

惑星間塵の一生

向井 正*

ハレー彗星が戻ってくる。1986年3月の近日点通過にむけて、この正月には太陽からおよそ8.2 AU (1 AUは太陽-地球間距離)の地点を、秒速12キロメートルのスピードで駆け抜けた。もっともこの彗星の軌道面は、黄道面に対して160度傾いているので、ハレー彗星が惑星軌道を横切ることはない。

ほうき星は突然現われて星狩人(コメットハンター)の勲章と輝くものも多いけれど、ハレー彗星はオペラグラスを手にした観客の前に登場する役者のようなものだ。おおまかなプログラムは決っている。さてこの役者がどのように振舞ってみせるのか。観客は緞帳の上がるのをじっと待っている。

ここでは彗星が太陽系内に撒き散らす固体微粒子(塵)についていくつかの話題を取り上げる。彗星を離れた塵(彗星塵)は、惑星間空間の塵雲に溶け込んでいく(惑星間塵)。そして塵の大部分は徐々に太陽に落ち込んでいき、昇華作用を受けてなくなってしまうわけだが、その直前に太陽を取り巻く環を作る。彗星から生れた塵が、やがて太陽ダスト環となって燃えつきるまでの一生を描いてみたい。

1. 彗星は消えゆく塵雲の有力な補給源となれるか?

彗星本体(中心核)が塵を放り出すことは、彗星の尾を見れば分る。まっすぐ伸びたプラズマの尾に対して、幅の広いゆるやかなカーブを描くのが塵の尾である。さて、惑星間空間には薄い塵雲が漂っている。この塵雲が時々刻々と失う塵の量を、時折出現する彗星達が十分賅いきれるのだろうか、というのが第一の問題である。

アポロ宇宙船が月から持ち帰った岩石の表面には、塵の衝突でできた穴ぼこ(クレーター)が残っている。このクレーターの解析によって、惑星間塵についてたくさんの情報が得られた。たとえば後で用いる惑星間塵のサイズ分布は、クレーターの大きさを丹念に測ることによって求められた。更にクレーターの分析に年代測定の手法を適用すると、塵の衝突頻度の時間変化について目安がつく。これによると過去100万年にわたって地球軌道を横切る塵の量には大きな変化がみられないという。地球付近だけが特殊領域ではないだろうから、上の結果を信頼すれば太陽系全域に広がる塵雲の質量が、かなり長い期間にわたって一定の値を保っていることになる。

そこで彗星から塵雲に供給される塵の量が問題となる。取り扱いを複雑にする一因として、彗星から放出された塵の一部だけが塵雲になるということがあげられる。周期彗星を例に採って話そう。太陽の周りを回る天体(質量 m)のエネルギー E は、軌道エネルギー T と位置エネルギー V との和である。 $E < 0$ がその天体が太陽系の一員であることを保証する。

$$V = -(mM_{\odot}G/r)(1-\beta), \quad (1)$$

が天体に働く太陽放射圧を考えに入れた位置エネルギーの表示である。ここで M_{\odot} は太陽質量、 G は重力定数、 r は天体の太陽からの距離を示す。 β は天体に働く太陽放射圧と太陽重力との比で、惑星のように大きな天体では β の値は1に比べてずっと小さい。

天体の大きさがどんどん小さくなると β の値が増えだす。これは太陽放射圧が天体の大きさの2乗(断面積)に比例するのに対し、重力の方が3乗(質量)に比例するためである。ここで取り上げた大きさが千分の1ミリメートル程度の塵になると、位置エネルギーに太陽放射圧の効果が入ってくる。可視光をよく吸収する物質、たとえば磁鉄鉱(マグネタイト)の塵では、その半径が0.2ミクロン以下になると β の値は1を越える。(1)式をみて分るように $\beta > 1$ だと位置エネルギーは絶えず正の値をとる。いいかえれば、黒っぽい金属質の小さな塵は太陽系の一員とはなりえない。一方、光が透過する珪酸塩鉱物(シリケイト、地上の岩石の仲間)の塵では、サイズが小さくなくても β の値は1を越えない。これは塵の大きさが可視波長より小さくなると β が塵のサイズの減少につれて、単調な増加を続けずに逆に減りはじめるからである。

