

小惑星による掩蔽観測マニュアル

第 1.0 版
2025 年 3 月

目次

はじめに	1
1 最近の掩蔽観測の動向	4
2 小惑星による掩蔽とその測定の原理	5
2.1 小惑星による掩蔽観測の概要	5
2.2 小惑星による掩蔽現象	6
2.3 小惑星による掩蔽観測	6
2.3.1 ビデオカメラで掩蔽現象をとらえる	6
2.3.2 測光結果から現象時刻の最確値を求める	9
2.3.3 推定時刻誤差	10
2.3.4 時間分解能	10
2.3.5 「瞬時でない」増減光	12
2.4 画像（動画）を撮る—掩蔽観測に適したビデオカメラ	14
2.4.1 撮像性能	14
2.4.2 時間的な安定性	14
2.4.3 グローバルシャッターとローリングシャッター	15
2.5 正確な時刻を得る—時刻と時計	16
2.5.1 PC のシステム時計	16
2.5.2 NTP サーバ	17
2.5.3 衛星測位システム	18
2.5.4 GPS 受信機とその種類	18
2.5.5 GPS 受信機とうるう秒	19
2.5.6 いわゆる「旧世代」GPS 受信機の運用上の注意事項	19
2.5.7 その他の時計	21
2.5.8 受信状況の改善	22
2.6 ビデオ画像に UTC の時刻値を記録する	22
2.7 ビデオ画像に PC の時刻値を記録する	23
2.8 1PPS に同期した LED 光の撮影から精密な時刻を求める	25
2.8.1 整数でないフレームレートによる 1 PPS の LED 光の撮影	25
2.8.2 フレームレートの選択と LED の必要記録秒数	25
2.8.3 LED の増（減）光を「複数回（セット）」測定する	27
2.8.4 画面上での LED 光の照射範囲と LED 光の時間的安定性	27
2.8.5 LED 光の増光（または減光）を 1 回しか記録できなかった場合	29
2.8.6 LED 光が利用できない場合	29
3 観測機器	29
3.1 高感度天体用 CMOS カメラを掩蔽観測に用いる	29
3.2 カメラ制御ソフト SharpCap	30
3.2.1 使用環境	30

3.2.2	インストール	31
3.3	使用機材	32
3.3.1	CMOS カメラ	32
3.3.2	鏡筒	32
3.3.3	架台	35
3.4	時刻合わせツール	35
3.5	GPS の PPS 信号で LED 発光する装置	35
4	観測方法	36
4.1	観測準備	36
4.1.1	掩蔽現象の予報取得	38
4.1.2	観測場所の選定	38
4.1.3	掩蔽の対象星の確認	39
4.1.4	電源の確保	39
4.2	現地にて	39
4.3	撮影条件	40
4.4	観測	42
4.4.1	試し撮り	42
4.4.2	本番の撮影	43
5	データ解析	44
5.1	測光の基本	44
5.1.1	測光領域と測光方法	44
5.1.2	星像の追尾（トラッキング）	46
5.1.3	Anchor モードと Drift モード	46
5.1.4	PSF 追尾と Aperture 追尾	47
5.2	Limovie による現象時刻の測定から観測報告まで	47
5.2.1	準備	47
5.2.2	大まかな流れ	49
5.2.3	操作手順詳解	49
5.2.4	出力例	66
6	観測報告	67
6.1	観測者の位置の取得	67
6.1.1	観測地経緯度の測定	67
6.1.2	標高の測定	68
6.2	報告	68
7	付録 a DESTINY ⁺ のフライバイ対象天体 (3200)Phaethon による掩蔽観測の成果	70
7.1	Phaethon 観測の重要性	70
7.2	Phaethon による恒星の掩蔽の観測	72

はじめに

月が太陽を隠す現象は「日食」と呼ばれる。昼間輝く太陽が突然欠けていき、辺りが暗くなるので、人々にとって畏れの対象だった。日食の仕組みがわかった現在においては、日食は観測ツアーの一つであり、親しまれている。

日食は昼に起こる現象であるが、これに対して夜に起こるのが「月食」や「星食・掩蔽」である。月食は太陽に照らされている月を地球が隠す。これまた日食のように目で見てわかる現象なので、古くから人々に認識されている。では星食・掩蔽はどうだろうか？星食・掩蔽は星を別の天体が隠す現象である。太陽系には多くの天体（惑星、衛星、小惑星、彗星、太陽系外縁天体など）があり、これらの天体は恒星よりもずっと地球に近い距離にあり、地球から見た時、恒星の日周運動とは異なる速度で、異なる方向へ動く。一言で言うと、恒星の手前を太陽系天体は通過していくのである。そして、ある恒星と手前を通過する天体がちょうど重なった時、その恒星は突然見えなくなる。手前の天体がその恒星の光を遮ってしまうからである。なお、「星食」は月が恒星を隠す場合に用いられ、「掩蔽」は小惑星などの月以外の天体が恒星を隠す場合に用いられる用語として慣例的に用いられている。以降、星食・掩蔽双方を合わせて「掩蔽」という語を用いることにする。

恒星は遠くにあるので、点像のようにしか見えない。手前を通過する天体は近いので見かけ上恒星よりずっと速く動く。したがって、その天体が恒星を隠している時間は、隠す方の天体の大きさにもよるが（図1参照）、通常はごく短時間である。恒星が惑星や月のような大きな天体に隠される場合は数十分にわたり恒星を隠すこともあるが、小さい小惑星が恒星を隠す場合は隠している時間は1秒に満たないことも多い。現象がごく短時間であること、そして、隠される恒星は暗いので、見えなくなっても人々はおそらく気づかないだろう。したがって、掩蔽が日常生活の中で認識されることはまずない。しかし、気づかないような現象だからといって、無視せず、ここで宇宙に浮かび自転しながら太陽の周りを回っている地球の動きと、遠い星や太陽系内の天体の運行に想いを馳せてほしい。遠い星の手前を太陽系天体が通過する、その一瞬、恒星の光は太陽系天体に遮られ、地上に太陽系天体の影が落ちる。その影は、地球の自転や太陽系天体の動きとともに移動する。多くの太陽系天体は肉眼では見ることができないほど暗いが、それらの落とす影によって、その存在を知ることができる。望遠鏡でさえ見ることのできない小さく暗い天体の存在さ

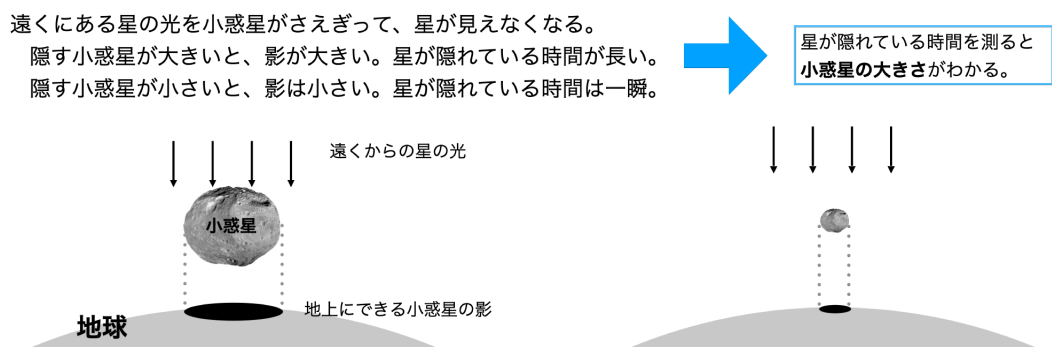


図 1: 小惑星がある恒星を隠して、地上に小惑星の影ができる様子。大きい小惑星ならば影は大きく、星が隠されている時間は長くなる。小さい小惑星の影は小さいので、当然、星が隠されている時間は短くなる。つまり、星が隠れている時間を測れば、小惑星の大きさがわかる。

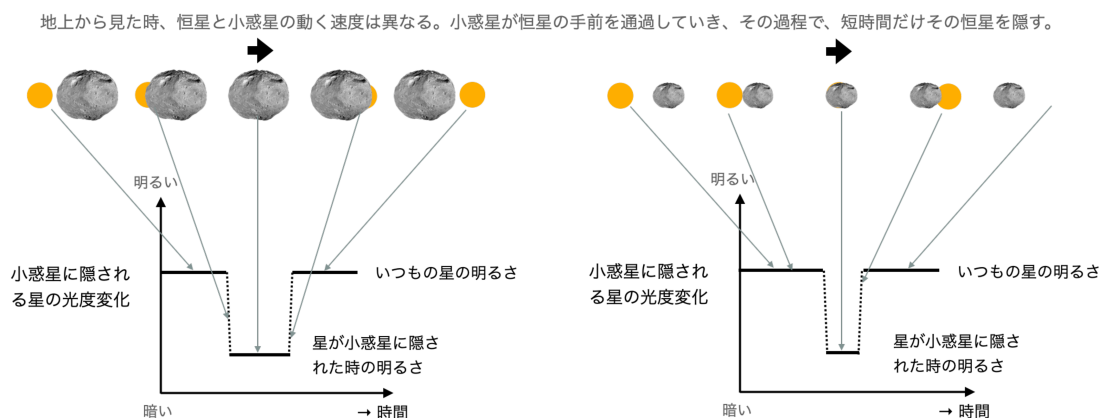


図 2: 小惑星が星（黄色丸）を隠す様子と星の明るさの変化。左パネルのように、隠す天体が大きいと、星が暗くなっている時間が長い＝影が大きい。一方、右パネルのように隠す天体が小さいと、星が暗くなっている時間は一瞬である。すなわち、影が小さい。隠される星を動画で撮影し、その明るさの変化を観察する。小惑星に隠されて暗くなった瞬間の時刻と、再び明るくなった時刻を測定し、暗くなっている間の時間から、影の大きさへ換算する。

えも、影を観測すれば明らかにできるのである。『影で見えない天体の存在を知る』をこれは結構凄いことではないだろうか。

星は遠くにあるので、星からの光は平行光として地上に届く。その時天体に遮られてできる影はその天体をほぼ同じ大きさ・形をしている。つまり、影の大きさ・形を測定すれば、目では見えない天体の大きさ・形がわかるのである。（*隠される物体が小さい場合は、光の回折効果を考慮する必要があることに注意。[?]）。

いかにして影の大きさを測るかは、図 2 を見ればわかりいただけるだろうか。小惑星に隠される星の明るさを測るのである。小惑星に隠されると星の明るさが急激に暗くなる。小惑星が星の前から移動して、再び星が見え始めると、星の明るさは元の明るさに戻る。この様子を動画で撮影して、星の明るさが暗くなっている時間を測るのである。

さらに、図 3 に示すように、多地点で同じ恒星がその小惑星に隠される様子を同時に観測を行えば、影の形＝小惑星の形（掩蔽が起こった時に地球から見える小惑星の断面図）も求めることができる。通常小惑星は不規則な形をしているので、形状を正確に求めたい場合は、観測地点は多いほど良い。

本マニュアルは、掩蔽観測をこれからやってみようと思っているアマ・プロ全ての観測者に資することを目的として執筆されたものである。本マニュアルに記された観測手法をご自身の観測に役立てていただきたい。

第 1 章には最近急速に進歩してきた掩蔽観測の様子が書いてある。掩蔽観測は昨今多くのアマ・プロ観測者の注目を集め、惑星探査ミッションのサポート役としての役割も担うなど重要な役割を果たすようになってきている。掩蔽観測に初めて足を踏み入れようとする人は、まず第 3 章や第 4 章を読んで、天体が恒星を隠すことを実際に見て見ることから始めてみるのも良い。自分の観測結果を報告し（報告方法は第 6 章を参照のこと）、他の地点での観測者の解析結果と比べる中で、自分の観測をより精度良くする方法に興味があれば、第 2 章や第 5 章の章で詳しく勉強してみると良い。実際に多地点での観測に成功した観測結果は付録 a の 7 節に書いてある。

多地点で小惑星が星を隠す様子を観測すると、小惑星の形状がわかる。

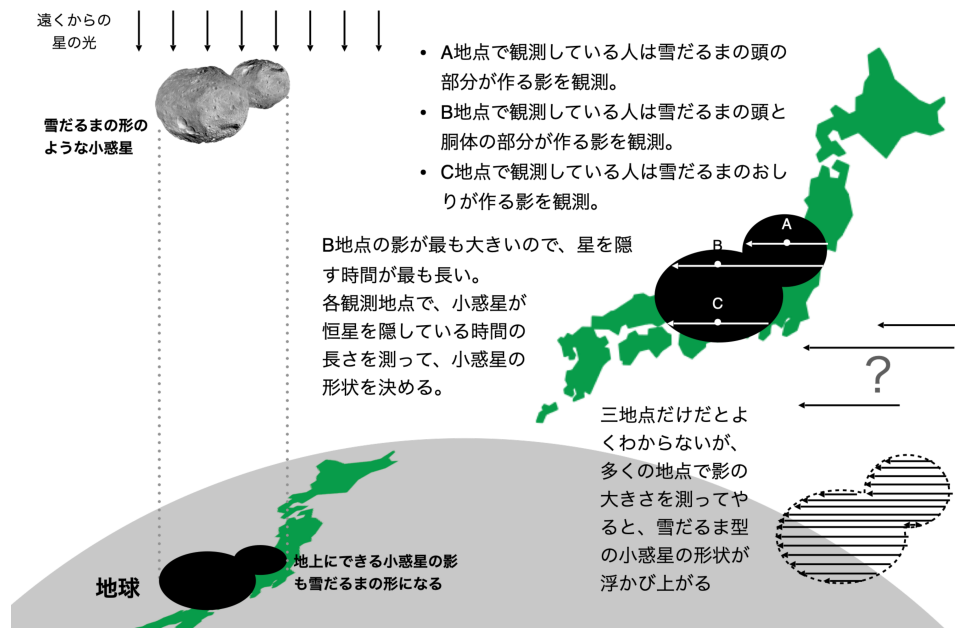


図 3: 小惑星がある星からの光を遮って地上に落とす影の形とその影を多地点で観測する様子。

掩蔽観測は観測点が多いほど有利であるので、国境を越えた共同観測にも役立ててほしいと思い、日本語版と英語版を用意した。掩蔽観測が、今後益々発展することを願う。

2025.03.31

著者一同 (あいうえお順)

早水勉

宮下和久

山村秀人

吉田二美

渡辺裕之

1 最近の掩蔽観測の動向

星を別の天体が運行の過程で隠す現象は『掩蔽』と呼ばれる。小惑星が星を隠す現象は掩蔽の一形態であるが、掩蔽観測の歴史としては比較的新しい。しかし近年の掩蔽観測においてはメジャーな分野になってきている。掩蔽観測は、食の起きた瞬間の時刻を正確に取得することが主たる目的であることから、動画撮影が可能なカメラと時刻を記録する装置があれば観測が可能である。掩蔽は頻繁に起こるが、非常に限られた地域での短時間の現象である。また単独の観測成果よりも多数の観測が集まることによって科学的成果が高まる。このような特徴により、掩蔽観測は主にアマチュア観測家の観測分野として成長してきた。

小惑星による掩蔽観測は、小惑星の大きさを測定する手段として行われてきたが、1983年に打ち上げられた赤外線衛星 IRAS の活躍以降 (<https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/iras/>)、可視と赤外線による観測で小惑星の直径を推定する手法が確立されたため、掩蔽は小惑星の大きさを推定するメジャーな手法から退いていた。観測された小惑星による掩蔽の数の統計を見てみると掩蔽予報ソフトウェア “OCCULT” (<http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>) の機能を利用した統計 (Occult v4.12.x.x > Asteroid Observations > statistics and find occultations of a star”) によれば、2022 年 12 月 6 日までに全世界で 2333 個の小惑星に対して、計 8020 回の食が観測され、のべ 26605 観測の減光が得られた。これらの観測の結果、115 個の重星と 47 個の小惑星の衛星が発見されたとのことである。全世界の一年あたりの観測数は、20 世紀のうちは数十件以下にとどまっていたが、2018 年あたりから 500 件を超え始めた。日本国内では 20 世紀のうちは十件以下、2021 年から 100 件を超えるようになった。この急速な増加は、(1) アマチュアでもプロに匹敵する精度の高い予報を計算できるようになったこと、(2) アマチュアが入手しやすく高感度の動画撮影を可能とするカメラが普及したこと、が大きな理由に挙げられる。(1) は Dave Herald 氏 (豪) が提供している掩蔽観測予報・整約用ソフトウェア OCCULT が、Gaia カタログ (Gaia ミッションにより星の正確な位置が測定され、非常に正確な星の座標カタログが公開された) と NASA-JPL の Horizons システム (近年精力的に行われている全天サーベイのおかげで小惑星の軌道精度が日々高まっており、日々改良された小惑星軌道要素が利用可能になった) を取り入れたことにより、予報精度が格段に増したことによるものである。(2) の観測カメラについては、現在日本でよく使われているものが QHY 社の QHY174M-GPS と ZWO 社の SI290MM である。掩蔽観測のために開発された QHY174M-GPS は、NASA の New Horizons 探査機がフライバイしたカイパーベルト天体 アロコスによる掩蔽観測 (2017 年) を機に標準的な掩蔽観測カメラとして普及した。一方、日本のアマチュアの間では高価な QHY174M-GPS は普及せず、代わりに普及型の惑星撮像用カメラとして開発された ASI290MM を代表とする CMOS カメラが掩蔽観測に使われている。このカメラは GPS 機能が内蔵されていないため、独特の観測手法をとる (4 章参照)。

前述のアロコスの掩蔽観測は New Horizons ミッションからサポートを受けて実施され、大きな成功を得た。掩蔽観測はアロコスがコンタクトバイナリーであることを探査機がフライバイする前に予測したのである。日本では、JAXA/千葉工業大学の DESTINY⁺ ミッションのフライバイターゲット天体であるアポロ型小惑星 (3200) Phaethon の掩蔽観測を 2019 年、2021 年、2022 年に組織的に行った。このうち 2021 年の観測は 35 地点で観測を



(a) QHY174M-GPS



(b) ASI290MM

図 4: (a) の QHY 社の QHY174M-GPS は海外の掩蔽観測者の間で主流となっている。 (b) の ZWO 社の ASI290MM は安価なことから日本の掩蔽観測者の間で普及している。 GPS 機能がないことを補うために、GPS 受信機を同時に使う必要がある。

行い、18 地点で Phaethon が星を隠したことによる減光が観測され、Phaethon の正確な大きさ・形状を得ることに成功し、ミッションの推進に大きく寄与した。2022 年の観測でも成功を収めている (Phaethon による掩蔽の観測については 7 章参照)。掩蔽観測から得られる小惑星の大きさ・形状は、誤差の入る余地が少ない。これらの例のように、掩蔽観測は太陽系探査ミッションのためのツールとして、近年プロの研究者の注目を集めている。

2 小惑星による掩蔽とその測定の原理

2.1 小惑星による掩蔽観測の概要

太陽系で現在約 100 万個以上が発見されている小惑星は、直径数百 km から数 m のものまでさまざまな大きさのものが存在する。大きな小惑星は球形に近い形をしているが、サイズが小さくなるにつれて、細長いものや凹凸の大きい不規則な形のものが多くなる。小惑星の形や大まかな大きさは、レーダーによる観測、光度の変化の観測と小惑星からの熱放射量に基づいて作成された熱モデルを介して推定されているが、形・大きさを精度よく求めるためには掩蔽観測が重要な役割を果たす。掩蔽観測は小惑星が地上に作る影を測る方法であり、人工的に生成したモデルを介さないで、ある時刻 (掩蔽が起こった時) の小惑星の一断面の形状と大きさを正確に測ることができる。どのくらい正確に測定できるかは掩蔽が起こった時刻をいかに正確に測定できるかにかかっている。2.3 節や 2.5 節をお読みいただき、正確な時刻の取得とその測定方法に関する様々な工夫について学んでほしい。掩蔽観測は、特徴的ないくつかの機器を用いて行われており、正確な観測を行うためには、次の点について理解しておく必要がある。

1. 安定したフレームレートで画像を撮影し続けることのできる高感度のビデオカメラ
2. 標準時 (UTC) に結びついた高精度の時計 (をはじめとする、様々な時計)
3. 一つ一つのフレームの露光開始時刻 (終了時刻) を精密に求める方法

4. 減光の継続時間等を考慮した、適切なフレーム露光時間の設定 (時間分解能)
5. 光の回折の影響を考慮して潜入・出現時刻を求める方法
6. 観測地の経緯度および標高を正確に求める方法

2.2 小惑星による掩蔽現象

夜、地表は遠くにある星々の光により照らされている。たいへん微弱な光なので、我々の目では認識できないが、月のない夜、街明かりのないところに行けば、全く暗闇というわけでないことがわかる。それが星明りである。遠くにある星々の中のある星の前を小惑星のような天体が通り過ぎたとき、小惑星はその星の光を遮ぎり、小惑星の影が地表にできる。天体と地球の位置関係の変化に伴って、その影も地表を移動していく。望遠鏡を使って観測している私たちからは、それまで光って見えていた恒星が小惑星に隠された瞬間に見えなくなり（これを「潜入」と呼ぶ、この時地上の観測者は小惑星の影に入っている）、しばらくして小惑星の影が通り過ぎるとまた急に星が現れる（これを「出現」と呼ぶ）ような見え方をする。この現象を「掩蔽」と呼ぶ。

2.3 小惑星による掩蔽観測

『掩蔽』は、天体の位置や形、大きさ等について明らかにする目的で観測が行われてきている。ある掩蔽現象を図 5 のように地上の複数の地点で観測したとする。すると、ある地点は影の中央付近を通過し（図 I-1 の E）、ある地点は影の端に近いところを通過する（同 B,G）。また、影から外れて全く恒星が隠されない地点もある（同 A,H）。

このとき恒星の隠される時間は、影の中央付近では長く、端の方では短く、影の通過する部分（直線）の長さを反映している（この直線に対応する小惑星「中」の直線を「弦長」という）。また、観測地が影が移動する経路の前の方にあるか後ろの方にあるかで、影の通過時刻が異なるが、影の速度を使って観測地間の差を補正する（これを「整約」と呼ぶ）と、小惑星の影の形を正確にとらえることが可能となる。また、補正のためには、正確な観測地の経緯度（GPS を利用（??節を参照））や標高（公開されている地形図を利用（6.1.2 節を参照））を求める必要がある。

2.3.1 ビデオカメラで掩蔽現象をとらえる

全天の星は暗い星ほど数が多いので、小惑星による掩蔽が起こる確率は暗い星ほど多くなる。最近報告されている掩蔽観測の多くは 10 等級から 12 等級の星を隠す現象である。このような暗い星の観測は望遠鏡に高感度の検出器を取り付けて行われる。その検出器の一つが高感度のビデオカメラである。

ビデオカメラは、短時間に露光された画像（フレーム）を連続的に出力して動画としている。図 6 は、フレーム露光時間を 0.202 秒として撮影された掩蔽現象のビデオフレーム画像を切り取って並べたものである。上から 4 番目のフレームで星像がやや暗くなり、5 番目のフレームで星像が完全に消えたように見える。タイムスタンプはフレーム露光時間

Geometry of an Asteroid Occultation

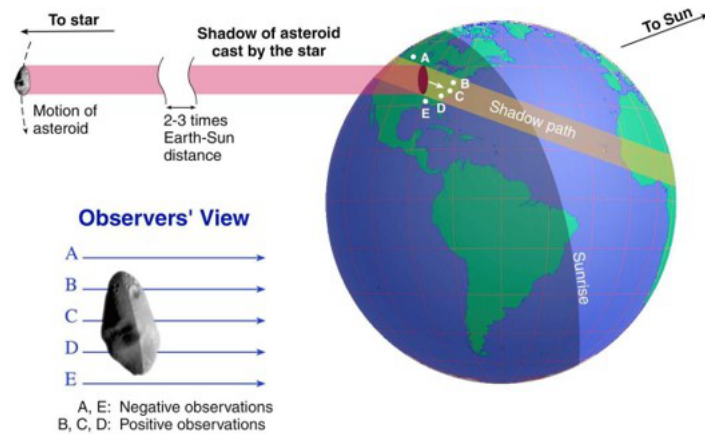


図 5: 小惑星が星の手前を通過したときに、小惑星の影が地上に移る様子。星は非常に遠くにあるので、星から地球へ届く光は平行光と考えて良い。そのため、小惑星の影の大きさはすなわち、小惑星の大きさと同様である（非常に小さい小惑星の場合は回折光の影響を考慮する必要がある）。

を表しているから、17h43m16.402s 付近で恒星の潜入が起こったことがわかる。ただし、そのタイムスタンプ（フレーム露光終了時刻）からどれだけ前（あるいは後）に現象（潜入）が起きたかはわからないので、誤差としてフレーム露光時間にあたるものが付けられ、 $17\text{h}43\text{m}16.402\text{s} \pm 0.202\text{s}$ のような報告がなされていた。ところが一方で、フレームが観測の単位のように扱われていたから、フレーム露光時間をもって時間分解能のように意識される（あるいは扱われる）ことが多かった。もし上記の誤差表現を正しいとするのであれば、時間分解能はフレーム露光時間の2倍に当たる 0.404s となるはずである。ビデオ画面の目視により時刻を求めている限りにおいてはこの矛盾を解決することはできなかったのだが、測光結果から現象時刻を求めることができるようになった現在でもこのことについての十分な理解が得られていない状況にある。（時間分解能について正確な理解を得るには、2.3.4 項を参照のこと。）それでは、この現象の出現側を見てみよう。17h43m16.402s とタイムスタンプされたフレームに淡い星像が写っている。このことから、スタンプされた時刻の少し前に星が出現したことがわかる。それでは、どの程度前に現れたのだろうか。測光結果からそれを判断する方法について、次項 (2.3.2) で考えることにする。

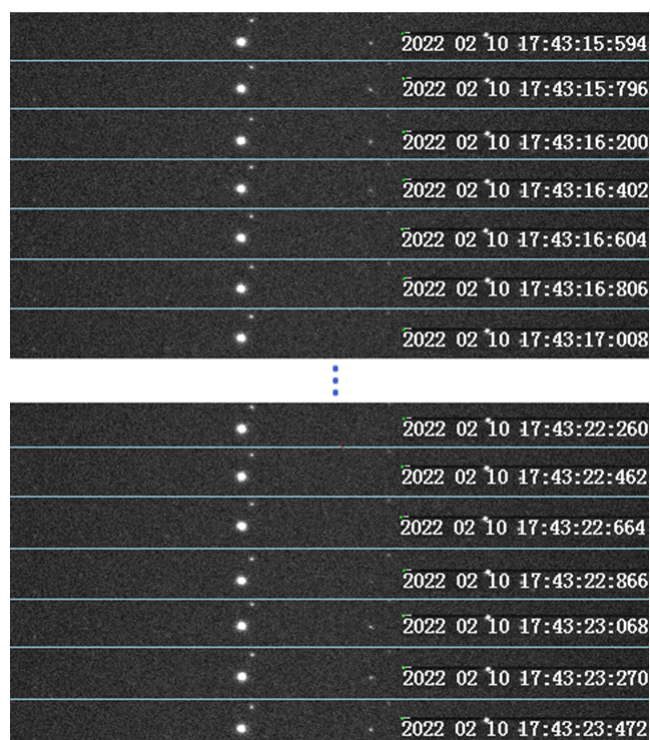


図 6: ビデオカメラがとらえた小惑星 (245)Vera (13.4 等級) による 恒星 TYC 285-00908-1(10.9 等星) の掩蔽 (2022 年 2 月 10 日 浅井 晃氏観測) .

2.3.2 測光結果から現象時刻の最確値を求める

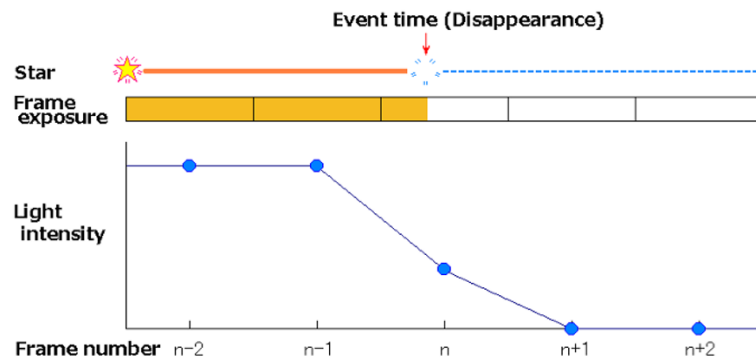


図 7: フレーム露光期間の途中で掩蔽（減光）が起きた場合.

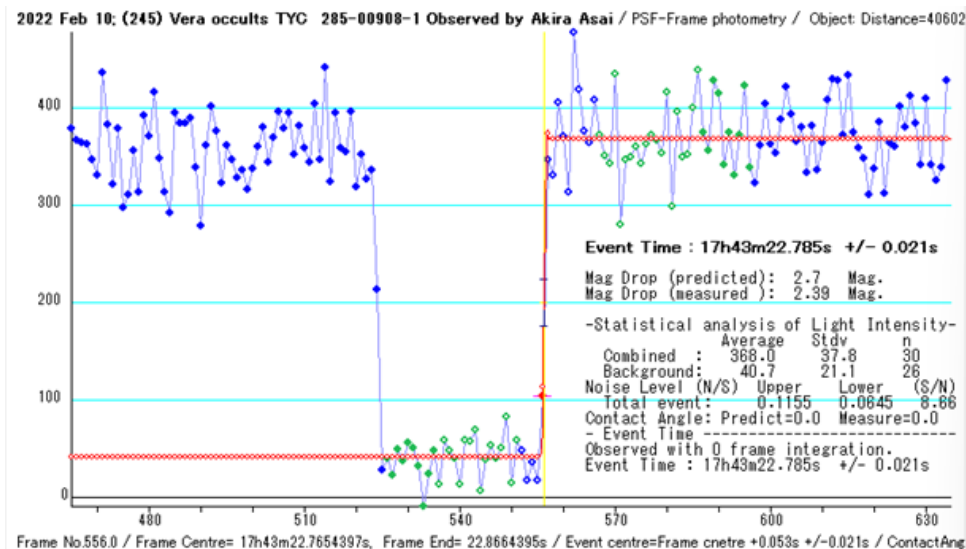


図 8: 回折シミュレーションモデルにフィットさせて現象時刻最確値を求める図 3 のビデオの解析を行い、現象時刻として 17h43m22.785 $\pm$ 0.021s が得られた。淡い星像が見られたフレームのタイムスタンプの 17h43m 22.866s よりも 0.081s 前に現象が起きたことになる。

ビデオのコマ送り（フレーム画像の目視）では、フレームの出力間隔が時間分解能であった。ビデオに映る星像を、静止画カメラと同じように光度測定することができれば、光量変化曲線（light curve）が得られ、それを用いて、更に時刻精度を向上させることができる。この測定は、Limovie や PyMovie をはじめとするビデオファイル用の光量変化測定ソフトウェアを用いることで可能となる。

図 7 は、第 n フレームの露光期間の約 3 分の 1 の時点で減光が起きた場合を示している。掩蔽現象により星像が瞬時に消えたと仮定すると、第 n フレームにはそれ以前の 3 分の 1 の明るさの星像が写っていることになる。逆に、星像が潜入前の 3 分の 1 の明るさであれば、第 n フレームの露光開始から、フレーム出力間隔の 3 分の 1 の時間後に現象が起きたことがわかる。これにより、フレーム出力間隔よりさらに精密な現象時刻を求

めることができる。Limovie ではこの原理に基づき、光の回折も含めた現象モデルを計算し、それと測光結果を比較することで現象時刻の最確値を求めている。測光から得られたライトカーブとそこから求められた現象時刻を図 8 に示す。

2.3.3 推定時刻誤差

まず、前項のような求め方をする上で誤差要因となるのは、ライトカーブ上に載っているノイズである。これらは、撮像素子上の読み取りノイズや、大気の揺らぎによる「星の瞬き」などに起因している。そのような場合、推定誤差はどのようにして求めたらよいだろうか。一つの現象を一つの観測地点で多数の望遠鏡で観測して結果を統計処理すれば誤差量が求められるが、現実的ではない。そこで、次のような考えに基づいて推定誤差を求める。

ノイズの載った現象を作り出す機能と、それから最確値を求める機能を持ったソフトウェアを作成した。現象をつくる機能は、ライトカーブに見られるようなランダムなノイズを発生させ、これを出現または減光のモデルに加える。また様々な大きさのノイズを作れるようにする。そのようにしてできたライトカーブを最確値を求める機能が解析する。ノイズを加える前の現象の瞬間と解析で求めた最確値の間には誤差が生じる。以上を多数(1000 回以上)繰り返して、そのばらつきの程度(単位はフレーム)を標準偏差(1 σ)として求め、これを推定誤差として扱う。

SD/LD が 0.4 になると誤差は 1 フレームに達することから、時間分解能はフレーム出力間隔と等しくなる。これは、星が極端に暗くて捉えられないときや、星に対して小惑星が明るく、減光量が小さな場合には起こりうる。

LD: 掩蔽の増減光による光量の変化, SD: 減光前の光量値の標準偏差, FT: フレーム出力間隔(秒)とすると、時刻誤差 ER (1 σ)(秒)は

$$ER = FT \times \frac{SD}{LD} \quad (1)$$

として表すことができる。

2.3.4 時間分解能

サイズの小さな小惑星の形状を調べるために行われる掩蔽観測では、小惑星上でどれだけ精密に地形を求めることができるか(長さの分解能)は、観測の「時間分解能」に依存している。時間分解能とは、掩蔽観測を計画するときに必要な概念であり、観測後には結果としての推定時刻誤差が求められて、それが時間分解能に代わる概念となる。したがって、計画時点に考えておくべき「時間分解能」は、式(1)で表されることになるが、その際にはフレーム露光時間に加えて想定されるライトカーブ上の S/N 比の値も必要となる。図 5 の下の図から考えて、S/N が 2.5 (N/S=0.4) のときに 1 σ がほぼ 1.0 になることから、それを目安として考えることができる。ただし、前日等に予備観測をしてライトカーブの S/N を測定したとしても、掩蔽時の減光がほぼゼロになるのであればそのままの S/N を用いてよいが、減光量が 50%であれば、S/N はその半分にすることに注意しなければならない。

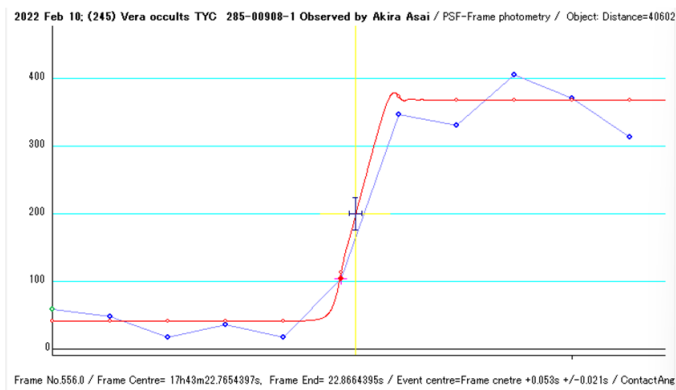
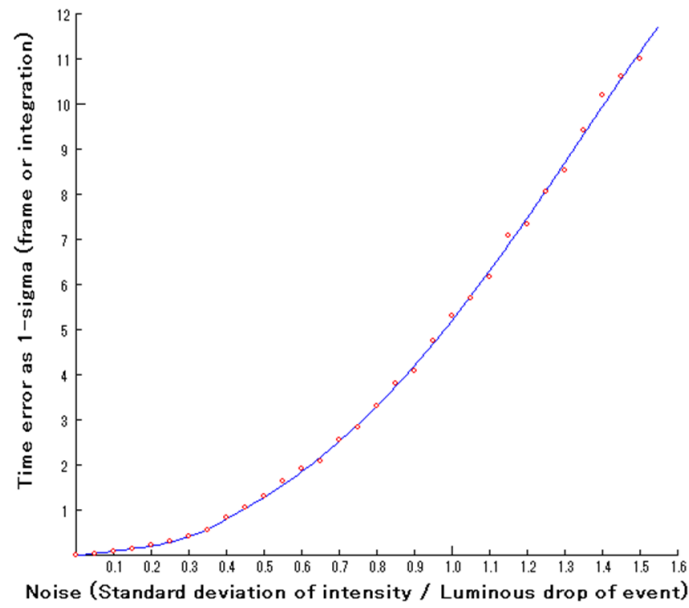
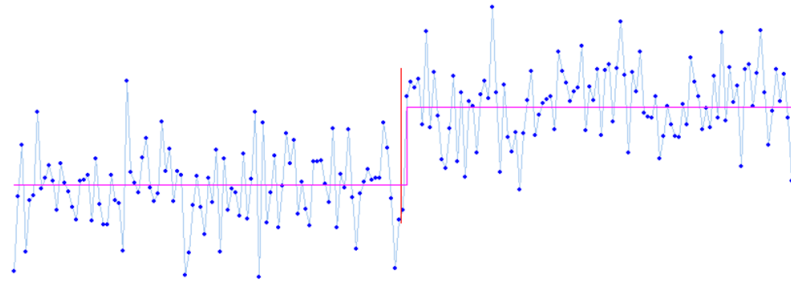


図 9: ライトカーブに載ったノイズの時刻誤差への影響 (上) 正しい出現時刻 (縦赤線) とノイズの載ったライトカーブから得た最確値 (マゼンタ) $S/N=2.0$ となるようなノイズが載った例. 正しい出現時刻 (縦赤線) とノイズの載ったライトカーブから得た最確値 (マゼンタ) これには $S/N=2.0$ となるようなノイズが載っている. この場合には 1 フレーム近い誤差が発生している. (中) ノイズ (S/N の逆数) の大きさと推定時刻誤差 (フレーム露光時間で表した 1σ) の関係上の図のような処理を多数繰り返して標準偏差を求めた結果を表す. (下) 測光より求めた現象時刻と推定誤差. エラーバー (中央十字形) の縦が光量のばらつき, 横がそれから求められた推定時刻誤差.

