

カタリナ彗星 (C/2013 US10) におけるダストのコマの広がり

加藤 英行*

Expanse of dust coma of comet C/2013 US10 (Catalina).

Hideyuki KATO*

(要旨) 2015年12月2日から2016年2月8日までの期間中の7夜において、カタリナ彗星 (C/2013 US10) をデジタルカメラで撮影した。得られた画像を3色 (R・G・B) に分解し、その中で主にダストの散乱光が多くを占めるR画像を用いて、彗星核から太陽方向のコマの終端までの距離とコマの直径を測定し、それらの時間変化を捉えた。考察では、彗星ダストのコマの変化はダストにはたらく重力と太陽放射圧の比 β が影響しているだろうことを示した。一方、彗星ダストのコマの広がり の測定精度を高めるためには、狭帯域フィルターを用いることに加え、彗星ダストのコマの輝度分布からコマの終端を決定する方法を再検討する必要がある。

キーワード：カタリナ彗星 (C/2013 US10), 彗星コマ, 彗星ダスト, デジタルカメラ

1. はじめに

1-1 彗星のコマについて

彗星核が太陽に近づくと氷成分が蒸発し、吹き出したガスやダストがコマと呼ばれるぼんやりとした光のかたまりを作る。その直径は、彗星によって異なり、同じ彗星でも太陽からの距離によって大きく変化する (鈴木ほか, 2013)。

また、コマの直径は、太陽に近いときよりも遠いときの方が大きくなることが知られているが、彗星によってこの関係を顕著に示さないこともあるという (広瀬・関, 1968)。

このように、興味深い彗星の振る舞いの1つとして、コマの変化を捉えることは重要なテーマである。

1-2 カタリナ彗星 (C/2013 US10) について

カタリナ彗星 (C/2013 US10) (以下、「カタリナ彗星」という。) は、カタリナ・スカイサーベイで2013年10月31日にみずがめ座を撮影した捜索画像上にコワルスキ氏が発見した彗星である (中野, 2014)。

この彗星の近日点通過は2015年11月15日、近日点距離は0.82AUであり、日本からは2015年11月から2016年1月まで、ほぼ6等級の明るさで観測された (中野, 2016)。図1にカタリナ彗星の眼視観測による全光度変化を示す (Yoshida, 2016)。

本稿では、カタリナ彗星のコマ、特にダストの日心距離、時間変化を捉えることを目的として、デジタルカメラを使用した観測の結果について報告する。

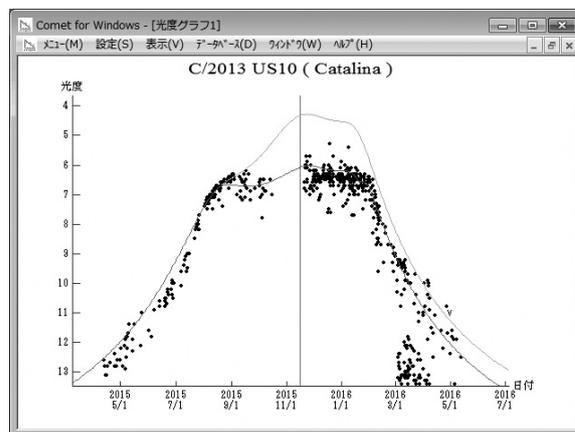


図1：カタリナ彗星 (C/2013 US10) の眼視観測による全光度変化 (Yoshida, 2016)

2. 観測

観測は2015年12月2日から2016年2月8日までの期間中の7夜において行った。観測を行った日と場所、カタリナ彗星の日心距離と地心距離を表1に示す。観測には20cmニュートン式反射望遠鏡 (Vixen R200SS, f=800mm, F4) と補正レンズ (Vixen コレクターPH, 合成焦点距離f=760mm, F3.8), デジタルカメラ (Canon EOS6D, センサーサイズ35.8mm×23.9mm, 画素数5,472×3,643pixel (R画像の画素数2,748×1,835pixel)), 赤道儀 (Vixen SXD2) を用いた。本システムの画角は2.7×1.8°, R画像のピクセルスケールは、3.53秒角/pixelである。デジタルカメラのISO感度は3200, 露光時間は10秒として撮影した。

