

ダストの生成

山本哲生, 長谷川博一*

1. はじめに

宇宙の空間のほとんどすべての場所に、固体微粒子——ダスト——が存在している。星間空間のダストは星の光の減光と赤化を起す。まわりに濃いダストの雲をもつ星は、赤外線星として観測される。新星では、爆発して数日後、放出されたガスの中でダストが凝結する。銀河系の中心部にも、原始星が誕生しつつある暗黒星雲の中にも、多量のダストがある。これら、さまざまなダストの源はなんであるだろうか。

太陽系に目を転じると、惑星間空間のダストは、黄道光に、彗星の尾に、地上に降下したいわゆる「宇宙塵」に、また月の岩石表面のマイクロクレターに、その姿をあらわし、space vehicle によって直接観測される。

太陽系の起源に関しても、ダストは重要である。原始太陽系星雲の中でのダストの生成過程の記録は、隕石の中に残っている。この記録を読み取るコードは惑星系誕生の秘密を解く鍵である。

2. ダスト生成の物理的過程

固体になりやすい物質の蒸気を含んだガスが冷えていくと、ある温度で固体の飽和蒸気圧と、ガス中の蒸気の圧力とが等しくなる。この温度は、蒸気と固体の大きな塊とが共存しうる温度で、平衡温度と呼ばれる。しかし、名の示す通り、これは熱平衡の状態である。しかし、この状態では固体の凝結は起らない。さらに温度がさがって、過冷却の状態になってはじめて固体の微粒子——ダストが生成される。

過冷却の蒸気の中で、蒸気分子が何個か集まったもの（クラスター）ができる。1個のクラスターに注目すると、周囲の蒸気分子の付着と、分子のクラスターからの離脱が確率的に起るので、クラスターの大きさは時間的に変動する。クラスターが小さいうちは、離脱確率が付着確率より大きいが、クラスターの大きさがたまたまある限界の大きさを越えると、付着確率の方が大きくなるのでクラスターは蒸気分子をつぎつぎに付着させて固体微粒子へ成長する。この限界の大きさのクラスターはいわばダストの「たね」であって、凝結核と呼ばれる。そして、このようにして過冷却の蒸気中で凝結核がつけられる現象を核生成 (nucleation) という。

凝結核の大きさと、凝結核の生成率とは、凝結する物質の表面張力の大きさと、蒸気の過飽和比すなわち蒸気の圧力と飽和蒸気圧との比によってきまる。表面張力が小さく、また過飽和比が大きいほど、凝結核の大きさは小さく、凝結核の生成率は大きい。つまり、ダストはできやすい。特に過飽和比がある臨界値に達すると凝結核の生成率が急激に増加するという性質は、現象の全体像を描くうえで重要である。

冷えつつある蒸気に対しては、時間の経過とともに飽和蒸気圧が減少するので過飽和比は増加し、図1に示すように、ある時刻で核生成率が急激に増加する。このときつくられた多数の凝結核はまわりの蒸気分子を付着させてダストへと成長する。このとき重要なことは、原料となる蒸気分子が消費されることである。最近では、地球は有限である、とよく言われるが、宇宙のガスといえども限りがある。原料分子が消費されると、過飽和比は減少し、過飽和比に敏感な量である核生成率は急速にゼロに近づく。すなわち、核生成は実際には非常に短い時間のあいだに終わってしまう。そして、その後は新たな「たね」は生成されないうまま、さきに出来た核だけが蒸気分子を付着させて大きくなり、原料の蒸気分子を消費しつつして（厳密には過飽和比が1になって）その成長を止める。図1には、ダストの半径の増加と、原料分子の消費の様子とをあわせて示した。

このように、冷えつつある蒸気からのダストの生成は、平衡温度に達した瞬間に起るのではなく、①核生成までの待ち時間、②核生成 ③核からダストへの成長という3段階を経過する。各段階の継続時間の比は、1:1/100:1/10のオーダーである。特に①の過飽和状態の継続時間は、実際に蒸気が固化する温度が平衡温度からどれだ

