は小惑星の表面温度状況の特徴付けるパラメータで, 天体の物性値, 太陽からの距離, 自転周期の関数である. TYORP は $\theta \sim 1$ の条件下で強く働くことが数値計算で示されている[35]. この事実は次のように理解できる. 先行研究[13]と同じく太陽方向に垂直な自転軸を持つ球形の小惑星の表面に構造物が2つ(午前側にあるAと午後側にあるB)存在する状況を考える(図9). 天体は東側から太陽が昇り西側に沈む向きに自転しているとす. また構造物AとBはともに赤道上交つ球形の天体の中心に対して対称となる位置にあるとする. $\theta \sim 1$ というのは天体の自転サイクルの中で構造物中を熱がちょうど良いタイムスケールで伝導することに対応する. この場合には構造物Aの東側が与えるトルクと構造物Bの

西側が与えるトルクの差(正味のトルク)を自転周期で平均した値が常に正となる. つまり自転加速をもたらすTYORPトルクが発生する. θ が十分大きいという状況は天体の自転が速い場合と言い換えられる. 天体の自転が速いと表面は等温に近づくため天体表面方向の温度差はなく, TYORP効果によるトルクは発生しない. また θ が小さい状況は天体の自転が遅い場合と言い換えられる. 天体の自転が遅いと表面は熱平衡状態となり太陽からの距離に依存して温度が決まる. よって $\theta \sim 1$ の場合と異なり構造物Aの東側と構造物Bの西側の温度が等しくなるため, TYORP効果によるトルクは発生しない.

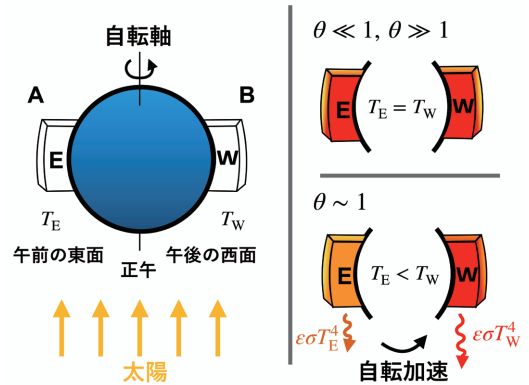


図9: TYORP 効果の概念図. 先行研究[13] を元に作成.

以上から, 天体の自転周期がある条件を満たす場合にTYORP効果が効率的に作用することがわかる. これをもとにTYORP 効率を以下の通り記述する:

$$\eta(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta_{min} < \theta < \theta_{max}, \\ 0 & \text{それ以外}, \end{cases} \quad (11)$$

ただし θ_{min} と θ_{max} はTYORP効率が働く条件を表すパラメータである. TYORPを考慮した際にYORP加速により加速可能な臨界自転周期を図10(a)に示す. TYORPを考慮した際のNEO年齢 τ_{TYORP} が10 Myr (NEOの典型的な力学的タイムスケール)の当時線を臨界自転周期として描画した. TYORPがNYORPと同等かそれよりも強く作用すると仮定して $\gamma = 0.1, 0.5$ の二種類で計算を行った[35]. 先行研究[36, 37]でいくつかの微小小惑星の表面が微小粒子で覆われていることが示唆されて

いることから、小惑星の物性値は天体表面がレゴリスで覆われていると仮定し $\lambda = 0.0015 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C = 680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 1500 \text{ kg m}^{-3}$ を採用した。また NEO の典型値として $\varepsilon = 0.7$, $a_{\text{ast}} = 2.0 \text{ au}$ を採用した。NEO の典型的な幾何アルベドと位相積分から $A = 0.084$ とした。

