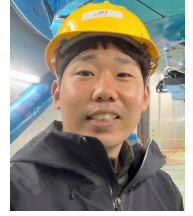


はやぶさ2拡張ミッション探査先小惑星 1998 KY₂₆の可視分光および偏光観測



紅 山 仁^{1,2}

¹コートダジュール大学 コートダジュール天文台 ラグランジュ研究所 Bd de l'Observatoire, CS 34229, 06304 Cedex 4

²東京大学 〒113-9933 東京都文京区本郷 7-3-1

e-mail: jinbeniyama@gmail.com

2024年6月上旬に、すばる望遠鏡学生PI来訪プログラムを通じてマウナケア山頂での観測を実施しました。メインミッションを終えて地球に帰還したはやぶさ2が拡張ミッションとして向かっている地球接近小惑星1998 KY₂₆の観測という提案内容です。あいにく自然現象に味方されず観測データを得ることはできませんでした。提案の背景、実際の観測の様子、および他の望遠鏡を用いた1998 KY₂₆の観測結果について紹介いたします。

1. 背 景

日本の小惑星探査機「はやぶさ」と「はやぶさ2」は、イトカワおよびリュウグウへの探査を通じて、目覚ましい成果をもたらしました。その成功を支えた要因として、探査に先立って行われた多数の望遠鏡観測が挙げられます。これらの観測により、対象小惑星の物理特性（サイズ、形状、自転状態、物質組成、反射率など）が事前に推定されていました [1-4]。それらの情報をもとに、探査機のカメラのゲイン調整などが行われるため、探査先小惑星の物理特性は必須の情報と言えます。実際、望遠鏡観測の結果の多くは探査機によるその場観測の結果とよく一致しており、事前観測の重要性が示されています。また近年、地球に接近する軌道をもつ小惑星（地球接近小惑星）の探査数は増加傾向にあり、より科学的価値の高い天体への探査が重視されるようになっていきます。さらにここ数年で、位置天文観測装置Gaiaの精密な位置測定により地球接近小惑星の掩蔽予報までもが実現し、探査先小惑星のサイズに制約が与えられています [5, 6]。探査結果の科学的価値を最大化するためにも、望遠鏡観測による詳細

な特徴付けは極めて重要です。

今回私たちが提案したのは、1998 KY₂₆という（2023年提案時の）推定直径30 mの小さな小惑星の可視分光および偏光観測です。1998 KY₂₆は1998年に地球から80万kmの近傍を通過し、その接近途中に発見されました。撮像観測およびレーダー観測が実施され、当時最速となる周期10.7分で回転している小天体であることが発表されました [7]。地球に近づいたことで観測された面白い天体でしたが、当時はミッション探査先として選ばれていたわけではありませんでした。

「はやぶさ2」は2014年に打ち上げられ、2018年にメインターゲットの小惑星リュウグウに到着しました。その後2020年にリュウグウのサンプルを携えて地球に帰還し、見事サンプルリターンを成功させました。そしてサンプルを切り離れた「はやぶさ2」は、そのまま次の旅（拡張ミッション）に出発しました [8, 9]。こうして始まった拡張ミッションは2026年の小惑星トリフネどのフライバイを経て、2031年に1998 KY₂₆とのランデブーを予定しています。

最終目的地として選ばれた1998 KY₂₆は、地球からアクセスしやすい軌道であることも選択理由

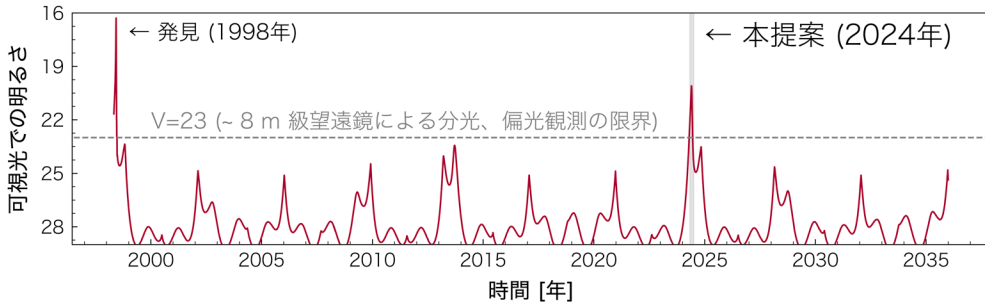


図1 1998 KY₂₆の天体暦. 図中の横向きの破線で示されている8 m級望遠鏡の分光・偏光観測限界 ($V=23$) は、天体のスペクトルエネルギー分布および偏光度に依存するためあくまで参考値です.

