

恒星掩蔽を用いた53 Kalypsoの形状決定

岡山大学 理学部 地球科学科

05502504 宇野 詩織

2024/02/9

要旨

小惑星が観測者と恒星の間を通過する現象を掩蔽という。掩蔽が起きると、恒星の光が小惑星によって遮られるため、恒星の光は観測されなくなる。掩蔽の開始と終了の時刻から小惑星の形と大きさは精度よく求めることができる。本研究は、2023年5月31日に53 Kalypsoが起こした恒星掩蔽を観測し、その結果から53 Kalypsoの形を制約した。

目次

第1章	序論	2
1.1	小惑星の形状決定と掩蔽	2
1.1.1	形や大きさの決め方	2
1.1.2	掩蔽	2
第2章	研究手法	4
2.1	観測	4
2.1.1	掩蔽予報	4
2.1.2	観測	4
第3章	結果	6
3.1	掩蔽時刻の決定	6
3.1.1	測光	6
3.1.2	掩蔽開始と終了の時刻の推定	8
3.1.3	掩蔽時刻	9
3.2	小惑星の形	11
3.2.1	ベッセル基準面	13
3.2.2	53 Kalypso の形	14
第4章	まとめ	16
第5章	謝辞	17

第1章 序論

1.1 小惑星の形状決定と掩蔽

1.1.1 形や大きさの決め方

探査機を使って小惑星の姿を近くから撮影できる機会はほとんどない。したがって小惑星の大きさや形を知るには地上から調べる必要がある。これまでは主に2つの方法で形状を求めてきた。1つ目は小惑星の直接撮像である。しかし、地球から望遠鏡を使って直接撮像する場合、小惑星の大きさや形を決定するには角分解能が足りないという問題がある。角分解能は「2つの接近した天体を識別できる最小の角度」である。地上で観測する場合、角分解能は大気のゆらぎで規定され、その大きさは条件が良い時で0.6秒角くらいになる(高見, 2006)。この角分解能で1auの距離にある天体を観測すると、その分解能は約400kmになる。小惑星は100km未満の天体がほとんどであるため、地球に近づくもの以外は直接撮像して小惑星の大きさを決めることはできない。2つ目は小惑星の明るさから大きさを推定する方法である。観測される小惑星の明るさは、小惑星の断面積と表面の反射率の積で決まる。反射率を仮定すると明るさから断面積を求めることができる。小惑星の自転周期以上の期間に渡って明るさの時間変化を観測すれば、自転による断面積の時間変化を求めることができ、断面積の時間変化から小惑星の形状を3次元で推定することもできる。しかし、この方法は反射率を仮定する必要があり、反射率が既知の小惑星はほとんど無いため、推定された小惑星の断面積がどれくらい正しいのか分からない。従来の方法はどちらも小惑星の大きさや形を決める上で十分とはいえないものであったが、最近では、恒星掩蔽を用いることで、これまでにない精度で小惑星の大きさや形を推定する方法が使えるようになった。

1.1.2 掩蔽

掩蔽は、小惑星が観測者と恒星の間に入って恒星を隠す現象である(図1.1)。小惑星は恒星よりも地球に近い位置にあるので、一般に、地球から見ると小惑星は恒星よりも大きく見える。したがって掩蔽時は恒星が完全に隠されて見えなくなる。恒星が隠される時間は小惑星の大きさと小惑星が観測者の視線を横切る速さで決まる。小惑星の軌道が分かれば移動速度を求めることができるので、恒星が隠された時間を測ると、小惑星の移動速度を使って小惑星の大きさを決められ

る。掩蔽の観測による小惑星の大きさの決定精度は、時間分解能によって決まる。高速撮影が可能なカメラを利用して時間分解能の高い観測をすることで、掩蔽観測は小惑星の大きさを高い精度で決定することができる。

