

ダストテイル

菅原 賢 < sugawara@star.email.ne.jp >

(1) 彗星ダストの力学

彗星核から放出されたダストは、小さいながらも独立した天体として太陽に対して公転を開始する。あるものはすばやく、あるものはゆっくりと彗星核から遠ざかっていく。こうした無数のダストの任意の時刻における分布を見たものが、ダストテイルである。したがって、ダストテイルのモデルは、彗星核から放出されたダストの軌道計算が基礎となる。

ダストの軌道は、(A)放出時の位置ベクトル、(B)速度ベクトル、(C)ダストに働く力、によって決まる。(A)は、彗星核本体の位置推算から得られる。(B)は、放出時の彗星核本体の軌道速度と核からの放出速度の和になる。放出速度は通常 1 km/sec のオーダーであり、軌道速度にくらべ十分に小さく近似的にはゼロとみなせる（放出というよりも離脱というイメージに近い）ので、核本体の速度、言い換えれば放出時刻によってきまると考えてよい。(C)については、まず太陽の重力があげられる。しかし、彗星ダストのように小さな天体では、太陽から受ける光圧の影響も無視できない。光圧の大きさは、後述のように、ダストの種類やサイズによって決まる。

そこで、重力 F_{grav} と光圧 F_{rad} の比を、

$$= F_{\text{rad}} / F_{\text{grav}}$$

で表わすことにする。

重力と光圧は正反対の方向に働き、ともにその大きさが日心距離の 2 乗に反比例するので、比をとると日心距離の項は消えてしまう。つまり、この値はダストの種類（正確に言えば光学的性質）とサイズによって決まる。

従って、核から放出されたダストの軌道は、ダストがいつ核から放出されたか（放出時刻 T_e ）、そのダストがどんな光学的特性を持つか（ ）によって決まると考えてよい。

(2) ダストテイルのモデル

様々な時刻 T_e に放出された、様々な値を持つダストの位置を計算すると、ある時刻におけるダストの配列、すなわちダストテイルの形状を再現することができる。これがベッセル・ブレディッヒン (Bessel-Bredikhin) 法である。同じ T_e を持つダストの位置を結んだ曲線をシンクロン曲線、同じ値を持つダストの位置を結んだ曲線をシンダイン曲線と呼ぶ。

ベッセル・ブレディッヒン法では、ダストの位置に関する情報を与えるが、輝度分布を定量的に扱うことができない。そこで開発されたのが、フィンソン・プロブスタイン (Finson-Probstein) 法である (Finson and Probstein 1968)。ベッセル・ブレディッヒン法では通常ゼロとして扱われる初速度を、流体力学の概念を導入することによって考慮に入れ、加えて放出時刻、サイズ分布、放出率の時間変化をパラメータとし、これらを少しずつ変化させながら観測されたダストテイルの輝度分布を最もうまく再現する組合せを探す方法である。実際にいくつかの彗星に適用され、たいへん良い一致を示してきた。ただこのモデルでは、広い範囲に渡ってパラ

メータを変えながら観測とうまくフィットする値を探さなければならない。したがって、計算が複雑となるとともに、パラメータの採用に任意性が入り込みやすい欠点がある。こうした点の改良を含め、最近では計算機パワーの飛躍的向上により様々な手法が開発されている（Fuller 1987, その他）。

