

特集 「新世紀の宇宙塵研究」

宇宙塵の起源

佐々木晶¹、山本哲生²、吉川 真³、花田俊也⁴

1. 太陽系の宇宙塵

宇宙塵というのは、もともと地球上で、海底などから発見された微小球に対して命名されたものである。その後の研究で、たしかに宇宙起源の粒子が存在することが明らかになり、また大気上空での直接の塵の採取からも、宇宙起源の複雑な構造を持つ粒子が発見された。現在では太陽系内に存在する様々なダスト微粒子の総称として、この言葉は使われている。

黄道光が観測されることから、太陽系の黄道面には、天体の他に太陽光を散乱するダスト微粒子が存在することがわかり、小惑星や彗星、星間塵が源であると考えられていた。赤外線衛星IRASは、ダストの集中するバンドを発見して、小惑星の族に対応するものや、特定の彗星と軌道が一致するものがあることを明らかにした。つまり、小惑星帯での衝突や、彗星からの放出の両方が、太陽系内の宇宙塵すなわち惑星間塵の主な源になっているのである。

一方、微粒子の検出器が宇宙空間のミッションに搭載されるようになった。この宇宙塵の直接計測については本号の大橋らの項を参照されたい。直接計測の結果から、非常に重要なことが明らかになった。太陽系内には、ケプラー公転をしながら時間をかけてPoynting-Robertson効果で太陽方向へ落下する小惑星・彗星起源粒子のほかに、太

陽から外側へ流出する高速粒子であるベータメテオロイドという種類、さらに太陽系外から流入する、高速の星間起源塵が存在することが判明した。さらにボイジャー探査機の光学観測からは、全ての木星型惑星にはダストのリングが存在することがわかっている。また木星からは、リング粒子と磁場との相互作用で、高速のダスト流が放出されていることが、直接計測で観測された。

一方で、人間の活動が宇宙に広がるようになると、新たな塵が宇宙空間に増え始めた。人工衛星の破片などを原因とするスペースデブリである。これは、宇宙空間を汚染して太陽系微粒子の探査を難しくするだけでなく、宇宙空間での衝突の頻度が高まることは、宇宙活動に深刻な危険性をもたらすため、最近大きな問題になっている。

図1には、これまでわかっている宇宙塵の種類を

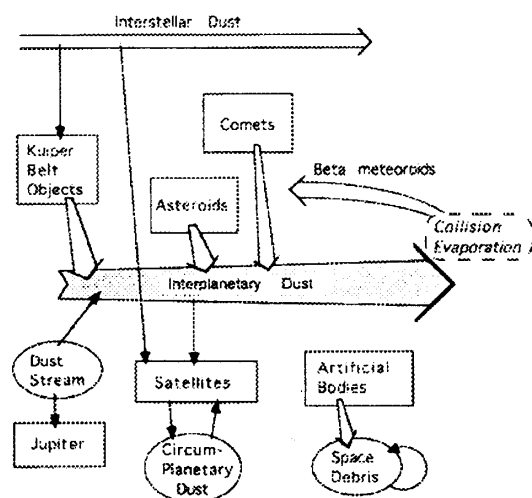


図1. 太陽系内の宇宙塵。

¹東京大学大学院理学系研究科, ²北海道大学大学院理学研究科, ³通信総合研究所, ⁴九州大学工学部

起源と関係づけてまとめてある。例えば、太陽系内のケプラー運動する塵は、小惑星、彗星起源のもの他に、もっと遠方のエッジワース・カイパーベルト天体起源のものが最近考えられている。以下では、宇宙塵の起源について、その源となる天体の起源とも併せて論じることにしたい。

2. 小惑星とその起源

太陽系内のダスト微粒子の供給源として最も重要と考えられているのは、小惑星である。小惑星帯での衝突頻度は、太陽系の他の場所に比べるとはるかに高い。天体どうしの衝突が、太陽系のダストを供給している可能性が非常に高い。

19世紀が始まる日である1801年1月1日に最初の小惑星ケレス(Ceres)が発見された。それより、ほぼ200年が過ぎようとしている現在、発見されている小惑星の数は非常に多くなっている。小惑星は発見後にその軌道が正確に求められると、確定番号というものが付けられる。この確定番号がついたものだけでも、現在(1997年5月)、7700個ほどになっている。軌道がそれほど正確には求められていない小惑星も加えると、その数は3万個以上にも及ぶ。さらに、軌道を出すまで観測できなかった小惑星が山のようにある。

図2に、ある時点における小惑星の位置を示す。これは、黄道面に投影した図である。この図を見ると、小惑星は太陽を取り囲む巨大なドーナツ状に分布していることがわかる。このドーナツ状の部分、小惑星帯と呼ばれているところである。さらに、火星軌道の内側にもばらばらと小惑星があるが、これらは、内側の惑星と接近する可能性を持ったもので、特に最近、天体の地球衝突という問題から、注目を浴びているものである。この他、海王星軌道の外側にも発見されたエッジワース・カイパーベルト天体も、広い意味では小惑