*〒918-8006 福井県福井市足羽上町147 福井市自然史博物館

*Fukui City Museum of Natural History, 147 Asuwakami-cho, Fukui-shi, Fukui 918-8006, Japan

3. 解析

3-1 彗星のダスト成分とデジタルカメラのRGB画像

彗星コマのスペクトルとデジタルカメラのRAW形式のRGB感度域を比較すると、BにはCNとC₂の輝線の一部、GにはC₂の強い輝線が含まれる。一方、RにはNH₂などの輝線はあるが、主にダストの散乱光が多くを占めると考えられる(鈴木ほか, 2013)。したがって、彗星ダストのコマの変化を捉えるためには、デジタルカメラのR画像を用いた解析が有効と考え、解析を行った。

3-2 データ整約

デジタルカメラのRAW形式画像をR・G・B画像への分解及びFITS形式への変換には星空公団のウェブサイト(星空公団, 2016)で配布しているソフトウェ

ア「raw2Fits」、画像データのダーク補正とフラット補正、空の明るさの見積もりとその減算には、国立天文台のウェブサイト(国立天文台, 2016)で配布しているソフトウェア「すばる画像解析ソフトマカリ」を用いた。

3-3 彗星核からダストのコマの拡がりの測定

図2に示すように、彗星の輝度分布の重心を彗星核、カウント値が0以上となる部分を彗星のコマの終端と定義し、彗星核から太陽方向の終端までの距離と、太陽方向と垂直方向の終端から終端までの距離を画像から測定した。実距離に換算するための地心距離と太陽方向を決定するための位置角は、NASA JPLのウェブサイト(NASA JPL, 2016) JPL's HORIZONS systemから得られるデータを用いた。

表1: 観測を行った日と場所,カタリナ彗星の日心距離と地心距離

観測日	観測場所	日心距離[AU]	地心距離[AU]
2015年12月2日	福井県勝山市平泉町	0.88	1.51
2015年12月8日	福井県勝山市平泉町	0.93	1.39
2015年12月20日	福井県勝山市平泉町	1.05	1.13
2015年12月31日	静岡県島田市南町	1.17	0.91
2016年1月19日	静岡県焼津市石津港町	1.42	0.73
2016年2月4日	福井県勝山市平泉町	1.63	0.96
2016年2月8日	福井県勝山市平泉町	1.69	1.06

