

特集 「新世紀の宇宙塵研究」

惑星間塵の空間分布と軌道進化

石元裕史¹

1. 太陽放射圧とポインティング・ロバートソン効果

惑星間塵は古くから黄道光の原因としてその存在が知られているが、それがどのような空間分布、サイズ分布で太陽系内に存在しているのか、またその力学進化と母天体との関係など、不明な部分も多く残されている。ここでは、まず惑星間塵(ダスト)の力学として重要な太陽放射圧(Radiation Pressure)とポインティング・ロバートソン(Poynting-Robertson)効果の説明から、大まかな背景としてダストの力学進化について述べる。またこれらの効果や光学観測をもとにした、惑星間塵の起源へのアプローチ、ダストの空間分布について現在提唱されているモデルなどを紹介し、最後に理論と観測の課題について簡単に述べることにする。

太陽放射圧とポインティング・ロバートソン効果は、運動している座標系において粒子が太陽放射を受けることによる運動量変化を静止座標系にローレンツ変換することによって導出される[1]。静止系に対して v で運動している粒子の系において粒子が受けるエネルギーと運動量とを E'_i , P'_i とし、粒子から放出されるエネルギーと運動量とを E'_o , P'_o とすると(図1),

$$E'_o = E'_i, P'_o = (U - Q'_r) P'_i \quad (1)$$

となる。厳密には、 P'_o と P'_i は平行である必要はない。従って、 U は 3×3 の単位行列、 Q'_r は太陽放射

圧の効率であり、これも一般には 3×3 の行列として表される。しかし、粒子が球であるといった光散乱の対称性を仮定すれば、 $U=1$ で Q'_r は定数として扱うことができる。

ほしい式は、 dP/dt であり、これは固有時間 $d\tau$ での運動量変化($P_i - P_o$)から

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP}{d\tau} \frac{d\tau}{dt} = \frac{P_i - P_o}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

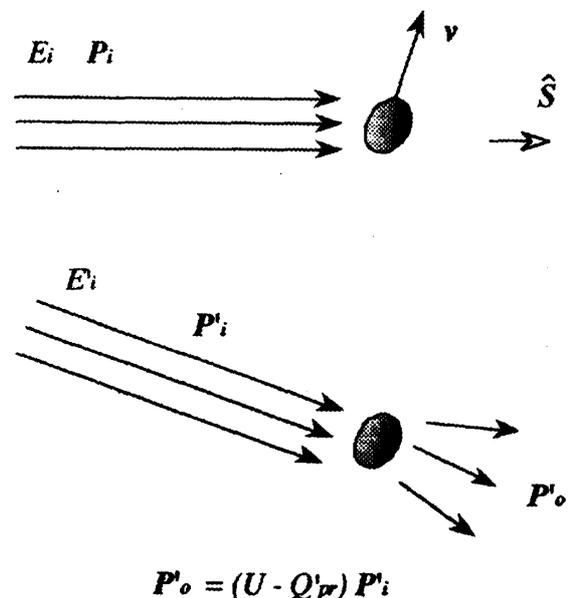


図1. 太陽放射によってダストに働く運動量変化。ポインティング・ロバートソン効果はダストから見た系(下)での運動量変化を静止系(上)にローレンツ変換することにより導出される。

¹神戸大学大学院自然科学研究科

ここでローレンツ変換

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}' + \left[(\gamma - 1) \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{P}'}{v^2} + \gamma \frac{E'}{c^2} \right] \mathbf{v}$$

より

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{Q'_{pr}}{\gamma} \left\{ \mathbf{P}'_i + \left[(\gamma - 1) \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{P}'_i}{v^2} \right] \mathbf{v} \right\}$$

また、 \mathbf{P}_i , \mathbf{P}'_i 方向の単位ベクトル(光の入射方向)を $\hat{\mathbf{S}}$, $\hat{\mathbf{S}}'$ とすると、

$$\mathbf{P}'_i = \frac{E'_i}{c} \hat{\mathbf{S}}' = \frac{E_i}{c} \left\{ \hat{\mathbf{S}} + \left[(\gamma - 1) \frac{\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{S}}}{v^2} - \frac{\gamma}{c} \right] \mathbf{v} \right\}$$

となる。 $W = \gamma(1 - \mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{S}}/c)$ として $E_i W = E'_i$ となり、さらに

$$E'_i = n' A' h v' c, \quad n' = n W, \quad v' = v W$$

となる。ここで n , A' , h , v は単位断面積に入射する光子数, 粒子の断面積, プランク定数, 光子の

振動数である。これらから

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = Q'_{pr} A' n h v \left\{ \frac{W}{\gamma} \hat{\mathbf{S}} - \frac{W^2}{c} \mathbf{v} \right\}$$

$$= Q'_{pr} A' n h v \left\{ \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{S}}}{c} \right) \hat{\mathbf{S}} - \frac{\left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{S}}}{c} \right)^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} \frac{\mathbf{v}}{c} \right\} \quad (3)$$

$$\approx Q'_{pr} A' n h v \left\{ \left(1 - \frac{v}{c} \right) \hat{\mathbf{S}} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right\} \quad (4)$$