星と分類しても構わないかも知れない。

さて、小惑星そのものの起源であるが、以前は惑星が爆発してできたものと言われたこともあった。しかし、爆発するための適当な理由がないので、現在ではそうは思われていない。現在の太陽系形成論では、小惑星は惑星までに成長できなかった天体であると考えられている。

太陽系の材料となった物質もまた、塵である。原始太陽系のガスディスクが冷却して、材料物質の塵が凝縮する。太陽から3AUより外側では氷の塵が凝縮するため、惑星形成の材料物質に富むことになる。結果として、惑星の成長も木星領域の方で早く進行して、小惑星領域では氷の塵の少ない微惑星が合体して大きく成長する前に、木星ができてしまったのである。すると、木星の強い引力の影響で、小惑星領域にあった成長中の天体の軌道は大きく乱されることになる。そして、互いに秒速10kmを越すような速度で衝突することになり、これは衝突合体ではなく「衝突粉碎」となってしまう。大きな惑星にはなれなかった。初期の小惑

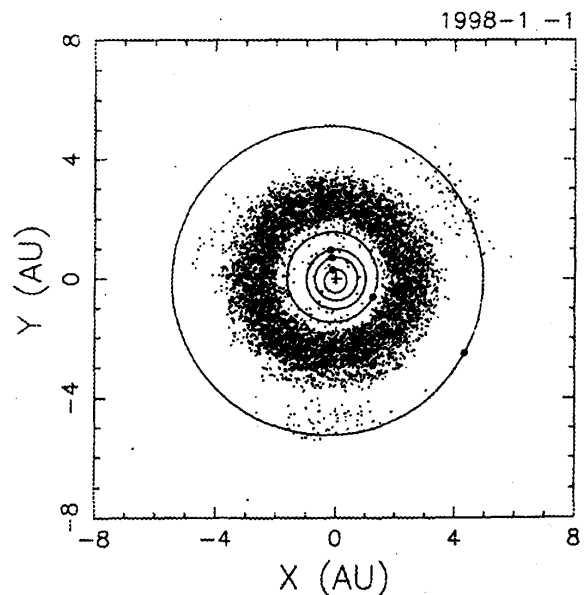


図2. 小惑星の分布。確定番号が付いた7000個の小惑星の1998年1月1日の位置を黄道面に投影した図である。軌道は内側から水星、金星、地球、火星の軌道で、最も外側の軌道が木星軌道である。

星帯には、現在の千倍から1万倍もの物質があったと推定されているが、それらは木星や内側の惑星に衝突して消滅したり、惑星との接近で太陽系外へと飛ばされてしまった。そして、現在は、比較的安定な軌道にある小惑星だけが残ったと考えられる。(現在、小惑星帯にある小惑星をすべて集めても、その全質量は地球の月の質量の3割くらいにしかない。)

その後の小惑星帯の進化は、やはり主に木星や土星などの大惑星の重力に支配されたものであった。その証拠の1つとして、小惑星帯には、木星と共鳴が起こるところ(公転周期の比が簡単な整数比となる)に、分布のギャップや集中が見られる。また、タイムスケールのより大きい共鳴現象(「永年共鳴」という)が起こるところにも分布のギャップがある。これらの共鳴は、太陽系のより内側の領域に小惑星や隕石などを運んでくる1つのメカニズムを提供している[1]。また、共鳴で離心率が大きくなった天体では、衝突での相対速度が高くなり、衝突破砕やダスト放出が起きやすくなると考えられる。

さらに、小惑星帯には、「族」と呼ばれる似た軌道を持つ多数の小惑星もあり、これは、小惑星同士が衝突することで形成された直接の証拠であると考えられている。このような衝突が起これば、当然ダストも多量に放出されると思われる。また、族を構成する小惑星は軌道要素が似ているため、再衝突する確率は高く、そのときに塵を放出する。実際にIRASでは、小惑星の族に対応する塵の濃集が観測されている。天体を破壊するほどの、大きな衝突でなくても、小惑星表面には多数のクレーターが存在する。そのようなクレーターを作る程度の衝突でも、ダストが生成される。このように、現在の小惑星帯は、地球に接近する天体だけでなく、隕石やダストの供給源ともなっているのである。

3. 彗星ダストから惑星間ダストまで

彗星は惑星間塵の有力な供給源のひとつである。彗星が惑星間塵の供給源としてのどれくらい寄与しているかを考えるとき、1)彗星からのダストの放出量、および2)放出されたダストが太陽系に残る確率という2つのファクターを検討する必要がある。この問題についてはMukai [2]も参照されたい。

3.1 彗星からのダスト放出量

観測的には、コマの明るさから放出されているダスト量を推定することができる。可視波長域で観測された等級とダスト放出率(dust production rate: 単位時間あたりのダスト放出量)を関係づける経験式がいくつか提案されている。また、ダストの放出率と比べて分子の蒸発率(gas production rate)は精度良く決定できるため、ダスト/ガス比を仮定して、分子蒸発率からダスト放出率を推定する方法もある。