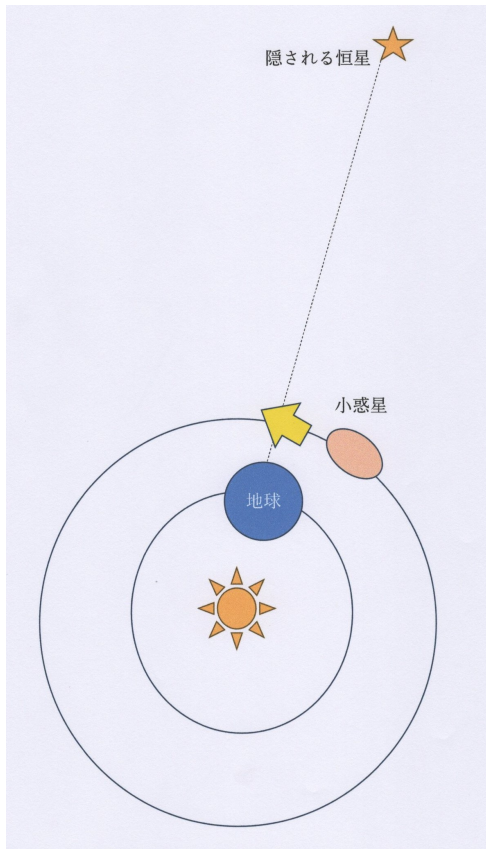


図 1.1: 小惑星による恒星の掩蔽。地球と恒星を結ぶ点線は観測者の視点を表す。小惑星が視線を遮る時、恒星は隠されて見えなくなる。

第2章 研究手法

2.1 観測

2.1.1 掩蔽予報

近年、恒星の位置を精密に測定したデータ Gaia DR2 (Gaia Collaboration et al., 2016, 2018) が利用できるようになり、NASA Horizons System で公開されている小惑星の軌道データと組み合わせることで、掩蔽を高い精度で予測することができるようになった。無料で使える掩蔽予報ソフトウェアが開発されたりウェブサイトですべての予報が公開されたりして、観測者はこれらから情報を入手できる。本研究は Occult4 (Herald, 2022) を用いて掩蔽の予報を作成し、観測計画を立てた。

2.1.2 観測

望遠鏡は口径 35cm の MEADE LX600-35F8ACF を使用した。撮影には CMOS カメラ QHY174M-GPS を用いた。星図はステラナビゲータを使用し、カメラの制御は SharpCap を用いた。時刻は、カメラの付属する GPS アンテナを用いて受信した GPS の時刻を使用した。観測した場所は岡山大学天文台で、緯度は北緯 34 度 41 分 19.1 秒、経度は東経 133 度 55 分 21.4 秒、高度は 45m である。

表 1 にある 4 つの掩蔽を観測した。

表 2.1: 観測した小惑星

日付	隠される恒星	恒星の赤緯	恒星の赤経	恒星の等級	小惑星	時刻	露出時間 (ms)	天候
2023/4/20	Tycho2 0883-00965-1	+ 9 42' 57" 51	13 02' 49" 994	12.40	22 Kalliope	11:48	1000	曇
2023/5/10	UCAC4 504-048476	+10 41' 4" 3	8 42' 45" 8	14.1	1023 Thomana	13:12	2000	曇
2023/5/11	G165817.7-171310	- 17 13' 9" 839	16 58' 17" 7270	14.2	348 May	0:57	500	曇
2023/5/31	UCAC4 527-050263	+15 18' 32" 110	9 52' 7" 5346	13.8	53 Kalypto	12:49	350	晴

第3章 結果

3.1 掩蔽時刻の決定

3.1.1 測光

星の明るさを測ることを測光という。測光は AstroImageJ (Collins et al., 2017) を用いて行った。掩蔽中と掩蔽の前後は、小惑星と恒星が非常に近い位置にあり、両者はほとんど重なって撮影される。測光では、小惑星と恒星を区別せず、まとめて明るさを測定した。掩蔽が起こっていない時刻に撮影した画像では、恒星と小惑星の両方の明るさを足し合わせたものが測られ、掩蔽中は小惑星の明るさだけが測られる。すなわち、掩蔽前後と掩蔽中の明るさは丁度恒星の明るさの分だけ変化する。観測で連続撮像した画像を1枚ずつ測光し、結果を時間順に並べることで、明るさの時間変化から掩蔽の開始と終了の時刻を決定する。

測光は、53 Kalypso によって隠された星だけでなく、その近傍にあった2つの星についてもおこなった。(図 3.1)。掩蔽開始時刻と終了時刻の推定にあたっては、53 Kalypso によって隠された星の明るさを近傍にある2つの恒星の和で割ったものを用いた。近傍にある恒星の明るさで割るのは、空の状態の変化による明るさの変動の影響を取り除くためである。

