

彗星のダストテイルの観測とダストの
軌道計算結果の比較によるダストの物性に
ついての研究

岡山大学 理学部地球科学科

05424514 澤井健太

2015/03/27

1 はじめに

彗星は2種類の尾をもっている(図1)。1つはイオンテイルと呼ばれ、彗星の本体である核から放出されるガスによって作られる。もう1つはダストテイルと呼ばれ、ガスが放出されるときに巻き上げられたダスト(塵)によって作られる。

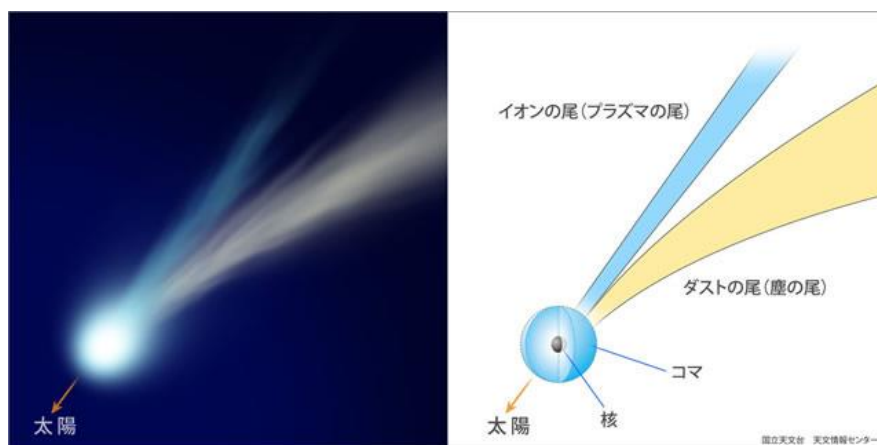


図1 彗星の模式図。

出典：彗星 | 国立天文台 (<http://www.nao.ac.jp/astro/comet/>)

イオンテイルは太陽と反対の方向にまっすぐ伸びるが、ダストテイルは曲がりながら伸びる。ダストテイルの曲り方はダストテイルを構成するダストの大きさによって決まる。なので、ダストテイルを観測することで、彗星が放出するダストの大きさを特定することができる。

本研究の目的は彗星から放出されたダストの軌道計算結果と彗星の観測結果を比較し、ダストの放出された時期や物性を特定することである。

2 彗星の観測とデータの処理

本研究では 2014 年 8 月 28 日から 8 月 30 日の 3 夜にわたり、岡山県井原市星空公園にある 60cm 反射望遠鏡（東経 133°34'18, 北緯 34°40'48, 標高 532m）に CCD カメラを取り付け彗星の観測を行った。本研究では SBIC STL-1001E という CCD カメラを使用した。

2.1 観測した彗星について

本研究では C/2014 E2(Jacques) という彗星を観測した。図 2 は 2014 年 8 月 30 日の地球と彗星の位置関係を示した図である。この図から彗星が太陽に接近した後、太陽から離れていくときに彗星を観測したことがわかる。