を得る。 $Q'_{pr} A' n h v$ を全波長で積分した値を F'_{pr} とおけば、粒子が受ける力 \mathbf{F}'_{pr} は

$$\mathbf{F}'_{pr} \approx F'_{pr} \left\{ \left(1 - \frac{v}{c} \right) \hat{\mathbf{S}} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right\} \quad (5)$$

となる。よく用いられる形として、太陽重力 $F_g = G M \cdot m/r^2$ との比 $\beta = F'_{pr}/F_g$ を使って(図2),

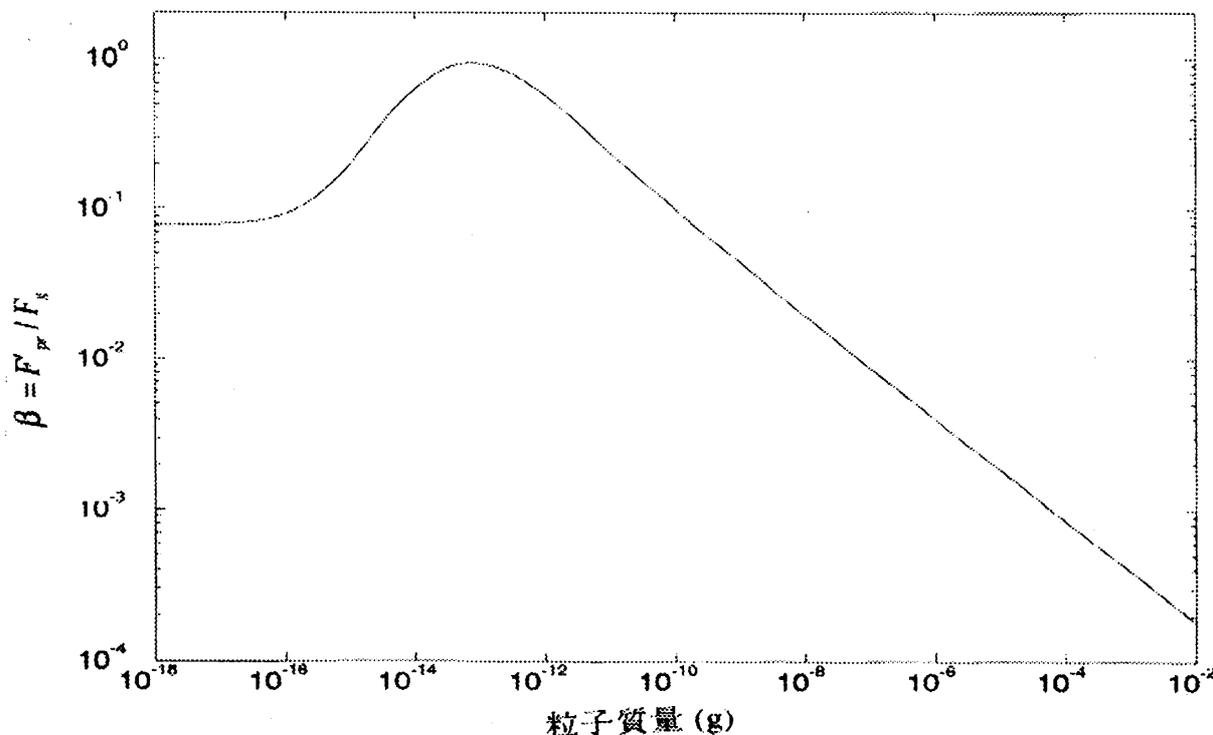


図2. 粒子サイズによる β 値. 粒子は均質球とし、物質は惑星間塵のモデルとして比較的よく使われている“アストロノミカル・シ

リケイト”を用いた。

$$F_{pr} \approx \beta \frac{GM_* m}{r^2} \left\{ \hat{S} - \left(\frac{\dot{r}}{c} \hat{S} + \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \right\} \quad (6)$$

を得る。ここで右辺第一項が太陽放射圧であり、第二項がポインティング・ロバートソン効果である。太陽重力を加えた運動方程式

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{pr} \approx -\frac{GM_* m}{r^2} \left\{ (1-\beta) \hat{S} + \beta \left(\frac{\dot{r}}{c} \hat{S} + \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \right\}$$

を見てわかるように、太陽放射圧を受けた粒子は、 v/c の項を無視した時間スケールでは、あたかも太陽重力が β ぶんだけ減少したかのようなケプラー運動としてふるまう。一方、ポインティング・ロバートソン効果の項は抵抗力であり、短い時間スケールではその効果は無視できるが、長い時間スケールにおいて粒子はその運動量を失っていき、太陽に落下してゆくことになる。特徴的なサイズ($\sim 10 \mu\text{m}$)の惑星間塵における1AUから太陽までの落下時間(lifetime)はおよそ 2×10^3 年である。すなわち、現在我々が観測している惑星間塵はこの程度のタイムスケールで入れ替わっている。このことから我々は、惑星間塵の多くが、なにかある母天体から太陽系内に絶えず供給されているものと考えてよいであろう。