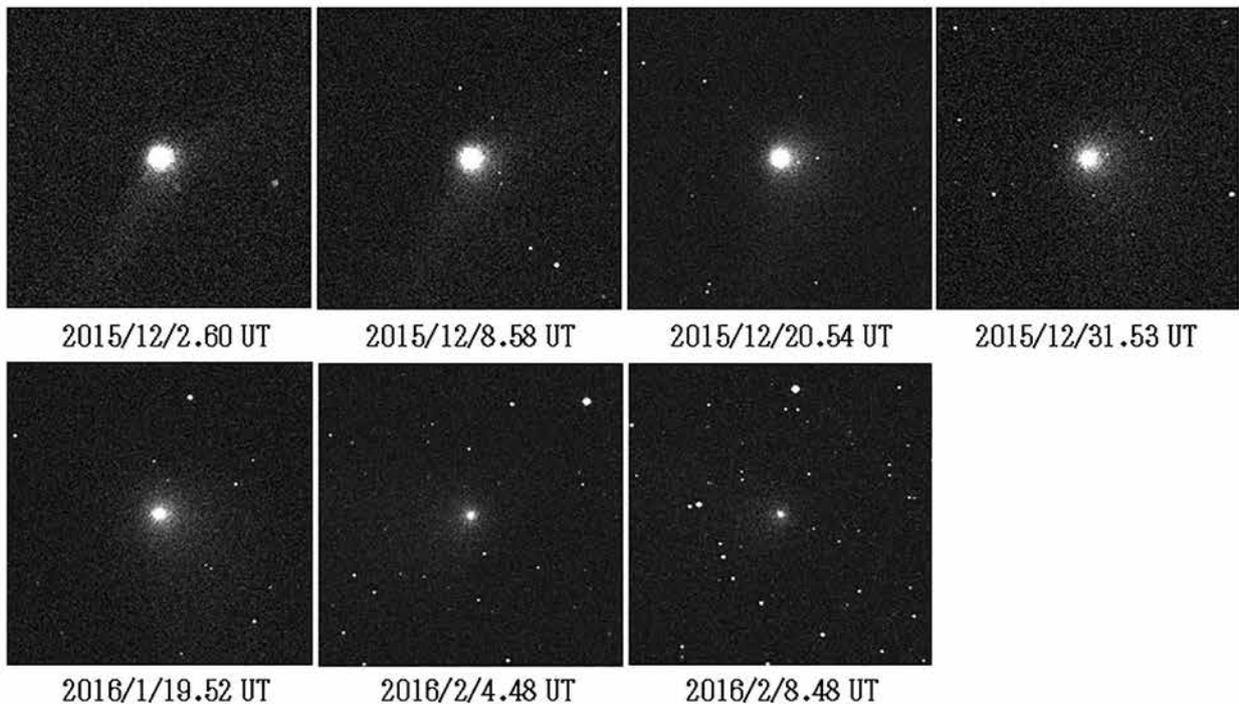


図3: カタリナ彗星のコマの変化。彗星の輝度分布の重心を中心としてトリミングしたR画像。それぞれの画像の画角は2分角で左上の画像でおよそ132.36万km, 右下の画像でおよそ92.94万kmに相当する。上が北, 左が東である。太陽の位置角は、左上から順に113.72°, 116.71°, 120.00°, 119.82°, 94.65°, 311.37°, 289.87°である。

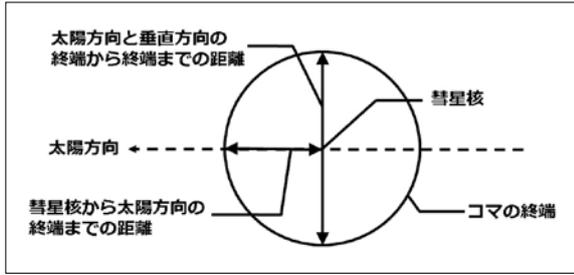


図2：測定した要素の概念図

4. 結果

各観測日から得られた観測画像の例を図3に示した。画像の比較から、時間の経過とともにコマの直径が小さくなっていく様子がみられる。彗星核から太陽方向の終端までの見かけの実距離（以下、「核から太陽方向の距離」という。）の日心距離と時間に対する変化を図4、5に示した。彗星核をとおり、太陽方向と垂直