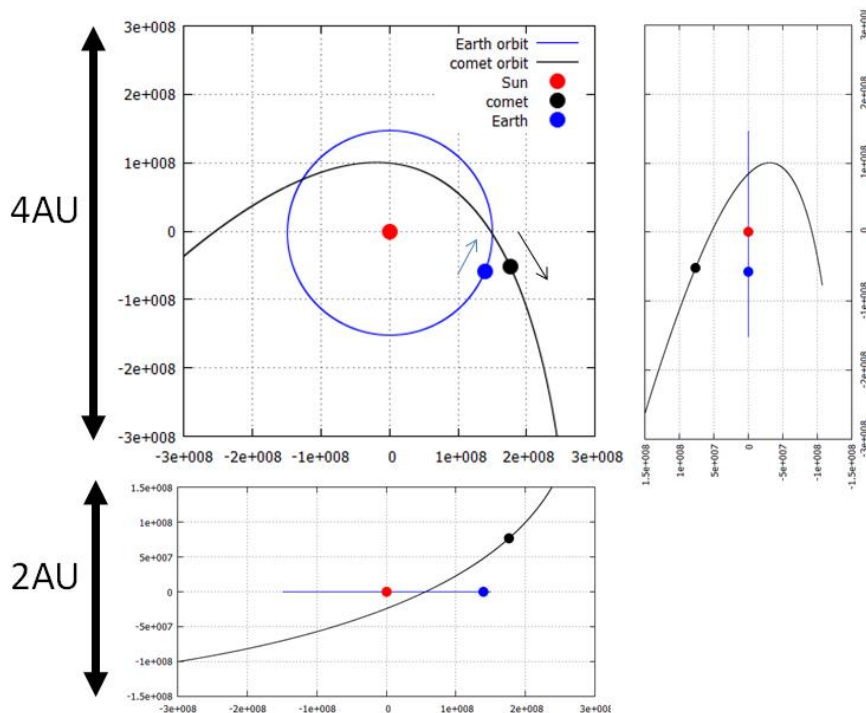


図 2 観測時の彗星と地球の位置関係。左上の図は地球の軌道面を真上から見下ろした図、右図は秋分方向から見た図、下の図は夏至方向から見た図である。彗星の軌道要素は JPL Small-Body Database Browser (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>), 地球の軌道要素は JPL Keplerian Elements for Approximate Positions of the Major Planets (http://ssd.jpl.nasa.gov/txt/aprx_pos_planets.pdf)を参考にした。

2.2 露光時間の設定

本研究で使った望遠鏡は恒星の日周運動を追尾することはできるが、彗星の動きを追尾することはできない。なので、露光時間を短くし、彗星があまり伸びないようにする必要がある。しかし、露光時間の短い写真では尾の暗い部分が写らない。それにくわえ、露光時間が短いと大気の揺らぎの影響を強く受けてしまう。なので、今回の観測では彗星の伸びと写真の明るさを両立した露光時間で観測を行い、その画像を重ね合わせることで大気の揺らぎやノイズの影響を小さくした。

2.2.1 露光時間の決め方

望遠鏡を恒星追尾モードに設定し、恒星にピントを合わせ撮影すると理論上ではまったくぼやけることなく CCD のある一つのピクセルに恒星の光が集まる。しかし、実際は大気の影響を受け周辺数ピクセルに広がって写る。この広がりの大きさはシーイングと呼ばれる。彗星の伸びがシーイングより小さくなるように露光時間を設定することで彗星の伸びの影響を小さくすることができる。

観測を行った時のシーイングはおよそ 2.5 秒角であった。この彗星は 8 月 30 日時点で、1 分間に天球上を 8.3 秒角動いた。よって、彗星が 2.5 秒角動くのに必要な時間はおよそ 20 秒となる。なので、今回の撮影では露光時間を 20s に設定し撮影を行った。

2.3 観測

本研究では彗星を 3 夜にわたり観測した。最初に 2 夜は IR, R, V, B バンドとフィルターなしでそれぞれ数十枚ずつ撮影した。3 夜目は R バンドで 511 枚撮影した。本研究で使用する画像は 3 夜目に撮影した画像のうち、画像の中心付近に彗星が写っていて、宇宙線によるノイズなどの異常がない 97 枚を使用する。図 3 は 3 夜目に観測したデータのうちの 1 枚である。

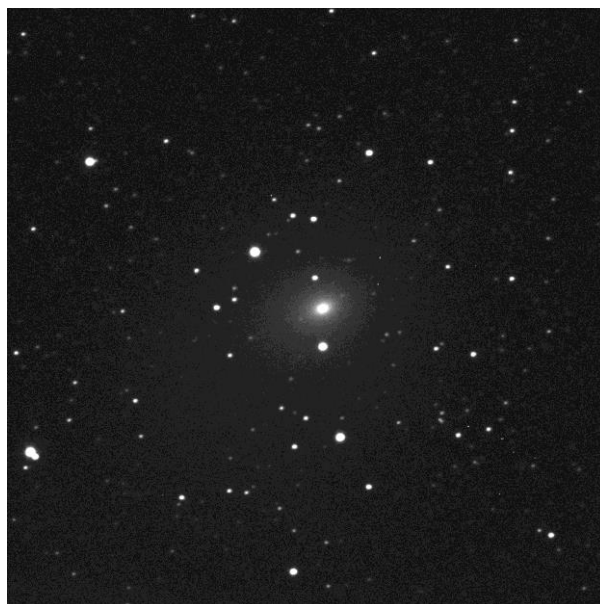


図 3 2014 年 8 月 30 日に観測した C/2014 E2. 中心付近に写っている天体が C/2014 E2.