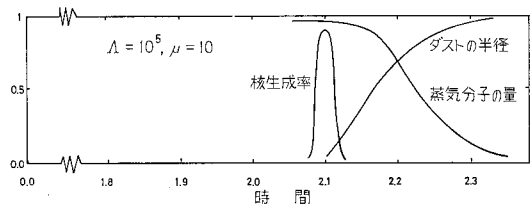


図1 ダストの生成過程。パラメータ A, μ については本文参照。時間の原点は平衡温度に達した時刻をとり、その単位は温度低下によって過飽和比が e 倍になる時間を1とする。ダストの半径は最終半径を、蒸気分子の量は時刻0での量を単位にとらえる。核生成率は任意単位。

* 京都大学理学部 T. Yamamoto, H. Hasegawa: Formation of Dust

け降下しているかをきめる量で、次節で述べる原始太陽系星雲の中でのダストの生成に関し特に重要である。

上に述べたように、ダストの生成過程は、蒸気の分子の付着による凝縮核の成長と、原料となる蒸気の分子の消費とで特徴付けられる。この2つを表わす方程式の性質を調べてみると、これらは2個のパラメータだけで特徴づけられる。第1のパラメータ A は、ダストが生成される環境の物理的条件によってきまるもので、蒸気の分子の密度に比例し、その冷却速度に反比例する。ダストは宇宙のいろいろな場所で生成されるであろうが、それぞれの場所の物理的条件の違いがこのパラメータ A に反映する。これに対して、ダストの物質の種類の違いは、その表面張力に比例する第2のパラメータ μ を通してあらわされる。このような一種の相似則が見出されることは、ダストの生成過程を見通しよく調べるのに大いに役立つ。

図2には生成されるダストの半径を示す。パラメータ μ については、 $\mu=10, 20, 30$ がそれぞれグラファイト、シリケート鉱物、鉄にほぼ対応している。 μ の物質による相違はこの程度のものであるのに対して、パラメータ A は、ダストが生成される場所によって、10桁近くも違う。従って、實際上ダストの半径は物理的条件をあらわすパラメータ A にほぼ比例することになる。すなわち、

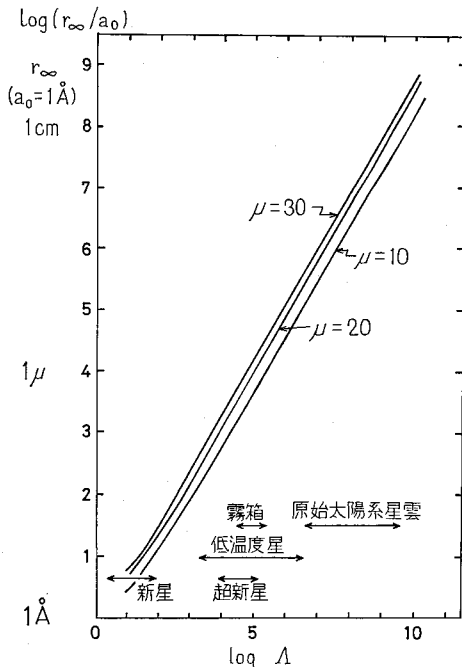


図2 生成されるダストの最終半径 r_∞ と A, μ の関係。
 a_0 は固化した物質の分子半径。たて軸の $1\text{cm}, 1\mu, 1\text{\AA}$ は $a_0=1\text{\AA}$ としたときの値である。図中 \longleftrightarrow の記号は、それぞれの場所について今まで想定されている物理的条件からきまる A の範囲を示す。

ダストの大きさは、それがつくられた場所の環境を推定する重要な量である。

生成されるダストの総数もまた、パラメータ A と μ とできまるが、ダストの半径の場合と同じく μ にはあまりよらない。そして、ダストの総数と原料分子の総数との比はほぼ A^3 に反比例する。したがって、濃いガスがゆっくり冷える原始太陽系星雲のような場所では、少数の大きなダストができる。これに反して、新星から放出されたガスのように、希薄で、冷却の速い場所では、多数の小さなダストができることになる。

