

〈2022年度日本天文学会天文功労賞〉

小惑星ディディモスによる 恒星食観測への挑戦



渡部 勇人

〈JOIN (Japan Occultation Information Network)〉

〈IOTA/EA (International Occultation Timing Association East Asia)〉

e-mail: starship@cty-net.ne.jp

このたびは「小惑星ディディモスによる恒星食の観測主導」に対して、荣誉ある賞をいただき、誠にありがとうございました。

私が小惑星による恒星食の観測を始めたきっかけから今回の観測成功に至るまでを、東アジア地域での観測協力体制の構築を交えてお話をまとめてみました。

より多くの方に関心を寄せていただき、日本におけるこの観測の発展につながれば幸いです。

1. 天文台を建てる

今から20年前の2003年の春、長年憧れていた天体ドームを載せた離れを建てました。

20年以上続けている地域の天文講座において、曇ったときに星が見られずに残念そうに帰っていく親子を幾度となく見ていましたので、自宅に天文台があればいつでも楽しんでもらえると、望遠鏡の揺れを防止するために鉄筋コンクリート造とし、専用の玄関と階段、階下には2,000冊以上の天文書を取めたに資料室（書斎）を設けました（図1）。

近所の方や講座の参加者など多くの人で賑わうとともに、その年大接近した火星を幾晩も撮影したりして、気が向いたときに望遠鏡をすぐに使えることに大満足をしていました。

その賑わいが落ち着いたころ、高校地学部の先輩で三重県桑名市在住の浅井晃さんから、「見えている星が消えて、また戻るといった面白い天体現象があるんだけど、せっかく立派な天文台を持つ



図1 自宅天文台。

ているのだから観測してみない？」と誘われました。それが小惑星による恒星食（掩蔽）の観測でした。

2. 初めての観測

月縁で星が明滅する接食観測は、浅井さんのお誘いを受けて何度か経験したことがありましたが、小惑星による恒星食は未体験。

太陽の周りを回る小惑星が、背景の恒星の前を横切るときに、暗い小惑星は見えずに、恒星が突然消えたように見える天体現象であるとは知っているもの、観測はしたことはありませんでした。

2004年から2006年にかけては、浅井さんから観測できそうな予報を教えてもらい、一緒に天文台で、または個別に10回余り挑戦しましたが、天候が悪かったり、隠される対象星は暗く、口径13 cm 屈折望遠鏡と浅井さん所有の接食観測に使用する防犯用のCCDモジュールカメラの組み合わせでは写らなかったり、自動導入しても眼視ではどの星かわからなかったりと、全く観測にはなりませんでした。

そんな中、眼視観測を行った(141) Lumen (リュウメン) による恒星食は、対象星が9.8等と明るく見やすいものでした。予報時刻前から目を凝らしていたところ、視野の真ん中に入れて見つめていた星が、突然見えなくなりました。そしてしばらくして星が復活。何事もなく元の明るさで光っています。予報時刻通りに現象が起こったことにも驚きましたが、パッと消えて、スパッと明るさが戻る現象に興奮しました。

残念なことに短波ラジオの時報と私の「消えた、出たあ！」の発声がテープレコーダーに録音できておらず、私の観測は不成立となりました。

この恒星食は、全国32カ所で観測され、同じ三重県いなべ市で観測された浅井さんを含む8地点で減光がとらえられました。また、推定直径135 km とほぼ等しい詳しい形状も明らかになりました。

初めてみる現象の観測が記録として残せなかったという悔しい思いもあり、少しずつ機材を揃えていき、2007年初めに観測者が集うメーリングリストのJOINに入れていただきました。

3. 観測にハマる

年間100予報ほどの計画、天候に左右されます

が、その内の50の予報を観測するまでになりました。

観測にのめり込むと、世界の観測が気になります。アメリカやヨーロッパ、オーストラリア・ニュージーランドと日本では、観測データを整理したコーディネーターによるホームページで、その地域の過去の観測結果を見ることができます。

しかし、この小惑星は過去に観測されたのだろうか？各サイトを回って調べるには大変で、世界中の観測結果すべてを一目でわかる表やデータ集はなかったため、自分が作るしかない、小惑星番号順に観測結果を整理して、各サイトに掲載されている整約図へリンクをさせたエクセル表を作りました。

