

〈2021年度国内研修支援金による成果報告書〉

彗星ダストの物理観測

鈴木 文二

〈渋谷教育学園幕張高校 〒261-0014 千葉県千葉市美浜区若葉 1-3〉

e-mail: suzukibn@da2.so-net.ne.jp



彗星は水や一酸化炭素などの氷とダストの混合物からなり、遠方では微かな光点にしか過ぎないが、太陽に接近すると明るく輝き、時には長い尾を引き、多くの人々の目を引きつける存在となる。彗星には太陽系の始原的な物質が含まれていると考えられ、測光・分光・偏光という手段を用いて地上観測が行われている。偏光観測は、ダストの光学的性質や質量分布を知るために重要である。自主製作した偏光撮像装置により、Leonard (C/2021 A1) 彗星について、位相角 49.1° – 139.4° の観測に成功した。その結果、この彗星の最大偏光度は18.9%（位相角 98.0° ）であり、偏光度曲線から、幾何アルベドは0.052と求められた。

1. はじめに

筆者は1990年度の日本天文学会「内地留学奨学金」を受けた。研修報告は天文月報に掲載されたが、いま読み返しても変わらぬ思いが蘇ってくる[1]。この内地留学の研究は、Austin (C/1989 X1) 彗星からの C_2 ジェット検出という形でまとめられた[2]。そして、その30年後には、内地留学奨学金は「国内研修支援金」という名称が変わったが、制度としてまだ残っていた。天文月報の募集案内には、『シニアの応募も歓迎』と記されていた。数年前に定年退職した筆者は、強い誘惑を受けた気がして応募してしまった。テーマは「彗星ダストの物理観測」である。本稿は、その研修成果だけでなく、シニアのチャレンジという視点も付け加えさせていただこうと思う。

偏光という観測手段に触れたのは、Shoemaker-Levy 9 (D/1993 F2) 彗星の木星衝突である。当時の岡山天体物理観測所では、188 cm 望遠鏡に岡山近赤外多目的分光撮像装置 (OASIS), 91 cm 望遠鏡に偏光撮像分光装置 (OOPS) という、す

ばる望遠鏡に向けた試作装置ができ上がったばかりであった[3]。そして、衝突観測は、それらの装置のファーストライトとなった。筆者はOOPSの分光モードでの観測を企画していたが、装置開発者である佐々木敏由紀氏と相談し、偏光モードでの観測に切り替えた。観測結果は世界唯一のデータであったが、筆者の力不足のため、投稿した論文はリジェクトされてしまった。そのデータは、いまだ陽の目を見ていない。大変申し訳ないと思っている。しかし、衝突痕の分光観測は論文として出版できたので、観測所スタッフのみなさんに恩返しができた[4]。OOPSは撮像装置であるので、面積天体の偏光観測に威力を発揮する。続いて、Hale-Bopp (C/1995 O1) 彗星を対象に、OOPSで4ヵ月にわたる観測を行った。ダストコマの偏光に関する成果は、古荘玲子氏によってまとめられた[5]。

ある年齢に近づいてくると、「本来の仕事」が増え、自分の研究や趣味を広げる時間が少なくなってくる。筆者は高校地学教師が本来の仕事であるので、教育・普及に関わることが多くなり、

しだいに彗星の観測・研究から遠ざかっていった。しかし、新しい世界も広がった。しし座流星群を契機とした高校生天体観測ネットワークは、そのひとつである [6]。また、普及活動として、彗星観測の本を上梓し、偏光観測を紹介した [7]。

自前の観測機器でサイエンスをしたいという思いは、天文少年だった半世紀前から変わらない。再びその思いが強くなったのは、定年が近づいてきたときだった。小さな移動式赤道儀と望遠レンズを用いて、彗星のダストテイルの偏光観測を始めた [8]。それは、市販の偏光フィルタを手動で回すというアナログ的な手法であった。銀塩写真と比較するとデジタルカメラの感度のよさに驚いた。そして、忘れかけていた観測・解析手順を思い出出すことができた。

