

木曾 Tomo-e Gozen を用いた
高速移動天体検出システムの開発及び
即時追観測による微小地球接近小惑星の観測的研究

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 修士課程 2 年
学生証番号 35-196127 紅山 仁

2021 年 2 月 19 日

概要

地球に接近する軌道を持つ地球接近小惑星 (Near Earth Objects, NEO) は太陽系内の物質を地球にもたらし うる天体であり、その組成、強度、軌道進化過程やサイズ頻度分布の理解は、地球の水や生命の起源を解明する上で非常に重要である。多くの NEO は火星-木星間のメインベルトから軌道進化した天体であることがわかつており、その軌道進化過程では太陽や惑星の重力に加え、太陽の輻射に起因して小惑星の軌道や自転状態が変化する非重力効果が重要となる。非重力効果の一つである YORP 効果は直径が小さい天体により強く作用し、NEO の軌道進化に比べて短いタイムスケールで自転周期を変化させる。高速自転する小惑星には強い遠心力が働き、構造を維持できなくなる臨界自転周期に達すると変形や自転破壊を経験するため、YORP 効果が強く働く微小 NEO の自転周期を用いることで、微小小惑星の強度に制約を与えることができる。微小小惑星の観測を行うには地球に接近した見かけの明るさが明るい天体を観測する必要があるが、地球に接近した天体は見かけの移動速度が大きくなることで観測時に星像が伸びて感度が低下するという問題が生じてしまう。また見かけの速度が大きいために観測可能時間が短く、微小小惑星の組成や自転周期などの物理量を得るために追観測を行うことが難しい。このような理由から微小 NEO の発見率は低く、例えば直径 30m 以下の NEO の約 98 % が未発見であり、物理量を得るために追観測は限られた天体にしか行われていない。近年では分以下の自転周期をもつ高速自転小惑星が見つかりつつあるが、10 秒以下の自転周期を持つ小惑星は発見されていない。各観測装置で推定可能な自転周期は電荷の読み出しなど露光間のオーバーヘッド時間に依存するため、分以下の高速自転小惑星の周期を推定するためには高速撮像観測を行う必要がある。これまで得られている小惑星の自転周期は多種多様な装置で推定された値であり、どの自転周期までが真の小惑星の自転周期分布を正しく再現しているのか、また 10 秒以下の高速自転周期を持つ小惑星が存在しないのかは明らかではない。このような観測的困難を解決するため本研究では(1) 高速移動天体検出システムを開発し、それを用いることで Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データ中の NEO の探索を行った。また、(2) 微小 NEO の高時間分解光度曲線を取得することで自転周期と形状を推定した。

(1) ではまず Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データの中から高速移動天体を検出するシステムの開発を行った。20 平方度の広視野で約 7000 平方度の空に対し 2 fps の動画観測を行う Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測では毎晩約 20 TB の膨大なデータが生成される。そのため従来の移動天体検出方法ではデータ量に比例して多くの誤検出が発生し、真の移動天体の検出が困難となる。高速移動天体の観測可能時間は短いため、真の移動天体であるかの即時判断は不可欠である。そこで本研究では誤検出と真の移動天体の分類をより正確に行うため、ランダムフォレストアルゴリズムを用いた機械学習モデルを作成した。さらに移動天体の中に存在する NEO 候補天体に対し即時追跡観測を行うために必要な機能を実装したウェブアプリケーションを開発した。開発した高速移動天体検出システムを用い、Tomo-e Gozen 全天サーベイ観測データ中の NEO を探索した。約 1 年 4 ヶ月の全天サーベイ観測において NEO 候補天体に対し 2752 回の追跡観測を実施し、新たに 18 天体の NEO を発見することに成功した。Tomo-e Gozen が発見した NEO の平均移動速度は 2.8 arcsec/s、平均直径は 20 m であり、これまで困難であった高速移動する微小 NEO の発見に成功している。

(2) では本研究で発見した NEO を含む計 29 天体の微小 NEO に対し、Tomo-e Gozen を用いた 2 fps の動画観測を行い 20 分間の光度曲線を取得した。過去に Tomo-e Gozen を用いて観測した NEO を含めた計 34 天体のうち 19 天体の自転周期が求まった。先行研究との自転周期の比較から、本研究で推定した自転周期の分布には 100 秒以下の短周期に超過傾向が見られることがわかった。これは従来の観測において小惑星の高速自転を正しく検出できていなかったことを示唆する結果である。また重要な結果として、2 fps の観測を行っても自転周期 10 秒以下の NEO は検出されなかった。微小 NEO の系統的な高速観測により高速自転する微小 NEO の欠如を示したのは本研究が初めてである。YORP 効果により自転加速された微小 NEO は力学的進化過程のタイムスケール (~ 10 Myr) に比べ短いタイムスケールで自転周期 10 秒以下へと自転加速する。本研究で得られた高速自転する NEO が少ない直径-自転周期分布は、1) 微小 NEO の強度は小さい、2) 微小 NEO は自転破壊、潮汐力および熱疲労により、より大きな母天体が破壊され生成した天体であるため生成後に十分な自転加速を経験していない、という二つの解釈により説明することができる。

目次

概要	1
第 1 章 導入	3
1.1 Near Earth Objects (NEO)	3
1.2 NEO の起源	6
1.3 NEO の観測	9
1.4 本研究の目的と本稿の構成	12
第 2 章 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データを用いた高速移動天体検出システムの開発	13
2.1 広視野高速カメラ Tomo-e Gozen	13
2.2 高速移動天体検出システムの開発	16
2.3 ユーザーインターフェースの開発	36
第 3 章 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データからの NEO の探索	47
3.1 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測	47
3.2 結果	48
3.3 今後	63
第 4 章 微小 NEO の高時間分解光度曲線観測	64
4.1 観測戦略	64
4.2 観測諸元	66
4.3 解析	68
4.4 結果	69
第 5 章 議論	76
5.1 YORP 自転加速と直径-自転周期分布	76
5.2 解釈 1: 微小 NEO の強度が小さい	78
5.3 解釈 2: 微小 NEO が十分な自転加速を経験していない	80
5.4 結論	83
第 6 章 まとめと今後	84
謝辞	86
付録	94
A 小惑星に関する補足	95
B 機械学習に関する補足	101
C 測光解析	110
D 周期解析	111
E 光度曲線	114
F 折りたたみ光度曲線/Lomb-Scargle periodogram	129
G YORP 効果を用いた年齢の算出	139

第1章

導入

1.1 Near Earth Objects (NEO)

太陽系に存在する太陽、惑星、その他小天体の軌道は軌道要素を用いて表される。太陽からの距離の指標である軌道長半径 a と軌道の形状を表す軌道離心率 e を用いて $q = a(1 - e)$ で計算される近日点距離は、天体がどの程度太陽に接近するかの指標となる。軌道長半径が 1 au である地球への接近指標として用いることができ、近日点距離 q が 1.3 au 未満の小惑星を地球接近小惑星 (Near Earth Objects; 以下 NEO) という¹。

NEO は地球への水・生命の輸送を担った可能性があり、その軌道進化や組成、強度やサイズ頻度分布を知ることは極めて価値がある。そのため近年では多くの小惑星探査機が NEO を訪れている。1996 年に (433) Eros を訪れた NEAR Shoemaker をはじめ、はやぶさ、Chang'e 2、はやぶさ 2、OSIRIS-REx とその場観測による高解像度画像の取得、重力場測定など地上観測では得ることのできない情報が取得されている。はやぶさによる (25143) Itokawa の接近観測は小惑星が岩石の集積体 (ラブルパイル) であることを示した。さらにはやぶさ、はやぶさ 2 は小惑星表面物質のサンプルリターンミッションを実施し、大気圏突入時の変性を受けていない始原的な物質の取得に成功している。これまで探査された小惑星の直径は数百メートル以上と比較的大きく、直径が小さい小惑星についての情報はほとんど得られない。直径 30 m 級小惑星 1998 KY₂₆ へのはやぶさ 2 の拡張ミッションでは微小小惑星に関する知見を得ることが期待されている。以降、直径 100 m 以下の天体、小惑星、NEO をそれぞれ微小天体、微小小惑星、微小 NEO と表記する。

これまでに発見された小惑星の直径の分布を発見年度毎に図 1.1 に示した。観測で得られる絶対等級 (太陽位相角が 0°、日心距離と地心距離とともに 1 au の時的小惑星の視等級) から小惑星直径への変換は幾何アルベド 0.168 (Wright et al. 2016)² を仮定した³。微小天体の物理量を得るには、地球に近づいた NEO の観測が有用である。多くの小惑星が存在する火星-木星間のメインベルトに存在する小惑星 (メインベルト小惑星) は NEO に比べて地球から遠く、微小小惑星を発見、観測することが困難である。たとえ発見できたとしても、現状の観測装置では分光観測によるスペクトル型推定や連続観測による光度曲線の取得といった特徴づけは難しい。しかし地球に近づくことで見かけの明るさが明るくなる NEO であれば直径が小さい天体を観測することができ、最小で直径約 1 m の NEO が発見されている。微小小惑星は直径の大きなラブルパイル小惑星とは異なり、一枚の岩塊 (一枚岩小惑星) である可能性が高い。一枚岩小惑星とラブルパイル小惑星の密度、表面様相、強度などの本質的な違いは、その力学進化過程の差異に繋がる。

NEO は地球に近づくことにより、地球史において多くの被害をもたらしてきた。約 6,600 万年前に恐竜絶滅の契機となったユカタン半島への直径約 15 km の小惑星の落下 (Schulte et al. 2010) や、1913 年地球上の広範囲に衝撃波をもたらした直径数十メートルの小惑星 (Chant 1913)、近年では 2013 年に直径約 20 m の小惑星がチェリャビンスク隕石としてロシアに落下し、甚大な被害をもたらした (Popova et al. 2013)。地球衝突に至らなかつた天体では、2020 年 11 月 3 日に直径 10 m 級の NEO 2020 VT₄ が国際宇宙ステーション高度と同程度の地表約

¹ 本稿では、国際天文学連合 (International Astronomical Union) 監督の元、小天体に関する多くの情報提供を行うスミソニアン天体物理観測所 (Smithsonian Astrophysical Observatory) が運営する組織である小惑星センター (Minor Planet Center) を MPC と表記する。本稿の小惑星の諸情報は主に MPC が公開しているデータを用いている。詳細は A.2 を参照のこと。

<https://minorplanetcenter.net/>

² NEO を主な対象とする本研究では小惑星の典型的な幾何アルベドの値として、Wright et al. (2016) の NEO のアルベド分布のピークの一つである 0.168 を用いる。ただし後述する LCDB の直径は NEO の典型的な幾何アルベドを 0.2 として計算しているため、光度曲線に関する議論では幾何アルベドは 0.2 とする。

³ 詳細は A.1 を参照のこと。

400 km の距離を通過し、小惑星観測史上最接近距離を記録した。地球衝突軌道をもつ天体を発見し被害を軽減するスペースガードの観点からも NEO は重要な観測対象である。

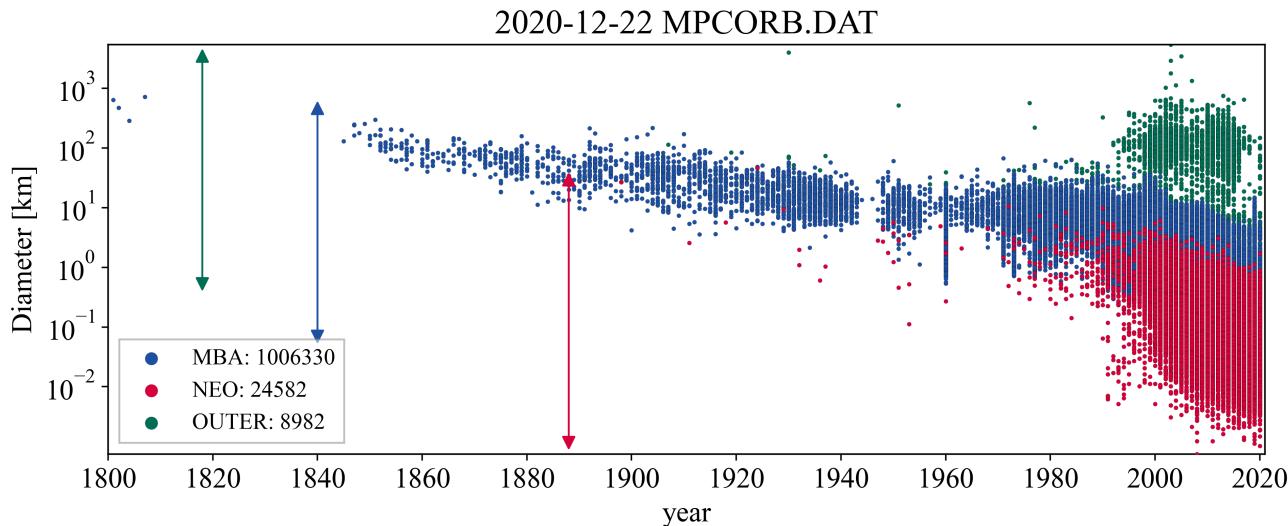


図 1.1 発見された小惑星のサイズ分布 (2020 年 12 月 22 日時点)。

小惑星の直径を縦軸に用いて発見年毎にプロット。青色点、赤色点、緑色点はそれぞれメインベルト小惑星、NEO、太陽系外縁天体を表す。縦方向の各色の矢印はそれぞれの分類の発見天体のサイズ範囲を表す。ここでは近日点距離が 1.3 au 未満の天体を NEO、軌道長半径が 5.2 au 以上の天体を太陽系外縁天体、その他をメインベルト小惑星とした。1801 年、1802 年、1804 年、1807 年の天体はそれぞれ (1) Ceres、(2) Pallas、(3) Juno、(4) Vesta の四大小惑星。1898 年の天体は最初の NEO (433) Eros。1930 年、直径約 2400 km の天体は冥王星。発見数が特に少ない 1939 年-1945 年は第二次世界大戦期間。発見数が突然的に多い 1960 年、1971 年、1973 年、1977 年は米パロマーハ天文台と蘭ライデン天文台によるパロマーライデンサーベイ (PLS) が行われた年。直径は MPC が公開している小惑星の軌道情報データベース⁴の絶対等級を幾何アルベド 0.168 を仮定。小惑星番号が付与された天体はその発見年⁵を使用し、その他の天体は仮符号から発見年を推定。

2020 年 12 月 21 日現在までに発見された NEO の 2020 年 12 月 23 日時点の位置を図 1.2、図 1.3 に示す。探査機によるその場探査が行われた NEO (25143) Itokawa, (162173) Ryugu, (101955) Bennu のように地球 (軌道長半径 1 au) 軌道付近に存在する小惑星や 2020 AV₄ のように地球や金星の内側の軌道をもつ天体など (Marcos and Marcos 2019; Greenstreet 2020)、多様な NEO が発見されている。

既知の NEO の絶対等級と軌道要素の分布を図 1.4 に示した。発見されている中で最大、最小の NEO の直径はそれぞれ約 30 km、1 m であり、幅広い直径を持つ天体が存在する。メインベルト小惑星では観測が難しい直径 100 m 以下の天体も多く観測されている。NEO の軌道要素の特徴として軌道離心率や軌道傾斜角が大きな天体が多いことが挙げられる。

⁴ <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/MPCORB.DAT>

⁵ <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/NumberedMPs.txt>

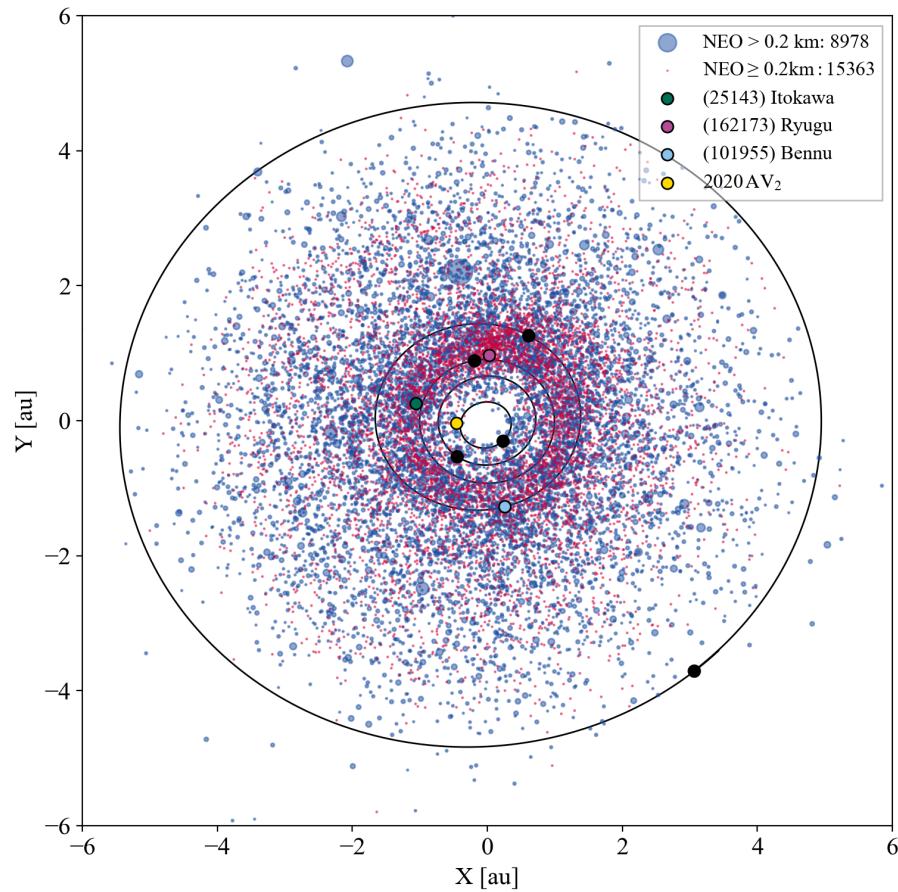


図 1.2 黄道北極方向からみた発見済み NEO の空間分布 (2020 年 12 月 23 日時点)。

原点は太陽、X 軸正の方向は春分点方向。青色、赤色点はそれぞれ直径が 200 m 以上、以下の NEO を表し、直径に比例してプロット。絶対等級から直径への変換は幾何アルベド 0.168 を仮定。緑色点、紫色点、水色点は (25143) Itokawa、(162173) Ryugu、(101955) Bennu、黄色点は Vesta 族小惑星 2020 AV₂。黒色の円と点は内側から水星、金星、地球、火星、木星の軌道と 2021 年 1 月 1 日時点での位置を表す。MPC が公開している NEO の軌道要素データベース (2020 年 12 月 23 日)⁶ に存在する NEO の天体暦を JPL の HORISONS⁷ を用いて計算。

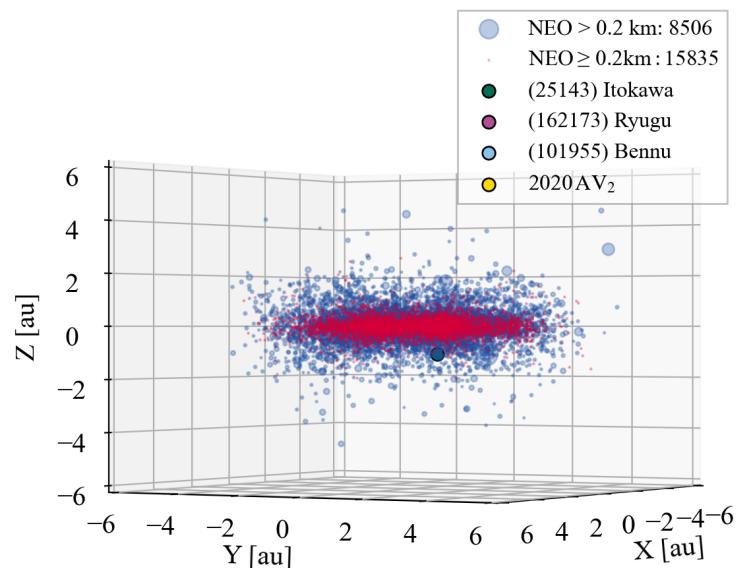


図 1.3 黄道面方向からみた発見済み NEO の空間分布 (2020 年 12 月 23 日時点)。

黄道北極を Z 軸正の方向とした。凡例は図 1.2 と同様。ただし惑星と惑星軌道は図示していない。

⁶ <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/NEAm00.txt>

⁷ <https://ssd.jpl.nasa.gov/>

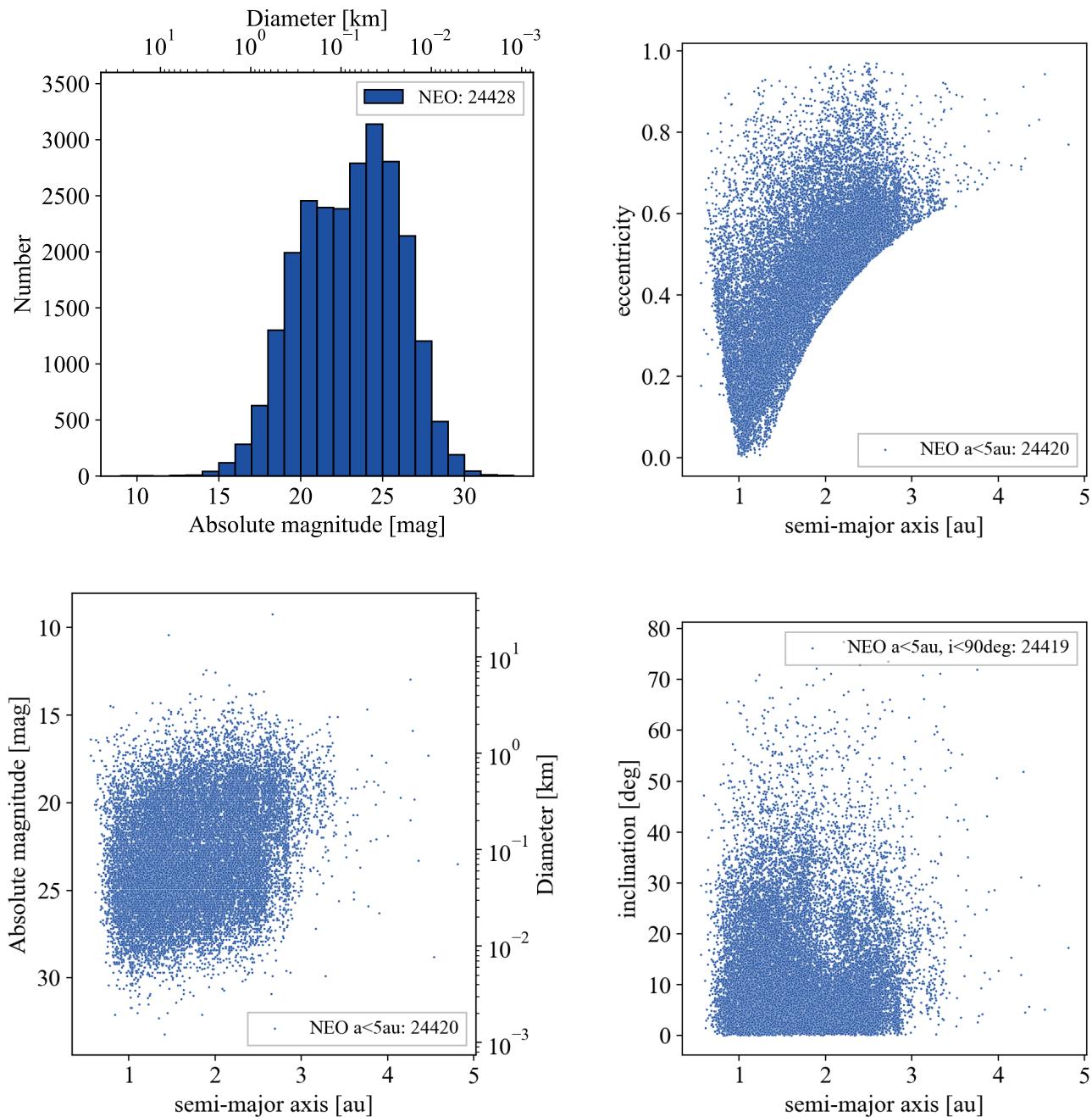


図 1.4 NEO の絶対等級と軌道要素の分布 (2021 年 1 月 4 日時点)。

仮符号を取得した天体で絶対等級が推定されている 24428 天体をプロット⁸。絶対等級から直径への変換は幾何アルベド 0.168 を仮定。左上:NEO の直径毎の発見数のヒストグラム。右上:NEO の軌道長半径と軌道離心率の関係。ただし NEO のうち軌道長半径が大きな 8 天体は除外。右側に NEO が存在しないのは NEO の定義 ($q = a(1 - e) < 1.3$) を満たさないからである。左下:NEO の軌道長半径と絶対等級の関係。NEO のうち軌道長半径が大きな 8 天体を除外。右下:NEO の軌道長半径と軌道傾斜角の関係。NEO のうち軌道長半径または起動傾斜角が大きい 9 天体を除外。MPC が公開している軌道要素データベース (2021 年 1 月 4 日) を使用。

1.2 NEO の起源

メインベルト小惑星の軌道進化を数値計算により追跡することで、メインベルト小惑星の一部は地球近傍領域に軌道進化することが示されている (Bottke W.F. et al. 2000; Granvik et al. 2018)。つまり多くの NEO はメインベルト小惑星が軌道進化した天体である。その軌道進化過程において、太陽や惑星の重力以外に太陽からの輻射圧に起因する重力以外の力、すなわち非重力効果が重要となる。以下では二種類の非重力効果について述べ(図 1.5)、NEO の力学的進化についてまとめる。

⁸ WISE 衛星による赤外線観測のみ行われており絶対等級が求められていない 2 天体を除外した。

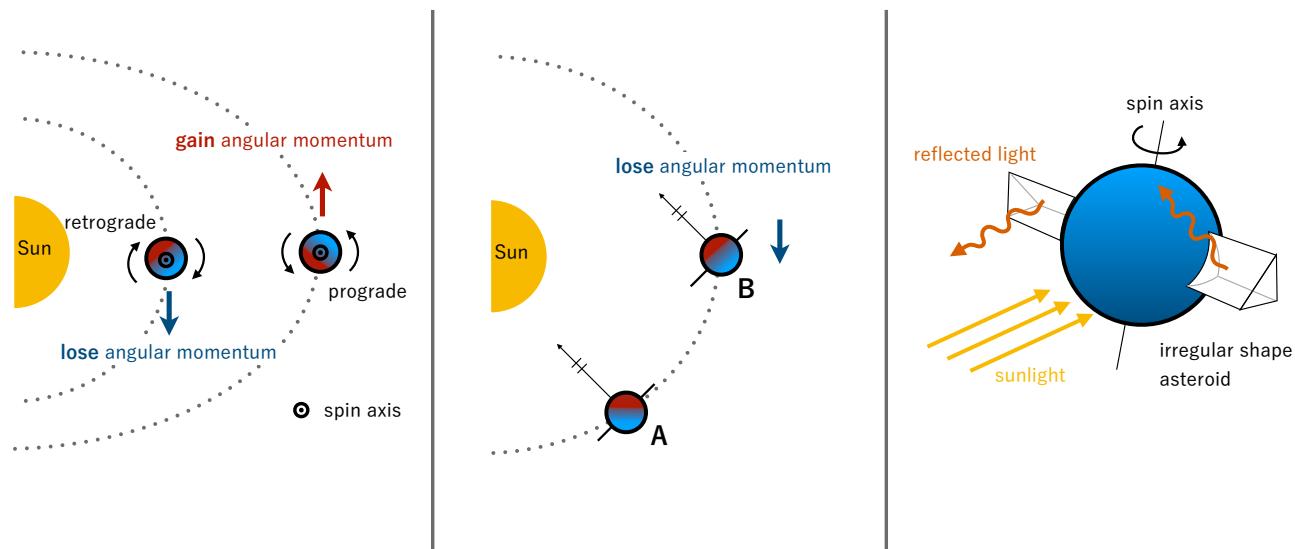


図 1.5 非重力効果の概念図。

左:日周 Yarkovsky 効果の概念図。太陽(黄色)の右にある二つの円は、公転面に対して垂直な自転軸をもち、順行自転、逆行自転している小惑星を表す。赤面、水色面はそれぞれ温度が高い、低いことを意味する。太陽から受けた熱が伝播する間に自転することで、順行自転、逆行自転それぞれ軌道方向に対し後方、前方で最も温度が高くなる。結果としてそれぞれの小惑星では角運動量が増加、減少し、軌道長半径が増加、減少する。中央:年周 Yarkovsky 効果。太陽、小惑星に関する記号は日周 Yarkovsky 効果と同様で、軌道平面と並行な自転軸を持つ小惑星が A 地点から B 地点に公転している場合を考える。A 地点で太陽に面している面は、太陽から受けた熱が伝播する間に公転することで、B 地点で最も高温となる。結果として軌道方向前面の温度が高くなり、角運動量、軌道長半径の減少をもたらす。右:YORP 効果。球に図のようなふたつの突起を持つ形状を持ち自転している小惑星(青色)を考える。小惑星は太陽から受けた輻射を反射、再放射する。図のような形状を持つ場合、右側、左側で等量の輻射を受けた際に図の奥側でより大きな自転方向逆方向のトルクを受ける。この小惑星が半周自転した場合も全く同じ状況となり、自転方向逆方向のトルクを受ける。つまりこの小惑星は長い時間をかけて自転周期が遅くなる方向にトルクを受ける。

1.2.1 非重力効果

Yarkovsky 効果

太陽から受けた輻射を天体表面で吸収、再放射する過程で熱慣性により天体の軌道が変化する効果を Yarkovsky 効果という。Yarkovsky 効果には自転のタイムスケールで働く日周効果と公転のタイムスケールで働く年周効果が存在する (Bottke et al. 2006)。太陽の周りを公転する小惑星は、太陽に面した側(昼側)が太陽に照らされる。その輻射の一部を熱放射として再放射するが、吸収から再放射までには熱慣性による時間差が生じる。この間に小惑星が自転することで、熱放射は太陽重心と小惑星重心を結ぶ直線からはずれた方向にピークをもつことになる(図 1.5 左)。その結果、順行(自転と公転の方向が同一)小惑星であれば進行方向後ろ側、逆行(自転と公転の方向が反対)小惑星であれば進行方向前側に強くエネルギーを放射することになり、角運動量の増減が生じる。これにより順行では軌道長半径が増大、逆行では軌道長半径が減少する。このような小天体の自転のタイムスケールで起こる軌道変化を日周 Yarkovsky 効果とい。また公転のタイムスケールで生じる軌道変化を年周 Yarkovsky 効果とい。簡単のため自転周期が 0 かつ自転軸が公転面と並行である小惑星を考える(図 1.5 中央)。この小惑星のある時期(図 1.5A 地点)の昼面が最も温まるのは、熱慣性の影響により少し公転した位置(図 1.5B 地点)となり、角運動量を失い軌道長半径が減少する。年周 Yarkovsky 効果は常に軌道長半径を減少させる効果である。

Yarkovsky 効果は直径が小さい天体により強く働く。また直径 100 m よりも小さい天体では年周効果が支配的となる (Vokrouhlický et al. 2000)。直径以外には軌道要素、密度、自転状態や熱慣性など多くの物理量に依存する効果である。小惑星の軌道変化の測定から、多くの小惑星で観測的に検出されている (Greenberg et al. 2020)。

YORP効果

小惑星表面での太陽輻射の反射、再放射時にトルクが生じ小惑星の自転状態(自転周期、自転軸の向き)を変化させる現象をYORP効果(Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack effect, [Rubincam \(2000\)](#))という。理想的な球形の小惑星では、小惑星表面で積分した上記のトルクは0となり、自転状態は変化しない。しかし実際の 小惑星は様々な形状をもち、その形状に起因して正味のトルクが生じることで自転状態が変化する(図1.5右)。

YORP効果はYarkovsky効果と同様に、小惑星の直径、軌道要素、密度、自転状態、熱慣性など多くの物理量に依存する効果である。2007年の(54509)YORP,(1862)Apolloでの初検出以降いくつかの小惑星において、長期間の光度曲線を用いることでYORP効果による自転状態の変化が確認されている([Kaasalainen et al. 2007](#); [Lowry et al. 2007](#); [Lowry et al. 2014](#); [Taylor et al. 2007](#); [Durech et al. 2008, 2012](#); [Hergenrother et al. 2019](#))。

1.2.2 NEOの力学的進化

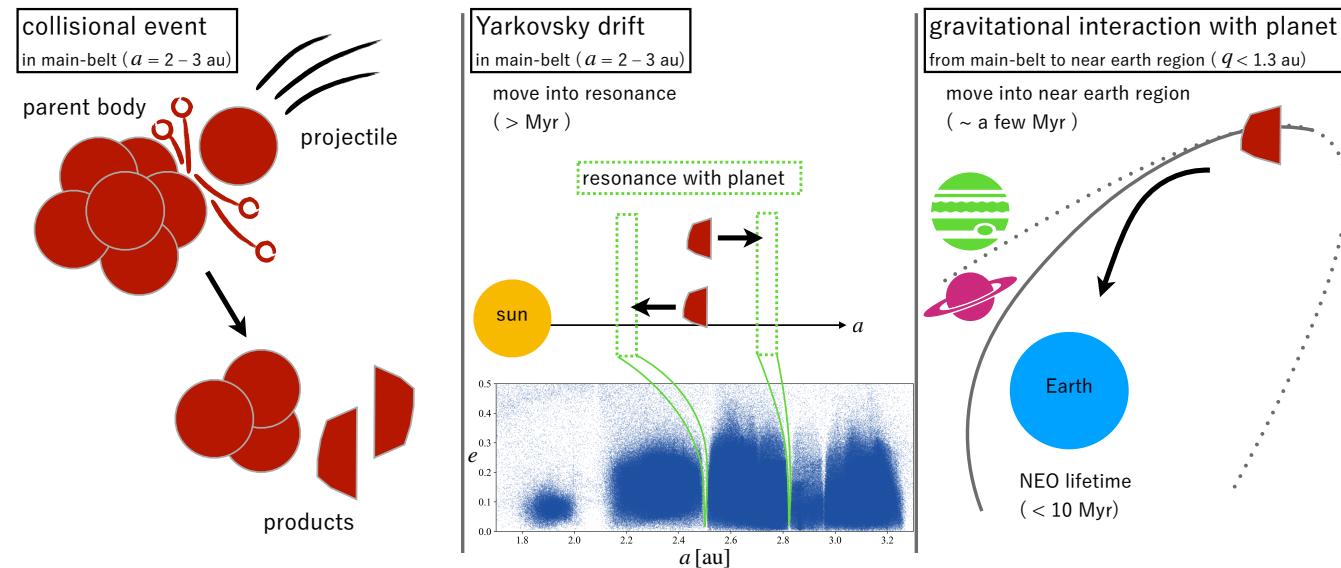


図1.6 NEOの力学的進化の模式図。

左から順にメインベルトでの衝突破壊、Yarkovsky効果による天体のメインベルト内の移動(Yarkovsky drift)、惑星重力による軌道変化を表す。中央下部は既知の小惑星の軌道要素(軌道長半径と軌道離心率)分布を表し、緑色の領域を含め小惑星が存在しない領域は軌道共鳴の位置。

非重力効果を考慮したNEOの力学的進化過程についてまとめる(図1.6)。

惑星形成期以後、メインベルト小惑星は頻繁に衝突破壊を経験し、観測されている小惑星の多くは衝突破壊を繰り返した天体であると考えられる。比較的若い(\sim Myr)小惑星族(類似した軌道要素をもつ天体の集団)が多く発見されていることからも衝突破壊が起きていることが示されている([Nesvorný et al. 2015](#))。メインベルト小惑星は、Yarkovsky効果を受けることでその自転状態に依存してメインベルト内を移動する。Yarkovsky効果の軌道変化率は非常に小さい(直径1km小惑星で 10^{-4} au/Myr)ため長い時間をかけて移動し、メインベルト内で、木星や土星の重力相互作用を強く受ける共鳴帯に入ると、巨大惑星の重力作用により軌道離心率が増大し、地球近傍領域に達したものはNEOとなる。Yarkovsky効果はサイズ依存性を考慮すると微小天体に強く働くが、ラブルパイル小惑星と本質的に異なる一枚岩小惑星であると考えられる微小小惑星において、Yarkovsky効果が効率的に作用するかどうかは自明ではない。共鳴帯からNEOへの軌道進化のタイムスケールは典型的に10Myr以下であると見積もられている([Gladman et al. 1997](#))。

内惑星に近いNEOの軌道は安定でなく、多くが太陽や惑星に衝突、または外縁部へと軌道進化することがわかっている、NEOとして存在する典型的タイムスケールは10Myr以下であると見積もられている([Granvik et al. 2018](#))。軌道が不安定であるNEOが太陽系形成後数十億年経った現在も発見されているという事実はNEOが絶えず供給されていることを意味する。

以上の衝突生成、Yarkovsky効果によるメインベルトでの共鳴への移動、共鳴から地球近傍領域への軌道進化

の間に、YORP 効果により小惑星の自転状態が変化する。直径依存性を考慮すると Yarkovsky 効果、YORP 効果は微小小惑星により強く作用するため、微小小惑星の自転状態は大きく変化する。

1.3 NEO の観測

1.3.1 サーベイ観測による NEO の発見

主要な観測計画による年度毎の NEO 発見数を図 1.7 に示した。1898 年に一つ目の NEO (433) Eros が発見されて以来、2021 年 1 月 04 日現在仮符号が付与された NEO は 24430 天体に及び、大型サーベイ計画が NEO 発見に大きく貢献している (Jedicke et al. 2015)。

Pan-STARRS (The Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, Chambers et al. 2016)⁹ はハワイ州ハレアカラにある Pan-STARRS1 と Pan-STARRS2 の二台の口径 1.8 m 望遠鏡を用いた観測計画である。ハワイ大学により運用されている。2010 年に Pan-STARRS1 の観測を開始した。

CSS (Catalina Sky Survey)¹⁰ はアリゾナ州サンタカタリーナ山地にある口径 1.0 m、1.5 m 望遠鏡 (レモン山)、口径 0.7 m シュミット望遠鏡 (ビゲロウ山) を用いた観測計画である。サーベイ観測は 1.5 m、0.7 m を用いて行われ、1.0 m 望遠鏡は NEO の追跡観測を行う。アリゾナ大学のスチュワード天文台により運用されている。1998 年にビゲロウ山サーベイとして 0.7 m 望遠鏡を用いたサーベイ観測を開始した。

ZTF (Zwicky Transient Facility, Bellm et al. 2019; Masci et al. 2019)¹¹ はカリフォルニア州パロマー山にある口径 1.2 m (48 inch) シュミット望遠鏡を用いた観測計画である。カリフォルニア大学により運用されている。地球軌道より内側の小惑星の発見を目的とした薄明での観測 (Ye et al. 2020) を行い、2020 年に金星より内側の軌道をもつ 2020 AV₂ を発見している (Greenstreet 2020)。2017 年に観測を開始した。

ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System, Tonry et al. 2018)¹² はハワイ州にある ATLAS1 (ハレアカラ)、ATLAS2 (マウナロア) の二台の口径 50 cm 望遠鏡を用いた観測計画である。ハワイ大学により運営されている。2015 年に一台、2017 年に二台の望遠鏡を用いた観測を開始した。

NEOWISE (Near Earth Objects Wide-field Infrared Survey Explorer)¹³ は NASA のジェット推進研究所 (JPL) により運用されている口径 40 cm の赤外線天文衛星である。望遠鏡の冷却材が切れた後、2011 年に NEOWISE として NEO の観測を開始した。

Spacewatch¹⁴ はアリゾナ州クヴィンラン山にある口径 0.9 m、1.8 m の二台の望遠鏡を用いた観測計画である。アリゾナ大学のスチュワード天文台により運用されている。1984 年に 0.9 m 望遠鏡を用いた観測を開始し、2002 年に 1.8 m 望遠鏡の観測を開始した。

NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking)¹⁵ はハワイ州ハレアカラの二台の 1 m 望遠鏡とカリフォルニア州パロマー山にある口径 1.2 m (48 inch) シュミット望遠鏡を用いた観測計画である。アメリカ空軍の協力のもと JPL により運用され、1995 年から 2007 年まで観測を行った。

LONEOS (The Lowell Observatory Near-Earth-Object Search)¹⁶ はカリフォルニア州パロマー山にある 0.6 m (24 inch) シュミット望遠鏡を用いた観測計画である。ローウェル天文台により運営され、1993 年から 2008 年まで観測を行った。

LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research)¹⁷ はニューメキシコ州ソコロにある 1 m 望遠鏡を用いた観測計画である。マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所により運営されていた。1996 年から 2013 年まで 1 m 望遠鏡を用いて観測を行い、2013 年から 2017 年までは口径 3.5 m の Space Surveillance Telescope (SST) を用いた観測を行った。SST をオーストラリアに移動した後、観測を再開する予定である。

⁹ <https://panstarrs.stsci.edu/>

¹⁰ <https://catalina.lpl.arizona.edu/>

¹¹ <https://www.ztf.caltech.edu/>

¹² <https://atlas.fallingstar.com/home.php>

¹³ <https://www.jpl.nasa.gov/missions/neowise/>

¹⁴ <https://spacewatch.lpl.arizona.edu/>

¹⁵ <https://sbn.psi.edu/pds/resource/neat.html>

¹⁶ <https://asteroid.lowell.edu/asteroid/loneos/loneos.html>

¹⁷ <https://www.ll.mit.edu/impact/watch-potentially-hazardous-asteroids>

発見数が減少傾向にあるメインベルト小惑星に比べ NEO の発見数は増加しており、未発見の NEO が多く存在することが示唆される。これまでの NEO 観測数を Granvik et al. (2018) で見積もられたサイズ頻度分布と比較すると、直径約 130 m 以上、約 30 m 以上の NEO の発見率はそれぞれ約 35%、2% となる。それよりも小さな NEO はさらに発見率が低い。微小小惑星は地球から近く明るい天体でなければ観測は難しい。しかし地球に近い天体は見かけの速度が大きく、露光時間が長いと像が伸びてしまい感度が低下するという別の問題が生じる。また小惑星の発見、軌道決定には複数回観測することが重要だが、見かけの速度が大きい天体は観測可能期間が短く、十分に観測点を増やすことができずに見失われる可能性が高い。微小天体の発見、軌道決定には、これまでのサーベイ観測と同様の広視野観測に加え、高速移動天体を検出するための高速観測が必要となる。

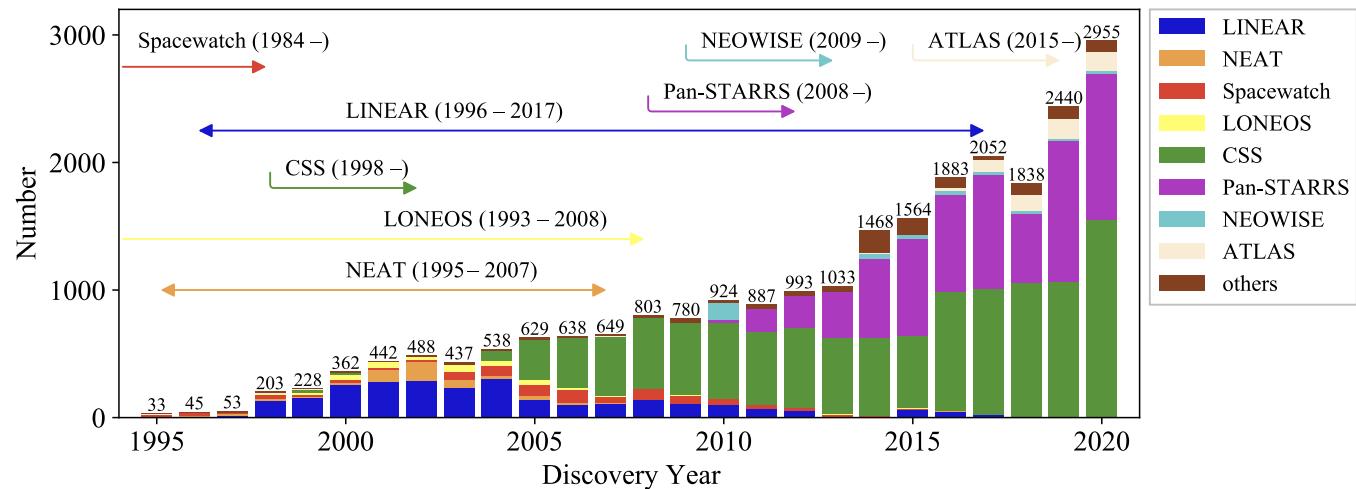


図 1.7 観測計画別の NEO 発見数の推移 (1995 年–2020 年)。

棒グラフの上の数はその年の全 NEO 発見数。JPL Center for Near Earth Object Studies(CNEOS) が公開している観測プロジェクト毎の発見数情報¹⁸を使用。

1.3.2 光度曲線を用いた NEO の特徴づけ

小惑星の多くは自転による断面積の変化などに起因して見かけの明るさが時々刻々と変化する。この特性を利用し小惑星の明るさの時系列情報(光度曲線)から小惑星の軸比、自転周期を推定することができる。これまで多くの観測がなされており、小天体の光度曲線データが蓄積されているライトカーブデータベース(The Asteroid Lightcurve Database; 以下 LCDB)には 2020 年 10 月現在 30522 天体の光度曲線が登録されている¹⁹。

軸比

小惑星を軸の長さが a 、 b 、 c ($a > b > c$) の三軸不等楕円体とし、観測時のアスペクト角(小惑星と観測者を結ぶ直線と、小惑星の自転軸がなす角度)を 90° と仮定すると、小惑星の軸比 (a/b) の下限値は以下の式で求まる²⁰。

$$\frac{a}{b} = 10^{0.4\Delta m} \quad (1.1)$$

ただし Δm は観測時の等級振幅である。軸比が大きい天体ほど自転による断面積の変化が大きく、明るさが大きく変化する。

LCDB に存在するデータの質が高い(LCDB の不定性指標 $U = 3, 3 -$ ²¹) 4930 天体の自転周期-軸比の関係、直径-軸比の関係を図 1.8 に示す。直径が小さい天体(図 1.8 赤色点)の多くは NEO であり観測可能な期間が限

¹⁸ https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/site_all.html

¹⁹ <http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

²⁰ 詳細は A.1 を参照のこと

²¹ U についての定義は以下の通り(2020 July 21)。3+:ダブルピークの周期が完全に求まる。位相を用いて光度曲線(折りたたみ光度曲線)を書いた際にデータがかけている範囲は高々数度で隙間がほとんどない 3-:唯一の周期がもとまるが、折りたたみ光度曲線にいくらか隙間がある。誤っている可能性がある。2+:ほとんどないが、周期が誤っている可能性を否定できない。3- と同様に折りたたみ曲線に隙間がある。2-:一周期分以下の観測による結果で、周期が誤っている可能性は 30 パーセント程度。複数の周期の候補を考えられる場合にも 2 となる。2-:周期と振幅が精度よくもとまらない。極大と極小を一度ずつ含むような光度曲線。LCDB が統計に用い

られているため、直径が大きな天体(図1.8青色点)に比べ自転周期が求まった天体は少ない。先行研究(Hatch and Wiegert 2015; Thirouin et al. 2016)では直径が約60mより小さいNEOにおいて自転周期-軸比、直径-軸比の間に強い相関がないことが示されている。

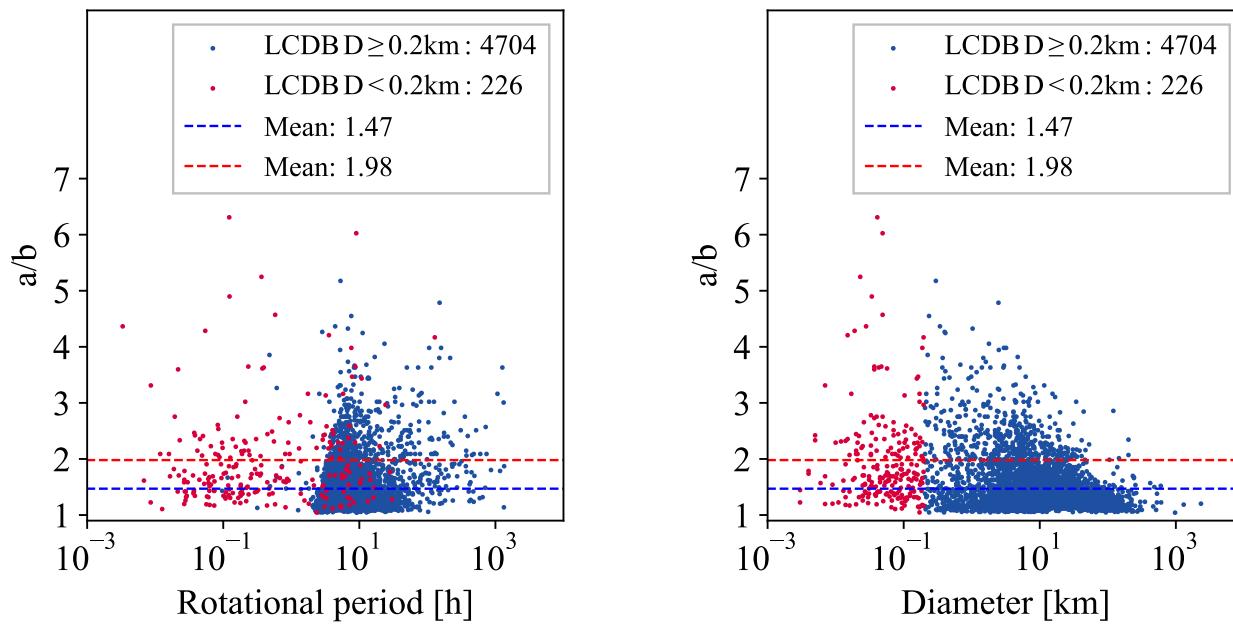


図1.8 左:LCDBの自転周期-軸比関係。右:LCDBの直径-軸比関係(2020年10月22日時点)。
青色点、赤色点はそれぞれ直径200m以上、未満の天体を表す。絶対等級から直径への変換は幾何アルベド0.2を仮定。破線はそれぞれの軸比の平均。LCDB 2020年10月22日版を用いてプロット。

自転周期

LCDBに存在するデータの質が高い4930天体の直径-自転周期関係を図1.9に示す。図1.9から自転周期が求められている微小天体のほとんどはNEOであり、微小小惑星の自転周期を求めるには微小NEOの観測が有用であることがわかる。

小惑星の自転周期と直径を用いることで構造についての知見を得ることができる。図1.9における自転周期約2時間の緑色領域は、重力のみで束縛されたラブルパイル小惑星がそれより高速で自転すると、ラブルパイルを構成する岩に働く遠心力が重力よりも強くなり、破壊や変形を経験する臨界自転周期(スピナリヤ)を表している(Pravec and Harris 2000)²²。黄色領域、オレンジ領域はそれぞれ典型的なレゴリス強度、隕石の強度を表す。直径約200m以上の小惑星の多くの自転周期はスピナリヤよりも長く、岩石が互いに重力束縛したラブルパイル天体であると考えられる。一方直径200m以下の小惑星のスピナリヤよりも短い自転は、重力以外に強度をもつことで実現していると考えられる。小惑星の直径、自転周期、形状から自転状態を実現するのに必要な強度を推定し、推定した強度を隕石やレゴリスの強度と比較することで小惑星の構造を推定することができる。例えば、図1.9の中で最速自転している直径約30mの小惑星2019BE₅の自転周期は11.98秒でありオレンジ領域に近いことから、その高速自転を実現するには隕石程度の強度を必要とし、一枚岩小惑星である可能性が高いと考えられる。このように小惑星の自転周期は、小惑星の内部構造に制約を与える上で非常に有用である。図1.9の最速自転周期は約12秒であり、これまで10秒以下の自転周期を持つ小惑星は検出されていない。各観測装置で推定可能な自転周期は電荷の読み出しなど露光間のオーバーヘッド時間に依存するため、分以下の高速自転小惑星の周期を推定するためには高速撮像観測を行う必要がある。これまで得られている小惑星の自転周期は多種多様な装置で推定された値であり、どの自転周期までが真の小惑星の自転周期分布を正しく再現しているのか、また10秒以下

²² 良いと判断する最低の階級。1+;2-と同様に周期がもとまらないもののうち、振幅が小さく小惑星の光度曲線かノイズによるものか判別できない。1:完全に間違っている可能性がある。1-:1と同様に完全に間違っている可能性があることに加え、直径が大きな天体が2時間以下の自転のようないい得そうにない値。0:後に誤っていることがわかったデータ。個々の観測につく可能性があるが、天体にはつかない。本稿では一貫してF-D_BASIC.TXTに含まれるUが3または3-の天体を用いる。

²² 詳細はA.1参照のこと。

の高速自転周期を持つ小惑星が存在しないのかは明らかではない。

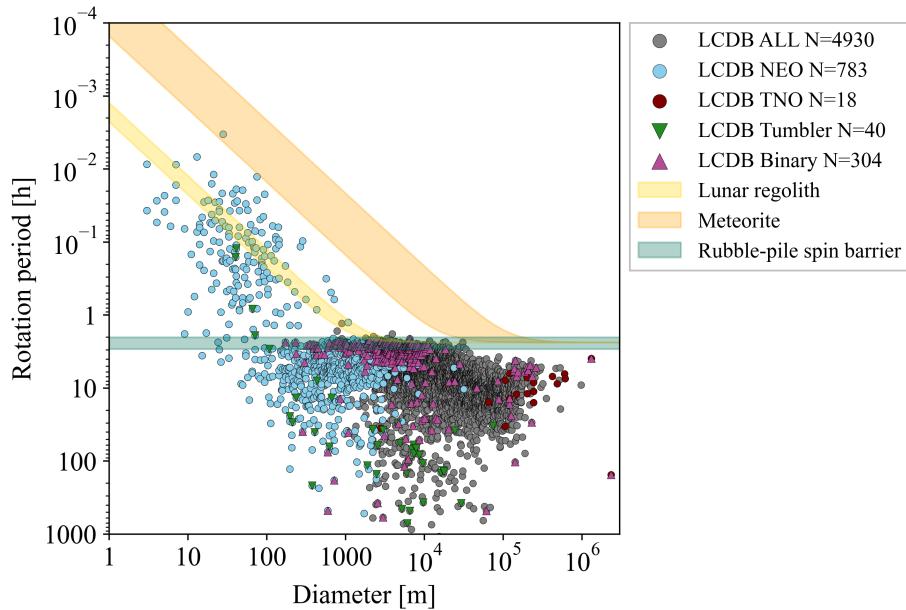


図 1.9 LCDB 直径-自転周期関係 (2020 年 10 月 22 日時点)。

横軸は直径、縦軸は天体の自転周期。絶対等級から直径への変換は幾何アルベド 0.2 を仮定。水色点、小豆色点、緑逆三角、紫三角はそれぞれ NEO、TNO(太陽系外縁天体)、タンブラー(非主軸回転天体)、バイナリー(二重小惑星)を表す。緑色領域はスピンバリアを表し、Bennu(B 型、 1.26 g/cm^3 、Chesley et al. 2014)、Eros(S 型、 2.67 g/cm^3 、Yeomans et al. 2000) の密度を用いて計算。黄色領域、オレンジ領域はそれぞれ典型的な月のレゴリス強度、地上に落ちた隕石の強度。ただし摩擦角が 40° 、密度が 2500 kg/m^3 の球を仮定。LCDB 2020 年 10 月 22 日版を用いてプロット。

1.4 本研究の目的と本稿の構成

本研究の目的は 1) 観測が難しく発見率が低い微小 NEO の独立発見、2) 微小小惑星の高速自転周期の推定及び独立した直径-自転周期分布の取得、の二つである。1) の微小 NEO の発見における課題は高速移動天体の星像の伸びに起因する感度低下と限られた観測時間であった。この課題を解決するため、本研究では 2fps 動画観測を行うことで高速移動天体の感度低下を防ぐことができる Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データを用いる。2fps 動画観測と 20 平方度の広視野観測を組み合わせることにより、高速移動天体の大量検出が期待できる。検出天体中の誤検出を除去するために機械学習を用いた移動天体分類モデルを作成し、NEO 候補天体をリアルタイムで追跡するためのウェブアプリケーションの開発を行う。開発したシステムを用いて Tomo-e Gozen のサーベイ観測データからの NEO の検出、リアルタイム追跡観測、軌道決定を行い、NEO の独立発見を目指す。2) の微小小惑星の自転周期分布における課題は、オーバーヘッド時間が無視できない従来の観測では高速自転周期を正しく推定できていないことであった。Tomo-e Gozen を用いて微小 NEO の高時間分解光度曲線を取得することで、秒スケールの高速自転周期を十分に検出することができる。従来の自転周期分布の妥当性、10 秒以下の高速自転小惑星が存在するかどうかを明らかにし、微小 NEO の強度に制約を与える。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では小惑星検出のための高速移動天体検出システムの開発について述べ、3 章では開発したシステムを用いて行った NEO 探索の結果を述べる。4 章では微小 NEO の高時間分解光度曲線観測についての手法と結果を述べ、5 章では 4 章の結果をもとに、非重力効果の一つである YORP 効果を用いた微小 NEO の強度と力学進化過程に関する議論を展開する。最後に 6 章でまとめと今後の展望を述べる。

第2章

Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データを用いた高速移動天体検出システムの開発

2.1 広視野高速カメラ Tomo-e Gozen

東京大学木曾観測所は長野県木曽郡の山中、標高約 1120 m の尾根の上に位置する天文台である。主力装置である口径 105 cm シュミット望遠鏡(図 2.1 左)は世界に 4 台存在する有効口径が 1 m よりも大きいシュミット望遠鏡の一つであり、1974 年の開所以来、広視野を生かした数多くの研究が行われてきた。1989 年に写真乾板から CCD 観測へ移行し、1997 年には 2KCCD カメラの運用を開始、2012 年には 8K×8K の KWFC (Kiso Wide Field Camera) を完成させ、深く広い観測を展開してきた。そして 2014 年より広視野高速カメラ Tomo-e Gozen の開発が開始した。Tomo-e Gozen は 84 枚の CMOS センサがシュミットの全直径 9 度角を覆う広視野カメラである (Sako et al. 2018, 図 2.1 右)。木曾 105 cm シュミット望遠鏡と Tomo-e Gozen の基本仕様を表 2.1 に示す。



図 2.1 木曾 105 cm シュミット望遠鏡(左)と Tomo-e Gozen(右)。

左:ドーム内の 105 cm シュミット望遠鏡。長い鏡筒に直径 150 cm の主鏡、105 cm の補正版が納められている。右:望遠鏡内部の焦点面に並べられた全 84 枚の Tomo-e Gozen センサー部。球状のシュミット焦点面に沿って 3 次元的にセンサーが配置されている。中央右の機材はフィルター交換用ロボットアーム。

表 2.1 木曽 105 cm シュミット望遠鏡、
Tomo-e Gozen の基本仕様

場所	長野県木曽郡
高度	海拔 1132 m ^a
望遠鏡有効口径	105 cm
有効視野	20 deg ²
限界等級 (1 s 積分、S/N=5)	18.5 等 ^b
フィルター	なし
データレート	20 TB/夜

^a 望遠鏡の中心不動点の位置

^b Tomo-e Gozen が感度をもつ波長帯での AB
等級 (Sako et al. 2018)

Tomo-e Gozen は CMOS センサの高速読み出しを生かした動画観測が特徴であり、一つの視野に対し 2 fps のフレームレートで複数枚の画像 (3 次元 fits ファイル) を取得する全天サーベイ観測を行う。本稿ではこの 3 次元 fits ファイルをデータフレームセット、その中の各フレームをデータフレームと呼ぶ。各視野における動画のフレーム数を 12 とした場合、全天 (高度 35 度以上) を約 2 時間で観測することができる。約 6 年にわたる開発期間を終え 2019 年 10 月に本格運用が開始し、全天サーベイ観測からの数々の突発天体の発見が期待されている。広視野高速撮像により生成されるデータは一晩約 20TB にも及び、サイエンスグループごとにこのデータから必要情報を抽出している。超新星、重力波対応天体、太陽系小天体などの突発現象が主な観測対象である。観測データ量が膨大であるためその取り扱いが重要であり、例えば秒スケールの変動が重要ではない超新星探査ではデータフレームセットを重ね合わせて感度を挙げたスタック画像を用いるなど各自が適切な処理を行い解析を進めている。

高速移動する NEO の発見において、広視野高速観測を行う Tomo-e Gozen は非常に強力な装置である。Tomo-e Gozen と他のサーベイ観測の比較を図 2.2 に示した。多くの NEO を発見している既存のサーベイ観測 (Pan-STARRS、CSS、ZTF、ATLAS) と 2023 年に本格稼働が始まる LSST (Large Synoptic Survey Telescope, Ivezić et al. 2019)²³ を比較対象とする。Tomo-e Gozen 以外のサーベイ観測は、典型的に数十秒の露光時間でサーベイ観測を行い、20 等前後の暗い天体まで検出することができる。地球から離れた暗い天体を検出することができ、その結果多くの小惑星を発見することができている。有効口径が 6.4 m の LSST の予測限界等級は約 25 等であり LSST の稼働が始まると、広いサーベイ面積と大口径により既存のサーベイ観測が対象とする小惑星の多くの発見を担うことになると期待されている。一方 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測は他のサーベイ観測に比べ限界等級は低いものの、シュミット望遠鏡の特徴である広視野と CMOS センサを用いた 2 fps 動画観測による高速撮像という他のサーベイ観測にない特徴をもつ。露光時間は検出可能な天体の速度、すなわち地球からの距離に対応する。CCD カメラを用いた数十秒露光を行う他のサーベイ観測では地球の極近傍を通過する移動天体は星像が著しく伸びてしまい感度が低下する。速度の異なる天体に対する Tomo-e Gozen (有効口径 1.05 m) と Pan-STARRS (有効口径 1.8 m) の感度を比較すると、高速移動天体に対しては短時間露光を行う Tomo-e Gozen の感度が高いことがわかる (図 2.3)。Tomo-e Gozen の広視野高速動画サーベイ観測からは、他のサーベイ観測では発見が難しい地球近傍を高速移動する NEO の発見が期待できる。

²³ <https://www.lsst.org/>



図 2.2 サーベイ観測の比較。

Tomo-e Gozen、Pan-STARRS、CSS(Catalina Sky Survey)、ZTF(Zwicky Transient Facility)、ATLAS(Asteroid Terrestrial-impact Alert System)、LSST(Large Synoptic Survey Telescope) の 6 つサーベイの望遠鏡開口面積 (Aperture)、限界等級 (Limitting magnitude)、視野 (Field of view)、フレームレート (Frame rate)、データレート (Data rate) を比較。各項目の最大値 (開口面積 40.96 m²、限界等級 25 等、視野 47 deg²、フレームレート 2 fps、データレート 20 TB/night) で規格化。動画観測を行う Tomo-e Gozen は他のサーベイ観測とは異なる特徴を持つ。

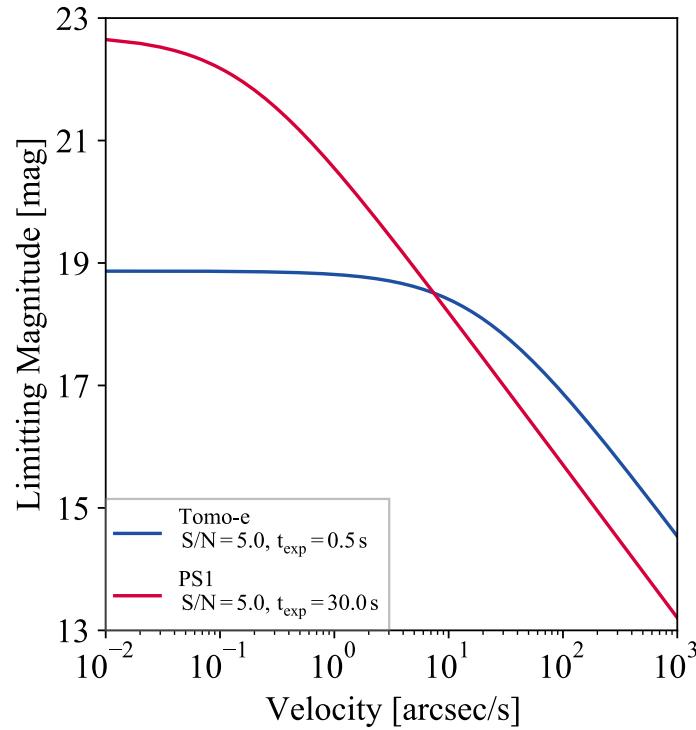


図 2.3 Tomo-e Gozen と Pan-STARRS1 の感度比較。

青色、赤色それぞれ Tomo-e Gozen、Pan-STARRS の移動天体に対する限界等級 ($S/N = 5$) を表す。Tomo-e Gozen の 0.5 秒に比べ長い 30 秒の露光時間で観測を行う Pan-STARRS では像の伸びにより感度が著しく低下する。移動速度が大きな天体に対しては口径の小さい Tomo-e Gozen の感度が高い。それぞれの望遠鏡サイトの典型的な PSF(Point Spread Function) の FWHM(Full Width at Half Maximum) の 2 倍の半径をもつ円形開口を仮定。

2.2 高速移動天体検出システムの開発

以降本章では Tomo-e Gozen のサーベイ観測データから高速移動天体を検出するための高速移動天体検出システムについての詳細を述べる。高速移動天体検出システムを含む NEO 検出システムの流れを図 2.4 に示した。Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データから移動天体を検出するまでの流れは、実際にデータフレームセットから天体の検出を行う 1) 移動天体の検出、それらの検出を結びつけることで移動天体を抽出する 2) 検出天体のグルーピング、これらの過程で生じてしまう 3) 誤検出の除去の三つの段階に分けられる。3) の開発を主体的に行い、1)、2) は共同研究者と共に開発を進めた。