この一覧表を日本のコーディネーターである早水勉さん(当時せんだい宇宙館勤務)が、IOTA(国際掩蔽観測者協会)に紹介。IOTAの方にも気に入ってもらい、IOTAのウェブページにせんだい宇宙館ウェブページの掲載へのリンクを貼ってもらいました。

4,000近くの観測を掲載していましたが、各サイトのサーバー引越してアドレスが変わってしまったことでリンクが切れて、その修正に追われる毎日が続いたことと、観測数の急増等で更新することができないまま今に至ってしまいました。

4. 観測の転機

自宅天文台で観測する限り、予報掩蔽帯から外れていることがほとんどで、よくても年数個、運が悪いと1個のみしか減光がとらえられないという状況が続きました。それでも観測数は日本でのトップクラスを維持していきました。

減光を観測するには、予報掩蔽帯の中へ移動すればよいのですが、移動用には口径75 mmの鏡筒と写真用架台しかなく、しかも星図を使って、カメラ写野の星をたどりながらの手動導入。

たまに何時間もかけて出かけても、雲に遮られる、晴れているのに対象星を導入できず、と何度

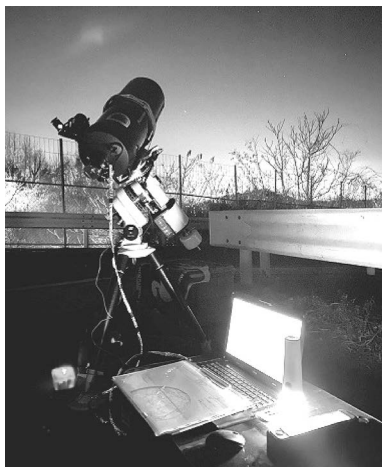


図2 移動観測。GPS受信機を2台使い、パソコンに写し出して動画をキャプチャ。目盛環による手動導入でいまだにミスあり。

も観測に失敗することがあって、減光観測数を稼ぐことはできませんでした。

時々一緒に観測することもあった妻を病で亡くし、観測の意欲が湧かず、1年半ほどブランクができました。

その間、渡辺裕之さんを中心に、感度が高いCMOSモノクロカメラによる観測方法が確立され、JAXAの探査ミッション、ディステニー十の対象小惑星である(3200) Phaethon (フェートン、又はファエトン)による恒星食の日本やアメリカの観測成功などがありました。

時代についていこうと、クランプが効かないまま放置してあった三鷹光器製のGN-170赤道儀を修理に出し、少しでも大きな口径と20 cmのシュミットカセグレンとCMOSカメラを手に入れて、移動観測の準備を整えました(図2)。

また予報もESA(欧州宇宙機関)の恒星精密位置観測によるGaia(ガイア)カタログが発表され、予報が正確になったことや、誰でも予報を出すことができるOCCULT4という無料ソフトで、IOTA発表の予報だけでなく、少し条件の悪い予報も数多く出すことができ、日本だけでなく世界中の観測成功数も飛躍的に増えていきました。

JOINでは複数個所で減光をとらえようと、日本で観測できるOCCULT4予報の情報を共有しています。私もその予報に合わせて、ほかの方と観測ラインが重ならないように移動観測が増えていきました。

5. ディディモスへの挑戦

2022年の年明け早々、IOTAの会員でもある渡辺さんから、日本における重要天体の恒星食の予報がもたらされました。

その予報の中に、地球近傍小惑星(NEA)である(65803) Didymos(ディディモス)やフェートンなどの予報が含まれていました。

またその予報の中には、同じくNEAの直径1.8 kmほどの(163693) Atira(アチラ)による予報がありました。

アチラによる予報掩蔽帯の幅は2 km、減光の最大継続時間は0.1秒しかありません。しかも予報誤差(1シグマ)の幅は20 kmですから、私がJOINで観測計画をお知らせしましたが、誰からも反応はありませんでした。

これまでJOINを含め、予報が出される観測対象は、およそ直径20 km以上の小惑星。過去に観測例があり予報精度が高い小惑星である探査ミッション対象の直径約5 kmのフェートンと直径340 mほどの(99942) Apophis(アポフィス)の2例はありますが、予報精度がなく誰も経験したことのなく途方もない観測の挑戦に、二の足を踏むのも当然です。私はゴールデンウィーク中で暇を持て余している？ 娘のひとりと、岐阜県高山市の予報帯の中で観測しましたが、結果減光は認められず小惑星の影は別の所を通過したことになります。

