

塵粒子の凝集実験

尾 中 敬*

まずはじめに

表紙写真をごらんいただきたい。天文の雑誌ではあまり見られない妙なものが写っている。銀河の写真でもないし、太陽表面でもない変な粒々が見られるだろう。これは、われわれが室内実験で作っているシリコンの微粒子で、大きさは 100 \AA 程度のものである。こんなに小さなものなので、普通の光学顕微鏡ではなかなか調べられない。この写真は電子顕微鏡を使って撮影したもので、数万倍に拡大されている。天体写真の方は実際の大きさを何兆分の1かそれ以上に縮めたものになっているわけだから、大きさの点では正反対の写真と言えるだろう。宇宙空間にはこの様な固体微粒子がたくさん漂っているものと思われていて、「星間塵」(つまり宇宙のチリ)と呼ばれている。大きさは 100 \AA から 1000 \AA ぐらい、種類も珪酸塩や金属などが考えられている。われわれのグループ(上条, 中田と筆者)は、こういった微粒子を室内実験で作って、その性質についていろいろ調べようとしている。われわれが実験を始めたきっかけ、及びその天体現象との関連についてはすでに上条が詳しく書いている(天文月報 66巻6号)ので、そちらの方を読んでいただきたい。

最近では外国でも二、三のグループで、天体現象と関連のある微粒子を実験室内で作って調べる研究が進められている。その背景には、赤外観測などが発展したために、星間塵についての情報が増加し、またその情報が精密になってきたことがあげられる。特に観測が精密になったために星間塵の性質がかなり限定されることになり、星間塵の候補者も相当具体的なものになってきている。例えば、単に珪酸塩といってもいろいろな種類のものがあり、そのうちでも輝石はあまりよく合わないが蛇紋石ならばよい、といった様な天文屋には耳慣れない言葉が出てくる議論もされている。また一方、数 100 \AA の大きさの微粒子については、われわれが日常手にしているものとは違った振舞いをすることが知られている。原子・分子の大きさまで小さくなれば、一つの極限世界として精密な理論も展開され、多くのことがわかっているのだが、微粒子という大きさは、普通のものの大きさと原子・分子の大きさの中間にあたっているために、両方からの理論的外挿が微妙なところで、どこまでそういう外挿が有効かということが難しい大きさなのである。実験的な研究が必然的に重要となってくる。こういうこ

とも背景にあって、天文の分野でも関連のある微粒子を作って性質を調べる研究が進められているのだろう。今回ここで紹介したいのは、微粒子の性質でもそのうち特に「凝集」ということについて、われわれのグループで調べた結果である。次に、この微粒子の

凝集とはどういうことか

ということに話を進めよう。

みなさんは「凝集」と聞くとどんな様子を想像されるだろうか。ちなみに辞書を引いてみると、「こりあつまること」と書かれてあってあまり参考にならない。頭の中で考えていても進展がないのでもう一度写真を見ていただこう。よく見ると粒同志がぶどうの房の様にくっついていくつかの集団をなしていることがわかるだろう。この現象を、われわれは「凝集」と呼んでいる。あまりこったところはなくて、ただ集まっているだけの様でもあり、「凝集」というのは必ずしも適当ではないかもしれない。「集団化」とでもした方がよいかもかもしれない。なお、われわれはこの微粒子の集まりを、「クラスター」(集団)と呼んでいる。

こういう凝集の過程は、理論的には微粒子の成長の一過程としてとらえられている。微粒子は、まず何がしかの“たね”からまわりの原子あるいは分子を集めて成長してゆく。凝集はその後の第二段階の成長過程で、微粒子としての形ができたあとでのお互いの衝突により付着して成長してゆく過程である。“たね”の成長が少年期の成長とたとえるなら、この凝集過程は青年期の成長とも言えるものであろう。この型の成長については、理論的な考察はいくつかあるものの、実際に実験的に固体微粒子に対して調べられた研究はまだない。われわれは、今までの微粒子を作ってきた方法を多少工夫してこの問題を調べてみようと考えた。次に実験の方法の話を始めたいのだが、その前にこういった「微粒子の凝集」が実際の天体現象としてはどういうところで起きているのかを簡単にみておこう。