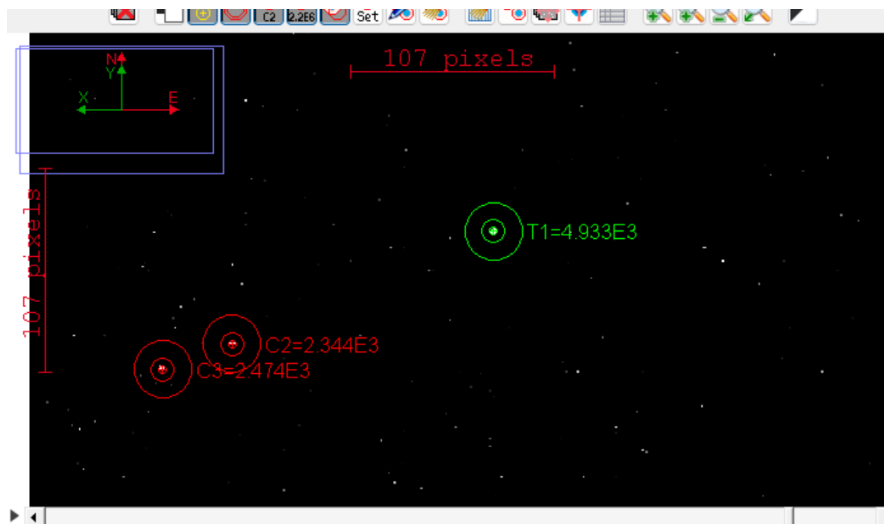


図 3.1: 測光した天体 (フレーム番号は 770). 緑色で囲んでいるのが 53 Kalypso と隠された恒星. 赤色で囲んでいるのは大気透過率の変動を補正するために求めた恒星. 本研究では 2 つの恒星の明るさの和を用いた.

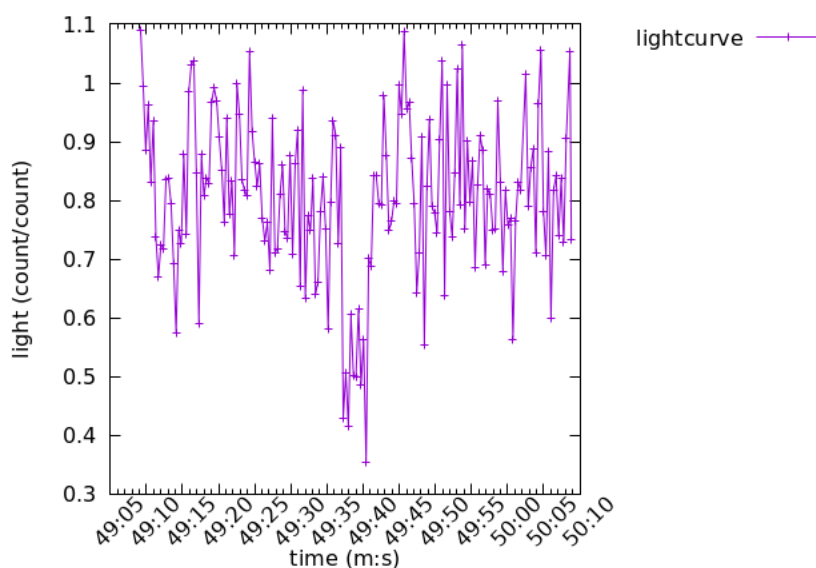


図 3.2: 2023 年 5 月 31 日に観測したライトカーブ。縦軸は明るさ、横軸は撮影時刻である。

3.1.2 掩蔽開始と終了の時刻の推定

図 3.2 は、2023 年 5 月 31 日の観測結果を解析して得られた、53 Kalypso とそれが隠した恒星の明るさの和のライトカーブである。ライトカーブを見ると、掩蔽による明るさの変化以外にも、明るさの変動がある。恒星や小惑星の明るさが短時間にこれだけ変化することはありそうにないので、この明るさの変動は大気のゆらぎや統計的なゆらぎによるものと考えられる。

掩蔽開始時刻と終了時刻を推定するにあたって、掩蔽が起こる前の 114 フレーム、掩蔽中の 10 フレーム、掩蔽が終わった後の 119 フレーム、それぞれについて平均と不偏分散を計算し、平均をゆらぎが無い場合の明るさ、不偏分散をゆらぎの大きさと推定した (表 3.1)。