推定直径780 mの小惑星ディディモスの予報についても、条件は同じようなもの。地元三重県を含む近畿地方での予報がいくつかありましたが、個人的には観測しても、仲間呼びかけてよいのか迷っていたところ、浅井さんから、「地元の

天文台や同好会に声をかけるので、一緒に観測しましょう」とお誘いがありました。

まずは7月末の予報をターゲットにしましたが、予報誤差は大きいし、予報が変わるとそれに対応して観測地を変更する必要があるなど、初めて観測する人には機材を含めて難しすぎることから、接食観測などで集まって観測したことがある渡辺さんや滋賀県の井田三良さんと山村秀人さんのベテラン勢に、まずは声をかけました。

5月頃からESAの下部組織であるACROSS（アクロス）からディディモスを含む地球近傍小惑星の予報（アクロス予報）が出るようになりました。OCCULT4で採用されているアメリカのJPL-Horizons軌道要素を用いた予報（ホライズンズ予報）と比較できるようになりましたが、両者の予報掩蔽帯の差は当初で数十km以上、予報誤差も40km以上と、少ない人数でどこに布陣するとよいのか皆目わからない状況でした。

渡辺さんがアクロスと連絡を取り合ってくれて、予報誤差帯の少ないアクロス予報をメインに観測計画を立てることや、JOINやフェートンのプロアマ共同観測で結集したグループのメーリングリストで呼び掛けて参加者を募ることを始め、7月末の予報を観測する当初メンバーは12名となりました。

また、私としてはこのディディモスの観測には口径20cmでは力不足と思い、14インチのドブソニアン望遠鏡を購入しました（図3）。

最新のドブソニアン望遠鏡はかなり精度の高い自動導入ができ、いくつかのパーツに分解して運ぶことができるなど、恒星食の観測でも世界的にも利用者が多くなっています。

観測チームメンバーとは、超小型の小惑星観測のノウハウを共有、オンラインのミーティングやメールで、最新の予報に基づく観測地の配置を決めていきました。

予報掩蔽帯の幅900mプラス予報誤差4.6kmをカバーするため、観測者間を600m取って、



図3 ディディモスが14インチドブソニアン望遠鏡の初減光となった三重県松阪市で。

1ヵ所ないし上手くいけば2ヵ所で減光をとらえようという戦法です。

渡辺さんからもたらされる予報はどんどん更新され、観測当日のお昼ようやく配置が決まるといって慌ただしい状況でした。

奈良県と兵庫県に分かれての観測ですが、両地方とも雲のない最高の観測日和となりました。

しかし、2ヵ所の導入トラブルを除いてどこも減光なしの結果、過去に1ヵ所でも減光が観測されていれば、予報の精度が格段に向上するのですが、恒星食の観測において誰もとらえたことのない小惑星の難しさを痛感させられました。

6. ディディモスへの再挑戦

その後は10月上旬まで、アメリカ、ヨーロッパ、オーストラリアの各地で観測が計画されましたが、天候等による不成立を含め、どこも減光をとらえることができず仕舞いでした。

この間に、DART（ダート）探査機の衝突実験が成功し、ディディモスの恒星食観測に影響するのか情報がなく不安でしたが、日本では10月に3つの予報が出ていて、どこが世界初の減光を観測できるか、日本にもチャンスがあるとメーリングリストで観測チームメンバーを再募集しました。

その頃から、ディディモスの位置観測のために世界の望遠鏡が向けられるようになったことで、アクロス予報とホライズンズ予報ともに予報誤差が少なくなるとともに、両者の予報差が100 m以下まで縮まってきました。

再開最初となる10月18日（実際の予報時刻は日本時間19日3時頃）は三重県松阪市を中心に、長野県，和歌山県に分かれ，7ヵ所8名で観測しました。

7月の観測計画と同じく，何度もメールやオンラインミーティングで観測布陣を詰めていきましたが，翌19日の三重県伊勢市を中心とした予報の布陣を含めて計画しなければならなかったことや，予報が何度も更新され，1日に3回も私の指示で観測地を変更してもらったこともあり，観測チームメンバーからは「私はどこに行けばいいの？」と現地に着いてからも問い合わせがあるほどでした。

また18日にどこかでとらえた時に19日の観測配置に対応できるシフト配置案を作りましたが，これも混乱の原因のひとつとなりました。

18日当日になって，アクロスから未公表のヨーロッパでの1ヵ所の減光観測があったこと，予報より600 mほど東に中心がくると思われるとの情報が，渡辺さんから入りました。