太陽放射圧およびポインティング・ロバートソン効果を考慮したダストの軌道進化は以下のようなものである。まず、ダストがその母天体から放出される。このときダストの軌道は太陽放射圧によって母天体の軌道より膨らんだ形になる。簡単のためダストは母天体(軌道長半径 a_p 、離心率 e_p)の近日点から放出されたと考えると、エネルギー積分の式と角運動量保存から、放出後のダストの軌道(a_d, e_d)は、

$$a_d = \frac{(1-e_p)}{1-e_p-2\beta} a_p, \quad e_d^2 = 1 - \frac{(1+e_p)(1-e_p-2\beta)}{(1-\beta)} \quad (7)$$

となる。ここで重要なことは、ある程度 β 値が大きなダストでは、母天体から放出後、太陽系内に残れないことである。母天体が円軌道なら $\beta \geq 0.5$ のダストは太陽系から脱出する。また太陽系内に残ることの出来る最大の β 値は母天体の離心率が大きいほど小さい。このことは、離心率の大きな長周期彗星が惑星間塵の起源としては比較的小さな寄与しかしていないことを示唆している。

母天体から放出された後太陽系内に残ったダストは、ポインティング・ロバートソン効果により、徐々に軌道を小さくしてゆく。式(6)で導出したポインティング・ロバートソン効果の軌道1周期の平均をとり、摂動方程式に代入すると、

$$\left[\frac{da_d}{dt} \right]_{PR} = -\frac{\beta GM_*}{a_d c} \frac{(3e_d^2 + 2)}{(1-e_d^2)^{3/2}} \quad (8)$$

$$\left[\frac{de_d}{dt} \right]_{PR} = -\frac{5\beta GM_*}{2a_d^2 c} \frac{e_d}{(1-e_d^2)^{1/2}} \quad (9)$$

となる。ダスト軌道は、その軌道長半径 a_d を減少させながら円軌道に近づいてゆく。また式(8)は、離心率がある程度小さくなったダスト群では、平衡状態においてその数密度が日心距離に逆比例($n(r) \propto r^{-1}$)した形になることを示している。

2. 小惑星か彗星か?

惑星間塵の母天体は一般的には彗星と小惑星であろうと考えられている。彗星は、その尾にみられるように彗星核の揮発性物質の昇華によってダストを惑星間空間に放出している。一方小惑星の族(family asteroids)の存在からわかるように、小惑星同士の衝突が小惑星帯内で起っており、このときの衝突放出物として多量のダストが生成していると考えられている。

赤外線天文衛星(IRAS)の波長 $12 \sim 100 \mu\text{m}$ の観測

によって、IRASダストバンドと呼ばれる複数の帯が2~3 AU領域に存在することが確認された[2]. これらの帯は10 μ m程度の粒子で構成されており、それらが小惑星の主要な族(テミス, エオス, コロニス)起源であることが明らかとなることによって、ダストバンドのバックグラウンドであるダスト群も小惑星同士の衝突放出物とその主要な起源の一つであることを強く印象づけた[3]. 小惑星帯内に確認されている全小惑星族で同様にダストが生成されているとすれば、IRASダストバンド内でのダスト量と小惑星族数のかけ算で小惑星族の形成にともなって生成した全体のダストの寄与が推定できる. その結果は黄道光を形成するダスト量の約10%であった[4]. この結果は今現在確認されている小惑星族のみを考慮した結果であり、未確認の族や、小さな小惑星同士の衝突などによってダストが生成されているとすれば、黄道光全体での小惑星起源ダストの寄与はもっと大きくなるだろう.

一方彗星起源ダストであるが、こちらはダストの生成過程が見えているにもかかわらず、黄道光内でどのくらい寄与しているのかよくわかっていない. 前節で述べたように、離心率の大きな彗星から放出されたダストの多くは太陽放射圧によって太陽系外に出ていってしまうことになる. そのため黄道光に大きく寄与している彗星は離心率の比較的小さな短周期彗星であろう. しかし、現在見積られている彗星のフラックスとその活動度では黄道光を定常的に保つほどのダスト量は供給できない.

彗星起源のダストが黄道光に大きく寄与している可能性は、それでもなお多くの研究者によって支持されている. その理由の一つは、地球上層大気中で採取されたダストの多くが、空隙の多いふわふわした形状をしていることである. このようなダストはおそらく、小惑星起源ダストのような衝突放出物よりも比較的始源的な形状を保ってい

ると考えられている彗星起源ダストと考える方が自然であろう.

