

# 2017年度内地留学奨学金による成果報告書

西田 信幸

〈太陽系小天体セミナー〉

e-mail: shooting\_star\_0812@cpost.plala.or.jp



研究テーマ：彗星の特異な塵の尾の研究

受入機関：大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台 天文情報センター

指導教員：渡部潤一

C/2012 S1 ISON 彗星の軌道の内側に伸びたダストテイルの解析

研究内容の概要：アイソン彗星（C/2012 S1）は、2013年11月末に太陽の0.0125 auの距離まで接近し消滅したが、近日点通過後に彗星軌道の内側に伸びる淡い尾を見せた。この尾は、一般に見られる太陽放射圧により軌道の外側に流される傾向と相反する動きに見える。

本研究では、アメリカの太陽観測衛星 SOHO や STEREO による近日点通過前後に見られた尾の観測結果を再現すべく、塵の尾のシミュレーションを行った。その結果、この特異な塵の尾を再現できる条件（放出速度や放出方向）として、2013年11月15日頃のアウトバースト時に反太陽方向に約600 m/sの放出などの可能性を見いだしたので、報告する。

## 1. はじめに

アイソン彗星(C/2012 S1, 以下アイソン彗星)は、2011年9月発見当時に6.3 auもの遠さにもかかわらず19等という明るさであったことから、彗星核が大きければ肉眼彗星となることが期待されて社会的にも話題となりました。また太陽に最も近い近日点通過時に太陽半径約2.7倍もの距離に近づくことから、彗星核が生き残ることができるかについても話題となりました。残念ながら彗星は近日点通過前に崩壊しましたが、太陽観測衛星 SOHO や STEREO により彗星の近日点通過前後の様子が観測されていました。

私は近日点通過後の太陽観測衛星の画像に見られた2本に分かれた尾のうち、徐々に彗星軌道の内側に入り込んでいくように見える尾が気になりました(図1)。一般的に彗星の塵(以下、ダスト)が軌道の内側に入るのは難しいと思ったから

です。そこで、どのような物理条件によりこのような尾が観測されたのかを解析することによって、彗星に起こったことの解明やダストの特性に対する物理的な制限などの手がかりが得られるかもしれないと考えました。

### ダストにかかる太陽放射圧

なぜ、彗星のダストは軌道の内側に入り込むのが難しいのでしょうか。

彗星核から放出されるダストは、太陽の光による圧力である「太陽放射圧」を受けることで、核とは異なる運動をするために、核から大きく離れて軌道平面上に扇形の尾を作ります。この塵の尾(ダストテイル)は、主にそのダスト粒子の放出時刻と、サイズによって変化する太陽放射圧と重力の比の大きさという二つのパラメータで決定される軌道運動を計算することで、観察される尾の形状を予測可能です。また逆に観察された尾の再現により、ダストの物理量や放出時期を推測する

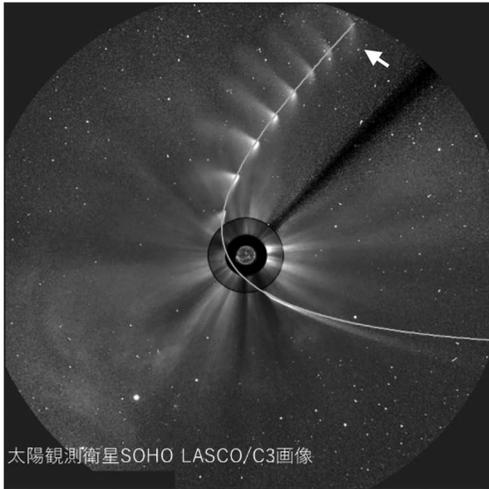


図1 太陽観測衛星SOHOの捉えたアイソン彗星の近日点通過前後の様子（軌道の線を追加）. 右下から太陽に接近し，左上に移動している．軌道の線を描くと近日点通過後に軌道の線に対して内側（矢印のある側）に広がる尾が見られている．(c)NASA/ESA/SOHO.