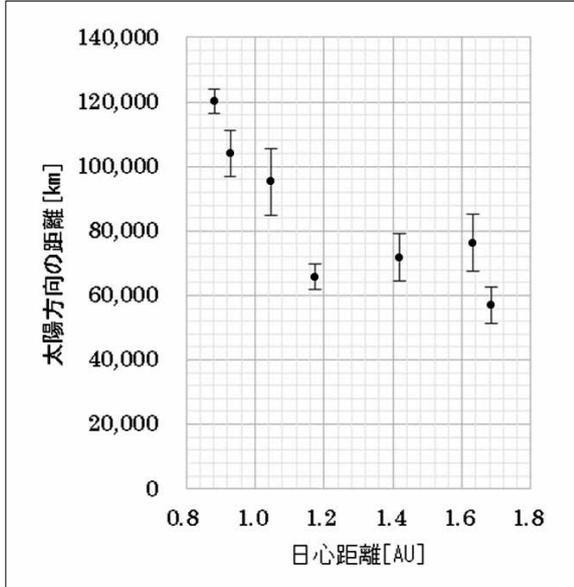


図4：核から太陽方向の距離に対する日心距離

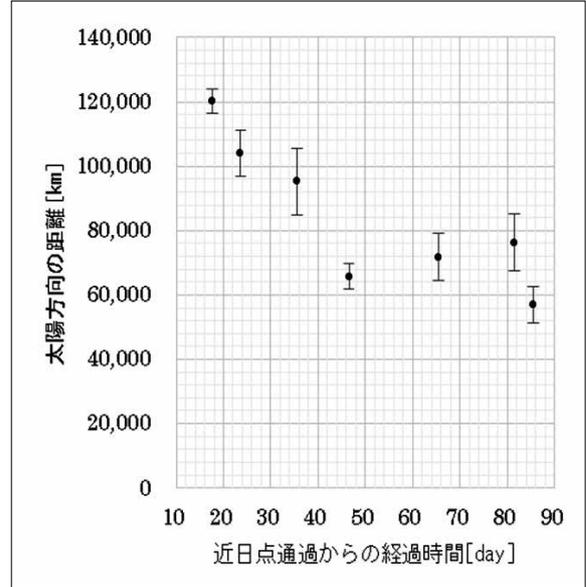


図5：核から太陽方向の距離に対する近日点通過からの経過時間

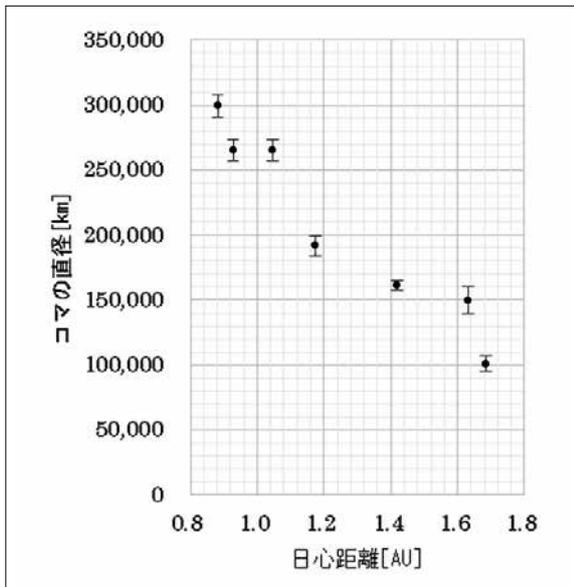


図6：コマの直径に対する日心距離

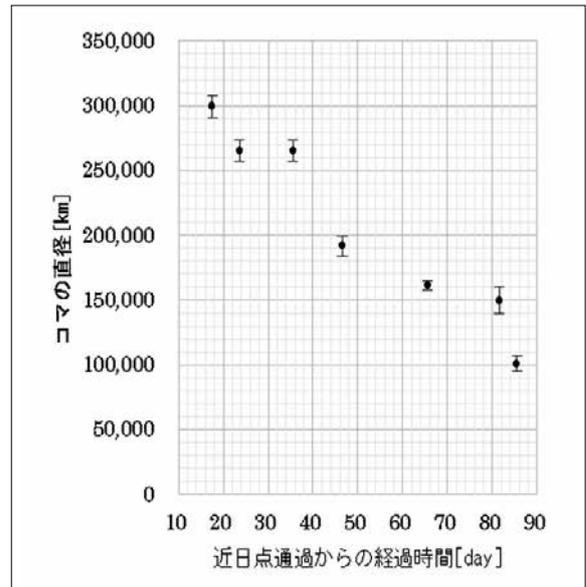


図7：コマの直径に対する近日点距離通過からの経過時間

図4、5、6、7のプロットは、各観測日に撮影した画像の中から目視で雲とガイドエラーの影響が少ない5つの画像を選択し、太陽方向の距離とコマの直径を測定した平均値である。エラーバーは標準誤差を示している。図5、7の横軸は、近日点通過時刻2015年11月15.72日 (UT) からの経過時間である。

方向の終端から終端までの見かけの距離（以下、「コマの直径」という。）の日心距離と時間に対する変化を図6, 7に示した。

図4, 6から彗星が太陽から遠ざかるにつれて、核から太陽方向の距離とコマの直径は小さくなる傾向がみられた。図5, 7から時間の経過とともに、核から太陽方向の距離とコマの直径は小さくなる傾向がみられた。