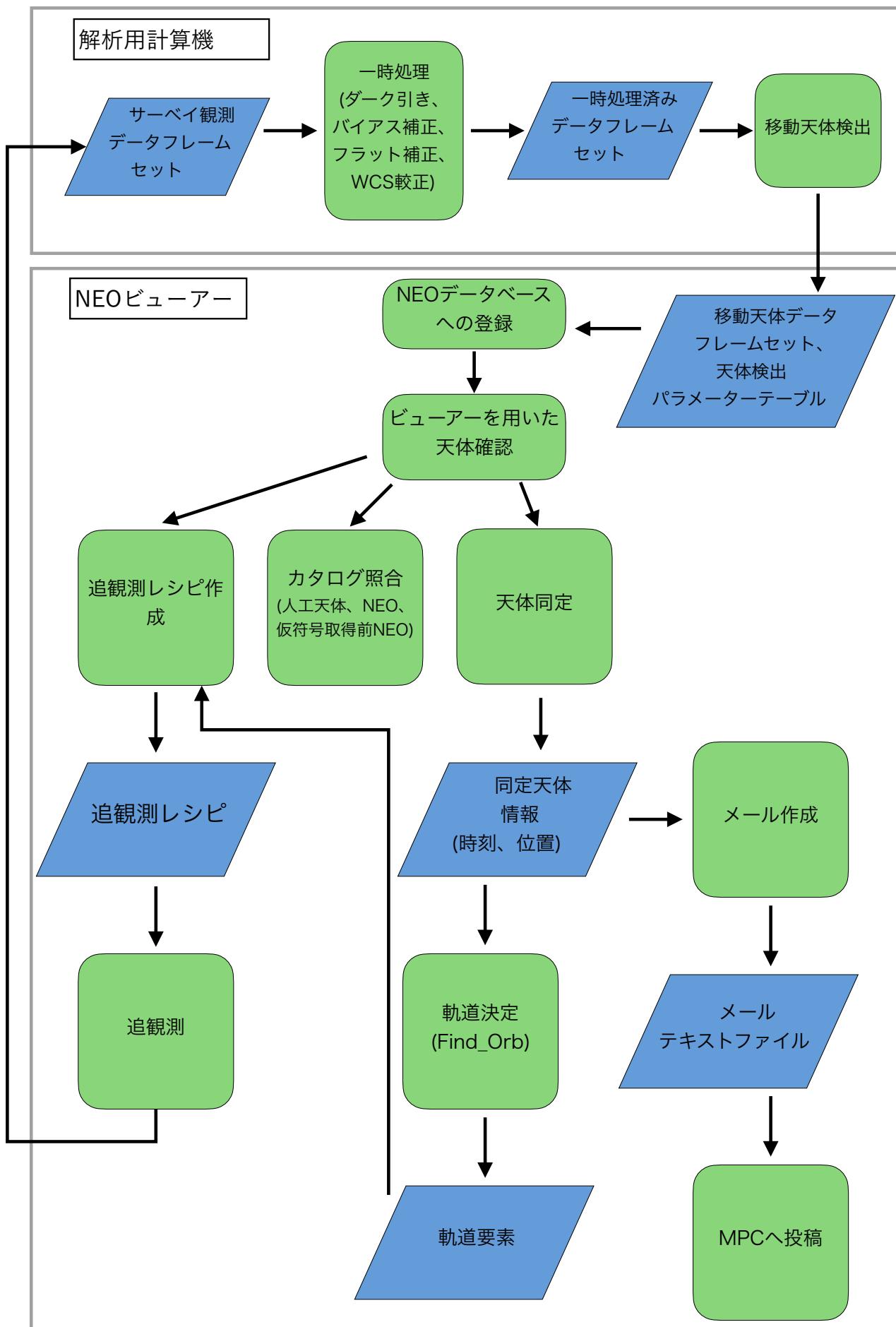


図 2.4 Tomo-e Gozen 移動天体発見までの流れ。

青色は入出力データ、緑色は処理を表す。移動天体検出は Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データフレームセットの一時処理済みデータに対して行う。検出された移動天体のデータフレームセット、天体検出パラメーター（座標、速度、機械学習のスコアなど）は NEO データベースに登録される。登録された情報は自ら開発したアプリケーション（NEO ビューアー）を用いて確認でき、追跡観測や天体同定を行うことが可能。解析用計算機の処理は自動で行われるが、NEO ビューアーでの処理の実行の判断は人が行う。

2.2.1 移動天体の検出

小惑星を含む移動天体の軌道決定は複数の観測点を組み合わせることで行われる。原理的には同一天体を異なる時刻に3回観測することで軌道を決定することができるが、測光誤差、地球や月の重力による天体の軌道変化などを考慮すると、より多くの観測点が必要となる。

地球から遠く離れた天体ほど見かけの移動距離は小さく、地球近傍を通過する天体ほど見かけの移動距離が大きい。検出できる移動天体の速度は、取り扱うデータの積分時間とその取得間隔に依存する。地球から遠いため暗く移動速度が小さい天体を捉えるには長時間露光が必要となり、地球に近く移動速度が大きい天体を捉えるには像の伸びを抑えるための短時間露光が望ましい。つまり2fps動画観測を基本戦略とするTomo-e Gozenの全天サーベイ観測では、CCDカメラを用いた数十秒露光が基本となる既存のサーベイ観測では検出が難しい、秒スケールで視野内を高速に移動する天体を検出することが期待できる。

検出は以下の流れに沿う。Tomo-e Gozenの全天サーベイ観測では同領域に対して典型的に12または18フレームのデータフレームセットを取得する。よってここでは取り扱うデータは2fps(0.5秒露光)12フレームのデータフレームセットとする。

1. 恒星マスクの作成

データフレームセットの最初と最後のフレームそれぞれで、閾値以上のカウント値を持つピクセルのマスク画像を作成する(図2.5左)。このマスク画像を用いることで、閾値以上の恒星(非移動天体)、背景ノイズ、宇宙線、移動天体が存在するピクセルをマスクすることができる。本研究では1、12フレームのマスク画像の論理積をとったアンドマスク画像を作成し、さらに膨張させた画像を最終的なマスク画像として利用する(図2.5中央、右)。データフレームセット内で移動しない検出(つまり恒星など)の位置をマスクし、データフレームセット内で検出位置が変化する移動天体を検出することができる。マスク生成の閾値はデータフレームにおける背景光ノイズのカウント値の定数倍とする。

2. 恒星マスクを用いた天体検出

作成した恒星マスクを用いて、各データフレームで天体検出を行う。天体検出においても閾値を設定し、マスク外かつ閾値以上のピクセルが検出となる。明るさの閾値を小さくすることで暗い天体まで検出することができるが、背景光の大きなピクセルを検出してしまいため誤検出が増える。本研究では明るさの閾値として背景ノイズの1.2倍のカウント値を採用した。比較的多くの誤検出が検出されるが、この後のグループング、機械学習により誤検出の削減を行う。

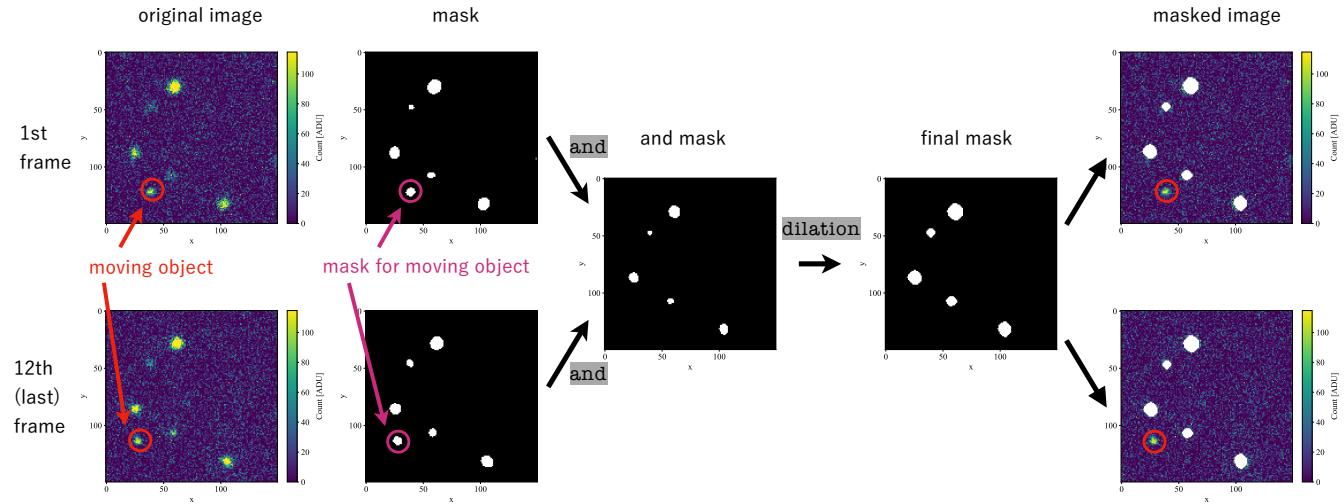


図 2.5 マスク作成の流れ。

左から順にデータフレームセットの最初と最後のフレームでマスクを生成。各フレームで検出閾値以上のカウント値をもつ移動天体、非移動天体に対するマスク(2値画像)が生成される。赤色丸、紫色丸はそれぞれ移動天体の位置、その位置に生成されたマスクを表す。2フレームのマスクのアンド演算を行いアンドマスク(2値画像)を生成し、アンドマスクを膨張させたものが最終的なマスクとなる。一番右の masked image は、生成した最終的なマスクを最初と最後のフレームに適用した画像。移動天体(赤色丸)はマスクされずに検出することができる。

2.2.2 検出天体のグルーピング

前項目の手順を経ることによりデータフレームセットの各フレームで天体の検出が行われる。Kojima (2019)では各フレームの検出に対し探索円を用いることで移動天体の同定を行った。Kojima (2019)の手法では例えば望遠鏡の振動や大気揺らぎによる星像の揺れを移動天体として検出してしまう。本移動天体検出の目的は NEO を含む一方向に移動する移動天体を抽出することでありそのような天体の検出は望ましくない。

ここでは各検出を位置 x 、 y 、時刻 t の (x, y, t) 三次元空間上の点として取り扱う。移動天体は太陽周回軌道、地球周回軌道、または離心率 $e > 1$ の太陽系外天体軌道がありうるが、いずれも十分に短い本観測のデータフレームセットにおいてその軌跡は直線上を移動するものと近似できる。一方誤検出として考えられる恒星マスク近傍の大気揺らぎの変動に起因する誤検出(シーゲングダンス)の一部の軌跡は非直線となる(図 2.6、左図)。そこで各検出点から直線状の軌跡をもつ検出のみを抽出しグルーピングする²⁴。手順は以下の通りである。

1. 初期線分の生成

離散的に分布した点の集合から規則性を持った線分を生成する(k-NNGraph, Dong et al. 2011)。

2. 線分のグルーピング

二つの線分に対し定義される d_{ver} 、 d_{para} 、 θ が条件を満たす線分を同一線分とみなす。それぞれ基準線分と他の線分の垂直距離、平行距離、なす角度である(図 2.7)。この操作を全ての線分に対して行うことでき直線状に検出される移動天体を一つの線分に、一方ランダムな検出となる誤検出は独立した線分としてグルーピングされない。

3. イテレーションをかけてグルーピング

上記のグルーピングを繰り返し行う。

4. 検出天体の決定

グルーピングされた天体のうちフレーム数が閾値以上の天体を最終的な検出天体とする。独立した線分とみなされグルーピングされない誤検出は除外される。

²⁴ <https://pypi.org/project/fdlsgm/>

上記のグルーピングにより図 2.6 左のような誤検出を除外することができる。しかし移動天体と判断された中にはまだ見かけ直線状に検出される誤検出が存在する(図 2.6 右)。Tomo-e Gozen の観測データは毎晩約 20 TB および誤検出の数は無視できず、上記の過程を経てグルーピングされた移動天体の数は一晩で約 100 万天体に及ぶ。毎晩この数を確認して移動天体を抽出することは難しい。そこで次節ではこれらの天体から誤検出を削減するための機械学習モデルの作成を行う。

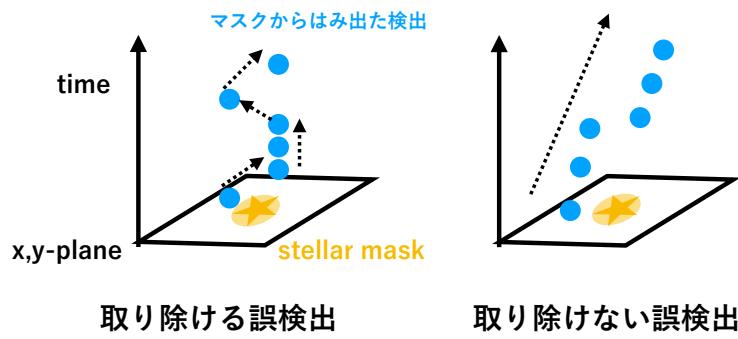


図 2.6 恒星マスク近傍で生じる誤検出の例。

左:3 次元空間で非直線の軌跡をもつ検出は線分のグルーピングにより除外することが可能。右:3 次元空間で直線上に検出される誤検出は原理的に除外できない。

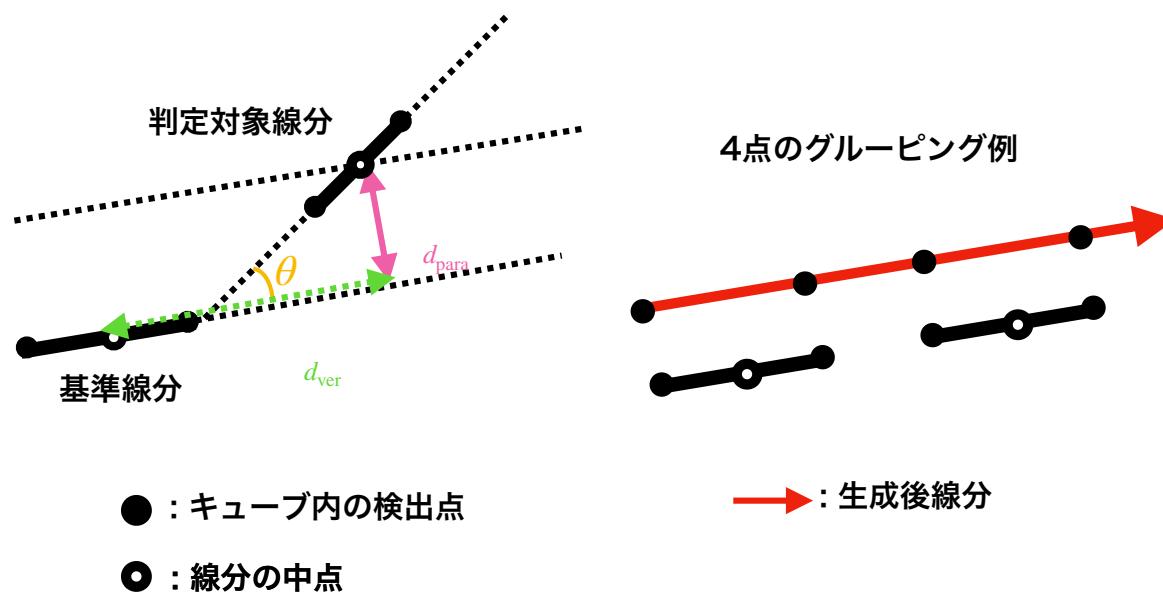


図 2.7 線分検出概念図。

左:二つの三次元空間での検出点(黒色丸)をグルーピングするために、垂直距離 d_{ver} (緑色)、並行距離 d_{para} (桃色)、なす角 θ (黄色)を利用する。右:グルーピングされた天体(赤色)は新たな線分となり次のイテレーションに移行する。

2.2.3 機械学習を用いた誤検出の除去

これまでの手順によりデータフレームセットを直線状に移動する信号を抽出することができた。この中に含まれる誤検出を除去するために、誤検出と真の移動天体の天体検出パラメーター (PSF の FWHM やデータフレームセット内の検出数など) の違いに着目した分類を行った。分類問題を行うためのアルゴリズムは多数存在するが、[Henghes et al. \(2020\)](#) では Dark Energy Survey データからの TNO 探索におけるランダムフォレストの有用性が示されている²⁵。Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データにおける移動天体の分類においても、[Kojima \(2019\)](#) では他の機械学習に比べてランダムフォレストが有用であるとの結論が得られている。しかし [Kojima \(2019\)](#)において数少ない試験観測のデータフレームセットを用いて作成した機械学習モデル（以下 Kojima モデル）には改善が必要な点が存在する（表 2.2）。また高速移動天体検出システムを更新すると検出される誤検出の特徴も変化し、その都度最適化された機械学習モデルを作成しなければ高い分類性能は得られない。そこで本研究では Kojima モデルに変わる複数の機械学習モデルの作成を行った。

表 2.2 機械学習モデルの改善項目

改善点	解決策
教師データの種類の欠如	蓄積された最新のサーベイデータを使用
シミュレーション NEO の星像	subpixel を考慮したシミュレーション
高速移動天体検出システムと機械学習の非同期	最適化モデル生成環境の構築

データフレームセットへの擬似天体の埋め込み

あらかじめ移動天体か否かラベルづけされたデータ（教師データ）を用いて移動天体分類モデルを作成する。実際の検出天体を目視で確認しラベルをつける手法は、膨大な量のデータを確認する必要があり多くの時間と労力を必要とする。高速移動天体検出システムは開発開始から複数回のアップデートを行っているが、アップデートごとに目視で天体確認を行い最適化されたモデルを作成するのは現実的ではない。

本研究では移動天体を模擬した信号（擬似天体）を観測データに埋め込み移動天体と誤検出の教師データを用意した（図 2.8）。用意した実際の観測データを複製し、一方に擬似天体を埋め込む。両方を高速移動天体検出システムに通すことで、擬似天体を埋め込んだデータからは移動天体と誤検出の両方、埋め込んでいないデータからは誤検出のみが検出される。擬似天体を埋め込んだデータの検出のうち、埋め込み時のパラメーター（後に述べるように位置と速度）と近い値を持つ検出を移動天体、擬似天体を埋め込んでいないデータからの検出を誤検出の教師データとする（図 2.8 右）。

擬似天体の埋め込みは天体数、速度、S/N(信号雑音比) を指定して行う。Tomo-e Gozen の各センサーは 2000×1128 ピクセル、約 $39.7' \times 22.4'$ の広い視野をもち、一枚のセンサー画像に複数の擬似天体を埋め込んでもお互いの結果はほとんど干渉しない。また実際の観測でも一枚のセンサーから複数の移動天体が検出されることがある。以上の理由から一枚のデータフレームセットに、同時に 30 個の擬似天体を埋め込んだ。擬似天体の速度の大きさはモデルごとに異なるが、典型的に 1 arcsec/s から 15 arcsec/s (静止軌道衛星の速度) までとした。天体の明るさは各データフレームセットの典型的背景ノイズを用い、指定した S/N となるように調整した。高速移動天体検出システムが検出限界である $S/N=3$ から地球近傍を通過する明るい天体に対応する $S/N=30$ まで考慮した。

上記の条件を満たす擬似天体が、乱数で決まるフレーム内のある位置に埋め込まれる（図 2.8 中央）。移動天体の進行方向は一様分布を仮定し、埋め込んだ信号をデータフレームセット内で、進行方向へ移動させた。擬似天体の PSF はデータフレームセットの明るい星を用いて測定した典型的な PSF の FWHM を用い、移動速度に比例して進行方向に伸びた形状を用いた。

²⁵ ランダムフォレストの詳細は [B.1](#) に記載。

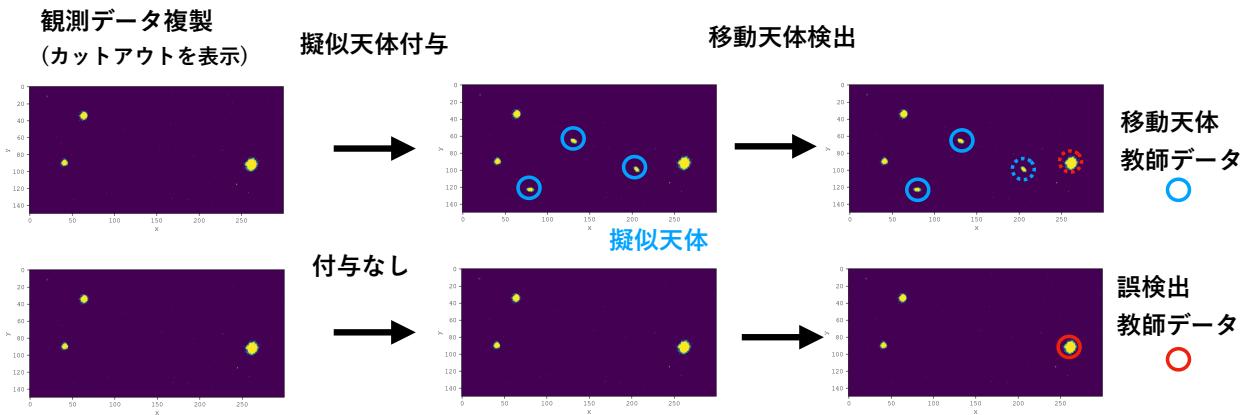


図 2.8 教師データ作成の概念図。

実観測データフレームセットを複製し、一方に移動天体を埋め込み。移動天体検出を行い、移動天体を埋め込んだデータフレームセットから検出される天体を移動天体、埋め込んでいない元のデータフレームセットから検出される天体を誤検出の教師データとした。

移動天体の検出

上記データフレームセットを高速移動天体検出システムに通すことで、システムの出力として天体の特徴量(以下天体検出パラメーター)を得る。天体検出パラメーターの例を表 2.3 に示す。

表 2.3 天体検出パラメーターの例。

上段、下段はそれぞれ静止画的パラメーター、動画的パラメーター。

天体検出パラメーター	説明
fwhm	PSF の FWHM
peak	天体の明るさのピーク値
x,y	検出位置
vnorm	速度の大きさ
tracks	動画内検出数

検出システムの出力として、各フレームでの位置、PSF の FWHM、天体フラックス等が得られる(図 2.3 上段)。さらに本研究では時系列情報をもつデータフレームセットを用いるため、天体の速度、動画内検出数といった動画的なパラメーターを取得することができる(図 2.3 下段)。各データフレームで得られる天体検出のパラメーターを静止画的パラメーター、データフレームセットの時系列情報を用いて得られる天体検出のパラメーターを動画的パラメーターと呼ぶ。

次に天体検出パラメーターのうち位置 x, y 、速度 v_x, v_y の 4 つの天体検出パラメーターを用いることで埋め込んだ移動天体か否かのラベリングを行う。

$$r = \sqrt{(x_{\text{emb}} - x)^2 + (y_{\text{emb}} - y)^2 + (v_{x\text{emb}} - v_x)^2 + (v_{y\text{emb}} - v_y)^2} < r_{\text{th}}, \quad (2.1)$$

を満たす天体を埋め込み天体と判断し、移動天体の教師データとして採用する。ただし添字 emb は埋め込み点の値、添字がないものは検出点の値を表す。判定の閾値 r_{th} を大きくすることで埋め込み天体の回収率を上げられ

るが、検出点付近で生じた誤検出を移動天体とする誤ラベリングも多くなる。誤検出データは埋め込みなしデータフレームセットを用いて別途用意するため、移動天体として得るデータの中での誤検出数は極力減らすことが望ましい。実際の天体のラベリング位置を用いてこの閾値 r_{th} を決定した。モデル作成に用いた 2020 年 2 月 18 日、2020 年 6 月 7 日のデータフレームセットの各検出天体の最も近い埋め込み天体との四次元距離のヒストグラムを図 2.9 に示す。埋め込み天体の位置と速度の検出値が、埋め込み時に指定した値と近い天体は最も近い埋め込み天体との距離が小さくなる。実際に両日ともに小さい値にピークをもつ。両図のヒストグラムをもとに埋め込み天体判定の閾値 $r_{\text{th}} = 10$ を採用する。

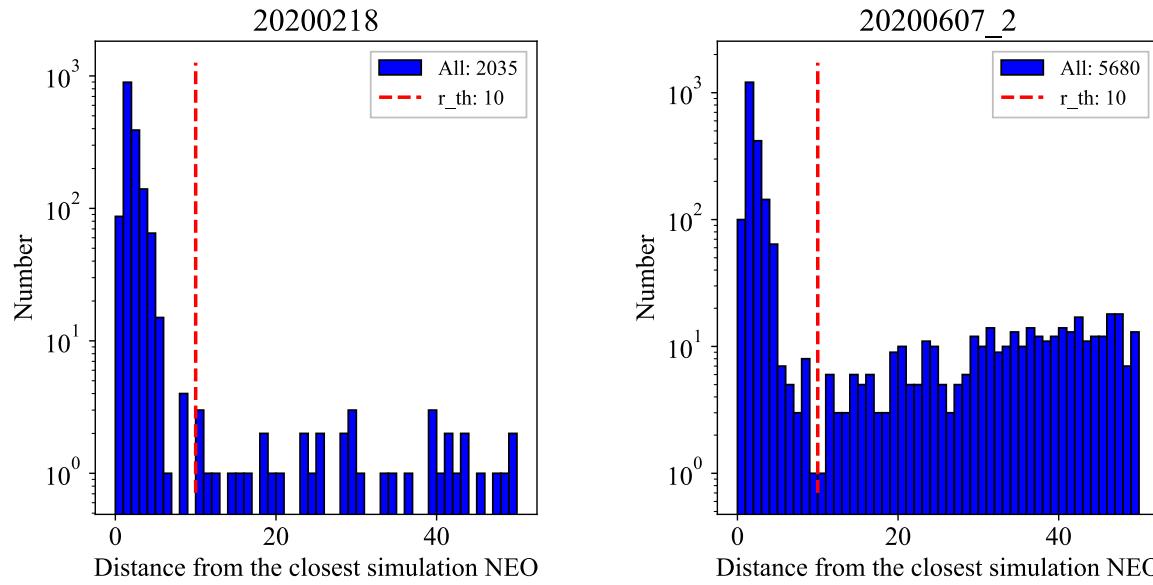


図 2.9 検出位置と擬似天体埋め込み位置の 4 次元距離。

0 に近い位置にピークを持つ分布であり、埋め込み天体とその検出の四次元距離が小さいことがわかる。

ただし図 2.9 のみからでは、 $r_{\text{th}} < 10$ の天体に誤検出が存在しないということは断定できない。確認のため実際に検出された移動天体と誤検出の 4 次元距離 r を調べた(図 2.10)。この図は上記の閾値 $r_{\text{th}} < 10$ を満たす天体を移動天体と判断した時の、移動天体と誤検出の最近傍距離を表す。距離が 0 である検出は同一の検出、つまり誤ラベリングを表す。図 2.10 の右、2020 年 6 月 7 日のデータには誤ラベリングが 2 天体存在したため目視で確認し除外した。この誤ラベリングが生じたデータを図 2.11 に示す。星が多い領域では星が少ない領域に比べ多くの誤検出が検出されてしまうことで誤ラベリングの可能性が高くなる。

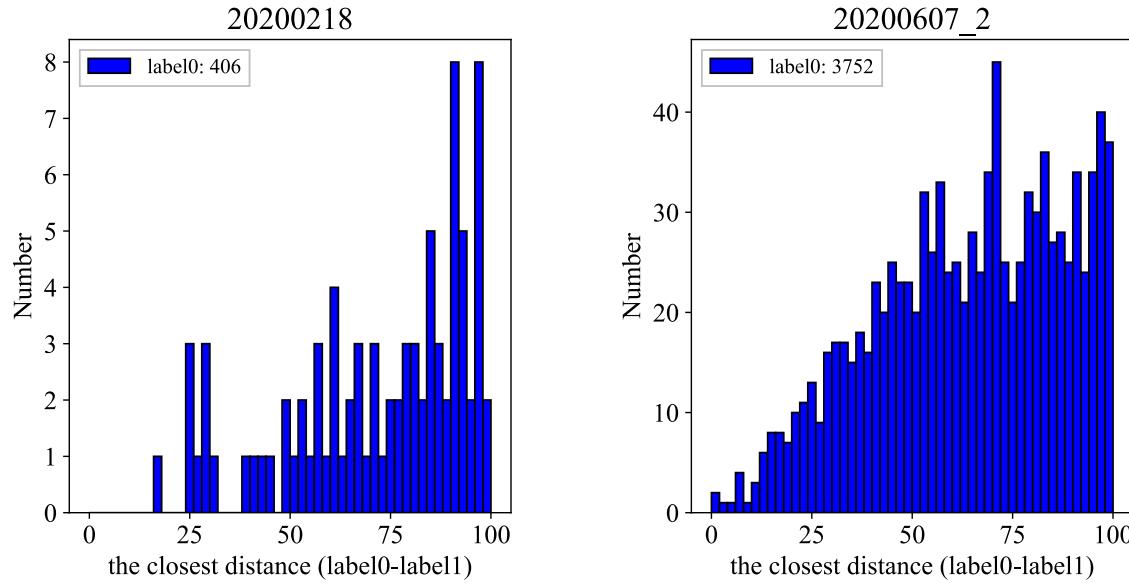


図 2.10 異なるラベルをもつ最近傍天体との四次元距離。

異なるラベルを持ち四次元距離が最も近い天体との四次元距離のヒストグラム。多くの天体は異なるラベルを持つ検出から遠いことから誤ラベリングされていないことがわかる。一方、星が多い領域（右）のデータフレームセットでは異なるラベルをもつ最近傍天体との4次元距離が0、つまり誤ラベリングが2件存在。

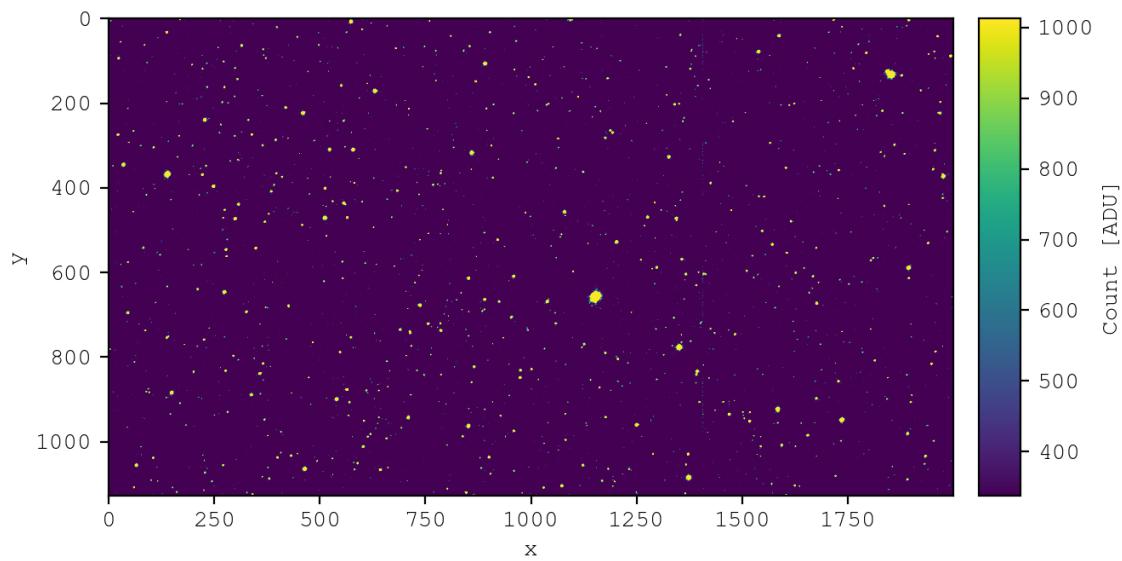


図 2.11 星が多い領域の観測データフレーム例 (2020年6月7日)

以上を経て天体検出のパラメーターと移動天体か誤検出かのラベルがついたデータセットを得ることができた。ラベリングに当たっては視野中の星の量、背景光ノイズの大きさなどに注意し、丁寧に取り扱う必要があるが、丁寧に処理をしても誤ラベリングを0にすることは難しい。擬似天体を埋め込まずに検出された信号を全て誤検出としているが、この中には眞の移動天体が含まれている可能性がある。また他の誤ラベリングとしては擬似天体を埋めることによる元々の誤検出の変化が考えられる。しかしこれらを目視で確認するのは困難である。よって、次の機械学習モデルの作成では誤ラベリングが存在する可能性を考慮したモデルの作成が必要となる。つまり誤ラベリングを分類することによる過学習を防ぐモデルを構築する。

モデル作り

これまでに述べた前処理で得られる天体検出のパラメーターとラベルを用いてランダムフォレストアルゴリズムを用いた機械学習モデルを作成した。モデル作成には python の `scikit-learn v0.22.2`²⁶ を用いた。これまでに天体検出パラメーター、ハイパーパラメーター、観測データフレームセットの種類を変化させて 7 つのモデルを作成した(表 2.4)。それぞれのモデルに用いた観測データフレームセットの PSF の FWHM、背景ノイズ、星の数の多様性を図 2.12 に示した。段階的に用いるデータフレームセットを増やし多様性を持つモデルを作成した。なお model202008 以降に作成した model202011、model202012 は model202008 と同様のデータフレームセットを用いている。以下最新のモデル model202012 を例に実際の作成手順を述べる。モデル作成の流れは以下の流れに沿う。

1. 分類に用いる天体検出パラメーターの選択
2. ハイパーパラメーターの選択
3. ROC 曲線の確認
4. 木の確認
5. 検証用データに対する性能

まず model202012 の概要を述べ、その後上記の流れに沿ってモデルを作成する。

²⁶ <https://github.com/scikit-learn/scikit-learn>

表 2.4 機械学習モデル一覧

num.	model	period	#fits	#object(label1, label0)	#parameter	impurity	#tree	note
0	model201903	- 2020/02/22, 2020/03/04	228	3377(1497, 1880)	21	gini	100	Kojima モデル (Kojima 2019)
1	model2000223	2020/02/23-2020/03/01	25	9114(4557, 4557)	21	gini	100	サンプル数を増大
2	model2000303	2020/03/05-2020/03/10	400	20368(10184, 10184)	21	gini	100	サンプル数を増大、過学習が判明
3	model2000311	2020/03/11-2020/04/01	400	20368(10184, 10184)	19	gini	100	過学習を改善
4	model2000402	2020/04/02-2020/08/07	560	15260(7630, 7630)	21	gini	100	サンプル数を増大、星像の伸びを考慮
5	model2000808	2020/08/08-2020/12/01	1120	49078(28082, 20996)	21	gini	100	サンプル数を増大、フレーム数で規格化
6	model202011	2020/12/02-2020/12/13	1120	14706(7353, 7353)	14	gini	100	移動天体検出方法の変更
7	model202012	2020/12/14-	1120	13874(6937, 6937)	14	entropy	50	model202011 における不適切な学習を改善

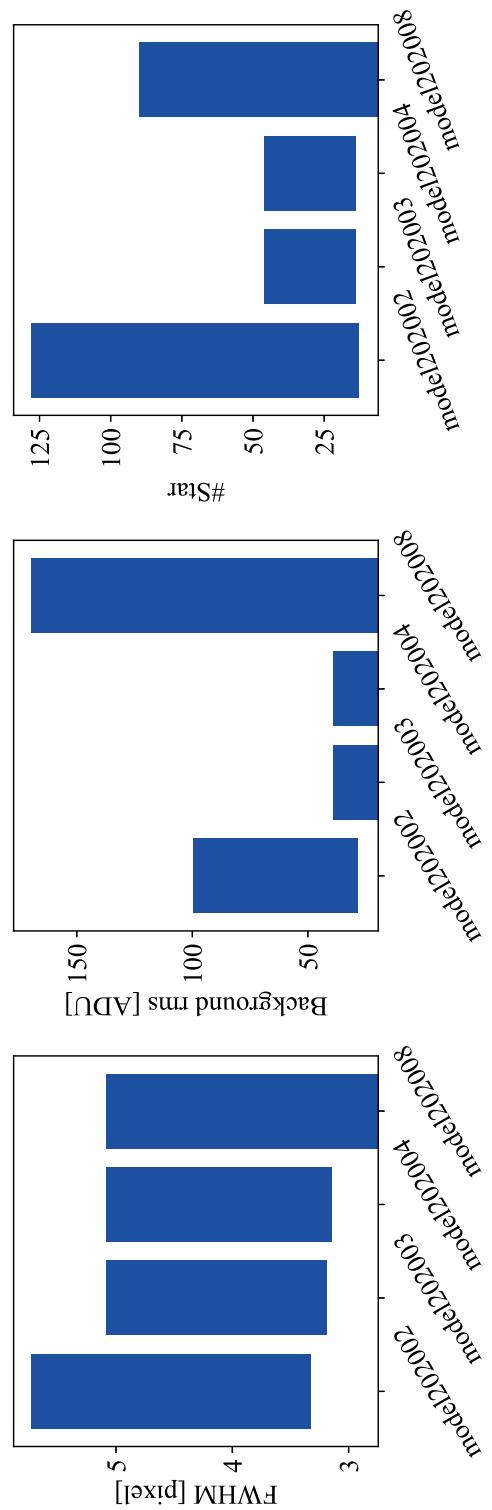


図 2.12 教師データとして用いたデータフレームセットの多様性。
左:PSF の FWHM、中央:背景ノイズのカウント値、右:星の数。全てデータフレームセットの最初のフレームを用いて典型値を算出。

教師データ概要 model202012

実際の観測データ 14 露光 1120 枚のデータフレームセットを用いてモデルを作成した。この 14 露光は視野内の星の数、背景光、PSF の FWHM にバリエーションが出るように選択した(表 2.5)。それぞれのデータフレームセットに速度、S/N の多様性をもつ擬似天体を 30 天体埋め込んだ(表 2.6)。このように埋め込みを行った教師データからは移動天体、誤検出それぞれ 28130 天体、6937 天体が検出された。過学習を防ぐためランダムサンプリングすることで比率を 1:1 に調整した(表 2.4)。

表 2.5 model202012 の作成に用いた観測データフレームセットの諸元

raw fits ^a	fw hm ^b (arcsec)	star ^b (ADU)	background rms ^c
rTMQ*2020021800259456**.fits	4.80	29	24.93
rTMQ*2020021900261256**.fits	3.19	14	23.38
rTMQ*2020022000262281**.fits	3.64	46	19.56
rTMQ*2020022300265456**.fits	5.09	28	21.43
rTMQ*2020022300265776**.fits	3.65	26	39.23
rTMQ*2020032500291205**.fits	3.15	22	20.95
rTMQ*2020032500291452**.fits	4.55	23	21.93
rTMQ*2020060400342780**.fits	3.32	15	77.30
rTMQ*2020060400343140**.fits	2.75	16	119.31
rTMQ*2020060500344060**.fits	3.29	6	143.53
rTMQ*2020060500344230**.fits	3.79	11	169.83
rTMQ*2020060700345490**.fits	2.91	14	70.58
rTMQ*2020060700345630**.fits	2.92	90	112.56
rTMQ*2020060700345770**.fits	2.77	28	85.73

^a *は全 80 枚のセンサーを表す。

^b det111 センサーの明るい星を用いた測定値。

^c det111 センサーの典型的背景ノイズ。

表 2.6 model202012 の作成で用いた擬似天体の速度と S/N

velocity (pixel/frame)	S/N
1, 1.2, 1.5, 2, 3	7, 9, 11, 13, 15

分類に用いる天体検出パラメーターの選択

分類に用いる天体検出パラメーターとして表 2.7 の 14 種類を採用した。x2、y2 はそれぞれ PSF の x、y 方向の 2 次モーメントで星像の広がりを表す。xy は PSF の x、y 方向の共分散で PSF の扁平具合を表す。ferr は開口内総フラックス F_{total} の誤差であり背景ノイズと天体のフラックスのポアソンノイズを反映している。peak は天体フラックスのピークカウント値 F_{peak} である。fop は $F_{\text{total}}/F_{\text{peak}}$ で表される量である。特定のピクセルでカウント値が大きくなる誤検出(宇宙線やホットピクセル)で値が大きく、広がった天体(恒星や小惑星)では相対的に小さな値になる。fwhm は PSF の FWHM、bg_level はデータフレームセットの典型的背景カウント値である。以上の 8 つは静止画的パラメーターであり、各フレームの平均値を値として採用する。

tracks は動画内検出数/データフレーム数で定義され 0–1 の値をとる。vnorm は移動天体の速度の大きさ、svx、svy その標準偏差である。最後に cvx、cvy は x、y 方向の速度の動画内での符号変化の数のデータフレー

ム数に対する割合を表す。短時間の動画中で直線軌道をとることが期待される移動天体では小さい値をとり、望遠鏡振動などに起因する誤検出では大きな値をとる。以上の6つは動画的パラメーターである。パラメーターはデータフレーム数で規格化しているため、任意のフレーム数の観測で適切な分類が可能となる。学習に用いた教師データの天体検出パラメーターのヒストグラムを図2.13に示す。

表2.7 model202012で用いた天体検出パラメーター

天体検出パラメーター ^a	説明
x2, y2	PSFのx、y方向の2次モーメント ^b
xy	PSFのx、y方向の共分散 ^b
ferr	天体の明るさの誤差
peak	天体の明るさのピーク値
fop	開口内総フラックスとピーク値の比 (flux over peak)
fwhm	PSFのFWHM
bg_level	背景光の典型的カウント値
tracks	動画内検出割合
vnorm	速度の大きさ
svx, svy	速度の標準偏差
cvx, cvy	速度の符号変化の割合

^a 静止画的パラメーター(上段)については各フレームの平均値を用いる。

^b $x2 = \frac{\sum_i p_i x_i^2}{\sum_i p_i} - x^2$ 、 $y2 = \frac{\sum_i p_i y_i^2}{\sum_i p_i} - y^2$ 、 $xy = \frac{\sum_i p_i x_i y_i}{\sum_i p_i} - xy$ 。ただし $x = \frac{\sum_i p_i x_i}{\sum_i p_i}$ 、 $y = \frac{\sum_i p_i y_i}{\sum_i p_i}$ であり i 、 p_i はそれぞれ開口内のピクセル、そのピクセルのカウント値を表す。

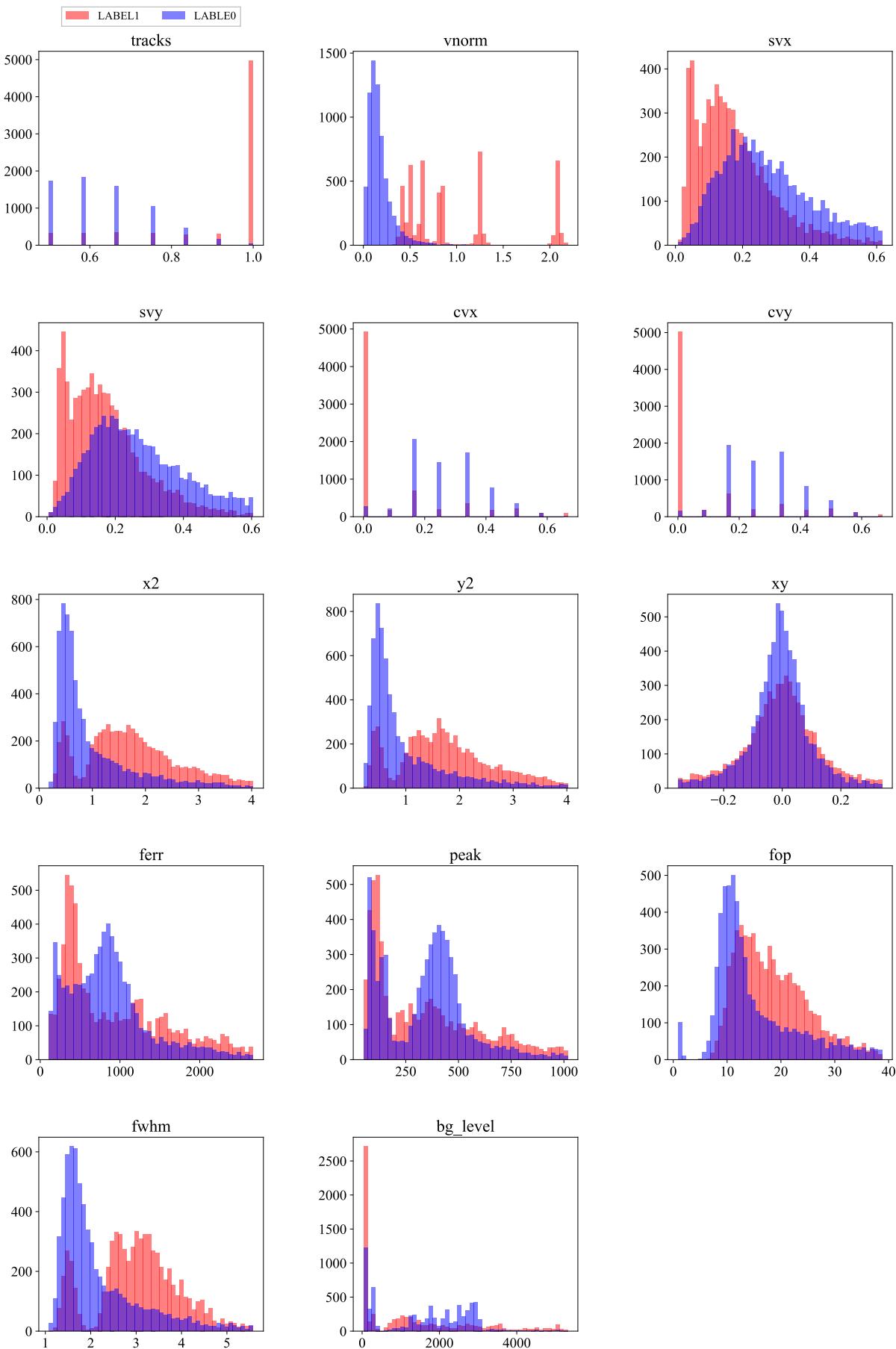


図 2.13 model202012 教師データにおける天体検出のパラメーターの分布。
赤色、青色はそれぞれ移動天体 (LABEL1)、誤検出 (LABEL0) のヒストグラム。可視性のため外れ値を除いて表示している (3 sigma clipped)。

ハイパーパラメーターの選択

複数のハイパーパラメーターでモデルを作成、比較するグリッドサーチを行いハイパーパラメーターの探索を行った。探索したハイパーパラメーター候補を表 2.8 にまとめ、最終的に用いたハイパーパラメーターをボールド体で表した。

表 2.8 model202012 ハイパーパラメーター

ハイパーパラメーター	値
不純度	["gini", "entropy"]
木の数	[50 , 100, 300, 1000]
木の深さ	[3, 5, 10]

木の深さの調整は誤ラベリングデータへの過学習の抑制に役立つ。図 2.14、図 2.15 は二つのパラメーターを用いた分類において木の深さを変化させたスコアリングの例である。木の深さを指定しない図 2.14 では教師データに最適化された分類が行われるため局所的なスコアの分布が見られる ($vnorm = 3$ 、 $tracks = 0.5$ や $vnorm = 6$ 、 $tracks = 1.0$)。特に $vnorm = 6$ 、 $tracks = 1.0$ はデータフレームセットに元々存在する移動天体を非移動天体と判定した誤ラベリングと考えられ、この領域の天体には高いスコアをつけるべきである。図 2.15 では木の深さを調整することで分類を途中で終え、上記のような少數の誤ラベリングに対する過学習が抑制されている。

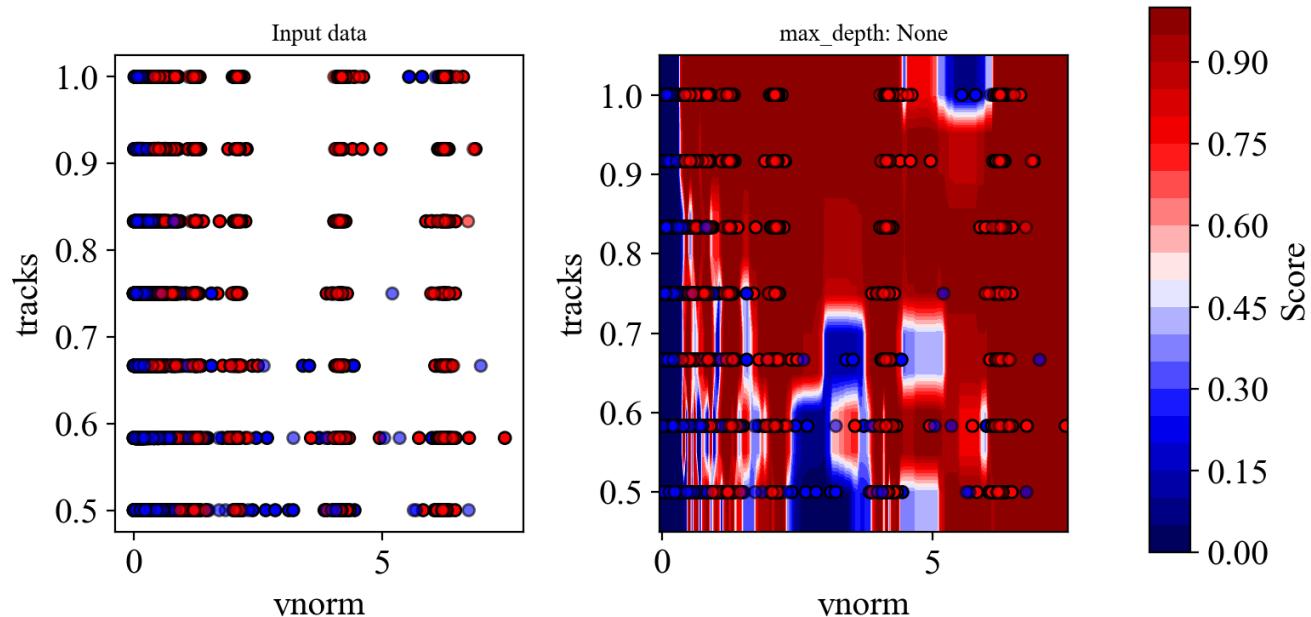


図 2.14 二つのパラメーターを用いた分類例 (木の深さの指定なし)。

木の深さを指定しないことで、 $tracks = 1$ 、 $vnorm = 6$ 付近の誤検出 (青色点) などの周辺のスコアが低くなるモデルが生成されている。この領域は天体検出割合が高く速度も大きい移動天体が多く存在する領域であり、本来は移動天体と判断し高スコアをつけたい領域である。誤検出であると誤分類された移動天体を分類するために最適化されている。

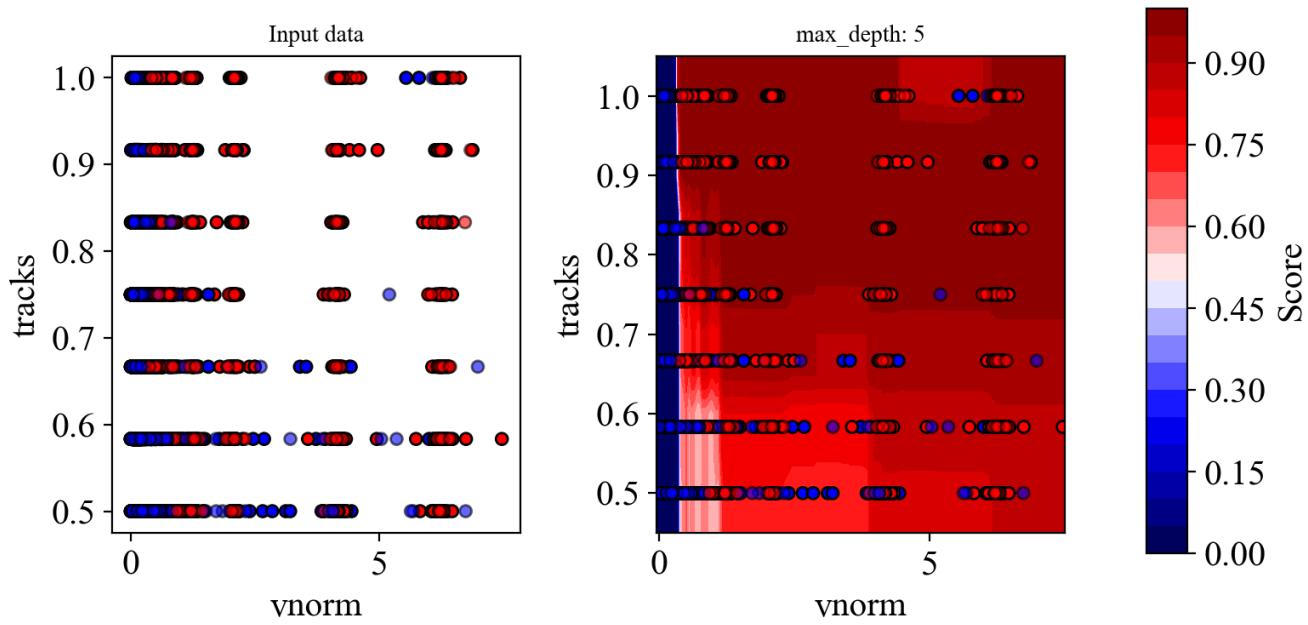


図 2.15 二つのパラメーターを用いた分類例（木の深さを 5 に指定）。
木の深さを指定することで誤ラベリングに対する学習を抑制し、図 2.14 での不適切な学習が緩和されている。

ROC 曲線

二分類問題における分類結果は表 2.9 の 4 つ（混同行列 confusion matrix）に分けられる。

表 2.9 二分類問題における分類クラス

クラス	シンボル	説明
True Positive	TP	label1(正解) を label1(正解) と分類
False Positive	FP	label0(不正解) を label1(正解) と誤分類
True Negative	TN	label0(不正解) を label0(不正解) と分類
False Negative	FN	label1(正解) を label0(不正解) と誤分類

これらを用いて機械学習モデルの性能を表す量が定義される。

$$TPR(\text{Recall}) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.2)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (2.3)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (2.4)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.5)$$

TPR (True Positive Rate、再現率 (Recall) とも) は正解を正しく正解と判断できた割合であり、 FPR (False Positive Rate) は存在する不正解を正しく不正解と判断できた割合である。正解率 (Accuracy) は全てのデータのうち正しく判断できた割合を表す量である。最後に適合率 (Precision) は正解と判断したもののうち真の正解の割合である。適切な判断基準は作成するモデルの要求により異なる。

ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線は機械学習モデルの性能評価に用いられる一つの指標であり、横軸を FPR 、縦軸を TPR とする曲線である。 ROC 曲線の下面積を AUC (Area Under the Curve) と呼び、性能の良いモデル (TPR が大きく、 FPR が小さい) ほど 1 に近づく。model202012 の ROC 曲線を図 2.16 に示す。model202012 作成に用いた教師データからランダムに $3/4$ を抽出しモデルを作成、残りの $1/4$ に対するスコアづけを行い TP 、 FN を計算した。これを乱数のシードを変えて五回行い AUC の平均と分散を求めた。ス

コアの閾値が大きいほど誤検出 (FP) が少ないが、 TPR が小さく一部の真の移動天体を非移動天体と判断 (FN) してしまう。一方スコアの閾値が小さいほど誤検出 (FP) が多く TPR は大きく FN が少ない。

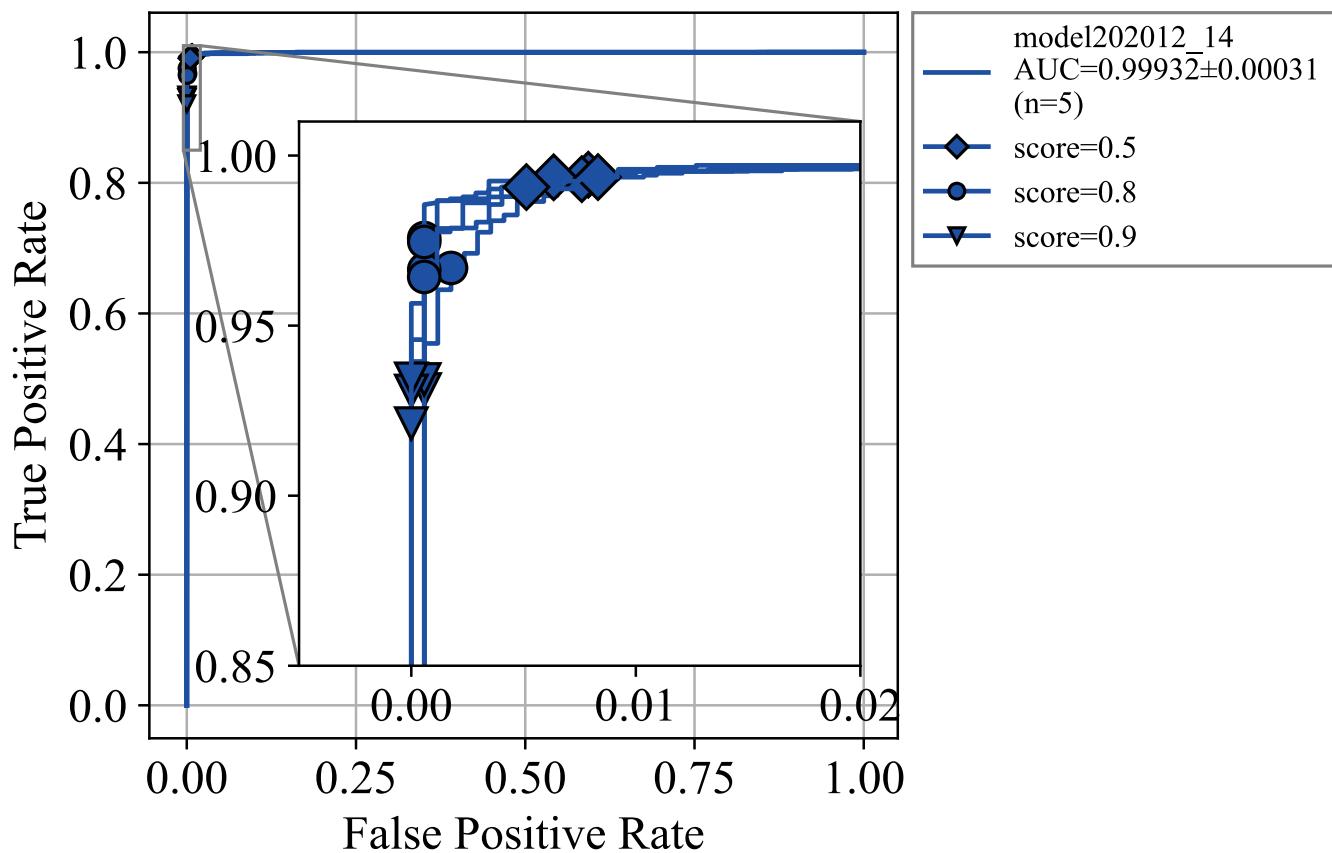


図 2.16 model202012 の ROC 曲線。

青色線が ROC 曲線を表し、菱形、丸、逆三角はそれぞれスコアの閾値を 0.5、0.8、0.9 とした時の ROC 曲線上の点を表す。スコアの閾値が高いほど FPR が小さく移動天体と判断される誤検出が少なくなるが、 TPR が小さくなり誤検出と判断してしまう真の移動天体が多くなる。乱数のシードを変えて 5 つの ROC 曲線を書き、その AUC の平均と分散はそれぞれ 0.99932、0.00031。

木の確認

model202012 の木の最大深さは 10 で非常に大きな木となる。ここでは例として深さ 3 の木を図示した(図 2.17)。

この木では `bg_level`、`cvx`、`tracks`、`cvy`、`svy` の 5 つのパラメーターに基づいてクラス分類される。分類クラスが分かれきらない末端ではそのリーフでの移動天体、誤検出の比率がスコアとなる。このような複数の木(model202012 では 50 本)の平均スコアがランダムフォレストのスコアとなる。

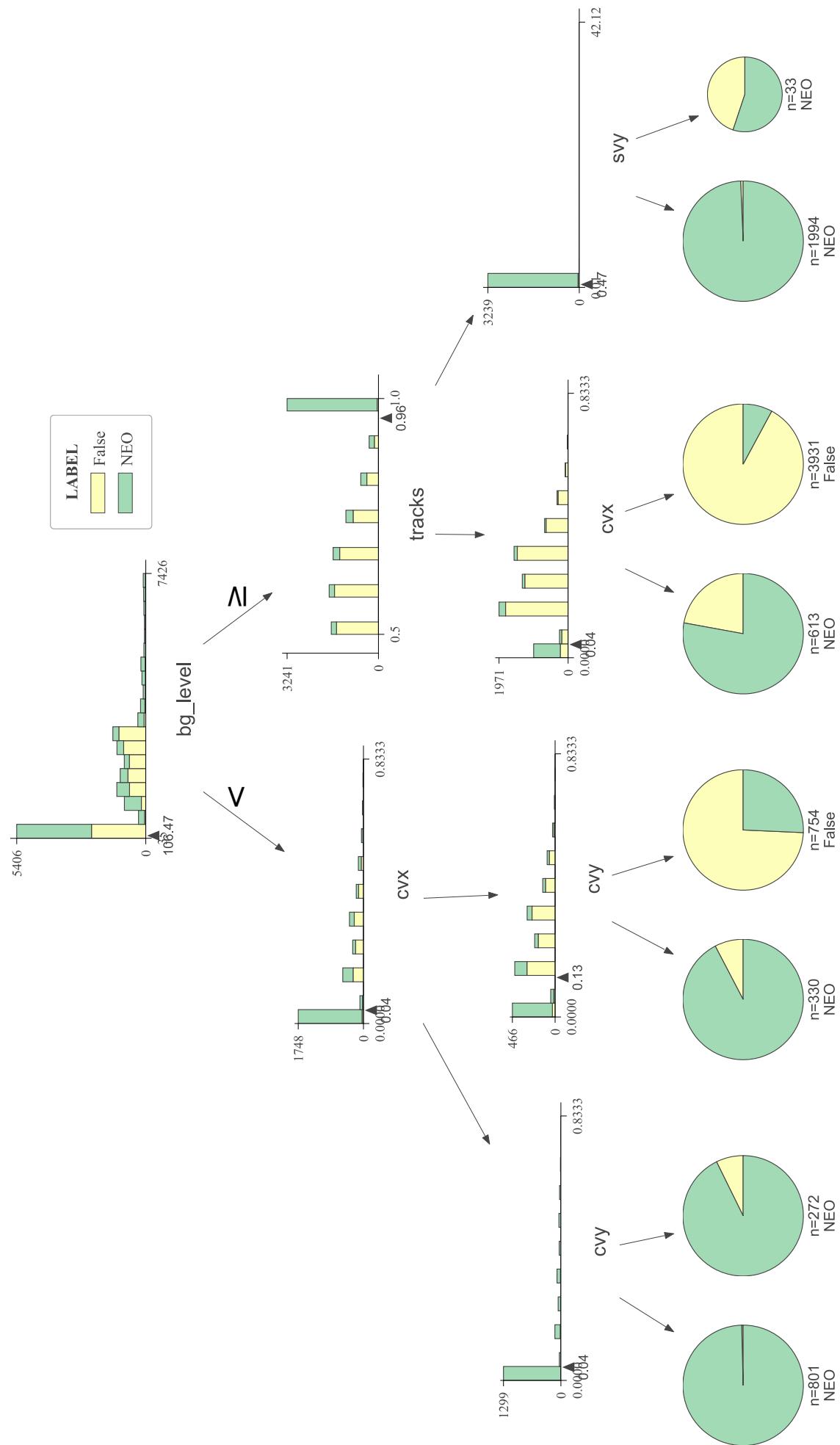


図 2.17 木構造の例。
model202012 の作成に用いた教師データを用いて木の深さを 3 とした木の例。例として天体検出のパラメーター $bg_label = 120$ 、 $tracks = 1$ 、 $svy = 0.2$ をもつ天体 A を考える。まず最初に bg_label が 106.47 より大きいか否かで分岐する。 $bg_label = 120$ である天体 A は右側の枝へと分岐する。同様に $tracks$ 、 svy を用いた分類が行われ、天体 A は最下段右から二番目の葉(リーフ)に分類される。教師データのうちこのリーフに分類される移動天体 (LABEL1) の割合 (緑色の円グラフの割合) が天体 A のスコアとなる。

また作成したモデルの天体検出パラメーターの重要度を図 2.18 に示す。重要度は天体検出パラメーターが各ノードでどれだけ不純度を減らしたかを全ての木で平均したものであり、効果的に分類できる天体検出パラメーターで大きな値となる。model202012 では vnorm (速度の大きさ)、tracks (動画内検出数の割合) などが支配的なパラメーターであることがわかる。

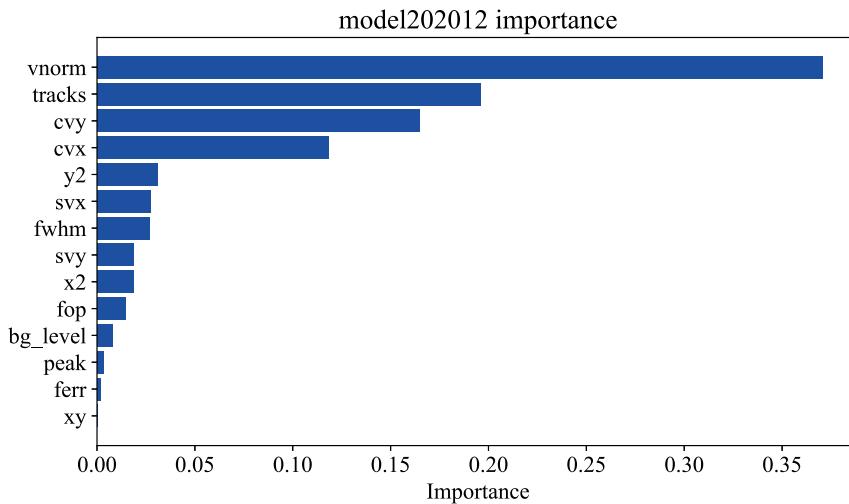


図 2.18 model202012 の天体検出パラメーターの重要度の例。

このモデルでは vnorm (速度の大きさ) や tracks (動画フレームセットでの天体検出割合) が重要なパラメーターであることがわかる。

検証用データに対する性能

学習に用いたものとは独立なデータとして 2020 年 12 月 5 日、6 日の 2 露光 160 枚のデータフレームセットを用意し、等級が 15.5、16、16.5、17、17.5 等の 5 種類、速度が 1、1.2、1.5、2、3、5、10、15 pixel/frame の 8 種類の多様性を持つ擬似天体を埋め込んだ。一つのデータフレームセットに 30 天体、合計 4800 天体の検証用データとした。教師データ生成時と同様に埋め込みの位置と速度を用いることで埋め込んだ移動天体かどうかがわかる。

埋め込んだ 4800 天体のうち検出できた天体は 3556 天体であり、スコア問わず検出できた割合 (回収率) は約 74 % である。これは機械学習以前の天体検出の性能を表す指標となる。回収率の評価には Tomo-e Gozen の検出限界付近の 17.5 等の天体が全体の 20 % 存在する点を考慮する必要がある。model202012 を用いた各検出に対するスコアリング結果を図 2.19 に示す。多くの移動天体に高スコア、誤検出に低スコアをつけられていることがわかる。

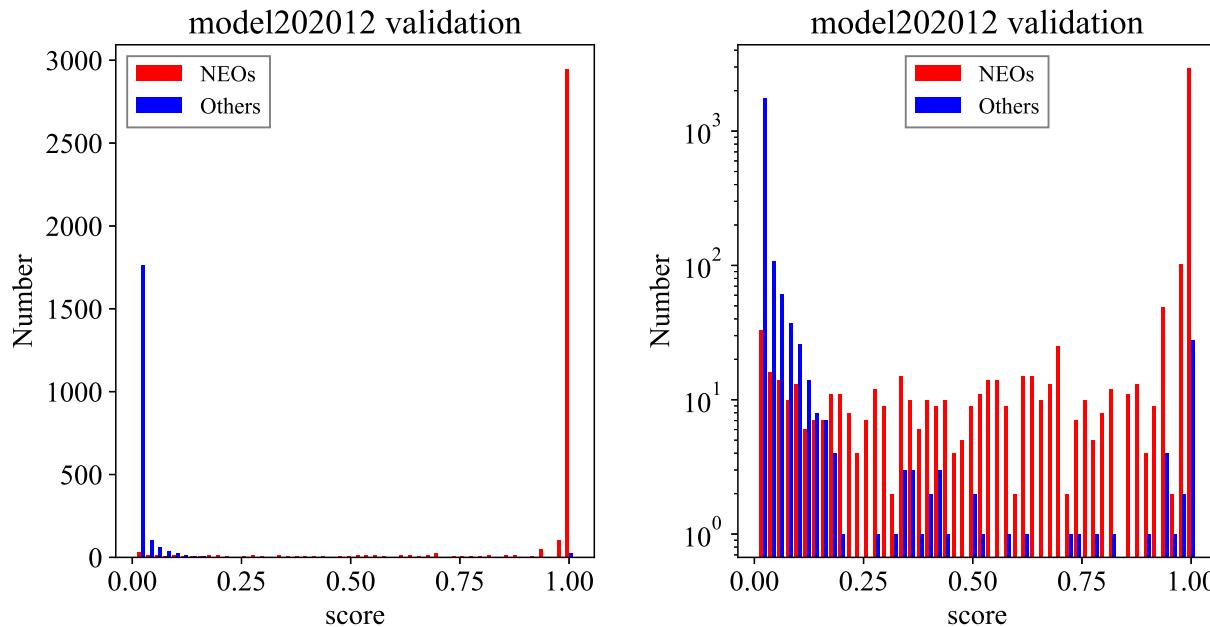


図 2.19 model202012 の検証用データの検出に対する機械学習のスコアの分布。

左: 2020 年 12 月 5 日、6 日の各 1 露光 80 枚、合計 160 枚のデータフレームセットに対して擬似天体を埋め込み、移動天体検出と機械学習によるスコアリングを実施したスコアの分布。右: 左図の縦軸を対数としたもの。埋め込み天体 (赤色) に対して高いスコア、誤検出 (青色) に対して低いスコアを与えられている。