3. 原始太陽系星雲中でのダストの生成

原始太陽系星雲中での固体の生成について、上に述べた理論はどのような新しい知見を与えるであろうか。

今まで、この問題は主として化学平衡論によって研究されてきた。すなわち、宇宙元素組成をもつガスが冷えるとき、析出する鉱物の種類と固化温度とは、化学平衡の式と、原子数保存の式とから求められた。その結果は、隕石、特に始源的と考えられる炭素質コンドライトの観測と比較され、物質固化の時点での全圧力や温度の推測がされた。ところが、この理論は本質的には平衡論の立場に立っている。前に述べたように、冷えつつあるガス中での固体の生成は本来、非平衡的な過程として取り扱われなければならない。

原始太陽系星雲の物理的条件のなかで重要なものは、その冷却速度である。前節に示した理論によれば、ダストの大きさは、ガス圧と冷却速度とを含むパラメータ A からきまる。表1には、高温鉱物の代表としてコランダム (Al_2O_3)、マグネシウムシリケートの代表としてフォーステライト (Mg_2SiO_4 、かんらん石の主成分) をとり、その半径を示してある。前にのべたように、ガス圧と冷却速度とから A がきまり、さらにダストの半径がきまる。もし隕石中に、蒸気から固化し、その後何等の変成を受けなかった「始源的な粒」が同定できれば、その大きさから原始太陽系星雲の冷却速度を推定できるであろう。

つぎの問題は、種々の鉱物間の固化の順序である。前節の理論によれば、実際に固体——ダスト——が生成さ

表1 宇宙元素組成をもつガスから固化するダストの半径。等しいガス圧、冷却速度におけるコランダム、フォーステライトの半径の違いは、ガス中のアルミニウムとマグネシウムの組成量の違いによる。

ガス圧 (atm)		10^{-8}			10^{-6}		
冷却時間 (sec)		10^6	10^7	10^8	10^6	10^7	10^8
半径	コランダム	3.4μ	2.9μ	24μ	13\AA	78\AA	550\AA
	フォーステライト	3.5μ	29μ	250μ	92\AA	660\AA	0.5μ

れるのは決して平衡温度においてではなく、過冷却の状態においてである。このときの温度降下は、表面張力の 1.5 乗に比例する。

原始太陽系星雲中で固化する物質の主要成分は、マグネシウムシリケートと鉄である。今までの化学平衡論では、これらの物質の固化の潜熱の違いから、全圧力 10^{-4} atm 以上では鉄が先に固化することになる。図 3 に示された全圧力 10^{-3} atm の場合では、鉄は 1468K で固化し始め、フォーステライトが固化し始める 1444K では、鉄はその 46% がすでに固化していることになる。

このような固化の順序は、惑星系形成の化学的な歴史の上で非常に重大なことと考えられてきた。化学者の中には、先に固化した鉄がまず集まって地球型惑星のコアをつくり、おくらせて固化したマグネシウムシリケートがそのマントルになるという説もつくられた。

しかし、この固化の順序は変更されなければならない。図 3 には、冷却速度が 1 桁異なる 2 つの場合を示しているが、どちらでも本質的な違いはない。すなわち鉄のダストは、その大きい表面張力のために、平衡温度から約 200K も低い状態になって始めて生成される。他方マグ

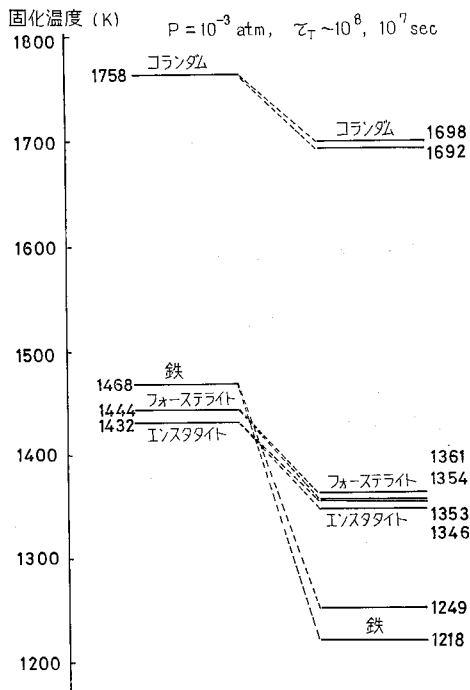


図 3 全圧力 $P=10^{-3}$ atm の宇宙元素組成をもつガス中で高温鉱物が固化する温度。鉄は金属鉄、エンスタタイト ($MgSiO_3$) は輝石の主成分である。左側のレベルが平衡論による計算値、右側のレベルが過冷却効果を取り入れた計算値を示す。右側のレベルで各物質に 2 つのレベルが示されているが、それぞれの物質に対して、上側が冷却のタイムスケール τ_T が 10 sec、下側が 10^7 sec の場合。