の一つですが、高速自転する小さな小惑星を探索するという科学的な興味深さも考慮されました。これまでに40,000個以上発見されている、地球接近小惑星の多くは、火星と木星の間にあるメインベルトからやってきたと考えられています。その過程では太陽からの光によって表面が温められることで生じる微小な力が、長期的には軌道変化を引き起こす現象も作用していると考えられています。つまり、地球接近小惑星の起源や力学的進化を理解するためには熱物性や内部構造の理解が不可欠です。1998 KY₂₆のように高速で自転する小惑星は、強い遠心力の影響により、重力だけではラブルパイル構造を維持できません。高速自転小惑星はウルルのような一枚岩なのか、あるいは表面にレゴリス層を保持しており、その粒子間の粘着力によって構造が維持されているのか、その内部構造や表面様相についてはまだ十分に理解されていません。これらの理解が進めば、小惑星の力学史をより正確に評価することが可能になります。

直径が小さい1998 KY₂₆は暗く、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡を用いても観測することは容易ではありません。(2023年提案時には)1998年以降、軌道の不確実性を小さくするための位置観測のみが行われていました。1998 KY₂₆の直径、自転状態、物質組成、反射率は強い制約が得られておらず、はやぶさ2拡張ミッションの探査を成功させるためにも、追加の観測が求められていました。

そのようななか1998 KY₂₆は2024年に26年ぶ

りに地球に接近し、1998年ほどではないものの見かけ上明るくなりました(図1)。8 m級望遠鏡を使えばさまざまな特徴づけ(たとえば分光、偏光)が可能な明るさです。前回とは大きく異なり、1998 KY₂₆は高速自転するミッション探査先小惑星です。世界の大型望遠鏡が競って観測することは明らかであり、その中ですばる望遠鏡で観測しない方が不自然な状況でした。そこで日本でミッション探査先小惑星の観測を担ってきた先輩方にお力添えをいただき、観測提案を執筆しました。小惑星の物質組成を知る基本的な手法である分光観測に加え、その反射率を推定するために、大きな太陽位相角での偏光撮像観測を提案しました(例えば、[10-12])。8 m級望遠鏡での偏光観測という、世界的にも限られた手法を用いることができる点がすばる望遠鏡を使う大きな利点であると考えました。

また、すばる望遠鏡は私にとって長年憧れの地でした。さらに、観測提案の募集があった時、私は「微小な高速自転小惑星」というテーマを含む博士論文を執筆中でした。まさに1998 KY₂₆のような小惑星に関連する内容です。はやぶさの影響を受けて天文学者を志した私にとって、1998 KY₂₆を観測しない理由はありませんでした。

2. いざ、観測へ

観測提案の採択通知が届いたのは、2023年12月のことでした。博士論文を執筆中のタイミング

での嬉しい知らせであり、そのことは今でも鮮明に覚えています。採択通知が届いたその日から晴天を祈りつつ、観測に備えました。

年明けの1月には担当のSupport Astronomer (SA)である青木さんと三鷹でお会いする機会があり、観測準備について相談に乗っていただきました。4月になり、ポスドク生活を開始するためにフランスに異動したため、その後の観測準備は主にメールで進めました。最終調整は、観測前日に中間宿泊施設ハレポハクで行いました。

