

# 木曾シュミットを用いた彗星ダストトレイル観測

石黒正晃

〈ハワイ大学天文学研究所 (Institute for Astronomy, University of Hawaii), 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822〉

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: ishiguro@ifa.hawaii.edu

彗星ダストトレイルとは、彗星軌道に分布する黒っぽい大きなチリからなる雲である。しし座流星群のおかげで、最近ではダストトレイルの存在もすっかりなじみ深いものになった。しかしながら、ダストトレイルを直接イメージングできた例は驚くほど少ない。2002年に可視光で初めて検出に成功し、今後一気に多くの彗星の軌道にダストトレイルが検出されると期待される。本稿では、ダストトレイルについて簡単に紹介しながら、筆者らが木曾観測所 105 cm シュミットを使って2年間ダストトレイルサーベイを実施し明らかになったことを紹介する。

## 1. はじめに

彗星と聞いてまず真っ先に想像することは、太陽と反対方向にたなびくイオンの尾（イオンテイル）と、チリの尾（ダストテイル）ではないだろうか。彗星から放出されたサブミクロンからミクロンサイズのチリは、太陽の輻射圧を受けて反太陽方向に押しやられる（ダストテイル）。チリのサイズが大きくなると太陽輻射圧の影響が小さくなり、彗星と近い軌道をとる。しかしながら、全く輻射圧が効いていないわけではないので、わずかだが彗星より外側の軌道を通る。結果としてこのようなチリは彗星の進行方向とは反対向きに軌道にほぼ沿ったチューブ状のチリ雲（ダストトレイル）を形成する（図1）。非常に短いタイムスケールで彗星から遠ざかる小さなサイズのチリからなるダストテイルと比較すると、ダストトレイルは長時間安定して彗星の近くを漂っていることになる。

流星群が起こることから、ダストトレイルの存在は古くから知られていた。最初にダストトレイルの2次元画像が撮られたのは1983年赤外線天

文衛星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) が全天サーベイをしたときである<sup>1)</sup> (図2)。IRASは8個の短周期彗星軌道にダストトレイル粒子からの熱輻射を検出することに成功した。この発見は、彗星の質量放出の大半が揮発性成分であるという従来の考え方に疑問を投げかけるきっかけとなった。すなわち、従来の観測では検出することができなかった暗くて大きな（直径約1ミリメートル）物質が彗星から放出されていたからである。彗星は「汚れた雪玉」<sup>2)</sup> であると考えられていたが、「凍ったドロ玉」<sup>3)</sup> へとそのイメージを変えようとしているのである。決してよい表現とは言えないが、それほど難揮発性成分が多く含まれているということをとえようとしているのである。

IRASの発見以降、COBE (Cosmic Background Explorer)、ISO (Infrared Space Observatory) といった赤外線観測衛星があがるたびにダストトレイルの検出が試みられたわけだが、視野が狭かったり、空間分解能が足りなかったりと、思うような観測ができていない。結局、ISOが発見した二つの彗星のダストトレイルを確認しただけに止まり<sup>4),5)</sup>、COBEでは一つも検出できな

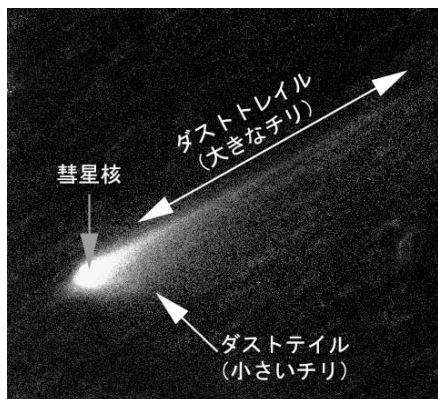


図1 チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星のダストトレイルとダストテイル. 2003年2月木曾シュミットにて撮像.

