

## 〈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 恒星食観測への道程

渡辺 裕之

〈JOIN (Japan Occultation Information Network)〉

e-mail: admin@rockhand.jp

2022年9月27日 (JST)\*<sup>1</sup>に実施されたNASAの小惑星軌道変更ミッション「DART」で対象となった二重小惑星である (65803) Didymos (ディディモス: 推定直径約780 m) による掩蔽 (恒星食) 現象に対する世界的な観測キャンペーンが2022年春から行われました。私たちJOIN (Japan Occultation Information Network) を中心としたアマチュア天文グループは、当観測を7月に行いましたが、予報の誤差が大きく観測の成功には至りませんでした。今回、DARTによる衝突実験後の10月15日と18日の欧米各1地点で、ようやく食による減光が捉えられましたが、私たちは、その観測情報も少ない中、10月18日、19日、27日の3つの掩蔽イベントに連続して多地点で減光の検出に成功するという大きな成果を得ることができました。その経緯を述べたいと思います。

## 1. 私の天文活動履歴

私が小学校低学年のころは、アポロ11号が月に行った時代です。

周りに書店がない田舎だったので、楽しみは小学校で移動販売されていた毎月の学研の「科学」と「学習」位でした。

宇宙に関する情報は「科学」とその関連図書で、太陽系の惑星、探査機などわくわくしながら、何度もボロボロになるまで読み見直していました。

しかし、天体望遠鏡を買ってもらおうという考えも浮かばず、そのまま中学・高校・大学へ、社会人へと流れていきました。

結婚後、米国に長期出張したとき、Sky&Astronomy誌にあったMeadeの9 cm望遠鏡を見て、なぜか非常に興味を持ち、欲しかったのですが手が出ず、そのまま帰国しました。

その後、1996年ヘル・ボップ彗星、2001年しし座流星群を体感し、宇宙熱が高まってきました。

シュミットカセグレン望遠鏡、屈折望遠鏡、反射望遠鏡、FRP製観測ドームと機材は増え、惑星撮影や冷却CCDを使った天体写真もやってみました。美的感覚が天文誌に掲載されるような達人に及ばないことを悟りトーンダウンしてしまいました。

## 2. 掩蔽観測を始めたきっかけ

そんな中、2012年ごろ天文雑誌に出ていた当時せんだい宇宙館の早水勉さんの掩蔽観測の紹介記事を。減光する時刻を原子時計を持ったGPS (=UTC) を使って正確に計測するという、技術的に興味をそそられる方法でした。

早速、早水さんに問い合わせ、GPSタイムスパーインポザーとセキュリティ用途の高感度カ

\*<sup>1</sup> 本記事での時刻は特に断りがない限りすべてUT (Universal Time: 世界時)。

メラを購入，星食観測のメーリングリスト JOIN (Japan Occultation Information Network) に参加しました。

2回目位の観測であった2012年10月9日(20) Massaliaによる恒星食観測で初めての減光を観測することができました。このときの成功体験から掩蔽観測にのめり込むことになりました。

その後、数年は主に自宅の観測ドームにて、掩蔽時間数秒～十数秒の現象を観測・報告してきました。

また、時折 三重の渡部勇人さんのお誘いで月による星食観測を数名で行うこともありました。このときの経験が後の Phaethon や Didymos の様な小型小惑星の移動観測に役立つことになりました。

小惑星の掩蔽観測は美的感覚がなくとも成立し、短時間の観測で成果が天文誌や記録サイトに掲載されることがモチベーションを上げ、継続意欲を高めることになりました。

### 3. 掩蔽観測へのCMOSカメラの適用

2019年4月22日 千葉工業大学とJAXA等が参画している DESTINY+ チームによってフライバイ探査を行う対象小惑星(3200) Phaethon の恒星食が8月と10月にあるとアナウンスがありました。