定年退職後は、コロナウイルス禍 (COVID-19) である。非常勤職員で在宅勤務が続く中、素晴らしい彗星が次々と出現したにもかかわらず、手も足も出なかった。もちろん、各国の天文台も閉鎖である。筆者自身の身の振り方も含めて、先行きどうなるかわからない。そこで、実家のある群馬県高崎市に、望遠鏡とドームを新築することを決断した。口径の大きな望遠鏡ほど下を向かない。すなわち高度の低い天体は観測できない。付け入る隙があるとしたら、そのあたりである。低高度まで開けた場所に、不動点を高くした赤道儀を設置し、彗星観測に特化することを考えた。

2. 偏光撮像装置の製作

日本には口径1 m級の望遠鏡に取り付けられた偏光撮像装置が数台ある。これらの偏光素子にはウォラストンプリズム、光の振動方向の選別として1/2波長板を用いている。常光・異常光を二光路で同時に撮像ができ、効率よく観測することができることから、観測中の大気変動に対応しやすい利点がある。しかし、個人で作るとなると問題外である。金額だけでなく重量も増大し、小望遠鏡には向かない。もっとも、偏光フィルタを正確



図1 角度を変えてセットした偏光フィルタ。

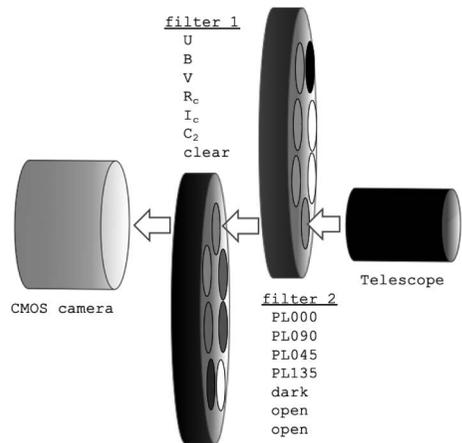


図2 フィルタを用いた偏光撮像装置の概念図。

に回転させ、特定の角度で停止させる機構の製作も難しい。ところが、あらかじめフィルタの角度を変えてホイールにセットし、そのホイールを回せば観測的には同じことである (図1)。なるべく大きなサイズの偏光フィルタを用いれば、広い視野を得ることができる。

最近のCMOSカメラは高感度であるため、フィルタ回転中の大気変動は、短時間で撮像することでカバーできるはずである。波長選別用のフィルタは別ホイールを用意し、標準測光システムのフィルタ、彗星に特有なC₂バンドの狭帯域フィ

表1 観測装置のスペック.

望遠鏡	GSOptics D=405 mm, fl=3250 mm Ritchey-Chrétien
撮像カメラ	ZWO ASI6200MM pro(Sony IMX455)
画素数	9576(H)×6388(V) ピクセルサイズ 3.76 μ m
撮像スケール	0.95" /pix (4×4ビニング出力時)
撮像視野	38.1' (H)× 25.4' (V)
フィルタ(2inch)	偏光フィルタ : Edmund(XP42-200基板 : 偏光度 99.98%) 測光フィルタ : Optlong Kron-Cousins system(U, B, V, Rc, Ic) C ₂ フィルタ : Edmund (中心波長 510nm, FWHM 20nm)

ルタを装着した。これらのホイールを2段重ねして自作アルミフレームに収め、偏光撮像のシステム構築ができた(図2)。望遠鏡と組み合わせたスペックは、表1の通りである。主鏡はF8と暗いが、Rc-bandにおいて11等級の彗星が10秒で撮像可能である。

偏光度 (P), 偏光位置角 (θ_p) は、セットした偏光フィルタの角度0°, 90°, 45°, 135°で得られたフラックスを、それぞれ $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{135}$ とすると、以下のように求められる。

$$\frac{Q}{I} = \frac{I_0 - I_{90}}{I_0 + I_{90}}, \quad \frac{U}{I} = \frac{I_{45} - I_{135}}{I_{45} + I_{135}}$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I}\right)^2 + \left(\frac{U}{I}\right)^2}, \quad \theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{U}{Q}\right)$$