放出されるダスト質量のオーダーを以下で見積もってみよう。簡単のため吸収した太陽光はすべて核の氷の蒸発に使われると仮定する。核の氷の蒸発が活発でなくなる距離(太陽から約3AU)より楕円軌道の通径が小さい彗星については、この仮定は成立する。単位質量あたり氷の蒸発潜熱を H 、核のアルベドを A 、太陽光度を L 。とすると、太陽から距離 r にあるとき質量 M 、半径 R 、密度 ρ の核からの質量放出率は

$$-\frac{dM}{dt} = -4\pi\rho R^2 \frac{dR}{dt} = \frac{L \cdot (1-A) \pi R^2}{4\pi r^2 H} \quad (1)$$

で与えられる。彗星の楕円軌道の通径を p とすると、角運動量保存より

$$r^2 \frac{d\phi}{dt} = (GM_p)^{1/2} \quad (2)$$

ここで ϕ は軌道の位相角, G は重力定数, M_{\odot} は太陽質量である. (1), (2) より, 1周期での核半径 R の減少 ΔR は

$$\Delta R = \frac{L_{\odot}(1-A)}{8\rho H(GM_{\odot}\rho)^{1/2}} \approx 8(1-A) \left(\frac{\text{AU}}{\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{0.6 \text{ g/cm}^3}{\rho}\right) \text{ m} \quad (3)$$

で与えられる. 例えばハレー彗星 ($p=1.15 \text{ AU}$) では $\Delta R \sim 4 \text{ m}$ となる. 1周期あたりの質量放出は

$$\Delta M = 4\pi\rho R^2 \Delta R = \frac{L_{\odot}(1-A)\pi R^2}{2H(GM_{\odot}\rho)^{1/2}} \quad (4)$$

質量放出 ΔM は核密度 ρ に依らないことに注意. 核物質のダスト質量比を χ とすると, 1周期あたりに放出されるダスト質量は

$$\Delta M_d = \chi \Delta M \approx 1.5 \times 10^{15} \chi (1-A) \left(\frac{\text{AU}}{\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{R}{5 \text{ km}}\right)^2 \text{ g} \quad (5)$$

となる. これが1つの彗星が1周期あたり放出するダスト量の目安となる. 実際と比べて, この ΔM_d は p が大きい彗星では, 適用できないことに注意しておく必要がある. また短周期彗星では, 核表面にダストの「クラスト」ができていないことが予想されるため, ここで仮定しているように核表面全域から質量放出が起るわけではない. 実際には, この節の最初に述べたような観測からのチェックが必要である.

3.2 放出されたダストの残存率

彗星から放出されたダストはすべて惑星間塵として残るわけではない. 太陽の輻射圧によって太陽系外に放出されるダストが生じる. 以下で, 放出されたダスト粒子が輻射圧に抗して, 太陽系内に残り得る条件を求めよう.

核から放出される前のダストの軌道運動の力学

的エネルギーは単位質量あたり,

$$E_1 = \frac{1}{2} v_c^2 - \frac{GM_{\odot}}{r_c} = -\frac{GM_{\odot}}{2a_c} (<0) \quad (6)$$

で与えられる. ここで v_c は太陽からの距離 r_c における彗星の軌道運動の速度, a_c は彗星の軌道長半径である. 距離 r_c で放出されたダストの軌道運動の力学的エネルギーは単位質量あたり,

$$E_2 = \frac{1}{2} v_c^2 - \frac{GM_{\odot}(1-\beta)}{r_c} \quad (7)$$

となる. ここで核に対するダスト粒子の相対速度 (\sim 数100 m/s) は軌道運動の速度と比べて無視した. β はダスト粒子がうける太陽の輻射圧と重力との比である. ダスト粒子の半径を a , 物質密度を ρ_d とすると, β は

$$\beta = \frac{3L_{\odot} \langle Q_{pr} \rangle}{16\pi c GM_{\odot} \rho_d a} = 0.58 Q_{pr}^{-1} \left(\frac{\text{g/cm}^2}{\rho_d}\right) \left(\frac{\mu\text{m}}{a}\right) \quad (8)$$

で与えられる. ここで c は光速, $\langle Q_{pr} \rangle$ はダストへの光の運動量輸送断面積/ダストの幾何学的断面積 Q_{pr} の太陽光スペクトル平均で, ダスト物質の複素屈折率と半径で決まる量である. $a >$ 数 μm では $Q_{pr} \sim \text{const}$ であるため, $\beta \propto 1/a$ となる. (6), (7) より,

$$E_2 = -\frac{GM_{\odot}}{2a_c} \left(1 - \frac{r_{cm}}{r_c}\right) \quad (9)$$

を得る. ここで

$$r_{cm} \equiv 2\beta a_c = 2\beta q / (1-e) \quad (10)$$

q は彗星の近日点距離, e は軌道離心率である. 太陽系内にとどまり得る条件は $E_2 < 0$ であるから, $r > r_{cm}$ で放出された粒子のみが惑星間塵として寄与できる.