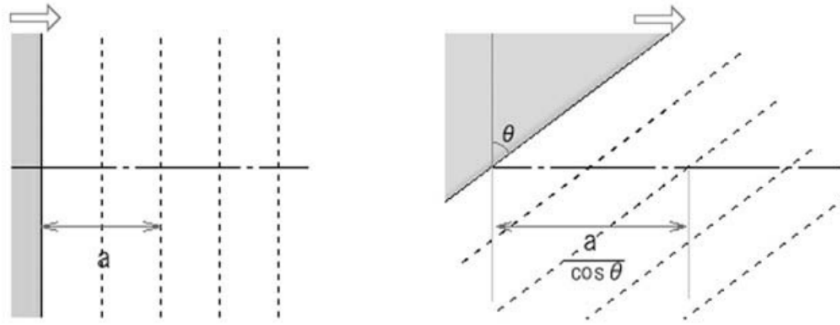


図 10: 天体の縁が進行方向となす角と回折パターンの移動

以上より、観測計画の時点で時間分解能を考えると、フレーム露光時間だけでなく、減光量や当日の大気の状態（対象星の高度や季節風の状況等にも依存する）も考慮して決めていく必要がある。

2.3.5 「瞬時でない」増減光

星は点光源であるから、地上にできた小惑星の影の端はくっきりしていると思われがちだが、実際には小惑星の端で起こる光の回折のために緩やかな明るさの変化となる。そのため、小惑星が星の手前を通り過ぎる際の増減光は瞬時ではなく、図 11 のような曲線を描いて光量が変化する。恒星を掩蔽する天体のサイズが十分に大きく、縁が直線とみなすことができる場合には、影の縁付近の明るさの変化は次式で表すことができる。

$$I(t) = 0.5I_0 [(0.5 + C(\omega))^2 + (0.5 + S(\omega))^2]$$

ここで、 $C(\omega)$ と $S(\omega)$ はフレネル積分で、下記の式で表される。

$$C(\omega) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right), \quad S(\omega) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right)$$

また、 ω はフレネル数で、下記のように表される。

$$\omega = \left(\frac{2}{\lambda D}\right)^{\frac{1}{2}} \nu(t - t_0)$$

ここで、 λ は光の波長、 D は小惑星までの距離、 ν は視線方向に垂直な面にできた月の影が移動する速度である。小惑星の縁が月の進行方向に対して垂直な状態から傾くと、地上にできた影の移動による明るさがゆっくり変化ようになる (図 10)。

図 11 は月が星を隠した場合を示しているが、小惑星でも同様の曲線を描く。このゆっくりした光量変化は、天体が星をかすめるようにして通過する場合に顕著に見られる。そのような場合は、シミュレーションで作成した緩やかな光量変化を観測されたライトカーブとフィットさせることにより、精密な時刻を求める。

また、恒星が視直径を持つ場合には、日の出で太陽が地面から少しずつ顔を出してくるのと同じようにゆっくりした増減光の要因となる。それと前述の回折の影響が合わさって、図 12 に見られるように視直径が大きくなるほど変化はゆっくりとなる。

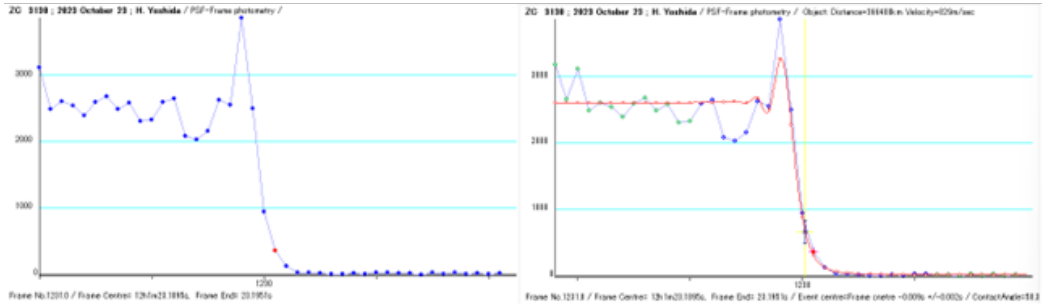


図 11: 光の回折による掩蔽（潜入）時の光量変化が恒星（視直径がなく点光源として扱うことができる）を隠した場合の光量変化。変化に要する時間は「隠す」天体までの距離とコンタクトアングル、および天体の影の移動速度により異なる。星が点光源であるとして扱える場合は、現象時（恒星の中心と天体（この場合は月）の縁、そして観測地点が一直線になったとき）の光量は掩蔽前の 25 %となる。右は回折シミュレーション（赤曲線）と比較したもの。コンタクトアングルを 50.8 度とした場合に良好な一致となった。

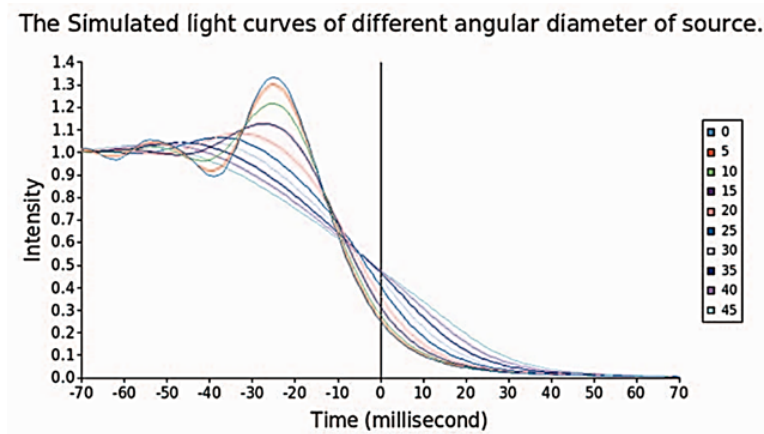


図 12: 恒星のに視直径を考慮する必要がある場合の、掩蔽時の光量変化を示す。恒星の視直径により 25 %から 50 %までの様々な値となる。なおこの曲線は、天体が十分に大きく、天体の縁も直線として扱うことのできる場合に成り立つ。地球からの距離が遠く、かつ直径の小さい天体である場合には、これとは曲線が異なってくることから、天体の形や星を隠す縁の場所を特定してシミュレーションを作成する必要がある。

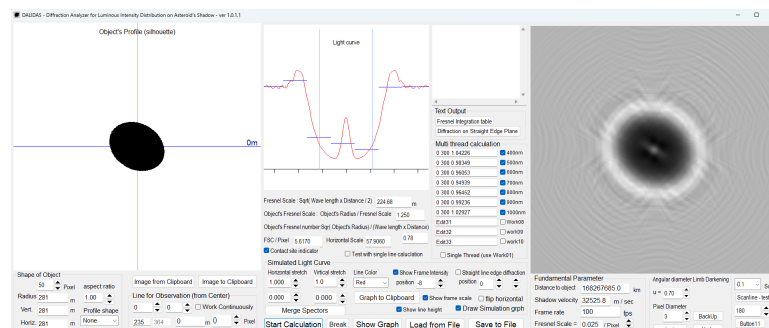


図 13: 距離が遠く径の小さな小惑星が地表に作る影。フレネル数が 1.0 以下となると、掩蔽観測から小惑星の形状を求めることはできなくなる。図は、フレネル数 1.5 の場合を想定して作成したシミュレーションであるが、この状態でも影の縁がはっきりしない状態となる。

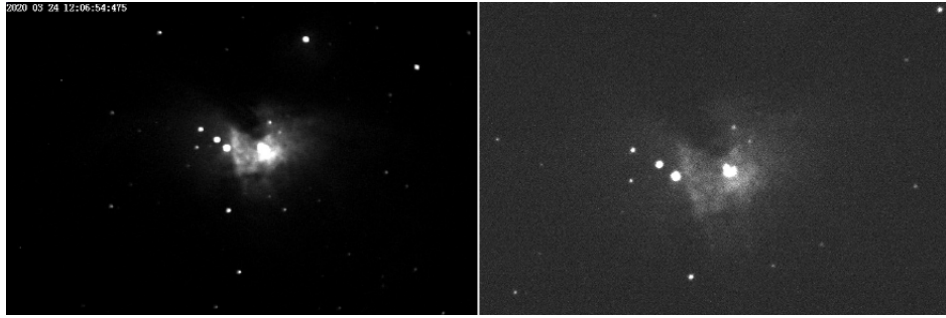


図 14: CCD アナログカメラ (左) と CMOS カメラ (右) の感度の比較. 同じ光学系に CCD アナログカメラ (左:WAT120N exp=0.0334 × 16frame stack) と CMOS カメラ (右:ASI290MM exp=0.0333sec (2× binning)) をそれぞれ取りつけて撮影した M42. 2つの画像を比べてみると, CMOS カメラは CCD カメラの 16 フレーム蓄積とほぼ同等の写りをしている. したがって CMOS カメラは従来の CCD カメラに比較して 10 倍ほどの感度であると考えられる.

2.4 画像 (動画) を撮る—掩蔽観測に適したビデオカメラ

ビデオカメラは,「一定の露光時間で撮影されたフレーム画像を連続して出力する装置」である. 掩蔽観測に使われるビデオカメラは, まず第一に, 暗い星の現象をとらえるために高感度であること, 星の明るさを正確に記録した画像が得られること, さらに, 正確な時計としても機能することが求められる.

2.4.1 撮像性能

明るさを正確に記録するためには, たとえばガンマ補正のような画像処理がなされていないことが重要である. 従来一眼レフカメラやハンディカムなどで撮影された動画のフレームには強い画像処理がなされており, 出力画像には撮像素子に入射した光の量がリニアに反映されていない. そのため, このようなカメラで撮影すると, 星が重星であった場合に, それぞれの星の明るさを正しく測定することができない. 一方, 高感度アナログビデオカメラ (CCD) は受光量に対して出力値が直線的になる特性を持っており, 従来掩蔽観測に用いられてきた. また, 現在主力として用いられている CMOS ビデオカメラは, 途中でアナログビデオ信号に変換されないことから, アナログ信号を作り出すアンプの歪の影響を受けず, より確実に素子の受光量を反映した出力値となる. 更に, アナログビデオカメラと比べて 10 倍ほど感度が高く, 低ノイズである.

2.4.2 時間的な安定性

フレームの出力間隔が一定であれば,「潜入」から「出現」まで何フレームかかったかを数え, それにフレーム出力間隔 (フレームレートの逆数) を掛ければ, 現象の継続時間が決まり, この継続時間に基づいて, 弦長が求まる. ビデオカメラでの動画撮影時の時間安定性について, 高性能のストロボスコープを撮影して調べてみた. 結果, フレーム出力のタイミングは 1 ミリ秒より一桁小さい誤差で安定していることがわかった. これにより,

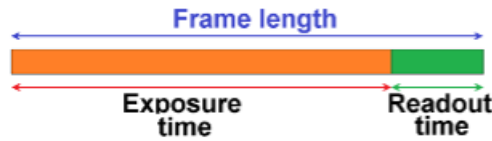


図 15: CCD の 1 フレーム中の露出時間と読み出し時間の関係

CMOS ビデオカメラは高精度の時を刻む装置（時計）として機能していることが確認できた。

2.4.3 グローバルシャッターとローリングシャッター

CCD と CMOS の大きく異なる点は、データの読み出し方法である。CCD は露光が終わると、受光ピクセルに蓄積された電子をバケツリレーのように隣のピクセルに渡していき、素子の端でアンプにより増幅されて信号が得られる。そのため、素子全体のデータを読み出すためには、一旦全ピクセルの露光を停止し、その間に「バケツリレー」を完了させる必要があった（このバケツリレーにかかる時間をリードアウトタイムと呼ぶ）。これにより全てのピクセルの露光開始と露光終了の時刻を同一とすることができる。このような露光をグローバルシャッターと呼び、掩蔽観測では、画面のどこかに正確な時刻が映しこまれていれば、その時刻をもって現象時刻とすることができた。ただ、この方式では、一定のリードアウトタイムがかかるため、フレーム出力間隔を短くして高速シャッターを切るという使い方には向かない。

一方 CMOS は、ピクセル一つ一つがアンプを持ち、露光終了後に蓄積された電子を電圧の信号に変換してピクセルが並んだ順に専用の回路で出力される。このため、素子内でのデータ転送時間が短いという特長がある。更に、画面全体のデータを読み出すのではなく、1 ラインごとにデータを読み出すと、データ量はたいへん小さくなることから、読み出しに要する時間（リードアウトタイム）はたいへん短くなる。その結果、フレーム長に対する露光時間の割合を大きくでき、より大きなフレームレートでの撮影が可能となる。これをローリングシャッターと呼ぶ。

図 16 は、公開されている SONY 社製 IMX290 素子のデータシートおよび 1PPS（パルス/秒）の LED 光の撮像より得られた結果を元にまとめたローリングシャッターの動作順序（シーケンス）である。データシート（http://static6.arrow.com/aropdfconversion/c0c7efde6571c768020a72f59b226308b9669e45/sony_imx290lqr-c_datasheet.pdf）を参考にするとともに、1PPS で発光する LED の撮像による解析の結果を元にまとめた。1 ラインのデータ読み取りに要する時間（リードアウトタイム）は 0.0077 ミリ秒であり、その残りの時間を露光に使っている。たとえば、フレーム長が 20 ミリ秒のビデオの場合、露光時間は 19.9923 ミリ秒となり、フレーム長の 99.96 % を露光に当てることができる。このように、キャプチャ可能なフレームレートのビデオにおいては、実質上「フレーム長＝露光時間」として扱うことが可能である。

ところが、このローリングシャッターには、画面の上下方向で露光開始と終了の時刻が異なるという特徴がある。画面の下の方を写した時刻は、画面上の方に写っている部分の時刻よりも僅かに早い時刻（たとえば、540 ライン異なると時刻に 4.16 ミリ秒の差が生じる）になる。したがって、掩蔽観測で正しい時刻を得るためには、画面上の時刻信号は、

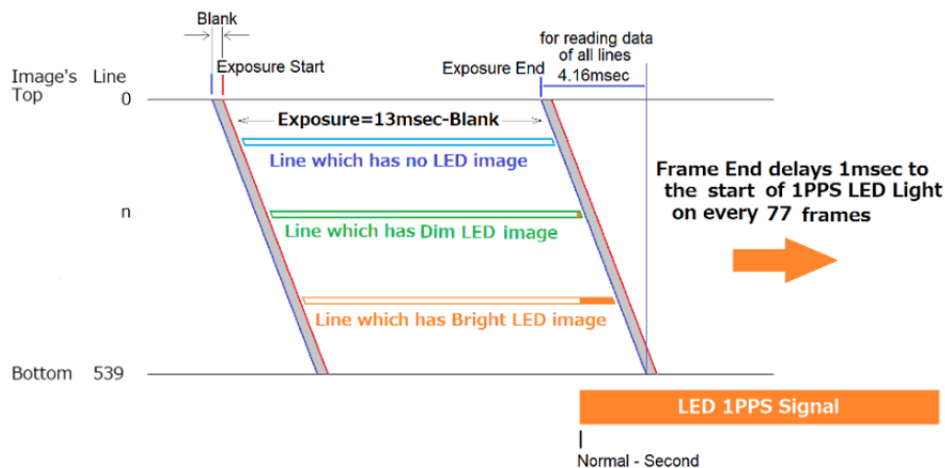


図 16: ローリングシャッター方式撮像素子 (SONY IMX290) の動作シーケンス。

対象とする星が写っているのと同じのライン（削除水平な位置）になければならない。したがって、たとえばLEDの時刻信号は、一点を照射すればよいのではなく、画面を縦方向に細長く照射するか、あるいは画面全体を照射する必要がある。また、このことは、ローリングシャッター方式のカメラでは、グローバルシャッター方式のアナログビデオカメラで良く使われていたビデオタイムインサータのような「画面に時刻値が表示される」等の方法は使えないことを意味している。

上記の二つのシャッター方式は、それぞれ一長一短であり、用途がどちらを重視するかにより選択がなされている。ちなみに感度・時刻精度双方が重視される掩蔽観測にとっては困ったことではあるが、アマチュアが使用する比較的小口径の望遠鏡にとっては、「感度が高く観測対象が映る」ことがまず優先されることから、ローリングシャッターのカメラの方がより有用である。そこで、時刻精度を高める方法を工夫することで、ローリングシャッターの持つ短所を補うような工夫がなされてきている。ちなみに本稿の多くの部分は、その工夫について述べることに充てられている。

※ CMOS 撮像素子の中にもグローバルシャッターを採用した製品がある (QHY174 等)。フレーム出力間隔に対する露光時間の割合を大きくとれないこと等から感度は劣るが、画面上に時間差はない。

2.5 正確な時刻を得る—時刻と時計

掩蔽観測で活用される様々な時計を紹介する。

2.5.1 PC のシステム時計

CMOS カメラを活用した観測では、撮影した画像を動画ファイルとしてPCのドライブ上に保存する。その際に動画の中にPCのシステム時計の時刻が記録されるので、PCのシステム時計は観測に重要な働きをする時計のひとつである。PCはCPUを駆動させるための水晶発振器を持っており、OSはその発振器からの信号を数えることで時計の働きを

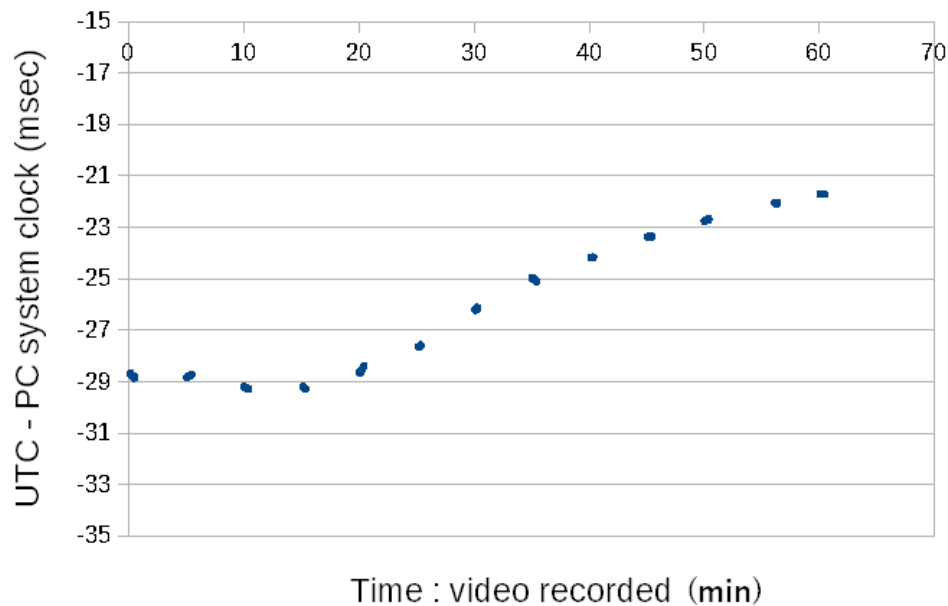


図 17: PC システム時計の示す時刻の経時変化

している。これをシステム時計と呼ぶ。WINDOWS のタスクトレイに表示される時刻は、このシステム時計の時刻値である。PC の電源を切ればシステム時計は機能しなくなるが、PC には別に水晶時計が内蔵されており、PC の起動時にはこの水晶時計の時刻を読み込んで、以降は CPU 駆動の水晶発振器によるシステム時計として動作するのである。以上からわかるように、PC の時計というのは、私たちが日常使っている電子時計（水晶時計）と同じ仕組みで動作しており、進み遅れもある。掩蔽観測に用いるには、誤差（進み遅れ）が大きいことから、そのままでは使えず、精密な時刻合わせが必要である（図 17）。最も簡単な時計合わせは、インターネットに接続されていれば、NTP サーバの時刻に同期する方法である（2-5-2 を参照）。また、より精密に時刻合わせを行うには、GPS 受信機による同期を行う必要がある（2-5-3 を参照）。それに加えて掩蔽観測では「GPS 受信機の出力する 1 PPS の LED 光による補正」を行う必要がある。

2.5.2 NTP サーバ

NTP とは、ネットワークに接続されたコンピュータ等の時刻同期に用いられるプロトコルである。通信されるデータにはサーバとクライアントがそれぞれ受信した時刻の情報が含まれており、ネットワーク上でのデータ転送や PC 等での処理に伴う遅延を補正するしくみになっている。同期精度については、NICT: 日本標準時グループからの案内によると、「インターネット環境に応じて数ミリ秒から数百ミリ秒位まで大きく変化する場合があります。」とされている。このままでは掩蔽観測に十分な精度とは言えないが、PC の時刻を大まかに合わせる目的には好適である。後述する 1PPS の LED 光を活用した精密時刻を求める方法を適用する前に NTP サーバと同期させ、PC の時刻を合わせておくと良い。

同期の方法は、Windows10, 11 の場合は、インターネットに接続された状態で、『設定』－『言語と時刻』－『日付と時刻』から『時刻を同期する』の下の『今すぐ同期』ボタンをク

リックするだけで完了である。ただし、操作時に PC の時刻が UTC に対しての進み遅れが 1 秒以内であったときは同期が行われない。そのときの進み遅れが 0.5 秒以上であると Limovie の時刻補正機能で 1.0 秒異なる値が求められることになる。したがって、もしこの方法で時刻合わせをするときは、予め PC の時刻に対して手動で数秒～数分異なる値を与えておき、その後に行う必要がある。観測遠征先など PC が直接インターネットに接続されていない場合は、携帯電話のテザリング機能を使うか、ポケット WiFi の電波を利用するなどしてインターネットにつなぎ、上記のようにして同期することができる。なお、一旦同期した後でも、観測録画中に自動同期が行われた場合には PC 時計の値が変化してしまうことがある。観測中は AirPlane モードにして、インターネットから PC を切り離しておくが良い。NTP の詳しい解説は一般社団法人日本ネットワークインフォメーションセンター <https://www.nic.ad.jp/ja/basics/terms/ntp.html> を参照いただきたい。

2.5.3 衛星測位システム

まず最初に、以下に用いる用語の整理をする。衛星を用いた測位システムは、最初に開発・運用を行ったアメリカのシステム”GPS”がそれを表す用語として広く用いられてきた。しかし、ロシアの GLONASS、ヨーロッパの GALILEO など運用されるようになったことから、それらを総称して GNSS と呼ばれている。ただ、我々も日常の中で GPS との呼称を使うことが多いことから、次のように統一して記述する。

- (1) 受信機については、GPS 受信機という呼称を用いる。
- (2) 衛星測位システムの総称としては、GNSS との呼称を用いる。
- (3) 上記 (1) の場合以外は、GPS はアメリカの運用するシステムについてのみの呼称とする。

2.5.4 GPS 受信機とその種類

GPS 受信機は、その開発時期について、および PC との接続方式についてそれぞれ二つずつに大別される (図 18)。

開発時期については、ここでは便宜的に、

旧世代の機種：初期設定（メーカーが標準的に使用されることを期待して行った設定）において、電源投入後の受信開始時点で、GPS(USA) およびその補助手段であるみちびき衛星のみを利用して測位がなされる受信機

新世代の機種：初期設定の状態、電源投入の時点において GPS(USA) に加えて GLONASS (Russia) 衛星も利用して測位がなされる受信機

のように分ける。新世代の受信機に比べて旧世代の受信機は安価に購入することができるが、掩蔽観測については、以降に述べるように新世代の方が利便性が高い。

次いで、PC への接続方式であるが、USB 接続の機種を用いた場合は、時刻を伝える手段が TXD(受信機側) から RXD(PC 側) により受信された NMEA センテンスにより PC の時刻補正が行われる。NMEA センテンスは UTC の正秒に対して 50～100msec 遅れて送信が開始され、また出力タイミングにも最大 10msec に及ぶばらつきがあることから、その精度でしか PC のシステムタイムを補正することができない。この機種を用いた場合でも、1PPS の LED 光を録画することにより、Limovie により精密に時刻を補正することが

	Vendor	Engine	Satellites	RS232C type	USB type
Old generation	ublox	NEO-6M NEO-7M	GPS(USA) etc.	Ren He GY-NEO-6MV2	VK172 DOCTORADIO GR7
	Garmin			15XL/H(GHS-OSD) 18xLVC	
New generation	ublox	NEO-M8M NEO-M9N	GPS(USA) GLONASS(Russia) etc.	GT902PMGG	
	MediaTek	MT3333 MT3337 MT3339		GT502MGG-N AE-GNSS- EXTANT+ANT_SET	GT502MGG-USB GlobalSat BU-353N5 USB

図 18: GPS 受信機の種類

できる。ただし、1PPS の LED が実装されていない機種では、1PPS 用の受信機を別途に用意する必要がある。

一方、RS232C のケーブルまたは端子を有する機種は、それを用いた工作が必要になる場合が多い。そのとき、RS232C の DSR 通信線を介して 1PPS を PC に伝えるように配線すると、HACSTIP-GPS を用いて精密な PC の時刻補正 (+/-0.2msec) をすることができる。ただし、PC の時刻が精密であっても、SharpCap などのキャプチャソフトウェアのフレーム画像処理時間だけタイムスタンプに遅延が発生するので、USB タイプと同様、1PPS の LED による時刻補正は必須である。なお、こちらは、可変抵抗器により LED の光量を調節することができ、1 台で時刻まわりの用途を賄うことができることから、観測にはたいへん便利である。

2.5.5 GPS 受信機とうるう秒

前節に示した GPS 受信機のうち、新世代のものは、受信開始時点で GLONASS 衛星が捕捉されており、それよりうるう秒のデータを取得していることから、電源投入後に LED が点滅を始めた時点で正しい UTC の時刻を出力している。したがって、次節に述べるような旧世代に関しての「うるう秒情報を待つ」ような操作や運用は必要ない。しがたって、新世代の機種を使用している場合には、次節は飛ばして読んでかまわない。

2.5.6 いわゆる「旧世代」GPS 受信機の運用上の注意事項

ここで注意が必要なのは、GPS(USA) のみを利用するような旧世代の GPS 受信機の起動直後に出力される時刻値は「正しくない」ことである。

GPS 受信機は起動直後から GPS(USA) 衛星から電波で送られてくる衛星の軌道やうるう秒などのデータの受信を始める。これらのデータ（図 19 参照）全て取得するまでは正しい時刻値が得られない。経験的には受信機の起動から 20 分ほど経ってから掩蔽観測に用いるのが良いとされているが、どの時点で安定した時刻が得られるのか知るためには、GPS(USA) 衛星を利用した場合の受信機の動作について知っておく必要がある。受信機が位置や時刻を計算するための基礎データは「航法メッセージ」と呼ばれ、図 19 のようなフレームを一単位として送信されている。300 ビットのサイズを持つ 5 つのサブフレー

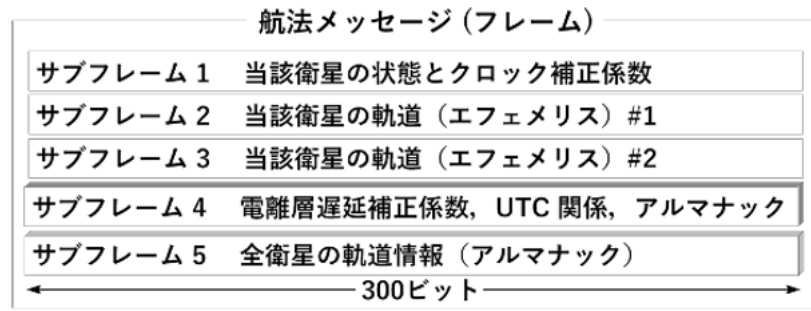


図 19: GPS 衛星が送信する航法メッセージのデータ構造

ムから成り、1 フレームのサイズは 1500 ビットである。航法メッセージは 50BPS で送信されており、30 秒で 1 フレームの送信が完了する。サブフレーム 1—3 には送信している衛星自身についての状態やエフェメリスと呼ばれる精密軌道の情報が格納されている。一方、サブフレーム 4—5 には全衛星の概略軌道 (アルマナック) や電離層、UTC に関する情報が格納されている。

このうちサブフレーム 1—3 については、送信している衛星のデータが毎回送られてくるので、受信機は GPS 受信機は複数の受信チャンネルを持ち、同時に 4 基またはそれ以上の数の衛星の情報を受信できる。

ただし、チャンネル (衛星) により受信開始のタイミングのずれがあるため受信にデータは 30 秒よりは長く (数分程度) かかる。受信機は、多くの場合、数分後には衛星から得たデータを元に位置 (経緯度) や精密な時刻を算出し、出力し始める。この位置と時刻の算出ができる状態になっていることを、私たちは、1PPS の LED 光が点滅し始めることから知ることができる。

なお、このときに GPS 受信機の内部で扱われている精密時刻 (GPS 時刻と呼ぶ) は、1PPS のタイミングは UTC に同期されているが、時刻値が UTC とは異なっている。1980 年 1 月 6 日の時点では GPS 時刻は UTC に等しいものであったが、その後 UTC には、地球の自転速度の変化に合わせるための「うるう秒」が必要に応じて挿入されてきており、そのため現在 (2022 年 1 月) では GPS 時刻が UTC に対して 19 秒進んでいる。GPS 受信機内ではそれで不都合はないが、時刻値として受信機が出力する際には問題である。GPS 受信機の内部プログラムは、それが書かれた時点までに挿入されたうるう秒の数をデータとして持っているので、たとえば 2012 年 7 月 1 日に書かれたプログラムであれば GPS 時刻から 17 秒補正した (引き算した) 値を現在時刻として表示するのである。しかしそれは UTC に対して 2 秒進んだ時刻値である。後に「更なるうるう秒の補正」が行われて正しい時刻が表示される場合もある。このように、ユーザは GPS 時刻と UTC のずれとそのずれを補うための補正の仕組みを意識していなければならない。

さて、上記の「更なるうるう秒の補正」はいつ行われるかであるが、受信機の種類や経歴、状況によって異なる。そしてこのことが、掩蔽観測者が観測時に混乱と困惑を深める大きな原因の一つとなっている。

GPS 受信機は、内部メモリに GPS 衛星と同期して動作していた経歴を持つ場合、前回の受信時に読み込んだうるう秒等のデータをメモリに保持している。そのため、受信機の電源を入れたのとほぼ同時に、1PPS の LED が点滅を始めて同期がとれている状態にな

り、出力（表示）する時刻値もうるう秒が完全に補正され、正しい UTC の時刻を示している。ただしこの電池容量は機種により違いがあり、CR2032 電池のような大容量を持つ受信機では年単位で保持されるが、GT502MGG-N では数時間、VK172 では数分しか保持されない。

いずれにせよ、うるう秒データを受信できているかどうかは、電話時報あるいはテザリング等が利用できるのであれば Timeis などを使って、GPS 受信機の時刻をチェックするとよい。両者が一致していたら、うるう秒の補正は完了している。それ以降は、GPS 受信機の電源が切れるということでもない限り、そのまま GPS 受信機を UTC の時計として扱って構わない。このように正しい時刻かどうかを確認することを観測ルーチンとしておくことが大切である。

それでは、うるう秒の補正がなされておらず、UTC との時刻差が起きてしまっていた場合はどうしたらよいだろうか。答えは「12.5 分間待てば良い」である。

このことを説明するために、再び、航法メッセージのフレームデータに話を戻す。サブフレーム 1—3 が、送信毎に同じデータを繰り返し送り出しているのに対し、サブフレーム 4—5 の送信内容は、送信回毎に異なっている。それは、サブフレーム 4—5 に格納されるデータ量がたいへん多く、一度のフレーム送信では送りきることができないからである。そこで、データを 25 ページに分け、1 回目のフレームには 1 ページを、2 回目には 2 ページをというように、25 回に分けて送信されている。先に述べたうるう秒に関するデータは、サブフレーム 4 の 18 ページ目に記載されている。一度このページの受信を逃すと、次に同じデータが読み取れるのは 25 回先のフレーム送信（受信）の時となる。1 フレームが 30 秒かけて送信されるから、25 フレーム先とは 12.5 分先である。逆に言えば、12.5 分待てば正常な UTC 時刻値が得られるということである。そして、一旦正しくうるう秒の補正がなされたら、受信機の電源を切らない限り安定して UTC の時刻値が得られる。

筆者の場合、次のような手順で観測をしている。まず GPS 受信機の電源を ON にする。LED の点滅を確認して、電波を受信したことがわかったところで、望遠鏡等のセットアップをする。セットアップには早くても 15 分以上かかるので、その間に受信機はうるう秒データを受信して、正しい UTC 時刻値を出力しているはずである。このようにして、GPS 受信機と GPS 衛星の同期が確実に取れた後は、PC のシステム時計を GPS 時計に同期させる作業を行う。GPS 衛星との通信、航法メッセージ等の説明は「GPS キャディー講座-6. GPS 衛星システム (2) 航法メッセージ」<https://greenon.jp/gpslecture/2011/01/26/2849/>を参照していただきたい。

2.5.7 その他の時計

PC の時計の時刻表示が正しいかどうかを確認するには、電波時計（標準時の電波による時報を使って自動的に時計合わせを行う時計）が便利である。同期されたときの精度は NTP 同様に高くはないが、PC の時計の時刻表示の正しさを容易に確認できる。短波による標準時放送や電話時報（いわゆる「時報」）は古くから掩蔽観測の際に利用されてきた。詳細は略すが、ともに PC の時刻表示が正しいかどうかの確認に利用できる。



図 20: SharpCap がフレーム画像に記録する時刻値 (拡大図). これが画像にスーパーインポーズされる. 左上端の 7 ピクセルには, ピクセルデータとして紀元 1 年 0:00:00 からの時間が 10^{-7} を単位として記録される.

2.5.8 受信状況の改善

CMOS カメラによる観測が行われるようになってから, 観測中に GPS 受信機の動作が停止する, という現象がしばしば報告されてきた. これは, CMOS カメラを PC に接続する際に用いられる USB3.0 のケーブルを含む回路に流れる信号が GNSS の電波帯域と重なり, 強い妨害電波源となっているためである. そのため, カメラ本体や接続ケーブルを GPS 受信機のアンテナや信号のケーブルに近づけたり接触させたりすると, 受信状況が著しく低下する. GPS 受信機は最低 4 機の衛星からの電波を捕捉する必要があるが, 受信状況が低下してその数を満たせなくなると動作を停止するのである.

これを防止するには, カメラ付属の USB ケーブルに替えてシールド付の USB3.0 ケーブルを使用することがたいへん効果的である. これまでも, USB3.0 ケーブルにアルミホイルを巻いたりフェライトコアを付けたりする対策がとられてきているが,それほど大きな効果はないことから, やはりシールド付きケーブルの利用をお薦めする. また, カメラケーブルと GPS 受信機ケーブルを 60cm 以上離して設置することが望ましい. もしそれが難しいときでも, なるべく離して設置する方がよい.

それに加えて, 新世代の GPS 受信機を使用することにより, 更に大幅に受信不良を改善することができる. 新世代の機種は GPS(USA) に加えて GLONASS(Russia), GALILEO(Europa) の衛星を受信できることから, 旧世代の倍近い衛星数が確保できることから, 衛星 4 機からの受信という条件を満たすことができるためである.

2.6 ビデオ画像に UTC の時刻値を記録する

GPS 受信機を内蔵したビデオカメラである QHY174-GPS を利用した場合には, カメラが直接 GPS 信号を受信し, 正しい時刻をキャプチャした画像に出力することができる. SharpCap というソフトウェアでキャプチャを行うと, 得られたビデオ画像の最上部に, 露光が終了した時刻 (注意: QHY174GPS では, QHY174GPS の GPS が On の時は露光が開始した時刻, GPS が Off の時は露光が終了した時刻である)(UTC) の精密な値が記録される (記録の形式は図 20 参照). また, このカメラはグローバルシャッターなので, 対象となる恒星が画面のどこに写っていても, この時刻値を適用して潜入・出現の時刻を求めることができる. ただし, 感度はローリングシャッターのカメラと比べると落ちるので, 掩蔽の対象星が明るい場合や, 十分な光量を集光できる大口径の望遠鏡で観測する場合には, 有効な選択となる (多くの掩蔽現象の対象星は暗いし, 移動不可能な大型望遠鏡でねらった掩蔽が観測できる機会は少ないため, 日本のアマチュア観測家の多くは次節の方法を用いる).