ネシウムシリケートは、1350K 付近でダストになってしまう。

以上、簡単にダスト生成の理論から導かれる新しい知見を述べた。現実の凝縮過程はさらに複雑であろうし、隕石に埋もれた暗号は極めて難解であって、われわれはようやく狭き門の入口の一つを探しあてたばかりである。

4. 星間空間のダスト

星間空間のダストが生成される場所としては、低温度星の大気中や、新星・超新星の爆発時に放出されるガス中などが考えられている。特に新星は、ダスト生成過程の時間的経過が観測できる点で、魅力的な宇宙実験室と言えよう。

話は、1970 年のへび座新星 (Nova Serpentis 1970) に、ガイゼル、クライマン、ロウが赤外の眼を向けたことに始まる。この新星は発見されて約 55 日後から、赤外線線の急激な増光が始まり、同時に可視光の急激な減少を示した。赤外放射は黒体温度約 1000K に相当するものであった。赤外線の強度は 90 日後に極大に達し、その後はゆっくり減少していった。極大時の赤外放射の量は、発見直後の全放射量（主として可視と紫外）に匹敵する (図 4 (a))。

このような、新星爆発後数十日を経て、突然の赤外線線の増光と可視光の減少とは、1976 年のこぎつね座新星 (Nova Vulpeculae 1976) ではさらに詳細に観測されている。図 4 (b) は京大上松赤外線観測室での観測結果で、10 月 21 日に発見されて約 50 日後の 12 月中旬から急激な赤外線線の増光と可視光の減光が始まり約 150 日で完了した。その後は、150 日間で 3.5 等の割合できわめてゆっくり減光した。

この著しい赤外線線の増光こそ、ダストの生成の証拠である。新星から放出されたガスは秒速 1000 km の程度で膨張し、数十日後にガスが 2000K、あるいは 1000K という温度まで冷えると、その中でグラファイトあるいは

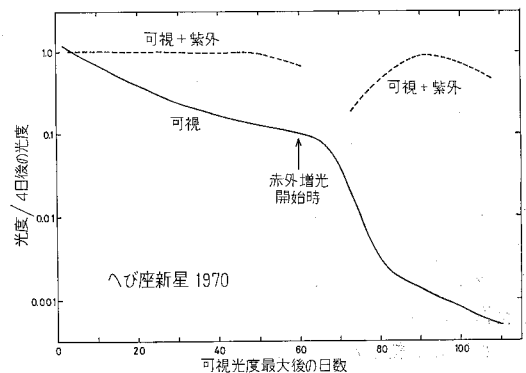


図 4 (a) へび座新星の可視光、赤外線、紫外線域における光度曲線 (Gallagher, Astron. J. 82, 209, 1977 による)。

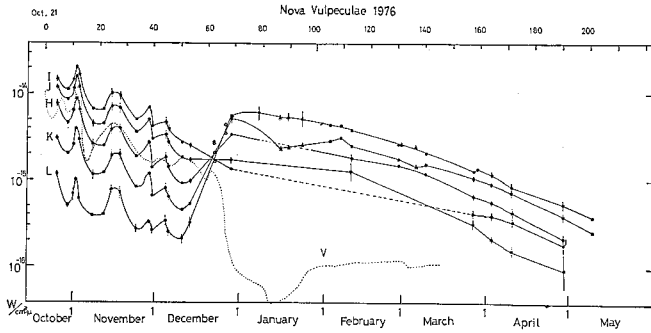


図 4 (b) こぎつね座新星の赤外線 ($I=1.0\mu$, $J=1.25\mu$, $H=1.65\mu$, $K=2.25\mu$, $L=3.7\mu$) および可視光 ($V=5500\text{\AA}$) の光度曲線。