2.3 ユーザーインターフェースの開発

Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データからの新小惑星発見までの流れは大きく以下の 7 段階である(図 2.4)。

1. サーベイ観測データからの高速移動天体検出
2. NEO データベースへの情報登録
3. 検出天体の確認
4. NEO 候補天体の追跡観測
5. NEO 候補天体のグルーピング
6. NEO 候補天体の軌道決定
7. MPC への投稿

1 は前節の高速移動天体検出システムにより実現される。その後天体検出により得られる天体検出パラメーターおよび検出天体のデータフレームセットは NEO データベースへ登録される。NEO 発見にはこのデータベース中から NEO を見つけ出し、追跡観測する必要がある。一連の操作を行うことができるアプリケーションである NEO ビューアーを開発した(図 2.4 下部)。以下 NEO ビューアーを用いて行うことができる操作を順に述べる。最終的に MPC に投稿された天体は MPC の NEO confirmation page²⁷ に掲載されることになる。本稿ではこのページに存在する天体のことを仮符号取得前 NEO と呼ぶ。

2.3.1 検出天体の確認

NEO ビューアーのトップページを図 2.20 に示す。トップページでは観測日を指定し、その日の検出天体を確認することができる。条件を指定することにより、数千-数万の全検出から条件を満たす天体のみを抽出できる。その日の検出天体に対する機械学習のスコア分布のヒストグラムから検出状況を確認することもできる。またトップページではその日接近する既知の小惑星、仮符号取得前 NEO の情報を得ることもできる(図 2.20 緑色枠、青色枠)。図 2.21、図 2.22 はそれぞれある日に観測可能な既知の小惑星、仮符号取得前 NEO の一覧である。また時刻、速度、等級の条件を満たす小天体を MPC のホームページへ問い合わせる機能も実装されている(図 2.20 赤色枠)。

²⁷ https://minorplanetcenter.net/iau/NEO/toconfirm_tabular.html

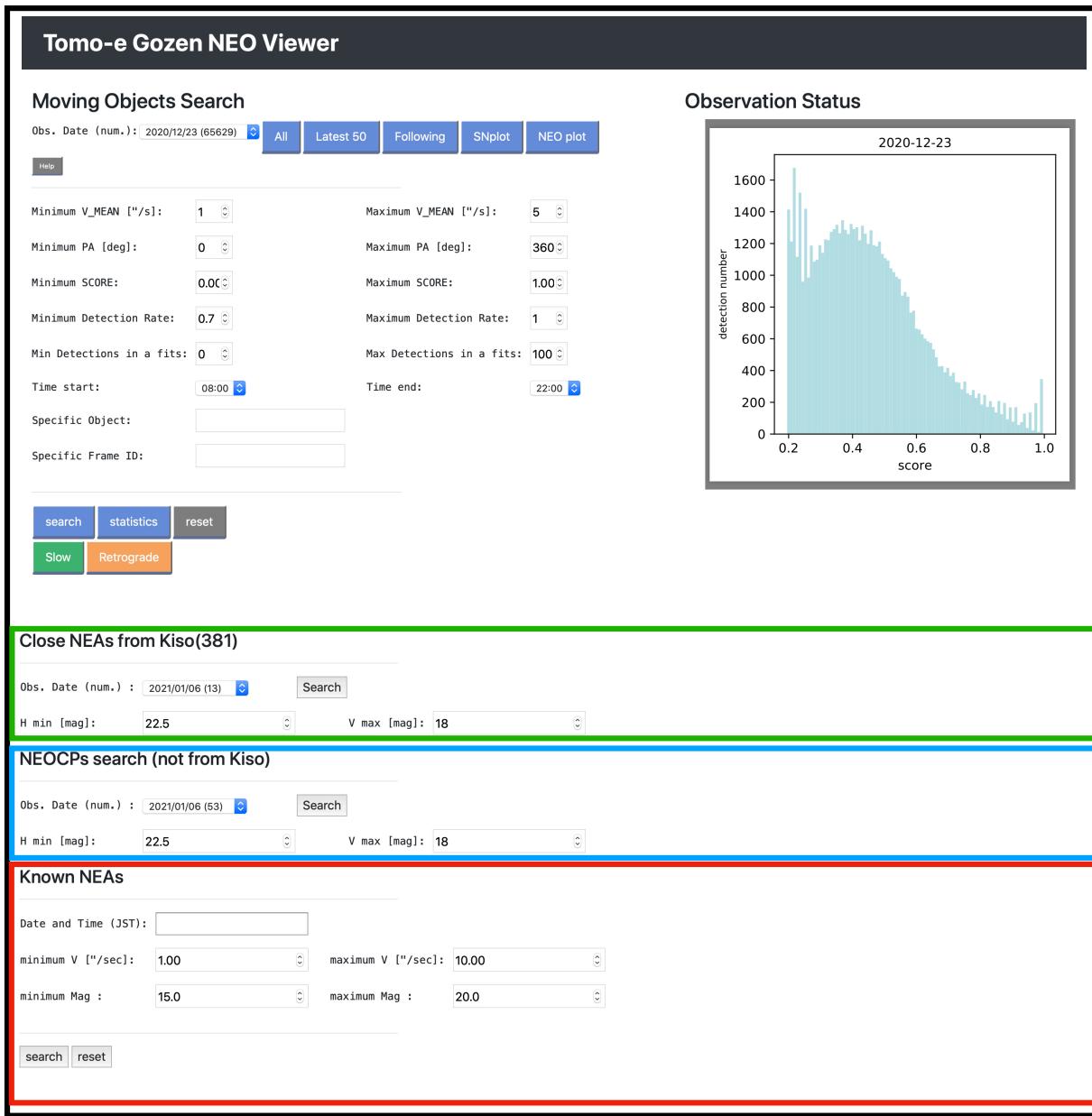


図 2.20 NEO ビューアーのトップページ。

上部左:日付を選択して検出天体を確認することができる。詳細な検索条件を設定することができる。上部右:毎日の検出天体の機械学習スコアの分布。緑色枠(Close NEAs from Kiso(381)):日付、絶対等級、視等級の条件を用いた既知の NEO の検索機能。青色枠(NEOCPs search):既知の NEO と同様の条件を用いた仮符号取得前 NEO の検索機能。赤色枠(Known NEAs):時刻、速度、視等級の条件を用いた NEO の検索機能。

Close NEOs				
NAME	ABSOLUTE MAGNITUDE	DIAMETER[m]	MINIMUM APPARENT MAGNITUDE	CLOSEST TIME
K20V04X	27.5	11.232100045341985	17.9	2020-11-19-000000
K20S000	28.81	6.144138021624161	14.4	2020-12-01-000000

図 2.21 NEO ビューアーの接近天体の確認結果。左カラムから順に天体名、絶対等級、直径、視等級、最接近日。

Tomo-e Gozen NEO Viewer			
NEO CPs			
NAME	ABSOLUTE MAGNITUDE	APPARENT MAGNITUDE	N_OBS
A10u6SN	24.1	17.7	9
A10u6SL	24.4	17.0	38

図 2.22 NEO ビューアーの仮符号取得前 NEO の確認結果。
左カラムから順に天体名、絶対等級、視等級、これまでの観測点の数。

図 2.23 はトップページから条件を指定した天体の検索結果である。左カラムには観測時間、天体名、天体が検出されたデータフレームセットが表示されている。下にある Tracklet Search と Circle fit は後述する二種類の天体グルーピング機能である。その右の MATCHING では、既知の人工天体、既知の NEO、仮符号取得前 NEO とのカタログ照合、同定を行うことができる。カタログ照合する NEO 候補天体の検出時刻、検出座標を t 、 (α, δ) とする。人工天体は Space-Track²⁸ と高軌道人工天体カタログ²⁹、NEO は MPC の NEO カタログ³⁰ の軌道要素を用いてカタログに存在する天体の時刻 t での座標を取得する。仮符号取得前 NEO は MPC の該当ページ³¹ にアクセスし、時刻 t での座標を取得する。取得した各天体の座標を (α_i, δ_i) とした時、その残差の二乗の平方根 $r = \sqrt{(\alpha - \alpha_i)^2 + (\delta - \delta_i)^2}$ が閾値以下の天体をカタログ天体と同定する。図 2.24 は人工天体との照合結果の例である。照合した位置が近い天体は赤文字で強調して表示される。この例では検出天体がカタログ化された人工天体と精度よく同定されている。

カタログ照合の右 (IMAGE) には最初と最終フレームの差分画像が表示されており、ポインタをホバーすると全フレームの GIF 動画が再生される。さらに赤道座標での測光位置と測光情報を表す光度曲線も掲載されている。その右では移動天体らしさの指標となる機械学習のスコアが確認できる。明らかに不当なスコアをもつ検出に対して FP (False Positive)、 FN (False Negative) フラグを挿入することで次のモデル作成の教師データを得ることができる。その他 S/N、検出座標、天体の速度が表示されている。各天体の IMAGE をクリックすると一つの天体の情報のみが表示される詳細情報画面に遷移する (図 2.25)。ここでは照合半径を指定したカタログ照合、天体グルーピング (後述) を行うことができる。

²⁸ <https://www.space-track.org/auth/login>

²⁹ <https://github.com/Bill-Gray/tles>

³⁰ <https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/NEAm00.txt>

³¹ <https://cgi.minorplanetcenter.net/cgi-bin/confirmeph2.cgi>

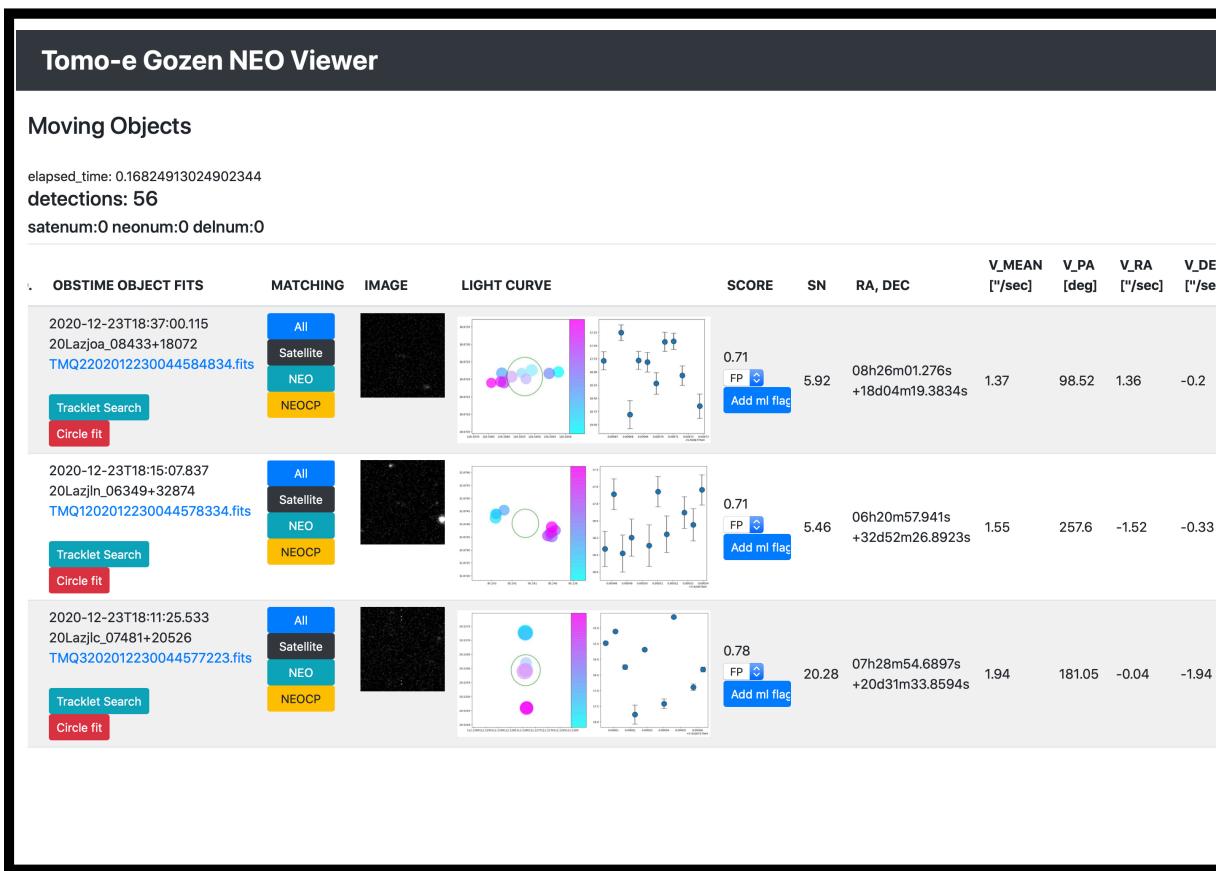


図 2.23 NEO ビューアーの NEO 候補天体の一覧。

条件を満たす天体が諸情報とともに縦に一覧で表示される。スクロールすることで全天体(上記画面では 56 天体)を確認することができる。左カラムから順に観測時刻、天体名、検出されたデータフレームセット、天体のグルーピング機能(後述)、既知の天体とのカタログ照合機能、最初と最終フレームの差分画像と GIF 動画、検出座標と光度曲線、機械学習のスコアと教師データ作成機能、検出情報諸元(S/N、座標、速度)。

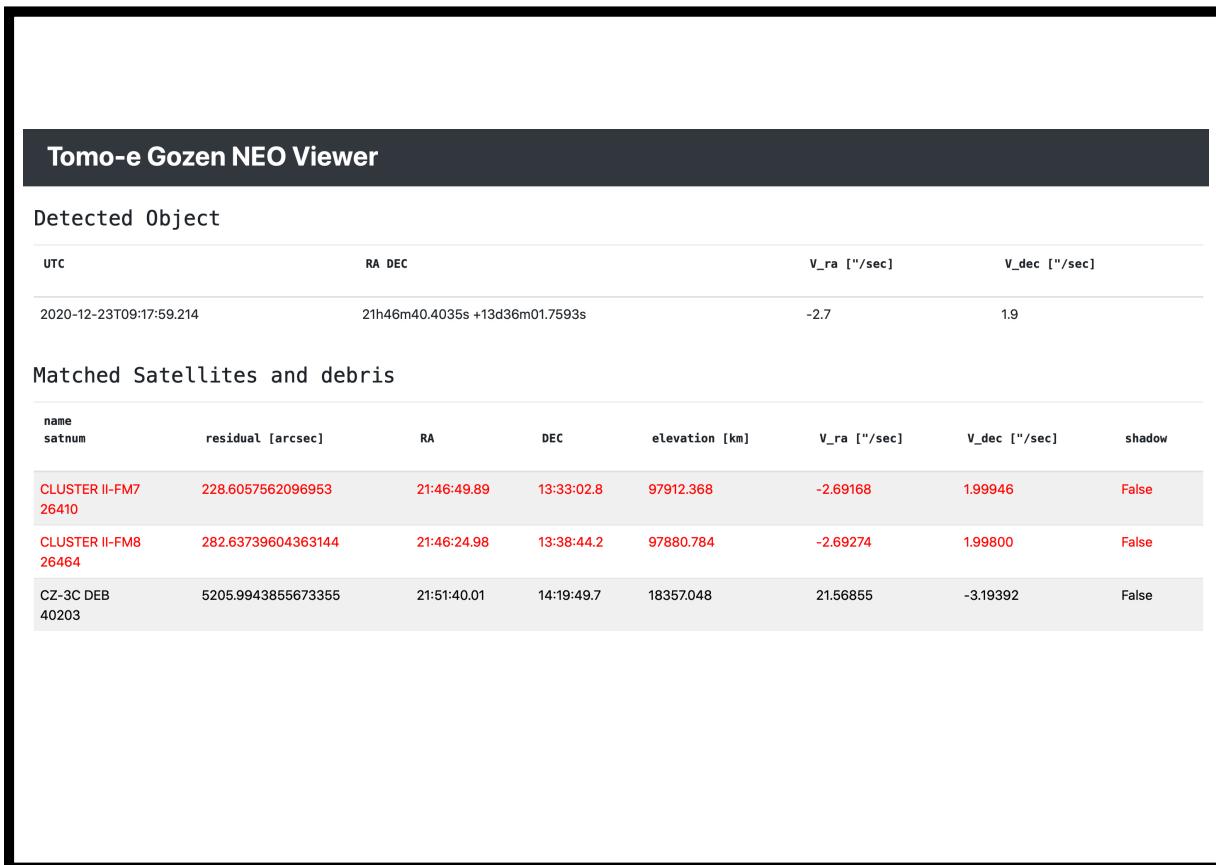
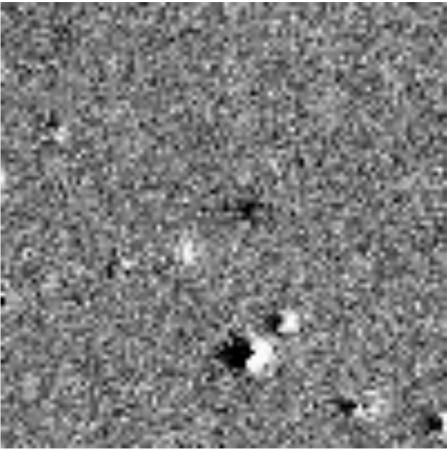


図 2.24 NEO ビューアーの既知の人工天体との照合結果。

左カラムから順に照合天体の名前、衛星番号(通し番号)、照合位置の差、赤道座標、天体高度、速度、天体が地球影に存在するか否か。精度よく同定された天体は赤色文字で強調される。

Tomo-e Gozen NEO Viewer

Detail Informations



UTC 2020-12-21T12:41:54.242

SCORE 1.0

RA, DEC 04h01m37.8663s +57d53m13.0131s

SN 8.79

V_mean 3.52 ["/sec]

V_ra 2.91 ["/sec]

V_dec -1.98 ["/sec]

FOLLOW:1 NAME:J.Beniyama

GIF

Catalog Matching

Search Radius [arcmin]: 100

Search Radius [arcmin]: 100

Search Radius [arcmin]: 100

Search Radius [arcmin]: 100

Tree number 0

Tracklets Search

+V_ra ["/s]: 1.0

+V_dec ["/s]: 1.0

SCORE min : 0.00

Satellite Filter : true false

Sigma: 1

-V_ra ["/s]: 1.0

-V_dec ["/s]: 1.0

SCORE max : 1.00

Search Radius [arcsec]: 10

New Tracklets Search (Circle Fit)

+V_ra ["/s]: 0.5

+V_dec ["/s]: 0.5

SCORE min : 0.80

Satellite Filter : true false

Circle Threshold: 1

-V_ra ["/s]: 0.5

-V_dec ["/s]: 0.5

SCORE max : 1.00

Search Radius [arcsec]: 10

図 2.25 NEO ビューアーの移動天体候補の詳細画面。

上部:一天体の情報が全画面に表示される。緑色枠:上段から全て、人工天体、NEO、仮符号取得前 NEO とのカタログ照合、同定機能。照合半径の変更が可能。青色枠:上部 (Tracklets Search)、下部 (New Tracklets Search) それぞれが本文 1、2 の手法に対応。Sigma、Circle Threshold がそれぞれの同定閾値に対応し、変更することが可能。

2.3.2 NEO 候補天体の追跡観測

既存のカタログに存在しない NEO 候補天体に対して、観測点を増やすための追跡観測を行う。NEO ビューアーでは Tomo-e Gozen 観測システムへ観測時刻、優先度、観測者を指定した追跡観測レシピ (Tomo-e Gozen 観測システムでの観測命令) を送信することができる (図 2.26)。Tomo-e Gozen の観測システムは登録されたレシピを優先度の高い順に実行する。NEO 候補天体の中にはカタログ化されていない人工天体が多く存在する。NEO の発見が目的である本研究では人工天体を追跡観測することを避けるため速度等の基準を設けて追跡観測天体を選択した。詳細は 3 で述べる。追跡観測レシピでの望遠鏡のポインティング先 ($\alpha_{\text{recipe}}, \delta_{\text{recipe}}$) は追跡観測する天体の観測時の時刻 t 、赤道座標 (α, δ) 、速度 $(v_{\text{ra}}, v_{\text{dec}})$ を用いて、

$$\alpha_{\text{recipe}} = \alpha + (t_{\text{recipe}} - t) \cdot \frac{v_{\text{ra}}}{\cos \delta}, \quad (2.6)$$

$$\delta_{\text{recipe}} = \delta + (t_{\text{recipe}} - t) \cdot v_{\text{dec}}, \quad (2.7)$$

で計算する。計算した座標を中心に、センサー間の隙間を埋めるためのディザリングを行うレシピが生成される。センサー間の隙間を完全に埋めることができる 2×3 ディザリング (ra 方向に 1 回、dec 方向に 2 回の視野移動) を行うため、2 fps、12 フレームの観測の場合、一回の追跡観測での総露光時間は 36 秒間である。ポインティング先は天体が検出時と同一の速度で移動していると仮定して算出されるが、Tomo-e Gozen の約 9° の広い視野により高確率で天体を視野内に収めることができる。この追跡観測は動画観測で得られる速度情報を用いることで実現できる、他のサーベイ観測では行えないユニークな手法である。追跡観測レシピを投入した天体には追跡観測フラグが付与される。追跡観測天体確認画面で確認することでプロジェクトメンバー内の同一天体に対する重複した追跡観測を避けることができる (図 2.27)。

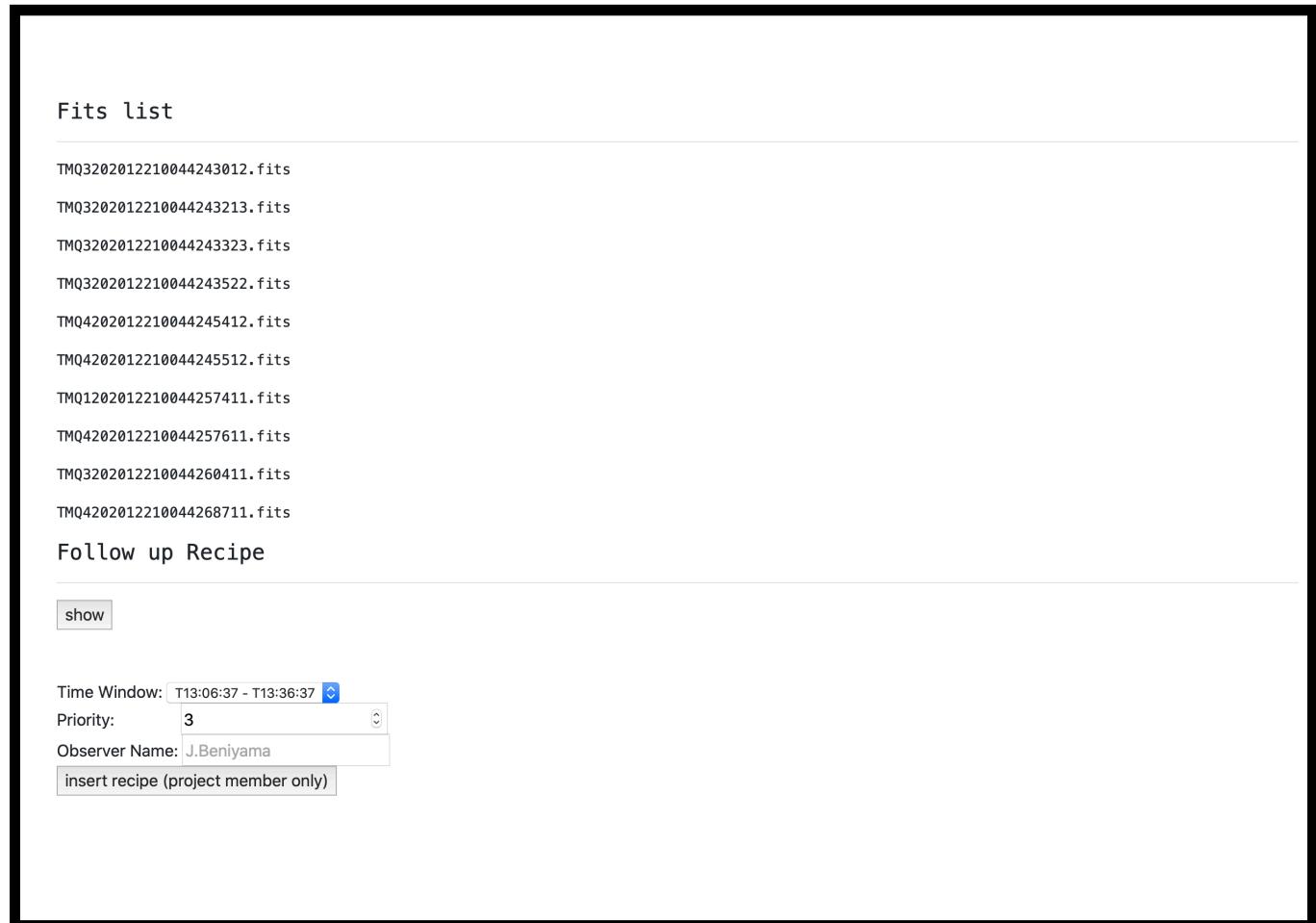


図 2.26 NEO ビューアーの追跡観測レシピの投入画面。

画面下部に追跡観測時刻、優先度、観測者を指定して投入する。他に優先度が高い重要な観測があった場合には観測が実行されない。

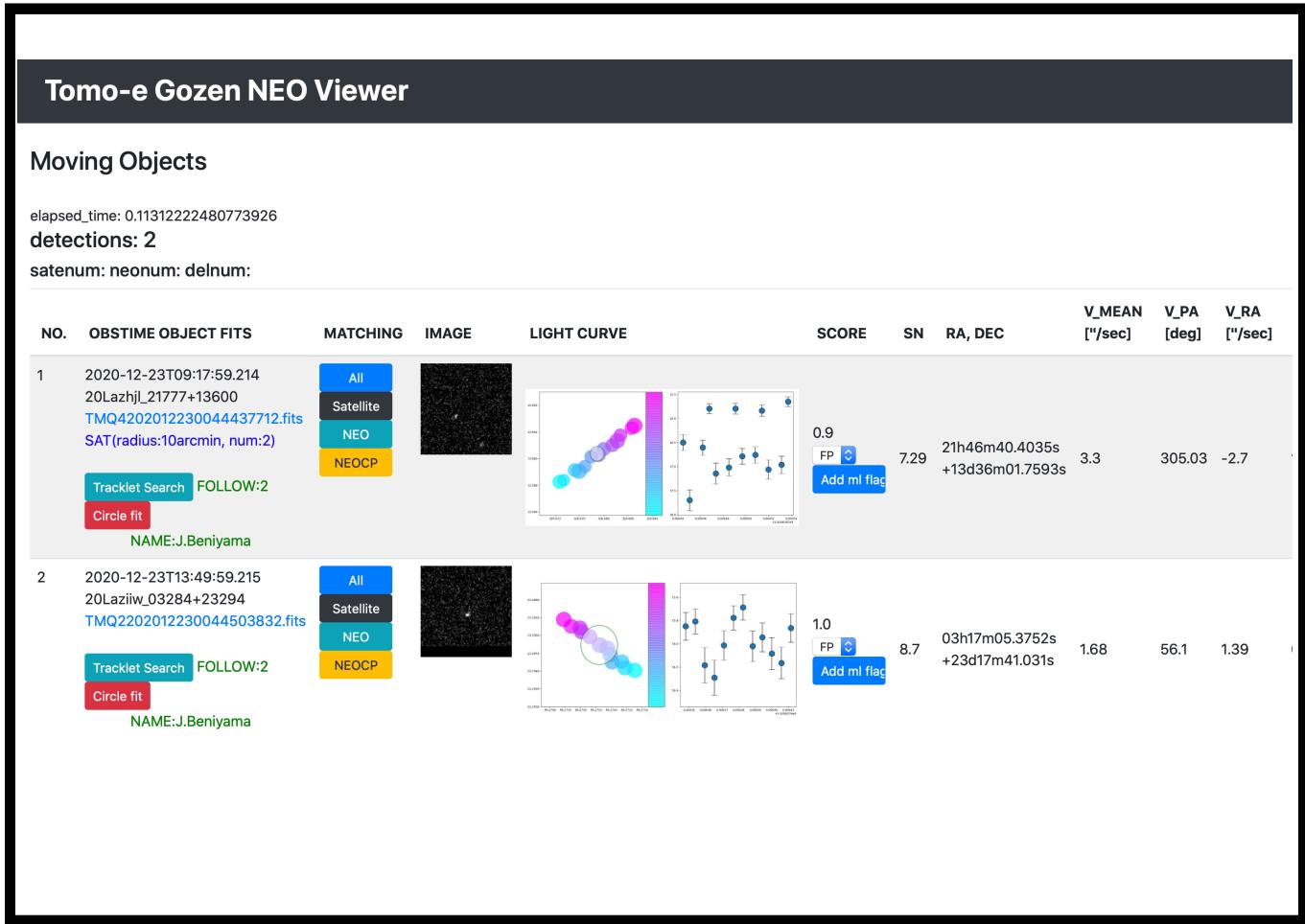


図 2.27 NEO ビューアーの追跡天体の確認画面。

追跡観測レシピを投入した天体のみを確認することが可能。追跡観測数、追跡観測者名が緑色の文字で強調して表示されている。

2.3.3 NEO 候補天体のグルーピング

追跡観測レシピ投入後観測が行われた天体は Tomo-e Gozen システムで優先的に解析され、典型的には数分後に NEO ビューアーで確認することができる。NEO 候補天体と追跡観測結果を紐づけるために天体のグルーピングを行う。グルーピング方法は 1) 線形軌道予測 (Kojima 2019 の方法)、2) 大円近似の二種類である。時刻を t 、赤道座標系における位置、速度を (α, δ) 、 (v_{ra}, v_{dec}) と表記する。

1. 線形軌道予測

同一天体を探査する NEO 候補天体の観測情報を t 、 α 、 δ 、 v_{ra} 、 v_{dec} とする。まず速度幅 Δv_{ra} 、 Δv_{dec} を指定し、 $v_{ra} - \Delta v_{ra} < v_{ra} < v_{ra} + \Delta v_{ra}$ 、 $v_{dec} - \Delta v_{dec} < v_{dec} < v_{dec} + \Delta v_{dec}$ を満たす天体を抽出する。次に抽出された各天体の検出時刻 t_i としたとき、時刻差 $\Delta t = t_i - t$ と NEO 候補天体の移動速度を用いて時刻 t_i での NEO 候補天体の位置を計算することができる。計算した NEO 候補天体の位置とグルーピング対象天体の検出位置が閾値以下となる天体を同一天体とみなす。

2. 大円近似

同一天体を探査する NEO 候補天体の検出の最初と最終フレームでの位置 (α_0, δ_0) 、 (α_1, δ_1) を通る天球上の大円を考える。赤道座標を直交座標に変換し、大円を含む平面の法線ベクトル (a, b, c) を得る³²。他の天体に対して同様に係数 (a', b', c') を求め、NEO 候補天体の係数との残差の二乗の平方根 $r = \sqrt{(a - a')^2 + (b - b')^2 + (c - c')^2}$ が閾値以下である天体を同一天体とみなす。

NEO 候補天体に対し 9 天体グルーピングされた例を図 2.28 に示す。天球上、赤道座標上での位置と速度を一

³² 最初と最終フレームの二点は直交座標で $(x_0, y_0, z_0) = (\cos \delta_0 \cos \alpha_0, \cos \delta_0 \sin \alpha_0, \sin \delta_0)$ 、 $(x_1, y_1, z_1) = (\cos \delta_1 \cos \alpha_1, \cos \delta_1 \sin \alpha_1, \sin \delta_1)$ と表される。この二点を通る大円を含む平面の法線ベクトルの各成分は $(a, b, c) = (y_0 z_1 - y_1 z_0, z_0 x_1 - z_1 x_0, x_0 y_1 - x_1 y_0)$ と計算できる。

目で確認することができる。投入天体確認画面(図 2.25 水色)では閾値を変更してグルーピングを行うことができる。判定対象は同じ観測日の全データとなるため、天体検出数が多い日は閾値を小さくすることで抽出にかかる時間を短縮することができる。ただしその場合同一天体を見落とす可能性があるため注意が必要である。追跡観測、グルーピングに成功した天体に対してさらに追跡観測を行い観測点を増やす。

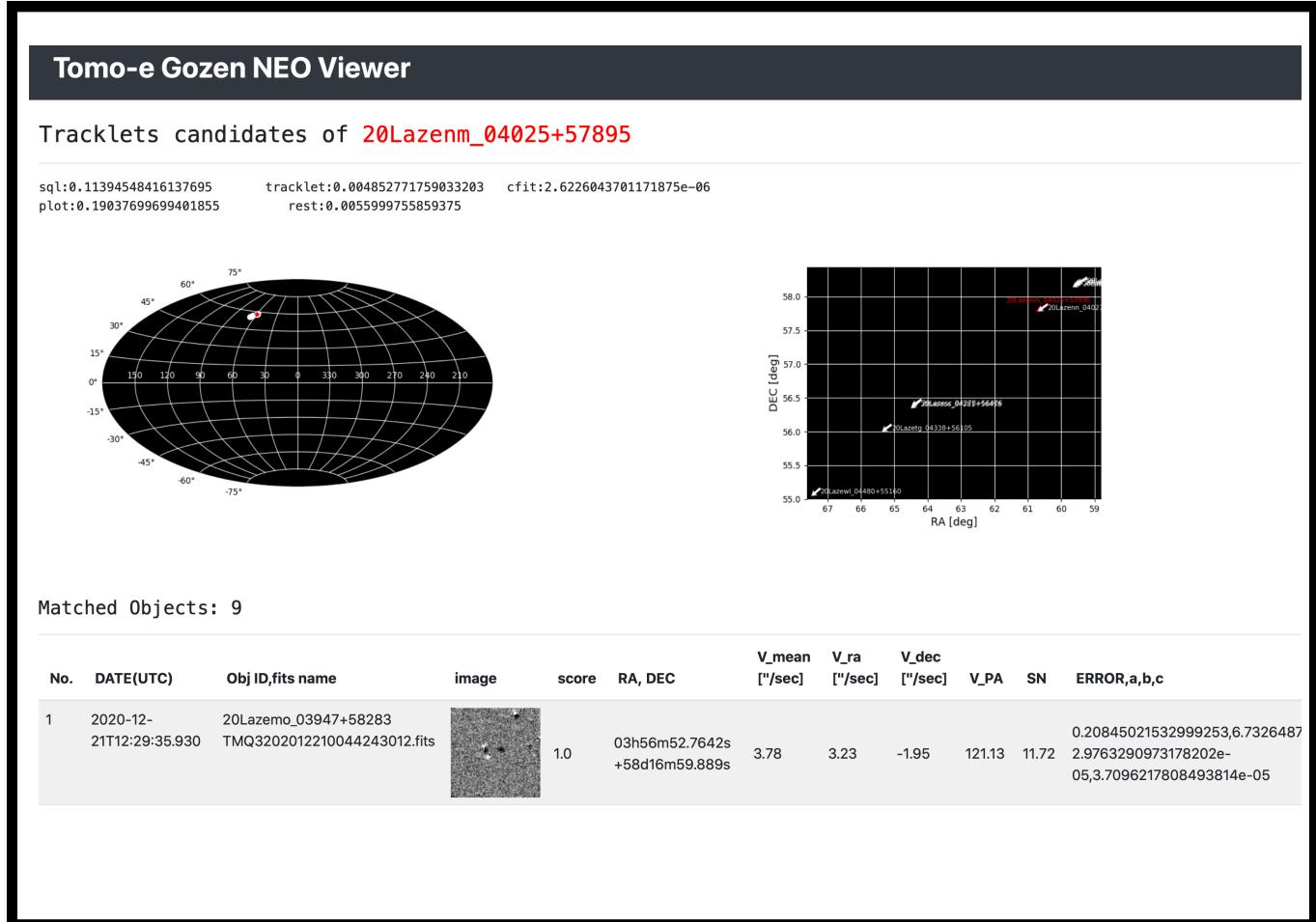


図 2.28 NEO ビューアーの天体グルーピング結果。

左上:グルーピングされた天体の天球上の位置。右上:グルーピングされた天体の赤道座標平面での位置と速度。

下:同定天体の観測諸元。

2.3.4 NEO 候補天体の軌道決定

実質 3 回以上の観測³³ が行われかつグルーピングが成功した NEO 候補天体に対し、米 Project Pluto が開発した軌道決定ソフト Find_Orb³⁴ を用いて軌道計算を行う。Find_Orb は観測情報と軌道タイプ(太陽周回軌道、地球周回軌道)を選択することで軌道決定を行うことができる。その入力は MPC に小惑星候補天体を投稿する際の形式である 1 行 80 文字の MPC 形式に対応している。NEO ビューアーは観測情報をもとに自動で MPC 形式を作成し(図 2.29)、軌道タイプを選択することで Find_Orb にアクセスしその結果を表示する。

候補天体の追跡観測の段階ではカタログ化されていない人工天体(宇宙ゴミなど)が多く含まれるが、人工天体は地球周回軌道で精度良く軌道が求まる。地球周回軌道の天体を太陽周回軌道で計算すると地球と似た軌道を持つ太陽周回天体としての計算結果が得られる。一方 NEO は太陽のまわりを公転しているため太陽周回軌道で精度よく軌道が求まる(図 2.30)。太陽周回軌道の天体を地球周回軌道で計算すると、地球に束縛されていないため軌道離心率が大きい計算結果が得られることになる。以上から、3 点観測点を得た天体を地球周回で軌道計算し、その軌道がうまく求まらない(つまり離心率が大きい)天体を太陽周回の小惑星であると判断する。

³³ Tomo-e Gozen の観測ではセンサー間の隙間を埋めるためのディザリングが行われる。センサー端の一部では複数回観測されることになり、そのような移動天体は秒・分間隔の観測点が得られることになる。このような観測は軌道精度を著しくあげることはないため実質 1 点とする。

³⁴ <https://www.projectpluto.com/fo.htm>

Online Find_Orb

check to exclude some mpcformats(left:findorb, right:mail)

C2020 12 21.52054403	56 51.64 +58 17 05.3	16.1 G	381
C2020 12 21.52060203	56 53.48 +58 16 56.5	15.9 G	381
C2020 12 21.52096103	57 05.84 +58 15 55.7	15.6 G	381
C2020 12 21.52100703	57 07.47 +58 15 48.6	16.0 G	381
C2020 12 21.52114603	57 12.29 +58 15 24.9	15.9 G	381
C2020 12 21.52121503	57 14.56 +58 15 14.2	16.2 G	381
C2020 12 21.52155103	57 26.02 +58 14 17.0	16.1 G	381
C2020 12 21.52162003	57 28.24 +58 14 06.0	16.3 G	381
C2020 12 21.52886604	01 30.40 +57 53 50.7	16.1 G	381
C2020 12 21.52893504	01 32.49 +57 53 40.1	16.3 G	381
C2020 12 21.52906304	01 36.86 +57 53 18.5	16.5 G	381
C2020 12 21.52912004	01 38.87 +57 53 07.6	16.3 G	381
C2020 12 21.55952504	16 43.19 +56 28 40.0	16.5 G	381
C2020 12 21.55956004	16 43.92 +56 28 36.2	17.6 G	381
C2020 12 21.55993104	16 53.93 +56 27 34.5	16.7 G	381
C2020 12 21.55998804	16 55.52 +56 27 24.1	16.4 G	381
C2020 12 21.56766204	20 18.37 +56 06 24.0	16.8 G	381
C2020 12 21.56772004	20 20.00 +56 06 14.8	16.5 G	381
C2020 12 21.58869204	28 50.31 +55 09 43.4	16.2 G	381
C2020 12 21.58876204	28 51.84 +55 09 32.8	16.3 G	381

Center Observer J.Beniyama Object Name TMG0000 new

図2.29 NEO ビューアーの軌道計算前画面。

表示されている 80 文字の MPC 形式を用いて Find_Orb を用いた軌道計算を行う。左下の Center をプルダウンから選択し、地球周回軌道、太陽周回軌道それにたいする軌道計算が可能。

Tomo-e Gozen NEO Viewer

Find_Orb Result (AUTO)

Astrometry:

```
C2020 12 21.52054403 56 51.64 +58 17 05.3   16.1 G  381
C2020 12 21.52060203 56 53.48 +58 16 56.5   15.9 G  381
C2020 12 21.52096103 57 05.84 +58 15 55.7   15.6 G  381
C2020 12 21.52100703 57 07.47 +58 15 48.6   16.0 G  381
C2020 12 21.52114603 57 12.29 +58 15 24.9   15.9 G  381
C2020 12 21.52121503 57 14.56 +58 15 14.2   16.2 G  381
C2020 12 21.52135103 57 26.02 +58 14 17.0   16.1 G  381
C2020 12 21.52162003 57 28.24 +58 14 06.0   16.3 G  381
C2020 12 21.52886604 01 30.40 +57 53 50.7   16.1 G  381
C2020 12 21.52893504 01 32.49 +57 53 40.1   16.3 G  381
C2020 12 21.52906304 01 36.86 +57 53 18.5   16.5 G  381
C2020 12 21.52912004 01 38.87 +57 53 07.6   16.3 G  381
C2020 12 21.55952504 16 43.19 +56 28 40.0   16.5 G  381
C2020 12 21.55956004 16 43.92 +56 28 36.2   17.6 G  381
C2020 12 21.55993104 16 53.93 +56 27 34.5   16.7 G  381
C2020 12 21.55998804 16 55.52 +56 27 24.1   16.4 G  381
C2020 12 21.56766204 20 18.37 +56 06 24.0   16.8 G  381
C2020 12 21.56772004 20 20.00 +56 06 14.8   16.5 G  381
C2020 12 21.58869204 28 50.31 +55 09 43.4   16.2 G  381
C2020 12 21.58876204 28 51.84 +55 09 32.8   16.3 G  381
```

Station data:
(381) Tokyo-Kiso ([N35.797229 E137.625420](#)) Japan, 1.05-m Kiso Schmidt.

Orbital elements:

```
Perihelion 2020 Nov 4.70857 +/- 0.158 TT = 17:00:20 (JD 2459158.20857)
Epoch 2020 Dec 22.0 TT = JDT 2459205.5 Earth MOID: 0.0019 Ve: 0.0343
M 23.56741956 +/- 0.42 Ma: 0.0109 Auto-Find
n 0.49834443 +/- 0.00737 Peri: 292.27760 +/- 0.19
a 1.57561330 +/- 0.0155 Node: 85.89251 +/- 0.09
e 0.5207092 +/- 0.00599 Incl: 1.71619 +/- 0.042
P 1.98/722.38d H 27.4 G 0.15 U 9.4
q 0.75517688 +/- 0.00209 Q 2.39604971 +/- 0.0331 (J2000 ecliptic)
From 20 observations 2020 Dec. 21 (98.2 min); mean residual 0".67
```

Residuals in arcseconds:

201221 381 .68+ .56-	201221 381 1.4- .37+	201221 381 .90- .35+
201221 381 .53- .36+	201221 381 .29+ .49-	201221 381 .49- .65-
201221 381 .25- .32-	201221 381 1.0- .48+	201221 381 .40- .35+
201221 381 .17+ .29+	201221 381 .56+ .33+	201221 381 .70+ .64+
201221 381 .62+ .13-	201221 381 1.8+ 1.0-	201221 381 .36+ .42-
201221 381 .11- .73+	201221 381 1.2+ 1.1-	201221 381 .27- .15+
201221 381 .35- .19-	201221 381 .62- .85+	

Ephemerides for (381) Tokyo-Kiso:

Date (UTC)	RA	Dec	delta r	elong	mag	" sig PA
2021 01 07 06 35 02.223	+27 49 04.13	.13977	1.1212	170.0	24.0	69.3 120
2021 01 08 06 35 14.387	+27 45 08.42	.14852	1.1296	169.2	24.1	69.2 120
2021 01 09 06 35 26.727	+27 41 26.79	.15735	1.1379	168.3	24.3	69.2 120
2021 01 10 06 35 39.464	+27 37 56.70	.16625	1.1462	167.4	24.5	69.2 120
2021 01 11 06 35 52.792	+27 34 36.15	.17523	1.1546	166.6	24.6	69.2 120
2021 01 12 06 36 06.876	+27 31 23.52	.18429	1.1629	165.7	24.8	69.3 120
2021 01 13 06 36 21.859	+27 28 17.47	.19344	1.1713	164.8	24.9	69.4 120
2021 01 14 06 36 37.861	+27 25 16.93	.20268	1.1796	163.8	25.1	69.6 120
2021 01 15 06 36 54.980	+27 22 20.99	.21200	1.1879	162.9	25.2	69.9 120
2021 01 16 06 37 13.298	+27 19 28.90	.22141	1.1963	162.0	25.3	70.2 120
2021 01 17 06 37 32.876	+27 16 40.03	.23092	1.2046	161.1	25.5	70.6 120
2021 01 18 06 37 53.762	+27 13 53.83	.24052	1.2129	160.2	25.6	71.0 120
2021 01 19 06 38 15.994	+27 11 09.85	.25022	1.2212	159.3	25.7	71.6 120
2021 01 20 06 38 39.597	+27 08 27.69	.26001	1.2294	158.4	25.8	72.2 120
2021 01 21 06 39 04.591	+27 05 46.99	.26990	1.2377	157.5	25.9	72.9 120
2021 01 22 06 39 30.987	+27 03 07.46	.27989	1.2460	156.6	26.0	73.7 120
2021 01 23 06 39 58.793	+27 00 28.83	.28997	1.2542	155.7	26.2	74.6 120
2021 01 24 06 40 28.010	+26 57 50.86	.30016	1.2624	154.8	26.3	75.5 119
2021 01 25 06 40 58.635	+26 55 13.35	.31045	1.2706	153.9	26.4	76.6 119
2021 01 26 06 41 30.663	+26 52 36.11	.32084	1.2788	153.1	26.5	77.7 119

図2.30 NEOビューアーの軌道計算結果。

太陽周回軌道での軌道決定に成功した例。実際に Tomo-e Gozen が発見した小惑星の観測点 20 点を使用。上から順に軌道計算に用いた MPC 形式、観測所情報、軌道要素、軌道決定の誤差。最下段は天体暦。

2.3.5 MPCへの投稿

NEO 候補天体に対して追跡観測により観測点を増やし、軌道計算の結果 NEO である可能性が高いと判断した場合、候補天体情報を e メールにて MPC へ投稿する。NEO ビューアーでは MPC 形式に基づく報告メールを作成することもできる(図 2.31)。MPC により既知の人工天体、NEO、仮符号取得前 NEO ではないことが確認されると、新たな NEO 候補天体として MPC の仮符号取得前 NEO ページに追加される。その後追跡観測により軌道の精度が高まった天体には小惑星としての仮符号が付与される。

Tomo-e Gozen NEO Viewer

Magnitude Modified Mail format

COD 381
CON N.Kobayashi, Kiso Observatory, Institute of Astronomy,
CON Graduate School of Science, The University of Tokyo,
CON 10762-30 Mitake, Kiso-machi, Kiso-gun, Nagano 397-0101, Japan
OBS J.Beniyama
TEL 1.05-m f/3.1 Schmidt + CCD
NET Gaia DR2
ACK NEOCP TMG0000 381 2021-01-06T14:44:08Z
AC2 tomoe-ps@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

TMG0000	C2020 12 21.52054403 56 51.64 +58 17 05.3	16.1 G	381
TMG0000	C2020 12 21.52060203 56 53.48 +58 16 56.5	15.9 G	381

図 2.31 NEO ビューアーで作成された e メールの例。

一行目から順に天文台コード (COD)、観測プログラムの情報 (任意、CON)、観測者 (OBS)、望遠鏡と装置の情報 (TEL)、解析に用いたカタログ (NET)、天体の種類など (ACK)、返信メッセージ受信用 e メールアドレス (AC2)。最後の二行は MPC 形式の天体の観測情報。詳細は MPC の観測詳細のページ³⁵を参照のこと。

³⁵ <https://minorplanetcenter.net/iau/info/ObsDetails.html>

第3章

Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データ からの NEO の探索

3.1 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測

2019年10月1日より、木曾Tomo-e Gozenの本格稼働が始まった。シュミット望遠鏡の広視野とCMOSセンサによる2fps高速撮像を組み合わせた全天サーベイ観測は他のサーベイ観測(1.3.1)とは大きく異なる特徴をもち、秒スケールの変動現象を捉えることができる(表3.1)。Tomo-e Gozenの全天サーベイ観測の目的は超新星、重力波対応天体、NEOなどの時間変動天体の検出である。

表3.1 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測の特徴

特徴	説明
広視野	84枚のセンサーが視野 20 deg^2 を覆う。
動画観測	2fps 動画観測により秒スケールの変動現象を検出することができる。
	NEO検出においては地球近傍を通過する小惑星を検出できることに対応する。

2019年9月19日から2020年12月26日までの約1年4ヶ月間のTomo-e Gozenの全天サーベイ観測の露光数を図3.1に示す。全天サーベイ観測によりデータ取得が行われた日数は307日、総露光回数は261885回、平均露光回数は1日約853回である。梅雨時期(2020年6月11日–2020年8月1日)以外は一年を通して恒常に観測が行われていることがわかる。またTomo-e Gozenの全天サーベイ観測により観測した領域(図3.2)より、木曾から観測可能な広大な領域を複数回観測していることがわかる。

Tomo-e Gozenの全天サーベイ観測では、日が沈むとまず全天の掃天観測を行う。その後特定の領域に対して高頻度観測(同一視野に対し~7回観測)を行い、再度日が昇る前に約一時間半の全天の掃天観測が行われる。感度が低下する月の周辺を避け、高度35度以上を最適化された経路で観測する。観測データはTomo-e Gozenの計算機システムにてリアルタイムで一時処理が行われる。

本章では、Tomo-e Gozenの全天サーベイ観測データに対し前章で開発した高速移動天体検出システムを用いることにより、NEOの独立発見を目的としたNEOの探索を行った。

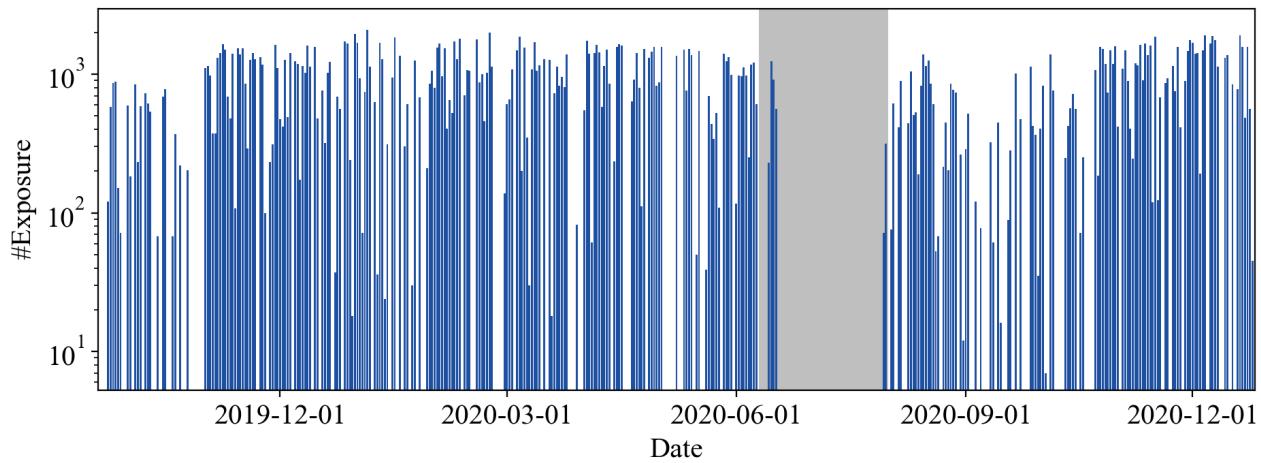


図 3.1 2019 年 9 月 19 日から 2020 年 12 月 26 日までの Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測での観測 (露光) 数。灰色領域は 2020 年の長野県の梅雨 (2020 年 6 月 11 日–2020 年 8 月 1 日) を表している。

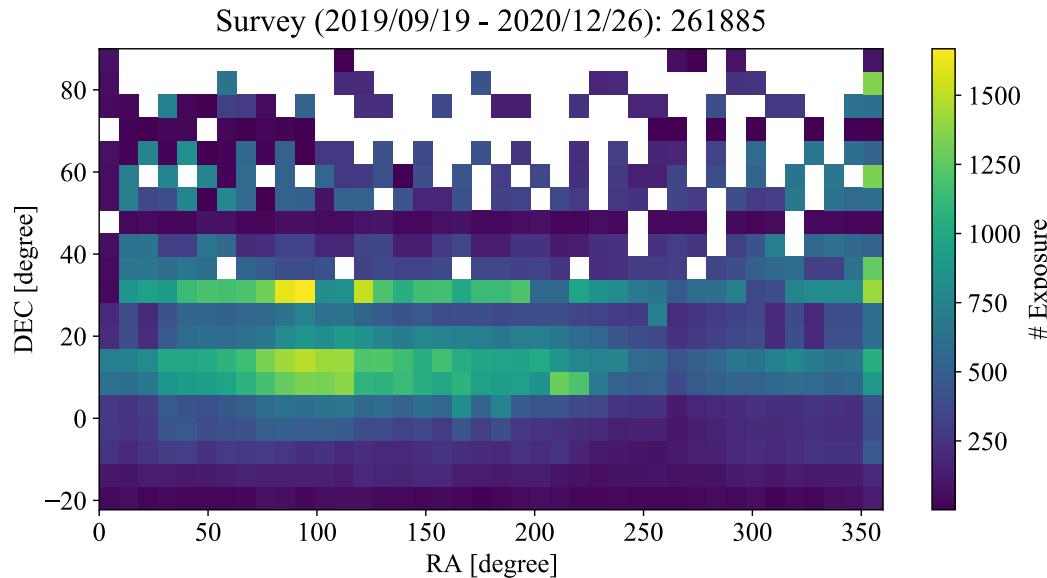


図 3.2 2019 年 09 月 19 日から 2020 年 12 月 26 日までの Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測領域。望遠鏡のポインティング中心の赤道座標。

3.2 結果

本節では高速移動天体検出システムによる検出状況の結果と約 1 年 4 ヶ月の NEO 探索の結果を述べる。

3.2.1 高速移動天体検出システムの実観測への適用

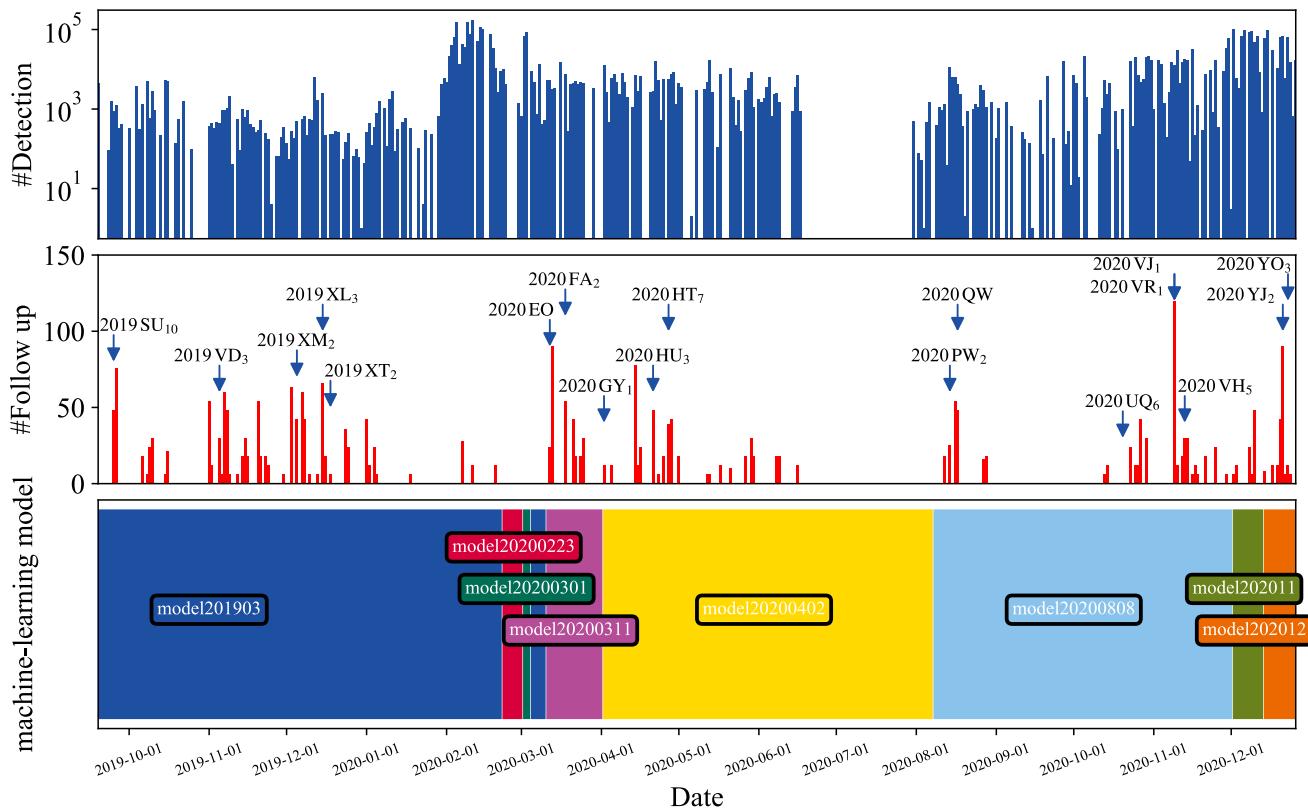


図 3.3 2019 年 9 月 19 日から 2020 年 12 月 26 日までの NEO パイプライン検出状況。

上:データベースに登録された NEO 候補天体検出数、中:NEO 候補天体の追跡観測数と Tomo-e Gozen による小惑星発見、下:機械学習モデルの変遷。

2019 年 9 月 19 日から 2020 年 12 月 26 日までの約 1 年 4 ヶ月間の全天サーベイ観測データの中からの NEO 候補天体検出数、追跡観測数、仮符号取得日、機械学習モデルの情報を図 3.3 にプロットした。高速移動天体検出システムでは典型的に一晩で数千-数万件の天体が検出されデータベースに登録される。登録天体を NEO ビューアーを用いて確認し、候補天体に対して追跡観測を行うが、数千-数万の検出天体全てを目視で確認することは困難であるため、本研究ではいくつかの基準により追跡観測対象を抽出を行った。

例として、2020 年 12 月 23 日の観測結果を用いる。この日の移動天体候補の総検出数は 65629 天体である。2.3.2 で言及したように、カタログに存在しない NEO 候補天体を全て追跡観測する場合その数は一晩 100–1000 天体となり現実的ではない。検出天体が NEO かどうかの基準として、1) 機械学習スコアが大きい天体のみを対象とするためのスコアの条件、2) データフレームセット内での検出率が多い天体のみを対象とする検出率の条件。3) 人工天体である可能性が高い天体を除外するための速度の条件、4) 一つのデータフレームセット内で多く天体が発生するデータ(望遠鏡の揺れなどが原因)を取り除くための同一データフレーム内の天体検出数の条件、を用いることで抽出を行う。抽出条件は 1) スコアの下限値は 0.70、2) 検出率の下限値は 0.70、3) 速度は 1 arcsec/s 以上 5 arcsec/s 以下、4) 1 データフレーム内での天体検出数の上限値は 3、を用いた。また既知の人工天体、NEO とのカタログ照合における照合距離は 10 分角とした。

抽出条件を用いた検出天体の天球上の分布を図 3.4、ヒストグラムを図 3.5 に示す。まず抽出前の図 3.4A では天体は広範囲で検出されている。図 3.4B は 1) スコアの条件、2) 速度の条件を満たす 4355 天体の分布である。この二つの条件で天体数を大きく減らすことができたが、まだ多くの天体が存在する。次に 3) 検出率、4) 同一データフレームセット内天体検出数の条件を用いて抽出した天体の分布が図 3.4C である。4 つの条件を用いることで目視でも確認可能な 56 天体にまで絞り込むことができている。これは観測を終えた後の件数であり、当日観測中に条件を満たす天体数はこれよりも少ない。最後に図 3.4D は、既知の天体カタログと照合、同定した 10 天体を除く 46 天体の分布である。同定した 10 天体は全て人工天体であった。以上で抽出された天体を目視で確認し移動天体であると判断した天体に対し、軌道を求めるための追跡観測を行う。

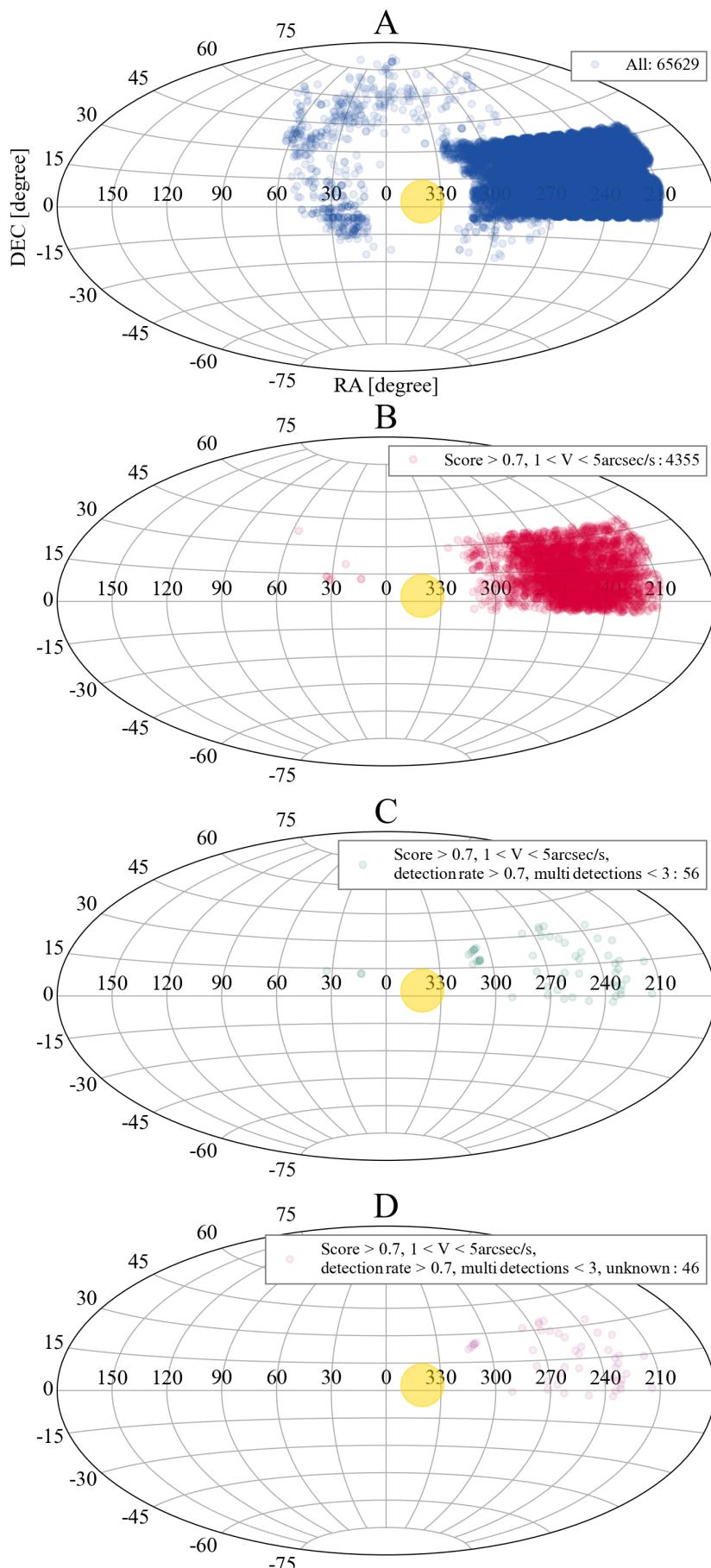


図3.4 検出した NEO の天球上の分布 (2020年12月23日)。

抽出条件を変更した赤道座標での NEO 候補天体の検出位置の分布。A:全天体。B:スコアが 0.7 以上、速度が 1 (arcsec/s) 以上 5 (arcsec/s) 以下を満たす天体。C:B に加え検出率が 0.7 以上、同一データフレームセット内天体検出数が 3 未満を満たす天体。D:C に加えカタログと照合、同定されない天体。

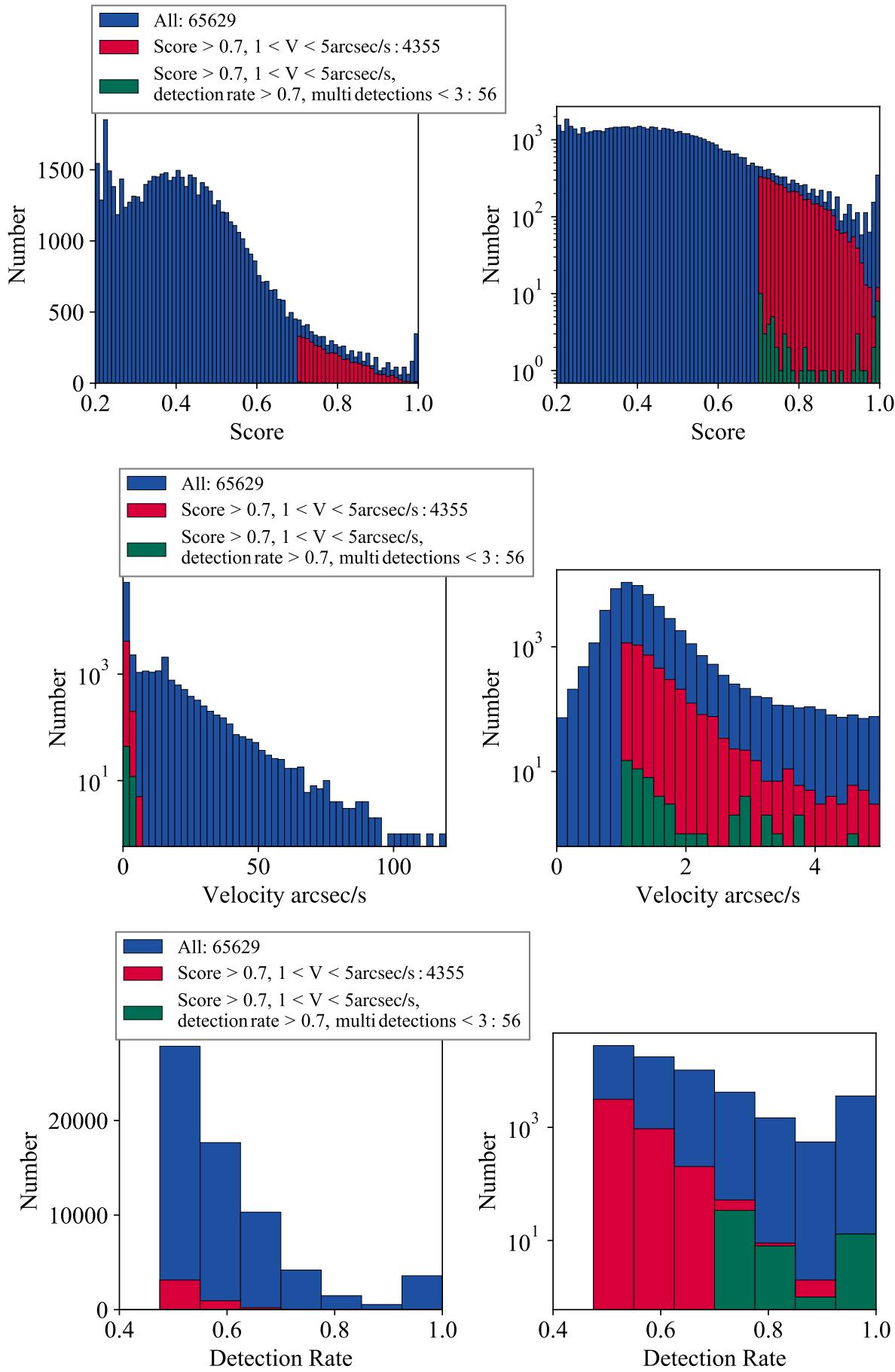


図 3.5 NEO 候補天体のスコア、速度、検出率の分布。

青色:全天体。赤色:スコアが 0.7 以上、速度が 1 (arcsec/s) 以上 5 (arcsec/s) 以下を満たす天体。緑色:赤色に加え検出率が 0.7 以上、同一データフレームセット内天体検出数が 3 未満を満たす天体。