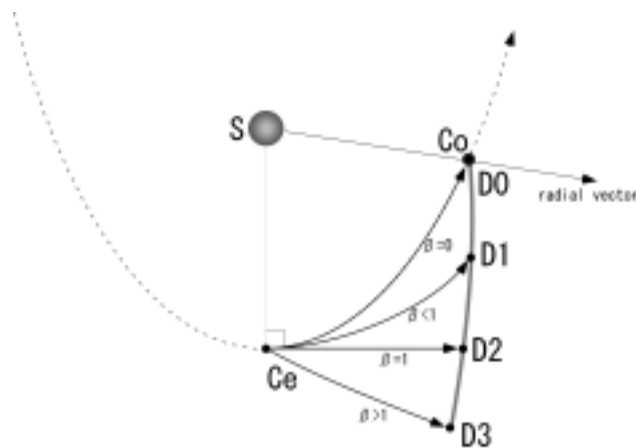


図1 シンクロンの概念図

時刻 T_e に、彗星が軌道（破線）上の C_e において同時にさまざまな β 値を持つダストを放出したとしよう。 $\beta = 0$ のダストは、彗星と全く同じ軌道をたどり、時刻 T_o においては、彗星核 C_o 上にある。 $\beta > 0$ のダストは、太陽重力の影響が弱まるため、彗星軌道よりも外側の（太陽を大回りする）軌道にのる。 $\beta = 1$ の場合は、重力と光圧がバランスし、無重力状態となるため、接線方向へ等速直線運動する。このように、同時に放出されたダストは、さまざまな軌道を通るが、観測時刻においては、 D_0, D_1, D_2, D_3 を結ぶ1本の曲線状に分布する。これがシンクロン曲線である。

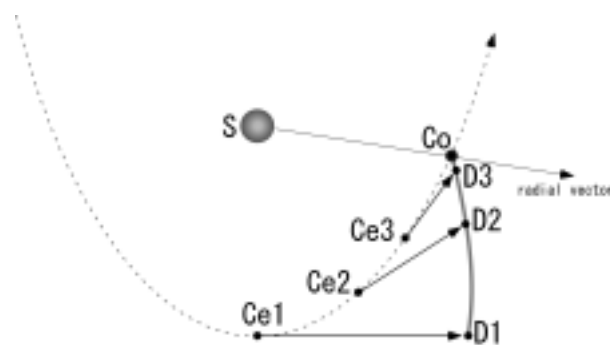
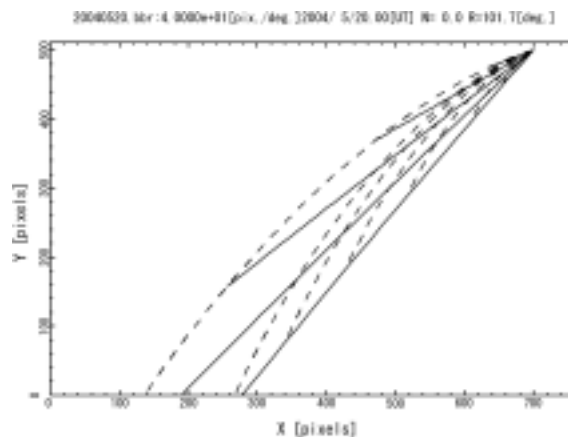
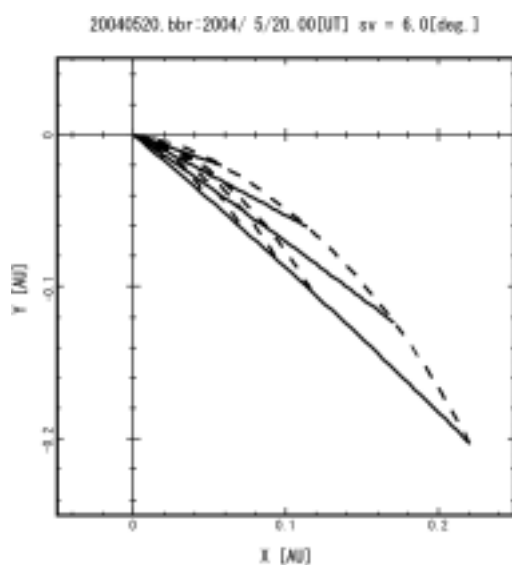


図2 シンダインの概念図

彗星が軌道（破線）上を運動しながら、 C_{e1}, C_{e2}, C_{e3} の各点にいたときに、ある特定の値を持つダストを放出したとしよう。それぞれのダストは、それぞれの軌道をたどり、観測時刻 T_o において、 D_1, D_2, D_3 を結ぶ1本の曲線状に分布する。これがシンダイン曲線である。



シンクロン・シンダイン曲線の例

図3 (左) C/2001Q4 (NEAT) の、2004年5月20.0日[UT]におけるシンクロン(実線)、シンダイン(破線)曲線の計算例。軌道平面上にプロットしたもの。右が反太陽方向。原点が彗星核の位置。シンクロンは、最も長いものから順に、観測時刻からそれぞれ50,40,30,20,10日前に放出されたダストからなるもの。シンダインは、最も彗星核に近いものから $\beta = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0$ のダストからなるもの。