はシリケート鉱物や鉄などの凝結核が生成され、ダストへと成長する。ちなみに、この凝結核生成は約1日で完了する。ダストは、中心星の光を吸収し、赤外線として再放出する。ダストの単位表面積当り放出する赤外放射の量は、赤外線の波長に比べて小さいダストに対しては、ダストの半径に比例する。従って、1個のダストの放出する赤外放射は、ダストの半径の3乗、従ってその体積に比例する。だから結局、赤外放射の総量は、固化してダストになっている物質の総量に比例する。こぎつね座新星に観測された約20日の赤外線増光の立ち上がり時間は、個々のダストの成長であるが、ダストの生成が放出ガス中の全域にひろがるか、ともかくダストの生成が進行している時間である。そして、それに伴って中心星の光の、ダストによる吸収量が増加し、観測される可視光は減少する。その後は、ダストは中心星からの光の吸収と赤外放射とのバランスでできる温度をもって、中心星から遠ざかっていく。

生成されるダストの種類をきめるのは、放出されたガス中の炭素原子と酸素原子との個数比 (C/O 比) である。山本、西田は C/O 比が1より小さい場合の典型として宇宙元素組成を仮定し、シリケート鉱物のダストを考察した。このときには、鉄のダストも生成される。これらの物質が固化する温度は1000K前後である。いっぽう、クレイトン、ヴィクラマシンは C/O 比が1より大きい場合について約2000Kでグラファイトのダスト生成を論じている。この場合、炭素原子のごく一部でもグラファイトにならないで残れば、シリコンカーバイド (SiC) のダストも生成されるであろう。今まで観測された赤外スペクトルは黒体的で、シリケート鉱物 (および SiC) に特徴的な波長 10μ 付近のピークは確認されていない。いずれにせよ新星から放出されるガスの C/O 比が、問題を解明する重要な鍵である。

さて、§2の議論によって新星がつくるダストの大きさや個数を推定すると、ひとつの興味ある結果が導き出

される。新星が放出するガスの総量を太陽質量の 3×10^{-5} 倍ないし 3×10^{-8} 倍とし、ガスの膨張速度を秒速1000kmとすると、パラメータ A は、シリケート鉱物と鉄とに対して、1ないし 10^2 となる。(図2参照) この値は、ダストの生成が考えられている他の場所での値にくらべてかなり小さく、半径 100\AA 以下のダストが非常に多数つくられることになる。星の光の星間減光曲線をもとに、星間ダストのモデルとして、多数の微小な (100\AA 以下) ダストと、比較的少数のサブミクロンサイズのダストからなる2成分モデルが提案されている。新星はこのうち微小なダストの供給源である可能性が大きい。

他方、サブミクロンサイズのダストの源については、図2から低温度星の大気が有力な候補者としてうかがいあがる。もちろん今の段階ではこのような議論は、いくつかの矛盾、不完全さを含んでいるが、星間空間のダストの大きさと組成を、その源と結びつけるものとして今後の新しい研究の一つの方向を示すものであろう。

宇宙のダストを地上の実験室でつくる試み、それはこの中でふれたかったことの一つであるが、与えられた枚数も尽きた。上条文夫氏の天文月報66巻6号(1973)の興味深い解説を参照されたい。

学会だより

山田科学振興財団 53年度研究援助申請の募集について

この度、昭和53年度分として、次の四件の研究援助申請の公募が行われる旨連絡がありましたのでお知らせ致します:

1. 学術交流集会援助
申請受付期間 昭和53年4月1日～昭和53年5月31日
2. 招へい援助
申請締切り期日 招へい予定日の6ヶ月前の日
3. 短期招へい援助
4. 派遣援助
申請締切り期日 出発予定日より4ヶ月前の月の15日

なお、上記援助申請要領及び申請書は参考として夫々1部ずつ学会宛に届いておりますが、申請要領と申請書様式は改定されております。詳しくは、

〒544 大阪市生野区巽西1丁目8番1号

ロート製薬(株)内 財団法人山田科学振興財団

電話 大阪(06)758-1231(内線428)

に御照介下さい。