人工天体と誤検出

速度 1 arcsec/s 以上 5 arcsec/s 以下という抽出条件は、低速で検出される誤検出と高速で移動する人工天体を避けるための条件である。本観測ではカタログと照合、同定する人工天体、同定しない人工天体が共に大量に検出されている(図 3.6)。カタログと照合、同定する天体は条件抽出により除外できるため追跡観測を行わないが、カタログ化されていない人工天体は追跡観測により軌道を決定するまで小惑星かどうかわからない。実際に追跡観測したところ、速度が大きい天体の多くは地球周回軌道で精度良く軌道が求まり、経験的に人工天体である可能性が高い。カタログ化されていない人工天体の軌道決定はスペースガードの観点からは重要であるが、本研究の目的は NEO の発見であるため追跡を行わない。意図しない人工天体の追跡を減らすためにも軌道要素や速度の分布をもとに小惑星と人工天体を判別するアルゴリズムを作成することは今後の課題である。

また本研究の条件抽出を満たす天体の中にも明らかな誤検出が含まれる(図 3.7)。このような天体の除去にはより多様な誤検出を教師データに含めたモデルの学習が必要となる。

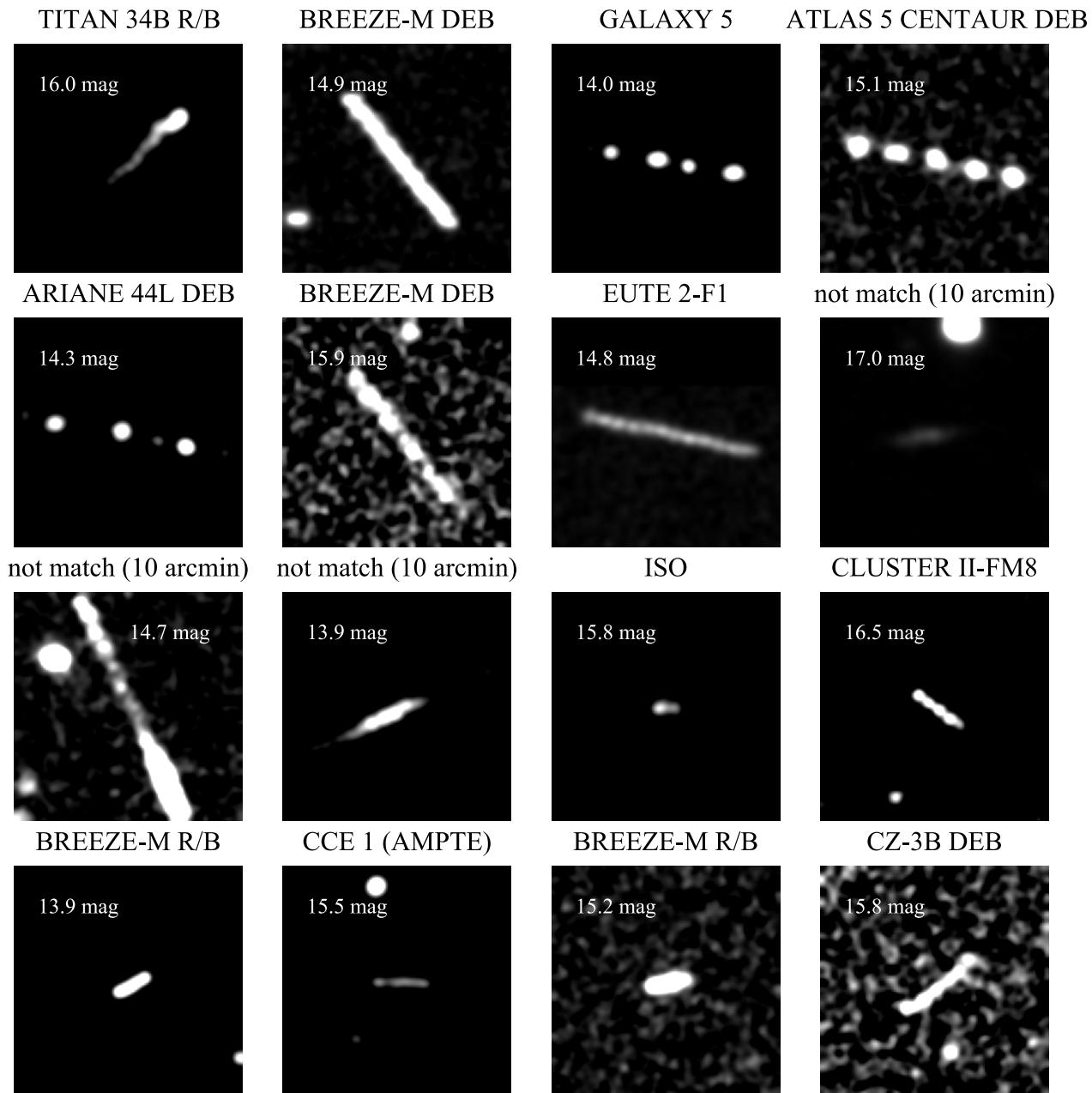


図 3.6 Tomo-e Gozen が発見した人工天体、不明天体。

12 または 18 フレームのデータフレームセットの各ピクセルの最大値を取得し NEO 周辺 100 ピクセル (2 分角) 四方を切り出した画像。各画像の中央に NEO が存在し画像の上部には天体名を記載した。カタログと照合、同定した天体はその対応天体名、not match (10 arcmin) は天体検出時刻に 10 分角以内にカタログ対応天体が存在しない天体。各画像の等級値はその天体の初フレームの等級値で、可視性を上げるためにスケールは天体毎に調整している。

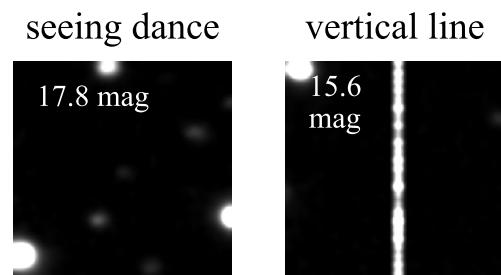


図 3.7 誤検出の例。

表記は図 3.6 と同様。seeing dance (左) は大気揺らぎに起因する誤検出。vertical line (右) はセンサーの不調による誤検出。

3.2.2 全天サーベイ観測データからの NEO の探索

2019年9月19日から2020年12月26日までの約1年4ヶ月間にNEOの追跡観測を行った日数は108日、NEO追跡観測の総露光回数は2752回であり、追跡観測を行った日の平均追跡観測回数は25露光である(図3.3)。NEOの追跡観測ではセンサー間の隙間を埋めるためにディザーリングを行うことを考慮すると、独立な追跡観測は平均1日約4回である。

NEO candidate follow up (2019/09/19 - 2020/12/26): 2752

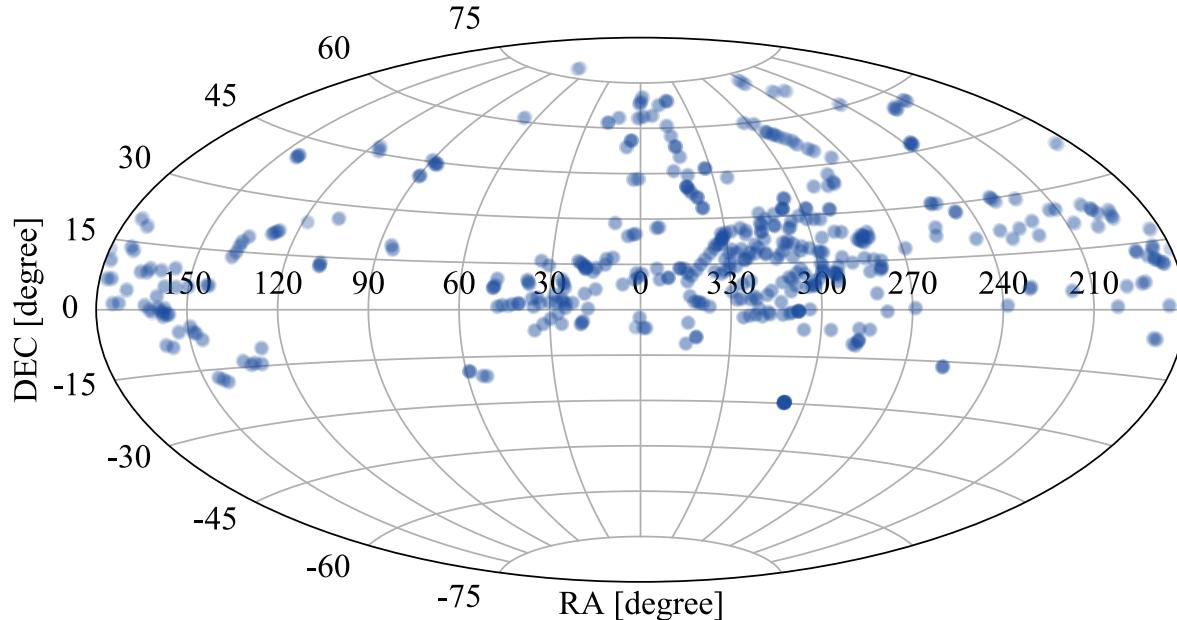


図3.8 追跡観測した NEO の天球上の分布。

NEO の追跡観測が行われた赤道座標での 2752 露光の位置。直線状に連なる点 ($RA=140^\circ$ 、 $DEC=15^\circ$ や $RA=290^\circ$ 、 $DEC=50^\circ$;付近) の多くは同一天体に対する追跡観測。

3.2.3 これまでの NEO 探索結果

高速移動天体検出システムを用いた NEO 探索の結果、これまでに NEO 候補天体 35 天体を MPC に投稿した。MPC に投稿された天体は天体暦などの情報が世界中の観測者に公開される。追跡観測が行われて軌道の精度が高まった NEO には小惑星としての仮符号が付与される。これまでに Tomo-e Gozen を用いて発見し投稿した天体のうち 19 天体に仮符号が付与された(図3.9、図3.10)³⁶。以下、仮符号を取得した NEO を Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO と呼ぶ。Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO の詳細を表3.2 にまとめた。図3.9 から運用期間において恒常に発見に成功していることがわかる。

³⁶ Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO のうち 2019 FA、2020 SU₁₀ は本格稼働前に発見している。

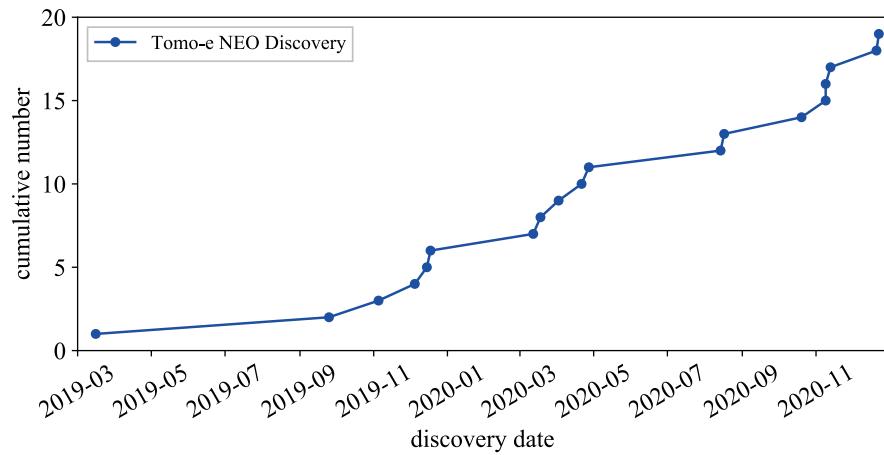


図 3.9 Tomo-e Gozen による NEO 累積発見数の推移。

2019 年 10 月の本格稼働から NEO を恒常的に発見している。Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO のうち 2019 FA、2020 SU₁₀ は本格稼働前に発見している。

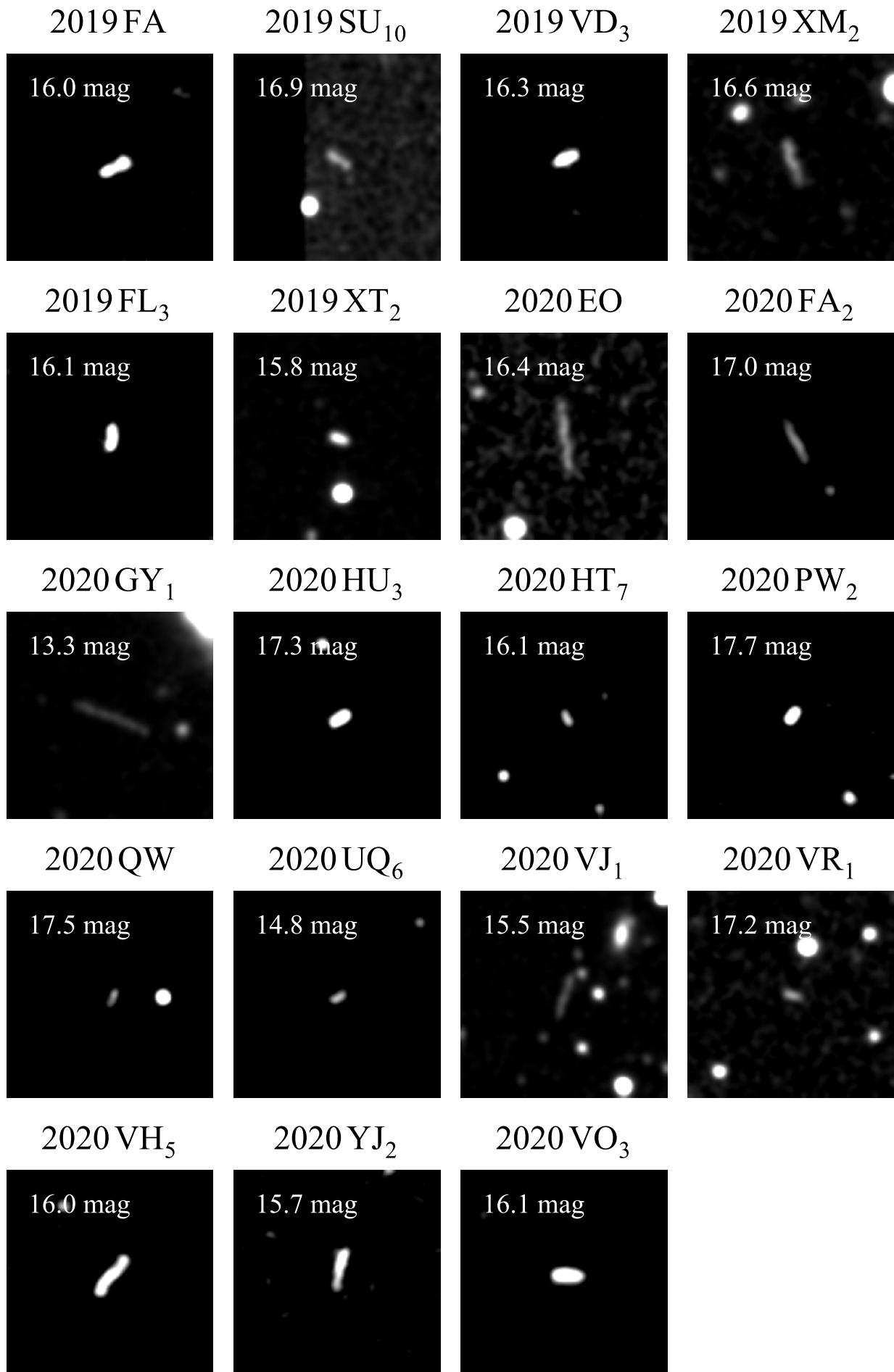


図 3.10 Tomo-e Gozen が発見した NEO
表記は図 3.6 と同様。等級は初検出時初フレームの値を記載している。

表 3.2 Tomo-e Gozen 発見小惑星諸元^a

Num.	Designation	NEOCP name	Disc. Date (UTC)	Mag. (mag)	Vel. ^b (arcsec/s)	H (mag)	D (m)	a (au)	e	i (°)	Ω (°)	ω (°)	M (°)	Epoch (UTC)
1	2019 FA	TMG0002	2019-03-16	16.0	2.30	28.7	6	1.34	0.30	1.10	174.25	320.38	38.75	2020-10-31
2	2019 SU ₁₀	TMG0004	2019-09-25	16.9	1.66	27.2	12	2.57	0.61	16.34	182.25	195.20	92.93	2020-10-31
3	2019 VD ₃	TMG0010	2019-11-05	16.3	1.75	25.9	21	2.45	0.60	1.68	227.46	152.98	96.85	2020-10-31
4	2019 XM ₂	TMG0013	2019-12-05	16.6	4.64	26.6	16	1.20	0.19	32.80	73.15	326.14	271.59	2020-10-31
5	2019 XT ₂	TMG0014	2019-12-08	16.1	4.62	26.4	17	0.93	0.16	13.47	255.58	56.15	110.59	2020-10-31
6	2019 XI ₃	TMG0016	2019-12-15	15.8	4.47	27.0	13	0.87	0.14	23.64	262.82	19.50	182.73	2020-10-31
7	2020 EO	TMG0018	2020-03-12	16.4	1.28	25.9	21	1.30	0.25	7.07	352.39	149.74	172.25	2020-10-31
8	2020 FA ₂	TMG0019	2020-03-18	17.0	1.20	27.5	10	1.22	0.22	11.05	358.48	223.05	137.31	2020-10-31
9	2020 GY ₁	TMG0021	2020-04-02	13.3	2.79	26.6	16	1.28	0.41	5.97	195.60	278.97	180.50	2020-10-31
10	2020 HU ₃	TMG0022	2020-04-21	17.3	1.23	26.0	21	1.43	0.30	24.13	211.03	342.70	120.42	2020-10-31
11	2020 HT ₇	TMG0023	2020-04-27	16.1	1.15	26.9	14	1.29	0.22	4.95	215.34	10.89	119.89	2020-10-31
12	2020 PW ₂	TMG0024	2020-08-14	17.7	2.91	28.8	6	1.48	0.37	13.08	321.66	316.97	61.89	2020-10-31
13	2020 QW	TMG0026	2020-08-17	17.5	1.10	25.3	28	1.56	0.41	7.84	149.36	126.55	57.67	2020-10-31
14	2020 UQ ₆	TMG0028	2020-10-20	14.8	1.19	22.7	94	2.34	0.76	4.53	37.22	266.73	13.53	2020-10-31
15	2020 VJ ₁	TMG0029	2020-11-09	15.5	4.42	26.7	15	1.35	0.31	32.58	47.12	316.17	23.36	2020-11-10
16	2020 VR ₁	TMG0030	2020-11-09	17.2	4.65	28.9	5	2.06	0.56	12.58	47.02	39.86	350.61	2020-11-11
17	2020 VH ₅	TMG0032	2020-11-13	16.0	4.40	29.2	5	1.94	0.49	4.83	51.33	13.66	359.75	2020-11-24
18	2020 YJ ₂	TMG0034	2020-12-21	15.7	4.77	27.3	11	1.60	0.53	1.72	85.85	292.30	23.03	2020-12-22
19	2020 YO ₃	TMG0035	2020-12-23	16.1	1.70	24.6	39	2.08	0.63	9.49	91.21	295.98	14.10	2020-12-25

^a Designation.:仮符号、NEOCP name: MPC での仮符号取得前の登録時の名前 (NEO Confirmation Page name)、Disc. Date:発見日、Mag.:初検出時の視等級 (G バンド)、Vel.:天球上移動速度 (arcsec/s)、H:絶対等級、D:直径 (幾何アルベド 0.168 を仮定して絶対等級から変換)、a:軌道半径、e:軌道離心率、
^b:軌道傾斜角、Ω:昇交点黄緯、ω:近日点黄緯、M:平均近点角、Epoch:元期。

表 3.2 から直径が小さく、地球に接近する、明るい NEO の発見に成功していることがわかる。以下では発見した NEO の絶対等級と軌道要素、地球との最接近距離、視等級を他の NEO と比較する。また 3 年後に再度地球に接近する 2020 YO₃ の天体暦を掲載する。最後に仮符号を取得できなかった投稿天体について取り扱う。

Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO の絶対等級と軌道要素

Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO の絶対等級と軌道要素の分布を図 3.11 に示す。直径の大きな天体の衝突破壊片である微小天体ほど存在数が多く (Granvik et al. 2018)、地球近傍を観測対象とする Tomo-e Gozen の観測ではそのような微小 NEO が多く発見されている。地球近傍を通過する天体であれば直径が大きな NEO も検出できるが、微小 NEO に比べ存在数が少ないため検出率は低い。直径が大きな NEO であれば地球からの距離が遠くても明るいため Tomo-e Gozen で検出することができるが、そのような天体は天球上の見かけの移動速度が小さく、高速移動天体検出システムでは検出されない (例えば、メインベルト最大の天体 (1) Ceres は Tomo-e Gozen の 2fps 観測でも十分に明るく検出可能だが、12 フレームのデータフレームセットではほとんど移動しないため恒星マスクによりマスクされ、移動天体として検出できない)。発見天体の軌道長半径、軌道離心率、軌道傾斜角は幅広い値を持つ。軌道要素は NEO がメインベルトから軌道進化すると考えた場合、軌道変化の時間情報に対応する。より発見数を増やすことで、偏りない NEO の軌道要素を用いて NEO の軌道進化に対する知見を得ることが期待できる。

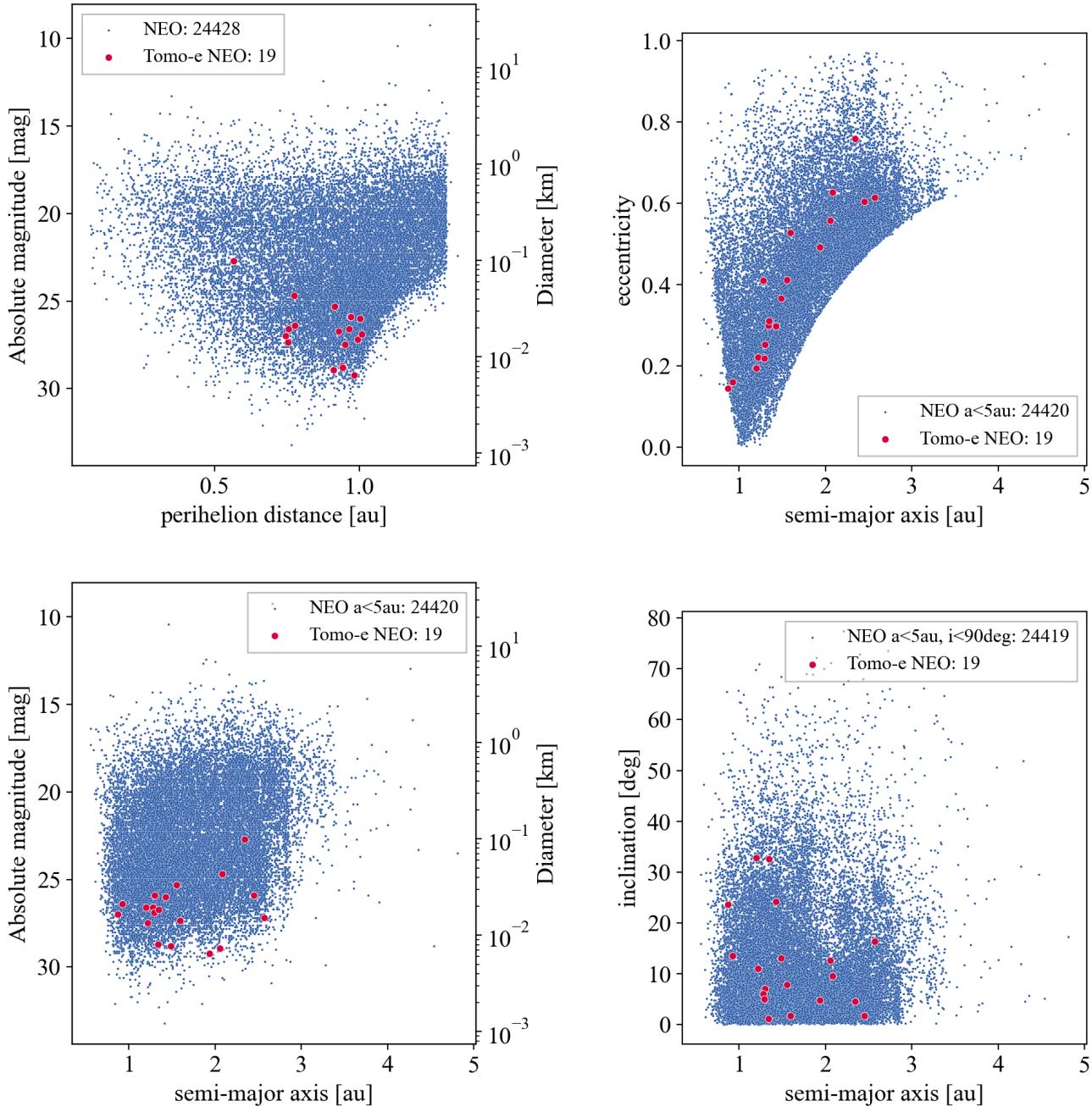


図 3.11 既知の NEO と Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO の絶対等級と軌道要素の分布 (2021 年 1 月 4 日時点)。

絶対等級から直径への変換は幾何アルベド 0.168 を仮定。左上:NEO の近日点距離と絶対等級の関係。右上:NEO の軌道長半径と軌道離心率の関係。ただし NEO のうち軌道長半径が大きな 8 天体は除外。右側に NEO が存在しないのは NEO の定義 ($q = a(1 - e) < 1.3$) を満たさないからである。左下:NEO の軌道長半径と絶対等級の関係。NEO のうち軌道長半径が大きな 8 天体を除外。右下:NEO の軌道長半径と軌道傾斜角の関係。NEO のうち軌道長半径または起動傾斜角が大きい 9 天体を除外。MPC が公開している軌道要素データベース (2021 年 1 月 4 日) を使用。

地球との接近距離

過去一年間に地球に接近した NEO の接近距離のヒストグラムを図 3.12 に示す。Tomo-e Gozen による観測では過去一年間に月距離以内を通過した天体の約 4.6 % を発見している。このような地球極近傍を通過する天体の発見はスペースガードの観点から非常に重要である。また接近時の強い潮汐力により NEO の自転状態や表面様相(組成)の変化が起こる可能性があり、惑星接近時に小天体に働く作用を明らかにする上でも重要な天体である。

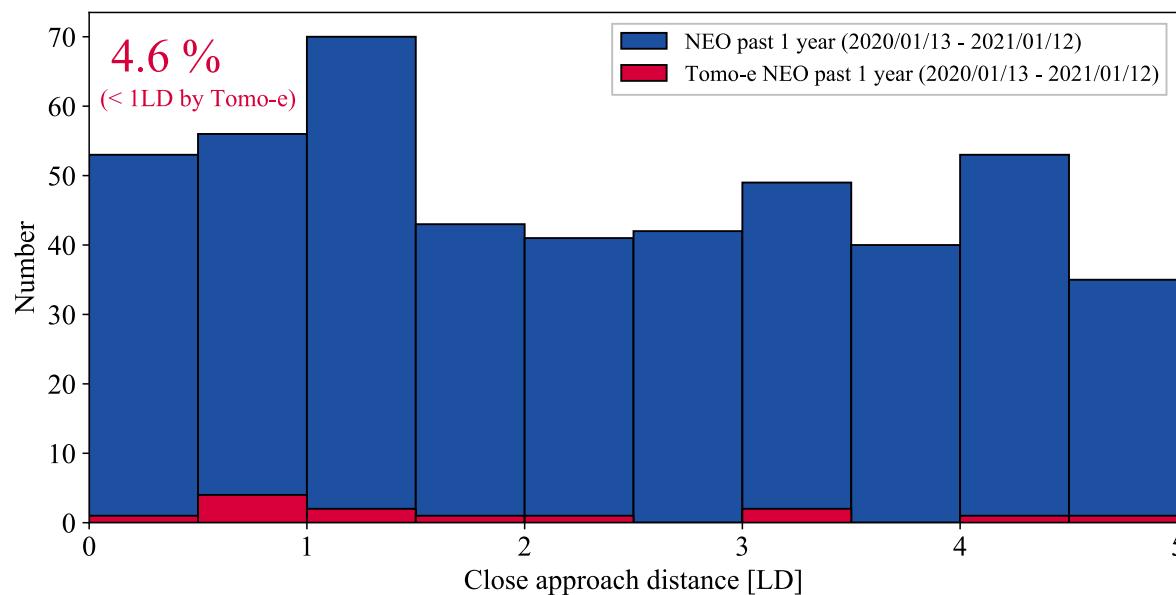


図 3.12 2020 年 1 月 13 日から 2021 年 1 月 12 日に地球に接近した NEO の接近距離のヒストグラム。1 月距離以内まで接近した天体において Tomo-e Gozen による発見天体の割合は 4.6% に及ぶ。JPL Center for Near Earth Object Studies(CNEOS) が公開している最接近距離の情報³⁷を使用。

視等級

MPC に登録された仮符号取得前 NEO の視等級と絶対等級の関係を図 3.13 に示す。Tomo-e Gozen が発見する NEO は他の仮符号取得前 NEO に比べ明るい。明るい天体は小中口径の望遠鏡でも観測ができる、追跡観測が行いやすい。観測時間が限られた NEO の観測において観測点、観測期間を増やすことは発見以降の軌道予測の精度を高めることにつながる。

³⁷ <https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/>

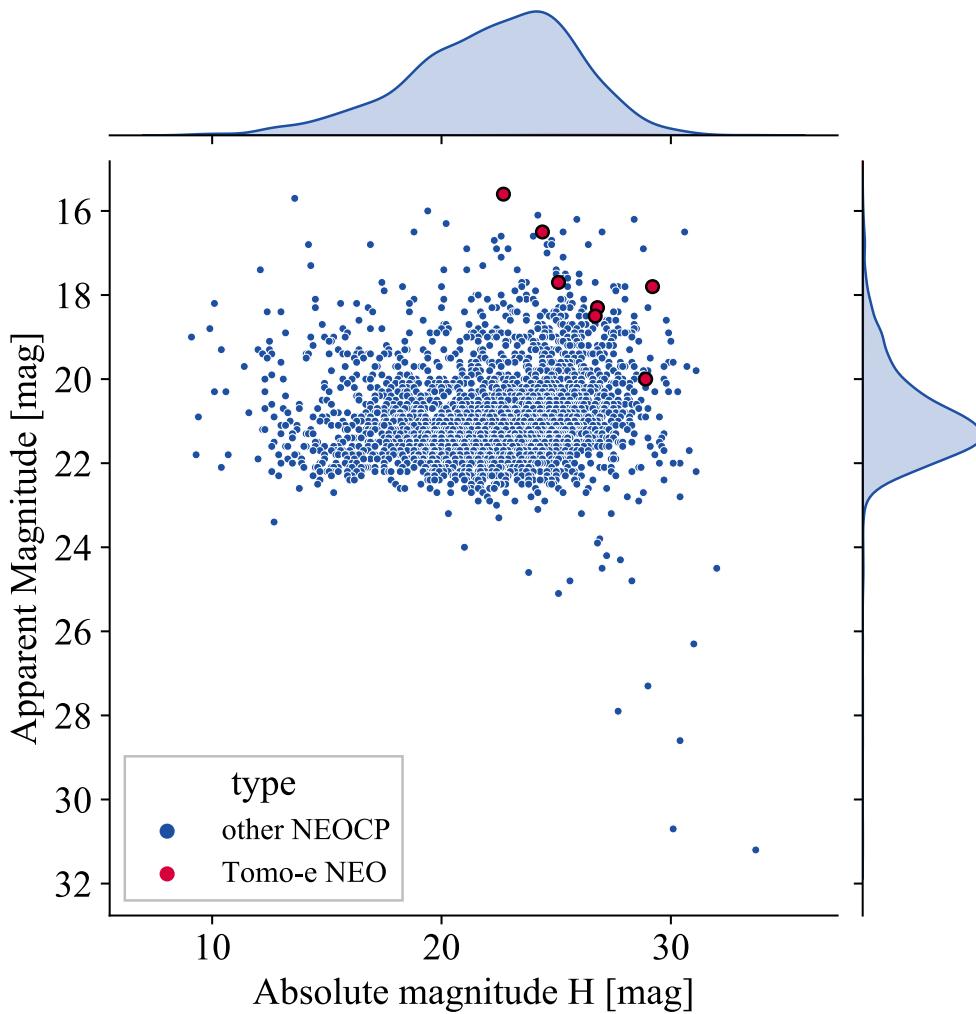


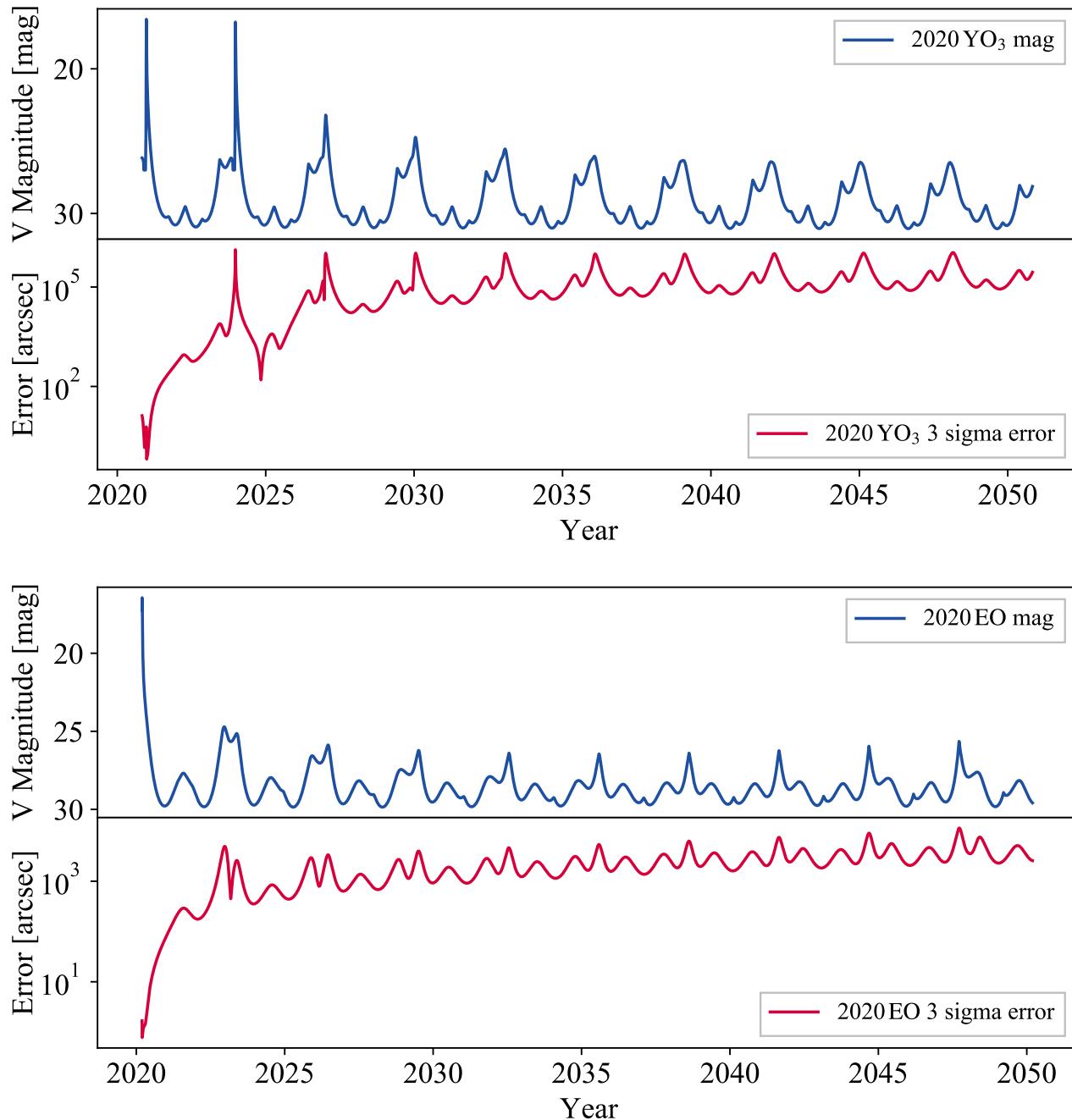
図 3.13 仮符号取得前 NEO の視等級と絶対等級の関係。

MPC の仮符号取得前 NEO の一覧 (2020 年 5 月 5 日から 2020 年 12 月 31 日) を使用³⁸。視等級は取得前天体に存在する間 (仮符号を取得する天体の多くは数日) の最も明るい値を使用。ただし MPC 投稿前、仮符号取得後の等級は反映されていないことに注意が必要。

再度地球に接近する天体

発見天体の一つである 2020 YO₃ は 3 年後に地球に再接近し、16 等台まで明るくなる (図 3.14 上)。これまでに発見した NEO の中で 5 年以内に 17 等よりも明るくなる天体は 2020 YO₃ のみである (図 3.14 下)。ただし軌道誤差は大きく、接近時までに再度観測が行わなければターゲット観測するのは難しい。世界中のサーベイ観測により接近以前に観測点を増やすことができれば、最接近時に詳細な分光や光度曲線を取得するための追観測の良い対象となる。

³⁸ https://minorplanetcenter.net/iau/NEO/toconfirm_tabular.html

図 3.14 2020 YO₃(上)、2020 EO(下)の等級と軌道予測誤差の推移。

ともに本研究で発見した天体である。多くの天体は 2020 EO と同じく、少なくとも数十年間は再度地球に接近することはないが、対して 2020 YO₃ は 3 年という近いうちに再度接近する。

仮符号が付与されなかった投稿天体

仮符号取得に至らなかった天体の諸元を表 3.3 にまとめた。これらは以下 4 つに分類できる。

1 つ目は投稿失敗または誤投稿天体である。表 3.3 では TMG0001、TMG0003、TMG0006 が該当する。避けるべき行為であり、MPC への投稿過程 (MPC 形式を含めた投稿メール作成) を自動化することで対処した。

2 つ目は人工天体である。表 3.3 で TMG0003、TMG0011、TMG0012、TMG0017、TMG0025、TMG0027 が該当する。TMG0012、TMG0017 は MPC が保持している人工天体カタログと照合、同定した天体である。NEO ビューアーで用いている人工天体カタログではカタログ化された人工天体を全て網羅できていないことを意味し、参照天体を追加することが必要である。他の 4 天体は人工天体カタログと照合、同定しないが小天体ではないと判断された天体である。TMG0025 の観測では実質 3 点 (最初と最後の検出の間隔は約 2.5 時間) の観測の後に地球周回軌道での軌道離心率が 1 より大きくなつたため、太陽周回軌道であると判断して MPC に投稿した。しかし後に確認したところ、3 点を用いた軌道計算結果の軌道誤差が数十秒と大きかったことがわかった。軌道計算結果の解釈には軌道誤差の影響も加味する必要がある。

3つ目は既知の仮符号取得前 NEO である。表 3.3 で TMG0020 と TMG0031 が該当する。NEO ビューアーを用いて仮符号取得前 NEO との照合、同定を行うことはできるが、発見直後の仮符号取得前 NEO は軌道不定性が大きく、うまく照合、同定できないことがある。既知の天体の投稿を避けるためには、新天体として投稿する前に既知の天体一覧を確認することが望ましい。

4つ目は十分な追跡観測が行われず仮符号が付与されなかった天体である。表 3.3 の TMG0006、TMG0007、TMG0009、TMG0015、TMG0033 が該当する。Tomo-e Gozen で検出した翌日にデータを確認して投稿した天体はここに該当する。このカテゴリーの天体を減らすには毎晩リアルタイムでデータを確認することが必要となる。

表 3.3 その他投稿天体

num.	NEOCP name	obs. date	Note
1	TMG0001	2018-11-15	投稿失敗
2	TMG0003	2019-04-22	not a minor planet
3	TMG0004	2019-09-25	誤投稿、TMG0005 として投稿
4	TMG0006	2019-10-16	not confirmed
5	TMG0007	2019-10-16	not confirmed
6	TMG0008	2019-11-01	誤投稿、TMG0009 として投稿
7	TMG0009	2019-11-01	not confirmed
8	TMG0011	2019-11-07	not a minor planet
9	TMG0012	2019-11-15	ARTSAT
10	TMG0015	2019-12-15	not confirmed
11	TMG0017	2020-02-07	ARTSAT
12	TMG0020	2020-03-22	NEOCP 天体 (2020 FM ₂)
13	TMG0025	2020-08-16	not a minor planet
14	TMG0027	2020-08-17	not a minor planet
15	TMG0031	2020-11-13	NEOCP 天体 (2020 VF ₄)
16	TMG0033	2020-12-20	not confirmed

3.3 今後

現在のシステムでは抽出天体の目視確認、レシピの投入と人の手を必要とする箇所がいくつか残っている。そのため 3.2.3 でみたように、翌日にデータを確認して NEO 候補天体を発見し投稿したため十分な追跡観測が行われず仮符号がつかないという事例が存在する。このような事態を避けるためにも今後は MPC の投稿までを自動化することが目標となる。そのためには検出システムのソフト面での開発に加え、適切な候補天体抽出条件の選択が重要である。現在は日によらず同一の条件（最新モデルでは 3.2.1 の抽出条件）を用いているが、天候の悪い日など検出天体の質が変化した時にうまく抽出できないことがわかっている。例えば薄雲が通過したすることで最初、最終フレームのどちらかで恒星の明るさが軽減されたデータでは恒星マスクがうまく生成されず多くの誤検出が生じる。全ての観測条件で十分な天体抽出ができなければ投稿の自動化はできない。悪天候時にも有効なロバストな機械学習モデルの作成が必要である。

第4章

微小 NEO の高時間分解光度曲線観測

自らが開発した高速移動天体検出システムを用いることで、これまで観測が困難であった地球近傍を通過する直径 100 m 以下の微小 NEO を多数発見した。これらは他のサーベイ観測で発見される微小 NEO に比べて格段に明るく、追観測により他の物理量を得るために好観測対象である。微小 NEO の高速自転の検出を目的とした 2 fps 高時間分解光度曲線観測を行った。

4.1 観測戦略

開発した高速移動天体検出システムを用いて発見する微小 NEO (Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO) を主な観測対象として高時間分解光度曲線観測を行った。観測装置は木曾 105 cm シュミット望遠鏡と高速カメラ Tomo-e Gozen を用いた。観測対象は予測視等級が 17 等以下かつ絶対等級 H が 22.5 等 (直径約 100 m) 以下の NEO とした。

Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO 以外に、MPC のホームページ³⁹ を参照し条件を満たす NEO を観測対象とした。この中には過去に発見されて数年ぶりに地球に接近する NEO、仮符号取得後間もない NEO、仮符号取得前 NEO が含まれる。発見時の観測以降数年間観測されていない天体や発見直後の観測点が少ない天体のうち軌道不定性が大きい (分角以上) 天体は観測対象から除外した。

観測した天体の内訳を表 4.1 に示す。なお本研究で観測した小惑星候補天体は全て観測後に仮符号を取得しているため仮符号取得後間もない天体に含めた。表 4.1 から観測天体の 30% 以上は Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO であることがわかる。これら微小 NEO の観測可能時間は短く、迅速な追観測が必要となる。例として本研究の観測対象の一つである小惑星 2020 VH₅ の観測日前後の予測天体暦を図示した (図 4.1)。Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測での検出 (灰色線) 後に軌道決定のための追跡観測を行い、約 3 時間で小惑星候補天体として報告 (黒色線) した天体である。その後に急激に暗くなつたため、十分明るい時期 (16 等台) の追観測は発見後数時間しか行うことができない。

表 4.1 高時間分解光度曲線観測対象天体の分類

天体	観測数	天体例	備考
Tomo-e Gozen 仮符号取得 NEO	11	2020 EO	前章を用いて自ら発見
過去に発見され数年ぶりに接近する天体	1	2017 WJ ₁₆	軌道不定性が大きいことがある
仮符号取得後間もない天体	17	2020 FL ₂	接近前に発見された天体は観測が容易

³⁹ <https://minorplanetcenter.net/>

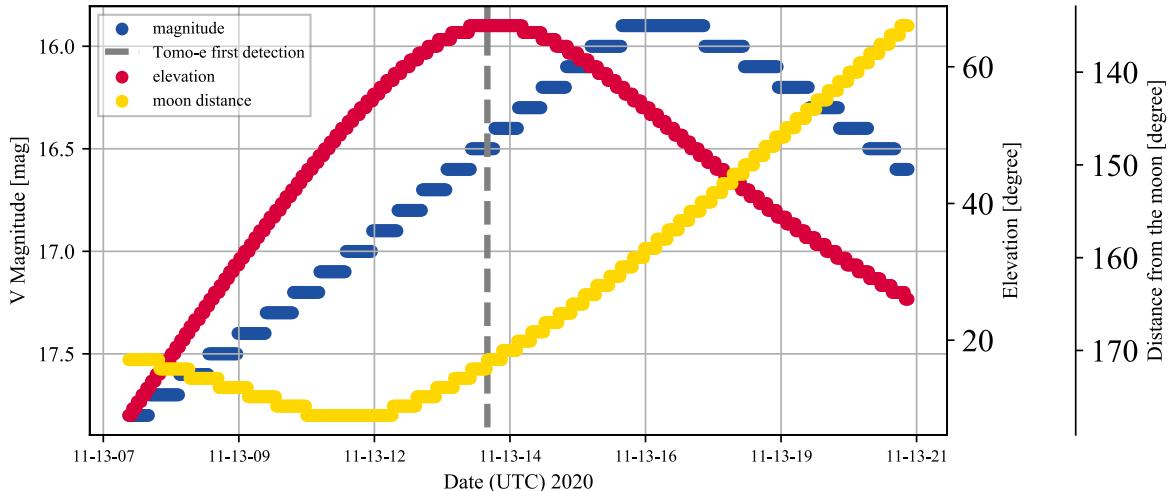


図 4.1 Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データから発見し、高時間分解光度曲線観測を行った 2020 VH₅ の天体暦。

青色線、赤色線、黄色線はそれぞれ木曾から見た 2020 VH₅ の視等級、高度、月距離、を表し、灰色破線は Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測での初検出時刻。発見直後に明るさの極大を迎え、追観測の好機は数時間しかない。

典型的な観測時間は絶対等級 H が 22.5 等以下かつ自転周期が求まっている小惑星の典型的な自転周期⁴⁰に比べ長い 20 分間と設定した。本光度曲線観測では 1 フレームの露光時間を 0.5 秒とし、120 フレーム計 1 分間を一つのデータフレームセットとしてデータを取得した。本稿ではこの 1 分間を 1 ブロックと定義する(表 4.2、 ΔT)。Tomo-e Gozen 全 84 枚のセンサーのうち 1 枚のセンサに天体を導入をし、高速移動天体に対しては必要に応じて視野移動を行った。ブロック内での天体追尾(非恒星追尾)は行なっていない。図 4.1 は 2020 HS₇ の 1 ブロックに対し最大値処理⁴¹を施した画像である。画像中央下部に存在する線が 2020 HS₇ の軌跡である。

⁴⁰ LCDB 2020 年 10 月 22 日版に存在する絶対等級 22.5 以下の天体の自転周期の中央値は約 10 分。

⁴¹ 時間軸方向で最大の値を各ピクセルの値とする処理。

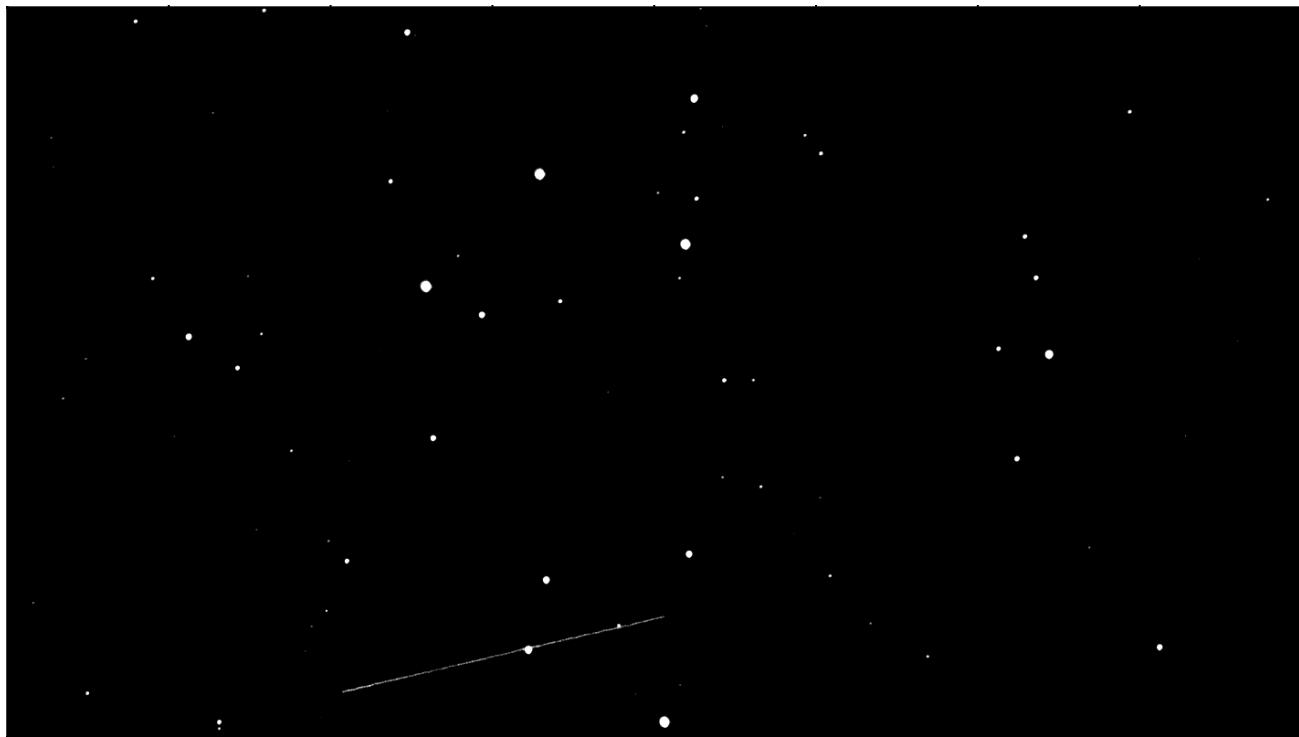


図4.2 2020 HS₇ 1分間のデータフレームセットの最大値処理後画像。

39.7' × 22.4' の視野を持つ Tomo-e Gozen の一つのセンサーを表す。画面上が北。 $(x, y) = (1000, 200)$ から $(x, y) = (1500, 100)$ 付近の線が 2020 HS₇ の軌跡である。広い視野を持つ Tomo-e Gozen の 1 センサーを数分間で横断する高速移動天体のため移動方向に合わせた視野移動を行いつつ光度曲線を取得した。

4.2 観測諸元

本研究では新たに 29 天体の微小 NEO に対し高時間分解光度曲線観測を行った。観測期間は 2020 年 3 月–12 月の約 10 ヶ月間である。2018 年、2019 年に Tomo-e Gozen を用いて観測した 3 天体の微小 NEO を解析に加え、後の議論には Kojima (2019) の 2 天体の微小 NEO の観測結果も用いる。本研究で取り扱う NEO は計 34 天体である (表 4.2)。

表 4.2 高時間分解光度曲線観測を行った微小 NEO の観測諸元と解析結果^a

Num.	Object	Date (UTC)	Seeing ^b (pixel)	σ_{sky} (ADU)	Mag. (mag)	Vel. (arcsec/s)	α ($^{\circ}$)	Elev. (au)	Δ ($^{\circ}$)	H (mag)	D (m)	t_{exp} (s)	ΔT (min)	N_{det}	P (s)	Δm (mag)	Observer
1	2020 EO	2020-03-13T10:47:05	3.23	26.32	16.3	1.10	29.6	48	0.0066	25.9	20	0.5	9	1003	155.47	0.36	J.Beniyama
2	2020 FA ₂	2020-03-18T16:53:30	4.21	19.84	17.4	1.27	22.5	51	0.0057	27.5	9	0.5	15	1800	150.64	0.27	J.Beniyama
3	2020 FL ₂	2020-03-18T18:31:54	3.60	23.03	17.2	1.37	21.5	29	0.0055	27.5	9	0.5	29	3357	150.84	0.21	J.Beniyama
4	2020 GY ₁	2020-04-05T17:16:28	5.03	86.33	14.9	1.32	11.7	43	0.0035	26.1	18	0.5	14	1613	312.81	0.06	J.Beniyama
5	2020 HU ₃	2020-04-21T16:23:06	3.73	21.75	17.6	1.33	32.0	70	0.0011	26.0	19	0.5	6	720	>360	J.Beniyama	
6	2020 HT ₇	2020-04-27T16:40:37	3.41	19.68	16.9	1.11	39.5	73	0.0049	26.9	12	0.5	20	1735	45.72	0.32	J.Beniyama
7	2020 HS ₇	2020-04-28T14:36:30	3.41	22.58	16.0	3.01	19.2	50	0.0015	29.1	4	0.5	14	1465	>840	J.Beniyama	
		2020-04-28T16:24:40	4.22	24.80	15.1	8.40	25.7	30	0.00091	29.1	4	0.5	10	981			J.Beniyama
8	2020 HK ₃	2020-04-30T13:41:54	4.01	34.59	17.2	2.21	69.2	71	0.0013	24.2	43	0.5	13	1513	>780		J.Beniyama
9	2020 PW ₂	2020-08-14T16:46:48	3.30	22.88	17.8	2.02	24.8	43	0.0037	28.8	5	0.5	24	1809	>1500		J.Beniyama
10	2020 QW	2020-08-17T16:10:51	3.50	22.18	18.3	1.13	73.4	36	0.012	25.3	26	0.5	20	1890	332.32	0.41	J.Beniyama
		2020-08-18T12:46:51	3.31	25.24	17.6	1.14	49.8	83	0.012	25.3	26	0.5	20	994	334.88	0.67	J.Beniyama
11	2020 PY ₂	2020-08-20T12:50:56	3.52	24.27	15.7	2.38	12.1	41	0.0049	26.5	15	0.5	23	2312	19.84	0.28	J.Beniyama
12	2020 TS ₁	2020-10-12T10:13:04	3.37	23.41	16.7	3.73	37.4	58	0.0017	29.1	4	0.5	9	849	>540		J.Beniyama
13	2020 TE ₆	2020-10-18T10:30:50	3.67	27.08	16.8	3.30	62.9	42	0.0027	27.4	10	0.5	19	1872	tumbler cand.		J.Beniyama
14	2020 TD ₈	2020-10-26T16:59:35	3.46	22.36	17.3	1.63	48.3	73	0.0050	27.0	12	0.5	19	1296	29.49	0.9	J.Beniyama
15	2020 UQ ₆	2020-10-28T17:39:35	2.99	27.88	16.0	0.38	16.0	58	0.030	22.7	86	0.5	17	1908	163.00	0.68	J.Beniyama
16	2020 UN ₃	2020-11-04T13:01:31	2.96	50.79	17.5	0.22	3.2	64	0.039	24.2	39	0.5	20	634	>1200		J.Beniyama
17	2020 VJ ₁	2020-11-09T15:23:30	4.61	23.16	16.6	3.33	34.2	58	0.0049	26.7	13	0.5	20	1878	242.01	0.45	J.Beniyama
18	2020 VR ₁	2020-11-09T15:44:37	4.07	26.86	17.5	6.44	36.2	56	0.0026	28.9	5	0.5	21	1316	>1200		J.Beniyama
19	2020 VF ₄	2020-11-13T16:56:23	3.55	21.96	17.0	2.00	18.5	40	0.0078	26.6	14	0.5	20	634	>1200		J.Beniyama
20	2020 VH ₅	2020-11-13T17:33:04	3.76	22.44	15.9	5.68	7.8	49	0.0017	29.2	4	0.5	21	2344	158.75	0.14	J.Beniyama
21	2017 WJ ₁₆	2020-11-23T17:42:48	5.20	21.27	16.7	0.50	37.1	76	0.014	24.5	37	0.5	19	1102	tumbler cand.		J.Beniyama
		2020-11-25T13:30:59	3.20	38.49	16.7	0.48	34.9	65	0.014	24.5	37	0.5	60	5540			J.Beniyama
22	2020 SO	2020-11-30T16:51:41	5.38	98.99	14.7	1.63	24.5	82	0.00089	28.9	5	0.5	15	1447	9.39	2.59	J.Beniyama
23	2020 VZ ₆	2020-12-02T14:07:02	2.69	63.58	14.7	1.14	31.0	50	0.0048	25.0	30	0.5	14	1638	344.90	0.6	J.Beniyama
24	2020 XH	2020-12-05T16:35:39	4.03	41.16	16.9	0.64	24.2	61	0.016	24.7	34	0.5	20	904	>1200		J.Beniyama
25	2020 XH ₁	2020-12-08T12:56:09	4.36	22.45	16.6	0.40	30.9	47	0.030	22.8	82	0.5	20	2208	>1200		J.Beniyama
26	2020 XQ ₂	2020-12-09T15:00:39	4.67	22.05	16.6	0.79	15.0	81	0.039	22.8	82	0.5	20	1003	>1200		J.Beniyama
27	2020 XX ₃	2020-12-17T14:09:52	4.15	22.23	16.4	1.02	38.0	57	0.020	28.5	6	0.5	19	2026	136.35	0.88	J.Beniyama
28	2020 XY ₄	2020-12-20T11:10:51	4.07	28.03	17.4	2.11	40.3	46	0.0059	27.0	12	0.5	20	2243	320.62	0.18	J.Beniyama
29	2020 YJ ₂	2020-12-21T14:09:09	4.00	23.43	16.7	2.91	35.7	69	0.0039	27.4	10	0.5	20 + α	1440	1243.35	0.59	J.Beniyama
A1 ^d	2018 JX	2018-05-15T12:53:43	3.48	31.85	14.1	1.38	3.1	31	0.011	23.4	62	0.5	2	187	>60		R.Ohsawa & Y.Kojima
A2 ^d	2018 UD ₃	2018-11-01T13:47:46	3.30	29.08	17.1	0.98	50.3	25	0.0064	26.2	17	0.5	36.5	4239	59.53	0.42	R.Ohsawa & Y.Kojima
A3 ^d	2019 BE ₅	2019-02-01T09:58:47	5.08	25.74	17.5	0.71	39.1	56	0.015	25.1	28	0.5	114	7299	11.98	0.92	R.Ohsawa & Y.Kojima
K1 ^e	2010 WC ₉	2018-05-15T12:19:01	3.65	37.38	12.4	2.28	28.0	24	0.0033	23.5	83	0.5	10	1270	668.9	1.1	R.Ohsawa & Y.Kojima
K2 ^e	2018 LV ₃	2018-06-13T15:18:08	3.47	82.61	17.9	0.37	33.6	42	0.010	26.5	21	0.5	100	862	415.99	0.43	R.Ohsawa & Y.Kojima

^a Object:天体名、Date:観測日時(UTC)、Seeing:星像の典型的なFWHM (pixel)、 σ_{sky} :典型的な背景ノイズ (ADU)、Mag.:MPCによる予測等級 (Vバンド)、Vel.:天球上移動速度 (arcsec/s)、 α :天体位相角 ($^{\circ}$)、Elev.:天体高度 ($^{\circ}$)、 Δ :地心距離 (au)、H:絶対等級、D:直徑 (幾何アルベド 0.2 を仮定)、 t_{exp} :積分時間 (秒)、 ΔT :観測プロック数、 N_{det} :観測点数、 ΔT :自転周期、 Δm :等級振幅 (mag)、Observer:観測者。

^b 観測データ中の明るい恒星を用いて測定した値。Tomo-e Gozen のピクセルスケールは 1.2 arcsec/pixel。

^c 全天サーベイ観測の観測点を含む。

^d 過去の Tomo-e Gozen 観測データを解析結果を利用。

^e Kojima (2019) の解析結果を利用。

4.3 解析

解析には Tomo-e Gozen の自動解析パイプラインを用いて一時処理が行われたデータを用いた。自動解析パイプラインで行われる処理はバイアス処理、ダーク引き、フラット補正、WCS 調整である。つまり取り扱うデータは一時処理が行われたフィルタなし単色データフレームセット(3次元 fits ファイル)となる。このデータフレームセットから小惑星の物理量を取得するため測光解析と周期解析を行った⁴²。等級への変換は Gaia Data Release2(Gaia Collaboration et al. 2018)として公開されている Gaia 衛星が測定した等級(以下 G 等級)を用いた⁴³。典型的に 20 分の観測時間内における NEO の位相角、地心距離(地球と天体間の距離)の変化は十分に小さいとし、補正是行っていない⁴⁴。

4.3.1 測光解析

測光解析は以下の手順で行った。

1. 移動天体の軌道決定

視野内を移動する小惑星の測光を行うには、フレームごとに測光位置を移動させる必要がある。データフレームセット中の複数枚の検出点を目視で確認し線形補完することで小惑星の測光位置を決定した。

2. 参照星を用いた等級原点の決定

観測対象となる NEO と同じフレームに存在する G 等級 12-15 等の複数の星を用いて等級原点を決定した。ただし星が多く存在する領域では明るい天体のみを用いて等級原点を求めた。

3. NEO の測光

Gaia カタログを用いることで、視野内の等級閾値以下の天体に対する恒星マスクを作成した。マスク半径は各フレームにおける典型的な PSF の FWHM を用いた。この恒星マスクと小惑星の測光位置の情報を用いて各フレームでの小惑星の測光を行った。測光半径は星像マスクと同様に典型的な PSF の FWHM をもとにその定数倍を採用した。また開口内にマスクされたピクセルが含まれるデータは除外した。等級原点(C)、小惑星の開口内総カウント(F_{neo})を用いて以下の式で小惑星の等級 m_{neo} を推定した。

$$m_{\text{neo}} = C - 2.5 \log_{10} F_{\text{neo}} \quad (4.1)$$

また測光誤差 σ_{neo} は

$$\sigma_{\text{neo}}^2 = \sum_i \sigma_i^2 + \frac{F_{\text{neo}}}{g}, \quad (4.2)$$

で計算した。ただし右辺第一項の和は測光半径のピクセルについてとることを表し、第一項、第二項それぞれ背景ノイズ、天体のポアソンノイズに対応する。 g はコンバージョンファクター(ADU/e⁻)である。背景ノイズは各フレームの全体で測定したカウントの標準偏差をフレーム内の測光値の誤差計算に用いた。複数のデータフレームセットにおける時系列データをつなげることで NEO の光度曲線を取得する。

4.3.2 周期解析

本研究の観測対象の多くは高速移動天体であり、天体追尾のための視野移動を行う間は観測点が欠如する。また恒星付近を通過するデータも解析に使用せず観測点が欠如する。すなわち得られる明るさ情報のサンプリング間隔は不均一となる。このような特徴をもつ測光結果から自転周期を推定するために Lomb-Scargle 法(以下 LS 法)を用いた(Lomb 1976; Scargle 1982; VanderPlas 2018)。LS 法は正弦波を仮定して最小二乗フィッティング

⁴² 詳細は C、D を参照のこと。

⁴³ フィルターをもたず可視域に幅広い感度を持つ Tomo-e Gozen と Gaia 衛星の広域バンドフィルターの感度特性が等しいと仮定していることに対応。厳密にはこの両者には差がある。以降の議論では等級振幅と自転周期が重要であり、等級の絶対値は重要ではない。観測天体の明るさの指標として光度曲線の縦軸を G 等級で表した。

⁴⁴ 2020 EO の観測(2020-03-13T10:47-55)において位相角は 29.6286–29.5644°、地心距離は 0.00662297171562–0.006622886512355 au と変化。それぞれ 0.1°、0.1% 以下の変動である。

グを行い時系列データの周期を推定する手法である。推定周期を用いて光度曲線を折りたたむことで小惑星の等級振幅と自転周期の推定が可能となる。本稿では折りたたんだ光度曲線を折りたたみ光度曲線と呼ぶ。基本的にフィッティング曲線の項数(次数)は2として解析を行ったが、局所的な構造を持ちフィッティング曲線が明らかにフィットしない天体では項数を5とした。自転周期の見積もりにはおおよそ影響しないが、等級振幅の推定値が変化する。フィッティングの項数を大きくすることでより細かな構造を推定することができるが全ての周波数で適合度を上げることになる。求めた周期が適切な周期であるか判断する上で細心の注意が必要である。

周期解析結果を元に、観測天体を1)自転周期を推定、2)自転周期の下限値を推定、の2つに分類した。2)の天体はi)軸比が小さい(形状が球に近い)、ii)自転周期が露光時間より十分に短い、iii)自転周期が露光時間よりも十分に長い、iiii)測光誤差が大きい等の原因が考えられる。観測開始から観測終了までの時間を自転周期の下限値とした。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。タンブラーは通常の自転に加え、自転軸が歳差運動している天体であるPaolicchi et al. (2002)。一般にタンブラーの光度曲線は自転周期と歳差周期の複合により複雑になる。それらが近似的に整数比となる場合、その複合周期で折りたたむことにより自転周期を推定することができる(Urakawa et al. 2019)。複合周期が観測時間に収まらない場合は明らかな等級変動があるが両周期が定まらない。ただし一方の周期が周波数のピークとなり自転周期を推定できることがあり、この場合には折りたたみ光度曲線が広がりをもつことになる。つまりタンブラーには2つの周期が求まる、1つの周期のみ求まる、周期が一つも求まらないという3つの可能性が考えられる。

実際的な手順としてはまず測光解析データに対してLS法を用いていくつかの候補(5-10個)となる自転周期を求めた。それぞれの自転周期で折りたたんだ光度曲線から適切な自転周期であるかどうかの判断を行った。タンブラーについては折りたたみ曲線を位相毎に分解して確認することで判断を行った。

4.4 結果

4.4.1 自転周期

解析の結果、20天体の自転周期を推定し、12天体については自転周期の下限値を求めた(図4.3)⁴⁵。また2020 EO、2017 WJ₁₆、2020 TE₆の3天体をタンブラー候補天体と判断した。2020 EOは一方の周期が推定できたが、残り2天体は自転周期不定である。本稿では途中に薄雲が通過した場合など悪天候と思われるデータはブロックごと用いず除外した。そのような天体は観測ブロックの典型的時間である約1分間の倍数の時間のデータが欠如した光度曲線となる(E.19 2020 HT₇の光度曲線など)。

以下に注意すべき天体をまとめる。

- 2020 HS₇

2020年4月27日にPan-STARRS2により発見されたNEOである。観測開始時の移動速度が3arcsec/sと大きく、さらにその後地球に近づき、観測時間中に徐々に明るくなった(E.19 2020 HS₇ 2)。このような天体に対しては地球距離の補正が必要となるが、より長い光度曲線(E.18 2020 HS₇ 1)の解析において周期性が見られないことから自転周期不定と判断した。

- 2020 QW

2020年8月17日にTomo-e Gozenにより発見されたNEOである。発見日に取得したデータは視野内に多くの星が存在し、推定自転周期の折りたたみ曲線から正しい自転周期であるかの判別がつかなかった。翌日に行った追加観測の周期解析結果も同様であるが、両日で独立に求めた推定周期が整合的であることから正しい自転周期であると判断した。議論では一日目のデータから求めた自転周期を用いた。

- 2020 SO

2020年9月17日にPan-STARRS1により発見されたNEOである。発見後に一時的に地球重力に束縛された天体であり、分光観測によるスペクトルから人工天体である可能性が高いことがわかっている(Weiner et al. 2020)。よって本稿では後の議論に含めない。