2.7 ビデオ画像に PC の時刻値を記録する

QHY174-GPS 以外のビデオカメラは、GPS 受信機を内蔵していない。そのようなカメラの場合、GPS 時刻とキャプチャされた画像の時刻を関連づけるために様々な工夫が必要である。以下本マニュアルの記述は特に断りがない限り、GPS 受信機を内蔵していないカメラを使った掩蔽観測の方法である。GPS 受信機を内蔵していないカメラでは、SharpCap はフレーム画像のデータを読み込んだ時点の PC のシステム時計の時刻を画面最上部に記録する。まず、はじめに意識しておかなければならない重要な点は、「この時刻値は掩蔽の時刻を精密に求めるための時刻基準として扱うことができない」ということである。先に述べたとおり、ローリングシャッターでは画面の上下方向で露光開始・終了の時刻が異なっている。それ以外にも、次のようないくつかの誤差を含んでいる。記録される時刻値は、PC のシステム時計から得たものであるため、システム時計が UTC に同期された際に、GPS 受信機からであれば数ミリ秒、NTP サーバを用いた場合は百ミリ秒におよぶ同期誤差が起こりうる。換言すれば、同期された時点で、この程度の進み遅れが生じているということである。

また、PC のシステム時計は水晶発振器により駆動されているため、その誤差による進み遅れが加わる。水晶発振器の精度は PC の機種により異なるが、大きなものでは進み遅れが 1 時間に十数ミリ秒に達することがある。更には、カメラから出力されてから、キャプチャソフトがデータを読み出してファイル書き込み準備が終わるまでの間に、転送時間や処理時間が必要であるため、ファイルに書き込まれた時刻値はフレーム露光終了時よりも遅い時刻となっている。その「遅れ」の大きさはフレーム毎にばらつきがあり一定しない。PC は複数のプロセスが動いており、キャプチャソフトが CPU を占有できずに、タイミングにより速く処理できるフレームとそうでないフレームがあるためである。このような状況を避けるため、観測時にはキャプチャソフト以外のソフトはできるだけ起動しないで、キャプチャソフトが CPU を占有できるようにしておくこと。そうしないと、非常に短い露光時間で連続的にキャプチャを繰り返す際に PC の処理能力を超えて、フレームドロップ（コマ落ち）が生じることがある。

以上から、SharpCap により書き込まれた時刻値は、PC システム時計が良好に同期できていたとしても、カメラでの露光終了の時刻に対して 100 ミリ秒あるいはそれ以上の誤差を含んでいる場合があり得る。このように、PC システム時計は直接的には掩蔽の精密時刻観測に用いることのできない時刻表示であるが、次のような場合に必要となり、重要な役割を果たすことになる。

(1) 1PPS の LED 光の撮影においてフレーム時刻を求める場合

次節に述べる精密な時刻値を求める方法には、どこか 1 か所のフレームにおける秒の時刻値（整数）が必要となる。この時刻値をキャプチャ画像に書き込まれた PC システム時計の時刻から得る必要がある。

(2) フレームドロップを検出する場合

フレームドロップは、キャプチャソフトが取得したデータを次のフレームの出力までに処理しきれなかった場合に起こる現象である。取得に失敗したフレームは、動画に加えられることなく、一つ前のフレームの次に一つ後のフレームが続く、という形で、取得に失敗したフレームが欠如したまま動画ファイルが作られてしまう。これは、後述する 1 PPS に同期した LED 光を用いて精密時刻を得る際に大きな障害となる。フレームドロップが起

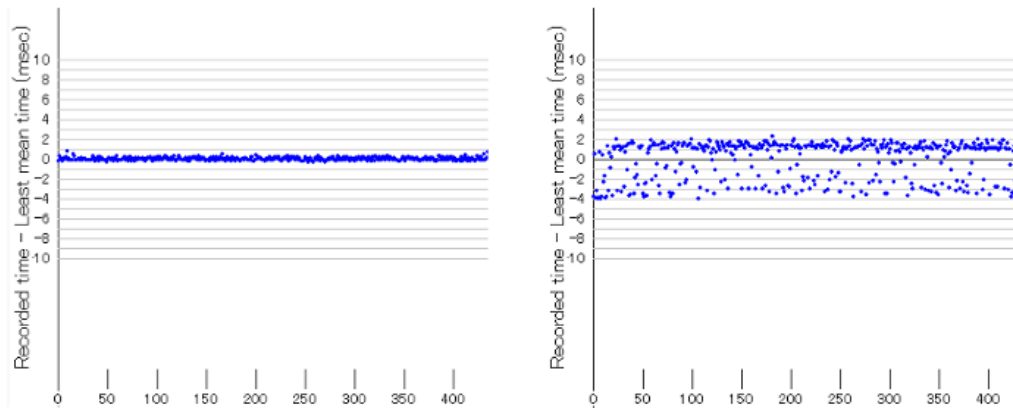


図 21: フレーム画像にキャプチャソフトが記録した時刻の変化。横軸はフレーム番号である。フレームは一定の間隔で出力されるので、フレームが出力された時刻は一定の速さで進むはずである。ところが、PC がデータ进行处理するのに要する時間がフレームごとに変化するため、フレームに記録された時刻値から一定に進む推定時刻を引き算すると、図のようなばらつきが現れる。このばらつきは PC やその動作環境により異なる。図の左右は別の PC で測定したものであるが、このばらつきが PC のどのようなスペックやコンディションによるのかは、今のところ明確でない。

きたときには、図 21 の点の並びに傾きが生じ、欠損したフレームの箇所で急に値が変化するような形のグラフとなる (図 22)。これを避けるには、予めキャプチャのテストを行い、フレームドロップを避けることのできるフレームレートを選択することが大切であるが、もし起きてしまったときは図 22 のグラフからフレームの欠損箇所を避けて解析を行わなければならない。

(3) 後述する GPS (LED) による時刻補正が得られなかった場合の予備として

GPS 受信機を用いた時刻補正ができないとき、NTP により時刻同期がなされた PC があれば、その同期の精度の範囲で現象時刻を推定することができる。故障等に備えてのバックアップ手段として、PC のシステム時計を可能な限り正確に合わせておくことは重要である。

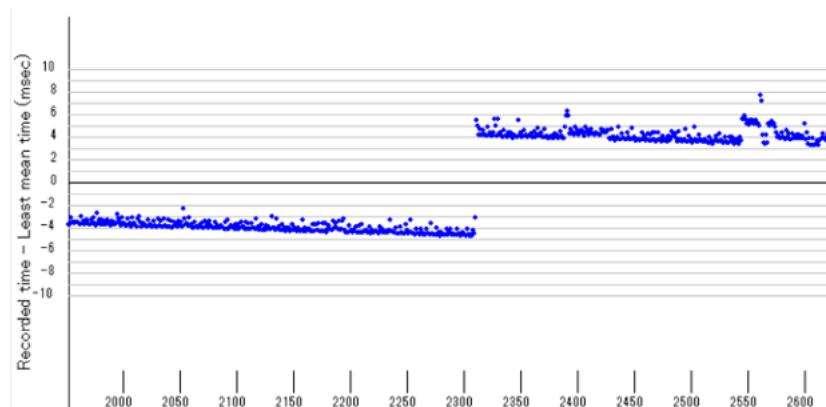


図 22: フレームドロップが発生した場合の時刻の平均の進み方と、各フレームに記録された時刻の差。

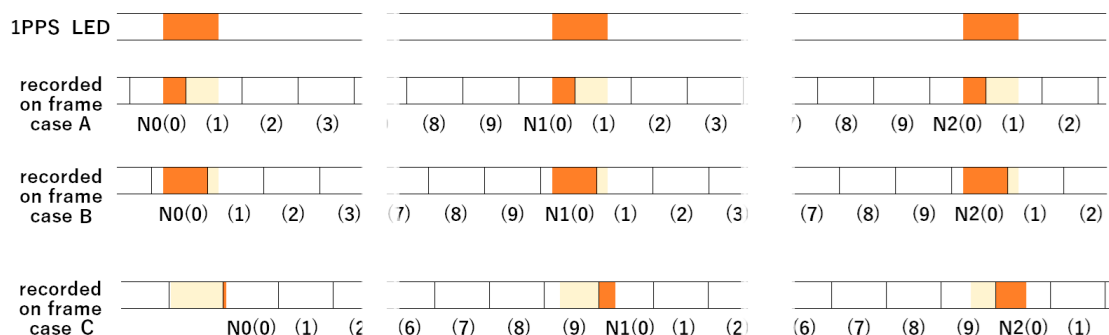


図 23: フレームレートと記録された 1PPS の LED 光. 10 個間隔のフレームに記録された LED 光の光量を橙色で表す. フレームレートが整数の場合 (case A, case B) の場合には光量の変化がないが, フレームレートが整数でないときは, 明るさが一定の割合で変化する.

2.8 1PPS に同期した LED 光の撮影から精密な時刻を求める

ビデオカメラのフレーム出力はそれ自体が精密な時計である. しかしそれは相対的なコマ数として与えられる時間であって, UTC とは結びついていない. そこでフレームと UTC を結びつける必要がある. GPS 受信機を内蔵していない CMOS カメラにおいては, 現在のところ以下に記述した方法が唯一の精密な時刻測定手段である.

2.8.1 整数でないフレームレートによる 1 PPS の LED 光の撮影

1PPS の LED 光は, 正秒に立ち上がり, それから 100 ミリ秒後に立ち下がるパルス信号である. これを CMOS カメラで撮影する. この時, 1 秒間に出力するフレーム数が整数であった場合, 決まった間隔で現れるフレームに記録された明るさは一定になる. そのため図 23 の case A, case B のように, フレームの露光期間のうちどこが正秒かを知ることができない. 一方, case C のように, 1 秒間に出力するフレーム数が整数でないときには, 決まった間隔のフレームに写る光の明るさは, 一定の割合で増加または減少していく. この明るさの変化を調べることで, 明るさが立ち上がった起点すなわち UTC の正秒を特定することができる. そしてこの正秒との差から露光終了時刻を求めることができる (図 24). Limovie にはこの処理を行うために SharpCap Timing Analysis という機能が用意されており, フレーム一つ一つの露光中央時刻と露光終了時刻を精密に得ることができる.

2.8.2 フレームレートの選択と LED の必要記録秒数

Ex: フレーム露光時間 (ミリ秒) = フレーム出力間隔, Sh: フレーム内の PPS 信号のシフト量 (ミリ秒), Rn: シフトの 1 サイクルが完了する LED 記録時間 (秒), An: シフトのうち, 増光 (減光) となって現れる秒 (点) 数, L: 最低限必要な LED 記録時間 (秒) とすると, フレーム内の PPS 信号のシフト量, シフトの 1 サイクルが完了する LED 記録時間, 最低限必要な LED 記録時間, シフトのうち, 増光 (減光) となって現れる秒 (点) 数はそ

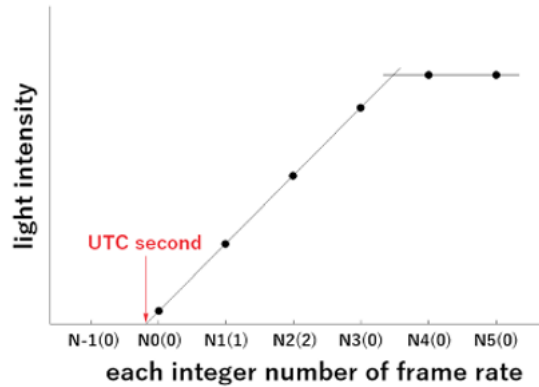


図 24: フレームレートと記録された 1PPS の LED 光. 図 23 の case C の光量変化を表したものである.

それぞれ以下のような式で表される.

$$Sh = Abs(1000 - Ex * Round(1000/Ex, 0)) \quad (2)$$

これより,

$$Rn = RoundUp(Ex/Sh, 0) \quad (3)$$

$$L = 2 * Rn \quad (4)$$

$$An = Min(RoundDown(Ex/Sh), RoundDown(100/Sh)) \quad (5)$$

これらの式は EXCEL の関数を利用して表した. L が Rn の 2 倍になっているのは, LED を記録するタイミングが増光 (減光) の途中から記録される場合もあることから, 図 24 に示す増光 (減光) の 1 セットが確実に録画されるようにするためである. Rn については, 図 24 のように, 3 秒 (点) 以上は確保したい. また, たとえば L が 300 になったとすると, LED を記録する時間は 300 秒=5 分におよび, 観測時の準備時間を圧迫するとともに, 解析時にも多くの労力を割かなければならない. 更には, Rn が大きくなると, 増光 (減光) 量の傾きが緩やかになり, 図 24 のグラフの斜線と横軸の交点である正秒の時刻の誤差が大きくなる. Rn は 5—20 秒 (点) 程度, またはそれ以下となるように設定することが望ましい (Rn を 5—20 回程度にするために LED 露光支援ソフトウェア CaSEDLEP が用意されている (後述)). こうすれば, LED 光の記録時間は 30 秒ほどとなり, 観測準備時間を圧迫することもない. また, LED の発光は 100 ミリ秒間であるので, たとえば Sh が 50 ミリ秒だとすると, 増光は $100/Sh = 2$ となり, 2 回分の増光しか得られないことになる. このシフト量が必要となるような長時間の露光は普通は行わないが, 場合によっては留意する必要がある. 以下に設定の例を示す.

設定の例

Ex を 41.8 ミリ秒とすると,
 $Sh = Abs(1000 - 41.8 * Round(1000 / 41.8, 0))$
 $= Abs(1000 - 41.8 * 24) = Abs(1000 - 1003.2) = 3.2$
 $Rn = RoundUp(41.8 / 3.2, 0) = 14$ (回)
 $L = 28$ (秒)

様々なフレーム露光時間（フレームレート）について適切な値を計算することはたいへんなので、露光時間決定支援ソフト CaSEDLEP (Calculation of Suitable Exposure for Decision of LED's Pulse light) を利用して求めるとよい。

2.8.3 LED の増（減）光を「複数回（セット）」測定する

上記の方法を実現させるためには、整数でないフレームレートとなるようなフレーム露光時間を選ぶとともに、図 24 のようなグラフが描けるように、LED 光の増（減）光を複数回記録させなければならない。これは掩蔽観測において重要な設定項目であるので、以下にその方法を述べる。カメラのフレーム出力のタイミングを制御している発振器はたいへん安定して動作しており、カメラ自体が高精度の時計であるということができる。しかし、カメラは時刻値を知る手段を持たないし、フレーム出力の間隔は、キャプチャソフトウェアから指定されて動作するが、それを数値として出力することはしない。この状況を以下のような式で表すことができる。

$$T_n = T_o + E_x \times n \quad (6)$$

T_n は第 n フレームを代表する時刻（ここではフレーム露光中央時刻とする）、 T_o は第 0 フレーム（最初のフレーム）の露光中央時刻、 E_x はフレーム露光時間（フレーム出力間隔）である。カメラから出力されたビデオのフレームからは T_o と E_x は得られないから未知数である。そこで、上記のように LED 光でビデオ上の任意の少なくとも 2 か所で正秒の位置を決定すれば、連立方程式で T_o と E_n を精密に求めることができる。また、正秒の位置決定をより多くの箇所について行うことができれば、最小二乗法でさらに精度を向上させることができる。

2.8.4 画面上での LED 光の照射範囲と LED 光の時間的安定性

これまでに何度か述べたとおり、ローリングシャッターのビデオカメラの場合には、画像の上下で撮像の時刻が少し異なるため、画像の上から下まで LED 光が記録できなくてはならない。なお、LED 光が画面で均一である必要はなく「光っていれば」よい。一方、LED 発光の明るさは、LED 光の点滅が記録されている間は一定に保たれていることが重要である。これは、どのシャッター方式についても共通である。LED 光の照射範囲の例を図 25 に示す。照射方法には、望遠鏡の主鏡の前で LED 光を照射し、ビデオ画面全体を光らせる方法（明視野照明）と、画面（視野）の一部を光らせる方法（部分照明）がある。明視野照明は LED 発光器を望遠鏡の筒先に確実に固定する必要があるが、比較的簡易に実現できる方法である。レデューサや縮小光学系と撮像素子との間が短く、部分照明装置を入れる場所がない時はこの方法による他ない。一方、部分照明は、LED 発光器のサイズや取り付け位置など、設定がやや難しいが、掩蔽中にも発光させることができ、時刻測定精度の面ではやや有利となる。また、観測のために必要な録画時間も、部分照明の方が短くできる。

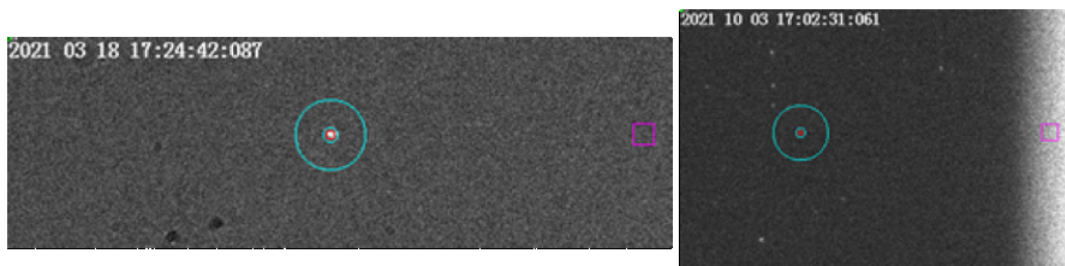


図 25: LED 光の照射範囲. 左: 筒先で明視野照明を行った. LED 光により視野全体が明るくなっている. この方法を取るときは, 潜入の前および出現の後に LED 光を記録し, 掩蔽現象の記録を妨げないようにする. 右: オフアキسسガイダー (オフアキسسガイダーは, 天体写真を長時間露光で撮影する際, 星を点像にするため, カメラの前部の視野端にプリズムを配置し, 光軸とは直交方向に設けたガイド用カメラに星像を導くもの) の改造により, 視野の右側のみを照明. この方法の場合は, 潜入・出現の時刻にも LED 光の点滅を記録することができる.

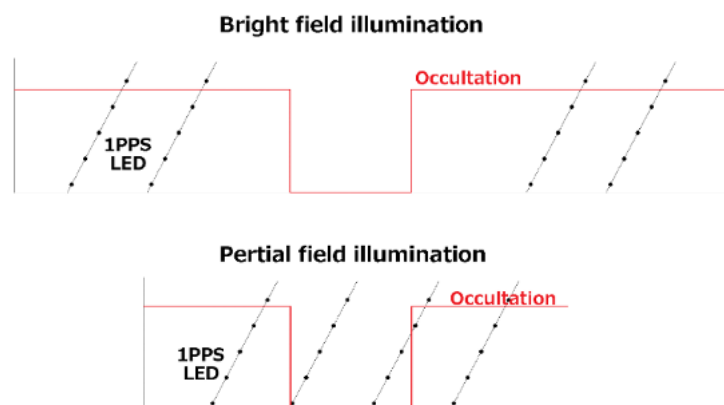


図 26: 照明方式と LED 照射の時間帯. 上: 明視野照明で LED 光を記録した場合. 現象中は測光の邪魔になるため LED は記録できない. そのため, LED 光の増光を現象の前後に記録して, 時刻精度を高める. 下: 画面の右端または左端のみを照射すると, LED 光は対象星の明るさの変化を「妨害」しないので, 常時 LED 光を点灯・記録することができる.

2.8.5 LED 光の増光（または減光）を 1 回しか記録できなかった場合

しばしば起きることではないが、たとえば現象前に LED の増光を 1 回だけ記録し、減光が起きた後しばらくしてフレームドロップが起きてしまったような場合などにはこのような状況となる。このような場合には、どのようにすればよいだろうか。図 17 で示したように、PC システム時計はあまり精度のよい時計ではない。しかし、数分以内であれば、誤差は 1—2 ミリ秒、またはそれ以下であろうと考えられる。そこで、(6) 式の Ex についてのみ、キャプチャ時に記録された PC システム時計の値から求めるのである。具体的にはフレームドロップの起きていない区間について PC システム時計の進み方を調べ、それから Ex を算出する。LED 光と現象の間の時間は調べた区間に比べて短いので、比較的精度よく時刻を求めることができる。5 章で説明する Limovie は、このように LED 光の増減光を 1 セットしか用いない場合でも、フレームドロップを探す段階で PC システム時計の記録値を調べ、仮の Ex を算出し、それを時刻計算に用いている。

2.8.6 LED 光が利用できない場合

GPS 関係の機器の不調などで、LED 光が正しく得られないときは、上述の PC システム時計に頼らざるを得ない。PC システム時計が正確に UTC に同期されている場合には、PC システム時計の進み方が正確であることを仮定して時刻を得る。そのとき問題になるのは、図 21 に示すようなキャプチャのタイミングがフレームごとにばらつきがあることである。これを解決するためには、PC システム時計は一定の進み方をする、と仮定して、その平均の進み方を求めればよい。具体的には、フレームに記録された PC システム時刻を最小二乗法で一次関数に近似させる処理を行う。観測とは別の機会に、同一の PC とカメラで LED 光を使ってキャプチャに要する時間を測定すれば、それを補正值として、「比較的」正しい掩蔽の時刻値を得ることができる。

3 観測機器

3.1 高感度天体用 CMOS カメラを掩蔽観測に用いる

掩蔽観測はこれまで高感度のアナログビデオカメラを用いて行われてきた。その際掩蔽の対象星が暗い場合は露出時間を長くして動画撮影がなされてきた。たとえば、12 等星の掩蔽を観測する場合、筆者（H.W, H.Y.）が使っていた観測システムではアナログビデオ（NTSC 方式）の動画で 32 フレームの蓄積が必要で、時間分解能は約 1 秒となる。そのため 1 秒以下の現象の観測は困難だった。近年、アナログビデオカメラにかわる有力な観測機器が普及してきている。動画を撮影ができる天体用 CMOS カメラである。裏面照射型の CMOS が使われており、アナログビデオカメラに比べて格段に高感度低ノイズで動画撮像ができる。この CMOS カメラで掩蔽現象を撮影すれば、その高感度を生かして露出時間を短くすることができる。また、天体用のカメラであることから、ガンマ補正等の絵作りのための補正がなされておらず、撮像素子の捕らえた光の量がリニアに出力される場所も掩蔽観測に好適である。また、明るい恒星の掩蔽現象の場合は、これまで普及していた NTSC 方式よりもはるかに高いフレームレートで観測することができ、1 秒以下の

減光も観測可能である。最近では直径 5km やそれ以下の小型の小惑星による掩蔽現象も観測対象に入ってきた。2021 年 10 月 3 日 (UT) に西日本で観測された直径 5km ほどの (3200)Phaethon による掩蔽観測の成功は記憶に新しい [42]。また、離角の小さい重星や星の視直径を求める観測も可能となる。ここでは、天文用 CMOS カメラを使用して掩蔽観測を行う際に必要なソフトや機材について説明する。

3.2 カメラ制御ソフト SharpCap

SharpCap は 2010 年、英国の Robin Glover 氏が、天文用 Web カメラのキャプチャーソフトとして開発した (名前の由来は「C#」というプログラム言語で書かれたことによる)。今日では広範囲の天体撮像ハードウェア (カメラ、フォーカサー、フィルターホイール、架台) をサポートするアプリケーションになっている。基本無償ソフトだが機能が追加された SharpCap Pro という有償版もある。掩蔽観測には無償版の機能で事足りる。下記サイトからダウンロードできる。

<https://www.sharpcap.co.uk/sharpcap/downloads>

掩蔽観測で SharpCap を使うのが便利である第一の理由は、ビデオに時刻を記録できることである。設定により、画像上部に 1/1000sec までの時刻が表示される。そのとき、各フレームの画像の左上隅の 8 個のピクセルに西暦 1 年 1 月 1 日の午前 0 時 0 分 0 秒を起点とする時刻が 100ns (ナノ秒) の単位とする 24 ビットのデータとして書き込まれる (前章の図 20 参照)。この時刻値の読み取りについては、Limovie や PyMovie などの解析ソフトが対応し、ソフトウェアの画面に時刻を表示し、掩蔽現象時刻の解析ができるようになった。したがって SharpCap を使った場合は解析には Limovie か PyMovie を使うと良い。これらは以下からダウンロードできる。

Limovie: <http://astro-limovie.info/limovie/program/limovie-P02.zip>

PyMovie: <https://occultations.org/observing/software/pymovie/>

また、SharpCap は先に述べたような高感度、低ノイズ、高フレームレートの CMOS カメラを扱うことができ、フレームサイズもある程度自由に設定できるため、掩蔽観測の様に 1 つまたは 2 つの対象星だけを観測する場合、フレームサイズを小さくして、さらに高フレームレート (高時間分解能) の観測もできる。CMOS カメラでは従来の CCD を使った場合の数~数十倍の時間分解能の観測が可能で、光の回折による瞬間的でない光量変化も解析できるようになった。掩蔽観測への CMOS カメラの導入は、掩蔽観測者にとって、非常に大きな躍進である。

3.2.1 使用環境

対象 OS は Windows のみで、Windows 7~11 であれば、最新の Ver.4.1 または 4.0, 3.1 か 3.2 が対応している。サポートするカメラは、Altair, Basler, Celestron, Imaging Source, iNova, QHY, ZWO 各社の天文用カメラ、Windows Webcam 対応カメラ、ASCOM 対応



図 27: SharpCap4.0 (Test Camera2 (High Speed) を接続した画像)

カメラである。掩蔽観測では高時間分解能で多数の画像を取得するため、SharpCapを使うにあたり、高速書き込みができる PC でないと具合が悪い。推奨される PC の仕様はたとえば以下のようなものである。

- CPU：COREi5 か i7 が良い。
- メモリ：64bitOS では 8Gb 以上を推奨。メモリは大きい方が安心である。
- ディスク：SSD(Solid State Drive) が既存の HDD より書き込み速度が早くて良い。
- USB：USB3(転送速度 5Gb/s) が良い。(USB2(転送速度 480Mb/s) より 10 倍速く、遅延も最小になる。)
- Windows バージョン：32bit 版と 64bit 版では、64bit 版の方がメモリを多く使えるのでお勧めである。

3.2.2 インストール

SharpCap のインストール手順を以下に示す。

1. <https://www.sharpcap.co.uk/sharpcap/downloads> から SharpCap をダウンロードする。これは 32bit 版か 64bit 版か、自分の環境に適したものを選ぶ。
2. SharpCap をダウンロードしたフォルダに行き、Sharpcapinstall-[version-number].exe をダブルクリックする。インストールが始まる。
3. ライセンス同意可否のダイアログが出てくるので、チェックし、「Install」ボタンを押す。
4. 必要があれば、アカウント名とパスワードを入れる（通常この作業は必要無い）。

5. 「Installation Successfully Completed」のメッセージが出たら、「Close」を押して終了するか、「Launch」を押して SharpCap を起動させる。

以上で SharpCap のインストールは完了である。

3.3 使用機材

3.3.1 CMOS カメラ

入手しやすいのは Celestron, QHY, ZWO 社の製品であろう。各社多くの種類のカメラを販売しているが、高感度 (量子効率:QE が大きい)、高速 (高 fps)、低ノイズ (Read Noise が最小 $<2e$) のモノクロの CMOS チップ (現状 IMX290, IMX492 あたりが適) を使っているものを選ぶと良い (これらは惑星撮像用素子としても良く使用されている)。

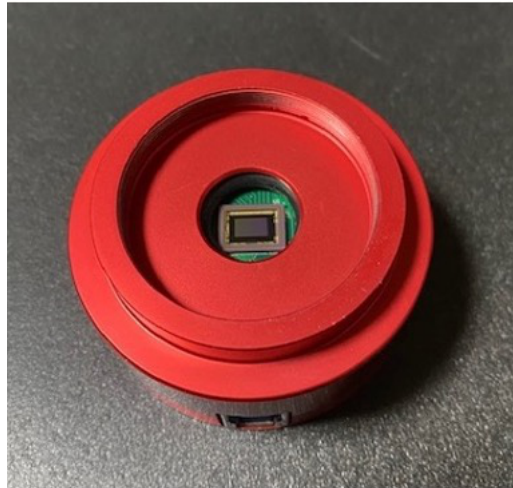
鏡筒との接続にはカメラ先端 1.25" (31.7mm) 径スリーブを使うことが多い。

カメラドライバーをインストールする際の注意点は、以下の通りである。

1. ドライバーを PC にインストールするまでカメラを PC に接続しないこと。
2. ドライバーは管理者権限でインストールするのが良い。
3. ドライバーは、カメラに付属の CD-ROM 等からではなく、各カメラメーカーのサイトから最新のものをダウンロードして使う。
4. カメラドライバーをインストールできたら、Windows を再起動させ、カメラを接続し、コントロールパネル → デバイスにカメラが記載されていることを確認する。

3.3.2 鏡筒

屈折、反射、シュミットカセグレンなどの天体望遠鏡、中望遠のカメラレンズなどが対象となる。口径が大きいほど暗い掩蔽現象まで観測可能になるが、掩蔽観測は掩蔽帯へ出かけていって観測することが多いので、持ち運びのしやすさも考えて鏡筒を選ぶ。できるだけ F 値 (= 対物レンズや主鏡の口径 (有効径) の焦点距離 ÷ 対物レンズや主鏡の口径 (有効径)) が小さく (明るく) できるものが良い。F 値が小さいと視野が広くなり、対象星の同定や比較星の選定がしやすくなる。また、星像が小さくなり、S/N が上がる (検出器の素子の各ピクセルで受け取られる星からの光が多くなる) ので、より暗い星の観測が可能となる。天体望遠鏡の場合、レデューサーや縮小光学系 (接眼レンズに単焦点のレンズをつけたカメラを接続) を使って、F6 以下 (できれば F4—2) にすると良い (図 29)。最近、F10 のシュミットカセグレン系では 0.63× と 0.33× のレデューサーを重ねて F2 クラスにしたり、0.63× レデューサーと 0.5× 接眼レンズ用のレデューサーを組み合わせで F3 にしたりする事例も出ている (図 30)。ただし、対象星と他の恒星が接近している場合や月明により写野が明るく対象星とのコントラストが小さい場合には、逆に F 値を大きくした方が良い場合もある。



(a) ZWO 社の ASI290MM カメラの IMX290 センサー



(b) 望遠鏡への取り付け方

図 28: 天体用 CMOS カメラ (ZWO 社 ASI290MM) (上図: 受光センサー, 下図: 鏡筒への取付例 (x0.33 レデューサーと PPS-LED 発光導入オフアキスガイド付))



図 29: 縮小光学系構成例

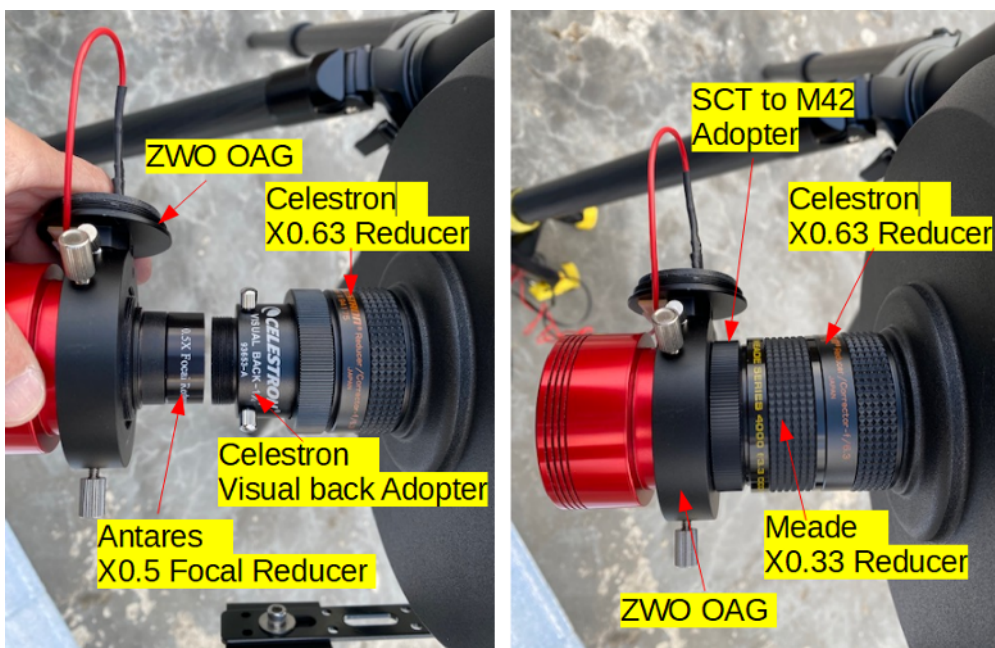


図 30: レデューサー組み合わせ例. 左: $\times 0.63 + \times 0.5$ レデューサーの組合せ. 右: $\times 0.63 + \times 0.33$ レデューサーの組合せ

3.3.3 架台

自動導入方式の赤道儀、経緯台どちらでも良い。小惑星による掩蔽観測の場合、対象星の等級が10等星より暗いことがほとんどなので、星表カタログ入りのPC、スマホ、タブレットなどで自動導入できるシステムがあると大変便利である。特に、移動観測の場合、不慣れな場所で確実に対象星を導入しなければならないので、自動導入システムは備えておいた方が良好だろう。自動導入の架台をPCで制御する場合は、前章の2.7節に書いた理由（キャプチャソフトにPCのCPUを占有させるため）により、別に、CMOSカメラの画像のキャプチャ専用のPCを準備した方がよい。

3.4 時刻合わせツール

前章の2.5.1節と2.5.2節でPCシステム時計の誤差とそれをNTPサーバを使って修正する方法について述べた。ここではさらに、USB端子付きのGPSモジュール(GT902PMGG, GT502MGG-N, VK-172等)を使って、遠征先でも正確な時刻をPCに設定できる方法について述べる。GPSモジュールなので、観測場所の位置(経緯度)の特定にも使える。

ソフトウェア「HACSTIP-GPS」はGPSモジュールによる時刻合わせができるソフトウェアである。図32に示した回路によりDSR信号線経由で1PPS信号をPCに伝達できるタイプの受信装置であれば0.2ミリ秒以内の誤差でPCの時刻をUTCと同期させることができる。また、USB端子に直付けする機種(VK-172等)では、数十ミリ秒の遅延があるものの、ほぼUTCに合わせることができる。

NICT(情報通信研究機構)のサイト(<https://www.nict.go.jp/JST/JST5.html>)やTime.is(<https://time.is/>)のサイトから確認ができる。

さらにPCの時刻を標準時に対し数ミリ秒内の誤差に収めたい場合には、以下の機器が使える。

Sheltak Instruments 社:「TimeBox」 <http://www.timeboxutc.com/>

Sidereal Technology 社:「SiTechTimeServer」

<https://www.siderealtechnology.com/store.html>

3.5 GPSのPPS信号でLED発光する装置

また、I-8で述べた1PPSに同期したLED光の撮影から掩蔽の精密な時刻を求めるためにGPSのPPS信号でLED発光する装置を用意する必要がある。図32は、PPS出力を持ったGPSモジュールに、可変抵抗(10—20kオーム)、スイッチ、LED、固定抵抗(330オーム程度)を接続して作成したものである。LED発光の明るさを調節でき、LED光8をON-OFFできるので、観測上非常に使いやすい。さらに、CMOSカメラの前に入れたオフアキシスガイダー(光路変更プリズムを逆向きにした)にLEDの先端をセットして、CMOSカメラのセンサーにLED光を直接導くことで、確実なPPS発光を撮影することができる。オフアキシスガイダーを使用しない場合は、LEDを鏡筒の先端に固定して、LED光を直接主鏡に導く方法もある。

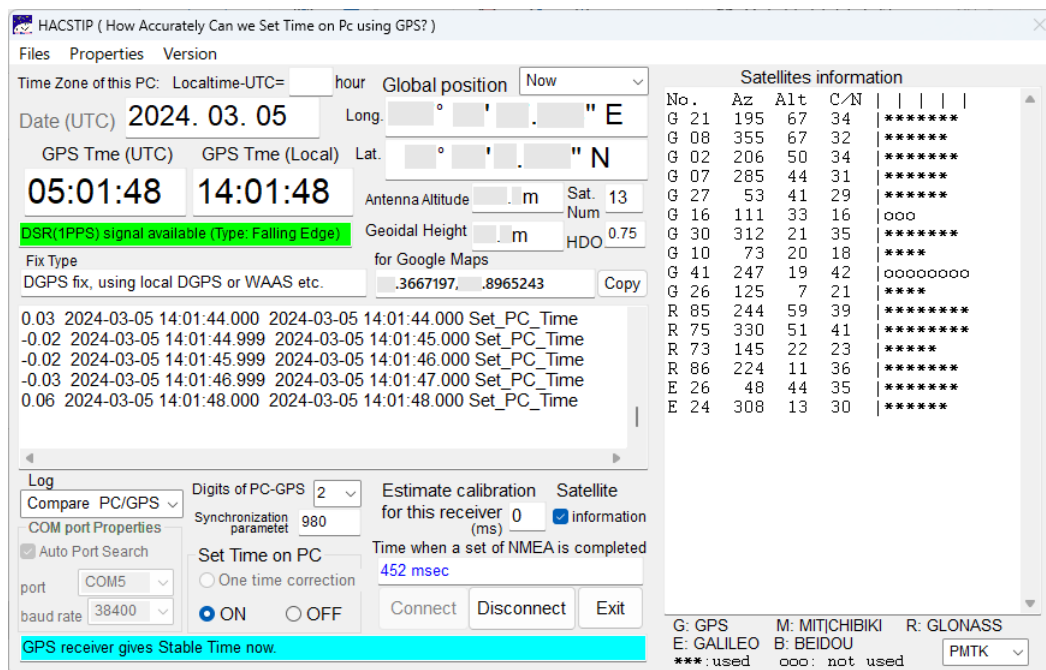


図 31: 掩蔽観測用時刻補正ソフトウェア HACSTIP-GPS

この装置の製作が難しい人は、PPS 発光機能を持った小型の GPS モジュール（図 33）を使う。このような小型 GPS モジュールでは、USB VK-172 GPS レシーバ（図 33）が最適である。これを使うときは、常時点灯している赤色の LED（パイロット）と 1 PPS 発光する緑色 LED がついている。赤色 LED は不要なので図 33 の左図のようにカバーを外して、カッターナイフの刃の先端などで赤色 LED を破壊する事前処理が必要である。

鏡筒先に設置するには、図 33 の右図のように小型のフレキシブルクリップなどを使って、GPS モジュールを設置して、安定した LED 光を受光できるようにする。GPS モジュールの位置を変えて LED 光の受光量を調節する。図 32 と図 33 の装置のいずれの場合も、観測前後のタイミングで、LED 光を望遠鏡の光路に数十秒間、適切な光量で安定導光するよう配置する仕組みが必要である。観測には PPS 発光の仕方が 0.1 秒だけ発光するモジュールを使う。中には 0.9 秒発光し、0.1 秒消えるモジュールがある。このような製品は時刻補正には使えないので、GPS モジュールを選ぶ際には注意が必要である。

4 観測方法

4.1 観測準備

Occult (<http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>) や, OccultWatcher (<http://www.occultwatcher.net/>) というアプリケーションで、掩蔽の日時、掩蔽帯の位置を把握し、観測場所を選定する。まず、掩蔽が起こる日時と対象星の位置座標から、空のどの方向（高度も）で掩蔽現象が起こるのかを確認する。ステラナビゲータや例えば <https://www.not.iac.es/observing/forms/visibility/> などでも掩蔽の対象星の高度や太陽離角、月との位置関係などが確認できる。観測場所は、GoogleEarth のストリート

