

太陽系の固体微粒子 '94

向 井 正

〈神戸大学・理学部・地球惑星科学教室 〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1〉

e-mail: mukai@jasmin.kobe-u.ac.jp

地球上層大気で採集される固体微粒子(塵)は、結晶中に水酸基を含む密構造の含水惑星間塵と、含まない粗な無水惑星間塵に大別される。前者は炭素質コンドライト隕石の母天体(多分小惑星)から、後者は彗星からやってくる。また太陽極探査機ユリシーズは、木星近傍で星間塵の流れ込みを発見。火星衛星軌道付近のダストリング探査計画が進んでいるが、太陽Fコロナのダストリングは、'91年の日食時にはなぜか消えていた。

1. はじめに

星の周りの星周塵、星と星の間の星間塵、そして太陽系内の惑星間塵というように、宇宙に存在する固体微粒子は、それらがみつまっている場所によって異なる名前がついている。

ここで話題とする太陽系の固体微粒子にも、細かい名称の使い分けがある。彗星と共に現われるのを彗星塵といい、地球の人工衛星軌道周辺になるとスペースデブリの仲間に入る。これらが地球大気に突入して大気中で採集されると、IDPs (Interplanetary Dust Particles の略) と呼ばれる。ところがこれらの塵が大気中を降下し、長い年月を経た後に、深海底の堆積物や極地方の氷の中から回収されると、宇宙塵と呼ばれる。

この4半世紀の間に、太陽系の塵の研究が大きく変化している。初期には、地上からの黄道光観測が、太陽系の塵に対する唯一の観測手段であった。その後、惑星間飛翔体を用いた黄道光の観測が行われ、塵の熱放射が赤外線で見られている。また飛翔体は地球近傍のみならず、太陽から0.3天文単位の近場から、遠くは木星軌道にまで進出し、搭載した測定機器によって、衝突する塵を直接調べる道をひらいた。一方、微量試料の化学分析・同位体分析・鉱物学的解析等の技術進歩によ

って、IDPsの研究は、隕石の研究で培われた精度の高い解析技法を使えるようになった。

こうした背景のもとで、現在注目を集めている太陽系の固体微粒子に係わるトピックスを取り上げるのが、この小文の目的である。

2. 地球近傍の塵

スペースデブリ中の塵成分については、LDEF (Long Duration Exposure Facility)、EuReCa (European Retrieval Carrier)、HST (Hubble Space Telescope)等の回収された本体や、取り替えて持ち帰った太陽電池パネルに残っている衝突痕を使って、衝突粒子のフラックス・サイズ分布・化学組成などが調べられている。これによると、衝突粒子の大きさが10ミクロン以下や、1ミリメートル以上になると、宇宙からの塵が地球起源の微粒子よりも少なくなるという。このように、衛星軌道高度でも、地球起源の汚染が、宇宙の塵を徐々に侵食している様子が明らかとなっている¹⁾。

さて、太陽系に存在する固体微粒子は、太陽光のポインティング・ロバートソン効果を受けて、およそ1万年で太陽に落ち込んで消滅する。一方、月試料に残る塵の衝突痕は、過去数十万年にわたって、塵の存在量は目に見えて変化していないという。このことから、塵を定常的に供給する源が

必要となる。彗星、小惑星、星間塵が今のところ確からしい供給源である。では、太陽系空間の個々の塵が、どこからやってきたのかを、どのようにして見分けることができるのだろうか？

鉱物の構造や化学組成が詳しく測定できるIDPsについては、その供給源の見分け方はかなり確かになっている²⁾。それによると、IDPsは、その結晶構造の中に、水酸基や水分子を持つ密な構造をした含水惑星間塵と、それらを持たないポーラスな(空洞の多い)無水惑星間塵に大別される。採集されたIDPsの中で、両者の比はほぼ半々である。しかし、サンプル数が少ないことや、大気突入の際に生き残る確率が、塵の構造に依ることなどを考えると、この比が惑星間空間での両者の存在比だとはいえない。