ことができます<sup>3)</sup>．

核の軌道要素は，一回帰といった短期間であれば太陽放射圧の影響を無視し，太陽や惑星からの重力のみで計算されることが一般的で，彗星のダストテイルもまた，核からのダストの放出速度を0として予想されることが多いです．彗星のダスト1粒も一つの天体であることに変わりはなく，核からの放出速度0で放出後に重力以外の力がかからなければ，核と全く同じ軌道をとることになります．一方，ダストのサイズが小さいほど太陽放射圧の割合が相対的に増えるという関係があります．特に小さなミクロンオーダーサイズのダストになると太陽放射圧が大きくなり，ダストは彗星核の本来の軌道から外側に流されていくような動きになります．また，太陽は彗星軌道面上にあり，太陽と反対方向に放射圧を受けることから，ダストは彗星の軌道面上に薄く広がることになります．従って，一般的に彗星のダストの尾として観測されている部分は，太陽放射圧によって核の軌道の外側に流され，彗星軌道面上に薄い板のよ

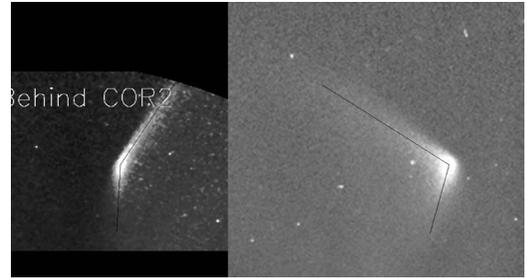


図2 尾の三次元解析. STEREO-B(左)とSOHO(右)による画像で，スケールを合わせた．ほぼ同時刻(2013/11/29 15-18UT)に撮影された画像を使用．軌道の内側に伸びた尾(図の下側)もほぼ彗星軌道面上に伸びていたことがわかった．(c)NASA/ESA/SOHO/STEREO

うに広がったところを見ていることになります．

改めてアイソン彗星の太陽観測衛星SOHOの画像を見てみると，近日点通過後に尾が軌道の内側に入っていきます．これは単純な放出速度0のモデルでは再現できません．そこで，再現できる物理条件を探してみることにしました．なお，彗星軌道面の上下方向に放出した場合，彗星核の速度に対して放出速度が3桁以上小さいため影響が小さいとし，上下方向のシミュレーションは行いませんでした．

## 2. 三次元解析

最初に，軌道の内側に伸びた尾の三次元的な分布を確認しました．直前に何らかの突発的な放出があり，見かけ上，軌道の内側に入っているように見えたのかもしれないと考えたからです．通常，彗星の尾は彗星軌道面上に分布しますが，もし軌道面以外の方向に初速をもって放出されると，彗星軌道面から外れて運動します．そこで彗星軌道面に乗っているかどうかを確認しました．解析には地球の軌道の異なる場所からほぼ同時に観測された太陽観測衛星SOHOとSTEREO-Bの画像を使いました．結果はほぼ彗星軌道面上に分布していることがわかりました（図2）．

### 3. ダストシミュレーションの作成

次に、ダストの動きを計算するためのシミュレーションプログラムを作成しました。まずは基本的なこととして軌道要素から核の位置の計算と地球上の観測点や太陽を周る観測衛星など任意の場所からの見かけの様子を計算できるようにしました<sup>1),2)</sup>。その後、任意の時刻、重力と太陽放射圧の比を表す $\beta$ <sup>3)</sup>、放出の方向と速度を設定し、1粒のダストの動きを数値積分で逐次計算するようにしました。計算は1秒間隔で積分を行い、4次のルンゲクッタ法で高精度化を図りました。

ちなみに、ダストの放出位置、速度、方向が決まれば軌道要素を計算できる方法があるので、実はわざわざ数値積分法を行う必要はありません。それでも数値積分法で作成したのは、アイソン彗星が非常に太陽に接近したことから、ダストが昇華しサイズが小さくなるのが考えられ、数値積分法であれば $\beta$ が逐次変化していくことも計算に組み込みやすいと考えたからです。また、最初は数値積分によるダストシミュレーションを、Excelで行っていました。当然計算は重かったのですが、万有引力の法則のみを使用してExcelでも彗星のダストシミュレーションが行えることに感激したということもあります。宇宙空間に浮かぶ小さなダスト1粒ですら万有引力の法則に従っていることを実感することができますし、高校生の教育教材としても使えるのではないかと考えています。