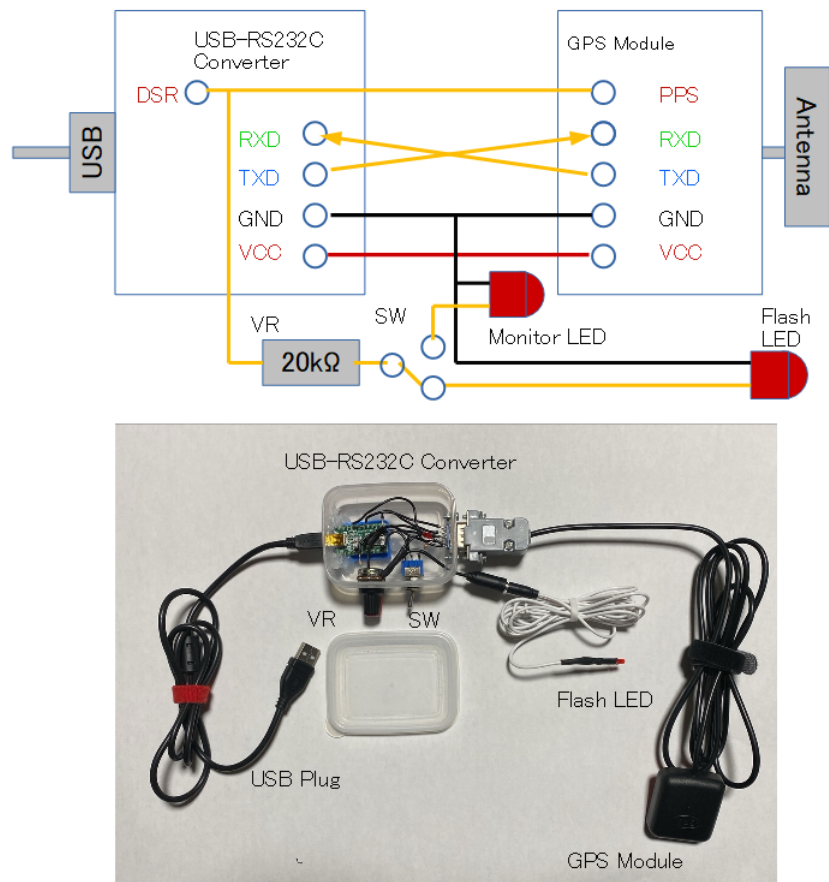


図 32: GPS-PPS-LED 発光装置例と自作のための回路図

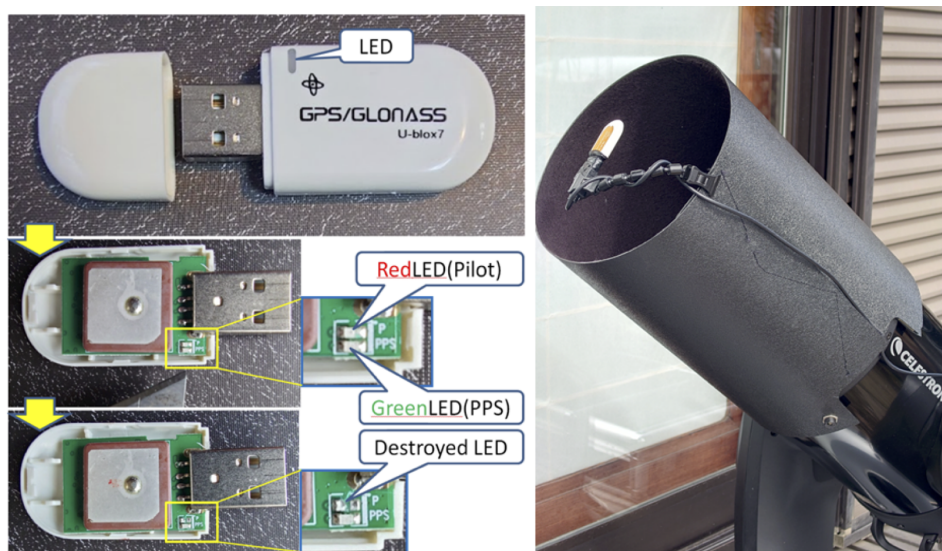


図 33: USB 接続の GPS 受信機 (VK-172) と事前処理 (左), 鏡筒先への設置 (右)

ビューなどなるべく民家から離れたところで周囲の迷惑にならない場所を選定する。駐車場や公共の敷地内を利用させてもらう時は、事前に使用許可が必要な場合もある。その観測場所から見てどちらの方角の空がひらけているかも調べ、観測する掩蔽の対象星が観測できることを確認する。移動観測の場合、電源の確保は重要である。特にPCの電源はバッテリーを内蔵しているノート型であっても、CMOSカメラやGPSモジュールとの接続で電力が多く消費されるので、移動に使う自動車の12V電源からインバータ等で100V電源を得るか、別に携帯用バッテリーなどを使用して、観測中に電源が落ちることがないように留意する。

4.1.1 掩蔽現象の予報取得

Occult4(<http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>)や、OccultWatcher(<http://www.occultwatcher.net/>)というアプリケーションで、小惑星による掩蔽の日時、対象星（赤経、赤緯）、小惑星（番号、名前）、光度（恒星の等級、小惑星との合成等級）、減光継続時間、減光等級、掩蔽帯の位置などの情報を得る。Occult4は各種の掩蔽現象の予報を独自に導出することができ、特に小惑星による掩蔽では、NASA-JPLのHorizonsシステムによる最新の軌道要素とGaiaカタログにより、精度の高い予報が得られる。掩蔽DataはXML形式で保存されていて、Occult4により現象の一覧表や掩蔽帯図を表示することができ、GoogleEarth上に掩蔽帯の表示をすることもできる。OccultWatcherは世界の小惑星掩蔽予測をフィルタリングして、観測地の近くを通過するイベントを表示することができる。さらに、観測者が掩蔽観測をする場所をあらかじめ宣言して地図上の掩蔽帯と観測ラインを表示することができる。また、他の研究者からの観測依頼もあり、TNOやトロヤ群小惑星の掩蔽観測を進めるパリ天文台の「ERC Lucky Star project」(<https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>)から予報も出されることがある。

4.1.2 観測場所の選定

観測場所の選定には、GoogleEarthに表示した掩蔽帯の中で観測目的に合った場所を選ぶ。チーム観測の場合には観測目的に合わせてあらかじめ観測ラインを設定して、その観測ラインに近くで観測可能な場所を選定する。ストリートビューなどを利用して周辺の様子も確認しながら選定する。選定する基準は観測場所から観測する掩蔽の対象星が観測でき、架台のアライメントをする星が見える視界があること。移動に車を使うことが多いので駐車と観測のスペースがあること（公共駐車場、空き地、港湾、農道などが良い）。なるべく民家から離れたところで周囲の迷惑にならない場所であること。車などが通らないこと（行き止まりの農道など）。空の明るさができるだけ暗いこと（近くの街灯より、街明かりを避ける）。近くにトイレがあると良い。駐車場や公共の敷地等を利用させてもらう時は、事前に使用許可が必要な場合もある。大切な観測の場合には、あらかじめ観測予定地の現地下見をして、上の選定基準に照らして検討しておくほうが良い。

公開天文台、公共施設、教育施設の大型望遠鏡を利用することも考えられる。大型望遠鏡では暗い対象星を観測できる、露出時間の縮小できる、FPSの大きくすることができることなどのメリットがある。しかし、公開天文台は一般の利用者のための眼視観察専用として使っていることも多く、接眼部にカメラ接続できるか？、短焦点化しての撮影が可能

か？、使用許可が得られるか？（施設職員の観測協力が必要なことが多い）等，いくつかのハードルもあるので，施設と前もって十分な打ち合わせを行うことが必要である．

4.1.3 掩蔽の対象星の確認

掩蔽が起こる日時と対象星の位置座標から，空のどの方向（高度も）で掩蔽現象が起こるのかを確認する．ステラナビゲータや例えば <https://www.not.iac.es/observing/forms/visibility/> などでも掩蔽の対象星の方位や高度，太陽離角，月明の有無などを確認する．あわせて撮影機材に合わせた写野を確認する．また，対象星を眼視で導入する場合には，徐々に表示領域が狭く，恒星の明るさを暗い星まで表示した観測用星図を準備しておく必要がある．重要な観測や薄明に近い時間帯の観測などは，あらかじめ対象星の導入練習や撮影テスト（4.4.1 節を参照）をしておくといい．

4.1.4 電源の確保

移動観測の場合，電源の確保は重要である．望遠鏡の架台用の電源はもちろんのこと，PC の電源はバッテリーを内蔵しているノート型であっても，CMOS カメラや GPS モジュールなどの接続で電力が多く消費されるので，移動に使う自動車の 12V 電源からインバータ等で 100V 電源を得るか，別に携帯用バッテリーなどを使用して，観測中に電源が落ちることがないように留意する．

4.2 現地にて

現地で架台を設置，鏡筒とカメラを搭載し，PC を起動させることになるが，PC の初期化のため，スリープや休止からの復帰ではなく，コールドスタートか再起動すると良い．また，余分な通信を止めるため，起動後は無線 LAN と Bluetooth をオフにする．（無線 LAN 経由で NTP サーバーによる時刻合わせをする場合は，先に時刻合わせを行ってからオフにする）．ここまでできたら，以下の手順に従う．

1. GPS モジュールを使った PC の時刻合わせを行う場合，予定時刻の 30 分前には GPS モジュールの電源を入れ，測位を始めると観測時には緯度・経度の座標，時間が安定する．
2. 観測に使用する望遠鏡セットの架台を設置する．赤道儀は極軸のセッティング，自動導入（赤道儀，経緯台）の場合は 3 点アライメントを確実に行う．
3. GPS により PC の内部時計を正確に合わせるアプリ（例：GPS 時計，BktTimeSync，NEMAMonitor for Windows）などで観測場所の位置座標の把握と，PC の時刻補正を行う．念のため，117 などの時報サービス（中国・台湾も 117，韓国は 02-116，シンガポール 1711，）で秒単位のズレが無いか確認すると良い．
4. 標高については後述の「V-1-2. 標高の測定」に従い取得する．

5. SharpCap を起動し、PC の中で SharpCap の使用優先度を上げるため、タスクマネージャーから SharpCap を右クリックで「詳細を表示」→ SharpCap.exe を右クリックし「優先度の設定」から「リアルタイム」を選択する。
6. SharpCap のメニューの「Cameras」から接続したカメラを選択する。すぐにプレビューモニターに撮影できる動画画像が表示される。この時 CaptureArea を最大にし、明るい適当な星を導入し、ピントを合わせを行う。
7. 対象星を導入する。架台が自動導入機の場合でもあらかじめ2点ないし3点アライメントを行う必要がある。CMOS カメラの受光素子が小さいもの（ASI290MM 等）では1回で確実に導入することは難しいので、明るい恒星から順次導入していくと、対象星を確実に視野内に導入することができる。10等星くらいまで捉えられる、電子ファインダーを使用すると、さらに順調に導入ができる。

4.3 撮影条件

ここでは SharpCap の設定について述べる。図 35 は SharpCap のキャプチャー画面である。右側のパネルがコントロール部でそれぞれのパネルで、以下の設定を行う。

< Capture Format and Area >

1. 「Color Space」では、モノクロ撮影するので、[MONO8](8bit) か [MONO16](16bit だが、実際は 12bit 程度) を選ぶ。MONO8 の方がデータ量が少なく記録できる。カラー CMOS カメラを使う場合でも MONO で記録した方がデータが小さくなり、PC の保存領域を圧迫せず良いだろう。
2. 「Capture Area」では、できるだけ画面を狭く、特に高さ方向を小さくした方が、高速なフレームレートで記録できる。ただし、対象星だけ記録していると雲による減光と区別が出来ないので、比較星として、近くの星がいくつか含まれるようなフレームサイズにすることが望ましい。
3. 「Binning」は [2] を推奨する。[1] よりも断然感度が上がり、より暗い対象星を短時間露出設定で撮影することができる。
4. 「Output Format」は、MONO8 で撮影した場合 [AVI files] が標準で、MONO16 で撮影した場合は、[SER files] や [FITS files] になる。解析に Limovie を使用する場合は、[AVI files] でないといけない。解析に PyMovie を使用する場合は、[AVI files], [SER files], [FITS files] いずれも対応可能である

注) 暗い星の場合、bit 数が多い程解析しやすいという考えから、海外では PyMovie を 16bit で SER または FITS を使う人が多いようである。こうすると撮影ファイルサイズが大きくなる。

< Camera Controls >

「Exposure」または「Quick picks」で露出時間を選ぶ。2.8 節で説明した GPS の PPS 発光

と Limovie (ver.0.9.99.5A(Aqua)5i5 以降) により時刻補正を行うには、適切な露出時間を露出時間決定参考用ソフトウェア CaSEDLEP (<http://astro-limovie.info/limovie/program/CaSEDLEP101.zip>) で導出するか、導出されたリスト (<http://astro-limovie.info/limovie/cmos/LEDRecTime3.pdf>) から選択して設定する。なお、この方法 (PPS 発光 0.1 秒) による時刻補正が可能な最大露出時間は 500 ミリ秒未満である。後述する「Gain」をノイズが酷くならない程度まで上げ、その分露出時間を短く設定すると、時間分解能の高い撮影ができる。ただし、実際の最高速フレームレートは、使用するカメラの仕様、PC の性能、フレームサイズ、Color Space が大きく影響するので、Previewing の状態で検証しておく必要がある。カメラ接続・表示後、SharpCap 撮影画面下部に Previewing 表示が出るので、ここで設定したフレームレートでドロップフレームが起こってないこと (0 dropped が維持されること) を確認する必要がある。

< Gain >

カメラの利得を調整するものであり、高いほど微光星が見えるようになる。特にスケールの 90 % と 100 % では大きく変化するのだが、その分ノイズも多くなるので、解析に支障が無い程度まで上げるようにする。例：ZWO ASI290MM では最大 Gain600 に対し 400 500 までに抑えた方が解析しやすい。

< Frame Rate Limit >

最大のフレームレートを制限するものである。[Maximum] で最大になる。[480fps] などと指定も可能であるが、筆者 (H.W.) の確認した結果では、実際にそのフレームレートで記録できる訳ではなさそうである。

< Flip >

画面を左右、上下など反転させる機能である。星図などと同じ絵柄になる様設定しておく、対象星の特定がしやすい。

< Turbo USB >

「AUTO」にするとフレームドロップしづらくなるとされるが、フレームレートが稼げなくなる可能性がある。

< High Speed Mode >

「On」にすると、状況によってはフレームレートが向上する場合があるとされている。またゲインが低く設定されているときにノイズが入る場合があるとのこと。筆者 (H.W.) の経験によれば、ZWO ASI290MM では「OFF」にした方がノイズが少ない。10ms 以下の様な高速撮影時でドロップフレームが発生する場合は「ON」にした方が良い場合がある。

< Hardware Binning >

カメラドライバーのビニングではなく、カメラ自体でビニングされるモードである。ゲインもノイズも増え、フレームレートも上がる (カメラの種類によっては選択表示されない場合がある)。

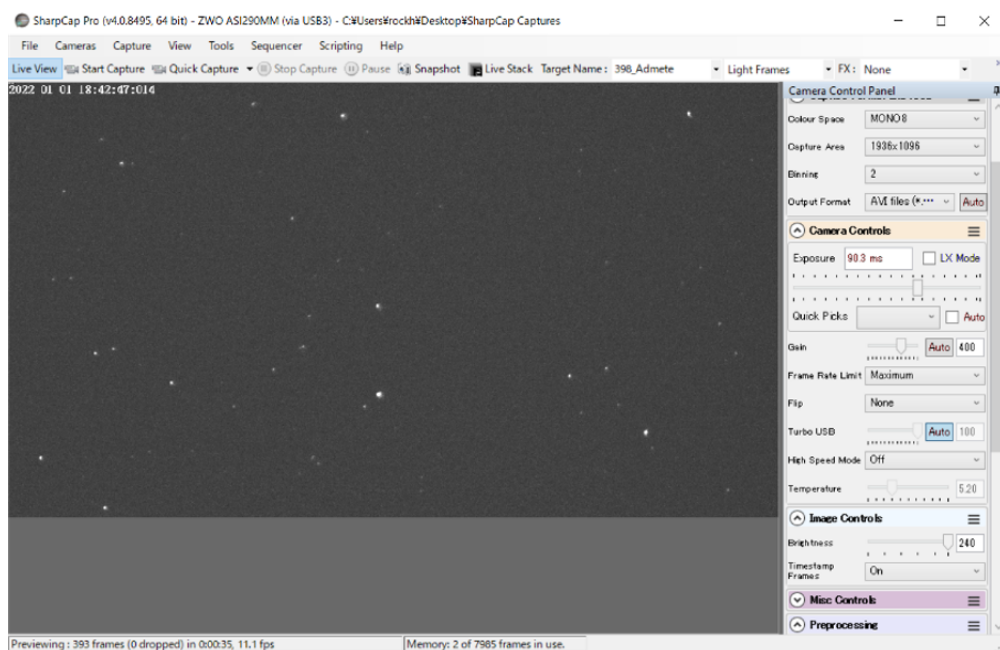


図 34: SharpCap のキャプチャー画面。右側がコントロール部，ここで本文に記したような設定を行う。）

< Image Controls >

「Timestamp Frames」を必ず [On] にすること。時刻を記録するためである。時刻は画面の左上に 1/1000 秒単位まで表示される。さらに各フレームの画面上隅の左側 8 ピクセルに 100 ナノ秒単位で時刻データが刻まれるので，後の読み取りでは，画面表示の時刻ではなく，この時刻データを解析ソフト (Limovie や PyMovie) が直接読み取る。

4.4 観測

4.4.1 試し撮り

予報時刻の少なくとも 10 分以上前までには，観測目的に合った露出時間，適度な Gain を設定して 10 秒程度試し撮りをする。Limovie などの解析ソフトで対象星を測光して，カウント値が数百～数千に収まっているか（特に CMOS 素子の受光量が飽和していないか）を確認する。露出時間の制約の範囲で，できるだけ長く露光して光量を確保することで，S/N が上がり，解析時の時刻誤差を小さくすることができる。PPS 発光の明るさの調節については，SharpCap のプレビューモニターで最も明るく映っているとき，画面が真っ白にならず，中間程度の明るさになるように LED 光の減光調整（可変抵抗器による LED 減光や減光フィルム等で）をする必要がある。画面が白飛び（明るくなりすぎて，諧調が無くなりデータが最大値（真っ白）になってしまう状態）しないように，そして，最も明るく映っている frame の測光時に飽和していない程度に LED 光の減光調整（可変抵抗器による LED 減光や，減光フィルム等）をする必要がある。前述した CaSEDLEP のソフトを用いると，SharpCap のモニター上での LED 光の明るさと比較して，適度な明るさを示し

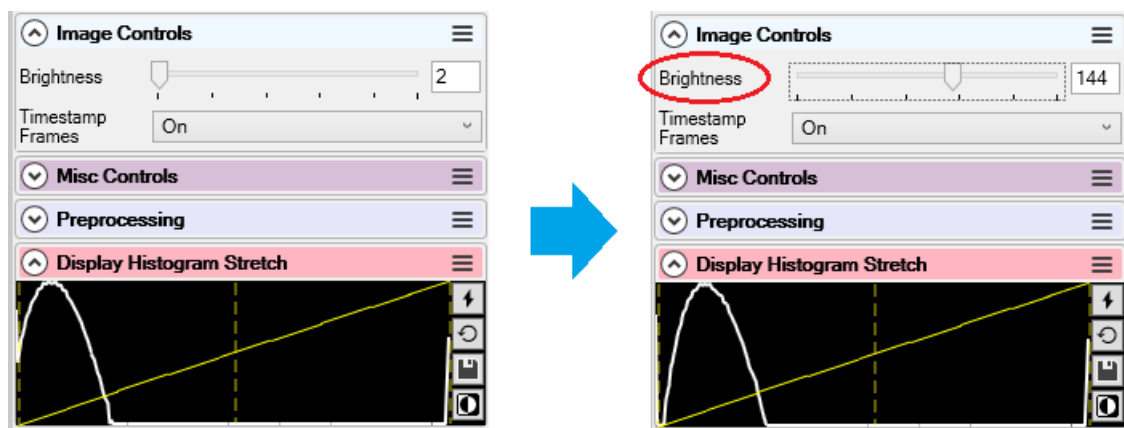


図 35: ヒストグラムに表示された山形の曲線の左の裾が左端の縦軸に接してしまうときは、輝度の値を上げて縦軸から離すようにする。

てくれる index が備えられている。図 36 のように SharpCap で対象星の撮影条件にあわせた露出時間と Gain の状態でモニターし、PPS-LED 光を重ねて表示する。次に、あらかじめ立ち上げていた CaSEDLEP の Brightness index を SharpCap のモニター上に表示して、Compare LED's light with this area の領域とプレビューの LED 光が最も明るく光るときを比べる。LED 光の明るさがピクセル輝度 230 推奨値の明るさとほぼ同じになるように、LED の可変抵抗で調節する。露出時間が非常に小さく、LED 光の明るさが十分得られないときは、対象星の撮影時の前後に、露出時間は変えずに Gain を大幅に上げて LED 光のみを撮影しておく。

4.4.2 本番の撮影

予報時刻が近づいてきたら、対象星を撮影する 30 秒以上前から、対象星と同時に GPS の PPS 発光装置の LED 光を撮影する。鏡筒の先端に設置した。GPS の PPS 発光を約 30 秒以上撮影する。その後、予報精度にもよるが、予報時刻の前後 30 秒—1 分間、LED 光が写野に入らないように対象星を撮影する。対象星の観測撮影中は露光時間・Gain を変えてはいけませんが、PPS 発光撮影調整中の Gain 変更は可能である。減光を観測したら、再び GPS の PPS 装置の LED 光を約 30 秒以上記録して撮影を終える。これらを 1 連（1 つの avi ファイルとして）の撮影で行うと解析作業がしやすい。やむをえず一連の撮影ができない場合は、数分違いならば別のファイルとして撮っても良いが、露出時間は変えてはいけない。

参考文献

- 高感度天体用 CMOS カメラを用いた掩蔽観測の方法：星食観測ハンドブック 2020 第 1.00 版星食観測日本地域コーディネーター (JCLO) 編 <http://astro-limovie.info/jclo/documents/Handbook/>

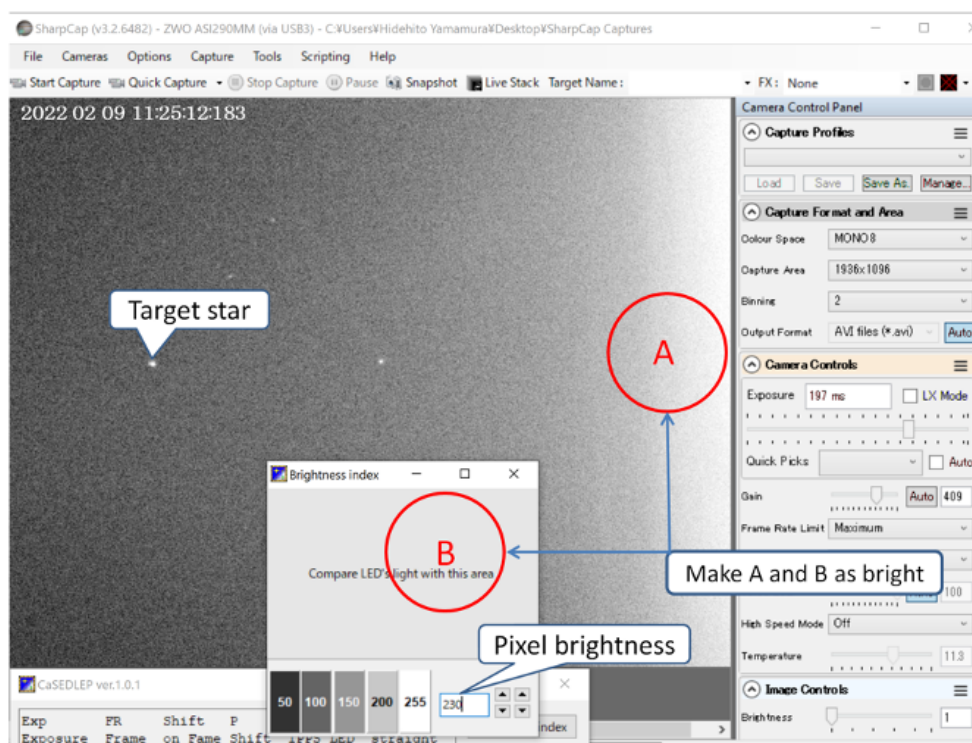


図 36: PPS-LED 光の明るさの調整

- 天体用 CMOS カメラの露光・データ記録シーケンスの推定 (Rev. 1.02) 宮下和久
<https://astro-limovie.info/limovie/cmos/SequenceR102.pdf>

5 データ解析

5.1 測光の基本

ビデオは、多数のフレーム画像を連続的に表示することにより動画として見せている。ビデオの測光は、基本的には各フレームをスチル画像として測光を行えばよいわけだが、いくつかの点でスチル画像の測光にない配慮や工夫が必要となる。以下にその共通点と相違点について述べる。測光のためのソフトウェアはいくつかあるが、以下では Limovie を例に説明する。

5.1.1 測光領域と測光方法

始めに測光領域について説明する。基本的にスチル画像の測光と同じである。

PSF 測光では、星像の FWHM を求めることができ、Limovie ではその値が画面下部左付近に表示される。その下にある Fix にチェックが入っている時に、形の乱れの少ない星像を選んでクリックするとその FWHM 値を記憶し、以降の測光にその値を適用する。これにより、大気が比較的落ち着いていて、星像の変形の少ないときは PSF 測光を用いて時間経過によるノイズを低減させることができる。特に、減光中の光量が低い状態の時、

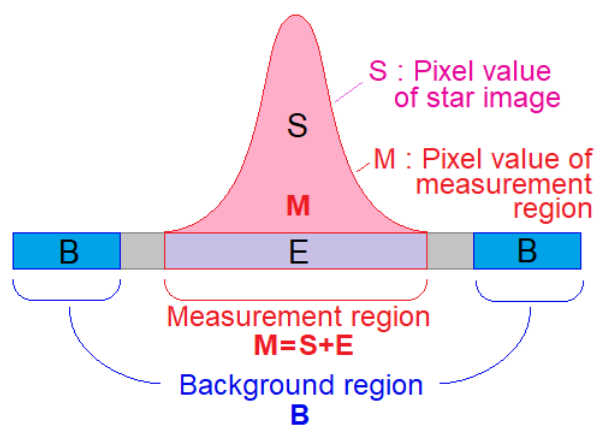
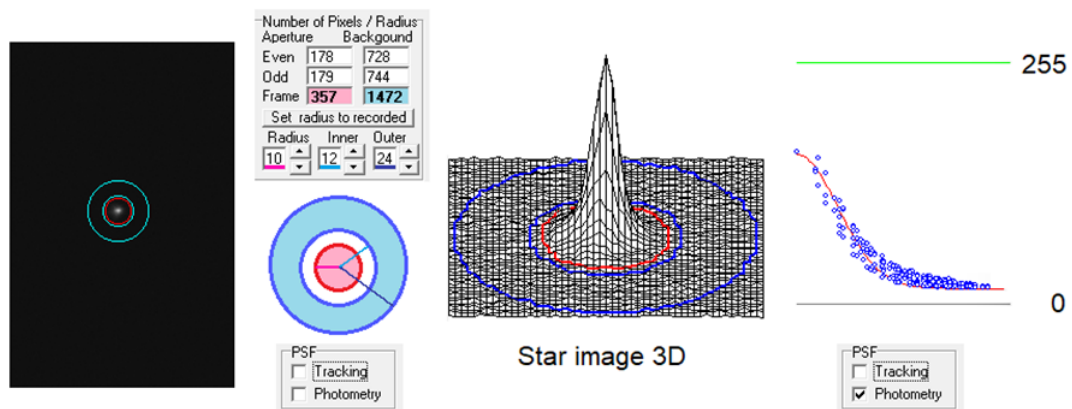


図 37: Limovie の測光領域

測光領域に含まれるピクセル数を

Nm : Pixel number of measurement region

Nb: Pixel number of background region

とすると、星像の明るさを示す合計ピクセル値 S は、

$$S = M - \frac{N_m}{N_b} B$$

として求めることができる。

このとき、Measurement region のピクセル値を単純合計したものが Aperture 測光、理論的な式とフィットさせてピクセル値を計算するのが PSF 測光である。

画像に載っている読み出しノイズなどのノイズ（バックグラウンドのざらつきとして見えているノイズ）の影響を低減することができ、重星の位コンポーネントの検出等に有効である。一方、Fix のチェックを外すと、それぞれのフレーム画像に対して星像と回転曲線のフィットが行われるようになる。この場合には、アパチャー測光とほぼ同様の結果となることから、利用する場面は少ない。アパチャー測光は、天体の高度が低い天体の高度が低い場合やジェット気流が強い場合など、星像が大きく変形している時に有効である。そのようなときは星像が回転楕円体から大きく外れた形となっており、PSF 測光では正しくフィットできなくなるためである。以上のように、観測時の主として大気の状態により、それぞれの測光法を使い分けることが、より確実な解析をするために重要である。

5.1.2 星像の追尾（トラッキング）

ビデオ測光のスチル画像測光にはない特徴として、トラッキング機能がある。一つのフレームで星像の位置を決定しても、観測時に鏡筒の振動や極軸のずれなどにより画像内を星像が移動してしまうと、星像が測光領域から外れてしまう。かつての光電測光では固定された大き目のアパチャー（孔）を用意して、星像がその中に入るようにして測光を行っていた。しかし、大き目のアパチャーには星像でない部分も大きく、そこにあるノイズを拾うことになる。そこで Limovie をはじめとするビデオ測光ソフトウェアでは、それぞれのフレームに対して、測光領域の位置を星像に合わせる機能を持っており、トラッキング機能と呼ばれている。トラッキングには、星像の移動への対処法としての Anchor モードと Drift モードがあり、また、星像を追尾するときの位置決めを、上記の PSF で行うか、またはアパチャー測光で行うか、についても選択することになる。

5.1.3 Anchor モードと Drift モード

このうち、Anchor モードは、主として鏡筒の振動による星像の動きを追尾するとき用いられる。この振動の大きさは、撮影の状況により異なる。焦点距離が長くなるほど、また、センサーの撮像素子のサイズが小さくなるほど、わずかな振動でも移動量が大きくなる。そのため、追尾の範囲を異なる値に設定できるようになっている。星像のクリックにより設定した定点から、Tracking の radius のまで離れたところまで移動することができる、という仕組みである。船が投錨した地点から錨の延びる範囲を半径とした円内のみを移動できる、ということに例えた命名である。星像位置の振動が大きければ、radius の値を大きく設定すればよい。ただし、radius で定められた移動範囲の中に、星像よりも明るい星があったり、月の輝面の端付近の山が点状に輝いていたりすると、測光領域がそちらに重なってしまうことがあるので、そうならないように適切な値に設定しなければならない。

一方、赤道儀の極軸がずれていた場合などには、星像が画面内をほぼ一定の速度で一定の方向に移動していく。実際にはそこに鏡筒の振動とうによる揺れが加わる。そのような場合に対応するのが Drift モードである。Drift モードは定点を定めずに、フレームごとに星像の中心であると考えられる位置に測光領域を置く。これにより、観測期間内に星像が大きく画面増を移動したとしても、それを追尾していくことができる。このとき、星像の移動量（移動速度）に応じて適切な radius 値を設定する必要がある。ただし、Drift モー

ドは、radius 内に他の星像やノイズ・月縁等の輝点があると、そちらに測光領域を移してしまう場合があることに注意しなければならない。

5.1.4 PSF 追尾と Aperture 追尾

追尾のために星像の位置を決定するためには、明るさを測定するのと同様の測光を行い、その値が最も大きくなる場所を見つければよい。用いる方法としては Aperture 測光と PSF 測光がある。これを切り替えるには、画面下部中央付近の PSF の枠内の Tracking のチェックの有無により行う。チェックを入れたときは PSF 測光が用いられ、チェックを外すと Aperture 測光が用いられる。

Aperture 測光を追尾に用いる場合 (PSF の Tracking のチェックを外す) は、星像を構成するピクセルのうちの、ピークからどの程度までを追尾に用いるかを指定することができる。これは Tracking 枠内の Threshold の値を設定することにより行う。100 は、星像の頂点のみを対象として追尾し、0 では星像全体を対象として追尾する。Aperture 測光では 95 に設定して星像の明るい部分に測光領域の中心を合わせることで、S/N の高い良好な測光結果が得られることが、経験的に明らかになっている。これは、大気の乱れによる星像が変形は、主としてピーク位置の移動という形で現れるため、そこを中心としてアパチャーを設定した方が、測光値の影響の大きい「星像内の明るい部分」を確実にアパチャー内に収めることができるためだと考えられる。同様の理由で、ある程度大気の揺らぎが大きな場合の PSF 測光であっても、追尾を Aperture モード (PSF の Tracking のみチェックを外す) にすることにより、測光環境を改善できる場合がある。

一方、PSF 測光を追尾に用いる場合 (PSF の Tracking のチェックを入れる) は、星像と理論曲線の一致したところに測光領域を合わせる。こちらは、比較的大気が落ち着いている場合に効果的に用いることができる。また、付近の月縁の輝部や突然発生したノイズの基点があっても、測光領域がそちらに移動することはない。そのため、月による星食には必須の追尾手段となる。なお、Threshold の値はアパチャー測光のようには敏感ではなく、デフォルトの 50 の設定のままで充分有効にはたらく。

5.2 Limovie による現象時刻の測定から観測報告まで

CMOS カメラを用い、GPS の 1PPS-LED 信号と共に録画された小惑星による掩蔽現象のビデオファイルについて、Limovie を用いて解析し、IOTA/EA などに報告するまでの一連の操作をここでは解説する (月による星食の場合については、星食観測ハンドブックを参照のこと)。

5.2.1 準備

観測時にキャプチャしたフォルダには、avi ファイルのほかに、xx_xx_xxZ_CameraSetting.txt のようなファイル名のカメラ設定ファイルができています。この二つのファイルを、作業用のフォルダに入れる (キャプチャしたフォルダの中に入れても OK)。また、同じフォルダに OCCULT4 で作成した予報 xml ファイル (OccElmnt*****.xml) も入れておく。



図 38: アパーチャー測光と PSF 測光

アパーチャー測光は、測光領域内のピクセル値を合計して光量値を求める。PSF 測光は、ピクセル値のつくるピークを回転ガウスカーブで近似させ、その積分値として光量値を求める。
大気のゆらぎの影響で星像が変形（ピクセル値の分布が理想的な状態から外れる）が大きいときは、アパーチャー測光が向いている。一方、PSF 測光は時間経過によるノイズを低減することができる。

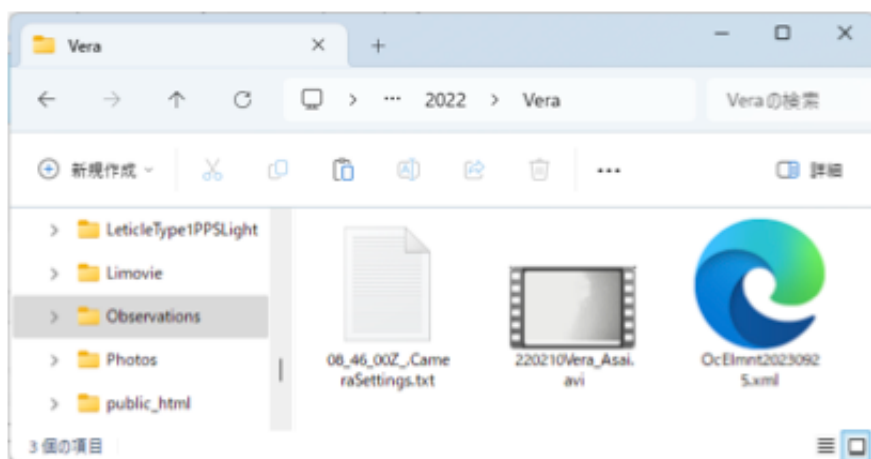


図 39: 観測ファイルの置き場所

5.2.2 大まかな流れ

Limovie の起動画面の左下部に、「Timing process indicator」と記された部分がある。これが大まかな処理（操作）の流れを示す。ひとつのステップ（段階）が終了すると、左から順に枠内が水色になり、どこまで処理がなされたかを示す。このうち 2 と 3 は順序が逆でもかまわないが、操作に慣れるまではこの順番で作業するのが良い。

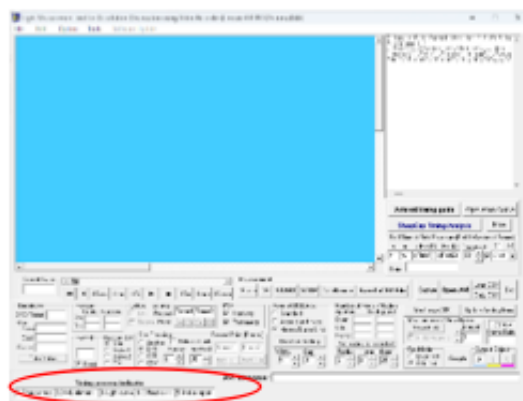


図 40: Limovie の起動画面

Timing process indicator

1. Time correct	2. XML element	3. Light curve	4. Diffraction fit	5. Make report
-----------------	----------------	----------------	--------------------	----------------