すぐに布陣案を組み直し，予報の中央の位置としていた私を最も西側として，東に観測者をシフト。観測者間も200 mから150 mに詰めることにした緊急配置指示を皆さんに出しました。

7. 遂にとらえた

私は松阪市中部台公園の南東の草むらの中に望遠鏡を組み立て，事前に導入テストをした甲斐あって，すぐに対象星を導入することができました。松阪市でのほかの方も無事現地に到着して，予報時刻を待つだけのようです。

雲一つなくシーイングの揺れもほとんどない絶好の条件となりました。

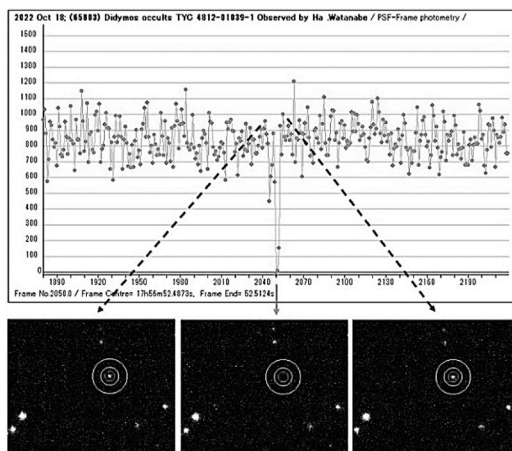


図4 (上)世界3例目となった，ディディモスによる掩蔽を示す対象星のライトカーブ（解析ソフトLimovieによって作成）。減光時間はわずか0.157秒。(下)減光前と減光中・減光後の画像を表す。対象星（白い円の中心に存在）からの光が減光中に消えていることがわかる。

最長でも0.17秒しか減光しないことから，シャッタースピードは0.05秒。パソコンのモニタに映し出した対象星をじっと見つめていましたが，予報時刻ちょうどに一瞬の瞬きが。

シーイングの乱れかとも思いながらも，観測手順通りに観測を終了させて仮解析。ライトカーブ（光量グラフ）を表示させると，0.1秒余りの減光をとらえていることがわかりました（図4）。

ひとり挟んだ井田さんからも減光があった連絡が入り，この減光が食によるもので間違いのないことが確実になりました（図5）。

渡辺さんが早めに撤収して，私の観測場所に来てくれ，減光は2ヵ所のみで他は減光がなかったことを確認して，翌日の配置方針を決めました。

興奮さめやらぬ中，帰宅後布陣の再配置に取り掛かり，私の減光時間から18日の結果はずれても200 m程であること，19日は一部の観測者を東にシフトして，観測者の間隔を150 mから100 m以下に詰めることを決定し，「全員が減光！」を合言葉に，皆さんと情報の共有を図りました。



図5 10月18日のディディモス掩蔽観測における布陣地図。左の直線と、右図の灰色で塗られた領域は、ディディモスの影が通過する領域を表す（右図矢印は移動方向）。✕は雲により観測が不成立となった地点を、▲は減光が観測されなかった地点を、☆は減光が観測された地点を表す。

18日は、長野県と和歌山県の観測者は雲により観測できませんでしたが、翌19日は、長野県、愛知県、三重県、和歌山県に分かれたどの観測地も天候に恵まれました。前日と同じく7ヵ所8名での観測体制です。

私が布陣した三重県伊勢市にある県営アリーナ付近は、透明度が高いもののシーイングの揺れが前日より大きく、対象星が前日より1等級あまり暗い12.5等しかないこともあって、シャッター速度を0.07秒ほどに落として観測しました。

予報時刻となり、前日よりわかりづらかったのですが、なんとか減光をとらえることができました。

結果は7ヵ所中、6ヵ所での減光が観測でき、その結果を渡辺さんからアクロスやIOTAに報告してもらいました。

18日の観測は、世界では3例目となりましたが、複数個所での成功は世界初となり、その週の金曜日には、ESAがプレスリリースを発表しました。

8. ディディモスの影を追いかける

その後、チームとしては、10月27日に福井県、



図6 4ヶ所で減光をとらえた11月4日の三重県伊勢市での観測を終えて、左から瀧本、山村、筆者、渡辺、浅井、井田の皆さん（瀧本さん撮影）。手にしているのは、恒星食のイメージイラストを描いたドブソニアン望遠鏡水平確保用の板。