この条件から以下のことがわかる(図3参照):

- i) 長周期彗星($e \sim 1$)では $r_{crit} \rightarrow \infty$. よって長周期彗星は惑星間塵の恒常的な源として寄与しない.
- ii) 一般に, 遠日点距離を Q とするとき, $r_{crit} > Q = a_c(1+e)$, すなわち $\beta > (1+e)/2$ なる粒子はすべて系内にとどまれない. 粒径が大きい粒子のみが系内にとどまることができる.
- iii) 逆に $r_{crit} < q = a_c(1-e)$ の場合, $\beta < (1-e)/2$ なる粒子はすべて系内にとどまる.
- iv) 一般の $q < r_{crit} < Q$ の場合, すなわち $(1-e)/2 < \beta < (1+e)/2$ のとき, 太陽からの距離 r が $r_{crit} < r < Q$ で放出された粒子のみが系内にとどまることができる. r 大ほど β 大の粒子(小さい粒子)がとどまり得る.

長周期彗星は一般にダスト放出量は大きいものの惑星間塵の供給には寄与せず, 放出されたダストのうち $\beta \sim 0$ の(大きい)粒子以外の大部分のダストは太陽系外に出てしまう. 惑星間塵に寄与する彗星は軌道長半径の小さい短周期彗星である. ダストは近日点付近で多量に放出されるが, $q < r_{crit}$ の場合, これらのダストは系外に出て行ってしまふ.

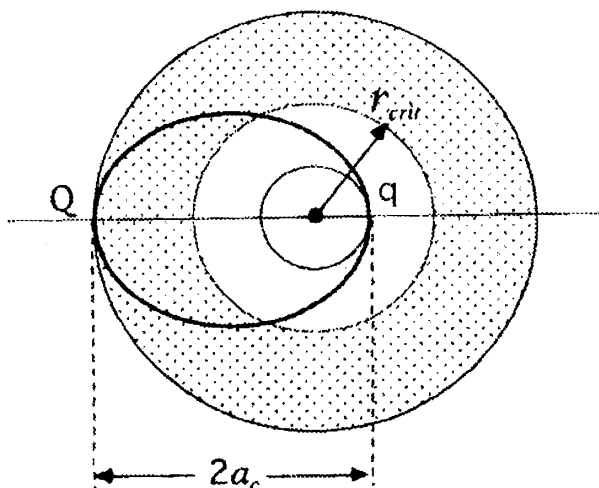


図3. 彗星から放出されたダストが太陽系に残る彗星軌道領域. $r_{crit} < r < Q$ で放出されたダストは太陽光圧に抗して太陽系内に残存できる. 臨界距離 r_{crit} はダスト半径に依存することに注意.

惑星間塵として観測・採取できる粒子は彗星ダストのうち, 比較的サイズの大きい(β の小さい)粒子に限られていることに注意しよう.

ダストの放出率と太陽系内に滞在できる確率の積とを各彗星について加え合わせれば, 惑星間塵への彗星からの全寄与を決定できる. 各彗星のダストの放出率やサイズ分布に大きな不定性があるため, 今のところ惑星間塵への寄与を精度良くに見積もることはできていない.

4. EKO (Edgeworth-Kuiper Belt Object)からのダスト

冥王星の外側を公転するエッジワース・カイパーベルト天体(EKOs)も惑星間塵の供給源候補である. EKOsどうしの衝突[3, 4, 5, 6]や太陽系に流入してくる星間塵とEKOsとの衝突[7]によってEKOsからダストが放出される.

EKOsは太陽系形成時の微惑星の残存天体であると信じられている. しかし, これはまだ証明されたことがらではないことに注意しよう. EKOsの軌道やその力学進化の研究は盛んになりつつあるが, 組成や物理的性質に関する研究はまだほとんど行われていない. 今のところ反射スペクトルの観測[8]が行われる段階に入ったにすぎない. EKOsが残存微惑星であることが明確になれば, これまでの太陽系形成論で幻の天体である微惑星の实在が確認されるとともに, その物理的性質に対して新しい知見を得ることができる.

EKOsからのダストを採取・同定することは, EKOの本性を知るための大きな手掛かりとなる. エッジワース・カイパーベルト(EKB)からのダスト供給量は上述の論文で見積もられている. しかし, そこで仮定されているEKBモデルは, 現在までの観測に合わせるようにパラメータ調節をした現象論的モデルであるため, EKOsが残存微惑星であることの証明を与えない. 太陽系形成論から期待さ

れるEKOモデルから期待されるダスト供給量と観測から推定されている惑星間塵量とを比較することによって、形成論を検証するという観点からの研究も必要である。

これとともに、採取された惑星間塵からEKOダストを同定するためにはEKOダストの特徴を明確にしておく必要がある。小惑星や彗星からのダストと比べてEKOからのダストは次の特徴をもつことが期待される：

i) 成層圏で採取された惑星間塵の中には変成を受けていない始原的な粒子が見いだされている[9]。これらの粒子の半径は $0.5\text{-}25\ \mu\text{m}$ に亘っている。Poynting-Robertson効果によってEKBから地球軌道付近まで落下してくる間に、サイズの大きいダストはその断面積が大きいため、惑星間塵同士の衝突や太陽系外から流入してくる星間塵との衝突によって破碎される。Liou et al. [10]によると、小さい粒子(半径 $5\ \mu\text{m}$ 以下)のみが地球軌道付近まで達することができる。上記の始原的な粒子のうち、半径 $0.5\text{-}5\ \mu\text{m}$ 範囲の粒子の中にはEKOからのダストが混在している可能性がある。この粒径範囲での、EKBから地球軌道までのPoynting-Robertson最短落下時