0. まず最初に、Open AVI ボタンをクリックして、AVI ビデオファイルを読み込みます。
※ Open AVI をした時点で、もしそれ以前に何らかの解析が行われていたとしたら、以降に述べる小惑星のデータや解析結果の値などはすべて消去されます。このことは逆に、AVI ファイルを読み込まない限り（測光データは消去しない限り）または Limovie を終了しない限り保持されます。

1. Time correct: LED による時刻補正を行います。
※ SharpCap Timing Analysis ボタンをクリックして行う一連の操作です。

2. XML element: 準備の時点でフォルダに保存しておいた Occelmntxxx.xml ファイルから現象の諸情報を読み込んだり、観測者や観測地の情報を入力したりします。

3. Light curve: 測光を行います。Limovie の主要な機能です。グラフ表示ができて完了です。

4. Diffraction fit: 2.で読み込んだ情報から回折シミュレーションを計算し、それとの比較で現象時刻を求めます。

5. Make report: 報告書（テキストデータ）を作成します。

図 41: 図 40 の赤で囲った部分を拡大した図とその説明

5.2.3 操作手順詳解

図の中の以下の記号は、おおまかに次のような事柄を表す。

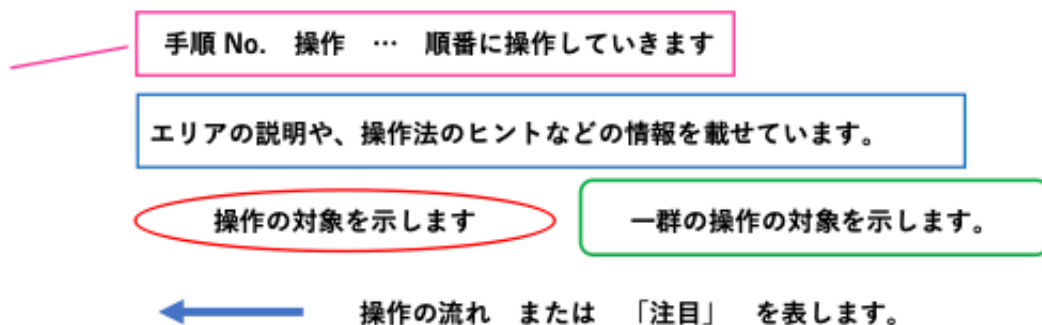


図 42: 図中の記号の説明

0. Limovie の起動画面 → Open AVI → ファイル選択

Limovie の起動画面から、図 43 の右下付近にある「Open AVI」をクリックし、AVI ファイルを読み込むと、画面左上に観測で取得した画像（AVI ファイル）が表示される。

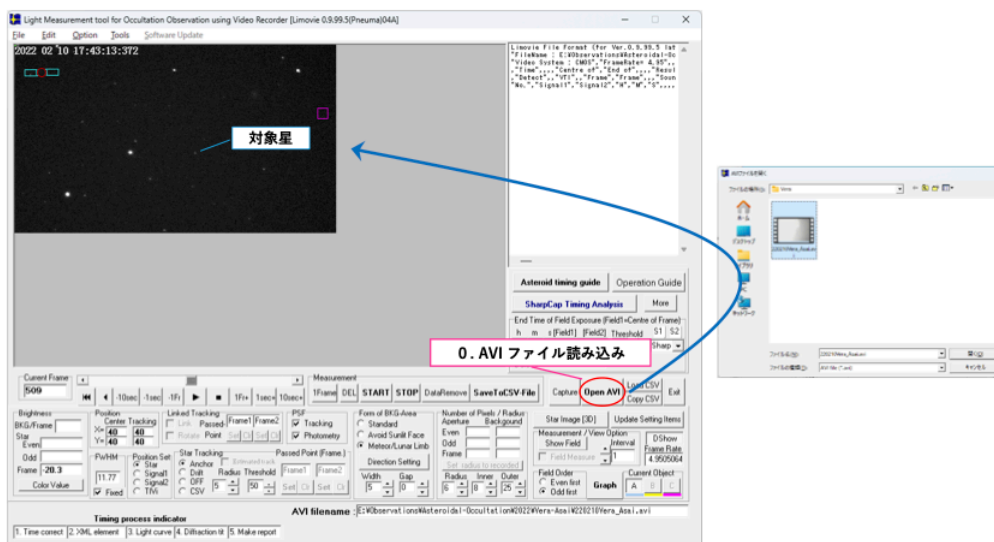


図 43: AVI ファイルを読み込む

1. Time correct

1-1. 現象直前（または直後）付近のフレームで星像をクリック

追尾モードは Anchor のままにし、スライドバーで現象直前（または直後）付近のフレームに移動し、星像をクリックと LED 光の測光領域が自動表示される。図 45 の右パネルに示すような操作をして、綺麗にフィットする星像のフレームを探す。

1-2. LED 光の測光

画面左上 (図 46) に表示されるタイムスタンプは、キャプチャソフトがカメラから画像を受け取って処理した瞬間の時刻であり、撮影時刻より少しだけ遅れている。それを補正するために現象を記録したビデオの最初と最後の 30 秒 ~ 1 分ほど、1PPS で点滅する LED の光を記録する。その明るさの変化を測定して、各フレームの精密な露出時刻を調べる。

1-3. SharpCap Timing Analysis (LED 光による時刻補正機能)

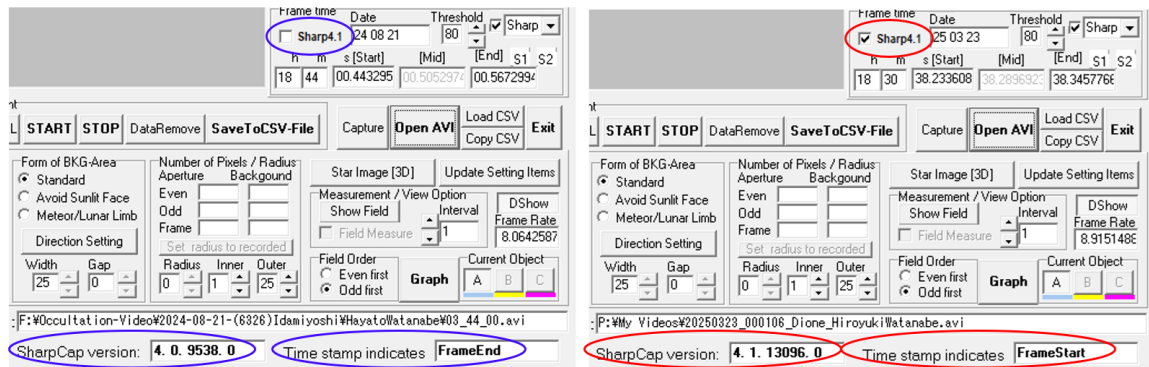


図 44: SharpCap はバージョンにより、タイムスタンプの示すフレーム露光位置が異なる。
 (左) Ver. 4.1.11756 以前はフレーム露光終了時刻
 (右) Ver. 4.1.11767 以降はフレーム露光開始時刻
 Limovie 1.0.1.8 以降では avi ファイル読み込み時に自動的にカメラ設定ファイルから SharpCap のバージョンを読み込み、正しい時刻が得られるようになっている。

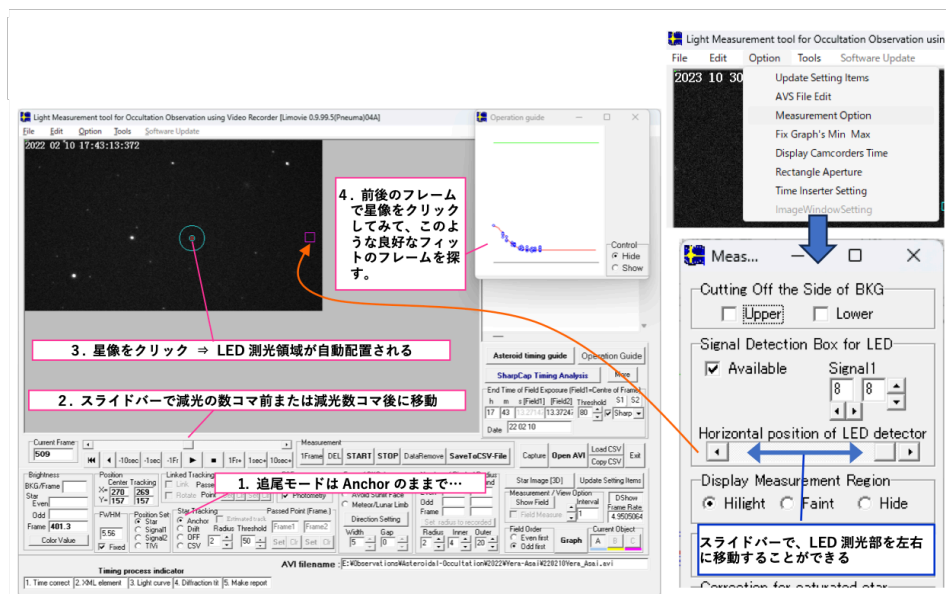


図 45: LED 光の測光の準備



図 46: LED 光の測光

図 47 で横に並ぶ青色の点は、各フレームに記録されたタイムスタンプが、一定の割合で進んでいるかどうかを示す。ここで、タイムスタンプをそのまま使うと、数ミリ秒の誤差が生まれてしまうことを確認した上で次の作業に移る。

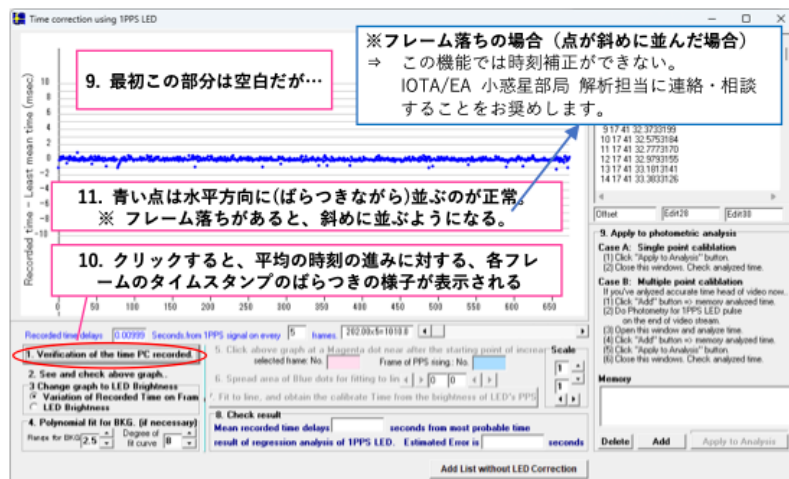


図 47: LED 光の測光後の画面

図 48 は、LED の明るさの変化を示したグラフである。マゼンタの点が斜めに並ぶのは、1 秒間に撮影するフレーム数が整数ではないときに、写り込む LED 光が一定ではなくなるためである。このことを利用して、その位相の差により正秒の位置を求め、それにより時刻補正を行う。



図 48: LED 光の明るさの変化

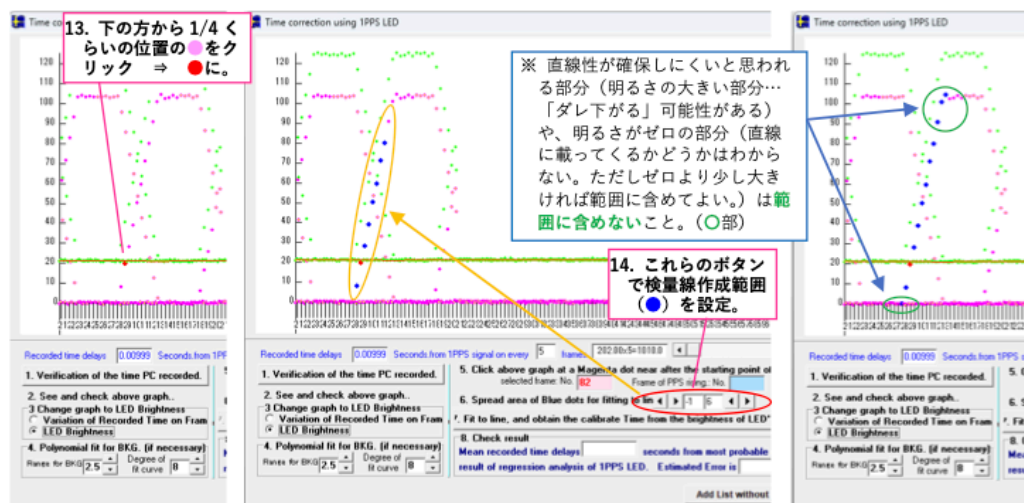


図 49: LED 光の明るさの変化測定 of 操作 1

斜めに並んだ一組の点に対して検量線を作り、それが x 軸と交わるところが正秒になることから、第○フレームの露光終了から○.○○○ミリ秒前が正秒，というデータを得る。それを Add ボタンでリストに登録する。

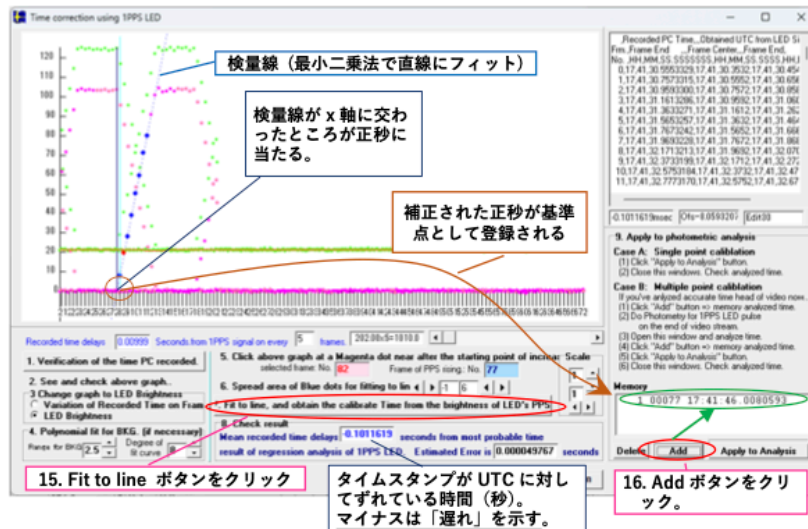


図 50: LED 光の明るさの変化測定の実操作 2

現象前後に 1~2 組のリストを登録する（多くとも前後 4 組で OK。また，HACSTIP Ver.2 シリーズと 1PPS 信号を RS232C の DSR 信号線経由で PC に伝える GPS 受信装置を組み合わせで使った場合には，前後どちらか 1~4 組で OK。「Apply to Analysis」ボタンのクリックで，解析に反映され，メインウィンドウの時時刻部が水色になる。

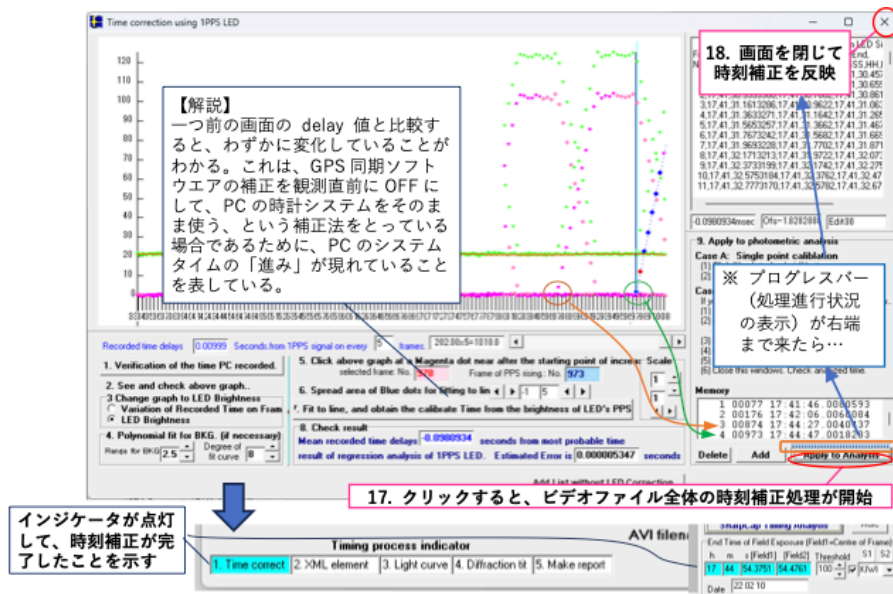


図 51: LED 光の明るさの変化測定の実操作 3

2. XML element

2-1. 小惑星の情報入力画面を開く

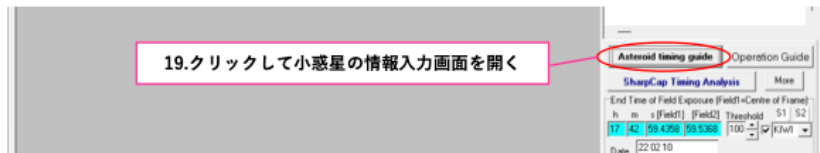


図 52: 小惑星の情報入力画面

2-2. 現象（小惑星や恒星など）の情報の読み込み

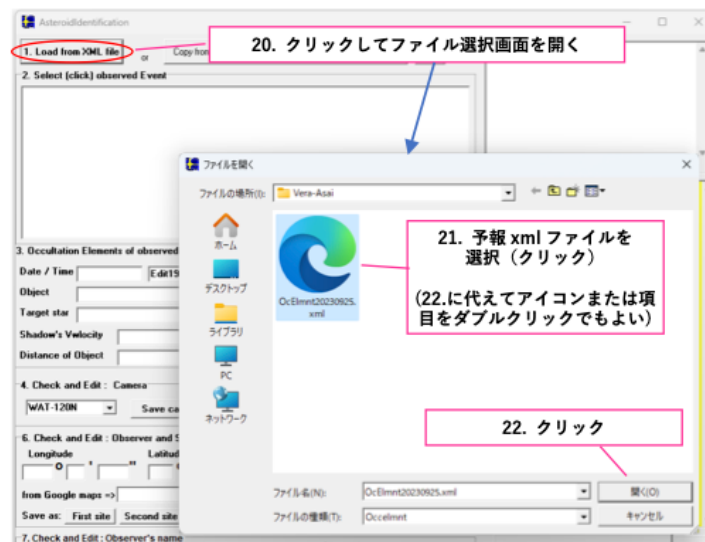


図 53: 小惑星や恒星などの情報の読み込む

2-3. 観測者、観測地、カメラ機種等の入力

ここで入力された諸情報は、回折シミュレーションの計算のパラメーターとして使われたり、報告書の記載として使用される。xml ファイルから読み込まれる内容は変更しなくてよい。経緯度や氏名などは誤りなく確実に入力すること（現バージョンでは、報告書作成のステップに進んでしまうと、そこでは変更はできない）。氏名や第一観測地を保存しておくと、次の立ち上げからは自動的に読み込まれる。ここで忘れがちなのはカメラの情報である。CMOS カメラの場合には ASI290MM を選ぶ。「Save camera to ini file」で設定を保存でき、次の立ち上げからは自動的に読み込まれる。

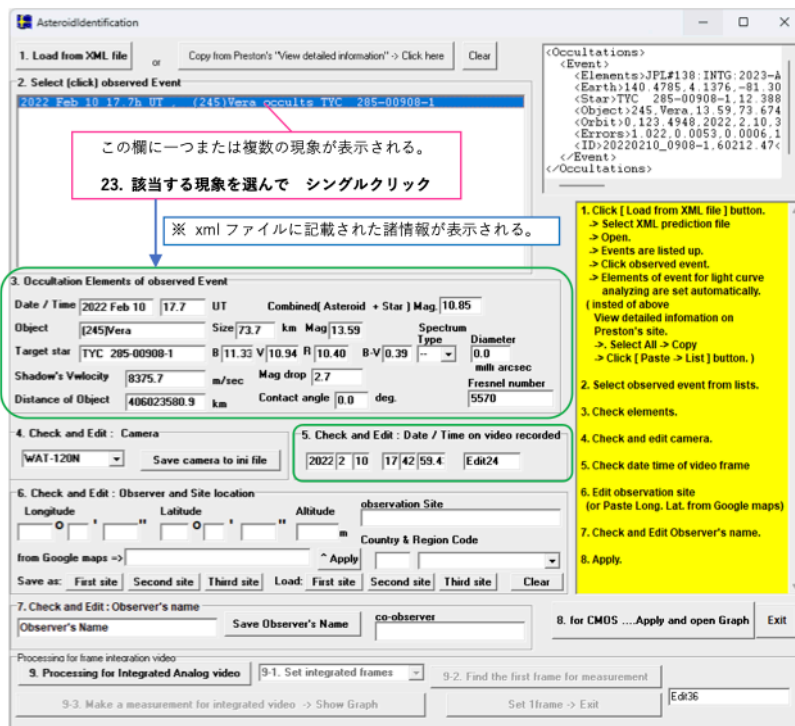


図 54: xml ファイルに記載された情報の読み込み

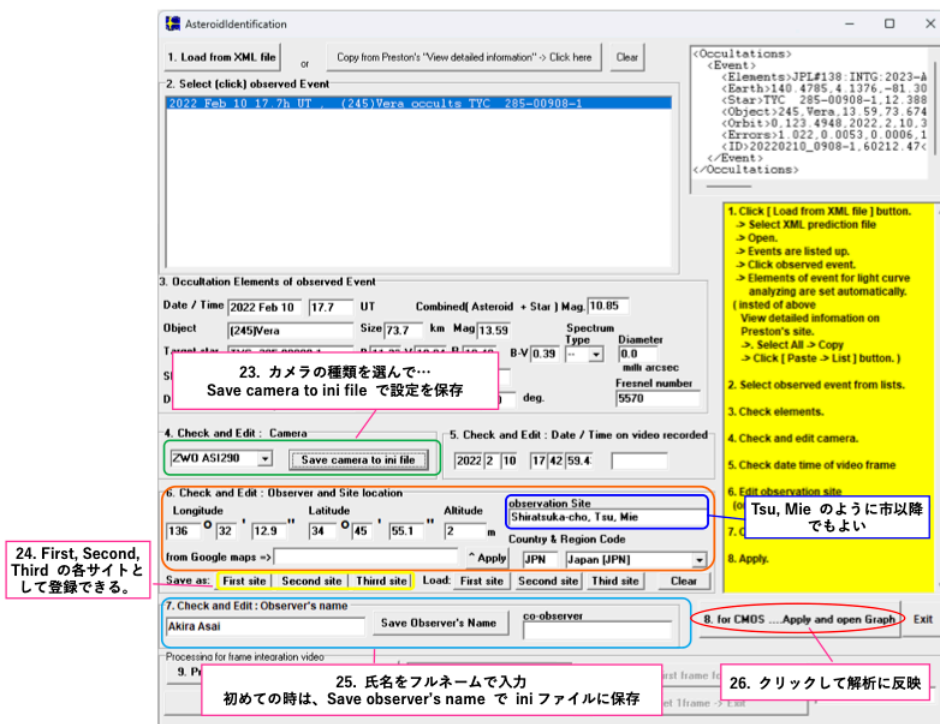


図 55: 設置の保存

3. Lightcurve

3-1. 測光

測光方式として、Aperture 測光、PSF 測光のどちらかを使うことができる。

- Aperture 測光: 測光領域中央の円形の中のピクセル値から周囲（バックグラウンド）のピクセル値の平均を面積換算して引き算して求める。星が掩蔽される前の明るいときに向いている測光法で、大気の揺らぎの大きいときにはこちらを利用する。
- PSF 測光: 回転ガウス曲線のモデルを実際の星像にフィットさせて星の明るさを求める方法。大気の揺らぎの小さい場合や、バックグラウンドノイズが大きいときにばらつきが少なくする場合に効果的に用いることができる。

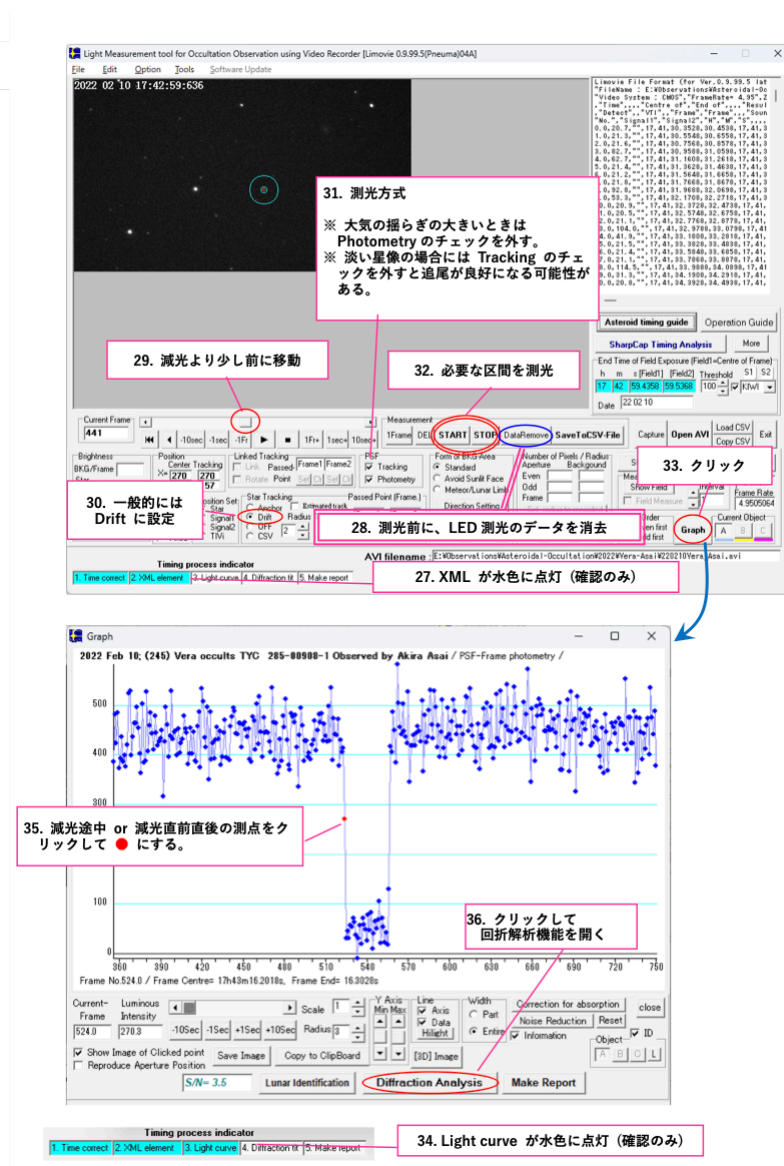


図 56: 掩蔽イベントの測光方法

4. Diffraction fit

4-1. フィッティングの準備（設定）（潜入時）

Limovieは、測光から得られたライトカーブを、回折シミュレーション（回折による光量変化曲線をフレームごとに積分してフレーム値としたもの）と比較して、最もよく合う位置を選んで現象時刻として求めている。視覚的には、グラフ上で測定された点と赤色の曲線が一致する、ということの意味している。二つを比較するには、赤色曲線の水平部の減光前と減光中の高さが、測光結果と合っている必要がある。その高さ得ているのが、減光前後の●○（緑色）で選択された部分である。そのようにして作成されたシミュレーションを測光結果と比較するが、時刻を求める、すなわち横方向の位置を合わせるのであるから、水平部がいくらかたくさんあっても時刻方向（横方向）での一致を求めることはできない。そこで、減光という変化を挟んで20～30点ほどの間で比較すればよいことになる。その比較をおこなう範囲を中抜き○で指定する。以上をまとめると、緑色は縦方向の「高さ」を、中抜き○は横方向の「比較範囲」を表している。

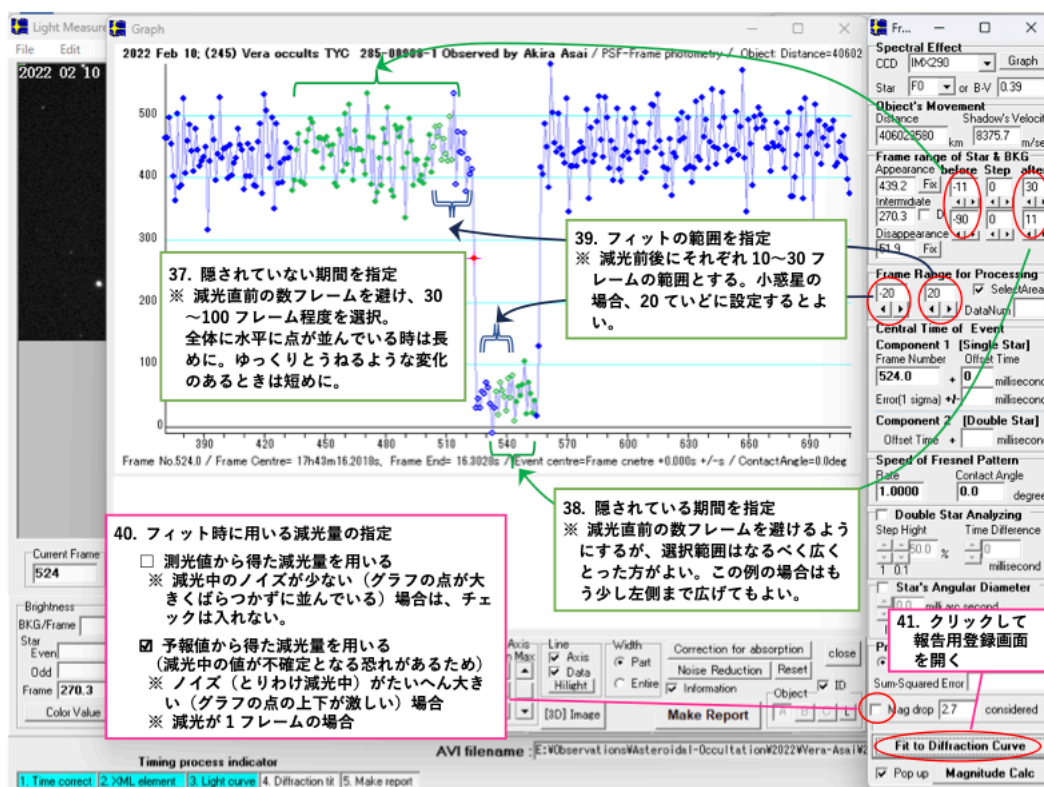


図 57: フィッティングの準備（設定）

4-2. フィッティングと報告用現象時刻データの「登録」(潜入時)

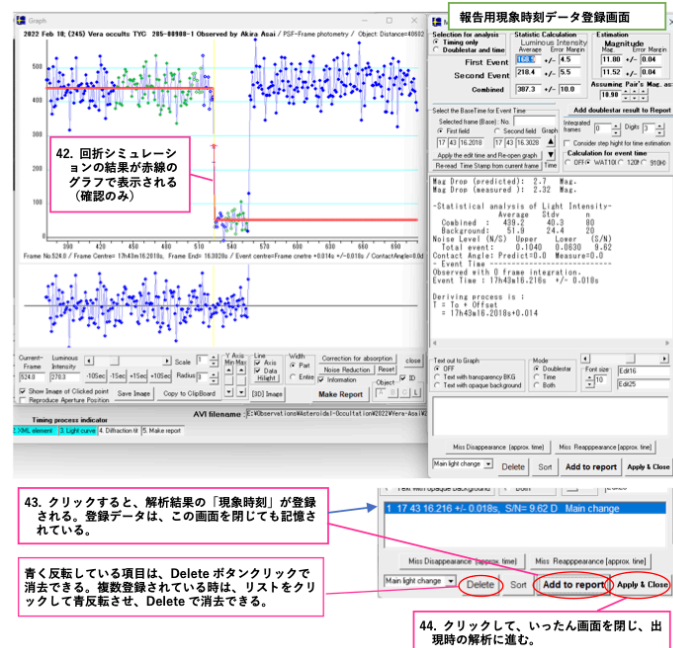


図 58: フィッティングと報告用現象時刻データの「登録」

4-3. フィッティングの準備(設定)(出現時)

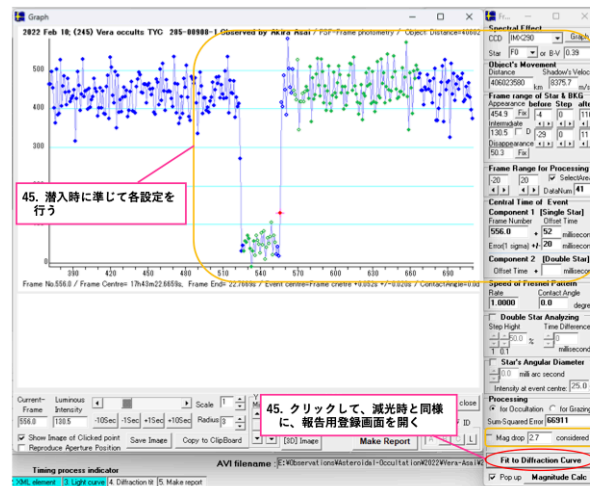


図 59: フィッティングの準備(設定)

4-4. フィッティングと報告用現象時刻データの「登録」(出現時)

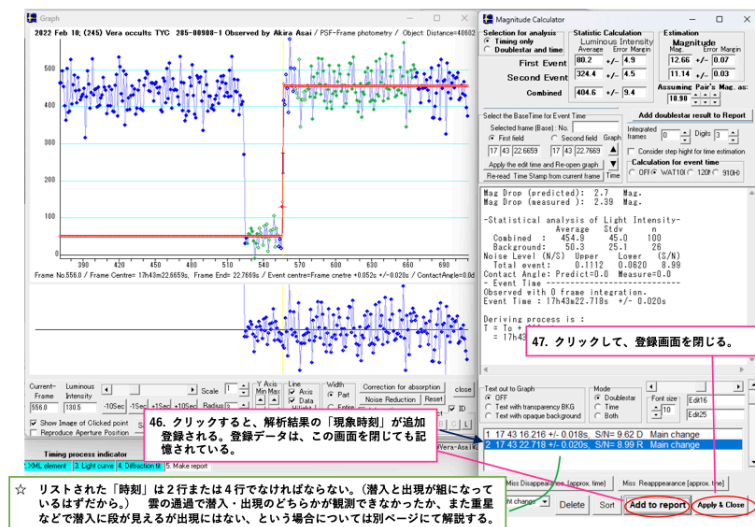


図 60: フィッティングと報告用現象時刻データの「登録」

4-5. テキストライトカーブデータのためのグラフの準備 (表示)

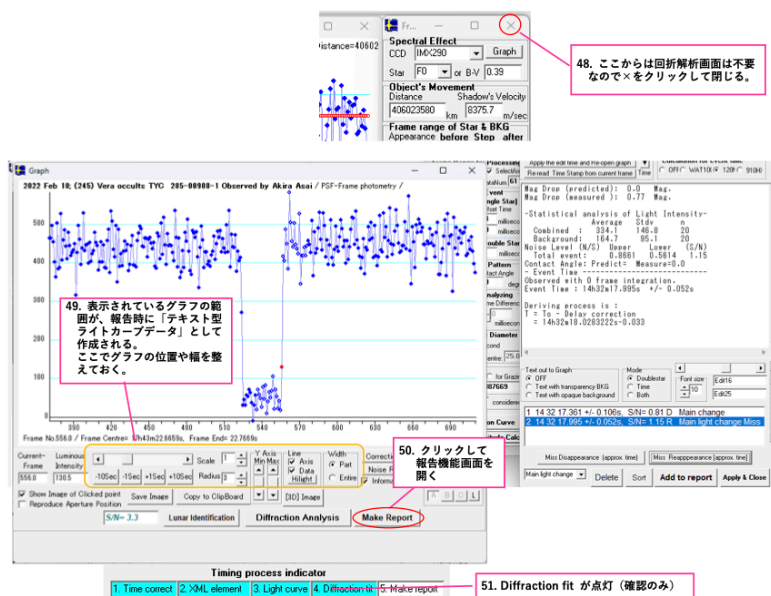


図 61: テキストライトカーブデータのためのグラフの表示

4-6. 【特別な場合 … 雲などにより、潜入と出現のどちらかが観測できなかった場合】

図 62 は、潜入時（●）は観測できたが、すぐに雲がかかって出現は観測できなかった場合である。そのようなときは、下図のようにして出現側にダミー値を与え、「潜入と出現は一組で存在する」という状況を作り出してから、Make report の処理を行う。