最も始原始的だと思われる(揮発成分が多い)炭素質コンドライト隕石に比べて、IDPsが炭素をより多く含むことは知られていた。この炭素超過は、無水惑星間塵に著しい。またこの炭素超過が、有機化合物やグラファイト、炭酸塩の炭素として存在し、それもIDPs中の1ミクロン以下の狭い領域に局在することも明かになった。

ハレー彗星の塵探査で分かったように³⁾、彗星塵の揮発性元素(炭素、窒素、酸素)をマグネシウムで規格化した存在量は、隕石で測定される揮発成分の存在量よりも多い。これは、彗星塵が隕石よりもより始原始的物質であることを示唆する。また、同時に、彗星塵の揮発元素が有機化合物の形で存在することも、塵の質量分析計の結果から推測されている。更に、彗星塵の主要鉱物組成であるマグネシウムと鉄の存在比の分布が、IDPsの無水惑星間塵と似ていることも分かった(図1)。これらの結果を併せて、無水惑星間塵の供給源は彗星である、と信じる人が増えている。無水惑星間塵のポーラスな構造も、揮発成分の抜けた跡だとすれば理解しやすい。

一方、含水惑星間塵と、隕石中の炭素質コンドライトは、バルク組成や赤外線吸収スペクトルが

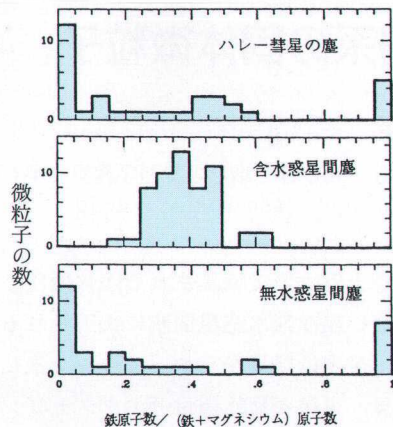


図1 鉄とマグネシウム比とその値を持った微粒子の数³⁾。太陽系における横軸の比の値(平均値)は0.45。上(ハレー彗星の塵探査の結果)、中(含水惑星間塵)、下(無水惑星間塵)。

良く似ている。このため、含水惑星間塵の供給源は、コンドライトの母天体(多分小惑星)であろう、といわれている。だとすると、含水惑星間塵に残る水質変成の痕跡は、母天体(小惑星)に水が存在していたことを示唆する。現在の小惑星の形態からみて、水の存在はそぐわないように見えるが、惑星系の形成初期には、原始小惑星は今とは違った形態にあったのだろう。このように、塵に残っている痕跡をもとに、太陽系の初期環境を推察する道が開かれつつある。

3. 星間塵の発見

太陽系は、周りの星間物質に対して秒速20キロメートルで移動している。このため、星間物質が太陽系に流れ込む。太陽の進行方向からやってくる星間中性水素やヘリウムが、既に観測されている⁴⁾。これらのガスの流れに乗って、星間塵が太陽系に流れ込むことは充分予測できる。流れ込んだ塵の軌道は、太陽の重力場によって曲げられて、太陽の後方に焦点を結ぶ。この焦点の位置では、塵同士が衝突して、運動エネルギーを失い、定常的な雲を作る、という予測があった。これを否定したのが、LevyとJokipiiの1976年の短い論文

である⁵⁾。彼らの説によると、帯電した星間塵は、太陽系を取り囲む太陽磁気圏によって跳ね飛ばされ、太陽系内部に侵入できない。大きさが1ミクロンより小さい塵の運動は、太陽重力や太陽放射圧よりも、むしろ、磁場から受けるローレンツ力によって支配される。星の減光などから推測される星間塵の大きさは、惑星間塵よりも小さくて、ローレンツ力が効くサイズと思われる。加えて、太陽重力によるフォーカス作用が予言する惑星間塵雲が発見されなかったこともあって、星間塵の太陽系への侵入説は下火となった。

