

ダストの物質進化からみた惑星系形成

山本 哲生

〈名古屋大学大学院環境学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: ty@eps.nagoya-u.ac.jp

香内 晃

〈北海道大学低温科学研究所 〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目〉
e-mail: kouchi@lowtem.hokudai.ac.jp

宇宙における物質進化においてダストは様々な局面で重要な役割を担っている。本稿ではまず宇宙の物質循環におけるダストの役割やその組成を概観する。ダストの重要な組成の一つである有機物に焦点をあて、有機物の熱変成と力学物性の実験を紹介する。これらの実験に基づいた惑星形成の新たなシナリオについて論じる。宇宙における物質進化とその一環としての惑星形成の研究において、実験室実験に基づく物質科学的な研究の重要性を指摘する。

1. 宇宙の物質進化におけるダストの役割

ダスト（固体微粒子）は宇宙に普遍的に存在し、宇宙の進化の様々な局面で重要な役割を演じている。図1に銀河系内でのダストの循環を示した。

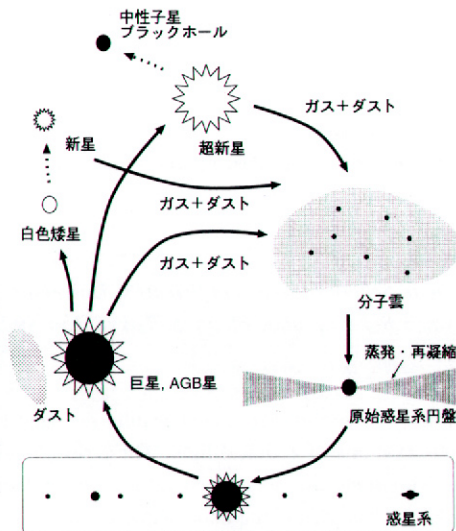


図1 銀河系におけるダストの循環

ダストは進化した星から放出されるガス中の重元素が凝縮することによって形成される。ガスの炭素/酸素存在比 (C/O 比) が1より小さいか大きいかに応じて、それぞれシリケートまたは炭素質ダストが凝縮する。星の周りで生成されたダストは星間空間に放出され、やがて星間分子雲に取り込まれる。分子雲ではC, N, O (およびこれらと結合したH) のような比較的軽い元素もダストの組成となる。これらの元素からなる分子はシリケートや炭素質ダストの表面に「凍りつき」、 H_2O , CO , CO_2 などの組成の氷マントルを形成する。ダストの表面は星間分子生成の触媒や高分子生成の役割も演じる。ダストの氷マントルは紫外線や宇宙線の照射を受けて高分子の有機物へと変成する。物質科学的な視点からみると、分子雲は雲内のガスから氷や有機物を生成する化学工場といえる。やがて分子雲内で星とその周りに原始惑星系円盤が形成され、惑星系が誕生する。星は赤色巨星まで進化するとその周りにダストを形成し、再び循環を繰り返す。

銀河系における物質循環の過程で、ダストは重元素の濃縮、星間分子や氷、有機物の生成、さら

には惑星の素材としての役割を演じる。これらの過程の研究においては、観測や理論に加えて地上の実験室での実験も重要な研究手段である。わが国においてもガスからダストへの凝縮過程と生成されたダストのミクロな構造や光学的性質の研究、氷表面での分子生成や氷への紫外線や荷電粒子の照射による有機物生成の実験、ダスト粒子の衝突実験やダスト集合体の力学物性の研究が現在活発に行われている。また隕石中の粒子と星間ダストとのリンクを解明する研究も盛んになりつつある^{1)~5)}。特に太陽系組成と大きく異なる同位体比をもつ隕石粒子 (presolar grains) は、星間ダストの誕生から惑星形成に至る過程を記録しており、天文学と惑星科学の橋渡しをする粒子でもある。わが国におけるこれらの研究の進展は、関連分野の研究者の参加を得て 20 年以上にわたって開催されてきた Grain Formation Workshop によるところが大きい。文献 6), 7) も参照。