2.1 24時間かけてフランスからハワイへ

私がポスドクをしていた南仏ニースからすばる望遠鏡のあるハワイ島までは、どうしても複数回のトランジットが必要です。往路はパリ、サンフランシスコ、ホノルルでの3回のトランジットを経て、ハワイ島に到達しました。経度にして地球の裏側にあるハワイへの24時間の旅は長く、楽しみにしている観測のためといえど疲れを感じました。さらに道中、すばる望遠鏡があるハワイ島の活火山キラウエアの活動が活発化しているという、耳を塞ぎたくなる知らせが飛び込んできました。トランジット時間に余裕がなく、詳しく調べることができませんでしたが、アメリカ本土からハワイへの飛行機の中でも、私はそわそわして落ち着きませんでした。

ホノルルに到着してすぐ、気になっていたキラウエアについてスマートフォンで調べ、活動が活発になっているというのはどうやら本当らしいということがわかりました。なお米国でのデータ通信が有料のプランに加入していたため、すぐさま「海外で携帯電話を使用したので60ユーロ（当時のレートで約1万円）請求します」という旨のメールが届きました。加えて、ハワイ島でのホテルの予約メールが見つけれず、（長時間フライトの疲れと時差の影響で）そもそも予約していないという結論にいたり、トランジット中に急いで予約しました。わずかに1時間の国内線の後、空港からタクシーを利用してようやくハワイ島のホテ

ルに到着しました。ホテルでは「あなたの名前で2部屋予約が入っています」と告げられました。疲れているときに予期せぬことが起こると、人間は思わぬミスをしてしまうものだと、改めて実感したのでした。同時に、ここまで不運が続いたのであれば、観測ではよい結果が得られるのではないかという非科学的な気持ちを抱いたことも覚えています。

2.2 山頂観測

私たちの観測が割り当てられたのは後半夜の2晩で、それぞれ可視分光観測、偏光観測を実施する予定でした。夜間に山頂に上がるのではなくSAの青木さんと同じタイミングで、夕方から山頂に上がり観測に備えました。山頂での滞在時間は長くなりましたが、観測前にゆっくりと過ごすことができ、体力的な負担は感じませんでした。

両日ともによく晴れました。しかし、初日はキラウエアの火山活動の影響でチリが舞っていて、観測所の規則によりドームを開けることができませんでした。二日目はチリの量も落ち着き、前半夜の観測は実施されました。晴天が継続することを祈る時間は、現地観測ならではの醍醐味です。前半夜の観測者の邪魔にならないように観測準備を進めました。しかしその願いも虚しく、ちょうど前半夜の観測が終わる頃には湿度が高くなり、ドームが閉められました。結局、後半夜は二日連続でドームを開けられず、私の山頂観測は美しい朝焼けとともに終わりを迎えました（図2）。

3. 結果

私が担当した観測時間中、すばる望遠鏡のドームが開くことはなく、1998 KY₂₆の観測データは得られませんでした。それでも、同時期に行われた世界中の他の望遠鏡による観測により、1998 KY₂₆の理解は大きく進展しました。ここで、自身が関わった観測も含め以下にそれらの結果を簡潔にまとめます。

1) 超大型望遠鏡 Very Large Telescope (VLT) を



図2 観測後の集合写真。観測データは得られなかったものの笑顔を見せる3名。左から夜間オペレータのAidan, 筆者, SAの青木さん。ディスプレイに映っているのはオンラインで参加して下さった共同研究者の浦川さん, 吉田さん, 関口さん。

用いた熱赤外線観測から、直径が従来の推定よりも小さく、17 m以下であるという報告 [13]

- 2) ジェミニ北望遠鏡を用いた可視分光および多色撮像観測から、スペクトル型がXe-type (Bus-DeMeo分類) であるという報告 [14]
- 3) ビクター・M・ブランコ望遠鏡, VLT, カナリア大望遠鏡 Gran Telescopio Canarias (GTC), ジェミニ南望遠鏡を用いた測光観測, および1998年の観測データの再解析により, これまで考えられていたよりも自転周期が短く(1998年の推定値の半分の5.35分), また直径が小さい(11 m)という報告 [15]*1