露出中に掩蔽が始ったフレームを考える。回折の影響を無視すると、恒星と小惑星を足した明るさは、掩蔽によって階段状に変化する。すなわち、シャッターを開いた時刻を 0 として、掩蔽が始った時刻を x とすると、そのフレームにおける天体の明るさ (恒星と小惑星の明るさを足したもの) L は、以下の式で与えられる。

$$L = L_1 \frac{x}{T} + L_2 \frac{T - x}{T}$$

ここで、 L_1 は掩蔽が起こっていないときの天体の明るさ、 L_2 は掩蔽中の天体の明

るさ、 T は露出時間である。これを x について解けば

$$x = T \frac{L_2 - L}{L_2 - L_1} \quad (3.1)$$

以上より、観測で得られた L , L_1 , L_2 から上の式を使って掩蔽開始時刻の最良推定が得られる。

掩蔽開始時刻の最良推定は式 (3.1) で与えられるが、 x の計算で使われる L_1 , L_2 , L はゆらぎの影響を受けている可能性がある。したがって、ゆらぎの影響を考慮して最良推定に含まれる誤差の大きさを評価する必要がある。 L_1 , L_2 , L , それぞれに由来する誤差を e_1 , e_2 , e_3 とすると、それらを合わせた誤差 e は次の式で与えられる。

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}$$

掩蔽開始時刻前の n_1 フレームの平均と標準偏差を L_1 と δ_1 としたとき、 L_1 の誤差は $\delta_1/\sqrt{n_1}$ と推定される。同様に、 n_2 フレームから推定した掩蔽中の明るさ L_2 の誤差は $\delta_2/\sqrt{n_2}$ と推定される。天体の明るさ L については、ゆらぎによって、 $\delta_1(x/T) + \delta_2(1-x)/T$ の不確定があると考えたことにした。 L , L_1 , L_2 , いずれについても、ゆらぎによって大きくなる場合と、小さくなる場合がある。そのため、式 (3.1) で推定される x は、ゆらぎによって大きくなる場合と小さくなる場合がある。ゆらぎによって x が大きくなる場合は e に $+$ を、小さくなる場合には e に $-$ を付けた。以上を用いて誤差 e を計算した結果を表 (3.2) に示す。掩蔽終了の時刻も、掩蔽開始と同様に時刻の推定と誤差の推定をおこなった。

3.1.3 掩蔽時刻

2023年5月31日に観測された53 Kalypsoによる掩蔽時刻は、開始は21時49分37.60秒、誤差は+0.00秒と-0.03秒、終了が21時49分41.32秒、誤差は+0.08秒と-0.08秒と推定された(表3.1)。

表 3.1: 掩蔽前後の明るさと掩蔽中の明るさ

	フレーム番号	フレーム数	明るさ	ゆらぎ	明るさの誤差
		n	L	δ	δ/\sqrt{n}
掩蔽前	527-640	114	0.8269	0.1110	0.0104
掩蔽中	641-650	10	0.4978	0.0786	0.0388
掩蔽後	652-770	119	0.8439	0.1160	0.0152

表 3.2: 掩蔽開始時刻と終了時刻の推定

フレーム番号	明るさ	掩蔽した時間の割合	誤差	e_+	e_-	e_{1+}	e_{1-}	e_{2+}	e_{2-}	e_{3+}	e_{3-}
	L	X									
640	0.8893	1.2634		0.1244	0.3209	0.0204	-0.0187	-0.0123	-0.3081	-0.0512	0.0512
641	0.4303	-0.7560		0.1359	0.1683	-0.0127	0.0116	0.0950	-0.1374	0.0964	-0.0964
650	0.3545	-0.5152		0.0396	0.0442	-0.0093	0.0084	0.0351	-0.0405	0.0158	-0.0158
651	0.7009	0.6206		0.0407	0.0408	0.0106	-0.0097	0.0094	-0.0109	0.0381	-0.0381

3.2 小惑星の形

小惑星が恒星の光を遮ると地表面に影ができる。観測者は小惑星の影に入ると、掩蔽を観測する。影に入らない観測地では掩蔽は観測されない。観測される掩蔽継続時間は観測点の上を通過した影の長さに比例し、掩蔽の開始時刻と終了時刻は影の通過経路に対する各観測点の相対的な位置によって決まる。したがって複数地点の観測結果を、位置を考慮して合わせると小惑星の形を制約できる。なお、掩蔽を観測する時間は小惑星の自転周期よりもはるかに短いので、小惑星の自転は考慮する必要はない。

表 3.3: 2023年5月31日の53 Kalyпсоによる掩蔽を観測した結果.