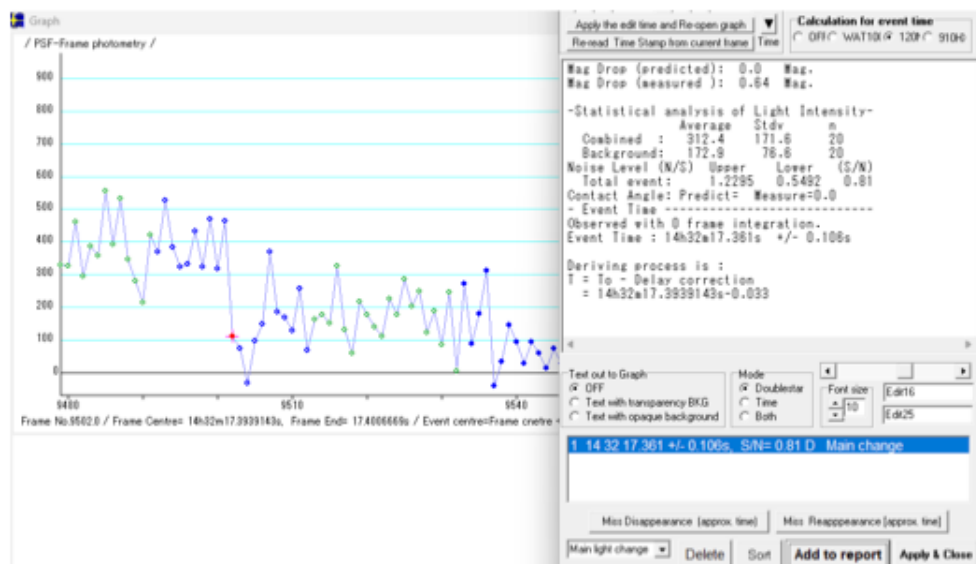


図 62: 雲などにより、潜入が観測できなかった場合

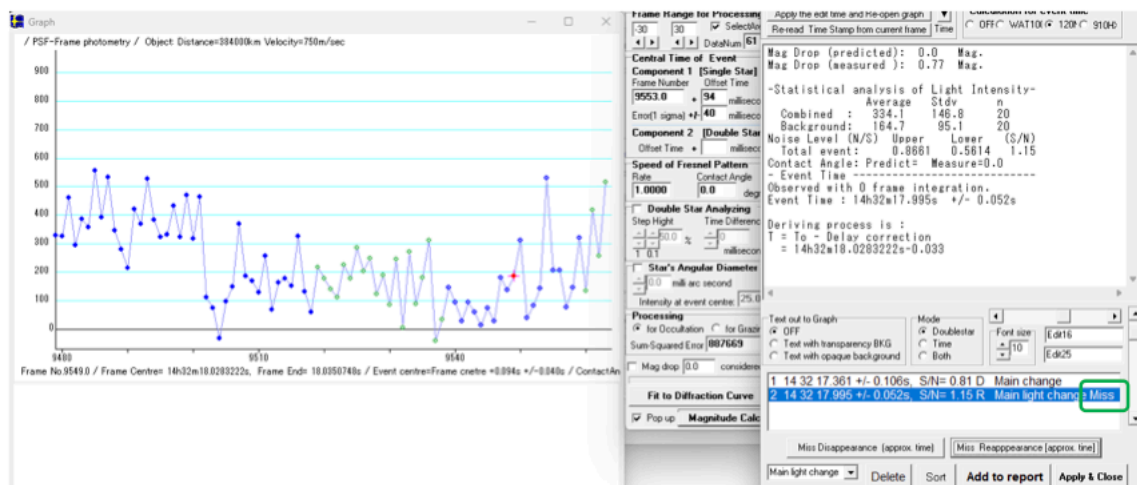


図 63: 出現側にダミー値を与える

4-7. 【特別な場合 … 通過（減光が見られない） 場合】

減光時刻付近の任意の場所をクリックし、Miss で登録してからレポート作成に進む。

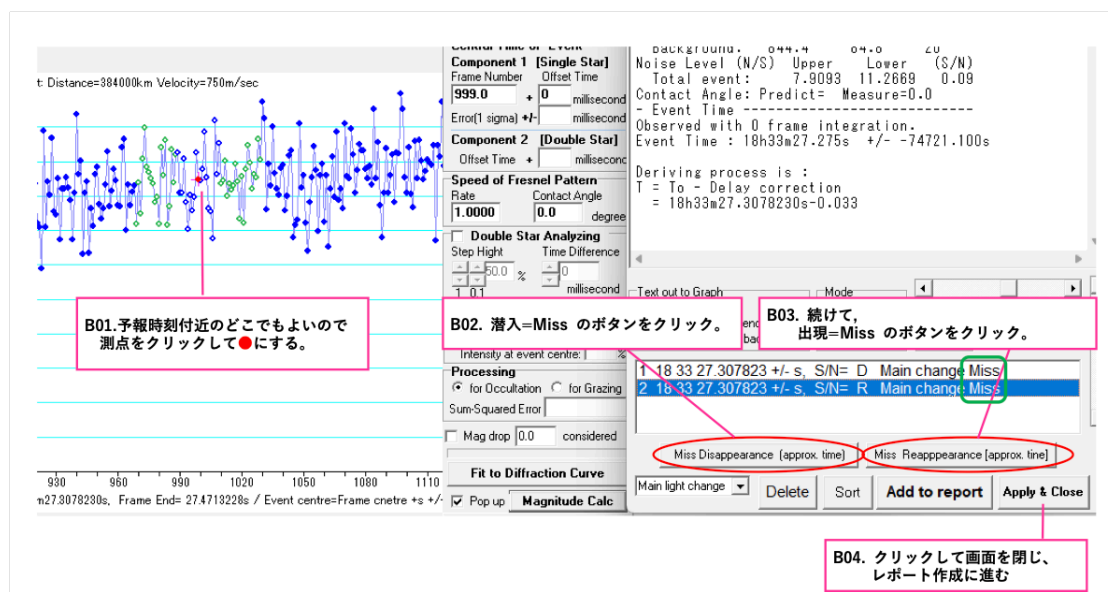


図 64: Miss で登録

4-8. 【特別な場合 … 特別な場合 … 重星の場合】

ここでは、潜入と出現の双方がステップを持っている場合について説明する。途中でステップがみられる場合、その前後で減光量大きい方を Main light change, 減光量小さい方を「minor light change」として登録していく。

「Add to report」ボタンでリストに加えたとき、主星 (Main light change) を押して登録される。もしその現象が減光量の小さい方であったときには、コンボボックスの「Main light change」を「minor light change」に変更する。ここで重要なのは、リストのうちの該当する行が青く反転している時にこの操作を行うことである。「Add to report」の直後は青く反転されているが、何らかの操作で白地に黒で表示された時は、その行をクリックすると青く反転させることができる。

なお、ここで記述したのは明るい星の潜入 → 暗い星の潜入 → 明るい星の出現 → 暗い星の出現の順に現象が起きた場合である。星の明るさ（ステップ前後の変化量）の順序が異なる場合には、適宜 Main / minor を設定すること。

また、この例で、たとえば出現側にステップが見られないときには、操作 E04 で出現を登録させた後、Miss Reappearance [approx. time] ボタンをクリックすれば、潜入－出現の組み合わせを二つ作ることができ、Make report を行う準備を整えることができる。

5. Make report

これまでに入力してある小惑星や恒星、観測地経緯度などの情報は、画面を開いた時点で表示されている。そこに観測機材や大気等の状況についてなどの情報を新たに入力する。カメラ設定情報のファイルを読み込むと、必要な諸情報を自動的に入力することができる。

以上を、Copy for Text Report ボタンでクリップボードにコピーし、図??の下パネルのようにメールに貼り付けると、そのまま報告することができる。

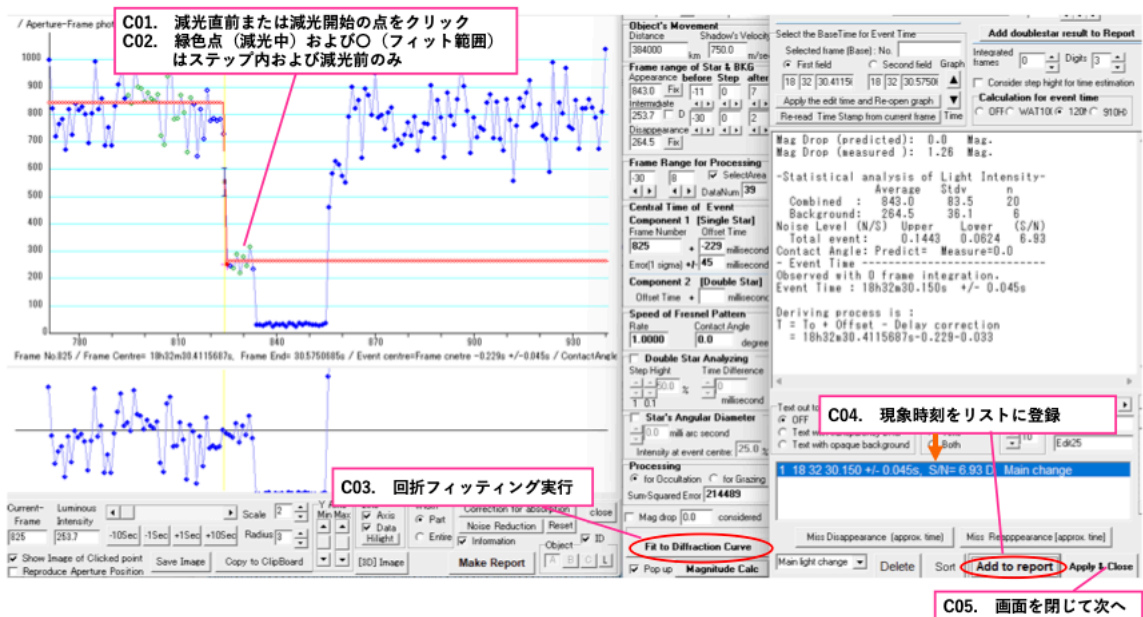


図 65: 重星の場合 1

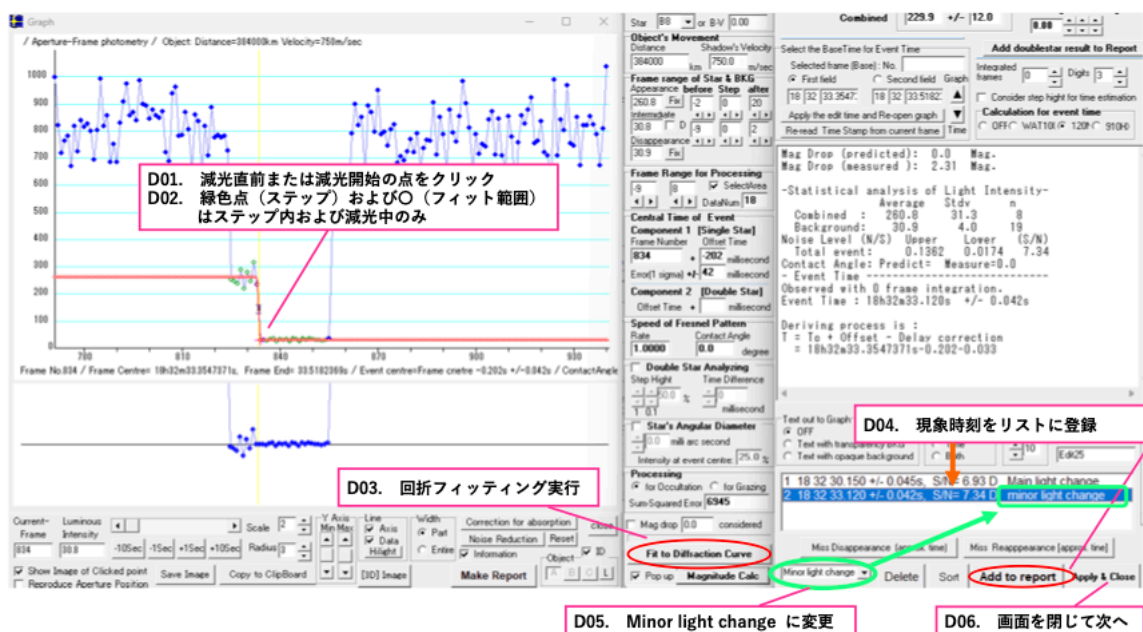


図 66: 重星の場合 2

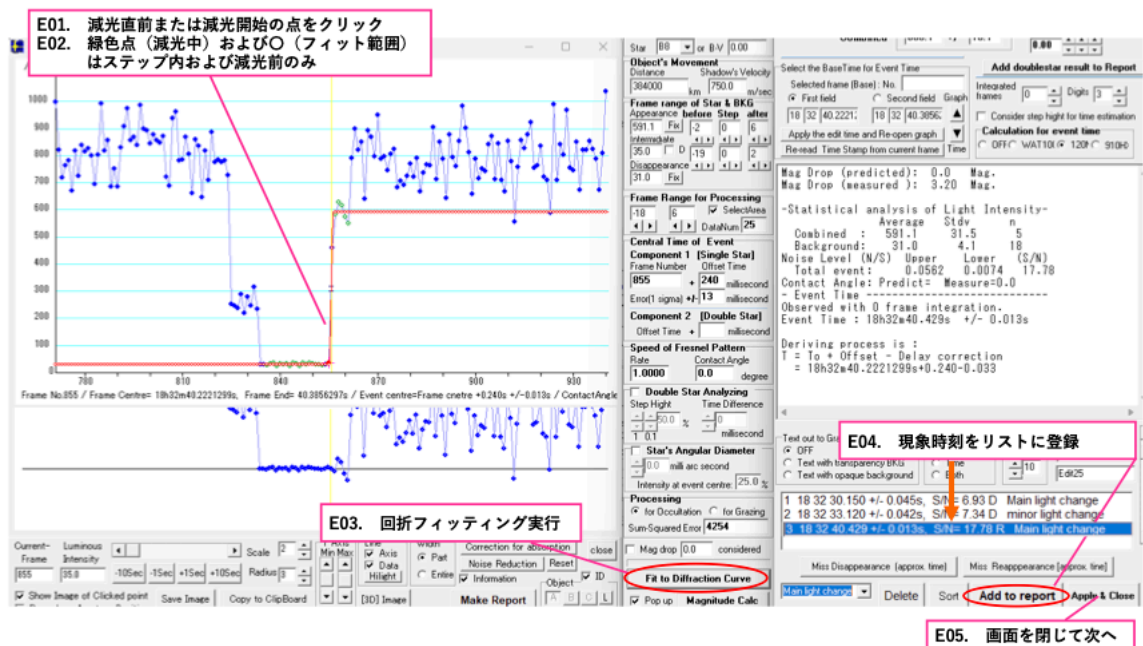


図 67: 重星の場合 3

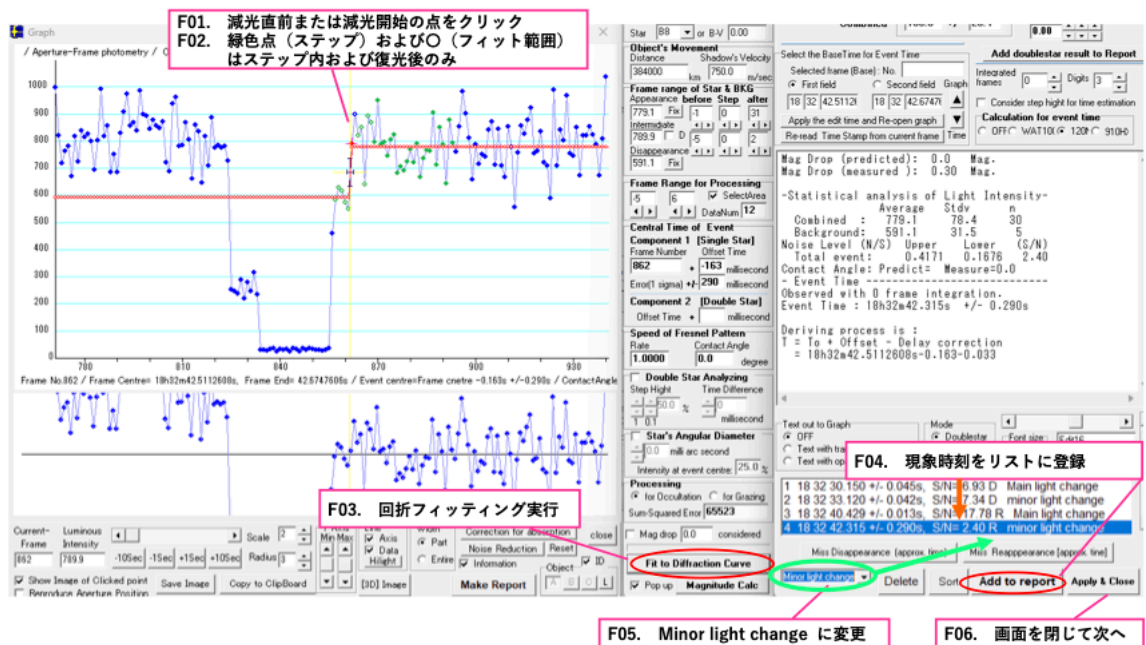


図 68: 重星の場合 4

[illegible]

図 69: 報告書の作成手順

5.2.4 出力例

```
***** Asteroid occultation Report *****

[Date      ] 2022.2.10 [Approx hour] 17.7
[Star      ] Ticho2 285-00908-1
[Asteroid   ] (245)Vera

[Observer  ] 1: Akira Asai 2:
[Location  ] Shiratsuka-cho, Tsu, Mie, JPN
[Longitude ] 136o32'12.9" E
[Latitude  ] 34o45'55.1" N
[Altitude  ] 2m
[Datum     ] WGS84

[Event time] D: 17h43m16.216s +/- 0.018s (UTC) S/N=9.62
              R: 17h43m22.718s +/- 0.020s (UTC) S/N=8.99

[Recorded  ] From 17h41m31s
              To 17h44m55s

[Mag. drop ] D: Measured: 2.32 ; Predicted: 2.7
              R: Measured: 2.39 ; Predicted: 2.7

[Telescope ] Aperture: 10cm Type: Refractor F=1.0
[Camera    ] Analog or Digital video , Model= ASI290MM
[Exposure  ] Set: 202msec, Measure: 202msec
[Setting   ] Area: 968x548 ; Binning=2
              Gain: 351 ; Brightness: 0 ; High Speed Mode: Off
[Time keep ] GPS ; Model: VK172
[Evidence  ] GPS Time Log : Recorded ; Screen shot: Recorded

[Condition ] Stability: Slight flickering Transparency: Clear
[Remarks  ]

[Additional comment]

*****

<Observations>
  <Event>
    <Date>2022|2|10|17.7</Date>
    <Details>
      <Star>Ticho2|                                     285-00908-
1|0|0.0000000000|0.000000000|0.00|0.00|0.00|0.00000000|0.0000000|25.00|25.00|25.00|0</Star>

    <Asteroid>245|Vera|0.00000000|0.00000000|0.0000000|0.0000000|0.0000000|0.0000000|1.00000|0.00000|0.0|1.0|2
0.00</Asteroid>
    </Details>
    <Observations>
      <Observer>
        <ID>1|Akira Asai||0|Shiratsuka-cho, Tsu, Mie|JPN|+136 32 12.9|+34 45 55.1|2| |10|1|a|a</ID>
        <Conditions>2|1|9.30||</Conditions>
        <D>17 43 16.216|D|0.018||</D>
        <R>17 43 22.718|R|0.020||</R>
      </Observer>
    </Observations>
    <LastEdited>2023|7|17</LastEdited>
  </Event>
</Observations>

*****
```

Text-based Light curve

Date: 2022-2-10 17:42:45.30: 68.48: 340

Star: 0: 0: 0: 0: 285-00908-1: 0-0

Observer: +136:32:12.9: +34:45:55.1: 2: Akira Asai

Object: Asteroid: 245: Vera

Values:463:464:496:453:403:364:504:384:388:528:407:458:485:443:410:478:444:419:427:433:449:316:426:496:461:39
6:438:528:431:446:448:399:452:404:422:431:479:452:445:381:403:455:403:446:387:387:458:487:374:
534:507:435:416:496:351:486:391:423:393:430:455:432:448:380:395:444:470:393:392:389:457:476:494:488:443:442:4
64:464:415:461:465:452:436:452:391:386:476:468:410:503:422:517:446:396:474:444:446:444:427:
405:534:466:389:465:361:377:431:387:479:456:513:430:380:369:484:476:466:480:416:336:439:495:460:388:428:428:3
96:404:390:420:429:468:409:450:481:466:483:428:462:438:426:498:428:535:389:473:441:440:472:
377:430:405:414:270:30:45:31:56:53:72:63:37:-
10:31:57:19:71:59:48:26:78:46:82:10:40:66:51:68:106:22:72:54:23:42:18:130:416:406:487:449:385:582:505:455:442:50
3:447:436:422:
526:346:419:418:439:418:445:457:448:426:509:366:479:426:436:490:530:460:432:528:496:414:459:396:446:511:413:3
95:435:494:441:430:467:511:488:441:458:399:457:408:442:487:517:516:447:534:458:438:417:386:
414:463:372:439:432:494:459:504:464:414:497:419:392:414:523:433:428:529:465:493:414:458:541:450:421:445:482:5
36:496:450:426:429:445:445:506:436:482:572:431:346:493:454:387:498:479:513:501:480:491:448:
448:411:456:449:488:450:472:445:415:478:504:370:370:400:437:469:511:367:527:449:468:472:326:518:439:491:422:4
63:483:451:478:478:492:419:423:457:435:467:430:397:375

6 観測報告

観測に必要なデータは以下の通りである．ここでは2について、どのように情報を取得するかについて記述する．3以降は解析が終われば得られることである．

1. 観測者氏名および氏名のローマ字表記
2. 観測地名および観測地の経緯度と標高、測地系
3. 観測開始と観測終了の時刻
4. 減光が観測されたか？ 減光が観測されなくとも重要なデータです．
5. 減光がおきた場合の時刻：減光開始の時刻および減光終了の時刻
6. 観測機材
7. 時刻保持の方法

6.1 観測者の位置の取得

観測者の位置情報は、現象時刻と同じ重みを有する重要なデータである．観測者の位置は、精度の保証された方法によって経緯度を報告する必要がある．

6.1.1 観測地経緯度の測定

経緯度の座標系は、かつては国によって独自の系が採用されていたが、現在では世界中で共通して利用できる「世界測地系」が採用されており、支障のない限り世界測地系に準

拠した経緯度を報告すべきである。世界測地系の座標が得られないような特殊な地域で観測がなされた場合は、測地系の種類を明記する。測地学的には世界測地系も国による成果が独立しており、例えば米国は「WGS84 座標系」、日本は「JDS2000 座標系」と呼ぶが掩蔽観測を含む一般的な利用において両座標系は実質的に同じものと見なして差し支えない。これらの世界測地系に基づく観測者の経緯度を示す場合の測地系は「WGS84」と示せばよい。日本国内であれば、国土地理院の地理院地図サイト (<https://maps.gsi.go.jp>) を利用できる。GPS による経緯度の測定値は、一般的な GPS 受信機であれば掩蔽観測に十分な精度を有しており、地球上のあらゆる地域で利用可能である。GPS による測量は、受信機の安定を得るために電源投入後 10 分以上の時間をおいて、数回の測定値を平均することが望ましい。報告する経緯度は、経度緯度とも「DD 度 MM 分 SS.S 秒」または、「DD.DDDDD 度」で報告する。前者であれば、0.1 秒の精度、後者であれば、小数点以下 5 桁の精度で報告することが望ましい。赤道上で 0.1 秒は地表での距離にすると約 3m、0.00001 度は約 1m に相当する。[HY1] 現象毎、時刻の分解能によって必要とされる経緯度の精度は異なるが、0.1 秒（または、0.00001 度）の位置精度は掩蔽観測においては十分である。

6.1.2 標高の測定

観測地の標高も、経緯度と同じく重要なデータである。標高はいわゆる「海拔（平均海面からの鉛直高）」（above mean sea Level）であり、測地学的には「ジオイド面からの高さ」である。これは、一般的な GPS の高さ（地球回転楕円体面からの高さ）とは異なった基準であり注意を要する。また、GPS の測定する高さは現在のところ誤差が大きく不十分な精度であるために推奨できない。これは、地平線下の GPS 衛星の情報が得られないことが精度の低い理由である。標高も経緯度同様に精度の保証された方法で測定することが望ましい。日本国内であれば、これも前述の国土地理院の地理院地図 Web サイトを利用できる。外国など信頼できる標高データが得られない場合は、以下のサイト「mapcoordinates.net」にて標高を取得することができる (<https://www.mapcoordinates.net/en>)。この類の全地球上の標高取得のできるインターネット上のサービスは、Google Earth(GE) の提供する「Google Elevation Service」を採用することが多い。Google はこのサービスの精度を公開していないが、米国内の調査によると、誤差 (1σ) 22m の精度との報告がある。報告する標高は、観測地の標高に建物の高さや望遠鏡位置の高さを加算して 1m の桁で報告する。現象毎に対象星の高度、時刻の分解能によって必要とされる標高の精度は異なるが、掩蔽観測のためには通常 10m の精度があれば十分である（現象毎に異なるが、通常は、時刻の誤差の方が標高の誤差よりもずっと大きい）。

6.2 報告

IOTA (The International Occultation Timing Association) は、小惑星による恒掩蔽の観測成果を収集して国際的に利用可能にしている。観測の成果は、減光があったか無かったにかかわらず、IOTA に報告することを推奨する。IOTA は各地域にコーディネーターがおり、観測された地域のコーディネーターに以下の情報を報告する。

1. 観測者氏名および氏名のローマ字表記
2. 観測地名および観測地の経緯度と標高, 測地系
3. 観測開始と観測終了の時刻
4. 減光が観測されたか? 減光が観測されなくとも重要なデータです.
5. 減光がおきた場合の時刻: 減光開始の時刻および減光終了の時刻
6. 観測機材
7. 時刻保持の方法

IOTA に報告された観測成果は, 掩蔽観測ソフト OCCULT4 の historical observation に登録されるとともに, 成果に応じて IAU の小惑星 Astrometry , JDSO に報告され天文学の発展に役立てられる. もし, OCCULT4 を利用できる観測者であれば, OCCULT4 による報告フォーム (OBS.xml) で報告することも推奨する.

表 1: 2022 年現在の各地域のコーディネーターと連絡先

北米	Jhon Moore	reports@asteroidoccultation.com
南米	Breno Loureiro Giacchini	bgiacchini@yahoo.com.br
ヨーロッパ	Eric Frappa	frappa@laposte.net
アジア	Tsutomu Hayamizu	asteroid-report@iota-ea.org
オセアニア	Steve Kerr	Steve.Kerr@outlook.com.au
	Dave Gault	davegault@bigpond.com

7 付録a DESTINY⁺のフライバイ対象天体 (3200)Phaethon による掩蔽観測の成果

7.1 Phaethon 観測の重要性

小惑星 (3200)Phaethon は、アポロ型の地球近傍小惑星である。公転周期は 1.43 年、軌道長半径:1.27au、離心率:0.89、傾斜角:22°.3 と黄道面から傾いた細長い形の軌道を公転している。近日点距離は 0.14 au と水星軌道より内側に入り込み、Phaethon の表面温度は約 1000K になり、一方、遠日点距離は 2.40au (この距離はメインベルト (小惑星帯) の中程に相当する) で、そこでの Phaethon の表面温度は約 200K まで低下すると見積もられている。つまり、Phaethon は 1.43 年ごとに約 800K もの温度変化を経験する [32, 21, 22, 35]。このような極端かつ周期的な温度変化を経験する Phaethon の表面は熱的に変化・崩壊をした物質に覆われているに違いない。Phaethon のような天体は、様々な形態が混在する地球近傍小惑星のなかでも稀である。

Phaethon はまた、毎年 12 月に観測されるふたご座流星群の母天体であると考えられている [15, 41, 20]。Phaethon は B 型または F 型に分類され [34, 28, 29, 5, 31, 23, 37], (162173)Ryugu のような炭素、有機物、含水鉱物等を含む C-complexs 小惑星に属する ([39])。Phaethon が地球へのダストの供給源の一つであるふたご座流星群の母天体であるということと有機物や含水鉱物等を含む C-complexs 小惑星に属するという事実は、Phaethon は生命の前駆体である炭素や有機物を含むダストを地球に運びこむルートの一つであるということである。したがって、小惑星 Phaethon の研究は小惑星からのダスト放出機構や地球に供給される有機物ダストの組成等を解明することにつながる。

上記のことから推察されるように、Phaethon は探査機で詳しく調査するに値する天体である。そこで、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所は、千葉工業大学惑星探査研究センターと共同で、“DESTINY⁺” (Space Technology demonstration and experiment for interplanetary voyage by Phaethon fLyby and dUst Science) 計画として、Phaethon へ探査機を送る計画を立ち上げた [2, 3, 4]。

DESTINY⁺ 計画の目的は、より高度なイオンエンジン航法技術や多天体フライバイ探査技術を駆使して、小惑星 Phaethon とそのダストの科学的調査を行うことである。探査機の打ち上げは 2024 年を予定している。DESTINY⁺ 探査機は、イプシロンロケットで地球を回る長楕円軌道に投入され、約 2 年かけて軌道高度を徐々に上げていき、「月スイングバイ」を経て地球を離れる。その後約 2 年かけて徐々に軌道を変え、2028 年初頭に Phaethon とのフライバイ地点に到達する。打ち上げからフライバイまでの約 4 年間では、探査機に搭載された DESTINY⁺ダストアナライザー (DDA)[25, 30] を用いて星間・惑星間塵の観測を行う。フライバイ時には、探査機は Phaethon に 500km まで接近し、Phaethon 用望遠鏡カメラ (TCAP) と Phaethon 用マルチバンドカメラ (MCAP) の 2 つのカメラを使って小惑星を観測する [19, 18]。さらに、DDA は Phaethon 周辺のダストを直接分析する。

DESTINY⁺ 探査機は、ほぼ黄道面上を周回して Phaethon の接近を待ち、フライバイ時には秒速 36km で Phaethon に遭遇することになる。このような高速フライバイでは、探査機が Phaethon の近くに滞在できる時間は短く、機上から小惑星を詳細に調査する時間はない。したがって、フライバイの前に天体の形状、アルベド、自転周期などの特徴をできるだけ詳しく調べ、露出時間、2 台のカメラの画角、フライバイのタイミングなどを詳

細に検討しておくことが、ミッションを成功させるために必要不可欠である。そこで必要なのが、地上観測である。

2017年12月、Phaethonは約0.07auまで地球に接近し、約11等級まで明るくなった。この機会を利用して、DESTINY+ 理学チームは、世界的な観測キャンペーンを呼びかけ、研究者たちがそれぞれにPhaethonの観測を行った。その結果、以前の研究結果と合わせて、Phaethonの自転周期と自転軸の方向 [36, 26, 1, 16, 17, 24], スペクトルタイプ [34, 28, 29, 5, 31, 23, 37] 等が高精度に決定された。アレシボ天文台で行われたレーダー観測により、Phaethonの有効直径が約6kmであることが明らかになり [38], さらに、Phaethonは、はやぶさ2 [40] や OSIRIS-Rex [27] が探査した (162173) Ryugu [39] や (101955) Bennu [11] と同様のスピントップ形状を持つことが判明した。

このような集中的な観測にもかかわらず、Phaethonの直径を推定するために不可欠な絶対等級は正確に決定することはできなかった。小惑星の絶対等級は、太陽位相角 0° における V 等級（可視光）と定義されているが、Phaethonと太陽、地球の軌道の関係から、太陽位相角 0° で Phaethon を観測するチャンスがない。そのため、Phaethonの直径とアルベドには大きな推定誤差が存在していた。アルベドはカメラの露出を決める際に重要な値であり、DESTINY+ 理学チームは、絶対等級以外の方法で Phaethon の直径を推定し、より正確なアルベドを導く必要があった。

小惑星の大きさを決める方法には、小惑星が背景の星を掩蔽することで地上できる影の大きさを測定する掩蔽観測がある。遠くの星から来る光は平行光と見做せるので、「小惑星が地球に落とした影の大きさ」 $\approx$ 「Phaethonの大きさ」である。絶対等級と赤外線観測を組み合わせ推定したアルベドから直径を計算する方法が一般に用いられるようになるまでは、小惑星の直径は掩蔽観測で測られていた。可視・赤外観測で小惑星の直径を求めるには、熱モデルという“大まかな仮定”が必要で、その結果、系統誤差が直径決定の精度に影響する。一方、掩蔽観測は小惑星の影の大きさを直接測定するため、掩蔽の時刻の測定精度だけで直径の推定が決定される。そのため、高時間分解能かつ高精度な時刻決定の観測を行えば、高い精度で直径を求めることができる。恒星掩蔽による小惑星の大きさの測定は、現在利用可能などの方法よりも正確に小惑星の大きさと形状を測ることができる。

そこで、DESTINY+ 理学チームは、より正確な Phaethon の直径の推定値を得るために、掩蔽観測を行うことにしたが、Phaethon のように小さな天体の掩蔽観測はほとんど前例がなかった。2019年以前に掩蔽観測に成功した最小の小惑星は、直径7kmの(11072) Hiraokaだったが、positive detectionの報告は1カ所だけだった (http://spiff.rit.edu/richmond/occult/hiraoka_may2006/Observation_of_a_Very_Small_Asteroid.doc). しかし近年、この状況は大きく変化している。欧州宇宙機関 (ESA) のガイア宇宙望遠鏡は、これまでにない精度で星の位置・距離・運動をカタログ化しており [14, 12, 13], 全天サーベイ (Pan-STARRS [33] とカタリーナスカイサーベイ [7]) のおかげで、小さな小惑星の軌道決定精度も良くなってきた。

恒星の位置精度が向上し、多くの小惑星の軌道情報が集まるにつれて、より多くの掩蔽現象の予測が正確に行えるようになりつつある。そのような中、佐藤勲氏は、2019年7月29日にアメリカ西部で Phaethon による恒星の掩蔽が起こることを発見した。また、野田寛大氏は、2019年8月21日と2019年10月15日に日本でも Phaethon による恒星の掩蔽

が観測できることに気づいた。そこで、DESTINY+ 理学チームは、国内外の掩蔽観測経験者に、これらの Phaethon による恒星の掩蔽を観測するよう依頼した。

7.2 Phaethon による恒星の掩蔽の観測

Phaethon による恒星の掩蔽の最初の成功は、2019 年 7 月 29 日にアメリカ西部で行われた観測である。この観測は大変大規模に組織され、サンホアキン溪谷の予測掩蔽帯の中心から 680m 間隔で引いた 66 本の線上に大勢の観測ボランティアが布陣した。また、ラスベガスでも 19 地点で同時観測が行われた。これらの観測の結果、図 70 のように Phaethon の影は直径 5km の円よりやや大きいことがわかった。2019 年 9 月 29 日にアメリカ・カリフォルニア州（図 71 参照）、10 月 12 日にアメリカ・バージニア州（図 72 参照）、10 月 15 日と 25 日にアルジェリア（図 74, 75 参照）、2020 年 10 月 5 日にアメリカ・ミシシッピ州（図 76 参照）でも Phaethon による掩蔽が観測されたが、これらの観測では、観測点の数が少なかったため、2019 年 7 月 29 日に得られた結果を改善するほどのデータは得られなかった [8, 9, 10]。

日本では、アマチュア天文観測家や惑星科学者からなる観測隊が、2019 年 8 月 21 日（北海道）と 10 月 15 日に Phaethon の掩蔽を観測したが、天候が悪く、10 月 15 日に二か所で減光が捉えられただけだった（図 73, [8], https://aas.org/sites/default/files/2020-10/David_Dunham_DPS52.pdf, <http://iota.jhuapl.edu/DunhamAstSciConf2019.ppt>）。

上述のように、2019 年から 2020 年にかけて集中的に行われた Phaethon による掩蔽観測では、DESTINY+ 理学チームが目指した「5%以下の誤差で Phaethon の大きさを決定する」という目標は達成できなかった。そこで、DESTINY+ 理学チームは、2021 年 10 月 3 日（UTC）に日本で観測される Phaethon による掩蔽を観測するために、再度観測キャンペーンを行った。これは、2019 年 7 月 29 日に米国西部で発生した Phaethon による掩蔽とは異なる角度で Phaethon の形状を観測する機会となった。2021 年 10 月 3 日の観測では 18 地点で減光を観測し、Phaethon の異なる断面での掩蔽観測に成功した。得られた掩蔽時の Phaethon の形状は長軸 $6.12 \pm 0.07 \text{ km}$ と短軸 $4.14 \pm 0.07 \text{ km}$ の楕円形でフィットできることがわかった（図 77 参照）。

さらに、DESTINY+ 理学チームは 2022 年 10 月 21 日に再度アマチュア天文観測家や惑星科学者からなる観測隊を北海道に招集し、2021 年 10 月 3 日とは異なる Phaethon の断面形状を測定することに成功した（図 80 参照）。

表 2 は (3200)Phaethon による掩蔽の観測のこれまでの成果をまとめたものである。図 70 から図 80 はそれぞれの観測の整約図である。これらの図を見れば、2019 年 07 月 29 日に DESTINY+ 理学チームが Marc Buie 氏らに依頼して行われた観測が非常に大規模で大勢の観測者を動員して行ったことが見て取れる。この最初の成功のおかげで、Phaethon の軌道改良が行われ、後の掩蔽予報の精度が増した。その後の掩蔽現象は天候に恵まれず、2019 年 07 月 29 日の観測を超える精度での観測ができなかったが、2021 年 10 月 3 日と 2022 年 10 月 21 日の日本で行われた観測は非常に成功した。これらの観測の成果は、DESTINY+ 理学チームのメンバーである Sean Marshall 氏が作成している Phaethon の 3D 形状モデルと比較され（図 81, 図 82）、モデルの改良のためのデータとして使用されている。図 81, 図 82 を見れば、観測結果と形状モデルがよく一致していることがわかる。

以上のように、Phaethon による掩蔽観測は非常に成功した。特に 2021 年 10 月 3 日のプロ・アマ合同観測については [42] に詳細に記した。この観測により、直径 5–6km の小惑星による継続時間が 1 秒以下の掩蔽でも正確に観測でき、多地点での観測に成功すれば形状まで求めることが可能であることが証明できた。これを機に、日本の掩蔽観測者たちは小さい小惑星による掩蔽観測にも手を広げていったように思う。例えば、NASA の DART ミッション (<https://dart.jhuapl.edu>) の二重小惑星の主星の Didymos (直径 780m) による掩蔽観測には四回も成功した。

日本では掩蔽観測が惑星探査ミッションのサポートとして昨日したのは DESTINY+ ミッションのフライバイターゲットの Phaethon による掩蔽が始めてだったが、海外では冥王星系や太陽系外縁天体をフライバイした NASA の New Horizons[6] や木星トロヤ群小惑星のフライバイミッションである NASA の Lucy で掩蔽観測は重要な役割を果たしている (<http://lucy.swri.edu/occultations.html>)。日本での二番目のミッションサポートは“はやぶさ 2#” ミッションのフライバイターゲット 2001 CC21 による掩蔽観測である。はやぶさ 2 拡張ミッションチームの呼びかけにより (https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20221227_2001_CC21/)、2023 年 1–3 月にかけて、観測キャンペーンを行う。この小惑星も Didymos と同じく、直径が 700m 程度で、減光の継続時間は最大で 0.1 秒ほどしかないが、Didymos の観測を成功させた観測者たちを交えて、大規模な観測キャンペーンを展開する予定である。小惑星の軌道精度と大きさ及び形状を求め、ミッションをサポートする。