彗星起源ダストが黄道光に大きく寄与しているもう一つの可能性は、上記IRASによる彗星ダストトレイルの発見による[5]. 彗星ダストトレイルは、短周期彗星の軌道に沿って集積した数十 μ mのダスト群の熱放射が帯状に見えているもので、彗星の尾の延長である. 彗星ダストトレイルの存在が不思議なのは、IRASで発見したような濃いダストの軌跡を形成するための母天体のダスト生成率は、現在見積られているそれら短周期彗星のダスト生成率の2倍程度が必要であることである. さらに、発見された彗星ダストトレイルの大部分は母彗星が近日点付近で比較的地球から近い条件の短周期彗星において確認された[5]. このことはIRASでは発見できないような彗星ダストトレイルが他の多くの短周期彗星に存在する可能性を示している. さらに母天体がなく、軌跡だけが見えているという“孤児軌跡”も発見されている[5]. このような事実は、黄道光を形成するダストの起源としての彗星の寄与は思ったより大きいのではないかと、いう期待をふくらませるものではあるが、いったいどのくらいの数の彗星ダストトレイルが存在しているのか、また軌跡を形成しているダストのサイズなど不明な部分も多く残されているため具体的な数値見積は今だなされていない.

3. 共鳴捕獲による地球近傍ダストリングと小惑星起源ダストの見積り

十数年前からダストの力学計算を行なう人々の間で、ポインティング・ロバートソン効果で太陽に落ちてゆくダストの軌道長半径が、惑星の共鳴領域で、ある期間一定になるという現象が起こることが報告されていた[6]. 近年になりその原因が計算誤差ではなく、解析的に説明されるようにな

ってから[7], この現象が惑星間空間のダスト群に実際に起こっているのではないかと考えられはじめた. 共鳴捕獲の原理は以下のようなものである[7]. ダスト軌道が惑星とj:j+1の共鳴領域に入った時, 共鳴によってダストに働く摂動力は, 惑星を円軌道, 惑星およびダストの軌道傾斜角を0として近似的に

$$\left[\frac{da_d}{dt} \right]_{\text{Res}} = -(j+1) a_d e_d n \mu C_j \sin \phi \quad (10)$$

$$\left[\frac{de_d}{dt} \right]_{\text{Res}} = -\frac{\mu n}{2} C_j \sin \phi \quad (11)$$

と表される. ここで n , μ , ϕ , C_j はそれぞれダストの平均運動, 惑星質量/太陽質量, ダストの近日点方向からみたダストと惑星が合になる角度, ラプラス係数である(図3). 捕獲が起こる条件は, (8)と(10)のつりあいから,

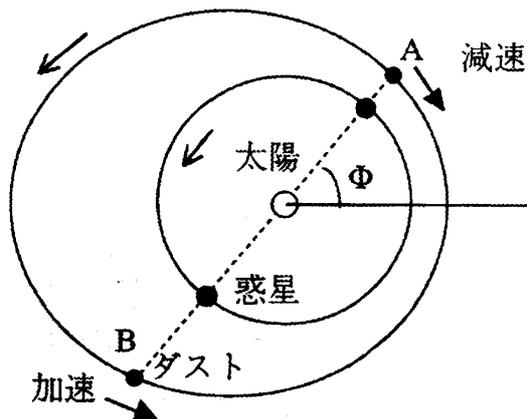


図3. 共鳴捕獲の概念図. ポインティング・ロバートソン効果による da_d/dt が惑星摂動による da_d/dt とつり合う時(B点), ダストの軌道長半径は一定を保つようになる. しかしその間ダストの離心率は増加してゆくため, ある時間がたつと上の条件が満たされなくなり, 捕獲からはずれる.

$$\begin{aligned} \sin \phi &= -\frac{\beta GM_s}{a_d^2 \mu n C_j (j+1) e_d (1-e_d^2)^{3/2}} (2+3e_d^2) \\ &= -\frac{1}{\mu c} \left(\frac{GM_s}{a_p} \right)^{1/2} \frac{\beta}{(1-\beta)^{2/3}} \frac{j^{1/3}}{C_j (j+1)^{4/3}} \frac{(2+3e_d^2)}{e_d (1-e_d^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで a_p は惑星の軌道長半径である. ϕ に解を持つような条件で, 共鳴捕獲が起こる. 太陽放射圧と太陽重力との比 β と離心率 e_d の依存性は, あまり大きな β 値や離心率を持つ粒子では解を持たなくなり, 捕獲が起こらないことを示している. このつりあいが成立している間, 軌道長半径は変化しないが ϕ , 離心率は変化する. (12)を(11)に代入すると,

$$\frac{de_d}{dt} = \frac{GM_s}{2a_p^2 c (1-\beta)^{2/3}} \left(\frac{j}{j+1} \right)^{4/3} \left[\frac{(2+3e_d^2)}{(j+1)e_d(1-e_d^2)^{3/2}} - \frac{5e_d}{(1-e_d^2)^{1/2}} \right] \quad (13)$$

となる. 近似的に $de_d/dt \propto 1/e_d$ であり, 離心率は $e_d \propto t^{1/2}$ の形で増加してゆく. 離心率が大きくなってくると(12)の条件が満たされなくなりダストは捕獲からはずれて, 再びポインティング・ロバートソン効果で軌道長半径を減少させてゆく. このように, ダストが惑星間空間をポインティング・ロバートソン効果で太陽に落ちてゆく過程の中で, 共鳴捕獲領域は, ある特定サイズのダスト群についての「溜り」を形成する. これは広い意味で, 惑星軌道の周りのリングと考えても良いであろう. また, 捕獲している期間の粒子の軌跡を追ってゆくと, 全体的に見てこのリングには定常的な密度の不均一ができることがわかった[8].