図4 (右) 図3を天球面上にプロットしたもの。上が北、右が西。

(3) 彗星ダストの性質を調べる

ダストテイルの観測の目的は、こうしたモデルをツールとして使いながら、彗星について様々な情報を得ることにある。それを簡単にまとめると次のようになる。

ダストの形を球形と仮定した場合、

$$\beta = (KQ) / (4ac)$$

$$K = (3E_0) / (4cGM)$$

なる関係が成り立つ。ここで、 Q は Mie 散乱効率、 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。cgs 単位系では K の値は、 $5.7 \times 10^{-5} [g \cdot cm^{-2}]$ となる (Burns et al. 1979)。 Q は、ダストのサイズと複素屈折率によって決まる値である。

様々な β 値に対応して描いたシンダイン曲線とダストテイルの比較から、テイルに含まれるダストの β 値を調べることにより、ダストの種類に関する情報を得ることが可能になる。

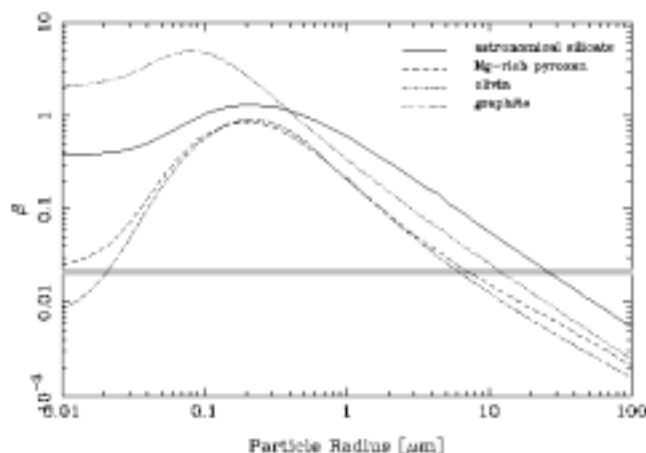


図5 ダストの種類と

長谷川均 <http://centaurs.mtk.nao.ac.jp/~kin/comet/LINEAR/fig4.gif> より引用。

ダストテイルは可視光で、しかもアマチュアにも容易に観測できる太陽系ダストの数少ない例のひとつである。彗星ダストは惑星間ダストの補給源として、さらに星間ダストとの関連という点で、その物性を探ることは興味深い。ダストテイルに含まれる大部分のダストは双曲線軌道を持ち、やがて太陽系から離れてしまうが、サイズの大きいものは太陽系内にとどまるからである。

ダストテイルは、過去に彗星から放出されたダストから構成される。あたかも地層のように、そこには彗星核の過去における活動の履歴が刻み込まれている。ダストの放出時刻 T_e の分布を観測から調べることにより、日心距離ごとのダストの放出の変化をさぐることができる。しかも、条件によっては、数100日以上前に放出されたダストが観測できることさえある。

一般に、彗星が人間の目に触れ様々な観測がなされるようになるのは、彗星がある程度太陽に近づいてからの事である。特に新発見の彗星の場合、発見前にまでさかのぼってそのふるまいを知る上で、ダストテイルの観測は強力な武器になる。

こうした長期間のダスト放出量の変化は、彗星核の蒸発特性をさぐるひとつのアプローチともなる。つまり、ダストテイルの研究は、核そのものの正体を知ることにつながるのである。

(4) シンクロニックバンド

よく発達したダストテイルには、筋上の構造；シンクロニックバンド (synchronic band あるいは striae) が観測されることがある。世紀の大彗星として名高いウエスト彗星 (C/1975 V1) とヘール・ボップ彗星 (C/1995 O1) が典型例である。通常のダストテイルに見られる構造の多くは、シンクロン・シンダイン曲線でうまく説明することが出来る。しかしシンクロニックバンドは、そのどちらにも一致せず、核からの間欠的な粒子の放出でも説明することができない。崩壊モデル (Sekanina and Farrell 1980) 寿命モデル (Nishioka and Watanabe, 1990) などが提

案されているが、定説はない。ダストテイルに関する最大の謎と言ってもよい。核から放出されたダストがその後なんらかの原因によって崩壊し、核から離れた場所で新しいテイルを形成したために生じたものであることは確かだが、問題は、その崩壊のメカニズムである。Watanabe et al. の3色分解写真からは、シンクロニックバンドが連続スペクトルを放つことが示唆された。しかし、これまでに分光観測の例がないため、それがダストではなく分子による構造であるという可能性も否定しきれない。