2.4 画像の処理

本研究では撮影した彗星の画像の 1 次処理にフリーソフトウェアであるマカリ (<http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>), 画像を重ね合わせるのにフリーソフトウェアである DeepSkyStacker (<http://deepskystacker.free.fr/english/index.html>) を使用した. 画像の重ね合わせに使った DeepSkyStacker は彗星の位置を基準として複数の画像の平均値, 中央値を計算することができる. 図 4 は撮影した 97 枚の写真を DeepSkyStacker を使い, その中央値を計算したものである.

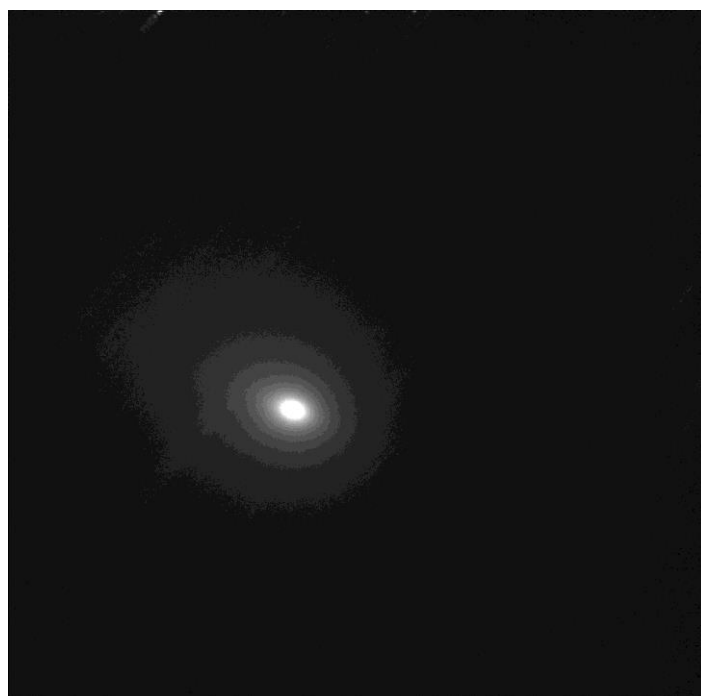


図 4 C/2014 E2 の観測結果.

3 ダストの軌道計算のモデル

ダストの軌道計算をするうえで、重要な力は2種類ある。一つは太陽との万有引力 F_g 、もう一つは太陽光による輻射圧 F_r である（図 5）。この二つの力を用いてダストの運動方程式を作ると式(1)の様に表させる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_g + F_r \quad (1)$$

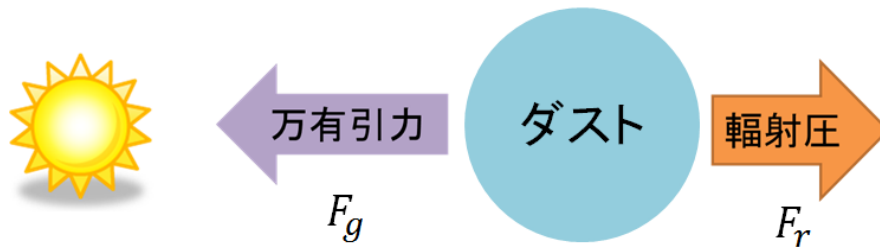


図 5 ダストに働く力の概念図。

3.1 万有引力

ダストが直径 d で密度 ρ の完全な球体であるとする、太陽との万有引力は式(2)の様に表される。

$$\begin{aligned} F_g &= -G \frac{M_s m}{r^2} \\ &= -G \frac{M_s}{r^2} \left\{ \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \rho \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで G は万有引力定数、 M_s は太陽質量、 r は太陽とダストの距離を示している。

3.2 輻射圧

輻射圧は光が物質に当たることで生じる圧力である。その向きは太陽と離れる方向に働き、大きさは入射するエネルギー量 E を光速 c で割った値となる。ダストが直径 d の完全な球体であるとする、輻射圧は式(3)の様に表される。

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{E}{c} \\ &= \frac{1}{c} \times \left(\frac{E_s}{4\pi r^2} \right) \times \left\{ \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right\} \times Q \end{aligned} \quad (3)$$

ここで E_s は太陽の全放射エネルギー(J/s)を示している。 Q は輻射圧係数(%)を示していて、この値はダストの構造、形によって決まる。

3.3 β の導入

式(2), 式(3)それぞれ整理すると以下のようになる。

$$F_g = -\frac{\pi GM_s \rho}{6} \times \frac{d^3}{r^2}$$

$$F_r = \frac{QE_s}{16c} \times \frac{d^2}{r^2}$$

これらの式から万有引力も輻射圧も太陽との距離 r の2乗に反比例していて、万有引力はダストの直径 d の3乗に比例し、輻射圧はダストの直径 d の2乗に比例していることがわかる。