もし, 地球軌道の周りに共鳴捕獲によるリングがあるのだとすれば, 地球から見て, リングによるダスト密度の不均一が確認できるかもしれない. このような意図により, 宇宙背景放射探査衛星(COBE)の赤外波長における地球の進行方向とその逆方向に対して黄道光の明るさを比べてみた結果,

進行方向に比べて逆方向はおよそ4%程度明るくなっていることがわかった。この4%が誤差ではない理由は、地球軌道のどの位置で計測してもこの違いが存在することによる[9]。数値シミュレーションの結果、この不均一を作っているリング粒子のサイズはおよそ $10\mu\text{m}$ であることがわかった[10]。共鳴捕獲を起こす粒子の離心率は小さくなければならない、という条件から、このリングを作るダスト群は小惑星起源であると考えられる。小惑星起源ダストが小惑星同士の衝突によってできたものと考えれば、破壊によるサイズ分布を仮定すれば、 $10\mu\text{m}$ で4%の不均一を作れる全体のダスト量を見積もることができる。破壊のサイズ分布に、よく用いられているサイズのべき乗の関係を使うことによって、黄道光全体の中で小惑星起源ダストの量の上限は約40%となる[10]。この結果は、IRASダストバンドからの見積りと矛盾しない。結局、黄道光のかなりの部分は小惑星起源である可能性が高い。

4. 黄道面での数密度分布(r^{-1} か $r^{-1.3}$ か?)

太陽からの距離を r とし、ポインティング・ロバートソン効果で太陽に落ちてゆく粒子群の数密度 $n(r)$ が、円軌道の場合 $n(r) \propto r^{-1}$ になることはすでに述べた。ところが、実際に黄道光の観測から数密度の r 依存性を逆算してみると、 $n(r) \propto r^{-1.3}$ が観測結果を最もよく再現する。また、Heliosのダスト検出器の観測結果も、0.3AUまでの領域で $n(r) \propto r^{-1.3}$ に合致する結果を得た[11]。ダスト軌道に離心率の効果を導入すれば、 r^{-1} よりも急な勾配を作ることができると思われるが、実際に計算してみると、この r 依存性は元々のダストに大きな離心率を与えただけでは、うまく説明できない。それは、ポインティング・ロバートソン効果による離心率の減少

のため、太陽に近い領域でやはり r^{-1} の依存性に戻ってしまうからである。 $n(r) \propto r^{-1.3}$ を説明するために提出された一つの可能性は、1AUよりも内側で大きなダストを供給するような何らかの供給源があり、さらにその大きなダストを他の黄道光内粒子との衝突によって破壊してゆくというものである[12]。この説明は、 $r^{-1.3}$ という依存性が必然的に再現できるというのではなく、むしろ $r^{-1.3}$ 依存性が定常的にあることが可能であることを示したにすぎないが、黄道光内で粒子同士の衝突破壊が起こっているのはおそらく間違いないことであり[13]、その意味でこの説明は広く受け入れられていた。

近年、そのモデルに異義を唱えたのは、やはり黄道光の光学観測からである。IRASとZIPロケットの観測の解析結果から、黄道光の0.5AU~1.5AUにおける温度は $r^{-0.35}$ という依存性を持つことが明らかとなった。この結果を単純に解釈すると、黄道光を構成している粒子の散乱係数(アルベド)が日心距離によって変化しているということになる。アルベド: A の変化を r のべき乗にあてはめると、 $A \propto r^{-0.3}$ となり、従来黄道光の光学観測から見積られていた $r^{-1.3}$ の依存性にこの効果を考慮すると、 $n(r) \propto r^{-1}$ になる。これは単純なポインティング・ロバートソン効果による数密度の依存性に他ならない[14]。

現在のところ、数密度の依存性が $r^{-1.3}$ かそれとも r^{-1} かという問題は、双方の主張とも間接的な根拠があるため、互いに譲れないところであるが、前者の根拠であるHeliosの観測もある限られた期間と粒子サイズについての観測にすぎないし、後者においても粒子のアルベドがどういった物理過程で変化するのか明らかにされているわけではない。両者に結論を下すにはまだ多くの観測が必要となるであろう。