### 4. シミュレーション結果

#### 核のシミュレーション

作成したツールによって最初に核の位置を確認しました。結果、近日点通過前は最も輝度が高い位置と核が一致していますが、通過後には最も輝度が高い位置が核の位置より遅れていることがわかりました(図3)。これは、核からの放出がなくなっていることと、大きなサイズのダストが核

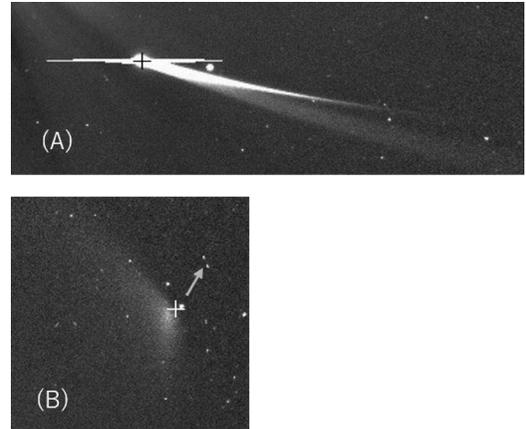


図3 太陽観測衛星の画像に彗星核の位置をプロット。十字記号が核の中心位置を示す。(A)近日点通過前2013/11/28 8:18UT。(B)近日点通過後2013/11/30 12:42UT 核の進む方向を追加。(c)NASA/ESA/SOHO。

の位置に残っていないことを示しています。なぜなら、もしメートルサイズの核に分裂しながらも核からダストが放出されていれば、核の位置に尾の一部が見えるでしょうし、放出されずにダストとしてセンチメートルサイズの岩石質のものだけが残ったとしても同様だからです。シミュレーションを行ったところ、1 mm以上のサイズのダストは残っていないという結果となりました。

#### ダストのシミュレーション

次に謎の尾の放出条件を探し、彗星軌道面上の放出方向と放出速度の関係を見つけます。まず、主に次の四つの放出地点を設定しました。近日点通過直前の最終崩壊時、2週間前のアウトバースト、約80日前、約1年2カ月前の遠距離です<sup>4),5)</sup>。放出方向は45°ピッチに一周分計算します。また、ずばる画像処理ソフトマカリを使って画像から尾の長さや方向を読み取り、尾を再現する放出時の方向角を求め、尾の長さや位置を再現する $\beta$ や放出速度を決定しました。例えばあらゆる方向に放出してみると、速度0での位置を中心に楕円型に分布します。このことから、軌道の内側に入った尾を再現するには、特定の方向への放出でなけれ

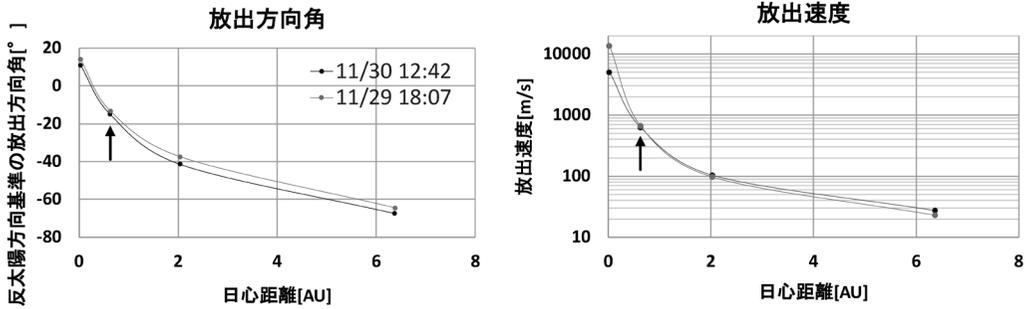


図4 シミュレーションにより求められた、軌道の内側の尾を再現する放出方向と速度の条件。11/29 18:07UTと11/30 12:42UTの2画像についての解析結果。放出方向角は、反太陽方向を0°として軌道の内側方向をマイナスで表す。矢印が、可能性が高いと考えられる近日点通過2週間前から続くアウトバースト。