このため、星間塵が太陽系で発見されることは期待できないと思われてきた。これはなにも、星間起源の塵が太陽系に存在しないということではない。微量試料の同位体分析によって、隕石試料やIDPsの中から、他の星の周りで生まれたと思われる微粒子が続々とみつまっている⁶⁾。隕石中のシリコン・カーバイドや、グラファイト、ダイヤモンドの微粒子の中には、その炭素同位体比からみて、炭素星の星周塵と同定されるものがみつまっている。また、二次イオン質量分析計はIDPsの中から、重水素の濃集した塵をみつけた。これらの中には、赤外線吸収スペクトルが、原始星雲のひとつW 33 A に似ているIDPs (“Skywalker”)も含まれている。重水素の濃集が、ケイ酸塩ではなく炭素とよく相関していることは、この重水素が有機化合物の一部に含まれることを示唆する。多分、星間雲内でのイオン-分子反応の生成物である重水素濃集塵が、原始惑星系に混在していたのだろう。このように、原始惑星系を作っていたガスとダストの混合系には、出生地の異なる物質が共存していたはずである。これらの一部が、始原天体に保存され、現代の科学技術で“発見”されることは、充分期待できる。だが、こうした星間塵は、過去の化石である。現在の太陽系に流れ込む“新鮮な”星間塵の存在が実証されたのは、ごく最近のことである。その話に進もう。

1990年10月に打ち上げられた惑星間探査機

Ulysses (ユリシーズ)の主な目的は、木星の重力効果(フライバイ)を効かせて、黄道面を離れ、太陽の極領域の観測をすることである。1992年の2月に木星とのフライバイを済ませて黄道面を離れたユリシーズは、1994年6月から11月にかけて、太陽からおおよそ2.9天文単位の南極域を通過中である。当初の予定では、アメリカとヨーロッパの2台の飛翔体を用いて、北と南の極域を探索することになっていたが、アメリカ側の予算削減のため、北へ向かう一機がキャンセルされた。このあおりを受けて、北機に搭載予定であった黄道光の測定機器がなくなった。このため、ユリシーズ計画のなかのダスト関係機器は、衝突塵のカウンターのみとなった。

これまでに、小惑星帯以遠に向かった飛翔体で、ダストカウンターを搭載していたのは、Pioneer (パイオニア)10号と11号である。1970年代のこれらの測定機器に比べて、今回のユリシーズに搭載されたダストカウンターの精度は飛躍的に向上している。測定可能な最小ダストの質量は、パイオニアの 2×10^{-9} グラムからユリシーズでは 10^{-15} グラムとなり、測定可能な塵の質量域(ダイナミックレンジ)が、1桁から6桁に広がった。いいかえれば、パイオニアでは10ミクロン以上の塵でないと測れなかったものが、ユリシーズでは0.1ミクロン程度まで測定できるようになった。加えて、ユリシーズでは、大きな塵も小さな塵も同時に測れる。さて、このユリシーズに搭載されている塵測定器が、木星とのフライバイ前後で興味深い出来事を測定した⁷⁾(図2)。

(1) 地球を離れてから、4天文単位の地点を通過する301日間に、ユリシーズは50個の塵との衝突に出会った。これは、1日に0.2個の割合である。ユリシーズより先に地球を出たが、軌道調整のために木星へは遅れて到着する木星探査機ガリレオにも、同型のダストカウンターが搭載されている。これら2台のダストカウンターで記録された塵の衝突場所から、塵の空間数密度の日心距離

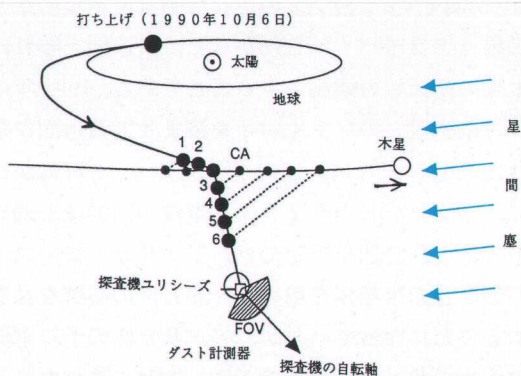


図2 太陽極探査機ユリシーズの軌道⁷⁾. FOVはダスト測定器の開口領域, CAは木星との最接近時(1992年2月8日)の位置を示す. 1から6の番号は, 木星方向からのダスト流を検出した地点. 矢印が星間塵の流入方向.