2022年4月現在、YORP効果による自転加速が報告された天体は10天体である ([38] とその引用を参照)。これら10天体の θ の値は0.26-1.3 と計算されることから暫定的に $\theta_{\text{min}} = 0.1$, $\theta_{\text{max}} = 5$ とした。TYORP効果を考慮することで直径-自転周期分布関係における平坦な分布を説明することができる。しかし観測された直径10m、自転周期10秒での頭打ちを説明することはできない。では観測で得られた周期10秒の頭打ちを説明するためには小惑星がどのような条件を満たせば良いかを考える。図10中の平坦な分布の位置は θ_{max} の値に依存し、図10 (b) に示す通り、仮に $\theta_{\text{max}} = 30$ の場合には周期約10秒の平坦な分布をTYORP効果で説明できる。式(10)より $\theta \propto (C\lambda)^{1/2} \Phi^{-3/4} \propto (C\lambda)^{1/2} (r^{-2})^{-3/4} \propto (C\lambda)^{1/2} r^{3/2}$ である。TYORPが効果的に働く範囲を表す最大値である θ_{max} の値が大きいうことは、広いパラメータ範囲(日心距離、熱物性など)の小惑星がYORP加速を経験することに対応する。つまり、日心距離 r , C や λ を固定した時に θ が30という大きな値をもつ小惑星に対してTYORPが効果的であるということは、 θ を固定した時に日心距離、 C や λ が小さい小惑星に対してもTYORPが効果的であると言い換えられる。我々が観測したTomo-e NEOの多くの近日点距離は2 au よりも小さく、観測時に地球近傍に存在した(日心距離 $r \sim 1 \text{ au}$)。Tomo-e NEOのような直径100 m以下の微小天体の C や λ の分布はわかっておらず、大きな小惑星とは異なる可能性が考えられる。Tomo-e NEOの日心距離が1 au でかつ C または λ が一桁小さい場合、 θ はファクター $10^{1/2} \cdot 2^{3/2} \sim 9$ 倍過大評価されていたことになる。すなわち、観測で得られた直径-自転周期関係上の周期10秒の頭打ちはTYORP効果を反映しているかもしれない。

4. まとめと今後

本稿では我々がトモエゴゼンを用いて行っている地球接近小天体(NEO)探索と微小NEOの即時追跡観測について紹介した。微小NEOの自転周期はその力学史や物理特性を反映した物理量である。現存の地上観測装置を用いて微小小惑星を観測するためには、地球に接近時に見かけ上明るくなったNEOを観測する必要があるが、微小NEOは観測好機が短い(数時間-数日)、高速自転している(周期1分以下)、天球上移動速度が大きい(毎秒数秒角)など多くの観測の困難性からその物理量(自転周期やスペクトル型)の推定例は限られている。我々は東京大学木曾観測所105 cm シュミット望遠鏡と広視野高速カメラトモエゴゼンを用いることで従来観測が困難であった直径100 m以下の微小小惑星の探索を行い、42天体の微小NEO発見に成功した。さらに自ら発見したNEOを含む60天体の光度曲線を取得し、周期60秒以下の高速自転小惑星13天体を含む32天体の自転周期推定に成功した。

本観測で得た微小小惑星の直径-自転周期分布では自転周期10秒付近の頭打ちが見られた。YORP効果を考慮した自転進化シミュレーションに基づくと、直径10 m以下の小惑星は周期10秒以下で自転していることが期待される。この観測と理論の不整合、すなわち直径-自転周期分布上の微小高速自転小惑星の頭打ち、は小惑星表面に沿う熱伝導に起因するTangential-YORP効果によって説明できることを示した。小惑星の自転進化過程において、Tangential-YORP効果の寄与は無視できないものであるかもしれない。

本稿で紹介したNEO探索と即時追跡観測による自転周期推定はトモエゴゼンNEOグループの活動の一部で、他にも複雑な自転状態にあるNEO 2012 TC₄の形状推定[39]、複数日の即時追跡観測による微小小惑星の形状推定などトモエゴゼンによるNEO研究は枚挙に暇がない。今後は世界でトモエゴゼンにしかできない微小NEOの自転周期推定を継続しつつその他の研究も発展させ、微小小惑星の起源と性質を明らかにすることを目指す。