さて彗星本体(半径数キロメートル)ではもちろん $\beta \ll 1$ である。ところが彗星から離脱した塵には突然大きな β の値がかかってくる。塵の彗星本体に対する相対速度は毎秒数百メートルで、これは塵の太陽に対する軌道速度(毎秒数キロメートル)に比べて小さいから、塵の運動エネルギーは彗星本体の T とほぼ等しい。(1)式によって塵の位置エネルギーは急速に小さくなるので、 β が1を越えない塵でも $E > 0$ となる。太陽放射圧がこのような小さな塵を太陽系外へと掃き出すのである。

彗星から新たに放出された塵の軌道が、母彗星の軌道と異なることを軌道離心率の変化として表わそう。黒曜石(オブシディアン、シリケイトの一種)と同じ光学定

* 金沢工大 Tadashi Mukai: A Life of Interplanetary Dust Grain.

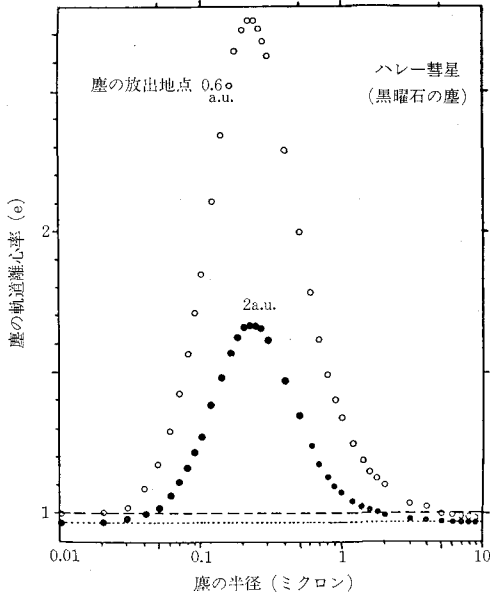


図 1

数を持った塵について β の値を計算し、母彗星としてハレー彗星を選ぶ。放出された塵の軌道離心率 e は、ハレー彗星の軌道離心率 0.967 (図 1 の点線) に比べて大きい。この図を見て分かるように、太陽に近い所で放り出された塵ほど位置エネルギーは小さくなるので、太陽系に残れる条件は厳しい。

それではある地点で放出された塵の総質量のうち、何パーセントが太陽系にとどまるのだろうか。これを求めるには図 1 の $e < 1$ となるサイズ領域にある彗星塵の質量を求めれば良い。次節で述べる彗星塵のサイズ分布を使い、3つの代表的な彗星について計算した結果 $P(r)$ を図 2 に掲げる。 $P(r)$ は太陽から距離 r の地点

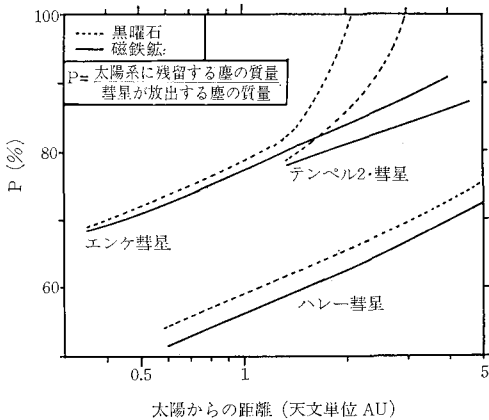


図 2

で放出された塵の $P(\%)$ が塵雲となれることを示す。この値と、彗星が塵を放出する量の太陽からの距離による変化 $M(r)$ (例えば観測によるとエンケ彗星では $M(r) = 3 \times 10^8 (r/1 \text{ AU})^{-2} \text{ g s}^{-1}$) との積をとり、 $P(r) \cdot M(r)$ を彗星軌道に沿って積分してやれば各々の彗星が 1 周期間に塵雲に供給できる塵の量が決まる。これが求めていた答えである (表 1 にまとめる)。

表 1

	彗星から供給される塵の総量 (1 周期当たり)	塵の供給率
ハレー彗星	$1.2 \times 10^{14} \text{ g}$	$5.0 \times 10^4 \text{ g s}^{-1}$
テンペル 2-彗星	$2.8 \times 10^{11} \text{ g}$	$1.7 \times 10^8 \text{ g s}^{-1}$
エンケ彗星	$9.5 \times 10^{12} \text{ g}$	$9.1 \times 10^4 \text{ g s}^{-1}$