本稿では多様な物質科学的研究のうち、有機物の研究に話題を絞り、有機物が惑星形成において演じる役割について議論する。

2. Why 有機物ダスト?

表 1 に主な元素とそれらが作る物質相をまとめた。

難揮発性ダストの主成分であるシリケートと鉄の構成元素は Mg, Si, Fe, Ni とそれらと結合した酸素 O である。一方、H と He の大部分はガスとして存在する。宇宙の元素存在比からシリケート (例えば Mg_2SiO_4) および鉄のダストとガスとの質量存在比は 3×10^{-3} に過ぎない。一方、星間分子雲では C, N, O もダストの氷や有機物成分となり得る。これらの元素を含めると、ダストとガスの質量比は 2×10^{-2} となる。もちろん、C, N, O のすべてがダストになっている訳ではないので、この値はダスト/ガス比の最大値である。しかし、このことを考慮しても氷や有機物はダストの重要な成分であることに変わりはない。実際、ハレー彗星探査では多量の有機物ダストが直接検出された。星間分子雲の赤外観測からも氷や有機物の存在を示すスペクトルが普遍的に観測されている。

従来、惑星物質科学や惑星形成論ではシリケートや金属 (鉄)、氷が固体物質として想定されてきた。氷は低圧下では低温環境 (100–200 K 以下) でしか存在できないのに対して、有機物はより高温になっても安定に存在できる。このため、氷は木星型惑星の形成域でのみ安定に存在できるのに対し、有機物は地球型惑星の形成にも関与できる。言うまでもなく有機物は生命の素材でもある。

表 1. 主な元素の存在比と化学的性質

	揮発度	相*	結合の種類	存在比				
H } He }	超揮発性	気体		10 ¹⁰				
C } N } O }					超揮発性 揮発性 やや難揮発性	気体 氷 有機物	水素, van der Waals 化学	10 ⁷
Mg } Si }	難揮発性	岩石質	化学	10 ⁶				
Fe } Ni }								

*) 低圧, 温度 = 10 ~ 1000 K での相

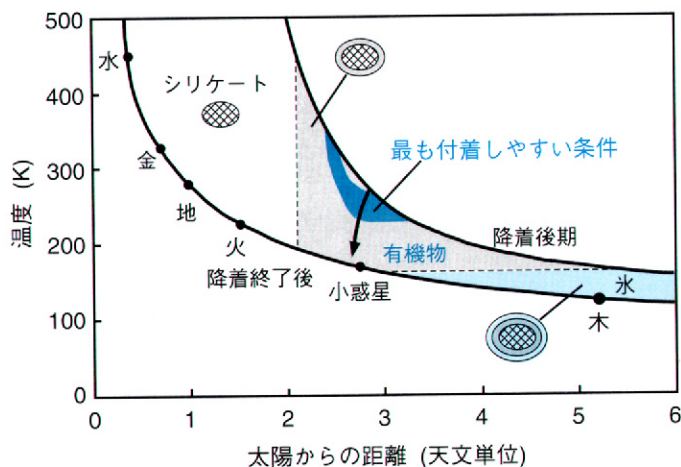


図2 原始太陽系円盤でのダスト物質の分布

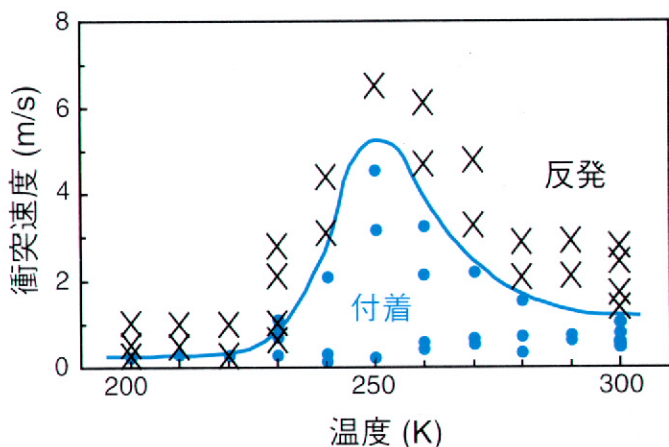


図3 有機物の衝突実験結果.