5. 考察

5-1 核から太陽方向の距離

本観測から得られた太陽方向の距離は最大で約12万kmであるのに対し、河北・古荘（2003）が太陽に向かった塵がどれくらいまで核から離れるかを見積った値は数万km程度であった。比較から、本結果の方が一桁大きな値であり、実際より大きく求めていることが考えられる。

以上の原因は2つあると考えている。1つはガスの輝線の影響である。デジタルカメラのR画像にはダストの散乱光が多くを占めるが、ガスの輝線も含まれており、ダストの広がりを実際より大きく見積もっていと考えられる。改善するためには、輝線をカットする狭帯域フィルターを用いた観測が必要となるだろう。

もう1つは反太陽方向とは異なる方向に伸びる尾の存在である。図2に示した12月2日と8日の画像には明らかに南南東方向（太陽方向と近い角度）へ広がる尾を確認することができる。したがって、核から太陽方向の終端と尾が重なり、核から太陽方向の距離を大きく見積もっていることが考えられる。改善するためには、彗星核からの距離（天球面上に投影した距離）に反比例してダストのコマは暗くなる（河北・古荘, 2003）ことを考慮に入れ、彗星核から終端までの距離を決定する方法の再検討が必要であろう。

また、図4, 5, 6, 7のプロットのばらつきは、月齢と観測場所が異なることによる空の明るさの違いが影響していると考えている。特に、2015年12月31日と2016年1月19日の観測場所は市街地から近いので、街の明かりが空を照らし、彗星の背景を明るくしていると考えられる。したがって、観測場所を同じにし、観測条件をそろえる必要がある。さらに、小型の三脚・赤道儀を用いたことで、鏡筒が風で揺らされ、各観測日のプロットのばらつきに影響していると考えている。

5-2 結果から得られた傾向

太陽方向の距離が日心距離と時間の変化とともに、小さくなる傾向について考察する。

ダストのコマの終端は、ダストにはたらく太陽放射圧で反太陽方向に押し返されることで決まる。菅原(1995)では、通常可視光で観測されるサイズのダストの場合、太陽の重力と放射圧以外の影響は非常に小さく、無視することができるとし、一般に放射圧の大きさは重力 F_{grav} と放射圧 F_{rad} の比 β

$$\beta = \frac{F_{rad}}{F_{grav}}$$

としてあらわされ、ダストの形を球形と仮定すると、

$$\beta = \frac{KQ}{\rho a}$$

$$K = \frac{3E_0}{4cGM}$$

とあらわされるとしている。QはMie散乱効率、 ρ 、 a がそれぞれダストの密度、半径、 E_0 は1天文単位における太陽定数、 c は光速、 G は万有引力定数、 M は太陽質量である。

ここで、仮にMie散乱効率 Q と密度 ρ を一定とした場合、重力と放射圧の比 β はダストの半径 a によって決まる。つまり、コマをつくるダストの半径 a が小さくなると、重力に比べて太陽放射圧の寄与が大きくなる。

したがって、半径が小さなダストほど早く反太陽方向に押し返される。もし、彗星が太陽から離れるにつれて小さなダストの放出が増えたと考えれば、彗星核からダストのコマの終端までの距離が短くなる。これは、本観測から得られた傾向と一致する。

5-3 ダストの重力と放射圧の比 β とダストの半径

以下では、ダストの放出速度を一定と仮定したとき、観測と一致するダストの重力と放射圧の比 β がどのような値をとるかを求め、およそのダスト粒子半径を推定した。

中村・山本（1984）は、コマをつくるダスト粒子はガス流によって加速され、最終的な速度は秒速数100mに達するとしている。ここでは、秒速数100mを具体的に500[m/s]一定と仮定し、ダストにはたらく加速度(式1)を用いて核から太陽方向の距離の最大値が観測と一致する β を0.01の精度で求めた。結果を図8に示す。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{GM_{sun}}{r^2} (1 - \beta) \quad (式1)$$