Phaethon は直径約5 km と小さく、対象星が12等、掩蔽の継続時間が0.6秒以下と既存のアナログCCDカメラの感度では十分な時間分解能が得られない可能性がありました。

そこで、惑星撮影に使われている高感度なCMOSカメラが使えないか JOIN の中で検討が開始されました。

中でも ZWO 製 ASI290MM (図1) が比較的感度が高く低ノイズであることがわかり、試験撮影で、アナログCCDカメラより少なくとも1等星分暗い星が同じ露光時間で撮影できたので、Phaethon の恒星食観測に使える形になりました。



図1 ZWO 社 ASI290MM

これで8月と10月の Phaethon の観測が行われ、8月は天候不順により全滅でしたが、10月15日に滋賀県の井田三良さんが ASI290MM にて10 ms 露光での撮影に成功されました。

この露光時間はアナログCCDカメラでは実現できない短さで、セントラルフラッシュも観測でき、CMOSカメラの高感度高速撮影の有効性が証明されました。

しかし、USB接続のCMOSカメラでは、PCの内部時刻を記録する方式であり、GPSによる正確な時刻を直接インポーズする方式ではありません。

PCの時刻をUTCに合わせる方法は、遠征観測先ではスマートフォン等によるインターネットのNTPサーバーとの時刻合わせか、GPSモジュールのセンテンスを使った方法しかありませんでしたが、故瀬戸口貴司さんが作成されたソフト Satk により、GPSのPPS信号をDSR端子に接続、ミリ秒レベルでPCの時刻を合わせることがわかりました。

でも、これをもってしても、CMOSカメラからフレーム画像を受け取った時刻を打刻表示するのにPC内の処理に時間がかかり、正確ではありません。

そこで、星食解析用ソフト Limovie の作者である宮下和久氏の提案により PPS 信号を LED にて発光させ、CMOSカメラで撮影することで、時刻補正する機能が、Limovie に組み込まれました。

PPS-LED発光補正が適用され、その後の小惑

星の掩蔽観測にCMOSカメラを使った観測が増え、Limovieの改良も進みました。

私は、その中で天体撮影時に使われるオフアキシスガイダー（OAG）を逆向きに使うことで、CMOSカメラの受光面の端部にのみLED光を当てる方法を見出し、「PPS projection unit」と命名しました（図2）。

これにより減光観測中でもPPS発光と一緒に撮影でき、観測前後のPPS発光を行わなくても、正確な時刻補正を行うことができるようになりました。

ただ、この方法はOAGの厚み分、光路が長くなるため、レジューサーの配置に制約がでてしまうことが難点ですので、多くの観測者は、PPS発光を筒先から入れる方法を採用しています。

2021年10月4日に再度Phaethon観測キャンペーンがあり、15ヵ所で減光を観測できました。これらの大勢を占めたのはCMOSカメラによる観測で、その性能・精度が証明された結果となりました。

また、2019年のPhaethon観測の打ち合わせにZoomによるWeb会議が使われました。

このZoomによるWeb会議は、その後のCMOSカメラによる撮影や、Limovieによる解析、他の観測イベント等の打ち合わせに使われ、観測者のスキル向上、観測計画打ち合わせに有効な方法となっています。



図2 PPS Projection unit

#### 4. Didymos掩蔽観測

2022年4月頃、NASAによるDART計画の対象二重小惑星であるDidymos（推定直径約780 m。実際の衝突試験の対象は推定直径160 mの衛星のDimorphos）の掩蔽観測の話が米国IOTAのフォーラムで始まりました。

2022年6月に7月29日予定の国内観測呼びかけをJOINの渡部勇人さんが開始、私は6月の米国観測結果を入手し、それらを基に渡部さんが布陣を計画しましたが、米国での観測は成功せず、軌道誤差が大きいままでは観測範囲が大きくなり、減光観測の布陣に悩ましい状況になりました。

そのころ、ESA（European Space Agency）の資金により活動を始めた、ACROSS（Asteroid Collaborative Research via Occultation Systematic Survey）という組織が独立して軌道予報をOccult Watcher Cloudのサイトで公開しはじめました。