依存性を導くと, 地球軌道付近の観測結果と明かに異なる. 地球を離れてしばらくの間は, 塵の空間数密度は日心距離に反比例しつつ一様に減少する. ところが, 小惑星帯に近づくと, 数密度の減少は鈍り, やがて増加に転じる. この傾向は, 先のパイオニアの測定でも指摘されていた. ユリシーズとガリレオによって, ミクロン以下の微小塵でも, この傾向が現われることが確かめられた.

では, 小惑星帯以遠で塵が増えるのはどうしてだろう? 水の氷が昇華作用を受けて消えるのは, 小惑星帯より内側である. このため, 近日点が遠くにある彗星から出た氷塵は, 小惑星帯以遠で生き残る. 測定された衝突塵の軌道傾斜角が, ほぼ等方的に分布することも, 長周期彗星の等方的軌道分布からみて好ましい. ただ, 長周期彗星から出た塵は, 軌道の離心率が大きいので, 太陽系から逃げやすい. このため, 測定された塵分布を定量的に説明するには, ひと工夫が必要だろう.

(2) ユリシーズが, 木星に近づいて, その半径のおよそ1000倍以内に入った領域で, ダストカウンターの開口部分が木星を向いた時に, 塵の集団が鋭い流れとなって飛び込んできた. 数時間から2日程度にわたって継続するこの事象は, ほぼ一月の周期で繰り返した. 木星の衛星イオカ, また

は木星の薄いダストリングから放出された荷電ダストと, 木星軌道付近の太陽風磁場との相互作用によって, 測定されたような木星起源のダストの流れが生まれる, というモデルが出されている.

(3) 最もセンセーショナルな発見は, 逆行軌道を秒速26キロメートルを越すスピードで移動するダスト群の同定であろう. 木星軌道付近のケプラー速度は, 毎秒13キロメートルだから, これらの逆行高速度塵は, 太陽系の仲間ではない. これらの塵群のやってきた方向が, 太陽系の進行方向と一致した. このため, これらの塵群は, 星間塵の太陽系への流入を直接捕まえたものだといわれている. 一方, ユリシーズに搭載されている別の測定機器は, 星間中性ヘリウムの流れ込みを直接観測した. 両者の入射方向が一致することから, 星間塵の発見は確からしく思われる.

それでは, LevyとJokipiiが提案した, 太陽系磁気圏による星間塵のシールド効果は働かないのだろうか? 測定された星間塵と思われる固体微粒子の質量は, 10^{-15} から 5×10^{-12} グラムである. 星の減光に効く 10^{-14} グラム以下を典型的な星間塵の質量とすれば, 観測された塵はそれらよりもやや大きい. このことから, 星間塵でも大きいものだけが, 太陽系の磁場シールドを破って, 木星近傍にまで侵入してきたのだといわれている. 太陽系周縁部の電磁構造を考慮した, 星間荷電塵の太陽系への侵入モデルを再検討する必要がある.

4. 火星近傍の塵

Mars Observerが行方不明になった. 先年のPhobos(フォボス)探査機の謎の失踪とあわせて, 火星には魔物が棲んでいる, という噂が流れている. この魔の惑星に向けて, 宇宙科学研究所は1998年に探査機を送る(Planet-B). ダスト関係の搭載機器としては, 一次元CCD多色可視カメラとプラズマ計測型ダストカウンター(飛天に搭載されたダストカウンターの姉妹機器)がある. カメラは, 火星の気象や地形の観測と共に, その衛

星の画像を撮ることを主な目的としている。加えて、ダストカウンターと協力して、フォボスとディモスのダスト・リングの検出を目指している。

火星の衛星フォボスとディモスの表面には、絶えず隕石が衝突している。この隕石の衝突によって、固体微粒子が衛星から飛び出してくる。これらの一部は、衛星軌道に沿って分布し、リング状に火星を取り囲む。石元による推定では⁸⁾、太陽放射圧のために衛星軌道よりも少し歪んだ軌道の上に、 10^{-7} から 10^{-9} グラム程度の塵が、数密度 $5 \times 10^{-12} \text{cm}^{-3}$ 、総質量 10^5 グラムのリングを作る(図3)。失踪した探査機フォボス2号は、ダストカウ