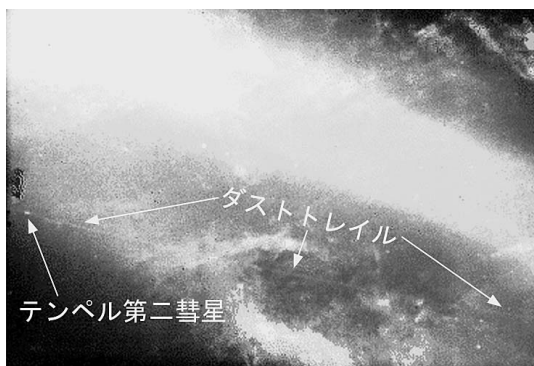


図2 IRASが発見したダストトレイル (画像提供: Mark Sykes 博士 (アリゾナ大学)). ここに写っているのは、テンペル第二彗星と、彗星本体から軌道に沿って延びているトレイル構造.

かった<sup>6)</sup>. IRASが発見した8個の短周期彗星軌道上のダストトレイルがすべてであり、後は地球軌道が彗星軌道と交わる極めてまれな流星群という現象によってその全体像を推測せざるをえなかった. 彗星からこのような大きなチリが放出されているということは、探査機による『その場』観測<sup>7)</sup>やサブミリ波での観測<sup>8)</sup>で知られている. また、地上可視観測においても、オースチン彗星<sup>9)</sup>や分裂したシューメーカー・レヴィ第9彗星<sup>10)</sup>で報告されている.

## 2. 木曾シュミットによるダストトレイル検出

ダストトレイルの検出は、何度か地上の観測装置を用いて試みられた. 地上から観測する場合、中間赤外線領域では望遠鏡や地球大気からの熱放射が大きく、ダストトレイルのような広がった天体には適していない. 可視波長域においてダストトレイル中のチリによる太陽散乱光の検出を試みることになるが、チリのアルベドが低いためにトレイル構造を検出することが困難だ. 我々の研究グループでは、1996年以降黄道光の観測を通じて、その局所的な構造としてダストトレイルの検出を試みた. 黄道光とは、惑星間に漂うチリによって散乱された太陽光である. このようなチリは一体どこからやってくるのか、その起源の一つとしてダストトレイルが注目されていたわけである. 実際、我々の観測によってさまざまなチリ起源と関連する黄道光微細構造が検出された. しかしながら、特別な例を除き細長く伸びたトレイル構造を検出するには至らなかった<sup>11)</sup>. その原因はいくつか考えられるが、おそらくダストトレイルの幅を太く見積もりすぎていたからではないだろうか. 実際、IRASが発見したダストトレイルの太さは、IRASの空間分解能とほぼ一致していた. 実際はもっと細く広視野カメラでは星にまぎれて見えなかったのではないだろうか. だとすれば、 $F$ 値(口径に対する焦点距離の比)の小さい望遠鏡を使ってひたすら長時間積分して探した方がトレイルを検出できる見込みは高い.

このような理由で、2002年から木曾シュミットを使ったダストトレイル探しが始まった. 木曾シュミットは口径が105 cmと現在第一線で活躍する望遠鏡と比較すると口径が大きいとはいえない. ただ、面光源の明るさは $F$ 値の $-2$ 乗に比例するため、ダストトレイルのような広がった天体の観測には適している. そして何より視野が50分角もあり、長く伸びたトレイル構造を捕らえる



図 3 木曾シュミットによって最初に検出されたコプフ彗星のダストトレイル。彗星本体は矢印の先に位置するが、あいにくこの日は星と重なって見えていない。

にはもってこいである。

トレイルの検出は思いのほか簡単に実現した。2002年2月に IRAS が検出していたコプフ彗星がたまたま太陽に近づきつつあった。まずはこの彗星を観測することにした。合計 65 分間露光したデータを重ね合わせると彗星軌道に沿ってうっすらとチリ雲が浮かび上がったのである<sup>12)</sup> (図 3)。トレイルの太さは 10 秒角程度と従来考えられていたよりも細かった。トレイルの幅が細いということは、彗星から放出されたときの速度が小