また、太陽系天体においては、太陽-目的天体(彗星)-観測者がつくる平面を考えて直線偏光度 (p) を定義する。そのため、平面を太陽の位置角 (ϕ) の方向に回転させる。

$$p = P \cos 2\phi$$

装置検定のため、無偏光標準星の観測を行ったところ、装置自身の偏光度は0.45%であった。これを考慮して強偏光標準星の観測を行ったところ、偏光位置角のオフセットは3.4°という値を得た。また、偏光度の誤差は0.20%以内に収まっていることを確認した。ウォラストンプリズムなどを用いる装置と比較すると大きいですが、桁外れなわ

けではない。

すべての観測の偏光度、位置角回転の計算は、標準星の値を反映させて求めた。これは、aperture photometryにおいては比較的単純だが、偏光度の二次元マップを得るためには、4枚の偏光フィルタで得られた画像を彗星に合わせてシフトさせ、それぞれの画像からスカイを引いたうえでピクセル単位で計算を行う。

3. Leonard 彗星の偏光観測

今回のターゲットは、Leonard (C/2021 A1) 彗星である。この彗星は、オールト雲からの新彗星であり、軌道傾斜角が大きい(133°)逆行軌道の彗星である。近日点距離は0.615 au、地球への最接近距離は0.234 auである。最大光度は4等と推定されていたが、低空であるため、肉眼彗星になるかどうかは微妙なところであった。しかし、図3に示すように、その位相角の変化は興味深いもので、従来の彗星の偏光観測が位相角90°以内(後方散乱)がほとんどであったことを考えると、前方散乱の貴重なデータが期待できると考えられた。ただし、太陽離角が小さく、かなり低空での観測となる。

4. 画像データ解析

彗星核の直径は10 km オーダーのため、地上から確認することは不可能であるが、彗星コマは100,000 km以上の広がりをもつため、詳細な観測が可能である。コマの形状変化は、核表面の変

化を捉えている場合が多い。核の分裂やダストジェット構造が発達すると、偏光度が変化する [8]。核の自転は数時間程度が多いため、そのタイムスケールで突発的な現象も起こりうる。そして、このような現象は、太陽に近づくほど発生確率が高くなる。一般に、太陽離角が減少すると位相角が大きくなる。言い換えれば、位相角 90° を超えた観測は、低高度での観測となる場合が多い。

測光観測は、高度 30° 以下ではあまり行われな
ない。大気の影響が懸念されるからである。偏光観測の最も大きな課題は、この大気変化への対応である。短時間の変化に対応するためには、露光時間やフィルタを回す時間が短ければ短いほどよい

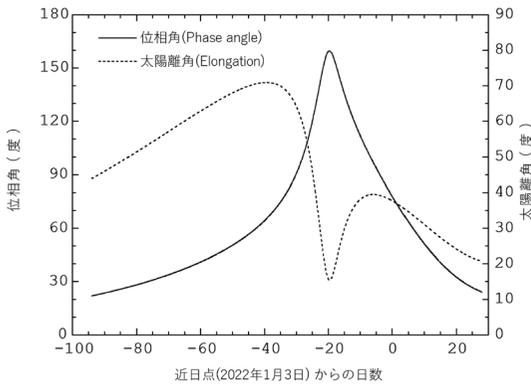


図3 Leonard (C/2021 A1) 彗星の位相角 (phase angle) と太陽離角 (Elongation).

ことになる。ただし、露光時間が短すぎると、シンチレーションの影響が顕著に出てくる。また、低高度の場合には、見通す大気経路が長い
ため、測光でしかわからない遠方での雲の往来の影響も多々ある。つまり、低高度の観測を行うためには、さまざまな工夫が必要なのである。

4.1 背景大気 (スカイ) の推定

撮像視野に対して彗星像の大きさが十分に小さい場合は、同一フレームで、彗星核から適度に離れた天域の明るさをスカイの明るさとして定義する。あるいは、核から放出されたダストが、核からの距離の 1/2 乗にしたがって数密度が下がることを利用して、コマのプロファイルから外挿してスカイの明るさとする。