さて塵雲がその質量を失う割合については、1960 年代にホイップル (F. Whipple) が求めた 10^7 g s^{-1} という値が採られてきた。これは彼一流のうまい概算の結果である。まず 1 AU 以内の塵雲の総量を地球に降り注ぐ流星の量から推して $3 \times 10^{19} \text{ g}$ と見積る。この領域の塵の寿命は、ポインティング・ロバートソン効果 (以下では PR 効果と書く。詳しくは後述) による太陽への落ち込みの速さで決まる。この寿命をほぼ 10^5 年とすると、先の質量損失率がでてくる。

この値を信じると月試料のクレーター解析からいわれている“100 万年間にわたって塵雲の質量は一定”という結果を満すためには、表 1 からみてエンケ型の彗星が 100 個も必要となる。これは無理な注文である。そこで塵の供給源として彗星以外に小惑星同士の衝突破片説とか、星間塵の太陽系内侵入説とかが論じられてきた。さらに最近では未知の小天体 (大きさ数メートルから数キロメートル) が、惑星間空間にごろごろ存在する、といった魅力的な考えもだされている。

一方、ホイップルの値が大きすぎるのではないかと、いう反省もできた。前述した月試料のクレーター解析から、1 AU を横切って太陽に向う塵の流量が推算できる。この値を基にして塵雲の質量損失率を見積ると $2 \times 10^6 \text{ g s}^{-1}$ にしかならない。もしこちらの小さい方の値を採用すれば、彗星が太陽系に供給する塵だけで、塵雲の平衡状態を維持することは難しくない。

2. 彗星から放たれた塵のサイズ分布は、月に衝突する塵のサイズ分布と一致するのか?

ドイツ・ミュンヘンから車で半時間ばかり南に下ると、オーストリアとの国境の山並みが望める谷間にリムベルグ (Ringberg) という小さな町が現われる。ここは保養地として有名で、美しい湖に沿った牧草地の間に、集落が点在する。この湖を見下す丘の上に城が建ってい

る。城本来の戦闘防禦といった機能を全く必要としない20世紀初めに、土地の貴族によって造られたいわば“遅れて生れた”中世風のこの城は、第2次大戦後マックス・プランク財団に買い取られ、今では会議場として使われている。城の外装はそのままだが、内部は全面改装された。大小の会議室はもちろん20を越える宿泊室に至るまで一流ホテル並みの設備が整っている。この旧城で、昨年9月、“Comet Halley Dust Experiments”に関する会合が開かれた。ハレー彗星にむけて、ヨーロッパ宇宙機構 (ESA) が打ち上げる人工天体、ジオトー・ミッションの塵関係グループの集りで、60名を越す参加者は、ヨーロッパにおける塵グループの大きな勢力を象徴していた。

イタリアの画家ジオトー (Giotto di Bondone (1267~1337)) が、パドバのアレナ寺院に描いたフレスコ画“東方の博士達によるキリスト誕生の祝福”には、人物像の背景上部にベツレヘムの星が輝いている。見事な尾を曳いたこの星は、1301年10月に近日点を通過した前後のハレー彗星と思われる。ハレー彗星の最も古いスケッチを残した人物ジオトーに因んで、ESAの人工天体には彼の名が冠せられた。

この会合で行われた議論のひとつに、彗星塵のサイズ分布、特に最も小さい塵ほどの位の大きさか、というのがあった。彗星塵のサイズ分布は彗星の広域全景写真から推定する。彗星本体を離れた塵の運動は塵の大きさ (β の値) によって異なる。同時刻に放出された塵が光っている尾の部分の明るさから β の分布を求める。これを塵のサイズ分布に焼き直すわけである。ところが小さな塵は太陽光を散乱する効率が極端に悪いので、その存在が確めにくい。そこで、彗星大気突入するジオトー・ミッションには、それぞれが感応する塵の質量領域が異なる5種類の測定器が積まれる。これによって 10^{-16} g から 10^{-8} g (0.01~500 ミクロン) までの塵の質量分布を調べることができる。

さて彗星から放出された直後の塵のサイズ分布が分ったとしよう (図3の破線。0.1 ミクロン付近の下限值は仮想値)。この分布形はあくまでも放出されたすべての塵が従う形であって、前節でみたように一部の塵はそのエネルギーが正となって太陽系に残留できない。図1で示したように同じ β (同サイズ) の塵でも、太陽に近い所で放たれば $E > 0$ となるが、遠くであれば $E < 0$ となることが起こる。こうした点を考慮して、彗星が塵雲に供給する塵のサイズ分布を求めたのが図3である。