- 2020 XH₁

2020年12月6日にATLASにより発見されたNEOである。他の自転周期が定まらないとした天体は平

⁴⁵ 全天体の詳細な結果はE、Fを参照のこと。

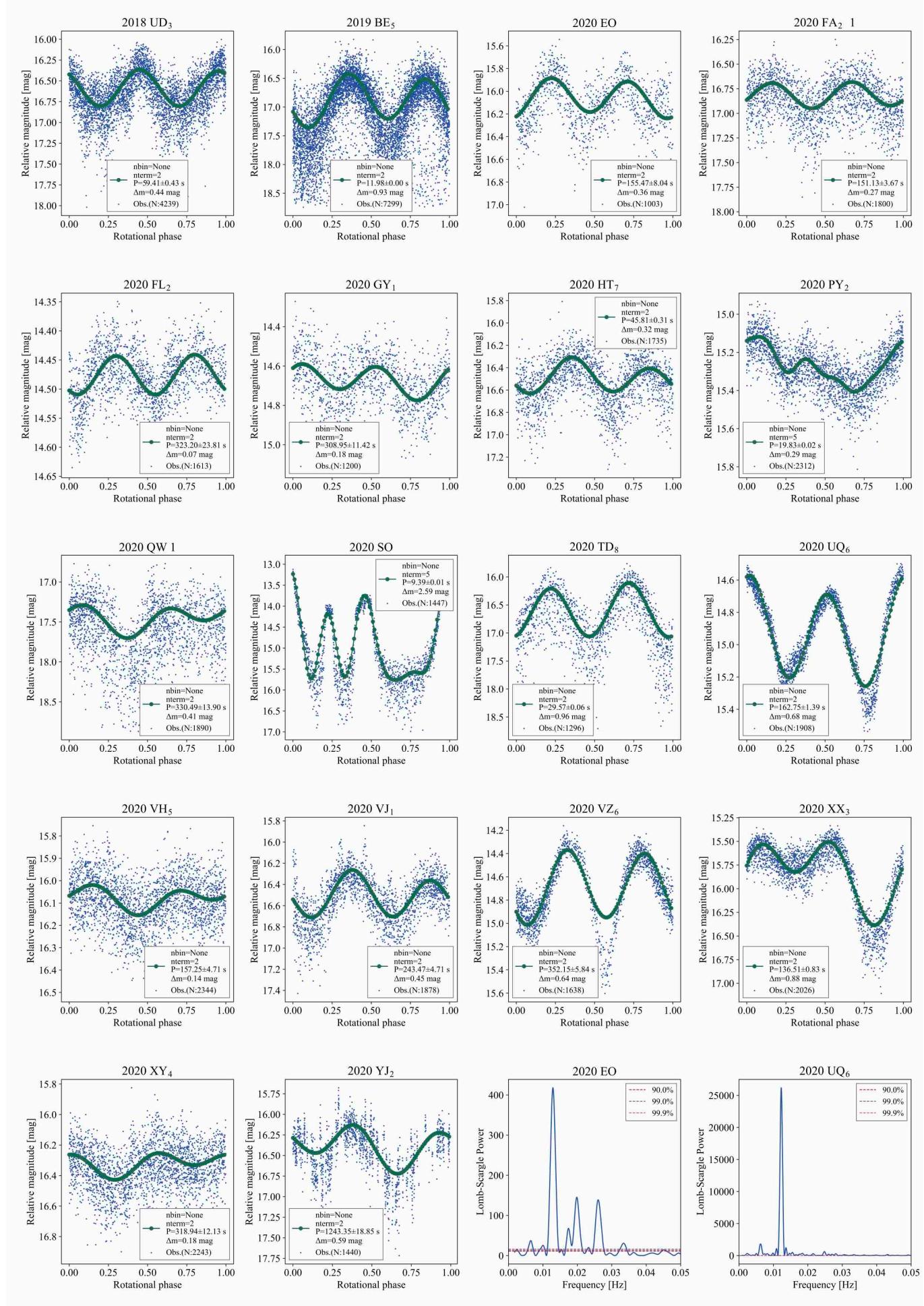


図4.3 自転周期が推定できた天体の折りたたみ光度曲線とLS法ピリオドグラム。

青色線、緑色線はそれぞれ推定した自転周期で折りたたみ光度曲線とフィッティング曲線。右下の二つは2020 EOと2020 UQ₆のLomb-Scargle periodogram。タンブラー候補天体である2020 EOは倍音でない位置にも周波数のピークをもつ。

坦な光度曲線を持つのに対し、観測時間内で明らかな増光傾向がある（付録光度曲線 2020 XH₁）。このような小惑星であれば等級振幅についても制限をつけることができる。この天体の場合約 0.5 等よりも大きいことがわかる。

- 2020 YJ₂

2020 年 12 月 21 日に Tomo-e Gozen により発見された NEO である。20 分間の高時間分解光度曲線観測からは高度の増減が見られるが自転周期が定まらなかった。光度曲線前後の Tomo-e Gozen サーベイ観測のデータ点を追加して周期解析を行い自転周期を求めた。

- 2019 BE₅

2019 年 1 月 31 日に ZTF により発見された NEO である。発見時の観測データから高速自転であることが示唆されており、共同研究者の連絡を受け観測することを決定した天体である。そのため他の天体に比べて長い約二時間の観測を行っている。

- 2018 JX

2018 年 5 月 7 日に CSS により発見された NEO である。他の観測により自転周期が約 207 秒であると報告されている（Hayes-Gehrke et al. 2018）。本稿では観測時間が少なく下限値を推定したとして議論を進める。

4.4.2 直径-自転周期関係

多数の小惑星の光度曲線が登録されている LCDB の NEO 783 天体に本研究の天体を加え直径-自転周期関係をプロットした（図 4.4）。これまで観測数が少ない高速自転する微小 NEO の自転周期の推定に成功していることがわかる。

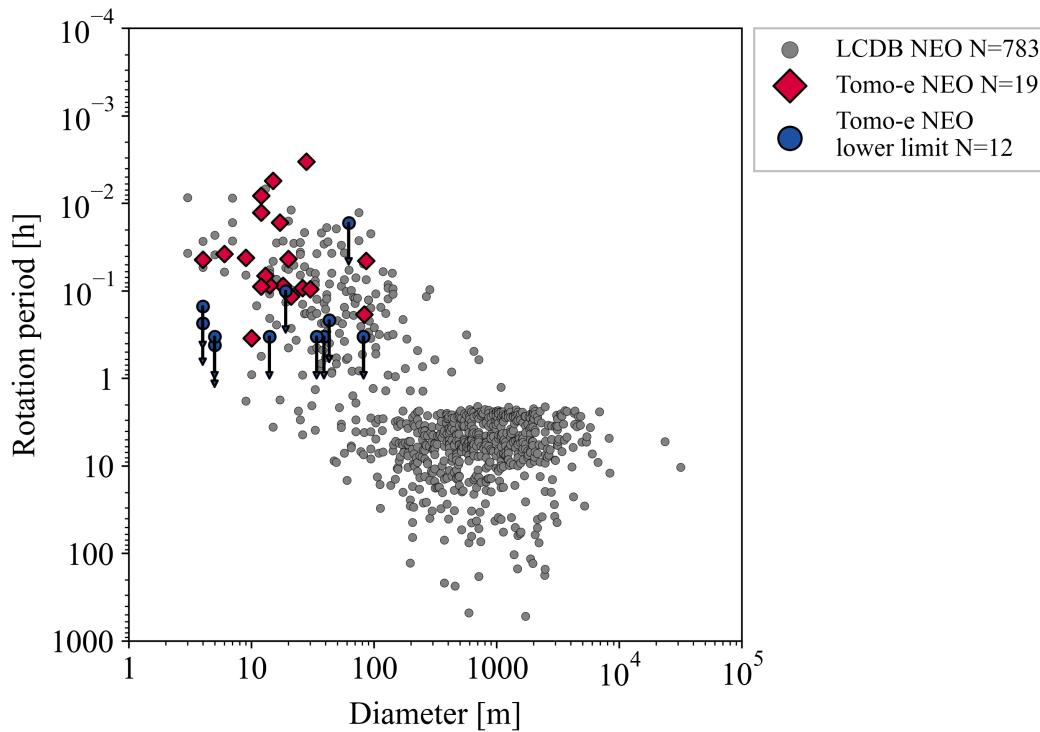


図 4.4 本研究と LCDB の NEO の直径-自転周期関係。

LCDB データの中で精度よく自転周期が求められている（LCDB の不定性指標 $U = 3, 3-$ ）783 天体を灰色点でプロットした。本研究で取り扱う天体のうち自転周期を推定した天体は赤色菱形点、自転周期の下限値を推定した天体は青色点に矢印を加えてプロットした。矢印の長さは一定で意味をもたない。

小惑星の光度曲線を多数取得している他の観測計画との比較を表 4.3、図 4.5 に示す。比較対象は 2013 から 2017 年まで 11 台の望遠鏡を用いて観測を行った EURONEAR (EUROpean Near Earth Asteroids Research, Vaduvescu et al. 2017)、2013 年から 2020 年まで 7 台の望遠鏡を用いて観測をおこなった MANOS (Mission Accessible Near-Earth Objects Survey, Thirouin et al. 2016, 2018) とした。ともに NEO を観測対象とする巨大計画である。

観測数において、本研究は複数望遠鏡による多年計画の MANOS、EURONEAR に及ばない。しかし本研究は望遠鏡一台を用いて一年で約 30 天体の観測を行っている。望遠鏡一台一年間あたりに換算した場合 EURONEAR と MANOS の観測数はそれぞれ 2.3、8.6 天体であり、本研究の観測数に及ばない。さらにその典型的観測時間は 20 分間であり、他の観測に比べて占有時間が少ないと特長といえる。本研究の観測天体のサイズは他の二つに比べて小さい。4m 望遠鏡を用いる他のサーベイ観測では遠くに存在するより小さい天体が観測可能だが、地球近傍を高速移動する小惑星を観測することが難しい。一方本研究では Tomo-e Gozen を用いて最接近する天体を高時間分解光度曲線観測することにより、微小 NEO を感度を落とさずに観測することができる。自転周期が求まった天体の割合は 0.45–0.58 の範囲で比較的近い。ただし EURONEAR は自転周期が既知の天体を多く観測していることに注意が必要である。また観測対象のサイズ、観測数、観測時間が異なるため直接比較することは難しい。本研究は他の 2 つのサーベイに比べてタンブラーの観測割合が高い。なお EURONEAR が観測した tumber の 8 つは既知のタンブラーである。

表 4.3 光度曲線観測の比較^a

survey	#object	mean H (mag)	mean D (m)	#period (rate)	#ultra-rapid rotators (rate)	#tumblers (rate)
Tomo-e Gozen	33 ^b	26.1	18	19 (0.58)	2 (0.061)	3 (0.091)
EURONEAR ^c	101	17.9	782	45 (0.45)	0 (0)	15 (0.149)
MANOS ^d	232	24.1	45	142 (0.47)	4 (0.017)	10 (0.043)

^a #object:観測天体数、mean H:平均絶対等級、mean D:平均直径、#period (rate):自転周期が求まった数(割合)、#ultrarapidrotators (rate):自転周期 20 秒未満の小惑星数(割合)、#tumblers (rate):タンブラーの数(割合)。

^b 人工天体の可能性がある 2020 SO を除く。

^c The EUROpean Near Earth Asteroids Reserch([Vaduvescu et al. 2017](#))

^d Misson Accesible Near-Earth Objects Survey による全観測天体(301 以上)の中で論文化されている天体のみを計上([Thirouin et al. 2016, 2018](#))。

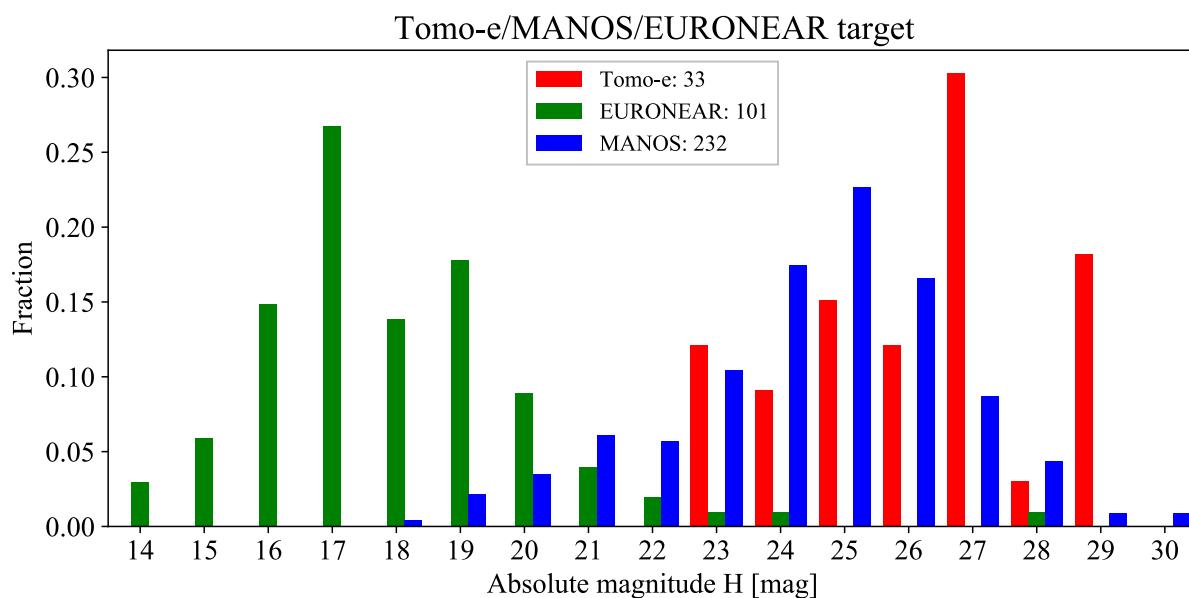


図 4.5 主要な光度曲線サーベイ観測天体の絶対等級。

ヒストグラムの幅は 1 等級であり、 $H - 0.5$ から $H + 0.5$ の天体が H のビンに含まれる。

本研究と先行研究の直径-自転周期分布を比較するため、図 4.4 の直径-自転周期関係を自転周期の短い方から積み上げたヒストグラムを作成した(図 4.6 右)。自転周期の範囲は本研究で正確に推定可能な 600 秒(典型的な観

測時間の半分)までとし、最小絶対等級は25等(約30m)と設定した(図4.6左)。範囲外の天体をグレーの領域で示している。図4.6右のヒストグラムから本研究の天体はLCDBの天体と比較して自転周期が短い側に超過傾向がある。これは特に短周期においてLCDBに含まれるデータの自転周期分布が真の自転周期分布を反映していない可能性を示唆する。微小 NEO の観測数を増やすことでこの差異の有無に強い制約を得ることが期待できる。

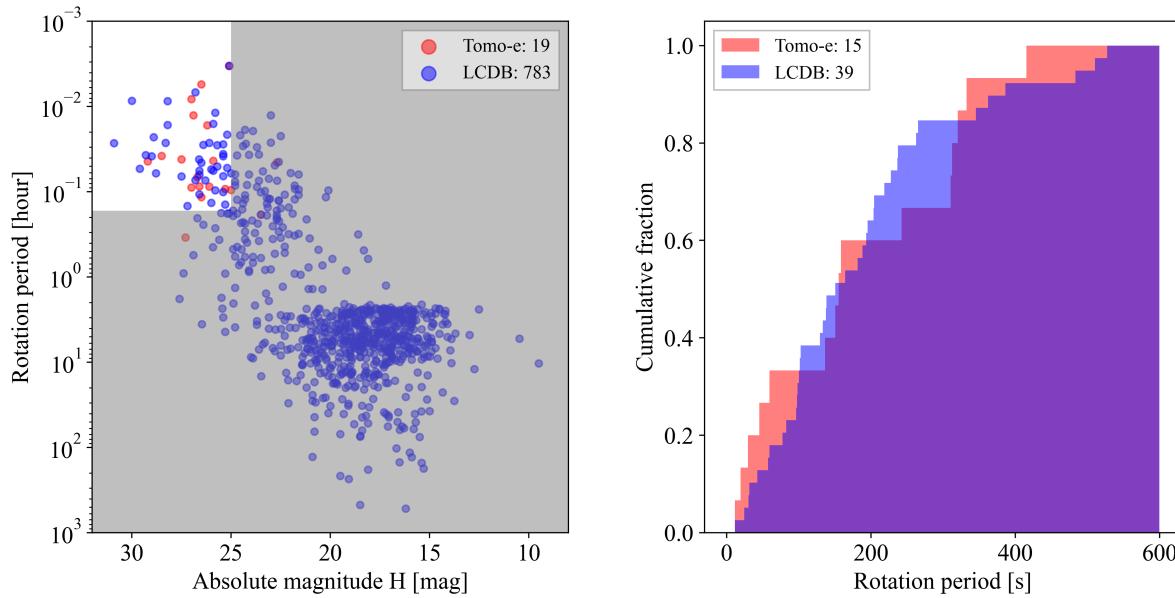


図4.6 自転周期の累積ヒストグラムの比較。

左:白色部($H > 25$ 、 $P < 600$ s)の天体をサンプルとする。

右:条件を満たす天体を自転周期の短い順に積み上げ、規格化した累積ヒストグラム。

Tomo-e Gozen(赤色)は自転周期が短い部分でLCDB(青色)よりも累積割合が高い。

4.4.3 高速自転小惑星の欠如

各観測装置で推定可能な自転周期は電荷の読み出しなど露光間のオーバーヘッド時間に依存するため、分以下の高速自転小惑星の周期を推定するためには高速撮像観測を行う必要がある。2fpsの高時間分解観測を行う本研究では、10秒以下の高速自転周期も検出することができる。本研究では34天体の微小NEOに対し2fpsの動画観測を行っても自転周期10秒以下の高速自転小惑星は検出されなかった⁴⁶。微小NEOの系統的な高速観測により高速自転する微小NEOの欠如を示したのは本研究が初めてである。

4.4.4 軸比

次に本研究の天体とMANOSの観測天体(MANOS天体)の軸比を比較する。光度曲線から推定した等級振幅と小惑星の軸比の下限値の間には以下の式が成り立つ。⁴⁷

$$\frac{a}{b} = 10^{-0.4 \frac{\Delta m(\alpha)}{1+s\alpha}} \quad (4.3)$$

本研究含め地球近傍の天体を観測する必要がある微小NEOの観測においては、高位相角の観測が行われることが多い。そのような観測から軸比を推定する場合、特に位相角による補正が重要となる。よって比較対象として観測時の位相角が公開されているMANOS天体を用いる。

⁴⁶ ただし人工天体であると考えられている2020 EOは除く。

⁴⁷ 詳細はA.1を参照のこと

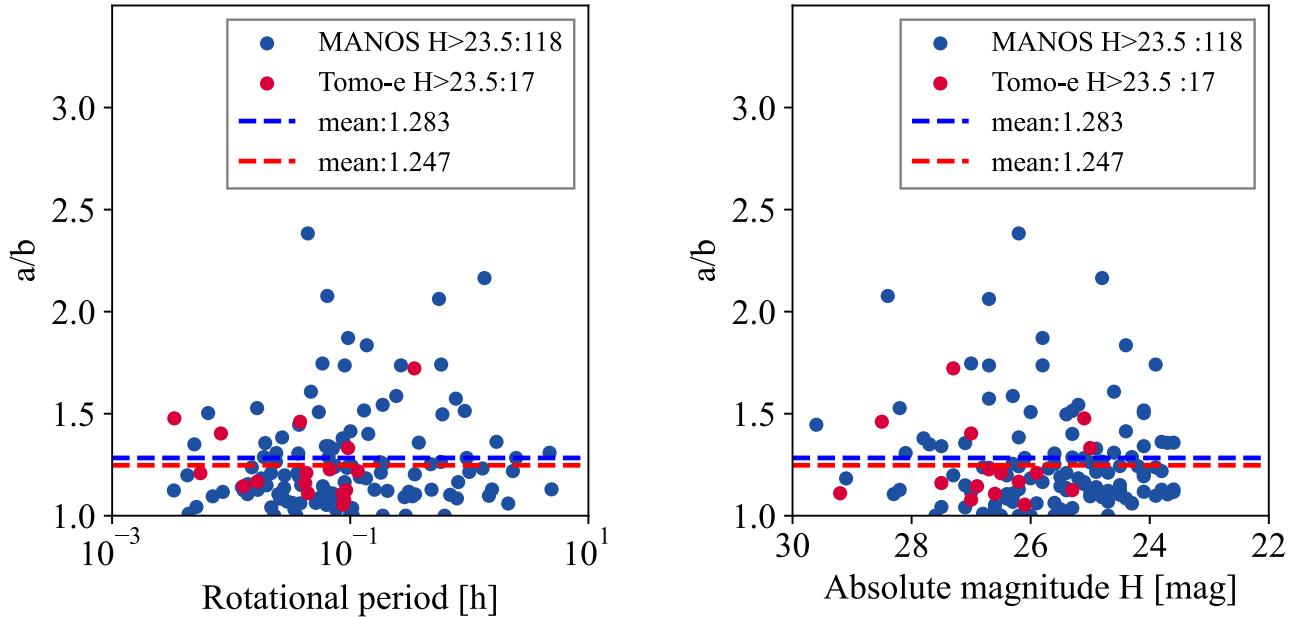


図4.7 左:自転周期と軸比の関係。右:直径と軸比の関係。

青色点、赤色点はそれぞれMANOS、Tomo-e Gozenによる観測天体。破線はそれぞれのサンプルの軸比の平均値を表す。

図4.7左から自転周期-軸比には強い相関はみられない。また図4.7右からサイズ-軸比には強い相関はみられない。これらの傾向は先行研究 (Hatch and Wiegert 2015; Thirouin et al. 2016) と整合的である。また軸比の平均値もMANOS天体と近い値であるとわかる。

4.4.5 タンブラーの自転周期を用いた衝突生成年代の推定

最後に本研究で観測されたうち、自転周期が求まったタンブラー候補天体 2020 EO に注目する。図4.4に含まれるタンブラーのみを図4.8にプロットした。また強度を考慮した際に小惑星が破壊されずに存在することができる臨界自転周期をプロットした。図4.8右上の自転周期が短く直径が大きい天体ほど、観測された自転周期を保つためには強い強度を必要とする。2020 EO はこれまで発見されているタンブラーのなかで強い強度を持つ天体であることが示唆される。

自転周期 P 、直径 D を用いて以下の式でタンブラーの典型的寿命を推定することができる (Burns and Safronov 1973; Harris 1994; Paolicchi et al. 2002)。

$$\tau_{\text{damp}} = \left(\frac{1}{17} \right)^3 \frac{P^3}{D^2} \quad (4.4)$$

ただし τ_{damp} は歳差が落ち着くまでの減衰時間 (Byr)、 P は自転周期 (hour)、 D は小惑星直径 (km) である。定数は Harris (1994) においてラブルパイル小惑星の物理量を仮定して算出した値である。(4.4) 式に物理量を代入し計算すると、2020 EO の減衰時間は 4 万年となる。衝突生成後のタンブリング状態を現在まで保っているとすると 2020 EO は衝突して間もない非常に若い天体であると推測される。(4.4) 式の定数は形状等に依存して変化するが、その点を考慮しても典型的な NEO の力学的タイムスケール (< 10 Myr) に比べて短い。

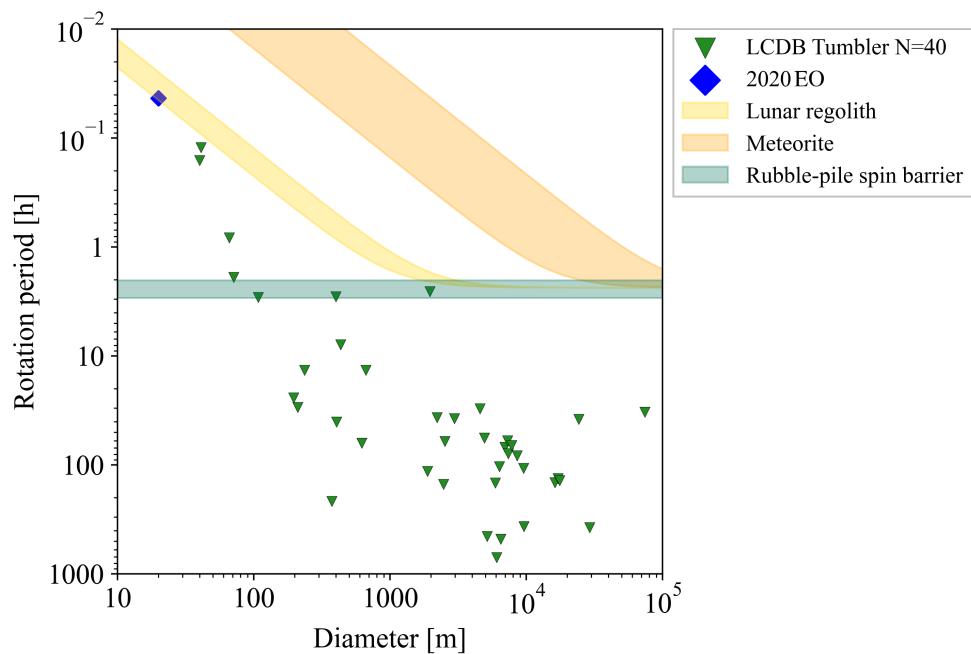


図 4.8 タンブラーの直径-自転周期関係。

緑色点、青色点はそれぞれ LCDB のタンブラー、本研究で観測したタンブラー候補天体 2020 EO を表す。緑色領域はスピンバリアを表し、Bennu(B 型、 1.26 g/cm^3 、Chesley et al. 2014)、Eros(S 型、 2.67 g/cm^3 、Yeomans et al. 2000) の密度を用いて計算。黄色領域、橙色領域はそれぞれ典型的な月のレゴリス強度、地上に落下した隕石の強度。ただし摩擦角が 40° 、密度が 2500 kg/m^3 の球を仮定。LCDB 2020 年 10 月 22 日版を用いてプロット。

第5章

議論

第4章において高速自転周期を推定可能な2fps動画観測を行うことで微小NEOの自転周期分布における高速自転の超過傾向が明らかになった。また周期10秒以下の高速自転は検出されなかった。これらは動画観測を行う本研究によって初めて明らかになった事実である。このような微小小惑星の直径-自転周期分布の解釈として1)微小NEOの強度が小さい、2)微小NEOは生成後に十分自転加速を経験していない、という二つの解釈を行う。

5.1 YORP自転加速と直径-自転周期分布

非重力効果の一つであるYORP効果は小天体の自転周期分布を変化させる。YORP効果による自転加速の強さ(YORP加速度)は天体の直径の二乗に反比例するため、微小NEOの自転周期は短いタイムスケールで変化する。YORP効果による自転周期の変化を考えることで、NEOの衝突生成時からの経過時間(NEO年齢)を推定する。

まず衝突生成時のNEOの自転周期分布を導入する。NEOの年齢を自転周期の変化から推定するには、小惑星生成時の自転周期の分布が必要となる。本研究の観測天体である直径100m以下の微小NEOの多くは大きな小惑星の破片、すなわち一枚岩小惑星であると考えられる。よってその生成時の自転速度として衝突実験における破壊片の直径-自転周期関係(Kadono et al. 2009, 以下Kadonoライン)を元に以下の式を用いる。

$$P = 10 \left(\frac{D}{1 \text{ [m]}} \right) \text{ [s]} \quad (5.1)$$

次にNEOの自転周期の変化要因としてYORP効果を考える。YORP加速度は天体の形状、サイズ、密度、熱慣性など多くの物理量に依存するが、特にサイズに対して二乗に反比例する強い依存性を持つ(Čapek and Vokrouhlický 2004; Bottke et al. 2006; Vokrouhlický and Čapek 2002; Vokrouhlický et al. 2015)。よって本研究では基準天体のYORP加速度をサイズでスケーリングすることで任意の天体に対するYORP加速度を得る。基準としてNEO(101955 Bennu(直径492m))の加速度

$$\frac{d\omega}{dt} = 3.63 \times 10^{-6} \text{ deg/day}^2, \quad (5.2)$$

を採用する(Hergenrother et al. 2019)。この式をサイズでスケーリングすることにより直径Dの小惑星の自転加速度を以下の式で得る⁴⁸。

$$\frac{d\omega}{dt} = 3.63 \left(\frac{D_{\text{Bennu}}}{D_{\text{NEO}}} \right)^2 \times 10^{-6} \text{ deg/day}^2 \quad (5.3)$$

ω は角速度、 D_{Bennu} 、 D_{NEO} はそれぞれBennu、NEOの直径である。(5.1)式、(5.3)式を用いてNEO年齢を計算する。まず(5.1)を用いて天体サイズから初期自転周期 P_0 を得る。観測で得た光度曲線から推定した小惑星の現在の自転周期を P_1 とすると、自転周期が P_0 から P_1 になるまでの時間、すなわちNEO年齢 τ_{YORP} は以下のように計算することができる⁴⁹。

⁴⁸ この仮定の妥当性は5.3.2で議論する。

⁴⁹ 詳細はGを参照のこと。

$$\tau_{\text{YORP}} \equiv \frac{360D^2}{C} \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{P_0} \right) \quad (5.4)$$

$$= \frac{360D^2}{C} \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{10D} \right) \quad (5.5)$$

ただし $C = 3.63 \cdot D_{\text{Bennu}}^2 \times 10^{-6}$ である。

上式を用いて計算した直径 0.1 km、0.01 km の天体の生成後の自転周期の推移の例を図 5.1 に示す。YORP 効果が強く働く直径が小さい天体ほど、短いタイムスケールで自転周期が変化する。直径 0.1 km の天体では 50 Myr (NEO に関する力学進化のタイムスケールに比べ十分長い時間) の間に典型的な一枚岩小惑星が自転破壊する臨界自転周期 (図 5.1 橙色領域) まで加速されないが、直径 0.01 km では臨界自転周期に達することがわかる。

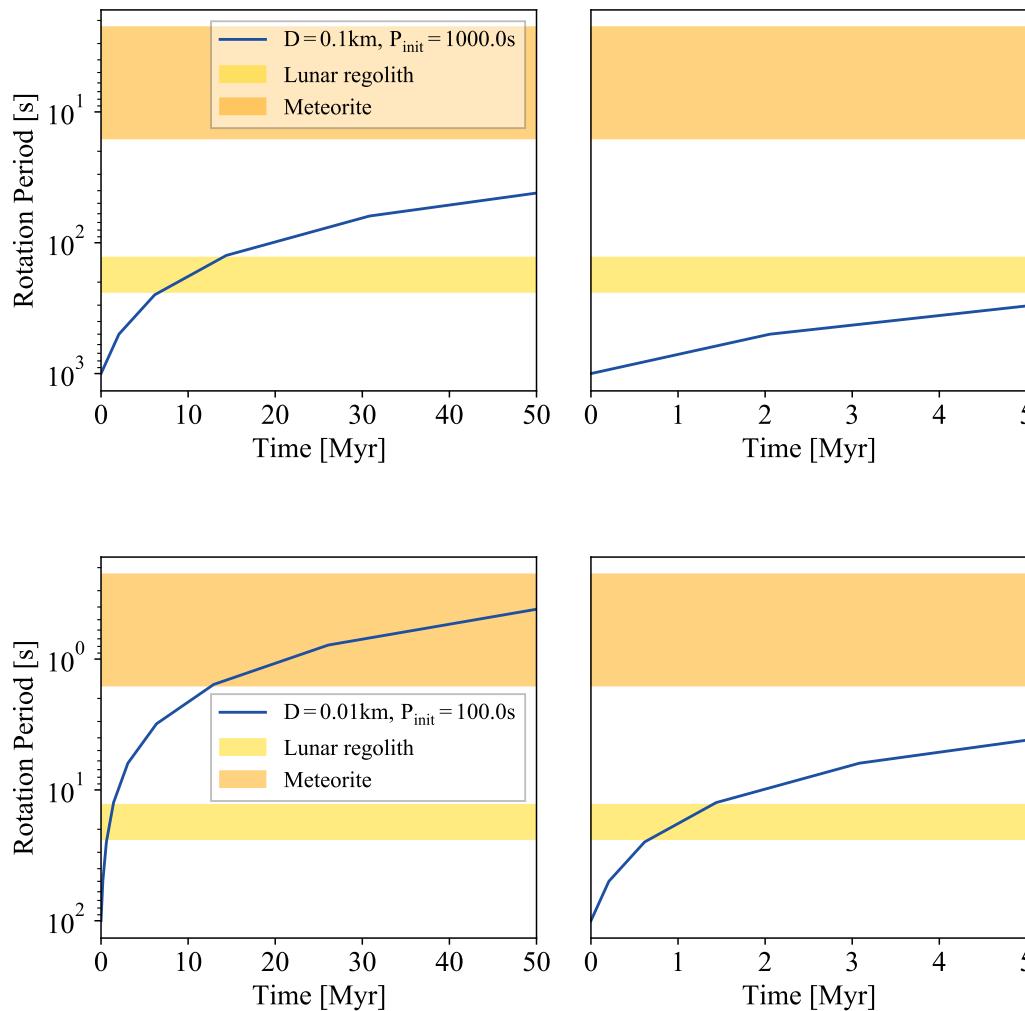


図 5.1 YORP 効果による NEO の自転周期の変化計算例。

上: 青線は初期自転周期 1000 秒、直径 100 m の天体の自転周期変化を表す。黄色破線、橙色破線はそれぞれ典型的な月のレゴリス強度、隕石の強度を表す。摩擦角は 40°、密度は 2500 kg/m³ の球として強度を算出した。下: 直径 10 m の天体に対する同図。

ある直径、自転周期を持つ天体が Kadono ラインから YORP 効果を受け加速したときの NEO 年齢を図 5.2 に示す。この図から微小 NEO の多くはその力学進化過程のタイムスケールに比べて短いタイムスケールで YORP 効果により自転加速し、高速自転していることが期待される。図中では年齢が若い青色領域から灰色領域へと移動することに対応する。しかし本研究で観測した微小 NEO 含むこれまで観測された微小 NEO の多くは高速自転していない (図 5.2 中点)。以下ではこの直径-自転周期分布を説明する二つの解釈を行う。

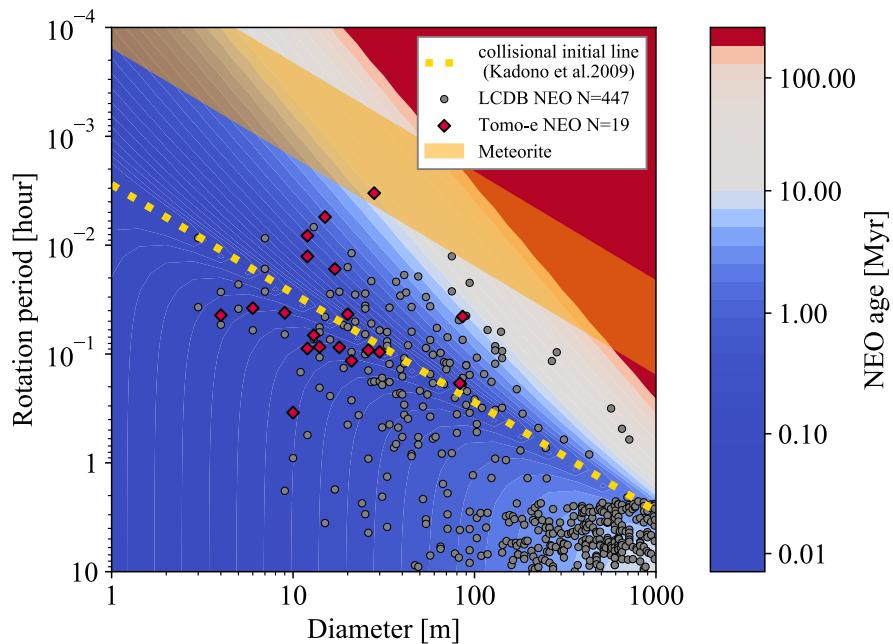


図 5.2 直径-自転周期関係に対応する NEO 年齢の計算結果。

灰色、赤色はそれぞれ LCDB、Tomo-e の NEO。黄色破線は Kadono ライン。橙色の領域は典型的な隕石の強度を表す。直径 1 km 以下の NEO の NEO 年齢をプロット。以下本稿では直径 100 m 以下を一枚岩と考え議論に用いる。微小天体には YORP 効果が強く働き、力学進化過程のタイムスケールに比べ短いタイムスケールで自転加速する。Kadono ラインの下側領域は自転減速のタイムスケールを計算。

5.2 解釈 1: 微小 NEO の強度が小さい

YORP 効果により自転加速した微小 NEO がある臨界自転周期で遠心力に耐えられず破壊されている場合、高速自転している天体が少ない自転周期分布を説明することができる。微小 NEO の多くは、重力のみで結合したラブルパイル小惑星が破壊されない臨界自転周期（スピナリヤ、[1.3.2](#)）よりも高速に自転している。この高速自転は表面レゴリスによる固着力や岩石の引張強度により実現している。重力のみを考慮したスピナリヤと同様に、固着力や小惑星の強度を考えた際にも臨界自転周期が存在し、臨界自転周期に達した小惑星は形状変形や破壊を経験することになる。その臨界自転周期と強度の関係は以下で見積もることができる ([Holsapple 2007](#); [Kwiatkowski et al. 2010](#))。

$$P = \frac{7.3 \times 10^{-4}}{C} \left(\frac{\rho}{\kappa} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot D^{\frac{5}{4}} \quad (5.6)$$

P は自転周期 (h)、 C は形状に依存する定数、 ρ は小惑星密度 (kg/m^3)、 κ は強度係数 ($\text{N}/\text{m}^{3/2}$)、 D は小惑星直径 (m) である。実験室実験から天体の強度 k はサイズ依存性を持つことがわかっており、強度係数との間には半径 $r = D/2$ を用いて

$$k = \kappa r^{-1/2}, \quad (5.7)$$

の関係が成立する ([Housen and Holsapple 1999](#))。観測で推定した天体の自転周期、サイズ、形状を用いることでその天体の自転を保持するために必要な強度の下限値を推定することができる。具体例として本研究の観測天体 2020 PY₂ (自転周期 19.84 秒)、2019 BE₅ (自転周期 11.98 秒) それぞれの自転速度を保つためには 0.43 MPa、3.7 kPa の強度が必要となる。

同様に、形状は光度曲線から得られる軸比の下限値、密度は 2500 kg/m³、摩擦角は 40° として (5.6) 式を用いることで MANOS 天体、Tomo-e Gozen 天体の強度の下限値を推定しヒストグラムを作成した (図 5.3)。ただし小惑星を 3 軸の長さ a 、 b 、 c ($a > b > c$) の 3 軸不等辺円体と考えた時の $\alpha = \frac{c}{a}$ 、 $\beta = \frac{b}{a}$ が等しいと仮定し、値を等級振幅から推定した。ある強度をもつ小惑星の臨界自転周期の値は広いパラメータ範囲で近い値をとることから、パラメーターの選択は結果に大きく影響しない (図 5.4)。月のレゴリスを保持した天体の強度 ($k = 0.9 - 3$ kPa, [Colwell et al. 2007](#))、地上で採取された隕石の強度 ($k = 0.2 - 0.3$ MPa, [Jenniskens et al. 2009](#)) をそれぞれ黄色、橙色の領域で表している。多くの小惑星は黄領域の左側に位置し、ラブルパイル小惑星

のレゴリスによる固着力で説明できる自転速度を持つ。これらがラブルパイル小惑星であれば、その多くはこれ以上自転加速した際に遠心力に耐えきれず自転崩壊する可能性がある。微小 NEO は強度が小さく高速自転すると破壊してしまうため微小な高速自転 NEO は欠如しており、自転周期が長い NEO が多く観測されていると解釈することができる。

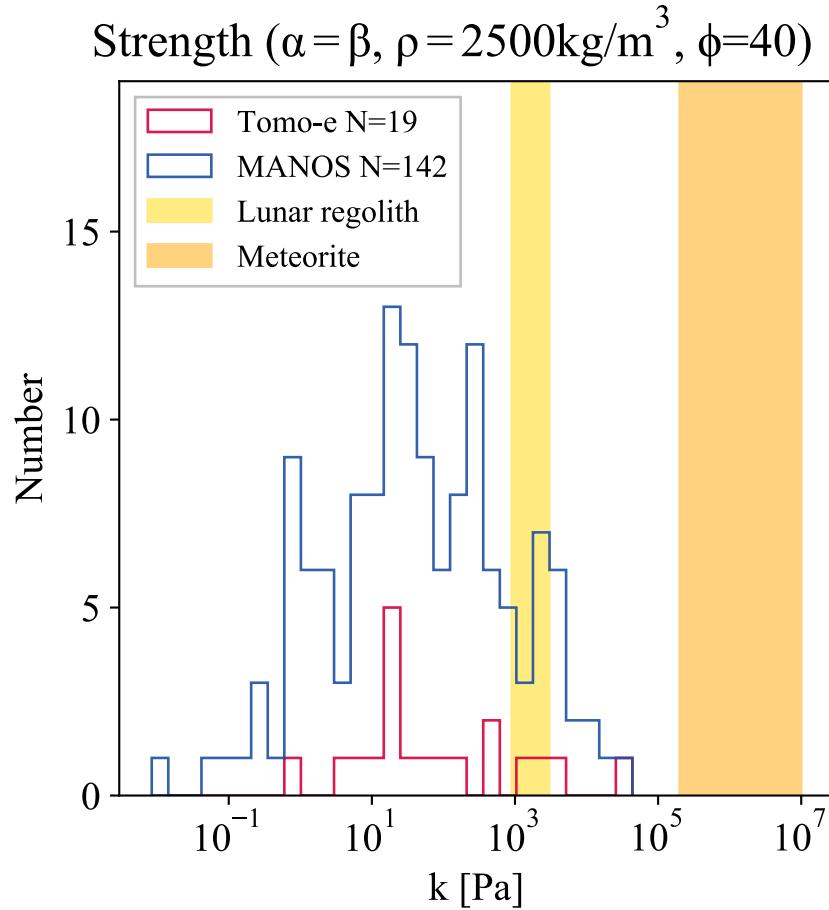


図 5.3 MANOS、Tomo-e Gozen の NEO の強度の下限値。

Tomo-e Gozen、LCDB 天体の NEO 年齢をそれぞれ赤色、青色で表した。黄色破線、橙色破線はそれぞれ典型的な月のレゴリス強度、隕石の強度を表す。 $\alpha = \beta$ 、密度は 2500 kg/m^3 、摩擦角は 40° として計算。

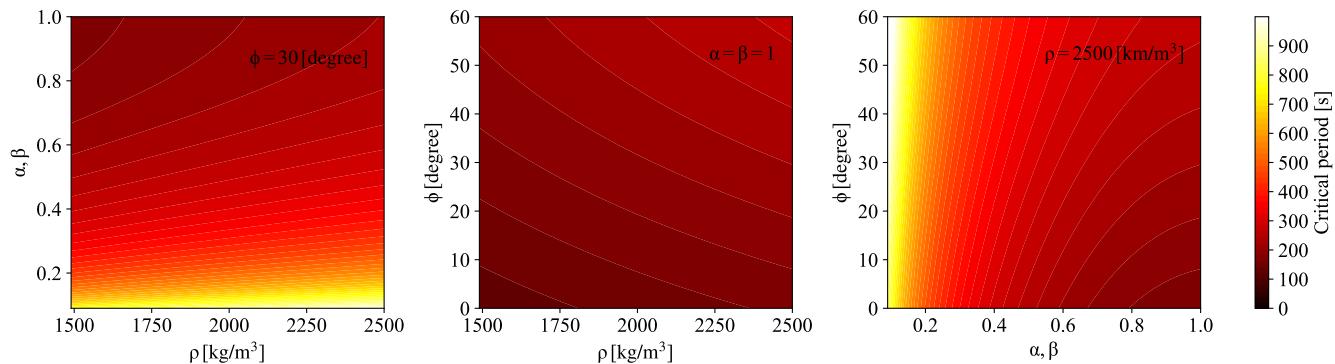


図 5.4 臨界自転周期のパラメーター依存性。

密度 (ρ)、摩擦角 (ϕ)、形状パラメーター (α, β) の一つを固定し他の二つを変化させた際の依存性を表す。本研究では常に $\alpha = \beta$ とした。

左:摩擦角を 30° と固定したときの臨界自転周期の密度と形状の依存性。

中:形状を $\alpha = \beta = 1$ と固定したときの臨界自転周期の密度と摩擦角の依存性。

右:密度を 2500 km/m^3 と固定したときの臨界自転周期の形状と摩擦角の依存性。

微小 NEO の強度が小さい理由として、それらがラブルパイル天体やひび割れた一枚岩小惑星であることが考えられる。微小 NEO が一枚岩かラブルパイルどちらであるかの決定的な証拠はないが、2008 年に地球に衝突

した直径数 m の微小 NEO 2008 TC₃ の突入時の観測では、2008 TC₃ が複数の組成を持つラブルパイル小惑星である可能性が示唆されている (Sánchez and Scheeres 2014)。この問い合わせに対しては、はやぶさ 2 が行う小惑星 1998 KY₂₆ への拡張ミッションの結果からの制約が期待できる。

5.3 解釈 2: 微小 NEO が十分な自転加速を経験していない

観測データから推定した天体の直径と自転周期から計算した LCDB と本研究の観測天体の NEO 年齢を図 5.5 に示す。図 5.5 左、右はそれぞれ初期自転速度を Kadono ライン、0 秒 (計算上 10⁸ 秒) として求めた NEO 年齢である。一枚岩小惑星であると考えられる絶対等級が 22.5 等より大きい (直径約 100 m 以下) NEO を用いた。

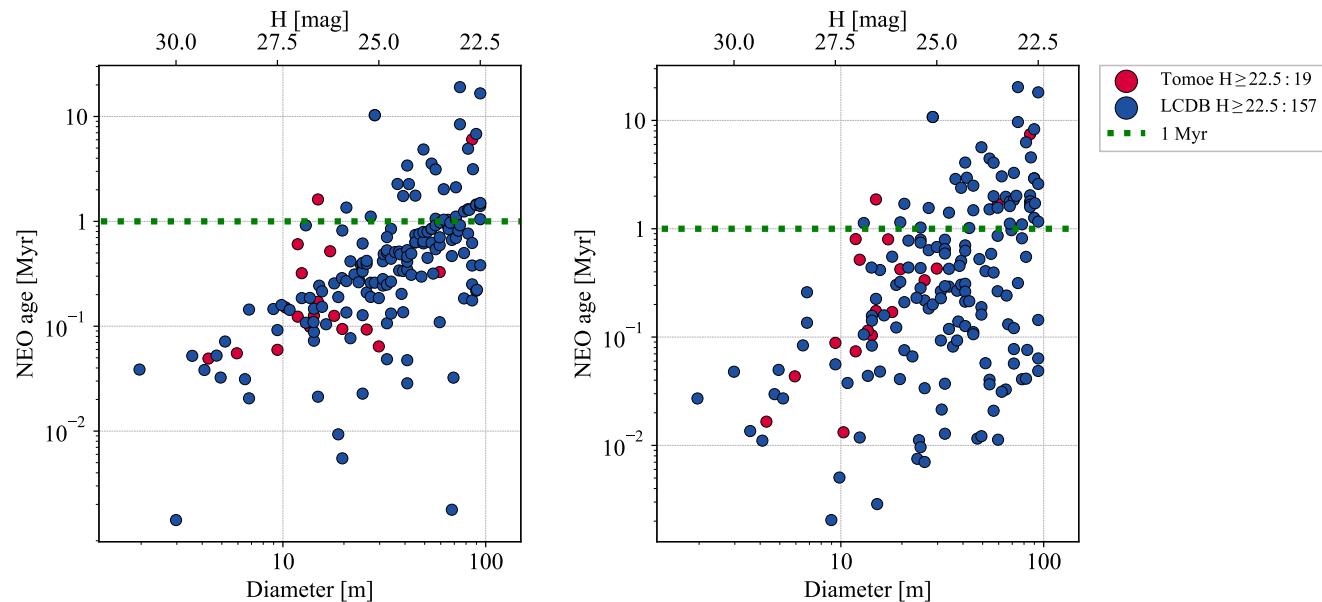


図 5.5 YORP 効果による自転加速から計算した NEO 年齢。

左:Kadono ラインを初期自転速度とする NEO 年齢。Tomo-e Gozen、LCDB 天体の NEO 年齢をそれぞれ赤色点、青色点で表した。絶対等級 H が 22.5 等より大きい (直径約 100 m 以下) 天体のみを用いている。緑色点線は 1 Myr を表す。右:初期自転速度を 10⁸ 秒とした NEO 年齢。

5.3.1 NEO 年齢と力学的タイムスケールの比較

図 5.5 より多くの微小 NEO の NEO 年齢は典型的な NEO の力学進化過程のタイムスケール (メインベルト内での Yarkovsky 効果による共鳴への移動、共鳴から地球近傍への軌道進化、~10 Myr) に比べ十分に短いことがわかる。また図 5.5 の左右の分布の比較から、NEO 年齢は NEO の形成時の自転周期分布に強く依存しない。

NEO 年齢の若さを説明するため、微小 NEO が地球近傍領域においてより大きな天体 (母天体) から生成した可能性を検証する。2008 年に地上に隕石として落下した NEO、2008 TC₃ と別の NEO、1998 KU₂ の軌道の類似性から、地球近傍領域での天体の分離の可能性は示唆されている (Jenniskens et al. 2009)。本稿では母天体から微小 NEO が生成する要因として衝突破壊、自転加速、潮汐破壊、熱疲労に着目する (図 5.6)。

1:衝突破壊

メインベルトにおける小惑星の衝突寿命は以下の式で見積もられる (Farinella et al. 1998)。

$$\tau_{\text{col}} = 20 \times (D [\text{m}])^{0.5} \text{ Myr} \quad (5.8)$$

この式を用いるとメインベルトにおける直径 1 km の小惑星の衝突寿命は約 630 Myr となる。NEO の数はメインベルト小惑星に比べ少ないため、衝突寿命はより長いと考えられる。NEO の典型的な力学的寿命 (10 Myr 以下、Granvik et al. 2018) との比較から、地球近傍領域での衝突可能性は低い。

2:自転加速

既知の小惑星の直径-自転周期関係(図1.9)における重力のみを考慮した臨界自転周期に近い自転周期をもつ天体の存在は、臨界自転周期に達した天体が変形や自転破壊を経験していることを示唆する。臨界線に近い自転周期約2時間の天体は直径200m程度まで存在しており、本研究における直径100m以下の微小NEOは、より大きなラブルパイル小惑星が自転破壊した際の生成破片である可能性がある。[Jacobson et al. \(2014\)](#)ではYORP効果による自転加速とその後の自転破壊を考慮したシミュレーションを行うことにより、メインベルト小惑星のサイズ頻度分布の再現に成功している。また観測されている二重小惑星の多くが臨界自転周期付近の大きな角運動量を持つという事実からも自転破壊による小惑星破壊シナリオを支持することができる([Pravec and Harris 2007; Margot et al. 2015](#))。つまり自転加速によるNEOの生成は起こりうると考えられる。

3:潮汐破壊

地球近傍を通過するNEOは地球や月の潮汐力を強く受ける。NEOのスペクトル型と惑星最接近距離の関係を調査した先行研究では、惑星接近時の潮汐力により小惑星の表面様相が変化することが示されている([Binzel et al. 2010; Nesvorný et al. 2010](#))。潮汐力がより強く働いた場合は表面様相変化のみではなく小天体が破壊される可能性がある(Comet Shoemaker-Levy 9, [Sekanina et al. 1994](#))。2029年に地球表面から約33,000kmを通過すると予測されている(99942)Apophisの最接近時の潮汐作用を模擬したシミュレーションでは、Apophis級の天体が地球表面から1.9 地球半径(約12000km)まで近づくと質量放出が起こることが示されている([Zhang and Michel 2020:4.1](#))。つまりNEO領域での潮汐破壊は起こりうると考えられる。

4:熱疲労

NEOの近日点距離とアルベドには相関がみられ、近日点距離が小さい天体ほど低アルベド小惑星が少ない。これは低アルベド小惑星は高アルベド小惑星に比べ1) 加熱により温度が上昇しやすい、2) 撥発性物質をより多く含むという二つの理由により熱的に破壊されやすいからであると考えられている([Delbo et al. 2014; Granvik et al. 2016](#))。この作用を熱疲労(thermal fatigue)という。NEOの組成ごとの質量割合において、直径が大きな小惑星に比べ微小NEOにおける低アルベド小惑星の割合は高い([Binzel et al. 2019; Mommert et al. 2016; Devogele et al. 2019; Perna et al. 2018](#))。熱疲労効果によるNEO領域での破壊現象は起こりうると考えれる。

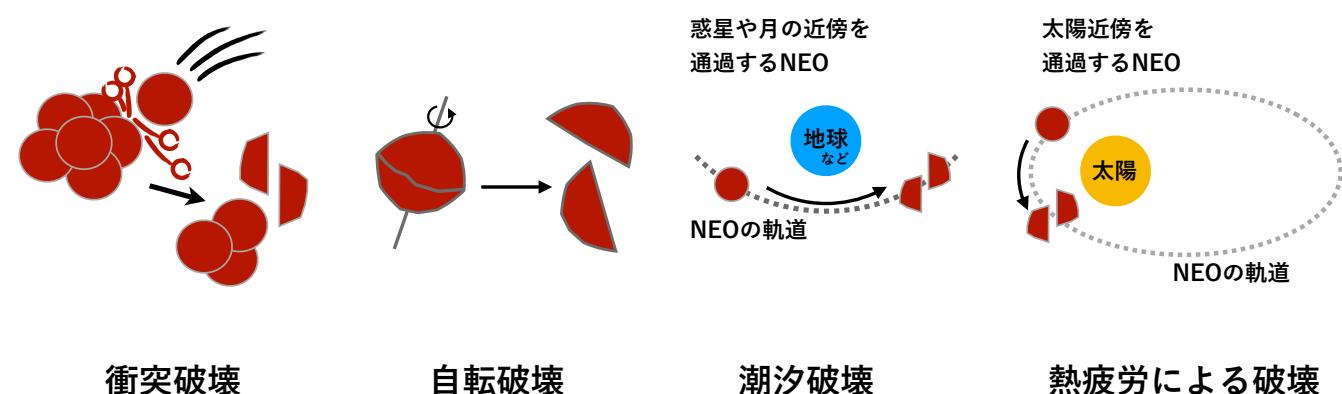


図5.6 地球近傍領域におけるNEOの生成過程の概念図。
左から順に衝突破壊、自転破壊、潮汐破壊、熱疲労による破壊。

5.3.2 考慮事項

本議論において重要な考慮事項を述べる。

YORP効果の表式の妥当性

本研究ではYORP効果による自転加速の強度(YORP加速度)としてサイズのみをスケーリングした(5.3)式を用いた。ここでは他の物理量(軌道長半径、軌道離心率、密度)の依存性について考慮する。これらを考慮したYORP加速度は以下のようにかける(Rossi et al. 2009):(1)式)。

$$\frac{d\omega}{dt} = 3.63 \left(\frac{D_{\text{Bennu}}}{D_{\text{NEO}}} \right)^2 \left(\frac{a_{\text{Bennu}}}{a_{\text{NEO}}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}}{\sqrt{1 - e_{\text{NEO}}^2}} \right) \left(\frac{\rho_{\text{Bennu}}}{\rho_{\text{NEO}}} \right) \times 10^{-6} \text{ deg/day}^2 \quad (5.9)$$

a 、 e 、 ρ はそれぞれ軌道長半径、軌道離心率、密度であり、(5.3)式と同様に添字は Bennu、NEO の物理量を表す。JPL Small Body Database⁵⁰によると $a_{\text{Bennu}} = 1.126$ 、 $e_{\text{Bennu}} = 0.204$ 、 $\rho_{\text{Bennu}} = 1.26$ である。本研究の天体の軌道長半径は 0.61–3.52 の範囲であり、(5.9)式の軌道長半径の項は桁では変わらない。軌道離心率(本研究天体の範囲 0.04–0.83)についても同様である。密度についても、NEO には Bennu(C型)に比べ高密度な S 型が多々存在することがわかっているが、桁では変わらない。よってサイズのみをスケーリングした(5.3)式でも結果は大きく変わらないと考えられる。ただし NEO の軌道要素の時間変化を考慮した計算は今後の課題である。

また高速自転する一枚岩小惑星の多くはその表面にレゴリスをもたず熱伝導度が高いと考えられるが、YORP効果による自転加速には大きく影響しない(Čapek and Vokrouhlický 2004)。

他の要因による自転変化

本研究では自転速度(自転周期)の変化要因として YORP効果のみを考慮した。実際には惑星との接近時の重力相互作用や微小隕石の衝突により自転状態が変化する可能性がある。

1. 惑星接近による自転変化

2012年的小惑星(367943)Duende(2012 DA₁₄)接近時(地表高度約28000km)には接近前と後で自転速度の変化が示唆されている(De León et al. 2013; Benson et al. 2020)。本研究で用いた NEO は観測時にはここまで地球に接近していない。2029年の(99942)Apophisの地球接近やその他地球に接近する小惑星の観測が惑星接近時の自転変化に対する知見を得るのに有用である。Tomo-e Gozenは他の観測に比べ格段に地球に近づく天体を発見しており、発見直後に観測を続けることによる自転周期の変化を捉えることが期待できる。

2. 微小隕石による自転変化

5.3.1において衝突破壊片を観測している可能性は低いことを確認した。この他に破壊には至らないが、角運動量を交換し自転周期を変化をもたらす微小隕石の衝突を考慮しなければならない。Wiegert(2015)では天体サイズを考慮した微小隕石の衝突と YORP効果の比較から直径約57mの微小 NEO(54509)YORP(2000 PH₅)においてYORP 加速が支配的であると結論を得ている。ただし小惑星のサイズが小さいほど微小隕石による自転周期の変化のタイムスケールが短くなり直径10m級天体ではYORP効果と同等になり無視できなくなると言及している。本研究が取り扱う天体には10m以下の微小 NEO も存在するため注意が必要である。ただしそのような天体を除いたとしても幅広いサイズ範囲で NEO の年齢は若く(図 5.5)、議論の結果は変わらない。

非主軸回転

自転変化を考える上では非主軸回転をしているタンブラーについても考慮しなければならない。衝突破壊シミュレーションにおいて、衝突生成破片の多くが非主軸回転をしていることが示されている(Asphaug and Scheeres 1999)。つまり生成直後の微小小惑星は高速自転タンブラーである可能性が高い。(4.4)式よりタンブリングの減衰時間は自転速度の3乗に反比例するため、高速自転する微小小惑星のタンブリングはすぐに減衰する。

⁵⁰ <https://ssd.jpl.nasa.gov/>

その後形状に依存して約半数が自転加速、半数が自転減速する (Čapek and Vokrouhlický 2004) が、減速する天体においては再度タンブリング状態にはいるなど複雑な進化をとげ、自転周期を年齢のトレーサーとすることができない。つまり約半数の小惑星に対しては本研究の議論は適用できず、本研究の観測天体の中にはこのような複雑な進化を経て現在の自転状態にある NEO が存在する可能性がある。しかし約半数存在する加速し続けてきた NEO も存在するはずであり、ほとんどの微小 NEO の年齢が力学的タイムスケールに比べ短いことを説明できない。

5.4 結論

YORP 効果により自転加速された微小 NEO は力学的進化過程のタイムスケール (~ 10 Myr) に比べ短いタイムスケールで自転加速する。本研究で観測した微小 NEO の中には自転周期 10 秒以下の高速自転 NEO は存在せず、YORP 自転加速では説明することができない。微小 NEO の直径-自転周期関係は 1) 微小 NEO の強度は小さく、高速自転する NEO は破壊されるため年齢が若い天体しか観測されない、2) 微小 NEO は地球近傍領域でより大きな母天体が自転加速、潮汐力および熱疲労により破壊されることで生成した天体である、という二つの解釈により説明することができる。ただしどちらの解釈を用いても、直径 10 m 以下の NEO のほとんどが自転周期 10^{-2} 時間よりも長いという観測事実は説明できない。直径が小さい NEO ほど高速移動し観測機会が限られるが、このような天体の観測を行うことでさらなる議論を展開することができる。

第6章

まとめと今後

地球に接近する軌道を持つ地球接近小惑星 (Near Earth Objects, NEO) は太陽系内の物質を地球にもたらしうる天体であり、その組成、強度、軌道進化過程やサイズ頻度分布の理解は、地球の水や生命の起源を解明する上で非常に重要である。多くの NEO は火星-木星間のメインベルトから軌道進化した天体であることがわかっており、その軌道進化過程では太陽や惑星の重力に加え、太陽の輻射に起因して小惑星の軌道や自転状態が変化する非重力効果が重要となる。非重力効果の一つである YORP 効果は直径が小さい天体により強く作用し、NEO の軌道進化に比べて短いタイムスケールで自転周期を変化させる。高速自転する小惑星には強い遠心力が働き、構造を維持できなくなる臨界自転周期に達すると変形や自転破壊を経験するため、YORP 効果が強く働く微小 NEO の自転周期を用いることで、微小小惑星の強度に制約を与えることができる。微小小惑星の観測を行うには地球近傍に接近した見かけの明るさが明るい天体を観測する必要があるが、地球に接近した天体は見かけの移動速度が大きく、観測時に星像が伸びて感度が低下するという問題が生じる。また見かけの速度が大きいために観測可能時間が短く、微小小惑星の組成や自転周期などの物理量を得るために追観測を行うことが難しい。以上の理由から微小 NEO の発見率は低く、例えば直径 30m 以下の NEO の約 98% が未発見であり、物理量を得るために追観測が行われた天体もごく一部に限られている。近年では分以下の自転周期をもつ高速自転小惑星が見つかりつつあるが、10 秒以下の自転周期を持つ小惑星は発見されていない。各観測装置で推定可能な自転周期は電荷の読み出しなど露光間のオーバーヘッド時間に依存するため、分以下の高速自転小惑星の周期を推定するためには高速撮像観測を行う必要がある。これまで得られている小惑星の自転周期は多種多様な装置で推定された値であり、どの自転周期までが眞の小惑星の自転周期分布を正しく再現しているのか、また 10 秒以下の高速自転周期を持つ小惑星が存在しないのかは明らかではない。本稿では微小 NEO の発見、特徴づけの二つの研究を行った。

第2章では Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データの中から高速移動天体を検出するシステムの開発を行った。20 平方度の広視野で約 7000 平方度の空に対し 2 fps の動画観測を行う Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測では高速移動天体の感度を低下させることなく検出することができる。しかし毎晩約 20 TB の膨大なデータに対し従来の天体検出を行うとデータ量に比例して多くの誤検出が生じてしまい、眞の移動天体の検出が困難となる。観測可能時間が短い高速移動天体の観測において眞の移動天体であるかの即時判断は不可欠である。そこで本研究では誤検出と眞の移動天体の分類を行うため、ランダムフォレストアルゴリズムを用いた機械学習モデルを作成した。さらに移動天体の中に存在する NEO 候補天体に対し即時追跡観測を行うためのウェブアプリケーションを開発した。移動天体候補の確認、天体カタログとの照合、同定、追跡観測、軌道決定、小惑星発見時の報告をインタラクティブに実行可能なウェブビューアーを完成させた。

第3章では開発した高速移動天体検出システムを用い、Tomo-e Gozen 全天サーベイ観測データからの NEO の探索を行った。高速移動天体検出システムの検出天体のうち独自の基準を満たす NEO 候補天体に対し約 1 年 4 ヶ月のサーベイ観測で 2752 回の追跡観測を実施した。Tomo-e Gozen を用いて発見した 35 天体の NEO 候補天体を小惑星センターに投稿し、18 天体に仮符号が付与された。これまでに Tomo-e Gozen が発見した NEO の平均移動速度は 2.8 arcsec/s、平均直径は 20 m であり、これまで困難であった高速移動する微小 NEO の発見に成功している。

第4章では自ら発見する NEO を含む計 29 天体の微小 NEO に対する高時間分解光度曲線観測を行った。過去に Tomo-e Gozen を用いて観測した NEO を含めた全 34 天体のうち 19 天体の自転周期を推定した。先行研究との自転周期の比較から、本研究で観測した NEO では高速自転 NEO の超過傾向が見られた。これは先行研究において高速自転を正しく検出できていなかったことを示唆する結果である。また重要な結果として、2 fps の観測

を行っても自転周期 10 秒以下の NEO は検出されなかった。微小 NEO の系統的な高速観測により高速自転小惑星の欠如を示したのは本研究が初めてである。

第5章では第4章の高時間分解光度曲線観測で初めて明らかになった微小 NEO の直径-自転周期分布の解釈を行った。YORP 効果により自転加速された微小 NEO は力学的進化過程のタイムスケール (~ 10 Myr) に比べ短いタイムスケールで自転周期 10 秒以下へと自転加速する。本研究で得られた、高速自転する NEO が少ない直径-自転周期分布は、1) 微小 NEO の内部強度は小さい、2) 微小 NEO は自転破壊、潮汐力および熱疲労により、より大きな母天体が破壊され生成した天体であるため生成後に十分な自転加速を経験していない、という二つの解釈により説明できる。

以上、本研究ではこれまでの微小 NEO の観測の困難性を克服し微小 NEO の発見と特徴づけを行った。最後に今後の課題を以下にまとめる。

1. ロバストな機械学習モデルの作成。

本研究の機械学習モデルは天候が悪化した際に多く誤検出を生成してしまう。よりロバストな機械学習モデルの作成には、NEO ビューアーの教師データ作成機能を用いることで誤ラベリングが限りなく 0 に近い教師データを用意することが有用である。

2. 超高速移動天体からの NEO 候補天体の抽出。

本研究では独自の基準として速度情報を用いて NEO 候補天体の抽出を行った。つまり見かけの速度が 5 arcsec/s よりも大きい超高速移動 NEO が存在しても追跡観測していない。これは Tomo-e Gozen の高速観測を最大限生かしきれていないことを意味する。超高速移動天体の検出点の赤道座標、速度の方向、データフレームセットでの光度変動などを用いて NEO らしさを評価し、NEO 候補天体を抽出することができれば極地球近傍を通過する NEO を発見することができる。このような NEO は第5章の潮汐力による NEO の破壊にも制限を与える有用な天体である。

3. 高時間分解光度曲線観測サンプルの増大。

第4章の結果である本研究の高速自転周期の超過傾向は現状では天体数が少なく議論の余地がある。より多くの微小 NEO の自転周期を求め、統計的な議論を展開する必要がある。

4. 分光観測、多色測光観測によるスペクトル型の決定

微小 NEO に対し、分光観測、多色測光観測によるスペクトル型の推定を行うことで第5章の解釈により強い制限をつけることができる。解釈 1) による微小 NEO の破壊が起こるのであれば、破壊されない丈夫な微小 NEO(例えば S 型) が多く存在することが予測される。一方、解釈 2) による母天体の破壊が起こるのであればよりもろい小惑星が多く破壊されることになり、観測される微小 NEO はよりもろい NEO(例えば C 型) が多く存在することが予測される。

5. 赤外線観測によるアルベドの決定

赤外線観測と可視光の観測を組み合わせることで天体のアルベドを正確に求めることができる。アルベド分布を得ることで、スペクトル型と同様に第5章の解釈に制限を与えることができる。またアルベドを求めて直径の不定性を小さくすることができる。

謝辞

修士課程二年間の研究生活において酒向重行准教授には大変お世話になりました。酒向氏の自由気ままな研究スタイルは一重に相性がよく、2年間の研究生活は充実したものとなりました。修士論文執筆に際してはこれまで以上に密な指導をしていただきました。研究以外においても、ものを大きく見せる術や人との付き合い方など人として参考にすべきことを多く学びました。心より感謝申し上げます。