ここで万有引力と輻射圧の大きさの比 β を式(4)の様に定義する。

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{|F_r|}{|F_g|} & (4) \\ &= \frac{3E_s}{8\pi c GM_s} \times \frac{Q}{\rho d} \\ &= \frac{KQ}{\rho d} \quad (K = 1.16 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2) \end{aligned}$$

上記の式から β 値は太陽との距離に依存せず、ダストの密度や大きさ、構造といったダストの性質によって決まることがわかる。また、彗星や惑星といったサイズの大きい天体では $\beta \approx 0$ となることがわかる。

β を利用し(1)式の運動方程式を書きかえると以下のようになる。

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= F_g + F_r \\ &= (1 - \beta) F_g \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= (1 - \beta) \frac{GM_s}{r^2} & (5) \end{aligned}$$

(5)式からダストの運動は β 値ごとに異なることがわかる。

3.4 計算例

(5)式の2階常微分方程式を数値計算した結果を以下に示す。

図6は β とダストの運動の関係を示した図で、点Aで彗星から放出速度0で放出されたダストが彗星が点Bに到達するときどこまで進んでいるかを示している。図6から β 値が大きい、つまり粒径の小さいダストほど彗星から離れた軌道を取り、 β 値が小さい、つまり粒径の大きいダストほど彗星に近い軌道を取ることがわかる。また β が1、つまり輻射圧と万有引力が釣り合っているダストは直進することがわかる。実際には β 値は連続的に変化するので、点Aで放出されたダストは彗星が点Bに到達したときに橙色で示された尾を作る。このように彗星がある場所で様々な β 値を持つダストを同時に放出すると、ダストは一つの曲線上に分布する。この曲線はシンクロン曲線（同時放出線）と呼ばれる。

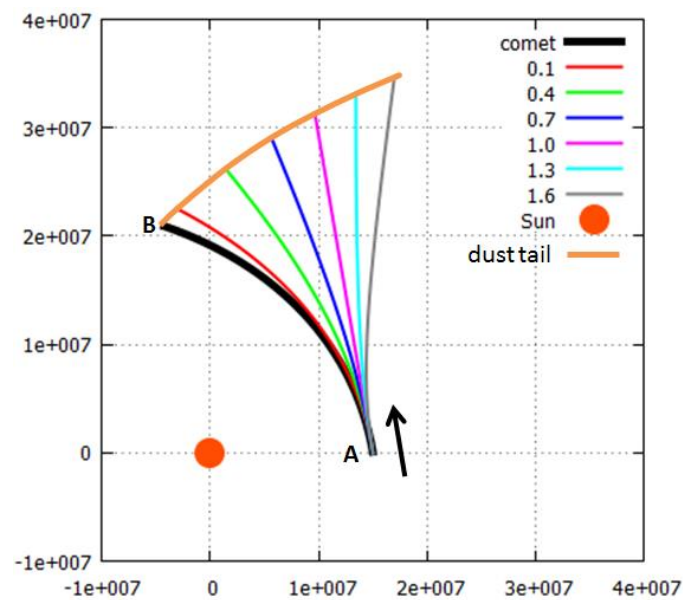


図6 ダストの軌道の β 依存性

この図は彗星の軌道面を真上から見下ろした時の様子を示している。

図7は彗星が移動しながら β 値が一定のダストを放出しているときにできるダストテイルを示した図である。彗星が C_1 から放出速度0で放出したダストは彗星が C_0 に到達したとき、ダストは赤線で書かれた軌跡を通り、 D_1 に到達する。同様に、 C_2 で放出されたダストは D_2 に到達する。このような計算を彗星の軌道の各点で行うと、 β の値が一定のダストが作る尾を書くことができる。この曲線はシンダイン曲線（等斥力線）と呼ばれる。