一目で分かるように、半径1ミクロン以下の塵が少い。特に金属質の塵 (マグネタイト) では β の値が1を越すこともあって、このサイズ領域の塵が太陽系内の安定軌道に投入されることはない。

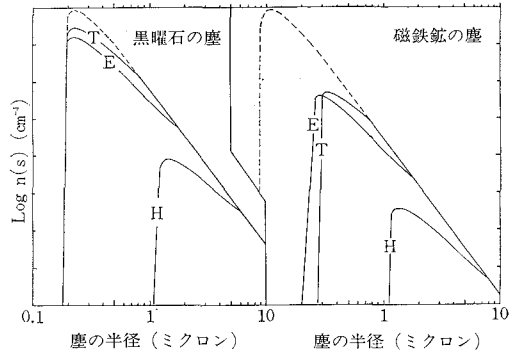


図3 塵のサイズ分布 彗星本体から放出される塵のサイズ分布 (点線)。太陽系に残留できる塵のサイズ分布 (実線)。H, ハレー彗星。T, テンペル2彗星。E, エンケ彗星を表わす。

それでは惑星間塵のサイズ分布はどんな形をしているのか? 今のところ使える資料は、月試料のクレーター解析から求めたものだけである。これによると1ミクロン以下の塵は少なくなっていない。逆に月面に衝突する塵では小さなものが増えているようにも見える。彗星から供給される塵に欠乏していた1ミクロン以下の大きさのものが、惑星間塵に多量にみつかるのはどうしてだろう。

誰もが想像するのは、太陽系内を漂う塵が衝突によって細片化された、というシナリオであろう。ところがこれを定量的に調べていくと、衝突破片だけで1ミクロン以下の塵の量を賄いきれないことが分った。そこで月面に衝突する小さな塵は、太陽系の一員ではない、という考えが生れた。彗星塵や衝突破片のなかで双曲線軌道上的ものが、太陽系から脱出する途上で月にぶつかった、とみなすわけである。これを検証するためには、地球軌道付近に広い表面積を持った塵測定器を上げるのが良い。もし1メートル四方の開口を取れば、1年間に千個を越す塵の衝突が期待できる。塵の飛来する方向、塵の質量・化学組成が同時判定できれば、大きな成果がもたらされるだろう。

3. 塵の墓場

いっそく飛びに塵の終焉をみよう。塵は様々な過程で太陽系から消えていく。小さな塵が太陽放射圧によって太陽系外へと吹き飛ばされることは既に話した。惑星に捕えられるものもある (たとえば地球では年間1千トンの塵が宇宙から降ってくる)。太陽風の荷電粒子との衝突によって塵の表面が徐々に削られる。地球軌道付近の塵で1年間に $1\sim 10 \text{ \AA}$ の表層が消える。太陽宇宙線に差し貫ぬかれた衝撃で爆裂する塵もある。こうした諸々の過程が塵をより単純な気体状態へと戻し、また塵を太

陽系空間から外部へと追いやる。

しかし塵の大部分は太陽に落ち込んで燃えつき、惑星間に漂う塵はその軌道角運動量を失いつつ、らせん軌道を描いて太陽に向う。これは光速に比べて無視できない塵の軌道速度のために、塵に対して光の射し込む方向が、運動体の進行方向に傾く(光行差現象)ことから生じる事象でPR効果と呼ばれる。この制動力は、軌道面内に働くので、塵は軌道面傾斜を変えずに、太陽に落ち込む。やがて塵の温度が上がるとその表面からガスが立ち上る。小さくなった塵では太陽放射圧が効きだして、塵が太陽へ落ち込むのを邪魔する。太陽への落ち込みにブレーキがかかった地点で塵の空間数密度が上昇する。太陽を取り巻く塵の環の誕生である。

黄道光の観測から分るように、塵の空間分布は黄道面に偏っている。だからPR効果で軌道面を保ちつつ落ち込んできた塵は、黄道面内に集中する。これが、太陽付近で発生する塵の空間数密度の上昇が、太陽を取り囲む殻とはならず、取り巻く環となる原因である(太陽ダスト環の形成機構については、天文月報 Vol. 68, No. 6, 1975年で解説した)。