大阪府、徳島県で、11月4日に三重県と岐阜県で、12月3日に福島県で、12月17日には三重県で観測（図6）。

渡辺さんや山村さんが遠征された福島県での観測は、直前の雲により不成立となりましたが、ほかの日は複数個所での減光をとらえることができました。

年が明けた2023年1月13日の予報は、観測高度が低いものの対象星が9等台と明るく、海外でディディモス本体と共に観測された直径160 mしかない衛星Dimorphos（ディモルフォス）を、日本でもとらえるチャンスとなりました。

10月27日の観測では、衛星の予報位置にも3名が布陣したのですが、予報が大きすぎて本体のディディモスさえ2ヵ所のみ減光結果となってしまったことから、観測者の配置を何度も検討しました。

嬉しいことにこれまでの連続成功で、今回は参加メンバーが増えてくれたことから、本体組と衛星組の二手にバランスよく分かれて、静岡県内での万全の観測体制を敷くことができました。

しかしながら無情にも、当日の予報掩蔽帯はどちらも雨模様となり、出かけることなく今シーズンの観測が終了してしまいました。

渡辺さんによると次の観測シーズンは、2024年に入ってからのこと。観測再開に向け、解析ソフト Limovie の開発者であり、IOTA のホーマー・ダ・ボール賞受賞で世界に認められている長野県の宮下和久さんにも観測チームに入ってもらい、さらなる観測の精度の向上やあまりにも小さ過ぎて食になっても完全に光量が0とならない衛星による減光を確実にとらえられるよう、オンラインミーティングで勉強会を重ねるなど、解散せずにチームを継続しているところです。

9. 東アジアの観測体制構築に向けて

小惑星による恒星食の観測は、各個人がそれぞれ判断して観測することが通例でしたが、惑星や衛星、探査機のターゲットとなるような小惑星などは、グループを作って情報共有を図りバランスよく観測することが重要になってきました。

日本では近年、海王星の衛星トリトン、前出の JAXA ディステニー+・ミッションのフェートン、はやぶさ2・ミッションの対象でありディディモスより更に小さい小惑星(98943) 2001 CC21, NASA のルーシー・ミッションが目指す木星トロヤ群小惑星の(3548) Eurybates (エウリュバテス) など、重要天体の恒星食では、研究機関からの観測依頼もあり、アマチュアとプロが共同で観測してきました。

この協力体制を維持し、東アジア全体に広げていくこと、観測計画策定や観測結果の集約、プロの研究資料となる貴重な観測データのアーカイブ、この観測を次の世代に引き継ぐことなどを目標に、産業医科大学の吉田二美さん、佐賀市星空学習館の早水勉さんが中心となって、2023年8月

末に東アジア地域の観測研究グループ IOTA/EA (EastAsia) が発足しました。

私も事務局を担当させていただくことになり、微力ながらこの観測の更なる発展に寄与できればと思っています。

謝 辞

これまでの常識を覆す直径1 km に満たない小惑星ディディモスの観測に、複数回成功できたことは、観測チームに参加していただいた皆さんと一丸となって得られた成果です。

また、観測に協力していただいた国内外の皆様や観測チームのご家族の皆様にも心から感謝しております。

皆さんを代表しての本受賞と思ひ、チームメンバーをご紹介しますとともに、今後も観測にお役に立てるよう努めていきたいと思ひます。

ディディモス観測・日本チームのメンバー：
井田三良（滋賀県東近江市）、山村秀人（滋賀県米原市）、北崎勝彦&直子（東京都武蔵野市）、渡辺裕之（岐阜県垂井町）、真砂礼宏（和歌山県上富田町）、浅井晃（三重県桑名市）、瀧本麻須美（三重県亀山市）、吉原秀樹（岡山県総社市）、加瀬部久司（兵庫県三田市）、宮下和久（長野県安曇野市）、根元健（東京都武蔵野市）、細井克昌（福島県三春町）、山下勝（大阪府池田市）、小和田稔（静岡県浜松市）、富岡啓行（茨城県日立市）、安江水琴ほか（北海道大学天文同好会）、岸本浩（兵庫県神戸市）※、磯部健（大阪府四條畷市）※、永田利博（京都府京都市）※、渡部勇人（三重県いなべ市）、〈順不同・敬称略・当初メンバー※含む〉