直径数 km より小さいサイズの小惑星による掩蔽は、一頃は予報さえ公開されていなかったが、Occult という掩蔽予報、観測、整約が可能なソフトウェアが公開され、誰もが自由に使えるようになってから、掩蔽観測を計画することが容易になった。CMOS カメラや GPS 受信機などの技術発展により、より暗い天体の減光時刻をより正確に測定することが可能になり、観測者の位置情報も精度よく取得できるようになった。掩蔽する恒星の位置情報や小惑星の軌道情報の精度も格段に向上した。今後掩蔽観測はより小さい小惑星、暗い恒星の観測に挑戦していこう。そして、より精密かつ正確になり、惑星探査のミッションをサポートするツールとして、重用されていくに違いない。

表 2: (3200)Phaethon による恒星の掩蔽現象の観測のこれまでの成果

日付 (UTC)	掩蔽する恒星	等級 (mag)	継続時間 (Max)(sec)	観測 者数	減光 検出数	国・地域
2019.07.29	HIP 24973	7.3	0.47	52	6	USA
2019.09.29	UCAC4 721-029705	12.0	0.27	8	4	USA
2019.10.12	TYC 3293-01959-1	11.3	0.23	2	2	USA
2019.10.15	TYC 3292-00570-1	11.5	0.22	3	2	東北
2019.10.15	UCAC4 707-014626	11.1	0.22	5	3	Europe
2019.10.25	TYC 3268-00276-1	11.3	0.22	4	3	Italy, Algeria
2020.10.05	TYC 1931-01029-1	11.2	0.16	6	1	USA
2021.10.03	UCAC4 646-021974	12.0	0.64	72	18	近畿, 四国, 広島
2021.12.07	UCAC4 617-00897	9.9	0.23	2	2	Taiwan
2022.10.21	TYC 2844-0735-1	10.8	0.22	39	9	北海道
2022.10.22	UCAC4 674-012720	12.8	0.30	1	1	広島

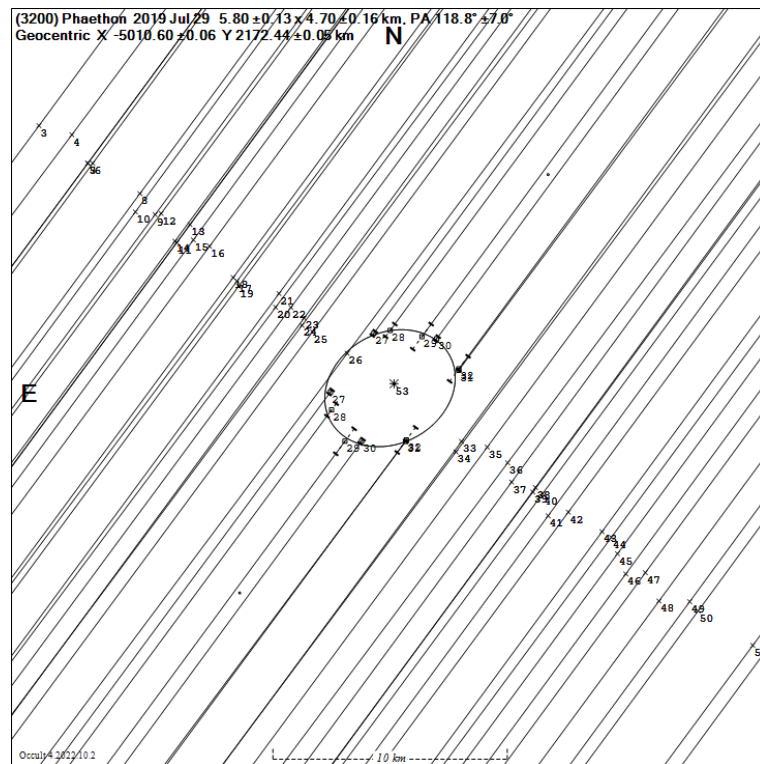


図 70: 2019.07.29 の観測の整約図

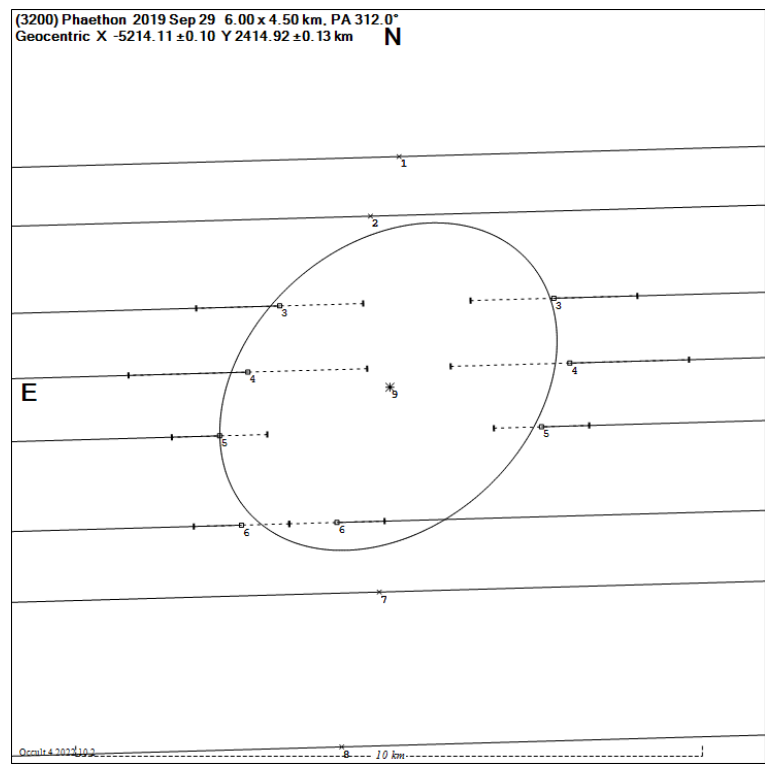


図 71: 2019.09.29 の観測の整約図

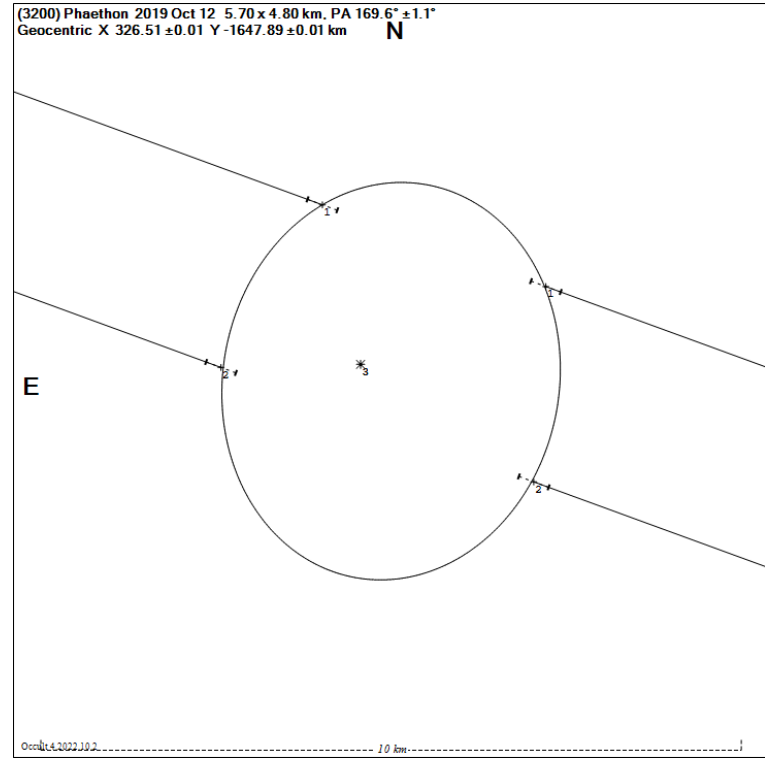


図 72: 2019.10.12 の観測の整約図

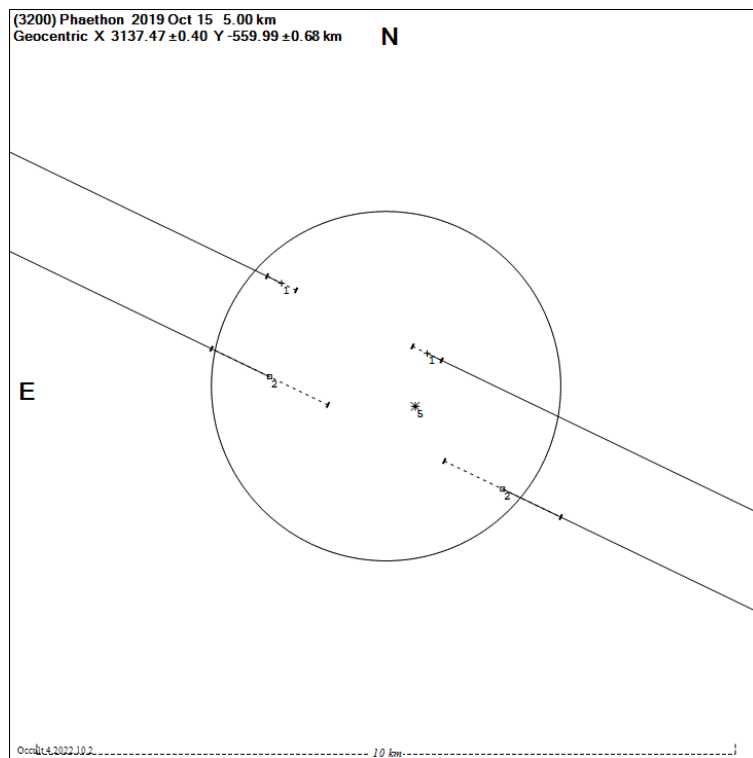


図 73: 2019.10.15 の東北での観測の整約図

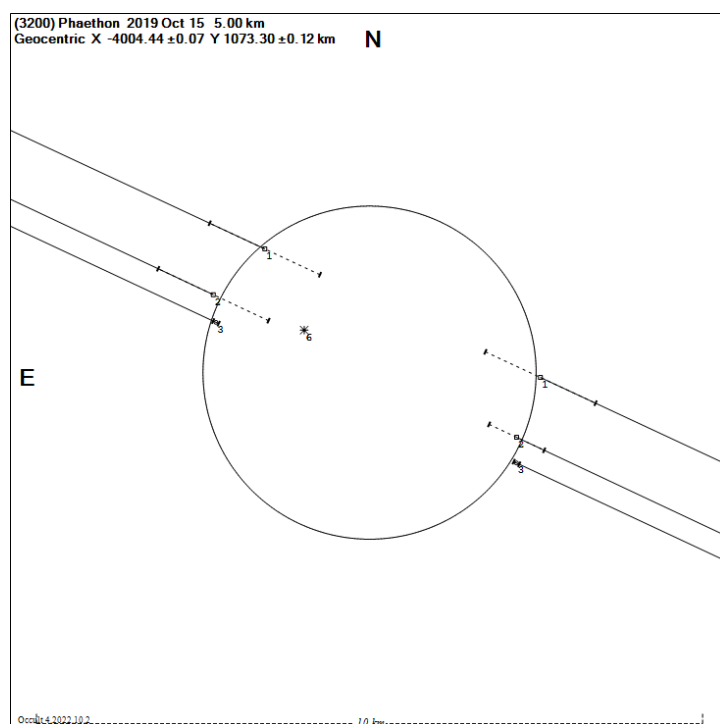


図 74: 2019.10.15 のヨーロッパでの観測の整約図

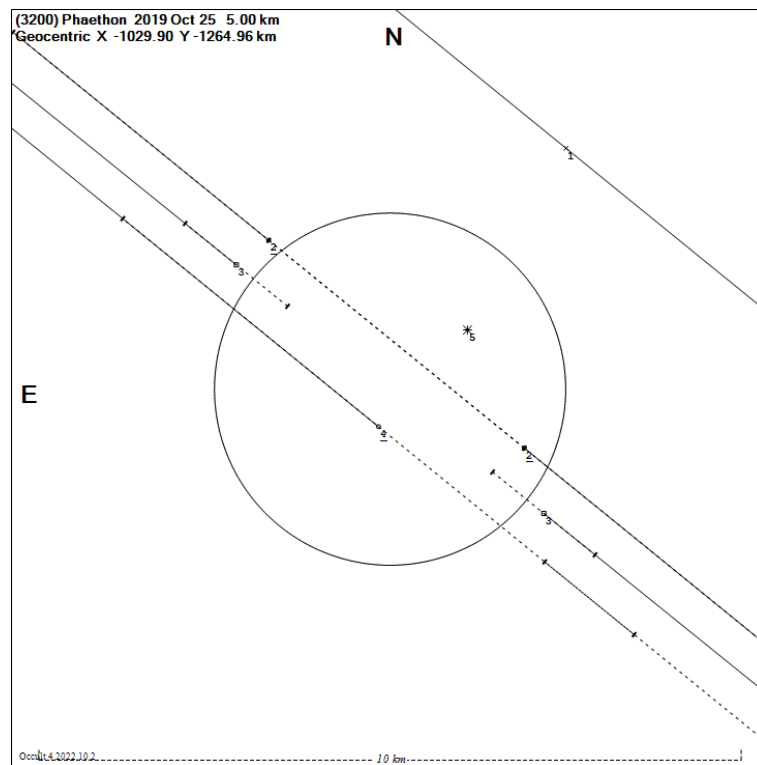


図 75: 2019.10.25 の観測の整約図

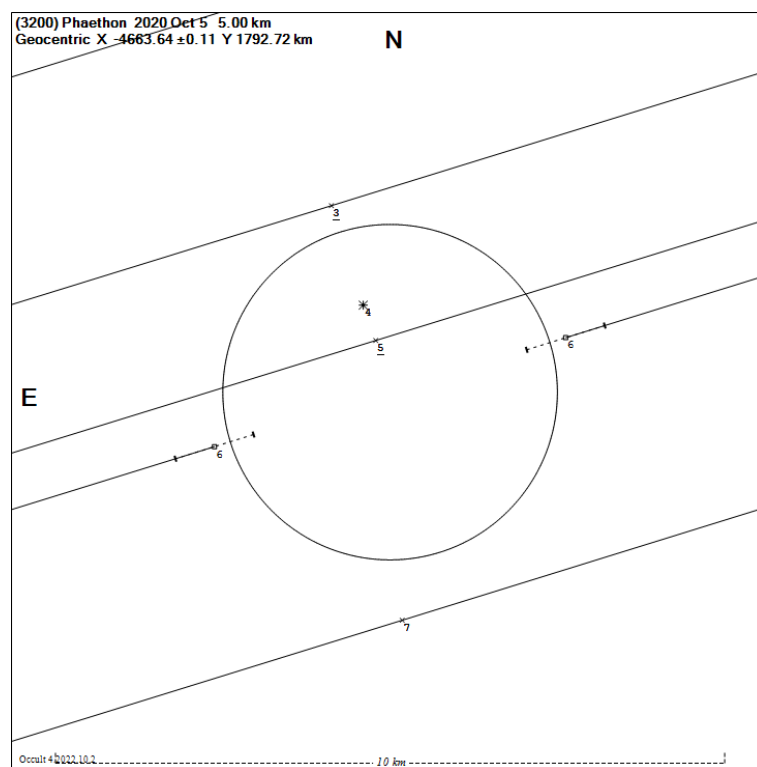


図 76: 2020.10.05 の観測の整約図

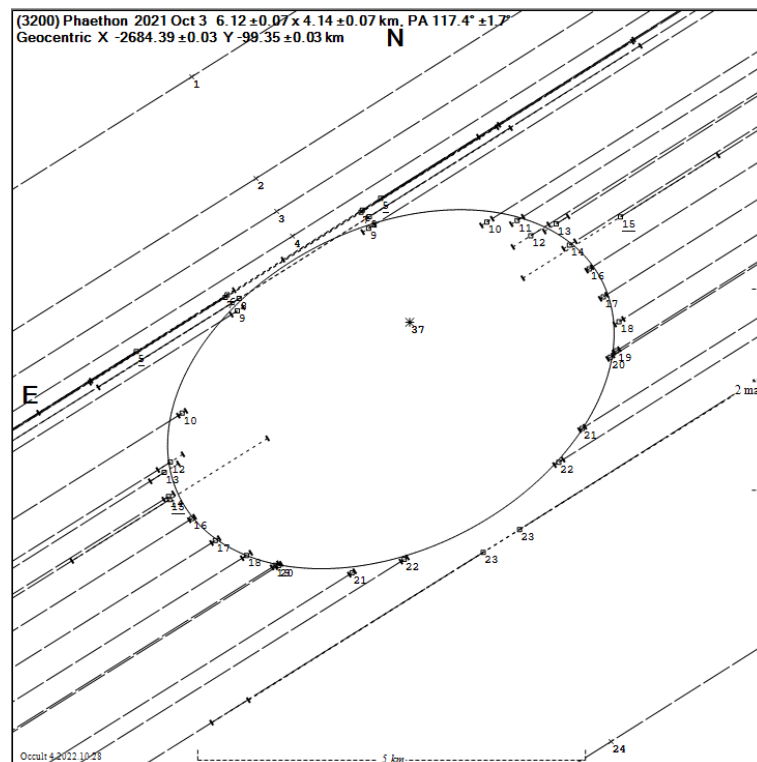


図 77: 2019.10.25 の観測の整約図

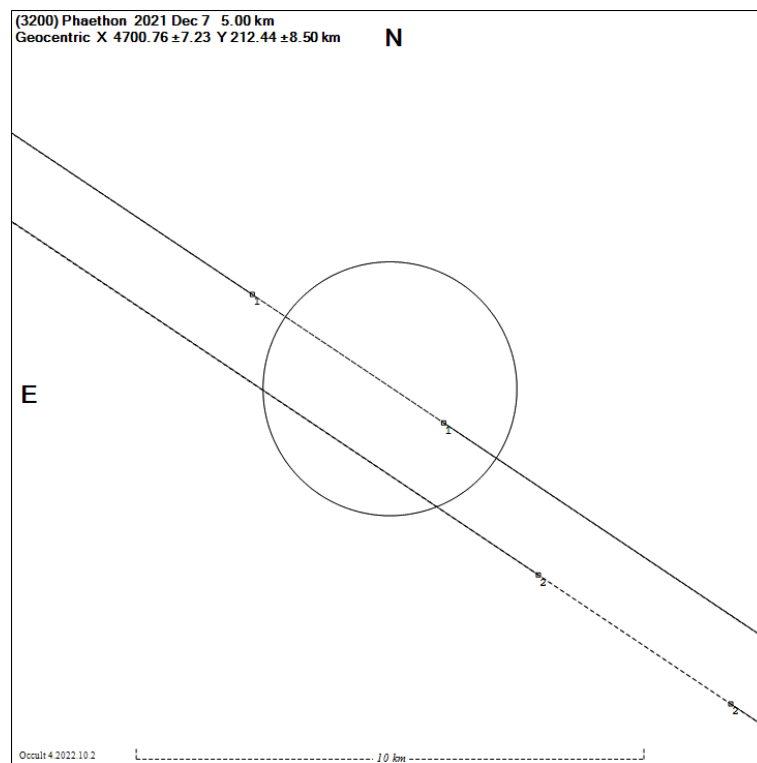


図 78: 2021.12.07 の観測の整約図

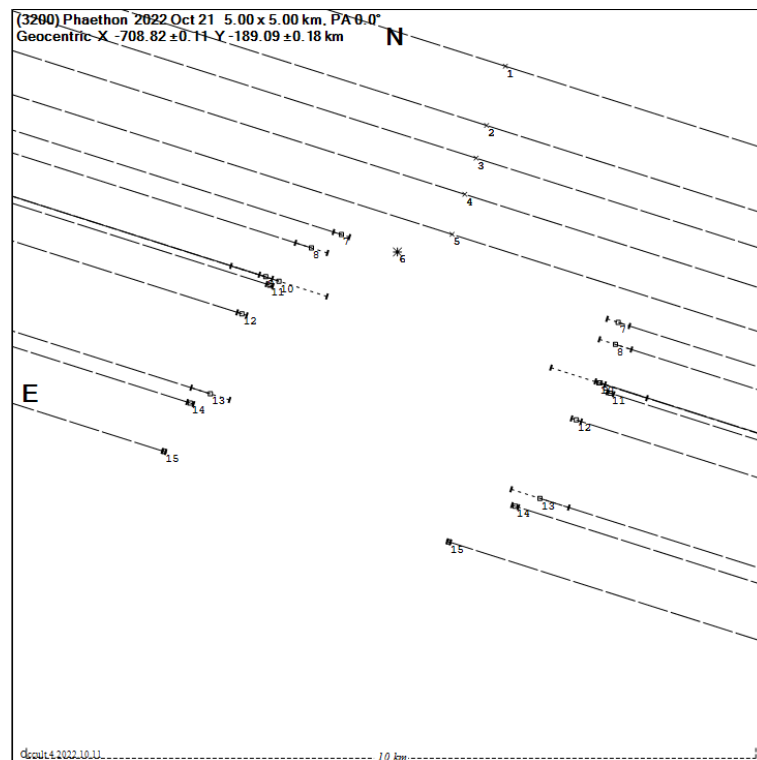


図 79: 2022.10.21 の観測の整約図

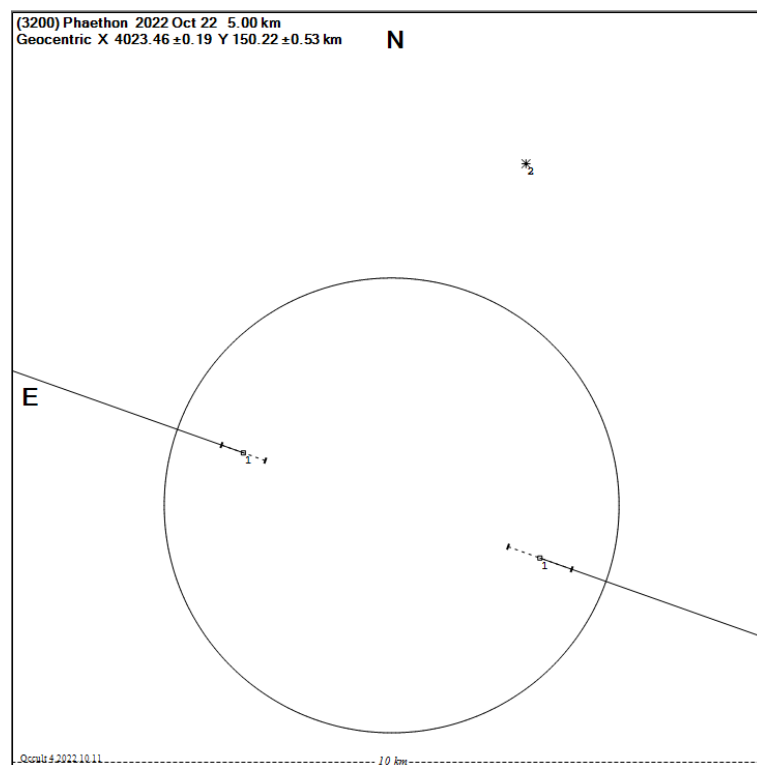


図 80: 2022.10.22 の観測の整約図

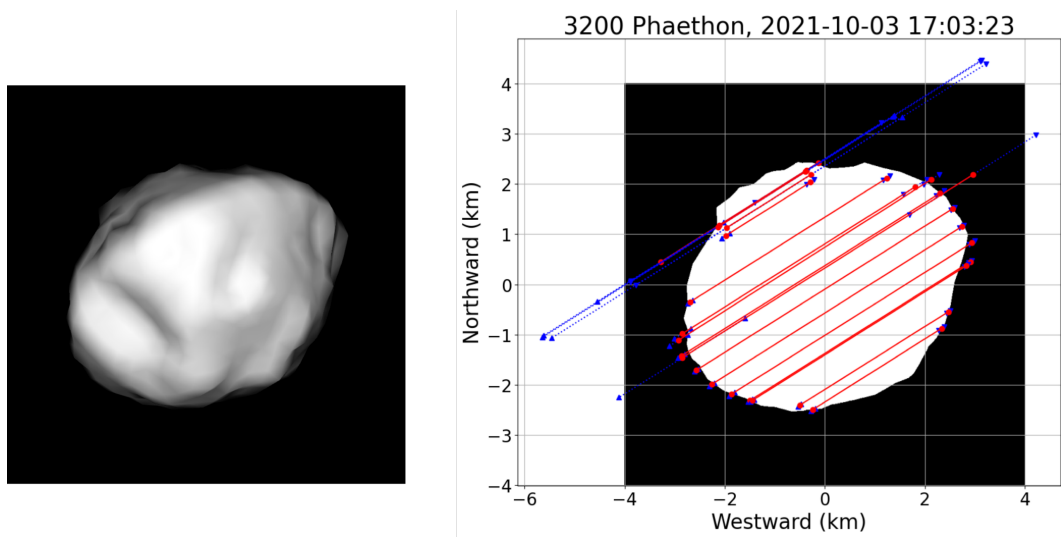


図 81: 左: Sean Marshall 氏の 3D 形状モデルを使って, 2021 年 10 月 3 日の掩蔽時に見える地球から見える Phaethon の形と向きを再現したもの. 右: 掩蔽観測によって得られた Phaethon の形状と 3D 形状モデルを重ねたもの. それぞれの赤い線の長さが, 各掩蔽観測者の測定した Phaethon の影の大きさに相当する. 青い線は測定誤差.

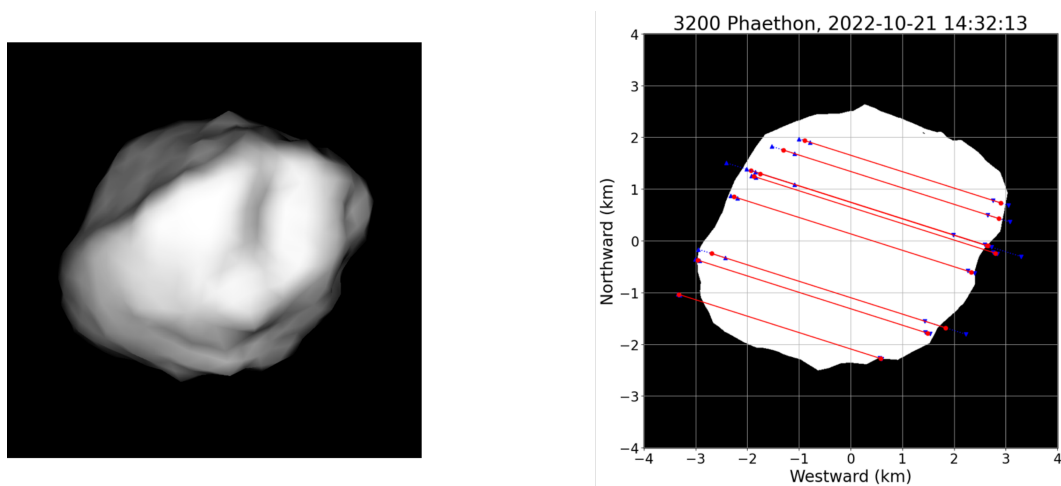


図 82: 左: Sean Marshall 氏の 3D 形状モデルを使って, 2022 年 10 月 21 日の掩蔽時に見える地球から見える Phaethon の形と向きを再現したもの. 右: 掩蔽観測によって得られた Phaethon の形状と 3D 形状モデルを重ねたもの. それぞれの赤い線の長さが, 各掩蔽観測者の測定した Phaethon の影の大きさに相当する. 青い線は測定誤差.

参考文献

- [1] M. Ansdell, K. J. Meech, O. Hainaut, M. W. Buie, H. Kaluna, J. Bauer, and L. Dundon. REFINED ROTATIONAL PERIOD, POLE SOLUTION, AND SHAPE MODEL FOR (3200) PHAETHON. *The Astrophysical Journal*, 793(1):50, sep 2014.
- [2] T. Arai. Overview and Science of DESTINY+. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2021–877, Sept. 2021.
- [3] T. Arai, T. Yamamoto, N. Ozaki, H. Toyota, K. Nishiyama, and T. Takashima. Current status and science of DESTINY+. In *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January - 4 February*, volume 43, page 276, Jan. 2021.
- [4] T. Arai, F. Yoshida, M. Kobayashi, K. Ishibashi, H. Kimura, T. Hirai, P. Hong, K. Wada, H. Senshu, M. Yamada, R. Srama, H. Krüger, M. Ishiguro, H. Yabuta, T. Nakamura, S. Kobayashi, J. Watanabe, T. Ito, T. Ootsubo, K. Ohtsuka, S. Tachibana, T. Mikouchi, T. Morota, M. Komatsu, K. Nakamura-Messenger, S. Sasaki, T. Hiroi, S. Abe, S. Urakawa, N. Hirata, H. Demura, G. Komatsu, T. Noguchi, T. Sekiguchi, D. Kinoshita, H. Kaneda, S. Kameda, S. Matsuura, M. Ito, A. Yamaguchi, T. Yanagisawa, H. Kurosaki, T. Okamoto, A. Nakato, H. Yano, M. Yoshikawa, D. W. Dunham, M. W. Buie, P. A. Taylor, S. Marshall, N. Ozaki, T. Yamamoto, H. Imamura, H. Toyota, K. Nishiyama, and T. Takashima. Current Status of DESTINY+ and Updated Understanding of Its Target Asteroid (3200) Phaethon. In *52nd Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 1896, Mar. 2021.
- [5] G. Borisov, M. Devogèle, A. Cellino, S. Bagnulo, A. Christou, P. Bendjoya, J.-P. Rivet, L. Abe, D. Vernet, Z. Donchev, Y. Krugly, I. Belskaya, T. Bonev, D. Steeghs, D. Galloway, V. Dhillon, P. O ’ Brien, D. Pollacco, S. Poshyachinda, G. Ramsay, E. Thrane, K. Ackley, E. Rol, K. Ulaczyk, R. Cutter, and M. Dyer. Rotational variation of the linear polarization of the asteroid (3200) Phaethon as evidence for inhomogeneity in its surface properties ★. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 480(1):L131–L135, 08 2018.
- [6] M. W. Buie, S. B. Porter, A. J. Verbiscer, R. Leiva, B. A. Keeney, C. C. C. Tsang, D. Baratoux, M. F. Skrutskie, F. Colas, J. Desmars, S. A. Stern, and N. H. C. Team. Pre-encounter update on (486958) 2014mu69 and occultation results from 2017 and 2018. 2018.
- [7] A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, E. Beshore, S. Larson, M. J. Graham, R. Williams, E. Christensen, M. Catelan, A. Boattini, A. Gibbs, R. Hill, and R. Kowalski. FIRST RESULTS FROM THE CATALINA REAL-TIME TRANSIENT SURVEY. *The Astrophysical Journal*, 696(1):870–884, apr 2009.

- [8] D. Dunham, J. Dunham, M. Buie, S. Preston, D. Herald, D. Farnocchia, J. Giorgini, T. Arai, D. Baba Aissa, and Z. Grigahcene. First Occultation Observations by a Small NEO, (3200) Phaethon. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 52 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 412.01, Oct. 2020.
- [9] D. Dunham, J. Dunham, M. Buie, S. Preston, D. Herald, D. Farnocchia, J. Giorgini, T. Arai, I. Sato, R. Nolthenius, J. Irwin, S. Degenhardt, S. Marshall, J. Moore, S. Whitehurst, R. Venable, M. Skrutskie, F. Marchis, Q. Ye, P. Tanga, D. B. Aissa, and Z. Grigahcene. Accurate NEO Orbits from Occultation Observations. In *7th IAA Planetary Defense Conference*, page 37, Apr. 2021.
- [10] D. W. Dunham, J. B. Dunham, M. Buie, S. Preston, D. Herald, and D. Farnocchia. (3200) Phaethon, First Successful Occultation Observations of a Small Near-Earth Object. In *Asteroid Science in the Age of Hayabusa2 and OSIRIS-REx*, volume 2189 of *LPI Contributions*, page 2062, Nov. 2019.
- [11] H. L. Enos and D. S. Lauretta. A rendezvous with asteroid Bennu. *Nature Astronomy*, 3:363–363, Apr. 2019.
- [12] Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones, M. Biermann, D. W. Evans, L. Eyer, F. Jansen, C. Jordi, S. A. Klioner, U. Lammers, L. Lindegren, X. Luri, F. Mignard, C. Panem, D. Pourbaix, S. Randich, P. Sartoretti, H. I. Siddiqui, C. Soubiran, F. van Leeuwen, N. A. Walton, F. Arenou, U. Bastian, M. Cropper, R. Drimmel, D. Katz, M. G. Lattanzi, J. Bakker, C. Cacciari, J. Castañeda, L. Chaoul, N. Cheek, F. De Angeli, C. Fabricius, R. Guerra, B. Holl, E. Masana, R. Messineo, N. Mowlavi, K. Nienartowicz, P. Panuzzo, J. Portell, M. Riello, G. M. Seabroke, P. Tanga, F. Thévenin, G. Gracia-Abril, G. Comoretto, M. Garcia-Reinaldos, D. Teyssier, M. Altmann, R. Andrae, M. Audard, I. Bellas-Velidis, K. Benson, J. Berthier, R. Blomme, P. Burgess, G. Busso, B. Carry, A. Cellino, G. Clementini, M. Clotet, O. Creevey, M. Davidson, J. De Ridder, L. Delchambre, A. Dell’Oro, C. Ducourant, J. Fernández-Hernández, M. Fouesneau, Y. Frémat, L. Galluccio, M. García-Torres, J. González-Núñez, J. J. González-Vidal, E. Gosset, L. P. Guy, J. L. Halbwachs, N. C. Hambly, D. L. Harrison, J. Hernández, D. Hestroffer, S. T. Hodgkin, A. Hutton, G. Jasiewicz, A. Jean-Antoine-Piccolo, S. Jordan, A. J. Korn, A. Krone-Martins, A. C. Lanzafame, T. Lebzelter, W. Löffler, M. Manteiga, P. M. Marrese, J. M. Martín-Fleitas, A. Moitinho, A. Mora, K. Muinonen, J. Osinde, E. Pancino, T. Pauwels, J. M. Petit, A. Recio-Blanco, P. J. Richards, L. Rimoldini, A. C. Robin, L. M. Sarro, C. Siopis, M. Smith, A. Sozzetti, M. Süveges, J. Torra, W. van Reeve, U. Abbas, A. Abreu Aramburu, S. Accart, C. Aerts, G. Altavilla, M. A. Álvarez, R. Alvarez, J. Alves, R. I. Anderson, A. H. Andrei, E. Anglada Varela, E. Antiche, T. Antoja, B. Arcay, T. L. Astraatmadja, N. Bach, S. G. Baker, L. Balaguer-Núñez,

P. Balm, C. Barache, C. Barata, D. Barbato, F. Barblan, P. S. Barklem, D. Bar-
rado, M. Barros, M. A. Barstow, S. Bartholomé Muñoz, J. L. Bassilana, U. Bec-
ciani, M. Bellazzini, A. Berihuete, S. Bertone, L. Bianchi, O. Bienaymé, S. Blanco-
Cuaresma, T. Boch, C. Boeche, A. Bombrun, R. Borrachero, D. Bossini, S. Bouquil-
lon, G. Bourda, A. Bragaglia, L. Bramante, M. A. Breddels, A. Bressan, N. Brouil-
let, T. Brüsemeister, E. Brugaletta, B. Bucciarelli, A. Burlacu, D. Busonero, A. G.
Butkevich, R. Buzzi, E. Caffau, R. Cancelliere, G. Cannizzaro, T. Cantat-Gaudin,
R. Carballo, T. Carlucci, J. M. Carrasco, L. Casamiquela, M. Castellani, A. Castro-
Ginard, P. Charlot, L. Chemin, A. Chiavassa, G. Cocozza, G. Costigan, S. Cowell,
F. Crifo, M. Crosta, C. Crowley, J. Cuypers, C. Dafonte, Y. Damerddji, A. Dapergo-
las, P. David, M. David, P. de Laverny, F. De Luise, R. De March, D. de Martino,
R. de Souza, A. de Torres, J. Debosscher, E. del Pozo, M. Delbo, A. Delgado,
H. E. Delgado, P. Di Matteo, S. Diakite, C. Diener, E. Distefano, C. Dolding,
P. Drazinos, J. Durán, B. Edvardsson, H. Enke, K. Eriksson, P. Esquej, G. Ey-
nard Bontemps, C. Fabre, M. Fabrizio, S. Faigler, A. J. Falcão, M. Farràs Casas,
L. Federici, G. Fedorets, P. Fernique, F. Figueras, F. Filippi, K. Findeisen, A. Fonti,
E. Fraile, M. Fraser, B. Frézouls, M. Gai, S. Galleti, D. Garabato, F. García-Sedano,
A. Garofalo, N. Garralda, A. Gavel, P. Gavras, J. Gerssen, R. Geyer, P. Giacobbe,
G. Gilmore, S. Girona, G. Giuffrida, F. Glass, M. Gomes, M. Granvik, A. Gueguen,
A. Guerrier, J. Guiraud, R. Gutiérrez-Sánchez, R. Haignon, D. Hatzidimitriou,
M. Hauser, M. Haywood, U. Heiter, A. Helmi, J. Heu, T. Hilger, D. Hobbs,
W. Hofmann, G. Holland, H. E. Huckle, A. Hypki, V. Icardi, K. Janßen, G. Je-
vardat de Fombelle, P. G. Jonker, Á. L. Juhász, F. Julbe, A. Karampelas, A. Kew-
ley, J. Klar, A. Kochoska, R. Kohley, K. Kolenberg, M. Kontizas, E. Kontizas,
S. E. Koposov, G. Kordopatis, Z. Kostrzewa-Rutkowska, P. Koubsky, S. Lambert,
A. F. Lanza, Y. Lasne, J. B. Lavigne, Y. Le Fustec, C. Le Poncin-Lafitte, Y. Le-
breton, S. Leccia, N. Leclerc, I. Lecoœur-Taïbi, H. Lenhardt, F. Leroux, S. Liao,
E. Licata, H. E. P. Lindstrøm, T. A. Lister, E. Livanou, A. Lobel, M. López,
S. Managau, R. G. Mann, G. Mantelet, O. Marchal, J. M. Marchant, M. Marconi,
S. Marinoni, G. Marschalkó, D. J. Marshall, M. Martino, G. Marton, N. Mary,
D. Massari, G. Matijević, T. Mazeh, P. J. McMillan, S. Messina, D. Michalik,
N. R. Millar, D. Molina, R. Molinaro, L. Molnár, P. Montegriffo, R. Mor, R. Mor-
bidelli, T. Morel, D. Morris, A. F. Mulone, T. Muraveva, I. Musella, G. Nelemans,
L. Nicastro, L. Noval, W. O'Mullane, C. Ordénovic, D. Ordóñez-Blanco, P. Osborne,
C. Pagani, I. Pagano, F. Pailler, H. Palacin, L. Palaversa, A. Panahi, M. Pawlak,
A. M. Piersimoni, F. X. Pineau, E. Plachy, G. Plum, E. Poggio, E. Poujoulet,
A. Prša, L. Pulone, E. Racero, S. Ragaini, N. Rambaux, M. Ramos-Lerate, S. Reg-
ibo, C. Reylé, F. Riclet, V. Ripepi, A. Riva, A. Rivard, G. Rixon, T. Roegiers,
M. Roelens, M. Romero-Gómez, N. Rowell, F. Royer, L. Ruiz-Dern, G. Sadowski,
T. Sagristà Sellés, J. Sahlmann, J. Salgado, E. Salguero, N. Sanna, T. Santana-
Ros, M. Sarasso, H. Savietto, M. Schultheis, E. Sciacca, M. Segol, J. C. Segovia,

D. Ségransan, I. C. Shih, L. Siltala, A. F. Silva, R. L. Smart, K. W. Smith, E. Solano, F. Solitro, R. Sordo, S. Soria Nieto, J. Souchay, A. Spagna, F. Spoto, U. Stampa, I. A. Steele, H. Steidelmüller, C. A. Stephenson, H. Stoev, F. F. Suess, J. Surdej, L. Szabados, E. Szegedi-Elek, D. Tapiador, F. Taris, G. Tauran, M. B. Taylor, R. Teixeira, D. Terrett, P. Teyssandier, W. Thuillot, A. Titarenko, F. Torra Clotet, C. Turon, A. Ulla, E. Utrilla, S. Uzzi, M. Vaillant, G. Valentini, V. Valette, A. van Elteren, E. Van Hemelryck, M. van Leeuwen, M. Vaschetto, A. Vecchiato, J. Veljanoski, Y. Viala, D. Vicente, S. Vogt, C. von Essen, H. Voss, V. Votruba, S. Voutsinas, G. Walmsley, M. Weiler, O. Wertz, T. Wevers, L. Wyrzykowski, A. Yoldas, M. Žerjal, H. Ziaeeepour, J. Zorec, S. Zschocke, S. Zucker, C. Zurbach, and T. Zwitter. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *A&A*, 616:A1, Aug. 2018.

