

譬如積微塵成山

木村 宏

塵からはじまる惑星系

惑星科学の分野では、ちりもつもればやまとなる(譬如積微塵成山)という諺のように、塵の付着成長により微惑星ができ、その微惑星の合体成長により惑星ができたと考えられている。その「塵」とは何ぞや?—この質問に答えることが本稿の目的である。以下では、まず、塵(ダスト)の組成・形状・大きさといった特徴を過去の関連する研究から割り出し、次に、それらの特徴を十分に踏まえた、且つ、最も明瞭簡潔なダストモデルを提示し、最後に、そのモデルから期待される結果と観測結果とを比べることでモデルの確かさを検証し塵とは何かを述べる。様々な環境下でどれほど塵の物性が異なっているかを調べることで塵の進化を知ろうとする我輩の研究紹介でもある。

そもその微惑星形成のはじまりは、星間に存在する塵である。微惑星形成過程で塵の組成・形状・大きさがどのように変化するかは、元々の種である星間塵と始原的小天体に保存された塵を比較してやることで見当がつく。彗星は最も始原的な現存する微惑星であり彗星から放出された塵は星間塵本来の特徴を比較的

表1：局所星間雲での水素原子100万個当りの元素存在量 [1]。ダスト相における元素存在量は、宇宙元素存在量として太陽光球の元素存在量を仮定し、ガス相における元素存在量の観測結果を用いて導出された。

	C	N	O	Mg	Al	Si	S	Fe
Dust	77	39	206	32	3	27	11	27
Gas	168	46	284	3	0	5	10	1
Total	245	85	490	35	3	32	21	28

留めていると考えられている。つい最近、アメリカ航空宇宙局のスターダストと呼ばれるミッションでは、星間塵と彗星塵のサンプルリターンが成功に終わった。これからの分析によって、星間塵と彗星塵の違いが見えてくることが期待されるが、塵本来の特性を知るにはサンプル収集時における変性を理解しなければならない。以下では、既知の研究結果に基づいて、星間塵と彗星塵の組成・形状・大きさを推論することにしよう。

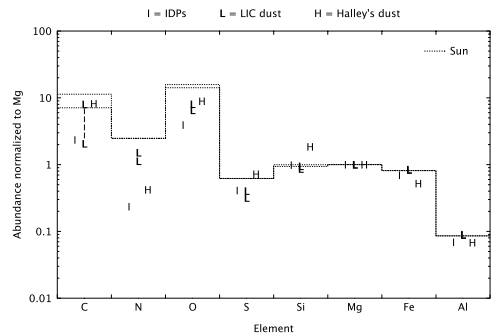


図1：星間塵 (LIC dust) と彗星塵 (Halley' dust) と惑星間塵 (IDP) と太陽光球の組成を比較 [1]。塵を構成する主な元素のダスト相での存在度をマグネシウムで規格化したもの。

塵の組成

星間塵の元素組成を知るために、星間ガスの組成を観測から導出することがよく行われてきた。何故ガスなのか、星間では、宇宙に存在する元素はダスト(固体)かガス(気体)かのどちらかになっている。したがって、ガス中のある元素が、宇宙元素存在度に比べて「枯渇」しているのならば、その元素については枯渇分がダス

トとして存在するはずであり、こうして星間塵の組成が推定される。それでは宇宙元素存在度はどうしてわかるのか？一星間ダストと星間ガスから形成された恒星の元素存在度から宇宙元素存在度がわかる。一般に、われわれが一番良く知っている太陽の元素存在度が宇宙元素存在度として用いられる。太陽に年齢の近いF型星やG型星の組成、そして若いB型星の組成は平均して太陽組成に近いことが近年わかってきた。表1に、ガスの枯渇から推定される星間塵の組成を示す。塵とガスの元素組成から、星間でのガスの総質量はダストのその約100倍であることもわかる。

彗星塵の元素組成については、ハレー彗星から放出された塵のその場測定がなされており、星間塵組成と比較することが出来る。また、スターダスト・ミッションによるビルト2彗星からの塵のその場測定データも近い将来出てくるだろう。彗星から放出された塵の一部は、ポインティング・ロバートソン効果と呼ばれる力学的摂動を受けて徐々に太陽へ落ちて行く。このような塵は惑星間塵と呼ばれ、黄道光として観測されている。これら惑星間塵の中には、地球に降り注ぎ成層圏で採取されるものもあり、Interplanetary Dust Particles (IDPs) と呼ばれる。図1では、星間塵と彗星塵と惑星間塵の組成を比較している。これからわかるように、星間塵と彗星塵と惑星間塵の元素組成に大きな違いはない、これは、星間塵と彗星塵と惑星間塵が、進化の上で互に関連していることを考えれば、ごく自然な結果と言えよう。