凝集はどんなところで起こりやすいのだろうか。お互いの衝突が原因で起こる現象であるから、微粒子がたくさんあるところで生じやすいことはすぐ想像がつく。それでは、微粒子(星間塵)が多いところというところ——いろいろな観測や推定される物理条件から、星間塵は赤色巨星のまわりや濃い星間雲の中に多く存在していると考えられている。偏光の変化などから、この様なところで空間的・時間的に星間塵が成長していると解釈される観測結果も得られていて、凝集成長による説明も考えられ

* 東京大学・理学部 T. Onaka: Experiment on the clustering of dust grains

ている。しかし、これらの環境の中でこれまで一番微粒子の凝集が議論されてきたのは、星間雲の一つとしてのわれわれの太陽系の初期、すなわち原始太陽系星雲内のできごととしてであろう。なんといっても、現在われわれが生活しているこの地球が存在していることは確かな事実である。地球、及びその他の惑星がどうやってできたかを考えると、どうしてもそのたねは、宇宙空間に漂っていた星間塵——1000 Å ぐらいの微粒子であったらうと思われる。そんな小さなものがこんな大きな地球を作ったというのは、まさに“チリも積もれば”とでも言える気の遠くなりそうな話であるが、その過程の基本が、お互いの衝突による凝集であることも想像に難くない。(太陽系の起源については、林の解説(天文月報 70巻1号)、あるいは「科学」の特集号(48巻7号)などを参考にされたい。)このうち特に微粒子の凝集は、惑星の形成でもその初期の段階の過程であり、実は、その後の太陽系の進化に間接的ではあるが大きな影響を与えるものであると考えられている。あとでの議論との関係もあるので、少し詳しく説明しておこう。

円盤状の原始太陽系を想像されたい(図1)。この中に浮遊している微粒子は、太陽重力の赤道面に垂直な成分に引かれて赤道面へ沈下する。この時、凝集成長も進

んでいる。ところで、沈下速度は何で決まっているのであろうか。ラッシュの中を強引に進むことを考えればおわかりの様に、自分が必死に進もうとする力(すなわち太陽重力)と、それを妨げようとするまわりの人々の力(まわりのガスによる抵抗力)との釣り合いで進行速度は決まる。ところが、重力は微粒子の体積に比例し、抵抗力は表面積に比例すると考えられるから、もし凝集が球状に起こったら、すなわち丸く太っていったならば、凝集が進むにつれて沈下速度は速くなる。一方、沈下が進むと微粒子同志は垂直方向には狭いところに集まることになるから凝集も速められる。この様に、凝集と沈下はお互いに速め合う効果を持っている。実は、この様にして微粒子が沈下して赤道面にたまって薄い層を作ると、その重力不安定性によって(つまり自分達の重力で集まろうとする力が太陽の潮汐力に打勝って)突然 10 km ぐらいの大きさの塊に分裂するものと思われている。この過程は、惑星を作る過程の中でも最もドラマチックなところで、微粒子の凝集がこの大事な場面で、前座として重要な役割を与えられていることがおわかりいただけよう。さて、この話題はまた後で触れることにして、こらへんで本題の実験の話に移ろう、まず