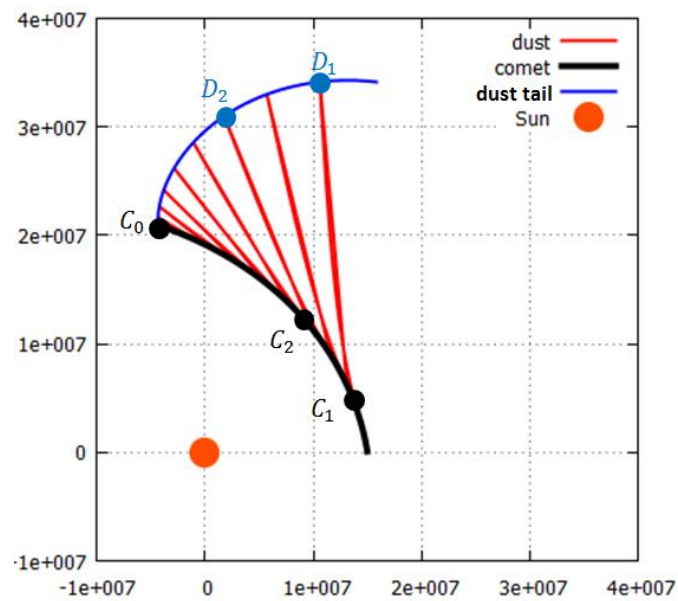


図7 $\beta = 1.5$ のダストが作るダストテイル。

この図は彗星の軌道面を真上から見下ろした時の様子を示している。

図 8 は様々な β 値でのシンダイン曲線を描いた図である．このように β 値によってシンダイン曲線の伸びる方向が変化することがわかる．

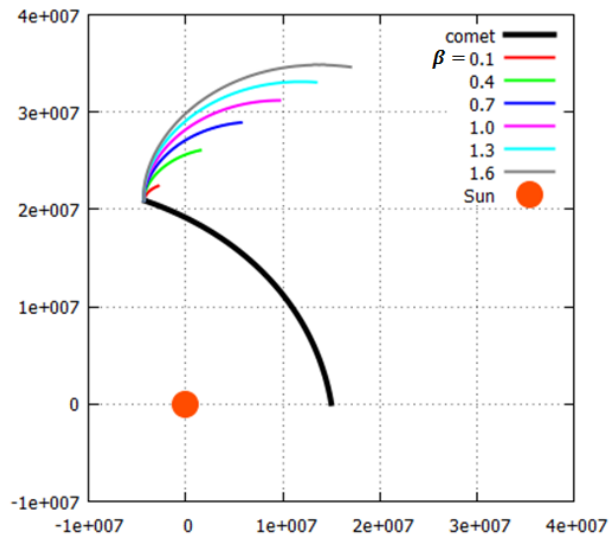


図 8 シンダイン曲線

この図は彗星の軌道面を真上から見下ろした時の様子を示している．

シンクロン曲線，シンダイン曲線とダストテイルの観測結果を比較することで，シンクロン曲線からはダストの放出がいつ起きたかを特定することができ，シンダイン曲線からは放出されたダストの β 値，つまり大きさ，密度といった物性を特定することができる．この2つの曲線を組み合わせることで，彗星がいつ，どのようなダストを放出したかを調べることができる．

4 結果と考察

観測で得られたデータと計算結果を合わせるために、画像を回転、反転させ、さらに明暗をわかりやすくするためにフリーソフトである Fv (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/fvtools/fv/>) を使い画像にコントアを描いたものを図 9 に示す。このコントアの広がり方から彗星の周辺部では左下（南西）部分がほかの部分よりも明るいことがわかる。