その誤差は通常参照しているJPL-Horizonsの誤差よりも小さかったため、ACROSSの予報を元に渡部氏の取りまとめで、約600 m間隔で奈良と兵庫合わせて11ヵ所の布陣が計画されました。

7月24日の観測結果（通過）を元にACROSSで再計算された予報が現象21時間前に来たので、急遽布陣を見直し、最終布陣は12時間前に決定、再配置されるという状況でした。

その観測では、9ヵ所で観測が成立し、2ヵ所トラブルで未成立となりましたが、残念ながら減光を検出することができませんでした。2ヵ所欠測がありましたがどこも検出できなかったことはかなり落ち込み、ACROSSの予報の信頼性が揺らぐ結果でした。

その後8月23日米国での観測や8月25日にポルトガルとアルジェリアで100ヵ所規模の大規模な観測もありましたが、いずれも不成立や未検出で減光検出には到りませんでした。

豪州でも9月12日、22日、25日、26日の観測

が検討されましたが、いずれも、欠測、未検出で、衝突試験前の観測期間が終わってしまいました。

9月26日DART計画の当日、実際の衝突試験が行われ、私もその様子をインターネット中継でリアルタイムで観ることができました。DisymosとDimorphosが鮮明に確認でき、Dimorphosに正確に向かって衝突するのをワクワクしながら観ておりました。

ふと疑問に思ったのは、これだけ精密に衝突させることができるのに、なぜ、軌道が正確に求められていないのかということ。

後日の報道では、どうも軌道要素だけで衝突させたのではなく、精密誘導兵器のように、対象小惑星をカメラで捉え、画像処理により軌道修正・衝突させたとのことです。

衝突実験の後、その影響を確認するためにも、掩蔽観測が必要とACROSSからの要請もあり、日本では10月18日、19日、27日に観測することをACROSS, IOTAに連絡、標高補正された予報ラインの作成を英国のJohn Irwinさんに依頼しました。

10月16日に18日19日の予報ラインを入手し、観測メンバーに展開、17日渡部勇人さん主催のZoom会議で観測位置の調整を行い、18日の結果からの19日の対応方針も決定しました。

ところが18日当日の夕方、ACROSSのKleomenis Tsiganisさんより重要なメールがきて、日本時間18日朝に欧州で減光観測され、中心が南に数百mずれた位置にあると推定される。150m単位で2本のラインを南にずらした方がよいとのこと。

それ以前にスマホアプリのLINEに観測メンバーを登録していたので、急遽2ステーションを南東に移動することにして、観測を開始しました(図3)。

天候に恵まれ、準備万端で予報時刻になり、私



図3 2022年10月18日のDidymos掩蔽観測の布陣。2本の黒線で挟まれた領域が予想掩蔽帯。減光が観測された地点は○で、観測されなかった地点は△で示している。

のところで減光は見られませんでした。渡部さんと井田さんの2ヵ所で減光したとの報告(図4)。

やったあ！と喜びをメンバーで分かち合いましたが、すぐに渡部さんと、この場合の翌日の布陣はどうすべきだろうかとなりました。減光観測できた2ヵ所は、当初の予報での中心付近だったため、最初の布陣で行く方針となりました。

自宅に戻り速報をACROSS, IOTAにメール報告すると、賞賛のメールをいただき、ESAの公式ニュースにリリースされました\*2。

19日の観測について、このままの布陣では、私の観測ラインでは減光観測できないだろうと判断し、渡部さんに連絡し西側の方にシフトした位置で観測を行いました(図5)。

結果は思惑通り以上の結果で、7ヵ所中、私を含む6ヵ所で減光を観測できました(図6)。

推定直径780mに対し6ヵ所の減光検出は、かなり高密度で、平均すると約130mごとの密度です(図7)。

\*2 [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Shadow\\_hunters\\_capture\\_Didymos\\_asteroid\\_eclipsing\\_stars](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shadow_hunters_capture_Didymos_asteroid_eclipsing_stars)