さいことを意味している。おそらく脱出速度ぎりぎりに加速された大きな粒子が彗星から“ポロポロ”とこぼれ落ちているといったイメージが適切なのであろう。更に、彗星から少し離れたところでトレイルの表面輝度が最大になっていることもわかった。コプフ彗星は前回の近日点付近でこのような大きなチリを放出して以来あまりチリを放出していないことによるものではないかと考えられる。

可視光でトレイルの検出に成功して、まず真っ

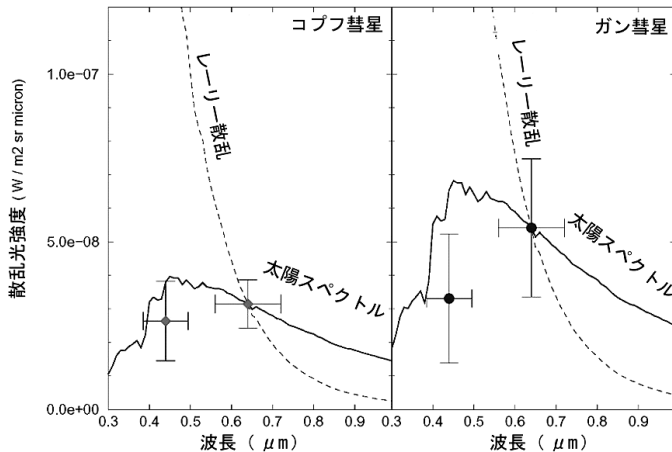


図 4 コプフ彗星とガン彗星のダストトレイルの色。太陽スペクトルに近いことから、チリの大きさは波長に対して十分大きいことがわかる。

先にやってみたかったことは、トレイル粒子の散乱光の色を調べることである。第1章で、ダストトレイルは「約1mmの大きなチリからなる」と書いた。しかしながら、力学的には100Åほどの小さなチリもまた同じような振舞をする。このようなチリは、太陽光を効率的に散乱できないので、輻射圧もほとんど受けないのである。IRASがトレイルの色温度を測定したとき、その場所においた黒体より高い温度になったことからこのような非常に小さなチリの可能性も示唆されていた。可視散乱光で色を調べると、チリのサイズの判別が可能である。非常に小さなチリの場合、レーリー散乱によって青く見えると予想された。結果はほぼ太陽と同じ色であることがわかった<sup>13)</sup>(図4)。この観測結果は、「凍ったドロ玉」モデルを後押しするものになった。さらに、筆者らの観測から、位相角(太陽-ダスト-観測者のなす角)の小さなところで散乱光強度が強くなるということがわかった<sup>14)</sup>。おそらく十分大きなトレイル粒子表面の凸凹に起因しているのであろう。いずれにせよトレイル粒子は観測波長(約0.5ミクロン)より十分大きいことは決定的となった。

現在までに確認されている周期彗星は約160個である。その多くが木星族と呼ばれる木星の摂動によって内惑星領域を約6年の公転周期で太陽の周りを回っているものだ。ダストトレイルを探すためには、彗星が太陽に近づき、強い太陽の光を受けているときに観測するのが好ましい。また、明け方よりも夕方の方が、ダストトレイルとダストテイルを見分けやすい。したがって、筆者らのダストトレイルサーベイは、夕方から夜半過ぎを中心に、木曾シュミットを用いて年間約20~30天体に対して実施してきた。現在までにダストトレイルと確認できた天体は9天体である(2004年4月10日現在)。そのうちIRASが見つけていないものは5天体(ホイップル、ドゥットイト・ニューイミン・デルポルト、ヴィルト第二、ヴィルト第四、ウエスト・ハートレイ)である。どのよう

な彗星にトレイルが存在しているかという傾向はわかっていない。検出した天体の一つにドゥットイト・ニューイミン・デルポルト彗星がある。この彗星は後に軌道に沿って分裂核が見つかったとの報告がある<sup>15)</sup>。このようなチリは彗星が分裂するときに生成されたものだと考えられる。もし分裂現象によってのみ濃いダストトレイルが形成されるのだとすると、ダストトレイルを大型望遠鏡で観測すればミニ彗星が並んでいるのかもしれない。もしくは、単に放出された大きなチリは彗星に対する相対速度が小さいために、たまたま濃いチリ雲として観測されている現象なのかもしれない。