今回のスカイの推定は、次のように行っている。まず、彗星核を通るスカイプロファイルを複数方向作る。次に、彗星の尾や恒星の影響がない箇所を選び、矩形領域のスカイの平均値を求める (図4)。さらに、この矩形領域の平均値を用いて、一次式で彗星核の位置のスカイの明るさを内挿して求める。この手順を複数方向で実施し、彗星核の位置のスカイの最適値を求める。実際の観測では、矩形領域の大きさは 1 分角程度で、pixel 数では 2,000 個程度となっている。矩形領域の明るさの標準偏差は 0.6% 以下であり、複数方向から求めたスカイの明るさの標準偏差は、1% 以下に収

表2 Leonard (C/2021 A1) 彗星の観測ログ。

Date	UT	h (deg)	mag	Filter	r (au)	d (au)	Phase (deg)	Elong.(deg)
2021 Nov 12	19:05 - 19:35	40.6	9.4	V, Rc	1.2088	1.1705	49.1	67.5
2021 Nov 14	19:00 - 20:13	44.5	9.1	V, Rc	1.1776	1.1005	51.3	68.4
2021 Nov 27	18:46 - 20:26	44.8	7.2	V, Rc	0.9785	0.6359	71.8	70.4
2021 Nov 28	17:57 - 19:55	36.5	7.1	V, Rc	0.9640	0.6010	74.1	70.0
2021 Dec 04	18:34 - 20:31	34.8	5.8	V, Rc	0.8761	0.3928	94.1	62.5
2021 Dec 18	8:15 - 8:54	7.0	4.6	Rc	0.7056	0.3347	139.4	27.8
2021 Dec 19	8:24 - 8:58	6.7	4.7	Rc	0.6954	0.3658	133.6	30.8
2022 Jan 02	8:30 - 9:01	5.4	6.2	Rc	0.6156	0.8834	79.8	38.0
2022 Jan 03	8:37 - 9:04	4.4	6.3	Rc	0.6153	0.9205	76.8	37.5
2022 Jan 04	8:37 - 8:49	4.9	6.4	Rc	0.6157	0.9570	73.9	37.0

h : 観測中央時刻における彗星高度

mag: 彗星の全光度

r, d : 観測中央時刻における彗星の日心距離, 地心距離

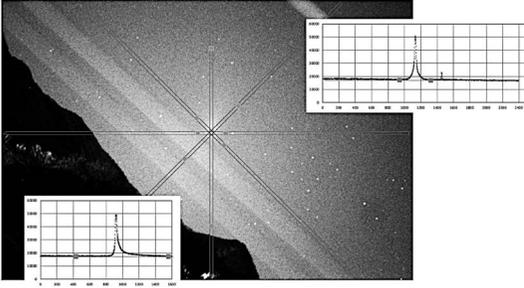


図4 背景大気（スカイ）の推定方法.
(模式的な画像で実際の解析画像とは異なる)

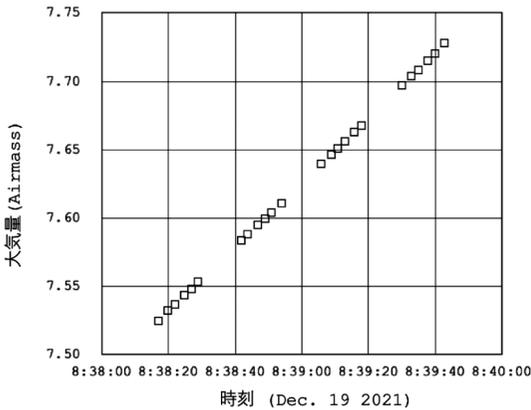


図5 高度7°における80秒間の大気量の変化.
(2021年11月19日)

束している。

4.2 フィルタ回転中の大気量変化

低高度では、大気量が変化していく影響が無視できなくなる。偏光度の計算は異なるフレーム間の演算であるため、筆者のように4枚のフィルタを順次変えていく方法は、二光路式と比較して大気変化の影響を受けやすい。たとえば、ひとつの観測ルーチンの総時間は、フィルタ回転の待ち時間を含めて、短いときでも約80秒かかる。彗星の高度が約7°での今回の観測では、その間に高度は約0.2°変化していた。この際の大気量の変化を、レーリー散乱のモデル式[9]で推定すると図5のようになる。大気による減光は、撮像フレームごとに大気量の逆数で補正することが考えられる。これを基に計算すると、大気量の時間変