どういふ方法で実験するのか

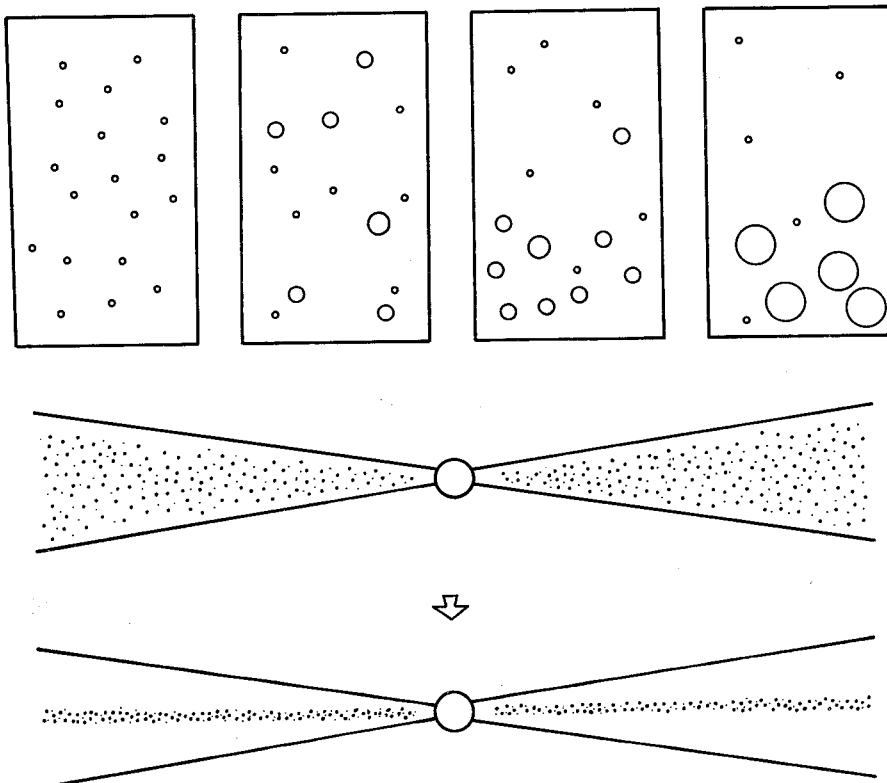


図1 円盤状の原始太陽系星雲。下の図は微粒子が赤道面へ沈下するところを示し、上の図はその時の微粒子の様子を表わしている。

について説明しよう。

どうやってあんなに小さな粒を作るのか不思議に思う方もいるだろう。われわれが用いているのは「ガス蒸発法」と呼ばれているもので、不活性ガス内で試料を蒸発させ、空中で再凝縮させる方法である。この時、不活性ガスの働きが重要で、蒸発した気体をすぐ冷やす役目を果しており、このガスがないと単なる「蒸着」になって、微粒子はできずにきれいな蒸着膜ができてしまう。さて、この方法を使って微粒子の凝集成長を調べてみようというのである。どうすればその成長過程をとらえることができるだろうか。実はうまくいことに、この方法を使うと蒸発させるヒータの熱のために、ガスの流れが生ずるのである。したがってこの流れに乗って微粒子の成長を調べればよいことになる。そこで、われわれはヒータからの距離を変えて微粒子を採集して電子顕微鏡でのぞいてみた(試料はシリコン)。確かにクラスターは距離が離れるにしたがって大きくなっている。定量的にその様子を見るために、クラスターの質量分布を調べてみよう。粒の大きさは距離によって変化していないので、各クラスターに含まれる粒子の数を数えて統計をとれば質量分布が得られる。結果を図2に示す。ここで、5トル、40トルというのはまわりの不活性ガス(アルゴン)の圧力である。2つの圧力で実験したのは結果の確認のためである。さて、こうしてクラスターの質量分布は得られたが、図を眺めているだけでは、確かに距離とともに大きなクラスターが増えてゆくことがわかるだけで進歩がない。何か微粒子の凝集成長の性質を、この図から導き出せないだろうか。考える基盤がないと話が進まないの

クラスターの質量分布

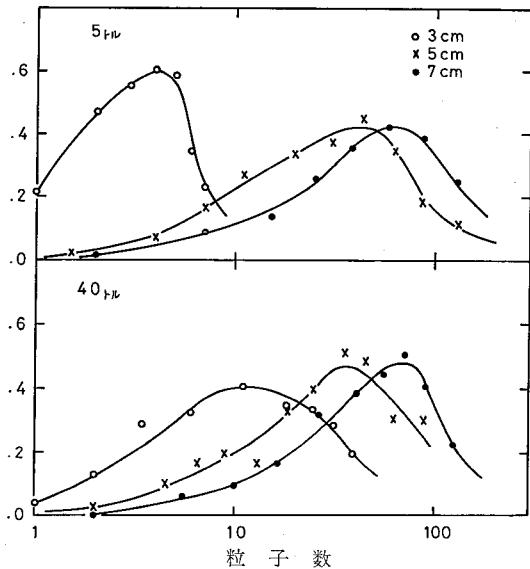


図2 (○×●はそれぞれヒーターからの距離)