ンターを積んでいなかったが、フォボス近傍でイオン・電子密度が増加し、磁場強度が減少したトラス状の領域をみつけている。これがダストリングに関係している、と主張する人もいる。

このダストリングをみつけよう、というのが計画の中味である。Planet-Bの軌道が、ダストリングを横切れば、リング粒子がダストカウンターに飛び込むだろう。火星探査機バイキングのカメラには、これらのダストリングは写っていない。これは、後方散乱を見る位置からの測定だからみつけれなかったと思われる。リング粒子のサイズ(10ミクロン程度)では、後方散乱光に比べて、前方散乱光の強度は4桁から5桁も大きい。太陽一リング粒子—Planet-Bが並ぶような配置(火星の夜側)から写せば、リングが浮かび上がってくるはずだ。ボイジャー2号が、木星のダストリングを発見したような僥倖を期待したい。

5. 太陽近傍の塵

太陽Fコロナにダストリングが存在するのか? 長い間、気に掛かりつつ、未だ解決に至らないのが、この問題である。1966年の11月の日食の際に、PetersonとMacQueenは独自に、太陽半径の4倍付近に近赤外線フラックスの盛り上がりを見つけた。その2か月後にMacQueenは、気球にコロナグラフを載せて観測し、こうした盛り上がりが見えたら10倍の太陽半径付近まで幾つか現われることをみつけた。1973年の日食の時には、Lenaのグループが飛行機(コンコルド)から中間赤線の観測を行ない、波長9から10ミクロン領域で、ほぼ4倍の太陽半径の位置に盛り上がりを見つけた。ただし、この報告の難点は、測定された中間赤線領域のフラックス強度が、先の近赤外線で見られた値より一桁近くも大きい点である。

ここでモデルが登場する。ポインティング・ロバートソン効果を受けて、太陽に落ち込みつつある塵は、太陽の近くで高温となり昇華し始める。塵のサイズが減りだすと、太陽放射圧が効きだし

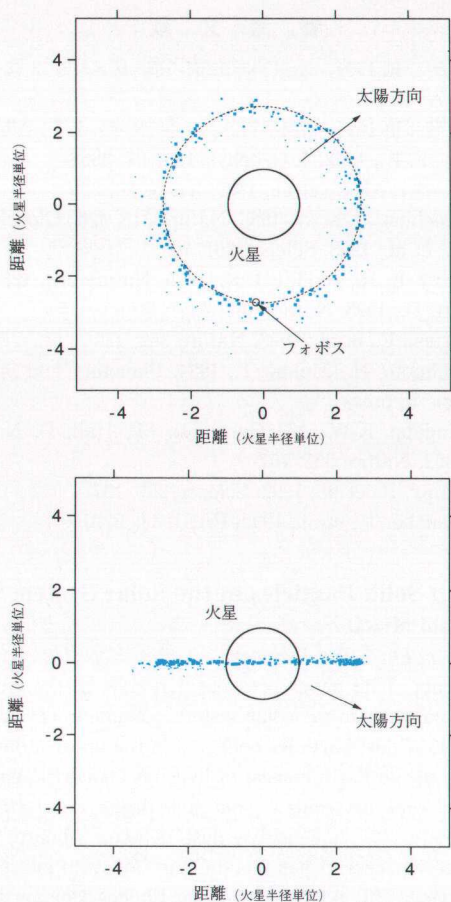


図3 隕石衝突でフォボスから飛び出した、3種の質量域のダスト(それぞれ100個のテスト粒子を使用)の軌道を、数値シミュレーションした結果、ある時刻におけるダストの位置を示す⁸⁾。