ば偏っている状態を再現できないことがわかります。

解析した結果が図4になります。放出方向角について、横軸は太陽からの日心距離、縦軸は方向角です。反太陽方向を0として軌道の内側方向をマイナスで表しています。結果、近日点付近ではほぼ反太陽方向であるのに対し、遠距離に行くほど軌道の内側60°程度の方向に放出する必要があることがわかりました。

一方、放出速度は、遠距離は10m/s程度であるのに対し、約0.7 auのアウトバースト時で600 m/s程度、近日点付近の最終崩壊では5-13 km/sという速度が必要という結果になりました。

## 5. 考 察

それぞれの放出速度と方向、サイズについて可能性を検証します。可能性はどれもゼロではありませんが、近日点付近で放出速度5 km/s以上は考えにくいものがあります。一方、遠距離では放出方向が軌道の内側の特定の方向になります。アイソン彗星は自転軸を太陽に向けて近づいてきたと考えられている<sup>4)</sup>ので、継続的な放出だとますます説明できなくなります。よって、2週間前から続くアウトバーストの頃におよそ反太陽方向に最大600 m/sで放出するのが最も可能性が高いと考えられます。

通常のダストの放出は50 m/s以下のような遅い速度と考えられています。また核が太陽方向を向いているときに放出されるのが一般的です。600 m/sという高速で反太陽方向に放出した例はあるのでしょうか。調べてみると、17P/ホームズ彗星で太陽から2.43 auという距離で反太陽方向に410 m/sで放出という解析結果になっている事例がありました<sup>6)</sup>。今回の600 m/sという速度は太陽から約0.7 auの距離です。放出メカニズムはまだ解明されていませんが、このような放出が起こりうることを示す共通の事例なのかもしれません。

太陽に接近し昇華した場合についても検討を行いました。接近時にサイズを小さくしてみると、簡単に軌道の外側に飛ばされてしまい、軌道の内側どころか軌道に残ることですら難しいことがわかりました。さらに調べてみると、小さなダストが昇華する場合は一気になくなってしまいが、大きなダストは若干のサイズダウンで止まることがわかりました。近日点通過後に構成していた尾の粒子は小さすぎてもいけないことがわかります。

## 6. ま と め

軌道の内側に伸びた尾は、彗星軌道面上に分布し、近日点通過2週間前から続くアウトバースト

による尾である可能性があります。ダストサイズ  $100 \mu\text{m}$  の粒子が反太陽方向に  $600 \text{ m/s}$  以下で放出されたと考えられます。また、近日点通過後にダストが遅れていることから、非常に大きなセンチメートルオーダーのダストは核の位置に残っていないと推測されます。このことはオールトの雲からやってきたと思われる彗星核がもともと小さなダストのみで構成されていた可能性を示唆しています。

### 謝 辞

本研究は日本天文学会の2017年度内地留学の研究として行われました。彗星会議、彗星夏の学校にて関連研究の発表、2018年3月の日本天文学会春季学会にて本研究の発表を行いました。ご指導いただいた国立天文台の渡部潤一先生に深く感

謝を申し上げます。また貴重なアドバイスをいただいた佐藤幹哉さん、大坪貴文さん、新中善晴さん、古荘玲子さん、太陽系小天体セミナーの皆様にも感謝を申し上げます。最後に、会社勤めをしながらさまざまな研究会に参加し、深く研究ができる貴重な機会を与えてくださった日本天文学会に御礼申し上げます。引き続き研究を続けていきたいと思えます。ありがとうございました。

### 参考文献

- 1) 長沢工, 1985, 天体の位置計算 増補版 (地人書館)
- 2) 長谷川一郎, 1980, 天文計算入門 (恒星社厚生閣)
- 3) 彗星観測ハンドブック 2004, 2003, 高校生天体観測ネットワーク
- 4) Moreno, F., et al., 2014, ApJ, 791, id.118,
- 5) Sekanina, Z., & Kracht, R., 2014, arXiv:1404.5968 [astro-ph.EP]
- 6) Watanabe, J., et al., 2009, PASJ, 61, 679,
- 7) 齋藤馨兒, 1983, 彗星 その実像を探る (講談社)