塵の形状

星間塵と彗星塵と惑星間塵を構成しているシリケートの類似性が、赤外線スペクトルの観測から明らかである。IDPと彗星塵はフォルステライト特有の赤外線スペクトルを示す。また、彗星起源だと思われているIDPにはGEMS (glass with embedded metal and sulfides) と呼ばれる金属や硫化物を含むマグネシウムに富んだ非晶質シリケートが多く存在し、その赤外線スペクトルは星間塵のそれと類似している。IDPの分析からは、その元素組成比だけでなく、物質・形状・大きさまで詳しく調べられている。では、IDPの分析から星間塵と彗星塵の物質・形状・大きさについて学ぶことができるのではないだろうか。IDPはケイ酸塩物質が炭素質物質に纏われたサブミクロンサイズの粒子が群れをなして大きな凝集体（アグリゲイト）を形作っている。IDPの中でも、特に彗星起源だと思われているcluster IDPと呼ばれるアグリゲイトのサブミクロン構成粒子では、ケイ酸塩物質はGEMSに富み、炭素質物質は有機物に富んでいる。

これらIDPに見られるアグリゲイト状の構造は付着成長の証でもある。ここで、空隙率の高いアグリゲイトはポインティング・ロバートソン効果で太陽へ落ちる前に太陽輻射圧で系外へ飛ばされてしまうので、IDPとして採取されるのは空隙率が小さいアグリゲイトに限られるということに留意しておかなければならない。付着成長が分子雲中でも起きていることは、星間偏光の測定から推測することができる。

微小重力下での模擬実験や数値シミュレーションでは、原始惑星系円盤での付着成長した塵の形状はフラクタルで記述できることがわかっている。図2に示すように、弾道的衝突により凝集体同士が付着成長すると、フラクタル次元は2に近い値をとる。フラクタル次元が小さいほど空隙率は大きい。しかし、これまでの研究では、いつまでフラクタル的成長が続くのかは未だよくわかっていない。衝突破壊も考慮したアグリ

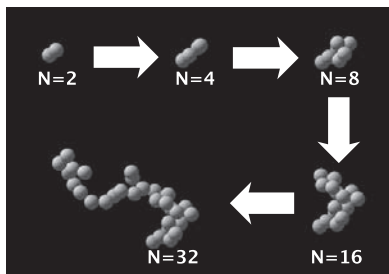


図2：塵の付着成長モデル。分子雲や原子惑星系円盤では付着成長によって塵は大きくなる。

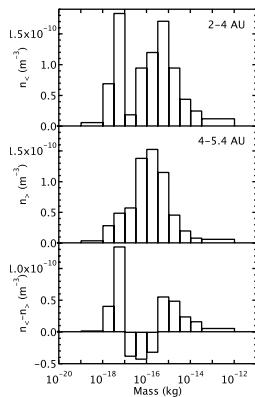


図3：太陽系で測定された星間塵の質量分布ヒストグラム [2]。塵に働く太陽輻射圧と太陽重力の大きさによって分布が太陽からの距離によって変化する。上段：2～4天文単位での結果，中段：4～5.4天文単位での結果，下段：4～5.4天文単位と比べて2～4天文単位での増分。

ゲイトの付着成長は、北海道大学低温科学研究所雪氷物性/惑星科学グループにて和田浩二博士を中心に目下研究中である。

塵の大きさ

塵の大きさを表す量として質量や断面積があるが、質量は那场測定によって直接わかる。現在の太陽系は Local Interstellar Cloud (LIC) と呼ばれる数パーセクスケールの典型的な希薄な星間雲をコンコルドの10倍にもおよぶ速さで横切っている。その結果として、星間塵が太陽系に流れ込んでおり、ユリシーズ惑星間探査機などによってその星間塵の流れが検出されてきた。図3では、ユリシーズによって検出された星間塵のサイズ分布をヒストグラムを用いて表している。太陽からの距離によってサイズ分布が異なっているのは、太陽の重力および輻射圧によって星間塵の軌道が曲げられて、空間数密度の増減が生じるためである。星間での塵の累積個数分布が質量のあるベキに比例するならば、星間でのベキが -0.67 ± 0.21 であることが導出できる [2]。また、星間でのガスの総質量はダストのその約100倍であることがユリシーズのダスト検出器とガス検出器からのデータを解析することによっ