5. 5種類ダスト分布モデル

流星や黄道光の地上および衛星での観測や、惑星間探査機に搭載されたダスト検出器などによる計測によって、惑星間塵についての情報は、かなりの量蓄積されてきている。それは地球軌道や黄道面上だけではなく、外惑星領域や黄道面外にもおよんでいる。これらのデータ全てを、例えば地球軌道での惑星間塵サイズ分布や、一つの r 依存性だけで説明することは困難であり根拠もない。

全ての惑星間塵データを説明できるように、惑星間塵をその軌道要素の特徴やサイズ領域で $n(r) \propto r^{\pm 1}$ を持つ1つのメイングループと4つのサブグループの計5つの群に分類したのが、5種類ダスト分布モデルである[15]。このモデル(図4)は、現在知られている惑星間塵の、空間、サイズ分布についての一つの解である。すなわち何らかの真実がそこにはあるのであろう。しかしこのモデルは、明らかにその作者が何らかの意図をもって作ったと思われるにも関わらず、それぞれのダスト群について、その起源と進化の積極的な説明がなされていない。またダスト群同士の相互作用(衝突破壊など)や時間的な平衡状態も考慮されていない(平衡状態になっているかどうか問題ではあるが)。さらに、近年UlyssesやGalileoによってそのフラックスが計測された星間塵や、まだ確認されていないが最近話題となっているカイパーベルト起源のダストなど、この5種類ダスト分布モデルを改定しなければならない事情は増えてきている。

このような事情により上記5種類ダスト分布モデルは、その発表に多くの研究者が注目したにも関わらず、コンセンサスを得られないために、その引用を控えられているが、その考え方には重要な点がある。すなわち、黄道光を形成するダストの空間分布やサイズ分布の見積りは、単に地球軌道でのサイズ分布とフラックスからの外挿では不相当

である。さらに地球軌道でのサイズ分布もいくつかの異なる軌道要素やサイズ分布をもったダスト群によって分割されるだろう。それらはダストの母天体や他のダスト群との相互作用、サイズによって異なる軌道進化などによって特徴づけられるに違いない。このような事柄を考慮した、新たな惑星間塵の分布モデルを構築することが急務とな

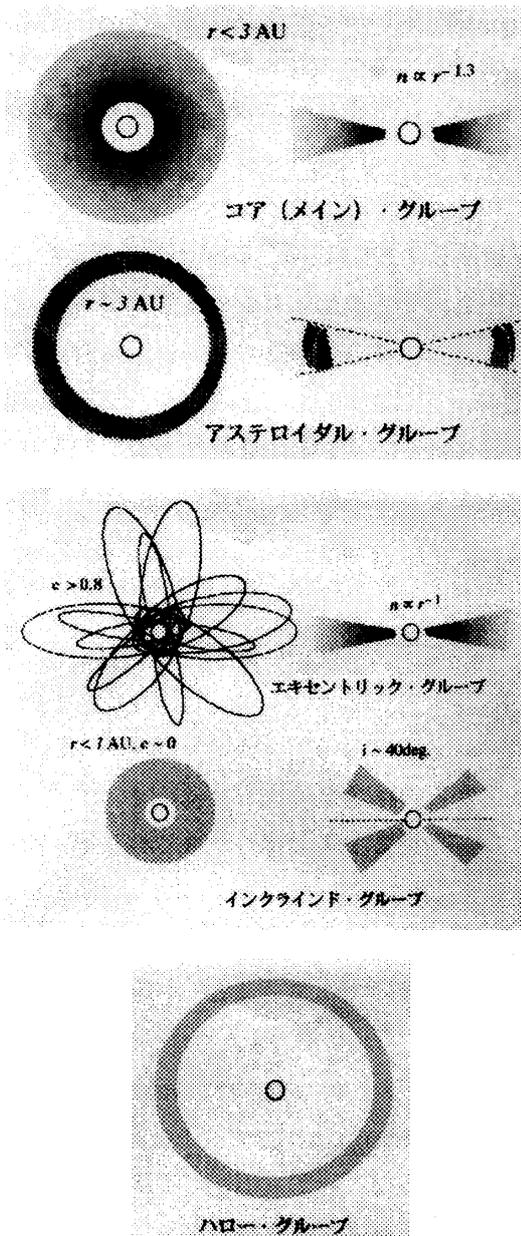


図4. 5種類ダスト分布モデルの一つのメイングループと四つのサブグループの特徴を模式的に示したもの。それぞれ左は極方向から、右は黄道面方向から見た図。(ハロー・グループは球殻状に広がっている)

っている。

6. 検討すべき課題

ここまで惑星間塵の軌道進化と空間分布について、最近の研究成果などを引用して大まかに述べてきた。しかしここで挙げた成果も、ダストについてのいくつかの物理過程においてかなり粗い仮定や近似を用いていることに注意する必要がある。