大澤亮特任助教には研究全体で非常にお世話になりました。計算機に関する基本的な知識から小天体の話まで、大澤氏との議論は非常に有意義な時間でした。慣れない開発でしたが、共同での検出システムの構築には言葉にできない楽しさがありました。研究会や学会の度にいただいた多くの正確なフィードバックも研究の糧となりました。深く感謝申し上げます。

指導教員である小林尚人准教授には研究内外で大変お世話になりました。会う機会は限られていましたが、木曾から優しく包み込む小林氏の存在は研究の支えとなりました。ありがとうございました。

瀧田怜氏には定例ミーティングにおいて多くのアドバイスをいただきました。諸隈智貴氏には毎日のサーベイ観測を始め Tomo-e の観測面でお世話になりました。また木曾観測所の皆様にも大変お世話になりました。高橋英則氏には木曾の初訪問時に送迎含めお世話になりました。森由貴氏には NEO 計算機セットアップ時にネットワーク設定等を優しく教えていただき大変勉強になりました。完成前に Tomo-e に関わることになった自分を暖かく迎えてくれてくださいました Tomo-e Gozen チームの皆様には大変感謝しています。最後のセンサー部取り付け時の皆様の表情は忘れることができません。ありがとうございました。

日本スペースガード協会の浦川聖太郎氏には NEO についての多くの教わりました。対面機会は限られていましたが、ビデオやメールでの議論は有意義な時間でした。タンブリング解析に関して多くの助言をいただきました。また本研究で発見した NEO に対するスペースガードセンターの追跡観測にも感謝しています。ありがとうございました。

産業医科大学、千葉工業大学の吉田二美氏には研究書類に関して多くの助言をいただきました。数々の率直なコメントは研究に厚みを持たせることにつながりました。また発見した NEO の追観測のための国外望遠鏡の迅速な手配には大変驚かされました。ありがとうございました。

宇宙航空開発機構の吉川真氏、柳沢俊史氏、黒崎裕久氏、日本スペースガード協会の奥村真一郎氏には学会、研究会の予稿等に関して多くのコメントをいただきました。また NEO 探索状況に関して共有する機会もいただき、大変勉強になりました。ありがとうございました。

東京警察病院の佐藤英貴氏には多くの発見 NEO の追跡観測をしていただきました。コロナ禍の中、研究に励むことができたのは佐藤氏を含む医療従事者の皆様のおかげです。本当にありがとうございました。

小天体セミナーの皆様には、修士二年の一年間で多くの発表機会をいただきました。多くのフィードバックが得られる貴重な機会をありがとうございました。

宇宙航空開発研究機構の臼井文彦氏には修士論文執筆に際し、多大なる助言をいただきました。また今後の研究に役立つ多くの参考資料もいただきました。ありがとうございました。

東京大学の杉田精司氏、杉田研究室の皆様、Dr.Patrick Michel との議論は非常に有意義な時間となりました。惑星科学の最先端を学ばせていただき大変勉強になりました。一週間前に急遽発表の場を用意してくださった杉田氏の臨機応変さからは、研究者として重要なものを学ばせていただきました。ありがとうございました。

産業医科大学の門野敏彦氏には研究内容に対して有意義なコメントをいただきました。衝突実験に関して知識がない自分にわかりやすく教えていただき大変感謝しております。

天文センターの皆様には毎日のようにお世話になりました。土居守氏には特に倉敷の研究会にて NEO 追観測の可能性について議論させていただきました。多くの方と NEO の話をすすめることができ非常に良い経験となりました。宮田隆志氏には MIMIZUKU サイエンス検討会に参加させていただき、赤外線観測について学ばせていただきました。本原顕太郎氏には多くの生活を豊にする術を教えていただきました。ハワイ観測所での MIMIZUKU 運搬作業では小西真広氏、上塙貴史氏にお世話になりました。山頂作業では高山病により迷惑をかけてしましましたが、貴重な経験をすることができました。上塙氏には研究に関してコメントをいただくことも多く、お話しする中で考えを整理することができました。浅野健太朗氏には特にコロナウイルスによる在宅期間、修士論文執筆期間と健康に気を配っていただき、家族のような優しさを感じました。研究に関しても頻繁に気にかけていただきました。益原愛子氏には毎日のように議論相手になっていただきました。加藤夏子氏にはネットワークに関して色々とお世話になりました。同期である橘健吾君とは研究に限らず話をすることが多く、充実した時間を過ごすことができました。橘君の思いつきで訪れた相撲パンケーキのおかげで、過酷な作業尽くしのハワイ出張が良い思い出となりました。また多くの先輩、同期、後輩に研究の内外でお世話になりました。ありがとうございました。

公益財団法人岩垂撲学会の奨学金制度は研究生活の支えとなりました。この場を借りて感謝申し上げます。

最後に、これまでの人生における自分の全てを肯定し、応援し続けてくれている最愛なる母と兄、祖父母への感謝を表します。

参考文献

- Asphaug, E., and D. J. Scheeres. 1999. Deconstructing Castalia: Evaluating a Postimpact State. *Icarus* 139:383–386.
- Bellm, Eric C., et al. 2019. The zwicky transient facility: System overview, performance, and first results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 131:1–19.
- Benson, Conor J., Daniel J. Scheeres, and Nicholas A. Moskovitz. 2020. Spin state evolution of asteroid (367943) Duende during its 2013 earth flyby. *Icarus* 340:113518. URL <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113518>.
- Bertin, E., and S. Arnouts. 1996. SExtractor: Software for source extraction. 117:393–404.
- Binzel, R. P., F. E. DeMeo, E. V. Turtelboom, S. J. Bus, A. Tokunaga, T. H. Burbine, C. Lantz, D. Polishook, B. Carry, A. Morbidelli, M. Birlan, P. Vernazza, B. J. Burt, N. Moskovitz, S. M. Slivan, C. A. Thomas, A. S. Rivkin, M. D. Hicks, T. Dunn, V. Reddy, J. A. Sanchez, M. Granvik, and T. Kohout. 2019. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). *Icarus* 324:41–76. URL <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.12.035>.
- Binzel, Richard P., Paolo Farinella, Vincenzo Zappala, and Alberto Cellino. 1989. Asteroid rotation rates: distributions and statistics. In *Asteroids II*, ed. Richard P. Binzel, Tom Gehrels, and Mildred Shapley Matthews, 416–441.
- Binzel, Richard P., Alessandro Morbidelli, Sihane Merouane, Francesca E. Demeo, Mirel Birlan, Pierre Vernazza, Cristina A. Thomas, Andrew S. Rivkin, Schelte J. Bus, and Alan T. Tokunaga. 2010. Earth encounters as the origin of fresh surfaces on near-Earth asteroids. *Nature* 463:331–334.
- Bottke, William F., David Vokrouhlický, David P. Rubincam, and David Nesvorný. 2006. THE YARKOVSKY AND YORP EFFECTS: Implications for Asteroid Dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34:157–191.
- Bottke W.F., Jr, R. Jedicke, A. Morbidelli, J. M. Petit, and B. Gladman. 2000. Understanding the distribution of near-earth asteroids. *Science* 288:2190–2194.
- Bowell, Edward, Bruce Hapke, Deborah Domingue, Kari Lumme, Jouni Peltoniemi, and Alan W. Harris. 1989. Application of photometric models to asteroids. In *Asteroids II*, ed. Richard P. Binzel, Tom Gehrels, and Mildred Shapley Matthews, 524–556.
- Breiman, L. 1984. Classification and regression trees. *New York: Routledge* .
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45, 5–32 (2001). .
- Brozović, Marina, Lance A. M. Benner, Joseph G. McMichael, Jon D. Giorgini, Petr Pravec, Petr Scheirich, Christopher Magri, Michael W. Busch, Joseph S. Jao, Clement G. Lee, Lawrence G. Snedeker, Marc A. Silva, Martin A. Slade, Boris Semenov, Michael C. Nolan, Patrick A. Taylor, Ellen S. Howell, and Kenneth J. Lawrence. 2018. Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012–2013. 300:115–128.
- Burns, Joseph A., and V. S. Safronov. 1973. Asteroid nutation angles. 165:403.
- Ďurech, J., D. Vokrouhlický, A. R. Baransky, S. Breiter, O. A. Burkhanov, W. Cooney, V. Fuller, N. M. Gaftonyuk, J. Gross, R. Y. Inasaridze, M. Kaasalainen, Y. N. Krugly, O. I. Kvaratshelia, E. A. Litvinenko, B. MacOmber, F. Marchis, I. E. Molotov, J. Oey, D. Polishook, J. Pollock, P. Pravec, K. Sárnczky, V. G. Shevchenko, I. Slyusarev, R. Stephens, Gy Szabó, D. Terrell, F. Vachier, Z. Vanderplate, M. Viikinkoski,

- and B. D. Warner. 2012. Analysis of the rotation period of asteroids (1865) Cerberus, (2100) Ra-Shalom, and (3103) Eger-search for the YORP effect. *Astronomy and Astrophysics* 547:1–9.
- Ďurech, J., D. Vokrouhlický, M. Kaasalainen, D. Higgins, Yu N. Krugly, N. M. Gaftonyuk, V. G. Shevchenko, V. G. Chiorny, H. Hamanowa, H. Hamanowa, V. Reddy, and R. R. Dyvig. 2008. Detection of the YORP effect in asteroid (1620) Geographos. *Astronomy and Astrophysics* 489.
- Čapek, D., and D. Vokrouhlický. 2004. The YORP effect with finite thermal conductivity. *Icarus* 172:526–536.
- Chambers, K. C., et al. 2016. The Pan-STARRS1 Surveys URL <http://arxiv.org/abs/1612.05560>.
- Chant, C. A. 1913. An Extraordinary Meteoric Display. 7:145.
- Chesley, Steven R., Davide Farnocchia, Michael C. Nolan, David Vokrouhlický, Paul W. Chodas, Andrea Milani, Federica Spoto, Benjamin Rozitis, Lance A. M. Benner, William F. Bottke, Michael W. Busch, Joshua P. Emery, Ellen S. Howell, Dante S. Lauretta, Jean-Luc Margot, and Patrick A. Taylor. 2014. Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target Asteroid (101955) Bennu. 235:5–22.
- Colwell, J. E., S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, and S. Sture. 2007. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics. *Reviews of Geophysics* 45:1–26.
- De León, J., J. L. Ortiz, N. Pinilla-Alonso, A. Cabrera-Lavers, A. Alvarez-Candal, N. Morales, R. Duffard, P. Santos-Sanz, J. Licandro, A. Pérez-Romero, V. Lorenzi, and S. Cikota. 2013. Visible and near-infrared observations of asteroid 2012 DA14 during its closest approach of February 15, 2013. *Astronomy and Astrophysics* 555:2–6.
- Delbo, Marco, Guy Libourel, Justin Wilkerson, Naomi Murdoch, Patrick Michel, K. T. Ramesh, Clément Ganino, Chrystele Verati, and Simone Marchi. 2014. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids. *Nature* 508:233–236.
- Devogeole, Maxime, Nicholas Moskovitz, Audrey Thirouin, Annika Gustaffson, Mitchell Magnuson, Cristina Thomas, Mark Willman, Eric Christensen, Michael Person, Richard Binzel, David Polishook, Francesca DeMeo, Mary Hinkle, David Trilling, Michael Mommert, Brian Burt, and Brian Skiff. 2019. Visible spectroscopy from the Mission Accessible Near-Earth Object Survey (MANOS): Taxonomic dependence on asteroid size URL <http://arxiv.org/abs/1909.04788>.
- Dong, Wei, Charikar Moses, and Kai Li. 2011. Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures. In *Proceedings of the 20th International Conference on World Wide Web*, WWW '11, 577–586. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. URL <https://doi.org/10.1145/1963405.1963487>.
- Farinella, Paolo, David Vokrouhlický, and William K. Hartmann. 1998. Meteorite Delivery via Yarkovsky Orbital Drift. *Icarus* 132:378–387.
- Fukugita, M., T. Ichikawa, J. E. Gunn, M. Doi, K. Shimasaku, and D. P. Schneider. 1996. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System. 111:1748.
- Gaia Collaboration, et al. 2018. Gaia data release 2 - summary of the contents and survey properties. *A&A* 616:A1. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>.
- Gladman, Brett J., Fabbio Migliorini, Alessandro Morbidelli, Vincenzo Zappalà, Patrick Michel, Alberto Cellino, Christiane Froeschlé, Harold F. Levison, Mark Bailey, and Martin Duncan. 1997. Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances. *Science* 277:197–201.
- Granvik, Mikael, Alessandro Morbidelli, Robert Jedicke, Bryce Bolin, William F. Bottke, Edward Beshore, David Vokrouhlický, Marco Delbò, and Patrick Michel. 2016. Super-catastrophic disruption of asteroids at small perihelion distances. 530:303–306.
- Granvik, Mikael, Alessandro Morbidelli, Robert Jedicke, Bryce Bolin, William F. Bottke, Edward Beshore, David Vokrouhlický, David Nesvorný, and Patrick Michel. 2018. Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus* 312:181–207. URL <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.04.018>.
- Greenberg, Adam H., Jean-Luc Margot, Ashok K. Verma, Patrick A. Taylor, and Susan E. Hodge. 2020.

- Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids. *The Astronomical Journal* 159:92. URL <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab62a3>.
- Greenstreet, Sarah. 2020. Orbital Dynamics of 2020 AV2: the First Vatira Asteroid 3:1–3. URL <http://arxiv.org/abs/2001.09083>.
- Harris, Alan W. 1994. Tumbling Asteroids. 107:209–211.
- Harris, Alan W. 1998. A Thermal Model for Near-Earth Asteroids. *Icarus* 131:291–301.
- Hatch, Patrick, and Paul A. Wiegert. 2015. On the rotation rates and axis ratios of the smallest known near-Earth asteroids - The archetypes of the Asteroid Redirect Mission targets. *Planetary and Space Science* 111:100–104. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.03.019>.
- Hayes-Gehrke, Melissa N, Taylor Leffler, Karley Hampton, Jacob Chavis, Joseph Fong, Yu Wang, Andrew Hung, James Mahoney, Muhammad Haziq, and Aiman Saiful Rizal. 2018. the Minor Planet Bulletin. *Minor Planet Bulletin* 45:110. URL <http://www.minorplanet.info/minorplanetbulletin.html>.
- Henghes, B., O. Lahav, D. W. Gerdes, E. Lin, R. Morgan, T. M. C. Abbott, M. Aguena, S. Allam, J. Annis, S. Avila, E. Bertin, D. Brooks, D. L. Burke, A. CarneroRosell, M. CarrascoKind, J. Carretero, C. Conselice, M. Costanzi, L. N. da Costa, J. DeVicente, S. Desai, H. T. Diehl, P. Doel, S. Everett, I. Ferrero, J. Frieman, J. García-Bellido, E. Gaztanaga, D. Gruen, R. A. Gruendl, J. Gschwend, G. Gutierrez, W. G. Hartley, S. R. Hinton, K. Honscheid, B. Hoyle, D. J. James, K. Kuehn, N. Kuropatkin, J. L. Marshall, P. Melchior, F. Menanteau, R. Miquel, R. L. C. Ogando, A. Palmese, F. Paz-Chinchón, A. A. Plazas, A. K. Romer, C. Sánchez, E. Sanchez, V. Scarpine, M. Schubnell, S. Serrano, M. Smith, M. Soares-Santos, E. Suchyta, G. Tarle, C. To, and R. D. Wilkinson. 2020. Machine Learning for Searching the Dark Energy Survey for Trans-Neptunian Objects. *arXiv e-prints* arXiv:2009.12856.
- Hergenrother, C. W., et al. 2019. The operational environment and rotational acceleration of asteroid (101955) bennu from osiris-rex observations. *Nature Communications* 10.
- Holsapple, Keith A. 2007. Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61. *Icarus* 187:500–509.
- Housen, Kevin R., and Keith A. Holsapple. 1999. Scale Effects in Strength-Dominated Collisions of Rocky Asteroids. *Icarus* 142:21–33.
- Ivezić, Željko, et al. 2019. LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products. *The Astrophysical Journal* 873:111.
- Jacobson, Seth A., Francesco Marzari, Alessandro Rossi, Daniel J. Scheeres, and Donald R. Davis. 2014. Effect of rotational disruption on the size-frequency distribution of the main belt asteroid population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 439.
- Jedicke, R., M. Granvik, M. Micheli, E. Ryan, T. Spahr, and D. K. Yeomans. 2015. *Surveys, Astrometric Follow-Up, and Population Statistics*, 795–813.
- Jenniskens, P., M. H. Shaddad, D. Numan, S. Elsir, A. M. Kudoda, M. E. Zolensky, L. Le, G. A. Robinson, J. M. Friedrich, D. Rumble, A. Steele, S. R. Chesley, A. Fitzsimmons, S. Duddy, H. H. Hsieh, G. Ramsay, P. G. Brown, W. N. Edwards, E. Tagliaferri, M. B. Boslough, R. E. Spalding, R. Dantowitz, M. Kozubal, P. Pravec, J. Borovicka, Z. Charvat, J. Vaubaillon, J. Kuiper, J. Albers, J. L. Bishop, R. L. Mancinelli, S. A. Sandford, S. N. Milam, M. Nuevo, and S. P. Worden. 2009. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3. *Nature* 458:485–488.
- Jordi, K., E. K. Grebel, and K. Ammon. 2006. Empirical color transformations between SDSS photometry and other photometric systems. *Astronomy and Astrophysics* 460:339–347.
- Kaasalainen, Mikko, Josef Durech, Brian D. Warner, Yurij N. Krugly, and Ninel M. Gaftonyuk. 2007. Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques. 446:420–422.
- Kadono, Toshihiko, Masahiko Arakawa, Takashi Ito, and Keiji Ohtsuki. 2009. Spin rates of fast-rotating asteroids and fragments in impact disruption. *Icarus* 200:694 – 697. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103508004223>.

- Kojima, Y. 2019. 木曾広視野高速 cmos カメラの性能評価及び高速移動する地球接近天体の広視野探査. *U-Tokyo*.
- Kwiatkowski, T., M. Polinska, N. Loaring, D. A.H. Buckley, D. O'Donoghue, A. Kniazev, and E. Romero Colmenero. 2010. Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope: III. Lightcurves and periods for 12 objects and negative detections. *Astronomy and Astrophysics* 511:1–10.
- Lomb, N. R. 1976. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. 39:447–462.
- Lowry, S. C., P. R. Weissman, S. R. Duddy, B. Rozitis, A. Fitzsimmons, S. F. Green, M. D. Hicks, C. Snodgrass, S. D. Wolters, S. R. Chesley, J. Pittichová, and P. Van Oers. 2014. The internal structure of asteroid (25143) Itokawa as revealed by detection of YORP spin-up. *Astronomy and Astrophysics* 562.
- Lowry, Stephen C., Alan Fitzsimmons, Petr Pravec, David Vokrouhlický, Hermann Boehnhardt, Patrick A. Taylor, Jean-Luc Margot, Adrian Galád, Mike Irwin, Jonathan Irwin, and Peter Kusnirák. 2007. Direct Detection of the Asteroidal YORP Effect. *Science* 316:272.
- Marcos, C. de la Fuente, and R. de la Fuente Marcos. 2019. Understanding the evolution of Atira-class asteroid 2019 AQ3, a major step towards the future discovery of the Vatira population. *arXiv* 2752:2742–2752.
- Margot, Jean Luc, Petr Pravec, Patrick Taylor, Benoît Carry, and Seth Jacobson. 2015. Asteroid systems: Binaries, triples, and Pairs. *Asteroids IV* 355–373.
- Masci, Frank J., Russ R. Laher, Ben Rusholme, David L. Shupe, Steven Groom, Jason Surace, Edward Jackson, Serge Monkewitz, Ron Beck, David Flynn, Scott Terek, Walter Landry, Eugean Hacopians, Vandana Desai, Justin Howell, Tim Brooke, David Imel, Stefanie Wachter, Quan Zhi Ye, Hsing Wen Lin, S. Bradley Cenko, Virginia Cunningham, Umaa Rebbapragada, Brian Bue, Adam A. Miller, Ashish Mahabal, Eric C. Bellm, Maria T. Patterson, Mario Jurić, V. Zach Golkhou, Eran O. Ofek, Richard Walters, Matthew Graham, Mansi M. Kasliwal, Richard G. Dekany, Thomas Kupfer, Kevin Burdge, Christopher B. Cannella, Tom Barlow, Angela Van Sistine, Matteo Giomi, Christoffer Fremling, Nadejda Blagorodnova, David Levitan, Reed Riddle, Roger M. Smith, George Helou, Thomas A. Prince, and Shrinivas R. Kulkarni. 2019. The Zwicky transient facility: Data processing, products, and archive. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 131:1–30.
- Mommert, M., D. E. Trilling, D. Borth, R. Jedicke, N. Butler, M. Reyes-Ruiz, B. Pichardo, E. Petersen, T. Axelrod, and N. Moskovitz. 2016. First Results From the Rapid-Response Spectrophotometric Characterization of Near-Earth Objects Using Ukirt. *The Astronomical Journal* 151:98. URL <http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/151/4/98>.
- Nesvorný, D., William F. Bottke, David Vokrouhlický, Clark R. Chapman, and Scot Rafkin. 2010. Do planetary encounters reset surfaces of near Earth asteroids? *Icarus* 209:510–519.
- Nesvorný, D., M. Brož, and V. Carruba. 2015. *Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families*, 297–321.
- Paolicchi, P., J. A. Burns, and S. J. Weidenschilling. 2002. *Side Effects of Collisions: Spin Rate Changes, Tumbling Rotation States, and Binary Asteroids*, 517–526.
- Perna, D., M. A. Barucci, M. Fulchignoni, M. Popescu, I. Belskaya, S. Fornasier, A. Doressoundiram, C. Lantz, and F. Merlin. 2018. A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening. *Planetary and Space Science* 157:82–95.
- Popova, Olga P., Peter Jenniskens, Vacheslav Emel, Anna Kartashova, Eugeny Biryukov, Sergey Khaibrakhmanov, Valery Shuvalov, Yurij Rybnov, Alexandr Dudorov, Victor I Grokhovsky, Dmitry D Badyukov, Qing-zhu Yin, Peter S Gural, Jim Albers, Mikael Granvik, Láslo G Evers, Jacob Kuiper, Vladimir Kharlamov, Andrey Solovyov, Yuri S Rusakov, Stanislav Korotkiy, Ilya Serdyuk, Alexander V Korochantsev, Michail Yu Larionov, Dmitry Glazachev, Alexander E Mayer, Galen Gisler, Sergei V Gladkovsky, Josh Wimpenny, Matthew E Sanborn, Akane Yamakawa, Kenneth L Verosub, Douglas J Rowland, Sarah Roeske, Nicholas W Botto, Jon M Friedrich, Michael E Zolensky, Loan Le, Daniel Ross, Qiu-li Li, Yu Liu, Guo-qiang Tang, Takahiro Hiroi, Derek Sears, and Ilya A Weinstein. 2013. RESEARCH ARTICLE

- Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization 342:1069–1074.
- Pravec, P., and A. W. Harris. 2007. Binary asteroid population. 1. Angular momentum content. *Icarus* 190:250–259.
- Pravec, Petr, and Alan W. Harris. 2000. Fast and Slow Rotation of Asteroids. *Icarus* 148:12–20.
- Rossi, A., F. Marzari, and D. J. Scheeres. 2009. Computing the effects of YORP on the spin rate distribution of the NEO population. *Icarus* 202:95–103. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.030>.
- Rubincam, David Parry. 2000. Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids. *Icarus* 148:2–11.
- Sako, Shigeyuki, Ryou Ohsawa, Hidenori Takahashi, Yuto Kojima, Mamoru Doi, Naoto Kobayashi, Tsutomu Aoki, Noriaki Arima, Ko Arimatsu, Makoto Ichiki, Shiro Ikeda, Kota Inooka, Yoshifusa Ita, Toshihiro Kasuga, Mitsuru Kokubo, Masahiro Konishi, Hiroyuki Maehara, Noriyuki Matsunaga, Kazuma Mitsuda, Takashi Miyata, Yuki Mori, Mikio Morii, Tomoki Morokuma, Kentaro Motohara, Yoshikazu Nakada, Shin-Ichiro Okumura, Yuki Sarugaku, Mikiya Sato, Toshikazu Shigeyama, Takao Soyano, Masaomi Tanaka, Ken'ichi Tarusawa, Nozomu Tominaga, Tomonori Totani, Seitaro Urakawa, Fumihiro Usui, Junichi Watanabe, Takuya Yamashita, and Makoto Yoshikawa. 2018. The Tomo-e Gozen wide field CMOS camera for the Kiso Schmidt telescope. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, ed. Christopher J. Evans, Luc Simard, and Hideki Takami, volume 10702, 140 – 156. International Society for Optics and Photonics, SPIE. URL <https://doi.org/10.1117/12.2310049>.
- Sánchez, P., and D. J. Scheeres. 2014. The strength of regolith and rubble pile asteroids. *Meteoritics and Planetary Science* 49:788–811.
- Scargle, J. D. 1982. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. 263:835–853.
- Schulte, Peter, Laia Alegret, Ignacio Arenillas, José A. Arz, Penny J. Barton, Paul R. Bown, Timothy J. Bralower, Gail L. Christeson, Philippe Claeys, Charles S. Cockell, Gareth S. Collins, Alexander Deutsch, Tamara J. Goldin, Kazuhisa Goto, José M. Grajales-Nishimura, Richard A.F. Grieve, Sean P.S. Gulick, Kirk R. Johnson, Wolfgang Kiessling, Christian Koeberl, David A. Kring, Kenneth G. MacLeod, Taka-fumi Matsui, Jay Melosh, Alessandro Montanari, Joanna V. Morgan, Clive R. Neal, Douglas J. Nichols, Richard D. Norris, Elisabetta Pierazzo, Greg Ravizza, Mario Rebollo-Vieyra, Wolf Uwe Reimold, Eric Robin, Tobias Salge, Robert P. Speijer, Arthur R. Sweet, Jaime Urrutia-Fucugauchi, Vivi Vajda, Michael T. Whalen, and Pi S. Willumsen. 2010. The chicxulub asteroid impact and mass extinction at the cretaceous-paleogene boundary. *Science* 327:1214–1218.
- Sekanina, Z., P. W. Chodas, and D. K. Yeomans. 1994. Tidal disruption and the appearance of periodic comet Shoemaker-Levy 9. 289:607–636.
- Sekiguchi, T, M Abe, H Boehnhardt, B Dermawan, O R Hainaut, and S Hasegawa. 2003. Astrophysics Thermal observations of MUSES-C mission target (25143) 1998 SF 36 328:325–328.
- Taylor, Patrick A., Jean-Luc Margot, David Vokrouhlický, Daniel J. Scheeres, Petr Pravec, Stephen C. Lowry, Alan Fitzsimmons, Michael C. Nolan, Steven J. Ostro, Lance A. M. Benner, Jon D. Giorgini, and Christopher Magri. 2007. Spin Rate of Asteroid (54509) 2000 PH5 Increasing Due to the YORP Effect. *Science* 316:274.
- Thirouin, A., N. Moskovitz, R. P. Binzel, E. Christensen, F. E. DeMeo, M. J. Person, D. Polishook, C. A. Thomas, D. Trilling, M. Willman, M. Hinkle, B. Burt, D. Avner, and F. J. Aceituno. 2016. the Mission Accessible Near-Earth Objects Survey (Manos): First Photometric Results. *The Astronomical Journal* 152:163. URL <http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/163>.
- Thirouin, Audrey, Nicholas A. Moskovitz, Richard P. Binzel, Eric J. Christensen, Francesca E. DeMeo, Michael J. Person, David Polishook, Cristina A. Thomas, David Trilling, Mark C. Willman, Brian Burt, Mary L. Hinkle, and Teznie Pugh. 2018. The Mission Accessible Near-Earth Objects Survey: Four Years of Photometry. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 239:4. URL <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/aae1b0>.
- Tonry, J. L., L. Denneau, A. N. Heinze, B. Stalder, K. W. Smith, S. J. Smartt, C. W. Stubbs, H. J. Weiland,

- and A. Rest. 2018. Atlas: A high-cadence all-sky survey system. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 130:64505. URL <http://dx.doi.org/10.1088/1538-3873/aabadf>.
- Urakawa, Seitaro, Ryou Ohsawa, Shigeyuki Sako, Shin-ichiro Okumura, Yuri Sakurai, Jun Takahashi, Kazuyoshi Imamura, Hiroyuki Naito, Fumitake Watanabe, Ryoma Nagayoshi, Yasuhiko Murakami, Ryo Okazaki, Tomohiko Sekiguchi, Masateru Ishiguro, Tatsuhiro Michikami, and Makoto Yoshikawa. 2019. Shape and Rotational Motion Models for Tumbling and Monolithic Asteroid 2012 TC 4 : High Time Resolution Light Curve with the Tomo-e Gozen Camera . *The Astronomical Journal* 157:155.
- Vaduvescu, O., A. Aznar Macias, V. Tudor, M. Predatu, A. Galád, Gajdoš, J. Világi, H. F. Stevance, R. Errmann, E. Unda-Sanzana, F. Char, N. Peixinho, M. Popescu, A. Sonka, R. Cornea, O. Suciu, R. Toma, P. Santos-Sanz, A. Sota, J. Licandro, M. Serra-Ricart, D. Morate, T. Mocnik, M. Diaz Alfaro, F. Lopez-Martinez, J. McCormac, and N. Humphries. 2017. The EURONEAR Lightcurve Survey of Near Earth Asteroids. *Earth, Moon and Planets* 120:41–100.
- VanderPlas, Jacob T. 2018. Understanding the Lomb–Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 236:16. URL <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/aab766>.
- Vokrouhlický, D., A. Milani, and S. R. Chesley. 2000. Yarkovsky Effect on Small Near-Earth Asteroids: Mathematical Formulation and Examples. *Icarus* 148:118–138.
- Vokrouhlický, D., and D. Čapek. 2002. YORP-Induced Long-Term Evolution of the Spin State of Small Asteroids and Meteoroids: Rubincam’s Approximation. 159:449–467.
- Vokrouhlický, David, William F. Bottke, Steven R. Chesley, Daniel J. Scheeres, and Thomas S. Statler. 2015. The Yarkovsky and YORP effects. *Asteroids IV* 509–531.
- Weiner, B., E. Pearce, H. Krantz, A. Block, R. Howie, S. Kattner, S. Self, and G. Williams. 2020. MMT/Binospec spectroscopy of near earth object 2020 SO distinguishes it from common natural asteroids. *The Astronomer’s Telegram* 14241:1.
- Wiegert, Paul A. 2015. Meteoroid impacts onto asteroids: A competitor for Yarkovsky and YORP. *Icarus* 252:22–31. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2014.12.022>.
- Wright, Edward L., Amy Mainzer, Joseph Masiero, Tommy Grav, and James Bauer. 2016. the Albedo Distribution of Near Earth Asteroids. *The Astronomical Journal* 152:79. URL <http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/4/79>.
- Ye, Quanzhi, Frank J. Masci, Wing-Huen Ip, Thomas A. Prince, George Helou, Davide Farnocchia, Eric C. Bellm, Richard Dekany, Matthew J. Graham, Shrinivas R. Kulkarni, Thomas Kupfer, Ashish Mahabal, Chow-Choong Ngeow, Daniel J. Reiley, and Maayane T. Soumagnac. 2020. A Twilight Search for Atiras, Vatiras, and Co-orbital Asteroids: Preliminary Results. 159:70.
- Yeomans, D K, P G Antreasian, J Barriot, S R Chesley, D W Dunham, R W Farquhar, J D Giorgini, C E Helfrich, A S Konopliv, J V Mc Adams, J K Miller, W M Owen Jr, D J Scheeres, P C Thomas, J Veverka, and B G Williams. 2000. Radio Science Results During the NEAR-Shoemaker Spacecraft Rendezvous with Eros 289:2085–2089.
- Zappala, V., A. Cellino, A. M. Barucci, M. Fulchignoni, and D. F. Lupishko. 1990. An analysis of the amplitude-phase relationship among asteroids. 231:548–560.
- Zhang, Yun, and Patrick Michel. 2020. Tidal distortion and disruption of rubble-pile bodies revisited – Soft-sphere discrete element analyses 1–15. URL <http://arxiv.org/abs/2006.14030>.

付録

以下の項目を付録として掲載する。

A. 小惑星に関する補足

B. 機械学習に関する補足

機械学習（ランダムフォレスト）の概要と7つの機械学習モデルの天体検出パラメーターの分布。視認性をあげるために外れ値を除いて作成(3 sigma clipped)。フレーム数に依存しないモデルを構築するため model202008 以降いくつかの検出ぱたメーターを規格化しており、それ以前のモデルと比べ検出パラメーターの絶対値が変化している。model202011で用いた天体検出パラメーターの種類は本文の model202012 の天体検出パラメーターと同一。他のモデルでの天体検出パラメーターは以下の通り。末尾の1、2は最初、最後のフレームでの値、X、Yはそれぞれx、y成分を表す。

FWHM_IMAGE:本文 fwhm に対応。X2_IMAGE:本文 x2 に対応。XY:本文 xy に対応。FLUX_MAX:検出のフラックスの最大値。FLUXERR_BEST:検出フラックスの誤差の最大値。本文での fluxerr は平均値であり異なる。BACKGROUND:本文 bg_level に対応。MOVE_MEAN:本文 vnorm の x、y 成分の値。MOVE_STD:本文 svx、svy に対応。TRACKS:本文 tracks に対応。SIGN_COUNT:本文 cx、xy に対応。

C. 測光解析

D. 周期解析

周期解析の手法の解説と、擬似光度曲線を用いた周期推定シミュレーション。

E. 光度曲線

Tomo-e Gozen を用いて観測した微小 NEO の光度曲線。横軸は1フレーム目の観測時刻からの経過時間(秒)。縦軸は Gaia カタログを用いて相対測光した G-band magnitude。複数回光度曲線を取得したデータは 2017WJ₁₆1 のように回数を表記した。また自転周期が短い天体は 2017WJ₁₆2 2000 – 4000s のように一部の時間の光度曲線を添付した。天体はアルファベット順に並べた。

F. 折りたたみ光度曲線/Lomb-Scargel periodogram

Lomb-Scargle 解析を行った周期解析結果(左)と推定した自転周期で折りたたんだ光度曲線。本稿で周期が求まらないと判断した天体については周期解析結果のみを掲載。天体はアルファベット順に並べた。

A 小惑星に関する補足

A.1 小惑星の基礎

軌道要素

小天体の軌道要素の概念図を図 A.1 に示す。各軌道要素の説明を表 A.1 にまとめる。

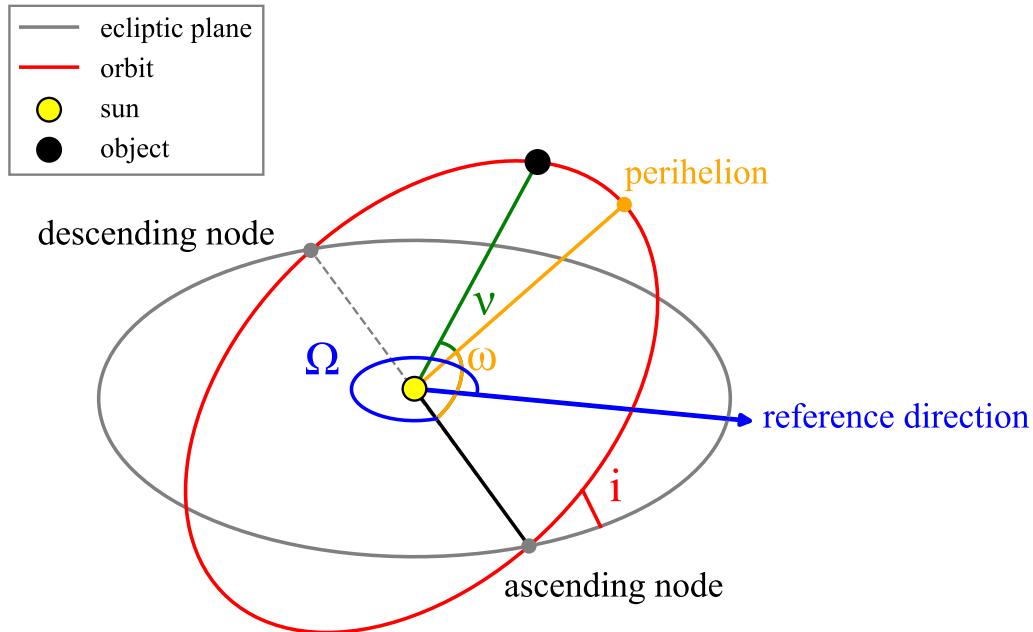


図 A.1 太陽系天体軌道要素概念図。

太陽 (黄色) の周りを円軌道で公転する天体 (黒色) を表す。灰色円、赤色円はそれぞれ黄道面と天体の軌道を表している。天体の軌道の昇交点 (ascending node)、降交点 (descending node)、近日点 (perihelion)、 i は軌道傾斜角、 ω は近日点引数、 ν は真近点角、 Ω は昇交点黄経、reference direction は天体から見た春分点方向。

表 A.1 軌道要素の定義

軌道要素	シンボル	説明
軌道長半径 (semimajor axis)	a	平均的な太陽からの距離。軌道のスケールを決める。
軌道離心率 (eccentricity)	e	軌道の形状を表す。 $0 < e < 1$ で橢円軌道、 $e = 1$ で放物線軌道、 $e > 1$ で双曲線軌道となる。
軌道傾斜角 (inclination)	i	基準面 (黄道面) に対する軌道の傾きを表す。 逆行天体で 90° 以上となる。
近(日)点引数 (argument of perihelion)	ω	軌道面の回転を表す。
昇交点黄経 (longitude of ascending node)	Ω	基準面 (黄道面) に対する軌道面の向きを表す。
平均近点角 (mean anomaly)	M	天体の橢円軌道と外接する円軌道を天体と等しい周期で等速 円運動しつつ近日点を同時刻で通過する仮想天体を考えたときに 円軌道の中心からみて、仮想天体が元期において存在する位置と 近日点がなす角。離心率と真近点角とケプラー方程式で結びつく。 $e \geq 1$ では定義できない。
真近点角 (true anomaly)	ν	太陽から近日点に向けた半直線と太陽から天体に向けた半直線の なす角。離心率と平均近点角とケプラー方程式で結びつく。
元期 (epoch)		軌道要素が得られた時刻を表す。

軌道要素による NEO のクラス分類

NEO は軌道要素を用いて細分化される (A.2)。

表 A.2 軌道要素による NEO のクラス分類

クラス	定義 ^a	発見数 ¹	例	説明
アモール群 (Amors)	$a > 1.0 \text{ au}, 1.017 < q < 1.3 \text{ au}$	9026	(1221) Amor	常に地球の外側の軌道。
アポロ群 (Apollos)	$a > 1.0 \text{ au}, q < 1.017 \text{ au}$	13442	(1862) Apollo	軌道長半径が地球よりも大きく 地球に交差する軌道。
アテン群 (Atens)	$a < 1.0 \text{ au}, Q > 0.983 \text{ au}$	1851	(2062) Aten	軌道長半径が地球よりも小さく 地球と交差する軌道。
アティラ群 (Atiras)	$Q < 0.983 \text{ au}$	23	(163693) Atira	常に地球の内側の軌道。
ヴァティラ群 (Vatiras) ^b	$Q < 0.718 \text{ au}$	1	2020 AV ₂	常に金星の内側の軌道。

^a 1.017、0.983、0.718 au はそれぞれ地球の遠日点距離、近日点距離、金星の近日点距離。

^b アティラ群のサブグループ。

観測における角度

太陽系内天体観測においては位相角 (phase angle)、アスペクト角 (aspect angle)、自転傾斜角 (obliquity angle) の三つの角度が定義される (図 A.2)。位相角は天体の軌道が定まれば決まる量である。光度曲線観測により形状を求める際には自転傾斜角、アスペクト角は仮定することが多い。

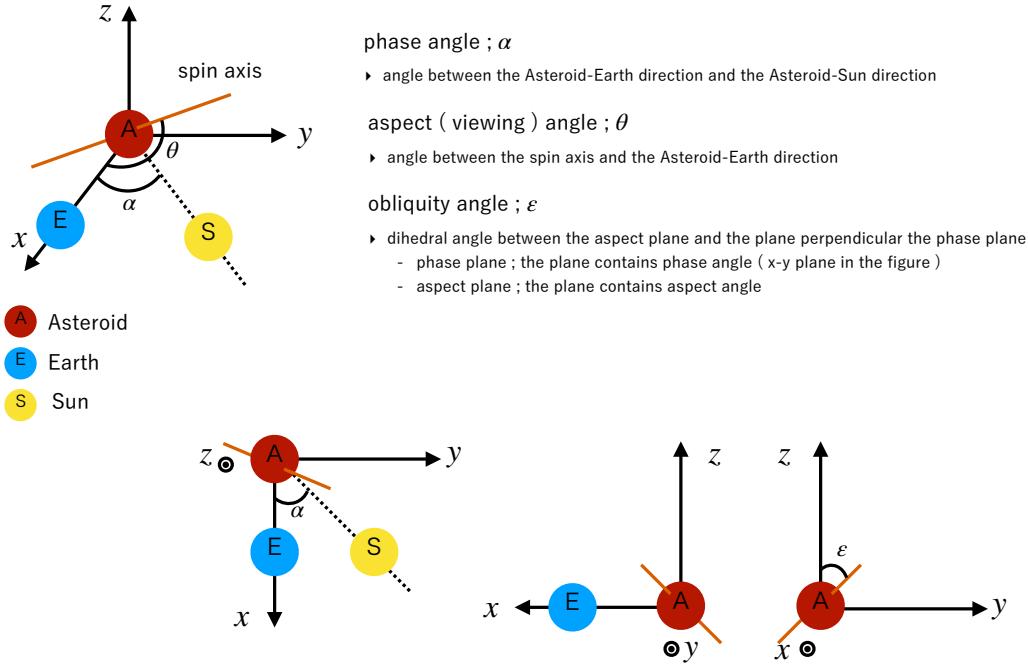


図 A.2 小天体観測における角度の模式図。
茶色、水色、黄色の円はそれぞれ小惑星、地球、太陽を表す。

小惑星のサイズ推定

単色の観測データから得られる天体の等級を用いて小惑星のサイズ(直径)を推定することができる。地上観測によるサイズ推定は以下の手順で行われる。V バンドフィルターを用いて位相角 α 、地心距離 Δ 、日心距離 R の小惑星を観測する場合を考える。V バンド等級でない場合は測定した等級を変換することで同様の推定が可能となる (Fukugita et al. 1996; Jordi et al. 2006)。まず、視等級を換算等級に変換する。換算等級は太陽位相角が α 、日心距離と地心距離が 1 au の時的小惑星の等級である。測定した等級が V_{obs} である時、換算等級が以下で求められる。

$$H(\alpha) = V_{\text{obs}} - 5 \log_{10}(R\Delta) \quad (\text{A.1})$$

次に換算等級を絶対等級に変換する。絶対等級は太陽位相角が 0° 、日心距離と地心距離が 1 au の時的小惑星の等級である。物理的には起こり得ない状況であるが便宜的に定義されサイズの指標として広く用いられている。換算等級 $H(\alpha)$ を用いて絶対等級は以下で求められる (Bowell et al. 1989)。

$$H = H(\alpha) + 2.5 \log_{10} [(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \quad (\text{A.2})$$

ただし G はスロープパラメーターとよばれスペクトル型と関係があることがわかっている。 Φ_1 、 Φ_2 は位相関数である。これらは広い位相角で観測を行うことで推定できる物理量である。新しい小惑星発見時など限られた位相角の観測からサイズ(絶対等級)を求める際は経験的な典型値を用いることになる。 G は 0.15 という値を仮定することが多い。最後に以下の式を用いて絶対等級をサイズへ変換する (Harris 1998)。

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_V}} \times 10^{-\frac{H}{5}} \quad (\text{A.3})$$

ただし D は天体直径(km)、 p_V は天体の V バンド幾何アルベド(反射率)である。以上のように地上観測で得られる情報からサイズを推定するには多くの仮定を用いる必要がある。正確なサイズの推定には熱観測 (Harris

1998; Sekiguchi et al. 2003)、レーダー観測によるサイズ測定 (Brozović et al. 2018)、高空間分解能観測、探査機によるその場探査などが必要である。

光度曲線からの物理量の導出

小惑星を軸の長さが a 、 b 、 c ($a > b > c$) の三軸不等辯円体と仮定すると、自転に伴う等級振幅は

$$\Delta m = 2.5 \log \left(\frac{a}{b} \right) - 1.25 \log \left(\frac{a^2 \cos \xi^2 + c^2 \sin \xi^2}{b^2 \cos \xi^2 + c^2 \sin \xi^2} \right), \quad (\text{A.4})$$

と表される (Binzel et al. 1989; Thirouin et al. 2016)。この式をアスペクト角 $\xi = 90^\circ$ を仮定して軸比 (b/a) について解くことで軸比の下限値が求まる。

$$\frac{a}{b} \geq 10^{0.4 \Delta m} \quad (\text{A.5})$$

また観測で得られる等級振幅は位相角に依存することがわかっている (Zappala et al. 1990)。小惑星組成 (スペクトル型) に依存した係数 s を用い、以下の式で位相角 0° の等級振幅を推定することができる。

$$\Delta m(\alpha = 0^\circ) = \frac{\Delta m(\alpha)}{1 + s\alpha} \quad (\text{A.6})$$

特に地球近傍を通過する NEO の観測では比較的高位相角での観測を行うことができ、低位相角に比べ大きな等級振幅が得られることになる。そのようなデータの等級振幅を用いて小惑星形状に関連する軸比などを推定する際は上記の補正を行った値を用いる必要がある。

以上を整理すると、観測から得られる位相角 α での等級振幅から小惑星の軸比は

$$\frac{a}{b} = 10^{0.4 \frac{\Delta m(\alpha)}{1 + s\alpha}}, \quad (\text{A.7})$$

と推定することができる。ただし a 、 b は小惑星の長軸、短軸、 α は観測時の太陽位相角、 s は小惑星毎に決まる定数である。 s については NEO に多い小惑星型である S 型小惑星の典型値 0.03 を用いる。近地球小惑星は高位相角でも観測を行うことができるため、この補正を行わなければ正確な軸比の下限値を得ることはできない。

光度曲線から求める形状は、アスペクト角の不定性から下限値となる。サイズ推定と同様レーダー観測やその場観測によりより詳細な形状を得ることができる (Brozović et al. 2018)。

ラブルパイル小惑星のスピンバリア

遠心力と重力の釣り合いより、秒単位の臨界自転周期 P_{cri} は

$$P_{\text{cri}} = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}, \quad (\text{A.8})$$

と表すことができる。ただし G 、 ρ はそれぞれ MKS 単位系での万有引力定数、密度である。典型的な密度を代入すると、ラブルパイル小惑星の臨界自転周期は約 2 時間と求まる。

A.2 小惑星情報の詳細

本稿で取り扱った小惑星関連情報について詳細をまとめる。

接近天体の確認

MPC のトップページ⁵¹ 右側下段に Close Approaches として約 2 ヶ月間に接近する天体が掲載されている。本研究における高時間分解光度曲線観測の観測天体を定める上で参考とした情報である。毎日それらの天体の天体暦を MPC の天体暦計算ページ⁵² を用いて確認し、基準を満たしている天体を観測した。ただし地球に接近し高速移動する天体の天体暦は精度が悪いことがある(大きい時には分角)。そのような天体の観測を行う際には NASA JPL Horizons⁵³ の天体歴も参考にした。

また仮符号取得前 NEO の光度曲線観測では仮符号取得前 NEO の公開ページ⁵⁴ を用いて観測対象の天体暦を取得した。

MPC 形式

MPC に対する観測報告は MPC が指定する形式で行う必要がある。これを MPC 形式といい、一行 80 文字からなるテキストである。詳細は MPC ホームページにて述べられている。⁵⁵

Find_Orb を用いた軌道計算

複数回観測を行った NEO は軌道計算ソフト Find_Orb⁵⁶ を用いて軌道計算を行った。Project Pluto により開発されているソフトウェアであり、オンライン版⁵⁷ を用いて軌道計算を行った。Find_Orb の入力の一つとして MPC 形式が採用されている。検出天体の MPC 形式をそのまま Find_Orb に入力することで軌道計算が行われる。地球周回/太陽周回の選択を行い、それぞれの軌道要素とそのフィット誤差を確認して軌道判断を行った。

MPC への投稿

以下 2020 年 11 月 9 日の観測にて発見した NEO 候補天体を TMG0030 として投稿した実例である。以下の内容のみを記載した e メールを MPC⁵⁸ に送信する。カタログに掲載された小天体/人工天体でないと判断されれば NEO 候補天体ページ⁵⁹ に掲載される。既知の天体を報告する際に MPC に属する個人から誤っていないか確認する旨の e メールが届いたことがあるが、基本的には機械的に処理されるため、フォーマット通りであるか十分に確認して投稿しなければならない。

⁵¹ <https://minorplanetcenter.net/>

⁵² <https://minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>

⁵³ <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#results>

⁵⁴ https://minorplanetcenter.net/iau/NEO/toconfirm_tabular.html

⁵⁵ <https://minorplanetcenter.net/iau/info/ObsDetails.html>

⁵⁶ https://www.projectpluto.com/find_orb.htm

⁵⁷ <https://www.projectpluto.com/fo.htm>

⁵⁸ obs@cfa.harvard.edu

⁵⁹ https://minorplanetcenter.net/iau/NEO/toconfirm_tabular.html

Listing 6.1 "firstMPCformat of TMG0030"

```

1 COD 381
2 CON N.Kobayashi, Kiso Observatory, Institute of Astronomy,
3 CON Graduate School of Science, The University of Tokyo,
4 CON 10762-30 Mitake, Kiso-machi, Kiso-gun, Nagano 397-0101, Japan
5 OBS J.Beniyama
6 TEL 1.05-m f/3.1 Schmidt + CCD
7 NET Gaia DR2
8 ACK NEO CANDIDATE TMG0030 2020-11-09T15:14:57Z
9 AC2 tomoe-ps@ioa.s.u-tokyo.ac.jp
10
11 TMG0030* C2020 11 09.48342601 39 44.92 +23 54 33.2 17.2 G 381
12 TMG0030 C2020 11 09.48353001 39 44.54 +23 55 12.4 17.2 G 381
13 TMG0030 C2020 11 09.55751201 32 35.99 +32 35 45.5 16.5 G 381
14 TMG0030 C2020 11 09.55758101 32 35.69 +32 36 14.1 16.8 G 381
15 TMG0030 C2020 11 09.56812501 31 20.13 +33 58 10.9 17.1 G 381
16 TMG0030 C2020 11 09.56819401 31 19.75 +33 58 40.0 16.9 G 381
17 TMG0030 C2020 11 09.60496501 26 21.93 +38 58 13.5 17.1 G 381
18 TMG0030 C2020 11 09.60502301 26 21.35 +38 58 45.7 16.5 G 381
19 TMG0030 C2020 11 09.61956001 24 06.17 +41 02 47.2 16.8 G 381
20 TMG0030 C2020 11 09.61959501 24 05.81 +41 03 04.8 15.8 G 381

```

Listing 6.2 "secondMPCformat of TMG0030"

```

1 COD 381
2 CON N.Kobayashi, Kiso Observatory, Institute of Astronomy,
3 CON Graduate School of Science, The University of Tokyo,
4 CON 10762-30 Mitake, Kiso-machi, Kiso-gun, Nagano 397-0101, Japan
5 OBS J.Beniyama
6 TEL 1.05-m f/3.1 Schmidt + CCD
7 NET Gaia DR2
8 ACK NEOCP TMG0030 2020-11-09T16:04:45Z
9 AC2 tomoe-ps@ioa.s.u-tokyo.ac.jp
10
11 TMG0030 C2020 11 09.59480301 27 50.16 +37 33 21.5 16.9 G 381
12 TMG0030 C2020 11 09.59486101 27 49.64 +37 33 54.2 17.4 G 381
13 TMG0030 C2020 11 09.60121501 26 54.98 +38 26 47.2 16.8 G 381
14 TMG0030 C2020 11 09.60128501 26 54.39 +38 27 17.8 17.3 G 381
15 TMG0030 C2020 11 09.61193301 25 18.41 +39 57 22.3 16.7 G 381
16 TMG0030 C2020 11 09.61200201 25 17.78 +39 57 54.9 16.9 G 381
17 TMG0030 C2020 11 09.61942101 24 07.51 +41 01 31.7 16.6 G 381
18 TMG0030 C2020 11 09.63430601 21 37.22 +43 11 17.4 16.5 G 381

```

B 機械学習に関する補足

B.1 機械学習（ランダムフォレスト）の概要

機械学習モデル

本稿で用いたランダムフォレスト、その基本となる決定木の二つの機械学習アルゴリズムについて述べる。

決定木 Decision Tree

決定木 (Decision tree) は 1984 年に Breiman により提唱されたアルゴリズムである (Breiman 1984)。以下では 2 クラス分類問題を考えることとし、その概念図を図 B.3 に示す。

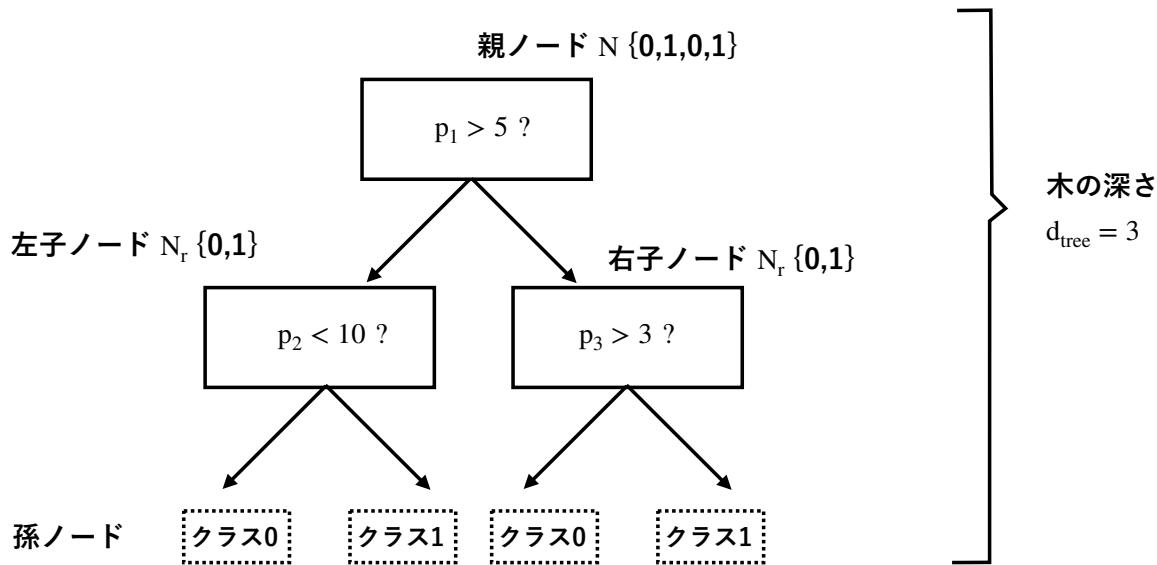


図 B.3 決定木の概念図。

この木ではパラメーター p_1, p_2, p_3 によってクラス 0、1 の分類が行われる。木の深さは 3 である。

基本的に決定木では複数回の分類過程を経て最終的なクラス分類が行われる。各分類過程においてデータの分類のための適切なパラメーター、閾値を探索することを学習という。あらかじめ分類クラスがわかっているデータを教師データといい、学習は教師データを用いて行われる。

図 B.3 に基づいて分類に用いる木構造を定義する。各分類過程をノードといい、起点となる階層を親ノード呼ぶ。親ノードの一つ下に存在するノードを子ノード、さらにその下を孫ノードという。この関係は相対的に定義されるものであり、ある親ノードにとっての孫ノードはその子ノードに対しては子ノードである。また 2 分類では二つの子ノードが定義されるが、それぞれを木構造の左右どちらに存在するかで左子ノード、右子ノードと定義する。また各ノードを t 、そのノード（親ノード）、左子ノード、右子ノードに存在するデータ数を N 、 N_l 、 N_r と表記する。最初の分類過程から最終的な分類クラスまでの階数を木の深さという。

各ノードではその階層に存在するクラスの割合をもとに不純度 (Inpurity) が定義される。不純度は各ノードの情報のばらつき具合を表す。代表的な不純度としては 1) ジニ不純度 (Gini's diversity index) I_G 、2) 情報エントロピ (Information entropy) I_H 、3) 誤分類率 (misclassification Error) I_E などがあり、それぞれ以下のように

定義される。

$$I_G(t) = 1 - \sum_{i=1}^c p(i|t)^2 \quad (B.9)$$

$$I_H(t) = - \sum_{i=1}^c p(i|t) \log_2 p(i|t) \quad (B.10)$$

$$I_E(t) = 1 - \max\{p(i|t)\} \quad (B.11)$$

2 クラス分類における不純度をプロットすると図 B.4 のようになる。横軸はそのノードにおける片方のクラスの割合 p_1 である。なおグラフの形状を比較するため情報エントロピーは 0.5 倍して表示している。

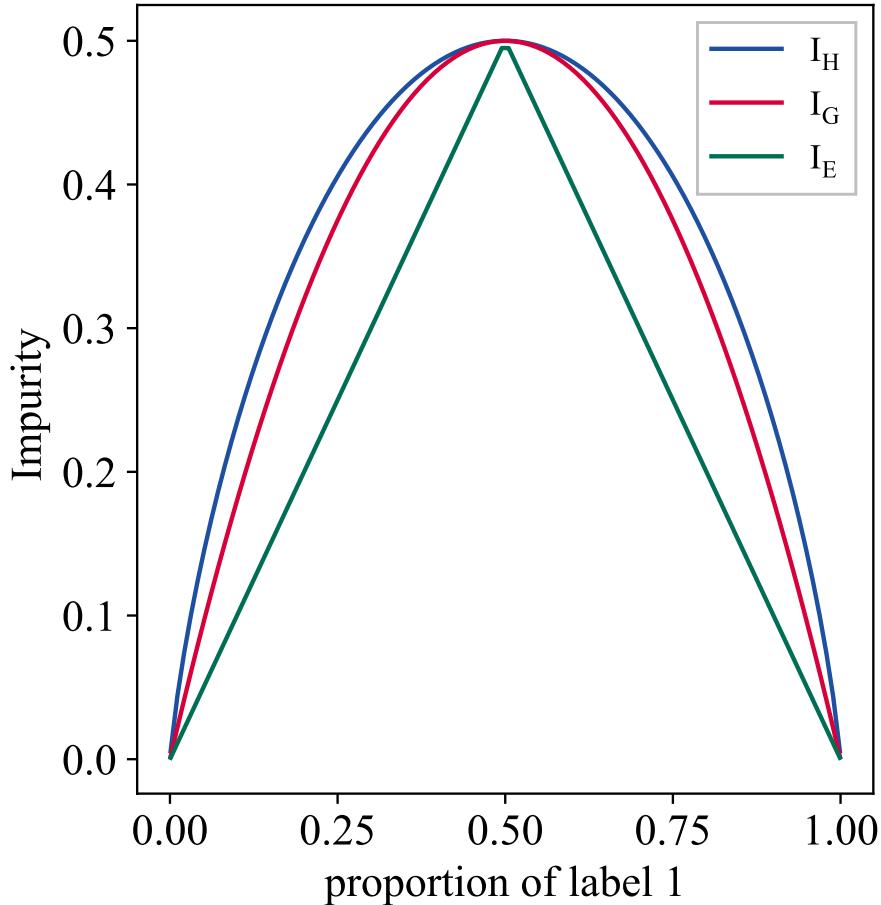


図 B.4 不純度の比較。
 I_H 、 I_G 、 I_E はそれぞれ情報エントロピー、ジニ不純度、誤分類率である。

これらはともに $p_1 = 0.5$ で最大値、 $p_1 = 0, 1$ で最小値をとりそれぞれ最も不純度が大きい/小さいという同様の傾向を持つ。

各階層不純度の差から以下の情報利得 (Information Gain)IG を定義することができる。

$$IG(t, f) = I(t_p) - \left(\frac{N_l}{N} I(t_l) + \frac{N_r}{N} I(t_r) \right) \quad (B.12)$$

ただし I は不純度を表す。これは親ノードとその子ノードの不純度の差であり、その分類により不純度がどの程度小さくなったかを表す。決定木分類では情報利得を最大化することで分類を行う。つまり情報利得が最大となるように適切なパラメータとその閾値を選択するのである。

ランダムフォレスト Random Forest

複数の決定木を組み合わせその結果の多数決を取ることで分類結果を評価するランダムフォレストが Breiman によって 2001 年に提唱された (Breiman 2001)。その概念図を図 B.5 に示す。

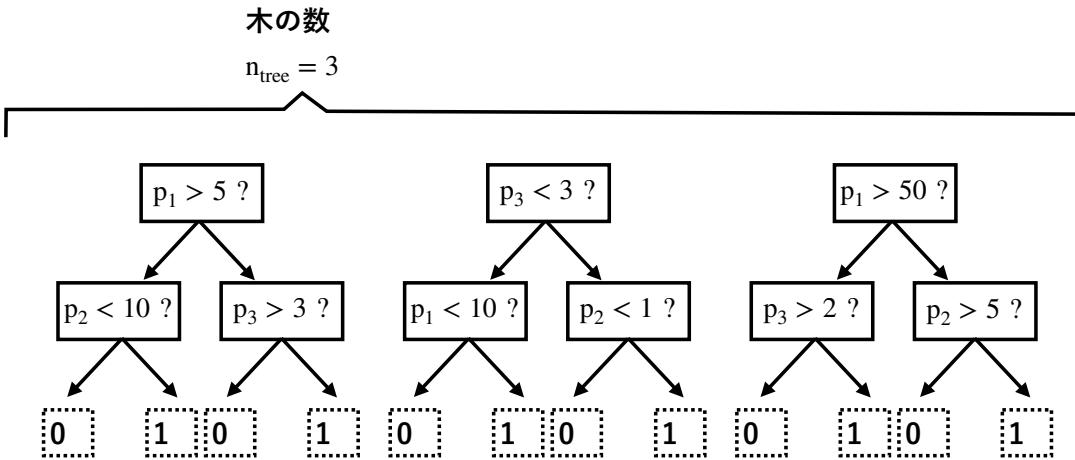


図 B.5 ランダムフォレストの概念図

決定木一つを用いた分類では学習に用いた教師データに最適化された分類が行われるため未知のデータに対して性能を発揮できない過学習が起こりうる。決定木を多数組み合わせた結果を最終結果とするランダムフォレストを用いることで過学習を抑制したモデルを構築することができる。木を複数用いるため単体の決定木より計算量は大きくなる。分類に用いるパラメーターとは別に、モデル作成において作成者が明示的に与えるべきパラメーターをハイパーパラメーターという。ランダムフォレストにおける主なハイパーパラメーターを表 B.3 に示した。

表 B.3 ランダムフォレストにおけるハイパーパラメーター

ハイパーパラメーター	シンボル	説明
不純度	I	本研究ではジニ不純度または情報エントロピー
パラメーター数	n_p	ひとつの木で用いるパラメーターの数
木の深さ	d_{tree}	各木の縦方向の階層(ノード)数
木の数	n_{tree}	モデルに用いる決定木の数

本研究では複数のハイパーパラメーターを用いてモデルを作成、比較することで、精度が高いモデルを生成したハイパーパラメーターを採用した。これはグリッドサーチと呼ばれハイパーパラメーターの決定においてしばしば用いられる手法である。

B.2 機械学習モデルの天体検出パラメーターの分布

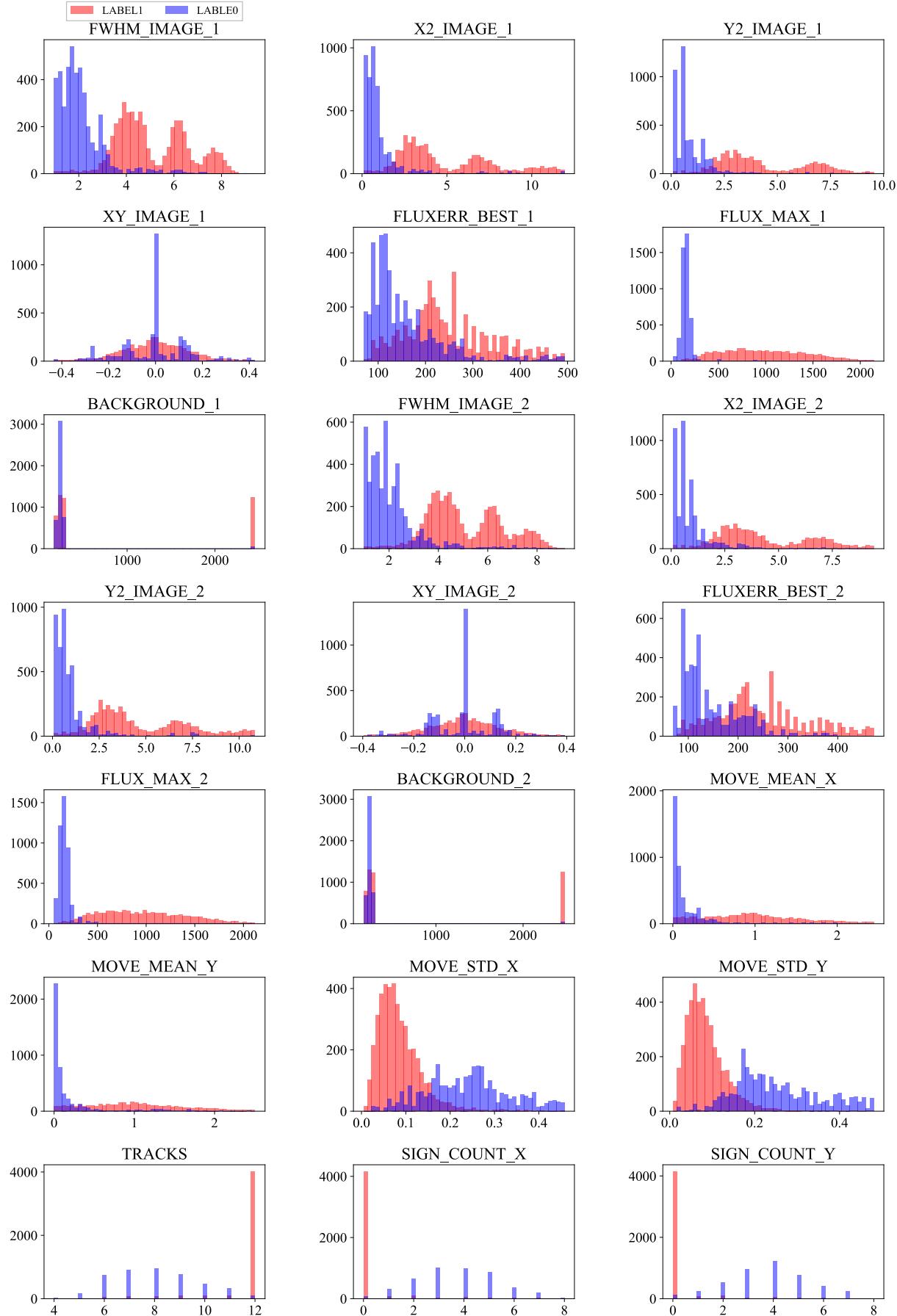


図 B.6 model 20200223 (3 sigma clipped)