ここで、 x は彗星核から放出されたダストまでの距離、 t はダスト放出からの経過時間、 G は重力定数、

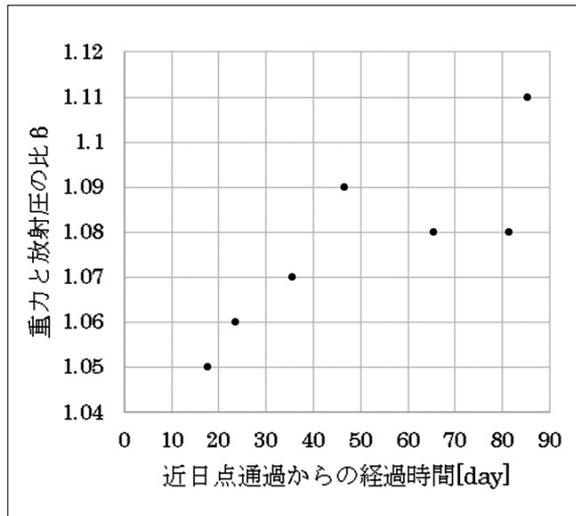


図8: $V_0=500$ [m/s]としたとき、観測値と一致する β

M_{sun} は太陽質量, r は日心距離である.

図8から, ダストが彗星核から終端まで達する観測期間中の β は $1.05 \leq \beta \leq 1.11$ の範囲である. 中村・山本 (1984) の β の計算例を参考にすると, 観測された物質は可視波長域において不透明な物体であり, 仮に磁鉄鉱とするとダストの粒子半径は $0.3 \mu\text{m}$ 程度以下である.

謝 辞

本稿をまとめるにあたり, 本稿をお読みいただき有益なご助言をいただいた都留文科大学の古荘玲子博士, 研究を進めるにあたり有益なご助言をいただいたソウル大学の石黒正晃博士, 光度曲線の掲載を快諾してくださった吉田誠一氏, 本稿掲載に関してお世話になった福井市自然史博物館の梅村信哉氏と有馬達也氏には, ここに厚くお礼を申し上げる.

引用文献

- 広瀬秀雄・関勉, 1968, 7彗星の物理. 7コマ. 彗星とその観測 天体観測シリーズ(6). 恒星社厚生閣, 196p.
- 星空公団, 2016/12/30, 開発製品(ソフトウェア). Raw2fits. <http://www.kodan.jp/?p=products>.
- 河北秀世・古荘玲子, 2003, 1-3 彗星のコマ, 高校生天体観測ネットワーク(Astro-HS)編, 彗星観測ハンドブック 2004. 30p.
- 河北秀世・古荘玲子, 2003, 1-3 彗星のコマ, 高校生天体観測ネットワーク(Astro-HS)編, 彗星観測ハンドブック 2004. 32p.
- 国立天文台, 2016/12/30, すばる画像解析ソフト Makalii - 配布サイト. <https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.htmlja>.
- 中村士・山本哲生, 1984, 2-2 コマ, アストラルシリーズ 4 彗星. 恒星社厚生閣, 23p.
- 中村士・山本哲生, 1984, 5-4 輻射圧, アストラルシリーズ4 彗星. 恒星社厚生閣, 82p.
- 中野圭一, 2014, 近く訪れる彗星, 天文年鑑2015年版. 誠

文堂新光社, 176p.

中野圭一, 2016, この1年間に発見された彗星, 天文年鑑 2017年版. 誠文堂新光社, 237-241p.

菅原賢, 1995, 2.3.1 ダストテイルの力学, 渡部潤一監修, アマチュアのための太陽系天文学. シュプリンガー・フェアラーク東京, 24p.

鈴木文二・秋澤宏樹・菅原賢, 2013, ②コマは巨大だ, 彗星の科学. 恒星社厚生閣, 18p.

鈴木文二・秋澤宏樹・菅原賢, 2013, ④RGBフォトメトリ, 彗星の科学. 恒星社厚生閣, 102p.

NASA Jet Propulsion Laboratory, 2016/12/30, HORIZONS Web-Interface. <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>.

Yoshida, S., 2016/12/30, カタリナ彗星 C/2013 US(Catalina). <http://www.aerith.net/comet/catalog/2013US10/2013US10-j.html>.