4. 終わりに

観測後は一休みしてから山麓に戻り, ハワイの郷土料理Laulau(お肉を葉っぱで包んだ蒸し焼き料理)をいただきながら身体を休めました。

帰りの便では, 24時間に及ぶフライトの終盤に目的地着陸(ダイバート)を経験し, カナダのガンダー国際空港で一夜を明かすことになりま

した。その影響で以降のトランジット予定も大きく崩れ, 自宅のあるニースに戻るのは, 当初の予定より2日遅れる結果となりました。

振り返ってみると, 往路から復路に至るまで予期せぬ出来事が続いた観測でした。それでも, マウナケア山頂での現地観測は何ものにも代えがたい経験です。近年, 世界的に望遠鏡観測のリモート化が進み, 観測時間を獲得しても現地観測を受け入れていない天文台は少なくありません。今回は現地で観測データを得ることはできず, 科学成果には結びつきませんでした, この現地観測を通じて研究への強いモチベーションを得ることができました。また本経験を通じて, 改めてマウナケアを訪れ, 天候にも恵まれた条件下で観測データを取得するという新たな目標もできました。今後も学生PI来訪プログラムが継続され, 多くの学生が現地観測を経験し, それぞれにとってかけがえのない学びを得ることを願っています。

謝 辞

観測提案共著者の石黒正晃氏, 黒田大介氏, 高橋隼氏, 関口朋彦氏, 浦川聖太郎氏, 吉田二美氏, 酒向重行氏に深く感謝いたします。また, 観測準備からハワイ滞在に至るまで多大なるご支援をいただいた, SAの青木賢太郎氏に御礼申し上げます。フランス発着で高額かつ複雑, さらにダイバートによる延泊も相まってより煩雑になった出張手続きをスムーズに進めていただいた関係者の皆様に心より感謝いたします。最後に, 担当SAではないにもかかわらず, 休日を割いて出国前にハワイ島の魅力を伝えて下さった寺居剛氏のお心遣いに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Sekiguchi, T., et al., 2003, A&A, 397, 325
- [2] Ishiguro, M., et al., 2003, PASJ, 55, 691
- [3] Hasegawa, S., et al., 2008, PASJ, 60, S399

*1 詳細はヨーロッパ南天天文台によるプレスリリース記事<https://www.eso.org/public/news/eso2515/>をご参照ください。

- [4] Ishiguro, M., et al., 2014, ApJ, 792, 74
- [5] Yoshida, F., et al., 2023, PASJ, 75, 153
- [6] Arimatsu, K., et al., 2024, PASJ, 76, 940
- [7] Ostro, S. J., et al., 1999, Science, 285, 557
- [8] Hirabayashi, M., et al., 2021, Adv. Space Res., 68, 1533
- [9] Kikuchi, S., et al., 2023, Acta Astron., 211, 295
- [10] Kuroda, D., et al., 2018, A&A, 611, A31
- [11] Ito, T., et al., 2018, Nat. Commun, 9, 2486
- [12] Shinnaka, Y., et al., 2018, ApJ, 864, L33
- [13] Beniyama, J., et al., 2025, AJ, 169, 264
- [14] Bolin, B. T., et al., 2025, AJ, 169, 303
- [15] Santana-Ros, T., et al., 2025, Nat. Commun., 16, 8275

Observation Proposal: Visible Spectroscopy and Polarimetry of the Hayabusa2 Extended Mission Target Asteroid 1998 KY₂₆

Jin BENJYAMA^{1,2}

¹*Université Côte-d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, Bd de l'Observatoire, CS 34229, 06304 Nice Cedex 4, France*

²*Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: We carried out observations at the summit of Maunakea through the Subaru Telescope Student PI Visiting Program in early June 2024. The proposal aimed to observe the near-Earth asteroid 1998 KY₂₆, which Hayabusa2 is heading toward as part of its extended mission after returning to Earth upon completion of its primary mission. Unfortunately, natural phenomena prevented us from obtaining observation data. We introduce the background of the proposal, describe the actual observing experience, and summarize observational results of 1998 KY₂₆ obtained with other telescopes in 2024.