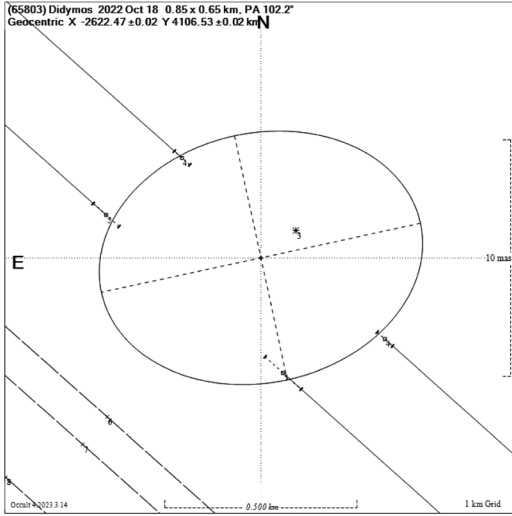


図4 2022年10月18日の観測結果を基に描いた整約図。Didymosの形状を楕円として中心に描いている。各観測点での観測は直線で示されており、2地点で減光が起こっている時間帯は線が途切れている。

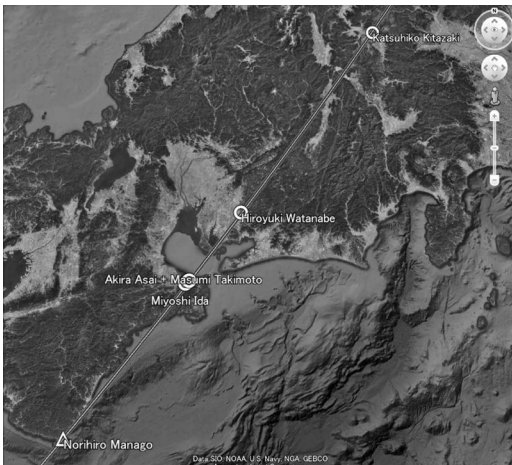


図5 2023年10月19日のDidymos掩蔽観測の布陣。2本の黒線で挟まれた領域が予想掩蔽帯。減光が観測された地点は○で、観測されなかった地点は△で示している。

この結果をACROSS, IOTAに整約し報告すると、Damya Souamiさん、Kleomenis Tsiganisさんは、さらに凄い賞賛の反応でした。

ここまで予想通りにいくと、27日は衛星のDi-

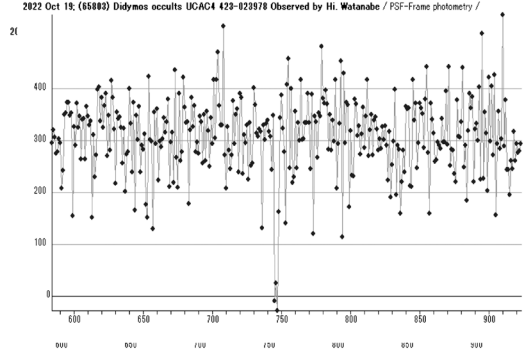


図6 対象星のライトカーブ。横軸の単位はフレーム。Didymosによる掩蔽により、図の中心付近の3点でほぼ光量が0となり減光が起こっている。

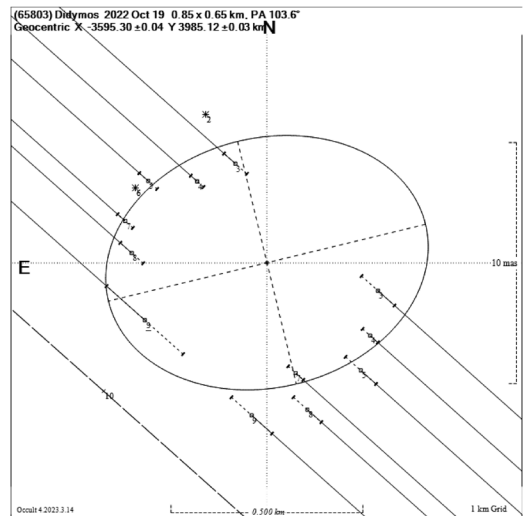


図7 2022年10月19日の観測結果を基に描いた整約図。Didymosの形状を楕円として中心に描いている。各観測点での観測は直線で示されており、6地点で減光が起こっている時間帯は線が途切れている。