3. 有機物の加熱蒸発実験

原始太陽系円盤での有機物の分布を明らかにするために、有機物の加熱実験をおこなった^{8), 9)}。その結果、100℃までに有機物の約75%が蒸発し、180℃までに大部分の有機物が蒸発してしまうことがわかった。実験室での加熱温度を降着後期の原始太陽系円盤 (active disk) の温度分布に読み替えると、円盤内のダスト物質の分布が再現できる (図2参照)。2.1 AU よりも内側では、シリケ-

ト・ダストのみが存在する。有機物が存在したのは2.1 AU よりも外側であることが分かる。それより外側では、さらに氷マントルが表面をおおう。図においてシリケートと有機物の境界線が縦になっているのは、有機物は、降着円盤の温度では CH_4 や CO_2 、 H_2O などの小さな分子に分解されて蒸発し (熱分解)、温度が低下した際にも再凝縮しないことによる。一方、有機物と氷の境界線が横になっているのは、 H_2O が160 K以下の温度で氷として凝縮するためである。

4. 有機物の衝突付着実験

次に、有機物が惑星成長の初期過程にどのような影響を与えたかを調べるために、有機物の衝突実験をおこなった^{8)~10)}。図3に有機物の付着臨界速度の温度依存性を示す。付着臨界速度は温度が下がるにつれて増加し、250 K 付近で最大5 m/s に達する。さらに温度が下がると、付着臨界速度は減少する。mm サイズの他の物質の場合、鉱物では0.15 m/s の衝突速度でも、氷では0.015 cm/s の衝突速度でも付着は観測されていない。これらと比較して、

mm サイズの有機物ダストは、氷や鉱物より数桁も大きな数 m/s の衝突速度でも付着する。この結果から、原始太陽系円盤で有機物がダスト表面に存在した領域では、乱流状態になっている降着期の円盤においても、ダストやそれらの集合体の成長が急速に進んだと結論される。

5. 惑星形成論への示唆

原始太陽系円盤が、降着期 (active disk) から降着終了後 (passive disk) へと進化する過程で、ダスト

物質が惑星系の形成に与えた影響を考えてみよう。

図2には、有機物による付着効果が最大となる温度（青く塗りつぶした領域）も示した^{8)~10)}。時間とともに円盤の温度が低下した場合、最大10 m/sの乱流があるにもかかわらず、青く塗りつぶした領域で最も効率的なダストの付着・凝集成長が起こった。一方、ダスト表面に氷が存在した木星領域やシリケートが存在した地球領域では、乱流のため付着・凝集成長は起こらなかった。したがって、「原始太陽系円盤で有機物がダスト表面に存在した小惑星領域（2.5-3.5 AU）では、星雲が乱流状態にあるにもかかわらず、ダスト集合体や微惑星の成長が急速に進行した」と結論される。この点がこれまでの太陽系形成標準モデルと大きく異なる結論である。

小惑星の起源は不明な点が多いものの、おおむね次のように考えられている。

(a) 現在、小惑星領域に存在する固体物質が非常に少ない（標準モデルの面密度より3-4桁少ない）のは、木星によって材料物質が飛ばされてしまった。

(b) 通常の惑星に比べて小さな天体が多数あるの

は、星雲ガス散逸後に大きな天体が高速衝突によって破壊されたからである。

しかし、有機物の効果を考慮すると、小惑星の起源についてもこれまでと全く異なる説が提案できる^{8)~10)}。(a)の「固体物質が非常に少ない」のは、次の理由による。降着後期には、星雲が乱流状態にあるにもかかわらず、有機物の付着効果によって小惑星は急速に成長した(寡占成長)。小惑星に取り込まれなかった1m程度のダスト集合体(質量では大部分を占める)は、ガス抵抗によって急速に内側に落下した。そのため2-3.5 AUでは小惑星の材料物質が急速になくなってしまった。したがって、小惑星領域に固体物質が非常に少ないのは、「固体物質がガス抵抗によって内側に落下した」からである。(b)の「小さいものが多数」あるのは、材料物質がガス抵抗で落下してしまい、「大きくなれずに成長が止まった」ためである。小惑星で破壊が重要になってくるのは、木星形成後で、しかも星雲ガス散逸後の高速衝突が起こりうる段階であるが、この時には、すでに小惑星領域の基本的な姿はできあがっていた。