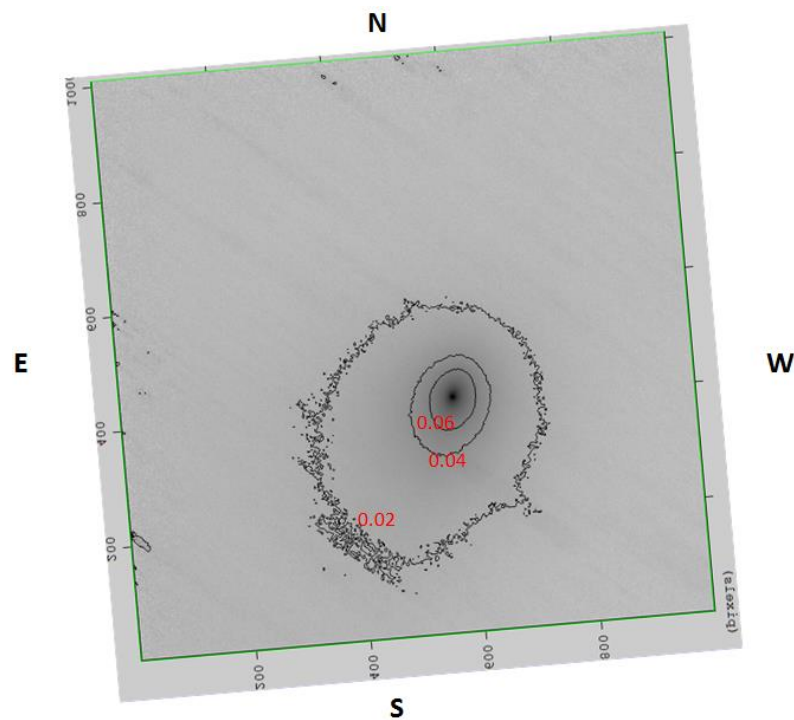


図 9 彗星の観測結果

赤字で示された数字は彗星のもっとも明るいピクセルの値を 1 とした時のものである。

次にダストの軌道の計算結果と彗星の観測結果を重ねたものを図 10 に示す。この図から彗星の左下の部分が明るいのはダストテイルの影響であると考えられる。

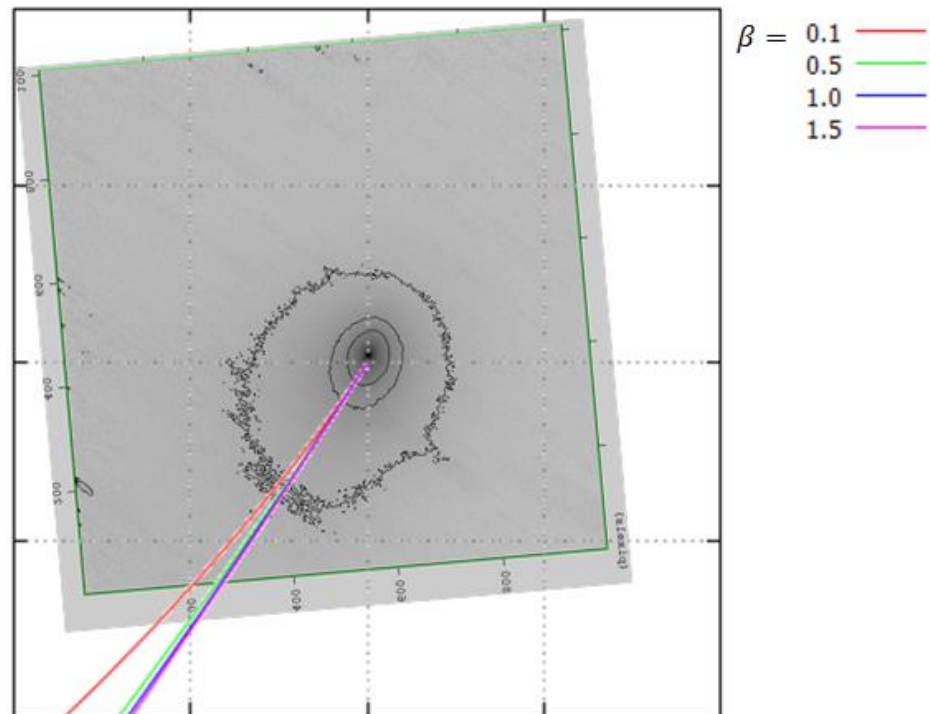


図 10 ダストの軌道計算結果と観測結果の比較

4.1 ダストの物性についての考察

今回の彗星の観測では β 値を読み取ることのできる構造を見ることはできなかった。その原因として彗星の本体に近い部分しか観測をしていなかったため、尾をうまく観察できなかったことが考えられる。

5 まとめ

彗星から放出されたダストの軌道の計算結果と彗星の観測結果を比較した。彗星の周辺の一部が明るいのはダストテイルの影響であると考えられる。ダストの物性を調べるために必要な数値である β を特定することはできなかった。

参考文献

木下 宙, 天体と軌道の力学. 東京大学出版会, 1998, pp259

鈴木 文二 ほか, 彗星の科学 知る・撮る・探る, 恒星社厚生閣, 1998, pp135

JPL HORIZONS System

<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

JPL Small-Body Database Browser

<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>

JPL Keplerian Elements for Approximate Positions of the Major Planets

http://ssd.jpl.nasa.gov/txt/aprx_pos_planets.pdf

マカリ

<https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html>

DeepSkyStacker

<http://deepskystacker.free.fr/english/index.html>

Fv

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fv/>