morphosを狙いたくなりました。この予想も英国のJohn Irwin氏が予測してくれましたので、布陣を計画。Didymos狙いとDimorphos狙いに分かれての布陣となります。

当日になると、またまた、海外から情報が流れてきて、数日前の観測で200 m程南にずれたとのこと。それを信じて、シフトした位置に布陣して

観測したら、減光を観測できたのが、主星側の2ステーションのみ。主星側の2ステーションと衛星の3ステーションは減光観測できませんでした。

後日わかった軌道要素からすると、シフトせずに観測した方が、より観測できた可能性が高いことがわかりました。速報情報がすべて正しいわけではないことを感じさせる一件でした。

## 5. その後の観測

その後11月4日に伊勢方面での観測では、対象星が暗いため、Dimorphos検出はあきらめ、Didymosのズレ確認のみを目的に布陣しましたが、予想よりも数百m北にずれた結果となりました。

IOTAに報告し、軌道要素との整合を確認していたところ、過去の結果と一致しない結果で、位置精度向上に貢献できない結果と判断されてしまいました。理由は対象星の位置が不正確(RUWE (the Revised Unit Weight Estimate, またはre-normalised unit weight error) となります。恒星の位置の信頼度を表し、 $<1.4$ であれば信頼度が確保されているとのこと。

次のイベントは12月3日福島県から新潟県にかけてありました。関東・東北からの4人の観測者と岐阜・滋賀からの遠征者の合計6人で構成し、そのうち3人4台でDimorphosを狙う計画。予報時間10分前まで対象星が見えていたが、雲に見舞われあえなく不成立となりました。

しかし、普段会えない、関東・東北の観測者と直接会って、共同観測できてよかったと感じました。

年内最後は12月17日、冬型の気圧配置で滋賀県予定組も三重県での観測となりました。その前のIOTAとJPL Horizonsの整約結果で、予報が北

にシフトしていたのですが、南にずれた結果で、半分残念な結果となりました。

2023年1月13日は対象星が9等台とDimorphos観測に期待が持て、冬型でも静岡県あたりなら大丈夫かと思いましたが、観測ライン全域が雨模様となり、Dimorphosを観測する夢は潰えました。

## 謝辞

今回は天文功労賞という立派な賞をいただき、大変光栄に思います。評価いただいたDidymosによる掩蔽現象は、複数の減光観測で、形状や位置精度の向上に貢献できたと思います。

これも、観測に参加いただいた皆様のおかげだと思ひ感謝しております。今後も楽しみながら、掩蔽観測に務めたいと思います。本当にありがとうございました。

### Way to the Observation of Occultation by the Asteroid Didymos

Hiroyuki WATANABE

JOIN (Japan Occultation Information Network)

Abstract: A global observation campaign for occultation (stellar eclipse) by (65803) Didymos (estimated diameter of about 780 m), a double asteroid targeted by NASA's DART mission on September 27, 2022 (JST), has been launched in spring 2022. The global observation campaign was started in the spring of 2022. We, an amateur astronomy group led by JOIN (Japan Occultation Information Network), conducted this observation in July, but we could not succeed due to a large forecast error. This time, after the DART collision experiment, a dimming was finally detected at one location in each of Europe and the United States on October 15 and 18. While there was not much information available, we were able to obtain significant results of multiple locations for three consecutive occultation events on October 18, 19, and 27. I would like to describe the circumstances.