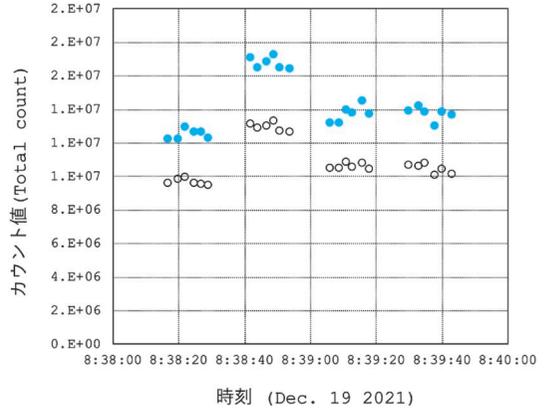


図6 シンチレーションによる測光値の変動.
(2種類の aperture を使用)
(2021年11月19日)

化の影響だけで、偏光度は約0.5%異なることがわかった。

4.3 シンチレーションなどの影響

4枚のフィルタによる観測ルーチンを、できるだけ短い時間で済ませることは必要であるが、短い露光時間ほどシンチレーションの影響を受ける。また、幾何学的な補正である大気量変化以外の変動要因も含まれる。したがって、シンチレーションを含めた測光誤差の見積もりが必要である。図6は高度7°における観測の一例である。観測において、1フレームの露光時間は2秒で、偏光フィルタの角度毎に6枚の画像を取得し、角度毎の合成メディアン画像で測光をしている。ここで、個々のフレーム毎の測光を行ってみると図6のようになった。メディアン画像の標準偏差は2~3%で、このことによる偏光度の誤差は1%程度であった。

5. 結果と考察

aperture 半径は約1分角で、おおむね彗星コマの10,000 km以内を測定している。彗星の地心距離が変化しているため、aperture の実距離を揃えるべきであるが、現段階では実現していない。いくつかの観測において、偏光度の二次元マップを

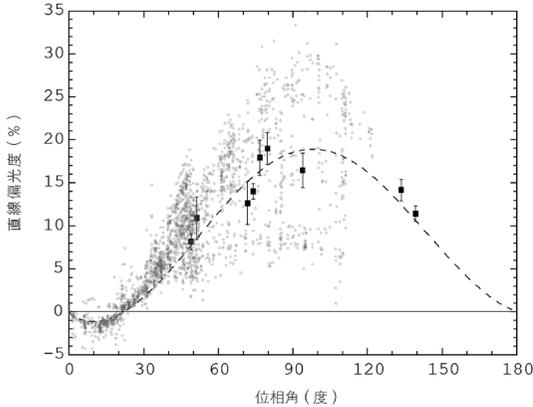


図7 彗星の位相角と直線偏光度。
○NASA彗星偏光度データベース
■Leonard (C/2021 A1) 彗星

作成した結果，aperture半径による偏光度の誤差は2%以内と見積もられる．これは低高度における大気変動に起因する誤差より小さい．

NASAの彗星偏光度のデータベース [10] に，今回の観測を加えた結果を図7に示す．筆者が行った同じ観測日（位相角）の偏光度の平均値をとると，その標準偏差は最大で3%程度まで達する日がある．この値が，彗星の活動度の変化に起因するのか，大気変動であるかは，まだ判明していない．当然のこととして低空では必然的に誤差は増大している．それでも，同一観測機器を用いて広い位相角をカバーする観測が実施できたことは，大きな成果だと言える．

彗星には高偏光度を示すものと，低偏光度を示すタイプが知られているが，Leonard (C/2021 A1) 彗星は，偏光度の低いタイプであることが明らかになった．偏光度データベースでは，位相角110°以上の観測は少なく，特定の観測データの重みが強くなっている [11]．これらの観測が彗星ダストのみならず，星間ダストの理論計算，室内実験の貴重な参照データとなっている [12]．今回の観測は，位相角140°の散乱データを提供するもので，この角度では初の事例となる．