これまでのダストの力学研究は、ダストを均質な球と近似した上でなされたものであった。しかし、地球上層大気中で採取されたダストなどを見ても、もっといびつな、またはふわふわした構造を持っている。このような不規則形状をしたダストについての光散乱、放射圧、温度や昇華の問題、起源による組成の違いや、その結果を考慮したダストの力学進化の研究は、まだそれほど進んでいるとは言えない。また、母天体の衝突破壊によるダストの放出に関して言うなら、破壊前に比べてそのサイズに10桁近く違いのある破壊放出物の量を推定するための実験結果もなければ、それが一つのべき乗則にのる保証もない。このため、前記した小惑星起源ダストの黄道光内での寄与は、極端に言えば10%が1%や、逆に90%にもなり得る。またこのことに関連して、ダスト同士の衝突現象についても知る必要があるであろう。 β 値の小さな、大きいダスト($\geq 100\mu\text{m}$)では、ポインティング・ロバートソン効果による軌道変化のタイムスケールに比べてダスト同士の衝突タイムスケールの方が短くなる。もしダスト同士の衝突によって、大きな粒子が消失し、小さな粒子が多数生成するのであれば、その割合によって、黄道光内の粒子のサイズ分布は、日心距離(時間)によって大きく変わってくるであろう。同じようなことは彗星ダストトレイルやIRASダストバンド内の粒子についても言えることである。

サイズの減少によって重力よりも太陽放射圧を強く受けるようになったダストは、大きな離心率と軌道長半径とを持つに至る。太陽方向から大きな離心率で飛んでくる β -メテオロイドと呼ばれる $1\mu\text{m}$ 以下の粒子群は、太陽近傍でのダスト同士の衝突による破片ではないかと考えられている[16]。このことについては、太陽近傍でのダストの昇華によるサイズの減少が原因であるという説もあるが[17]、ダスト同士の衝突で、その衝突速度によって破片がどれだけ生成するのかわかれば、どちらの起源のものが多いか推定できるであろう。

7. 今後のダスト計測

これまで惑星間空間のダスト計測は、アメリカやヨーロッパの探査機による観測が主であり、我々はその解析結果を示した論文をもとに、または後になり公表されたデータを使って研究を行ってきた。しかし今後、わが国でもさまざまな惑星探査ミッションが実現するようになり、これらの探査機にダスト計測機を搭載することで惑星間塵の生のデータを入手できる機会が増えてきた。と同時に、単にデータを取ってくるだけではなく、どのようなデータがサイエンスとして重要であり、オリジナルな研究ができるのかということを検討することが重要になってきている。これまで述べてきたように、惑星間塵はその起源や進化過程によって異なる空間分布、サイズ分布を持つ群に分類できるであろう。これらのダスト群の混在した状態から、逆にそれぞれのダスト群の起源や、その進化を推定するするためには、いくつかの側面から惑星間塵を分類する必要がある。

まず第一に、ある空間領域に対して、統計処理に耐えうるだけのデータが必要であることは言うまでもない。これまで地球軌道上においては、地上での流星のレーダー観測、人工衛星による微小

ダスト計測まで、広範囲の質量領域におけるダスト観測がなされてきた。しかしIAU以外の領域においては、内側ではHelios, 外側ではPioneer, 最近ではGalileo/Ulyssesなどの観測があるが[11, 18, 19, 20], それぞれの空間領域において観測(キャリブレーション)できるサイズ範囲やデータ個数が十分であるとはいえない。特に、黄道光を生み出す主要なダストサイズである数十 μm のダストのその場計測は、そのフラックスが小さいために、小さな面積のダスト検出器による一度きりの観測では有意な数のデータが得られないという問題があるため、惑星探査機の計画があるたびごとに標準装備としてダスト検出器を搭載し、フラックスデータの蓄積を計ることが望ましい。

観測したダストの軌道を推定することができれば、そこからダストの起源について見積ることが可能と思われる。星間塵や β -メテオロイドは、その軌道にかなり特徴的な方向性を持っていると考えられている。またその他のダストについても、小惑星起源か彗星起源かの分類や、特定の彗星(ダストトレイル)や流星群との関係が明らかになれば、そこから前記した「小惑星か彗星か?」という問題を解決する手がかりが得られることになる。惑星探査機搭載用のダスト検出器などでは、一般に検出器の視野を狭くすればダストの入射方向の決定精度が上り、探査機の運動とダストの入射速度とからダストの軌道が推定できるようになる。しかしあまりに視野を狭くとると、全体の観測データ数が少なくなるため得策とは言えない。したがって、視野の大きさと必要とするダスト軌道の精度との兼ね合いを考えた上で検出器をデザインする必要がある。許されるのならフラックス計測用と軌道検出用との二種類の検出器を搭載するか、または大きな視野でも入射したダストの方向がわかるような工夫を施した検出部の開発が必要になるであろう。