太陽ダスト環は半径300万キロメートル、総質量 $6 \times$

10^{12} g、体積 10^{38} cm^3 と見積られる。参考までに土星の環の半径は15万キロメートル、質量 2×10^{26} gである。惑星に発見されていたダスト環と太陽ダスト環との大きな違いは、環粒子の新陳代謝のスピードにある。太陽ダスト環では塵が数年以内に入れ換わる。これは 10^{5-6} g s^{-1} の質量損失率になるが、前に述べたIAUでの塵の内向き流量から推定した塵雲の質量損失率 2×10^5 g s^{-1} とよく一致している。空間的な環の外形は定期的に存在するのだが、環の中味を作っている塵はどんどん入れ替わっていくのである。

1966年11月のボリビヤ日食ではじめて見つかった太陽ダスト環は、その後の日食の際には、悪天候のせいもあって、なかなか姿をみせなかった。1980年2月のインド日食では、ダスト環がみつからず、その存在に疑問を持たれたこともあったが、昨年6月、インドネシア日食において、確かに存在することが分った。データが解析途中のために、詳しい解説は別の機会に譲ることにする。

燃えつき直前の塵が示す最後の華・太陽ダスト環が我々にどんな物語を教えてくれるのか、興味につきない。

(完)



D. Reidel Publishing Company

新刊

QUANTITATIVE ASPECTS OF MAGNETOSPHERIC PHYSICS

by
L. R. LYONS
Space Environment Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, USA
D. J. WILLIAMS
Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Maryland, USA

GEOPHYSICS AND ASTROPHYSICS
MONOGRAPHS

Cloth ¥15,600 ISBN 90-277-1663-3
March 1984, D. Reidel Publishing Co.

In describing basic quantitative aspects of magnetospheric physics, this book utilises topics where theory and data have been used together to obtain understanding. Theories of particle motion, particle trapping, and ring current dynamics are developed. The convection electric field is described as a direct result of the open geomagnetic field, and effects of the convection electric field on cold and hot particles are discussed.

GALACTIC AND EXTRAGALACTIC INFRARED SPECTROSCOPY

Proceedings of the XVth ESLAB Symposium held
in Toledo, Spain, December 5-8, 1982

edited by
M. F. KESSLER and J. P. PHILIPS
Astronomy Division, Space Science Department of ESA, Noordwijk, The Netherlands

ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE LIBRARY
108

494 pp
Cloth ¥18,600 ISBN 90-277-1704-7
January 1984, D. Reidel Publishing Company

The great potential at present clearly evident in the field of infrared spectroscopy will almost certainly be realized within the next decade or two. The IRAS mission has completed one of the pre-requisites, namely an all-sky photometric survey. Major space missions utilising cryogenic infrared telescopes have been approved in Europe (ISO), and seem likely in the USA (SIRTF); plans for space submillimeter telescopes are firming up.

STRUCTURE AND EVOLUTION OF THE MAGELLANIC CLOUDS

Symposium No. 108 held in Tübingen, West Germany, 5-8 September 1983

edited by
SIDNEY VAN DEN BERGH
Herzberg Institute, Dominion Astrophysical Observatory, Victoria, Canada

KLAAS S. DE BOER
Eberhard-Karl Universität, Astronomical Institute Tübingen, West Germany

PUBL. OF THE INTERNATIONAL ASTRONOMICAL
UNION, PROCEEDINGS OF SYMPOSIA 108

448 pp
Cloth ¥12,600 ISBN 90-277-1722-2
February 1984, D. Reidel Publishing Company

This book reviews recent progress made in the study of Magellanic Clouds and covers topics such as stars and star formation, clusters and cluster formation, the interstellar medium, gaseous coronae and supernova remnants, radio surveys, discussions of the dynamics of these small galaxies in relation to each other and to our Milky Way, and the nature of the most massive single star even suspected.

Reidel
日本総代理店



株式会社 ニュートリノ

本社 東京都港区赤坂8-4-7 カールビル107 TEL (03)405-6137(代)
英波 茨城県筑波郡大塚町花畑3-13-10 ヤマクチビル 千300-32 TEL (0298)64-2585
名古屋 名古屋市中区幸川町3-6 幸川マンション千464 TEL (052)782-7757