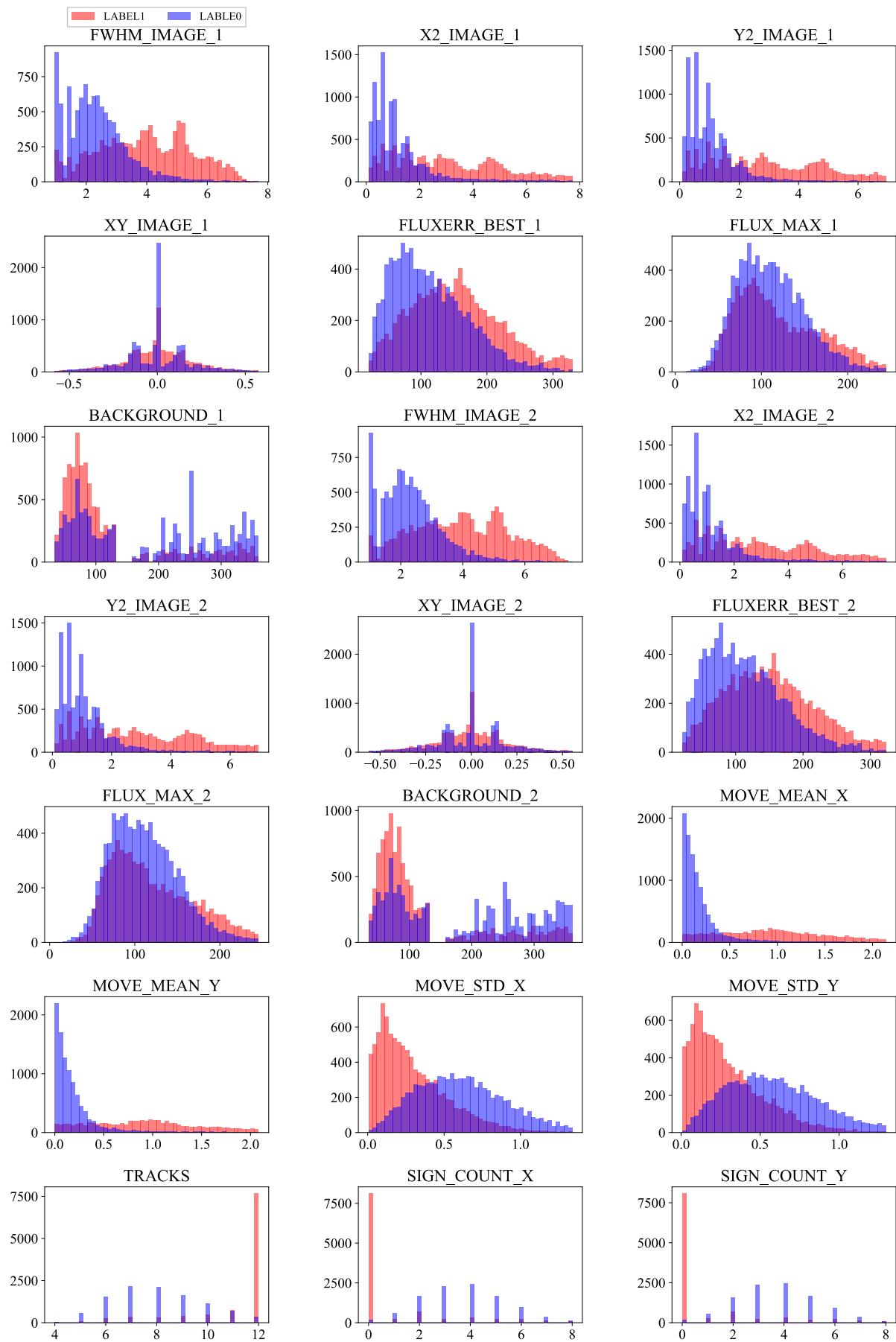


図 B.7 model 20200303 (3 sigma clipped)

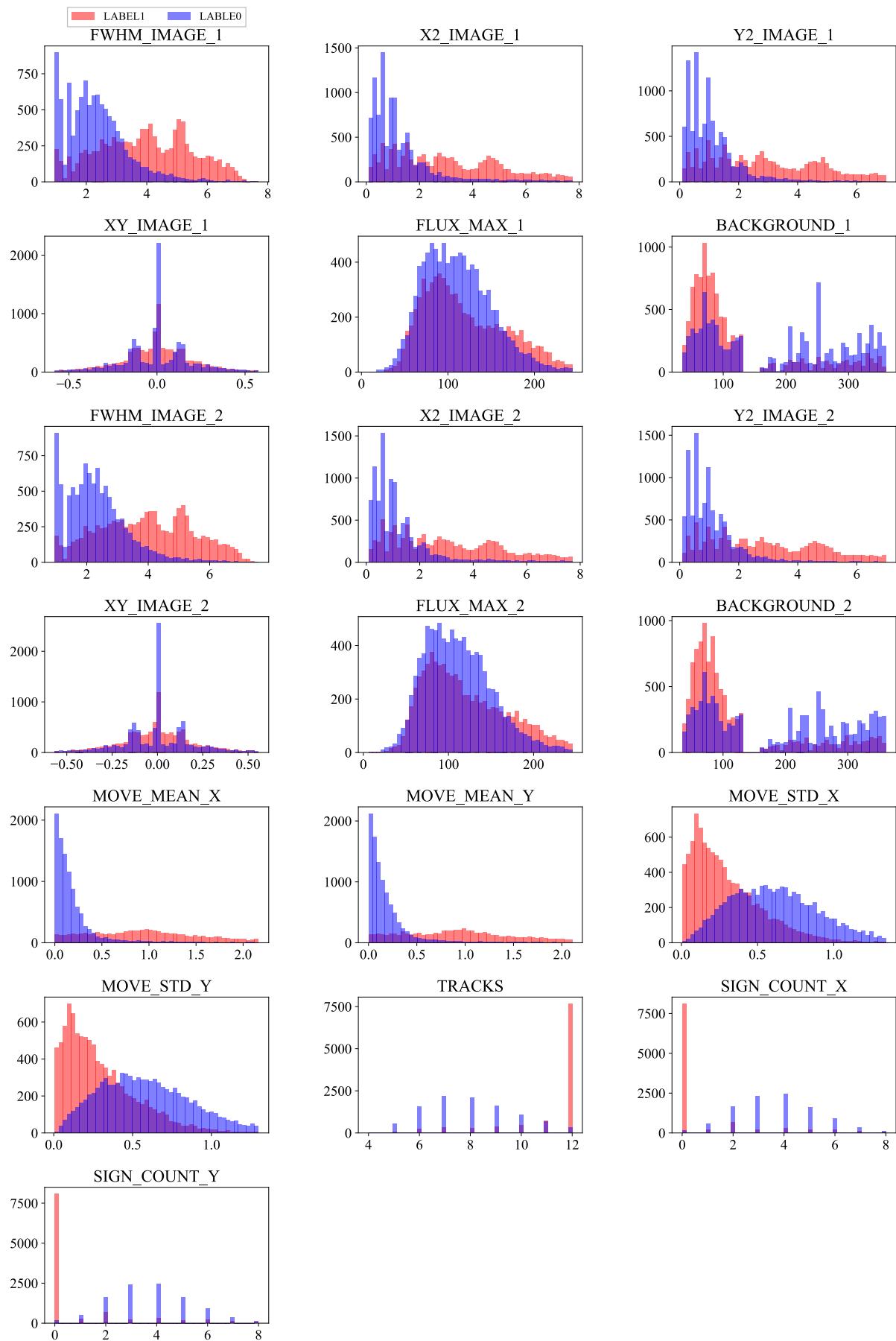


図 B.8 model 20200311 (3 sigma clipped)

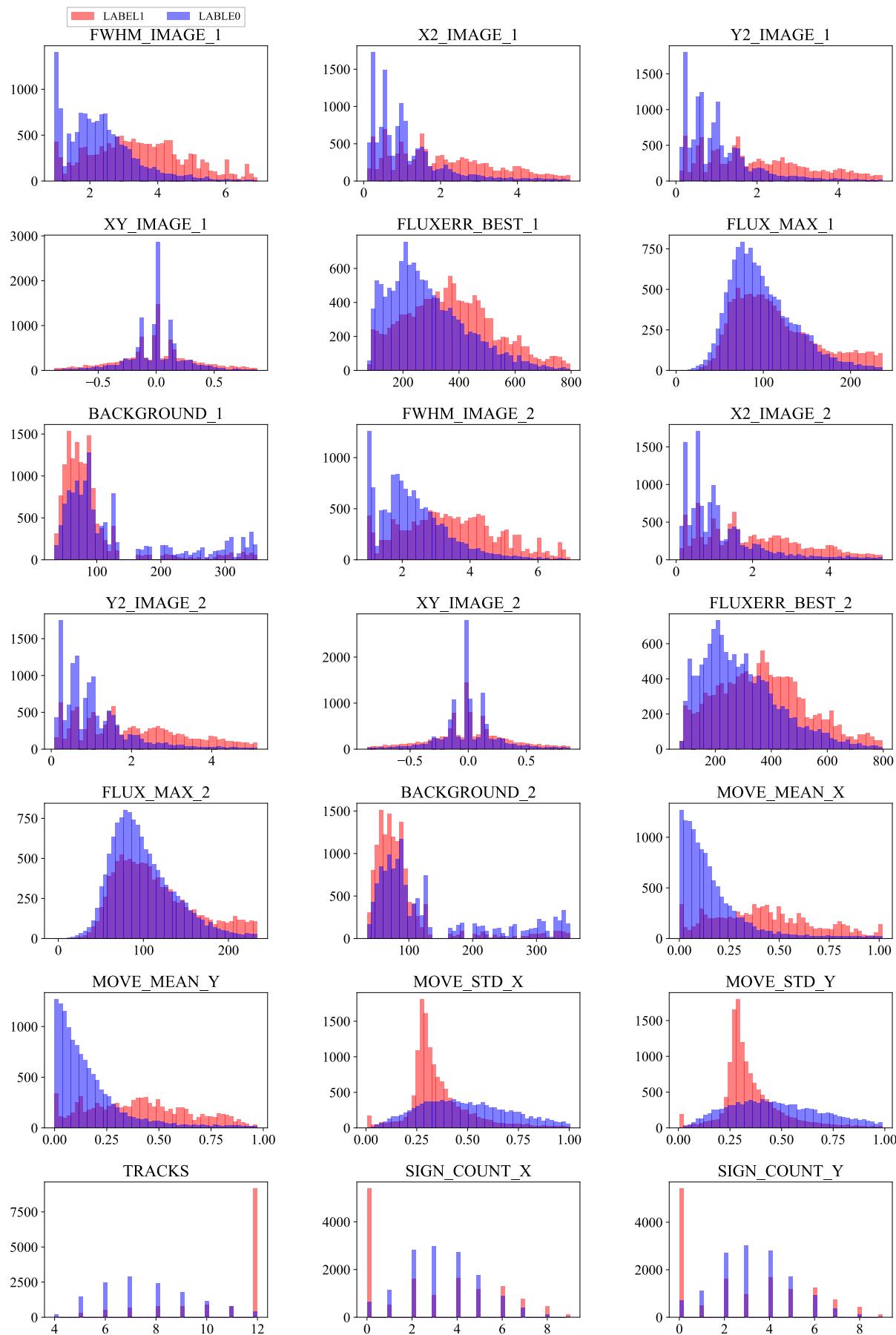


図 B.9 model 202004 (3 sigma clipped)

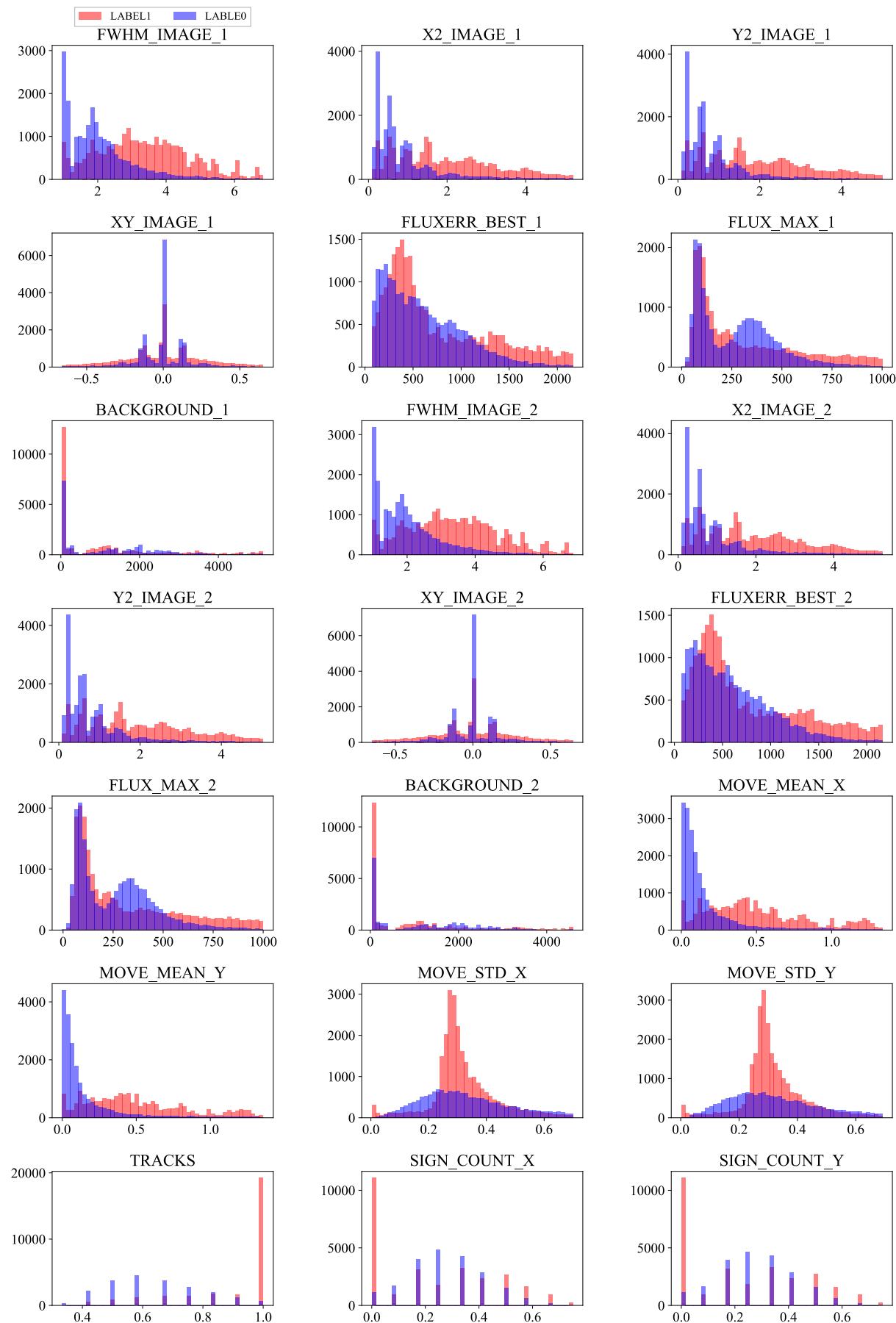


図 B.10 model 202008 (3 sigma clipped)

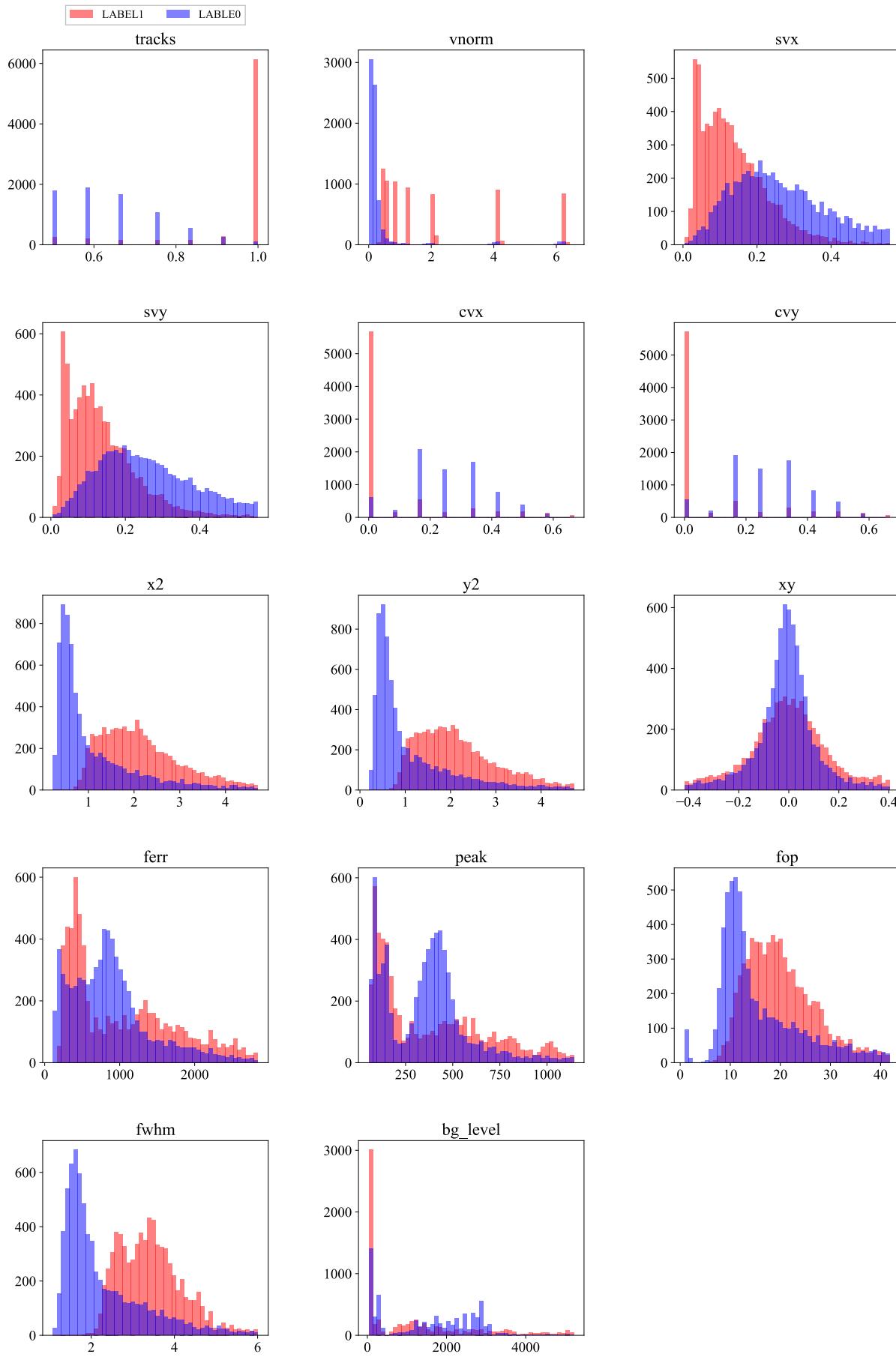


図 B.11 model 202011 (3 sigma clipped)

C 測光解析

Source Extractor(SExtractor, Bertin and Arnouts 1996) は天文分野で広く用いられている天体検出、測光のためのソフトウェアである。本研究では SExtractor の中枢機能を独立して利用可能にした python ライブラリ SEP(Python library for Source Extraction and Photometry⁶⁰) を用いて解析を行った。具体的な測光手順について SEP の関数を `sep.somefunction` のように引用し以下に示す。

- 背景光ノイズの推定

`sep.Background` を用いることでデータフレームの背景光ノイズ (ADU/frame) の推定を行う。本稿では大局的な背景光ノイズを求め、その定数倍をフレームにおける背景光ノイズとして用いた。以下では背景光ノイズを σ と表記する。

- PSF の FWHM の計算

`sep.extract` を用いて明るい星の検出を行う。本稿では検出の閾値を 20σ とした。

- データフレームセットを用いた恒星マスクの作成(第2章)

3σ を閾値とするマスクを作成する。データフレームセット(基本的には0.5秒積分データ120枚)の最初と最後のフレームにて閾値以上のデータを恒星と判断しマスク画像を生成する。理想的に恒星が動かなければこの二枚のマスクは同じとなるが、データフレームセット間の望遠鏡のトラッキングのズレ、大気揺らぎによるズレにより異なるマスクとなる。この二枚のマスクの `and` 演算を行い新しいマスクを作成する。このマスクを太らせることで最終的な恒星マスクとした。(この操作には画像処理ライブラリ scikit-image⁶¹ の `skimage.morphology.binary_dilation` を利用)

- Gaia カタログを用いた恒星マスクの作成(第4章)

小惑星の高時間分解光度曲線観測データの測光では Gaia カタログを用いて恒星マスクを作成した Gaia DR2 カタログをもち、視野内の等級閾値以下の天体に対し測光半径を指定したマスクを作成した。マスク半径は天体の測光半径と同様にデータの星像の典型的 FWHM を用いた。Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測と同じくデータフレームセットの形式でデータを取得するため上記方法の恒星マスクの作成も可能だが、先に述べたデータフレームセットを用いた恒星マスクの作成では検出閾値に近い明るさを持つ暗い星に対しては恒星マスクが作成されないことが経験的にわかっている。そのようにマスクされない星が天体の測光開口に混入した際本来よりも明るい測光結果が出力されてしまう。移動天体検出においては測光精度よりも検出することを重視しているためデータフレームセットを用いたマスクを作成した。一方第4章では測光制度を重視するためカタログを用いてマスクを作成した。

- 天体の測光

`sep.sum_circle` を用いて測光を行う。高速移動天体は像が伸びることがあるが、本稿で高時間分解光度曲線観測を行った天体の星像に顕著な伸びは見られない。よって星像は円形であるとし円形の開口測光を行った。測光半径は上記で推定した `fwlm` を用いた。円環測光はせず、開口内のフラックスを足し合わせ天体フラックスとした。

⁶⁰ <https://sep.readthedocs.io/en/v1.0.x/>

⁶¹ <https://scikit-image.org/>

D 周期解析

D.1 解析方法

Lomb-Scargle 法は天文学問わず周期解析に広く用いられている手法である。本稿では幅広い天文学的処理を行うことができる python ライブラリ astropy⁶² の時系列処理に有用なパッケージ `astropy.timeseries` に存在する `astropy.timeseries.LombScargle` クラスを用いた。以下 `astropy.timeseries.LombScargle` を `ls` と表す。具体的な解析手順について `ls` のメソッドを `ls.someMethod` のように引用し以下に示す。

- データ入力

時間、等級（、等級誤差）、のデータを入力することでインスタンスを作成する。この際に規格化に関する `normalization`、フィットする関数の項数を表す `nterm` を指定できる。本稿では後に述べる誤差の計算のため `normalization=psd` とし、項数は基本的に `nterm=2` とした。`normalization=psd` では以下の計算式でパワーが計算される。

$$P(f) = \frac{1}{2}(\chi_{\text{ref}}^2 - \chi(f)^2) \quad (\text{D.13})$$

$$\chi(f)^2 = \sum_f (y(f)_{\text{fit}} - y_{\text{obs}})^2 \quad (\text{D.14})$$

ただし $y(f)_{\text{fit}}$ は推定したフィッティング曲線、 y_{obs} は観測点である。また χ_{ref}^2 は定数である。

- ピリオドグラムの作成

`ls.power` を用いることでピリオドグラムを作成することができる。引数として与える周波数について本稿では以下のように設定した。

最大周波数 f_{max} は f_{Ny} とする。ただし f_{Ny} はナイキスト周波数であり、サンプリング間隔 ΔT を用いて $f_{\text{Ny}} = \frac{1}{2\Delta T}$ で定義される量である。一般に天文観測におけるサンプリング間隔はオーバーヘッド（電荷の読み出し時間など）と積分時間を考慮する必要がある。本稿では積分時間と読み出し時間がそれぞれ 0.5 秒、0 秒であるとし、 $f_{\text{max}} = 1$ とした。最小周波数 f_{min} は T （観測開始から終了までの時間）を用いて $f_{\text{min}} = \frac{1}{T}$ とした。観測時間の二倍以上の自転周期は推定できないと判断し用いないことを意味する。これらの選び方は一意ではない。関連する議論は VanderPlas (2018:7.1) に詳しい。

- 誤差の計算

フィッティング曲線の幅から周波数の誤差を計算する。

$$\sigma_f = f^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{1}{P_{\text{peak}}}} \quad (\text{D.15})$$

ただし $f^{\frac{1}{2}}$ はピーク周波数のピリオドグラムの幅、(HWHM)、 P_{peak} は注目している周波数のピークパワーである。ピリオドグラムの幅は観測開始から終了までの時間 T を用いて $f^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{T}$ とした。以上から周波数 f のピークをもつ自転周期の誤差 σ_P は

$$\sigma_P = P \times \left(\frac{\sigma_f}{f} \right) \quad (\text{D.16})$$

と推定できる。関連する議論は VanderPlas (2018:7.4.1) に詳しい。

- フィッティング曲線の作成

十分なパワーを持つ周波数に対して、`ls.model` を用いて作成した。

⁶² <https://docs.astropy.org/en/stable/index.html>

D.2 周期推定シミュレーション

Tomo-e Gozen による 2fps 動画観測では他の観測に比べ短い自転周期まで推定することが期待できる。ここでは等級振幅、自転周期を指定することで人工的に小惑星の光度曲線を生成し、二種類の観測でそれぞれどのような観測/解析結果となるかを比較する。1) 露光時間、オーバーヘッド(読み出し時間等)ともに 2 秒、2) Tomo-e Gozen の観測(露光時間 0.5 秒、オーバーヘッド 0 秒)二種類の観測を比較する。観測時間は 2 分間、小惑星の等級振幅は 1 等級、自転周期は 10 秒とする。

観測シミュレーション結果、周期解析結果をそれぞれ図 D.12、図 D.13 に示す。高速撮像かつオーバーヘッドがない Tomo-e Gozen の観測では他方に比べ密な光度曲線を得ることができ、周期解析結果では鋭いピークを得ることができる。一方露光時間が長くオーバーヘッド時間が無視できない観測の場合、周期解析結果にするどいピークは見られない。小さなピークで折りたたむことで自転周期を推定することができたとしても、データ点が少なく等級振幅を精度よく推定できないこともわかる。

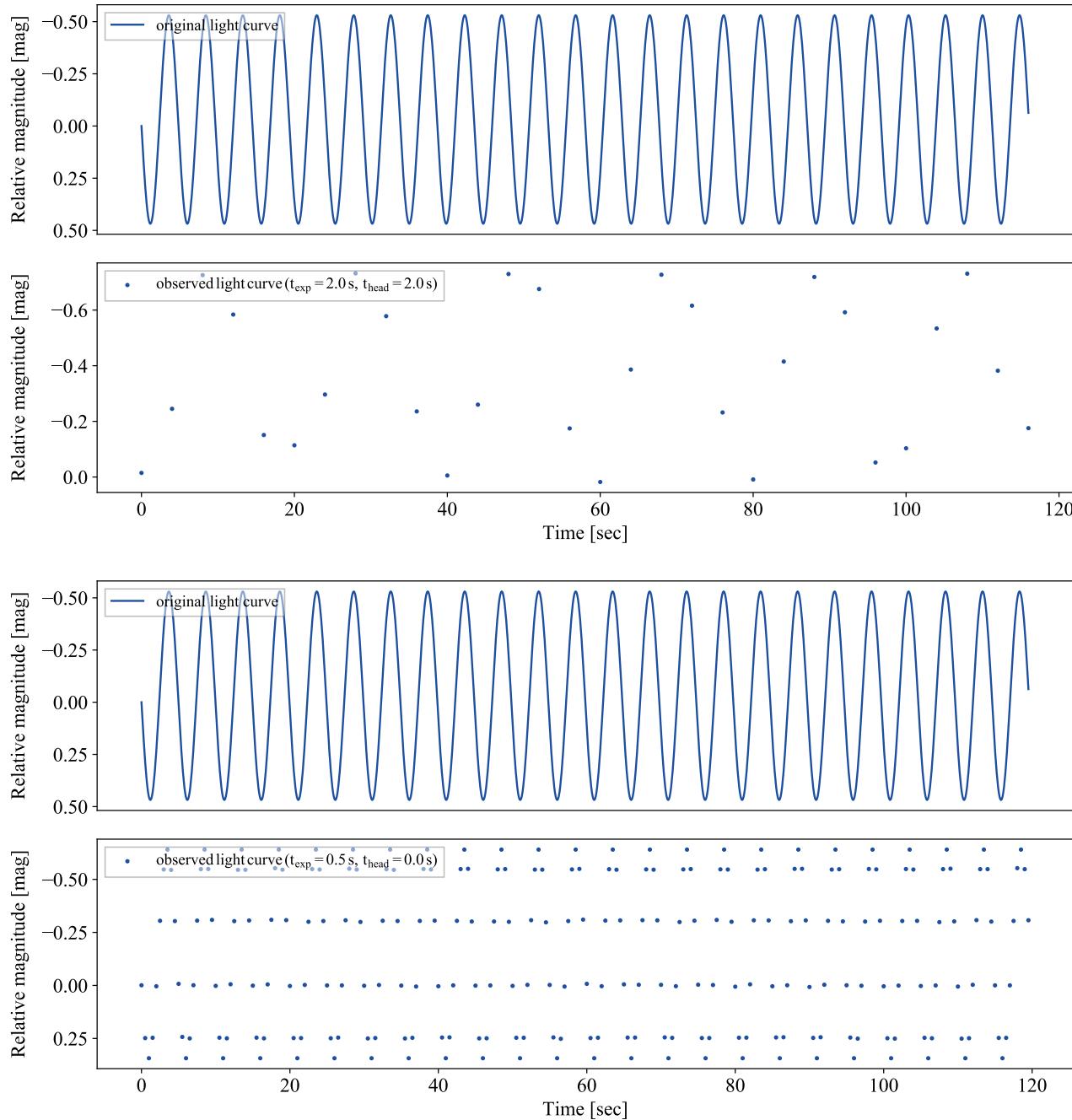


図 D.12 擬似光度曲線と観測点。

上:露光時間、オーバーヘッドとともに 2 秒と仮定した観測。下:Tomo-e Gozen による観測(露光時間 0.5 秒、オーバーヘッド 0 秒)。

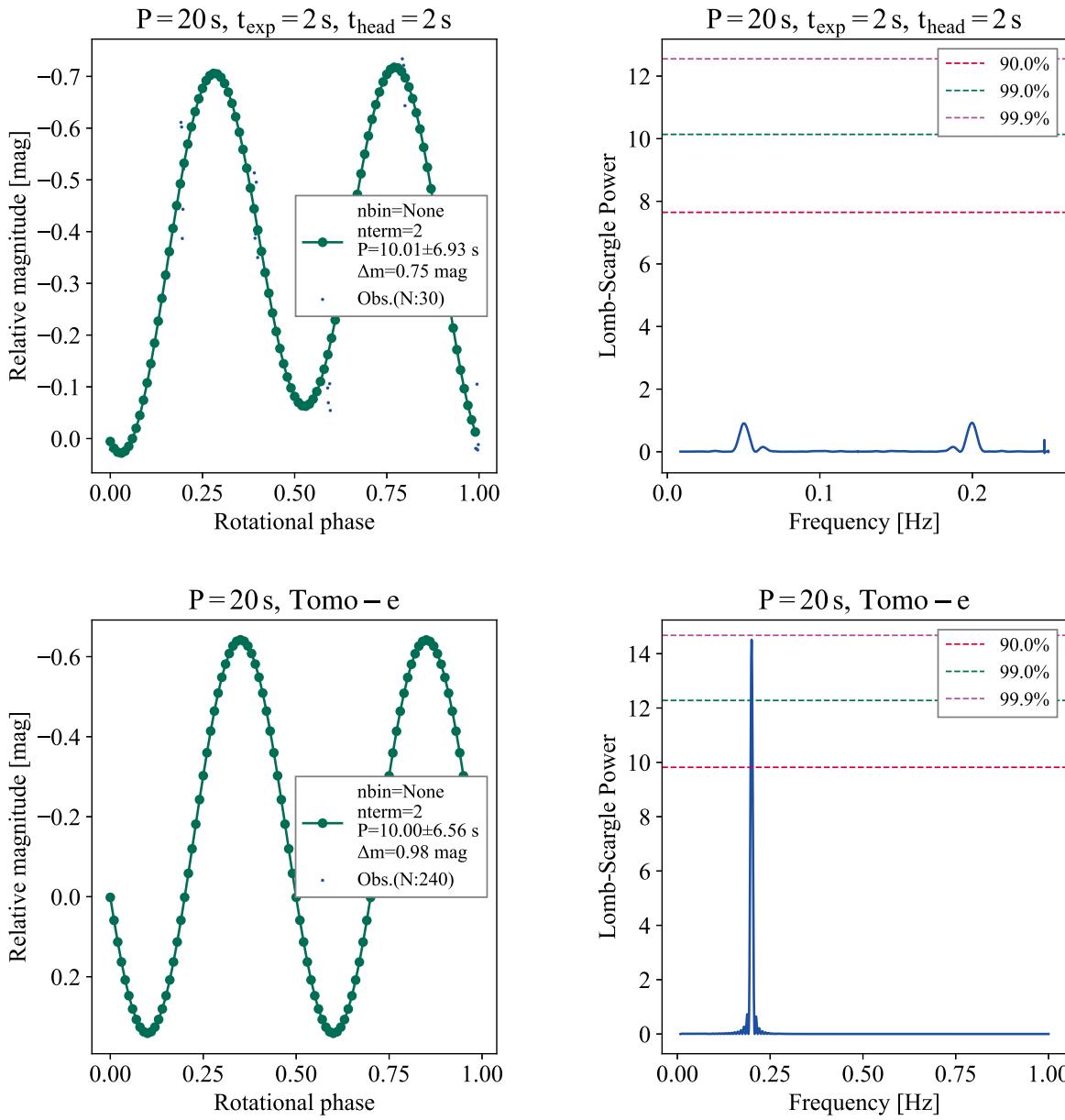


図 D.13 観測シミュレーションデータに対する周期解析結果と折りたたみ光度曲線。
上:露光時間、オーバーヘッドとともに 2 秒と仮定した観測。等級振幅の推定値は 0.75 等級。下:Tomo-e Gozen による観測 (露光時間 0.5 秒、オーバーヘッド 0 秒)。等級振幅の推定値は 0.98 等級。

E 光度曲線

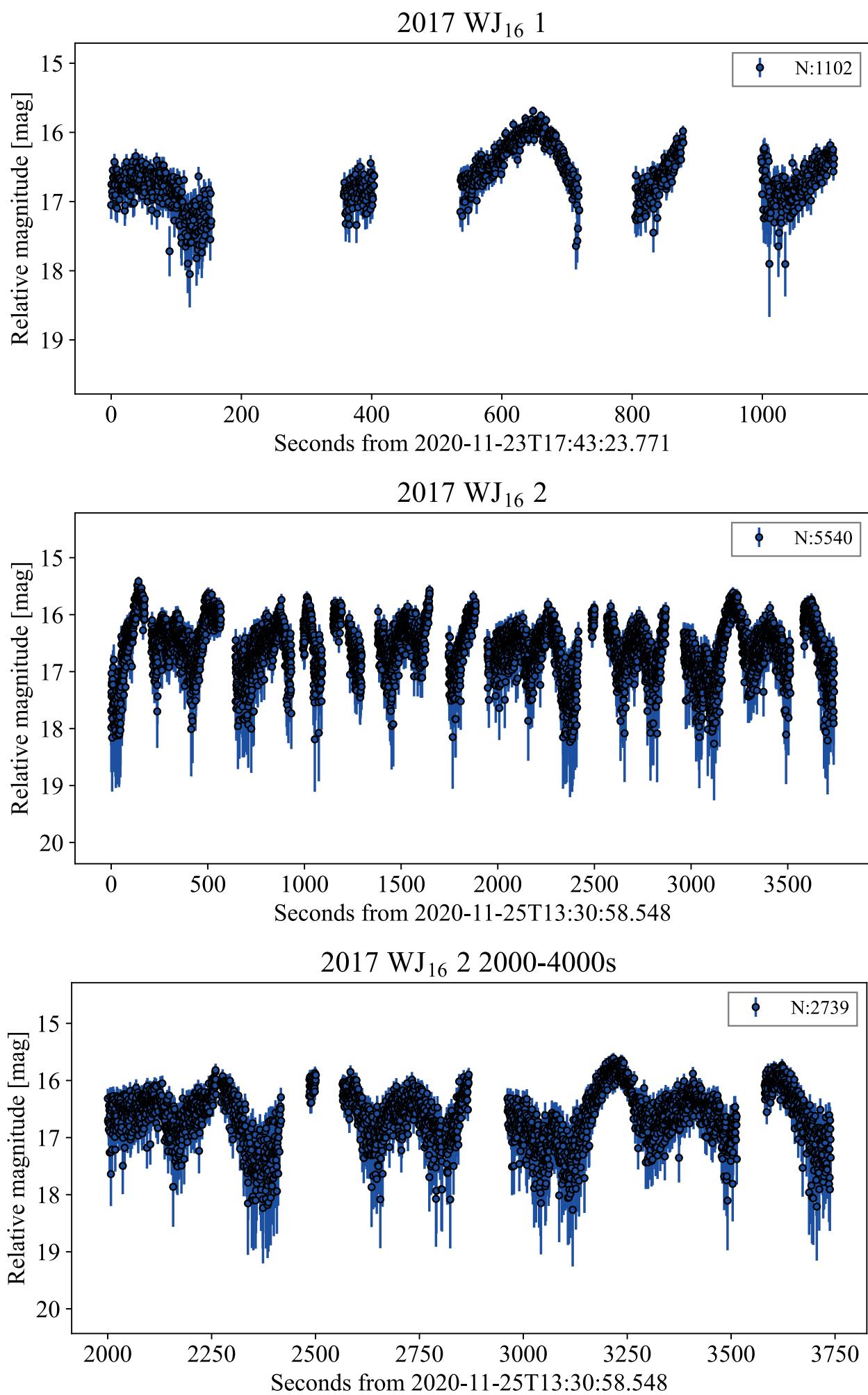


図 E.14 Light curve 1

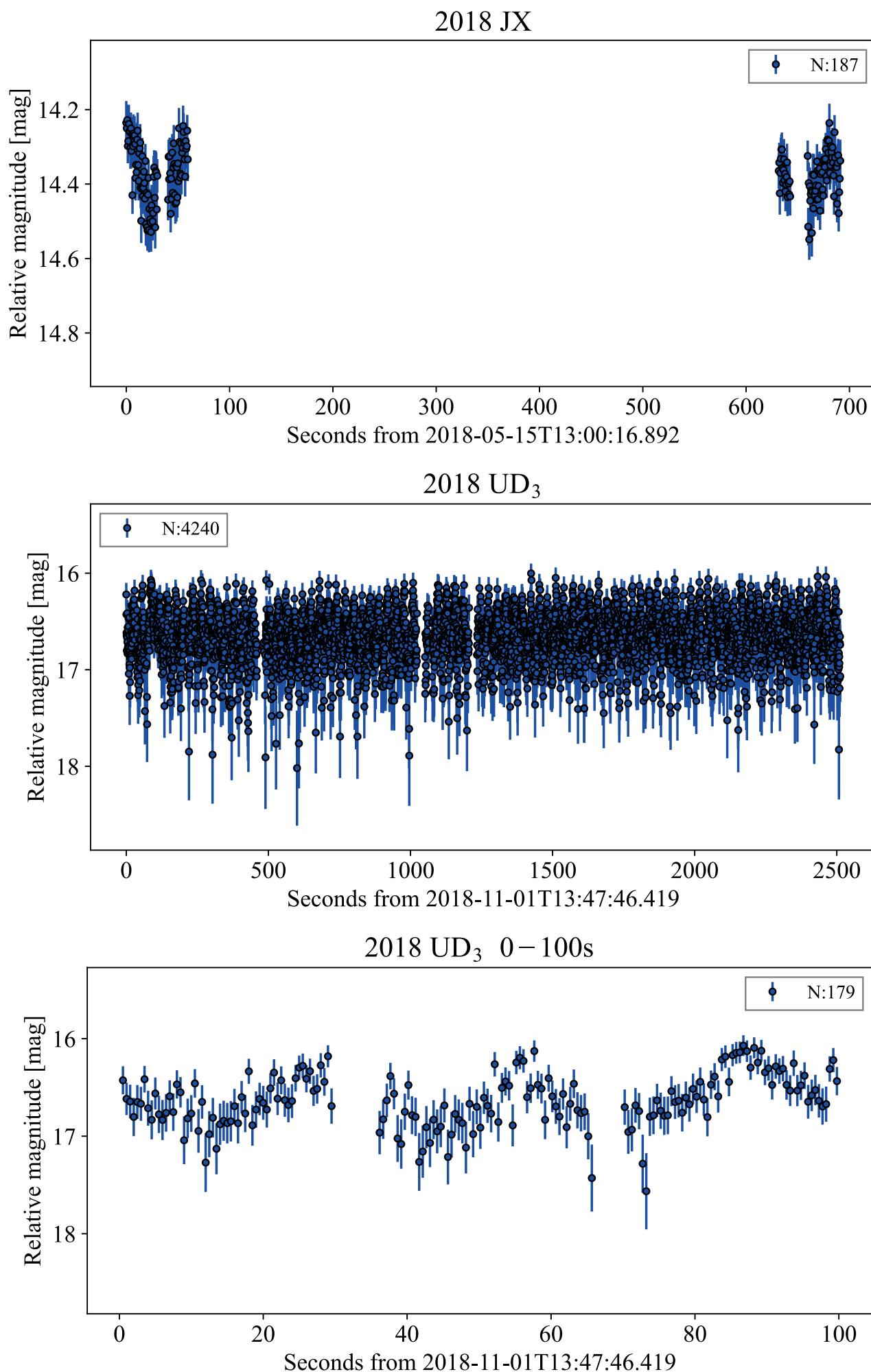
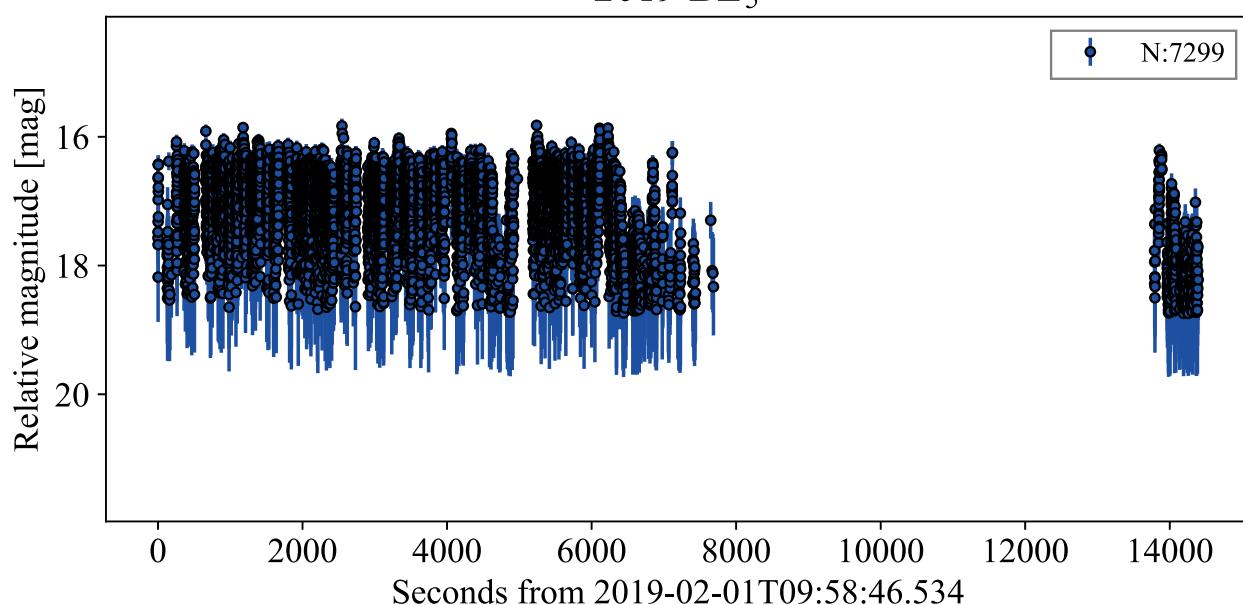
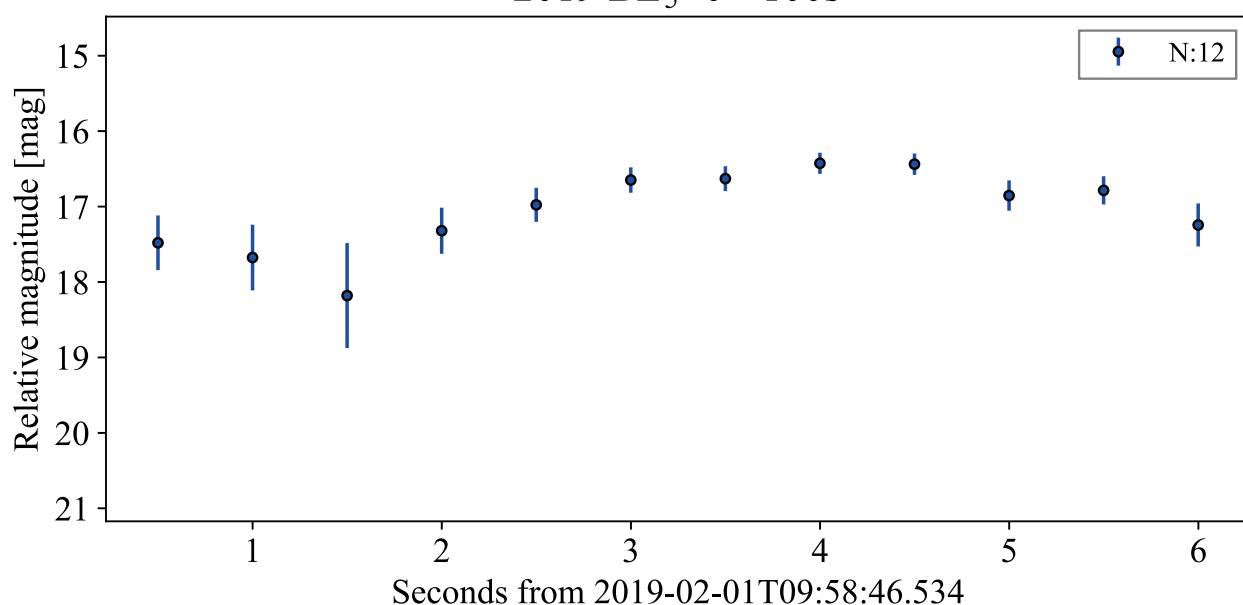


図 E.15 Light curve 2

2019 BE₅2019 BE₅ 0 – 100s

2020 EO

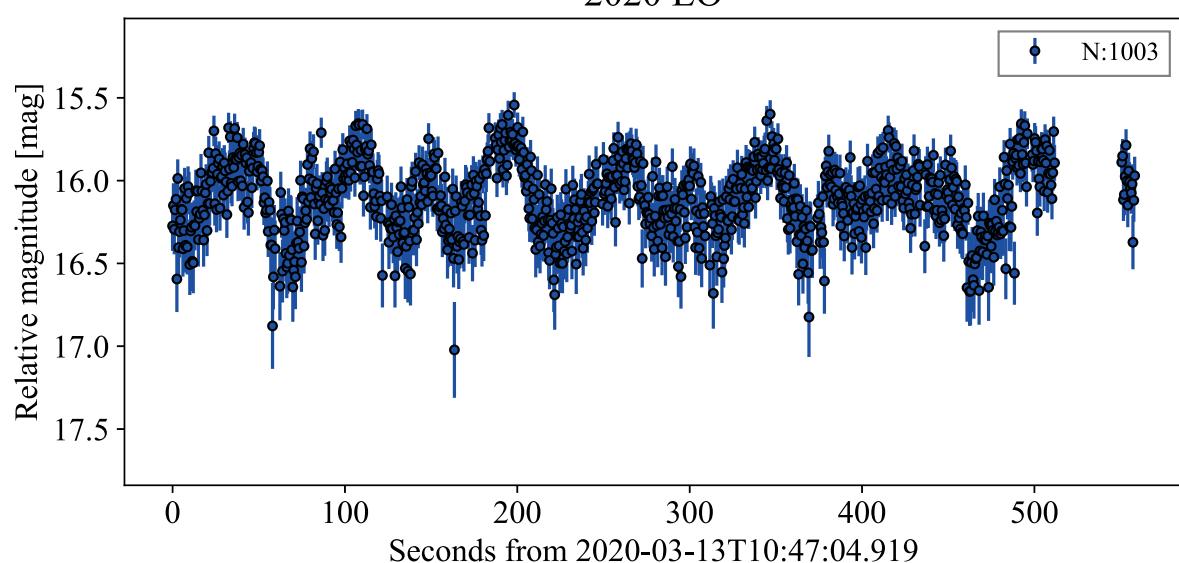


図 E.16 Light curve 3

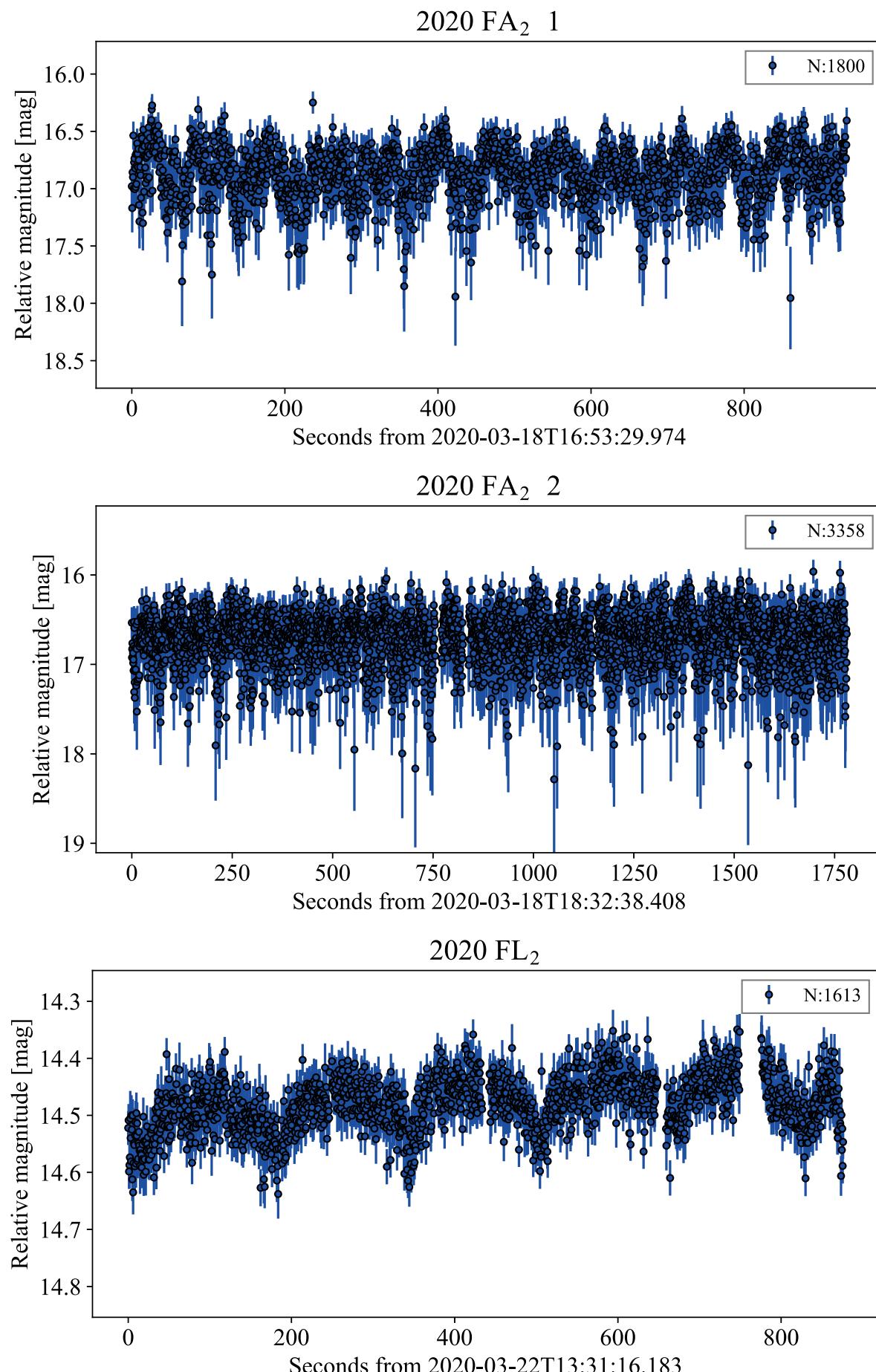


図 E.17 Light curve 4

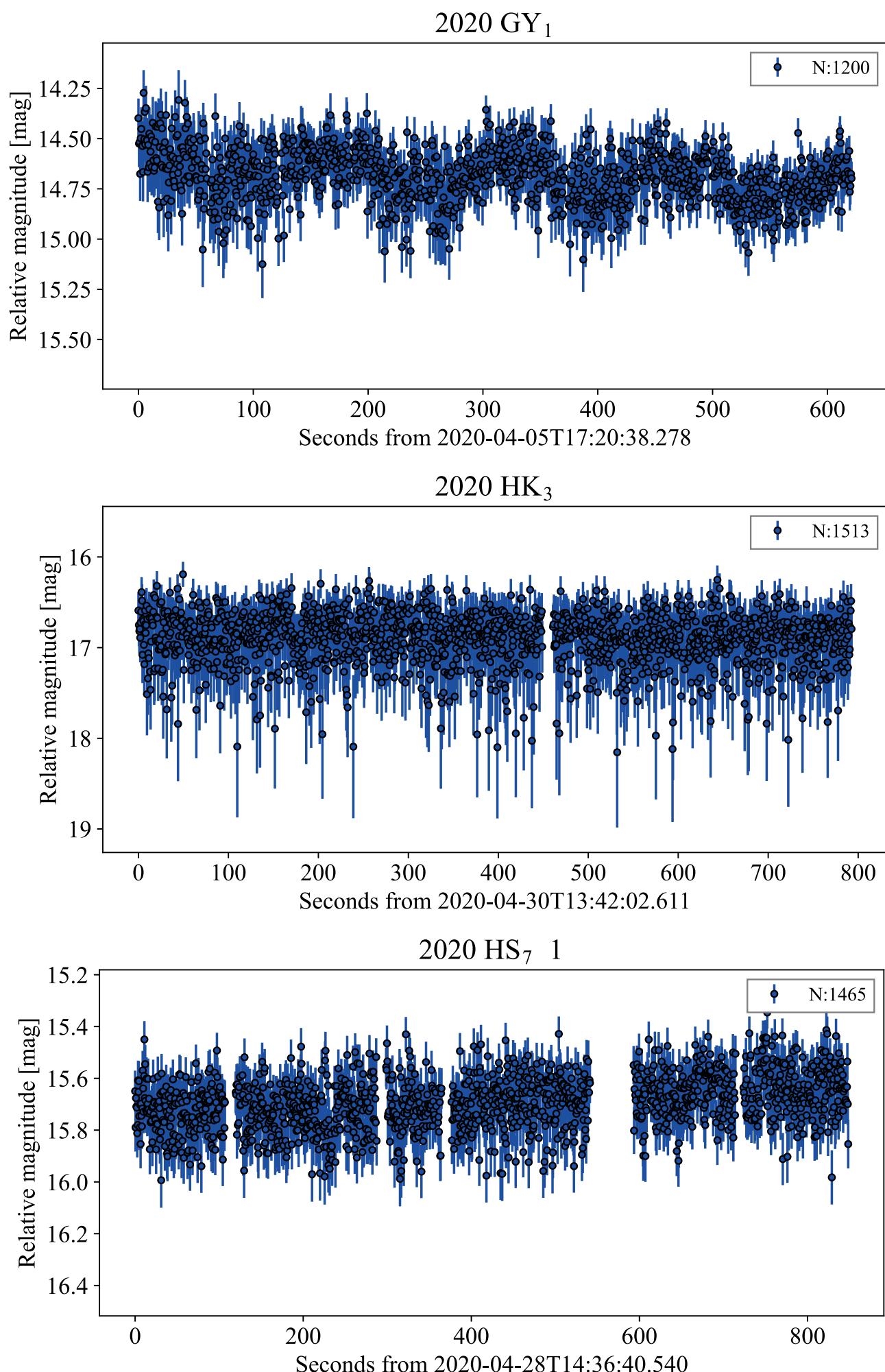


図 E.18 Light curve 5

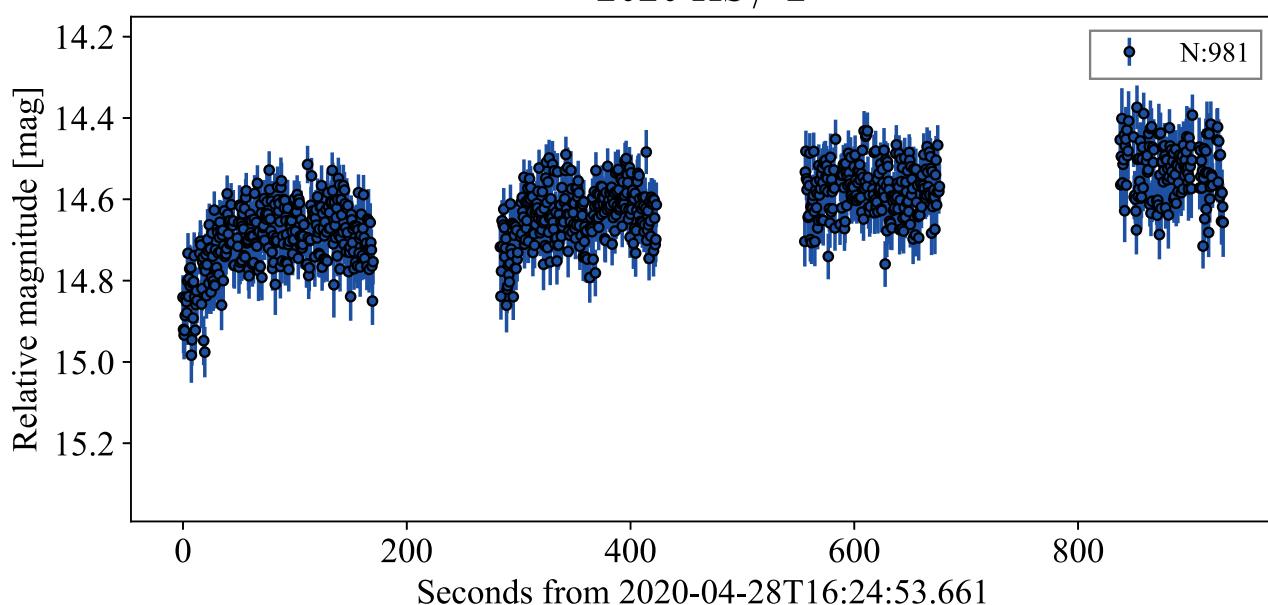
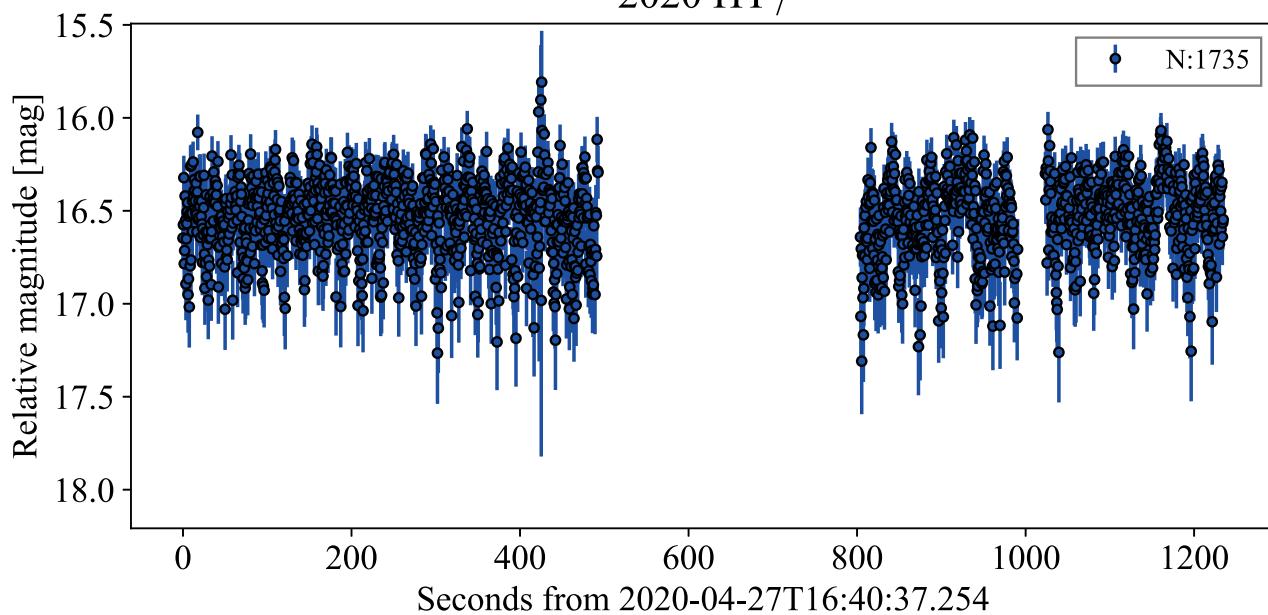
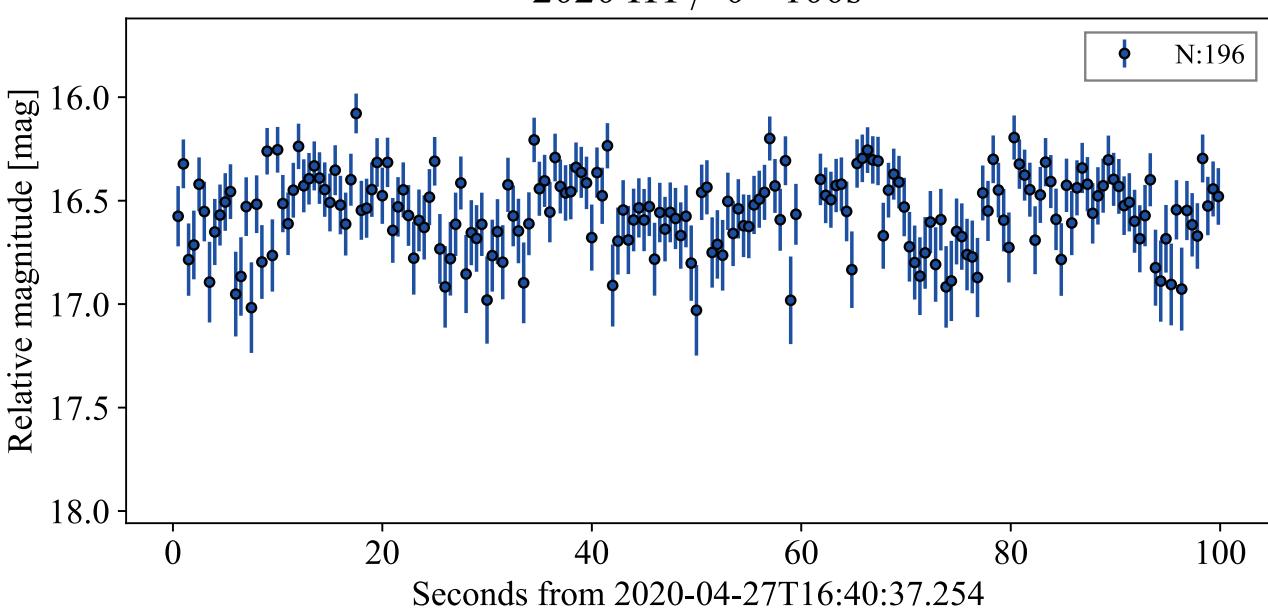
2020 HS₇ 22020 HT₇2020 HT₇ 0 – 100s