間は、 $0.5 \times 10^6\ \text{yr}$ である。宇宙線照射年代がこれより長い粒子はEKBからのダストである可能性が高い。

ii) 彗星ダストと比べたとき、軌道傾斜角が小さい。ただしEKBから放出されたときのダストの軌道傾斜角はもとのEKOとくらべて広がって分布するため、この特徴は統計的にのみ成り立つ。

iii) EKOダストの組成は彗星ダストの組成と類似していると予想される。

iv) EKBダストが同定されたとき、これらのダストはEKOを構成していたダストの典型と考えることはできない。彗星ダストの場合と同様に、選択効果がかかっている。

惑星間塵の研究において、EKOからのダストの同定は今後のチャレンジングなテーマである。

5. 星間起源ダスト

現在の太陽系は物質的に閉じた世界であると、多くの研究者は考えていた。太陽系外起源の彗星があるという主張も、多くの支持は得ていない。ところが、最近それを覆すような発見があった。木

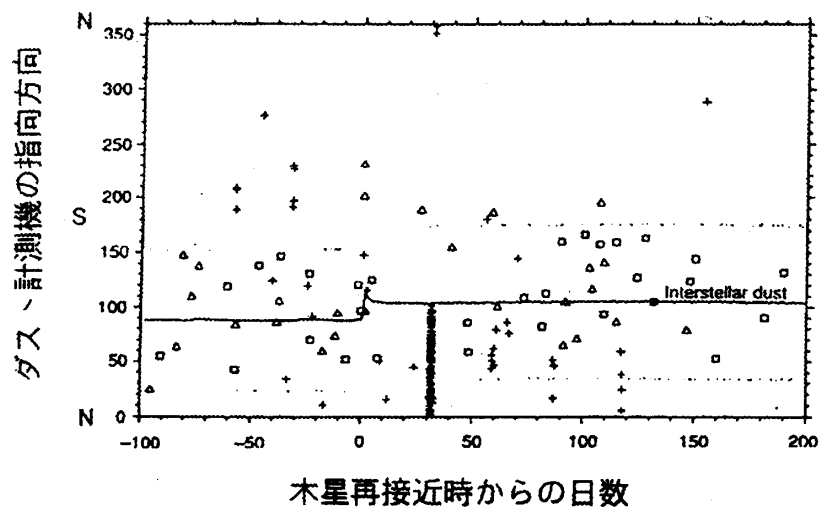


図4. Ulyssesの検出した星間起源(のダスト微粒子主として□: 26km/s 以上, $5 \times 10^{-14}\text{g}$ 以上の粒子)と木星起源粒子(+の大部分)。

星の重力を使って，太陽系を縦に切って黄道面から離れた領域を観測すべく，打ち上げられた探査機ユリシーズには，ドイツのGrünのグループのダスト計測器が搭載された．小惑星帯をすぎても，検出されるダストは大きくは減少しなかった．しかも，多くの粒子が，ケプラー速度よりも相対速度がはるかに大きく，太陽系に対して同じ方向から数10 km/sで流入してきていた[10](図4)．これは，ちょうど太陽系が周囲の星間ガスの中を運動する相対速度(26 km/s)に相当する．つまり，太陽系外起源のダスト粒子が多数，太陽系内に流入しているのである．ダスト計測器で見積もられた粒子質量は，これまで考えられていた星間塵の最大質量の約30倍で，サイズは0.4 μm 程度になる．

ユリシーズに引き続いて太陽系空間を探索したガリレオでも，この星間起源粒子は検出されている．また，地球＝月領域を観測した日本の工学試験衛星「ひてん」に搭載されたダスト計測器も，星間起源粒子を3年間に10-20個検出していた．粒子の主成分は決して氷ではない．またユリシーズは，ダストの検出方向から，黄道面より離れたところでは，星間起源粒子が検出されるダストの主成分になることも明らかにした．理論的にはこれまで，太陽放射圧や磁場の効果のため，星間塵の太陽系内部への流入は困難であると考えられていた．最近の数値シミュレーションでは，太陽磁場の状態によっては，地球軌道付近まで星間起源ダストがはいり込むことが明らかになっている[11]．

まだ今のところ，この星間起源粒子の構成成分の情報はない．今後打ち上げられる，Cassini, STARDUSTには質量分析機構を保有するダスト分析器が搭載される．これにより，星間起源粒子の正体が明らかになれば，惑星科学のみならず，天文学にとっても大きな成果になる．さらに，地球周回軌道で，直接に星間起源粒子を捕獲することができれば，鉱物や同位体分析により，さらに細