ても確認された [1]。これから最大 10^{-11} kgまでの星間塵が存在することが示唆される。

ハレー彗星から放出された塵の質量分布はダスト検出器でその場測定された。面白いことに、ハレー彗星からの塵で測定された累積個数分布のベキは、星間塵のそれに近い。しかし、測定された塵の質量は 10^{-19} kgから 10^{-8} kgまでの広範囲にわたる。

ダストトレイルの観測や流星の観測からは 10^{-8} kg以上の質量を持った塵も彗星から放出されていると期待されている [3]。ハレー彗星のその場測定データから、大きな塵ほど総断面積に占める割合が大きかったことがわかった。したがって、彗星塵からの散乱光や熱輻射を観測すると、大きな塵からの寄与が多いと推測できる。塵からの光散乱・熱輻射の観測などリモートセンシングによって断面積を決定することは、塵の形状を知らない限り不可能である。

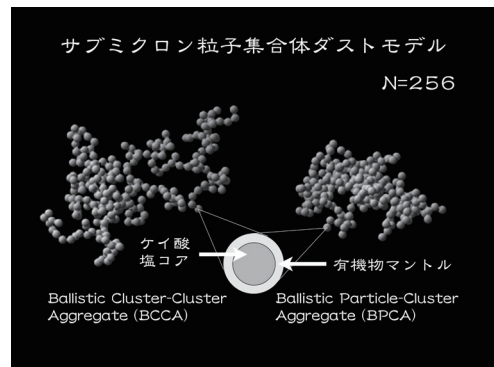


図4：ダスタグリゲイトモデル。構成粒子は半径70ナノメートルのシリケートと幅30ナノメートルの有機物からなるコア・マントル構造をしている。左のアグリゲイトは凝集体同士の衝突で付着成長したBallistic Cluster-Cluster Aggregate (BCCA)と呼ばれるもの。右のアグリゲイトは凝集体と構成粒子の衝突で付着成長したBallistic Particle-Cluster Aggregate (BPCA)と呼ばれるもの。

ダストモデル

上記の情報をもとに、塵を簡略化したモデルを図4に示す。ここでは、星間塵から彗星塵に至るまで、塵はサブミクロン粒子の集合体（ダスタグリゲイト）

とし、各々のサブミクロン構成粒子はコア・マントル構造を持っているとする(図4)。コアは岩石質物質(ケイ酸塩や硫化物や金属)、マントルは炭素質物質(有機物やアモルファスカーボン)からなると仮定する。ダストアグリゲイトの形状はフラクタルで記述する。以下に述べるように、モデルは簡素でも組成・形状・大きさのわずかな違いで様々な環境下における塵の観測結果を説明することができる。その違いは、塵の進化に伴う様々な変成に起因していると考えるのが自然であろう。表1のダスト相にあるそれぞれの元素を、星間塵・彗星塵・惑星間塵に比較的多く含まれると思われる物質、つまり、有機物に富む炭素質物質、マグネシウムに富むシリケート、鉄を含んだ硫化物や金属に割り当てると、それぞれの体積比が66%、28%、6%となる。ただし、質量比にすると岩石質物質と炭素質物質はほぼ同じである。この簡略化モデルで観測結果をどれほど説明できるのかを次に見ていくことにしよう。

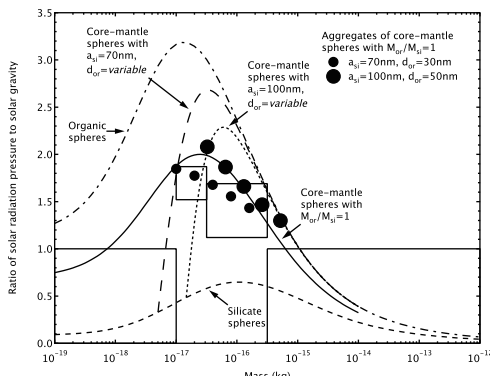


図5：星間塵に働く太陽輻射圧と太陽重力の比 β [2]。長方形はその場測定データから得られた β 値の範囲。小さな円で示された値は、半径70ナノメートルのシリケートと幅30ナノメートルの有機物からなるコア・マントル構造をした粒子の集合体である塵の β 値。