検出したダストの組成がわかれば、ダストとその起源の関係についてさらに決定的な情報を得ることになる。質量分析機能を持ったダスト検出器によって得られたデータは、その領域のダストと母天体を直接むすびつける。例えば、ハレー彗星についてGiottoで行なわれた彗星塵の質量分析結果との比較から彗星起源の惑星間塵を決定したり、隕石との比較から小惑星起源ダストなどを区別することができる。また、組成の面から β -メテオロイドや星間塵の特徴を判断することもできると考えられる。さらに、種々の惑星間環境下でのダストにおける起源の混合の度合や、これまで蓄積されたダストデータの解釈などにも多いに役立つことであろう。ダストの衝突電離を利用した飛行時間型質量分析機能を持った、ダスト分析器が現在わが国でも開発中である。こうした機能を持った新しいダスト計測器が惑星間塵についての新たな発見を生み出し、その起源と進化の解明が進んでゆくことを期待している。

参考文献

- [1] Klacka, J., 1992: Poynting-Robertson effect. I. Equation of motion. *Earth, Moon, and Planet* **59**, 41-59.
- [2] Dermott, S. F., Nicholson, P. D., Burns, J. A., and Houck, J. R., 1984: Origin of the Solar System dust bands discovered by IRAS. *Nature* **312**, 505-509.
- [3] Sykes, M. V., Greenberg, R., Dermott, S. F., Nicholson, P. D., Burns, J. A., and Gautier III, T. N., 1989: Dust bands in the asteroid belt. in *Asteroids II*, 336-367.
- [4] Dermott, S. F., Durda, D. D., Gustafson, B. A. S., Jayaraman S., Liou, J. C., and Xu, Y. L., 1994: Zodiacal dust bands. in *Asteroids, Comets,*

- Meteors* 1993, 127-142.
- [5] Sykes, M. V. and Walker, R. G., 1992: Cometary dust trails. I. Survey. *Icarus* **95**, 180-210.
- [6] Jackson, A. A. and Zook, H. A., 1992: Orbital evolution of dust particles from comets and asteroids. *Icarus* **97**, 70-84.
- [7] Weidenschilling, S. J. and Jackson, A. A., 1993: Orbital resonances and Poynting-Robertson drag. *Icarus* **104**, 244-254.
- [8] Dermott, S. F., Jayaraman, S., Gustafson, B. Å. S., Liou, J. C., 1994: A circumsolar ring of asteroidal dust in resonant lock with the Earth. *Nature* **369**, 719-723.
- [9] Reach, W.T., Franz, B. A., Weiland, J. L., Hauser, M. G., Kelsall, T. N., Wright, E. L., Rawley, G., Stemwedel, S. W., and Spiesman, W. J., 1995: Observational confirmation of a circumsolar dust ring by the COBE satellite. *Nature* **374**, 521-523.
- [10] Jayaraman, S. and Dermott, S. F., 1996: Estimation the asteroidal component of the zodiacal cloud using the Earth's resonant ring. in *Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust*, 155-158.
- [11] Grün, E., Fechtig, P. H., and Kissel, J., 1980: Orbital and physical characteristics of micrometeoroids in the inner solar system as observed by HELIOS 1. *Planet. Space Sci.* **28**, 333-349.
- [12] Leinert, C., Röser, S., and Buitrago, J., 1983: How to maintain the spatial distribution of interplanetary dust. *Astron. Astrophys.* **118**, 345-357.
- [13] Grün, E., Zook, H. A., Fechtig, H., and Giese, R. H., 1985: Collisional balance of the meteoritic complex. *Icarus* **62**, 244-272.
- [14] Levasseur-Regourd, A. C., Renard, J. B., and Dumont, R., 1990: The zodiacal cloud complex. in *Origin and Evolution of Interplanetary Dust*, 131-138.
- [15] Divine, N., 1993: Five populations of interplanetary meteoroids. *JGR* **98**, 17029-17048.
- [16] Zook, H. A. and Berg, O. E., 1975: Source for hyperbolic cosmic dust particles. *Space Sci.* **23**, 183-203.
- [17] Mukai, T. and Yamamoto, T., 1979: A model of the circumsolar dust cloud. *Publ. Astron. Soc. Japan* **31**, 585-595.
- [18] Humes, D. H., 1980: Results of Pioneer 10 and 11 meteoroid experiments: Interplanetary and near-Saturn. *JGR* **85**, 5841-5852.
- [19] Grün, E., Baguhl, M., Divine, N., Fechtig, H., Hamilton, D. P., Hanner, M. S., Kissel, J., Lindblad, B. -A., Linkert, D., Linkert, G., Mann, I., McDonnell, J. A. M., Morfill, G. E., Polanskey, C., Riemann, R., Schwehm, G., Siddique, N., Staubach, P., and Zook, H. A., 1995: Three years of Galileo dust data. *Planet. Space Sci.* **43**, 953-969
- [20] Grün, E., Baguhl, M., Divine, N., Fechtig, H., Hamilton, D. P., Hanner, M. S., Kissel, J., Lindblad, B. -A., Linkert, D., Linkert, G., Mann, I., McDonnell, J. A. M., Morfill, G. E., Polanskey, C., Riemann, R., Schwehm, G., Siddique, N., Staubach, P., and Zook, H. A., 1995 : Two years of Ulysses dust data. *Planet. Space Sci.* **43**, 971-999