観測者名	東経	北緯	高度 (m)	掩蔽開始時刻	掩蔽終了時刻
宇野詩織, はしもとじょーじ	133° 55' 21.4"	34° 41' 19.1"	45	12:49:37.60	12:49:41.32
吉原秀樹	133° 38' 35.0"	34° 39' 46.2"	55	12:49:37.39	12:49:40.94
宇野政文	133° 40' 12.7"	34° 30' 26.8"	3	12:49:38.32	12:49:41.42
加瀬部久司	135° 13' 37.3"	34° 54' 11.8"	213	12:49:38.83	12:49:41.52
山下勝	135° 26' 23.6"	34° 49' 34.6"	79	12:49:39.49	12:49:42.03
磯部健	136° 0' 40.7"	34° 34' 23.9"	406	12:49:41.0	12:49:42.7
山村秀人	135° 49' 37.7"	34° 44' 53.7"	26	12:49:41.12	12:49:42.0
井狩康一	135° 59' 23.8"	35° 27' 59.1"	105	通過	通過

3.2.1 ベッセル基準面

地表面に落ちる小惑星の影は、地表面が湾曲していることによって歪んだ形になる。歪んでいない小惑星の形を求めるため、小惑星の影をベッセル基準面(図3.3)と呼ばれる平面に投影して、平面の上で小惑星の影の形を制約する。ベッセル基準面は地球の中心と隠される恒星を結んだ線に直交する面である。

ベッセル基準面上の観測者の座標 (ξ, η) は以下の式で与えられる。

$$\xi = (N + h) \cos \varphi \sin (\theta - \alpha_s + \lambda)$$

$$\eta = (N + h) \{ \sin \varphi \cos \delta_s - \cos \varphi \sin \delta_s \cos (\theta - \alpha_s + \lambda) \}$$

ここで、 N は地球中心から WGS 準拋楕円体の表面までの距離、 h は高度、 φ は観測点の緯度、 λ は観測点の経度、 θ はグリニッジ恒星時、 α_s は隠される恒星の赤経、 δ_s は隠される恒星の赤緯である。 N は以下の式で計算される。

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$e = 2f - f^2$$

ここで、 a は赤道面半径、 f は扁平率であり、 $a = 6371137$ m、 $f = 1/298.257223563$ を用いた。

小惑星重心をベッセル基準面に射影した座標 (x_a, y_a) は以下の式で与えられる

$$x_a = r_a \cos \delta_a \sin (\alpha_a - \alpha_s)$$

$$y_a = r_a \{ \sin \delta_a \cos \delta_s - \cos \delta_a \sin \delta_s \cos (\alpha_a - \alpha_s) \}$$

ここで、 α_a は小惑星重心の赤経、 δ_a は小惑星重心の赤緯である。

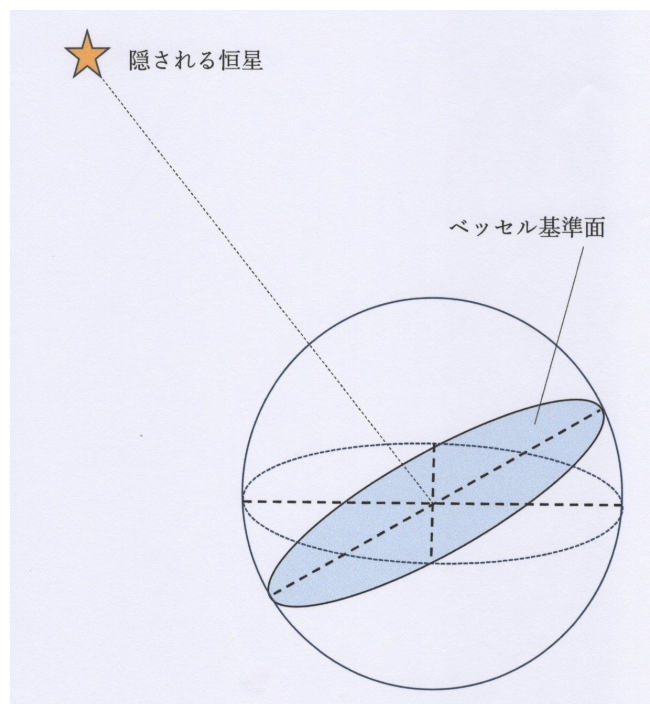


図 3.3: ベッセル基準面.