モデルの検証

図3の星間塵その場測定データから、星間塵に働く太陽輻射圧と太陽重力の比に制約が付く。星間塵に關しては、これまで数多くのモデルが提案されてきたが、

どれをとってもその場測定データを説明できるものはない。しかし、図5に示すように、有機物マントル・非晶質シリケートコアのサブミクロン粒子集合体ダストモデルから導出される太陽輻射圧/重力比は、その場測定データとよく一致する [4]。このアグリゲイトモデルは、観測された星間塵の中間赤外線スペクトルもよく再現できる。

可視光で観測された彗星塵の散乱光や偏光は、彗星塵の特性に依存しない波長依存性や散乱角依存性を示す。散乱光は、強い前方散乱と弱い後方散乱で形づけられる位相角の滑らかな関数で、波長と共に増加する(すなわち赤色)。偏光は、位相角が 90° より少し大きいところで最大を取るベルのような形をした位相角の滑らかな関数で、後方散乱領域では負になり、偏光度は波長と共に増加する(赤色)。これら彗星塵の散乱光・偏光特性を再現するために様々なダストモデルが提案された。その中でも、炭素質物質マントル・岩石質物質コアのサブミクロン粒子集合体ダストモデルだけが、図6にあるように、上述した彗星塵の光散乱特性を全て定性的に再現できる [5]。興味深いことに、アグ

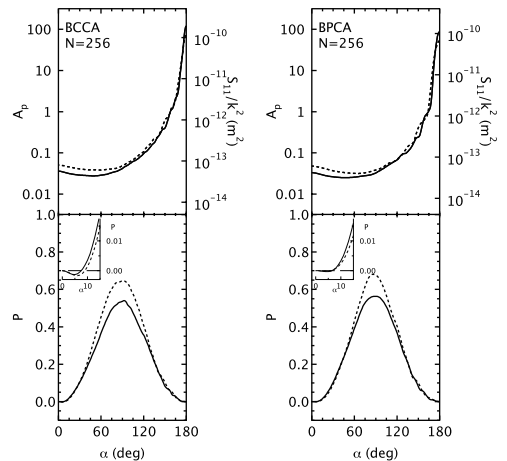


図6：彗星塵をモデル化したアグリゲイト塵のアルベド(A_p)と偏光度(P)の位相角(α)依存性 [4]。実線と点線はそれぞれ波長0.45ミクロンと0.60ミクロンでの結果。左はクラスターとクラスターの付着成長($D \sim 2$)で、右は一つの構成粒子とクラスターの付着成長($D \sim 3$)で形成された256個の構成粒子からなるアグリゲイトの場合。下段の小パネルは位相角 $\alpha = 0 \sim 15^\circ$ までの結果を拡大したもの。

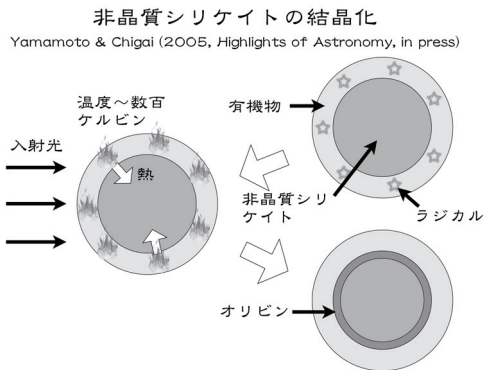


図7：非晶質シリケートの結晶化モデル。アグリゲイト塵の構成粒子は半径70ナノメートルのシリケートと幅30ナノメートルの有機物マントルからなるコア・マントル構造をしている。本来非晶質であるシリケートの表層10ナノメートルは有機物中の化学反応熱によって結晶質オリビンに変成する [6]。

リゲイトモデルでは、光散乱特性はアグリゲイトの形状や大きさにあまり依らない。従って、観測から示唆される彗星の特性に依らない光散乱特性を実現することができる。ただし、偏光観測結果を定量的に再現するには 10^{-11} kgかそれ以上の質量のダストアグリゲイトが必要となる。これは、ハレー彗星のその場測定データから推測される大きなダストが光散乱に寄与するという描像に一致する。

中間赤外線観測された彗星塵の熱放射スペクトルは、彗星ごとに異なる。オールト雲起源彗星ではフォルステライト特有の波長11.2ミクロン付近のピークを示し、カイパーベルト起源彗星ではそのピークを示さない傾向にある。この赤外線ピークはフォルステライトの存在を示唆する。非晶質シリケートを結晶化させるメカニズムとして、ここでは、北海道大学低温科学研究所雪氷物性／惑星科学グループの山本哲生教授が見いだしたすばらしいアイデアを拝借しよう [6]。彗星から放出された塵は、有機物中のラジカルの反応熱によりマントルの有機物の一部がカーボン化しコアのマグネシウムに富む非晶質シリケートの一部が結晶化すると仮定する (図7)。その結果、全ての彗星コマで塵はフォルステライトを含むと思われる。しかし、全ての彗星塵が同じ変成を受け同じ組成・物質か