かい情報が得られるであろう．

6. 周惑星ダスト

惑星探査機ボイジャーは，木星，土星，天王星，海王星のいずれの周囲にも，ダストリングが存在することを明らかにした．これらは，いずれも光学的に薄いため，探査機が惑星の陰に入ったときの，太陽光の前方散乱によって発見・確認されている．散乱強度から，リングを構成する粒子は1 μm 程度であることがわかっている．図5はボイジャー2号によって撮像された，海王星のリングである．明るい2本のダストリングの間にも薄く広がるリングが存在する．

リング粒子の起源は，内側を回る衛星であると考えられる．外惑星領域ではケプラー速度は小さいが，巨大惑星の重力が大きいため，惑星重力圏に飛び込んできた粒子は数10 km/sで衛星表面に衝突する．そのため，衛星表面からダスト粒子が放出される．一方で，惑星周囲の衛星もしくは大きなリング粒子どうしの衝突からもダストは生成される．ダストは太陽光によるPoynting-Robertson効果により角運動量を失い，徐々に惑星へと落下する．木星のダストリングでは，薄くディスク状になった部分と，荷電したダストが磁場の影響を受けて広がったハロの部分の確認されている．リングの維持機構として，土星のEリングでは，ダスト粒子の衛星への再衝突が新たなダストを生成する

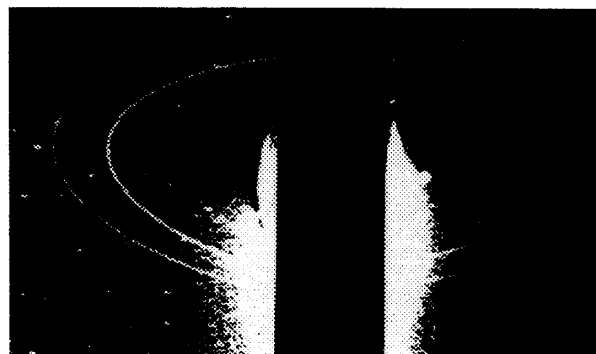


図5. ボイジャー2号によって撮像された，海王星のリング．

という、自己保持機構が提唱されている。

Soter [12]は、火星の周囲にも衛星から放出された粒子がダストリングを形成することを主張した。バイキング探査機の画像では、光学的厚さ 5×10^6 以上のリングは発見されなかったが、PHOBOS 2のイオン質量分析計が、フォボスの軌道付近で、非常に細かい粒子の存在を検出した。これが、ダストだとするとサイズは $0.01 \mu\text{m}$ 程度になる。ところが、理論的検討では、 $1 \mu\text{m}$ より小さい粒子は荷電して太陽風磁場のため、すぐに散逸してしまう。では、もっと大きな粒子はどうであろうか。

これを調べるため、日本が1998年に打ち上げる火星探査機PLANET-Bに衝突電離型ダスト計測器MDCが搭載されることになった[13]。その後、火星のダストリングの研究は急速に進んだ。太陽放射圧と火星の扁平度による重力高次項の効果のため、衛星が放出したダストの軌道離心率(ダイモスからの粒子では軌道傾斜角も)急速に増大する。火星に捕獲されないという条件から、フォボス起源のダストリングを構成する粒子は $20\text{-}200 \mu\text{m}$ であることが予想されている。現在の予想では、土星のEリングのように自己保持機構が効いているかどうか、MDCでダストリングが観測できるかを定めることになる。

周惑星ダストそのものではないが、ユリシーズ

表1. 地球周囲の円軌道衛星の軌道寿命。

軌道高度	軌道寿命
200 km	1-4年
600 km	25-30年
1000 km	2000年
2000 km	20000年

探査機は、木星での重力スイングバイの前後に、約28日の周期で木星方向から微小で高速なダストが多数やってくることを明らかにした[10](図4)。ガリレオ探査機が木星に到着する前には、木星起源のダストは非常に増加して、ピーク時には1日あたり数万個の高速ダストが観測された。このダストは、木星のダストリングかイオ起源の粒子が、木星磁場との相互作用のため加速されて、木星重力を振り切って飛び出したものと考えられている。

7. スペースデブリ

スペースデブリとは人工衛星とロケット運用上の廃棄物、ミッション終了後の人工衛星とロケット、およびそれらの破片や塗料片など、宇宙に存在する不用な人工物質の総称であり、運用中およ

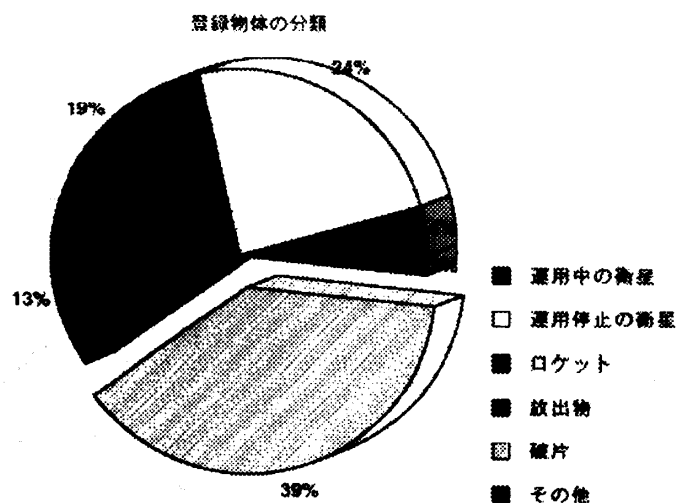


図6. スペースデブリ登録物体の起源。

び使用可能な衛星と自然物質であるメテオロイドは除くのが一般である。宇宙開発が盛んになるにつれて人工物体が増加し、低軌道ではむしろ人工物体のほうがメテオロイドよりも多くなりつつある。そしてスペースデブリは今日の宇宙活動に影響を与えるほどまで蓄積しており、もしその増加傾向を放置したならば近い将来には宇宙活動の存続そのものも危うくなることが明らかにされている。