て、ポインティング・ロバートソン効果を打ち消すようになる。このため、塵の太陽への落ち込みにストップがかかり、その地点で塵の空間数密度が上がる。高速道路で、車が料金所に近づくと、道路が混みだすのと同じ原理である。この塵雲が太陽を取り囲んでリングとなる。

奇妙なことに、1978年、1980年の両日食の際には、この盛り上がりが見つからなかった。しかし、1983年の日食では、我が国の遠征隊がインドネシアで気球観測に成功し、再びこの盛り上がりを見つけた。ただし、その位置はやや太陽に近く(3.8太陽半径)、波長1.65ミクロンでは顕著な盛り上がりが見測されたが、1.25, 2.25, 2.8ミクロンでは薄れていた。この後しばらくは適当な機会がないままに、この問題は放置されていた。1991年7月の日食帯は、観測施設の充実しているハワイを通った。MacQueenは、マウナケアでハワイ大学の2次元赤外線カメラを使って、太陽半径の2.5倍から15倍の領域のマッピングを行なった⁹⁾。運悪く、皆既の時間帯に現われた薄い雲の非一様な明るさが、得られたデータの質を損なった。しかし、日食終了4秒前に撮った10秒露出の波長2.12ミクロン・データは、雲の切れ間に撮れたので自信がある、とMacQueenは言っていた。ところが、これらのデータには、フラックスの盛り上がりが見つからない。同じ日食時に、ハワイで撮られたLamy達の赤外線画像¹⁰⁾にも、リングの痕跡はみられない。メキシコに出かけた日本隊の2次元偏光マッピング¹¹⁾にもその兆候はでていない。

だとすると、ダストリングは1991年には何処へ行ってしまったのだろうか？ 1966年に始めてフラックスの盛り上がりを見つけ、25年後にそれを見つけれなかったMacQueenは、測定の誤差がこのような結果を生むことはない、という。そして、このダストリングには、時間変動があるのではないかと、考えている。検討のボールは、モデルを立てる側に戻ってきた。

1995年8月には、太陽系の固体微粒子の国際会議が、フロリダで開かれる(IAU Colloquium No. 150, "Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust")。そこでは、上に掲げた問題の幾つかが解かれるだろう。そして、新たな観測や測定が報告され、新しい謎が生まれるだろう。太陽系の固体微粒子が存在するかぎり、新たな謎が生まれ、それを解く努力が続く。その過程の繰り返しの中で、塵に関する我々の知識が着実に増加し、太陽系の構造が明かになっていく。塵という微小な固体物質が、太陽系の起源と進化の解明のカギとなるような予感がしている。

参 考 文 献

- 1) 矢野 創 1994, 惑星科学会誌 "遊・星・人", 3巻(1号), 30
- 2) 留岡和重 1991, 鉱物学雑誌, 20巻(3号), 105; Gibson, Jr., E. K., 1992, J. Geophys. Res. 97, 3865
- 3) Lawler, M. E., et al., 1989, Icarus 80, 225
- 4) Moebius, E., et al., 1985, Nature 318, 426; Gloeckler, G., et al., 1993, Science 261, 70
- 5) Levy, E. H., Jopikii, J. R., 1976, Nature 264, 423
- 6) Ott, U., 1993, Nature 364, 25
- 7) Gruen, E., et al., 1993, Nature 362, 428
- 8) Ishimoto, H., Mukai, T., 1994, Planetary and Space Sci., in press
- 9) Hadapp, K-W., MacQueen, R. M., Hall, D. N. B., 1992, Nature 355, 707
- 10) Lamy, P., et al., 1992, Science 257, 1377
- 11) Tanabe, T., et al., 1992, PASJ, 44, L221

Small Solid Particles in the Solar System '94 Tadashi MUKAI

Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe University.
Abstract: The paper presents a review of the small solid particles in the solar system. Namely, (1) interplanetary dust particles collected in the upper atmosphere of the Earth consist of hydrous chondritic particles (from asteroids?) and anhydrous ones (from comets). (2) A sensitive dust detector aboard the Ulysses spacecraft has found the grains from interstellar space. (3) A plan to discover Phobos/Deimos dust rings, as well as a time-variation of solar dust ring(s), are briefly commented.