3.2.2 53 Kalypso の形

2023年5月31日の53Kalypsoによる掩蔽は、岡山大学天文台を含む8か所で観測した結果が報告されていた(表3.3). 表3.3のデータは早水氏の管理するデータベース(早水, HAL星研)から入手したものである. 各時刻における観測者と小惑星重心のベッセル基準面上の位置を計算し, 小惑星重心に対する各観測点の位置を求めた(図3.4)

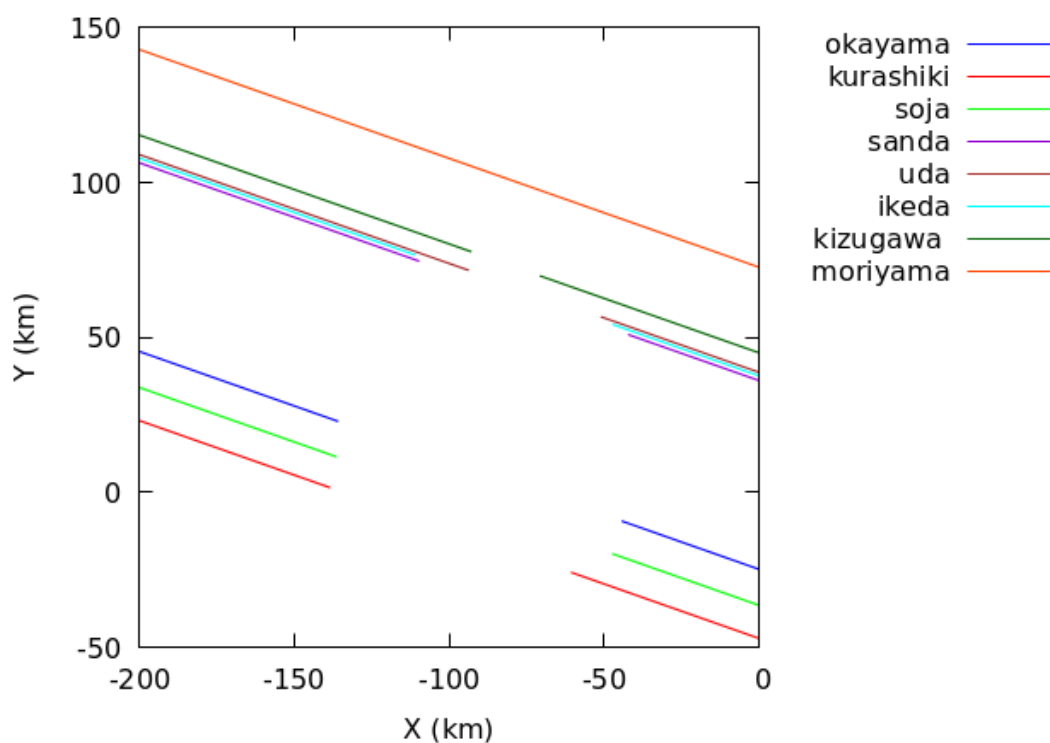


図 3.4: 2023 年 5 月 31 日の 53 Kalypso による恒星掩蔽.

図 (3.4) は、各観測点で恒星が見えていた時間を実線で描き、掩蔽が起こり恒星が隠された時間は線を描いていない。したがって線の消えている部分が 53 Kalypso の形を表している。この時観測された 53 Kalypso の断面は、円形というよりはややひしゃげた楕円形に近い形状をしている。また、守山の観測結果から 53 Kalypso の影の北限が決定された。一方、影の南限はこの観測では決めることができなかった。

第4章 まとめ

小惑星の大きさと形は恒星掩蔽を用いて精度よく求めることができる。小惑星による恒星掩蔽の予報を用いて、観測の計画をたてた。天候が適した日に観測し、掩蔽による減光を確認した。53 Kalypso は他の観測地の結果を合わせ、形状を求めた。

第5章 謝辞

本研究を進めるにあたって、熱心にご指導いただきました主指導教官であるはしもとじょーじ教授には心より深く感謝申し上げます。また、同研究室の皆様には多数の助言と励ましを頂きました。ありがとうございました。

参照文献

- [1] Collins, K. A. et al. (2017) AstroImageJ: Image processing and photometric extraction for ultraprecise astronomical light curves. *Astron. J.* 153, 77
- [2] Gaia Collaboration et al. (2016) The Gaia mission. *A & A* 595, pp. A1. External Links: 1609.04153
- [3] Gaia Collaboration et al. (2018) Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. ArXiv e-prints. External Links: 1804.09365
- [4] 早水 勉, HAL 星研, http://www.hal-astro-lab.com/data/occulte/20230531_53_Kalypso_OBS.xml
- [5] Herald, D. (2022) Occultation Prediction Software Occult4. <http://lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>
- [6] NASA Horizons System, <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>
- [7] 高見英樹 (2006) 超高解像度を実現したすばるアダプティブオプティクス (AO). *日本赤外線学会誌* 15, 26-30.