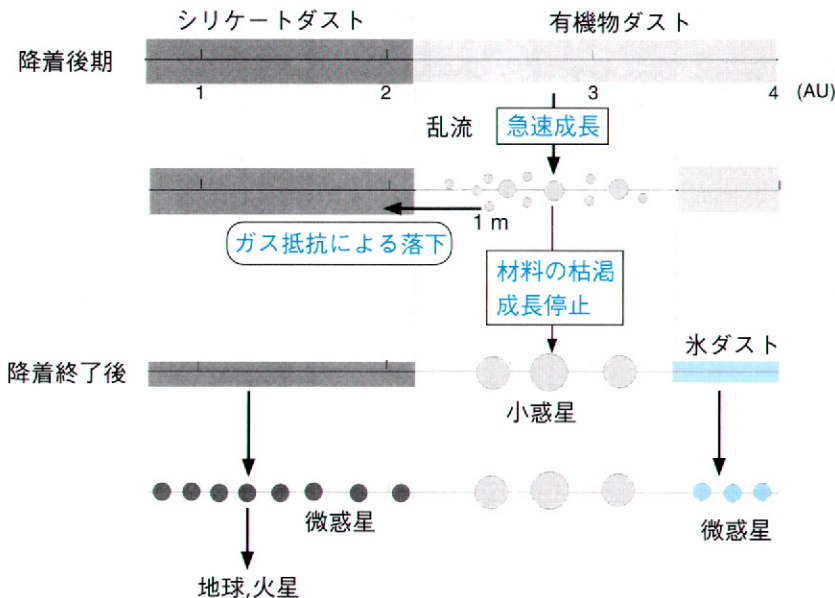


図4 小惑星の形成過程

6. 惑星形成論の新たな展開に向けて

実験室実験で明らかにされた結果が惑星形成論に与える効果の一例について論じた。このシナリオは今後様々な側面から検討する余地が残っているものの、物質科学的な考察が惑星形成論に新しいアイデアを導入することを示している。

隕石物質の分析を始め、これまで惑星物質科学の研究成果は膨大に蓄積されている。本稿で紹介した実験以外にも、第1節で述べたような研究分

野においても、わが国で先導的な独創的研究が多く行われてきた。物質科学的な素過程の実験的研究とその理論的な一般化は観測情報を読み解くツールの開発にも寄与することができる。これまで活発な研究が展開されてきた力学的惑星形成論と物質科学的研究のリンクを今後強める必要がある。惑星系形成のより実証的な総合的研究を進めることによって、第2の地球の発見や宇宙における生命探査にもつながる新たな研究の展開を旨ざしたい。

参考文献

- 1) Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials, ed. T. Bernatowicz and E. Zinner, AIP Conf. Proc. vol. 402, American Institute of Physics, 1989
- 2) Chigai T., et al., 2002, Meteoritics Planet. Sci. 37, 1937
- 3) Chigai T., et al., 2003, ApJ, in press
- 4) Tanaka K K., et al., 2003, Icarus, 160, 197
- 5) Kimura Y., Kaito C., 2003, MNRAS, in press
- 6) Formation and Evolution of Solids in Space, eds. Greenberg J.M., Li A. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), 1999
- 7) Laboratory Astrophysics and Space Research, eds. Ehrenfreund, P., Krafft, C., Pirronello, V. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), 1999
- 8) Kouchi A., et al., 2002, ApJ, 566, L121
- 9) 香内 晃 他, 2001, 遊星人 (日本惑星科学会), 第10巻, 第1号, 11 ページ
- 10) Kudo T., et al., 2002, Meteoritics Planet. Sci. 37, 1975

Role of Dust in Formation of the Planets

Tetsuo YAMAMOTO

*Department of Earth and Planetary Sciences,
Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan*

Akira KOUCHI

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan

Abstract : Dust grains are ubiquitous in space and play various important roles in the evolution of matter in space. This article provides first a brief overview of the roles of dust in the evolution of matter in space and its composition. We focus on organic materials, which are one of the important components of the dust, and present the recent results of the experiments of thermal alteration of the organic materials and of their mechanical properties. On the basis of the experimental results, we discuss a role that the organic materials played in the formation of the planets, and propose a new scenario suggesting rapid growth of the parent bodies of asteroids.