ロケットが打ち上げられると、その下段は直ちに地球に落下し、上段と衛星は地球を周回する軌道に乗る。地球周回軌道に乗った物体の中で、再び加速されて地球を脱出する惑星探査機やSFU(Space Flyer Unit)のように再び地球上に回収される宇宙機を除いた残りの大部分は地球周回軌道にそのまま残される。軌道上の物体には地球の引力は当然として、太陽・月の引力、太陽光輻射圧、上層大気抵抗が作用し、軌道が徐々に変化するが、地球に再び落下するのは主に大気抵抗のためである。標準的な衛星が落下する時間は表1に示すように、通常の衛星寿命に比べて極めて長い。そのため、寿命が尽きた衛星、すなわちスペースデブリが地球の周囲に蓄積することとなる。

1996年12月末日までに米国宇宙司令部(US Space Command)のカタログに記録された地球周回軌道上

の人工物体の総数は24700を越え、約8600個は未だ軌道に残ったままである。これらの軌道上物体の24%は寿命の尽きた衛星本体である。一方、衛星本体を切り放した後のロケット本体は全体の19%を占める。運用中の衛星本体は全体の4%にすぎない。残りの52%は人工衛星とロケットの運用中に放出されるボルト、断熱材、シュラウドなどのオペレーショナルデブリ(13%)と破碎現象により発生した破片(39%)である(図6)。

米国宇宙司令部の宇宙監視網(Space Surveillance Network)の探知能力は、高度1000km以下の低軌道では、金属球直径に換算して10cm以上である。一方、静止軌道では1m以上である。宇宙監視網が探知不可能な小さなデブリは1cm以上のもので数万個、1mm以上では数百万個に達すると推定されている。

探知不可能な小さなデブリが蓄積されてきた主要原因は破碎現象である。現在までに135の破碎現象が報告されている。約3/4の破碎現象は爆発と推定されている。最も多いのは衛星破壊実験や偵察衛星の爆破などの意図的な破壊(33%)だが、現在自粛されている。24%の破碎現象は推進剤が残留したロケット上段などの推進系の爆発である。原因不明とされる27%の破碎現象の中には明確な証拠こそないが、他のデブリとの高速衝突が原因と疑

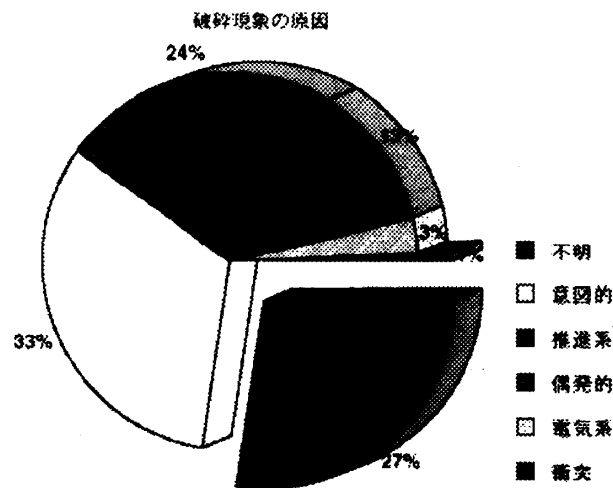


図7. 破碎現象の原因。

われる事例も含まれている(図7)。実際1996年7月には初の衝突事例が報告された。仏国のSPOT-1(1986-019A)の打ち上げに使用したロケット上段(1986-019C)が1986年11月に爆発し、その際発生した破片が同じく仏国の小型衛星CERIES(1995-033B)のブームを吹き飛ばした。

スペースデブリの発生と消滅を模式的に表すと図8のようなになる。発生源(Source)としては打ち上げ、破碎現象による破片の発生、ならびに衛星を構成する材料の劣化による分解・離散が考えられる。破碎現象も爆発と衝突のふたつがある。爆発は過去に例が多数あるが、将来はむしろ衝突が大きな要因となることが予想できる。材料の劣化に起因するデブリの発生は具体的な観測例や研究はなく、データに乏しいが、将来的には最も憂慮すべき発生源になる可能性がある。一方、消滅(Sink)に対し自然界が提供するものは上層大気の抵抗だけである。人為的なものは加速によって惑星間空間へ脱出させること、ならびに地球上に回収する、もしくは大気圏内に減速によって落下させることである。