図 E.19 Light curve 6

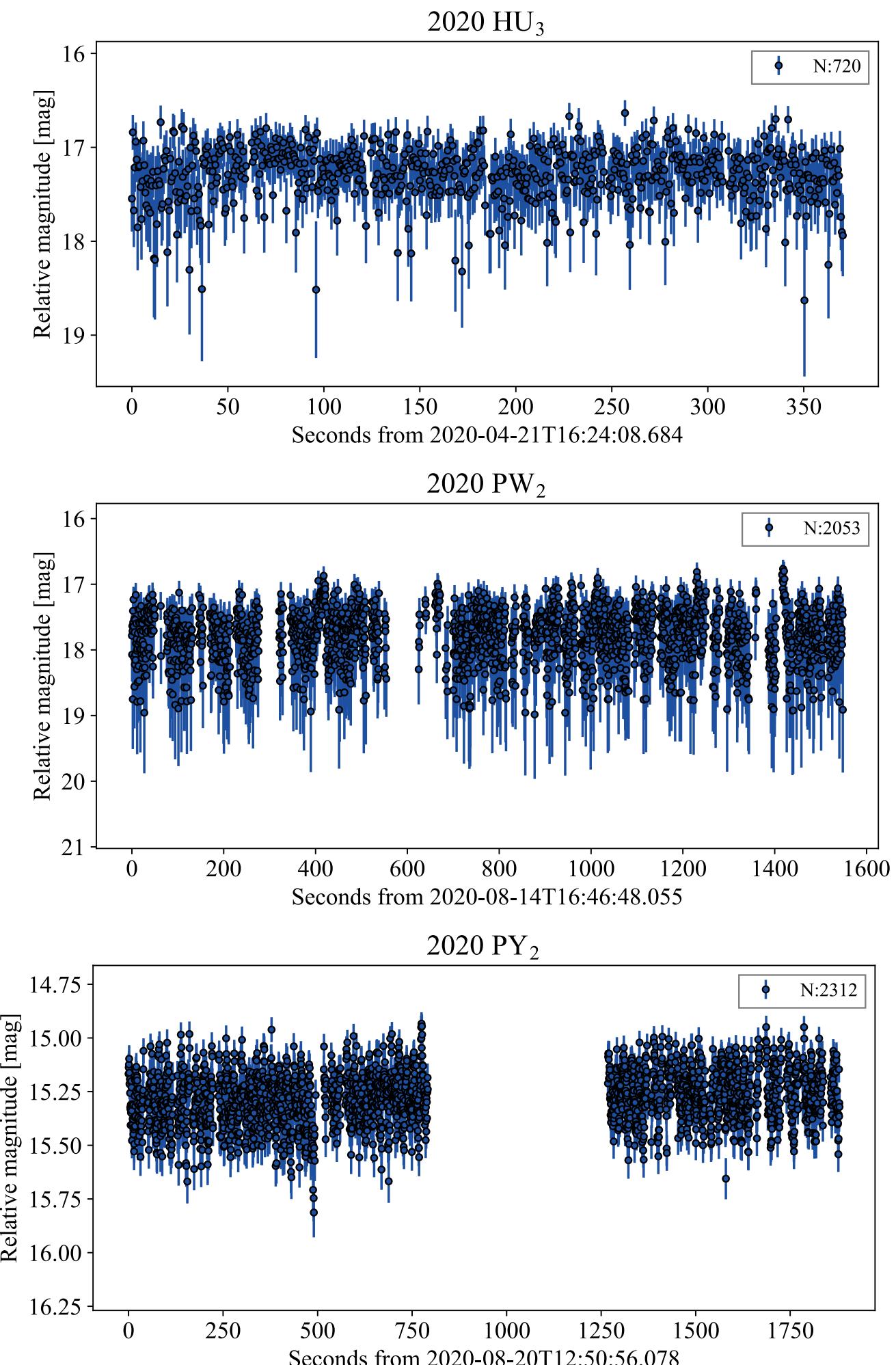


図 E.20 Light curve 7

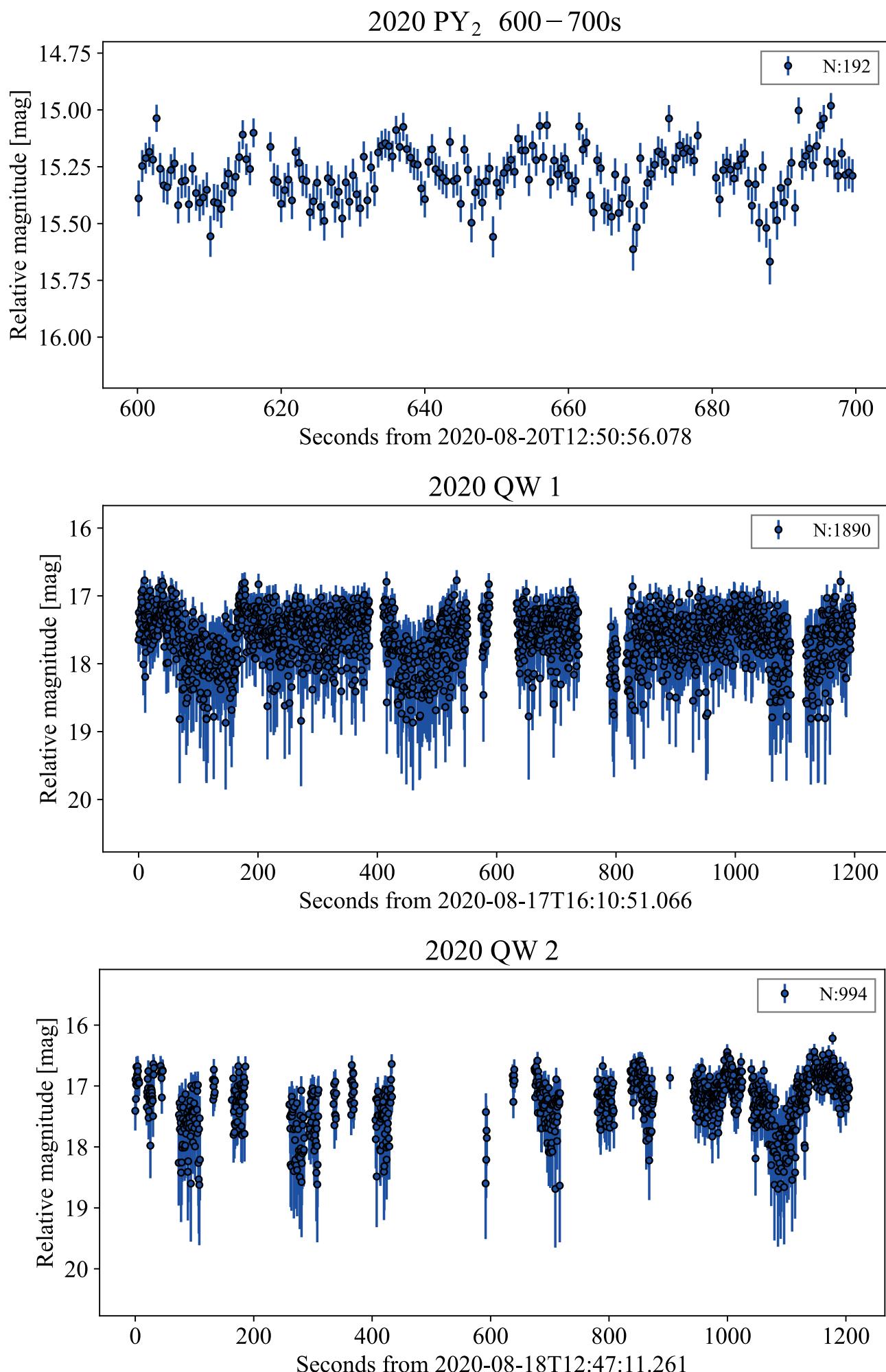


図 E.21 Light curve 8

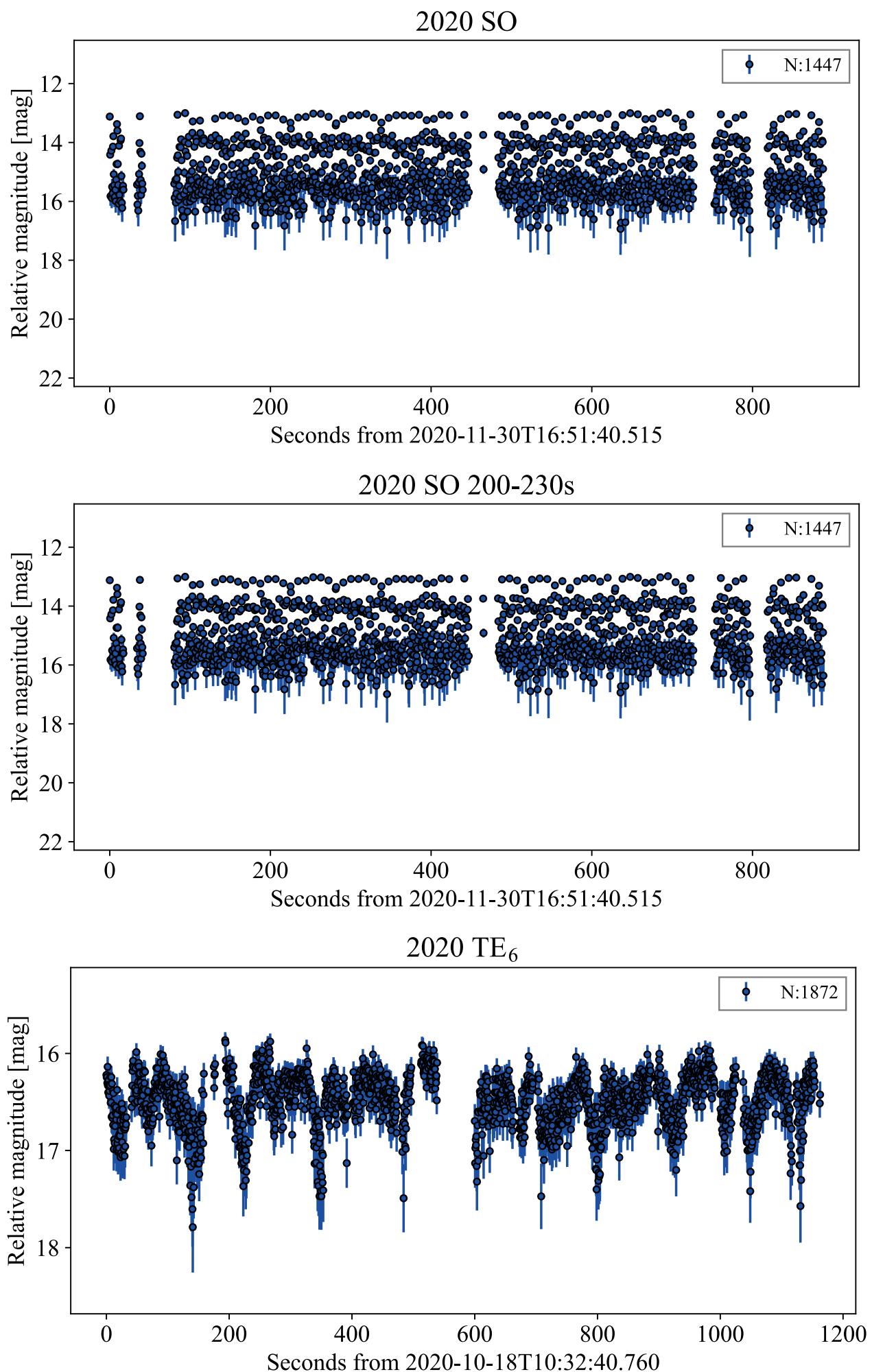


図 E.22 Light curve 9

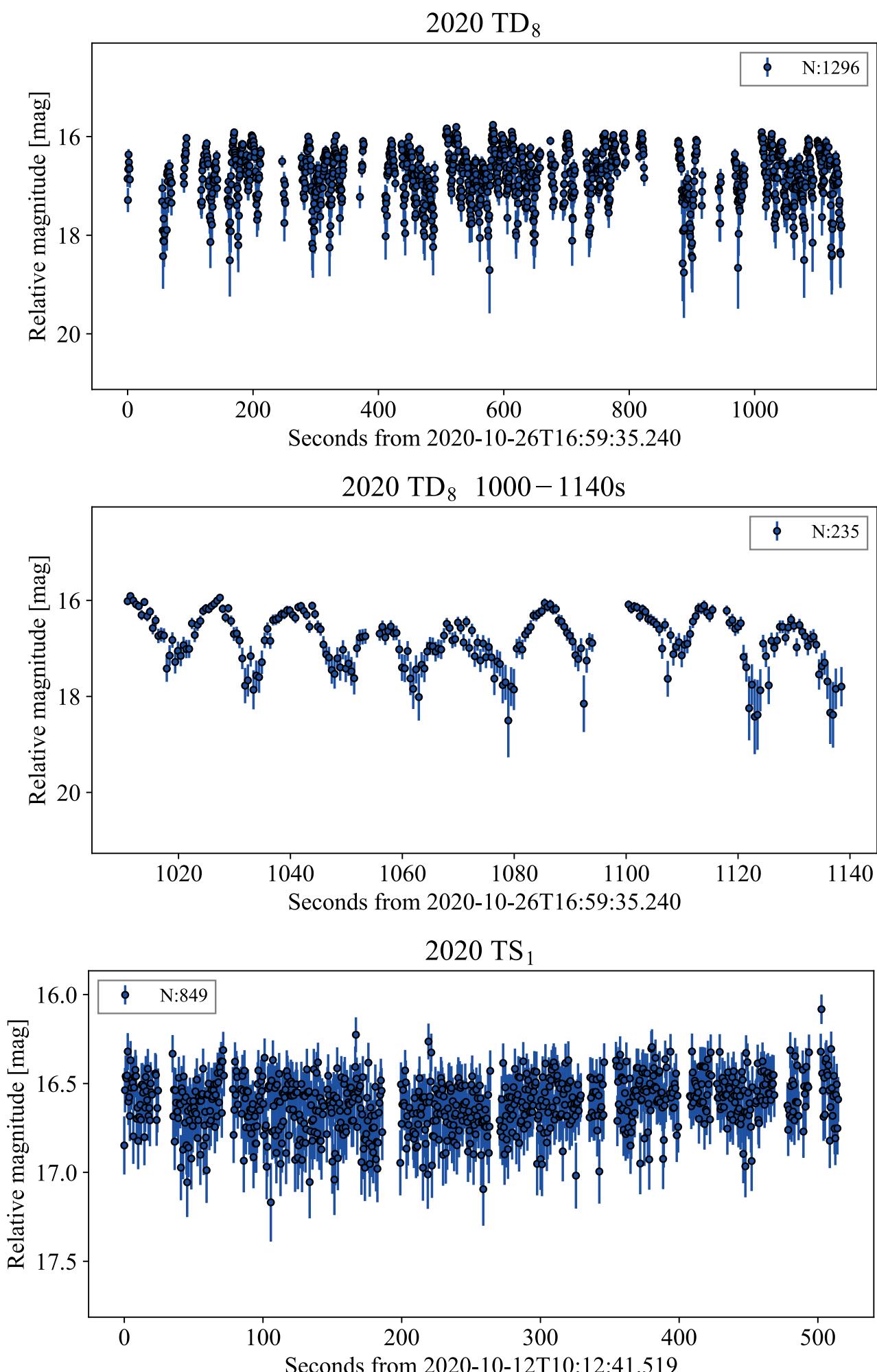


図 E.23 Light curve 10

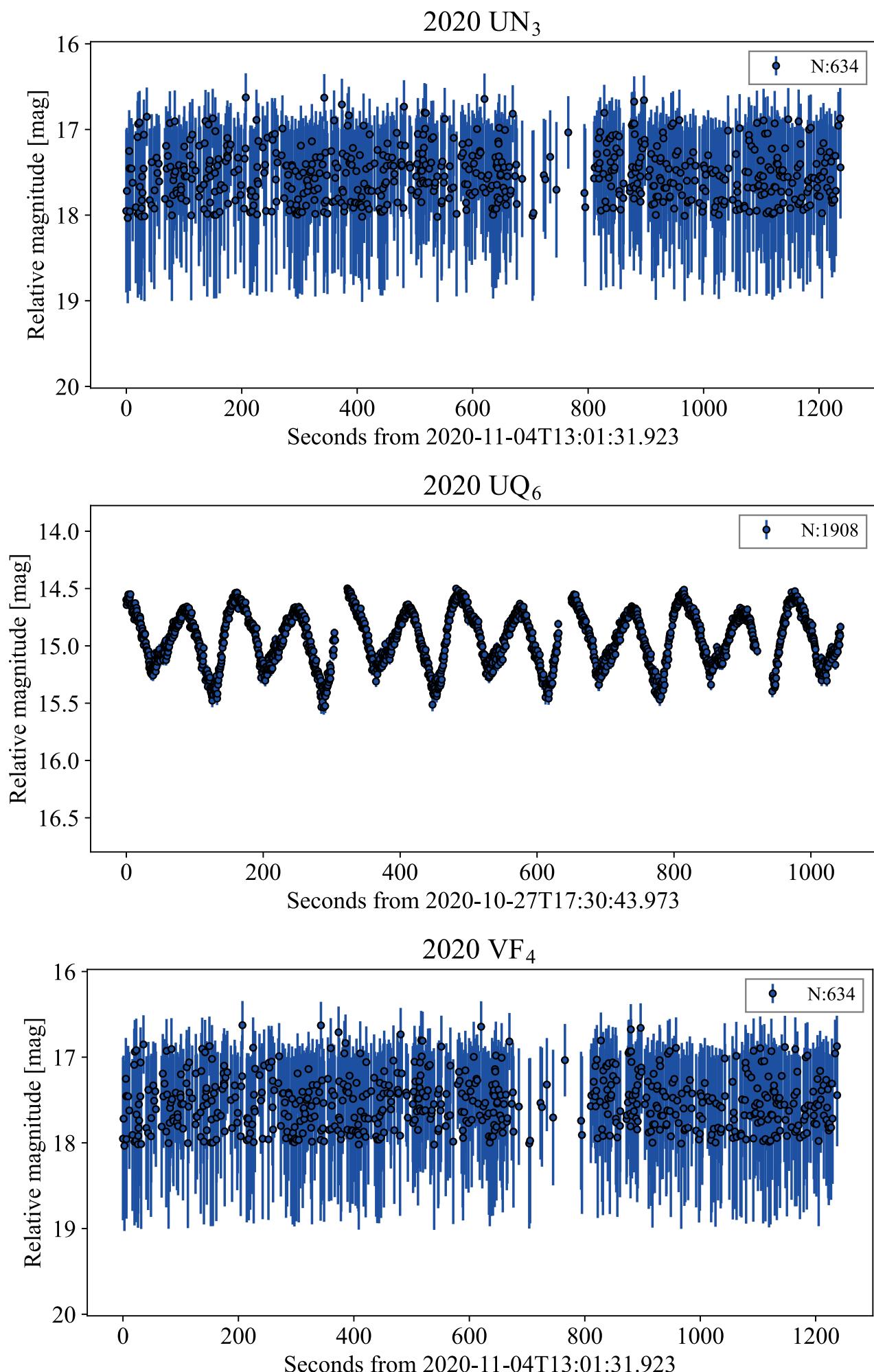


図 E.24 Light curve 11

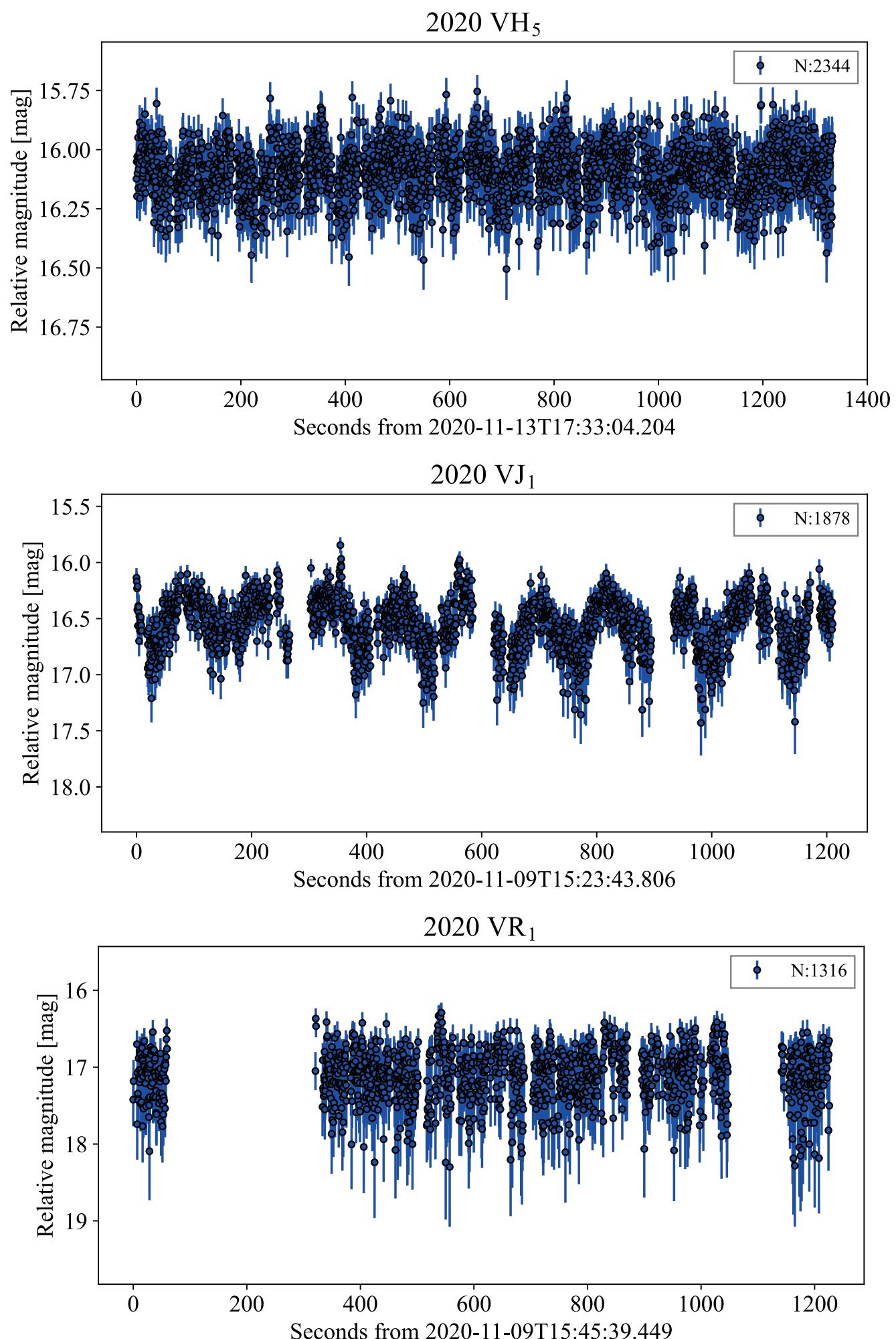


図 E.25 Light curve 12

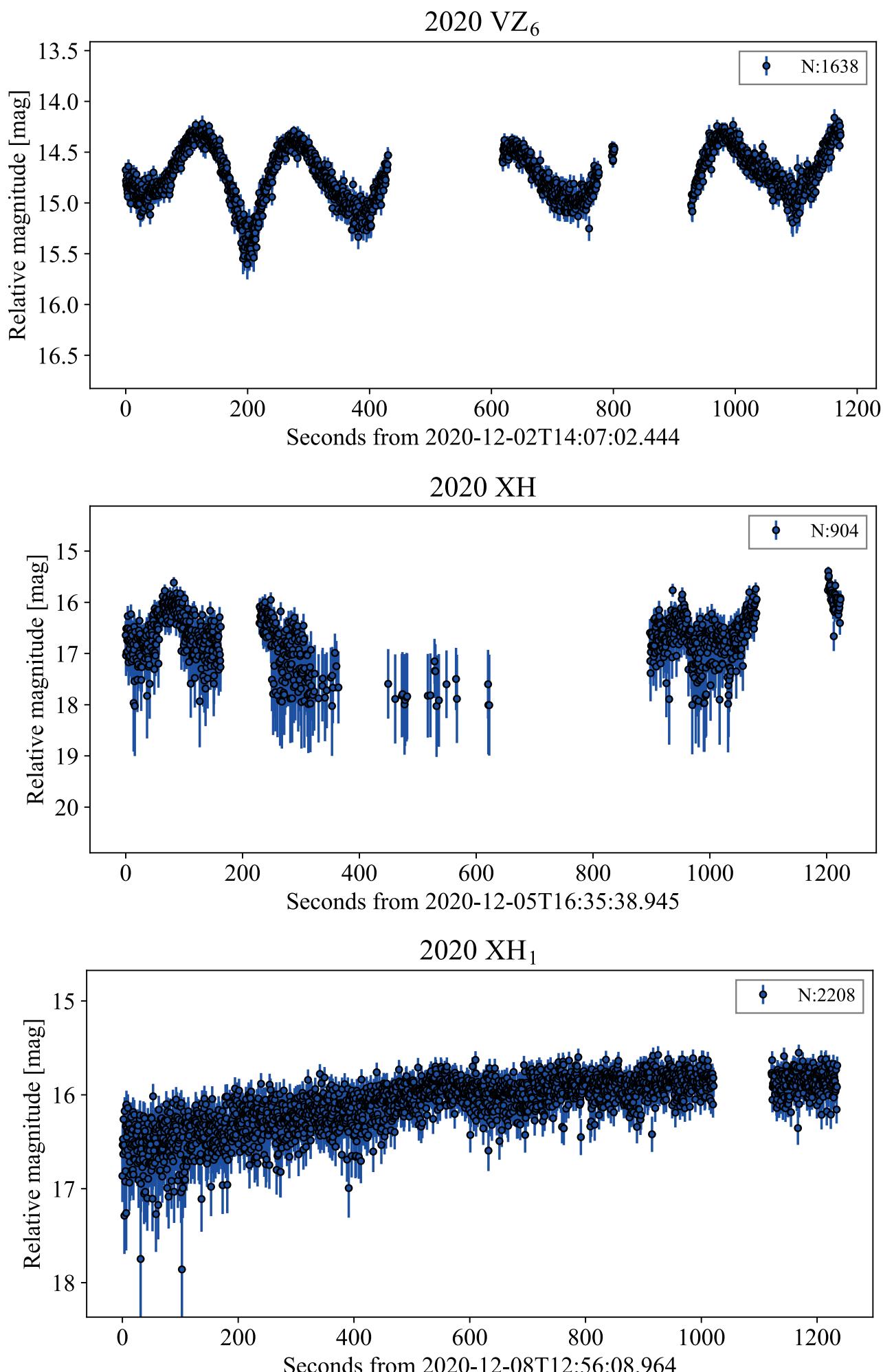


図 E.26 Light curve 13

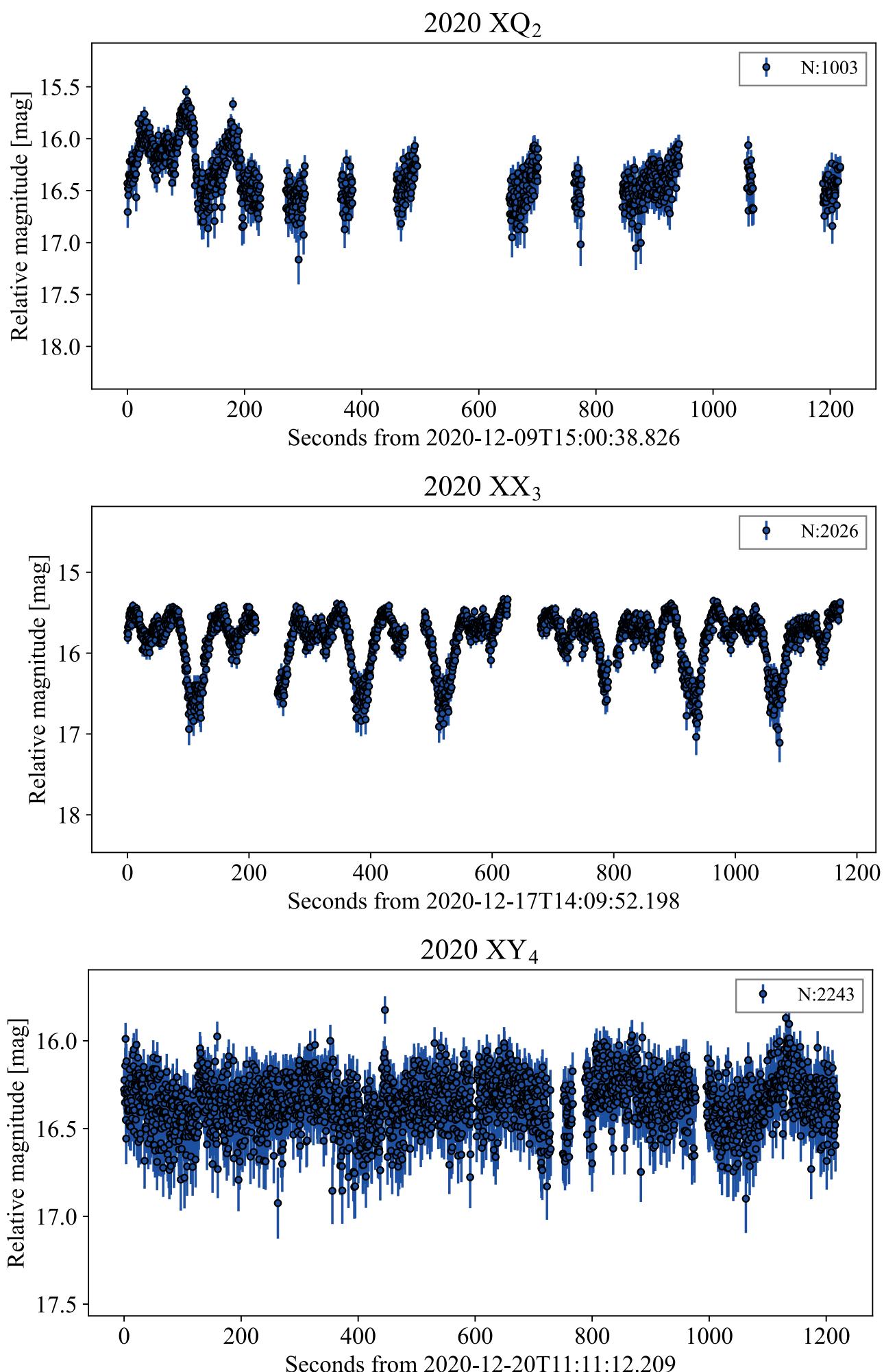


図 E.27 Light curve 14

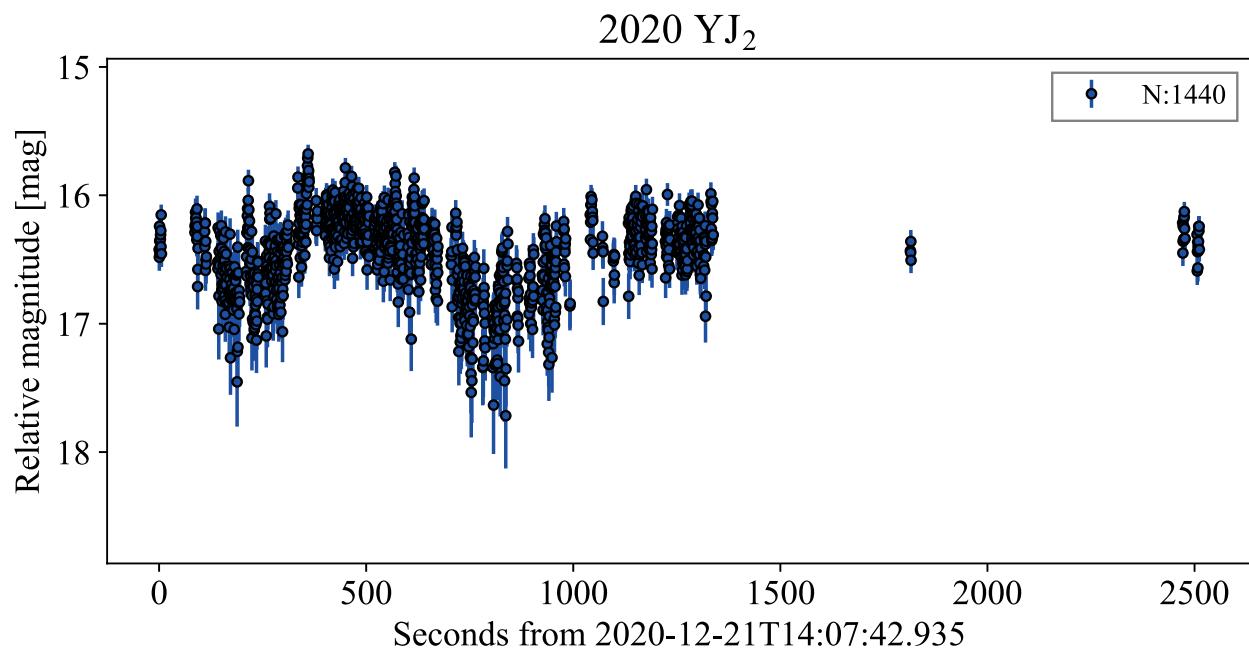


図 E.28 Light curve 15

F 折りたたみ光度曲線/Lomb-Scargle periodogram

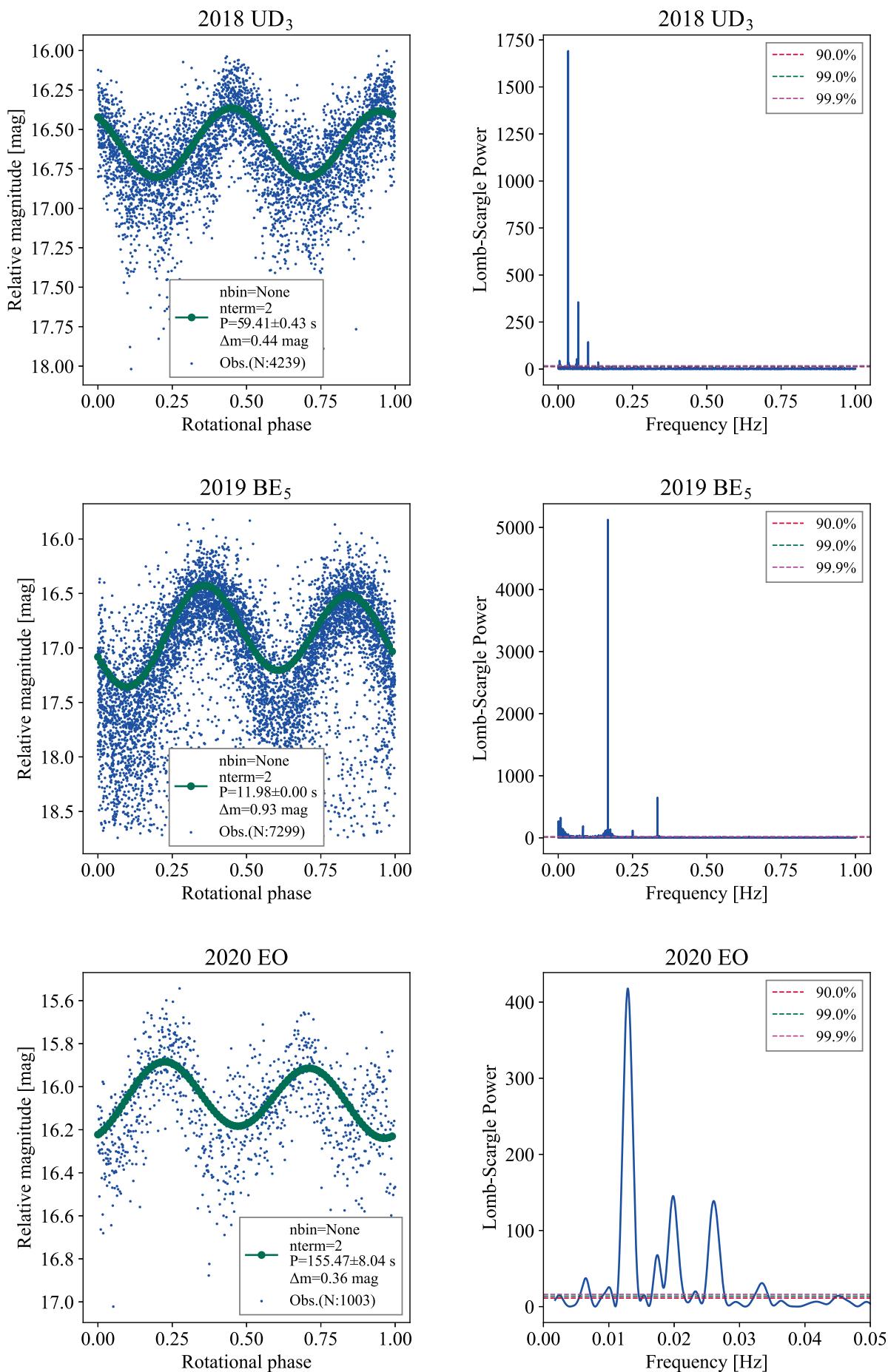


図 F.29 Phased light curve and periodogram 1

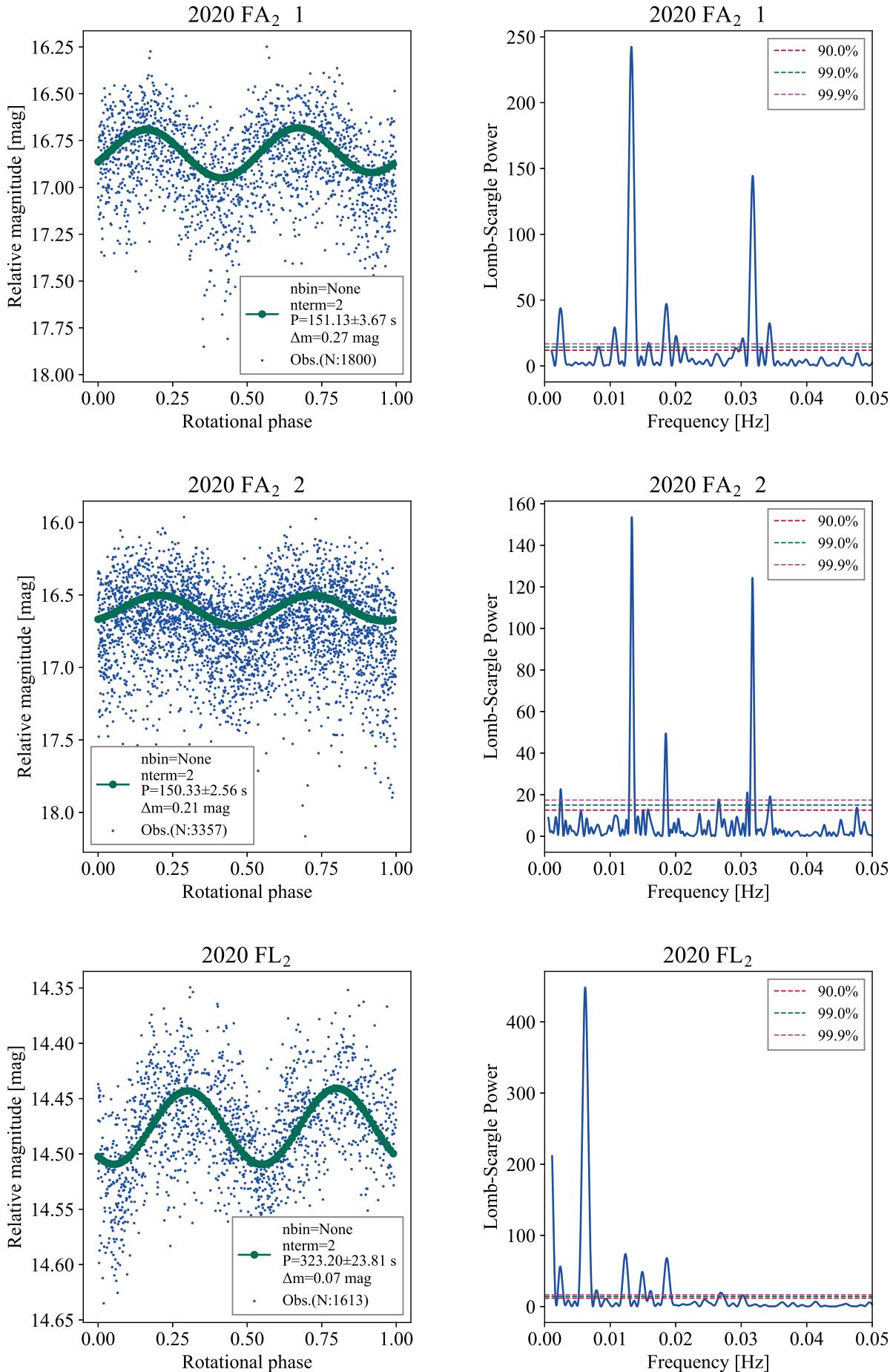


図 F.30 Phased light curve and periodogram 2

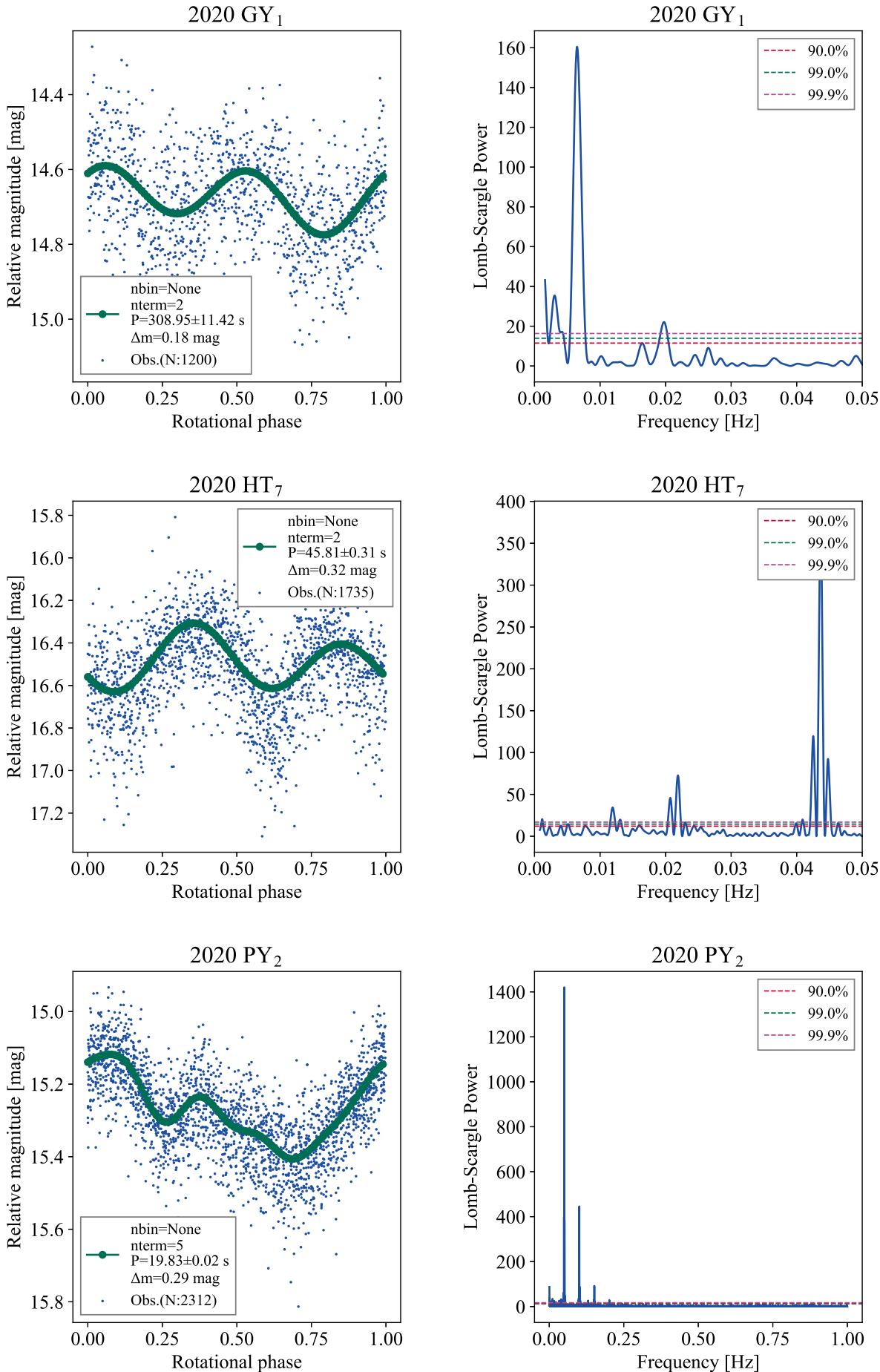


図 F.31 Phased light curve and periodogram 3

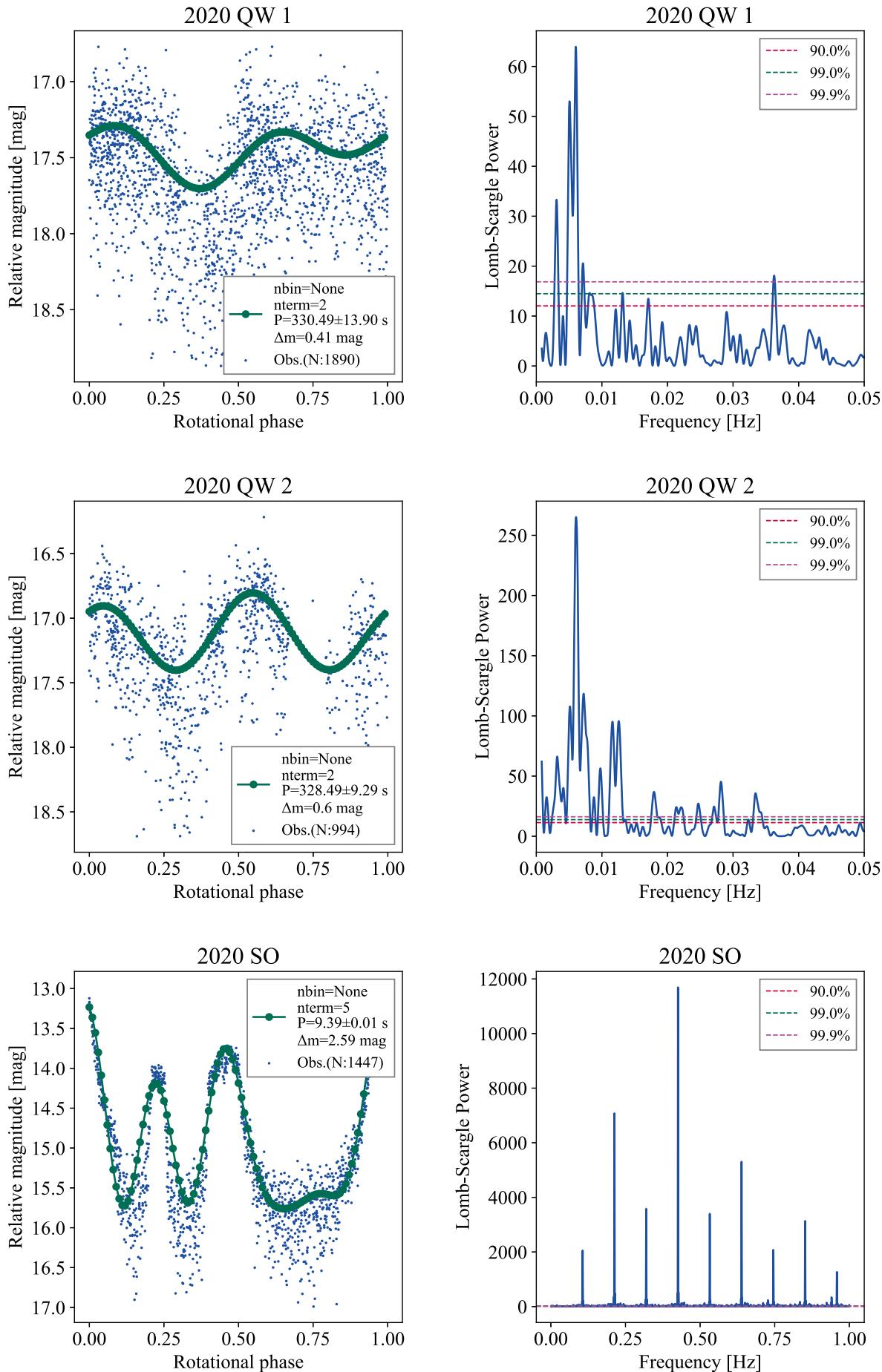


図 F.32 Phased light curve and periodogram 4

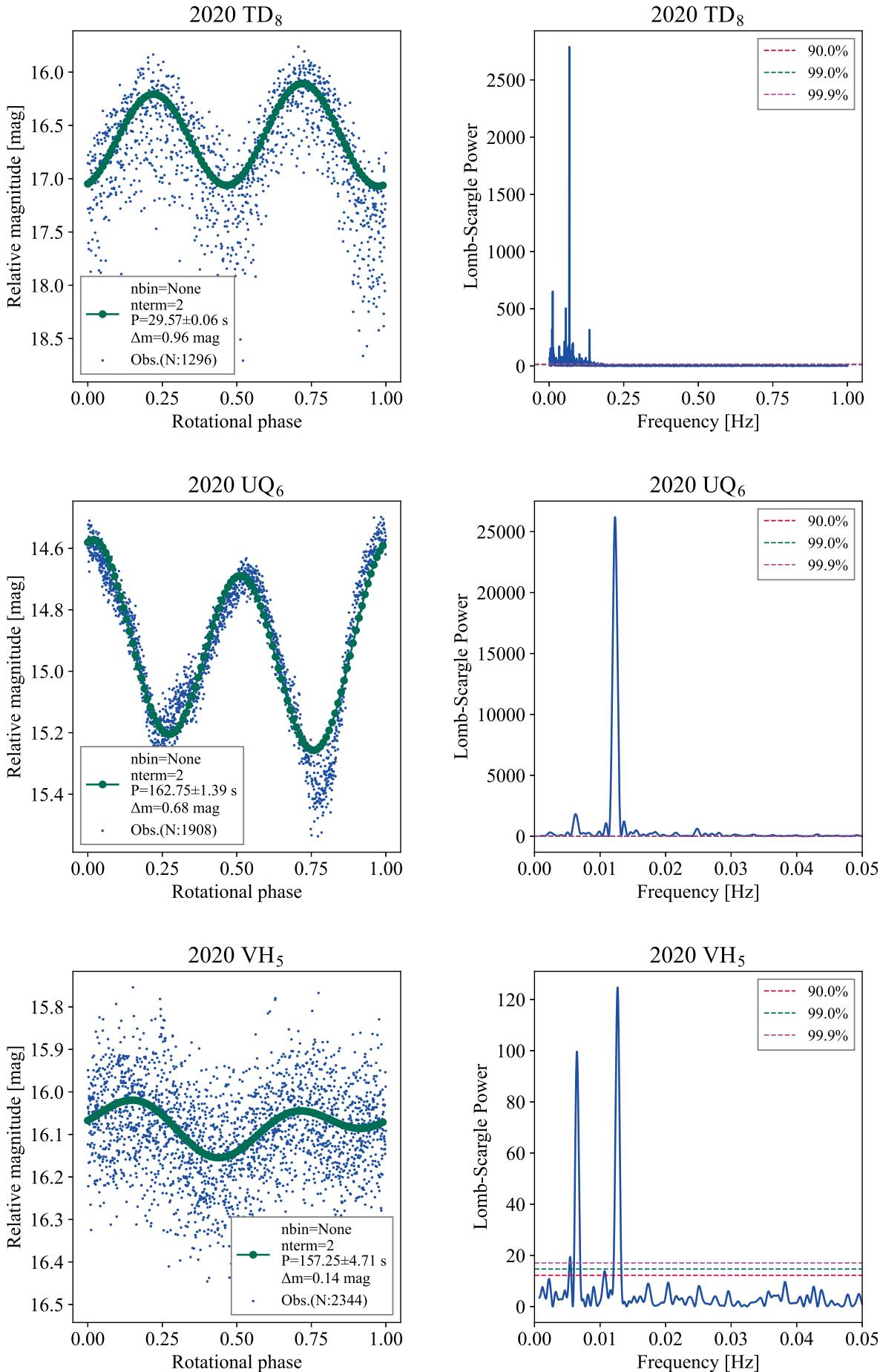


図 F.33 Phased light curve and periodogram 5

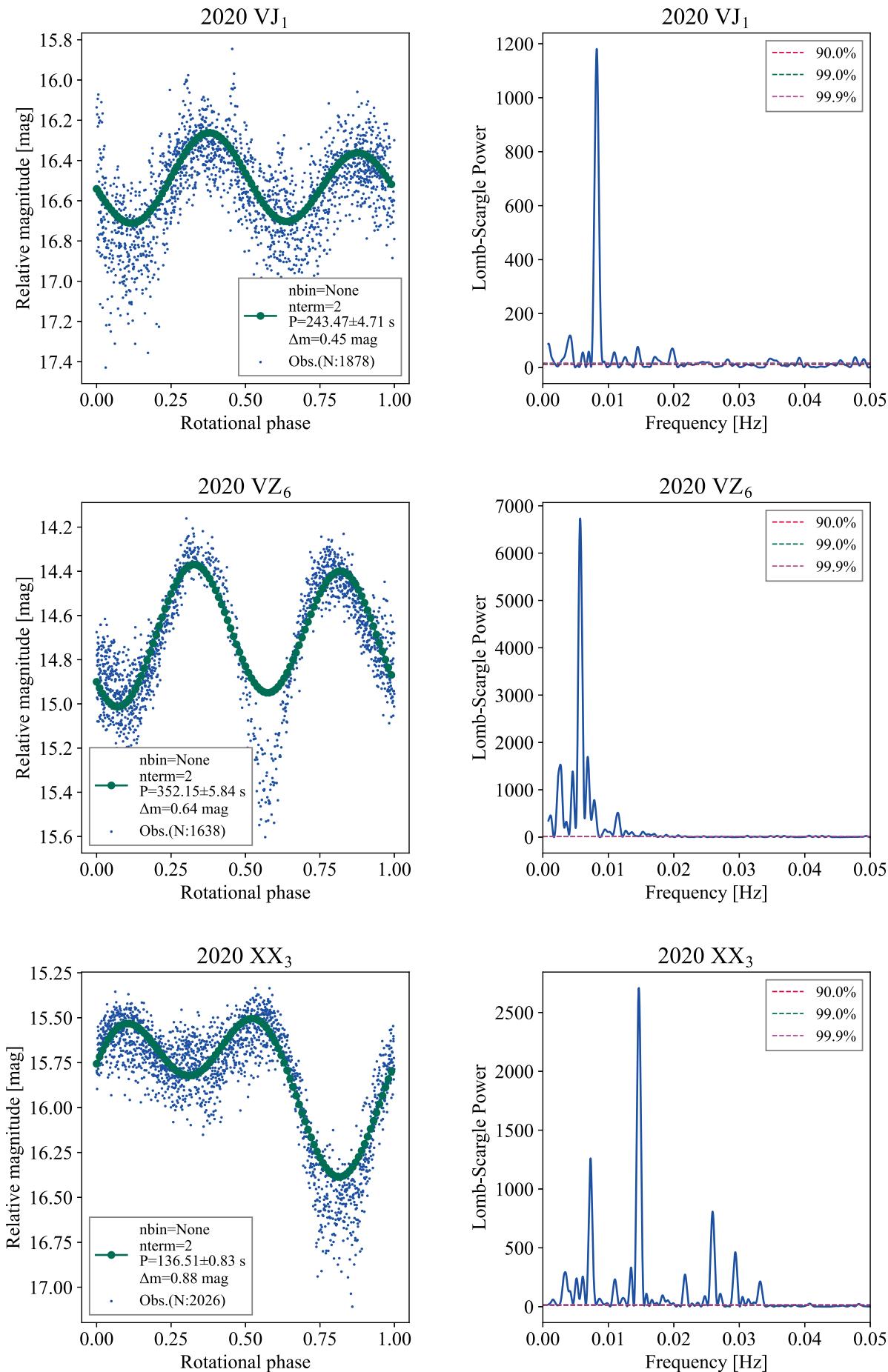


図 F.34 Phased light curve and periodogram 6

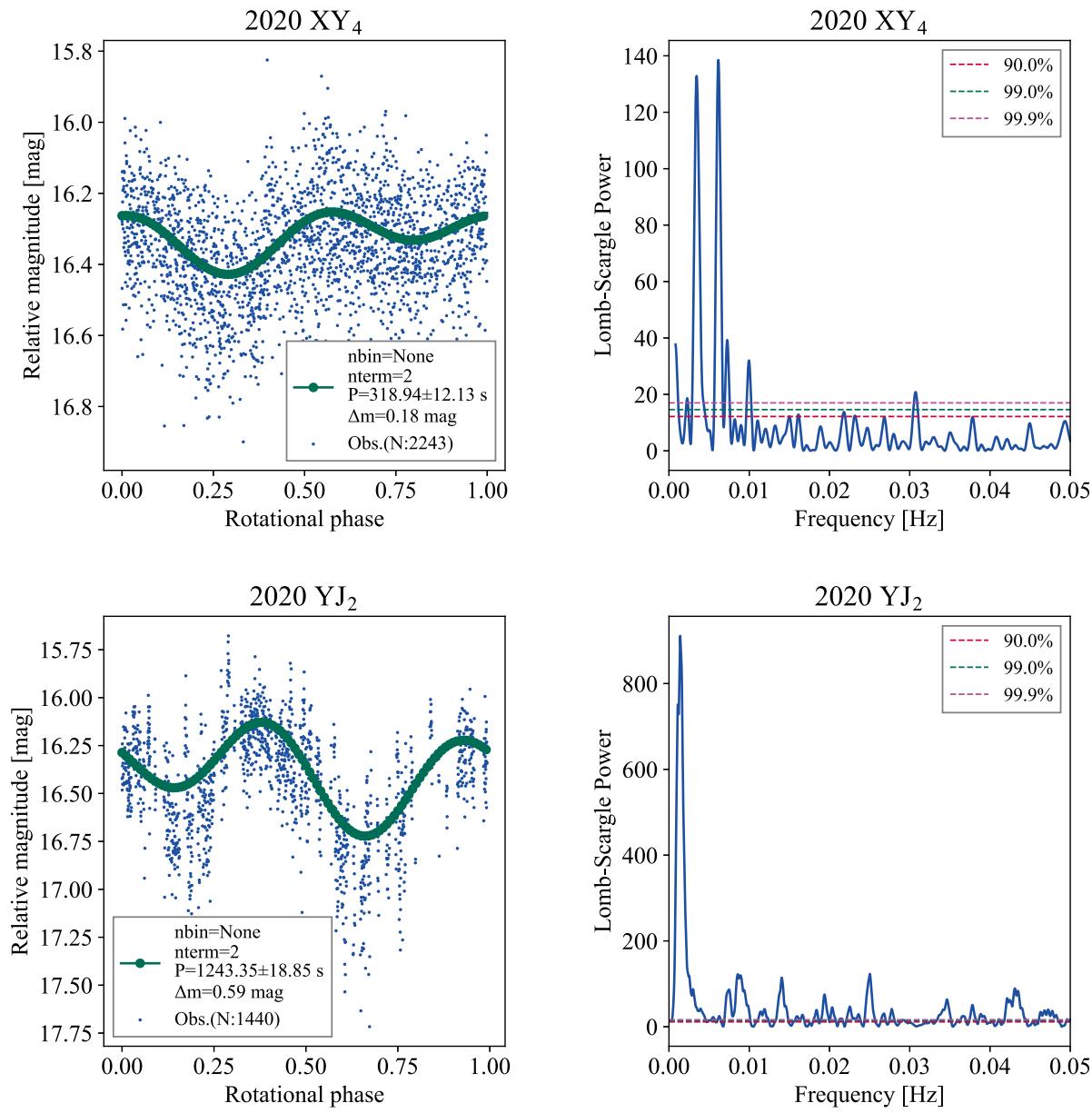


図 F.35 Phased light curve and periodogram 7

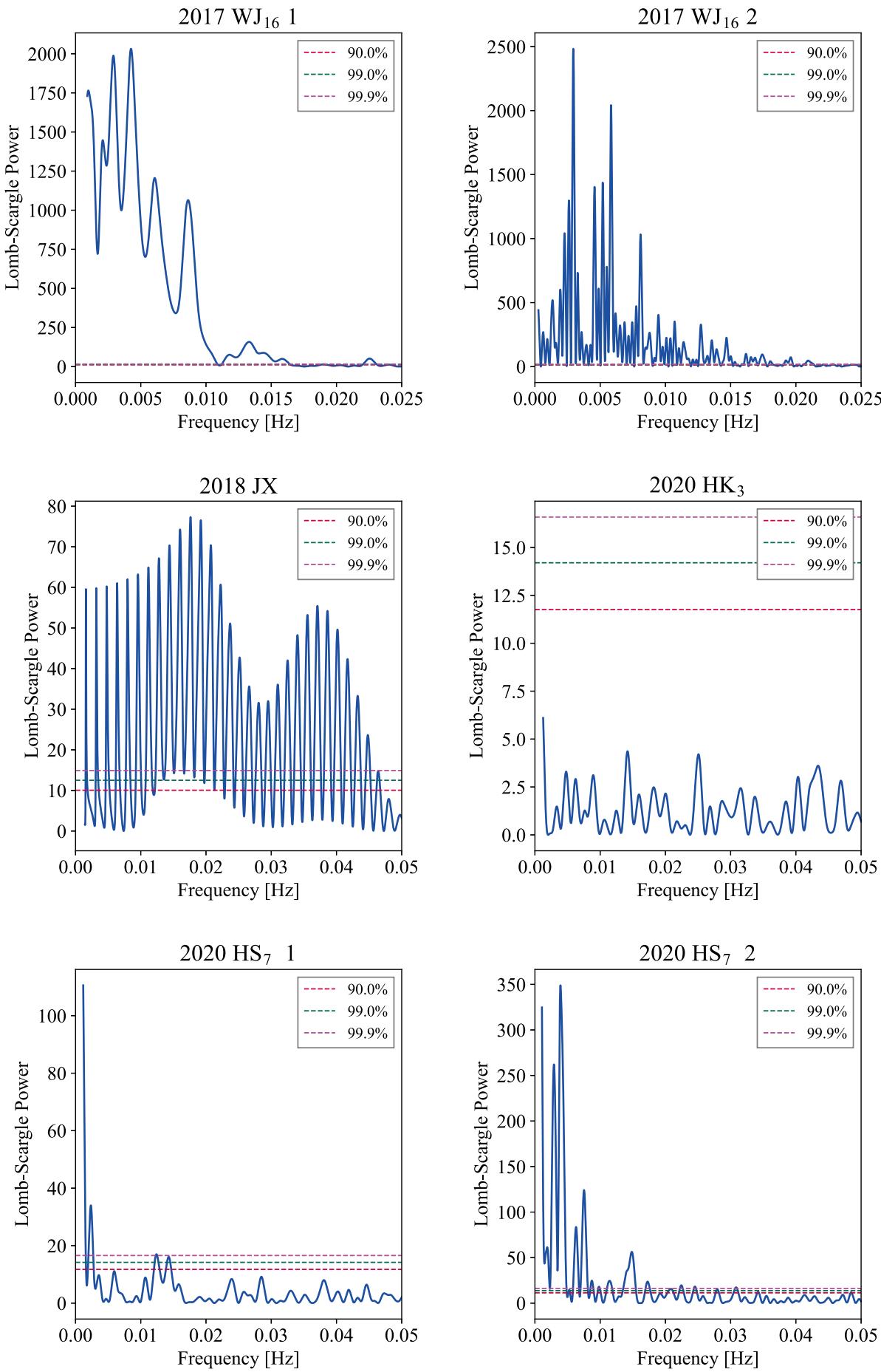


図 F.36 自転周期不定天体 periodogram 1

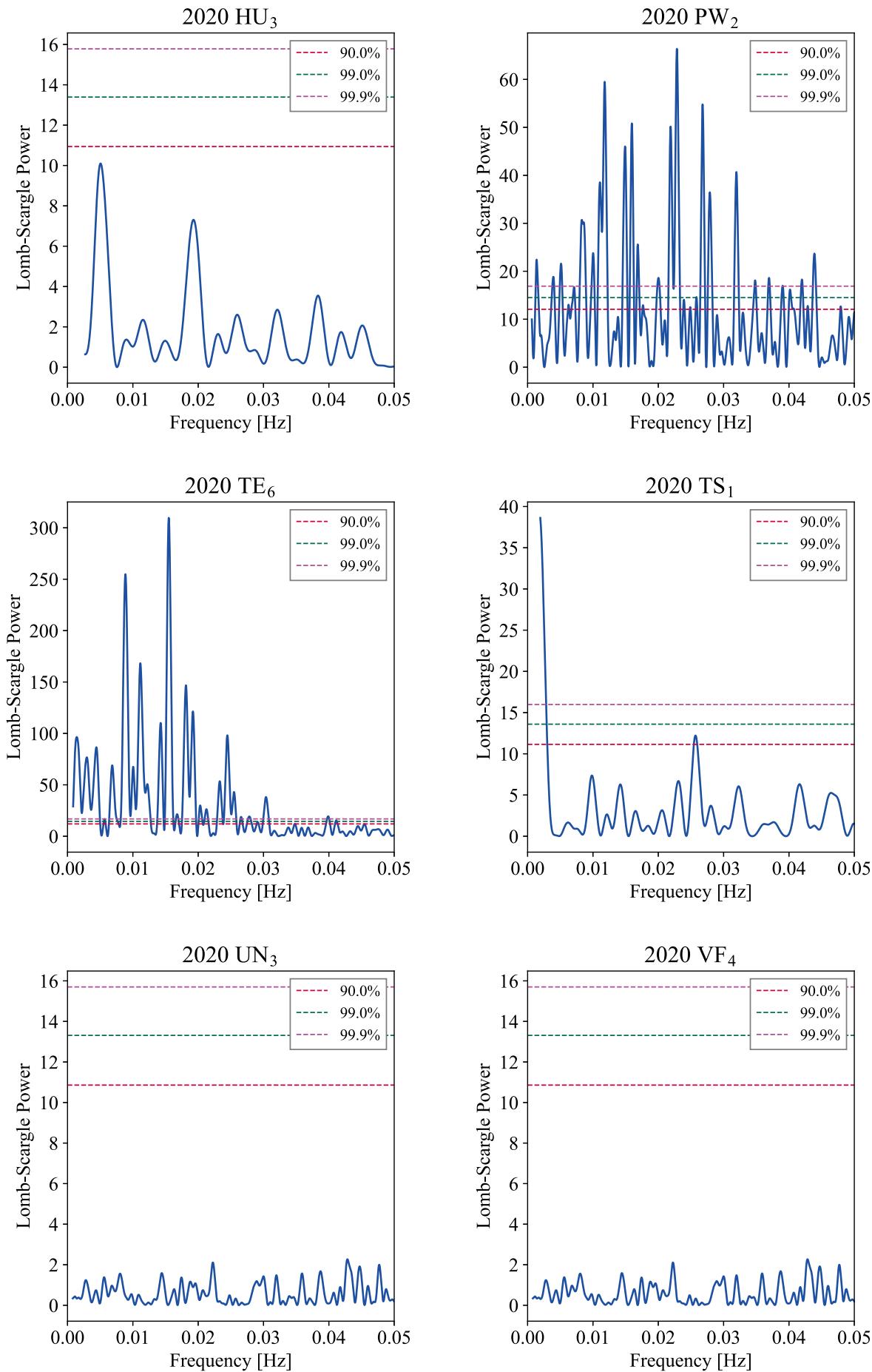


図 F.37 自転周期不定天体 periodogram 2

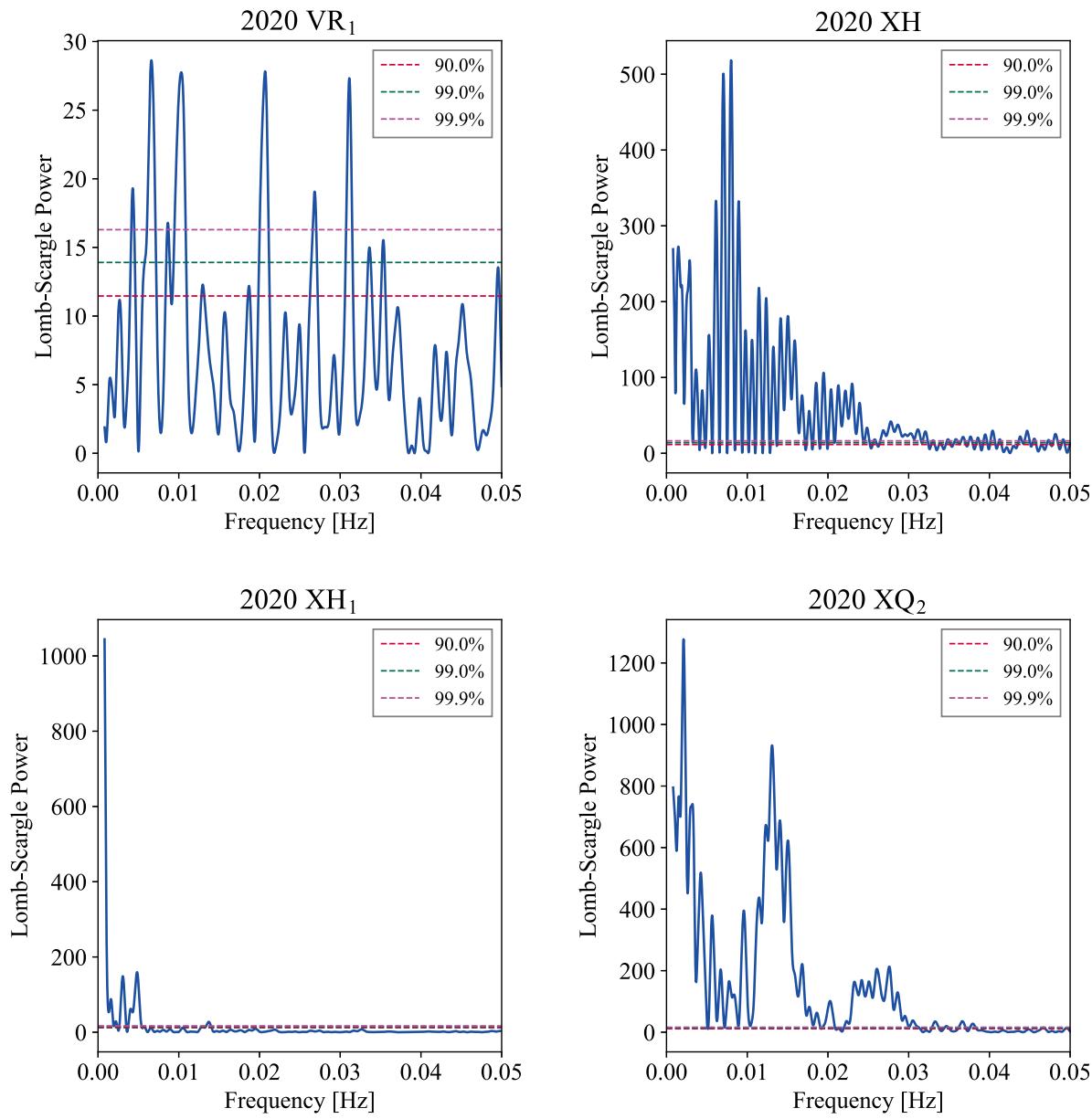


図 F.38 自転周期不定天体 periodogram 3

G YORP 効果を用いた年齢の算出

G.1 YORP 年齢の計算

まず本文 (5.3) の定数部分を C とおいて解く。

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{C}{D^2} \quad (G.17)$$

$$\omega = \frac{C}{D^2}t + C_0 \quad (G.18)$$

ただし C_0 は定数であり、生成時 ($t=0$) の角速度である。角速度と自転周期を変換する。

$$\frac{360}{P} = \frac{C}{D^2}t + \frac{360}{P_0} \quad (G.19)$$

ここで P_0 は初期自転速度であるので (5.1) を用いて t について変形すると

$$\tau_{YORP} \equiv t = \frac{360D^2}{C} \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{P_0} \right) \quad (G.20)$$

$$= \frac{360D^2}{C} \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{10D} \right) \quad (G.21)$$

となり本文の (5.5) 式が導かれる。