次の章では、検出された9個の彗星の一つヴィルト第二彗星についてご紹介する。

### 3. 彗星探査機スターダストとトレイル

今年年明け早々、彗星探査機「スターダスト」がヴィルト第二彗星に接近し、彗星本体の画像を地球に送ってきた(図5)。この彗星の名前の由来は、発見者の名前(Paul Wild・ポール・ヴィルト)にある。ハレー彗星、ボレリー彗星に継ぐ彗星探査である「スターダスト」の最大の目的は、彗星のチリを採取し地球に持ち帰ることである。エアロジェルと呼ばれる密度の低い物質を用いて衝突してくる彗星近傍のチリを捕獲し、2006年1月に地球に持ち帰るといふ壮大な計画である。彗星は、熱的に進化しておらず、スターダストが地球に持ち帰るサンプルには太陽系初期、いやそれ以前の情報が残っているものと期待されている。「スターダスト」は彗星ダストの採取にも成功した模様で地球帰還が待ち遠しいものである。

この彗星を木曾シュミットで観測したのは、フライバイの約1年前のことである。解析した結果、トレイル構造があることがわかった。このダストトレイルは、2kCCDカメラ(視野50分角)をはみ出している。彗星の軌道に沿って観測を続



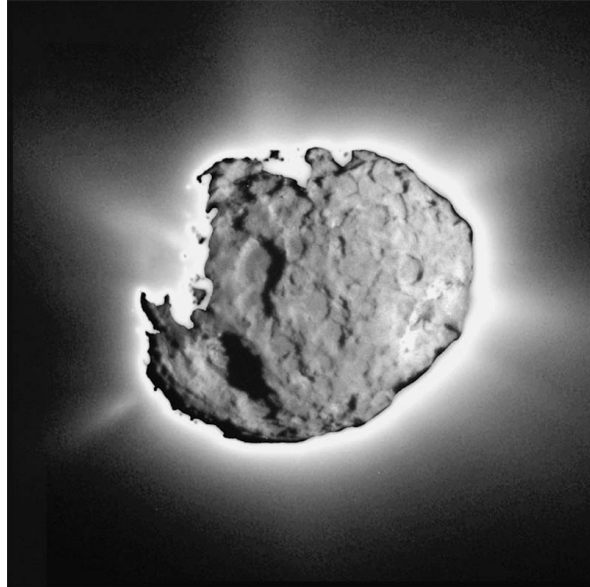


図 5 「スターダスト」探査機が撮像したヴィルド第二彗星核のイメージ（提供：NASA<sup>18)</sup>）。短時間露光（彗星本体）と長時間露光（彗星周辺の白いジェットの部分）二つの画像を合成している。衝突によるクレーター（黒い部分）だけでなく、pitと呼ばれるガス放出口と考えられている構造も見られるという。左上に1本夜側からジェットが出ているのも興味深い。

けた結果、少なくとも  $2.3^\circ$  (0.14 天文単位) 彗星から伸びていることがわかった。トレイルの軌道と彗星の軌道を詳細に比較した結果、トレイルを形成しているチリの大きさは約 1 mm であることも判明した<sup>16)</sup>。スターダストはヴィルド第二彗星と相対速度秒速 6 km でフライバイする。直径 1 mm のチリが秒速 6 km で探査機にぶつかってくるわけだから、ワイルドコメット (Wild Comet) と呼ばれるのも無理はない<sup>17)</sup>。筆者らの観測結果、1 mm サイズのトレイル粒子が探査機に衝突する確率は低いこともわかった。実際、探査機は 1 cm のチリが衝突しても耐えられるように設計されていたそうだ。とはいえチリの軌道からチリの大きさを推定するには大きな不確定性もあり、今年 1 月 2 日のフライバイが成功するまでは心配であった。2003 年 1 月 2 日に探査機が無事にフライバイに成功してホッとしたというのが本音である。