なぜ、どのようにしてダストが崩壊するのか。それはダストの物性をさぐる手がかりになる。シンクロニックバンドを見せる彗星と見せない彗星があるのはなぜか。それは、彗星核の組成や進化の違いにもかかわってくるだろう。



図6 ヘール・ボップ彗星のシンクロニックバンド

国立天文台ヘール・ボップ彗星観測チームによる。

<http://www.nao.ac.jp/pio/Comets/HB/hb309mch.jpg> より引用。

(5) 遠い日心距離でのダストテイルの形成

オースチン彗星(C/1989 X1)のダストテイルをベッセル・ブレディッヒン法で解析した結果、ダストの放出時刻は近日点通過 1000 日前、日心距離 11 天文単位という時期にまでさかのぼることがわかった。しかも、シンダイン曲線との比較からは、サイズが約 0.06 cm 程の大きなダストから構成されていることがわかった(Watanabe et al. 1990)。このような大きな日心距離で活動を見せた彗星は過去にもいくつかある。そのデータをまとめてみると、ダストの放出された日心距離は 2 ~ 15 天文単位の範囲に分布している (Watanabe and Sugawara 1992)。

ダストの放出は核からのガス放出に依存する。こうした遠距離で、しかもサイズの大きいダストが放出されるためには、 H_2O よりも揮発性の高い成分が豊富に存在していなければならない。核を構成する物質の候補に上がっている分子の中から、CO や CO_2 などがあてはまる。彗星核に

どのような成分が含まれているかは、原始太陽系星雲の組成、彗星形成時の温度、圧力環境などに依存する。特に、CO, CO₂ などの揮発性の高い分子が核に存在するかどうかは、太陽系のどのあたりで彗星が形成されたかを見きわめる上で重要である。彗星のダストテイルが果してどのくらいの日心距離から形成されるのか、より多くの彗星について観測する必要がある。また、このようなダストは通常のシリケートではなく、氷のダストであるという主張もある (Sekanina 1975)。

(6) スプリットテイル

ダストテイルを貫くようにして核付近から黒い筋状の構造が伸びているのが、いくつかの彗星で観測されてきた (Watanabe et al. 1989)。ダストテイルがあたかも2本に分かれているように見えることから、スプリットテイルと呼ばれる。その形成メカニズムについては、様々なモデルが提案されているが定説はない。1987~88年に接近したブラッドフィールド彗星 (C/1987 P1) では、アマチュアによって撮影された多くの写真の解析によって、黒い筋の方向が、プラズマテイルの方向の変化に似ていることが認められた (Sugawara and Watanabe 1991)。長期間の観測によってスプリットテイルの変化が追跡された例は他にはなく、今後の研究が必要である。

(7) 核の自転との関連

ダスト放出量の多い彗星は、ダストテイルの中に様々な構造を見せる。ストリーマーと呼ばれる核から放射状に伸びる筋上の構造は、核表面の活動領域が自転によって太陽方向を向くことで間欠的に多量のダストを放出した結果だとされている。ダストテイルの解析からは、彗星核の自転に関する情報も得られるのである。

一方、冷却 CCD カメラやデジタル画像処理の発達により、コマに埋もれた核近傍のジェット構造の観測例も増えてきた。これらの解析から、自転軸の向き、自転周期、ダストの放出速度などのパラメータを決めることで、ダストテイルのモデルに制限を加えることもできる。ダストテイルの研究に新しい展開をもたらすことを期待したい。

【参考文献】(本文中で直接引用していないものも含む)

ダストテイル全般

- [1] Burns, J. A., Lamy, P. L., and Soter, S., 1979, Radiation forces on small particles in the solar system, *Icarus*, 40, 1-48.
- [2] Sekanina, Z., 1976, Progress in our understanding of cometary dust tails, Donn, B., Mumma, M., Jackson, W., A'Hearn, M., and Harrington, R., eds., "The study of comets", NASA-SP 393, 2, 893-939.
- [3] Saito, K., Isobe, S., Nishioka, K., and Ishii, T., 1981, Substances of Cometary Grains Estimated from Evaporation and Radiation Pressure Mechanisms. *Icarus* 47, 351-360.
- [4] 齊藤馨児, 1983, 彗星, 講談社ブルーバックス.
- [5] 菅原賢, 1995, 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 .