で、適当なモデルを考えて、それと比較しながら結果の解釈をしてみよう。

モデルは、なるべく簡単に考えて衝突すればくっつくことにする。余計な力は考えない。そうするとクラスターの成長率は、衝突の頻度に比例することになるから、断面積に相対速度をかけたものに比例する。速度分布は普通にマックスウェル分布として、断面積の方に少し工夫した仮定をおいてみよう。写真を見ると、クラスターの形が単純な球形になっていないことに気付かれるだろう。そのことも頭に入れて、クラスターの断面積は粒子数の β 乗という仮定をしてみる。この β が、微粒子の凝集を特徴づけるパラメータと考える。例えば、 β が $1/3$ ならば通常考えられている丸く太ってゆく成長を表わし、 $1/2$ ならば平らに拡がってゆく成長を示している。この β を図2から求めてみようというわけである。

さて、こういった単純なモデルをとると、凝集を記述する式が比較的簡単になり、おもしろい性質がいくつか数学的に導ける。特に興味深いのが、分布の最大値を与える粒子数と距離の間に、両方を対数でプロットすると、 β で決まる傾きを持つ直線の上に乗るという性質である。これだ! これを使えば β が決められる! というわけでこのプロットをしたのが図3である。この図を見ると、明らかに実験値は $\beta=1/2$ の直線で合わせられることがわかる。つまり成長は平面的であるということである(分布の形全体を、モデルを数値計算した結果と比較してみても $\beta=1/2$ でよく合っている)。これは前にも書いた様に、写真に見られるクラスターの形からも納得できる。何か鎖の様に連らなっていて、確かに平らな構造をしている。

ところで、今回の実験ではシリコンを試料にしていたが、実はこのような鎖状の構造は何もシリコンに限ったものではなく、実験室で作られる微粒子は、珪酸塩でもグラファイトでもこの鎖状構造を示すのである。したがって、「微粒子の凝集成長は平面的である」ということは、きわめて一般的に言えることと思われる。さらにこの実験結果はもう少し重要な内容を含んでいる。つまり、クラスターの形が平面的であることは写真を見ればわかることであるが、実際の成長過程も、平面的であると仮定した簡単なモデルでよく説明されるということである。したがって、具体的に微粒子の凝集が関係する問題に対して、 $\beta=1/2$ の単純な平面成長のモデルが適用できることになる。というわけで、次にこの結果の

天体現象との関連

について話を進めてみよう。

いろいろな問題に対して平面成長の効果があるものと思われるが、ここでは話を限って、はじめに説明した原

分布の最大値を与える粒子数の対数

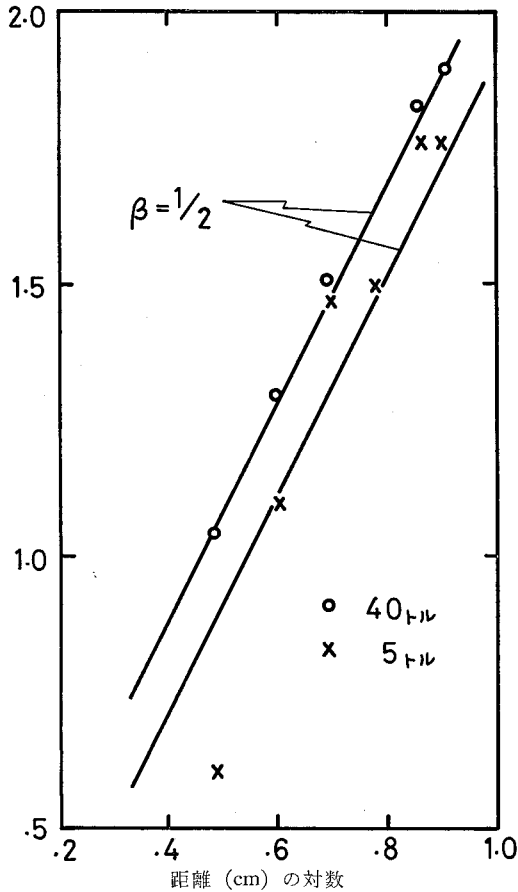
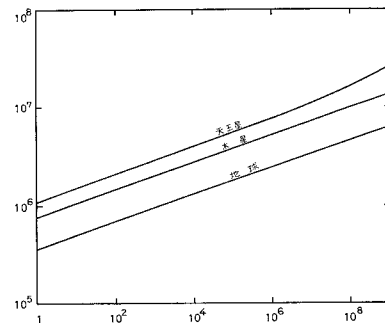