人為的に除去されない限り、スペースデブリの蓄積は発生と大気抵抗による落下消滅の度合いのバランスで決まる。低軌道における発生・消滅のダイナミズムについては米国NASAおよび独

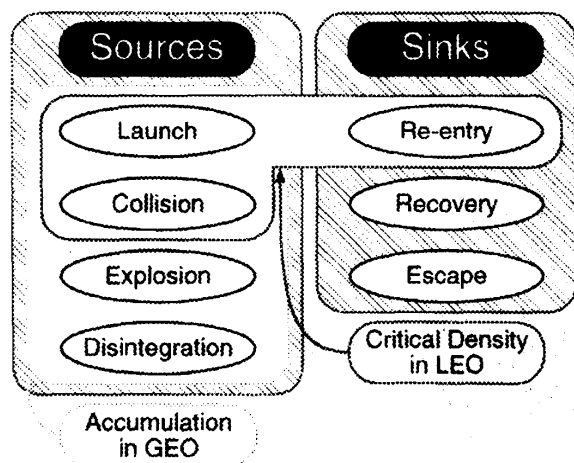


図8. スペースデブリの発生と消滅の機構。

Braunschweig大学で研究された。独立に行った両者の結果はほぼ同じであり、人工物体の密度がある値を超えるとそれ以後は新たな打ち上げがなくともお互いの衝突によって密度・個数がさらに増加する、いわゆる連鎖反応の臨界密度が見つかった。これによると、高度1000kmと1500kmではすでに臨界値を越えている。一方、高軌道ではもはや大気抵抗による落下消滅は期待できない。そのため、スペースデブリの密度・個数は単調に増加することは容易に理解できる。

地球に落下するメテオロイドの量は年間4000tといわれている。16,000tにも上ると主張する専門家もいる。しかし、メテオロイドは単に地球の近傍を通過するだけで、ある瞬間に地球近傍にある量だけを考えるとその量は200kg程度しかない。一方、SPUTNIK 1以来わずか30年間に蓄積されたスペースデブリの総量は3000tにも達する(1989年の調査)。スペースデブリはいつも地球を周回している。そのため、地球近傍ではもはやメテオロイドよりもスペースデブリと遭遇する率が高い。しかも、メテオロイドの量は昔から一定であるが、スペースデブリは急速に増加している。スペースデブリはもはや無視できない存在となった。

謝辞

国立天文台の磯部博士には原稿を改訂する上で
の助言をいただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 吉川真, 1992: 太陽系最後の謎 小惑星: 1. 小惑星の分布と運動. 日経サイエンス 1992年10月号, p. 14-21.
- [2] Mukai, T. 1985: Small Grains from Comets. *Astron. Astrophys.* **153**, 213-217.

- [3] Stern, S. A. 1995: Collisional Time Scales in the Kuiper Disk and their Implications. *Astron. J.* **110**, 856-868.
- [4] Backman, D. E., Dasgupta, A., and Stencel, R.E., 1995: Model of a Kuiper Belt Small Grain Population and Resulting Far Infrared Emission. *Astrophys. J.* **450**, L35-L38.
- [5] Stern, S. A. 1995: Signatures of Collisions in the Kuiper Disk. *Astron. Astrophys.* **310**, 990-1010.
- [6] Liou, J. C., Zook, H. A. and Dermott, S.F., 1996: Kuiper Belt Dust Grains as a Source of Interplanetary Dust Particles. *Icarus* **124**, 429-440.
- [7] Yamamoto, S. and Mukai, T., 1997: Dust Production by Impacts of Interstellar Dust on Edgeworth-Kuiper Belt Objects. *Astron. Astrophys.*, in press.
- [8] Luu, J. and Jewitt, D., 1996: Reflection Spectrum of the Kuiper Belt Object 1993 SC. *Astron. J.* **111**, L499-L503.
- [9] Bradley, J. P., Sandford, S. A., and Walker, R. M. 1988: Interplanetary Dust Particles. in *Meteorites and the Early Solar System* (Kerridge, J. F. and Matthews, M. S., Eds.), Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 861-895.
- [10] Grün et al., 1993: Discovery of Jovian Dust Streams and Interstellar Grains by the Ulysses Spacecraft. *Nature* **362**, 428-430.
- [11] Gustafson, B. Å. S. and Lederer, S. M., 1996: Interstellar Grain FLOW through the Solar Wind Cavity around 1992. in *Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust* (Gustafson, B. Å. S. and Hanner, M. S., Eds.), ASP Conf. Ser. 104, 35-38.
- [12] Soter, S. 1971: The dust belts of Mars. *Report of Center for Radiophysics and Space Research* 462, Cornell Univ., Ithaca.
- [13] Igenbergs, E., Sasaki, S., Fäber, G., Fishcer, F., Münzenmayer, R., Fujiwara, A., Iglseeder, H., Glasmachers, A., Grün, E., Mukai, T., Ohashi, H., Schwehm, G., Svedhem, H., Yamakoshi, K. 1996: Mars Dust Counter on Board ISAS PLANET-B. in *Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust* (Gustafson, B. Å. S. and Hanner, M. S., Eds.), ASP Conf. Ser. 104, 237-340.