- [6] 向井正, 1982, 「彗星ダスト」, 藪下信編『彗星と星間物質』, 地人書館 .

モデル

- [7] 西岡公彦, 1982, 論説: 彗星のタイプ II の尾の力学と彗星のダストの組成, 彗星夏の学校集録(1982,83年版), p.37.

(この論文には, Bessel-Bredikhin 法の具体的計算方法が載っている)

- [8] Finson, M. L. and Probst, R. F., 1968, A theory of dust comets. I. Model and equations, *Astrophys. J.*, 154, 327-352.
- [9] Finson, M. L. and Probst, R. F., 1968, A theory of dust comets. II. Results for comet Arend-Roland, *Astrophys. J.*, 154, 353-380.
- [10] Fulle, M., 1987, A new approach to the Finson-Probst method of interpreting cometary dust tails. *Astron. Astrophys.*, 171, 327-335.

シンクロニックバンド

- [11] Sekanina, Z., and Farrell, J. A., 1980, The striated dust tail of comet West 1976VI as a particle fragmentation phenomenon, *Astron. J.*, 85, 1538-1554.
- [12] Nishioka, K., and Watanabe, J., 1990, Finite lifetime fragment model for synchronic band formation in dust tails of comets, *Icarus*, 87, 403-411.

(彗星夏の学校集録 1990 年版に全文あり)

- [13] Nishioka, K., 1998, Finite Lifetime Fragment Model 2 for Synchronic Band Formation in Dust Tails of Comets, *Icarus*, 134, 24-34.
- [14] Notni, P. and Thoenert, W., 1988, The striae in the dust tails of great comets - A comparison to various theories., *Astron. Nach.*, 309, 133-146.
- [15] Watanabe, J., Fukushima, H., Kinoshita, D., Sugawara, K. and Takata, T., 1997., Detection of Synchronic Bands in the Dust Tail of Comet C/Hale-Bopp 1995 O1., *Pub. Astron. Soc. Japan*, Vol. 49, L35-L39 and Plates 17-18.
- [16] 菅原賢, (1993), 彗星の形状変化の謎を解く, 月刊天文 1992 年 3 月号.

遠い日心距離でのダストテイルの形成

- [17] Watanabe, J., Tsumura, M., and Sugawara, K., 1990, On the dust tail of comet Austin 1989c1, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 42, L69-L73.
- [18] Watanabe, J. and Sugawara, K., 1992, Dust Tail and Chemical Composition of Cometary Nuclei Depletion of CO, *Proc. 21th ISAS Lunar and Planetary Symp.*, p.279
- [19] Sekanina, Z., 1975, A study of the icy tails of the distant comets, *Icarus*, 25, 218-238.
- [20] 菅原賢, (1993), ダストテイルから見た彗星核の組成, 月刊天文 1993 年 9 月号.

スプリットテイル

- [21] Watanabe, J., Aoki, T., Taniguchi, Y., and Tarusawa, K., 1989, Photographic Observations of Comet Bradfield 1987XXIX at the Kiso Observatory., Publ. National Astronomical Observatory of Japan, 1, 71-84
- [22] Sugawara, K., and Watanabe, J., 1991, Formation mechanisms of the split tail of comet Bradfield 1987XXIX, Levasseur-Regourd, A.C., and Hasegawa, H.(eds.), Origin and Evolution of Interplanetary Dust, 273-276, 1991, Kluwer Academic Publishers.
- [23] 秋澤宏樹, 岡拓真, 菅原賢, 長谷川均, 1988, ブラッドフィールド彗星の Split Tail について, 彗星夏の学校集録 1988, p.1.

自転との関連

- [24] Beisser, K., and Boehnhardt, H., 1987, Evidence for the Nucleus Rotation in Streamer Patterns of Comet Halley's Dust Tail. Astrophys. Space. Sci. 139, 5-12.
- [25] 菅原賢、長谷川均 (1990) 彗星物理入門 5 -ダストテイルを調べよう、月刊天文 19905 月号、70-71

その他

- [26] 菅原賢(1997) ダストテイルに関する文献リスト
http://www.asahi-net.or.jp/~se2k-sgwr/comet_p/dtail/d_tail_ref.html