らなっている、大きな塵では図8からわかるように、空隙率の高いダストアグリゲイトはフォルステライト特有のピークを示し、空隙率の低いダストアグリゲイトはピークを示さない。従って、オールト雲起源彗星からは空隙率の高いアグリゲイトが放出されカイパーベルト起源彗星からは空隙率の低いアグリゲイトが放出されると考えると観測結果をうまく説明できる。空隙率の違いは彗星核表層でのダストマントル形成と関連づけられる。すなわち、ダスト表層マントル形成時、ダストアグリゲイトの空隙率が減少するのである。ここでも、赤外線観測結果を再現するには 10^{-11} kgかそれ以上の質量のダストアグリゲイトが必要であり、ハレー彗星のその場測定データから推測される大きなダストが熱輻射に寄与するという描像に一致する。このモデルでは、従来、エンスタタイト起源だと考えられてきた9.3ミクロンのピークもフォルステライトだけで説明できる。

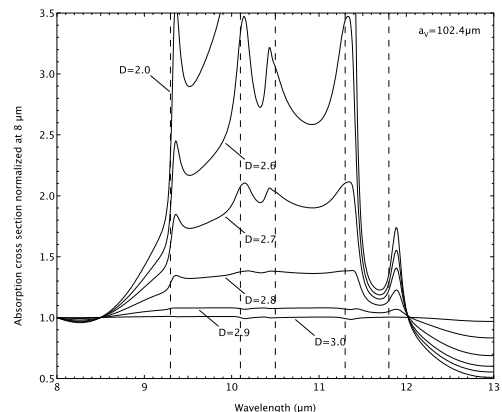


図8：彗星塵をモデル化したアグリゲイトの吸収断面積の波長依存性。アグリゲイト塵は半径70ナノメートルのシリケートと幅30ナノメートルの有機物マントルからなるコア・マントル構造をした粒子の集合体である。アグリゲイトの形状はフラクタル次元 (D) で特徴づけられ、体積は半径約100ミクロンの球と同じ場合、本来非晶質であるシリケートの表層10ナノメートルは結晶質オリビンに変成していると仮定 [6]。破線は彗星コマの観測で検出されたピーク波長。

塵とは何ぞや

これまでの結論をまとめると以下ようになる。星間から彗星コマに至るまで、塵はサブミクロン粒子集合体（アグリゲイト）であり、サブミクロン構成粒子はシリケートコア・炭素質マントル構造を持っている。星間では、非晶質シリケート（エンスタタイト組成）コア・有機物マントル構造をしたサブミクロン粒子からなるアグリゲイトで最大 10^{-11} kgの質量を持つ（図3と5）。彗星コマでは、最大質量は 10^{-8} kgかそれ以上の質量を持つアグリゲイトで、非晶質シリケート・有機物の一部は変成を受けてそれぞれ結晶化・カーボン化し、ダストマントルが形成された彗星では空隙率減少が生じていると考えることが出来る（図6と8）。このような認識が正しいかどうかは今のところまだ定かではなく、今後も塵の研究を続けていかなければならない理由はここにある。ただし、塵の進化を議論する上で、サブミクロン粒子集合体ダストモデルは重要な役割を担うと考えられる。

参考文献

- [1] Kimura, H., Mann, I., and Jessberger, E. K., 2003, *Astrophys. J.* 582, 846.
- [2] Kimura, H., Mann, I., and Jessberger, E. K., 2003, *Astrophys. J.* 583, 314.
- [3] Kasuga, T., Yamamoto, T., Kimura, H., and Watanabe, J., 2006, *Astron. Astrophys.* in press, doi: 10.1051/0004-6361:20065330.
- [4] Kimura, H., Kolokolova, L., and Mann, I., 2003, *Astron. Astrophys.* 407, L5.
- [5] Kimura, H., Kolokolova, L., and Mann, I., 2006, *Astron. Astrophys.* 449, 1243.
- [6] Yamamoto T. and Chigai T., 2006, In *Highlights of Astronomy*, Vol. 13 (ed. O. Engvold), *Astron. Soc. Pacific Press* in press.