図 3

始太陽系での問題に絞ろう。前の話では、微粒子が丸く太るとすると沈下速度が加速されて、沈下時間が短くなるということであったが、平面的に拡がる場合はどうなるのであろうか。丸い玉を落とした場合と薄い紙を落とした場合を想像すればわかる様に、平らなものが沈下する方がゆっくりで時間がかかる。実際にどれくらいの時間のびることになるのかを示したのが図4である。ここで、横軸にとってある粒子数は次の様に考えて出てきたパラメータである。

平面的に成長するといっても、厚さ数 100 Å くらいの薄い膜が数 10 cm² も拡がっているのを想像するのは不自然であろう。ある程度大きくなれば、結局は丸くなるに違いない。ただ残念なことに、われわれの実験では装置の大きさの制限もあって、その様な傾向はとらえられていない。したがって、ここでは簡単にある大きさより大きくなればクラスターは丸くなるとして計算した。横軸の粒子数はその変わり目を与えるパラメータである。当然左端 (1) は、はじめから球状の場合に対応している。

沈下時間 (年)



平面から球への変わるころの粒子数 (本文参照)

図 4

さて、図を眺めると、横軸ははっきりしないが、沈下時間が一桁くらい長くなることもありえないことではないことがわかる。ではこの様に沈下時間が長くなると、原始太陽系の話にはどういう影響がでるであろうか。この問題を考えるには、原始太陽系の諸々の出来事についての知識が必要で、それをすべて説明するのは大変であるが、ただこの場で特に一つ指摘しておきたいのは、星雲のガスの散逸の問題との関連である。原始太陽系にはかなり濃いガスが充満していたと思われているが、現在の惑星間空間はほとんど真空である。ガスはどうなってしまったのか。この問題については、まだはっきりした解答は得られていないが、強い太陽風によって吹き飛ばされたのだらうという説が有力である。原始太陽は、星雲形成後約 10⁷ 年で T タウリ段階とよばれる太陽風の強い状態に進化すると考えられている。この時の強い風でガスを吹き飛ばしたのだらうというのである。沈下時間が、球状成長の場合の様に短いと、重力不安定性で大きくな塊分裂したあとはまだ濃いガスがあたり一帯に存在していたことになるが、平面的な成長のために沈下時間がのびると、分裂した頃にはガスがなくなっていたことも考えられる。実は、分裂後にガスがあったかどうかは重大問題で、ガスがまだあったとすると塊の運動はガスの抵抗によってある程度おさえられるのに対して、ガスがない場合は非常に大きな相対速度を持つ様になり、その後の進化の様子が変わってくる。この様にガスの存在の有無はその後のダイナミクスと大きく関連していて、沈下の過程はその鍵を握っているところなのである。ダイナミクスが変わると、それではどの様な変化がでてくるのかというのが次の問題であるが、その話を始めると終わりそうにないので、このへんで打ち切らせていただいて、興味のある方は、先程あげた解説などを読んで研究していただきたい。暇な時にも、昔の太陽系はどんなだったんだらうと考えてみるのもおもしろいかもしれない。