以下の式で，Leonard (C/2021 A1) 彗星の位相

角 (α) による偏光度 ($P\alpha$) をフィッティングさせてみた [13]．

$$P_{\alpha} = b(\sin \alpha)^{C1} (\cos 0.5\alpha)^{C2} \sin(\alpha - \alpha_0)$$

パラメータの値は， $C1=0.79$, $C2=0.24$, $b=21.7$, $\alpha_0=22.0$ となり，位相角98.0°の際に，最大偏光度18.9%となった．また，この時の α_0 における傾き (h) は，0.31であった．この h と幾何アルベド (P_v) との関係は以下の式で表される [14]．

$$\log p_v = C3 \log h + C4$$

$C3=-1.207$, $C4=-1.892$ [15]を用いると， P_v は，0.052と求められ，一般的な彗星 [16] の0.049±0.020に近い値であった．

6. まとめ

フィルタを用いた偏光撮像装置を開発／製作し，口径405 mmの望遠鏡に装着した．この機器を用いてLeonard (C/2021 A1) 彗星の観測を，位相角49.1-139.4°の範囲で実施した．多くの観測は，低高度であったため，背景大気の影響の推定，観測時の大気量変化，短時間の大気変動を慎重に考慮した結果，測定誤差約3%で彗星の偏光度を求めることができた．この彗星は，低偏光度を示す彗星で，最大偏光度は18.9%（位相角98.0°）であり，幾何アルベドは，0.052である．

謝辞

彗星観測・研究をされている多くの方々に支えられ，この研修を終えることができた．偏光観測については，古荘玲子氏，河北秀世氏から貴重な助言をいただいた．天文台建設，観測機器調整については，大島修氏，高橋織男氏，佐藤文昭氏にお世話になった．ここに御礼申し上げる．そして，30年前も今回も，指導教員は渡部潤一氏である．アマチュアの観測研究指導に欠かせない方として，改めてここで感謝の意を表したい．

参考文献

- [1] 鈴木文二, 1991, 天文月報, 84, 267
- [2] Suzuki, B., et al., 1990, PASJ, 42, L93
- [3] 佐々木敏由紀他, 1995, 国立天文台報, 2, 545
- [4] Suzuki, B., et al., 1994, Earth Moon and Planets, 66, 19
- [5] Furusho, R., et al., 1999, PASJ, 51, 367
- [6] 鈴木文二, 2004, 天文月報, 97, 141
- [7] 鈴木文二他, 2014, 彗星の科学 (恒星社厚生閣), 76
- [8] 鈴木文二他, 2014, 日本天文学会秋季年会, L04a
- [9] Kasten, F., et al., 1989, Appl. Opt., 28 (22), 4735
- [10] <https://pdssbn.astro.umd.edu/> (2022.7.11)
- [11] Nikolai, K., 2006, Earth, Moon and Planet, 97, 365
- [12] Zubko, E., et al., 2020, ApJ, 895, 110
- [13] Penttila, A., et al., 2005, A&A, 432, 1081
- [14] Gehrel, T., et al., 1974, AJ, 79, 1100
- [15] Masiero, J., et al., 2012, ApJ, 749, 104
- [16] Kim, Y., et al., 2014, ApJ, 789, 151

Polarimetric Observation of Cometary Dust

Bunji SUZUKI

*Shibuya Kyoikugakuen Makuhari High School,
1-3 Wakaba Mihama-ku, Chiba, Chiba, 261-
0014, Japan*

Abstract: A polarization imaging system using polarization filters was developed and fabricated. The instrument was attached to a 405 mm aperture telescope and used to observe Comet Leonard (C/2021 A1). The phase angle range is 49.1 to 139.4 degrees. The measurement error was about 3% after carefully taking into account the subtraction of the background atmosphere, changes in the atmospheric quantity at the time of observation, and short-term atmospheric variations due to the low altitude. The comet was successfully observed at a large phase angle of polarization, which had not been observed before, and its physical parameters were obtained. This comet is a low-polarization comet with a maximum polarization of 18.9% (phase angle 98.0°) and a geometric albedo of 0.052.