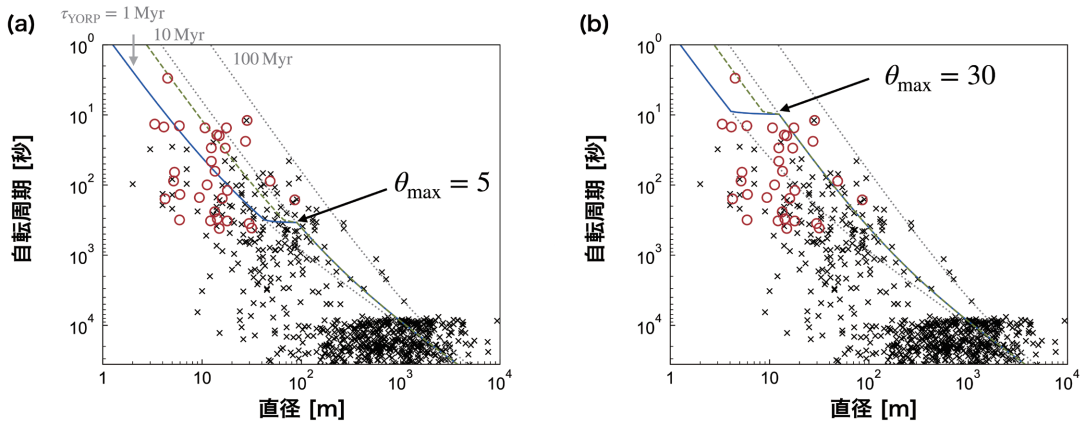


図10: NEOの直径-自転周期関係とNYORP 効果のみを考慮した際のNEO年齢が1, 10, 100 Myr の等時線(点線). 実線, 破線はそれぞれ $\theta_{\max} = 0.1, 0.5$ の場合のNYORP とTYORPを考慮した際のNEO年齢が10 Myr の等時線を表す. パネル(a), (b) はそれぞれ $\theta_{\max} = 5, 30$ の場合を表している. 著者らの論文[19] を元に作成.

謝辞

本研究はトモゴゼンの所在地である木曾の方々を含め多くの関係者に支えられながら行われました. 中でもトモゴゼンを用いた小惑星探査の礎を築いた小島悠人氏には大変お世話になりました. この場を借りて感謝申し上げます. 発表賞審査員, 年会で議論していただいた方々にも感謝しております. 本稿の執筆には三浦均編集長に提供していただいた谷川享行会員作成の $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ テンプレートを使用しました. 両氏に御礼申し上げます. 最後になりますが匿名の査読者には本稿の改善に繋がる多くのコメントを頂きました. 厚く御礼申し上げます. 本研究は科学研究費助成事業(課題番号: 21H04491, 20H04617, 18H05223, 18H01272, 18H01261, 18K13599, 17H06363, 16H06341, 16H02158, 26247074, 25103502), 光・赤外線天文学大学間連携事業, 公益財団法人岩垂奨学会, 岩井久雄記念東京奨学育英基金, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラムJPMJSP2108, UTEC東京大学奨学金の支援を受けました. This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission Gaia (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/>

[dpac/consortium](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/)). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the Gaia Multilateral Agreement.

参考文献

- [1] Meech, K. and Raymond, S. N., 2020, in Planetary Astrobiology (University of Arizona Press), 325.
- [2] Yoshikawa, M. et al., 2015, in Asteroids IV (University of Arizona Press), 397.
- [3] Arai, T. et al., 2018, 49th Annual Lunar and Planetary Science Conference, 2570.
- [4] Harris, A. W. et al., 2015, in Asteroids IV (University of Arizona Press), 835.
- [5] Chambers, J. et al., 2021, Astrophys. J. Letters 923, L8.
- [6] Drake, A. J. et al., 2009, Astrophys. J. 696, 870.
- [7] Tonry, J. L. et al., 2018, PASP 130, 064505.
- [8] 浦川聖太郎, 2017, 天文月報 110, 97.
- [9] Bottke, W. F. et al., 2002, Icarus 156, 399.
- [10] Granvik, M. et al., 2018, Icarus 312, 181.
- [11] Farinella, P. et al., 1998, Icarus 132, 378.
- [12] Bottke, W. F. et al., 2006, Annual Review of