#### 4. 今後の展望

昨年 8 月 25 日に宇宙赤外線望遠鏡「スピッツァー」が打ち上げに成功した。IRAS, ISO 以来の大型赤外線衛星とあって、ダストトレイルの観測において期待が高い。スピッツァーは現在までに 7 個の彗星を観測し、6 個の彗星にダストトレイルを検出している。赤外線ではチリからの熱放射を直接観測できるために、空間密度の薄いチリ雲まで検出が可能である。おそらくトレイル現象は彗星一般に起こっているものなのであろう。この観測と並行して、地上では木曾や CFHT (カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡) を使った可視光での同時期観測も実施している。可視光と赤外線のデータを比較することにより、温度とアルベドを決定することができる。また地上の高分解能・広視野のデータは、スピッツァーの狭い視野を補えるものとして期待されている。

2005 年 7 月には、IRAS によってダストトレイ

ルが見つかっているテンペル第一彗星に銅球をぶつけて彗星の一部を壊し、彗星の内部を調べる計画（ディープインパクト計画）が遂行される。この時期にトレイルの生成過程をモニター観測することにより、トレイルが形成される過程を観測できるかもしれない。また、日本でもこの年、赤外線天文衛星 ASTRO-F が打ち上げられる予定である。ASTRO-F がスピッツァーと大きく異なる点は、全天サーベイ型衛星であるということが言える。最初にも書いたように、ダストトレイルの中には何十度も伸びているものがある。彗星から離れたところにある古いチリがどのような軌道進化をしてきたかを探るためには、ASTRO-F でないと実現不可能である。

本研究を遂行するにあたり、木曾観測所のスタッフの方々には多大なご支援をいただきました。猿楽祐樹氏とは、観測からデータ解析、解釈に至るまで共に研究してきました。長期間の観測を実施するにあたり長谷川 直氏、臼井文彦氏、S. M. Kwon 氏をはじめ、JAXA（宇宙研）の方々にご協力いただきました。上野宗孝氏には赤外線衛星による観測について貴重なコメントをいただきました。渡部潤一氏、向井 正氏、中村良介氏、W. T. Reach 氏、D. Brownlee 氏には科学的な面でコメントをいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

1) Davies J. K., et al., 1984, Nature 309, 315  
2) Whipple F. L., 1950, AJ 111, 375  
3) Sykes M. V., Walker R. G., 1992, ICARUS 95, 180

4) Reach W. T., et al., 2000, ICARUS 148, 80  
5) Davies J. K., et al., 1997, ICARUS 127, 251  
6) Lisse C., et al., 1998, ApJ 496, 971  
7) McDonnell J. A. M., et al., 1987, A&A 187, 719  
8) Jewitt D., Matthews H., 1999, AJ 117, 1056  
9) Watanabe J., et al., 1990, PASJ 42, L69  
10) Hahn J. M., Rettig T. W., 2000, ICARUS 146, 501  
11) Urakawa S., et al., 2002, Proc. of IAU Colloq. 181, p. 368  
12) Ishiguro M., et al., 2002, ApJ 572, L117  
13) Mukai T., et al., 2004, Adv. Space Res. (in press)  
14) 猿楽祐樹, 2003, 東京大学理学系研究科修士論文  
15) Fernandez Y., et al., 2002, IAU Circ. 7935, 2  
16) Ishiguro M., et al., 2003, ApJ 589, L101  
17) Rowan L., 2003, Science (Editor choice) 300, 1345  
18) Stardust Home Page (<http://stardust.jpl.nasa.gov/>)

Cometary Dust Trails with Kiso Schmidt Telescope

Masateru ISHIGURO  
Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, Hawaii 96822, USA, and Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: Cometary dust trails, which are composed of large and dark particles, were recently detected along the orbit of comet Kopff by our ground-based observation at Kiso observatory. After that, we have surveyed such structures for all periodic comets. In this paper, we report the results and current status of our dust trail survey.