- [13] Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O. L. Creevey, D. W. Evans, L. Eyer, A. Hutton, F. Jansen, C. Jordi, S. A. Klioner, U. Lammers, L. Lindegren, X. Luri, F. Mignard, C. Panem, D. Pourbaix, S. Randich, P. Sartoretti, C. Soubiran, N. A. Walton, F. Arenou, C. A. L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Cropper, R. Drimmel, D. Katz, M. G. Lattanzi, F. van Leeuwen, J. Bakker, C. Cacciari, J. Castañeda, F. De Angeli, C. Ducourant, C. Fabricius, M. Fouesneau, Y. Frémat, R. Guerra, A. Guerrier, J. Guiraud, A. Jean-Antoine Piccolo, E. Masana, R. Messineo, N. Mowlavi, C. Nicolas, K. Nienartowicz, F. Pailler, P. Panuzzo, F. Riclet, W. Roux, G. M. Seabroke, R. Sordo, P. Tanga, F. Thévenin, G. Gracia-Abril, J. Portell, D. Teyssier, M. Altmann, R. Andrae, I. Bellas-Velidis, K. Benson, J. Berthier, R. Blomme, E. Brugaletta, P. W. Burgess, G. Busso, B. Carry, A. Cellino, N. Cheek, G. Clementini, Y. Damerdj, M. Davidson, L. Delchambre, A. Dell’Oro, J. Fernández-Hernández, L. Galluccio, P. García-Lario, M. Garcia-Reinaldos, J. González-Núñez, E. Gosset, R. Haigron, J. L. Halbwachs, N. C. Hambly, D. L. Harrison, D. Hatzidimitriou, U. Heiter, J. Hernández, D. Hestroffer, S. T. Hodgkin, B. Holl, K. Janßen, G. Jevardat de Fombelle, S. Jordan, A. Krone-Martins, A. C. Lanzafame, W. Löffler, A. Lorca, M. Manteiga, O. Marchal, P. M. Marrese, A. Moitinho, A. Mora, K. Muinonen, P. Osborne, E. Pancino, T. Pauwels, J. M. Petit, A. Recio-Blanco, P. J. Richards, M. Riello, L. Rimoldini, A. C. Robin, T. Roegiers, J. Rybizki, L. M. Sarro, C. Siopis, M. Smith, A. Sozzetti, A. Ulla, E. Utrilla, M. van Leeuwen, W. van Reeve, U. Abbas, A. Abreu Aramburu, S. Accart, C. Aerts, J. J. Aguado, M. Ajaj, G. Altavilla, M. A. Álvarez, J. Álvarez Cid-Fuentes, J. Alves, R. I. Anderson, E. Anglada Varela, T. Antoja, M. Audard, D. Baines, S. G. Baker, L. Balaguer-Núñez, E. Balbinot, Z. Balog, C. Barache, D. Barbato, M. Barros, M. A. Barstow, S. Bartolomé, J. L. Bassilana, N. Bauchet, A. Baudesson-Stella, U. Becciani, M. Bellazzini, M. Bernet, S. Bertone, L. Bianchi, S. Blanco-Cuaresma, T. Boch, A. Bombrun, D. Bossini, S. Bouquillon, A. Bragaglia, L. Bramante, E. Breedt, A. Bressan, N. Brouillet, B. Bucciarelli, A. Burlacu, D. Busonero, A. G. Butkevich, R. Buzzi,

E. Caffau, R. Cancelliere, H. Cánovas, T. Cantat-Gaudin, R. Carballo, T. Carlucci, M. I. Carnerero, J. M. Carrasco, L. Casamiquela, M. Castellani, A. Castro-Ginard, P. Castro Sampol, L. Chaoul, P. Charlot, L. Chemin, A. Chiavassa, M. R. L. Cioni, G. Comoretto, W. J. Cooper, T. Cornez, S. Cowell, F. Crifo, M. Crosta, C. Crowley, C. Dafonte, A. Dapergolas, M. David, P. David, P. de Laverny, F. De Luise, R. De March, J. De Ridder, R. de Souza, P. de Teodoro, A. de Torres, E. F. del Peloso, E. del Pozo, M. Delbo, A. Delgado, H. E. Delgado, J. B. Delisle, P. Di Matteo, S. Diakite, C. Diener, E. Distefano, C. Dolding, D. Eappachen, B. Edvardsson, H. Enke, P. Esquej, C. Fabre, M. Fabrizio, S. Faigler, G. Fedorets, P. Fernique, A. Fienga, F. Figueras, C. Fouron, F. Fragkoudi, E. Fraile, F. Franke, M. Gai, D. Garabato, A. Garcia-Gutierrez, M. García-Torres, A. Garofalo, P. Gavras, E. Gerlach, R. Geyer, P. Giacobbe, G. Gilmore, S. Girona, G. Giuffrida, R. Gomel, A. Gomez, I. Gonzalez-Santamaria, J. J. González-Vidal, M. Granvik, R. Gutiérrez-Sánchez, L. P. Guy, M. Hauser, M. Haywood, A. Helmi, S. L. Hidalgo, T. Hilger, N. Hladczuk, D. Hobbs, G. Holland, H. E. Huckle, G. Jasiewicz, P. G. Jonker, J. Juaristi Campillo, F. Julbe, L. Karbevská, P. Kervella, S. Khanna, A. Kochoska, M. Kontizas, G. Kordopatis, A. J. Korn, Z. Kostrzewa-Rutkowska, K. Kruszyńska, S. Lambert, A. F. Lanza, Y. Lasne, J. F. Le Champion, Y. Le Fustec, Y. Lebreton, T. Lebzelter, S. Leccia, N. Leclerc, I. Lecoœur-Taïbi, S. Liao, E. Licata, H. E. P. Lindstrøm, T. A. Lister, E. Livanou, A. Lobel, P. Madrero Pardo, S. Managau, R. G. Mann, J. M. Marchant, M. Marconi, M. M. S. Marcos Santos, S. Marinoni, F. Marocco, D. J. Marshall, L. Martin Polo, J. M. Martín-Fleitas, A. Masip, D. Massari, A. Mastrobuono-Battisti, T. Mazeh, P. J. McMillan, S. Messina, D. Michalik, N. R. Millar, A. Mints, D. Molina, R. Molinaro, L. Molnár, P. Montegriffo, R. Mor, R. Morbidelli, T. Morel, D. Morris, A. F. Mulone, D. Munoz, T. Muraveva, C. P. Murphy, I. Musella, L. Noval, C. Ordénovic, G. Orrù, J. Osinde, C. Pagani, I. Pagano, L. Palaversa, P. A. Palicio, A. Panahi, M. Pawlak, X. Peñalosa Esteller, A. Penttilä, A. M. Piersimoni, F. X. Pineau, E. Plachy, G. Plum, E. Poggio, E. Poretti, E. Poujoulet, A. Prša, L. Pulone, E. Racero, S. Ragaini, M. Rainer, C. M. Raiteri, N. Rambaux, P. Ramos, M. Ramos-Lerate, P. Re Fiorentin, S. Regibo, C. Reylé, V. Ripepi, A. Riva, G. Rixon, N. Robichon, C. Robin, M. Roelens, L. Rohrbasser, M. Romero-Gómez, N. Rowell, F. Royer, K. A. Rybicki, G. Sadowski, A. Sagristà Sellés, J. Sahlmann, J. Salgado, E. Salguero, N. Samaras, V. Sanchez Gimenez, N. Sanna, R. Santoveña, M. Sarasso, M. Schultheis, E. Sciacca, M. Segol, J. C. Segovia, D. Ségransan, D. Semeux, S. Shahaf, H. I. Siddiqui, A. Siebert, L. Siltala, E. Slezak, R. L. Smart, E. Solano, F. Solitro, D. Souami, J. Souchay, A. Spagna, F. Spoto, I. A. Steele, H. Steidelmüller, C. A. Stephenson, M. Süveges, L. Szabados, E. Szegedi-Elek, F. Taris, G. Tauran, M. B. Taylor, R. Teixeira, W. Thuillot, N. Tonello, F. Torra, J. Torra, C. Turon, N. Unger, M. Vaillant, E. van Dillen, O. Vanel, A. Vecchiato, Y. Viala, D. Vicente, S. Voutsinas, M. Weiler, T. Wevers, L. Wyrzykowski, A. Yoldas, P. Yvard, H. Zhao, J. Zorec, S. Zucker,

C. Zurbach, and T. Zwitter. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties (Corrigendum). *A&A*, 650:C3, June 2021.

- [14] Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, D. W. Evans, L. Eyer, F. Jansen, C. Jordi, D. Katz, S. A. Klioner, U. Lammers, L. Lindegren, X. Luri, W. O’Mullane, C. Panem, D. Pourbaix, S. Randich, P. Sartoretti, H. I. Siddiqui, C. Soubiran, V. Valette, F. van Leeuwen, N. A. Walton, C. Aerts, F. Arenou, M. Cropper, E. Høg, M. G. Lattanzi, E. K. Grebel, A. D. Holland, C. Huc, X. Passot, M. Perryman, L. Bramante, C. Cacciari, J. Castañeda, L. Chaoul, N. Cheek, F. De Angeli, C. Fabricius, R. Guerra, J. Hernández, A. Jean-Antoine-Piccolo, E. Masana, R. Messineo, N. Mowlavi, K. Nienartowicz, D. Ordóñez-Blanco, P. Panuzzo, J. Portell, P. J. Richards, M. Riello, G. M. Seabroke, P. Tanga, F. Thévenin, J. Torra, S. G. Els, G. Gracia-Abril, G. Comoretto, M. Garcia-Reinaldos, T. Lock, E. Mercier, M. Altmann, R. Andrae, T. L. Astraatmadja, I. Bellas-Velidis, K. Benson, J. Berthier, R. Blomme, G. Busso, B. Carry, A. Cellino, G. Clementini, S. Cowell, O. Creevey, J. Cuypers, M. Davidson, J. De Ridder, A. de Torres, L. Delchambre, A. Dell’Oro, C. Ducourant, Y. Frémat, M. García-Torres, E. Gosset, J. L. Halbwachs, N. C. Hambly, D. L. Harrison, M. Hauser, D. Hestroffer, S. T. Hodgkin, H. E. Huckle, A. Hutton, G. Jasiewicz, S. Jordan, M. Kontizas, A. J. Korn, A. C. Lanzafame, M. Manteiga, A. Moitinho, K. Muinonen, J. Osinde, E. Pancino, T. Pauwels, J. M. Petit, A. Recio-Blanco, A. C. Robin, L. M. Sarro, C. Siopis, M. Smith, K. W. Smith, A. Sozzetti, W. Thuillot, W. van Reeve, Y. Viala, U. Abbas, A. Abreu Aramburu, S. Accart, J. J. Aguado, P. M. Allan, W. Allasia, G. Altavilla, M. A. Álvarez, J. Alves, R. I. Anderson, A. H. Andrei, E. Anglada Varela, E. Antiche, T. Antoja, S. Antón, B. Arcay, N. Bach, S. G. Baker, L. Balaguer-Núñez, C. Barache, C. Barata, A. Barbier, F. Barblan, D. Barrado y Navascués, M. Barros, M. A. Barstow, U. Becciani, M. Bellazzini, A. Bello García, V. Belokurov, P. Bendjoya, A. Berihuete, L. Bianchi, O. Bienaymé, F. Billebaud, N. Blagorodnova, S. Blanco-Cuaresma, T. Boch, A. Bombrun, R. Borrachero, S. Bouquillon, G. Bourda, H. Bouy, A. Bragaglia, M. A. Breddels, N. Brouillet, T. Brüsemeister, B. Bucciarelli, P. Burgess, R. Burgon, A. Burlacu, D. Busonero, R. Buzzzi, E. Caffau, J. Cambras, H. Campbell, R. Cancelleri, T. Cantat-Gaudin, T. Carlucci, J. M. Carrasco, M. Castellani, P. Charlot, J. Charnas, A. Chiavassa, M. Clotet, G. Cocozza, R. S. Collins, G. Costigan, F. Crifo, N. J. G. Cross, M. Crosta, C. Crowley, C. Dafonte, Y. Damerdj, A. Dapergolas, P. David, M. David, P. De Cat, F. de Felice, P. de Laverny, F. De Luise, R. De March, D. de Martino, R. de Souza, J. Debosscher, E. del Pozo, M. Delbo, A. Delgado, H. E. Delgado, P. Di Matteo, S. Diakite, E. Distefano, C. Dolding, S. Dos Anjos, P. Drazinos, J. Duran, Y. Dzigan, B. Edvardsson, H. Enke, N. W. Evans, G. Eynard Bontemps, C. Fabre, M. Fabrizio, S. Faigler, A. J. Falcão, M. Farràs Casas, L. Federici, G. Fedorets, J. Fernández-

Hernández, P. Fernique, A. Fienga, F. Figueras, F. Filippi, K. Findeisen, A. Fonti, M. Fouesneau, E. Fraile, M. Fraser, J. Fuchs, M. Gai, S. Galleti, L. Galluccio, D. Garabato, F. García-Sedano, A. Garofalo, N. Garralda, P. Gavras, J. Gerssen, R. Geyer, G. Gilmore, S. Girona, G. Giuffrida, M. Gomes, A. González-Marcos, J. González-Núñez, J. J. González-Vidal, M. Granvik, A. Guerrier, P. Guillout, J. Guiraud, A. Gúrpide, R. Gutiérrez-Sánchez, L. P. Guy, R. Haigron, D. Hatzidimitriou, M. Haywood, U. Heiter, A. Helmi, D. Hobbs, W. Hofmann, B. Holl, G. Holland, J. A. S. Hunt, A. Hypki, V. Icardi, M. Irwin, G. Jevardat de Fombelle, P. Jofré, P. G. Jonker, A. Jorissen, F. Julbe, A. Karampelas, A. Kochoska, R. Kohley, K. Kolenberg, E. Kontizas, S. E. Koposov, G. Kordopatis, P. Koubsky, A. Krone-Martins, M. Kudryashova, I. Kull, R. K. Bachchan, F. Lacoste-Seris, A. F. Lanza, J. B. Lavigne, C. Le Poncin-Lafitte, Y. Lebreton, T. Lebzelter, S. Leccia, N. Leclerc, I. Lecoœur-Taibi, V. Lemaitre, H. Lenhardt, F. Leroux, S. Liao, E. Licata, H. E. P. Lindstrøm, T. A. Lister, E. Livanou, A. Lobel, W. Löffler, M. López, D. Lorenz, I. MacDonald, T. Magalhães Fernandes, S. Managau, R. G. Mann, G. Mantelet, O. Marchal, J. M. Marchant, M. Marconi, S. Marinoni, P. M. Marrese, G. Marschalkó, D. J. Marshall, J. M. Martín-Fleitas, M. Martino, N. Mary, G. Matijević, T. Mazeh, P. J. McMillan, S. Messina, D. Michalik, N. R. Millar, B. M. H. Miranda, D. Molina, R. Molinaro, M. Molinaro, L. Molnár, M. Moniez, P. Montegriffo, R. Mor, A. Mora, R. Morbidelli, T. Morel, S. Morgenthaler, D. Morris, A. F. Mulone, T. Muraveva, I. Musella, J. Narbonne, G. Nelemans, L. Nicastro, L. Noval, C. Ordénovic, J. Ordieres-Meré, P. Osborne, C. Pagani, I. Pagano, F. Pailler, H. Palacin, L. Palaversa, P. Parsons, M. Pecoraro, R. Pedrosa, H. Pentikäinen, B. Pichon, A. M. Piersimoni, F. X. Pineau, E. Plachy, G. Plum, E. Poujoulet, A. Prša, L. Pulone, S. Ragaini, S. Rago, N. Rambaux, M. Ramos-Lerate, P. Ranalli, G. Rauw, A. Read, S. Regibo, C. Reylé, R. A. Ribeiro, L. Rimoldini, V. Ripepi, A. Riva, G. Rixon, M. Roelens, M. Romero-Gómez, N. Rowell, F. Royer, L. Ruiz-Dern, G. Sadowski, T. Sagristà Sellés, J. Sahlmann, J. Salgado, E. Salguero, M. Sarasso, H. Savietto, M. Schultheis, E. Sciacca, M. Segol, J. C. Segovia, D. Segransan, I. C. Shih, R. Smareglia, R. L. Smart, E. Solano, F. Solitro, R. Sordo, S. Soria Nieto, J. Souchay, A. Spagna, F. Spoto, U. Stampa, I. A. Steele, H. Steidelmüller, C. A. Stephenson, H. Stoev, F. F. Suess, M. Süveges, J. Surdej, L. Szabados, E. Szegedi-Elek, D. Tapiador, F. Taris, G. Tauran, M. B. Taylor, R. Teixeira, D. Terrett, B. Tingley, S. C. Trager, C. Turon, A. Ulla, E. Utrilla, G. Valentini, A. van Elteren, E. Van Hemelryck, M. van Leeuwen, M. Varadi, A. Vecchiato, J. Veljanoski, T. Via, D. Vicente, S. Vogt, H. Voss, V. Votruba, S. Voutsinas, G. Walmsley, M. Weiler, K. Weingrill, T. Wevers, Ł. Wyrzykowski, A. Yoldas, M. Žerjal, S. Zucker, C. Zurbach, T. Zwitter, A. Alecu, M. Allen, C. Allende Prieto, A. Amorim, G. Anglada-Escudé, V. Arsenijevic, S. Azaz, P. Balm, M. Beck, H. H. Bernstein, L. Bigot, A. Bijaoui, C. Blasco, M. Bonfigli, G. Bono, S. Boudreault, A. Bressan, S. Brown, P. M. Brunet, P. Bunclark, R. Buonanno,

A. G. Butkevich, C. Carret, C. Carrion, L. Chemin, F. Chéreau, L. Corcione, E. Darmigny, K. S. de Boer, P. de Teodoro, P. T. de Zeeuw, C. Delle Luche, C. D. Domingues, P. Dubath, F. Fodor, B. Frézouls, A. Fries, D. Fustes, D. Fyfe, E. Gallardo, J. Gallegos, D. Gardiol, M. Gebran, A. Gomboc, A. Gómez, E. Grux, A. Gueguen, A. Heyrovsky, J. Hoar, G. Iannicola, Y. Isasi Parache, A. M. Janotto, E. Joliet, A. Jonckheere, R. Keil, D. W. Kim, P. Klagyivik, J. Klar, J. Knude, O. Kochukhov, I. Kolka, J. Kos, A. Kutka, V. Lainey, D. LeBouquin, C. Liu, D. Loreggia, V. V. Makarov, M. G. Marseille, C. Martayan, O. Martinez-Rubi, B. Massart, F. Meynadier, S. Mignot, U. Munari, A. T. Nguyen, T. Nordlander, P. Ocvirk, K. S. O’Flaherty, A. Olias Sanz, P. Ortiz, J. Osorio, D. Oszkiewicz, A. Ouzounis, M. Palmer, P. Park, E. Pasquato, C. Peltzer, J. Peralta, F. Péturaud, T. Pieniluoma, E. Pigozzi, J. Poels, G. Prat, T. Prod’homme, F. Raison, J. M. Rebordao, D. Risquez, B. Rocca-Volmerange, S. Rosen, M. I. Ruiz-Fuertes, F. Russo, S. Sembay, I. Serraller Vizcaino, A. Short, A. Siebert, H. Silva, D. Sinachopoulos, E. Slezak, M. Soffel, D. Sosnowska, V. Straizys, M. ter Linden, D. Terrell, S. Theil, C. Tiede, L. Troisi, P. Tsalmantza, D. Tur, M. Vaccari, F. Vachier, P. Valles, W. Van Hamme, L. Veltz, J. Virtanen, J. M. Wallut, R. Wichmann, M. I. Wilkinson, H. Ziaepour, and S. Zschocke. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *A&A*, 595:A2, Nov. 2016.

- [15] B. A. S. Gustafson. Geminid meteoroids traced to cometary activity on Phaethon. *A&A*, 225(2):533–540, Nov. 1989.
- [16] Hanus, J., Durech, J., Oszkiewicz, D. A., Behrend, R., Carry, B., Delbo, M., Adam, O., Afonina, V., Anquetin, R., Antonini, P., Arnold, L., Audejean, M., Aurard, P., Bachschmidt, M., Baduel, B., Barbotin, E., Barroy, P., Baudouin, P., Berard, L., Berger, N., Bernasconi, L., Bosch, J-G., Bouley, S., Bozhinova, I., Brinsfield, J., Brunetto, L., Canaud, G., Caron, J., Carrier, F., Casalnuovo, G., Casulli, S., Cerda, M., Chalamet, L., Charbonnel, S., Chinaglia, B., Cikota, A., Colas, F., Coliac, J-F., Collet, A., Coloma, J., Conjat, M., Conseil, E., Costa, R., Crippa, R., Cristofanelli, M., Damerdj, Y., Debackère, A., Decock, A., Déhais, Q., Déléage, T., Delmelle, S., Demeautis, C., Drózd, M., Dubos, G., Dulcamara, T., Dumont, M., Durkee, R., Dymock, R., Escalante del Valle, A., Esseiva, N., Esseiva, R., Esteban, M., Fauchez, T., Fauerbach, M., Fauvaud, M., Fauvaud, S., Forné, E., Fournel, C., Fradet, D., Garlitz, J., Gerteis, O., Gillier, C., Gillon, M., Giraud, R., Godard, J-P., Goncalves, R., Hamanowa, Hiroko, Hamanowa, Hiromi, Hay, K., Hellmich, S., Heterier, S., Higgins, D., Hirsch, R., Hodosan, G., Hren, M., Hygate, A., Innocent, N., Jacquinet, H., Jawahar, S., Jehin, E., Jerosimic, L., Klotz, A., Koff, W., Korlevic, P., Kosturkiewicz, E., Krafft, P., Krugly, Y., Kugel, F., Labrevoir, O., Lecacheux, J., Lehký, M., Leroy, A., Lesquerbault, B., Lopez-Gonzales, M. J., Lutz, M., Mallecot, B., Manfroid, J., Manzini, F., Marciniak, A., Martin, A., Modave, B., Montaignut, R., Montier, J., Morelle, E., Morton, B.,

- Mottola, S., Naves, R., Nomen, J., Oey, J., Ogloza, W., Paiella, M., Pallares, H., Peyrot, A., Pilcher, F., Pirenne, J.-F., Piron, P., Polińska, M., Polotto, M., Poncy, R., Previt, J. P., Reignier, F., Renauld, D., Ricci, D., Richard, F., Rinner, C., Risoldi, V., Robilliard, D., Romeuf, D., Rousseau, G., Roy, R., Ruthroff, J., Salom, P. A., Salvador, L., Sanchez, S., Santana-Ros, T., Scholz, A., Séné, G., Skiff, B., Sobkowiak, K., Sogorb, P., Soldán, F., Spiridakis, A., Splanska, E., Sposetti, S., Starkey, D., Stephens, R., Stiepen, A., Stoss, R., Strajnic, J., Teng, J.-P., Tumolo, G., Vagnozzi, A., Vanoutryve, B., Vugnon, J. M., Warner, B. D., Waucomont, M., Wertz, O., Winiarski, M., and Wolf, M. New and updated convex shape models of asteroids based on optical data from a large collaboration network. *A&A*, 586:A108, 2016.
- [17] J. Hanuš, D. Vokrouhlický, M. Delbo', D. Farnocchia, D. Polishook, P. Pravec, K. Hornoch, H. Kučáková, P. Kušnirák, R. Stephens, and B. Warner. (3200) Phaethon: Bulk density from Yarkovsky drift detection. *A&A*, 620:L8, Dec. 2018.
- [18] P. Hong, K. Ishibashi, S. Sato, O. Okudaira, M. Otsuki, T. Hosonuma, H. Toyota, K. Nishiyama, and T. Takashima. Initial Test for the Breadboard Model of TCAP Tracking Mirror of DESTINY+ Mission. In *52nd Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 1741, Mar. 2021.
- [19] K. Ishibashi, P. Hong, T. Okamoto, T. Ishimaru, N. Okazaki, T. Hosonuma, S. Sato, T. Arai, F. Yoshida, O. Okudaira, M. Kagitani, T. Miyabara, M. Ohta, and T. Takashima. Development of Cameras Onboard DESTINY+ Spacecraft for Flyby Observation of (3200) Phaethon. In *52nd Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 1405, Mar. 2021.
- [20] P. Jenniskens. *Meteor Showers and their Parent Comets*. Cambridge University Press, 2006.
- [21] D. Jewitt, D. Asmus, B. Yang, and J. Li. High-resolution thermal infrared imaging of 3200 phaethon. *The Astronomical Journal*, 157(5):193, apr 2019.
- [22] D. Jewitt and J. Li. ACTIVITY IN GEMINID PARENT (3200) PHAETHON. *The Astronomical Journal*, 140(5):1519–1527, oct 2010.
- [23] T. Kareta, V. Reddy, C. Hergenrother, D. S. Lauretta, T. Arai, D. Takir, J. Sanchez, and J. Hanuš. Rotationally resolved spectroscopic characterization of near-earth object (3200) phaethon. *The Astronomical Journal*, 156(6):287, nov 2018.
- [24] Kim, M.-J., Lee, H.-J., Lee, S.-M., Kim, D.-H., Yoshida, F., Bartczak, P., Dudziński, G., Park, J., Choi, Y.-J., Moon, H.-K., Yim, H.-S., Choi, J., Choi, E.-J., Yoon, J.-N., Serebryanskiy, A., Krugov, M., Reva, I., Ergashev, K. E., Burkhonov, O., Ehgamberdiev, S. A., Turayev, Y., Lin, Z.-Y., Arai, T., Ohtsuka, K., Ito, T., Urakawa, S., and Ishiguro, M. Optical observations of nea 3200 phaethon (1983 tb) during the 2017 apparition. *A&A*, 619:A123, 2018.

- [25] H. Krüger. Dust Science with the DESTINY+ Dust Analyzer. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2021–871, Sept. 2021.
- [26] Y. Krugly, I. Belskaya, V. Shevchenko, V. Chiorny, F. Velichko, S. Mottola, A. Erikson, G. Hahn, A. Nathues, G. Neukum, N. Gaftonyuk, and E. Dotto. The near-earth objects follow-up program: Iv. ccd photometry in 1996–1999. *Icarus*, 158(2):294–304, 2002.
- [27] D. S. Lauretta, D. N. Dellagiustina, C. A. Bennett, D. R. Golish, K. J. Becker, S. S. Balram-Knutson, O. S. Barnouin, T. L. Becker, W. F. Bottke, W. V. Boynton, H. Campins, B. E. Clark, H. C. Connolly, C. Y. Drouet D’Aubigny, J. P. Dworkin, J. P. Emery, H. L. Enos, V. E. Hamilton, C. W. Hergenrother, E. S. Howell, M. R. M. Izawa, H. H. Kaplan, M. C. Nolan, B. Rizk, H. L. Roper, D. J. Scheeres, P. H. Smith, K. J. Walsh, C. W. V. Wolner, and Osiris-Rex Team. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature*, 568(7750):55–60, Mar. 2019.
- [28] M. Lazzarin, V. Petropoulou, I. Bertini, F. La Forgia, P. Ochner, A. Migliorini, and A. Siviero. Phaethon variability during december 2017 closest approach to earth. *Planetary and Space Science*, 165:115–123, 2019.
- [29] H.-J. Lee, M.-J. Kim, D.-H. Kim, H.-K. Moon, Y.-J. Choi, C.-H. Kim, B.-C. Lee, F. Yoshida, D.-G. Roh, and H. Seo. Investigation of surface homogeneity of (3200) phaethon. *Planetary and Space Science*, 165:296–302, 2019.
- [30] Y. Li, Z. Sternovsky, H. Krueger, R. Srama, M. Kobayashi, N. Altobelli, T. Arai, A. Mocker, H. Kimura, J. Simolka, M. Tieloff, F. Posterberg, N. Khawaja, J. Hillier, M. Sommer, H. Strack, and S. Kempf. Interplanetary and interstellar dust measurement with DESTINY+. In *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January - 4 February*, volume 43, page 307, Jan. 2021.
- [31] Z.-Y. Lin, F. Yoshida, Y.-C. Lin, C.-C. Cheng, W.-H. Ip, Y.-C. Cheng, K.-S. Pan, K. Daisuke, and H.-C. Chi. A study of photometric observations of (3200) phaethon from lulin observatory. *Planetary and Space Science*, 194:105114, 2020.
- [32] E. MacLennan, A. Toliou, and M. Granvik. Dynamical evolution and thermal history of asteroids (3200) phaethon and (155140) 2005 ud. *Icarus*, 366:114535, 2021.
- [33] E. A. Magnier, K. C. Chambers, H. A. Flewelling, J. C. Hoblitt, M. E. Huber, P. A. Price, W. E. Sweeney, C. Z. Waters, L. Denneau, P. W. Draper, K. W. Hodapp, R. Jedicke, N. Kaiser, R. P. Kudritzki, N. Metcalfe, C. W. Stubbs, and R. J. Wainscoat. The Pan-STARRS Data-processing System. *ApJS*, 251(1):3, Nov. 2020.

- [34] K. Ohtsuka, T. Ito, D. Kinoshita, S. Abe, K. Sawai, K. Funabashi, R. Kato, S. Miyasaka, S. Hasegawa, T. Nakamura, and W.-P. Chen. Full rotationally phase-resolved visible reflectance spectroscopy of 3200 phaethon. *Planetary and Space Science*, 191:104940, 2020.
- [35] K. Ohtsuka, A. Nakato, T. Nakamura, D. Kinoshita, T. Ito, M. Yoshikawa, and S. Hasegawa. Solar-Radiation Heating Effects on 3200 Phaethon. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61(6):1375–1387, 12 2009.
- [36] P. Pravec, M. Wolf, and L. Šarounová. Lightcurves of 26 near-earth asteroids. *Icarus*, 136(1):124–153, 1998.
- [37] M. Tabeshian, P. Wiegert, Q. Ye, M.-T. Hui, X. Gao, and H. Tan. Asteroid (3200) phaethon: Colors, phase curve, limits on cometary activity, and fragmentation. *The Astronomical Journal*, 158(1):30, jun 2019.
- [38] P. A. Taylor, E. G. Rivera-Valentín, L. A. Benner, S. E. Marshall, A. K. Virkki, F. C. Venditti, L. F. Zambrano-Marin, S. S. Bhiravarasu, B. Aponte-Hernandez, C. Rodriguez Sanchez-Vahamonde, and J. D. Giorgini. Arecibo radar observations of near-earth asteroid (3200) phaethon during the 2017 apparition. *Planetary and Space Science*, 167:1–8, 2019.
- [39] S. Watanabe, M. Hirabayashi, N. Hirata, N. Hirata, R. Noguchi, Y. Shimaki, H. Ikeda, E. Tatsumi, M. Yoshikawa, S. Kikuchi, H. Yabuta, T. Nakamura, S. Tachibana, Y. Ishihara, T. Morota, K. Kitazato, N. Sakatani, K. Matsumoto, K. Wada, H. Senshu, C. Honda, T. Michikami, H. Takeuchi, T. Kouyama, R. Honda, S. Kameda, T. Fuse, H. Miyamoto, G. Komatsu, S. Sugita, T. Okada, N. Namiki, M. Arakawa, M. Ishiguro, M. Abe, R. Gaskell, E. Palmer, O. S. Barnouin, P. Michel, A. S. French, J. W. McMahon, D. J. Scheeres, P. A. Abell, Y. Yamamoto, S. Tanaka, K. Shirai, M. Matsuoka, M. Yamada, Y. Yokota, H. Suzuki, K. Yoshioka, Y. Cho, S. Tanaka, N. Nishikawa, T. Sugiyama, H. Kikuchi, R. Hemmi, T. Yamaguchi, N. Ogawa, G. Ono, Y. Mimasu, K. Yoshikawa, T. Takahashi, Y. Takei, A. Fujii, C. Hirose, T. Iwata, M. Hayakawa, S. Hosoda, O. Mori, H. Sawada, T. Shimada, S. Soldini, H. Yano, R. Tsukizaki, M. Ozaki, Y. Iijima, K. Ogawa, M. Fujimoto, T. M. Ho, A. Moussi, R. Jaumann, J. P. Bibring, C. Krause, F. Terui, T. Saiki, S. Nakazawa, and Y. Tsuda. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. *Science*, 364(6437):268–272, Apr. 2019.
- [40] S.-i. Watanabe, Y. Tsuda, M. Yoshikawa, S. Tanaka, T. Saiki, and S. Nakazawa. Hayabusa2 Mission Overview. *SSRv*, 208(1-4):3–16, July 2017.
- [41] I. P. Williams and Z. Wu. The Geminid meteor stream and asteroid 3200 Phaethon. *MNRAS*, 262(1):231–248, May 1993.
- [42] F. Yoshida, T. Hayamizu, K. Miyashita, H. Watanabe, H. Yamamura, H. Akitaya, A. Asai, Y. Fujiwara, T. Goto, G. L. Hashimoto, A. Hatanaka, T. Horaguchi,

M. Ida, K. Imamura, K. Isobe, M. Ishiguro, N. Kaizuka, H. Kasebe, Y. Kawasaki, T. Kim, K. Kitazaki, N. Manago, M. Matsumura, H. Matsushita, S. Matsuura, T. Nakamura, T. Nagata, H. Noda, M. Ogawa, O. Ohshima, M. Owada, K. Saitou, M. Tsumura, Y. Ueyama, H. Watanabe, M.-y. Yamamoto, H. Yoshihara, T. Fujiwara, M. Haraguchi, H. Hayashi, T. Hitotsuda, T. Horikawa, K. Ishida, T. Ito, S. Jin, W. Kang, T. Katayama, K. S. Kawabata, R. Kawasaki, K. Kim, M. Kita, N. Kitazaki, H. Kurisu, M. Matsushima, C. Matsumi, A. Mihari, M. Naka, T. Nakaoka, R. Nishihama, Y. Nishiyama, S. Nukui, M. Oba, T. Okamoto, Y. Omori, J. Seo, H. Shirakawa, T. Sugino, Y. Tani, K. Takagaki, Y. Ueda, S. Urakawa, M. Watanabe, K. Yamashita, M. Yamashita, I. Sato, S. Murayama, T. Arai, D. Herald, and A. Higuchi. Multi-chord observation of stellar occultation by the near-Earth asteroid (3200) Phaethon on 2021 October 3 (UTC) with very high accuracy. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 12 2022. psac096.