- Earth and Planetary Sciences 34, 157.
- [13] Golubov, O. and Krugly, Y. N., 2012, *Astrophys. J. Letters* 752, L11.
- [14] Warner, B. D. et al., 2009, *Icarus* 202, 134.
- [15] Pravec, P. and Harris, A. W., 2000, *Icarus* 148, 12.
- [16] Thirouin, A. et al., 2016, *Astron. J.* 152, 163.
- [17] Thirouin, A. et al., 2018, *Astrophys. J. Supplement Series* 239, 4.
- [18] Yeomans, D. K. et al., 2000, *Science* 289, 2085.
- [19] Beniyama, J. et al., 2022, *PASJ* 74, 877.
- [20] Sako, S. et al., 2018, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 107020J.
- [21] Jiang, J. et al., 2021, *Astrophys. J. Letters* 923, L8.
- [22] Ohsawa, R. et al., 2020, *P&SS* 194, 105011.
- [23] Arimatsu, K. et al., 2019, *Astron. J.* 158, 236.
- [24] Nishino, Y. et al., 2022, *PASJ* 74, L17.
- [25] Ohsawa, R., 2021, *J. Space Sci. Informatics Japan* 11, 1.
- [26] Bertin, E. and Arnouts, S., 1996, *Astron. Astrophys. Supplement* 117, 393.
- [27] Gaia Collaboration et al., 2018, *A&A* 616, A1.
- [28] Lomb, N. R., 1976, *Astrophysics and Space Science* 39, 447.
- [29] Scargle, J. D., 1982, *Astrophys. J.* 263, 835.
- [30] VanderPlas, J. T., 2018, *Astrophys. J. Supplement Series* 236, 16.
- [31] Kadono, T. et al., 2009, *Icarus* 200, 694.
- [32] Rossi, A. et al., 2009, *Icarus* 202, 95.
- [33] Hergenrother, C. W. et al., 2019, *Nature Communications* 10, 1291.
- [34] Lowry, S. C. et al., 2007, *Science* 316, 272.
- [35] Golubov, O. et al., 2014, *Astrophys. J.* 794, 22.
- [36] Mommert, M. et al., 2014, *Astrophys. J. Letters* 789, L22.
- [37] Fenucci, M. et al., 2021, *Astron. Astrophys.* 647, A61.
- [38] Ďurech, J. et al., 2022, *Astron. Astrophys.* 657, A5.
- [39] Urakawa, S. et al., 2019, *Astron. J.* 157, 155.

著者紹介

紅山 仁



東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程2年。同修士課程修了。修士(理学)。専門は観測天文学(太陽系小天体)。日本惑星科学会, 日本天文学会, 日本地球惑星科学連合, 日本航空宇宙学会に所属。DESTINY⁺に参加。

酒向 重行

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・准教授。

大澤 亮

国立天文台 JASMINE プロジェクト助教。東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程を修了。東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター研究員・特任助教を経て2022年8月より現職。専門は星周ダスト, 地球接近小惑星, 観測装置開発, データサイエンスなど。日本惑星科学会, 日本天文学会, 日本地球惑星科学連合に所属。

瀧田 怜

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・特任助教。

小林 尚人

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・准教授, 木曾観測所所長。

奥村 真一郎

日本スペースガード協会理事長。東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員PD, 国立天文台岡山天体物理観測所COE研究員, 宇宙航空研究開発機構招聘研究員などを経て, 2005年6月より日本スペースガード協会所属, 2021年6月より現職。専門は大質量

星形成, 地球接近小惑星, 観測機器など。日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本天文学会, 日本天文教育普及研究会, 国際天文学連合に所属。

浦川 聖太郎

神戸大学大学院自然科学研究科構造科学専攻博士課程修了。博士(理学)。専門は太陽系小天体の観測的研究。日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本天文学会, 国際天文学連合, アメリカ天文学会に所属。はやぶさ2, DESTINY⁺に参加。

吉川 真

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・准教授。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。専門は, 天体力学, 惑星探査。日本天文学会, 日本惑星科学会, 日本航空宇宙学会, 日本地球惑星科学連合, 国際天文学連合に所属。

白井 文彦

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 宇宙科学プログラム室・主任研究開発員。

吉田 二美

神戸大学大学院自然科学研究科構造科学専攻博士課程修了。博士(理学)。台湾国立中央大学天文研究所ポスドク, 国立天文台ハワイ観測所研究員, 国立天文台国際連携室専門研究職員, 千葉工業大学惑星探査研究センター研究員(嘱託)などを経て, 2020年7月より現職。専門は太陽系小天体の観測的研究。日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本天文学会, 国際天文学連合に所属。はやぶさ, はやぶさ2, DESTINY⁺, New Horizons Kuiper Belt Extended Missionなどに参加。